中央地質調查所報告第 104-05 號
計畫編號：104-5226904000-03-01

經濟部中央地質調查所

104年度委託專業服務計畫執行期末報告書

「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析（3/4）」（第三年度）

全 程 計 畫：自102年4月至105年12月止
本年度計畫：自104年1月至104年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學
中 華 民 國 104 年 12 月

中央地質調查所報告第 104-05 號
計畫編號：104-5226904000-03-01

經濟部中央地質調查所

104年度委託專業服務計畫執行期末報告書

「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析（3/4）」（第三年度）

全 程 計 畫：自102年4月至105年12月止
本年度計畫：自104年1月至104年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學

中 華 民 國 104 年 12 月

斷層活動性觀測研究第三階段-
斷層整合性觀測與潛勢分析（3/4）
（第三年度）

計畫主持人：胡植慶

協同主持人：劉啟清、楊燦堯、景國恩、鄭錦桐

研　究　員：陳宏宇、吳善薇、劉聰桂、郭明錦、
饒瑞鈞、李元希、張午龍、邵國士、
林柏伸、顏銀桐

副 研 究 員：李易叡

博士後研究員：黃鐘、傅慶州、范愷軍

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學

中　華　民　國　104　年　12　月

目錄

目錄 I
表目錄 VII
圖目錄 IX
摘要 XXVII
Abstract XXIX
第一章、緒　論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2 研究目的 12
1-2-1 移動式 GPS 及精密水準測量 12
1-2-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS） 17
1-2-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR） 18
1-2-4 活動斷層發生潛勢圖建置 19
1-2-5 井下應變儀資料分析 22
1-2-6 地球化學及地下水觀測 23
1-2-7 整合觀測資料分析 23
1-3 本年度工作內容概述 25
1-4 前一年度工作成果 27
1-4-1 GPS 觀測及精密水準測量 27
1-4-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS） 31
1-4-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR） 32
1-4-4 活動斷層發生潛勢圖建置 35
1-4-5 井下應變儀資料分析 36
1-4-6 地球化學與地下水觀測 40
1-4-7 整合觀測資料分析 46
第二章、大地測量資料分析 53
2-1 連續 GPS 站解算成果分析 53
2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略 53
2-1-2 GPS 資料品質檢測 55
2-1-3 GPS 連續站時間序列分析 58
2-2 2015 GPS 測量資料檢核 60
2-2-1 GPS 座標計算穩定度分析 60
2-2-2 座標殘差分析 60
2-2-3 均方根誤差分析 60

2-2-4 臺北地區 GPS 觀測成果分析 62
2-2-5 恆春地區 GPS 觀測成果分析 65
2-2-6 桃竹苗地區 GPS 觀測成果分析 69
2-2-7 嘉南地區 GPS 觀測成果分析 72
2-2-8 高屏地區 GPS 觀測成果分析 76
2-2-9 中部地區 GPS 觀測成果分析 79
2-2-10 花東地區 GPS 觀測成果分析 82
2-2-11 宜蘭地區 GPS 觀測成果分析 85
2-2-12 GPS 觀測成果分析 88
2-3 精密水準測量精度分析 90
2-3-1 垂直速度場之推求 90
2-3-2 台 2_石門至萬里測線 91
2-3-3 三芝至士林測線 92
2-3-4 淡水至士林測線 93
2-3-5 五股至台北測線 94
2-3-6 信義測線 95
2-3-7 縣 115_新屋至童話世界測線 96
2-3-8 縣 122_新竹至五峰測線 97
2-3-9 縣 117_新竹至峨眉測線 98
2-3-10 苗栗至南庄測線 99
2-3-11 縣 132_大安至東勢測線 100
2-3-12 縣 136_龍井至太平測線 101
2-3-13 縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線 102
2-3-14 縣 150-台 16_北斗至水里測線 103
2-3-15 縣 164_金湖至瑞峰測線 104
2-3-16 縣 174_北門至楠西測線 105
2-3-17 縣 182_安平至龍崎測線 106
2-3-18 台 28_路竹至茂林測線 107
2-3-19 台 22_岡山至安坡測線 108
2-3-20 佳冬至七佳測線 109
2-3-21 恆春半島地區測線 110
2-3-22 跨車籠埔斷層之測線 112
2-3-23 台 19 甲_善化至關廟測線 115
2-3-24 嶺頂至瀧澗測線 116
2-3-25 光復至豐濱測線 117
2-3-26 紅葉至靜浦測線 118

2-3-27 東成至富岡測線 119
2-3-28 梗枋-東澳測線 120
2-3-29 跨梅山斷層之短測線 121
2-3-30 精密水準速度場檢核 125
2-3-31 全台精密水準速度場 135
2-4 南部地區應變矩率及地震矩率之分析討論 136
2-4-1 南部地區 GPS 速度場 136
2-4-2 南部地區 GPS 應變率場 137
2-4-3 大地測量矩率分布圖 138
2-4-4 地震矩率 139
2-5 PS-InSAR 143
2-5-1 ERS1/2 (1995/4~1999/9) 144
2-5-2 ENVISAT (2004/6~2008/9) 149
2-5-3 ALOS (2007/1~2011/3) 152
2-6 斷層剖面分析 156
2-6-1 木屐寮斷層 156
2-6-2 六甲斷層 158
2-6-3 後甲里斷層 160
2-6-4 新化斷層 162
2-6-5 左鎮斷層 165
2-6-6 小崗山斷層 167
2-6-7 龍船斷層與旗山斷層 169
2-6-8 右昌斷層 177
2-6-9 潮州斷層 179
2-6-10 恆春斷層 182
2-7 斷層面滑移速率及虧損率評估 187
2-7-1 臺灣北中南部活動斷層幾何參數及塊體模型設定 187
2-7-2 活動斷層長期滑移速率及虧損率 190
2-7-3 斷層之測地矩率及未來發震規模 198
2-7-4 小結 199
第三章、活動斷層發生潛勢圖建置 201
3-1 木屐寮-六甲斷層 201
3-1-1 木屐寮-六甲斷層參數表之建立及說明 201
3-1-2 木屐寮-六甲斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 210
3-1-3 木屐寮-六甲斷層特徵地震模式 211
3-1-4 木屐寮-六甲斷層發震機率之推估 213

3-2 新化斷層 214
3-2-1 新化斷層參數表之建立及說明 214
3-2-2 新化斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 221
3-2-3 新化斷層特徵地震模式 222
3-2-4 新化斷層發震機率之推估 224
3-3 後甲里斷層系統 225
3-3-1 後甲里斷層參數表之建立及說明 225
3-3-2 後甲里斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 232
3-3-3 後甲里斷層系統特徵地震模式 233
3-3-4 後甲里斷層系統發震機率之推估 235
3-4 左鎮斷層 236
3-4-1 左鎮斷層參數表之建立及說明 236
3-4-2 左鎮斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 242
3-4-3 左鎮斷層特徵地震模式 243
3-4-4 左鎮斷層發震機率之推估 244
3-5 小崗山斷層 245
3-5-1 小崗山斷層參數表之建立及說明 245
3-5-2 小崗山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 252
3-5-3 小崗山斷層特徵地震模式 254
3-5-4 小崗山斷層發震機率之推估 255
3-6 旗山斷層 256
3-6-1 旗山斷層參數表之建立及說明 256
3-6-2 旗山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 265
3-6-3 旗山斷層特徵地震模式 266
3-6-4 旗山斷層發震機率之推估 269
3-7 潮州斷層 270
3-7-1 潮州斷層參數表之建立及說明 270
3-7-2 潮州斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 280
3-7-3 潮州斷層特徵地震模式 282
3-7-4 潮州斷層系統發震機率之推估 285
3-8 恆春斷層 286
3-8-1 恆春斷層參數表之建立及說明 286
3-8-2 恆春斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 298
3-8-3 恆春斷層特徵地震模式 299
3-8-4 恆春斷層發震機率之推估 301
3-9 小結 302

第四章、井下應變儀資料分析 311
4-1 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷 311
4-1-1 影響應變儀資料變化的因素 311
4-1-2 檢視井下應變儀資料中異常事件 323
4-1-3 井下應變儀應變異常判釋統計 343
4-2 井下應變儀數值絕對量的校正 344
4-3 地震對於應變儀軸差應變之計算 347
第五章、地球化學觀測與研究 351
5-1 緒論 351
5-1-1 觀測站分布位置 352
5-1-2 觀測站相關地震選擇依據 353
5-1-3 利用時序分析方法處理觀測資料 355
5-2 土壤氣體觀測結果 358
5-3 地下水壓觀測結果 368
5-4 地下水水氡觀測結果 373
5-5 沄水溶解氣體觀測站 375
第六章、整合觀測資料分析 379
6-1 異常記錄與大地震活動之關係 381
6-2 GPS 應變與井下應變儀的共同解釋 389
6-3 連續觀測資料的共同解釋 392
6-4 花蓮地區 GPS 應變 395
第七章、結論與建議 401
參考文獻 407
委員審查意見 419
附錄 3-2 邏輯樹專家諮詢會議 ..... 附 3-2.1

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1-1] 104 年期末_連續 GPS 觀測站基本資料

[附錄 1-2] 104 年期末_井下應變儀與地下水位監測井站基本資料

[附錄 1-3] 104 年期末_井下應變儀基本設計、測量原理、分析理論與資料校正

[附錄 1-4] 104 年期末_土壤氣體觀測站之選址依據與相關背景

[附錄 1-5] 104 年期末_土壤氣體觀測站之儀器使用

[附錄 1-6] 104 年期末_水氡監測站之區域地質背景

[附錄 1-7] 104 年期末_地下水水氡量測分析方法

[附錄 1-8] 104 年期末_地球化學觀測之研究方法

[附錄 2-1] 104 年期末_CGPS 時間序列

[附錄 2-2] 104 年期末_CGPS 速度表

[附錄 2-3] 104 年期末_GPS 移動站時間序列

[附錄 2-4] 104 年期末_GPS 移動站速度表

[附錄 2-5] 104 年期末_精密水準時間序列

[附錄 2-6] 104 年期末_精密水準速度表

[附錄 3-1] 104 年期末_活動斷層地震潛勢評估方法論

[附錄 3-2] 104 年期末_邏輯樹專家諮詢會議

[附錄 4-1] 104 年期末_井下應變儀資料分析結果

[附錄 5-1] 104 年期末_土壤氣體觀測站每月連續觀測資料

[附錄 5-2] 104 年期末_地下水壓逐月觀測資料

[附錄 5-3] 104 年期末_地下水水氡觀測結果

[附錄 7-1] 104 年期末_GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準及井下應變儀之變動值異常分析月報

[附錄 7-2] 104 年期末_計畫參與人員運用計畫執行成果所發表之相關著作電子檔

[附錄 7-3] 104 年期末_成果報告內圖片「300dpi 以上清晰圖檔（電子檔）」

表目錄

表 A：本年度預期進度甘梯圖（GANTT CHART）。 XIX
表 B：預期進度查核點（CHECK POINT）。 XXI
表 C：期末須交付之各項工作項目。 XXIII
表 1-1.1：中央地質調查所建置的 GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。 8
表 1-1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起始時間表。 9
表 1-1.3：土壤氣體觀測站資料接收起始時間表。 9
表 1-1.4：地下水水氡觀測站資料接收起始時間表。 9
表 1-1.5：地下水位觀測站資料接收起始時間表。 9
表 1-1.6：全程計畫預期進度甘梯圖（GANTT CHART）。 11
表 1-4.1：井下應變儀前兆判釋統計表。 39
表 1-4.2：主要地震活動發生前於多個測站皆有異常氡氣反應。 41
表 1-4.3：新竹橫山地震群相關資料表。 42
表 1-4.4：新竹地區在 2014 年 2 月群震之後，5 月底在相同位置仍有兩個地震。 49
表 2-1.1：測站資料接收度低於 80%一覽表。 55
表 2-3.1：測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱、距離及圖例。 125
表 2-3.1(續)：測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱、距離及圖例。 126
表 2-7.1：圖 2-7.1 中所示 28 條斷層之幾何參數。 189
表 2-7.2：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。 193
表 2-7.3：塊體模型計算所得各斷層之長期平均滑移速率及平均滑移虧損率。 194
表 2-7.4：斷層之滑移虧損與推估規模。 198
表 3-1.1：鑽井岩芯資料表（修改自楊志成等，2005）。 204
表 3-1.2：木屐寮-六甲斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 205
表 3-1.3：木屐寮-六甲斷層長期滑移速率相關文獻。 207
表 3-1.4：木屐寮-六甲斷層參數表。 208
表 3-1.5：木屐寮-六甲斷層系統各破裂事件規模及權重。 211
表 3-1.6：木屐寮-六甲斷層發生機率評估。 213
表 3-2.1：新化斷層幾何形貌相關文獻。 218
表 3-2.2：新化斷層參數表。 219
表 3-2.3：新化斷層之中值各破裂事件規模及權重。 222
表 3-2.4：新化斷層發生機率評估。 224
表 3-3.1：後甲里斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 227
表 3-3.2：後甲里斷層短期滑移速率各調查方法及斷層參數。 227
表 3-3.3：後甲里斷層參數表。 230
表 3-3.4：後甲里斷層系統之破裂事件規模及權重。 233
表 3-3.5：後甲里斷層系統發生機率評估。 235
表 3-4.1：左鎮斷層幾何形貌相關文獻。 239
表 3-4.2：左鎮斷層參數表。 241
表 3-4.3：左鎮斷層之中值各破裂事件規模及權重。 242
表 3-4.4：左鎮斷層發生機率評估。 244
表 3-5.1：小崗山斷層幾何相關文獻彙整。 248
表 3-5.2：小崗山斷層參數表。 250
表 3-5.3：小崗山斷層各破裂事件規模及權重。 253
表 3-5.4：小崗山斷層發生機率評估。 255
表 3-6.1：旗山斷層幾何相關文獻彙整。 261
表 3-6.2：旗山斷層長期滑移速率相關文獻彙整。 262
表 3-6.3：旗山斷層參數表。 263
表 3-6.4：旗山斷層之中值各破裂事件規模及權重。 266
表 3-6.5：旗山斷層發生機率評估。 269
表 3-7.1：潮州斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 276
表 3-7.2：潮州斷層參數表。 278
表 3-7.3：潮州斷層之破裂事件規模及權重。 281

表 3-7.4：潮州斷層發生機率評估。 285
表 3-8.1：恆春斷層幾何形貌相關文獻。 292
表 3-8.2：恆春斷層四重溪垂直抬升速率計算（中興公司，2012）。 295
表 3-8.3：恆春斷層長期滑移速率相關文獻。 295
表 3-8.4：恆春斷層參數表。 296
表 3-8.5：恆春斷層之中值各破裂事件規模及權重。 298
表 3-8.6：恆春斷層發生機率評估。 301
表 3-9.1：活動斷層參數表。 303
表 4-1.1：井下應變儀氣壓影響評估方法之比較。 322
表 4-1.2：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。 322
表 4-1.3：2014 年 12 月至 2015 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄到之應變異常事件。 324
表 4-1.4：2014 年 12 月至 2015 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄無法判斷前兆之事件。 324
表 4-1.5：井下應變儀前兆判釋統計表（表列 2014/10-2015/09）。 343
表 4-2.1：理論地潮振幅與井下應變儀實測振幅比較。深綠色表示 M2 與 O1 在理論與實測得比值接近，淺綠色表示兩者比值較大，粉色則是差異太大需要進一步分析的測站。 345
表 4-2.2：原始面應變要調整至平均氣壓反應（-0.317 MS/KPA）的比例。 345
表 4-3.1：井下應變儀觀測站的各頻道氣壓響應因子（單位: MICROSTRAIN/KPA）。 348
表 5-1.1：地球化學既有觀測站的座標。座標系統為 TWD67。 353
表 5-1.2：各測站氣體異常反應之地震比率。 355
表 5-1.3：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率。 356
表 5-1.3（續）：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率。 357
表 5-2.1：單一地震與多個土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。 359
表 5-2.2：4 月 20 日花蓮外海地震序列表（規模大於 5）。 359
表 5-2.3：苗栗外海地震序列表。 359
表 6-1.1：2009 年 1 月至 2015 年 11 月規模大於五之地震事件列表。 381

圖目錄

圖 1-1.1：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全臺分布圖。 2
圖 1-1.2：臺灣活動斷層分布圖與本計畫擬定之研究區域。 3
圖 1-1.3：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-臺北網分布圖。 4
圖 1-1.4：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-新竹網分布圖。 5
圖 1-1.5：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-嘉義網及甲仙網分布圖。 6
圖 1-1.5（續）：嘉義網及甲仙網之地層圖例說明。 7
圖 1-1.6：圖 1-1.3~圖 1-1.5 構造線圖例說明。 7
圖 1-1.7：斷層活動性觀測研究第三階段之架構。 10
圖 1-2.1：GPS 連續觀測站分布圖（中央地質調查所）。 12
圖 1-2.2：GPS 與精密水準測量監測點位分布圖。 13
圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場（胡植慶等，2012）。 14
圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場（胡植慶等，2012）。 15
圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖（胡植慶等，2014）。 16
圖 1-2.6：屏東平原 NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。 17
圖 1-2.7：2003 年成功地震 CGPS 30 秒解。 18
圖 1-2.8：ERS-1/2、ENVISAT C 波段影像升軌、降軌之框架（FRAME）與軌道（TRACK）圖。 19
圖 1-2.9：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。 19
圖 1-2.10：美國加州地區活動斷層與孕震構造潛勢評估之四大流程（摘錄自 WG07, 2008）。 20
圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌（WG07, 2008）。 20
圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹（摘錄自 WG07, 2008）。 21
圖 1-2.13：加州地區未來 30 年發生地震規模為 5、6.7、7.7 以上之機率分布圖。 21
圖 1-2.14：日本主要孕震構造未來 30 年之活動潛勢評估成果（日本全國地震動預測圖，2010）。 22
圖 1-4.1：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 連續站水平方向 2002~2014 年速度場。 28
圖 1-4.2：全臺灣應變率場分布圖。 29
圖 1-4.3：2001~2014 年全臺精密水準速度場。暖色系為抬升，冷色系為下降。 30
圖 1-4.4 : GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。 31
圖 1-4.5：整合歷史資料至 2014 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場。 32
圖 1-4.6：ENVISAT 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 WUKU。 33
圖 1-4.7：ALOS 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 WUKU。 33
圖 1-4.8：ENVISAT 與編號 4 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 34
圖 1-4.9：判識斷層跡之比較。 34
圖 1-4.10：本計畫活動斷層分布及未來 30 年、50 年及 100 年地震發生機率。 35
圖 1-4.11：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件(白底紅字表示)之位置及震源機制圖。 37
圖 1-4.12：臺北網錦和測站（JING）於 2014 年 2 月陽明山地震前的應變資料。 37
圖 1-4.13：2014 年 2 月新竹群震前後新竹網井下應變儀梅花站應變資料。 38
圖 1-4.14：2014 年 5 月花蓮地震前嘉義網達邦站井下應變儀資料。 38
圖 1-4.15：2014 年 8 月新北市烏來區地震前臺北網錦和測站（JING）井下應變儀資料。 39
圖 1-4.16：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。 40
圖 1-4.17：2014/5/21 花蓮鳳林地震與各測站觀測情形 41
圖 1-4.18：2014 年 5 月 21 日花蓮鳳林地震與嘉義中興站水位異常關係圖。 42
圖 1-4.19：2014/2/5-2014/2/8 新竹橫山地震群與大平地站觀測情形。 43
圖 1-4.20：2014 年 2 月新竹橫山群震與新竹新樂站水位異常關係圖。 43
圖 1-4.21：2014 年 1 月、2 月嘉義地區鄰近地震與嘉義中興站水位異常關係圖。 44
圖 1-4.22：宜蘭地區土壤氣固定點採樣分布圖。 44
圖 1-4.23：社頂站地下水水氡濃度變化與雨量關係圖（雨量資料來源：中央氣象局）。 45
圖 1-4.24：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。 45
圖 1-4.25：2009 年 1 月至 2014 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。 46
圖 1-4.26：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件(白底紅字表示)之位置及震源機制圖。 47
圖 1-4.27：DARB 井下應變與其附近兩個 GPS 網的地表應變的時間序列。 48

圖 1-4.28：顯示震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI，以及井下應變儀觀測站的相關位置。 49
圖 1-4.29：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 與 PFMT 於 2013~2014 年間的資料與震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI 的時間序列。 49
圖 1-4.30：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 在 2014 年 2 月群震後，應變仍持續壓縮，至 5 月 31 日再發生兩個地震後才趨平穩。 50
圖 1-4.31：陽明山地區 GPS 連續站網。 50
圖 1-4.32：為 GS08-GS11-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果。 51
圖 1-4.33：為 GS08-WANL-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果。 51
圖 2-1.1：本計畫約制之國際連續站與國內連續站分布圖。 53
圖 2-1.2：地調所連續站和與其它單位所交換之連續站分布圖，共 334 站。 54
圖 2-1.3：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。 57
圖 2-1.4：整合歷史資料至 2015 年 10 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場。 58
圖 2-1.5：今年觀測資料扣除去年觀測資料，並修正同震位移及測站異常之年速度場。 59
圖 2-1.6：測站 NANK 累積歷史資料至 2015 年 10 月時間序列。 59
圖 2-2.1：2002-2014 年及 2015 年 GPS 點位座標殘差分布圖。 61
圖 2-2.2：2002-2014 年及 2015 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 61
圖 2-2.3：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 62
圖 2-2.4：臺北地區 GPS 移動測站 GA83 及 B229 相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 .. 62
圖 2-2.5：臺北地區 GPS 移動站 GA83 周圍環境圖。 63
圖 2-2.6：臺北地區 GPS 移動站 B229 周圍環境圖。 63
圖 2-2.7：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 64
圖 2-2.8：2002-2015 年臺北地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 .. 64
圖 2-2.9：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 65
圖 2-2.10：2002~2015 年恆春地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之座標時間序列圖。 66
圖 2-2.11：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 67
圖 2-2.12：2002~2015 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 67
圖 2-2.13：恆春地區 GPS 連續站 GS47 周圍環境圖。 68
圖 2-2.14：恆春地區 GPS 移動站 G669 及連續站 HENC 周圍環境全景圖。 68
圖 2-2.15：精密水準測點 Q052 現場圖。 68
圖 2-2.16：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 69
圖 2-2.17：2002~2015 年桃竹地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 70
圖 2-2.18：G416（五峰國小）移動測站現場照片。 70
圖 2-2.19：GE24（關西國中）移動測站現場照片。 71
圖 2-2.20：T007（園區內）移動測站現場照片。 71
圖 2-2.21：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 72
圖 2-2.22：GPS 移動測站 GB13 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。 73
圖 2-2.23：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 73
圖 2-2.24：2002~2015 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 74
圖 2-2.25：2002~2015 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 75
圖 2-2.26：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 76
圖 2-2.27：GPS 移動測站 G614 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。 77
圖 2-2.28：GPS 移動測站 GC66 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。 77
圖 2-2.29：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 77
圖 2-2.30：2002~2015 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 78
圖 2-2.31：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 79
圖 2-2.32：GPS 移動測站 GF35 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。 80
圖 2-2.33：GPS 移動測站 M007 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。 80
圖 2-2.34：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 80
圖 2-2.35：2002~2015 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 81
圖 2-2.36：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 82
圖 2-2.37：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 83
圖 2-2.38：2002~2015 年花東地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 84
圖 2-2.39：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 85
圖 2-2.40：宜蘭地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 86
圖 2-2.41：2002~2015 年花東地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 87

圖 2-2.42：2002~2015 年臺灣地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 89
圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。 90
圖 2-3.2：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 91
圖 2-3.3：三芝至士林測線水準高程變化圖。 92
圖 2-3.4：淡水至士林測線水準高程變化圖。 93
圖 2-3.5：五股至台北測線水準高程變化圖。 94
圖 2-3.6：信義測線水準高程變化圖。 95
圖 2-3.7：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 96
圖 2-3.8：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。 97
圖 2-3.9：水準點位 G416 現地情形。 97
圖 2-3.10：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。 98
圖 2-3.11：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。 99
圖 2-3.12：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 100
圖 2-3.13：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 101
圖 2-3.14：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。 102
圖 2-3.15：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。 103
圖 2-3.16：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。 104
圖 2-3.17：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。 105
圖 2-3.18：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。 106
圖 2-3.19：縣 184_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。 107
圖 2-3.20：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。 108
圖 2-3.21：水準點位 G533 現地情形。 108
圖 2-3.22：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。 109
圖 2-3.23：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。 111
圖 2-3.24：台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。 111
圖 2-3.25：五光至黃竹水準高程變化圖。 112
圖 2-3.26：曾厝至霧峰水準高程變化圖。 113
圖 2-3.27：北勢至峰谷水準高程變化圖。 113
圖 2-3.28：烏溪南岸水準高程變化圖。 114
圖 2-3.29：中興新村水準高程變化圖。 114
圖 2-3.30：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 115
圖 2-3.31：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。 116
圖 2-3.32：光復至豐濱水準高程變化圖。 117
圖 2-3.33：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 118
圖 2-3.34：東成至富岡測線水準高程變化圖。 119
圖 2-3.35：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。 120
圖 2-3.36：水準點位 9053 現地狀況。 120
圖 2-3.37：B003-B092 測線水準高程變化圖。 121
圖 2-3.38：B036-B086 測線水準高程變化圖。 122
圖 2-3.39：B087-B080 測線水準高程變化圖。 122
圖 2-3.40：B002-B059 測線水準高程變化圖。 123
圖 2-3.41：B110-B101 測線水準高程變化圖。 123
圖 2-3.42：B037-B095 測線水準高程變化圖。 124
圖 2-3.43：B037-G330 測線水準高程變化圖。 124
圖 2-3.44：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。 126
圖 2-3.45：水準點位 GB06 與連續站 YM05 之間序列比較。 126
圖 2-3.46：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。 126
圖 2-3.47：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。 126
圖 2-3.48：水準點位 1187 與連續站 S101 之間序列比較。 127
圖 2-3.49：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較。 127
圖 2-3.50：水準點位 HCCA 與連續站 TCMS 之間序列比較。 127
圖 2-3.51：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之間序列比較。 127
圖 2-3.52：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之間序列比較。 127
圖 2-3.53：水準點位 G896 與連續站 GS36 之間序列比較。 128
圖 2-3.54：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之間序列比較。 128
圖 2-3.55：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之間序列比較。 128

圖 2-3.56：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之間序列比較。 128
圖 2-3.57：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之間序列比較。 128
圖 2-3.58：水準點位 T074 與連續站 WUFN 之間序列比較。 129
圖 2-3.59：水準點位 T033 與連續站 FNGU 之間序列比較。 129
圖 2-3.60：水準點位 T005 與連續站 CAOT 之間序列比較。 129
圖 2-3.61：水準點位 B238 與連續站 KZN1 之間序列比較。 129
圖 2-3.62：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。 129
圖 2-3.63：水準點位 I088 與連續站 GS44 之間序列比較。 130
圖 2-3.64：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之間序列比較。 130
圖 2-3.65：水準點位 R016 與連續站 GS55 之間序列比較。 130
圖 2-3.66：水準點位 J116 與連續站 CISH 之間序列比較。 130
圖 2-3.67：水準點位 G525 與連續站 AKND 之間序列比較。 130
圖 2-3.68：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。 131
圖 2-3.69：水準點位 G670 與連續站 HENC 之間序列比較。 131
圖 2-3.70：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之間序列比較。 131
圖 2-3.71：水準點位 G374 與連續站 GS29 之間序列比較。 131
圖 2-3.72：水準點位 G971 與連續站 YENL 之間序列比較。 131
圖 2-3.73：水準點位 G991 與連續站 FENP 之間序列比較。 132
圖 2-3.74：水準點位 GA22 與連續站 JUSI 之間序列比較。 132
圖 2-3.75：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之間序列比較。 132
圖 2-3.76：水準點位 GG83 與連續站 SUAO 之間序列比較。 132
圖 2-3.77：水準點位 I033 與連續站 PKGM 之間序列比較。 132
圖 2-3.78：水準點位 GF07 與連續站 PKGM 之間序列比較。 133
圖 2-3.79：水準點位 B080 與連續站 PKGM 之間序列比較。 133
圖 2-3.80：水準點位 B002 與連續站 CHIA 之間序列比較。 133
圖 2-3.81：水準點位 B058 與連續站 CHIA 之間序列比較。 133
圖 2-3.82：水準點位 B106 與連續站 S103 之間序列比較。 133
圖 2-3.83：水準點位 G088 與連續站 GS05 之間序列比較。 134
圖 2-3.84：全臺精密水準速度場。 135
圖 2-4.1：2002 年至 2015 年南部地區相對於澎湖白沙（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 136
圖 2-4.2：2002 年至 2015 年南部地區應變率場分布圖。 137
圖 2-4.3：最小大地測量矩率分布圖。 138
圖 2-4.4：2002 年至 2015 年之地震資料品質展示。 139
圖 2-4.5：2010 年 3 月 4 日甲仙地震，規模 6.4，深度 22.6 公里。資料來源：中央氣象局。 140
圖 2-4.6：2012 年 2 月 26 日霧台地震，規模 6.4，深度 26.3 公里。資料來源：中央氣象局。 140
圖 2-4.7：2002 年至 2015 年地震矩率分布圖。 141
圖 2-4.8：臺灣南部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。 142
圖 2-4.9：2002 年至 2015 年臺灣南部地區矩率綜合分析圖。 142
圖 2-5.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。 143
圖 2-5.2：ERS-1/2 衛星選取區域涵蓋圖。 144
圖 2-5.3：ERS-1/2 TRACK 232，FRAME 3141 影像時間與垂直基線相對關係。 145
圖 2-5.4：利用 ERS PATH 232，FRAME 3141 共 32 幅影像，以 1997/07/10 為主影像所獲得 31 幅差分干涉圖之結果。 145
圖 2-5.5：ERS-1/2 TRACK 232，FRAME 3159 影像時間與垂直基線相對關係。 146
圖 2-5.6：利用 ERS PATH 232，FRAME 3159 共 37 幅影像，以 1997/07/10 為主影像所獲得 36 幅差分干涉圖之結果。 146
圖 2-5.7：ERS-1/2 TRACK 461，FRAME 3159 影像時間與垂直基線相對關係。 147
圖 2-5.8：利用 ERS PATH 461，FRAME 3159 共 27 幅影像，以 1998/03/28 為主影像所獲得 26 幅差分干涉圖之結果。 147
圖 2-5.9：ERS 衛星視衛星方向上年平均變動量。 148
圖 2-5.10：ENVIAST 衛星選取區域涵蓋圖。 149
圖 2-5.11：ENVISAT TRACK 232，FRAME 3141 及 3159 影像時間與垂直基線相對關係。 149
圖 2-5.12：ENVISAT PATH 232，FRAME 3141 及 3159 共 24 幅影像，以 2007/06/28 為主影像所獲得 23 幅差分干涉圖之結果。 150
圖 2-5.13：ENVISAT PATH 232，FRAME 3141 及 3159 視衛星方向上年平均變動量。 151
圖 2-5.14：ALOS 衛星選取區域涵蓋圖。 152

圖 2-5.15：ALOS TRACK 447，FRAME 430、440 及 450 影像時間與垂直基線相對關係。 153
圖 2-5.16：ALOS PATH 447，FRAME 430、440 及 450 共 18 幅影像，以 2010/01/25 為主影像所獲得 17 幅差分干涉之結果。 153
圖 2-5.17：ALOS TRACK 446，FRAME 430 及 440 影像時間與垂直基線相對關係。 154
圖 2-5.18：ALOS PATH 446，FRAME 430 及 440 共 14 幅影像，以 2009/10/08 為主影像所獲得 13 幅差分干涉之結果。 154
圖 2-5.19： ALOS PATH 447，FRAME 430、440 及 450 及 PATH 446，FRAME 430 及 440 視衛星方向上年平均變動量。 155
圖 2-6.1：木屐寮斷層速度剖面圖。 156
圖 2-6.2：木屐寮斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 157
圖 2-6.3：六甲斷層速度剖面圖。 158
圖 2-6.4：六甲斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 159
圖 2-6.5：後甲里斷層速度剖面圖。 160
圖 2-6.6：後甲里斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 161
圖 2-6.7：新化斷層速度剖面圖。 163
圖 2-6.8：新化斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 164
圖 2-6.9：左鎮斷層速度剖面圖。 165
圖 2-6.10：左鎮斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 166
圖 2-6.11：小崗山斷層速度剖面圖。 167
圖 2-6.12：小崗山斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 168
圖 2-6.13：龍船斷層北段速度剖面圖。 169
圖 2-6.14：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 170
圖 2-6.15：龍船斷層與旗山斷層北段速度剖面圖。 171
圖 2-6.16：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 172
圖 2-6.17：龍船斷層中段與旗山斷層中段速度剖面圖。 173
圖 2-6.18：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 174
圖 2-6.19：可能向西延伸的部分與旗山斷層南段速度剖面圖。 175
圖 2-6.20：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 176
圖 2-6.21：右昌斷層速度剖面圖。 177
圖 2-6.22：右昌斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 178
圖 2-6.23：潮州斷層速度剖面圖。 180
圖 2-6.24：潮州斷層剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 181
圖 2-6.25：恆春斷層震前速度剖面圖。 183
圖 2-6.26：恆春斷層震後至 2010 年速度剖面圖。 184
圖 2-6.27：恆春斷層 2010 年至 2015 年速度剖面圖。 185
圖 2-6.28：恆春斷層剖面區域之 ERS 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 186
圖 2-7.1：（A）本文所用的臺灣北中南部三維塊體模型及活動斷層分布。（B）利用 2006~2014 年連續 GPS 及 2002~2014 年 CAMPAIGN GPS 資料所觀測的水平地表速度場。 188
圖 2-7.2：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 EULER'S POLE 所在的位置及誤差範圍。 191
圖 2-7.3：（A）最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 EULER'S POLE 為軸的旋轉角速度。（B）以圖 A 中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。 192
圖 2-7.4：（A）推求的斷層長期滑移速率。（B）各斷層面的震間滑移速率。（C）由（A）圖減去（B）圖，得到斷層面上的滑移虧損率。 195
圖 2-7.5：比較 GPS 觀測速度場（圖 A）以及本研究所得之最佳塊體模型所預估的地表運動（圖 B）。圖 C 表示模型預估的殘差值。 196
圖 2-7.6：跨旗山（圖 A）、木屐寮—六甲（圖 B）及左鎮斷層（圖 C）的 GPS 觀測速度場變化。 197
圖 2-7.7：各塊體內之內部形變應變大小。 197
圖 3-1.1：地調所五萬分之一地質圖。 201
圖 3-1.2：六甲斷層及木屐寮斷層平面分布地形圖。 201
圖 3-1.3：中油十萬分之一地質圖與震測剖面線分布圖（王宏霖, 2006）。 202
圖 3-1.4：木屐寮斷層之震測剖面。 202
圖 3-1.5：牛山背斜及南寮構造剖面（SUPPE, 1980）。 203
圖 3-1.6：P-P'剖面圖（楊志成等，2005）。 203
圖 3-1.7：EE'剖面及投影至剖面 GPS 測站之水平速度（HUNG ET AL.,1999）。 203
圖 3-1.8：左圖為平衡剖面分布地質圖。 203
圖 3-1.9：六甲斷層莿桐崎附近鑽井點位分布及整合露頭觀察及 1 號井資料所繪製的 A-A'剖面。 204

圖 3-1.10：各鑽井等比例對比圖，投影至走向 N60W（陳文山，2006）。 204
圖 3-1.11：木屐寮-六甲斷層 1991-2010 地震深度分布圖。 205
圖 3-1.12：海岸平原至麓山帶前緣鑽井柵狀剖面。 206
圖 3-1.13：薊桐崎與花梨坑溪鑽井剖面，（陳文山，2006）。 207
圖 3-1.14：木屐寮-六甲斷層之破裂模式及權重分配。 210
圖 3-1.15：木屐寮-六甲斷層系統邏輯樹。 211
圖 3-1.16：A 事件特徵地震模式。 212
圖 3-1.17：B 事件特徵地震模式。 212
圖 3-1.18：C 事件特徵地震模式。 212
圖 3-1.19：木屐寮-六甲斷層 3 種破裂事件之規模-權重分布圖。 212
圖 3-1.20：木屐寮-六甲斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。 213
圖 3-1.21：（A）木屐寮-六甲斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）木屐寮-六甲斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 213
圖 3-2.1：新化斷層地形圖與條帶地質圖（林啟文等，2007）。 214
圖 3-2.2：1946 年地表破裂調查（張麗旭等，1947）。 215
圖 3-2.3：西部延伸段裂隙分布與 E 斷層（E 箭頭所指之黑線）(BONILLA, 1975）。 215
圖 3-2.4：新化斷層延伸位置（陳文山等，2004B）。 215
圖 3-2.5：農業改良場內鑽井資料（修改自陳文山等，2011）。 216
圖 3-2.6：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007）。 217
圖 3-2.7：新化斷層平衡剖面（黃旭燦等，2004）。 217
圖 3-2.8：1973-2010 年地震深度分布圖與歷史地震位置。 218
圖 3-2.9：新化斷層之破裂模式。 221
圖 3-2.10：新化斷層邏輯樹。 222
圖 3-2.11：A 事件之特徵地震模式。 223
圖 3-2.12：B 事件之特徵地震模式。 223
圖 3-2.13：新化斷層之規模-權重分布圖。 223
圖 3-2.14：新化斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖。 223
圖 3-2.15：（A）新化斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）新化斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 224
圖 3-3.1：左圖為後甲里斷層條帶地質圖（林啟文等，2007），右圖為台南台地數值地形模型。 225
圖 3-3.2：（A）台南台地構造地質分布圖（B）AA'地質剖面（LACOMBE ET AL., 1999）。 226
圖 3-3.3：參考台南地區大地測量資料建立之地下構造模型剖面圖（饒瑞鈞等，2003）。 226
圖 3-3.4：台南地區地下構造模型（HUANG ET AL., 2009）。 226
圖 3-3.5：後甲里斷層 1991-2010 地震深度分布圖。 227
圖 3-3.6：（A）台南地區地層柱剖面。（B）相同之剖面位置。 228
圖 3-3.7：台南地區各採樣點位置相對於海水面變化之地殼變形速率曲線（CHEN AND LIU, 2000）。 228
圖 3-3.8：後甲里斷層系統破裂模式（改自鄭錦桐 2002）。 232
圖 3-3.9：後甲里斷層邏輯樹。 233
圖 3-3.10：A 事件特徵地震模式。 234
圖 3-3.11：B 事件特徵地震模式。 234
圖 3-3.12：後甲里斷層系統 2 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖。 234
圖 3-3.13：後甲里斷層系統 2 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖。 234
圖 3-3.14：（A）後甲里斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）後甲里斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 235
圖 3-4.1：左鎮斷層條帶地質圖（林啓文等，2007）。 236
圖 3-4.2：左鎮斷層與崙後斷層、龍船斷層位置（陳延宗，2007；黃旭燦等，2004）。 236
圖 3-4.3：左鎮斷層延伸位置（陳文山等，2004B)。 237
圖 3-4.4：左鎮斷層淺層震測（陳延宗，2007）。 238
圖 3-4.5：左鎮斷層平衡剖面（黃旭燦，2003）。 238
圖 3-4.6：1973-2010 地震深度分布圖。 239
圖 3-4.7：左鎮斷層露頭與階地分布。 240
圖 3-4.8：左鎮斷層之破裂模式。 242
圖 3-4.9：左鎮斷層邏輯樹。 243
圖 3-4.10：A 事件之特徵地震模式。 243
圖 3-4.11：左鎮斷層之規模-權重分布圖。 244
圖 3-4.12：左鎮斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖。 244

圖 3-5.1：小崗山斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。 245
圖 3-5.2：小崗山斷層（HKSF）、梅嶺斷層（MLF）分布圖（陳文山等，2010B）。 246
圖 3-5.3：小崗山斷層淺層震側（石瑞銓等，2008；陳文山等，2010B）。 247
圖 3-5.4：小崗山斷層鑽井資料（陳文山等，2010B）。 247
圖 3-5.5：小崗山斷層區域平衡剖面（鄭宏祺，2000）。 248
圖 3-5.6：地震深度分布資料。 248
圖 3-5.7：小崗山斷層鑽井結果（陳文山等，2010B）。 249
圖 3-5.8：小崗山斷層之破裂模式及權重分配。 252
圖 3-5.9：小崗山斷層系統邏輯樹。 253
圖 3-5.10：A 事件特徵地震模式。 254
圖 3-5.11：B 事件特徵地震模式。 254
圖 3-5.12：小崗山斷層 2 種破裂事件之規模-權重分布圖。 254
圖 3-5.13：小崗山斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。 255
圖 3-5.14：（A）小崗山斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）小崗山斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 255
圖 3-6.1：旗山斷層、內英斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。 256
圖 3-6.2：旗山斷層、內英斷層兩側岩性與層位落差（陳文山等，2005A）。 257
圖 3-6.3：旗山斷層南部延伸段（陳文山等，2012）。 257
圖 3-6.4：鳳山丘陵西側海域震測資料（LIU ET AL., 1997）。 258
圖 3-6.5：旗山斷層野外露頭（陳柏村，2005）。 259
圖 3-6.6：旗山斷層震測資料（張家鳳，2005）。 259
圖 3-6.7：旗山斷層平衡剖面（鄭宏祺，2000）。 260
圖 3-6.8：旗山斷層平衡剖面（黃旭燦等，2004）。 260
圖 3-6.9：GPS 資料反演斷層幾何（蔡旻倩，2013）。 260
圖 3-6.10：旗山斷層地震深度分布資料。 261
圖 3-6.11：旗山斷層鑽井資料（陳文山等，2012）。 262
圖 3-6.12：旗山斷層之破裂模式。 265
圖 3-6.13：旗山斷層邏輯樹。 266
圖 3-6.14：A 事件之特徵地震模式。 267
圖 3-6.15：B 事件之特徵地震模式。 267
圖 3-6.16：C 事件之特徵地震模式。 267
圖 3-6.17：D 事件之特徵地震模式。 267
圖 3-6.18：旗山斷層之規模-權重分布圖。 268
圖 3-6.19：旗山斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖。 268
圖 3-6.20：（A）旗山斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）旗山斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 268
圖 3-7.1：左圖：潮州斷層條帶地質圖，右圖：潮州斷層沿線地質圖。 271
圖 3-7.2：六龜地區地質圖（陳文山等，2005B）。 272
圖 3-7.3：青灰色的 L 礫岩不整合於左側的長枝坑層，其與紅水坑礫岩則為斷層接觸。。 272
圖 3-7.4：臺灣西南部海域地形及構造（修改自 LIN ET AL., 2008）。 272
圖 3-7.5：（A）屏東地區的剩餘重力值圖（B）重力值逆推所得屏東平原的地下構造。 273
圖 3-7.6：潮州斷層及西側分支斷層構造分布圖。 273
圖 3-7.7：潮州地區震測剖面及地下構造解釋。 273
圖 3-7.8：（A）淺層震測測線配置圖。（B）淺層震測 CCU-WS 及其解釋。（C）淺層震測 CCU-MZ 及其解釋。 274
圖 3-7.9：從淺層震測剖面推測潮州斷層地下幾何形貌（林昱圻，2008）。 274
圖 3-7.10：潮州斷層北段 1900-2010，MW≧3 地震深度分布圖。 275
圖 3-7.11：潮州斷層南段 1900-2010，MW≧3 地震深度分布圖。 275
圖 3-7.12：（A）地震、震源機制解及剖面線分布圖（B）剖面 7 及剖面 9 之震深度分布及震源機制，CF 為潮州斷層（C）剖面 7、剖面 8 及剖面 9 之地震深度分布及地層速度構造剖面圖。 276
圖 3-7.13：潮州斷層之破裂模式。 280
圖 3-7.14：潮州斷層邏輯樹。 281
圖 3-7.15：A 事件特徵地震模式。 282
圖 3-7.16：B 事件特徵地震模式。 282
圖 3-7.17：C 事件特徵地震模式。 282
圖 3-7.18：D 事件特徵地震模式。 282

圖 3-7.19：E 事件特徵地震模式。 282
圖 3-7.20：F 及 G 事件特徵地震模式。 282
圖 3-7.21：H 事件特徵地震模式。 283
圖 3-7.22：潮州斷層 8 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖。 283
圖 3-7.23：潮州斷層 8 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖。 284
圖 3-7.24：（A）潮州斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）潮州斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 285
圖 3-8.1：恆春斷層條帶地質圖（林啓文等，2009）。 286
圖 3-8.2：恆春斷層條帶地質圖（陳柏村與紀權宥，2010）。 286
圖 3-8.3：恆春半島前人研究之構造線分布（修改自李珀儂，2008）。 287
圖 3-8.4：南部海域多音束水深調查。 287
圖 3-8.5：竹坑地區沖積扇地形分布圖（李珀儂，2008）。 287
圖 3-8.6：竹坑地區之沖積扇剖面圖。 288
圖 3-8.7：恆春斷層四重溪地區陸域探查鑽孔分布圖（中興公司，2012）。 289
圖 3-8.8：恆春斷層四重溪地區地質剖面圖（中興公司，2012）。 289
圖 3-8.9：恆春斷層柴櫛山地區陸域探查鑽孔分布圖（中興公司，2012）。 289
圖 3-8.10：恆春斷層柴櫛山地區地質剖面圖（中興公司，2012）。 290
圖 3-8.11：（A）恆春斷層外海海上多頻道反射震測震測探查測線位置（B）MCS-S18-1 反射震測剖面及其解釋（C）MCS-S16-1 反射震測剖面及其解釋（中興公司，2012）。 290
圖 3-8.12： MCS423-13 震測剖面及其解釋。 291
圖 3-8.13：（A）臺灣南部海域地震及速度構造剖面線 Y40~Y120 分布圖（B）Y60 剖面線 P 波之速度構造剖面（C）Y40 剖面線 P 波之速度構造剖面（CHENG ET AL.，2012）。 291
圖 3-8.14：恆春斷層上盤處 1900-2010 地震深度分布圖。 292
圖 3-8.15：海階定年計算恆春半島各地之抬升速率（CHEN AND LIU, 1993）。 293
圖 3-8.16：左圖為南灣場址鑽井位置，右圖為南灣鑽井剖面圖（陳文山等，2010A）。 294
圖 3-8.17：上圖為南灣鑽井及海階定年標本位置分布，下圖為恆春斷層鑽井及海階估算的抬升速率。 294
圖 3-8.18：左圖為擷取條帶地質圖說明 BH02、BH03、BH04 及 BH01 井之位置，右圖為鑽探地層剖面圖以及 BH02、BH03、BH04 井的沉積層對比（陳文山等，2006）。 294
圖 3-8.19：恆春斷層之破裂模式。 298
圖 3-8.20：恆春斷層邏輯樹。 299
圖 3-8.21：A 事件特徵地震模式。 299
圖 3-8.22：B 事件特徵地震模式。 299
圖 3-8.23：C 事件特徵地震模式。 299
圖 3-8.24：恆春斷層 3 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。 300
圖 3-8.25：恆春斷層 3 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。 300
圖 3-8.26：（A）恆春斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）恆春斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 301
圖 3-9.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。 305
圖 3-9.2：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。 306
圖 3-9.3：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。 307
圖 3-9.4：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。 308
圖 3-9.5：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。 309
圖 3-9.6：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。 310
圖 4-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。 312
圖 4-1.2：井下應變儀中地潮分量的評估。 312
圖 4-1.3：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。 313
圖 4-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花測站（PFMT）地下水位持續下降。 313
圖 4-1.5：臺北地區地下水各測站水位資料。 314
圖 4-1.6：臺北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。 314
圖 4-1.7：嘉義網達邦測站（DARB）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 315
圖 4-1.8：嘉義網中興測站（TSUN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 316
圖 4-1.9：嘉義網太興測站（TAIS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 316
圖 4-1.10：臺北網錦和測站（JING）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 317
圖 4-1.11：臺北網明德中學測站（SANS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 317

圖 4-1.12：臺北網樹林測站（SLIN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 318
圖 4-1.13：達邦測站（DARB）CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較（0~40 MHZ）。 319
圖 4-1.14：達邦測站（DARB）觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較。 320
圖 4-1.15：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。 320
圖 4-1.16：大坪測站（BMMT）CH0 氣壓影響計算值比較。 321
圖 4-1.17：觀測應變去除氣壓響應後的結果。 321
圖 4-1.18：2014 年 12 月至 2015 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件之位置及震源機制圖。 325
圖 4-1.19：臺北網錦和測站（JING）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。 326
圖 4-1.20：新竹網梅花測站（PFMT）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。 327
圖 4-1.21：臺北網錦和測站（JING）於 2015 年 1 月 7 日花蓮縣秀林鄉地震前的應變資料。 328
圖 4-1.22：新竹網梅花測站（PFMT）於 2015 年 1 月 7 日花蓮縣秀林鄉地震前的應變資料。 329
圖 4-1.23：嘉義網達邦測站（DARB）於 2015 年 2 月 14 日臺東近海地震前的應變資料。 330
圖 4-1.24：2015 年 3 月 23 日花蓮近海地震前後臺北網錦和測站（JING）應變資料。 331
圖 4-1.25：2015 年 3 月 23 日花蓮近海地震前後新竹網梅花測站（PFMT）應變資料。 332
圖 4-1.26：2015 年 3 月 23 日花蓮近海地震前後嘉義網達邦測站（DARB）應變資料。 332
圖 4-1.27：2015 年 4 月 20 日花蓮外海地震前後新竹網梅花測站（PFMT）應變資料。 333
圖 4-1.28：2015 年 4 月 20 日花蓮外海地震前後嘉義網達邦測站（DARB）應變資料。 334
圖 4-1.29：2015 年 5 月 11 日苗栗西部外海地震前後新竹網大坪測站（BMMT）應變資料。 335
圖 4-1.30：2015 年 5 月 11 日苗栗西部外海地震前後新竹網梅花測站（PFMT）應變資料。 336
圖 4-1.31：2015 年 6 月 21 日花蓮外海地震前後新竹網大坪測站（BMMT）與梅花測站（PFMT）之應變資料。 337
圖 4-1.32：2015 年 10 月 19 日宜蘭近海地震前後台北測網錦和測站（JING）之應變資料。 338
圖 4-1.33：2015 年 6 月 27 日臺灣東部海域地震前後台北網錦和測站（JING）之應變資料。 339
圖 4-1.34：2015 年 8 月 13 日臺灣東南部海域地震前後新竹網梅花測站（PFMT）之應變資料。 340
圖 4-1.35：2015 年 8 月至 9 月底嘉義網達邦測站（DARB）與太興測站（TAIS）之應變資料。 341
圖 4-1.36：2015 年 8 月至 9 月底新竹測網大坪測站（BMMT）、梅花測站（PFMT）與新樂測站（CINT）之應變資料。 342
圖 4-2.1：新竹網梅花測站（PFMT）面應變長期 M2 地潮分潮。 344
圖 4-2.2：嘉義網井下應變儀應變與 GPS 應變。 346
圖 4-2.3：新竹網井下應變儀應變與 GPS 應變。 346
圖 4-3.1：在均質等向的理想環境下，應變儀受力後的水平張量變化情形（ROELOAFFS, 2010）。 347
圖 4-3.2：2014 年 2 月 12 日於臺北市士林區發生規模 4.2 的有感地震。 349
圖 4-3.3：錦和測站（JING）利用軸向差應變的計算，可比面應變更易解讀出地震前之前兆異常現象。 349
圖 5-1.1：觀測站分布位置。 352
圖 5-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。 354
圖 5-2.1：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。 358
圖 5-2.2：2014/12/11 基隆外海地震與大平地測站觀測情形。 360
圖 5-2.3：2015/1/7 花蓮秀林地震與各測站觀測情形。 361
圖 5-2.4：2015/3/23 花蓮外海地震與各測站觀測情形。 362
圖 5-2.5：2015/4/20 花蓮外海地震與各測站觀測情形。 363
圖 5-2.6：2015/5/11 苗栗西部外海地震與大平地站觀測情形。 364
圖 5-2.7：2015/9/1 花蓮壽豐地震與各測站觀測情形。 365
圖 5-2.8：2015/9/16 花蓮近海地震與各測站觀測情形。 366
圖 5-2.9：2015/11/2 臺東外海地震與各測站觀測情形。 367
圖 5-3.1：新竹新樂站 10 月水位異常圖示。 369
圖 5-3.2：臺北站群井下應變儀應力異常時段之水位比較圖。 370
圖 5-3.3：新竹站群井下應變儀應力異常時段之水位比較圖。 371
圖 5-3.4：嘉義站群井下應變儀應力異常時段之水位比較圖。 372
圖 5-4.1：社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。 373
圖 5-4.2：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較圖。 373
圖 5-4.3：地下水水氡濃度與地下水位比較圖。 374
圖 5-4.4：本年度社頂站地下水水氡觀測結果圖。 374
圖 5-5.1：嘉義沄水測站內管線配置簡圖。 375
圖 5-5.2：沄水測站主要溶解氣體濃度變化。 376
圖 5-5.3：沄水測站氡氣濃度變化圖。 377

圖 6-1.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五的地震事件之位置及震源機制圖。 386
圖 6-1.2：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五的地震事件之位置及震源機制圖。 387
圖 6-1.3：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於五的地震事件及規模小於五的特別地震事件之位置及震源機制圖。 387
圖 6-1.4：2014 年 12 月至 2015 年 11 月規模大於五的地震事件及規模小於五的特別地震事件之位置及震源機制圖。 388
圖 6-1.5：2009 年 1 月至 2015 年 11 月規模大於五的地震事件之異常記錄對應比較圖。 388
圖 6-2.1：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。 390
圖 6-2.2：GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013/01~2015/08 的觀測換算成應變量的變化。 390
圖 6-2.3：ALIS-W029-WANS 所形成的 GPS 三角網在 2013/01~2015/08 的觀測換算成應變量的變化。 391
圖 6-3.1：新竹地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀梅花測站（PFMT）資料的變化。 392
圖 6-3.2：嘉義地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀達邦測站（DARB）資料的變化。 393
圖 6-4.1：利用花蓮地區的連續觀測 GPS 站組成八個網，用來觀測各區域的地殼應變。 395
圖 6-4.2：花蓮北區的連續觀測 GPS 站網的面應變、剪斜應變 GM1 與 GM2 的時間應變。 396
圖 6-4.3：花蓮中區的連續觀測 GPS 站網的面應變、剪斜應變 GM1 與 GM2 的時間應變。 396
圖 6-4.4：花蓮南區的連續觀測 GPS 站網的面應變、剪斜應變 GM1 與 GM2 的時間應變。 397
圖 6-4.5：花蓮北區三個連續觀測 GPS 站網的面應變時序與主要地震間的關係。 397
圖 6-4.6：花蓮中區三個連續觀測 GPS 站網的面應變時序與主要地震間的關係。 398
圖 6-4.7：花蓮南區兩個連續觀測 GPS 站網的面應變時序與主要地震間的關係。 398
圖 7.1：2015 年 1 月至 10 月井下應變儀雨量計的資料。 403
圖 7.2：嘉義網太興測站（TAIS）與達邦測站（DARB）平面應變與地下水於 2013 年前後的比較。 404
圖 7.3：新竹網梅花測站（PFMT）面應變與地下水的關係。 404

表 A：本年度預期進度甘梯圖（Gantt Chart）。

計畫名稱：斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析（3/4）													
月次 工作項目　　月份	第1月(1)	第2月(2)	第3月(3)	第4月(4)	第5月(5)	第6月(6)	第7月(7)	第8月(8)	第9月(9)	第10月(10)	第11月(11)	第12月(12)	備註
第一季查核點													
第二季查核點													
期中報告													
第三季查核點													
期末報告													
第四季查核點													
GPS 移動站資料檢核及分析 (由成大工作團隊負責)													
GPS 及水準測量規劃、督導 (由成大工作團隊負責)													
地殼矩率及大地測量矩率分析 (由成大工作團隊負責)													
GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算(由臺大工作團隊負責)													
PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 (由臺大工作團隊負責)													
活動潛勢評估方法論研究 (由中興工程顧問社負責)													
木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層活動特性參數表 (由中興工程顧問社負責)													
建立木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)													
木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)													
小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層活動特性參數表 (由中興工程顧問社負責)													
建立小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)													
小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)													
利用地表運動場來推測南部地區 9 條活動斷層之斷層面的震間滑移速率 (由中興工程顧問社負責)													
探討各活動斷層的滑移虧損(slip deficit) (由中興工程顧問社負責)													
地震規模尺度研究 (由中興工程顧問社負責)													

月次 工作項目　　月份	第1月(1)	第2月(2)	第3月(3)	第4月(4)	第5月(5)	第6月(6)	第7月(7)	第8月(8)	第9月(9)	第10月(10)	第11月(11)	第12月(12)	備註
南部地區9條活動斷層斷層活動潛勢評估 (由中興工程顧問社負責)													
井下應變儀資料校正及計算分析 (由臺大工作團隊負責)													
維護井下應變儀資料庫 (由臺大工作團隊負責)													
既有氣體觀測站持續分析數據 (由臺大地化工作團隊負責)													
既有水位觀測站持續分析數據 (由臺大地化工作團隊負責)													
既有水氡觀測站持續分析數據 (由臺大地化工作團隊負責)													
墾丁公園地下水持續定期監測分析 (由臺大地化工作團隊負責)													
整合並綜合分析觀測資料 (由臺大工作團隊負責)													
預定進度（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

表 B：預期進度查核點（Check Point）。

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第一季查核點） 1. 修正後之契約書與工作計畫書 2. 第一期款請款收據 3. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 12-1 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 12-1 月 c. 彙整南部地區 SAR 影像對 d. 木屐寮、六甲、左鎮斷層活動特性參數表 e. 井下應變儀資料校正 12-2 月 f. 既有氣體觀測站 12-2 月資料分析 g. 既有水位觀測站 12-2 月資料分析 h. 既有水氡觀測站 12-2 月資料分析	三月三十一日	第一季工作進度報告 第一期款請款
2	（第二季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 2-4 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 2-4 月 c. 製作南部地區干涉影像 d. 新化、後甲里斷層活動特性參數表 e. 木屐寮、六甲、左鎮、新化、後甲里斷層三維幾何形貌 f. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 g. 井下應變儀資料校正 3-5 月 h. 既有氣體觀測站 3-5 月資料分析 i. 既有水位觀測站 3-5 月資料分析 j. 既有水氡觀測站 3-5 月資料分析	六月三十日	第二季工作進度報告
3	（期中報告） 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 期中報告簡報資料 4. 會計報表 5. 第二期款請款收據	七月三十一日	期中報告書面與簡報資料 會議記錄與委員意見辦理狀況 第二期款請款
4	（第三季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 5-7 月 b. GPS 連續站計算及時序分析至 5-7 月 c. 處理 PSInSAR 平均視衛星方向位移之數值資料 d. 小崗山、旗山、潮州、恆春斷層活動特性參數表 e. 小崗山、旗山、潮州、恆春斷層三維幾何形貌 f. 井下應變儀資料校正及計算分析 6-8 月 g. 既有氣體觀測站 6-8 月資料分析 h. 既有水位觀測站 6-8 月資料分析 i. 既有水氡觀測站 6-8 月資料分析	九月三十日	第三季工作進度報告

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
5	（期末報告） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料 8-9 月查核及分析 b. 地殼矩率及大地測量矩率分析 c. GPS 連續站計算及時序分析 8-9 月 d. PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 e. 南部地區 9 條活動斷層斷層活動潛勢評估 f. 南部地區 9 條活動斷層之斷層面的震間滑移速率 g. 各活動斷層的滑移虧損率 h. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 i. 井下應變儀資料校正 9 月 j. 既有氣體觀測站 9 月資料分析 k. 既有水位觀測站 9 月資料分析 l. 既有水氡觀測站 9 月資料分析 m. 綜合分析觀測資料 2. 期末報告書面資料初稿	十一月三十日	期末報告書面初稿與簡報資料 會議記錄與委員意見辦理狀況
6	（第四季查核點，驗收） 1. 正式研究成果報告書 30 份 2. 正式研究成果報告書電子檔 10 份 3. 會計報表 4. 尾款請款收據	十二月三十一日	成果報告書 30 份 成果報告書電子檔 10 份

表 C：期末須交付之各項工作項目。

	工作項目	章節
移動式 GPS 及精密水準測量	1. 測量外業督導（GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點，共計 40 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段，共計 41 測段。以上數據將以 2015 年度測量公司承辦之業務範圍為準)、GPS 分區測量數量之 10%（小數點以下四捨五入）抽樣檢核測量、GPS 測量成果與抽測結果基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。	2-2 2-3
	2. 藉由 GPS 移動站（依據透空度及距斷層遠近規劃測量點位）與核心連續站（以解算移動站座標框架時所需約制者為限）及精密水準測量資料，計算地表位移向量，以推求地表水平與垂直方向的速度場，並提供區域之應變速率分析。	2-4
	3. GPS 與水準測量歷年誤差及成果分析。	2-2、2-3
	4. 利用所得之地表速度場及應變矩率，推估研究區域彈性地殼內對應之能量累積，同時也估計並比較同時期由地震所釋放之地震矩率，藉以探討研究地區內能量蘊含之盈虧空間分布,提供地震潛能分析模式之依據。	2-4
連續式 CGPS 及 PS-InSAR 技術	1. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及坐標與高程差解算，獲得地表水平與垂直方向的位移量及速度場之初解，並與前一年速度場比較。	2-1
	2. 完成地調所全台連續 GPS 測量資料之時序分析，提供週期性變化結果（以超過一年以上之資料做分析）。GPS 連續站資料分析包含各測站的雜訊特性、週期性效應與自然界影響因子分析。	2-1
	3. 交付南部地區雷達影像之原始格式（RAW），單觀點複數影像（SLC: Single Look Complex）和 PS-InSAR 技術所得之平均視衛星方向位移之數值資料，套疊在 5 米或 LiDAR 數值地形資料。	2-5
	4. 將 PSInSAR 資料與 GPS、水準資料和構造剖面比較，確定 PSInSAR 資料的可信度，並應用在其他大地測量密度較低之地區，獲得該區域完整的地表變形資訊，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。	2-6
活動斷層發生潛勢圖建置	1. 召開第 2 次活動斷層參數表及邏輯樹專家討論會議，針對斷層分段特性、三維幾何形貌、最近一次活動時間、長期滑移速率、可能引致地震規模等參數不確定性，進行邏輯樹架構與參數權重之合理性探討。	附錄 3-2
	2. 蒐集台灣陸域構造平衡剖面資料以及重定位地震資料建立活動斷層三維幾何形貌、並研究活動斷層之活動特性與地震規模尺度，建立活動斷層特性之參數表。包含：斷層名稱、分段資訊、斷層長度與破裂深度、面積、斷層機制、傾角、錯動量及分布、長短期滑移速率、再現週期、最近一次活動時間、可能最大地震	3-1-1 3-2-1 3-3-1 3-4-1 3-5-1 3-6-1

	規模。可將參數表之資訊以及野外調查成果彙整為 GIS 圖層。	3-7-1 3-8-1
	3. 蒐集包含槽溝、地形或是地球化學定年之相關研究成果，推估活動斷層之長期滑移速率。	2-7
	4. 利用 GPS 連續觀測站以及其他測地學的觀測資料所記錄的地表運動場（速度及應變率）來推測斷層面的震間滑移速率。並將測地學所得之變形反演斷層面震間滑移分布及滑移虧損（slip deficit），分析短期及長期滑移速率及其在活動斷層潛勢分析上的意義，進一步推算斷層的能量累積率與發生特徵地震規模間的關係。	2-7
	5. 完成南部地區 9 條活動斷層（木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層）之錯動機率評估。其項目包括：（a）建立活動斷層之特徵地震模式、（b）評估活動斷層未來發生機率、（c）製作活動斷層發生機率潛勢圖。	3-1-3 3-1-4 3-2-3 3-2-4 3-3-3 3-3-4 3-4-3 3-4-4 3-5-3 3-5-4 3-6-3 3-6-4 3-7-3 3-7-4 3-8-3 3-8-4 3-9
井下應變儀資料分析	1. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係；並進行面應變、剪應變分析。	附錄 4-1
	2. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。並經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。	4-1-2
	3. 持續維護及更新井下應變儀資料庫。	持續維護 更新中
地球化學觀測與研究	1. 嘉義沄水溶解氣體觀測站 2014 年 12 月至 2015 年 11 月溶解氣體之甲烷、水氣、氮氣、氧氣、氬氣、二氧化碳、氡氣氣體觀測結果。	5-5
	2. 新竹大平地、雲林古坑、屏東屏科大、台東池上、花蓮東華站 2014 年 12 月至 2015 年 11 月土壤氣體之氡氣氣體觀測結果。	5-2 附錄 5-1
	3. 既有水位觀測站 2014 年 12 月至 2015 年 11 月水位觀測結果。	5-3 附錄 5-2
	4. 墾丁社頂站 2014 年 12 月至 2015 年 11 月地下水水氡觀測結果。	5-4 附錄 5-3

	5. 墾丁社頂站 2014 年 12 月至 2015 年 11 月定期採樣地下水水氡分析結果。	5-4 附錄 5-3
	6. 將觀測資料同步轉移至委託單位之伺服器。	已完成
整合觀測資料分析	1. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站及地下水資料加以比較，找出其相關性。	6-1
	2. 以井下應變儀時間點為主，分析連續 GPS 資料的相同或相異性，理解影響其異同的因素、以進一步解釋應變異常。	6-2
	3. 選擇一個較大之異常事件做高頻 GPS 分析，從地殼位移與地殼應變的觀點來解釋斷層的活動性。	6-3
綜合部分	1. 每個月初 email 發布 GPS 連續站與井下應變儀之變動值異常分析，分析資料為 2 個月以前的一整個月期間之資料。	持續發布
	2. 對於國內陸地上地震規模大於六的地震，在地震後 6 個星期內，運用 GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準測量、井下應變儀及地球化學觀測等資料（GPS 移動站及精密水準測量需配合中興測量於震後一周內完成測量並提供資料）提出分析報告。	無
	3. 於本年度舉辦一場成果發表會，將本計畫之重大成果具體呈現。	20150923 舉辦
	4. 計畫參與人員運用計畫執行成果所發表之相關著作電子檔。	附錄 7-2
	5. 提供成果報告內圖片「300dpi 以上清晰圖檔(電子檔)」。	附錄 7-3
	6. 成果報告 30 份（包含紙本與光碟）。	完成

摘要

本計畫計算 2015 年全臺連續全球定位系統測站共 334 站，除彙整時間序列外，也利用天空圖分析各測站透空率，統計出遮蔽較嚴重測站資訊。本年度計算累積歷史資料至今之速度場結果與過去長期解算結果約略相同，唯發現部分測站架設時間為 2013 年底到 2014 年初的測站因測量時間過短，因此計算出來的時間序列還不穩定，造成其速度與累積至去年的速度有較大的差異。另外，也發現部分測站於 2013 年至 2014 年於垂直方向上有較大跳動，原因尚未確認，可能為測站資訊未更新，後續將針對該測站資訊確認及重新解算。

截至期末報告前，精密水準已完成 41 條測線共 1175 個測段之施測及查核；GPS 亦完成台北地區 82 點、桃竹苗地區 112 點、中部地區 156 點、嘉南地區 178 點、高屏地區 109 點、恆春地區 32 點、花東地區 70 點和宜蘭地區 34 點之移動站測量及查核工作。藉由誤差分析及與 GPS 連續站座標時間序列比對後，顯示觀測資料品質符合歷年施測水準且穩定可靠。

PS-InSAR 工作部份為彙整臺灣西南部地區成果，西南部區域主要下陷區域為嘉南沿海區域以及屏東地區。若以連續 GPS 測站 LIKN 為參考點，由 ERS 及 ENVISTAT 結果顯示此沿海區域於 1995-1999 年和 2004-2008 年兩個時期間呈現將近 30 mm/yr 的視衛星方向下陷速率。而最大抬升區域則為台南台地周圍，速率約為 20 ~ 30 mm/yr。ALOS 結果則顯示，在這段期間 2007 年到 2011 年期間，西南地區變形行為較明顯，左鎮斷層以及龍船斷層周圍有較大的視衛星方向抬升量，推測其結果為受到 2010 年 3 月 4 日甲仙地震所引起的同震變形行為，其最大視衛星方向抬升量約為 30 mm/yr，並且由 PSInSAR 結果都能看到除了跨過本區域九條活動斷層有視衛星方向速度不連續外，跨過龍船斷層、右昌斷層以及鳳山斷層也有明顯的斷層兩側變形速度不連續，尤其以龍船斷層最為明顯，值得架設加密監測網持續觀測。

本研究藉由三維塊體模型 DEFNODE，針對臺灣北、中、南部地區由 GPS 所觀測到的現今水平地表變形速率進行運動學分析（2006~2014 連續站及 2002~2014 移動站）。模型中將此區共分為 29 個塊體，並將地調所公佈的活斷層（梅嶺、龍船、右昌斷層除外）及構造邊界（鳳山斷層）當成各塊體的邊界。利用 DEFNODE 及地質滑移速率為約束值，同時解算符合 GPS 觀測速度的各塊體最佳剛體旋轉速率及邊界斷層上的最佳滑移速率及滑移虧損率（slip deficit rate）。本次期末階段研究成果的 28 條斷層中，木屐寮-六甲、旗山、小崗山及龍船斷層的平均滑移虧損率大約 3~7 mm/yr，因此該斷層的地震潛能可能相對較高。在新化、後甲里、潮州斷層部分則計算出 0~3 mm/yr 的低平均滑移虧損率。總結來說，本階段南臺灣以麓山帶南北向一系列斷層之滑移虧損率最高，各斷層面上滑移虧損皆較小。

斷層潛勢評估目的是建立臺灣 33 條活動斷層潛勢評估流程，本年度以南部 9 條活動斷層進行評估。木屐寮-六甲斷層採用 Poisson 模式，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 16.7%、26.1%及 44.5%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 6.2%、9.9%及 17.6%。新化斷層最後一次發生時間為西元 1946 年，採用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 3.3%、5.9%及 12.1%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0%、0%及 0%。後甲里斷層本身不會造成大規模之地震，且實際上是台南斷層之背衝斷層，本計畫建議採用孕震構造進行評估，後甲里斷層系統最後一次發生時間可能為西元 1862 年，因此本計畫分別採用 BPT 模式及 Poisson 進行評估，以 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 12.8%、20.2%及 35.2%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 3.1%、5.3%及 10.4%。以 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 9.4%、15.0%及 26.8%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 3.1%、5.0%及 9.2%。左鎮斷層採用 Poisson 模式，未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 1.5%、2.3%及 4.0%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.0%、0.0%及 0.0%。小崗山斷層以 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 3.4%、5.6%及 10.7%；發生地震矩規模 7.0

以上之機率為0.4%、0.7%及1.3%。旗山斷層以Poisson模式評估之結果，未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為3.1%、5.2%及10.0%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.9%、1.6%及3.1%；發生地震矩規模7.5以上之機率為0.01%、0.01%及0.02%。潮州斷層以Poisson模式評估之結果，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為2.6%、4.3%及8.4%；發生地震矩規模7.0以上之機率為1.5%、2.5%及4.9%；發生地震矩規模7.5以上之機率為0.03%、0.05%及0.1%。恆春斷層以Poisson模式評估之結果，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為9.3%、14.8%及26.7%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.8%、1.2%及2.3%。

井下應變儀部份，處理台北網、新竹網及嘉義網共10個測站，目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，嘗試建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式並做修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。在2014年12月至2015年11月期間，嘉義網、新竹網及台北網分別觀測到3、6和4個應變異常事件。分別為嘉義網應變異常事件為：2015/2/14 台東近海地震、2015/3/23 花蓮近海地震及2015/4/20 花蓮外海地震；新竹網應變異常事件為：2014/12/11 基隆外海地震、2015/1/7 花蓮秀林地震、2015/3/23 花蓮近海地震、2015/4/20 花蓮外海地震、2015/5/11 苗栗西部近海地震及2015/6/21 花蓮外海地震；台北網觀測應變異常事件為：2014/12/11 基隆外海地震、2015/1/7 花蓮秀林地震、2015/3/23 花蓮近海地震及2015/10/19 宜蘭近海地震。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至2015年9月為止，檢視井下應變儀含有前兆訊號並成功對應地震的機率在嘉義網、新竹網與臺北網分別有：67%、77%與75%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：33%、23%與25%；地震前沒有前兆訊號的機率為：29.4%、62%與36%。

地球化學觀測部份，本年度觀測期間，2014/12/11 M_L 6.7 基隆外海地震、2015/1/7 M_L 5.5 花蓮秀林地震、2015/3/23 M_L 6.2 花蓮近海地震、2015/4/20 M_L 6.4 花蓮外海地震、2015/5/11 M_L 4.9 苗栗西部近海地震、以及2015年9/1、9/16、花蓮近海地震（M_L 5.1~5.6）和11/2 M_L 5.9 台東外海地震等八起，皆於發生前出現土壤氡氣異常上升的情況，其中1/7、3/23、4/20、9/1與9/16等五起發生於花蓮附近的地震，皆同時有兩座以上的測站觀察到顯著的氡氣異常，而前三起也與井下應變儀之應力異常時間相近，可視為地震的前兆訊息。而在地下水位監測的部分，在三區的測站之中均未觀察到明顯的震前水位異常現象，除了11/24於新樂站觀察到12公分顯著的地下水位下降。另外，2014年12月至2015年11月計畫執行期間，此期間恆春半島附近也未發生強震（Mw＞6.0），社頂站地下水水氡濃度觀測均無發現異常下降之地震前兆，該站水樣出自自由含水層，長期觀測結果顯示地下水水氡濃度受降雨及地下水位等環境因子影響。

另外，GPS應變雖然雜訊較大，對於較小的變化訊息無法明確顯現，但它有明確的絕對量以及長期的穩定性，井下應變儀可用GPS應變來做尺度較準。在這一期的觀測中，新竹觀測網很明顯的在2015/01/07、2015/02/14、2015/03/23以及2015/04/20幾個地震間有明顯的相同變化模式，都在地震前約40天由壓縮轉舒張，然後到地震前幾天再突然轉壓縮，然後地震發生後幾天，又重複新的周期，由壓縮轉舒張。由於新竹地區在這段期間的雜訊顯得特別的小，可以顯示出這重複性與地震息息相關的應變，這顯示臺灣地區較大較深的地震會造成各地的地殼作應力（應變）的調整。

在東部的地體構造活動較為急遽，每個區域的應變各有不同的特性，大多有較明確的長期穩定的應變量，假若有偏離長期變化的應變通常表示有應力的累積，通常也表示將有地震會發生。本年對花蓮地區2013~2015年的GPS應變作系統性的分析，可明顯的看出這段期間幾個顯著地震在各區域應變的時序變化，希望對明年討論東部斷層時可以當作一個現今斷層應變速率的參考值。

關鍵詞：全球衛星定位系統、連續觀測站、塊體模型、PS-InSAR、井下應變儀、氣體地球化學、水位觀測井、斷層活動潛勢分析、滑移虧損率

Abstract

We calculate the daily solution and time series of 334 continuous GPS stations in Taiwan. In addition, we also use skyplot to estimate penetration condition of GPS stations which may cause poor accuracy or error during time series estimations. The present velocity field shows a similar trend with long-term estimation. However, some stations demonstrate the deviatory trends due to the insufficient observation time from late 2013 or early 2014 for time series analysis.

For the 2015 final-term report, we have achieved the examinations of results from 41 precise leveling routes with 1175 sessions and from 82 campaign-mode GPS stations in Taipei area , 112 campaign-mode GPS stations in Taochumiao area , 156 campaign-mode GPS stations in central area , 178 campaign-mode GPS stations in Chianan area , 109 campaign-mode GPS stations in Kaoping area,32 campaign-mode GPS stations inHengchun area , 70 campaign-mode GPS stations in Huatung area, 34 campaign-mode GPS stations in Ilan area that have been measured up-to-date. After comparing the coordinates from campaign-mode GPS sites and precise leveling benchmarks with the time series from continuous GPS stations, the velocity field is consistent with previous measurement which show the reliability of observation.

For the PS-InSAR works in southwestern Taiwan in period of 1995-1999 and 2004-2008 by using ERS and ENVISAT images, the major land subsidence are located in coastal area of Chianan and Pingtung with a LOS rate of ~ 30 mm/yr with respect to continuous GPS station LIKN as a reference point. Meanwhile, the maximum LOS uplift rate of ~20-30 mm/yr is observed in and around Tainan Tableland. In the period of 2007-2011 by using ALOS images, the most significant LOS uplift rate located around in the Tsochen and Longchuan faults. This high uplift rate might partially contributed from coseimic deformation of the Jiasian earthquake occurred on March 4, 2010. The significant LOS velocity gradients can not only be observed across the 9 active faults in SW Taiwan, but also present across the Longchuan, Fongshan and Youchang faults. Especially, the anomalous deformation rate is observed across the Longchung fault, thus it is worthy to continuously monitor dense geodetic measurements.

This research evaluated the slip rate and slip deficit rate of active faults in northern, central and southern Taiwan by 3D block model DEFNODE. We first get the surface fault traces and the subsurface fault geometry parameters, and then establish the block boundary model of our study area. The surface deformation observations are the 2006~2014 and 2002~2014 average horizontal velocities measured by GPS continuous and campaign networks in southern Taiwan. By employing the DEFNODE technique and geologic constraints, we invert these GPS velocities for the best-fit block rotation rates, long term slip rates and slip deficit rates. Our results show that the slip deficit rates of the Hsinhua, Houchiali, Chaochou faults are relatively low（about 0~3 mm/yr）, inferring that the earthquake potential of these faults may be relatively low. On the other hand, the slip deficit rates of the Muchiliao-Liuchia, Hsiaogangshan, Chishan, Longchuan fault are higher（about 3~7 mm/yr）, implying a relatively high earthquake potential. Our results also indicate that the slip deficit rates of faults in southern Taiwan are higher in foothills region.

The purpose of probability analysis of active faults is to establish the flow chart of 33 active faults in Taiwan. In this year, we need to assess 9 active faults in southern Taiwan. The Poisson model was used for Muchiliao–Liuchia fault. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 16.7%, 26.1% and 44.5%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 6.2%, 9.9%, and 17.6%, respectively. The BPT model was used for Hsinhua fault and the last event is set at year 1946. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 3.3%, 5.9%, and 12.1%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake

occurred in 30, 50, and 100 years are 0.0%, 0.0%, and 0.0%, respectively. Because the Hochiali fault is a back thrust of Tainan fault and could not trigger large earthquake by itself, we suggested a seismogenic structure to assess the probability of Hochiali fault system. The last event may be set at year 1862. For instance, it still has debate about the last event time, both BPT model and Poisson model were used. By using BPT model, the probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 12.8%, 20.2% and 35.2%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 3.1%, 5.3% and 10.4%, respectively. By using Poisson model, the probabilities for the Mw ≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 9.4%, 15.0% and 26.8%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 3.1%, 5.0% and 9.2%, respectively. The Poisson model was used For Tsochen fault. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 1.5%, 2.3%, and 4.0%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.0%, 0.0%, and 0.0%, respectively. The Poisson model was used for Hsiaokangshan fault. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 3.4%, 5.6%, and 10.7%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.4%, 0.7% and 1.3%, respectively. For Chishan fault, Poisson model was used. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 3.1%, 5.2% and 10.0%; the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.9%, 1.6% and 3.1%; and the probabilities for the Mw≧7.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.01%, 0.01% and 0.02%, respectively. For Chaochou fault, Poisson model was used. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 2.6%, 4.3% and 8.4%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 1.5%, 2.5% and 4.9%, respectively. For Hengchun fault, Poisson model was used. The probabilities for the Mw≧ 6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 9.3%, 14.8% and 26.7%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 0.8%, 1.2% and 2.3%.

Several significant barometric changes were used to remove the environmental effects from strain data in 10 borehole strainmeters located in Taipei, Hsinchu and Chiayi networks. From December 2014 to November 2015, totally 3, 6 and 4 strain anomalies are found in Chiayi, Hsinchu and Taipei networks respectively. In Chiayi network, 3 strain anomalies are related to 2015/02/14 M_L 6.3 offshore Taitung earthquake, 2015/03/23 M_L 6.2 offshore Hualian earthquake and 2015/04/20 M_L 6.4 offshore Hualian earthquake. In Hsinchu network, 6 strain anomalies are related to 2014/12/11 M_L 6.7 offshore Keelung earthquake, 2015/01/07 M_L 5.5 Hsiulin earthquake, 2015/03/23 M_L 6.2 offshore Hualian earthquake, 2015/04/20 M_L 6.4 offshore Hualian earthquake, 2015/05/11 M_L 4.9 offshore Miaoli earthquake and 2015/06/21 M_L 5.0 offshore Hualian earthquake. In Taipei network, 4 strain anomalies are related to 2014/12/11 M_L 6.7 offshore Keelung earthquake, 2015/01/07 M_L 5.5 Hsiulin earthquake, 2015/03/23 M_L 6.2 offshore Hualian earthquake and 2015/10/19 M_L 5.2 offshore Yilan earthquake. The probability for successful investigation of strain anomaly with corresponding earthquake in Chiayi, Hsinchu and Taipei networks is 67%, 77% and 75% respectively. The probability of no significant stain anomaly found prior to a significant earthquake is 29.4%, 62% and 36%.

There are 8 earthquakes observed associated with soil radon anomalies from geochemical monitoring observations during the period from December 2014 to November 2015. These earthquakes are 2014/12/11 M_L 6.7 offshore Keelung earthquake, 2015/01/07 M_L 5.5 Hsiulin earthquake, 2015/03/23 M_L 6.2 offshore Hualian earthquake, 2015/04/20 M_L 6.4 offshore Hualian earthquake, 2015/05/11 M_L 4.9 Miaoli earthquake, 2015/09/01 (M_L 5.5), 2015/09/16 (M_L 5.6) offshore Hualian earthquakes and 2015/11/02 (M_L 5.9) offshore

Taitung earthquake. The period of three events associated with soil radon anomalies at three stations are similar to those form strain anomalies observed in borehole strainmeter networks, such as 2015/01/07, 2015/03/23 and 2015/04/20 events which occurred in Hualien area. It could be recognized as the precursor signal of earthquake. Concerning the water-level monitoring data, no significant precursory anomaly was observed this year, except for an obvious water-level decrease for 12 cm on November 24 at Shinle station. In addition, neither large earthquakes (Mw > 6.0) nor precursory declines in the concentration of groundwater radon occurred near the Kenting station. The Kenting station is an unconfined aquifer. The long-term observation at the Kenting station indicates that the concentration of groundwater radon in an unconfined aquifer is affected by precipitation and water table.

The noise of GPS strain is relative large compare to other observations. Even though, GPS strain owns some distiguish characters such as absolute values and long term stability. Borehole strain observation can use GPS strain for scale calibration. In this study period, in between several major events, such as 2015/01/07、2015/02/14、2015/03/23 and 2015/04/20 events, GPS strain observations show repeated pattern of strain changes. It changes at about 40 days before the event from compression to dilatation, and keep it until several days before the event, switch from dilatation back to compression. Right after the event, it repeat the cycle, change from compression to dilatation again after the event. During this observation period, the noise of GPS strain observation keep stable and small, we can observe these repeated pattern of strain change in the crust close related to the major events in eastern Taiwan. It show us that the local crust can be adjusted according to the major and deep earthquages in Taiwan.

Tectonic activity in the eastern Taiwan is large and fast, crustal strain of each region shows its own characteristics , Strain deviate from the long-term strain rate of its surrounding region usually indicates accumulation of stress , often also said there will be an earthquake occur . Systematic analysis of strain changes during 2013~2015 in Hualien areas has been done, and timing variations of different regions can obviously see its relationships with some significant earthquakes during this period. Studies of active faults in eastern Taiwan will be the main target of this project in next year. The long term GPS starin at different regions, and the strain accumulation-relaxation processes related to the major earthquakes can be used as a modern strain rate of the nearby active fault.

KEYWORDS: GPS, CGPS, Block model, PS-InSAR, Borehole strainmeter, Gas geochemistry, Water-level observation well, Probabilistic analysis for active faults, Slip deficit rate

第一章、緒　論

1-1 計畫整體概述

災害性地震主要源於斷層的活動，瞭解活動斷層的活動性及分析潛在孕震斷層的潛勢評估是地震與活動斷層危害度評估的重要參考數據。經濟部中央地質調查所於 91~95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，已逐年在臺灣陸上活動斷層帶設置監測點位，包括全球定位系統（Global Positioning System，簡稱 GPS）與井下應變儀（borehole strainmeter）。累積至今，已完成連續 GPS 站共 83 站、13 口井下應變儀及地球化學觀測站共 13 站（圖 1-1.1 和表 1-1.1~表 1-1.5）。而從 98 年至 101 年的「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究」四年計畫研究當中，已藉由高精度的水準與大地測量瞭解各斷層的活動特徵；藉由連續 GPS 觀測的時間序列分析除可瞭解各斷層於間震、同震以及震後的變形型態變化，尚可計算出間震期短期的滑移速率，以及利用同震及震後的斷層面滑移特性推導地表下斷層面的滑移特性。利用地球化學方法與地下水位觀測斷層活動性，當斷層錯動引發地震發生前，常伴隨周遭環境流體的物理性質、氣體成分、液體化學成分和同位素組成發生改變，會出現異常現象。在整合性地表變形觀測的手段中，針對各孕震構造的觀測的重點在於是否可以觀測到災害性地震前的應變異常訊號，由過去四年井下應變儀分析的經驗得知，井下應變儀可以觀測到極小的應變率變化，但此應變速率變化亦可能由環境因子所引起。這些環境因子包含地下水位升降、降雨、氣壓變化（一般是颱風引起）和潮汐。目前的分析成果已能評估潮汐、地下水位和氣壓的影響進行修正，而在降雨部分則已經得到部分成果。有些應變速率異常與慢地震（slow earthquake）和長微震（tremor）有關，有些極可能與規模大於 5.5 以上的地震前應變異常相關。然而，2011 年 3 月 11 日發生於日本 Mw 9.0 宮城外海的地震，深深地提醒我們下列兩件事之重要性：（1）辨識已知與未知高發震潛能構造的位置及（2）評估其所蘊含之地震潛能。這些高發震潛能構造不一定會通過主要城市，然其引發之重大地震卻會對周遭城市造成慘重之災情。經由過去近十年之大地測量監測資料，我們觀測到數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域，例如：東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部。因此，本計畫將利用整合性大地測量技術所獲得之地表運動觀測值，期望得到：（1）辨識臺灣地區已知與未知高發震潛能構造的位置；（2）推估這些區域地殼內能量之變化及（3）探討大地測量觀測資料在地震災害分析上的應用。

過去 98~101 年針對臺灣 8 條活動斷層（瑞穗斷層、車籠埔斷層、山腳斷層、新城斷層、六甲斷層、木屐寮斷層、池上斷層和小崗山斷層）做了斷層活動度及地震潛能分析，針對孕震構造與活動斷層逐步進行了詳細的參數研究及地震發生機率評估。然而，在本階段的計畫裡，欲透過蒐集與分析地調所及國內既有之 33 條活動斷層資料（圖 1-1.2），並參考日本地震研究推進本計畫及美國加州之經驗方法，將各孕震構造之活動特性予以統計數量化，以製作臺灣地區第一版之斷層活動潛勢圖。經由本計畫系統性地研究各活動斷層之活動特性，建立全國之活動斷層發生機率潛勢圖，以及可能引致之地震規模，據此成果可後續再完成鄰近斷層地區之震度，可充分利用地調所研究之活動斷層與孕震構造之地質資訊，逐步充實我國地震防災整備資訊內容，並可使我國之地震與活動斷層研究與世界先進國家水準並駕齊驅。102 年度已完成中部地區 7 條活動斷層（彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、觸口斷層）之錯動機率評估。103 年度已完成北部地區 9 條活動斷層（山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層）之錯動機率評估。

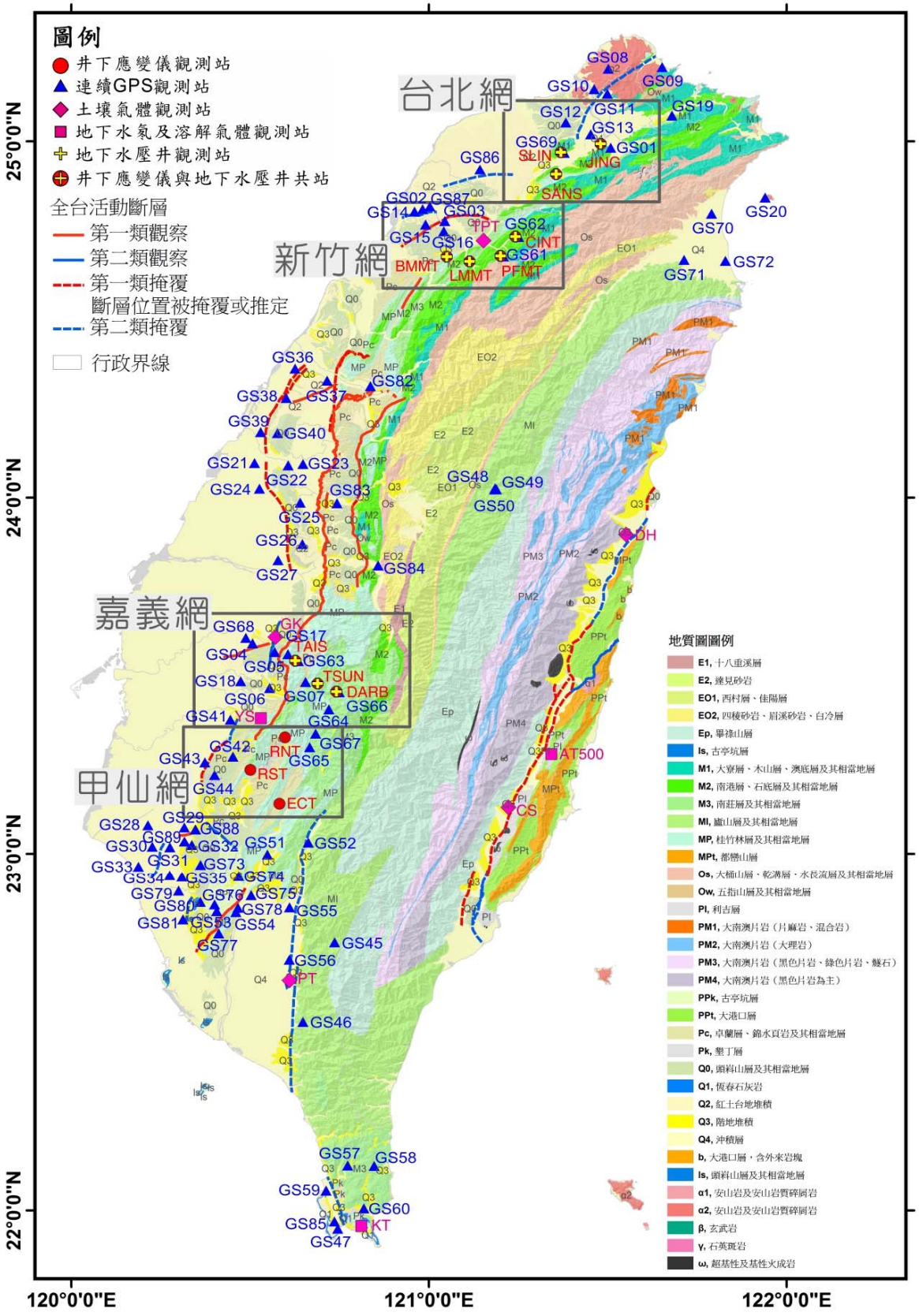


圖 1-1.1：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全臺分布圖。

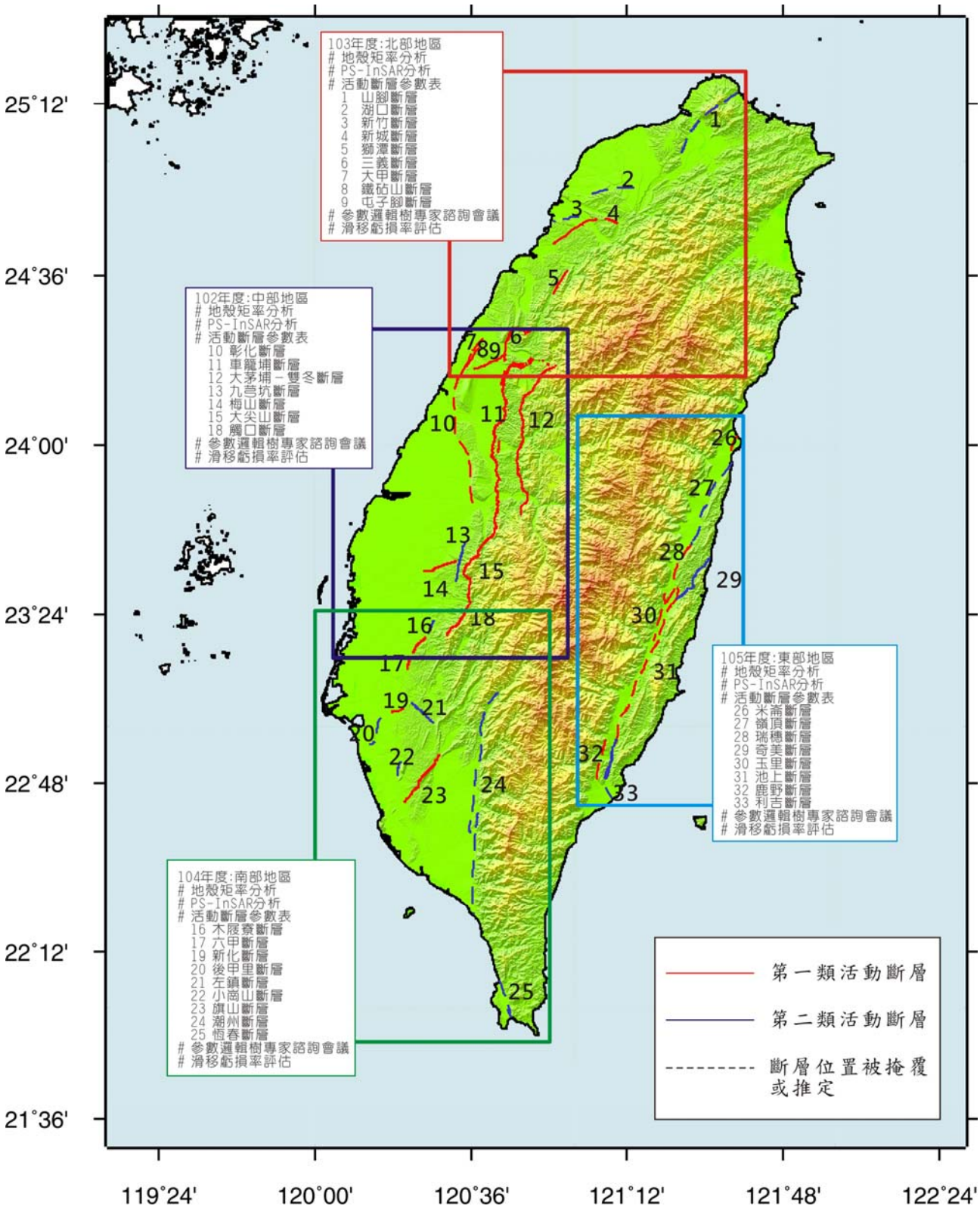
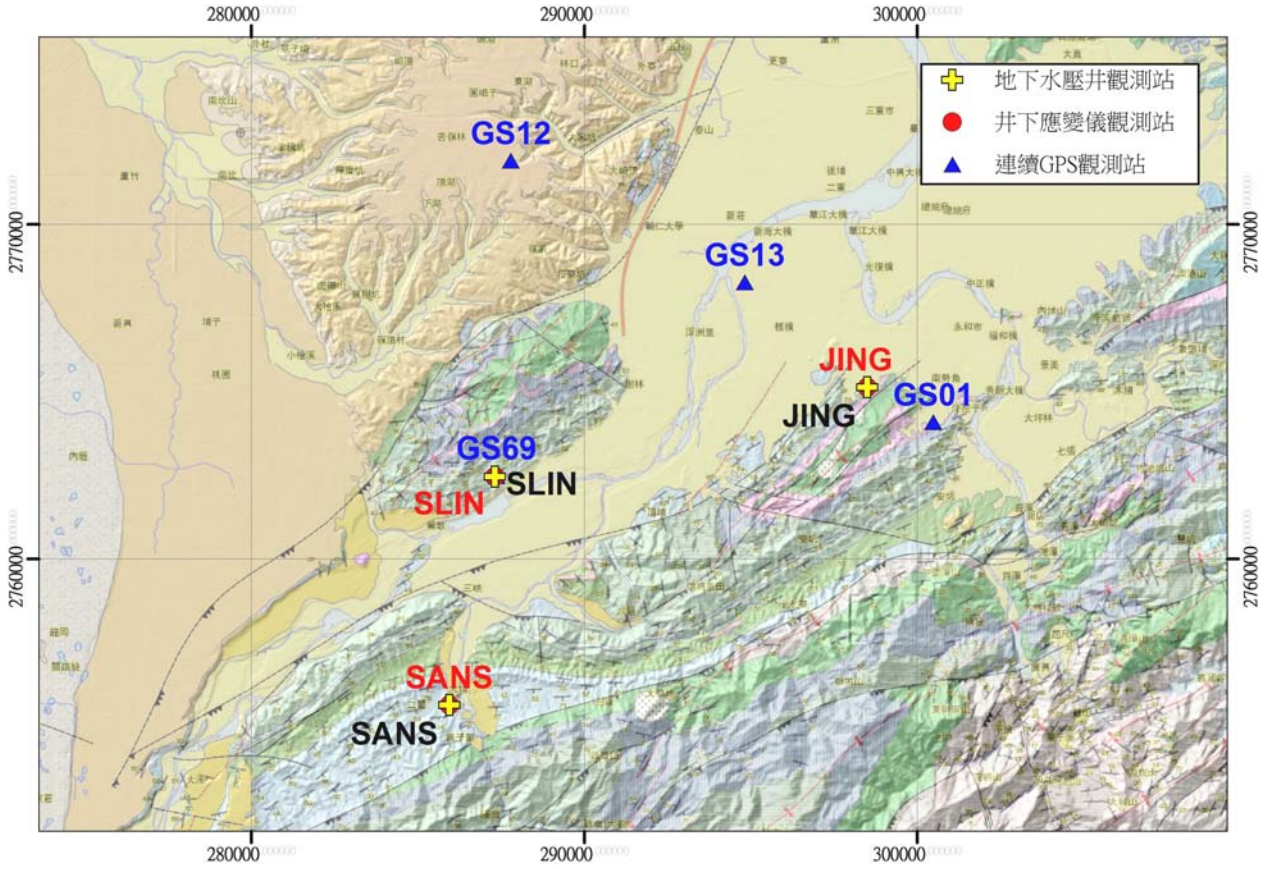


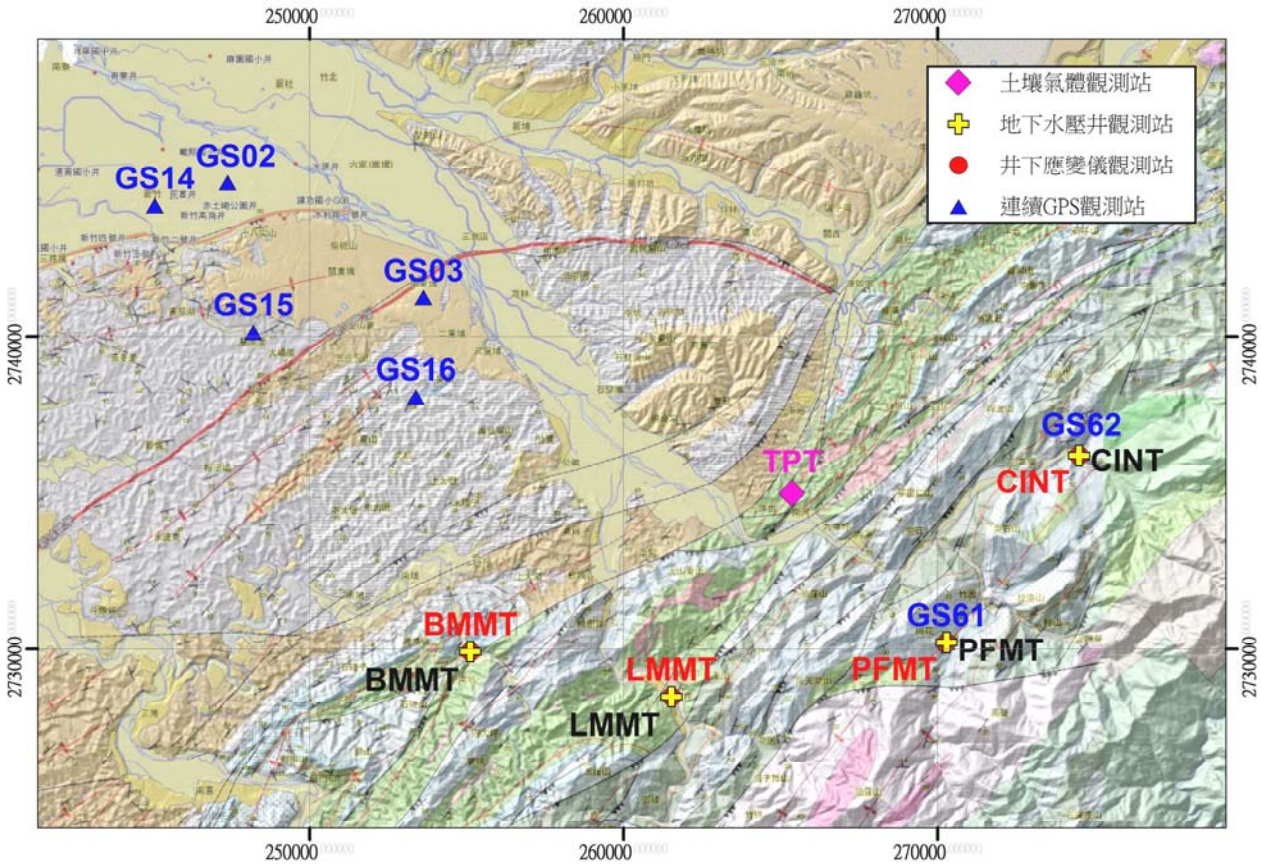
圖 1-1.2：臺灣活動斷層分布圖與本計畫擬定之研究區域。



地層圖例說明_臺北網

沖積層（6020） 第四紀	火成岩類（7030） 更新世	大寮層（1132） 中新世	南港層（1393） 中新世
階地堆積層（6060） 全新世	林口層（1371） 更新世	南莊層（1380） 中新世	木山層（1181） 中新世
桃園層（1440） 更新世	錦水頁岩（1680） 上新世	南港層（1390） 中新世	南莊層（1381） 中新世
中壢層（1150） 更新世	卓蘭層（1330） 上新世	木山層（1180） 中新世	南港層（1391） 中新世
大南灣層（1070） 更新世	桂竹林層（1430） 中新世－上新世	南港層（1395） 中新世	粗窟層（1920） 漸新世
林口層（1370） 更新世	桂竹林層大埔段（1433） 中新世─上新世	石底層（1271） 中新世	大桶山層（1110） 漸新世
紅土礫石層（6051） 更新世	大寮層（1130） 中新世	石底層（1270） 中新世	

圖 1-1.3：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-臺北網分布圖。黑色站名為地下水壓井觀測站。



地層圖例說明_新竹網

沖積層（6020） 第四紀	卓蘭層（1330） 上新世	南港層尖石山段（1398） 中新世	南港層（1393） 中新世
階地堆積層（6060） 全新世	桂竹林層（1430） 中新世－上新世	南港層七寮段（1396） 中新世	南港層（1390） 中新世
紅土台地堆積層（6050） 更新世	桂竹林層關刀山砂岩段（1436） 中新世—上新世	南港層牛肩頭段（1397） 中新世	石底層（1270） 中新世
㮾山層（1690） 更新世	桂竹林層大埔段（1433） 中新世—上新世	大埔層（1100） 中新世	南莊層（1380） 中新世
大茅埔礫岩（1090） 更新世	桂竹林層二鬮段（1431） 中新世—上新世	北寮層（1210） 中新世	東坑層（1360） 中新世
店子湖層（1350） 更新世	桂竹林層十六份頁岩段（1432） 中新世—上新世	打鹿頁岩（1250） 中新世	大寮層（1130） 中新世
楊梅層照鏡段（1562） 更新世	桂竹林層魚藤坪砂岩段（1435） 中新世—上新世	觀音山砂岩（1761） 中新世	木山層（1181） 中新世
楊梅層照門段（1561） 更新世	澳底層（1660） 中新世	木山層（1180） 中新世	巴陵層（1170） 漸新世
二鬮層（1010） 上新世	上福基砂岩（1050） 中新世	南莊層（1381） 中新世	巴陵層（1171） 漸新世
錦水頁岩（1680） 上新世	碧靈頁岩（1600） 中新世	大寮層（1132） 中新世	

圖 1-1.4：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-新竹網分布圖。黑色站名為地下水壓井觀測站。

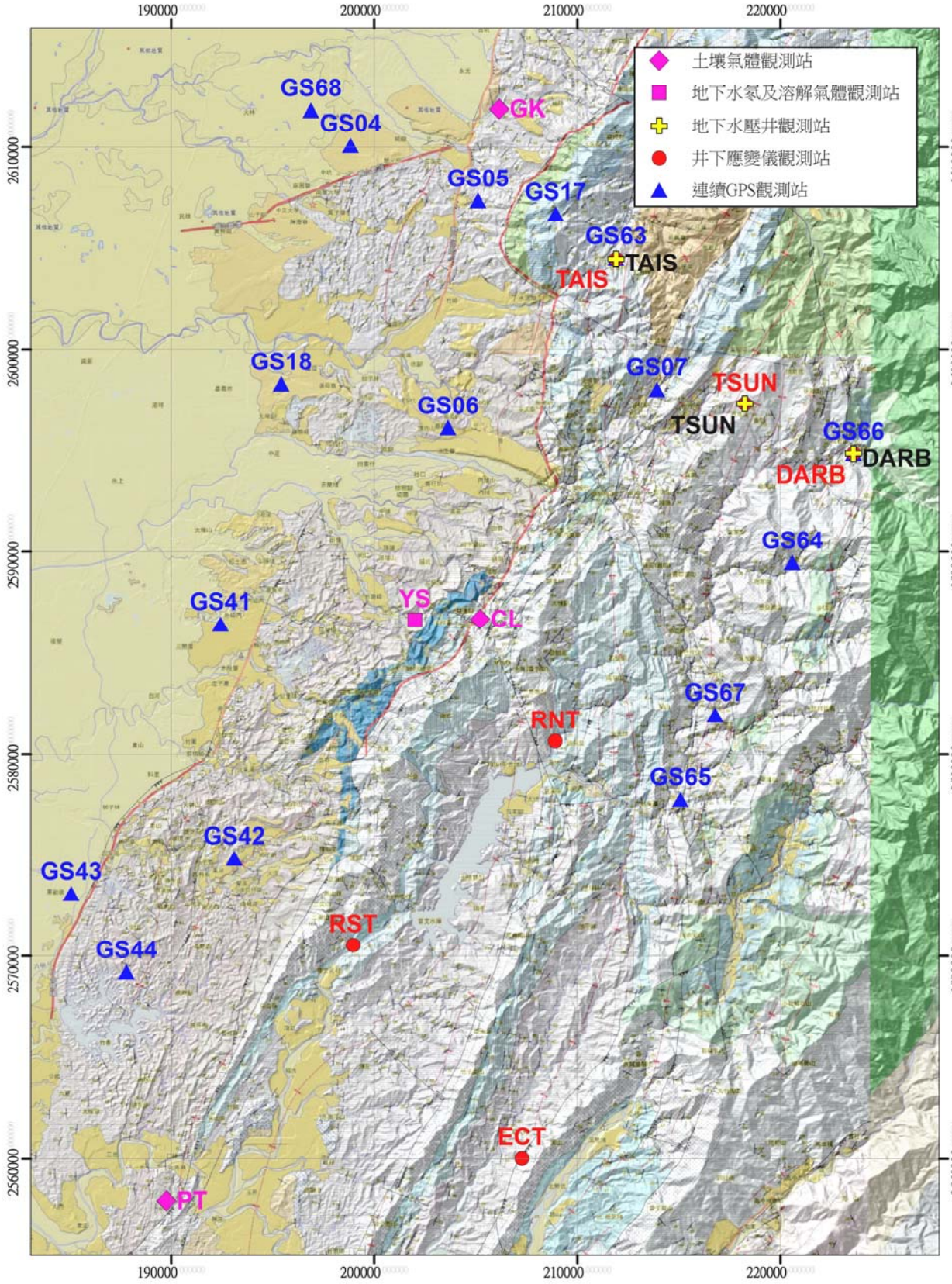


圖 1-1.5：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-嘉義網及甲仙網分布圖。黑色站名為地下水壓井觀測站。

地層圖例說明_嘉義網及甲仙網

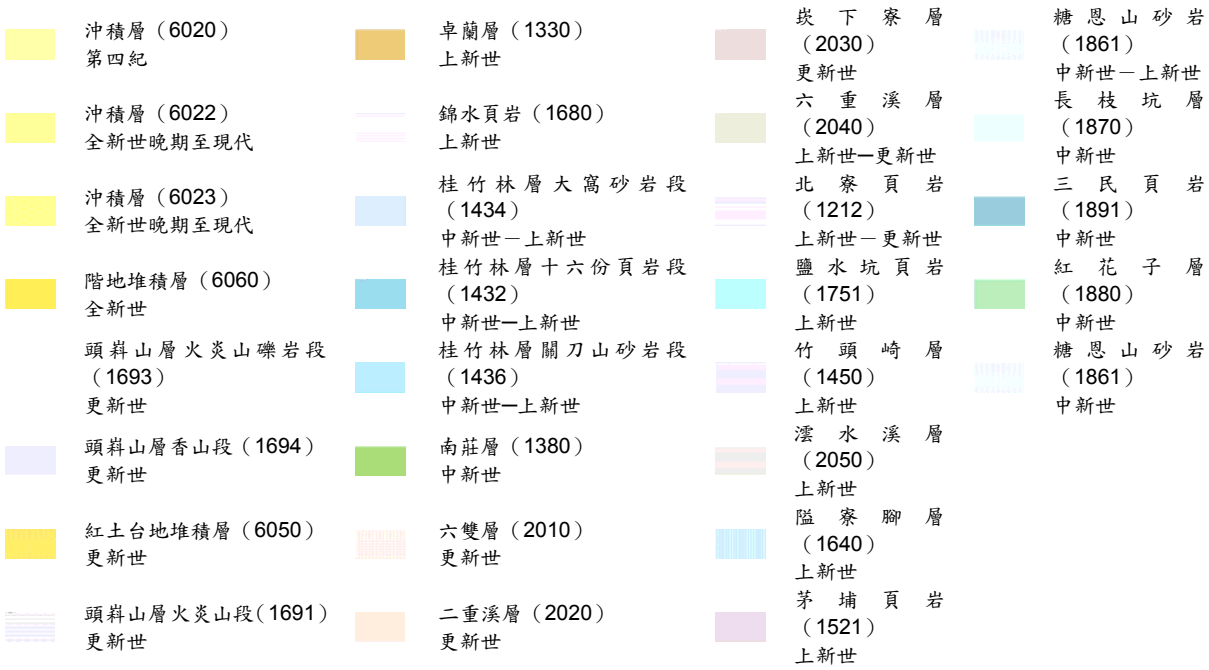


圖 1-1.5（續）：嘉義網及甲仙網之地層圖例說明。

構造線圖例說明

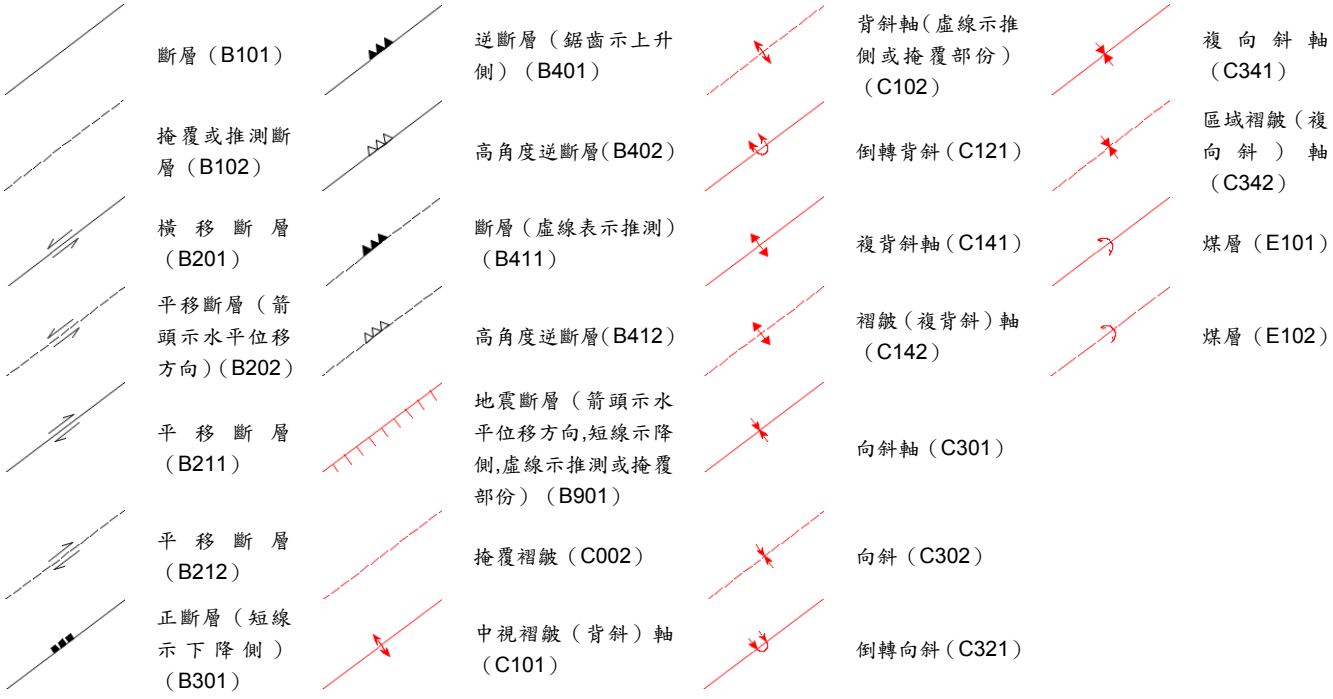


圖 1-1.6：圖 1-1.3~圖 1-1.5 構造線圖例說明。

表 1-1.1：中央地質調查所建置的 GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。

測站代碼	測站名稱	接收起始時間	測站代碼	測站名稱	接收起始時間
GS01	地調所	2002/06/17	GS46	來義國小	2009/01/06
GS02	新竹高工(2015.08.17 廢站)	2004/10/21	GS47	台電南展館 (2013.7.25 廢站)	2009/01/05
GS03	工研院	2004/10/19	GS48	警光山莊	2009/04/01
GS04	大埔美農場 (2009.11.11 廢站)	2004.10.16	GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS06	民和國中	2004/10/21	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS07	培英國小	2004/10/21	GS52	新發國小	2009/12/18
GS08	興華國小	2005/08/15	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS54	大洲國中(2013.7.12 廢站)	2009/12/15
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS11	北投國小	2005/08/15	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS12	樂善國小	2005/09/06	GS57	石門國小	2009/12/15
GS13	國光國小	2005/08/16	GS58	高士國小	2009/12/14
GS14	西門國小	2005/09/13	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS60	永港國小	2009/12/18
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS17	太平國小	2005/09/14	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS63	太興國小	2010/09/24
GS19	保長國小(2012.5.25 廢站)	2006/07/12	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS20	龜山島	2006/08/04	GS65	茶山國小(2011.7.28 廢站)	2010/10/14
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS66	達邦	2010/09/28
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS67	新美國小	2010/09/28
GS23	五光國小	2006/05/30	GS68	三和國小	2010/12/17
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS73	新光國小	2012/11/02
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS74	內門國小	2012/11/02
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS76	新興國小	2012/11/02
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS77	深水國小	2012/11/14
GS33	永華國小	2006/06/22	GS78	溪洲國小	2013/10/22
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS79	中路國小	2013/10/16
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS80	田寮國中	2013/10/16
GS36	德化國小	2006/10/21	GS81	嘉興國中	2013/10/16
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS82	卓蘭實驗高中	2014/12/16
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS83	土城國小	2014/12/22
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS84	水里國中	2014/12/17
GS40	龍峰國小	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2015/01/08
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS86	水美國小	2015/09/15
GS42	東原國中	2007/11/23	GS87	水源國小	2015/09/08
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS89	新化國中	2015/09/14
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05			

表 1-1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起始時間表。

觀測網	觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間	資料停止接收時間
臺北網	JING	錦和	2007/11/20	
	SANS	明德中學	2007/11/12	
	SLIN	樹林焚化廠	2009/09/11	
新竹網	PFMT	梅花國小	2005/06/04	
	LMMT	瑞峰國小	2005/06/07	2012/10
	BMMT	大坪國小	2005/06/09	
	CINT	新樂國小	2006/11/15	
嘉義網	DARB	達邦	2006/11/19	
	TSUN	中興國小	2006/03/01	2014/06
	TAIS	太興國小	2006/03/04	
甲仙網	RNT	曾文水庫北	2003/10/28	
	RST	曾文水庫南	2003/10/23	
	ECT	甲仙十八灣	2004/04/16	2007/07

表 1-1.3：土壤氣體觀測站資料接收起始時間表。

觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
TPT	大平地站	2005/12/16
PT	屏科大站	2008/10/17
CS	池上站	2008/11/13
GK	古坑站	2011/12/22
DH	東華站	2012/10/25

表 1-1.4：地下水水氡觀測站資料接收起始時間表。

觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
AT500	安通站	2011/09/16
KT	墾丁社頂站	2012/08/18
YS	嘉義沄水站	2014/04/01

表 1-1.5：地下水位觀測站資料接收起始時間表。

觀測網	原 觀測站代碼	新 觀測站代碼	站　名	資料接收 起始時間	資料接收停止時間
臺北網	JH	JING	錦和	2007/11/16	
	MD	SANS	明德中學	2007/11/16	2013/07/15
	SLN	SLIN	樹林焚化廠	2009/11/01	
新竹網		PFMT	梅花國小	2008/11/01	2011/07/02
		LMMT	瑞峰國小	2009/09/30	2012/04/02
	DP	BMMT	大坪國小	2013/01/15	
	SL	CINT	新樂國小	2006/12/15	
嘉義網	DB	DARB	達邦	2006/12/05	
	CS（2）	TSUN	中興國小	2012/12/19	2014/05/28
	TS（2）	TAIS	太興國小	2012/12/19	
		YS	沄水國小	2008/11/01	2014/04/28(改氣體站)

第三階段計畫除了持續以連續及非連續觀測 GPS、精密水準測量、地球化學觀測、地下水位觀測和井下應變儀監控斷層的活動性以及分析高發震潛能地區構造之外，其中西部平原地殼運動的變化將會是需要關注的對象，平原地區的沉降除了是人為超抽地下水之外，也很有可能是區域性的盲構造所引起，對於這些盲斷層位置的推測也有助於區域地震災害的評估。雖然目前連續及非連續觀測 GPS 測量、水準測線已有相當密集的測網與測線，但這些測站在空間分布上仍屬於點、線狀分布，近來合成孔徑雷達差分干涉（D-InSAR）技術發展迅速，尤其是利用地表人工結構體或天然岩石露頭當做持久性散射體的合成孔徑雷達差分干涉（PS-InSAR: Persistent Scatterers Interferometric SAR）之分析技術更能得到精確的成果。因此本計畫將可以藉由分析地表上穩定持久性散射體的相位，經由連續雷達影像或小基線技術得到面狀分布且為公釐級精度的地表變位的資料及其隨時間序列變化的資訊，經由連續及非連續觀測 GPS、精密水準測量、持久性散射體的合成孔徑雷達差分干涉將可使空間資訊更為密集，有助於釐清可能的孕震構造在不同時間與空間的應變異常。

對於原有的連續性觀測資料，如持續 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料、地球化學觀測資料及地下水觀測資料，以及間歇性的觀測如固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量觀測，再加上新加入的間歇性的 PS-InSAR 觀測，這些資料詳細地記錄了地表或近地表的地殼變形活動，各有著不同的時空分布以及不同的精度。如何將這些資料更進一步的整合，作綜合性的解釋，將是這四年的重要任務與使命。尤其是連續性的 GPS 觀測資料原來只使用每三十秒一次的觀測，但近年來許多測站已更換成每秒一次的觀測資料，因此與井下應變儀可以加強在極高頻（1 Hz）、高頻 （~0.01 Hz）、中頻（十分鐘一筆）與低頻（一天一筆）之橫向整合，再加上非連續性的觀測，如移動式 GPS 觀測、水準測量以及新加入的 PS-InSAR 等極低頻（數天、數月或一年一筆）的觀測量，將可以掌握地殼在時、空完整的分布的變化，期望能更精確估計斷層的現代活動性。

本階段之計畫架構主要針對斷層活動觀測統整為兩大研究區塊（圖 1-1.7），一為斷層潛勢分析，側重於斷層活動性觀測，包括精密水準測量、移動式及連續式 GPS 資料分析和 PS-InSAR 分析，透過大地測量整合性觀測，研究活動斷層在間震期間之發震潛勢，提供地殼應變矩率之分析和斷層面滑移虧損率（slip deficit rate）評估。此觀測資料將結合活動斷層參數表，進行斷層潛勢之分析，估算活動斷層在未來 30 年、50 年和 100 年之發震潛勢。另一研究區塊則為整合觀測資料分析，針對地球化學觀測資料分析、連續式 GPS 資料和井下應變儀資料分析所得之異常觀測資料，進一步整合，作綜合性的解釋，分析異常觀測資料之環境影響因子和地殼應變之關資，以期瞭解異常訊號之物理機制。預期進度甘梯圖請見表 1-1.6，並配合參考圖 1-1.1~圖 1-1.6。第一年選擇中部地區 7 條斷層，主要是考量 921 地震之後，中部車籠埔斷層有豐富的研究資料以及參數成果，本計畫可藉由蒐集車籠埔斷層參數的同時，建立完整的活動斷層潛勢評估標準化流程，以供後續活動斷層評估之參考；第二年選擇北部地區 9 條斷層，主要是考量臺灣北部幾個主要都會區和科技園區；第三年和第四年則分別是南部地區 9 條斷層及東部地區 8 條斷層，逐步完成全臺灣活動斷層潛勢評估之工作。

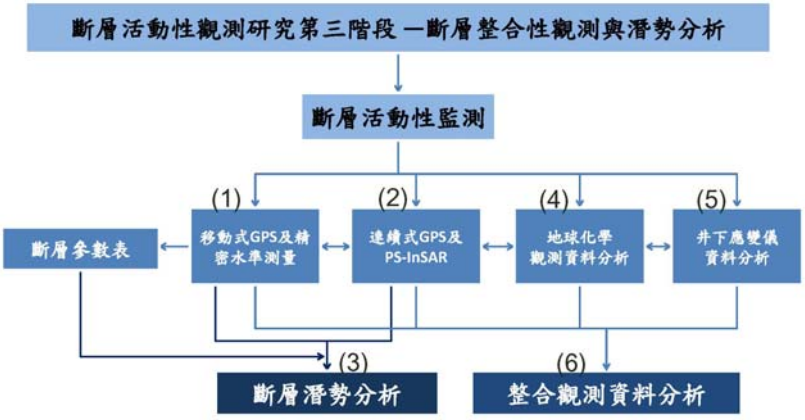


圖 1-1.7：斷層活動性觀測研究第三階段之架構。

表 1-1.6：全程計畫預期進度甘梯圖（Gantt Chart）。

計畫名稱：斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析						
年 次 工 作 項 目			第 1 年 （102 年度）	第 2 年 （103 年度）	第 3 年 （104 年度）	第 4 年 （105 年度）
GPS 移動站資料檢核及分析						
GPS 及水準測量規劃、督導						
GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算						
● 地殼矩率及大地測量矩率分析 ● PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 ● 建立活動特性參數表及三維幾何形貌並 ● 每年召開 2 次參數邏輯樹專家諮詢會議 ● 利用地表運動場來推測活動斷層之斷層面震間滑移速率、滑移虧損（slip deficit）及斷層活動潛勢評估		中部地區				
		北部地區				
		南部地區				
		東部地區				
活動潛勢評估方法論及地震規模尺度研究						
井下應變儀觀測站	資料校正及計算分析					
	維護資料庫					
	時頻分析	嘉義網測站				
		新竹網測站				
		臺北網測站				
		所有測站				
地化觀測站	既有氣體觀測站持續分析數據					
	既有水位觀測站持續分析數據					
	既有水氡觀測站持續分析數據					
	安通溫泉持續定期監測分析					
	墾丁公園地下水持續定期監測分析					
	未來設站地點評估並設置（暫訂並配合地調所規劃）	苗栗臺中地區				
		宜蘭地區 原蘇澳站遷站				
		北部山腳斷層帶				
整合觀測資料分析						
預定進度（累積數）			25%	50%	75%	100%

1-2 研究目的

本計畫目的在於整合連續 GPS 站觀測、測站式 GPS 觀測、精密水準資料、井下應變儀觀測、地球化學觀測及 PS-InSAR 資料，進行活動性斷層之觀測，並同時進行整合觀測資料之分析。除了持續監測斷層活動性之外，對於平原地區的地殼變動推測以及地表下盲斷層的分布欲有更透徹的瞭解。各項目工作目的如下：

1-2-1 移動式 GPS 及精密水準測量

自 96 年起，地調所在全臺已設置了 83 座 GPS 連續觀測站（表 1-1.1）(藉由資料交換機制，可取得其它單位約 245 個連續觀測站資料)(圖 1-2.1)、788 座 GPS 移動站(圖 1-2.2)及 42 條精密水準路線（含 29 條長測線及 13 條短測線）(圖 1-2.2)。由觀測 GPS 連續站、GPS 移動站以及精密水準的時間序列可以得知地殼三維活動隨時間變化的情形。根據監測資料估算之地表水平（圖 1-2.3）與垂直位移向量（圖 1-2.4），可推求斷層的短期滑移速率與近斷層區域的應變分布（圖 1-2.5）。由於地表速度場的變化可以反映出斷層活動的特徵，故分析 GPS 速度場及水準垂直速度場資料，可以協助我們判定活動斷層的位置，並闡明該斷層之活動特性。

由於 GPS 之水平誤差為 10 或數毫米(mm)，故可利用 GPS 測網進行水平變形之監測；另一方面連續 GPS 觀測已累積長時間之時間序列，過去對於連續 GPS 在垂直方向變化較少討論，但未來已可將長時間的連續 GPS 測站垂直變化加以分析討論並與精密水準測量相輔佐分析臺灣垂直升降變化與斷層活動之關聯性。此外，GPS 連續站的加密以及精密水準測線的延伸亦可以解析臺灣斷層兩側的滑移速率，推斷高發震潛能構造之活動行為，並瞭解地殼變形與地震發生間之關係。

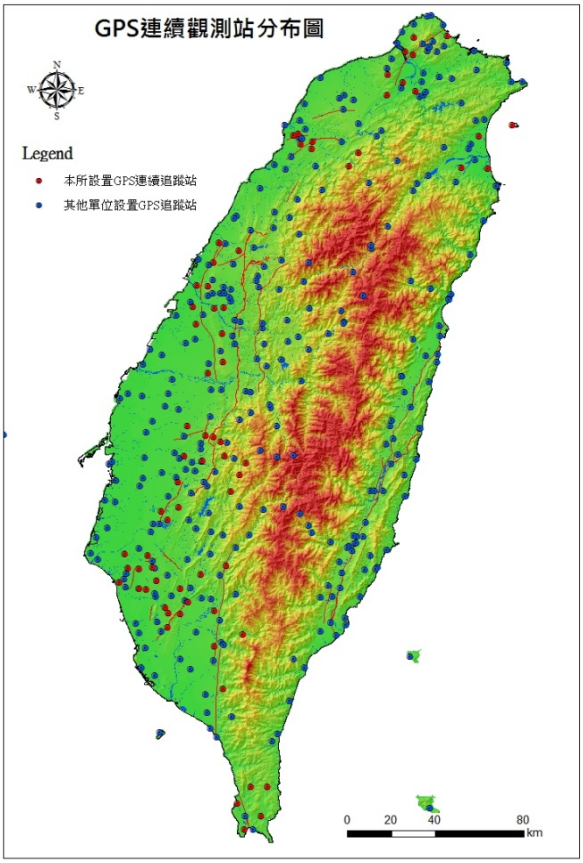


圖 1-2.1：GPS 連續觀測站分布圖（中央地質調查所）。

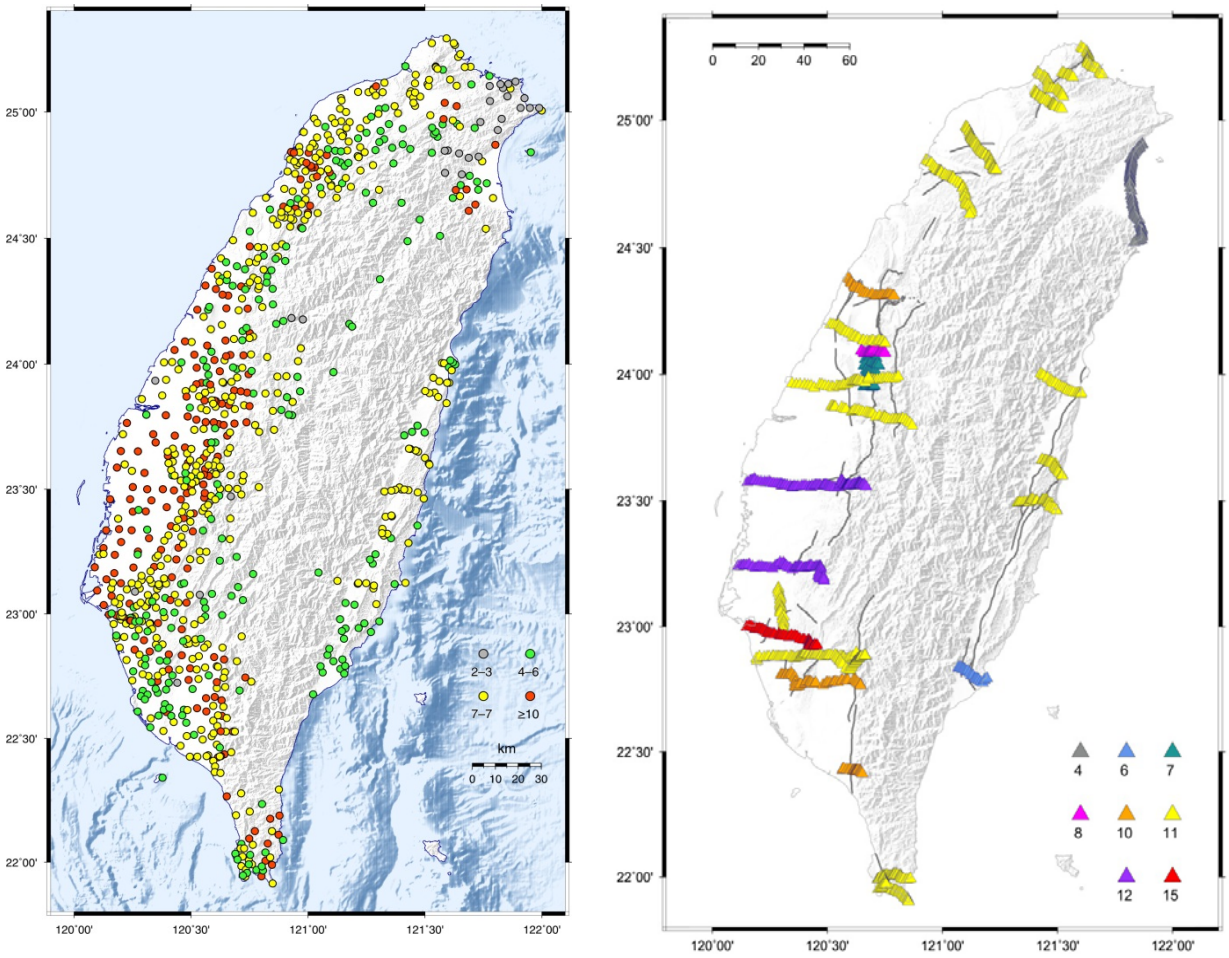


圖 1-2.2：GPS 與精密水準測量監測點位分布圖，共有 788 座 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。右圖點位之顏色表示該測線施測的次數。

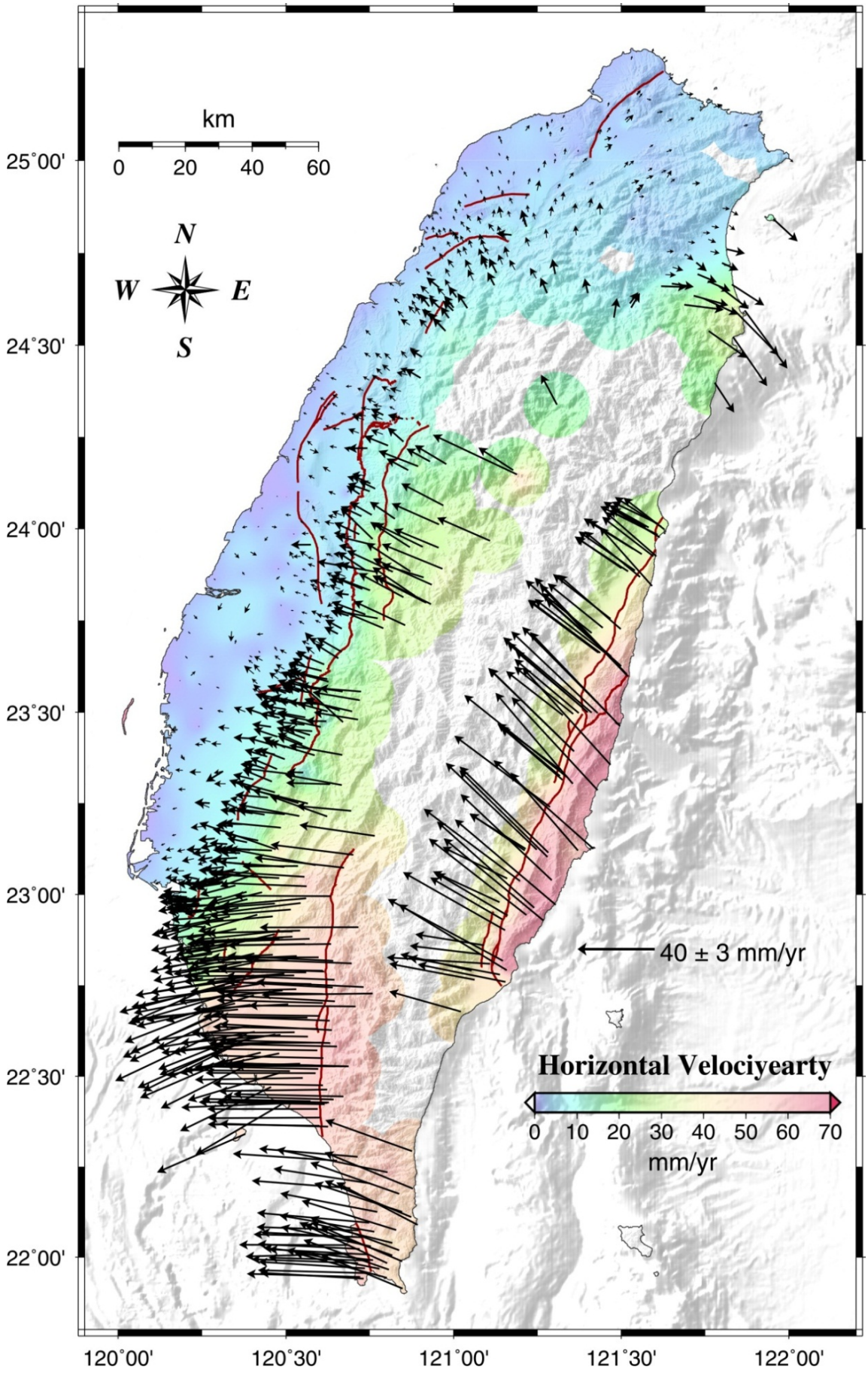


圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場（胡植慶等，2012）。

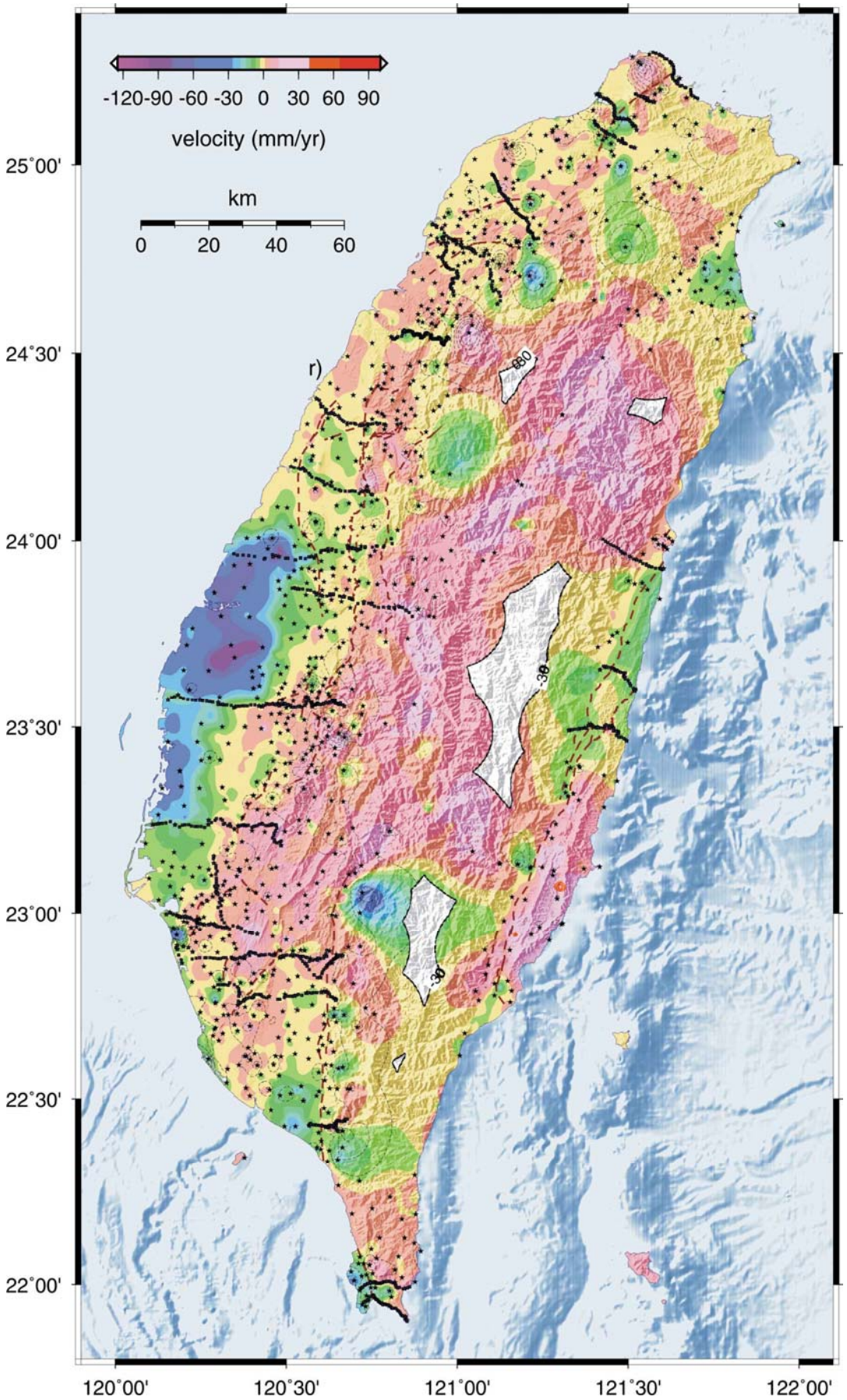


圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場（胡植慶等，2012）。

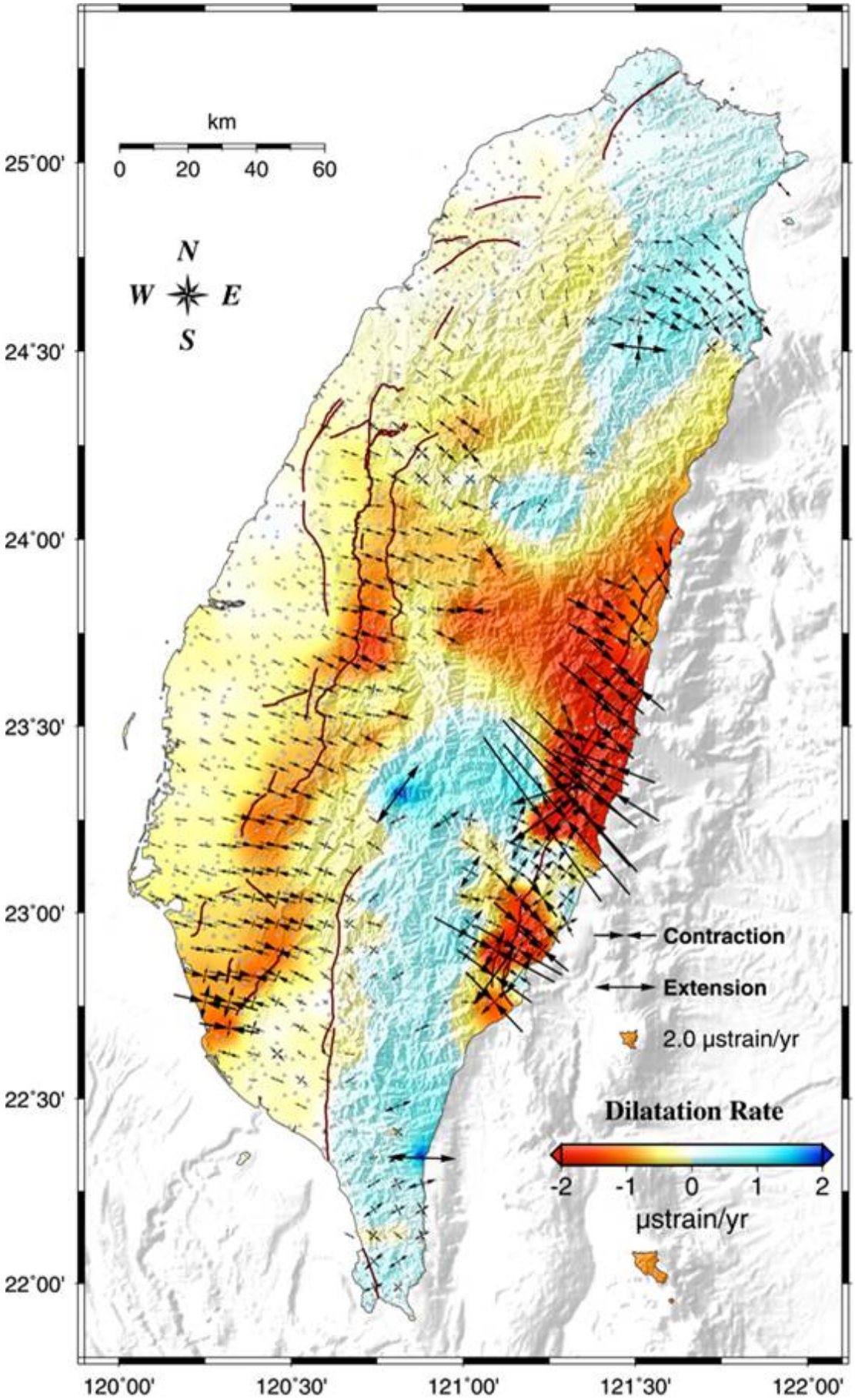


圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖（胡植慶等，2014）。

1-2-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS）

連續 GPS 觀測目前以每日解（Daily solution）為主，分析時間序列之變化，經由長時間資料累積，時間序列可提供年週期與半年週期的變化，利用全球 GPS 觀測站分析週期性變動，多以季節性變化為主，而造成這些變化的因子可歸納為：

a. 重力所引發的效應：極移動、固體地潮、海潮以及大氣潮。
b. 熱效應所引起的水氣變化：大氣壓力、非海潮的海洋表面的擺動、岩床受地下水變化及熱膨脹。
c. 誤差：衛星軌道模式、大氣模式、水氣分布模式、相位中心變化模式、天線盤受熱影響、當地多路徑效應以及天線盤上的雪量。
d. 構造變化：區域的斷層滑移以及應力變化。

以往研究中較少談論到此一因素所造成的時間序列變化，但在研究時間序列的過程中必須先釐清可能的影響因子，以達成設立連續站的目的。本研究將以臺灣連續觀測站時間序列資料分析其季節性週期變化，並先整合各分區內測站是否含有相同的週期性特性。胡植慶等（2012）初步指出臺灣沖積平原區（高屏，濁水溪以及宜蘭）測站在垂直方向受週期性影響相當明顯（圖 1-2.6）。唯先釐清影響因子後期望可以獲得構造影響所造成的變化，進而了解造成的機制。

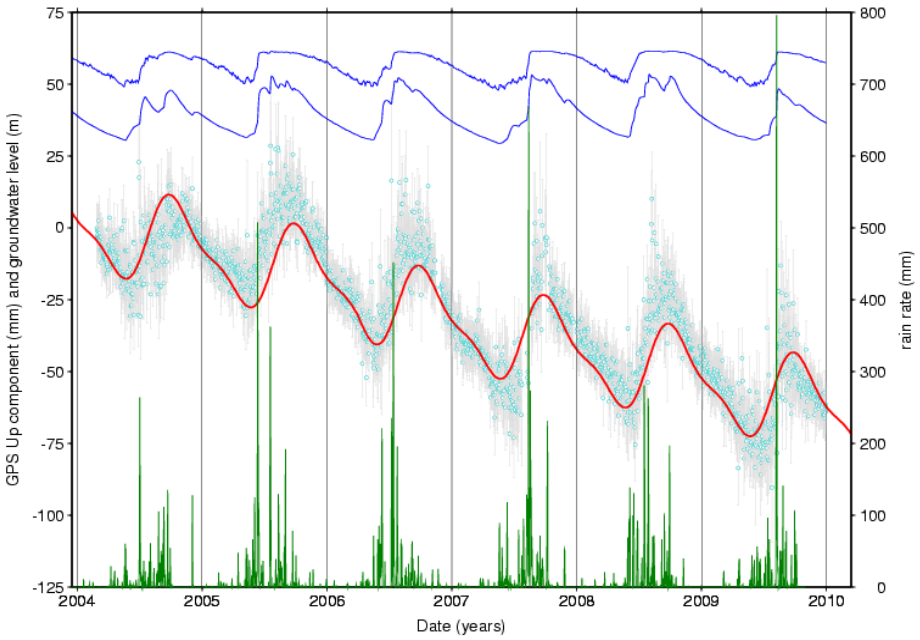


圖 1-2.6：屏東平原 NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。圖中時間序列、地下水位以及日雨量分別以紅線、藍線及綠線表示（胡植慶等，2012）。

除了上述的每日解座標變化外，目前也進一步研究高頻 epoch by epoch 的可行性，過去研究中多以地震事件後處理該項資料，並試圖提高點位精度，圖 1-2.7 為 2003 年成功地震之 30 秒解，今日許多連續 GPS 觀測站所接收的資料可達 1 Hz，因此，未來可進一步提升解析的時間精度與空間精度，以獲得較準確的時間序列並可進一步與井下應變儀的異常訊號互相分析，了解是否有相互關連。

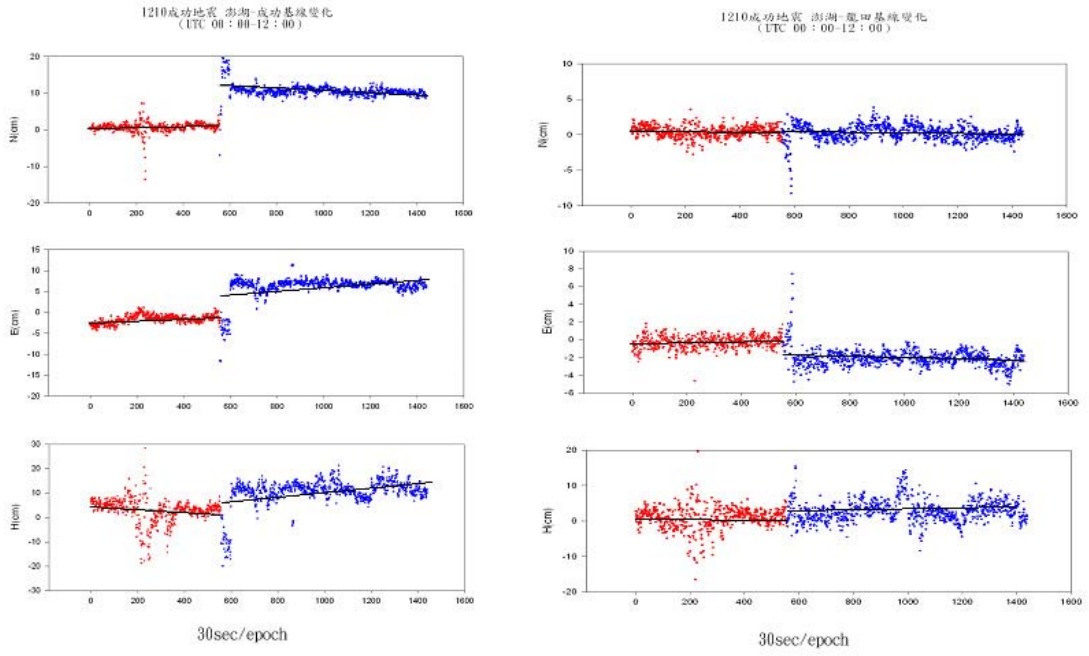


圖 1-2.7：2003 年成功地震 CGPS 30 秒解。（a）成功站相對於澎湖之變化（b）龍田站相對於澎湖之變化。

1-2-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR）

水準測量雖能夠得到高精度的地表垂直變化量，但由於實測需要大量的人力及物力，且獲得之資訊以線狀分布為主，對於大範圍的地表垂直變化不能夠做有效率的監測。目前臺灣利用 PS-InSAR 觀測地表變形已有不錯之成果(Champenois et al., 2012; Tung and Hu, 2012; Wu et al., 2013)。因此本計畫欲結合 PS-InSAR 之技術，對於西部麓山帶做大範圍的地形變化監測。利用 C 波段 ERS-1/2 和 EnviSAT 影像、L 波段 ALOS 和 ALOS-2 影像及 x 波段 COSMOS-skyMED 或 TerraSAR 影像，並且配合 SAR 衛星與臺灣地區影像涵蓋圖（圖 1-2.8 及圖 1-2.9），用以得到北部地區、中部地區、南部地區以及東部地區（圖 1-1.2）間震時期的地殼運動變化情形，並以補佐 GPS 觀測資料分析斷層的活動性質。

持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR）為 InSAR 技術之延伸，其基本概念為觀測不同時間之合成孔徑雷達干涉（SAR）影像，選出散射特性良好且穩定的散射點作為持久性散射點（Persistent Scatterers），例如建物牆角、橋樑道路或裸露的岩石，可以提供較高的雷達回波訊號及較為可靠的相位值。利用這些持久性散射點的相位差來計算不同時間對衛星方向距離的變化量，獲得的變動速率精度為毫米（mm）等級。由於雷達影像是大範圍掃描（一幅雷達影像範圍為 100 km X 100 km），PS-InSAR 的運算結果在市區往往每平方公里可達數十個持久性散射點，是一種高空間密度、高精度且低成本的技術，由 PS-InSAR 所測量的結果配合大地測量監測可以得到地表變動，掌握震間變形速率，監測地表短期變形速率，了解斷層滑移趨勢並提供斷層出露在地表較明確的位置。

雷達差分干涉技術（Differential InSAR）是用來量測地表微小移動的技術，方法為利用不同時期產生的干涉圖中移除地形效應後，得到純粹因變形所產生的相位干涉圖，這個技術可提供至公分級或更小的相對精度。比起傳統的測量方式，雷達干涉技術主要有四項優勢：面狀資訊、主動式、穿透性及高精度。傳統的大地測量主要以點狀資訊為多（如 GPS 及水準測量等），雷達差分干涉法可提供快速且大面積的地變資訊。儘管 DInSAR 於現今已經是非常成熟且廣泛地被使用，但在雷達差分干涉技術之中，許多因素會使得干涉結果產生雜訊及誤差而無法形成明顯的干涉環。例如：地表物特徵、大氣效應、基線常誤差、數值高程模型

誤差以及時間性誤差等等。並且，一般來說 DInSAR 較適合應用於平原都會地區，山區及植被較厚的地區因地表特徵物會隨著時間而變化，使得干涉結果不易獲得。

永久散射體（Persistent Scatterers，PS）技術是雷達差分干涉方法中，較先進的處理技術，主要的目的在解決（克服）長時間的序列影像中，影像對因地表地貌變形或環境效應影響（大氣及 DEM）導致影像相位改變產生不相關現象，而造成干涉處理的困難。在雷達影像的成像過程中，一個解析像元（Resolution Element）所反映訊號是由該像元範圍內所有散射訊號的平均值，因此像元內大量雜訊會影響影像相位值及振幅值的結果（形成訊號或破壞訊號），所以當像元內訊號源均勻，較容易產生雜訊（訊號不相干），這也就是在傳統處理的方法中，植生密集區不易產生干涉影像的原因。永久散射體（PS）技術主要是利用像元內的最大的主要訊號源如橋樑及建物等，因該類像元有明顯固定的散射訊號，因此在時間序列的影像中，這些點位在該區域中，有足夠穩定的訊號來提供分析的資訊，根據同一區域鄰近像元環境條件相類似的假設，在後續分析中，就可以利用這些永久散射的點位資訊進行雜訊的濾除，進而推算出在時間序列中不同時間點 PS 點相位及高程的變化。

PS-InSAR 在多張 SAR 影像之中尋找穩定點，即為在各影像中高相關性或高反射訊號的點位，也就是永久散射體，再將永久散射體的相位於一時間序列上的影像之中萃取出來，並做相位回復（unwrapping）的動作，進而得到長時間地表位移量，可得到點位在時間序列上的地表位移速率。一般情況來說，PS 點位數量於城市區域每平方公里都可在數十個點以上，而郊區部份也可達每平方公里內有數個點，這樣的資料密度，已經遠超過臺灣的 GPS 站及日本等高 GPS 密度區域的站位密度。此外我們還可以將 PS 點位資料於空間上做內插以獲得全面性的資料。

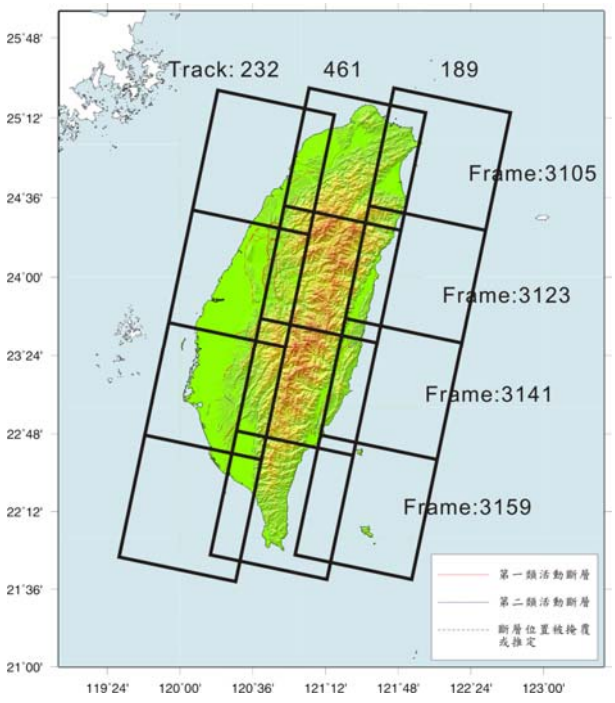


圖 1-2.8：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km×110 km。

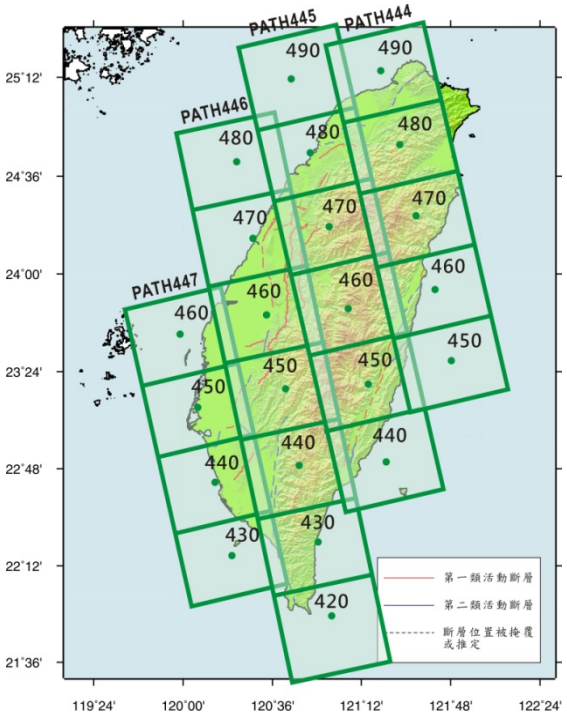


圖 1-2.9：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。

1-2-4 活動斷層發生潛勢圖建置

根據美國 WG07（2008）針對加州地區之活動斷層及孕震構造所做的地震潛勢評估經驗，可將孕震構造活動潛勢評估工作分為四大流程：斷層幾何形貌（Fault Models）、斷層變

形模式（Deformation Models）、地震發生率模型（Earthquake-Rate Models）及總體機率模型（Probability Models），如圖 1-2.10 所示。

a. 斷層幾何形貌：即為活動斷層之空間三維幾何形貌，如圖 1-2.11 所示為加州地區建立之斷層幾何模型。整段的活動斷層需依據分段準則或分段特性進行分段，而各段破裂模式之權重及比例分配則由專家會議評估給定。
b. 斷層變形模式：結合斷層滑移速率及 GPS 地殼變形測量以估算地震矩釋放，此滑移速率係指斷層之長期滑移速率。
c. 地震發生率模型：為長期可能造成災害性地震之發生率，即推估各地震規模之年發生次數。
d. 總體機率模型：主要是藉由各種機率密度函數評估活動斷層未來特定時間內之發生地震機率。

在進行活動斷層地震潛勢評估時，需考慮斷層資料的不確定性，包含資料本身的隨機性及離散性，以及目前科學知識尚未克服之問題。對於活動斷層資料之不確定性，可建構專家意見交換與討論機制，邀請各專家進行最新研究現況（state of the art）模式之討論，將各種斷層參數及專家模式給予合理的邏輯樹（logic tree）權重以進行評估。圖 1-2.12 為美國加州地區地震評估所採用之邏輯樹，可明確地將斷層幾何形貌、斷層變形模式、地震發生率模型及總體機率模型四大流程之不確定性予以合理地掌握。

參考美、日兩國活動斷層地震潛勢之展示方式，美國 WG07（2008）同時考慮了活動斷層與孕震構造，建立了如圖 1-2.13 之網格式機率分布圖。另外日本活動斷層的潛勢分析成果圖（摘自日本全國地震動預測地圖，2010）如圖 1-2.14 所示，圖中包含了各活動斷層之位置分布、發生機率及可能引致之地震規模，各活動斷層潛勢以不同顏色表示。本計畫之目的乃產製如圖 1-2.13、圖 1-2.14 之活動斷層地震潛勢成果，以供我國地震防災相關分析所需之基礎應用資料。

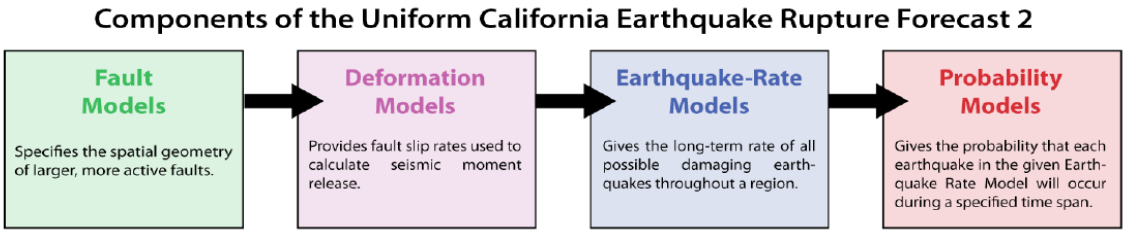


圖 1-2.10：美國加州地區活動斷層與孕震構造潛勢評估之四大流程（摘錄自 WG07, 2008）。

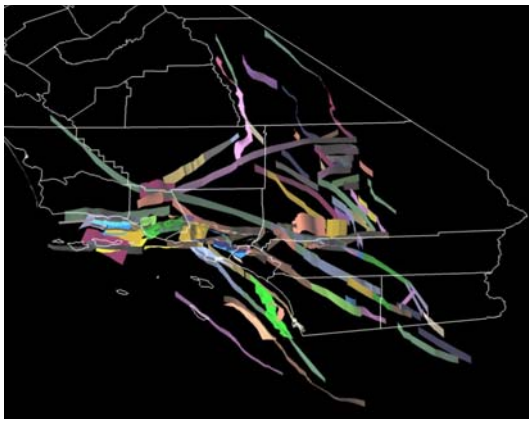


圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌（WG07, 2008）。

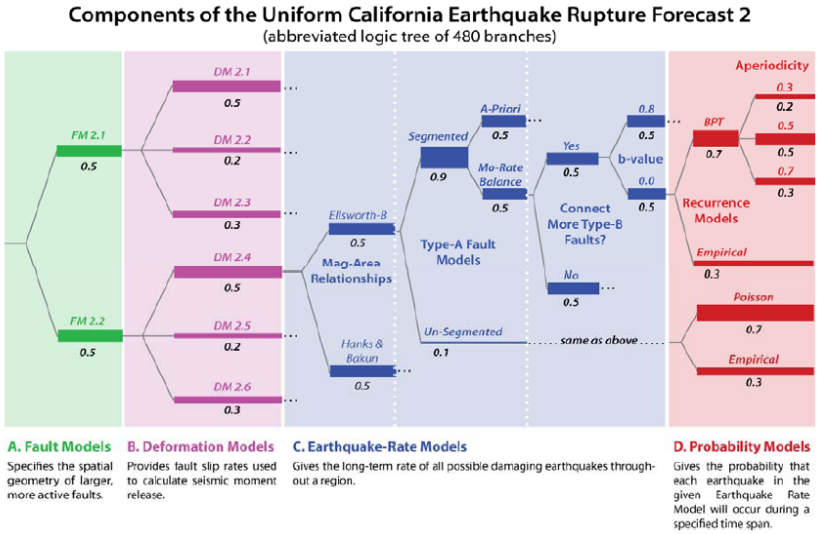


圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹（摘錄自 WG07, 2008）。

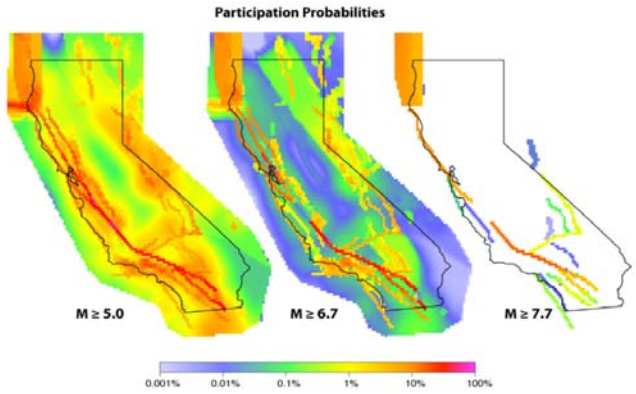


圖 1-2.13：加州地區未來 30 年發生地震規模為 5、6.7、7.7 以上之機率分布圖。網格為 0.1 × 0.1 度，此圖為整合各類型之孕震構造（區域震源+活動斷層）所呈現之機率分布圖（WG07, 2008）。



圖 1-2.14：日本主要孕震構造未來 30 年之活動潛勢評估成果（日本全國地震動預測圖，2010）。

1-2-5 井下應變儀資料分析

應變儀不僅在精度上可量測到小至 10^{-8} 的地潮應變訊號（可感測 10^{-9}~10^{-12} 之微細應變），且其週期變化可觀測到短中長期甚至數十年以上的構造變化。井下應變儀不僅深入地下深處，可有效降低干擾雜訊，又可緊密接觸地下厚實且未經風化之堅硬岩盤，理論上可觀測到 100 Hz 的微細應變，恰可填補地震儀與 GPS 觀測不到的頻率範圍。井下應變儀若能結合連續 GPS 觀測，對於數個月至數十個 Hz 的範圍內的微細地殼應變研究，提供另一有力的工具，有助於臺灣活動斷層的活動度及其地震潛勢之評估。

然而井下應變儀的資料處理、分析與解釋之技術的確來源不易取得；由於應變儀觀測資料預計需時三年才能達穩定狀態。第一年前半年觀測資料會明顯有呈指數衰減之水泥漿固放熱之熱應變訊號。此外，地層因鑽井擾動的應力狀態亦須要兩、三年才能恢復。同時也容易受到環境因素所影響，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、空氣壓力變化、降雨、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形等。首先，在各測站建立起正

確的應變異常修正模式，並藉此盡量移除各種環境效應後，地殼變動的訊號就較能突顯在最後較乾淨的訊號中，其次藉由與地震相關的變化，試圖從這乾淨的訊號中，找出與地震斷層活動相關的應變資訊。藉由高精度 GPS 與井下應變儀資料處理與分析，可研究地表變形、區域應變並進一步瞭解斷層活動的狀況，分析斷層的滑移速率，瞭解間震、同震與震後斷層活動的型態。

1-2-6 地球化學及地下水觀測

源自於地殼深處之天然逸氣常有高於地表空氣之組成，而氡氣、氦氣、氫氣與二氧化碳等揮發性氣體易沿著活斷層逸散至地表而顯示出異常高濃度值；此特性除了可用於觀測斷層活動以外，亦常被用來協助確認地表斷層構造之位態與分布。位於活斷層上的一些有利測站，則有較敏感的成份變化，且經常與地震活動有明顯關聯；這些"敏感"的測站通常沿著活斷層，特別是在二條斷層的交會或彎曲的地方，或一些構造上處於應變（strain）集中之處。

氡-222 是鈾-238 蛻變系列中的一個放射性核種，為地層中自然存在之放射性示蹤劑，近年來已有相當多研究顯示出地下水水氡濃度異常變化可做為捕捉地震前兆示蹤劑，地殼中所含天然放射性物質（鈾）在衰變過程中會產生放射性核種氡-222，氡氣溶解進入地下水。地下水水氡濃度異常變化監測可用來做為地震前兆預測方法。長時間監測地下水水氡濃度監測，可由地下水水氡及其他溶解氣體變化來判斷地殼是否有異常活動產生，預警災害性地震來臨的前兆。

由許多成功的案例，顯示地球化學的異常變化，確實可做為斷層活動與地震的前兆。臺灣島上具有從事這些研究的有利條件，如：地震與活斷層多，溫泉、自噴地下水井、受壓含水層、泥火山多等。因此經由野外調查研究，朝自動化採樣、自動化分析、觀測的方向發展，選定適當的地點設立地震地球化學觀測站，進而建立站網，是地質與地球物理方法之外，從事臺灣之活斷層及地震防災基礎及應用研究重要的一環。因此，本計畫選擇位於斷層帶附近的適當位置，設置氣體、水氡地球化學與水位遠端傳輸觀測站，配合鄰近地區之地殼活動觀測資料，將有助於吾人瞭解該地區之斷層、地震活動與觀測結果之關聯，並進一步觀測其活動可能之前兆訊息與可能機制。

1-2-7 整合觀測資料分析

在本計畫中利用多種大地測量的方法來對斷層活動作不同時空分布的觀測，其中包括持續 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料及地下水觀測資料，固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量觀測，與間歇性的 PS-InSAR 觀測，這些資料詳細地記錄了地表或近地表的地殼變形活動，各有著不同的時空分布，例如 GPS 連續站資料每天計算一個精密座標的解，其空間分布遍及全臺灣，平均約每 10 km x 10 km 有一個測站，井下應變儀及地下水觀測則只有十多站，是連續的觀測資料，固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量的測站沿斷層分布，每年觀測 1~2 次，PS-InSAR 則依賴衛星通過時對臺灣地區的雷達掃瞄，空間涵蓋相當大，資料點則是看地面是否有可當做雷達波散射體的地表人工結構體或天然岩石露頭，通常呈散彈狀的區域分布，因此這些資料的綜合分析解釋則要利用各個的基本特性，通常以井下應變儀資料為中心，因其精度最高，頻率響應最廣，可在 10 Hz 至無窮大，但因敏感度太高，雜訊較大，所以長期的觀測骨架還是以 GPS 連續站資料為主，由於 GPS 連續站具有全球參考網的穩定性，可當作長期穩定的地殼變動參考觀測網。在高程變動方面還是以精密水準測量為主，測量精度通常是 mm 等級，可惜其觀測耗時，在本計畫中僅能沿每一斷層作十多點的觀測，因此這資料需與 PS-InSAR 的觀測資料結合，可將高程變動的成果，從點-線狀的高精度高程變動觀測擴展成面狀的變動，並增加其觀測的頻率。除了這些大地測量的資料必須綜合解釋之外，另外還需要結合地震儀的資料與地下水觀測的資料，地震儀的資料與井下應變儀有相同

的觀測精度，只是一個記錄地表變動的時間變化，另一個記錄的是空間變化，而且各種地震儀分別設置遍及全臺灣，期望能從兩種資料的綜合解釋得到更明確的成果。

1-3 本年度工作內容概述

（1） 移動式 GPS 及精密水準測量 （成功大學工作團隊負責）

a. 當年度新設監測樁位之規劃與施工督導。
b. 當年度外業施測作業督導、抽測與成果檢核。
c. 由連續 GPS 座標時間序列判斷地震同震變形、震後變形及其他擾動所造成地表變形之時間，確認各時期之 GPS 移動站速度場及水準測量是否受相同影響並加以修正之，並獲得水平及垂直速度場。
d. 利用水平速度場推求南部地區應變速率之空間分布情形。
e. 透過所得之應變速率在空間中的變化，推算其在彈性地殼內對應之能量累積，同時也估計並比較同時期由地震所釋放之能量，藉以探討南部地區內能量蘊含之盈虧空間分布。

（2） 連續式 GPS 及 PS-InSAR （臺灣大學工作團隊負責）

a. 規劃當年度新設連續 GPS 監測樁位置。
b. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及坐標與高程差解算，獲得地表水平與垂直方向的位移量及速度場之初解，並與前一年速度場比較。
c. 經由連續 GPS 站提供時間序列中是否受到地震影響所造成之同震變形與震後變形及其他擾動所造成地表變化，確認不同時期連續 GPS 速度場是否受相同影響而改變並加以修正之。GPS 連續站資料分析包含各測站的雜訊特性、週期性效應與自然界影響因子分析。
d. 利用連續 GPS 之高頻 1 秒瞬時 GPS 座標（epoch by epoch），比較井下應變儀所觀測到之應變異常時段，嘗試搜尋是否有相同之訊號異常並且解釋可能的變形機制。
e. 蒐集南部地區 C 波段與 L 波段之雷達影像，利用 PS-InSAR 技術分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊，了解震間變形速率及應變積累，同時利用 GPS 連續站之資料與 PS-InSAR 所得之視衛星方向（LOS）位移，求得區域性三維變形資訊，解析潛在的活動構造。
f. 利用 PS-InSAR 與連續 GPS 時間系列，研究活動斷層隨時間變化之地殼應變累積及斷層活動度。

（3） 活動斷層發生潛勢圖建置 （中興工程顧問社工作團隊負責）

a. 召開 2 次活動斷層參數表及邏輯樹專家討論會議，針對斷層分段特性、三維幾何形貌、最近一次活動時間、長期滑移速率、可能引致地震規模等參數不確定性，進行邏輯樹架構與參數權重之合理性探討。
b. 蒐集臺灣陸域構造平衡剖面資料以及重定位地震資料，建立活動斷層三維幾何形貌、並研究活動斷層之活動特性與地震規模尺度，建立活動斷層特性之參數表。包含：斷層名稱、分段資訊、斷層長度與破裂深度、面積、斷層機制、傾角、錯動量及分布、長短期滑移速率、再現週期、最近一次活動時間、可能最大地震規模。可將參數表之資訊以及野外調查成果彙整為 GIS 圖層。
c. 蒐集包含槽溝、地形或是地球化學定年之相關研究成果，推估活動斷層之長期滑移速率。
d. 利用 GPS 連續觀測站以及其他測地學的觀測資料所記錄的地表運動場(速度及應變率）來推測斷層面的震間滑移速率。並將測地學所得之變形反演斷層面震間滑移分

布及滑移虧損率（slip deficit），分析短期及長期滑移速率及其在活動斷層潛勢分析上的意義，進一步推算斷層的能量累積率與發生特徵地震規模間的關係。

e. 完成南部地區 9 條活動斷層（木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層）之錯動機率評估。其項目包括：(a) 建立活動斷層之特徵地震模式、(b) 評估活動斷層未來發生機率、(c) 製作活動斷層發生機率潛勢圖。

（4） 井下應變儀資料分析 （臺灣大學工作團隊負責）

a. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係；並進行面應變、剪應變分析。

b. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。

c. 經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。

d. 持續維護及更新井下應變儀資料庫。

（5） 地球化學及地下水觀測 （臺灣大學工作團隊負責）

a. 維護既有 5 座地球化學土壤氣體觀測站、2 座水氡觀測站，使能夠連續運轉接收資料。

b. 於 1 座水氡觀測站（社頂站）進行地下水水氡採樣分析。

c. 收集並分析地下水位資料，建立地震地下水相關性初步模型。

d. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析觀測站氣體成份與當地斷層、地震活動之關聯性。

（6） 整合觀測資料分析 （臺灣大學工作團隊負責）

a. 建立資料綜合解釋的方法，例如找出共同的特徵頻率、將 GPS 資料轉換成地表應變的觀測、異常資料的時間領域或頻率領域的比對。

b. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料及井下應變儀觀測資料，分析應變異常事件。

c. 彙整地球化學觀測站及地下水資料加以比較，利用時間序列比對，分析各觀測資料異常之時間的相關性。

d. 針對較近的異常事件在各種資料上相同或不同的表現作綜合解釋。

1-4 前一年度工作成果

1-4-1 GPS 觀測及精密水準測量

過去研究將臺灣地區 2002~2014 年所測量之 GPS 移動站與連續站觀測資料作時序分析，藉由各站的座標時間序列可知各點之位移變化情形並求得各地區速度場分布。以臺北地區、宜蘭地區、桃苗竹苗地區、中部地區、嘉南地區、高屏地區、恆春地區及花東地區 8 個測網，解算 788 座移動站之水平方向速度場（圖 1-4.1），並由移動站及連續站平面速度場計算得平面應變速率場（圖 1-4.2）。

GPS 部分，宜蘭地區在宜蘭平原地區之速度場就整個臺灣北部而言其速度變化亦是最顯著的，由西向東其速度變化亦由西北快速地往東南方向移動，越靠近外海移動速度越快，速度變化由西向東南順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，值由西向東約在 3 ~ 40 mm/yr。

桃竹苗地區在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0 ~ 10 mm/yr。

中部地區在大茅埔斷層以東速度場約 30 ~ 45 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 16 ~ 20 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小約 6 ~ 15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海地區速度場值小於 5 mm/yr，卓蘭地區及獅潭地區點位速度場分布轉為西北向值約 12 ~ 16 mm/yr。

嘉南地區在觸口斷層和九芎坑斷層－木屐寮斷層－六甲斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑－木屐寮-六甲斷層系統，其水平位移速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其水平位移速率皆小於 10 mm/yr，臺南地區速度場分布則以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平位移速率約 12 ~ 15 mm/yr。後甲里斷層以東水平位移速率約 15 ~ 20 mm/yr 速度場呈西向東逐漸遞增。

高屏地區主要之活動構造為東北－西南走向之旗山斷層與南北走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度差異顯示，跨過潮州斷層及恆春斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr。由沿著斷層走向之速度剖面分析可知，跨龍船斷層有約 40-50 mm/yr 之縮短量及約 6 mm/yr 之左移分量，同時塊體二之垂直速度量由 34 mm/yr 上升至約 95 mm/yr，說明龍船斷層為一具有左移分量之逆衝斷層。鳳山斷層是一條以左移為主的走向滑移斷層，斷層北段為鎖定斷層並有擠壓分量，中段與南段則為具伸張分量之潛移斷層。且依據斷層模擬結果指出，鳳山斷層的傾角約為 50°，深度約至 7-13 公里。

恆春地區由於 2006 年 12 月 26 日發生屏東外海地震對恆春地區之影響，採震後觀測時間為 2010~2014 年的資料解算速度場，速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41 ~ 62 mm。

花東地區自北段花蓮至中段玉里瑞穗方位角由西北西轉為西北，至南段臺東則再轉為西北西，速度值由約 20 ~ 40 mm/yr 增加至 50 ~ 70 mm/yr 再減少為 20 ~ 60 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸增加的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。

精密水準部分，2014 年進行 29 條水準測線施測。從圖 1-4.3 所示，臺灣北部及新竹地區大致呈現穩定下陷狀態，垂直速度大多落在-10 mm/yr 內；中部在靠近山區呈現抬升，但在平原及沿海地區呈現下陷，最大值超過-25 mm/yr；南部地區的垂直速率也是呈現平原下降、山區抬升；恆春半島地區在恆春斷層以東有顯著的抬升現象，速率達到 10 mm/yr 以上，說明恆春斷層仍有活動；花東地區在海岸山脈呈現抬升，在縱谷及跨過海岸山脈靠近沿海一

帶則為沉陷的趨勢，速率約落在-10mm/yr 至-15mm/yr 之間。

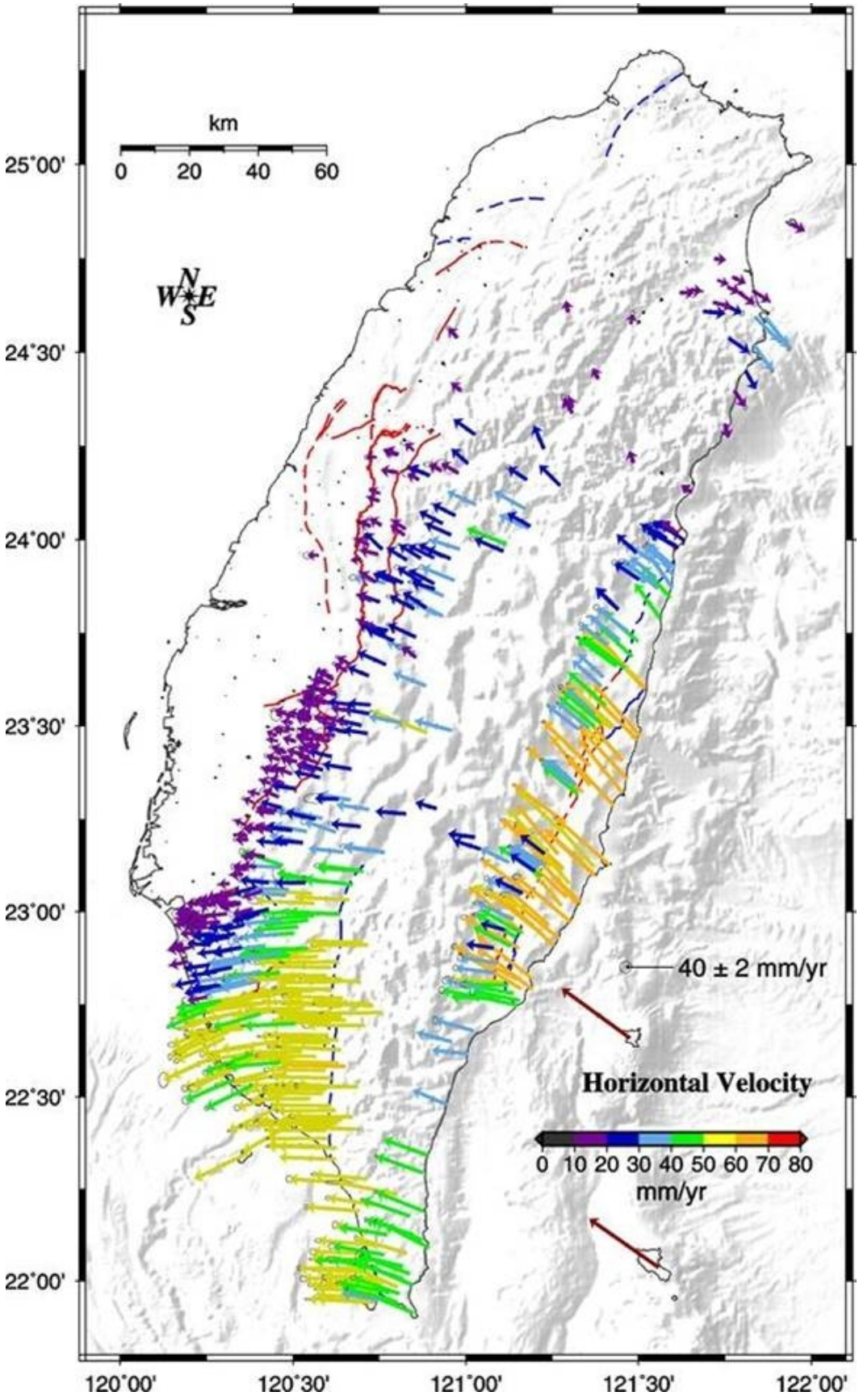


圖 1-4.1：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 連續站水平方向 2002~2014 年速度場。

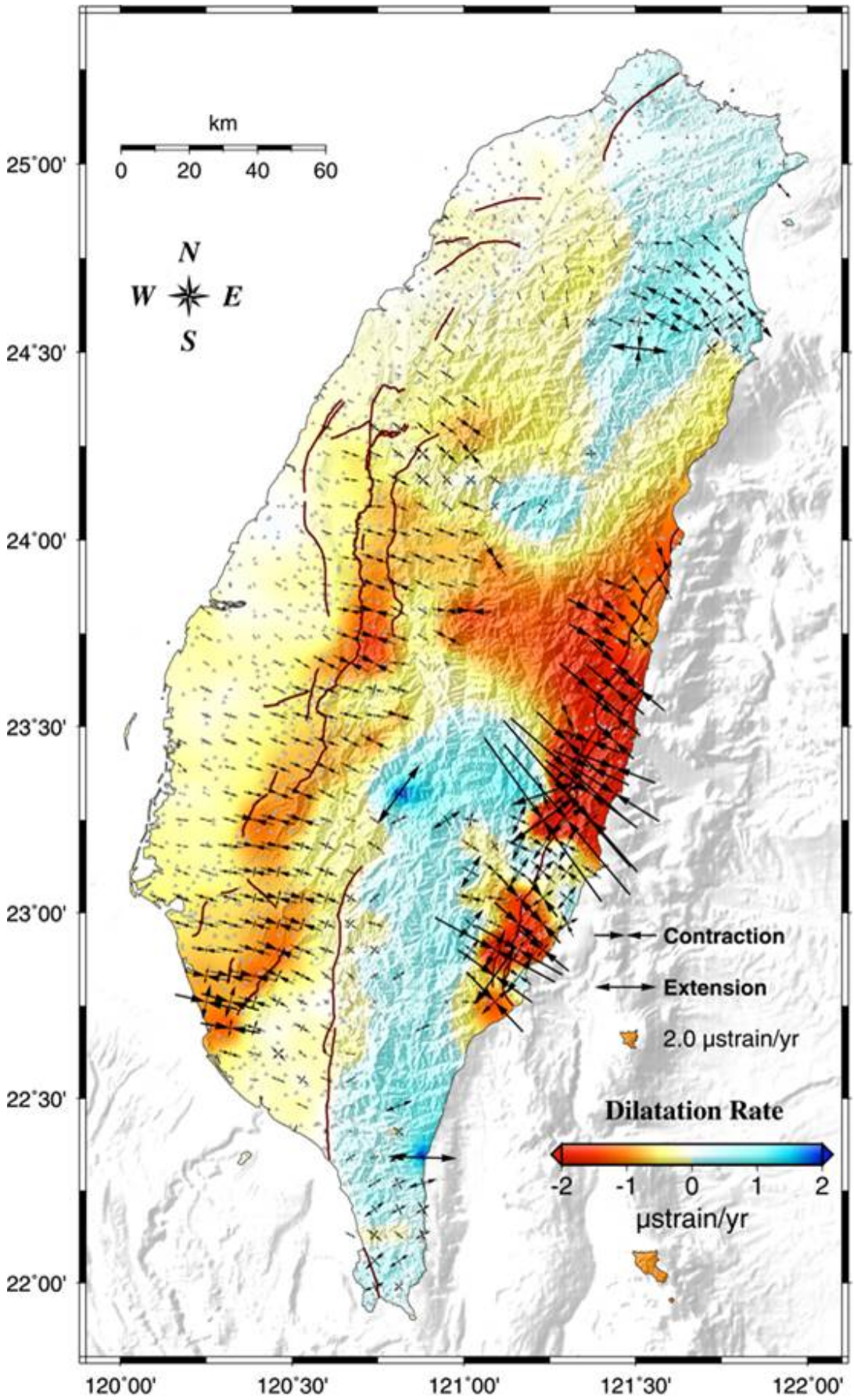


圖 1-4.2：全臺灣應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

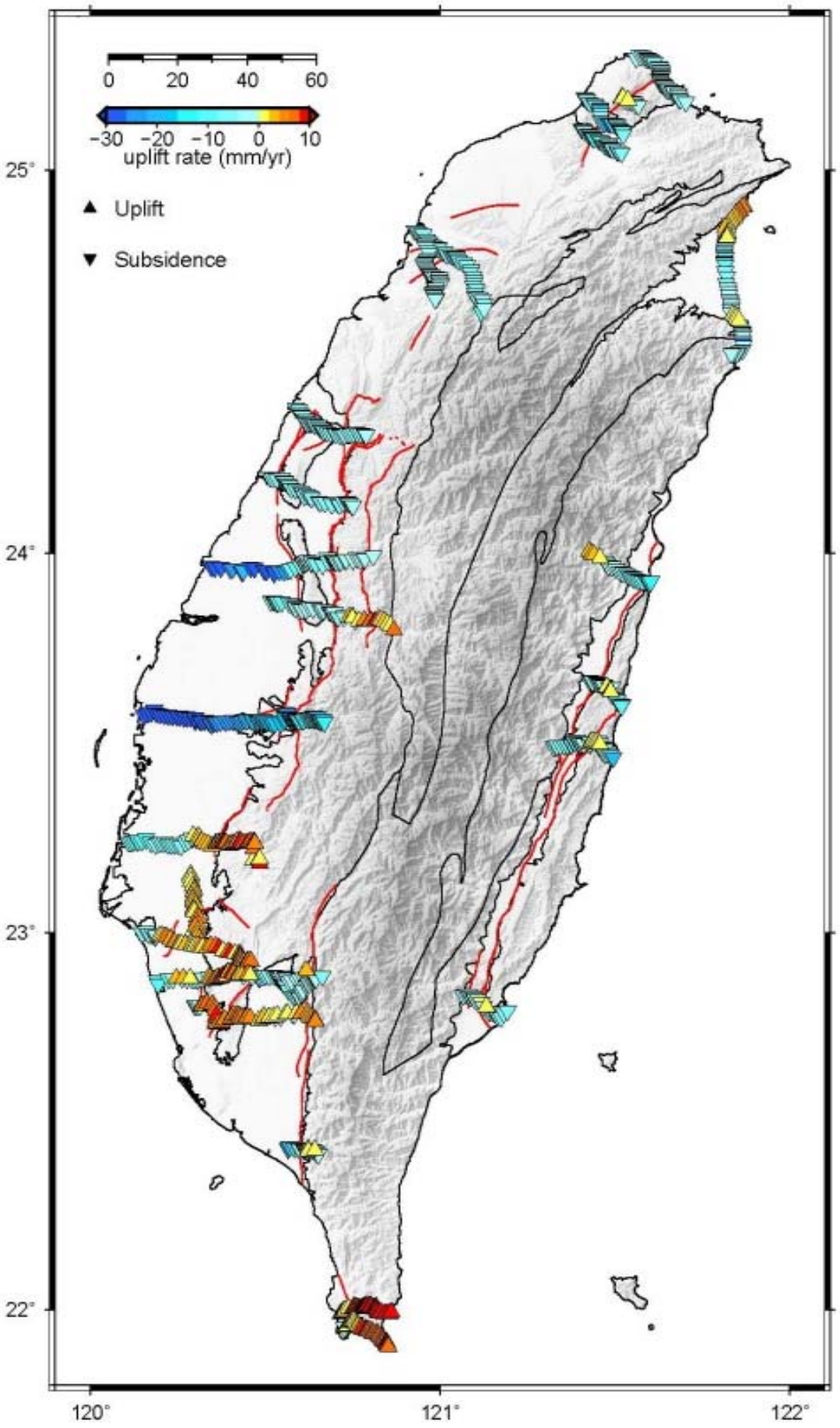


圖 1-4.3：2001~2014 年全臺精密水準速度場。暖色系為抬升，冷色系為下降。

1-4-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS）

統計自 2013 年 12 月至 2014 年 9 月的連續 GPS 資料月報，利用點位透空圖分析資料接收品質，統計出所有交換測站資料接收度分布圖（圖 1-4.4），明顯看出大部份接收度較低的測站都位於靠近中央山脈區域，建議應定期清除測站周圍環境，以避免測站遮蔽過度嚴重導致資料品質隨時間變差。

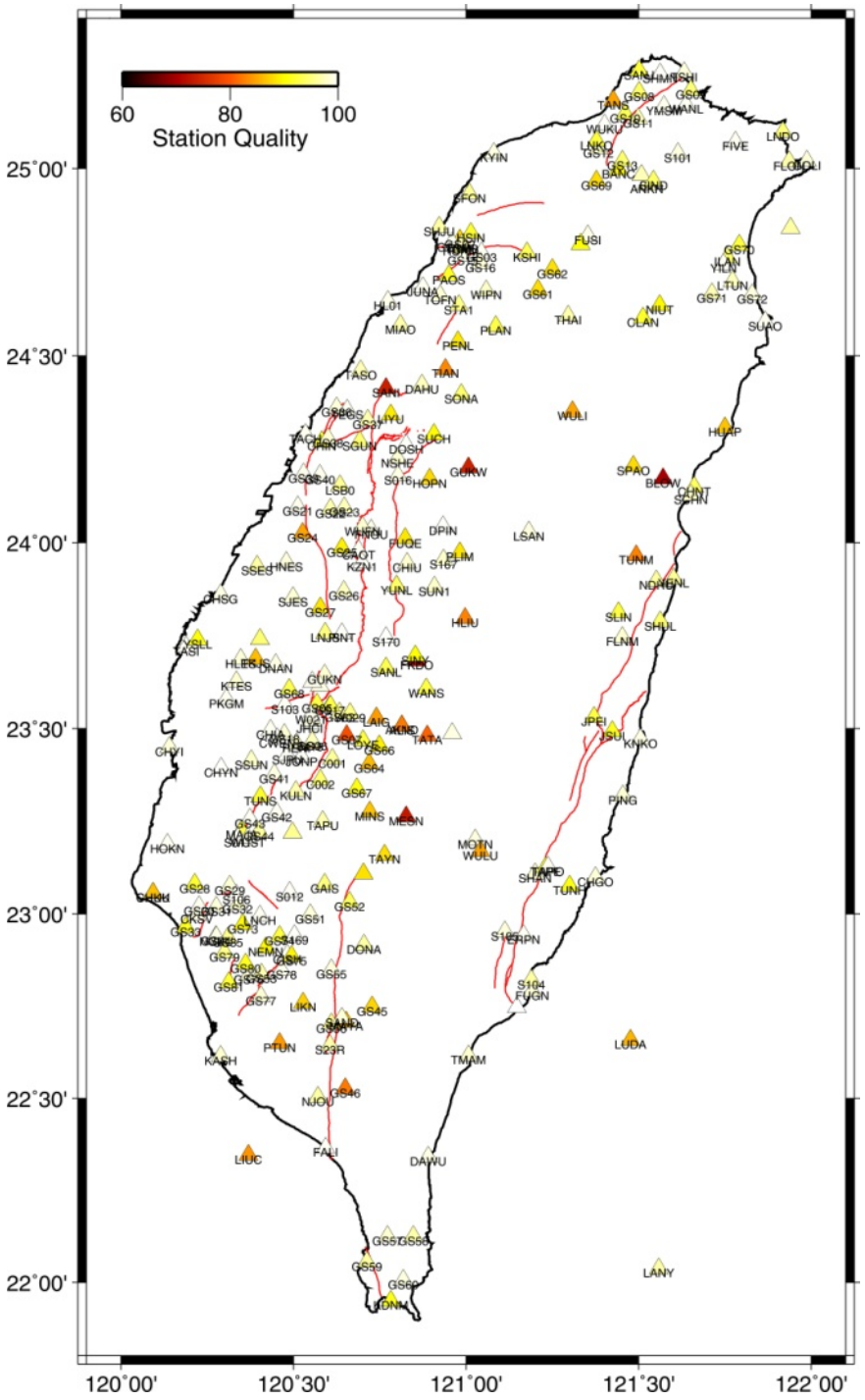


圖 1-4.4 : GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。

分析由經濟部中央地質調查所所提供之全臺連續全球定位系統（Continuous Global Positioning System, CGPS）連續測站，其包括中央地質調查所、中央氣象局、中央研究院、內政部、國土測繪中心、中正大學等單位，共 267 站。結果顯示水平速度場相對澎湖白沙，

中南部測站多為東南往西北移動，臺南以南地區多呈現東北往西南移動；另外北部地區則是由南往北移動，在宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為，此結果與過去長期解算結果約略相同（圖 1-4.5）。

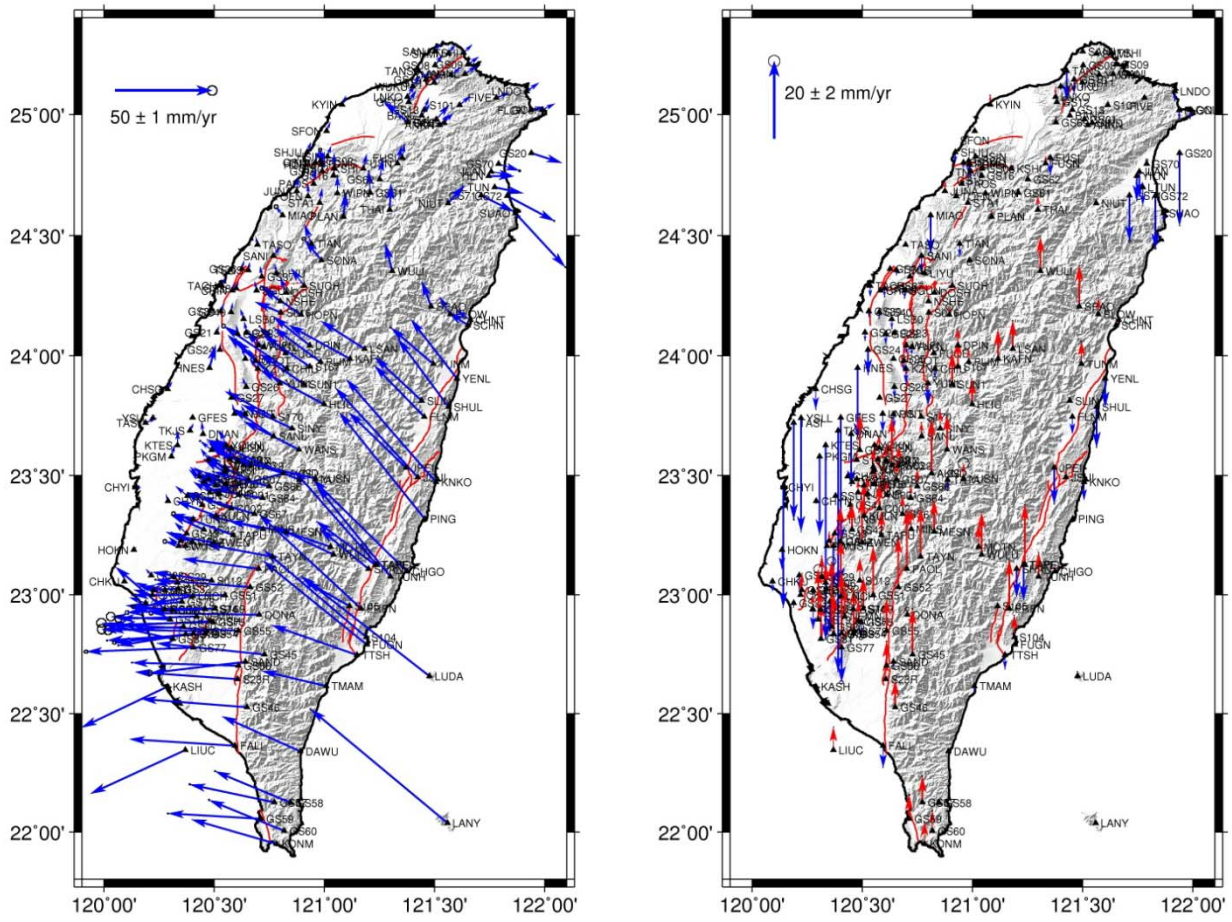


圖 1-4.5：整合歷史資料至 2014 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

1-4-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR）

針對臺灣北部地區，我們利用 Stamps 軟體（Hooper., 2012）計算得到 PS-InSAR 成果來分析活動構造的活動情形， 由 ERS 結果顯示，北部區域於 1996 年到 2000 年之間主要以為對視衛星方向抬升的運動為主。以 ENVISAT 結果來看，在 2003 年到 2008 年這段期間，臺北盆地主要以對視衛星方向下陷的運動為主（圖 1-4.6）。而以 ALOS 結果顯示，此區域在 2007 年到 2011 年其間，臺北盆地主要以往視衛星方向輕微抬升或不動的運動為主（圖 1-4.7）。儘管三個時期北部地區呈現的變形大不相同，但其分別與連續 GPS 以及精密水準測量比較結果都相當吻合，顯示 PSInSAR 結果的可信度，其更提供了北部地區完整以及全面性的地表時空變化。並且，由 ENVISAT 結果顯示出，臺北盆地由西向東跨過山腳斷層下陷速率明顯增大（圖 1-4.8）。

另外，利用套疊 PSInSAR 在臺北盆地 DTM 上更能確定 PSInSAR 選點的可靠性。以構造線形相對較多的臺灣東部地區來說，根據資料比較結果，線形明顯的地方與視衛星方向抬升活躍的區域，具有高度的吻合。依照 PSInSAR 資料比對推測瑞穗地區斷層跡應該在更西緣靠近秀姑巒溪溪床處。因此，利用 PSInSAR 判識斷層跡位置可列為後續地表地質調查重點項目，以補足可能誤判上覆河床沖積物錯動情形（圖 1-4.9）。

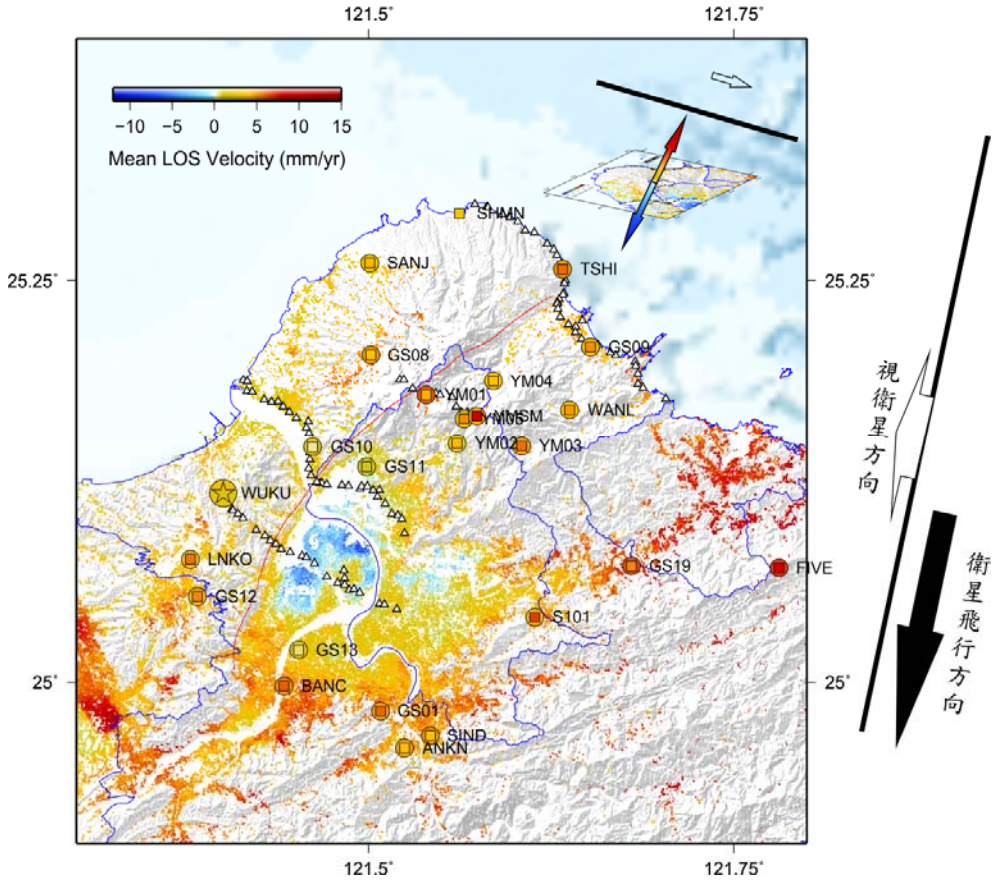


圖 1-4.6：ENVISAT 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 WUKU。

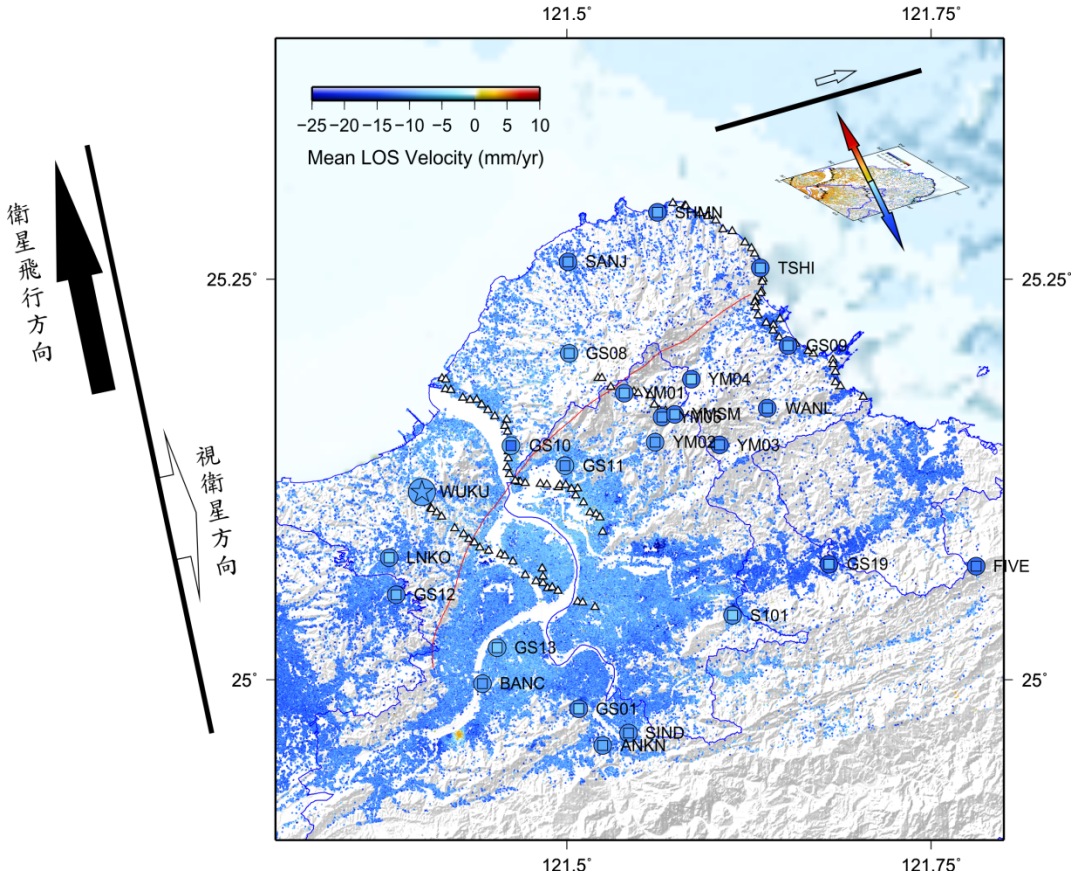


圖 1-4.7：ALOS 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 WUKU。

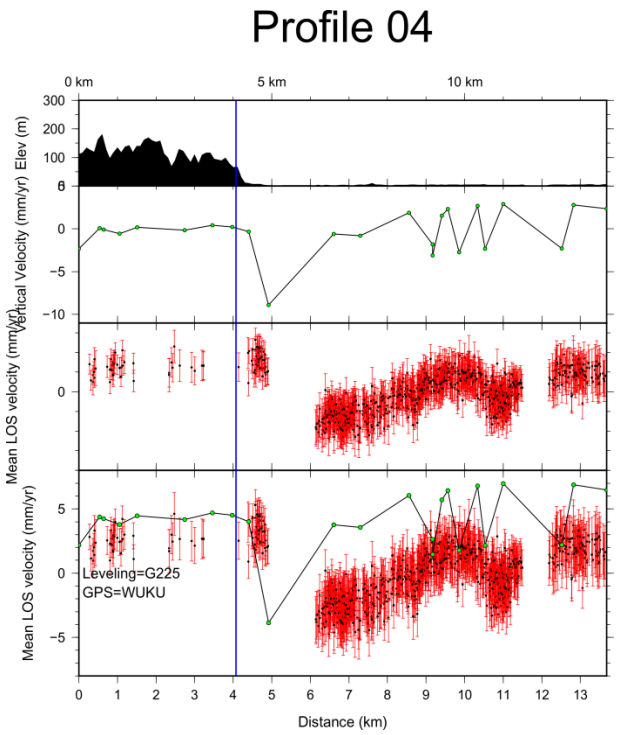


圖 1-4.8：ENVISAT 與編號 4 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率，跨過山腳斷層有明顯改變。

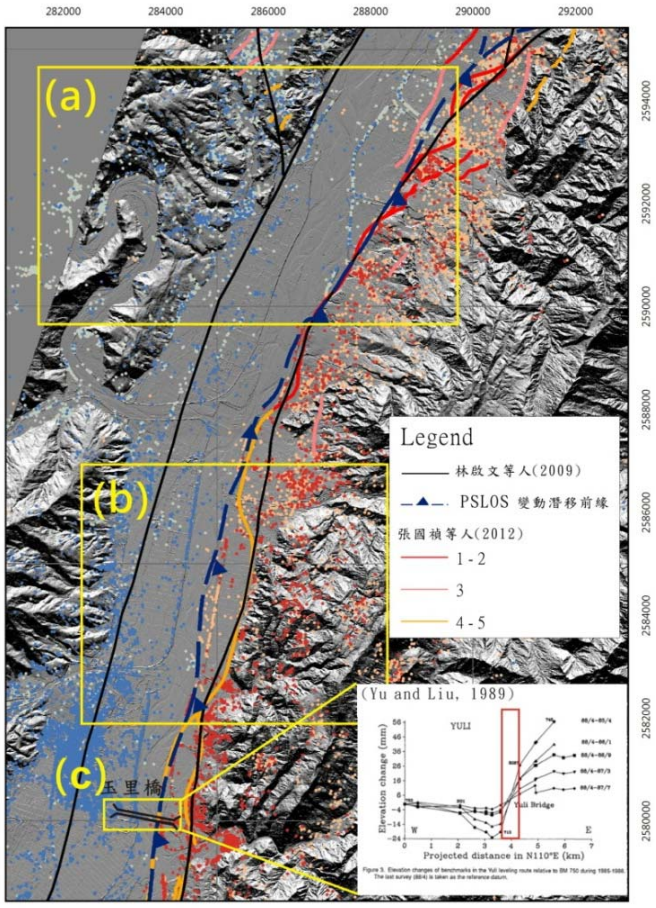
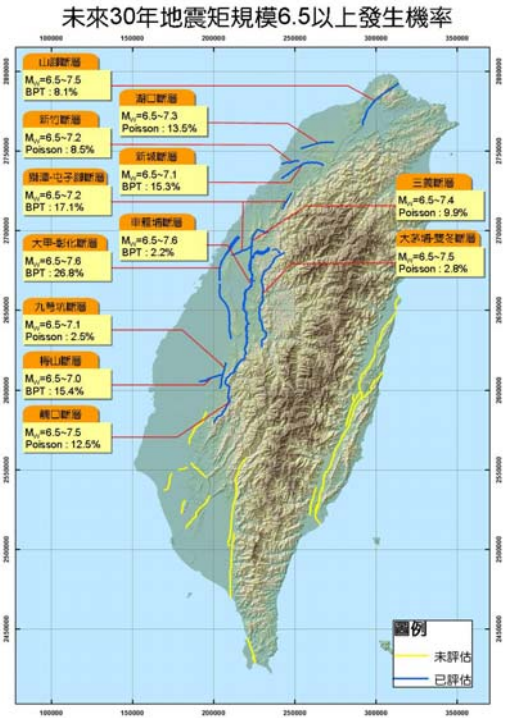
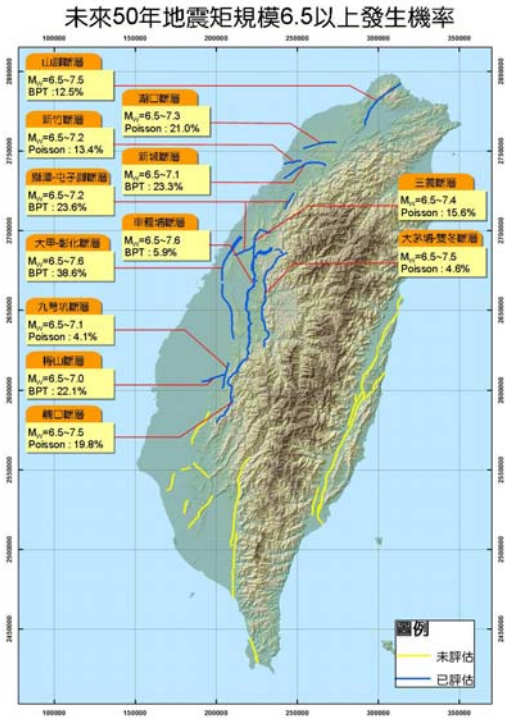


圖 1-4.9：判識斷層跡之比較。黑色線為兩萬五千分之一地質圖標示斷層位置（林啟文等，2009）。藍色線為利用 PS-InSAR 判釋斷層前緣；紅、橘色線為張國禎等（2012）構造線形分布，確實度愈高，線條愈趨於鮮紅色。

1-4-4 活動斷層發生潛勢圖建置

關於斷層活動潛勢分析部分，以中部 7 條及北部 9 條活動斷層進行評估。首先建立活動斷層參數表，透過本計畫建立之活動斷層潛勢評估方法論，了解斷層的重複間隔相關資訊後，以機率法評估活動斷層未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率（圖 1-4.10）。





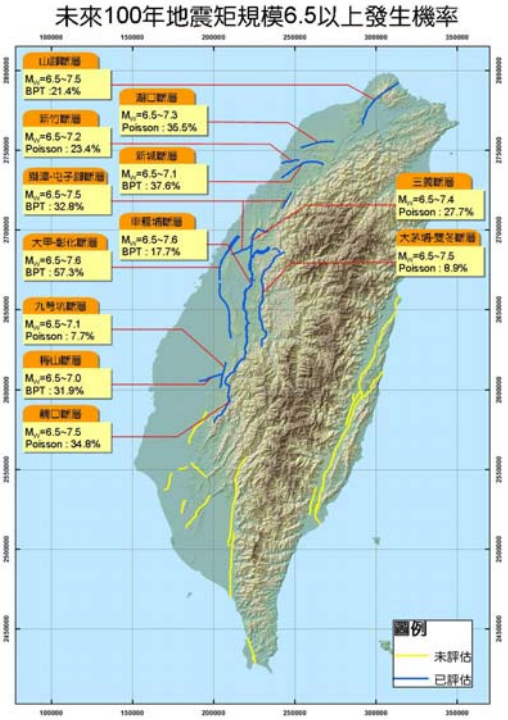


圖 1-4.10：本計畫活動斷層分布及未來 30 年、50 年及 100 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估說明如下：

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。
(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。
(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。
(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

1-4-5 井下應變儀資料分析

井下應變儀是一種相當敏感的地殼變形監測儀器，通常需要埋設於地底下一至二百公尺深度以下，以減少溫度變化或其它環境或地表活動所產生的地殼變形。然而，縱使如此細心的設計，仍然無法排除所有的環境變化因素，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、地表空氣壓地變化、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形...等。

但估計各種因素對井下應變儀的影響，不可僅有單一種因素來估計，也無法由幾個單一時間多種因素來做回歸分析，畢竟在這階段還無法把所有會影響井下應變儀的所有因素都放在多變數回歸模式中，不完整的回歸模式會因為各種變數間的高相關性而產生錯誤的回歸模式，例如颱風來時的低氣壓往往伴隨著很大的降雨量，氣壓、氣溫、潮汐與地下水都有很明顯的年週期，各變數間的高相關性很容易產生偏差的模式，因此，本計畫將依各測站各變數一步一步的試圖建立起正確的修正模式，希望能將可以移除的各種效應盡量移除，然後才在剩餘的資料中，試圖找出可能的地震前兆訊號，或是由地震相關的變化找出斷層在地震前、後或同震的活動狀況。

在本計畫中嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

(1) 因為尚未修正降雨的效應，本計畫僅搜尋臺灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，對於降雨期間應變變化的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不與考慮。這是因為臺灣地區規模大於五的地震並不少，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。在沒有地震事件的影響下才可考慮觀察較長時段的應變資料是否有異常。

(2) 對於"異常"的定義，是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線（意指忽略每日潮汐的變化後）。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。

(3) 事後檢定"異常"是否為地震前兆的判斷：要判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件：

   a. 在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳（徒升或突降），也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這測站並不在該地震的應力影響範圍內。

   b. 在附近幾個井下應變儀觀測站中盡量要有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現"異常"。

   c. 對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，適當的資料補遺與篩選是必要的程序，"異常"資料的再確認也是必須的。

2013 年 12 月至 2014 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有 1 個事件，嘉義網記錄到 1 個應變異常為 5 月 21 日芮氏規模 5.9 花蓮地震；其餘有 3 個規模小於 5 但卻有應變異常的地震分別為 2 月 12 日芮氏規模 4.2 陽明山地震、2 月 5 日至 2 月 8 日新竹群震與 8 月 16 日芮氏規模 3.8 的新北市烏來區地震。圖 1-4.11 為 2013 年 12 月至 2014 年 11 月所有規模大於 5 之地震事件與特別地震事件位置，圖 1-4.12~圖 1-4.15 為地震事件期間的井下應變儀資料。

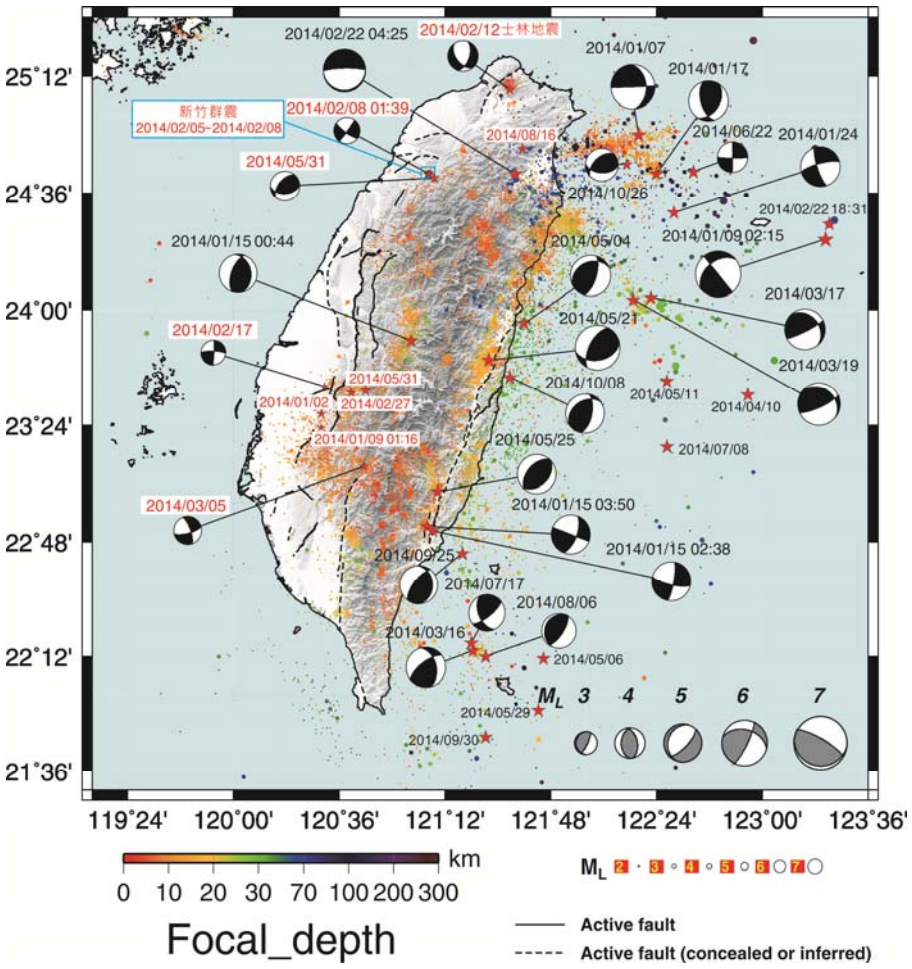


圖 1-4.11：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件(白底紅字表示)之位置及震源機制圖。2014/11/21 地震事件已於圖框外無秀出。

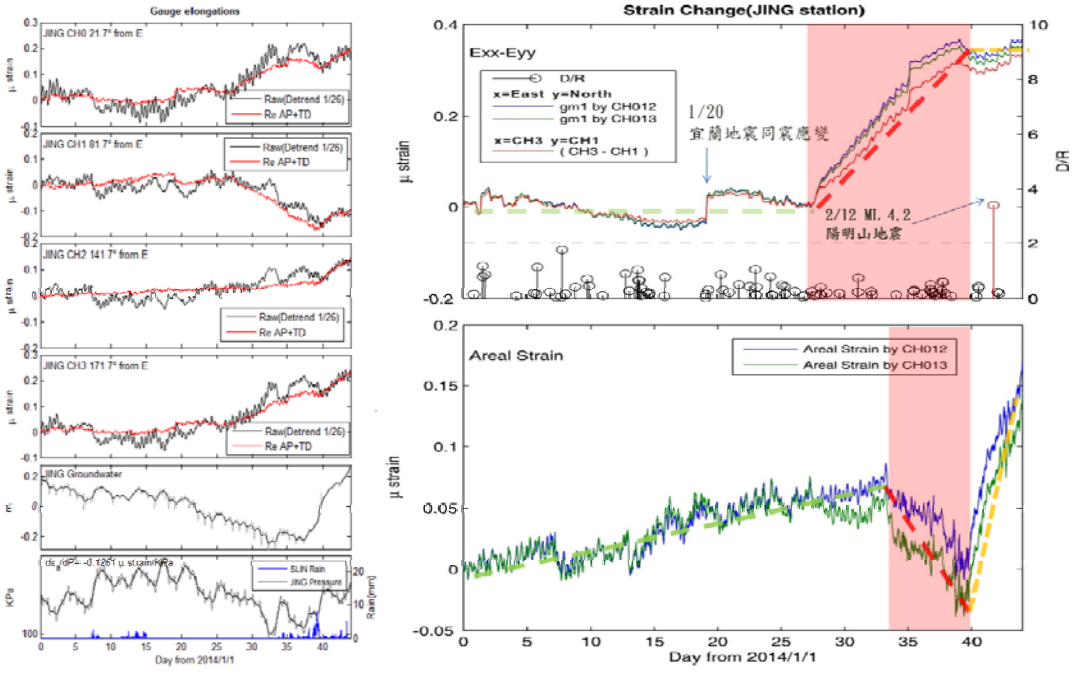


圖 1-4.12：臺北網錦和測站(JING)於 2014 年 2 月陽明山地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

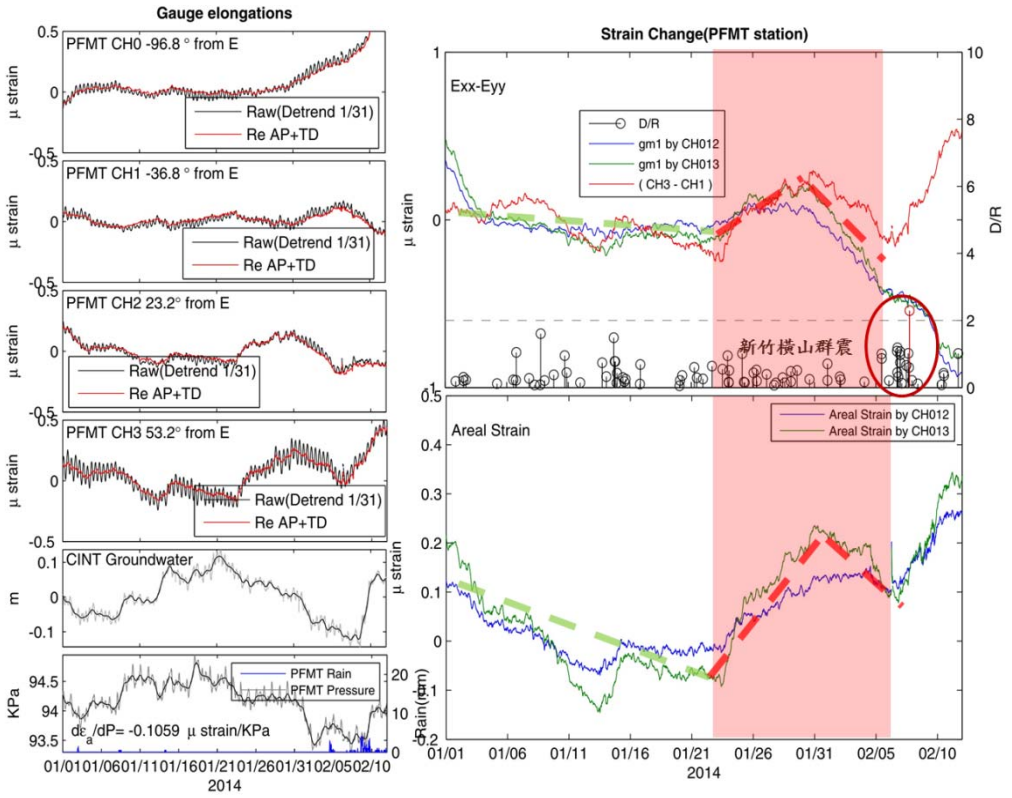


圖 1-4.13：2014 年 2 月新竹群震前後新竹網井下應變儀梅花站應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

