中央地質調查所報告第 103-02 號
計畫編號：103-5226904000-04-01

經濟部中央地質調查所

103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（2/4）」（第二年度）

全 程 計 畫：自102年4月至105年12月止
本年度計畫：自103年1月至103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 103 年 12 月

中央地質調查所報告第 103-02 號
計畫編號：103-5226904000-04-01

經濟部中央地質調查所

103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（2/4）」（第二年度）

全 程 計 畫：自102年4月至105年12月止
本年度計畫：自103年1月至103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 103 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（2/4）
（第二年度）

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、唐昭榮、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、王順民

博士後研究員：傅慶州

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　103　年　12　月

目錄

目錄 I
表目錄 VII
圖目錄 IX
摘要 XXVII
Abstract XXXI
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 20
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 第一年度工作成果 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） 29
1-4-3 PS-InSAR 32
1-4-4 活動斷層發生潛勢圖建置 34
1-4-5 井下應變儀資料分析 37
1-4-6 地球化學觀測與研究 42
1-4-7 整合觀測資料分析 49
第二章、大地測量資料分析 51
2-1 連續 GPS 站解算成果分析 51
2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略 51
2-1-2 GPS 資料品質檢測 53
2-1-3 GPS 連續站時間序列分析 57
2-1-4 鳳林地震同震位移分析 58
2-2 2014 GPS 測量資料檢核 61
2-2-1 GPS 座標計算穩定度分析 61
2-2-2 座標殘差分析 61

2-2-3 均方根誤差分析 62
2-2-4 嘉南地區 GPS 觀測成果分析 63
2-2-5 高屏地區 GPS 觀測成果分析 64
2-2-6 中部地區 GPS 觀測成果分析 65
2-2-7 花東地區 GPS 觀測成果分析 66
2-2-8 恆春地區 GPS 觀測成果分析 67
2-2-9 臺北宜蘭地區 GPS 觀測成果分析 68
2-2-10 桃竹苗地區 GPS 觀測成果分析 69
2-2-11 GPS 移動站異常點位清查 70
2-2-12 全台水平速度場 74
2-3 精密水準測量精度分析 76
2-3-1 垂直速度場之推求 76
2-3-2 台 2_石門至萬里測線 77
2-3-3 三芝至士林測線 78
2-3-4 淡水至士林測線 79
2-3-5 五股至台北測線 80
2-3-6 縣 115_新屋至童話世界測線 81
2-3-7 縣 122_新竹至五峰測線 82
2-3-8 縣 117_新竹至峨眉測線 83
2-3-9 苗栗至南庄測線 84
2-3-10 縣 136_龍井至太平測線 85
2-3-11 縣 164_金湖至瑞峰測線 86
2-3-12 佳冬至七佳測線 87
2-3-13 瀧澗至嶺頂測線 88
2-3-14 光復至豐濱測線 89
2-3-15 紅葉至靜浦測線 90
2-3-16 跨車籠埔斷層之測線 91
2-3-17 縣 132_大安至東勢測線 92
2-3-18 縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線 93
2-3-19 縣 150-台 16_北斗至水里測線 94
2-3-20 縣 174_北門至楠西測線 95
2-3-21 縣 182_安平至龍崎測線 96
2-3-22 台 28_路竹至茂林測線 97
2-3-23 台 22_岡山至安坡測線 98
2-3-24 恆春半島地區測線 99
2-3-25 台 19 甲_善化至關廟測線 102

2-3-26 東成至富岡測線 103
2-3-27 台 2_梗枋至東澳測線 104
2-3-28 精密水準速度場檢核 105
2-3-29 全台精密水準速度場 113
2-3-30 2014 年鳳林地震 114
2-4 地表速度場分析 115
2-4-1 六甲-木屐寮斷層 115
2-4-2 龍船斷層 120
2-4-3 鳳山斷層 130
2-4-4 恆春斷層 139
2-5 北部地區應變矩率及地震矩率之分析討論 149
2-5-1 北部地區 GPS 速度場 149
2-5-2 北部地區 GPS 應變率場 149
2-5-3 大地測量矩率分布圖 150
2-5-4 地震矩率 151
2-6 PS-InSAR 155
2-6-1 ERS1/2 (1996/1~1999/12) 156
2-6-2 ENVISAT (2003/4~2008/6) 159
2-6-3 ALOS (2007/1~2011/3) 162
第三章、活動斷層發生潛勢圖建置 165
3-1 三義斷層 165
3-1-1 參數表之建立及說明 165
3-1-2 三義斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 171
3-1-3 三義斷層特徵地震模式 173
3-1-4 三義斷層發震機率之推估 175
3-2 大甲—彰化斷層系統 176
3-2-1 大甲-彰化斷層參數表之建立及說明 176
3-2-2 鐵砧山斷層參數表之建立及說明 180
3-2-3 大甲—彰化斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 182
3-2-4 大甲—彰化斷層系統特徵地震模式 184
3-2-5 大甲—彰化斷層發震機率之推估 188
3-3 獅潭-屯子腳斷層系統 189
3-3-1 屯子腳斷層參數表之建立及說明 189
3-3-2 獅潭斷層參數表之建立及說明 194
3-3-3 獅潭—屯子腳斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 199
3-3-4 獅潭—屯子腳斷層系統特徵地震模式 201

3-3-5 獅潭—屯子腳斷層發震機率之推估 204
3-4 新城斷層 205
3-4-1 參數表之建立及說明 205
3-4-2 新城斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 210
3-4-3 新城斷層特徵地震模式 212
3-4-4 新城斷層發震機率之推估 213
3-5 新竹斷層 214
3-5-1 參數表之建立及說明 214
3-5-2 新竹斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 220
3-5-3 新竹斷層特徵地震模式 222
3-5-4 新竹斷層發震機率之推估 224
3-6 湖口斷層 225
3-6-1 參數表之建立及說明 225
3-6-2 湖口斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 231
3-6-3 湖口斷層系統特徵地震模式 233
3-6-4 湖口斷層發震機率之推估 234
3-7 山腳斷層 235
3-7-1 參數表之建立及說明 235
3-7-2 山腳斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 244
3-7-3 山腳斷層系統特徵地震模式 246
3-7-4 山腳斷層發震機率之推估 248
3-8 小結 249
第四章、井下應變儀資料分析 259
4-1 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷 259
4-1-1 影響應變儀資料變化的因素 259
4-1-2 檢視井下應變儀資料中異常事件 270
4-1-3 井下應變儀應變異常判釋統計 276
4-2 時頻圖分析案例 277
4-2-1 井下應變儀資料時頻分析 277
4-2-2 自然事件案例分析 281
4-2-3 綜合討論 299
4-2-4 地震地下水資料分析 302
4-3 井下應變儀數值絕對量的校正 304
4-4 地震對於應變儀軸差應變之計算 306
第五章、地球化學觀測與研究 309
5-1 緒論 309

5-1-1 觀測站分布位置 310
5-1-2 觀測站相關地震選擇依據 311
5-1-3 利用時序分析方法處理觀測資料 313
5-2 土壤氣體觀測結果 317
5-2-1 土壤氣體綜合觀測結果 317
5-2-2 新觀測站設置之評選與研究區域 323
5-3 地下水壓觀測結果 333
5-3-1 地下水壓綜合觀測結果 333
5-3-2 地震誤報率統計與各測站近況 337
5-4 地下水水氡觀測結果 339
5-4-1 安通地下水水氡觀測站 339
5-4-2 社頂地下水水氡觀測站 340
5-5 溪水測站改設之評選與資料呈現 341
5-6 綜合觀測結果 345
第六章、整合觀測資料分析 347
6-1 斷層活動性討論 349
6-1-1 InSAR 與 GPS 測量比較 349
6-1-2 InSAR 與精密水準測量比較 352
6-1-3 InSAR 判釋斷層跡線位置與 LiDAR 判釋構造線形分布比較(以縱谷地區為例) 360
6-1-4 GPS 時間序列與地下水觀測資料比較 361
6-1-5 林口地區 ENVISAT、ALOS、水準測量以及長期 GPS 應變之比較 362
6-2 斷層面滑移速率及虧損率評估 364
6-2-1 臺灣中部活動斷層幾何參數及塊體模型設定 364
6-2-2 活動斷層長期滑移速率及虧損率 366
6-2-3 斷層之測地矩率及未來發震規模 372
6-2-4 小結 372
6-3 連續觀測異常資料整合與可能解釋 373
6-3-1 異常記錄與大地震活動之關係 373
6-3-2 GPS 應變與井下應變儀的共同解釋 380
6-3-3 連續觀測資料的共同解釋 383
6-3-4 臺灣地區地殼應變與大地震的關係 388
第七章、結論與建議 391
參考文獻 395
委員審查意見 409

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1-1] CGPS 觀測站基本資料

[附錄 1-2] 井下應變儀與地下水位監測井站基本資料

[附錄 1-3] 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] 土壤氣體觀測站之選址依據與相關背景

[附錄 1-5] 土壤氣體觀測站之儀器使用

[附錄 1-6] 水氡監測站之區域地質背景

[附錄 1-7] 地下水水氡量測分析方法

[附錄 1-8] 地球化學觀測之研究方法

[附錄 2-1] CGPS 時間序列

[附錄 2-2] CGPS 速度表

[附錄 2-3] GPS 移動站時間序列

[附錄 2-4] GPS 移動站速度表

[附錄 2-5] 精密水準時間序列

[附錄 2-6] 精密水準速度表

[附錄 2-7] 地震同震量表

[附錄 3-1] 活動斷層地震潛勢評估方法論

[附錄 3-2] 邏輯樹專家諮詢會議

[附錄 4-1] 井下應變儀資料分析結果

[附錄 4-2] 井下應變儀資料管理系統網站

[附錄 4-3] 時間序列資料分析理論

[附錄 4-4] 井下應變儀資料時頻分析結果

[附錄 5-1] 土壤氣體觀測站每月連續觀測圖

[附錄 5-2] 地下水壓逐月觀測資料

[附錄 5-3] 地下水水氡觀測結果

[附錄 6-1] GPS 連續觀測站及井下應變儀之變動值異常分析月報

[附錄 7-1] 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

表目錄

表 A：本年度預期進度甘梯圖。 XIX
表 B：預期進度查核點。 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。 11
表 1-4.1：第二階段已設置之連續觀測站配置儀器及分析項目。 42
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。 45
表 2-1.1：測站資料接收度低於 80%一覽表。 53
表 2-3.1：測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱、距離及圖例。 105
表 2-6.1：ERS-1/2 TRACK 461，FRAME 3105 詳細影像資訊與相對垂直基線。 157
表 2-6.2：ENVISAT TRACK 461，FRAME 3105 詳細影像資訊與相對垂直基線。 159
表 2-6.3：ALOS TRACK 444，FRAME 480、490 詳細影像資訊與相對垂直基線。 163
表 3-1.1：三義斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 167
表 3-1.2：三義斷層參數表。 169
表 3-1.3：三義斷層之中值各破裂事件規模及權重。 172
表 3-1.4：三義斷層發生機率評估。 175
表 3-2.1：大甲斷層與彰化斷層傾角及深度資料與文獻列表。 177
表 3-2.2：大甲、彰化斷層參數表。 178
表 3-2.3：鐵砧山斷層長度、傾角資料與文獻列表。 180
表 3-2.4：鐵砧山斷層參數表。 181
表 3-2.5：大甲—彰化斷層系統之中值各破裂事件規模及權重。 183
表 3-2.6：大甲—彰化斷層系統發生機率評估。 188
表 3-3.1：屯子腳斷層參數表。 192
表 3-3.2：獅潭斷層 A~E 模式參數表。 196
表 3-3.3：獅潭斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 196
表 3-3.4：獅潭斷層參數表。 197
表 3-3.5：獅潭-屯子腳斷層系統各破裂事件規模計算。 200
表 3-3.6：獅潭—屯子腳斷層系統發生機率評估。 204
表 3-4.1：新城斷層幾何形貌相關文獻。 206
表 3-4.2：新城斷層長期滑移速率相關文獻。 206
表 3-4.3：新城斷層參數表。 208
表 3-4.4：新城斷層之中值各破裂事件規模及權重。 211
表 3-4.5：新城斷層發生機率評估。 213
表 3-5.1：新竹斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 216
表 3-5.2：新竹斷層參數表。 218
表 3-5.3：新竹斷層之中值各破裂事件規模及權重。 220
表 3-5.4：新竹斷層發生機率評估。 224
表 3-6.1：湖口斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 227
表 3-6.2：湖口斷層參數表。 229
表 3-6.3：湖口斷層之中值各破裂事件規模及權重。 231
表 3-6.4：湖口斷層發生機率評估。 234
表 3-7.1：山腳斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 239
表 3-7.2：山腳斷層長期滑移速率相關文獻。 240
表 3-7.3：山腳斷層參數表。 241
表 3-7.4：山腳斷層之中值各破裂事件規模及權重。 244
表 3-7.5：山腳斷層發生機率評估。 248
表 3-8.1：活動斷層參數表。 251

表 4-1.1：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。 269
表 4-1.2：井下應變儀前兆判釋統計表。 276
表 4-2.1：2014 年新竹群震與陽明山地震詳細資訊。 292
表 4-2.2：地震事件詳細資訊。 299
表 4-2.3：對應花蓮地震地下水地震事件詳細資訊。 303
表 4-3.1：理論地潮振幅與井下應變儀實測振幅比較。 305
表 4-4.1：井下應變儀觀測站的各頻道氣壓響應因子。 307
表 5-1.1：地球化學既有觀測站的座標。 311
表 5-1.2：各測站氣體異常反應之地震比率。 314
表 5-1.3：各測站氣體異常反應之地震比率（扣除因儀器故障與降雨影響）。 314
表 5-1.4：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率。 315
表 5-2.1：地震與多個土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。 318
表 5-2.2：新竹橫山地震群相關資料表。 318
表 5-2.3：宜蘭固定點採樣分析結果 332
表 5-3.1：水位異常測站與地震資訊相對列表。 333
表 5-3.2：2014 上半年度每周誤報率統計表。 337
表 5-3.3：2014 下半年度每周誤報率統計表。 338
表 5-6.1：2013 年 12 月至 2014 年 11 月間，規模大於 5 且多個土壤氣體觀測站有前兆訊號的地震事件與各地球化學觀測站之前兆反應列表。 345
表 6-1.1：2009 年 08 月 17 ~ 20 日，於花蓮市地震站東偏南方 200 ~ 240 公里處連續發生了 6 個規模 5.2 ~ 6.8 的地震。 363
表 6-2.1：圖 6-2.1 中所示 17 條斷層之幾何參數。 365
表 6-2.2：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。 369
表 6-2.3：斷層之平均滑移速率。 370
表 6-2.4：車籠埔斷層之滑移虧損與推估規模。 372
表 6-3.1：2009 年 1 月至 2014 年 11 月規模大於五之地震事件列表。 373
表 6-3.2：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。 385

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台分布圖。 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 1-1.6：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，共有 909 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。 13
圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站之 GPS 水平速度場。 14
圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站之垂直速度場。 15
圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖。 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 波段影像降軌之框架與軌道圖。 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。 20
圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌。 21
圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹。 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。 22
圖 1-4.1：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 連續站水平方向速度場。 28
圖 1-4.2：由 GPS 及水準測量所得臺灣現今垂直速度場。 29
圖 1-4.3：測站 SUN1 每日解時間序列。 30
圖 1-4.4：2013 年 1 月至 9 月修正同震位移及測站異常之年速度場。 31
圖 1-4.5：測站 DSIN、GUFU 高頻動態解地震前後 1 分時間序列。 32
圖 1-4.6：ENVISAT 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。 33
圖 1-4.7：ERS 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。 33
圖 1-4.8：ALOS(PATH 446 FRAMES 460 & 470)與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。 34
圖 1-4.9：ENVISAT 與編號 17 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 1-4.10：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震發生機率。 35
圖 1-4.11：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震發生機率。 36
圖 1-4.12：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震發生機率。 36
圖 1-4.13：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。 38
圖 1-4.14：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。 38
圖 1-4.15：井下應變儀中地潮分量的評估。 39
圖 1-4.16：錦和國小觀測站（JING）受到降雨引發的快速響應函數。 39
圖 1-4.17：應用模擬降雨響應至原始觀測應變資料上，可有效地除去降雨造成的快速響應的異常現象。 39
圖 1-4.18：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 41
圖 1-4.19：本計畫已設置之觀測站與這 4 年預定設置觀測站之區域。 43
圖 1-4.20：嘉義中崙濁水潭觀測站對於發生於臺灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應（2003/1/1~2004/7/31），非常適合持續長期觀測。 43
圖 1-4.21：新竹大平地觀測站對於發生於臺灣北部與東北部地區的地震活動有敏感的反應（2006/6/14-2007/9/9），非常適合持續長期觀測。 44
圖 1-4.22：嘉南地區的中興、太興、達邦水位觀測站（2008/1/1-2008/3/31）對於發生於臺灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應。 44
圖 1-4.23：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。 46
圖 1-4.24：臺灣島與鄰近地區的板塊構造架構以及新竹地區觀測井有前兆反應的地震震央分布圖（2008 年 11 月至 2013 年 11 月）。 47
圖 1-4.25：大平地氣體觀測站與新樂水位觀測站之比較（2009/9/1-2009/12/31）。 47

圖 1-4.26：中崙濁水潭觀測站野外現地照片。 47
圖 1-4.27：臺灣東部吉祥水氡監測站 2003-2008 年之水氡濃度監測圖。 48
圖 1-4.28：社頂站地下水水氡濃度變化與雨量關係圖。 48
圖 1-4.29：2009 年 1 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。 49
圖 1-4.30：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 49
圖 1-4.31：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 50
圖 2-1.1：本計畫約制之國際連續站與國內連續站分布圖。 51
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。 52
圖 2-1.3：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖。 56
圖 2-1.4：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。 57
圖 2-1.5：2014521 鳳林地震同震變形圖。 58
圖 2-1.6：地調所連續 GPS 測站分布圖。 59
圖 2-1.7：測站 GS07 高頻動態解地震前後 10 分時間序列。 60
圖 2-2.1：2002 ~ 2013 年及 2014 年 GPS 點位座標殘差分布圖。 61
圖 2-2.2：2002 - 2013 年及 2014 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 62
圖 2-2.3：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 63
圖 2-2.4：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 64
圖 2-2.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 65
圖 2-2.6：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 66
圖 2-2.7：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 67
圖 2-2.8：臺北宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 68
圖 2-2.9：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 2-2.10：桃竹地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場解算結果。 70
圖 2-2.11：2006 - 2014 年移動測站 G416（五峰國小）、GE24（關西國中）及 T007（園區內）相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 71
圖 2-2.12： G416（五峰國小）移動測站現場照片。 71
圖 2-2.13：GE24（關西國中）移動測站現場照片。 72
圖 2-2.14：T007（園區內）移動測站現場照片。 72
圖 2-2.15：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場解算結果。 73
圖 2-2.16：2006 - 2014 年移動測站 G047（潮厝國小）及 GF35（東興國小）相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 73
圖 2-2.17：GF35（東興國小）移動測站現場照片。 73
圖 2-2.18：台灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向 2002 – 2014 年速度場解算結果。 75
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。 76
圖 2-3.2：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 77
圖 2-3.3：水準點位 0811 現地情形。 77
圖 2-3.4：三芝至士林測線水準高程變化圖。 78
圖 2-3.5：淡水至士林測線水準高程變化圖。 79
圖 2-3.6：五股至台北測線水準高程變化圖。 80
圖 2-3.7：水準點位 1001 現地情形。 80
圖 2-3.8：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 81
圖 2-3.9：水準點位 GB55 現地情形。 81
圖 2-3.10：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。 82
圖 2-3.11：水準點位 G416 現地情形。 82
圖 2-3.12：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。 83
圖 2-3.13：水準點位 GB90 現地情形。 83
圖 2-3.14：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。 84
圖 2-3.15：水準點位 GD56 現地情形。 84
圖 2-3.16：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 85
圖 2-3.17：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。 86
圖 2-3.18：水準點位 G757 現地情形。 86
圖 2-3.19：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。 87
圖 2-3.20：瀧澗至嶺頂測線水準高程變化圖。 88
圖 2-3.21：光復至豐濱測線水準高程變化圖。 89
圖 2-3.22：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 90
圖 2-3.23：水準點位 W044 現地情形。 90

圖 2-3.24：五光至黃竹水準高程變化圖。 91
圖 2-3.25：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 92
圖 2-3.26：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。 93
圖 2-3.27：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。 94
圖 2-3.28：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。 95
圖 2-3.29：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。 96
圖 2-3.30：水準點位 G435 現地情形。 96
圖 2-3.31：縣 184_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。 97
圖 2-3.32：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。 98
圖 2-3.33：水準點位 G533 現地情形。 98
圖 2-3.34：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。 100
圖 2-3.36：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 102
圖 2-3.37：東成至富岡測線水準高程變化圖。 103
圖 2-3.38：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。 104
圖 2-3.39：水準點位 9053 現地情形。 104
圖 2-3.40：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。 106
圖 2-3.41：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較。 106
圖 2-3.42：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。 106
圖 2-3.43：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。 106
圖 2-3.44：水準點位 GG03 與連續站 YAME 之間序列比較。 107
圖 2-3.45：水準點位 HCCA 與連續站 TCMS 之間序列比較。 107
圖 2-3.46：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之間序列比較。 107
圖 2-3.47：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之間序列比較。 107
圖 2-3.48：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之間序列比較。 108
圖 2-3.49：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之間序列比較。 108
圖 2-3.50：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。 108
圖 2-3.51：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。 108
圖 2-3.52：水準點位 G971 與連續站 YENL 之間序列比較。 109
圖 2-3.53：水準點位 G991 與連續站 FENP 之間序列比較。 109
圖 2-3.54：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之間序列比較。 109
圖 2-3.55：水準點位 G896 與連續站 GS36 之間序列比較。 109
圖 2-3.56：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之間序列比較。 110
圖 2-3.57：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之間序列比較。 110
圖 2-3.58：水準點位 I088 與連續站 GS44 之間序列比較。 110
圖 2-3.59：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之間序列比較。 110
圖 2-3.60：水準點位 R016 與連續站 GS55 之間序列比較。 111
圖 2-3.61：水準點位 G525 與連續站 AKND 之間序列比較。 111
圖 2-3.62：水準點位 G670 與連續站 HENC 之間序列比較。 111
圖 2-3.63：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之間序列比較。 111
圖 2-3.64：水準點位 1157 與連續站 GS29 之間序列比較。 112
圖 2-3.65：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之間序列比較。 112
圖 2-3.66：水準點 GG83 與連續站 SUAO 之間序列比較。 112
圖 2-3.67：全臺精密水準速度場。 113
圖 2-3.68：鳳林地震震央與東部水準測線分布圖。 114
圖 2-4.1：（A）臺灣西南部相對於澎湖白沙 S01R 的水平速度場。（B）臺灣西南部相對於澎湖白沙 S01R 的垂直速度場。 117
圖 2-4.2：（A）二維斷層模型示意圖。（B）橫跨速度剖面的模型結果。 119
圖 2-4.3：連續站、大地變位監測點和導線點參考於 ITRF 之水平速度場。 121
圖 2-4.4：連續站、大地變位監測點和導線點參考於 ITRF 之水平速度場（隧道北口至高架橋一帶）。 122
圖 2-4.5：連續站、大地變位監測點和導線點參考於 ITRF 之水平速度場（隧道北口）。 123
圖 2-4.6：連續站、大地變位監測點和水準點參考於 ITRF 之垂直速度場。 125
圖 2-4.7：連續站、大地變位監測點和水準點參考於 ITRF 之垂直速度場（隧道北口至高架橋一帶）。 126
圖 2-4.8：連續站、大地變位監測點和水準點參考於 ITRF 之垂直速度場（隧道北口）。 127
圖 2-4.9：水平速度場之速度剖面圖（沿龍船斷層與旗山斷層）。 128
圖 2-4.10：三維速度剖面圖（沿 A-A'剖面）。 129
圖 2-4.11：臺灣西南部相對於澎湖之 GPS 水平速度場。 131

圖 2-4.12：臺灣西南部主應變率分布圖。 132
圖 2-4.13：臺灣西南部剪應變率分布圖。 133
圖 2-4.14：鳳山轉換斷層北、中、南三段之速度剖面位置圖。 134
圖 2-4.15：斷層北段模型剖面及滑移速率分布。 136
圖 2-4.16：斷層中段模型剖面及滑移速率分布。 137
圖 2-4.17：斷層南段模型剖面及滑移速率分布。 138
圖 2-4.18：西台地-佳樂水水準測線 2002~2013 年時間序列圖。 140
圖 2-4.18（續）：西台地-佳樂水水準測線 2002~2013 年時間序列圖。 141
圖 2-4.19：墾丁-鵝鑾鼻水準測線 2002~2013 年時間序列圖。 142
圖 2-4.19（續）：墾丁-鵝鑾鼻水準測線 2002~2013 年時間序列圖。 143
圖 2-4.20：（A）恆春 GPS 連續站（HENC） 2002~2012 年時間序列圖。（B）墾丁 GPS 連續站（KDNM）2002~2012 年時間序列圖。 144
圖 2-4.21：恆春半島水平速度場。 145
圖 2-4.22：恆春半島水平速度場變化量。 146
圖 2-4.23：恆春半島垂直速度場。 147
圖 2-4.24：恆春半島垂直速度場變化量。 148
圖 2-5.1：北部地區相對於澎湖白沙（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 149
圖 2-5.2：北部地區應變率場分布圖。 150
圖 2-5.3：最小大地測量矩率分布圖。 150
圖 2-5.4：2002-2014 年之地震資料品質展示。 151
圖 2-5.5：2005 年 3 月 6 日宜蘭地震，規模 5.9，深度 6.4 公里。 152
圖 2-5.6：2013 年 3 月 7 日花蓮地震，規模 5.9，深度 5.6 公里。 152
圖 2-5.7：地震矩率分布圖。 153
圖 2-5.8：臺灣北部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。 154
圖 2-5.9：臺灣北部地區矩率綜合分析圖。 154
圖 2-6.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。 155
圖 2-6.2：ERS-1/2 衛星選取區域涵蓋圖，TRACK 461，FRAME 3105。 156
圖 2-6.3：ERS-1/2 TRACK 461，FRAME 3105 影像時間與垂直基線相對關係。 156
圖 2-6.4：利用 ERS PATH 461，FRAME 3105 共 29 幅影像，以 1997/08/30 為主影像所獲得 28 幅差分干涉圖之結果。 157
圖 2-6.5： ERS PATH 461，FRAME 3105 視衛星方向上年平均變動量。 158
圖 2-6.6：ENVISAT TRACK 461，FRAME 3105 影像時間與垂直基線相對關係。 159
圖 2-6.7：ENVISAT PATH 461，FRAME 3105 共 30 幅影像，以 2005/11/26 為主影像所獲得 29 幅差分干涉圖之結果。 160
圖 2-6.8： ENVISAT PATH 461，FRAME 3105 視衛星方向上年平均變動量。 161
圖 2-6.9：ALOS 衛星選取區域涵蓋圖，TRACK 444，FRAME 480、490。 162
圖 2-6.10：ALOS TRACK 444，FRAME 480、490 影像時間與垂直基線相對關係。 162
圖 2-6.11：ALOS PATH 444，FRAME 480、490 共 21 幅影像，以 2007/11/30 為主影像所獲得 20 幅差分干涉之結果。 163
圖 2-6.12： ALOS PATH 444，FRAME 480、490 視衛星方向上年平均變動量。 164
圖 3-1.1：三義斷層條帶地質圖。 165
圖 3-1.2：三義斷層南段延伸部分，圖中 SYF 之藍色線段即三義斷層。 165
圖 3-1.3：本計畫三義斷層 4 種破裂模式。 166
圖 3-1.4：左圖為三義斷層西元 1973-2010 地震分布圖，右圖為地震深度-數量統計圖。 166
圖 3-1.5：（A）三義斷層（紅色實線）沿線構造線形平面位置及野外點位（藍色實心圓圈）分布；（B）后里槽溝照片，位於（A）之點 1 中；（C）后里馬場地形崖，位於（A）之點 2 中。 167
圖 3-1.6：（A）三義斷層（紅色實線）沿線地形剖面位置分布；（B）地形剖面圖，剖面位置為（A）中之黑色實線。 168
圖 3-1.7：三義斷層之破裂模式及權重分配。 171
圖 3-1.8：三義斷層邏輯樹。 172
圖 3-1.9：A 事件特徵地震模式。 173
圖 3-1.10：B 事件特徵地震模式。 173
圖 3-1.11：C 事件特徵地震模式。 173
圖 3-1.12：D 事件特徵地震模式。 173
圖 3-1.13：三義斷層 4 種破裂事件之規模-權重分布圖。 174
圖 3-1.14：三義斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。 174

圖 3-1.15：（A）三義斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）三義斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 175
圖 3-2.1：大甲與鐵砧山斷層條帶地質圖。 176
圖 3-2.2：大甲與鐵砧山斷層地形圖與周邊斷層分布圖。 176
圖 3-2.3：1848 年歷史地震災害分布圖地震災害主要沿彰化斷層分布，推斷地震與彰化斷層活動有關。 177
圖 3-2.4：大甲—彰化斷層系統之破裂模式及權重分配。 182
圖 3-2.5：大甲—彰化斷層系統邏輯樹。 183
圖 3-2.6：A 事件特徵地震模式。 184
圖 3-2.7：B 事件特徵地震模式。 184
圖 3-2.8：C 事件特徵地震模式。 184
圖 3-2.9：D 事件特徵地震模式。 184
圖 3-2.10：E 事件特徵地震模式。 185
圖 3-2.11：F 事件特徵地震模式。 185
圖 3-2.12：G 事件特徵地震模式。 185
圖 3-2.13：大甲—彰化斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖。 186
圖 3-2.14：大甲—彰化斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖。 187
圖 3-2.15：（A）大甲—彰化斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）大甲—彰化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。 188
圖 3-3.1：1935 年地震系列主要地震分布及構造線地圖。 189
圖 3-3.2：臺灣中部地震（1935）崖崩、地震裂隙、屯子腳地震斷層分布圖。 190
圖 3-3.3：屯子腳斷層地表破裂位置（紅色實線），與推測之斷層延伸（紅色虛線）位置圖。 190
圖 3-3.4：左圖為屯子腳斷層西元 1973-2010 地震分布圖，右圖為地震深度-數量統計圖。 191
圖 3-3.5：獅潭斷層條帶地質圖。 194
圖 3-3.6：臺灣中部地震（1935）崖崩、地震裂隙、獅潭地震斷層分布圖。 195
圖 3-3.7：LIN ET AL. (2013)彙整斷層模型之五種模式（A~E），獅潭斷層之參數。 195
圖 3-3.8：獅潭-屯子腳斷層系統破裂模式及權重分配。 199
圖 3-3.9：獅潭-屯子腳斷層系統邏輯樹。 200
圖 3-3.10：A 事件特徵地震模式。 201
圖 3-3.11：B 事件特徵地震模式。 201
圖 3-3.12：C 事件特徵地震模式。 201
圖 3-3.13：D 事件特徵地震模式。 201
圖 3-3.14：E 事件特徵地震模式。 201
圖 3-3.15：F 事件特徵地震模式。 201
圖 3-3.16：獅潭—屯子腳斷層系統 6 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖。 202
圖 3-3.17：獅潭—屯子腳斷層系統 6 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖。 203
圖 3-3.18：（A）獅潭—屯子腳斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）獅潭—屯子腳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。 203
圖 3-4.1：新城斷層條帶地質圖。 205
圖 3-4.2：新城斷層分布圖。 205
圖 3-4.3：新城斷層之破裂模式及權重分配。 210
圖 3-4.4：新城斷層邏輯樹。 211
圖 3-4.5：A 事件之特徵地震模式。 212
圖 3-4.6：B 事件之特徵地震模式。 212
圖 3-4.7：新城斷層 2 種破裂事件之規模-權重分布圖。 212
圖 3-4.8：新城斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。 213
圖 3-4.9：（A）新城斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）新城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 3-5.1：新竹斷層條帶地質圖。 214
圖 3-5.2：HCU02-7 震測剖面。 214
圖 3-5.3：新竹斷層階地及斷層崖線形描繪。 214
圖 3-5.4：40 公尺數值高程模型（DEM）彩繪陰影地形圖。 214
圖 3-5.5：新竹地區海域震測剖面。 215
圖 3-5.6：本計畫推估新竹斷層之延伸位置，海域線形取自沈玟劭（2008）。 215
圖 3-5.7：左圖為地質圖及平衡剖面位置圖。 216
圖 3-5.8：（A）美山－客雅區域地質圖，AA'剖面圖位置為圖中藍色線段（B）AA'地殼垂直變動速率剖面圖。正值代表抬升，負值代表沉降，（C）新竹斷層兩側地殼垂直變動速率圖。 217

圖 3-5.9：新竹斷層之破裂模式及權重分配。 220
圖 3-5.10：新竹斷層邏輯樹。 221
圖 3-5.11：A 事件特徵地震模式。 222
圖 3-5.12：B 事件特徵地震模式。 222
圖 3-5.13：C 事件特徵地震模式。 222
圖 3-5.14：D 事件特徵地震模式。 222
圖 3-5.15：新竹斷層 4 種破裂事件之規模-權重分布圖。 223
圖 3-5.16：新竹斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。 223
圖 3-5.17：（A）新竹斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）新竹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 3-6.1：湖口斷層條帶地質圖。 225
圖 3-6.2：湖口斷層西部延伸段地形。 226
圖 3-6.3：湖口斷層西部延伸段地形。 226
圖 3-6.4：湖口斷層分段模式。 227
圖 3-6.5：湖口斷層鑽井位置與鑽井資料。 228
圖 3-6.6：湖口斷層兩側地殼平均垂直變動速率圖。 228
圖 3-6.7：湖口斷層之破裂模式及權重分配。 231
圖 3-6.8：湖口斷層邏輯樹。 232
圖 3-6.9：A 事件特徵地震模式。 233
圖 3-6.10：B 事件特徵地震模式。 233
圖 3-6.11：湖口斷層 2 種破裂事件之規模-權重分布圖。 233
圖 3-6.12：湖口斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。 234
圖 3-6.13：（A）湖口斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）湖口斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 234
圖 3-7.1：山腳斷層條帶地質圖。 236
圖 3-7.2：大屯山地區之 LIDAR DTM，觀察之線形呈現雁行排列，北段觀察到之斷層線形，平均落差為 3.3 M。 236
圖 3-7.3：大屯山地區之 LIDAR DTM 及構造地形分析及判釋。 237
圖 3-7.4：臺灣東北部海域震測分布及震測剖面斷層延伸位置對比圖。 237
圖 3-7.5：北部海域多音束水深調查-海底地形光影圖。 238
圖 3-7.6：（A）柑園橋位置及山腳斷層南段延伸推估（B）柑園橋上游照片（C）柑園橋下游照片。 238
圖 3-7.7：臺北盆地的地下剖面，成子寮剖面。 239
圖 3-7.8：山腳斷層之破裂模式及權重分配。 244
圖 3-7.9：山腳斷層邏輯樹。 245
圖 3-7.10：A 事件特徵地震模式。 246
圖 3-7.11：B 事件特徵地震模式。 246
圖 3-7.12：C 事件特徵地震模式。 246
圖 3-7.13：山腳斷層 3 種破裂事件之規模-權重分布圖。 247
圖 3-7.14：山腳斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。 247
圖 3-7.15：（A）山腳斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）山腳斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。 248
圖 3-8.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 6.5 以上之發生機率。 253
圖 3-8.2：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。 254
圖 3-8.3：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。 255
圖 3-8.4：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 7.0 以上之發生機率。 256
圖 3-8.5：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。 257
圖 3-8.6：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。 258
圖 4-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。 260
圖 4-1.2：井下應變儀中地潮分量的評估。 260
圖 4-1.3：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。 261
圖 4-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小測站（PFMT）地下水位持續下降。 261
圖 4-1.5：臺北地區地下水各測站水位資料。 261
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。 262
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。 263
圖 4-1.8：嘉義網中興國小測站（TSUN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 263
圖 4-1.9：嘉義網太興國小測站（TAIS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 264

圖 4-1.10：臺北網錦和國小測站（JING）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 264
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。 264
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。 265
圖 4-1.13：達邦站 CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較（0-40MHZ）。 266
圖 4-1.14：達邦站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。 267
圖 4-1.15：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。 267
圖 4-1.16：BMMT CH0 氣壓影響計算值比較。 268
圖 4-1.17：觀測應變去除氣壓響應後的結果。 268
圖 4-1.18：2013 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。 271
圖 4-1.19：臺北網錦和測站（JING）於 2014 年 2 月陽明山地震前的應變資料。 272
圖 4-1.20：2014 年 2 月新竹群震基本資料。2 月 5 日至 8 日間，新竹寶山鄉地區發生共 10 起芮氏規模 2.3 ~ 3.4 的地震。 273
圖 4-1.21：2014 年 2 月新竹群震前後新竹網井下應變儀梅花站應變資料。 273
圖 4-1.22：2014 年 5 月花蓮地震前嘉義網達邦站井下應變儀資料。 274
圖 4-1.23：2014 年 8 月新北市烏來區地震前臺北網錦和站(JING)井下應變儀資料。 275
圖 4-2.1：2013 年 10 月~2014 年 10 月大坪國小測站（BMMT）面應變資料時頻圖與能量變化。 278
圖 4-2.2：2013 年 10 月~2014 年 10 月新樂國小測站（CINT）面應變資料時頻圖與能量變化。 279
圖 4-2.3：2013 年 10 月~2014 年 5 月梅花國小測站（PFMT）面應變資料時頻圖與能量變化。 280
圖 4-2.4：大坪國小（BMMT）測站汶川地震前後面應變時頻分析結果。 282
圖 4-2.5：新樂國小（CINT）測站汶川地震前後面應變時頻分析結果。 283
圖 4-2.6：梅花國小（PFMT）測站汶川地震前後面應變時頻分析結果。 284
圖 4-2.7：甲仙地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。 285
圖 4-2.8：甲仙地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。 286
圖 4-2.9：甲仙地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。 287
圖 4-2.10：日本東北地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。 288
圖 4-2.11：日本東北地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。 289
圖 4-2.12：日本東北地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。 290
圖 4-2.13：2013 年 3 月地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。 291
圖 4-2.14：2014 年 2 月地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。 293
圖 4-2.15：2014 年 2 月地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。 294
圖 4-2.16：2014 年 2 月地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。 295
圖 4-2.17：2014 年 5 月 21 日花蓮地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。 296
圖 4-2.18：2014 年 5 月 21 日花蓮地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。 297
圖 4-2.19：2014 年 5 月 21 日花蓮地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。 298
圖 4-2.20：2013 年 10 月 1 日至 2014 年 7 月 27 日大坪測站（BMMT）測站面應變時頻分析結果。 300
圖 4-2.21：2013 年 10 月 1 日至 2014 年 7 月 27 日新樂國小測站（CINT）測站面應變時頻分析結果。 300
圖 4-2.22：2013 年 10 月 1 日至 2014 年 7 月 27 日梅花國小測站（PFMT）測站面應變時頻分析結果。 ... 301
圖 4-2.23：2013 年 9 月 12 日至 2014 年 11 月 2 日花蓮地震地下水測站(HWA)時頻分析結果。 302
圖 4-3.1：PFMT 站平面應變長期 M2 地潮分潮。 304
圖 4-4.1：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。 306
圖 4-4.2：2014 年 2 月 12 日於臺北市士林區發生規模 4.2 的有感地震。 308
圖 4-4.3：錦和國小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。 308
圖 5-1.1：既有觀測站的分布位置。 310
圖 5-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。 312
圖 5-2.1：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。 317
圖 5-2.2：2014/1/15 南投魚池地震與各測站觀測情形。 319
圖 5-2.3：2014/1/15 臺東卑南地震與各測站觀測情形。 320
圖 5-2.4：2014/5/21 花蓮鳳林地震與各測站觀測情形。 321
圖 5-2.5：2014/2/5-2014/2/8 新竹橫山地震群與大平地站觀測情形。 322
圖 5-2.6：綜合各研究所繪之斷層分布圖。 324
圖 5-2.7：宜蘭平原採樣點分佈圖。 324
圖 5-2.8：宜蘭平原土壤氣之氦氣等濃度分布圖。 325
圖 5-2.9：宜蘭平原土壤氣之氪氣等濃度分布圖。 326
圖 5-2.10：宜蘭平原土壤氣之二氧化碳等濃度分布圖。 326

圖 5-2.11：宜蘭平原土壤氣二氧化碳通量之等濃度分布圖。 327
圖 5-2.12：臺灣斷層附近學校分布圖。 328
圖 5-2.13：臺灣北部地區斷層 500 公尺內各級學校分布圖。 329
圖 5-2.14：臺灣北部地區斷層 100 公尺內各級學校分布圖。 330
圖 5-2.15：土壤氣固定點採樣分布圖。 331
圖 5-3.1：2014 年 2 月新竹橫山群震與新竹新樂站水位異常關係圖。 334
圖 5-3.2：2014 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。 335
圖 5-3.3：2014 年 5 月 21 日花蓮鳳林地震與嘉義中興站水位異常關係圖。 336
圖 5-4.1：安通站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。 339
圖 5-4.2：利用四分位數統計分析安通站地下水水氡濃度。 339
圖 5-4.3：社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。 340
圖 5-4.4：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。 340
圖 5-5.1：嘉義溓水測站內管線配置簡圖。 341
圖 5-5.2：溓水站溶解氣氣體百分比與測站相關地震（D/R > 1）之時間分布。 342
圖 5-5.3：溓水測站水中溶解氣氦同位素比值與氖氦比值。 342
圖 5-5.4：溓水測站各溶解氣體間之比值。 343
圖 5-5.5：溓水測站水中溶解氪氣。 343
圖 5-5.6：溶解氣體甲烷、氧、氮、二氧化碳、氬與 RTM 幫浦抽氣速率、測站內氣溫。 344
圖 6-1.1：ERS 衛星與 CGPS 視衛星方向上年平均變動量比較。 349
圖 6-1.2：ENVISAT 衛星與 CGPS 視衛星方向上年平均變動量比較。 350
圖 6-1.3：ALOS 衛星與 CGPS 視衛星方向上年平均變動量比較。 351
圖 6-1.4：比較 ENVISAT 與編號 01 精密水準測量視衛星方向變形速率。 352
圖 6-1.5：比較 ENVISAT 與編號 02 精密水準測量視衛星方向變形速率。 353
圖 6-1.6：比較 ENVISAT 與編號 03 精密水準測量視衛星方向變形速率。 354
圖 6-1.7：ENVISAT 與編號 04 精密水準測量視衛星方向變形速率。 355
圖 6-1.8：比較 ALOS 與編號 01 精密水準測量視衛星方向變形速率。 356
圖 6-1.9：比較 ALOS 與編號 02 精密水準測量視衛星方向變形速率。 357
圖 6-1.10：比較 ALOS 與編號 03 精密水準測量視衛星方向變形速率。 358
圖 6-1.11：比較 ALOS 與編號 04 精密水準測量視衛星方向變形速率。 359
圖 6-1.12：判識斷層跡之比較。 360
圖 6-1.13：CGPS 測站時間序列與鄰近地下水位站日平均水位線。 361
圖 6-1.14：林口地區的 GPS 站分佈。 362
圖 6-1.15：GS10-GS13-LNKO 三角網的長期應變。 362
圖 6-2.1：本文所用的臺灣中、北部三維塊體模型及在 2002-2012 期間利用連續 GPS 及 CAMPAIGN GPS 資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站）。 365
圖 6-2.2：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。 367
圖 6-2.3：（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。 368
圖 6-2.4：（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。 370
圖 6-2.5：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 X2 為 38.7。 371
圖 6-2.6：各塊體內之內部形變應變大小。 371
圖 6-3.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 377
圖 6-3.2：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 378
圖 6-3.3：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件之位置及震源機制圖。 378
圖 6-3.4：2009 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。 379
圖 6-3.5：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。 381
圖 6-3.6：GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013 ~ 2014 年的觀測換算成應變量的變化。 381
圖 6-3.7：GS07-GS66-W029 所形成的 GPS 三角網在 2013 ~ 2014 年的觀測換算成應變量的變化。 382
圖 6-3.8：DARB 井下應變與其附近兩個 GPS 網的地表應變的時間序列。 383
圖 6-3.9：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。 384
圖 6-3.10：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-KSHU 與 GS61-PLAN-KSHI 的時間序列。 385