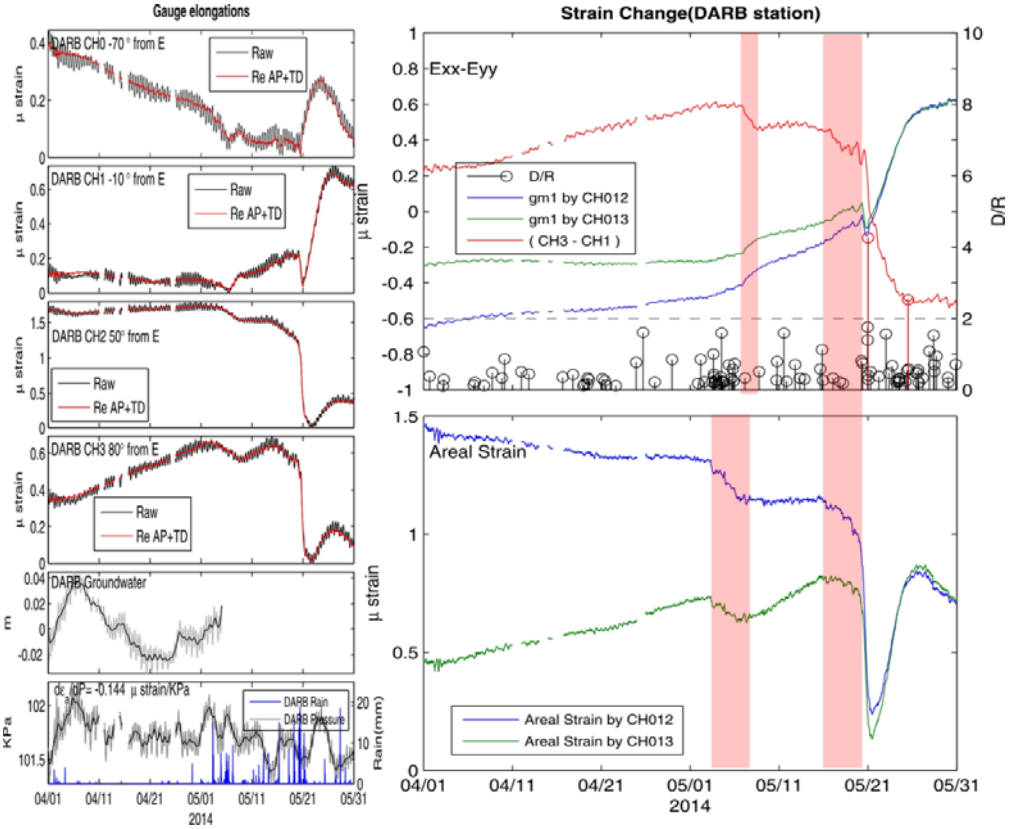


圖 1-4.14：2014 年 5 月花蓮地震前嘉義網達邦站井下應變儀資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

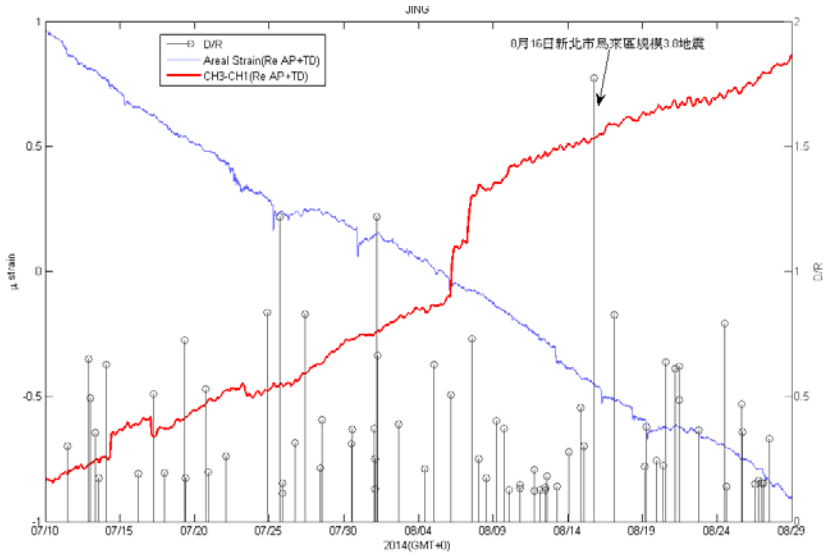


圖 1-4.15：2014 年 8 月新北市烏來區地震前臺北網錦和測站（JING）井下應變儀資料。應變儀應變資料（藍色:CINT 面應變;紅色:CINT 剪應變），D/R 為測站距震源的距離的比值，資料皆移除氣壓、地潮影響。地震發生 9 天前有異常應變上升約 0.39 μstrain。

目前每個月會進行一次井下應變儀的資料分析，分析當月前三個月的一整個月資料（10 月初分析 7 月），資料必須先移除環境變因，如無法移除者，也必須列出環境影響資料，以做為比對之用。當有無法藉由環境因子解釋的應變率變化時，則是為應變儀的應變異常訊號，在藉由必對之後的地震資料，判斷是否地震相關的前兆訊號。分析至 2014 年 10 月為止，井下應變儀有前兆訊號，也成功對應地震的機率在嘉義網、新竹網與臺北網分別為：40%、71%與 71%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：60%、29%與 29%；地震前沒有前兆訊號的機率為：10%、38%與 25%（表 1-4.1）。

表 1-4.1：井下應變儀前兆判釋統計表。

	嘉義網		新竹網		臺北網	
	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震
2013-08	X	X	O	X	X	X
2013-09	X	X	O	O	O	O
2013-10	O	O	O	O	X	O
2013-11	X	X	X	X	O	X
2013-12	O	X	O	X	X	X
2014-01	X	X	X	O	X	O
2014-02	X	X	O	O	O	O
2014-03	O	X	O	O	O	O
2014-04	O	X	X	X	X	X
2014-05	O	O	X	O	X	X
2014-06	X	X	X	X	X	X
2014-07	X	X	X	X	O	O
2014-08	X	X	X	X	X	X
2014-09	X	X	O	O	O	X
2014-10	X	O	X	O	O	O
前兆判斷成功機率	40%		71%		71%	
前兆誤判機率	60%		29%		29%	
未指示前兆機率	10%		38%		25%	

1-4-6 地球化學與地下水觀測

根據過去的觀測結果我們可經由地震活動所造成的異常變化而初步劃分出各觀測站的異常反應範圍，當各測站的反應區間出現交集處，則地震可能將發生在這個區域。例如：當北部的大平地觀測站出現異常且嘉義的中崙測站也出現異常變化時，此時兩個測站的反應區間交集處則可能為地震即將發生的位置；如果東部的池上觀測站也出現異常變化，那則可更提高準確度，如圖 1-4.16 所示。

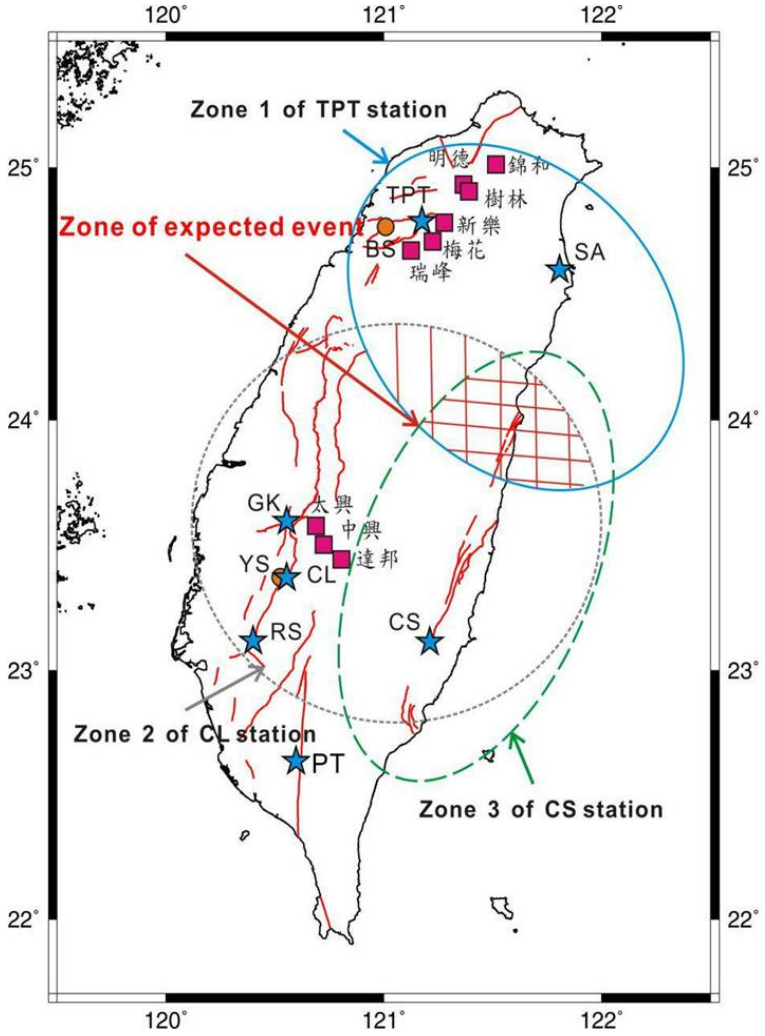


圖 1-4.16：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生地點。

2013 年 12 月至 2014 年 11 月間，各觀測站所觀測到的氡氣異常共有 7 起地震同時有兩個（含）以上的測站氡氣產生前兆反應現象。如表 1-4.2。此外，在 2014 年 2 月 5 日至 2 月 8 日於新竹橫山共發生 10 起規模由 2.3 到 3.4 不等的小地震，如表 1-4.3 所示，鄰近的大平地土壤氣體測站在數天前，已出現明顯的氡氣異常反應，如圖 1-4.18 所示。

表 1-4.2：主要地震活動發生前於多個測站皆有異常氡氣反應。

西元時間	規模	深度 (km)	震央位置	大平地（TPT）			古坑（GK）			中崙（CL）			屏科大（PT）			池上（CS） 錦園（CY）			東華（DH）		
				Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R
2013/12/7 14:53	3.4	13	嘉義竹崎				2		2.4	2	4.8	1.8									
2014/1/15 00:44	**5**	**15**	**南投魚池**			**1.4**	**1**	**2.2**	**2.6**									**1.7**			
2014/1/15 02:38	**5.1**	**8.3**	**臺東卑南**				**1**	**0.9**	**1.6**				**3**	**9.8**	**2.6**	**3**	**9.7**	**4.8**			
2014/1/15 03:50	**5.1**	**8.4**	**臺東卑南**						**1.6**				**2**	**4.1**	**2.7**	**3**	**20**	**4.9**			
2014/3/5 00:02	4.1	7.6	高雄桃源							1	1.9	2.1						1.1			
2014/4/26 00:33	4.7	17.6	花蓮瑞穗							2	3.5	1.2				2	3.4	2			
2014/5/21 08:21	**5.9**	**16.5**	**花蓮鳳林**							**2**	**6.9**	**3.8**							**5**	**246.6**	**14.5**

2014/5/21 花蓮鳳林地震（M_L 5.9）發生之前，中崙站在 22 天前，東華站在 22 天前，即有氣體異常的前兆反應。由於地震規模大，地底下釋放的氣體濃度長達三週以上，兩站皆超過我們定義的異常門檻值。中崙站扣除掉中間偶有受到降雨影響的部分，仍可看出其異常變化的趨勢。東華站則是從 4 月底開始緩慢上升，直到下降仍維持平穩的趨勢，唯有利用時序分析標準化，才能看出其有異常變化。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 1-4.17（B）黃色星號），如圖 1-4.17 所示。另外，地下水中興站於 2014 年 3 月起水位異常穩定，水位讀數維持在 8.9 公尺（上下波動不超過 10 公分）持續兩個多月，直到 5 月 20 日夜間，也就是地震前約 13 小時的時間點突然快速上升，地震發生後也未回降，可能同為該地震之前兆，不過由於在 5 月 28 日水位計遭受雷擊而資料停止，無法進行後續的判讀。5 月 21 日花蓮鳳林地震前中興站的異常水位如圖 1-4.18 所示。

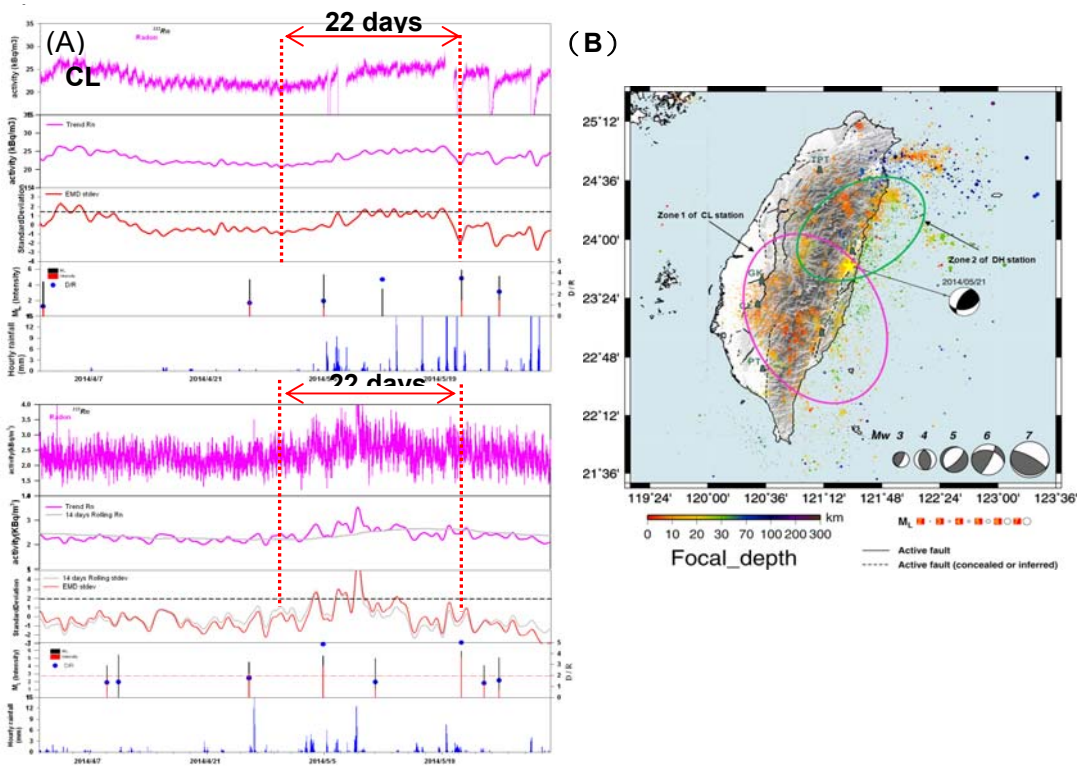


圖 1-4.17：2014/5/21 花蓮鳳林地震與各測站觀測情形，（A）中崙站（CL）、東華站（DH）土壤氣體觀測結果（2014/4/1-2014/5/31）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮鳳林地震的震央位置。

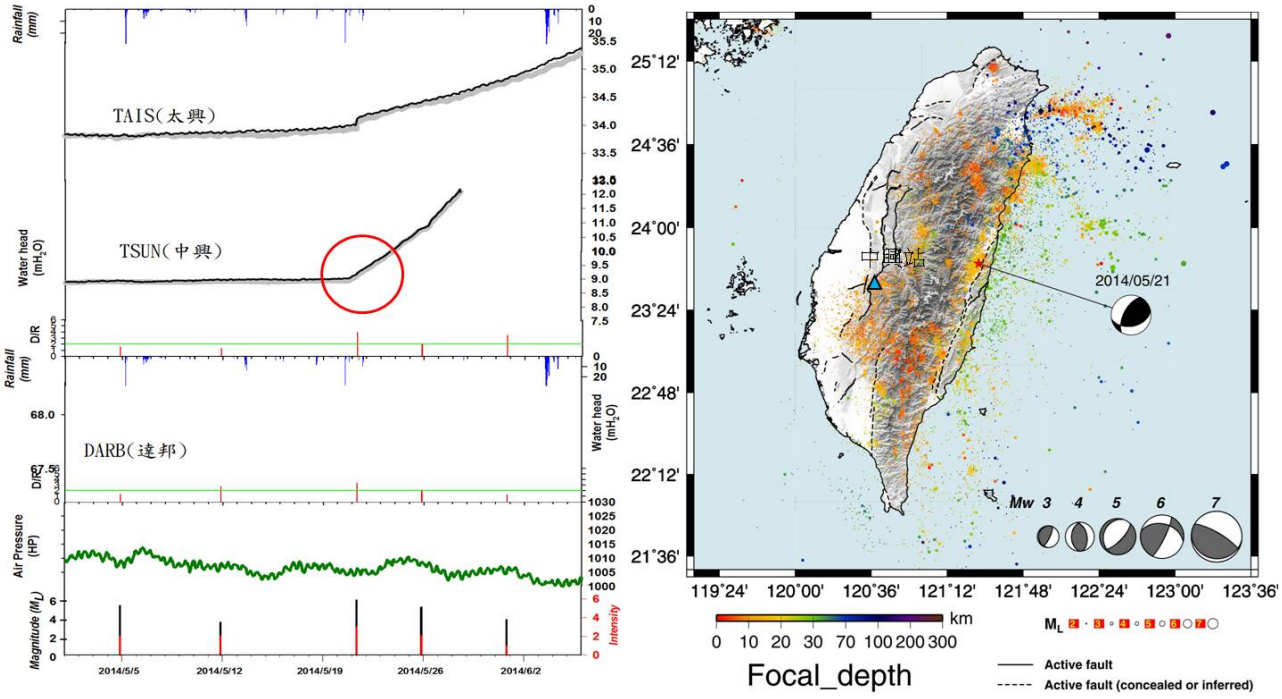


圖 1-4.18：2014 年 5 月 21 日花蓮鳳林地震與嘉義中興站水位異常關係圖。左方水位圖中，淡灰色線代表水位原始資料，黑色線則是經氣壓修正後的數據。中興站水位於5月20日突然開始上升，約為花蓮鳳林地震發生前 13 小時。

表 1-4.3：新竹橫山地震群相關資料表。

NO.	西元時間	規模	深度 (km)	詳細資料	距測站（km）	D/R
1	2014/2/5 19:14	2.7	10.9	新竹縣政府東南方 20.0 公里（位於新竹縣橫山鄉）	5.36	1.19
2	2014/2/5 19:17	2.6	10.9	新竹縣政府東南方 18.5 公里（位於新竹縣橫山鄉）	5.23	1.09
3	2014/2/7 01:05	2.8	11.3	新竹縣政府東南方 19.4 公里（位於新竹縣橫山鄉）	4.49	1.32
4	2014/2/7 02:00	2.8	9.6	新竹縣政府東南方 20.0 公里（位於新竹縣橫山鄉）	5.36	1.45
5	2014/2/7 07:04	2.3	9	新竹縣政府南偏東方 17.3 公里（位於新竹縣橫山鄉）	6.91	0.86
6	2014/2/7 07:04	2.3	6.7	新竹縣政府南偏東方 15.7 公里（位於新竹縣北埔鄉）	8.38	0.91
7	2014/2/7 07:26	2.4	6.6	新竹縣政府東南方 19.1 公里（位於新竹縣橫山鄉）	5.99	1.21
8	2014/2/7 19:14	2.3	11.3	新竹縣政府東南方 18.3 公里（位於新竹縣橫山鄉）	5.23	0.78
9	2014/2/7 23:01	2.7	10.6	新竹縣政府東南方 20.2 公里（位於新竹縣橫山鄉）	5.36	1.22
10	2014/2/8 01:39	3.4	8.4	新竹縣政府東南方 20.0 公里（位於新竹縣橫山鄉）	5.99	2.81

2014/2/5~2/8 新竹橫山群震（M_L 2.3~3.4），大平地站在 10 天前，由原始資料觀察有明顯的氣體異常反應。直到 2 月 5 日開始發生第一起地震，至 2 月 8 日結束，共計 10 起小地震，這段時間氡氣是緩慢的上升，到 2 月 4 日才下降，不過隨即於一天內又緩慢上升，直到因雨影響逸氣來源導致氡氣降至空氣值狀態。同時，利用時序分析方法，其標準差同樣也達到我們定義的異常門檻。這群地震震央落在圖上黃色星號處（圖 1-4.19（B））。如圖 1-4.19 所示。此外，地下水新樂站對於新竹群震也出現顯著的異常，如圖圖 1-4.20 所示，以往新樂站水位異常的型態，多以突降的方式呈現，而 2014 年 1 月 13 日起的水位異常則是出現先升

後降的型態，與以往不同；經過氣壓修正後，仍能發現 1 月 13 日新樂水位在無雨的情況下上升約 7 公分左右，這段較高的水位維持了 22 天，在 2 月 4 日快速的降回原本的水位高度，之後便發生 2 月 5 日開始的新竹橫山群震。

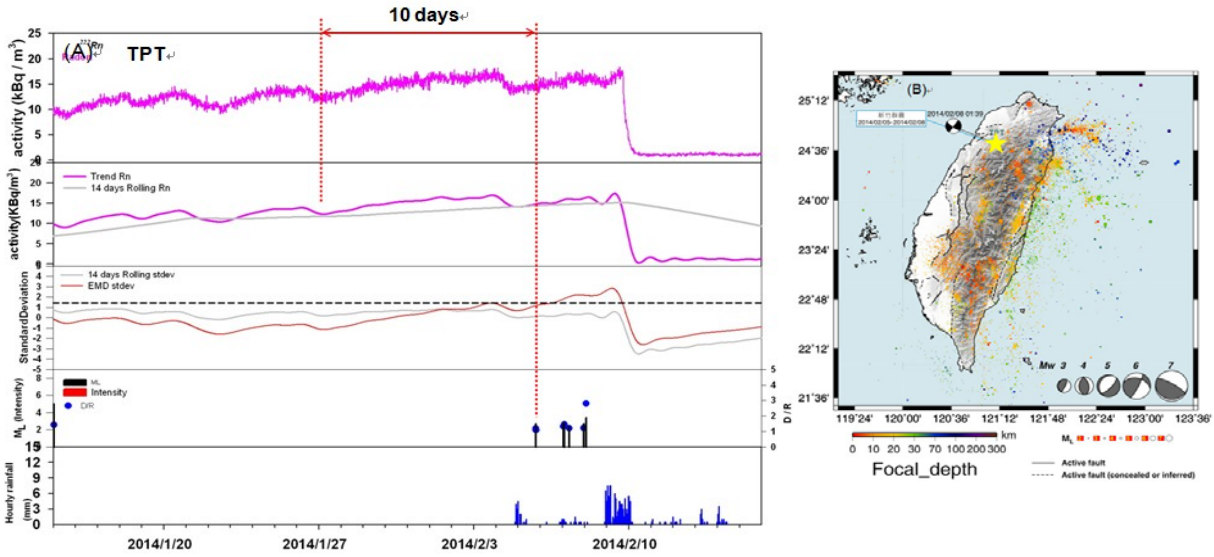


圖 1-4.19：2014/2/5-2014/2/8 新竹橫山地震群與大平地站觀測情形，（A）大平地站（TPT）土壤氣體觀測結果（2014/1/15-2014/2/15）；（B）臺灣地區地球化學觀測站大平地站的相關地震分布示意圖。黃色星號表示新竹橫山群震的震央位置。

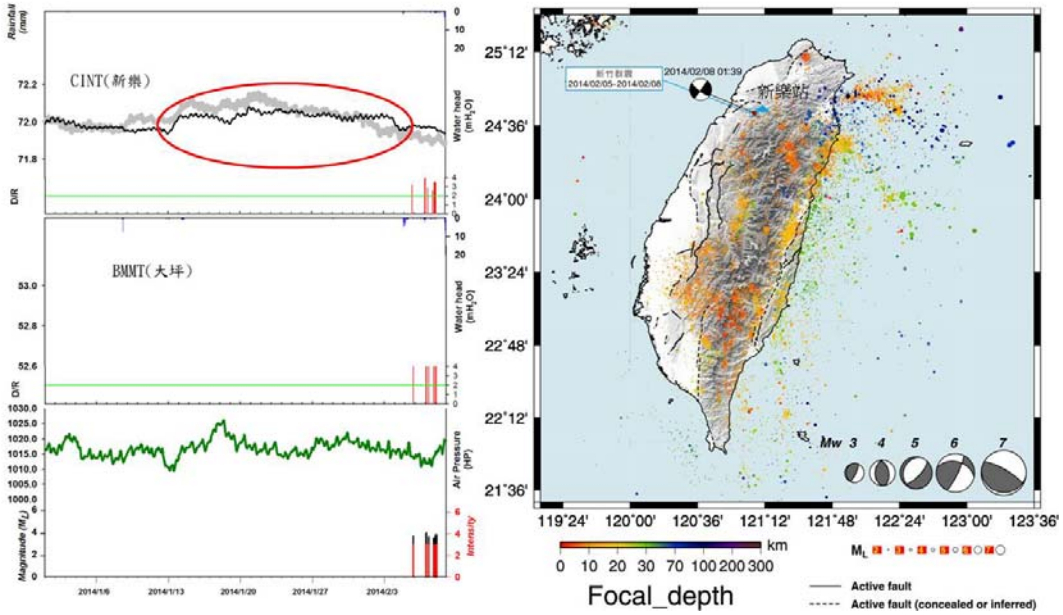


圖 1-4.20：2014 年 2 月新竹橫山群震與新竹新樂站水位異常關係圖。左圖新樂站水位中，淡灰色線代表水位原始資料，黑色線則是經氣壓修正後的數據。新樂站水位於 1 月 13 日小幅上升，維持至 2 月 4 日降回，之後於 2 月 5 日開始發生群震。

2014 年中興站在枯水期（約每年的 11 月至 4 月的期間）的水位下降過程中，出現多次突降型的異常，隨後都可以在嘉義當地發現符合篩選條件的地震，包含 1 月 2 日規模 3.4、2 月 17 日規模 3.8、2 月 27 日規模 3.3 等三起鄰近地震，異常發生時間為震前 5 到 13 天。因水位異常型態大至相同，該三起地震同列於圖 1-4.21 中顯示。

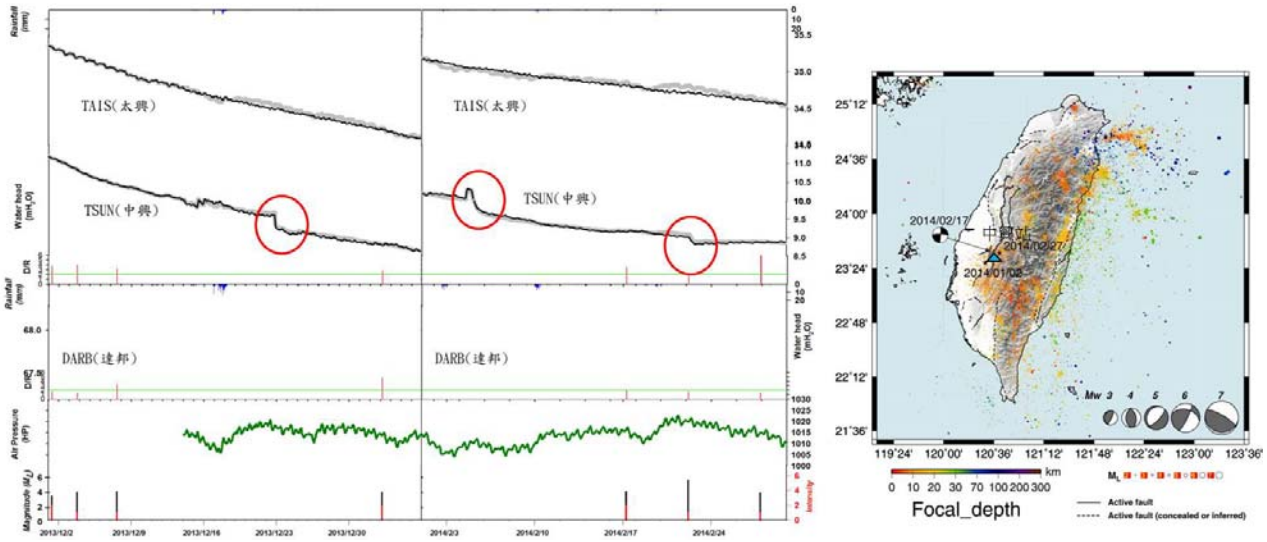


圖 1-4.21：2014 年 1 月、2 月嘉義地區鄰近地震與嘉義中興站水位異常關係圖。左方兩張水位圖中，淡灰色線代表水位原始資料，黑色線則是經氣壓修正後的數據。中興站水位於去年 12 月 22 日、今年 2 月 4 日、2 月 22 日有三次突降記錄，之後均對應到嘉義當地的地震，異常與地震時間間距為 5 到 13 天。

過去第一階段的主要研究成果包含土壤逸氣調查與當地構造關連之探討、氣體成份變化之連續觀測與斷層地震活動之關連、以及斷層帶土壤逸氣量之測量與其應用。2014 年於宜蘭地區進行土壤氣普查的採樣結果來看，位於斷層帶上的土壤氣採樣點如蘭陽技院、二城國小、同樂國小、內城中學、四季國小，在氡氣、二氧化碳濃度、氪氣濃度的表現上都顯示出較其他採樣點來的高。唯一的特殊點位是在羅東地震密集帶上的中段－羅東高中，在二氧化碳、氪氣的濃度上都是相對高的，甚至於較斷層帶上的點位來的高，唯獨氡氣沒有異常。至於南澳地震群上的四個採樣點，只有南澳國小二氧化碳、氪氣濃度較其他三個點來的高，至於氡氣則都是沒有異常。宜蘭地區在 2009 年曾進行大規模土壤氣普查，經由普查分析了解此區的土壤氣體濃度分布狀況，根據氣體分析結果，輔以斷層上學校分布圖，我們選擇 12 個位於斷層帶或是地震密集帶上的學校進行固定點持續採樣調查，希望能從中找到將來適合設站的位置。根據目前的調查結果，建議未來可設站之後選地點依序為蘭陽技院、二城國小、同樂國小、內城中學、四季國小和羅東高中，如圖 1-4.22 所示。



圖 1-4.22：宜蘭地區土壤氣固定點採樣分布圖。

本計畫於 2010 年在恆春半島墾丁社頂監測站執行地下水水氡及溶解氣體（二氧化碳）之定期採樣及實驗室分析，並且於 2010 年 3 月 4 日發生芮氏地震規模 M_L = 6.4 的高雄甲仙地震前，觀測到地下水水氡及溶解氣體（二氧化碳）同時有明顯的異常下降之前兆行為，且趨勢一致（圖 1-4.2），此結果支持安通溫泉地震前兆地下水水氡逸散機制（Kuo et al., 2006a, b；2009； 2010a, b, c; 2011）。本計畫並於 2011 年分別在安通溫泉和墾丁公園社頂新設置地下水水氡和溶解氣體連續監測站，以期即時的連續監測資料，能有助於釐清溶解氣體與地震活動的關聯性，使全島能夠完成較為完整之地球化學觀測網。

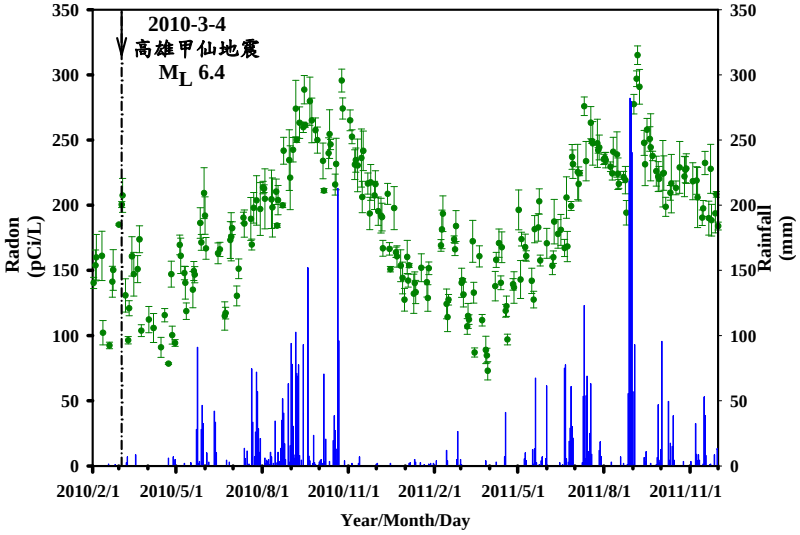


圖 1-4.23：社頂站地下水水氡濃度變化與雨量關係圖（雨量資料來源：中央氣象局）。

圖 1-4.24 為社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。現地連續監測系統（SARAD2200）進水損壞送原廠維修，已於 2014 年 10 月份恢復運作。2014 年度計畫執行期間，社頂站實驗室樣本分析與現地連續監測均無發現異常下降之地震前兆，且實驗室分析與連續監測數據比對結果相當吻合。

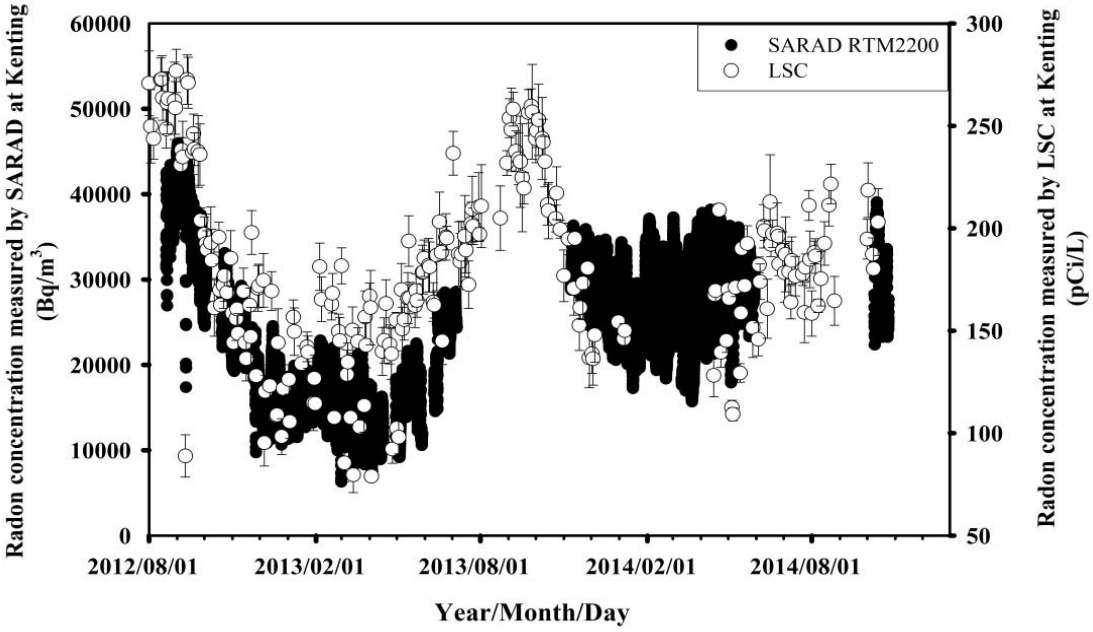


圖 1-4.24：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。

以土壤氣體異常變化之方法來評估斷層活動性或地震活動之發生，並利用時序分析方法處理不同觀測站的數據，可進一步以較客觀的方式辨識出與地震前兆的異常反應。觀測期間，在 2014 年 1 月 15 日芮氏規模 5 南投地震發生前，大平地、古坑和池上土壤氣體觀測站，分別在 8 天、20 天和 21 天前出現土壤氡氣異常升高的變化，可能為該地震之地震前兆反應。同一天於臺灣東南部連續發生了兩起芮氏規模 5.1 的臺東卑南地震，古坑、屏東和池上土壤氣體觀測站皆觀察到顯著的異常變化。在 2 月初新竹地區發生的群震，鄰近的大平地土壤氣體觀測站約在 10 天前即出現持續的異常升高變化；期間，鄰近的地下水壓新樂站，在 1 月 13 日出現了水位異常變化，呈現先升後降的型態，這可能也跟隨後發生的新竹群震有關。此外，2014 年 5 月 21 日芮氏規模 5.9 的花蓮鳳林地震發生前，中崙和東華土壤氣體觀測站出現顯著的土壤氡氣濃度異常上升的變化；而中興地下水壓觀測站在該地震發生前也出現水位大幅度升高的變化，可視為顯著的前兆反應。然而，於觀測期間地下水溶解氣的觀測結果並未發現明顯的異常變化，這可能是由於在海岸山脈南段及恆春半島附近並未發生強震（Mw＞6.0）有關。安通站為受限含水層，地下水水氡濃度未受環境因子影響；而社頂站屬於自由含水層，地下水水氡濃度受季節性降雨量影響，呈現一週期變化。未來可進一步應用時頻分析方法，分離出水氡濃度之週期訊號，並探討此訊號與降雨量及地下水位之關係。

1-4-7 整合觀測資料分析

累計 2009 年 1 月至 2014 年 11 月共 174 個規模大於 5 之地震事件，在這期間各種觀測的異常記錄標示在相關的地震編號上，如圖 1-4.25。圖 1-4.26 為 2013 年 12 月至 2014 年 11 月間規模大於 5.0 的地震事件，其中發生於 2014/05/21 10:03 規模 5.9 發生在花蓮縣政府南偏西方 33.3 公里的地震（ID=163）同時在嘉義地區觀測到三樣異常，分別為：(1) 二個地化氣體記錄異常（中崙測站、東華測站）；(2) 井下應變儀（達邦站）及該地區尚未正式列入異常觀測運作的 GPS 地表應變；(3) 嘉義地區中興地下水站水位在地震前 13 小時突然急速上升。

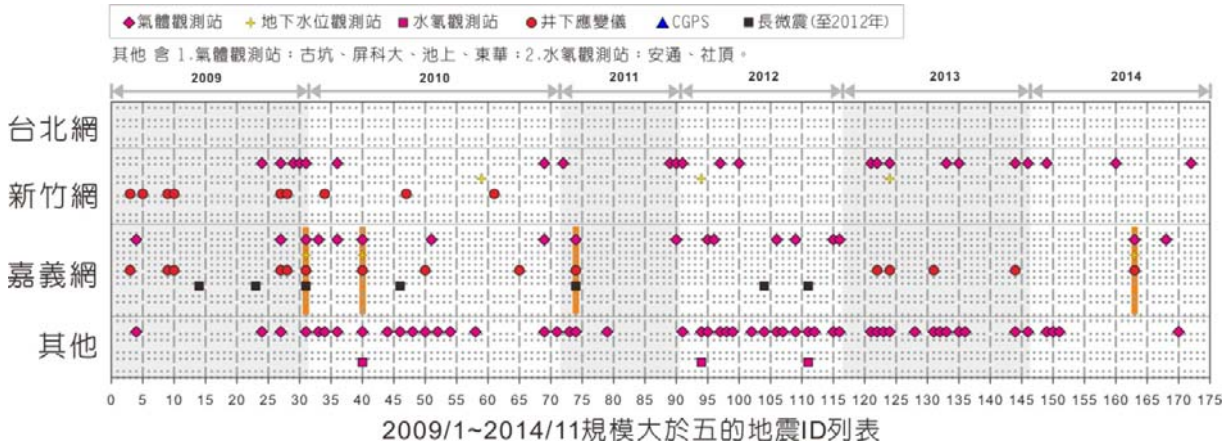


圖 1-4.25：2009 年 1 月至 2014 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID，粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。

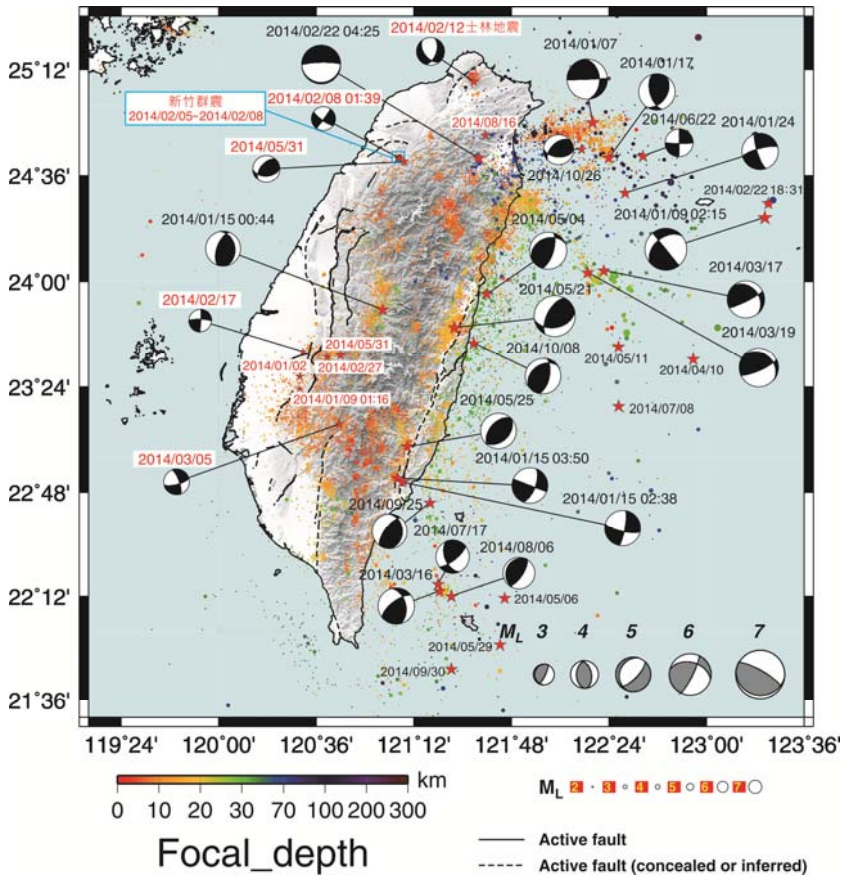


圖 1-4.26：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件(白底紅字表示)之位置及震源機制圖。

在這一階段的觀測中，主要可以分為三個時段的異常事件，下面將探討各種觀測的異同點，希望對各類異常與地震的關係能有進一步的了解。

● 2014/5/21 花蓮鳳林地震（M_L 5.9）(ID=163)

此地震對於嘉義井下應變儀網產生疑似的應變異常訊號，該訊號發生於地震前 5/3~5/8 之間(約 15 天前)，由於資料已排除氣壓與地潮，相對於可能影響應變的降雨，可以比對 5/21 降雨對於應變的反應，結果顯示 5/3~5/8 的應變反應與 5/21 降雨的應變反應趨勢並不相似，大致可以排除降雨的影響。

在地球化學觀測方面，土壤氣測站嘉義中崙（CL）與花蓮東華（DH）兩站均出現氡氣的異常，中崙站在 22 天前，東華站在 31 天前，即有氣體異常的前兆反應。由於地震規模大，地底下釋放的氣體濃度長達三週以上，兩站皆超過異常門檻值。中崙站扣除掉中間偶有受到降雨影響的部分，仍可看出其異常變化的趨勢。東華站則是從 4 月中開始緩慢上升，直到下降仍維持平穩的趨勢，唯有利用時序分析標準化，才能看出其有異常變化。

地下水觀測則在嘉義地區的中興國小觀測站於三月起水位異常穩定，水位讀數維持在 8.9 公尺（上下波動不超過 10 公分）持續兩個多月，直到 5 月 20 日夜間，也就是地震前約 13 小時的時間點突然快速上升，地震發生後也未回降，可惜在 5 月 28 日水位計遭受雷擊而資料停止，無法進行後續的判讀。太興地下水壓觀測站甚至有同震的變化。

這一個地震的規模較大，但大多數有異常的觀測站都離地震較遠，所以異常的啟動期差異甚大，從一天前一直到 30 天前不等。若考慮 GPS 的地表應變，因 DARB 站的地下水停止記錄，改用 TAIS 站的地水資料勉強修正，圖 1-4.27 中可看出在震前修正結果的一致性。5 月 21 日花蓮地震，井下應變儀與 GPS 應變在地震前約 20 天由壓縮變為鬆弛的變化，地震後約一個月，兩種資料都顯示地殼壓縮，但在六月中以後，井下應變儀資料持續壓縮，但 GPS

應變則回復變為鬆弛，一直延續到年底。圖中亦可看出新竹群震對這一組資料也略有影響，不過若單獨只看這資料並不容易往這一方向去解釋，畢竟，臺灣斷層太密集，任一地方的地殼都受遠近每一斷層活動的影響。

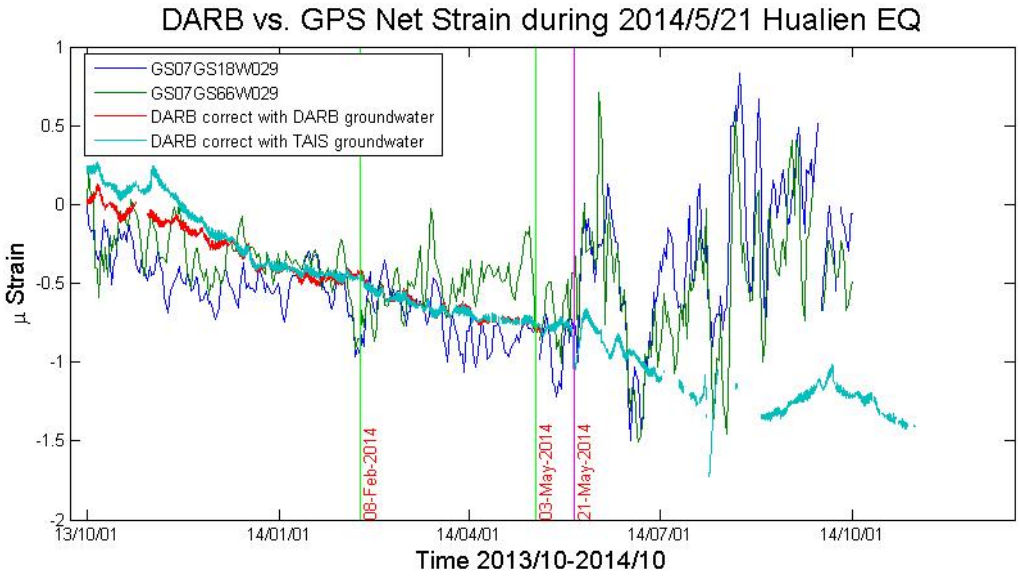


圖 1-4.27：DARB 井下應變與其附近兩個 GPS 網的地表應變的時間序列，圖中並標示了新竹群震 2/8 與井下應變異常起始時間 5/3。

● 2014/2/5~2/8 新竹橫山群震（M_L 2.3~3.4）

新竹地區的井下應變儀共有 BMMT、CINT 與 PFMT 三個站，地震前大約 1/31 有異常應變，其中 PFMT 在 1/31~2/4 之間上升約 0.0688 μstrain，然後在 2/4 地震前極速降低（壓縮），緊接著發生群震，然後至 2/7 間下降約 0.057 μstrain，再到 2/10 升至最高點，然後仍持續有相當大的變化。若再看同期間的另外兩個站：BMMT 與 CINT，其變化與 PFMT 大不相同，這顯示這些測站位於震源附近，在斷層的不同方位就會有大不相同的應變，甚至完全相反（擠壓 vs.舒張）的應變。

在地球化學氣體觀測方面，大平地站（TPT）在 10 天前，由原始資料觀察有明顯的氣體異常反應，氡氣是緩慢的上升，到 2 月 4 日才下降，不過隨即於一天內又緩慢上升，直到因雨影響逸氣來源導致氡氣降至空氣值狀態。利用時序分析方法，仍可看出其標準差切過我們定義的異常門檻。

在水位觀測方面，以往新樂（CINT）站水位異常的型態，多以突降的方式呈現，而今年 1 月 13 日起的水位異常則是出現先升後降的型態，與以往不同；經過氣壓修正後，仍能發現 1 月 13 日新樂水位在無雨的情況下上升約 7 公分左右，這段較高的水位維持了 22 天，在 2 月 4 日快速的降回原本的水位高度，之後便發生 2 月 5 日開始的新竹橫山群震。

綜觀幾種異常的變化，地下水約在 22 天前開始有異常，氣體異常則在 10 天前開始，井下應變則在 5 天前開始有異常，但所有的觀測都在 2/4 群震開始的前一天突然轉向。

若看此地區較長期的應變，包括井下應變以及地表的 GPS 應變，如圖 1-4.28 顯示震源附近的 GPS 觀測站與井下應變儀觀測站的相關位置，並利用兩個 GPS 三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI，來計算地表應變。這次的群震剛好位於兩個 GPS 三角網交界之處。其結果如圖 1-4.29 所示。

自 2013 年起，BMMT 與 GPS 的地表應變較為吻合，在 2013 年 3 月底有顯著壓縮，9 月底些微膨脹，整體上與地表 GPS 應變相當一致。GPS 在 2013 年 6 月到 8 月的大幅度跳動，但 BMMT 與 PFMT 井下應變資料並無對等的變化。2013 年 10 月各種應變資料開始有所差異，BMMT 與 GS16-GS61-KSHI GPS 三角網的地表應變走勢一直都很接近，

GS61-PLAN-KSHI GPS 三角網的地表應變則居中，PFMT 的井下應變則顯示完全相反的變化，而且所有的應變並不因 2 月的群震而結束，反而一直持續到資料處理的最後，5 月 31 日。若仔細追蹤此地區的地震，可發現在 2014 年 5 月還有兩個地震（表 1-4.4），最大規模 4.2，其震源機制海灘球可見圖 1-4.26，應為東北西南走向那一條斷層面。此地區應變在 2 月群震後仍持續壓縮，至 5 月 31 日再發生兩個地震後才趨平穩（見圖 1-4.30）。

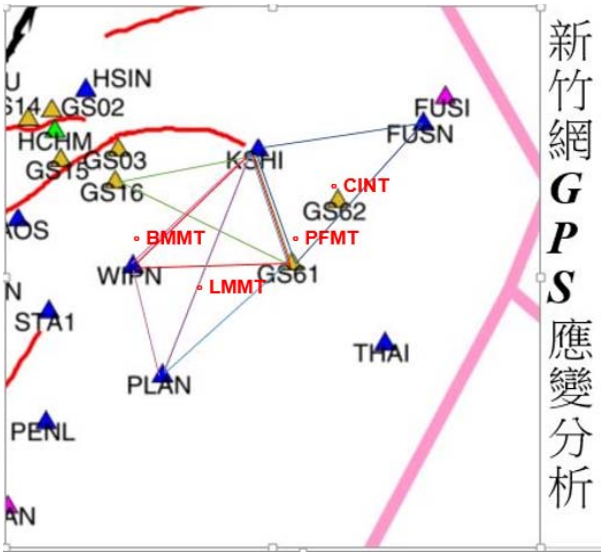


圖 1-4.28：顯示震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI，以及井下應變儀觀測站的相關位置。

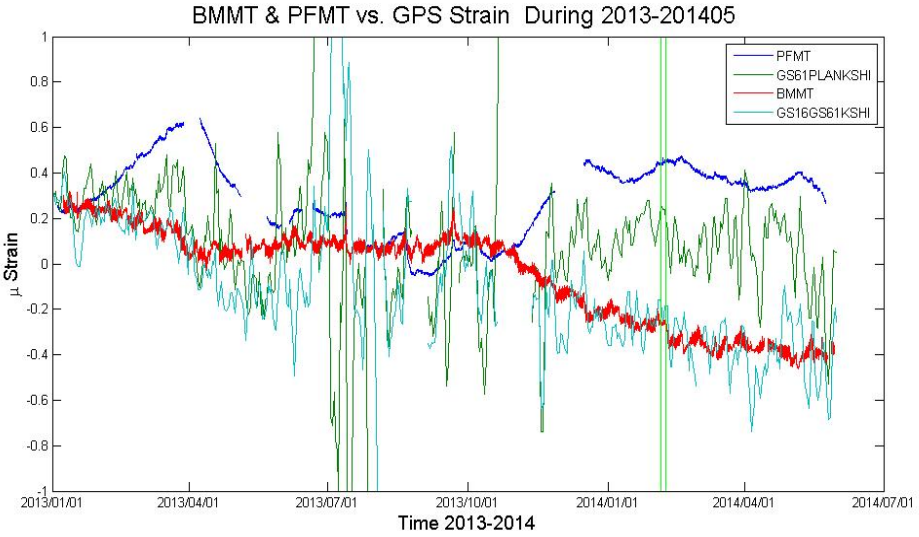


圖 1-4.29：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 與 PFMT 於 2013~2014 年間的資料與震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI 的時間序列。

表 1-4.4：新竹地區在 2014 年 2 月群震之後，5 月底在相同位置仍有兩個地震。

編號	發生時間	經度	緯度	深度	規模	地　　點
第 079 號	5 月 31 日 10 時 51 分	121.11	24.70	9.2	4.2	新竹縣政府東南方 17.7 公里
小區域	5 月 31 日 12 時 36 分	121.14	24.67	5.0	2.8	新竹縣政府東南方 21.4 公里

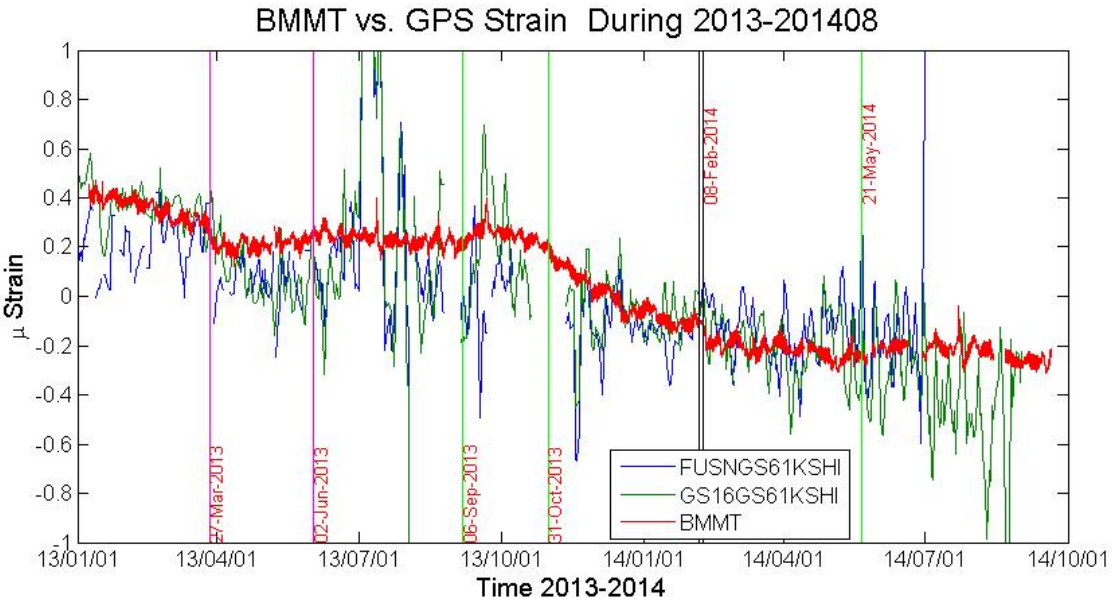


圖 1-4.30：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 在 2014 年 2 月群震後，應變仍持續壓縮，至 5 月 31 日再發生兩個地震後才趨平穩。

● 2014/2/12 陽明山地震（M_L 4.2）

2014 年 2 月 12 日在臺北市士林區發生一規模 4.2 的有感地震，臺北市全區震度可達 4 級，利用錦和測站井下應變儀資料分析的結果顯示地震前在 1/5 至 1/20 間呈現穩定的情形，直到於 1/21 宜蘭縣政府東偏北方 33.1 公里發生規模 4.0 的淺層地震時所造成同震反應，又持續維持約一個星期的穩定，自 1/28 開始差應變數值即異常地持續增加，約至 2/9 才又恢復穩定，而在 2/12 發生了地震，整個過程紀錄了岩層中的應變累積、鎖死、破壞的過程，顯示利用差應變結果來判釋地震前兆能夠提供不錯的結果。近年來由於對大屯火山的關注，陽明山附近設置了一些 GPS 連續觀測站，全部在震央距離數公里之內，如圖 1-4.31 所示。因此，利用這一些資料選取最接近的兩個三角網做應變之分析，如下：(a) GS08-GS11-YMSM (b) GS08-WANL-YMSM

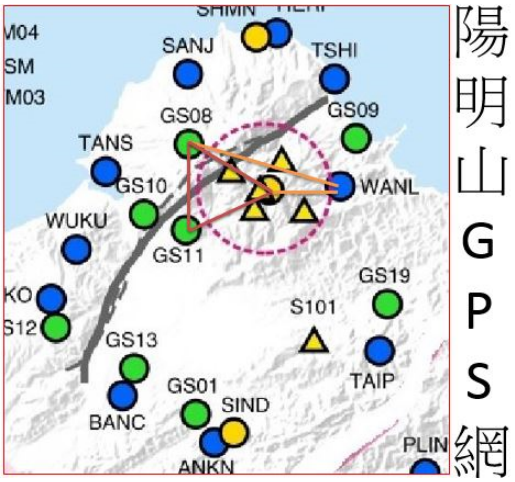


圖 1-4.31：陽明山地區 GPS 連續站網。

圖 1-4.32 為第一個三角網的面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下），圖中可看出在 2013 年幾乎一整年都維持穩定的面應變，直至 2013/12/30 日突然有個壓縮的突跳，約較低了 3 μstrain，第一工程剪斜應變也降了約略相等的量。這樣維持較低

的應變量直至 2014/04/30 才跳回原來的應變水準。

圖 1-4.33 為第二個三角網應變量，圖中可看出在 2013 年幾乎一整年都維持穩定的面應變，直至 2013/12/30 日突然有個壓縮的突跳，約較低了 15 μstrain，第一工程剪斜應變卻是增加約略相等的量。這樣維持較低的應變量直至 2014/04/30 才跳回原來的應變水準。這樣大的應變還是第一次發現，在相鄰兩個三角網有相同的應變，一大一小，表示主要的變形較靠近萬里這一邊。

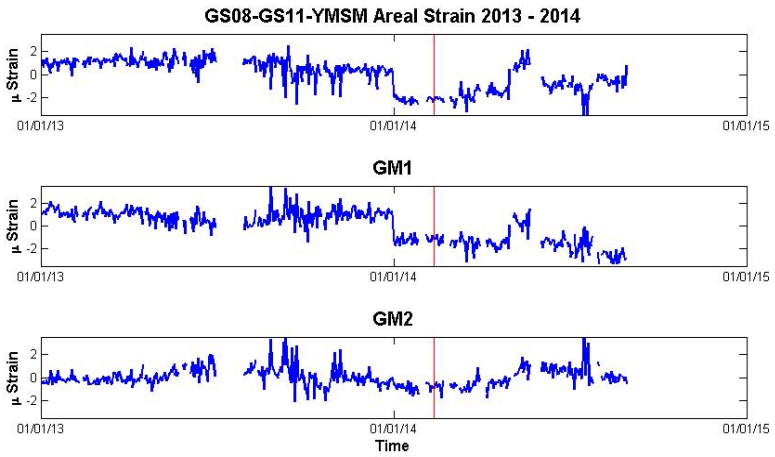


圖 1-4.32：為 GS08-GS11-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果，其中顯示面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下）。

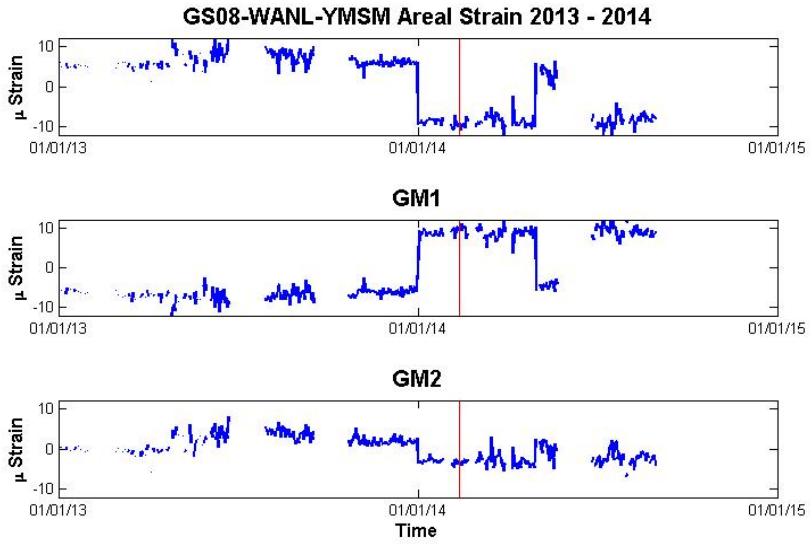


圖 1-4.33：為 GS08-WANL-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果，其中顯示面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下）。

第二章、大地測量資料分析

2-1 連續 GPS 站解算成果分析

本次報告所使用之 GPS 連續站資料係由經濟部中央地質調查所所提供，連續站所屬機構包括中央地質調查所、中央氣象局、中央研究院、內政部、國土測繪中心、中正大學等單位，共 334 站。以下為計算每日座標解之方法與流程。

2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略

本研究利用 GAMIT/GLOBK（Herring et al.,2006）軟體計算求解精密之測站座標。GAMIT/GLOBK 其主要功能為估計 GPS 站之座標與速度場、同震與震後效應、大氣層遲延量、衛星軌道估計與地球軌道參數（EOP）估計。GAMIT/GLOBK 利用 Bock et al. （1986）與 Schaffrin and Bock （1988）所建立之演算法來分析二次差分觀測量，此法有助於衛星軌道之決定與週波未定值之求解。此外，為了偵測與修復週波脫落之影響，GAMIT/GLOBK 對二次差分觀測量再進行時間差分工作，也稱三次差分觀測量。座標定位工作主要是以使用相位觀測量 （Phase observation）為主，但虛擬距離觀測量（pseudo-range observation）仍在 GAMIT/GLOBK 中處理合理之先驗衛星座標與地面站座標值之提取，也協助接收機鐘偏差之決定。為了有效處理電離層誤差之影響，GAMIT/GLOBK 利用 L1 與 L2 頻之不同的線性組合來解決不同基線長度所造成電離層之影響。

計算流程以 ITRF2008 國際框架為基準，選取臺灣連續 GPS 約制站分別為：墾丁連續站（KDNM）、白沙連續站（S01R）、中研院地球所連續站（S101）、富山連續站（S104）以及暨南大學連續站（S167）（圖 2-1.1）。另外國際約制站座標及速度場之計算是藉由參與國際導航服務（International GNSS Service （IGS））的全球站中，觀測資料穩定且鄰近臺灣的測站如：PIMO（菲律賓馬尼拉）、GUAM（美國關島）、WUHN（中國武漢）、TSKB（日本筑波）和 TNML（臺灣工研院量測中心）（圖 2-1.1）聯合解算求得。由於軟體運算效率之限制，故將所有站以站數、網型幾何及臺灣地區斷層分布為原則切割成 8 個子網分別計算，其網型分布如圖 2-1.2。每個子網之計算均包含 10 個已估計座標與速度場之核心站，並於最後整體網型平差時提供一致之約制。

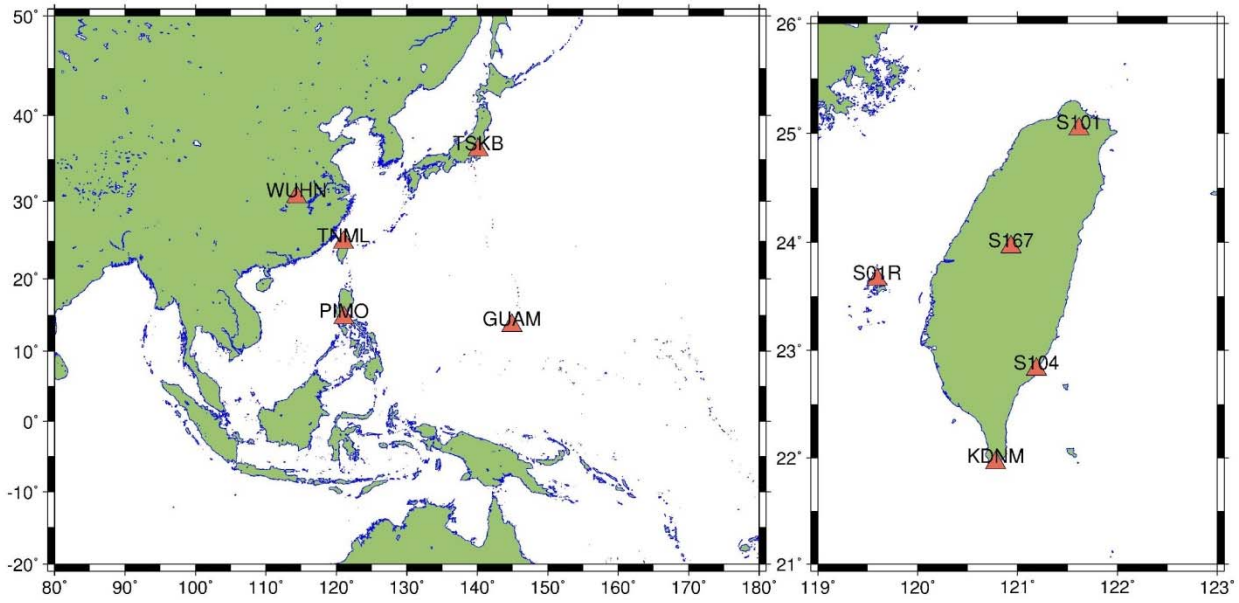


圖 2-1.1：本計畫約制之國際連續站與國內連續站分布圖。

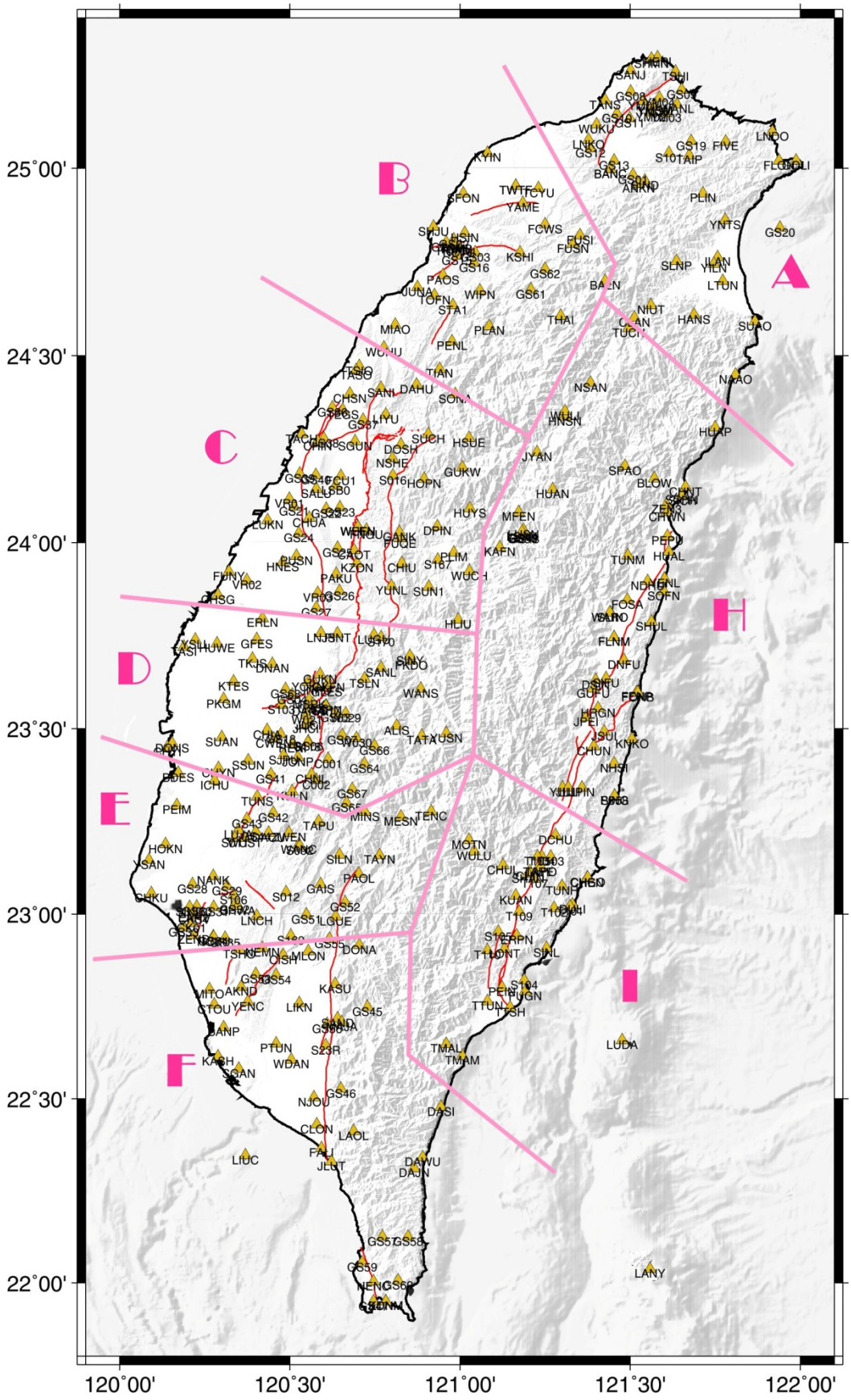
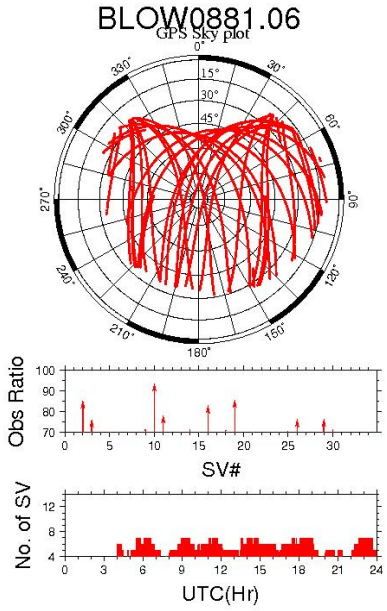


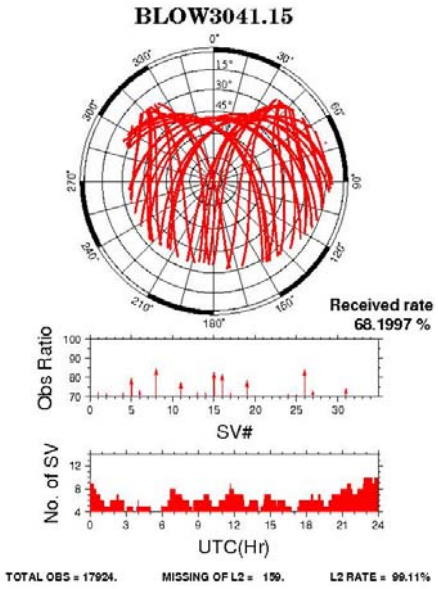
圖 2-1.2：地調所連續站和與其它單位所交換之連續站分布圖，共 334 站。圖中的各分網乃先行分別計算後再合併所有網進行網型平差，最後取得每站在一致之框架下之時間序列。

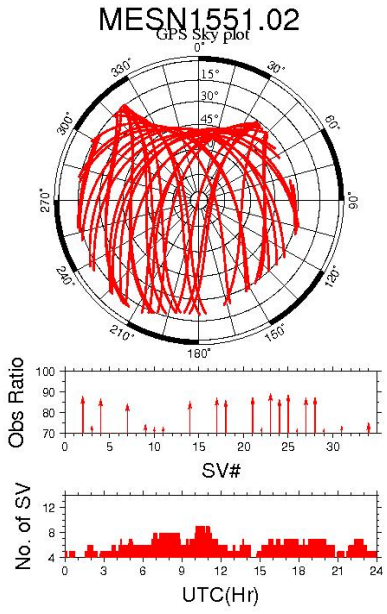
2-1-2 GPS 資料品質檢測

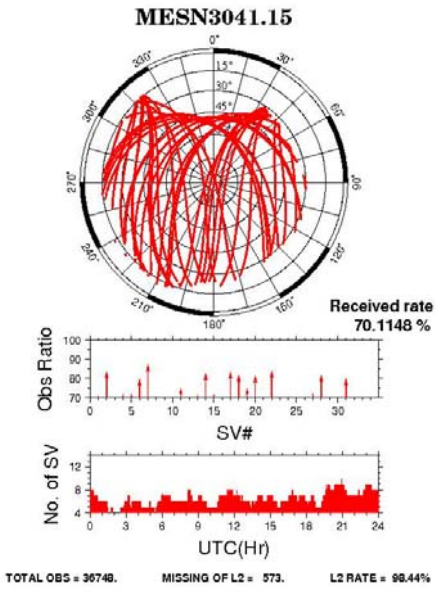
本報告統計自 2015 年 1 月至 2015 年 10 月的連續 GPS 資料月報，利用點位透空圖分析資料接收品質，統計出總體資料接收度低於 80%的測站，結果如表 2-1.1。由 2015 年 10 月 31 日的點位透空圖可見得 BLOW 西方及南方、MESN 東方、FKDO 西南方以及 GUKW 南方均有建築物的遮罩。而 FKDO 東方則有疑似因植被遮罩而產生的資料接收不連續，相比於設站初期，可明顯看出衛星軌跡的不連續。HUAN 則相比於設站初期有資料接收不完全的問題。圖 2-1.3 為所有交換測站資料接收度分布圖，明顯看出大部份接收度較低的測站都位於靠近中央山脈區域，建議應定期清除測站周圍環境，以避免測站遮蔽過度嚴重導致資料品質隨時間變差。

表 2-1.1：測站資料接收度低於 80%一覽表。

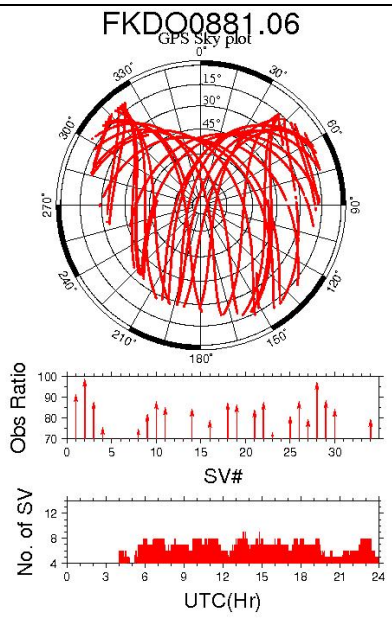
<table>
<tr>
<td>

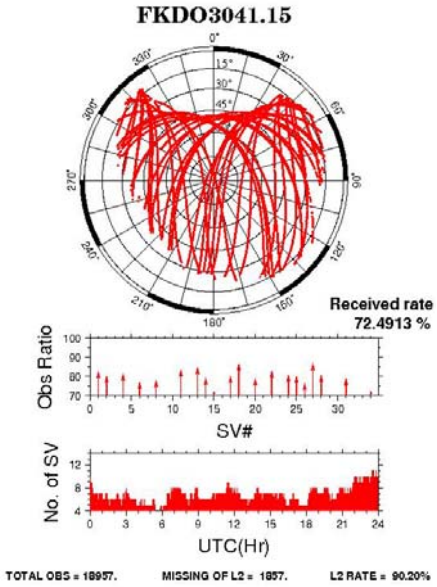
(中央氣象局)
2006 設站初期</td>
<td>

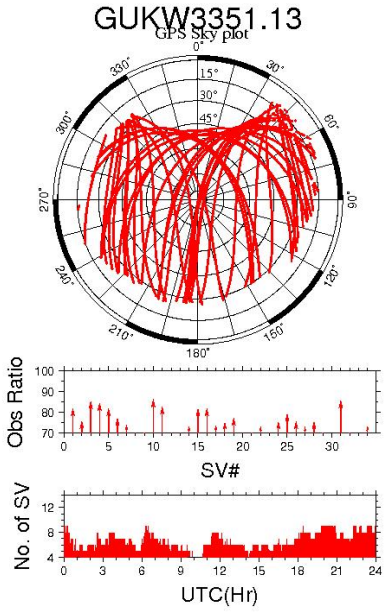
(中央氣象局)
70.35 %</td>
</tr>
<tr>
<td>

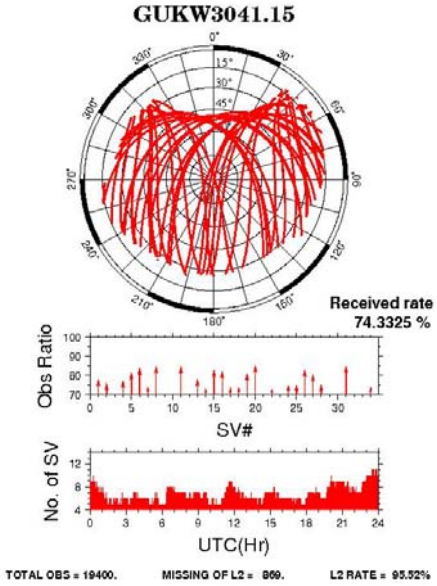
(中央研究院)
2002 設站初期</td>
<td>

(中央研究院)
73.69 %</td>
</tr>
</table>

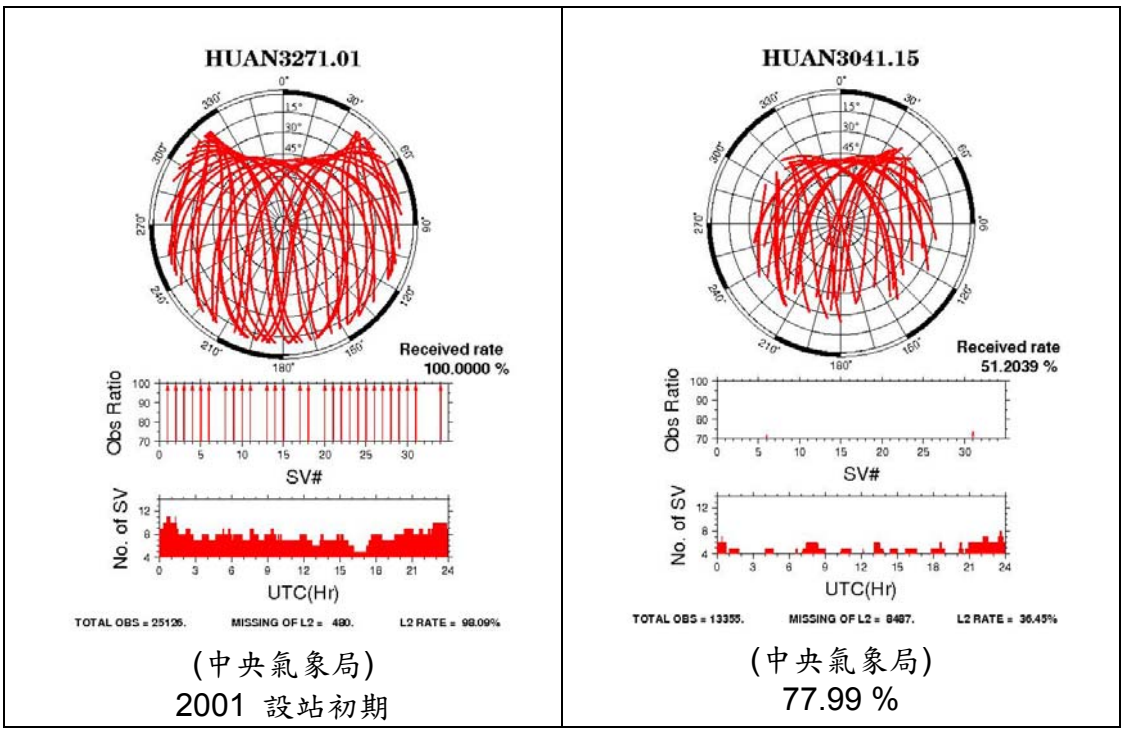
<table>
<tr>
<td>

(中央氣象局)
2006 資料初期</td>
<td>

(中央氣象局)
75.10 %</td>
</tr>
<tr>
<td>

(中央氣象局)
2013 設站初期</td>
<td>

(中央氣象局)
76.63 %</td>
</tr>
</table>



(中央氣象局)
2001 設站初期

(中央氣象局)
77.99 %

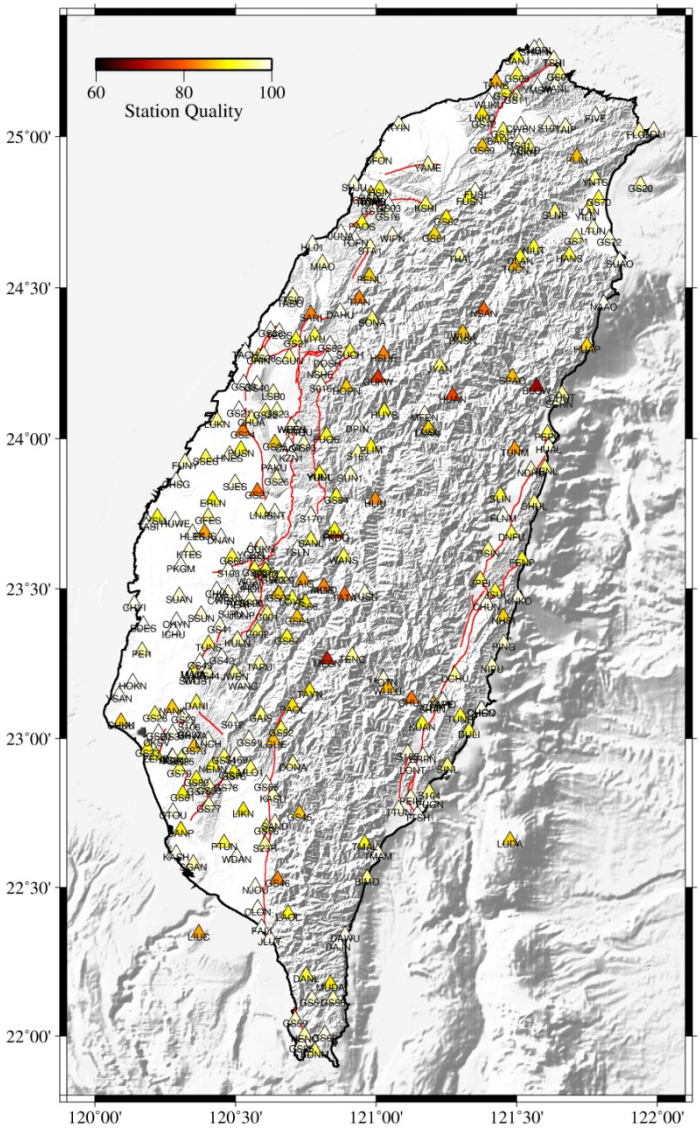


圖 2-1.3：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。

2-1-3 GPS 連續站時間序列分析

本次期末報告主要接續去年報告，持續分析 2015 年 1 月至 2015 年 10 月的資料，並結合各測站從設站以來長時間資料解算的結果，就測站移動速度場或地震跳階影響加以探討。

圖 2-1.4 為彙整歷史資料至 2015 年 10 月年速度場之結果。由解算結果顯示水平速度場相對澎湖白沙，中南部測站多為東南往西北移動，臺南以南地區多呈現東北往西南移動；另外北部地區則是由南往北移動，在宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為；垂直速度場方向上則以西部地區為主要下陷區域，中央山脈則呈現以抬升為主的變形行為，此結果與過去長期解算結果約略相同。

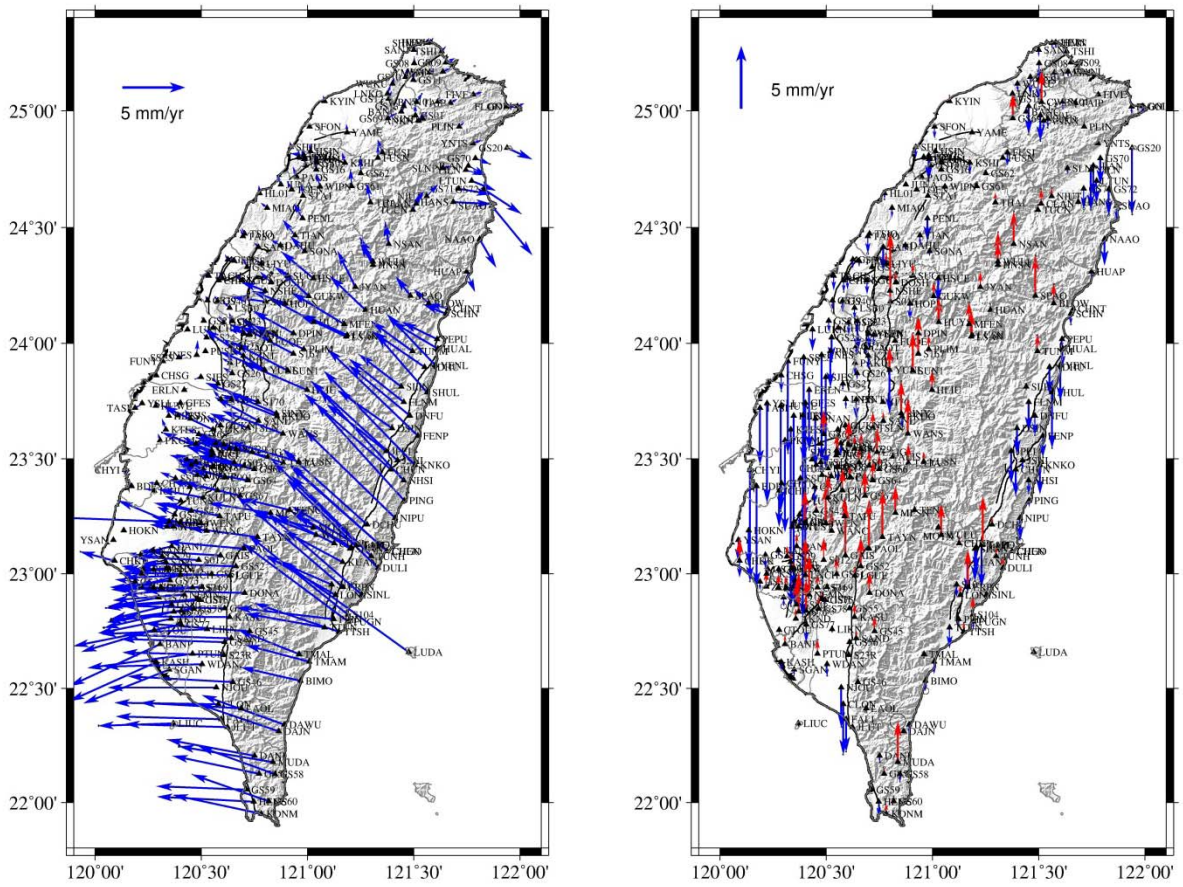


圖 2-1.4：整合歷史資料至 2015 年 10 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

圖 2-1.5 為扣除累積歷史資料至 2014 年底速度場之殘差。結果顯示，水平方向上造成與去年資料差異較大的測站為東部的 NIPU、BIMO、MUDA 以及西部的 GS78、GS79、GS80 測站。主要原因為測站時間架設時間為 2013 年底到 2014 年初，測量時間過短，因此計算出來的時間序列還不穩定。另外西部的 NANK 測站則是在 2014 年初有一明顯跳動，導致其水平及高程方向對比於去年資料都有明顯差異（圖 2-1.6）。在垂直方向上，除上述提到因測站架設時間較短造成較大差異的測站之外，西部的 ERLN、GS68 及北部的 CWBN 均因垂直方向上在 2013 至 2014 年有較大跳動造成兩年計算速度場有較大的差異。而 FKDO 則可能因為周圍植被過於茂密，該測站從 2011 年後資料品質就下降，導致解算成果擁有相對大的跳動為可能的原因。所有測站詳細的時間序列請參照附錄。

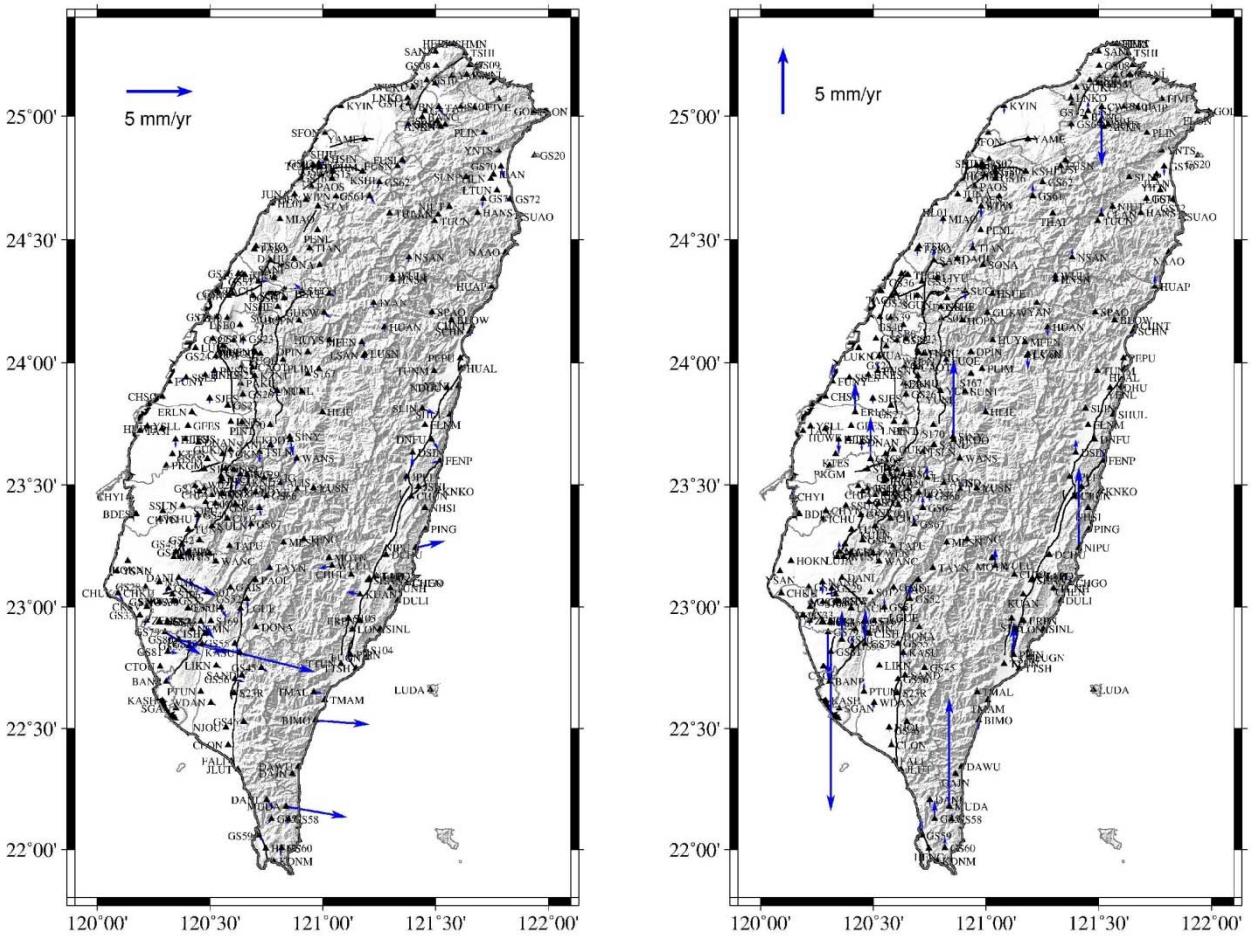


圖 2-1.5：今年觀測資料（歷史資料至 2015 年 10 月）扣除去年觀測資料（歷史資料至 2014 年 12 月），並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場差，右圖為垂直方向速度場差。

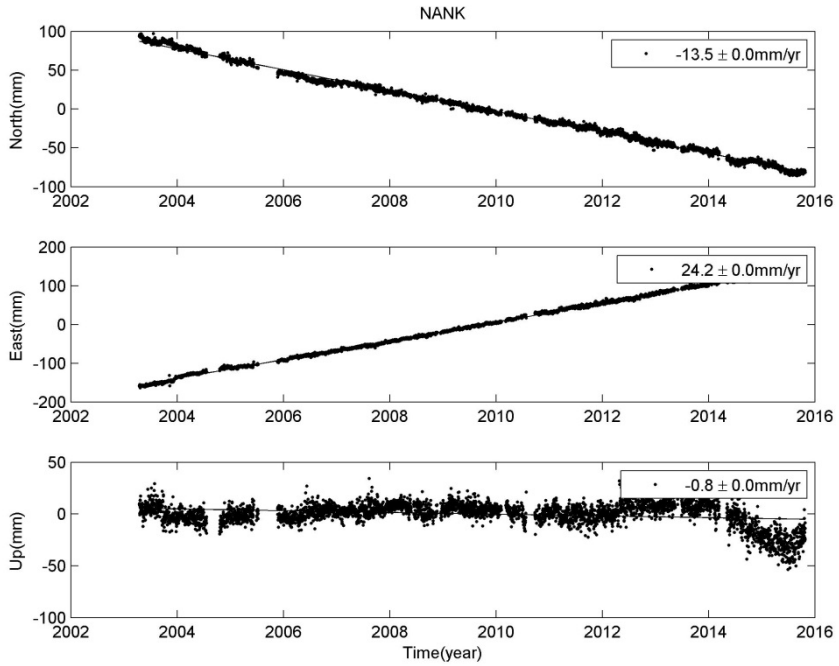


圖 2-1.6：測站 NANK 累積歷史資料至 2015 年 10 月時間序列。2014 年後有一明顯跳動為造成前後兩年速度場差異大的可能原因。

2-2 2015 GPS 測量資料檢核

在 GPS 資料處理方面，本計畫主要以移動站之觀測資料為主，再配合部分連續站的觀測資料，進行臺灣地區斷層活動之監測。本研究 GPS 觀測資料之解算與網形平差，是採用 Bernese 5.0（Dach et al., 2007）解算軟體進行。

2-2-1 GPS 座標計算穩定度分析

在資料計算方面，由於存在許多因素而導致計算結果不穩定，並在座標時間序列上呈現離散的現象，因此我們藉由統計的方式來查核資料計算的穩定性。在本計畫中，我們採用座標殘差及均方根誤差分析兩種方式來檢視資料計算的穩定性。座標殘差分析是將各站每次測量所獲得之座標觀測值與擬合曲線上之座標計算值相減，將所獲得之座標殘差值（residual）進行統計。在理想狀況下，如果資料之計算成果是穩定的，此殘差值會等於零；另一方面，均方根誤差分析為針對各測站每次解算時所產生的均方根誤差量（RMS error）進行統計。

2-2-2 座標殘差分析

由圖 2-2.1 可知 2002-2014 年及 2015 年 GPS 觀測資料之座標殘差分布情形。2002-2014 年資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為-0.3 ± 3.8 mm（2 倍標準差）、E 方向為-0.4 ± 4.9 mm 及 H 方向為-0.4 ± 13.8 mm。在 2015 年的資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為-0.3 ± 2.8 mm、E 方向為-0.2 ± 3.6 mm 及 H 方向為-0.7 ± 13.3 mm。

2-2-3 均方根誤差分析

均方根誤差分析為針對測站每次解算時，所產生的均方根誤差量（RMS error）做其統計。本計畫採用水平及垂直兩分量來分析。由統計結果（圖 2-2.2）可看出 2002-2014 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.4 mm，在垂直方向的平均值為 23.5 mm，及 2015 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.1 mm，垂直方向的平均值為 20.6 mm。

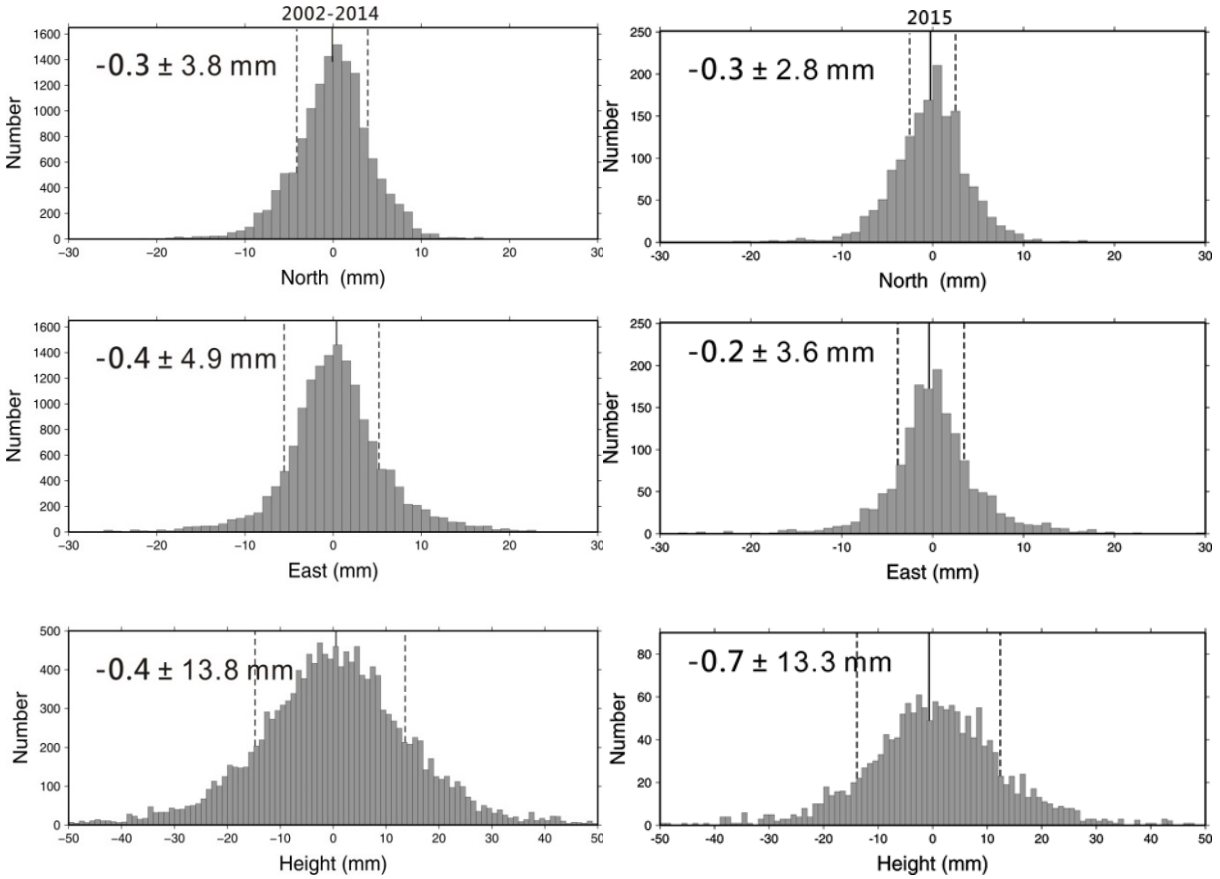


圖 2-2.1：2002-2014 年及 2015 年 GPS 點位座標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95%信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

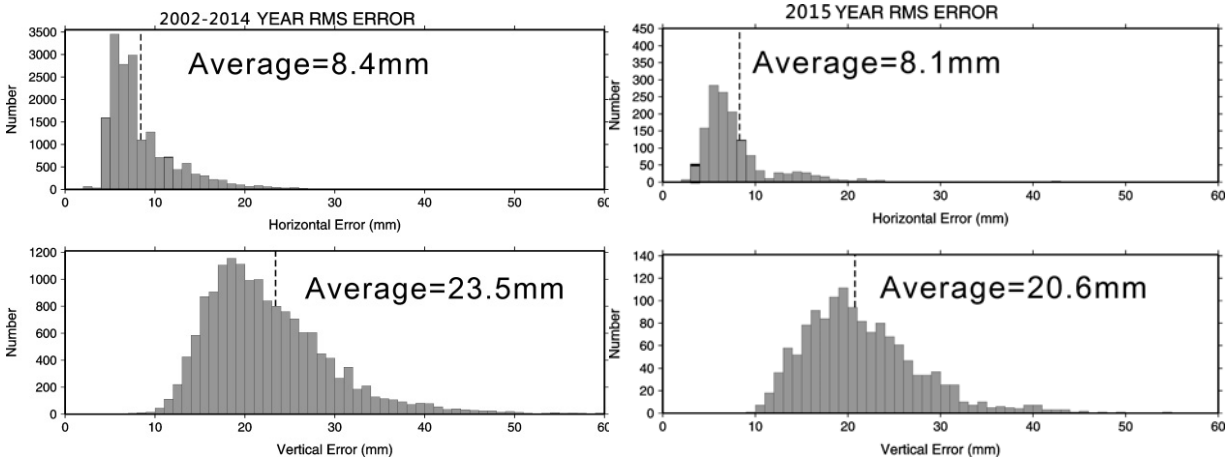


圖 2-2.2：2002-2014 年及 2015 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

2-2-4 臺北地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之臺北地區觀測資料進行分析，臺北地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.3 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2015 年之速度場，速度量值 0.2 ~ 6.7 mm/yr，其中 GF94、TC29~TC31 以及 GG39~GG57 等點位因僅有 4 次觀測（2012~2015 年），其解算誤差較大且速度場分布亦與該地區整體趨勢有較大差異，此外由 GPS 解算結果及精密水準測量分析結果發現 GA83 及 B229 兩點與該地區速度場分布有所差異。

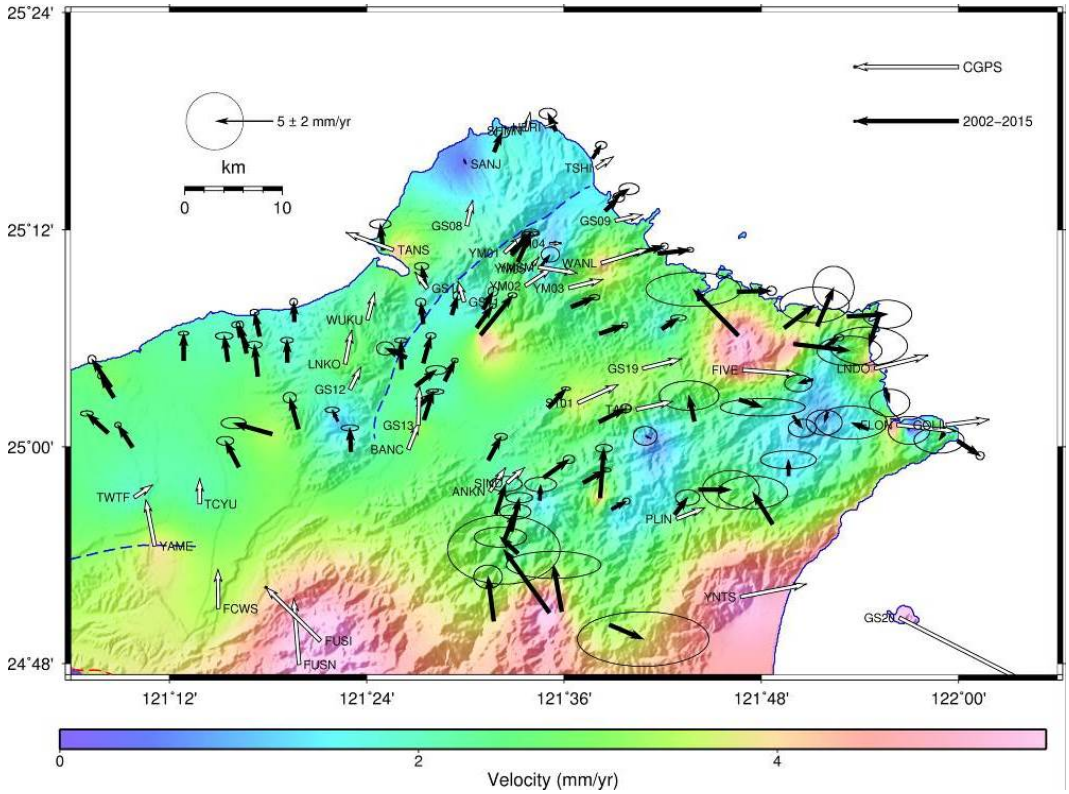


圖 2-2.3：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2015 年資料所解算之速度場分布色階圖。

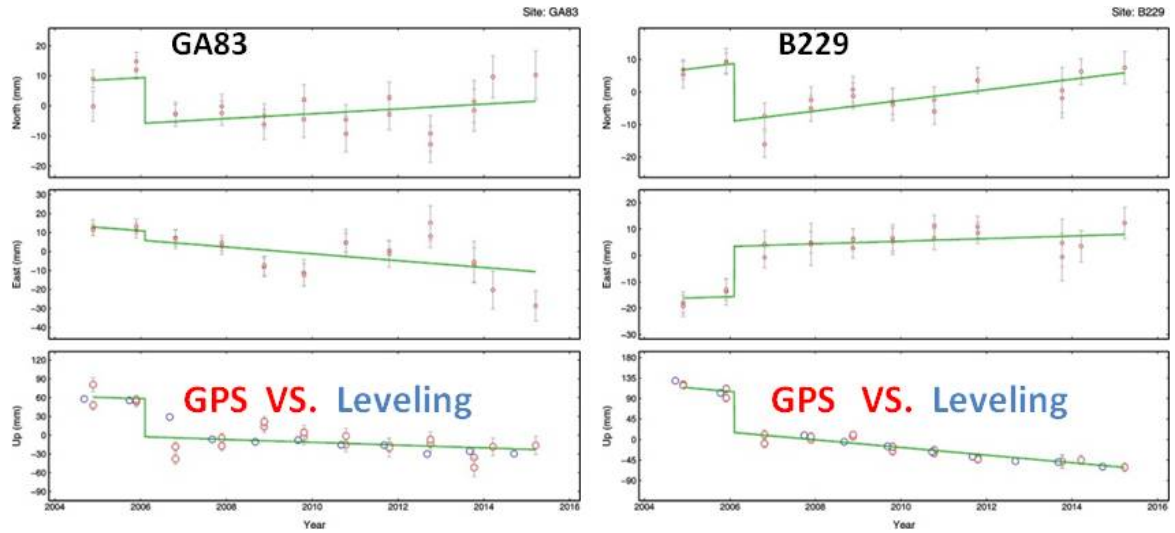


圖 2-2.4：臺北地區 GPS 移動測站 GA83 及 B229 相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。

GA83（圖 2-2.5）位於台 107 甲及台 108 甲高架聯絡道路下方交界處，為水準及 GPS 共點監測點位，高架工程開工時間約在 2006 年，完工通車日為 2009 年 1 月 12 日，該點位通車後在東西向持續朝西，南北向先朝南後朝北位移，事件時間給定於 2006 年 1 月，其餘時間變形量尚查無特殊事件，其解算速度場與該地區東北走向不符，推測可能原因為該高架工程載重及五股溼地地質之影響。



圖 2-2.5：臺北地區 GPS 移動站 GA83 周圍環境圖。

GPS 點位 B229（圖 2-2.6）位於台 2 乙貴子溪橋中央分隔島，為水準及 GPS 共點監測點位，解算該點 GPS 及精密水準資料均可發現，於 2006 年發生明顯位移，推測為道路施工所致，事件時間給定於 2006 年 1 月，消除該因素後速度呈東北走向，與該地區速度場分布相符，建議持續觀測。



圖 2-2.6：臺北地區 GPS 移動站 B229 周圍環境圖。

藉由高時間解析之 GPS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GPS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里

為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之座標時間序列。本計畫首先挑選最近的移動站與連續站進行比較。臺北地區（圖 2-2.7）可比對座標時間序列之組合為 GOLI-GG44、PLIN-GF13、GS10-GA69、GS13-GA97、YM01-2101 及 YMSM-GB05 六組，由座標時間序列比對可知，移動站與連續站座標時間序列型態皆相符（圖 2-2.8）。

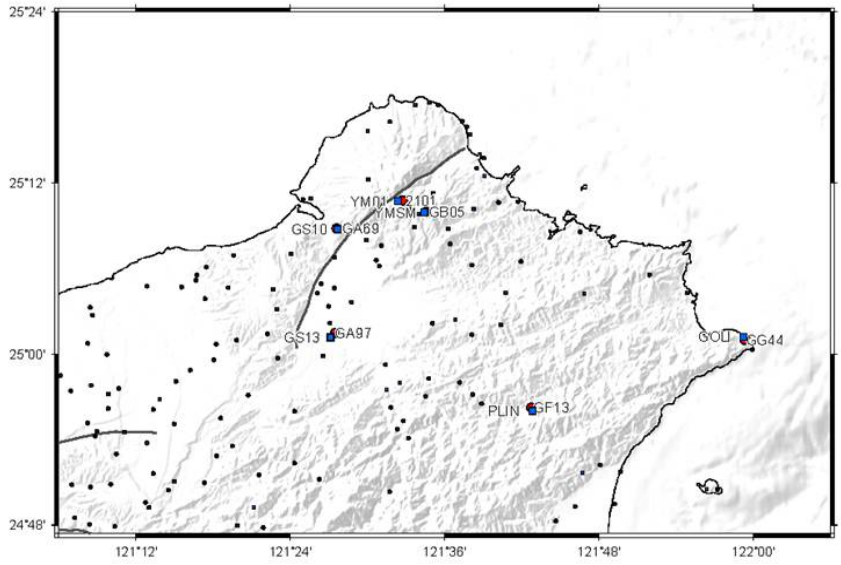


圖 2-2.7：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

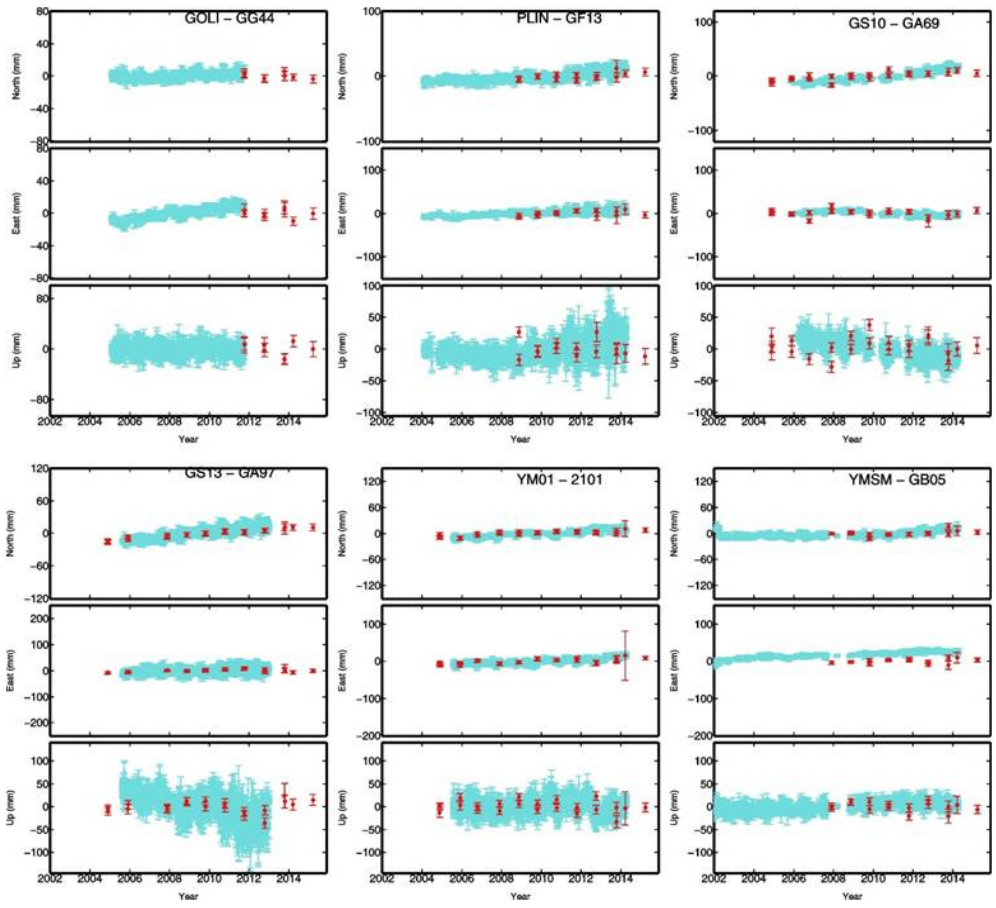


圖 2-2.8：2002-2015 年臺北地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-5 恆春地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之恆春地區觀測資料進行分析，由於 2006 年 12 月 26 日發生屏東外海地震對恆春地區之 GPS 速度場造成影響，觀察本區各站之時間序列可得地震前後之速度場略有不同，由於本區在地震後已有 8 次 GPS 觀測資料，且透過 2002 至 2014 年精密水準測線共 10 次觀測記錄以及兩個 GPS 連續站（KDNM、HENC）所求得的座標時間序列可以發現，此區域速度場在 2006 年屏東西南外海 M_L 7.0 地震前後有明顯的速率變化，在 2010 年之後又發生一次顯著之速率改變，故本章節將恆春地區 2002 至 2015 年速度場分為三個時間段討論（圖 2-2.10）。

恆春地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.9 所示，藍色箭頭表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，速度量值 45.5 ~ 58.6 mm/yr，紅色箭頭表示屏東外海地震後 2006~2010 年速度場，速度量值 44.2 ~ 59.6 mm/yr，黑色箭號表示 2010~2015 年之速度場，速度量值 42.3 ~ 54.7 mm/yr。

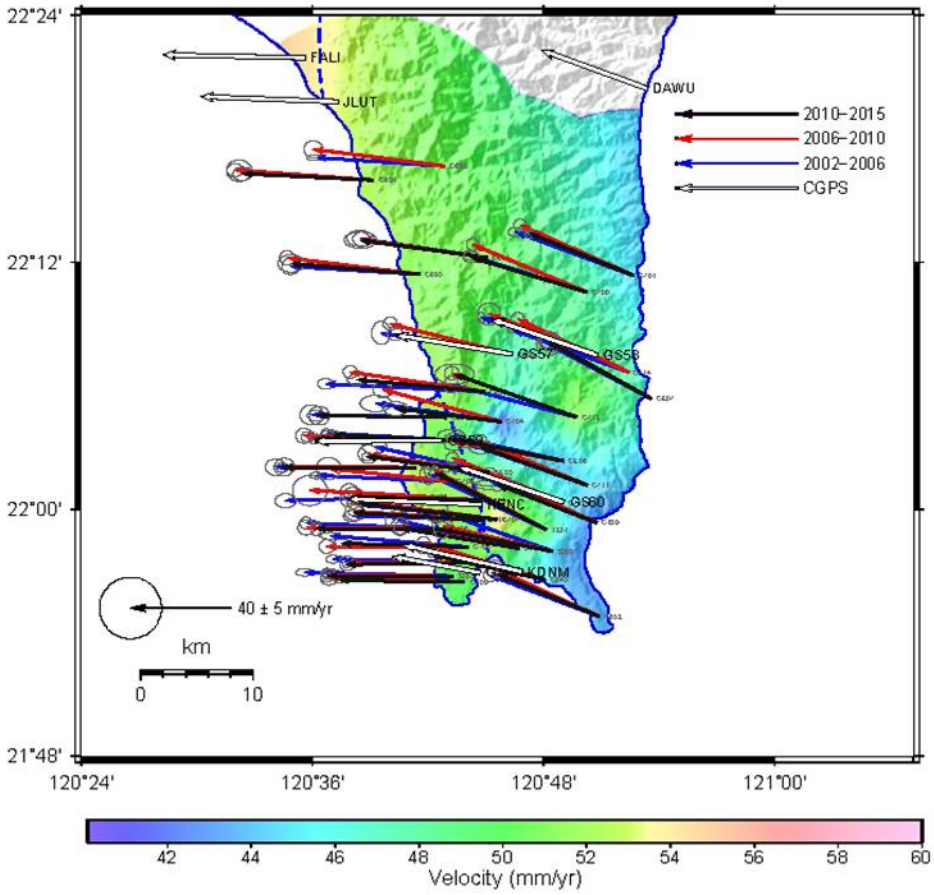


圖 2-2.9：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，藍色箭頭表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，紅色箭頭表示震後 2006~2010 年速度場，黑色箭頭表示震後 2010~2015 年速度場，彩色色階為 2010~2015 年資料所解算之速度場分布色階圖。

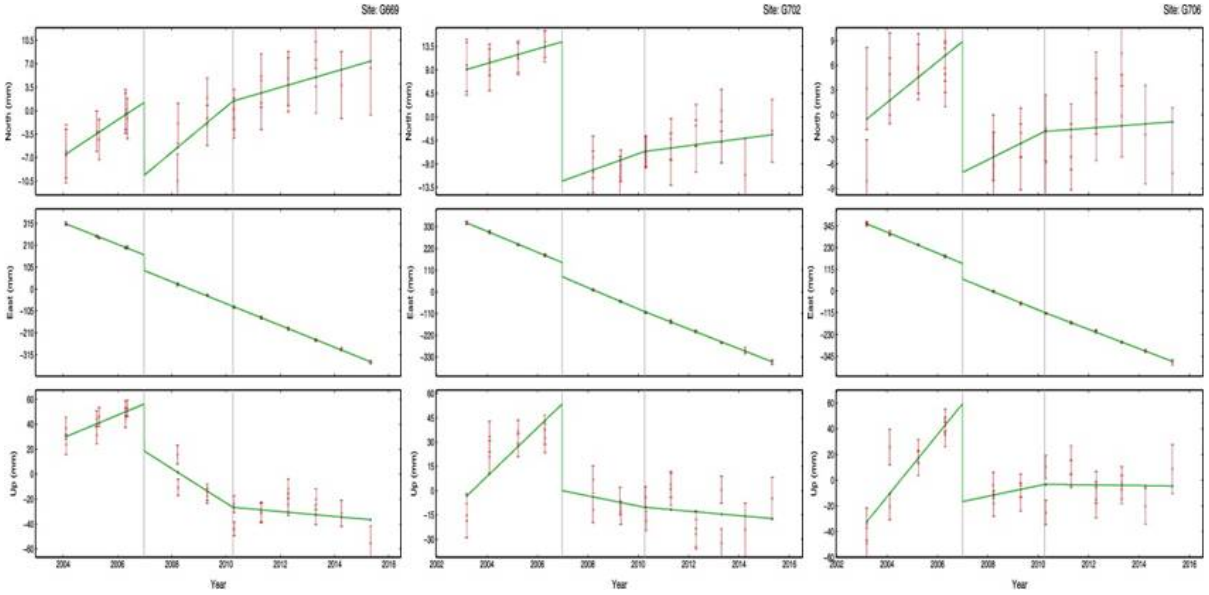


圖 2-2.10：2002~2015 年恆春地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之座標時間序列圖。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。恆春地區（圖 2-2.11）可比對座標時間序列之組合為 GS57-G699、GS59-G702、GS60-G710、GS47-GE05、HENC-G669 五組，由座標時間序列比對可知，GS47（台電南展館）、GE05（阿利海產）在水平及高程方向速度皆有顯著差異（圖 2-2.12），經現地勘查後（圖 2-2.13），得知 GE05 周圍環境穩固且無透空不良等情形，而 GS47 現地為填土地基，並曾發生數次半徑約 2~3 公尺之小規模之崩塌，此塌陷之原因並不明確，可能和地下石灰岩體溶蝕有關。另一組 HENC 站（恆春氣象站）及 G669 站（恆春國小）同位於斷層西側下盤，由資料解算結果可知移動站解算結果（圖 2-2.12）在水平方向速度場符合連續站趨勢，然而在高程方向可發現 2006 年底恆春地震之後移動站座標時間序列與 HENC 連續站型態分布不同，震前高程速度值亦有所差異。由於兩站同位於鏨丁混同層，而移動站 G669 站較靠近東邊地形抬升處（圖 2-2.14 及圖 2-2.15），推測造成高程方向時間序列的差異可能是由於此二測站皆位於斷層帶上，又由於垂直分量之變化對於傾向滑移斷層之活動相當敏感，因此短距離之差異就有可能產生不同之高程變化。其餘各組移動站與連續站座標時間序列型態相符（圖 2-2.12）。

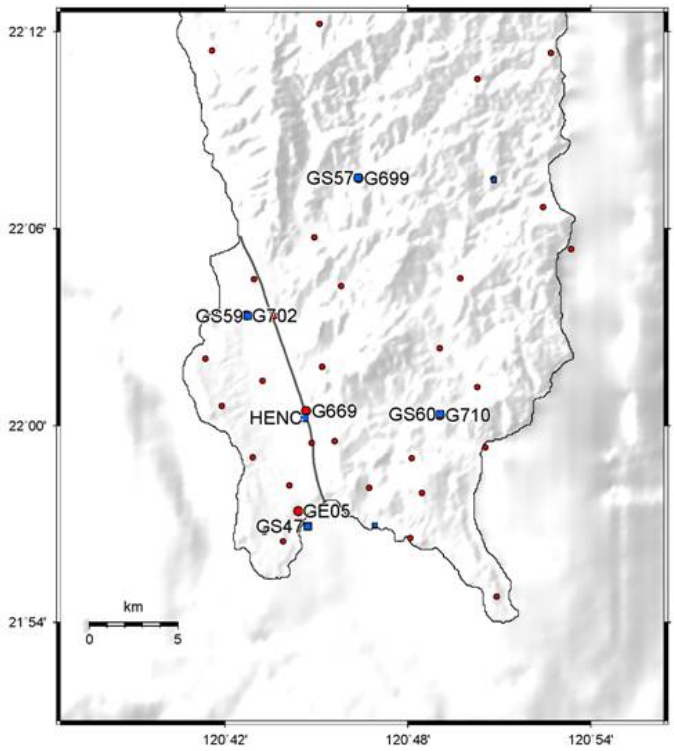


圖 2-2.11：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

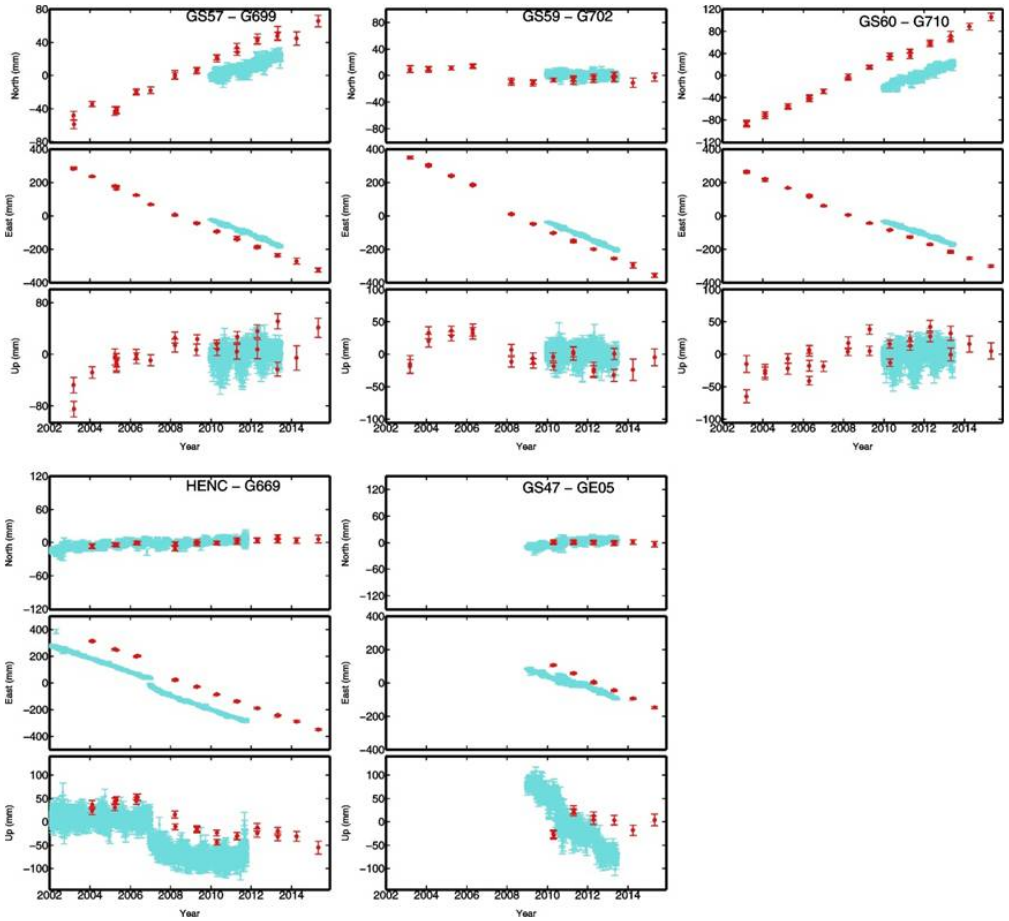


圖 2-2.12：2002~2015 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。



圖 2-2.13：恆春地區 GPS 連續站 GS47 周圍環境圖。



圖 2-2.14：恆春地區 GPS 移動站 G669 及連續站 HENC 周圍環境全景圖。



圖 2-2.15：精密水準測點 Q052 現場圖。

2-2-6 桃竹苗地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之桃竹地區觀測資料進行分析，桃竹地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.16 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2015 年之速度場，速度量值 1.2 ~ 10.9 mm/yr，其中 GE24（關西國中）、T007（園區內）及 G416（五峰國小）之原速度場與該地區趨勢不符合，G416 由座標時間序列可知座標位移呈連續變化（圖 2-2.17），顯示該點位以穩定速度朝東北方向移動，經現地勘查得知測點位於山坡，操場及邊坡樓梯均有明顯崩塌裂縫，且坡面朝西偏北與解算成果速度場向量相符，由此證明觀測速度場主要反映地滑位移，建議減少觀測頻率（圖 2-2.18）。GE24 經現場勘查，得知操場於 2010 年 10 月進行翻修，點位經施工單位重新埋設（圖 2-2.19），2010 年前後座標時間序列的分布形態不同（圖 2-2.17），以 2011 年至 2015 年之速度場作為震間速度場，並建議持續觀測。T007 位於新竹科學園區公園內溜冰場旁，公園於 2007 年進行整修（圖 2-2.20），整修前後的座標時間序列分布型態相符（圖 2-2.17），推測為施工造成點位移動，建議持續觀測。

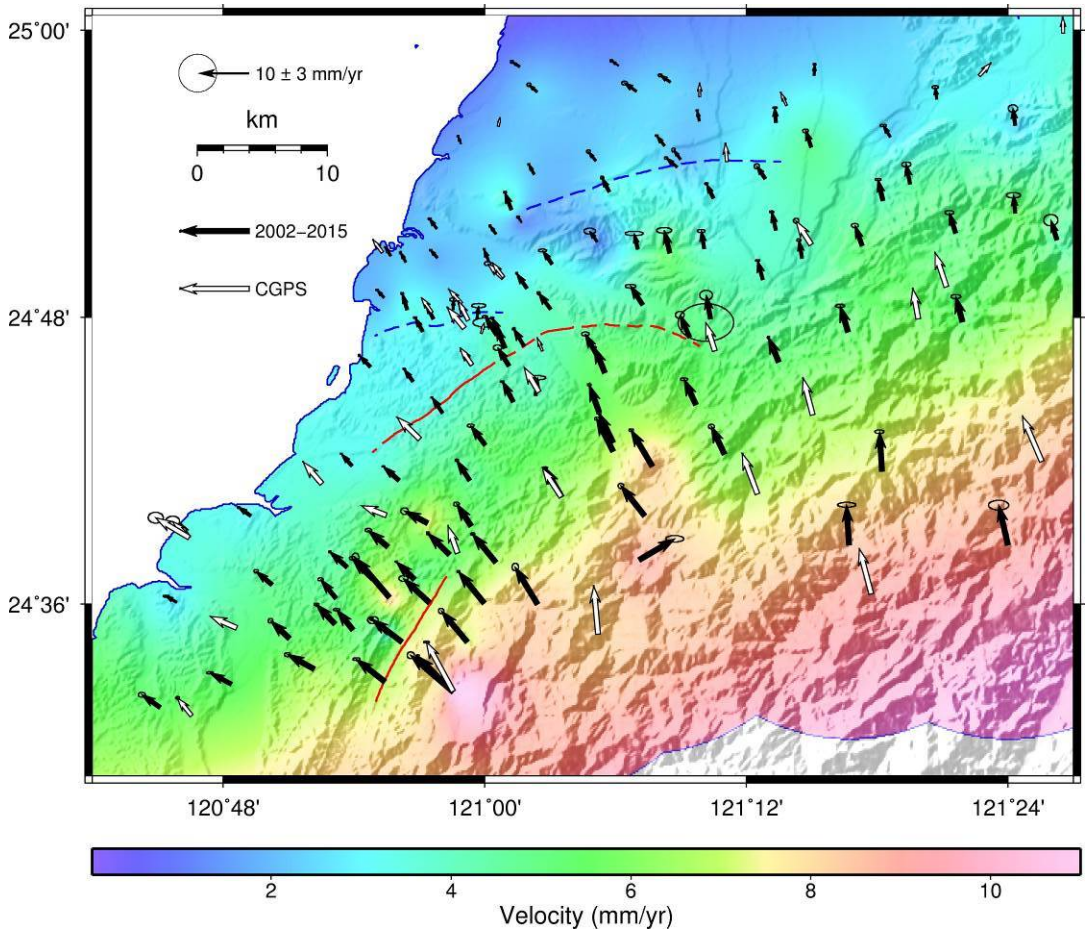


圖 2-2.16：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2015 年資料所解算之速度場分布色階圖。

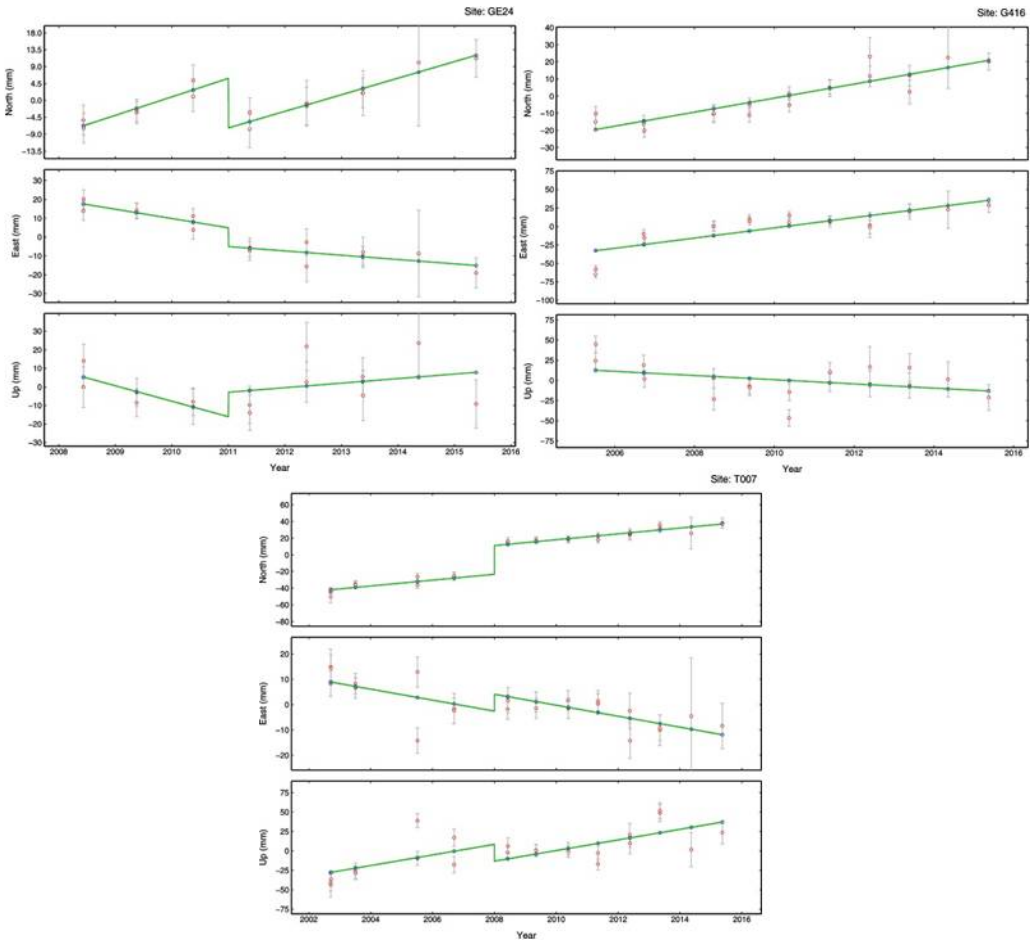


圖 2-2.17：2002~2015 年桃竹地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。



圖 2-2.18：G416（五峰國小）移動測站現場照片。



圖 2-2.19：GE24（關西國中）移動測站現場照片。



圖 2-2.20：T007（園區內）移動測站現場照片。

2-2-7 嘉南地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之嘉南地區觀測資料進行分析，各觀測點位之速度值如圖 2-2.21 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2004 年至 2015 年之速度場，速度量值 0.4 ~ 37.1 mm/yr，其中 GB13 位於阿里山青年活動中心，於 2009 年可見由莫拉克颱風造成的瞬間永久位移，經過速度修正後該點位速度仍然與該地區速度分布不符，顯示該點速度主要反應該地地滑現象（圖 2-2.22）。

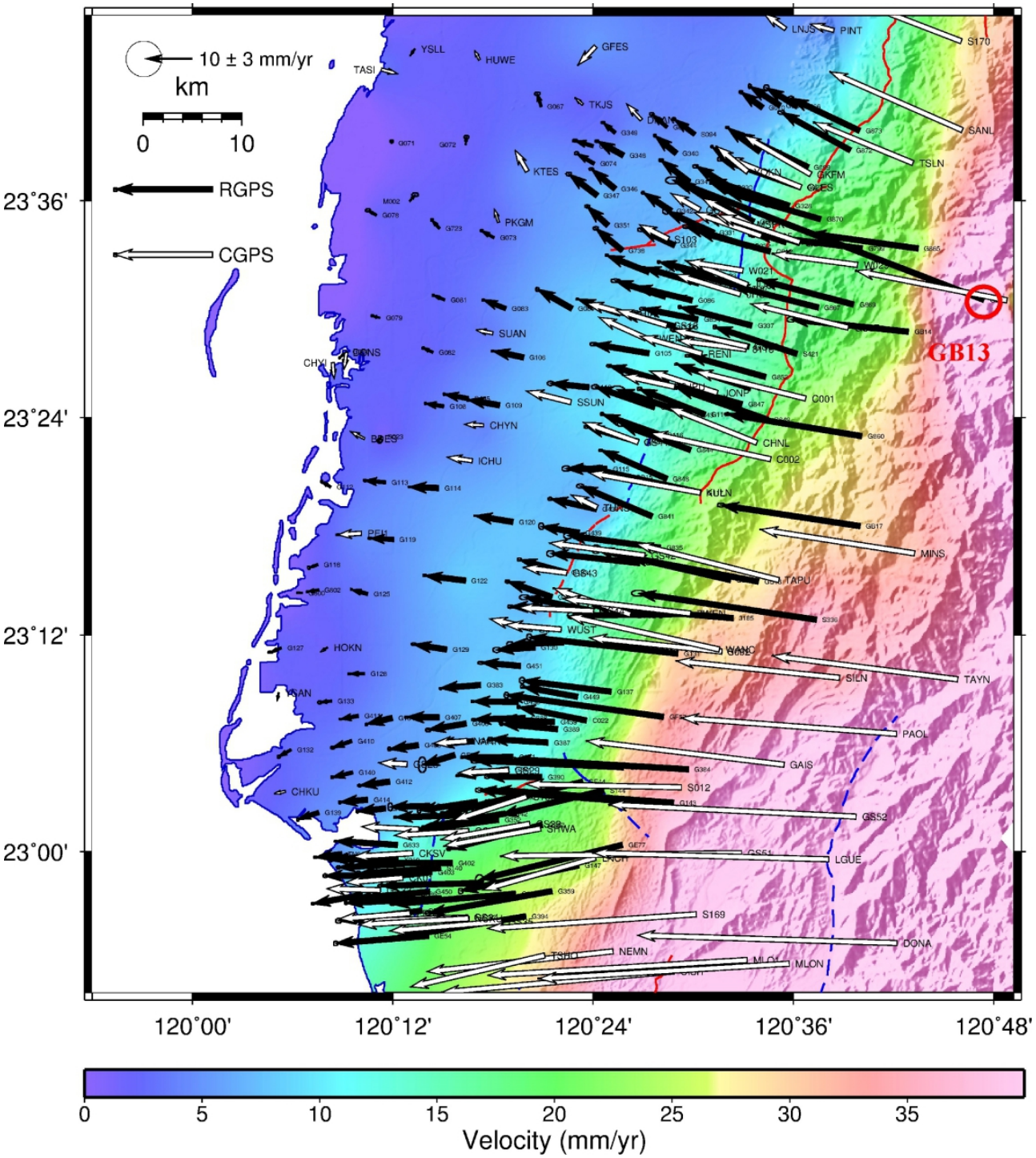


圖 2-2.21：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2004~ 2015），白色箭頭表示該區連續站 2002~2015 年速度場解算結果。

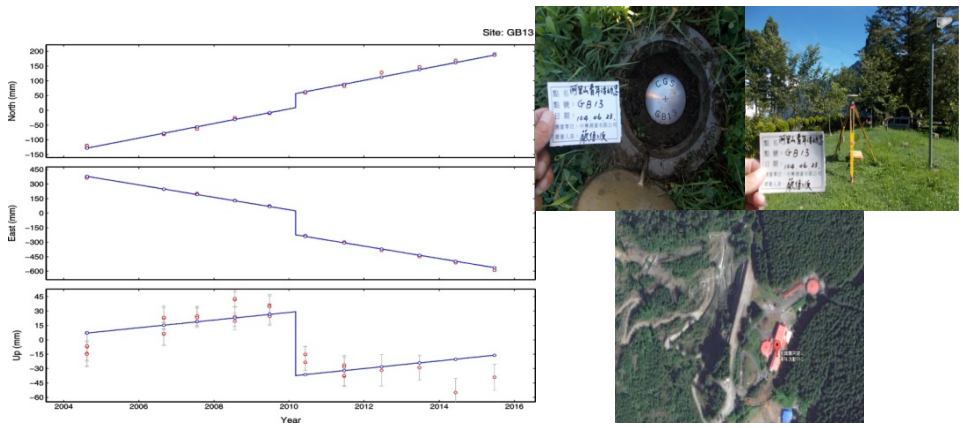


圖 2-2.22：GPS 移動測站 GB13 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。嘉南地區（圖 2-2.23）可比對座標時間序列之組合為 GS29-G884、GS34-G398、GS41-G846、GS42-G124、GS43-G123、GS44-G447、KULN-G117、NANK-G405、NCKU-G398、SHWA-G842、SJPU-T005、TUNS-G430、ZWEN-G888、8118-G107、CHIA-G338、GS06-G107、GS17-G776、GS18-G336、JHCI-G087、S103-G344 等二十組，由座標時間序列比對可知（圖 2-2.24、圖 2-2.25），移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

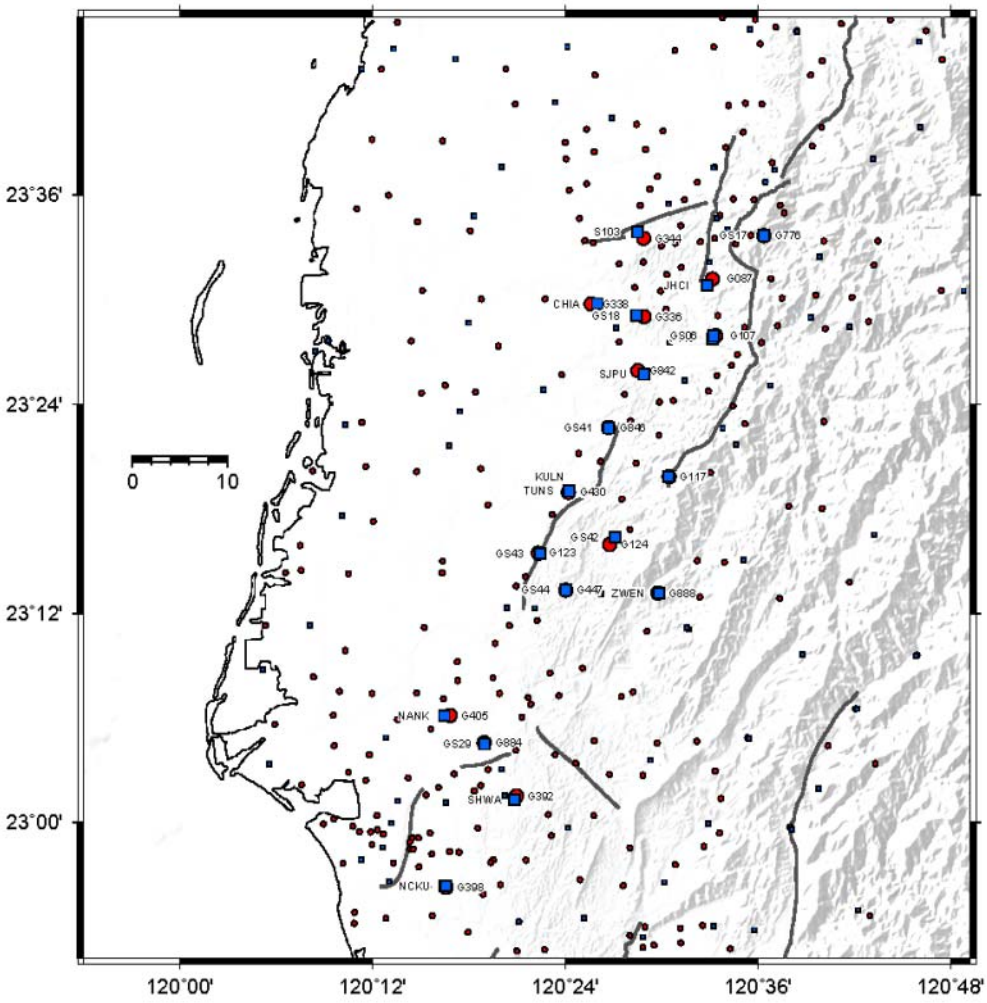


圖 2-2.23：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

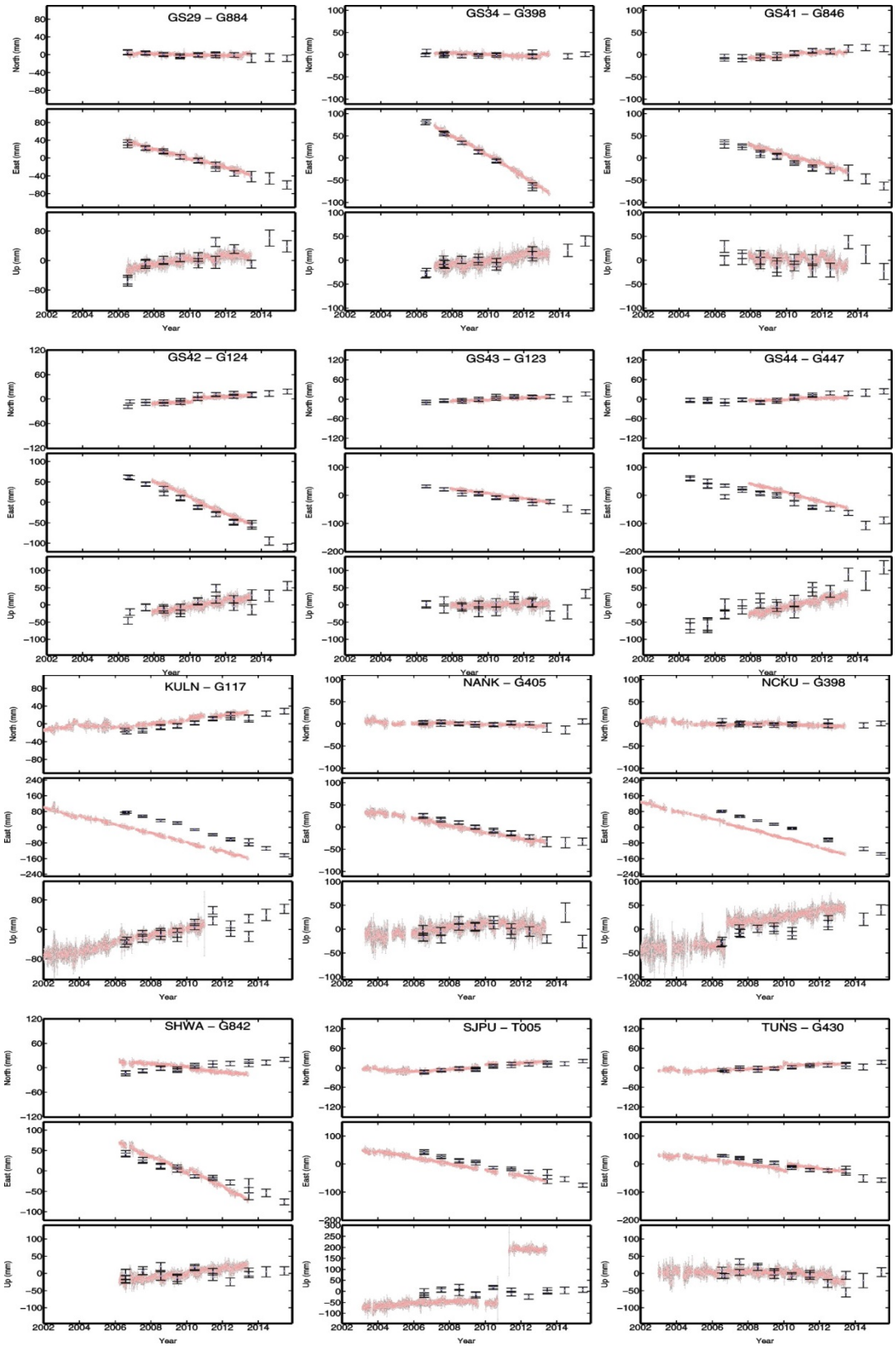


圖 2-2.24：2002~2015 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

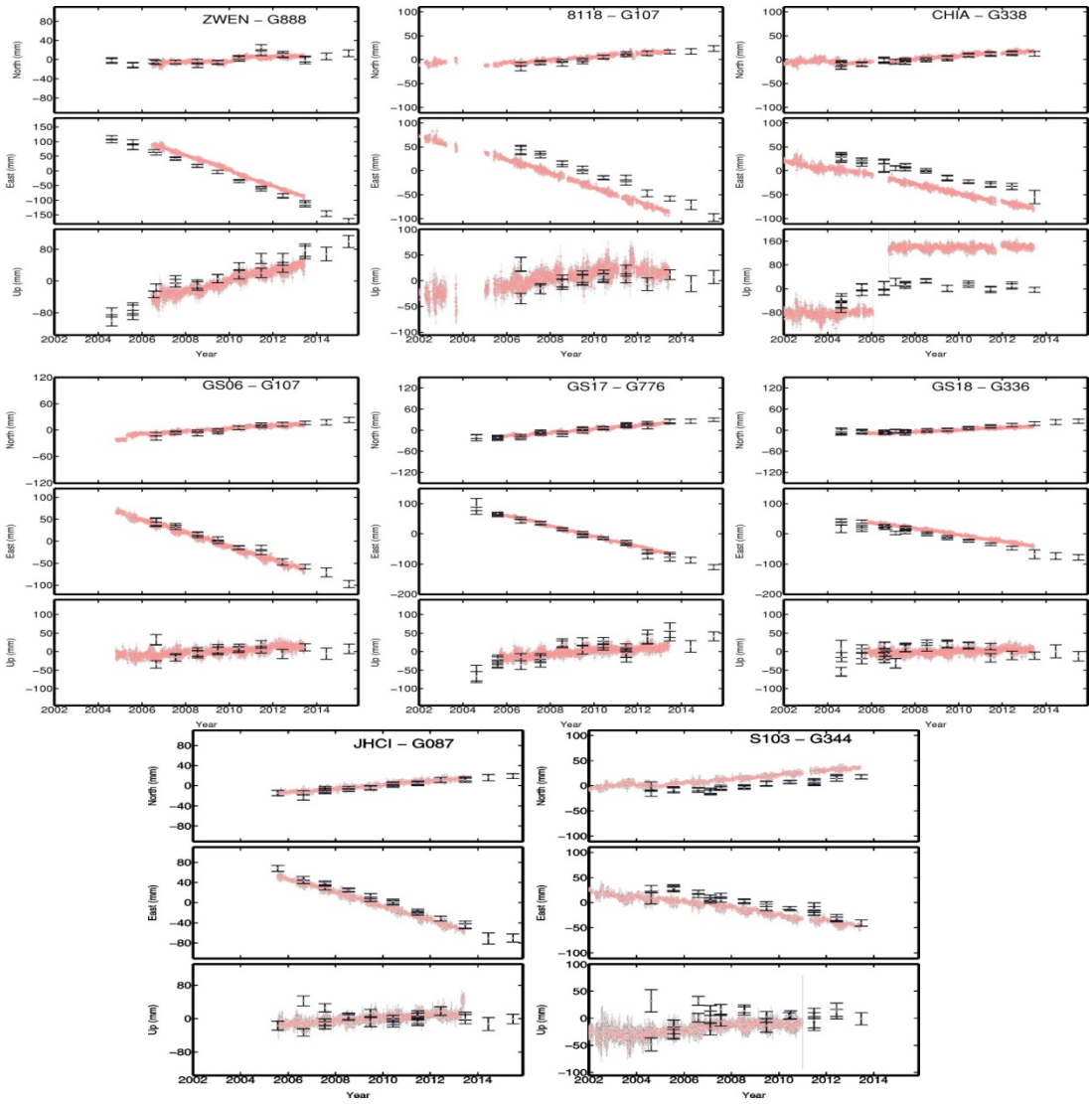


圖 2-2.25：2002~2015 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-8 高屏地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之高屏地區觀測資料進行分析，各觀測點位之速度值如圖 2-2.26 示，黑色箭號表示 2002 年至 2015 年之速度場，速度量值 12.9 ~ 97.5 mm/yr，其中 G614 位於屏東縣泰武鄉舊部落泰武國小操場上，於 2009 年莫拉克颱風後遷村，經過速度修正後該點位速度仍然與該地區速度分布差異極大，顯示該點速度主要反應該地地滑現象（圖 2-2.27）；GC66 點位旁擋土牆，可見明顯裂縫，顯示該點速度主要反應該地地滑現象（圖 2-2.28）。

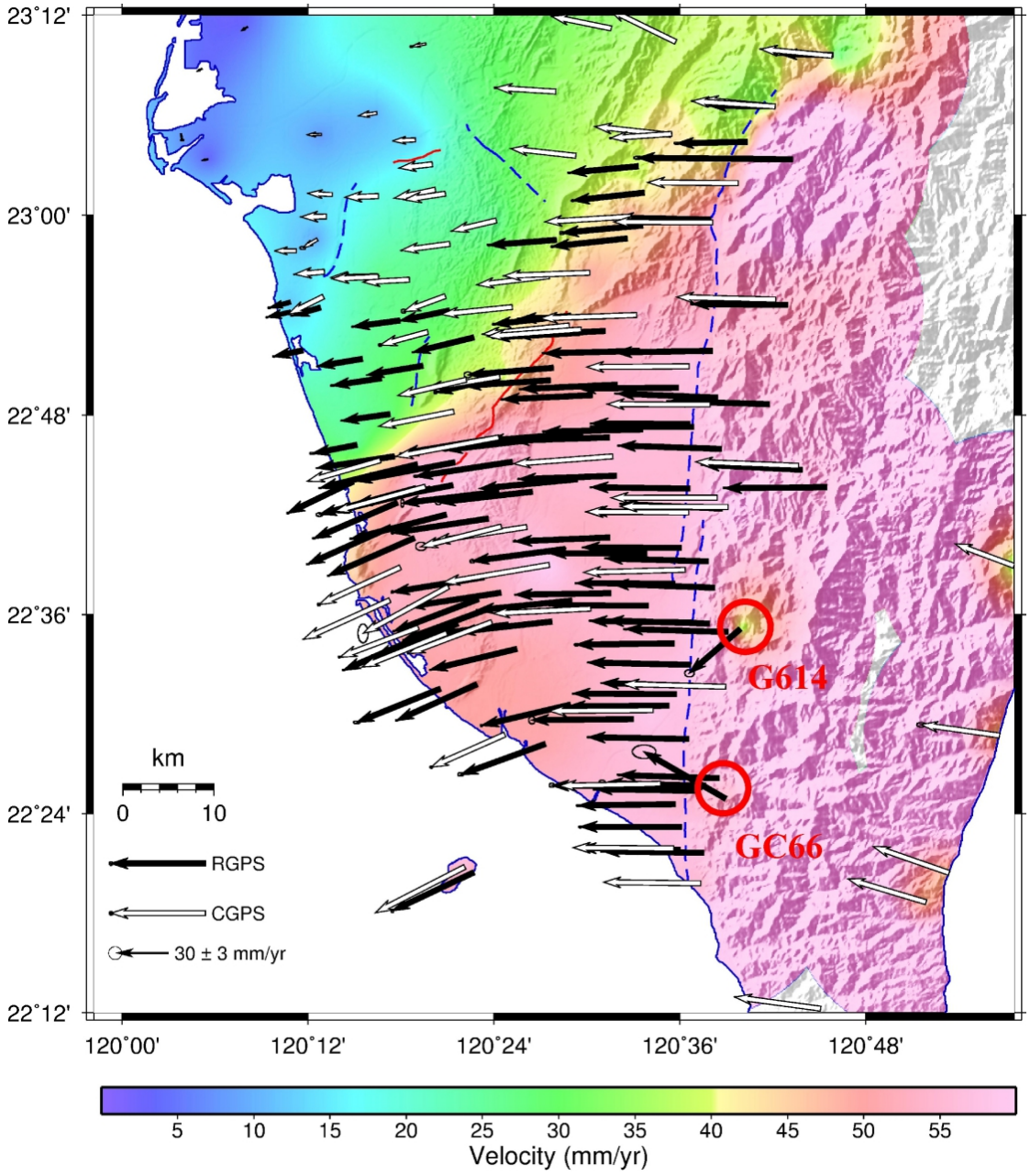


圖 2-2.26：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002~2015），白色箭頭表示該區連續站 2002~2015 年速度場解算結果。

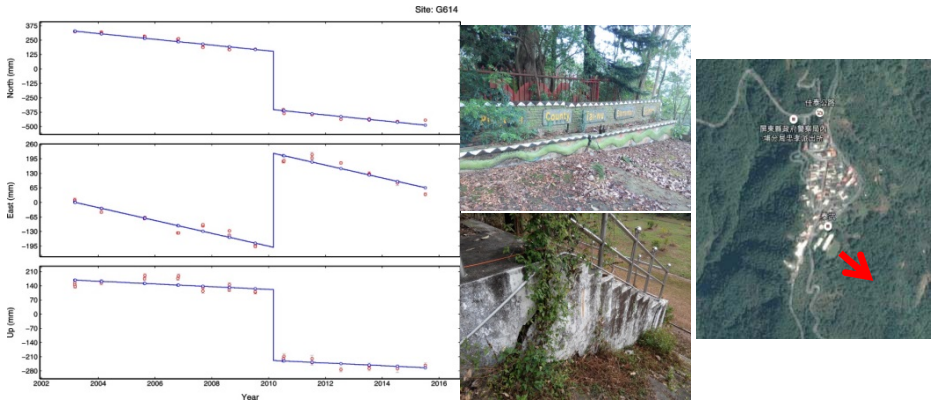


圖 2-2.27：GPS 移動測站 G614 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。

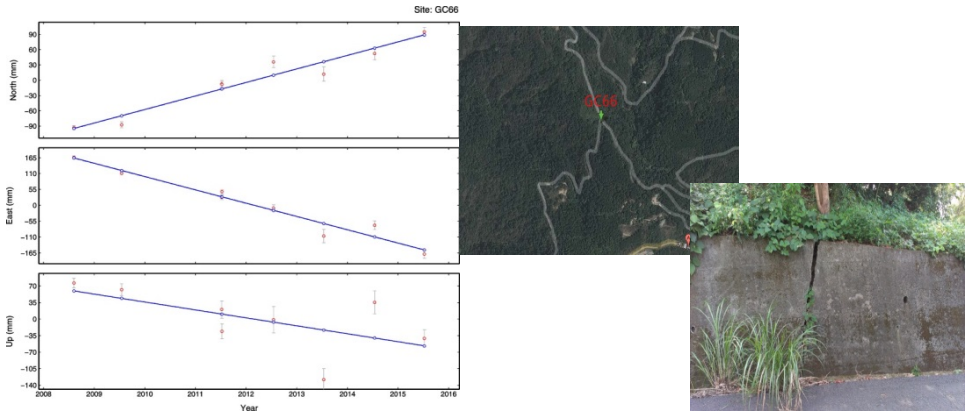


圖 2-2.28：GPS 移動測站 GC66 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。高屏地區（圖 2-2.29）可比對座標時間序列之組合為 GS56-G003、DONA-G600、KASU-G054、PAOL-G460、GS53-G589、TAYN-G595、GS45-G607、MAJA-G609、LIUC-S041 等九組，由座標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.30）。

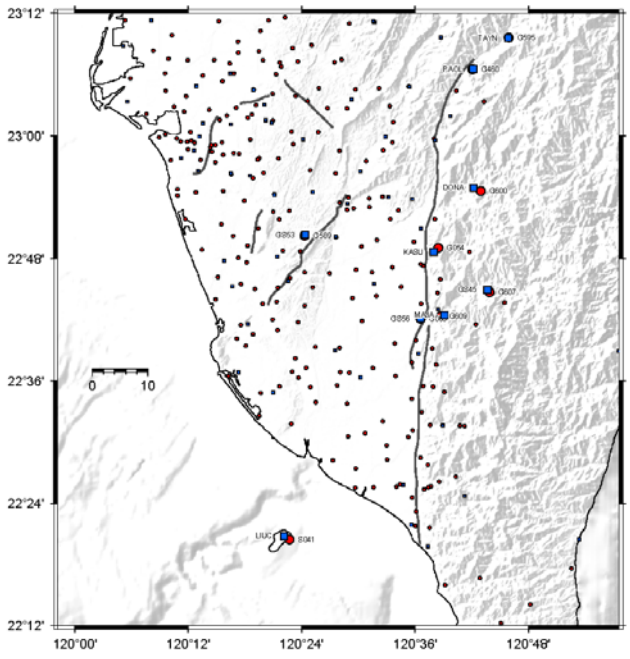


圖 2-2.29：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

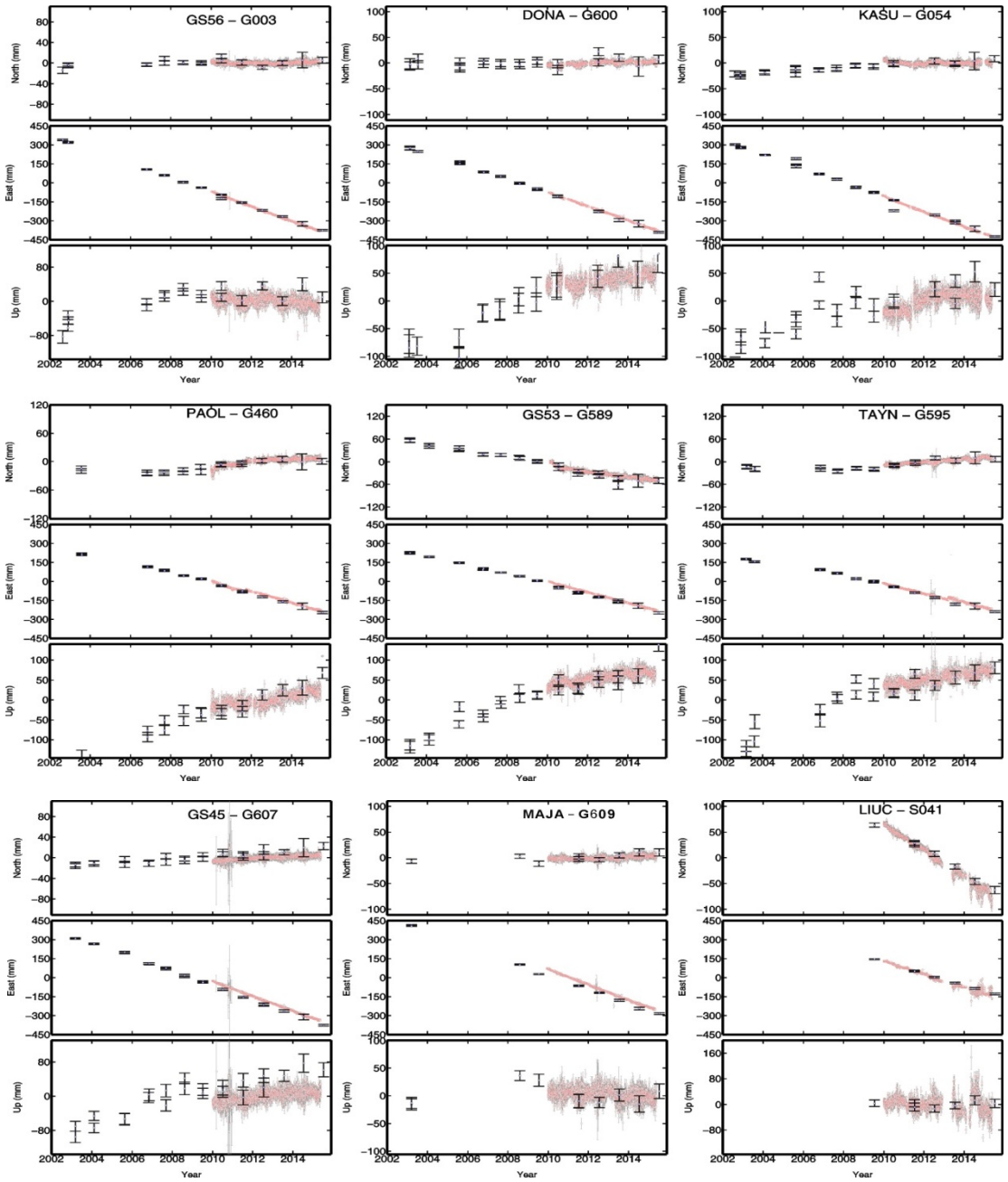


圖 2-2.30：2002~2015 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-9 中部地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之中部地區觀測資料進行分析，各觀測點位之速度值如圖 2-2.31 所示，黑色箭號表示 2002 年至 2015 年之速度場，速度量值 1.3 ~ 46.7 mm/yr，其中 GF35 位於苗栗縣大湖鄉東興國小操場上,操場於 2011 年整修，樁位經重新埋設，經過速度修正後該點位速度符合該地區速度分布，建議可持續監測（圖 2-2.32）；M007 為內政部一等衛星控制點，由時間序列可知 2012 年至 2013 年之間發生明顯位移，可能為 2013 年的南投地震所誘發，經修正後速度符合本區速度分布，建議持續觀測（圖 2-2.33）。

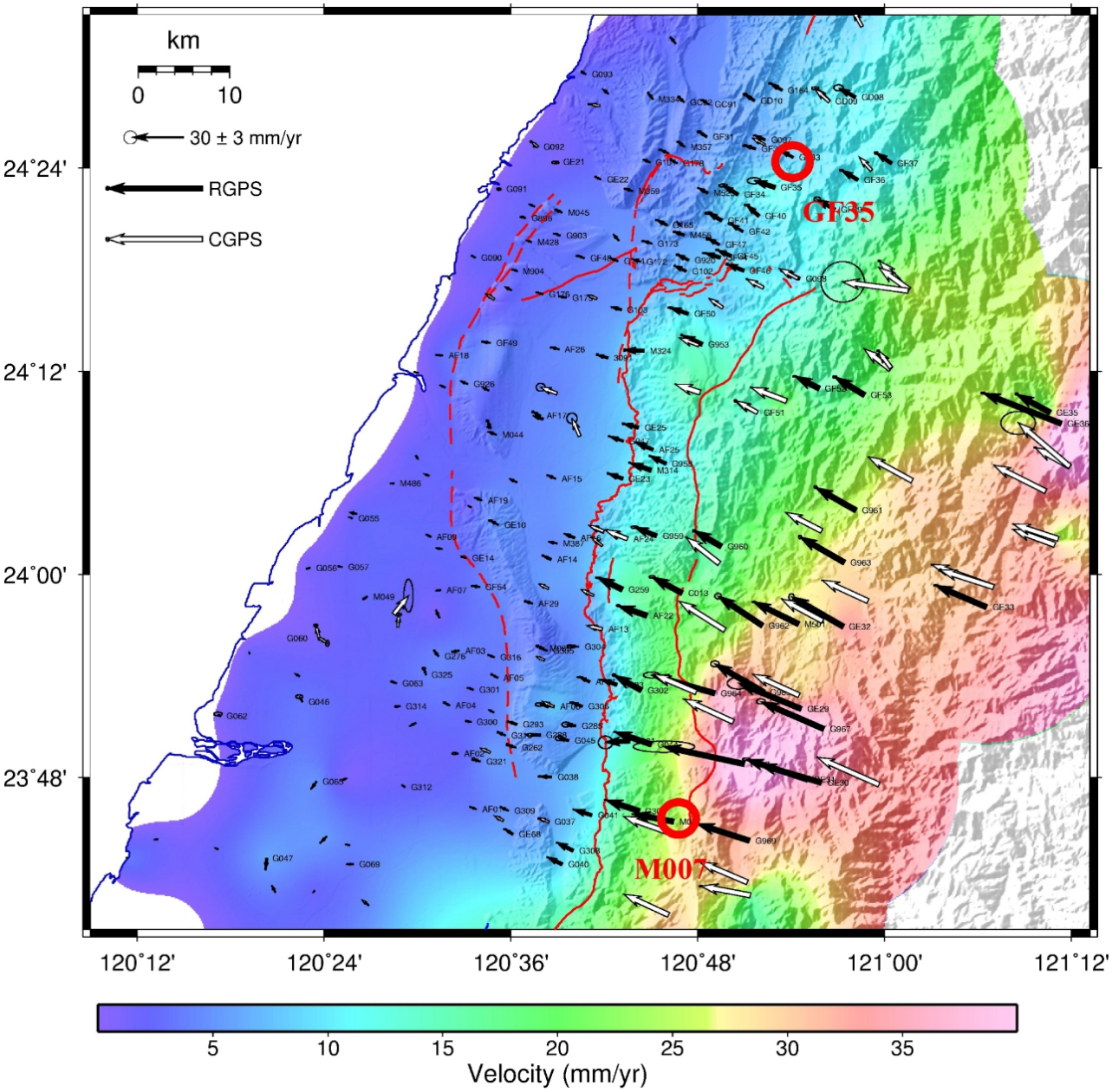


圖 2-2.31：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002~2015），白色箭頭表示該區連續站 2002~2015 年速度場解算結果。

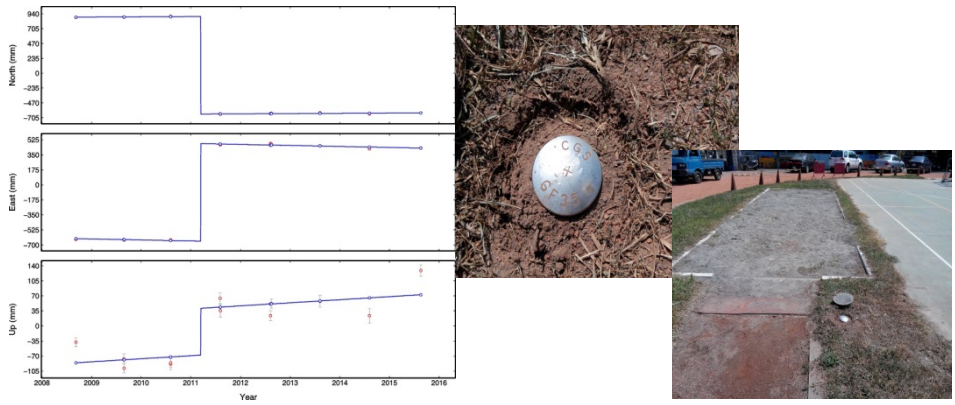


圖 2-2.32：GPS 移動測站 GF35 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。

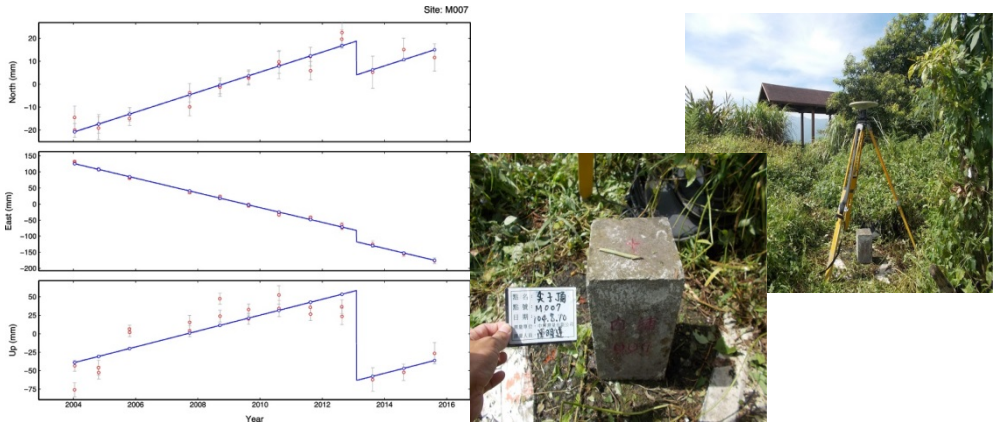


圖 2-2.33：GPS 移動測站 M007 相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖及現場環境圖。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。中部地區（圖 2-2.34）可比對座標時間序列之組合為 GS27-AF06、KZN1-AF13、GS23-AF15、LSB0-AF17、FNGU-AF24、PINT-G037、LUKN-G055、G062-CHSG、DAHU-G097、SUCH-G098、HNSN-M031、SALU-M044 等十二組，由座標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.35）。

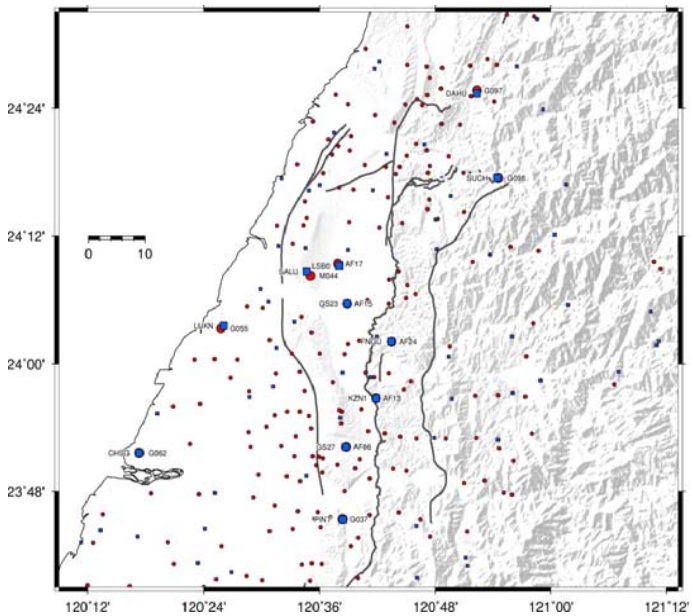


圖 2-2.34：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

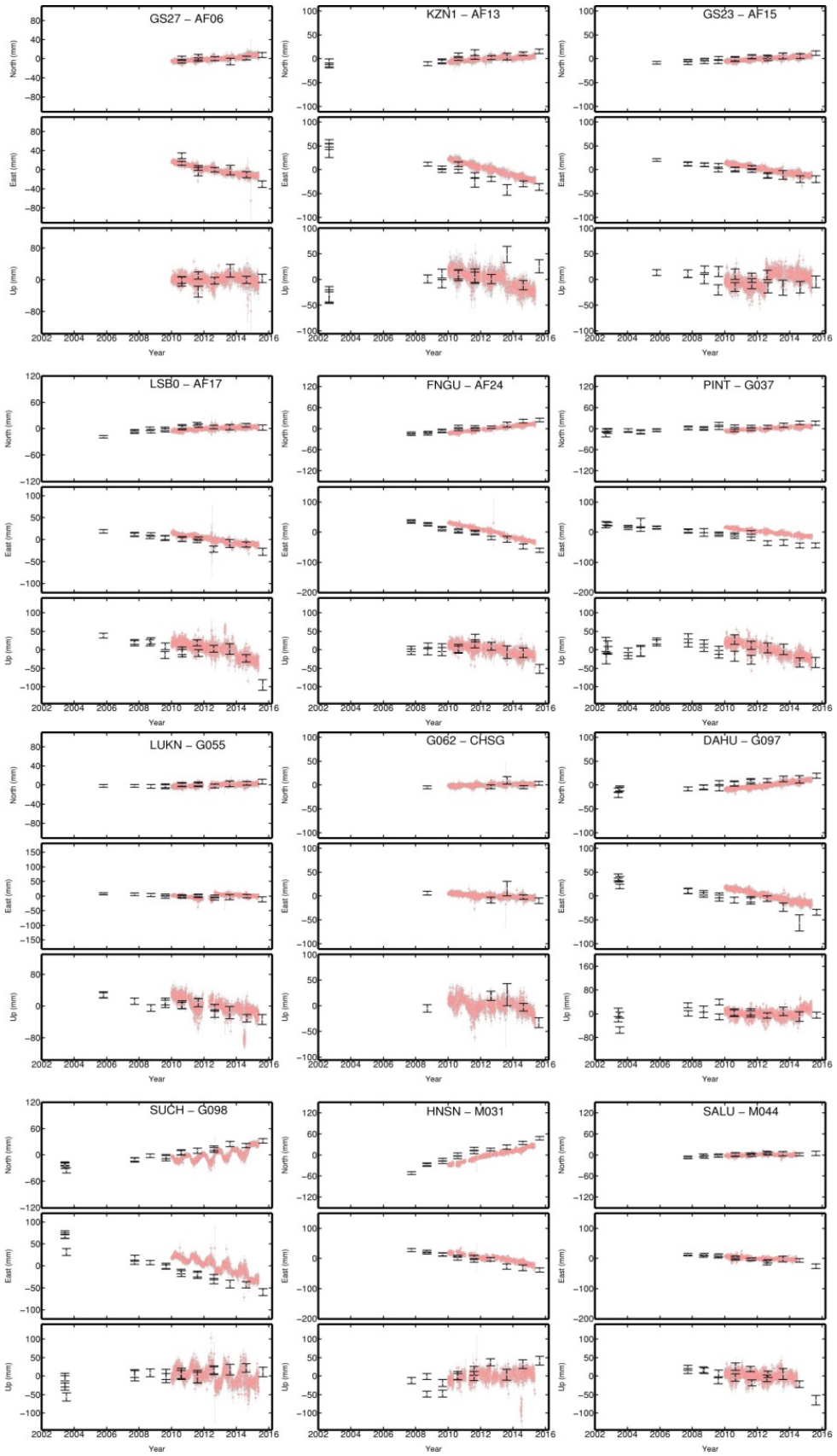


圖 2-2.35：2002~2015 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-10 花東地區 GPS 觀測成果分析

花東地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2015 年，各觀測點位之速度值如圖 2-2.36 所示，黑色箭號表示 2004 年至 2015 年之速度場，速度量值 21.8 ~ 69.5 mm/yr。

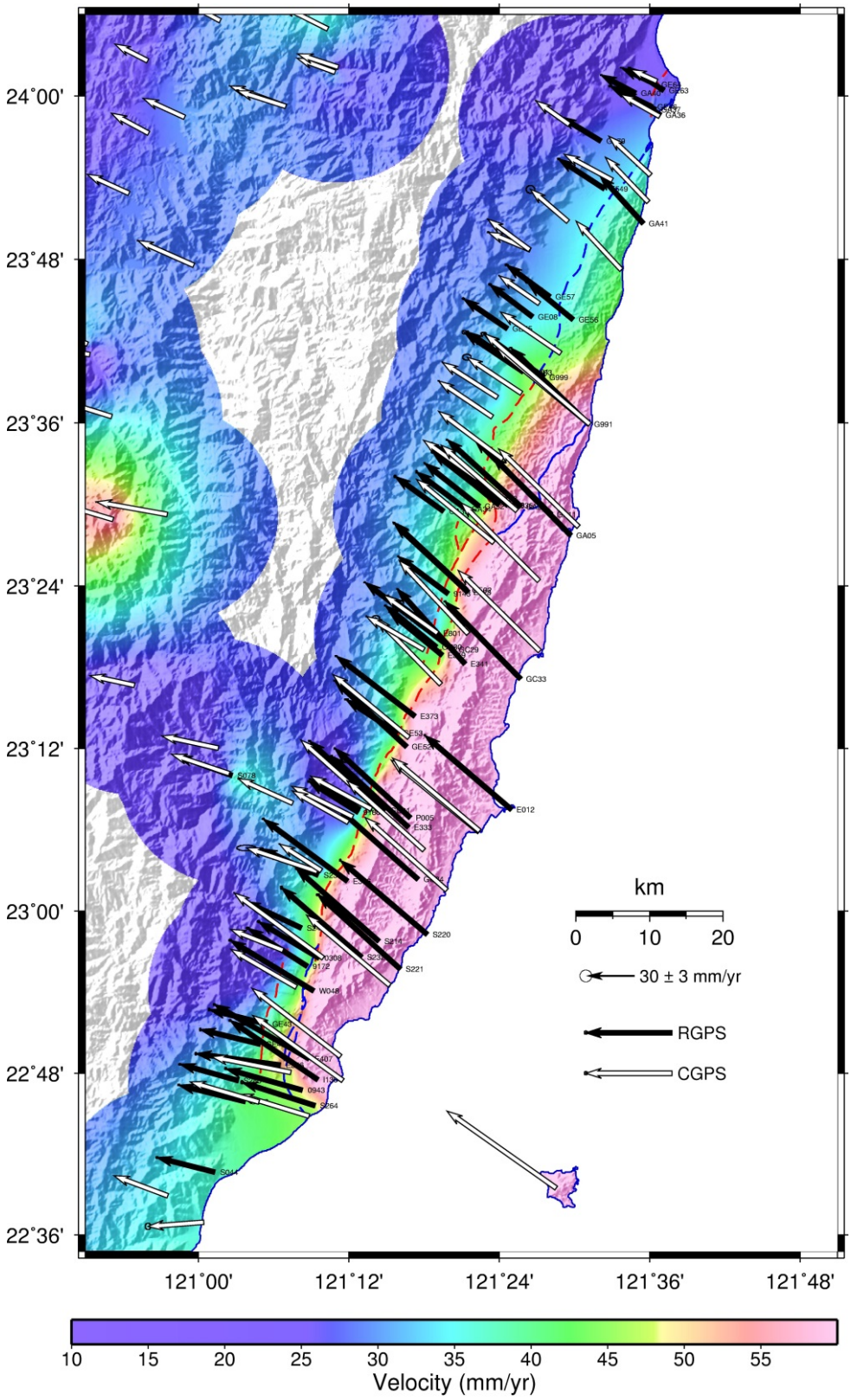


圖 2-2.36：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2004~2015），白色箭頭表示該區連續站 2002~2015 年速度場解算結果。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。花東地區（圖 2-2.37）可比對座標時間序列之組合為 ERPN-0308、CHIH-9160、JULI-E801、FENP-G991、KUAN-S233、PEPU-GE64 等六組，由座標時間序列比對可知，連續站 ERPN 及移動站 0308 間存在明顯速度梯度，推測為縱谷斷層通過兩側點間所造成，其餘移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.38）。

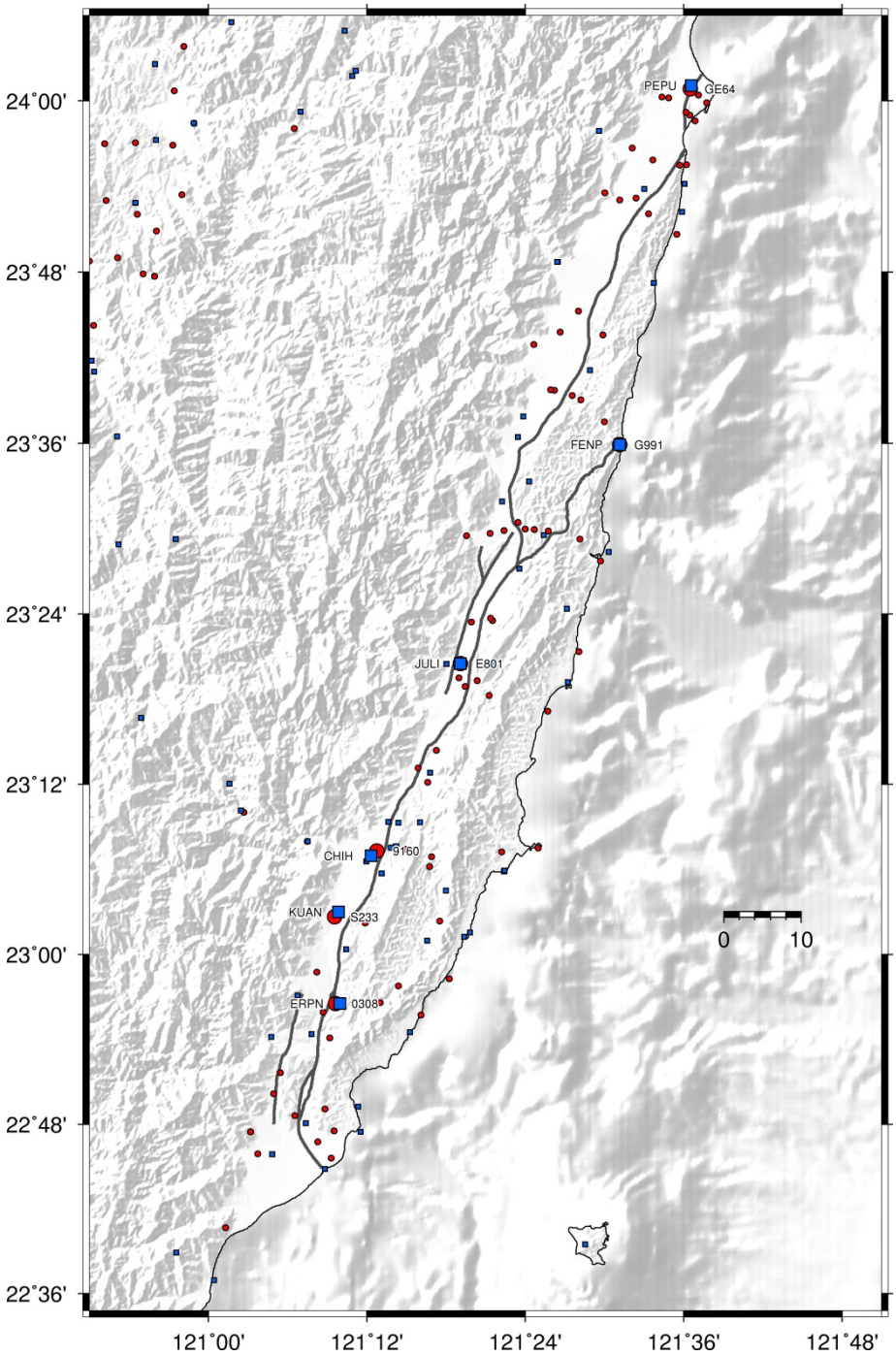


圖 2-2.37：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

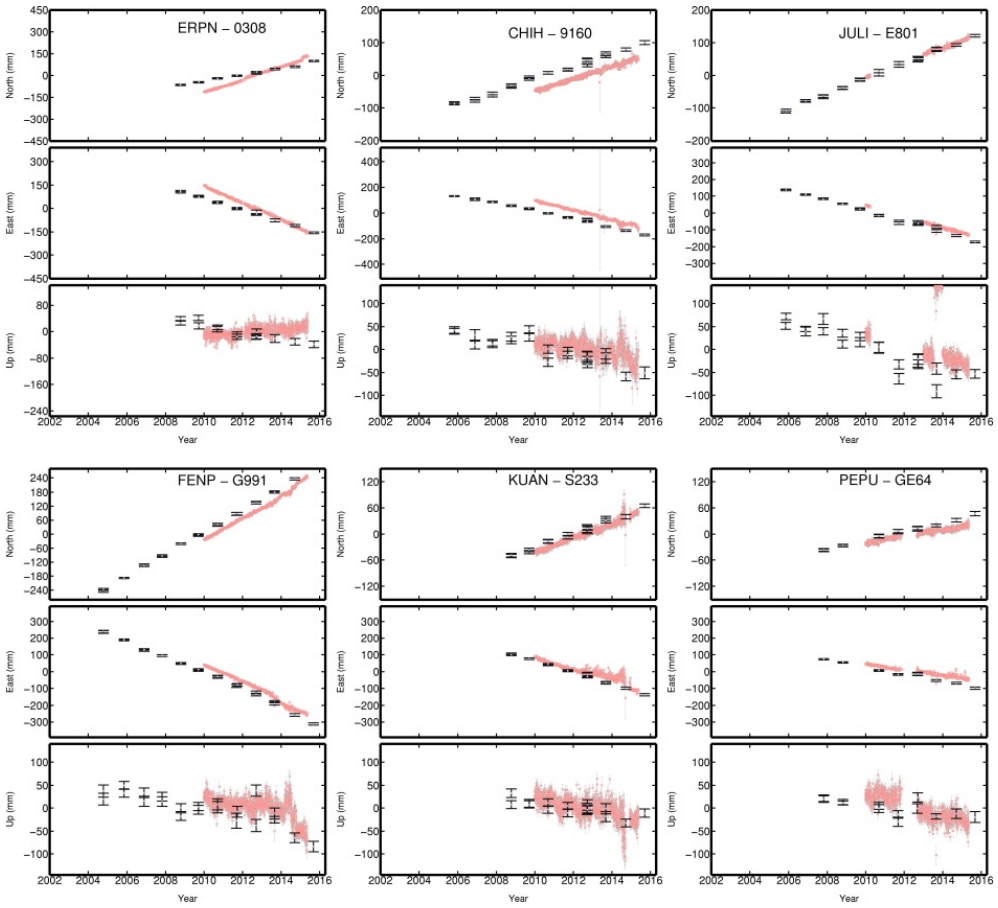


圖 2-2.38：2002~2015 年花東地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-11 宜蘭地區 GPS 觀測成果分析

宜蘭地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2015 年，各觀測點位之速度值如圖 2-2.39 所示，黑色箭號表示 2002 年至 2015 年之速度場，速度量值 1.5 ~ 34.5 mm/yr。

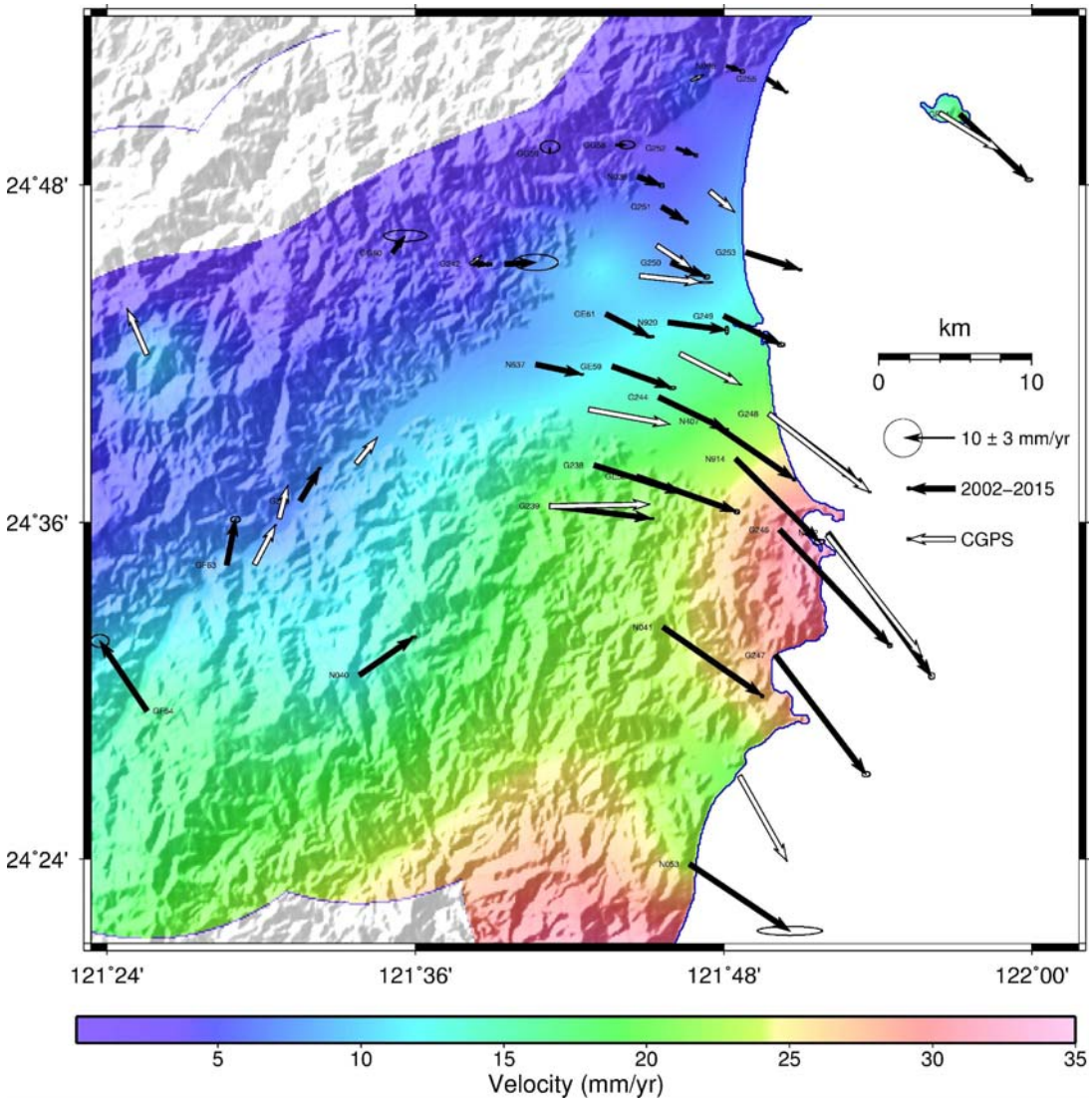


圖 2-2.39：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002~2015），白色箭頭表示該區連續站 2002~2015 年速度場解算結果。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。宜蘭地區（圖 2-2.40）可比對座標時間序列之組合為 GS20-GF74、SLNP-G242、HANS-G239、SUAO-N052 等四組，由座標時間序列比對可知，移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.41）。

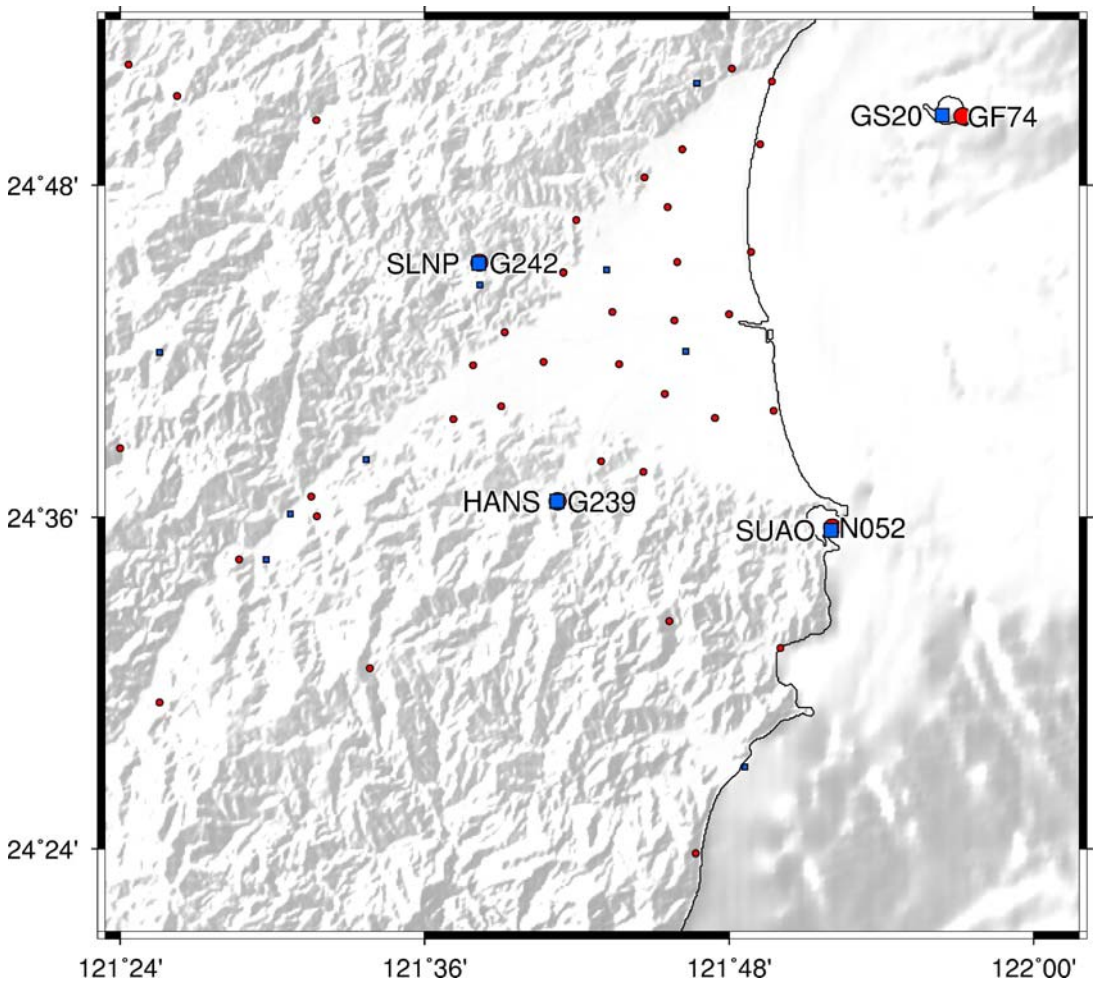


圖 2-2.40：宜蘭地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

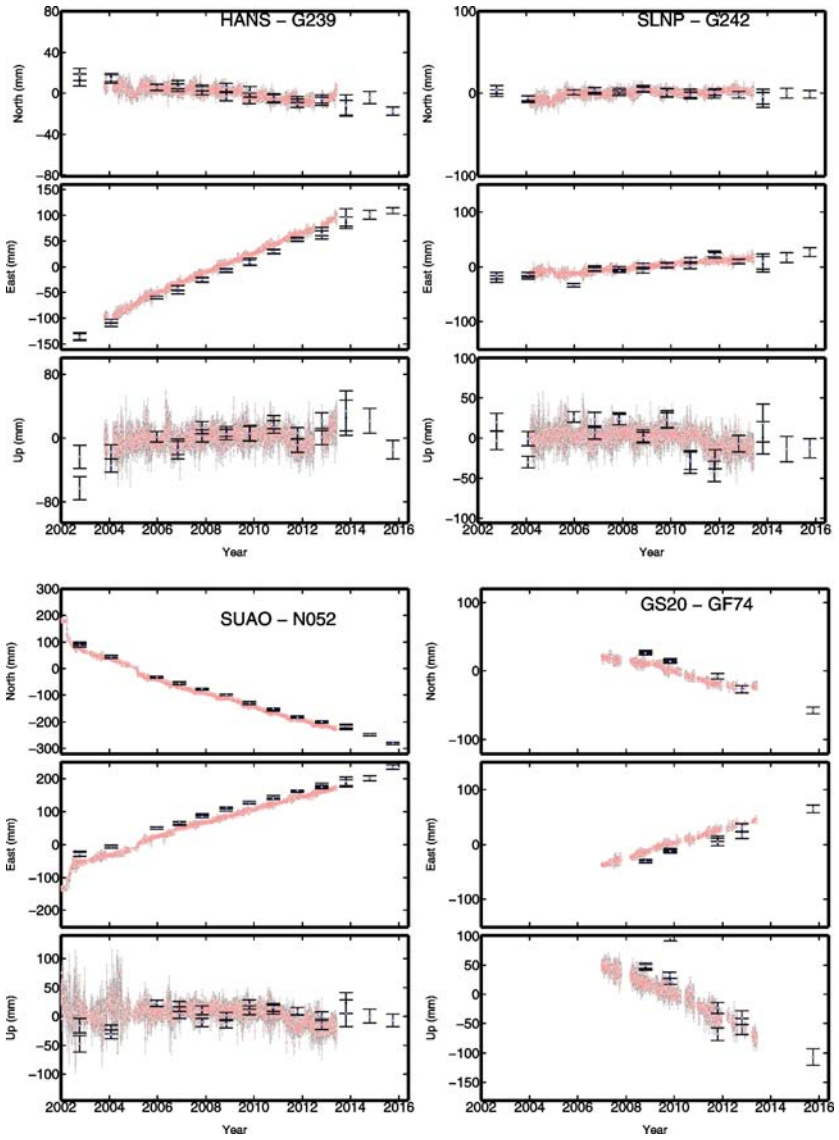


圖 2-2.41：2002~2015 年花東地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-12 GPS 觀測成果分析

由解算結果可知臺灣地區 2002~2015 年連續站水平速度分布如圖 2-2.42，桃竹苗地區在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0 ~ 10 mm/yr。

中部地區在大茅埔斷層以東速度場約 30 ~ 45 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 16 ~ 20 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小約 6 ~ 15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海地區速度場值小於 5 mm/yr，卓蘭地區及獅潭地區點位速度場分布轉為西北向值約 12 ~ 16 mm/yr。

嘉南地區在嘉義南部至臺南北部地區在觸口斷層和九芎坑斷層－木屐寮斷層－六甲斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑－木屐寮－六甲斷層系統，其水平位移速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其水平位移速率皆小於 10 mm/yr，臺南地區速度場分布則以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平位移速率約 12 ~ 15 mm/yr。後甲里斷層以東水平位移速率約 15 ~ 20 mm/yr 速度場呈西向東逐漸遞增，速度值約為 10 至-40 mm/yr。

高屏地區主要之活動構造為東北－西南走向之旗山斷層與南北走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度差異顯示，跨過潮州斷層及恆春斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr，恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41 ~ 62 mm。

花東地區自北段花蓮至中段玉里瑞穗方位角由西北西轉為西北，至南段臺東則再轉為西北西，速度值由約 20 ~ 40 mm/yr 增加至 50 ~ 70 mm/yr 再減少為 20 ~ 60 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸增加的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。

北部地區在宜蘭平原地區之速度場就整個臺灣北部而言其速度變化是最顯著的，由西向東其速度變化亦由西北快速地往東南方向移動，越靠近外海移動速度越快，速度變化由西向東南順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，值由西向東約在 2 ~ 35 mm/yr。

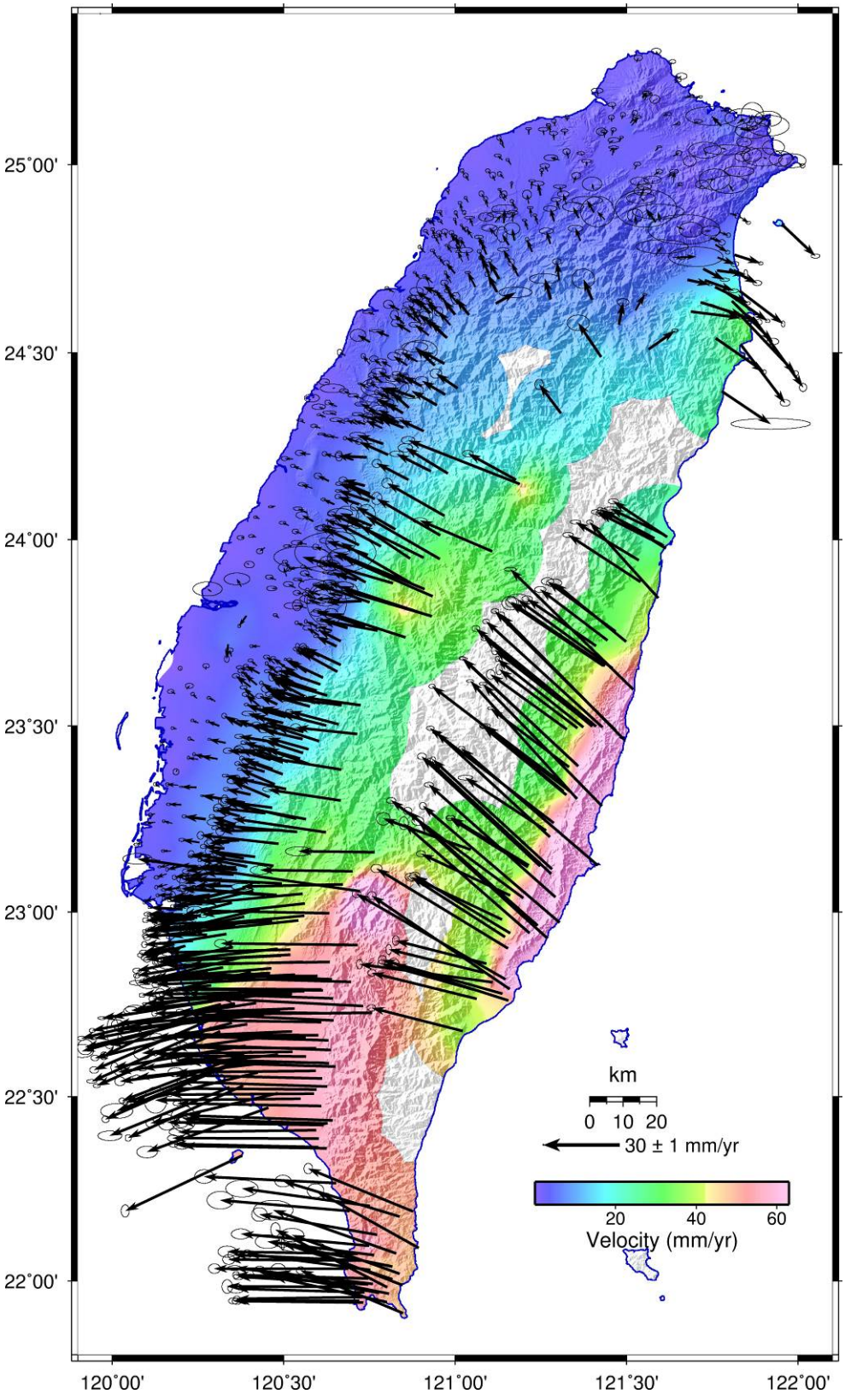


圖 2-2.42：2002~2015 年臺灣地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。

2-3 精密水準測量精度分析

截至 2015 年 11 月底前所獲得之精密水準測量資料包含「台 2_石門至萬里測線」、「士林至三芝測線」、「淡水至士林測線」、「五股至臺北測線」、「信義測線」、「縣 115_新屋至童話世界測線」、「縣 122_新竹至五峰測線」、「縣 117_新竹至峨眉測線」、「苗栗至南庄測線」、「縣 132_大安至東勢測線」、「縣 136_龍井至太平測線」、「縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線」、「縣 150-台 16_北斗至水里測線」、「縣 164_金湖至瑞峰測線」、「縣 174_北門至楠西測線」、「縣 182_安平至龍崎測線」、「台 28_路竹至茂林主、副線」、「台 22_岡山至安坡測線」、「佳冬至七佳測線」、「恆春西台地至佳樂水測線」、「台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線」、「台 19 甲_善化至關廟」、「嶺頂至瀧澗」、「光復至豐濱」、「紅葉至靜浦」、「東成至富岡」、「梗枋至東澳」共 29 條測線，以及「五光至黃竹測線」、「曾厝至霧峰測線」、「北勢至峰谷測線」、「烏溪南岸測線」和「中興新村測線」共 5 條跨車籠埔斷層之短測線，與「B003-B092」、「B036-B086」、「B087-B080」、「B002-B059」、「B110-B101」、「B037-B095」、「G088-G330」共 7 條跨梅山斷層之段測線。

2015 年 11 月底前所獲得共計 1175 個測段，其往返閉合差均合乎內政部九十年度編印之「一等水準測量作業規範」。其中，測段往返閉合差絕對值小於 2.0 mm 以下者，有 1131 個測段（圖 2-3.1a），佔所有測段比例之 96.2%。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 90.8%（1068 個測段）；測段往返閉合差精度小於 $2.0\sqrt{k}$ 者，則佔所有測段比例為 98.8%（1161 個測段）。考慮與測段距離的關係後（Bomford, 1985），每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 1128 個測段達測段達 96.0%(圖 2-3.1b)顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

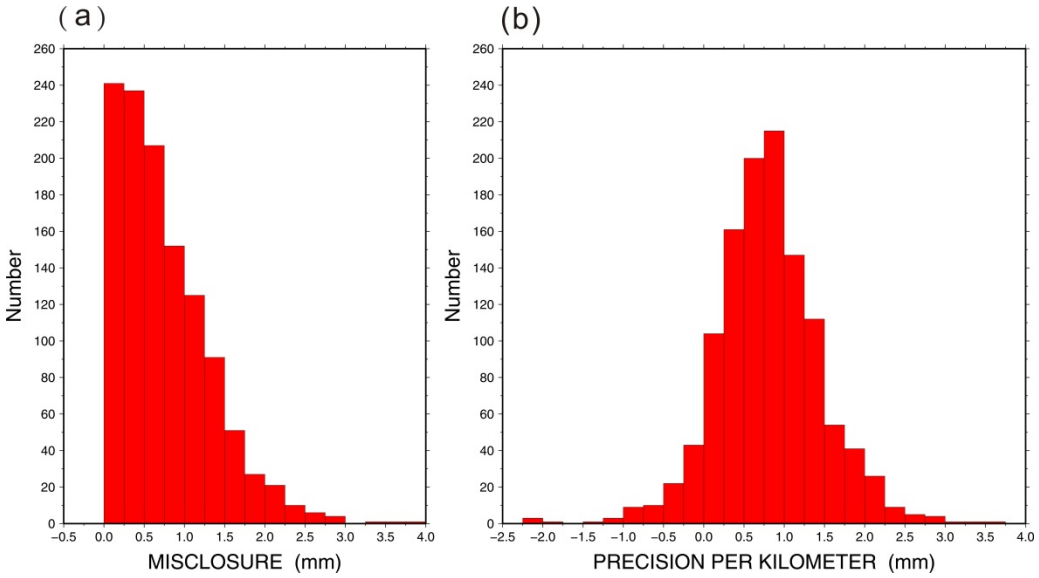


圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。（a）為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.0 ~ 0.25 mm 上。（b）為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.75 ~ 1 mm 上。

2-3-1 垂直速度場之推求

由於 GPS 與水準垂直速度的參考點與座標框架不同，欲得到完整的臺灣地區垂直速度場，本研究將水準結果修正為相對 S01R（澎湖白沙），以利後續討論臺灣地區的垂直變形。由於 GPS 連續站之速度場是相對 S01R 所求得，因此，合理地假設如果 GPS 站和水準測量點位距離越接近，則兩者的垂直速度將越一致。因此，先尋找距離水準測量點位相對較近且資料品質較穩定的 GPS 連續站，並以該站作為約制條件，來進行下一步驟的計算。

2-3-2 台 2_石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 20 公里，2004 至 2015 年間共進行 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-1.88 mm/yr 與-0.11 mm/yr），作為控制點 2027 和 0807 之垂直速率。

根據圖 2-3.2，本測線垂直速度均落在 -4 至 0 mm/yr 之間，而跨斷層點位之垂直速度變化< 1 mm/yr，此結果說明近幾年山腳斷層在該區域並未有明顯之活動跡象。另在地形高程變化部分，在橫跨斷層區域約有 3 ~ 5 m 的跨斷層地形高度的變化量，可能是因山腳斷層及其分支斷層長期活動所導致。

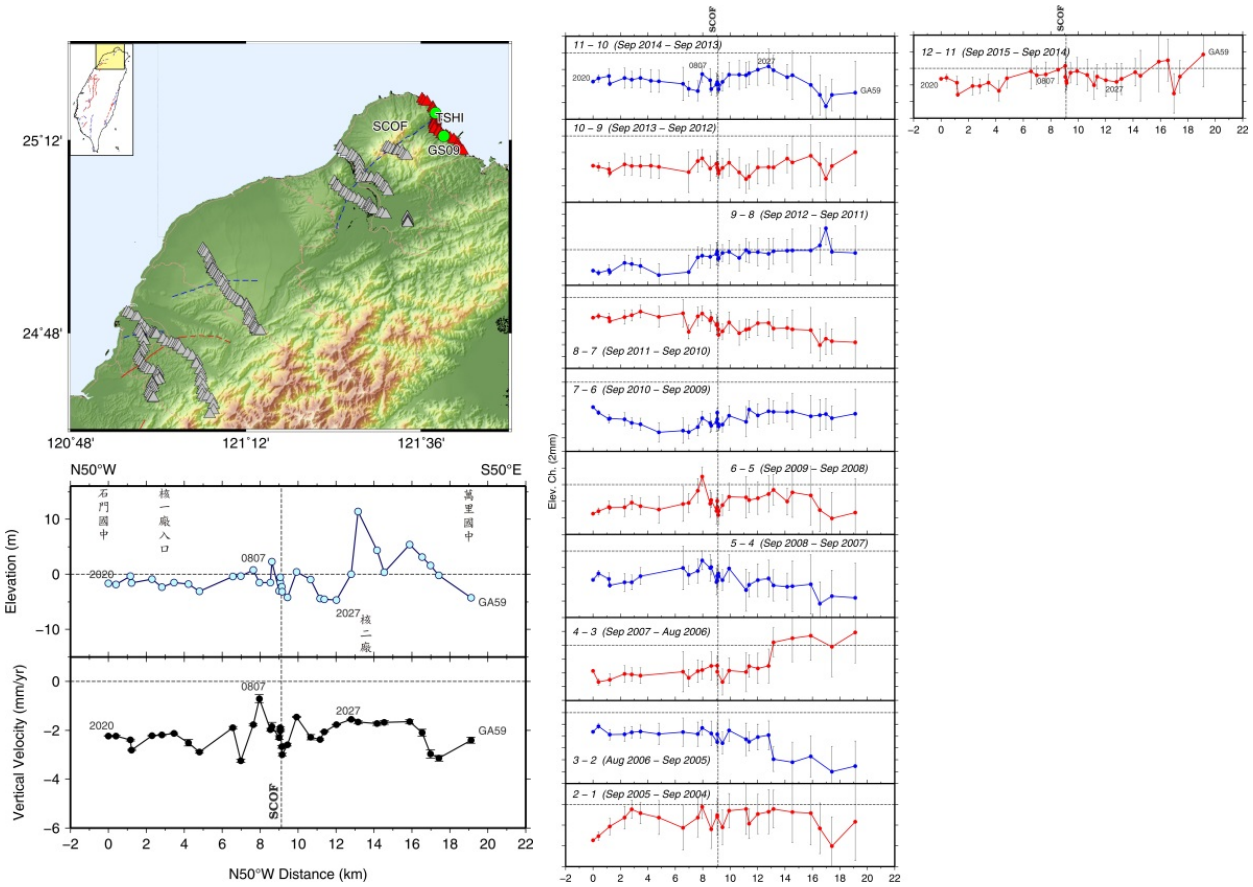


圖 2-3.2：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。左側上欄為高程地形變化，左側下欄為水準平均抬升速率。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-3 三芝至士林測線

本測線跨越山腳斷層，測線長約 5 公里。該測線 2004 至 2015 年間共進行 12 次測量。本測線以 GPS 連續站 YM01、YM05 和 YMSM 之垂直速率（-0.52 mm/yr、-1.98 mm/yr、0.39 mm/yr），作為控制點 GF66 和 GB06 之垂直速率。

根據圖 2-3.3，此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側，整條水準的垂直速度均介於 -4 至 0 mm/yr 之間。跨斷層之垂直速度非常不明顯（約 0 至 1 公里），僅有約 0.2 mm/yr 的變化量，在 2 到 5 公里之測段稍有變化。據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能較為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要更長時間的監測以及與其他相關資料的佐證。

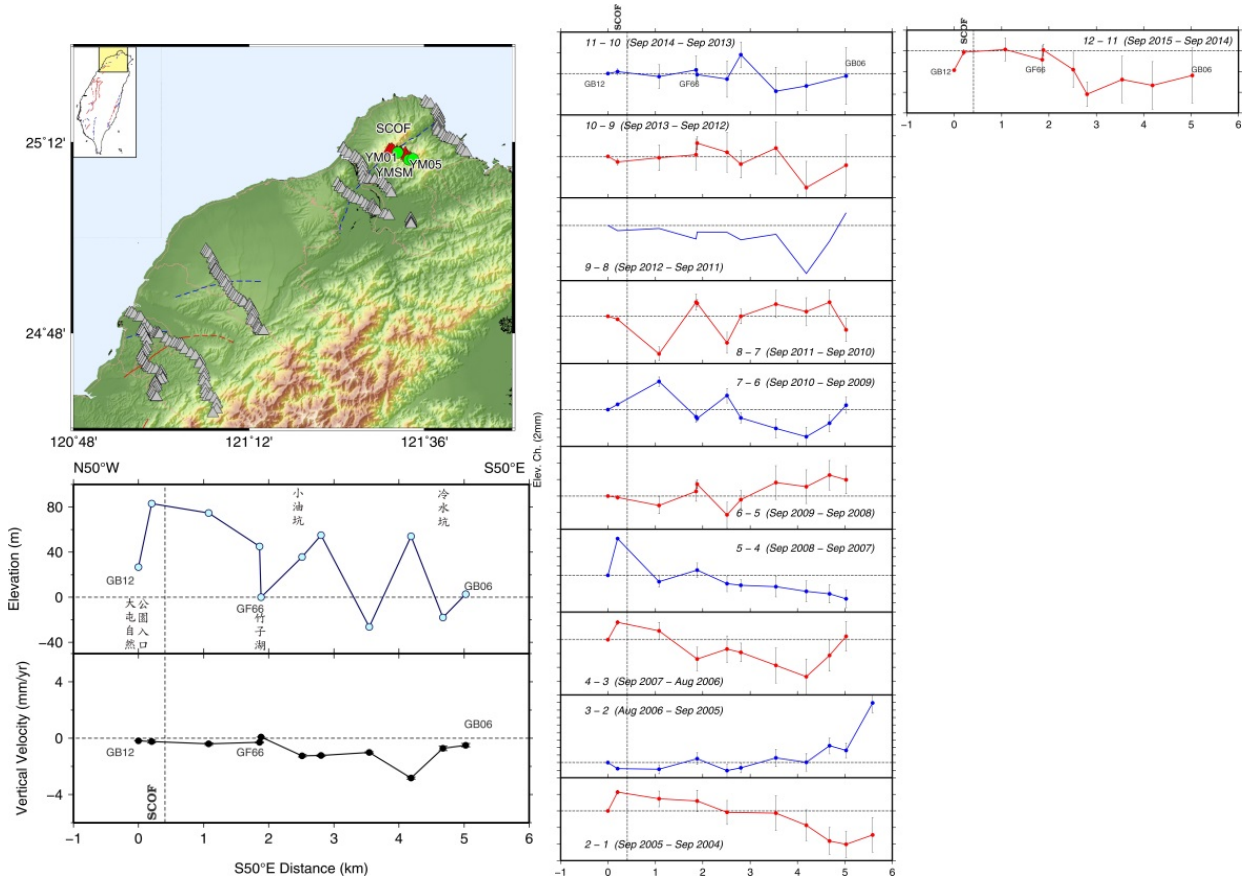


圖 2-3.3：三芝至士林測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-4 淡水至士林測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 16 公里，在 2004 至 2015 年間進行共 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 及 TANS 之垂直速率（-4.89 mm/yr 及-0.21 mm/yr），作為控制點 GA69 與 GA63 之垂直速率。

根據圖 2-3.4，此測線之垂直速度在跨斷層有 10 mm/yr 的變化量，最大值達-13.2 mm/yr；在斷層東側的高程變化呈現緩步下陷的趨勢。觀察 2004~2006 及 2007~2014 之歷年高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由-30 mm 至-10 mm，顯示跨山腳斷層之沉陷有逐年減少的趨勢。由於該區位於基隆河與淡水河的匯流處，屬於河流下游沙洲的一部分，此明顯的變化應與該區域因地表未固結岩體之壓密與固結岩層之排水結合高密度人為活動，以及部分斷層活動而產生的地表沉陷有關。

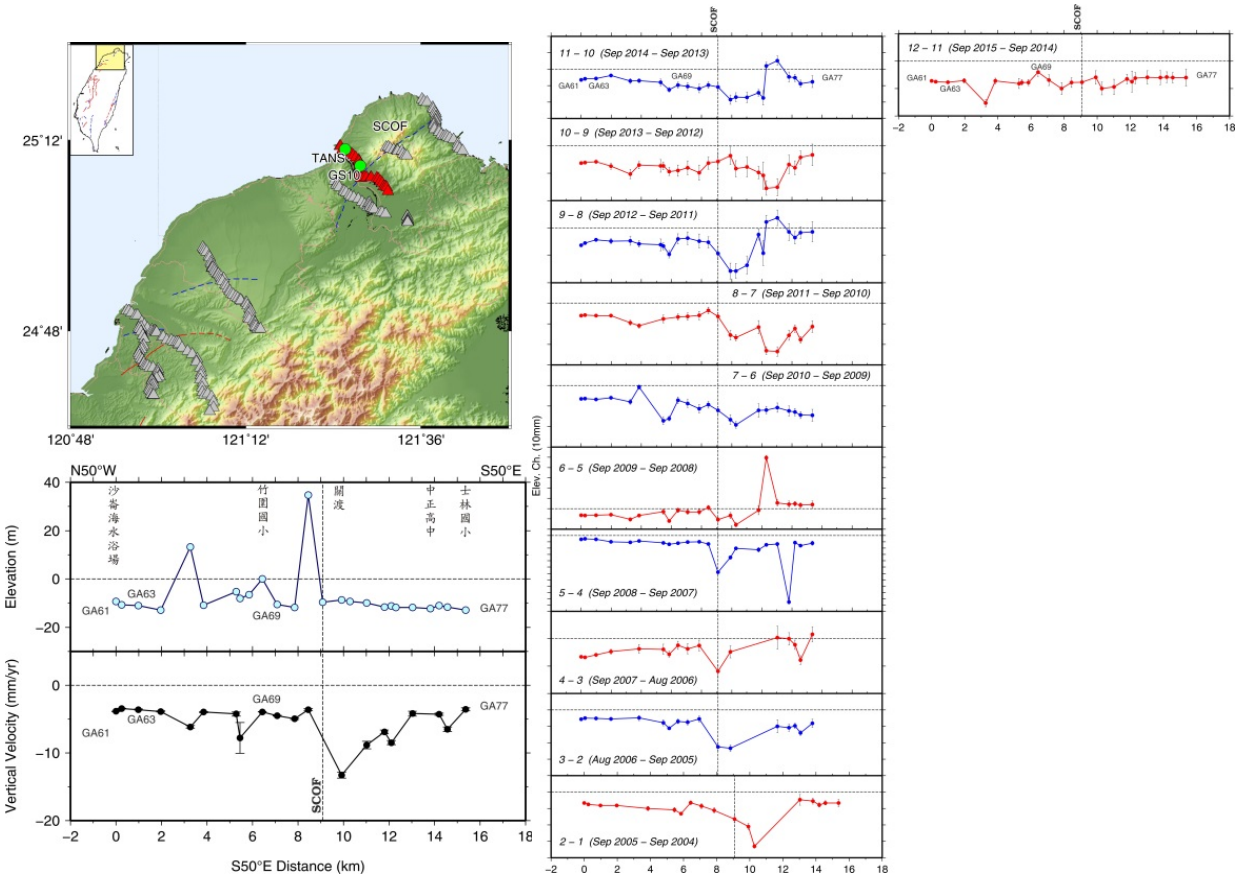


圖 2-3.4：淡水至士林測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-5 五股至台北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 14 公里。此水準測線於 2004 至 2015 年間共進行 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率（-1.7 mm/yr），作為控制點 GA78 之垂直速率。

根據圖 2-3.5，此測線之垂直速度在跨斷層有 5 mm/yr 的變化量，在疏洪親水公園一帶為本測線沉陷較大的區域，最大垂直速度達 6.6 mm/yr，此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。另從歷年高程變化來看，2008 年至 2013 年在山腳斷層東側有週期性的抬升及沉降現象，2014 年起至今變化則較不明顯。

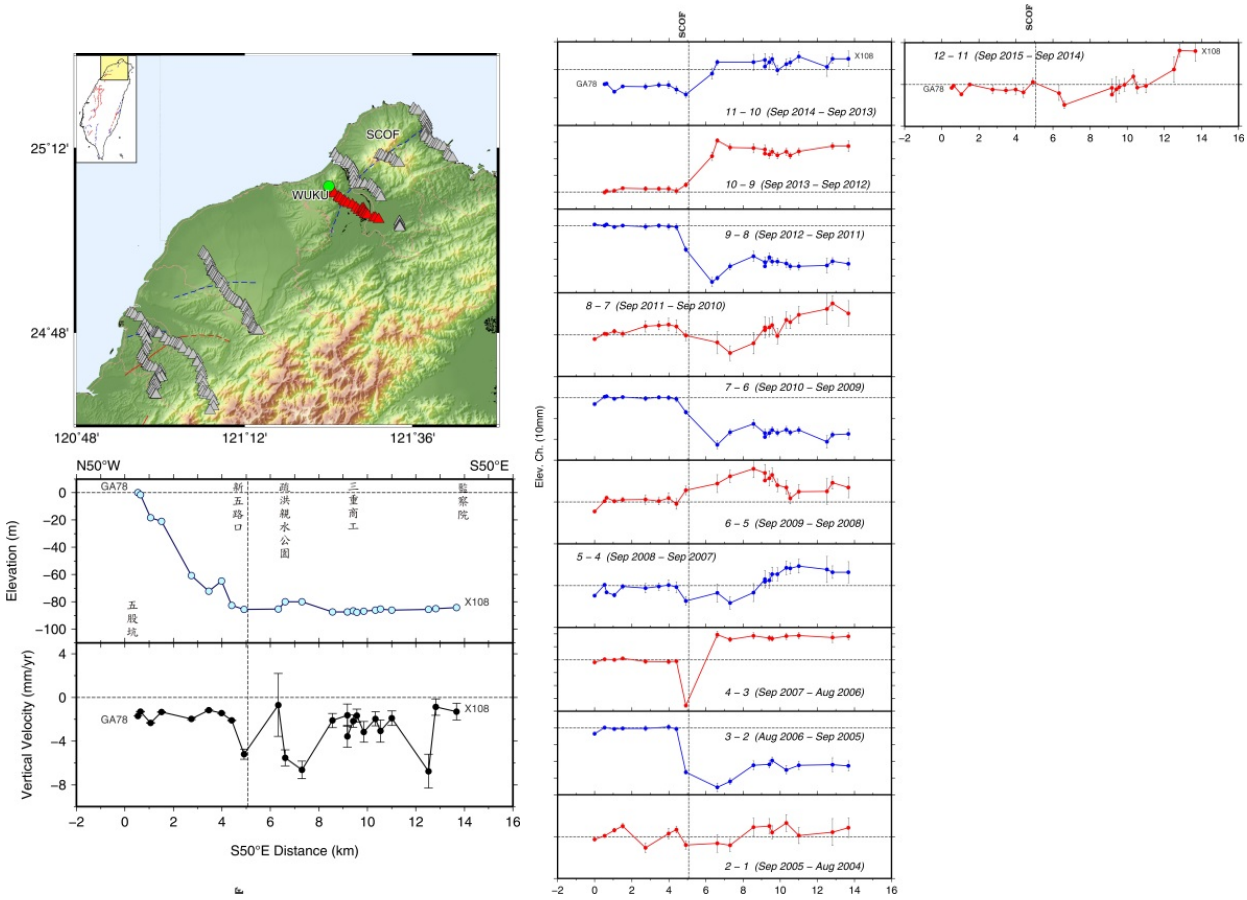


圖 2-3.5：五股至台北測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-6 信義測線

本測線長約 1.5 公里，於 2009 至 2015 年間共進行 5 次的施測。本測線以 GPS 連續站 S101 之垂直速率（-0.86 mm/yr），作為控制點 1187 之垂直速率。