圖 6-3.11：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。 385
圖 6-3.12：陽明山地區 GPS 連續站網。 386
圖 6-3.13：為 GS08-GS11-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果。 387
圖 6-3.14：為 GS08-WANL-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果。 387
圖 6-3.15：顯示 DARB 測站與 GS07-GS66-W029 GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致。 388
圖 6-3.16：顯示宜蘭地區 PFMT 測站與 FUSN-GS61-KSHI 以及 GS61-PLAN-WIPN GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致。 389
圖 6-3.17：顯示新竹地區 BMMT 測站與 GS16-GS61-KSHI 以及 FUSN-GS61--WIPN 二個 GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致。 390

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（2/4）													
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)													
井下應變儀資料校正及計算分析 (由臺大工作團隊負責)													
新竹網測站時頻分析 (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)													
整合並綜合分析觀測資料 (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)													
宜蘭地區土壤氣體調查結果及未來設站地點評估 (由臺大地化工作團隊負責)													
安通溫泉持續定期監測分析 (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)													
活動潛勢評估方法論研究 (由中興工程顧問社負責)													
三義斷層、大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層活動特性參數表 (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
建立三義斷層、大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)													
三義斷層、大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)													
山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層活動特性參數表 (由中興工程顧問社負責)													
建立山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)													
山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭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北部地區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)													
北部地區9條活動斷層斷層活動潛勢評估 (由中興工程顧問社負責)													
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 12-2 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 12-2 月 c. 彙整北部地區 SAR 影像對 d. 井下應變儀資料校正 12-2 月 e. 既有氣體觀測站 12-2 月資料分析 f. 既有水位觀測站 12-2 月資料分析 g. 既有水氡觀測站 12-2 月資料分析 h. 三義斷層、屯子腳斷層活動特性參數表	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 3-5 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 3-5 月 c. 製作北部地區干涉影像 d. 井下應變儀資料校正 3-5 月 e. 既有氣體觀測站 3-5 月資料分析 f. 既有水位觀測站 3-5 月資料分析 g. 既有水氡觀測站 3-5 月資料分析 h. 宜蘭地區土壤氣調查初步結果 i. 新竹網測站時頻分析 j. 整合觀測資料至最新 k. 大甲斷層、鐵砧山斷層活動特性參數表 l. 三義斷層、大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層三維幾何形貌 m. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議	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

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
4	（第三季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 6-8 月 b. GPS 連續站計算及時序分析至 6-8 月 c. 處理 PSInSAR 平均視衛星方向位移之數值資料 d. 井下應變儀資料校正及計算分析 6-8 月 e. 既有氣體觀測站 6-8 月資料分析 f. 既有水位觀測站 6-8 月資料分析 g. 既有水氡觀測站 6-8 月資料分析 h. 新竹網測站時頻分析 i. 整合觀測資料至最新 j. 山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層活動特性參數表 k. 山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層三維幾何形貌	九月三十日	第三季工作進度報告
5	（期末報告） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料 9-10 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 9-10 月 d. PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 e. 既有氣體觀測站 9-10 月資料分析 f. 既有水位觀測站 9-10 月資料分析 g. 既有水氡觀測站 9-10 月資料分析 h. 宜蘭地區土壤氣體調查結果 i. 井下應變儀資料校正 9-10 月 j. 新竹網測站時頻分析 k. 綜合分析觀測資料 l. 北部地區 9 條活動斷層斷層活動潛勢評估 m. 北部地區 9 條活動斷層之斷層面的震間滑移速率 n. 各活動斷層的滑移虧損率 o. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 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 2014 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。	2-2 2-3
	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。	2-5
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。	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. 交付北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。	2-6
	4. 將 PSInSAR 資料與 GPS 以及水準資料比較，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。	6-1
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. 利用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。	3-1-1 3-2-1 3-3-1 3-4-1 3-5-1 3-6-1 3-7-1

	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資料；並利用 GPS 地表速度場及活動斷層地下幾何形貌，推估斷層面上短期滑移速率，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。	6-2
	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，並利用中油構造平衡剖面資料及重定位地震位置，建構活動斷層鄰近地區三維幾何形貌。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。	6-2
	5. 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。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 3-2-4 3-2-5 3-3-4 3-3-5 3-4-3 3-4-4 3-5-3 3-5-4 3-6-3 3-6-4 3-7-3 3-7-4
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. 針對新竹網測站進行時頻分析，利用時頻分析技術尋找應變儀測站之特徵頻率、分析颱風或地震事件是否有異常頻率的發生，進而探討可能的產生原因。	4-2
	4. 維護井下應變儀資料庫，持續更新，並維護更新網頁資訊。	持續維護更新中
地球化學觀測與研究	1. 嘉義中崙濁水潭觀測站或沄水溶解氣體觀測站 2013 年 12 月至 2014 年 11 月土壤氣體之甲烷、水氣、氦氣、氧氣、氬氣、二氧化碳、氪氣氣體觀測結果。	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 2013 年 12 月至 2014 年 11 月土壤氣體之氪氣氣體觀測結果。	5-2-1
	3. 宜蘭地區的土壤氣體調查結果，評估未來土壤氣體觀測站的可能設站地點。	5-2-2

	4. 既有水位觀測站 2013 年 12 月至 2014 年 11 月水位觀測結果。	5-3
	5. 墾丁社頂站 2013 年 12 月至 2014 年 11 月地下水水氡觀測結果。	5-4-2
	6. 台東安通站 2013 年 12 月至 2014 年 11 月定期採樣地下水水氡分析結果。	5-4-1
	7. 墾丁社頂站 2013 年 12 月至 2014 年 11 月定期採樣地下水水氡分析結果。	5-4-2
	8. 將觀測資料同步轉移至委託單位之伺服器。	已同步轉移
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。	6-3-1
	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。	6-3-2
	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。	6-3-3
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。	定期發布
	2. 對於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(需配合中興測量於震後一周內完成測量並提供資料)、精密水準測量、井下應變儀及地球化學觀測等資料提出分析報告。	20141211 地震事件處理中
	3. 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 7-1
	4. 成果報告 30 份（包含紙本與光碟）。	完成

摘要

本計畫計算 2014 年全臺連續全球定位系統測站共 250 站，由於各測站設置背景不同，利用 GAMIT 計算時所需提供基本資料各有差異，由於某些測站資料精度不佳，造成解算誤差過大而遭剔除。因此今年本研究除彙整時間序列外，也分析各測站遮蔽狀況，來瞭解各測站周遭環境，探討座標跳動與誤差過大的點位，瞭解發生的原因，以利於測站移動速度場分析。在同震變形研究方面，2014 年 5 月 21 日於鳳林地區發生芮氏規模 5.9 的地震，本次期末報告同樣針對該地震分析鄰近測站的同震變形行為。截至期末報告前，精密水準已完成 30 條測線共 1,099 個測段之施測及查核；GPS 亦完成北宜地區 116 點、桃竹苗地區 112 點、嘉南地區 181 點、中部地區 155 點、高屏地區 111 點、花東地區 69 點和恆春地區 32 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 工作為彙整本實驗室既有的臺灣北部地區衛星影像，ERS-1/2 衛星 SAR 影像區域為 Track 461，Frame 3105，該區域範圍共有 29 張影像；ENVISAT 衛星 SAR 影像區域跟 ERS-1/2 衛星一樣，則有 30 張影像；ALOS 衛星 SAR 影像區域為 Path 444，Frame 480 及 490，共有 21 幅 SAR 影像。不論使用何種衛星所拍攝的 SAR 影像，本計畫首先利用影像對相關值挑選出主影像干涉配對副影像，產生雷達影像干涉圖，並且與此區域同期間水準測線和連續 GPS 測站得到的變形速率比較。由 ERS 結果顯示，北部區域於 1996 年到 1999 年之間最大抬升速率為位於士林、北投地區的 8 mm/yr。而土城地區則有最大下陷速率，約為 5 mm/yr。以 ENVISAT 結果來看，在 2003 年到 2008 年這段期間，最大下陷速率為位於泰山、五股地區的 9 mm/yr，而盆地西側則為平均 3~4 mm/yr 的下陷速率。其 PS 結果與四條由北至南的水準測線比較，雖有部份速率不同但趨勢相當一致，皆為由西向東跨過山腳斷層下陷速率越來越大。最後，由 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。其速率結果與 CGPS 相當一致。另外，與水準測線比較上，由於此期間地表變動不大，在第一條與第二條測線上因 PSInSAR 誤差較大，無法明確比較兩者異同，而第三條與第四條測線則呈現相同的變形情形。另外，在與 LiDAR 對比上。本年度除了將 PS-InSAR 速度場套疊在臺北盆地 DTM 上以呈現更精確的 PS-InSAR 選點位置可靠性外，也嘗試將套疊在構造線形相對較多的臺灣東部地區。結果顯示線形明顯的地方也為視衛星方向抬升活躍的區域，具有高度的吻合。

斷層潛勢評估目的是於建立臺灣 33 條活動斷層潛勢評估流程，本年度以北部 9 條進行評估，分別為山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、三義斷層、獅潭斷層、屯子腳斷層、鐵砧山斷層、大甲斷層。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。山腳斷層利用 BPT 模式，北段以西元 1867 年，南段以西元 1694 年為最近一次發生時間，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 9.9%、15.0%及 24.6%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 8.1%、12.5%及 21.4%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.7%、1.1%及 2.4%；湖口斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.1~7.3 之機率為 19.6%、29.8%及 48.7%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 13.5%、21.0%及 35.5%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 1.1%、1.8%及 3.2%；新竹斷層 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.1~7.2 之機率為 18.4%、28.3%及 47.3%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 8.5%、13.4%及 23.4%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.2%、0.3%及 0.5%；新城斷層利用 BPT 模式，以 300 年前為最近一次發生時間，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.1~7.1 之機率為 28.1%、41.6%及 63.9%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 15.3%、23.3%及 37.6%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.1%、0.2%及 0.4%；三義斷層利用 Poisson 模式，

其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.4~7.4 之機率為 10.0%、15.8%及 28.1%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 9.9%、15.6%及 27.7%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 1.4%、2.2%及 4.1%；獅潭、屯子腳斷層有互相驅動的可能性，必須整體考慮為獅潭─屯子腳斷層系統，利用 BPT 模式，以西元 1935 年為最近一次發生時間，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.9~7.2 之機率為 45.2%、58.6%及 74.9%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 17.1%、23.6%及 32.8%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.3%、0.5%及 1.1%；鐵砧山斷層屬於大甲斷層的背衝斷層，不會有單獨破裂之可能性，且斷層長度僅 13 公里，不會造成大規模的地震，因此鐵砧山斷層不列入潛勢評估中考慮。大甲、彰化斷層有同時破裂的可能性，必須整體考慮為大甲─彰化斷層系統，大甲─彰化斷層系統利用 BPT 模式，以西元 1848 年為最近一次發生時間，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2~7.6 之機率為 27.7%、39.9%及 58.9%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 26.8%、38.6%及 57.3%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 9.6%、14.5%及 23.1%；發生地震矩規模 7.5 以上之機率為 0.05%、0.08%及 0.16%。

本研究藉由三維塊體模型 DEFNODE，針對臺灣中部及西北部地區由 GPS 所觀測到的現今（2002-2012）水平地表變形速率進行運動學分析。模型中將此區共分為 23 個塊體，並由地調所公佈的活斷層（義竹斷層除外）當成各塊體的邊界。利用 DEFNODE，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）。研究結果顯示大甲斷層及屯子腳斷層上的平均滑移虧損率皆大約 1 ~ 2 mm/yr，因此此兩斷層的地震潛能可能相對較小。在三義斷層部分則計算出 11.4 mm/yr 的高平均滑移虧損率。總結來說，在中臺灣以麓山帶斷層之滑移虧損率最高，而北臺灣則是整體構造活動度較低，各斷層面上反應的滑移虧損皆較小。

井下應變儀部份，處理臺北網、新竹網及嘉義網共 11 個測站，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"。2013 年 12 月至 2014 年 11 月期間,在嘉義網觀測到 1 個應變異常事件:5 月 21 日芮氏規模 5.9 花蓮地震;新竹網觀測到 1 個應變異常事件：2 月 5 日至 2 月 8 日新竹群震；臺北網觀測到 2 個應變異常事件：2 月 12 日芮氏規模 4.2 陽明山地震和 8 月 16 日芮氏規模 3.8 新北市烏來區地震。以上地震除了使用原本的平面應變來分析，也嘗試利用剪應變來分析新北市烏來區地震案例，初步判斷出該應變異常為該地震的前兆訊號。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至 2014 年 8 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：40%、71%與 67%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：60%、29%與 33%；地震前沒有前兆訊號的機率為：0%、29%與 25%。針對新竹網井下應變儀測站所記錄的面應變時間序列資料進行時頻分析，並以七項地震事件及 2013 年 10 月至 2014 年 9 月資料為分析對象，成果顯示各個測站的特徵頻率（0.05、0.09、0.1 Hz）會隨站井環境的不同而變；0.03 Hz 以下之面應變強度變化，能夠反應地震發生前後，應變量開始累績而後釋放的現象。各站時頻圖中皆在 0.2 ~ 0.5 Hz 之間出現有雲狀頻率變化，特殊事件則會產生異常頻率，如降雨或氣壓於極值點時，雲狀頻率之頻段則為 0.1 ~ 0.5 Hz。

在本年度觀測期間，在 2014 年 1 月 15 日芮氏規模 5 南投地震發生前於大平地、古坑和池上土壤氣體觀測站，以及 2014 年 5 月 21 日芮氏規模 5.9 花蓮鳳林地震發生前於中崙和東華站都有出現顯著的土壤氡氣濃度異常上升，可視為該地震的前兆訊息。此外，大平地測站對於 2 月初發生在新竹地區的群震，也觀察到土壤氡氣異常升高的反應；期間，新樂地下水位站也出現顯著的異常變化，也可視為成功的前兆反應。2014 年水位異常多對應於當地的小型地震，主要為 2 月份新竹群震與嘉義地區零星地震；大型地震僅 5 月 21 日花蓮鳳林地震，於中興站出現震前水位異常。2014 年 11 月前，海岸山脈南段及恆春半島附近均未發生強震（Mw＞6），此期間安通站與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。由長期觀測結果發現，安通站水樣來自受限含水層，地下水水氡濃度不受降雨及其他環境因子影

響。社頂站水樣出自自由含水層，地下水水氡濃度受降雨環境因子影響。

整合分析部分，包括地下水位異常、地化異常、井下應變儀異常和地震訊號異常之整合，整合期間含跨 2009 年整年到 2014 年 11 月間 174 個地震事件。本次報告中考慮的異常觀測中為 2014/05/21 規模 5.9 發生在花蓮縣鳳林鎮的地震（ID=163），造成嘉義網中同時觀測到地下水位、井下應變儀和地化氣體記錄三樣異常。另外在 2014 年 2 月 5～8 日間在新竹有十個群震，規模在 2.3 ~ 3.4 之間，有多種當地的觀測異常，對這兩系列的地震觀測，都做了綜合性的整合解釋。

本次整合性的觀測資包括時序 PS-InSAR、CGPS 應變與 CGPS 高頻解三種資料，PS-InSAR 可提供區域性的地殼的視衛星方向位移，對地殼的垂直變形較敏感，若結合其他的大地測量觀測，可將原本點狀的觀測擴展成面狀的觀測。後二者都是 CGPS 的產物，高頻解除可看出大地震近場的同震位移外，尚可與地震儀資料及井下應變儀資料做共同解釋，三者分別代表地殼的位移、加速度與應變，目前階段尚在評估可靠性分析，將來可快速建立共同解釋的方向。

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 utilize GAMIT/GLOBK software to estimate the precise coordinates for continuous GPS station (CGPS) of Central Geological Survey (CGS) in Taiwan. To promote the software estimation efficiency, 250 stations are divided by 8 subnets which have been considered by station numbers, network geometry and fault distributions. Each of subnets include around 50 CGPS and 10 international GNSS service (IGS) stations. Furthermore, 8 subnets are process in parallel mode and combined into a daily solution. Due to the data comes from different research centers, the basic information for stations such as antenna types, antenna height and other maintain record cannot been obtained by exchanging the data. Under the requirement of processing procedure, the basic information of stations needs to be corrected. A poor accuracy or a big error will be occurred by incorrect basic information, and then the station will be removed. After long period of data collection and estimation, a time series variation can be build up to study the effect of earthquakes and estimate the velocity of stations. In terms of co-seismic deformation research, the coseismic deformation of the Fanglin earthquake occurred on May 2014 was carried out. However, no significant coseismic deformation was detected by continuous GPS stations due to the moderate magnitude and deep hypocenter. For the 2014 final-term report, we have achieved the examinations of results from 30 precise leveling routes with 1,099 sessions and from 116 campaign-mode GPS stations in Peiyi area ,112 campaign-mode GPS stations in Taochumiao area ,181 campaign-mode GPS stations in Jianan area , 155 campaign-mode GPS stations in central area,111 campaign-mode GPS stations in Kaoping area,69 campaign-mode GPS stations in Huatung area and 32 campaign-mode GPS stations in Hengchun 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.

In PS-InSAR study, we use 29 ERS1/2 SAR images and 30 ENVISAT SAR images from track 232 and frame 3123. In addition, area covered by path 444, frame 480 and 490 is chosen for ALOS and 21 PALSAR images are obtained. No matter which kind of SAR images used, all master images are paired with slave images according to temporal baseline, perpendicular spatial baseline, Doppler centroid frequency, and thermal noise. In this moment, we first compare PS-InSAR results with deformation rate from leveling profiles and continuous GPS station in study area. The results of ERS1/2 in the period 1996-1999 shows that the maximum uplift rate of 8 mm/yr located in Shihlin and Peitao area, meanwhile the maximum subsidence of 5 mm/yr located in Tucheng area. In the period of 2003-2008 with ENVISAT images, maximum subsidence rate of 9 mm/yr located in Taishan and Wukou area. On average, the subside rate is about 3-4 mm/yr. The comparison of PS results and four leveling profiles demonstrate that the general trends are consistent even some disturbances occurred in some area. In the period of 2007-2011, Taipei basin revealed a slight uplift or no significant deformation along LOS from PS-InSAR with ALOS images. The deformation rate from INSAR is consistent with that of continuous GPS. In comparison with the leveling profiles, the accuracy of PS-InSAR is not good enough along the routes 1 and 2, thus the match of two data is unclear. However the comparison of routes 3 and 4 with PS-results is quite consistent. In addition, we first try to superimpose the PS-InSAR results on LiDAR-derived DEM to improve the precise locations of PS and characterize deformation pattern across and along the lineaments revealed by LiDAR-derived DEM. We also try it in eastern Taiwan in which the lineaments are quite dense from the geomorphological analysis of LiDAR-derived DEM. In general, the significant uplift along LOS is consistent with the significant lineaments in eastern Taiwan.

The goal of probability analysis of active faults is to establish the flow chart of 33 active

faults in Taiwan. In this year, 9 active faults in northern Taiwan have been assessed to get the recurrence interval and the probabilities for the characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years. The faults are as followings: Shanchiao, Hukou, Hsinchu, Hsincheng, Sanyi, Shitan, Tuntzuchiao, Tiehchanshan, and Tachia faults. For Shanchiao fault, BPT model was used, and the last event is set at year 1867 for the northern segment, and year 1694 for the southern segment respectively. The probabilities for the $6.2 \leqq Mw \leqq 7.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 9.9%, 15.0%, and 24.6%, and the probabilities for the $Mw \geqq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 8.1%, 12.5%, and 21.4%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.7%, 1.1%, and 2.4%. For Hukou fault, Poisson model was used, the probabilities for the $6.1 \leqq Mw \leqq 7.3$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 19.6%, 29.8%, and 48.7% respectively. The probabilities for the $Mw \geqq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 13.5%, 21.0%, and 35.5%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 1.1%, 1.8%, and 3.2%. For Hsinchu fault, Poisson model was used, the probabilities for the $6.1 \leqq Mw \leqq 7.2$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 18.4%, 28.3%, and 47.3%, and the probabilities for the $Mw \geqq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 8.5%, 13.4%, and 23.4%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.2%, 0.3%, and 0.5%. For Hsincheng fault, BPT model was used, and the last event is set at 300 years ago. The probabilities for the $6.1 \leqq Mw \leqq 7.1$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 28.1%, 41.6%, and 63.9%, and the probabilities for the $Mw \geqq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 15.3%, 23.3%, and 37.6%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.1%, 0.2%, and 0.4%. For Sanyi fault, Poisson model was used, then the results showed that the probabilities for the $6.4 \leqq Mw \leqq 7.4$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 10.0%, 15.8% and 28.1%, and the probabilities for the $Mw \geqq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 9.9%, 15.6% and 27.7%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 1.4%, 2.2% and 4.1%. The Shitan fault and Tuntzuchiao fault, which may trigger each other, can be considered as a Shitan－Tuntzuchiao fault system. BPT model was used for the fault system, and the last event is set at year 1935, then the results showed that the probabilities for the $5.9 \leqq Mw \leqq 7.2$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 45.2%, 58.6%, and 74.9%, and the probabilities for the $Mw \geqq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 17.1%, 23.6%, and 32.8%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 0.3%, 0.5%, and 1.1%. Tiehchanshan fault is a back thrust of Tachia fault, and may not rupture independently. Besides, the fault length is so short that the fault will not generate earthquakes with large magnitude, thus Tiehchanshan fault is not taken into account for assessment of earthquake hazard. Considering Tachia fault may rupture together with Changhua fault, the Tachia－Changhua fault system is assessed. BPT model was used for this fault system, and the last event is set at year 1848. The probabilities for the $6.2 \leqq Mw \leqq 7.6$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 27.7%, 39.9%, and 58.9%, and the probabilities for the $Mw \geqq 6.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 26.8%, 38.6%, and 57.3%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.0$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 9.6%, 14.5%, and 23.1%, and the probabilities for the $Mw \geqq 7.5$ earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 0.05%, 0.08%, and 0.16%.

This research evaluated the slip rate and slip deficit rate of active faults in northern and central 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 2002-2012 average horizontal

velocities measured by GPS networks in northern and central Taiwan. By employing the DEFNODE technique, we invert these GPS velocities for the best-fit block rotate rates, long term slip rates and slip deficit rates. Our results show that the slip deficit rates of the Tachia and Tuntzuchiao faults are low（about 1 ~ 2 mm/yr）, inferring that the earthquake potential of these two faults may be relatively low. On the other hand, the slip deficit rates of the Sanyi fault are higher than the surrounding faults（about 11.4 mm/yr）, implying a relatively high earthquake potential. In northern Taiwan, because the horizontal velocities observed by GPS are generally lower than that of the central Taiwan, the modeled fault slip deficit rates are therefore relative low. Our results also indicate that the detachment faults with low dipping angles play an important role on the surface deformation of this study area.

The persisted data processing on 11 borehole strainmeter stations is carried out in Chiayi, Hsinchu and Taipei networks. The barometric effect was removed from the strainmeter data by several events with significant barometric pressure changes to search the strain anomalies associated with big earthquakes. From December 2013 to November 2014, One strain-anomaly event in Chiayi network related to the M_L 5.9 event occurred in Hualien on May 21, one strain-anomaly event in Hsinchu network related to the swarm earthquakes in Hsinchu from February 5 to February 8 and one strain-anomaly event in Taipei network related to the M_L 4.2 event occurred in Yangmingshan on February 12 were detected. Besides the analysis of areal strain, the shear strain is also used to study the pre-event anomalous strain of earthquake occurred in Wulai, New Taipei City. This pre-event strain anomaly is considered as a precursor in our preliminary results. Statically, the probability for successful prediction of strain anomaly with corresponding earthquake in Chiayi, Hsinchu and Taipei network is 40%, 71% and 67% respectively. The probability of no significant stain anomaly found prior to a significant earthquake is 0%, 29% and 25% in above-mentioned networks. Time series data of areal strain associated with events of earthquake are analyzed via time-frequency analysis. Those data are collected in stations of Hsinchu network. Time span of analysis ranges from October 2013 to September 2014. Analysis results show existence of long lasting characteristic frequencies being 0.05、0.09、0.1 Hz. The areal strain intensity's frequency response ranges from 0.0 to 0.03 Hz, which reflects the phenomenon that the areal strain increases and then releases on the earthquake. Different station has different characteristic frequencies. The frequency response ranges from 0.2 to 0.5 Hz on average. It is shifted to 0.1 to 0.5 Hz when precipitation or pressure riches its extreme value.

During the period from December 2013 to November 2014, the Tapingti, Gukeng and Chihshang stations show a significant increase of soil radon concentrations, which might be an precursor related to Nantou earthquakes (M_L 5.0) occurred on January 15, 2014. Furthermore, the Chunglun and Donghua stations show a pregressively increasing of soil radon, anfd TSUN monitoring well also show a big water-level raising anomaly 13hrs before the Fanglin earthquake (M_L=5.9) which occured at May 21st,as a precursor. Before the earthquake swarm occurred at Hsinchu area in February, variations of soil radon at TPT station and water level at CINT station present a significant change. However, most of the groundwater anomalies related to the local earthquake. In this year, neither large earthquakes ($M_L > 6.0$) occurred nor precursory declines in the concentration of groundwater radon were recorded near the Antung station and the Kenting station. Based on our long-term observations, the concentration of groundwater radon is not affected by the precipitation and other environmental factors at the Antung station with water sampled from a confined aquifer. On the other hand, the concentration of groundwater radon is affected by the precipitation at the Kenting station with water sampled from an unconfined aquifer.

We have searched for possible precursory anomalies for magnitude greater than 5 earthquakes （M>5）, using geochemical, hydrological observation, borehole strainmeter, and seismological observations. During the study period of January 2009 to November

2014, 174 M>5 events have been occurred in and around Taiwan. For the study period of this report, the M=5.9 Hualien earthquake occurred on 2014/05/21 （ID=163） might be related to three individual anomalies in the same network with groundwater anomaly, borehole strain anomaly and geochemical gas anomalies occurred simutaneously. In addition, some anomalies were also observed, which might be related to the 10 swarm events occurred on February 5-8 in Hsinchu area, an integrated discussion was made so far.

We also try to integrate 3 observations of geodetic strain from PS-InSAR, CGPS and high frequency CGPS strain data. The PS-InSAR could provide the displacement of LOS which is sentitive to the vertical deformation. If the traditional geodetic measurement is integrated with the deformaition observed by PS-InSAR, the 3D deformation could be archieve with large area. High frequency GPS could not only provide the nearfield coseismic deformation but also can be used to co-analyze with seismoters and borehole strainmeters to get the crustal displacement, acceleration and strain. The strain calculated from high freguency GPS is similar to that from borehole strainmeters, but the strain from high frequency GPS is obviously with less sensitivity. However, due to the densily distributed CGPS networks, it can be useful for co-anlysis of strain anomly in the future.

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 76 站（圖 1-1.1 和表 1-1.1）、13 口井下應變儀（圖 1-1.1 和表 1-1.2）及地球化學觀測站共 17 站（圖 1-1.1 和表 1-1.3~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。

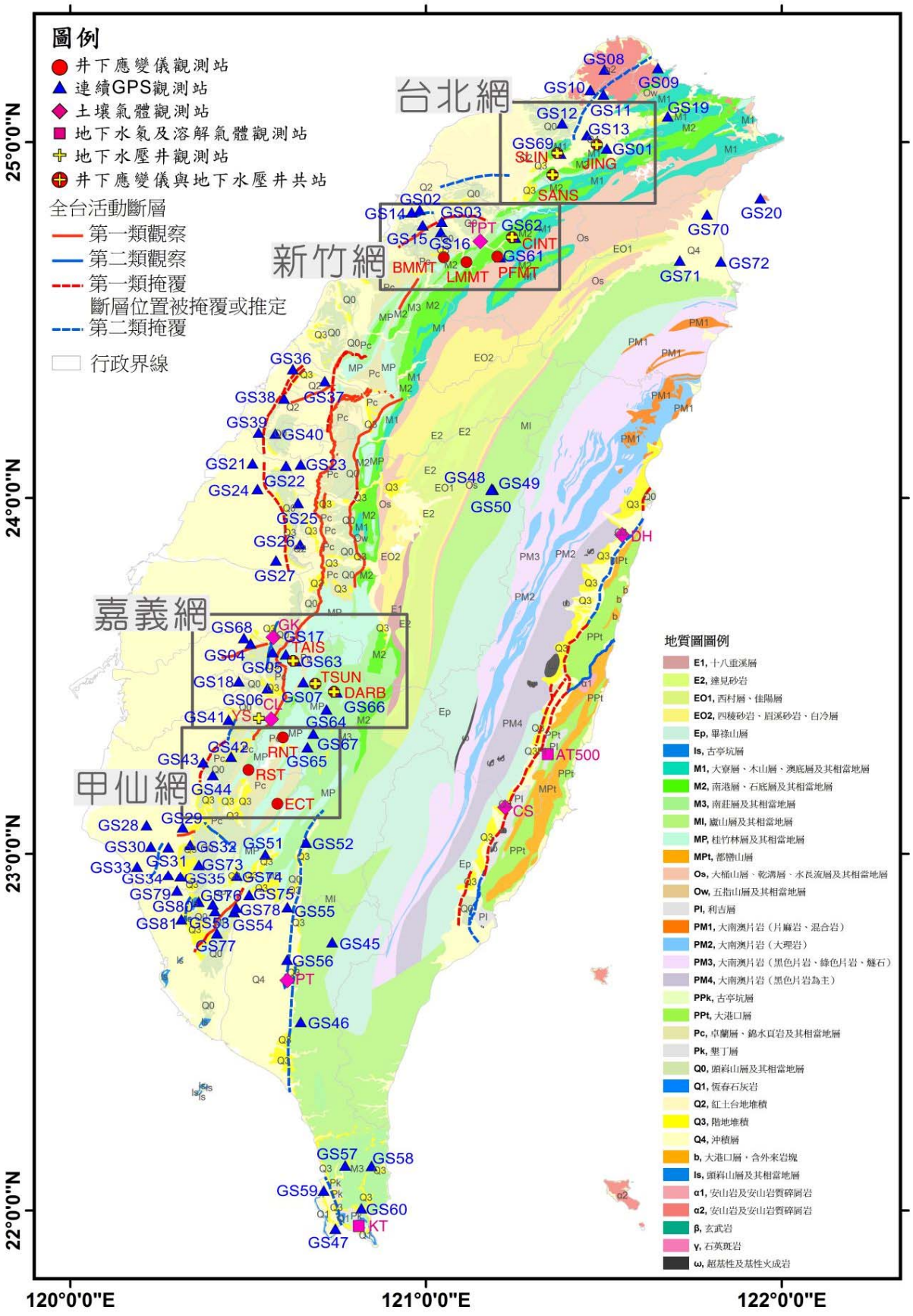


圖 1-1.1：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全台分布圖。

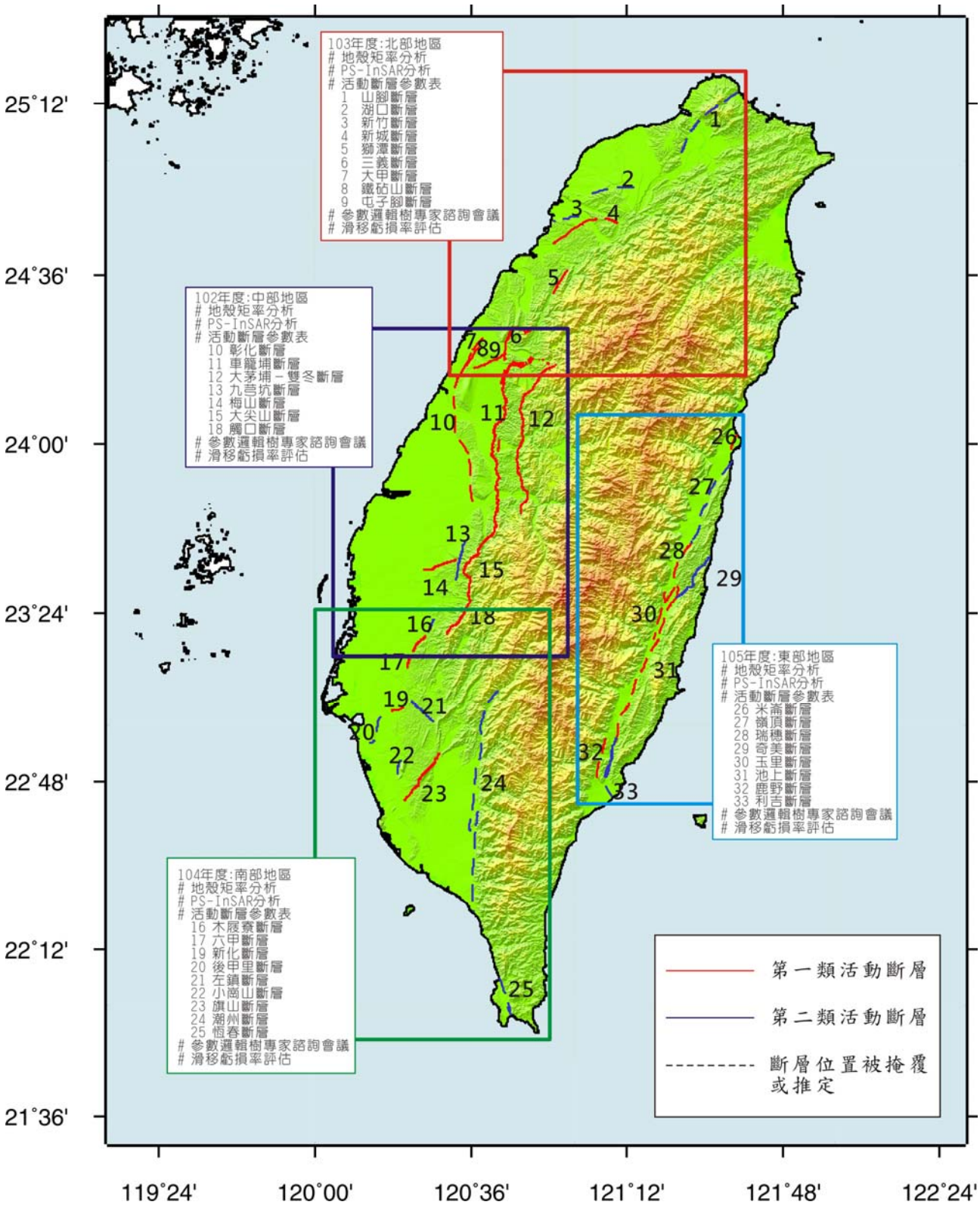
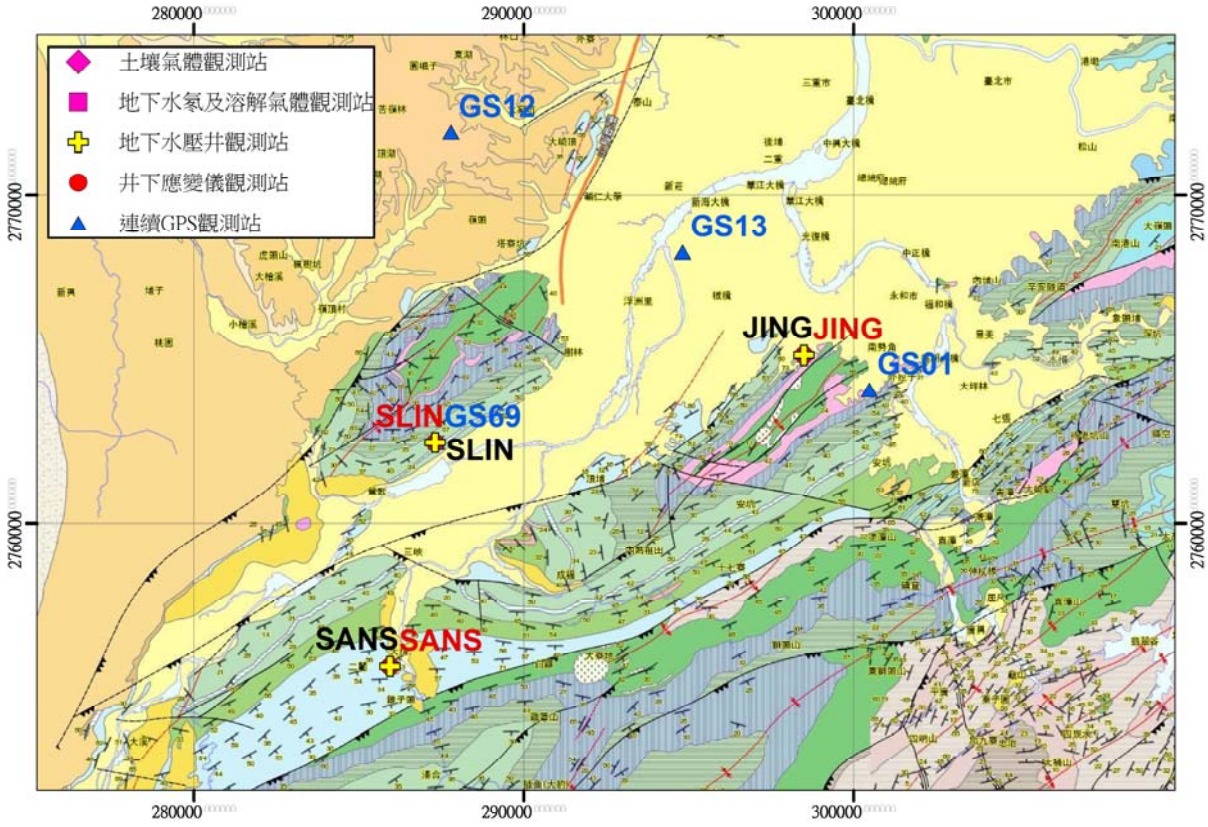


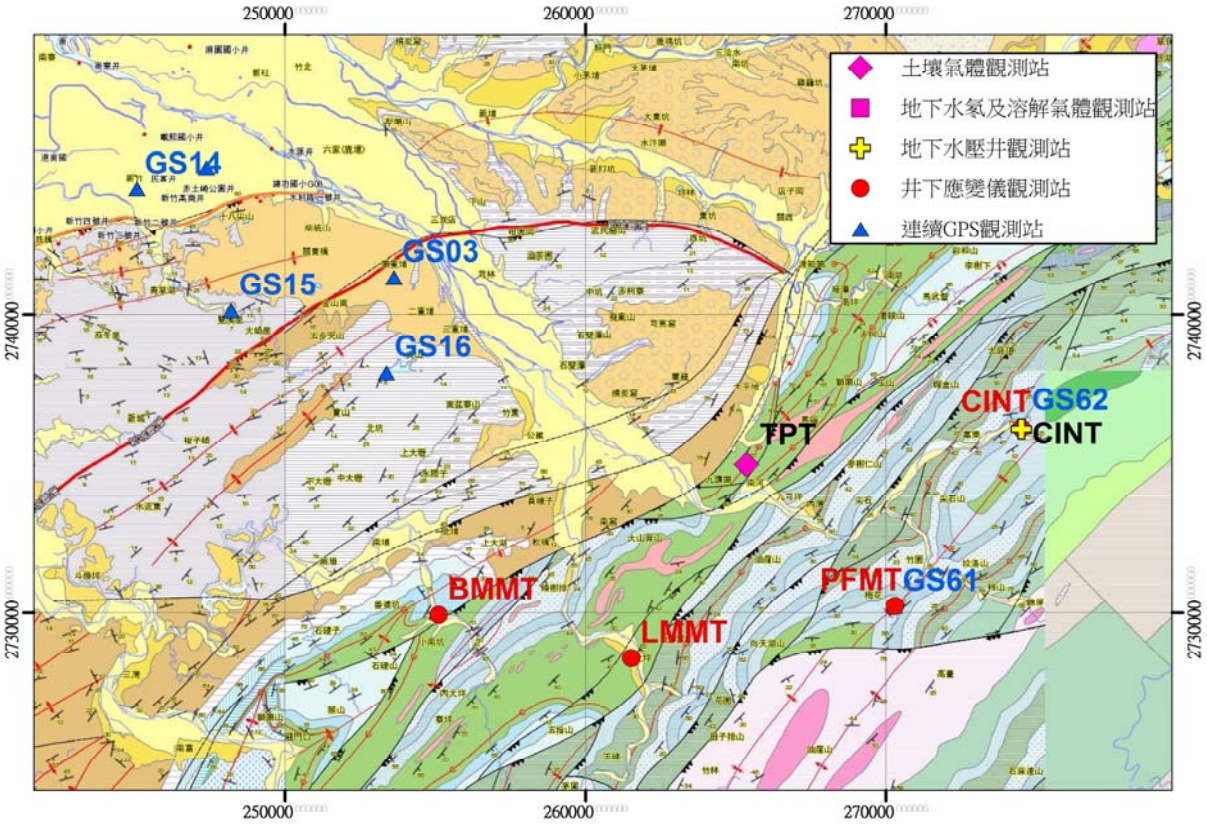
圖 1-1.2：臺灣活動斷層分布圖與本計畫擬定之研究區域。



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
舂山層（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 CINT 為地下水壓井觀測站。

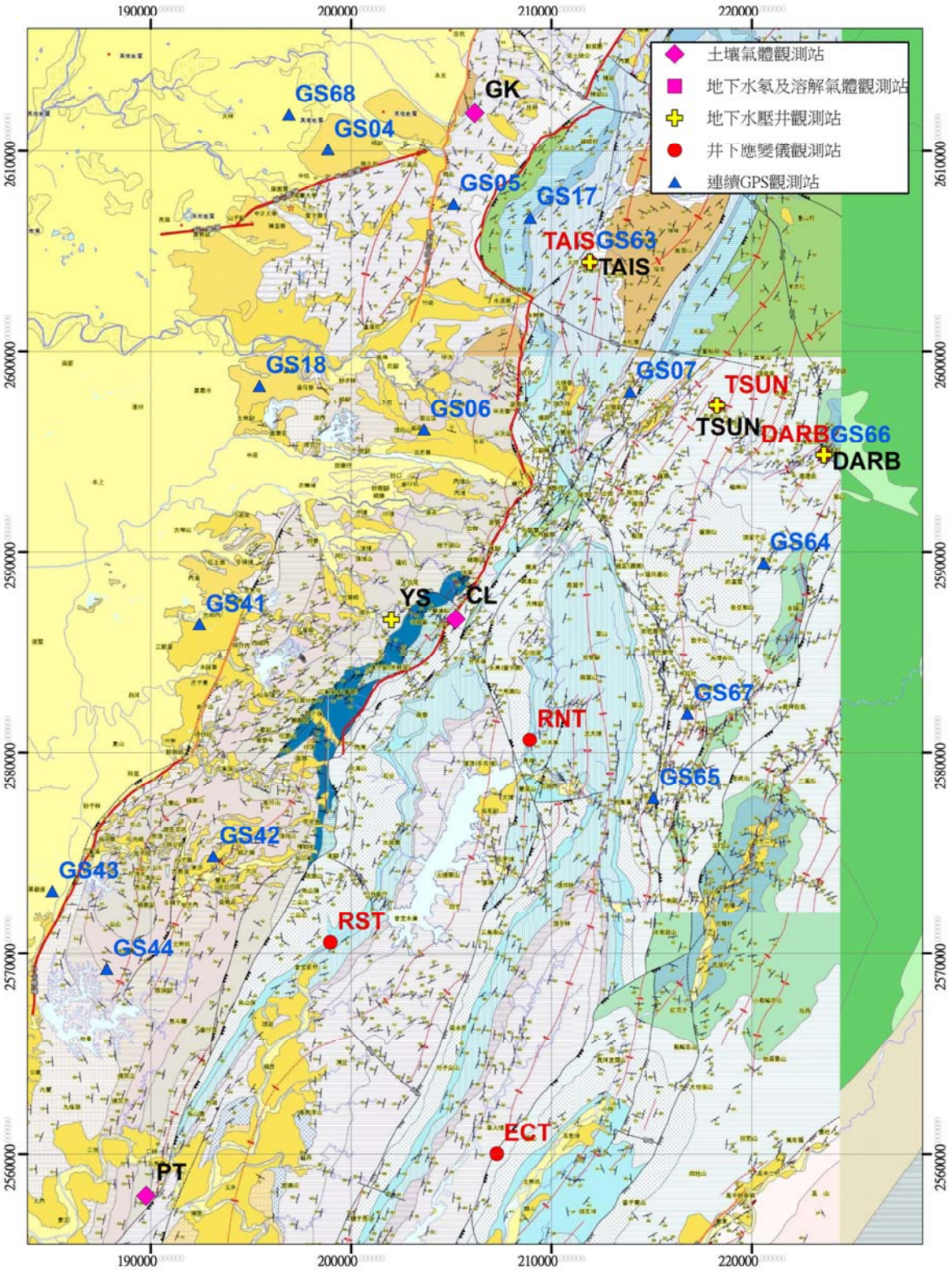


圖 1-1.5：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站 -嘉義網及甲仙網分布圖。黑色站名 TSUN 及 DARB 為地下水壓井觀測站。

地層圖例說明_嘉義網及甲仙網

- 沖積層（6020）第四紀
- 沖積層（6022）全新世晚期至現代
- 沖積層（6023）全新世晚期至現代
- 階地堆積層（6060）全新世
- 頭嵙山層火炎山礫岩段（1693）更新世
- 頭嵙山層香山段（1694）更新世
- 紅土台地堆積層（6050）更新世
- 頭嵙山層火炎山段（1691）更新世
- 卓蘭層（1330）上新世
- 錦水頁岩（1680）上新世
- 桂竹林層大窩砂岩段（1434）中新世－上新世
- 桂竹林層十六份頁岩段（1432）中新世－上新世
- 桂竹林層關刀山砂岩段（1436）中新世－上新世
- 南莊層（1380）中新世
- 六雙層（2010）更新世
- 二重溪層（2020）更新世
- 崁下寮層（2030）更新世
- 六重溪層（2040）上新世－更新世
- 北寮頁岩（1212）上新世－更新世
- 鹽水坑頁岩（1751）上新世
- 竹頭崎層（1450）上新世
- 濁水溪層（2050）上新世
- 隘寮腳層（1640）上新世
- 茅埔頁岩（1521）上新世
- 糖恩山砂岩（1861）中新世－上新世
- 長枝坑層（1870）中新世
- 三民頁岩（1891）中新世
- 紅花子層（1880）中新世
- 糖恩山砂岩（1861）中新世

圖 1-1.5：（續）

構造線圖例說明

- 斷層（B101）
- 掩覆或推測斷層（B102）
- 橫移斷層（B201）
- 平移斷層（箭頭示水平位移方向）（B202）
- 平移斷層（B211）
- 平移斷層（B212）
- 正斷層（短線示下降側）（B301）
- 逆斷層（鋸齒示上升側）（B401）
- 高角度逆斷層（B402）
- 斷層（虛線表示推測）（B411）
- 高角度逆斷層（B412）
- 地震斷層（箭頭示水平位移方向,短線示降側,虛線示推測或掩覆部份）（B901）
- 掩覆褶皺（C002）
- 中視褶皺（背斜）軸（C101）
- 背斜軸（虛線示推側或掩覆部份）（C102）
- 倒轉背斜（C121）
- 複背斜軸（C141）
- 褶皺（複背斜）軸（C142）
- 向斜軸（C301）
- 向斜（C302）
- 倒轉向斜（C321）
- 複向斜軸（C341）
- 區域褶皺（複向斜）軸（C342）
- 煤層（E101）
- 煤層（E102）

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

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	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
CL	中崙站	2004.4.7
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	2011.9.16
KT	墾丁社頂站	2012.8.18

表 1-1.5：地下水位觀測站資料接收起始時間表。

原 觀測站代碼	新 觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
JH	JING	錦和站	2007.11.16
MD	SANS	明德站	2007.11.16
SLN	SLIN	樹林站	2009.11.1
SL	CINT	新樂站	2006.12.15
DP	BMMT	大坪站	2013.1.15
CS（2）	TSUN	中興站（2）	2012.12.19
TS（2）	TAIS	太興站（2）	2012.12.19
DB	DARB	達邦站	2006.12.5

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。

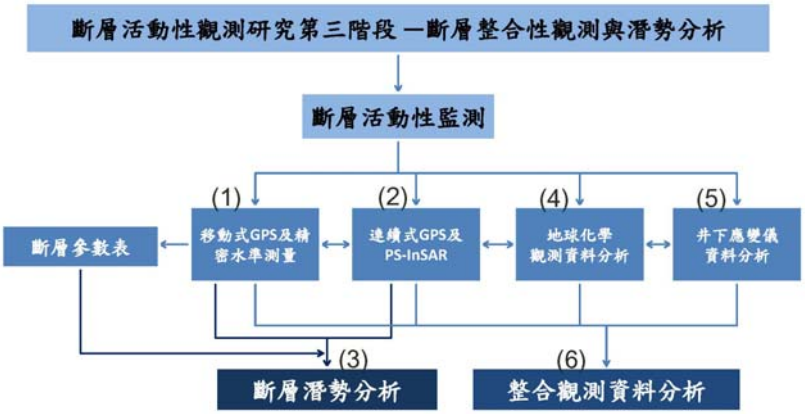


圖 1-1.7：斷層活動性觀測研究第三階段之架構。

表 1-1.6：全程計畫預期進度甘梯圖（Gantt Chart）。

<table>
<tr><td colspan="6">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</td></tr>
<tr><td colspan="5">年 次
工 作 項 目</td><td>第 1 年
（102 年度）</td><td>第 2 年
（103 年度）</td><td>第 3 年
（104 年度）</td><td>第 4 年
（105 年度）</td></tr>
<tr><td colspan="5">GPS 移動站資料檢核及分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">GPS 及水準測量規劃、督導</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4" rowspan="4">● 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</td><td>中部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>北部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>南部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>東部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">活動潛勢評估方法論及地震規模尺度研究</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">井下應變儀觀測站</td><td colspan="3">資料校正及計算分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">維護資料庫</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">時頻分析</td><td>嘉義網測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>新竹網測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>臺北網測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>所有測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="8">地化觀測站</td><td colspan="3">既有氣體觀測站持續分析數據</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">既有水位觀測站持續分析數據</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">既有水氡觀測站持續分析數據</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">安通溫泉持續定期監測分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">墾丁公園地下水持續定期監測分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">未來設站地點評估並設置（暫訂並配合地調所規劃）</td><td>苗栗台中地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>宜蘭地區
原蘇澳站遷站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>北部山腳斷層帶</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">整合觀測資料分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">預定進度（累積數）</td><td>25%</td><td>50%</td><td>75%</td><td>100%</td></tr>
</table>

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 76 座 GPS 連續站（表 1-1.1）（藉由資料交換機制，可取得其它單位共 128 個連續觀測站資料）（圖 1-2.1）、909 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。

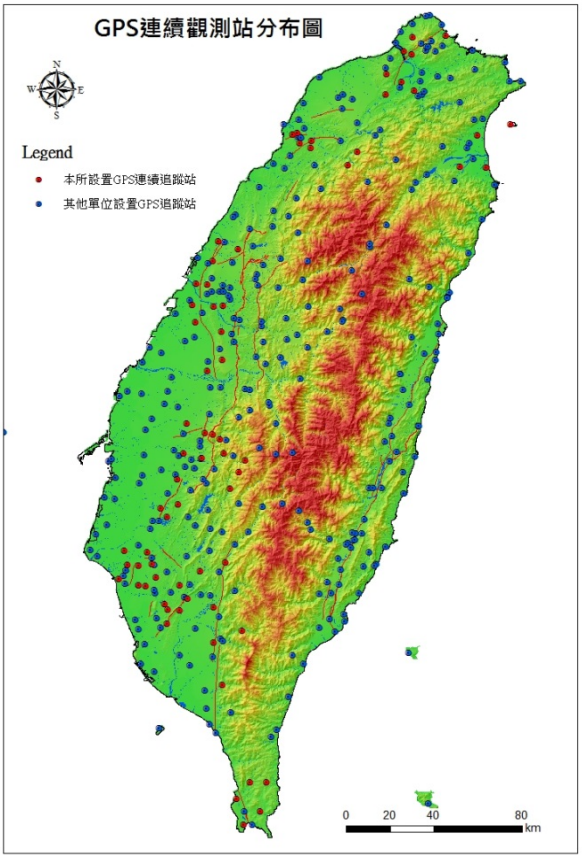


圖 1-2.1：GPS 連續觀測站分布圖（中央地質調查所）。

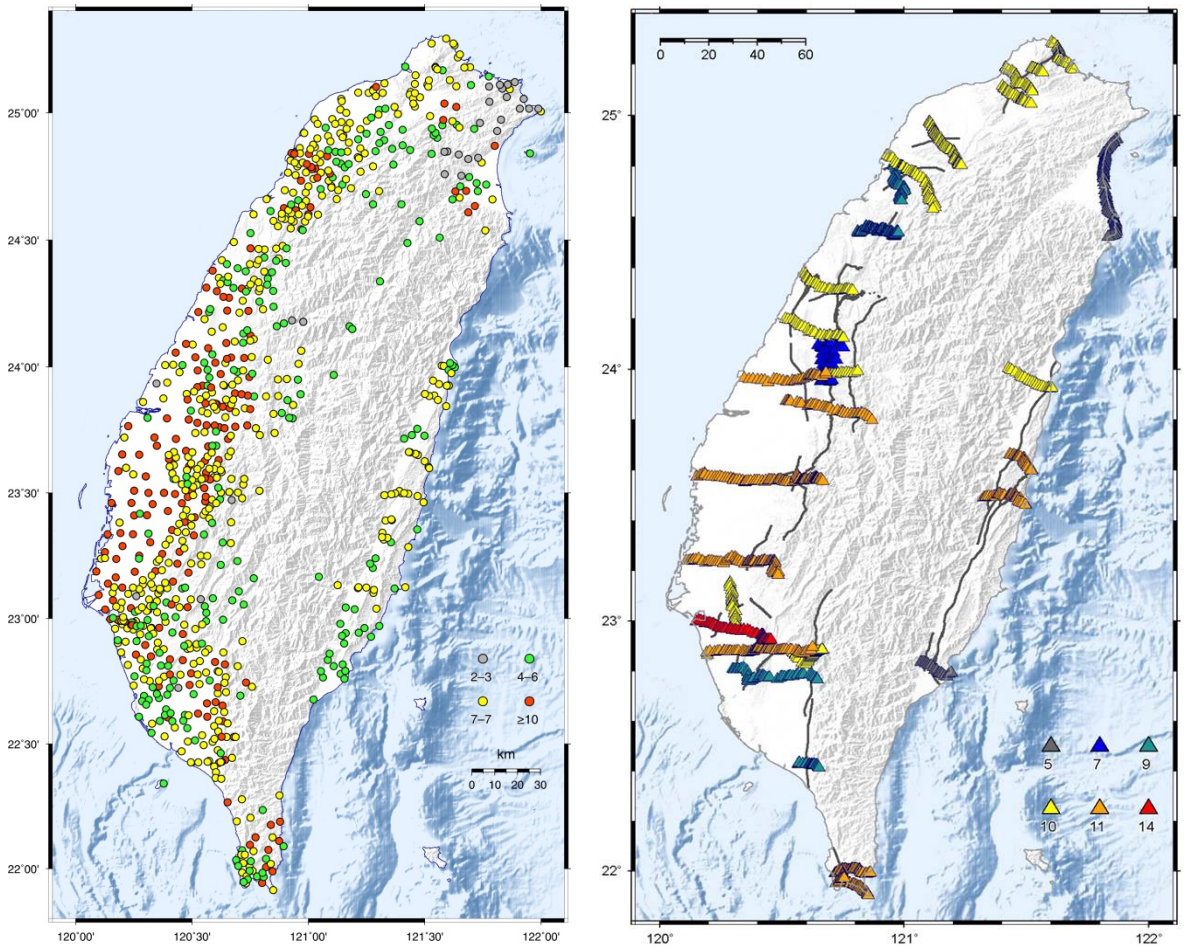


圖 1-2.2：GPS 與精密水準測量監測點位分布圖，共有 909 座 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。右圖點位之顏色表示該測線施測的次數。

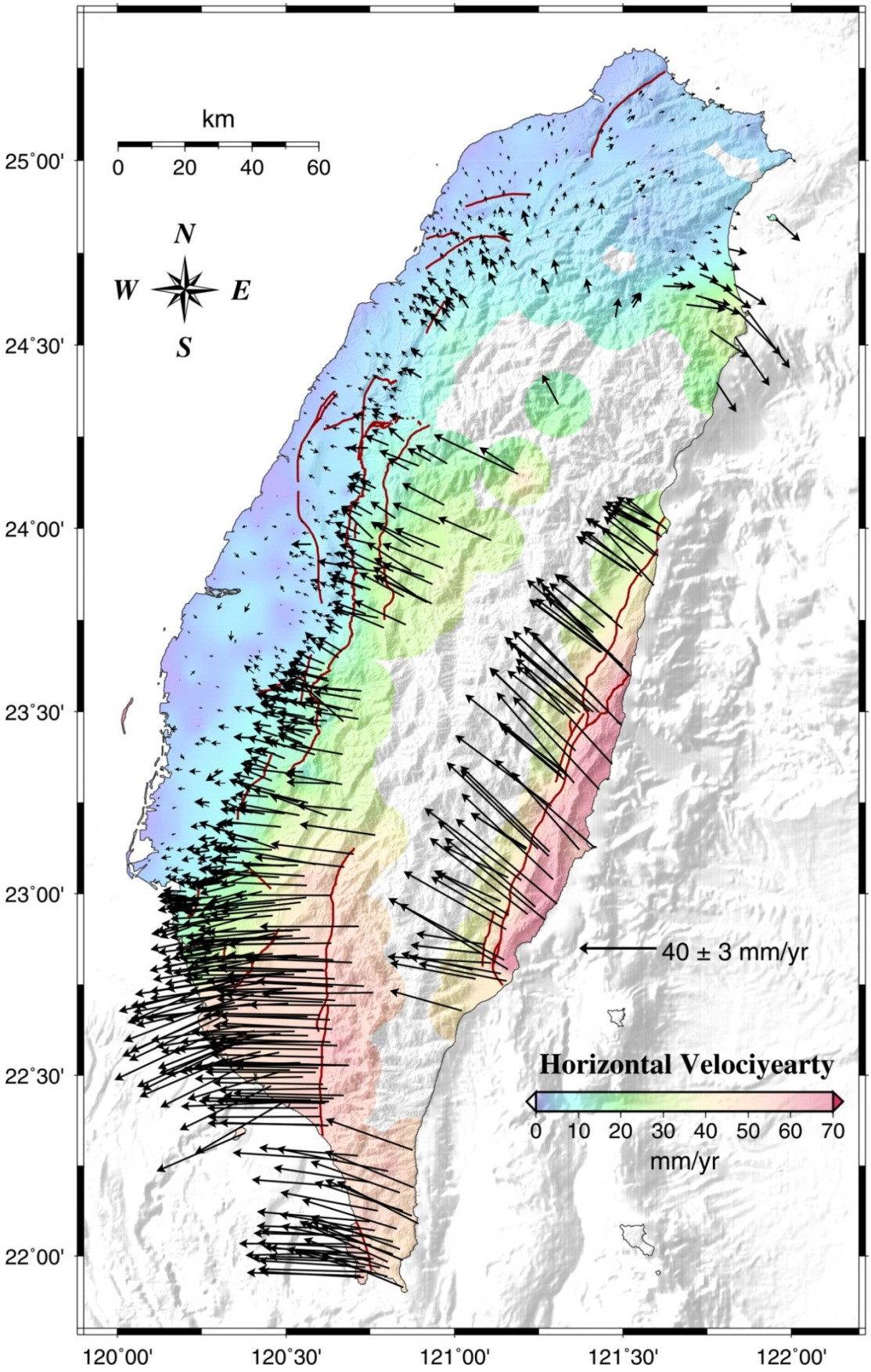


圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場（胡植慶等，2012）。

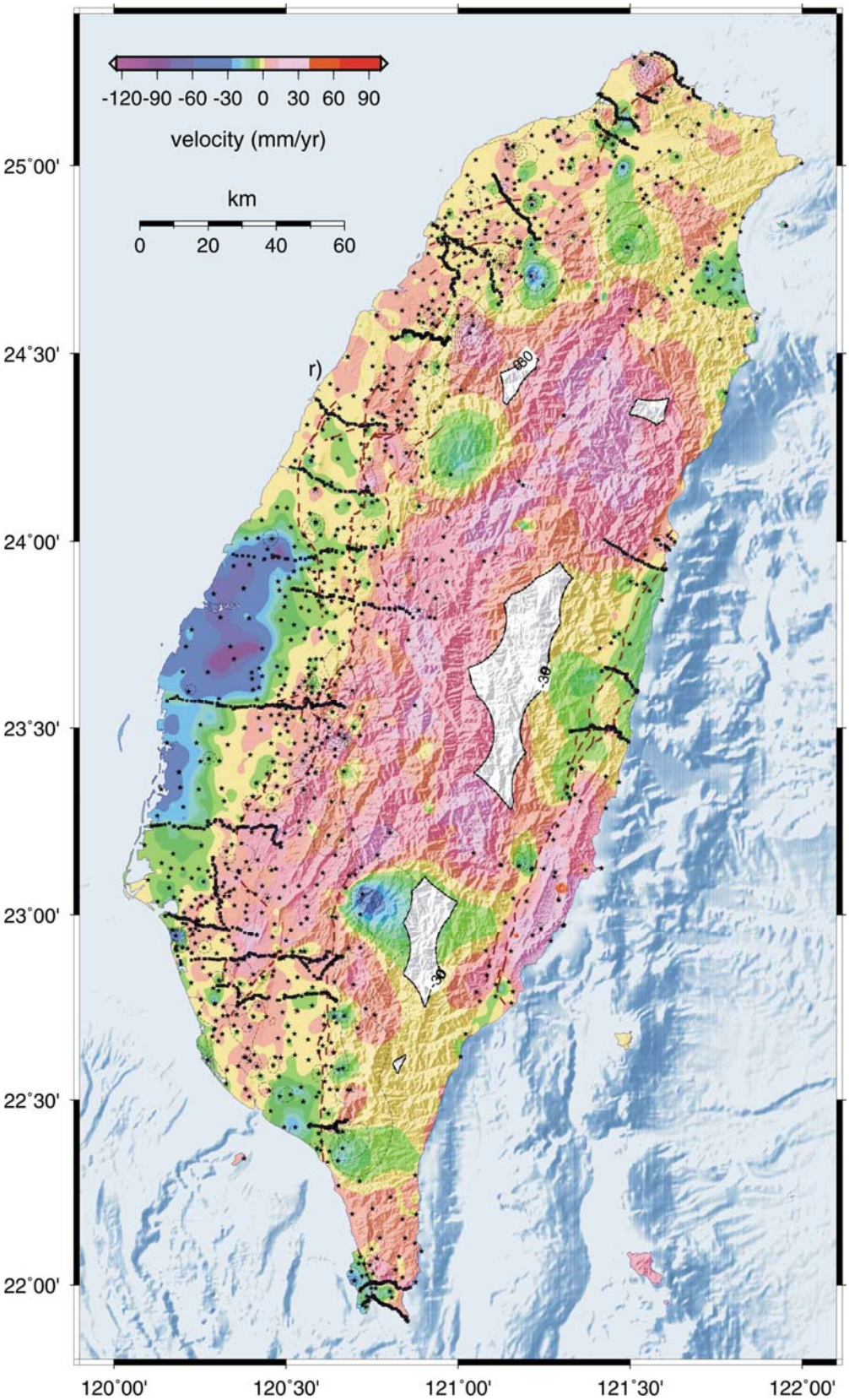


圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場（胡植慶等，2012）。

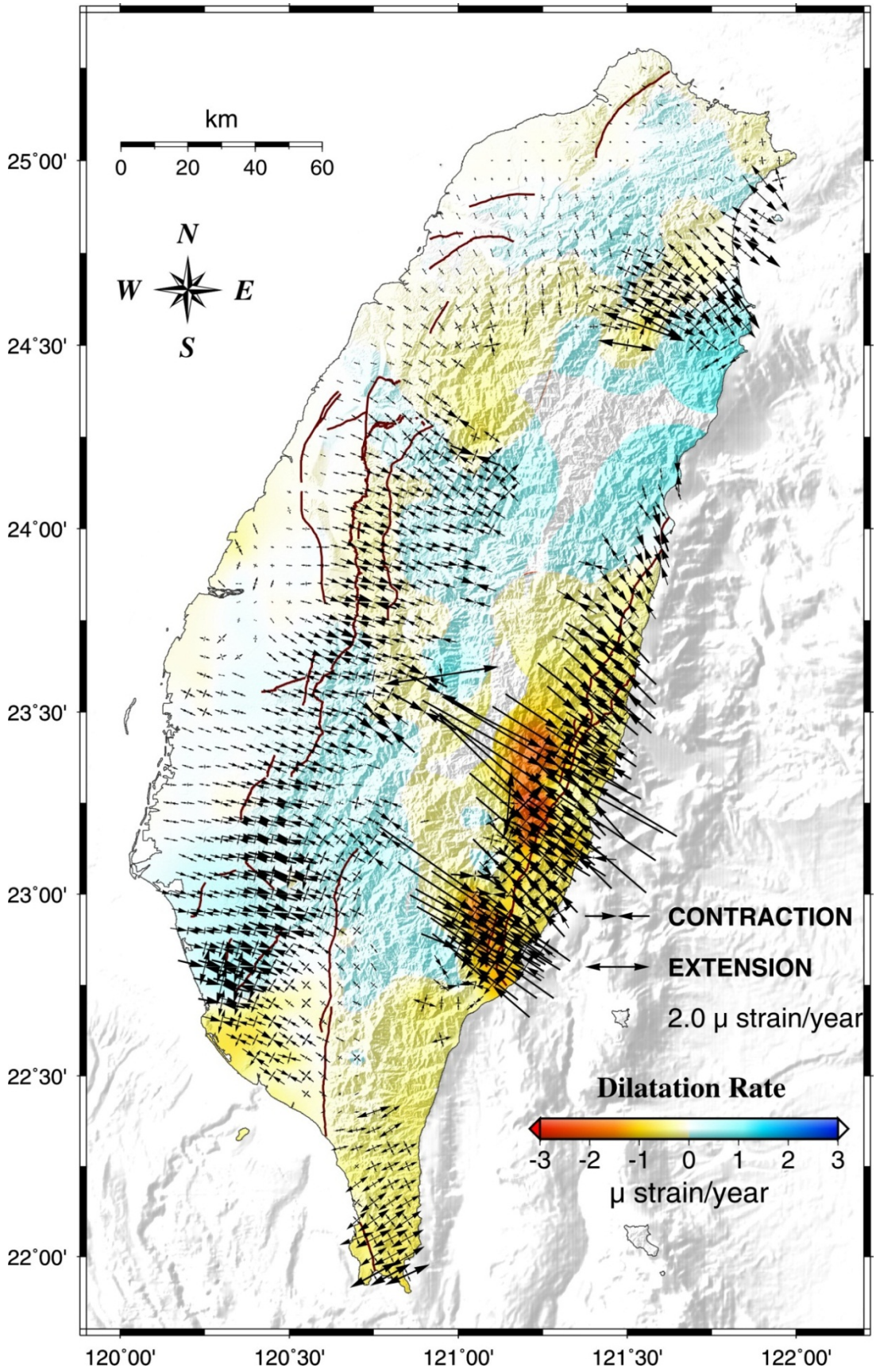


圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖（胡植慶等，2012）。

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。

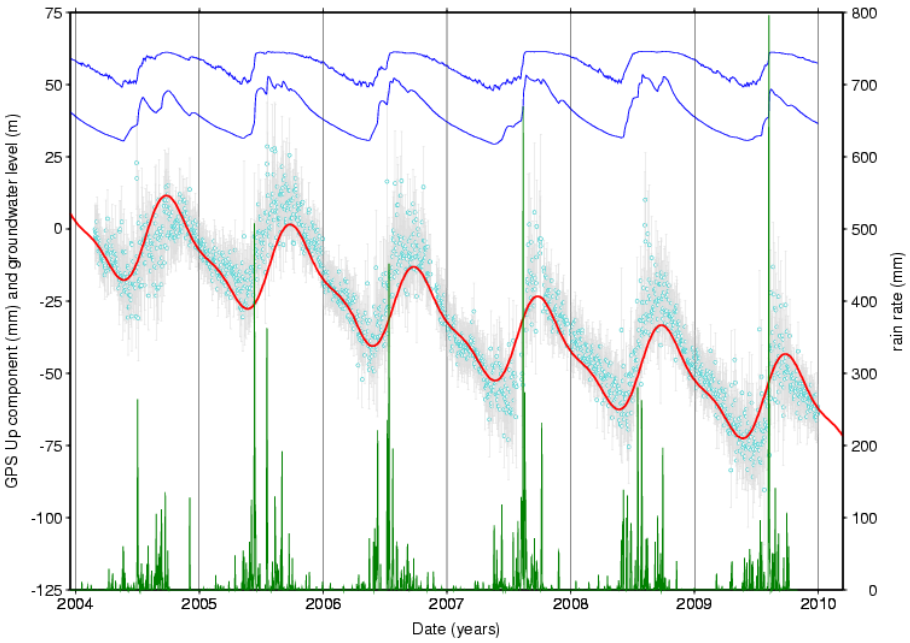


圖 1-2.6：屏東平原 NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。圖中時間序列、地下水位以及日雨量分別以紅線、藍線及綠線表示（胡植慶等，2012）。

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。

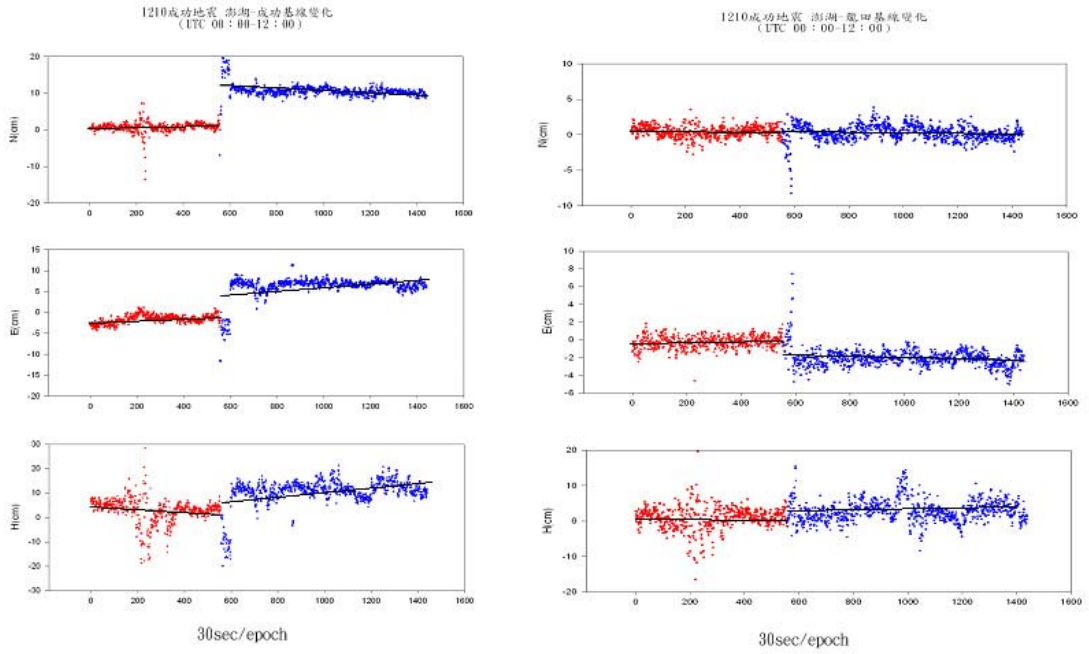


圖 1-2.7：2003 年成功地震 CGPS 30 秒解。（a）成功站相對於澎湖之變化（b）龍田站相對於澎湖之變化。

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。

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。而 PS-InSAR 是在多張 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，已經遠超過台灣的 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。

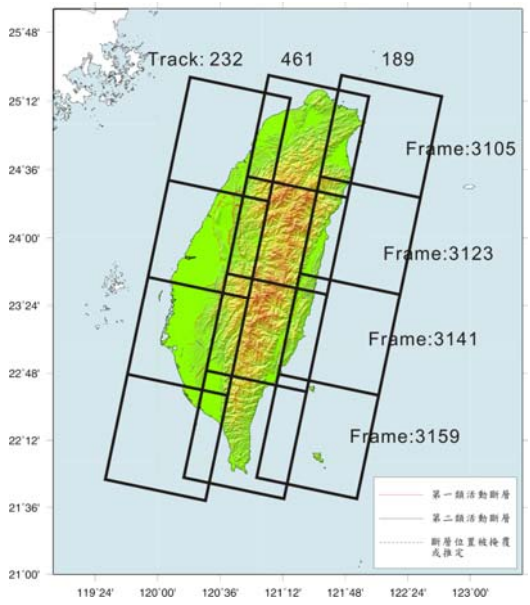


圖 1-2.8：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

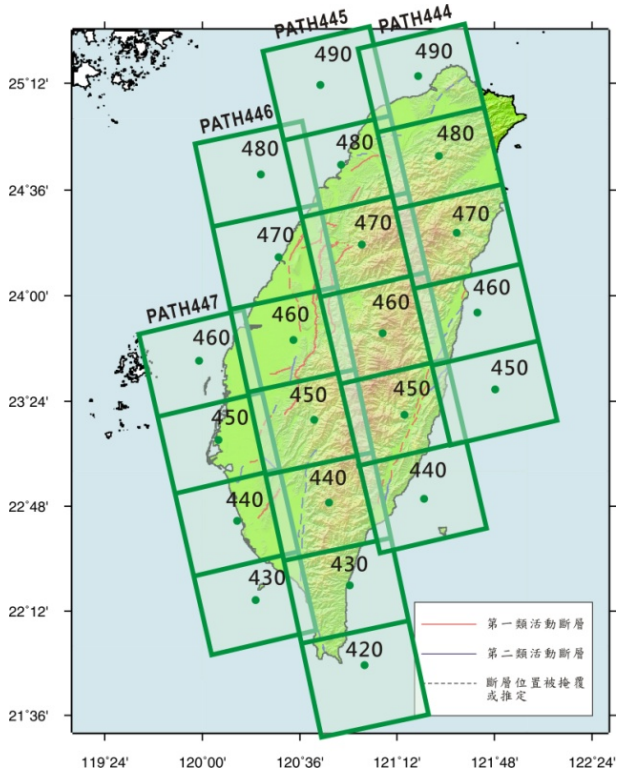


圖 1-2.9：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。

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可分為四大流程：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。

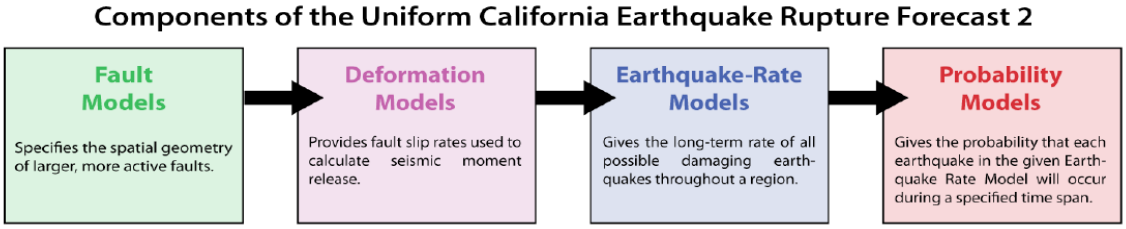


圖 1-2.10：美國加州地區活動斷層與孕震構造潛勢評估之四大流程 （摘錄自 WG07, 2008）。

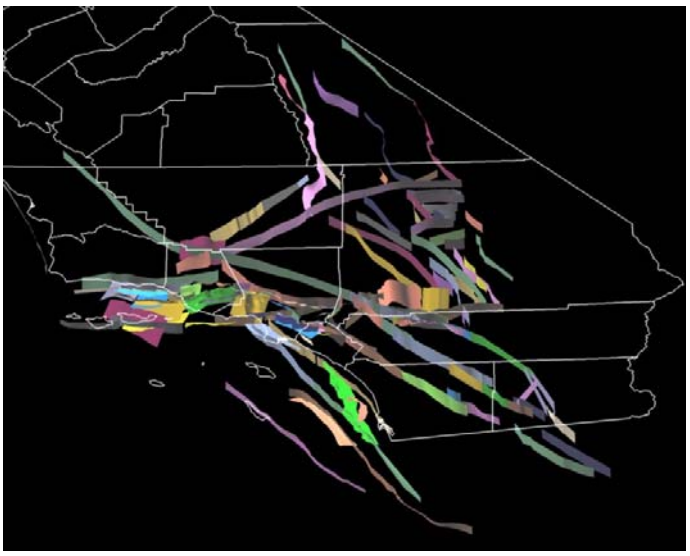


圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌（WG07, 2008）。

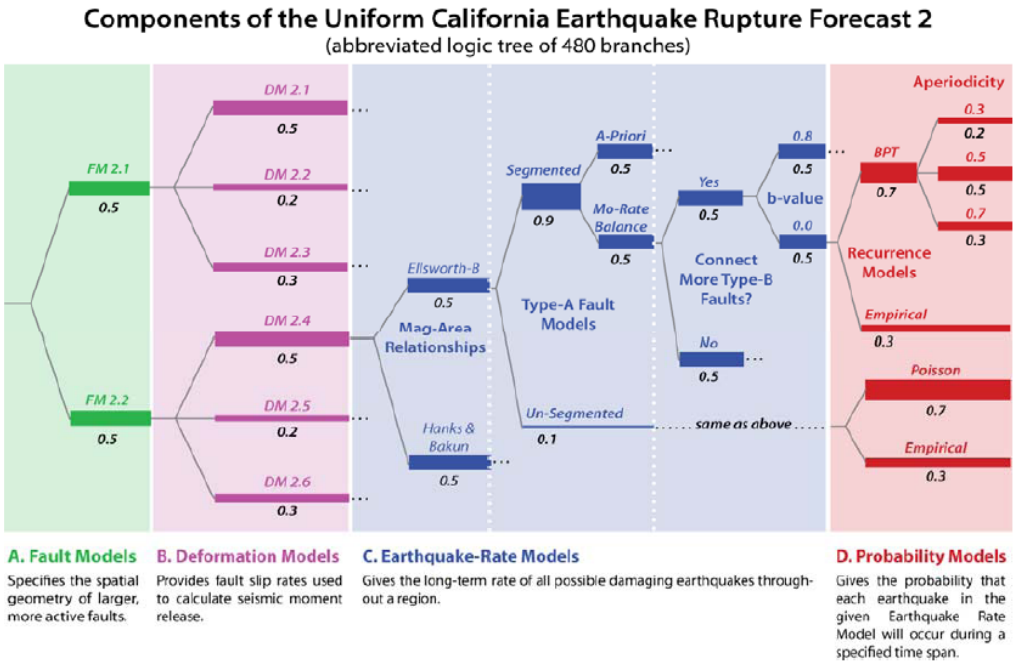


圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹（摘錄自 WG07, 2008）。

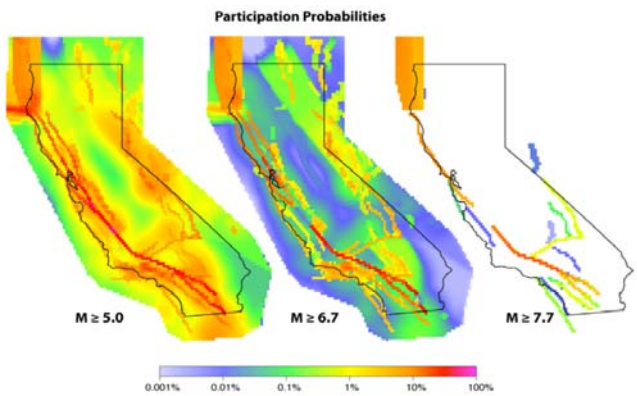


圖 1-2.13：加州地區未來 30 年發生地震規模為 5、6.7、7.7 以上之機率分布圖。網格為 0.1 × 0.1 度，此圖為整合各類型之孕震構造（區域震源+活動斷層）所呈現之機率分布圖（WG07, 2008）。



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 10-8Hz 的地潮訊號(可感測 10-9~10-12Hz 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。

在過去的經驗之中，仍然可發現許多明顯的應變訊號與地震活動，卻未能有明顯的相關性，這會妨礙我們在做異常地殼應變的分析與判斷。有鑒於此，在新一階段的分析中，我們將引入希爾伯-黃轉換（Hibet-Huang Transform, HHT）的“時頻分析法”，將應變的時間序列轉入頻率的領域，但能保留相當的時間序列資訊，使得我們在各事件時間上可以觀察所記錄到的應變資料的頻率特性，如此可以較明確的分析所觀測到的應變異常與斷層活動或其它因素的相關性，因為同樣的事件在不同的儀器記錄上大多仍然保留著相同的頻率特性。

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北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，藉以探討北部地區內能量蘊含之盈虧空間分布。

(2) 連續式 GPS 及 PS-InSAR 技術 （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。
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. 蒐集北部地區 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. 利用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資料；並利用 GPS 地表速度場及活動斷層地下幾何形貌，推估斷層面上短期滑移速率，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。
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，並利用中油構造平衡剖面資料及重定位地震位置，建構活動斷層鄰近地區三維幾何形貌。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。

e. 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。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. 針對新竹網測站進行時頻分析，利用時頻分析技術尋找應變儀測站之特徵頻率、分析颱風或地震整事件是否有異常頻率的發生，進而探討可能的產生原因。

e. 維護井下應變儀資料庫，持續更新，並維護更新網頁資訊。

(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 6 座地球化學土壤氣體觀測站、1 座水氡觀測站，使能夠連續運轉接收資料。

b. 分析上述既有地球化學土壤氣體觀測與水位變化資料，評估氣體成分及水位變化與斷層活動之關聯性。

c. 於宜蘭地區進行土壤氣體採樣調查，評估適合設置連續觀測站之位置。

d. 於 2 座水氡觀測站進行地下水水氡採樣分析。

e. 中崙濁水潭土壤氣體觀測站遷至沄水地下水觀測站，並改建為溶解氣體觀測站。

f. 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。

g. 比較不同時序分析方法對於異常值辨識的差異。

h. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析土壤、地下水水氡含量、地下水位異常變化的情形與當地斷層、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與空間的相關性。

d. 針對較近的異常事件在各種資料上相同或相異的表現作綜合解釋。

1-4 第一年度工作成果

1-4-1 GPS 觀測及精密水準測量

過去研究將臺灣地區 2002-2012 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 909 座移動站之水平方向速度場（圖 1-2.3）及 71 個中央地質調查所 GPS 連續站與其他單位交換約 128 個 GPS 連續觀測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（圖 1-2.3 及圖 1-4.1）計算得平面應變速率場（圖 1-2.5）。

臺灣現今的垂直速度場在臺灣中間區帶以及海岸山脈南段有較高的抬升速率，其大致呈現一圓頂狀的圖案（圖 1-4.2）。而沉陷速率則發生在平原和盆地區，以及臺灣島周圍沿海地帶（圖 1-4.2）。臺灣的地表抬升（圖 1-4.2 中的暖色系）速率在雪山山脈、中央山脈與西部麓山帶南段為 0.2-18.5 mm/yr，其中該範圍內最大速率 22.9 mm/yr 發生於中央山脈中北段。從最大抬升速率的位置向北和向南其值迅速下降。大於 5.0 mm/yr 抬升速率的 70%發生在雪山山脈與中央山脈的範圍內。此外，海岸山脈南段有 1.3-25.4 mm/yr 的抬升速率且具有臺灣最大的抬升速率 25.8 mm/yr。而臺灣地區的地表沉陷（圖 1-4.2 中的冷色系）可區分為四個主要的區域。第一為臺灣西南部的海岸平原區，其沉陷速率通常大於 15.0 mm/yr，且臺灣最大的沉陷速率-113.0 mm/yr 也位於該地區內。第二個位於屏東平原的最南端角落，在該區域內，沉陷速率有較大的 10.0 mm/yr 以及-33.2 mm/yr 的最大值。海岸山脈北段是第三個主要的沉陷地區，其沉陷速率為 5.0-20.0 mm/yr，該區最大值為-23.5 mm/yr。最後一個主要的沉陷區域在臺灣東北部的宜蘭平原。通常在平原南部的側面的沉陷速率和從海岸線向西往宜蘭平原的沉陷速率之減少比在北部的側面稍大；一般而言，該區的沉陷速率在 2.0-18.0 mm/yr 之間，而宜蘭平原的最大沉陷速率為-23.9 mm/yr。在臺灣北部及恆春半島的垂直速度分別是 -3.5 ± 3.9 mm/yr 及-1.7 ± 3.6 mm/yr（圖 1-4.2）。

過去研究將臺灣地區 2002-2012 年所測量之 GPS（包含移動站與連續站）與 29 條精密水準觀測資料整合，針對各地區的跨斷層速度剖面結果，分析各斷層之水平及垂直速度變化情形。其中嘉南地區六甲-木屐寮、觸口及竹頭崎斷層之斷層透過 GPS 觀測、精密水準測量及斷層模擬之結果指出，滑移速率分別為 8.6 ± 1.3 mm/yr、6.9 ± 1.6 mm/yr 及 29.6 ± 2.7 mm/yr；其鎖定深度則分別是 1.2 ± 0.4 km、0.4 ± 0.3 km 與 5.6 ± 0.4 km。假設六甲-木屐寮、觸口及竹頭崎斷層之斷層長度分別為 23 km、27 km 與 25 km，則各斷層每年累積之能量及最大地震規模分別為 1.44 ± 0.46 × 1023 dyne-cm（M 6.66 ± 0.28）、0.41 ± 0.17 × 1023 dyne-cm（M 6.76 ± 0.19）與 2.10 ± 0.22 × 1024 dyne-cm（M 6.71 ± 0.28）。由上述之結果顯示，竹頭崎斷層具有較高的斷層滑移速率及較深的鎖定深度，此結果可解釋成滑脫面上其實是有能量在累積。西南部泥岩區之主要變形帶位於小崗山斷層與旗山斷層之間，此區域具有顯著之抬升速率，最大約為 18 mm/yr，出現在小崗山和旗山斷層之間，但水平速度場中相對應之位置卻無梯度變化之記錄。而在小崗山斷層與旗山斷層之間，可觀察到右移與擠壓之變形分量向東逐漸增加，速度差異量分別可達 8 mm/yr 與 10 mm/yr。隨著兩斷層間水平速度分量之增加，垂直速度場之量值也跟著增加。跨越旗山斷層北段，則有約 12 mm/yr 之縮短量。