此測線位於台北市信義區內，台北 101 大樓以東約 300 公尺，橫跨台北捷運信義線。根據圖 2-3.6，僅控制點之垂直速度為負值，其原因有待現場勘驗。

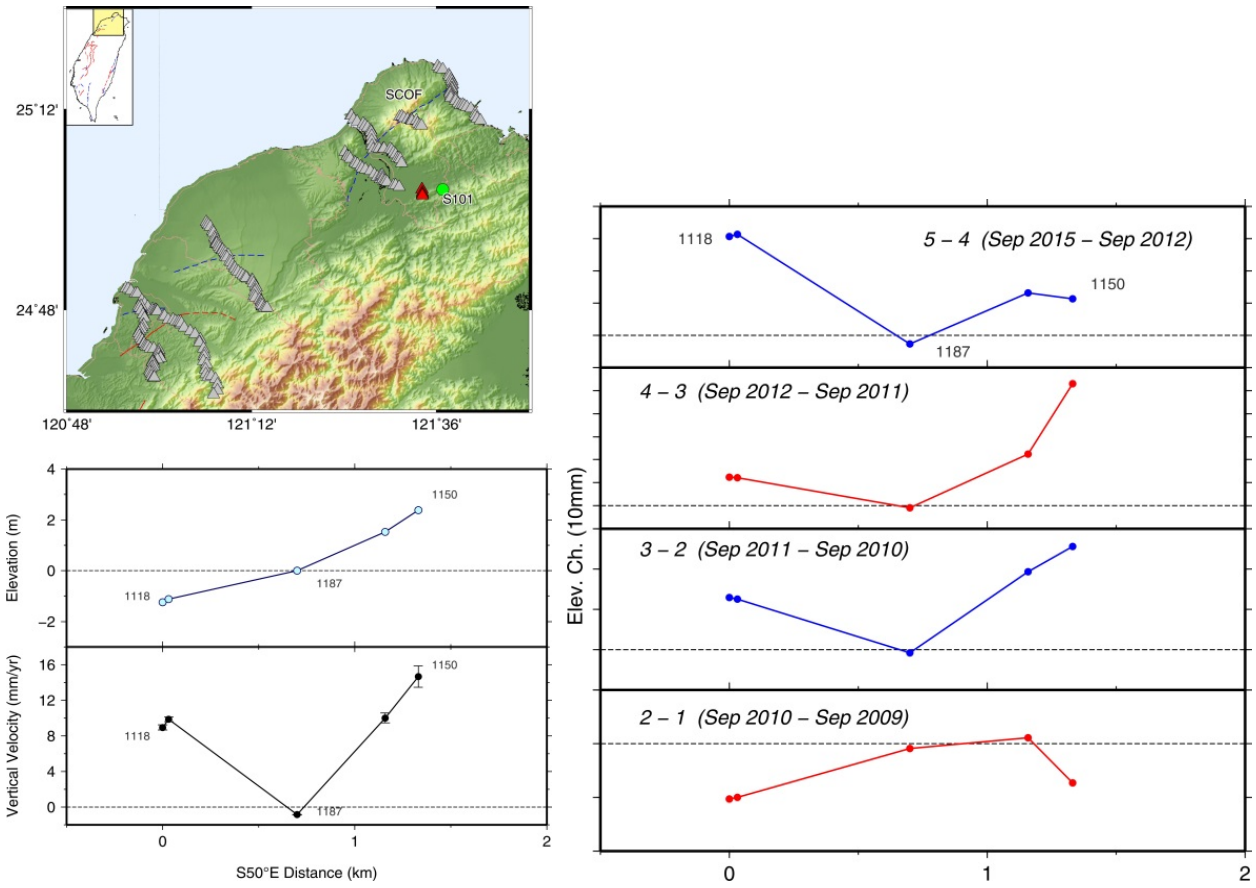


圖 2-3.6：信義測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。

2-3-7 縣 115_新屋至童話世界測線

本測線橫跨雙連坡斷層、湖口斷層與大平地斷層，測線長約 24 公里，分別於 2004 至 2015 年間進行 12 次的施測作業。本測線以 GPS 連續站 YAME 之垂直速率（2.26 mm/yr），作為控制點 GB40 之垂直速率。

根據圖 2-3.7，此測線之垂直速度在跨雙連坡斷層區域未有顯著變化，跨斷層變化< 1 mm/yr，說明近幾年來雙連坡斷層並不活躍；而跨湖口斷層則有 3 mm/yr 的變化量；而跨大平地斷層則有較大之垂直速度變化（~4 mm/yr）。

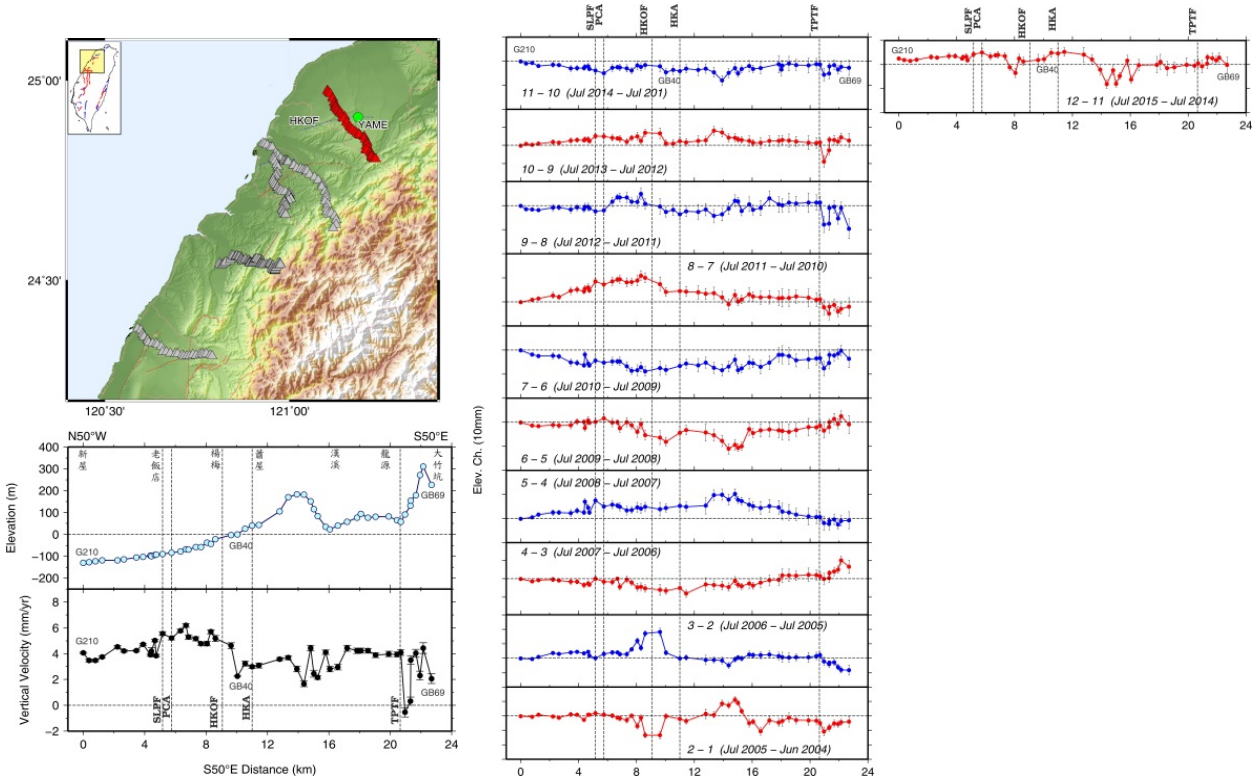


圖 2-3.7：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SLPF 為雙連坡斷層、PCA 為平鎮背斜、HKOF 為湖口斷層、HKA 湖口背斜、TPTF 為大平地斷層。

2-3-8 縣 122_新竹至五峰測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及大平地斷層，測線長 31 公里。2002 年至 2015 年間，共進行 12 次的施測。本測線以連續 GPS 站 TCMS 之垂直速率（-0.19 mm/yr），作為控制點 HCCA 之垂直速率。

根據圖 2-3.8，此測線之垂直速度在跨新竹斷層和跨平地斷層皆未有顯著變化，變化量皆 < 1 mm/yr，但在跨新城斷層有約 6 mm/yr 的變化量（-6.2 至-12.6 mm/yr）。從歷年高程變化來看，水準點位 G416（五峰國小）近 2013 至 2014 年間年下陷約 2.1 公分，而此點 GPS 之觀測資料也與週遭趨勢異常。經實地勘查後發現，點位本身並無損壞，由於該校位於山坡地，推測是因大規模崩塌所造成。建議此點可以繼續觀測，但在應用相關資料時須特別注意。（圖 2-3.9）

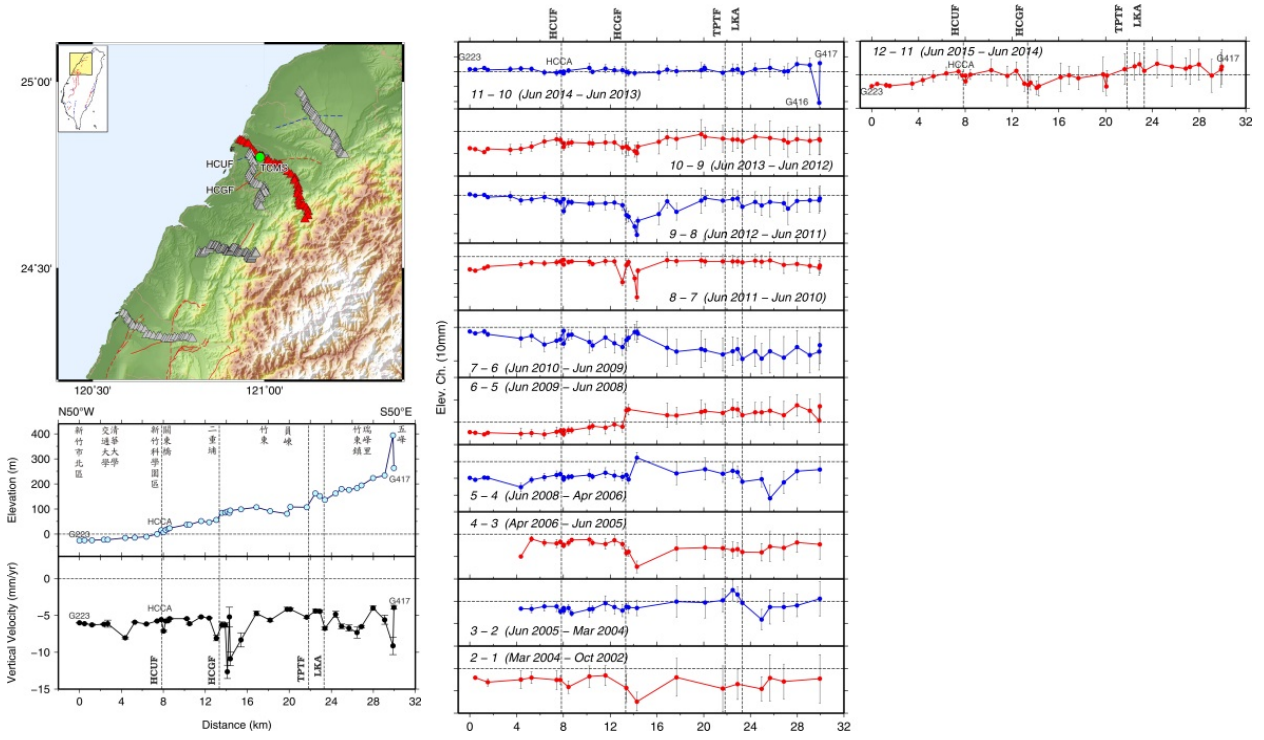


圖 2-3.8：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層、TPTF 為大平地斷層、LKA 為鹿廚坑背斜。



圖 2-3.9：水準點位 G416 現地情形。

2-3-9 縣 117_新竹至峨眉測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層，測線長 31 公里。此測線於 2004 至 2015 年間進行共 11 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS14 之垂直速率（-3.16 mm/yr），作為控制點 GB72 之垂直速率。

根據圖 2-3.10，此測線的垂直速度在跨新竹斷層和新城斷層皆未有顯著的變化，變化量皆< 1 mm/yr，而跨斗煥坪斷層則有約 2 mm/yr 的變化量。另 2005~2006 年間之高程變化與其他時段（2004~2005、2006~2010）不同，疑與 2006 年 7 月凱米颱風（KAEMI）之降雨有關（颱風警報期間：7/23~7/26；水準測量期間：7/10~8/01）。

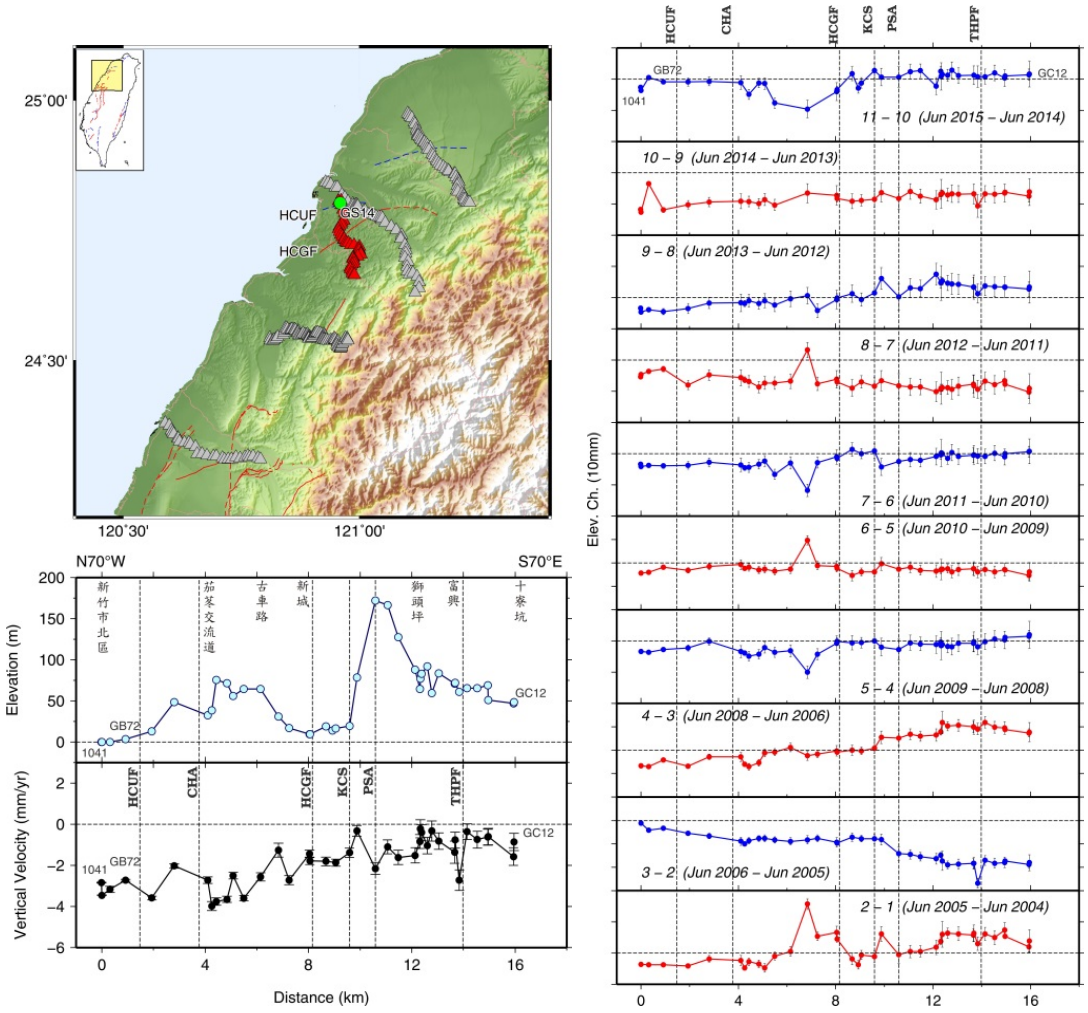


圖 2-3.10：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、CHA 為青草湖背斜、HCGF 為新城斷層、KCS 為柑子崎向斜、PSA 為寶山背斜、THPF 為斗煥坪斷層。

2-3-10 苗栗至南庄測線

本測線橫跨獅潭斷層，測線長約 17 公里，此測線於 2005 至 2015 年間共進行 11 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 之垂直速率（-2.34 mm/yr），作為控制點 GD95 之垂直速率。

根據圖 2-3.11，整條測線的水準垂直速度大多在-6 至-2 mm/yr 之間，跨獅潭斷層之區域之變化並不顯著（變化量< -1 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。從歷年高程變化來看，除 2009~2010 年間之高程變化接近地形變化外，2005~2009 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。此結果或許說明此地區之斷層滑移量主要是集中在滑脫面上。

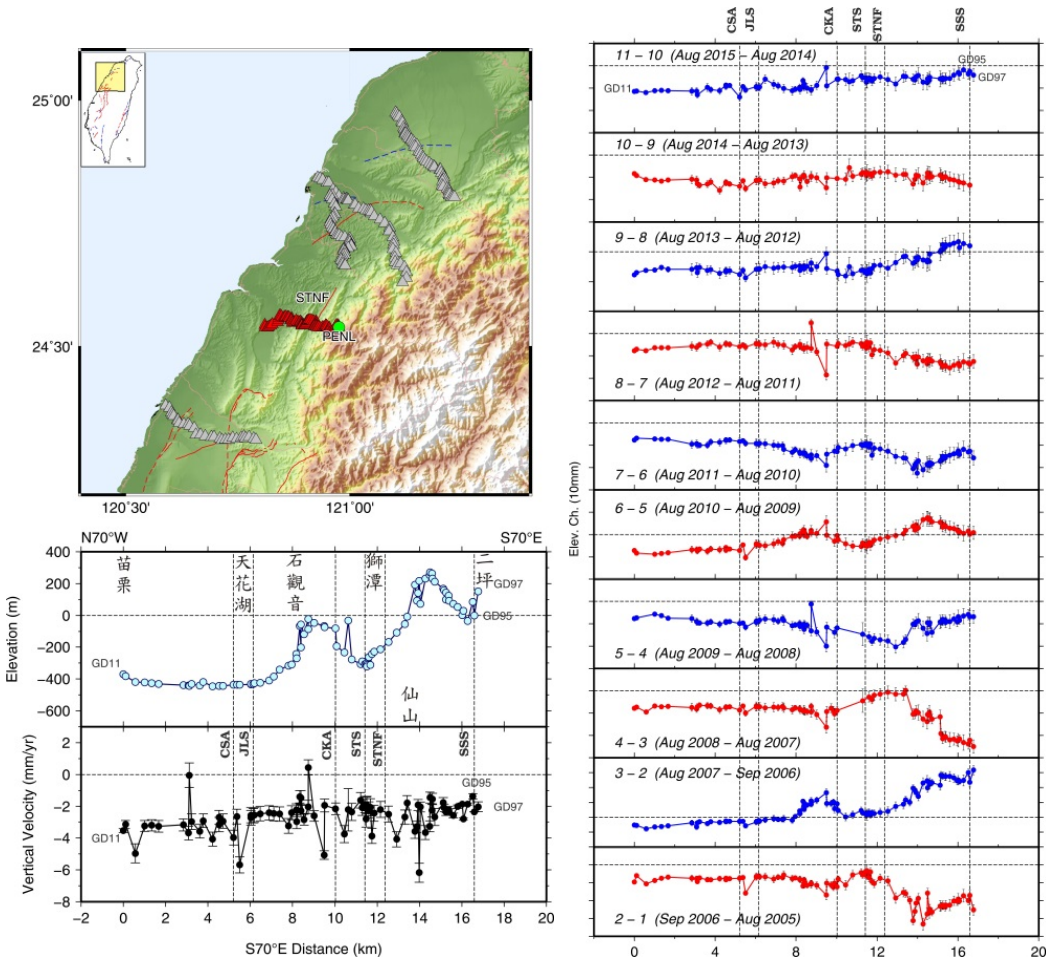


圖 2-3.11：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每欄刻度均代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CSA 為錦水背斜、JLS 為仁隆向斜、CKA 為出磺坑背斜、STS 為獅潭向斜、STNF 為獅潭斷層、SSS 為神社向斜。

2-3-11 縣 132_大安至東勢測線

本測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 22 公里，從 2004 年至 2015 年止共計有 11 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS36 之垂直速率（-1.7 mm/yr），作為控制點 G896 之垂直速率。

根據圖 2-3.12，就水準垂直速度之變化而言，各處之垂直速度多在-4 mm/yr 至 0 mm/yr 之間，且自鐵砧山至屯子腳斷層間（大甲東至月眉）的垂直速度呈現下滑的趨勢（約-0.8 至~ -3.2 mm/yr），在通過三義斷層後又逐步抬升至測線末端，顯示屯子腳斷層北側有略微下陷的現象，而三義斷層的上盤正持續抬升。此外，海墘至大甲之間的歷年高程變化於 2004 至 2014 年呈現規律之起伏，說明該段區域有以年為週期的變化。

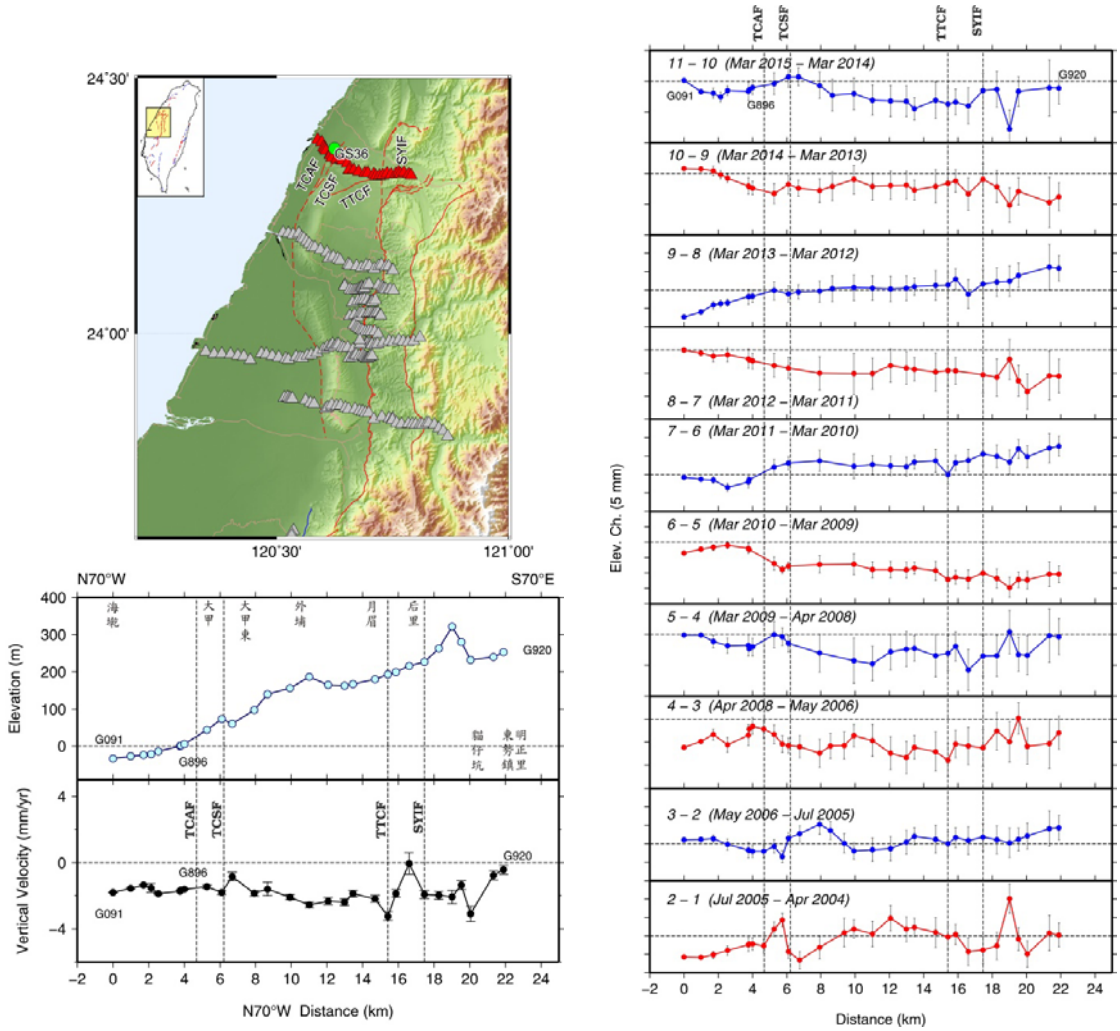


圖 2-3.12：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。左側上欄為水準高程之地形變化，左側下欄為水準平均抬升速率。右側欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

2-3-12 縣 136_龍井至太平測線

本測線橫跨清水斷層和車籠埔斷層，測線長約 26 公里，於 2004 至 2015 年間，共進行 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 和 GS40 之垂直速率（-3.27 mm/yr 和-2.69 mm/yr），作為控制點 G937 及 G929 之垂直速率。

根據圖 2-3.13，此測線之垂直速度在兩個斷層間之垂直速率大多落在-4 到-3 mm/yr 之間，無顯著變化；在清水斷層兩側則呈現不同的趨勢，左側為逐步抬升（由-2.31 mm/yr 到-1.49 mm/yr），右側至大肚山背斜則為下降（最大達-3.85 mm/yr），兩側最大變化量達 5 mm/yr；在跨車籠埔斷層區域之垂直速度則有 4 mm/yr 的變化，均可說明此兩斷層有持續性的活動現象。

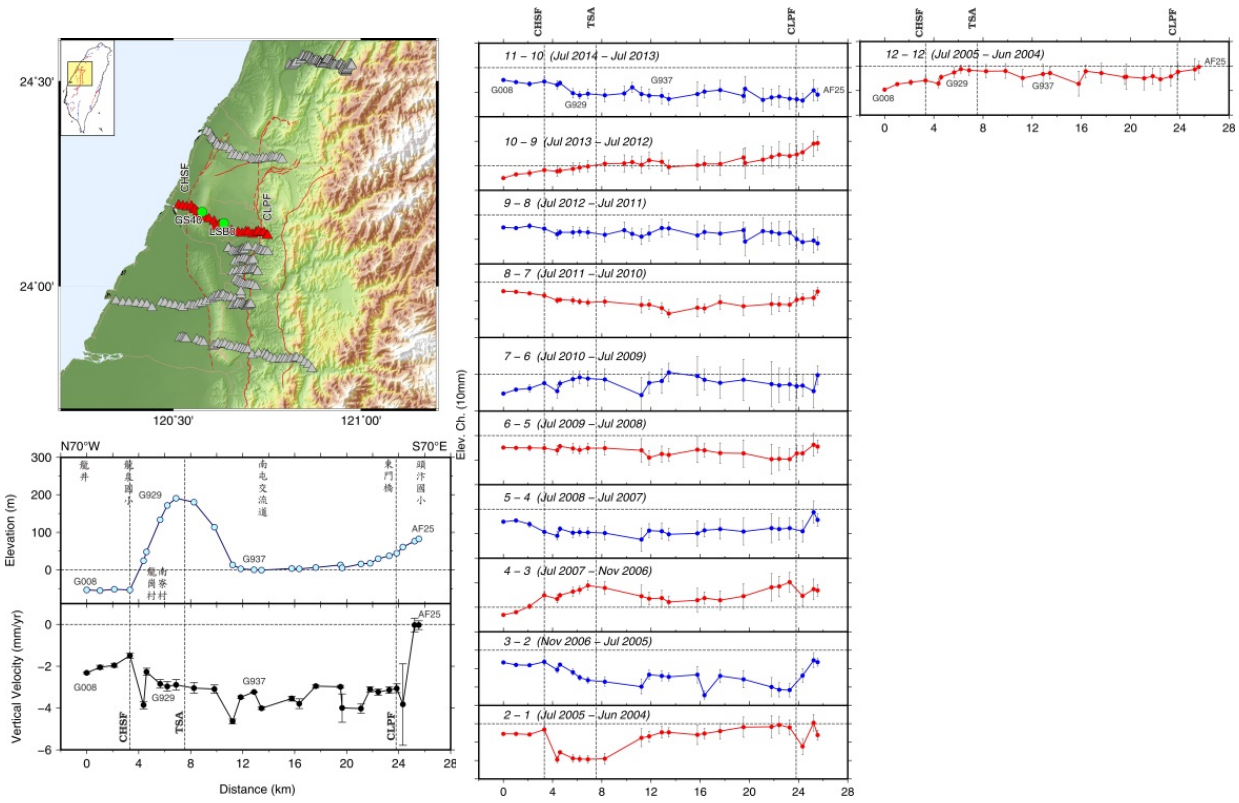


圖 2-3.13：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-13 縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，長約 46 公里，從 2002 至 2015 年共計有 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 CAOT 之垂直速率（-0.3 mm/yr），作為控制點 T075 之垂直速率。南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模六以上的地震，但在 2013 至 2014 年之歷年高程差方面未有明顯的變化；而在跨車籠埔斷層以東至測線末端的點位，其同震位移量僅落在-4.5 mm 到 5.5 mm 之間，此結果說明這兩次地震對本測線的影響未如較南邊的北斗至水里測線顯著。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮南投地震同震位移之影響。

根據圖 2-3.14，彰化斷層以西一帶可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速率最大可達-50 mm/yr。自彰化斷層以東區域之垂直速度均約在-5 ~ 5 mm/yr 之間，然通過車籠埔斷層區域有-4 ~ -1 mm/yr 之垂直速度變化，相對於大茅埔－雙冬斷層地區之變化皆在 3 mm/yr 左右，橫跨車籠埔斷層之變化較為顯著。此結果顯示大茅埔-雙冬斷層在此地區的活動性較不明顯。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，彰化斷層以東之地表垂直變化相對而言較不顯著。

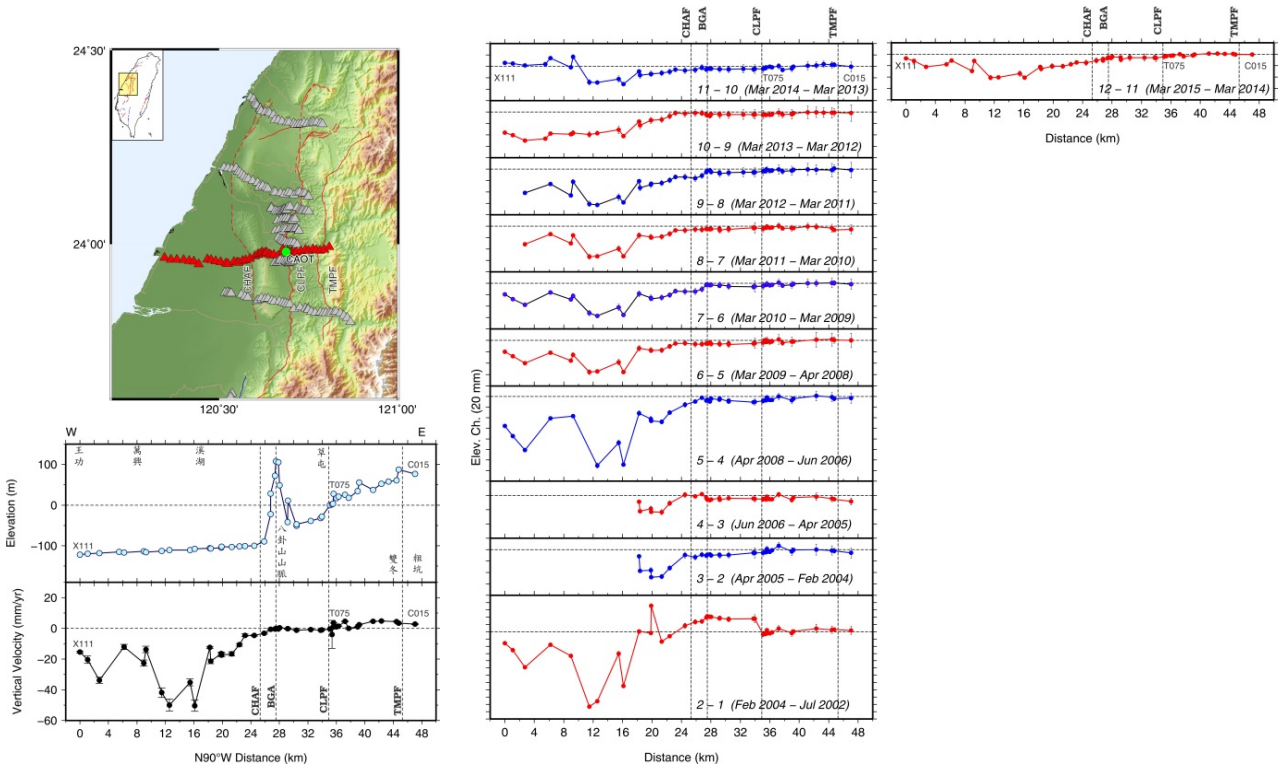


圖 2-3.14：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 為八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

2-3-14 縣 150-台 16_北斗至水里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 38 公里，從 2002 至 2015 年共計有 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS26 之垂直速率（-0.9 mm/yr），作為控制點 MX83 之垂直速率。此外，南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模六以上的地震，造成此測線各點位有 64 mm 到 138 mm 的同震位移量，2013 年至 2014 年之歷年高程差在大茅埔－雙冬斷層上盤也有顯著的抬升，最大值達 85 mm。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮南投地震同震位移之影響。

根據圖 2-3.15 來看，彰化斷層以西之垂直速度雖為沉陷（最大值約-5.5 mm/yr），但不似王功至埔里測線可見明顯的地層下陷現象（最大值約-50 mm/yr）。而自彰化斷層以東至赤水、竹圍一帶，地表則無明顯沉陷。通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的區段（名間至集集），地表高程與垂直速度抬升的狀況更為明顯（約由-4 ~ 8 mm/yr），然而通過大茅埔－雙冬斷層後之地區，其抬升速率由 12 mm/yr 下降至 6 mm/yr，此結果可能顯示斷層滑移量於集集地震過後約 10 年仍然集中於車籠埔斷層以東之滑脫面。

相較於本測線北方之王功至埔里測線，不論是西側的地層下陷情形，與通過車籠埔斷層以東地區的地表抬升趨勢，兩者有明顯的差異，此結果說明車籠埔斷層在中興新村南北兩段的運動模式有所不同。

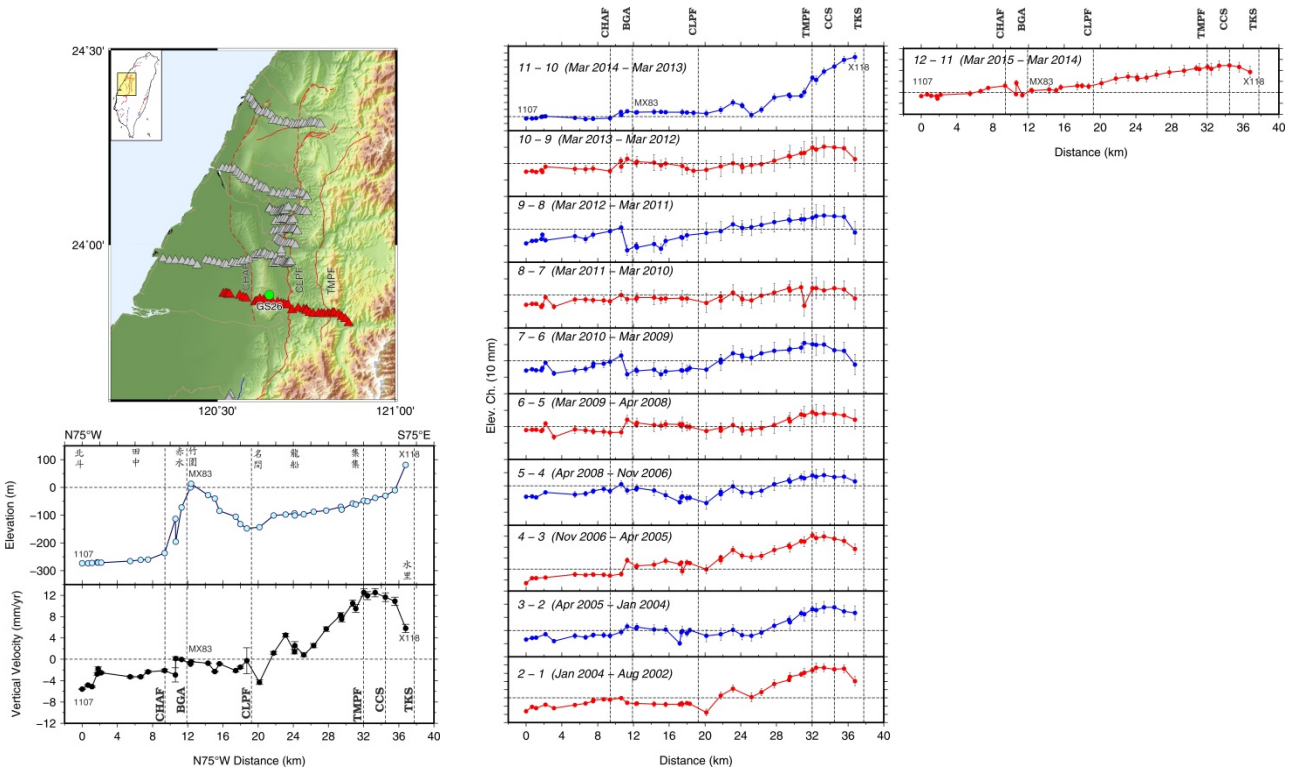


圖 2-3.15：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層、CCS 集集大山向斜、TKS 為頂崁向斜。

2-3-15 縣 164_金湖至瑞峰測線

本測線橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層，總長約 54 公里， 2003 年至 2015 年間共進行 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS17、GS05 及 S103 之垂直速率（-2.13 mm/yr、-0.21 mm/yr 及 4.70 mm/yr），作為控制點 G776、G758 和 G742 之垂直速率。

根據圖 2-3.16，梅山斷層以西之垂直速度變化較大，最大達-26 mm/yr，以東到九芎坑斷層則大多介在-2 至 0 mm/yr 之間；在跨九芎坑斷層與觸口斷層之區域（約 40~46 公里處），垂直速率雖然未有顯著變化（變化量<2 mm/yr），但至測線末段之整體趨勢為逐步抬升（約從 0.5 到 6 mm/yr）。在地形高程部分，梅山斷層以西為平原地區，因此較無變化，而在九芎坑斷層以東則有顯著的地形起伏，或許可說明九芎坑斷層與觸口斷層仍有活動的跡象。

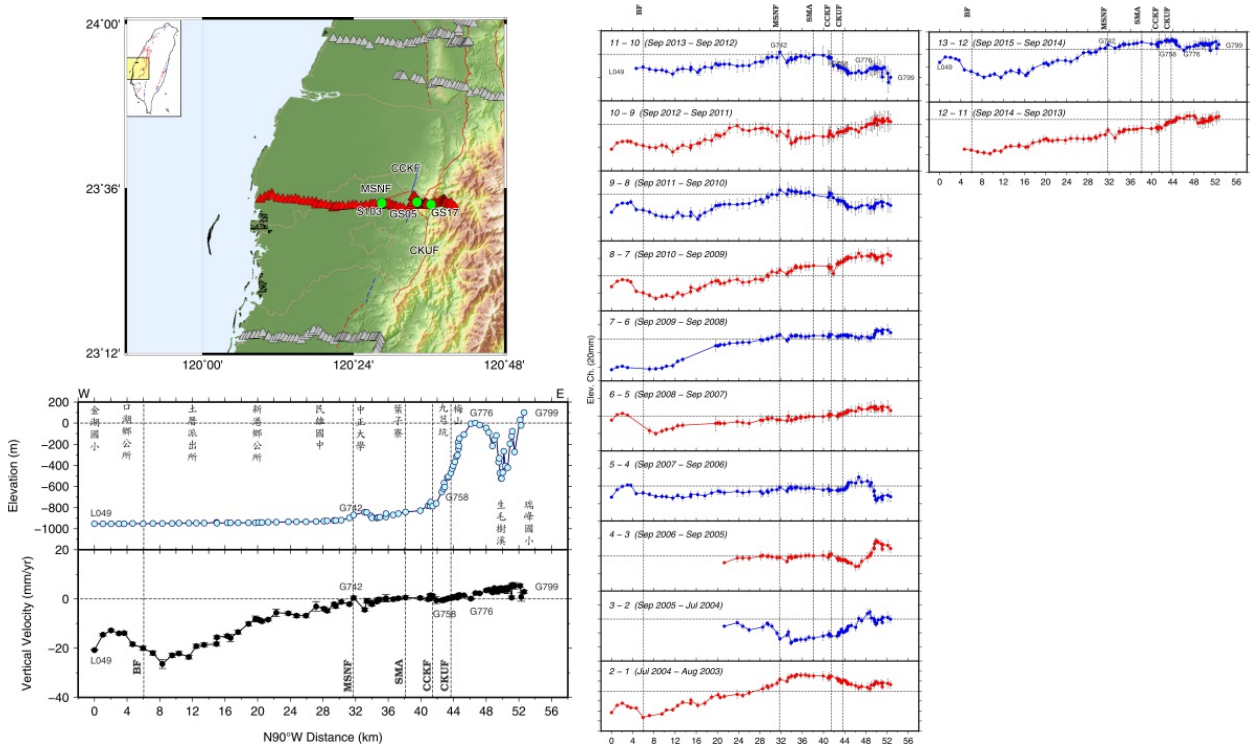


圖 2-3.16：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。BF 為 B 斷層、MSNF 梅山斷層、SMA 為小梅背斜、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

2-3-16 縣 174_北門至楠西測線

本測線橫跨六甲斷層與觸口斷層，測線長約 40 公里，從 2003 年至 2015 年共計有 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS44 之垂直速率（8.0 mm/yr），作為控制點 I088 之垂直速率。

根據圖 2-3.17，六甲斷層以西的地表高程變化雖較和緩，但垂直速率卻有逐步抬升的趨勢（約-15 ~ 4 mm/yr），在通過六甲斷層至觸口斷層以西的 5 公里內之間有達 10 mm/yr 以上的垂直抬升速度，此結果若非反應六甲斷層在此 10 年內均保持著活動性，即表示六甲斷層與觸口斷層間存在的北勢坑斷層為一活動構造。本測線自六甲斷層以東，點位的高程變化趨勢變得較顯著，顯示自進入山區地段，地表高程活動性增加。

此外，水準點位 G824（柚子坑）在近四年有明顯的沉陷，確實原因有待現場勘驗。

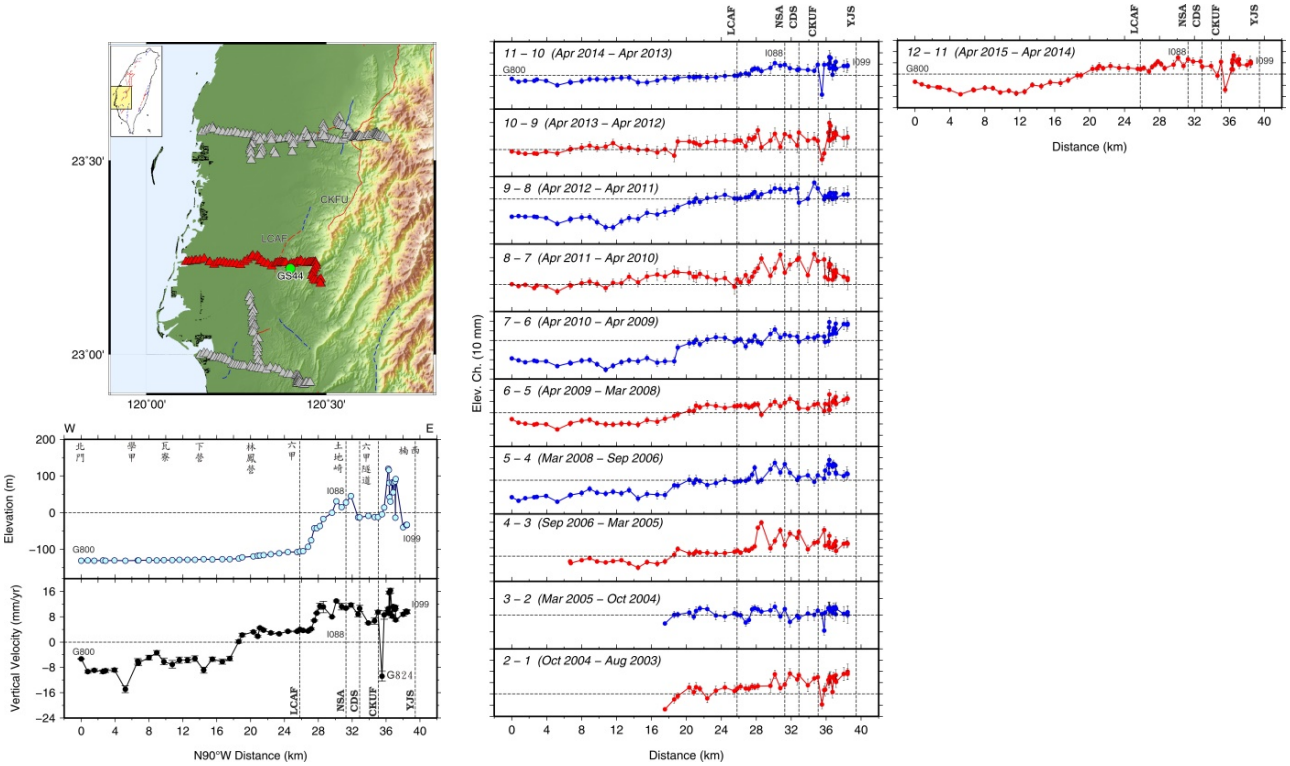


圖 2-3.17：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、NSA 為牛山背斜、CDS 為前大埔向斜、CKUF 為觸口斷層、YJS 為玉井向斜。

2-3-17 縣 182_安平至龍崎測線

本測線橫跨臺南台地與後甲里斷層，從臺南安平至龍崎，全長約 33 公里，從 2001 年至 2015 年共計有 16 次施測。本測線以 GPS 連續站 CK01 之垂直速率（2.7 mm/yr），作為控制點 TN04 之垂直速率。

不論由地形剖面、高程歷年變化及垂直速率圖上均可明顯見到臺南台地之存在（臺南市中西區至仁德一帶），且台地之東緣有往東延伸之趨勢。測線最西側（臺南市安平區至中西區）有約 5 mm/yr 之沉陷速率；而臺南台地的西緣（臺南市中西區）至台地的東緣（虎尾寮、仁德），由水準高程變化可發現該區域有穩定的之地表抬升速率趨勢（約 0.3 ~ 5 mm/yr），但整體的地表垂直變化量並不明顯；另外在虎尾寮地區跨過後甲里斷層的點位每年均有抬升的趨勢，平均抬升速率變化約為 6 mm/yr，且通過斷層後（仁德）立即有下陷的變化，最大差異量達 7 mm/yr（圖 2-3.18），此現象或可說明後甲里斷層為一活躍之活動構造，然因此區域之歷年高程變化量均在 10 mm/yr 以下，故在最近 10 年內該斷層之垂直方向的活動性並不顯著。在關廟以東之區域。抬升速率一路上升至 20 mm/yr，並在通過龍船斷層後，立即降至無顯著抬升。

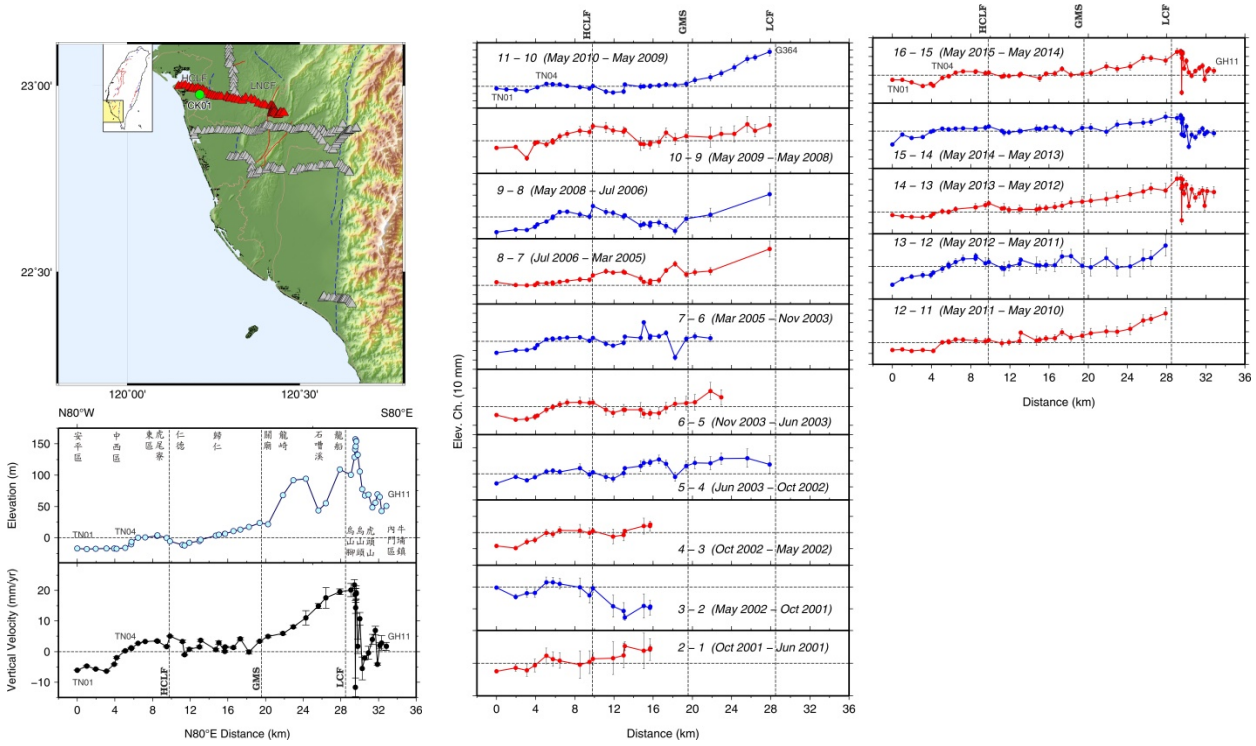


圖 2-3.18：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、GMS 為關廟向斜、LCF 為龍船斷層。

2-3-18 台 28_路竹至茂林測線

本測線橫跨小崗山、龍船、旗山及潮州斷層，路線長約 50 公里，從 2002 至 2015 年共計有 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS55 和 CISH 之垂直速率（0.6 及 3.5 mm/yr），作為控制點 R016 與 J116 之垂直速率。此外，2010 年 3 月芮氏規模 6.4 的甲仙地震，造成此水準測線點位有-5 ~ 95 mm 之同震位移量，由 2010 至 2011 年之歷年高程變化圖可知，小岡山斷層與旗山斷層間有明顯的同震現象，龍船斷層附近尤其顯著。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮甲仙地震之同震位移之影響。

台 28_路竹至茂林測線於中壇分成北（縣 184 主線）與南（台 27 副線）兩條水準測線。由圖 2-3.19 顯示，主線於小崗山斷層與龍船斷層之間的垂直速率持續增加（約 0 ~ 15 mm/yr），與地形剖面比較，此區域（月世界一帶）垂直速率增加之處與地形高程變化並不吻合，推測此地表抬升現象可能與小崗山斷層的活動或是泥灌入體有關。

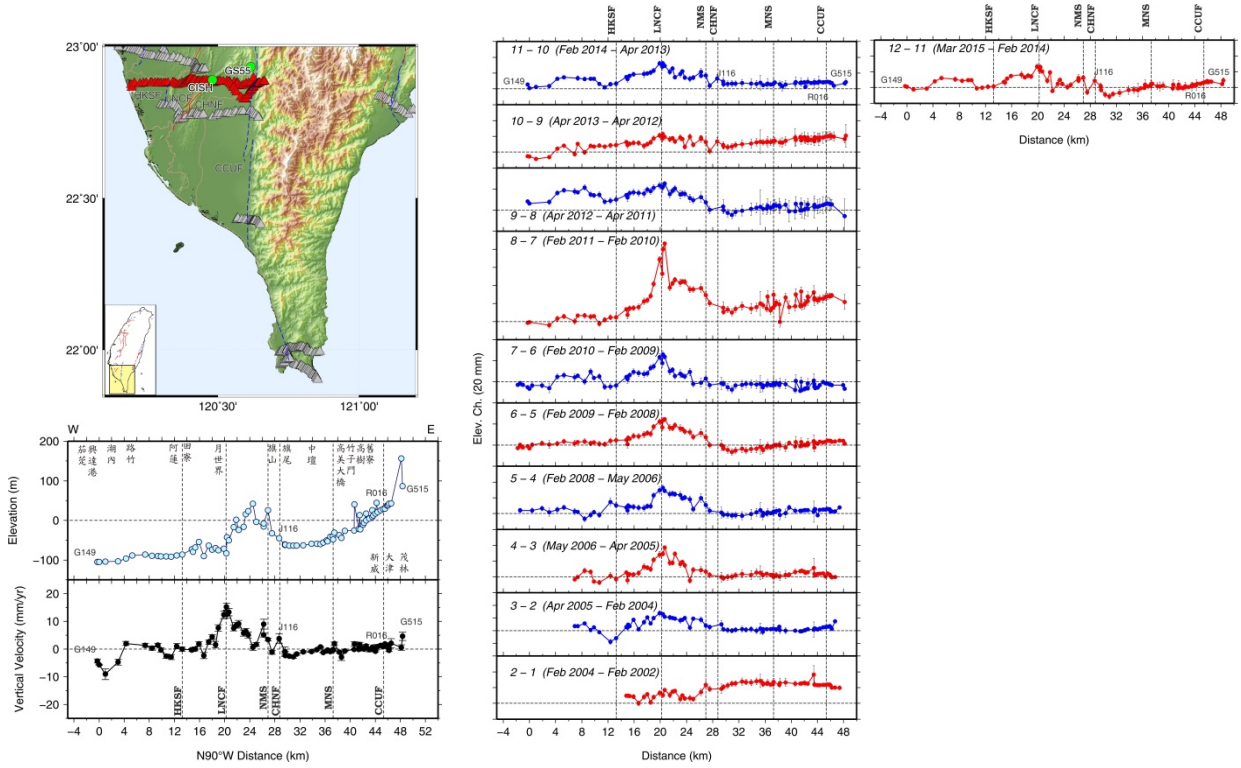


圖 2-3.19：縣 184_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、LNCF 為龍船斷層、NMS 為內門向斜、CHNF 為旗山斷層、MNS 為美濃向斜、CCUF 為潮州斷層。

2-3-19 台 22_岡山至安坡測線

本測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層，測線長約 36 公里，從 2004 年至 2015 年共計 11 次施測。本測線以 GPS 連續站 AKND 之垂直速率（3.2 mm/yr），作為控制點 G525 之垂直速率。

根據圖 2-3.20，地表高程在跨越小崗山斷層有抬升現象，垂直速率由-4.5 mm/yr 升至 4 mm/yr。在橫跨潮州斷層區域，垂直速率並未有明顯之變化量（約 1 mm/yr），或許可說明潮州斷層在本區域中並未有明顯之活動發生。

此外，水準點位 G533（橫山國小）在 2010 年至 2011 年間下陷約 100 mm，但之後幾年趨於穩定。其主要因為該校於 2011 年初進行操場周邊整建工程，造成該點下陷及位移，並非由地質活動所引發，在資料應用時須特別注意。（圖 2-3.21）

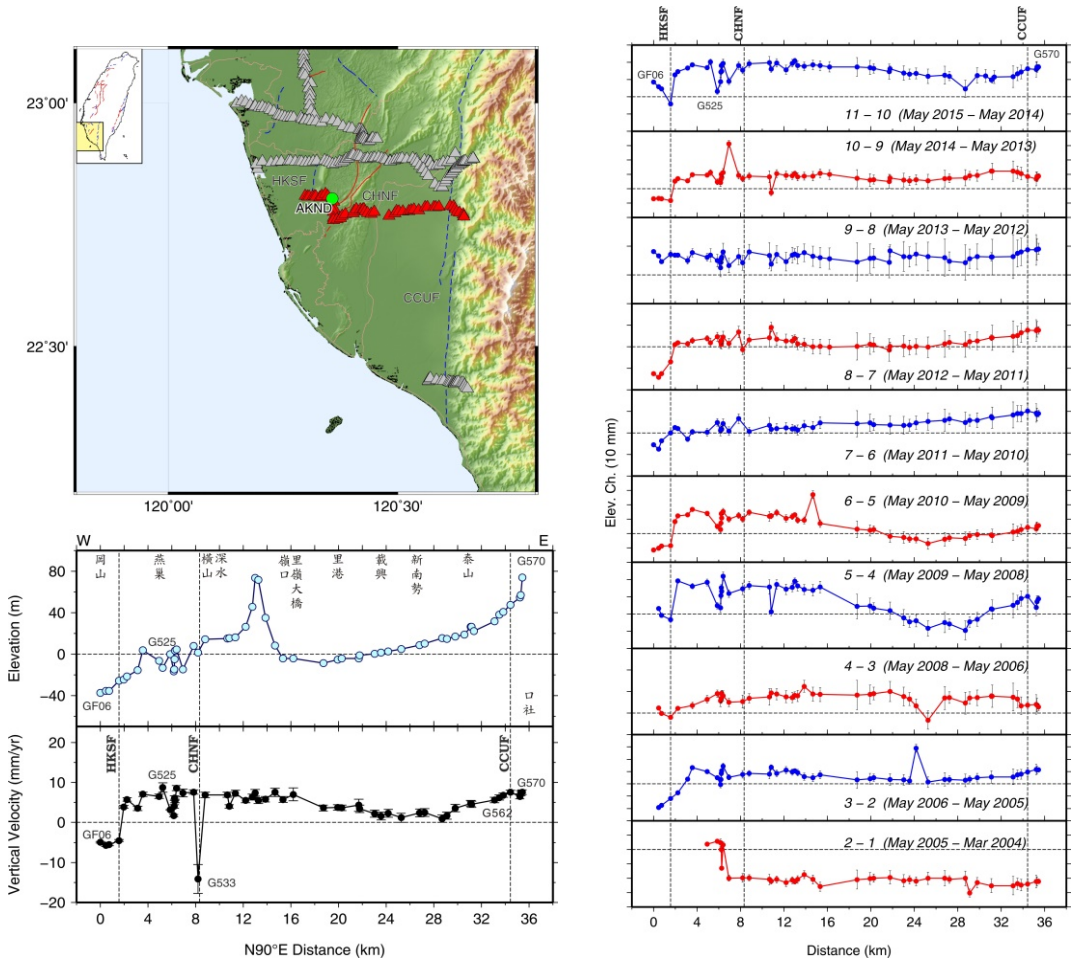


圖 2-3.20：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。



圖 2-3.21：水準點位 G533 現地情形。

2-3-20 佳冬至七佳測線

本測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里，於 2005 至 2015 年間共進行了 11 次的施測，主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。本測線以 GPS 連續站 CLON 之垂直速率（-14.53 mm/yr），作為控制點 GC85 之垂直速率。

根據圖 2-3.22，該測線於 2007~2008 年間之高程變化與其他時段（2005~2007 年、2008~2010 年）不同，疑與 2008 年 8 月如麗颱風（NURI）之降雨有關（警報期間：8/19~8/21；水準測量期間：9/04~9/09）。潮州斷層西側之垂直速度變化較明顯，最大值達-20 mm/yr；斷層東側 2 公里內之變化較小，垂直速度落在-3 至 0 mm/yr 之間，說明潮州斷層近期仍有活動跡象。

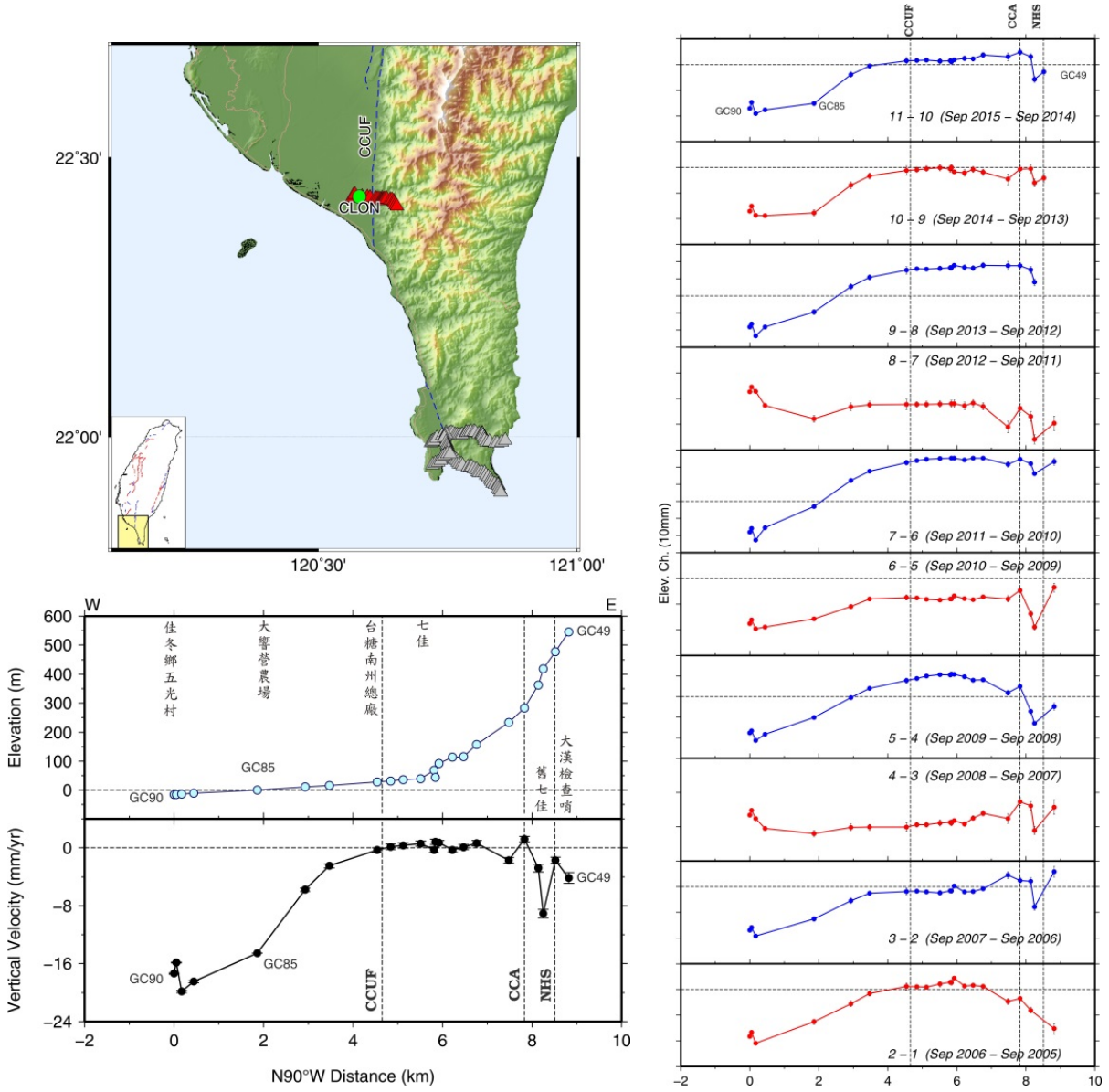


圖 2-3.22：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層、CCA 為七佳背斜、NHS 為南和向斜。

2-3-21 恆春半島地區測線

恆春半島地區共規劃有 2 條橫跨恆春斷層的精密水準測線，分別是北邊的恆春西台地至佳樂水測線（長約 15 公里）以及南邊地台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副測線（分別長約 13 和 3 公里)。至 2015 年止，共有 12 次的測量資料。恆春西台地至佳樂水測線以 GPS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-4.12 mm/yr)、震後至 2010 年垂直速率（-8.4 mm/yr）及 2010 年至今之垂直速率（-1.5 mm/yr)，作為控制點 G670 之垂直速率；台 26_恆春至鵝鑾鼻則以 GPS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（1.4 mm/yr)、震後至 2010 年垂直速率（6.9 mm/yr）與 2010 年至今之垂直速率（4.8 mm/yr)，作為控制點 Q014 之垂直速率。

根據圖 2-3.23 與圖 2-3.24，在歷年高程變化的部分，恆春半島的兩條水準測線在 2006 年以前均無明顯變化，說明 2006 年以前恆春斷層並無顯著之活動性。但在 2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號)，造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化。恆春西台地至佳樂水測線支點位，最大同震量達-63 .08 mm；恆春至鵝鑾鼻測線，最大同震量達-76.09 mm。

在垂直速率部分，以斷層東邊約兩公里為分界，兩條測線在震後均呈現不同的運動型態（紅色及藍色部分)，西側為沉陷、東側為抬升。其中較南邊的恆春至鵝鑾鼻測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為 5.96 mm/yr（紅色部分)，2010 年至今的平均速率約為 3 mm/yr（藍色部分)；較北邊的恆春西台地至佳樂水測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為 2 mm/yr(紅色部分)，2010 年至今的平均速率約為 4 mm/yr(藍色部分)，此現象或許可說明在 2006 年震後至 2015 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北傳遞的現象。

此外，恆春至鵝鑾鼻主、副測線之點位 G637（南灣渡假飯店)，其 2010 年後至今之垂直速度（藍色）與 2010 年前的兩段速度並不一致（黑、紅色)。根據實地勘驗結果，是因點位周遭進行道路工程所導致，並非由地質活動所造成。

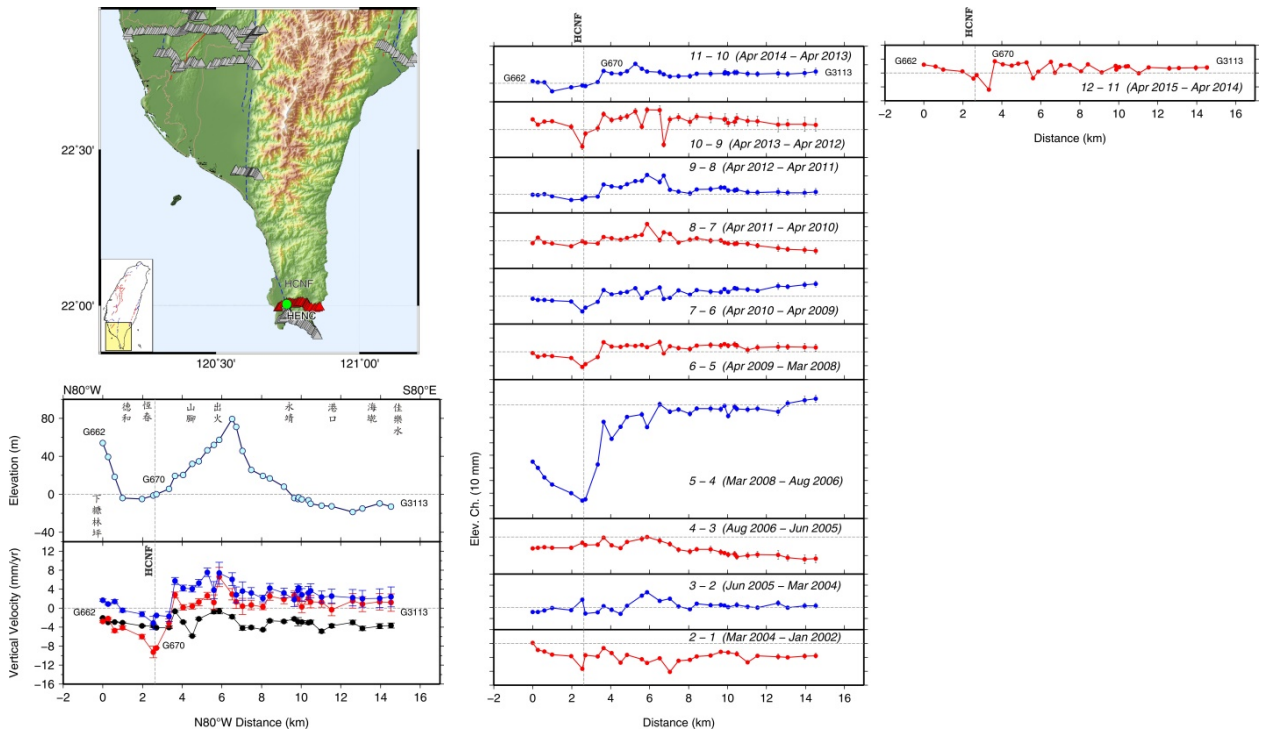


圖 2-3.23：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。左下欄中之黑色 2002~2006 年恆春地震震前垂直速度、紅色為 2006~2010 年恆春地震震後垂直速度、藍色為 2010 年至今之垂直速度。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

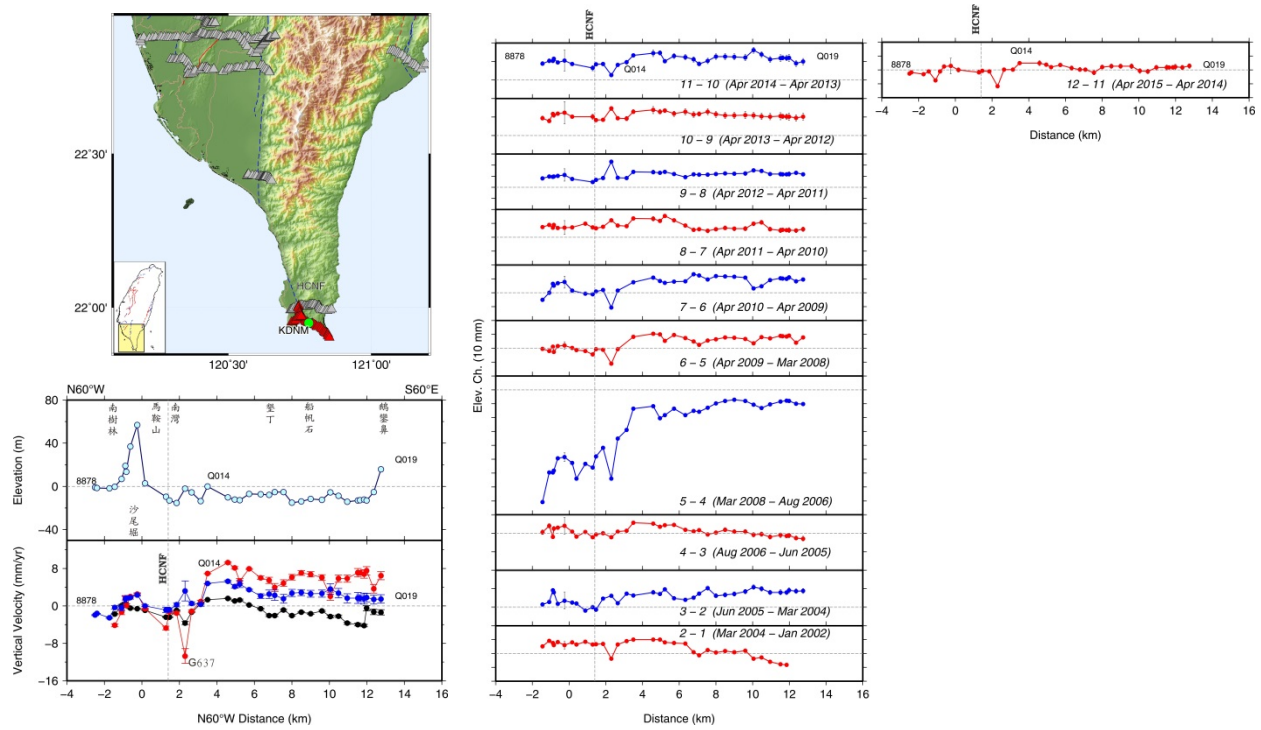


圖 2-3.24：台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。左下欄中之黑色為 2002~2006 年恆春地震震前垂直速度、紅色為 2006~2010 年恆春地震震後垂直速度、藍色為 2010 年至今之垂直速度。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HNCF 為恆春斷層。

2-3-22 跨車籠埔斷層之測線

經濟部中央地質調查所從 2007 年起在車籠埔斷層沿線，設置了 5 條橫跨斷層之水準測線，由北至南分別為五光至黃竹、曾厝至霧峰、北勢至峰谷、烏溪南岸及中興新村。自 2007 至 2015 年止，除五光至黃竹共計有施測 9 次外，其他四條測線各有 8 次施測（2014 年僅施測五光至黃竹）。根據圖 2-3.25 至圖 2-3.29 之垂直速度及歷年高程變化來看，跨車籠埔斷層之五條短測線，近幾年並無明顯之變化，呈現相對穩定的狀態。

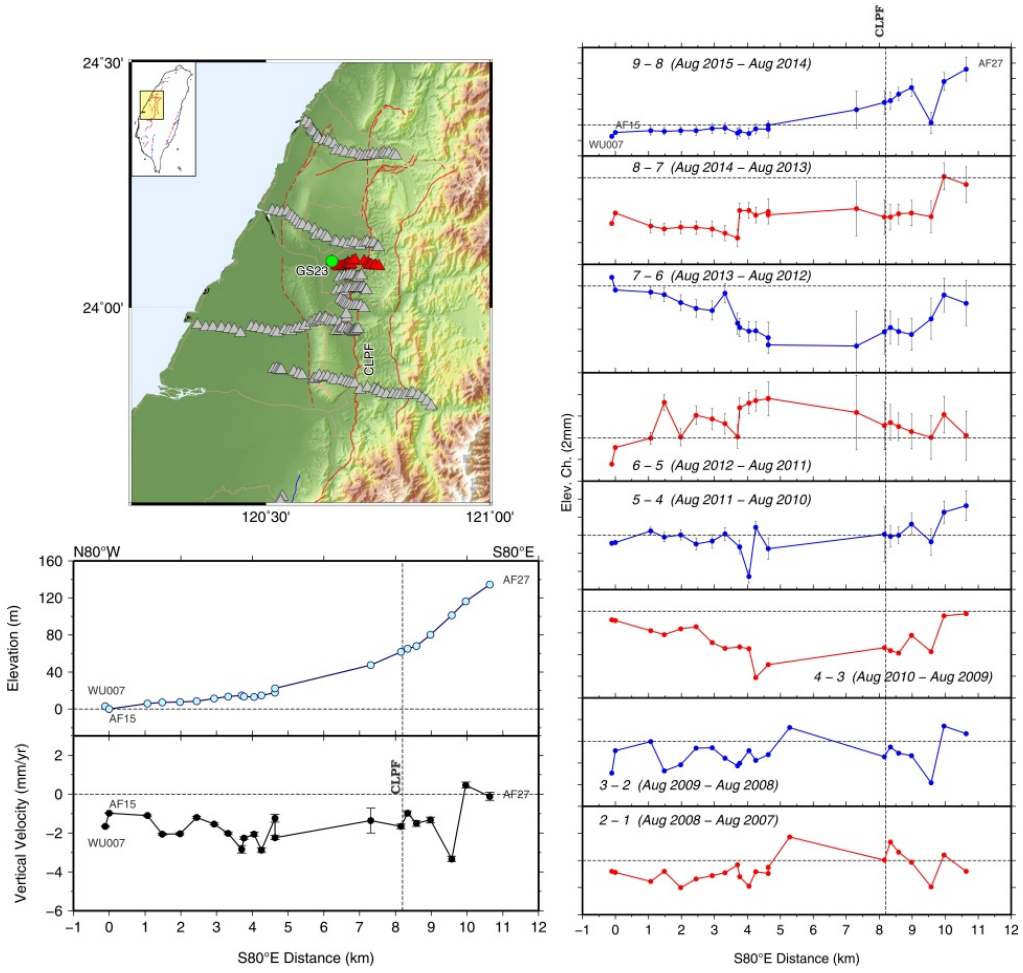


圖 2-3.25：五光至黃竹水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

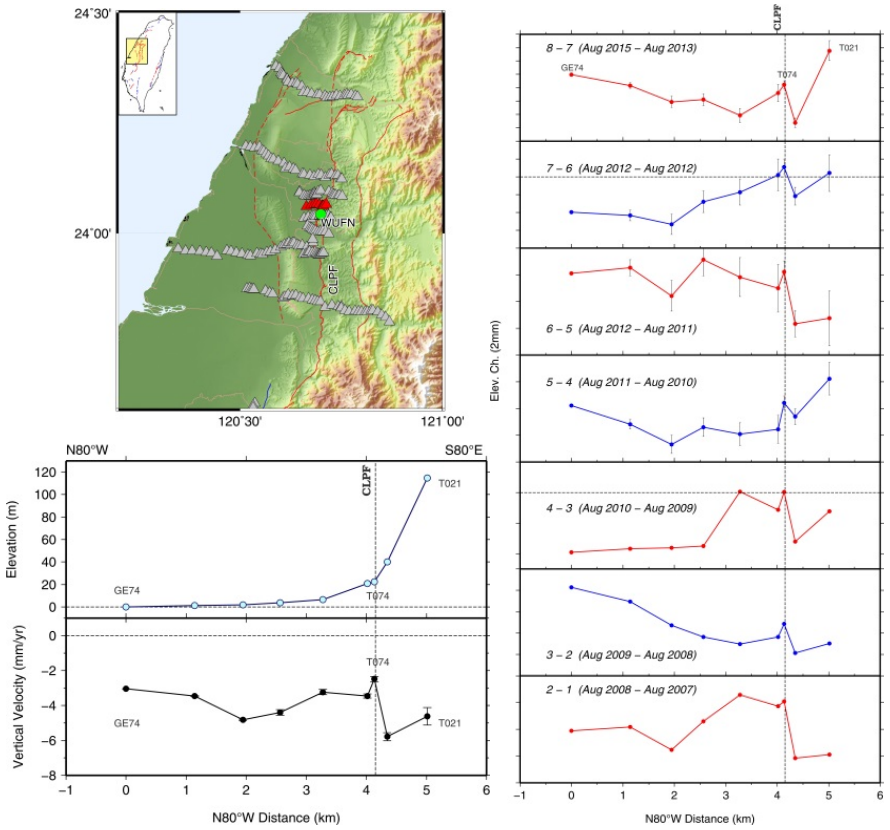


圖 2-3.26：曾厝至霧峰水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

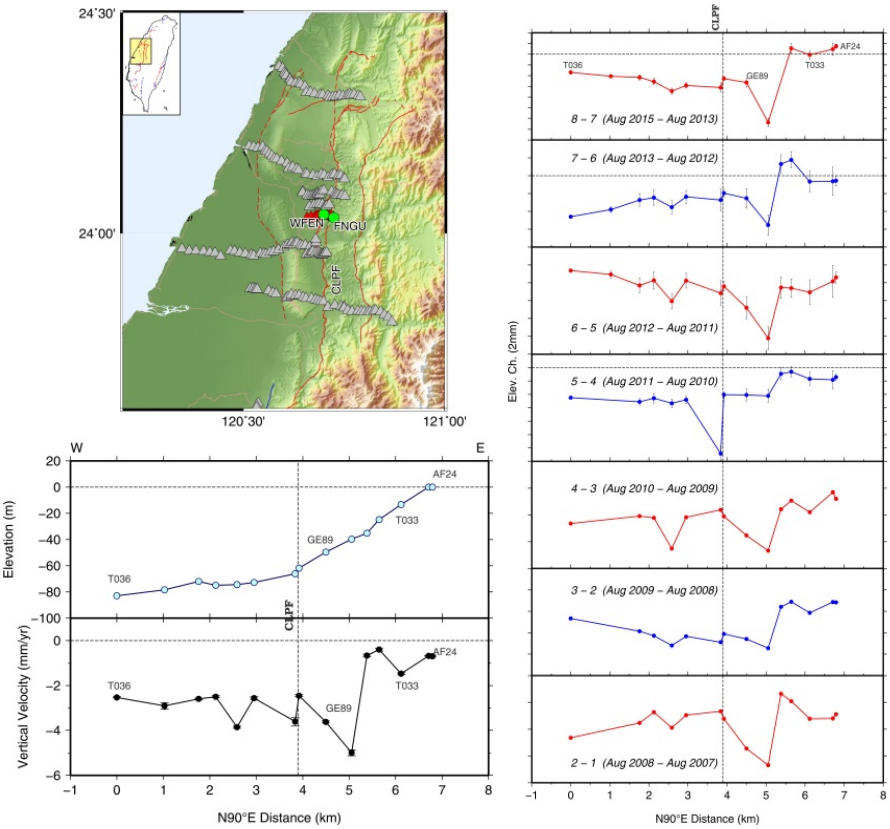


圖 2-3.27：北勢至峰谷水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

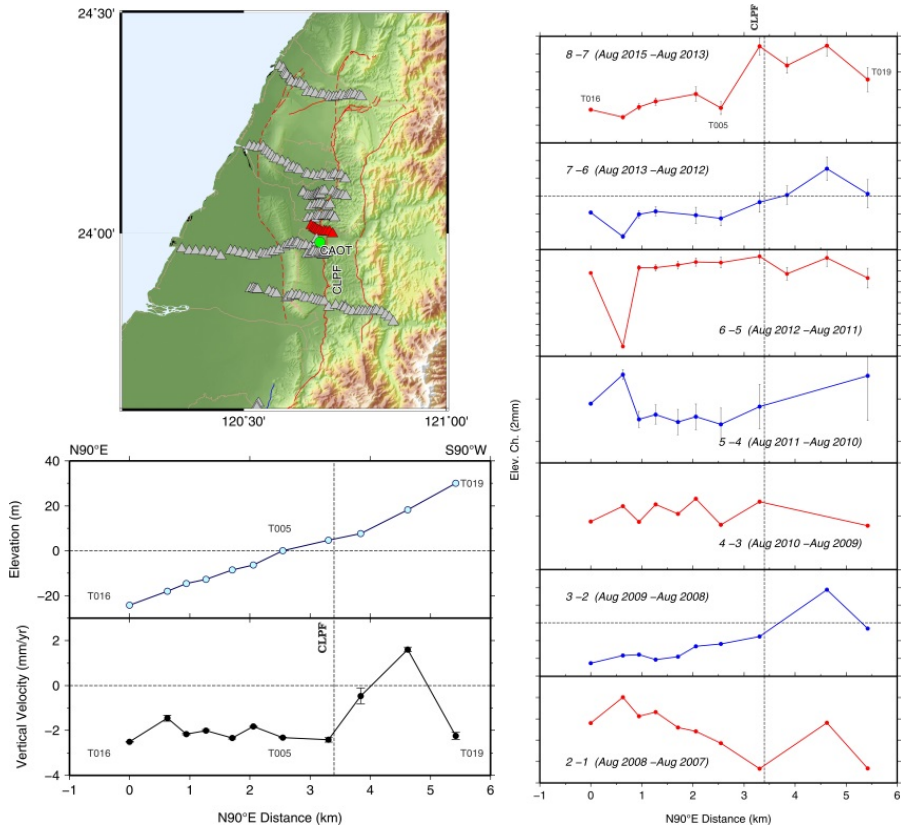


圖 2-3.28：烏溪南岸水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

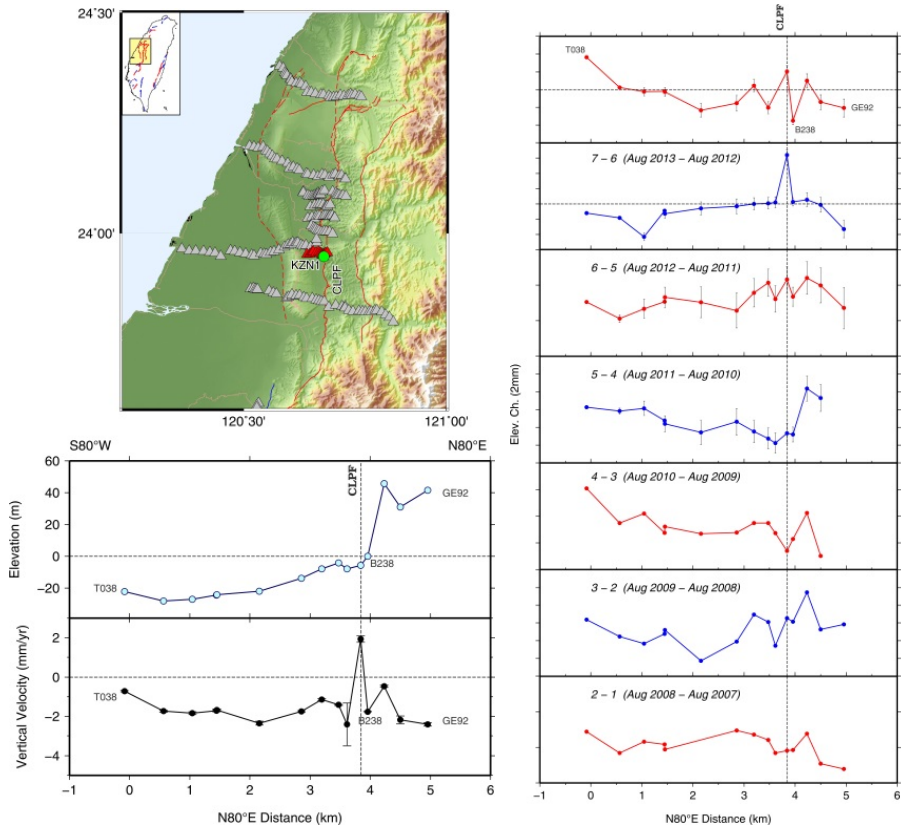


圖 2-3.29：中興新村水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-23 台 19 甲_善化至關廟測線

本測線橫跨新化斷層，測線長約 22 公里，從 2003 年至 2015 年共計有 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（2.84 mm/yr），作為控制點 G374 之垂直速率。

根據圖 2-3.30， 此測線之北側垂直速度約落在 0 ~ 4 mm/yr 之間，南側垂直速度約落在 2 ~ 8 mm/yr 之間，地形高程在跨越斷層後也有顯著抬升現象。另從歷年高程變化來看，此測線在 2009 年至 2015 年在跨越斷層皆後有抬升的趨勢，約有 20 mm 變化量。

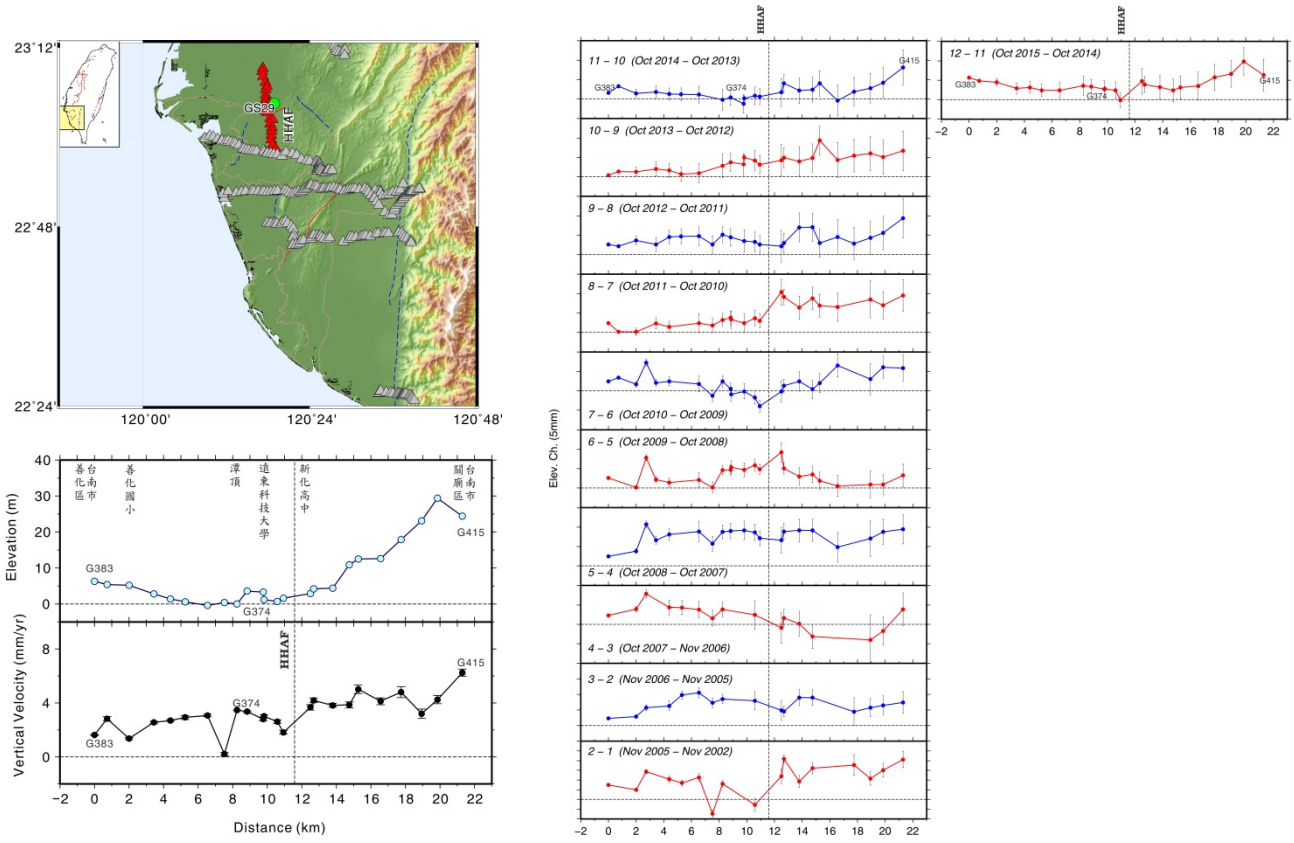


圖 2-3.30：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

2-3-24 嶺頂至瀧澗測線

本測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 20 公里，從 2004 年至 2015 年共計有 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 YENL 之垂直速率（-8.27 mm/yr），作為控制點 G971 之垂直速率。

根據圖 2-3.31，此測線在斷層西側之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在斷層東側則不一致。跨斷層之垂直速度為沉降趨勢，速度約由-7.2 mm/yr 降至-9.2 mm/yr，地表高程則約有 10 m 的抬升量。

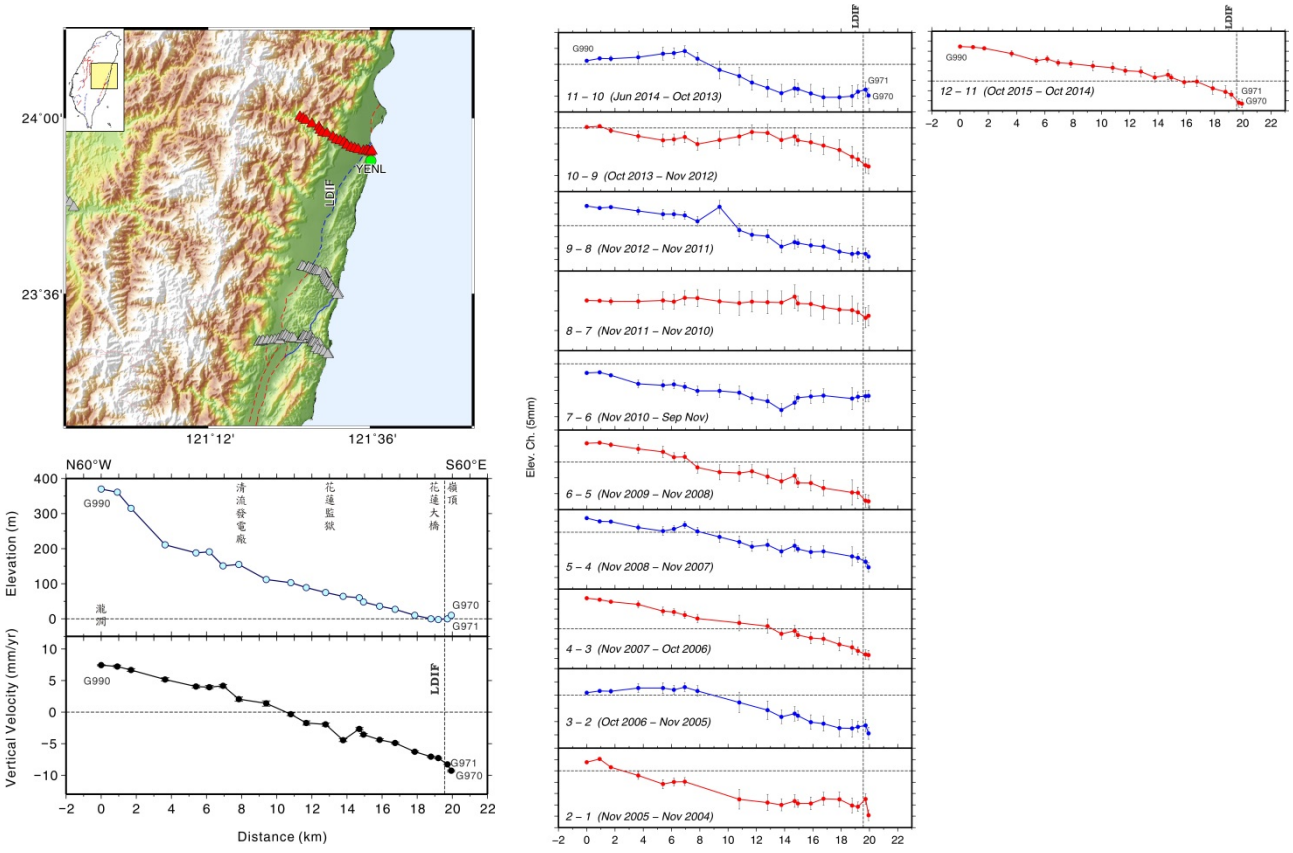


圖 2-3.31：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

2-3-25 光復至豐濱測線

本測線橫跨瑞穗及奇美斷層，測線長約 12 公里，從 2004 年至 2015 年共計有 13 次施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 FENP 之垂直速率（-6.68 mm/yr），作為控制點 G991 之垂直速率。

根據圖 2-3.32，此測線在奇美斷層以西之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在奇美斷層東側則不一致。在跨奇美斷層後之地表高程約有 18 m 沉陷量，而垂直速度則從-11.4 mm/yr 緩升至-9.7 mm/yr。另在瑞穗斷層西側之垂直速度約落在-10 mm/yr 至-5 mm/yr，跨斷層後則逐漸抬升至 5 mm/yr。另外，根據歷年高程變化（Sep 2013 - Oct 2013）可知，2013 年 10 月 31 日之瑞穗地震在奇美斷層西側造成顯著抬升，同震位移量達 100 mm，抬升量較紅葉-靜浦測線大（20 mm）。

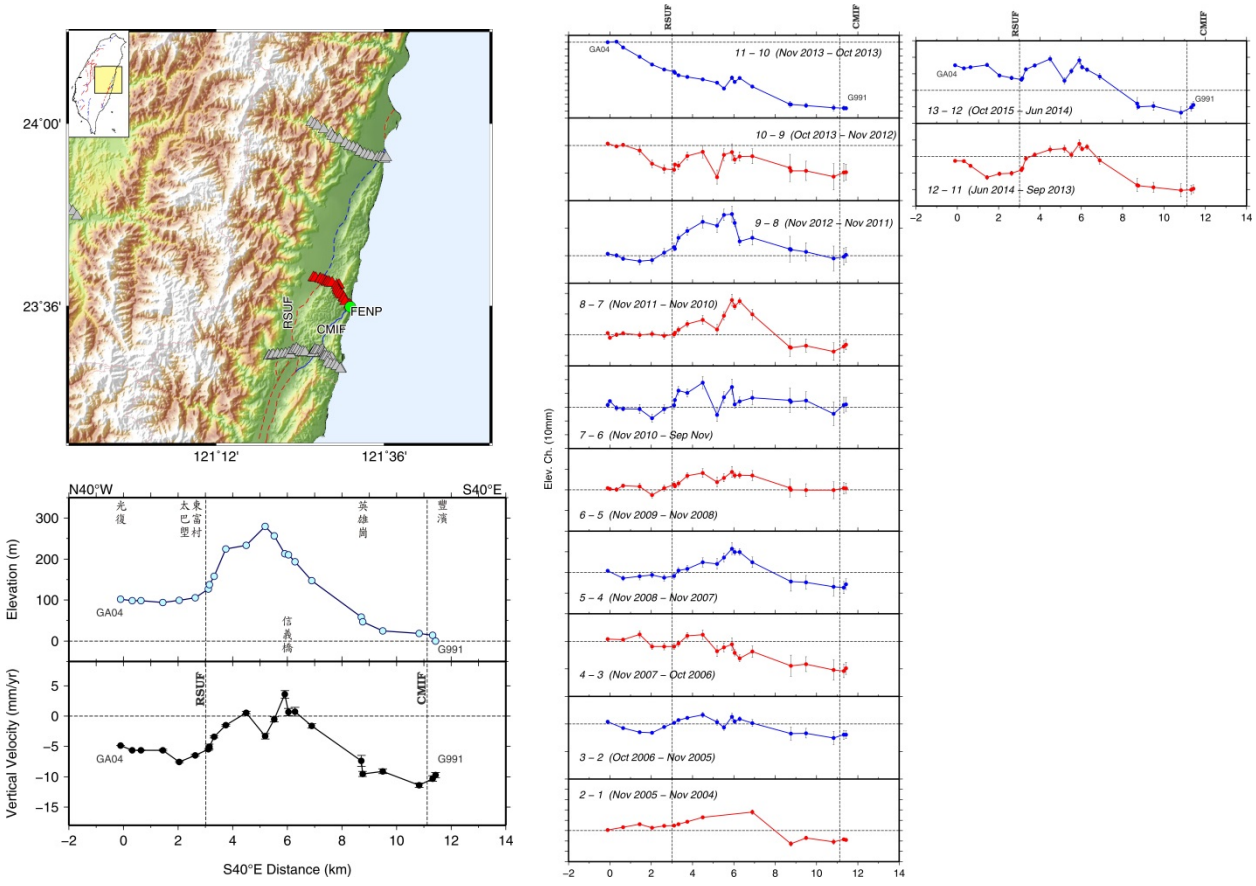


圖 2-3.32：光復至豐濱水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

2-3-26 紅葉至靜浦測線

本測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層，測線長約 18 公里，2004 年至 2015 年間進行共 13 次的施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（0.32 mm/yr），作為控制點 GA22 之垂直速率。

根據圖 2-3.33，此測線在玉里斷層左側之垂直速度約由-5 mm/yr 降至-10 mm/yr，在玉里斷層東側至奇美斷層西側，速度變化約由-10 mm/yr 緩升至 2 mm/yr，可說明此測線跨過的三條斷層仍有地質活動。另外，根據歷年高程變化（Nov 2013 - Oct 2013）可知，2013 年 10 月 31 日之瑞穗地震在奇美斷層西側造成顯著抬升，同震位移量達 20 mm，抬升量較光復-豐濱測線小（100 mm）。

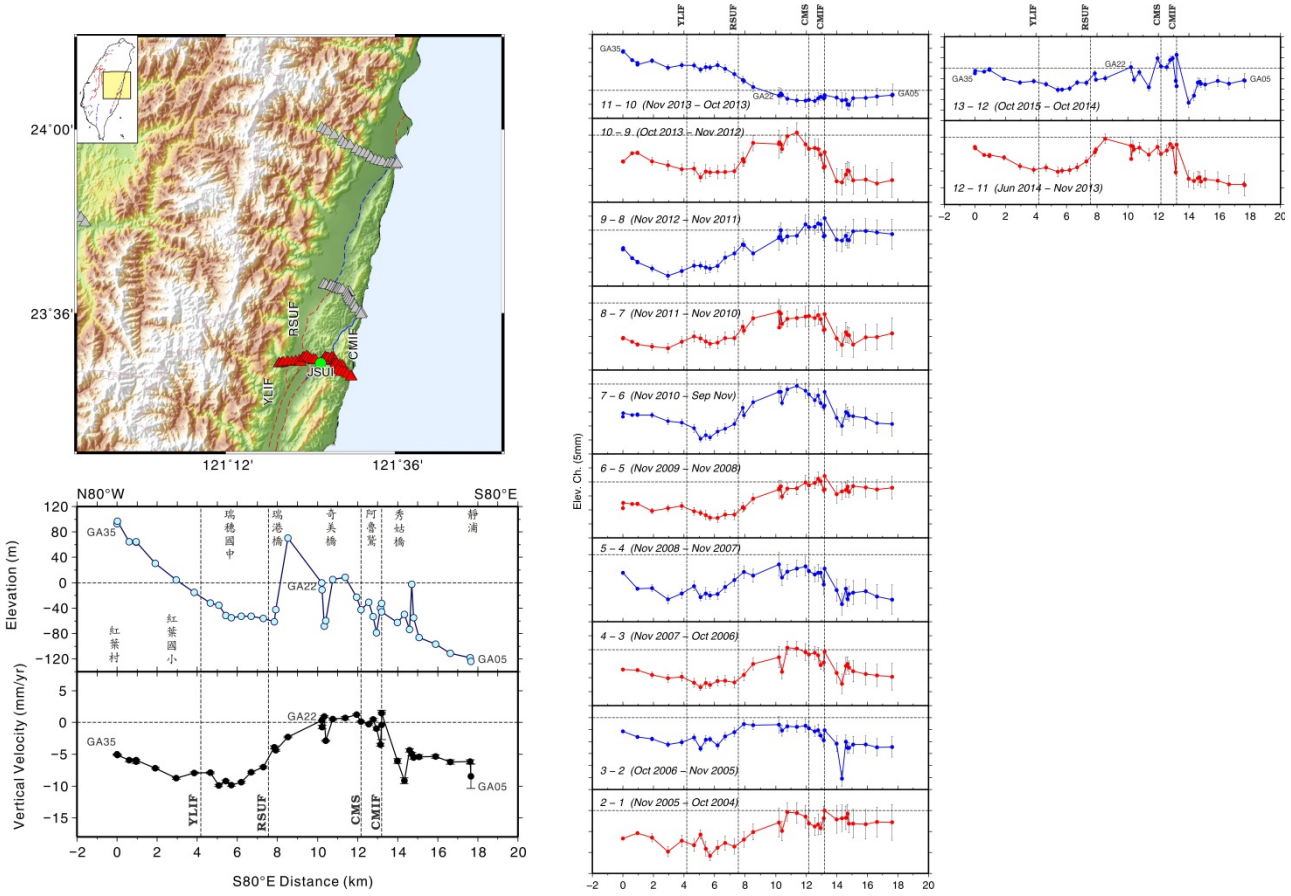


圖 2-3.33：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

2-3-27 東成至富岡測線

本測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層，測線長約 14 公里，2009 年至 2015 年間共進行 7 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 之垂直速率（-2.49 mm/yr），作為控制點 A086 之垂直速率。

根據圖 2-3.34，從東成跨過鹿野斷層到岩灣國小一帶，垂直速度約由-3 mm/yr 上升至 6 mm/yr；此外，從歷年高程變化來看，過去一年（Oct 2015 - Oct 2014）鹿野斷層以東有顯著的抬升，最大變化量達 25 mm，可說明鹿野斷層近期仍有活動。

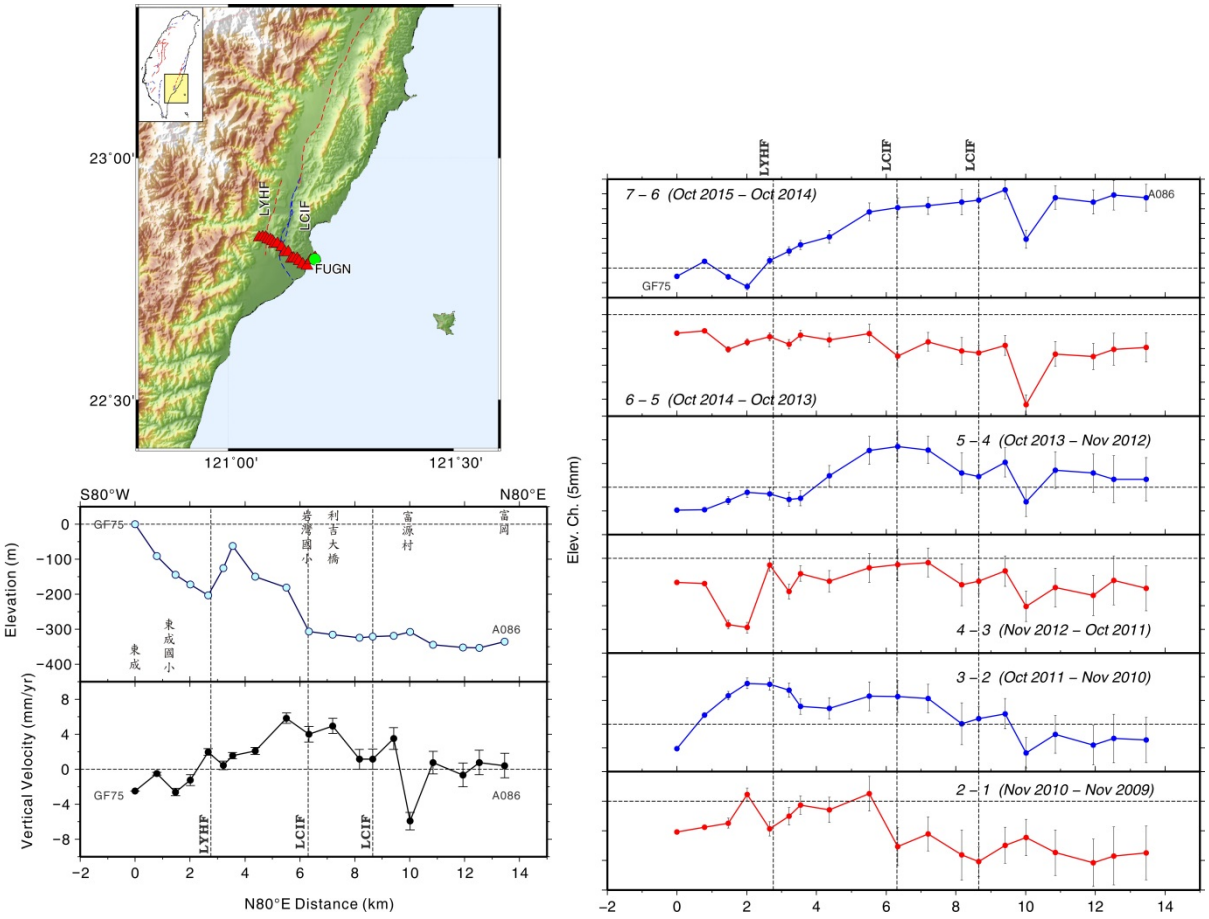


圖 2-3.34：東成至富岡測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

2-3-28 梗枋-東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長約 44 公里，2011 年至 2015 年間共進行 5 次施測。本測線以 GPS 連續站 SUAO 之垂直速率（-2.27 mm/yr），作為控制點 GG83 之垂直速率。

根據圖 2-3.35，該測線由宜蘭縣頭城鎮沿台 2 線至蘇澳鎮再轉接台 9 線至南澳鄉東澳村。在梗枋至蘭陽隧道前皆為蘭陽平原地區，故地形高程起伏較小，但自頭城鄉烏石港至五結鄉傳藝中心一帶，垂直速度約從 0 mm/yr 降至-10 mm/yr，，歷年高程（Oct 2015 – Oct 2014）也有 20 mm/yr 的變化量，顯示該區有地層下陷之情形。通過蘭陽隧道至東澳嶺一帶為丘陵及山地地形，因此地表高程有明顯的起伏。測線終點東澳一帶為三角洲，因此過東澳嶺一帶地形呈現下降的趨勢，垂直速度約在 0 mm/yr 至-10 mm/yr 之間。

水準點位 9053（永平橋）位於蘇花公路 116 公里處，近幾年有 3～7 公分的下陷。經現地勘查發現，該處有坍方情況發生，建議停止測量此點並另尋地基較穩固之處重新埋設此點，避免測量人員危險，另在運用資料時排除該點數據。

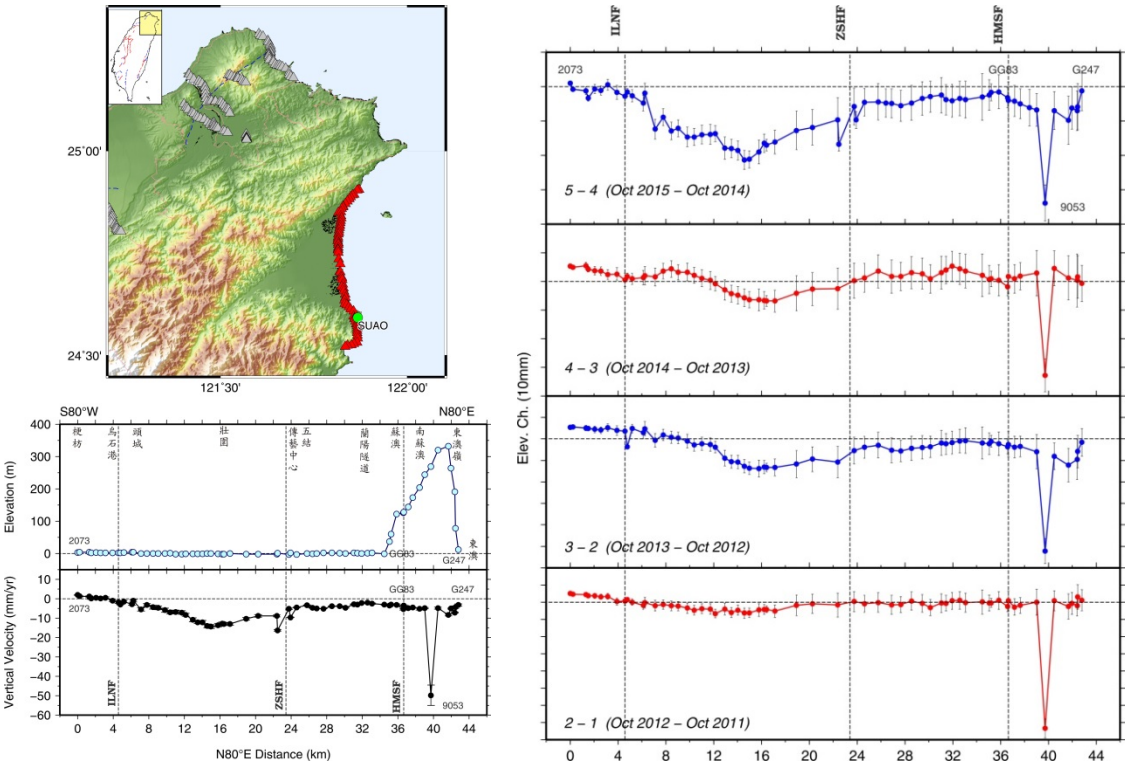


圖 2-3.35：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水-梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。



圖 2-3.36：水準點位 9053 現地狀況。

2-3-29 跨梅山斷層之短測線

經濟部中央地質調查所從 2007 年起在梅山斷層沿線，設置了 7 條橫跨斷層之水準測線，由西至東分別為「B003-B092」、「B036-B086」、「B087-B080」、「B002-B059」、「B110-B101」、「B037-B095」、「G088-G330」。自 2007 至 2015 年止，共計有 7 次施測。此七條短測線並非由鄰近連續站作速度約制，而是約制和金湖-瑞峰測線共點之水準點位的垂直速度。依序分別為 I033（-18.28 mm/yr）、GF07（-15.84 mm/yr）、SNGN（-8.12 mm/yr）、G736（-6.86 mm/yr）、B033（-2.17 mm/yr）、G747（-1.00 mm/yr）、G088（1.08 mm/yr）。

根據圖 2-3.39 至圖 2-3.41，「B087-B080」、「B002-B059」、「B110-B101」這三條測線在最近一次的歷年高程變化（Nov2015 - Nov2012）有 20 mm 以上的變化量，但與其鄰近的金湖-瑞峰測線（圖 2-3.16）在最近一年之高變化並不顯著，因此可排除是因地質活動造成此現象。

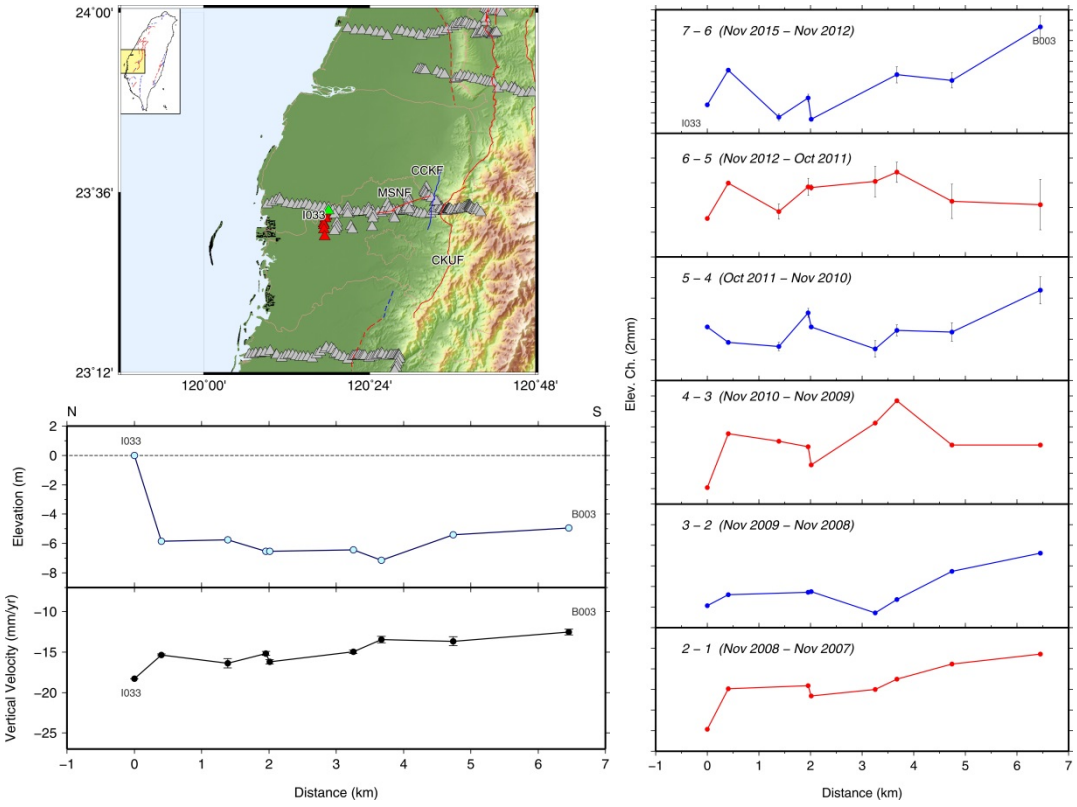


圖 2-3.37：B003-B092 測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

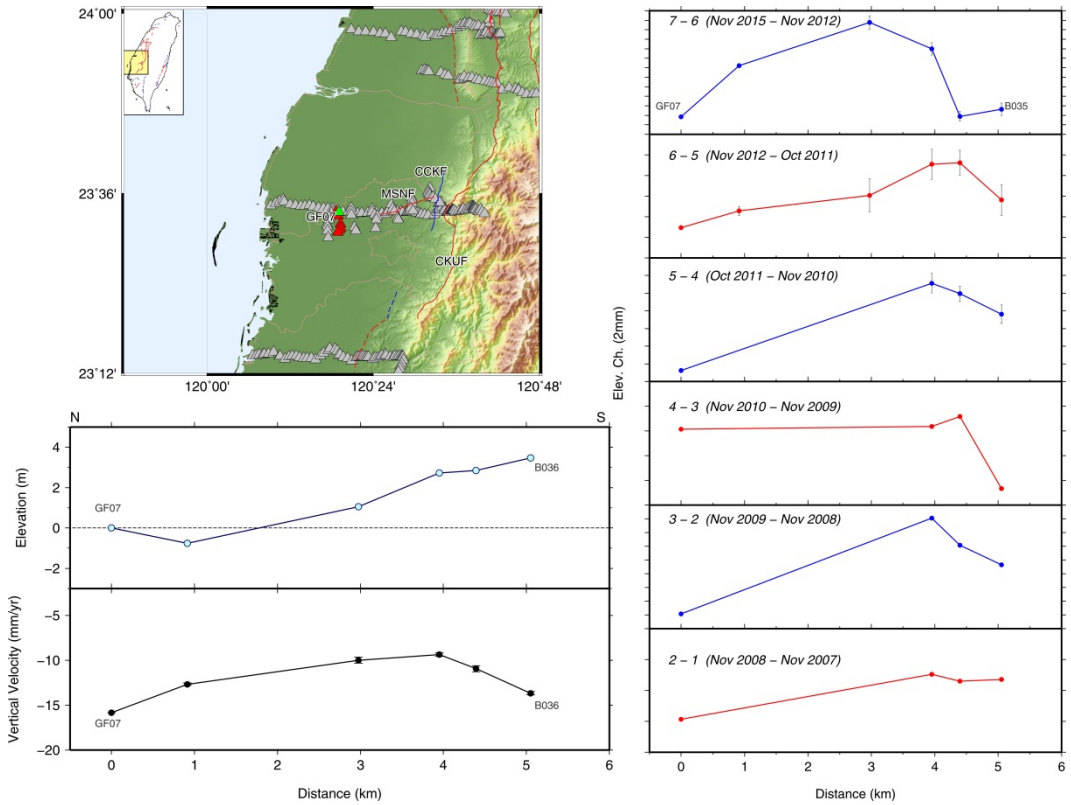


圖 2-3.38：B036-B086 測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

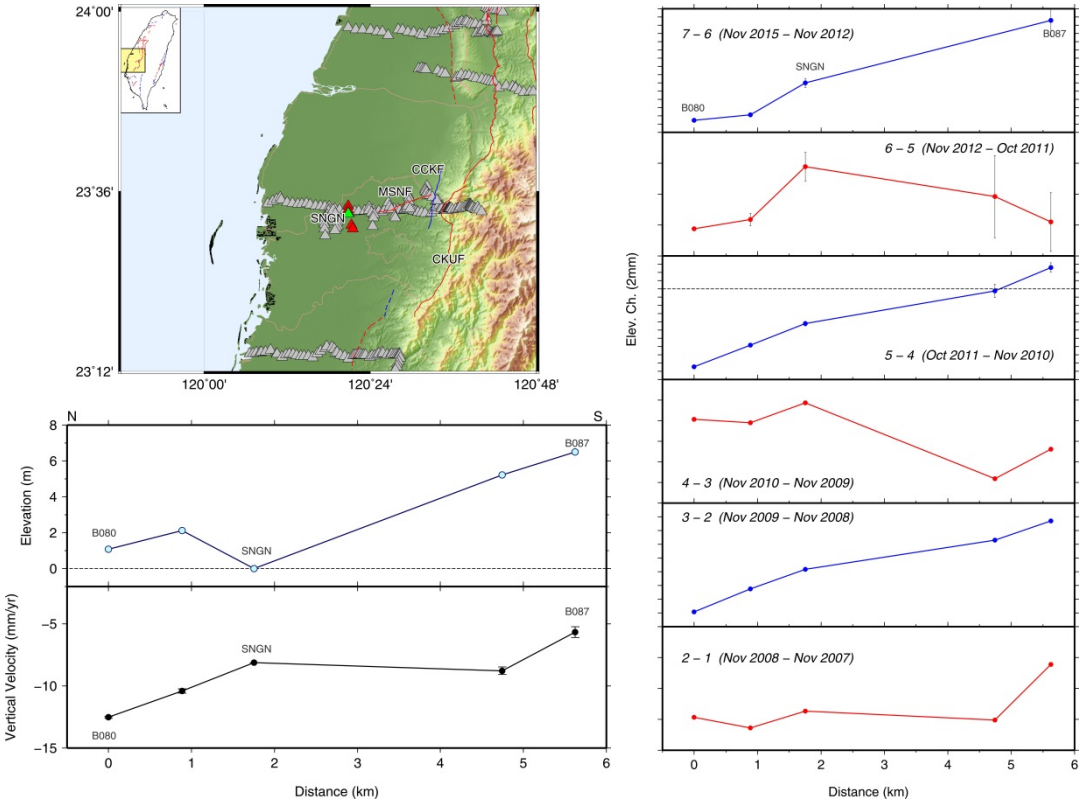


圖 2-3.39：B087-B080 測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

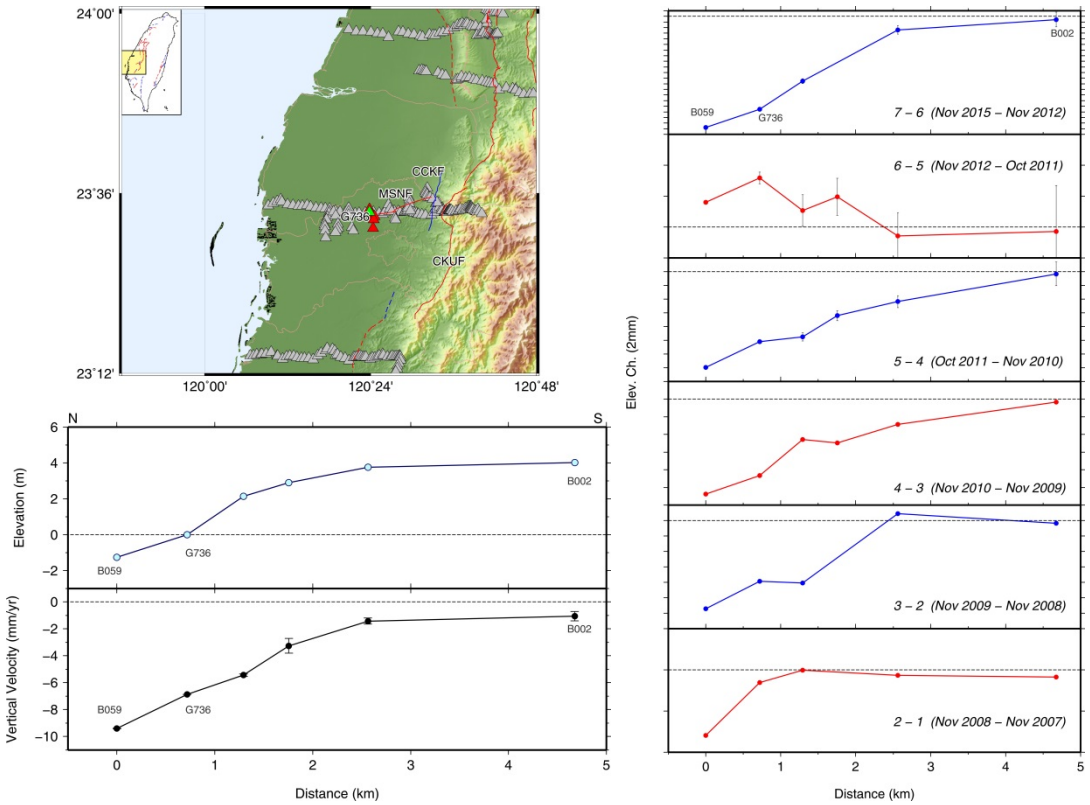


圖 2-3.40：B002-B059 測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。

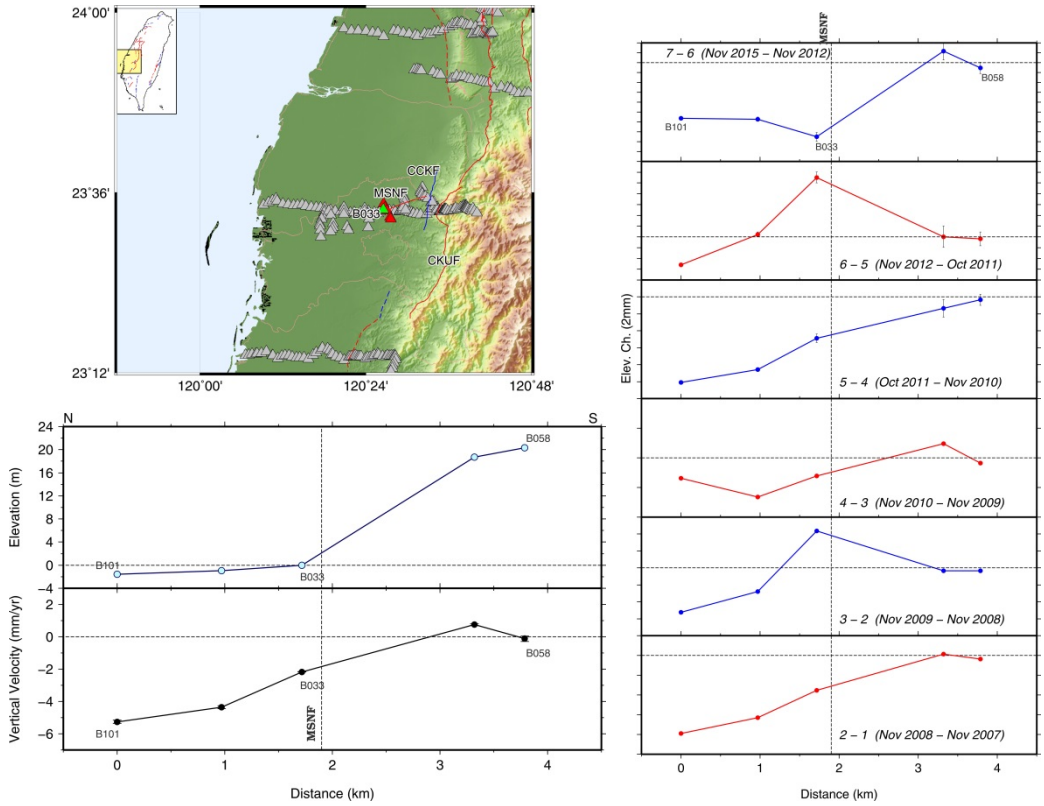


圖 2-3.41：B110-B101 測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層。

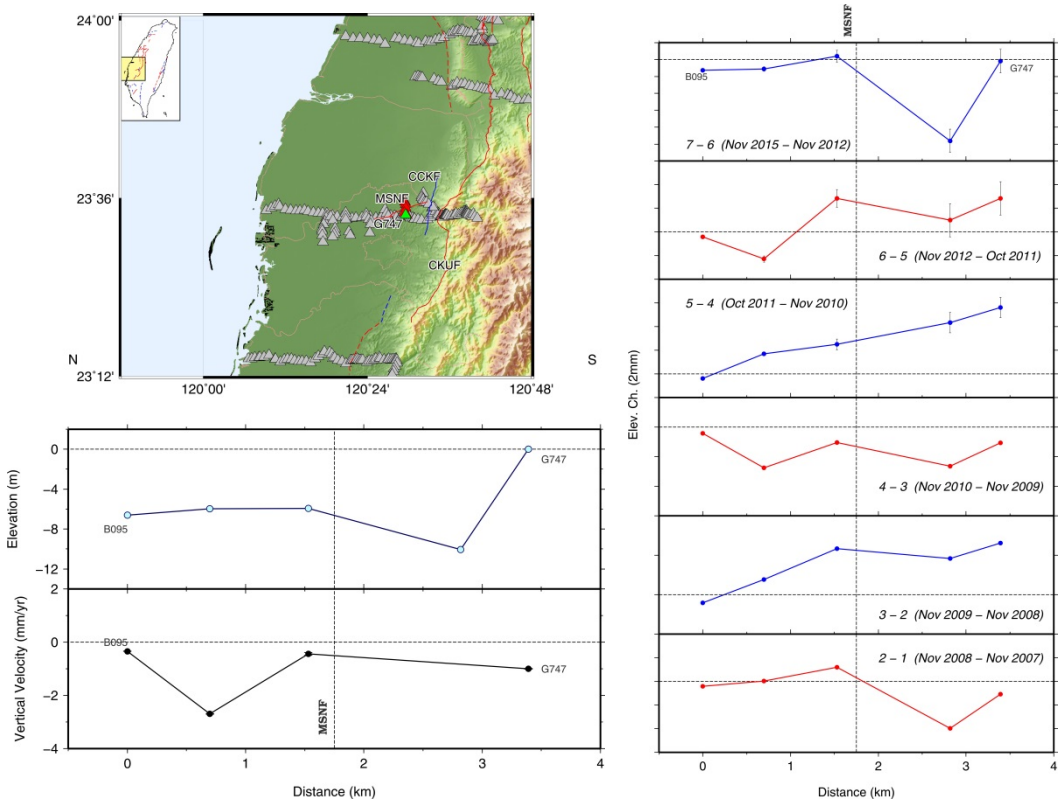


圖 2-3.42：B037-B095 測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層。

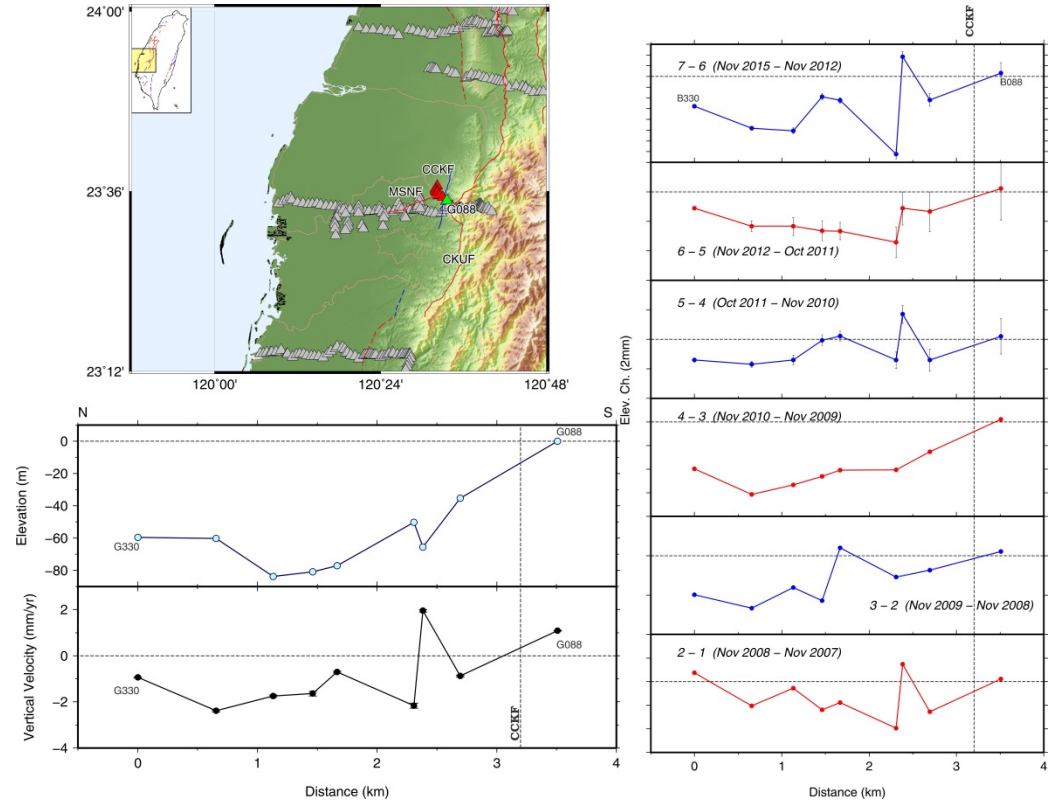


圖 2-3.43：B037-G330 測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCKF 為九芎坑斷層。

2-3-30 精密水準速度場檢核

精密水準測線之速度場以各條精密水準測線上之距離最近且資料品質較穩定之 GPS 連續站速率作為約制條件，以檢核各精密水準測線與 GPS 連續站速度趨勢符合程度，來確認水準資料可信度。測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱及距離如表 2-3.1。

由圖 2-3.44 至圖 2-3.83 顯示，所有連續站高程與精密水準點位之時間序列走向趨勢大致相符，證明了精密水準資料的可靠性。

表 2-3.1：測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱、距離及圖例。

項次	測線名稱	GPS 連續站名	水準點位名	兩者距離（km）	圖例
1	台 2_石門至萬里	GS09	2027	0.01	2-3.44
2	士林至三芝	YM05	GB06	0.5	2-3.45
3	淡水至士林	GS10	GA69	0.2	2-3.46
4	五股至台北	WUKU	GA78	0.3	2-3.47
5	信義	S101	1187	4.5	2-3.48
6	縣 115_新屋至童話世界	YAME	GB40	3.3	2-3.49
7	縣 122_新竹至五峰	TCMS	HCCA	0.6	2-3.50
8	縣 117_新竹至峨眉	GS14	GB72	0.1	2-3.51
9	苗栗至南庄	PENL	GD97	0.02	2-3.52
10	縣 132_大安至東勢	GS36	G896	1.6	2-3.53
11	縣 136_龍井至太平	LSB0	G937	0.8	2-3.54
12	縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里段	CAOT	T075	0.3	2-3.55
13	縣 150-台 16_北斗至水里	GS26	MX83	1.5	2-3.56
14	五光至黃竹	GS23	AF15	0.03	2-3.57
15	曾厝至霧峰	WUFN	T074	2.0	2-3.58
16	北勢至峰谷	FNGU	T033	0.02	2-3.59
17	烏溪南岸	CAOT	T005	2.5	2-3.60
18	中興新村	KZN1	B238	0.5	2-3.61
19	金湖至瑞峰	GS17	G776	0.02	2-3.62
20	縣 174_北門至楠西	GS44	I088	0.9	2-3.63
21	縣 182_安平至龍崎	CK01	TN04	1.4	2-3.64
22	台 28_路竹至茂林主、副線	GS55	R016	0.05	2-3.65
		CISH	J116	0.9	2-3.66
23	台 22_岡山至安坡	AKND	G525	0.2	2-3.67
24	佳冬至七佳	CLON	GC85	0.5	2-3.68
25	恆春西台地至佳樂水	HENC	G670	0.1	2-3.69
26	台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線	KDNM	Q014	0.2	2-3.70
27	台 19 甲_善化至關廟測線	GS29	G374	1.5	2-3.71
28	嶺頂至瀧澗	YENL	G971	2.1	2-3.72
29	光復至豐濱	FENP	G991	0.01	2-3.73
30	紅葉至靜浦	JSUI	GA22	0.7	2-3.74
31	東成至富岡	FUGN	A086	0.3	2-3.75
32	梗枋至東澳	SUAO	GG83	0.8	2-3.76

表 2-3.1(續)：測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱、距離及圖例。

項次	測線名稱	GPS 連續站名	水準點位名	兩者距離（km）	圖例
33	B003-B092	PKGM	I033	2.2	2-3.77
34	B036-B086	PKGM	GF07	2.3	2-3.78
35	B087-B080	PKGM	B080	4.4	2-3.79
36	B002-B059	CHIA	B002	4.1	2-3.80
37	B110-B101	CHIA	B058	5.8	2-3.81
38	B037-B095	S103	B106	1.5	2-3.82
39	B037-B330	GS05	G088	1.6	2-3.83

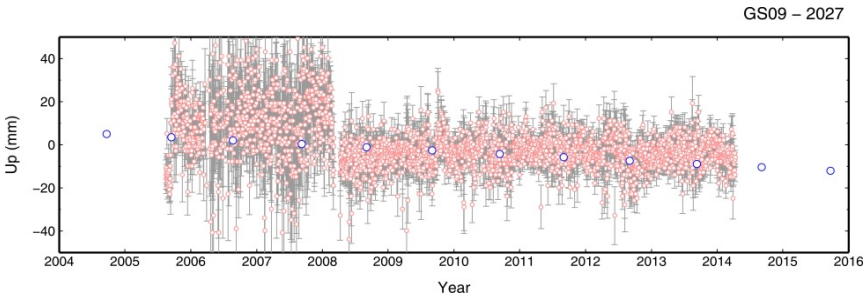


圖 2-3.44：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。

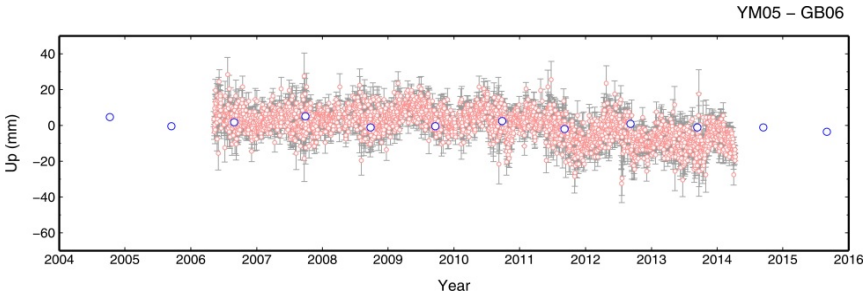


圖 2-3.45：水準點位 GB06 與連續站 YM05 之間序列比較。

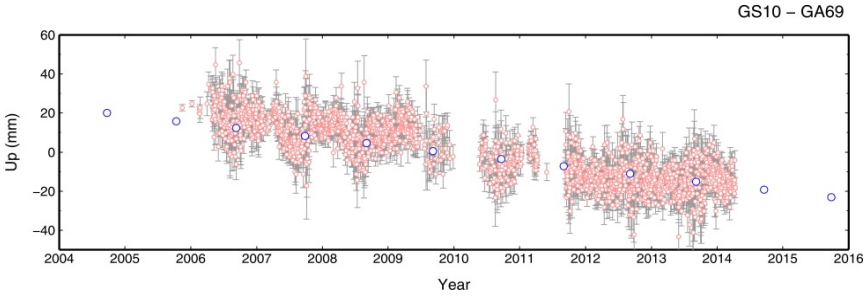


圖 2-3.46：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。

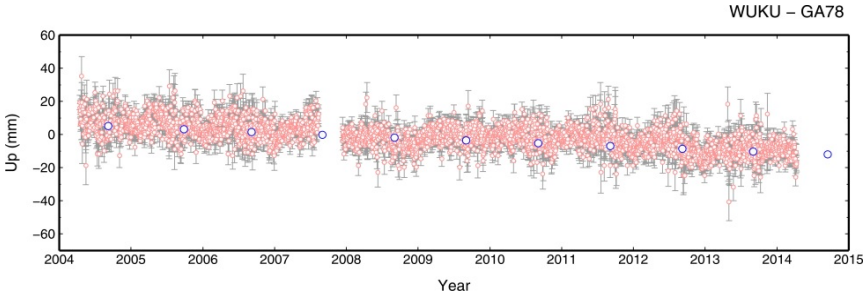


圖 2-3.47：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。

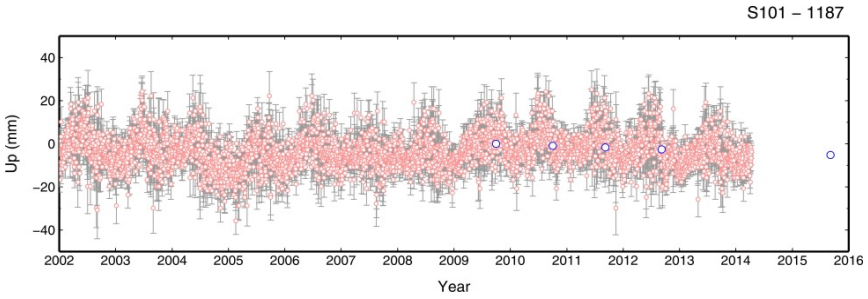


圖 2-3.48：水準點位 1187 與連續站 S101 之間序列比較。

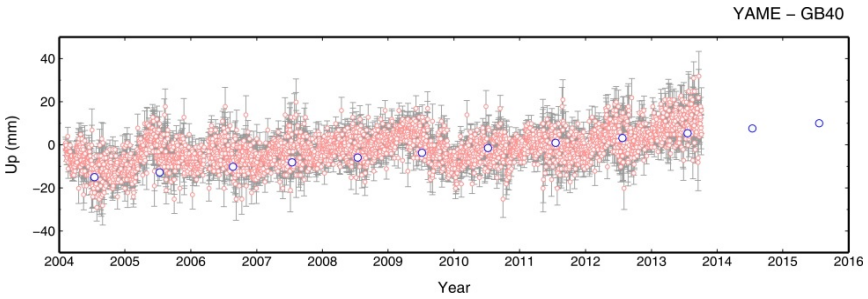


圖 2-3.49：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較。

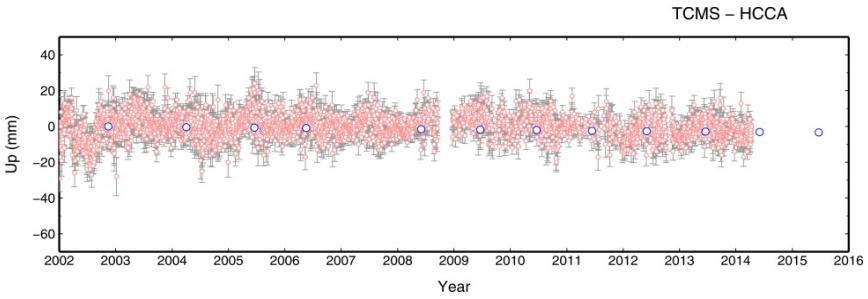


圖 2-3.50：水準點位 HCCA 與連續站 TCMS 之間序列比較。

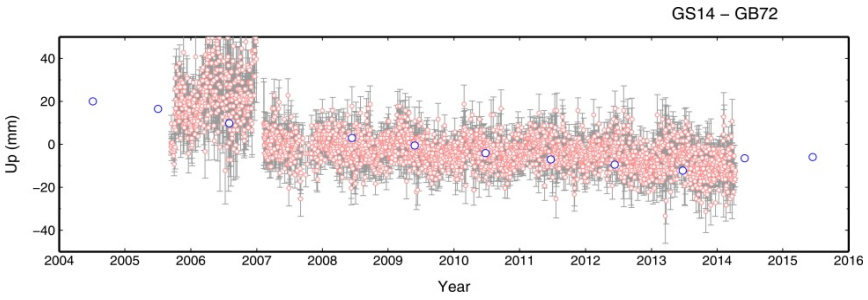


圖 2-3.51：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之間序列比較。

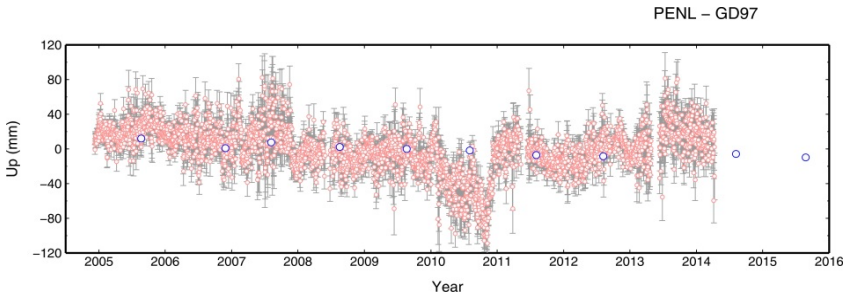


圖 2-3.52：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之間序列比較。

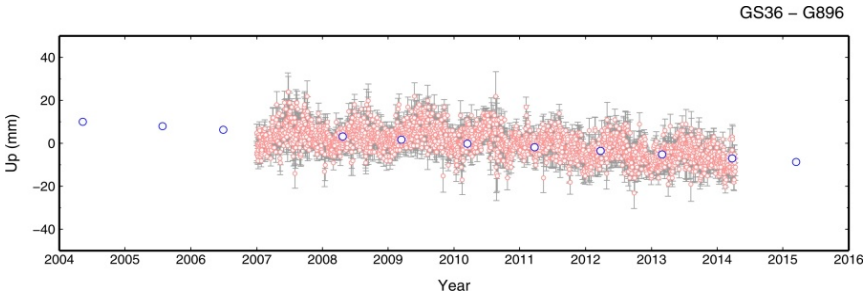


圖 2-3.53：水準點位 G896 與連續站 GS36 之間序列比較。

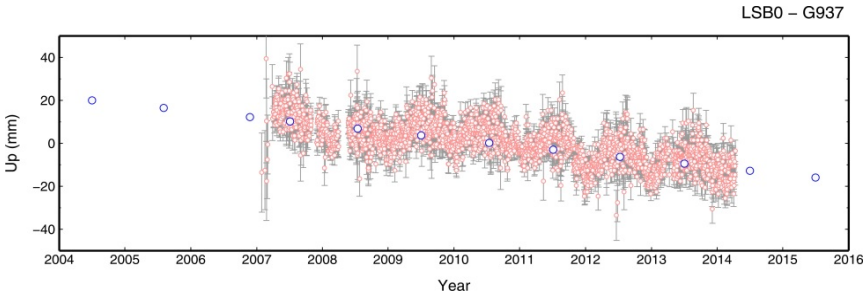


圖 2-3.54：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之間序列比較。

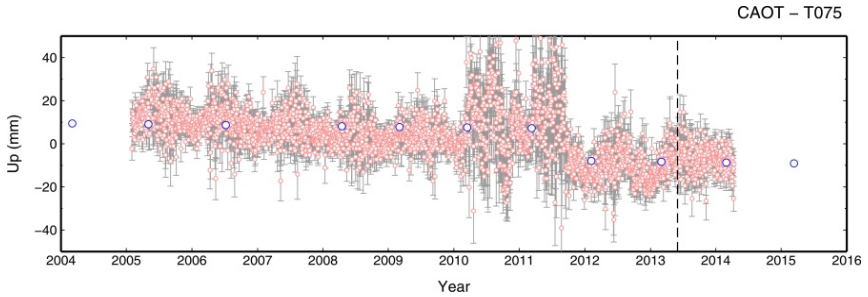


圖 2-3.55：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之間序列比較。

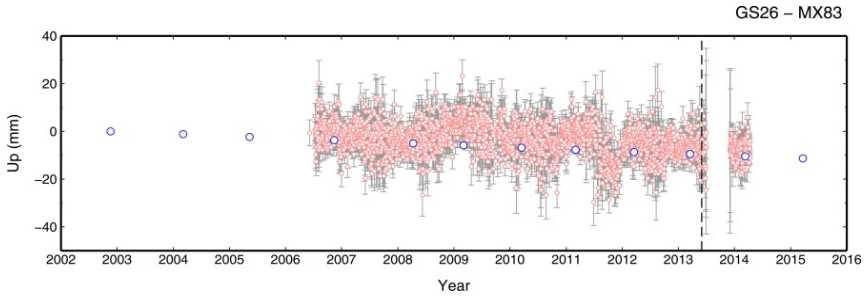


圖 2-3.56：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之間序列比較。

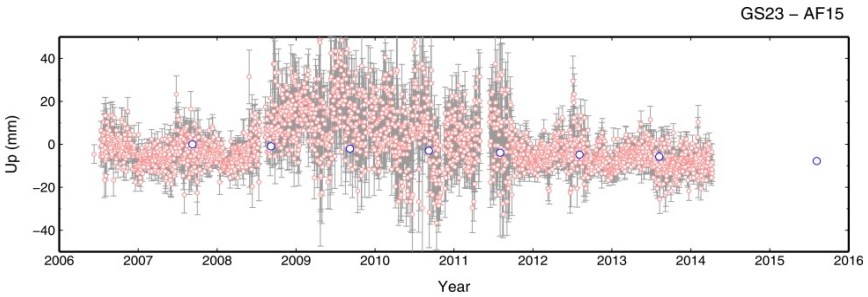


圖 2-3.57：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之間序列比較。

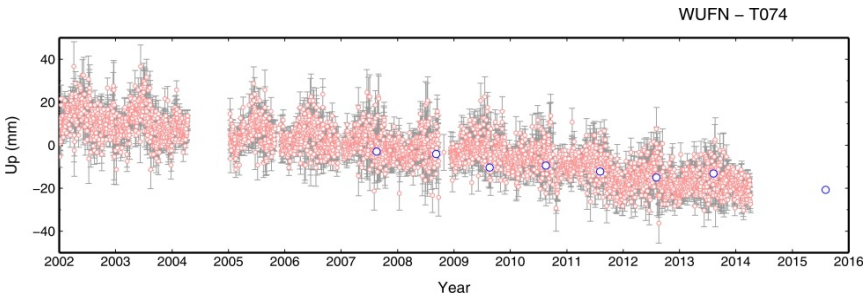


圖 2-3.58：水準點位 T074 與連續站 WUFN 之間序列比較。

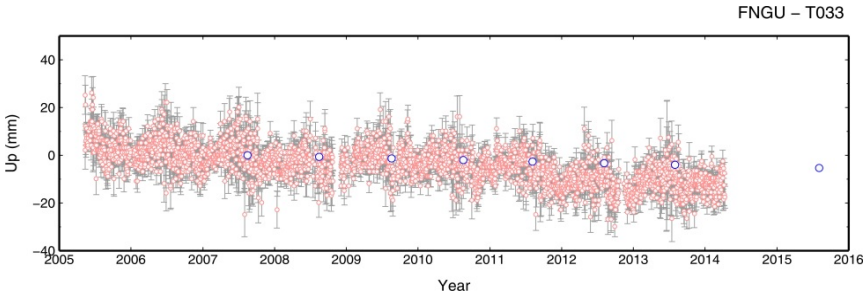


圖 2-3.59：水準點位 T033 與連續站 FNGU 之間序列比較。

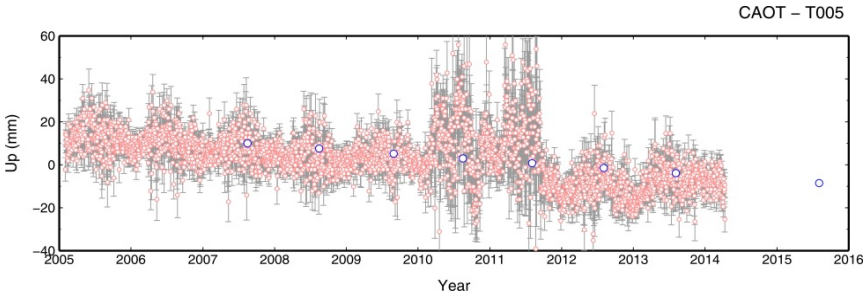


圖 2-3.60：水準點位 T005 與連續站 CAOT 之間序列比較。

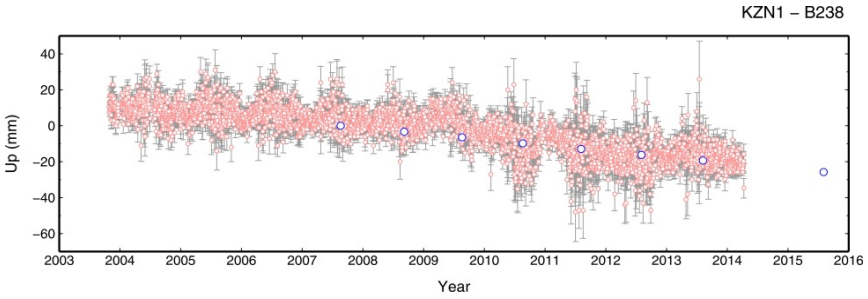


圖 2-3.61：水準點位 B238 與連續站 KZN1 之間序列比較。

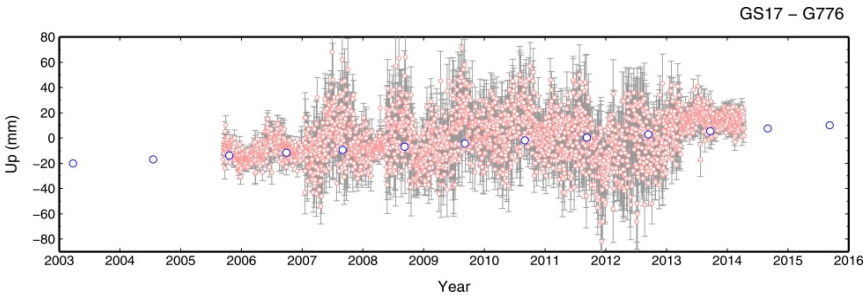


圖 2-3.62：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。

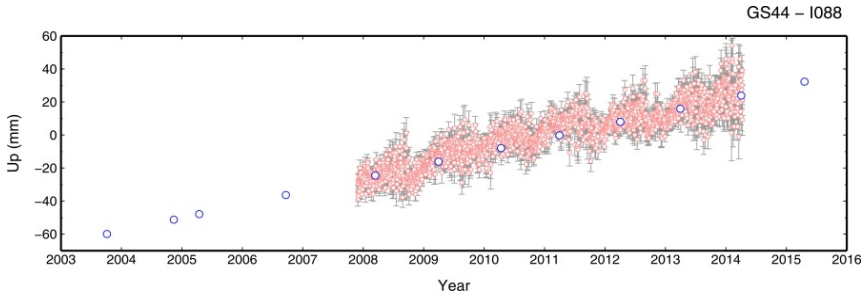


圖 2-3.63：水準點位 I088 與連續站 GS44 之間序列比較。

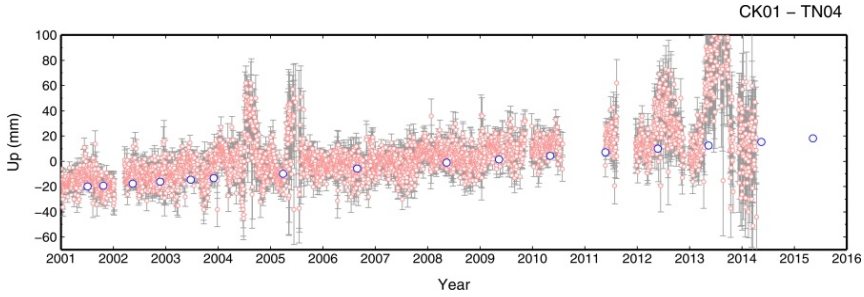


圖 2-3.64：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之間序列比較。

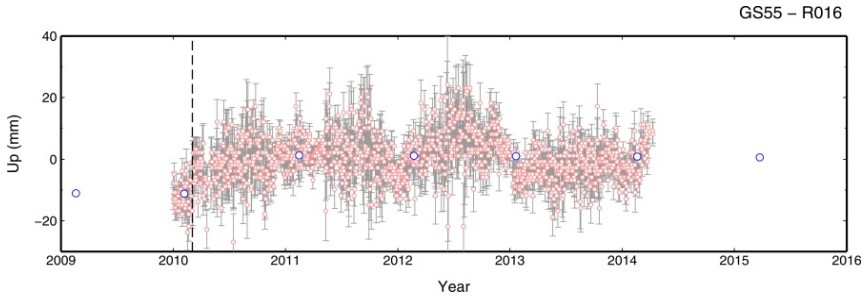


圖 2-3.65：水準點位 R016 與連續站 GS55 之間序列比較。

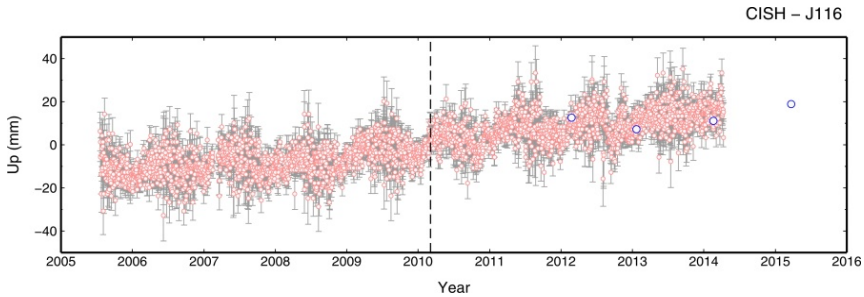


圖 2-3.66：水準點位 J116 與連續站 CISH 之間序列比較。

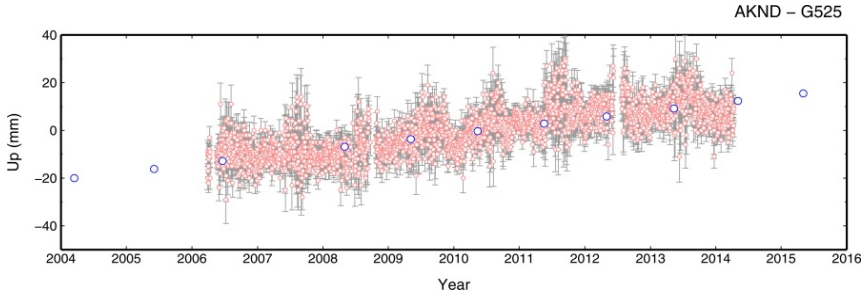


圖 2-3.67：水準點位 G525 與連續站 AKND 之間序列比較。

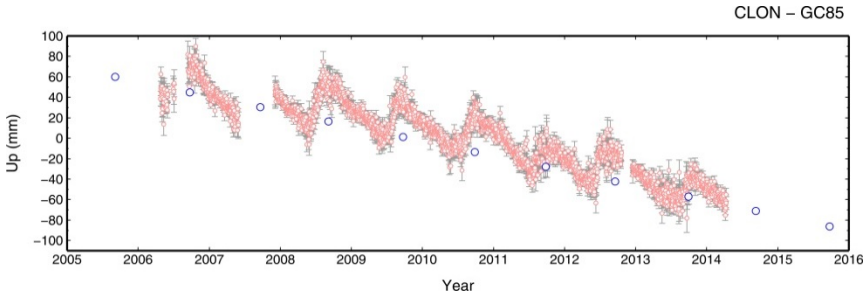


圖 2-3.68：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。

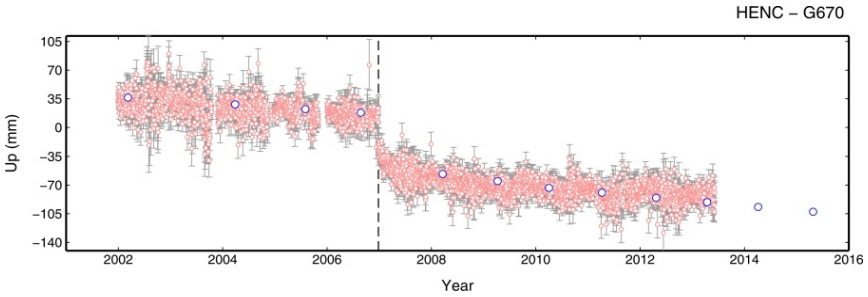


圖 2-3.69：水準點位 G670 與連續站 HENC 之間序列比較。

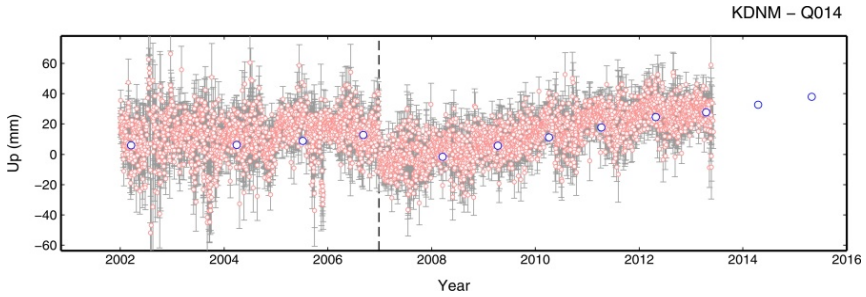


圖 2-3.70：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之間序列比較。

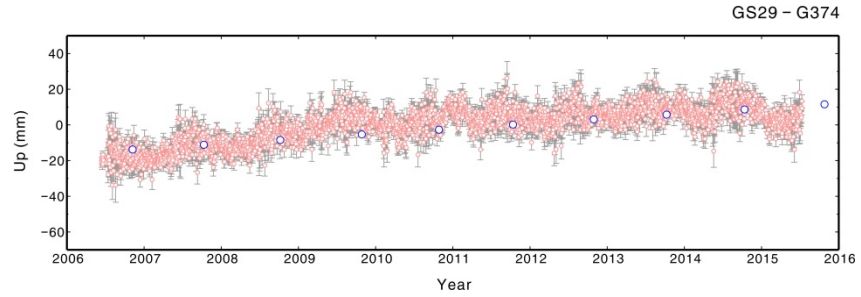


圖 2-3.71：水準點位 G374 與連續站 GS29 之間序列比較。

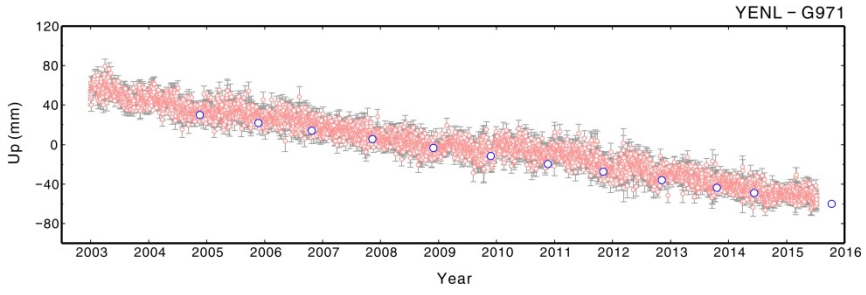


圖 2-3.72：水準點位 G971 與連續站 YENL 之間序列比較。

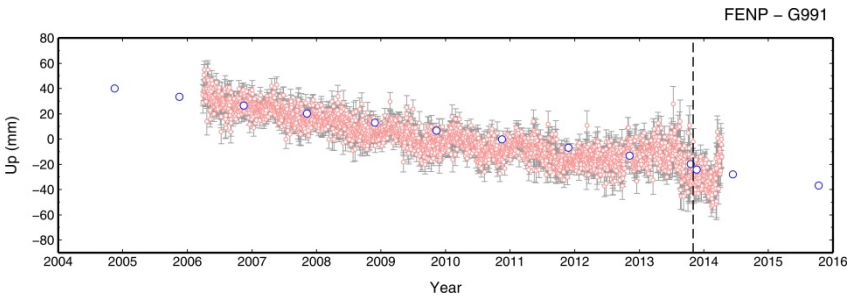


圖 2-3.73：水準點位 G991 與連續站 FENP 之間序列比較。

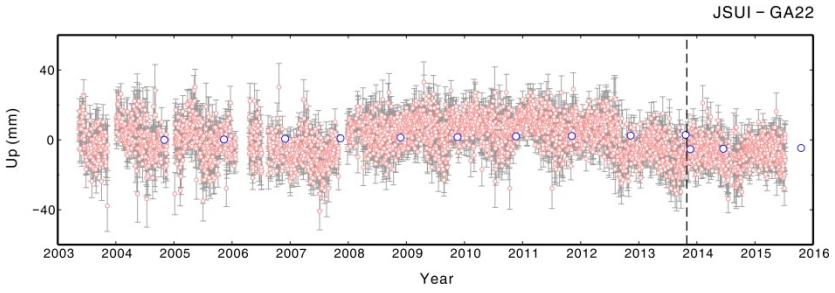


圖 2-3.74：水準點位 GA22 與連續站 JUSI 之間序列比較。

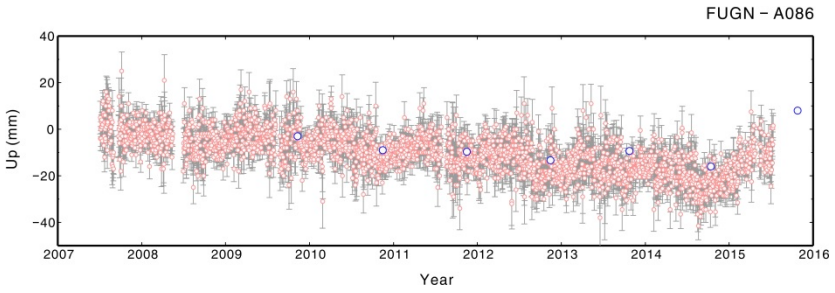


圖 2-3.75：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之間序列比較。

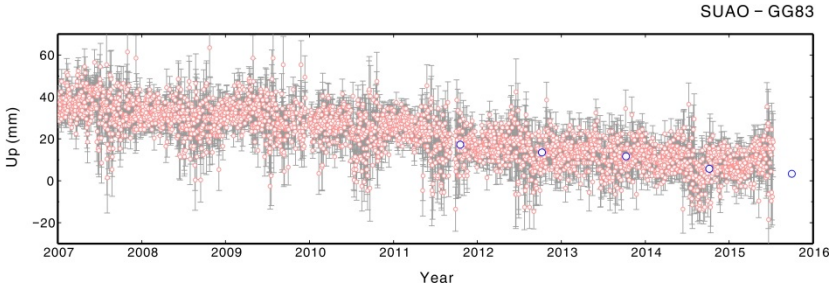


圖 2-3.76：水準點位 GG83 與連續站 SUAO 之間序列比較。

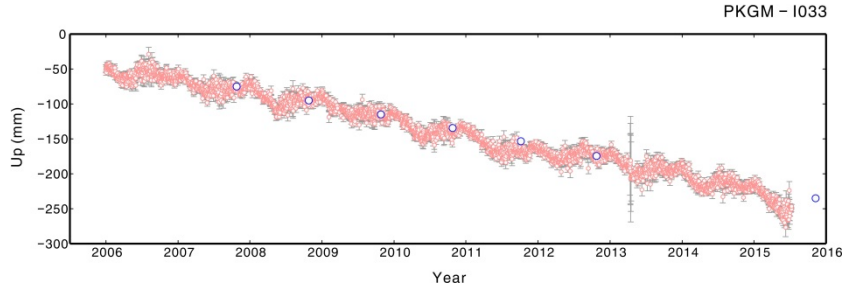


圖 2-3.77：水準點位 I033 與連續站 PKGM 之間序列比較。

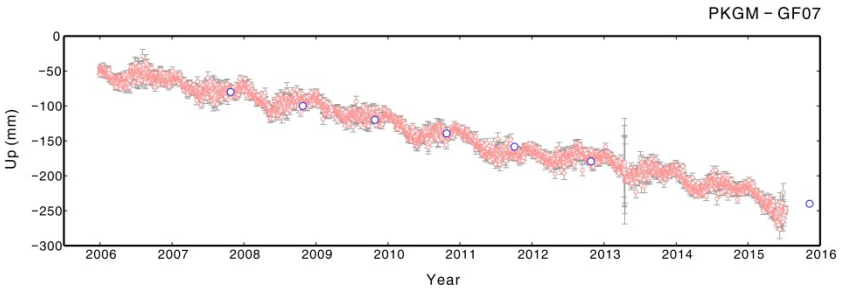


圖 2-3.78：水準點位 GF07 與連續站 PKGM 之間序列比較。

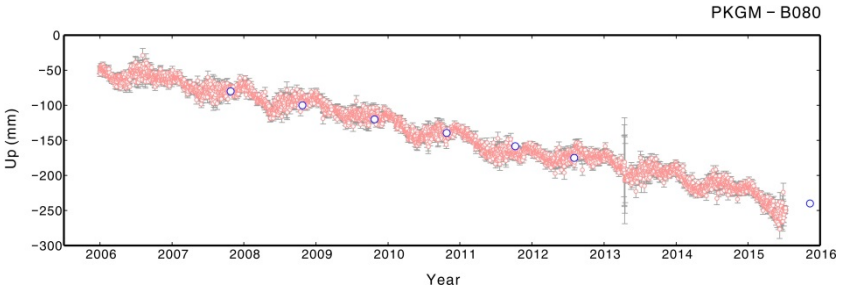


圖 2-3.79：水準點位 B080 與連續站 PKGM 之間序列比較。

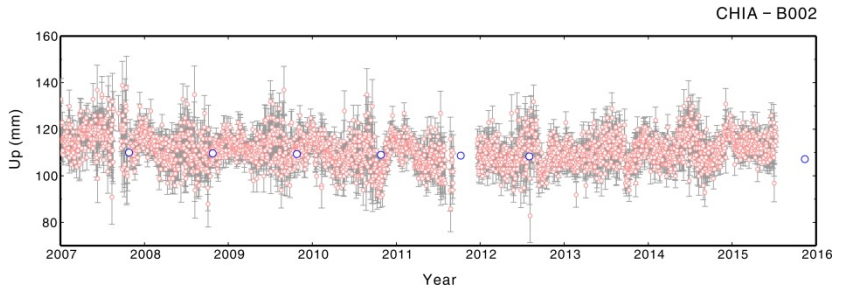


圖 2-3.80：水準點位 B002 與連續站 CHIA 之間序列比較。

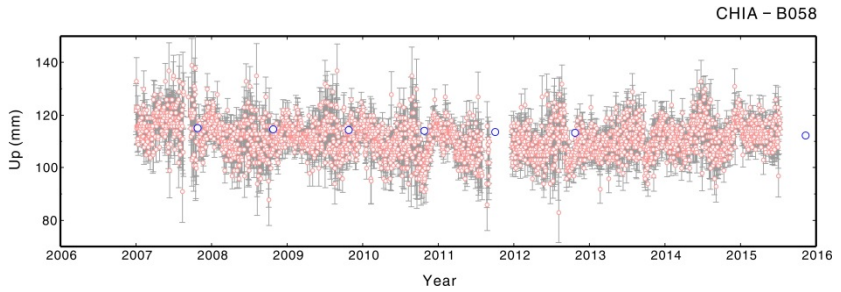


圖 2-3.81：水準點位 B058 與連續站 CHIA 之間序列比較。

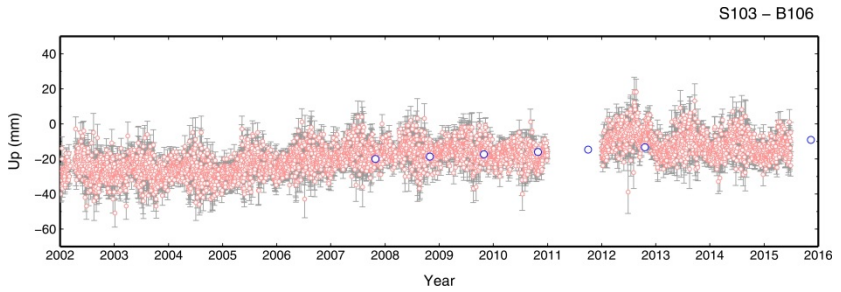


圖 2-3.82：水準點位 B106 與連續站 S103 之間序列比較。

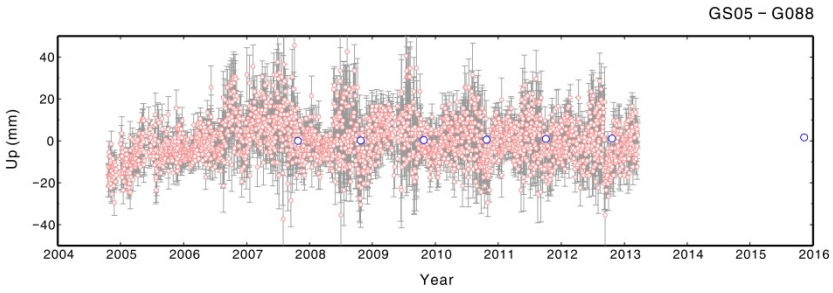


圖 2-3.83：水準點位 G088 與連續站 GS05 之間序列比較。

2-3-31 全台精密水準速度場

根據圖 2-3.84，大台北地區大致呈現穩定沉陷狀態，垂直速度大多落在-15 mm/yr 內，僅信義測線之點位有抬升現象；桃竹地區大多為沉陷，垂直速度大多落在-10 mm/yr 內，但橫跨獅潭斷層的新屋-童話世界測線則有平均 10 mm/yr 的抬升；中部在靠近山區呈現抬升，在平原及沿海地區呈現明顯下陷，最大值超過-25 mm/yr；嘉南地區的垂直速率也是呈現山區抬升，平原至沿海一帶為沉陷；恆春半島地區的時間段為 2010 至 2015 年，在恆春斷層以東有顯著的抬升現象，速率達到 10 mm/yr 以上，說明恆春斷層仍有活動；花東地區大致呈現中央山脈與海岸山脈抬升，縱谷地區沉陷，垂直速度落大約介在-10 mm/yr 至 10 mm/yr 之間；宜蘭地區測線除較北邊一帶(頭城)為抬升外，其餘皆為沉陷，垂直速度約在-15 mm/yr 至 0 mm/yr 之間。

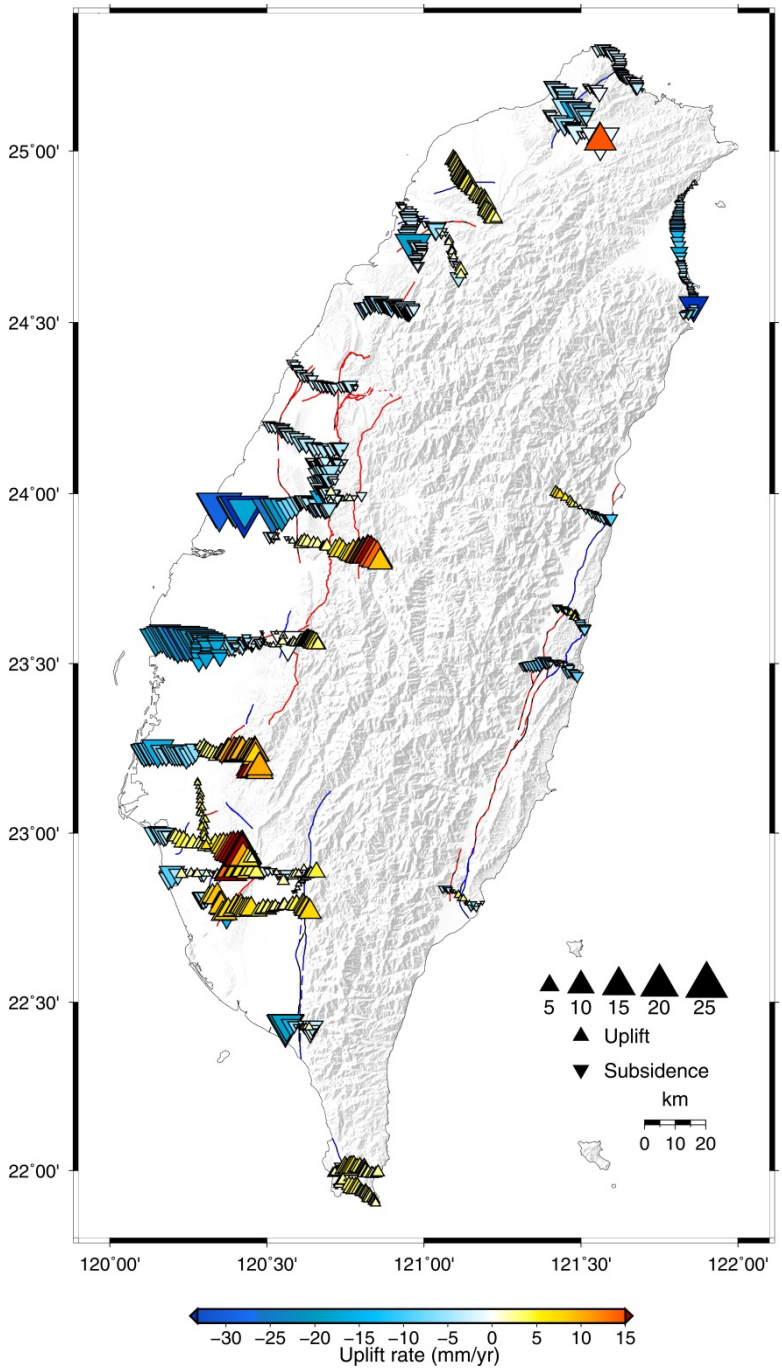


圖 2-3.84：全臺精密水準速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

2-4 南部地區應變矩率及地震矩率之分析討論

本章節將分三部份，依序展示南部地區之速度場、應變率場以及大地測量矩率分布。

2-4-1 南部地區 GPS 速度場

分析南部地區 GPS 水平速度場結果發現(圖 2-4.1)，整個南部地區(不包含東部地區)，由北至南分段解釋，觸口斷層為分界，東西兩側有速度變化約 10 mm/yr。在觸口斷層及木屐寮斷層－六甲斷層－新化斷層－後甲里斷層系統之間，由東往西之速度值由約 30 mm/yr 降至約 20 mm/yr，其斷層系統兩側沿線間有顯著的速度梯度變化，其速度值由約 20 mm/yr 降至約 10 mm/yr，繼續往西之西部海岸平原，其速度值皆小於 10 mm/yr。

高屏地區主要之活動構造為東北－西南走向之旗山斷層與南北走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 50 ~ 60 mm/yr 降至約 40 mm/yr，旗山斷層以東至潮州斷層速度值約 55 mm/yr。觀察恆春半島之東側為其速度值由約 48 mm/yr 跨斷層變為 54 mm/yr，方位角約由 343°轉至 355°。

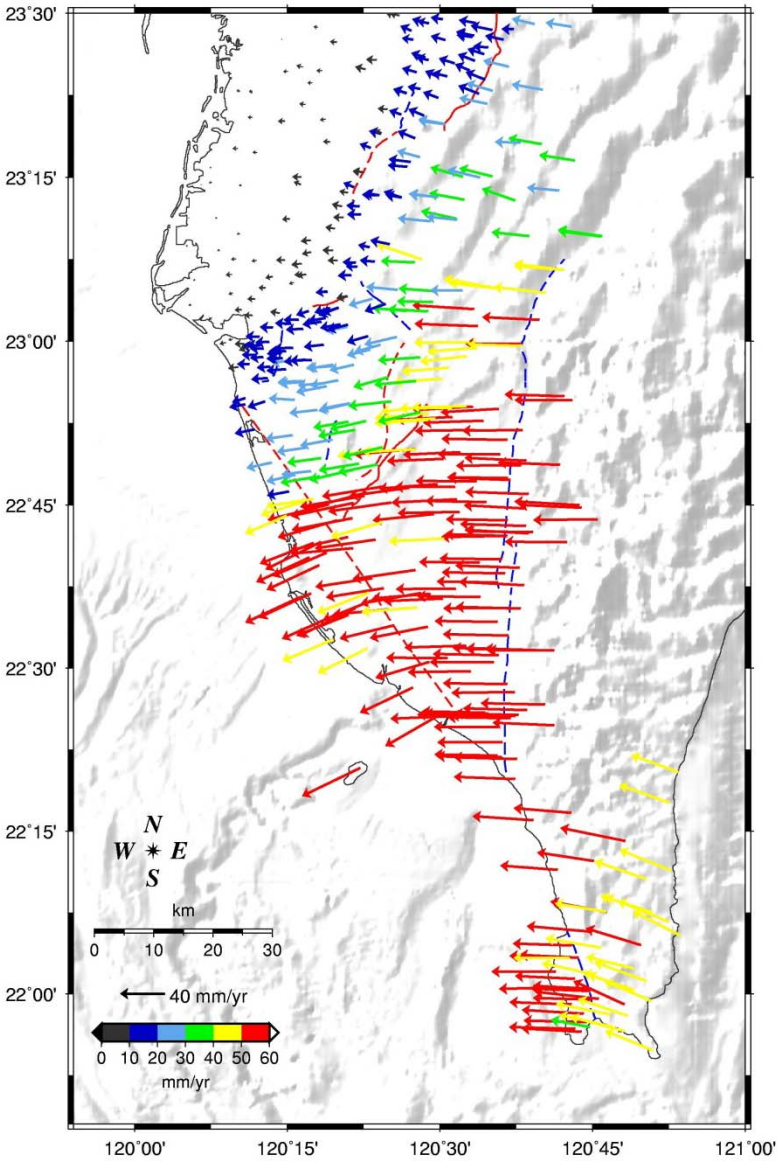


圖 2-4.1：2002 年至 2015 年南部地區相對於澎湖白沙（S01R）之 GPS 水平方向速度場。

2-4-2 南部地區 GPS 應變率場

南部地區之應變率最大的區域主要集中在觸口斷層－木屐寮斷層－六甲斷層－新化斷層－後甲里斷層系統沿線一帶介於-1.00 至 1.55 μstrain/yr，鳳山斷層西側和恆春半島介於 1.10 strain/yr 以下（圖 2-4.2）。

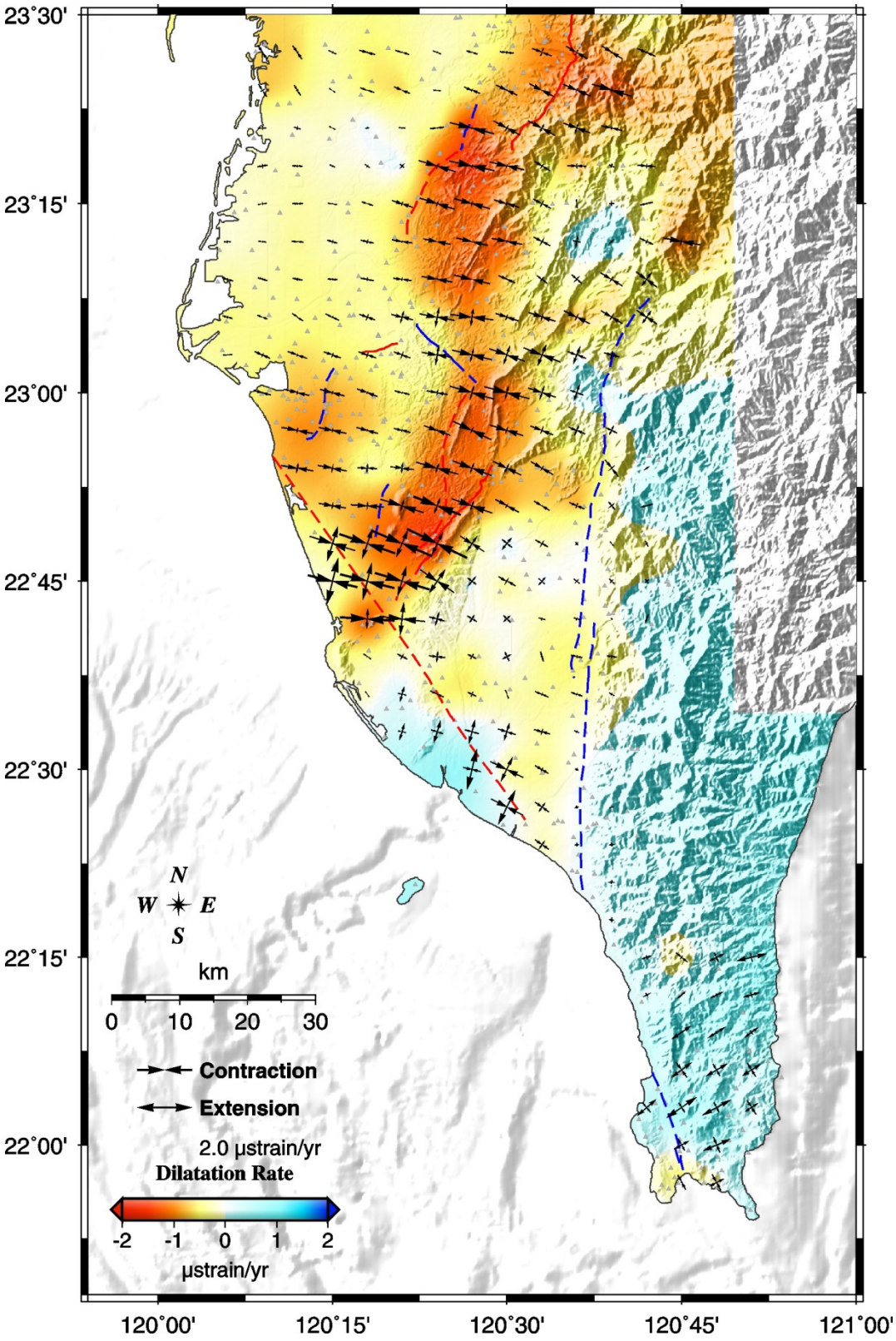


圖 2-4.2：2002 年至 2015 年南部地區應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

2-4-3 大地測量矩率分布圖

最小大地測量矩率（minimum geodetic moment rate）（圖 2-4.3）指出，其矩率值集中在 8×10^{16} ~ 1×10^{17} Nm/yr 之間，最大量值（1.4×10^{17} Nm/yr）主要顯示在觸口斷層－木屐寮斷層－六甲斷層－新化斷層－後甲里斷層系統沿線。圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑為 10 km。

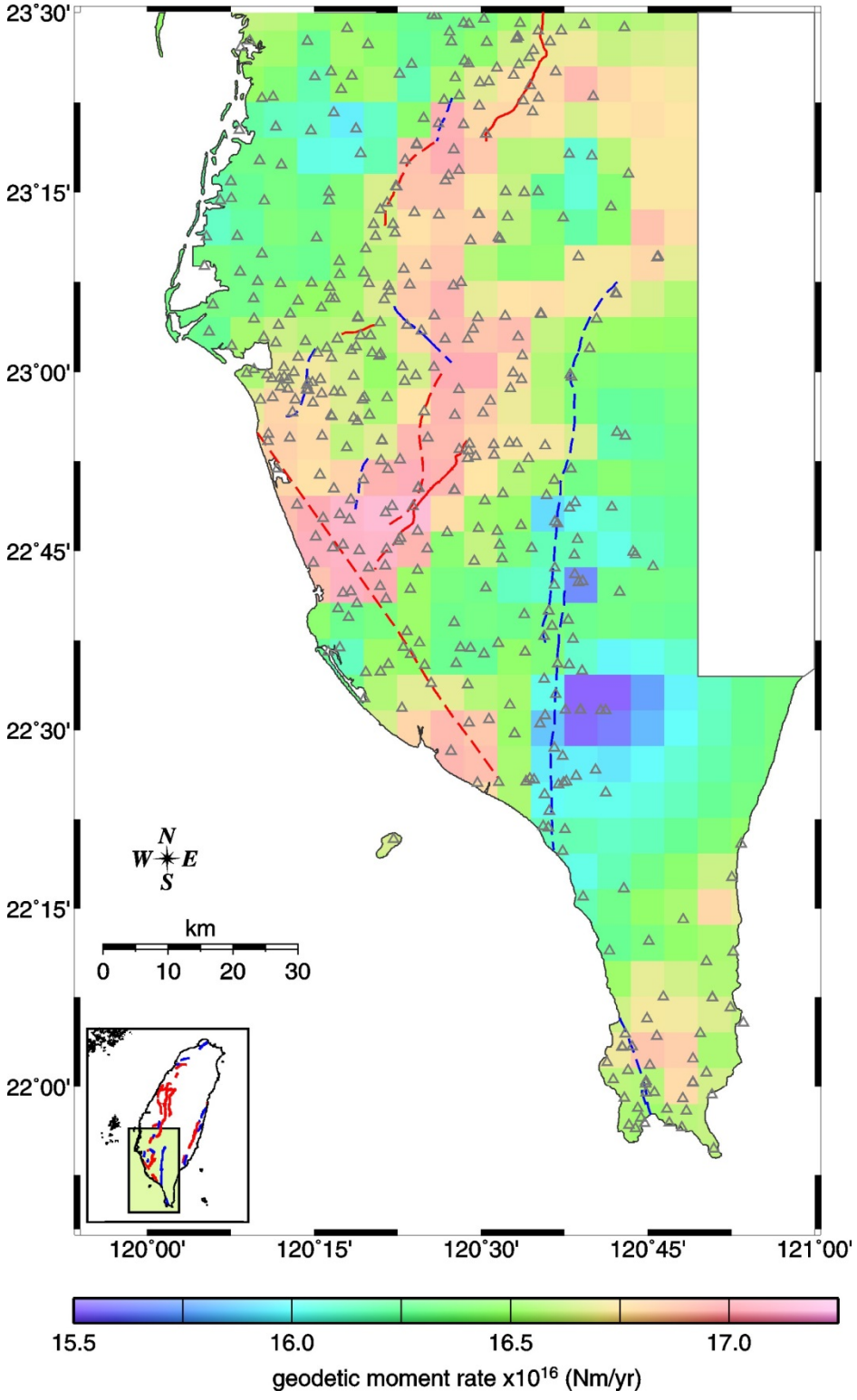


圖 2-4.3：最小大地測量矩率分布圖。三角形顯示 GPS 測點之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察之易讀性，故求其指數值以色階表示。

2-4-4 地震矩率

此章節將分三部份說明，依序為資料來源及品質、地震矩率計算以及地震矩率分布。

2-4-4-1 資料來源及品質

本研究蒐集臺灣地區自 2002~2014 年臺灣地區偵測到之有感地震事件，一共是 306,850 筆。

在氣象局地震目錄原始資料中，根據中央氣象局地震品質分類，若該筆地震資料品質不佳（接收測站數目 Ns＜6，或者兩相鄰測站之最大方位角 GAP＞180°，或者地震震央距離最近之接收測站 DM＞50 km），將予以篩除；此外，地震震央以及深度之定位標準差（ERH、ERZ）大於 5 km 之地震事件，亦予以篩除。

經過以上篩選條件，臺灣南部地區自 2002-2014 年之地震事件一共是 59,029 筆。圖 2-4.4 展示所選取之地震在深度與數量上的變化，以及各深度所累積之地震矩率量值。圖中顯示，地殼藉由地震所釋放之能量主要集中在深度 0~30 km。亦即深度 30 km 以上之地殼會進行彈性應變能累積（elastic strains accumulate），然後再藉由地震釋放（Kostrov，1974），本研究因此假設臺灣南部地區之地殼發震深度為 30 km，將 59,029 筆地震事件，再以深度＜30 km 及 Mw≧3 之條件進行篩選，最終剩下 1,440 筆地震，視為臺灣南部地區發震深度內之主要發震事件。。

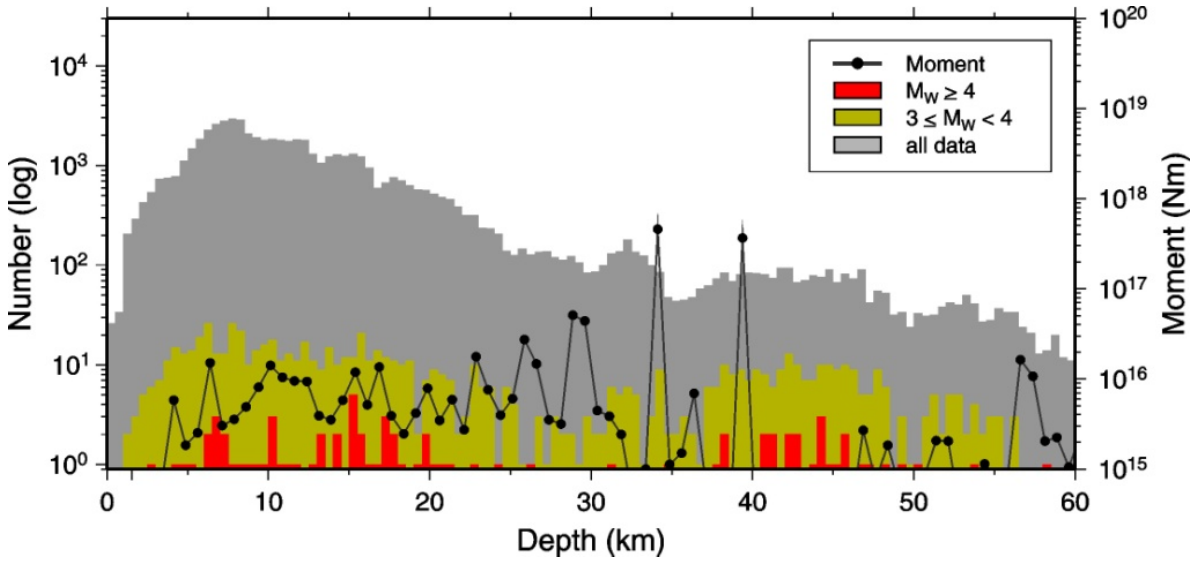


圖 2-4.4：2002 年至 2015 年之地震資料品質展示。長條圖顯示地震數量在深度之分布情形；折線圖反映地震矩率在各個深度區間累積之情形。

2-4-4-2 地震矩率計算

其中 2002~2014 年期間受地震影響的最大記錄有 2 筆地震（圖 2-4.5 和圖 2-4.6）。

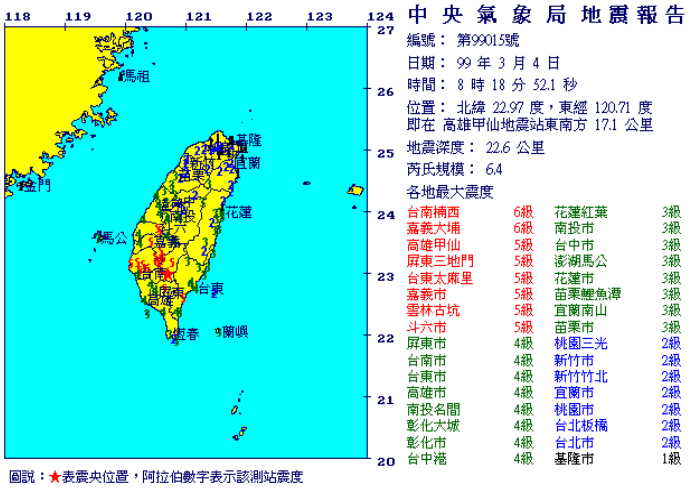


圖 2-4.5：2010 年 3 月 4 日甲仙地震，規模 6.4，深度 22.6 公里。資料來源：中央氣象局。

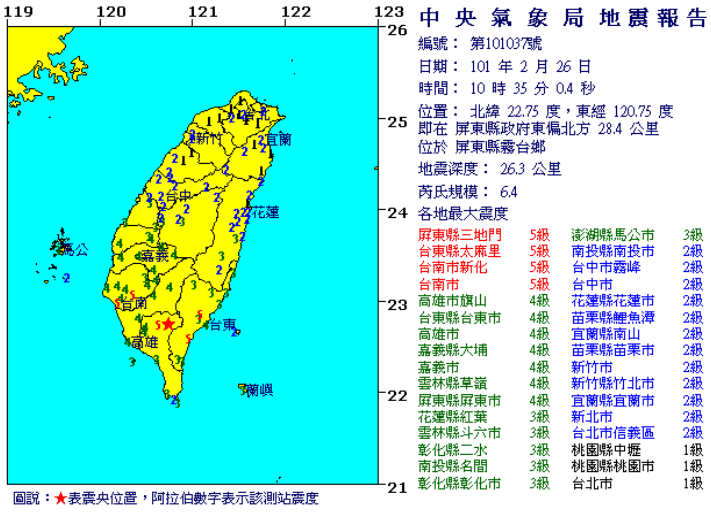


圖 2-4.6：2012 年 2 月 26 日霧台地震，規模 6.4，深度 26.3 公里。資料來源：中央氣象局。

使用公式如下：

$$M_W = (0.931 \pm 0.017) M_L - (0.107 \pm 0.081) \quad \text{（式 2-4.1）}$$

$$M_W = 2/3 \times \log_{10} M_0 - 6.0 \quad \text{（式 2-4.2）}$$

$$\dot{M}_0 = \sum M_0 / \Delta t \quad \text{（式 2-4.3）}$$

由於氣象局所記錄之地震規模為芮氏地震規模 M_L（local magnitude scale），經由中央研究院地球科學研究所提出的經驗關係式（式 2-4.1），可將每筆地震之 M_L 轉換為地震矩規模 M_W（moment magnitude scale），M_W 再經由 Kanamori（1977）之經驗式（式 2-4.2）換算為地震矩 M_0（seismic moment），代表每筆地震所釋放之能量量值。為了計算地震矩率 M_0（seismic moment rate），以等間距位移之移動空間視窗（moving window）方式進行取樣，如此可消除取樣格點之間的邊界效應，相關參數如下：在研究區域以每 5 km 為格點間距位移、將 10×10 km^2 格子範圍內之所有地震矩 M_0 累加，代入（式 2-4.3）式即可求得地震矩率，Δt = 12 年為地震目錄時間長度（2012~2014 年）。

2-4-4-3 地震矩率分布圖

為了計算地震矩率 M_0（seismic moment rate），以等間距地震矩率（seismic moment rate）（圖 2-4.7）呈現，研究區域中其矩率值集中在 8×10^{11} ~ 9×10^{15} Nm/yr 之間，地震矩率最大值介於為 3×10^{16} Nm/yr ~ 5×10^{16} Nm/yr，位置位於潮州斷層東側附近，圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑 10 km。

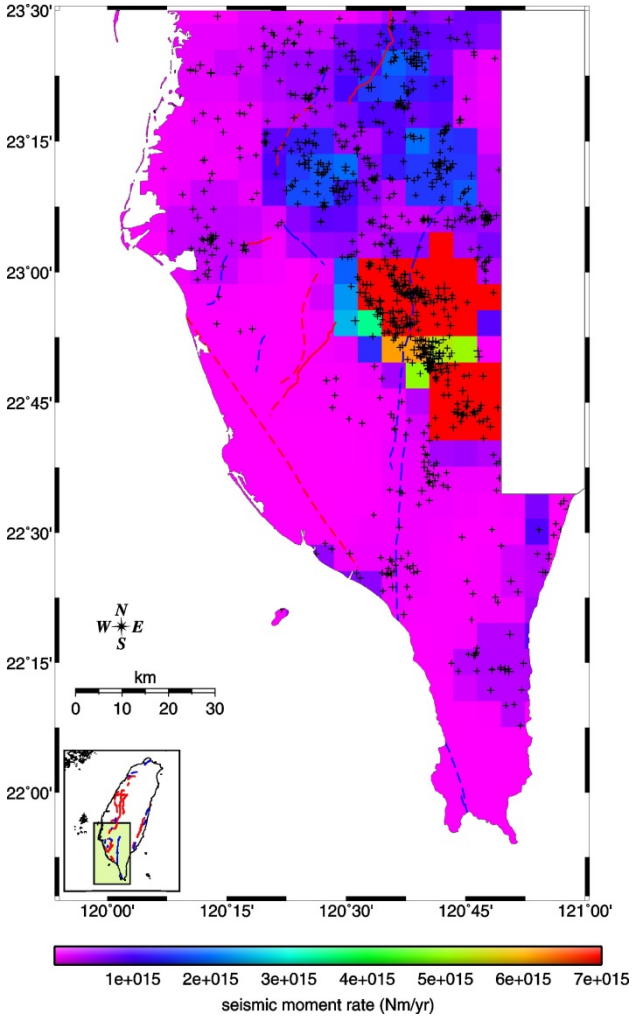


圖 2-4.7：2002 年至 2015 年地震矩率分布圖。灰色三角為無地震發生區域，黑色十字顯示地震之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察的易讀性，故求其指數值以色階表示之。

兩種矩率依照取樣格點統計，如圖 2-4.8 所示，最小大地測量矩率之量值主要集中於 8×10^{16} ~ 1×10^{17} Nm/yr，地震矩率則介於 8×10^{11} ~ 9×10^{15} Nm/yr，兩者相差逾百倍，而最小大地測量矩率遠高於地震矩率，顯示臺灣南部地區在觀測期間，地殼所承載之能量多數尚未藉由地震釋放。將兩種矩率相減，可求得矩率虧損值（deficit of oment rate），代表能量在地殼中所承載與發震釋放之差距。圖 2-4.9A 即為矩率虧損圖，其分布形態與最小大地測量矩率圖（圖 2-4.3）極為相似，矩率虧損之最大量值主要分布在觸口斷層－木屐寮斷層－六甲斷層－新化斷層－後甲里斷層系統沿線。將兩種矩率相除，可求得矩率比值（ratio of moment rate），矩率比值圖（圖 2-4.9B）之分布形態近似於地震矩率圖（圖 2-4.7）。若把矩率虧損視為最小大地測量矩率與地震矩率之絕對相差量，則矩率比值可視為相對之相差量。兩者差距之能量可能在未來以地震形式來釋放－能量累積於彈性地殼中，瞬間爆發成地震釋放，或是以無震（aseismic）形式釋放－能量隨著塑性地殼之形變逐漸釋放。由目前的速度變化形態分析結果暗示，這些能量差異可能是以無震（aseismic）的形式進行釋放。

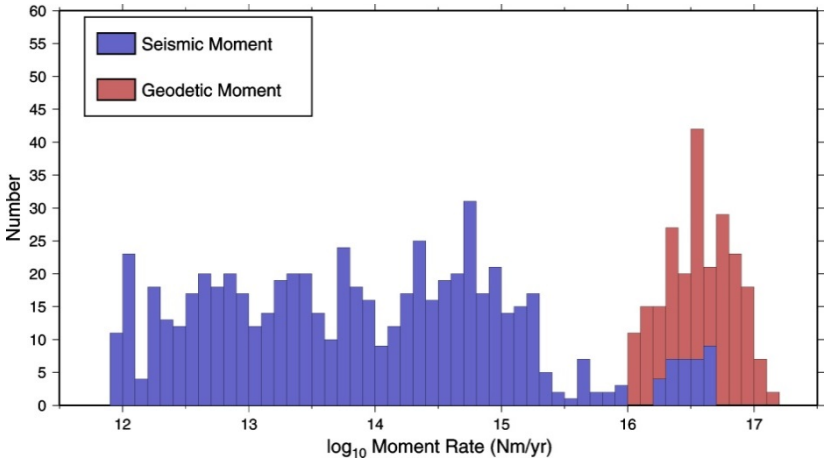


圖 2-4.8：臺灣南部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。

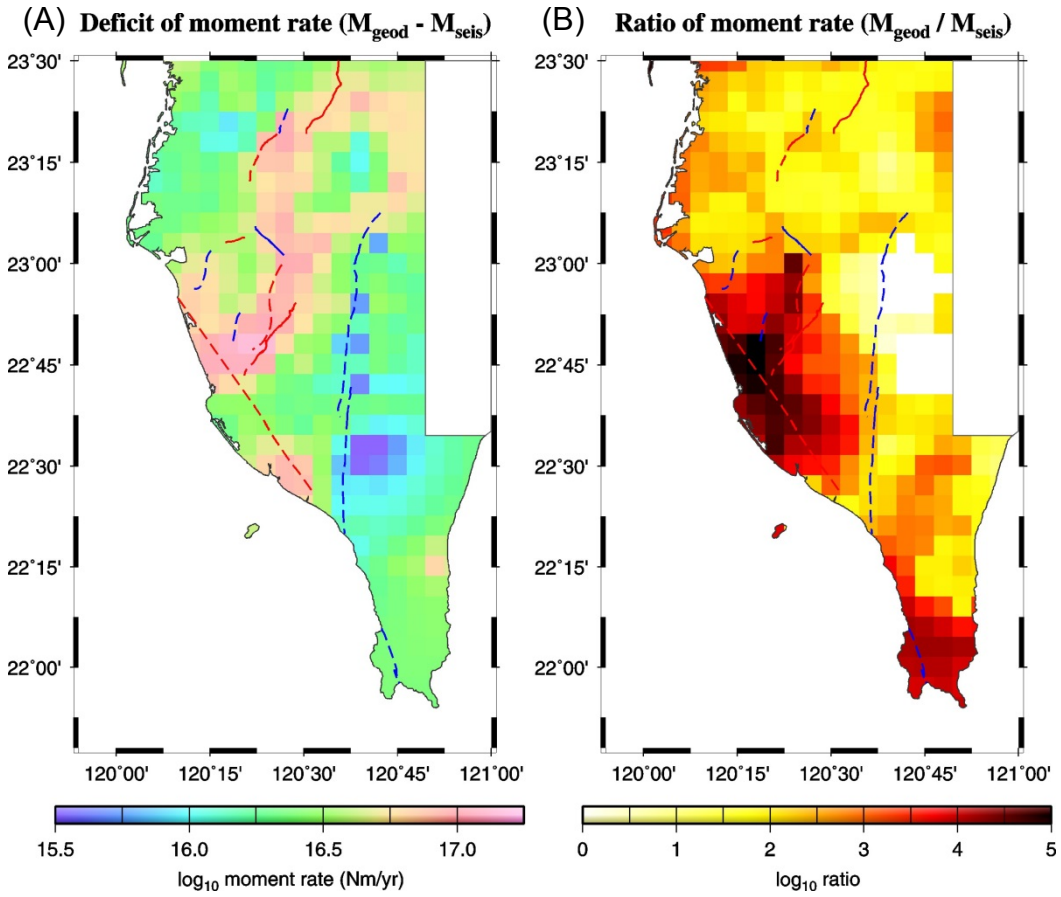


圖 2-4.9：2002 年至 2015 年臺灣南部地區矩率綜合分析圖：（A）矩率虧損圖，由最小大地測量矩率扣除地震矩率。（B）矩率比值圖，由最小大地測量矩率除以地震矩率。

2-5 PS-INSAR

本計畫彙整臺灣南部地區，由 ERS（European Remote Sensing Satellite）-1/2、ENVISAT（Environmental Satellite）以及 ALOS（Advanced Land Observing Satellite）等衛星所拍攝的 SAR 影像，並分析其相對基線值，以檢核可供產生干涉之影像對，製作干涉影像。

歐洲太空總署（European Space Agency，ESA）於 1991 年 7 月發射 ERS-1 衛星，並於 1995 年發射同系列的 ERS-2 衛星，波長為 C 波段。ENVISAT 為 ERS-1/2 後續繼承任務的衛星，於 2002 年發射，同樣為 C 波段。此外，ALOS 衛星於 2006 年 1 月 24 日發射，並於 2006 年 2 月 16 拍攝第一幅影像，為日本地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地區域進行觀測的衛星，其為 L 波段。

不論利用哪種衛星所拍攝的 SAR 影像，本計畫都首先利用影像對相關值，根據時間基線（Temporal Baseline）、空間垂直基線（Perpendicular Spatial Baseline）、都普勒中心頻率（Doppler Centroid Frequency）及熱雜訊（Thermal Noise）挑選出主影像（Master）干涉配對副影像（Slave），產生雷達影像干涉圖。

圖 2-5.1 為本團隊目前使用於地殼變形監測雷達影像分別有以下衛星及其波段，還有所使用的時間區間：

(1) C 波段之 **ERS-1/2** 衛星 SAR 影像時間：
時間涵蓋從 1995 年 4 月至 1999 年 9 月。

(2) C 波段之 **ENVISAT** 衛星 SAR 影像時間：
時間涵蓋從 2004 年 6 月至 2008 年 9 月。

(3) L 波段之 **ALOS** 衛星 SAR 影像時間：
時間涵蓋從 2007 年 1 月至 2011 年 3 月。

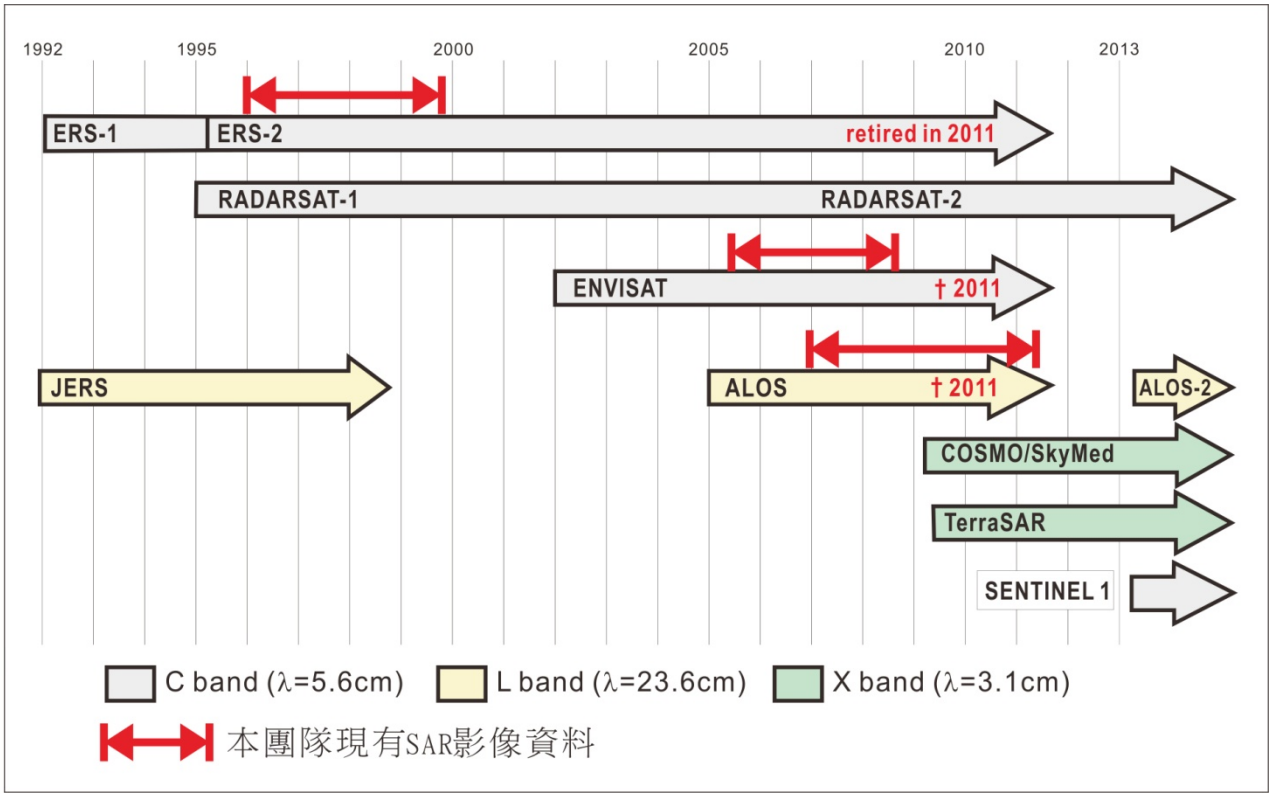


圖 2-5.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。

2-5-1 ERS1/2 (1995/4~1999/9)

本計畫選取 ERS-1/2 衛星 SAR 影像區域為 Track 232，Frame 3141、3159 以及 Track 461，Frame 3159，如圖 2-5.2 所示。影像時間從 1995 年 4 月至 1999 年 9 月。本研究利用時間基線、空間垂直基線、都普勒中心頻率及熱雜訊（Thermal Noise）挑選出適當影像作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-5.3、圖 2-5.5 與圖 2-5.7 所示。在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將影像製作出 N-1 張干涉條紋圖（圖 2-5.4、圖 2-5.6 與圖 2-5.8）。

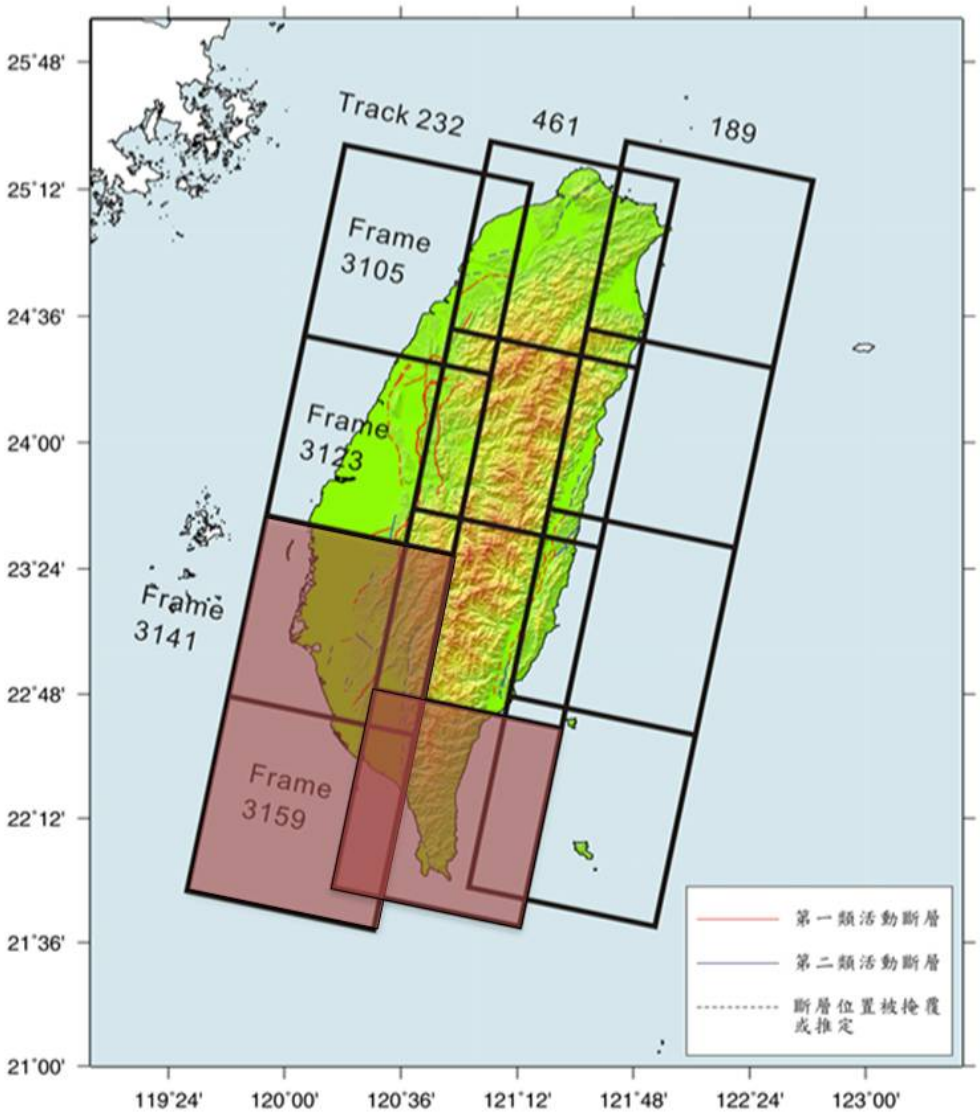


圖 2-5.2：ERS-1/2 衛星選取區域涵蓋圖，Track 232，Frame 3141、3159 及 Track 461，Frame 3159。

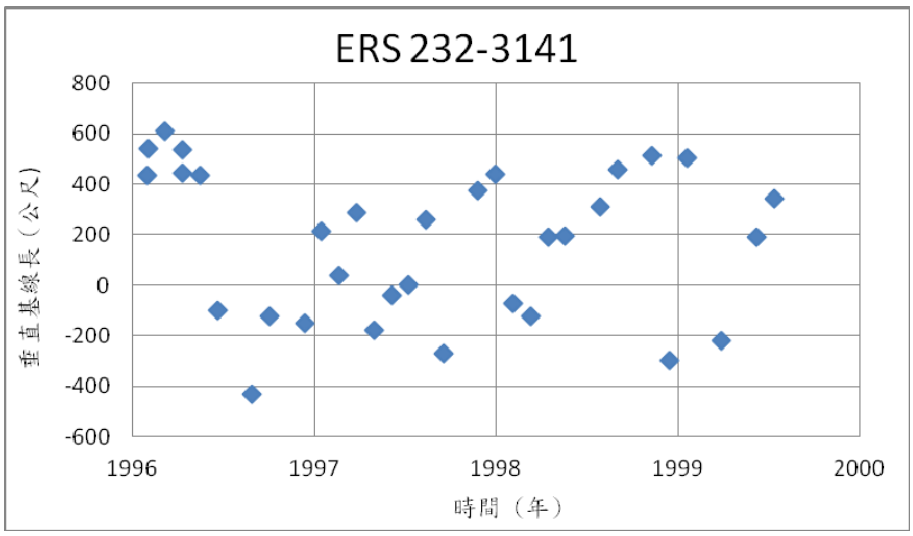


圖 2-5.3：ERS-1/2 Track 232，Frame 3141 影像時間與垂直基線相對關係。

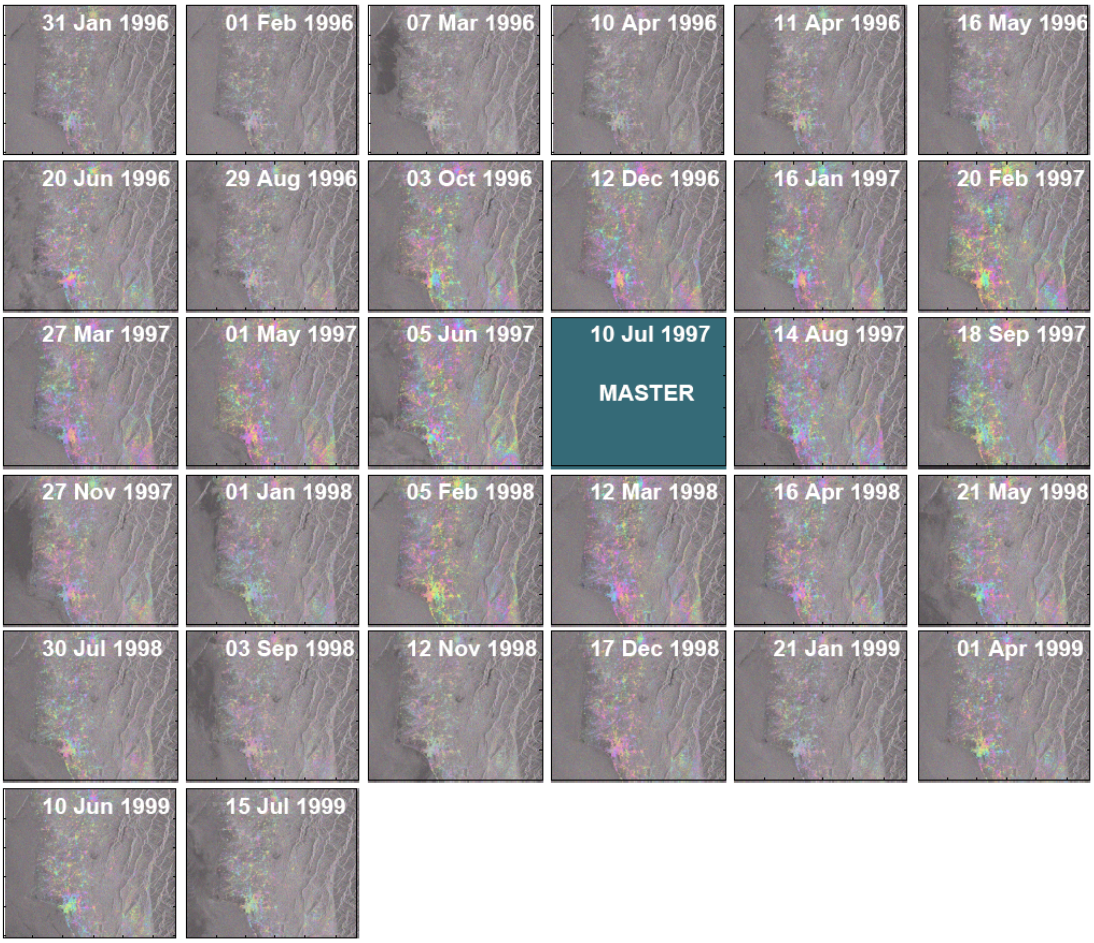


圖 2-5.4：利用 ERS Path 232，Frame 3141 共 32 幅影像，以 1997/07/10 為主影像所獲得 31 幅差分干涉圖之結果。

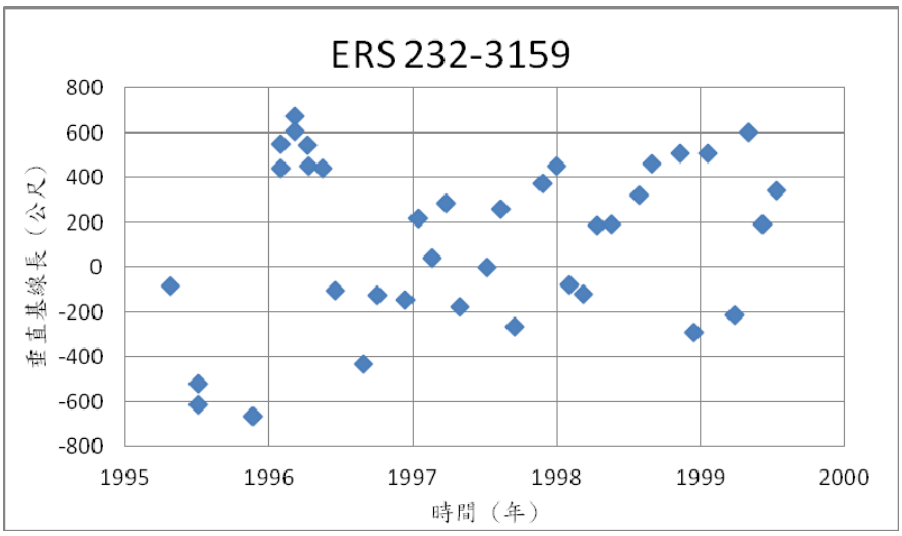


圖 2-5.5：ERS-1/2 Track 232，Frame 3159 影像時間與垂直基線相對關係。

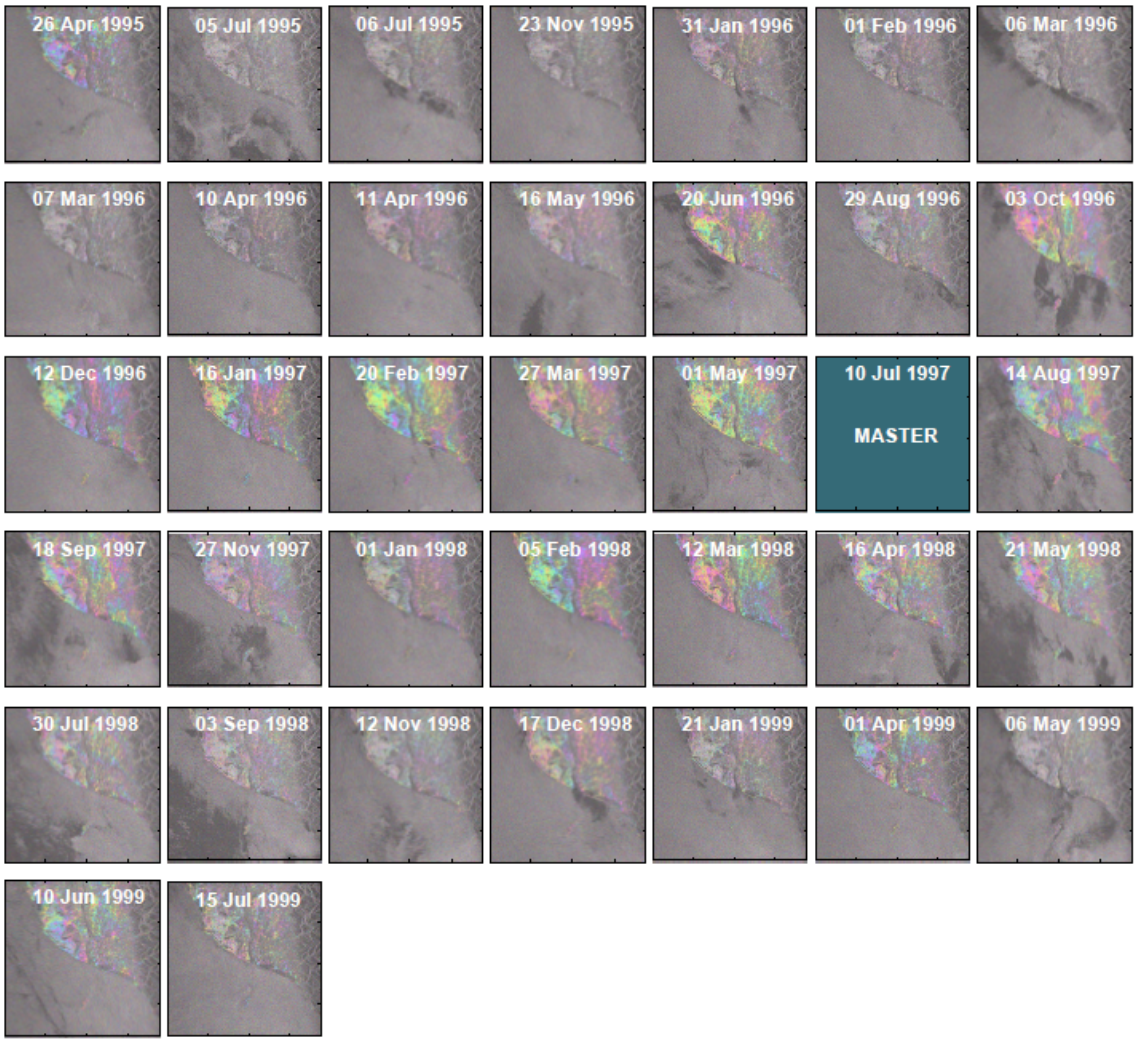


圖 2-5.6：利用 ERS Path 232，Frame 3159 共 37 幅影像，以 1997/07/10 為主影像所獲得 36 幅差分干涉圖之結果。

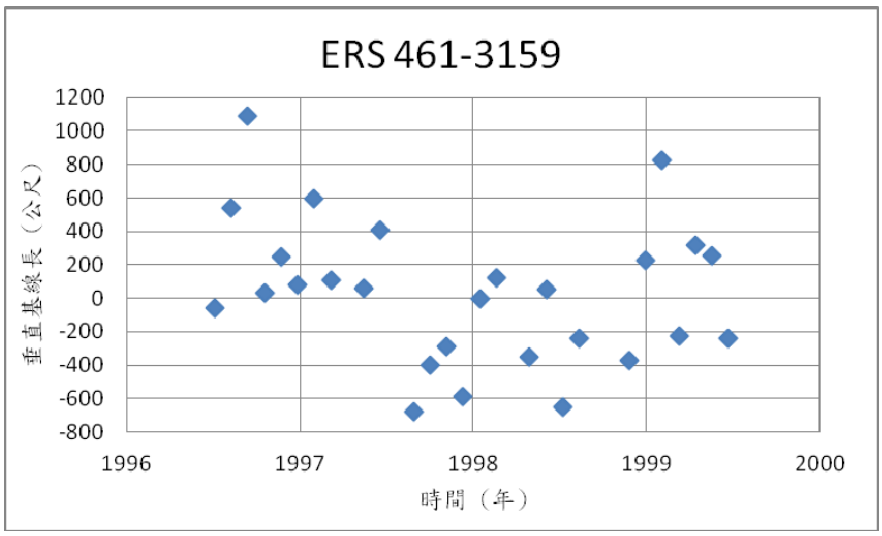


圖 2-5.7：ERS-1/2 Track 461，Frame 3159 影像時間與垂直基線相對關係。

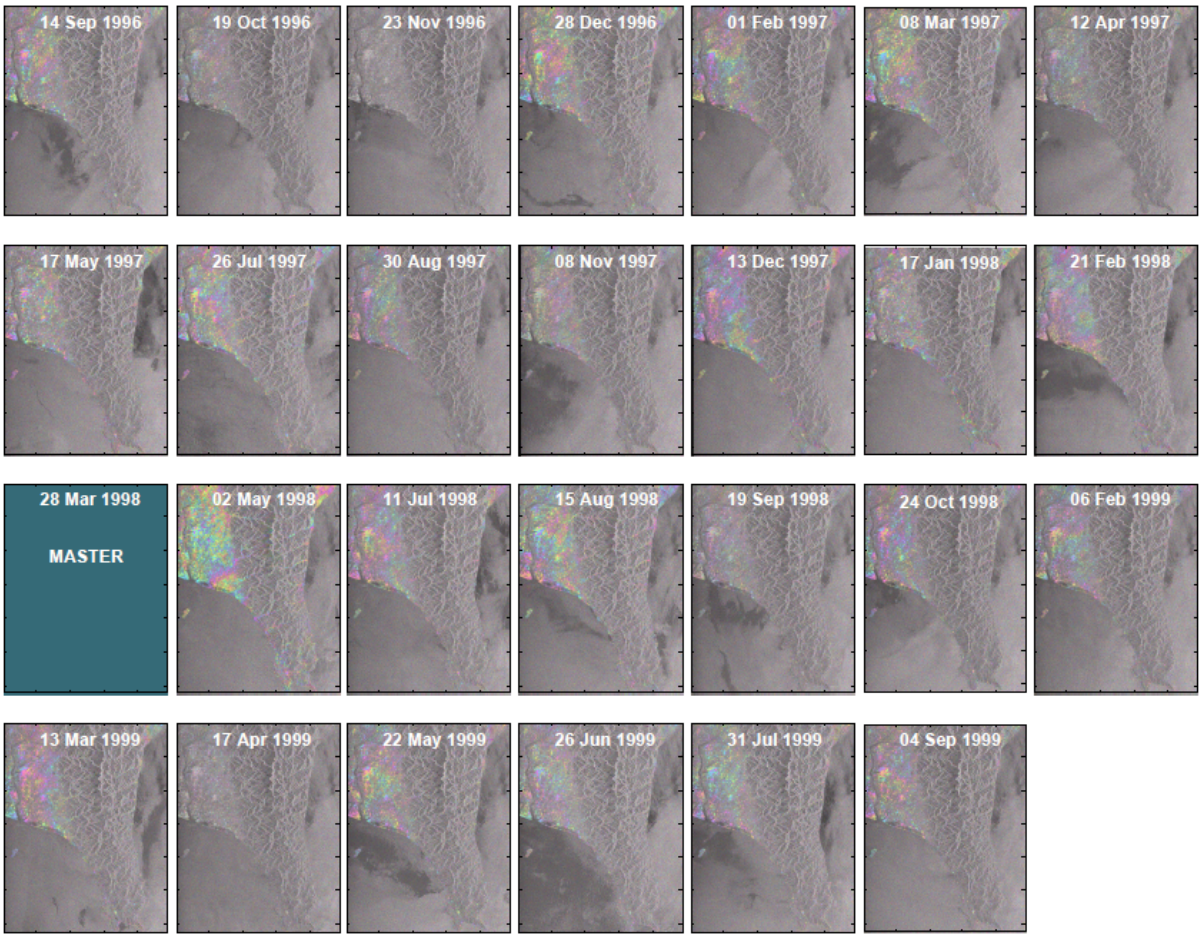


圖 2-5.8：利用 ERS Path 461，Frame 3159 共 27 幅影像，以 1998/03/28 為主影像所獲得 26 幅差分干涉圖之結果。

由圖 2-5.4、圖 2-5.6 與圖 2-5.8 可見，影像中干涉條紋大多產生於西部麓山帶區域，進入中央山脈山區則無法產生明顯的干涉條紋。完成所有影像對的干涉結果後，本計畫利用 StaMPS 軟體進行 PS-InSAR 流程解算，圖 2-5.9 即為 ERS 影像在此期間獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 LIKN 為參考點位，對所有 PS 點做校正。並且將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻