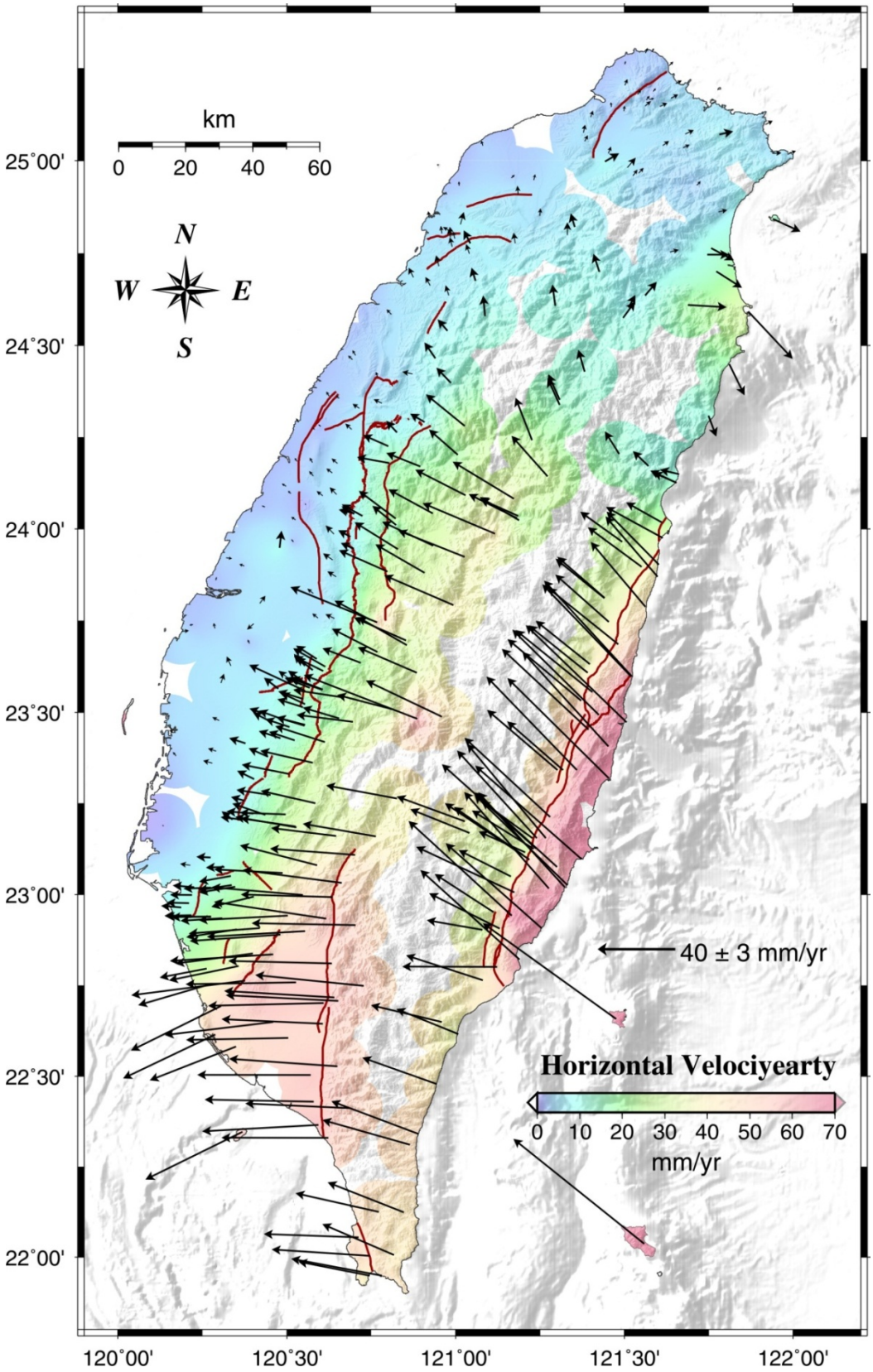


圖 1-4.1：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 連續站水平方向速度場，彩色色階反映 2002-2012 年測量資料所求得之速度場量值大小，黑色箭頭表示 2002-2012 年速度場方向及大小之分布情形。

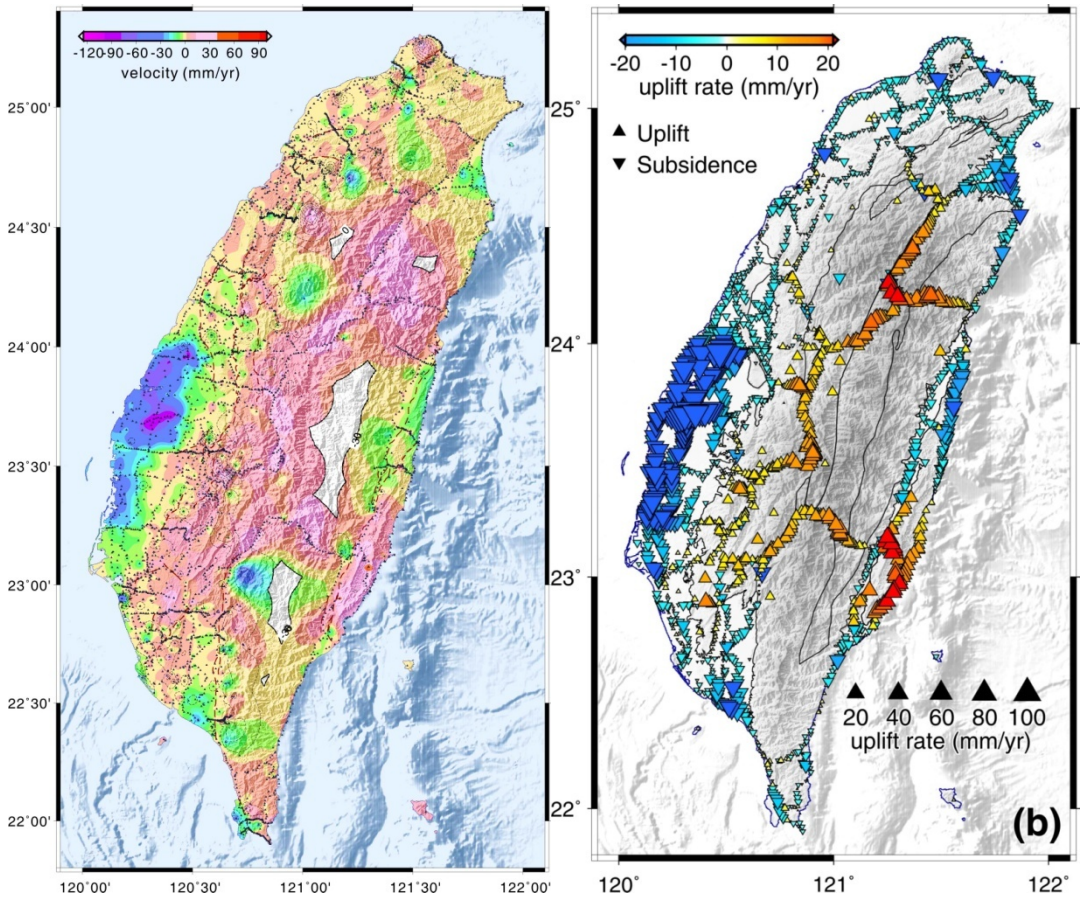


圖 1-4.2：由 GPS 及水準測量所得臺灣現今垂直速度場。經擬合後之資料均以大陸邊緣穩定站（S01R）為參考點。左圖之色階變化顯示速度量值的大小，其結果是採用最小曲率法之內插所求得。左圖彩色色階反映測量資料所求得之速度場量值大小。右圖黑色點為點位位置，黑色虛線表示各點之誤差值分布情形，其誤差值介於 10-40 mm/yr 之間。 右圖的色彩變化及三角形大小反映速度量值，三角形為計算點位位置；正三角表示地表抬升，倒三角表示地表沉陷。

1-4-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS）

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 246 站。結果顯示水平速度場在 ITRF2008 框架下在台南以北測站多為西北往東南移動，以南地區多呈現東北往西南移動。此外，結果顯示中部地區近中央山脈區域之測站多為向西移動，且移動量相對偏大。對比中央氣象局地震資料庫，2013 年 3 月 27 日以及 2013 年 6 月 2 日分別在南投縣仁愛鄉發生兩次規模 6 以上地震，推測是造成此區域位移量大的原因。另外，以垂直速度場來看，解算結果顯示許多測站在本年度速度都偏大。此原因初步推估為測站更換天線而為更新資料庫所致解算錯誤。

分析兩次地震附近測站時間序列，受到較大同震影響的測站為 DPIN、PLIM、S167、S170、SINY 以及位移量最大的 SUN1。其最大水平位移量為 0602 地震時的同震變形，向北向西各為 32.6 mm 以及 33.0 mm。將其同震變形修正後，可得到 2013 年震間位移速率三個方向分別為：向北 3.0 ± 1.0 mm/yr、向西 7.0 ± 1.0 mm/yr 以及垂直向上 28.8 ± 1.8 mm/yr（圖 1-4.3）。除了地震發生造成的地表位移外，本研究團隊根據 GPS 解算之時間序列分析，分別觀察到在 2013 年 4 月中、6 月底以及 7 月初三個時期，由國土測繪中心、內政部、中央研究院以及地調所所架設之測站，都出現高程方向上的座標不連續。由於這些測站前後兩天之間高程變化大約為 20-40 mm，推測為單位更新天線後造成與資料庫天線高度不一致所形成的位移量。將地震造成的同震效應以及更換天線造成之高程位移修正後，得到一較準確之

平均速度場，如圖 1-4.4。

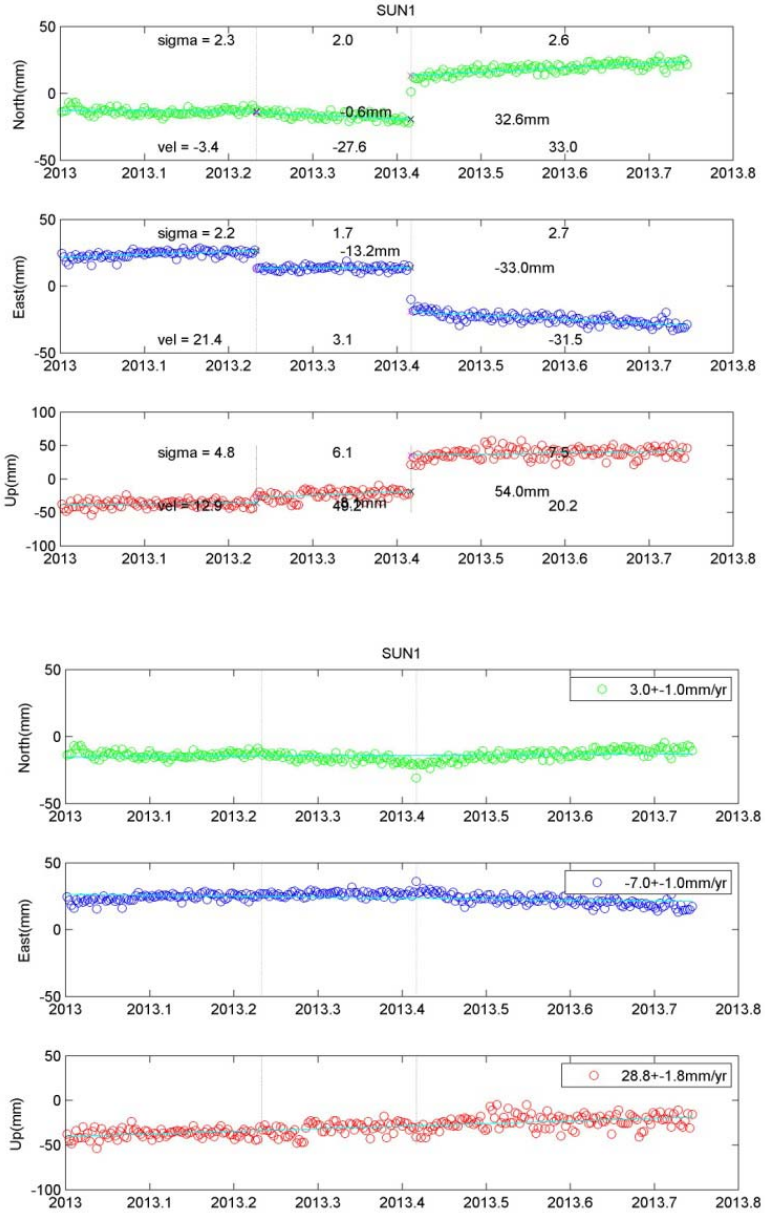


圖 1-4.3：測站 SUN1 每日解時間序列。下圖為扣除 2013 年 3 月以及 2013 年 6 月南投地震所造成地表同震位移的時間序列（圖中黑線為 2013 年 3 月以及 2013 年 6 月南投地震發震時間）。

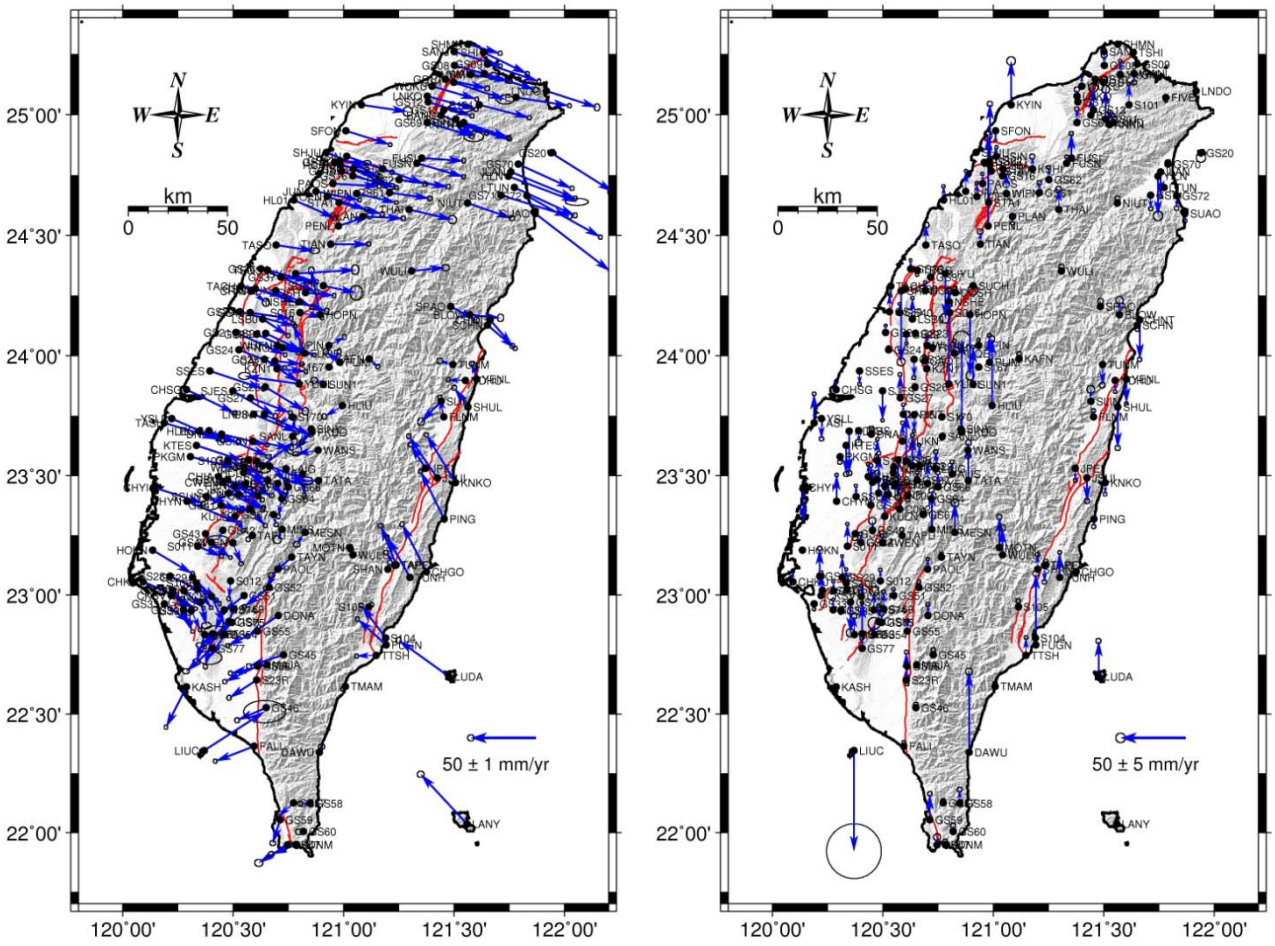


圖 1-4.4：2013 年 1 月至 9 月修正同震位移及測站異常之年速度場。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

另外，於估算同震變形方面，其他單位解算之同震變形皆為一天一筆之 GPS 資料，其必須等到震後數天才能計算，震後變形勢必也會貢獻一定的位移量。而本研究團隊利用動態解算高頻 GPS 資料，雖然其精確度較一般靜態 GPS 解算差，但可於地震發生後立即解算地震發生當下前後數分鐘地表變形的動態位移。分析 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震，初步成果顯示一秒採樣率可詳細記錄測站的地形變化（圖 1-4.5），可作為後續動態變形模式的參考。

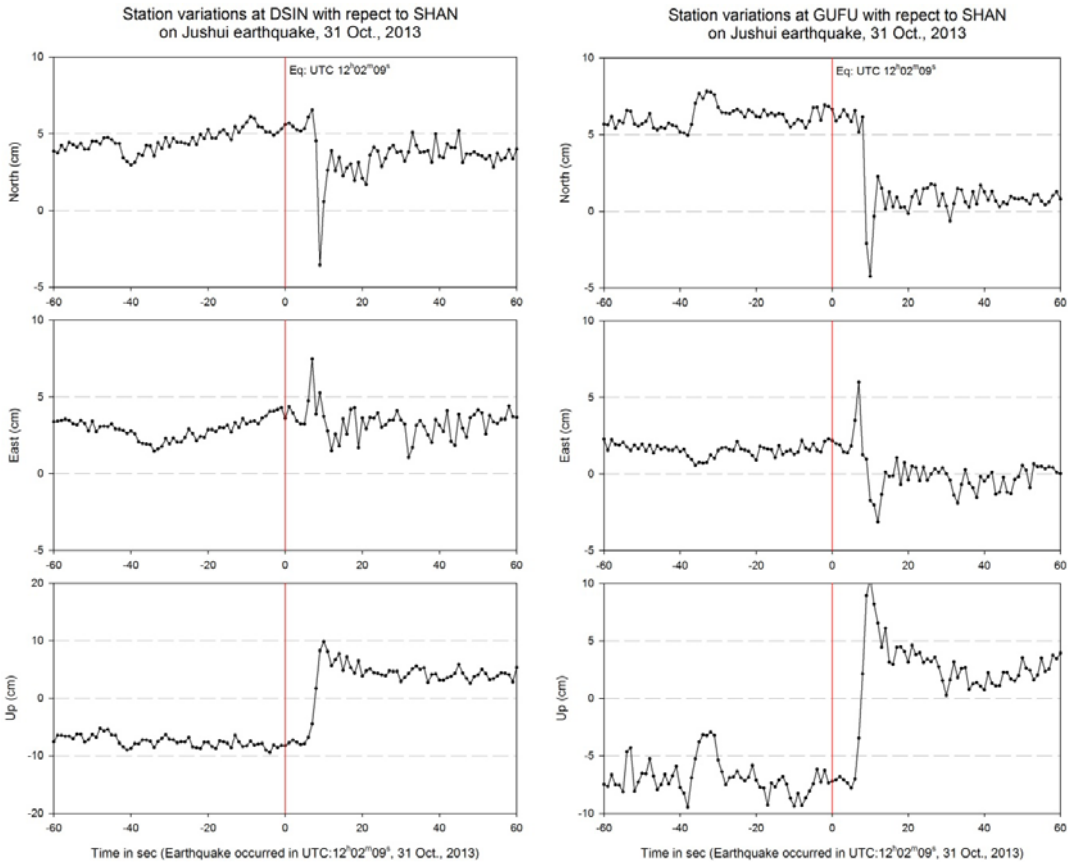


圖 1-4.5：測站 DSIN、GUFU 高頻動態解地震前後 1 分時間序列。紅線為 2013 年 10 月 31 日地震發震時間。

1-4-3 PS-InSAR

針對臺灣西南部地區，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，使用的資料為不同時間段的 C 波段 （ERS 和 ENVISAT） 與 L 波段 （ALOS） 的合成孔徑雷達影像。結果所得的視衛星方向速度場變化，必須再用其他大地測量資料做真值校正，才可以進行分析。我們所使用的校正資料為連續 GPS 與精密水準測量資料。

GPS 的水平與垂直速度可藉由黃孟涵 （2006） 的方法轉換為視衛星方向速度，並選定一站為參考點，比較所有 GPS 與 PS 的視衛星方向速度場是否吻合 （圖 1-4.6~圖 1-4.8），結果顯示 Envisat 的結果最佳。雖然 ENVISAT 與 ERS 同樣為 C 波段，在不同觀測時間對同一地點施測，ENVISAT PS 點分布都比 ERS PS 點分布來的波動；ERS 觀測時間涵蓋從 1996 年 1 月至 1999 年 6 月，而 ENVISAT 則從 2004 年 4 月至 2008 年 6 月，可能是因為不同時間段相異的活動情形，也有可能是其他原因，有待日後探討。

精密水準資料只有垂直方向的速度，無法轉換為視衛星方向，然而 InSAR 結果所呈現的速度場中，垂直分量往往大於水平分量，因此我們仍然將兩者進行比較。三種衛星結果皆顯示水準編號第 17 的結果吻合度較佳 （圖 1-4.9），確實証明在彰化斷層以西的西部平原區域一直長期下陷。

總結 PS-INSAR 分析部分主要工作：1）把 GPS 的垂直與水平速度場轉換成 LOS 方向的向量，並與 PS-InSAR 結果做比較; 2）直接比較 PS-InSAR 之 LOS 速度場與水準的垂直速度場。

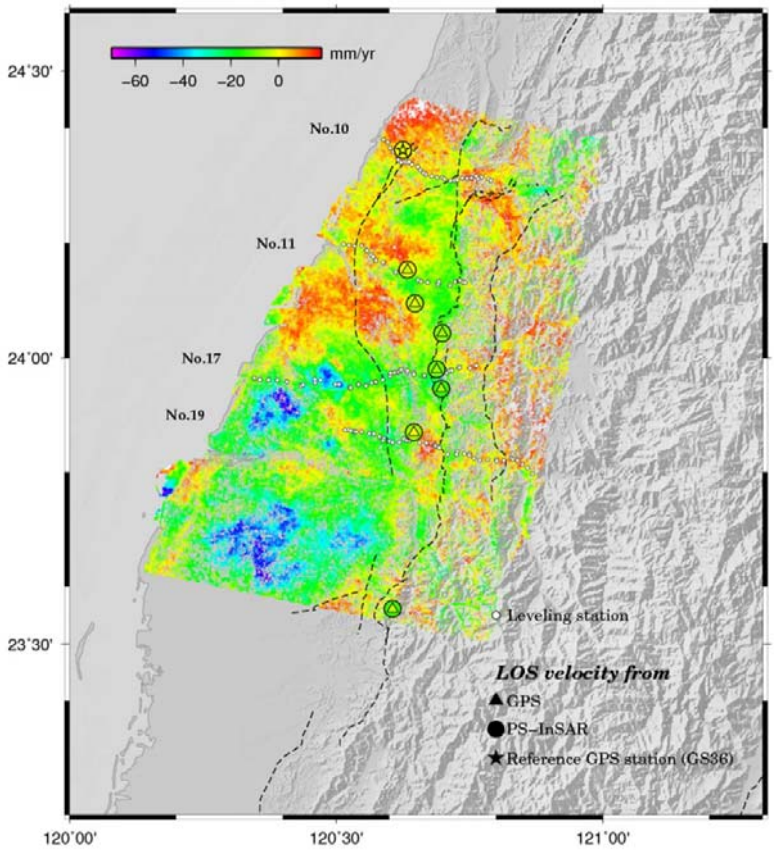


圖 1-4.6：ENVISAT 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。

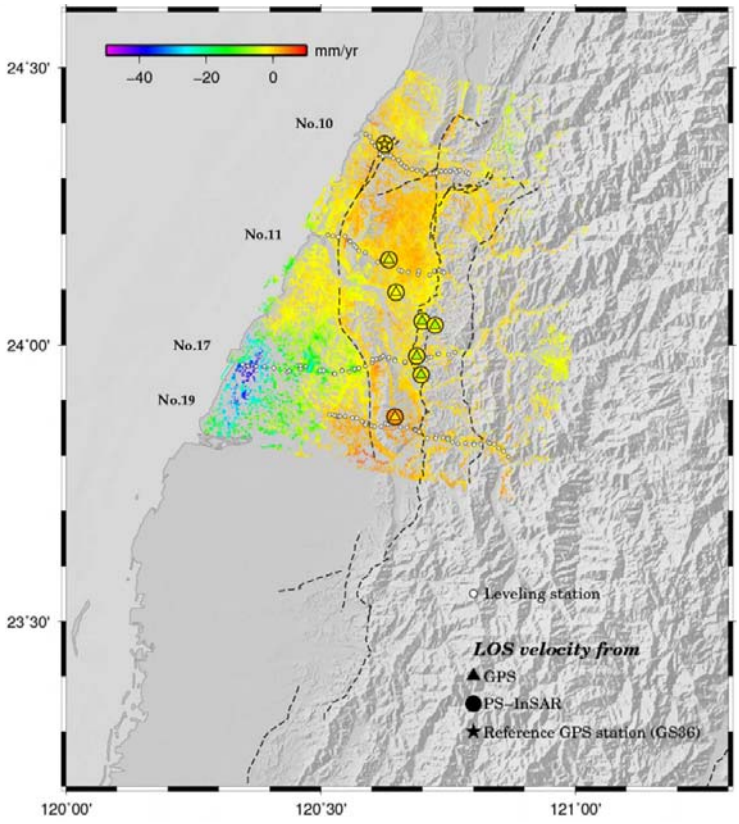


圖 1-4.7：ERS 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。

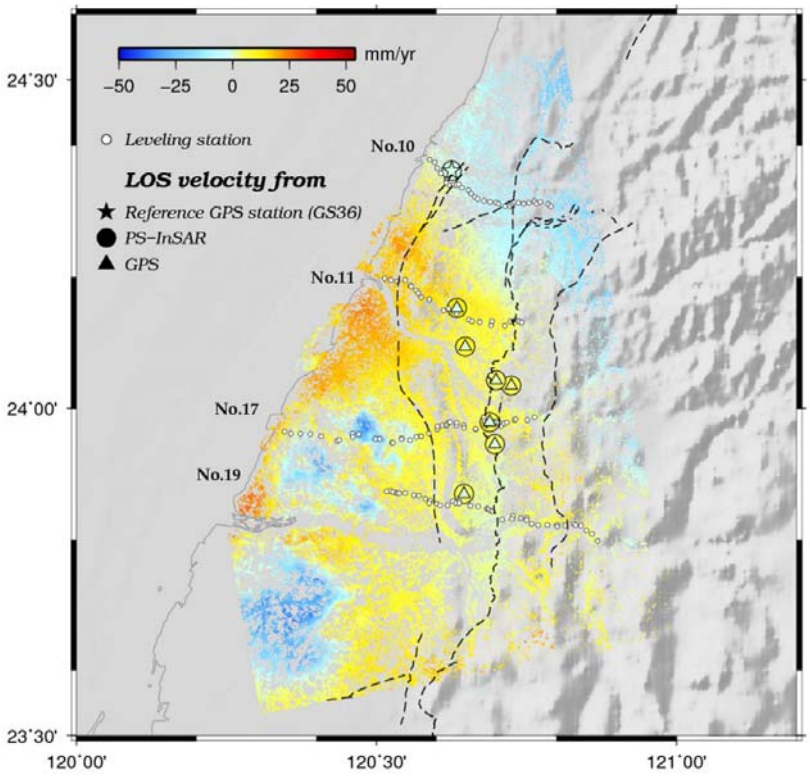


圖 1-4.8：ALOS(Path 446 Frames 460 & 470)與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。

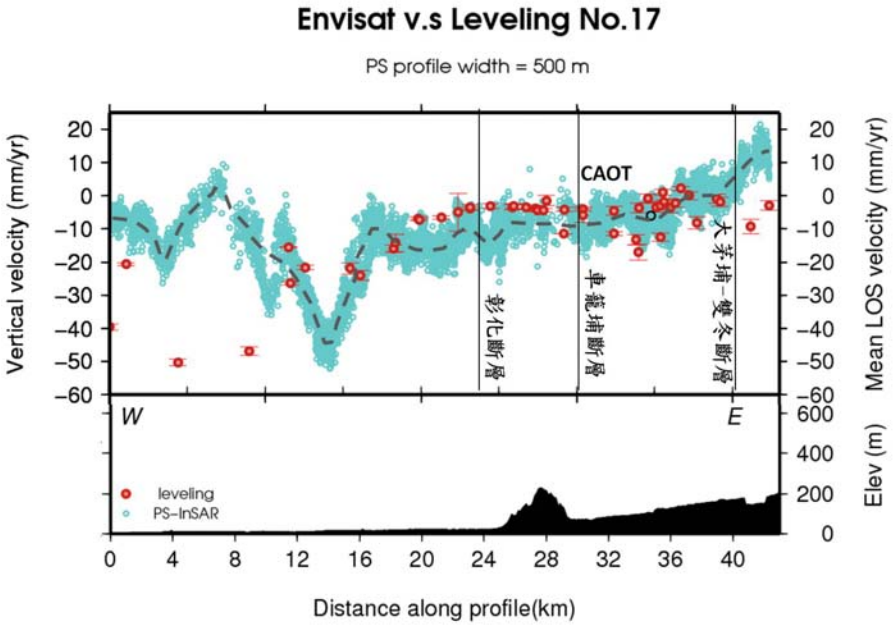


圖 1-4.9：ENVISAT 與編號 17 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

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，初步建立臺灣地區評估活動斷層潛勢之方法論。斷層潛勢評估的目的是建立臺灣活動斷層潛勢評估流程，以中部 7 條進行評估，分別為車籠埔斷層、梅山斷層、大茅埔-雙冬斷層、彰化斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層。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 1-4.12)。車籠埔斷層利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 2.2%、5.9%和 17.7%；梅山斷層利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 30.9%、44.1%和 63.4%；大茅埔-雙冬斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 3.2%、5.1%和 9.6%；彰化斷層利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 15.0%、22.4%和 35.5%，採用 Poisson 模式未來 30 年、50 年及 100 年發生機率各為 10.5%、16.4%及 27.9%；九芎坑斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 3.1%、5.0%和 9.2%；觸口斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 11.7%、18.2%和 30.3%。

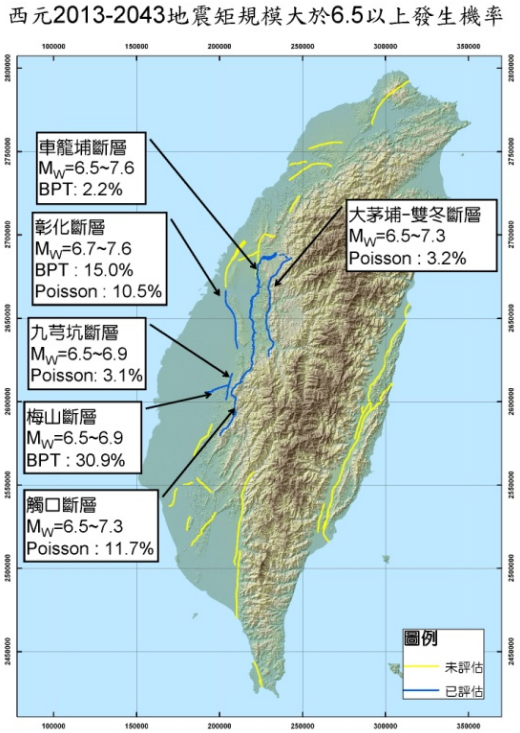


圖 1-4.10：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

(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。

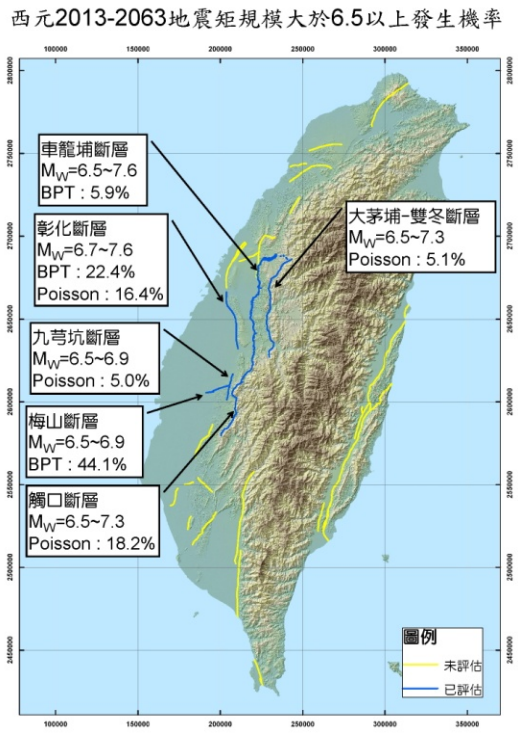


圖 1-4.11：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

(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。

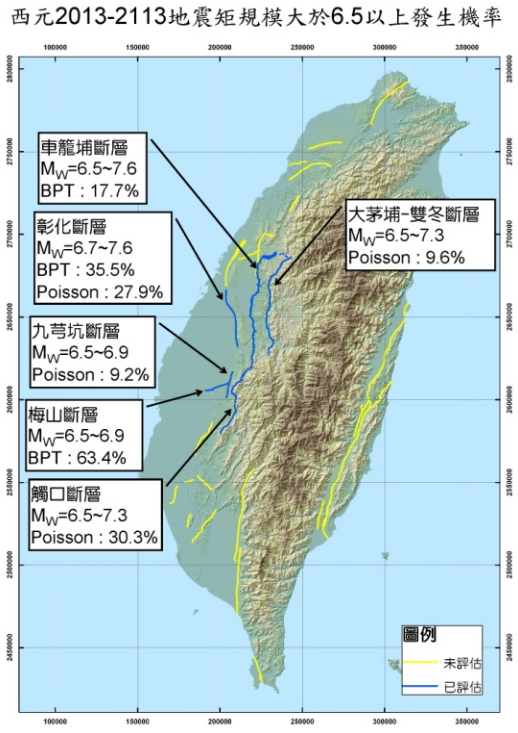


圖 1-4.12：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

(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 1-4.13 與圖 1-4.14）、初步計算面應變中地潮的影響分量（圖 1-4.15）與初步降雨影響的計算（圖 1-4.16 與圖 1-4.17），且地下水的處理狀況如下：

- 嘉義地區的地下水變化相當大，可高達 20 公尺，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。但今年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也需重新評估，未來待資料長度足夠時，將會重新再估算新裝水井中地下水與應變儀的反應。
- 新竹地區的地下水資料則較不完全，大坪國小測站（BMMT）無地下水的觀測資料，瑞峰國小測站（LMMT）的地下水資料與其井下應變儀資料一樣，不太完全，新樂國小測站（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，梅花國小測站（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，無明顯週期性，但這一測站的井下應變儀資料並沒有持續下降的變化，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。
- 臺北地區的地下水資料較新竹測網的地下水資料完整，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，是否可以直接移除地下水的影響量需要進一步的研究。

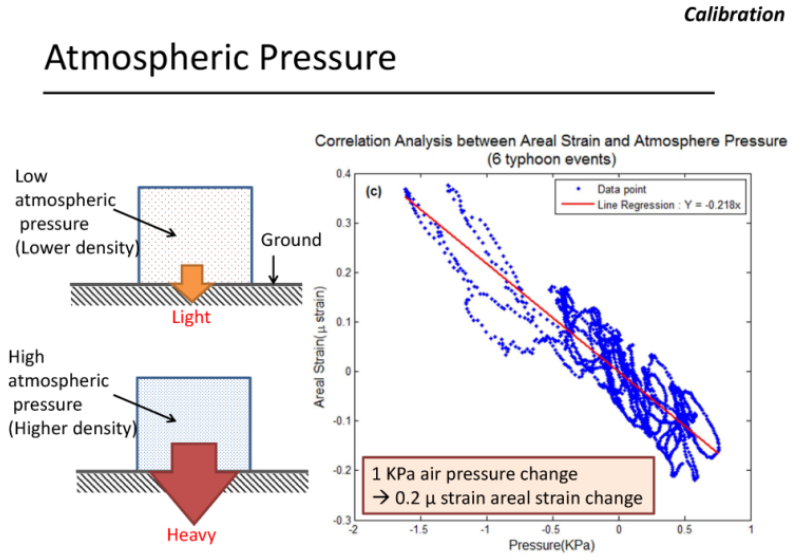


圖 1-4.13：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。氣壓的上升對應變儀面應變造成重荷而產生壓縮，因此氣壓的變化與面應變的變化是負相關。

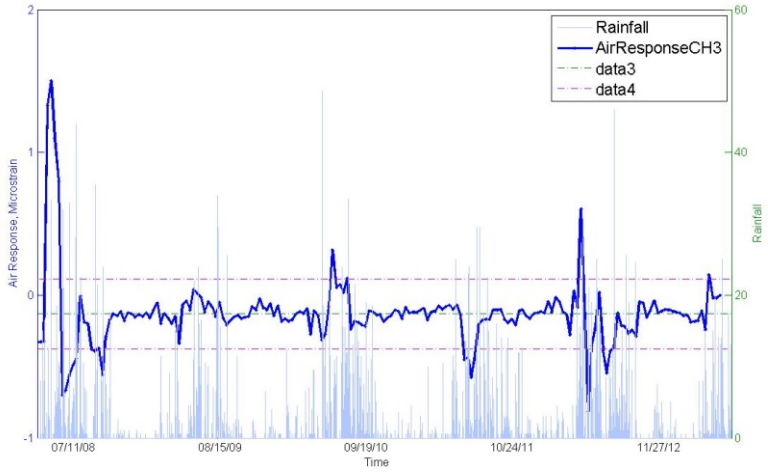


圖 1-4.14：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。我們發現氣壓對觀測應變的影響是固定的，並不會隨時間變化而改變，但是計算氣壓時仍需注意地下水位變化的影響，其最直接的指標就是降雨，因此要計算良好穩定的氣壓響應因子，必須先避開降雨密集的時段，才能夠得到相對乾淨穩定的結果。

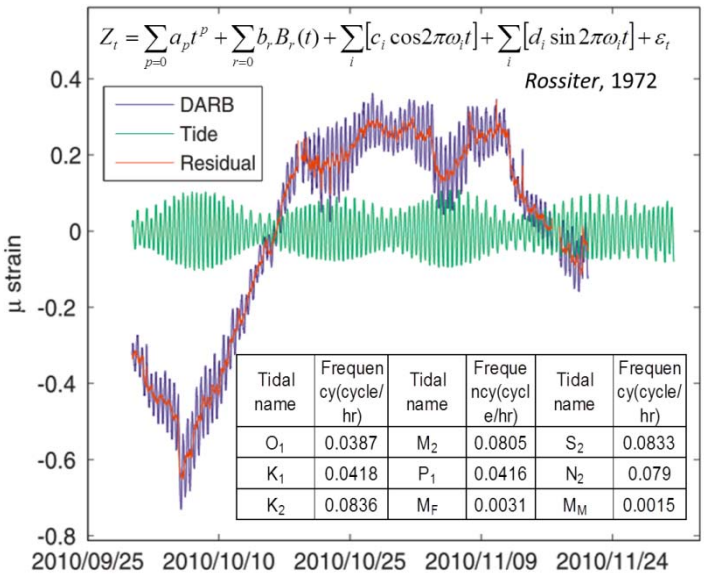


圖 1-4.15：井下應變儀中地潮分量的評估。利用固定幾個主要得起潮頻率的正弦函數與餘弦函數所組成的時間序列，再加上氣壓的時間序列，用多變數迴歸法估計每一個時間序列對潮位資料時間序列的響應，詳細理論請參考附錄 1-3。藍色線段是原始面應變資料、綠色線段為所評估出來的地潮分量，而紅色線段為原始面應變扣掉地潮分量後的殘差。

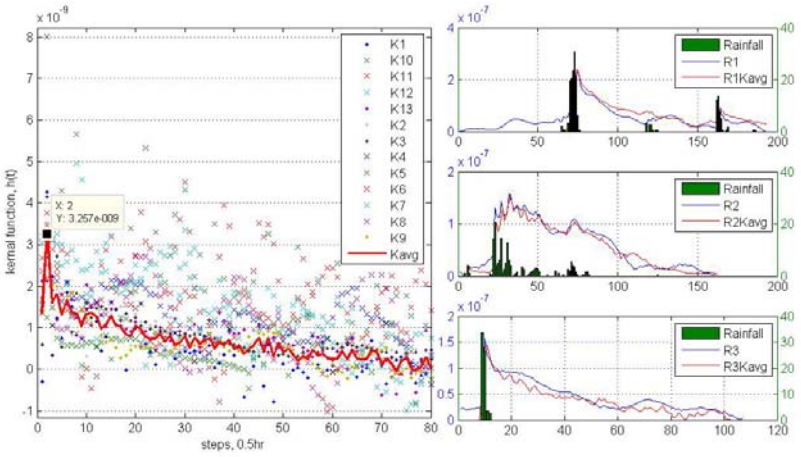


圖 1-4.16：錦和國小觀測站（JING）受到降雨引發的快速響應函數，左圖為計算出平均單位降雨影響函數（kernel function），右圖為利用計算結果預測之快速響應變曲線（紅色）與實際觀測曲線（藍色）。

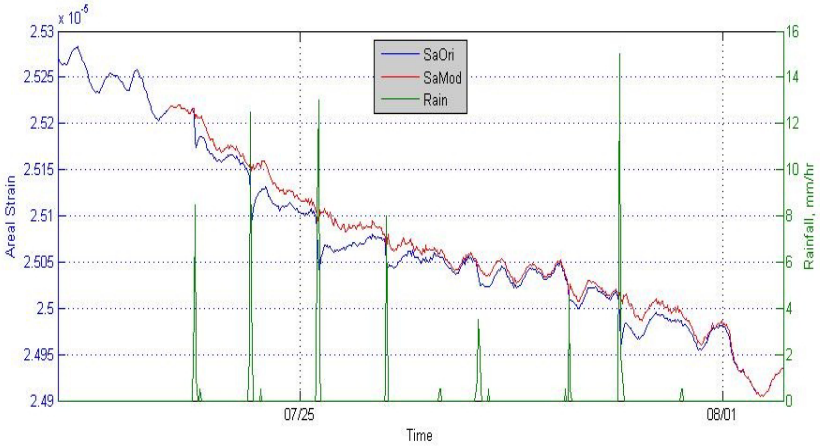


圖 1-4.17：應用模擬降雨響應至原始觀測應變資料上，可有效地除去降雨造成的快速響應的異常現象。

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：

a. 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。

b. 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"。

c. "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。

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。然後再用適當的內插法，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。

在修正的資料中，由於新竹網的大坪國小測站（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。

2012 年 12 月至 2013 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 3 個事件，嘉義網記錄到 3 個應變異常。可能與下列三個地震事件相關：(1) 2013 年 3 月 7 日芮氏規模 5.9 花蓮地震與 3 月 27 日芮氏規模 6.2 南投地震；(2) 2013 年 6 月 2 日芮氏規模 6.3 南投地震；(3) 2013 年 10 月 31 日芮氏規模 6.3 花蓮地震。如圖 1-4.18 為 2012 年 12 月至 2013 年 11 月所有規模大於 5 之地震事件。

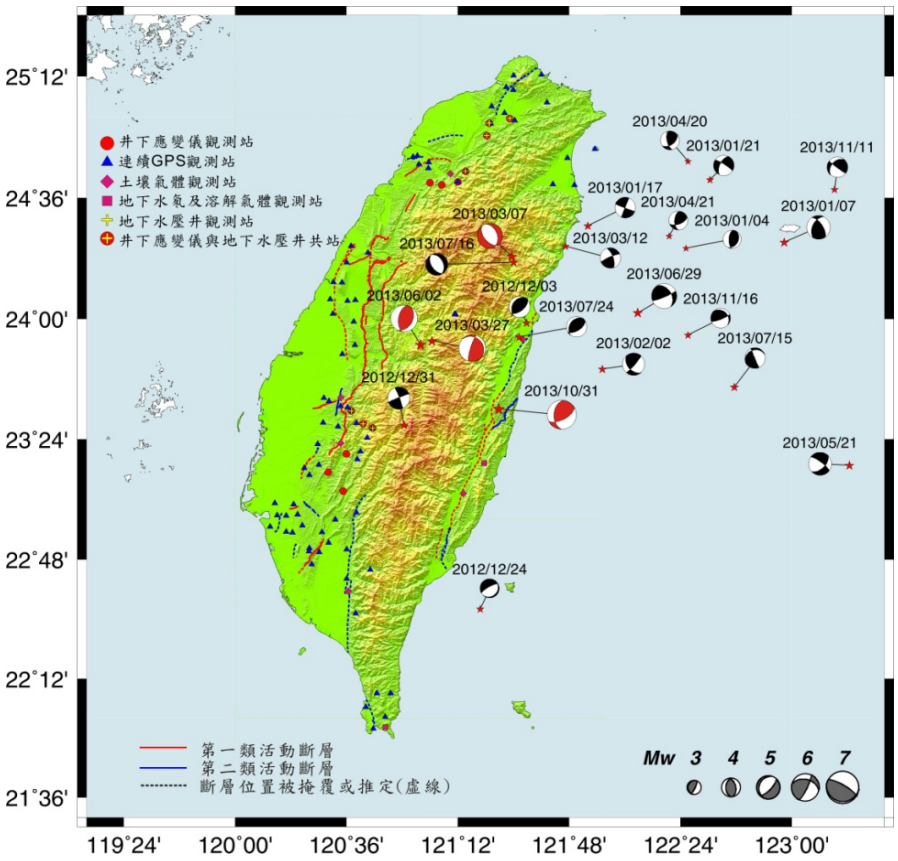


圖 1-4.18：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。紅色海灘球為井下應變儀地震前兆相關之地震。

井下應變儀資料時頻分析之目的在於了解應變資料的特性，並借用時頻特性的相似性來了解產生應變異常或變化的環境影響因素。102 年度分析嘉義網之達邦 （DARB）、太興國小 （TAIS）、中興國小 （TSUN）三測站的資料，針對 2013 年 1~9 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析。分析流程為先去除面應變資料的趨勢變化，並針對不同頻率範圍進行短時距傅立葉轉換分析，頻率範圍分別為高頻（0.15~0.5 Hz）、中頻（0.07~0.15 Hz）以及低頻（0.0~0.07 Hz）。再對各個頻段之面應變資料的時間積分 （Marginal Time），取面應變資料的變化趨勢與其對應之累積雨量、地下水水位和氣壓的變化趨勢正規化（Normalize）後進行比對，透過井下應變儀面應變資料與水文資料之趨勢比對兩者之間的關聯性。分析中採用天然事件（地震與颱風）所產生的應變與環境變數來尋找事件所造成變化的特性與原因。高頻強度變化趨勢與氣壓變化趨勢，在颱風影響臺灣期間具有顯著的負相關現象：當氣壓極低時，對應之高頻面應變強度較大 （伸張）。而高頻面應變強度與地下水水位趨勢有正相關的情形；地下水壓高則地殼有伸張應變颱風時大氣壓力與累積雨量為逆相關的關係，是故高頻強度變化與累積雨量變化趨勢具有正比關係，這些都是已知的合理現象。在這一次的分析中，證實此方法的可信度，並可以此方法來找出變數與應變數之間的精確數值關係。未來期望也可以對未知原因的異常應變，利用時頻分析來找出異常的原因，或是與其它因素的相關性。

1-4-6 地球化學觀測與研究

本計畫前兩階段之觀測計畫中（2005-2012 年）主要著重於區域之土壤氣體調查與氣體連續觀測站之設置、水壓觀測站之設置，逐年於各地區鄰近斷層之敏感地區分別設置土壤氣體觀測站、與水位觀測井（表 1-4.1 與圖 1-4.19），進行氣體成份與水位之觀測，成為一個初步的觀測網，配合鄰近地殼變形與地震觀測資料，探討各研究區域內斷層、地震活動與觀測結果之關聯，並進一步觀測可能之前兆訊息、及其活動可能機制。

表 1-4.1：第二階段已設置之連續觀測站配置儀器及分析項目。

站位	配置儀器	分析樣品	分析成份
中崙濁水潭站（CL）	四極桿質譜儀、氡氣分析儀、不斷電系統、數據專線	土壤氣體	N_2, O_2, Ar, H_2O, CO_2, CH_4, Rn
新竹大平地站（TPT）	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
雲林古坑站（GK）	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
屏東屏科大站（PT）	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
臺東池上站（CS）	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
花蓮東華站（DH）	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
雙溪水位站（SS）	水壓計、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	水壓變化	-
沄水水位站（YS）	水壓計、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	水壓變化	-
安通水氡站（AT）	氡氣分析儀、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	溶解氣體	Rn
社頂水氡站（ST）	氡氣分析儀、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	溶解氣體	Rn, CO_2

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。根據已經設立之各個觀測站之觀測結果，顯示各觀測站之氣體成份皆有顯著的變化，可能與地震活動有關，適合予以持續觀測。其中嘉義中崙濁水潭站對於發生於南部與東南部地區的地震活動有較為敏感的反應（圖 1-4.20）；而新竹大平地站則對於北部與東北部地區的地震較為敏感（圖 1-4.21）。南部的水位觀測結果亦顯示對於南部之地震活動有敏感反應（圖 1-4.22），非常適合持續觀測。唯嘉義梅山氣體觀測站，因為颱風大雨破壞地基，而明顯影響觀測結果，已於 2009 年計畫中於鄰近雲林古坑地區選擇適合位置，予以遷建後持續觀測。

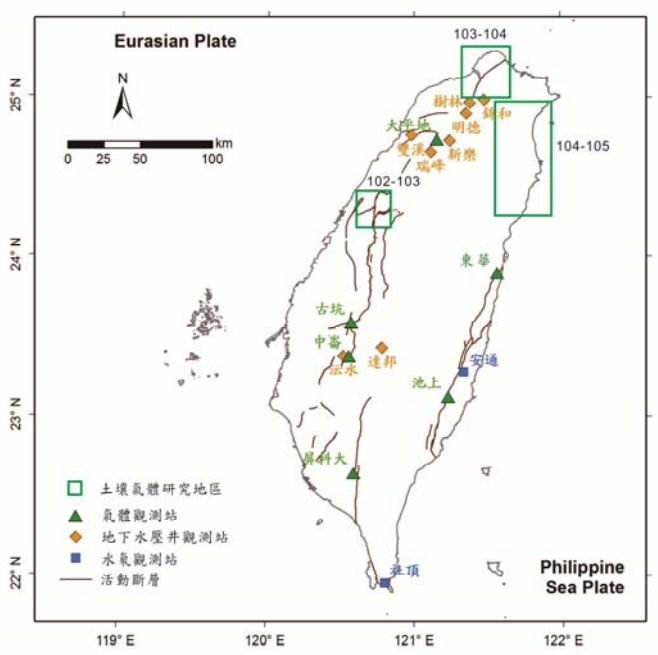


圖 1-4.19：本計畫已設置之觀測站與這 4 年預定設置觀測站之區域。方框為本階段（102-105 年度）預計設置觀測站之區域；方框所標示之數字代表計畫年份。

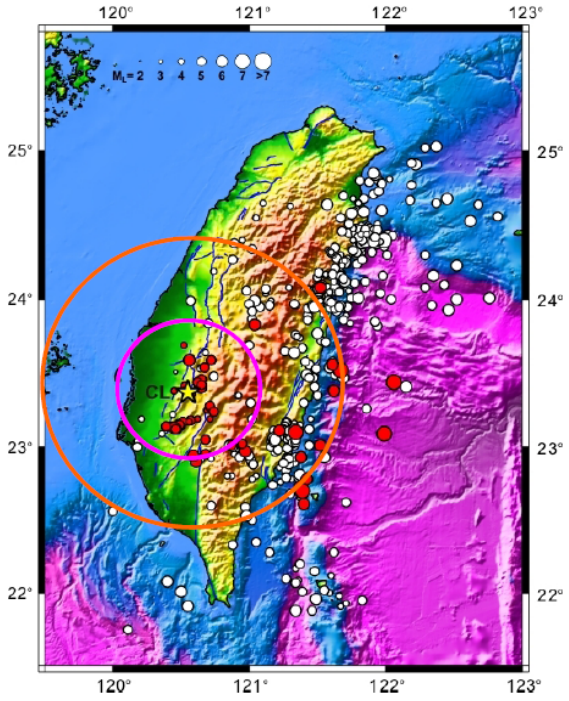
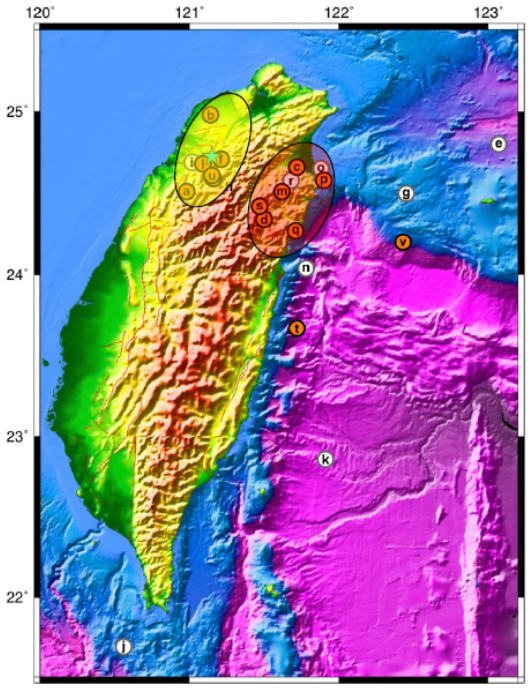


圖 1-4.20：嘉義中崙濁水潭觀測站對於發生於臺灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應（2003/1/1~2004/7/31），非常適合持續長期觀測。其中星形符號位置為觀測站；圓形符號為地震發生之位置（符號大小代表不同規模），其中紅色圓形符號為觀測站有反應的地震。初步結果看來，發生於觀測站 60 公里內且地震規模大於 4.5 者，本觀測站皆有很好的感應；而發生於 60-120 公里之地震則對於較大之地震活動（規模大於 5.0）才有反應。



No.[1]	Depth (km)	Mag. (M_L)	Int. (M_I)	Distance (km)	$\triangle t^2$ (day)
a	5.6	3.2	2	29.4	1.5
b	14.7	3.6	1	28.3	0.2
c	9.7	3.1	1	58	3.4
d	5.3	3.5	1	55.5	3.5
e	135.3	6	2	193.9	-
f	8.3	3.7	2	6.3	0.7
g	88.4	4.9	1	133.7	-
h	6.4	4	2	15	0.6
i	10.1	3.9	2	13.7	x[3]
J	44.1	7	2	342.6	-
k	5	6.2	2	221.2	-
l	8.6	3.5	2	7.8	10.5
m	41	4.2	2	53.2	14.6
n	25.4	4.7	2	99.3	-
o	85.5	4.6	1	74.2	-
p	68.7	5.2	2	77.5	2.6
q	11.6	4.2	2	75.9	4.5
r	40.9	4.9	2	55.9	-
s	7.3	3.5	1	46.9	7.4
t	29.6	6	2	130.7	17.4
u	8.4	3.8	1	12.8	7.5
v	27	6.6	3	142	11.5

圖 1-4.21：新竹大平地觀測站對於發生於臺灣北部與東北部地區的地震活動有敏感的反應（2006/6/14-2007/9/9），非常適合持續長期觀測。其中星形符號位置為觀測站；圓形符號為地震發生之位置，實心圓形符號為觀測站有反應的地震。初步看來，發生於觀測站附近 30 公里內且淺源（<15 公里）之地震，本觀測站皆有很好的感應；而發生於 40-80 公里之地震亦有不錯之反應。

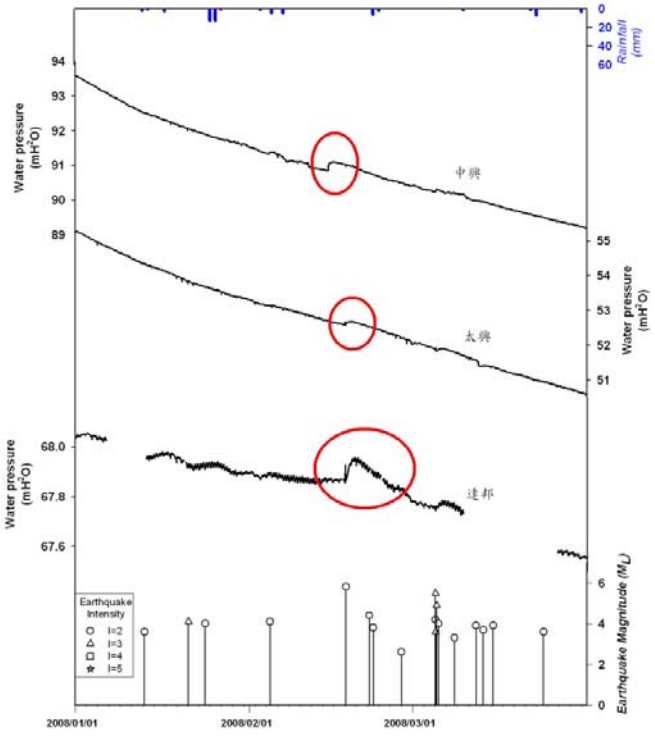


圖 1-4.22：嘉南地區的中興、太興、達邦水位觀測站（2008/1/1-2008/3/31）對於發生於臺灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應。於 2009 年與 2010 年執行計畫期間，亦多次於地震發生前有異常水位之變化，顯示這些水位觀測井，適合持續長期觀測。

本計畫第二階段，除了承續前一階段已設置氣體與水壓觀測站維護與資料分析外，也加入地下水氡與溶解氣體之調查與研究工作（圖 1-4.19），以期於全島能夠完成較為完整之觀測網。

根據過去的土壤氣體與水位觀測結果顯示，許多觀測站在主要的大地震發生前幾天都有異常的變化，可以視為震前反應。目前我們正持續累積更多的經驗，以評估不同站位對於不同地震（不同規模、發生位置、與地震發生機制等）的異常反應範圍。

總結土壤氣體觀測結果顯示，新竹大平地測站對於臺灣北部的地震活動較為敏感，尤其是宜蘭地區一帶；雲林古坑和嘉義中崙溪觀測站則對於臺灣中南部地區的地震活動較為敏感；屏東屏科大站對於臺灣南部地區的地震活動比較有關聯；花蓮東華站對於臺灣東部地區鄰近之地震活動有關；而臺東池上站之土壤氡氣氣體成份則與臺東及花蓮南部附近的地震活動有很顯著的關連性。尤其新竹大平地、嘉義中崙、與臺東池上站之觀測結果與地震活動有明顯關連、且有幾次規模較大的地震活動皆有異常的前兆變化（表 1-4.2），非常值得進一步持續觀測。

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。

地震資料				大平地站			古坑站			中崙站			屏科大站			池上站		
西元時間	規模	深度（km）	震央位置	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常
2009/11/5 17:32	6.2	24.1	南投名間	2	6.2	●				5	175.8	●				2		●
2009/12/19 21:02	6.9	43.8	花蓮市	4	29.4	●				5	131.5	●				4		●
2010/1/19 14:09	5.6	41	花蓮市							3	22.5	●				2	5.0	●
2010/2/12 10:41	5.2	14	南投埔里	1	1.0	●	2	4.6	●	4	27.2	●				2	2.9	●
2010/3/4 08:18	6.4	22.6	高雄甲仙				4	36.0	●	6	377.5	●	5	99.5	●	4		●
2010/11/21 20:31	6.1	40.7	花蓮市	2	4.8	●										4	28.1	●
2010/12/06 10:14	5.2	25	花蓮西林	2		●				4		●				2		●
2011/03/20 16:00	5.8	16	臺東外海									●			●	4	28.1	●

● 表示氡氣濃度有震前異常

經由地震活動所造成的異常變化而可以初步劃分出各觀測站的異常反應範圍，如圖 1-4.23 所示，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。

2009 年度至今的水壓觀測結果顯示，新竹及嘉義地區之地下水壓觀測井記錄到數次地震前兆反應。譬如 2012 年 2 月 26 日的霧台地震，新竹新樂站於震前 7 至 8 日出現明顯的水位下降異常，正好也與 2013 年 3 月 27 日的南投地震震前異常相當類似。將 2008 年 11 月至 2013 年 11 月有震前地下水壓異常之地震震央空間分布圖繪製於圖 1-4.24。

過去研究初步觀測結果顯示，土壤氡氣之變化經常與鄰近水位站之變化可以對比，且土壤氡氣之變化經常發生於水位之變化（圖 1-4.25），有助於我們往後對於異常前兆之判定。

然而，嘉義四座地下水壓觀測井，中興、太興兩站屬於新井，水位監測已經穩定進行，而達邦站目前狀況不佳，正在處理中；沄水站因 2012-2013 年未觀察出任何異常，且發現井體本身有產氣，故建議將沄水測站改為進行氣體地球化學的觀測，目前已前往沄水井採取水樣，進行初步分析與調查。此外，中崙濁水潭土壤氣體測站近年由於大雨影響，持續沖刷侵蝕測站地基，目前測站後方與潭水僅有一步之隔，觀測站及其旁邊的 FRP 箱（內有地震儀）

皆已傾斜，短期內雖尚無倒塌風險，惟之後若繼續大雨發生，很難確保測站不會因後方遭沖刷而掉落潭水裡（如圖 1-4.26 所示）。由 2013 年觀察結果顯示，每當梅雨季或是颱風季，土壤逸氣通道常會受到雨水侵入，導致儀器抽到水故障，增加辨識該段時期資料的困難，因此只有在乾季才有較佳的觀測品質。綜合上述，認為嘉義濁水潭測站現地已不適合進行連續觀測且遷站實屬必要。同時，沄水站觀測站已發現有氣體至水井內溢出，建議將原中崙濁水潭土壤氣體測站設備移沄水地下水觀測站，改建為溶解氣體觀測站。

計畫研究團隊郭明錦教授自 2003 年 7 月起，持續在臺灣東部玉里（安通溫泉）長期觀測地下水水氡濃度異常變化至今，已有優良之研究成果。2003 年 12 月 10 日地震規模 M_W 6.8 成功地震來臨前，成功在安通溫泉地下水水氡監測站捕捉到震前地下水水氡濃度異常下降之地震前兆。此外也在 2006 年 4 月 1 日及 2008 年 2 月 17 日池上斷層發生地震矩規模 M_W 6.1 及 M_W 5.4 強震前，觀測到地下水水氡濃度異常下降之地震前兆（圖 1-4.27），此為在同一監測點觀測到地震前兆氡濃度異常之再現性。

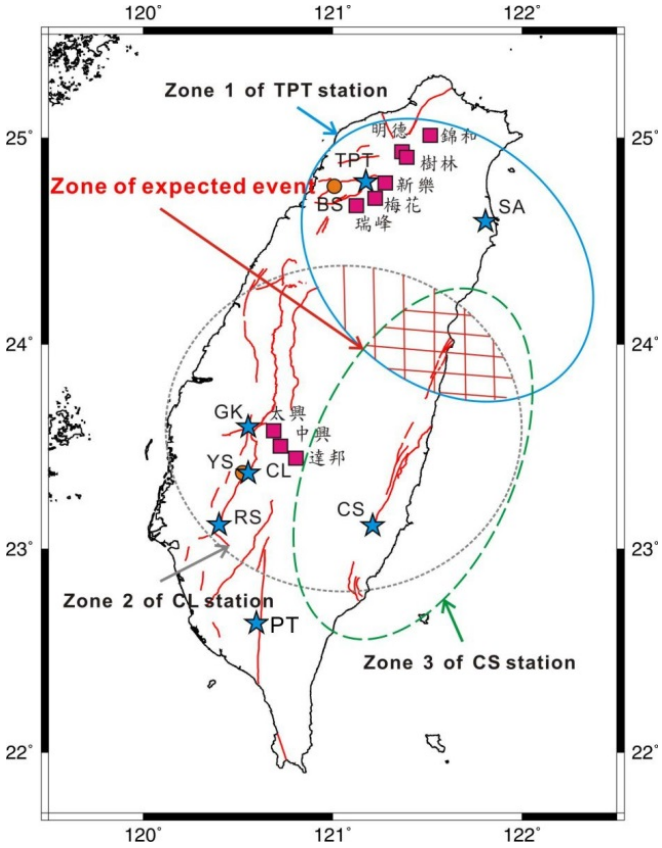


圖 1-4.23：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖，藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生的地點。

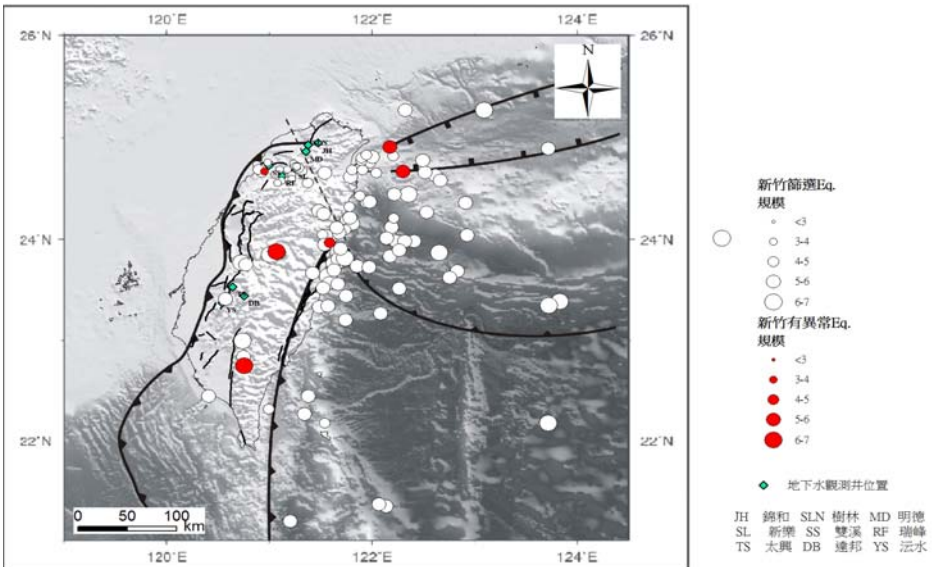


圖 1-4.24：臺灣島與鄰近地區的板塊構造架構以及新竹地區觀測井有前兆反應的地震震央分布圖（2008 年 11 月至 2013 年 11 月）。

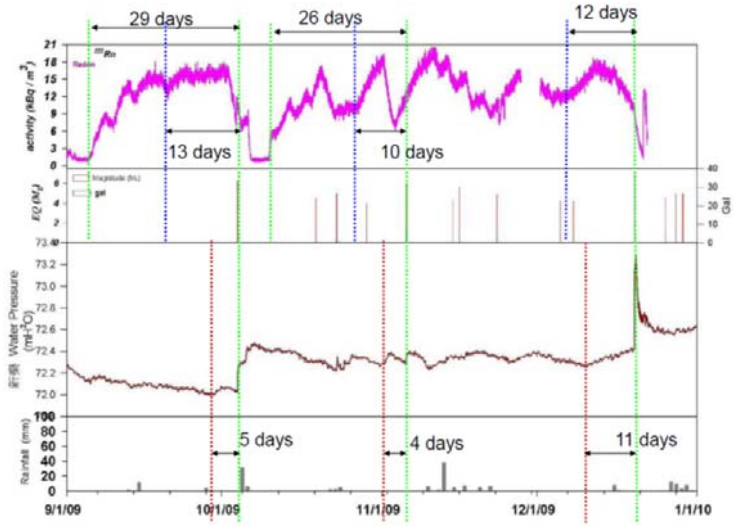


圖 1-4.25：大平地氣體觀測站與新樂水位觀測站之比較（2009/9/1-2009/12/31）。氣體之前兆異常變化經常比水位之異常變化要早數天發生。



圖 1-4.26：中崙濁水潭觀測站野外現地照片，圖中顯示測站與潭水之間的距離逐漸接近，有崩塌之疑慮。

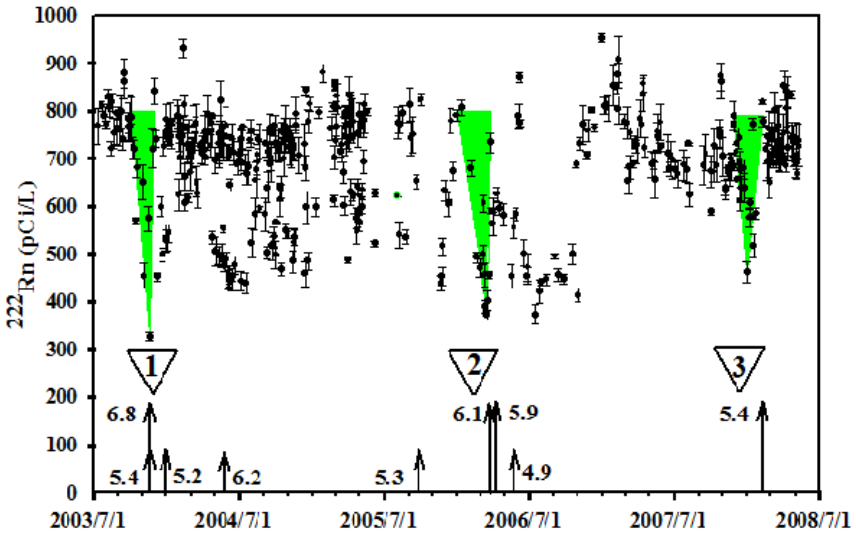


圖 1-4.27：臺灣東部吉祥水氡監測站 2003-2008 年之水氡濃度監測圖 （Kuo et al., 2006a, b; 2009; 2010a, b, c; 2011）。

本計畫在花東縱谷南段附近安通溫泉安通站監測井定期採集水樣，分析地下水水氡及溶解氣體（甲烷及氮氣）。同時，現地連續監測地下水溫度及水位。2009 年 3 月至 2011 年 11 月，花東縱谷南段未發生強震 （M_W＞6.0），在這期間，安通溫泉飯店監測井（安通站）中地下水水氡及地下水溶解氣體（氮氣及甲烷）濃度亦未觀測到異常之變化。雖然在執行本計畫期間安通溫泉安通站未發現地下水水氡異常下降之變化，但安通站在 2008 年 2 月 17 日發生地震矩規模 M_W 5.4 安通地震前，能捕捉到地下水水氡異常下降之地震前兆，顯示安通溫泉具適當地質條件成為理想地下水水氡地震前兆觀測站 ，建議持續長時間監測安通站地下水水氡濃度，預期捕捉下次在花東縱谷南段發生災害性地震（大約 M_W＞6.0）之前兆。

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 1-4.28)，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。

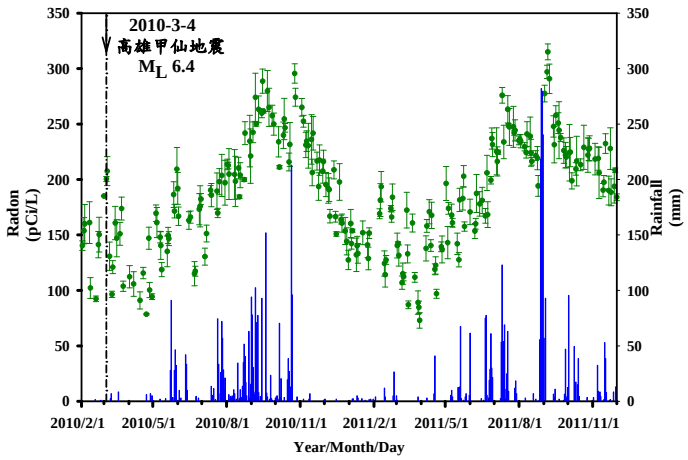


圖 1-4.28：社頂站地下水水氡濃度變化與雨量關係圖 （雨量資料來源：中央氣象局）。

1-4-7 整合觀測資料分析

過去研究成果包括（1）地下水位異常（2）地球化學異常（3）井下應變儀異常（4）GPS 變位異常之整合，整合期間含跨 2009 年到 2013 年 11 月間 146 個規模大於五的地震事件，異常記錄對應比較圖如圖 1-4.29 所示；位置及震源機制圖請見圖 1-4.30 及圖 1-4.31。分析針對井下應變儀應變異常、地下水及地化異常、利用時間分布列表以尋找共同事件。在去年（2012 年 11 月到 2013 年 11 月期間並無任何同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測，但有一個地震（ID=124）同時觀測到（1）地下水位（新竹網）(2）井下應變儀（嘉義網）（3）地化氣體記錄（新竹網、雲林古坑測站）三樣異常，其為 2013/03/27 10:03 規模 6.2 發生在南投縣政府東方 36.9 公里的地震。

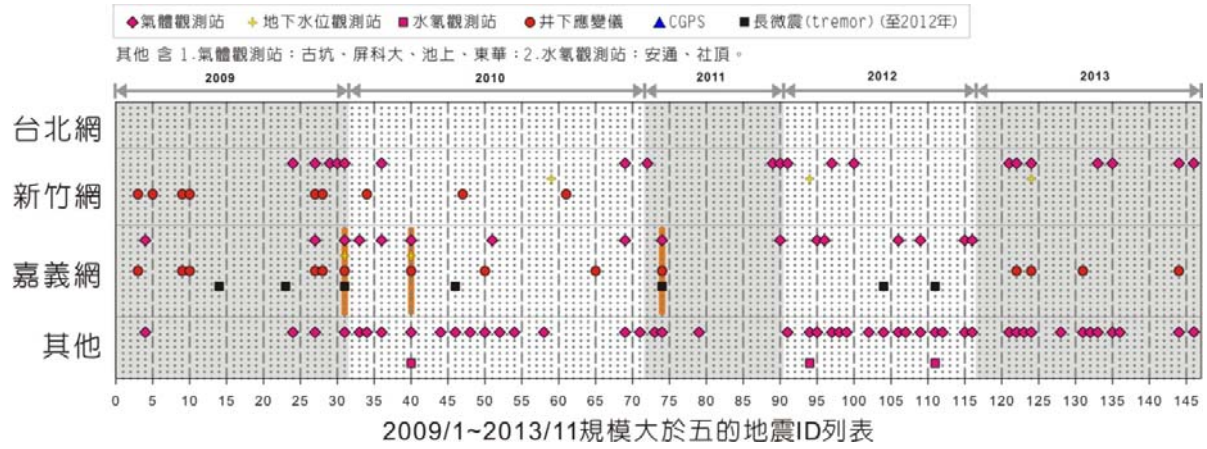


圖 1-4.29：2009 年 1 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID，粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。

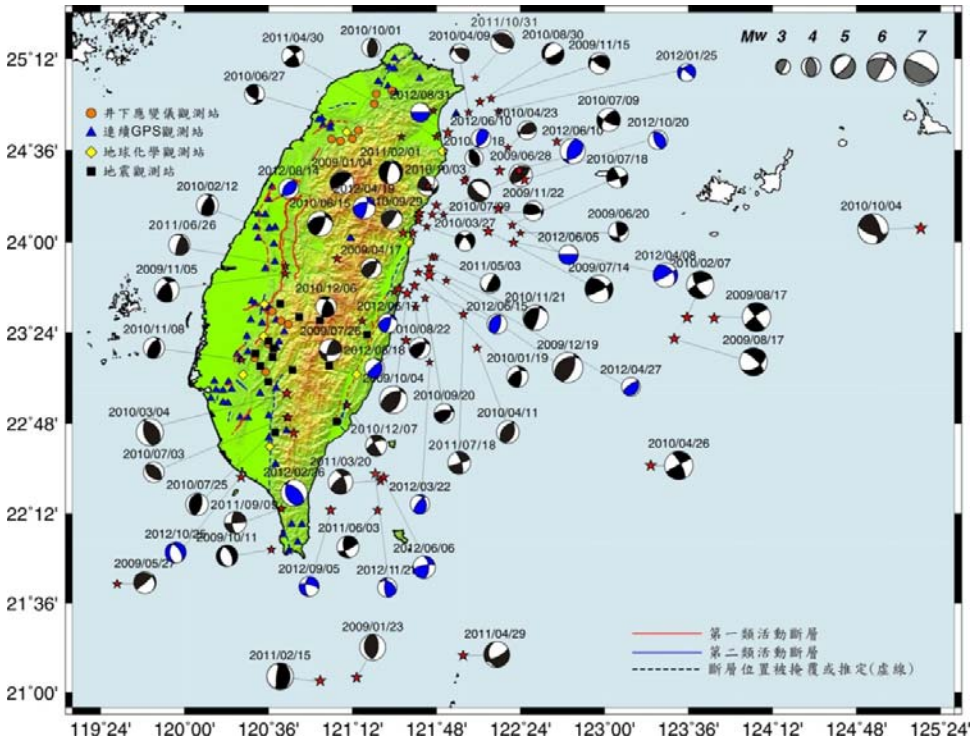


圖 1-4.30：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。橘色圓圈、藍色三角形、黃色菱形和黑色方形分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、CGPS、地化觀測（氣體和水位）及地震觀測站。藍色海灘球為 2011 年 12 月至 2012 年 11 月規模大於五之地震事件。

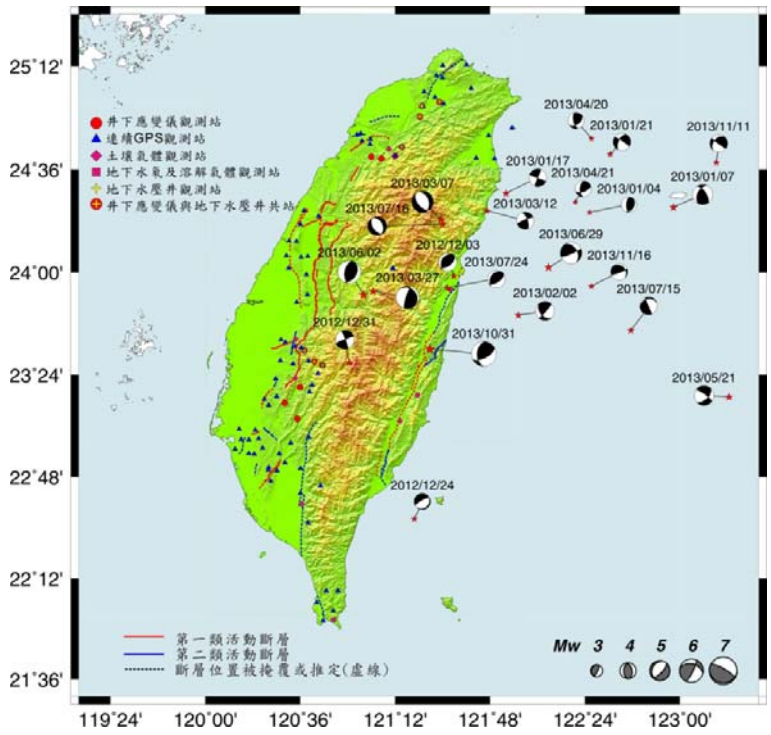


圖 1-4.31：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。紅色圓圈、藍色三角形、粉紅色菱形、粉紅色方形和黃色十字分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、CGPS、地化氣體、地化水氡和地下水位觀測站。

第二章、大地測量資料分析

2-1 連續 GPS 站解算成果分析

2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略

本次期末報告所使用 GPS 連續站資料係由經濟部中央地質調查所提供，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、國土測繪中心及中正大學等單位，共 250 站。以下為計算每日座標解之方法與流程。

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。

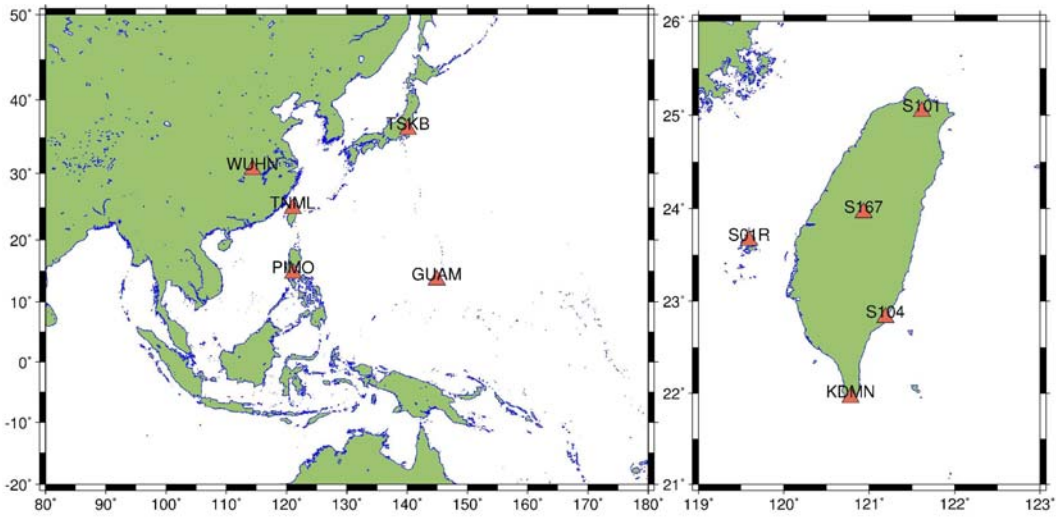


圖 2-1.1：本計畫約制之國際連續站與國內連續站分布圖。

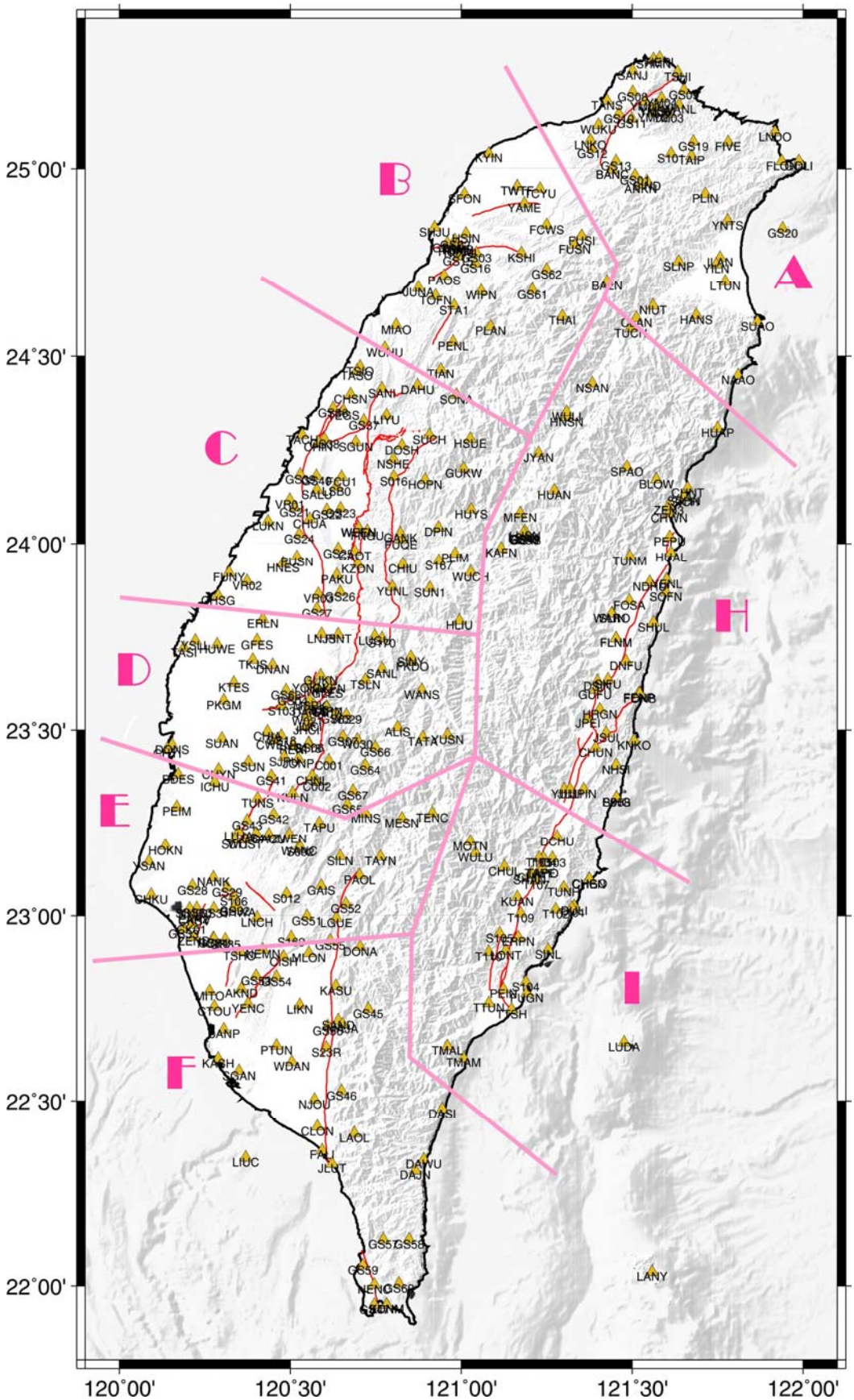
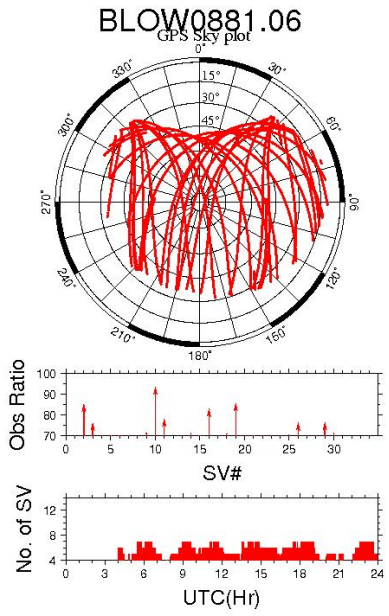
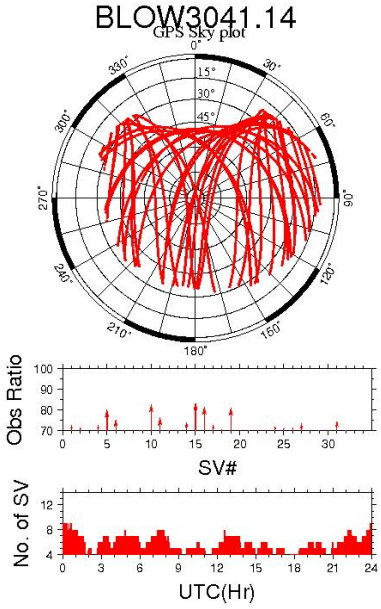
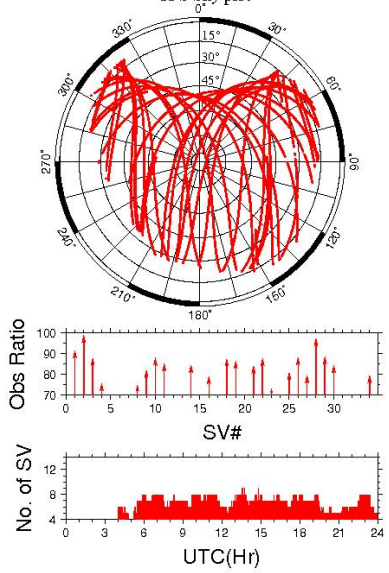
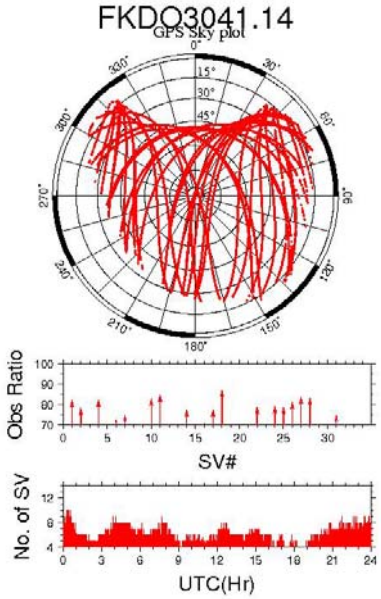


圖 2-1.2：地調所連續站和與其它單位所交換之連續站分布圖，共 250 站。圖中的各分網乃先行分別計算後再合併所有網進行網型平差，最後取得每站在一致之框架下之時間序列。