合，顯示此結果的可靠性相當高。分析永久散射點的結果，可以得到在這段期間（1995~1999），兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。以連續 GPS 測站 LIKN 為不動點而言，此兩處沿海地區最大視衛星方向下陷量可達到近 30 mm/yr。台南台地則擁有最大抬升量，速率約為 30 mm/yr。此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。此外，跨過龍船斷層以及鳳山轉換帶也有明顯的速度不連續，速度梯度可達將近 20mm/yr，需持續關注。

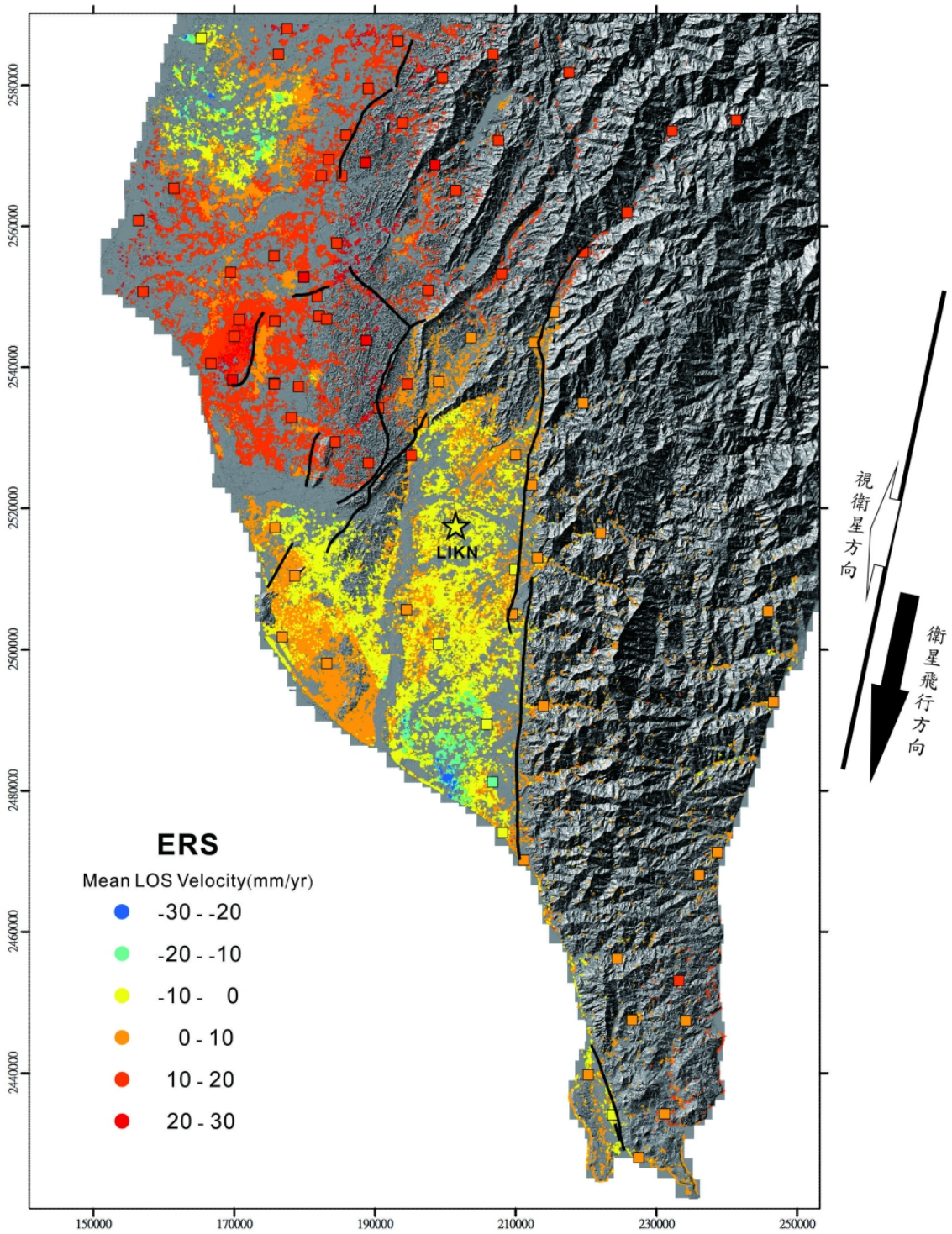


圖 2-5.9：ERS 衛星視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。正方形為連續 GPS 測站，其中以 LIKN 測站為參考點位（星星標示）。

2-5-2 ENVISAT (2004/6~2008/9)

ENVISAT 衛星影像為 Track 232，Frame 3141 及 3159，如圖 2-5.10 所示。另外，Track 461，Frame 3159，未取得影像資料。本區域範圍一共有 24 張影像，影像時間從 2004 年 6 月至 2008 年 9 月。利用時間基線、空間垂直基線、都普勒中心頻率及熱雜訊(Thermal Noise)挑選出 2007 年 6 月 28 日作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-5.11 所示。

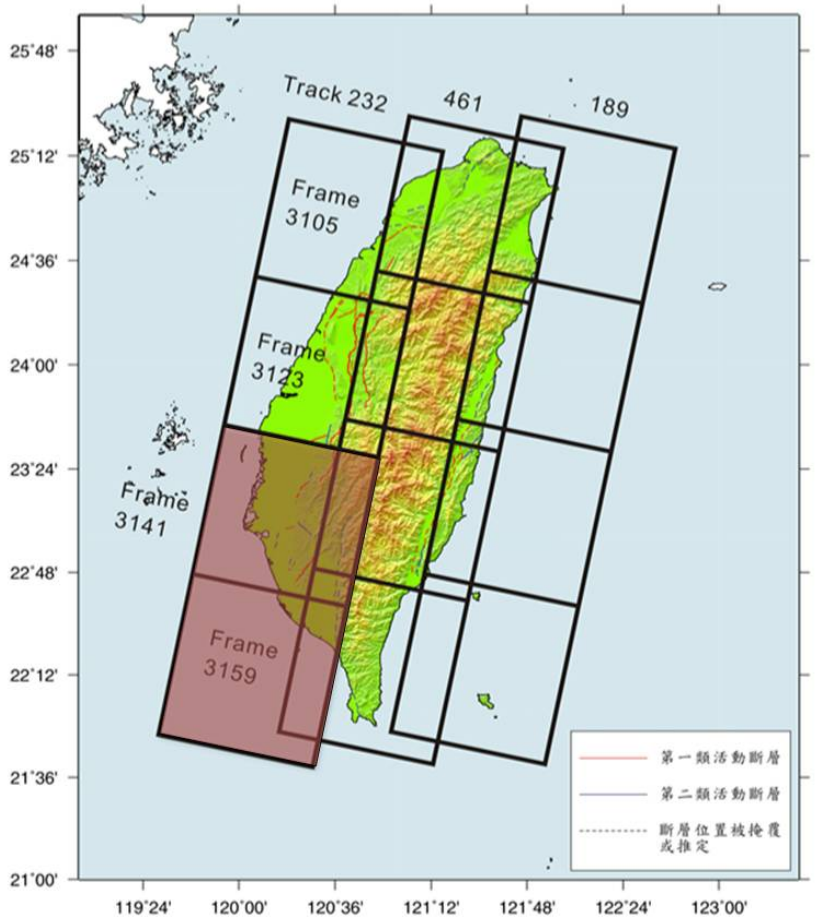


圖 2-5.10：ENVIAST 衛星選取區域涵蓋圖，Track 232，Frame 3141、3159。

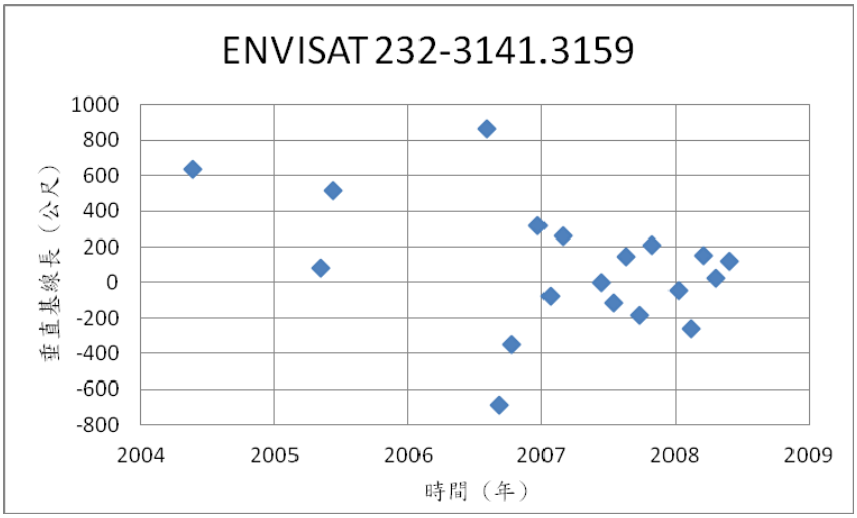


圖 2-5.11：ENVISAT Track 232，Frame 3141 及 3159 影像時間與垂直基線相對關係。

在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將 24 張影像製作出 23 張干涉條紋圖（圖 2-5.12）。

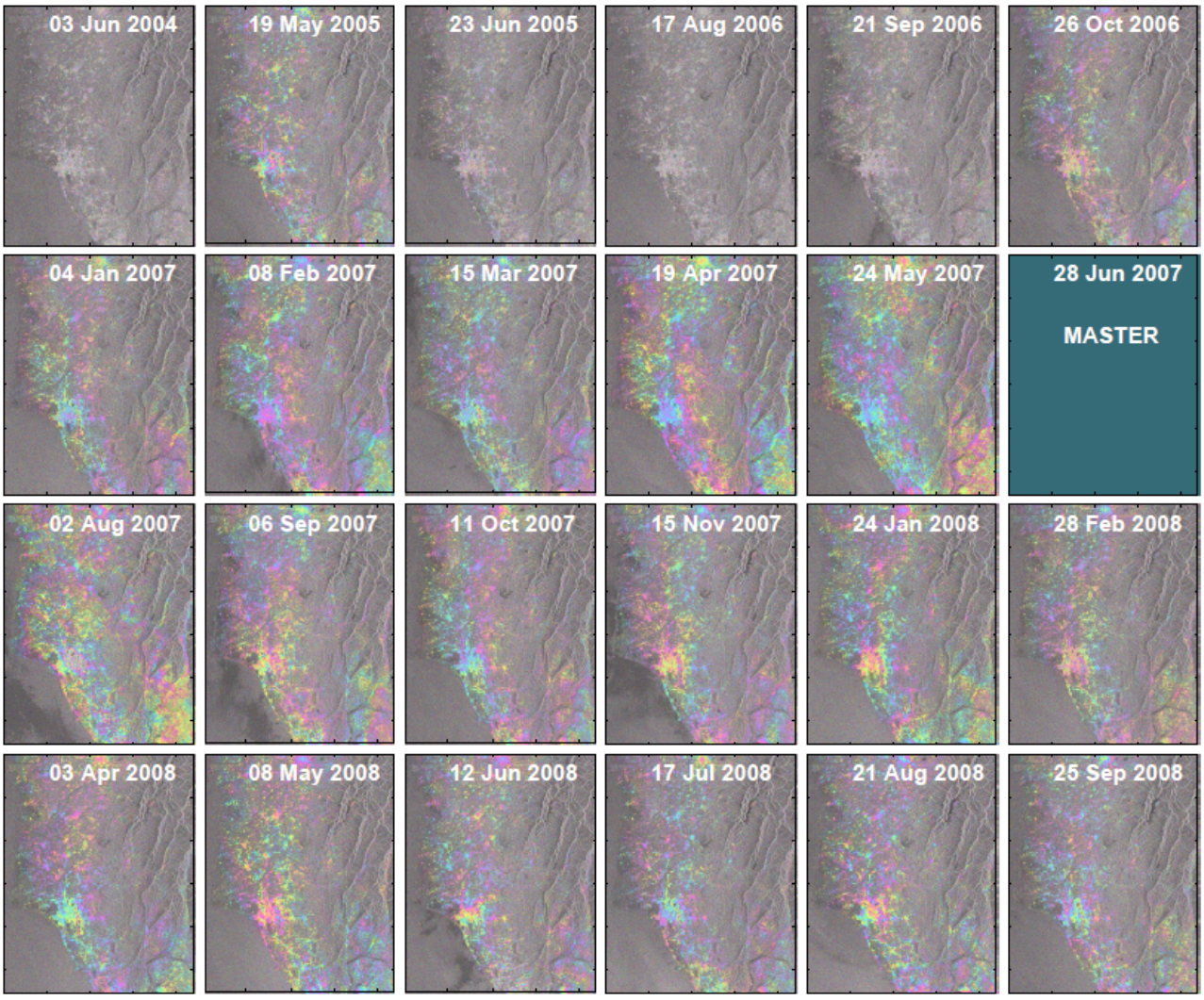


圖 2-5.12：ENVISAT Path 232，Frame 3141 及 3159 共 24 幅影像，以 2007/06/28 為主影像所獲得 23 幅差分干涉圖之結果。

圖 2-5.12 可見，相較於 ERS 衛星差分干涉結果，ENVISAT 在像對所組成的干涉圖中表現較為良好，幾乎所有的影像對皆可以得到大面積的干涉成果。影像中干涉條紋主要還是產生於西部麓山帶區域，幾乎整個西部麓山帶都有明顯的干涉條紋。只有中央山脈山區較無法產生明顯的干涉條紋。其中第一張影像與第二張影像及第三張影像時間間隔較長，因此較無明顯的干涉條紋，若後續 PSInSAR 結果雜訊過大，也可針對上述影像做刪減來探討。

完成所有影像對的干涉結果後，本計畫利用 StaMPS 軟體進行 PSInSAR 流程解算，圖 2-5.13 即為 ENVISAT 影像在此期間獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 LIKN 為參考點位，對所有 PS 點做校正。將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻合，顯示此結果的可靠信相當高。從圖 2-5.13 可見，在這段期間（2004-2008），西南地區變形行為與 ERS 結果相似。以 LIKN 為不動點而言，嘉南沿海地區最大視衛星方向下陷量約為 20 mm/yr。新化斷層以北以及台南台地及大灣低地南側則擁有最大抬升量，最大速率約為 30 mm/yr。其中跨過六甲斷層、木屐寮斷層及龍船斷層都能看到有變形速率不一的情形。反之，跨過後甲里斷層兩側之變形不連續則較為不明顯。

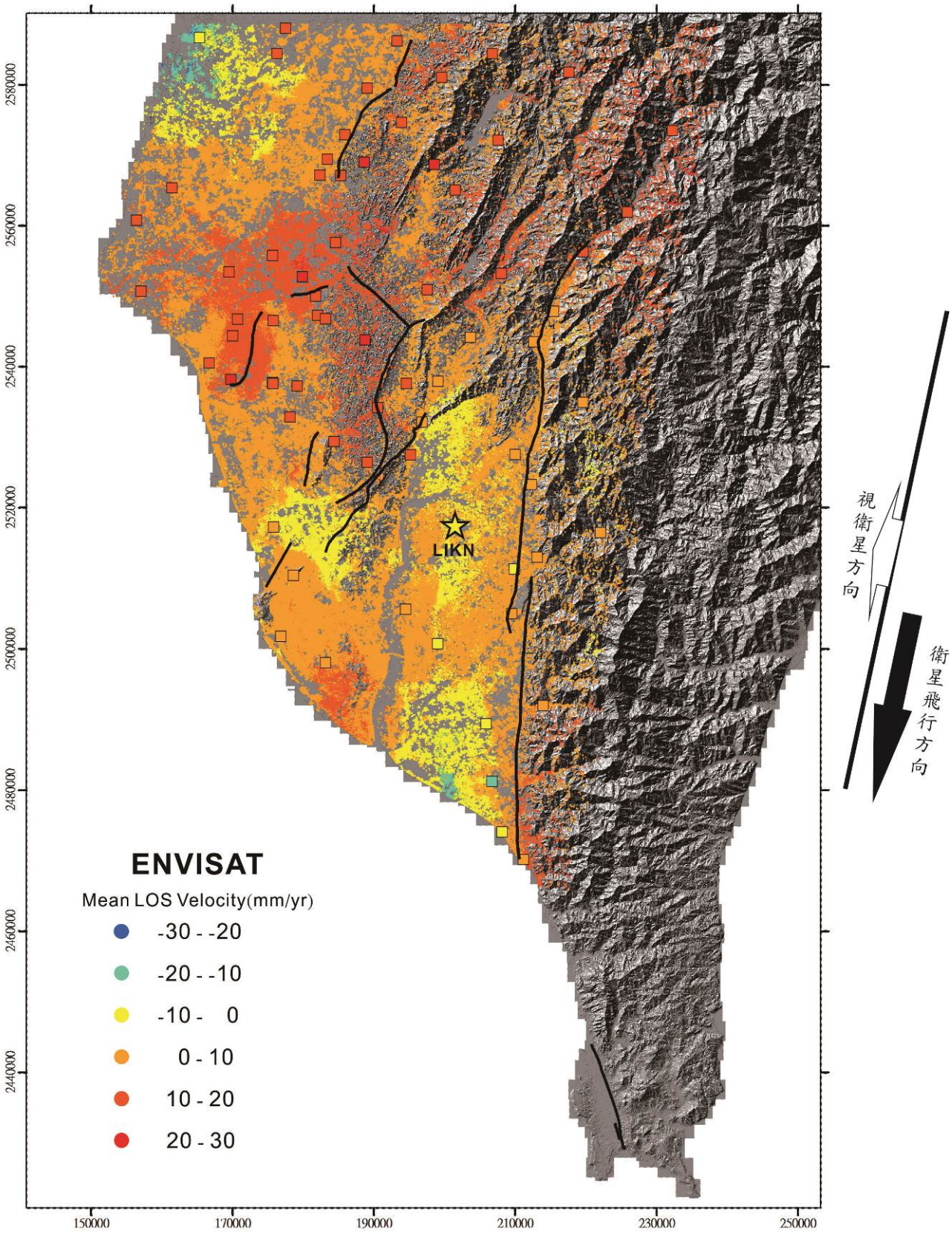


圖 2-5.13：ENVISAT Path 232，Frame 3141 及 3159 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。正方形為連續 GPS 測站，其中以 LIKN 測站為參考點位（星星標示）。

2-5-3 ALOS (2007/1~2011/3)

本計畫選取 ALOS 衛星 SAR 影像區域為 Track 447，Frame 430 到 450 及 Track 446，Frame 430 到 440，如圖 2-5.14 所示。影像時間從 2007 年至 2011 年 3 月。本研究利用時間基線、空間垂直基線、都普勒中心頻率及熱雜訊（Thermal Noise）挑選出適當影像作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-5.15 所示。在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將 1 影像製作出 N-1 張干涉條紋圖（圖 2-5.15 及圖 2-5.17）。

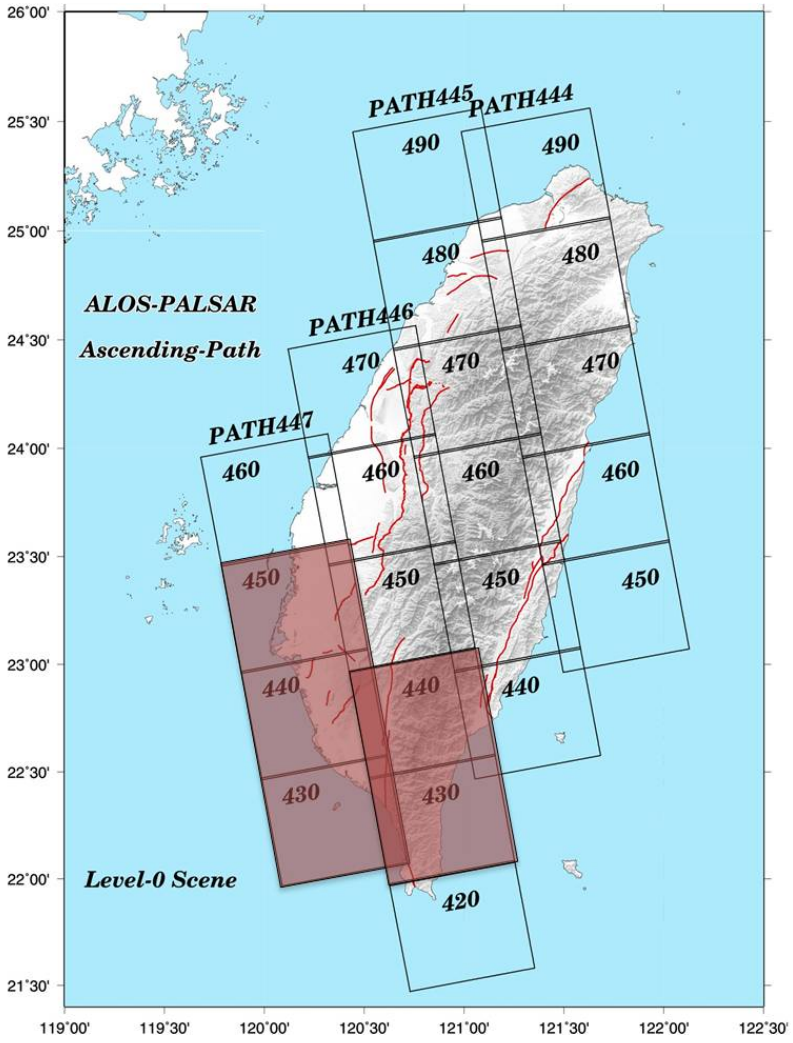


圖 2-5.14：ALOS 衛星選取區域涵蓋圖，Track 447，Frame 430 到 450 及 Track 446，Frame 430 到 440。

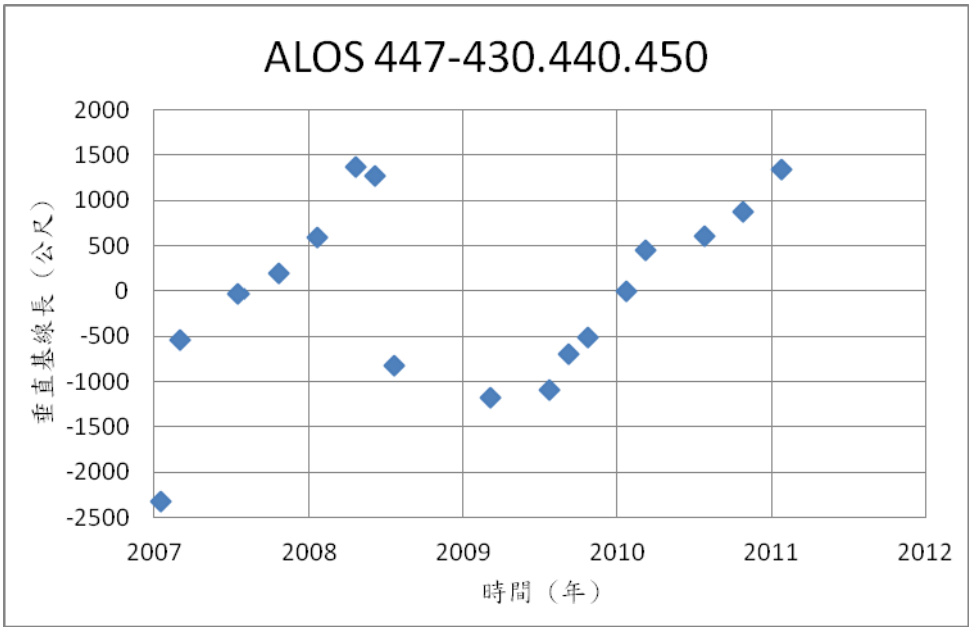


圖 2-5.15：ALOS Track 447，Frame 430、440 及 450 影像時間與垂直基線相對關係。

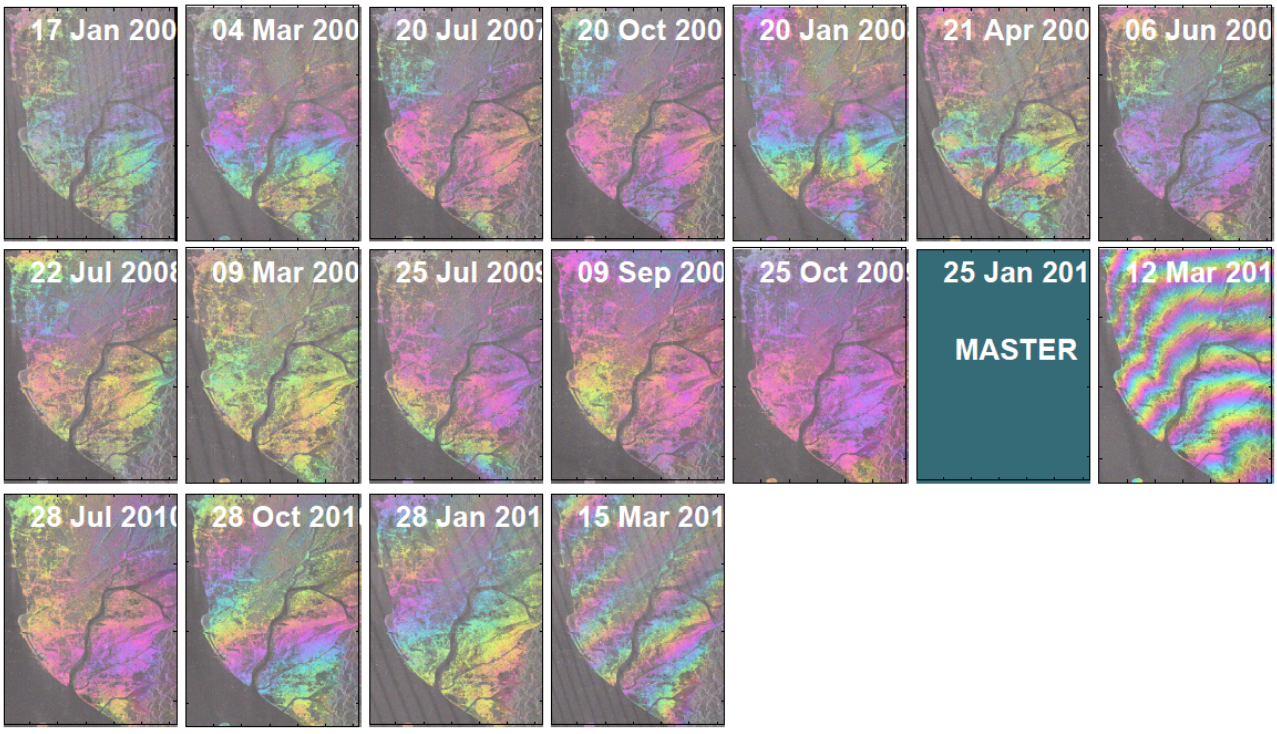


圖 2-5.16：ALOS Path 447，Frame 430、440 及 450 共 18 幅影像，以 2010/01/25 為主影像所獲得 17 幅差分干涉之結果。

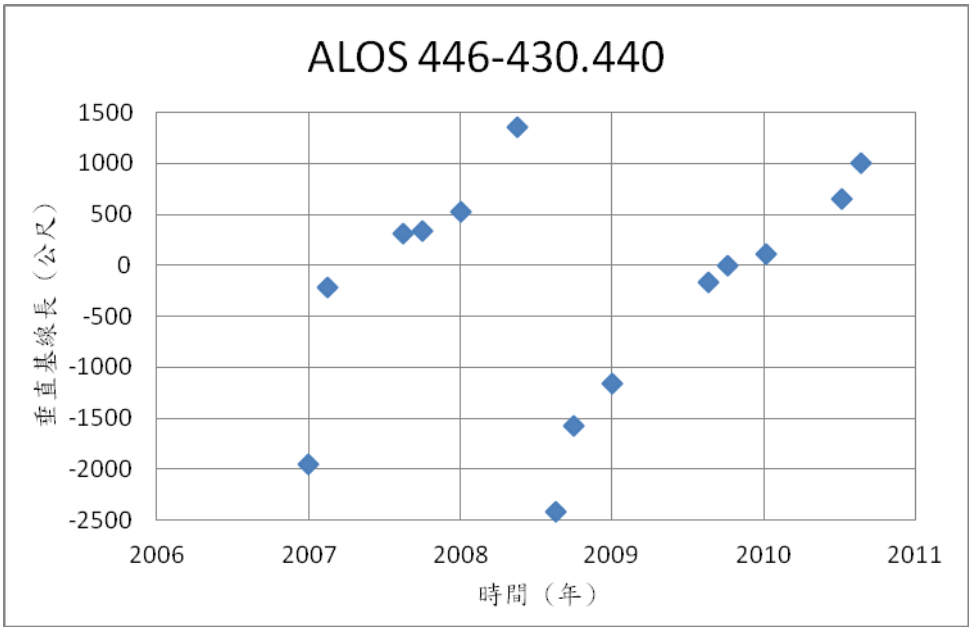


圖 2-5.17：ALOS Track 446，Frame 430 及 440 影像時間與垂直基線相對關係。

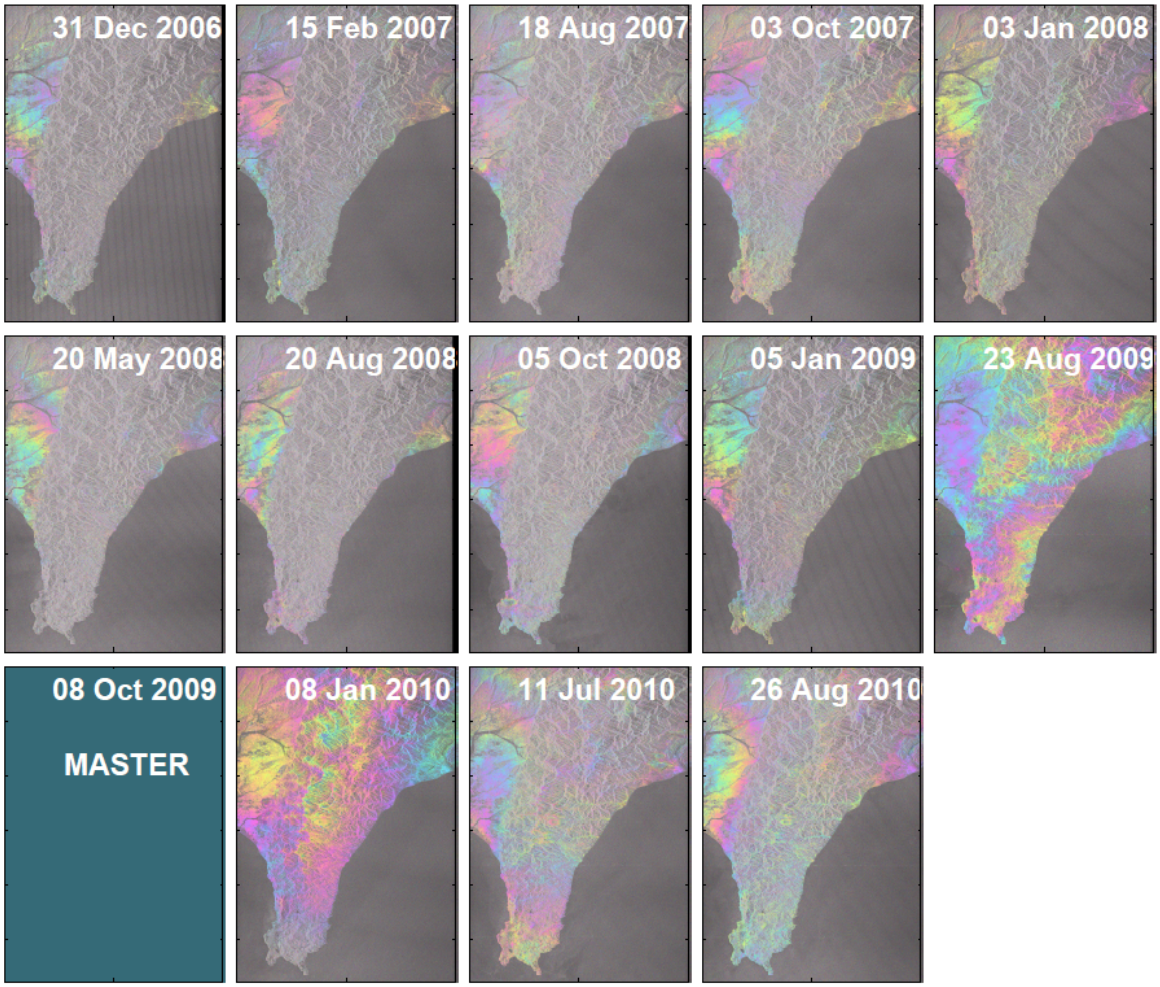


圖 2-5.18：ALOS Path 446，Frame 430 及 440 共 14 幅影像，以 2009/10/08 為主影像所獲得 13 幅差分干涉之結果。

圖 2-5.16 及圖 2-5.18 可見，相較於 ERS 衛星及 ENVISAT 衛星差分干涉結果，L 波段的 ALOS 衛星在像對所組成的干涉圖中表現最為良好，儘管進入中央山脈區域，幾乎所有的影像對還是可以得到部分的干涉成果。完成所有影像對的干涉結果後，本計畫利用 StaMPS 軟體進行 PSInSAR 流程解算，圖 2-5.19 即為 ALOS 衛星影像在此期間獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 LIKN 為參考點位，對所有 PS 點做校正。將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，可發現所有 PSInSAR 速度都比連續 GPS 測站速度大，造成此原因應該為此影像序列期間包含 2010 年 3 月 4 日發生於高雄甲仙地區規模 6.4 的地震，因此 PSInSAR 結果包含甲仙地震造成的同震變形。以 LIKN 為不動點而言，其最大視衛星方向抬升量約為位於龍船斷層西側的 30 mm/yr。在這段期間（2007-2011），西南變形行為顯示九條斷層跨斷層兩側都有明顯程度不一的速度變化，其中又以旗山斷層最為明顯。另外，跨過龍船斷層以及右昌斷層也顯示出明顯的速度不連續。

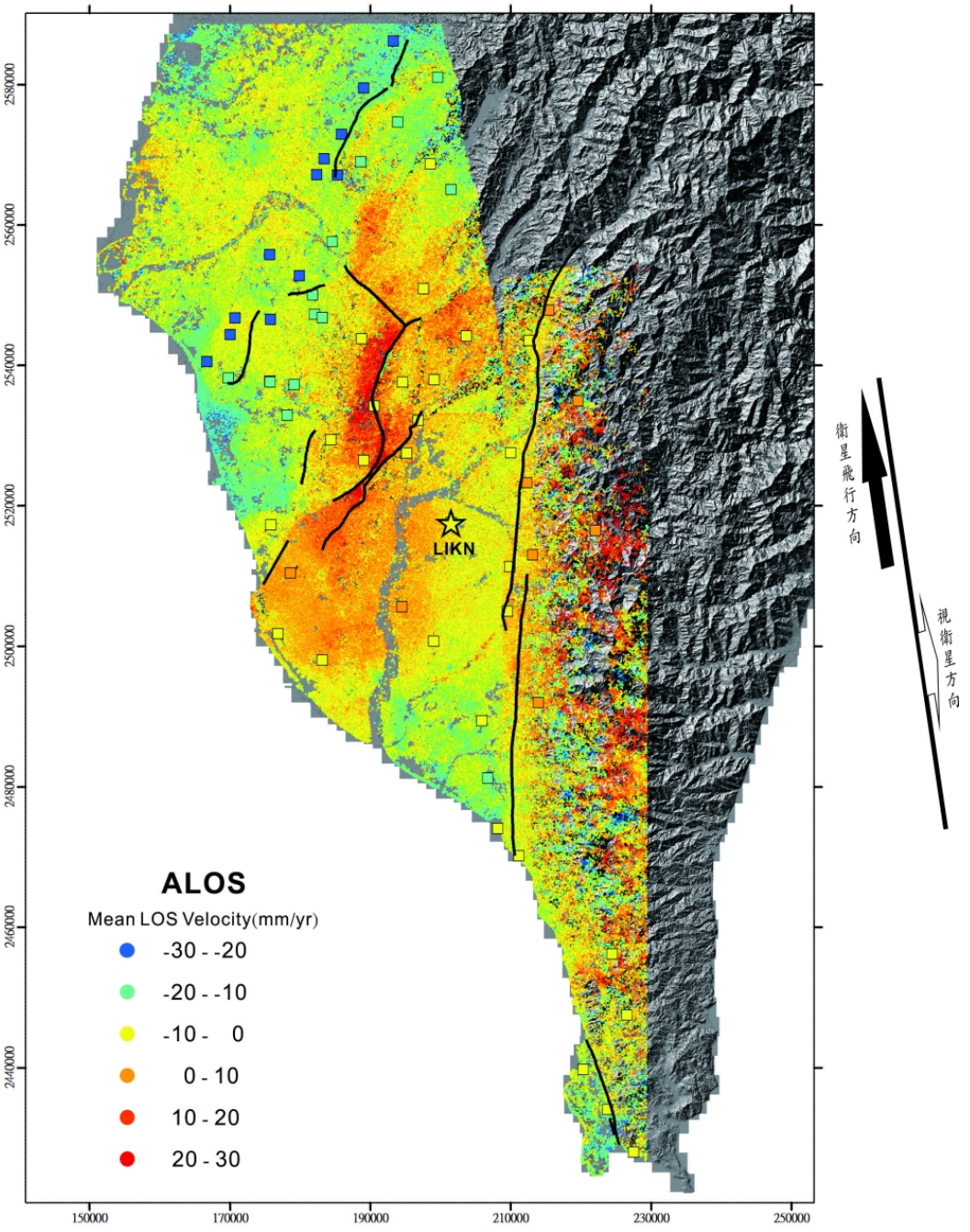


圖 2-5.19： ALOS Path 447，Frame 430、440 及 450 及 Path 446，Frame 430 及 440 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。正方形為連續 GPS 測站，其中以 LIKN 測站為參考點位（星星標示）。

2-6 斷層剖面分析

2-6-1 木屐寮斷層

本剖面長度 45 公里、半寬 3 公里、剖面走向 110°。ALOS 衛星結果顯示跨過斷層後有明顯相對抬升，速度梯度約將近 10 mm/yr，相對來說在 ERS 衛星以及 ENVISAT 衛星相對抬升量側較不明顯，速度梯度約近 5 mm/yr。由 ALOS 衛星結果相對 ERS 衛星以及 ENVISAT 衛星相對抬升量為明顯顯示出此斷層有相當程度的平移分量。由於缺乏橫跨本斷層的水準測線，因此僅有兩個由 GPS 測站提供之垂直位移資料落在本剖面範圍內（圖 2-6.1），以至於無法解析解析木屐寮斷層之垂直運動；水平分量在平行斷層走向方向上則有約 3 mm/yr 的跨斷層左移分量，在垂直斷層走向方向有約 5 mm/yr 的縮短量，由此可推測木屐寮斷層為帶有左移分量的逆衝斷層。此外，由於跨斷層的所有資料皆顯示無顯著的速度梯度變化，因此木屐寮斷層之淺部應為鎖定狀態，然而就橫跨木屐寮與觸口斷層之視衛星方向變型特徵，可推測於六甲斷層與觸口斷層之間的斷塊下可能存在一斷坡，以致該斷塊抬升量向東逐漸增加。受限於橫跨斷層剖面之測站數量不足的緣故，現階段對於解析斷層現今之運動與斷層特性仍有待加強，倘若未來有資源及經費，木屐寮斷層之運動特性即可被揭示。

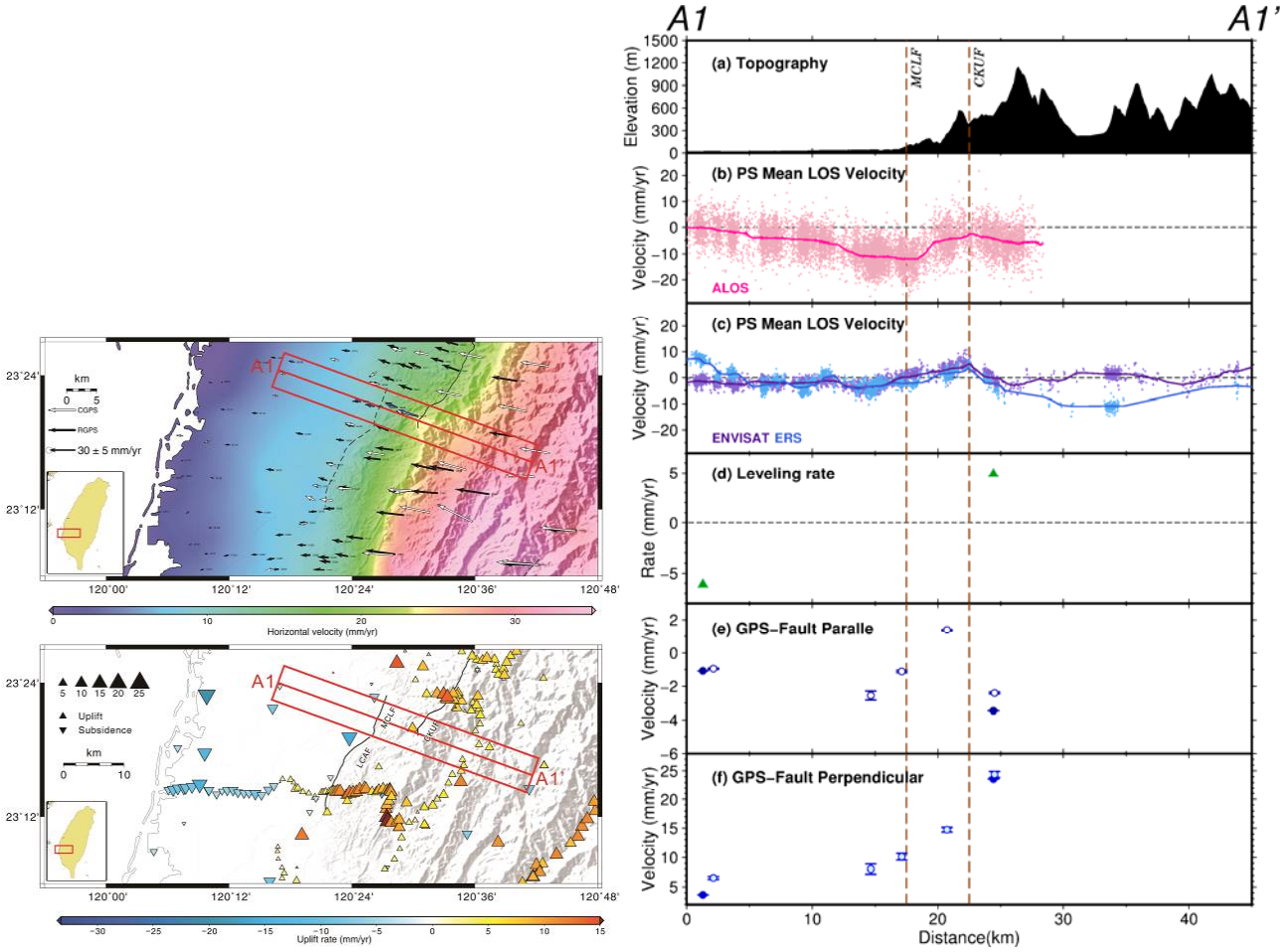


圖 2-6.1：木屐寮斷層速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖為斷層剖面速度場圖，(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。MCLF 為木屐寮斷層，CKUF 為觸口斷層。

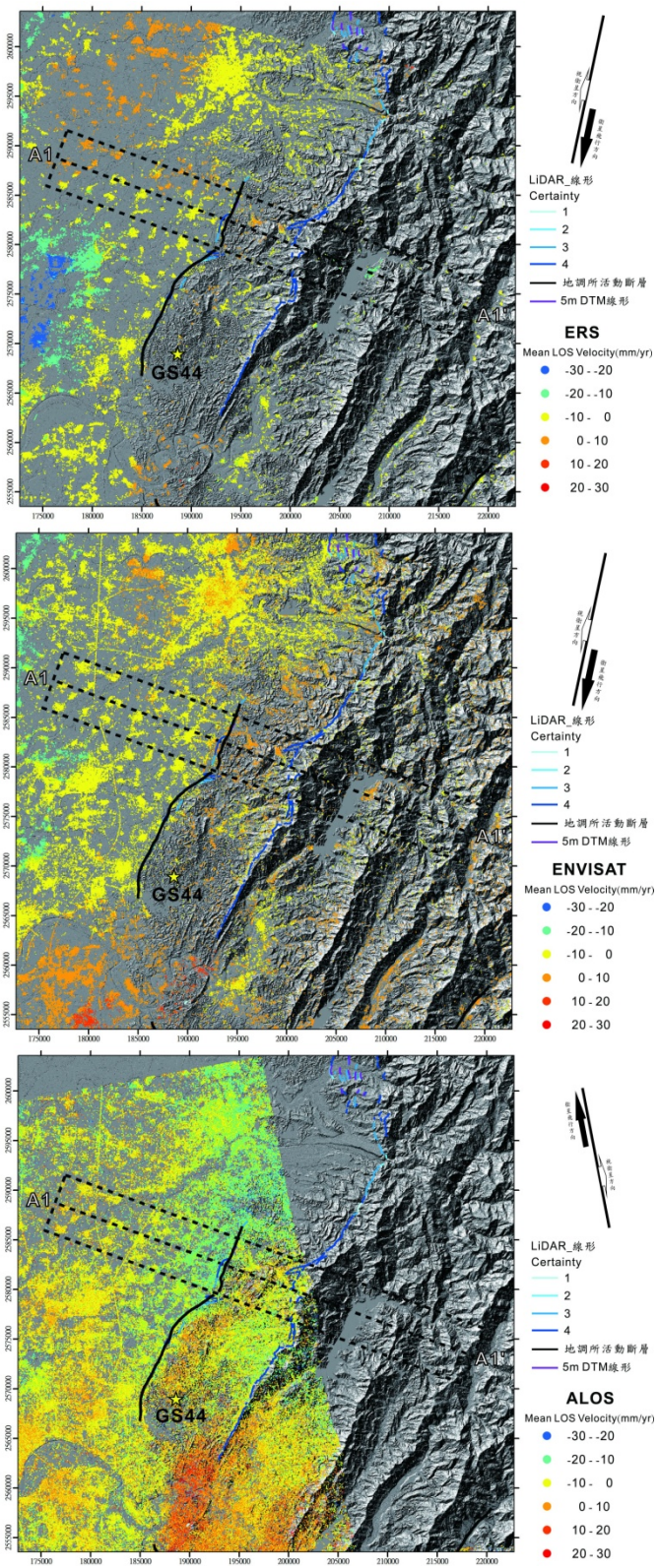


圖 2-6.2：木屐寮斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 GS44。LiDAR_線形 1：可完全指示構造之活動位置、特性等，於今日之地表位置或資料庫明確者；LiDAR_線形 2：就文獻中，尚無詳細之地表露頭證據、或無相關之資料者，亦或尚無精細之構造線形位置記錄，但在 LiDAR 地形資料上，其構造地形上有詳細而明確的地形特徵或證據指出地表線形確為構造活動所引致；LiDAR_線形 3：其線段之地形特性同地形線形 2 所描述者，但本線形經由野外查核中，可或因地形受人為開發而破壞、或其他因素影響，而未能直接於野外觀察到本線段之地表真實構造特徵者；LiDAR_線形 4：文獻中無詳細之地表露頭證據、或無相關之資料者，亦或尚無精細之構造線形位置記錄，但在 LiDAR 之地形資料上，其構造地形上之地形特徵證據推測本地表線形可能為構造活動所影響。（張國禎，2014）

2-6-2 六甲斷層

六甲斷層分北段（A2-A2’）和南段（A3-A3’）兩個剖面，長度皆為 30 公里、半寬 4 公里、剖面走向 110°。根據圖 2-6.3，三種衛星結果與水準測量結果一致顯示沿海區域有明顯下陷量，並且在北段的六甲斷層西側 5 公里處有明顯抬升量；在南段的六甲斷層西側 3 公里處開始有抬升量，且 ENVISAT 衛星測得之數據顯示，在跨斷層後速度有增加的趨勢，梯度約為 5 mm/yr。此結果暗示六甲斷層上盤深處可能存在一高角度斷坡，以致產生視衛星方向速度增加的趨勢。在跨斷層垂直速度分量上，北段有約 2 mm/yr 的右移分量，南段則不顯著；在垂直斷層走向方向上，北段有約 10 mm/yr 的速度變化量，南段則有約 5 mm/yr 的速度變化量。此結果顯示六甲斷層為帶有些微右移分量的逆衝斷層。此外，由於所有資料在跨斷層並無顯著的速度梯度變化，因此，預期六甲斷層之淺部應為鎖定狀態。然而由跨斷層剖面之 GPS 測站數相當不足，對於明確解析斷層現今之運動與斷層特性相當不夠。

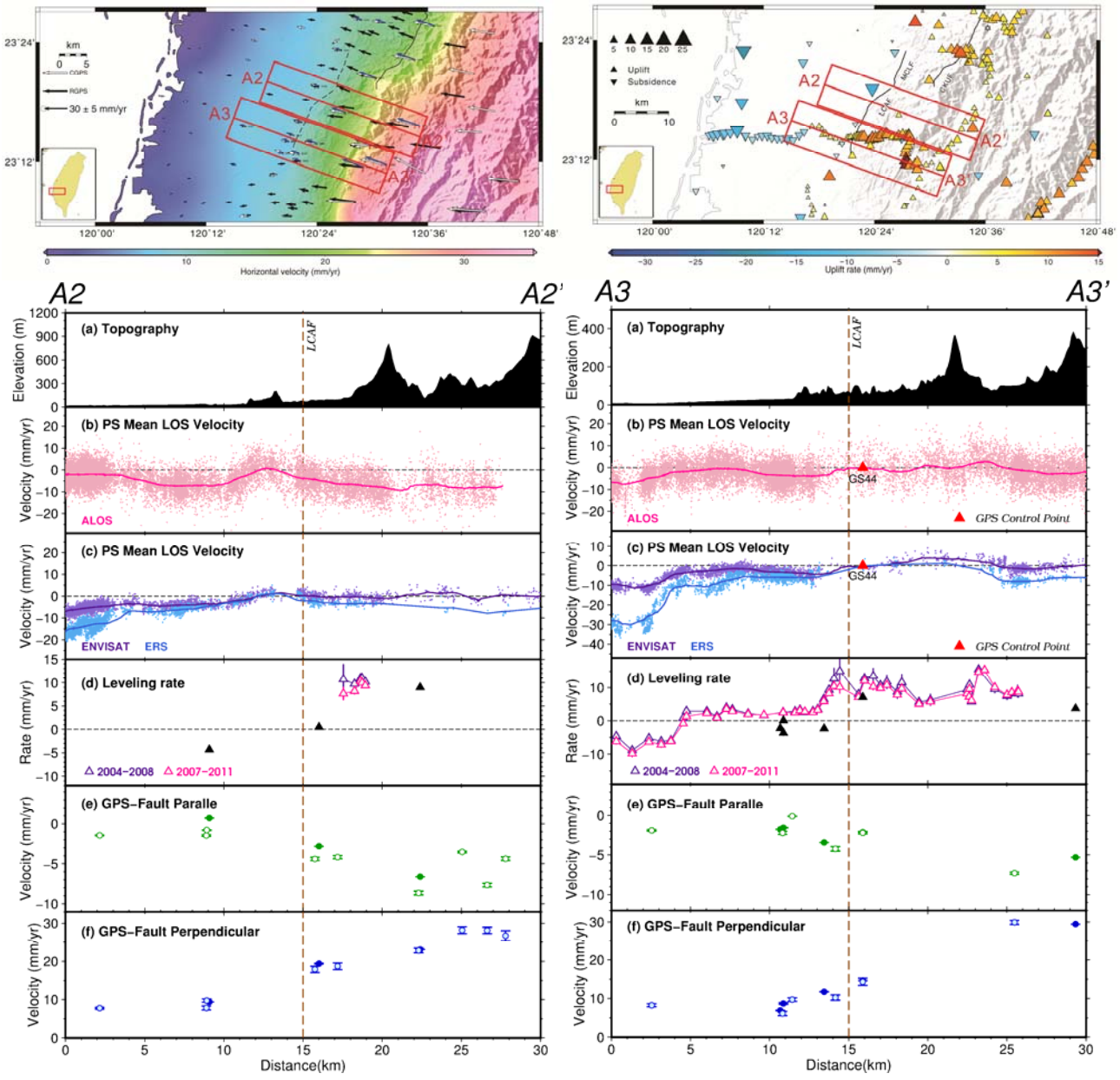


圖 2-6.3：六甲斷層速度剖面圖。上方左圖為水平速度場及剖面位置圖。上方右圖為垂直速度場圖。下方左圖為 A2-A2’剖面，下方右圖為 A3-A3’剖面，剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。LCAF 為六甲斷層。

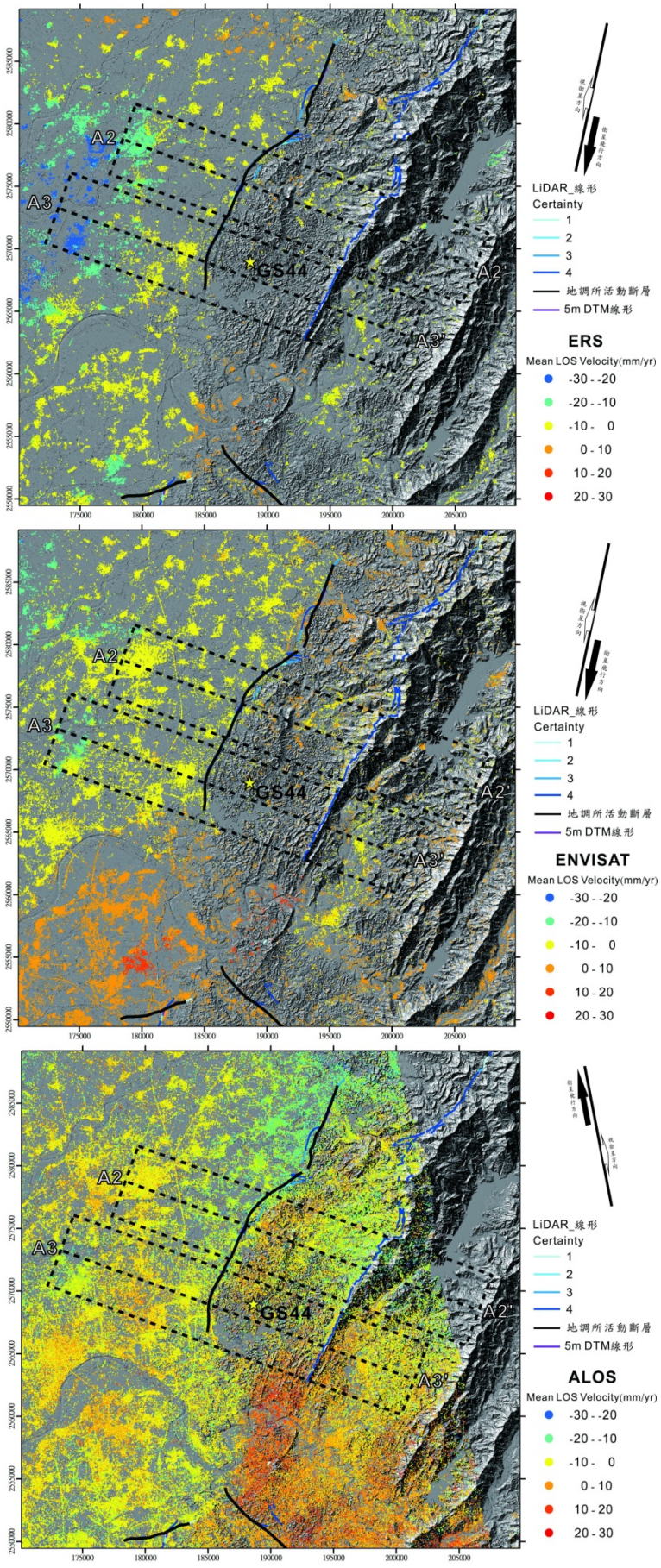


圖 2-6.4：六甲斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 GS44。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-3 後甲里斷層

本剖面長度 30 公里、半寬 5 公里、剖面走向 105°。三種時期的衛星資料結果不太相同，在 ERS 時期（1995-1999），此斷層主要以高角度逆斷層方式呈現，跨斷層上下盤速度梯度約為 15 mm/yr，到 ENVISAT 時期（2004-2008）以及 ALOS 時期（2007-2011）此跨過斷層活動性降低，速度梯度低於 5 mm/yr。此結果暗示後甲里斷層活動性應受 1999 年集集地震所影響，斷層在集集地震前較鎖定，而在集集地震後較為活躍，以致三種衛星之測量結果有所差異。根據圖 2-6.5，於 2002-2015 年間，在跨斷層垂直速度分量上並不顯著。在平行斷層走向的水平分量上，於跨斷層約 5 公里的範圍內有約 2 mm/yr 的右移分量，而在垂直斷層走向方向則有約 5 mm/yr 的縮短量，由此可推得後甲里斷層為帶有右移分量的逆衝斷層。此外，由於跨斷層並無顯著的速度梯度變化，因此後甲里斷層之淺部應為鎖定狀態。

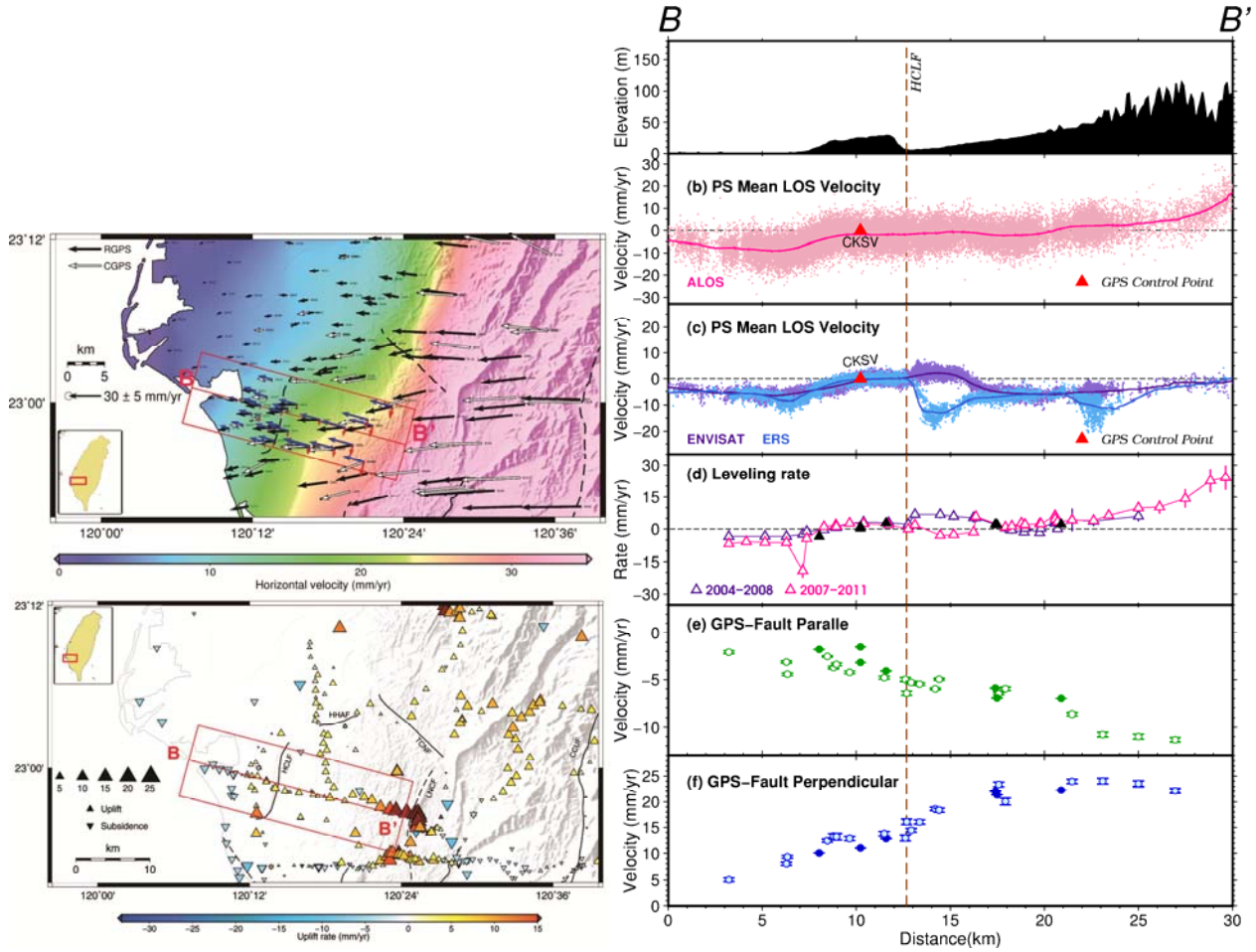


圖 2-6.5：後甲里斷層速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖為 B-B' 剖面，剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。HCLF 為後甲里斷層。

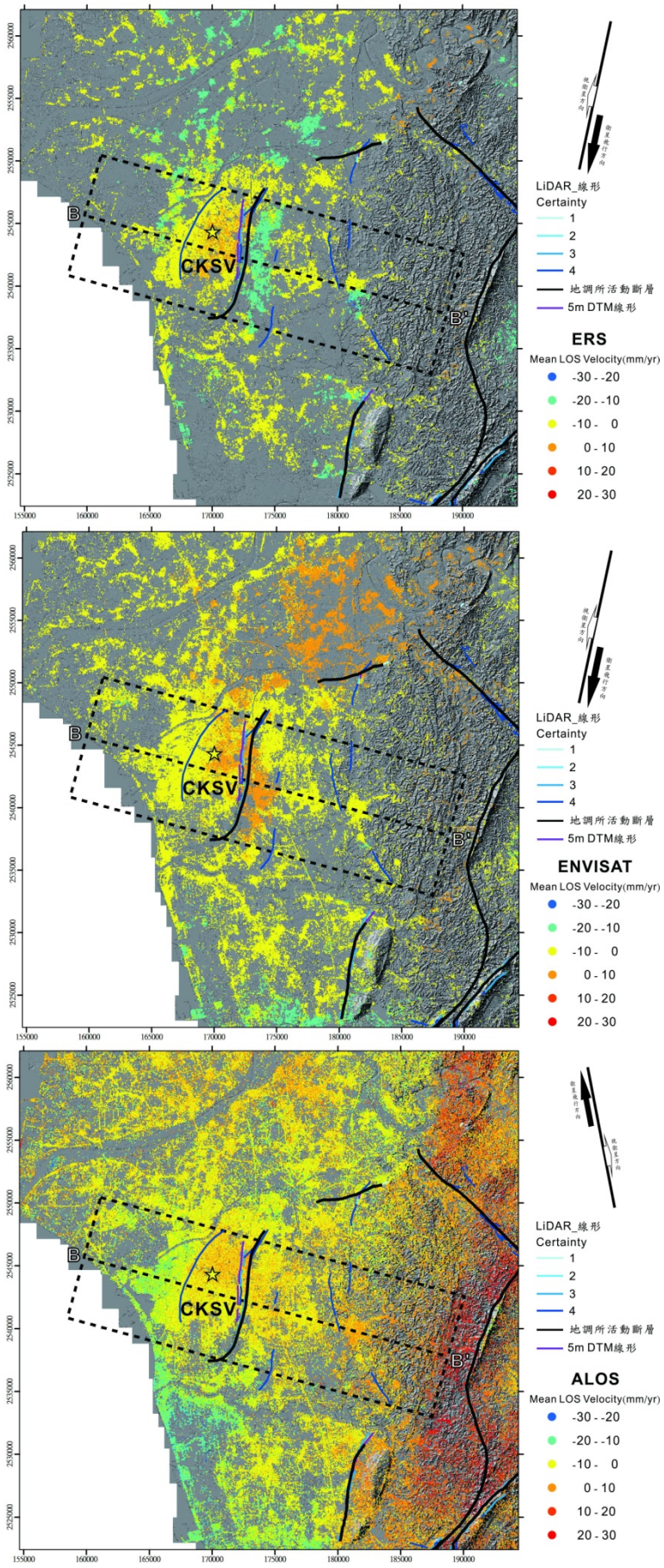


圖 2-6.6：後甲里斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 CKSV。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-4 新化斷層

針對新化斷層及其向西延伸地區之速度分布，分別取 C1 及 C2 範圍分析剖面，其中 C1 剖面長度 30 公里、半寬 4 公里、剖面走向 170°，C2 剖面長度 20 公里、半寬 4.2 公里、剖面走向 170°。根據三個時期的 PSInSAR 結果顯示，與後甲里斷層相同，只在早期時受到 1999 年集集地震影響，在 ERS 衛星時期呈現較明顯的跨斷層速度差異，速度梯度約為 5 mm/yr。而向西延伸的 C2 剖面則無明顯的跨斷層速度差異。C1 剖面在垂直速度分量上並無顯著之跨斷層相對抬升量；跨過斷層之垂直斷層走向水平分量變化並不顯著，平行斷層走向分量則有約 10 mm/yr 的右移分量，同時在跨斷層約 1 公里內有約 3-5 mm/yr 的速度差。C2 剖面在垂直速度分量上並無 GPS 連續站或精密水準之觀測資料；跨過斷層垂直斷層走向之水平分量的速度變化同樣不顯著，而平行斷層走向分量則有約 5 mm/yr 的右移分量。故由跨斷層之速度變化可得知新化斷層為右移斷層，同時斷層可能向西繼續延伸。此外，由於在跨斷層約 1 公里內有約 3-5 mm/yr 的速度差，顯示新化斷層於 1946 新化地震之地表破裂處之淺部有潛移的斷層特性。然而斷層向西延伸的部分由於 GPS 測站數不足，對於解析此段斷層現今之斷層特性並不充足，因此尚待未來增加測站密度，以期了解新化斷層近地表之活動特性。

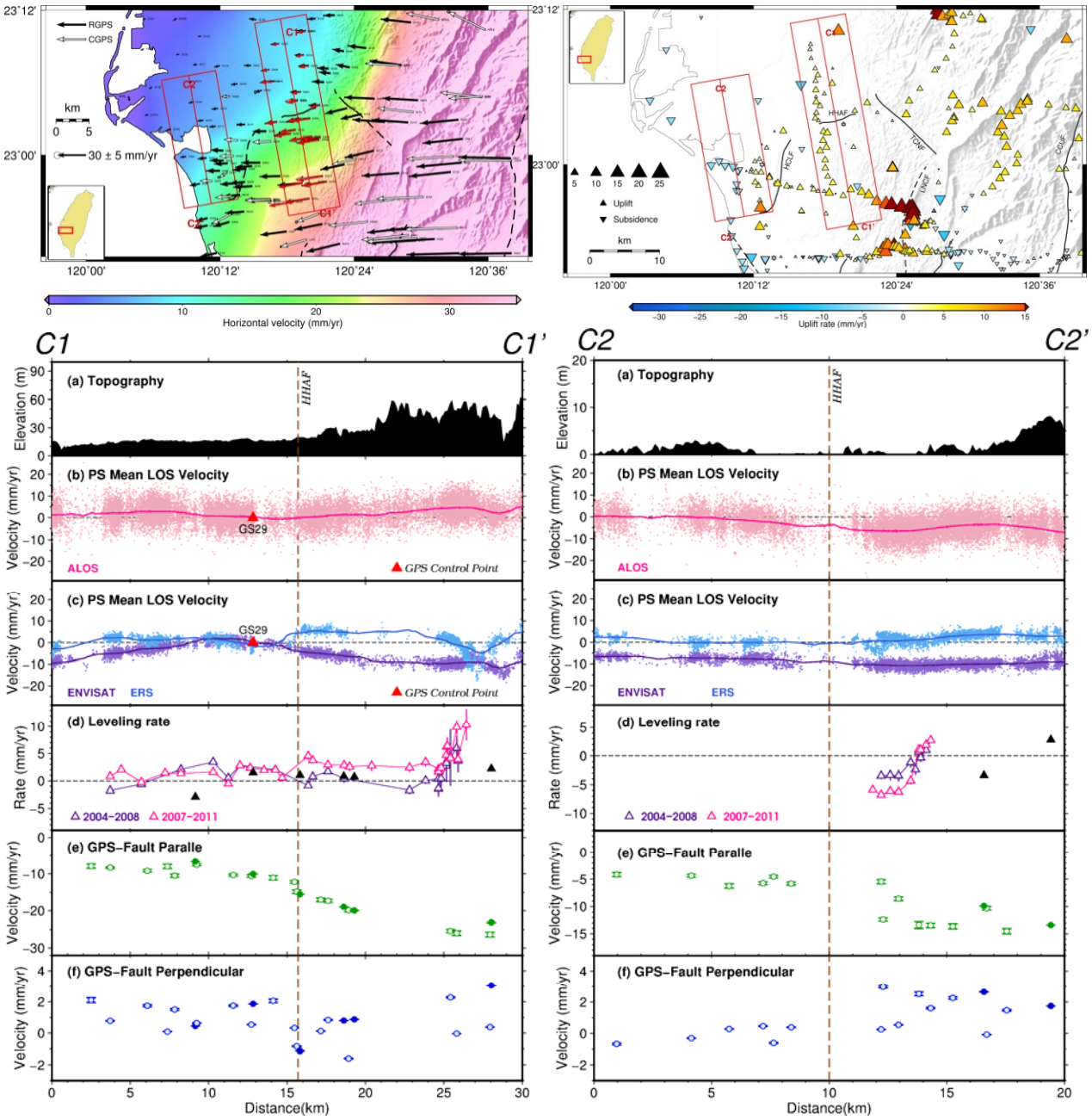


圖 2-6.7：新化斷層速度剖面圖。由上往下依序為水平速度場及剖面位置圖、垂直速度場圖、斷層剖面速度場圖。下方左圖為 C1-C1'剖面，下方右圖為 C2-C2'剖面。剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。HHAF 為新化斷層。

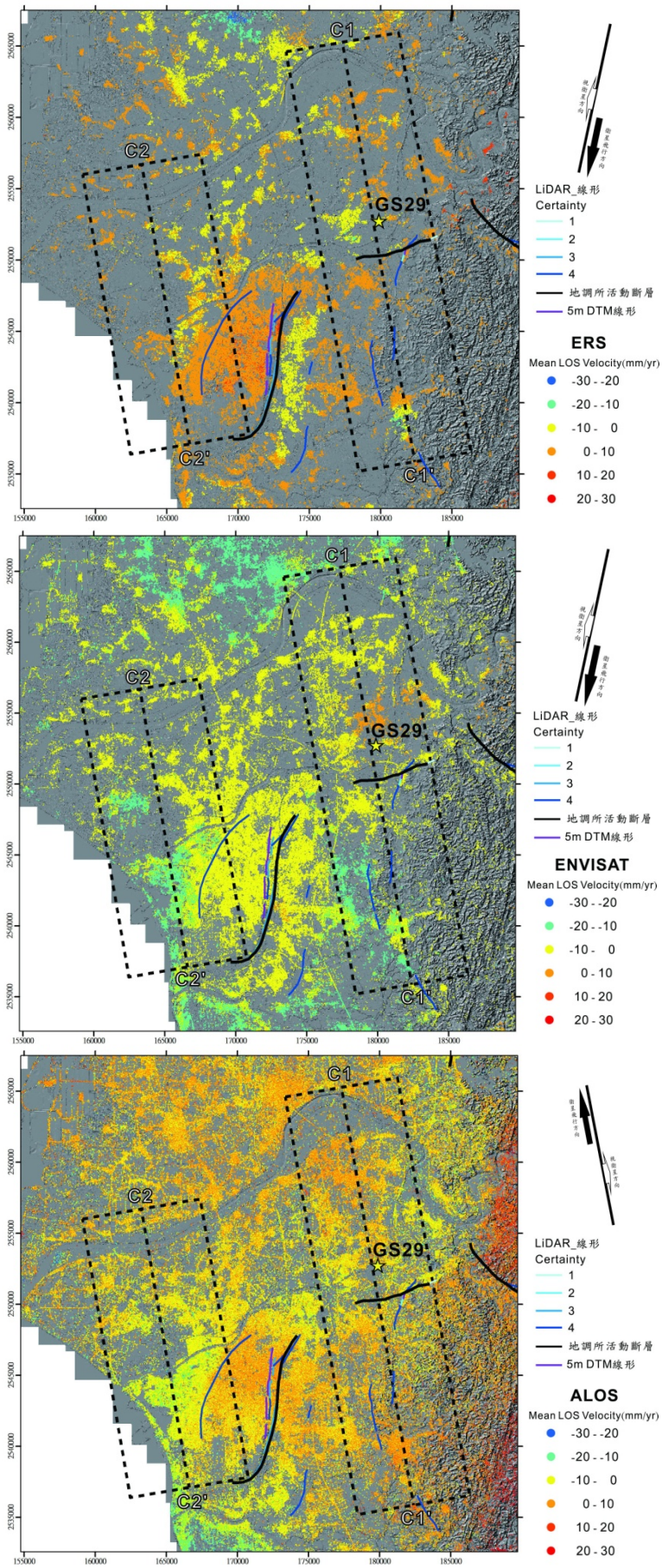


圖 2-6.8：新化斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 GS29。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-5 左鎮斷層

本剖面長度 30 公里、半寬 8 公里、剖面走向 47°。根據圖 2-6.9，三種衛星資料均無顯示出明顯的跨斷層速度差異，不過由 ALOS 衛星結果相對 ERS 衛星以及 ENVISAT 衛星有較為明顯的快斷層速度差異顯示出此斷層有相當程度的平移分量。由於跨斷層並無足夠的 GPS 連續站或精密水準觀測資料，因此在垂直速度分量上並無成果。水平速度場在跨過斷層之垂直斷層走向方向的速度變化量並不顯著，而平行斷層走向方向則有約 15 mm/yr 的左移分量發生在約 1 公里的範圍內，由此可得知左鎮斷層為左移斷層，且具有潛移的特性。

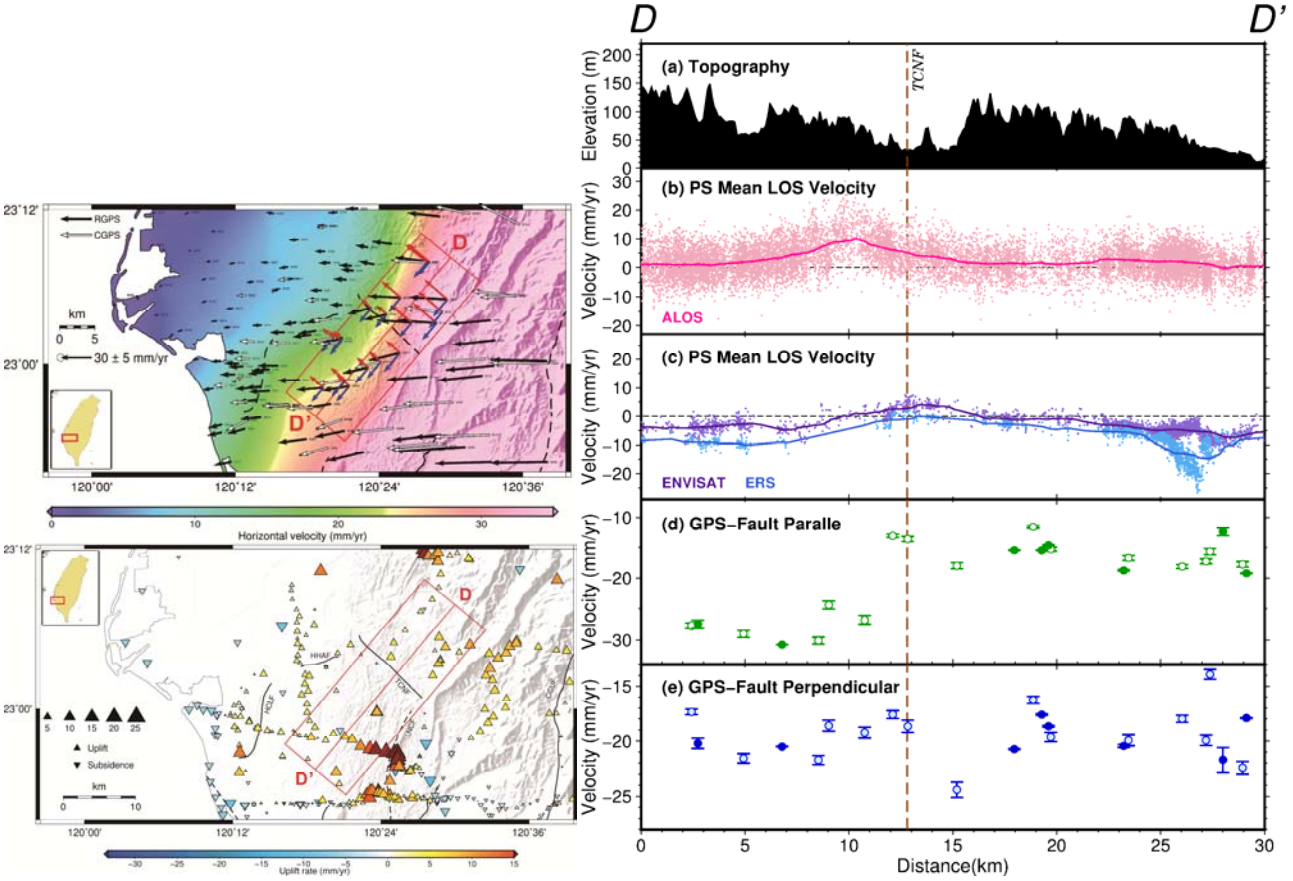


圖 2-6.9：左鎮斷層速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(e)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。TCNF 為左鎮斷層。

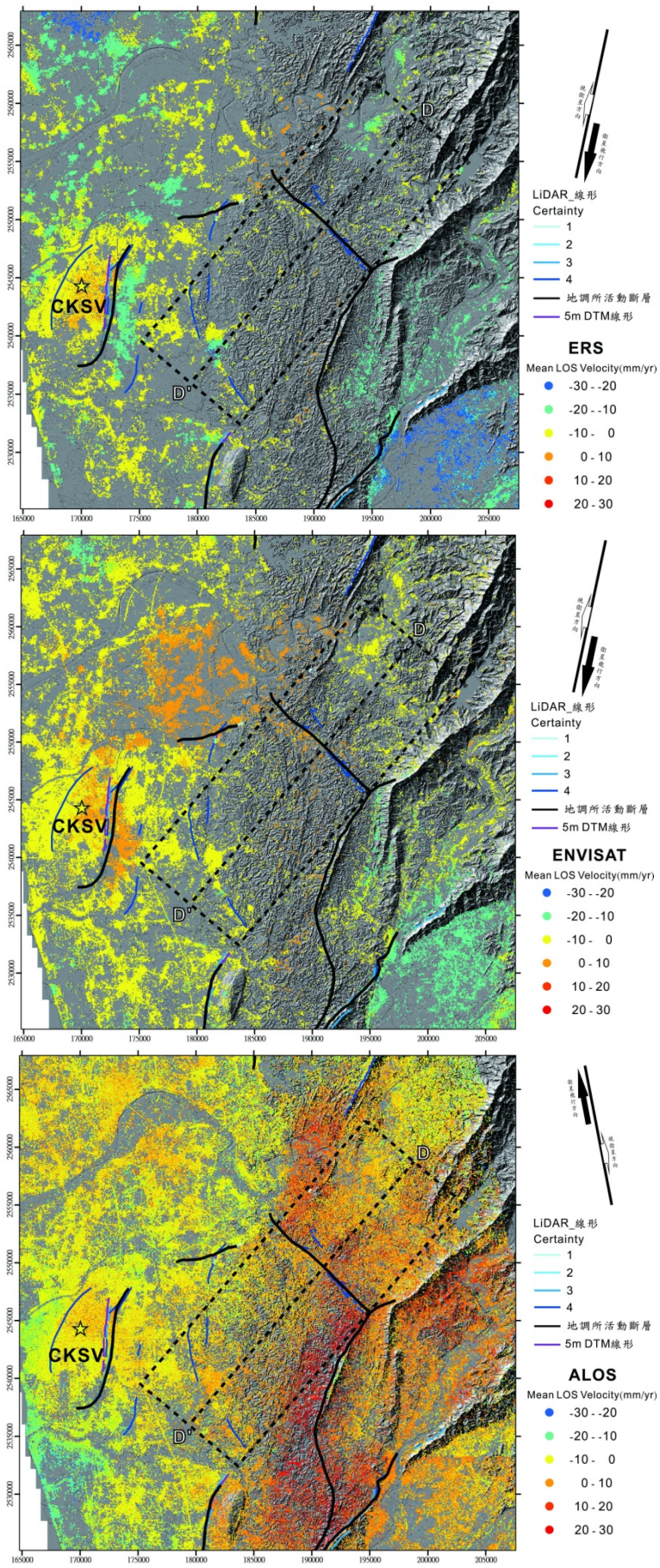


圖 2-6.10：左鎮斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 CKSV。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-6 小崗山斷層

本剖面長度 10 公里、半寬 2 公里、剖面走向 105°。根據圖 2-6.11，ALOS 衛星結果顯示跨過斷層後有近 10 mm/yr 的相對速度梯度，但在 ERS 衛星以及 ENVISAT 衛星相對抬升量側較不明顯，可能是由於衛星飛行方向平行斷層走向，以及地表地物特性造成不同波段之雷達波有不一樣反應所致。由於使用之 ALOS 衛星影像與其他兩顆衛星屬於不同之視衛星方向，因此 ALOS 衛星之結果比另兩顆衛星更能指出本斷層之右移分量。在結合高鐵橋墩柱之水準資料後指出，於垂直速度分量上，跨過斷層後的點位有約 4 mm/yr 的相對抬升量。水平速度場跨斷層之資料並不充足，然而在平行斷層走向方向上可見約 7 mm/yr 的右移分量，在垂直斷層走向方向上有約 14 mm/yr 的速度變化量，由此可推測小崗山斷層為帶有右移分量的逆衝斷層。由於此地區之 GPS 測站密度較其他斷層不足，為得到更精確的橫跨小崗山斷層之水平速度變化量，增加此地區之 GPS 測站密度為近期內之必要工作。

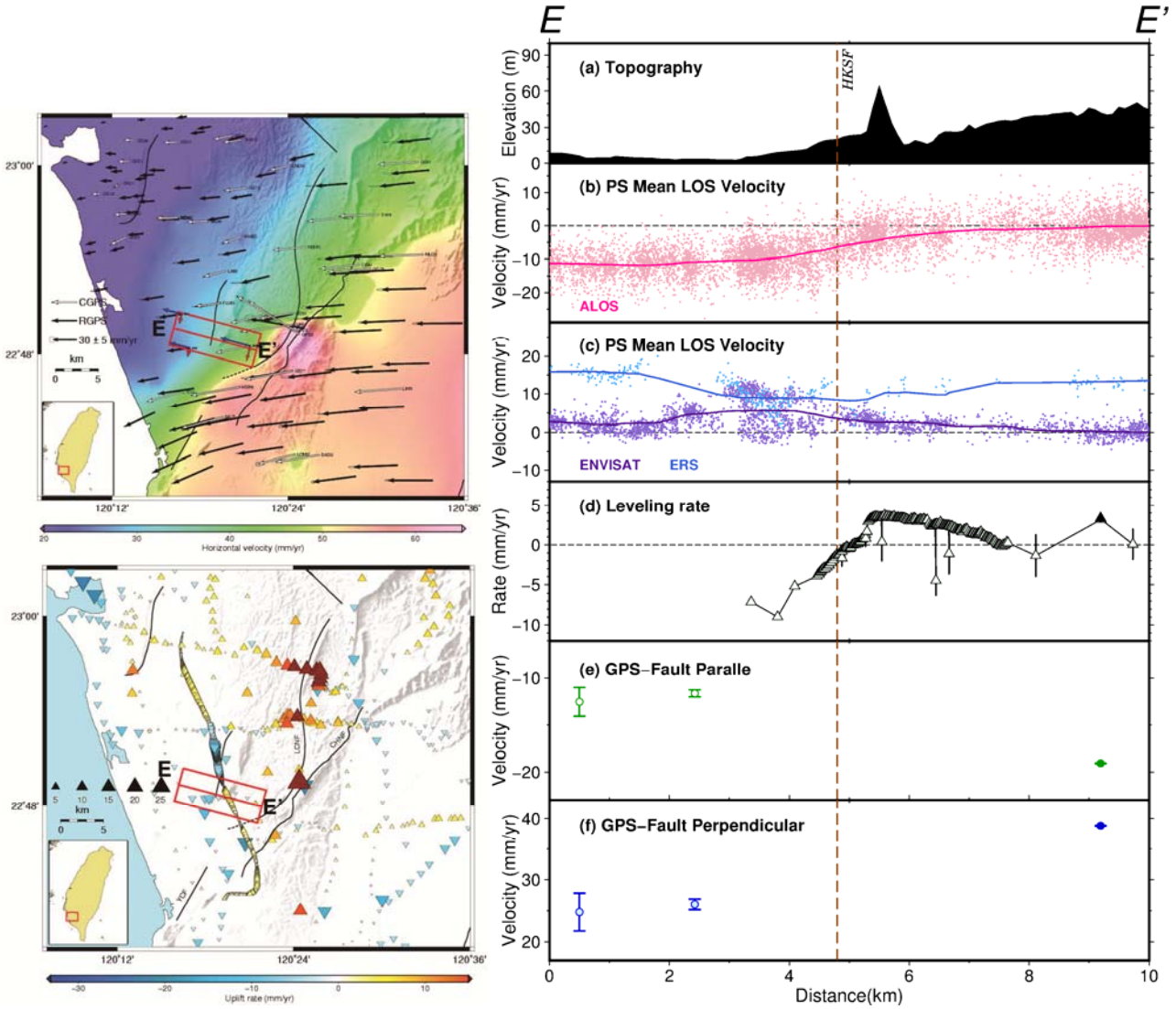


圖 2-6.11：小崗山斷層速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。HKSF 為小崗山斷層。

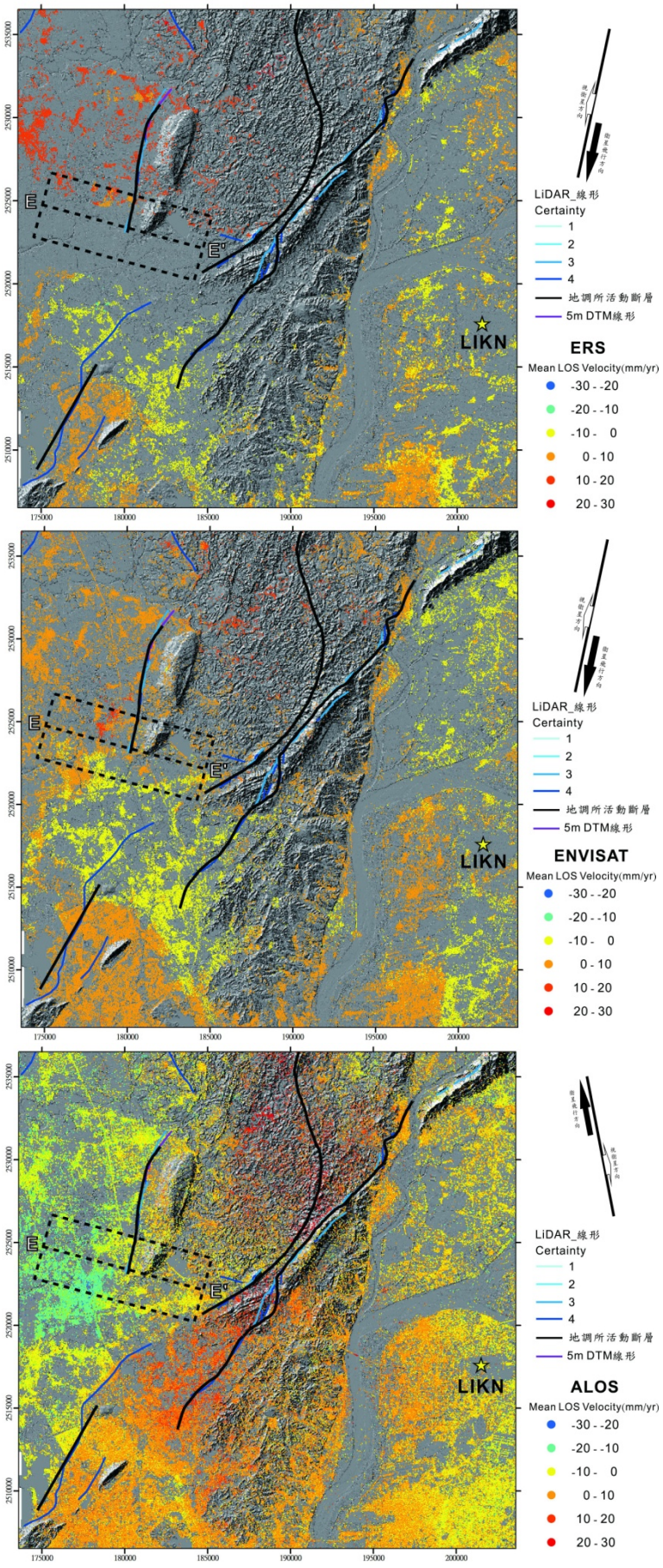


圖 2-6.12：小崗山斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 LIKN。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-7 龍船斷層與旗山斷層

由於跨龍船斷層與旗山斷層的側向速度變化相當大，所以本計畫針對這兩條斷層由北而南選取四個速度剖面進行討論。首先是最北邊的 F1-F1'剖面，本剖面長度 25 公里、半寬 2.5 公里、剖面走向 105°。根據圖 2-6.13，三種時期的 PSInSAR 結果都顯示出龍船斷層跨斷層有明顯的速度差異，在 ERS 及 ENVISAT 衛星飛行期間（1995-2008），其視衛星方向速度梯度約為 15 mm/yr 及 10 mm/yr；在 ALOS 衛星飛行期間（2007-2011），其跨斷層視衛星方向速度梯度為 15 mm/yr，應包含了部分的甲仙地震同震變形。在龍船斷層北段的部分，垂直速度場由西約 5 mm/yr 向東逐漸遞增至約 20 mm/yr，此外，在跨過斷層約 3 公里的範圍內有約 20 mm/yr 的相對下降量，呈現一個西緩東陡之不對稱穹頂型態。水平速度場在平行斷層走向分量上，跨斷層約 10 公里的範圍內有約 4 mm/yr 的右移分量，在垂直斷層走向分量上有約 15 mm/yr 的速度變化量，由此可推論龍船斷層北段為帶有右移分量的逆衝斷層。然而，由於此地區之 GPS 測站密度較低，因此建議增加此地區之 GPS 測站以提供更佳的跨龍船斷層之水平速度變化量。

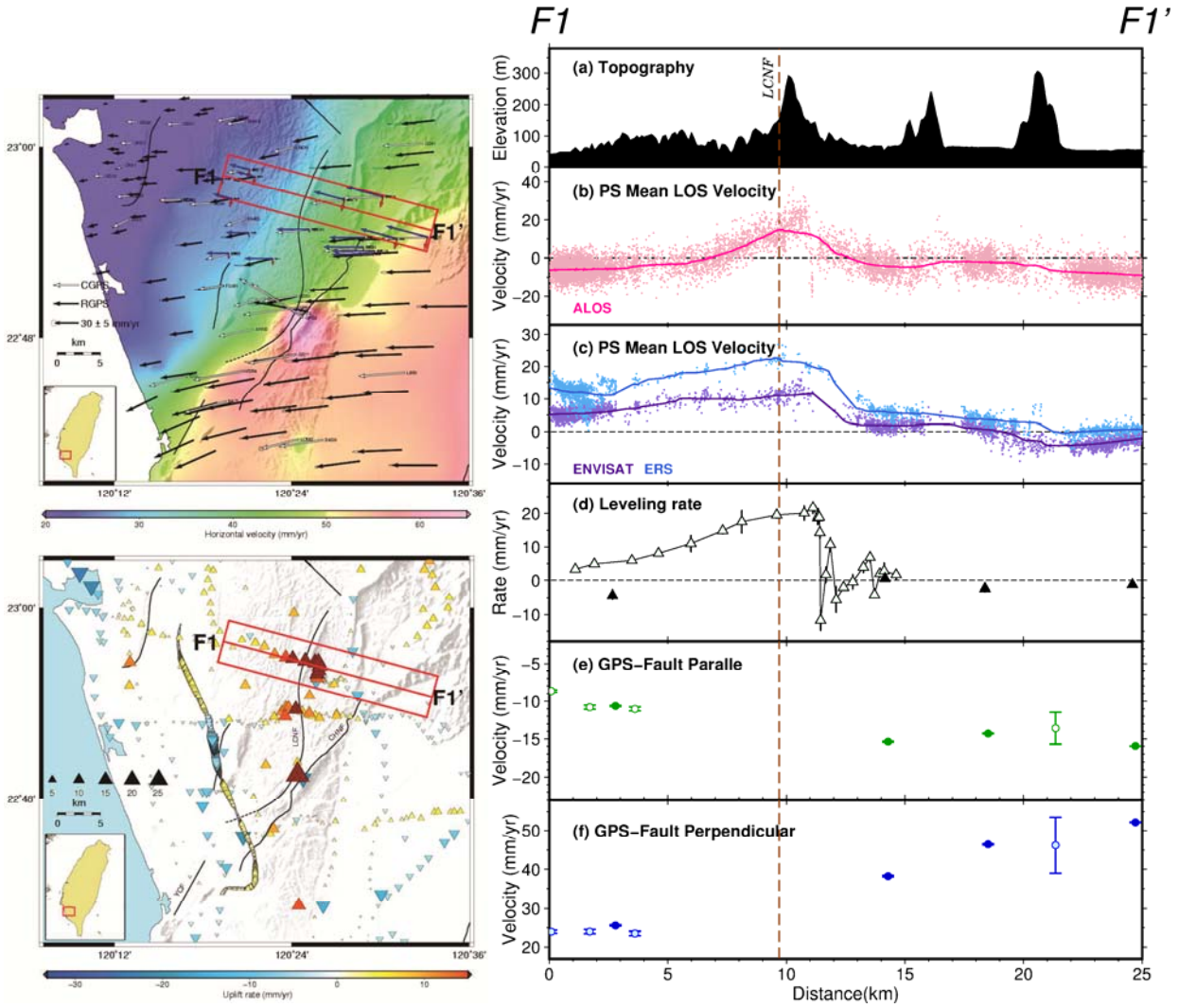


圖 2-6.13：龍船斷層北段速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。LCNF 為龍船斷層。

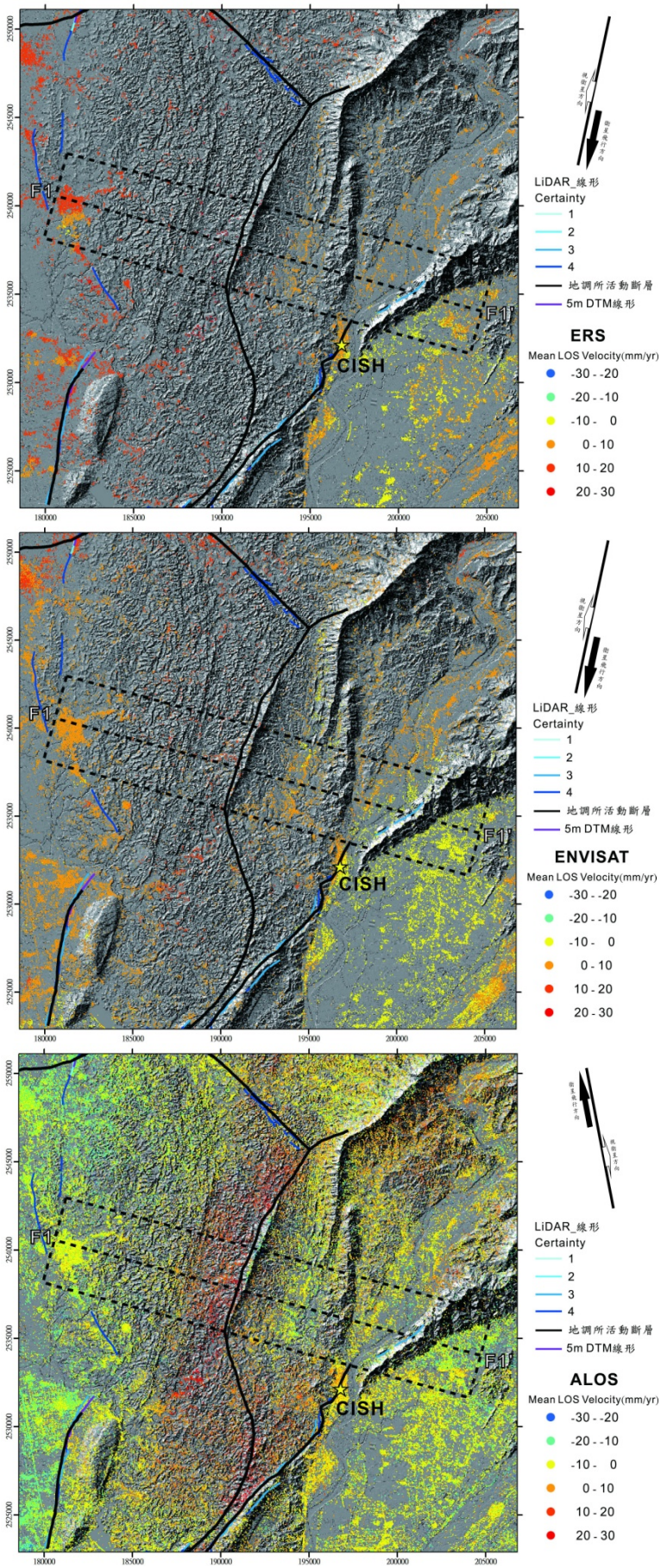


圖 2-6.14：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 CISH。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

F2-F2’剖面長度 20 公里、半寬 2 公里、剖面走向 90°。根據圖 2-6.15，在龍船斷層的部分，PSInSAR 結果顯示，龍船斷層中段部分跨斷層速度差異較北段不明顯。在 ERS 及 ENVISAT 衛星飛行期間約為 5-10 mm/yr；在 ALOS 衛星飛行期間約可達到 20 mm/yr。垂直速度場顯示一近乎對稱之穹頂形貌，最大垂直速度場約為 15 mm/yr。龍船斷層位於背斜軸之東側，跨斷層有約 8 mm/yr 的相對速度變化量。雖然此地區之 GPS 測站密度稍低，但還可判識水平速度場在平行斷層走向方向的 4 mm/yr 左移分量，在垂直斷層走向方向有約 5 mm/yr 的速度變化量，由此可推測龍船斷層此段為帶有左移分量的逆衝斷層。在旗山斷層北段的部分，垂直速度場的跨斷層變化量並不顯著，水平速度場在跨斷層平行斷層走向分量上也並不顯著，然而在垂直斷層走向分量上有約 10 mm/yr 的速度縮短量，估推得旗山斷層北段為逆衝斷層。

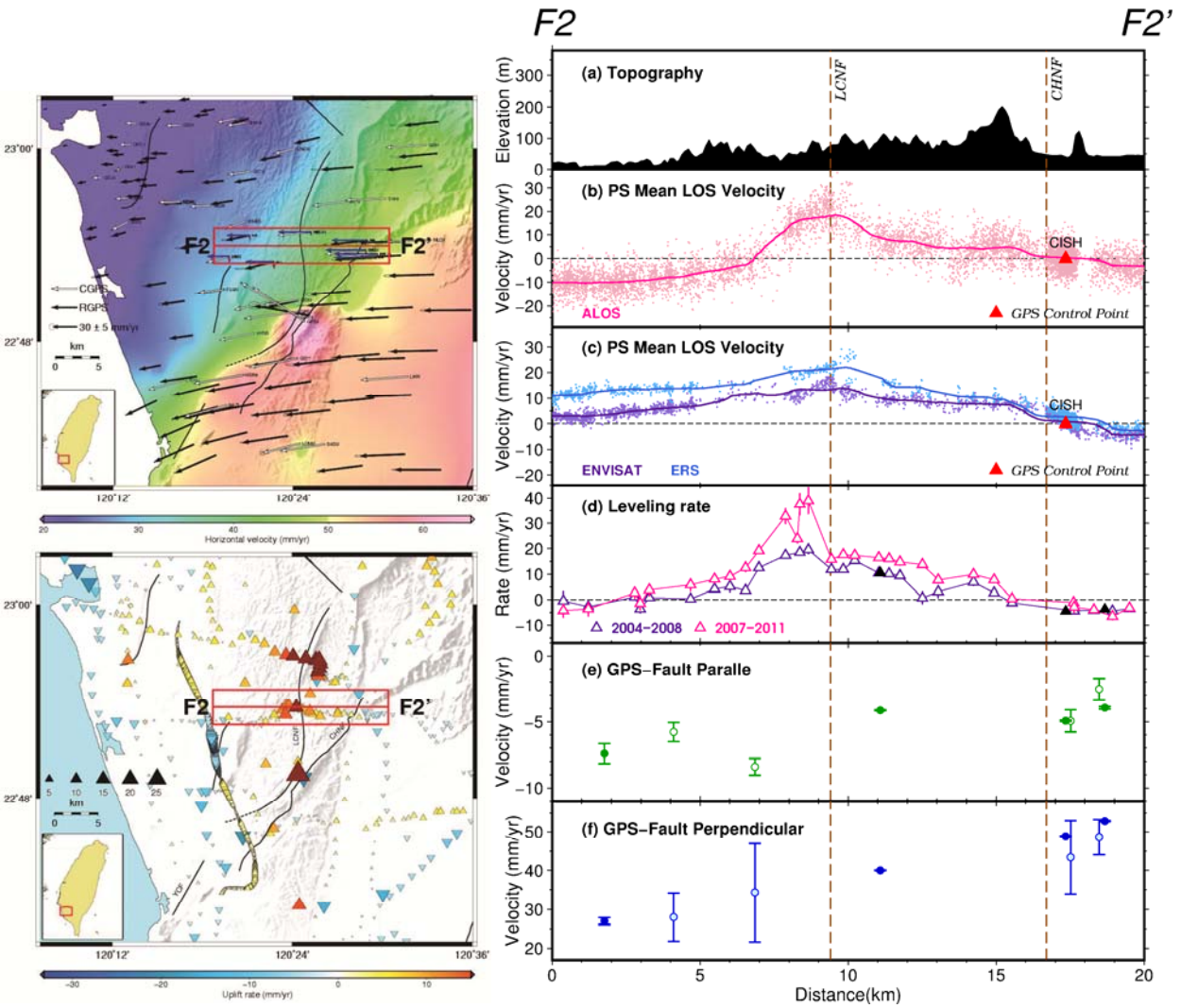


圖 2-6.15：龍船斷層與旗山斷層北段速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。LCNF 為龍船斷層，CHNF 為旗山斷層。

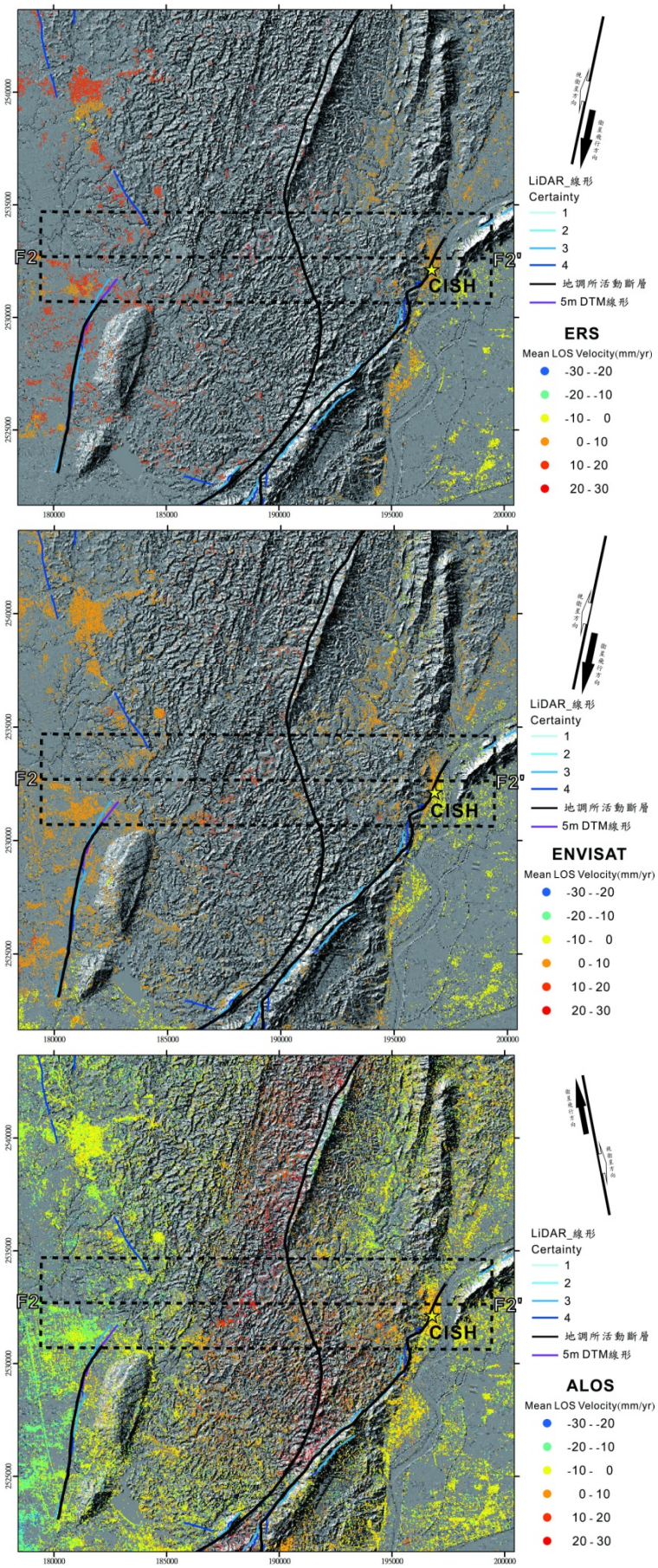


圖 2-6.16：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 CISH。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

F3-F3'剖面位於龍船斷層與旗山斷層相距最近之位置，該剖面長度 10 公里、半寬 2 公里、剖面走向 105°。根據圖 2-6.17，在龍船斷層中段的部分，垂直速度場在跨過斷層後的點位由約 20 mm/yr 向東逐漸遞增至約 80 mm/yr，故有近 60 mm/yr 的抬升量。水平速度場在平行斷層走向方向則有約 10 mm/yr 的左移分量，在垂直斷層走向方向有近 50 mm/yr 的速度縮短量，由此可推測龍船斷層中段為帶有左移分量的逆衝斷層。在旗山斷層中段的部分，垂直速度場在跨過斷層後立即下降約 80 mm/yr，水平速度場在平行斷層走向分量上則有約 10 mm/yr 的右移分量，在垂直斷層走向方向則有約 30 mm/yr 的速度伸張量，由此可推測旗山斷層中段為帶有右移分量的正斷層。從大地測量資料可看出旗山斷層與龍船斷層之間的斷塊有非常高的活動性，然而，由於此地區之 PSInSAR 密度顯著的不足，無法解釋此區域斷層的活動性，為更好的解析跨龍船斷層之速度變化量，需再針對影像進一步的分析，以期了解此斷塊之活動特性。

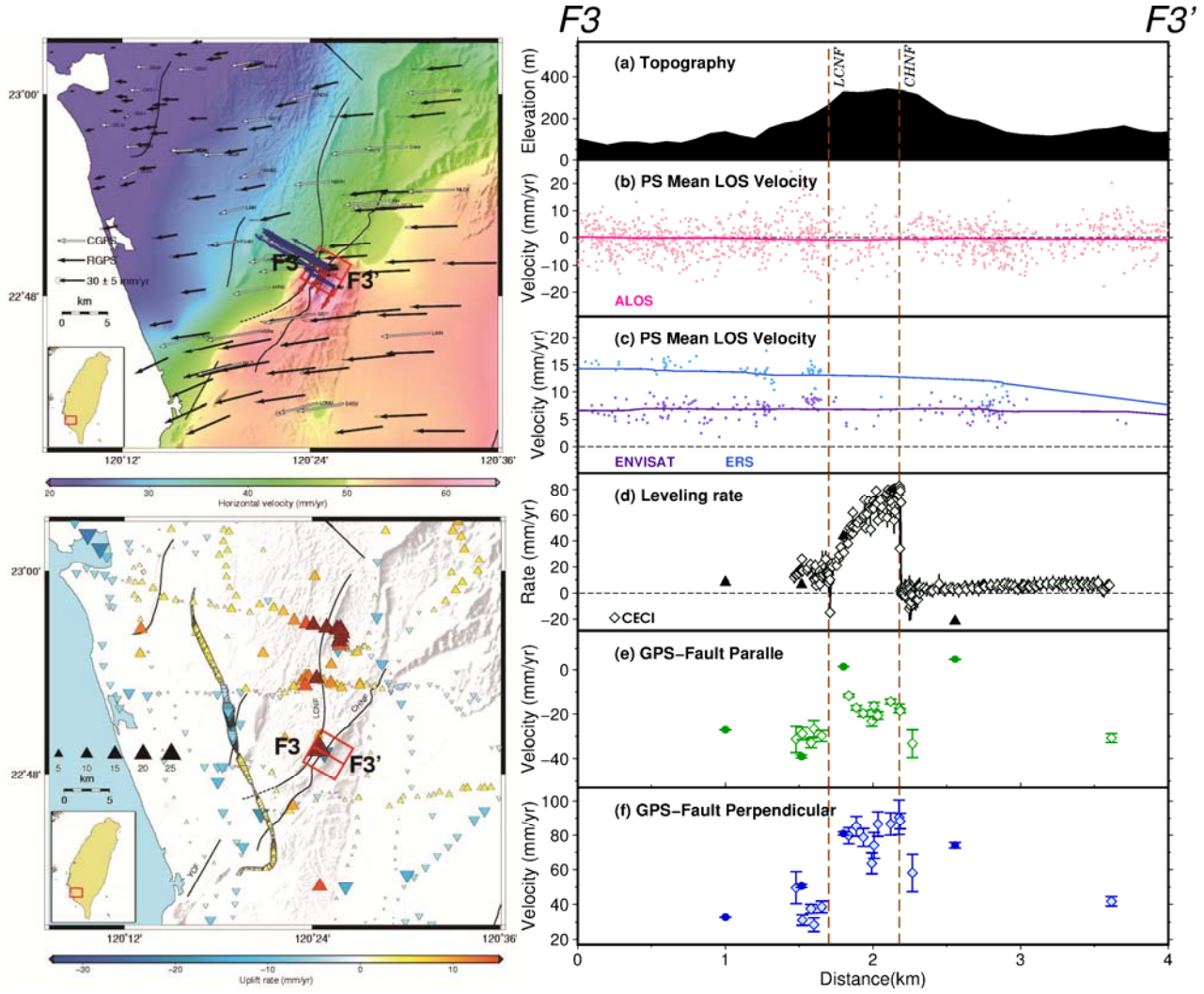


圖 2-6.17：龍船斷層中段與旗山斷層中段速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。CHNF 為旗山斷層。

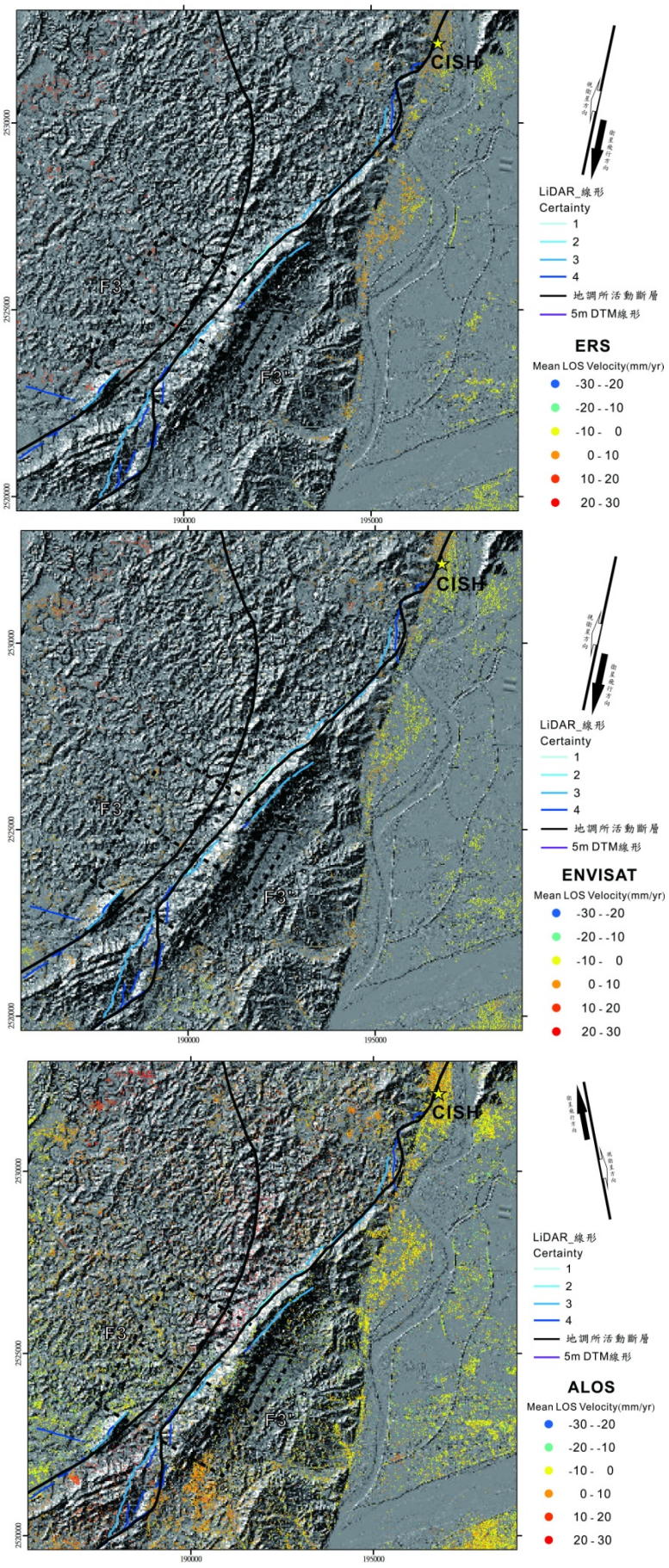


圖 2-6.18：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 CISH。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

剖面 F4-F4'長度 12 公里、半寬 2 公里、剖面走向 160°，為跨龍船斷層與旗山斷層最南端之速度剖面。根據圖 2-6.19，在龍船斷層可能向西延伸的部分，在 ALOS 衛星飛行時期跨過斷層有近 10 mm/yr 的視衛星方向抬升量。由於在 ERS 及 ENVISAT 影像期間無明顯速度差異，推測為甲仙地震同震變形行為。垂直速度場在跨過斷層後的點位有約 1 mm/yr 的抬升量。雖然此速度剖面並無跨龍船斷層之 GPS 測站分布，然而由整個水平速度場分布及垂直速度變化形態可推測龍船斷層可能向西延伸的部分為帶有右移分量的逆衝斷層。在旗山斷層南段的部分，垂直速度場在跨過斷層後的點位有約 1 mm/yr 的抬升量，水平方向在平行斷層方向速度變化不顯著，水平方向在垂直斷層方向有約 5 mm/yr 的速度變化量，由此可推測旗山斷層南段為逆衝斷層。

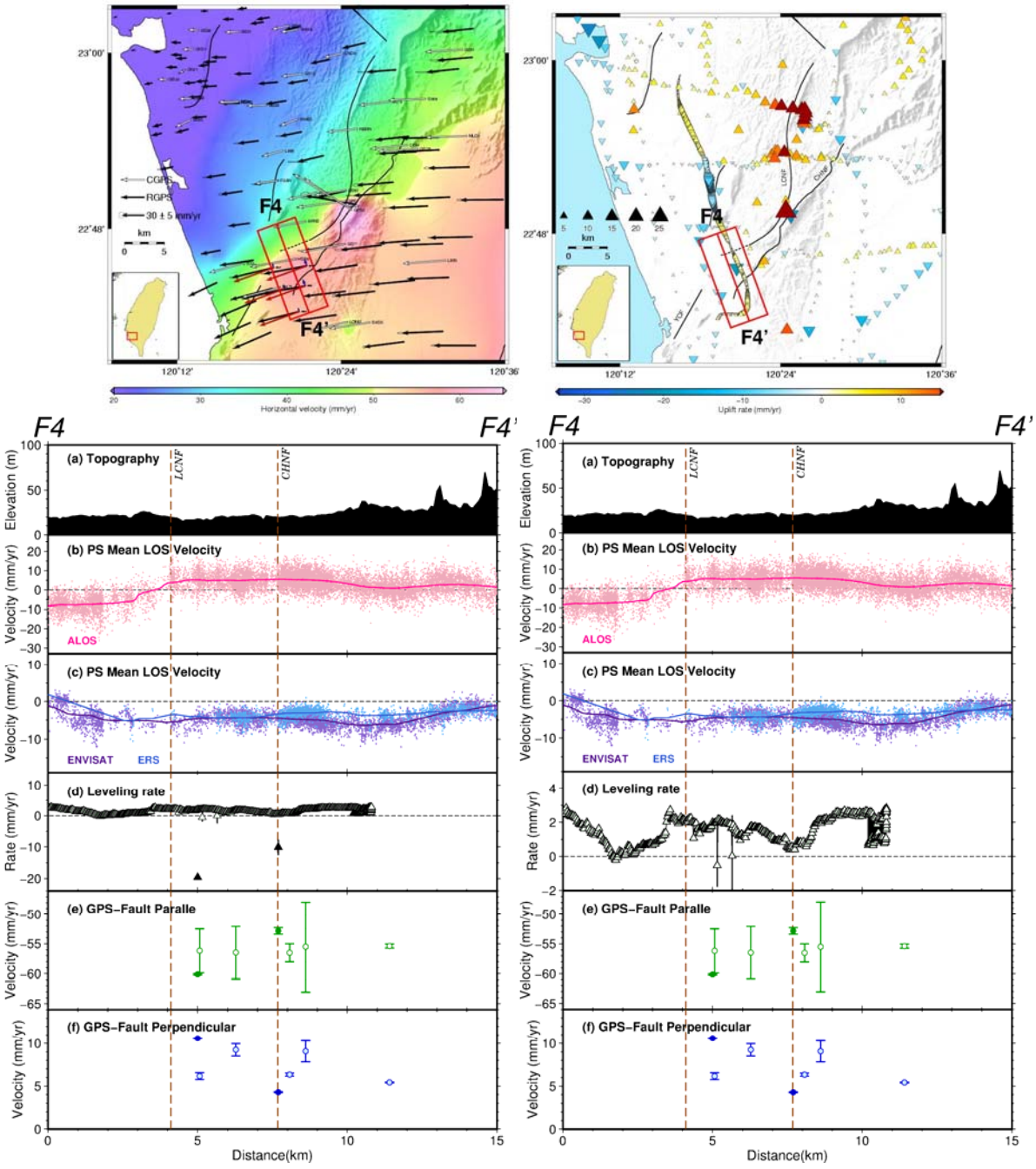


圖 2-6.19：可能向西延伸的部分與旗山斷層南段速度剖面圖。上方左圖為水平速度場及剖面位置圖。上方右圖為垂直速度場圖。下方左圖(d)之中包含所有垂直位移資料，下方右圖(d)為去除 GPS 提供之垂直位移資料，僅呈現水準資料的位移速率剖面。剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。LCNF 為龍船斷層，CHNF 為旗山斷層。

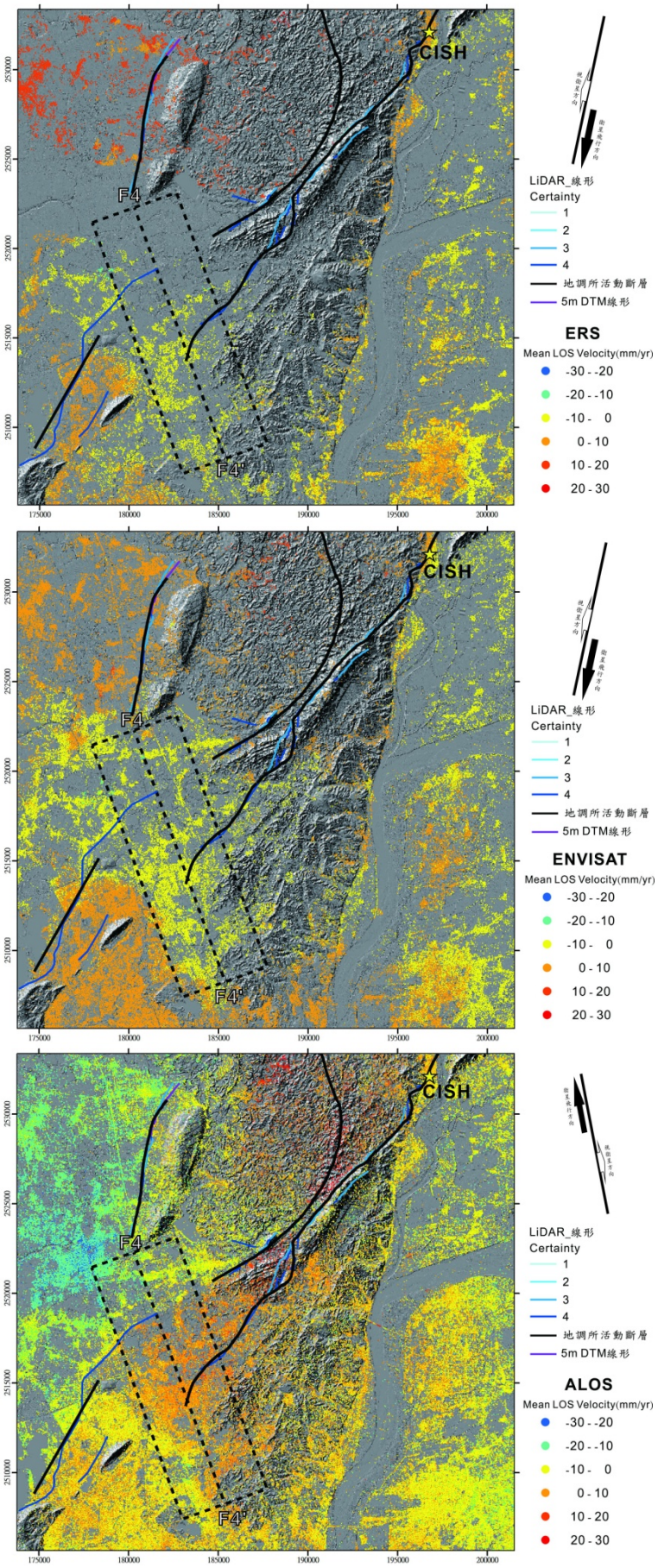


圖 2-6.20：龍船及旗山斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 CISH。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-8 右昌斷層

本剖面長度 11 公里、半寬 4 公里、剖面走向 124°。根據圖 2-6.21，三種時期的 PSInSAR 結果都顯示出此斷層跨斷層有速度差異，且 ALOS 衛星結果相對 ERS 及 ENVISAT 衛星相對跨斷層速度差異較為明顯，速度梯度約為 10 mm/yr。另外，ALOS 衛星結果搭配 LiDAR 構造線形也顯示出右昌斷層有向東北延伸的可能性。水平速度場跨過斷層在垂直斷層走向方向的速度有約 10 mm/yr 的速度變化量，平行斷層走向方向則有約 10 mm/yr 的右移分量，由此可推測右昌斷層為帶有右移分量的逆衝斷層。然而由於橫跨右昌斷層之測站數稍低，對於解析此斷層現今之運動模式與斷層特性仍缺乏有力證據，若未來能加密此區之大地測量點位，則可了解右昌斷層之特性。

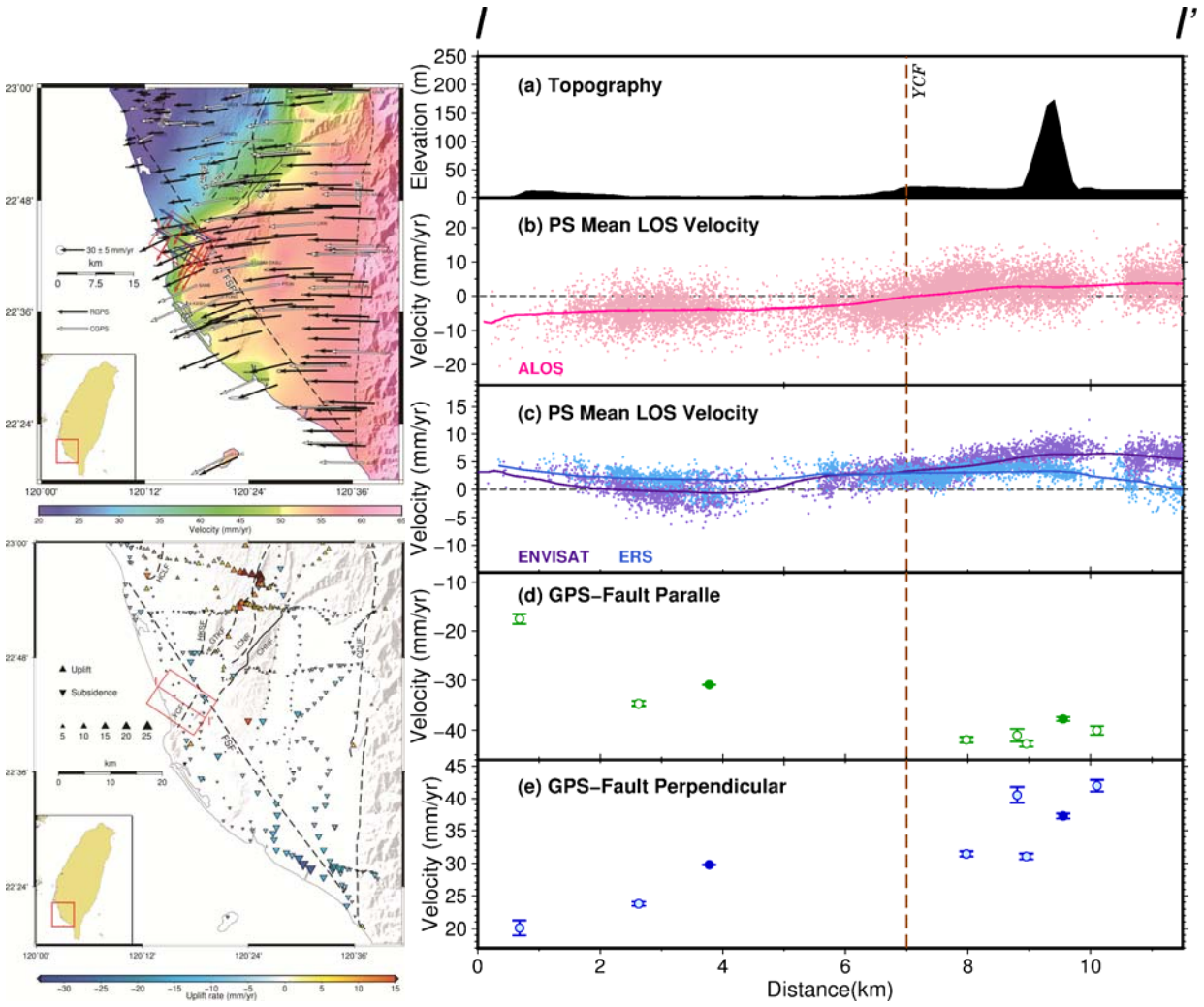


圖 2-6.21：右昌斷層速度剖面圖。左圖上方為水平速度場及剖面位置圖，下方為垂直速度場圖。右圖剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(e)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。YCF 為右昌斷層。

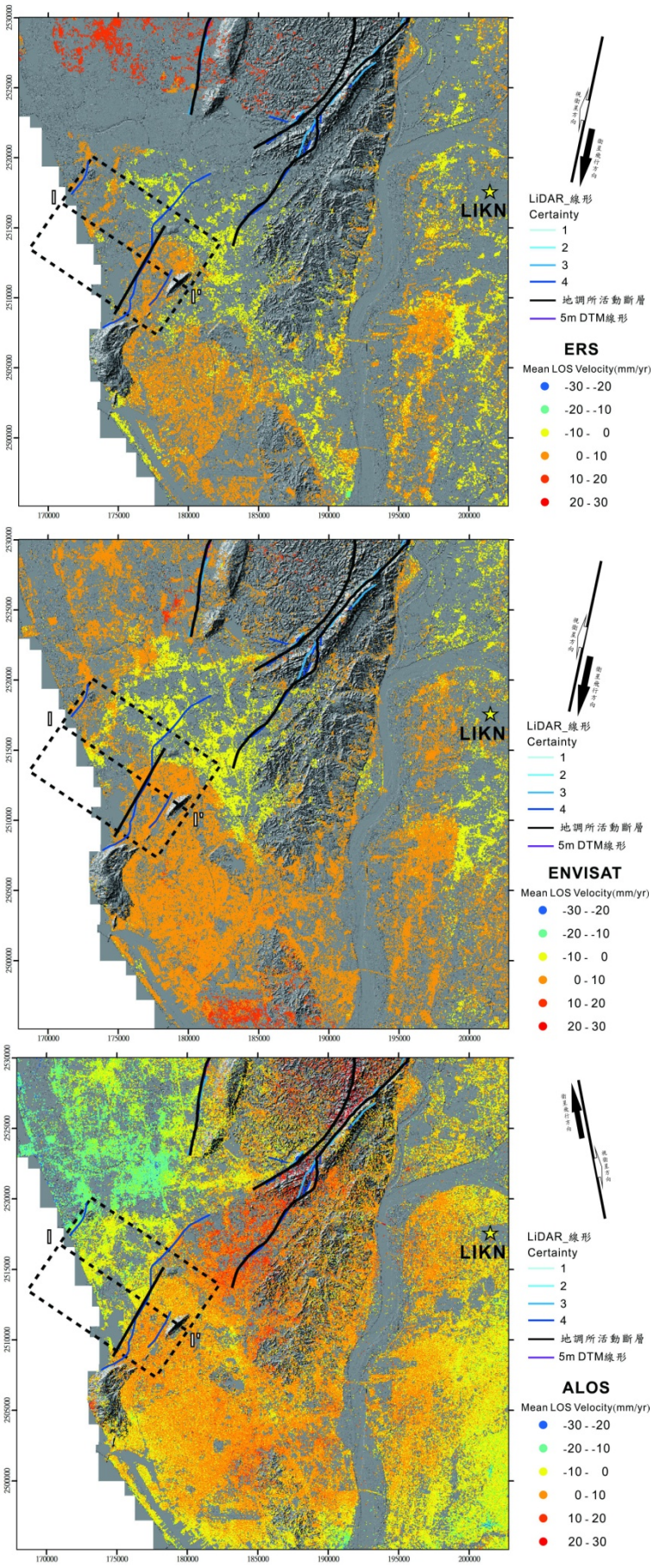


圖 2-6.22：右昌斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 LIKN。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-9 潮州斷層

將潮州斷層南北段分別作兩剖面 J1-J1'及 J2-J2'分析，J1-J1'剖面長度 15 公里、半寬 7 公里，J2-J2'剖面長度 13.5 公里、半寬 7 公里，而剖面走向皆為 95°。根據圖 2-6.23，由於斷層走向與三顆衛星飛行方向大致相同，因此在此衛星之位移速度剖面資料點群較容易產生發散的現象。由位移資料趨勢研判，跨斷層兩側的速度變化梯度約為 5-10 mm/yr，且南段與北段於斷層上盤均為穹頂狀變形趨勢，暗示斷層東側有一斷坡存在。在 J2-J2'剖面中，三種衛星測量之結果均顯示跨斷層速度不連續發生在斷層西側約 2 公里處，且南段較北段明顯，暗示潮州斷層南斷西側下盤之構造幾何形貌尚待釐清。水平速度場跨斷層之平行斷層走向分量皆顯示潮州斷層含有左移分量，J1-J1'剖面速度落差約 3 mm/yr，J2-J2'剖面有較明顯鎖定，速度落差約 2 mm/yr，而垂直斷層方向分量 J1-J1'、 J2-J2'剖面的速度落差皆約 1 mm/yr。垂直速度場在 J1-J1'的跨斷層速度落差約為 3 mm/yr，斷層東側抬升速度高於西側；另由於 J2-J2'剖面點位不足，僅能得知此區域潮州斷層之上盤垂直位移高於下盤約 10 mm/yr。另外因為大地測量點位密度較低之緣故，因此無法對比經由衛星影像判識之潮州斷層西側 2 公里處的位移不連續位置，然而由於該處的垂直斷層方向速率亦有約 2 mm/yr 之水平速度差，因此不能完全忽略此一現象，尚待未來更高密度之大地測量點位設置，以了解潮州斷層西側之構造活動模式。由目前之測量結果，可以推論潮州斷層為鎖定且帶有左移分量的逆衝斷層。

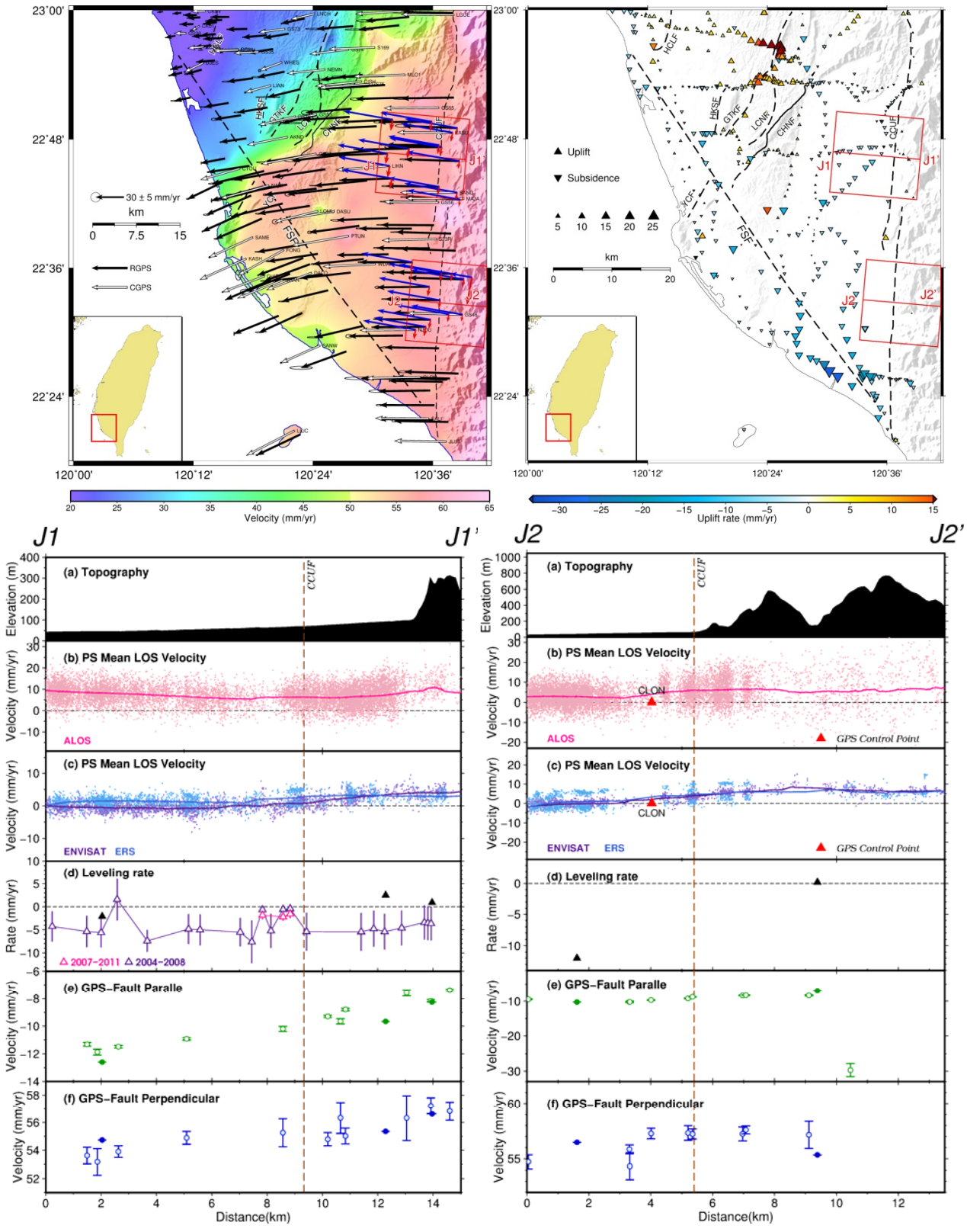


圖 2-6.23：潮州斷層速度剖面圖。上方左圖為水平速度場及剖面位置圖。上方右圖為垂直速度場圖。下方左圖為 J1-J1'剖面，下方右圖為 J2-J2'剖面。剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。CCUF 為潮州斷層。

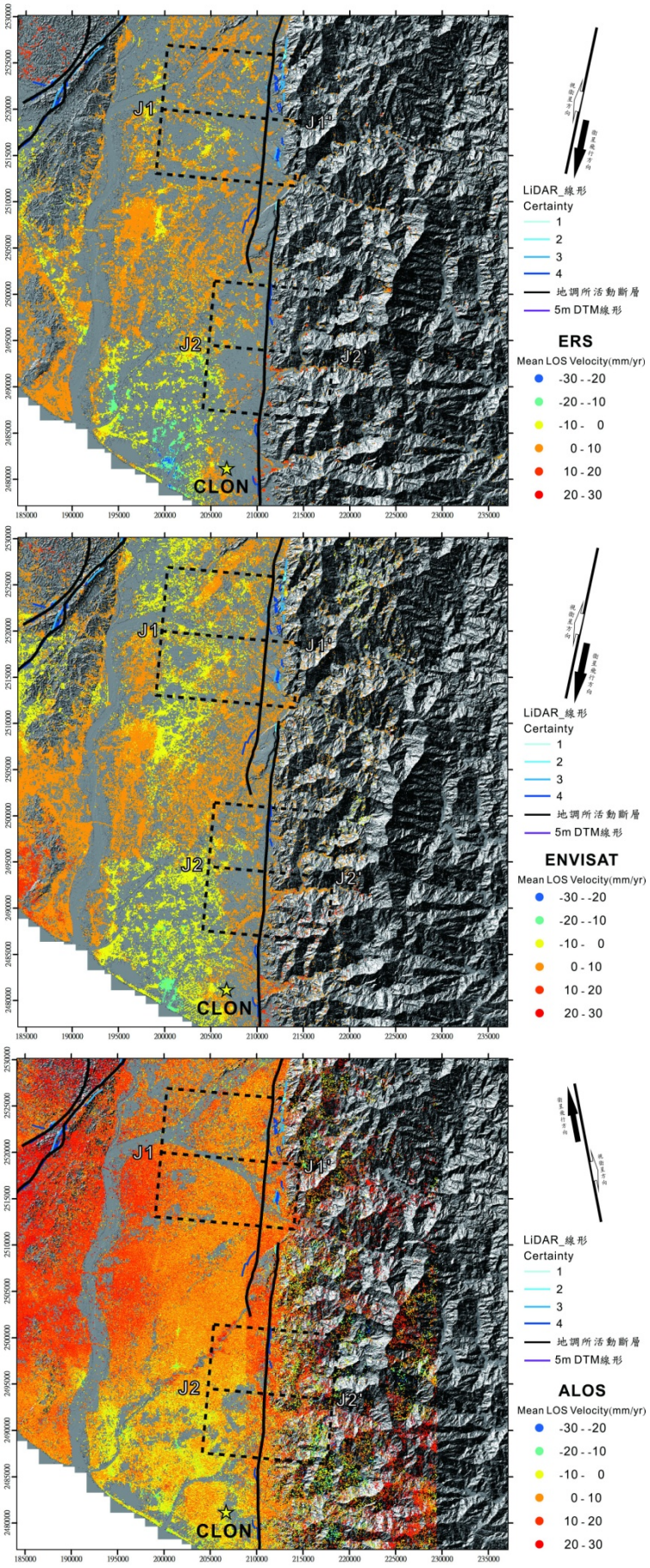


圖 2-6.24：潮州斷層剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 CLON。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-6-10 恆春斷層

恆春斷層分成兩個剖面，北段剖面（K1-K1’）長度 15 公里、半寬 2.3 公里、剖面走向 90°方位角；南段剖面（K2-K2’）長度 18 公里、半寬 4 公里、剖面走向 90°。根據水準點之時間序列變化分成三個時間段，分別是 2006 年恆春地震前、震後至 2010 年和 2010 年至 2015 年（圖 2-6.25 至圖 2-6.27）。

根據圖 2-6.25 至圖 2-6.27，震前時期北段在跨斷層之高程方向並沒有明顯變化、南段則有 5 mm/yr 的相對抬升量；在水平方向平行斷層部分，北段約有 20 mm/yr 的左移分量、南段則有約 10 mm/yr 的左移分量；在水平方向垂直斷層部分，北段及南段皆有約 5 mm/yr 的變化量。震後至 2010 年，北段與南段在跨斷層之高程方向皆約有 10 mm/yr 的相對抬升量；在水平方向平行斷層部分，北段約有 20 mm/yr 的左移分量、南段則約有 10 mm/yr 的左移分量；在水平方向垂直斷層部分，北段約有 5 mm/yr 的變化量，南段變化則不顯著。2010 年至 2015 年，北段在跨斷層之高程變化約有 8 mm/yr 的相對抬升量、南段則有約 3 mm/yr 的相對抬升量；在水平方向平行斷層部分，北段約有 20 mm/yr 的左移分量、南段則約有 10 mm/yr 的左移分量；在水平方向垂直斷層部分，兩段剖面變化皆不明顯。由此可推測恆春斷層為左移斷層。

由於恆春斷層方向與 ALOS 衛星飛行方向相同，因此在 ALOS 衛星跨斷層速度差異相對較不明顯。而在 ERS 衛星影像結果則可見在斷層西側約 1 公里處，視衛星方向速度開始下降，同樣情形也與三個時期的水準測量一致。

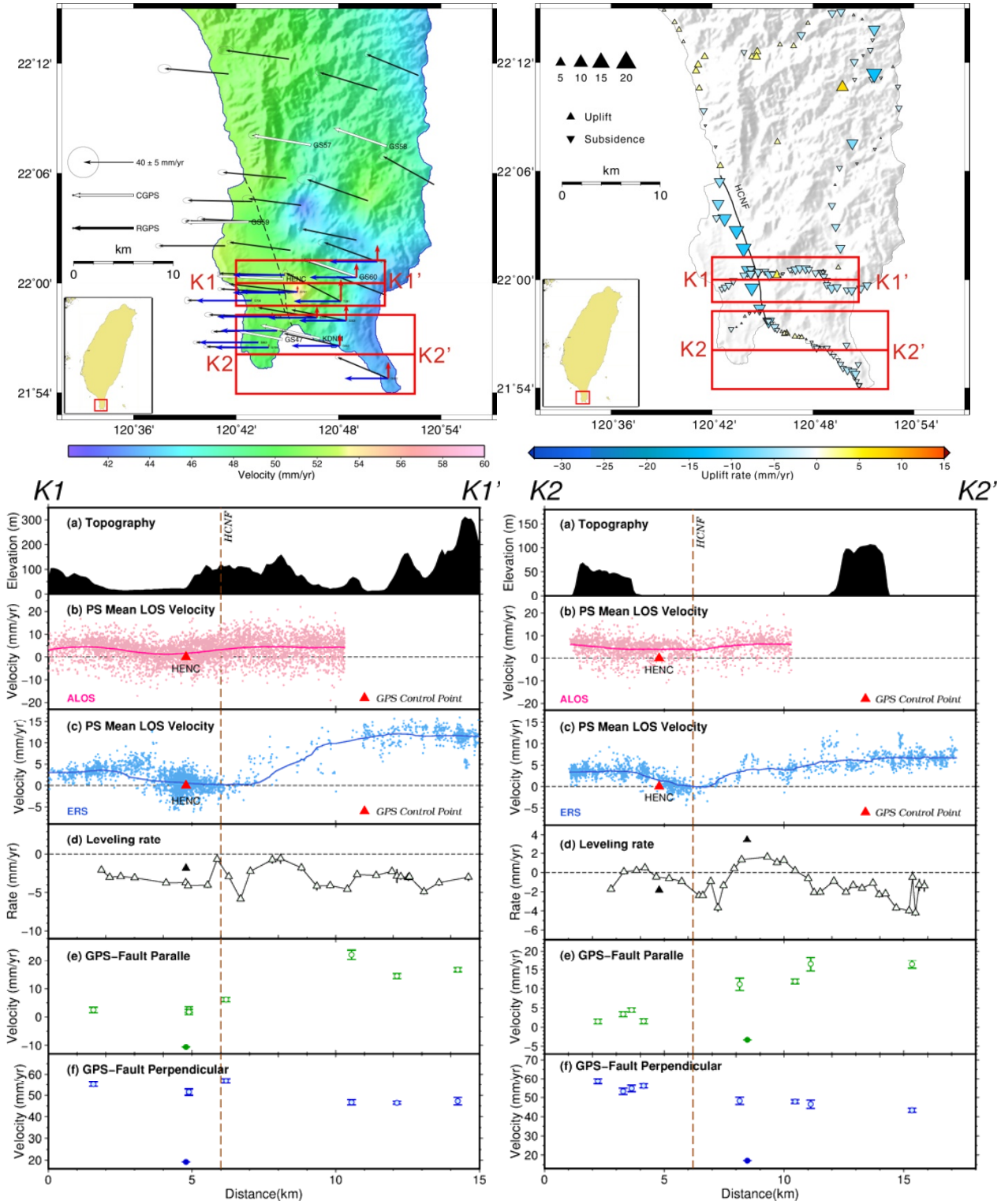


圖 2-6.25：恆春斷層震前速度剖面圖。上方左圖為水平速度場及剖面位置圖。上方右圖為垂直速度場圖。下方左圖為 K1-K1'剖面，下方右圖為 K2-K2'剖面。剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。HCNF 為恆春斷層。

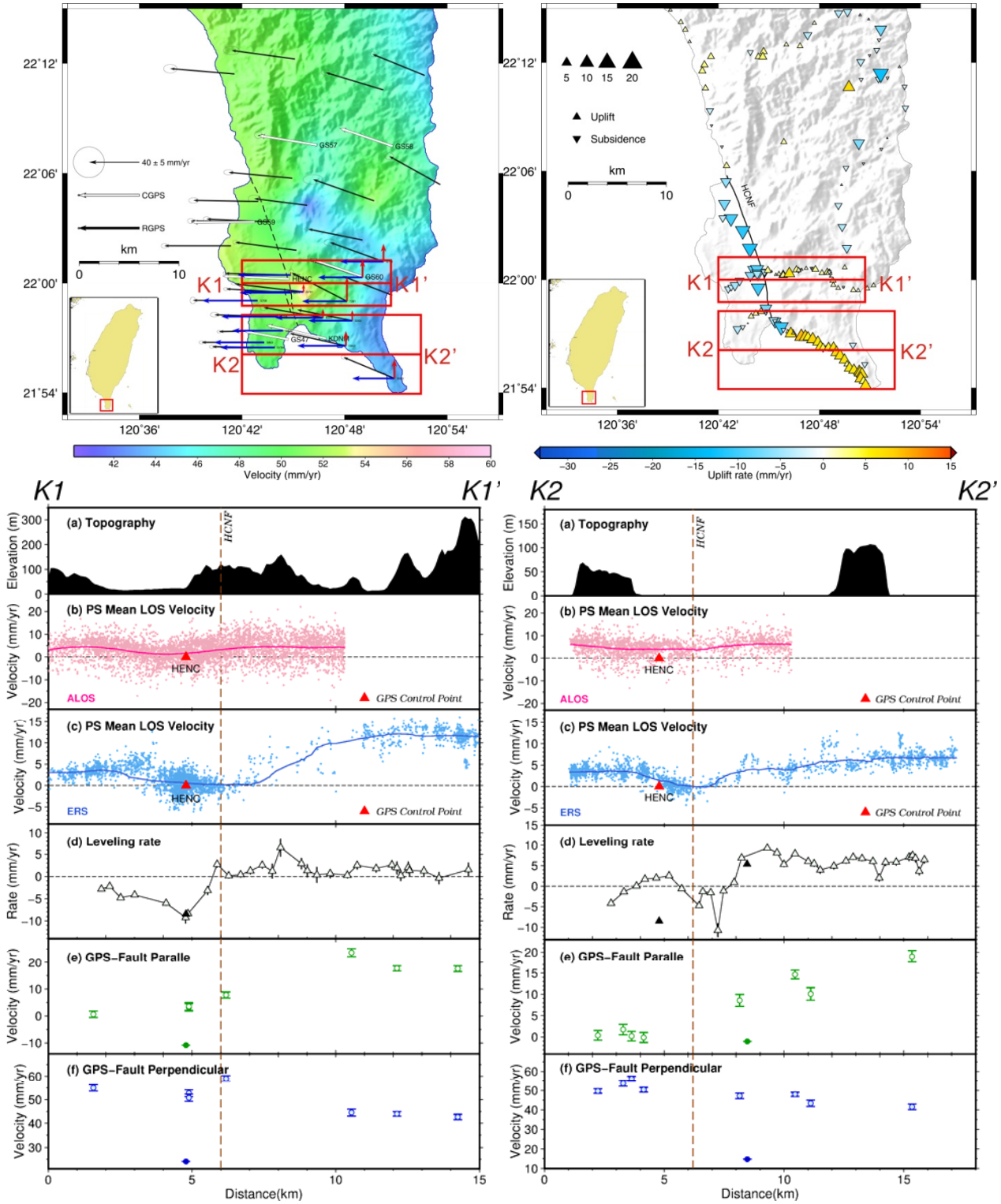


圖 2-6.26：恆春斷層震後至 2010 年速度剖面圖。上方左圖為水平速度場及剖面位置圖。上方右圖為垂直速度場圖。下方左圖為 K1-K1'剖面，下方右圖為 K2-K2'剖面。剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。HCNF 為恆春斷層。

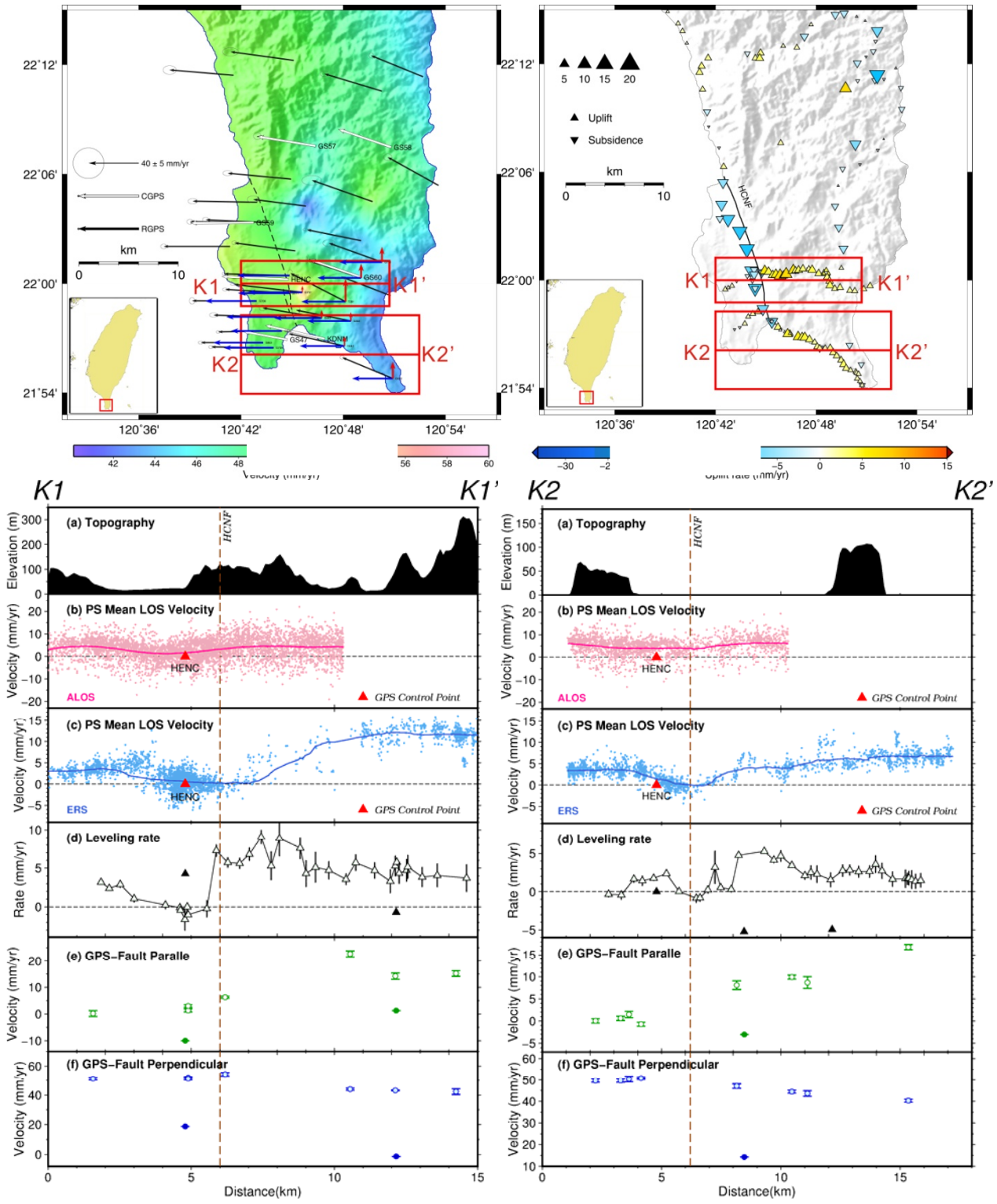


圖 2-6.27：恆春斷層 2010 年至 2015 年速度剖面圖。上方左圖為水平速度場及剖面位置圖。上方右圖為垂直速度場圖。下方左圖為 K1-K1'剖面，下方右圖為 K2-K2'剖面。剖面圖中(a)為地形高程；(b)為 L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)為 C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)為水準測量資料；(e)為 GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)為 GPS 垂直斷層方向之速度變化。HCNF 為恆春斷層。

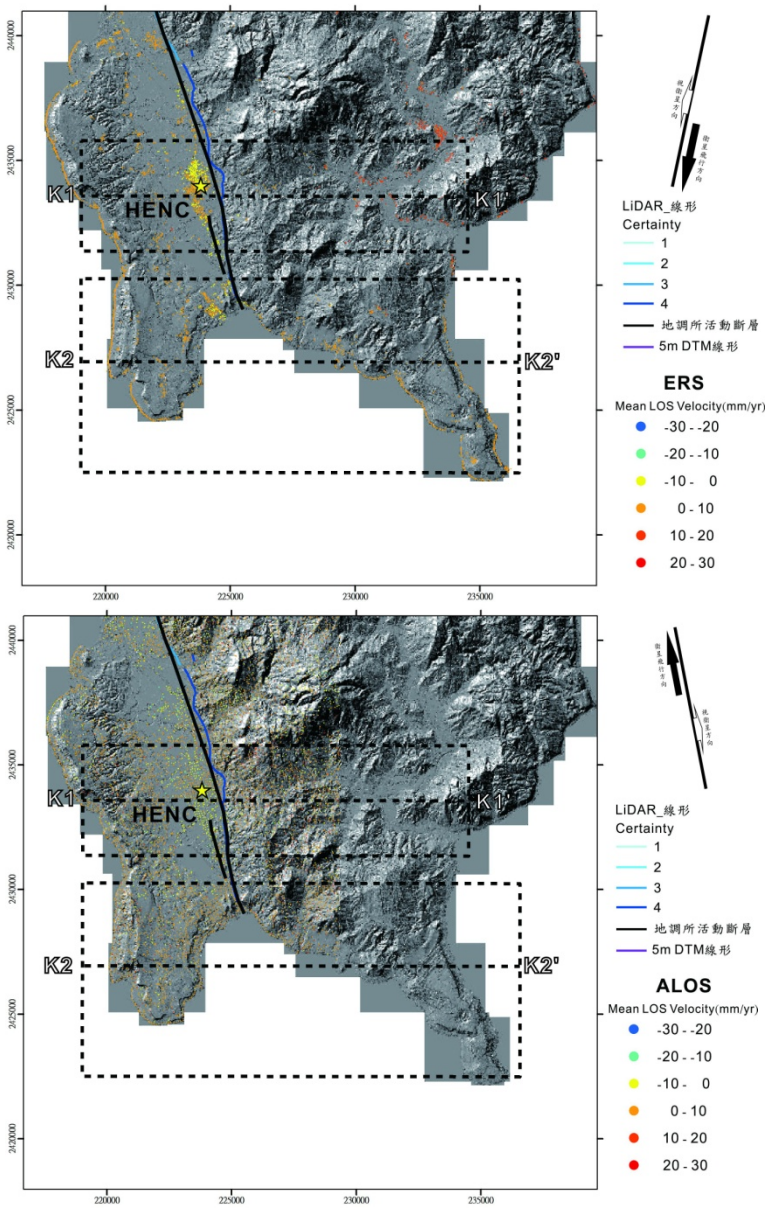


圖 2-6.28：恆春斷層剖面區域之 ERS 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考站為連續 GPS 測站 HENC。LiDAR 線形說明如圖 2-6.2 所示。

2-7 斷層面滑移速率及虧損率評估

2-7-1 臺灣北中南部活動斷層幾何參數及塊體模型設定

依彈性回彈理論指出，板塊之間的相對運動，會使應變在彈性地殼中累積。其中對斷層系統而言，是以剪應變形式的應變能累積為主。斷層破裂時可能的能量釋放比例可藉由各種地殼變形測量結果獲得，其中短期的斷層滑移速率可藉由大地測量的方式，如 GPS 及水準測量，量測斷層兩側之相對地表變形而得。

本研究藉由 Rob McCaffrey 提出的三維塊體模型 DEFNODE（McCaffrey, 2005）來進行斷層現今滑移率及虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每個斷層都位於兩個轉動塊體（block）的邊界上。Ching et al.（2011）曾將臺灣地區幾個重要的斷層視為塊體邊界，再利用塊體模型來探討臺灣現今的地殼運動情形。本研究針對地質調查所於 2012 年公佈的臺灣活斷層位置，並參考本計畫之斷層參數資料（表 2-7.1），建構了本次研究區域的塊體邊界模型（圖 2-7.1）。為了符合地調所公布的活動斷層分布資料，我們修正了 Ching et al.（2011）的模型，除了另外加入 HSS1、HECH、LCNF 及 YCNG 塊體外，並修改 LUCU、WCPS、EKSH、SCEN 等塊體幾何，分別對應木屐寮-六甲斷層、觸口斷層、恆春斷層、龍船斷層及右昌斷層，以設定其塊體邊界（圖 2-7.1），因木屐寮斷層及六甲斷層地理位置相當接近，且我們蒐集到兩條斷層的深度、傾角等斷層參數也很相似，為了模型簡化，因此在本模型中將木屐寮斷層及六甲斷層設定為同一條斷層構造。在模型中，除了本計畫階段所針對的斷層外，另外加入了梅嶺斷層、龍船斷層、右昌斷層及 Ching et al.（2011）所提到的鳳山轉換斷層帶(後改稱為鳳山斷層)作為塊體邊界，以呈現更完整的地表活動。上述之梅嶺斷層、龍船斷層及右昌斷層皆非地調所公佈的活斷層，其中梅嶺斷層的構造可能對其西側的臺南台地之孕震潛勢有一定程度的影響，龍船斷層南段與旗山斷層距離相當靠近，而 Sun（1964）認為右昌斷層切斷半屏山背斜軸的西南端，這些構造可能對本地區的地表活動有一定程度的影響，所以將這些構造加入塊體模型的邊界。鳳山斷層的活動使臺灣西南部由東往西的速度方位角由朝西轉為朝西南西方向（圖 2-7.1b），也就是平行臺灣西南部拖曳構造運動的方向，預期會影響此地區的地殼變形，因此也將此構造納入塊體模型的邊界。

本研究使用 EURA 做為參考塊體（圖 2-7.1a），並假設參考塊體是不旋轉的，因此其餘塊體上的水平速度皆是相對於 EURA 的運動。DEFNODE 再以此計算各塊體的剛體轉動速度場及斷層面（塊體邊界）上各節點的滑移速率以及虧損率。除此之外，由於斷層潛勢評估需要知道表 2-7.1 上所列各斷層段的長期滑移速率、間震期滑移速率及滑移虧損率、因此我們將塊體模型所得之各斷層節點上的值取平均，可以得到各個速率的平均值及標準差。由此可知，若沿斷層面的滑移速率分布較不平均，則所得的速率標準差也會相對較大。

由圖 2-7.1b 可看出，各塊體的邊界幾乎都和地表的斷層線一致，而有些延伸的斷層邊界主要是為了符合塊體在幾何上的連續性以供數值模型所需。圖中邊界上的圓圈代表節點，塊體模型即是用來估算斷層面在各節點上的滑移速率值。

為了求取各斷層面上的震間滑移速率及滑移虧損率，必須先得到斷層的地下幾何形貌。本研究經由整理南部活斷層的各種地質及地球物理文獻及證據，建立了本文研究範圍內的斷層幾何參數表（表 2-7.1）。注意除了如圖 2-7.1a 中所示的地表節點外（深度為 0 km），沿著斷層傾角也分別在一半斷層深度及斷層底部各設一個節點。本文下一節中斷層面上的滑移量分佈皆是由這些節點上的值進行內插所得。

本次研究中在模型反演過程中加入塊體內部形變，此時各塊體將不再是剛性塊體，塊體內部的速度差異將可用內部形變解釋，較為符合臺灣目前大地構造，並加入地質研究方法所推估的斷層滑移速率（表 2-7.3, Shyu, J. Bruce H., unpublished, 2015）作為反演時的約束值，以得到更佳的擬合結果。

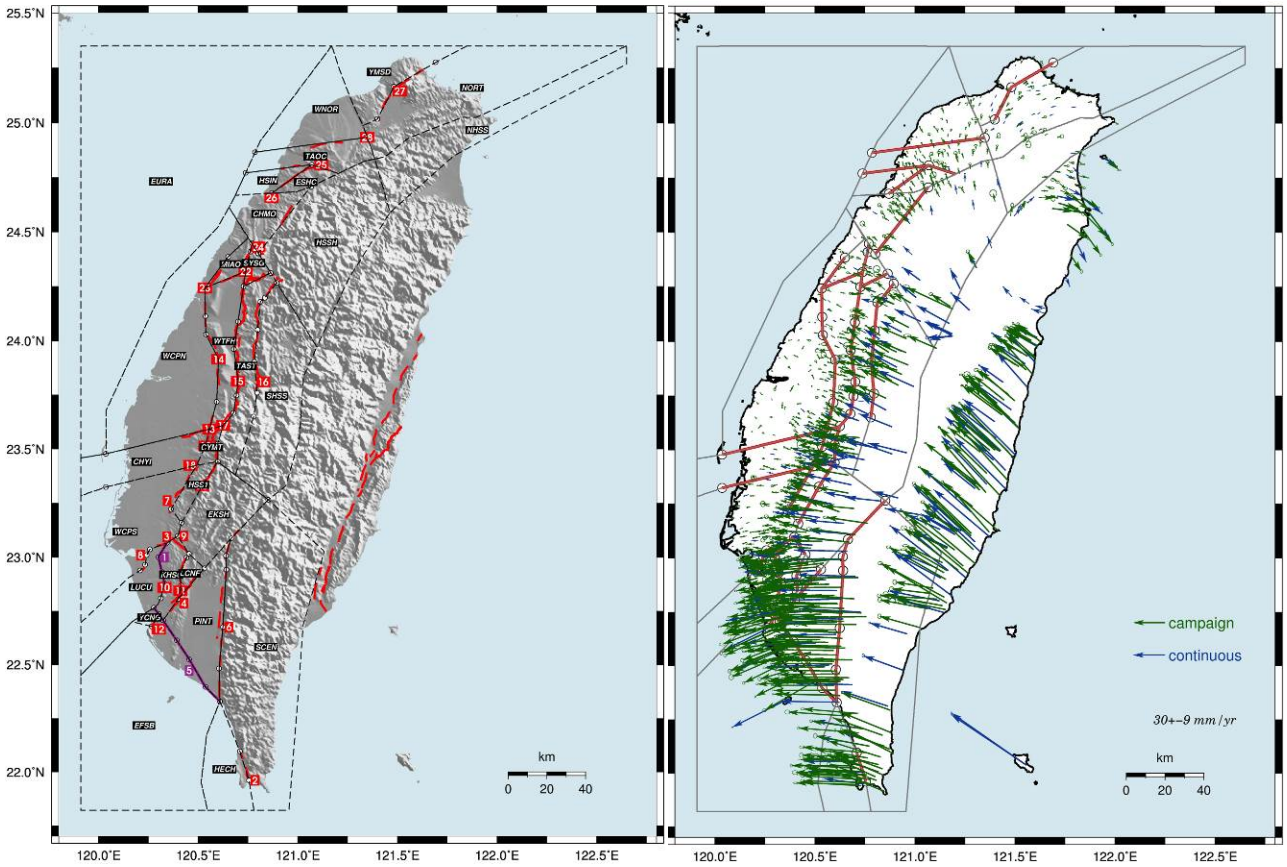


圖 2-7.1：（a）本文所用的臺灣北中南部三維塊體模型及活動斷層分布，右上角為本研究所使用之參考塊體 EURA 的相對位置。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公佈之第一類活斷層，紅色虛線表示地調所公佈之第二類活斷層，紫色實線表示非地調所公佈之斷層及構造邊界。數字代表之斷層分別為 1. 梅嶺斷層; 2. 恆春斷層; 3. 新化斷層; 4.旗山斷層; 5. 鳳山斷層; 6. 潮州斷層; 7. 木屐寮-六甲斷層; 8. 後甲里斷層; 9. 左鎮斷層; 10. 小崗山斷層; 11. 龍船斷層; 12. 右昌斷層; 13. 梅山斷層; 14. 彰化斷層; 15. 車籠埔斷層; 16. 大茅埔—雙冬斷層; 17. 大尖山斷層; 18. 義竹斷層; 19. 九芎坑斷層; 20. 觸口斷層; 21. 大甲斷層; 22. 三義斷層; 23. 屯子腳斷層; 24. 獅潭斷層; 25. 新竹斷層; 26. 新城斷層; 27. 山腳斷層; 28. 湖口斷層。（b）利用 2006~2014 年連續 GPS（藍色箭頭）及 2002~2014 年 campaign GPS（綠色箭頭）資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站），紅色實線表示各斷層在模型設定中出露地表的位置。

表 2-7.1：圖 2-7.1 中所示 28 條斷層之幾何參數。

	斷層名稱	傾角（degree）	斷層底部深度（km）
1	梅嶺	30	7.0
2	恆春	57.5	16.0
3	新化	80	12.5
4	旗山	58	13.0
5	鳳山	85	10.0
6	潮州	60	17.5
7	木屐寮-六甲	0-6 km:40, 6-10 km:15	10.0
8	後甲里	65	4.0
9	左鎮	70	10.0
10	小崗山	0-10 km:45, 10-11 km:5	11.0
11	龍船	58	9.8
12	右昌	50	12.0
13	梅山	75	12.5
14	彰化	25	10.0
15	車籠埔	N: 25; S: 35	10.0
16	大茅埔—雙冬	45	12.0
17	大尖山	45	10.0
18	義竹	70	10.0
19	九芎坑	30	7.0
20	觸口	40	10.0
21	大甲	25	8.0
22	三義	30	8.0
23	屯子腳	80	10.0
24	獅潭	50	8.0
25	新竹	50	10.0
26	新城	40	10.0
27	山腳	65	12.5
28	湖口	50	9.0

2-7-2 活動斷層長期滑移速率及虧損率

本研究所使用的地表運動資料為臺灣 GPS 觀測網在 2006~2014 年所觀測的連續測站及 2002~2014 年所觀測的 campaign 站之平均水平速度場，包含了 426 個連續測站及 1466 個 campaign 測站資料（圖 2-7.1），為了更接近地質研究的結果，我們加入了地質研究方法所得到的滑移速率作為反演過程的約束值（表 2-7.3, Shyu, J. Bruce H., unpublished, 2015）。利用這些速度場、各斷層參數及地質結果的約束值，即可估算出最符合 GPS 觀測資料的塊體旋轉率（圖 2-7.2 及圖 2-7.3a、b；表 2-7.2），圖 2-7.2 中顯示各塊體的 Euler's pole 皆於臺灣周圍，由我們所推求的水平速度（圖 2-7.3b）可看出部分塊體旋轉速率較大（圖 2-7.3a），圖 2-7.4a、b、c 分別顯示本區域的斷層長期滑移速率、間震期滑移速率及滑移虧損率等值。圖 2-7.5 則顯示本研究區域的三種水平速度場，分別是 GPS 觀測值（a）、塊體模型所預測的值（b），以及上述兩者的差別（殘差值，c）。由此圖可知，在大部分地區，觀測值和塊體模型預估的水平運動有很好的一致性，而預估較差的部分則落在旗山斷層及鳳山轉換斷層帶之間的塊體，推測此現象可能是因為該區有未被考慮的活動構造或地表有潛移現象，使塊體模型的預測結果不如預期，也有可能是塊體邊界劃設不足以表現該區的地表變形。在鄰近 EKSH 塊體邊界的殘差值較大，可能和 2010 年甲仙地震的震後效應有關。

除此之外，為了評估各塊體可能存在的內部變形（internal deformation），我們利用 block modeling 來推算南部塊體的內部應變率（internal strain rate）。結果如圖 2-7.7，顯示臺灣南部的塊體主應變軸以東西向壓縮應變、南北向伸張應變為主，平均應變率約為 400 nanostrain/yr。這個結果和一些前人直接由 GPS 觀測值求得的應變速率場相似，間接說明了 block modeling 的正確演算過程。

在此針對本計畫期末階段 9 條南臺灣的斷層－木屐寮、六甲、新化、後甲里、左鎮、小崗山、旗山、潮州、恆春及非地調所公布活斷層之梅嶺、龍船及右昌斷層進行探討，結果陳述如下。

表 2-7.3 顯示此 9 條斷層上各節點的滑移速率的平均值，並可看出這些斷層之平均長期滑移速率、平均間震期滑移速率及平均滑移虧損率，及其對應之計算標準差。其中斷層的長期平均滑移速率（geodetic long-term slip rate）的計算是由近十年測地資料（GPS, 水準等）所得的地表運動推估而得，和利用地質資料（槽溝開挖或河階等）所觀測的長期（數百~數千年）滑移速率（geologic long-term slip rate）存在有本質上的差異。若假設斷層的震間能量累積速率為常數，則 geodetic 和 geologic slip rates 應該相同。然而由於板塊構造及運動的複雜性，在地質時間的尺度下，斷層活動往往存在變異性，所以許多研究都曾指出這兩種斷層滑移速率的差別（e.g., Ward, 1998）。評估長期平均滑移速率（geodetic long-term slip rate）的方法，除了和滑移速率（geologic long-term slip rate）進行比較外，也可以由地震活動度等資料來間接進行。

表 2-7.3 顯示恆春、新化、潮州及後甲里斷層面上的長期滑移速率分別為 6.47 mm/yr、6.27 mm/yr、0.79 mm/yr 及 4.70 mm/yr，這些值都接近地質觀測的長期滑移速率。而滑移虧損率為長期滑移速率減去間震期滑移速率，由於斷層深部設定成自由滑動的，本研究將地表及斷層一半深度的滑移虧損率作平均，得到 4 條斷層之滑移虧損率僅為 4.07 mm/yr、2.72 mm/yr、0.67 mm/yr 及 2.91 mm/yr。另外，塊體模型顯示旗山、木屐寮-六甲、左鎮斷層的長期滑移速率分別為 12.31 mm/yr、7.90 mm/yr、11.33 mm/yr，明顯高於地質長期滑移速率（圖 2-7.4a）。造成這差異的原因除了左鎮斷層缺少地質速率約制外，主要是由於 GPS 水平速度場在跨過這些斷層時有明顯的梯度及方向變化（圖 2-7.6a），因此以測地資料為主的塊體模型就會將大的速度梯度解釋為高滑移速率。由於塊體模型的設定是根據給定的斷層幾何參數，因此梅嶺、木屐寮—六甲、小崗山、龍船及右昌斷層的深部都和鄰近塊體相互重疊（圖 2-7.4），形成較不合理的塊體邊界幾何，因而造成滑移速率的計算偏差（五條斷層的長期滑移速率分別為 10.50 mm/yr、7.90 mm/yr、6.86 mm/yr、7.35 mm/yr 及 5.22 mm/yr）。整體來看，在

麓山帶南北向一系列的斷層具有較高的平均滑移虧損率，本研究假設所有斷層近地表處皆為鎖定狀態，故大部份斷層面上間震期滑移速率在地表附近都接近 0（圖 2-7.4b）。

模型結果顯示，新化及後甲里斷層的滑移虧損率較其東邊的左鎮、梅嶺、小崗山、龍船及旗山斷層為低，塊體模型的滑移虧損率是由 GPS 所測之地表水平運動所推求，而由於跨新化、後甲里、潮州及恆春斷層的水平速度場變化很小，因此本斷層的滑移虧損也就偏低。由於塊體模型設定上的限制及本區域的斷層構造較複雜，使得部分斷層的滑移速率和地質研究結果有落差，未來會針對這些跨塊體的斷層做討論。另外本研究只使用水平速度進行模型分析，缺乏垂直運動的約制，無法將可能的垂直速度變化納入滑移虧損計算，因此對於具有垂直分量的活動無法解算出較好的結果，未來將考慮加入垂直速度場的分析，以得到更合理的結果。

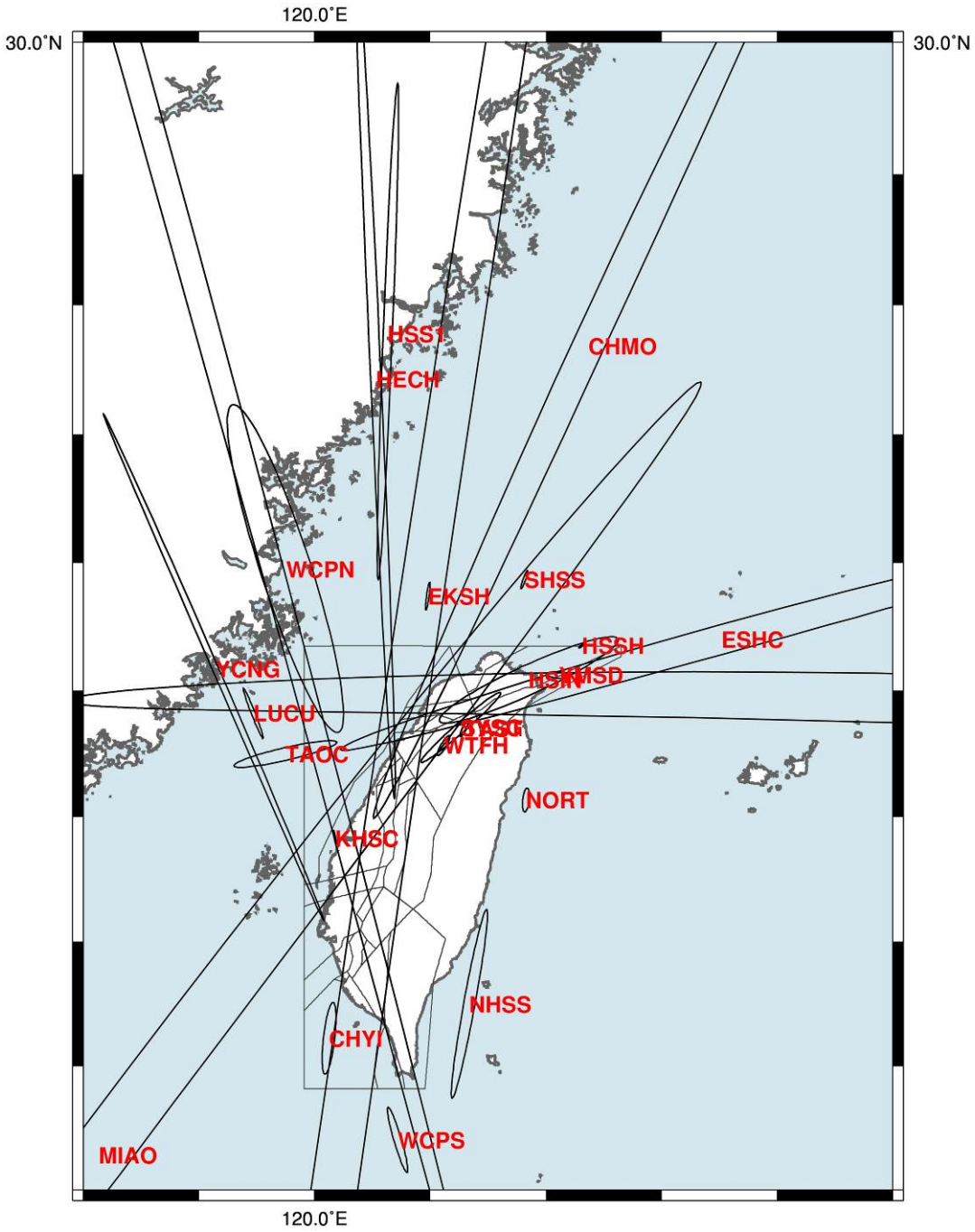


圖 2-7.2：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler's pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（紅色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 2-7.1）。

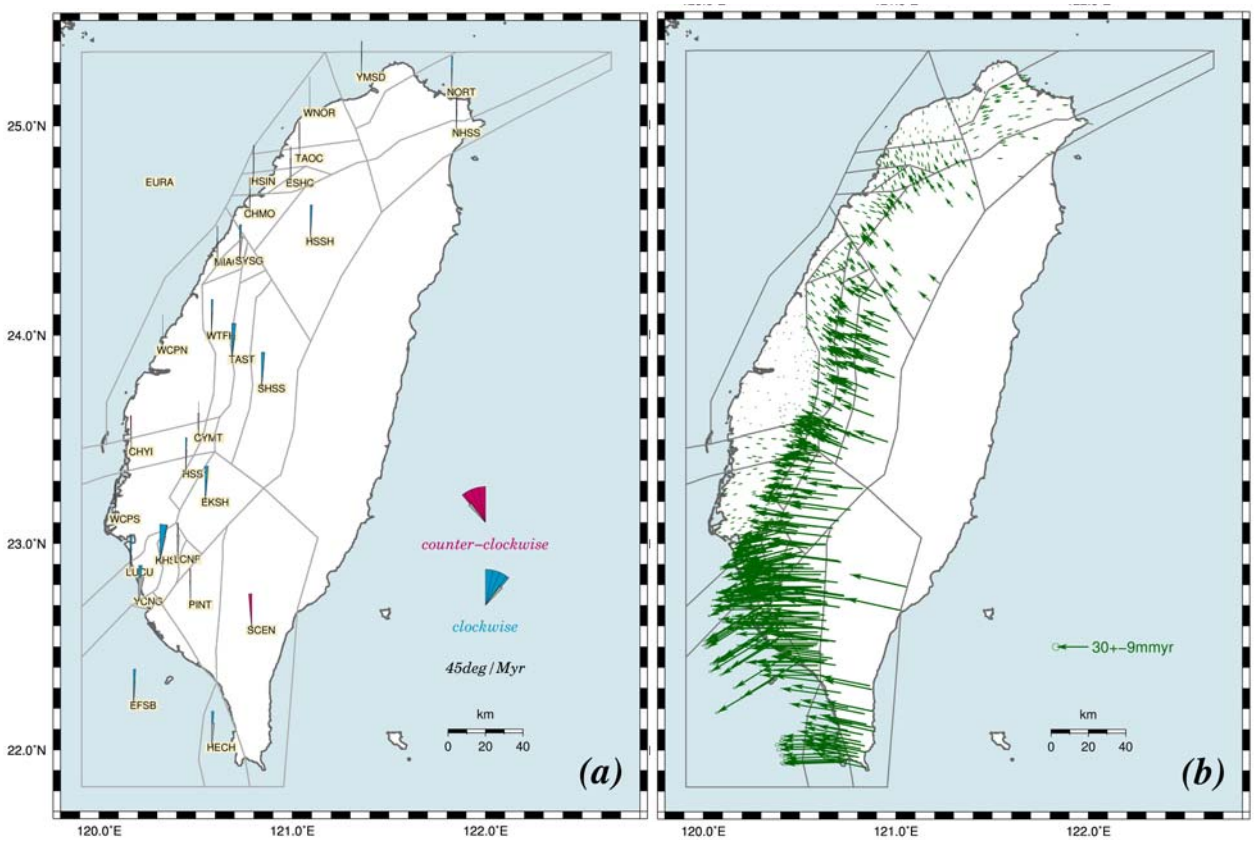


圖 2-7.3：（a）最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler's pole 為軸的旋轉角速度。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15 º/My 的角速度。（b）以圖 a 中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。

表 2-7.2：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。

名稱	經度	緯度	角速度（deg/my）	角速度誤差	誤差橢圓長軸長（deg）	誤差橢圓短軸長(deg)	誤差橢圓長軸方位角
EURA	180.000	-0.000	-0.000	0.000	0.00	0.00	180.00
CHYI	120.1252	22.2265	1.4736	0.5238	0.58	0.09	6.46
WCPS	120.7183	21.4064	0.9122	0.1976	0.55	0.06	163.82
EKSH	120.9792	25.7424	-6.7666	0.4186	0.22	0.02	7.60
LUCU	119.4693	24.8204	-4.3794	0.6332	0.42	0.03	158.68
KHSC	120.177	23.8269	-17.8380	1.7745	0.13	0.01	169.25
PINT	120.6017	-0.8523	1.2315	0.6211	17.57	0.15	0.34
EFSB	116.7863	27.6521	-5.1040	1.4733	2.58	0.08	146.92
SCEN	120.1731	19.0134	7.0381	0.3226	0.23	0.02	9.88
CYMT	117.9124	5.1217	0.4621	1,8009	74.44	0.42	7.65
HSS1	120.6331	27.7796	-2.5032	1.5314	3.82	0.07	2.24
HECH	120.5299	27.4313	-5.1390	4.4214	6.58	0.08	177.43
WCPN	119.7522	25.9519	-0.1141	0.1054	2.69	0.39	162.16
WTFH	121.1155	24.5646	-3.6875	0.6662	0.18	0.04	31.14
MIAO	118.1305	21.2807	0.4113	1.1735	15.49	0.46	36.74
SHSS	121.8137	25.8709	-6.8026	0.3238	0.15	0.02	19.76
CHMO	122.3664	27.6862	-0.5717	0.9733	8.11	0.24	24.69
HSSH	122.3108	25.3539	-4.5532	0.1340	0.06	0.01	50.03
TAST	121.2952	24.6992	-8.9178	0.9711	0.14	0.03	26.27
SYSG	121.2638	24.7079	-4.2875	4.5904	0.83	0.08	48.62
TAOC	119.7466	24.4984	1.4779	0.6645	0.83	0.10	76.96
WNOR	127.2758	24.8753	-0.1671	0.3663	17.13	0.40	92.28
HSIN	121.8510	25.0842	-1.4071	1.6253	1.54	0.23	65.10
ESHC	123.5167	25.4005	-0.9391	1.7450	6.21	0.23	74.48
YMSD	122.1118	25.1215	-1.6758	0.3920	0.19	0.05	94.80
NORT	121.8278	24.1343	-2.5347	0.3580	0.19	0.05	5.84
NHSS	121.3380	22.5018	-0.8734	0.3778	1.54	0.09	10.31
LCNF	116.3759	35.8120	-1.6886	3.4154	36.32	0.21	163.30
YCNG	119.1430	25.1697	-8.2794	9.6675	4.34	0.05	156.62

表 2-7.3：塊體模型計算所得各斷層之長期平均滑移速率及平均滑移虧損率，最左側兩欄則為斷層之地質滑移速率約束值（Shyu, 2015, unpublished）。

斷層名稱	地質長期滑移速率最小值 (mm/yr)	地質長期滑移速率最大值 (mm/yr)	長期平均滑移速率（mm/yr）	標準差	平均滑移虧損率（mm/yr）	標準差
梅嶺			10.50	5.34	3.73	5.34
恆春	5.86	6.44	6.47	6.23	4.07	6.02
新化	0.80	4.50	6.27	3.82	2.72	3.90
旗山	0.73	1.46	12.31	12.79	4.86	8.07
鳳山			26.07	7.16	10.03	11.01
潮州	0.59	2.93	0.79	3.40	0.67	2.35
木屐寮—六甲	4.40	7.10	7.90	3.93	3.34	2.69
後甲里		7.07	4.70	1.61	2.91	2.80
左鎮			11.33	4.87	3.85	6.59
小崗山	1.10	5.50	6.86	6.88	1.94	3.27
龍船			7.35	6.66	1.94	3.27
右昌			5.22	13.50	2.90	9.77
梅山		2.51	7.98	4.57	2.64	4.56
彰化	1.13	5.66	5.95	7.03	1.67	2.82
車籠埔		6.94	6.40	4.10	2.88	3.92
大茅埔—雙冬	0.66	3.34	2.96	2.39	0.72	1.21
大尖山			12.67	3.46	5.32	5.78
義竹			9.38	10.85	6.12	8.72
九芎坑	2.40	12.00	9.10	6.92	2.94	3.93
觸口			6.88	7.89	4.07	6.23
大甲			2.08	2.85	1.79	2.58
三義	0.62	3.09	4.55	3.81	2.85	2.23
屯子腳	0.33	1.68	2.38	2.38	2.38	2.38
獅潭	0.62	3.11	1.61	3.26	1.54	3.21
新竹	0.24	1.17	1.55	1.04	1.55	1.04
新城	0.60	3.00	2.68	1.73	1.10	1.40
山腳	1.09	2.60	2.31	1.73	1.79	0.83
湖口	0.32	2.00	0.57	3.13	0.57	2.02

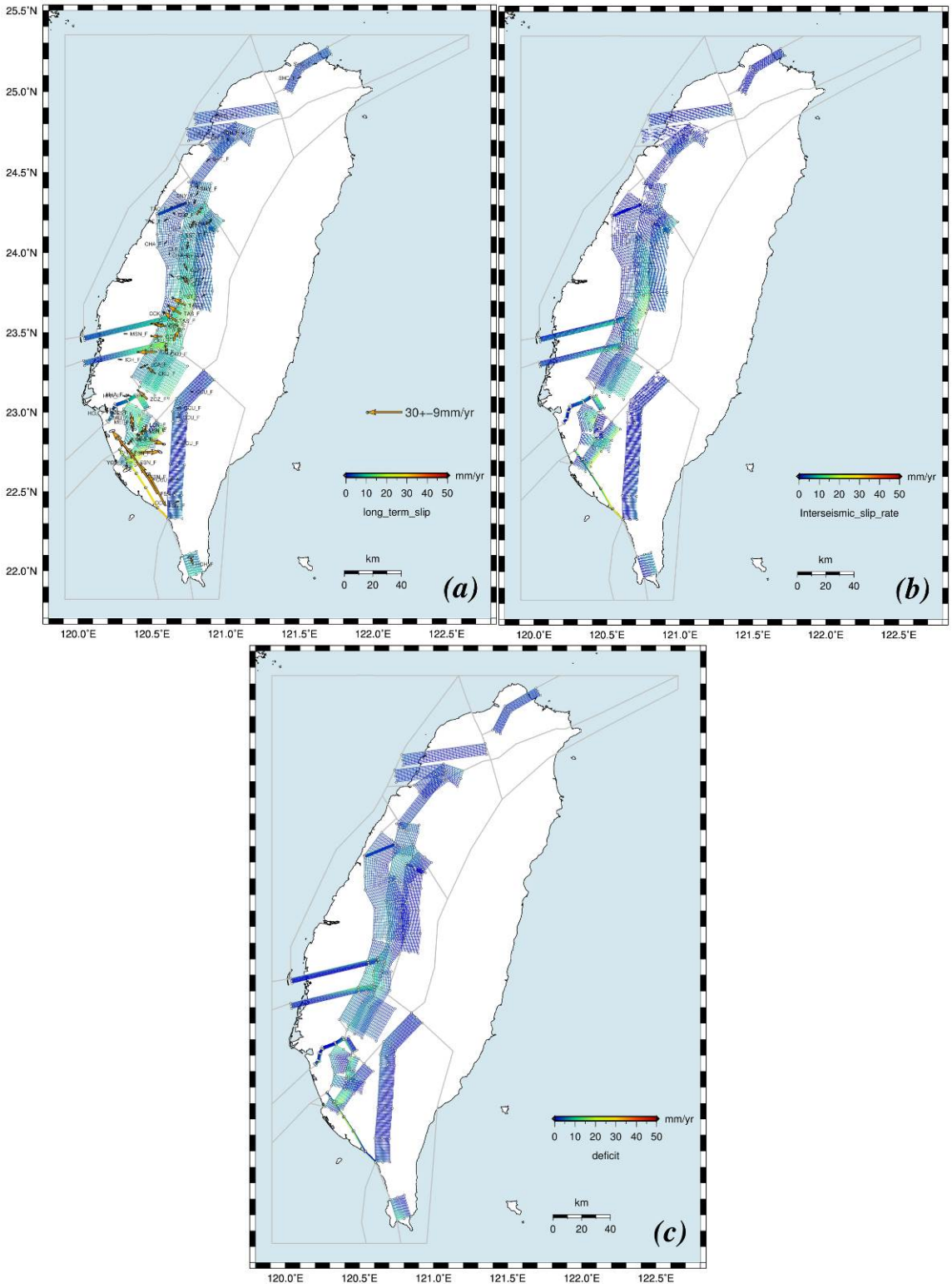


圖 2-7.4：（a）推求的斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層出露地表的位置。橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。（b）各斷層面的震間滑移速率。（c）由（a）圖減去（b）圖，得到斷層面上的滑移虧損率。

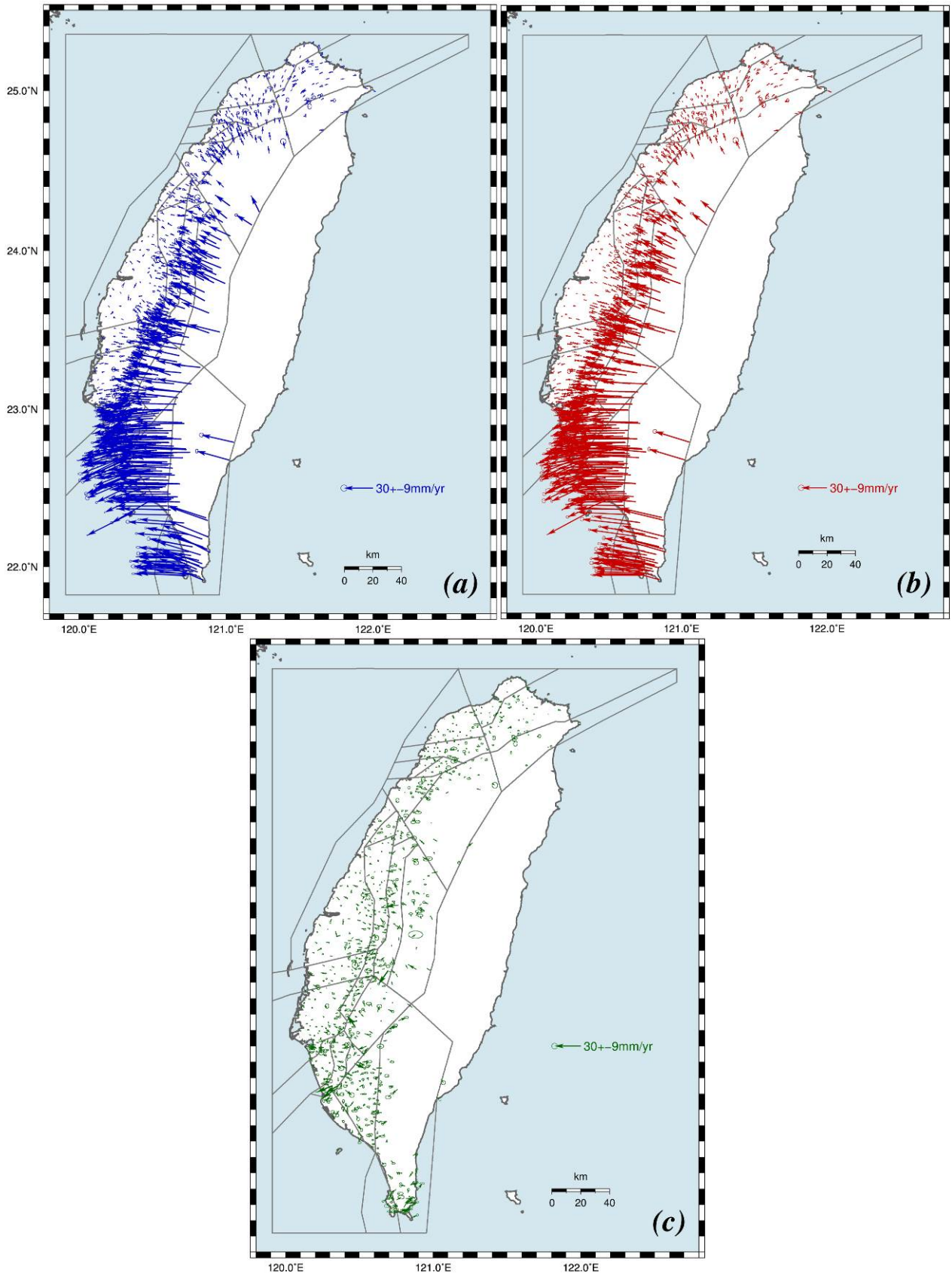


圖 2-7.5：比較 GPS 觀測速度場（圖 a）以及本研究所得之最佳塊體模型所預估的地表運動（圖 b）。圖 c 表示模型預估的殘差值，其對應之 reduced χ^2 為 52.176。

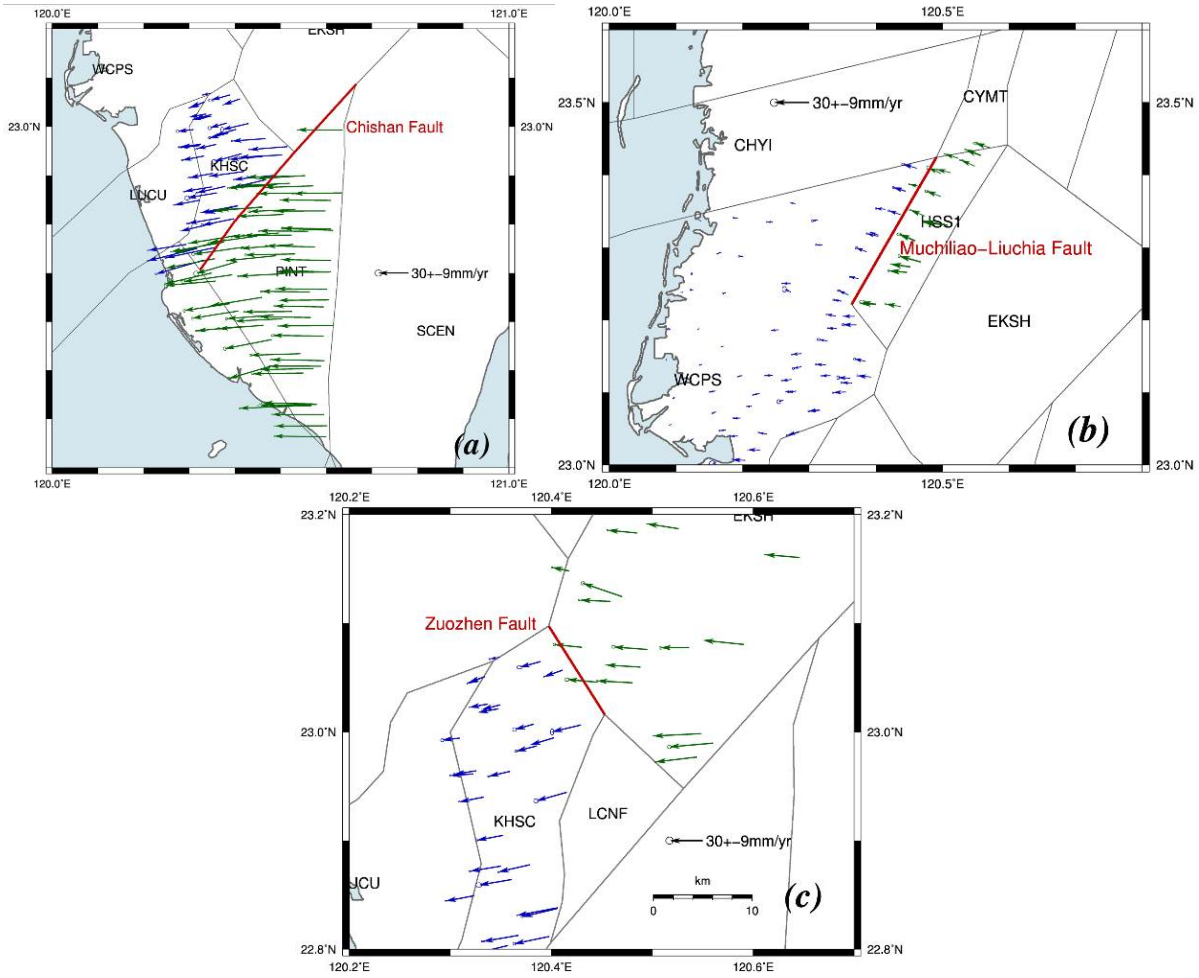


圖 2-7.6：跨旗山（圖 A）、木屐寮─六甲（圖 B）及左鎮斷層（圖 C）的 GPS 觀測速度場變化。

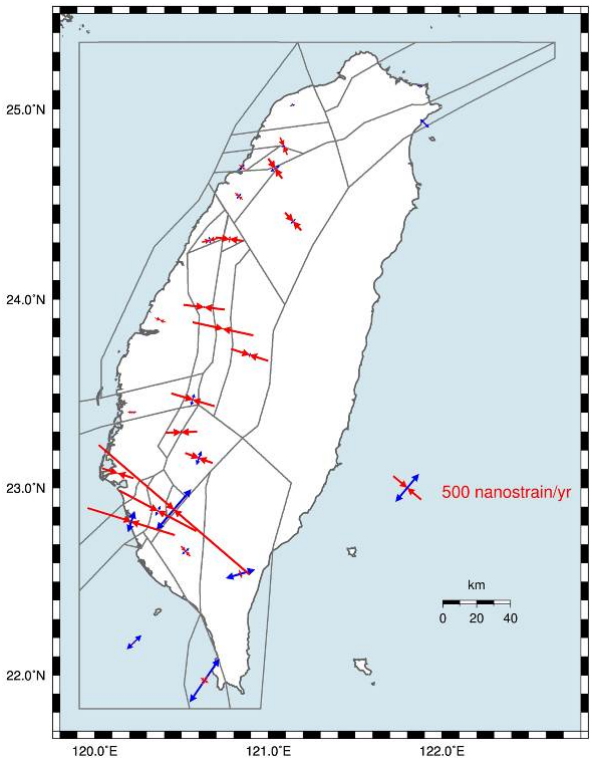


圖 2-7.7：各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

2-7-3 斷層之測地矩率及未來發震規模

為了將各斷層求得之滑移虧損與地震災害結合，本研究利用以下公式可將滑移虧損轉換成地震規模，藉以分析發生災害性地震之機率，而三維塊體模型 DEFNODE 將這些公式加入程式模擬出結果。假設臺灣地區之 $\mu = 3\times10^{10}\,Pa$，A 為各斷層面之面積，$\dot{D}$ 為斷層面上之滑移虧損率，可利用式（1）求得測地矩率，乘上再現週期即為地震矩，再利用 Hanks and Kanamori（1979）提出之轉換公式可得該斷層之地震矩規模，未來將以此方法計算各斷層可能發生之地震矩規模。

$$\dot{M} = \mu A\dot{D} \qquad （式 2-7.1）$$

$$M_0 = \dot{M} \times T \qquad （式 2-7.2）$$

$$M_w = \frac{2}{3}(\log M_0 - 9.1) \qquad （式 2-7.3）$$

注意的是，以上的估算是假設未來各斷層滑移虧損率不隨時間變化，也就是維持相同的值。然而利用測地資料進行斷層潛勢評估的優勢，即在於所評估的結果可隨時間更新修正。由於臺灣位處板塊邊緣，地殼活動相對劇烈，因此由測地資料所得地表速度場應會隨時間有可觀測的變化。因此表 2-7.4 中估算的未來地震規模也可能會隨時間而有所修正。

表 2-7.4：斷層之滑移虧損與推估規模。

	面積 (km^2)	平均滑移虧損率 (mm/yr)	標準差	測地矩率 Mw (N-m)	Mw (T=30yr)	Mw (T=50yr)	Mw (T=100yr)
梅嶺	242.8	3.73	5.34	3.456×10^{16}	5.94	6.09	6.29
恆春	299.4	4.07	6.02	4.652×10^{16}	6.03	6.18	6.38
新化	199.5	2.72	3.90	1.697×10^{16}	5.73	5.88	6.08
旗山	519.9	4.86	8.07	1.185×10^{17}	6.30	6.45	6.65
鳳山	595.3	10.03	11.01	2.857×10^{17}	6.55	6.70	6.90
潮州	2187.0	0.67	2.35	1.092×10^{17}	6.27	6.42	6.62
木屐寮-六甲	846.5	3.34	2.69	1.122×10^{17}	6.28	6.43	6.63
後甲里	53.52	2.91	2.80	6.474×10^{15}	5.45	5.60	5.80
左鎮	113.8	3.85	6.59	1.310×10^{16}	5.66	5.81	6.01
小崗山	204.5	1.94	3.27	1.862×10^{16}	5.76	5.91	6.11
龍船	194.7	7.35	6.66	7.085×10^{16}	6.15	6.30	6.50
右昌	114.4	2.90	9.77	2.100×10^{17}	5.79	5.94	6.14

2-7-4 小結

本期報告加入27條活動斷層(其中2條非地調所公布之活斷層)及1條構造邊界作為塊體邊界斷層，其中南部的活動斷層分別為恆春斷層、新化斷層、旗山斷層、潮州斷層、木屐寮—六甲斷層（本研究中將此2條斷層設為1條斷層）、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、梅嶺、龍船及右昌斷層（其中梅嶺、龍船及右昌斷層非地調所公佈之活斷層），構造邊界為鳳山斷層，本次研究將各構造線作為塊體邊界以符合現在地調所公布之活動斷層分布。針對期末階段的 9 條斷層—木屐寮、六甲、左鎮、新化、後甲里、小崗山、旗山、潮州、恆春及非地調所公布活斷層之梅嶺、龍船、右昌斷層來討論，DEFNODE 估算的結果，顯示恆春、新化、潮州及後甲里斷層上的平均滑移虧損率分別為 4.07 mm/yr、2.72 mm/yr、0.67 mm/yr 及 2.91 mm/yr ，因此這 4 條斷層上累積之滑移虧損較小。在木屐寮—六甲、旗山、左鎮、龍船斷層部分則計算出 3.34 mm/yr、4.86 mm/yr、3.85 mm/yr、7.35 mm/yr 的平均滑移虧損率，此一系列麓山帶斷層都有相同的高滑移虧損率趨勢，因為此一系列斷層正好是速度梯度及速度場方向由東往西變化的交界帶，可能在震間期會快速累積能量，因此對應到本研究的高滑移虧損率。而至西部平原區時，因速度梯度較小，反應在斷層面上之滑移虧損也相對較小(約小於 3 mm/yr)。總結來說，南臺灣的南北向麓山帶斷層具有相對較高的滑移虧損累積，而平原區整體構造活動度低，反應在斷層面上之滑移虧損也較低。

第三章、活動斷層發生潛勢圖建置

3-1 木屐寮-六甲斷層

3-1-1 木屐寮-六甲斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：木屐寮斷層位於嘉南隆起海岸平原與嘉義丘陵的交接帶，長約 7 公里（Sun, 1970；張徽正等，1998），由數值地形模型（DTM，40 公尺一格點）與衛星遙測影像發現，在木屐寮斷層跡附近均呈現相當明顯的線形，線形北起頭前溪橋南側的山豬崁，向南延伸至六重溪北岸，此線形區隔東側地勢較高的丘陵區與西側平緩的平原區，兩側地勢落差約數十公尺。根據地調所五萬分之一地質圖，木屐寮斷層可再往北延伸，到八掌溪一帶斷層跡則無法追蹤，總長可達 13 公里（圖 3-1.1）。六甲斷層為逆移斷層，位於嘉義丘陵與嘉南平原的交接帶，呈北北東走向，本計畫認為其延伸可由台南縣白河鎮蓮桐崎向南延伸至曾文溪，被左鎮斷層延伸段所截切，長約 22 公里（圖 3-1.1）（張徽正等，1998；林啟文等，2000；楊志成等，2005），圖 3-1.2 為六甲斷層及木屐寮斷層之平面分布地形圖，紅色斷層線為中央地調所 2012 年活動斷層分布圖，圖中之紅色圓點為鑽井點位，P-P’為楊志成等（2005）繪製之剖面線，E-E’為 Hung et al（1999）繪製之剖面線。本計畫認為木屐寮斷層與六甲斷層有一起破裂之可能性，因此以木屐寮-六甲斷層系統考慮其破裂模式。

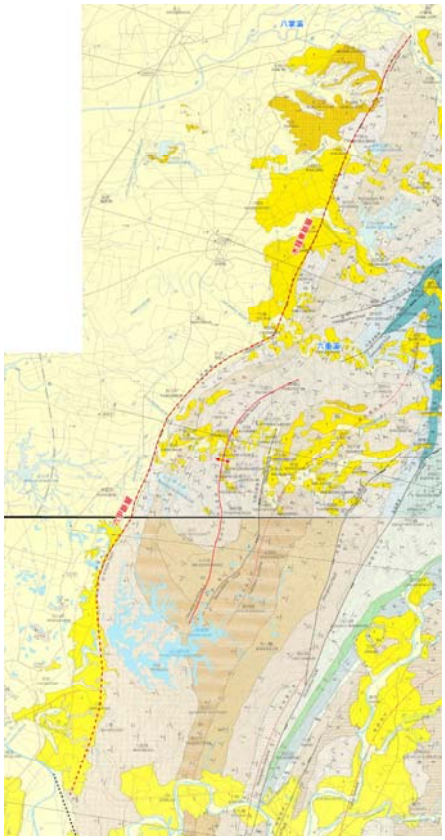


圖 3-1.1：地調所五萬分之一地質圖。

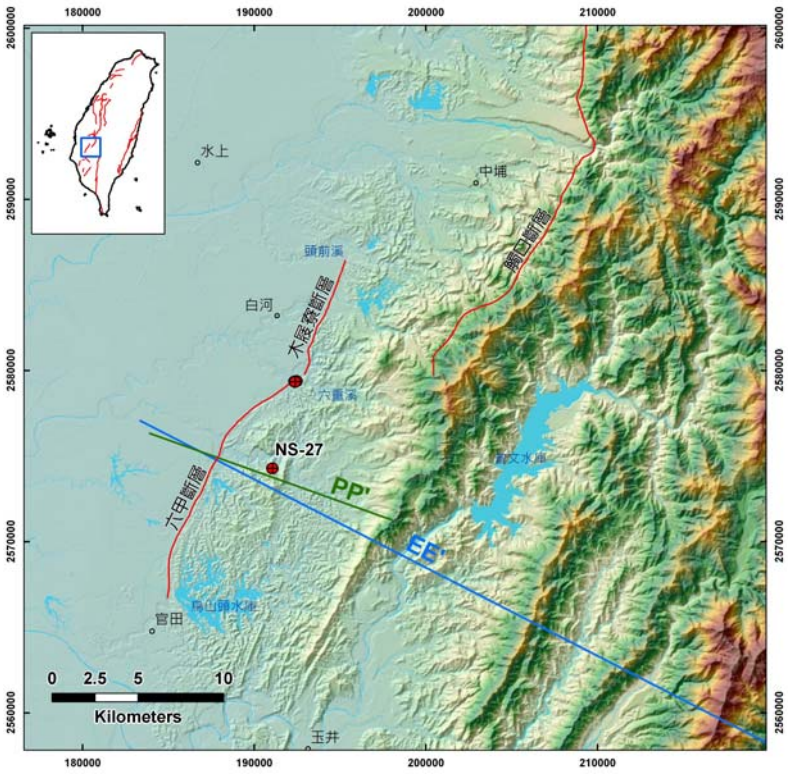


圖 3-1.2：六甲斷層及木屐寮斷層平面分布地形圖。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 木屐寮斷層：王宏霖(2006)曾針對木屐寮斷層施測震測剖面，其平面分布如圖 3-1.3 所示，其中跨越木屐寮斷層之 D 剖面及 E 剖面可以發現地層上有明顯的轉折（圖 3-1.4），應為受木屐寮斷層擾動所造成。

(2) Suppe（1980）認為牛山地區及東側麓山帶之地下深部是由多重疊瓦構造組成（圖 3-1.5），基底滑脫面至少 8 公里深。六甲斷層上盤之牛山背斜屬於褶皺崖地形。

(3) 中油公司在牛山背斜軸部的鑽井（NS-27，位置如圖 3-1.2），深度約 3,350 公尺處鑽遇一傾角約 43 度的斷面（Hu and Sheen, 1989），楊志成等（2005）根據此鑽井位置及野外斷層露頭，推測斷層之斷坡（ramp）大致以 30~45 度的傾角向西逆衝到地表，圖 3-1.6 為楊志成等（2005）描繪之 PP'地質剖面圖，顯示不對稱的牛山背斜隨六甲斷層擴展至地表而形成，且六甲斷層下盤在 5,000 年來有新營斷層的發育（楊志成等，2005）。

(4) Hung et al.（1999）建立跨六甲斷層之地層剖面（圖 3-1.7），平面位置如圖 3-1.2EE' 剖面，圖中之六甲斷層並無出露至地表，牛山背斜主要受控於深部斷坡構造而形成，而此處基底滑脫面至少 8 公里。

(5) 黃旭燦等（2004）建立之平衡剖面（圖 3-1.8）顯示牛山背斜為褶皺崖地形，並無描繪六甲斷層。

(6) 地調所在六甲斷層的莿桐崎附近有 4 口鑽井，鑽井點位分布如圖 3-1.9 所示。各鑽井鑽遇剪切面之深度及定年資料詳如表 3-1.1，表中的定年資料也顯示剪切面之年代均有 2 萬年以上。由各個鑽井資料連結所建立的剖面（圖 3-1.10），六甲斷層在地下淺部的斷層面位態為 N40E/30E（陳文山等，2006）。

(7) 由 1991-2010 地震深度分布圖顯示此區域地震主要集中於 12 公里以內(圖 3-1.11)。

木屐寮-六甲斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-1.2。

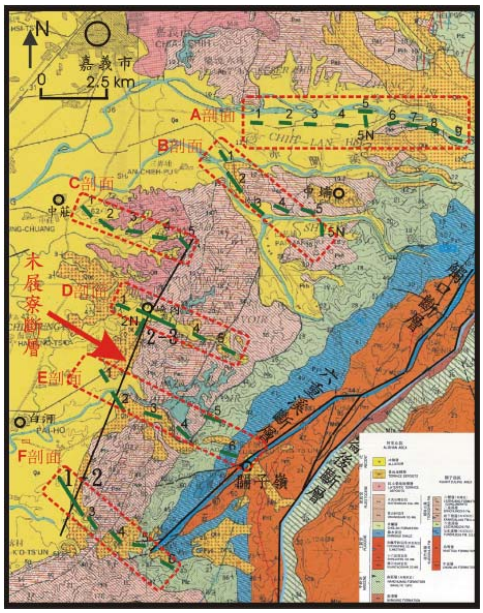


圖 3-1.3：中油十萬分之一地質圖與震測剖面線分布圖(王宏霖, 2006)。

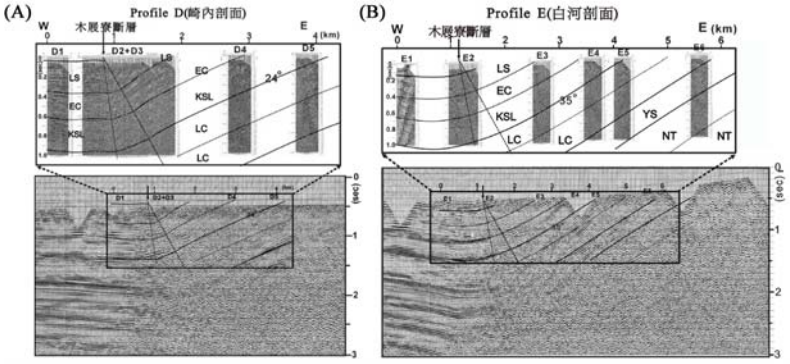


圖 3-1.4：木屐寮斷層之震測剖面，平面圖分布如圖 3-1.3，（A）D 剖面，（B）E 剖面（王宏霖, 2006）。

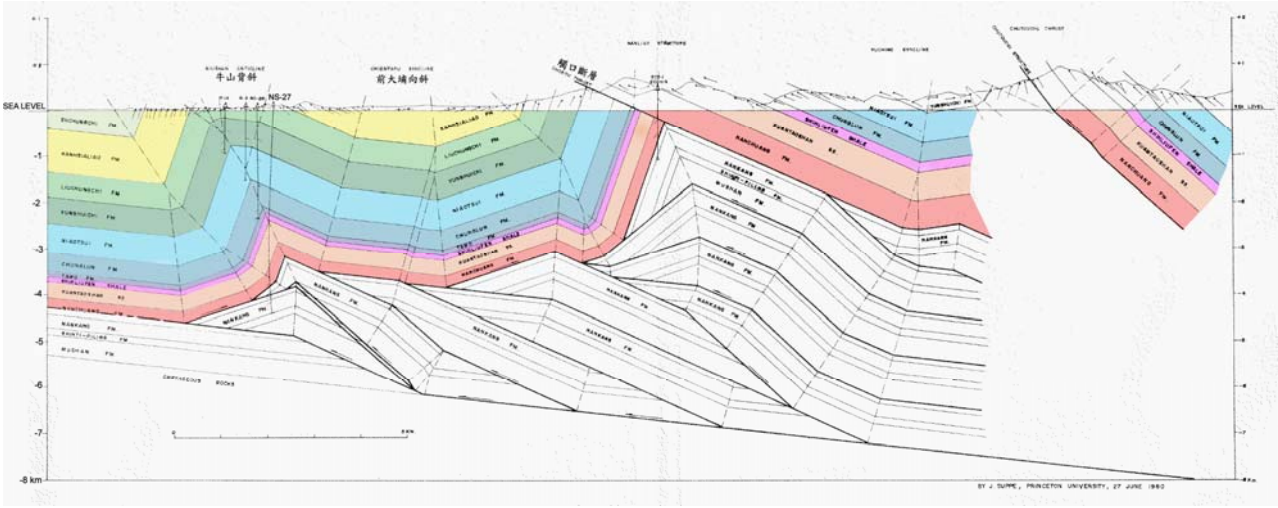


圖 3-1.5：牛山背斜及南寮構造剖面（Suppe, 1980）。

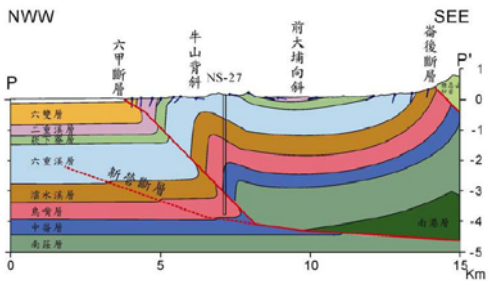


圖 3-1.6：P-P'剖面圖（楊志成等，2005）。

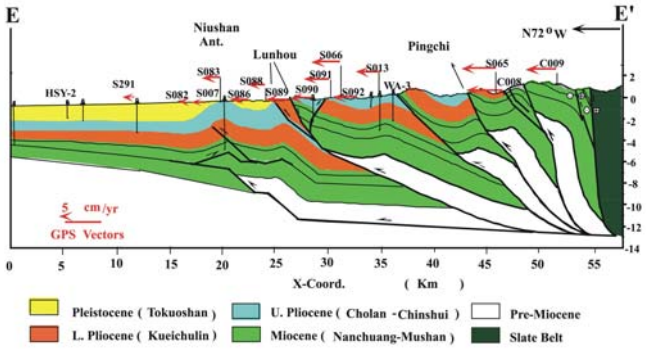


圖 3-1.7：EE'剖面及投影至剖面 GPS 測站之水平速度（Hung et al.,1999）。

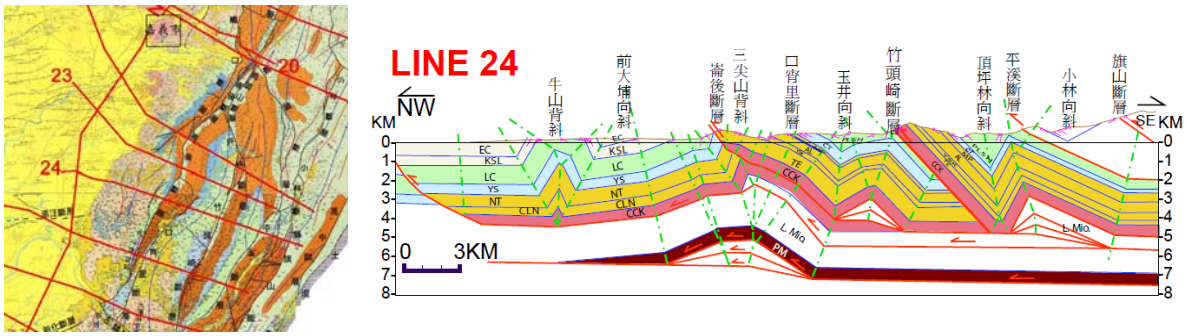


圖 3-1.8：左圖為平衡剖面分布地質圖，右圖為 LINE 24 地質平衡剖面（黃旭燦等，2004）。

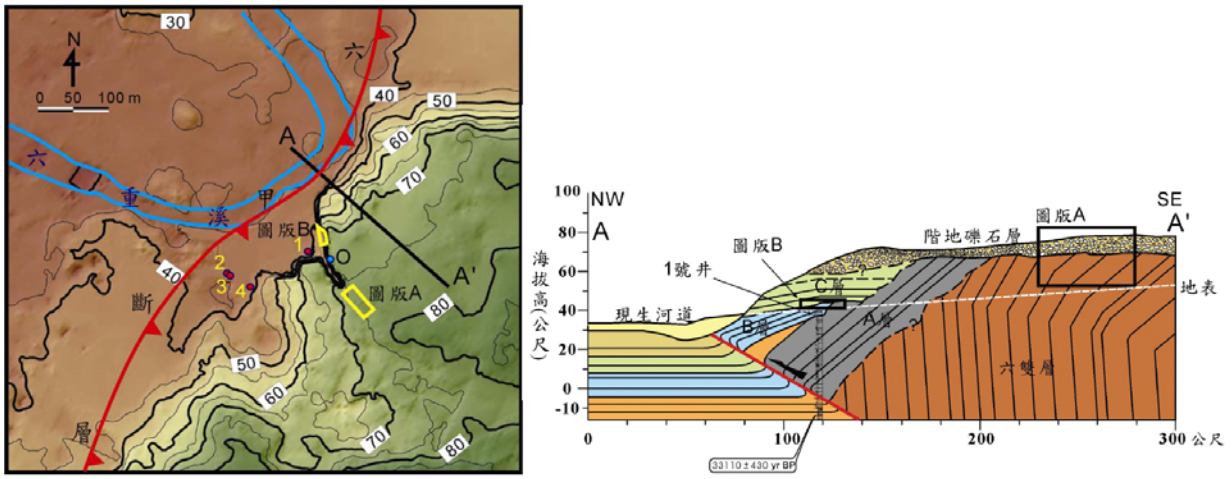


圖 3-1.9：六甲斷層蓊桐崎附近鑽井點位分布及整合露頭觀察及 1 號井資料所繪製的 A-A'剖面(摘自楊志成等，2005）。

表 3-1.1：鑽井岩芯資料表（修改自楊志成等，2005）。

編號	地表高程 (公尺)	井深 (公尺)	構造特徵	定年標本
			井下(公尺)	Conventional Radiocarbon Age
1	40	56	斷層泥	33110±430 BP
			(44.4-44.8)	-52.7
2	37	25	剪切面	41500±1280 BP
			-21.4	-21.8
3	37	60	剪切面	>47200 BP
			-25.5	-27.7
4	37	50	剪切面	22820±120 BP
			-40.6	-45.8