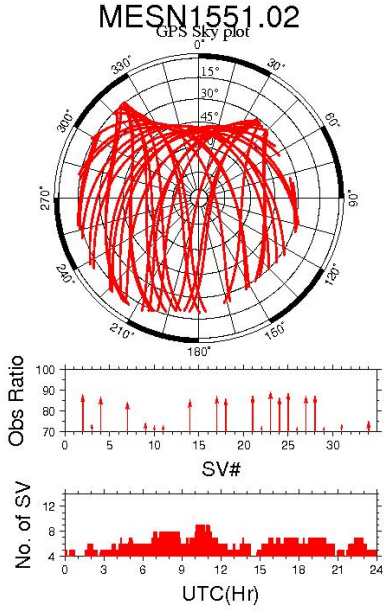
2-1-2 GPS 資料品質檢測

本報告統計自 2013 年 12 月至 2014 年 11 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 2014 年 10 月 31 日的點位透空圖可見得 BLOW 西方及南方、FKDO 西南方、MESN 東方以及 GUKW 南方均有建築物的遮罩。而 FKDO 東方、SANI 西方以及 GUKW 西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。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。

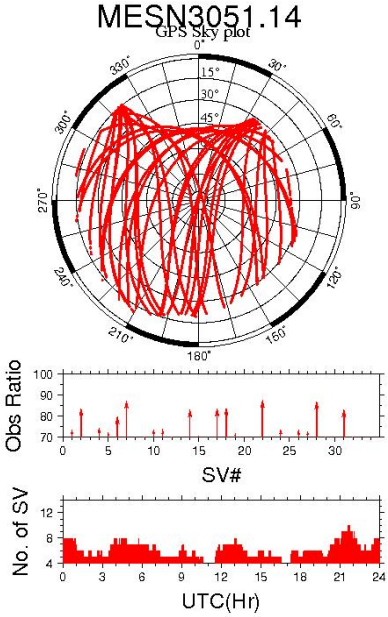
BLOW0881.06  (中央氣象局) 2006 設站初期	BLOW3041.14  (中央氣象局) 69.85 %
FKDO0881.06  (中央氣象局) 2006 設站初期	FKDO3041.14  (中央氣象局) 72.40 %

MESN1551.02



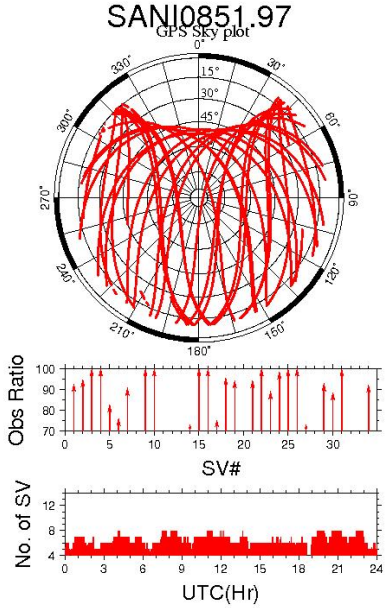
(中央研究院)
2002 設站初期

MESN3051.14



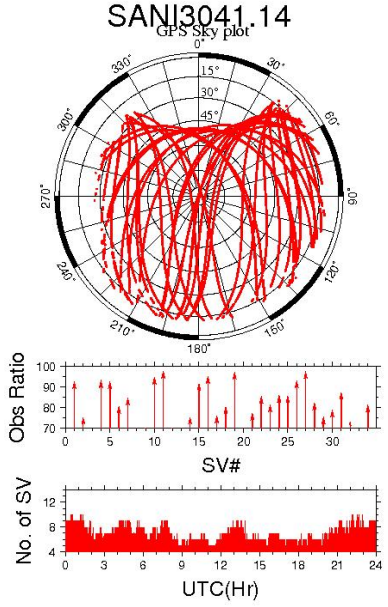
(中央研究院)
72.95 %

SANI0851.97

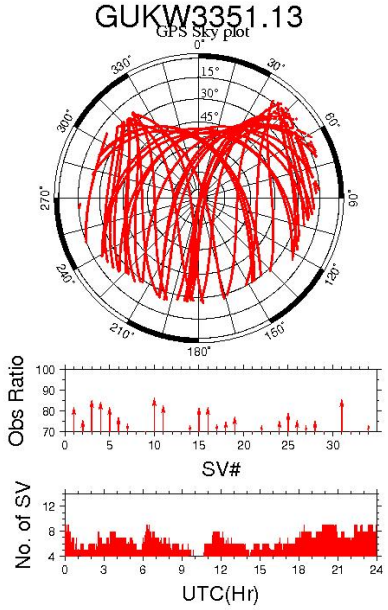
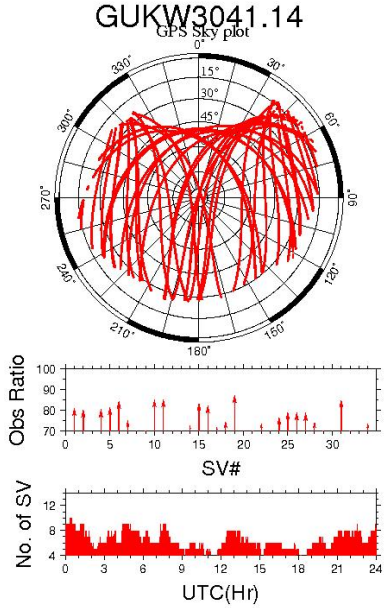


(中央氣象局)
1997 設站初期

SANI3041.14



(中央氣象局)
73.77 %

GUKW3351.13  (中央氣象局) 2013 資料初期	GUKW3041.14  (中央氣象局) 74.01 %

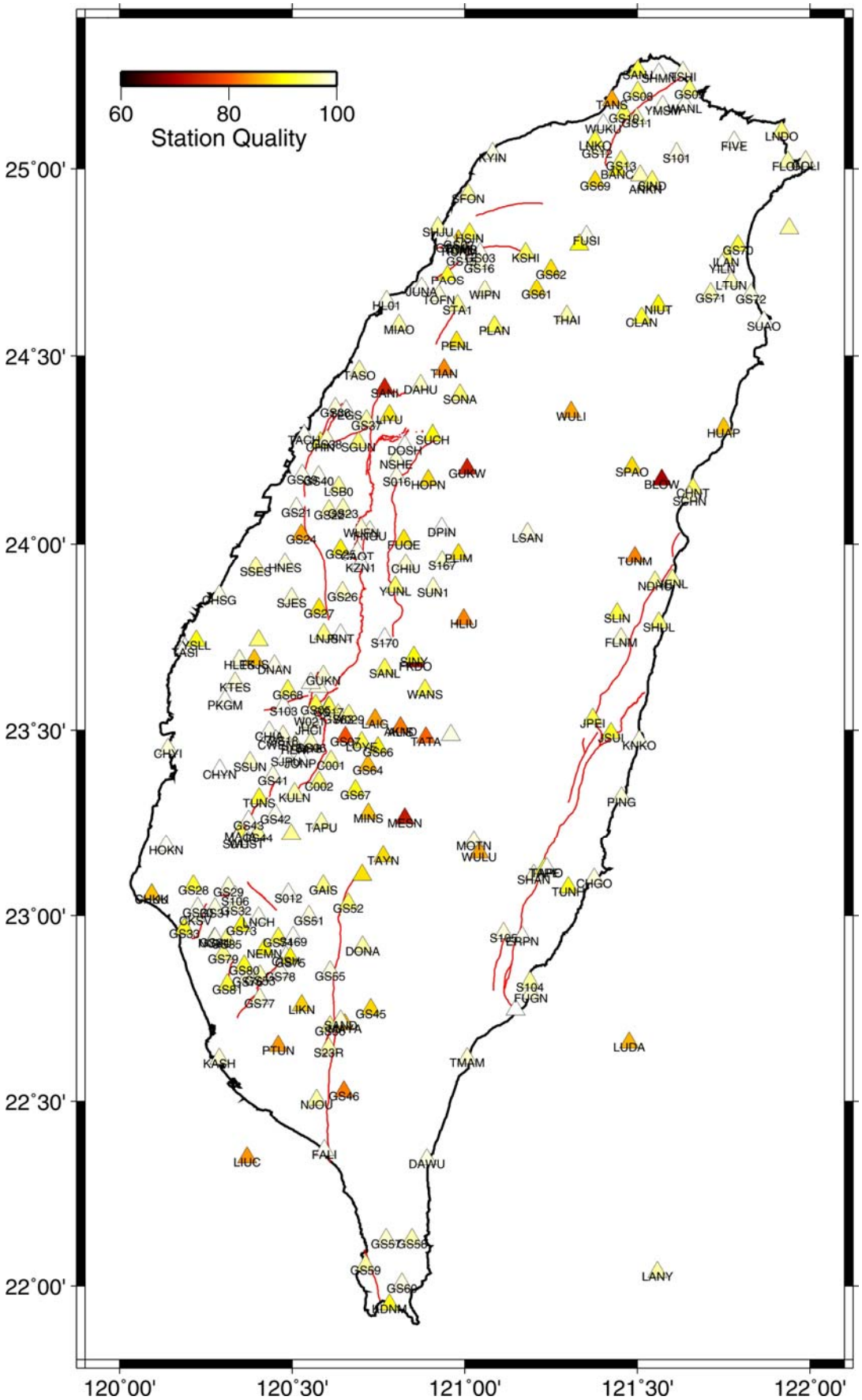


圖 2-1.3：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。

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 2013 年 12 月至 2014 年 11 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 2014 年 11 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，此結果與過去長期解算結果約略相同。

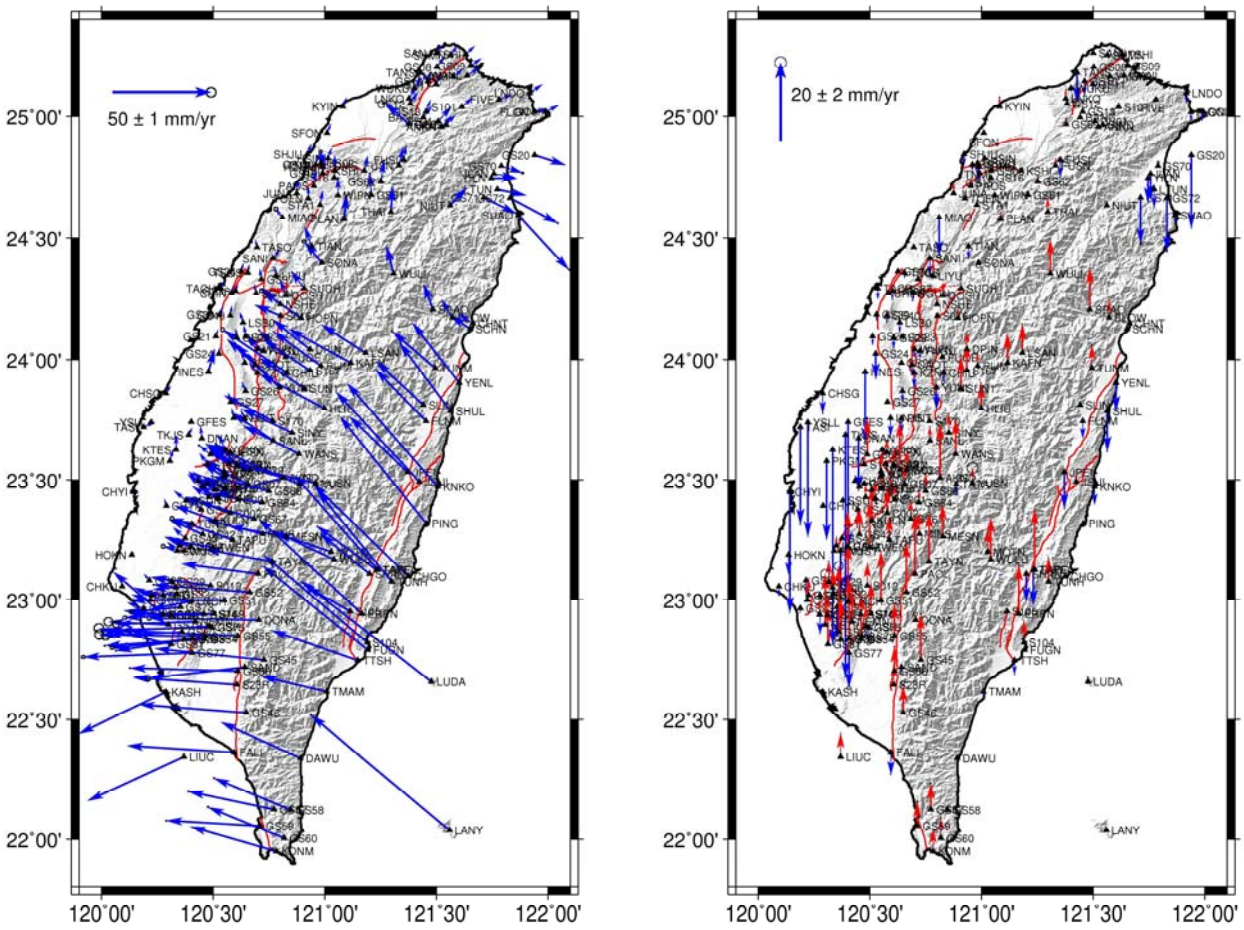


圖 2-1.4：整合歷史資料至 2014 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

2-1-4 鳳林地震同震位移分析

臺灣時間 2014 年 5 月 21 日 08 時 21 分花蓮鳳林地區發生一芮氏規模 5.9 的地震，其震央位於花蓮縣政府南偏西方 33.3 公里處（花蓮縣鳳林鎮），深度 18.0 公里。本研究團隊除了利用地震前後各三天單日解相減計算出地震發生時的同震變形外，同時整合其他單位 GPS 單日解同震位移速度場。由圖 2-1.5 可看出，各單位所擷取的地震前後天數不同，計算出來的同震變形位移量不僅大小不同，方向也不盡相同。由於此地震芮氏規模為 5.9，深度位於地下 18 公里處，要在地表上觀察到同震變形相當困難，因此各單位計算出來的同震變形量應該都還在 GPS 解算軟體的誤差範圍內，才會有如此大的差異。

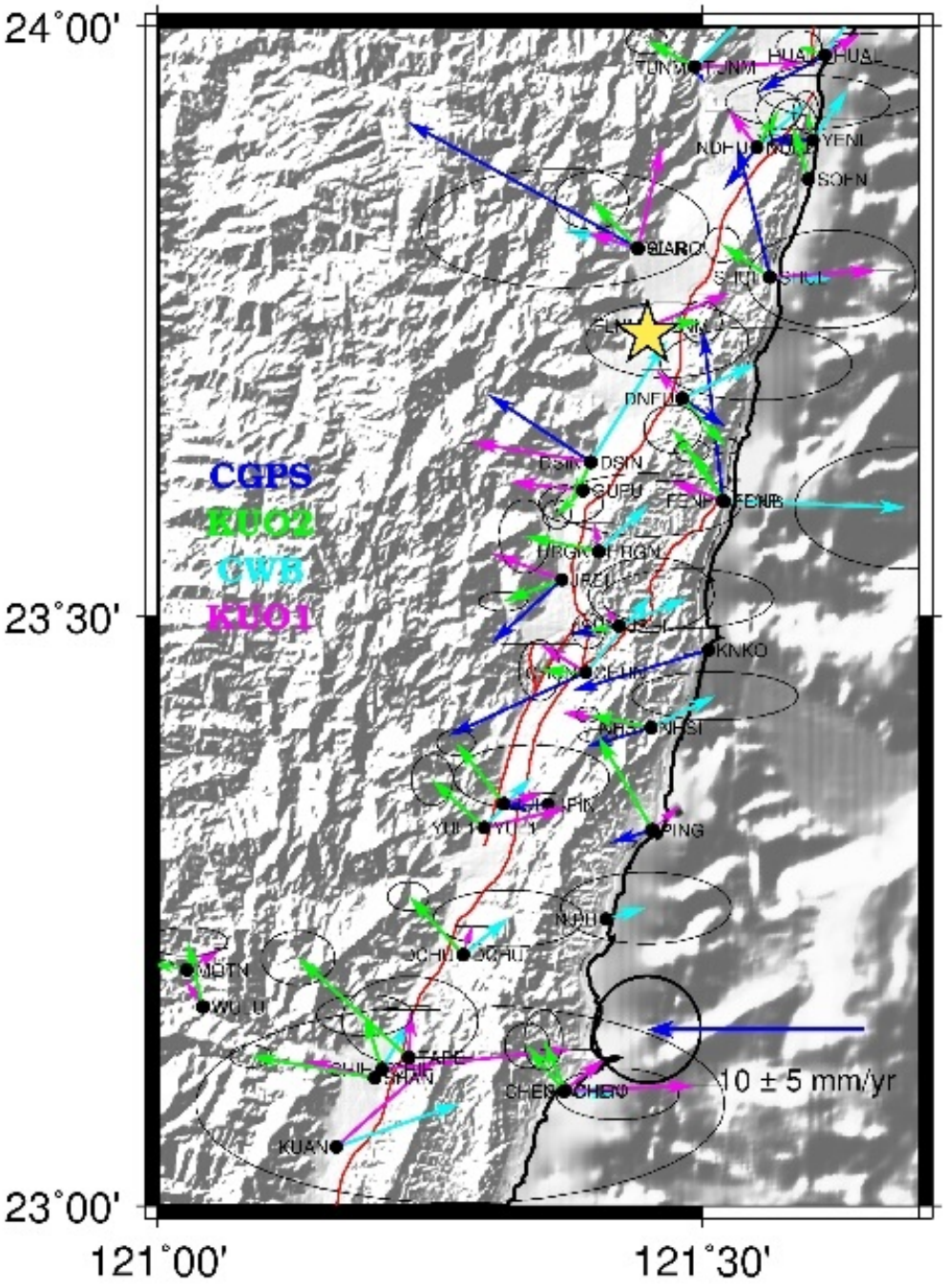


圖 2-1.5：2014521 鳳林地震同震變形圖（星星為地震震央位置）。

本研究團隊另針對此地震，利用 GAMIT/TRACK 計算高頻（1Hz）的資料，以期得到地震發生前後地表動態變形過程。故使用地調所位於臺灣西部嘉義縣竹崎鄉培英國小 GS07 測站作為初步點位來進行分析，從圖 2-1.7 中分析後結果可得知該地震並沒有觀察到有震前或震後的位移。探討其原因可能由於該地震震央位置位於臺灣東部花蓮縣，地震芮氏規模為 5.9，深度位於地下 18 公里處，而地調所連續 GPS 測站則都位於臺灣北部，西部以及南部，且根據上段中所提到之原因，要在地表上觀察到同震變形相當困難。

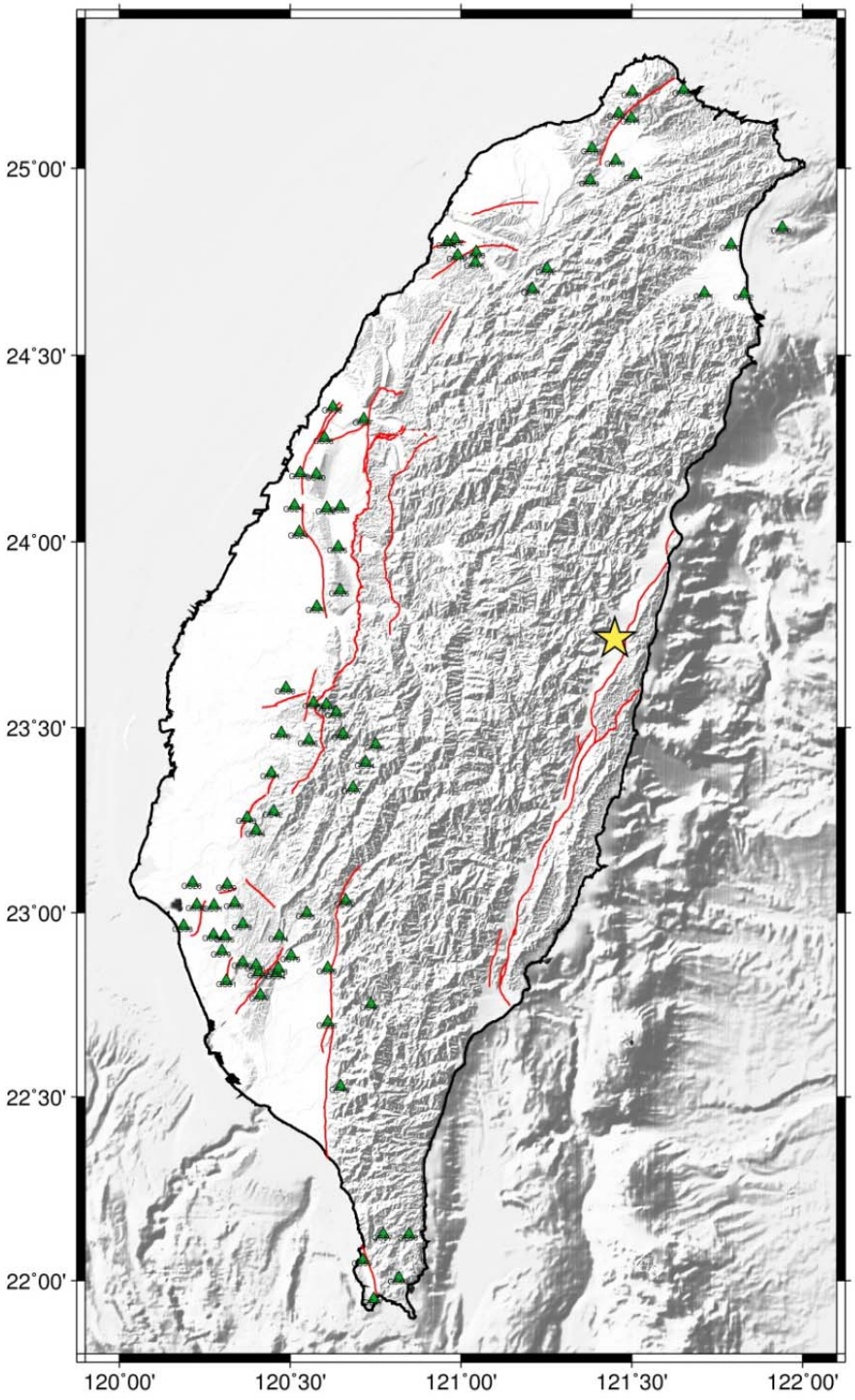


圖 2-1.6：地調所連續 GPS 測站分布圖（星星為地震震央位置）。

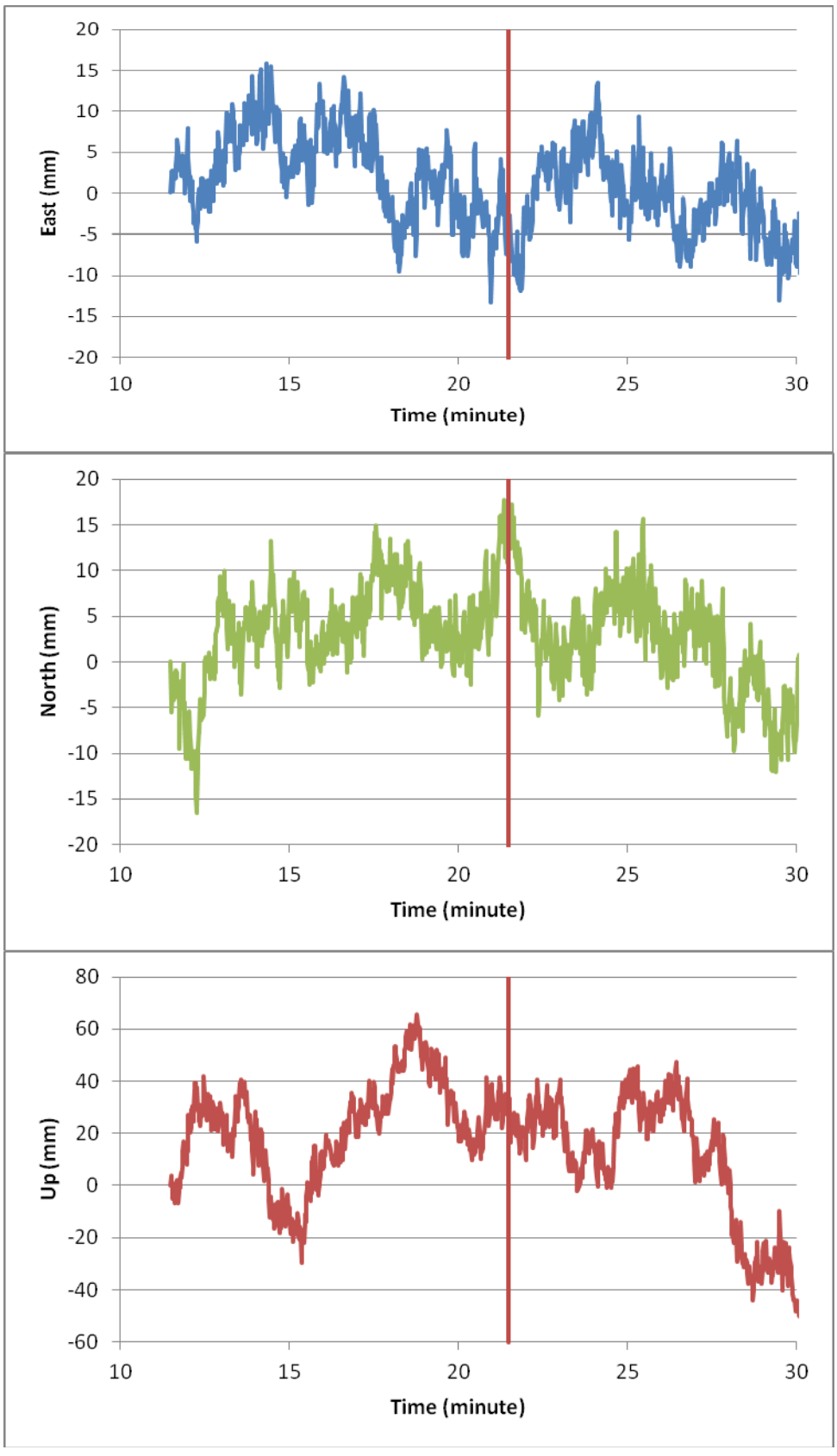


圖 2-1.7：測站 GS07 高頻動態解地震前後 10 分時間序列。紅線為 20140521 地震發震時間。

2-2 2014 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 ~ 2013 年及 2014 年 GPS 觀測資料之座標殘差分布情形。2002 ~ 2013 年資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 -0.1 ± 4.0 mm(2 倍標準差)、E 方向為 -0.2 ± 5.4 mm 及 H 方向為 -0.6 ± 14.2 mm。在 2014 年的資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 -0.2 ± 3.0 mm、E 方向為 -0.3 ± 3.9 mm 及 H 方向為 -0.6 ± 12.7 mm。

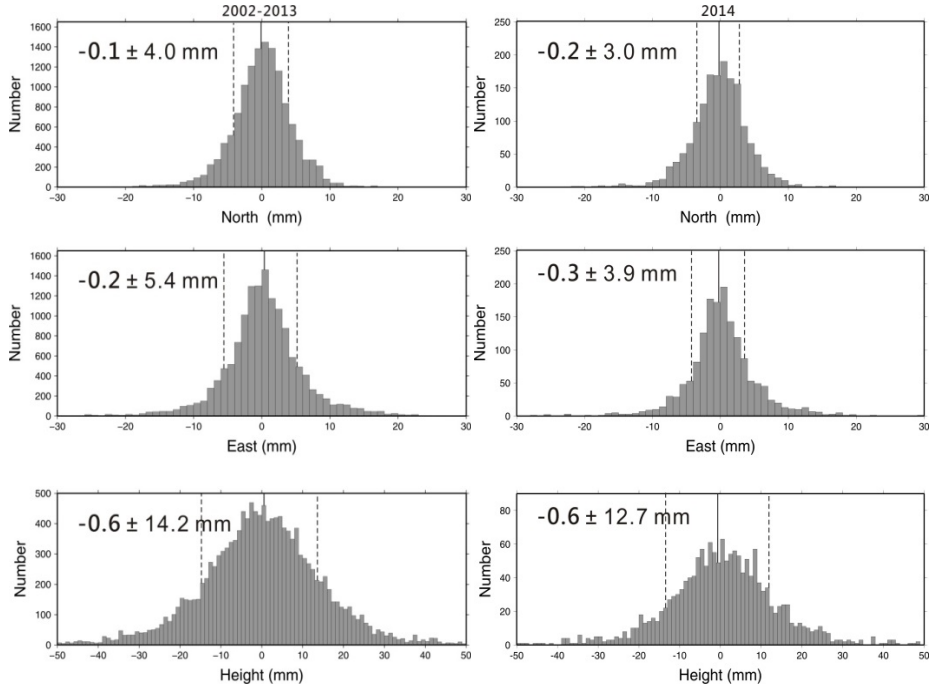


圖 2-2.1：2002 ~ 2013 年及 2014 年 GPS 點位座標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95%信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

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 ~ 2013 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.6 mm，在垂直方向的平均值為 23.3 mm，及 2014 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.8 mm，垂直方向的平均值為 21.5 mm。

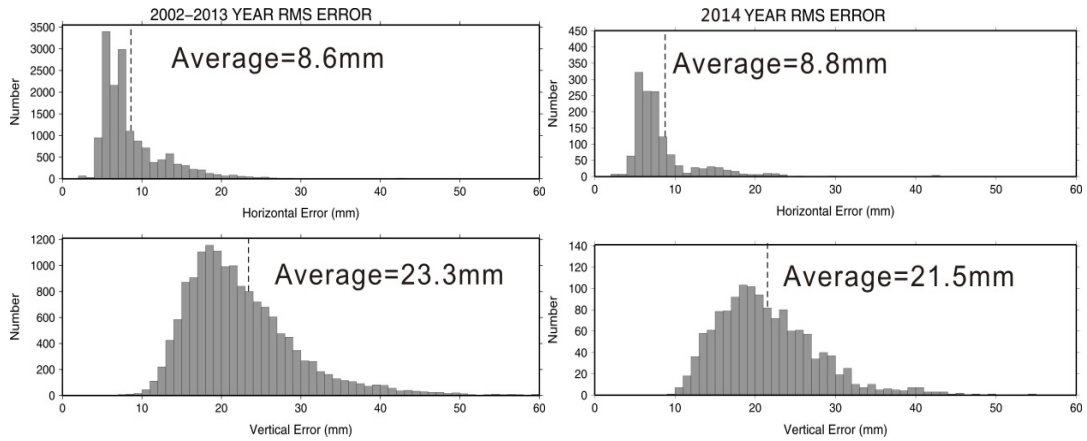


圖 2-2.2：2002 - 2013 年及 2014 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

2-2-4 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，嘉南地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.3 所示，黑色箭號表示 2002 年至 2013 年之速度場，速度量值 0.4 ~ 36.9 mm/yr，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2014 年之速度場，速度量值 0.2 ~ 37.2 mm/yr，結果顯示加入今年解算結果後，與去年成果大致吻合。

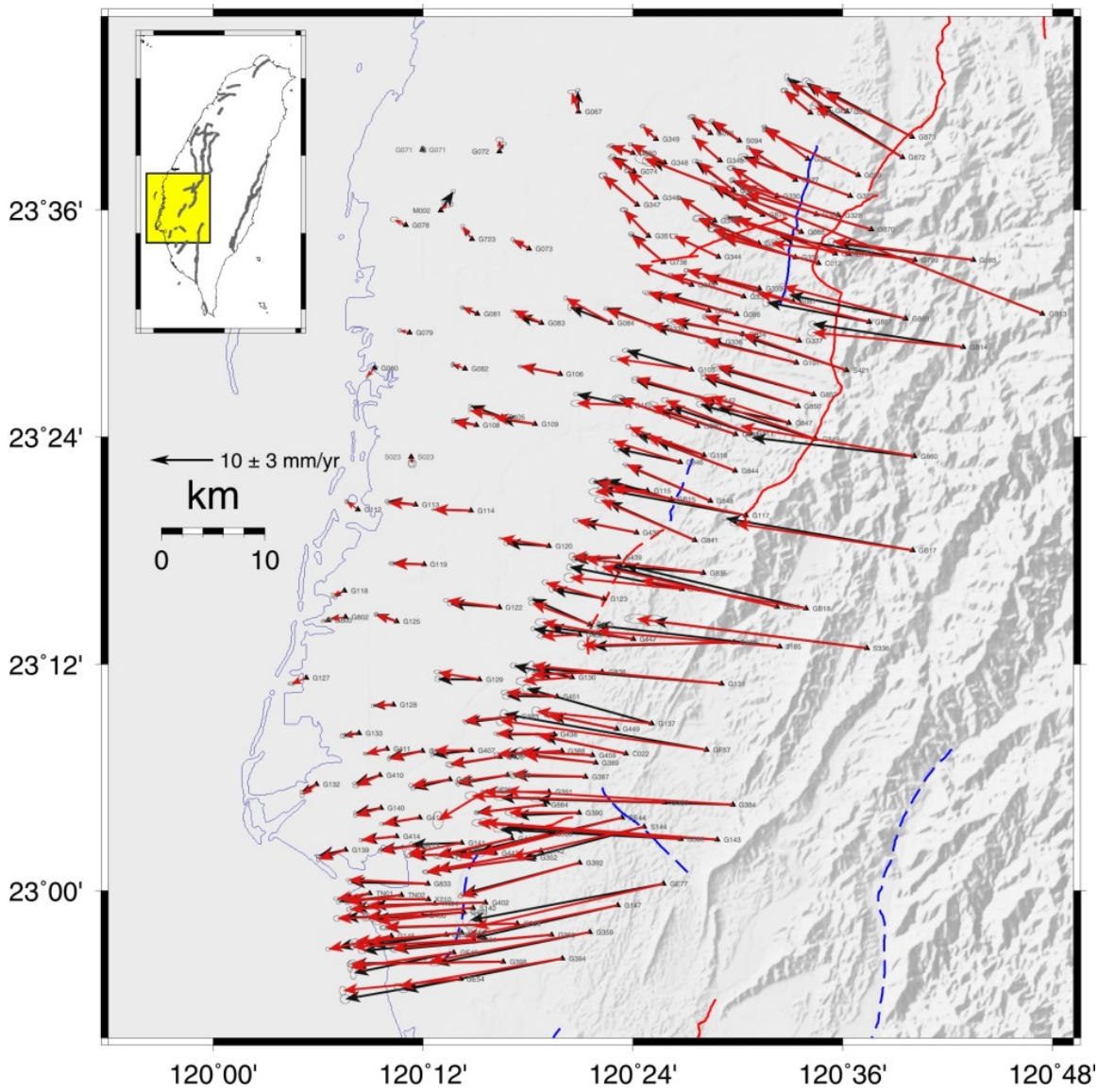


圖 2-2.3：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2014），黑色箭頭表示 2002 ~ 2013 年速度場解算結果。

2-2-5 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，高屏地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.4 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2014 年之速度場，速度量值 12.2 ~ 96.5 mm/yr，黑色箭號表示 2002 年至 2013 年之速度場，速度量值 12.9 ~ 97.5 mm/yr，結果顯示加入今年解算結果後，速度場與去年成果大致相符。

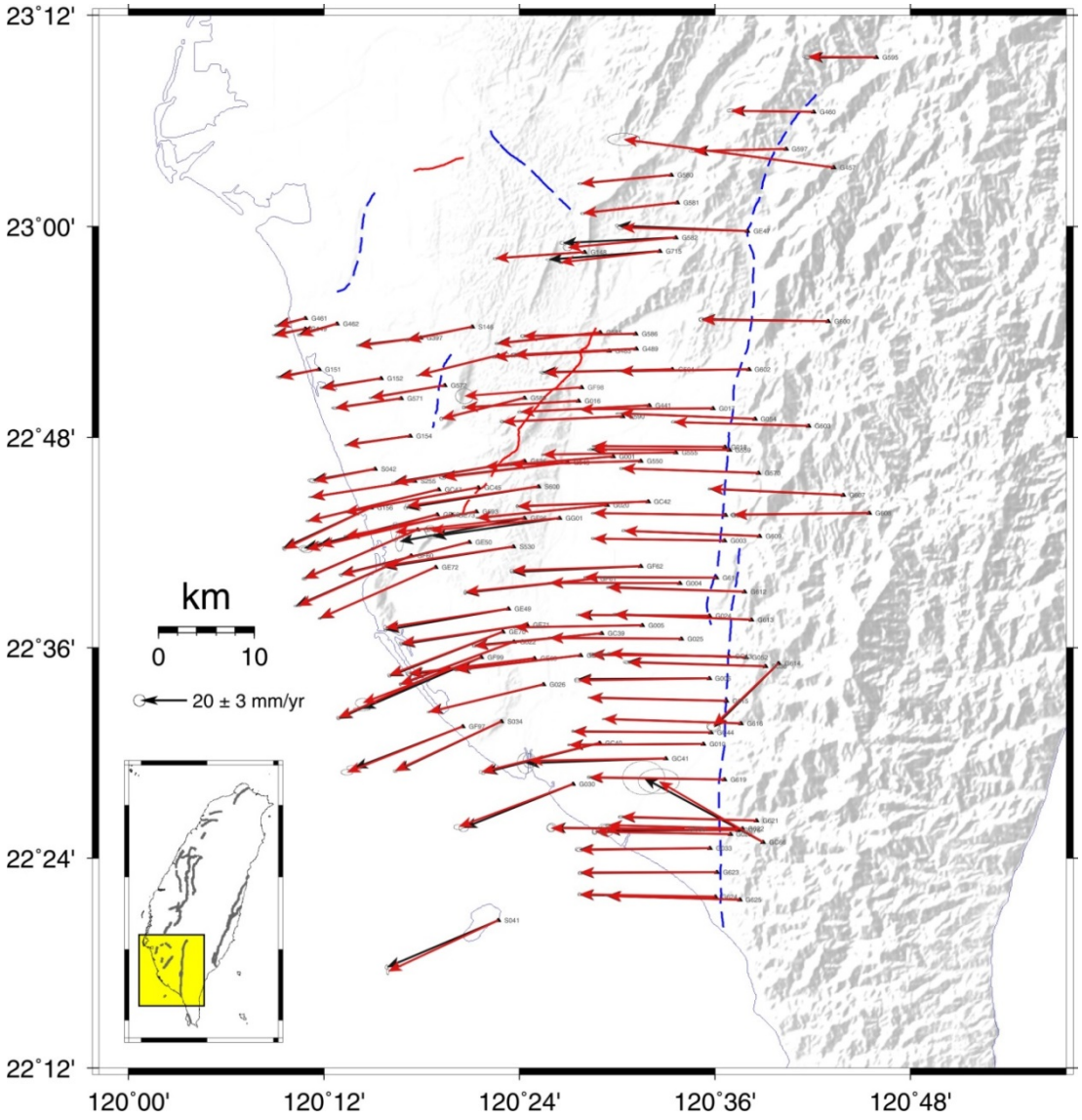


圖 2-2.4：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2014），黑色箭頭表示 2002 – 2013 年速度場解算結果。

2-2-6 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，中部地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.5 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2014 年之速度場，速度量值 1.1 ~ 44.9 mm/yr，黑色箭號表示 2002 年至 2013 年之速度場，速度量值 1.3 ~ 46.7 mm/yr，結果顯示加入今年解算結果後，速度場與去年成果大致相符。

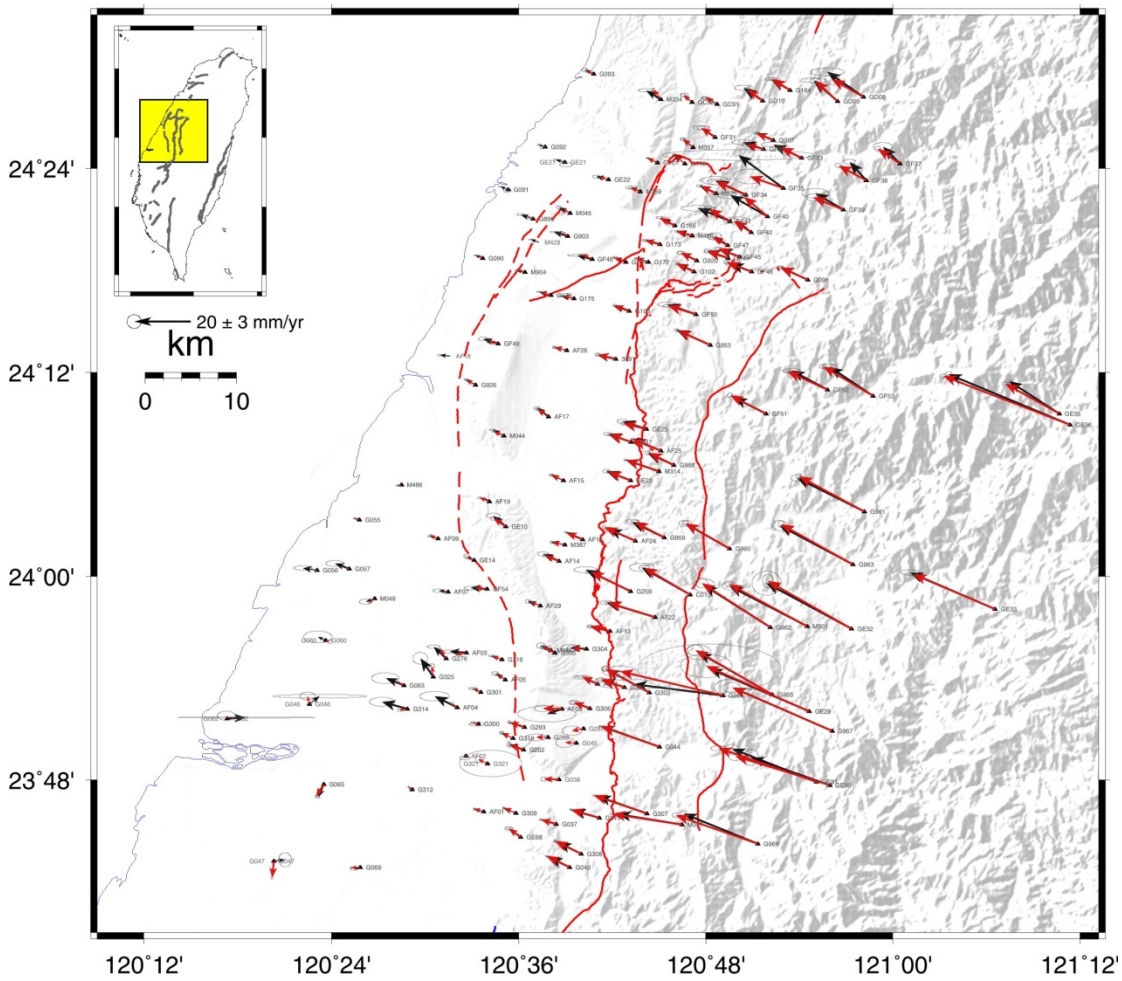


圖 2-2.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2014），黑色箭頭表示 2002 – 2013 年速度場解算結果。

2-2-7 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 2014 年，本節針對今年已完成測量之花東~~中部~~地區觀測資料進行分析，各觀測點位之速度值如圖 2-2.6 所示，速度向量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 23.8 ~ 39.1 mm/yr 增加至 51.2 ~ 70.3 mm/yr 再減少為 22.8 ~ 58.8 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸變大的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北，紅色箭號表示觀測時間為 2004 年至 2014 年之速度場，速度量值 22.8 ~ 70.3 mm/yr，黑色箭號表示 2004 年至 2013 年之速度場，速度量值 21.8 ~ 69.5 mm/yr，結果顯示加入今年解算結果後，速度場與去年成果大致相符。