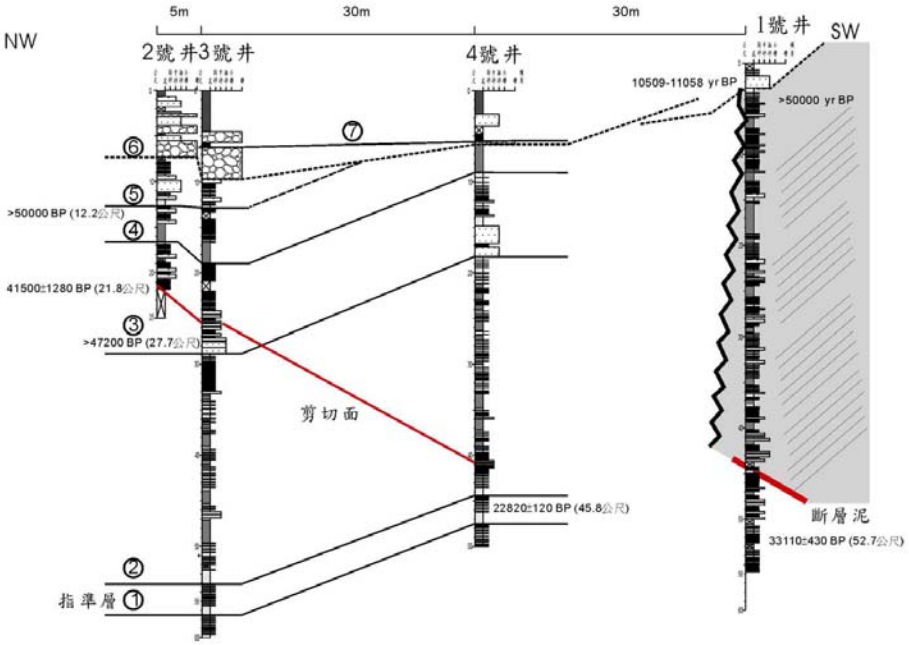


圖 3-1.10：各鑽井等比例對比圖，投影至走向 N60W（陳文山，2006）。

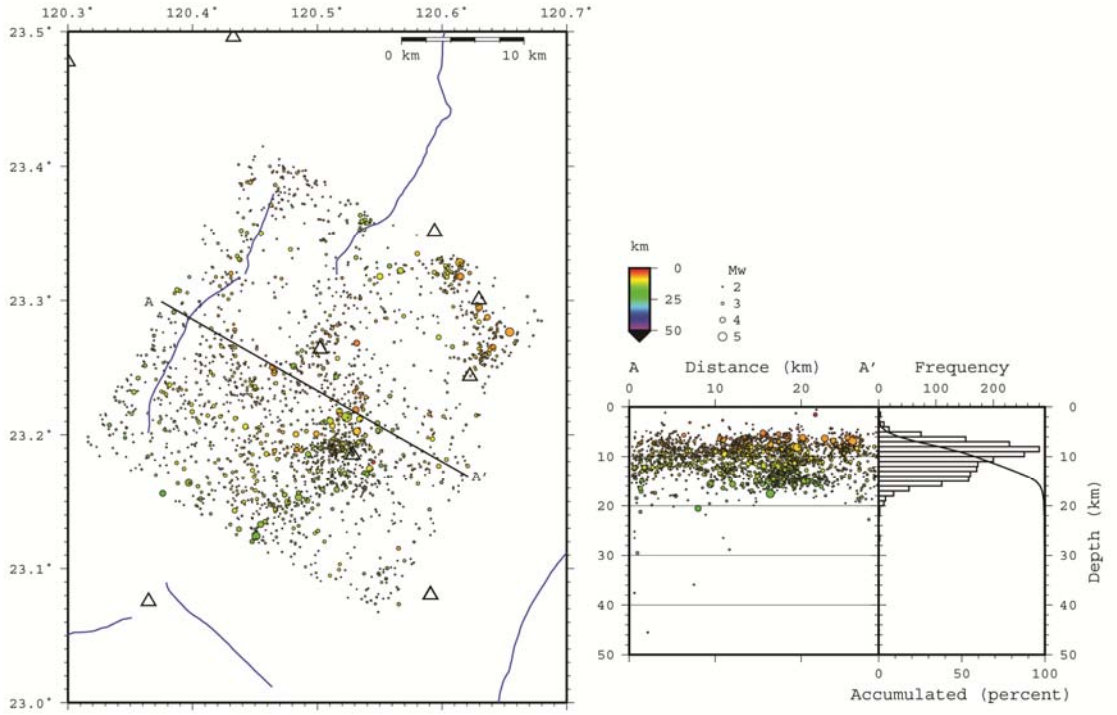


圖 3-1.11：木屐寮-六甲斷層 1991-2010 地震深度分布圖。

表 3-1.2：木屐寮-六甲斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

參考文獻	方法	調查斷層	傾角	深度
王宏霖, 2006	震測剖面	木屐寮斷層		
Suppe, 1980	地質平衡剖面	六甲斷層		基底滑脫面至少 8 公里
Hu and Sheen, 1989	牛山背斜軸部 NS-27 鑽井	六甲斷層	43E	
Hung et al.,1999	地質剖面	六甲斷層		基底滑脫面至少 8 公里
黃旭燦等，2004	地質平衡剖面	六甲斷層		基底滑脫面至少 5.5 公里
楊志成，2005	地質剖面	六甲斷層	30~45E	至少 4 公里
陳文山等，2006	鑽井剪切面	六甲斷層	近地表 30E	
本計畫推估	1991-2010 地震分布	六甲斷層		集中於 12 公里內

3. 斷層機制：木屐寮-六甲斷層系統屬於逆移斷層（Sun, 1970；石再添等，1986；張徽正等，1998；林啟文等，2000；楊志成等，2005）。
4. 短期滑移速率：參照表 3-1.4。
5. 長期滑移速率：
   (1) 木屐寮斷層：陳文山等（2010a）藉由由白河與六重溪場址之鑽探及定年，估算各井位置的抬升速率（圖 3-1.12），木屐寮斷層下盤的抬升速率為 3.4±1.0 mm/yr，上盤為 9.0±1.0 mm/yr，推算木屐寮斷層抬升率為 5.6±2.0 mm/yr。
   (2) 六甲斷層：楊志成等（2005）由六甲斷層上下盤岩層的對比與定年結果（圖 3-1.9），

來分析斷層上盤相對下盤的長期滑移速率，其中 C 層定年經樹輪校正為 9,559~10,147 yr，六甲斷層將 C 層抬升了 55 公尺，計算抬升速率為 5.4~5.8mm/yr。

(3) 六甲斷層：另陳文山（2006）整合野外露頭、鑽井及定年資料分析（圖 3-1.13），六甲斷層斷層帶中有 S1（主斷層）及 S2（分支斷層），在 S1 中觀察到約 1 萬年左右之地層垂直變位為 32 公尺；在 S2 中觀察到約 1 萬年左右之地層垂直變位為 35 公尺，將 S1 及 S2 之垂直滑移速率相加之後，得到六甲斷層的長期垂直滑移速率約為 6.33±0.06 mm/yr。

木屐寮-六甲斷層長期滑移速率各調查方法及斷層參數彙整於表 3-1.3。

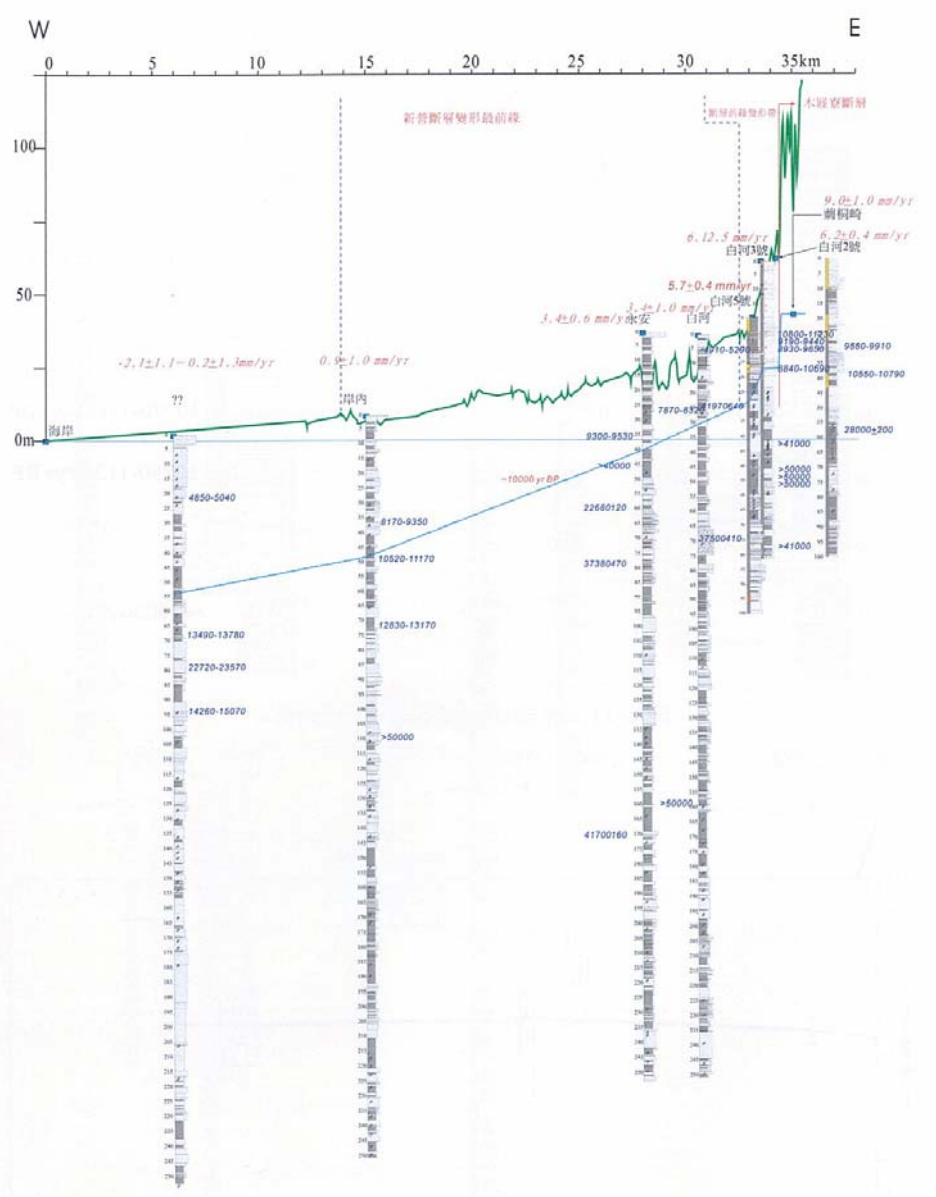


圖 3-1.12：海岸平原至麓山帶前緣鑽井柵狀剖面，藍色線為 10,000 年 BP 等時面（陳文山等，2010a）。

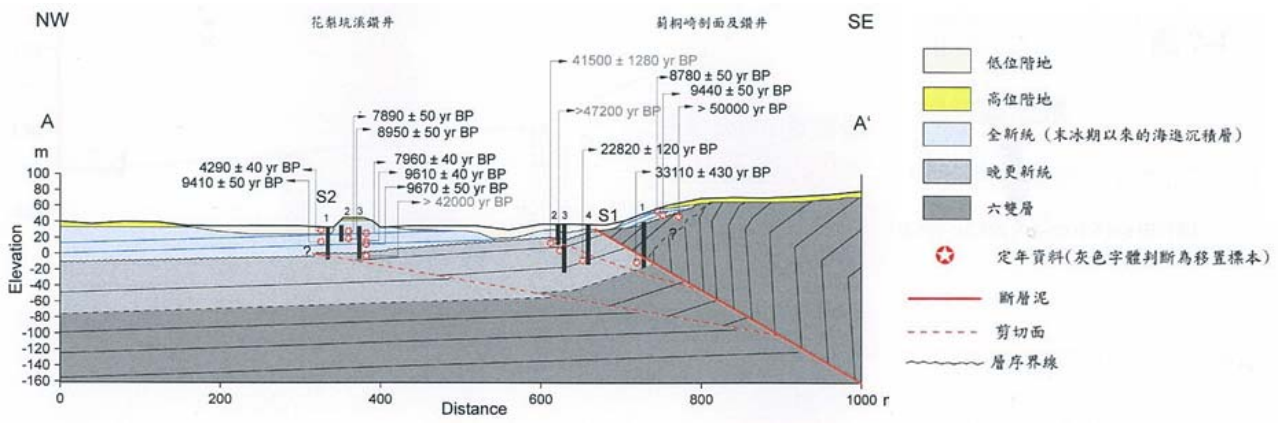


圖 3-1.13：莿桐崎與花梨坑溪鑽井剖面，（陳文山，2006）。

表 3-1.3：木屐寮-六甲斷層長期滑移速率相關文獻。

文獻	方法	位置	垂直滑移速率 (mm/yr)	淨滑移速率(mm/yr) (斷層面傾角 40 度)
陳文山等，2010a	白河與六重溪場址之鑽探及定年	木屐寮斷層	3.6~7.6	5.6~11.8
楊志成等，2005	六甲斷層野外露頭上下盤岩層錯動量及定年	六甲斷層	5.4~5.8	8.4~9.0
陳文山，2006	整合野外露頭、鑽井及定年資料	六甲斷層	6.3~6.4	9.8~10.0

6. 單一事件變位量：無槽溝古地震或是歷史地震可供參考，根據 Wells and Coppersmith（1994）之經驗公式計算結果，詳於表 3-1.4。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。本文提到之規模均為地震矩規模。
8. 最近一次活動時間：根據莿桐崎剖面的露頭，1 萬年來的沉積層有抬升－擾曲的現象（楊志成等，2005），推估一萬年內六甲斷層曾經活動過。在進行斷層活動潛勢評估時，本計畫假設其最後一次活動時間是未知，因此將採用 Poisson 模式進行評估。

彙整前人對於木屐寮斷層及六甲的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-1.4 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-1.4：木屐寮-六甲斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
木屐寮、六甲斷層	斷層分段與破裂事件	C：木屐寮六甲斷層系統	A：木屐寮斷層	遙測影像判釋、地形判釋、地表地質調查	Sun, 1970；張徽正等，1998；林啟文等，2000；林啟文等，2007；楊志成等，2005
			B：六甲斷層		
	長度 (km)	C：35	A：13		
			B：22		
	寬度 (km)	32.5		深度/sin 傾角 （0~6km 傾角 40 度， 6~12km 傾角 15 度）	
	破裂深度 (km)	基底滑脫面至少 8 公里		地質平衡剖面	Suppe, 1980
		基底滑脫面至少 8 公里		地質剖面	Hung et al.,1999
		基底滑脫面至少 5.5 公里		地質平衡剖面	黃旭燦等，2004
		至少 4 公里		地質剖面	楊志成等，2005
		集中於 12 公里內		1991-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積 (km^2)	C：1138	A：423	長度×寬度 （0~6km 傾角 40 度， 6~12km 傾角 15 度）	
			B：715		
	走向	A：北北東		地形、航照判釋	Sun, 1970；張徽正等，1998
		B：北北東轉南北走向		地形、航照判釋，地表地質調查	林啟文等，2007
	傾斜角度 (度)	43E		牛山背斜軸部 NS-27 鑽井對比地表露頭	Hu and Sheen, 1989
		30~45E		地質剖面	楊志成，2005
		近地表 30E		鑽井剪切面對比地表露頭	陳文山等，2006
	斷層機制	逆移斷層		地表地質調查、地物探勘瞭解地下地層錯動情形、鑽井調查、大地測量（GPS，水準測量）	Sun, 1970；張徽正等，1998；楊志成等，2005；饒瑞鈞等，2006
	短期滑移速率 (mm/yr)	平行斷層走向分量-1.8mm/yr（右移） 垂直斷層走向分量 2.4 mm/yr（壓縮） 高程方向抬升量為 6.8 mm/yr		(1999~2006)GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
		上盤有最大 12.5 mm/yr 的水準高程變化		2002~2009 橫跨六甲斷層之水準測線	饒瑞鈞等，2010

	長期滑移速率 (mm/yr)	木屐寮斷層：5.6±2.0(抬升)		藉由白河與六重溪場址之鑽探及定年，估算各井位置的抬升速率	陳文山等，2010a
		六甲斷層：5.4~5.8 mm/yr(抬升)		六甲斷層野外露頭上下盤岩層錯動量及定年	楊志成等，2005
		六甲斷層：6.33±0.06 mm/yr(抬升)		整合野外露頭、鑽井及定年資料	陳文山，2006
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	3.34		三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)	C：1.66	A：1.27 B：1.45	1log D = 0.29 Mw - 1.84（逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	特徵地震規模 (Mw)	A：6.7　B：6.9　C：7.1		Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.6　B：6.9　C：7.1		$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	100-200		特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-1.21）	本計畫推估
	最近一次活動時間	1 萬年內曾經活動過		鑽井定年結果	楊志成等，2005

3-1-2 木屐寮-六甲斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估木屐寮-六甲斷層系統之破裂，可分為 3 種破裂事件來探討，A 為木屐寮斷層破裂，B 為六甲斷層破裂，C 為木屐寮+六甲斷層破裂，本計畫認為木屐寮斷層與六甲斷層活動性及幾何形貌均類似，兩者同時破裂之可能性高於分段破裂之可能性，因此給予整段破裂較高之權重，權重分配為 A（0.25）、B（0.25）、C（0.5）如圖 3-1.14 所示。

木屐寮-六甲斷層之傾角及破裂深度，根據所蒐集到之震測剖面、平衡剖面及地震深度分布等資料，本計畫認為傾角可採用雙傾角方式以符合斷層面斷坡連接基底滑脫面之情形，權重分配為「0-6 公里 35 度，6 公里以下 15 度」(0.3)、「0-6 公里 40 度，6 公里以下 15 度」（0.4）、「0-6 公里 45 度，6 公里以下 15 度」(0.3)，破裂深度權重為 10 公里（0.2）、12 公里（0.6）、14 公里（0.2）。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-1.5 所示為利用邏輯樹中值所求得之各破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

木屐寮-六甲斷層之滑移速率，上節中提到主要是利用鑽井柵狀剖面計算層位落差，或是推估野外露頭上下盤岩層錯動量及定年，計算地層垂直滑移速率，假設斷層為逆斷層滑動，將垂直滑移速率以 40 度換算至斷層面之長期滑移速率，如表 3-1.3 所示，可得到長期滑移速率範圍，本計畫設定邏輯樹下限為各調查方式之下限值平均= (5.6+8.4+9.8)/3 =7.9；邏輯樹上限為各調查方式之上限值平均= (11.8+9.0+10.0)/3 =10.3；邏輯樹中值則採用(7.9+10.3)/2 =9.1。權重分配為 7.9（0.3），9.1（0.4），10.3（0.3）。

木屐寮-六甲斷層各節點權重的分配詳如圖 3-1.15 所示。

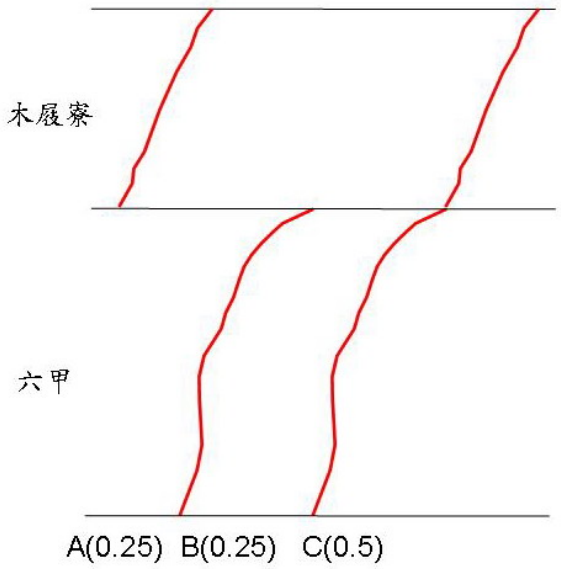


圖 3-1.14：木屐寮-六甲斷層之破裂模式及權重分配。

表 3-1.5：木屐寮-六甲斷層系統各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角(度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
							-σ	中值	+σ	
木屐寮斷層	A	13	12	32.5	0~6km：40，6~12km：15	423	6.4	6.7	6.9	6.6
六甲斷層	B	22	12	32.5	0~6km：40，6~12km：15	715	6.6	6.9	7.1	6.9
木屐寮-六甲斷層系統	C	35	12	32.5	0~6km：40，6~12km：15	1138	6.8	7.1	7.3	7.1
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

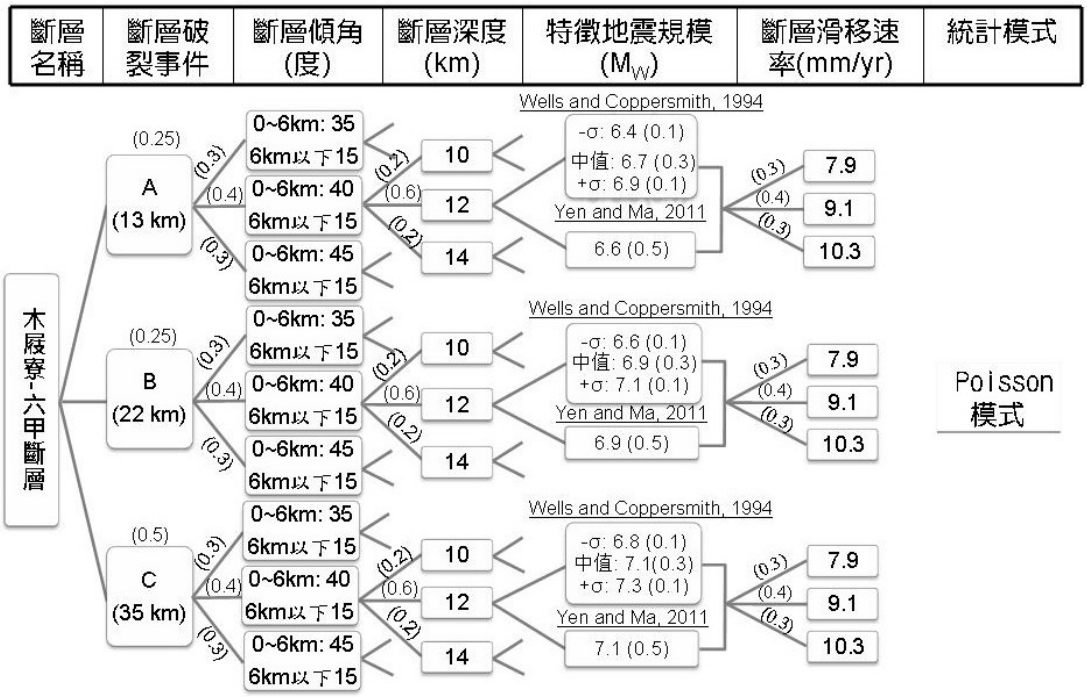


圖 3-1.15：木屐寮-六甲斷層系統邏輯樹。

3-1-3 木屐寮-六甲斷層特徵地震模式

木屐寮-六甲斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式（詳附錄 3-1）得到一地震復發間隔時間，圖 3-1.16~圖 3-1.18 為 3 個破裂事件取邏輯樹傾角及深度中間值之特徵地震模式分布情形。

圖 3-1.15 之木屐寮-六甲斷層邏輯樹可得到 324 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-1.19 為 3 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 6.6 之權重最高，6.7 次之；破裂模式 B 以規模 6.9 之權重最高，6.8 次之；破裂模式 C 以規模 7.1 之權重最高，7.0 及 7.2 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-1.20 為 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，3 種破裂模式在地震復發間隔時間 100 年~200 年間均有較高之權重。

將 3 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-1.21（a）之木屐寮-六甲斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-1.21（b）之木屐寮-六甲斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

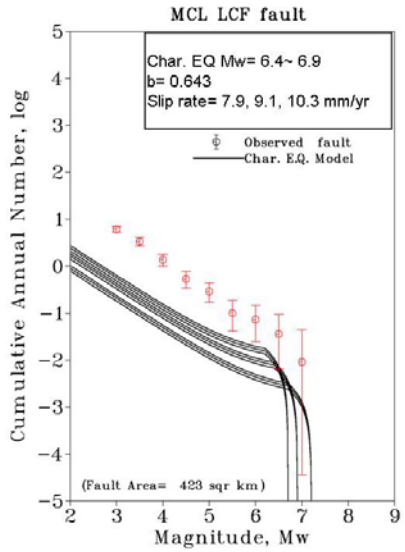


圖 3-1.16：A 事件特徵地震模式。

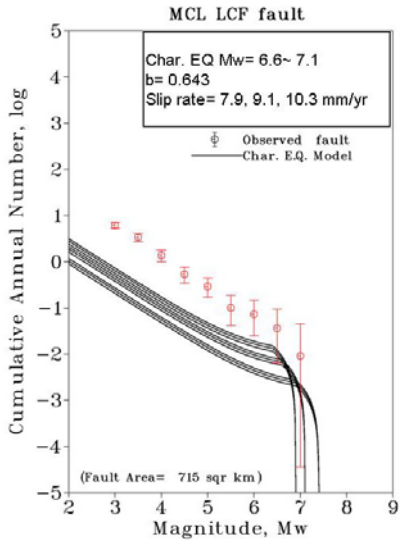


圖 3-1.17：B 事件特徵地震模式。

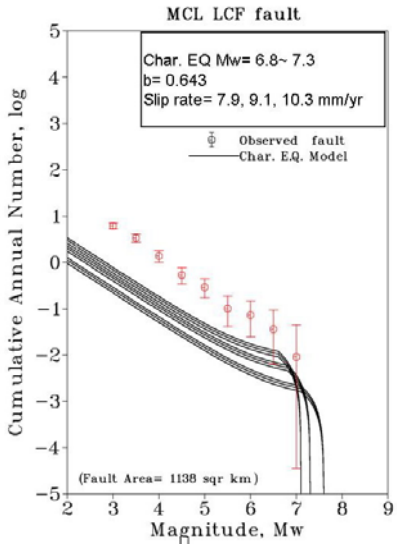


圖 3-1.18：C 事件特徵地震模式。

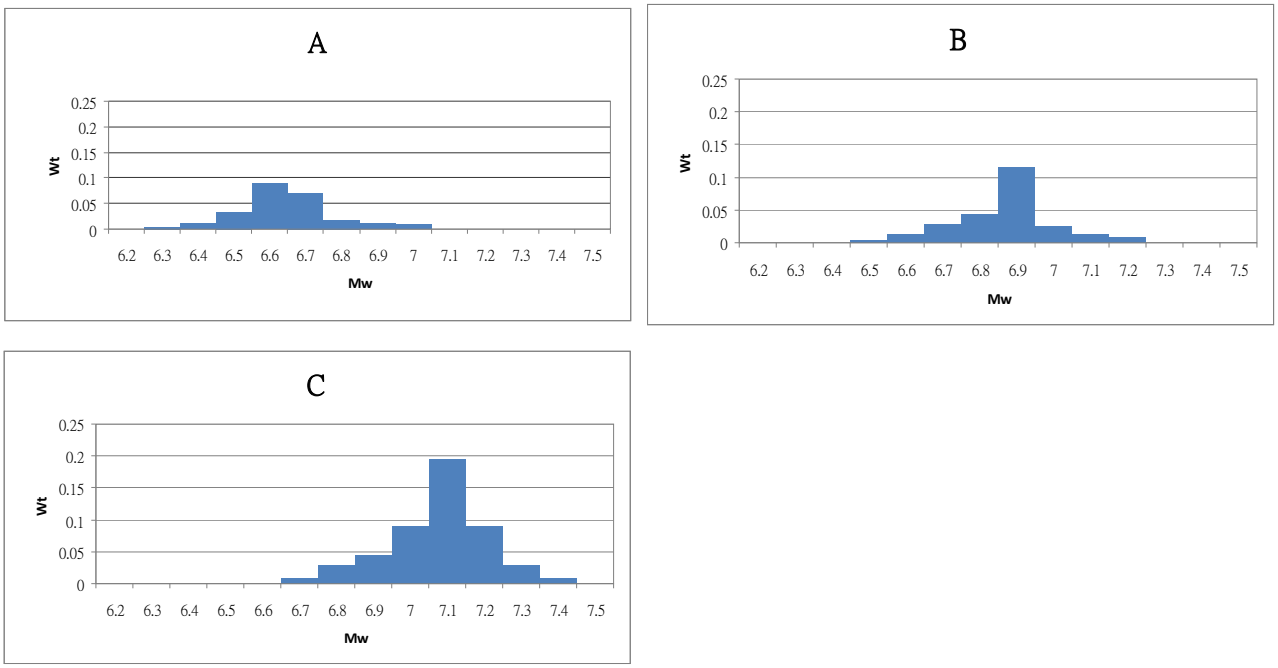


圖 3-1.19：木屐寮-六甲斷層 3 種破裂事件之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

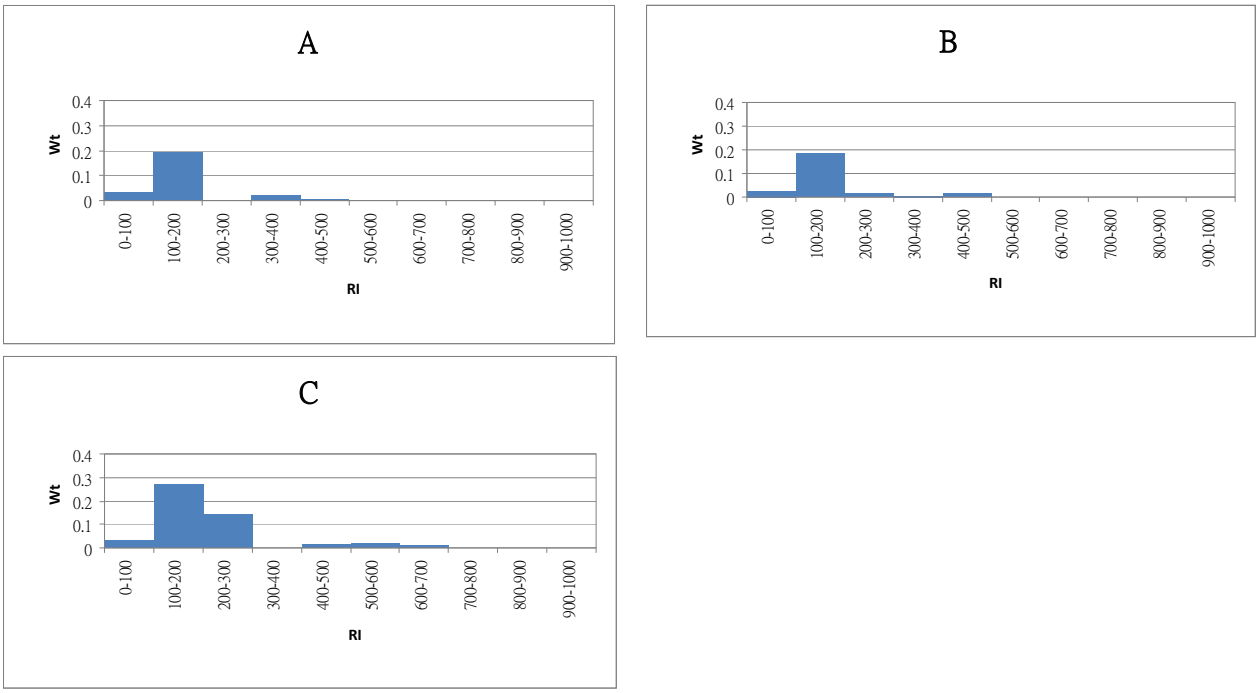


圖 3-1.20：木屐寮-六甲斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

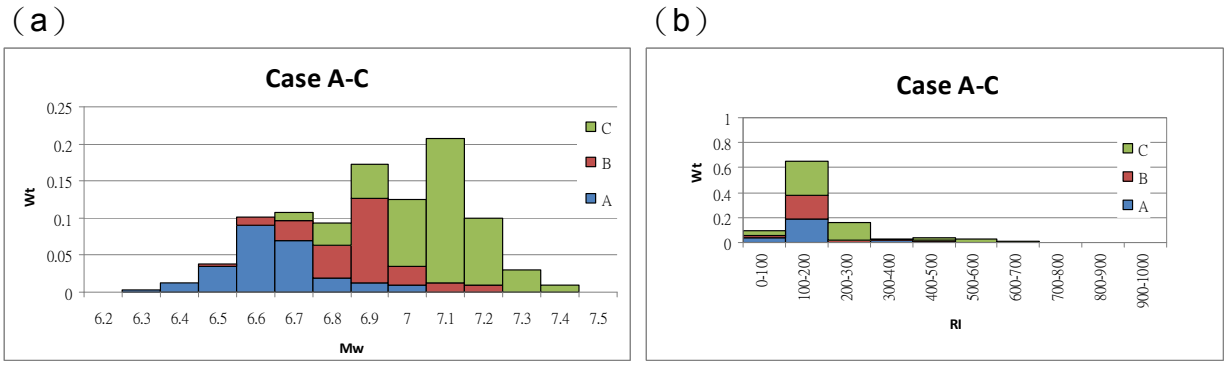


圖 3-1.21：（a）木屐寮-六甲斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）木屐寮-六甲斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-1-4 木屐寮-六甲斷層發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式（詳附錄 3-1）估算木屐寮-六甲斷層斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，木屐寮-六甲斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-1.6 為木屐寮-六甲斷層 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.3~7.4 之機率為 17.3%、26.9%及 45.7%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 16.7%、26.1%及 44.5%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 6.2%、9.9%及 17.6%。

表 3-1.6：木屐寮-六甲斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.3 ≦ M ≦7.4	17.3%	26.9%	45.7%
M ≧ 6.5	16.7%	26.1%	44.5%
M ≧ 7.0	6.2%	9.9%	17.6%

3-2 新化斷層

3-2-1 新化斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：斷層長度與分段：地質調查所（林啟文等，2007）劃設之新化斷層總長度約 6 公里（張麗旭等，1947），斷層自台南縣新化鎮那拔里向西延伸至北勢里，為東北東走向的右移斷層，於 1946 年 12 月 5 日發生芮氏規模 6.3 的地震（張麗旭等，1947）（圖 3-2.1、圖 3-2.2）。Bonilla（1975，1977）認為 1946 年地表破裂處向西南方延伸方向，約有 6 公里的雁行排列破隙與撓曲現象，且有少許垂直方向的變位量；此外，中油繪製的構造等高線圖中，在新化鎮西北方有斷層 E 及 G（Sun, 1964）（圖 3-2.3），其中，斷層 E 位置與 1946 年地表破裂西南延伸的裂隙位置一致，因此研判新化斷層可能向西延伸至台南台地北邊，斷層總長達 12 公里。此外，本計畫於訪談中，陳文山認為新化斷層亦可能繼續向西延伸至海岸附近，總長度有 24 公里（圖 3-2.4）。

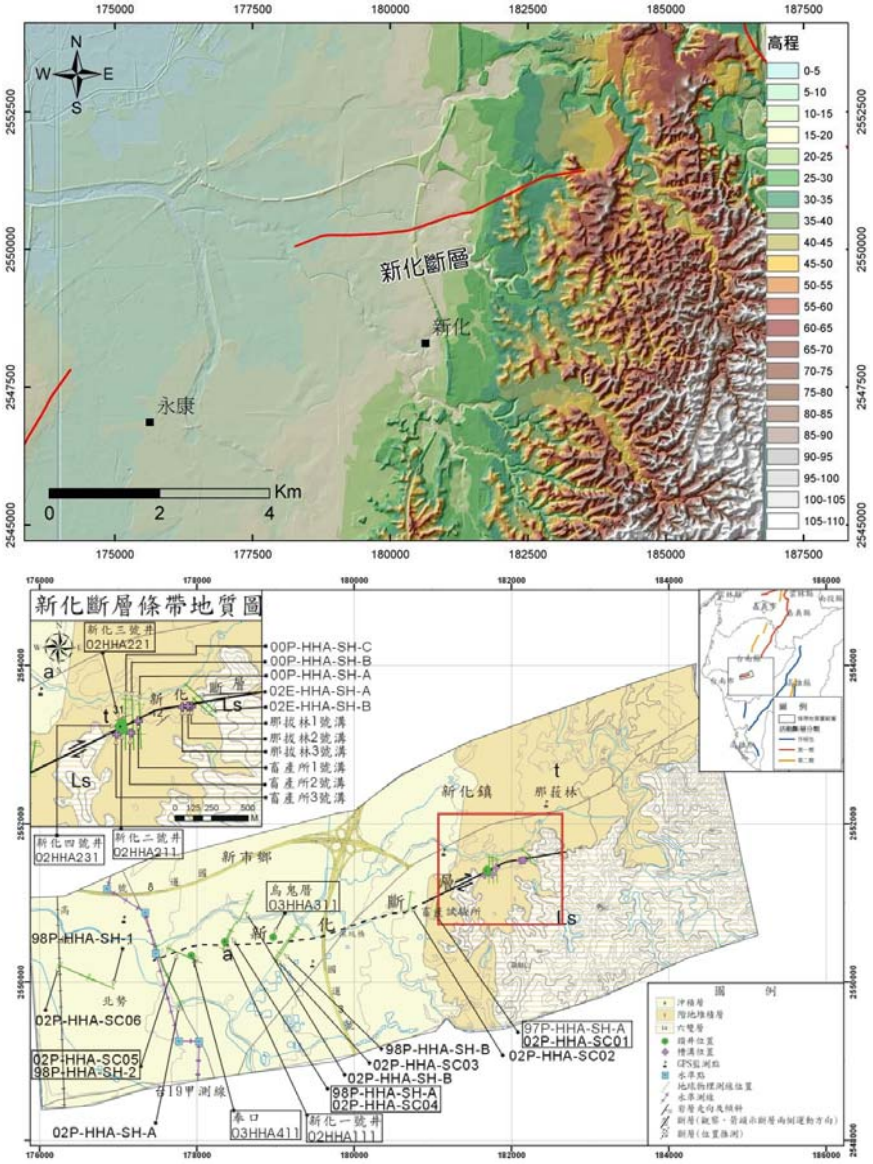


圖 3-2.1：新化斷層地形圖與條帶地質圖（林啟文等，2007）。

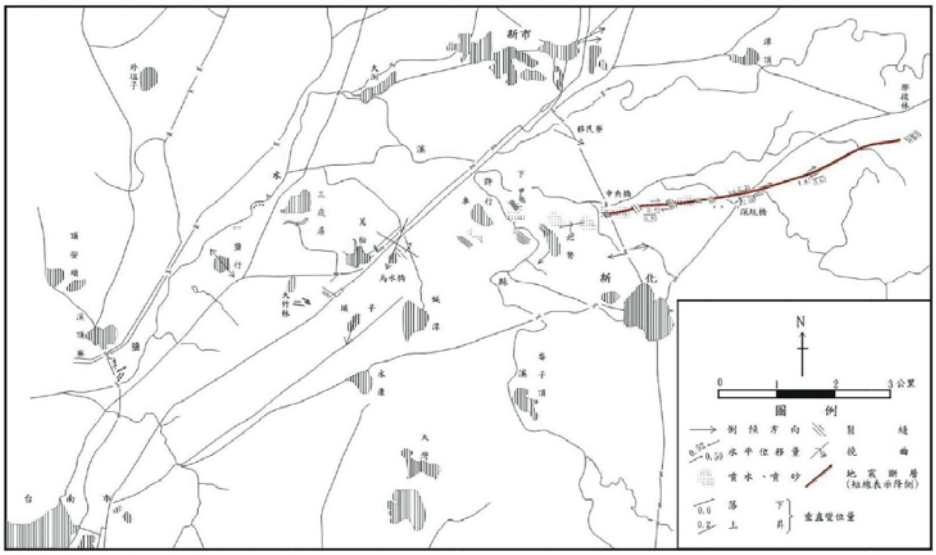


圖 3-2.2：1946 年地表破裂調查（張麗旭等，1947）。

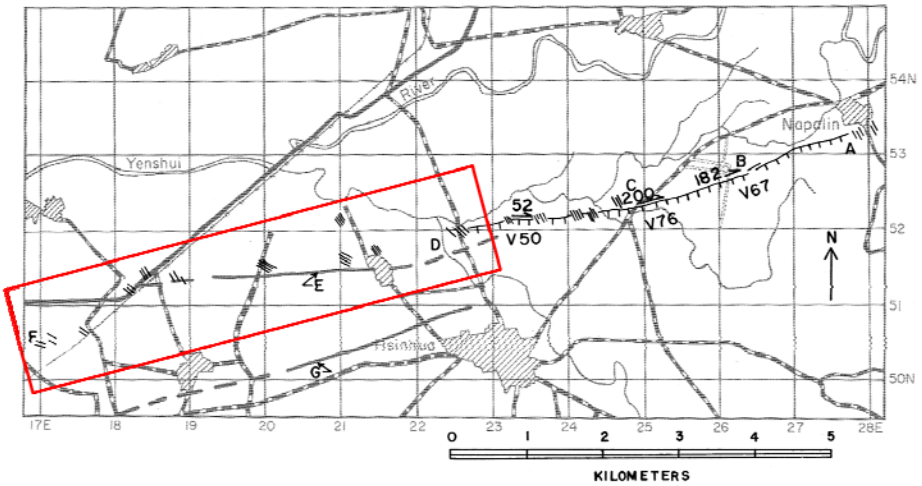


圖 3-2.3：西部延伸段裂隙分布與 E 斷層（E 箭頭所指之黑線）（Bonilla, 1975）。

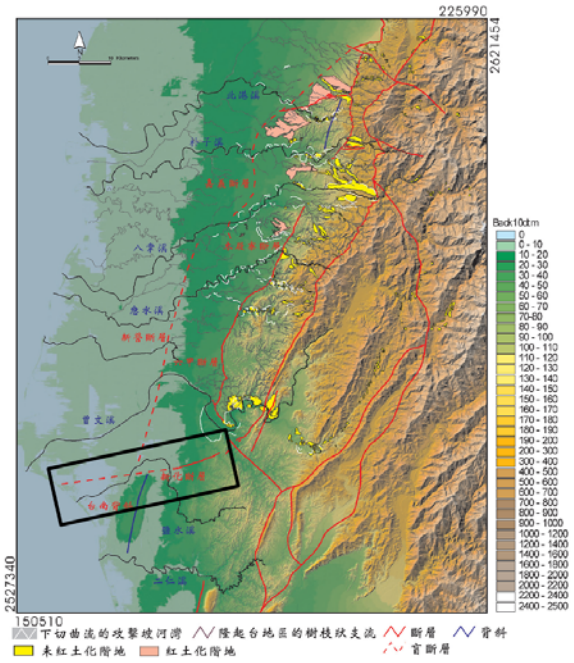


圖 3-2.4：新化斷層延伸位置（陳文山等，2004b）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 地質調查所（林啟文等，2007）在新化鎮台南農業改良場內，有 3 口跨越斷層排列的排鑽，新化 2 號至 4 號井（陳文山等，2011）。3 號井由下至上具有密集的剪切構造，4 號井中段以下也有密集的剪切構造，2 號井岩芯中不具任何剪切構造，3 口井皆未鑽遇主斷層，研判斷層可能通過 2 號與 4 號井之間，由於兩口井距離相當接近，因此推測斷層傾角應很陡，而剪切帶寬度至少有 50 公尺（圖 3-2.5）。

(2) 淺層震測資料結果（圖 3-2.6）顯示，新化斷層淺部為寬廣的剪切帶，剪切帶內岩層被高角度不連續面截切，為開花狀構造。剪切帶寬度在斷層東部較窄，不連續帶有向下收斂的現象；西部剪切帶較寬，收斂現象逐漸消失，至北勢附近斷層仍有向西延伸的可能（石瑞銓等，1998，2002；黃勝群等，2004）。

(3) 黃旭燦等（2004）平衡剖面顯示，新化斷層為一反向之逆衝斷層，斷層於淺處呈高角度約 70 度，深處呈低角度約 17 度，斷層向西沒入相當於鳥嘴層頂部的滑離面，深度約 3.5 公里（圖 3-2.7）。

(4) 由 1973-2010 地震深度分布圖顯示此區域地震主要分布於 18 公里以內（圖 3-2.8），1946 年新化地震經鄭世楠等（1999）利用各測站 S-P 時間（氣象局館藏資料)重新定位後，結果顯示震央位於 23.025°N，120.325°E，震源深度 14（±0.5）公里，地震規模 Mw 為 6.3；其震源機制由鄭世楠等（1999）綜合斷層露頭與地表最大水平振動方向推估，斷層走向為 N75°E，傾角 90 度，滑移角-151，最大壓應力（P）軸呈西北─東南向（圖 3-2.8）。1736 年台南地震的災害分布與震度分布情形，與 1946 年新化地震相當吻合，地震規模也與 1946 年地震相當，因此推測 1736 年地震與新化斷層有密切關連（鄭世楠等整理），鄭世楠參考 1946 年地震參數進行重定位，震源位於 23.070°N，120.330°E，深度 5.0 公里，M_L=6.1，M_W=6.1（圖 3-2.8）。

以上斷層幾何相關研究資料彙整於表 3-2.1。此外，於專家諮詢會議中，李錫堤認為新化斷層底部最深至台南盲斷層，深度約 15 公里。

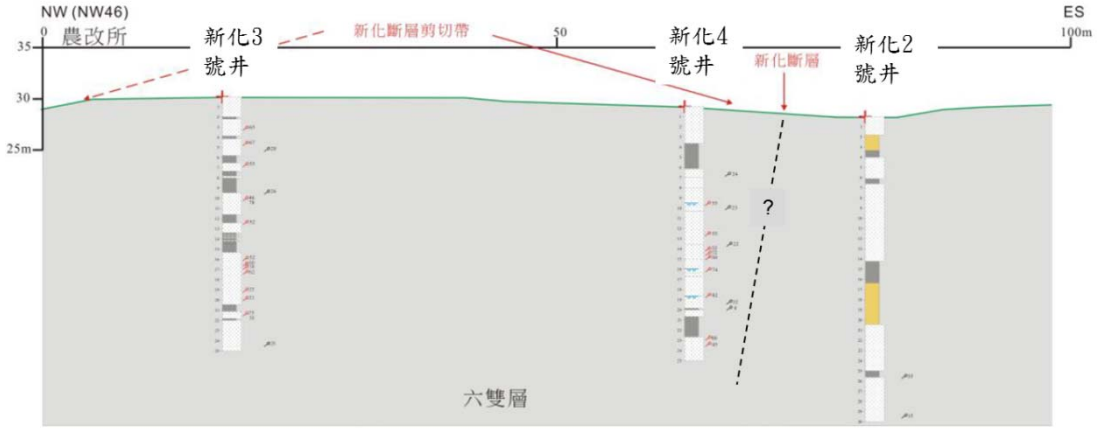


圖 3-2.5：農業改良場內鑽井資料（修改自陳文山等，2011）。

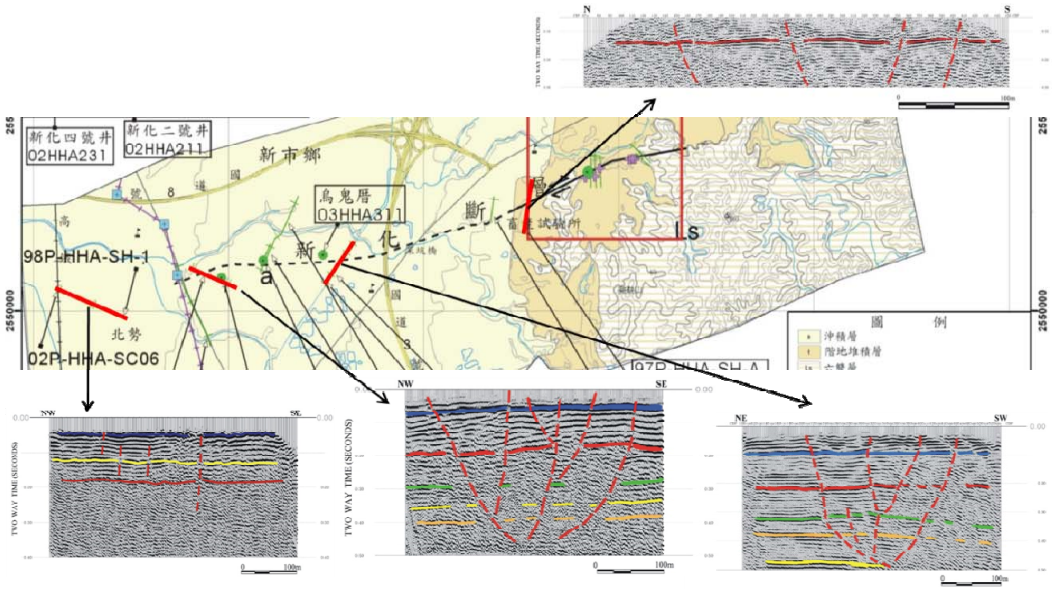


圖 3-2.6：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007）。

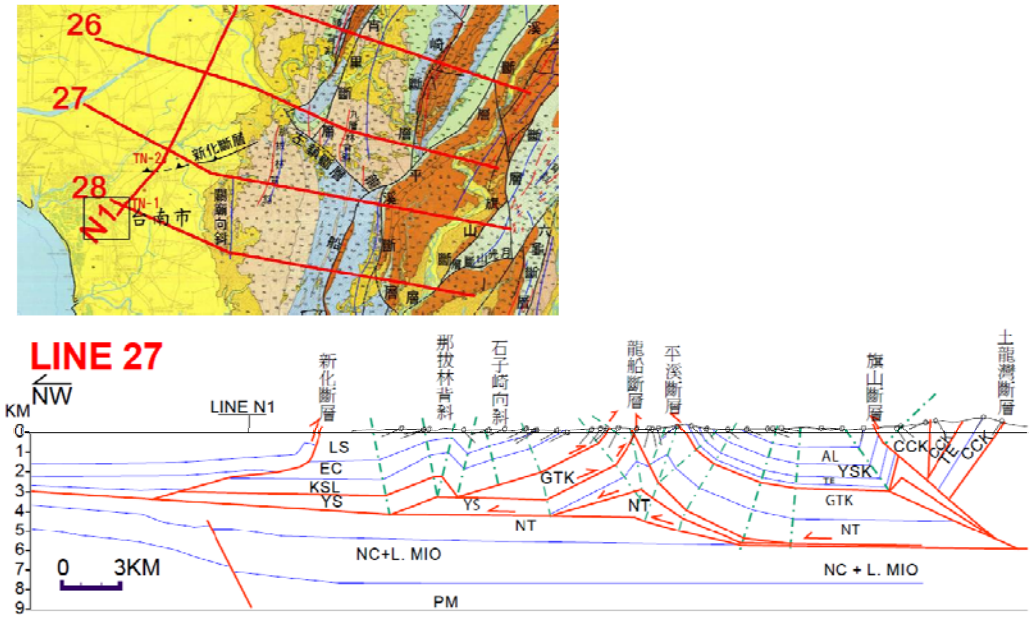


圖 3-2.7：新化斷層平衡剖面（黃旭燦等，2004）。

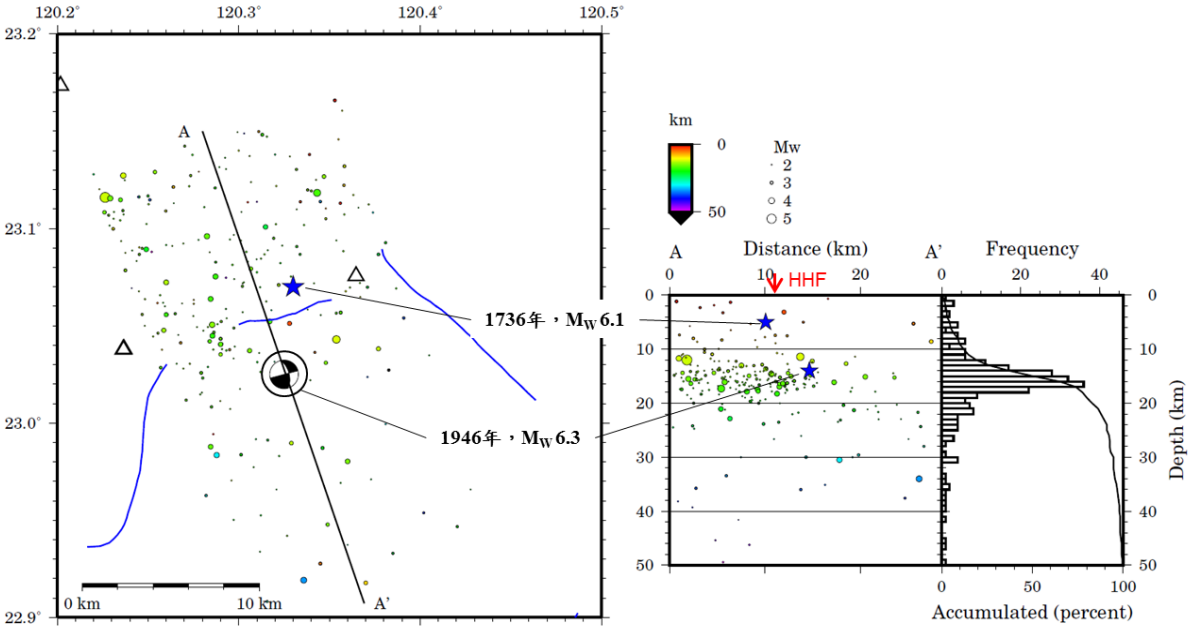


圖 3-2.8：1973-2010 年地震深度分布圖與歷史地震位置。

表 3-2.1：新化斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度
陳文山等，2011	排鑽	高角度	--
石瑞銓等，1998，2002；黃勝群等，2004	淺層震測	開花狀構造	--
黃旭燦等，2004	平衡剖面	--	滑離面約 3.5 公里
鄭世楠等人	1736 歷史地震重定位	--	5 公里
鄭世楠等，1999	1946 歷史地震重定位	--	14 公里
本計畫推估	1973-2010 地震分布	--	12-18 公里

3. 斷層機制：張麗旭等（1947）在地震後的調查顯示斷層西北側向東移動並抬升，東南側向西移動並下降。最大變位出現在現今的深坑橋北側公路上，水平變位 2 公尺，垂直變位 0.76 公尺，此處斷層面走向略呈 N80E，面上有斷層擦痕，擦痕向西傾斜 28~30 度，顯示斷層為帶垂直分量的右移斷層。
4. 短期滑移速率：參照表 3-2.2。
5. 長期滑移速率：本計畫採用塊體模型推估的滑移虧損率作為邏輯樹參數依據。
6. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。
7. 單一事件變位量：1946 年地震最大變位量出現在深坑橋北側公路上，水平變位 2 公尺，垂直變位 0.76 公尺（張麗旭等，1947）。
8. 最近一次活動時間：最近一次活動時間：1946 年 12 月 5 日新化地震，芮氏規模 6.3。

彙整前人對於新化斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-2.2 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-2.2：新化斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
新化斷層	斷層分段與破裂事件	A：新化斷層與西部延伸段 B：新化斷層延伸至海岸附近	歷史地震紀錄、地表地形	林啟文等，2007；張麗旭等，1947；Bonilla, 1975, 1977；陳文山等，2004b
	長度 (km)	A：12 km　B：24 km		
	寬度 (km)	12.7	深度/sin 傾角 （以深度 12.5 公里，傾角 80 度計算）	
	破裂深度 (km)	基底滑脫面至少 3.5 公里	平衡剖面	黃旭燦等，2004
		5 公里	1736 歷史地震	鄭世楠等人整理
		14 公里	1946 歷史地震重定位	鄭世楠等，1999
		12-18 公里	1973-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積 (km^2)	A：152.4　B：304.8	長度×寬度	
	走向	東北偏東走向	歷史地震紀錄、地表地形	林啟文等，2007；張麗旭等，1947；Bonilla, 1975, 1977
	傾斜角度 (度)	高角度	鑽井資料	陳文山等，2011
		淺部呈開花狀構造	淺層震測	石瑞銓等，1998，2002；黃勝群等，2004
	斷層機制	帶垂直分量的右移斷層	斷層擦痕、歷史地震資料	張麗旭等，1947
	短期滑移速率 (mm/yr)	跨斷層高程方向變化速率不明顯	台 19 甲_善化至關廟水準測量	饒瑞鈞等，2010
		平行斷層走向分量-9.7 mm/yr（右移） 垂直斷層走向分量 0.4 mm/yr（壓縮） 高程方向抬升量 2.8 mm/yr	(1999~2006)GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
	長期滑移速率 (mm/yr)	斷層兩側垂直變動速率並無太大不同	鑽井資料	陳文山等，2011
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	2.72	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)	最大水平變位量 2 公尺，垂直變位量 0.76 公尺	1946 年歷史地震	張麗旭等，1947
	最大可能地震規模	A：6.2　B：6.5	Mw =3.98+1.02 log A σ=0.23 （平移斷層）	Wells and Coppersmith, 1994

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
	(M_W)	A：6.2　B：6.5	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
		1946 年台南地震 Mw　6.3	歷史地震紀錄	張麗旭等，1947；鄭世楠等整理；鄭世楠等，1999
	地震復發間隔 (年)	100-200	特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-2.15 圖 3-3.14）	本計畫推估
		觀察到 3 期地震，1946 年、1865-1690 yr BP、9546-8644 yr BP	槽溝	陳文山等，2004a
		蔦松文化期（400~2000 yr BP）以來有 3 次。	那拔林槽溝	李錫堤等，2002
		台南層（約 2700 年）以來有 4 次	農改場槽溝	李錫堤等，2000
		1946 年台南地震、1736 年台南地震	歷史地震	鄭世楠等整理
	最近一次活動時間	西元 1946 年	歷史地震	張麗旭等，1947

3-2-2 新化斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

新化斷層之破裂模式，本計畫綜合張麗旭等（1947）1946 年地表破裂的調查與 Bonilla（1975）的看法，地表破裂確實度較高之長度為 6 公里，若加入西側有雁行排列破隙與撓曲的地區，本計畫稱為西部延伸段，則總長度有 12 公里。因 6 公里長度之破裂模式不足以產生大規模的地震，因此本計畫不評估此破裂模式。除了 Bonilla（1975）認為新化斷層應延伸至西部延伸段外，此破裂模式規模經本計畫評估可達 6.2，與 1946 年新化地震規模相近。本計畫也參考陳文山的建議，將新化斷層繼續向西延伸至海岸（本計畫稱為海岸延伸段），長度約 24 公里。因此本計畫針對新化斷層共評估兩種破裂模式，一為新化斷層與西部延伸段，權重為 0.6，另一為新化斷層至海岸延伸段，權重 0.4（圖 3-2.9）。

斷層傾角部分，由鑽井資料與震測結果顯示新化斷層為高傾角，呈開花狀構造，因此本計畫以走向滑移常見之傾角 70、80、90 作為邏輯樹數值，權重分別為 0.2、0.6、0.2。深度部分，雖然黃旭燦等（2004）認為新化斷層於深處沒入滑脫面，深度約 3.5 公里深，然而 1946 年地震震源深度達 14 公里，因此本計畫認為，新化斷層破裂應不只侷限於 3.5 公里深的滑離面上，而應考慮至 14 公里深，與當地背景地震發震深度（約 12~18 公里深）一致。於專家諮詢會議中，委員認為新化斷層深部被台南盲斷層截切，建議深度不宜超過 15 公里，根據委員建議，本計畫將深度由 12、15、18 調整為 10、12.5、15 公里，權重分別為 0.2、0.6、0.2。

新化斷層之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-2.3 所示為利用邏輯樹中值所求得之破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

新化斷層之長期滑移速率，雖有鑽井資料，然而，僅能得知斷層兩側抬升速率無明顯差異，且無法評估走向滑移斷層之水平向滑移速率（陳文山等，2011），因此本計畫參考塊體模型分析結果，新化斷層長期平均滑移速率為 6.27 mm/yr，滑移虧損率為 2.72 mm/yr，本計畫將邏輯樹滑移速率數值設定為 6.27 mm/yr（權重 0.5）、2.72 mm/yr（權重 0.5）。

新化斷層各節點權重的分配詳如圖 3-2.10 所示。

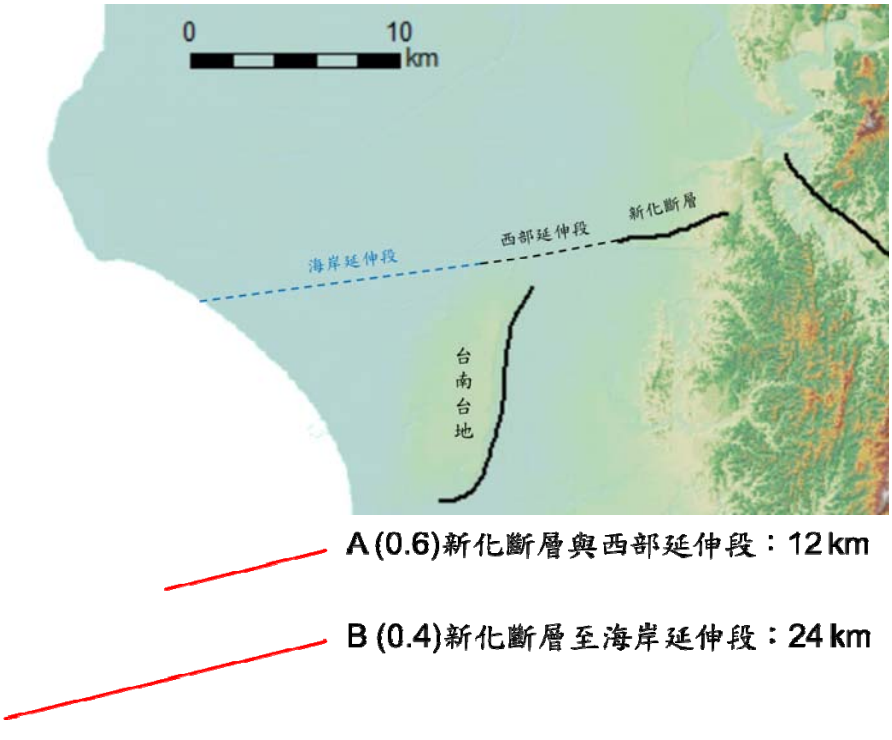


圖 3-2.9：新化斷層之破裂模式。

表 3-2.3：新化斷層之中值各破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
A	12	12.5	12.7	80	152	6.0	6.2	6.4	6.2
B	24	12.5	12.7	80	305	6.3	6.5	6.7	6.5
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

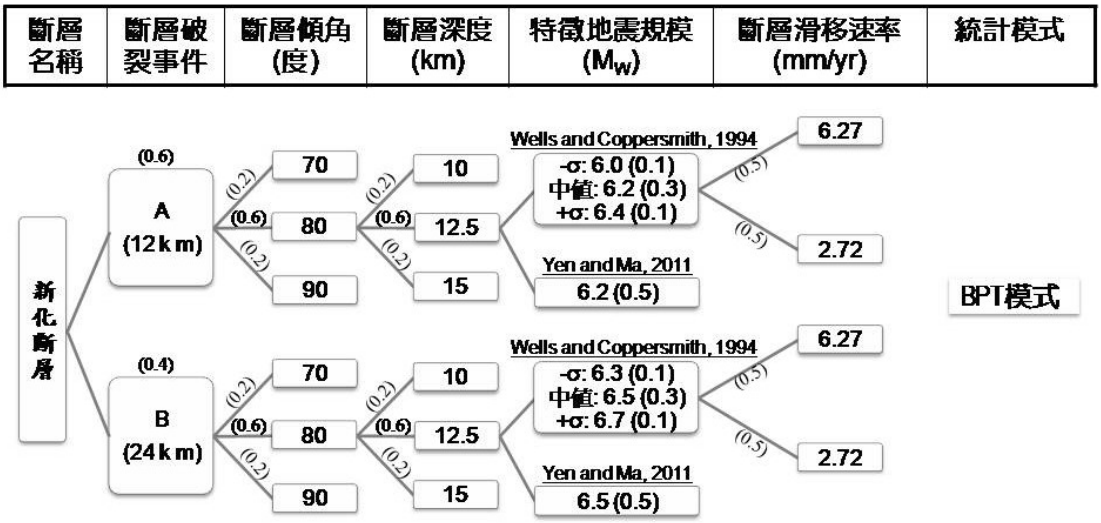


圖 3-2.10：新化斷層邏輯樹。

3-2-3 新化斷層特徵地震模式

新化斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式（詳附錄 3-1）得到一地震復發間隔時間，圖 3-2.11 至圖 3-2.12 為破裂事件取邏輯樹傾角及深度中間值之特徵地震模式分布情形。

圖 3-2.10 之新化斷層邏輯樹可得到 144 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-2.13 為 2 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 6.2 之權重最高，6.3 次之，破裂模式 B 以規模 6.6 之權重最高，6.5 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-2.14 為 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，破裂模式 A 在地震復發間隔時間 100 年~200 年間有較高之權重，而破裂模式 B 在地震復發間隔時間 100 年~200 年間有較高之權重。

將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-2.15（a）之新化斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-2.15（b）之新化斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

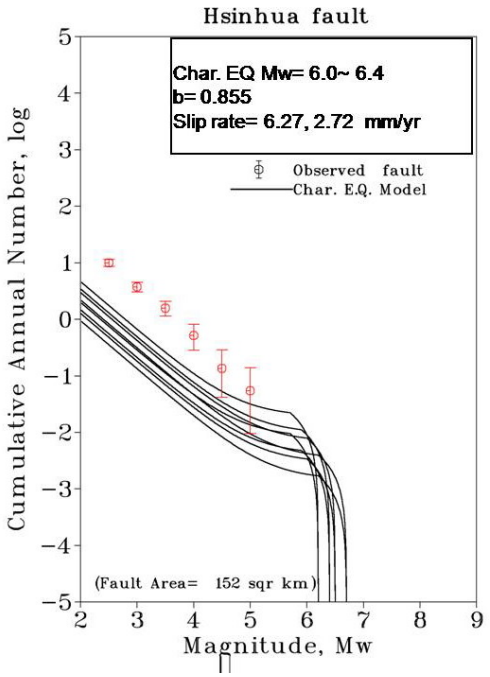


圖 3-2.11：A 事件之特徵地震模式。

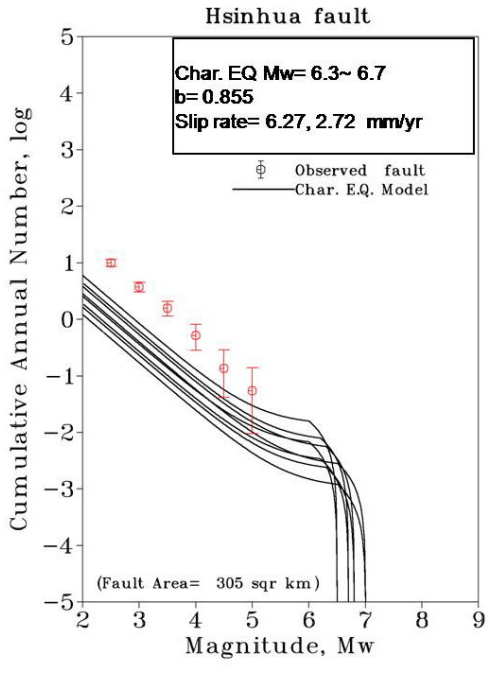


圖 3-2.12：B 事件之特徵地震模式。

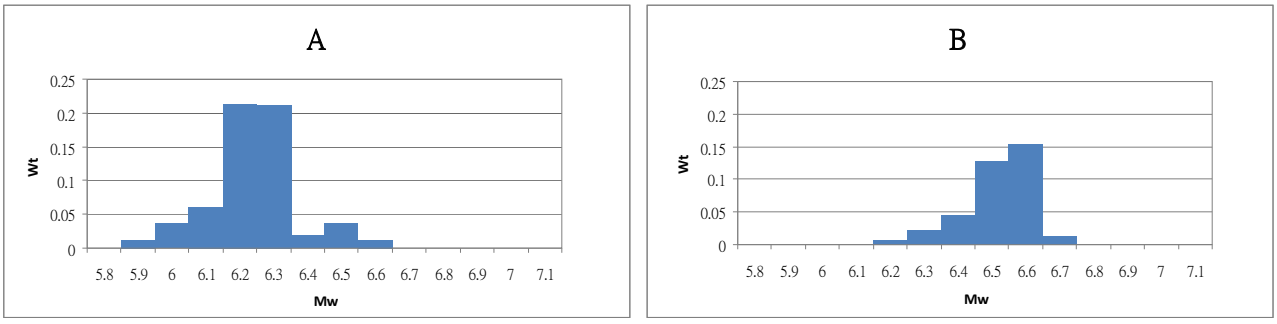


圖 3-2.13：新化斷層之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

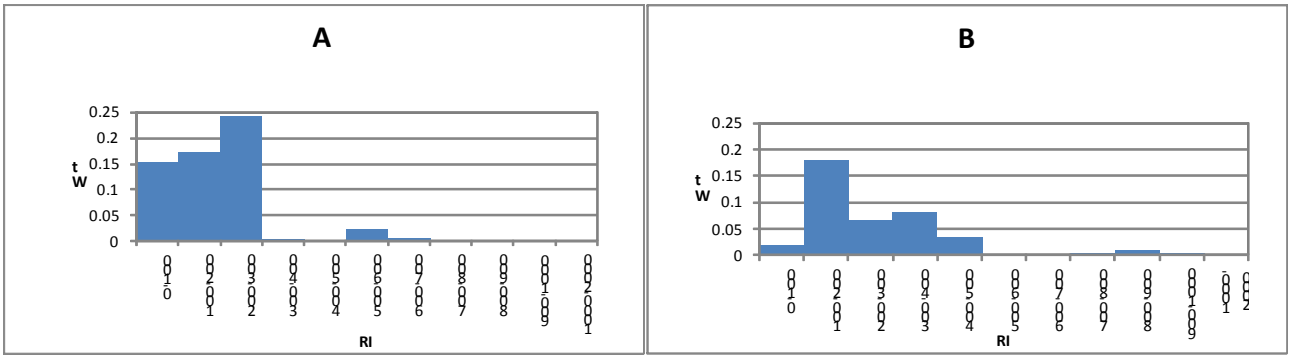
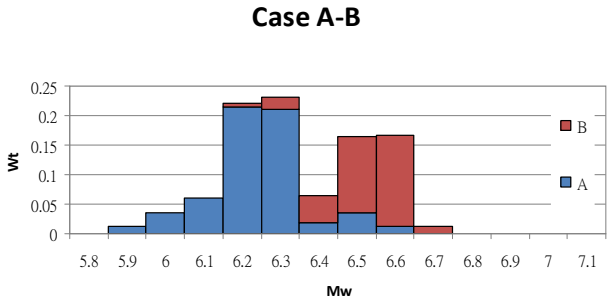


圖 3-2.14：新化斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

（a）



（b）

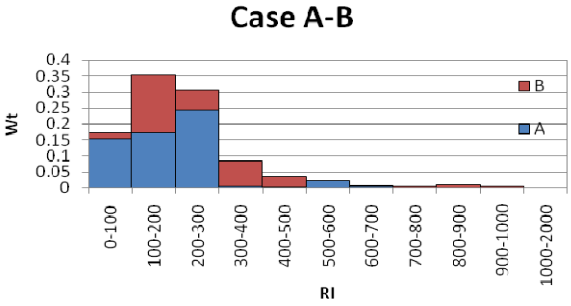


圖 3-2.15：（a）新化斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）新化斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-2-4 新化斷層發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式（詳附錄 3-1）估算新化斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，新化斷層最後一次發生時間為西元 1946 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 3-2.4 為新化斷層 BPT 模式評估之結果，自西元 2015 年以後，未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.9~6.9 之機率為 20.1%、30.9%及 51.2%，發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 3.3%、5.9%及 12.1%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.0%、0.0%及 0.0%。

表 3-2.4：新化斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	BPT	BPT	BPT
5.9 ≦ M ≦ 6.9	20.1%	30.9%	51.2%
M ≧ 6.5	3.3%	5.9%	12.1%
M ≧ 7.0	0.0%	0.0%	0.0%

3-3 後甲里斷層系統

3-3-1 後甲里斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

台南台地長軸為南北向，橢圓外形，台地東緣有一明顯的線形崖，崖的中段高約 30 公尺，孫習之（Sun, 1964）由航照判釋認為此線形崖為後甲里斷層之斷層崖，為一向西傾斜的逆衝斷層，由台南永康向南延伸至虎山（圖 3-3.1），長約 12 公里。近期的研究（林啟文等，2000）認為台南台地東緣存在著一條正在活動的後甲里斷層。

從近期的台南台地地殼變形量測中，多數學者認為後甲里斷層是屬於台南斷層之背衝斷層（Lacombe et al., 1999；饒瑞鈞等，2003；胡植慶等，2006；Huang et al., 2009），根據李錫堤等人（2001）槽溝開挖結果，也推論後甲里斷層為背扭褶皺或背衝斷層。

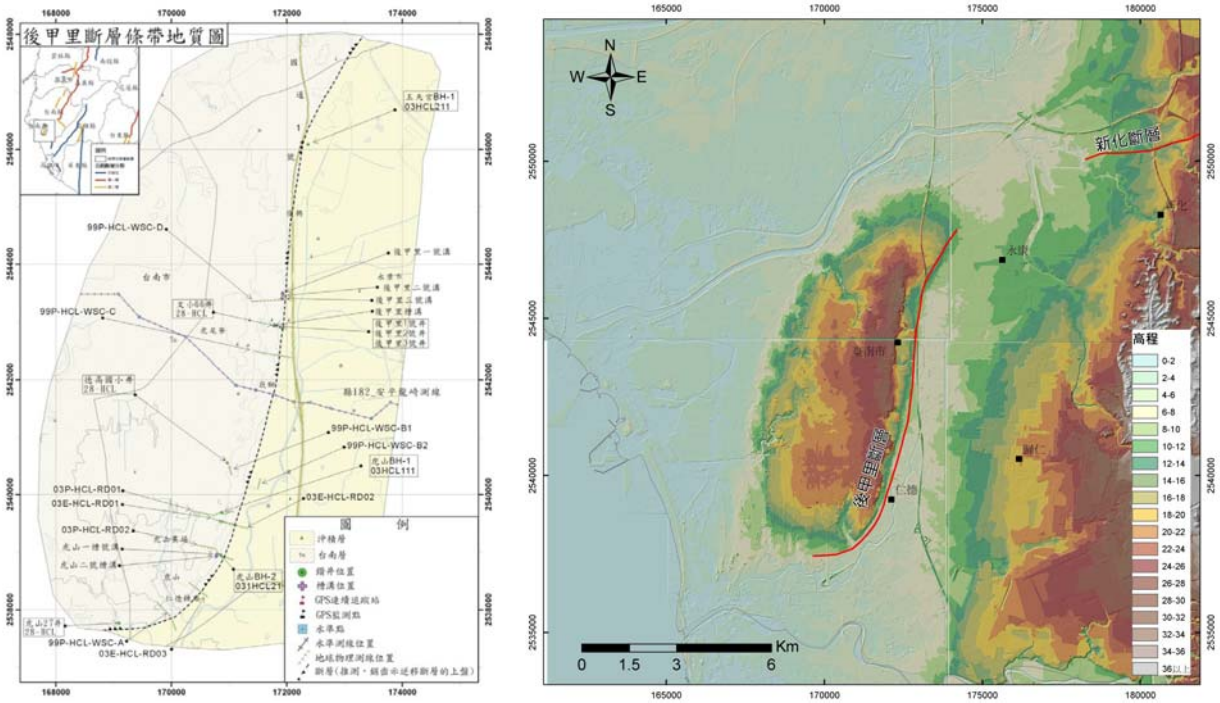


圖 3-3.1：左圖為後甲里斷層條帶地質圖（林啟文等，2007），右圖為台南台地數值地形模型。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：

(1) Lacombe et al.（1999）參考鑽井資料及震測資料描繪台南地區之地質剖面，其中後甲里斷層為西傾之背衝斷層，如圖 3-3.2，圖中顯示上部底脫面可達 4 公里，往東之底脫面可達 6 公里。

(2) 饒瑞鈞等（2003）參考 GPS 大地測量資料以及台南台地之地形，以彈性半空間錯位模型進行斷層幾何及運動模型之建立（圖 3-3.3），該模型認為台南台地下方存在一向東傾斜之台南斷層（TF，屬於盲斷層），後甲里斷層為台南斷層之背衝斷層，傾角向西 75 度，在深度 4 公里處即與台南斷層相連。

(3) 胡植慶等（2006）及 Huang et al.（2009）根據 D-InSAR 觀察台南台地 1996-2000 之地表變形，提出之地下構造模型大致與饒瑞鈞等（2003）之模型差異不大，認為台南台地是一組逆衝、背衝斷層所構成的上拱構造，然而其推測後甲里背衝斷層東

側有一分支，且斷層的傾角較淺（圖 3-3.4）。

(4) 由 1991-2010 地震深度分布圖顯示此區域地震主要集中於 14 公里以內（圖 3-3.5），圖 3-3.5 中地震深度剖面疊加 Lacombe et al.（1999）之地質剖面，認為台南台地西側的群震應該和後甲里斷層無關，而後甲里斷層東邊的中洲背斜及麓山帶地區地震則較為稀少。

後甲里斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-3.1。

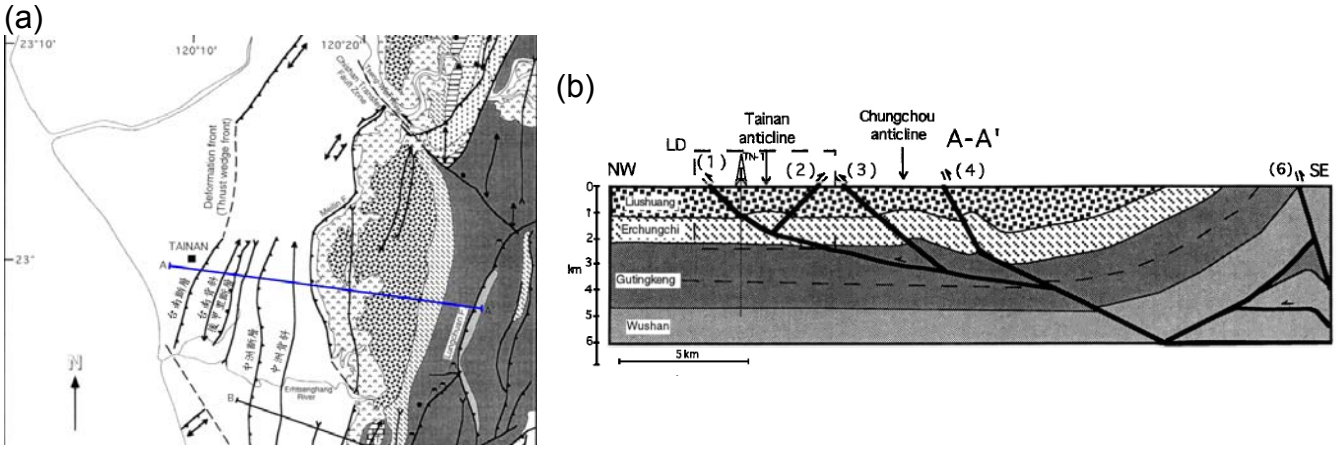


圖 3-3.2：（a）台南台地構造地質分布圖，圖中藍色線段為地質剖面 AA'位置（b）AA'地質剖面（Lacombe et al., 1999）。

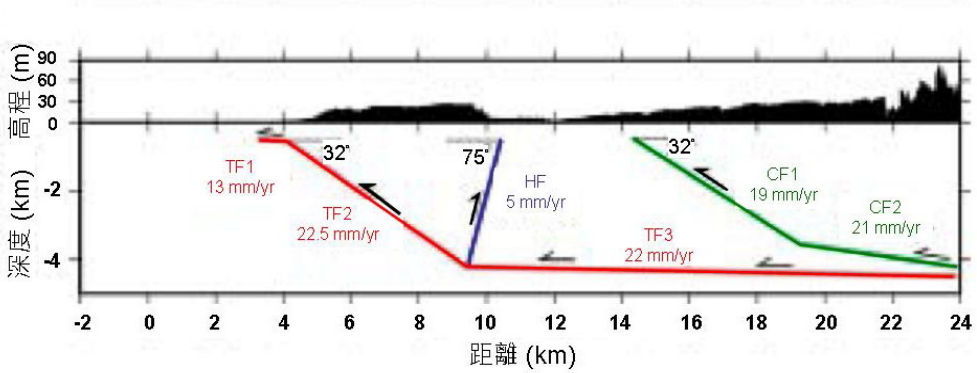


圖 3-3.3：參考台南地區大地測量資料建立之地下構造模型剖面圖（饒瑞鈞等，2003）。

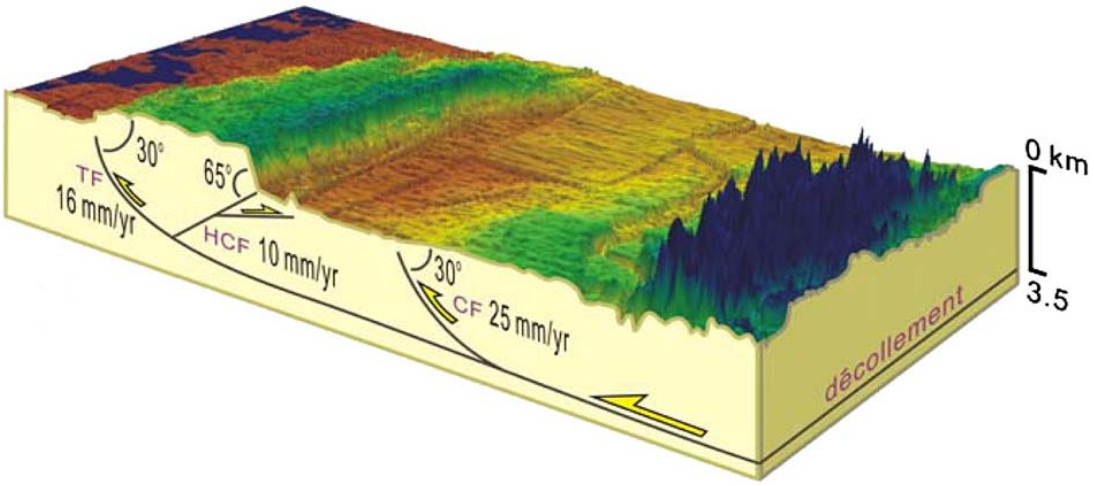


圖 3-3.4：台南地區地下構造模型（Huang et al., 2009）。

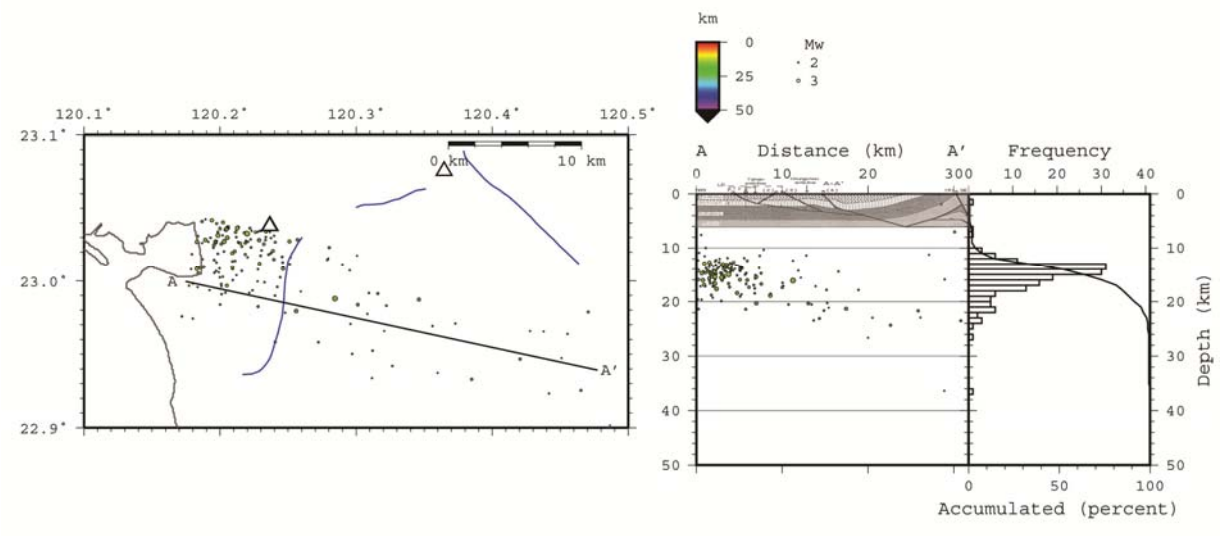


圖 3-3.5：後甲里斷層 1991-2010 地震深度分布圖。

表 3-3.1：後甲里斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

作者	方法	傾角	深度
Lacombe et al., 1999	參考鑽井資料及震測資料描繪台南地區之地質剖面		上部底脫面可達 4 公里，往東之底脫面可達6公里
饒瑞鈞等，2003	參考 GPS 資料以及台南台地之地形，進行斷層幾何及運動模型之建立	75W	至少 4 公里
胡植慶等，2006；Huang et al., 2009	根據 D-InSAR 之地表變形，推估地下構造模型	65W	至少 4 公里
本計畫	1991-2010 地震分布	--	14 公里內

3. 斷層機制：由跨斷層剖面速度場變化分析結果，1999~2006 年間後甲里斷層為為逆移形式兼具右移分量。
4. 短期滑移速率：後甲里斷層短期滑移速率各調查方法及斷層參數彙整於表 3-3.2。

表 3-3.2：後甲里斷層短期滑移速率各調查方法及斷層參數。

作者	方法	時間	短期滑移速率
Fruneau et al. (2001)	InSAR	1996-1998	抬升速率約為 16 mm/yr
Rau et al. (2003)	精密水準測量	2001-2003	台南台地平均抬升速率，相對於台南台地最西側的測站為 11-13 mm/yr，而位於東側之大灣低地則有約 2.5mm/yr 的下陷速率
Huang et al. (2009)	衛星影像 D-InSAR	1996-2000	台地上有平均 12.5mm/yr 之視衛星方向抬升速率
饒瑞鈞等（2006）	GPS 測量分析	1999~2006	平行斷層走向分量-4.3mm/yr(右移) 垂直斷層走向分量 7.3mm/yr(壓縮)
饒瑞鈞等（2006）	精密水準測量	2001~2006	在台南台地相對鄰近地區有約 15 公厘/年的垂直位移

5. 長期滑移速率：根據全新世海水面變化曲線及台南台地上之碳 14 定年，採樣位置詳如圖 3-3.6，其中台南台地之樣本以紅色實心三角形表示，大灣低地之樣本以藍色空心三角形表示。圖 3-3.8 之地殼變形速率曲線顯示，台南台地之長期抬升速率約為 4 mm/yr，然而位於後甲里斷層下盤之大灣低地長期抬升速率約為-1 mm/yr，推估後甲里斷層有 5 mm/yr 之相對位移速率（Chen and Liu, 2000）。

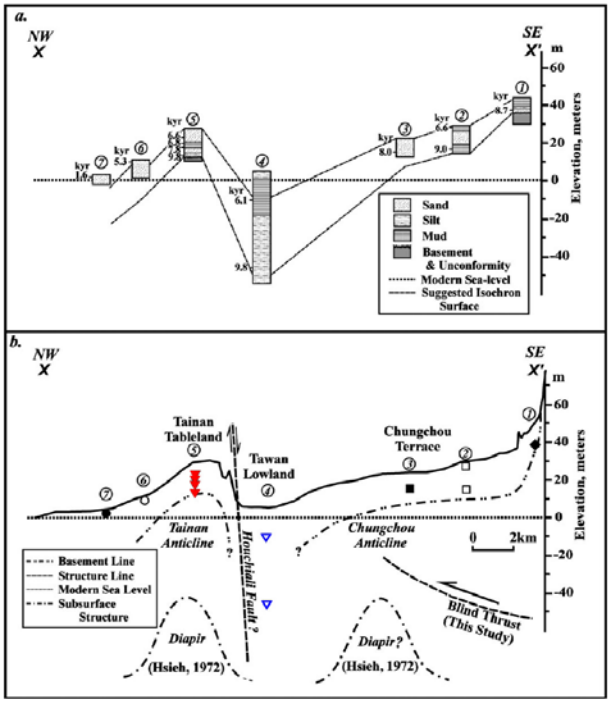


圖 3-3.6：（a）台南地區地層柱剖面，定年資料附於地層柱左側，點線為現今海平面高度，兩條虛線則分別為六千年前及一萬年前之等時線。（b）相同之剖面位置，實線呈現了實際地形高度，圖中之圓形、三角形及正方形符號則為地下樣本之位置及高度，同時也呈現先前學者提到之地殼變形可能之機制，例如後甲里斷層以及泥貫入體（Diapir）（Chen and Liu, 2000）。

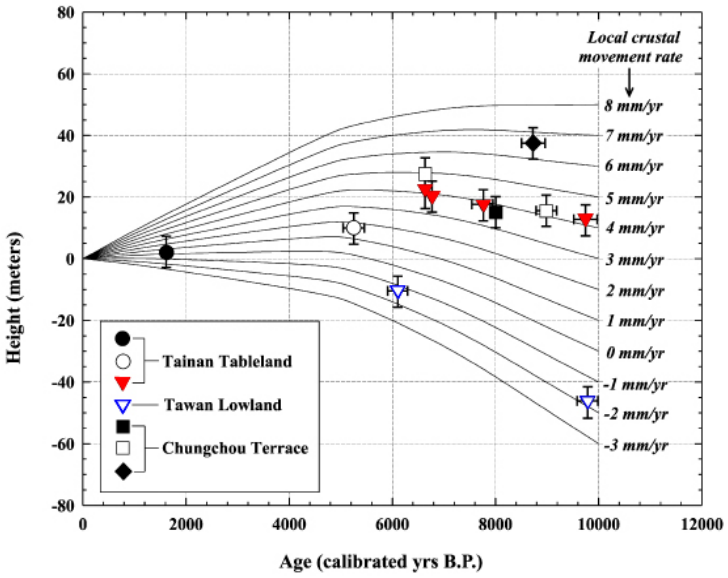


圖 3-3.7：台南地區各採樣點位置相對於海水面變化之地殼變形速率曲線（Chen and Liu, 2000）。

6. 單一事件變位量：本計畫藉由 Wells and Coppersmith（1994）之規模-地表最大錯動量

推估，規模以 Mw=5.9 計算，地表錯動量為 0.74±0.42 公尺。

7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。本文提到之規模均為地震矩規模。
8. 最近一次活動時間：由槽溝所見之地層沉積及變形情形，後甲里斷層的主要活動期應在台南層形成之後，並一直持續至今（翁淑卿，2002）。槽溝中發現之地裂及古墳棺槨傾斜的古地震事件，可能與西元 1862 年造成千人死亡的台南地震有關（李錫堤等，2001）。

彙整前人對於後甲里斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-3.3 所示，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-3.3：後甲里斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
後甲里斷層	斷層分段與破裂事件	無分段	地形、航照判釋	林朝棨，1957；Sun, 1964 林啟文等，2000
	長度 (km)	12 公里		
	寬度 (km)	4.14 or 4.41	深度/sin 傾角 （以深度 4 公里，傾角 65 度及 75 度計算）	
	破裂深度 (km)	至少 4 公里	參考 GPS 資料以及台南台地之地形，進行斷層幾何及運動模型之建立	饒瑞鈞等，2003
			根據 D-InSAR 之地表變形，推估地下構造模型	胡植慶等，2006；Huang et al., 2009
		14 公里以內	1991-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積 (km^2)	50 or 53	長度×寬度	
	走向	約呈南北走向	航照判釋、地形判釋	林朝棨，1957；Sun, 1964 林啟文等，2000
	傾斜角度 (度)	75W	參考 GPS 資料以及台南台地之地形，進行斷層幾何及運動模型之建立	饒瑞鈞等，2003
		65W	根據 D-InSAR 之地表變形，推估地下構造模型	胡植慶等，2006；Huang et al., 2009
	斷層機制	逆移斷層	航照判釋	Sun, 1964
		逆移形式兼具右移分量	GPS 速度場變化分析	饒瑞鈞等，2006
	短期滑移速率 (mm/yr)	16 mm/yr（抬升速率）	1996-1998 年間 InSAR	Fruneau et al. (2001)
		11-13 mm/yr（抬升速率）	精密水準測量	Rau et al., 2003
		12.5mm/yr	1996-2000 年間衛星影像 D-InSAR	Huang et al. (2009)
	長期滑移速率 (mm/yr)	約為 5 mm/yr（抬升速率）	全新世海水面變化曲線及台地上之碳 14 定年	Chen and Liu, 2000
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	2.91	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)	0.74±0.42	log D= 0.29Mw-1.84 σ=0.42 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	特徵地震規模 (Mw)	5.9	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994

		5.7	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	100-300	特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-3.14）	本計畫推估
	最近一次活動時間	西元 1862 年（？）	後甲里斷層槽溝中發現地裂及古墳棺槨傾斜的古地震事件	李錫堤等，2001；翁淑卿，2002

3-3-2 後甲里斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

由於後甲里斷層本身不會造成大規模之地震（表 3-3.3 顯示規模不到 6），且實際上是台南斷層之背衝斷層，本計畫建議採用孕震構造進行評估，斷層長度則參考台南斷層之長度，由於台南斷層並未出露於地表，因此採用圖 3-3.8（鄭錦桐，2002）之台南盲斷層版本。經由諮詢專家之意見，李錫堤教授認為台南盲斷層會被左鎮斷層延伸段截切，長度 30 公里，陳文山教授則認為台南盲斷層會被新化斷層延伸段截切，長度 12 公里，圖 3-3.8 顯示台南盲斷層被兩條走向滑移斷層截切的情形。本計畫考慮兩種破裂模式，A 為長度 12 公里，B 為長度 30 公里，權重分配為 A（0.5）、B（0.5）。

本計畫建議孕震構造形貌，從地質剖面得到深度 6 公里，而地震深度分布可達 14 公里，建議邏輯樹分支為 6 公里（0.2），10 公里（0.6），14 公里（0.2），傾角則採用 0~4 公里 30 度，4 公里以下 15 度。

滑移速率，上節中提到是根據全新世海水面變化曲線及台南台地上之碳 14 定年，推估台南台地相對於大灣低地之抬升速率約為 5mm/yr，本計畫設定邏輯樹權重分配為 2.5（0.2），5.0（0.6），7.5（0.2）。

孕震構造之特徵地震規模，則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-3.4 所示為該破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

後甲里斷層各節點權重的分配詳如圖 3-3.9 所示。

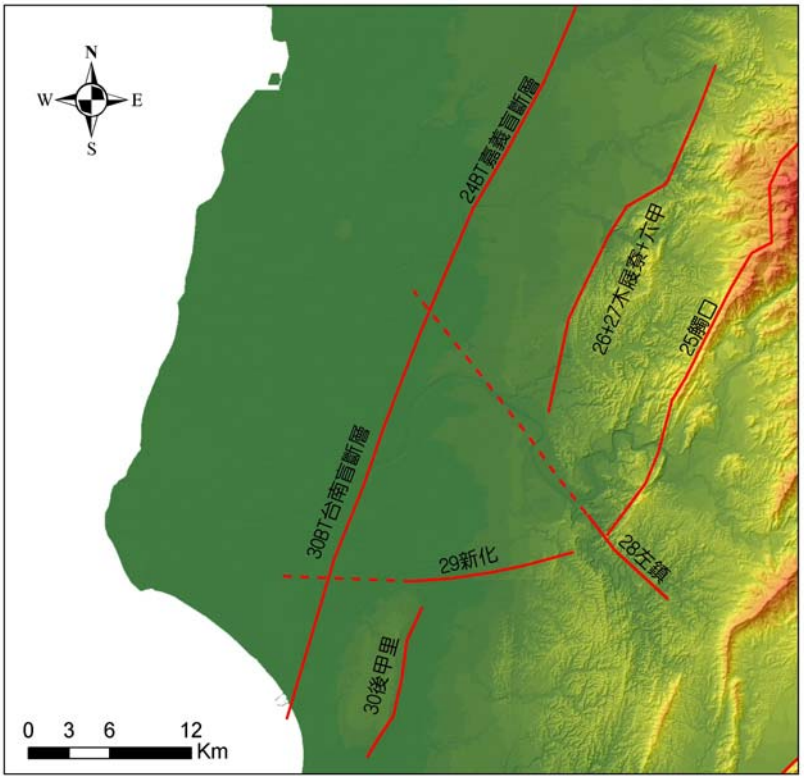


圖 3-3.8：後甲里斷層系統破裂模式（改自鄭錦桐 2002）。

表 3-3.4：後甲里斷層系統之破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	傾角(度)	深度 (km)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
					-σ	中值	+σ	
A	12	0~4km：30 4km 以下：15	10	374	6.4	6.6	6.9	6.6
B	30	0~4km：30 4km 以下：15	10	935	6.8	7.0	7.3	7.0
權重					0.1	0.3	0.1	0.5

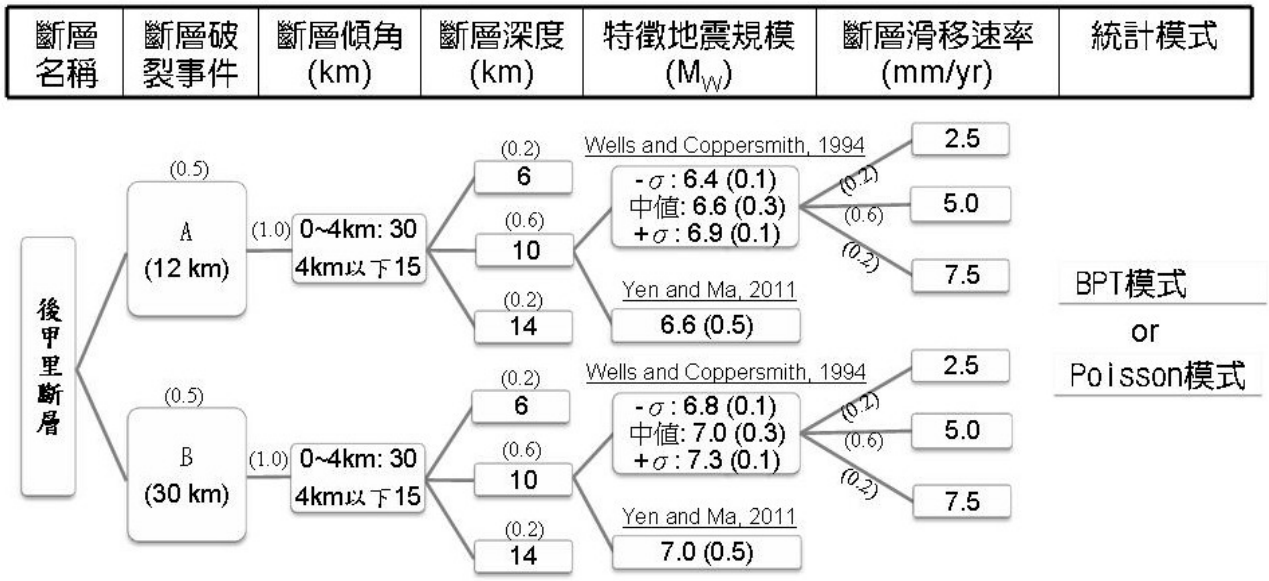


圖 3-3.9：後甲里斷層邏輯樹。

3-3-3 後甲里斷層系統特徵地震模式

後甲里斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 3-3.10 及圖 3-3.11 為 2 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

圖 3-3.9 之後甲里斷層邏輯樹可得到 72 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-3.12 為 2 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 6.6 之權重最高；破裂模式 B 以規模 7.0 之權重最高。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-3.13 為 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-3.14（a）之後甲里斷層系統規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-3.14（b）之後甲里斷層系統地震復發間隔時間-權重分布圖。

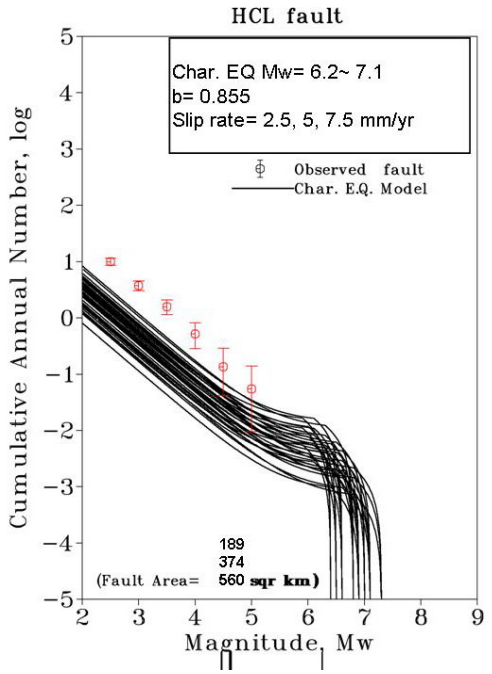


圖 3-3.10：A 事件特徵地震模式。

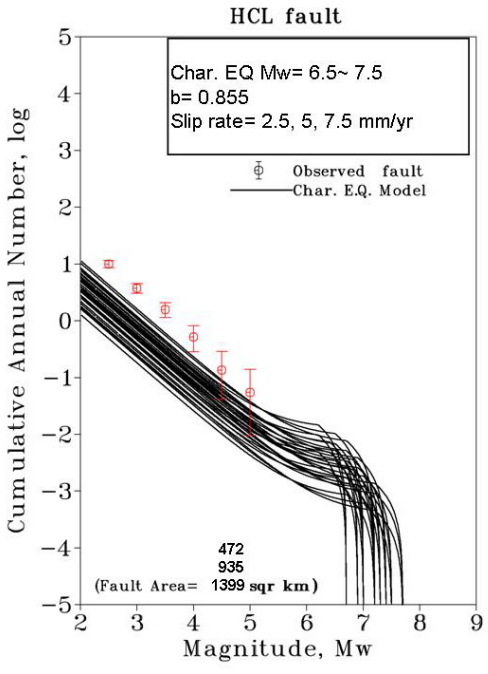


圖 3-3.11：B 事件特徵地震模式。

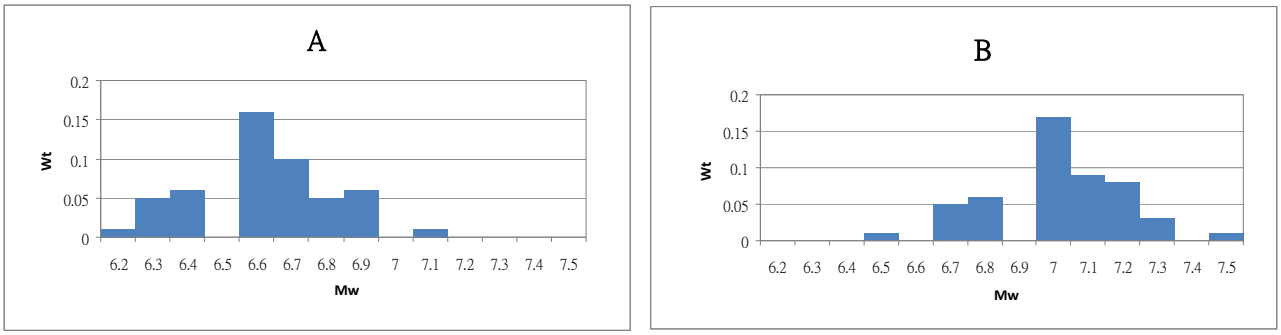


圖 3-3.12：後甲里斷層系統 2 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

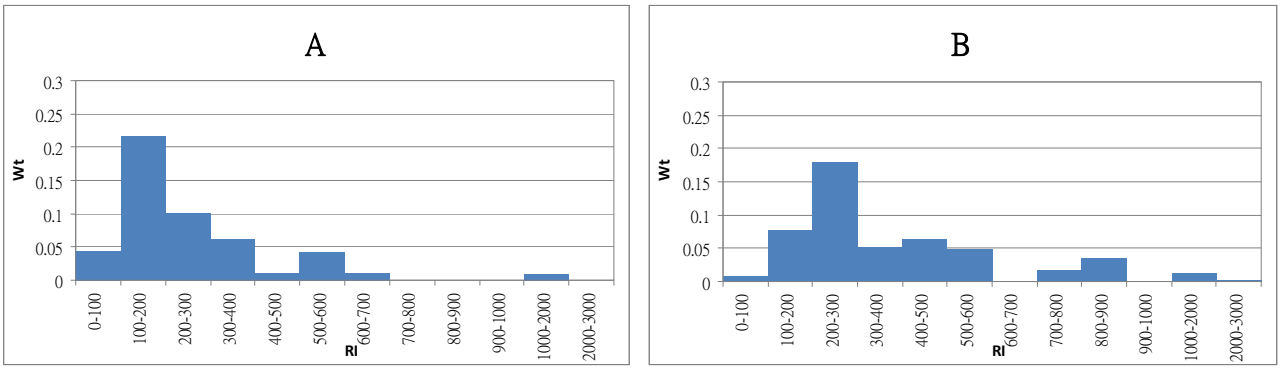
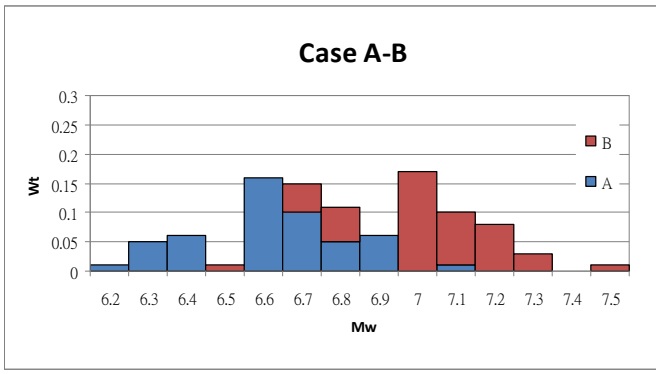


圖 3-3.13：後甲里斷層系統 2 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。

（a）



（b）

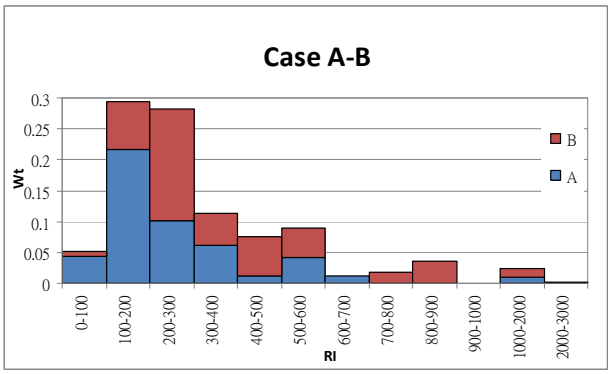


圖 3-3.14：（a）後甲里斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）後甲里斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-3-4 後甲里斷層系統發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算後甲里斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，後甲里斷層系統最後一次發生時間可能為西元 1862 年，本計畫分別採用 BPT 模式及 Poisson 進行評估。

表 3-3.5 為後甲里斷層系統評估之結果，以 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2~7.5 之機率為 17.3%、26.6%及 44.4%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 12.8%、20.2%及 35.2%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 3.1%、5.3%及 10.4%。以 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2~7.5 之機率為 12.0%、18.9%及 33.3%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 9.4%、15.0%及 26.8%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 3.1%、5.0%及 9.2%。

表 3-3.5：後甲里斷層系統發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
6.2~7.5	17.3%	12.0%	26.6%	18.9%	44.4%	33.3%
M ≧6.5	12.8%	9.4%	20.2%	15.0%	35.2%	26.8%
M ≧7.0	3.1%	3.1%	5.3%	5.0%	10.4%	9.2%

3-4 左鎮斷層

3-4-1 左鎮斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：中央地質調查所繪製的條帶地質圖中（林啓文等，2007），左鎮斷層西起台南縣山上鄉新庄附近，往東南延伸至南化鄉心仔寮附近，走向約呈東南—西北向，全長約 12 公里，為左移斷層，屬第二類活動斷層。（Wang, 1976；中國石油公司，1989；張徽正等，1998；林啓文等，2000）（圖 3-4.1）。由淺層震測顯示，左鎮斷層西北端可能被崙後斷層截切，東南端則可能被龍船斷層截切（陳延宗，2007，圖 3-4.2）。然而，於本計畫的訪談中，陳文山教授認為左鎮斷層非終止於崙後斷層，而繼續向西延伸，且有地形崖特徵，最遠只能追溯至地形崖消失處，總長約 20 公里（圖 3-4.3）。

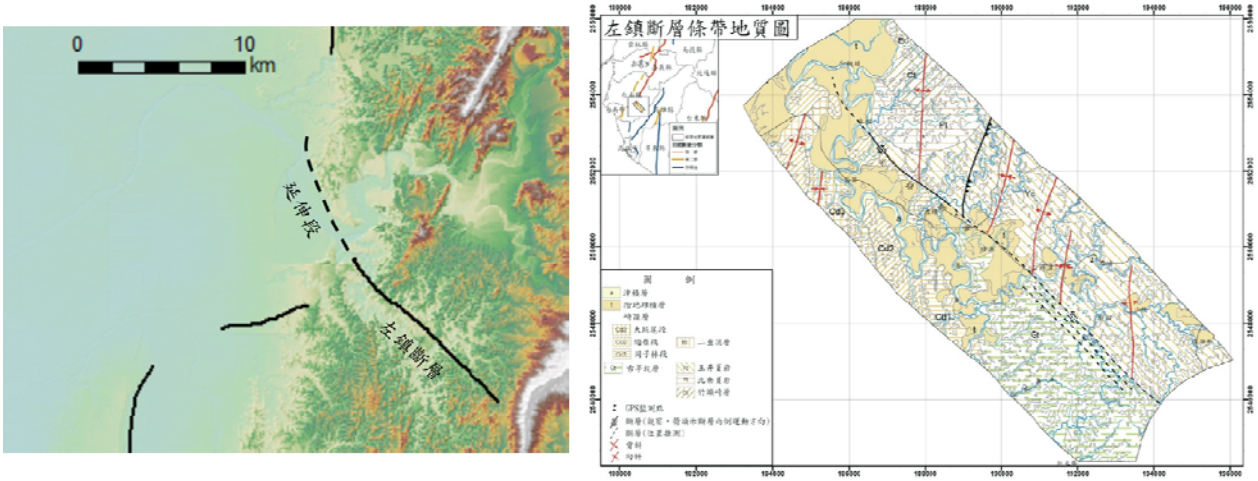


圖 3-4.1：左鎮斷層條帶地質圖（林啓文等，2007）。

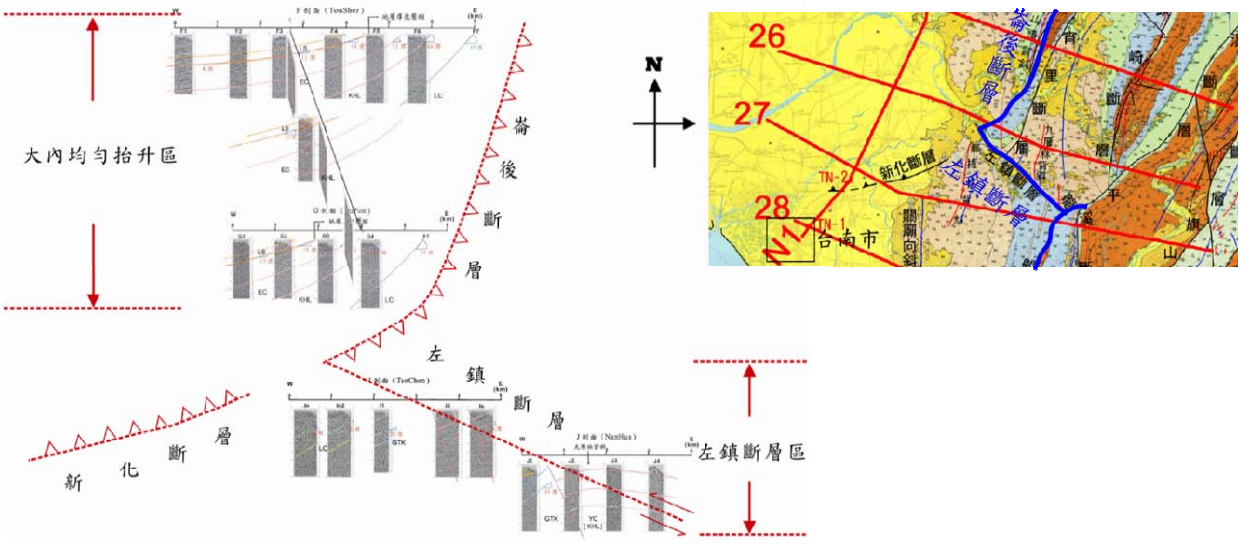


圖 3-4.2：左鎮斷層與崙後斷層、龍船斷層位置（陳延宗，2007；黃旭燦等，2004）。

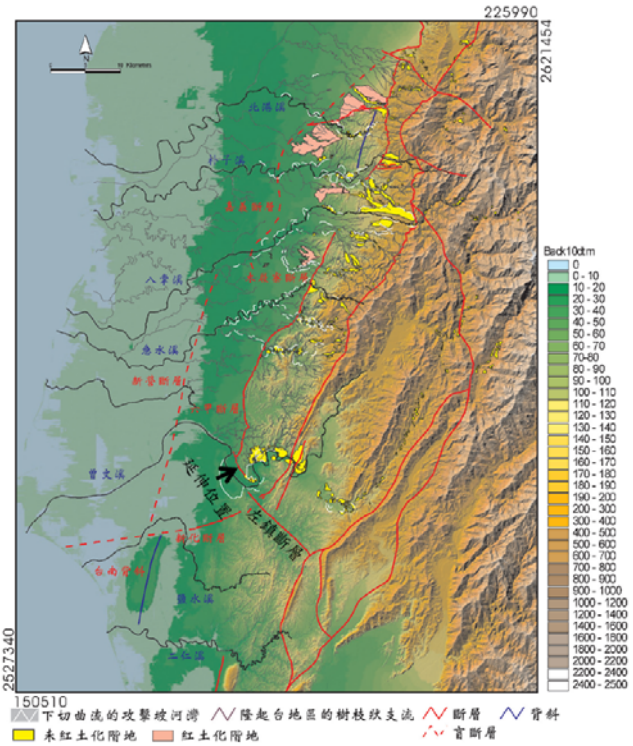


圖 3-4.3：左鎮斷層延伸位置（陳文山等，2004b）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 陳延宗（2007）以反射震測法研究左鎮斷層，然而可能因當地岩性主要為厚層的泥岩，無明顯岩層界面，使震測訊號不佳，僅能從地表位置推測於震測剖面中可能的訊號位置，而無法得知斷層的地下幾何樣貌（圖 3-4.4）。

(2) 黃旭燦（2003）認為左鎮斷層為臺灣西南部麓山區重要的撕裂斷層，也是此區域構造單元的邊界斷層。斷層以北有車籠埔斷層、大尖山斷層、崙後斷層等斷層系統，此系統終止於左鎮斷層附近。斷層西南側則有那拔林背斜、新化斷層、台南背斜、中洲背斜等，而對於左鎮斷層的幾何樣貌，則沒有進一步的描述（圖 3-4.5）。本計畫認為由於左鎮屬構造單元間的邊界斷層，斷層深度應與周圍構造深度一致，此區域構造滑脫面約 8~12 公里深，應可作為參考。

(3) 由 1973-2010 地震深度分布圖顯示此區域地震主要分布於 18 公里以內（圖 3-4.6）。

左鎮斷層幾何形貌相關文獻彙整於表 3-4.1 中。

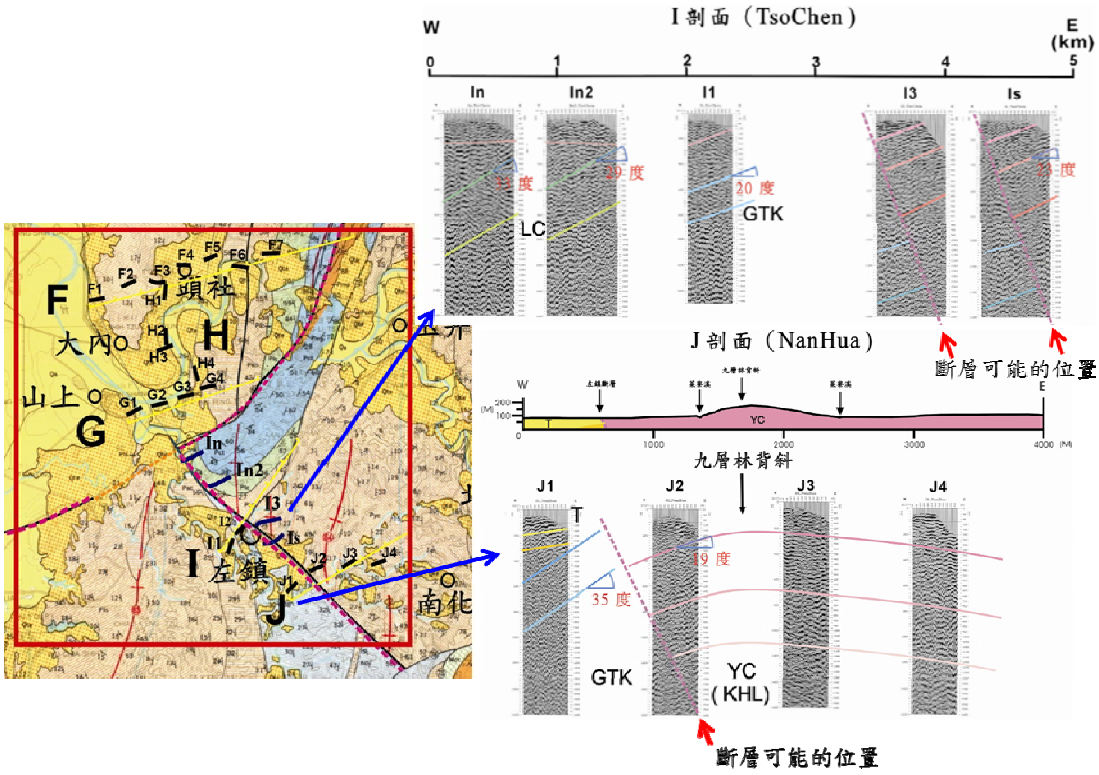


圖 3-4.4：左鎮斷層淺層震測（陳延宗，2007）。

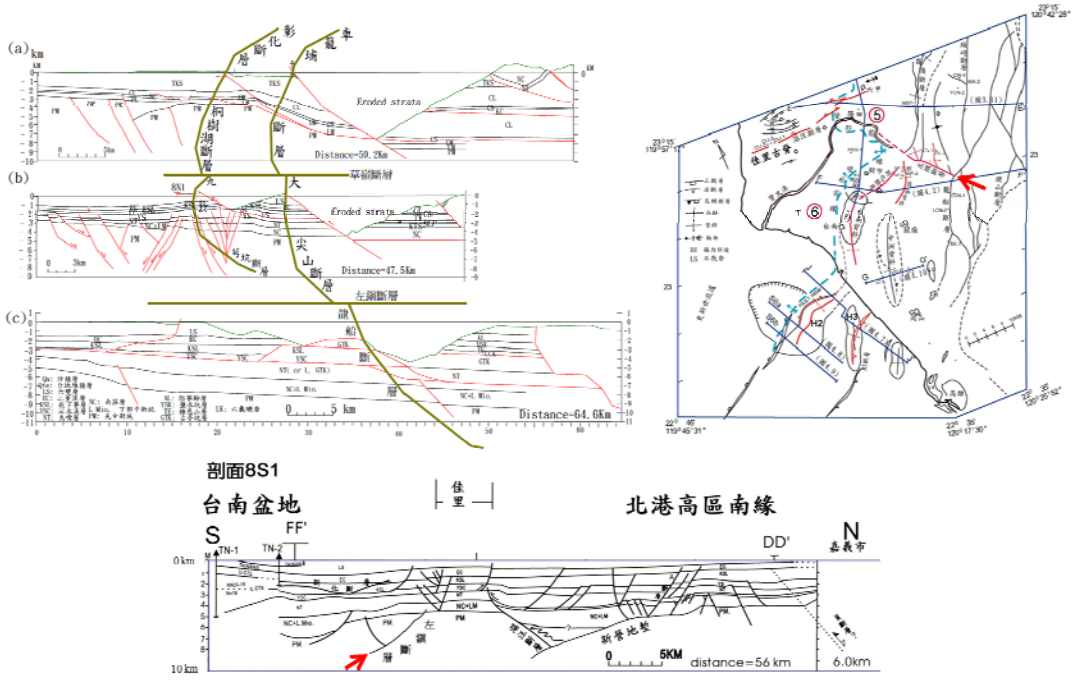


圖 3-4.5：左鎮斷層平衡剖面（黃旭燦，2003）。

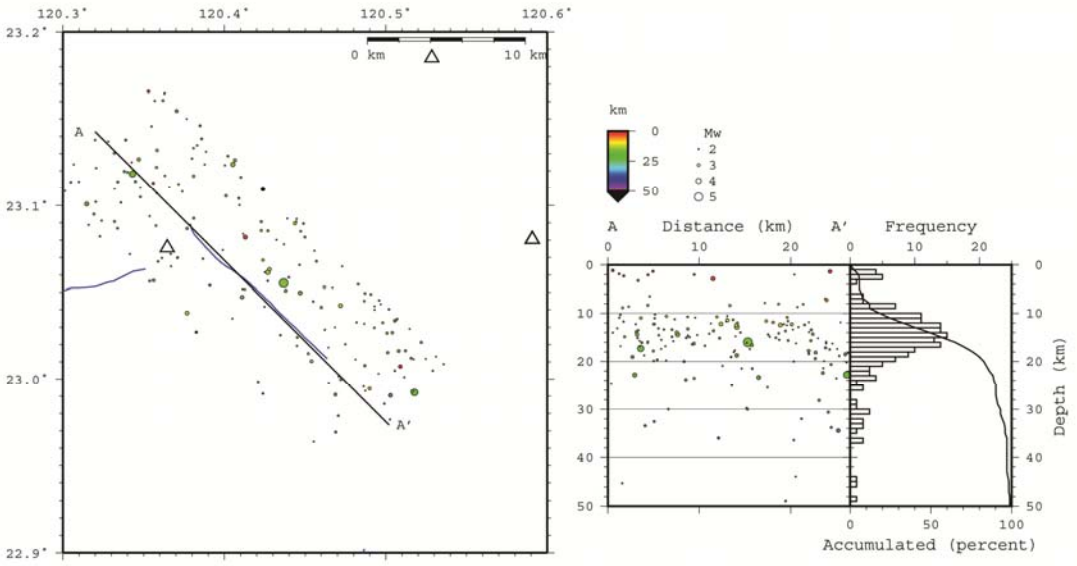


圖 3-4.6：1973-2010 地震深度分布圖。

表 3-4.1：左鎮斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度
陳延宗，2007	淺層震測	未知，訊號不明顯。	--
黃旭燦，2003	平衡剖面(參考左鎮斷層南北兩側構造滑脫面深度)	--	約 8~12 公里
本計畫推估	1973-2010 地震分布	--	18 公里以內

3. 斷層機制：斷層北側主要褶皺軸之走向，由遠離斷層至接近斷層，方位由東北轉南北，而從南側的地層界線方位，由遠離斷層至接近斷層，方向由北北西轉為西北，與橫移斷層區的岩層與構造特徵相近（Price and Cosgrove, 1990；Jamison, 1991）。此外，饒瑞鈞（2005）應變速率分析結果顯示，左鎮斷層具有顯著的左剪應變量（3.1~3.3 μstrain/yr）。由以上現象推測，左鎮斷層應為左移斷層（林啓文等，2007）。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-4.2。
5. 長期滑移速率：左鎮斷層雖可觀察到斷層露頭，但露頭主要位於古亭坑層與崎頂層中，其岩性為厚層泥岩（林啓文等，2007），無法從中取得定年樣本。此外，斷層雖然通過全新世階地，但階地無錯動跡象，因此無法由地質調查中獲得長期滑移速率（圖 3-4.7）。於本計畫舉行的專家會議中，徐澔德建議利用階地進行假設與估算，階地年代相當於台南層，年代約 3 千年，階地錯動量低於 5 公尺 DEM 可解析程度，因此假設階地錯動量低於 5 公尺，由此可得長期滑移速率應小於 1.7 mm/yr；此外，本計畫利用塊體模型推估的滑移虧損率，可作為邏輯樹參數依據。

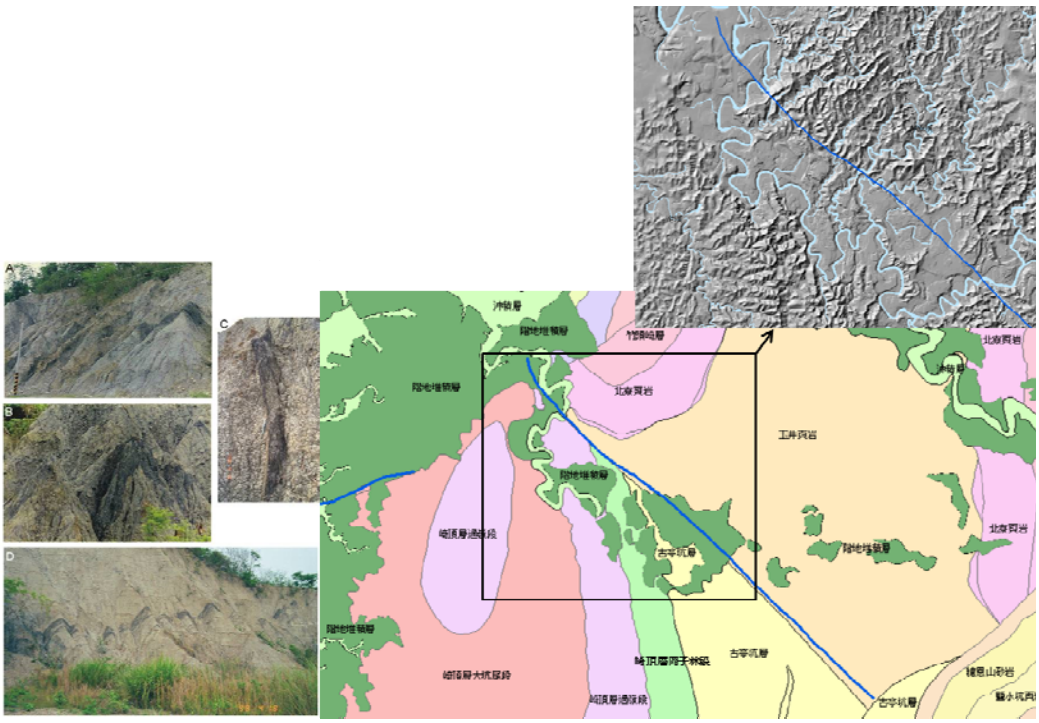


圖 3-4.7：左鎮斷層露頭與階地分布。

6. 單一事件變位量：本計畫藉由 Wells and Coppersmith（1994）之規模-地表最大錯動量推估，規模以 Mw=6.4，地表錯動量為 0.36±0.34 公尺。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。
8. 最近一次活動時間：由地層分布來分析，左鎮斷層活動年代應在六雙層及玉井頁岩沉積之後，所以確認為更新世晚期的活動斷層，然而是否在全新世活動，仍需進一步的定年資料與構造分析結果（林啓文等，2007）。

彙整前人對於左鎮斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-4.2 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-4.2：左鎮斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
左鎮斷層	斷層分段與破裂事件	未分段	地表地形、岩層分布	Wang, 1976；中國石油公司，1989；張徽正等，1998；林啓文等，2000；陳文山等，2004b
	長度 (km)	20 km		
	寬度 (km)	10.6	深度/sin 傾角 （以深度 10 公里，傾角 70 度計算）	--
	破裂深度 (km)	約 8-12 公里	參考左鎮斷層南北兩側構造滑脫面深度	黃旭燦，2003
		18 公里以內	1992-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積(km^2)	212	長度×寬度	
	走向	呈東南一西北走向	地表地形、岩層分布	林啓文等，2007
	傾斜角度 (度)	本計畫設定為 60-80 度，向北傾	淺層震測訊號不明顯，本計畫以走向滑移斷層常見之傾角設定	本計畫推估
	斷層機制	左移斷層	構造地形特徵	林啓文等，2007
	短期滑移速率 (mm/yr)	平行斷層走向分量 1.3 mm/yr（右移） 垂直斷層走向分量 6.9 mm/yr（壓縮） 高程方向抬升量 3.6 mm/yr	(1996~2006)GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
		斷層兩側速度向量對比，顯示具左移現象	(2000~2005)GPS 資料	饒瑞鈞等，2005
	長期滑移速率 (mm/yr)	更新世以來曾經活動，全新世階地無錯動跡象。無法推估長期滑移速率	野外露頭調查	林啓文等，2007
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	3.85	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)	0.36	log D= 1.03Mw-7.03 σ=0.34 （平移斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模 (Mw)	6.4	Mw =3.98+1.02 log A σ=0.23 （平移斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		6.3	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	0-100	特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-4.12）	本計畫推估
	最近一次活動時間	更新世晚期	地層年代分析	林啓文等，2007

3-4-2 左鎮斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫對於左鎮斷層破裂模式的評估，為參考陳文山教授建議，向西延伸至地形崖消失處，並排除左鎮斷層與甲仙地震盲斷層相連之可能性，因此僅評估一種破裂模式，其長度為20 公里（圖 3-4.8）。

左鎮斷層之傾角與破裂深度，因淺層震測訊號不明顯，無法得知斷層幾何樣貌，而斷層屬走向滑移斷層，因此本計畫以高傾角 60 度、70 度、80 度作為邏輯樹數值，其權重分別為0.2、0.6、0.2。深度則參考左鎮斷層南北兩側構造單元之滑脫面深度，設為 8 公里、10 公里、12 公里。其權重分別為 0.2、0.6、0.2。

左鎮斷層之滑移速率，因缺乏地質調查之長期滑移速率，因此本計畫參考塊體模型分析結果，左鎮斷層長期平均滑移速率為 11.33 mm/yr，滑移虧損率為 3.85 mm/yr，本計畫將邏輯樹滑移速率數值設定為 11.33 mm/yr（權重 0.5）、3.85 mm/yr（權重 0.5）。

左鎮斷層之特徵地震規模，則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-4.3 所示為利用邏輯樹中值所求得之各破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

左鎮斷層各節點權重的分配詳如圖 3-4.9 所示。

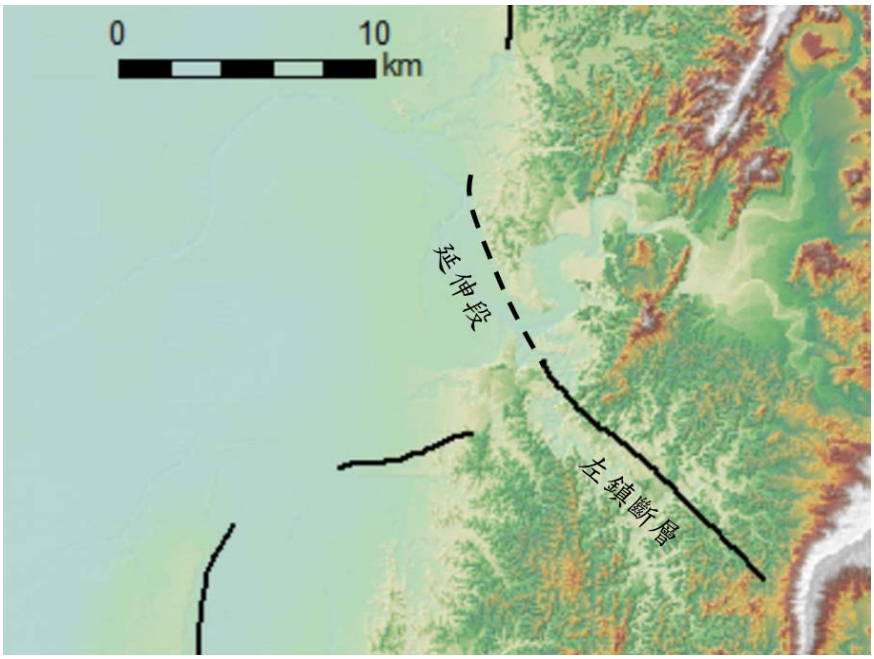


圖 3-4.8：左鎮斷層之破裂模式。

表 3-4.3：左鎮斷層之中值各破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994 (破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011 (破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
A	20	10	10.6	70	212	6.1	6.4	6.6	6.3
	權重					0.1	0.3	0.1	0.5

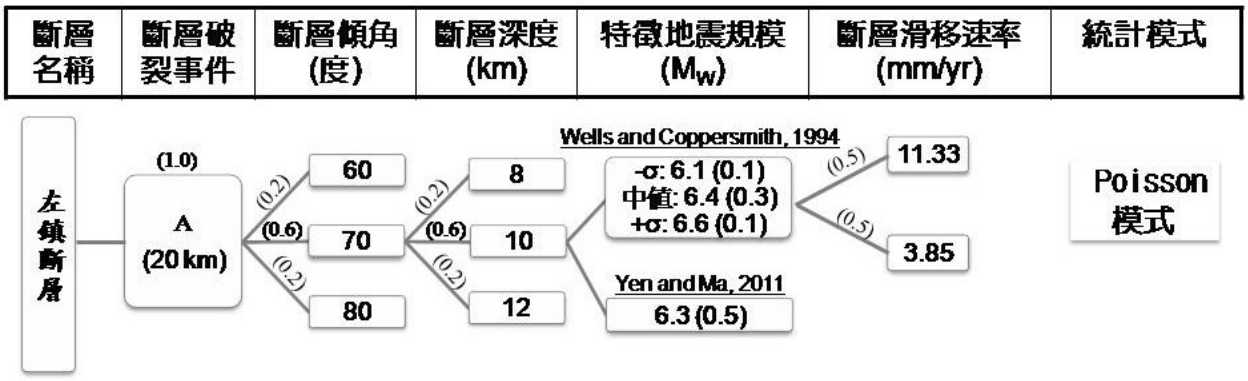


圖 3-4.9：左鎮斷層邏輯樹。

3-4-3 左鎮斷層特徵地震模式

左鎮斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式（詳附錄 3-1）得到一地震復發間隔時間，圖 3-4.10 為破裂事件取邏輯樹傾角及深度中間值之特徵地震模式分布情形。

圖 3-4.9 之左鎮斷層邏輯樹可得到 72 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-4.11 為 A 破裂事件之規模-權重分布圖，其中以規模 6.4 之權重最高，6.3 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-4.12 為地震復發間隔時間-權重分布圖，破裂模式 A 在地震復發間隔時間 0 年~100 年間有較高之權重。

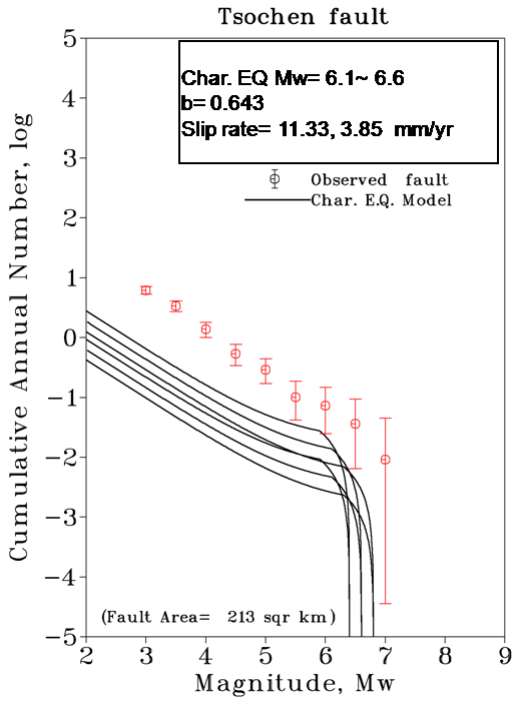


圖 3-4.10：A 事件之特徵地震模式。

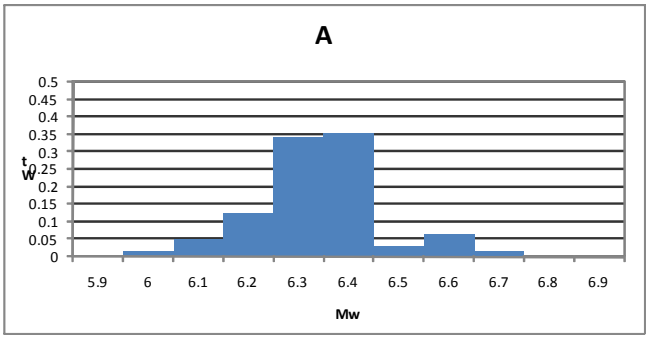


圖 3-4.11：左鎮斷層之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

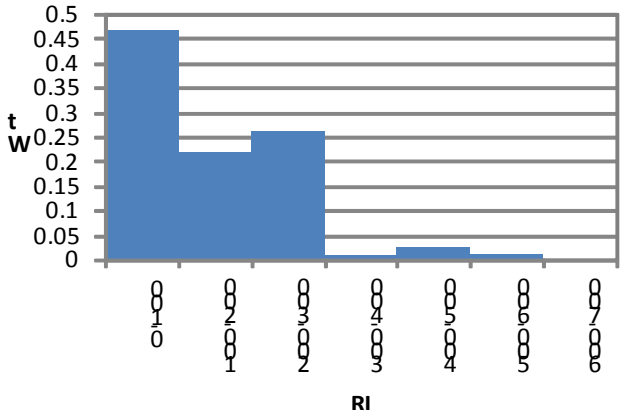


圖 3-4.12：左鎮斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

3-4-4 左鎮斷層發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式（詳附錄 3-1）估算左鎮斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，左鎮斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-4.4 為左鎮斷層 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.0~6.7 之機率為 24.4%、36.2%及 56.4%，發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 1.5%、2.3%及 4.0%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.0%、0.0%及 0.0%。

表 3-4.4：左鎮斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.0 ≦ M ≦6.7	24.4%	36.2%	56.4%
M ≧ 6.5	1.5%	2.3%	4.0%
M ≧ 7.0	0.0%	0.0%	0.0%

3-5 小崗山斷層

3-5-1 小崗山斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：

孫習之（Sun, 1964）首先利用航照判讀，認為在二仁溪與阿公店溪之間的大小崗山西側存在一呈南北走向線型崖，認為是一斷層崖，命名為小崗山斷層，之後研究者大致認同孫習之看法，認為此線型崖為一逆斷層構成之斷層崖。根據地調所條帶地質圖（林啟文等，2009），小崗山由高雄縣阿蓮鄉南蓮村向南延伸至燕巢鄉瓊林村，總長約 9 公里(圖 3-5.1)。小崗山以北經二仁溪為梅嶺斷層（圖 3-5.2），梅嶺斷層與小崗山斷層的上盤抬升速率與變形型態不同，陳文山（2010）認為應劃分為兩條斷層。然而，由地形來看，梅嶺斷層上盤為麓山帶，前緣為全新世海階，下盤為海階台地(中洲台地)，與小崗山斷層兩側之地形相似(陳文山，2010），此外，兩斷層的走向一致，且位在彼此的延伸線上，因此仍不排除有同時破裂的可能性。若小崗山斷層與梅嶺斷層相連，總長度達 31 公里左右。

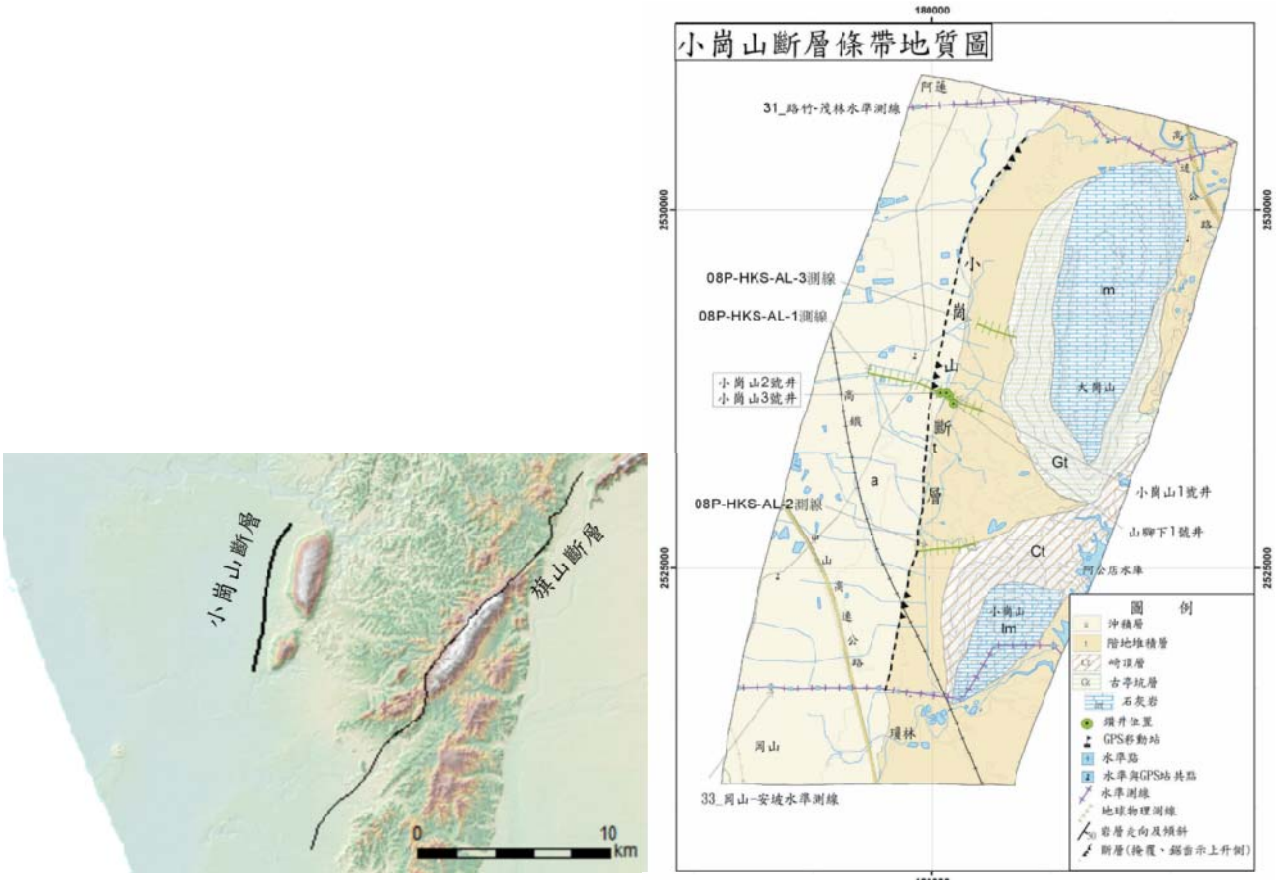


圖 3-5.1：小崗山斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。

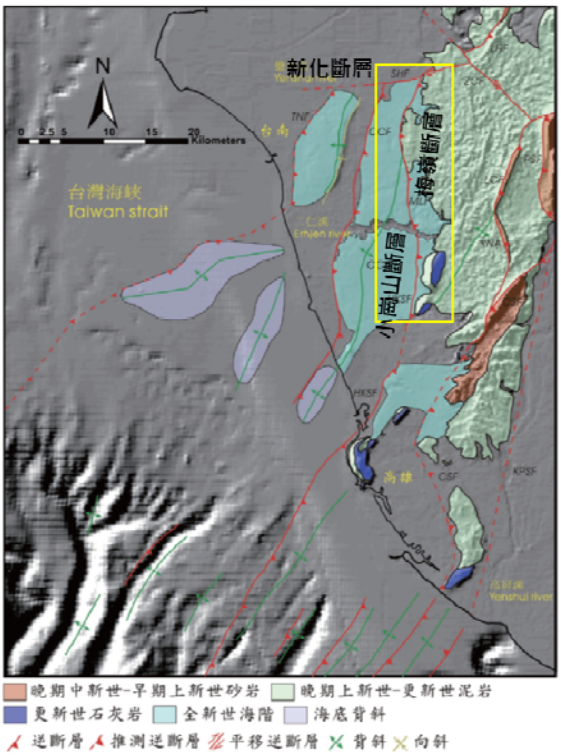


圖 3-5.2：小崗山斷層（HKSF）、梅嶺斷層（MLF）分布圖（陳文山等，2010b）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 地質調查所在小崗山沿線實施 3 條淺層震測測線，其中於大崗山與小崗山之間的阿蓮測線 2（08P-HKS-AL-2）可看到基盤向東逐漸升高，推測斷層傾角約呈 45 度角，向東傾斜（石瑞銓等，2008）（圖 3-5.3）。

(2) 大、小崗山西側有四孔鑽井，由東至西分別為山腳下 1 號，井深 200 公尺，小崗山 1 號，井深 100 公尺，小崗山 2 號及 3 號，井深各 70 公尺。其中，山腳下 1 號、小崗山 1 號井雖都未鑽遇斷層帶，但兩口井的古亭坑層具有密集的剪切構造，剪切面與層面傾角大致平行，傾角向東傾斜約 50-70 度（陳文山等，2010b）（圖 3-5.4）。

(3) 鄭宏祺（2000）認為此區域存在一滑脫面，應位在長枝坑層底部或更深，無法確認小崗山斷層是否連接至滑脫面。假設小崗山斷層為疊瓦狀構造的其中一分支，並將小崗山斷層延伸至滑脫面上，則深度可達 10 公里，若延伸至古亭坑斷層，則深度約為 11 公里（圖 3-5.5）。

(4) 由 1935-2010 地震深度分布圖無法看出與斷層有關（圖 3-5.6）。

以上斷層幾何相關研究資料彙整於表 3-5.1。

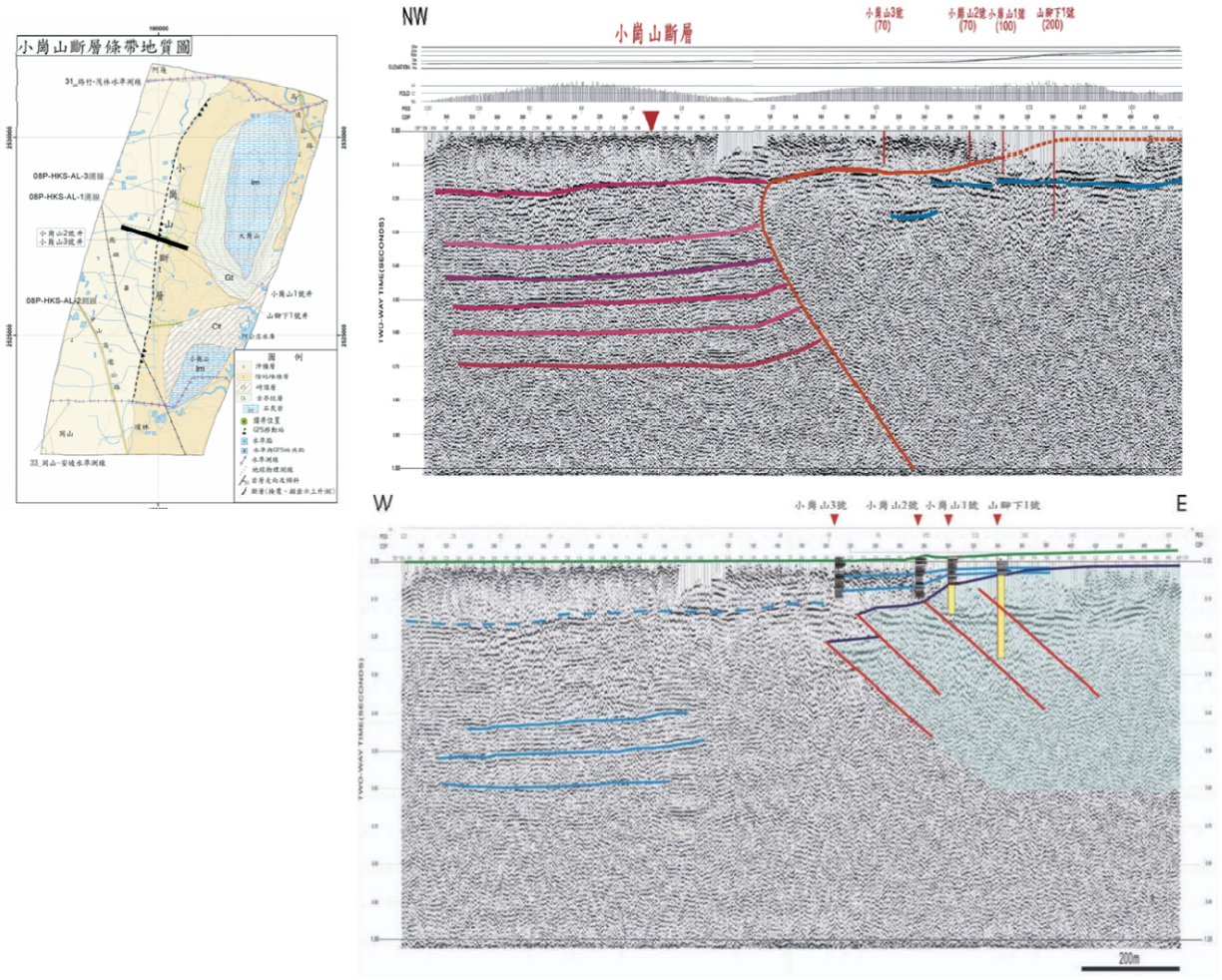


圖 3-5.3：小崗山斷層淺層震側（石瑞銓等，2008；陳文山等，2010b）。

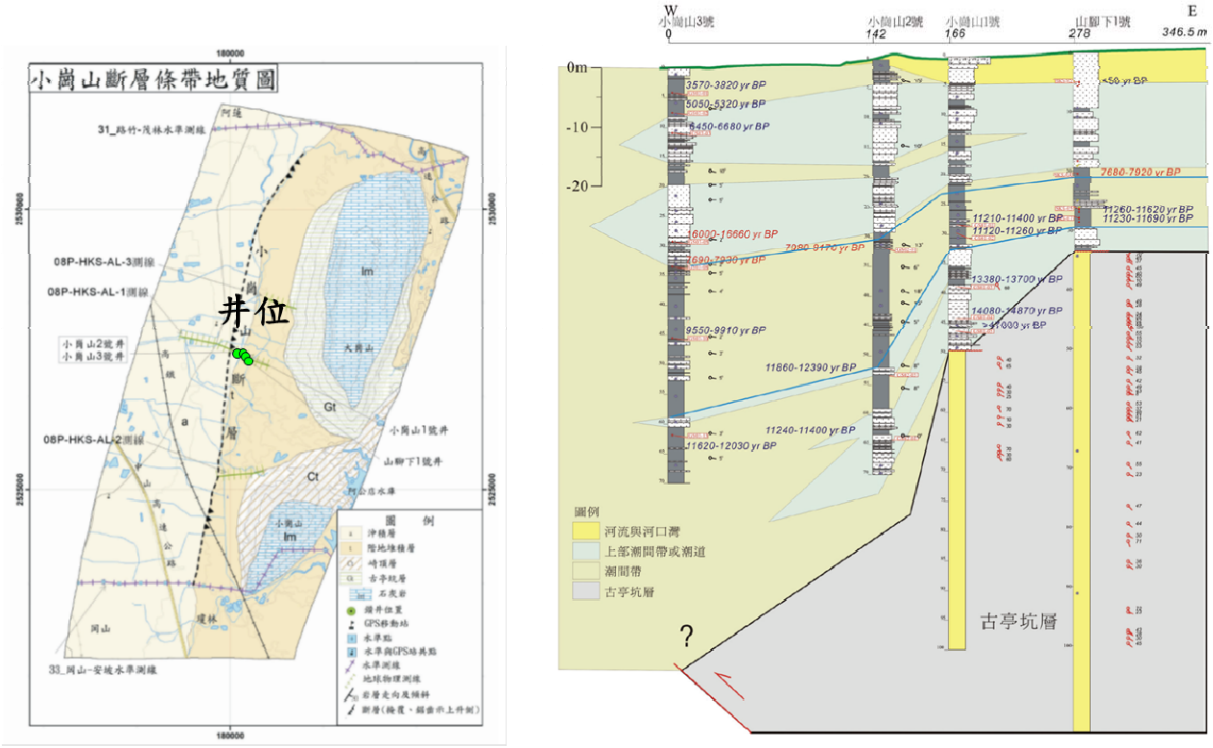


圖 3-5.4：小崗山斷層鑽井資料（陳文山等，2010b）。

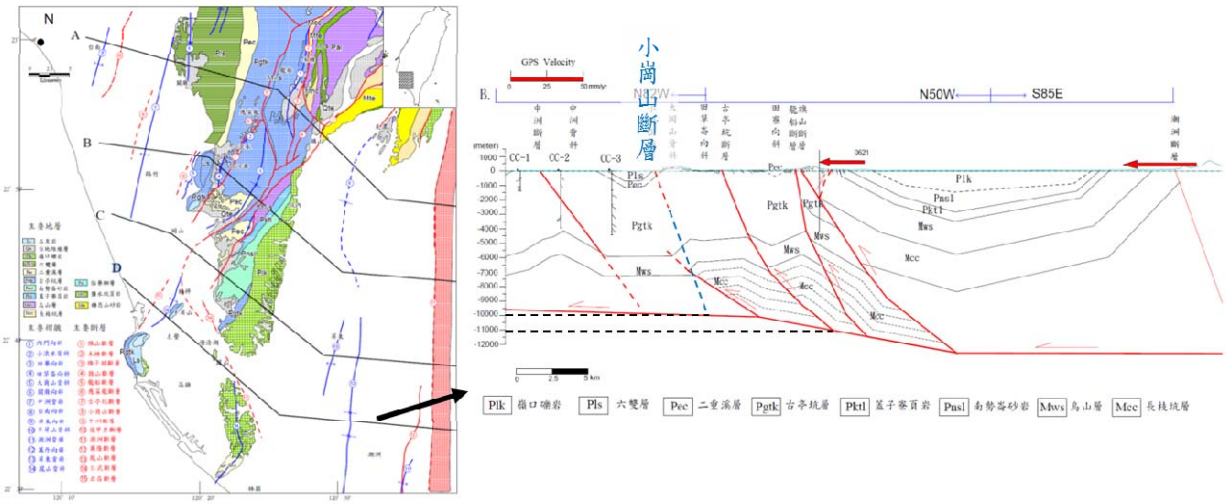


圖 3-5.5：小崗山斷層區域平衡剖面（鄭宏祺，2000）。

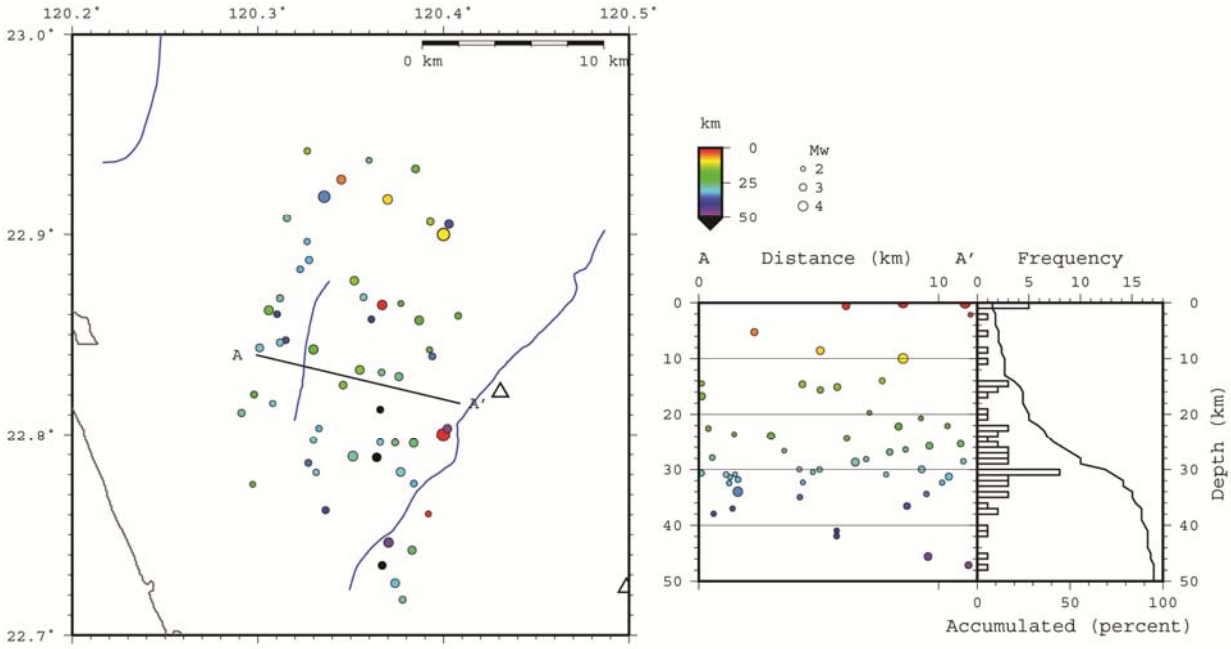


圖 3-5.6：地震深度分布資料。

表 3-5.1：小崗山斷層幾何相關文獻彙整。

參考文獻	方法	傾角	深度
石瑞銓等，2008；林啟文等，2009	淺層震測	約 45 度	--
陳文山等，2010b	鑽井	50-70 度剪切帶	--
鄭宏祺，2000	平衡剖面	--	10-11 公里
本計畫推估	地震分布深度	--	--

3. 斷層機制：由淺層震測及地形顯示小崗山斷層東側為抬升側，斷層傾角為向東傾，且上盤鑽井鑽遇剪切帶，剪切帶位態也與震測結果一致，因此研判為逆移斷層（石瑞銓等，2008；陳文山等，2010b）。
4. 短期滑移速率：參照表 3-5.2。
5. 長期滑移速率：由大、小崗山西側四口鑽井資料，分析碳十四年代、古環境與埋藏深度，

顯示四口鑽井皆處在抬升的構造環境，顯然井位都在小崗山斷層上盤，垂直變動速率東側較大，向西遞減（圖 3-5.7）。從地形及各井變動速率趨勢分析，小崗山 1 號、2 號、3 號井可能位在斷層尖端的變形帶範圍，山腳下 1 號井應位在上盤變形帶範圍之外，因此，山腳下 1 號井相對於小崗山 3 號井的垂直變動速率，應小於斷層整體垂直變動速率，斷層抬升速率至少約 1.5-2 mm/yr，以淺層震測剖面解釋之傾角 45 度，推算小崗山斷層之淨滑移速率約為 2.1-2.8 mm/yr（陳文山等，2010b）。

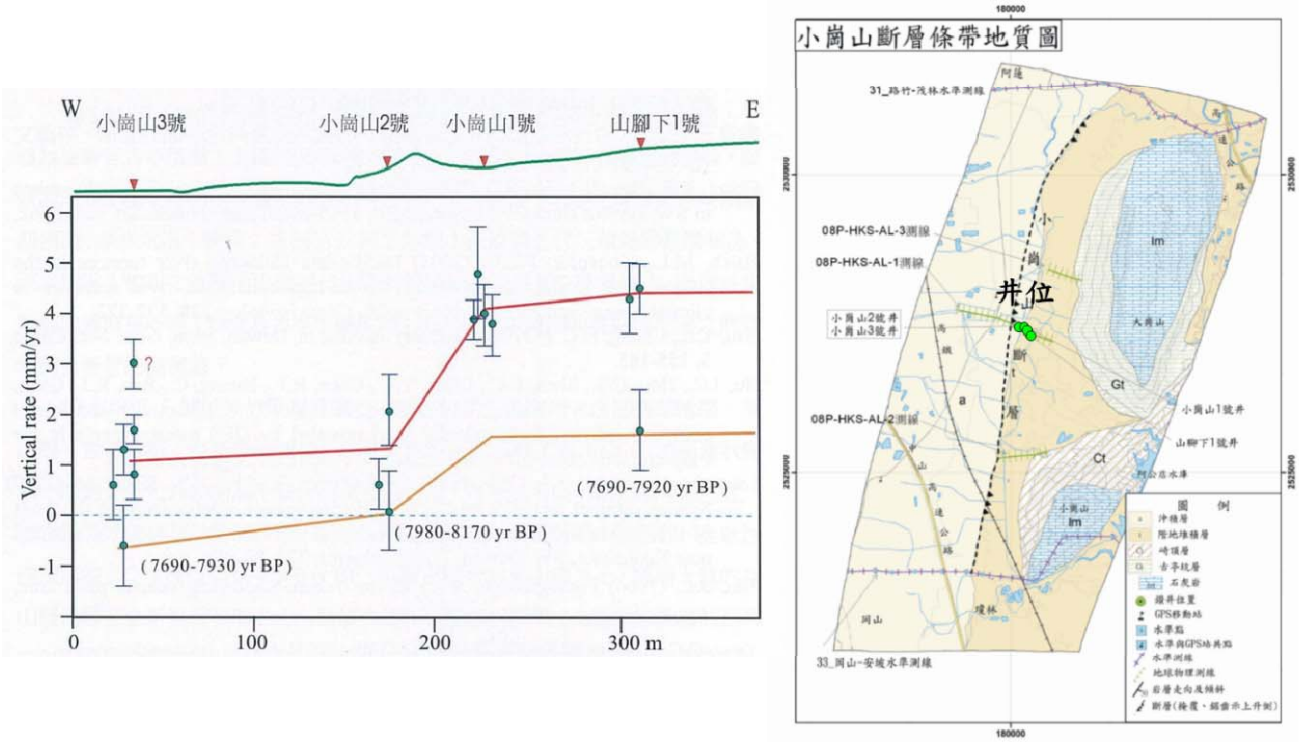


圖 3-5.7：小崗山斷層鑽井結果（陳文山等，2010b）。

6. 單一事件變位量：無槽溝古地震或歷史地震可供參考，根據 Wells and Coppersmith（1994）之經驗公式計算結果，詳於表 3-5.2。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。本文提到之規模均為地震矩規模。
8. 最近一次活動時間：未知。

彙整前人對於小崗山斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-5.2 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-5.2：小崗山斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
小崗山斷層	斷層分段與破裂事件	A 小崗山斷層 B 小崗山斷層、梅嶺斷層	地形、岩層分布與對比	Sun, 1964；林啟文等，2009；陳文山等；2010b
	長度 (km)	A：9　B： 31		
	寬度 (km)	25.6	深度/sin 傾角 （以深度 11 公里，傾角 45 度計算）	
	破裂深度 (km）	10-11	平衡剖面	鄭宏祺，2000
		與斷層深度無關	1935-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積 (km^2)	A: 230　B: 794	長度×寬度 （以深度 11 公里，傾角 45 度計算）	
	走向	呈東北一西南走向		
	傾斜角度 (度)	45 度	震測資料	石瑞銓等，2008；林啟文等，2009
		岩心剪切面大多呈 50-70 度	鑽井資料	陳文山等，2010b
	斷層機制	逆移斷層	地形、鑽井	林啟文等，2009；陳文山等；2010b
	短期滑移速率 (mm/yr)	平行斷層走向分量 4.4 mm/yr（右移） 垂直斷層走向分量 8.3 mm/yr（壓縮） 高程方向兩側差異不明顯	(2002~2008)GPS 資料、水準測量	饒瑞鈞等，2008
		23-25（沿斷層面）	GPS 資料反演	蔡旻倩，2013
	長期滑移速率 (mm/yr)	2.1-2.8	鑽井資料	陳文山等，2012
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	1.94	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估

	單一事件變位量 (m)	A:1.11　B: 1.45	1og D = 0.29 Mw - 1.84（逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模 (Mw)	A: 6.5　B: 6.9	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A: 6.4　B: 6.9	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	300-400	特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-5.14 圖 3-3.14）	本計畫推估
	最近一次活動時間	N/A	N/A	N/A

3-5-2 小崗山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估小崗山斷層之破裂，分為 2 種破裂事件來探討，A 為小崗山斷層破裂，B 為小崗山與梅嶺斷層破裂，本計畫認為整段破裂之可能性較低，因此給予較低的權重。所有破裂模式之權重分配為 A（0.6）、B（0.4），如圖 3-5.8 所示。

小崗山斷層之傾角及破裂深度，根據所蒐集到之震測剖面、平衡剖面資料，本計畫認為傾角可採用雙傾角方式以符合斷層面斷坡連接基底滑脫面之情形。依據淺層震測資料，本計畫將淺部斷層傾角 45 度定為邏輯樹中間值，上下值各加減 5 度；依據鄭宏祺（2000）繪製的剖面，小崗山下滑脫面深度約 10-11 公里，滑脫面傾角約 5 度，10 公里以上為採用淺部斷層傾角，10 公里以下採用滑脫面傾角。深度部分以 11 公里為中間值，上下取 1 公里為邏輯樹分支。權重分配為「0-10 公里 40 度，10 公里以下 5 度」，權重 0.2；「0-10 公里 45 度，10 公里以下 5 度」，權重 0.6；「0-10 公里 50 度，10 公里以下 5 度」，0.2。，破裂深度權重為 10 公里（0.2）、11 公里（0.6）、12 公里（0.2）。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-5.3 所示為利用邏輯樹中值所求得之各破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

小崗山斷層之滑移速率，依據陳文山等（2012）鑽井資料，顯示斷層之滑移速率至少為 2.1-2.8 mm/yr，本計畫設定邏輯樹數值分別為 2.1、2.4、2.8 mm/yr。權重分配為 2.1（0.3），2.4（0.4），2.8（0.3）。

小崗山斷層各節點權重的分配詳如圖 3-5.9 所示。

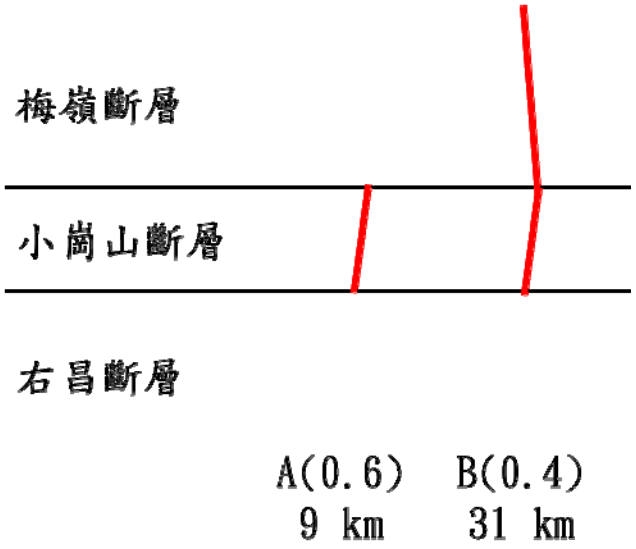


圖 3-5.8：小崗山斷層之破裂模式及權重分配。

表 3-5.3：小崗山斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角(度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
							-σ	中值	+σ	
小崗山斷層	A	9	11	25.6	0~10km：45 10~11km：5	230	6.2	6.5	6.7	6.4
小崗山、梅嶺	B	31	11	25.6	0~10km：45 10~11km：5	794	6.7	6.9	7.2	6.9
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

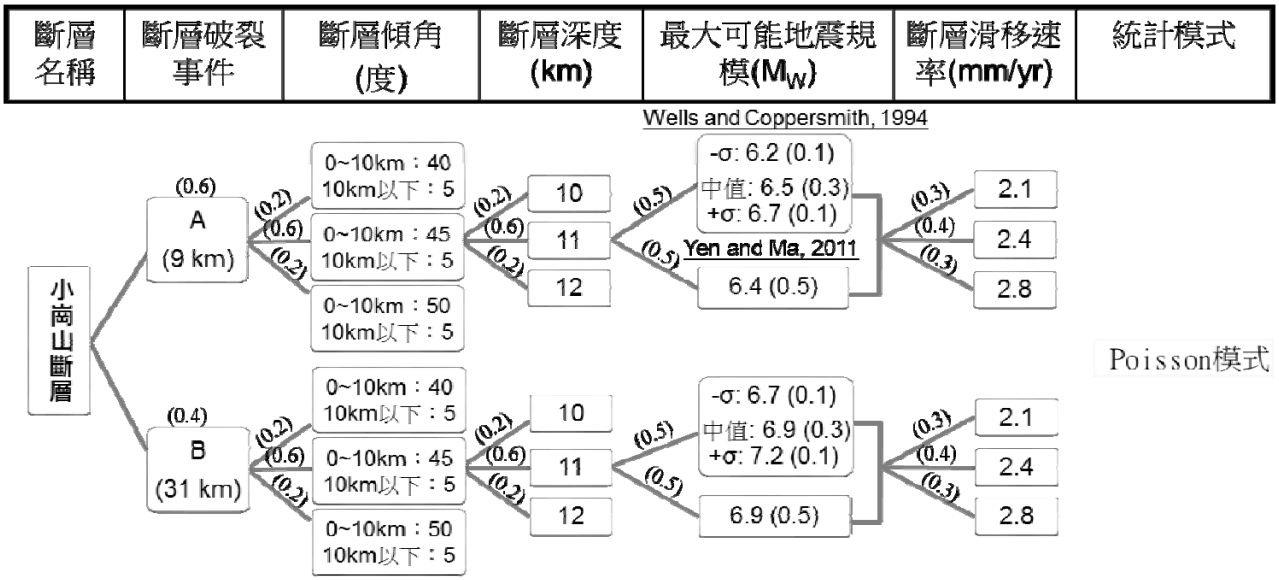


圖 3-5.9：小崗山斷層系統邏輯樹。

3-5-3 小崗山斷層特徵地震模式

小崗山斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式（詳附錄 3-1）得到一地震復發間隔時間，圖 3-5.10~圖 3-5.11 為 2 個破裂事件取邏輯樹傾角及深度中間值之特徵地震模式分布情形。

圖 3-5.9 之小崗山斷層邏輯樹可得到 216 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-5.12 為 2 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 6.4 與 6.5 之權重最高；破裂模式 B 以規模 6.9 之權重最高。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-5.13 為 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，其中破裂模式 A 在地震復發間隔時間 300 年~400 年間有較高之權重，破裂模式 B 在地震復發間隔時間 500 年~600 年間有較高之權重。

將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-5.14（a）之小崗山斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-5.14（b）之小崗山斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

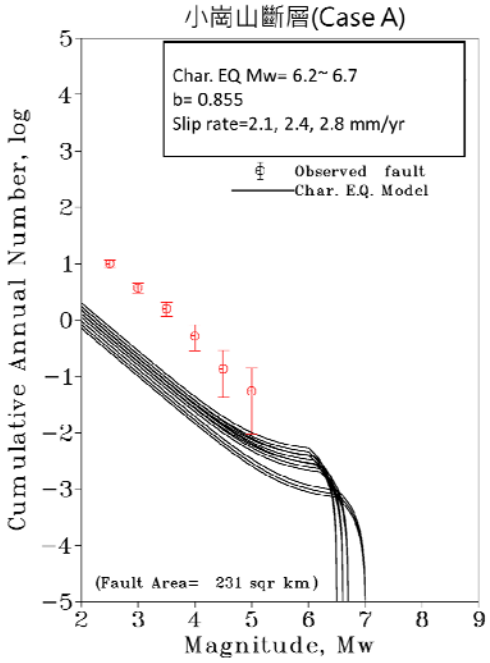


圖 3-5.10：A 事件特徵地震模式。

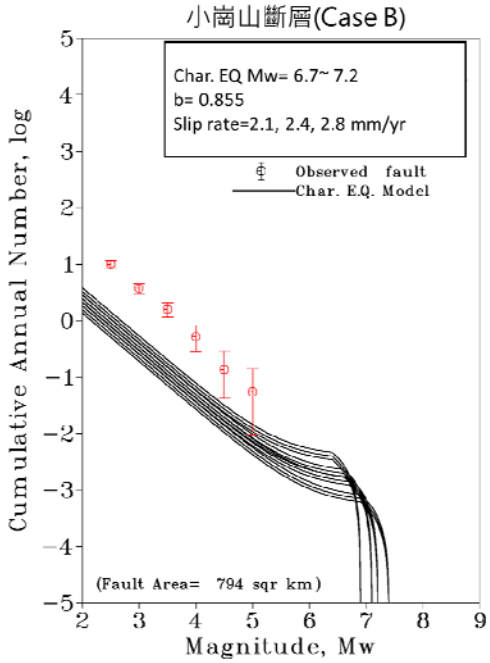


圖 3-5.11：B 事件特徵地震模式。

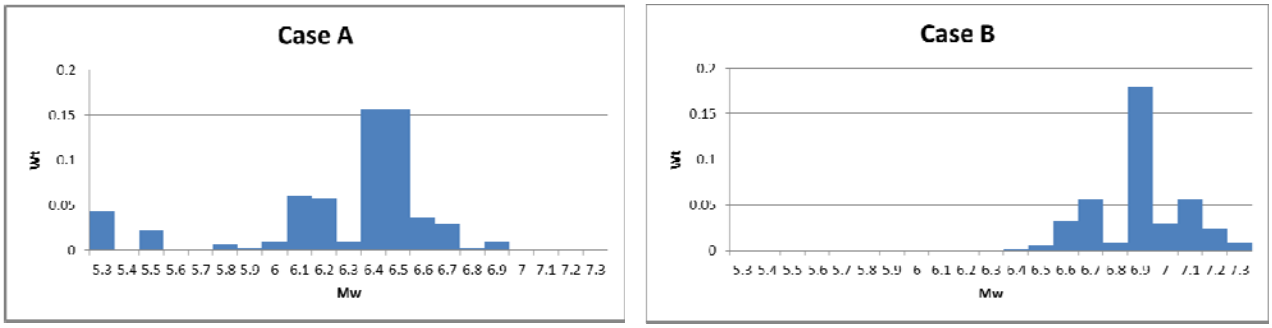


圖 3-5.12：小崗山斷層 2 種破裂事件之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

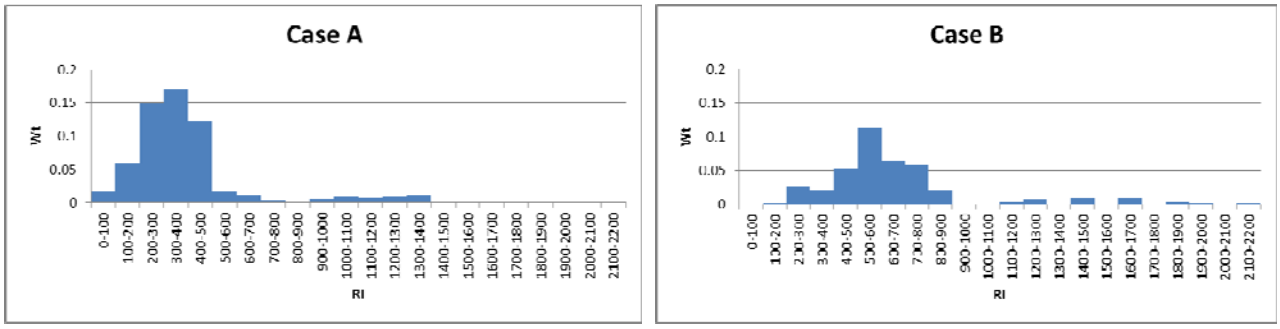


圖 3-5.13：小崗山斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

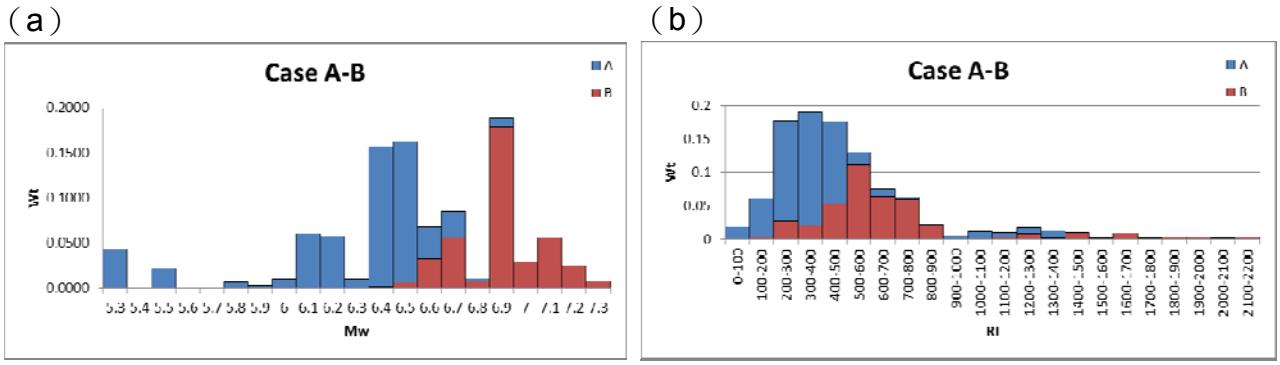


圖 3-5.14：（a）小崗山斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）小崗山斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-5-4 小崗山斷層發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式（詳附錄 3-1）估算斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，小崗山斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-5.4 為小崗山斷層 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.3~7.3 之機率為 8.1%、13.0%及 23.6%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 3.4%、5.6%及 10.7%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.4%、0.7%及 1.3%。

表 3-5.4：小崗山斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
5.3 ≦ M ≦7.3	8.1%	13.0%	23.6%
M ≧ 6.5	3.4%	5.6%	10.7%
M ≧ 7.0	0.4%	0.7%	1.3%

3-6 旗山斷層

3-6-1 旗山斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：地質調查所（林啟文等，2009）繪製之旗山斷層北起高雄旗山鎮附近，往南延伸至高雄縣仁武附近，全長約 30 公里，呈東北走向，為逆移斷層（吉田要，1932；鳥居敬造，1933；耿文溥，1967；Tsan and Keng, 1968）（圖 3-6.1）。旗山斷層通過中寮隧道，可觀測到顯著的變形作用，係具潛移作用的斷層，為第一類活動斷層。以往旗山斷層與其北邊的內英斷層合稱為旗山斷層（林啟文等，2000），但陳文山等（2005a）調查結果認為，內英斷層與旗山斷層兩側岩層特性不同，上下盤層位落差亦不同，因此認為旗山與內英為不同的兩斷層（圖 3-6.2）。由於兩斷層間僅相隔著楠梓仙溪，距離相近，走向一致，且內英斷層位在旗山斷層的延伸線上，因此本計畫不排除兩者一起破裂的可能性。陳文山等（2012）由地表或井下岩盤特性分析結果，認為旗山斷層往南經大社 A、B 剖面之間，後往南經澄清湖東側與大社丘陵之間凹谷，再沿鳳山丘陵西側進入海域，總長自旗山鎮至海岸線達 51 公里。澄清湖西側前緣應還有一分支斷層，造成澄清湖附近的丘陵地形，以及相較西側都會區呈現較快的抬升速率（圖 3-6.3）。內英斷層與旗山斷層因岩性差異以楠梓仙溪為分段點；大社以南，斷層位置較不精確，本計畫稱為南部延伸段。鳳山丘陵以西的海域，根據 Liu et al.（1997）的海底震測資料，可觀察到泥貫入體沿斷層面發展，因此本計畫將海域部分斷層線延伸至測線位置，約 11 公里長（圖 3-6.4）。

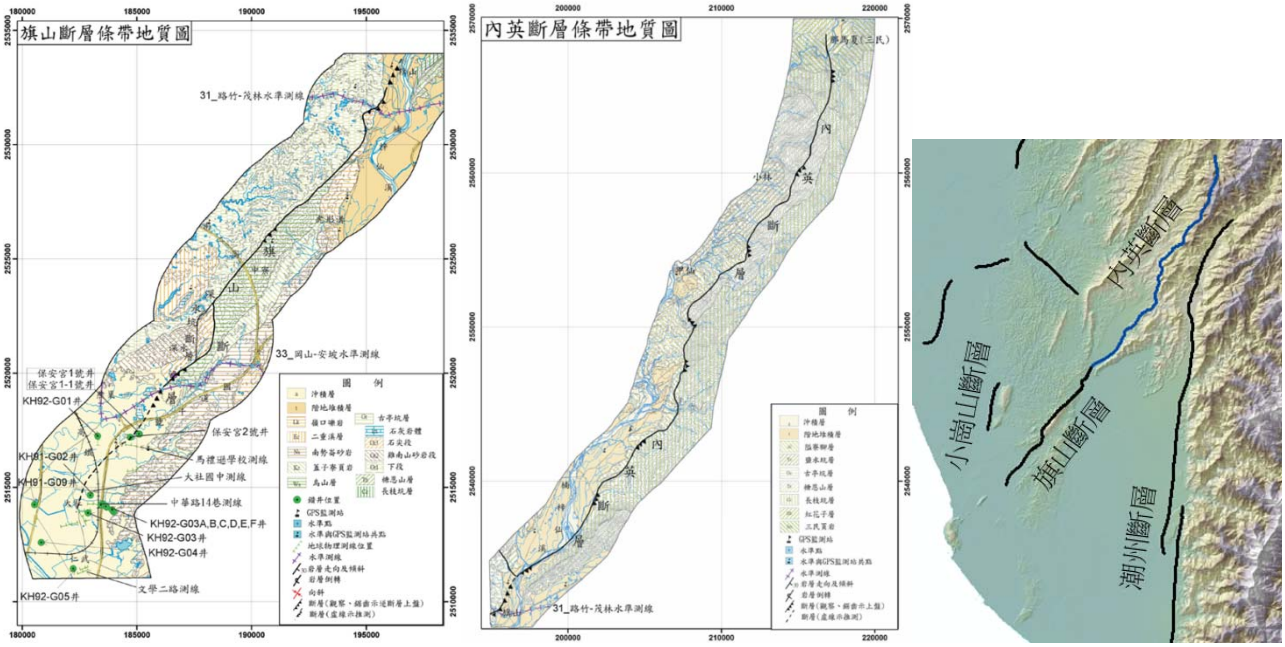


圖 3-6.1：旗山斷層、內英斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。

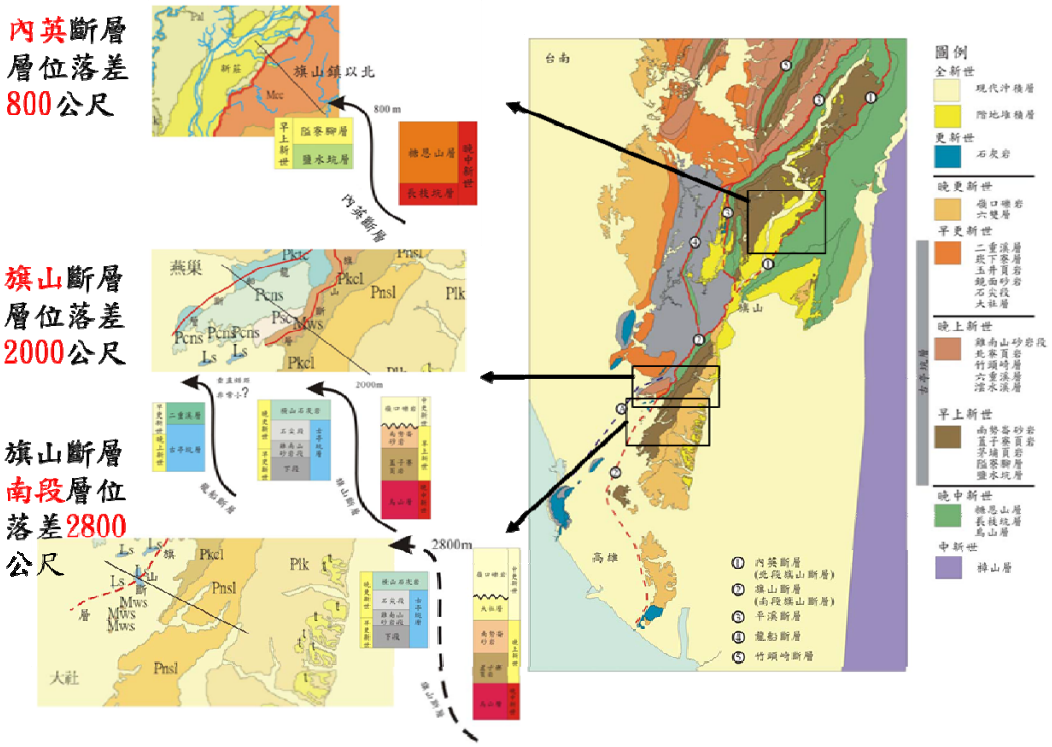


圖 3-6.2：旗山斷層、內英斷層兩側岩性與層位落差（陳文山等，2005a）。

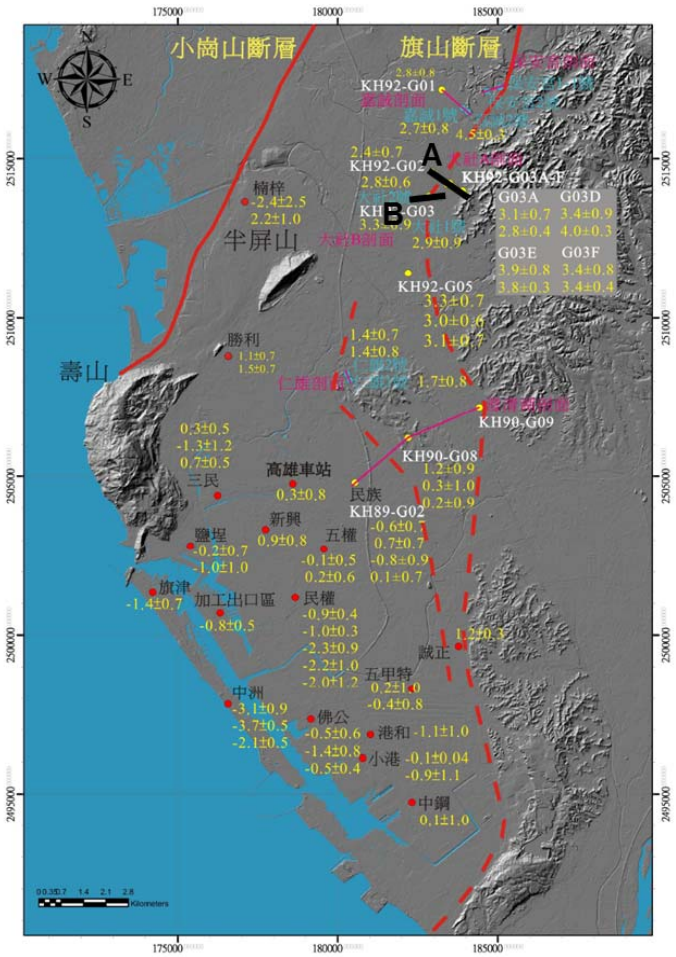


圖 3-6.3：旗山斷層南部延伸段（陳文山等，2012）。

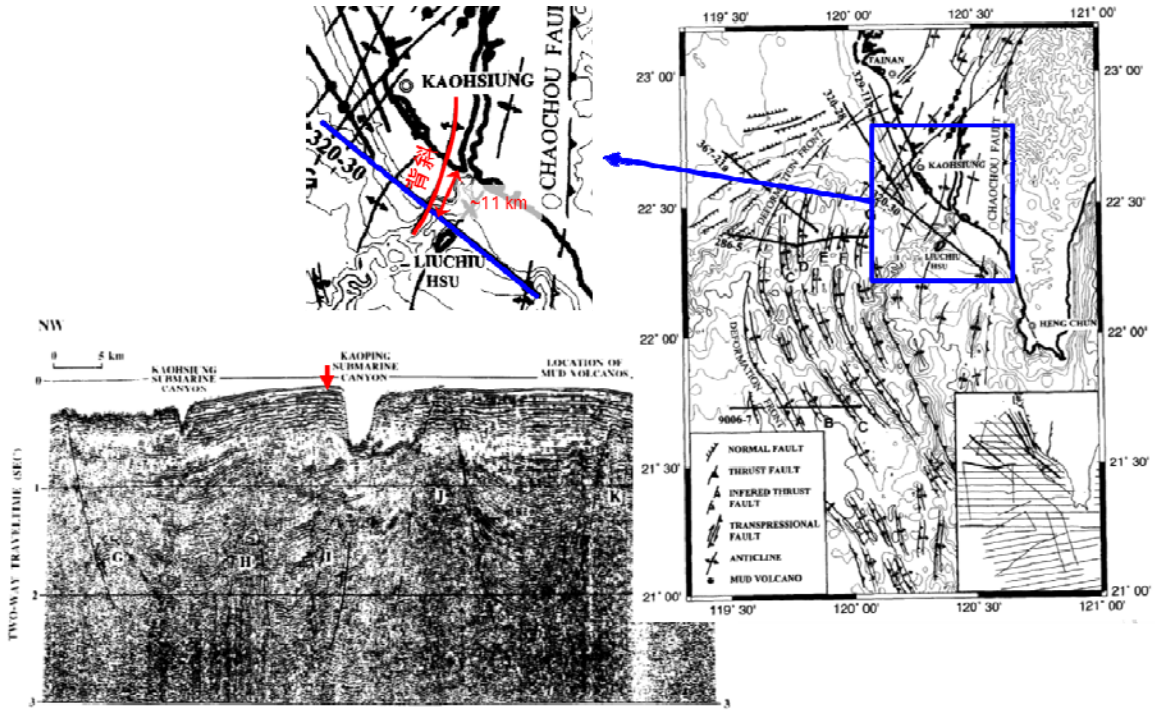


圖 3-6.4：鳳山丘陵西側海域震測資料（Liu et al., 1997）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 陳柏村（2005）在中寮隧道附近南勢湖剖面觀察斷層露頭並量測斷層位態，主斷面位態為 N30E/50S，斷層擦痕量測到兩組位態 N44E，60S/RAKE80，TL、N52E，56S/RAKE90，T，顯示旗山斷層為逆移為主兼具左移分量的斷層（圖 3-6.5）。陳柏村（2005）也指出，旗山斷層係由一主斷層帶及多個分支斷層組成的變形帶，整體變形帶寬度約 40~400 公尺，而主斷層變形帶寬度為 9~30 公尺。

(2) 由大社二號測線的淺層反射震測結果顯示，近地表處有一不連續面，往下延伸至約 170 公尺深，對應其延伸處的地表特徵，推測應為旗山斷層，其傾角為 65 度向東（張家鳳，2005）（圖 3-6.6）。

(3) 旗山斷層的地下構造模型，鄭宏祺（2000）認為旗山斷層與龍船斷層、古亭坑斷層為疊瓦狀構造，由於此區域出露最老的岩層為長枝坑層，因此滑脫面應位在長枝坑層底部或更深，推估深度約 9-12 公里左右（圖 3-6.7）。洪日豪（2006）也認為此區域為疊瓦狀構造。黃旭燦等（2004）繪製的地質剖面通過內英斷層，傾角約 50 度，其剖面具有雙坪構造與三角構造帶的特徵（圖 3-6.8）。

(4) 蔡旻倩（2013）利用 GPS 資料反演推測旗山斷層傾角為 50-60 度向東，沿斷層面滑移速率約 23-25 mm/yr，並認為旗山斷層東側應存在一不同於嘉南地區之滑脫面，其深度約 8-10 公里，與鄭宏祺（2000）觀測結果相近。此外，斷層東西兩側運動形式不同，西側為典型的構造逃脫運動型態，而東側的速度改變可能主要來自於構造沿基底滑脫面移動所致，構造逃脫僅發生在近海處沉積物厚而質地較軟的區域（圖 3-6.9）。

(5) 由 1935 至 2010 年地震目錄顯示，此區域地震深度主要集中於 16 公里以上（圖 3-6.10）。

以上斷層幾何相關研究資料彙整於表 3-6.1。

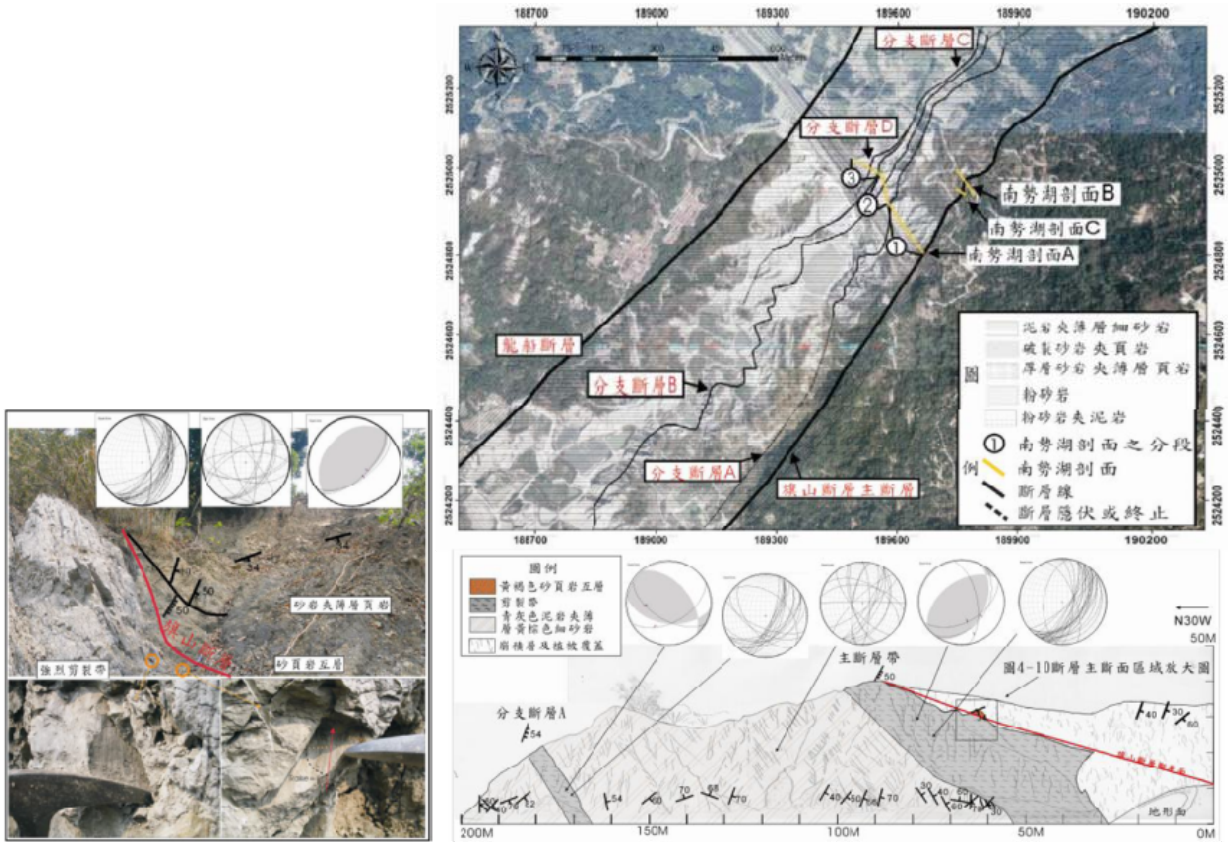


圖 3-6.5：旗山斷層野外露頭（陳柏村，2005）。

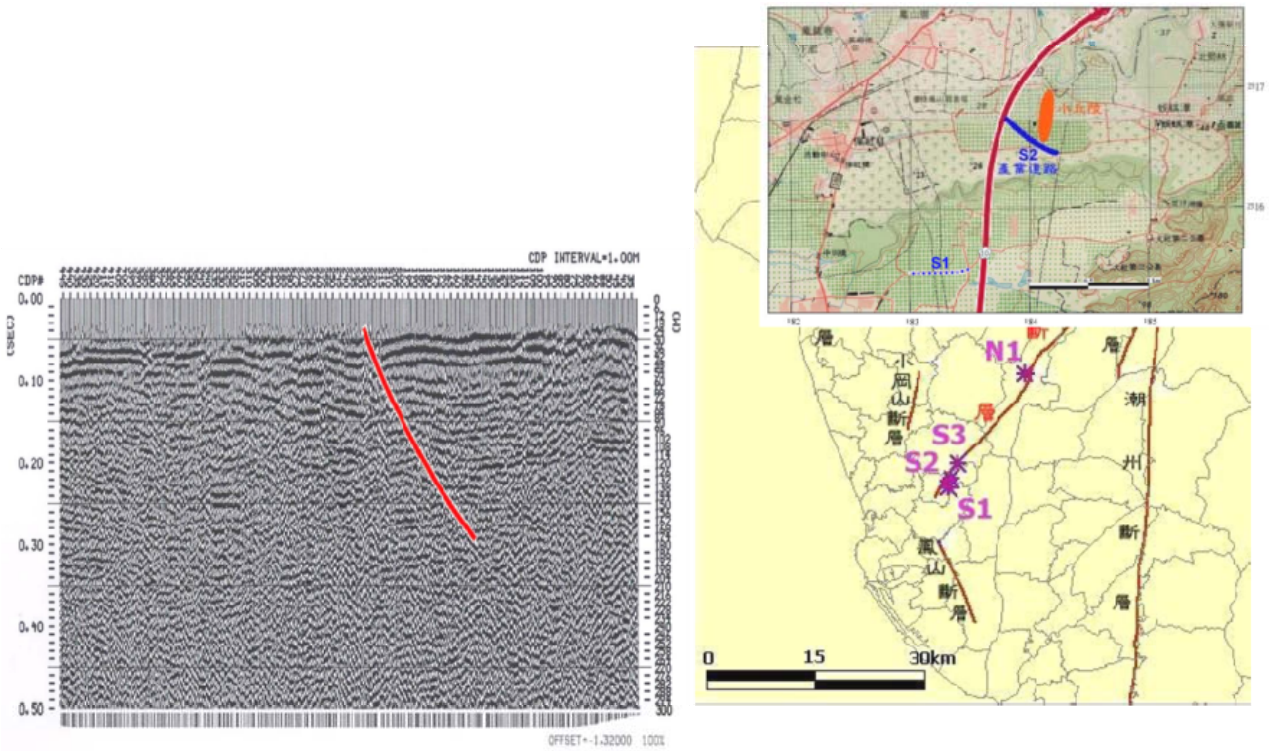


圖 3-6.6：旗山斷層震測資料（張家鳳，2005）。

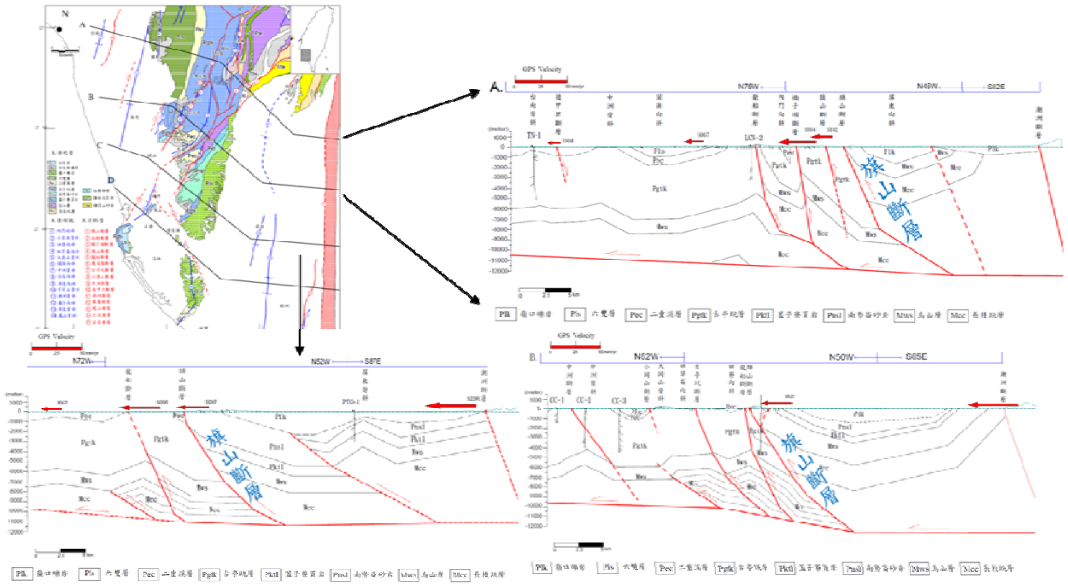


圖 3-6.7：旗山斷層平衡剖面（鄭宏祺，2000）。

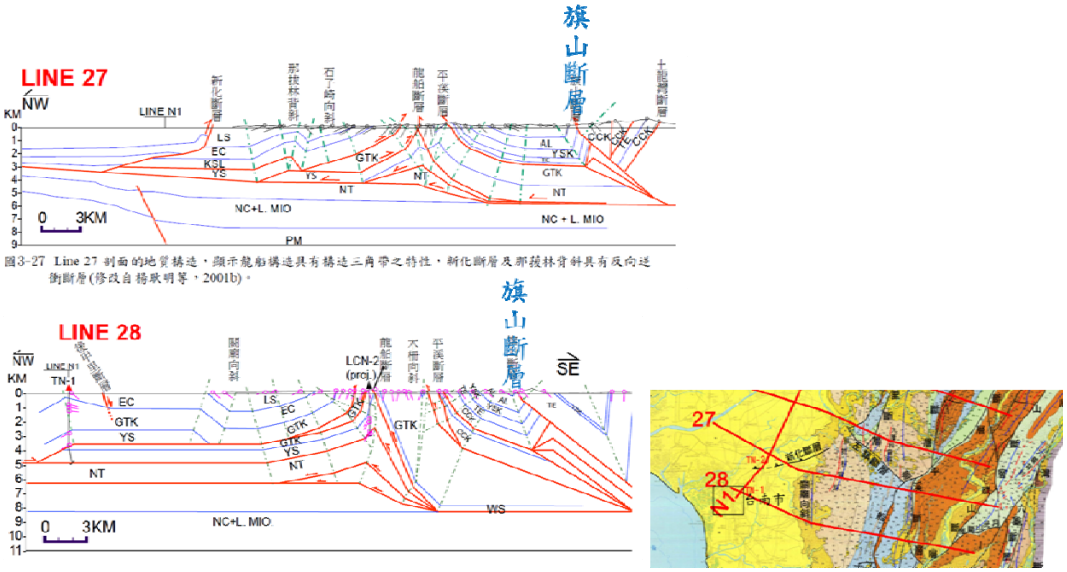


圖 3-6.8：旗山斷層平衡剖面（黃旭燦等，2004）。

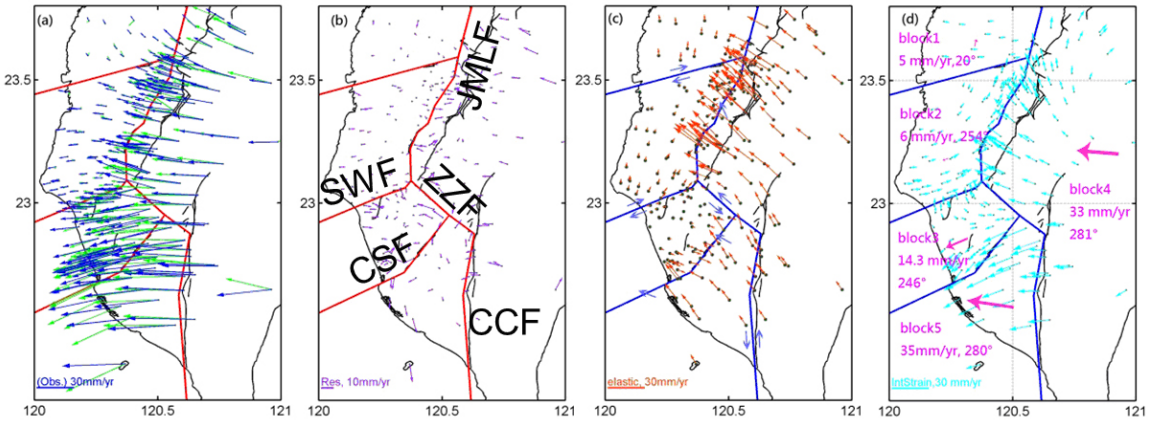


圖 3-6.9：GPS 資料反演斷層幾何（蔡旻倩，2013）。

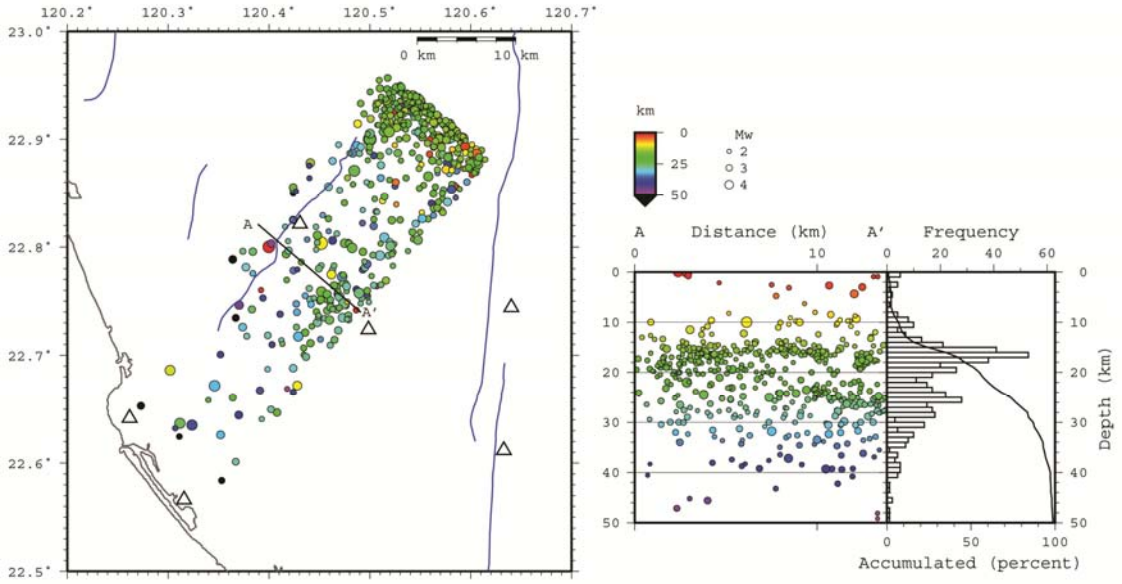


圖 3-6.10：旗山斷層地震深度分布資料。

表 3-6.1：旗山斷層幾何相關文獻彙整。

參考文獻	方法	傾角	深度
陳柏村，2005	野外露頭觀察	約 60 度向東	--
張家鳳，2005	淺層反射震測	65 度向東	--
黃旭燦等，2004	平衡剖面	50 度向東（內英斷層)	--
鄭宏祺，2000	平衡剖面	--	9-12 公里
蔡旻倩，2013	GPS 資料反演	50-60 度向東	8-10 公里
本計畫推估	地震深度分布	--	集中於 16 公里以上

3. 斷層機制：Chiang et al.（2004）認為旗山斷層原為一正斷層，而後轉為逆斷層。陳柏村（2005）及陳柏村等（2009）觀察斷層露頭與斷層擦痕，認為主斷層面上的滑移形式為逆移為主兼具左移分量，但部分分支斷層卻顯示右移的特性，大地測量結果也顯示，旗山斷層為逆移兼走向滑移分量的斷層，但走向滑移分量以右移為主（Lacombe et al., 2001；Hu et al., 2007；侯進雄等，2004；胡植慶，2004；Ching et al., 2007；台灣世曦，2011）。陳柏村等（2009）認為，造成長期地質時間尺度的資料與反應短時間尺度的大地測量資料滑移方向不一致的原因，可能是在旗山斷層鎖定的狀態下，岩體受到右剪加上縮短作用而造成的「視右移」，此變形作用的原因，也許是旗山斷層下盤的古亭坑層相對於上盤的地層是弱岩，當岩層受到東至東南方的作用力時，最先反應出來的是整體岩層的單剪變形與縮短作用，而旗山斷層主斷面並無滑動。
4. 短期滑移速率：參照表 3-6.3。
5. 長期滑移速率：大社 A 剖面共有 7 口鑽井，最北側的 KH92-G02 井位在斷層下盤，其抬升速率為 2.4±0.7 mm/yr，其餘鑽井位在上盤，抬升速率為 3.4±0.8 mm/yr 至 4.0±0.3 mm/yr，相較下盤長期抬升速率快約 1.0-1.6 mm/yr。由大社二號震測剖面得知斷層傾角為 65 度（張家鳳，2005），換算沿斷層面滑移速率為 1.1-1.8 mm/yr。大社 B 剖面有 3 口鑽井，大社 2 號井位在下盤，長期抬升 2.8±0.6 mm/yr，上盤 KH92-G03 鑽井抬升速率為 3.3±0.9 mm/yr，相較下盤長期抬升速率快約 0.5 mm/yr（陳文山等，2012）（圖 3-6.11）。以斷層傾角 65 度換算沿斷層面滑移速率為 0.6 mm/yr。彙整以上長期滑移速率相關文獻如表 3-6.2。

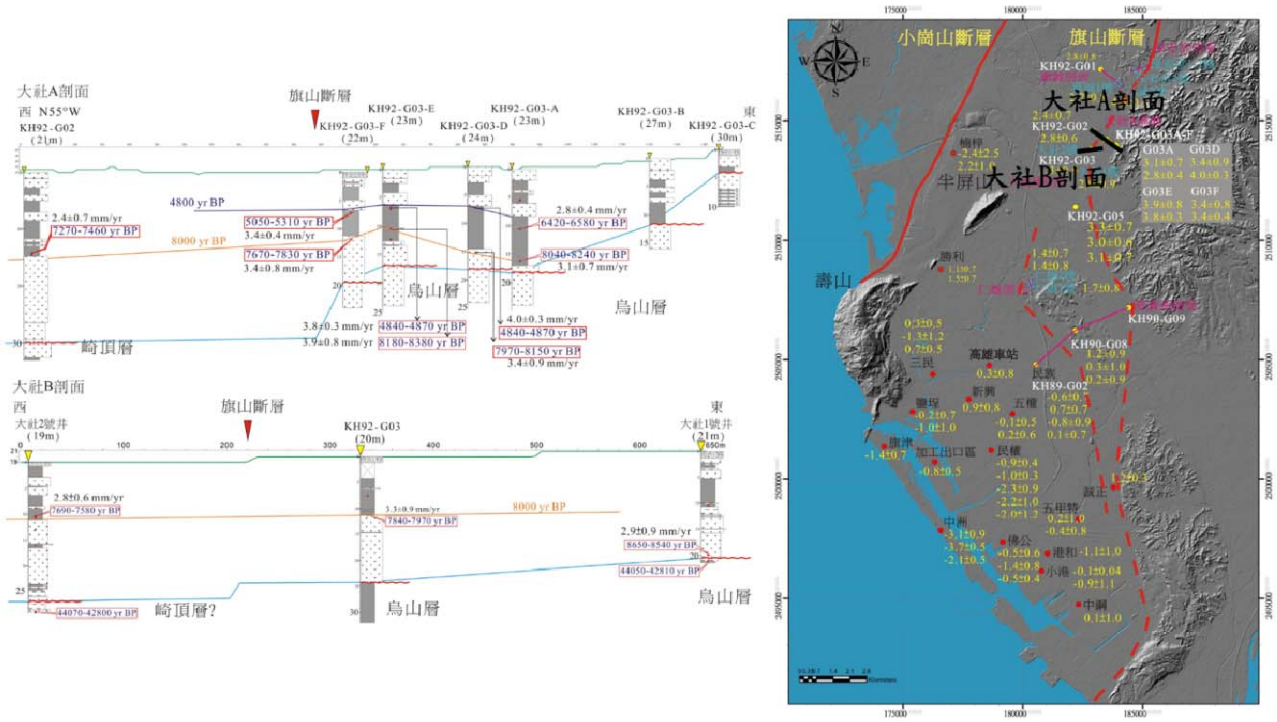


圖 3-6.11：旗山斷層鑽井資料（陳文山等，2012）。

表 3-6.2：旗山斷層長期滑移速率相關文獻彙整。

參考文獻	方法	長期滑移速率(mm/yr)
陳文山等，2012	大社 A 鑽井資料	1.1-1.8
陳文山等，2012	大社 B 鑽井資料	0.6

6. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。
7. 單一事件變位量：無。
8. 最近一次活動時間：野外調查深水溪北岸露頭，發現旗山斷層截切全新世河階礫石層，礫石層與崩積層年代為 7189±160 yr BP，顯示全新世以來仍有活動（陳文山等，2005a）。此外，由大地測量監測顯示旗山斷層為潛移的構造。

彙整前人對於旗山斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-6.3 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-6.3：旗山斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
旗山斷層	斷層分段與破裂事件	A 旗山斷層 B 旗山斷層、南部延伸段 C 旗山斷層、內英斷層 D 旗山斷層、內英斷層、南部延伸段	地形、野外調查、岩層對比、鑽井、海域震測資料	吉田要，1932；鳥居敬造，1933；耿文溥，1967；Tsan and Keng, 1968；林啟文等，2009；陳文山等；2012；Liu et al., 1997
	長度 (km)	A：30；B：62 C：71；D：103		
	寬度 (km)	11.6	深度/sin 傾角 （以深度 9.8 公里，傾角 58 度計算）	
	破裂深度 (km）	9-12 公里	平衡剖面	鄭宏祺，2000
		8-10 公里	GPS 資料反演	蔡旻倩，2013
		集中於 16 公里以上	1935-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積 (km^2)	A：347；B：716 C：820；D：1190	長度×寬度 （以深度 9.8 公里，傾角 58 度計算）	
	走向	呈東北一西南走向		
	傾斜角度 (度)	60 度	野外露頭	陳柏村，2005
		65 度	震測資料	張家鳳，2005
		50 度	平衡剖面	黃旭燦等，2004
		50-60 度	GPS 資料反演	蔡旻倩，2013
	斷層機制	逆移斷層		

	短期滑移速率 (mm/yr)	平行斷層走向分量 10 mm/yr（右移） 垂直斷層走向分量 32 mm/yr（伸張） 高程方向抬升量 80 mm/yr	(2011~2013)GPS 資料、水準測量	張李群，2014
		23-25（沿斷層面）	GPS 資料反演	蔡旻倩，2013
	長期滑移速率 (mm/yr)	1.1-1.8	大社 A 鑽井資料	陳文山等，2012
		0.6	大社 B 鑽井資料	
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	4.86	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)	1.1-1.7（以規模 6.5-7.1 計算）	1og D = 0.29 Mw - 1.84（逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模 (Mw)	A：6.7；B：7.0 C：7.1；D：7.2	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.7；B：7.0 C：7.0；D：7.2	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	900-1,000	特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-6.20 圖 3-3.14）	本計畫推估
	最近一次活動時間	7189±160 yr BP	深水溪北岸露頭	陳文山等，2005a

3-6-2 旗山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

旗山斷層之破裂模式，本計畫綜合陳文山等（2012）的看法及 Liu et al.（1997）的震測資料結果，分為 4 種破裂事件來討論。內英斷層與旗山斷層兩側岩性雖有差異，但兩斷層距離相近，且走向一致，並位在旗山斷層的延伸線上，因此不排除兩者一起破裂的可能性，兩斷層以楠梓仙溪為分段點；大社以南，斷層位置較不精確，本計畫稱為南部延伸段，海域部分則參考震測資料，延長約 11 公里。4 種破裂模式分別為，A 為旗山斷層單獨破裂，B 為旗山斷層、南部延伸段（含海域部分）同時破裂，C 為旗山斷層、內英斷層破裂，D 為旗山、內英、南部延伸段（含海域）整段同時破裂。本計畫認為整段破裂之可能性較低，因此給予較低的權重，而斷層單獨破裂的可能性較高，因此旗山斷層單獨破裂模式給予較高的權重。所有破裂模式之權重分配為 A（0.5）、B（0.2）、C（0.2）、D（0.1），如圖 3-6.12 所示。

旗山斷層傾角及破裂深度，綜合野外露頭調查、淺層震測、平衡剖面、GPS 資料反演等前人文獻資料，得知傾角約 50~65 度，因此本計畫以此做為邏輯樹上下界，其平均值做為邏輯樹中間值。權重分配為 50 度（0.2）、58 度（0.6）、65 度（0.2）。由鄭宏祺（2000）及蔡旻倩（2013）研究結果，得知滑脫面深度約 10 公里，本計畫以此作為邏輯樹下界；地震深度分布主要集中於 16 公里以上，以此作為上界，中間值取 13 公里深。破裂深度權重分配為 10 公里（0.2）、13 公里（0.6）、16 公里（0.2）。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-6.4 所示為利用邏輯樹中值所求得之各破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

旗山斷層之長期滑移速率，由陳文山等（2012）大社 A 鑽井資料及張家鳳（2005）震測資料，得到斷層長期滑移速率為 1.1-1.8 mm/yr，本計畫以此做為邏輯樹上下分支，其平均值做為邏輯樹中間分支，權重分配為 1.1（0.3）、1.5（0.4）、1.8（0.3）。

旗山斷層各節點權重的分配詳如圖 3-6.13 所示。

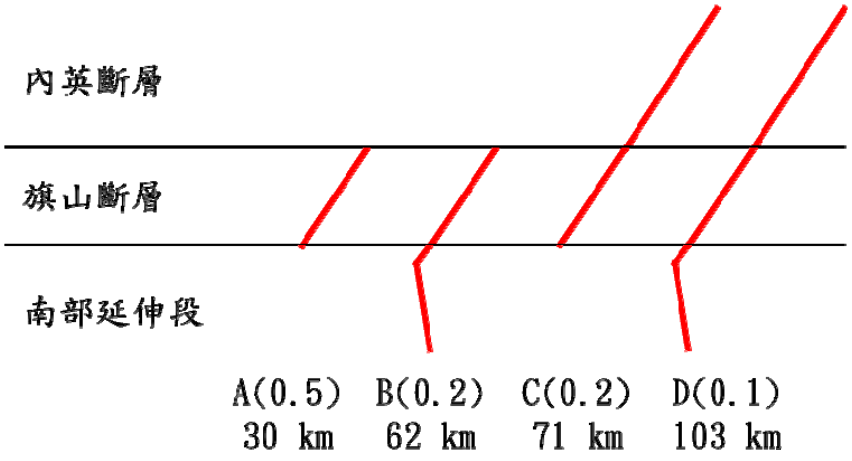


圖 3-6.12：旗山斷層之破裂模式。

表 3-6.4：旗山斷層之中值各破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
A	30	9.8	13	58	459	6.5	6.7	7.0	6.7
B	62	9.8	13	58	949	6.8	7.0	7.3	7.0
C	71	9.8	13	58	1086	6.8	7.1	7.3	7.0
D	103	9.8	13	58	1576	7.0	7.2	7.5	7.2
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

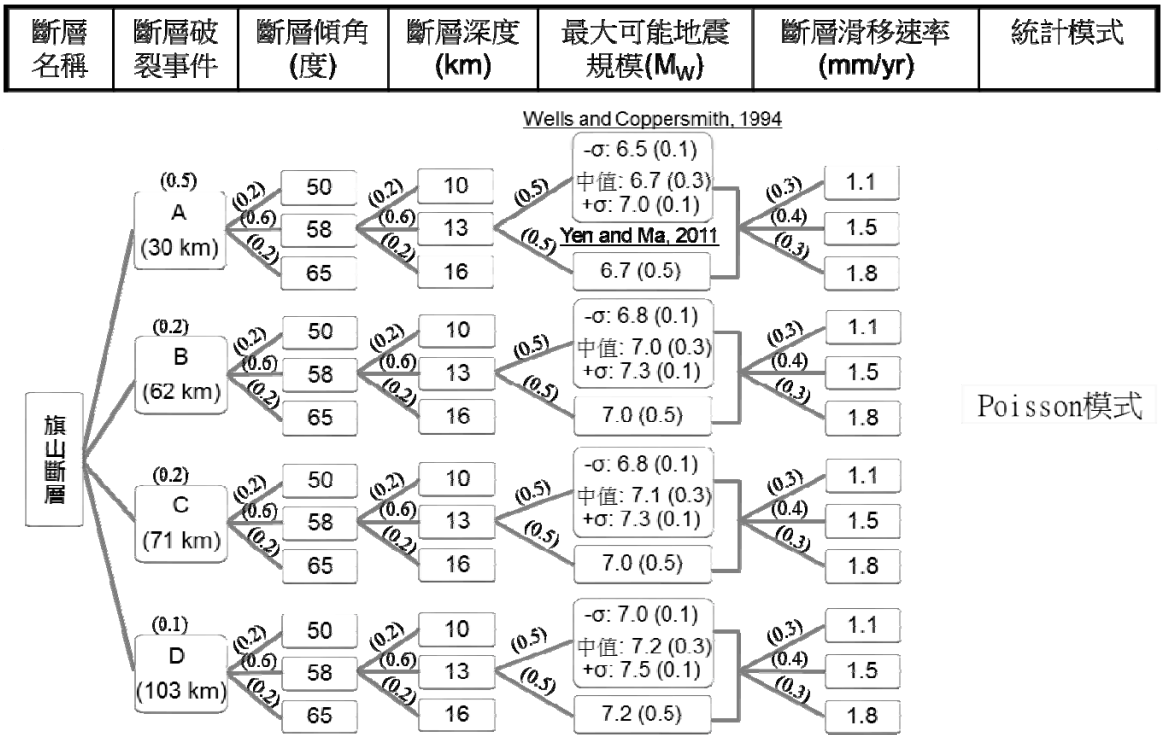


圖 3-6.13：旗山斷層邏輯樹。

3-6-3 旗山斷層特徵地震模式

旗山斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式（詳附錄 3-1）得到一地震復發間隔時間，圖 3-6.14 至圖圖 3-6.17 為破裂事件取邏輯樹傾角及深度中間值之特徵地震模式分布情形。

圖 3-6.13 之旗山斷層邏輯樹可得到 433 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-6.18 為 4 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 6.7 之權重最高，6.8 次之，破裂模式 B 以規模 7.0 之權重最高，6.9 次之，破裂模式 C 以規模 7.0 之權重最高，7.1 次之，破裂模式 D 以規模 7.2 之權重最高，7.1 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-6.19 為 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，破裂模式 A 在地震復發間隔時間 600 年~700 年間有較高之權重，而破裂模式 B 在地震復發間隔時間 900 年~1000 年間有較高之權重，而破裂模式 C 在地震復發間隔時間 1100 年~1200 年間有較高之權重，而破裂模式 D 在地震復發間隔時間 1600 年~1700 年間有較高之

權重。

將 4 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-6.20（a）之旗山斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖圖 3-6.20（b）之旗山斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

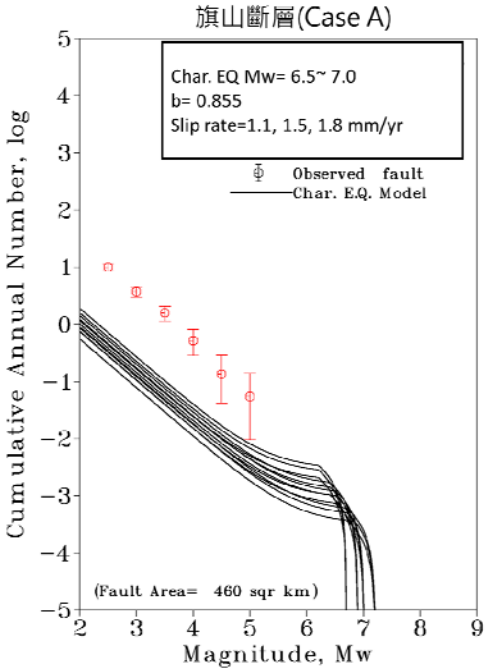


圖 3-6.14：A 事件之特徵地震模式。

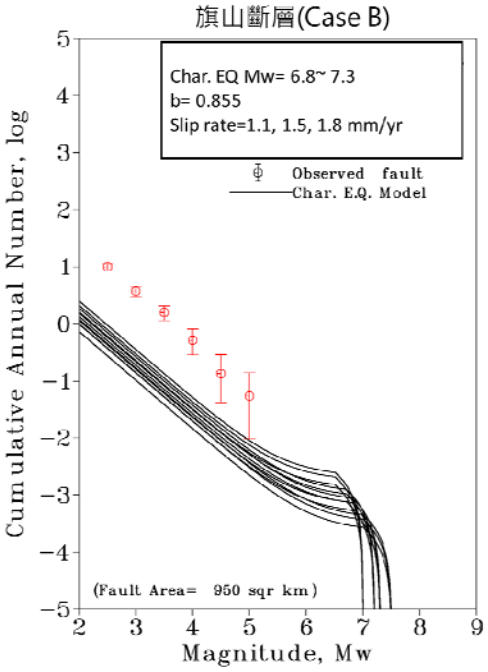


圖 3-6.15：B 事件之特徵地震模式。

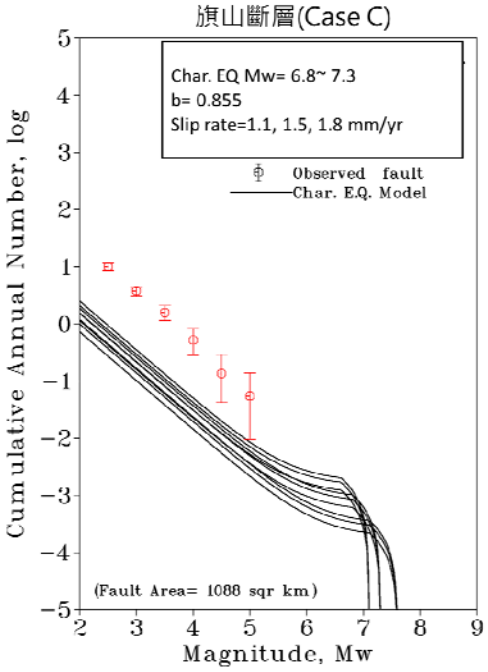


圖 3-6.16：C 事件之特徵地震模式。

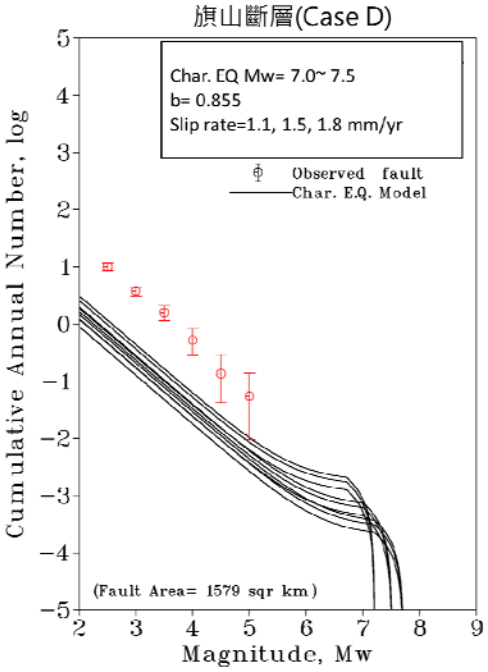


圖 3-6.17：D 事件之特徵地震模式。

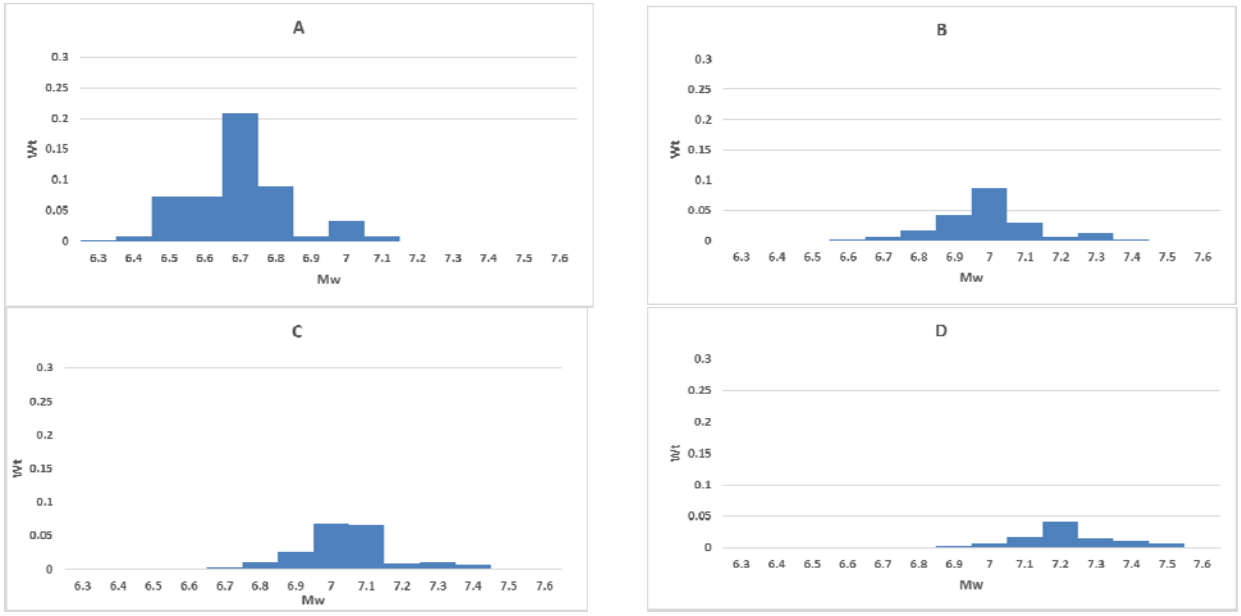


圖 3-6.18：旗山斷層之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

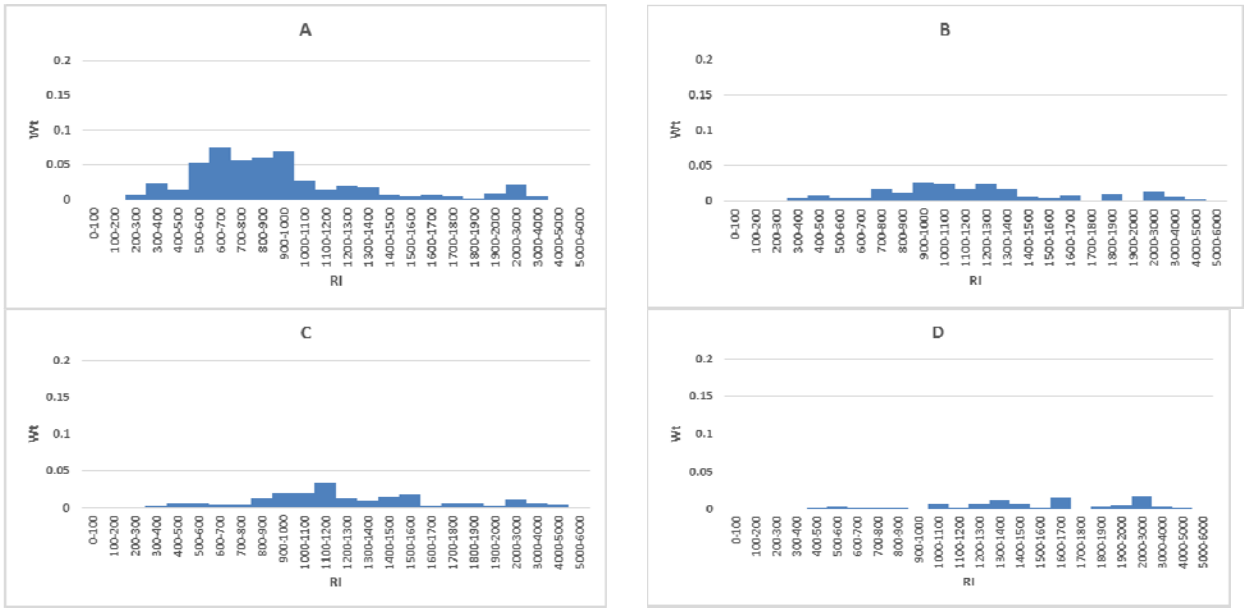


圖 3-6.19：旗山斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

（a）　　（b）

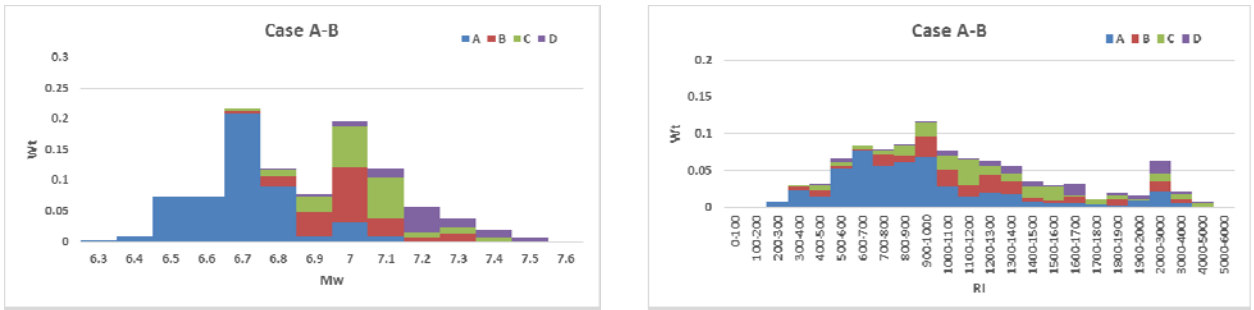


圖 3-6.20：（a）旗山斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）旗山斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-6-4 旗山斷層發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以BPT 模式（詳附錄 3-1）估算斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，旗山斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 3-6.5 為旗山斷層 Poisson 模式評估之結果，自西元 2015 年以後，未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.3~7.6 之機率為 3.2%、5.3%及 10.3%，發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 3.1%、5.2%及 10.0%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.9%、1.6%及 3.1%；發生地震矩規模 7.5 以上之機率為 0.01%、0.01%及 0.02%。

表 3-6.5：旗山斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.3 ≦ M ≦ 7.6	3.2%	5.3%	10.3%
M ≧ 6.5	3.1%	5.2%	10.0%
M ≧ 7.0	0.9%	1.6%	3.1%
M ≧ 7.5	0.01%	0.01%	0.02%

3-7 潮州斷層

3-7-1 潮州斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

根據地調所 2009 年出版之特刊第二十三號（林啟文等，2009），潮州斷層可以分為南北兩段，北段由高雄縣六龜鄉寶來村向南延伸至屏東縣三地門鄉大津村，長約 28 公里，本段又稱土壟灣斷層（鳥居敬造，1933），南段由大津村向南延伸至枋寮鄉加祿村，長約 61 公里（Tomita, 1955），總長約 89 公里（圖 3-7.1 左圖）。

陳文山等（2005b）推測潮州斷層北段位置，如圖 3-7.2 六龜地質圖，在六龜以北，分析紅水坑溪出露礫岩層並非六龜礫岩，而是分屬兩種不同組成的礫石層，因此重新命名為紅水坑礫岩與 L 礫石層，東側的紅水坑礫岩不整合沉積在樟山層之上，西側的 L 礫石層不整合覆於長枝坑層之上，紅水坑礫岩與 L 礫石層之間則以斷層接觸（圖 3-7.3），該斷層即為潮州斷層，也稱土壟灣斷層。在六龜以南，斷層向南延伸至六龜橋東側，仍有長枝坑層出露，顯示斷層可能為河階礫石層所掩覆，因此六龜地區潮州斷層位於階地西側的荖濃溪河床中（圖 3-7.2）。六龜斷層則位於六龜礫岩與長枝坑層之間。經量測潮州斷層與六龜斷層相接以北的土壟灣斷層，長度約 16 公里。

石再添與鄧國雄（1983）認為潮州斷層之斷層跡原位於斷層引曳崖下，呈明顯的南北向直線狀山麓線，後來因北方荖濃溪谷與東側河谷的沖積物，和沿崖坡而下的崩積物的堆積，逐漸在山麓前緣形成廣大的沖積扇群。沖積扇群因逆斷層活動，形成背斜隆起及平行的副斷層，遂產生傾動面、反斜斷崖、斷層溝及斷側丘等斷層地形。受新堆積物掩覆的潮州斷層在後續的逆斷層作用時，其斷層延伸穿越新堆積層，致使露出地表的斷層跡向西外移，現今的位置約在扇階群的扇端附近。

陳文山等（2005b）研判斷層位於沖積扇階崖的西側，證據包括（1）紅水坑礫岩向南延伸至口社溪的扇階之下，（2）在青葉、青山（沙漠溪）、馬兒（安坡溪）、坪頂（口社溪）等地區扇階下，出露一層傾斜的砂礫岩層，岩性與紅水坑礫岩相似，不整合覆於樟山層之上，而扇階礫石層不整合覆於此傾斜礫岩層之上，青葉扇階的最西側階崖下出露此傾斜約 50°的砂礫岩層，而青葉溪河床中砂礫岩層的傾角約 10-20°，傾角向西逐漸變陡，研判斷層通過這些扇階的西緣，造成上盤岩層傾角變陡。

圖 3-7.1 右圖陳文山（2006）之地質圖中可看到在潮州斷層北段有許多沖積扇階群，在過了平頂山之南段則無顯著的階地，潮州斷層可能在平原處被掩覆，如江新春所提及的萬隆斷層（圖 3-7.7），也有可能連接至中央山脈前緣（最東側）的線形崖位置，本計畫認為此處可作為一斷層行為的分段點，北段長度約 44 公里，南段長度約 30 公里。

圖 3-7.4 為臺灣西南部海域地形及構造線形判釋（Lin et al., 2008），本計畫認為潮州斷層延伸至外海的可能性不高，原因是從潮州斷層出海後到海底峽谷之間有一段平坦的地形，無觀察到因受到斷層錯動形成之地形崖，較有可能沿著山脈前緣向南延伸，如圖 3-7.4 中紅色虛線位置，延伸長度為 16 公里。

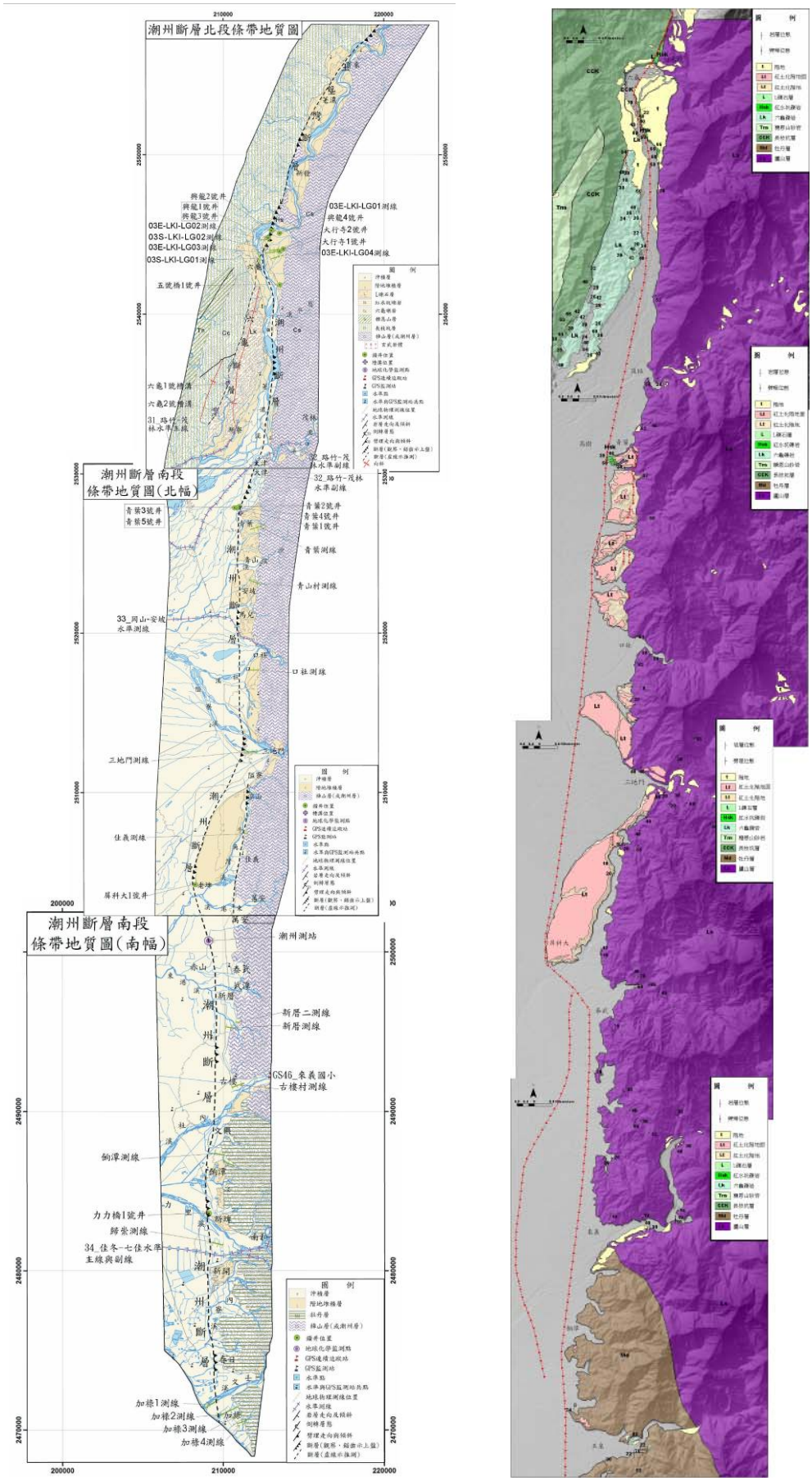


圖 3-7.1：左圖：潮州斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）（座標系統：TWD67），右圖：潮州斷層沿線地質圖（引自陳文山等，2006）。



圖 3-7.2：六龜地區地質圖（陳文山等，2005b）。

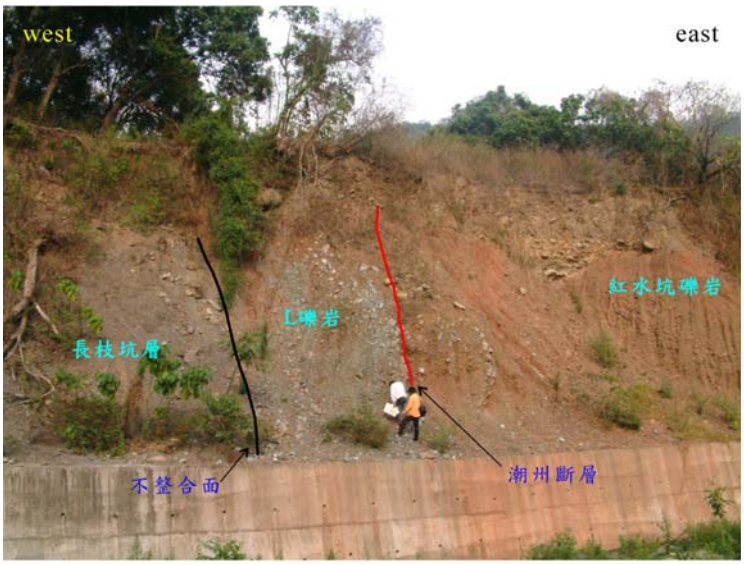


圖 3-7.3：青灰色的 L 礫岩不整合於左側的長枝坑層，其與紅水坑礫岩則為斷層接觸。（陳文山等，2005b）。

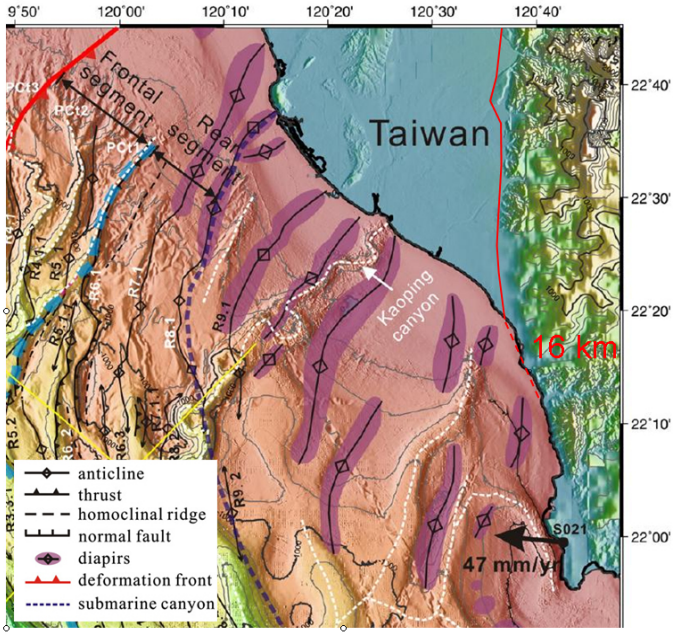


圖 3-7.4：臺灣西南部海域地形及構造（修改自 Lin et al., 2008）。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：

(1) 謝世雄（Hsieh, 1970）由重力異常資料指出屏東平原是一巨厚而鬆軟沉積物所填滿沉積槽谷，其東緣的重力梯度甚陡，由屏東平原的重力低值區陡升至中山山脈的高值區，推測有一向東傾斜 75 至 80 度的高角度逆斷層（圖 3-7.5）。

(2) 江新春（Chiang, 1971）由震測及鑽井資料指出，潮州東南方約 7 公里處的潮州背斜西翼為萬隆逆斷層所切斷，剖面線平面分布如圖 3-7.6，斷層面向東傾斜 50 度（圖 3-7.7），至於東側受限於震測之品質無法觀察出潮州斷層之地下形貌。

(3) 林昱圻（2008）於屏東縣舊寮村萬興巷內及位於屏東縣青山村民族巷進行淺層震測

（圖 3-7.8），結果顯示位於沖積扇階地西側之 CCU-WS 側線跨過潮州斷層，斷層為一傾角向東之高角度逆衝斷層，由深部斷層破裂面向上有數條分支破裂帶，位於中央山脈與沖積扇間的 CCU-MZ 側線，顯示階地堆積受到一向西傾約 35 度的逆斷層切穿，推測為潮州斷層的背衝斷層，圖 3-7.9 為藉由淺層震測剖面推估之地下幾何模型。

(4) 由 1900-2010 潮州斷層北段中央氣象局地震目錄深度分布圖顯示此區域地震主要集中於 20 公里以內（圖 3-7.10）；潮州斷層南段中央氣象局地震目錄深度分布圖則顯示此區域地震多超過 20 公里（圖 3-7.11）。

(5) 為了了解潮州斷層孕震深度，本計畫蒐集 Francis T. Wu et al.（2014）的地震及速度構造剖面（圖 3-7.12），從地震深度剖面中推估潮州斷層孕震深度約在 15-20 公里。

潮州斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-7.1。

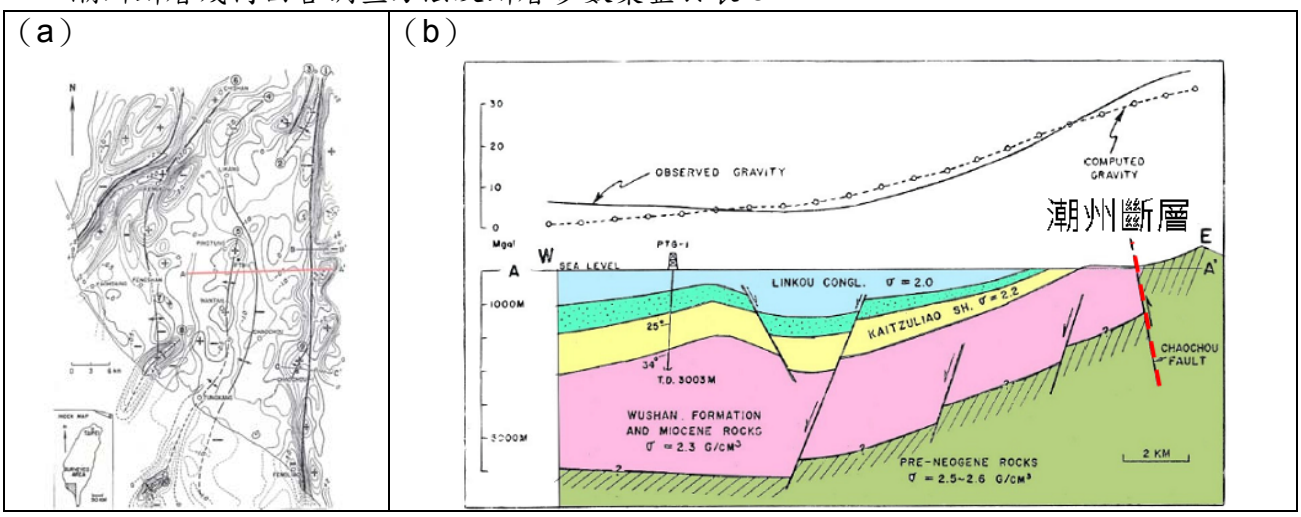


圖 3-7.5：（a）屏東地區的剩餘重力值圖（b）重力值逆推所得屏東平原的地下構造，位於（a）中的 AA'剖面（改繪自 Hsieh, 1970）。

（a）

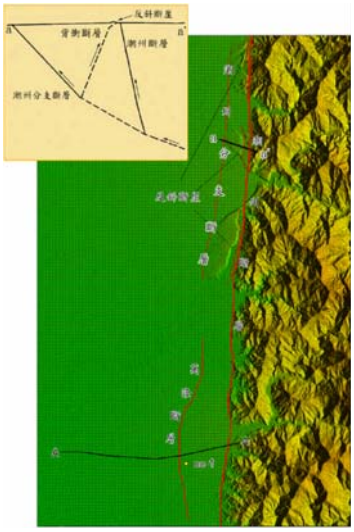


圖 3-7.6：潮州斷層及西側分支斷層構造分布圖。AA'線段為震測剖面位置，黃點為 CC-1 井位。左上角方框為分支斷層、反斜斷崖及潮州斷層之構造示意圖（廖何松，2003）。

（b）

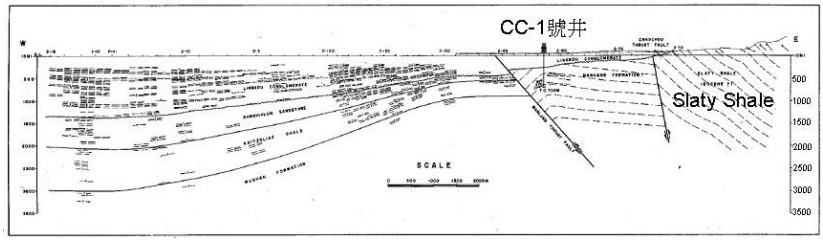


圖 3-7.7：潮州地區震測剖面及地下構造解釋，剖面線位置位於圖 3-7.6AA'線段（修改自 Chiang，1971）。

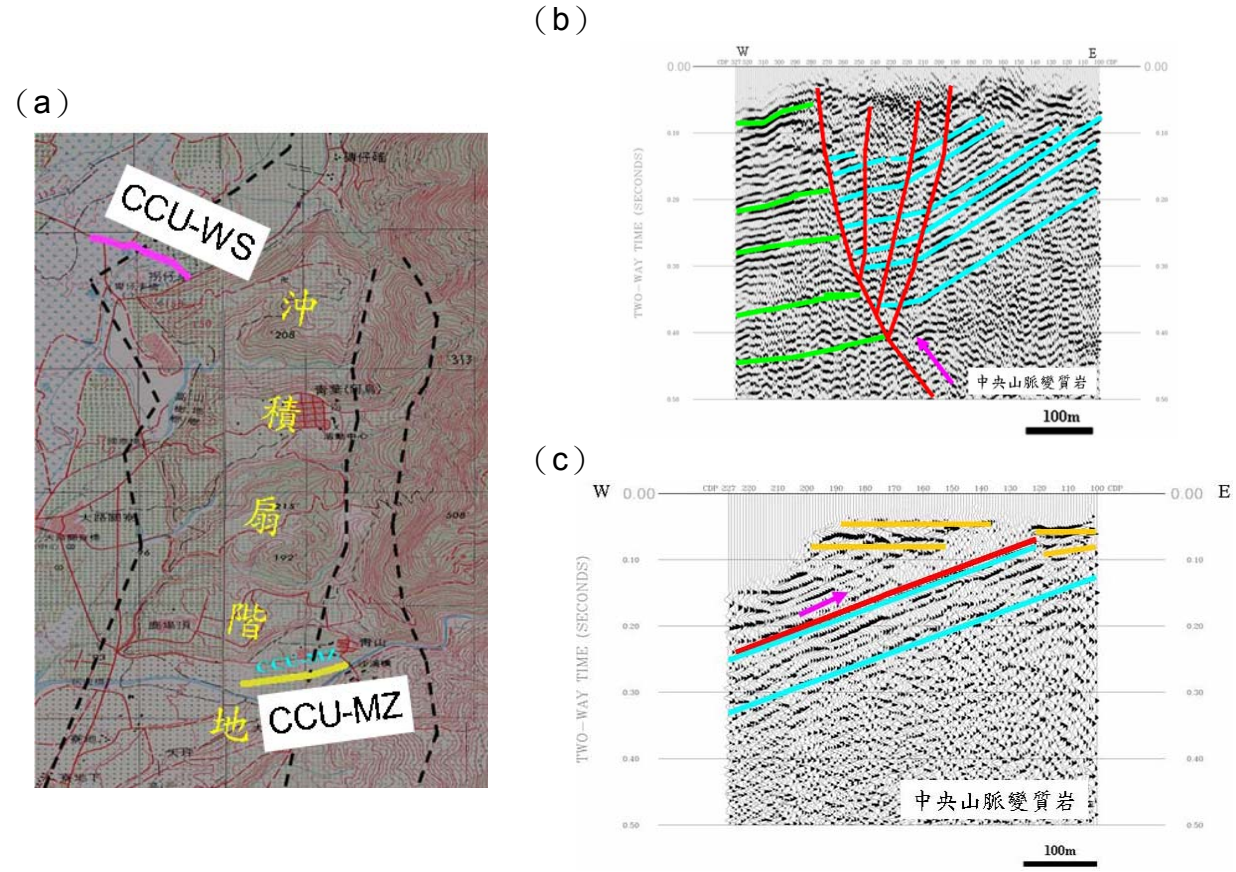


圖 3-7.8：（a）淺層震測測線配置圖。測線 CCU-WS 跨越屏東平原與沖積扇階地之間，測線 CCU-MZ 跨越沖積扇階地與阿烏斷層之間。（b）淺層震測 CCU-WS 及其解釋，本測線底下地層跨越斷層面朝東的高角度逆衝斷層帶，此斷層帶應屬於潮州斷層通過的位置。（c）淺層震測 CCU-MZ 及其解釋（修改自林昱圻，2008）。

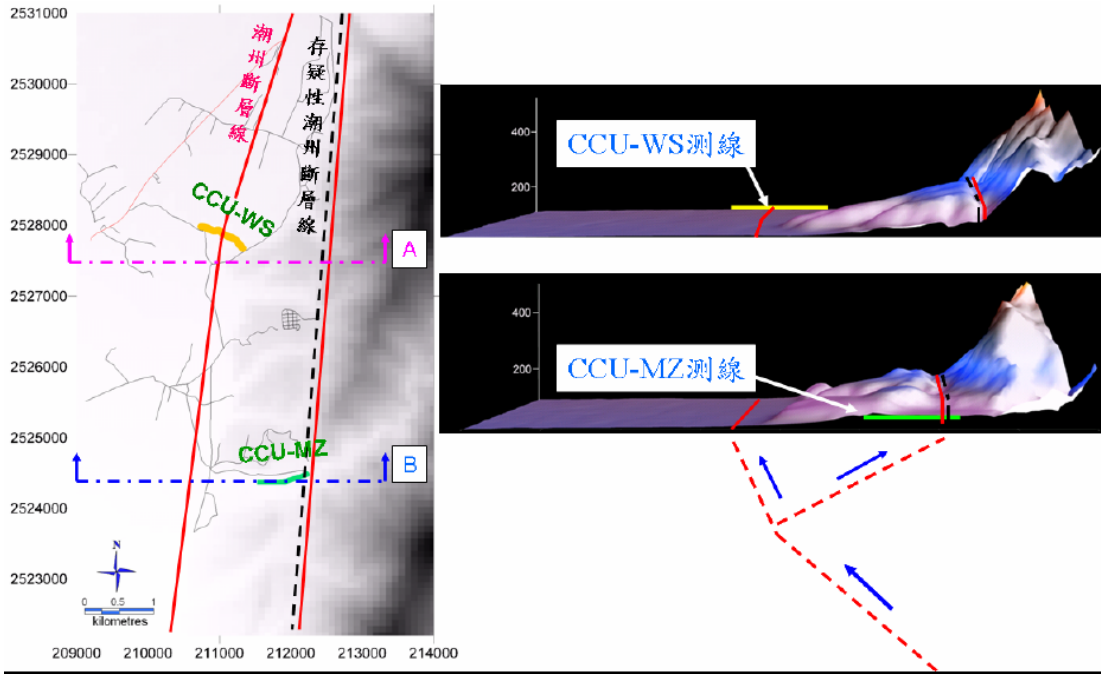


圖 3-7.9：從淺層震測剖面推測潮州斷層地下幾何形貌（林昱圻，2008）。

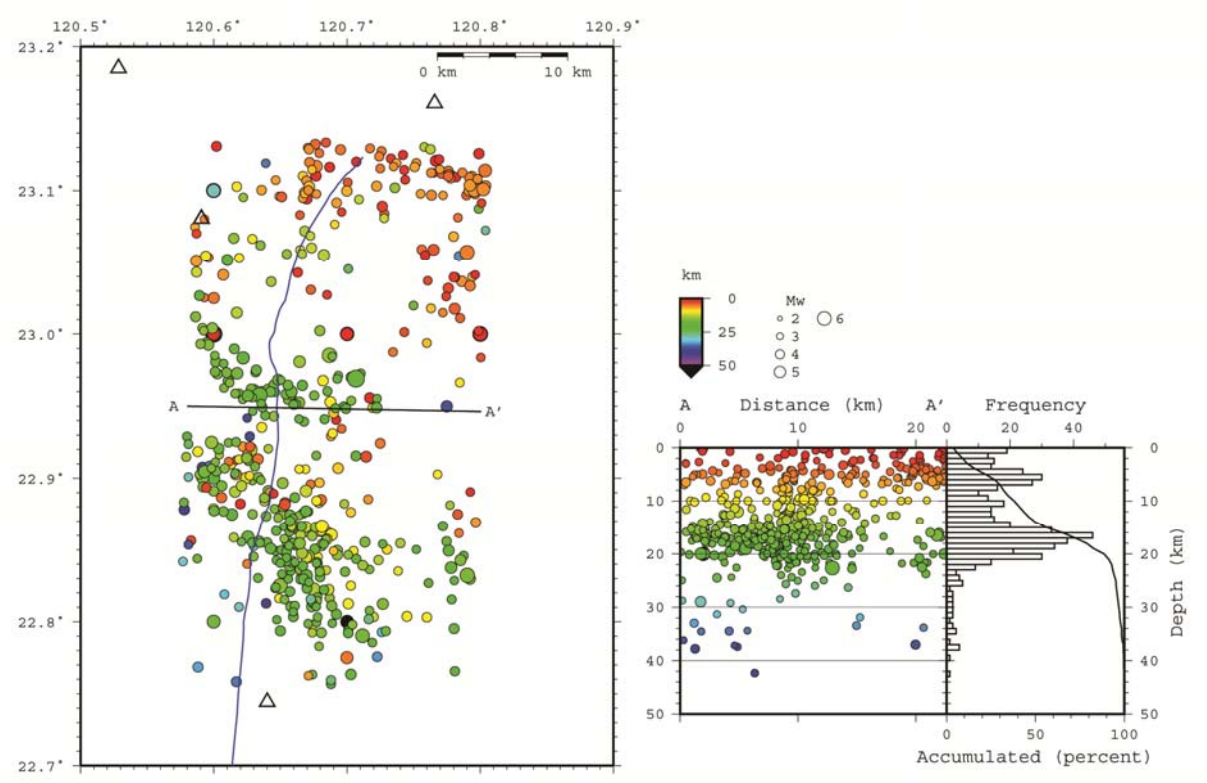


圖 3-7.10：潮州斷層北段 1900-2010，Mw≧3 地震深度分布圖。

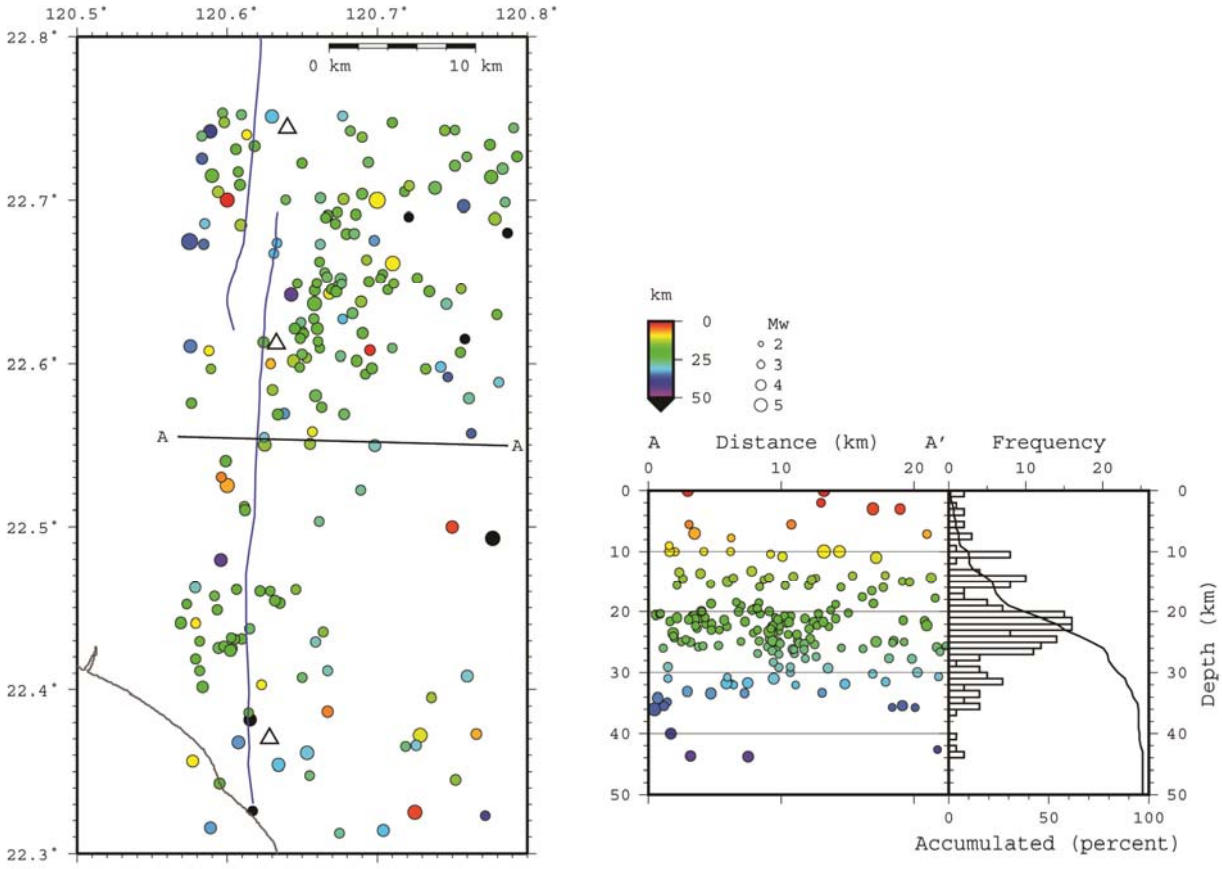


圖 3-7.11：潮州斷層南段 1900-2010，Mw≧3 地震深度分布圖。

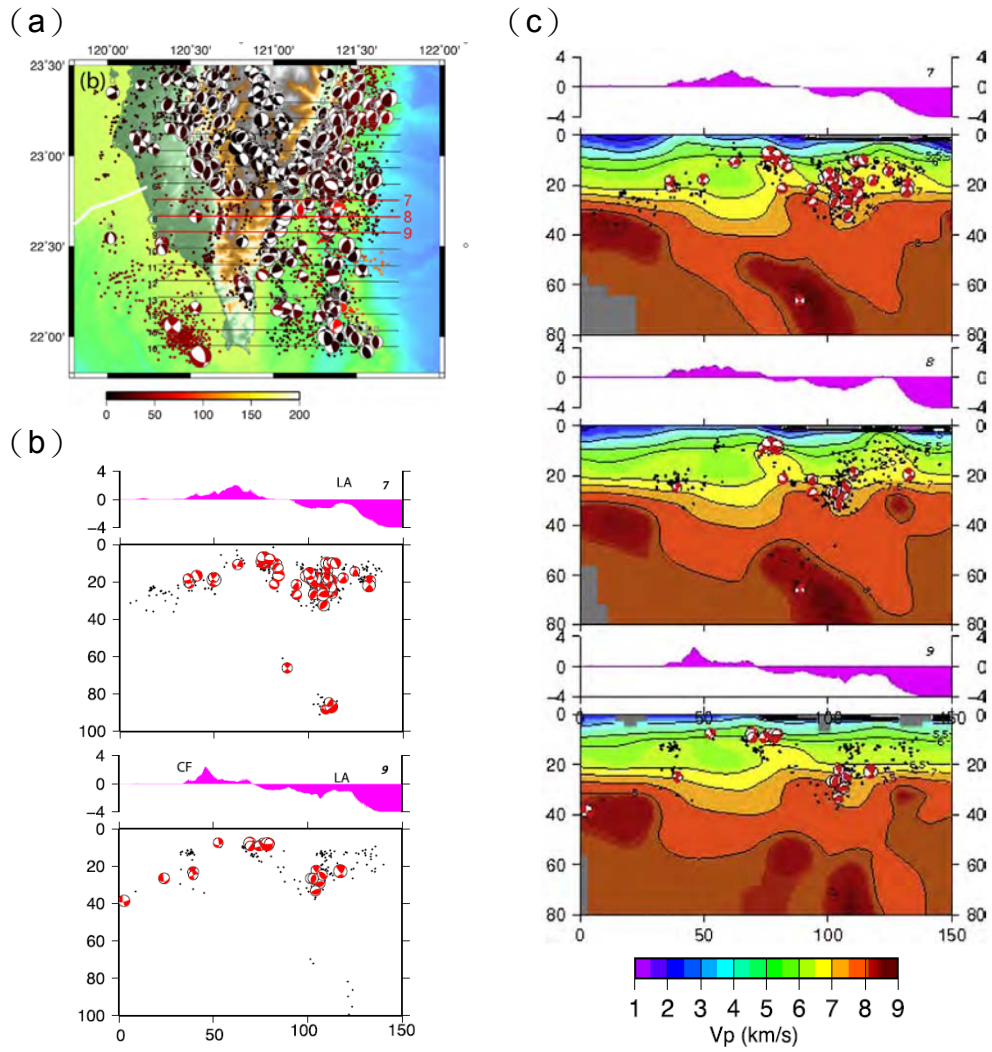


圖 3-7.12：（a）地震、震源機制解及剖面線分布圖（b）剖面 7 及剖面 9 之震深度分布及震源機制，CF 為潮州斷層（c）剖面 7、剖面 8 及剖面 9 之地震深度分布及地層速度構造剖面圖（Francis T. Wu et al., 2014）。

表 3-7.1：潮州斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

作者	方法	傾角	深度
謝世雄(Hsieh, 1970)	重力資料	東傾 75~80	--
Chiang, 1971	震測與鑽井剖面	50 度	
林昱圻，2008	淺層震測資料	高角度	
Cheng et al., 2012; Francis T. Wu et al., 2014	P 波速度構造剖面		孕震帶約 15-20 公里
本計畫推估	地震深度分布	--	集中於 20 公里

3. 斷層機制：潮州斷層是一條南北走向的逆斷層，並且含有左移的分量（Meng, 1967；Yen and Tien, 1986；中國石油公司台探總處，1992；林啟文等，2000）。孟昭彝（Meng, 1967）以潮州斷層西側六龜礫岩的向北楔狀尖滅，認為潮州斷層具左移分量。石再添等（1984）根據地形變異如台地、山丘和河流錯移判斷潮州斷層為左移斷層。
4. 短期滑移速率：詳如表 3-7.2。
5. 長期滑移速率：根據 TEM（2014）野外調查成果，青葉扇階地形崖可量得高差約 60 公

尺高，階面上土壤紅土化程度推估年代約 3 萬年到 15 萬年間。利用地形崖高度 60 公尺除以上盤之紅土化階地年代 3-15 萬年，得到抬升速率介於 0.40~2.00 mm/yr，以斷層面傾角 60 度換算，則斷層面長期滑移速率約為 0.46~2.31 mm/yr。

6. 單一事件變位量：未知。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。本文提到之規模均為地震矩規模。
8. 最近一次活動時間：Bonilla（1975）根據沿岸珊瑚礁的高度及碳十四定年法，算出斷層跡東側和西側的上升率沒有顯著的差別，認為此斷層在全新世以來並不活躍。梁勛泓等（2007）利用使用電阻率影像剖面探測法作斷層之電阻率構造探查電潮州斷層構造，指出淺部水平沖積層的形成，顯示潮州斷層已有相當一段時間沒有活動，研判部份斷層線已被深埋。

彙整前人對於潮州斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-7.2 所示，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-7.2：潮州斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
潮州斷層	斷層分段與破裂事件	土壟灣斷層段 北段 南段 南段延伸	地形、野外調查、岩層對比、鑽井、海域地形判釋	鳥居敬造，1933；Tomita, 1955；林朝棨，1957；Bonilla, 1975； Wang, 1976；Hsu et al., 1985；張慧中，1986；石再添等，1984；楊貴三，1986；陳文山等，2004c，2005；Lin et al., 2008；林啟文等，2009
	長度 (km)	A：44 B：60 C：30 D：46 E：74 F：90 G：90 H：106		
	寬度 (km)	20.2	深度/sin 傾角 （以深度 17.5 公里，傾角 60 度計算）	
	破裂深度 (km)	孕震帶約 15-20 公里	P 波速度構造剖面	Cheng et al., 2012; Francis T. Wu et al., 2014
		集中於 20 公里	1991-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積 (km^2)	A：889 B：1212 C：606 D：930 E：1495 F：1819 G：1819 H：2142	長度×寬度	
	走向	呈南北走向	地形判釋	林啟文等，2009
	傾斜角度 (度)	東傾 75~80	重力資料	Hsieh, 1970
		50 度	震測與鑽井剖面	Chiang, 1971
		高角度	淺層震測資料	林昱圻，2008
	斷層機制	逆移斷層兼具左移性質	地形、野外地質調查	Meng，1967；詹新甫，1974；Yen and Tien, 1986；林昱圻，2008；林啟文等，2009
	短期滑移速率（mm/yr）	平行斷層走向分量 1.2 mm/yr (左移) 垂直斷層走向分量 0.5 mm/yr (擠壓) 高程方向抬升量 7.7 mm/yr	(2002~2008)GPS 資料	饒瑞鈞等，2008
		未有明顯的變化	路竹至茂林在 2002-2010 共 7 次水準施測 岡山至安坡在 2004-2010 共 6 次水準施測	饒瑞鈞等，2010
		潮州斷層地區之最大壓縮量約 0.2 至 0.6 μstrain/yr	1995 至 2006 年之 GPS 速度場	楊佳勳等，2008
	長期滑移速率 (mm/yr)	0.46~2.31	野外階地年代判斷及階崖高差量測	TEM, 2014

	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	0.67	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量(m)	尚未發現指準地層等確認一次事件變位量		
	特徵地震規模 (Mw)	A : 7.0 B : 7.1 C : 6.8 D : 7.0 E : 7.2 F : 7.3 G : 7.3 H : 7.3	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A : 6.9 B : 7.1 C : 6.8 D : 7.0 E : 7.2 F : 7.3 G : 7.3 H : 7.4	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1 + \max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	1000-2000 年	特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-7.24）	本計畫推估
	最近一次活動時間	全新世	由階地的變位顯示潮州斷層近期曾經活動，並且形成和主斷層平行的副斷層 ，該副斷層經過更新世的紅土階地及全新世尚未紅土化的沖積河階	Bonilla,1975

3-7-2 潮州斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估潮州斷層系統之破裂，可分為 8 種破裂事件來探討（圖 3-7.13），A 為北段破裂，B 為土壟灣斷層+北段破裂，C 為南段破裂，D 為南段+南段延伸破裂，E 為北段+南段破裂，F 為北段+南段+南段延伸破裂，G 為土壟灣斷層+北段+南段，H 為土壟灣斷層+北段+南段+南段延伸破裂。各事件權重分配如圖 3-7.13 所示。

潮州斷層之傾角，根據所蒐集到之震測剖面及地震深度分布等資料，潮州斷層可能為屏東平原處之盲斷層，傾角 50 度，也有可能是位於中央山脈與屏東平原之高角度斷層，本計畫認為傾角邏輯樹可設定 50 度為下限值，70 度為上限值，權重設定為 50 度（0.2）、60 度（0.6）、70 度（0.2）。

潮州斷層之破裂深度，根據地震深度分布及速度構造剖面，應在 15~20 公里，破裂深度權重設定為 15 公里（0.2）、17.5 公里（0.6）、20 公里（0.2）。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-7.3 所示為利用邏輯樹中值所求得之各破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

潮州斷層之滑移速率，根據野外階地年代判斷及階崖高差量測，滑移速率約為 0.46 ~ 2.31 mm/yr。權重分配為 0.46（0.3），1.39（0.4），2.31（0.3）。

潮州斷層各節點權重的分配詳如圖 3-7.14 所示。

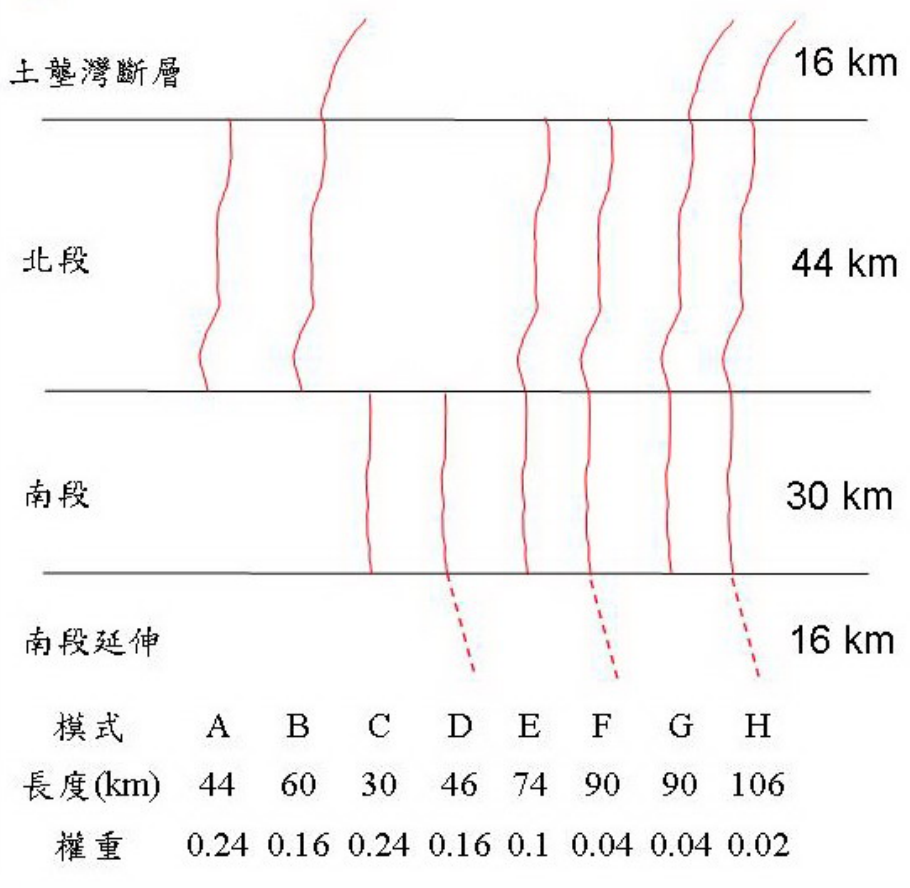


圖 3-7.13：潮州斷層之破裂模式。

表 3-7.3：潮州斷層之破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
A	44	17.5	20.2	60	889	6.7	7.0	7.2	6.9
B	60	17.5	20.2	60	1212	6.9	7.1	7.4	7.1
C	30	17.5	20.2	60	606	6.6	6.8	7.1	6.8
D	46	17.5	20.2	60	930	6.8	7.0	7.3	7.0
E	74	17.5	20.2	60	1495	6.9	7.2	7.4	7.2
F	90	17.5	20.2	60	1819	7.0	7.3	7.5	7.3
G	90	17.5	20.2	60	1819	7.0	7.3	7.5	7.3
H	106	17.5	20.2	60	2142	7.1	7.3	7.6	7.4
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

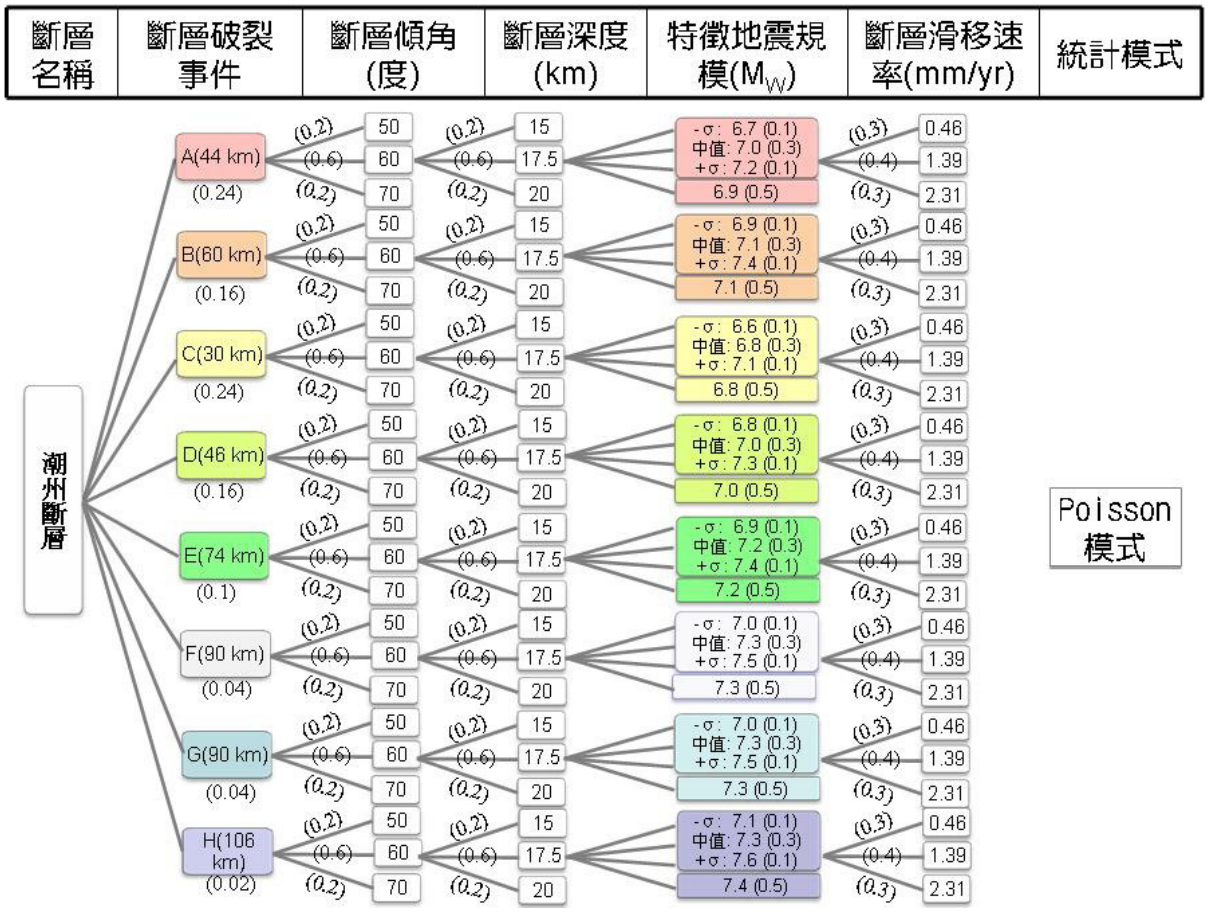


圖 3-7.14：潮州斷層邏輯樹。

3-7-3 潮州斷層特徵地震模式

潮州斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 3-7.15～圖 3-7.21 為 8 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

圖 3-7.14 之潮州斷層邏輯樹可得到 864 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-7.22 為 8 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 7.0 之權重最高；破裂模式 B 以規模 7.1 之權重最高；破裂模式 C 以規模 6.9 之權重最高；破裂模式 D 以規模 7.0 之權重最高；破裂模式 E 以規模 7.3 之權重最高；破裂模式 F 以規模 7.4 之權重最高；破裂模式 G 以規模 7.4 之權重最高；破裂模式 H 以規模 7.4 之權重最高。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-7.23 為 8 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將 8 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-7.24（a）之潮州斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-7.24（b）之潮州斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

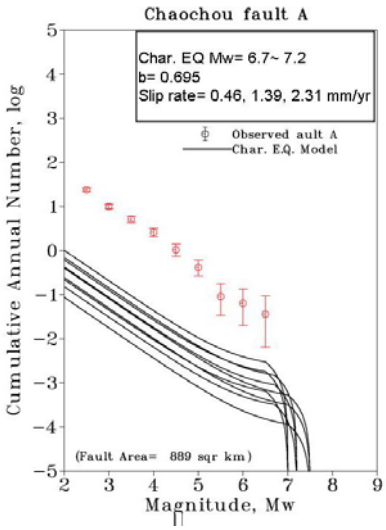


圖 3-7.15：A 事件特徵地震模式。

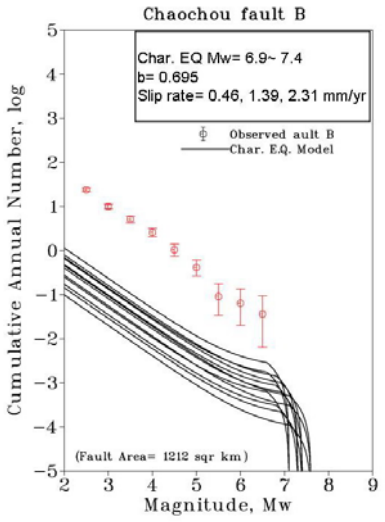


圖 3-7.16：B 事件特徵地震模式。

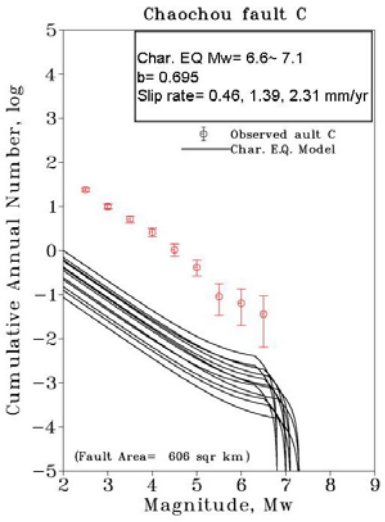


圖 3-7.17：C 事件特徵地震模式。

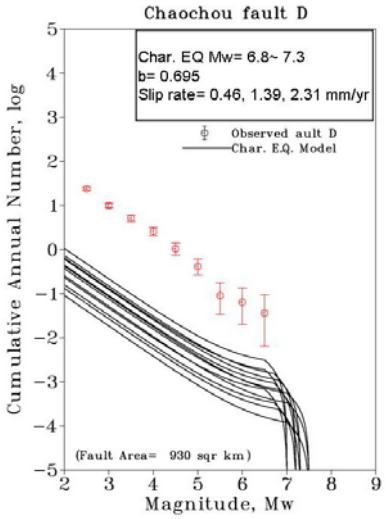


圖 3-7.18：D 事件特徵地震模式。

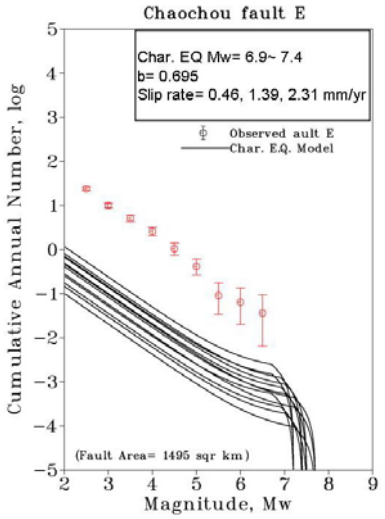


圖 3-7.19：E 事件特徵地震模式。

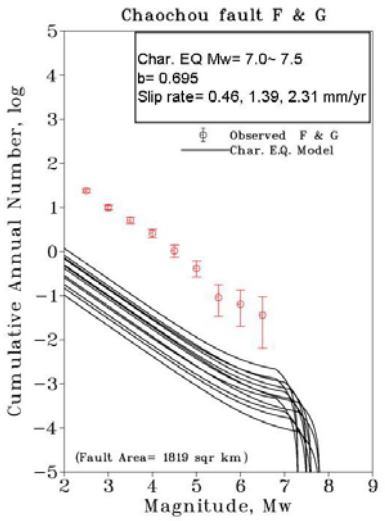


圖 3-7.20：F 及 G 事件特徵地震模式。

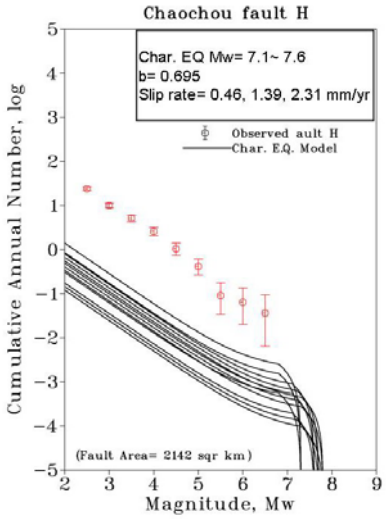


圖 3-7.21：H 事件特徵地震模式。

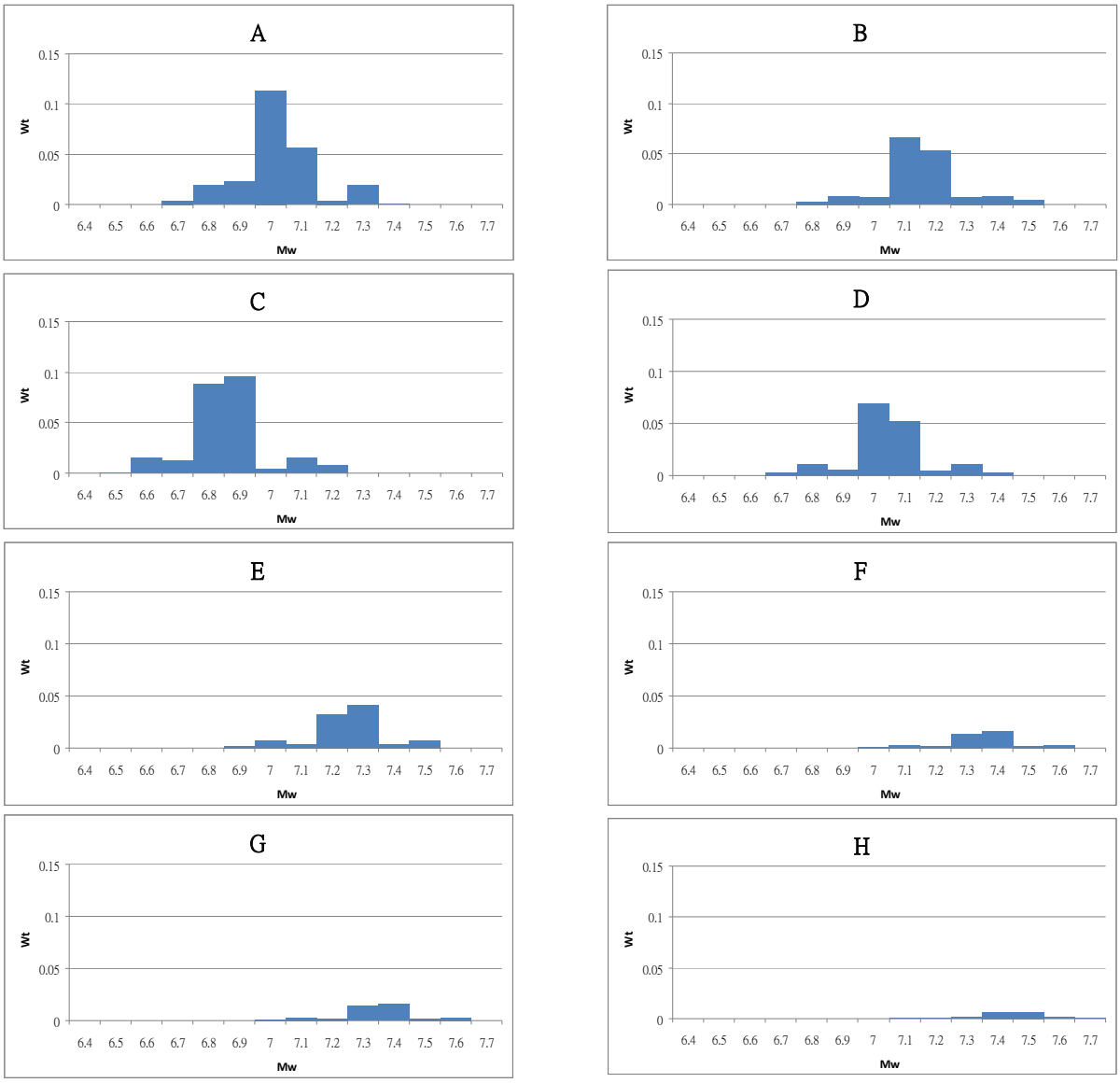


圖 3-7.22：潮州斷層 8 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

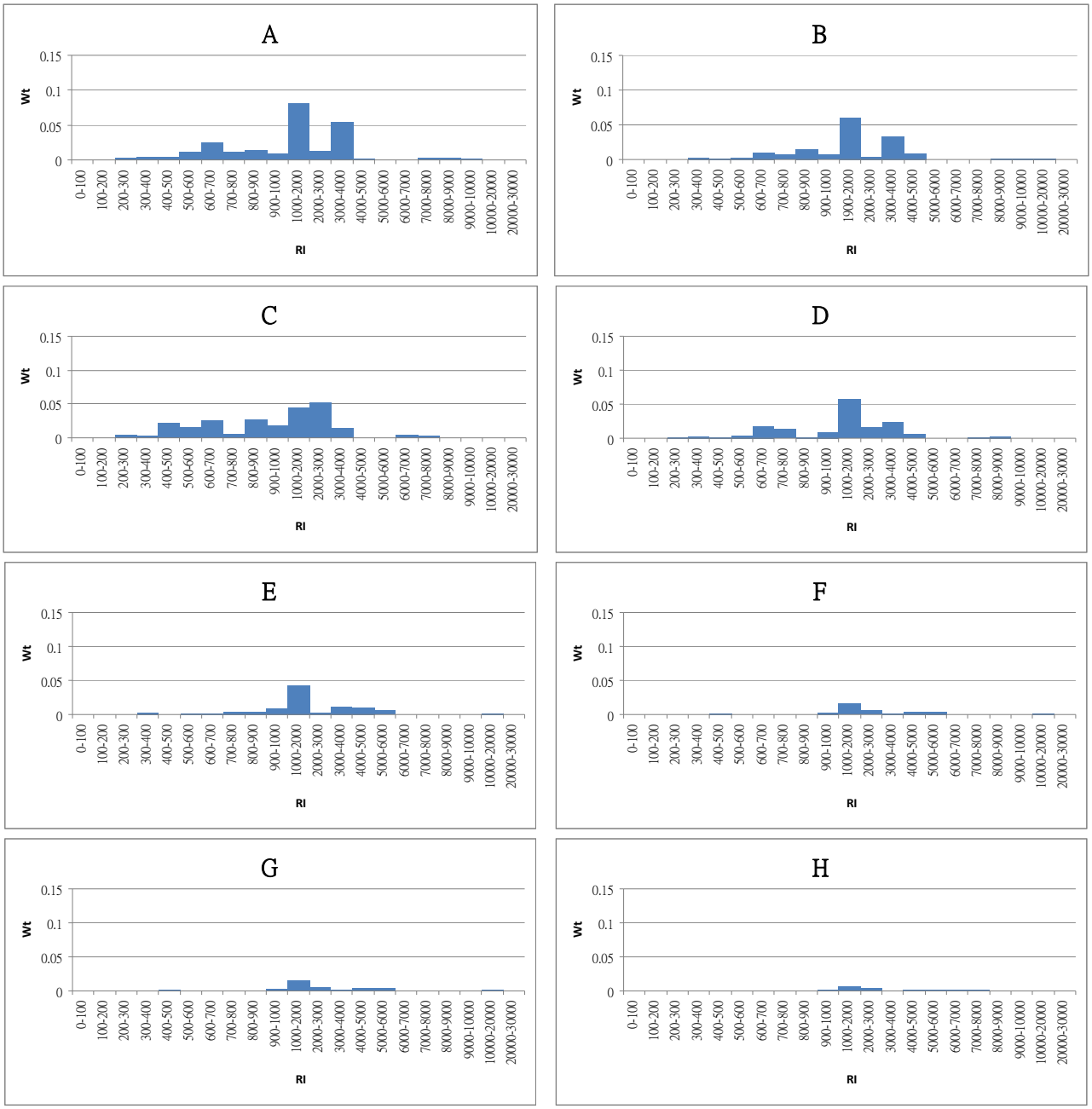
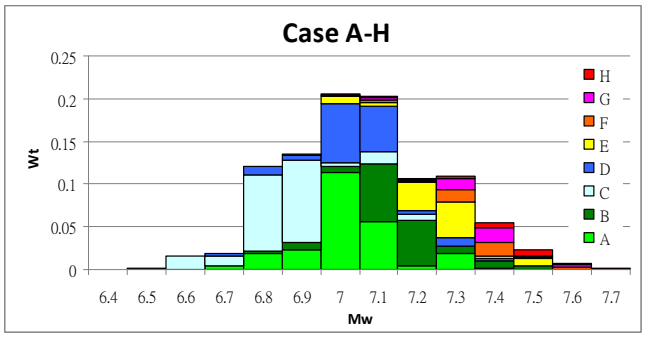


圖 3-7.23：潮州斷層 8 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。

（a）



（b）

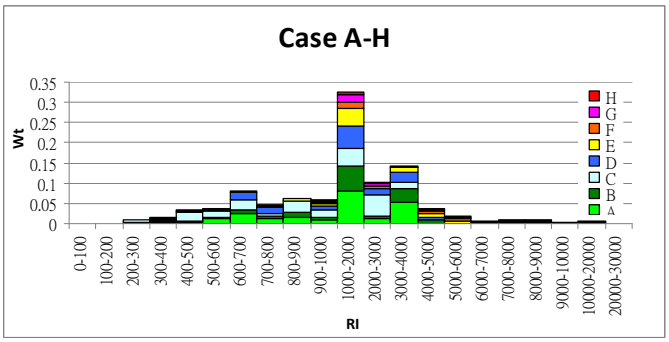


圖 3-7.24：（a）潮州斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）潮州斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-7-4 潮州斷層系統發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算潮州斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，潮州斷層最後一次發生時間未知，因此本計畫採用 Poisson 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-7.4 為潮州斷層 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 2.6%、4.3%及 8.4%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 1.5%、2.5%及 4.9%；發生地震矩規模 7.5 以上之機率為 0.03%、0.05%及 0.1%。

表 3-7.4：潮州斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
M ≧6.5	2.6%	4.3%	8.4%
M ≧7.0	1.5%	2.5%	4.9%
M ≧7.5	0.03%	0.05%	0.10%

3-8 恆春斷層

3-8-1 恆春斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

陸域部份為 16 公里，由屏東縣車城鄉海口向南延伸至恆春鎮南灣（林啟文等，2009），如圖 3-8.1 所示。過去石再添等人（1985）在恆春斷層南端的西側描繪出馬鞍山斷層（圖 3-8.3），Liew and Lin(1987)則根據挖溝與鑽井資料，發表了石牛橋斷層的位置(圖 3-8.3)，本計畫認為這些構造線均位於恆春斷層帶。陳柏村與紀權窅（2010）透過野外調查及鑽井岩芯分析，認為恆春斷層可分為 E 斷層及 M 斷層，如圖 3-8.2 所示。

南部外海延伸部分，中興公司（2012）利用多音束海底地形進行判釋，恆春斷層於南灣外海仍有一明顯地形崖至北緯 21°5'附近，且為一東西向水道所分隔，此延伸之線型長度可達 23 公里，如圖 3-8.4 所示。

往北延伸部分，恆春斷層往北延伸出恆春縱谷，沿著台 26 線往北，過了海口之後並沒有在陸上發現像海口一般明顯的斷層崖，也沒有發現其他可能是由恆春斷層造成的構造地形（圖 3-8.5、圖 3-8.6）(李珀儂，2008）。然而中興公司（2012）在竹坑村以南沿海地區發現隆起珊瑚礁與海階，研判東恆春斷層位於竹坑村以南海域離岸約 300 公尺內往南延伸至谷地北側海口村海口里北側海岸，推測恆春斷層於恆春谷地以北海域，斷層延伸長度約 2 公里。

本計畫推估之恆春斷層長度，除了陸域 16 公里外，加上北部延伸長度 2 公里以及南部外海延伸 23 公里，總長為 41 公里。

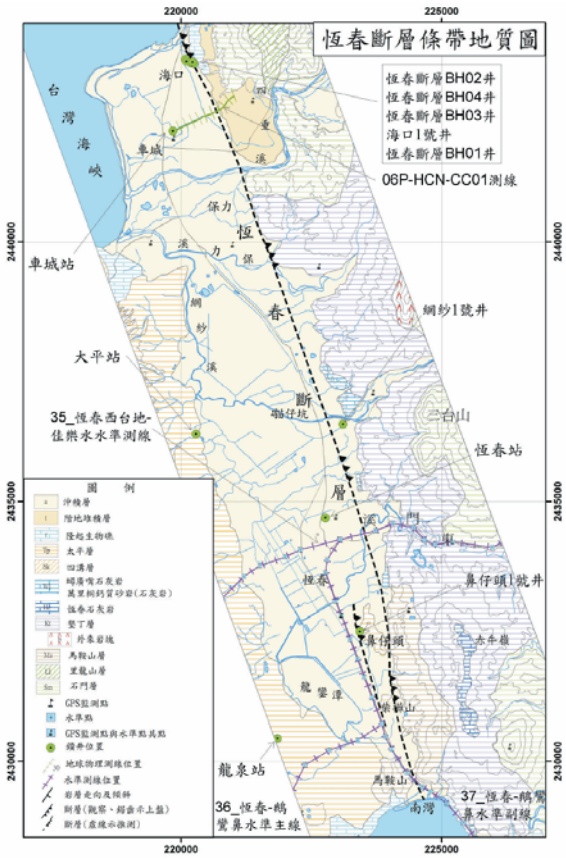


圖 3-8.1：恆春斷層條帶地質圖(林啓文等，2009)。

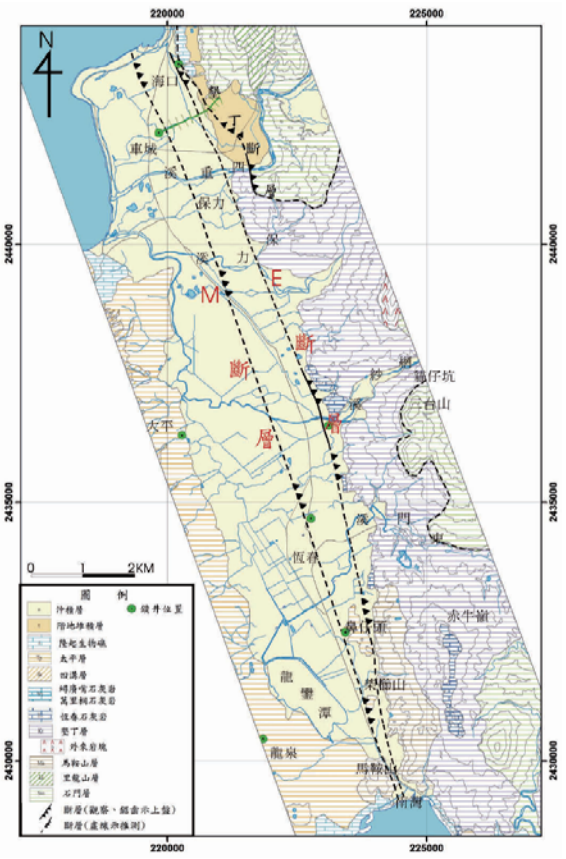


圖 3-8.2：恆春斷層條帶地質圖（陳柏村與紀權窅，2010）。

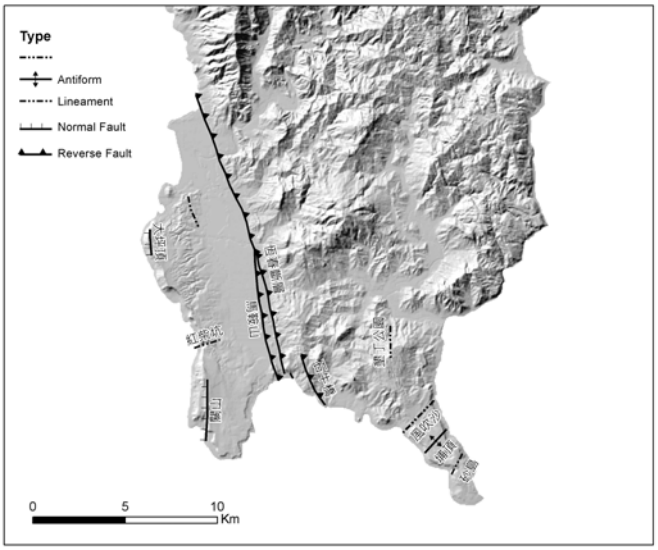


圖 3-8.3：恆春半島前人研究之構造線分布（修改自李珀儂，2008）。

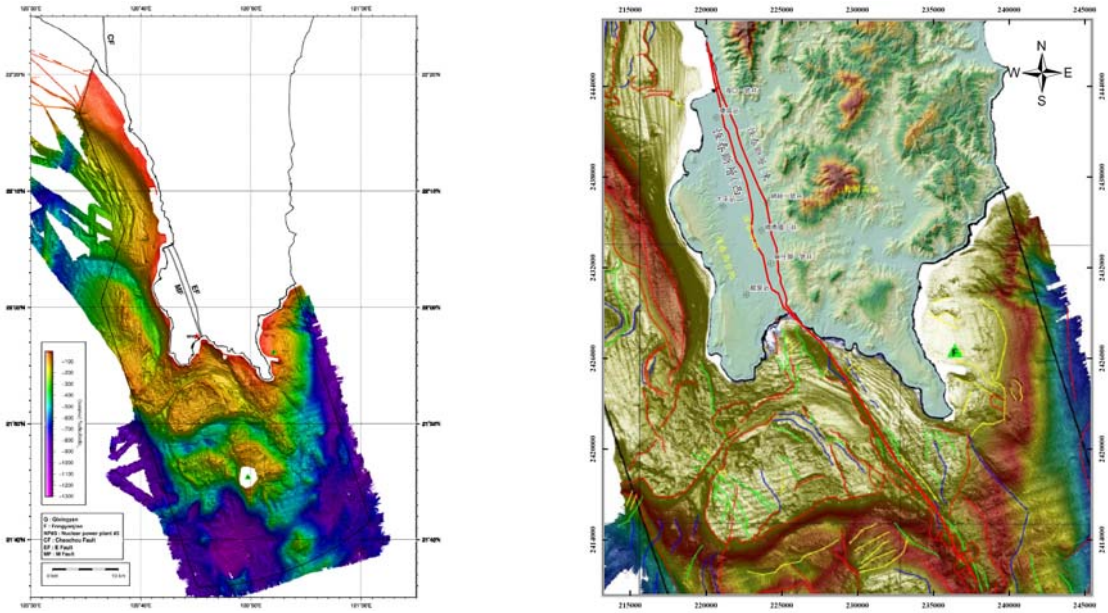


圖 3-8.4：南部海域多音束水深調查，左圖為海底地形光影圖，右圖為海底變動地形判釋成果，恆春斷層外海延伸約 23 公里（中興公司，2012）。

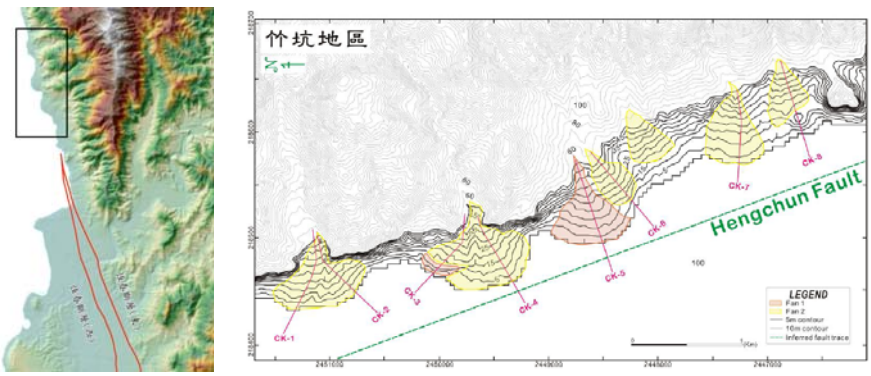


圖 3-8.5：竹坑地區沖積扇地形分布圖（李珀儂，2008）。

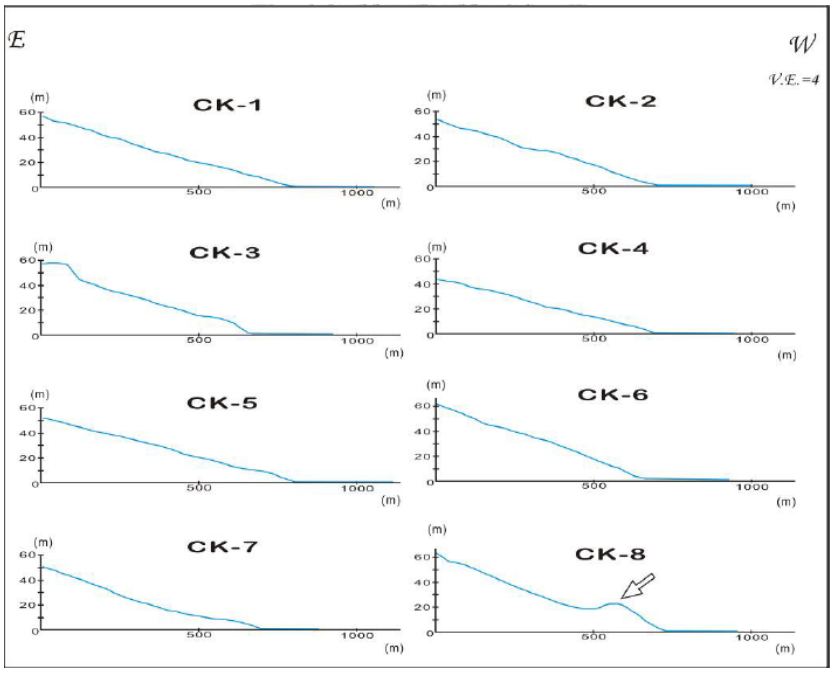


圖 3-8.6：竹坑地區之沖積扇剖面圖，圖中沖積扇並未發現明顯變形行為（李珀儂，2008）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 詹新甫（1974）根據斷層兩側之岩層與地形推定斷層之存在，並指出恆春斷層為走向北 22 度西之高角度逆斷層，斷層面向東傾約 70 度。

(2) 張若磐（1993）針對恆春半島斷層之重力進行研究，根據線性逆推結果，恆春斷層呈高角度向東傾斜的逆斷層。

(3) Vita-Finzi and Lin（2005）參考地調所地質圖，推估恆春斷層面為東傾 70 度之斷層。

(4) 李奕亨（2001）在鼻仔頭地區進行淺層反射震測，研判恆春斷層為數條高角度傾斜之分支斷層所組成，斷層前緣約在屏鵝公路東側與地形面之間。

(5) 中興公司（2012）在四重溪地區的鑽井位置詳如圖 3-8.7，在鑽井地質剖面中，鑽孔 LSB-3 與 LSB-2 分別於孔深 170.9 公尺與 88.1 公尺處鑽穿剪切帶，由鑽孔 LSB-3 與 LSB-2 兩孔之水平距離約 80 公尺、兩孔鑽穿剪切帶位置之高程落差約 82 公尺及區域地層結構研判，恆春斷層斷層面約為 45°E（圖 3-8.8），剪切帶西側稱為西恆春斷層，其位置與陳柏村等之 M 斷層位置相當。在柴櫛山地區的鑽井位置詳如圖 3-8.9，在鑽井地質剖面中，LSB-5 與 LSB-6 均未鑽穿剪切帶（圖 3-8.10），以鑽孔岩心剪切帶之深度研判，斷層活動造成 LSB-5 剪切帶界面之深度高於 LSB-6，以鑽孔岩心岩樣之剪切紋理平均角度，以及鑽孔 LSB-6 孔深 300 公尺仍未鑽穿剪切帶，推估斷層面角度約為 70°。

(6) 中興公司（2012）於恆春斷層南灣外海進行數條多頻道反射震測，剖面線平面分布如圖 3-8.11（a），從經過恆春斷層外海延伸段之震測剖面 MCS-S-18-1 顯示，本剖面多處具有開花狀構造，詳如圖 3-8.11（b），此花狀構造往南可延伸至 MCS-S-16-1 為止，詳如圖 3-8.11（c）。推估恆春斷層外海延伸處屬於高角度斷層，李珀儂（2008）的海域震測剖面也顯示恆春斷層處為高角度斷層（圖 3-8.12）。

(7) Cheng et al.（2012）描繪臺灣南部恆春半島之地震及速度構造剖面（圖 3-8.13），其中 y60 及 y40 剖面中，在恆春斷層處幾乎沒有地震，本計畫僅能從 y60 的 PLVF 西側的群

震中推測孕震深度約在 14~18 公里左右。

(8) 由 1900-2010 地震深度分布圖顯示，恆春斷層上的地震個數較少，且從深度分部無法判斷與斷層相關（圖 3-8.14）。

恆春斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-8.1。

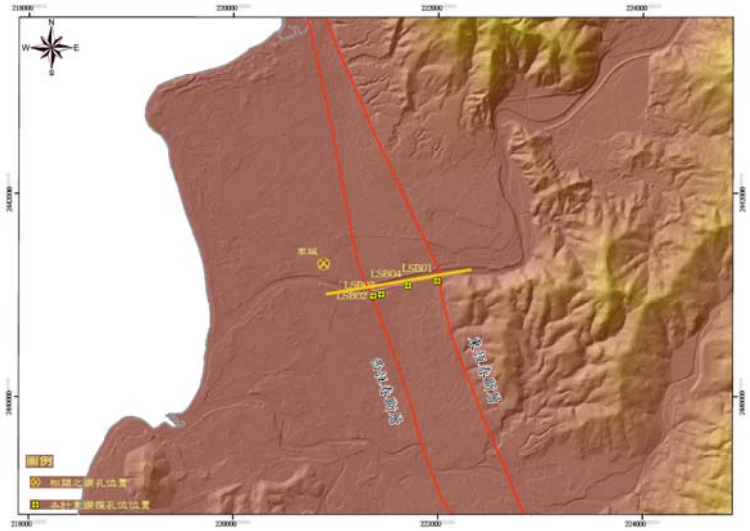


圖 3-8.7：恆春斷層四重溪地區陸域探查鑽孔分布圖（中興公司，2012）。

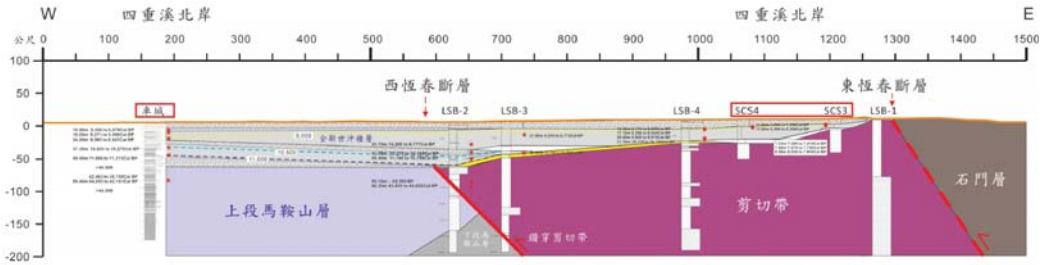


圖 3-8.8：恆春斷層四重溪地區地質剖面圖（中興公司，2012）。

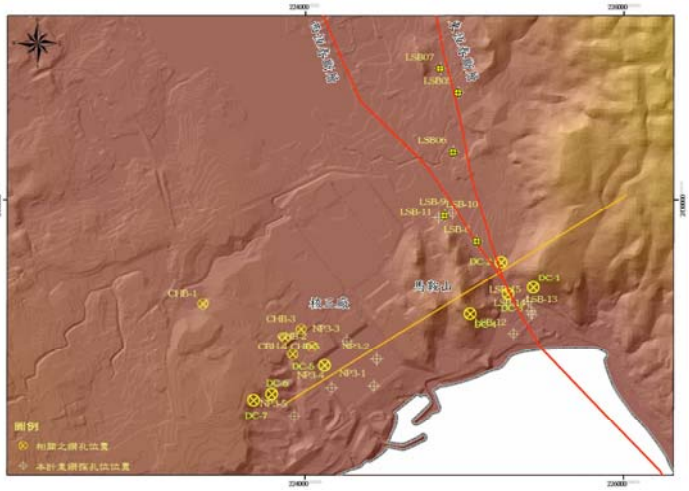


圖 3-8.9：恆春斷層柴櫛山地區陸域探查鑽孔分布圖（中興公司，2012）。

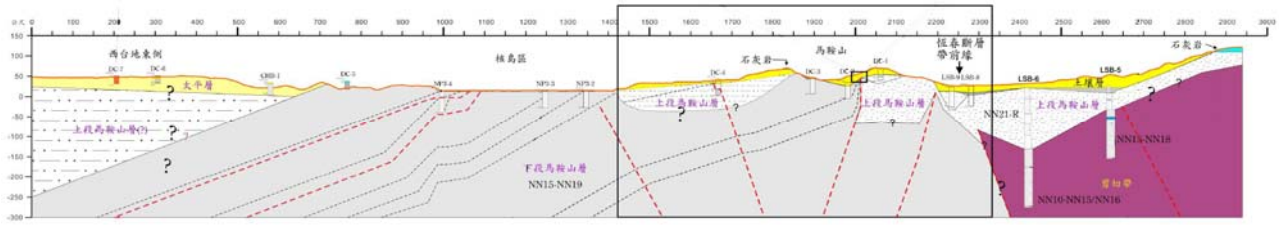
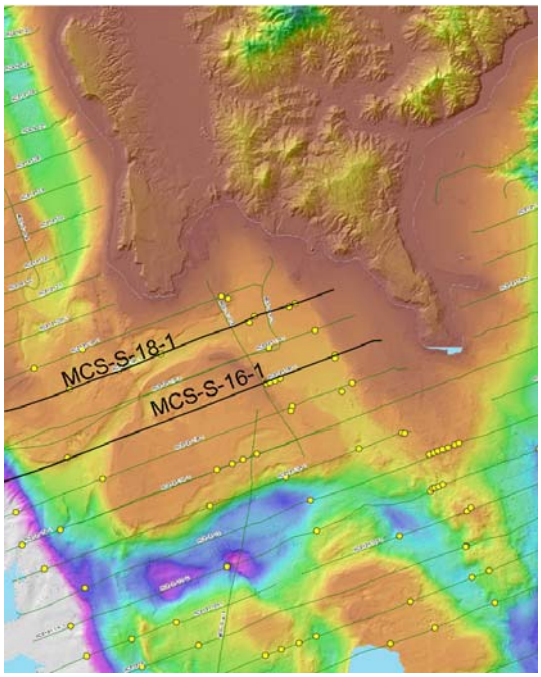
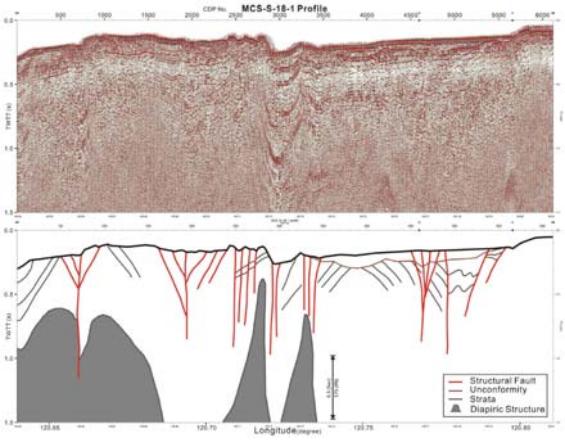


圖 3-8.10：恆春斷層柴櫥山地區地質剖面圖（中興公司，2012）。

（a）



（b）



（c）

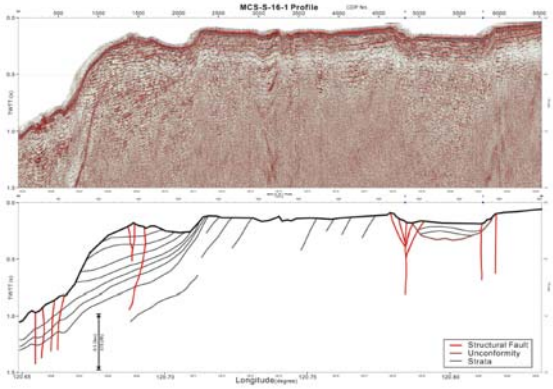


圖 3-8.11：（a）恆春斷層外海海上多頻道反射震測震測探查測線位置（b）MCS-S18-1 反射震測剖面及其解釋（c）MCS-S16-1 反射震測剖面及其解釋（中興公司，2012）。

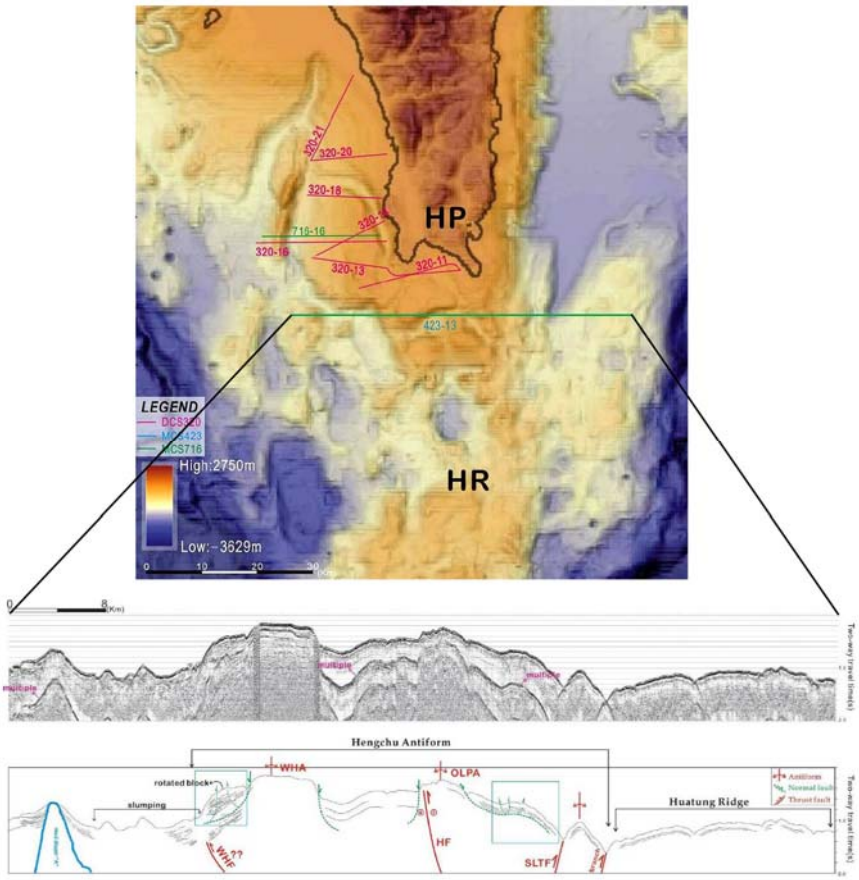
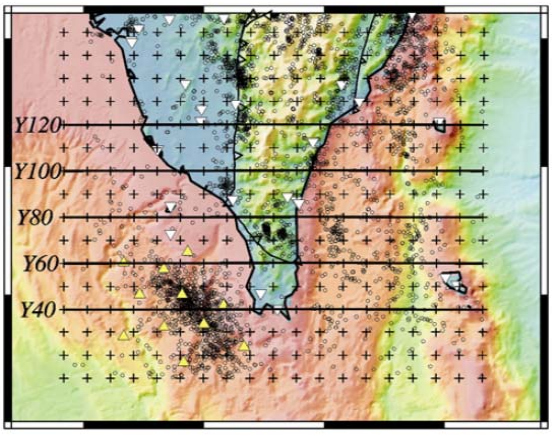
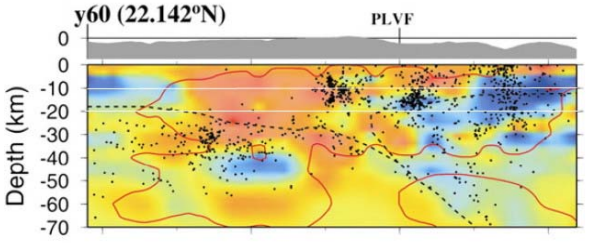


圖 3-8.12： MCS423-13 震測剖面及其解釋。西側藍線為泥貫入體，紅線為逆衝斷層，綠線為正斷層，HF 為恆春斷層。（李珀儂，2008）。

（a）



（b）



（c）

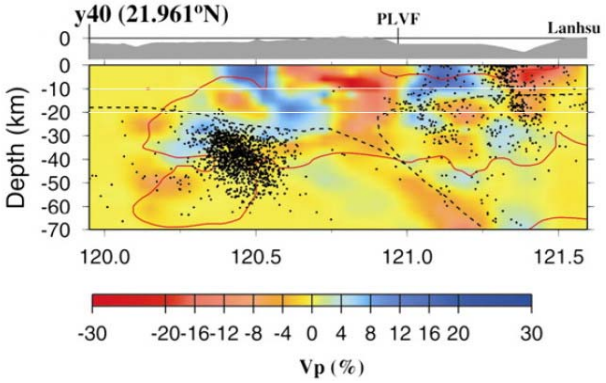


圖 3-8.13：（a）臺灣南部海域地震及速度構造剖面線 Y40~Y120 分布圖（b）y60 剖面線 P 波之速度構造剖面（c）y40 剖面線 P 波之速度構造剖面（Cheng et al.，2012）。

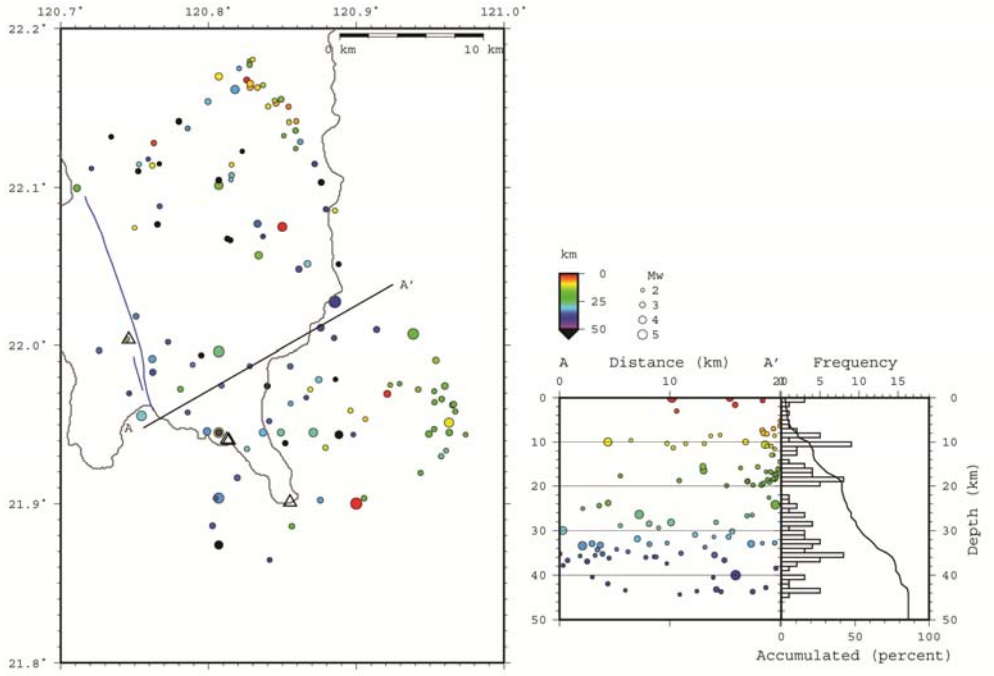


圖 3-8.14：恆春斷層上盤處 1900-2010 地震深度分布圖。

表 3-8.1：恆春斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度
詹新甫，1974		向東傾 70 度	
張若磐，1993	重力、線性逆推	向東傾高角度	
李奕亨，2001	震測	高角度	
Vita-Finzi and Lin, 2005	參考地調所地質圖	向東傾 70 度	
中興公司，2012	地質鑽探剖面	西恆春斷層 45 度 南灣地區 70 度	
李珀儂，2008； 中興公司，2012	海域震測剖面	高角度	
Cheng et al., 2012	P 波速度構造剖面及附近地震群深度分布		孕震深度 14-18 公里
本計畫推估	地震深度分布	-	無法判斷

3. 斷層機制：詹新甫（1974）根據斷層兩側之岩層及地形推定恆春斷層為高角度傾斜之逆斷層。李珀儂（2008）利用航照及數值地型判釋，斷錯河與沖積扇遭移置之地形俱為走向斷層獨有之構造地形特徵，這些構造地形又比鄰恆春斷崖發育，因此認為恆春斷層同時具有左移之走向分量。中興公司（2012）根據地質鑽探成果顯示，恆春斷層為逆斷層。
4. 短期滑移速率：詳如表 3-8.4。
5. 長期滑移速率：

(1) 陳于高等（Chen and Liu, 1993）由珊瑚或化石做碳 14 定年，以及利用海階高度推估

抬升速率，各處抬升速率計算結果彙整於圖 3-8.15，恆春斷層北段海口處抬升速率為 6.3 mm/yr；恆春斷層南段根據潭仔灣、石牛橋及墾丁等處計算的抬升速率為 3.8~6.1 mm/yr。

(2) 陳文山等（2010a）於南灣場址鑽井，估算垂直變動速率幾乎沒有變動或微有沉降（圖 3-8.16），然而在恆春斷層上盤墾管處海階，其計算出垂直變動速率為 4.2±0.2 mm/yr，圖 3-8.17 即恆春斷層鑽井及海階估算的抬升速率。此結果與陳于高等（Chen and Liu, 1993）計算的抬升速率 3.8~6.1 mm/yr 差異不大。

(3) 陳文山等（2006）在恆春斷層海口附近有 4 口淺井鑽探（BH01-BH04）（圖 3-8.18），位在斷層北段西北走向的階地崖下（崖高 20-30 公尺），隆起珊瑚礁海階不整合覆於石門層與墾丁層之上，海階珊瑚礁的碳 14 年代為距今 4,450-4,310 年前。由 BH04 井、BH02 與 BH03 鑽井岩芯比對，顯示沉積層沒有斷層剪切現象，恆春斷層沒有位在此 3 口井之間。BH01 井東側的海階中隆起珊瑚礁位於恆春斷層上盤，研判古海岸線位在海拔高度約 26 公尺，珊瑚礁年代為距今 4450-4310 年前，由此計算斷層上盤的抬升速率約 5.9±0.1 mm/yr。

(4) 中興公司（2012）在四重溪地區的鑽井位置詳如圖 3-8.7，各鑽井採樣定出的垂直抬升速率詳如表 3-8.2，除鑽孔 LSB-3 孔深 21.80 公尺具有較高之抬升速率（1.9±0.7mm/yr）外，其餘變動速率皆約為 1 mm/yr 或以下，因此推測本地區西恆春斷層之整體垂直變動不大。

恆春斷層長期滑移速率各調查方法及斷層參數彙整於表 3-8.3。

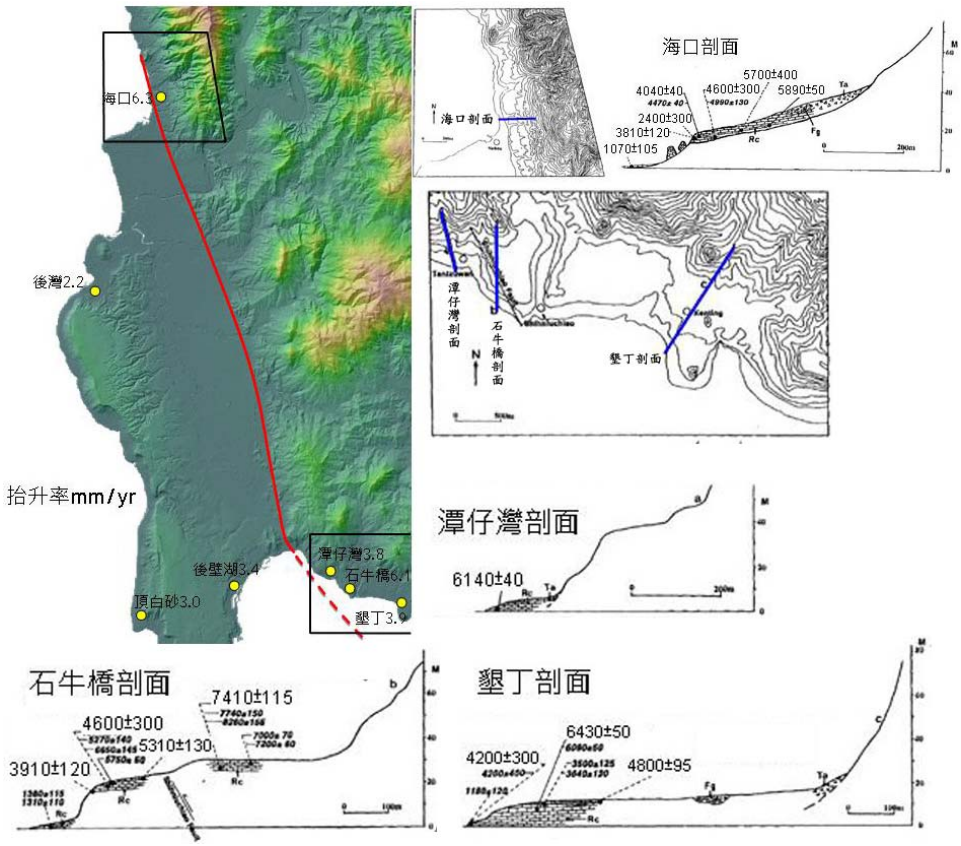


圖 3-8.15：海階定年計算恆春半島各地之抬升速率（Chen and Liu, 1993）。

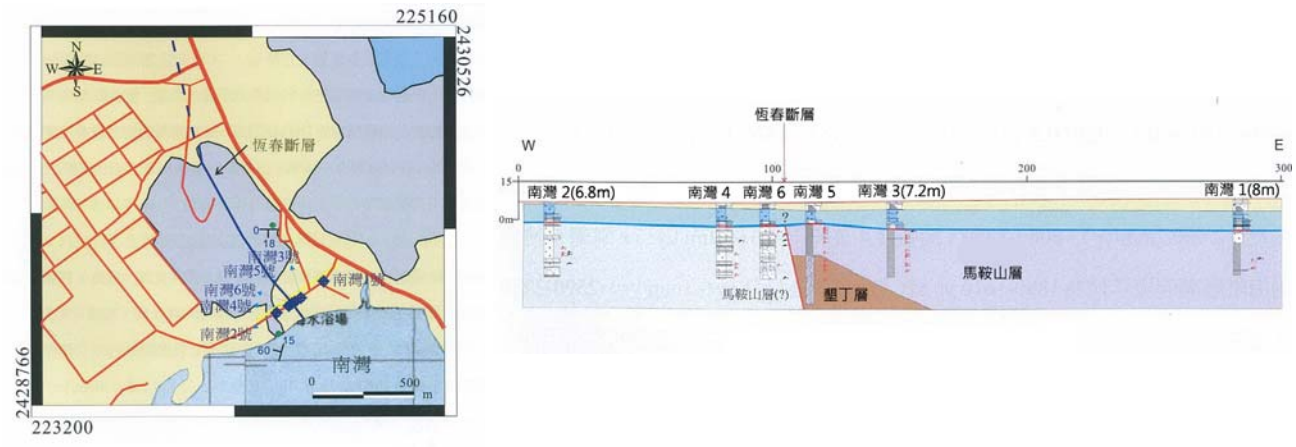


圖 3-8.16：左圖為南灣場址鑽井位置，右圖為南灣鑽井剖面圖（陳文山等，2010a）。

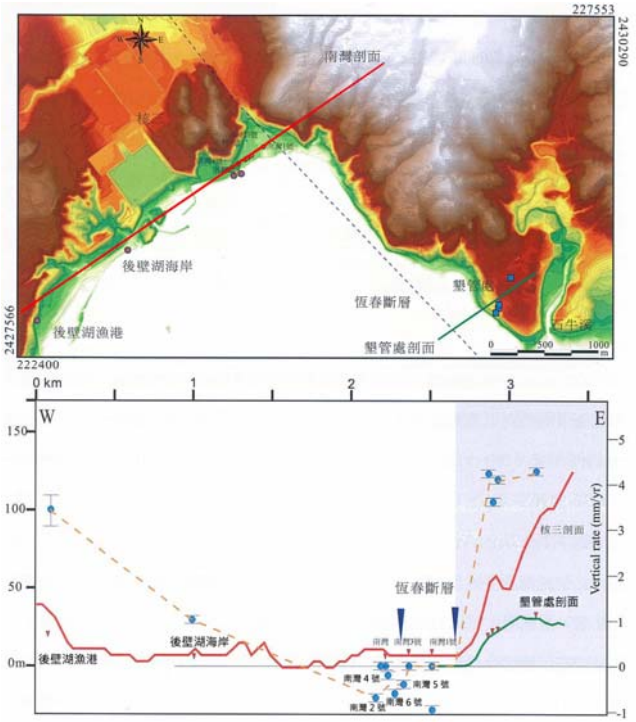


圖 3-8.17：上圖為南灣鑽井及海階定年標本位置分布，下圖為恆春斷層鑽井及海階估算的抬升速率（陳文山等，2010a）。

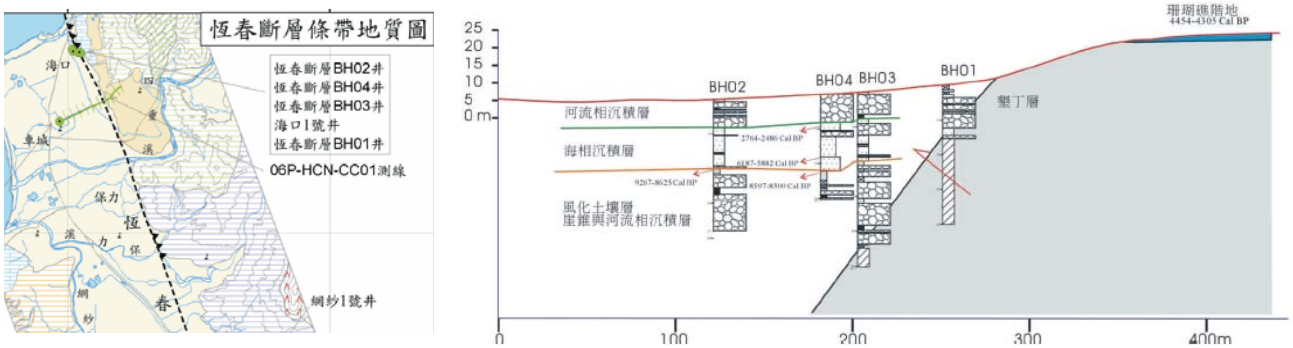


圖 3-8.18：左圖為擷取條帶地質圖說明 BH02、BH03、BH04 及 BH01 井之位置，右圖為鑽探地層剖面圖以及 BH02、BH03、BH04 井的沉積層對比（陳文山等，2006）。

表 3-8.2：恆春斷層四重溪垂直抬升速率計算（中興公司，2012）。

鑽井名稱	鑽孔高程 (m)	樣本深度 (m)	推測之古水深 (m)	樣本年代 (Cal B.P.)	垂直變動速率 (mm/yr)
LSB-2	6.204	33.75	0 - (-2)	10,200-9,777	0.4±0.4
LSB-2	6.204	41.00	0 - (-2)	10,370-10,180	0.4.±0.0
LSB-2	6.204	59.40	0 - (-2)	11,180-10,750	0.3.±0.8
LSB-3	6.983	21.80	0 - (-2)	10,300-9,216	1.9±0.7
LSB-3	6.983	48.85	0 - (-2)	10,760-10,580	0.3±0.1
LSB-4	10.040	15.55	0 - 5	5,710-5,590	-0.4±0.4
LSB-4	10.040	17.10	0 - (-2)	8,290-8,040	1.0±0.0
LSB-4	10.040	29.60	0 - (-2)	10,120-9,670	1.2±0.4
LSB-4	10.040	31.50	0 - (-2)	10,110-9,630	0.9±0.4
車城	5.300	10.80	0 - 3	5,300-4,979	-0.8±0.3
車城	5.300	16.60	0 - 3	6,271-5,998	-1.2±0.2
車城	5.300	24.00	0 - (-2)	8,993-8,647	0.5±0.0
車城	5.300	37.30	0 - (-2)	10,653-10,275	0.9±0.1
車城	5.300	49.00	0 - (-2)	11,606-11,213	0.9±0.2

表 3-8.3：恆春斷層長期滑移速率相關文獻。

參考文獻	方法	垂直抬升速率(mm/yr)	淨滑移速率(mm/yr)
Chen and Liu, 1993	海階定年	6.3(海口)	6.7(斷層面傾角 70 度)
		3.8~6.1(南灣)	4.04~6.49 (斷層面傾角 70 度)
陳文山等，2006	鑽井及珊瑚礁 C14 定年計算抬升率	5.9±0.1(海口)	6.17~6.39 (斷層面傾角 70 度)
陳文山等，2010a	階地珊瑚礁定年，與恆春谷地鑽探剖面對比	4.0~4.4 (南灣)	4.26~4.68 (斷層面傾角 70 度)
中興公司，2012	四重溪鑽探剖面對比	1 mm/yr(西恆春斷層)	1.41 (斷層面傾角 45 度)

6. 單一事件變位量：中興公司（2012）從南灣地區槽溝開挖中，有發現約 3.5 公尺的地形高差，因此暫定單一事件變位量為 3.5 公尺。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。
8. 最近一次活動時間:斷層最近一次活動時間則根據斷層截切更新世晚期之石灰岩而推測約在更新世晚期,東恆春斷層最近一次活動時間以海口珊瑚礁定年分析,為距今 4,450-4,310 年（陳文山等，2006）。

彙整前人對於恆春斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-8.4 所示，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-8.4：恆春斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
恆春斷層	斷層分段與破裂事件	A:陸域 18 公里 B:海域延伸 23 公里 C:陸域+海域 41 公里		地形、野外調查、岩層對比、鑽井、淺層震測剖面、海域地形判釋	Liew and Lin, 1987；六角兵吉及牧山鶴彥，1934；詹新甫，1974；宋國城，1991；林啟文等，2009；石再添等，1985；楊貴三，1986；李珀儂，2008；陳柏村與紀權宥，2010；中興公司，2012
	長度 (km)	A：18 B：23 C：41			
	寬度 (km)	19.0		深度/sin 傾角 （以深度 16 公里，傾角 57.5 度計算）	
	破裂深度 (km)	孕震帶約 14-18 公里		P 波速度構造剖面	Cheng et al., 2012
		–		1900-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積 (km^2)	A：341 B：436 C：778		長度×寬度	
	走向	N22W		地形判釋	詹新甫，1974；林啟文等，2009
		N20W		地表地質、地球物理探查	中興公司，2012
	傾斜角度 (度)	向東傾 70 度			詹新甫，1974
		向東傾高角度		重力、線性逆推	張若磐 ，1993
		高角度		震測	李奕亨，2001
		向東傾 70 度		參考地調所地質圖	Vita-Finzi and Lin,2005
		西恆春斷層 45 度 南灣地區 70 度		地質鑽探剖面	中興公司，2012
		高角度		海域震測剖面	李珀儂，2008；中興公司，2012
	斷層機制	逆移斷層兼具左移性質		上下盤岩層及地形判釋	詹新甫，1974；李珀儂，2008；林啟文等，2009
		逆移斷層		地質鑽探	中興公司，2012
	短期滑移速率 (mm/yr)	2003-2004	未有明顯差異，可能具左移分量	GPS 測量	陳建良等，2006
		2002-2008	平行斷層走向 3.5 垂直斷層走向 5.3		饒瑞鈞等，2008
		2002-2006	高程 0.5-0.6	水準測線	中央地調所

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
	長期滑移速率 (mm/yr)	垂直抬升速率	5.9±0.1(海口)	鑽井及珊瑚礁C14 定年計算抬升率	陳文山等，2006
			6.3(海口)	海階定年	Chen and Liu , 1993
			3.8~6.1(南灣)		
			4.0~4.4 (南灣)	階地珊瑚礁定年，與恆春谷地鑽探剖面對比	陳文山等，2010a
			1 (西恆春斷層)	四重溪鑽探剖面對比	中興公司，2012
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	4.07		三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2014 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)	暫定為3.5		槽溝開挖，具有明顯之地形隆起與剪切紋理，地形高差約 3.5 公尺	中興公司，2012
	特徵地震規模 (Mw)	A：6.6 B：6.7 C：6.9		Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.5 B：6.6 C：6.9		$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	200-300 年		特徵地震模式計算權重最高者（圖 3-8.26）	本計畫推估
	最近一次活動時間	更新世晚期		截切晚期更新世的石灰岩層	中央地調所
		4,450-4,310 年持續活動		隆起珊瑚礁之海階	陳文山等人，2006

3-8-2 恆春斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫對於恆春斷層破裂模式的評估，考慮三種破裂模式：A 為陸域破裂，長度為 18 公里，B 為南部海域延伸段破裂，長度 23 公里，C 為整段破裂，長度 41 公里（圖 3-8.19）。

恆春斷層之傾角，一般從震測及地形推估恆春斷層為高角度斷層，向東傾 70 度，然中興公司（2012）根據鑽井推估西恆春斷層之傾角為 45 度，本計畫考慮以上兩種情形，以傾角 70 度當作邏輯樹上限值，45 度當作邏輯樹下限值，邏輯樹中間值則採用兩者平均(70+45)/2= 57.5 度，其權重分別為 45（0.2）、57.5（0.6）、70（0.2）。

恆春斷層之破裂深度，由於從地震分布中無法觀察到恆春斷層孕震深度，因此參考 Cheng et al.（2012）P 波速度構造剖面及附近地震群深度分布，推測孕震深度約 14-18 公里，因此深度以 14、16、18 公里為邏輯樹數值，權重分別為 0.2、0.6、0.2。

恆春斷層之滑移速率，上節中提到主要是利用海階地及珊瑚礁定年計算垂直抬升速率，假設斷層為逆斷層滑動，將垂直滑移速率換算至斷層面之長期滑移速率，如表 3-8.3 所示，可得到長期滑移速率範圍。參考表 3-8.3，本計畫長期滑移速率設定邏輯樹下限為 1.5；邏輯樹上限為 6.5；邏輯樹中值則採用(1.5+6.5)/2 =4.0。權重分配為 1.5（0.3），4.0（0.4），6.5（0.3）。

恆春斷層之特徵地震規模，則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-8.5 所示為利用邏輯樹中值所求得之各破裂事件地震矩規模，其中 Yen and Ma（2011）為臺灣本土之經驗公式，因此給予較高之權重 0.5。

恆春斷層各節點權重的分配詳如圖 3-8.20 所示。

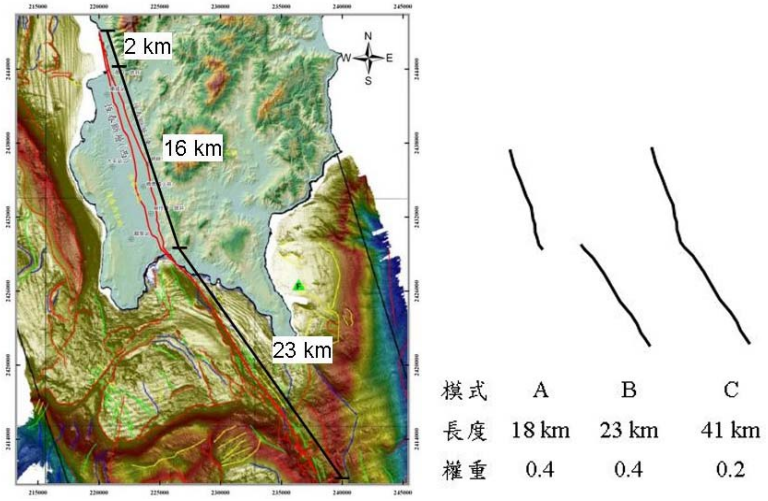


圖 3-8.19：恆春斷層之破裂模式。

表 3-8.5：恆春斷層之中值各破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994 (破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011 (破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
A	18	16	19	57.5	341	6.4	6.6	6.9	6.5
B	23	16	19	57.5	436	6.5	6.7	7.0	6.6
C	41	16	19	57.5	778	6.7	6.9	7.2	6.9
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

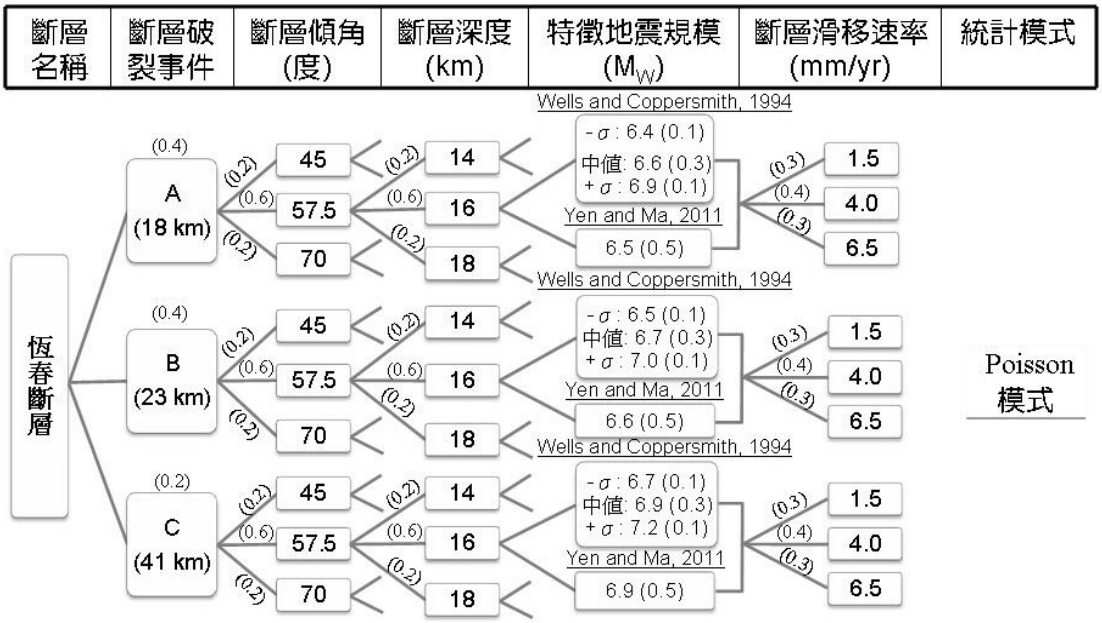


圖 3-8.20：恆春斷層邏輯樹。

3-8-3 恆春斷層特徵地震模式

恆春斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一地震復發間隔時間，圖 3-8.21～圖 3-8.23 為 3 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

圖 3-8.20 之恆春斷層邏輯樹可得到 324 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-8.24 為 3 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 6.6 之權重最高；破裂模式 B 以規模 6.7 之權重最高；破裂模式 C 以規模 6.9 之權重最高。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-8.25 為 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將 3 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-8.26（a）之恆春斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-8.26（b）之恆春斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

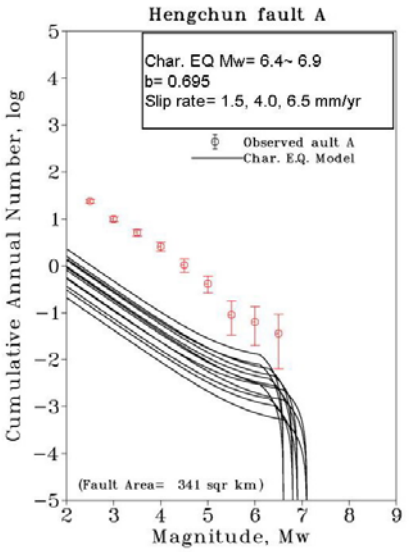


圖 3-8.21：A 事件特徵地震模式。

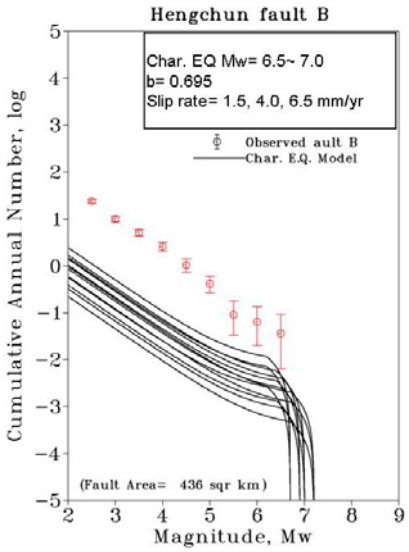


圖 3-8.22：B 事件特徵地震模式。

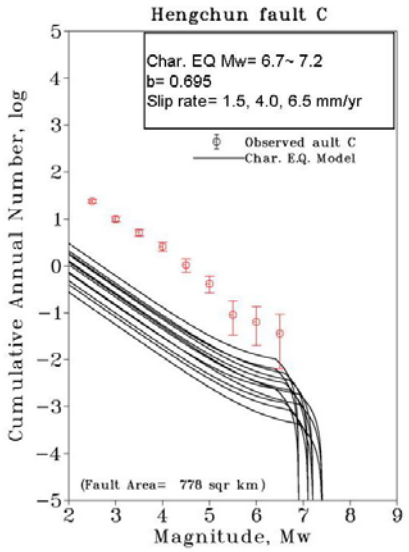


圖 3-8.23：C 事件特徵地震模式。

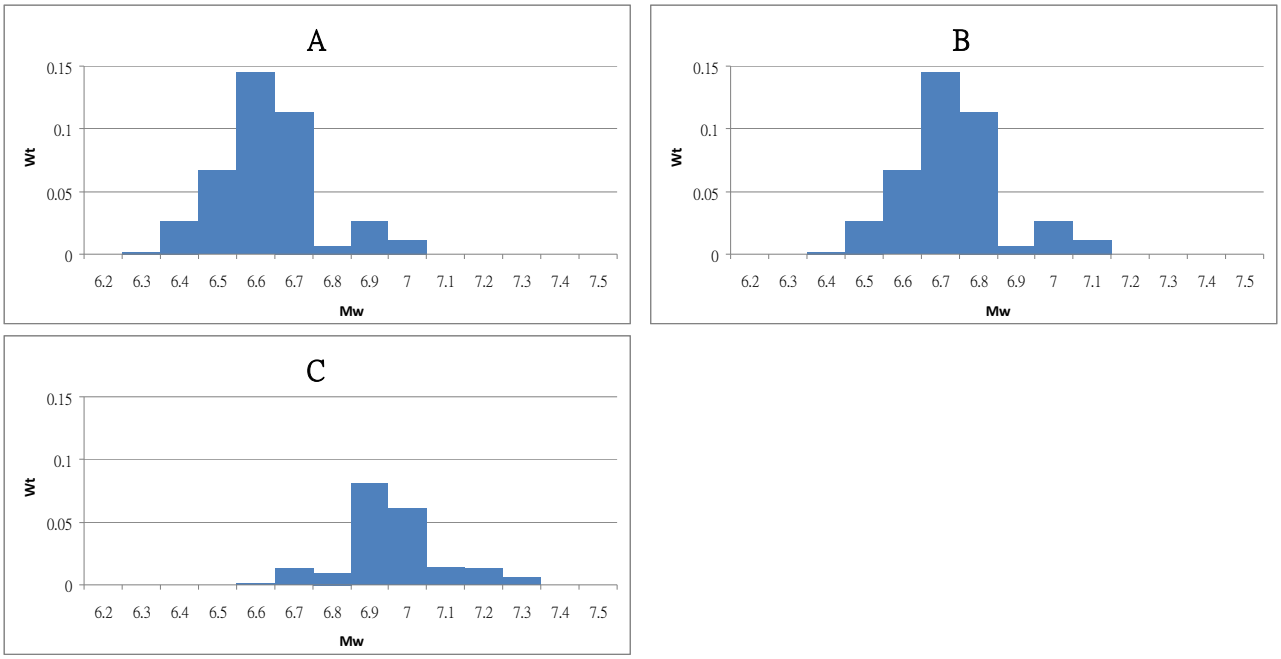


圖 3-8.24：恆春斷層 3 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

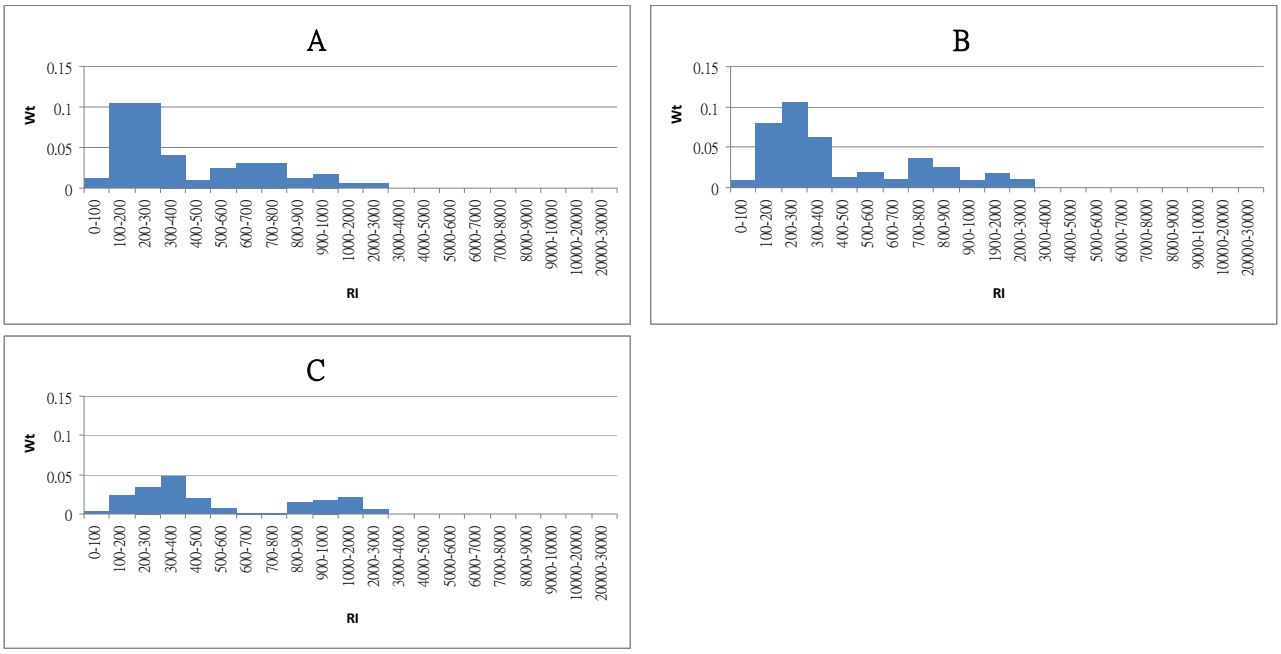
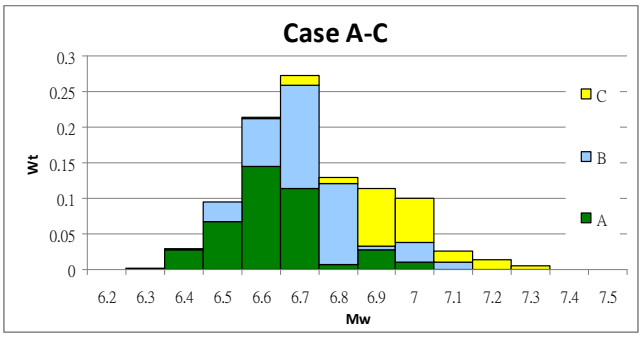


圖 3-8.25：恆春斷層 3 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。

（a）



（b）

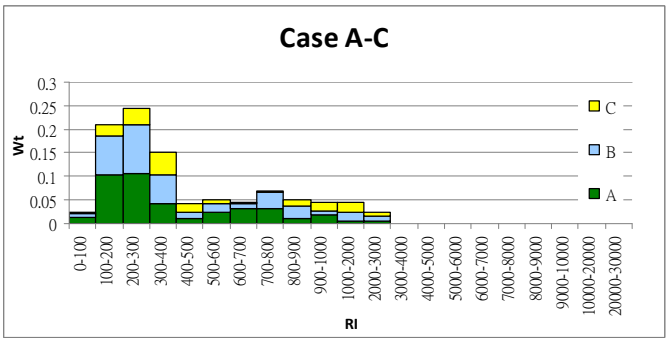


圖 3-8.26：（a）恆春斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）恆春斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-8-4 恆春斷層發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式（詳附錄 3-1）估算恆春斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，恆春斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-8.6 為恆春斷層 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.3~7.3 之機率為 9.9%、15.8%及 28.2%，發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 9.3%、14.8%及 26.7%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.8%、1.2%及 2.3%。

表 3-8.6：恆春斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.3 ≦ M ≦7.3	9.9%	15.8%	28.2%
M ≧ 6.5	9.3%	14.8%	26.7%
M ≧ 7.0	0.8%	1.2%	2.3%

3-9 小結

1. 經彙整文獻後，蒐集完成各活動斷層之參數，建立活動斷層邏輯樹之分段、參數及權重詳列於表3-9.1中。
2. 圖3-9.1~圖3-9.3除了展示臺灣活動斷層之分布外，同時標示了活動斷層未來30年、50年、100年發生地震矩規模6.5以上之機率，圖3-9.4~圖3-9.6則標示了活動斷層未來30年、50年、100年發生地震矩規模7.0以上之機率。其中已知上一次斷層錯動與大規模地震之發生時間得採用BPT模式（假設發生率會隨時間變化）；未知上一次斷層錯動與大規模地震之發生時間得採用Poisson模式（假設發生率固定，不隨時間變化）。活動斷層之復發間隔是根據斷層滑移速率之研究與調查成果所推估，進一步再計算活動斷層發生大地震之機率。
3. 本計畫在評估木屐寮-六甲斷層系統之破裂，可分為3種破裂事件來探討，A為木屐寮斷層破裂，B為六甲斷層破裂，C為木屐寮+六甲斷層破裂。木屐寮-六甲斷層Poisson模式評估之結果，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為16.7%、26.1%及44.5%；發生地震矩規模7.0以上之機率為6.2%、9.9%及17.6%。
4. 本計畫針對新化斷層共評估兩種破裂模式，一為新化斷層與西部延伸段，長度12公里，另一為新化斷層至海岸延伸段，長度24公里。新化斷層最後一次發生地震為西元1946年，以BPT模式評估之結果，自西元2015年以後，未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為3.3%、5.9%及12.1%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.0%、0.0%及0.0%。
5. 後甲里斷層本身不會造成大規模之地震，且實際上是台南斷層之背衝斷層，本計畫建議採用孕震構造進行評估，斷層長度則參考台南斷層之長度，本計畫考慮兩種破裂模式，分別為長度12公里及長度30公里。後甲里斷層系統最後一次發生時間可能為西元1862年，因此本計畫分別採用BPT模式及Poisson進行評估，以BPT模式得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為12.8%、20.2%及35.2%；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為3.1%、5.3%及10.4%。以Poisson模式得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為9.4%、15.0%及26.8%；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為3.1%、5.0%及9.2%。
6. 本計畫對於左鎮斷層破裂模式的評估，僅評估一種破裂模式，其長度為20公里。以Poisson模式評估之結果，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為1.5%、2.3%及4.0%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.0%、0.0%及0.0%。左鎮斷層無論是幾何形貌（傾角與深度）或長期滑移速率的資料，都相當不足，建議進一步調查，以利地震潛勢的評估。

表 3-9.1：活動斷層參數表。

斷層名稱	分段		長度（km）	深度（km）	面積(km^2)（邏輯樹中值）	滑移特性	斷層傾角（度）	斷層滑移速率（mm/yr）	最近一次活動時間（yr）	特徵地震規模(Mw)	
										W & C, 1994	Y & M, 2011
山腳	整段	A	83	10(0.2) 12.5(0.6) 15(0.2)	1145	正移	50(0.2) 65(0.6) 80(0.2)	0.02(0.3) 1.31(0.4) 2.6(0.3)	A.D.1867(？)	6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.1(0.5)
	北段	B	53		731			0.02(0.3) 0.1(0.4) 0.17(0.3)	A.D.1867(？)	6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.1(0.1)	6.9(0.5)
	南段	C	30		414			0.8(0.3) 1.7(0.4) 2.6(0.3)	A.D.1694(？)	6.3(0.1) 6.6(0.3) 6.8(0.1)	6.6(0.5)
湖口	A		21	7(0.2) 9(0.6) 11(0.2)	412	逆移	0~7km, 60 度 7km 以下, 10 度	1.8(0.2) 3.4(0.6) 5.0(0.2)	三萬年以來曾經活動	6.4(0.1) 6.7(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	B		30		588					6.6(0.1) 6.8(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
新竹	A		17	8(0.2) 10(0.6) 12(0.2)	222	逆移兼右移	40(0.2) 50(0.6) 60(0.2)	1.9(0.2) 2.7(0.6) 3.5(0.2)	更新世晚期	6.2(0.1) 6.4(0.3) 6.7(0.1)	6.3(0.5)
	B		29		379					6.4(0.1) 6.7(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	C		34		444					6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.6(0.5)
	D		46		600					6.6(0.1) 6.8(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
新城	A		28	8(0.2) 10(0.6) 12(0.2)	436	逆移	30(0.2) 40(0.6) 50(0.2)	1.8(0.2) 2.1(0.6) 2.5(0.2)	＜300 yr	6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.6(0.5)
	B		16		249					6.2(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.4(0.5)
獅潭-屯子腳系統	屯子腳	A	20	11(0.2) 13(0.6) 15(0.2)	269	右移	65(0.2) 75(0.6) 85(0.2)	1.6(0.2) 5.2(0.6) 8.8(0.2)	A.D.1935	6.2(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.4(0.5)
		B	37		498					6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.7(0.5)
	獅潭	C	15	6(0.2) 8(0.6) 10(0.2)	157	逆移	40(0.2) 50(0.6) 60(0.2)	2.4(0.2) 5.2(0.6) 8.0(0.2)		6.1(0.1) 6.3(0.3) 6.6(0.1)	6.2(0.5)
		D	25		261					6.3(0.1) 6.5(0.3) 6.8(0.1)	6.4(0.5)
		E	35		366					6.4(0.1) 6.6(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	獅潭-屯子腳	F	-	-	-	-	-	1.6(0.2) 5.2(0.6) 8.8(0.2)		6.7(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
三義	A		25	7(0.2) 9(0.6) 11(0.2)	532	逆移	20(0.2) 25(0.6) 30(0.2)	0.4(0.25) 1.9(0.25) 2.0(0.25) 3.6(0.25)	全新世	6.5(0.1) 6.8(0.3) 7.0(0.1)	6.7(0.5)
	B		33		703					6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
	C		36		767					6.7(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
	D		44		937					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
大甲-彰化系統	大甲	A	30	6(0.2) 8(0.6) 10(0.2)	568	逆移	10(0.2) 25(0.6) 45(0.2)	11.0(0.3) 3.4(0.4)	A.D.1848(？)	6.6(0.1) 6.8(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
	彰化	B	36		681		20(0.2) 25(0.6) 30(0.2)	5(0.3) 10(0.4) 15(0.2) 20(0.1)		6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
		C	51		965					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
		D	50		946					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	整段	E	70		1120		20(0.2) 30(0.6) 40(0.2)	5(0.3) 10(0.4) 15(0.2) 20(0.1)		6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
		F	85		1360					6.9(0.1) 7.2(0.3) 7.4(0.1)	7.1(0.5)
		G	84		1344					6.9(0.1) 7.1(0.3) 7.4(0.1)	7.1(0.5)
車籠埔	整段	A	110	同南、北段數值	1836	逆移	同南、北段數值	12.1(0.2) 14.3(0.6) 16.4(0.2)	A.D.1999	7.0(0.1) 7.3(0.3) 7.6(0.1)	7.3(0.5)
		B	92		1522					6.9(0.1) 7.2(0.3) 7.4(0.1)	7.2(0.5)
		C	94		1590					7.0(0.1) 7.2(0.3) 7.5(0.1)	7.2(0.5)
		D	76		1276					6.9(0.1) 7.1(0.3) 7.4(0.1)	7.1(0.5)
	北段	E	40	5.5(0.2) 6.5(0.6) 7.5(0.2)	615		23(0.2) 25(0.6) 27(0.2)	13.3(0.2) 20.5(0.6) 27.7(0.2)		6.6(0.1) 6.8(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
		F	24		369					6.4(0.1) 6.6(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	南段	G	70	8.5(0.2) 10(0.6) 11.5(0.2)	1220		33(0.2) 35(0.6) 37(0.2)	4.9(0.2) 8.3(0.6) 11.7(0.2)		6.9(0.1) 7.1(0.3) 7.4(0.1)	7.1(0.5)
		H	52		907					6.7(0.1) 7.0(0.3) 7.2(0.1)	7.0(0.5)
大茅埔-雙冬	整段	A	69	10(0.2) 12(0.6) 14(0.2)	1171	逆移	35(0.2) 45(0.6) 55(0.2)	0.4(0.2) 0.8(0.6) 1.2(0.2)	A.D.1999	6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.1(0.5)
	大茅埔	B	14		238					6.2(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.4(0.5)
	雙冬	C	55		933					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
九芎坑	九芎坑+桐樹湖	A	28	5(0.2) 7(0.6) 9(0.2)	392	逆移	25(0.2) 30(0.6) 35(0.2)	0.3(0.5) 1.5(0.5)	＜18,540 年	6.4(0.1) 6.7(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	九芎坑	B	17		238					6.2(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.4(0.5)
梅山	A		35	10(0.2) 12.5(0.6)	453	右移	70(0.2) 75(0.6) 80(0.2)	2.6(0.5) 5.3(0.5)	A.D.1906	6.5(0.1) 6.7(0.3) 6.9(0.1)	6.7(0.5)

	B		25	15(0.2)	324				6.3(0.1) 6.5(0.3) 6.8(0.1)	6.5(0.5)
	C		13		168				6.0(0.1) 6.3(0.3) 6.5(0.1)	6.2(0.5)
大尖山	北段		13	7.5(0.2) 10(0.6) 12.5(0.2)	184	右移兼逆移	40(0.2) 45(0.6) 50(0.2)	5(0.2) 10(0.6) 15(0.2)	A.D.1999	6.1(0.1) 6.4(0.3) 6.6(0.1)	6.3(0.5)
	南段		13		184	逆移			-	6.1(0.1) 6.4(0.3) 6.6(0.1)	6.3(0.5)
觸口	觸口	A	28	7.5(0.2) 10(0.6) 12.5(0.2)	436	逆移	35(0.2) 40(0.6) 45(0.2)	1.25(0.2) 2.5(0.6) 3.75(0.2)	38,000 年前	6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.6(0.5)
	大尖山+觸口	B	42		653					6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
	觸口+崙後	C	58		902					6.7(0.1) 7.0(0.3) 7.2(0.1)	7.0(0.5)
	大尖山+觸口+崙後	D	72		1120					6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
木屐寮-六甲	木屐寮	A	13	10(0.2) 12(0.6) 14(0.2)	423	逆移	0~6km, 35 度(0.3) 40 度(0.4) 45 度(0.3) 6km 以下, 15 度	7.9(0.3) 9.1(0.4) 10.3(0.3)	1 萬年以內	6.4(0.1) 6.7(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	六甲	B	22		715					6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.1(0.1)	6.9(0.5)
	木屐寮+六甲	C	35		1138					6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.1(0.5)
新化	A		12	10(0.2) 12.5(0.6) 15(0.2)	152.4	帶垂直分量的右移	70(0.2) 80(0.6) 90(0.2)	6.27(0.5) 2.72(0.5)	A.D.1946	6.0(0.1) 6.2(0.3) 6.4(0.1)	6.2(0.5)
	B		24		304.8					6.3(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.5(0.5)
台南斷層-後甲里斷層系統	A		12	6(0.2) 10(0.6) 14(0.2)	374	逆移	0~4km, 30 度 4km 以下, 15 度	2.5(0.2) 5.0(0.6) 7.5(0.2)	A.D.1862(?)	6.4(0.1) 6.6(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	B		30		935					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
左鎮	A		20	8(0.2) 10(0.6) 12(0.2)	212	左移	60(0.2) 70(0.6) 80(0.2)	11.33(0.5) 3.85(0.5)	-	6.1(0.1) 6.4(0.3) 6.6(0.1)	6.3(0.5)
小崗山	A		9	10(0.2) 11(0.6) 12(0.2)	230	逆移	0~10km, 40 度(0.2) 45 度(0.6) 50 度(0.2) 10km 以下, 5 度	2.1(0.3) 2.4(0.4) 2.8(0.3)	更新世晚期	6.2(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.4(0.5)
	B		31		794					6.7(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
旗山	A		30	10(0.2) 13(0.6) 16(0.2)	459	逆移	50(0.2) 58(0.6) 65(0.2)	1.1(0.3) 1.5(0.4) 1.8(0.3)	距今 7,189 年	6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.7(0.5)
	B		62		949					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	C		71		1086					6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	D		103		1576					7.0(0.1) 7.2(0.3) 7.5(0.1)	7.2(0.5)
潮州	A		44	15(0.2) 17.5(0.6) 20(0.2)	889	逆移斷層兼具左移	50(0.2) 60(0.6) 70(0.2)	0.46(0.3) 1.39(0.4) 2.31(0.3)	更新世晚期	6.7(0.1) 7.0(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
	B		60		1212					6.9(0.1) 7.1(0.3) 7.4(0.1)	7.1(0.5)
	C		30		606					6.6(0.1) 6.8(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
	D		46		930					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	E		74		1495					6.9(0.1) 7.2(0.3) 7.4(0.1)	7.2(0.5)
	F		90		1819					7.0(0.1) 7.3(0.3) 7.5(0.1)	7.3(0.5)
	G		90		1819					7.0(0.1) 7.3(0.3) 7.5(0.1)	7.3(0.5)
	H		106		2142					7.1(0.1) 7.3(0.3) 7.6(0.1)	7.4(0.5)
恆春	A		18	14(0.2) 16(0.6) 18(0.2)	341	逆移斷層兼具左移	45(0.2) 57.5(0.6) 70(0.2)	1.5(0.3) 4.0(0.4) 6.5(0.3)	更新世晚期	6.4(0.1) 6.6(0.3) 6.9(0.1)	6.5(0.5)
	B		23		436					6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.6(0.5)
	C		41		778					6.7(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)

註 1：斷層滑移速率及特徵地震規模中參數旁之括弧內數字為參數之權重。

註 2：特徵地震規模以斷層面積分別以 Yen and Ma（2011）及 Wells and Coppersmith（1994）之經驗公式推求得知。

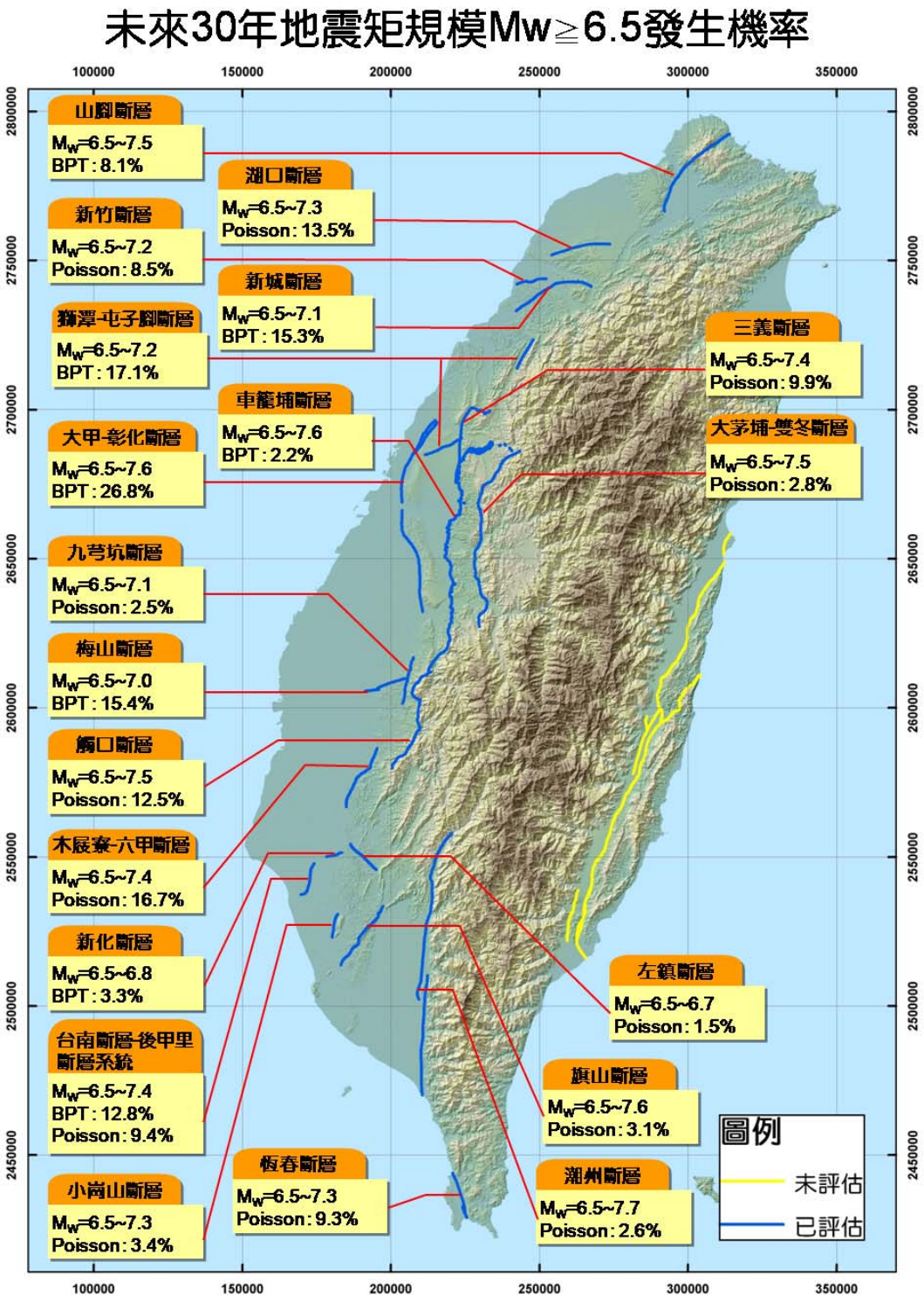


圖 3-9.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

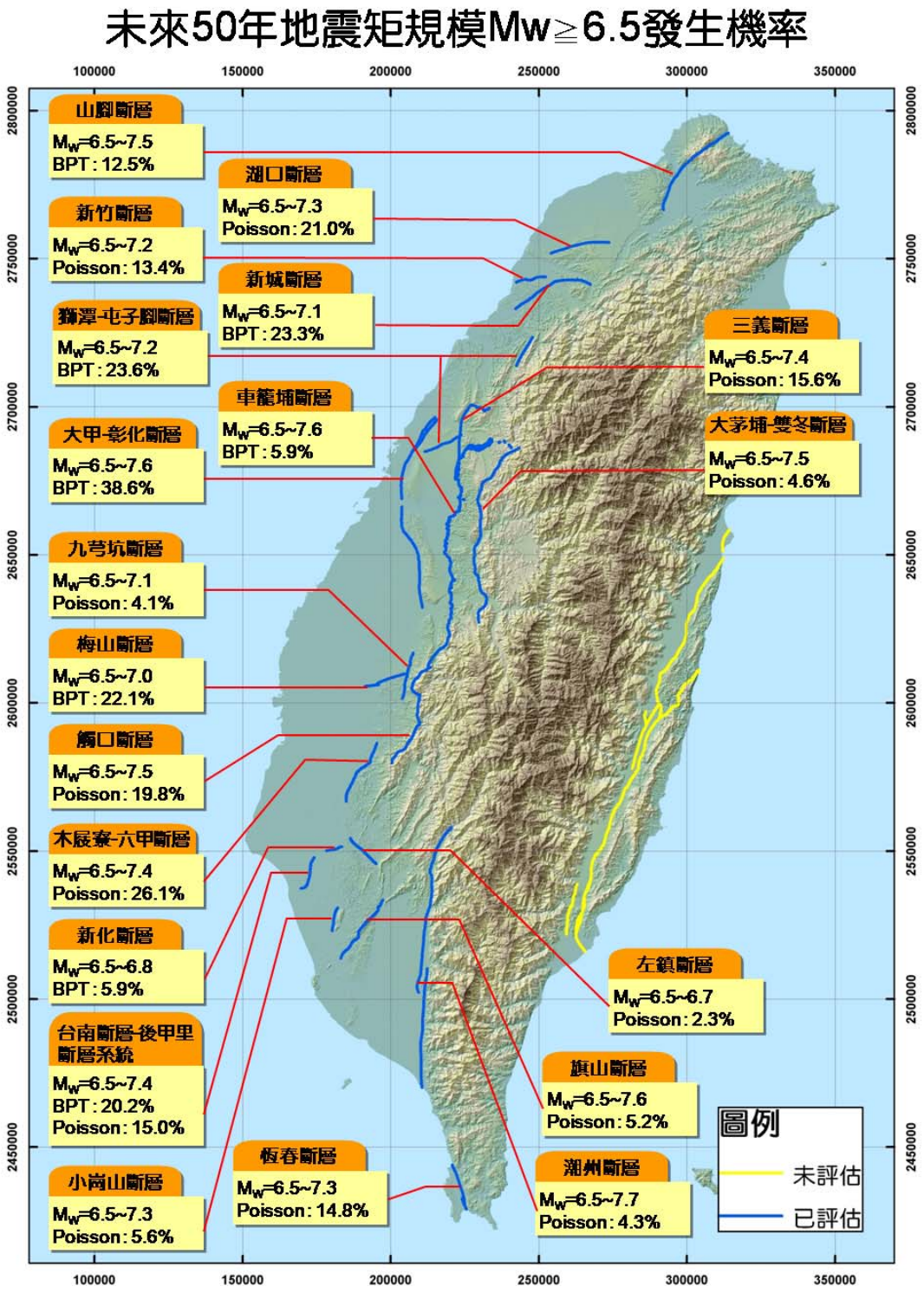


圖 3-9.2：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

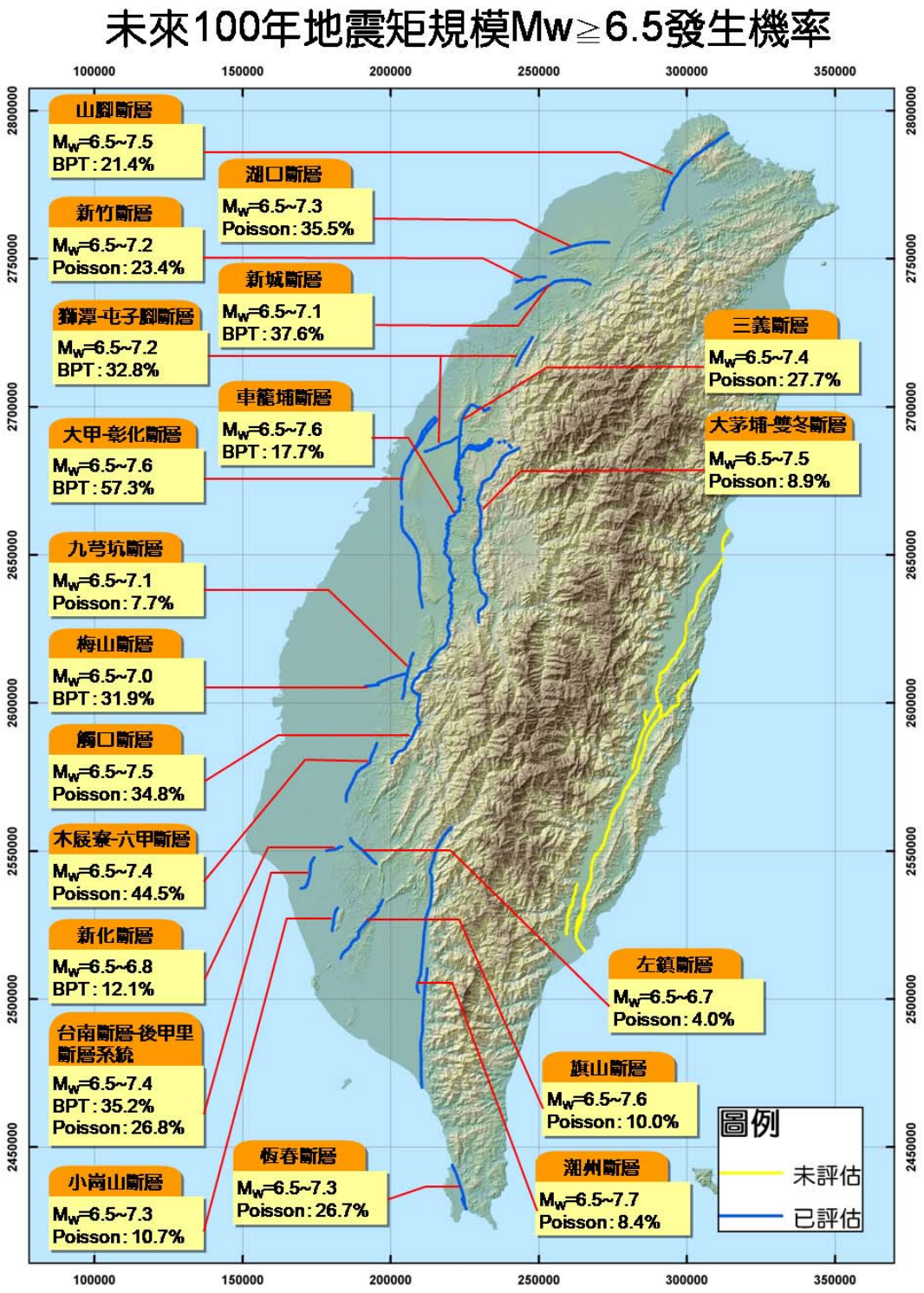


圖 3-9.3：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

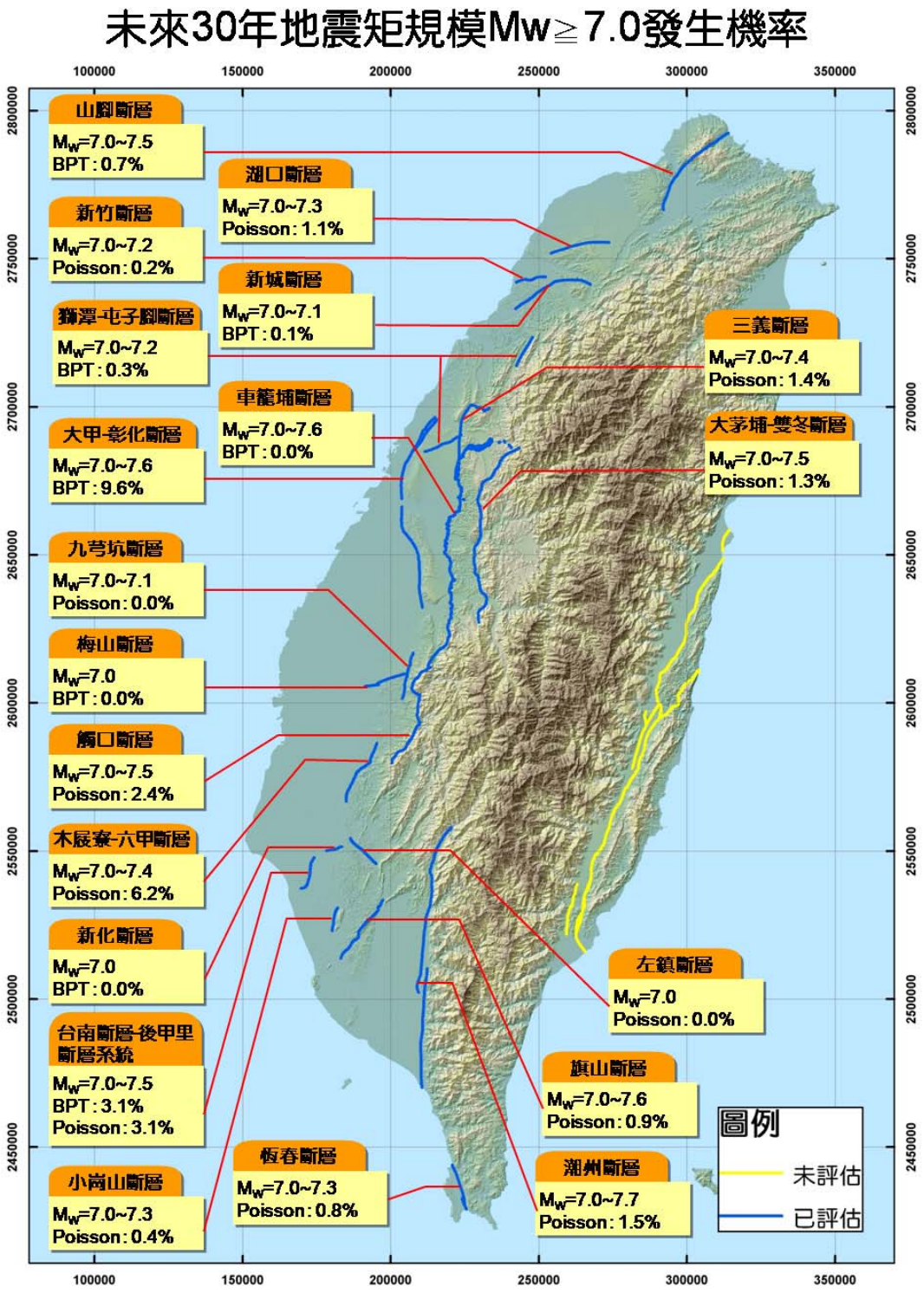


圖 3-9.4：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

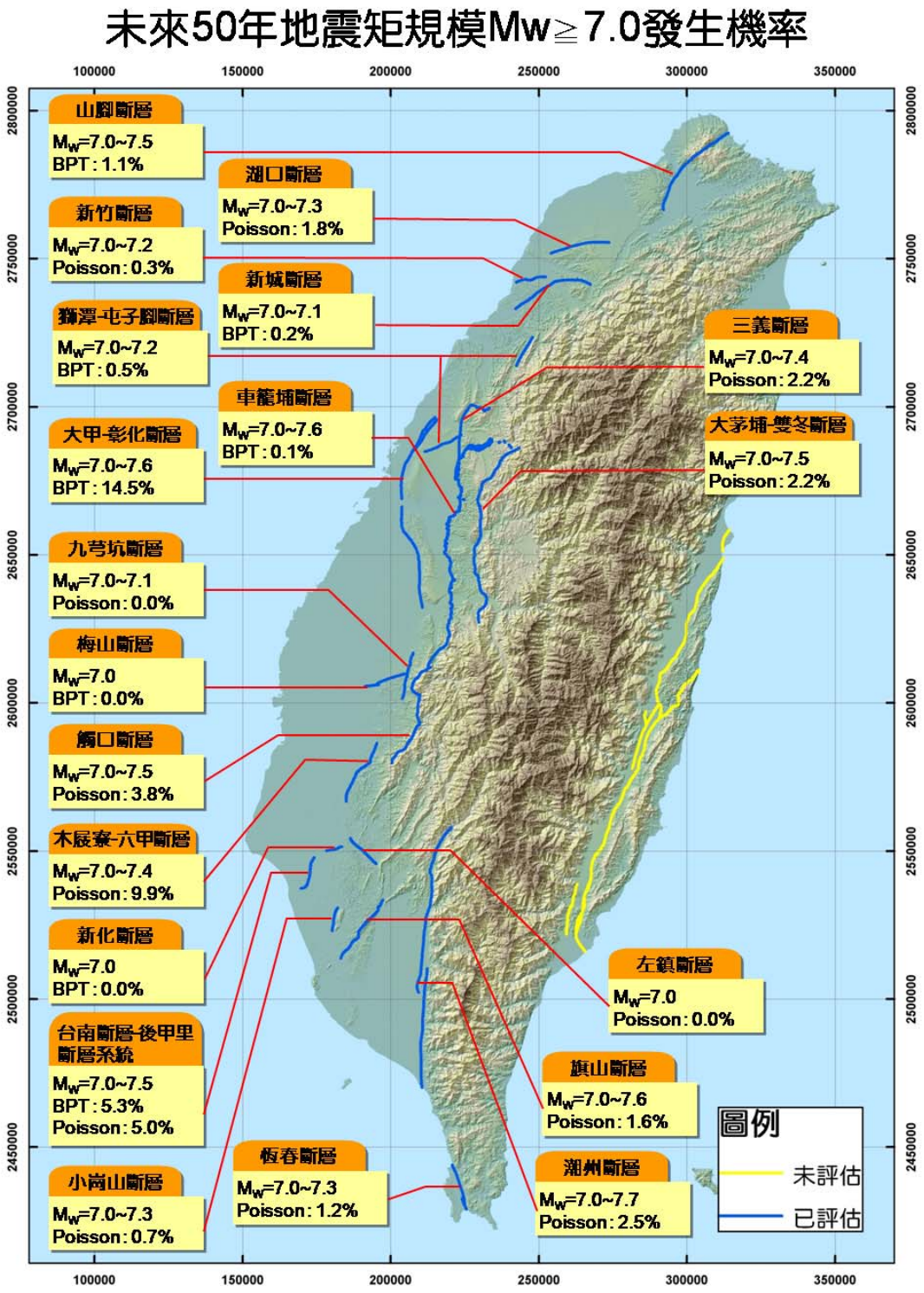


圖 3-9.5：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

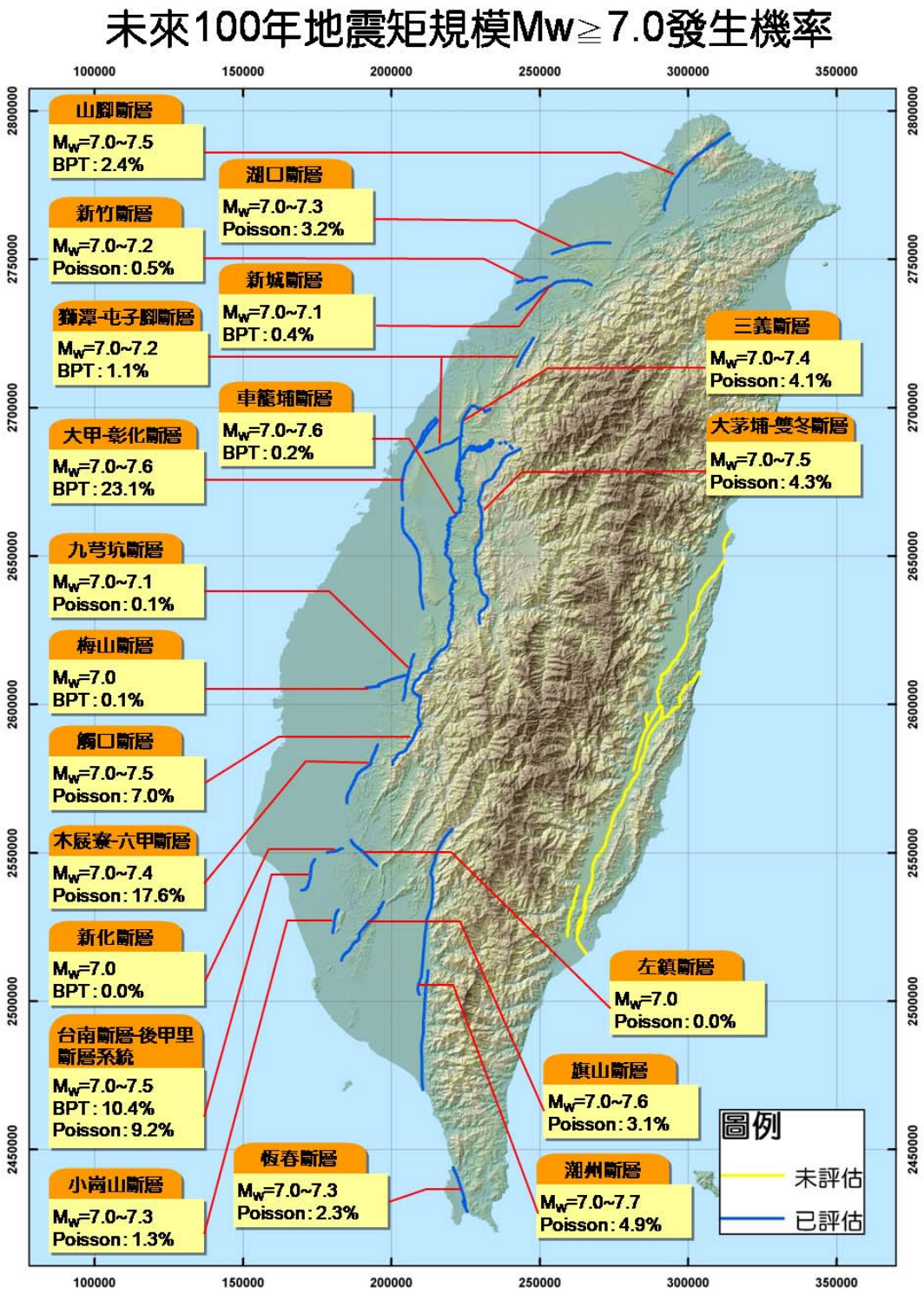


圖 3-9.6：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

第四章、井下應變儀資料分析

4-1 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷

4-1-1 影響應變儀資料變化的因素

井下應變儀是一種相當敏感的地殼變形監測儀器，通常需要埋設於地底下一至二百公尺深度以下，以減少溫度變化或其它環境或地表活動所產生的地殼變形。然而，縱使如此細心的設計，仍然無法排除所有的環境變化因素，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、地表空氣壓地變化、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形...等。

但估計各種因素對井下應變儀的影響，不可僅用單一種因素來估計，也無法由幾個單一時間多種因素來做回歸分析，畢竟在這階段還無法把所有影響井下應變儀的因素都放在多變數回歸模式中，不完整的回歸模式會因為各種變數間的高相關而產生錯誤的回歸模式，例如颱風來時的低氣壓往往伴隨著很大的降雨量，氣壓、氣溫、潮汐與地下水都有很明顯的年週期，各變數間的高相關性很容易產生偏差的模式，因此，本計畫將依各測站各變數一步一步地試圖建立起正確的修正模式，希望能將可以移除的各種效應盡量移除，然後才在剩餘的資料中，試圖找出可能的地震前兆訊號，或是由地震相關的變化找出斷層在地震前、後或同震的活動狀況。

在過去對資料分析的成果中（胡植慶等，2012），已能正確的建立各測站的井孔恢復效應、估算大氣壓力影響分量（圖 4-1.1）與初步計算面應變中地潮的影響分量（圖 4-1.2），且地下水的處理狀況如下：

1. 嘉義地區的地下水資料中可看出此區域的地下水變化相當大，可高達 20 公尺（圖 4-1.3），而每公尺地下水變化可能相對於岩層中的孔隙水壓的變化，對岩層會產生約 0.56~9.05 μstrain /meter 的應變影響，因此這一地區的資料一定要先移除地下水效應（或孔隙水壓效應）的影響，否則無法估計其它的效應。但 2013 年後，於嘉義地區重新裝設地下水觀測井，由於井位深度不同，地下水對應變的反應與過去不同，甚至出現數天的應變儀與地下水資料不同步的情況，新井位的地下水資料與井下應變儀之間的物理機制需要重新思考，無法套用之前的模式，這需要進一步的分析才能更清楚。
2. 新竹地區的地下水資料則較不完全（圖 4-1.4），大坪測站（BMMT）無地下水的觀測資料，瑞峰測站（LMMT）的地下水資料與其井下應變儀資料一樣，不太完全，新樂測站（CINT）的地下水資料變化不大，約在 61~64 公尺之間，其對井下應變儀的效應則約為 4.0 μstrain/meter，梅花測站（PFMT）的地下水變化約在 115~132 公尺之間，於 2005 年至今持續的下降，水位的年變化不大，看不出週期性，但這一測站的井下應變儀資料並看不出持續下降的變化，這也有可能是在移除井孔效應時，這長期的線性變化也一併的被移除了。所以對新竹地區的應變資料無法先移除地下水的影響量。
3. 臺北地區的地下水資料較新竹測網的地下水資料完整（圖 4-1.5），各測站水位長期趨勢大致不變，水位變化與井下應變儀資料並沒有像嘉義地區那麼高相關（圖 4-1.6），是否可以直接移除地下水的影響量需要進一步的研究。

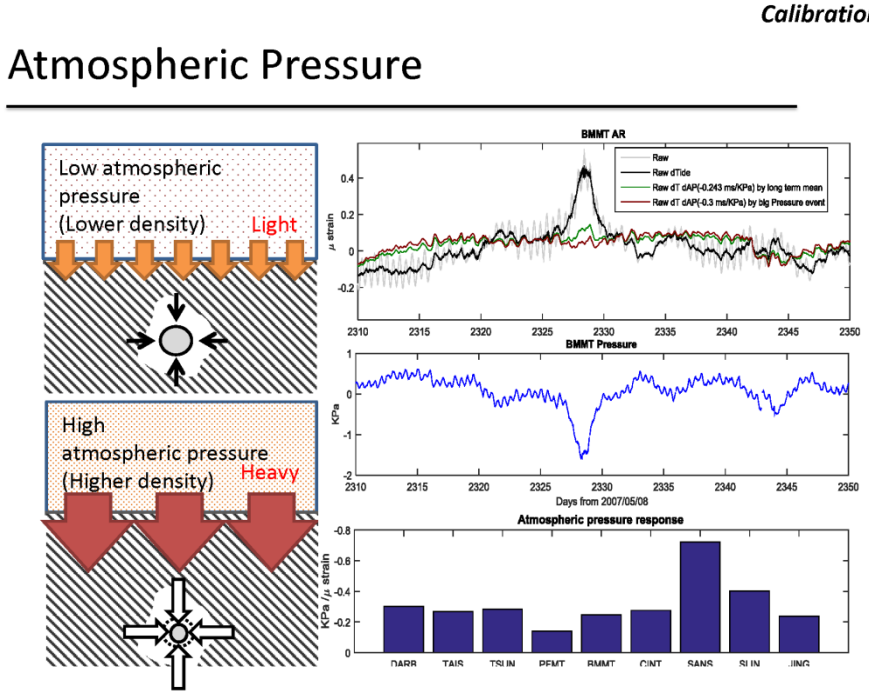


圖 4-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。氣壓的上升對應變儀面應變造成壓力增加而產生壓縮，因此氣壓的變化與面應變的變化是負相關。

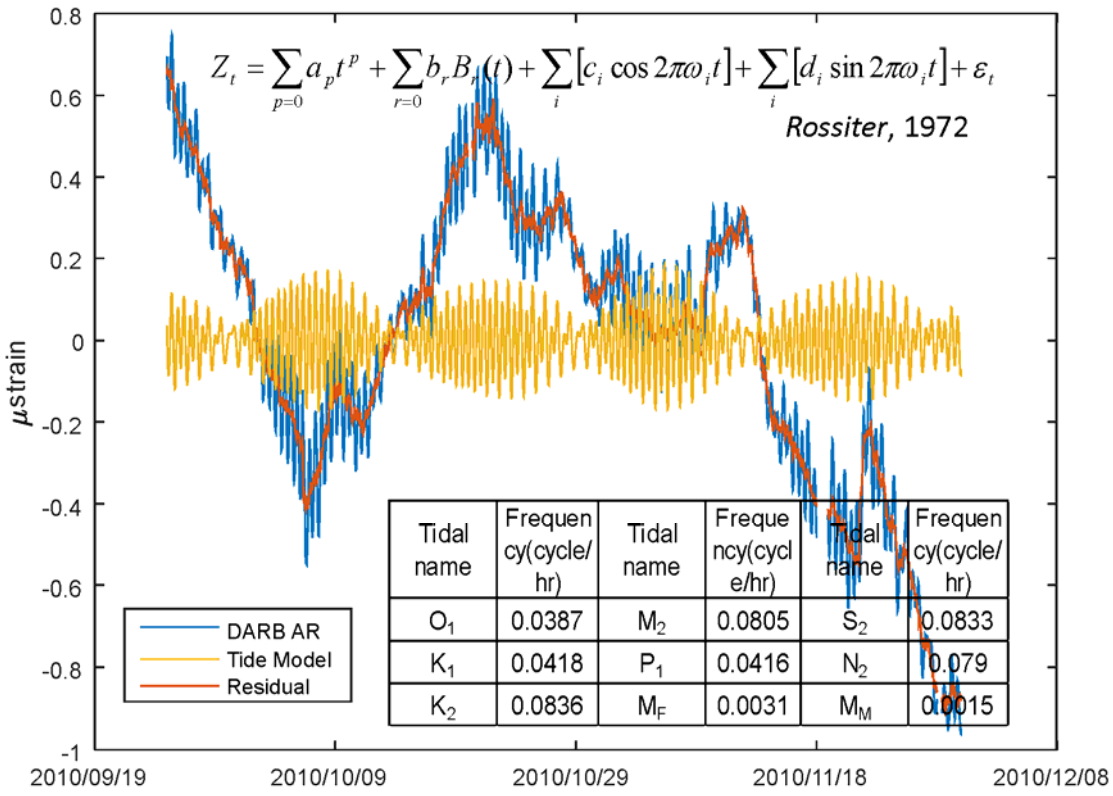


圖 4-1.2：井下應變儀中地潮分量的評估。利用固定幾個主要起潮頻率的正弦函數與餘弦函數所組成的時間序列，再加上氣壓的時間序列，用多變數迴歸法估計每一個時間序列對潮位資料時間序列的響應，詳細理論請參考附錄 1-3。**藍色**線段是原始面應變資料、**橘色**線段為所評估出來的地潮分量，而**紅色**線段為原始面應變扣掉地潮分量後的殘差。

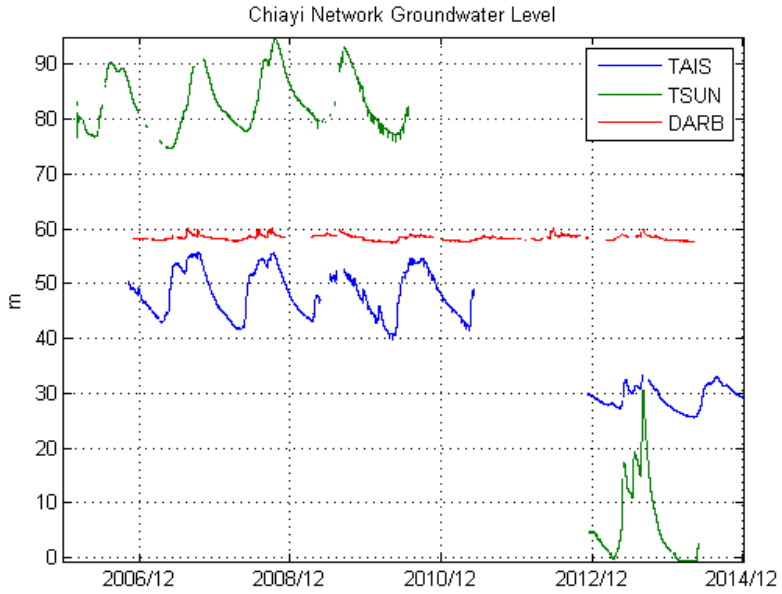


圖 4-1.3：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。

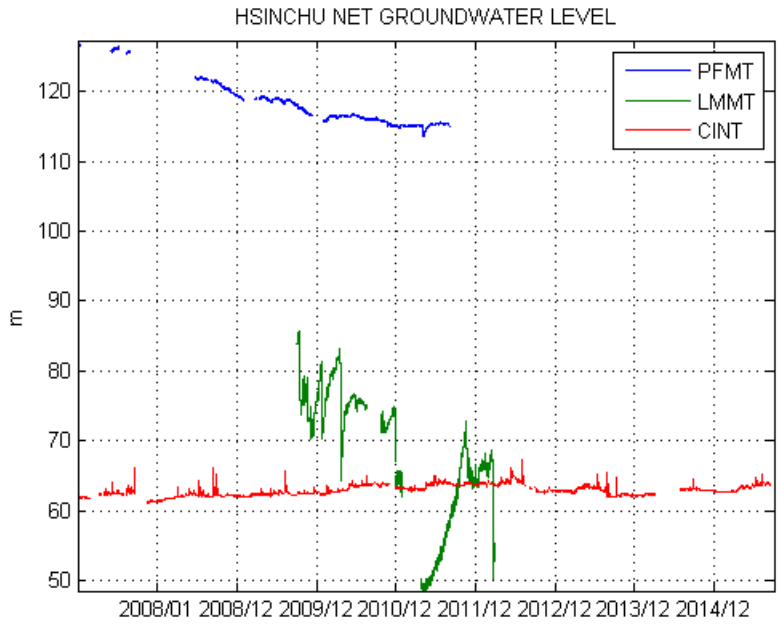


圖 4-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花測站（PFMT）地下水位持續下降。

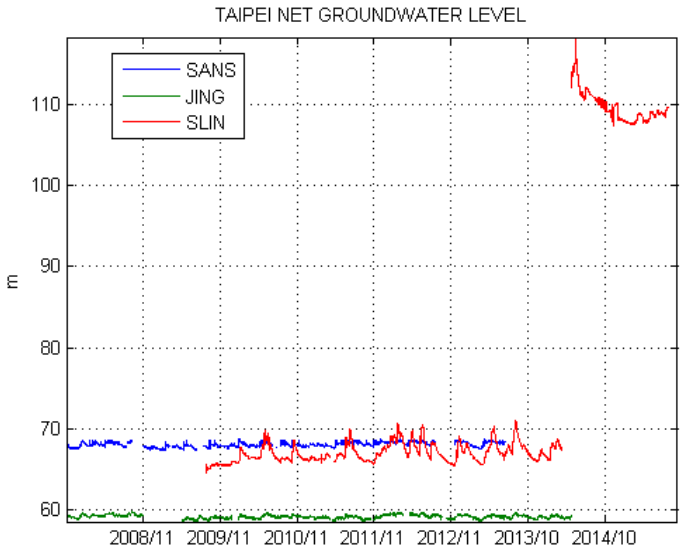


圖 4-1.5：臺北地區地下水各測站水位資料。

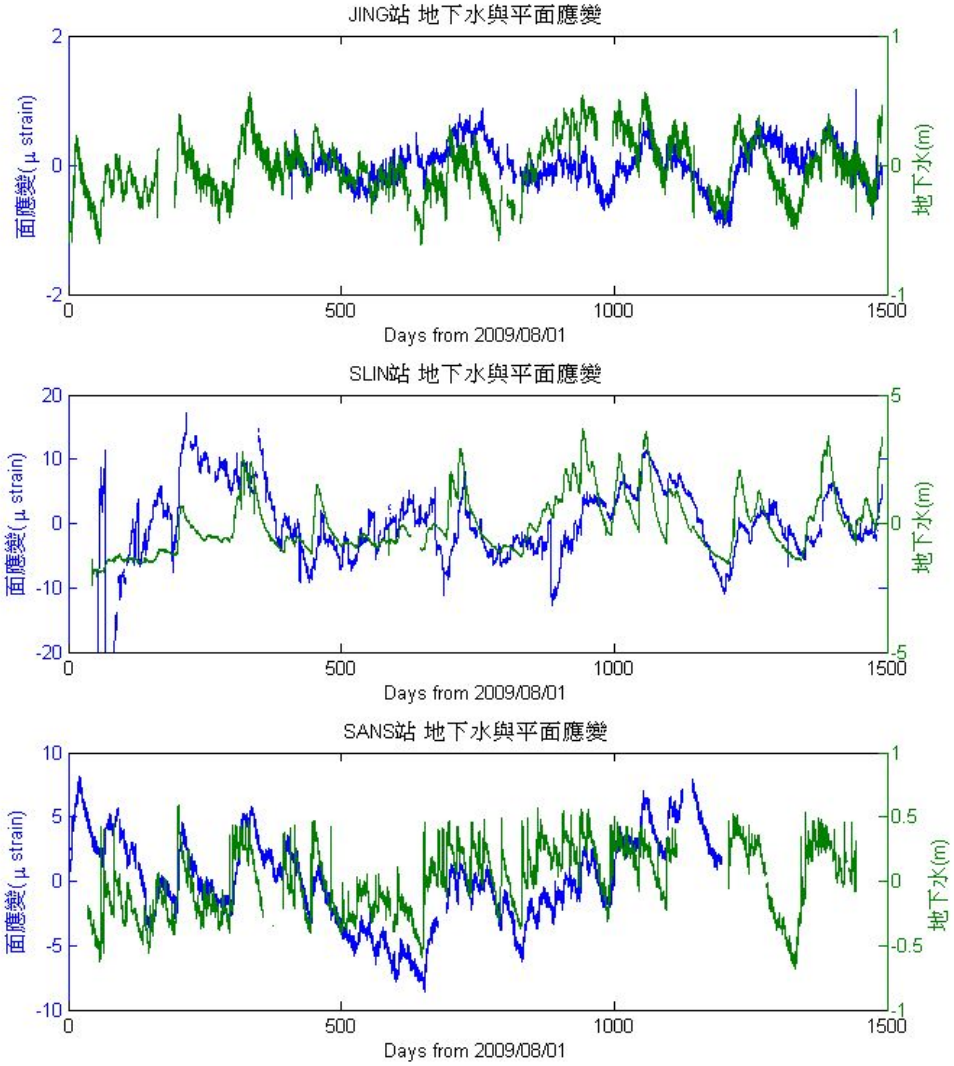


圖 4-1.6：臺北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。

在建立各種修正模式之前，須對其效應做物理性的探討，故下面分別就地下水及氣壓兩方面來進行討論：

（1）地下水效應

由於地下水儀器並非與井下應變儀設置在同一深度，也非同一井孔，所以地下水資料一般是代表儀器周遭岩層的孔隙水壓，以及代表儀器上方地下水的多寡量，前者孔隙水壓增大時，可抵消岩層外來的應力，減少岩層的擠壓應變（或增加其膨脹應變），但後者所代表的物理效應是增加儀器上方的垂直負載，其效應與氣壓變化相同，與孔隙水壓效應相反。由於地下水壓代表這兩種相反的效應，各測站會因為地下水壓計所設置的含水層的位置、水層分布範圍的大小以及水層與地表水的相通程度而有很大的不同反應，當然儀器附近岩層的孔隙率與透水性也是主要的因素。若地下水壓計是設置在封閉的含水層，則其四周岩層的體積應變也會改變水層中的水壓，因此這水壓變化會與井下應變儀同步，如此去除地下水效應也可能移除了真正的岩層應變資訊。不過，應該沒有完全封閉的地下水層，水層本身的體積應變僅能短期的增加其中的水壓，並不會有長期的效應。所以移除地下水壓變化對井下應變儀資料的效應，應該還是可以保留地殼的長期應變。

依照現在所分析的幾個測站來看，以嘉義網長期地下水的影響較為明顯，量約在0.56~9.05 μstrain/meter 之間。嘉義網達邦（DARB）、中興（TSUN）與太興（TAIS）三測站的地下水影響係數分別為：7.33、0.75 與 8.99（圖 4-1.7 至圖 4-1.9）。

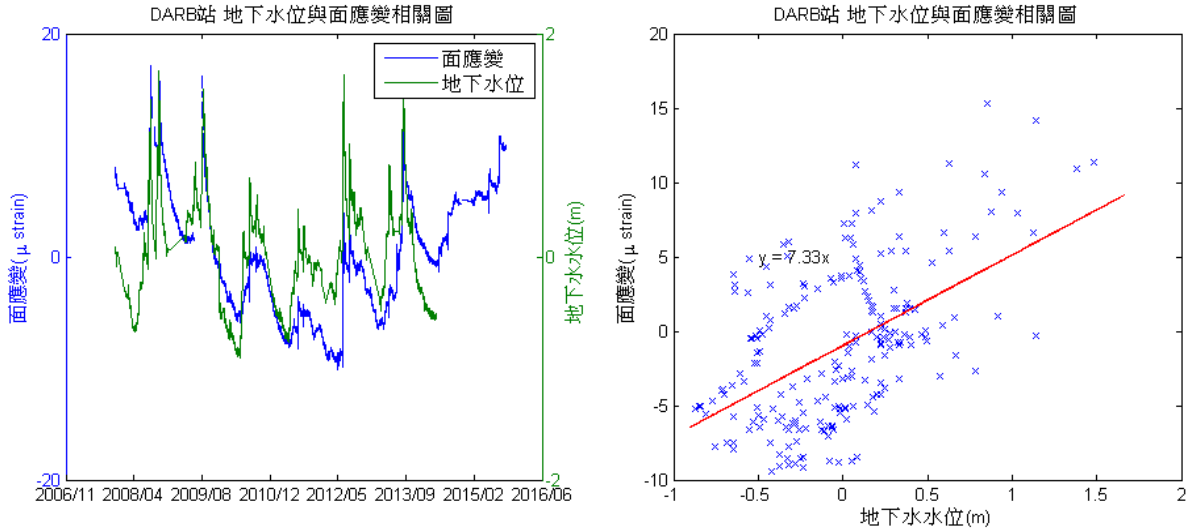


圖 4-1.7：嘉義網達邦測站（DARB）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

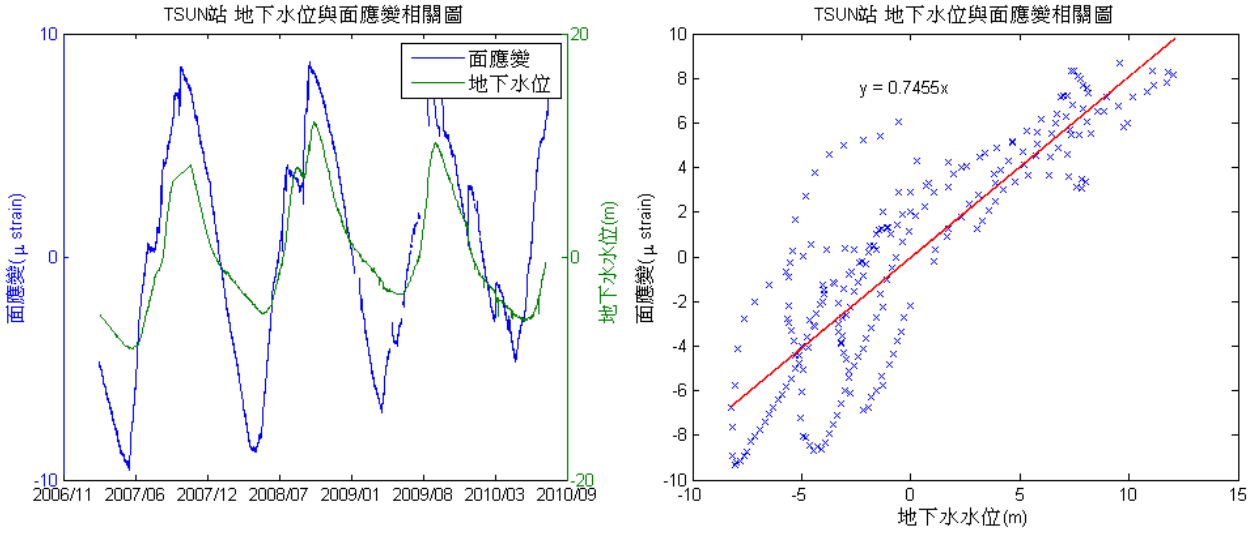


圖 4-1.8：嘉義網中興測站（TSUN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

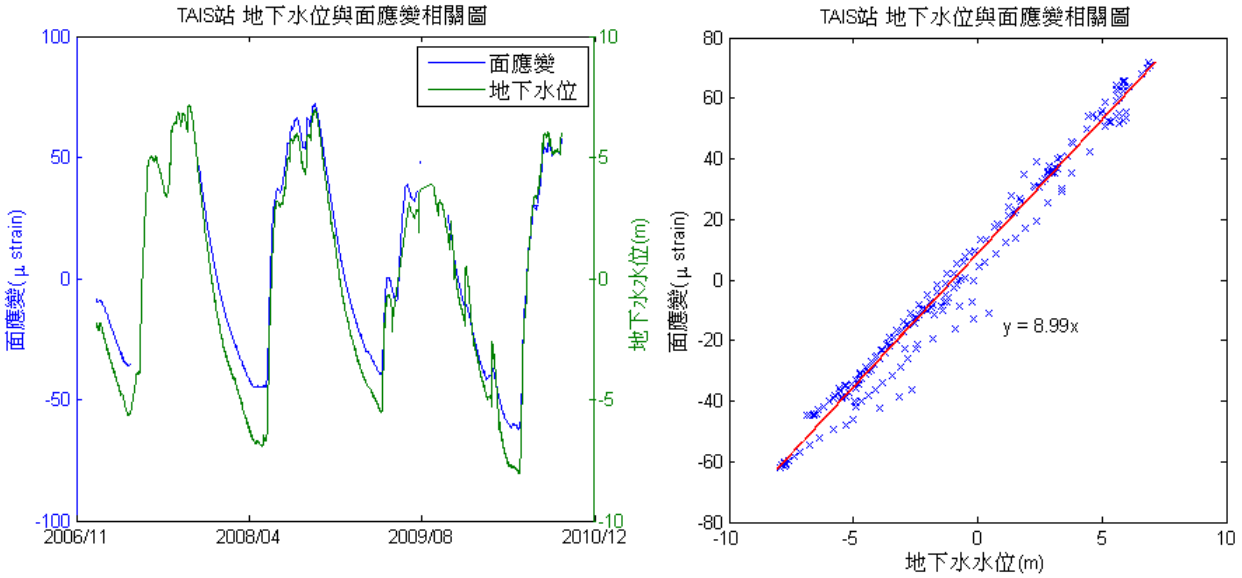


圖 4-1.9：嘉義網太興測站（TAIS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

之前提到新竹網的地下水資料較不完全，且地下水位變動與面應變之關係並不明顯，因此暫時無法做地下水的影響效應評估。

另外在觀察臺北測網的應變儀資料與地下水位之關係時，長時間的資料與地下水的相關性並沒有很好（圖 4-1.6），但當觀察較短時間（大約一年），井下應變儀的面應變資料與地下水水位的變化有較好的線性相關（圖 4-1.10 至圖 4-1.12）。但相較於嘉義網，它們之間的線性關係有比較大的誤差，可能來自於其他環境因子影響，因此所求得的參數只是初步的測試，錦和（JING）、明德中學（SANS）與樹林（SLIN）三測站的地下水影響係數分別為：2.58、5.15 與 1.75（圖 4-1.10 至圖 4-1.12）。

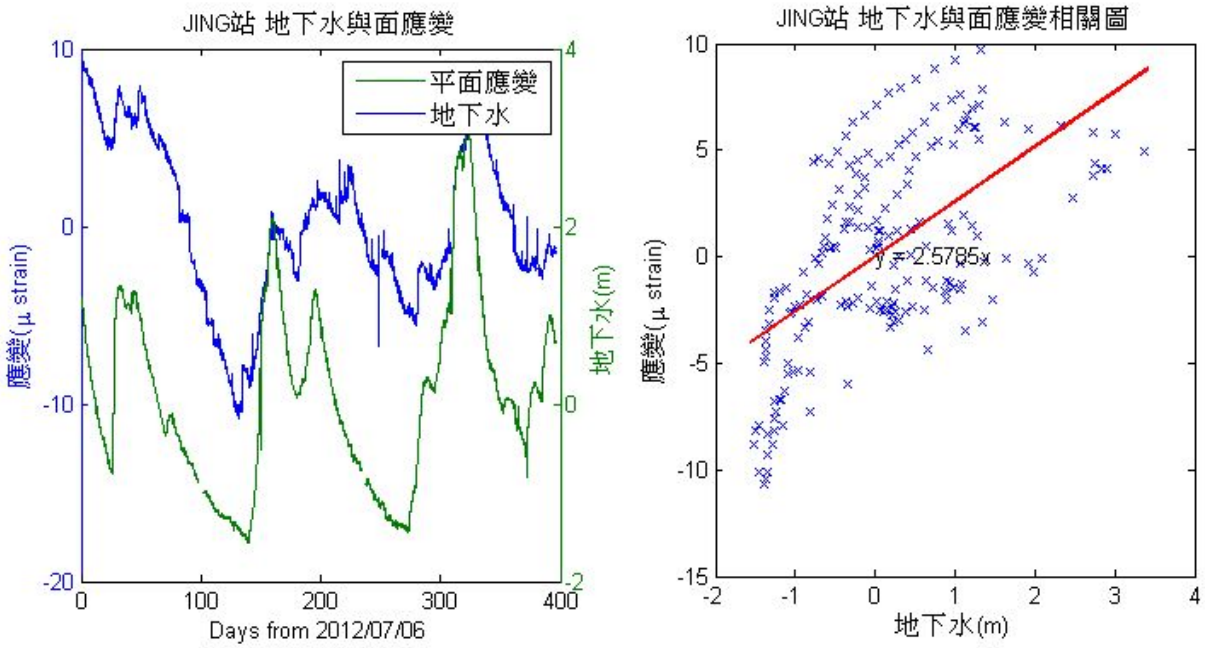


圖 4-1.10：臺北網錦和測站（JING）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

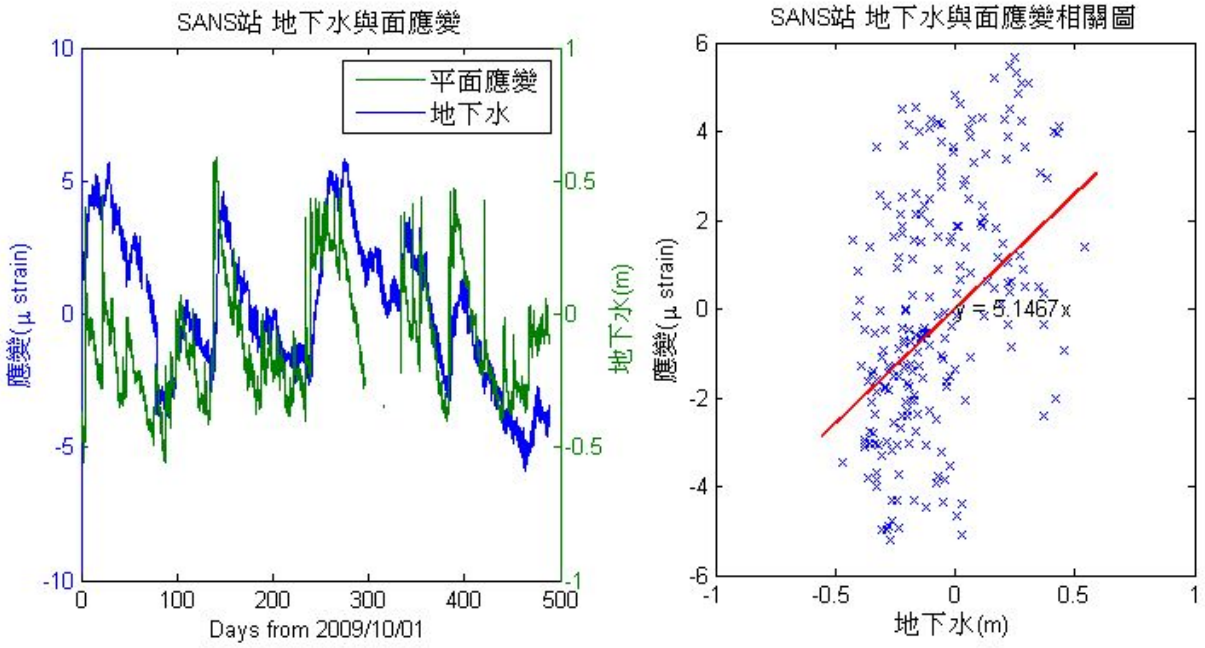


圖 4-1.11：臺北網明德中學測站（SANS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

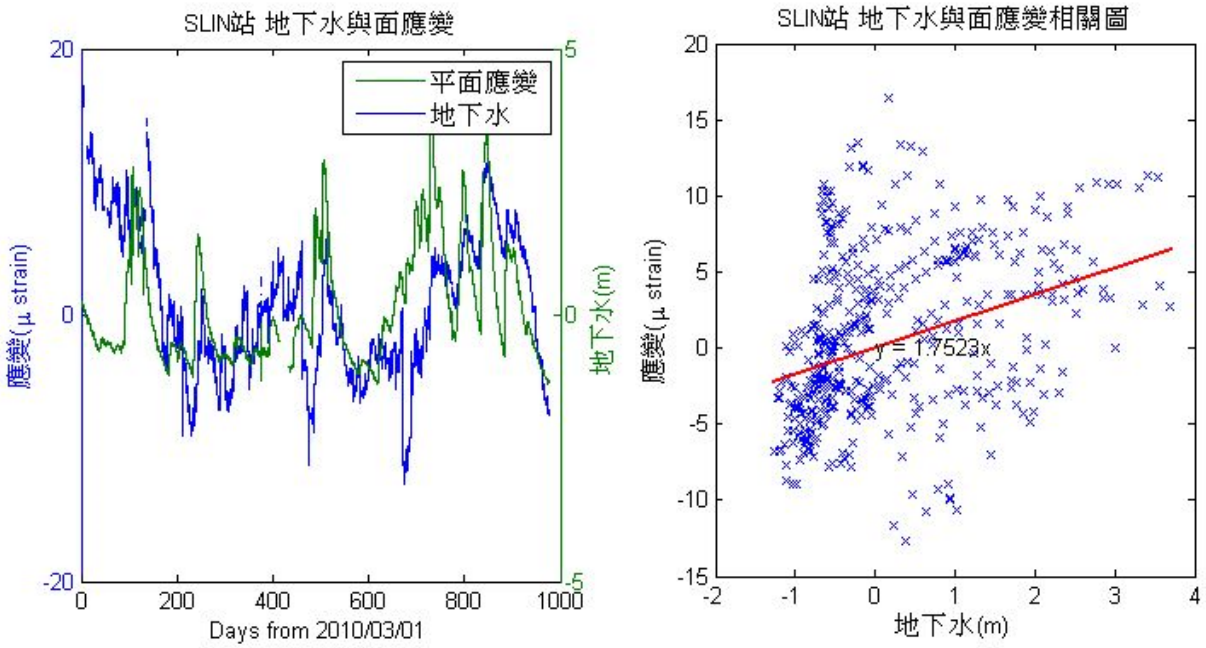


圖 4-1.12：臺北網樹林測站（SLIN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

（2）氣壓的影響量

大氣壓力的變化，通常是較大區域的，除了在鋒面邊緣，否則氣壓是均勻的平面垂直壓力，其對井下應變儀的影響應該只受岩層彈性係數的變化以及岩層與儀器的偶合係數不同而有所差異，因此，對於同一測站的儀器，其單位氣壓變化對井下應變儀記錄的影響應該是長期不變的，而且這影響量在大範圍氣壓變化中應該是一致的，也就是這兩者間的關係是線性的，氣壓變化對於地殼來說等於是上覆壓力的直接改變。

因此，氣壓與應變間的關係，可透過線性回歸來計算，但由於影響應變儀的因素相當多，為避免其他因素所造成的應變變化錯誤估算成氣壓的影響，尋找這關係式的原則是先在資料中搜尋較大氣壓變化的記錄，特別是幾個較大的颱風，或者是高氣壓或低氣壓時的記錄，然後再從其中挑選井下應變儀記錄比較單純的，最後再來計算這段期間氣壓與應變的關係，可以做為氣壓對於應變儀的影響量。但可能由於可以用來計算的樣本事件太少，無法確定數值是否能作為代表。

另外，在（Roeloffs, 2010）的文章中指出由於應變訊號中含有多種不同來源的訊息，氣壓與應變間的關係透過直接線性迴歸的方式並不適當，他建議利用帶通濾波（band-pass filter）取兩者週期 4~6 天左右的濾波後訊號再進行線性迴歸可得到較佳的結果。因此，我們利用頻率分析上常用的相干性（coherence）來檢視兩者的相關係數的高低。

相干性（coherence）可用來檢視兩個時序資料在頻譜上的相關性，利用自相關頻譜密度間的相關性求取兩者交叉相關頻譜密度的量值，所得結果界於 1 至 0 間，越接近 1 表示兩者在頻譜上相關性越高，可幫助我們尋找出兩個不同時序資料的共通頻段。

考量一隨時間變化的函式 x = x（t），在有限時間 T 裡，可透過富利葉轉換表示為

$$X(f,T)=\int_0^T x(t)e^{-2\pi fti}dt \qquad \text{（式 4-1.1）}$$

該頻率域函數的自相關頻譜密度可以下列式子表示：

$$Pxx = \frac{2}{n_d N \Delta t} \sum_{k=1}^{nd} \left| Xi(f_k) \right|^2 \qquad k = 0,1,2...., \frac{N}{2} \qquad \text{（式 4-1.2）}$$

其中 $f_k = k/Ts = K/N\Delta t$　k = 0,1,2, …, N-1 ，N 為各分段的長度。
而交叉相關頻譜密度則為：

$$Pxy = \frac{2}{n_d N \Delta t} \sum_{k=1}^{nd} \left[X_i^*(f_k) Y_I(f_k) \right] \qquad \text{（式 4-1.3）}$$

$X_i^*(f_k)$ 表示為 $X（f_k）$ 的複數共軛函數。
兩個函數的相干性（coherence）的定義如下式：

$$r_{xy}^2(f_k) = \frac{\left| P_{xy}(f_k) \right|^2}{P_{xx}(f_k) P_{yy}(f_k)} \qquad \text{（式 4-1.4）}$$

根據上述定義，我們以達邦測站（DARB）為例子，來討論氣壓與觀測應變在頻率域上的相關性，找出氣壓對於觀測應變的響應。我們取較少受降雨與其他因素影響的區段，約在每年 10 月至隔年 4 月間的降雨次數與量都相對較小，因此我們取 2008 年 10 月至 2009 年 3 月的應變資料，以一個月長度為觀測視窗，每步驟向前移動重覆取樣 50%，取 1024 頻率區段進行兩者在頻率域上的相干性比較，圖 4-1.13 為 CH0 觀測應變與氣壓在頻率域上 0 至 40 μHz 的相干性比較，較高頻率的相干性較低且越高頻干擾源越多，因此我們僅就 40 μHz，亦即 0.3 天以上週期的訊號來進行比較。比較結果可見其相干性平均值加減標準差為 0.36 ± 0.21，其中在 34.7、22.8、3.8 至 1.6 有較佳的相干性，轉換為週期則為 0.3 天、0.5 天、3 至 7 天，由於 0.3 與 0.5 天的周期與潮汐的半日潮與 1/3 日潮週期相近，但其形成原因卻不相同，頻率相干性雖高卻不能對比，因此還是以 3~7 天的周期區段裡兩者有較高的對比性，而此值包含 Roeloffs 的建議值（4~6 天）。

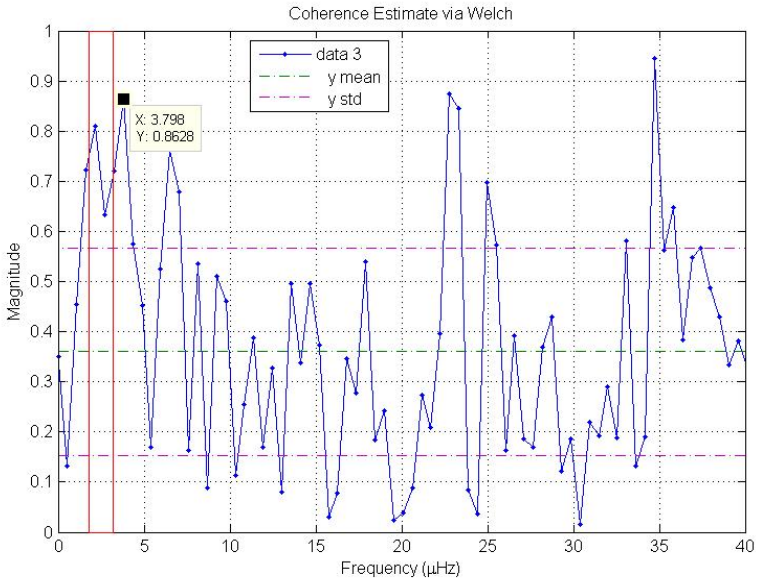


圖 4-1.13：達邦測站（DARB）CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較（0~40 μHz）。

達邦測站（DARB）的其他 channel 與氣壓對比也得出類似的結果，因此可以說利用帶通濾波取週期 3~7 天結果進行比對來取得觀測應變中的氣壓響應因子的方式是合理的（圖

4.1-14）。

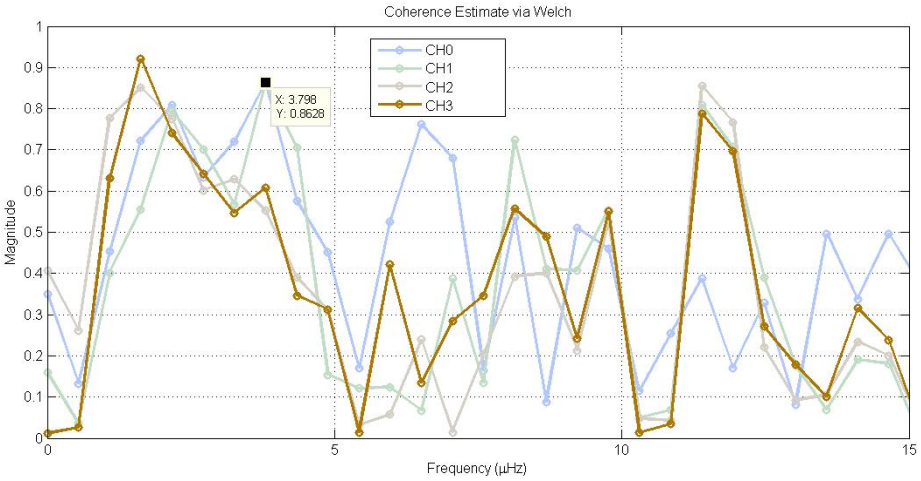


圖 4-1.14：達邦測站（DARB）觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較，可見在 3~7 天的週期間隔兩者有較高的相干性。

再進一步討論，氣壓因子是否會隨著時間不同而有浮動的對應值，利用前述所得結果，先將觀測應變與氣壓資料進行帶通濾波後進行迴歸分析，隨著時間觀察氣壓響應因子的變化。從結果來看氣壓響應因子大致上維持在一定值（圖 4-1.15），但受到降雨影響很大，在雨季期間的氣壓響應因子震盪幅度相當大，從負值擺盪到正值都有，這表示在降雨期間入滲的雨水會促使地下水位上升，影響到觀測應變的大小，造成應變頻率上的干擾，使得氣壓響應因子的計算結果誤差變大。綜上所述，發現氣壓對觀測應變的影響是固定的，並不會隨時間變化而改變，這點也符合理論上的關係，但是計算氣壓時仍需注意地下水位變化的影響，其最直接的指標就是降雨，因此要計算良好穩定的氣壓響應因子，必須先避開降雨密集的時段，才能夠得到相對乾淨穩定的結果。

如果上述方法可得到正確的氣壓影響量，理論上可以與利用大氣壓事件所計算的氣壓影響一致，以大坪測站（BMMT）CH0 在 2007 年 8 月聖帕颱風的資料來看（圖 4-1.16），與表 4-1.1 所列兩方法對於氣壓反應的評估比較，證明 Roeloffs（2010）的方法的確可以應用於臺灣地區的井下應變儀，並得到正確的氣壓影響量。

將計算出來的氣壓響應因子帶入關係式除去氣壓的效應後，結果如圖 4-1.17。最終我們可以得到各測站感應器對於氣壓的反應（表 4-1.2），並藉此對氣壓影響做校正。

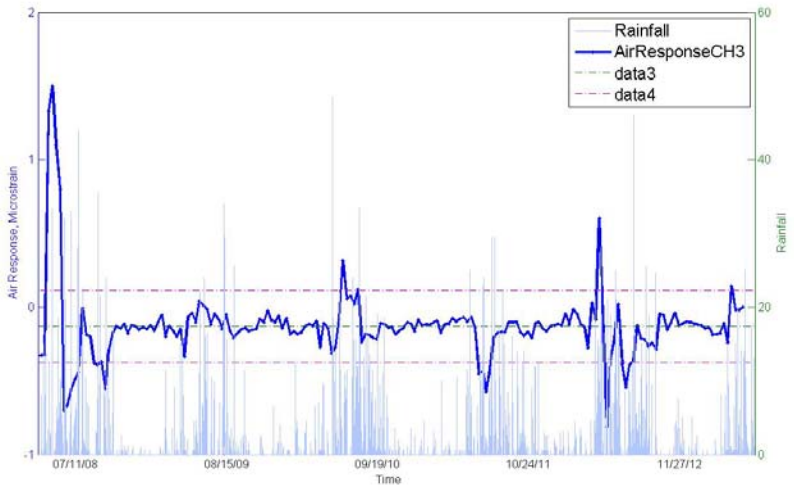


圖 4-1.15：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。

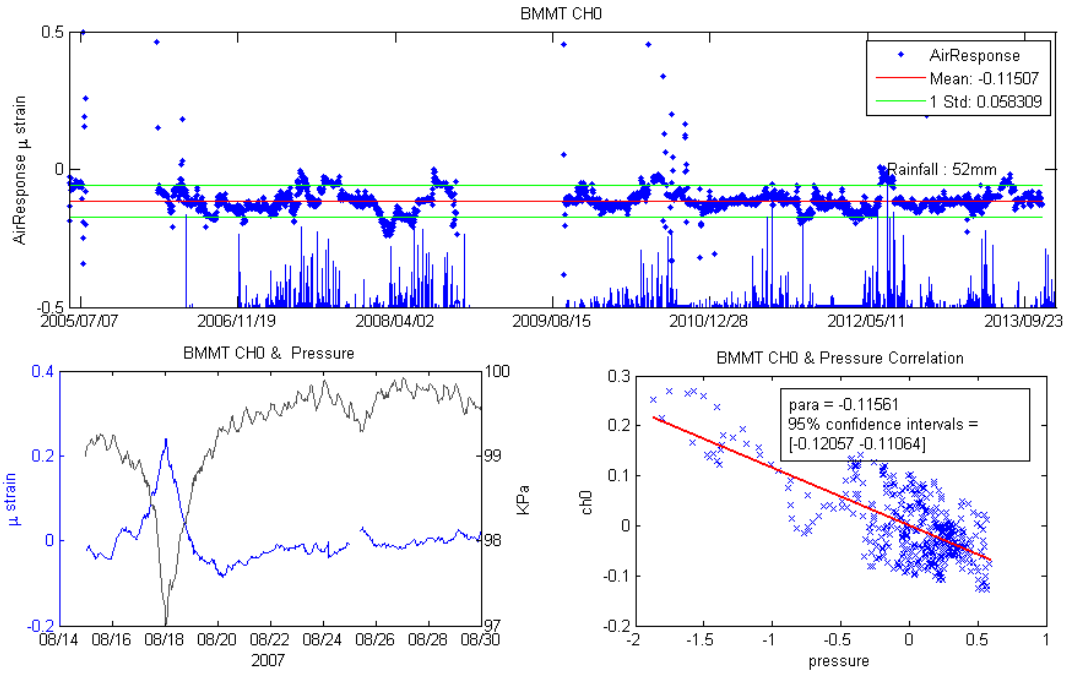


圖 4-1.16：大坪測站（BMMT）CH0 氣壓影響計算值比較。上圖表是由 Roeloffs（2010）方法計算的長期氣壓影響量：-0.11507 μstrain/KPa，下方兩圖表示由 2007 年 8 月聖帕颱風期間資料計算之氣壓影響量：-0.11561 μstrain/KPa。

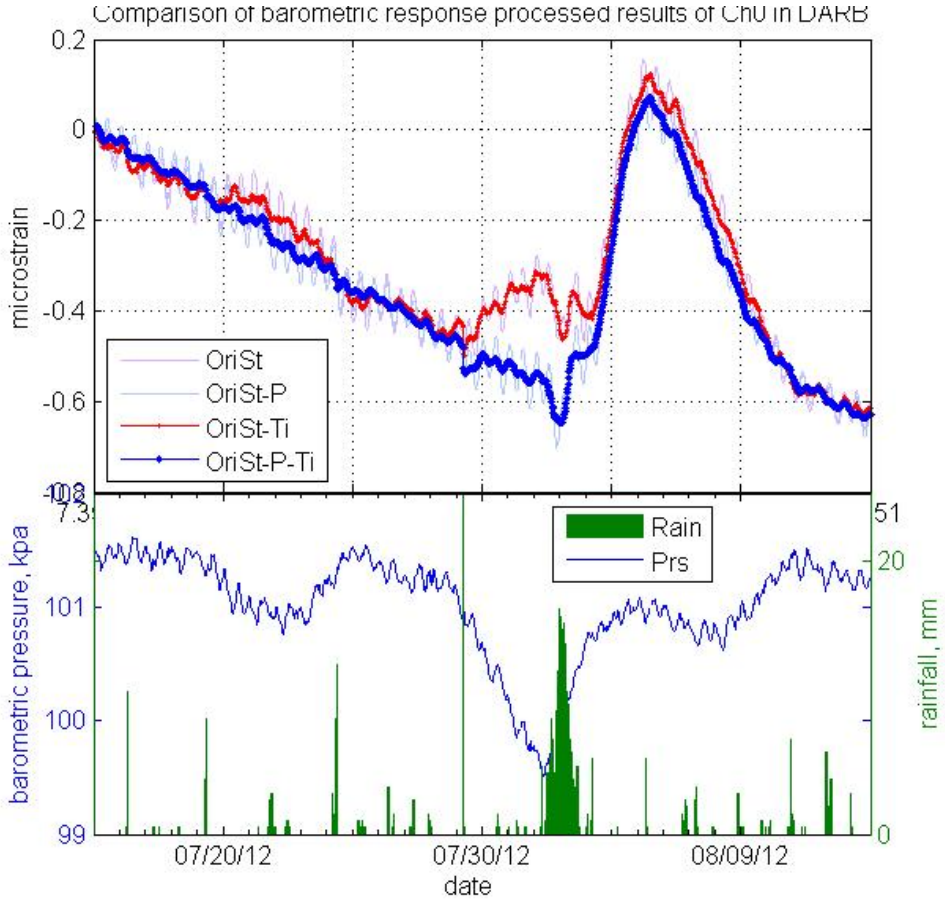


圖 4-1.17：觀測應變去除氣壓響應後的結果。

表 4-1.1：井下應變儀氣壓影響評估方法之比較。

	單位氣壓應變 Areal strain(ms)/KPa	
SITE	**方法一: Big Pressure event**	**方法二: Roeloffs, 2010**
DARB	-0.350	-0.387
TAIS	-0.271	-0.277
TSUN	-0.268	-0.258
PFMT	-0.145	-0.142
BMMT	-0.264	-0.243
CINT	-0.290	-0.285
SANS	-0.652	-0.791
SLIN	-0.375	-0.380
JING	-0.238	-0.255

表 4-1.2：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。

SITE	氣壓影響係數（μstrain/KPa）				
	CH0	**CH1**	**CH2**	**CH3**	**AR**
DARB	-0.132	-0.327	-0.107	-0.121	-0.387
TAIS	-0.149	-0.129	-0.130	-0.105	-0.277
TSUN	-0.172	-0.124	-0.135	-0.168	-0.258
PFMT	-0.058	-0.107	-0.061	-0.053	-0.142
BMMT	-0.124	-0.139	-0.104	-0.065	-0.243
CINT	-0.182	-0.101	-0.114	-0.180	-0.285
SANS	-0.207	-0.399	-0.556	-0.184	-0.791
SLIN	-0.233	-0.140	-0.197	-0.251	-0.380
JING	-0.150	-0.117	-0.118	-0.124	-0.255
註：以 Roeloffs, 2010 之方法計算					

4-1-2 檢視井下應變儀資料中異常事件

由於現今對地震前後地殼應變是否會有什麼前兆會出現？多久前會出現？其大小會有多大？哪些地震（多大的或多遠的）會在某一測站出現異常前兆？這些都是我們所關切的，但至今仍無確切的答案。因此，在本計畫中嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

(1) 因為尚未修正降雨的效應，本計畫僅搜尋臺灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，對於降雨期間應變變化的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不考慮。因為臺灣地區規模大於 5.0 的地震並不少，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。在沒有地震事件的影響下才可考慮觀察較長時段的應變資料是否有異常。

(2) 對於"異常"的定義，是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線（意指忽略每日潮汐的變化後）。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。

(3) "異常"前兆的判斷：要判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件：

a. 在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳（徒升或突降），也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這測站並不在該地震的應力影響範圍內，任何半個月前或一個月前的地殼應變應該與地震不相關。

b. 在附近幾個井下應變儀觀測站中至少有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現"異常"，若只有一個測站的明顯"異常"僅能存疑。

c. 對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，適當的資料補遺與篩選是必要的程序，"異常"資料的再確認也是必須的。

根據以上的思考與原則，我們主要測試三個井下應變儀網，即嘉義網，包括達邦（DARB）、太興國小（TAIS）與中興國小（TSUN）三測站；以及新竹網，包括大坪國小（BMMT）、新樂國小（CINT）與梅花國小（PFMT）三測站，並在 2012 年度加入臺北網，包括樹林（SLIN）、明德中學（SANS）與錦和國小（JING）三測站。