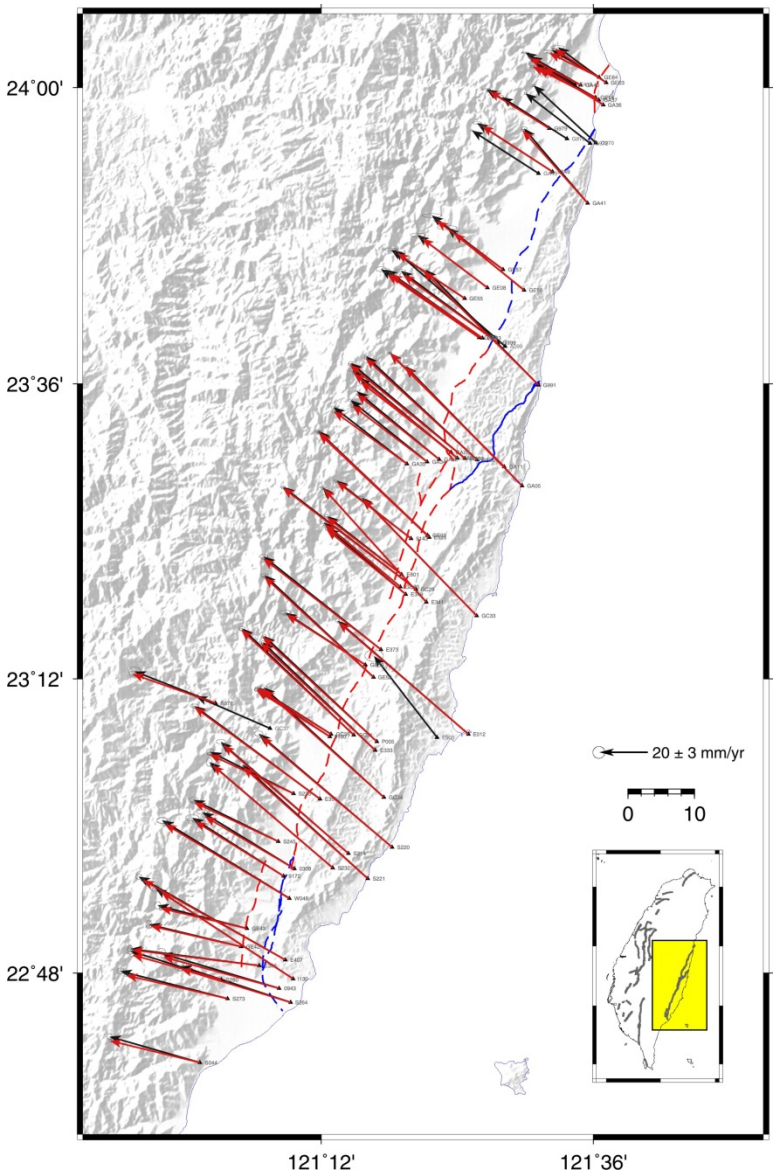


圖 2-2.6：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2004- 2014），黑色箭頭表示 2004 – 2013 年速度場解算結果。

2-2-8 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 7 次 GPS 觀測資料，且透過 2002 年至 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 2014 速度場分為三個時間段討論。

恆春地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.7 所示，藍色箭頭表示屏東外海地震前 2002 年至 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 年至 2010 年速度場，速度量值 44.2 ~ 59.6 mm/yr，黑色箭號表示 2010 年至 2014 年之速度場，速度量值 41.5 ~ 54.3 mm/yr。

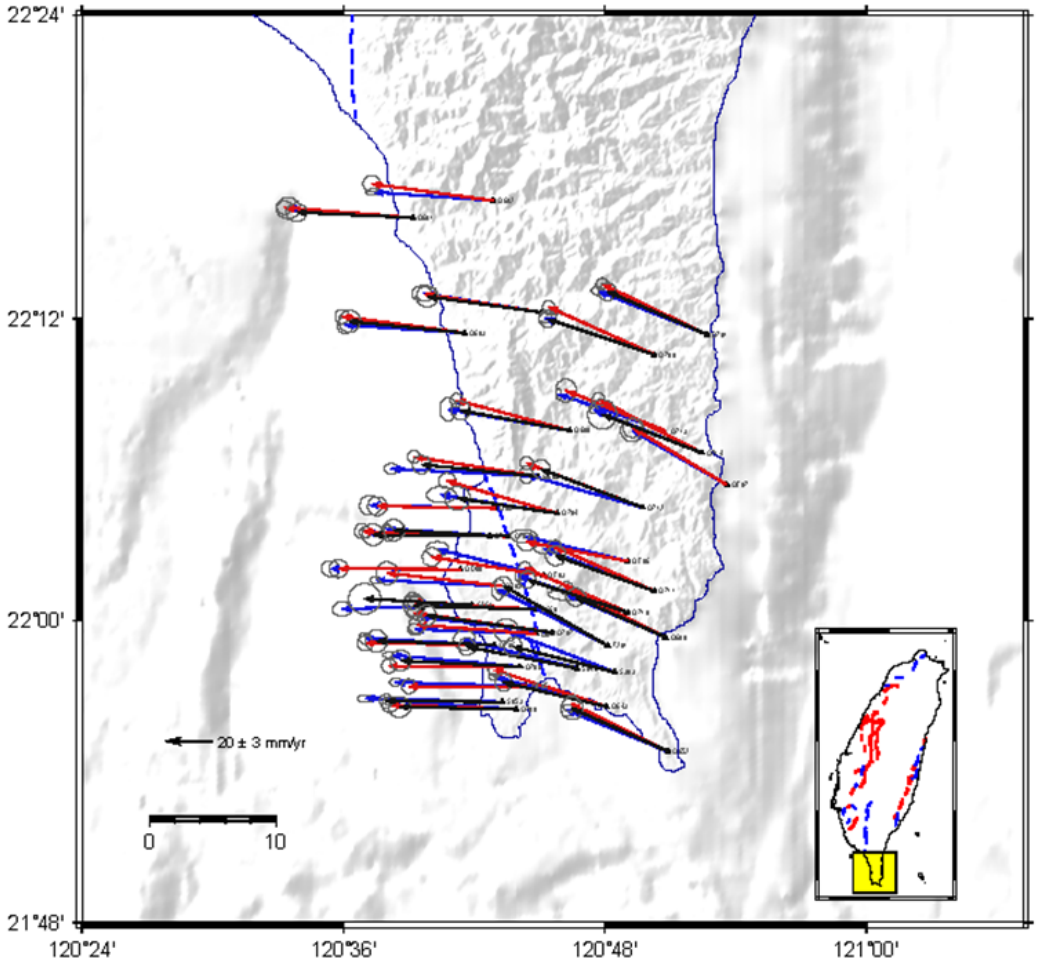


圖 2-2.7：恆春地區相對於澎湖白沙站(S01R)之 GPS 水平方向速度場，藍色箭頭表示屏東外海地震前 2002 ~ 2006 年速度場，紅色箭頭表示震後 2007 ~ 2010 年速度場，黑色箭頭表示震後 2010 ~ 2014 年速度場。

2-2-9 臺北宜蘭地區 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 2-2.8 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2014 年之速度場，臺北地區速度量值 0.2 ~ 9.9 mm/yr，宜蘭地區速度量值 3.6 ~ 39.5 mm/yr，其中 GF94、GG39 至 GG57 等點位因為僅有 3 次觀測，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。

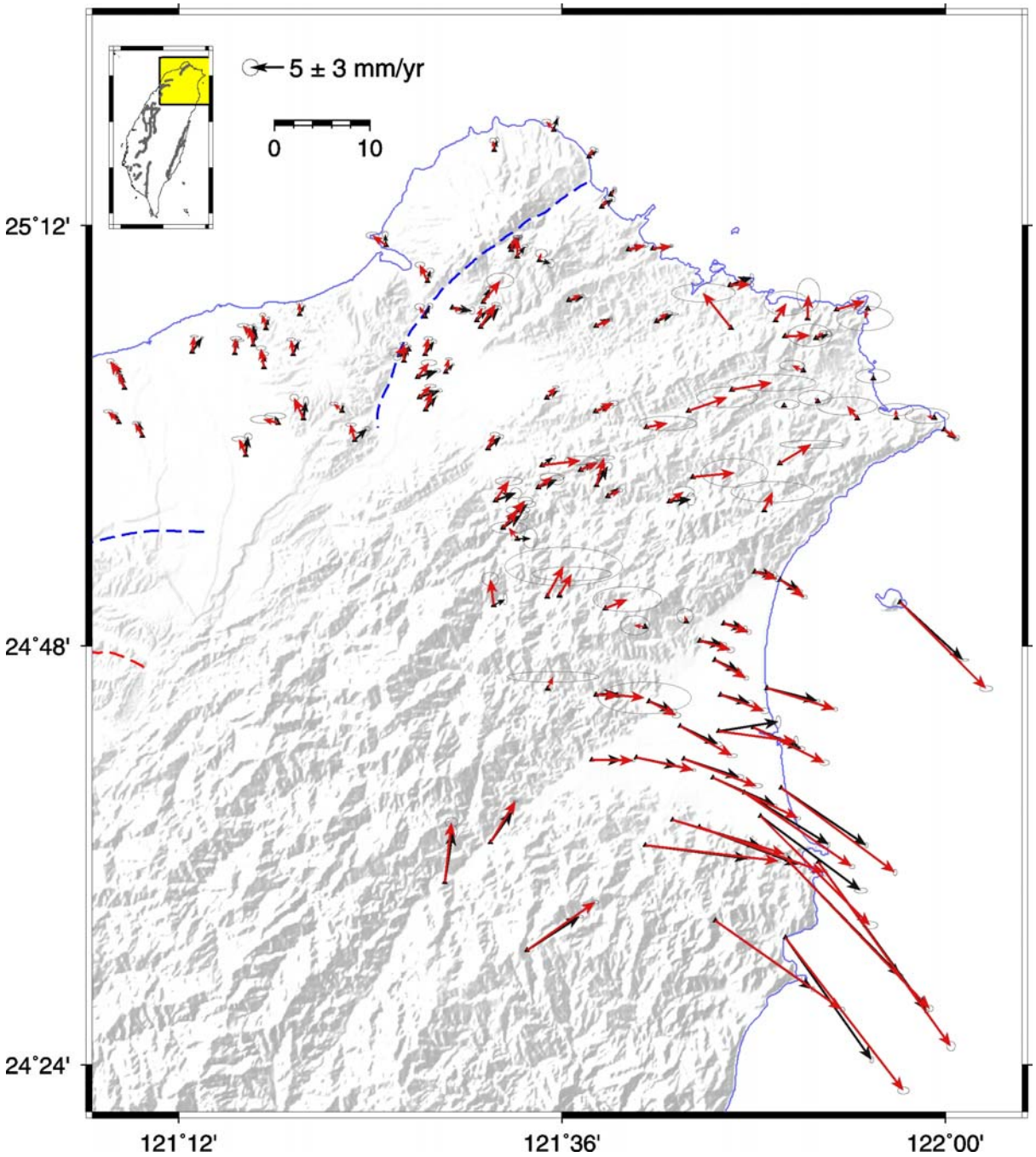


圖 2-2.8：臺北宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2014），黑色箭頭表示 2002 – 2013 年速度場解算結果。

2-2-10 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苗地區觀測資料進行分析，桃竹苗地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.9 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2014 年之速度場，速度量值 1.0 ~ 11.1 mm，其中 GE24（關西國中）及 G416（五峰國小）速度場與該地區趨勢不符合，可能的原因為邊坡滑移所造成。

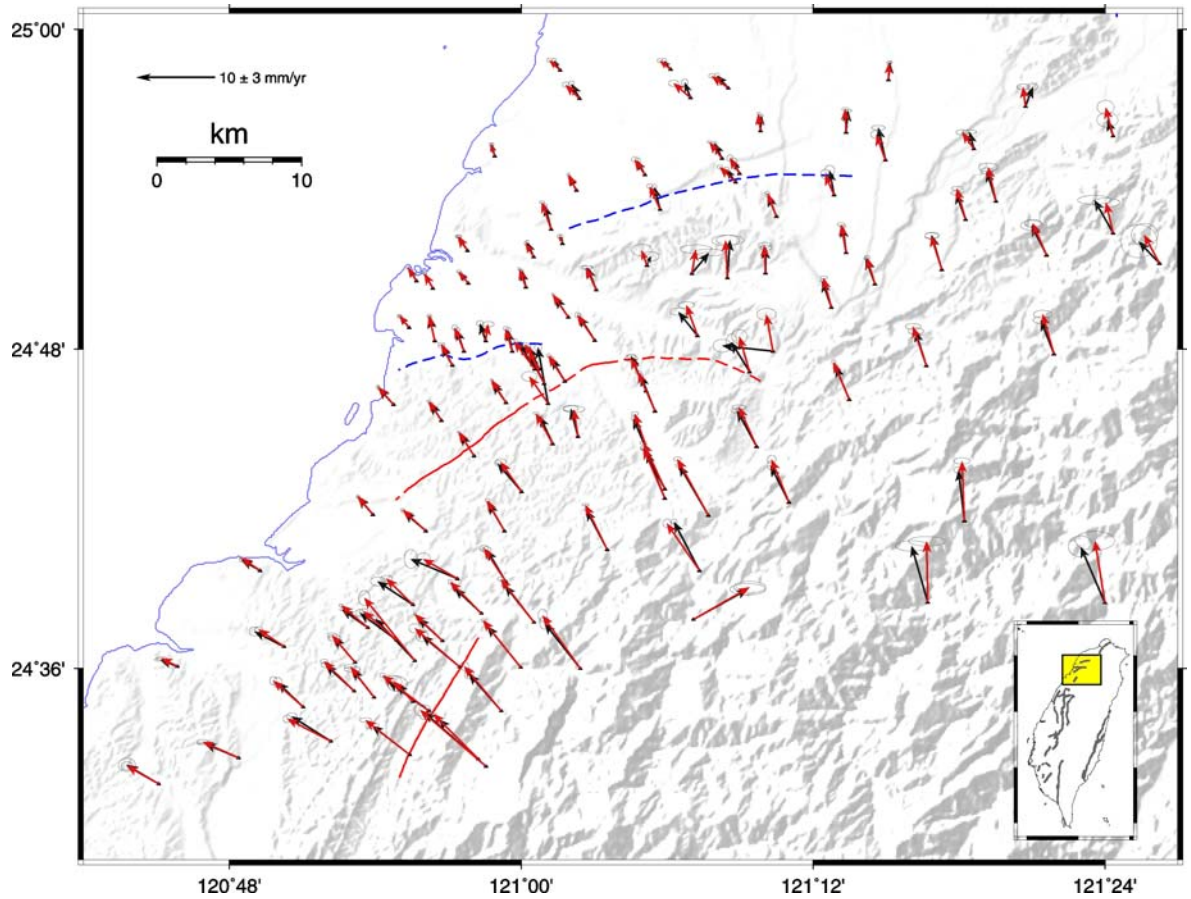


圖 2-2.9：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2014），黑色箭頭表示 2002 – 2013 年速度場解算結果。

2-2-11 GPS 移動站異常點位清查

在上一年度藉由高時間解析之 GPS 連續站每日解算成果，獲得更可靠之移動站速度場，但在利用速度場分析地表活動時，仍有可能因為區域的環境差異，如地下水超抽造成的高程沉陷、地滑崩塌或現地施工，使得解算結果無法反映因構造所造成的實際位移，因此進行現地勘查及比對座標時間序列以釐清原因，以助於增加觀測資料的可靠性，若確認為非構造因素的異常點位，則可減少觀測頻率或停止施測。

由解算結果及速度場分布（圖 2-2.10）可知桃竹地區速度異常點位為 G416（五峰國小）、GE24（關西國中）及 T007（園區內）。G416 由座標時間序列可知座標位移呈連續變化（圖 2-2.11a），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 2-2.12）。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 2-2.13），2010 年前後座標時間序列的分布形態不同（圖 2-2.11b），以 2011 年至 2014 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 2-2.14），整修前後的座標時間序列分布型態相符（圖 2-2.11c），推測為施工造成點位移動，建議持續觀測。

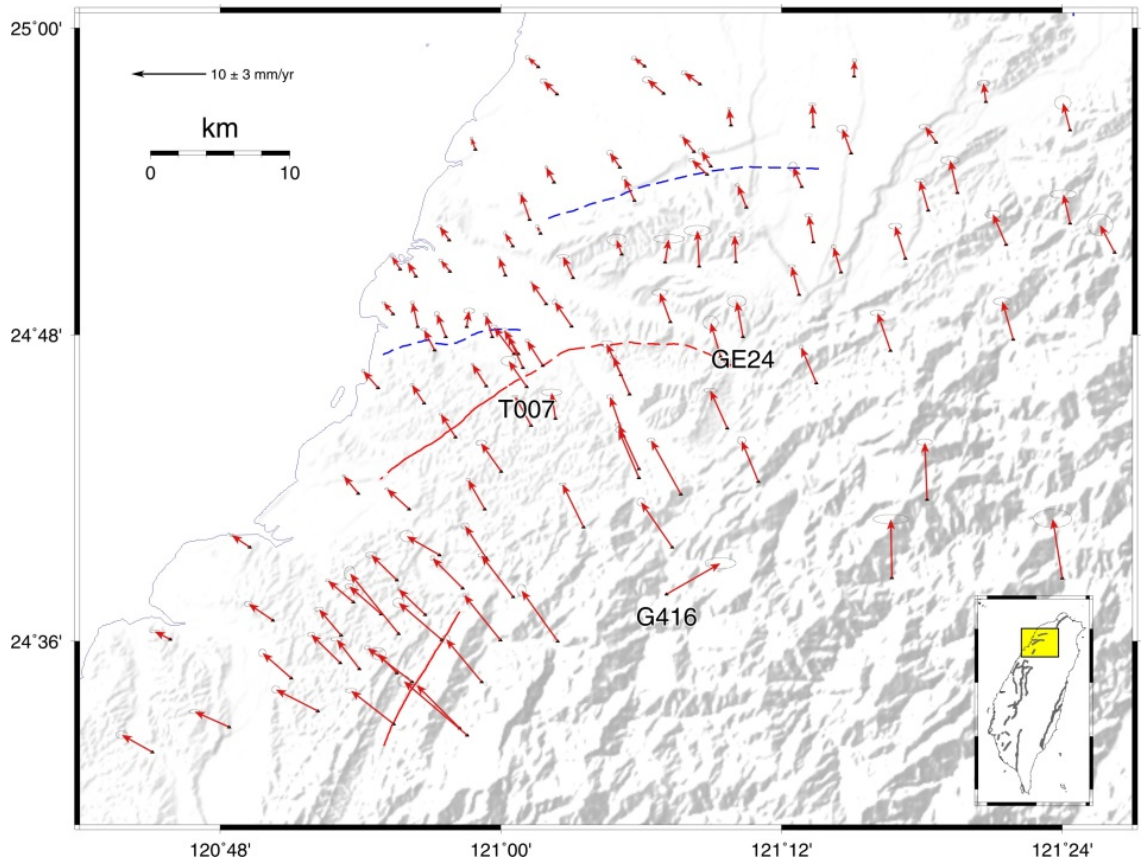


圖 2-2.10：桃竹地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場解算結果。

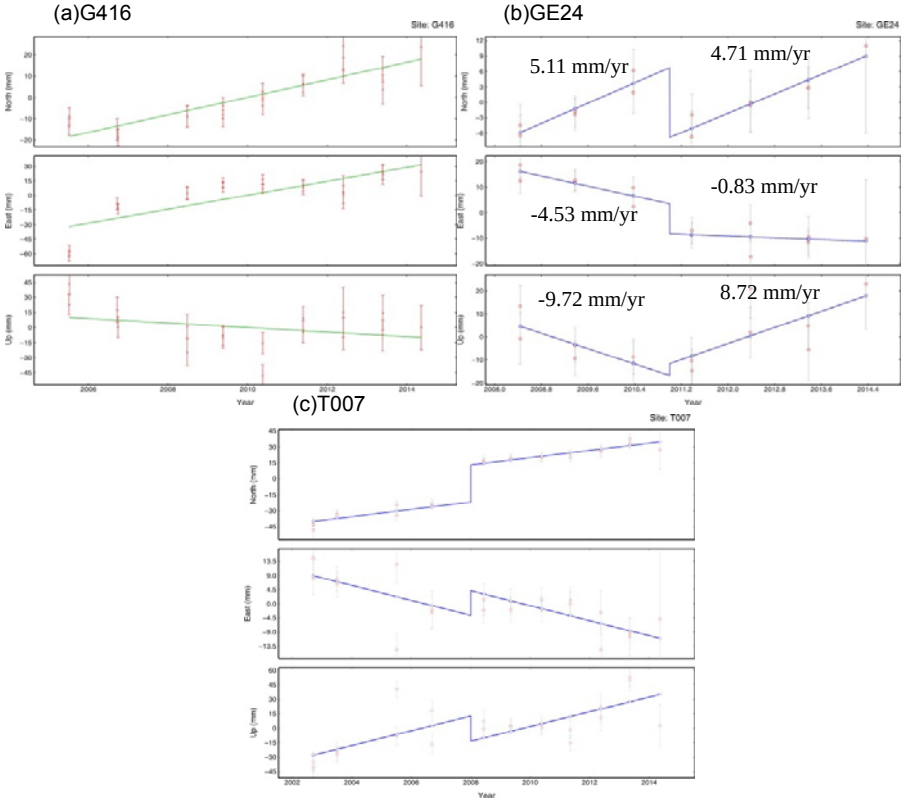


圖 2-2.11：2006 - 2014 年移動測站 G416（五峰國小）、GE24（關西國中）及 T007（園區內）相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。



圖 2-2.12： G416（五峰國小）移動測站現場照片。



圖 2-2.13：GE24（關西國中）移動測站現場照片。



圖 2-2.14：T007（園區內）移動測站現場照片。

由解算結果及速度場分布（圖 2-2.15）可知中部地區速度異常點位為 G047（潮厝國小）及 GF35（東興國小），G047 及 GF35 皆位於學校操場內，操場於分別在 2010 年進行整修，整修前後的座標時間序列分布型態相符（圖 2-2.16），推測為施工造成點位移動，建議持續觀測（圖 2-2.17）。

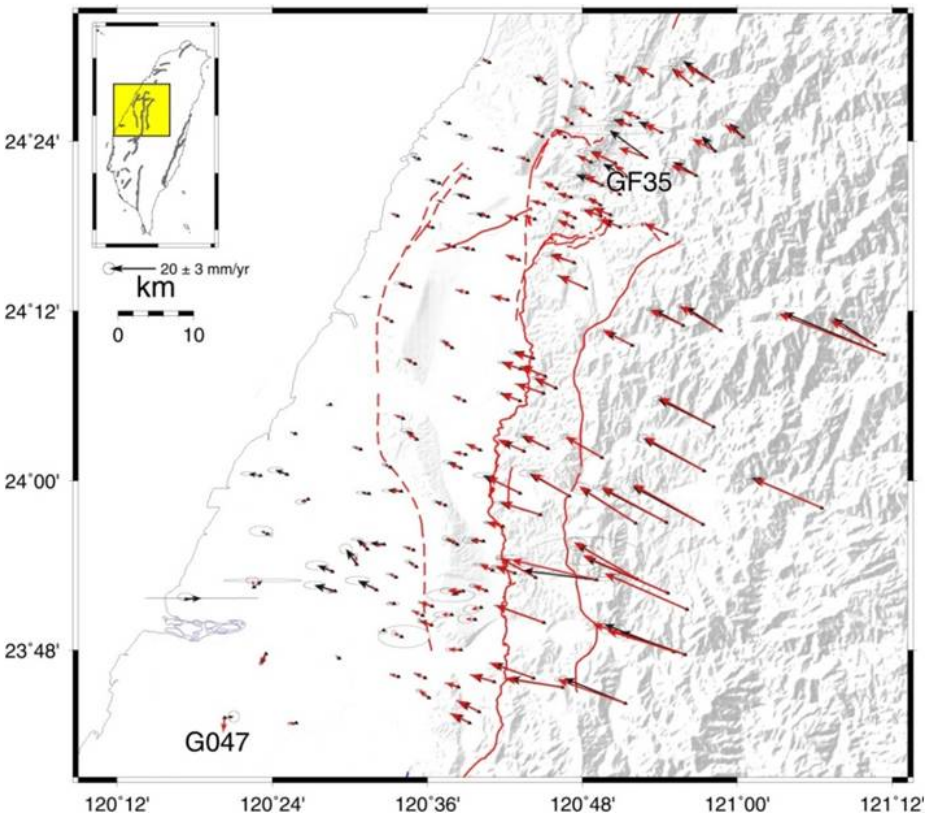


圖 2-2.15：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場解算結果。

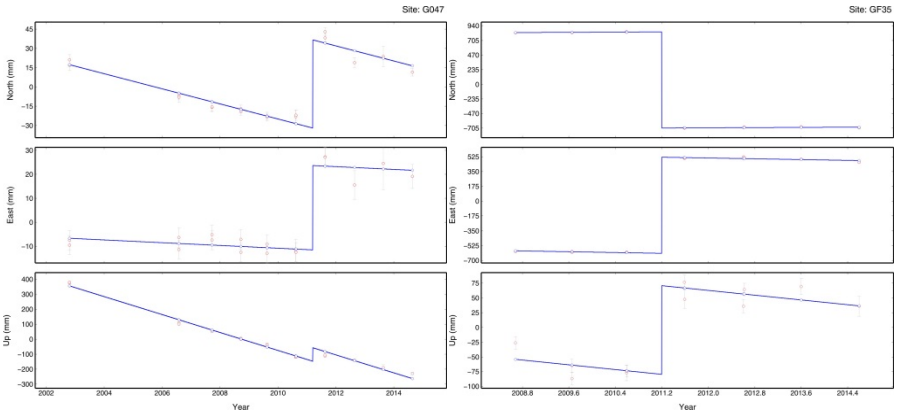


圖 2-2.16：2006 - 2014 年移動測站 G047（潮厝國小）及 GF35（東興國小）相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。



圖 2-2.17：GF35（東興國小）移動測站現場照片。

2-2-12 全台水平速度場

宜蘭地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2014 年，本區域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 GPS 資料觀測時間自 2003 至 2014 年，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 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2014 年，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 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2014 年，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。

高屏地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2014 年，本區域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 至 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 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2014 年，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。

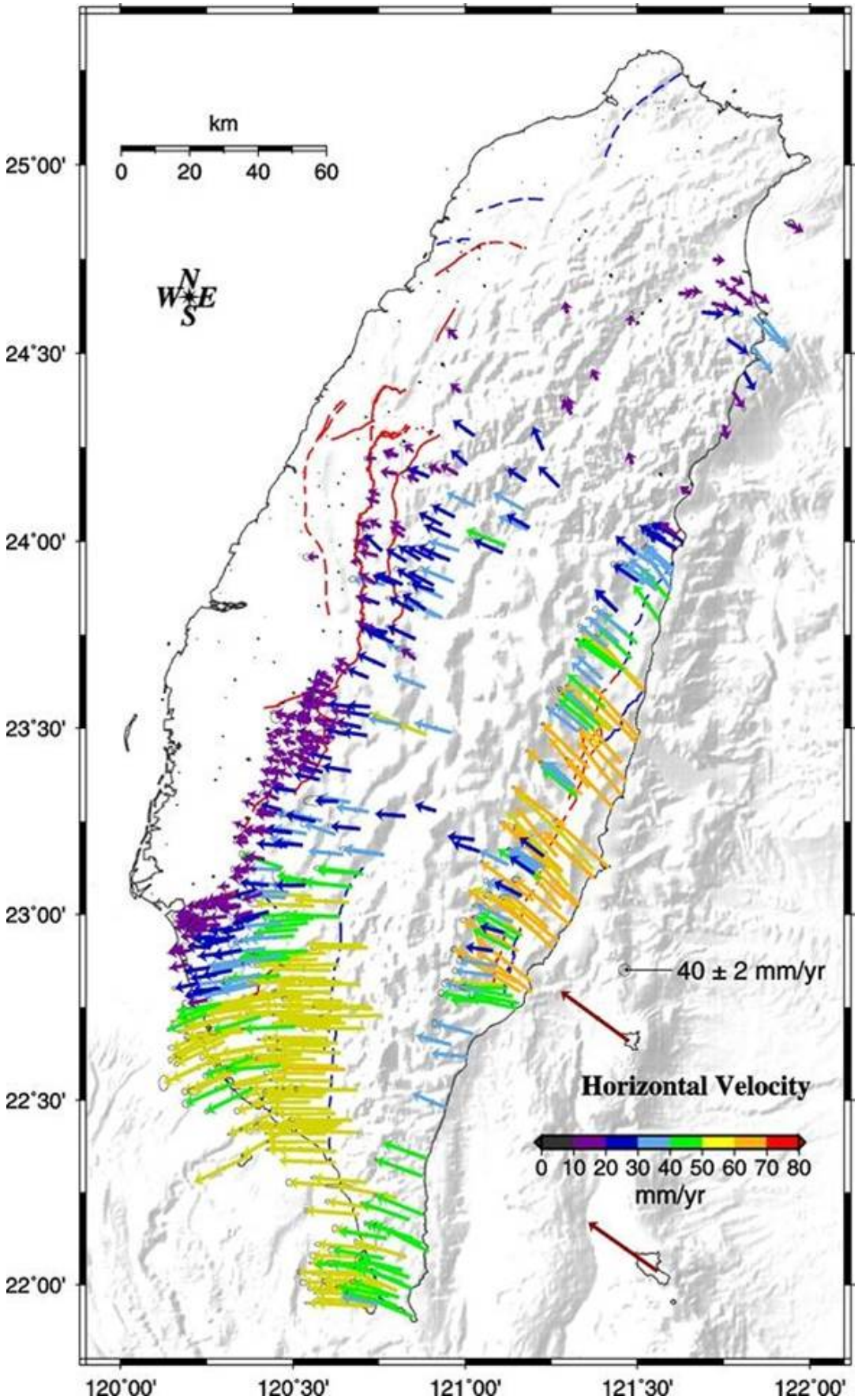


圖 2-2.18：台灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向 2002 – 2014 年速度場解算結果。

2-3 精密水準測量精度分析

截至 2014 年 10 月 31 日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」、「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 136_龍井至太平測線」、「縣 164_金湖至瑞峰測線」、「佳冬至七佳測線」、「嶺頂至瀧澗測線」、「光復至豐濱測線」、及「紅葉至靜浦測線」、「縣 132_大安至東勢測線」、「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 174_北門至楠西測線」、「縣 182_安平至龍崎測線」、「縣 184_路竹至茂林主、副線」、「台 22_岡山至安坡測線」、「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_善化至關廟測線」、「東成至富岡測線」及「台 2_梗枋至東澳測線」等 29 條主、副測線，以及「五光至黃竹測線」跨車籠埔斷層之短測線。

2014 年 10 月底前所獲得共計 1099 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 1053 個測段（圖 2-3.1a），佔所有測段比例之 95.8%。測段往返閉合差精度小於$1.5\sqrt{k}$者，佔所有測段比例為 88.6%（974 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 97.2%（1067 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 1046 個測段達測段達 95.1%（圖 2-3.1b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

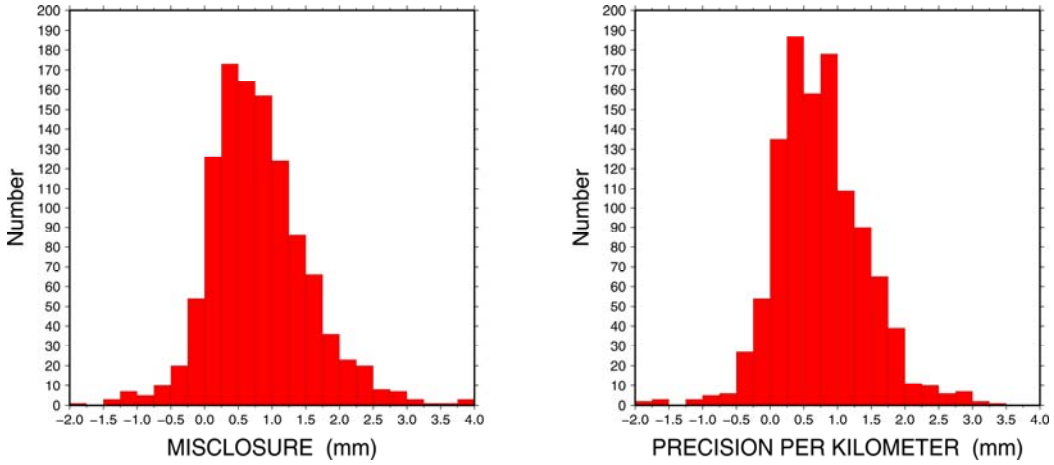


圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。（a）為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.25 mm 上。（b）為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.25 mm 上。

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 2014 年間共施測 11 次，分別於 2004 ~ 2005 及 2007 ~ 2014 年間的 9 月份、2006 年 8 月間進行。本測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-2.23 mm/yr 與-2.65 mm/yr），作為控制點 2027 和 0807 之垂直速率。由圖 2-3.2 顯示，本測線垂直速度均落在 -5 至-2 mm/yr 之間，此結果顯示 2004-2014 年間，山腳斷層在該區域並未有明顯之活動性。然該測線在 8 ~ 10 km 處及 16 ~ 18 km 處分別有 5mm 和 3mm 的高程變化量，與地調所公佈之山腳斷層地表位置相關，可能屬於山腳斷層及其分支斷層的活動現象。

此外，水準點位 0811（香菓園）在 2011 年至 2013 年間發生異常的抬升與沉陷，經現地勘查發現，該點位於路旁水溝邊緣，底部懸空進而影響觀測品質，建議重新埋設此點（圖 2-3.3）。

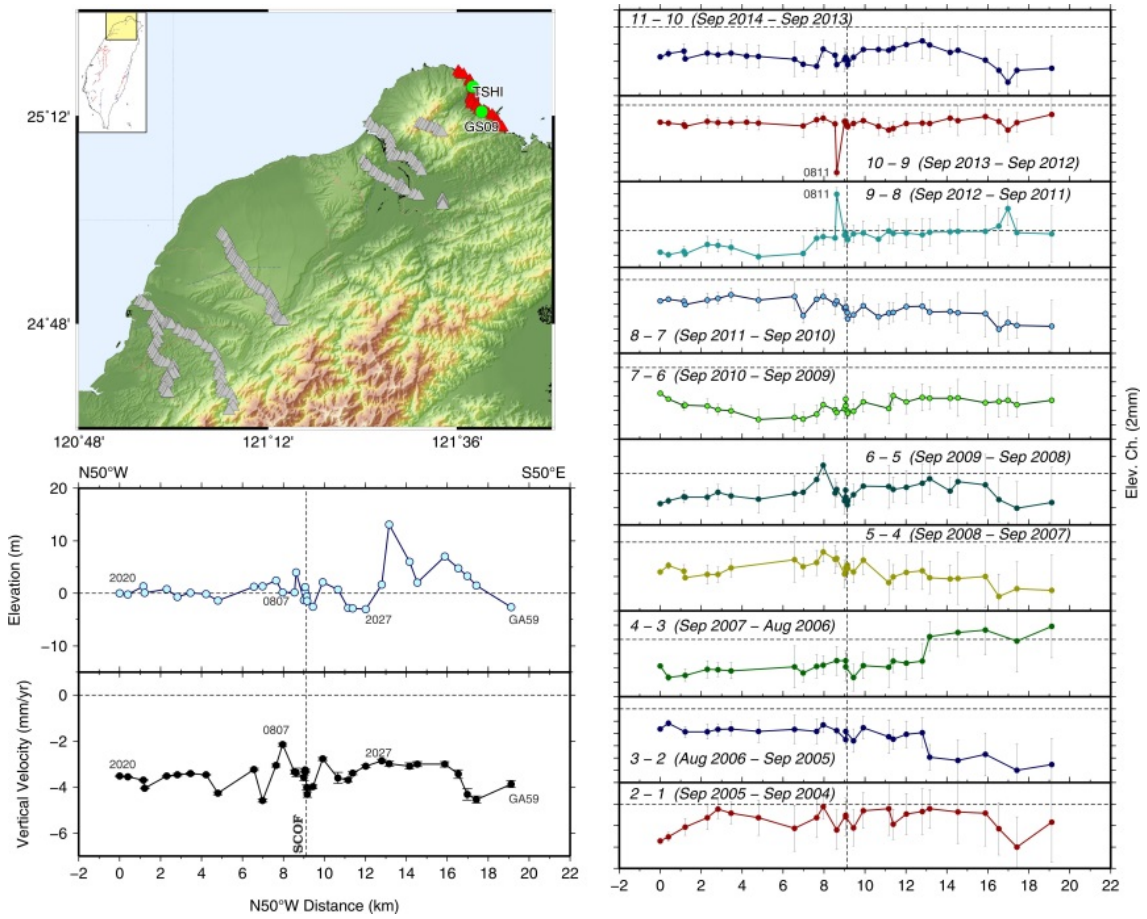


圖 2-3.2：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。左側上欄為固定西側點位高程為 0 m 之地形變化，左側下欄為水準平均抬升速率。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。



圖 2-3.3：水準點位 0811 現地情形。

2-3-3 三芝至士林測線

本測線跨越山腳斷層，測線長約 6 公里。該測線 2004 至 2014 年間共進行 11 次測量，分別於 2004 ~ 2005 及 2007 ~ 2014 年的 9 月、2006 年 8 月間進行。本測線以 GPS 連續站 YM01、YM05 和 YMSM 之垂直速率（0.16 mm/yr、-1.05 mm/yr、0.09 mm/yr），作為控制點 GF66 即 GB06 之垂直速率。此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側，由圖 2-3.4 結果顯示，本區域跨斷層之水準垂直速度變化介於 -3 至 2 mm/yr 之間，在跨斷層後有較明顯的變化，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，需要長時間的監測以及與其他資料的佐證。

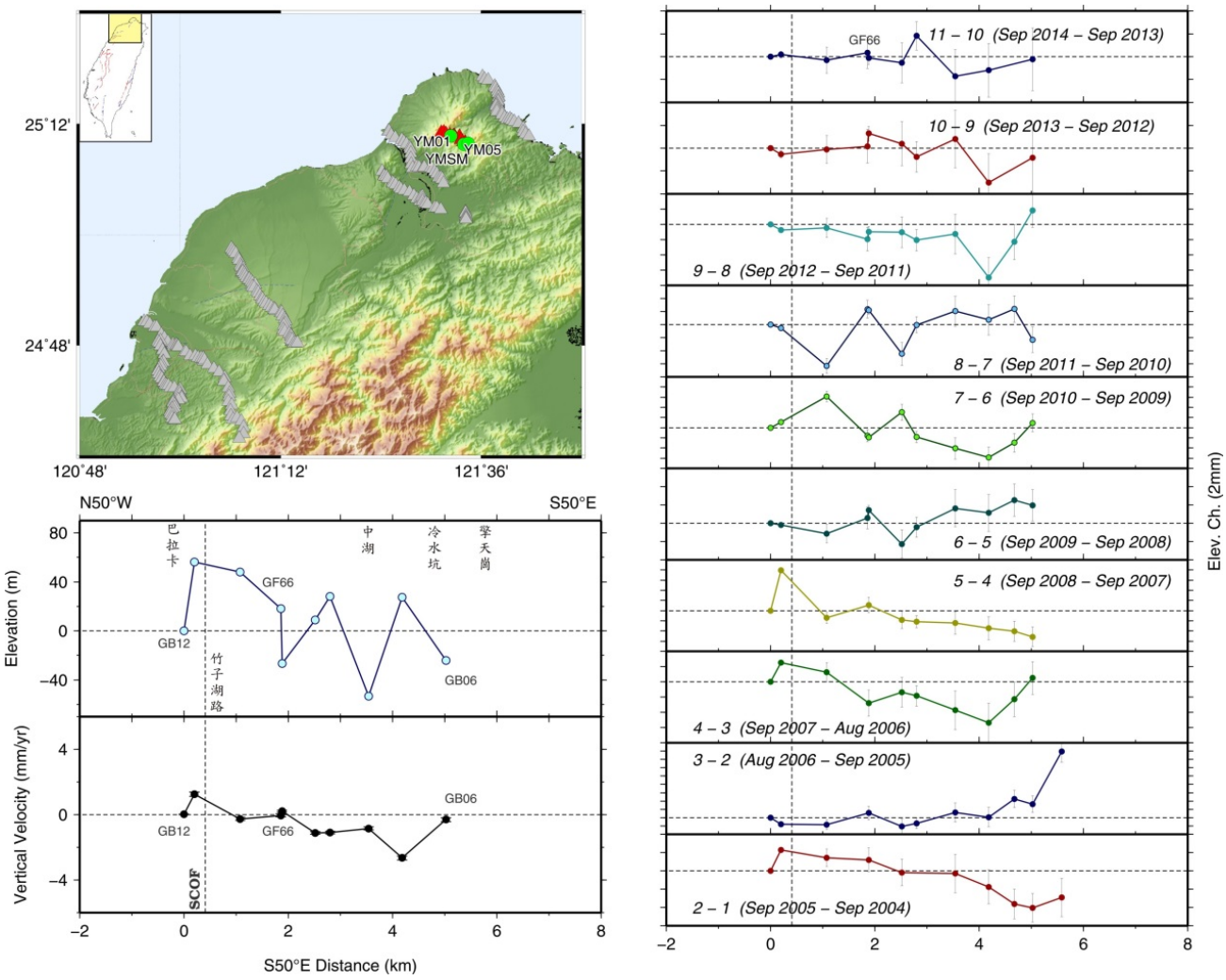


圖 2-3.4：三芝至士林測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

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 年 9 月進行第一次施測之後，又分別於 2005 年 10 月、2006 年 8 月、2007-2014 年的 9 月間進行第 2 至第 11 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 及 TANS 之垂直速率(-8.34 mm/yr 及-3.36 mm/yr)，作為控制點 GA69 與 GA63 之垂直速率。由圖 2-3.5 中得知，山腳斷層東側 3.5 公里內的垂直速度皆顯示顯著的沉陷（GE82 至 B229），其最大沉陷量為-26.8mm/yr；而點位時間序列亦在此區段間呈現下陷的趨勢。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。

此外，水準點位 2008（紅樹林）在近一年有 14 公分的沉陷，原因待現場勘驗。

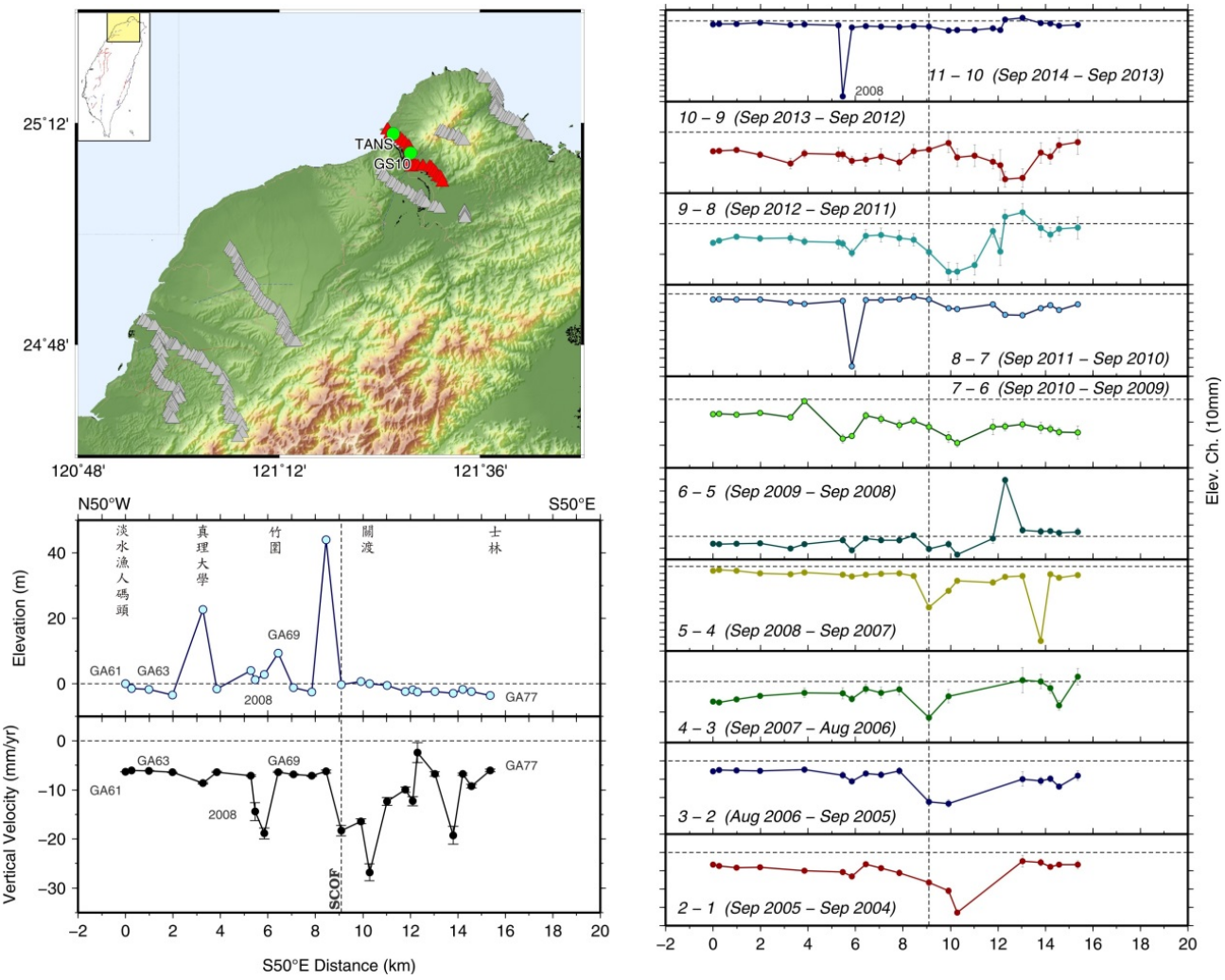


圖 2-3.5：淡水至士林測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

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 及 2006 年的 8 月、2005 及 2007-2014 年的 9 月間進行 11 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率(-5.04 mm/yr)，作為控制點 B225 之垂直速率。由水準垂直速度的變化說明，點位五股至五股濕地公園間（1153 至 GA85）有最大垂直速度變化約-14 mm/yr（圖 2-3.6），此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。依據經濟部水利署於 2007 年 9 月 17 日所發佈之新聞稿，臺北局部地區（臺北縣三重市、蘆洲鄉、新莊市、臺北市中山區）於 2004-2006 年間出現較明顯地層下陷徵兆，最大年平均下陷速率約 26 mm/yr，與本研究之垂直速度相較，說明 2007 年至 2009 年間地表下陷情形雖有略微緩減，但該地區仍為地表沉陷。