為了避免因為環境因子的資料缺失或不同採樣率，而在做環境因子的模式修正時損失了部份的觀測量，所以原來地下水每分鐘一筆的資料下降到每十分鐘一筆，氣壓資料量原為每卅分鐘一筆，而且多有缺失，先將同一地區的氣壓資料互相補遺，也就是假設同一地區氣壓在短時期的變化大致相同，若其中某一測站氣壓資料缺失一小段時期，則可以用另外一測站的氣壓變化值補遺。如此各網的三個測站互相補遺，可以得到完整的資料。然後再用適當的內差法，將每卅分鐘一筆的資料內插成每十分鐘一筆，如此所有的井下應變儀、氣壓、地下水位資料都有相同的取樣率，依照上面的原則建立環境因子模式，並做修正，最後再估算資料中的地潮訊號，進而扣除地潮的訊號，然後再依上述原則判斷所有規模大於五的地震（依氣象局公告）是否有同震以及震前的異常應變。

修正的資料中，由於新竹網大坪測站（BMMT）地下水觀測紀錄損壞，一直都無資料，考慮該地區短時期的地下水變化不大，所以先停止該地區的地下水影響量修正。另外臺北地區的地下水水位與井下應變儀面應變的關係還不明確，也暫不做臺北地區的地下水影響量修正。

2014 年 12 月至 2015 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有 7 個事件（表 4-1.3、圖 4-1.19~圖 4-1.32），統計有記錄到地震前應變異常的井下應變儀測網其分別記錄的事件如下，嘉義網記錄到 3 個應變異常事件，分別為 2/14、3/23 及 4/20；新竹網記錄到 6 個異常事件，分別為 2014/12/11、1/7、3/23、4/20、5/11 及 6/21；臺北網記錄

到 4 個應變異常事件，分別為 2014/12/11、1/7、3/23 及 10/19。圖 4-1.18 為 2014 年 12 月至 2015 年 11 月所有規模大於 5 之地震事件與特別地震事件，紅色海灘球為井下觀測網紀錄到應變異常之地震事件。

表 4-1.3：2014 年 12 月至 2015 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄到之應變異常事件。

No	臺灣時間	規模	經度	緯度	深度 km	震央位置
1	2014/12/11 05:03	6.7	122.61	25.45	268.6	基隆市政府東偏北方 93.6 公里 (位於臺灣東北部海域)
2	2015/01/07 12:48	5.5	121.69	24.26	30.4	花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)
3	2015/02/14 04:06	6.3	121.40	22.66	27.8	臺東縣政府東偏南方 27.4 公里 (位於臺灣東部海域)
4	2015/03/23 18:13	6.2	121.67	23.73	38.4	花蓮縣政府南方 29.8 公里 (位於臺灣東部海域)
5	2015/04/20 09:42	6.4	122.37	24.05	17.5	花蓮縣政府東方 76.2 公里 (位於臺灣東部海域)
6	2015/05/11 16:38	4.9	120.42	24.59	15.6	苗栗縣政府西方 41.0 公里 (位於臺灣西部海域)
7	2015/06/21 14:15	5.0	122.44	23.95	22.4	花蓮縣政府東方 83.4 公里 (位於臺灣東部海域)
8	2015/10/19 10:17	5.2	122.01	24.85	17.4	宜蘭縣政府東偏北方 28.1 公里 (位於臺灣東部海域)

另外由於 6 月至 9 月期間受颱風、強降雨與資料缺漏等因素所影響，有 7 個地震事件無法判斷是否有地震前兆訊號（表 4-1.4、圖 4-1.33~圖 4-1.36）。

表 4-1.4：2014 年 12 月至 2015 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄無法判斷前兆之事件。

No	臺灣時間	規模	經度	緯度	深度 km	震央位置
1	2015/06/27 00:16	5.3	123.32	24.84	114.3	宜蘭縣政府東方 157.8 公里 (位於臺灣東部海域)
2	2015/08/13 06:21	5.7	122.31	21.27	206.1	臺東縣政府東南方 202.8 公里 (位於臺灣東南部海域)
3	2015/08/13 22:08	5.5	122.45	24.06	15.4	花蓮縣政府東方 84.7 公里 (位於臺灣東部海域)
4	2015/09/01 21:24	5.5	121.55	23.91	20.3	花蓮縣政府西南方 11.1 公里 (位於花蓮縣壽豐鄉)
5	2015/09/16 03:37	5.6	121.81	24.28	15.3	花蓮縣政府東北方 37.2 公里 (位於花蓮縣近海)
6	2015/09/16 21:09	5.5	121.86	24.31	17.8	花蓮縣政府東北方 42.6 公里 (位於花蓮縣近海)
7	2015/09/30 03:37	5.1	121.60	24.00	17.9	花蓮縣政府西偏北方 2.0 公里 (位於花蓮縣花蓮市)

以下分別針對有應變前兆反應的地震事件與無法判斷是否有前兆反應之事件進一步說明。

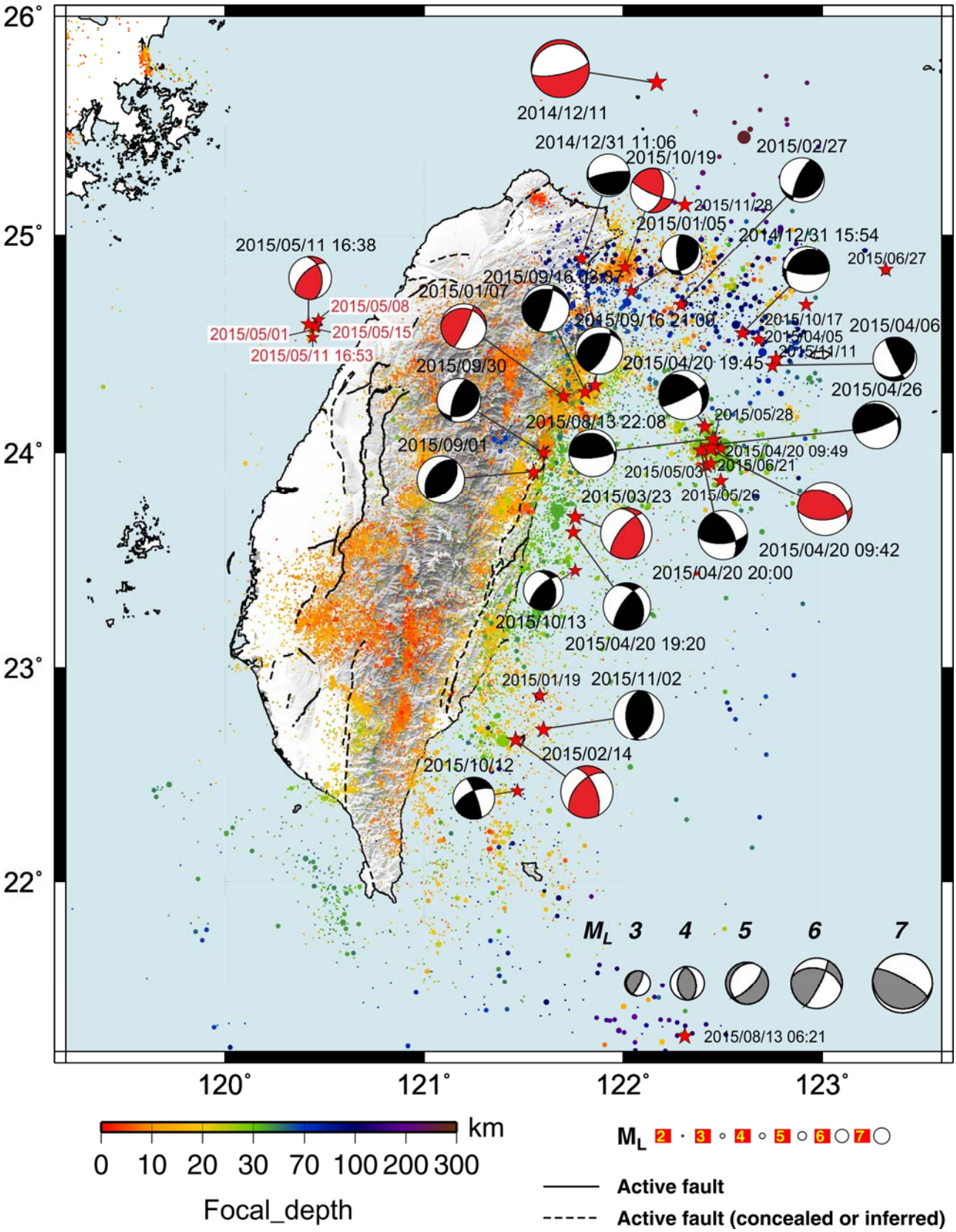


圖 4-1.18：2014 年 12 月至 2015 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件（白底紅字表示）之位置及震源機制圖。紅色海灘球為井下觀測網紀錄到應變異常之地震事件。

（1）2014/12/11 基隆外海地震（M_L 6.7，Depth 268.6 km）

2014 年 12 月 11 日的地震位於基隆外海，雖然是一個較深的地震約 268.6 公里，臺北網錦和測站（JING）與新竹網梅花測站（PFMT）仍然在地震之前有發現一些應變異常的訊號。臺北網錦和測站（JING）的面應變與剪應變於地震前約 11 天有明顯變動，剪應變的趨勢在 11/30 前後非常明顯的不同；面應變方面，地震前後一個月內共有三次明顯的壓縮轉伸張的應變改變，時間為 11/16、11/30 與 12/27，每次伸張後約 4~11 天就有一個 D/R 大於 2 的地震發生，地震後應變又回到原來的趨勢，很可能為地震前的訊號，但錦和測站（JING）面應變與地震的這個現象需要更多的資料分析，才得以確認這種地震前的行為模式（圖 4-1.19）。新竹網梅花測站（PFMT）也相同於地震前有發現應變異常訊號，時間約在地震前 19~31 天（11/10~11/22），剪應變與面應變的應變率在這段期間有明顯的變異，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.20）。

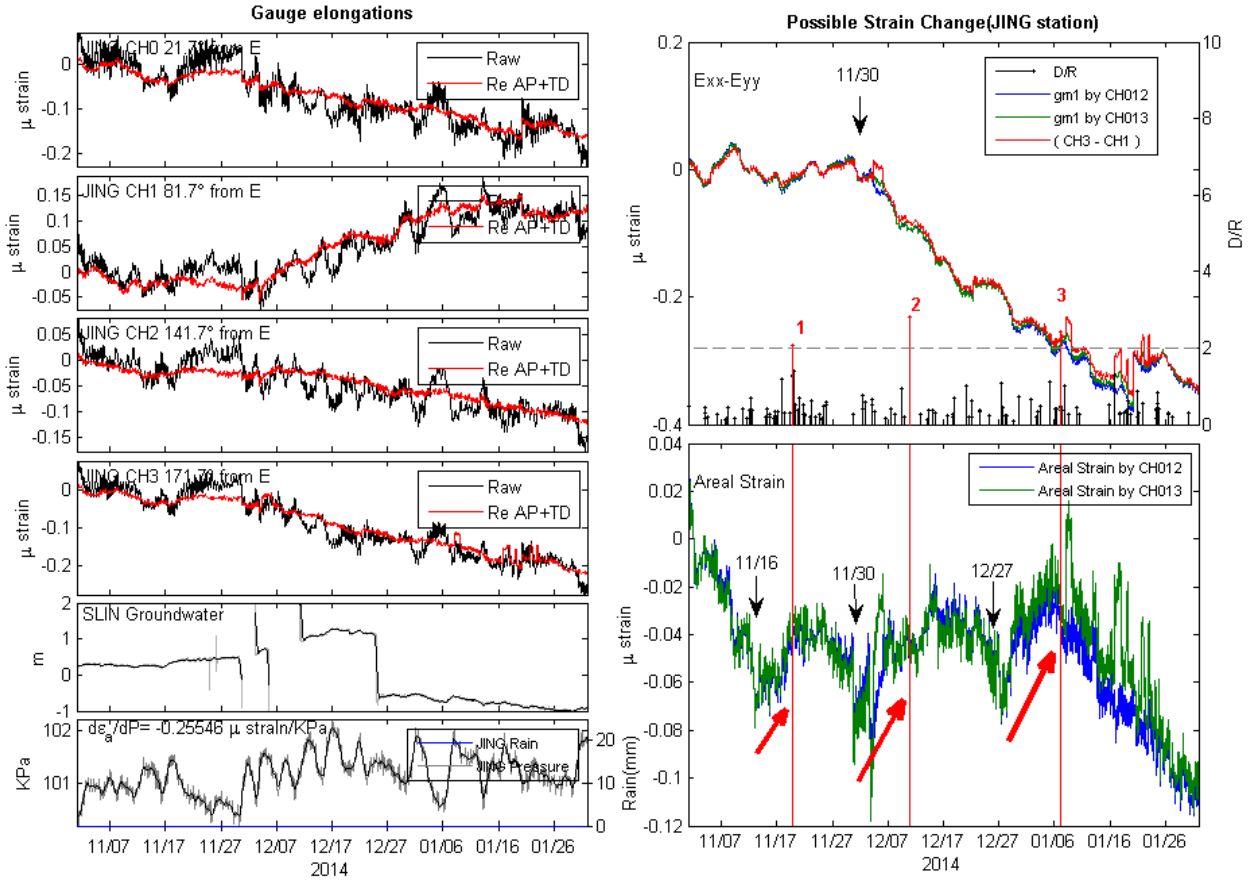


圖 4-1.19：臺北網錦和測站（JING）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。右上圖所標示三個地震分別為:（1）2014/11/19 M_L 4.8 宜蘭縣政府東偏北方 32.0 公里地震、（2）2014/12/11 M_L 6.7 基隆市政府東北方 93.6 公里地震與（3）2015/01/07 M_L 5.5 花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里地震。

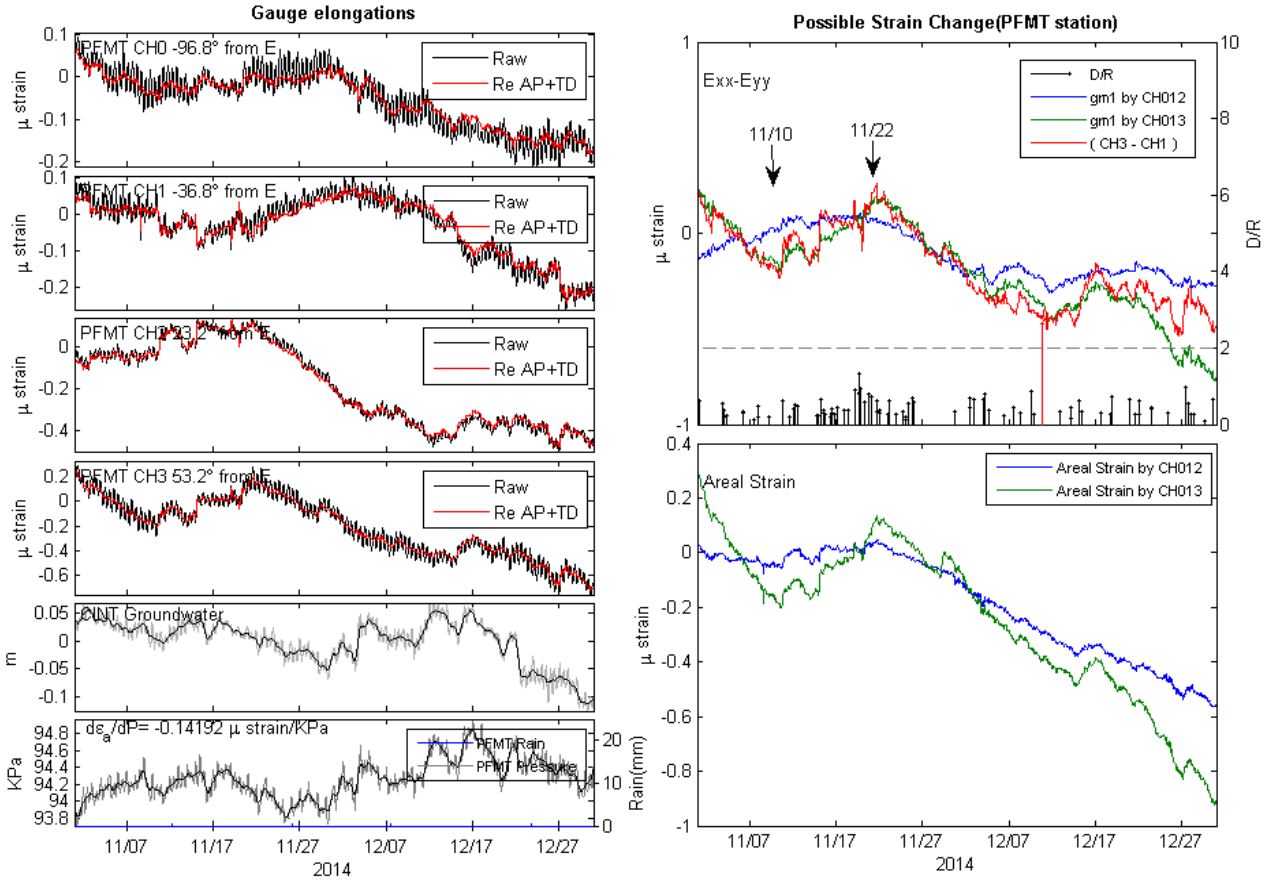


圖 4-1.20：新竹網梅花測站（PFMT）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

（2）2015/01/07 花蓮秀林地震（M_L 5.5，Depth 30.4 km）

臺北網錦和測站（JING）在該地震前約 11 天（2014/12/27）有應變異常的訊號出現，應變由相對壓縮轉為伸張，地震後應變率也有明顯變化，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4.1.21）。

新竹網梅花測站（PFMT）雖然在地震前 24 天（2014/12/14）之後在面應變與剪應變都有些微跳動的反應，但由於前一個地震時間相鄰太近，是否為震後的效應也是有待商榷，最有可能的地震相關異常應該是前 5 天（2015/01/02），面應變與剪應變都有突然的跳動，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4.1.22）。

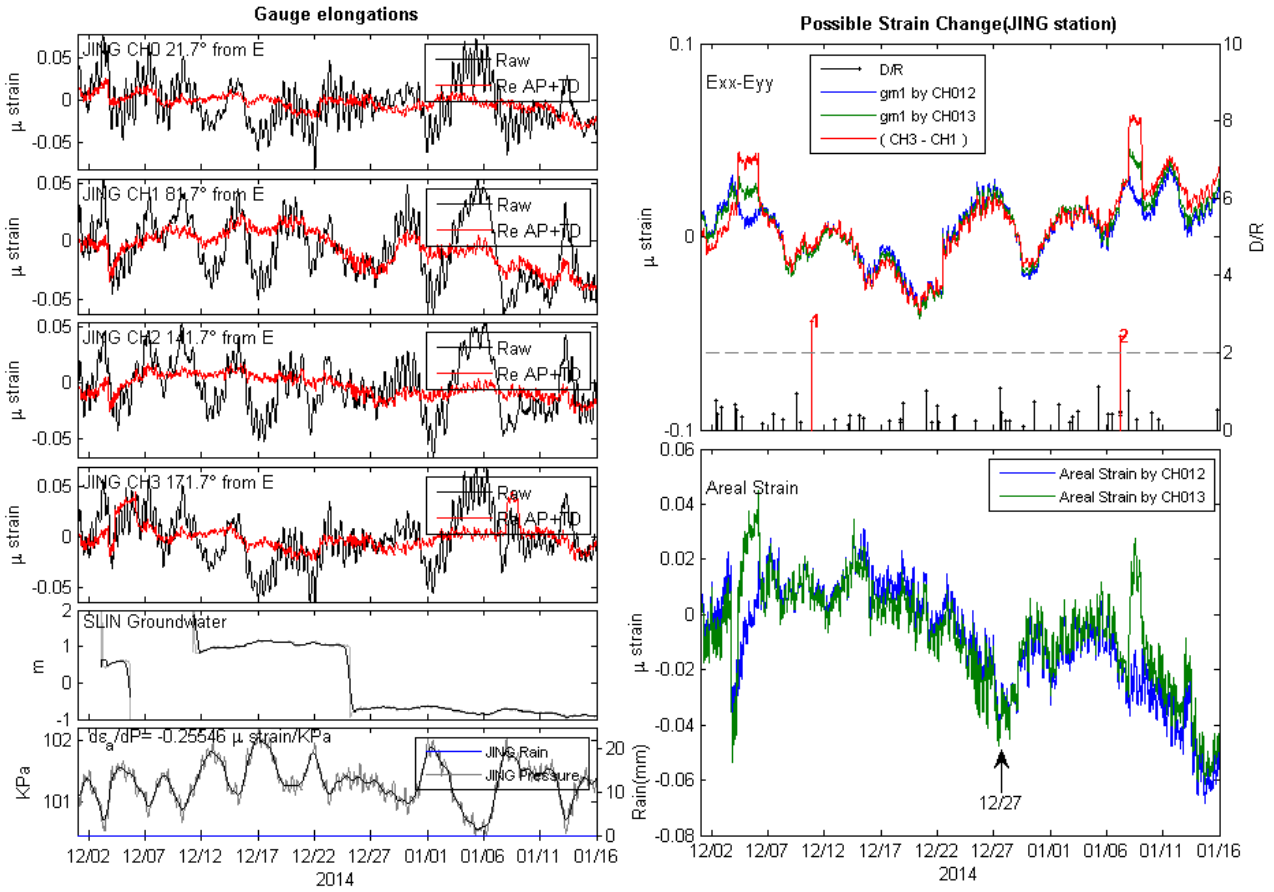


圖 4-1.21：臺北網錦和測站（JING）於 2015 年 1 月 7 日花蓮縣秀林鄉地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

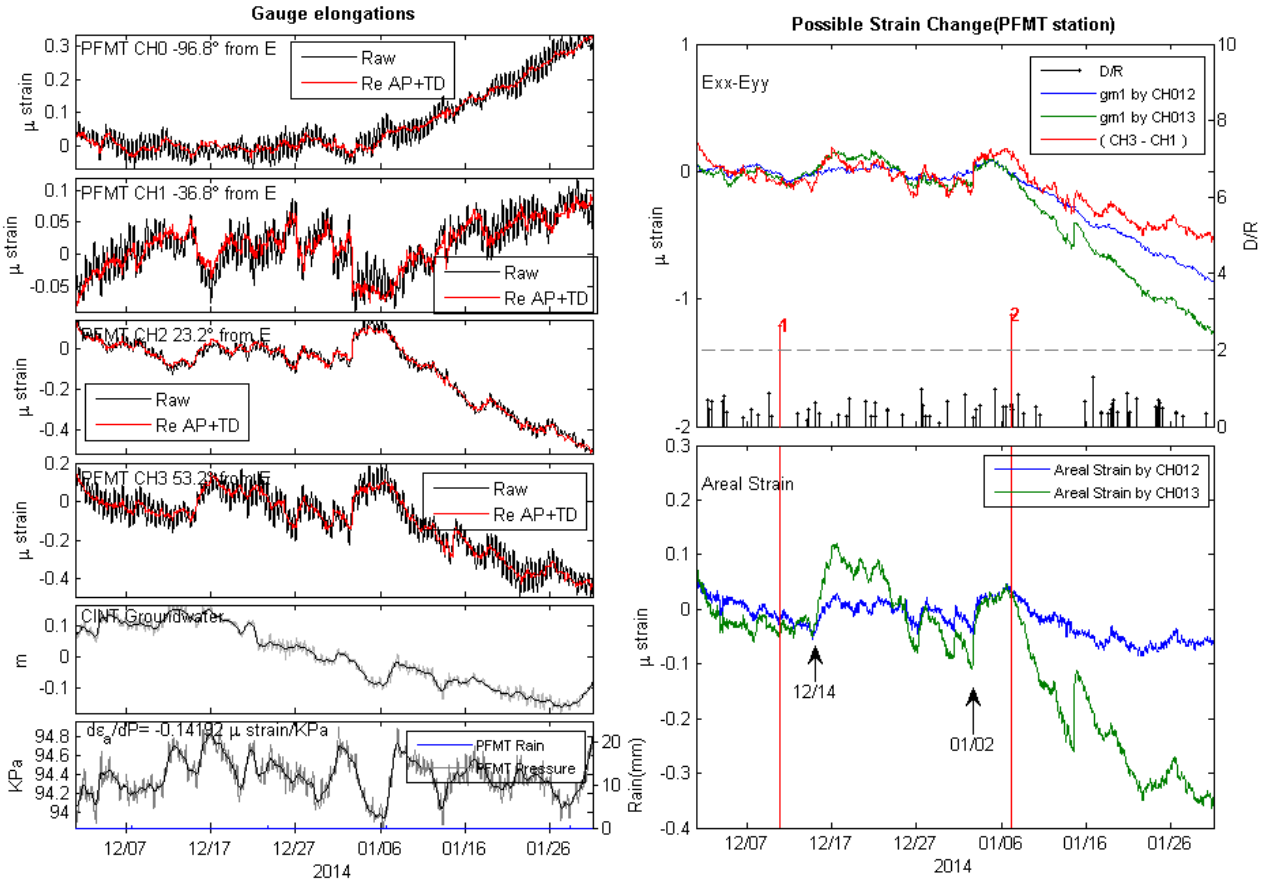


圖 4-1.22：新竹網梅花測站（PFMT）於 2015 年 1 月 7 日花蓮縣秀林鄉地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

（3）2015/02/14 臺東近海地震（M_L 6.3，Depth 27.8 km）

該地震對於嘉義網達邦測站（DARB）有造成明顯同震應變永久改變，且 D/R 值顯示理論上該地震之震前的孕震行為可以影響到達邦測站的距離。井下應變儀資料經過環境因素校正後，面應變與剪應變也都有明顯的應變率異常，剪應變與面應變在地震前約 15 天（1/30）開始有明顯變化。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.23）。

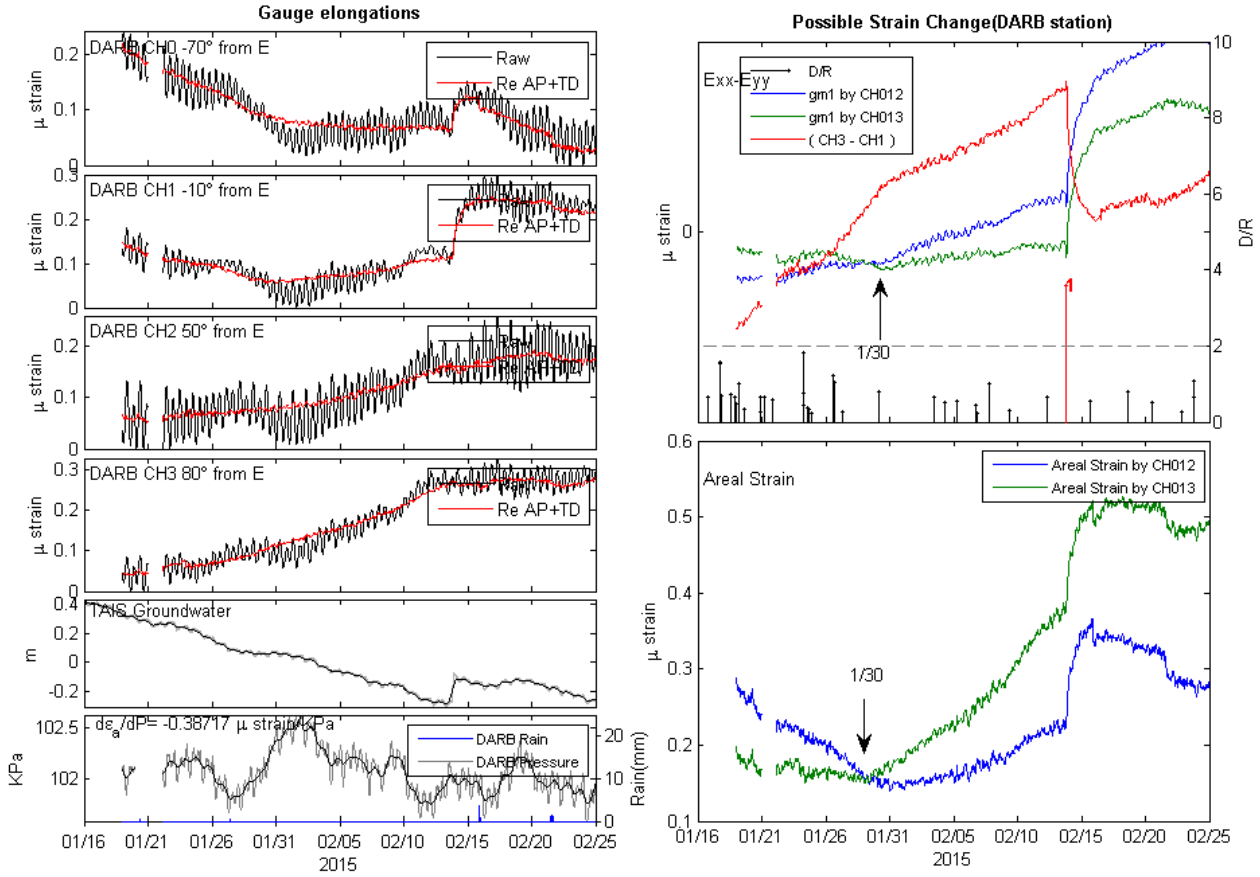


圖 4-1.23：嘉義網達邦測站（DARB）於 2015 年 2 月 14 日臺東近海地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

（4）2015/03/23 花蓮近海地震（M_L 6.2，Depth 38.4 km）

2015 年 3 月 23 日的花蓮近海地震，臺北、新竹與嘉義三個應變網都有異常應變訊號出現。臺北網錦和測站（JING）面應變與剪應變在地震前約 20 天內都有應變異常訊號出現，其中剪應變在 3/9 至地震前有 4 次明顯的應變率變化，在地震後又回復到異常前的應變率；面應變在 3/4 與 3/12 有明顯應變的變動，而且地震前約 6 個小時偵測到應變突然壓縮，這個壓縮現象持續約 3 個小時，之後應變變得相對伸張，3 個小時後發生地震。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.24）。

新竹網梅花測站（PFMT）大約於地震前 7 天內（3/16）有較明顯的異常訊號出現在面應變與剪應變，時間點大概一致，且面應變在地震前約 6 小時偵測到應變突然壓縮，這個壓縮現象持續約 2 個小時，之後應變變得相對伸張，4 個小時後發生地震。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.25）。

嘉義網達邦測站（DARB）的應變異常訊號發生於地震前 14 天內（3/9），剪應變有較明顯的應變率變化在 3/9 與 3/15，而面應變由相對伸張持續轉變為相對壓縮，並且面應變在地震前約 8 小時偵測到應變突然壓縮，這個壓縮現象持續到幾乎地震前，地震後也有緩慢的應變趨勢變化，可能受到震後地下水水壓的影響。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.26）。

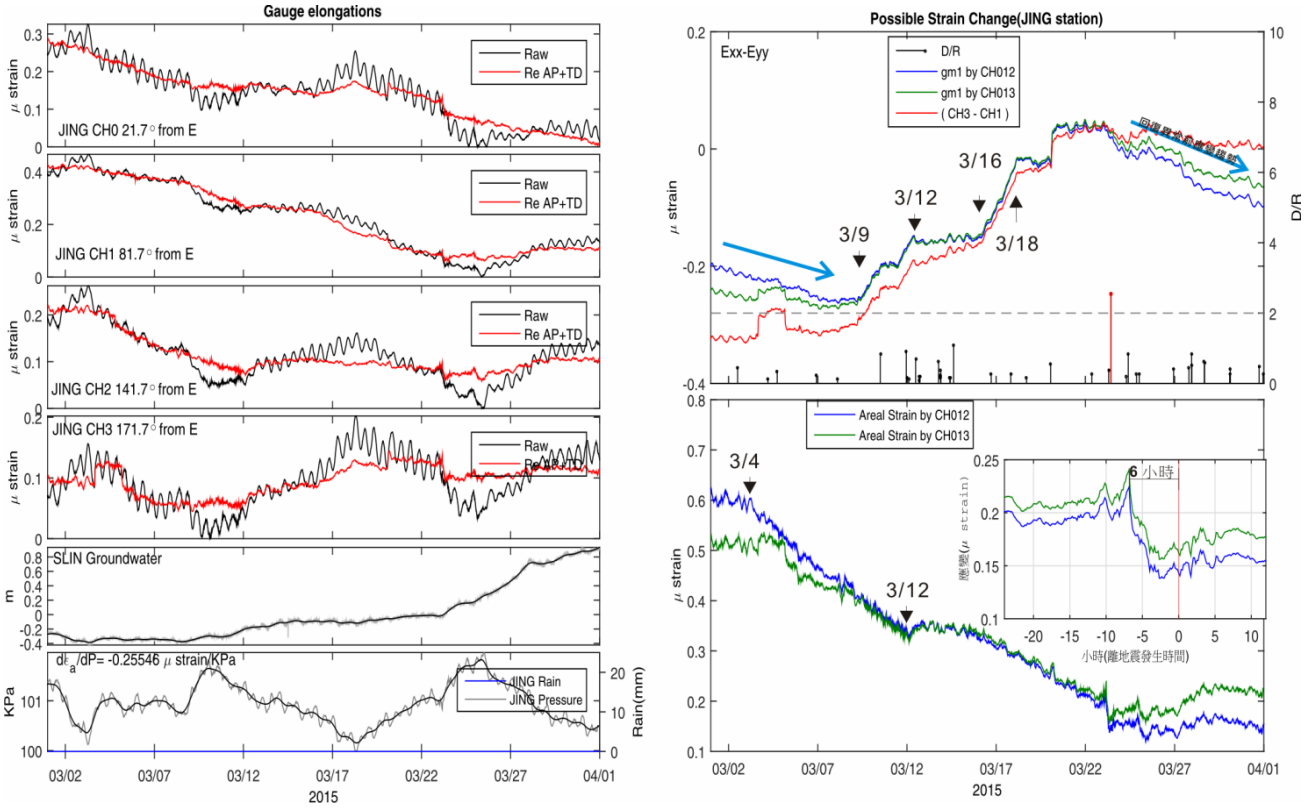


圖 4-1.24：2015 年 3 月 23 日花蓮近海地震前後臺北網錦和測站（JING）應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

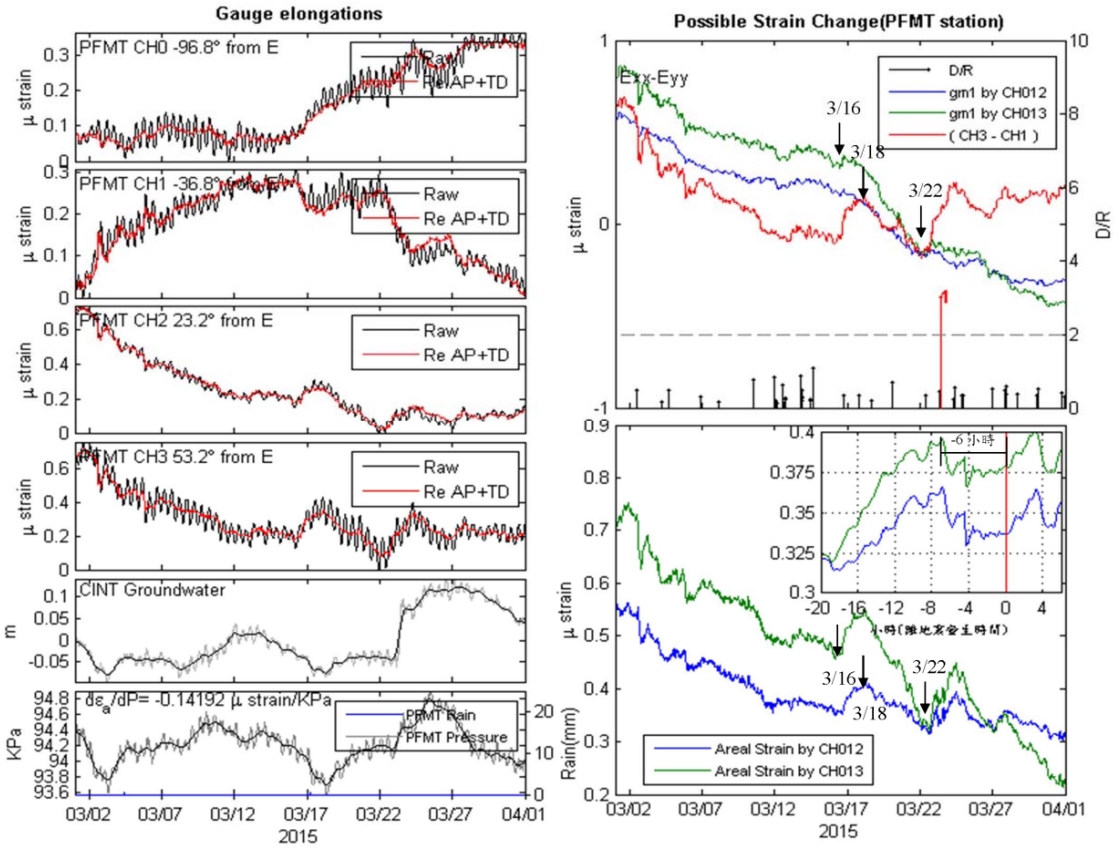


圖 4-1.25：2015 年 3 月 23 日花蓮近海地震前後新竹網梅花測站（PFMT）應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

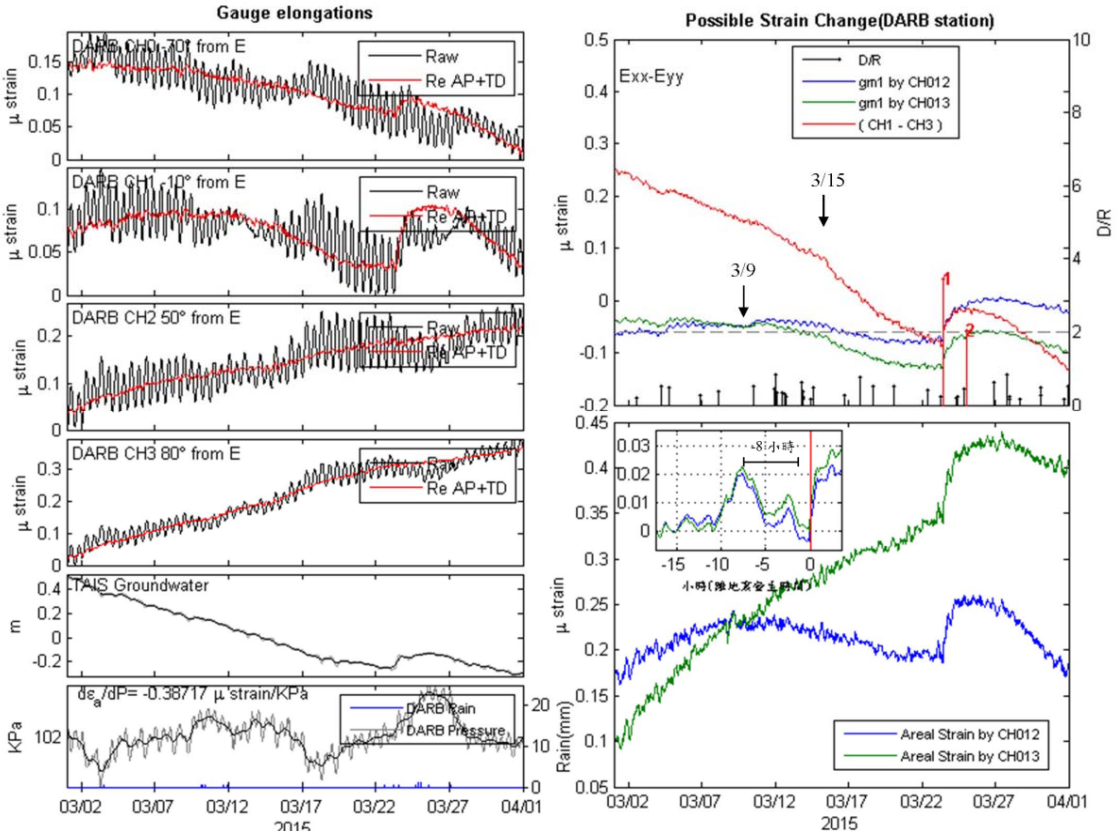


圖 4-1.26：2015 年 3 月 23 日花蓮近海地震前後嘉義網達邦測站（DARB）應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

（5）2015/04/20 花蓮外海地震（M_L 6.4，Depth 17.5 km）

2015 年 4 月 20 日的花蓮外海地震，新竹網與嘉義網都有異常應變訊號出現。新竹網梅花測站（PFMT）大約於地震前 10 天內（4/10）有較明顯的異常訊號出現在面應變與剪應變，時間點大概一致，且面應變在地震前約 24 小時偵測到應變相對壓縮，隨後即發生地震，也伴隨著明顯的同震應變變化。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.27）。

嘉義網達邦測站（DARB）大約於地震前 11 天內（4/9）有較明顯的異常訊號出現在面應變與剪應變，時間點大概一致。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.28）。

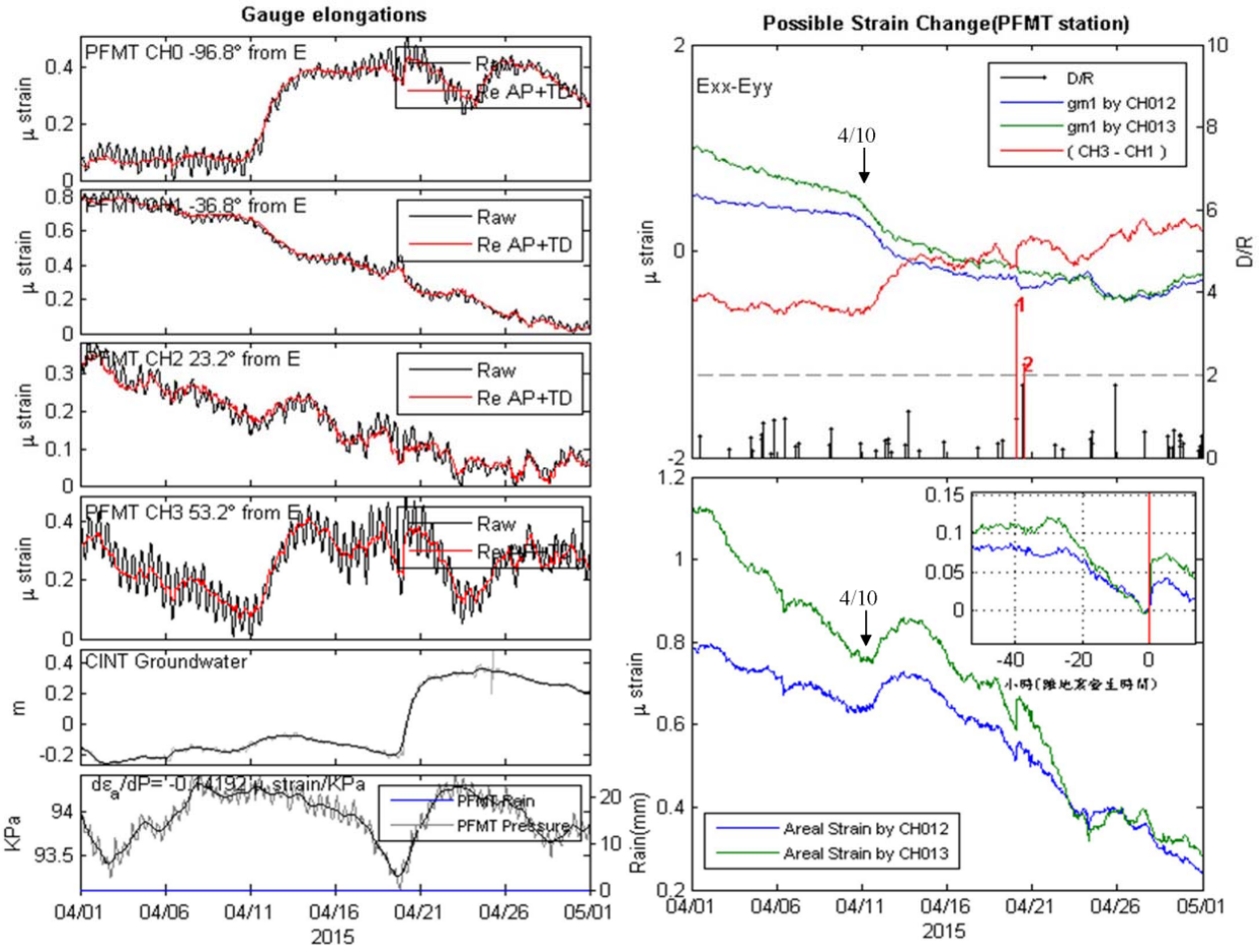


圖 4-1.27：2015 年 4 月 20 日花蓮外海地震前後新竹網梅花測站（PFMT）應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

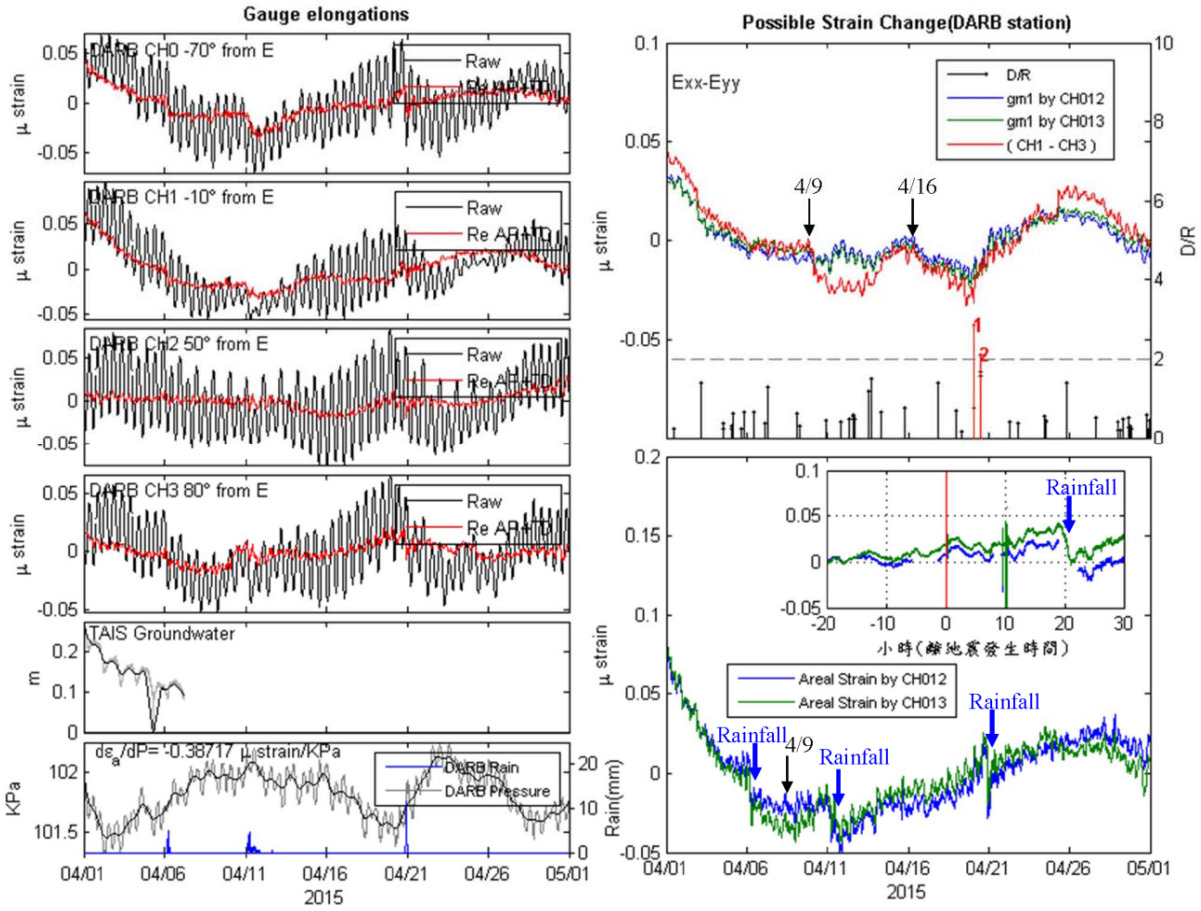


圖 4-1.28：2015 年 4 月 20 日花蓮外海地震前後嘉義網達邦測站（DARB）應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

（6）2015/05/11 苗栗西部近海地震（M_L 4.9，Depth 15.6 km）

新竹網有兩個測站對於該地震有震前的應變異常訊號，大坪測站（BMMT）於地震前 8 天（5/3）剪應變與面應變都有異常訊號出現，但時間點有些微不同。異常訊號發生後接連發生兩起時間很接近，且 D/R 大於 2 的地震，顯示應變異常可能與這兩起地震相關。非常相似的，新竹網梅花測站（PFMT）也大約在地震前 7 天內有應變異常訊號出現，較明顯的異常訊號出現在面應變與剪應變，時間點大概一致（5/4 與 5/8），5/11 的地震前 3 天有另一起規模較小但距離測站較接近的新竹尖石鄉地震，這兩起地震很接近，因此地震前的應變異常訊號並無法區分為哪一個地震的震前影響，也有可能為兩起地震震前的行為共同影響所造成。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.29 與圖 4-1.30）。

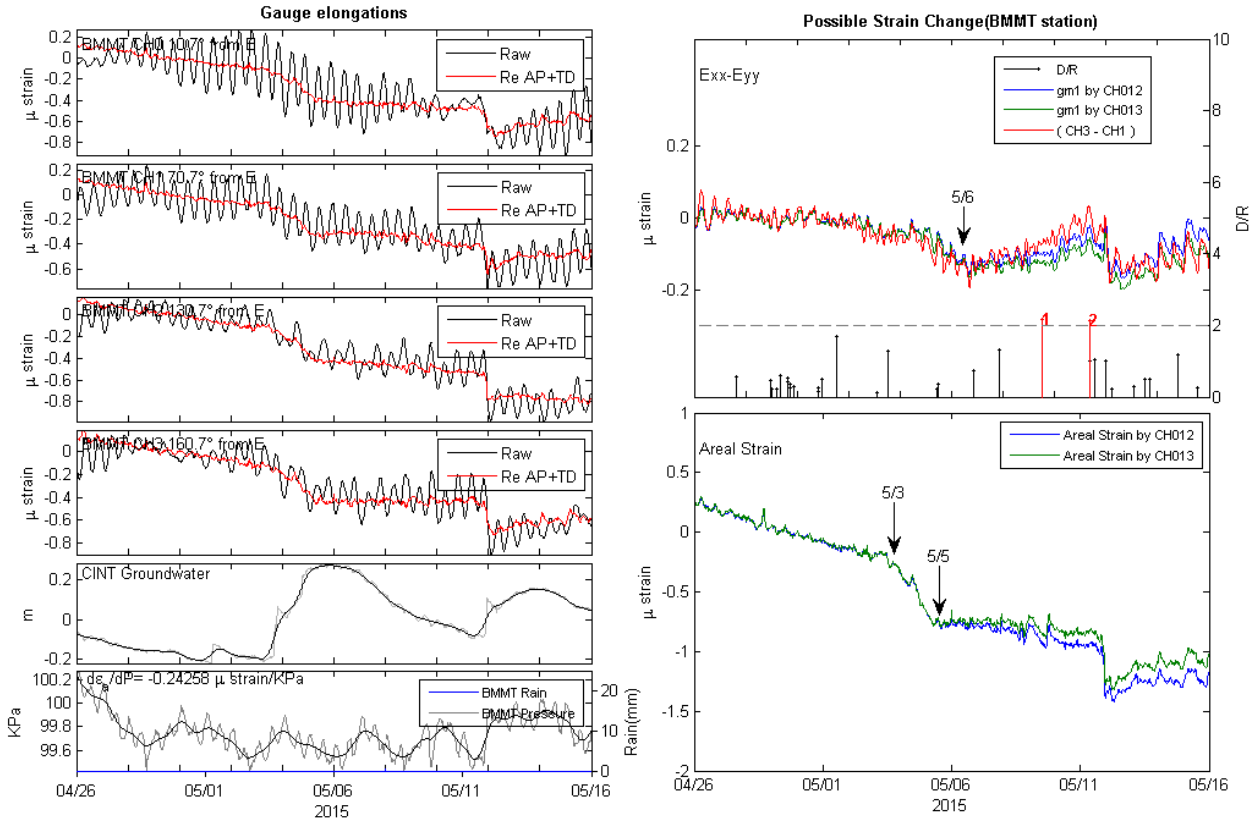


圖 4-1.29：2015 年 5 月 11 日苗栗西部外海地震前後新竹網大坪測站（BMMT）應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

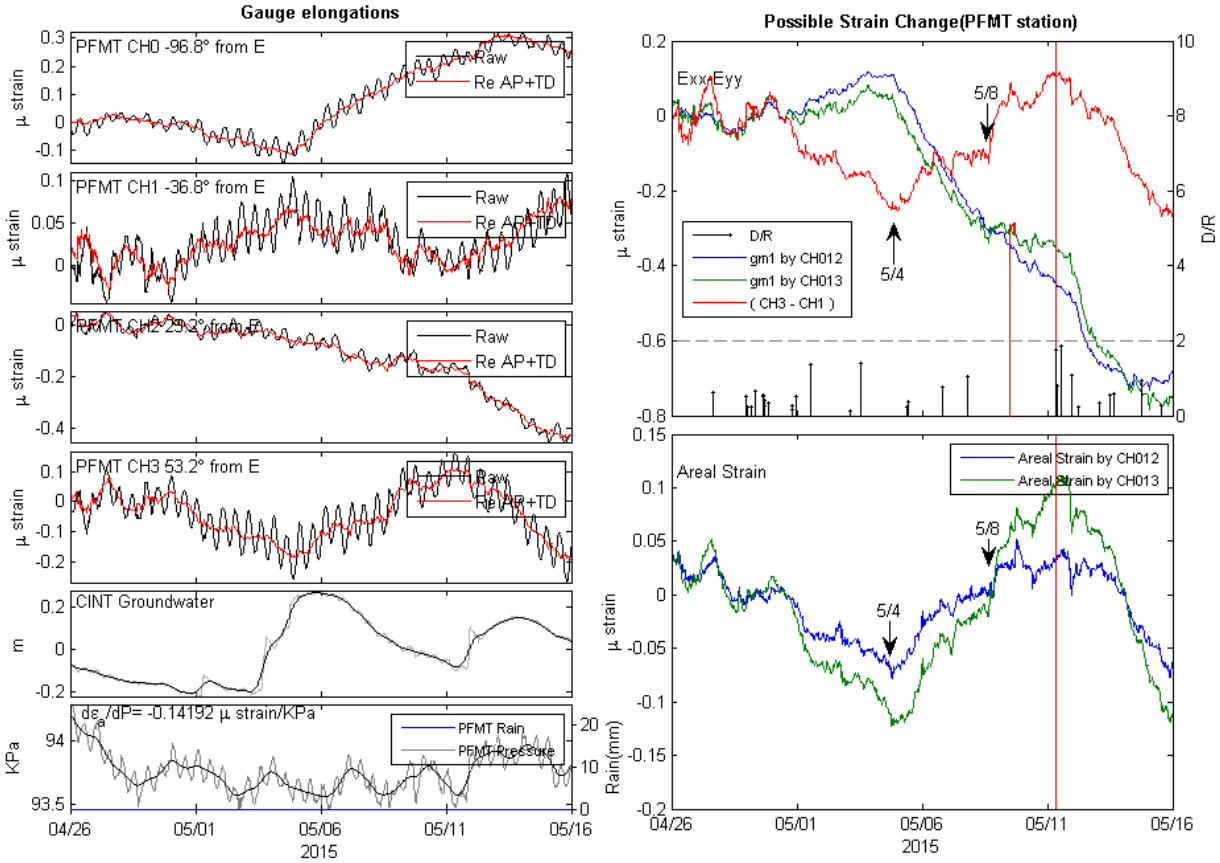


圖 4-1.30：2015 年 5 月 11 日苗栗西部外海地震前後新竹網梅花測站（PFMT）應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

（7）2015/06/21 花蓮外海地震（M_L 5.0，Depth 22.4 km）

6/21 地震之前，新竹測網的剪應變在 5/24 至約 6/9 之間有很明顯的異常上升趨勢，隨後接著反向的應變，應變的變化與地下水於 5/19 上升，在 5/25 上升至頂點後開始下降至 6/13 之趨勢並無明顯關係，排除氣壓與降雨等已知的環境影響後，仍是明顯的應變異常訊號。此次地震與 4/20 地震相似，但由 D/R 值（<2）來看，震前對新竹網的可能造成的應變影響相對小很多，但 5/24~6/9 的確有應變異常，該異常可能為 6/21 的地震前兆訊號，或者視為 7/6 新竹地震的前兆訊號都有可能的（圖 4-1.31）。

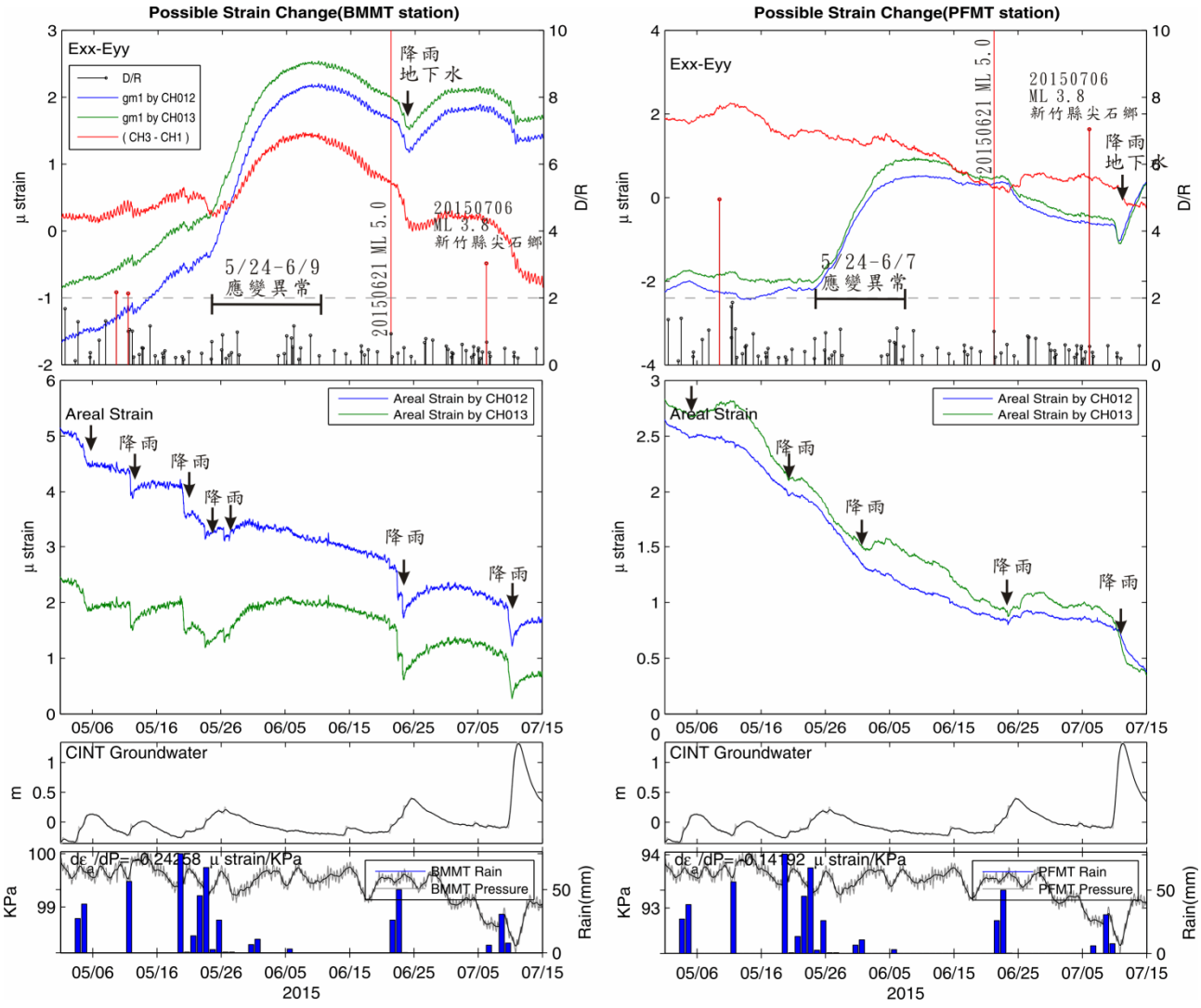


圖 4-1.31：2015 年 6 月 21 日花蓮外海地震前後新竹網大坪測站（BMMT）與梅花測站（PFMT）之應變資料。

（8）2015/10/19 宜蘭近海地震(M_L 5.2，Depth 17.4 km)

台北網錦和測站（JING）於 9/23 之前應變訊號相對穩定，主要變動受降雨與降雨後地下水變動影響，應變率異常的變動訊號發生於 9/23 之後的剪切應變（Exx-Eyy），由 CH0、CH1 與 CH3 都可看出在方向應變有異常的改變。因當日前後皆無無明顯降雨，推測由降雨所導致的地下水位變動也不至於太大。目前認為此應變異常與環境因素沒有明顯關係，可能為 10 月地震相關，比較有可能是 10/19 發生於宜蘭縣政府東偏北方 28.1 公里，規模 5.2 的海域地震的地震前兆訊號（圖 4-1.32）。

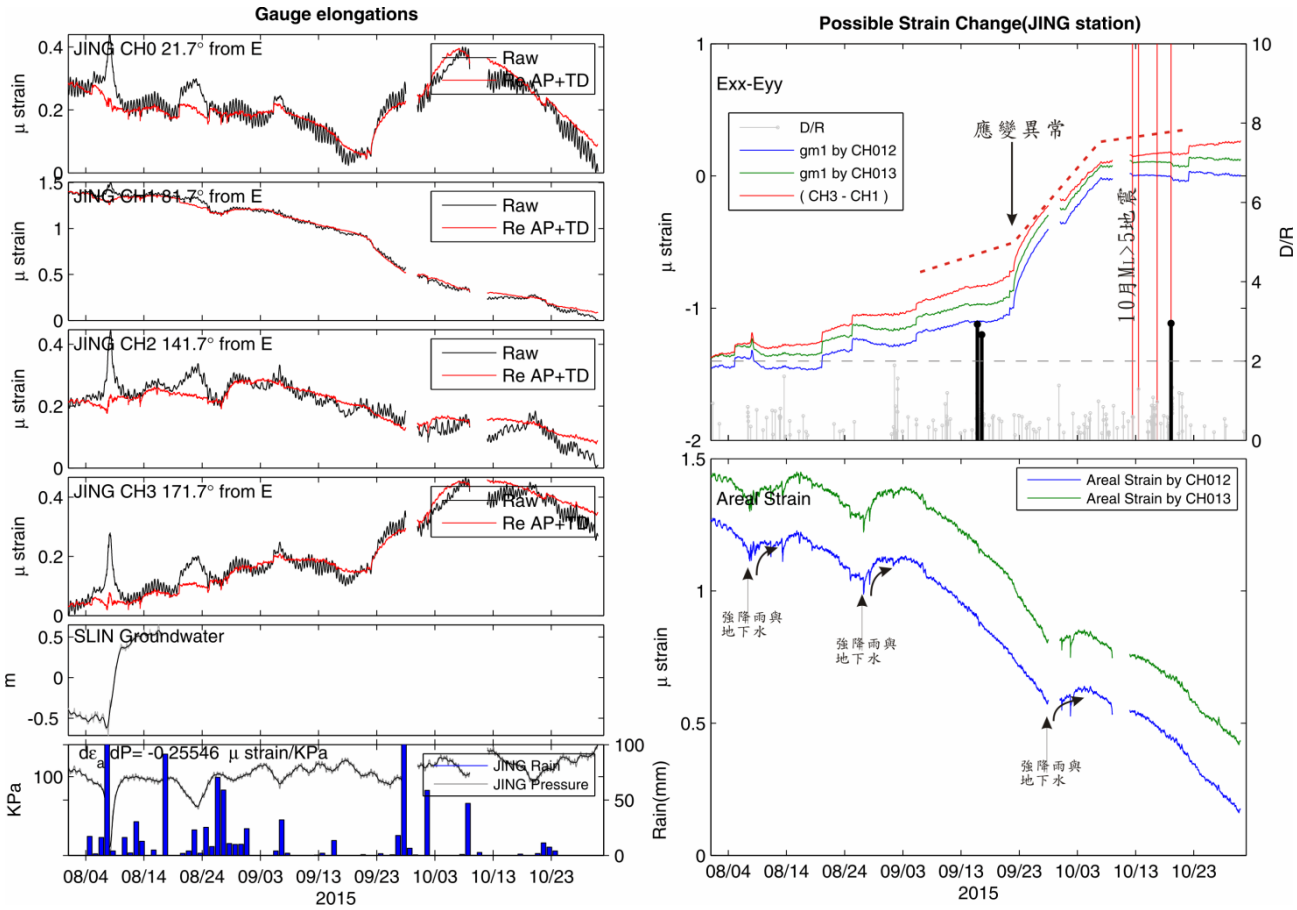


圖 4-1.32：2015 年 10 月 19 日宜蘭近海地震前後台北測網錦和測站（JING）之應變資料。

另於今年 6 月至 9 月期間受颱風、強降雨與資料缺漏等因素所影響，導致有 7 個地震事件無法判斷是否有地震前兆訊號，下面也將其列出。

（1）2015/06/27 臺灣東部海域地震（M_L 5.3，Depth 114.3 km）

離該地震最近測網為台北網，但其中錦和測站（JING）因於 6 月初停電，而其後復電可能導致應變變化，另於 6/14 與 6/25 有降雨造成的壓縮應變。另 6/10 與 6/23 發生兩次突然跳階的應變異常，過去產生此現象較有可能為儀器本身的問題，而非區域構造所造成的應變，且此次地震 D/R 顯示該地震理論上對於該測站並不會有太明顯的孕震應變，綜合上述原因，目前排除為該地震的地震前兆（圖 4-1.33）。

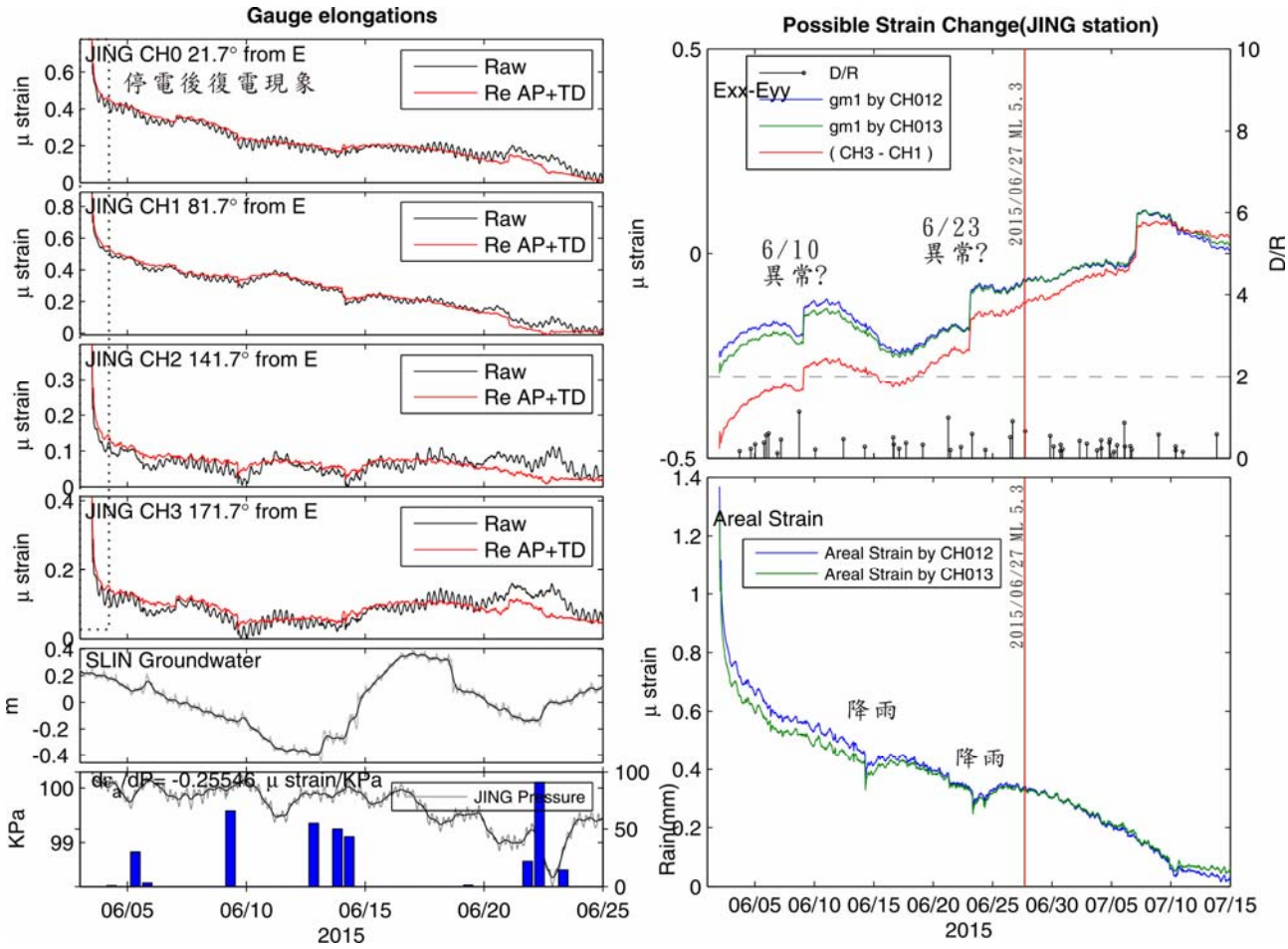


圖 4-1.33：2015 年 6 月 27 日臺灣東部海域地震前後台北網錦和測站（JING）之應變資料。

（2）2015/08/13 臺灣東南部海域地震（M_L 5.7，Depth 206.1 km）與花蓮外海地震（M_L 5.5，Depth 15.4 km）

8/13 發生兩起規模大於 5 的地震，其中新竹網梅花測站（PFMT）比較有可能觀測到的是 M_L5.5 東部外海的地震，但目前 D/R 顯示該地震比較沒有明顯孕震應變，另外也由於地震前恰逢因颱風影響，導致資料受水文影響甚大，故無發現地震前兆（圖 4-1.34）。

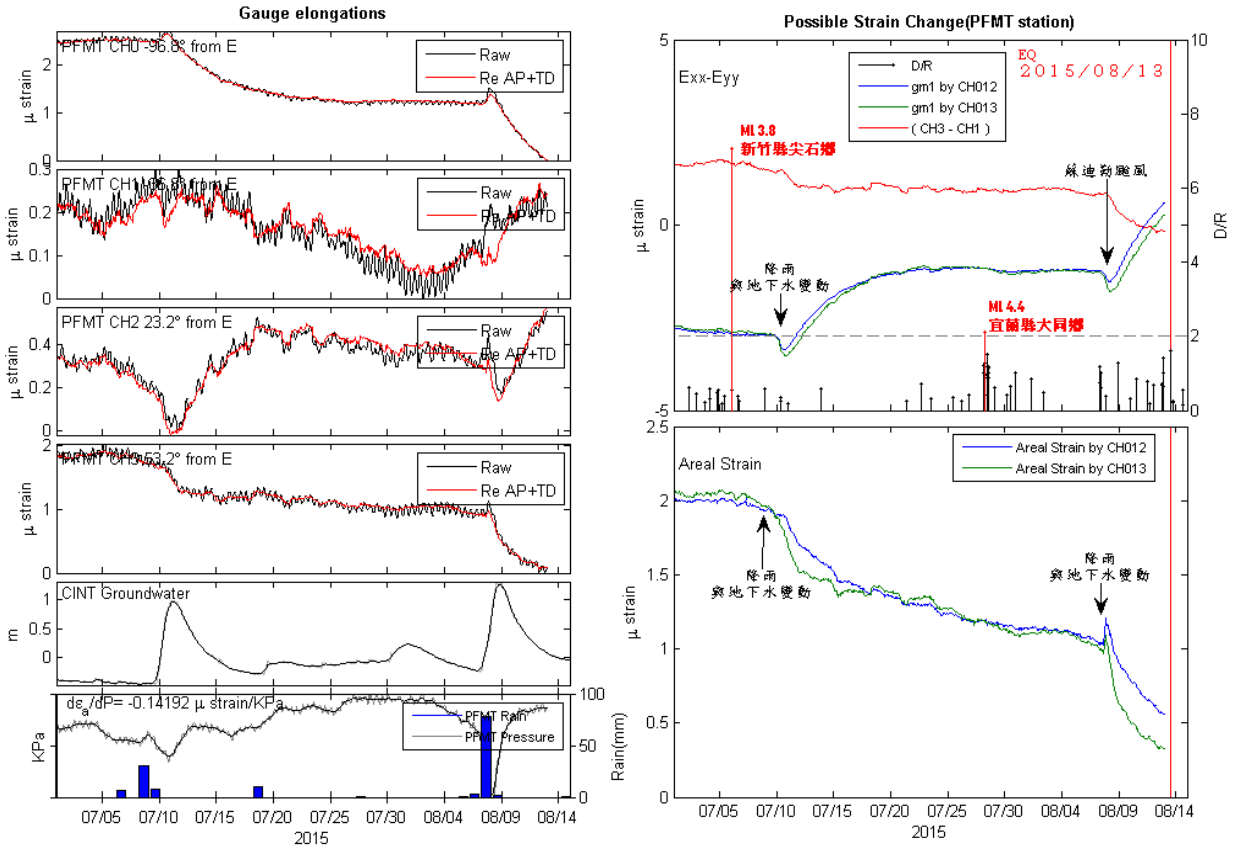


圖 4-1.34：2015 年 8 月 13 日臺灣東南部海域地震前後新竹網梅花測站（PFMT）之應變資料。

（3）2015/09/01 花蓮壽豐鄉地震（M_L 5.5，Depth 20.3 km）

在嘉義測網中 8 月至 9 月這段期間的應變變化主要受控於颱風與降雨所影響，其變化的應變尺度也較過往可以觀察到的地震前孕震應變大許多，另外因太興測站 9 月資料缺漏，也造成不易辨別是否有地震相關應變異常（圖 4-1.35）。

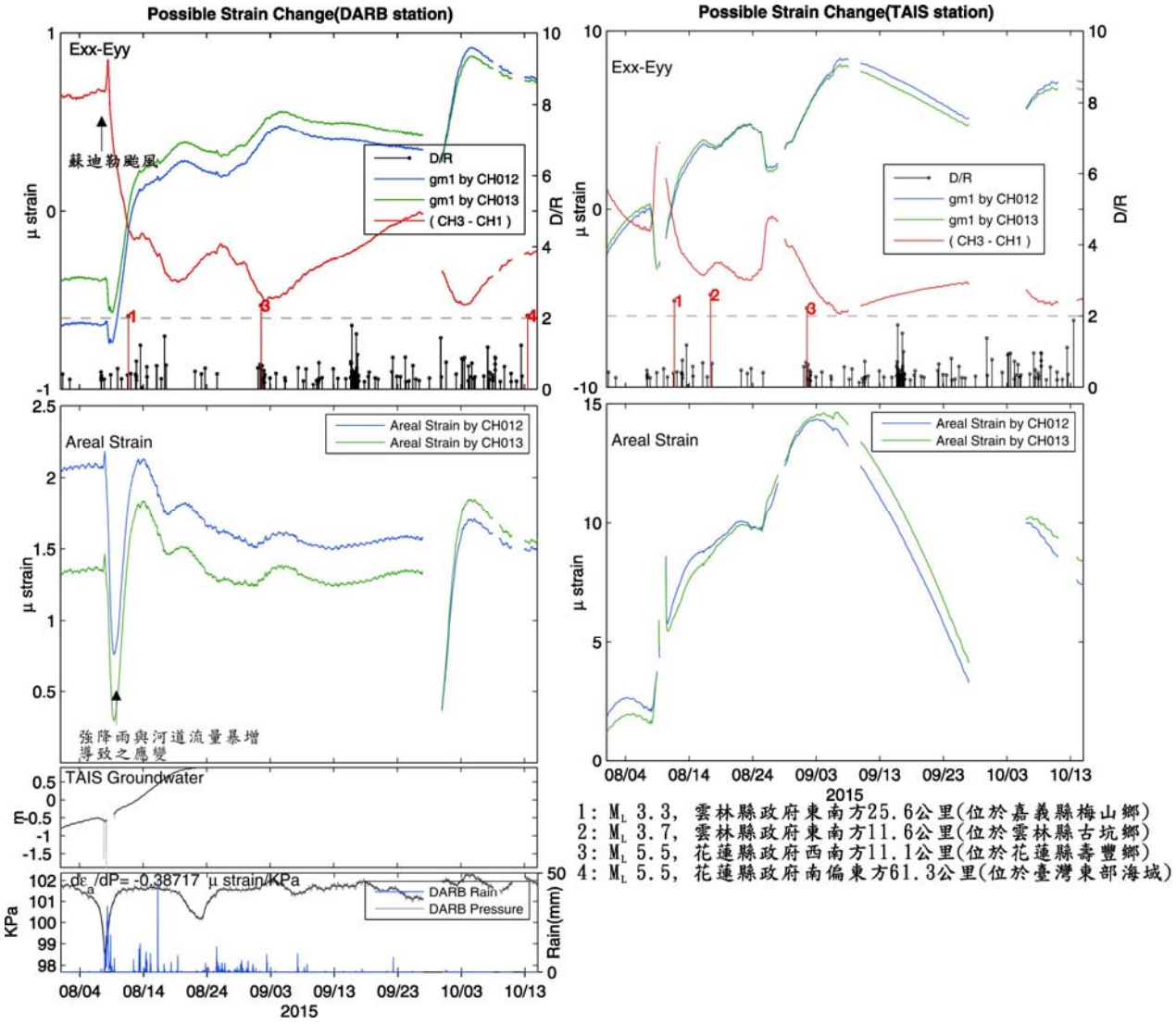


圖 4-1.35：2015 年 8 月至 9 月底嘉義網達邦測站（DARB）與太興測站（TAIS）之應變資料。

（4）2015/09/16 花蓮近海地震（M_L 5.6、5.5，Depth 15.3、17.8 km）與 2015/09/30 花蓮市地震（M_L 5.1，Depth 17.9 km）

新竹測網對於 9 月的幾起地震，在 D/R 上都顯示可能有較明顯的孕震應變反應，但這段期間受颱風與降雨影響甚劇，比較明顯的應變訊號都與水文變化有關，導致不易分辨地震相關應變異常（圖 4-1.36）。

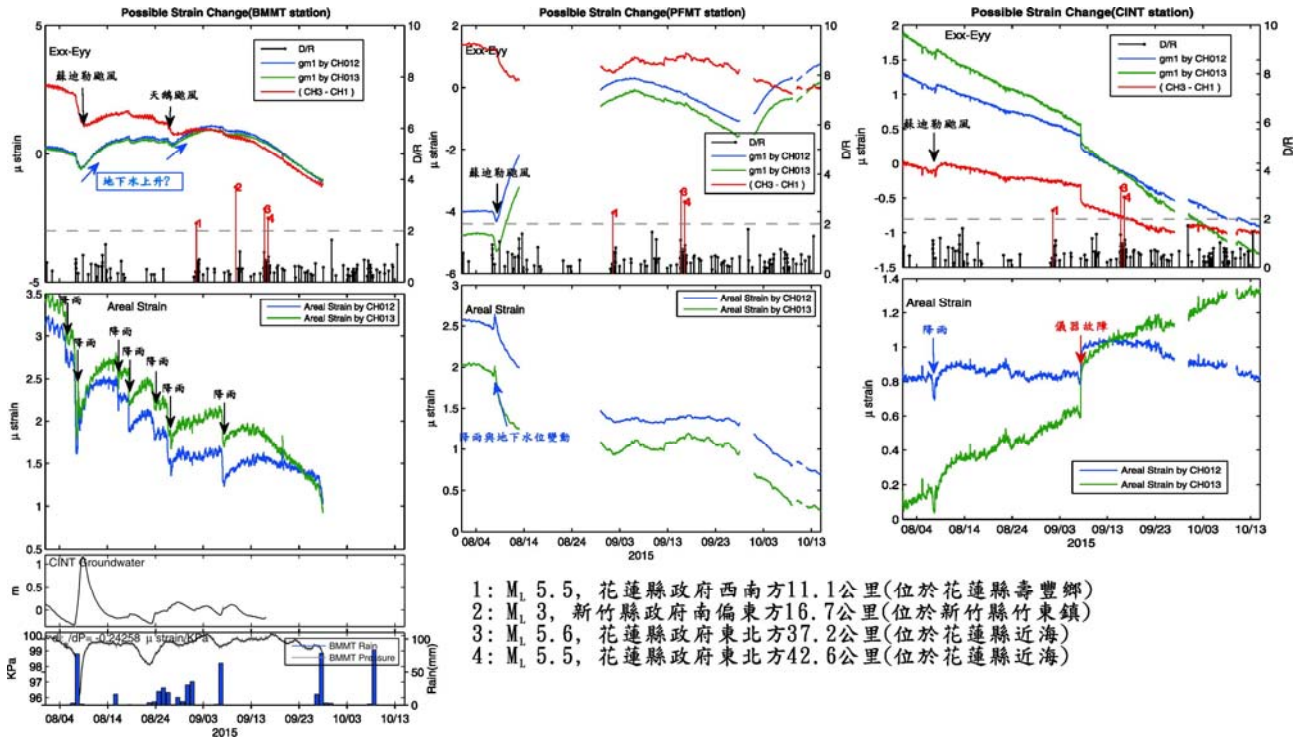


圖 4-1.36：2015 年 8 月至 9 月底新竹測網大坪測站（BMMT）、梅花測站（PFMT）與新樂測站（CINT）之應變資料。

4-1-3 井下應變儀應變異常判釋統計

目前每個月會進行一次井下應變儀的資料分析，分析當月前三個月的一整個月資料（例如 10 月初分析 7 月），資料必須先移除環境變因，如無法移除者，也必須列出環境影響資料，以做為比對之用，當有無法藉由環境因子解釋的應變率變化時，則是為應變儀的應變異常訊號，在藉由比對之後的地震資料，判斷是否為地震相關的前兆訊號。分析至 2015 年 9 月為止，井下應變儀有前兆訊號，也成功對應地震的機率在嘉義網、新竹網與臺北網分別為：67%、77%與 75%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：33%、23%與 25%；地震前沒有前兆訊號的機率為：29.4%、62%與 36%。

表 4-1.5：井下應變儀前兆判釋統計表（表列 2014/10-2015/09）。

	嘉義網		新竹網		臺北網	
	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震
2014-10	X	O	X	O	O	O
2014-11	-	-	O	O	O	O
2014-12	X	X	X	O	X	O
2015-01	O	O	O	X	X	X
2015-02	O	O	O	O	O	O
2015-03	O	O	O	O	O	O
2015-04	O	O	O	O	X	O
2015-05	X	X	O	O	X	X
2015-06	X	X	X	O	O	X
2015-07	X	O	X	O	X	X
2015-08	X	O	X	O	X	O
2015-09	X	O	X	O	O	O
前兆判斷成功機率	67%		77%		75%	
前兆判斷誤判機率	33%		23%		25%	
無前兆機率	29.4%		62%		36%	

4-2 井下應變儀數值絕對量的校正

GTSM 井下應變儀埋設在地底下深處，利用膨脹性水泥將儀器與岩層緊緊耦合以確實反應地下岩層變形的大小，但是由於岩層、水泥與儀器外殼不同彈性係數的關係，儀器記錄的觀測數值要確實反應遠場（far-field）的應變量就必須經過一定的計算與校正，考量這三種不同材質的組合，GTSM 設計者提出了在等向（isotropic）環境下的雙環模型（two-ring model）並計算出實驗室內的關係曲線（Gladwin and Hart, 1985）。可是實際上的儀器安裝到地底下後，我們對於膨脹性水泥的耦合程度與厚度難以量測，因此無法直接以實驗室的公式來計算，（Hart, Gladwin et al., 1996）利用鄰近的兩測站井下型與長基線的雷射應變儀觀測站資料比對，校正出井下型應變儀的耦合參數（coupling factor），並提出修正的方法。利用理論與觀測潮汐振幅與相位間的關係，我們可以推導出井下應變儀與岩層間的耦合參數，使得觀測數值更能反應出實際的物理變化量。一般來說，GTSM 應變儀設計為 3~4 個不同方位角指向的水平線性應變量組合而成的，其分量皆為水平方向而無垂直向，但近年有研究發現應變儀觀測資料中可能也存有垂直變化的分量（Roeloffs, 2010），其可能與對應垂直變化的水平變化量，其量值與各岩層的泊松比（poisson's ratio），顯示應變儀資料校正工作的複雜與必要性。

由上可知各觀測站因其周圍岩層與水泥耦合程度的不同而有不同的特性，因此可能造成觀測結果上振幅與相位間的差異，未來需要藉由其他觀測結果或理論潮汐的估算來將原始應變儀數值做一校正，來得到正確的物理絕對量。

以理論地潮來說，可以先藉由應變儀長時間下取移動視窗計算實際地潮分潮的量值（圖 4-2.1），再與軟體 GOTIC2 所計算的理論地潮分潮振幅作為比較，計算出各測站所需校正的比例（表 4-2.1）。應變儀當中較明顯的分潮為 M2 與 O1，因此我們分別計算這兩者的校正量，理論上應該要一致，實際上大部分測站的校正比例在 M2 與 O1 都相近，只有曾文水庫南測站（RST）與梅花測站（PFMT）兩測站的校正量在 M2 與 O1 的差異較大，未來必須進一步分析，其餘測站的校正量，我們偏向採用振幅較大的 M2 分潮的校正量。

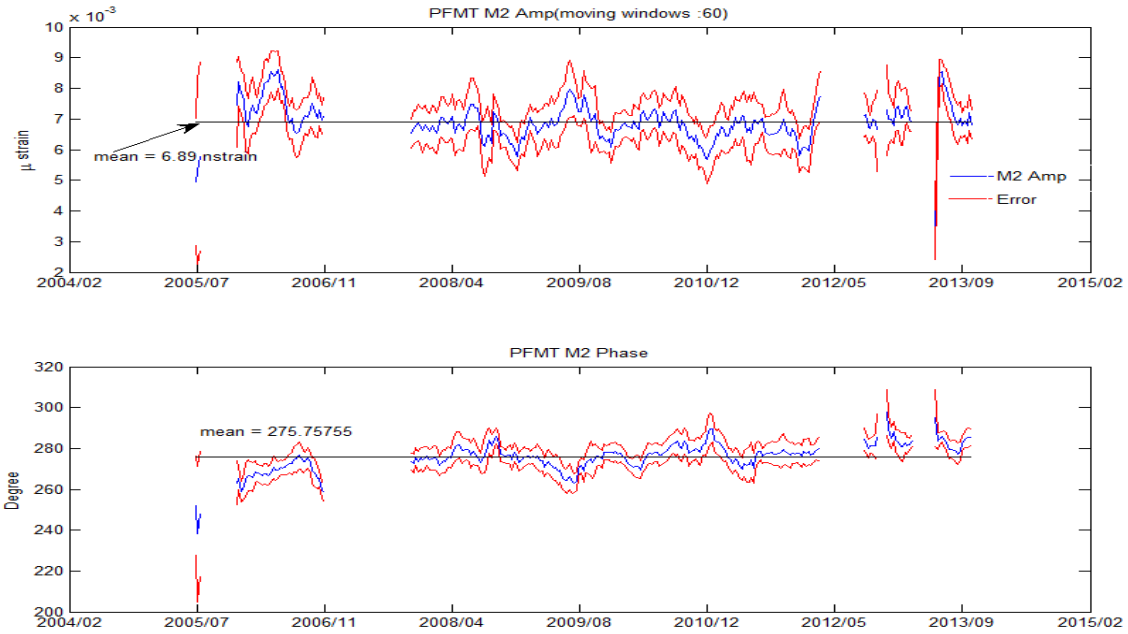


圖 4-2.1：新竹網梅花測站（PFMT）面應變長期 M2 地潮分潮。

表 4-2.1：理論地潮振幅與井下應變儀實測振幅比較。深綠色表示 M2 與 O1 在理論與實測得比值接近，淺綠色表示兩者比值較大，粉色則是差異太大需要進一步分析的測站。

	理論 Amphitude（nstrain）		實測 Amphitude（nstrain）		M2:O1 比例		理論/實測	
	M2	O1	M2	O1	理論	實測	M2	O1
RST	27.51	6.79	7.34	7.54	4.05	0.97	**3.75**	**0.9**
RNT	27	6.73	70.83	17.09	4.01	4.14	**0.38**	**0.39**
TSUN	26.81	6.7	19.6	5.68	4	3.45	**1.37**	**1.18**
TAIS	27.18	6.73	28.8	12.43	4.04	2.32	**0.94**	**0.54**
DARB	26.52	6.68	73.19	14.87	3.97	4.92	**0.36**	**0.45**
BMMT	20.93	7.22	47.44	13.86	2.9	3.42	**0.44**	**0.52**
PFMT	24.22	6.82	6.89	2.78	3.55	2.48	**3.52**	**2.45**
CINT	24.21	6.83	65.51	14.2	3.54	4.61	**0.37**	**0.48**
SANS	22.97	7.12	232.1	57.06	3.23	4.07	**0.1**	**0.12**
JING	23.56	7.37	26.01	5.36	3.2	4.85	**0.91**	**1.37**
SLIN	22.59	7.26	97.47	20.34	3.11	4.79	**0.23**	**0.36**

另外本研究也嘗試利用 GPS 測站基線變化所計算之區域應變來比對該 GPS 應變網內的井下應變儀，試圖將校正井下應變儀的數值。我們第一步先將所有測站的氣壓反應調整至所有測站的平均值（-0.317 ms/KPa），會有第一個調整值（表 4-2.2），接下來再根據 GPS 長期應變來計算井下應變儀所需要校正的比例值。目前已完成嘉義網太興測站（TAIS）與達邦測站（DARB）、新竹網大坪測站（BMMT）與梅花測站（PFMT）（圖 4-2.2 與圖 4-2.3）。初步結果顯示井下應變儀的應變皆需要乘以 0.02~0.16 才能與 GPS 所計算的區域長期應變一致，這顯示原始井下應變儀的應變數值可能是過大不合理的情況，需要進一步校正。

表 4-2.2：原始面應變要調整至平均氣壓反應（-0.317 ms/KPa）的比例。

測站	調整比例
DARB	0.906
TAIS	1.170
TSUN	1.183
PFMT	2.187
BMMT	1.200
CINT	1.095
SANS	0.486
SLIN	0.845
JING	1.332

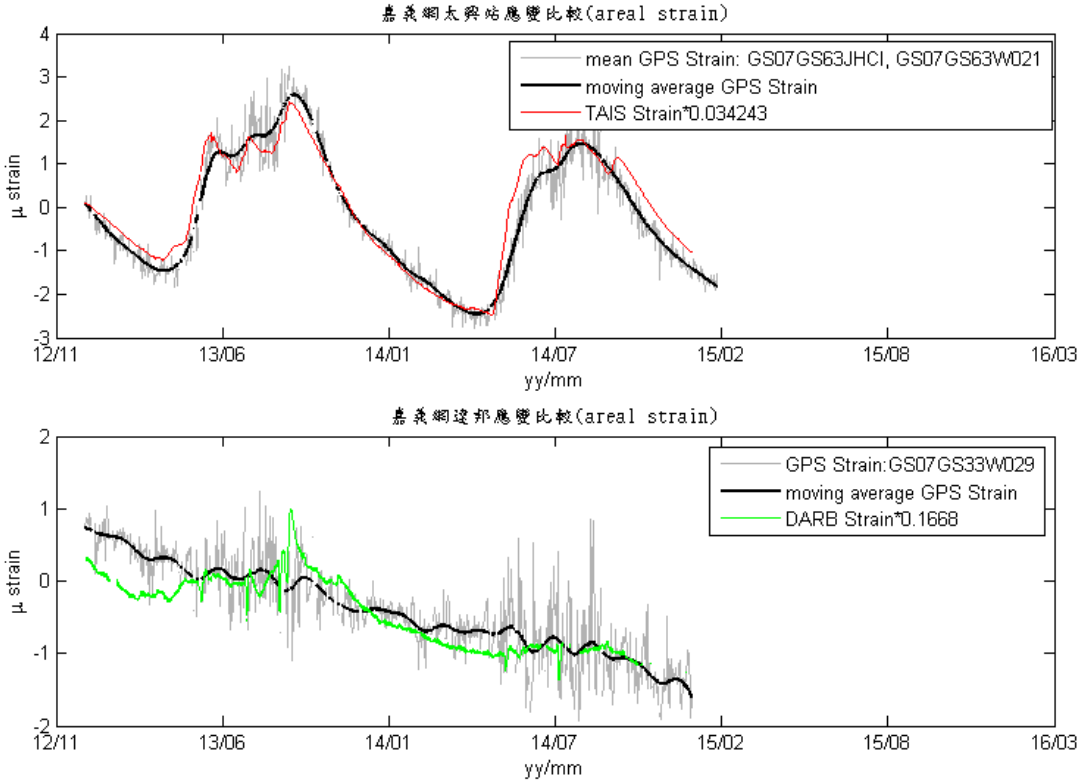


圖 4-2.2：嘉義網井下應變儀應變與 GPS 應變。

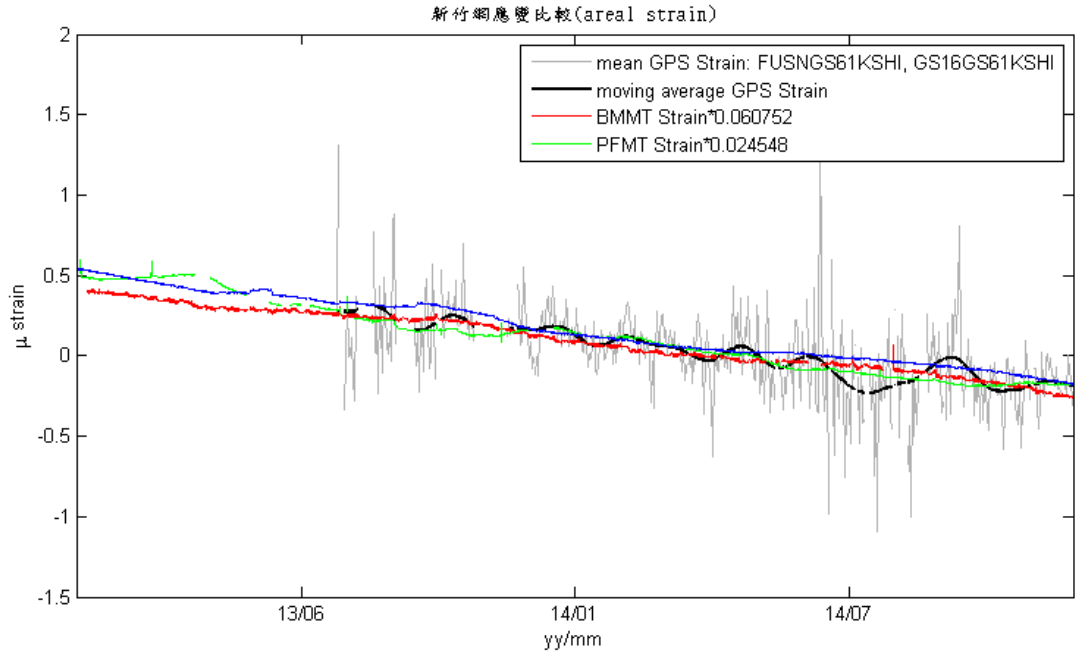


圖 4-2.3：新竹網井下應變儀應變與 GPS 應變。

4-3 地震對於應變儀軸差應變之計算

GTSM 井下應變儀的設計是以四個不同方向的軸向感應器所構成，CH0 的角度在安裝時可以透過井下的方向計量得，CH1 與 CH2 則與 CH0 分別夾 60°與 120°，CH3 則與 CH3 夾 30°，透過這樣的設計，除可提供一個當有頻道損壞不能運作時的後備選擇外，也可透過 CH3 與 CH1 的正交關係來進行資料的檢核。

以圖 4-3.1 為例，e_i 表示第 i 個頻道的軸向伸張量，圖 4-3.1a 中表示平行該頻道之伸張方向之 x_i 軸，正交 x_i 軸方向為 y_i 軸的未變形的座標型態，假設在一個均質等向的環境裡，應變儀受力後會產生幾個不同的水平張量（tensor），一個是沿著 x_i 軸方向伸張的應變量 ε_{xixi}，一個是沿著 y_i 軸方向的應變量 ε_{yiyi}，而一個是剪應變量 $2\varepsilon_{xiyi}$（不影響 i 方向的變化量），而要來表示應變儀受力的行為（圖 4-3.1b），我們可將其張量分別以面應變（areal strain）$\varepsilon_a=\varepsilon_{xixi}+\varepsilon_{yiyi}$，差應變（differential strain, 或 gamma1 shear strain） $\varepsilon_{xixi}-\varepsilon_{yiyi}$ 以及工程剪應變（simple shear 或 gamma2 shear strain） ε_{xiyi} 來表示其變化的行為（圖 4-3.1c）。

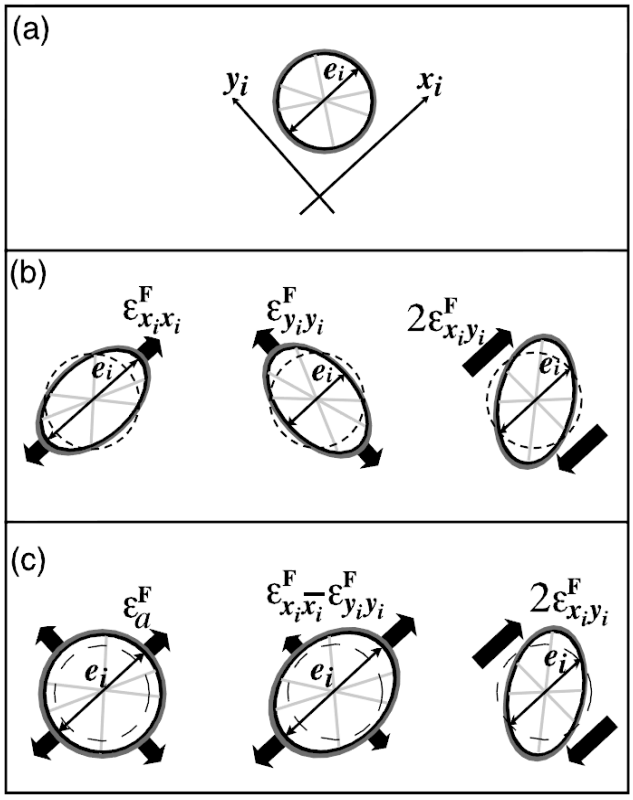


圖 4-3.1：在均質等向的理想環境下，應變儀受力後的水平張量變化情形（Roeloaffs, 2010）。

在均質等向的環境下，我們可以透過上面的關係直接計算觀測應變對應的面應變與剪應變，但是實際的狀況下，儀器設置所在岩層並非均質等向的環境，上述的關係必須改寫為如下：

$$\frac{g_1e_1+g_3e_3}{2}=C\varepsilon_a^F \qquad \text{（式 4-3.1）}$$

$$(g_1e_1-g_3e_3)=D(\varepsilon_{x1x1}-\varepsilon_{y1y1})^F \qquad \text{（式 4-3.2）}$$

其中 g_1 表示各頻道的儀器因子，表示與原始出廠資料值間的差距，C 與 D 分別表示儀器設置的耦合（coupling）因子，表示儀器本體與岩層間的耦合結果，與岩層的性質，灌漿凝固厚度與狀況有關，須透過一系列的校正程序修正來取得。因此在未得到正確的 CD 值，我

們是無法推算出來觀測應變與遠場應變間的關係。

雖然尚未取得應變儀的耦合因子，但可以利用氣壓效應來比較出其儀器因子間的關係，即使無法獲得絕對的應變異常量，仍可以迅速地得出相對的應變異常現象，對於要快速得到地震前兆的資訊可以有相當的助益。由於氣壓對於井下應變儀的影響屬於一種均勻分布施向地表的力向，設置於地下的應變儀因岩層泊松比（poisson's ratio）的影響，於地下同深度的應力影響應為相同（雖各頻道的設置深度有約 30 公分的差別，但對比於 200 公尺深度的觀測站來說，可視為同一平面上），因此對於應變儀的各個頻道來說，其壓力應為一致，其不同的響應結果則表示其頻道上的儀器因子的差異。

表 4-3.1 為井下應變儀觀測站各個頻道的氣壓響應因子，可看到同一觀測站在相同的氣壓環境下，各頻道對於氣壓變化的響應也有不同，顯示出各頻道的儀器響應的差異。

表 4-3.1：井下應變儀觀測站的各頻道氣壓響應因子（單位: microstrain/KPa）。

SITE	CH0	CH1	CH2	CH3	AR
RNT	-0.013	-0.017	-0.020	-0.003	-0.026
RST	-0.030	-	-0.052	-0.059	-0.035
DARB	-0.132	-0.327	-0.107	-0.121	-0.387
TAIS	-0.149	-0.129	-0.130	-0.105	-0.277
TSUN	-0.172	-0.124	-0.135	-0.168	-0.258
PFMT	-0.058	-0.107	-0.061	-0.053	-0.142
BMMT	-0.124	-0.139	-0.104	-0.065	-0.243
CINT	-0.182	-0.101	-0.114	-0.180	-0.285
SANS	-0.207	-0.399	-0.556	-0.184	-0.791
SLIN	-0.233	-0.140	-0.197	-0.251	-0.380
JING	-0.150	-0.117	-0.118	-0.124	-0.255

2014 年 2 月 12 日在臺北市士林區發生一規模 4.2 的有感地震，臺北市全區震度可達 4 級（圖 4-3.2），由於臺北地區附近鮮少發生如此規模之地震，無論在新聞界與學術界都引起了不小的討論，而在這個事件中，臺北地區鄰近的觀測站是否能夠捕捉到地震發生前的前兆異常呢?由於利用面應變來判讀地震前兆異常現象常會受到雜訊如氣壓與地下水的變化影響，對於規模較小的地震常不易解析出明顯的異常訊號，利用差應變的檢測方法，應可以減少氣壓、地下水此類靜岩壓力式的等向應力影響，而凸顯出異常應變的變化。我們選取臺北地區週邊的錦和測站（JING）資料來檢視，從表 4-3.1 可以得知錦和測站在各個頻道中的氣壓響應結果都相近，顯示各頻道有類似的儀器響應因子，因此我們利用錦和測站的觀察結果來進行差應變的計算（式 4-3.2），以減少計算的誤差，結果如圖 4-3.3 所示。在圖 4-3.3 中將 CH1 與 CH3 的資料繪製在同一張表上（圖上 c1 與 c3，灰線），時間為 2014 年 1/3 至 2/12，地震發生後，由於前 2 個星期並無其他事件，因此將前 2 個星期的趨勢移除，以方便資料的判讀。同時我們也除去了潮汐的影響（c1-t，藍線；c3-t，綠線），我們也將氣壓的資料（淡棕線）劃在同一張圖上，我們並未特別先將氣壓從兩個頻道資料上移除，因此仍可以看到氣壓對於各頻道資料的影響，而在均質等向的情形下，氣壓對於各方向施予的壓力應為相同，氣壓的結果在計算差應變時會被去除，由於錦和測站各頻道氣壓響應的結果接近，我們可視錦和測站儀器設置的環境是等向的。差應變的計算利用除去潮汐資料的 c3-t 與 c1-t 的結果來計算，從氣壓響應結果來假設儀器的響應因子均相同，因此 gi 皆為 1 帶入式 4-3.2，可得沿 CH3 方向之差應變 $D(\varepsilon_{x1x1} - \varepsilon_{y1y1})^F$（紅線），其中 D 為常數。計算結果可顯示出地震前差應變的異常變化情形。從結果來看，影響單獨頻道甚劇的氣壓因子經過相減後減低，已看不出明顯的影響，而整體的趨勢在 1/5 至 1/20 間呈現一穩定的情形，直到於 1/21 宜蘭縣政府東

偏北方 33.1 公里發生規模 4.0 的淺層地震時所造成同震反應，又持續維持約一個星期的穩定，自 1/28 開始差應變數值即異常地持續增加，約至 2/9 才又恢復穩定，而在 2/12 發生了地震，整個過程紀錄了岩層中的應變累積、鎖死、破壞的過程，顯示利用差應變結果來判釋地震前兆能夠提供不錯的結果，但也發現應變觀測的局限性，以錦和測站觀測為例，對於距離 10 公里左右的 2/12 地震有良好的反應，但是對於同樣規模 4.0 但距離超過 60 公里的宜蘭地震則僅有同震的反應。

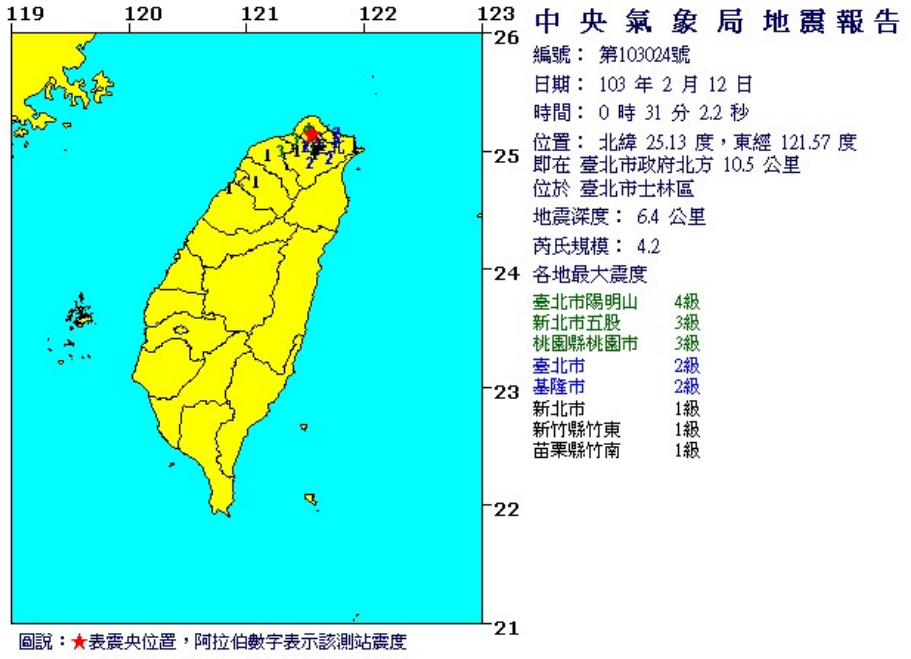


圖 4-3.2：2014 年 2 月 12 日於臺北市士林區發生規模 4.2 的有感地震。

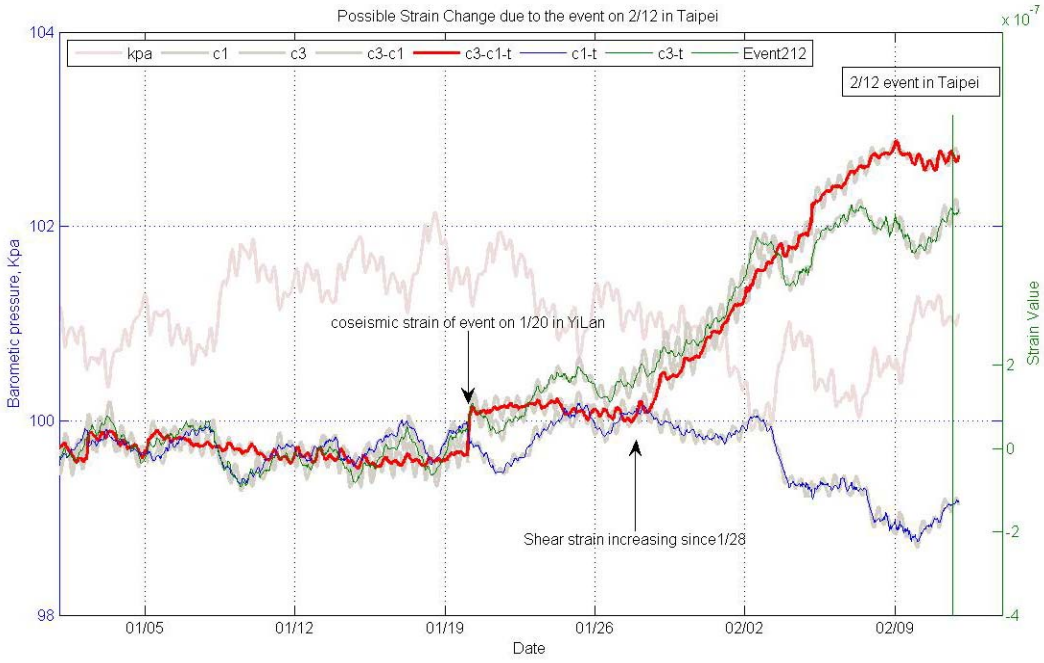


圖 4-3.3：錦和測站（JING）利用軸向差應變的計算，可比面應變更易解讀出地震前之前兆異常現象。圖上橫軸為時間 2014/1/3~2/12，左邊縱軸表示氣壓大小，右邊縱軸表示應變變化值，利用 CH3（綠線）與 CH1（藍線）間的差值（CH3-CH1）計算出沿 CH3 方向之差應變。

第五章、地球化學觀測與研究

5-1 緒論

臺灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊的交接處，隨著板塊的作用所造成的斷層活動與地震也就特別多，地球化學變化常可以提供明顯的地震前兆，其中氣體成分的變化較為明顯而迅速，這些大部分和熱水作用相關的氣體如氡（Rn）、氦（He）、氫（H_2）、氬（Ar）、氮（N_2）、甲烷（CH_4）和二氧化碳（CO_2）的異常，以及溶於水體的陰、陽離子濃度的劇烈變化，一般歸因於斷層活動造成地下流體（水與氣）循環系統的改變而導致流體的混合。

經過以往有系統的調查觀測結果顯示，土壤與溶解氣體成分之監測有較為敏感的變化，且較容易達到連續自動化分析，及持續維護之目標。配合鄰近水位觀測井與地震儀連續觀測分析以及鄰近地殼變形觀測結果，當可更有效解釋流體地球化學變化與地殼、地震活動之關聯性。

本研究在第一及第二階段之觀測計畫中，於八年內（94 年~101 年）逐年於臺灣各活動斷層之敏感地區，分別設置土壤氣體連續觀測站、地下水位觀測井及地下水溶解氣體連續觀測站，進行土壤氣體、地下水位及地下水溶解氣體（氡、二氧化碳）之觀測，成為一個含括臺灣各地的地球化學觀測網。

本（2015）年度，對於新竹大平地、雲林古坑、屏東屏科大、臺東池上、花蓮東華共五座已設置之土壤氣體連續觀測站，配合新改建之沄水地下水溶解氣體觀測站；以及新竹大坪國小地下水位觀測井與地調所設置之五座地下水位觀測井持續進行觀測；此外，在南部的恆春半島進行地下水氡的連續觀測並定期採樣分析，以此地球化學觀測網，進行資料分析與判讀。

然而，地下水位觀測在這兩階段計畫以來，逐步累積大量的連續觀測資料，並且試圖找出震前地下水位異常的規則性，於上一階段結束前，本研究判定出多數震前水位異常，臺北站群有 40 筆，約佔臺北地區通過篩選條件地震的 25%，新竹站群有 36 筆異常，佔新竹地區通過篩選條件地震的 30%，而嘉義站群有 104 筆，佔嘉義地區通過篩選條件地震的 40%，且全數在地震前兩周之內發生。但前述於 2012 年底所得到之統計數據，是因未考慮水位計特性與氣壓因素而誤判的結果，自去年起已使用氣壓修正刪除大多數 2012 年前誤判的異常事件，本章節所討論之地下水壓觀測結果，皆已進行相關氣壓修正。

本年度彙整各土壤氣體、地下水位和地下水溶解氣體觀測站之觀測結果，比較不同時序分析方法對於異常值辨識的差異，並討論與鄰近地區地震活動之關聯性，歸納出各測站對於地震活動的敏感範圍帶，以期進一步建立流體地球化學所相對應的地震活動模型。

5-1-1 觀測站分布位置

本計畫分別有五座既有的土壤氣體觀測站（新竹大平地、雲林古坑、屏東屏科大、臺東池上及花蓮東華）。另外，本計畫亦觀察一口新竹大坪國小及五口由中央地質調查所提供之地下水位觀測井：臺北錦和、樹林及新竹新樂，以及嘉義太興及達邦。另外原來的嘉義沄水地下水位觀測站於去年改設為地下水溶解氣體觀測站。此外，地下水氡觀測則在臺灣南部墾丁社頂站進行觀測。各測站之位置如圖 5-1.1 與表 5-1.1。

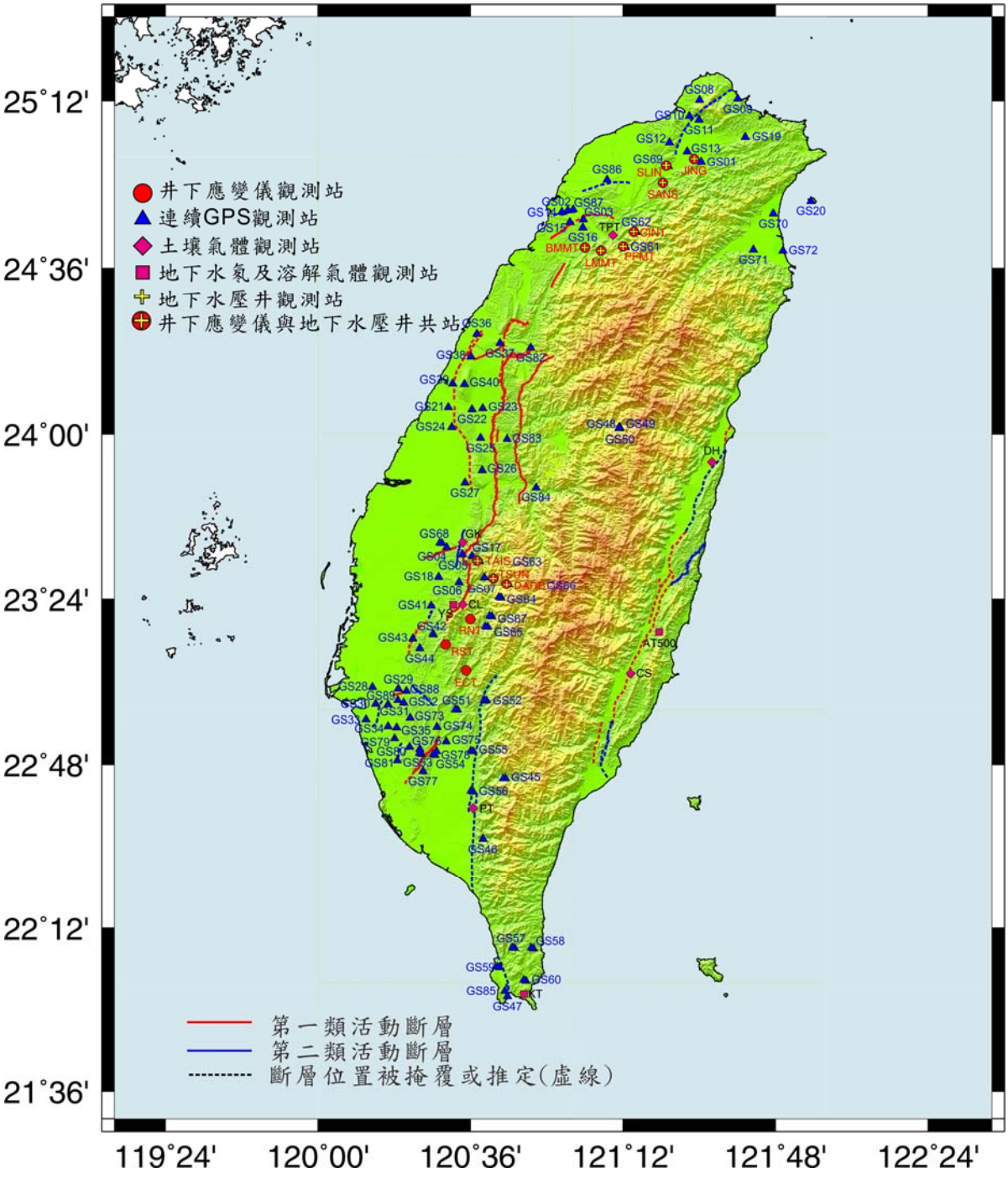


圖 5-1.1：觀測站分布位置。

表 5-1.1：地球化學既有觀測站的座標。座標系統為 TWD67。

	二度分帶（E）	二度分帶（N）
土壤氣體觀測站		
新竹大平地站（TPT）	265637	2736929
雲林古坑站（GK）	206325	2609740
屏東屏科大站（PT）	208060	2505203
花蓮東華站（DH）	305243	2643926
臺東池上站（CS）	273485	2558221
地下水壓觀測站		
臺北錦和站（JING）	298573	2764916
臺北樹林站（SLIN）	288631	2762888
新竹新樂站（CINT）	274564	2736304
新竹大坪站（BMMT）	255932	2729762
嘉義太興站（TAIS）	211814	2604620
嘉義達邦站（DARB）	227706	2592582
地下水溶解氣體觀測站		
嘉義沄水站（YS）	200697	2586171
墾丁社頂站（ST）	229668	2428983

5-1-2 觀測站相關地震選擇依據

臺灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊的交接處，由於兩板塊的相互作用，使得臺灣地區的地殼活動特別活躍，斷層活動所引發的地震也特別多，並且經常有強烈的地震發生。在眾多地震中如何篩選出可與觀測資料對比的地震是重要的課題，也因此隨著觀測結果不斷累積，本研究也持續對地震的篩選標準漸進修正。

據 Dobrovolsky *et al.*（1979）之研究，在大地應力作用下，即將發生地震的震源區會形成一個震前岩石變形破裂帶。假設此變形帶為一個以震央為中心的圓，其應變半徑（D）與地震規模的關係為：

$$D = 10^{0.43ML}\ km$$

由此估算，一個規模 M_L = 5 的地震，其應變半徑可達約 140 公里；規模 M_L = 6 的地震，其應變半徑約 380 公里；規模 M_L = 7 的地震，更可達 630 公里以上。因此在有較深循環的地下流體系統的特定地區，常可有機會反應出地震前兆。而地震前兆出現的時間，一般與測站距震源的距離成反比關係。

因此，本研究對於所有測站的地震一般篩選原則，納入地震規模（M_L）、測站當地地震震度（Int.）、測站與震源的距離（R），及應變半徑（D）與測站距震源的距離的比值（D/R）等四項參數，其次再依據各測站所在地區之地質構造特性（有的測站只對區域地震有反應，有的測站反應範圍較廣）來篩選出地震。本年度觀測期間自 2014 年 12 月 1 日至 2015 年 11 月 30 日止，各測站依據前述地震篩選原則，各測站相關地震數分別為大平地站 25 起、古坑站 23 起、屏科大站 15 起、東華站 26 起與池上站 22 起。

地震學者經過長期的觀察研究，歸納得知地震發生的可能五個步驟為：（1）板塊擠壓，地殼累積彈性應變；（2）地層發生膨脹和發展微裂隙；（3）斷層帶上有流體侵入和變形；（4）發生地震；（5）餘震後地殼應力突然陡降（Bolt, 1999）。

一般而言，在前三個步驟的地震孕育期中，地殼或多或少可能會有一些徵兆發生。若能對這些前兆的發生有所了解及掌握，則對於地震的即將發生，可能會有所知曉。這些徵兆包括地球物理的前震和地形變化，以及水文地球化學的變化。

綜合以上所述，可以將地震發生與氣體異常的時間關係概略分成四個類型（圖 5-1.2）：（1）地震發生在氣體異常高點；（2）地震發生在氣體異常高點下降途中；（3）地震發生在氣體異常高點後之最低點；（4）地震發生在氣體異常高點後之最低點後升高途中。

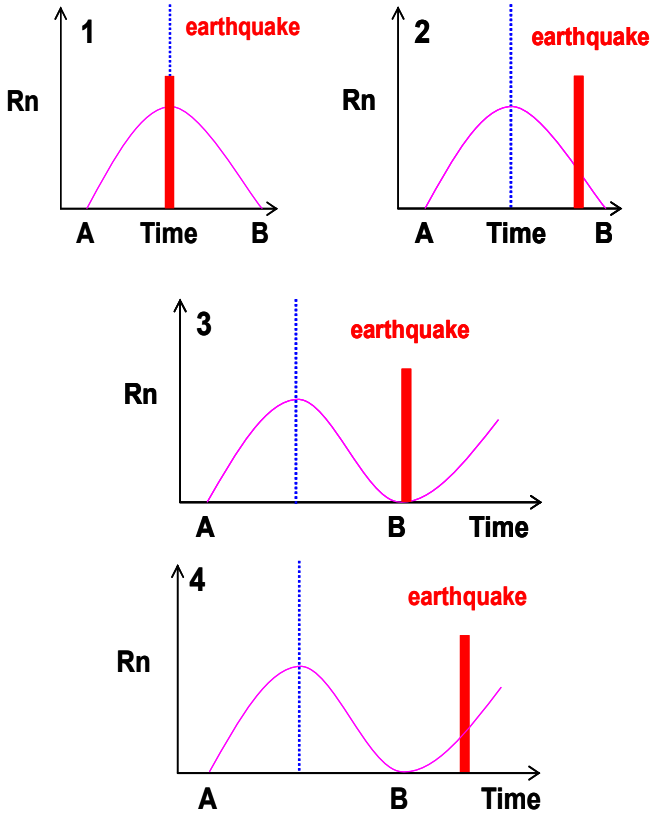


圖 5-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。A 至 B 代表一個完整氣體異常變化區間；垂直虛線為異常出現最高值的時間。（1）地震發生在氣體異常高點；（2）地震發生在氣體異常高點下降途中；（3）地震發生在氣體異常高點後之最低點；（4）地震發生在氣體異常高點後之最低點後升高途中。（Fu et al., 2009）。

5-1-3 利用時序分析方法處理觀測資料

由於有些觀測站所記錄到的數據常受到其它環境因子影響，造成判斷異常值與探討其與地震活動的困難。此外，各觀測站所定義的異常往往是主觀認定，故有時會存在認定之標準的問題，故本小節利用一些統計及數學方法，以較有系統的方式來分析連續觀測結果。

本研究利用 AnCAD 公司所開發的軟體 Visual Signal 進行數據的處理。在本節中使用兩種方法，分別是疊代式高斯平滑法（Iterative Gaussian Smoothing）及滾動統計法（Rolling Statistics）來處理不同測站的資料，分別於附錄 1-8 中詳細介紹。

本小節就今年度（103/12－104/11）多個測站所觀測的數據與相關地震作綜合分析討論。單一觀測站觀測到的數據與相關地震的詳細說明請參考附錄 5-1。在觀測數據的篩選上若有因外來因素，譬如降雨影響致使觀測品質不佳，或是人為因素的更換儀器、管線、乾燥器（劑）而導致數據無法連貫，會先行將其時段刪除，保留可堪用的數據，此外，為了以現有即時土壤氡氣資料研判未來地震發生的可能趨勢，可選擇以疊代式高斯平滑法與 14 天及 3.8 天的滾動平均值（Rolling average）相減後之殘值計算過去 6 個月之標準差並將其標準化，定義大於 N 倍標準差為異常。比較圖上 14 天及 3.8 天之滾動平均值的差異，並探討濾波後的訊號與地震活動的關聯。

每個測站利用時序分析方法將資料短缺或品質不佳遭刪除的時段，補齊數據並根據不同的時序分析法做出其標準差，我們給各站所定義的異常門檻會因測站的敏感度不同及隨著資料的增加而有差異（負標準差在本研究暫不做討論），我們以超出此異常門檻時段與後續發生的地震進行討論與說明。在地震的選擇上，我們則以地震規模較大的地震為主，根據過去的研究，超過門檻的時段常會與地震規模≧5 且深度<100 km 且震央距離測站≦150 km 的地震事件有關；此外，當地震規模＜5 且震度≧2 的地震，也會列入本研究的相關地震列表進行討論。

綜合以上方法可得知各測站氣體異常反應之地震比率如下表 5-1.2 所示。此外，我們每週會依據上述時序分析的流程，將各測站當週所觀察的數據進行分析與討論，並將其與之前的資料整合，用以觀察未來氣體濃度的變化趨勢，發布測站氣體異常訊息。本年度自 2014 年 12 月 1 日至 2015 年 11 月 30 日止共發布 47 週訊息（內含 62 則測站異常與否訊息），其中測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生的誤報率，其內容如表 5-1.3 所示，分別為以紅色、綠色、藍色及黑色來表示，其各代表的成立條件為「氣體有異常且有地震且有研判到，16 次」、「氣體有異常且有地震且無研判，18 次」、「氣體有異常且無地震，13 次」與「氣體無異常且無地震，15 次」共四項，經過計算後得到其誤報率約為 50 %；其中，「氣體有異常且有地震且無研判」的原因主要為時效性問題，意指在進行發布之前地震已經發生，但有氣體變化於地震發生前已出現異常，常與發布當週測站資料尚未更新有關。若將該項因子同樣視為成功前兆判斷，則誤報率降為 21%。

表 5-1.2：各測站氣體異常反應之地震比率。

觀測站名稱	與測站相關全部地震數	篩選後地震數	氡氣有異常地震數（篩選後地震數）	氡氣異常反應的地震占篩選後的地震比率
新竹大平地 TPT	61	25	13（10）跨號內為規模大於 5 的地震數	52%
雲林古坑 GK	62	23	9（4）跨號內為規模大於 5 的地震數	39%
屏東屏科大 PT	51	15	9（2）跨號內為規模大於 5 的地震數	60%
花蓮東華 DH	133	26	13（11）跨號內為規模大於 5 的地震數	50%
臺東池上 CS	70	22	13（9）跨號內為規模大於 5 的地震數	59%

表 5-1.3：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率。

NO	預報日期	氡氣有異常的測站	地震	研判正確與否
1	2014/12/2	測站無異常	無相關地震	
2	2014/12/9	大平地站	2014/12/11 基隆外海，規模 6.7	無研判
		古坑站	2014/12/13 臺南東山，規模 4	無研判
3	2014/12/16	測站無異常	無相關地震	
4	2014/12/25	測站無異常	無相關地震	
5	2014/12/29	測站無異常	無相關地震	
6	2015/1/6	古坑站	2015/1/7 花蓮秀林，規模 5.5	有研判到
		池上站	2015/1/7 花蓮秀林，規模 5.6	有研判到
7	2015/1/13	測站無異常	無相關地震	
8	2015/1/19	古坑站	2015/1/19 臺東外海，規模 5	有研判到
9	2015/1/26	屏科大站	2015/1/26 高雄美濃，規模 4.2	有研判到
			2015/1/26 高雄六龜，規模 4	有研判到
10	2015/2/3	測站無異常	無相關地震	
11	2015/2/10	測站無異常	無相關地震	
12	2015/2/25	屏科大站	2015/2/14 臺東外海，規模 6.3	無研判
13	2015/3/3	大平地站	2015/2/27 宜蘭外海，規模 5.3	有研判到
14	2015/3/10	測站無異常	無相關地震	
15	2015/3/17	測站無異常	無相關地震	
16	2015/3/24	大平地站	2015/3/23 花蓮外海，規模 6.2	無研判
		東華站	2015/3/23 花蓮外海，規模 6.2	無研判
17	2015/3/31	古坑站	無相關地震	
18	2015/4/8	測站無異常	無相關地震	
19	2015/4/14	古坑站	2015/4/13 嘉義水上，規模 3.4	有研判到
			2015/4/14 南投仁愛，規模 4.8	有研判到
		池上站	2015/4/7 臺東海端，規模 4.1	無研判
20	2015/4/21	大平地站	2015/4/20 花蓮外海，規模 6.4	無研判
		古坑站	2015/4/20 花蓮外海，規模 6.4	無研判
		東華站	2015/4/20 花蓮外海，規模 6.4	無研判
21	2015/4/28	古坑站	2015/4/26 花蓮外海，規模 5.7	有研判到
22	2015/5/5	東華站	2015/5/3 花蓮外海，規模 5	無研判
		大平地站	無相關地震	
		古坑站	無相關地震	
23	2015/5/12	測站無異常	無相關地震	
24	2015/5/19	東華站	2015/5/12 花蓮秀林，規模 4.7	無研判
25	2015/5/26	古坑站	無相關地震	
		東華站	2015/5/26 花蓮外海，規模 5	有研判到
26	2015/6/2	屏科大站	2015/5/26 臺東延平，規模 4.9	無研判
			2015/5/28 高雄杉林，規模 4.2	無研判
27	2015/6/16	測站無異常	無相關地震	
28	2015/6/22	大平地站	2015/6/21 花蓮外海，規模 5	無研判
29	2015/6/30	測站無異常	無相關地震	

表 5-1.3（續）：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率。

NO	預報日期	氡氣有異常的測站	地震	研判正確與否
30	2015/7/7	測站無異常	無相關地震	
31	2015/7/21	屏科大站	無相關地震	
32	2015/7/28	池上站	2015/7/25 臺東成功，規模 4.5	無研判
33	2015/8/4	池上站	無相關地震	
34	2015/8/11	池上站	無相關地震	
35	2015/8/18	池上站	無相關地震	
36	2015/8/24	東華站	無相關地震	
37	2015/9/1	東華站	2015/9/1 花蓮壽豐，規模 5.5	有研判到
38	2015/9/8	屏科大站	2015/9/24 屏東泰武，規模 4.5	有研判到
39	2015/9/22	東華站	2015/9/16 花蓮近海，規模 5.7	有研判到
		大平地站	2015/9/16 花蓮近海，規模 5.6	無研判
40	2015/10/6	大平地站	2015/9/30 花蓮市，規模 5.1	無研判
41	2015/10/13	測站無異常	無相關地震	
42	2015/10/20	池上站	2015/10/12 臺東外海，規模 5.2	無研判
		池上站	2015/10/13 花蓮外海，規模 5.5	無研判
43	2015/10/27	屏科大站	2015/11/2 臺東外海，規模 5.9	有研判到
44	2015/11/3	大平地站	無相關地震	
		池上站	無相關地震	
		東華站	無相關地震	
45	2015/11/10	大平地站	11/11 花蓮外海，規模 5.4	有研判到
		屏科大站	11/12 臺東外海，規模 4.5	有研判到
46	2015/11/17	大平地站	無相關地震	
		東華站	11/22 花蓮秀林，規模 4.1	有研判到
47	2015/11/24	池上站	12/3 臺東外海，規模 5.3	有研判到

5-2 土壤氣體觀測結果

數個土壤氣體觀測站對單一地震的異常變化：

根據過去的觀測結果，我們可經由地震活動所造成的異常變化而初步劃分出各觀測站的異常反應範圍，當各測站的反應區間出現交集處，則地震可能將發生在這個區域。例如：當北部的大平地觀測站出現異常且嘉義的中崙測站也出現異常變化時，此時兩個測站的反應區間交集處則可能為地震即將發生的位置；如果東部的池上觀測站也出現異常變化，那則可更提高準確度，如圖 5-2.1 所示。

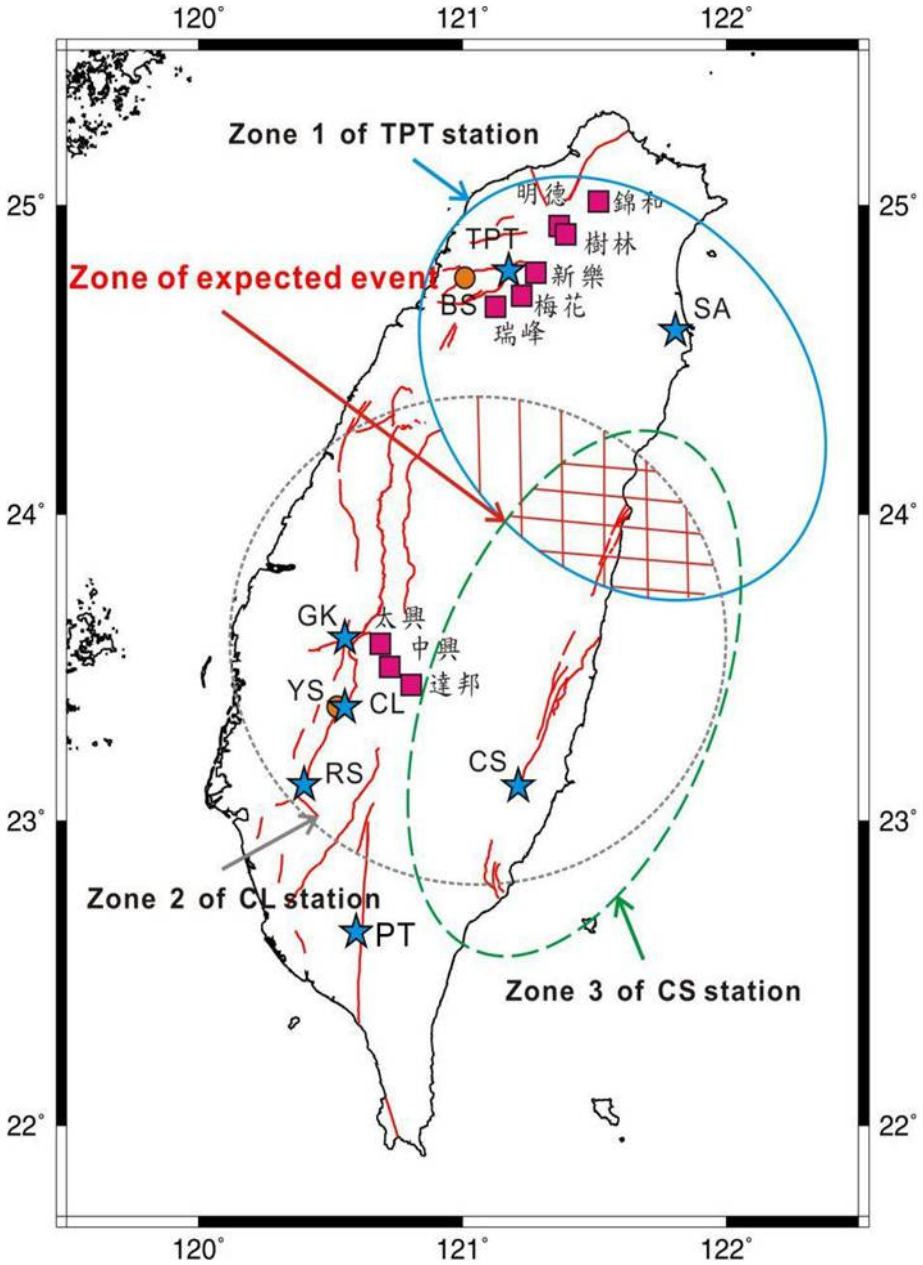


圖 5-2.1：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生地點。

2014 年 12 月至 2015 年 11 月間，有 6 起地震在發生前，同時有兩個（含）以上的測站土壤氡氣出現顯著的異常前兆反應。此外，2014 年 12 月 11 日於基隆外海發生規模 6.7 的地震；以及 2015 年 5 月初至 5 月中，共五起發生在苗栗外海的地震事件，大平地觀測站在這些地震發生前，都觀察到非常顯著的異常濃度升高變化，也一併列入討論。另外，東部的池上站附近，有另一獨立設置之錦園觀測站，當池上站出現異常變化或資料缺失時，可將兩測站資料相互比對與驗證，如表 5-2.1~表 5-2.3。

表 5-2.1：單一地震與多個土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。

NO.	西元時間	規模	深度 km	震央位置	大平地（TPT）			古坑（GK）			屏科大（PT）			池上（CS）錦園（CY）			東華（DH）		
					Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R
1	2015/1/7 12:48	5.5	30.4	花蓮秀林				1	2.5	1.7				1	1.3	1.7	3	14.3	4.4
2	2015/3/23 18:13	6.2	38.4	花蓮近海	3	8.1	3.5							3	13.6	5.1	5	106	9.4
3	2015/4/20 09:42	6.4	30.6	花蓮外海	2	6	3.9	3	10.5	2.9				2	4.5	3.6	3	11.5	6.3
4	2015/9/1 21:24	5.5	17.1	花蓮壽豐	2	6	2.3							1	2.1	2.5	5	151.3	13.5
5	2015/9/16 03:37	5.7	19.8	花蓮近海	3	16.6	3.4										3	16.6	5.3
	2015/9/16 21:09	5.6	20.2	花蓮近海	3	10.5	3.0										3	13.7	4.4
6	2015/11/2 05:09	5.9	18.9	臺東外海							2	3.2	3.3	4	28.6	5.5			

表 5-2.2：4 月 20 日花蓮外海地震序列表（規模大於 5）。

No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料
1	2015/4/20 09:42	6.4	122.44	24.02	30.6	花蓮縣政府東方 83.6 公里 (位於臺灣東部海域)
2	2015/4/20 09:49	5	122.43	24.05	30.7	花蓮縣政府東方 82.9 公里 (位於臺灣東部海域)
3	2015/4/20 19:45	6.2	122.51	24.04	33.9	花蓮縣政府東方 90.3 公里 (位於臺灣東部海域)
4	2015/4/20 19:59	6	122.51	23.96	29.4	花蓮縣政府東方 90.8 公里 (位於臺灣東部海域)

表 5-2.3：苗栗外海地震序列表。

No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	距大平地站(km)	D/R
1	2015/5/1 20:54	4.4	120.45	24.58	13.2	苗栗縣政府西方 37.4 公里 (位於臺灣西部海域)	73.4	1.05
2	2015/5/8 04:12	4.2	120.47	24.61	12.7	苗栗縣政府西方 36.4 公里 (位於臺灣西部海域)	70.8	0.89
3	2015/5/11 16:38	4.9	120.42	24.59	12.3	苗栗縣政府西方 41.0 公里 (位於臺灣西部海域)	76.2	1.66
4	2015/5/11 16:53	4.4	120.44	24.53	13.7	苗栗縣政府西方 39.2 公里 (位於臺灣西部海域)	75.8	1.01
5	2015/5/15 02:35	4.6	120.46	24.58	11.5	苗栗縣政府西方 36.7 公里 (位於臺灣西部海域)	72.4	1.3

（1）2014/12/11 基隆外海地震（M_L 6.7，Depth 268.6 km）

如圖 5-2.2（A）所示，大平地站在 14 天前，即有氣體異常反應。此起地震位於基隆外海，早已超過測站的敏感反應圈，但由於規模大、深度深，使得反應圈外的大平地站有氡氣異常反應，算是此站近期的特殊例子。不管是由原始資料或是時序分析結果，3.8 天及 14 天的滾動平均線標準差都超過我們定義的異常門檻。根據氣象局所解釋，此地震為菲律賓海板塊向北隱沒至歐亞大陸板塊所造成的隱沒帶深部地震。依據過去觀測資料，此類型地震會造成大範圍有感，但不致形成太大震度，所以損傷也最低（如下圖 5-2.2（C）等震度圖所示）。

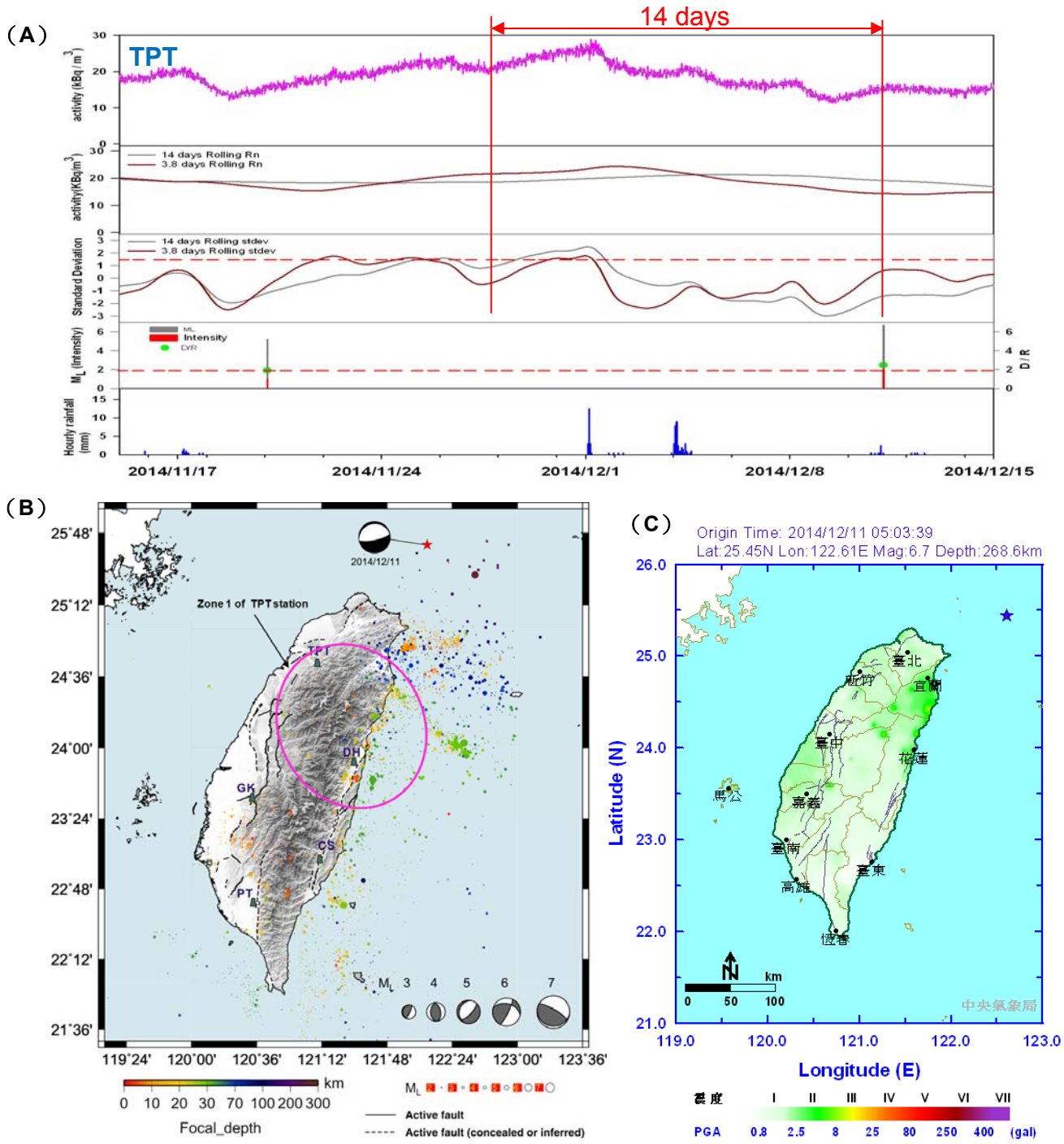


圖 5-2.2：2014/12/11 基隆外海地震與大平地測站觀測情形（A）大平地站（TPT）土壤氣體觀測結果（2014/11/15-2014/12/25）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈代表測站的敏感偵測區間範圍（C）等震度圖。

（2）2015/01/07 花蓮秀林地震（M_L 5.5，Depth 30.4 km）

如圖 5-2.3（A）所示，古坑站在 10 天前，東華站在 6 天前，錦園站在 7 天前即達到氣體異常門檻。其中變化較為顯著的為東華站及錦園站，有明顯的氣體異常變化趨勢。古坑站則是由時序分析結果判斷有氣體前兆異常反應。這起地震同樣位於大平地站的敏感反應圈內，由原始資料可發現氡氣濃度於地震發生 7 天前，呈現明顯的異常變化，但是由時序分析結果觀察，並未達到所定義的異常門檻。這起地震震央落在圖上三個反應區範圍交集處（圖 5-2.3（B）黃色星號）。

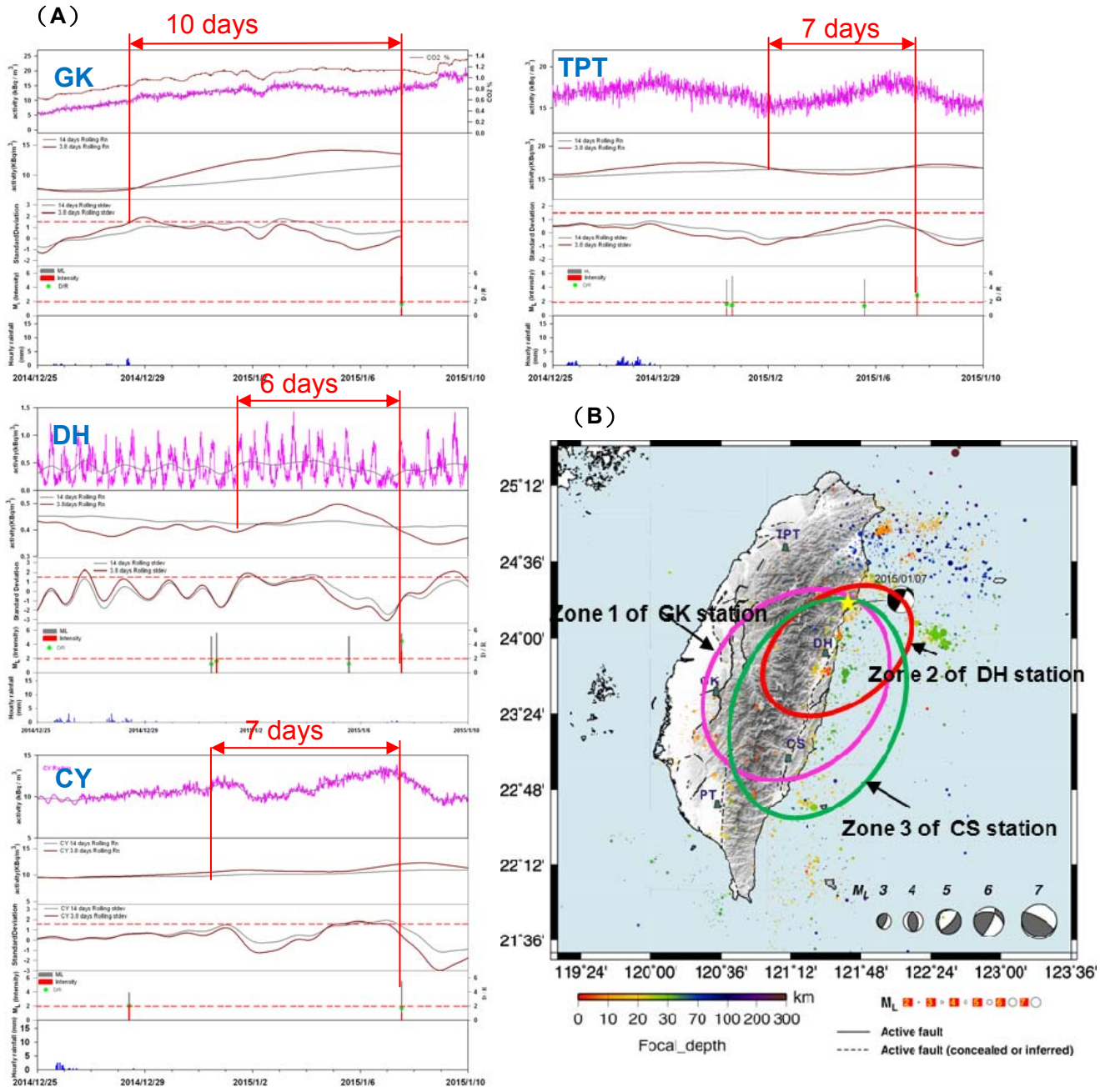


圖 5-2.3：2015/1/7 花蓮秀林地震與各測站觀測情形，（A）古坑站（GK）、東華站（DH）、錦園站（CY）、大平地站（TPT）土壤氣體觀測結果（2014/12/25-2015/1/10）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮秀林地震的震央位置。

（3）2015/03/23 花蓮近海地震（M_L 6.2，Depth 38.4 km）

如圖 5-2.4（A）所示，大平地站在 8 天前，東華站在 12 天前，池上站在 9 天前，即有氣體異常的前兆反應。其中較為清楚表示出氣體異常的為大平地站。東華站及池上站則是由時序分析結果判斷其亦超過異常門檻。由等震度圖看出距離震央最近的花蓮地區震度最大，中部次之，越往北及南震度越小。此地震的震源機制屬於逆衝斷層型式，是菲律賓海板塊向西北方向擠壓所造成。這起地震震央落在圖上三個反應區範圍交集處（圖 5-2.4（B）黃色星號）。

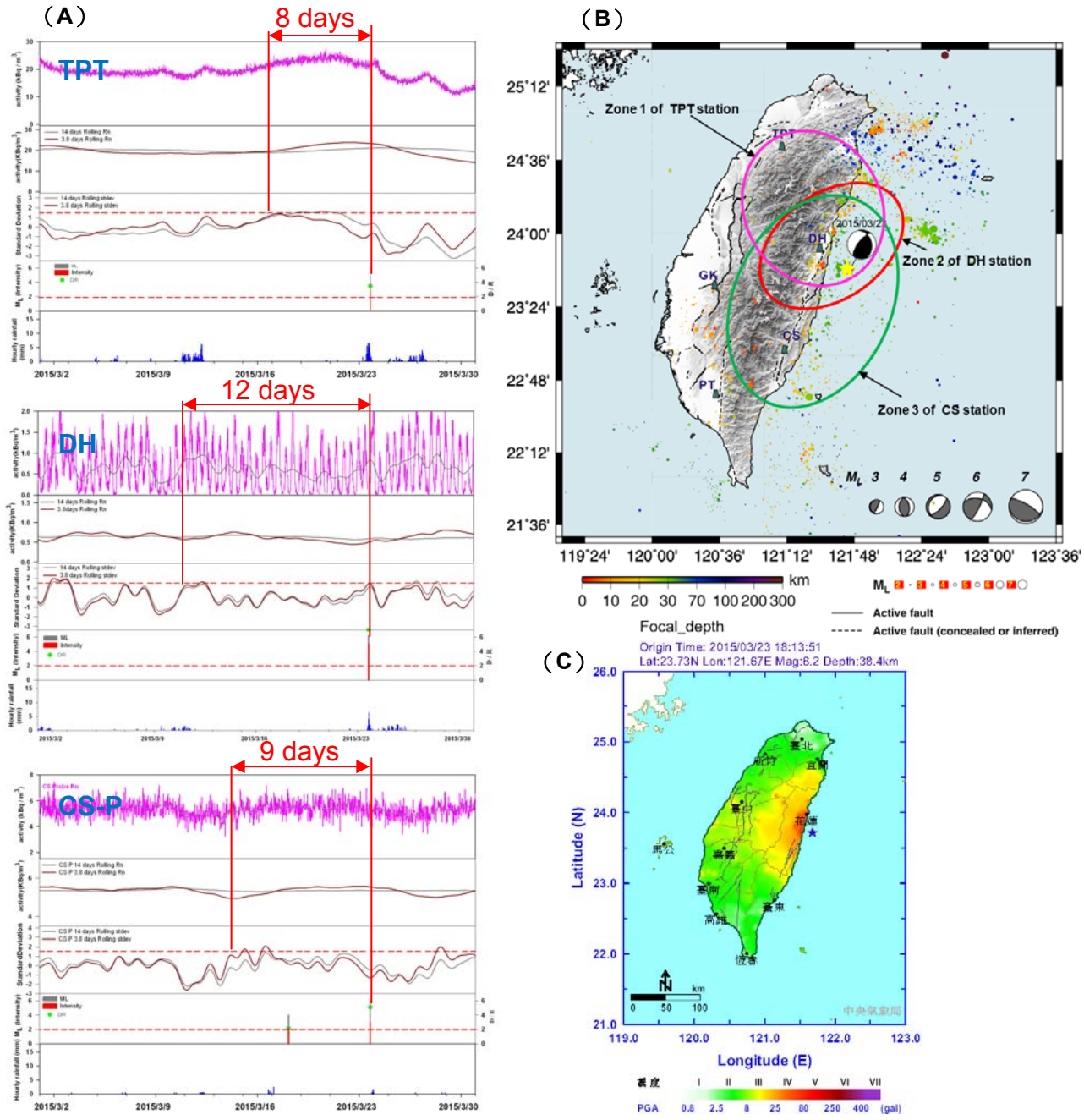


圖 5-2.4：2015/3/23 花蓮外海地震與各測站觀測情形（A）大平地站（TPT）、東華站（DH）、池上（CS-P）土壤氣體觀測結果（2015/3/1-2015/3/31）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮近海地震的震央位置（C）等震度圖。

（4）2015/04/20 花蓮外海地震（M_L 6.4，Depth 30.6 km）

如圖 5-2.5（A）所示，大平地站在 19 天前，古坑站在 13 天前，東華站在 7 天前，池上站在 5 天前，即有氣體異常的前兆反應。此地震震源位置皆不在四個測站的敏感反應圈內，其中反應較為清楚的為大平地站及古坑站，都有明確的氣體異常變化趨勢（包括氡氣及二氧化碳），原本此兩站的敏感反應圈內的二氧化碳變化較不顯著，所以研判可能有不同來源的氣體進入逸氣系統中，造成此兩站二氧化碳反應特別明顯。東華站及池上站則是由時序分析結果判斷有氣體前兆異常反應。根據氣象局研判此地震震源機制為逆衝斷層型式，截至目前為止餘震有七起，如表 5-2.2 所示。其中，在 4 月 20 日晚上於花蓮近海發生規模 5.5 地震，可能為 3 月 23 日規模 6.2 地震之餘震，這起地震就位在四個測站的敏感反應圈內，如圖上黃色星號處所示（圖 5-2.5（B））。

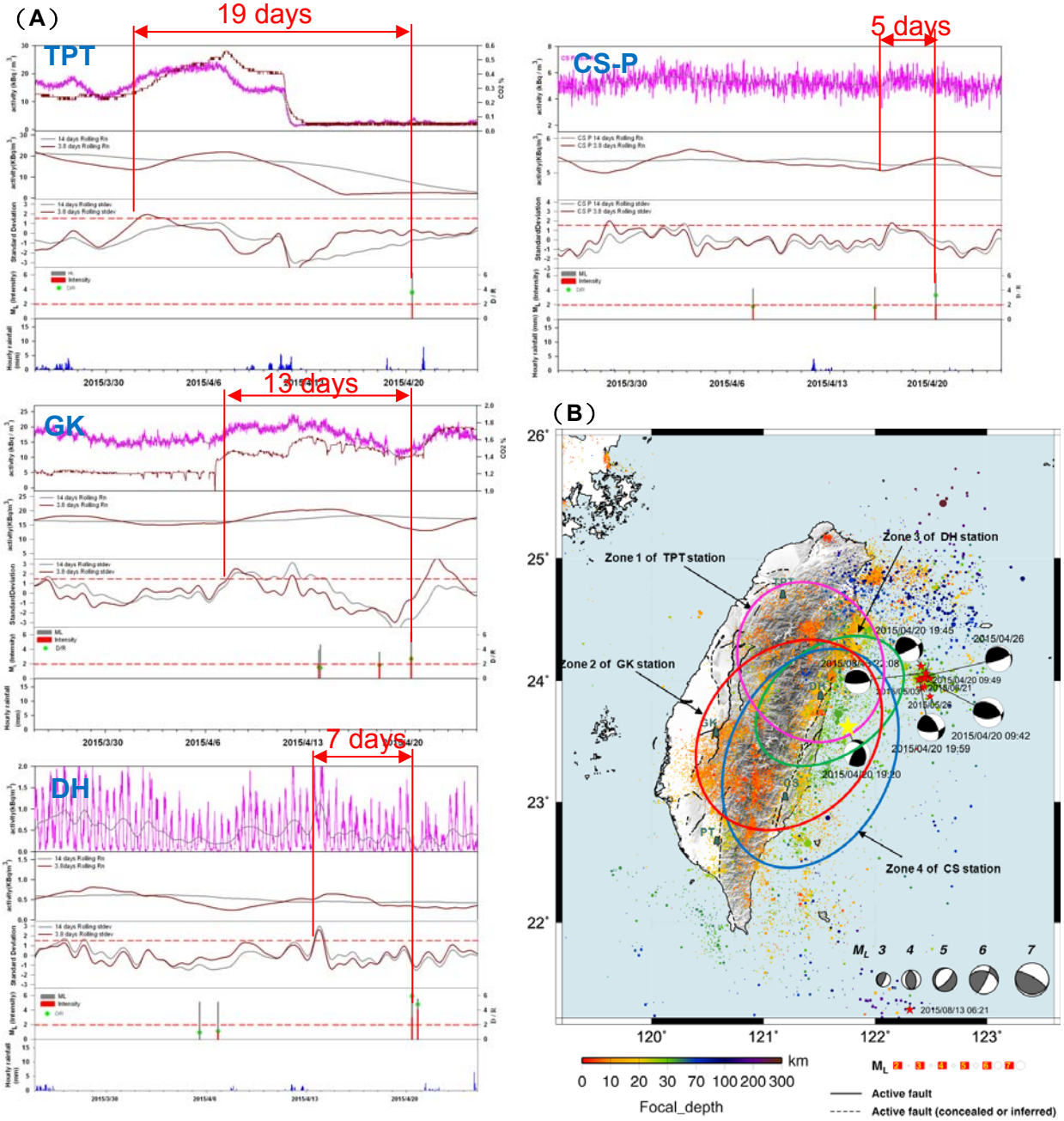


圖 5-2.5：2015/4/20 花蓮外海地震與各測站觀測情形（A）大平地站（TPT）、古坑站（GK）、東華站（DH）、池上站（CS-P）土壤氣體觀測結果（2015/3/25-2015/4/25）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮近海地震的震央位置。

（5）2015/05/11 苗栗西部近海地震（M_L 4.9，Depth 12.3 km）

如圖 5-2.6（A）所示，大平地站在 16 天前，觀察原始數據，發現氡氣及二氧化碳都有明顯的變化趨勢，尤其是二氧化碳的變化較之前在敏感反應圈內的變化更明顯，這表示有不同氣體進入原來的逸氣系統中。除了 5 月 11 日的地震事件之外，氡氣異常升高的期間，於苗栗外海發生數起規模約 4.2~4.6 的地震事件，且於測站的敏感區內並發生其它顯著的地震事件發生，這意味著該測站的氣體異常升高變化可能與這群地震的發生有關。不過，由於在此區發生的地震並不常見，仍需未來進一步的資料累積，以釐清兩者間的關聯性。此外由等震圖可以看出，主要影響在臺灣中部一帶，根據氣象局說法，臺灣海峽裡有尚未調查清楚的斷層，是 1900 年以來該震央半徑 30km 內規模第五大地震，後續餘震的規模應不致太大。截至目前為止，這起地震前後共有五起地震發生，如表 5-2.3 所示。

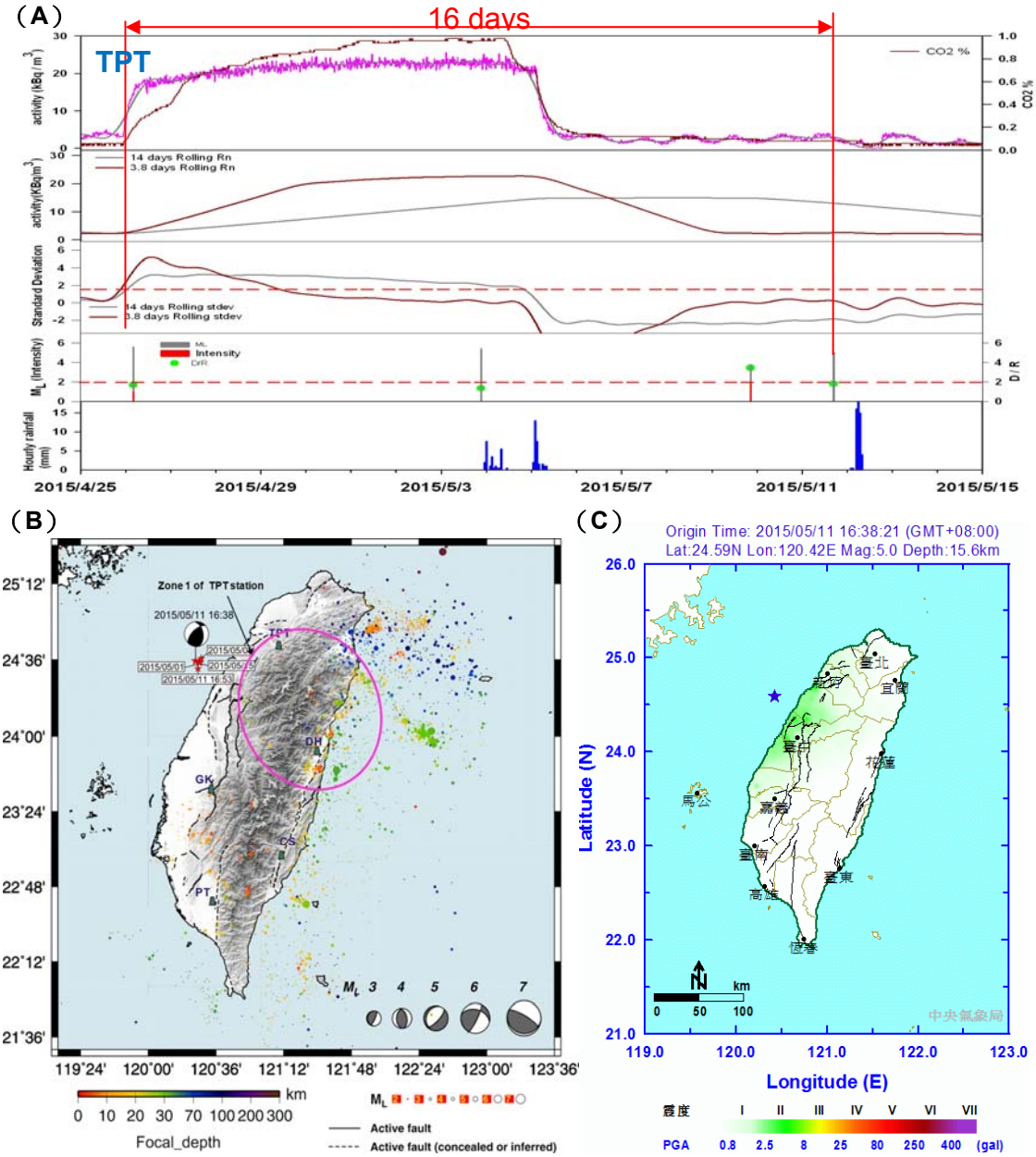


圖 5-2.6：2015/5/11 苗栗西部外海地震與大平地站觀測情形（A）大平地站（TPT）土壤氣體觀測結果（2015/4/25-2015/5/15）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈代表測站的敏感偵測區間範圍（C）等震度圖。

（6）2015/09/01 花蓮壽豐地震（M_L 5.5，Depth 20.3 km）

如圖 5-2.7（A）所示，大平地站在 6 天前，東華站在 7 天前，錦園站在 8 天前，即有氣體異常的前兆反應。其中較為清楚表示出氣體變化的為東華站及錦園站，氡氣自 8 KBq/m^3 上升至 12 KBq/m^3 不等，二氧化碳亦呈現緩慢的上升，表示地底下的氣體濃度正逐漸上升中。東華站對於縱谷地區發生的地震有明顯的前兆反應。由等震度圖看出距離震央最近的花蓮北部地區震度最大。此地震的震源機制屬於逆衝斷層型式，是菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊擠壓所造成。這起地震震央落在圖上三個反應區範圍交集處（圖 5-2.7（B）黃色星號）。

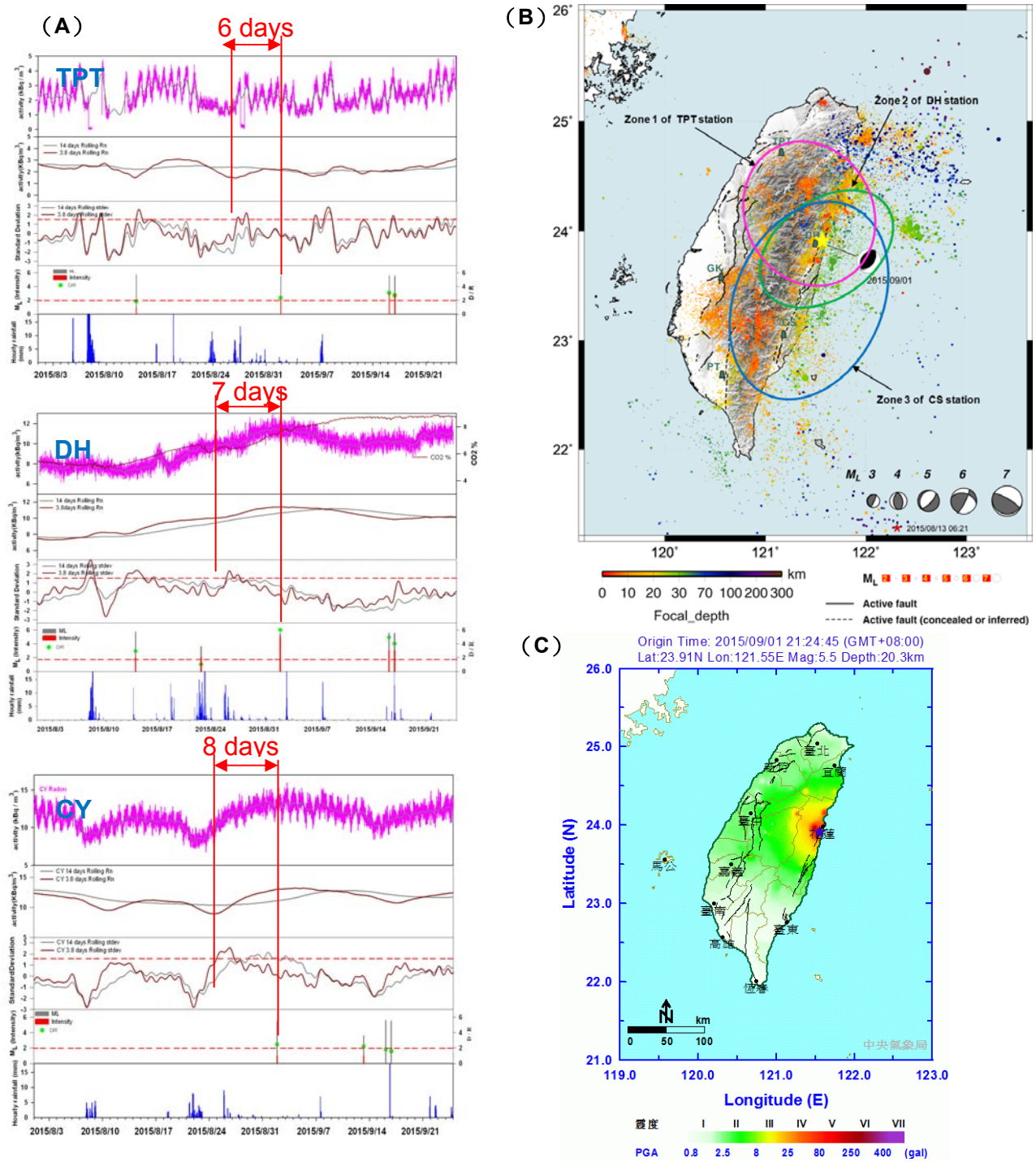


圖 5-2.7：2015/9/1 花蓮壽豐地震與各測站觀測情形（A）大平地站（TPT）、東華站（DH）、錦園（CY）土壤氣體觀測結果（2015/8/1-2015/9/25）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮壽豐地震的震央位置（C）等震度圖。

（7）2015/09/16 花蓮近海地震（M_L 5.6、5.5，Depth 15.3、17.8 km）

如圖 5-2.8（A）所示，大平地站在 12 天前，東華站在 22 天，即有氣體異常的前兆反應。東華站的氣體變化有助於判識縱谷地區或是測站壽豐附近的斷層活動，對於此次宜蘭花蓮交界處近海（和平溪口外約兩公里處）的群震（計算至 9 月底止共 31 起有感地震），由圖 5-2.8（A）觀之，可能經由長時間的氣體濃度逐漸累積、釋放而看出與此次地震的關係。由等震度圖看出距離震央最近的南澳地區震度最大。此地震的震源機制屬於逆衝斷層型式，同樣的也是菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊擠壓所造成。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 5-2.8（B）黃色星號）。

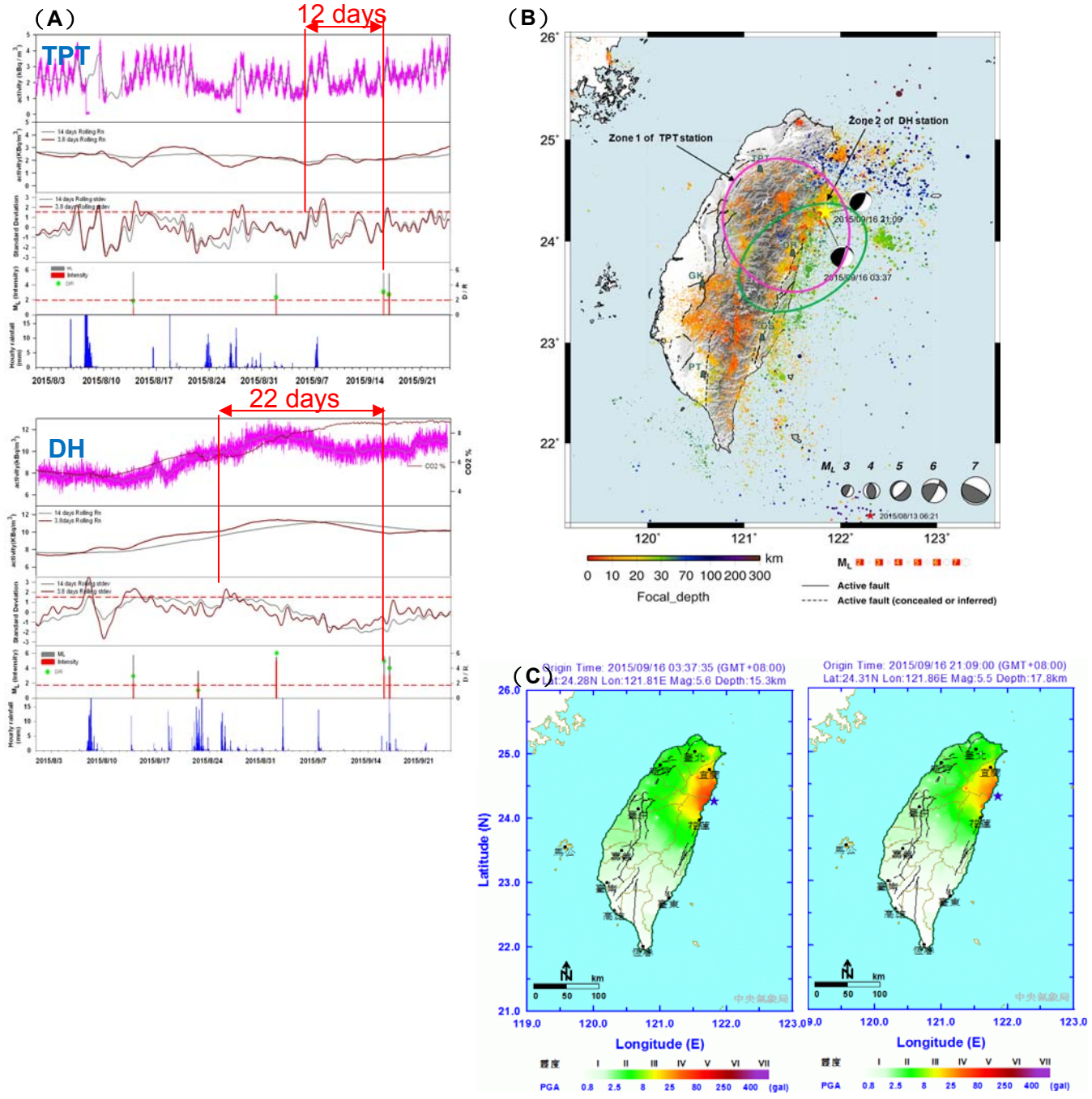


圖 5-2.8：2015/9/16 花蓮近海地震與各測站觀測情形（A）大平地站（TPT）、東華站（DH）土壤氣體觀測結果（2015/8/1-2015/9/25）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮近海地震的震央位置（C）等震度圖。

（8）2015/11/02 臺東外海地震（M_L 5.9，Depth 18.9 km）

如圖 5-2.9（A）所示，屏科大站在 9 天前，錦園站在 6 天前，即有氣體異常的前兆反應。其中較為清楚表示出氣體異常的為錦園站。錦園站則是在 15 天前氡氣即有異常緩慢上升的趨勢，在 6 天前時序結果顯示有異常，這段時期並無較大降雨，可以排除降雨的干擾。屏科大站氡氣變化較不顯著，但從時序分析結果可以看出微小的異常，且這起地震的震央也在屏科大以往所反應的敏感圈內。這起地震的震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 5-2.9（B）黃色星號）。

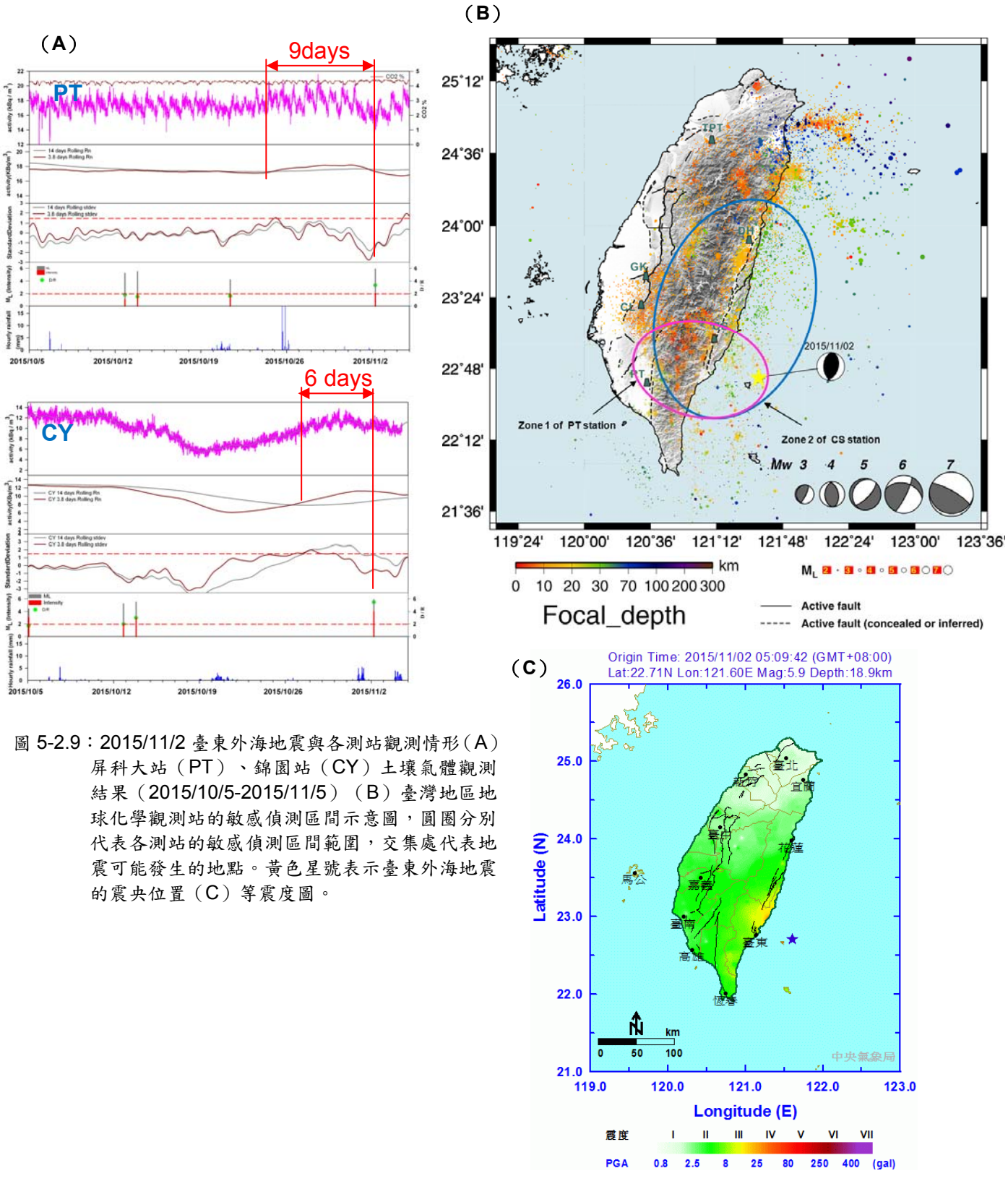


圖 5-2.9：2015/11/2 臺東外海地震與各測站觀測情形（A）屏科大站（PT）、錦園站（CY）土壤氣體觀測結果（2015/10/5-2015/11/5）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示臺東外海地震的震央位置（C）等震度圖。

5-3 地下水壓觀測結果

2015 年度（2014 年 12 月至 2015 年 11 月）地震資料之中，上半年出現數起規模大於 6 的地震，而下半年度雖無規模 6 以上的地震，但出現多起短時間內發生於同一地點的群震；而今年地下水位觀測結果，僅新樂站在 10 月 24 日出現一處下降型異常，且同一時段土壤氣的大坪地測站也出現異常，但後續未出現符合篩選標準之地震；共站的井下應變儀在去年 12 月 11 日、今年 1 月 17 日、2 月 14 日、3 月 23 日、4 月 20 日、5 月 11 日、6 月 21 日等六地震之震前觀測出應力異常變化；雖於 2015 下半年度花東地區出現多起大型地震與群震事件，但可惜無論水位或共站的井下應變儀均未能發現時間點相符的地震與震前異常現象。

至目前為止仍正常運作的觀測站，分別為臺北的樹林站、新竹的新樂站與大坪站、嘉義的太興站；於 2014 年 12 月至 2015 月 11 月期間，各水位觀測站均未能發現顯著與地震相關聯之震前水位異常。以下將就目前運作中的各站狀況分述如下：

（1）臺北樹林站

樹林站自設站以來均未發現與地震相關的異常現象,但去年 12 月中修復後資料有十數天的時間呈現不穩定狀態，其中包含一處驟降的疑似異常，但因位下降後水位平均高度與以往的水位資料吻合，且近期無相關地震，故推斷此為修復後的暫時不穩定現象。在臺北區與地下水位共站的井下應變儀中，去年 12 月 11 日、今年 1 月 7 日、3 月 23 日的三地震震前觀察出應力異常現象，故此以圖 5-3.2 呈現應力異常時段之樹林站水位資料（因去年 12 月中前樹林站尚未修復，故圖中僅出示 3 月 23 日地震前的水位資料）。

（2）新竹新樂站與大坪站

新樂站去年於新竹群震之前出現水位異常，而今年觀察至現在，地下水位的起伏多與降水有關，今年唯一的異常出現於 10 月 24 日，降幅約 12 公分。而大坪站復井至今的水位資料都相當平穩，剔除氣壓變化影響後，水位幾乎維持水平，雨量對該站也幾乎無影響。在新竹區與地下水位共站的井下應變儀中，去年 12 月 11 日、今年 1 月 7 日、3 月 23 日、4 月 20 日、5 月 11 日、6 月 21 日(其中 6 月 21 日之地震未達篩選標準，但作為與應變儀的比對圖故仍將其列上)等六起地震震前觀察出應力異常現象，故此以圖 5-3.3 呈現應力異常時段之新樂站水位資料。

（3）嘉義太興站

嘉義站群去年觀測出四起異常現象，均發生於中興水位站，而中興水位站在去年 5 月份因遭受雷擊而損壞，故今年已無中興水位站資料；目前的太興水位站為 2013 年 12 月啟用的新站，至今兩年多的資料顯示，太興水位趨勢大致呈現季節性的變化，乾溼季的水位差可至 12 到 15 公尺，然而對短期性的變化因素，如降雨、氣壓等，反應均相當遲鈍。以今年上半的水位資料而言，幾乎全程依照水位趨勢緩升或緩降，但除四月底的南部大雨之外，水位都相當穩定，五月開始南部進入雨季，出現大幅度、長週期隨降雨量而變化的水位。在嘉義區與地下水位共站的井下應變儀中，今年 2 月 14 日、3 月 23 日、4 月 20 日三起地震震前觀察出應力異常現象，故此以圖 5-3.4 呈現應力異常時段之太興站水位資料。

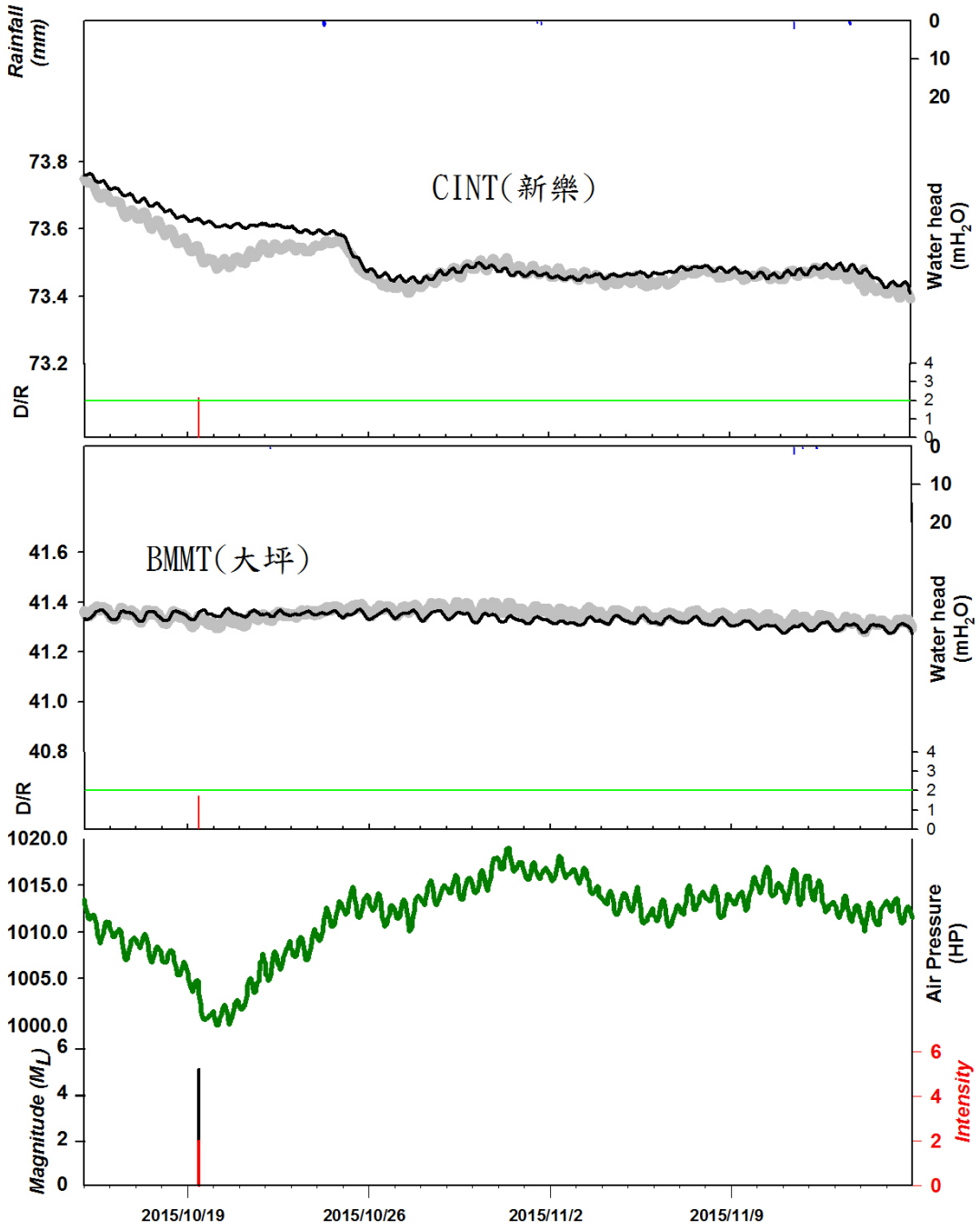


圖 5-3.1：新竹新樂站 10 月水位異常圖示。圖中新樂站水位紅圈處為異常發生點，但隨後之 11 月 2 日台東地震、11 月 3 日宜蘭地震、11 月 5 日花蓮地震、11 月 11 日宜蘭外海地震，均未超過新樂站的篩選標準（D/R≧2 或震度≧2）。

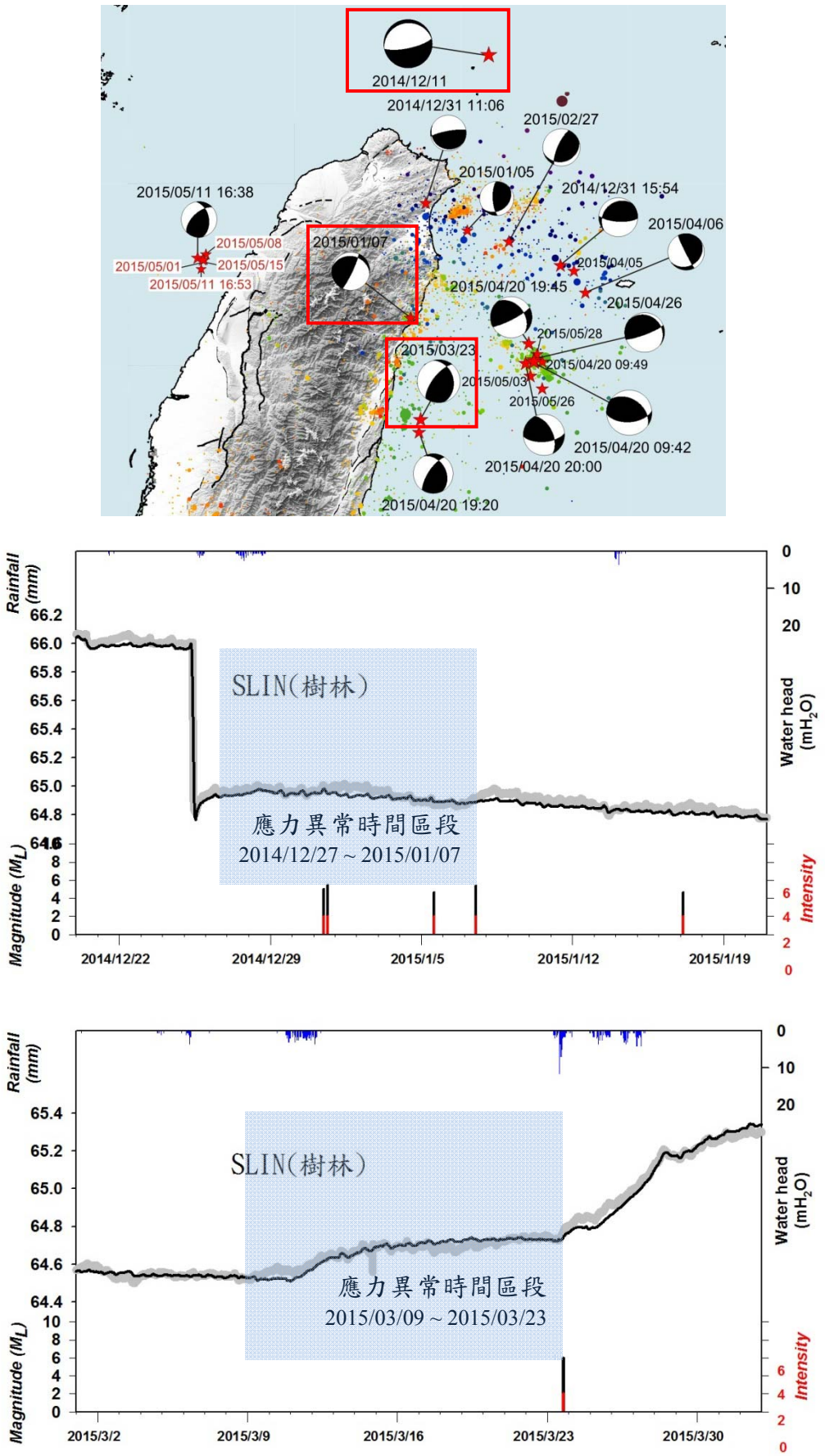


圖 5-3.2：臺北站群井下應變儀應力異常時段之水位比較圖。（上圖為地震資訊，紅框內為有震前應力異常之地震；下圖為樹林站水位，水藍色區段為井下應力異常時段。）2014/12/11 地震無法比對，因當時樹林站尚無資料，三月樹林站水位上升應為連續降雨之影響。灰線為水位原始資料；黑線為移除氣壓效應之水位結果。

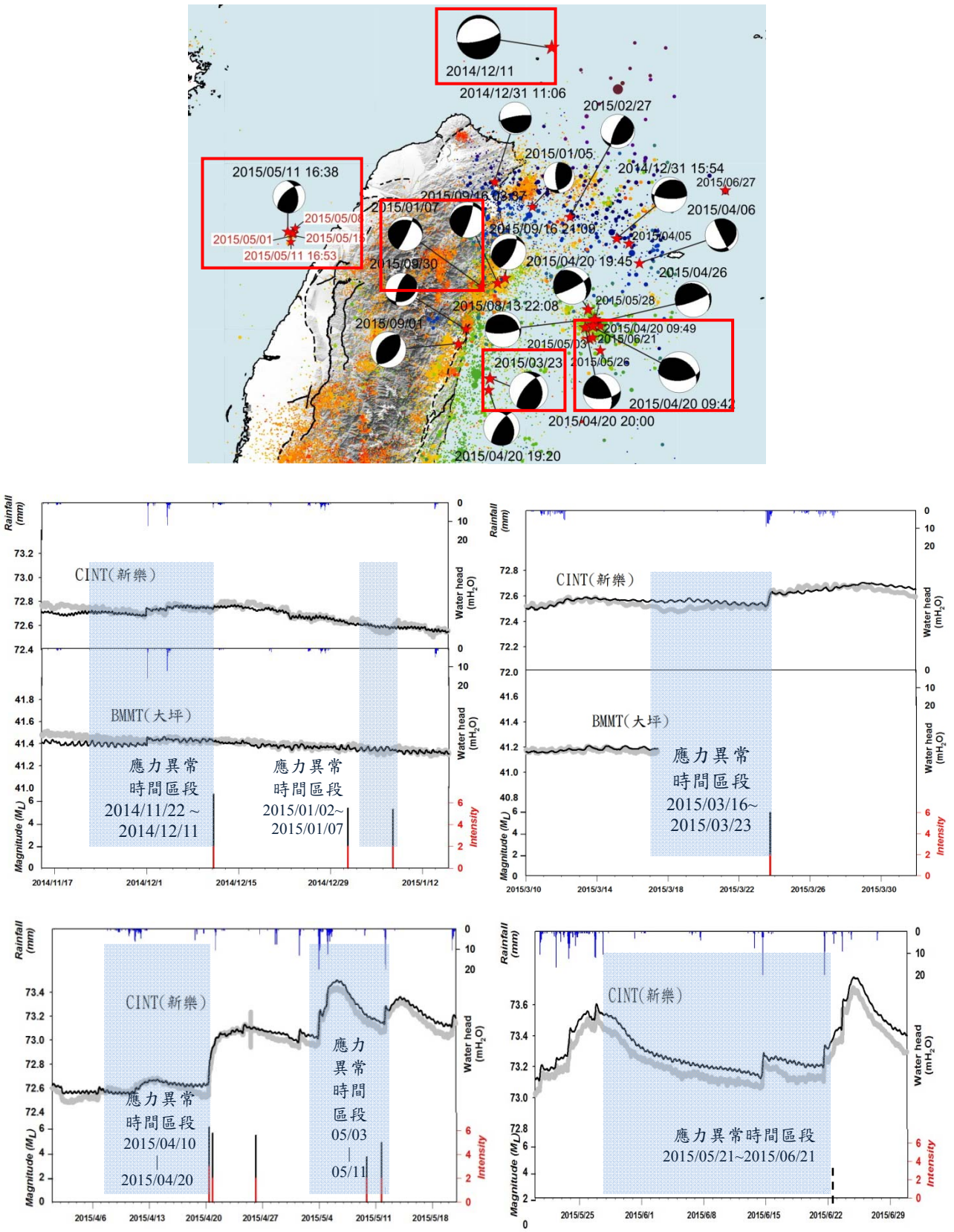


圖 5-3.3：新竹站群井下應變儀應力異常時段之水位比較圖。（最上圖為地震資訊，紅框內為有震前應力異常之地震；下圖依次為新樂站與大坪站去年 11 月到今年 1 月、今年 3 月、今年 4 到 5 月、今年 5 到 6 月之水位，水藍色區段為井下應力異常時段。）此六時段新樂站與大坪站水位平穩，新樂站四、五、六月的水位上升應為連續降雨之影響。灰線為水位原始資料；黑線為移除氣壓效應之水位結果。

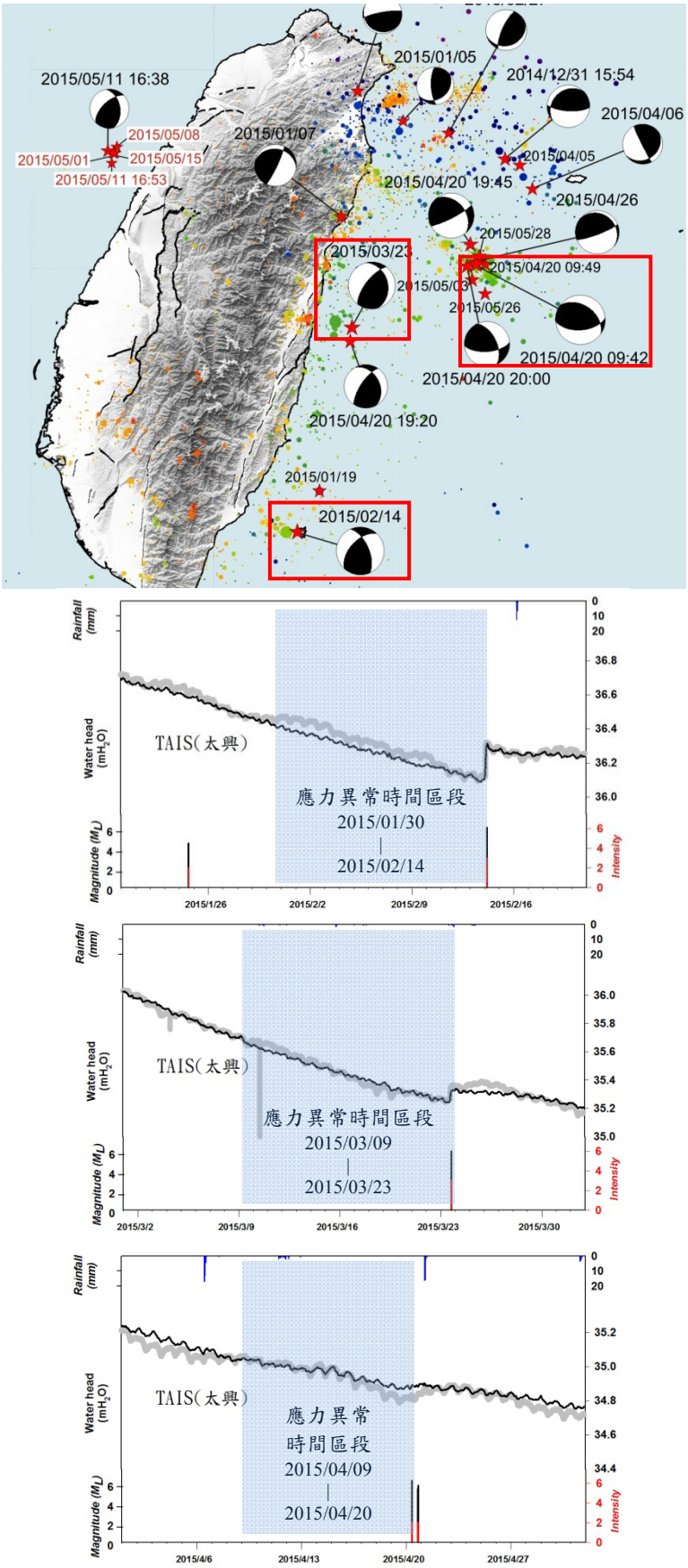


圖 5-3.4：嘉義站群井下應變儀應力異常時段之水位比較圖。(最上圖為地震資訊，紅框內為有震前應力異常之地震；下圖依次為太興站 2 月、3 月、4 月之水位，水藍色區段為井下應力異常時段。)此三時段太興站水位均平穩下降，僅出現同震水位上跳的變化。灰線為水位原始資料；黑線為移除氣壓效應之水位結果。

5-4 地下水水氡觀測結果

社頂站於 2009 年 9 月開始定期採集水樣，分析地下水水氡濃度。圖 5-4.1 為社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。社頂站屬於自由含水層，地下水水氡濃度存在週期變化，與季節性降雨量相關。

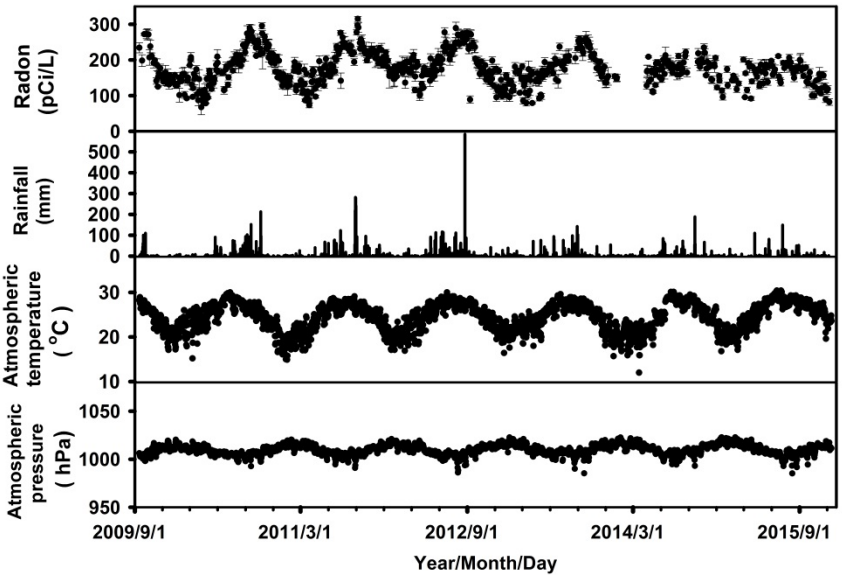


圖 5-4.1：社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。

圖 5-4.2 為社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。本計畫執行期間，社頂站實驗室樣本分析與現地連續監測，同步在 2012/10/25 Mw 5.0 高雄地震發生前，觀測到地下水水氡濃度異常下降之地震前兆。社頂站實驗室分析與連續監測數據比對結果相當吻合。

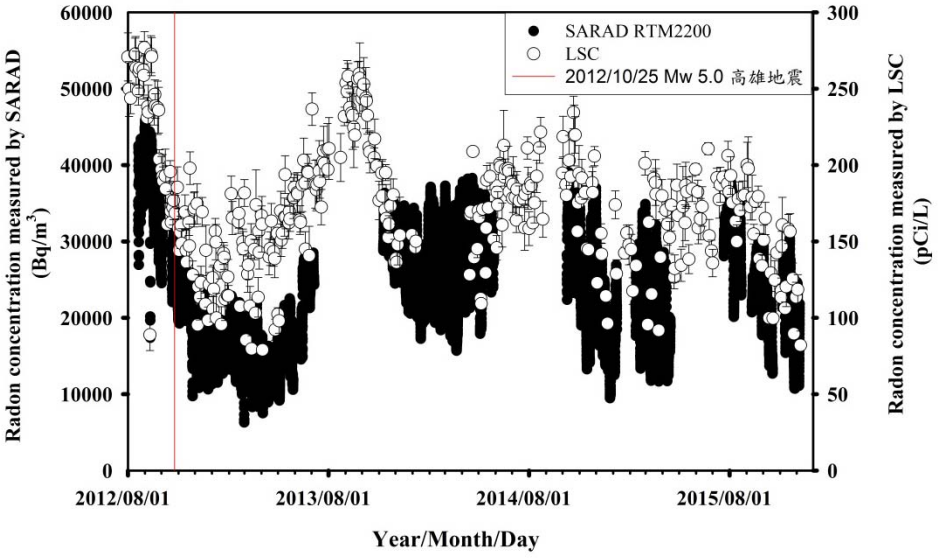


圖 5-4.2：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較圖。

圖 5-4.3 為地下水水氡濃度與地下水位比較圖。社頂站屬於自由含水層，地下水氡濃度隨地下水位有季節性週期變化。枯水期時，地下水水氡濃度背景值較大，須經由實驗室樣本分析輔助判斷有無異常下降之地震前兆發生。

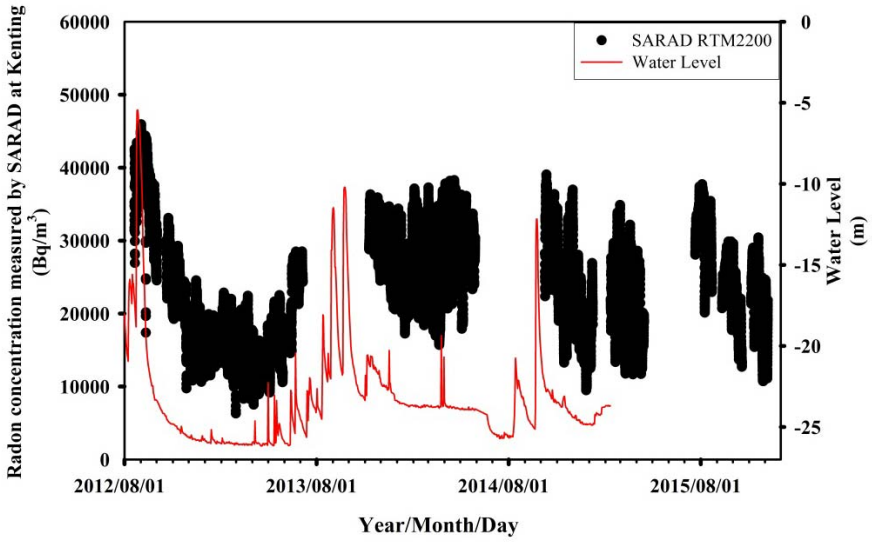


圖 5-4.3：地下水水氡濃度與地下水位比較圖。

圖 5-4.3 為本年度社頂站地下水水氡觀測結果圖。本年度計畫執行期間，社頂站實驗室樣本分析與現地連續監測均無發現異常下降之地震前兆，台灣西南部地區也未發生強震 。

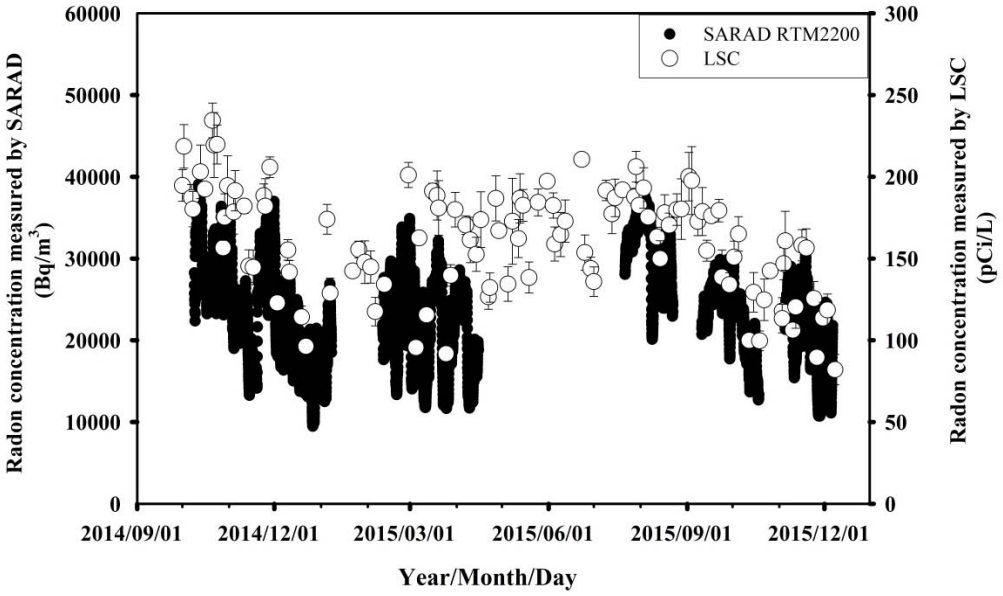


圖 5-4.4：本年度社頂站地下水水氡觀測結果圖。

5-5 沄水溶解氣體觀測站

沄水測站位於嘉義縣中埔鄉沄水村並位於中崙測站西邊 3 公里處，鄰近觸口斷層。測站配置以四極桿質譜儀（QMS）監測地下水溶解氣體；並配合氡氣分析儀（RTM-2100）量測水中溶解氡氣，使用除溼裝置（Drystik）將管線內濕度維持在 20%，使用自動採水裝置採集每日水樣進行水化學分析。測站配置示意圖，如圖 5-5.1 所示。

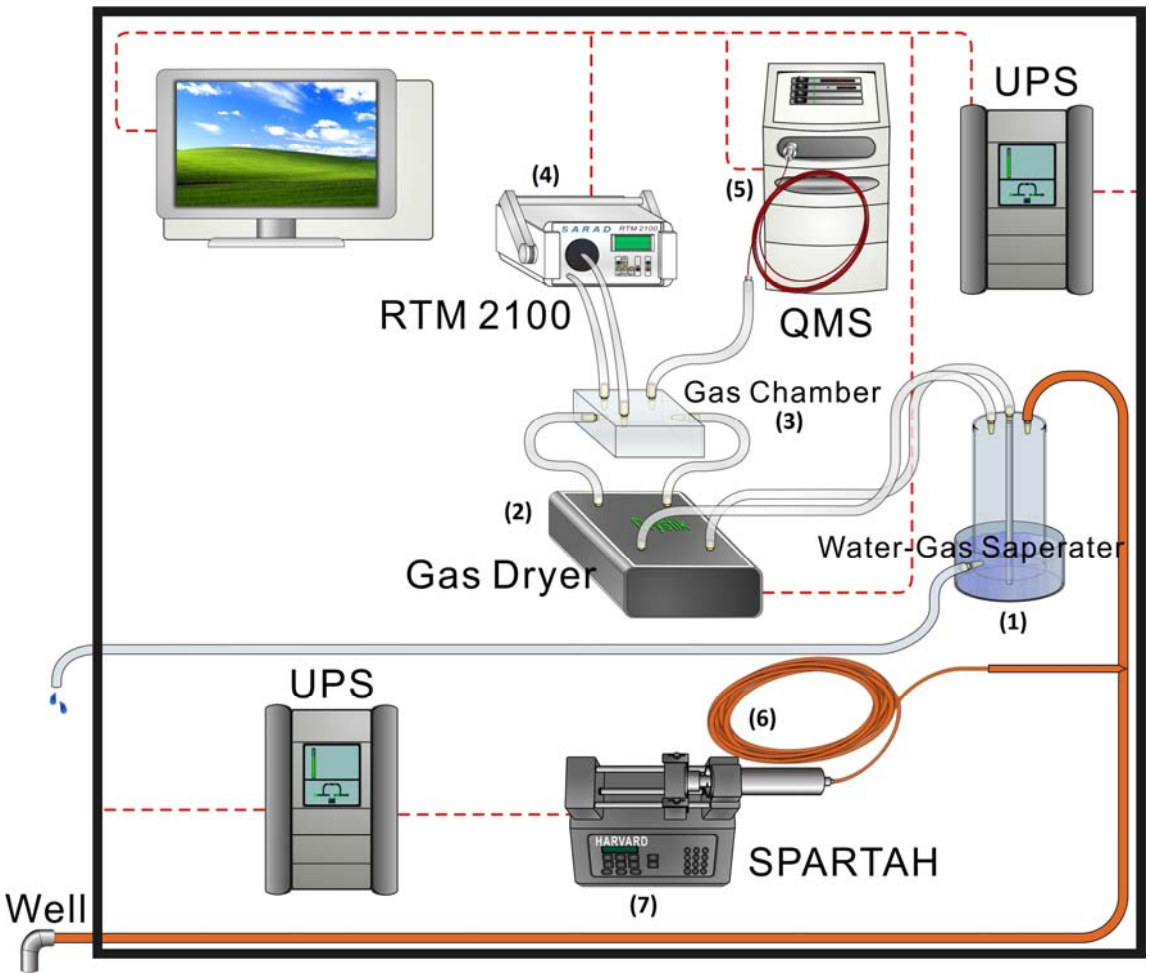


圖 5-5.1：嘉義沄水測站內管線配置簡圖。SPARTAH 為連續採樣之氡同位素樣本採集裝置，其採樣速率為 1 ml / day。其餘井水皆分流至水氣分離裝置進行氣化，並由乾燥器進行除濕後進入氣體分析系統；脫氣水樣依設定時間間距採集水體樣本。

沄水測站能夠同步監測多種氣體個別成分，結合鄰近氣象站資料，紀錄環境因子進行綜合討論。RTM 主要測量 ^{222}Rn 濃度；QMS 測量 CH_4、N_2、O_2、Ar、CO_2 等主要溶解氣體濃度，與 CH_4/CO_2、CH_4/N_2、CO_2/N_2 等比值。環境因子包含氣溫、氣壓、濕度與降雨量變化等。

本研究自 2014 年 4 月 12 日起開始監測，主要溶解氣體結果（圖 5-5.2）顯示沄水測站以 CH_4 為主（>92%），其次為 N_2（2~6%）、O_2（1~1.8%）、CO_2（0.1~0.2%），CH_4 與 N_2、O_2、Ar 幾乎呈現一至反向的相關性（R^2=0.9998）。溶解氣體及氡氣濃度的變化大致上相當穩定，適合進行長期監測。與符合篩選的地震事件相關性不高，12 個篩選後的地震事件只有 1 起與溶解氣體的變化有顯著相關，其中，溶解氣體 2014 年 9 月 18 日開始觀測到顯著的異常變化，隨後在 3 天和 7 天後分別於東部地區發生規模 5.0 和 5.3 的地震事件，可能為其相對應的前兆變化。

然而，本年度觀測期間，大部分的變化都與測站內儀器故障、管線堵塞或電力供應不穩

等問題有關，使得監測資料常發生中斷，例如 2014 年 12 月 29 日至 2015 年 2 月 16 日期間的資料缺失，為測站外的管線堵塞所致，故將資料剔除；2 月 14 日後，主要溶解氣體組成回到原背景值，但 CH_4 濃度比原先平均值高出約 2%，隨後於 2 月 27 日至 3 月 1 日間測站發生數次跳電，導致 QMS 受損故障並送修，使得 2 月 25 日至 5 月 4 日間超過 2 個月無溶解氣體資料。目前正持續改善觀測品質中。

本年度溶解氣體，因多起管線內有機物淤積與儀器故障、電源供應不穩等問題，資料相當不連續，無法提供良好的時序分析。

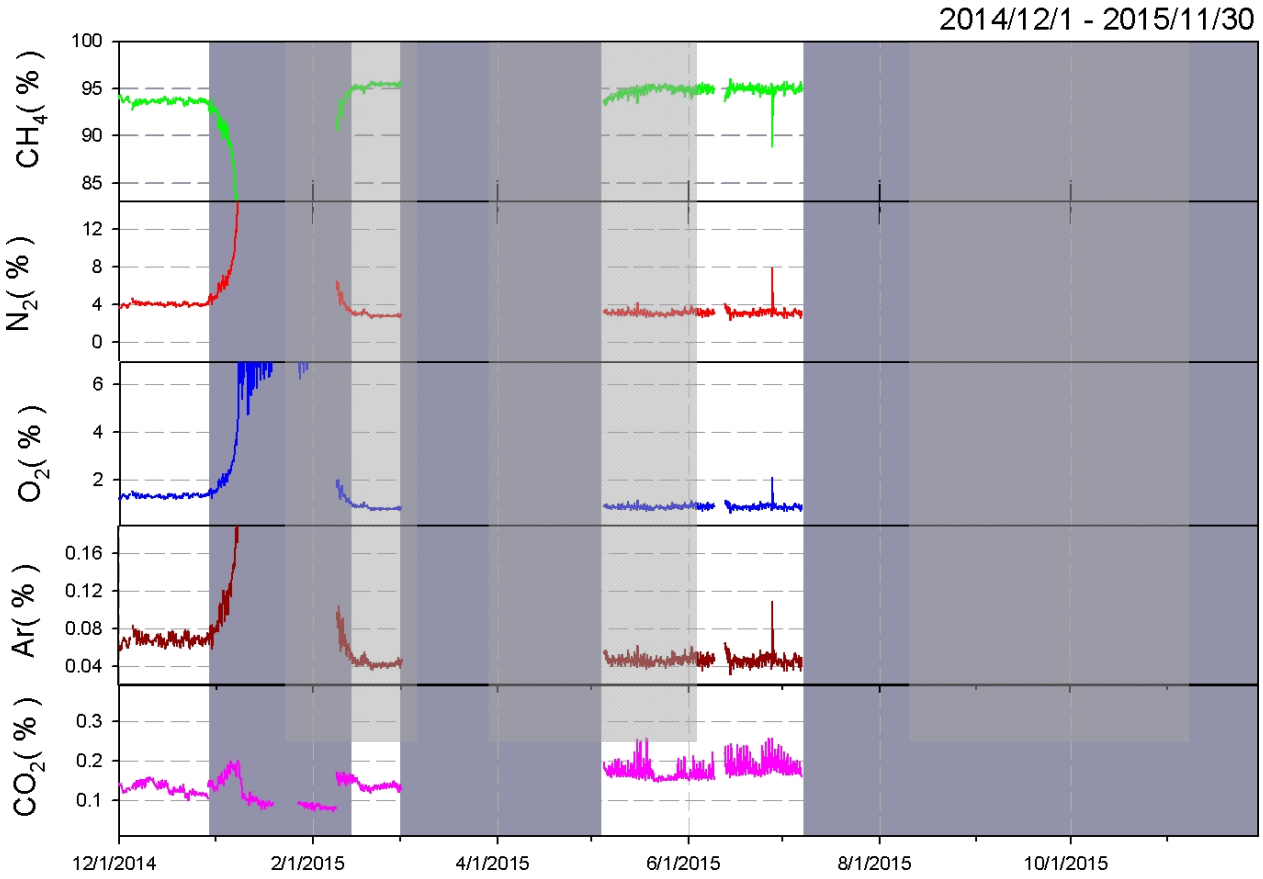


圖 5-5.2：沄水測站主要溶解氣體濃度變化，2014 年 12 月 1 日至 2015 年 11 月 30 日。灰色部分為儀器故障。

氡氣時序資料顯示其濃度介於 900~1200 Bq/m^3 （圖 5-5.3），其變化可能有些微的大氣因子影響，長時間尺度下 Rn-222（Radon）及其放射性同位素 Rn-220（Thoron），與大氣氣溫的變化趨勢相似；此外，與雨量資料進行比對，則顯示沄水測站的溶解氣體變化受到當地降雨的影響並不顯著。

氡氣分析儀 RTM-2100 因內建電池，可獨立維持運作 3 天以上，因此較不受測站跳電影響，但 Drystik 除濕器受到測站長時間停電影響而停止運作時，濕度上升則會造成氡氣濃度下降，RTM 的溼度紀錄中可發現測站有數次長時間停電的紀錄。另外，2014 年 12 月 29 至 2015 年 2 月 16 日間的異常變化，可能因測站管線堵塞造成。2015 年 4 月 10 日至 4 月 28 日間的異常變化，根據 RTM 原始資料紀錄顯示，應為儀器故障所致。2015 年 8 月 20 日的短時間濃度的升高變化，可能為 Drystik 除濕器受連續跳電影響而停止運作，導至濕度快速上升所致。

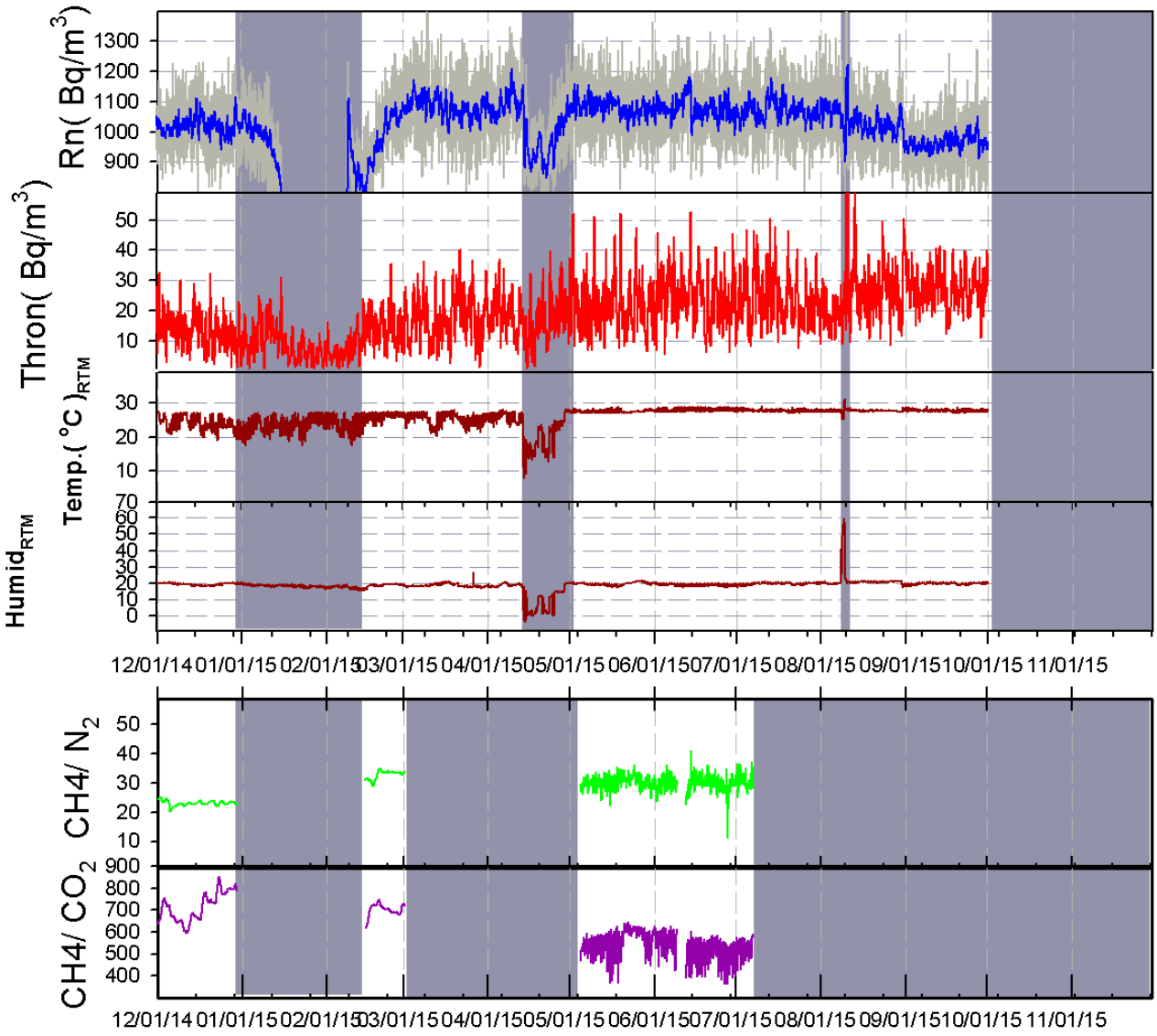


圖 5-5.3：沄水測站氡氣濃度變化圖，2014 年 12 月 1 日至 2015 年 11 月 30 日間，氡氣資料中藍線為 12 小時之移動平均，灰線為原始資料，灰色欄位為儀器故障時段。

第六章、整合觀測資料分析

整合觀測資料分析之目的在於綜合本計畫所用的各種觀測資料，依各種資料的時空分布及其物理特性，找出不同方法獨立觀測的相似性或相異性，可以提高觀測異常與地震關聯性的可信度，或找出異常變化與地震斷層活動的可能物理模式。在這階段，我們依下列的步驟，一面進行不同資料間的比對，一面對所使用比對資料的特性做修正，試圖使各種資料的敏感度與可靠度較相近，便於資料的整合解釋。

a. 建立資料綜合解釋的方法，例如找出共同的特徵頻率、將 GPS 資料轉換成地表應變的觀測、異常資料的時間領域或頻率領域的比對。
b. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料及井下應變儀觀測資料，分析應變異常事件。
c. 彙整地球化學觀測站及地下水資料加以比較，利用時間序列比對，分析各觀測資料異常之時間的相關性。

本計畫在現階段所使用的觀測方法：全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS）、PS-InSAR 技術、井下應變儀以及各種地球化學與地下水的觀測，除了 PS-InSAR 是新增加的方法，尚在蒐集資料與建立資料處理模式外，其餘觀測是承續上一期四年計畫，已經有固定的觀測模式以及異常現象的評斷標準，以及使用各自的方法來尋找與地震的關聯性，每種觀測在現階段都還無法單獨建立有效的異常與地震發生的模式，所以在這一期我們會努力的蒐集多種觀測的異常變化來尋求有效的模式。

首先，我們先回顧一下地震的一些特性，地震的發生最簡單的說法就是地殼中的斷層使巨大的累積能量在瞬間釋放出來，產生地殼的震動。所以早期的地震研究大多以地震儀的記錄為研究的基本資料，從中萃取地震發生的時間、地點、破裂形態與釋放能量的大小，來了解地震本身的性質。過去也有很多努力在研究地震發生的週期性、地殼的震波速度變化發生頻率變化等等，試圖推測地殼應變的累積或岩石的彈性狀況是否有所變化，以其能掌握所謂的”地震前兆”，來推測是否可能在預期的未來會發生較大的災害性地震。

在廿世紀有許多觀測方法的異常在統計上顯示和附近的地震有所關聯，也建立了一些物理或數學模式，近半世紀間也有兩三次成功的預測了地震，但這些方法並無法有效的複製到其它的地震，對於大多數上千百的災害地震仍無法有效的預測。一般而言，大家所認同的地震前兆需要能掌握下一個大地震的規模、時間與地點，不精確的預測反而會帶來更多的經濟損失與人民的恐慌。現階段全球科學家對地震前兆仍無法掌握的時機，對預測這些物理特性的精度要求仍然比較寬鬆，但類似"臺灣地區在今年之內會發生規模六以上的地震”的預測是無法被接受的，所以我們要先根據地震的特性與不同觀測的物理特性來對這些精度要求做一些規劃。

一個地震的發生會釋放大量的能量，這些能量是來自板塊擠壓，經數十年、數百年或數千年累積在地殼中，當應力超過地殼材質所能負荷時，會瞬間破裂而釋放出來，因板塊擠壓的速度是相當穩定的，所以以地震週期來預測地震是最早被使用的，但因地殼本身的複雜性，應力的累積與周遭的相對應力也有關係，以週期來預測還是有相當的不穩定性。因此，科學家考慮物質破裂過程的特性，岩石在一般應力擠壓所產生的應變通常會符合彈性變形的範疇，但在破裂前通常會歷經一段塑性變形的歷程，在這過程中，地殼的變形速度可能會與彈性變形有所差異，而岩層中的孔隙也可能會封閉再因破裂而展開，因此所有的變形觀測會看到位移速度或應變的異常，地下水的觀測也會看到突然的水位上升或下降，而觀測岩石中釋放出來的化學元素或氣體的觀測，也會在破裂前會有異常的濃度變化。因此在 1970 年代以後，大地測量的觀測網，如 DEM、精密水準測量、GPS 和地表應變儀等測量地殼位移、上升或下降和基線長度變化的方法普遍被佈設在斷層周遭，而定期量測自流水中特定化學元素

濃度或地表土壤或自流水中釋放出來的氣體中特定元素的濃度,也成為地震前兆的重要方法。

我們要先將關聯的地震限制在會產生災害的地震，根據中央氣象局統計，臺灣每年會有 1~2 個規模六以上的地震。自 1950 年至今，臺灣地區共計有 50 個災害性地震，其規模分佈在 5.3~7.8 之間，所以在本計畫中，只會將各種觀測的異常關聯到規模 5.0 以上的地震。再來考慮地震前兆發生的時間與關聯地震的時間差，發生的地點與相關聯地震間的距離，這可能會因為不同觀測方法而有不同。對於直接量測位移的方法如 GPS、PS-InSAR 或精密水準測量，因為在地震之前，斷層區域是被鎖住的，所以在該地震的影響範圍內的相對位移量是相當的小，所以必須將位移量相對於較遠的地震區外的穩定地點，而且其位移量是經數十年或數百年的累積，所以每年的變形量通常不大，只能做較長期的觀測，所以在本計畫中，此類觀測都是以數年的觀測資料一起評估。但若以觀測地殼應變的方法如地表應變儀、井下應變儀或 GPS 應變的觀測，則觀測的範圍通常是集中在地震斷層的鎖定區域，快速的應變累積最後會在同震變形釋放出來，若以規模 6.0 的地震，其斷層破裂長度約略在 8~16 km 左右，而規模 6.5 的地震斷層則在 30~40 km 的長度，若以井下應變儀的高敏感度，可能可以感應到兩三倍以上距離的地震之應變。而對於地下水位變化或經由地下水收集的氣體觀測，因為液體的流動性與地下水層分布的廣度，可能分佈範圍較廣，對地震規模 6.0 的影響範圍可能在 380 km 左右，這也就是爲什麼氣體觀測站與地下水觀測站總是關聯到較多的地震。

可以關聯到較大範圍的觀測異常代表其敏感性較高，但也表示其對所預測地震的可能位置的不確定性較大，但若有兩個以上不同地點的觀測站同時觀測到異常，則其影響範圍的重疊區域也可提高預測的地震位置之精度。多種獨立觀測若同時發生，並指向同一地區，也可以增加前兆的可信度。

6-1 異常記錄與大地震活動之關係

累計 2009 年 1 月至 2015 年 11 月臺灣地區（根據中央氣象局地震活動彙整資料庫）共有 210 個規模大於 5 之地震事件，如表 6-1.1 詳列，其震源機制海灘球標示於圖 6-1.1~圖 6-1.4 的相關位置中。在這期間各種觀測的異常記錄標示在相關的地震編號上，如圖 6-1.5 中，水平軸的數字代表事件 ID（表 6-1.1），粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測，垂直黃線則代表同一地震事件在三個或以上的觀測網觀測到異常。本次報告為 2014 年 12 月至 2015 年 11 月間的異常觀測，這期間共有 36 個規模大於 5.0 的地震（ID=175~210），有 4 個位於陸地上。其中發生於 2015/01/07 12:48 芮氏規模 5.5 發生在花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里（位於花蓮縣秀林鄉）（ID=179）、2015/03/23 18:13 芮氏規模 6.2 發生在花蓮縣政府南方 29.8 公里（位於臺灣東部海域）（ID=183）及 2015/04/20 09:42 芮氏規模 6.4 發生在花蓮縣政府東方 76.2 公里（位於臺灣東部海域）（ID=186）（如表 6-1.1），以上三個地震事件同時在三個觀測網觀測到異常，但並沒有在同一個測區同時有三種以上的觀測異常。

表 6-1.1：2009 年 1 月至 2015 年 11 月規模大於五之地震事件列表。

ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
1	2009/01/02 09:39	119.91	21.65	65.1	5.1	屏東恆春地震站西偏南 94.0 公里
2	2009/01/04 06:04	121.73	24.15	7.5	5.1	花蓮秀林地震站東偏北方 16.2 公里
3	2009/01/23 20:38	121.19	21.05	51.7	5.3	台東蘭嶼地震站南偏西方 116.2 公里
4	2009/04/17 20:37	121.68	23.92	43.4	5.3	花蓮市地震站東南方 9.5 公里
5	2009/05/27 06:27	119.56	21.74	55.1	5.7	高雄市地震站西南方 120.8 公里
6	2009/06/20 11:44	122.44	24.04	48.6	5.4	宜蘭南澳地震站東偏南方 82.2 公里
7	2009/06/25 05:09	122.29	24.03	21.9	5.0	花蓮市地震站東方 68.6 公里
8	2009/06/28 17:34	121.75	24.18	12.9	5.3	花蓮秀林地震站東北方 18.8 公里
9	2009/07/14 02:05	122.22	24.02	18.1	6.0	花蓮市地震站東方 61.9 公里
10	2009/07/14 04:28	122.19	24.08	16.9	5.2	宜蘭南澳地震站東南方 58.5 公里
11	2009/07/16 18:48	122.29	24.02	21.4	5.4	花蓮市地震站東方 69.1 公里
12	2009/07/17 02:42	122.29	24.00	20.8	5.1	花蓮市地震站東方 69.0 公里
13	2009/07/26 09:00	120.96	23.69	14.3	5.4	南投名間地震站東南方 34.3 公里
14	2009/07/26 14:10	121.32	23.43	12.5	5.4	花蓮玉里地震站北方 8.8 公里
15	2009/07/30 00:53	120.48	22.05	41.3	5.8	屏東恆春地震站西方 27.8 公里
16	2009/08/17 08:05	123.88	23.37	43.3	6.8	花蓮市地震站東偏南方 240.4 公里
17	2009/08/17 18:10	123.67	23.32	31.6	5.9	花蓮市地震站東偏南方 221.6 公里
18	2009/08/17 18:15	123.56	23.36	55.0	5.4	花蓮市地震站東偏南方 210.4 公里
19	2009/08/18 21:17	123.63	23.45	49.2	5.3	花蓮市地震站東偏南方 213.9 公里
20	2009/08/19 07:47	123.56	23.43	59.6	5.2	花蓮市地震站東偏南方 207.7 公里
21	2009/08/20 22:18	123.57	23.53	61.4	5.5	花蓮市地震站東偏南方 205.2 公里
22	2009/08/22 04:57	120.46	22.36	24.3	5.1	屏東枋寮地震站西方 16.9 公里
23	2009/09/12 20:05	122.49	23.97	25.1	5.1	花蓮市地震站東方 89.3 公里
24	2009/10/04 01:36	121.58	23.65	29.2	6.1	花蓮西林地震站東南方 23.0 公里
25	2009/10/11 14:42	120.63	21.93	42.0	5.0	屏東恆春地震站西偏南 14.8 公里
26	2009/10/23 07:05	121.49	22.69	104.0	5.1	台東市地震站東偏南方 35.1 公里

ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
27	2009/11/05 17:32	120.72	23.79	24.1	6.2	南投名間地震站南偏東方 10.1 公里
28	2009/11/05 19:34	120.76	23.77	24.0	5.7	南投名間地震站南偏東方 13.6 公里
29	2009/11/15 22:47	122.17	24.95	125.4	5.5	基隆市地震站東偏南方 46.3 公里
30	2009/11/22 01:27	121.76	24.22	66.9	5.0	花蓮秀林地震站東北方 22.4 公里
31	**2009/12/19 21:02**	**121.66**	**23.79**	**43.8**	**6.9**	**花蓮市地震站南偏東方 21.4 公里**
32	2010/01/05 03:27	121.83	24.18	46.1	5.5	花蓮秀林地震站東偏北方 25.8 公里
33	2010/01/19 14:09	121.68	23.82	41.0	5.6	花蓮市地震站南偏東方 18.2 公里
34	2010/02/07 14:10	123.77	23.33	88.0	6.6	花蓮市地震站東偏南方 230.9 公里
35	2010/02/09 13:02	121.21	20.94	65.8	5.4	台東蘭嶼地震站南偏西方 127.1 公里
36	2010/02/12 10:42	121.08	23.90	18.4	5.2	花蓮西林地震站西偏北方 38.3 公里
37	2010/02/22 13:21	122.97	24.05	35.6	5.6	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 128.5 公里
38	2010/02/26 09:07	122.87	23.69	52.1	5.8	花蓮市地震站東偏南方 131.9 公里
39	2010/02/26 13:38	122.84	23.72	42.9	5.0	花蓮市地震站東偏南方 128.1 公里
40	**2010/03/04 08:18**	**120.71**	**22.97**	**22.6**	**6.4**	**高雄甲仙地震站東南方 17.1 公里**
41	2010/03/04 15:07	122.06	22.80	35.4	5.1	台東成功地震站東偏南方 78.0 公里
42	2010/03/04 16:16	120.63	22.96	19.0	5.7	高雄甲仙地震站南偏東方 14.3 公里
43	2010/03/10 14:27	123.23	23.36	55.5	5.1	花蓮市地震站東偏南方 178.3 公里
44	2010/03/27 07:07	121.68	24.10	58.9	5.2	花蓮秀林地震站東偏北方 8.0 公里
45	2010/04/09 19:49	122.00	24.87	103.8	5.1	宜蘭市地震站東偏北方 27.6 公里
46	2010/04/11 12:57	122.10	23.27	30.3	5.4	台東成功地震站東偏北方 76.7 公里
47	2010/04/23 09:49	122.33	24.60	85.0	5.0	宜蘭蘇澳地震站東方 47.6 公里
48	2010/04/26 10:59	123.74	22.15	73.4	6.8	台東蘭嶼地震站東方 225.9 公里
49	2010/05/03 21:38	123.65	23.32	86.4	5.1	花蓮市地震站東偏南方 220.1 公里
50	2010/06/15 08:31	121.62	24.04	16.7	5.5	花蓮秀林地震站南偏東方 4.5 公里
51	2010/06/27 02:05	121.56	24.65	68.0	5.1	宜蘭牛門地震站西北方 1.9 公里
52	2010/07/03 03:11	120.68	22.86	17.8	5.1	高雄旗山地震站東方 26.0 公里
53	2010/07/09 03:43	122.04	24.35	19.3	5.3	宜蘭南澳地震站東偏南方 30.4 公里
54	2010/07/09 08:41	122.61	24.70	113.6	5.8	宜蘭蘇澳地震站東方 76.9 公里
55	2010/07/17 17:04	121.74	23.45	40.0	5.2	花蓮玉里地震站東偏北方 45.6 公里
56	2010/07/18 21:03	122.44	24.00	24.3	5.2	花蓮市地震站東方 84.5 公里
57	2010/07/25 11:52	120.69	22.84	19.6	5.7	高雄旗山地震站東方 27.0 公里
58	2010/08/22 00:38	121.59	23.58	40.2	5.3	花蓮西林地震站南偏東方 29.3 公里
59	2010/08/30 16:45	122.21	24.95	15.0	5.2	基隆市地震站東偏南方 48.8 公里
60	2010/09/04 03:06	122.68	24.13	43.7	5.0	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 98.1 公里
61	2010/09/20 11:17	121.62	23.68	36.2	5.1	花蓮西林地震站東南方 23.2 公里
62	2010/09/29 01:33	121.70	24.13	9.0	5.0	花蓮秀林地震站東偏北方 10.6 公里
63	2010/10/03 03:23	121.80	24.36	19.4	5.1	宜蘭南澳地震站東南方 9.0 公里
64	2010/10/04 21:28	125.51	23.97	35.0	6.6	宜蘭蘇澳地震站東方 377.7 公里
65	2010/11/08 21:01	120.41	23.21	17.5	5.2	台南東山地震站西偏南 11.2 公里
66	2010/11/12 21:08	122.48	24.10	26.1	5.3	宜蘭南澳地震站東偏南方 82.5 公里
67	2010/11/12 23:39	120.61	22.19	38.0	5.3	屏東枋寮地震站南方 20.4 公里
68	2010/11/21 20:31	121.69	23.85	46.9	6.1	花蓮市地震站南偏東方 15.5 公里

ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
69	2010/12/06 10:14	121.43	23.68	24.8	5.2	花蓮西林地震站南方 15.0 公里
70	2010/12/07 10:46	121.37	22.96	40.5	5.1	台東成功地震站南方 14.8 公里
71	2010/12/10 04:42	122.14	21.33	167.1	5.2	台東蘭嶼地震站東南方 98.9 公里
72	2011/02/01 16:16	121.80	24.21	18.3	5.5	花蓮縣政府東北方 30.6 公里外海
73	2011/02/15 15:18	121.20	21.18	71.2	5.5	台東縣政府南方 174.1 公里外海
74	**2011/03/20 16:00**	**121.38**	**22.44**	**27.5**	**5.8**	**台東縣政府東南方 41.9 公里外海**
75	2011/04/29 21:12	122.07	21.35	178.1	5.9	台東縣政府南偏東方 182.5 公里外海
76	2011/04/30 16:35	121.81	24.65	75.0	5.8	宜蘭縣政府南偏東方 10.1 公里
77	2011/05/03 23:52	121.71	23.93	41.2	5.2	花蓮縣政府東偏南方 10.7 公里外海
78	2011/05/22 09:34	121.76	24.12	6.1	5.0	花蓮縣政府東北方 20.3 公里外海
79	2011/06/03 01:07	121.34	22.26	22.2	5.2	台東縣政府南偏東方 58.0 公里 （位於台灣東部海域）
80	2011/06/10 09:25	121.59	23.59	34.9	5.1	花蓮縣政府南方 44.6 公里 （位於花蓮縣近海）
81	2011/06/26 21:19	121.00	23.85	14.8	5.0	南投縣政府東方 31.9 公里 （位於南投縣仁愛鄉）
82	2011/07/12 19:17	121.52	23.51	31.2	5.3	花蓮縣政府南偏西方 53.9 公里 （位於花蓮縣近海）
83	2011/07/13 15:19	123.80	24.91	120.8	5.4	宜蘭縣政府東方 206.8 公里 （位於台灣東部海域）
84	2011/07/18 22:48	122.37	23.59	29.8	5.1	花蓮縣政府東偏南方 88.2 公里 （位於台灣東部海域）
85	2011/09/09 11:26	120.99	22.31	10.4	5.0	台東縣政府南偏西方 52.4 公里 （位於台灣東部海域）
86	2011/09/12 13:15	122.84	23.70	43.8	5.1	花蓮縣政府東偏南方 128.2 公里 （位於台灣東部海域）
87	2011/09/22 06:18	121.67	24.09	17.2	5.1	花蓮縣政府北偏東方 11.9 公里 （位於花蓮縣近海）
88	2011/10/30 11:23	123.16	25.31	215.8	6.3	基隆市政府東方 143.6 公里 （位於台灣東北部海域）
89	2011/10/31 23:17	121.94	24.84	92.1	5.0	宜蘭縣政府東偏北方 21.7 公里 （位於台灣東部海域）
90	2011/12/23 03:39	122.60	23.97	26.9	5.0	花蓮縣政府東方 99.5 公里 （位於台灣東部海域）
91	2012/01/25 16:36	122.20	24.89	124.3	5.0	宜蘭縣政府東偏北方 47.4 公里 （位於台灣東部海域）
92	2012/01/29 16:07	122.37	25.32	264.7	5.6	基隆市政府東偏北方 66.4 公里 （位於台灣東北部海域）
93	2012/02/04 10:54	122.66	24.67	116.2	5.6	宜蘭縣政府東方 90.9 公里 （位於台灣東部海域）
94	2012/02/26 10:35	120.75	22.75	26.3	6.4	屏東縣政府東偏北方 28.4 公里 （位於屏東縣霧台鄉）
95	2012/03/22 07:44	121.59	23.25	42.5	5.0	台東縣政府東北方 70.7 公里 （位於台灣東部海域）
96	2012/04/09 05:43	122.36	24.04	29.2	5.7	花蓮縣政府東方 75.3 公里 （位於台灣東部海域）
97	2012/04/19 09:58	121.67	24.13	29.1	5.5	花蓮縣政府北偏東方 16.7 公里 （位於花蓮縣近海）
98	2012/04/27 22:48	121.73	23.79	44.3	5.0	花蓮縣政府南偏東方 24.7 公里 （位於台灣東部海域）
99	2012/06/05 04:38	122.19	24.22	49.9	5.1	花蓮縣政府東偏北方 62.9 公里 （位於台灣東部海域）
100	2012/06/05 17:56	122.24	24.22	28.6	5.1	花蓮縣政府東偏北方 67.4 公里 （位於台灣東部海域）
101	2012/06/06 09:08	121.42	22.44	18.4	5.9	台東縣政府東南方 44.6 公里 （位於台灣東部海域）
102	2012/06/10 05:00	122.31	24.46	69.9	6.6	宜蘭縣政府東偏南方 62.8 公里 （位於台灣東部海域）
103	2012/06/10 05:54	122.22	24.49	69.6	5.1	宜蘭縣政府東偏南方 53.7 公里 （位於台灣東部海域）
104	2012/06/15 00:15	121.54	23.71	6.5	5.3	花蓮縣政府南偏西方 32.0 公里 （位於花蓮縣豐濱鄉）
105	2012/06/17 17:01	121.53	23.68	6.5	5.0	花蓮縣政府南偏西方 35.5 公里 （位於花蓮縣豐濱鄉）
106	2012/08/14 18:55	121.51	24.05	21.8	5.2	花蓮縣政府西偏北方 13.0 公里 （位於花蓮縣秀林鄉）
107	2012/08/18 04:20	121.48	23.38	26.0	5.2	花蓮縣政府南偏西方 69.6 公里 （位於台東縣近海）
108	2012/08/31 20:11	120.88	24.72	10.0	5.0	新竹市政府西南方 13.0 公里 （位於苗栗縣竹南鎮）
109	2012/09/05 04:00	121.02	22.24	21.0	5.2	台東縣政府南偏西方 58.6 公里 （位於台灣東部海域）
110	2012/10/20 16:49	122.57	24.29	46.1	5.1	宜蘭縣政府東偏南方 95.5 公里 （位於台灣東部海域）

ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
111	2012/10/25 18:31	120.40	22.44	33.0	5.5	高雄市政府南偏東方 22.1 公里 （位於屏東縣近海）
112	2012/11/21 01:09	121.4	22.45	17.5	5.5	台東縣政府東南方 42.5 公里（位於台灣東部海域）
113	2012/12/03 01:45	121.58	23.98	11.8	5.0	花蓮縣政府西偏南方 4.4 公里 （位於花蓮縣吉安鄉）
114	2012/12/08 22:26	122.45	25.67	312	6.2	基隆市政府東北方 92.3 公里 （位於台灣東北部海域）
115	2012/12/24 11:17	121.28	22.53	67.8	5.0	台東縣政府南偏東方 28.5 公里 （位於台灣東部海域）
116	2012/12/31 00:03	120.91	23.47	4.4	5.3	嘉義市政府東方 46.3 公里 （位於嘉義縣阿里山鄉）
117	2013/01/05 04:38	122.43	24.35	71.4	5.0	宜蘭縣政府東偏南方 79.4 公里 （位於臺灣東部海域）
118	2013/01/07 14:49	122.84	24.48	69.4	5.7	宜蘭縣政府東偏南方 112.7 公里 （位於臺灣東部海域）
119	2013/01/17 16:30	121.98	24.44	13.7	5.1	宜蘭縣政府東南方 39.0 公里 （位於臺灣東部海域）
120	2013/01/21 03:09	122.52	24.7	108.2	5.6	宜蘭縣政府東方 76.5 公里 （位於臺灣東部海域）
121	2013/02/02 11:39	121.98	23.75	35	5.6	花蓮縣政府東南方 45.4 公里 （位於臺灣東部海域）
122	2013/03/07 11:36	121.46	24.3	5.6	5.9	花蓮縣政府北偏西方 38.1 公里 （位於花蓮縣秀林鄉）
123	2013/03/12 17:03	121.78	24.36	51.9	5.0	宜蘭縣政府南方 41.0 公里 （位於宜蘭縣近海）
124	**2013/03/27 10:03**	**121.05**	**23.9**	**19.4**	**6.2**	**南投縣政府東方 36.9 公里 （位於南投縣仁愛鄉）**
125	2013/03/31 08:49	121.97	21.18	162.2	5.5	臺東縣政府南偏東方 194.5 公里 （位於臺灣東南部海域）
126	2013/04/11 04:20	122.22	20.65	22.1	6.1	臺東縣政府南偏東方 258.2 公里 （位於臺灣南部海域）
127	2013/04/20 12:36	122.44	24.78	118.9	5.0	宜蘭縣政府東方 68.4 公里 （位於臺灣東部海域）
128	2013/04/21 11:07	122.34	24.41	70.6	5.0	宜蘭縣政府東偏南方 67.8 公里 （位於臺灣東部海域）
129	2013/05/21 16:25	123.69	23.33	53.1	6.1	花蓮縣政府東偏南方 223.2 公里 （位於臺灣東部海域）
130	2013/06/02 04:32	121.27	22.04	31.5	5	臺東縣政府南方 79.8 公里 （位於臺灣東部海域）
131	**2013/06/02 13:43**	**120.97**	**23.86**	**14.5**	**6.5**	**南投縣政府東方 29.3 公里 （位於南投縣魚池鄉）**
132	2013/06/08 00:38	122.65	23.98	35.3	6.2	花蓮縣政府東方 104.5 公里 （位於臺灣東部海域）
133	2013/06/29 07:51	122.24	24.03	19.8	5.7	花蓮縣政府東方 63.1 公里 （位於臺灣東部海域）
134	2013/07/15 21:41	122.84	23.76	40	5.7	花蓮縣政府東方 126.8 公里 （位於臺灣東部海域）
135	2013/07/16 18:11	121.5	24.28	4.9	5.5	花蓮縣政府北偏西方 34.1 公里 （位於花蓮縣秀林鄉）
136	2013/07/24 23:32	121.53	23.91	10.6	5.0	花蓮縣政府西南方 13.2 公里 （位於花蓮縣壽豐鄉）
137	2013/08/23 05:02	118.75	25.64	18	5.0	連江縣政府西偏南方 133.7 公里
138	2013/09/03 17:54	120.58	21.85	36.2	5.1	高雄市政府南偏東方 90.2 公里 （位於臺灣南部海域）
139	2013/09/04 06:23	118.76	25.64	14.7	5.3	連江縣政府西偏南方 132.2 公里
140	2013/09/06 19:33	122.24	20.32	211.6	6.7	臺東縣政府南偏東方 291.7 公里 （位於臺灣南部海域）
141	2013/10/11 12:45	121.61	25.05	142.6	5.2	臺北市政府東偏北方 4.8 公里 （位於新北市汐止區）
142	2013/10/14 01:20	122.79	23.03	31.9	5.1	花蓮縣政府東南方 159.7 公里 （位於臺灣東部海域）
143	2013/10/30 06:17	122.16	25.55	243.8	5.7	基隆市政府東北方 62.7 公里 （位於臺灣北部海域）
144	**2013/10/31 20:02**	**121.42**	**23.55**	**19.5**	**6.3**	**花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里 （位於花蓮縣萬榮鄉）**
145	2013/11/11 12:55	123.23	24.64	103	5.7	宜蘭縣政府東方 148.4 公里（位於臺灣東部海域）
146	2013/11/16 03:39	122.44	23.92	16.9	5.2	花蓮縣政府東方 84.1 公里（位於臺灣東部海域）
147	2014/01/07 02:49	122.95	25.38	226.6	5.8	基隆市政府東偏北方 124.1 公里 （位於臺灣東北部海域）
148	2014/01/09 02:15	123.41	24.46	72.6	6.0	宜蘭縣政府東方 169.3 公里 （位於臺灣東部海域）
149	**2014/01/15 00:44**	**120.98**	**23.86**	**15**	**5.0**	**南投縣政府東方 30.3 公里 （位於南投縣魚池鄉）**
150	**2014/01/15 02:38**	**121.08**	**22.89**	**8.3**	**5.1**	**臺東縣政府北偏西方 16.9 公里 （位於臺東縣卑南鄉）**
151	**2014/01/15 03:50**	**121.08**	**22.88**	**8.4**	**5.1**	**臺東縣政府北偏西方 15.8 公里 （位於臺東縣卑南鄉）**
152	2014/01/17 04:40	123.3	24.83	131	5.2	宜蘭縣政府東方 155.9 公里 （位於臺灣東部海域）

ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
153	2014/01/24 06:51	122.78	24.56	85.3	5.2	宜蘭縣政府東方 104.4 公里 （位於臺灣東部海域）
154	**2014/02/22 04:25**	**121.6**	**24.7**	**60.9**	**5.6**	**宜蘭縣政府西方 16.8 公里 （位於宜蘭縣大同鄉）**
155	2014/02/22 18:31	123.38	24.44	70.7	5.1	宜蘭縣政府東方 167.2 公里 （位於臺灣東部海域）
156	2014/03/16 04:04	121.36	22.23	13.2	5.2	臺東縣政府南偏東方 62.5 公里 （位於臺灣東部海域）
157	2014/03/17 21:12	122.37	24.06	15.8	5.3	花蓮縣政府東方 76.7 公里 （位於臺灣東部海域）
158	2014/03/19 20:19	122.27	24.05	16.2	5.6	花蓮縣政府東方 66.8 公里 （位於臺灣東部海域）
159	2014/04/10 10:38	122.92	23.56	21.9	5.5	花蓮縣政府東偏南方 141.0 公里 （位於臺灣東部海域）
160	2014/05/04 20:43	121.74	23.92	34	5.3	花蓮縣政府東偏南方 14.9 公里 （位於臺灣東部海域）
161	2014/05/06 08:02	121.76	22.19	118.3	5.1	臺東縣政府東南方 88.6 公里 （位於臺灣東部海域）
162	2014/05/11 02:24	122.46	23.63	27.7	5.0	花蓮縣政府東偏南方 94.5 公里 （位於臺灣東部海域）
163	**2014/05/21 08:21**	**121.45**	**23.74**	**18**	**5.9**	**花蓮縣政府南偏西方 33.3 公里 （位於花蓮縣鳳林鎮）**
164	**2014/05/25 20:41**	**121.16**	**23.06**	**7.1**	**5.1**	**臺東縣政府北方 33.5 公里 （位於臺東縣關山鎮）**
165	2014/05/29 00:58	121.73	21.92	25.9	5.3	臺東縣政府東南方 110.7 公里 （位於臺灣東南部海域）
166	2014/06/22 20:26	122.61	24.71	97.4	5.3	宜蘭縣政府東方 85.3 公里 （位於臺灣東部海域）
167	2014/07/08 07:06	122.46	23.29	38.8	5.2	花蓮縣政府東南方 116.1 公里 （位於臺灣東部海域）
168	2014/07/17 14:11	121.35	22.27	19.1	5.3	臺東縣政府南偏東方 57.8 公里 （位於臺灣東部海域）
169	2014/08/06 11:46	121.43	22.2	84.2	5.1	臺東縣政府南偏東方 68.2 公里 （位於臺灣東部海域）
170	2014/09/25 18:35	121.3	22.74	17.4	5.2	臺東縣政府東方 15.2 公里 （位於臺灣東部海域）
171	2014/09/30 00:44	121.43	21.78	75.8	5.2	臺東縣政府南偏東方 112.2 公里 （位於臺灣東南部海域）
172	2014/10/08 02:08	121.56	23.65	21.4	5.2	花蓮縣政府南方 38.0 公里 （位於花蓮縣近海）
173	2014/10/26 12:47	122.23	24.75	84.4	5.0	宜蘭縣政府東方 47.4 公里 （位於臺灣東部海域）
174	2014/11/21 11:29	120.13	20.65	69.6	5.9	高雄市政府南方 219.5 公里 (位於臺灣南部海域)
175	2014/12/11 05:03	122.61	25.45	268.6	6.7	基隆市政府東偏北方 93.6 公里(位於臺灣東北部海域)
176	**2014/12/31 11:06**	**121.79**	**24.82**	**68.9**	**5.1**	**宜蘭縣政府北偏東方 10.7 公里(位於宜蘭縣礁溪鄉)**
177	2014/12/31 15:54	122.57	24.59	96.1	5.6	宜蘭縣政府東方 82.8 公里(位於臺灣東部海域)
178	2015/01/05 13:53	122.02	24.69	73.8	5.1	宜蘭縣政府東方 26.2 公里(位於臺灣東部海域)
179	**2015/01/07 12:48**	**121.69**	**24.26**	**30.4**	**5.5**	**花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里(位於花蓮縣秀林鄉)**
180	2015/01/19 11:48	121.58	22.87	117.9	5.0	臺東縣政府東偏北方 45.3 公里(位於臺灣東部海域)
181	2015/02/14 04:06	121.40	22.66	27.8	6.3	臺東縣政府東偏南方 27.4 公里(位於臺灣東部海域)
182	2015/02/27 00:50	122.30	24.69	97.6	5.3	宜蘭縣政府東方 55.0 公里(位於臺灣東部海域)
183	2015/03/23 18:13	121.67	23.73	38.4	6.2	花蓮縣政府南方 29.8 公里(位於臺灣東部海域)
184	2015/04/05 12:37	122.68	24.52	106.7	5.1	宜蘭縣政府東偏南方 96.0 公里(位於臺灣東部海域)
185	2015/04/06 19:37	122.75	24.40	48.8	5.1	宜蘭縣政府東偏南方 106.0 公里(位於臺灣東部海域)
186	2015/04/20 09:42	122.37	24.05	17.5	6.4	花蓮縣政府東方 76.2 公里(位於臺灣東部海域)
187	2015/04/20 09:49	122.49	24.02	11.3	5.0	花蓮縣政府東方 89.0 公里(位於臺灣東部海域)
188	2015/04/20 19:20	121.75	23.63	32.6	5.5	花蓮縣政府南偏東方 42.4 公里(位於臺灣東部海域)
189	2015/04/20 19:45	122.41	24.12	19.4	5.8	花蓮縣政府東方 81.8 公里(位於臺灣東部海域)
190	2015/04/20 20:00	122.39	24.01	15.7	5.7	花蓮縣政府東方 78.6 公里(位於臺灣東部海域)
191	2015/04/26 04:01	122.44	24.03	16.4	5.6	花蓮縣政府東方 83.9 公里(位於臺灣東部海域)
192	2015/05/03 21:09	122.42	23.94	25.8	5.4	花蓮縣政府東方 81.9 公里(位於臺灣東部海域)
193	2015/05/11 16:38	120.42	24.59	15.6	4.9	苗栗縣政府西方 41.0 公里(位於臺灣西部海域)
194	2015/05/26 08:56	122.49	23.87	32.8	5.1	花蓮縣政府東方 89.7 公里 (位於臺灣東部海域)

ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
195	2015/05/28 15:57	122.46	24.06	18.6	5.1	花蓮縣政府東方 85.5 公里 (位於臺灣東部海域)
196	2015/06/21 14:15	122.44	23.95	22.4	5.0	花蓮縣政府東方 83.4 公里 (位於臺灣東部海域)
197	2015/06/27 00:16	123.32	24.84	114.3	5.3	宜蘭縣政府東方 157.8 公里 (位於臺灣東部海域)
198	2015/08/13 06:21	122.31	21.27	206.1	5.7	臺東縣政府東南方 202.8 公里 (位於臺灣東南部海域)
199	2015/08/13 22:08	122.45	24.06	15.4	5.5	花蓮縣政府東方 84.7 公里 (位於臺灣東部海域)
200	**2015/09/01 21:24**	**121.55**	**23.91**	**20.3**	**5.5**	**花蓮縣政府西南方 11.1 公里 (位於花蓮縣壽豐鄉)**
201	2015/09/16 03:37	121.81	24.28	15.3	5.6	花蓮縣政府東北方 37.2 公里 (位於花蓮縣近海)
202	2015/09/16 21:09	121.86	24.31	17.8	5.5	花蓮縣政府東北方 42.6 公里 (位於花蓮縣近海)
203	**2015/09/30 03:37**	**121.60**	**24.00**	**17.9**	**5.1**	**花蓮縣政府西偏北方 2.0 公里 (位於花蓮縣花蓮市)**
204	2015/10/12 19:14	121.47	22.42	24.6	5.2	臺東縣政府東南方 49.4 公里 (位於臺灣東部海域)
205	2015/10/13 19:49	121.76	23.45	42.2	5.5	花蓮縣政府南偏東方 61.3 公里 (位於臺灣東部海域)
206	2015/10/17 01:01	122.92	24.68	127.6	5.3	宜蘭縣政府東方 117.7 公里 (位於臺灣東部海域)
207	2015/10/19 10:17	122.01	24.85	17.4	5.2	宜蘭縣政府東偏北方 28.1 公里 (位於臺灣東部海域)
208	2015/11/02 05:09	121.60	22.71	18.9	5.9	臺東縣政府東方 46.7 公里 (位於臺灣東部海域)
209	2015/11/11 23:33	122.77	24.43	76.3	5.4	宜蘭縣政府東偏南方 107.2 公里 (位於臺灣東部海域)
210	2015/11/28 08:52	122.31	25.14	236.4	5.7	基隆市政府東方 57.0 公里 (位於臺灣東北部海域)

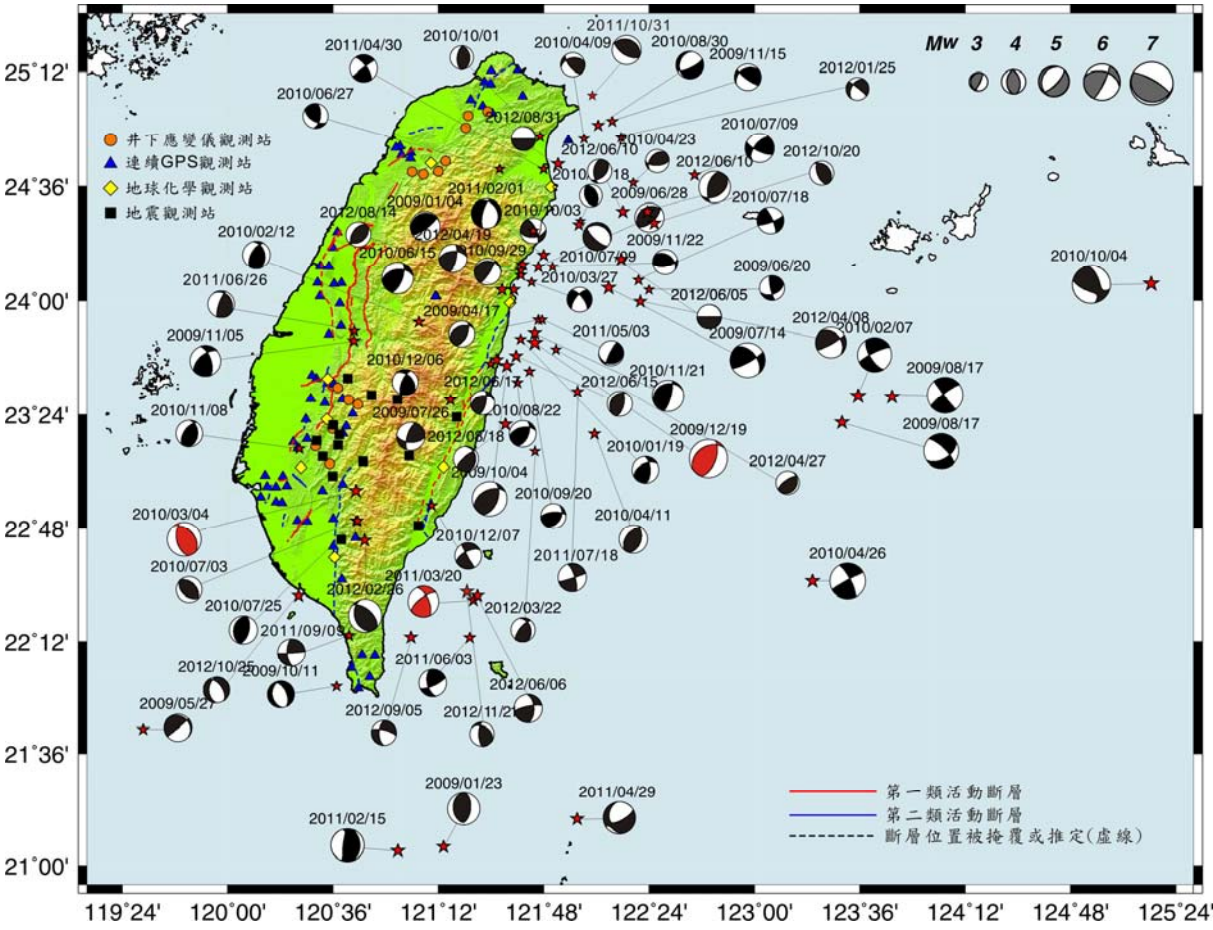


圖 6-1.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五的地震事件之位置及震源機制圖。紅色海灘球為同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測之地震事件。

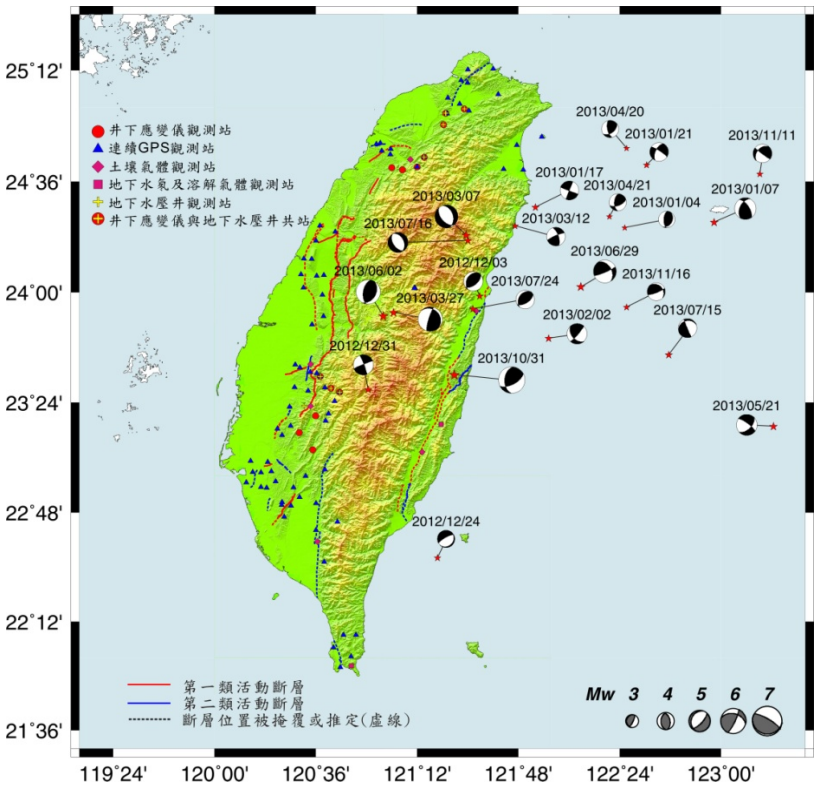


圖 6-1.2：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五的地震事件之位置及震源機制圖。

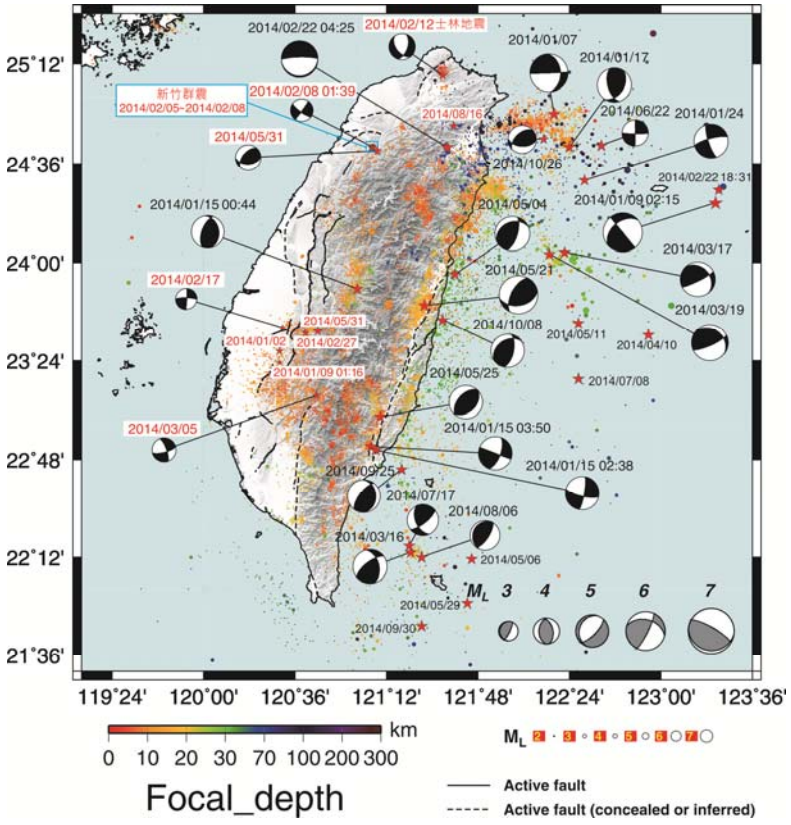


圖 6-1.3：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於五的地震事件及規模小於五的特別地震事件（白底紅字表示）之位置及震源機制圖。（ID174 地震事件已於圖框外無秀出。）

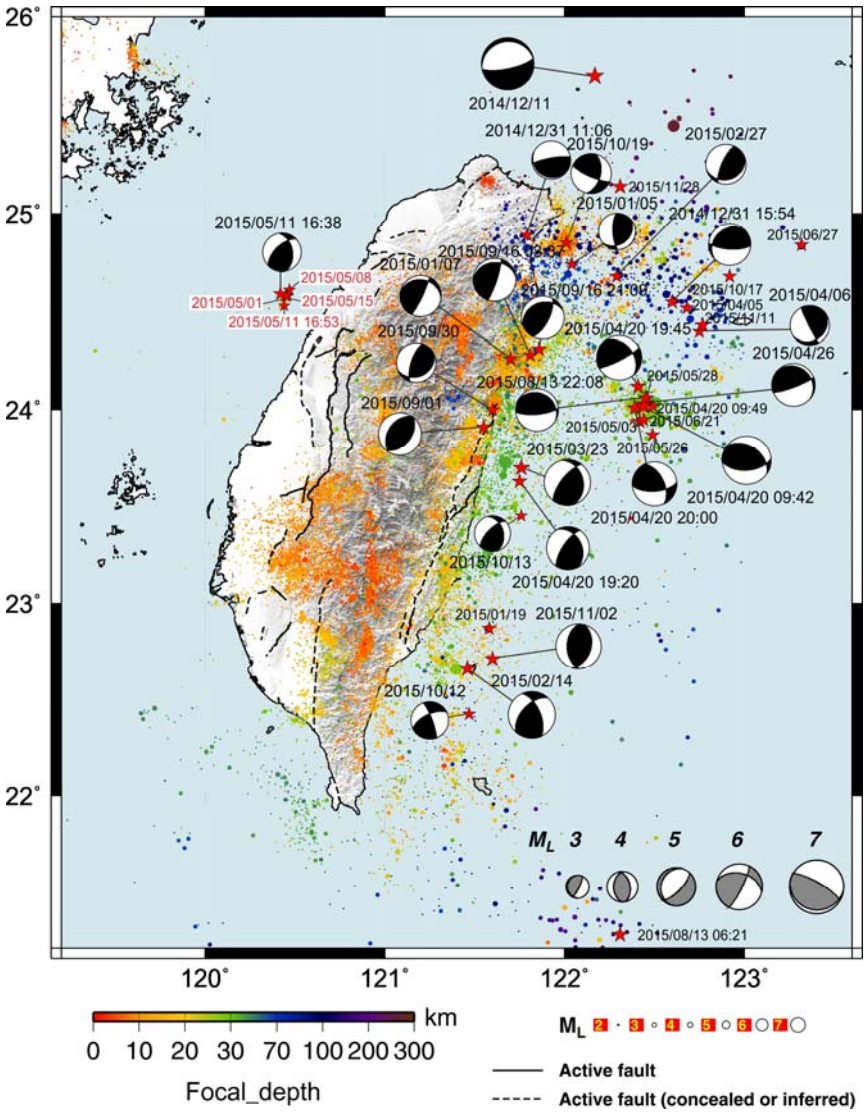


圖 6-1.4：2014 年 12 月至 2015 年 11 月規模大於五的地震事件及規模小於五的特別地震事件（白底紅字表示）之位置及震源機制圖。

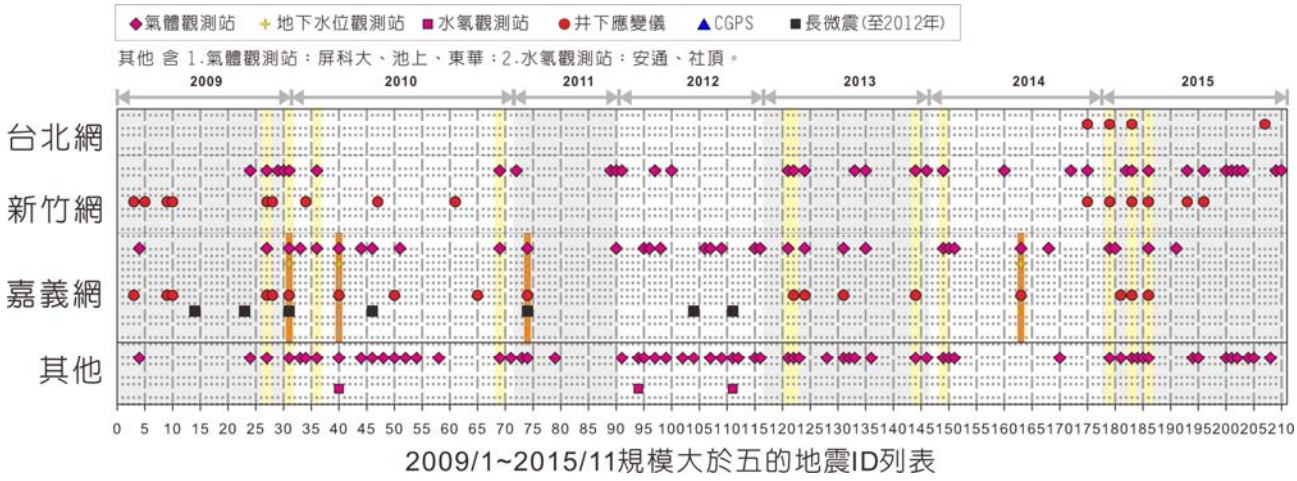


圖 6-1.5：2009 年 1 月至 2015 年 11 月規模大於五的地震事件之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID（表 6-1.1），粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測，垂直黃線則代表同一地震事件在三個或以上的觀測網觀測到異常。

6-2 GPS 應變與井下應變儀的共同解釋

GPS 應變的分析，其實與 Gladwin 應變儀的原理一般，在井下應變儀中，利用四個方向的線性應變來計算地殼中的水平面積應變，若我們選取三個 GPS 連續觀測站，形成一個三角網，其形狀越接近正三角形越好，計算每天的基線常變化，每條基線的變化可計算該方向的地表線性應變，三條基線的夾角各相距約 60 度，可以用來計算地表應變（參閱附錄 4-1），並轉換成區域性的面積應變與剪斜應變。

近年來連續衛星定位追蹤站（CGPS）普遍設置於高地震活動的區域，並交錯的設置了一些高精度的井下應變儀，這兩種儀器都可以用來觀測地殼的微小變形量。應變之觀測是單純觀測地區本身的應變，可以避開以往 GPS 觀測必須相對於某一穩定座標的要求，因此可以減少許多系統誤差所帶來的困擾。井下應變儀的觀測資料在移除各種非地殼構造活動相關的修正模式後，可以細微的觀測到地殼應變的時間序列，而 GPS 固定站普遍的安裝在全臺各地，用來觀測一地區每天之位移，通常以各測站的位移量或年平均位移速度來表示，假若幾個相鄰站的年平均速度不相等或不一致，則表示該地區除了地殼移動外，還有其地殼內部的應變。然而，GPS 測站間相距可能在數公里到數十公里，甚至達數百公里以上，一邊用 GPS 位移或速度來換算成應變時，通常都假設該地區地殼應變是均勻的，但其間的變形真如換算時所假設的均勻變形，或其間已有潛在斷層的破裂滑動，這些都會影響到最終的解釋。

井下應變儀的觀測，由於其超高的精度，已在近年來成為觀測慢地震（slow earthquake）的最佳利器。地殼釋放能量的過程除了一般所認知的地震活動外，尚有地殼的顫動（Tremor）與慢地震（slow earthquake）的可能性。因此，在本計畫中將針對結合 GPS 與井下應變觀測的聯合解釋踏出了第一步，二者有相同之處，亦有不同之處，其中還有許多尚待突破的異同點。在這過程中，將有助於科學家對地震，或對於地殼的能量釋放物理過程的了解，也對地震的前兆觀測有所助益。

GPS 觀測與井下應變儀觀測一般都可以觀測到地殼的應變率時間序列，而且相當的穩定。將 GPS 固定站所觀測得到的位移轉換成地殼應變，可看出板塊擠壓的情況。應變的大小及變化可能與地殼中的應力累積與釋放息息相關，也才是與地震活動最有直接關係的資料。一般而言，在 20 公里以內，若觀測數小時，GPS 基線的觀測精度約在 5 mm ± 1.0 ppm 左右，但若用連續觀測站的每日基線解而言，其觀測精度可提高到 5 mm ± 0.5 ppm 左右，利用一個 GPS 網形中各站所得的每日座標變化，每日座標解的精度約在 1~2 公分左右，以此求得該網的地表應變應該接近於 1.5 μstrain。若以這樣的地殼應變而言，除非有規模大於 5 的地震，否則很難明確的看到比這更小規模的地震相關的訊號。然而，對於小區域的 GPS 觀測網而言，這精度還是有改善的空間，例如在每日解的座標或基線分量，通常都有共同的誤差，相減求得相對運動時，會互相抵消，但是仍有一些不規則的誤差，特別是在垂直方向，因為收得到的 GPS 訊號都是來自上方（天空），在其下方無所控制的情況下，所有的垂直分量都較難以約制，誤差約為水平方向誤差的 1.5 倍以上。因此，放棄垂直分量，直接以水平分量來計算地殼的應變，可以得到較好的結果。另外若直接以 GPS 基線長直接換算成線性變形率，避開計算各站座標所引入的參考點誤差以及幾何性誤差，其精度會比較高。

另外，GPS 應變所代表的只是地表的相對位移量，縱使有變化，在這兩個 GPS 觀測站間的地殼可能有數公里到數十公里的距離，可能無法確定其斷層是應力或應變正在累積，還是斷層已經破裂且其能量已經釋放。但是井下應變儀則不同，在於精度高、基線短，雖然只能代表數十公分間的變化，但其結果明確，若有數個井下應變儀的觀測站，形成一個距離在數公里到數十公里的觀測網，且能得到一致的結果，或可以用合理模式推算出的結果，則其確定性遠高於 GPS。

將 GPS 觀測網組成許多三角形或長方形的區域，每個區域可根據所有點位間的基線長變化，換算成該區的應變，或是利用三角形三個點位的速度向量，轉換成該區的應變率。嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站，選取兩個三角形網做為分析的例子。如圖

6-2.1 所示，可以將達邦測站（DARB）與中興測站（TSUN）兩個井下應變儀站附近的三個 GPS 連續觀測站如測站 1（GS07）、測站 2（GS66）、測站 3（W029）形成一個三角網，網中每一邊的邊長都可由 GPS 的每日計算中取得，其變化即為線性變形量 e1、e2、e3，根據與井下應變儀的相同計算，可以轉換成該區域的面積變形及剪斜變形量，其結果可與井下應變儀的觀測互相比較。同樣的，測站 1（GS07）、測站 4（GS63）、測站 5（JHCI）也可以組成另一個三角網，與太興測站（TAIS）的觀測互相比較。

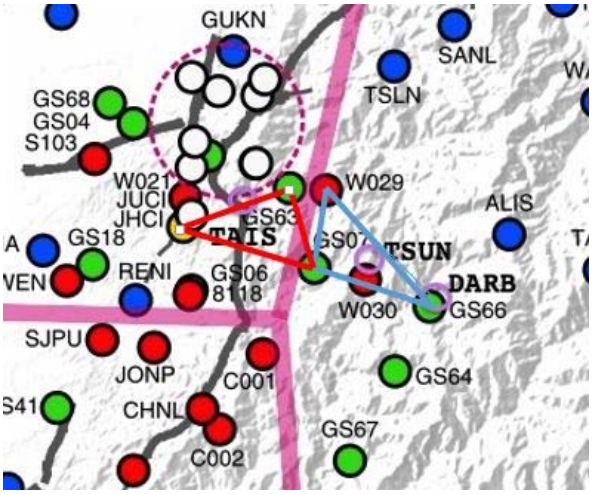


圖 6-2.1：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。

圖 6-2.2 顯示 GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013/01~2015/08 的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為井下應變儀太興測站（TAIS）在 2013/07~2015/08 的面積應變的變化，圖中的垂直線表示地震的時間，由此圖可檢視在井下應變儀變化的時刻，GPS 應變是否也有相同的異常現象。比較兩種資料在面積應變方面，在變化趨勢上有高度的相似性，但 GPS 應變所得到的變化較井下應變儀面積應變的變化為小，約在 1/15 左右，由於井下應變儀的絕對值尚在修正中，GPS 應變也是可用來修正的參考資料之一。

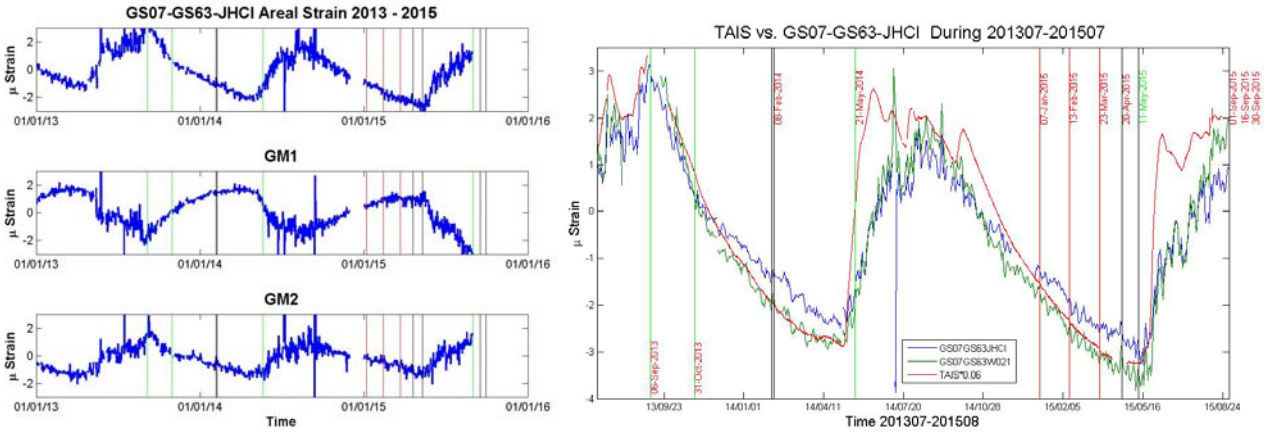


圖 6-2.2：GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013/01~2015/08 的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為井下應變儀太興測站（TAIS）在 2013/07~2015/08 的面積應變。

圖 6-2.3 顯示 ALIS-W029-WANS 所形成的 GPS 三角網在 2013/01~2015/08 的觀測換算成應變量的變化。此依區域的 GPS 應變與井下應變儀的應變大小一致，面積應變的變化時機與趨勢也大都一致，有幾個時刻的變化量略有不同，這表示 GPS 應變是一種可靠的觀測量，

因為一個三角網涵蓋約 5~10 平方公里的區域，這與井下應變儀只涵蓋約 0.04 平方公尺的區域，應變在趨勢上可預期有相似性，但在應變大小及細部變化未必要處處相等。

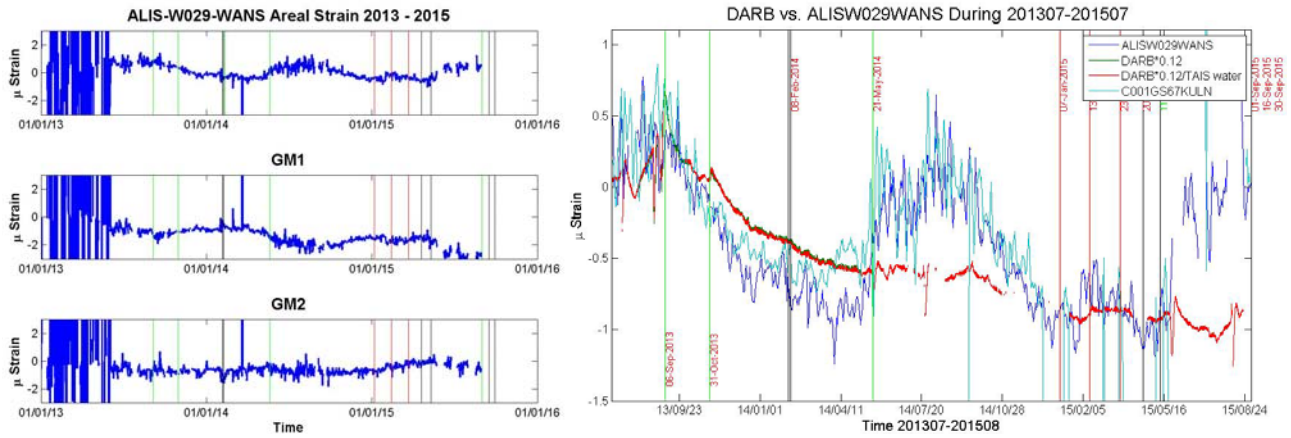


圖 6-2.3：ALIS-W029-WANS 所形成的 GPS 三角網在 2013/01~2015/08 的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為井下應變儀達邦測站（DARB）在 2013/07~2015/08 的面積應變。

井下應變儀的特性在於其高精度（10^{-9}）與其連續的高取樣率（可有 0.001Hz~100Hz 的穩定紀錄），但其造價昂貴，很難普遍設置，而且因為其高精度，任何空氣壓力、地下水與地下溫度變化都會顯現於其記錄之中，影響相當大，且會被誤解釋為地殼應變的變化。GPS 固定站現在已普遍設置於地殼活動區域，通常每十公里~百公里左右會有一個測站，在臺灣形成一個高密度的地殼位移觀測網，其精度大約是 0.5~2.0 公分的每日座標解，但在地殼變動大的區域很難找的到穩定的參考點，因此，往往困惑於其所測出來的微小位移或速度是否為真正的地殼變動。

一般在地震或斷層活動的研究觀測中，主要是要觀測地殼的應變，因此，比較注重相對的變形量，不需引用百公里外的參考點來求得變動量，因此，相對穩定的 GPS 程序可以求得測站間的精密距離及其變化，通常在數十公里距離之精度可達次公分之下，因此，對於一個單一斷層系統來說，其地殼應變的觀測應該可以達到 10^{-7} 左右之精度，雖不及井下應變儀的精密，但仍可以做有效率的應用。GPS 觀測的另外一個優點就在於其長期的穩定性，因為所有的 GPS 觀測都可追溯到 VLBI 與 SLR 的太空觀測技術，其穩定度可達數十年不變，所以 GPS 所觀測到的距離變化也是有數十年的一致性。

井下應變儀與 GPS 觀測的結果，另有一個不同點，就是在斷層附近，若在間震期時，其地殼應變值應該是該斷層系統中變動最大之處，而在位移的觀測中卻是移動最小之處。而且在 GPS 觀測中若偵測到一個變形量，並不一定表示該斷層的應變已累積。假若斷層已破裂時，在遠離斷層（數公里到數十公里外）所觀測的結果可能都是一樣的位移相對變化。因此，結合 GPS 觀測網與井下應變儀觀測站的聯合地殼變動網才是現代地殼監測的最佳組合。

6-3 連續觀測資料的共同解釋

在這一階段的觀測中，但有三個地震事件同時在三個觀測網觀測到異常。

本次報告為 2014 年 12 月至 2015 年 11 月間的異常觀測，這期間共有 36 個規模大於 5.0 的地震（ID=175~210），有 4 個位於陸地上。其中發生於 2015/01/07 12:48 芮氏規模 5.5 發生在花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里（位於花蓮縣秀林鄉）（ID=179）、2015/03/23 18:13 芮氏規模 6.2 發生在花蓮縣政府南方 29.8 公里（位於臺灣東部海域）（ID=183）及 2015/04/20 09:42 芮氏規模 6.4 發生在花蓮縣政府東方 76.2 公里（位於臺灣東部海域）（ID=186）（如表 6-1.1），以上三個地震事件同時在三個觀測網觀測到異常，但並沒有在同一個測區同時有三種以上的觀測異常，我們在此將這一些異常做一些整理，並與 GPS 應變作一比較。

（1）2015/01/07 花蓮秀林地震（M_L 5.5，Depth 30.4 km）（ID=179）

此地震對於臺北與新竹井下應變儀網產生應變異常訊號，臺北網錦和測站（JING）在該地震前約 11 天（2014/12/27）有應變異常的訊號出現（圖 4-1.21），應變由相對壓縮轉為伸張（約 0.04 μstrain 的變化），地震後應變率也有明顯變化。新竹網梅花測站（PFMT）在地震前 5 天（2015/01/02），面應變與剪應變都有突然的跳動，約 0.1 μstrain 的變化（圖 4-.1.22）。地球化學觀測方面，如圖 5-2.3（A）所示，古坑站在 10 天前，東華站在 6 天前，錦園站在 7 天前即達到氣體異常門檻。其中變化較為顯著的為東華站及錦園站，有明顯的氣體異常變化趨勢。

若觀察新竹 GPS 網在過去兩年的變化（圖 6-3.1），在 2014 年 10 月至 2015 年 4 月期間是比較平穩的時期，應變的上下跳動比前一年來的小很多，但在幾個主要地震（如垂直線所示）間明顯的有相同的變化形態，但對於 2015/01/07 這個地震前的變化則在誤差範圍之內，無法有任何肯定的判斷。

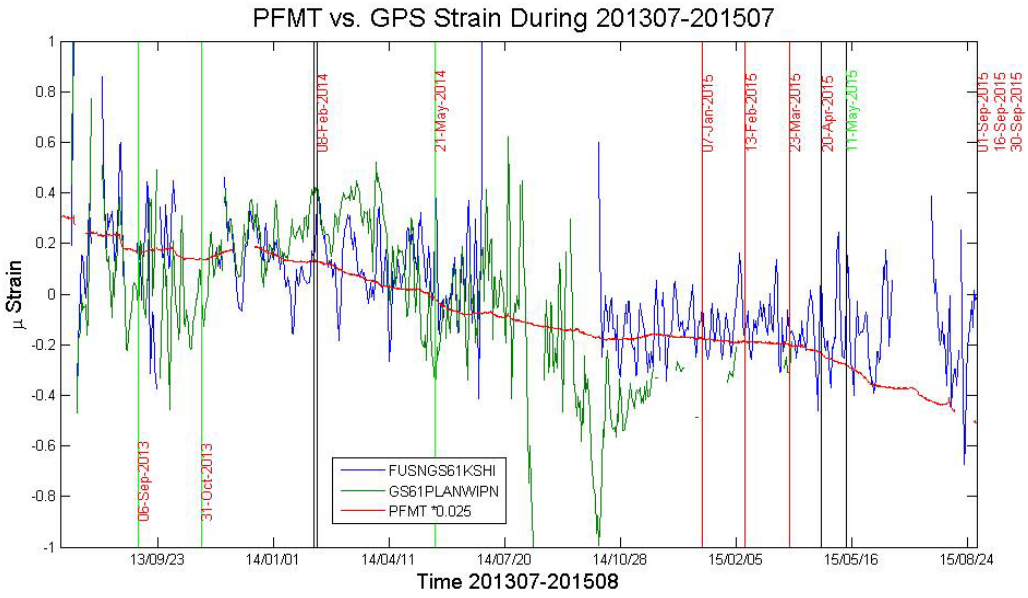


圖 6-3.1：新竹地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀梅花測站（PFMT）資料的變化。

圖 6-3.2 則為嘉義地區的 GPS 應變與鄰近井下應變儀達邦測站（DARB）的共同觀測。在這段期間達邦測站（DARB）剛好沒資料，但 GPS 應變明顯的由前半年約 1.5 μstrain 的總壓縮量在地震約五天前突然轉舒張，應該算是一個明顯的應變異常。

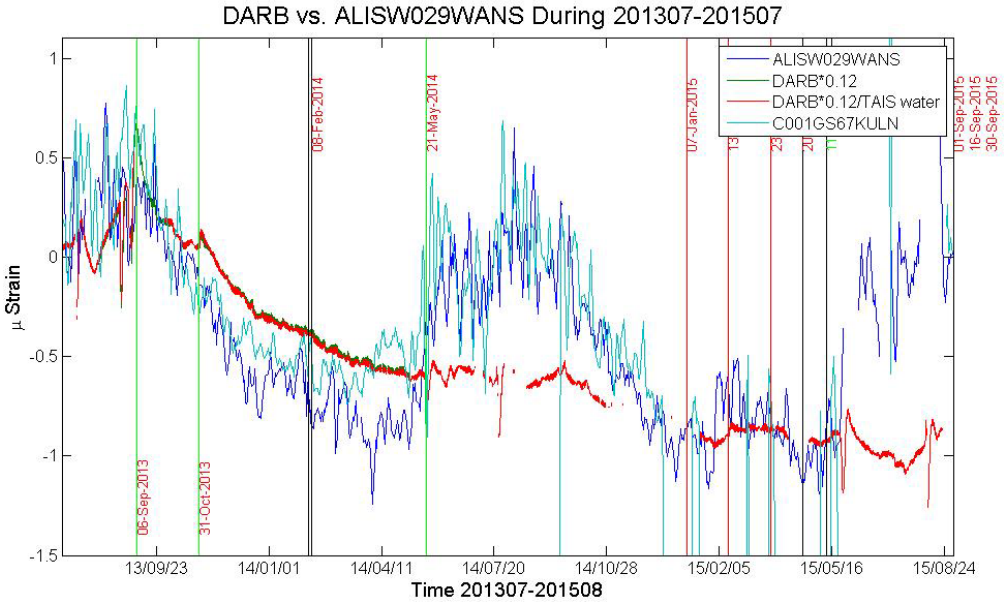


圖 6-3.2：嘉義地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀達邦測站（DARB）資料的變化。

總觀這個地震的相關觀測異常，分布範圍很廣，但明顯度較弱，約略大於雜訊的背景值，這應該與它的深層（30.4 km）地震與中度規模（M_L=5.5）的特性有關，一般而言，深層地震的影響範圍會較廣泛，而規模不夠大的地震會使得觀測異常的震幅較小。

（2）2015/03/23 花蓮近海地震（M_L 6.2，Depth 38.4 km）（ID=183）

與這地震相關的井下應變儀觀測異常，在臺北、新竹與嘉義三個應變網都有異常應變訊號出現。臺北網錦和測站（JING）面應變與剪應變在地震前約 20 天內至地震前有 4 次明顯的應變率變化，在地震後又回復到異常前的應變率；面應變在 3/4 與 3/12 有明顯應變的變動，而且地震前約 6 個小時偵測到應變突然壓縮，這個壓縮現象持續約 3 個小時，之後應變變得相對伸張，3 個小時後發生地震。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.24）。新竹網梅花測站（PFMT）大約於地震前 7 天內（3/16）有較明顯的異常訊號同時出現在面應變與剪應變，且面應變在地震前約 6 小時偵測到應變突然壓縮，這個壓縮現象持續約 2 個小時，之後應變變得相對伸張，4 個小時後發生地震（圖 4-1.25）。嘉義網達邦測站（DARB）的應變異常訊號發生於地震前 14 天內（3/9 至地震前），剪應變有較明顯的應變率變化，而面應變由相對伸張持續轉變為相對壓縮，並且面應變在地震前約 8 小時偵測到應變突然壓縮，這個壓縮現象持續到幾乎地震前，地震後也有緩慢的應變趨勢變化，可能受到震後地下水水壓的影響。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.26）。

如圖 5-2.4（A）所示，大平地站在 8 天前，東華站在 12 天前，池上站在 9 天前，即有氣體異常的前兆反應。其中較為清楚表示出氣體異常的為大平地站。東華站及池上站則是由時序分析結果判斷其亦超過異常門檻。由等震度圖看出距離震央最近的花蓮地區震度最大，中部次之，越往北及南震度越小。此地震的震源機制屬於逆衝斷層型式，是菲律賓海板塊向西北方向擠壓所造成。這起地震震央落在圖上三個反應區範圍交集處（圖 5-2.4（B）黃色星號）。

2015 年 3 月 23 日的花蓮近海地震也是個深層地震（38.4 公里），所以再多個地區都可以觀測到異常，在加上其規模（M_L=6.2）遠大於 2015 年 1 月 7 日的花蓮秀林地震，所以異常的明顯度相當確定，甚至在地震前短時間內都還有細微的明顯變化，將再作模式推演。

若觀察圖 6-3.1 與圖 6-3.2 中的 GPS 變化，新竹地區在 02/14（ID=181；M_L=6.3）、03/23

與 04/20 幾個大地震間都有明顯且相同的應變異常，這表示此區域在平穩時期（應變的變化幅度較小）對周遭的地震相當敏感，這也表示臺灣地區的地殼應變是息息相關的。嘉義地區的 GPS 應變由於雜訊較大，除了 02/14 地震前有明顯異常外，其餘兩個地震無法有明確的判讀。

（3）2015/04/20 花蓮外海地震（M_L 6.4，Depth 17.5 km）（ID=186）

對於此地震在井下應變儀的觀測，新竹網與嘉義網都有異常應變訊號出現。新竹網梅花測站（PFMT）大約於地震前 10 天內（4/10）有較明顯的異常訊號出現在面應變與剪應變，時間點大概一致，且面應變在地震前約 24 小時偵測到應變相對壓縮，隨後即發生地震，也伴隨著明顯的同震應變變化（圖 4-1.27）。在嘉義網達邦測站（DARB）的觀測，大約於地震前 11 天內（4/9）有較明顯的異常訊號出現在面應變與剪應變，時間點大概一致。這些震前的異常訊號排除由環境因素所造成，可能是地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.28）。

對於氣體異常的觀測，雖然此地震震源位置不在四個測站的敏感反應圈內，但大平地站在 19 天前，古坑站在 13 天前，東華站在 7 天前，池上站在 5 天前，即有氣體異常的前兆反應，其中反應較為清楚的為大平地站及古坑站，都有明確的氣體異常變化趨勢（包括氡氣及二氧化碳），如圖 5-2.5（A）所示。

GPS 應變的觀測則如前面所述，在新竹地區有明顯異常，在嘉義地區在無法判斷。

綜觀今年的觀測，地下水觀測雖然有多站與井下應變儀共站，但並不像井下應變儀一般有多站的觀測異常，這可能是地下水觀測儀器保養不易，有多站曾經更換儀器，而且地下水的影響因素較複雜，將繼續追蹤分析。至於今年幾個大地震都發生在東部陸地及近海，好像對新竹地區及嘉義地區都有明顯的影響，於下一章節做進一步的綜合分析。

6-4 花蓮地區 GPS 應變

本計畫在分析井下應變儀資料的同時，也分析了附近的 GPS 網的應變，一面可當作一種獨立的地殼應變資料，互為印證，並且可用來作為井下應變儀資料的校準用。由於地調所的井下應變儀都位於台灣西部的嘉義、新竹與台北地區，而大多數的地震還是以台灣東部為主，所以類似應變、地下水或氣體異常的觀測資料，往往都是觀測資料與震源有相當大的距離，常是異常現象不明確，或是有多個可能的相關地震，增加了異常現象與地震相關連接的不確定性，因此，本報告再增加了花蓮地區 GPS 應變的系統性觀測。

東部的地體構造活動較為急遽，每個區域的應變各有不同的特性，大多有較明確的長期穩定的應變量，當有偏離長期變化的應變時，通常表示有應力的累積，也表示將有地震會發生。本年對花蓮地區 2013~2015 年的 GPS 應變作系統性的分析，可明顯的看出這段期間幾個顯著地震在各區域應變的時序變化與影響，希望對明年討論東部斷層時可以當作一個現今斷層應變速率的參考值。

花蓮 GPS 網呈南北長形分布，大致上組成八個 GPS 三角網（圖 6-4.1），用來分析各地區的地殼應變：

Net1 = BLOW(布洛灣) - HUAL(花蓮) - TUNM(銅門)
Net2 = PEPU (北埔) - SPAO(西寶) - TUNM (銅門)
Net3 = PEPU (北埔) - TUNM (銅門) - YENL (鹽寮)
Net4 = SLIN(西林) - TUNM (銅門) - YENL(鹽寮)
Net5 = SHUL(水璉) - SLIN(西林) - YENL (鹽寮)
Net6 = JPEI(瑞北) - SHUL(水璉) - SLIN(西林)
Net7 = JPEI (瑞北) - KNKO(大港口) - SHUL(水璉)
Net8 = JPEI (瑞北) - KNKO (大港口) - PING(長濱)

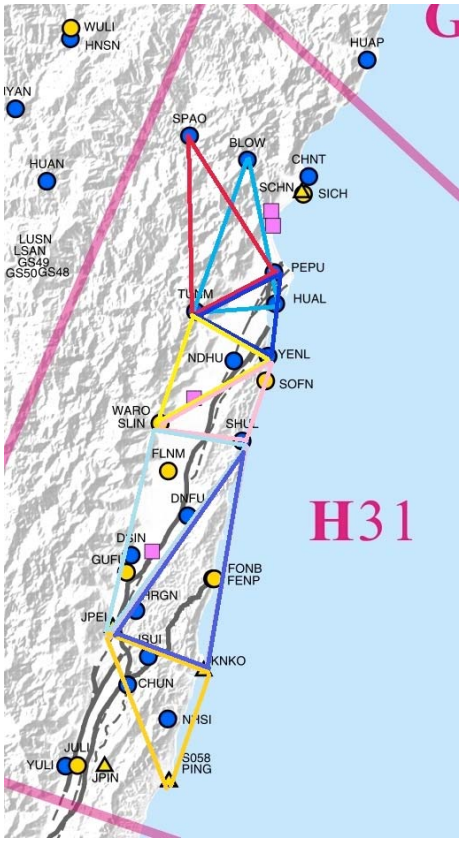


圖 6-4.1：利用花蓮地區的連續觀測 GPS 站組成八個網，用來觀測各區域的地殼應變。

這八個網的個性可又分類為北中南三區，每個地區都各自有其地體構造上的特性。Net1~3 屬花蓮北區，應變相對緩慢的壓縮，剪斜應變則為 GM1 與 GM2 大略相等。Net4~6 屬花蓮中區，應變相對的緩慢壓縮，剪斜應變則為 GM2 略大於 GM1，表現出潛移斷層在此區逐漸消失。Net7~8 屬花蓮北區，面應變呈快速壓縮，剪斜應變則為 GM2 遠大於 GM1，表現出此區域快速的 NNE 左移斷層的潛移。

花蓮北區位於花蓮以北，包括 Net1 = BLOW - HUAL – TUNM、Net2 = PEPU - SPAO – TUNM 與 Net3 = PEPU - TUNM – YENL 三個網，其面積應變、剪斜應變 GM1 以及剪斜應變 GM2 分析結果如圖 6-4.2 為例，面應變呈中等速度壓縮（-0.1 至-1.2 μstrain /yr），剪斜應變則為 GM1 與 GM2 大略相等，每年約略小於+1 μstrain 上下。

花蓮中區位於花蓮與瑞穗之間，包括 Net4 = SLIN - TUNM – YENL、Net5 = SHUL - SLIN – YENL 以及 Net6 = JPEI - SHUL – SLIN 三個 GPS 網，其面應變呈壓縮（-0.1 至-1.0 μstrain /yr），剪斜應變則為 GM2 （+1.3 μstrain /yr）略大於 GM1（~ +0.3 μstrain /yr），表現出潛移斷層在此區逐漸消失（如圖 6-4.3 為例）。

花蓮南區位於玉里、瑞穗間，有 Net7 = JPEI - KNKO – SHUL 與 Net8 = JPEI - KNKO – PING 兩個網，圖 6-4.4 為其面應變與剪斜應變的時間序列。此區面應變呈快速壓縮（~ -1.7 μstrain /yr），剪斜應變則為 GM2（~ +3.5 μstrain /yr）遠大於 GM1（~ +0.7μstrain /yr），充份表現出此區域受快速的 NNE 左移斷層潛移的影響。

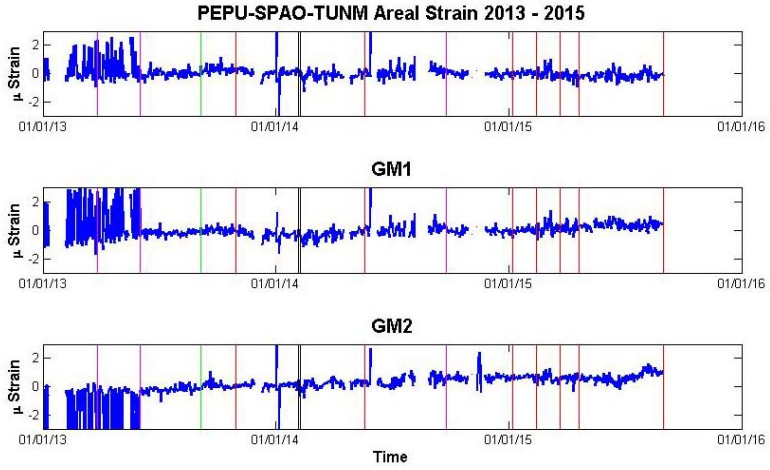


圖 6-4.2：花蓮北區的連續觀測 GPS 站網的面應變（最上）、剪斜應變 GM1（中間）與 GM2（最下）的時間應變。

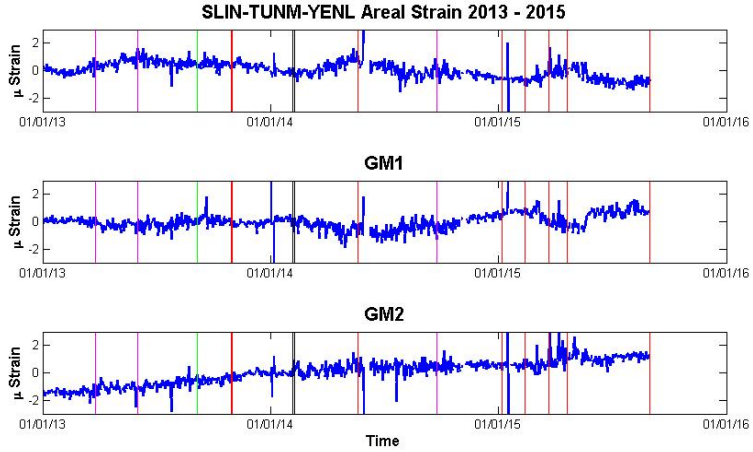


圖 6-4.3：花蓮中區的連續觀測 GPS 站網的面應變（最上）、剪斜應變 GM1（中間）與 GM2（最下）的時間應變。

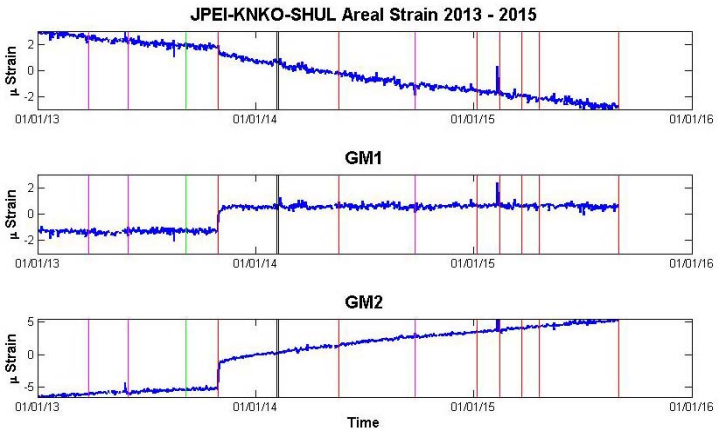


圖 6-4.4：花蓮南區的連續觀測 GPS 站網的面應變（最上）、剪斜應變 GM1（中間）與 GM2（最下）的時間應變。

若比較面應變與主要地震間的關係，則如圖 6-4.5~圖 6-4.7 的面應變時序所示，圖 6-4.5 是花蓮北區的面應變時序與地震時間畫在一起，此區基本上在這三年間對台灣地區的大地震並無明顯的反應，只有在 2013 年 3 月與 6 月的南投魚池鄉兩次規模大於六的地震後，明顯的改變了面應變的壓縮速率。另外值得一提的是在 2015 年 8 月 2 日 Net1（BLOW-HUAL-TUNM）有突跳，加速了此區域的面應變壓縮。

圖 6-4.6 顯示花蓮中區三個 GPS 應變網的應變時序與主要地震間的關係。基本上對這三年間台灣地區的幾個大地震都有明顯的反應，如在 2013 年兩次的南投魚池鄉規模大於六的地震間，或是在 2015 年出在花蓮附近四次規模大於 5.5 的地震間，都有明顯的改變了面應變的壓縮速率甚至變為舒張。另外值得一提的是在 2015 年 5 月 22 日三個網都同時有突跳，大小相等，方向有異，但都找不出任何大小地震與它有任何關連的證據。

圖 6-4.7 顯示花蓮南區的兩個 GPS 網與地震的時序關係。除了因玉里斷層的潛移所產生的快速壓縮應變與快速剪斜應變外，對大地震的反應其實與中區的網相似（若除去長期應變後可更明顯顯示），比較明顯的是在 2013 年 10 月 31 日於萬榮鄉規模 6.4 的大地震之後，除了同震約 1.0 μstrain 的壓縮（同震跳動）以外，此區的壓縮速率也有明顯的加速，這是此地震前因應力累積使得潛移速度變慢，在此地震釋放了能量，還是現在正在快速的累積能量?

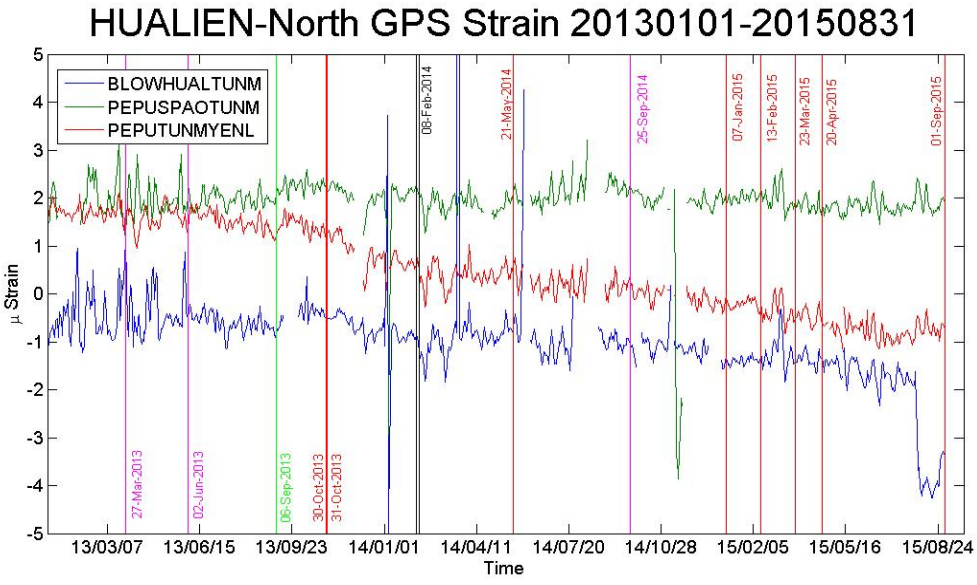


圖 6-4.5：花蓮北區三個連續觀測 GPS 站網的面應變時序與主要地震間的關係。

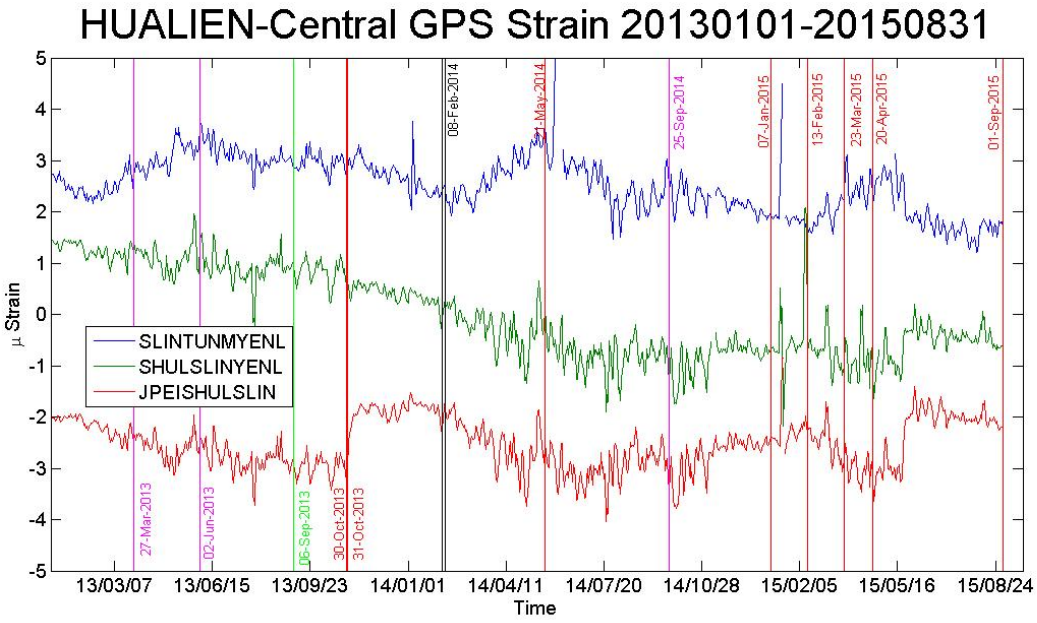


圖 6-4.6：花蓮中區三個連續觀測 GPS 站網的面應變時序與主要地震間的關係。

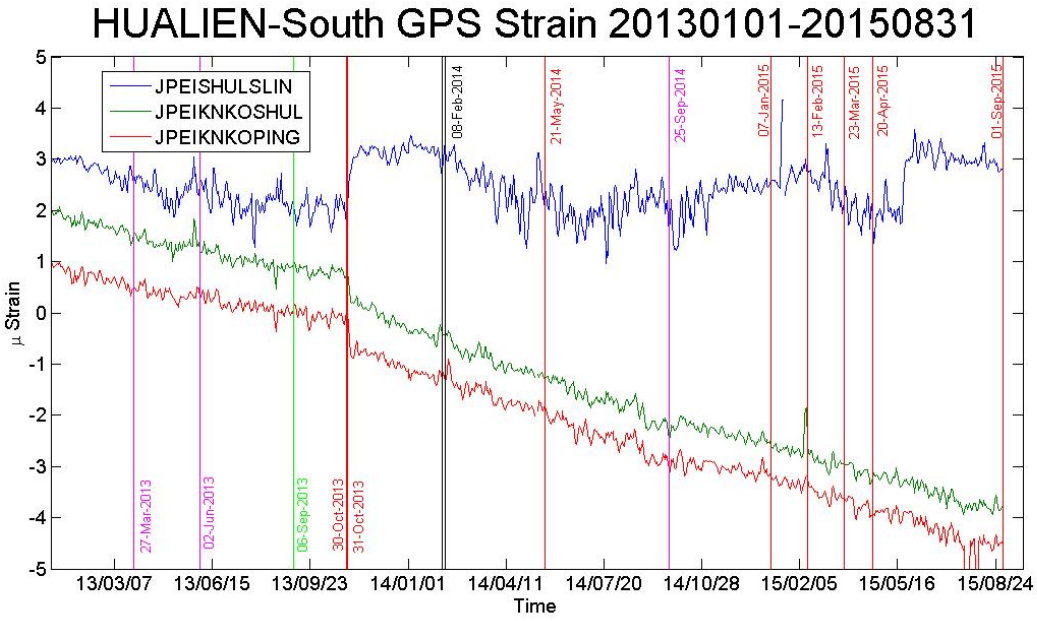


圖 6-4.7：花蓮南區兩個連續觀測 GPS 站網的面應變時序與主要地震間的關係。第一個網為屬於中區的網，列於此當作參考。

花蓮地區的 GPS 應變對這三年間的主要都明顯震前、同震與震後的變形。但由於台灣地震頻繁，兩個地震間的變形，到底是屬於前一個地震的震後變形，還是後一個地震的震前預兆，實在無法從單一觀測網來判斷，但若前後兩個地震位置不同，則可利用附近多個站的應變變化，或許可以利用地區與斷層的相關位置的不同，來判斷可能是屬於那一個地震的活動。另外，像 2013/03/27 與 2013/06/02 兩個南投魚池鄉規模分別為 6.2 與 6.5 的地震，在花蓮中部的三個網的影響最為明顯，尤其這段期間中應變也有明顯的變化，在 Net4 的變化與 Net5 及 Net6 的變化同時，但方向相反，這表示應該與魚池鄉的地震有關，因 Net4 在魚池鄉的東北方，而 Net5 與 Net6 則在東南方。

至於 2013/10/31 規模 6.4 萬榮鄉地震地理位置離 Net6 最近，所以同震或震後的變化也

最大，其餘的網則越遠越小，很明顯是這地震的影響。至於 2014/02/05~08 的嘉義群震，規模都很小,但卻對花蓮地區的每一個網都有影響,這是屬於巧合?還是有可以解釋的物理模式?

至於花蓮中部的三個 GPS 應變網在 2015/05/22 都同時有突跳，大小相等，方向有異，但都找不出任何大小地震與它有任何關連的證據;這與花蓮北部第一個網 Net1 在 2015/08/02 也有突跳，加速了此區域的面應變壓縮，也是找不到有關連的地震，這些是否為某種前兆? Net4~Net6 的跳動若是與某種斷層活動相關，應該是在 Net1 南邊，而在 Net5 與 Net6 北邊，剛好在 2015/09/01 有一個規模 5.5 的壽豐鄉地震合乎條件，是否如此可以看之後的資料變化。另外在 2015/09/16 在花蓮東北方 37~42 公里間也有規模 5.6 與 5.5 的地震，這是否與 Net1 的跳動相關？九月的結果看不出有預期的相關地震，這個變化仍然顯示與長期趨勢不一致，有可能預期的地震仍在不久的未來，或是這個 GPS 應變是其他原因造成的，但在 2003 年以來並沒有類似的現象。

基本上花蓮地區的地殼應變較為單純，板塊變界的碰撞與縱谷斷層的潛移，使得各區的長期應變較為穩定，在時間序列中，若偏離長期變動的應變速率，則傾向在下一個地震中補回來，看看圖 6-4.6 中花蓮中部三個網的變化，就可以看出地殼應變大致上是遵照此一規律在進行，一個斷層的應力累積與釋放，在 GPS 應變分析中，可以反映同震破裂、前震累積、震後釋放與調整的應力或應變的變化，但也包括井下應變儀所無法看的到的潛移變化。斷層的潛移隨時（或在一短時間）釋放剛累積的應力，所以在井下應變儀的觀測中不容易觀測的到，但 GPS 應變是由距離的變化來觀測應變，所以無法察覺到兩個 GPS 站之間的距離變化是否有累積應力。

第七章、結論與建議

（1）大地測量資料分析：GPS、精密水準測量及 PS-InSAR

本計畫計算 2015 年全臺連續全球定位系統測站共 334 站，累積歷史資料計算之速度場結果與過去長期解算結果約略相同，唯部分測站因觀測量不足，導致與歷史資料速度有較大差異。建議測站資料接收時間超過兩年以上的測站較適用於速度場分析。另部分測站也因各單位測站資訊與維修紀錄未更新而有較大差異，此基本資料交換須建立較完善的機制。

截至期末報告前，精密水準已完成 41 條測線共 1175 個測段之施測及查核；GPS 亦完成台北地區 82 點、桃竹苗地區 112 點、中部地區 156 點、嘉南地區 178 點、高屏地區 109 點、恆春地區 32 點、花東地區 70 和宜蘭地區 34 點之移動站測量及查核工作。藉由誤差分析及與 GPS 連續站座標時間序列比對後，顯示觀測資料品質符合歷年施測水準且穩定可靠。

由 PSInSAR 結果顯示，在 ERS 衛星期間（1995/4~1999/9），臺灣西南部九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的視衛星方向速度不連續性，其中跨過後甲里斷層速度梯度在視衛星方向上可達 15 mm/yr，跨過旗山斷層速度梯度則近 15 mm/yr。此外，跨過龍船斷層以及鳳山轉換帶也有明顯的速度不連續，速度梯度可達將近 15 mm/yr。在 ENVISAT 衛星期間（2004/6~2008/9），跨過六甲斷層、木屐寮斷層及龍船斷層都能看到有變形速率不一的情形，速度梯度約為近 5 mm/yr。反之，跨過後甲里斷層兩側之變形不連續則較為不明顯。在 ALOS 衛星期間（2007/1~2011/3），西南變形行為顯示九條斷層跨斷層兩側均有明顯不同程度的視衛星速度變化，其中又以旗山斷層最為明顯。另外，跨過龍船斷層以及右昌斷層也顯示出明顯的速度不連續，並且搭配LiDAR資料判釋構造線形，推斷右昌斷層有向東北延伸的可能性。綜合三階段結果，龍船斷層雖未列入為活動斷層，但其周圍變形行為持續且明顯，應持續關注。

利用 PSInSAR 技術除可觀測大面積的變形外，可克服連續 GPS 測站不足，有極大的潛力觀測隱伏的活動構造及其活動性。另外西南部地區活動變形常隨時間顯示暫態變形（transient deformation）現象，如跨越後甲里斷層（e.g., Wu et al., 2013）和龍船斷層兩側，均可觀測到暫態變形的現象，因此變形時間序列的解析是釐清活動變形的重點，建議將來大地測量應以連續 GPS 測站為主，並結合 PSInSAR 時間序列為活動斷層觀測重點。對於孕震構造的分析，由於臺灣逆衝摺皺帶的主要活動斷層，其孕震段常在內麓山帶或後陸帶西側的上部地殼，因此建議將來連續 GPS 測站架設，應以內麓山帶或後陸帶西側為主。

關於 GPS、精密水準測量的建議如下：

(1) GPS移動站部分，嘉南地區速度異常點位為GB13、高屏地區速度異常點位為G614及GC66、中部地區速度異常點位為GF53及M007，經過實地勘驗， GB13、G614、GC66及M007推測為現地地質構造或地形所引起，GF53則為人為或工程因素，分析時應特別注意修正其速度值。

(2) 精密水準部分，台2_石門至萬里測線之水準點0807和0811、縣122_新竹至五峰測線之水準點G416、縣177_新竹至五峨眉測線之水準點GB90、龍井至太平測線之水準點位G951，前述點位皆有異常變動。經過實地勘驗，除G416是因地質活動所造成外，其餘皆是因為點位附近施工或設置地點不穩定而造成，建議分析時應特別注意並停止測量或重新設置該點位。跨梅山斷層和車籠埔斷層之十二條精密水準短測線，建議在有重大事件發生後再進行測量，或者將其連結成一水準網，可以觀測出該地區之整體變化。

關於綜合剖面分析建議如下：

(1) 跨木屐寮斷層、六甲斷層、小崗山斷層、龍船斷層、旗山斷層、右昌斷層之測站數相當不足，對於解析斷層現今之運動與斷層特性相當不夠，建議加密測站。

(2) 新化斷層於 1946 新化地震之地表破裂處之淺部有潛移的斷層特性，然而斷層向西延伸的部分由於 GPS 測站數不足，對於解析此段斷層現今之特性並不充足。
(3) 由速度場分析可以得知左鎮斷層為左移之潛移斷層，這是過去並未被大家重視的，又 2010 年甲仙地震的發育可能與此斷層有關，因此建議加密此地區之測站密度以了解此斷層之活動特性。
(4) 龍船斷層與旗山斷層在地表速度場上有顯著的側向變化，顯示此二斷層現今的活動型態可能和其他如泥貫入體的構造活動有關。

（2）斷層面滑移速率及虧損率評估

本研究利用 GPS 觀測資料和三維塊體模型 DEFNODE，針對臺灣北中南部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析。模型中將研究區域共分為 29 個塊體，並將地調所公佈的活斷層（鳳山、梅嶺、龍船、右昌斷層除外）當成各塊體的邊界。利用 DEFNODE，我們同時解算符合 GPS 觀測速度的各塊體最佳剛體旋轉速率及邊界斷層上的最佳滑移速率及滑移虧損率（slip deficit rate）。在定性討論上，滑移虧損率高低可顯示該斷層在未來破裂及發生地震的潛勢，為了將此虧損率與地質資料顯示的長期滑移速率結合，本階段工作中嘗試將地質資料推估的長期滑移速率加入反演過程中，以獲得更合理的結果，但如何將這些不同研究方法的資料有效統整後，定量地計算斷層破裂機率，並放入機率地震災害評估的邏輯樹中，將是本計畫未來的研究重點。

（3）活動斷層潛勢分析

臺灣西南部之活動斷層通常長度較短，因此以尺度經驗公式計算所得之地震矩規模也較小，以特徵地震模式計算小規模地震之復發間隔就會變短，例如新化斷層及左鎮斷層之復發間隔不會超過 100 年。在進行潛勢評估時，建議可採用專家之建議，考慮斷層可能延伸之長度，使評估之發生地震規模變大。另外，西南部的活動斷層不一定符合特徵地震模式，建議對於活動斷層誘發地震之次數與規模特性仍未知者，可再加入截切指數模式為邏輯樹之分支進行評估，增加大規模地震之復發間隔以符合實際歷史紀錄情況。

後甲里斷層實為前緣主斷層面的背衝斷層，建議下一階段加入背衝斷層之主斷層破裂系統進行評估。對於未列於地調所公布之活動斷層之外的孕震構造(如右昌斷層、龍船斷層)，建議下一階段評估其震源參數，如幾何形貌、斷層面孕震深度、滑移速率等，以進行斷層潛勢評估工作。

現階段潮州斷層與恆春斷層是分為兩條斷層考慮其潛勢，而這兩條斷層其是否有系統破裂之可能性，目前受限於資料之不足，仍有爭議，建議可在下一階段潛勢評估中探討。

南部斷層周圍變形行為常伴隨著泥貫入體之影響，單純由泥貫入體造成之地形通常為對稱圓錐形，而南部部分背斜(例如小琉球、龜山、馬鞍山)之抬升雖可能有泥貫入體之貢獻，但地形呈現長條形，因此除泥貫入影響外，仍有構造作用造成之變形，而泥貫入體應是沿褶皺軸裂縫發育。滑移速率參數為避免泥貫入體影響，不採用短期滑移速率資料做評估。

為了建立塊體模型與潛勢評估之連結性，建議建立全臺灣的斷層模型，反推基底的滑移速率，並檢視各斷層虧損量的合理性。

部分活動斷層缺乏地質調查的資料評估長期滑移速率，本計畫建議暫時以 GPS 短期滑移速率或是塊體模型之滑移虧損率結果作為長期滑移速率進行評估，然而短期滑移速率是否能取代長期滑移速率，仍應審慎使用。

（4）井下應變儀與地球化學觀測

井下應變儀部分，目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。2014 年 12 月至 2015 年 11 月期間，在嘉義網觀測到 3 個

應變異常事件：2/14 台東近海地震、3/23 花蓮近海地震及 4/20 花蓮外海地震；新竹網觀測到 6 個應變異常事件：2014/12/11 基隆外海地震、1/7 花蓮秀林地震、3/23 花蓮近海地震、4/20 花蓮外海地震、5/11 苗栗西部近海地震及 2015/6/21 花蓮外海地震；台北網觀測到 4 個應變異常事件：2014/12/11 基隆外海地震、1/7 花蓮秀林地震、3/23 花蓮近海地震及 10/19 宜蘭近海地震。針對這七個異常事件進行分析，初步判斷出該應變異常可能是地震相關的應變異常訊號。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至 2015 年 9 月為止，檢視井下應變儀含有前兆訊號並成功對應地震的機率在嘉義網、新竹網與台北網分別有：67%、77%與 75%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：33%、23%與 25%；地震前沒有前兆訊號的機率為：29.4%、62%與 36%。

關於井下應變儀的建議如下：井下應變儀的資料分析非常需要環境監測資料的輔助，以釐清應變的來源，降雨與地下水監測則是兩個非常重要的參考監測資料。以今年的共站降雨資料來看，台北網與新竹網的共站降雨資料可能有明顯的問題（圖 7.1），需要進行維修或校正。另外在地下水的部分，過去嘉義測網的應變有很大的應變分量與共站地下水的變動相關，可利用地下水的監測資料進行校正，但 2014 年 5 月以後嘉義網達邦測站（DARB）地下水位無資料，只剩下嘉義網太興測站（TAIS）的水位站可以輔佐校正嘉義網的應變資料，但也因太興測站（TAIS）地下水位站於 2013 年重新埋設之後，地下水對於應變的影響比例與時間上都與之前的地下水位站不同（圖 7.2），因此需要再重新分析，也建議達邦測站（DARB）修復地下水位監測站以利應變分析。近來研究發現新竹網梅花測站（PFMT）對於地下水的反應與嘉義測網相反，地下水水位的上升，對應的是應變壓縮（圖 7.3）。如何以物理模型來解釋井下應變儀不同測站對於地下水的相反反應是未來重要的研究，也有助於校正應變儀的資料，更一步對構造活動的應變作分析。

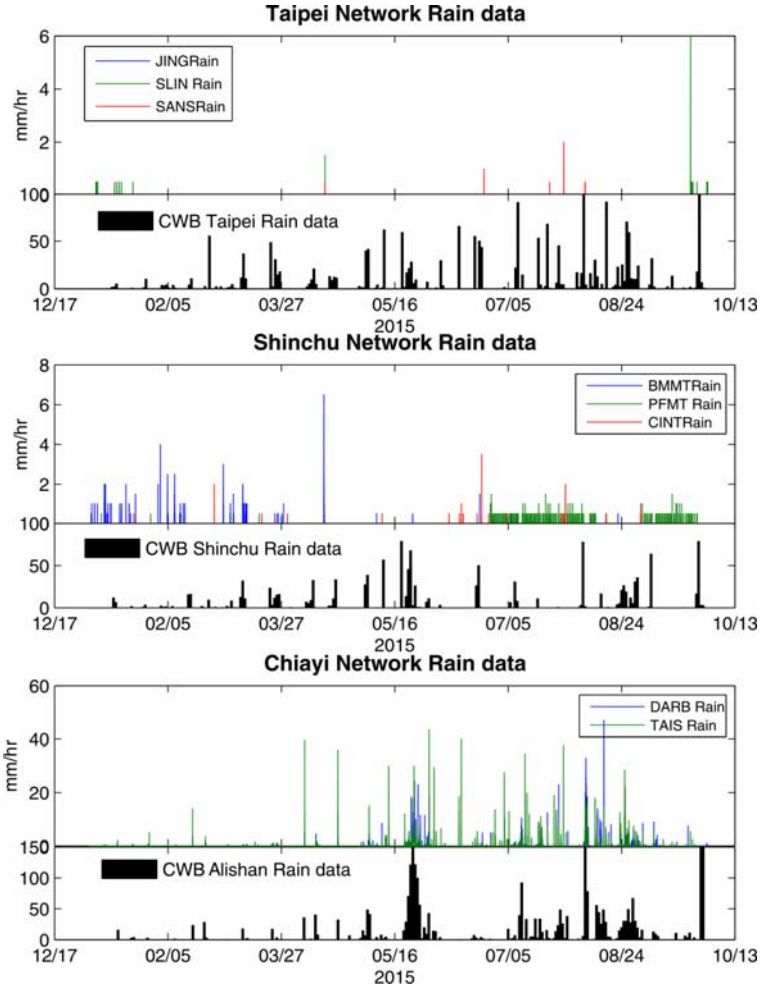


圖 7.1：2015 年 1 月至 10 月井下應變儀雨量計的資料。

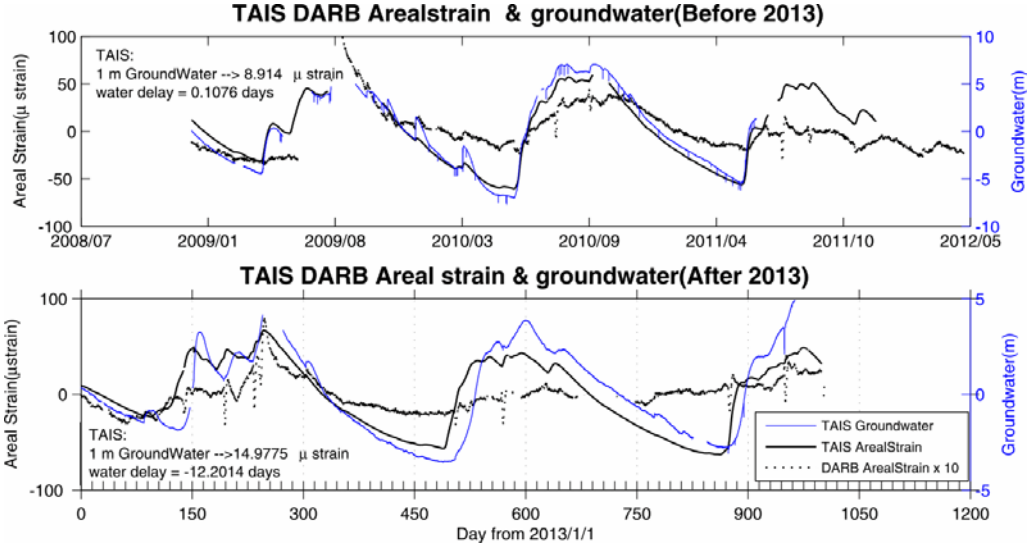


圖 7.2：嘉義網太興測站（TAIS）與達邦測站（DARB）平面應變與地下水於 2013 年前後的比較。

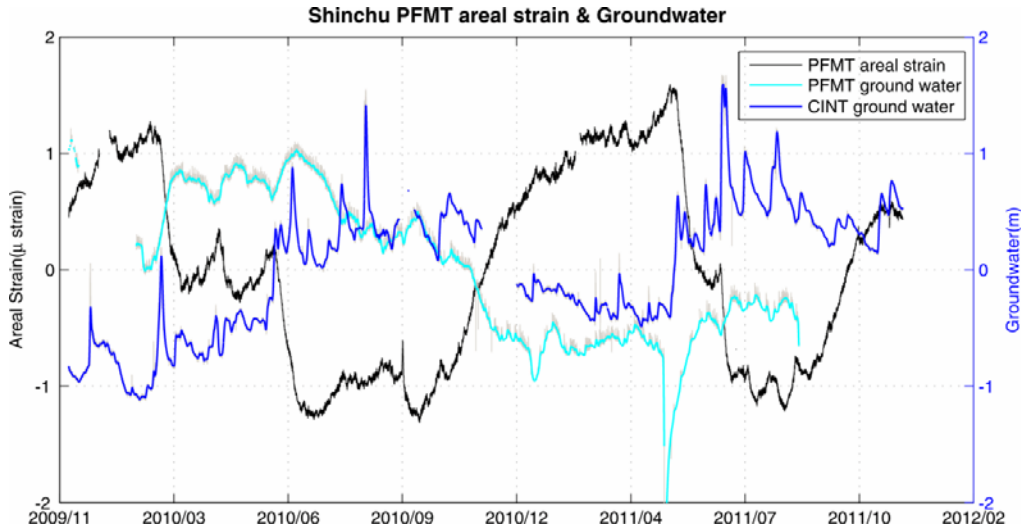


圖 7.3：新竹網梅花測站（PFMT）面應變與地下水的關係。

以土壤氣體異常變化之方法來評估斷層活動性或地震活動之發生，並利用時序分析方法處理不同觀測站的數據，可進一步以較客觀的方式辨識出與地震前兆的異常反應。本年度觀測期間，在 2014/12/11 芮氏規模 6.7 基隆外海地震發生前 14 日，大平地土壤氣體觀測站出現土壤氡氣異常升高的變化，可能為該地震之地震前兆反應。另外，1/7 花蓮秀林芮氏規模 5.5 的地震、3/23 花蓮近海芮氏規模 6.2 的地震、4/20 花蓮外海芮氏規模 6.4 的地震，以及 9/1 與 9/16 花蓮芮氏規模 5.5 與 5.7 的地震，均同時有二至三座土壤氣體觀測站出現氡氣異常升高的變化；其中，前二與後二者等四起地震震央均落於觀測站過去所建立的反應圈內，而 4/20 的地震震央雖接近反應圈但並未為包含於內，顯示各測站反應圈可能尚須進行些為調整。引發多數測站出現異常之規模較大的地震，若確認為顯著的震前訊號，可供修正各測站反應範圍之用。此外，2015/5/11 於苗栗西部外海所發生的罕見地震前 16 日，在大平地測站發現氡氣異常。此五起地震的氡氣異常資料與井下應變儀之應力異常時間點相近，可增進判斷為震前異常的可信度。地下水位監測方面，多數水位起伏為降雨所致，並於上述幾起地震中出現同震現象，但未觀察到顯著的震前水位異常，除了 11/24 於新樂站觀察到 12 公分顯著的地下水位下降。今年地下水位變化並未觀測到顯著的異常，應與過去較敏感的井無資料有關，因此建議未來能修復以前曾出現異常的井，如中興井、達邦井。2014 年 12 月至 2015

年 11 月計畫執行期間，由於恆春半島附近未發生強震（Mw＞6.0），社頂站地下水水氡濃度觀測均無發現異常下降之地震前兆。社頂站屬於自由含水層，地下水水氡濃度受季節性降雨量影響，呈現一週期變化。未來可進一步應用時頻分析方法，分離出水氡濃度之週期訊號，並探討此訊號與降雨量及地下水位之關係。目前，沄水溶解氣體觀測站的變化穩定，並在臨近測站的地震事件或東部地區較大的地震事件前，有機會觀測到異常變化，適合長期觀測。不過，本年度常因儀器問題造成觀測資料中斷，目前持續改善中。

（5）GPS 應變與井下應變儀及其他觀測

在今年的觀測中，我們從新調整了井下應變儀的係數，結果仍可看到相關的變化，但所有的井下應變的變化尺寸相對縮小，但長期的趨勢變化仍然相當一致。GPS 應變對於其他觀測量所觀測到的異常也都有對應的 GPS 應變變化，但對於 2015/02/14 的地震也認為與其它三個地震有相對等的變化，連續幾個在 2015 年臺灣東部的主要大地震，地震間的應變模式也都相同，都在地震前約 40 天由壓縮轉舒張，然後到地震前幾天再突然轉壓縮，然後地震發生後幾天，又重複新的周期，由壓縮轉舒張。

GPS 的地表應變與附近的井下應變儀的地底下應變似乎在長期趨勢相當一致，但在短期則有所差異，新竹與嘉義各自的兩個相鄰測站的變化很明顯的不同，但都與各自涵蓋的 GPS 三角網有相同的長期應變，這主要的原因應該是地殼的長期應變（或說應力）的變化應該是控制在整體的地殼應力累積，而區域性的斷層活動則控制著短期、區域的應變，因此，縱使相鄰近的兩個站，會因為在斷層的不同方位而會有不同的應變，甚至與同一地區的 GPS 地表應變有所不同。因此，兩種資料放在一起比較而有所差異時，或是相鄰兩站在做完環境因素修正之後仍有所差異，則可以判斷造成這種差異的因素應該是來自區域性的斷層活動。

新調整的井下應變儀資料與 GPS 應變顯然在尺度似乎較為統一， 都在同一個數量級，比以前不同測站相差兩個以上的數量級有很大的改善。但為何新竹地區的井下應變儀在與 GPS 同調後，其變化似乎變化都太小，尚待進一步探討。

另外今年對花蓮地區的 GPS 測站做了系統性的分析，由南到北組成了八個 GPS 觀測網，用來分析每個地區的地殼應變，及與大地震間的關係。花蓮地區的 GPS 應變這三年間有明顯震前、同震與震後的變形。但由於台灣地震頻繁，兩個地震間的變形，到底是屬於前一個地震的震後變形，還是後一個地震的震前預兆，實在無法從單一觀測網來判斷，但若前後兩個地震位置不同，則可利用附近多個站的應變變化，或許可以利用地區與斷層的相關位置的不同，來判斷可能是屬於那一個地震的活動。像 2013/03/27 與 2013/06/02 兩個南投魚池鄉規模分別為 6.2 與 6.5 的地震，在花蓮中部的三個網的影響最為明顯，尤其這段期間中應變也有明顯的變化，在 Net4 的變化與 Net5 及 Net6 的變化同時，但方向相反，這表示應該與魚池鄉的地震有關，因 Net4 在魚池鄉的東北方，而 Net5 與 Net6 則在東南方。

至於 2013/10/31 規模 6.4 萬榮鄉地震地理位置離 Net6 最近，所以同震或震後的變化也最大，其餘的網則越遠越小，很明顯是這兩個地震的影響。至於 2014/02/05~08 的嘉義群震，規模都很小，但卻對花蓮地區的每一個網都有影響，這是屬於巧合? 還是有可以解釋的物理模式?

至於花蓮中部的三個 GPS 應變網在 2015/05/22 都同時有突跳，大小相等，方向有異，但都找不出任何大小地震與它有任何關連的證據;這與花蓮北部第一個網 Net1 在 2015/08/02 Net1 也有突跳，加速了此區域的面應變壓縮，也是找不到可以有關連的地震，這些是否為某種前兆? Net4~Net6 的跳動若是與某種斷層活動相關,應該是在 Net1 南邊,而在 Net5 與 Net6 北邊，剛好在 2015/09/01 有一個規模 5.5 的壽豐鄉地震合乎條件，是否如此可以看之後的資料變化。另外在 2015/09/16 在花蓮東北方 37~42 公里間也有規模 5.6 與 5.5 的地震，這是否與 Net1 的跳動相關？九月的結果看不出有預期的相關地震，這個變化仍然顯示與長期趨勢不一致，有可能預期的地震仍在不久的未來，或是這個 GPS 應變是其他原因造成的，但在 2003 年以來並沒有類似的現象。

基本上花蓮地區的地殼應變較為單純，板塊變界的碰撞與縱谷斷層的潛移，使得各區的長期應變較為穩定，在時間序列中，若偏離長期變動的應變速率，則傾向在下一個地震中補回來，看看圖六中花蓮中部三個網的變化，就可以看出地殼應變大致上是遵照此一規律在進行，一個斷層的應力累積與釋放，在 GPS 應變分析中，可以反映同震破裂、前震累積、震後釋放與調整的應力或應變的變化，但也包括井下應變儀所無法看的到的潛移變化。斷層的前儀隨時（或在一短時間）釋放剛累積的應力，所以在井下應變儀的觀測中不容易觀測的到，但 GPS 應變是由距離的變化來觀測應變，所以無法察覺到兩個 GPS 站之間的距離變化是否有累積應力。

參考文獻

Angelier, J., Chu, H.T. Lee, J.C. and Hu, J.C. (2000) Active faulting and earthquake hazard: The case study of the Chihshang fault, Taiwan. Journal of Geodynamics, 29, 151-185.

Angelier, J., J.-C. Lee, H.-T. Chu, and J.-C. Hu (2003) Reconstruction of fault slip of the September 21st, 1999, Taiwan earthquake in the asphalted surface of a car park, and co-seismic slip partitioning, J Struct Geol, 25(3), 345-350.

Bardsley, W., and D. Campbell (2000), Natural geological weighing lysimeters: calibration tools for satellite and ground surface gravity monitoring of subsurface water-mass change, Natural Resources Research, 9(2), 147-156.

Baubron, J.-C., Rigo, A. and Toutain, J.-P. (2002) Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). Earth Planetary Science Letter, 196, 69-81.

Bock, Y, Abbot RI, Counselman, CharlesC III, King RW. (1986) A demonstration of 1–2 parts in 107 accuracy using GPS. Bulletin géodésique. 60:241-254.: Springer-Verlag 10.1007/BF02521056

Bolt, B.A. (1999) Earthquake, 4th edition, W.H. Freeman and Company, New York, 366pp.

Bomford, G., 1985, Geodesy, 4th Ed., Oxford University Press.

Bonilla, M.G. (1975) A review of recently active faults in Taiwan: U. S. Geological Survey Open-File Report 75-41, 58pp.

Bonilla, M.G. (1977) Summary of Quaternary faulting and elevation changes in Taiwan: Mem. Geol. Soc. China, no.2, 43-55.

Brace, W.F., Paulding, B.W.Jr. and Scholz, C. (1966) Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. Journal of Geophysical Research, 71, no. 16, 3939-3953.

Champenois, J., Fruneau, B., Pathier, E., Deffontaines, B. Lin, K.-C., Hu, J.-C. (2012) Monitoring of active tectonic deformations in the Longitudinal Valley (Eastern Taiwan) using Persistent Scatterer InSAR method with ALOS PALSAR data. Earth Planet. Sci. Lett., 337-338, 144–155, doi: 10.1016/j.epsl.2012.05.025.

Chang, C.-P., T.-Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J.-C. Lee, and S.-B. Yu (2003) Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data, Earth Planet Sc Lett, 214(1), 115-127.

Chapman, S., and Lindzen, R.S. (1970) Atmospheric Tides, D. Reidel Publishing, Dordrecht-Holland, 200pp.

Chen, C.H., Wang, C.H., Liu, J.Y., Liu, C., Liang, W.T., Yen, H.Y., Yeh, Y.H., Chia, Y.P., and Wang, Y. (2010) Identification of earthquake signals from groundwater level records using the HHT method. Geophysical Journal International, 180, 1231-1241.

Chen, W.S., and Wang, Y. (1996) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Geology of Taiwan 7.

Chen, Y.-G., Liu, T.-K. (2000) Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan. Quat. Sci. Rev. 19, 923–930.

Chen, Yue-Gau, T. K. Liu (1993) Holocene Radiocarbon Dates In Hengchun Peninsula And Their Neotectonic Implications. Journal of the Geological Society of China, 36(4): 457-479.

Cheng, W.B., S.K. Hsu, C.H. Chang (2012) Tomography of the southern Taiwan subduction zone and possible emplacement of crustal rocks into the forearc mantle. Global and Planetary Change 90–91, 20–28.

Chiang, C.S., Yu, H.S., and Chou, Y.W. (2004) Characteristics of the wedge-top depozone of the southern Taiwan foreland basin system. Basin Research, 16, pp. 65-78.

Chiang, S. C. (1971) Seismic Study of the Chaochou structure, Pingtung, Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.8, 281-294.

Ching, K.-E., R.-J. Rau, K. M. Johnson, J.-C. Hu, and J.-C. Lee (2011) Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, J. Geophys. Res., 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.

Ching, K.E., Rau, R.J., Lee, J.C., and Hu, J.C. (2007) Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995-2005. Earth Planet. Sci. Lett., 262, pp.601-619.

Cramer, C. H. (2001) A seismic hazard uncertainty analysis for the New Madrid seismic zone, Engineering Geology, 62, 251-266.

Cramer, C. H., Petersen, M. D., and Reichle, M. S. (1996) A Monte Carlo approach in estimating uncertainty for a seismic hazard assessment of Los Angeles, Ventura, and Orange counties, California, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1681-1691.

Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl (Eds.) (2007) Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Berne, 612 pp.

Dobrovolsky, P., Zubkov, S.I. and Miachkin, V.I. (1979) Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure and Applied Geophysics, 117, 1025-1144.

Dreiss, S. J. (1989) Regional scale transport in a karst aquifer: 1. Component separation of spring flow hydrographs, Water Resour Res, 25(1), 117-125.

Etiope, G. and Lombardi, S. (1995) Soil gases as fault tracers in clay basin: a case history in the Siena basin (Central Italy). Gas Geochemistry. Science Reviews, Northwood, 19-29.

Etiope, G. and Martinelli, G. (2002) Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 129, 185-204.

Francis T. Wu, H. Kuo-Chen, K.D. McIntosh (2014) Subsurface imaging, TAIGER experiments and tectonic models of Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences 90, 173–208.

Fruneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C.-T., Wang, H.-T., Angelier, J., Rudant, J.-P., Chang, C.-P. (2001) Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry. Geophys. Res. Lett. 28, 3071–3076.

Fu, C.C., Yang, T.F., Du, J., Walia, V., Chen, Y.G., Liu, T.K. and Chen, C-H. (2008) Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan. Radiation Measurements, 43, 348-352.

Fu, C.C., Yang, T.F., Walia, V., Liu, T.K., Lin, S.J., Chen, C-H. and Hou, C.S. (2009) Variations of soil-gas composition around the active Chihshang Fault in a plate suture zone, eastern Taiwan. Radiation Measurements, 44 (9-10):940-944.

Giammanco, S. and Gurrieri, S. (1997) Soil CO2 degassing along tectonic structures of Mount Etna (Sicily): the Pernicana fault. Applied Geochemistry, 12, 429-436.

Gladwin M.T. (1977) Simultaneous monitoring of stress and strain in massive rock, Pageoph, 115, 267-274.

Gladwin, M. T., and R. Hart (1985) Design Parameters for Borehole Strain Instrumentation, Pure Appl Geophys, 123(1), 59-80.

Gladwin, M.T. (1974) Ultrasonic stress monitoring in active sites: observation of the time dependence of stress relief mechanisms in mining pillars, Eos Trans. AGU, 55, 1192.

Gladwin, M.T. (1982) Ultrasonic stress monitoring in underground mining, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 221-228.

Gladwin, M.T. (1984) High precision multi component borehole deformation monitoring, Rev. Sci. Instrum., 55, 2011-2016.

Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., Higbie, J.W. and Hart, R.G. (1991) A medium term precursor to the Loma Prieta earthquake? Geophys. Res. Lett., 18, 1377-1380.

Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979) A moment magnitude scale. Journal of Geophysical

Research, 84(B5), 2348-2350.
Hart, R. H. G., M. T. Gladwin, R. L. Gwyther, D. C. Agnew, and F. K. Wyatt (1996) Tidal calibration of borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity, J Geophys Res-Sol Ea, 101(B11), 25553-25571.
Haubrich, R.A. (1965) Earth noise, 5 to 500 millicycles per second, 1, spectral stationarity, normality and nonlinearity, J. geophys. Res.,70, 1415-1427.
Hauksson, E. (1981) Radon content of groundwater as an earthquake precursor: Evaluation of worldwide data and physical basis. Journal of Geophysical Research, 86, no. B10, 9397-9410.
Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky (2006), Massachusetts Institute of Technology: GPS Analysis at MIT, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Release 10.3, September 2006.
Hodgkinson, K., J. Langbein, B. Henderson, D. Mencin, and A. Borsa (2013) Tidal calibration of plate boundary observatory borehole strainmeters, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, n/a-n/a.
Hooper A; Bekaert D; Spaans K; Arikan M (2012) Recent advances in SAR interferometrytime series analysis for measuring crustal deformation, Tectonophysics, 514-517, pp.1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013
Hsieh, S. H. (1970) A study on geology and gravity anomaly on the Pingtung Plain, Taiwan: Proc. Geol. Soc. China, no13.
Hsu, C.M., Chang, F.C. and Wang, Y. (1985) Fault-induced fissures at the Tulungwan fault zone, southern Taiwan, and its neo-tectonic implications: Acta Geologica Taiwanica, v.23, p. 197-207.
Hsu, T.L. (1962) Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Memoir of the Geological Society of China, 1: 95-102.
Hsu, T.L. (1956) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Bull. Geol. Surv. Taiwan, no.8, 39-64.
Hu, C.C., and Sheen, H.C. (1989) An evaluation on the hydrocarbon potential of the Niushan and Lungtien structures in the Tainan area. Petrol. Geol. Taiwan, 25, 11-34.
Hu, J.C., C.S. Hou, L.C. Shen, Y.C. Chan, R.F. Chen, C. Huang, R.J. Rau, H.S. Chen, C.W. Lin, M.H. Huang, and P.F. Nien (2007) Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pintung area of southwestern Taiwan. J. Asian Earth Sci., 31, 287-302.
Huang, M. H., J. C. Hu, C. S. Hsieh, K. E. Ching, R. J. Rau, E. Pathier, B. Fruneau, and B. Deffontaines (2006) A growing structure near the deformation front in SW Taiwan as deduced from SAR interferometry and geodetic observation, Geophys Res Lett, 33(12).
Huang, Mong-Han, Jyr-Ching Hu, Kuo-En Ching, Ruey-Juin Rau, Chia-Sheng Hsieh, et al. (2009) Active deformation of Tainan tableland of southwestern Taiwan based on geodetic measurements and SAR interferometry. Tectonophysics, 466, pp.322-334.
Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. L. C. Wu, H. H. Shih, Q. N. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454(1971), 903-995.
Hung, J.H., Wiltschko, D.V., Lin, H.C., Hickman, J.B., Fang, P., and Bock, Y. (1999) Structure and Motion of the Southwestern Taiwan Fold and Thrust Belt, TAO, 10(3), 543-568.
Igarashi, G. and Wakita, H. (1995) Geochemical and hydrological observations for earthquake prediction in Japan. Journal of physics of the earth, 43, 585-598.

Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y. (1995) Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. Science, 269, no. 5220, 60-61.

Igarashi, G., Tohjima, Y. and Wakita, H. (1993) Time-variable response characteristics of groundwater radon to earthquakes. Geophysical Research Letters, 20, no. 17, 1807-1810.

Igarashi, G.; Wakita, H. and Sato, T. (1992) Precursory and coseismic anomalies in well water levels observed for the Februaru 2, 1992 Tokyo Bay earthquake. Geophysical Research Letters, 19, 1583-1586.

J. Bruce H. Shyu, Yi-Rung Chuang, Ya-Lin Chen, Yi-Rui Lee, Thomas Chin-Tung Cheng (submitted) A new on-land seismogenic structure source database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) project for seismic hazard analysis.

Jamison, W.R. (1991) Kinematics of compressional fold development in convergent wrench terranes: Tectonophysics, 190, 209-232.

Jan, C.-D., T.-H. Chen, and H.-M. Huang (2011) Analysis of rainfall-induced quick groundwater-level response by using a Kernel function, Paddy and Water Environment, 1-10.

Johnston, M., A. Linde, I. Sacks, and D. Myren (1982) Borehole dilatometer strain array—installation and preliminary results from the Mojave desert, EOS, 63, 430.

Johnston, M.J.S., Linde, A.T. and Agnew, D.C. (1994) Continuous borehole strain in the San Andreas Fault zone before, during, and after the 28 June 1992, Mw 7.3 Landers, California Earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 799-805.

Johnston, M.J.S., Linde, A.T., Sacks, I.S. and Myren, D. (1986) Borehole dilatometer strain array- Preliminary results from Mojave Desert, Eos Trans. AGU, 63, 430.

Kanamori, H. (1977) The energy release in great earthquakes. J. Geophys. Res., 82(B20), 2981-2988.

Keefer, D. L., and Bodily, S. E. (1983) Three-point approximations for continuous random variables: Management Science, 29, 595-609.

Kostrov, V. V. (1974) Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rocks. Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth, 1, 23-40.

Kuo, M.C.T., Fan, K., Kuochen, H. and Chen, W. (2006a) A mechanism for anomalous decline in radon precursory to an earthquake. Ground Water, 44, no. 5, 642-647.

Kuo, T., Cheng, W., Lin, C., Fan, K., Chang, G. and Yang, T. (2010b) Simultaneous declines in radon and methane precursory to 2008 Mw 5.0 Antung earthquake: corroboration of in-situ volatilization. Natural Hazards, Vol. 54, 367-372.

Kuo, T., Fan, K., Kuochen, H., Han, Y., Chu, H. and Lee, Y. (2006b) Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung Earthquake. Journal of Environmental Radioactivity, 88, no. 1, 101-106.

Kuo, T., Lin, C., Chang, G., Fan, K., Cheng, W. and Lewis, C. (2010a) Estimation of aseimic crustal-strain using radon Repetitive radon precursors of the 2003 M 6.8, 2006 M 6.1, and 2008 M 5.0 earthquakes in eastern Taiwan. Natural Hazards, 53, no. 2, 219-228.

Kuo, T., Lin, C., Fan, K., Chang, G., Lewis, C., Han, Y., Wu, Y., Chen, W. and Tsai, C. (2009) Radon anomalies precursory to the 2003 Mw=6.8 Chengkung and 2006 Mw=6.1 Taitung earthquakes in Taiwan. Radiation Measurements, 44, no. 3, 295-299.

Kuo, T., Su, C., Chang, C., Lin, C., Cheng, W., Liang, H., Lewis, C. and Chiang, C. (2010c) Application of recurrent radon precursors for forecasting large earthquakes (Mw > 6.0) near Antung, Taiwan. Radiation Measurements, 45, 1049-1054.

Lacombe, O., Mouthereau, F., Angelier, J., Deffontaines, B. (2001) Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan: Tectonophysic, 333, 323-345.

Lacombe, O., Mouthereau, F., Deffontaines, B., Angelier, J., Chu, H.-T., Lee, C.-T. (1999) Geometry and Quaternary kinematics of fold-and-thrust units of southwestern Taiwan. Tectonics 18, 1198–1223.

Le Provost, C., M.L. Genco, and F. Lyard (1995) Modeling and predicting the tides over the World Ocean, In Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Studies, D.R. Lynch and A.M. Davies (Eds.), AGU, 175-202.

Liew, P.M. and Lin, C.F. (1987) Holocene activity of the Hengchun Peninsula as evidenced by the deformation of marine terraces. Mem. Geol. Soc. China, 9: 241-259.

Lin, Andrew T., Liu, C.S., Lin, C.C., Schnurle, P., Chen, G.Y., Liao, W.Z., Teng, L.S., Chuang, H.J. and Wu, M..S. (2008) Tectonic features associated with the overriding of an accretionary wedge on top of a rifted continental margin: An example from Taiwan, Marine Geology 255:186–203.

Liu, C. S., Huang, I. L., Teng, L. S. (1997) Structural features off southwestern Taiwan. Marine Geology, 137, pp. 305-319.

Loevenbruck, A., R. Cattin, X. Le Pichon, M.-L. Courty, and S.-B. Yu (2001) Seismic cycle in Taiwan derived from GPS measurements, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 333(1), 57-64.

Lyne, V. (1979) Recursive modeling of sluggish and time-varying streamflow responses, M.Eng. Sc. Thesis.

Lyne, V., and M. Hollick (1979) Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, paper presented at Institute of Engineers Australia National Conference.

Mark D. Petersen, Arthur D. Frankel, Stephen C. Harmsen, Charles S. Mueller, Kathleen M. Haller, Russell L. Wheeler, Robert L. Wesson, Yuehua Zeng, Oliver S. Boyd, David M. Perkins, Nicolas Luco, Edward H. Field, Chris J. Wills, and Kenneth S. Rukstales (2008) Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps. USGS Open-File Report 2008–1128.

McCaffrey, R. (2005) Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data, J. Geophys. Res., 110, B07401, doi:10.1029/2004JB003307.

McCalpin, J. P. (1996) Application of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research. McCalpin ed. "Paleoseismology", Academic Press, p.439-493.

McGuire, R. K., and Shedlock, K. M. (1981) Statistical Uncertainties in Seismic Hazard Evaluations in The United States, Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1287-1308.

Meng, C. Y. (1967) The structural development of the southern half of western Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.2, 1-20.

Munk, W. H. and D. E. Cartwright (1966) Tidal spectroscopy and prediction. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 259, 533–581.

National Research Council (1988) Probabilistic Seismic Hazard Analysis, National Academic Press, Washington, D.C., 97pp.

NOAA (2000) TIDAL DATUMS AND THEIR APPLICATIONS., NOAA Special Publicaation NOS CO-OPS 1.

Pacific Gas and Electric Company (PG&E) (1988) Diablo Canyon Power Plant Long term Seismic program, Final Report unpublished document.

Pearson, C., J. Beavan, D. Darby, G. Blick, and R. Walcott (1995) Strain distribution across the Australian-Pacific plate boundary in the central South Island, New Zealand, from 1992 GPS and earlier terrestrial observations, Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 100(B11), 22071-22081.

Price, N.J. and J.W. Cosgrove (1990) Analysis of Geological Structures: Cambridge Univ. Press, Cambridge, 502pp.

Roeloffs, E. (2005) Long-term trends in borehole strainmeter and tiltmeter data. 2005 Strainmeter and Tiltmeter Course.

Roeloffs, E. (2010) Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole strainmeters: Roles of vertical and shear coupling, J Geophys Res-Sol Ea, 115, 25.

Savage, J., and M. Lisowski (1995) Strain accumulation in Owens Valley, California, 1974 to 1988, B Seismol Soc Am, 85(1), 151-158.

Schaffrin, B, Bock Y. (1988) A unified scheme for processing GPS dual-band phase observations. Bulletin géodésique. 62:142-160.: springer-Verlag 10.1007/BF02519222.

Scherer, W.D. (1990) Decomposition of Sea Level Variations: An Approach, National Ocean Service, Oceanography Workshop, unpublished manuscript.

Schureman, P. (1941) Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, Special Publication No. 98 (1940), U.S. Coast and Geodetic Survey, U.S. Govt. Printing Office, revised ed.

Sun, S. C. (1970) Photogeologic study of the Tainan-Hsinying Coastal plain, Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, 7, 133-144.

Sun, S.C. (1964) Photogeologic study of the Tainan-Kaohsiung coastal plain area, Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no. 3, p. 39-51.

Suppe, J. (1980) Imbricated structure of western foothills belt, south central Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, n. 30, p. 163 -176.

Takemoto, S., Yamamoto, T., Mukai, A., Otsuka, S. and Fujimori, K. (2003) Crustal strain observation for nine years with a laser strainmeter in Kobe, Japan. J. Geody., 35, 483-498.

Tamura, Y.; Sato, T.; Ooe, M.; Ishiguro, M. (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. In: Geophysical Journal International, No. 104, pp. 507-516. Oxford.

Tomita, Y. (1955) Some geomorphological considerations to the Chaochou fault in south Taiwan (Formosa), China: Science Reports of Tohoku University, series 7, no. 4, p. 58-66.

Tsan, S. F. and W. P. Keng (1968) The Neogene rocks and major structural features of southwestern Taiwan. Proc. Geol. Soc. China, 11, p. 45-59.

Tung, H., and Hu, J.-C. (2012) Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of centralTaiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. Tectonophys., 578, 126-135.

Vita-Finzi C., Lin J. C. (2005) Neotectonics and seismic hazard assessment in Hengchun Peninsula, southern Taiwan. Computes Rendus Geosciences, 337(13), 1194-1199.

Wang, S. (1976) ERTS-1 satellite imagery and its application in regional geologic study of southwestern Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.13, 37-57.

Ward, S. N. (1998) On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135(3), 1011-1018.

Wells, D. L., and K. J. Coppersmith (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seis. Soc. Am., 84, 974–1002.

Working Group on California Earthquake Probabilities 2007 (2008) The uniform California earthquake rupture forecast, Version 2. USGS Open-File Report 07-1437.

Wu, Y.-Y., Hu, J.-C., Lin, G.-P., Chang, C.-P., Tung, H., Lu, C.-H. (2013) Transient active deformation in Tainan Tableland using Persistent Scatterers SAR interferometry. Bull. Soc. Geol. France, in press.

Yen, T. P., and Tien, P. L. (1986) Chaochou fault in Southern Taiwan: Proc. Geol. Soc. China, no.29, 9-22.

Yen, Y.T., and Ma, K.F. (2011) Source-scaling relationship for M 4.6–8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan. Bull. Seismol. Soc. Am., 101(2), 464–481.

Zadro, M., Plenizio, E., Ebblin, C. and Chiaruttini, C. (1988) Influence of groundwater table level variations and of rainfall on tilting in the Friuli area, NE, Italy. Acta Geophysica Polonica, 35, 323-338.

丁国瑜、田勤俭、孔凡臣、谢霄峰、张立人、王立平（1993）活断层分段——原则、方法及应用.北京：地震出版社，143 頁。

中國石油公司（1989）十萬分之一地質圖－台南幅。中國石油公司臺探總處出版。

中國石油公司台探總處（1992）高雄－屏東地質圖（1:100,000），中國石油公司出版。

中興公司（2012）營運中核能電廠補充地質調查工作地質調查成果總結報告，台灣電力公司報告。

六角兵吉、牧山鶴彥（1934）高雄州恆春油田調查報告。台灣總督府殖產局出版，第 660 號，共 43 頁。

日本地震調査研究推進本部地震調査委員会（2010）全国地震動予測地図 2010 年版。

王宏霖（2006）以反射震震測法研究木屐寮斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，台灣中壢，共 118 頁。

台灣世曦工程顧問股份有限公司（2011）國道 3 號田寮 3 號高架橋及中寮隧道安全檢測、監技術服務委外地質調查及評估工作。台灣世曦工程顧問股份有限公司。

石再添、鄧國雄（1983）潮州斷層帶的活斷層與地形。國立臺灣師範大學地理學研究，第 7 期，17-34 頁。

石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三（1986）臺灣活斷層的地形學研究。國立臺灣師範大學地理研究所研究報告，第 12 期，1-44 頁。

石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三、許民陽（1984）台灣西部與南部活段層的地形學研究。國立台灣師範大學地理研究報告，第十期，49-94 頁。

石再添、鄧國雄、張瑞津和楊貴三（1985）恆春地區的活斷層與地形面。國立台灣師範大學地理教育，第 11 期，第 1-12 頁。

石瑞銓、王乾盈、謝昭輝（1998）雲嘉南地區活動斷層震測調查。經濟部中央地質調查所活動斷層地球物理探勘計畫 87 年度報告，共 130 頁。

石瑞銓、王維豪、李元希（2008）地震地質與地變動潛勢分析─斷層帶地下構造調查研究（2/4）。經濟部中央地質調查所報告第 97-11 號，共 127 頁。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山（2002）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫－淺層地球物理探勘（1/5），經濟部中央地質調查所 91 年度研究報告，共 166 頁。

吉田要（1932）高雄州旗山南西部油田調查報告及旗山南西部油田地質圖（三萬分之一）。台灣總督府殖產局，第 610 號，162 頁。

江新春 (1976) 宜蘭平原之震測。礦業技術第 14 卷，第 6 期，第 215-221 頁。

何春蓀（2003）台灣地質概論台灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，130-134。

宋國城（1991） 臺灣地質圖幅及說明書，圖幅第六九、七十、七二號，恆春半島。 經濟部中央地質調查所，共 77 頁。

李奕亨（2001）恆春地區第四紀地層構造地球物理初探。中國地球物理年會論文集。

李珀儂（2008）南台灣恆春區域新期構造運動之研究。國立臺灣大學地質科學系碩士論文，共 92 頁。

李錫堤（1993）活斷層工程評估的新發展。地工技術，第 44 期，第 5-18 頁。

李錫堤、翁淑卿、廖啟雯、林柏伸、林彥享、林淑媛、王沛夫、呂玉菀（2002）台南那拔林新化斷層槽溝開挖之初步成果。第九屆台灣地區地球物理研討會暨 2002 年中國地球物理學會年會論文集，第 298-301 頁。

李錫堤、翁淑卿、鄭錦桐、廖啟雯（2001）台南後甲里斷層的構造發育及古地震研究之初步成果，九十年度中國地球物理年會暨學術研討會論文集，第 226-231 頁。

李錫堤、蔡義本（1997）台灣省中小學校園附近活動斷層普查及防震對策之研討計畫，台中：台灣省政府教育廳。
李錫堤、鄭錦桐、廖啟雯、張原賓（1998）台灣活斷層圖。中央大學應用地質研究所，工程及地質防災科技研究室。
李錫堤、鄭錦桐、廖啟雯、廖卿妃（2000）新化斷層開挖的初步結果。第八屆台灣地區地球物理研討會暨八十九年度中國地球物理學會年會論文集，第 659-664 頁。
杜冠穎（2013）以河道地形分析探討台灣西南部六甲斷層的新構造特性。國立台灣大學地質科學系碩士論文，109 頁。
松田時彦（1990）最大地震規模による日本列島の地震分帯図・地震研彙報，vol.65，p.289-319.
林昱圻（2008）潮州斷層之淺層震測研究 。國立中正大學地震研究所暨應用地球物理研究所碩士論文，共 68 頁。
林啟文, 盧詩丁, 石同生, 劉彥求, 林偉雄, 林燕慧（2007）臺灣西南部的活動斷層：二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 17 號，共 141 頁。
林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正（2000）台灣活動斷層概論，第二版。經濟部中央地質調查所，共 122 頁。
林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）台灣東部與南部的活動斷層，二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第二十三號，共 178 頁。
林朝棨（1957）臺 灣地形。臺灣省文獻委員會。共 424 頁。
林朝棨（1962）花蓮地方的第四系－臺灣之第四紀研究（三）。國家長期發展科學委員會研究報告，共 42 頁。
林朝棨（1957）臺灣地形，臺灣通志稿卷一，土地誌，地理篇。臺灣省文獻委員會，第一冊，共 424 頁。
侯進雄、陳建良、王菁穗、謝中敏、鐘瑋、鐘令和、陳彥甫（2004）台南西南地區地表斷層監測之近況與成果。2004 年台灣活動斷層與地震災害研討會，頁 46-61。
洪日豪（2006）台灣西南部前陸地區斷層演化與具油氣潛能之地塊構造。行政院國家科學委員會經濟部能源局九十五年度能源科技學術研討暨成果發表會。
胡植慶（2004）高屏地區活動斷層之衛星定位系統測量。2004 年台灣活動斷層與地震災害研討會，共 10 頁。
胡植慶、黃孟涵、景國恩、饒瑞鈞（2006）利用差分合成孔徑雷達干涉及大地測量觀測臺南台地之地殼變形，1906 梅山地震百週年紀念研討會。
胡植慶、劉啟清、楊燦堯、景國恩、鄭錦桐（2014）斷層活動性觀測研究第三階段：斷層整合性觀測與潛勢分析(2/4)。經濟部中央地質調查所期末報告書，共 461 頁。
胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞（2012）斷層活動性觀測研究第二階段：斷層監測與潛勢分析研究(4/4)。經濟部中央地質調查所期末報告書，共 366 頁。
徐鐵良（1976）台灣海岸山脈的利吉混同層。台灣省地質調查所彙刊，第二十五號，87-96。
翁淑卿（2002）台南台地暨鄰近地區之台南層及其構造運動，國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 117 頁。
耿文溥（1967）台灣南部甲仙及旗山間之地質，台灣省地質調查所彙刊，第 19 號，第 1-13 頁。
張李群（2014）以大地測量資料進行龍船斷層與旗山斷層行為分析之研究。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文，共 110 頁。
張若磐（1993）恆春半島斷層之重力研究。國立中央大學地球物理研究所學位論文。
張家鳳（2005）旗山斷層的淺層震測探勘。國立成功大學地球科學研究所，碩士論文，共 67 頁。

張國禎（2012）重要活動斷層調查特性研究－近斷層高精度地形資料之判釋與分析(1/4)。經濟部中央地質調查所委辦計畫成果報告書，共 289 頁。

張慧中（1986）台灣南部潮州斷層北段之新期構造研究。國立台灣大學地質學研究所碩士論文，共 56 頁。

張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998）台灣活動斷層概論－五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第十號，共 103 頁。

張麗旭、周 敏、陳培源（1947）民國 35 年 12 月 5 日台南之地震。臺灣省地質調查所彙刊，第 1 號，11~18 頁。

梁勛泓（2007）潮州斷層之電阻率構造研究。國立中央大學碩士論文。

陳于高（1993）晚更新世以來南臺灣地區海水面變化與新構造運動研究。國立臺灣大學地質學研究所博士論文，共 158 頁。

陳文山（2006）地震地質調查與活動斷層資料庫建置計畫－槽溝開挖與古地震研究計畫（總報告）: 一、「新期構造、古地震與槽溝開挖研究」。經濟部中央地質調查所研究報告 95-08 總號，共 133 頁。

陳文山、李錫堤、石瑞銓、楊小青、楊志成、顏一勤、劉力豪、張徽正、侯進雄（2004a）新化斷層的構造特性與古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 111-119 頁。

陳文山、松多信尚、石瑞銓、楊志成、游能悌、朱曜國、陳志壕、林啟文、劉桓吉、盧詩丁、劉彥求、林燕慧、陳柏村（2010b）台灣西部平原區隱伏在全新世沉積層下的新期構造－以小崗山斷層為例。經濟部中央地質調查所特刊，第 24 號，75-91。

陳文山、陳于高、楊小青（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置—槽溝開挖與古地震研究計畫(5/5)。經濟部中央地質調查所研究報告 95-7 號。

陳文山、陳勇全、游能悌、顏一勤、楊志成、石同生（2005b）潮州斷層沿線的地層與地形特性－重新檢討斷層的構造特性與位置，經濟部中央地質調查所特刊，第 16 期， 75-90 頁。

陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青（2010）地震地質與地變動潛勢分析計畫－斷層長期滑移速率與再現週期研究（4/4）。經濟部中央地質調查所報告第 95-9 號，共 68 頁。

陳文山、游能悌、楊小青 (2012) 重要活動斷層構造特性調查研究計畫─斷層活動特性分析與評估(2/4)。經濟部中央地質調查所報告第 101-9 號，共 130 頁。

陳文山、游能悌、楊小青（2010a）地震地質與地變動潛勢分析計畫－斷層長期滑移速率與再現週期研究（總報告）。經濟部中央地質調查所研究報告 99-9 號，共 141 頁。

陳文山、游能悌、楊小青（2011）重要活動斷層構造特性調查研究計畫─斷層活動特性分析與評估（1/4）。經濟部中央地質調查所報告第 100-9 號，第 36-74 頁。

陳文山、黃能偉、游能悌、周飛宏、顏一勤、宋時驊、楊志成、楊小青（2005a）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-槽溝開挖與古地震研究計畫(4/5)–旗山與龍船斷層條帶地質圖說明書，經濟部中央地質調查所報告，第 94-08-2 號，共 48 頁。

陳文山、黃能偉、顏一勤、楊志成、楊小青（2004）恆春斷層條帶地質圖說明書。經濟部中央地質調查所地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫－槽溝開挖與古地震研究計畫（3/5），共 38 頁。

陳文山、楊志成、吳樂群、楊小青、陳勇全、顏一勤、劉立豪、黃能偉、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄（2004c）沉降環境的山麓河谷地形特性－探討台北盆地、蘭陽平原與屏東平原鄰近山麓地形與構造的關係。經濟部中央地質調查所彙刊，第 17 期，79-106 頁。

陳文山、楊志成、楊小青、吳樂群、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄、李元希、石同生、盧詩丁（2004b）從構造地形探討嘉南地區的活動構造。經濟部中央地質調查所彙刊，

17 期，53-77 頁。
陳文山、鄭穎敏、黃奇瑜（1985）台灣南部恆春半島之地質。地質，6 卷 2 期，21-38。
陳正宏、劉聰桂、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎（2000）台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究（1/5）—嘉南地區。經濟部中央地質調查所報告 89-3 號，共 215 頁。
陳正宏、劉聰桂、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎（2001）台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究（2/5）—西部地區。經濟部中央地質調查所報告 90-5 號，共 258 頁。
陳正宏、劉聰桂、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎（2002）台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究（3/5）—西部地區。經濟部中央地質調查所報告 91-5 號，共 300 頁。
陳延宗（2007）以反射震測法研究左鎮斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 90 頁。
陳建良、林啟文、陳文山（2005）台灣南部恆春半島地殼變形初步研究。經濟部中央地質調查所特刊，第十六號，55-73。
陳建良、林啟文、陳文山（2006）台灣南部恆春半島地殼變形初步研究。經濟部中央地質調查所特刊第十六號，活動斷層與地震地質專輯（三），第 55-73 頁，共 141 頁。
陳柏村（2005）旗山斷層南段變形特性之研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
陳柏村、林啟文、江婉綺、劉彥求、林慶偉（2009）臺灣南部旗山斷層的構造特性研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 22 號，第 63-98 頁。
陳柏村、紀權宥（2010）台灣南部恆春谷地的地下構造型態探討。經濟部中央地質調查所特刊第廿四號，第 17-38 頁。
陳致言（2007）臺灣西南部井下應變研究。95 年度研究發展報告，經濟部中央地質調查所，共 51 頁。
鳥居敬造（1933）高雄州旗山油田調查報告及旗山油田地質圖（三萬分之一）。台灣總督府殖產局，第 633 號，共 36 頁。
傅慶州、楊燦堯、陳正宏（2004）利用土壤逸氣調查掩覆斷層及破裂帶可能分佈：以潮州斷層為例。經濟部中央地質調查所特刊，第十五號，147-160 頁。
黃旭燦（2003）台灣中南部褶皺逆衝斷層帶地質構造特徵分析。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 130 頁。
黃旭燦、楊耿名、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004）台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）-台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，經濟部中央地質調查所報告 93-13 號。
黃信樺（2007）台灣東北地區的地震構造：由碰撞末期轉變為隱沒拉張之構造特性。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 110 頁。
黃勝群、陳彥宏、石瑞銓、張徽正、林啟文、陳文山（2004）新化斷層帶的淺部構造特徵。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 99-110 頁。
張國禎（2014）重要活動斷層調查特性研究－近斷層高精度地形資料之判釋與分析(4/4)。經濟部中央地質調查所委辦計畫成果報告書，共 329 頁。
楊志成、顏一勤、宋時驊、黃能偉、陳勇全、陳文山、陳于高、吳樂群、張徽正、侯進雄、林啟文（2005）六甲斷層近萬年來滑移速率之探討。經濟部中央地質調查所特刊，16 期，1-16。
楊佳勳、景國恩、 饒瑞鈞、陳江鑫、侯進雄（2008）由 1995 至 2006 年之 GPS 觀測資料探討潮州斷層與恆春斷層之活動行為。經濟部中央地質調查所特刊第二十號，第 81-96 頁。
楊貴三（1986）台灣活斷層的地形學研究特論活斷層與地形面的關係。私立中國文化大學地學研究所博士論文，共 178 頁。
楊貴三（1986）臺灣活斷層的地形學研究-特論活斷層與地形面的關係。私立中國文化大學

地學研究所博士論文，共 178 頁。
楊燦堯、宋聖榮、傅慶州、蘇春旭、劉聰桂、陳正宏（2004）活動斷層地球化學監測現況與成果。2004 年台灣活動斷層與地震災害研討會論文集，120-137，國立成功大學。
楊燦堯、劉聰桂、陳正宏、吳逸民（2005） 斷層活動性之地球化學觀測與研究(1/4)。經濟部中央地質調查所報告第 94-15 號，共 506 頁。
詹新甫（1974）恆春半島之地層與構造並申論中新世傾瀉層。台灣省地質調查所彙刊，第 24 號：第 99-108 頁。
詹新甫（1974）恆春半島之地層與構造並申論中新世傾瀉層。台灣省地質調查所彙刊，第 24 號，99-108。
廖何松（2003）利用地形計測指標研究台灣南部潮州斷層沿線之活動構造。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，台灣桃園，共 124 頁。
劉聰桂、陳正宏、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎（2003）台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究（4/5）─北部地區。經濟部中央地質調查所報告 92-04 號，共 256 頁。
蔡旻倩（2013）台灣西南部地殼變形與地震活動相關性研究。國立中央大學地球科學學系博士論文，共 250 頁。
蔡義本（1976）宜蘭地區之地震研究。礦業技術第 14 卷，第 5 期，第 154-161 頁。
鄭世楠、江嘉豪、陳燕玲。台灣地區歷史地震資料的建置。427-448 頁。
鄭世楠、張建興、葉永田、徐明同（1999a）1946 年 12 月 5 日新化地震與新化地震斷層的研究。1999 中國地球物理學會成果發表會論文集，第 93-97 頁。
鄭世楠、葉永田、徐明同、辛在勤（1999）台灣十大災害地震圖集。交通部中央氣象局地震測報中心，210-211。
鄭世楠、葉永田、徐明同、辛在勤（1999b）台灣十大災害地震圖集。中央氣象局和中央研究院地球科學研究所，共 290 頁。
鄭宏祺（2000）台灣西南部台南至屏東地區地質構造之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 92 頁。
鄭錦桐（2002）台灣地區地震危害度的不確定性分析與參數拆解。國立中央大學地球物理研究所博士論文，227 頁。
顏滄波、吳慶餘（1986）恆春半島南部之上新世及上覆地層。地質，第 7 卷，1 期，1-10。
饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫－活動斷層監測系統計畫(5/5)。經濟部中央地質調查所報告 95-10 號，共 241 頁。
饒瑞鈞、李元希、胡植慶(2010)地震地質與地變動潛勢分析計畫－地變動監測分析總報告。經濟部中央地質調查所報告，99-10 總號。
饒瑞鈞、胡植慶、李元希（2008）地震地質與地變動潛勢分析─地變動監測分析（2/4）。經濟部中央地質調查所報告第 97-10 號，共 270 頁。
饒瑞鈞、胡植慶、洪日豪、余致義（2005）地震地質調查及活動斷層資料庫建置－活動斷層監測系統計畫（4/5）。經濟部中央地質調查所研究報告 94-10 號，共 147 頁。
饒瑞鈞、景國恩、謝宗訓、余致義、侯進雄、李元希、胡植慶、詹瑜璋、李建成、洪日豪(2003)台南台地的地表變形與地震潛能。經濟部中央地質調查所特刊，第十四號，第 161-171 頁。

委員審查意見

期初委員審查意見

期初審查意見	處理情形
（一） 有關計畫內容	
1. GPS及InSAR是本計畫欲完成全國活動斷層潛勢圖的重點資訊，請將此兩項列入年度工作重點，並加強GPS及InSAR之聯合分析以瞭解斷層鄰近地區應變量之詳細變化。	感謝委員建議，遵照辦理。
2. 是否可以利用已知的GPS測量、精密水準測量、InSAR及定年的資料來進一步量化活動斷層的活動性及活動範圍，以便作為劃分活動斷層的確實依據。	感謝委員建議，基於過去東部縱谷的研究經驗，PS-InSAR資料密度夠因此潛力較高，但GPS及水準部分則密度較低，在此項目期望可以盡量配合辦理。
3. 右昌斷層與龍船斷層近年來變形量大，建議加強調查，列入年度工作重點及服務建議書中。而位於今年研究區域的旗山斷層及恆春斷層，亦為年度之研究重點，請執行團隊加強調查及說明。	感謝委員建議，會將右昌斷層與龍船斷層列入今年工作重點。
4. 龍船斷層與旗山斷層間變形量大且複雜，去年期末報告之解釋為泥貫入體（mud diapir），但本次報告則解釋為活動斷層（active fault），請說明原因。	目前對於龍船斷層與旗山斷層間的變形機制尚在研究中，並無確切的論點。期望在今年的工作中有初步的想法。
5. 有關非活動斷層部分的變形分析，是否能加入其可能解決的方法或策略。	關於非活動斷層部分的變形分析（如地滑）需要另外大量的工作，本計畫先持續觀察，並提出下一階段解決方法或策略之建議。
6. 建議活動斷層潛勢圖建置工作項目可與科技部推動之臺灣地震模型（Taiwan Earthquake Model）相關研究成果相互交流討論。	感謝委員建議，遵照辦理。目前臺灣地震模型（Taiwan Earthquake Model）關於地調所33條活動斷層也有一些研究及調查資料產出，本計畫會納入斷層潛勢評估中考慮。
7. 本計畫採用松田時彥（1990）之斷層分段準則，請說明是否適用於台灣？例如：1935新竹臺中烈震，產生兩條破裂跡距離超過2公里；亦或是兩平行斷層間距大於2公里，但地底下可能為同一條斷層。另請說明是	本團隊進行斷層之分段首先會考慮歷史地震及斷層實際破裂之分段情況，並且會藉由邀請相關專家開會討論來得到較合意之斷層分段及權重。分段準則的目的則是針對那些延伸情形及活動狀況比較不明之斷層而

期初審查意見	處理情形
否有其他國家之分段標準可參考？	訂立之統一標準。本計畫也同時蒐集了美國、日本及中國等建立之分段準則作為參考。
8. 建議可將數值地形模型（DEM）之高程比誇大，較易找出地形與構造之關係。	感謝委員建議，遵照辦理。
9. 斷層活動性高其地震潛勢不一定高，請加以釐清解釋。	一般而言，活動性高的斷層，其累積能量的速度較快，其地震之復發間隔也較短，因此地震潛勢也會較高。然而若是斷層平時是藉由潛移的方式將能量釋放，或是塊體活動主要是貢獻於塊體之變形上，則發生較大規模地震之潛勢就會變低，要釐清這個問題，就必須建立模型來了解斷層實際貢獻於地震破裂的滑移虧損率，或是整個塊體之變形分配於斷層面上之比例。目前本計畫採用 block model 來評估活動斷層之滑移虧損率，嘗試解決這個問題，未來則會參考國外之經驗發展不同的變形模型進行比較。
10. 第 49 頁圖 3.46 全臺應變率場分布圖，恆春半島與中央山脈間及玉山附近皆有較大之伸張應變，請說明及解釋。恆春斷層於 2006 年恆春地震後速度場改變，建議增畫近年應變率場分布圖。	在恆春半島與中央山脈間及玉山附近較大之伸張應變，和解算策略的誤差有關。我們將在今年的工作中解決此問題。另外，也會增畫 2006 年恆春半島新的應變速率圖。
11. 計畫內容應能提供具體相關資料，如：GPS 測量、跨斷層水準測量及 PS-InSAR 及活動斷層發生潛勢圖建置，以協助地質調查所劃設「活動斷層地質敏感區」為目標。	感謝委員建議，遵照辦理。
（二） 有關經費編列與架構	
1. 第 152 頁經費需求配置之旅費，行政院已於 103 年 7 月修正「國內出差旅費要點」有關「膳雜費」部分已修正為「雜費」400 元/日，住宿費修正為 1600 元/日（薦任級以下），相關說明建議配合修正，計畫不同團隊間之編列標準不盡相同，也建議統一。	感謝委員指正，已修正。
2. 第 153 頁運費中之車輛油資，計畫不同團隊間之編列標準不盡相同，建議統一。	感謝委員建議，已修正。

期初審查意見	處理情形
3. 專家諮詢會議場地及設備皆為地質調查所提供，第 164 頁專家會議雜費應不需編列設備及場地租用費，建議減少雜費並增加舉辦研討會費用。	感謝委員建議，已修正。
4. 如經費經立法院審議通過刪減，建議可依委員意見及本所現階段目標調整工作項目及工作量，並依工作項目及工作量調整人事費及相關經費之分配。	感謝委員建議。
（三） 有關參與人力、經驗與能力	
1. 本計劃包含六位專任助理及十幾位研究員及主持人，請加強檢討研究人力在多項工作中的分配。	感謝委員建議。
（四） 有關報告書內容	
1. 目前本所已可交換取得氣象局全部 GPS 測站資料，建議修正第 9 頁最後一段「藉由資料交換機制，可取得其他單位共 128 個連續追蹤站資料」相關描述。	感謝委員指正，已修正。
2. 第 14 頁圖 3.8 及第 49 頁圖 3.46 全臺應變率場分布圖，兩圖樣態不同，請說明解釋。	第 49 頁圖 3.46 才是正確的圖。感謝委員指正，已修正。
3. 第 20 頁第 1 行「10-8Hz、10-9~10-12Hz」等數值之次方請上標，修正為「10^{-8}Hz、10^{-9}~10^{-12}Hz」。	感謝委員指正，已修正。
4. 第 27 頁第 5 段第 4 行「澎湖白砂 S01R」應為「白沙」。	感謝委員指正，已修正。
5. 第 28 頁圖 3.18 圖說「其西方有名顯因疑似...」應為「明顯」。	感謝委員指正，已修正。
6. 第 62 頁表 3.9 有關新竹網是否有對應之地震欄位資料是否有誤？台北網的資料（應變異常與對應之地震）與嘉義網相同，但判釋機率卻不相同，請確認相關內容。	感謝委員指正，已修正。
7. 第 64 頁圖 3.62 圖說「...方框為下一階段（102-105 年度）預計設置觀測站之區域，方框所標示之數字代表計畫年份...」，但今年已為 104 年度，建議修正相關描述。	感謝委員指正，已修正。
8. 第 78 頁期中交付事項「（2）完成全台灣 GPS 移動站與水準量測資料之解算分析...」並未註明資料分析時段，建議修正。	感謝委員建議，遵照辦理。
9. 第 104 頁第 3 行，Scholz(2001)，於參考文獻中未列出。	感謝委員指正，已列出。

期初審查意見	處理情形
10. 第 130 頁第 1 段「持續蒐集墾丁地區之雨量資料，預期明年度觀測將有助於進一步探討地下水水氡濃度變化和豐枯水季的週期性，並建立恆春半島預警災害性地震的方法。」為何不能及早分析探討地下水水氡濃度變化和豐枯水季的週期性，請說明理由或修正相關文字。	地下水水氡與豐枯水季之週期性變化，可在 104 年度提出初步分析結果。因週期性訊號背景值過大，直接濾除此訊號會影響地震前兆訊號之判定。故需持續收集資料，才能進一步探討。
11. 第 144 頁編號 8 及編號 9 之儀器及相關描述內容皆相同，請確認是否重複？	感謝委員指正，已修正。
12. 第 153 頁、156 頁及 158 頁出國參訪經費部分，地點為日本地質調查所，第 238 頁出國計畫之擬前往國家（區域）也為日本地質調查所，但出國主題及其他相關內容描述皆為日本京都大學防災研究所，請確認參訪地點並修正相關內容。	感謝委員指正，已修正。
13. 有關介紹各研究方法的原理及操作過程之描述過於詳細繁複，請考量是否予以適度精簡。	感謝委員建議，下年度會改進。
14. 請逐年更新服務建議書之摘要及內容。	感謝委員指正，已修正。
15. 有關出國參訪部分，請依據行政院相關規定繳交出國報告。	出國參訪日期為 12/17~12/23，規定需於返國後一個月內函送，已於 1/19 發函繳交報告。
16. 請更新地質調查所各項觀測站最新資訊，並依實際數量修正經費分配。	感謝委員指正，已修正。
17. 期末交付工作項目中，請增列繳交「300dpi 以上清晰圖檔（電子檔）」。	已增列於交付項目章節內。

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
（一） 斷層活動性觀測	
1. 從西南部之應變率場分布圖可知，西南部地區有兩處應變集中帶，分別為六甲-木屐寮斷層及龍船斷層，建議列為日後加強調查的重點。	感謝委員建議，遵照辦理。
2. 龍船斷層目前已有許多觀測資料，建議納入其他計畫亦或是研究生論文的觀測資料一起探討（例如：張李群，2013）。	感謝委員建議，遵照辦理。
3. 本次 PS-InSAR 於龍船斷層之觀測結果，其抬升速率不高，且水準測量至斷層東側有突然下降之趨勢，請於期末報告中加強解釋。	感謝委員建議，遵照辦理。
4. 水準測量剖面上的垂直向速度有過大之情形，請再檢查，並應標示計算速度使用資料的年期。	感謝委員建議，遵照辦理。
5. Hsu et al., 2014（Geology）指出於中央山脈及西部麓山帶連續 GPS 速度場的位移量受到降雨、乾溼季以及豪雨的影響。此外，有數站受到下坡運動的影響，本計畫宜進一步檢測資料是否有受到上述因素之影響。	感謝委員建議，遵照辦理。
6. 盲構造可由地表測量推估，建議將本計畫之觀測資料反推解釋地下構造。	感謝委員建議。
（二） 斷層活動潛勢分析	
1. 有關六甲-木屐寮斷層，是否向北延伸接續到九芎坑斷層，建議應做更保守的評估。	木屐寮斷層向北延伸，至八掌溪時已無地表地形及露頭證據，推測並未與九芎坑斷層相連。
2. 新化斷層的構造屬性是否歸屬於撕裂斷層（Tear Fault）？若然，則其延伸範圍就在逆衝斷塊之內，請重新檢討新化斷層是否向西再延伸 12 公里。	由於陳文山等（2004b）斷層圖中提出新化斷層可能延伸至海岸的說法，本團隊對於新化斷層海岸延伸段部份，建議仍保留此模式，然而會降低其權重進行評估。
3. 請探討後甲里斷層是否為震源斷層，以及其滑脫面是否太淺。	本團隊對於後甲里斷層，已採用孕震構造進行評估，斷層長度則參考台南斷層之長度，由於台南斷層並未出露於地表，因此採用鄭錦桐（2002）之台南盲斷層版本。
4. 請解釋長期平均滑移速率如何計算？報告中部分斷層（例如：恆春斷層外海、鳳山	長期平均滑移速率是由斷層相鄰塊體上所觀測到的水平速度場之差異所計算而得，因

期中審查意見	處理情形
轉換、梅嶺、小崗山斷層）的長期滑移速率過高。	此若速度場在跨斷層時有較大的量值及方向變化，塊體模型就會 估算出較大的長期滑移速率。除此之外，本區域的斷層幾何複雜，造成模型上一些邊界斷層在深部和鄰近塊體相互重疊，也會造成滑移速率計算上的偏差。
5. 活動斷層潛勢圖中，建議將發生率較高之斷層另行標示，表示其重要性，例如：規模大於 6.5、發生機率大於 20%以及規模大於 7.0、發生機率大於 15%之斷層。	感謝委員建議，現階段潛勢評估為初版的活動斷層潛勢圖，為避免大眾對潛勢圖產生誤解，現階段僅列出機率，不建議特別標示發生率較高之斷層。潛勢圖資在公布之前應研擬相關配套措施，本團隊會參考國外的作法，建議下一階段潛勢圖公布後可能衍生之相關問題應對策略。
6. 請將活動斷層參數表及邏輯樹專家討論會議參與人員及會議紀錄列入報告書。	專家討論會議參與人員及會議紀錄詳於附錄 3-2。
7. 斷層長期平均滑移速率模型未來有其參考價值，包含 Block Model 及徐澔德等人的參數僅在簡報中比較，未列入報告書，請將之列入。	感謝委員建議，期末階段會將徐澔德等人的參數列入報告書中與 Block Model 進行比較。
8. 報告書中地震發生機率最高之斷層為六甲-木屐寮斷層，是否可針對此斷層進行更審慎之評估？	感謝委員建議，本計畫會於結論與建議中，建議對於高發生機率斷層，於下一階段中進行更審慎之評估或是精進調查。
9. 目前潛勢分析以地調所公告的活動斷層為主，建議將盲斷層列為下一階段研究目標。	感謝委員建議，本計畫會於期末報告結論與建議中加入下一階段研究建議之工項。
（三） 報告書內容及其他建議事項	
1. 第 18 頁，宜進一步說明 DInSAR 和 PSInSAR 兩者之差異。	感謝委員建議，遵照辦理。
2. 第 18 頁、19 頁及 112 頁，Champenois et al., 2012；Tung and Hu, 2012；Wu et al., 2013；WG07, 2008；Ward, 1998；以上文獻於參考文獻中未列出，請修正。	感謝委員建議，已修正。
3. 第 102 至 108 頁，leveling rate 值與其他測量差異過大，請確認是否標示錯誤。（第 74 頁之 leveling 數值似乎較為合理）。	感謝委員指正，已修正。
4. 第 114 頁，表 2-7.3 之成果數值過大，且與簡報成果不同，如簡報所用為新的成果，請更改報告書；另活動斷層潛勢分析所採用之模型為第 114 頁之報告書內容，	感謝委員建議，所有斷層潛勢分析結果會於期末報告重新計算並更新。

期中審查意見	處理情形
請將潛勢分析成果一併更新。	
5. 本計畫研究成果不僅止於參考用，未來將落實到活動斷層地質敏感區之劃設。另請針對各種觀測方法可靠度進行排序，以供後續計畫參考。	感謝委員建議。
6. 地球化學觀測誤報率已達 10%，後續是否有進一步應用？誤報率達 10%是否可以反證 90%之準確率，國家災害防救科技中心應樂見此資訊，可作發佈預警之預備。	感謝委員建議，10%的誤報率包含些許未能及時判斷之異常變化，以及扣除部分因儀器故障而無資料可供判讀之時段，後續會持續改善觀測品質，以期提高準確率。未來當觀測團隊發現多個測站皆觀測到顯著的異常變化時，將嘗試對國家災害防救科技中心進行預警之報備。
7. 高機率再現之斷層應列入後續計畫之重點觀測。	感謝委員建議。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一） 斷層活動性觀測	
1. GPS 站若有地滑現象表示站址沒選好，其資料不宜納入分析，且必須移站。	感謝委員建議，遵照辦理。
2. 建議各條斷層的觀測結果解釋都必須有優質的地質剖面做依據。	感謝委員建議，下一年度會參考地調所的地質剖面。
3. 龍船斷層近年的變形量大，北段與南段變形量存在差異，其斷層面傾角為何？請予以釐清。	本計畫尚未蒐集龍船斷層幾何面資料，由於龍船斷層位置接近旗山斷層，且傾角方向相同，因此暫時設定龍船斷層的傾角與旗山斷層相同。
4. 恆春斷層尚缺 PS-InSAR 資料及其討論。	請詳見 2-6-10 章節及圖 2-6.28
5. 報告書中所有的 GPS 速度場及應變率圖皆應註明觀測時間。	感謝委員建議，已加註。
6. 報告書中建議加密部分地區之觀測點位以及 GPS 連續站位置，宜依重要性排序，提供地調所明年度建置新站之參考。	感謝委員建議
7. 不同大地測量方法的觀測結果是否有關聯性？宜建構其關連性的判釋準則。	不同的大地測量成果，可以藉由 GPS 連續站的成果來進行關聯。GPS 移動站的時間序列可以和 GPS 連續站的時間序列進行比對；精密水準的時間序列可以和 GPS 連續站垂直分量的時間序列進行比對;PSInSAR 的 LOS 速度場可以和 GPS 連續站的 LOS 速度場進行比對。此一系列比對工作已經在前年的計畫中就開始進行了。
8. 沉陷區域如扣除超抽地下水之地層下陷因素後，是否仍為下陷？建議釐清。	由於這個問題需要廣泛去蒐集其他獨立觀測資料以及研究不同的地層下陷模擬方法才有機會釐清，因此需要至下一階段的工作才有可能進行。
9. 第 2-6 章節中，斷層剖面圖中包含三種不同時期之視衛星速度場（ERS：1995-1999、ENVISAT：2004-2008、ALOS：2007-2011），水準垂直速度場剖面圖是否亦可分成三個時期與衛星影像進行比較與探討。	由於小崗山斷層(E-E')、龍船斷層與旗山斷層部分(F1-F1'及 F4-F4')水準資料量不足，而恆春斷層則原本就依時間區分來討論，因此沒有修正，其他皆已修正。
10. 第 108 頁，圖 2-3.24，水準測量向東跨過恆春斷層後，有一點位於不同年度間，分別有明顯上升及下降之變化，請加強說明解釋。	感謝委員建議，已於文中說明。

期末審查意見	處理情形
11. 第 126 頁，圖 2-4.9b，矩率比值圖顯示「鳳山轉換斷層帶」沿線有最大的數值，且第 125 頁文中提及「兩者相距之能量可能在未來以地震形式來釋放-能量累積於彈性地殼中，瞬間爆發成地震釋放，或是以無震形式釋放」，由於此結果十分特殊，請於報告書中詳細說明。	就常見的鎖定斷層而言，測地矩率與地震矩率的比值越大，則代表該斷層有越大的能量在快速累積。然而，就鳳山斷層而言，根據速度剖面分析指出，該斷層為潛移斷層，亦即跨斷層之高應變率是反映能量的釋放。又由於此地區的能量幾乎是由斷層釋放掉，幾乎沒有背景地震，所以才導致鳳山斷層有最大之測地矩率與地震矩率的比值。
12. 第 132 頁，圖 2-5.9，不同圖幅間 PS 相對位移有明顯的差異，似為參考點選定不佳造成，建議使用其他參考點以獲得較合理結果。	由於本 ERS 衛星結果為連接三張不同幅影像處理而成，選用之 GPS 參考點為三幅影像互相重疊之區域。相對參考點平移後的 LOS 速度場與整體 GPS 連續站速度相當吻合，且圖中缺失範圍的速度梯度亦比對前人結果，證實其速度梯度為合理範圍。
13. 第 155-159 頁，圖中之水平與垂直速度場未標示其速度值及單位，請修正。	感謝委員建議，已修正。
（二） 斷層活動潛勢分析	
1. 為計算斷層發生機率，斷層的各項參數採用邏輯數分析及決定，此結果將來如何歸納成單一值而做最後發生機率之出圖？請詳細說明。	本計畫採用邏輯樹的方法，邏輯樹之各分支皆有其權重，因此在計算出各分支的潛勢評估結果後，可藉由統計的方式得到發生機率的單一值，在參數呈現上則會以邏輯樹中間值來公佈。
2. 在後甲里斷層之潛勢評估中，後甲里斷層係屬臺南斷層之背衝斷層，因此本計畫採用孕震構造（即臺南斷層）進行活動斷層潛勢評估，並非後甲里斷層，建議於文內中加強說明。	在評估後甲里斷層潛勢，發現後甲里斷層本身並不會產生規模 6.5 以上之地震，且為台南斷層的背衝斷層，因此本計畫採用臺南斷層進行評估，在報告中以及潛勢圖中會補充說明。
3. 第 2-6 章節中，較新之觀測成果資料（至 2015 年），是否可列入活動斷層潛勢分析之參數數據。	可以使用更新的觀測資料供模型使用，但由時間序列的線性趨勢來看，新增一年的觀測資料大致上對結果不會有太顯著的影響。
4. 第 2-7 章節中，有關表 2-7.3 僅說明引用 Shyu, 2015 之未發表資料，建議加強說明該引用資料之計算方式與流程。	本研究引用徐澔德等人的資料已於日前公佈於台灣地震中心(Taiwan Earthquake Research Center, TEC)成立十周年的報告，其中詳細資料選取及計算處理方法已撰寫成期刊論文，並投稿至 SCI 期刊 TAO(審稿中)。
5. 左鎮與新化斷層因缺乏長期滑移速率資料，而採用塊體模型所推估之資料補足，對於計算結果有何影響？宜在報告書中加	當缺乏長期滑移速率資料，而採用塊體模型所推估之資料補足，其不確定性實際上會被低估，也就是資料不足時，所得到的數值選

期末審查意見	處理情形
強說明。	擇性不高，其不確定性的範圍易受限於單一模型。
6. 有關斷層潛勢分析部份，許多處理原則係經由專家會議討論後修訂，為一採滾動式修訂方式。本計畫明年為最後 1 年，建議明年需做整體性的檢視，以期針對 33 條活動斷層皆有一致性的處理原則與標準。	感謝委員意見，本計畫預計於明年計畫中召開一次額外專家會議，針對 33 條活動斷層進行整體的檢視。
7. 第 189 頁，有關六甲斷層最後一次活動時間欄位為「2 萬年以上」，係引用楊志成等（2005）之文章，但原文指出六甲斷層截切全新世地層，請確認相關描述。	經查楊志成等（2005），文中提到鑽井剖面中一萬年以內的沉積層，有受到斷層活動而產生的生長岩層構造，本計畫會修改敘述為「一萬年內曾經活動過」。
（三） 報告書內容及其他建議事項	
1. 簡報小結中提及南部斷層周圍變形行為常伴隨泥貫入體之影響，是否有其科學證據？「泥貫入體」是否有其明確定義，亦或可能僅是排水過程（或液化過程）之排水孔或噴砂現象。	南部數條斷層周圍的地表變形行為並無法很好的用斷層模型進行擬合，其中最常見的例子為水平速度場和垂直速度場的梯度發生位置並不一致，若為斷層活動，則兩者應當一致。又由於此地區主要的岩性為泥岩，過去的研究工作也指出此地區有泥貫入體的存在，因此才懷疑南部斷層周圍變形行為可能伴隨泥貫入體之影響。然其科學證據其實並不明確，抑或是僅是排水過程（或液化過程）之排水孔或噴砂現象目前也無法釐清。這需要後續持續的研究工作來解析。
2. 第 2-2 章節中，GPS 觀測成果分析之圖例建議一致，例如不同地區 GPS 速度場之箭頭，如觀測年份相同則建議繪製為相同顏色，以利讀者閱讀。	感謝委員建議，已改正。
3. 第 2-4 章節中，所有圖內皆出現「鳳山轉換斷層帶（臺南至枋寮之紅色虛線）」，由於此線非活動斷層線，文中尚無定義，請於報告書內說明。	此線形之中段最早為地調所在 1998 年與 2000 年活動斷層圖中的鳳山斷層；北段為 Deffontaines 在 1994 與 1997 年提出之鳳山轉換斷層帶；而整條線形，則是 Ching 在 2007 年根據 GPS 速度場的分析成果與整合過去的研究所繪製。
4. 第 2-6 章節中，有關斷層剖面分析之圖說過於簡略，建議加強說明（a 圖為、…b 圖為…），另建議於左下圖垂直速度場中，標示剖面位置及連續站位置。	感謝委員建議，已修正。
5. 第 40 頁第 2 段第 2 行，「如表 5-2.1」應為「如表 1-4.2」、第 3 行「如表 5-2.2」	感謝委員指正，已修正。

期末審查意見	處理情形
應為「如表 1-4.3」。	
6. 第 275 頁，有關恆春斷層單一事件變位量項下之敘述，建議修正為「從南灣地區槽溝開挖中」。	遵照辦理修改。
7. 第 277 頁，單一事件變位量項下「…地形隆起與簡切紋理」，應為「剪切」。	遵照辦理修改。
8. 第 189 頁、第 211 頁、第 231 頁、第 244 頁、第 259 頁、第 277 頁，斷層參數表部份為空白，請補正。	遵照辦理，表格空白處已補充。
9. 第 377 頁，第三段最後一行，「…更西側之後陸帶為主」，請說明何謂「後陸帶」？	後陸帶之原文為 hinterland，與 foreland 相對，分處於造山帶的相反兩側。
10. 本計畫最後目標若欲出版活動斷層發生機率圖，則地球化學觀測以及井下應變儀較無貢獻，宜分開成不同計畫執行。而斷層槽溝開挖及定年資料則是建置活動斷層發生機率圖之關鍵，建議與該計畫密切加強合作。	感謝委員建議

附錄 3-2 邏輯樹專家諮詢會議

3-2-1 邏輯樹建立目的

在進行活動斷層震源地震潛勢評估時，斷層震源之參數就成為影響潛勢評估結果之重要因素，因此在建立斷層參數時需盡可能的多方蒐集各專家之地質調查成果及測量結果。然而，活動斷層調查或是地震潛勢評估時所需之參數均有其不確定性，此不確定性之原因有二，一為資料本身固有的隨機誤差分布，屬於自然的誤差特性，例如地震規模大小、地震次數分布、斷層破裂面積誤差；二為目前科學研究上之不確定性，將來隨著資料的累積或是研究方法的突破可逐漸降低其誤差，如：震源模式選擇、斷層滑移速率、尺度-規模經驗公式、存疑性活動斷層等。

科學分析上常使用邏輯樹（logic tree）或決策樹（decision tree）來輔助分析各參數的不確定性對結果的影響。使用邏輯樹可將一個含有大量複雜且多種可能性假設條件的問題，轉換為一系列有條理且簡單的運算。邏輯樹包含一系列的節點（nodes）與分支（branches），每一個節點代表任一參數/模式，由此節點延伸出的每一分支，代表此參數/模式的變化或可能性選擇，將各種選擇或變化適當的給予分配機率或權重，使各分支匯入上層節點的機率值總和為1，然而如何藉由適當少量的分支來反映參數的不確定性與可能性是一個值得討論的重點。

3-2-2 國內外經驗

圖3-2.1是美國PG&E公司進行Diablo Canyon核電廠PSHA時所使用的邏輯樹結構。圖3-2.1中邏輯樹的節點是各種PSHA分析所需的參數/模式的不確定性或可能性狀況（如：斷層幾何面、上限地震規模、斷層滑移速率、地震規模分佈、衰減公式等……）。當PSHA分析參數的資訊不足時，往往無法針對參數進行統計分析而給予適當的機率值，但可藉由專家適切地給予參數或模式存在/發生的權重或可能性（McGuire and Shedlock 1981; National Research Council, 1988; PG&E, 1988）。Cramer et al.（1996）及Cramer（2001）認為在處理PSHA不確定性問題時，必須先建構參數的邏輯樹架構，並引入蒙地卡羅方法（Monte Carlo）根據各參數的機率/權重分佈的狀況，進行取樣而獲得各分支的參數組合，再個別進行PSHA分析而獲得其不確定性分佈。然而取樣數目多少以上才會使結果趨於穩定是此方法需要事先分析的部分，當然如果取樣越多越能正確反映出PSHA結果的不確定性，但是運算卻較耗時。

鄭錦桐（2002）在進行臺灣地區之機率式地震危害度分析時首度劃設了臺灣孕震源之邏輯樹，如圖3-2.2所示，包含了深淺層區域震源、活斷層震源、隱沒帶板塊介面或是內部震源之邏輯樹。2008年美國國家地震危害度地圖中，針對Wasatch fault劃設之邏輯樹如圖3-2.3所示，圖中主要考慮之節點有斷層模型、傾角、滑移速率、規模，而在進行地震危害度分析時還需考慮強地動模式選擇之邏輯樹。圖3-2.4為美國評估加州地區地震所採用之邏輯樹，主要分為斷層模型、斷層變形模型、地震發生率模型及機率模型之不確定性，依此邏輯樹劃分可以產生480個分支。

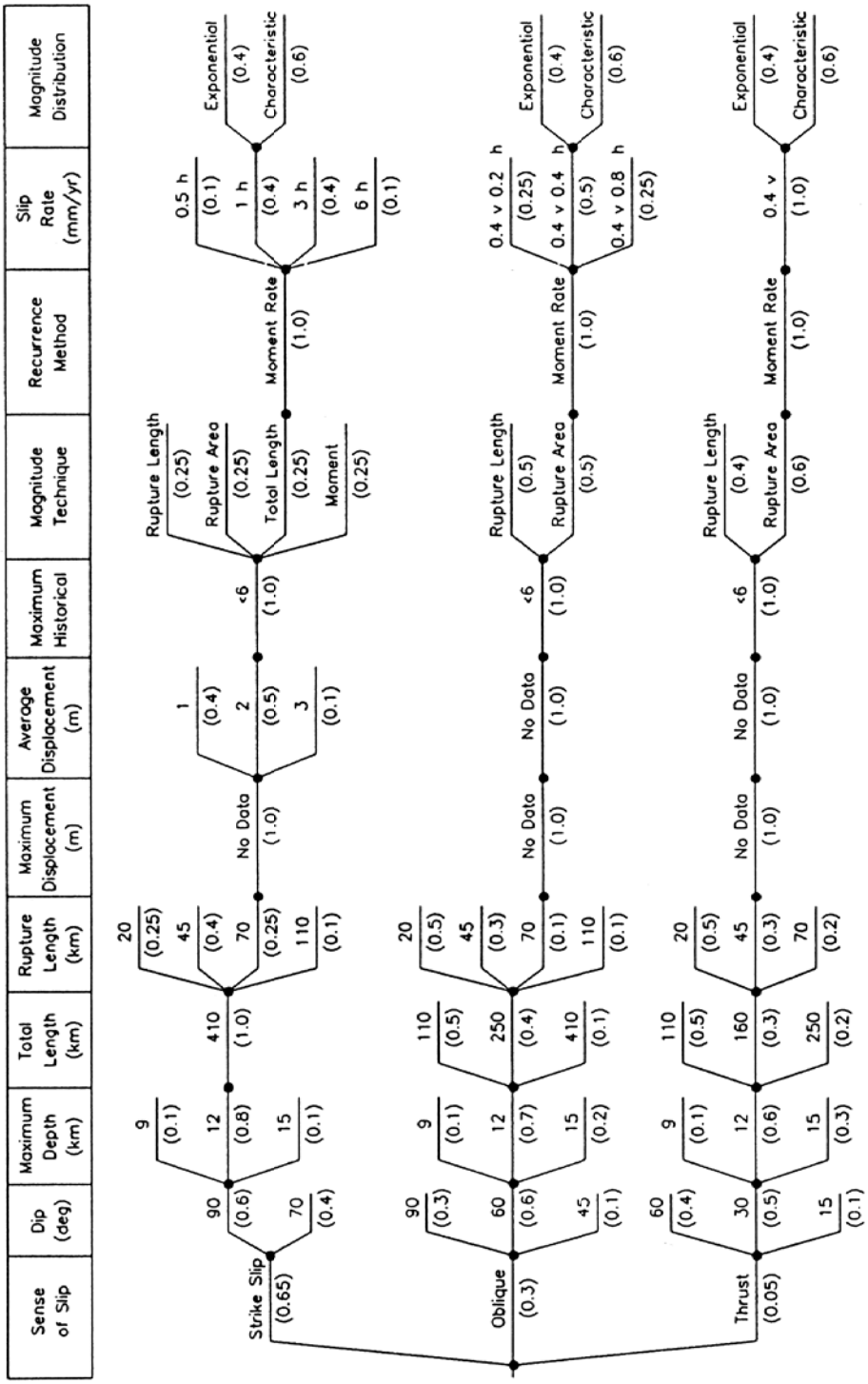


圖 3-2.1：美國 PG&E 公司設計 Diablo Canyon 核電廠時，PSHA 採用的邏輯樹（logic tree）（摘錄自 PG&E, 1988）。

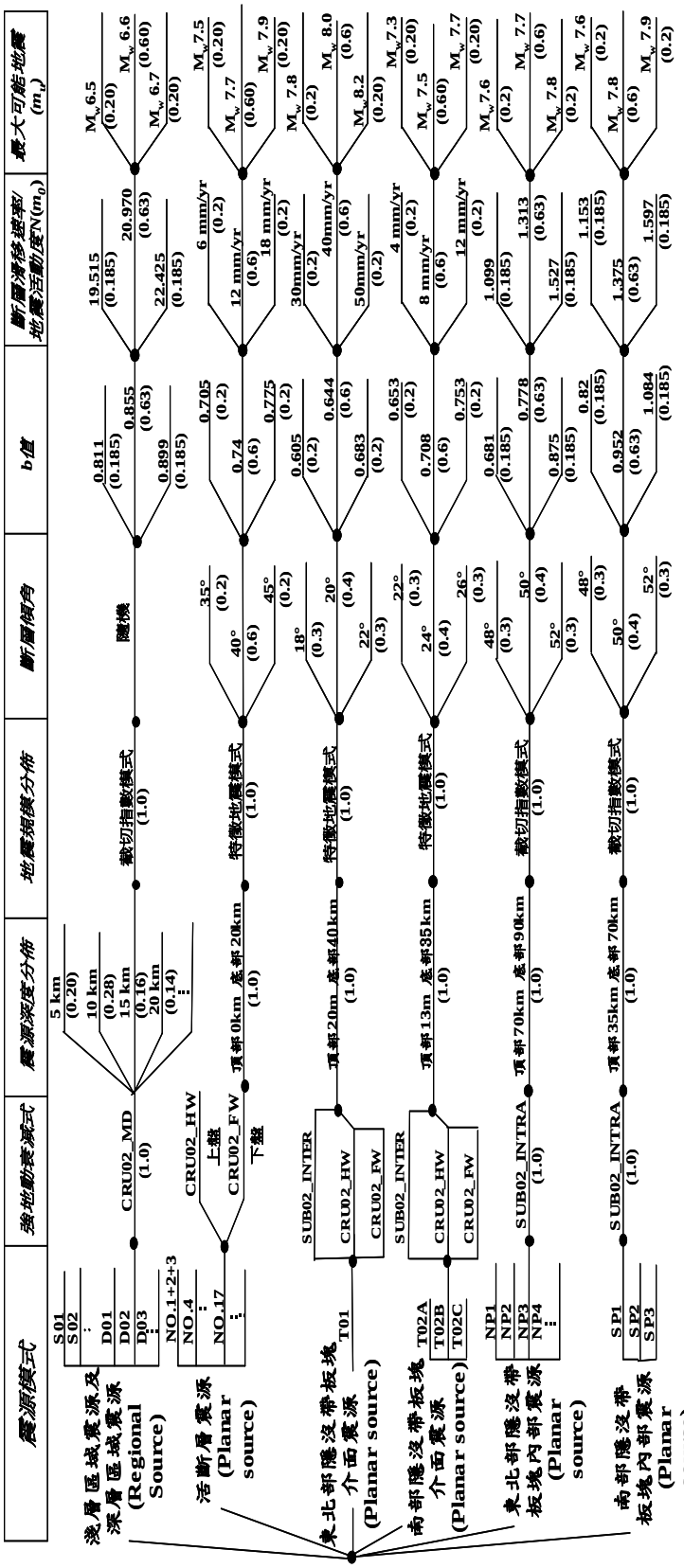


圖 3-2.2：臺灣地區 PSHA 處理參數與模式不確定性的邏輯樹架構示意圖（摘錄自鄭錦桐,2002）。

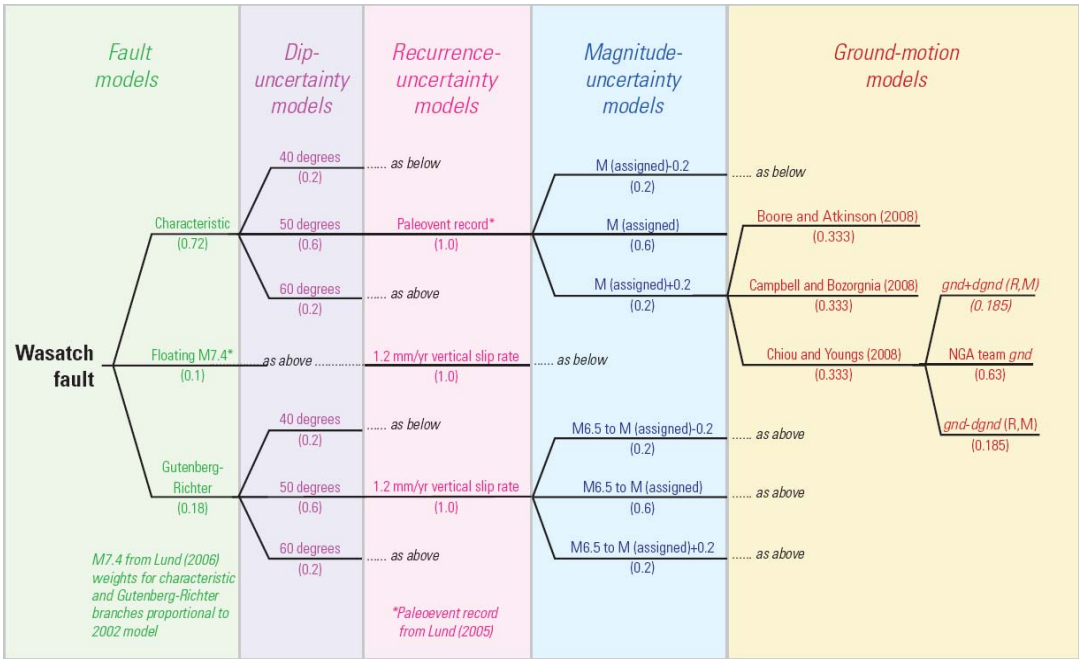


圖 3-2.3：Wasatch fault 之邏輯樹架構（摘錄自 Mark D. Petersen et al.,2008）。

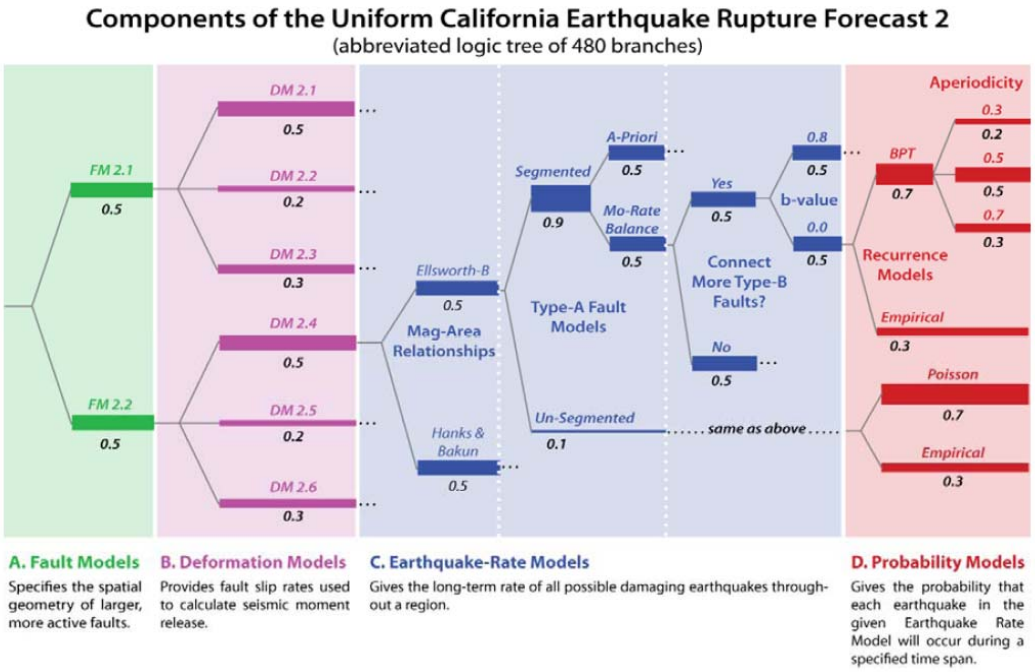


圖 3-2.4：加州地區地震潛勢評估邏輯樹（摘錄自 WG07, 2008）。

3-2-3 邏輯樹權重劃分基本原則

在邏輯樹中各分支的機率/權重一般有兩種設定方法：

（1）第一類是參數有上、下界限或是資料的變異特性適合以常態分佈或指數常態分佈來描述，例如：斷層滑移速率、破裂深度、b值等，這類的參數特性可以3個或多個分支來表現其不確定性。Keefer and Bodily（1983）證明參數若是屬於此類的特性，則可以3個權重值表示，其中中間值（median）50%給權重0.63，另外最小5%與最大95%（相當於±1.65個標準差位置），則皆設定權重為0.185，不過經驗上通常也可設定為0.6, 0.2, 0.2。當節點過多時，單一節點有3個以上的分支對結果影響並不敏感，因此，為節省運算時間又可分析出合適的結果，此類參數多以3個分支為主。

（2）第二類參數多屬具選擇性且可信度有爭議的假設、模式或方法，例如：斷層滑移速率、震源分區原則、斷層位態與機制、尺度-規模經驗公式的選擇。此類參數通常無法有足夠資訊以統計作為依據來設定各分支的權重，因此，專家的意見通常成為重要的權重依據，因此本計畫藉由召開專家諮詢會議，決定斷層參數與邏輯樹節點各分支之權重分配。

3-2-4 活動斷層邏輯樹節點選取與建立之規劃

本計畫建議臺灣地區活動斷層邏輯樹之劃設上，可分為以下五種節點，斷層分段及破裂事件、斷層傾角、斷層破裂深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，敘述如下。

1. 斷層分段及破裂事件：在斷層分段上，應蒐集各專家之研究，了解其分段之原則，同時在邏輯樹中呈現各專家意見之分支，本計畫目地是完成分段準則並建立適合於臺灣活動斷層之一套規範，可適用於所有活動斷層上。

日本的活動斷層資料庫建立之後，針對活動分段定立了分段之準則，部份提供了數據作為參考，圖3-2.5為其分段準則之圖示，說明如下：

(1) 兩斷層線跡中有超過2 公里之缺口；

(2) 斷層線跡走向彎曲20 度以上；

(3) 跳階處；

(4) 平行之斷層線跡距離超過2 公里；

另外還有：

(5) 斷層滑移速率及滑移方向改變處；

(6) 分段古地震歷史不一致者；

McCalpin（1996）在其對斷層分段之描述中建立如表3-2.1之表格，並同時評估了各分段特徵之確實度有多少。丁國瑜等（1993）利用如表3-2.2之分段原則，針對中國活斷層做了相關之分析研究與探討。

李錫堤（1993）曾參考國外分段準則，提出以下幾點分段的依據：

(1) 斷層線彎曲處；

(2) 雁形跳階處；

(3) 地形起伏巨變處；

(4) 橫斷構造交會處；

(5) 基岩種類或水文環境巨變處；

(6) 斷層滑移速率改變處；

(7) 最新活動時間不同者；

(8) 地震斷層不相連續者。

2. 斷層傾角：斷層的構造形貌在地下之之情況較為複雜，為了進行後續地震危害度及地震模擬之評估，需簡化斷層傾角以利分析，斷層傾角最多考慮雙傾角，並參考各地質調查研究成果以分支表示。

3. 斷層底部深度：根據以往對大地震之觀察，破裂深度通常不會比5公里淺，然而臺灣地質剖面往往只呈現深度10公里內之情形，從地質的角度與基底滑脫面的角度均難以與地震結合，因此在斷層底部深度推估上，除了參考地質剖面及震測剖面資料外，還可以考慮岩石的脆塑性轉換帶，此處可參考Scholz對於岩石深部脆塑性轉換之研究，同時蒐集臺灣地熱流之分布情形，可更精準的推估岩石脆塑性轉換帶之深度，另外在構造活躍區域也可參考該區地震重定位之深度分布，以上推估之斷層底部破裂深度可各當作邏輯樹之一分支。

4. 特徵地震規模：特徵地震規模主要是以斷層震源尺度-規模經驗公式推估而得，建議採用面積-規模公式，在臺灣地區採用各專家學者之經驗公式進行計算並給予權重。

5. 斷層長期滑移速率：詳如2-4節所述，在操作上需注意將抬升率轉換到斷層面之上。另外需考慮短期滑移速率，這是因為活動斷層會以潛移方式釋放能量，例如臺灣東部縱谷內之池上斷層即有潛移之現象。另外美國WG07在建立斷層參數表時會建立一無震滑移因子，如

表3-2.3所示，以Parkfield斷層為例，其無震滑移因子0.8，表示其量測之滑移速率乘上0.2才是真正由地震造成之滑移速率。

在邏輯樹中，各斷層參數的取得並非來自單一的調查方式，本計畫在蒐集車籠埔斷層參數時，將目前已有之活動斷層調查方法分類，並將該調查方法可獲得之參數整理如表3-2.4，敘述如下：

1. 構造地質：即斷層帶之地下地質調查，包括地質剖面，平衡剖面及鑽探調查等，針對斷層在地下的幾何形貌、上下盤之地層分布、地層錯動量等進行之調查，尺度通常為公里級，可幫助釐清斷層幾何（長度、傾角及深度），而從地質剖面、平衡剖面或鑽井得到之上下盤錯動量可幫助推估斷層之長期滑移速率。
2. （近）地表地質：相對於構造地質調查，（近）地表地質的調查深度尺度僅為公尺級。從地形及斷層地表破裂可以了解斷層之長度，斷層的分布及破裂形式則可用來判斷斷層分段點。槽溝開挖的目的主要是幫助了解古地震之資訊，若是槽溝中看到明顯的斷層面以及層位之錯移，也可判斷斷層之淺部傾角及長期滑移速率。階地之定年則可用於評估長期滑移速率。
3. 地物探勘：地物探勘主要是從斷層上下盤地層之電性或地球物理特性的不同，間接獲得斷層地下之形貌，震測剖面可得到傾角、深度等資訊，地電阻則可幫助研判斷層的延伸。
4. 遙測：包含雷達差分干涉與航照判釋，主要是從遙測影像中幫助了解斷層的延伸性，另外利用空載LiDAR製作高精度數值地型模型，或是本計畫之PsInSAR均屬於遙測方法，可以研判斷層之地表線形跡。
5. 地震學：利用歷史地震或是餘震震央分布，可推估（盲）斷層可能延伸之長度；利用震源剖面分布並配合地震重定位，可獲得斷層面傾角及深度，例如東部2003年成功地震，可從餘震重定位之分布中獲得池上斷層之深度及傾角；歷史地震之震源機制解則可獲得斷層之傾角。
6. 大地測量：以簡化幾何面反演GPS同震位移分布，並不斷修正斷層面以達最接近現實之同震位移，可以了解斷層簡化幾何之最佳解；利用GPS速度場，以塊體模型可推估斷層可能之長期滑移速率及滑移虧損率。

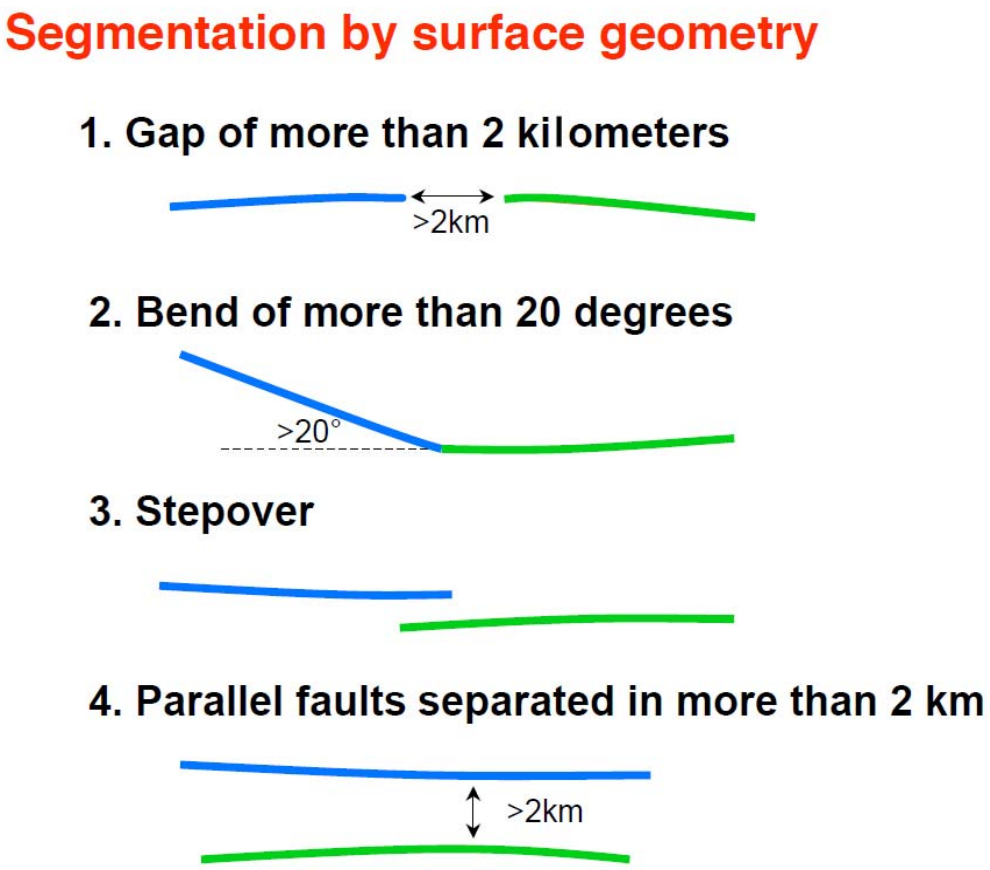


圖 3-2.5：日本斷層參數之斷層分段準則（摘錄自松田時彥，1990）。

表 3-2.1：斷層分段型式、特徵及可能性（McCalpin, 1996）

分段型式	定義分段之特徵	作為分段之可能性
1.地震	受限於歷史地震破裂	確定 100%
2.行為	1. 藉由複合的，資料良好的古地震破裂限制其分段	高
	2. 滑移速率、地震重現期、地震後持續時間、地表位移量、潛移或是鎖定行為、斷層複雜度	中(26%)
3.構造	分段邊界由斷層分支，或與其他斷層、褶皺交叉，或是交錯之構造	中高 (31%)
4.地質	1. 以第四紀盆地火火山體為分段邊界	可能性變異大(39%)
	2. 受限於單一的基盤或是流變地域	
	3. 以地球物理測勘異常點為界	
	4. 地貌指示分段點，例如山前地貌變化，山頂高程變化	
5.幾何	斷層之走向變化，跳階，分離或是斷層中之缺口	中低(18%)

表 3-2.2：以各種不同的標誌做為手段對斷層進行分段的方法（丁國瑜等，1993）

斷層進行分段的方法	說明
依據斷層幾何型態分段	利用斷層幾何型態的變化，如彎曲、分支、間斷、斜列、階區幾何型態的變化等做為標誌進行分段。
依據斷層結構、構造特色分段	利用沿斷層的結構特點，如寬度、斷層兩側岩性的變化、斷層與其他斷層或構造體的交叉切割等做為標誌進行分段。
依據斷層活動性分段	具蠕滑（stable sliding）現象、黏滑（stick-slip）現象的區別，滑動速率變化段落的劃分等進行分段。
依據斷層地貌特徵分段	根據斷層長期分段活動而形成之特定的地貌型態做為標誌進行分段
依據地震活動性分段	根據中小地震活動、空區空段、震源機制等方面所表現的特點進行分段的方法。
依據古地震活動歷史分段	根據活斷層的古地震事件的大小、復發間隔以及破裂狀況的分析進行分段的方法。
依據斷裂帶的地球物理特性分段	沿斷裂帶之重、磁異常的分布與斷層破裂活動關係的分析進行分段
分形幾何學分段的方法	
平均波速比（*V*p/*V*s）分段的方法	

表 3-2.3：美國 WG07 斷層參數表（摘錄自 WG07，2008）

Fault Name [ID # in Quaternary Fault and Fold Database- * indicates Q-faults compilation not yet completed]	model	Source of fault trace	rake	dip	dip direction	slip rate	slip rate error	Aseis-mic slip	top depth	bottom depth	Details of slip rate, black from 1996 model, red from 2002 model, blue from 2006
Main strands of the San Andreas fault system											
San Andreas (Offshore) [1a]		2002	180	90	n/a	24	3	0	0	11	Slip rate based on Niemi and Hall (1992) and Prentice, et al. (1991). WG99/WG02 source parameters used in 2002.
San Andreas (North Coast) [1b]		2002	180	90	n/a	24	3	0	0	11	Slip rate based on Niemi and Hall (1992) and Prentice, et al. (1991). WG99/WG02 source parameters used in 2002.
San Andreas (Peninsula) [1c]		2002	180	90	n/a	17	4	0	0	13	WG99/WG02 source parameters used in 2002.
San Andreas (Santa Cruz Mtn) [1d]		WGCEP 2007	180	90	n/a	17	4	0.1	0	15	WG99/WG02 source parameters used in 2002 for Santa Cruz Mtn section. Frequency of earthquakes revised in 2006 based on more frequent earthquakes at Arano Flat (Fumal et al. 1999, 2003).
San Andreas (Creeping Section) [1e]		2002	180	90	n/a	34	5	1	0	12	WG99/WG02 source parameters used in 2002.
San Andreas (Parkfield) [1f]		CFM-R	180	90	n/a	34	5	0.8	0	10.2	Slip rate reported by WGCEP (1995)
San Andreas (Mojave N) [1g, 1h]		WGCEP 2007	180	90	n/a	27	7	0	0	15.1	Slip rate based on Sieh (1984), Salyards et al. (1992), and WGCEP (1995) Section split from 2002 Mojave section because differences in slip distribution in 1812 earthquake.
San Andreas (Mojave S) [1h]		WGCEP 2007	180	90	n/a	29	7	0	0	13.1	Slip rate based on Sieh (1984), Salyards et al. (1992), and WGCEP (1995) Section split from 2002 Mojave section because differences in slip distribution in 1812 earthquake.
San Andreas (San Bernardino N) [1i]		WGCEP 2007	180	90	n/a	22	6	0	0	12.8	Slip rate reported by Weldon and Sieh (1985) Section split from 2002 San Bernardino section at intersection of north branch (Mill Creek fault).
San Andreas (San Bernardino S) [1i]		WGCEP 2007	180	90	n/a	16	6	0	0	12.8	Slip rate reported by Weldon and Sieh (1985) Section split from 2002 San Bernardino section at intersection of north branch (Mill Creek fault). Slip rate reduced from San Bernardino North section to accommodate slip transfer to San Jacinto fault and San Gorgonio knot zone of distributed shear.
San Andreas (San Gorgonio Pass - Garnet Hill) [1i, 250*]		WGCEP 2007	180	58	N	10	6	0	0	16.4	Slip rate reported by Weldon and Sieh (1985). Slip reduced from Coachella section by 10 mm/yr total slip in Eastern California Shear Zone.
San Andreas (Coachella) [1j]		2002	180	90	n/a	20	6	0.1	0	11.1	Slip rate based on Sieh and Williams (1990); Sieh (1986); Keller et al. (1982); Bronkowski (1981) Section modified from 2002 by moving northern end point to intersection of North Branch (Mill Creek fault) with Banning section. Aseismic slip factor of 0.1 applied due to documented creep and triggered slip.
Imperial [132]		CFM-R	180	82	NE	20	5	0.1	0	14.6	Slip rate based on study by Thomas and Rockwell (1996). Aseismic slip factor of 0.1 applied due to documented creep and triggered slip (Sharp and others, 1982)
San Jacinto (San Bernardino) [125a]		WGCEP 2007	180	90	n/a	6	4	0	0	16.1	Slip rate reported by WGCEP (1995). Southern end of section moved to south margin of San Bernardino valley, inferred

Fault revised since 2002 model　Fault added since 2002 model　Alternate slip rates in deformation models

表 3-2.4：各調查方法可獲得之斷層參數一覽表

調查方法		斷層分段(長度)	斷層傾角	斷層深度	長期滑移速率
構造地質	地質剖面	●	●	●	●
	上下盤地層序列	●			
	平衡剖面		●	●	●
	鑽井資料	●	●		●
（近）地表地質調查	地表破裂(斷層線分岔)	●			
	斷層槽溝開挖		●		●
	階地定年				●
地球物理探勘	震測剖面		●	●	
	地電阻	●			
遙測技術	雷達差分干涉	●			
	航照判釋	●			
地震學	餘震震央分布	●			
	震源剖面分布		●	●	
	震源機制解		●		
大地測量	GPS 同震位移分布	●			
	GPS 塊體模型反演				●

3-2-5 專家諮詢會議會議紀錄

表 3-2.5：「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析(3/4)」專家諮詢會議(一)會議記錄表

<table>
<tr><td>會議名稱</td><td colspan="5">活動斷層潛勢分析專家諮詢會議(一)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">主席</td><td rowspan="2">胡植慶
教授</td><td>日期</td><td>2015 年 06 月 08 日</td><td>時間</td><td>14:00~16:30</td></tr>
<tr><td>地點</td><td>經濟部中央地質調查所</td><td>記錄</td><td>李易叡、莊怡蓉</td></tr>
<tr><td>出席人員</td><td colspan="5">專家委員：
臺灣大學：徐澔德 副教授
中央大學：李錫堤 教授、黃文正 助理教授
中央地調所：李錦發 組長
朱傚祖 博士

其他與會人員：
臺灣大學：胡植慶 教授、黃鐘 博士後研究員
中央大學：張午龍 副教授、李秋賢
成功大學：景國恩 助理教授
中研院：李建成 研究員
地調所：盧詩丁 科長、賴慈華 科長、陳建良 科長、林依蓉、梁勝雄、陳致言、陳盈璇、許晉瑋
中興社：鄭錦桐 副主任、李易叡 副研究員、莊怡蓉</td></tr>
<tr><td>會議內容</td><td colspan="5">1. 木屐寮、六甲斷層參數討論、問題與意見</td></tr>
<tr><td colspan="3">(1) 由於木屐寮斷層長度不夠長，木屐寮斷層單獨破裂發生之地震規模太小，權重不宜太高，建議木屐寮+六甲斷層破裂事件權重應調高，經討論後調整 3 個破裂事件權重為等權重。</td><td colspan="3">經詢問陳文山教授意見，認為木屐寮與六甲斷層滑移速率相似，木屐寮+六甲斷層同時破裂可能性應較高，因此調整權重為木屐寮（0.25）、六甲（0.25）、木屐寮+六甲（0.5）。</td></tr>
<tr><td colspan="3">(2) 長度需參考不同版本之活動斷層分布圖，目前僅採用地調所版本，長度是否需再往南北延伸。</td><td colspan="3">兩條斷層均依建議延伸，木屐寮斷層往北延伸，到八掌溪一帶斷層跡則無法追蹤，六甲斷層向南延伸，被左鎮斷層延伸段所截切。</td></tr>
<tr><td colspan="3">(3) 斷層深度不應受限於平衡剖面，應考慮孕震構造之深度，可再加深。</td><td colspan="3">依建議將原設定深度 8，10，12 公里，更改為 10，12，14 公里。</td></tr>
<tr><td colspan="3">(4) 徐澔德副教授推薦一篇碩士論文：杜冠穎（2013）利用河道地形建立斷層幾何面並推估滑移速率之成果。</td><td colspan="3">感謝委員意見，本團隊會蒐集並納入參考資料中。</td></tr>
</table>

	(5) 西元 1862 年地震，在台南府城處評估為震度 6，此處位於六甲斷層之下盤，木屐寮、六甲斷層之破裂不可能造成下盤有如此高的震度，比較可能是台南前緣之盲斷層破裂造成。	依建議將 1862 年之地震設定為台南前緣之盲斷層。
	(6) 最近烏山頭水庫之評估報告可能有新的調查資料可供參考。	感謝委員意見，本團隊會蒐集並納入參考資料中。
	(7) 請檢查西元 1964 年白河地震是否與木屐寮斷層之錯動有關。	經查，1964 年之白河地震似乎未造成木屐寮斷層之地表破裂變形，根據中央氣象局之定位，其震央位於距六甲斷層上盤 23 公里處，應與木屐寮斷層之錯動無關。
	2. 新化斷層參數討論、問題與意見	
	(1) 西元 1946 年新化地震無餘震，認為新化斷層性質應屬於撕裂斷層（tear fault）。	感謝委員意見。
	(2) 新化斷層向下被台南盲斷層截切，邏輯樹中斷層深度太深，需重新考慮。	依建議將原設定深度 12，15，18 公里，更改為 10，12.5，15 公里。
	(3) 長期滑移速率採用塊體模型之滑移虧損來補足。	本計畫評估長期滑移速率是以地質資料為主，若是缺乏地質資料，則採用塊體模形計算滑移虧損率，再代入潛勢評估中。
	(4) 西元 1946 年新化地震規模建議再參考徐明同的。	感謝委員意見，本團隊會蒐集並納入參考資料中。
	(5) 槽溝開挖結論應是蔦松文化期（400-2000 年）以來有 3 次古地震，台南層（2700 年）後有 4 次。	感謝委員意見，本團隊已納入參數表中。
	3. 後甲里斷層參數討論、問題與意見	
	(1) 由於後甲里斷層本身非孕震構造，可考慮後甲里斷層系統之破裂模式。	本團隊已採用孕震構造進行評估，斷層長度則參考台南斷層之長度，由於台南斷層並未出露於地表，因此採用鄭錦桐（2002）之台南盲斷層版本。
	(2) 西元 1862 年台南地震較可能屬於此斷層系統破裂模式，建議作為此系統破裂模式之最近一次事件。	本計畫依建議設定 1862 年為此斷層系統破裂可能的最近一次發生時間。

	(3) 若西元 1862 年台南地震是由此斷層系統破裂造成，斷層長度應超過 12 公里，才會產生規模 7 的地震，斷層長度可參考中央大學劃設的版本再往北延伸。	本團隊斷層長度參考台南斷層之長度，由於台南斷層並未出露於地表，因此採用鄭錦桐（2002）之台南盲斷層版本，此版本即為中央大學劃設的版本。
	4. 左鎮斷層參數討論、問題與意見	
	(1) 建議在報告書中加入結論與建議，建議左鎮斷層做後續調查。	感謝委員意見，會在計畫報告書中加入後續調查之建議。
	(2) 目前尚未發現階地錯動資料可推估左鎮斷層長期滑移速率，可能原因是錯動量低於可觀測之值，建議可給予數值高程模型（DEM）觀測之極限值，例如 5 公尺，除以河階年代（台南層的約三千年前形成），初步推估長期滑移速率。	已依建議在左鎮斷層之長期滑移速率中說明此推估方法之結果。
	(3) 長期滑移速率建議採用塊體模型之滑移虧損來補足。	感謝委員意見，本團隊會採用塊體模型結果進行潛勢評估。
備註		

表 3-2.6：「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析(3/4)」專家諮詢會議(二)會議記錄表

<table>
<tr><td>會議名稱</td><td colspan="5">活動斷層潛勢分析專家諮詢會議(二)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">主席</td><td rowspan="2">胡植慶
教授</td><td>日期</td><td>2015 年 10 月 23 日</td><td>時間</td><td>09:30~12:00</td></tr>
<tr><td>地點</td><td>經濟部中央地質調查所</td><td>記錄</td><td>李易叡、莊怡蓉</td></tr>
<tr><td>出席
人員</td><td colspan="5">專家委員：
臺灣大學：徐澔德 副教授
中央大學：林殿順 副教授、黃文正 助理教授
成功大學：葉永田 教授
中央地調所：李錦發 組長、朱傚祖 博士
國家災害防救科技中心：柯孝勳 博士</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">其他與會人員：
臺灣大學：胡植慶 教授、黃鐘 博士後研究員、陳惠琪
中央研究院：李建成 研究員
中央地調所：盧詩丁 科長、賴慈華 科長、陳建良 科長、林依蓉、陳致言、陳盈璇、許晉瑋、張國峰、陳柏村、范力仁
中興社：鄭錦桐 副主任、李易叡 副研究員、莊怡蓉、謝銘哲</td></tr>
<tr><td>會
議
內
容</td><td colspan="5">1. 小崗山斷層參數討論、問題與意見</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">(1) 旗山與小崗山斷層延伸位置除陳文山（2010）發表之模式外，是否有其他可能性？由重力異常圖顯示，旗山斷層至半屏山一帶有重力異常高區，旗山斷層是否有可能延伸至半屏山，而小崗山往南延伸被旗山斷層截切。</td><td colspan="3">由於小崗山斷層與右昌斷層的連接仍不確定，且李錫堤教授認為從 PSInSAR 地表變形資料中，右昌斷層應與龍船斷層相連較為合理，因此本計畫現階段不考慮小崗山斷層南延至右昌斷層的破裂模式。</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">(2) 小崗山斷層邏輯樹分支中，規模小於 6.5，建議不列入計算。</td><td colspan="3">感謝委員意見，本計畫主要是計算發生規模 6.5 以上的機率。</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">2. 旗山斷層參數討論、問題與意見</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">(1) 旗山斷層深度之邏輯樹，建議參考地震深度分布做為邏輯樹深度下界，平衡剖面資料做為上界。</td><td colspan="3">依建議將原設定深度 8.5，9.8，11 公里，更改為 10，13，16 公里。</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">(2) 林殿順委員認為旗山斷層南段延伸有連接右昌斷層之可能性。</td><td colspan="3">李錫堤教授認為從 PSInSAR 地表變形資料中，右昌斷層應與龍船斷層相連較為合理。本團隊採用此說法，因此不考慮旗山連右昌的事件。</td></tr>
</table>

	(3) 地調所認為旗山斷層現階段應以其公布之長度為主，現階段不建議評估南延之事件。	在潛勢評估中為了避免地震危害度評估考慮不夠全面，建議評估時仍保留南段延伸的長度。
	(4) GPS 短期滑移速率觀察到在中寮隧道處旗山斷層右移量以及下盤變形量大，但可能是龍船斷層與旗山斷層間之變形為主。	本計畫目前仍以旗山斷層為主要評估對象，若是其長度有可能延伸，則加入延伸段作為邏輯樹中可能之破裂模式一分支，其他孕震構造，例如龍船斷層之潛勢可考慮於下一階段時加入評估。
	(5) 旗山斷層除垂直方向錯動外，應還有走向滑移方向分量，然而受限於地質資料不足，無法做走向滑移方向之長期滑移速率評估。因此現階段仍只評估垂直方向之變動，若未來有資料可供評估，建議納入計算。	感謝委員意見。
	3. 潮州斷層參數討論、問題與意見	
	(1) 地調所建議潮洲斷層南段現階段先以劃定之位置為主，不考慮南段延伸 16 公里之長度。	本計畫在潛勢評估中為了避免地震危害度評估考慮不夠全面，建議評估時仍保留南段延伸的長度。
	(2) 計畫團隊提到潮洲斷層南段延伸被楓港斷層截切，這代表楓港斷層比潮州斷層年輕之活動斷層，但地調所並沒有將楓港斷層劃為活動斷層，且目前對楓港斷層之存在與否仍未有定論，建議報告內容不需要提到楓港斷層。	感謝委員意見，依建議刪除關於楓港斷層之相關敘述。
	(3) 潮洲斷層與恆春斷層是否有同時破裂可能性，及潮州斷層是否延伸進海域，受限於海底資料之證據充分與否，目前仍有爭議，現階段暫不評估，但可在報告中加入討論與建議。	感謝委員意見，本團隊會在計畫報告書中加入討論與建議。
	4. 恆春斷層參數討論、問題與意見	
	(1) 恆春斷層分為兩條互相平行之 M 斷層與 E 斷層，對於此類斷層之評估，本計畫認為 M 斷層、E 斷層於地下實	感謝委員意見，本計畫採用此說法進行評估。

	為同一斷層面，斷層幾何評估以 E 斷層為主，滑移速率評估建議採用 M 斷層與 E 斷層之總合。	
	(2) 恆春斷層北部滑移速率 8 mm/yr 位於海口處（陳文山等，2006），已屬於恆春斷層之末端，權重設定上偏高，建議以南灣 4 mm/yr 為中值較為合理。	依建議將原設定滑移速率邏輯樹 4.04 mm/yr，6.09 mm/yr，8.13 mm/yr，更改為 1.5 mm/yr，4.0 mm/yr，6.5 mm/yr。
	(3) 恆春斷層滑移速率 8 mm/yr 可能受到泥貫入體之影響，導致速率太快，且計算得到之週期短於百年，不合於觀測歷史地震紀錄，建議不採用。	依建議將原設定滑移速率邏輯樹 4.04 mm/yr，6.09 mm/yr，8.13 mm/yr，更改為 1.5 mm/yr，4.0 mm/yr，6.5 mm/yr。
	5. 共同性問題與意見	
	(1) 徐澔德委員質疑此計畫是否需評估地調所發布之 33 條活動斷層以外之斷層，若評估之破裂模式涵蓋非地調所發布之斷層，則會與地調所報告繪製之斷層圖位置不一致。	本計畫目前仍以地調所公布的 33 條活動斷層為主要評估對象，若是其長度有可能延伸，則加入延伸段作為邏輯樹中可能之破裂模式一分支，其他孕震構造之潛勢可考慮於下一階段時加入評估。
	(2) 建議本計畫評估仍應著重在 33 條活動斷層，延伸段部分仍可加入評估，但不宜做過多延伸。若延伸段為地調所已發表之斷層，可納入評估；若非地調所繪製之斷層則不評估。若經專家學者評估後，認為斷層有延伸之可能性且非地調所繪製之斷層，則於報告中加入討論與建議。	感謝委員意見，遵照辦理。
	(3) 葉永田委員建議地震深度分布資料，地震需註明資料來源，建議採用吳逸民重定位過之地震資料，並加入最新地震目錄至 2014 年或 2015 年，亦可搭配 Vp、Vs 速度構造剖面協助判釋。	感謝委員意見，本團隊會蒐集並納入參考資料中。
	(4) 葉永田委員建議選取地震目錄範圍區域時，需建立準則，長度方面除了地調所繪製之斷層位置外，建議也加入延伸段區域；寬度方面，則考慮斷層傾角與深度之幾何形狀，投影至地表	感謝委員意見，本團隊會合理地選取與斷層相關之地震目錄。另外，除了平衡剖面及地震活動分布資料，建議可納入其他孕震深度評估方法，例如地溫梯度法或是孕震深度能量累積法，更合理地評估孕震深度。

	之範圍。	
	(5) 南部地區潛移、泥岩變形及泥貫入體問題：南部斷層周圍變形行為常伴隨著泥貫入體之影響，單純由泥貫入體造成之地形通常為對稱圓錐形，而南部部分背斜（例如小琉球、龜山、馬鞍山）之抬升雖可能有泥貫入體之貢獻，但地形呈現長條形，因此除泥貫入影響外，仍有構造作用造成之變形，而泥貫入體應是沿褶皺軸裂縫發育。也因地形受到構造作用之影響，因此仍需做地震潛勢評估，而滑移速率方面為避免泥貫入體影響，不採用短期滑移速率資料做評估。	感謝委員意見，泥貫入體問題現階段仍是難以評估其對地表以及對斷層潛勢的影響，本團隊會在計畫報告書中加入討論與建議。
備註		