此外，水準點位 1001（玉泉公園）在 2012 年至 2013 年間有近 13 公分的沉陷，但隨後即恢復正常。經現地勘查後發現，該點位週遭有進行植被工程，推測可能是因施工造成觀測資料異常。(圖 2-3.7)

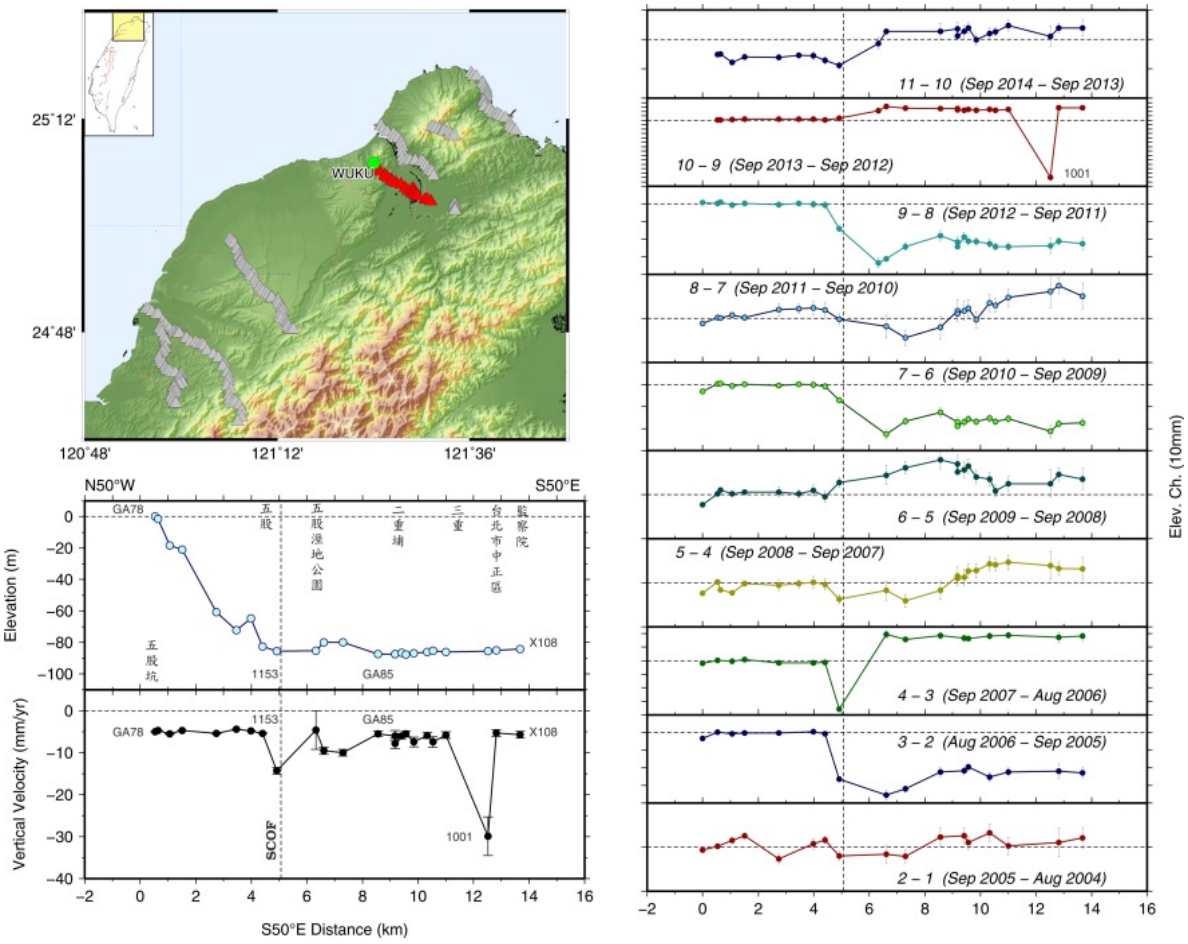


圖 2-3.6：五股至台北測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。



圖 2-3.7：水準點位 1001 現地情形。

2-3-6 縣 115_新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層與大平地斷層，測線長 24 公里，水準測線於 2004 年 6 月與 2005 - 2014 年的 7 月間進行 11 次的施測作業。本測線以 GPS 連續站 YAME 之垂直速率（-1.34 mm/yr），作為控制點 GG03 之垂直速率。整條水準測線之垂直速度大多落在 -5 至 3 mm/yr 之內（圖 2-3.8）。由垂直速度的變化顯示近幾年來雙連坡斷層的活動性並不顯著（跨斷層變化< 1 mm/yr）；而大平地斷層則有較大之垂直速度變化（~4 mm/yr）。

水準點位 GB55（上寶）在 2011 年至 2013 年間下陷近 5 公分，但近一年又趨於緩和。經實地勘查，由於該點設置於馬路旁之泥土地，基座並不穩固，導致沉陷現象發生，並非由地質活動所引起。（圖 2-3.9）

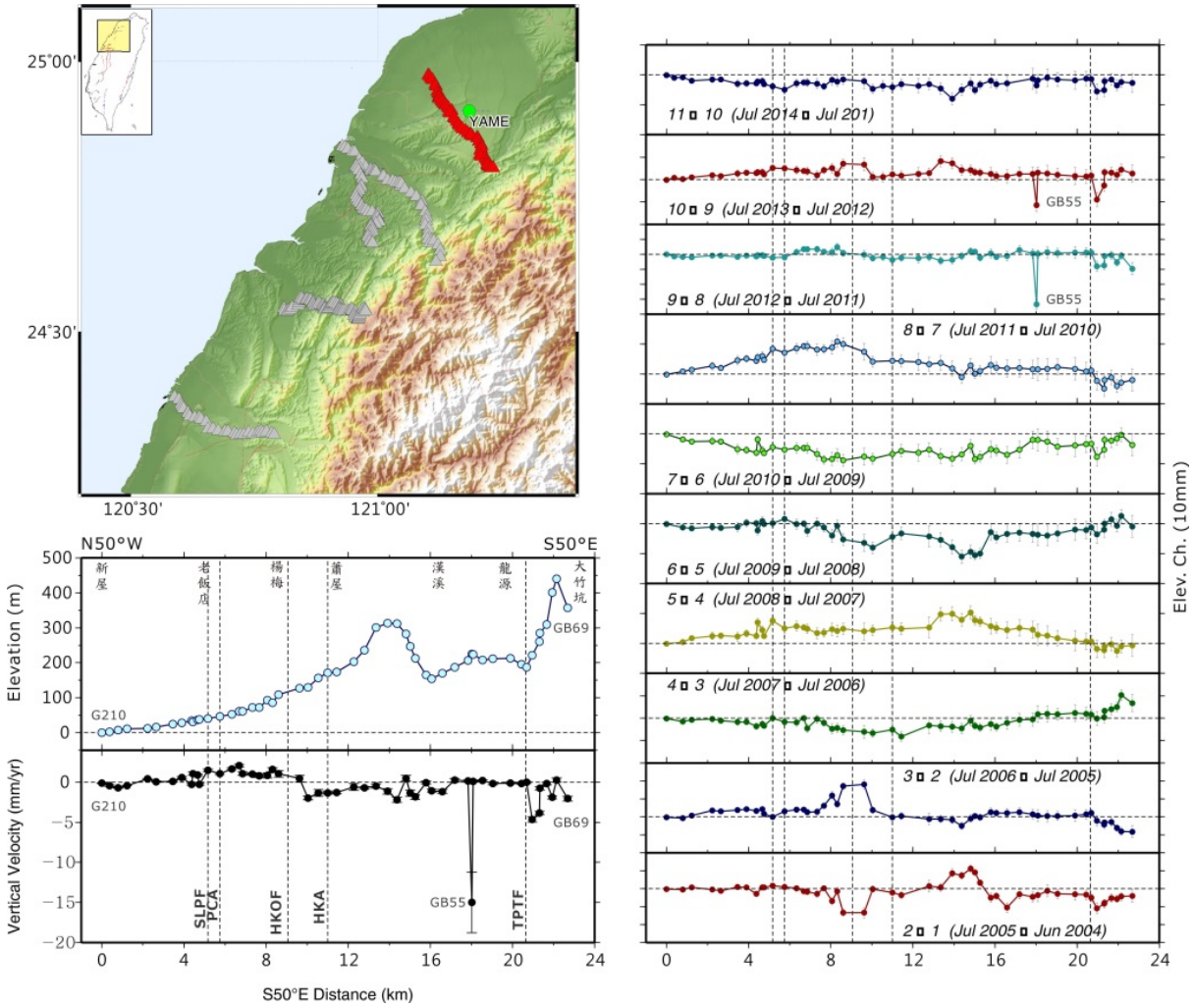


圖 2-3.8：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SLPF 為雙連坡斷層、PCA 為平鎮背斜、HKOF 為湖口斷層、HKA 湖口背斜、TPTF 為大平地斷層。



圖 2-3.9：水準點位 GB55 現地情形。

2-3-7 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。分別於 2002 年 10 月、2004 年 3 月、2005 年 6 月、2006 年 4 月、2008-2014 年的 6 月間進行共 11 次的施測。本測線以連續 GPS 站 TCMS 之垂直速率（-3.54 mm/yr），作為控制點 HCCA 之垂直速率。由 11 次的結果顯示整條水準測線之垂直方向速度幾乎均落在-6 至 0 mm/yr 之內（圖 2-3.10），最大速度變化為跨越新城斷層的 6 mm/yr。藉由時間序列的趨勢線斜率均大致相同，顯示於 2002-2014 年間，該區域斷層活動並不明顯。

從歷年高程變化來看，水準點位 G416（五峰國小）近一年下陷約 2.5 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 2-3.11）

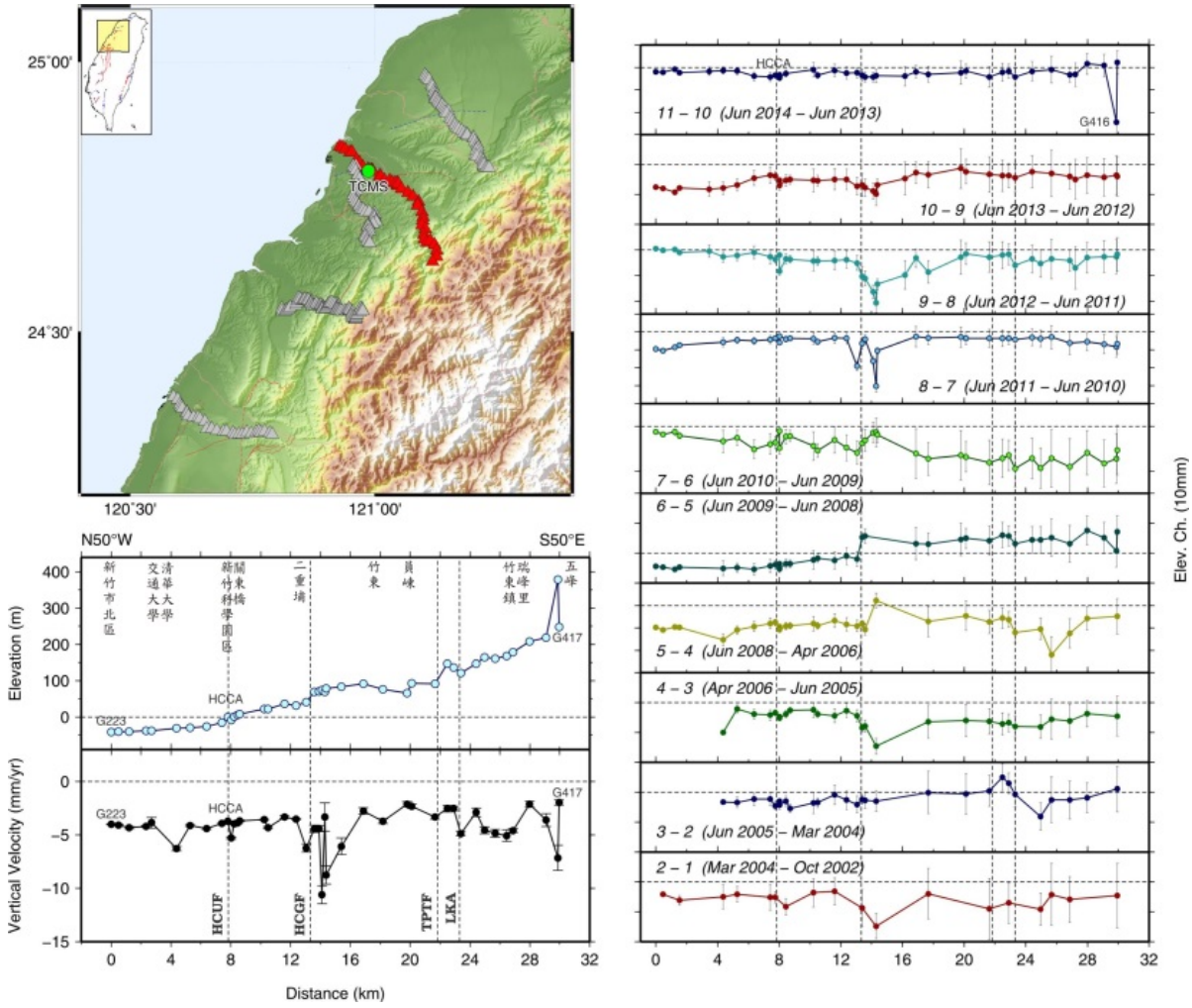


圖 2-3.10：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層、TPTF 為大平地斷層、LKA 為鹿廚坑背斜。



圖 2-3.11：水準點位 G416 現地情形。

2-3-8 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 2004-2005 的 6 月、2006 年 7 月及 2008-2014 年的 6 月間進行共 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS14 之垂直速率（-1.89 mm/yr），作為控制點 GB75 之垂直速率。整條測線的垂直速度（圖 2-3.12）及時間序列並未有明顯的變化，由垂直速度指出新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層並無產生顯著垂直變形之趨勢。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（警報期間：7/23 ~ 7/26；水準測量期間：7/10 ~ 8/01）。

從歷年高程變化來看，水準點位 GB90（新湖路）自 2006 年起呈現下陷趨勢。經過現場勘驗，發現點位設置於水溝旁之泥土地，基座並不穩固，並非是地質活動所造成。在應用本測線之垂直速率時，可排除此點。建議停止測量或重新埋設此點位。（圖 2-3.13）

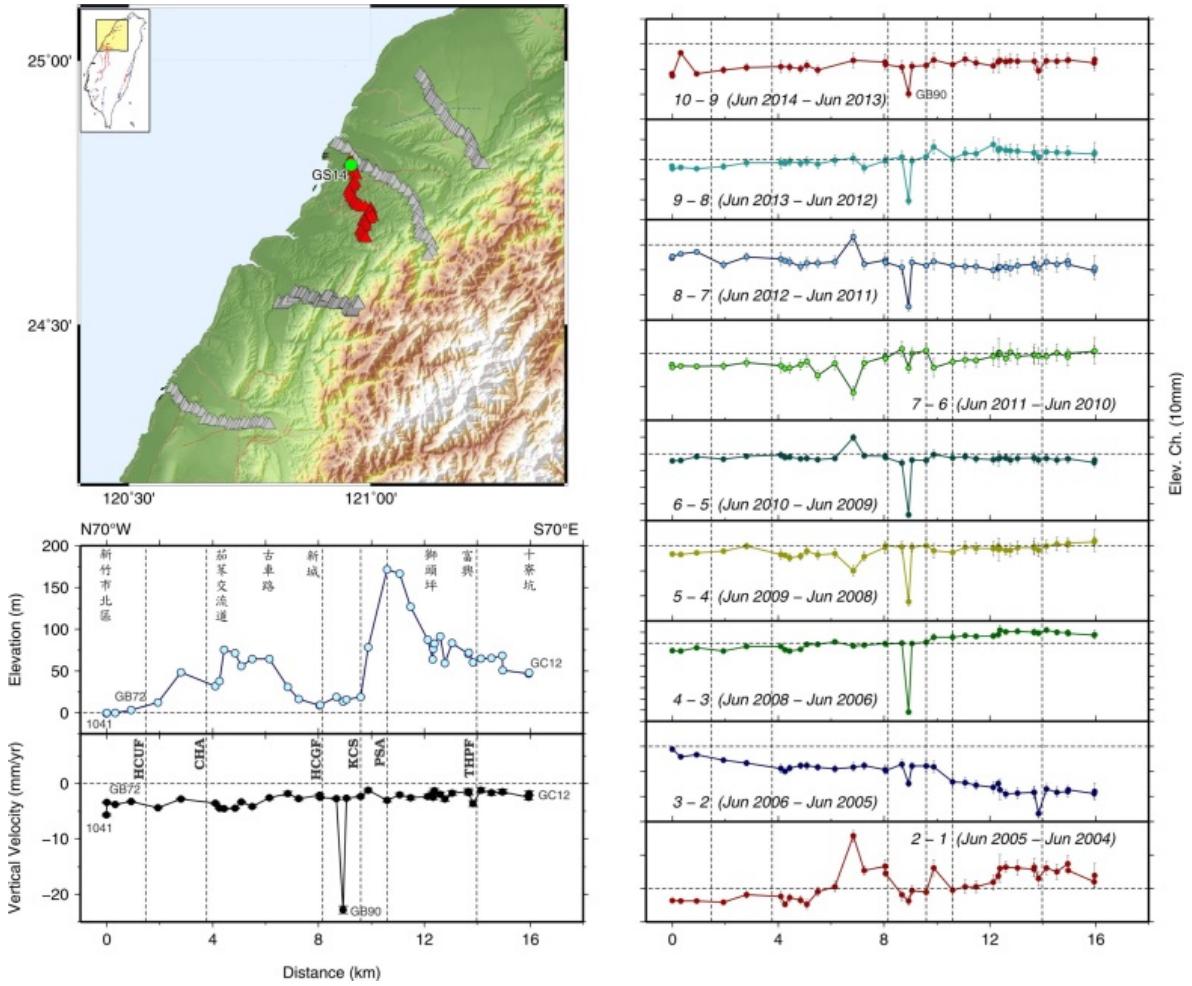


圖 2-3.12：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、CHA 為青草湖背斜、HCGF 為新城斷層、KCS 為柑子崎向斜、PSA 為寶山背斜、THPF 為斗煥坪斷層。



圖 2-3.13：水準點位 GB90 現地情形。

2-3-9 苗栗至南庄測線

本測線橫跨獅潭斷層，測線長 17 公里，此測線於 2005 年及 2007-2014 年的 8 月、2006 年的 9 月間共進行 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 之垂直速率（-6.98 mm/yr），作為控制點 GD97 之垂直速率。整條測線的水準垂直速度在-13 至-4 mm/yr 之間（圖 2-3.14），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。此結果可能暗示此地區之斷層滑移量主要是集中在滑脫面上。

從歷年高程變化來看，水準點位 GD56（鳴鳳枝 36）在近一年內有近 30 公分的抬升。經實地勘查發現，緊鄰點位旁的道路有進行灌漿補強之工程，推測抬升現象是因混凝土膨脹而造成。建議此點仍可繼續觀測，但應用資料時須排除此點相關數據。（圖 2-3.15）

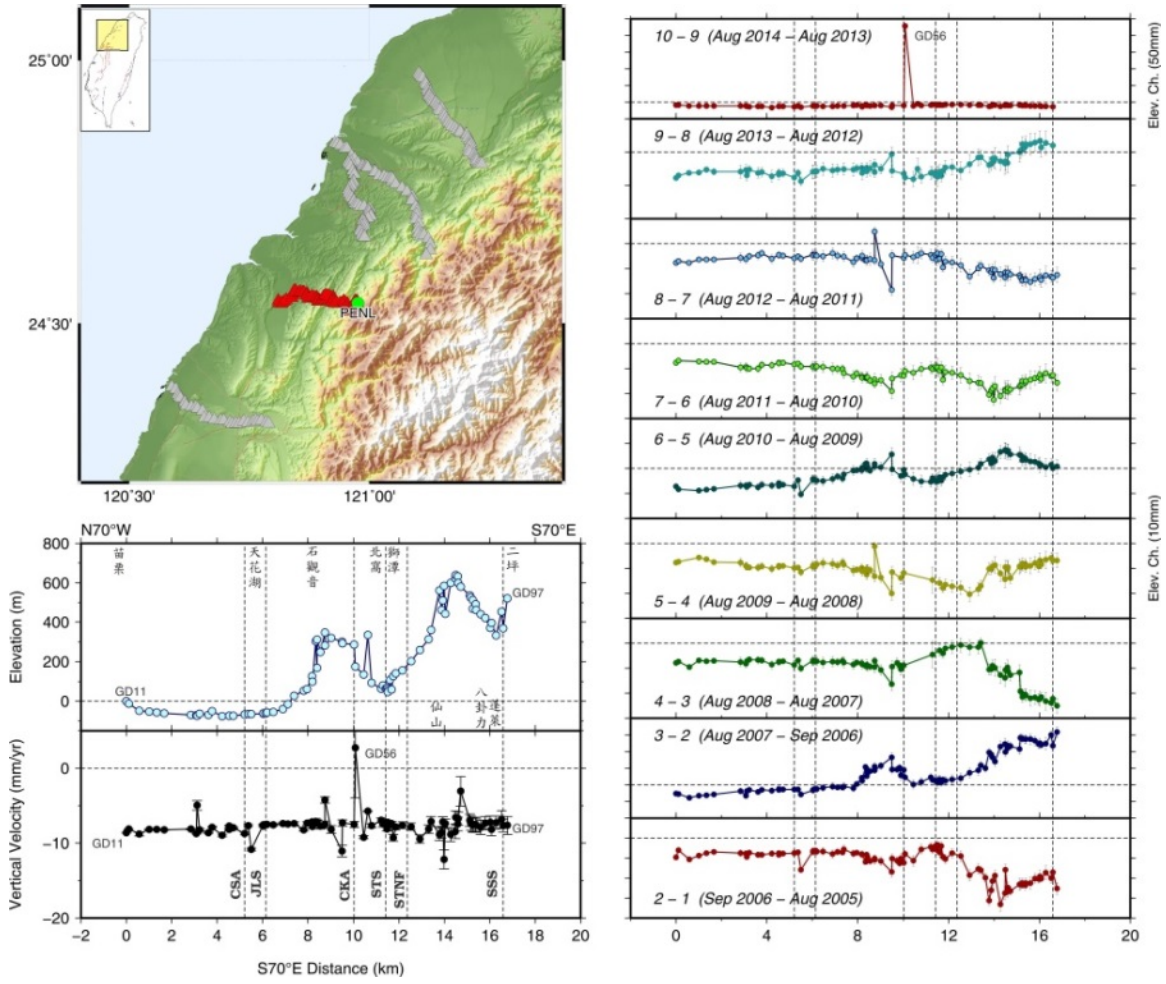


圖 2-3.14：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，除 10 - 9 (Aug 2014 - Aug 2013)欄每個科度代表 50 mm 變化量外，其餘每欄刻度均代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CSA 為錦水背斜、JLS 為仁隆向斜、CKA 為出磺坑背斜、STS 為獅潭向斜、STNF 為獅潭斷層、SSS 為神社向斜。



圖 2-3.15：水準點位 GD56 現地情形。

2-3-10 縣 136_龍井至太平測線

本測線橫跨彰化斷層，測線長約 26 公里，於 2004 年 6 月、2005 年 7 月、2006 年 11 月及 2007-2014 年的 7 月間，共進行共 11 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 和 GS40 之垂直速率（-7.01 mm/yr 和-5.33 mm/yr），作為控制點 G937 及 G929 之垂直速率。根據圖 2-3.16 整條水準測線之垂直速度除 25 km 附近有顯著抬升外，其餘大多在-7 ~ 0 mm/yr 之內。橫跨清水斷層區域（G924 至 G930）的水準抬升速率有~3 mm/yr 的變化；而在跨越車籠埔斷層區域（GE87 至 AF25）的水準抬升速率亦有 3.3 mm/yr 的最大變化量，兩者均可說明此兩斷層有持續性的活動現象。

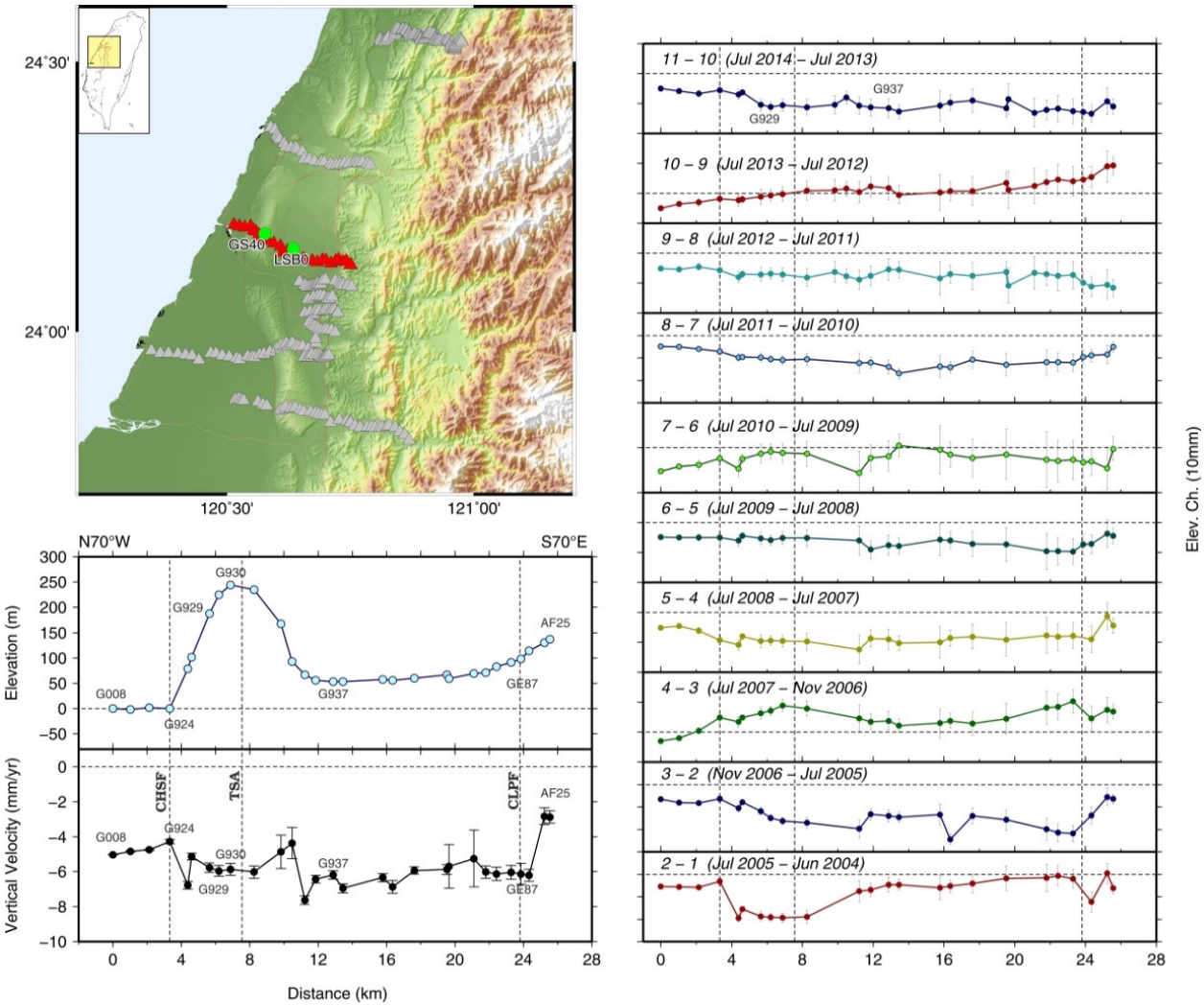


圖 2-3.16：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-11 縣 164_金湖至瑞峰測線

橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及大尖山斷層長 54 公里之縣 164_金湖至瑞峰水準測線有 12 次水準測量結果，分別於 2003 年 8 月、2004 年 7 月、2005-2014 年的 9 月間完成。本測線以 GPS 連續站 GS17、GS05 及 S103 之垂直速率(-2.01 mm/yr、-0.72 mm/yr 及 5.42 mm/yr)，作為控制點 G776、G758 和 G742 之垂直速率。從圖 2-3.17 可知梅山斷層以東之垂直速度變化並不明顯，均約落在-20 mm/yr 至-17 mm/yr 之間。測線 0 ~ 6 km 間之垂直速度變化較明顯，且內政部 2002-2007 年之台 17 線該測段水準測量資料亦符合此結果，參考中油公司地質圖顯示，金湖至口湖地區有 B 構造貫穿其間。通過大尖山斷層至 G799，垂直速度則略微增加（最大-20.1 mm/yr），顯示大尖山斷層或九芎坑斷層處於活動狀態。

此外，水準點位 G757（麻園寮）位於 162 甲線道路旁，及基座並不穩固，因此造成點位在 2003 年至 2013 年間逐年下陷，2014 年測量時已遺失，建議另外尋找合適地點重新埋設。(圖 2-3.18)

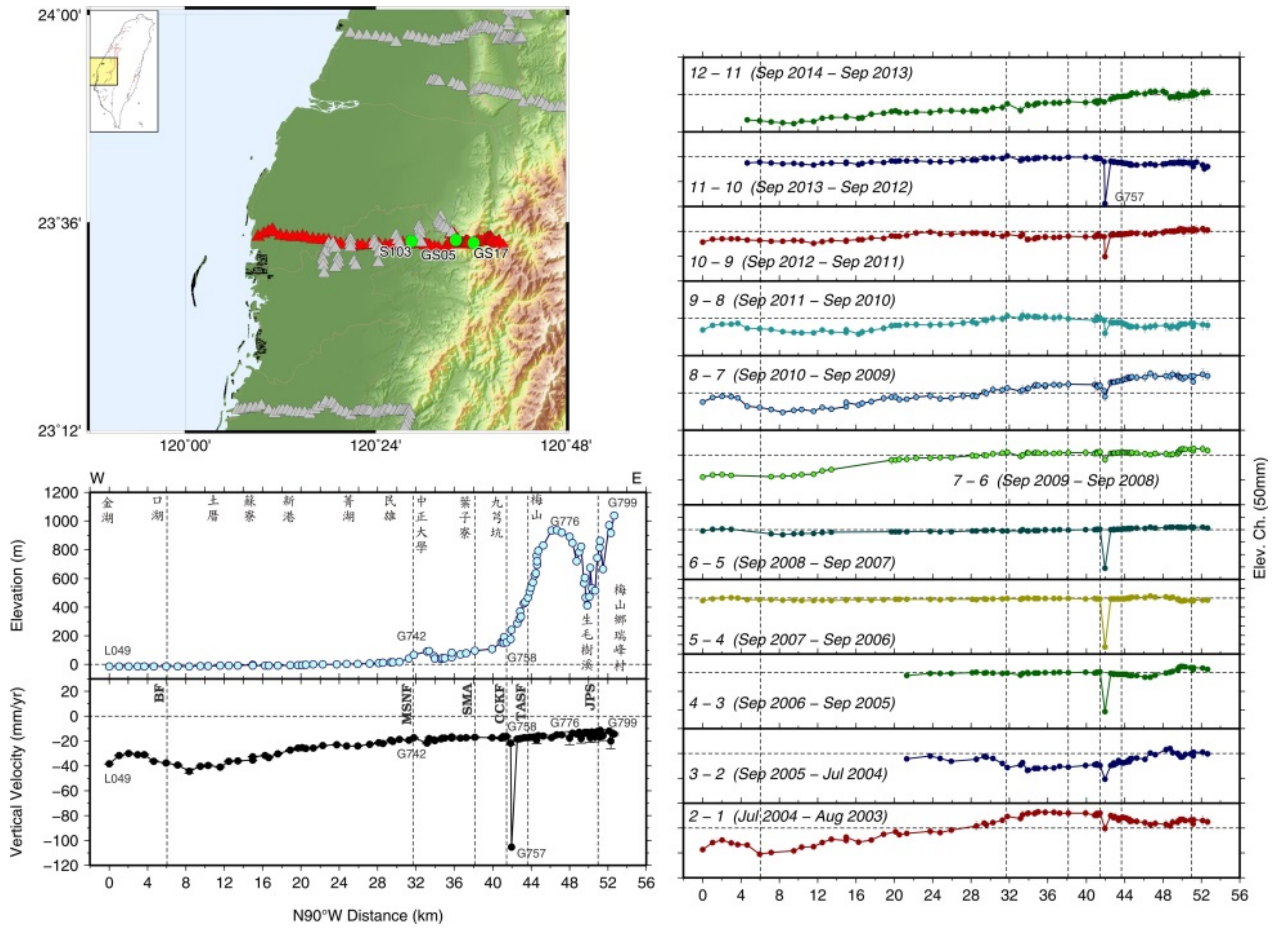


圖 2-3.17：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 50 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。BF 為 B 斷層、MSNF 梅山斷層、SMA 為小梅背斜、CCKF 為觸口斷層、TASF 大尖山斷層、JPS 為九芎坑斷層。



圖 2-3.18：水準點位 G757 現地情形。

2-3-12 佳冬至七佳測線

本測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里，於 2005-2014 年的 9 月間共進行了 10 次的施測。本測線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（-14.43 mm/yr），作為控制點 GC85 之垂直速率。該測線於 2007-2008 年間之高程變化與其他時段（2005～2007、2008～2010）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，整體的趨勢仍是處於抬升的狀態，透露有新期的活動產生。（圖 2-3.19）

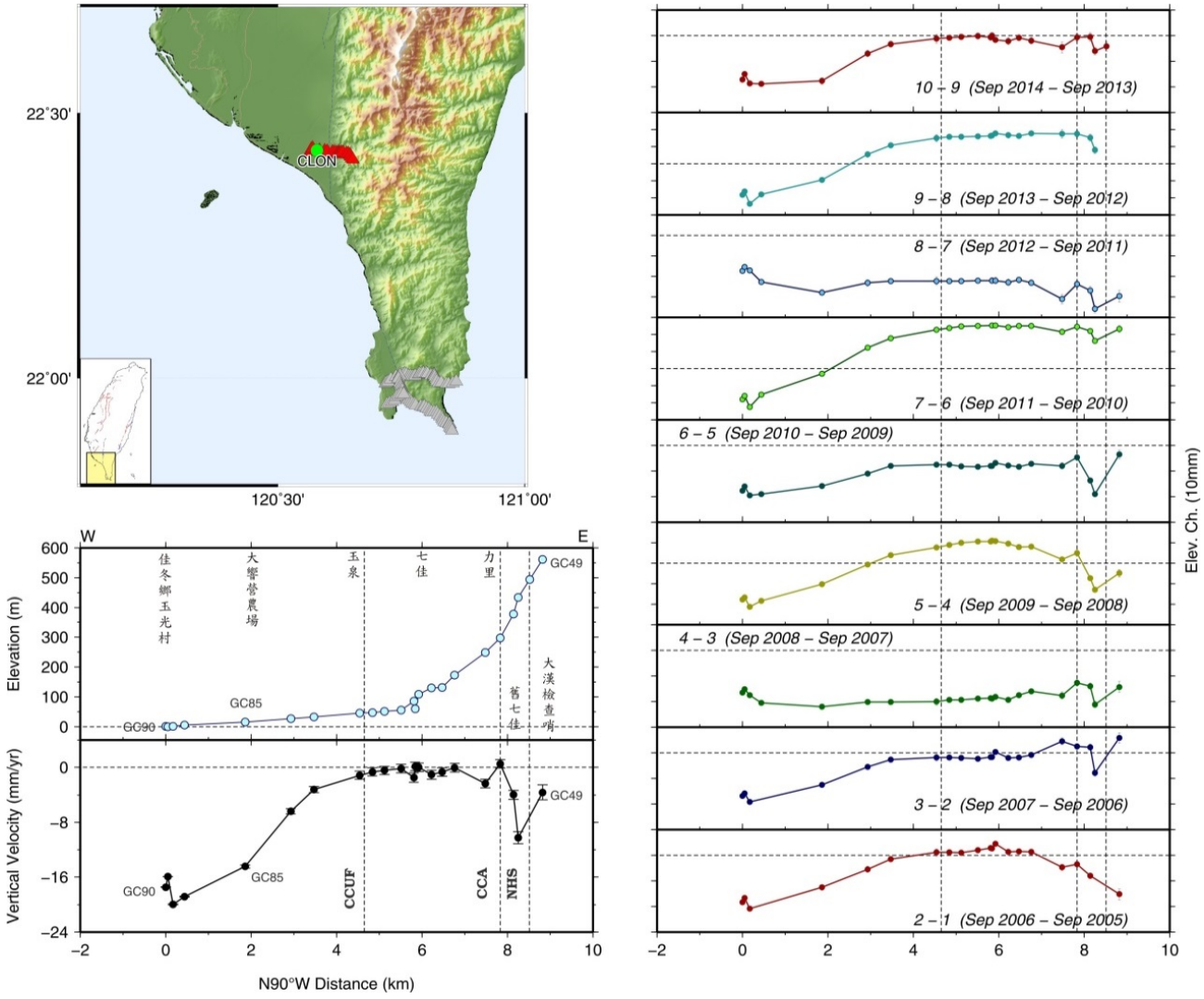


圖 2-3.19：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層、CCA 為七佳背斜、NHS 為南和向斜。

2-3-13 瀧澗至嶺頂測線

本測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 20 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2007-2012 年 11 月、2006 與 2013 年 10 月及 2014 年 6 月，進行共 11 次的施測。本測線以 GPS 連續站 YENL 之垂直速率（-12.35 mm/yr），作為控制點 G971 之垂直速率。該測段之歷年高程變化與垂直速度場均與地形變化相似（圖 2-3.20），然在嶺頂斷層東側之垂直速度與高層變化並不一致，呈現下陷的趨勢。

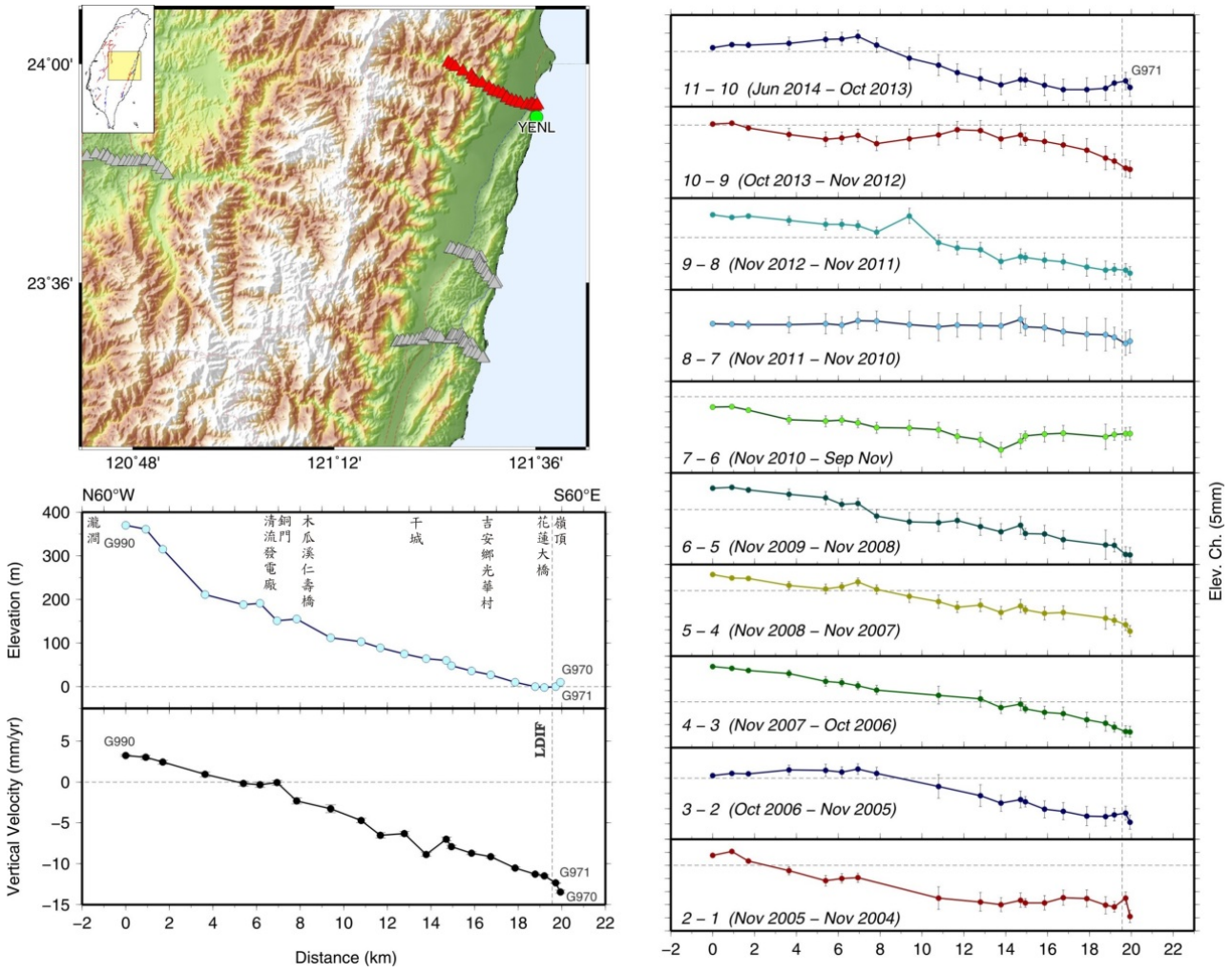


圖 2-3.20：瀧澗至嶺頂測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

2-3-14 光復至豐濱測線

本測線位於奇美斷層的西側，測線長約 12 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2007-2012 年的 11 月、2006 與 2013 年 10、11 月及 2014 年 6 月進行共 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FENP 之垂直速率（-7.58 mm/yr），作為控制點 G991 之垂直速率。於圖 2-3.21 顯示，在 G996 至 A105（泰來至豐富）有-10.86 mm/yr 的水準抬升速率變化。此結果說明奇美斷層以西之海岸山脈內有活動構造之發育，或說明海岸山脈確實持續在抬升中。

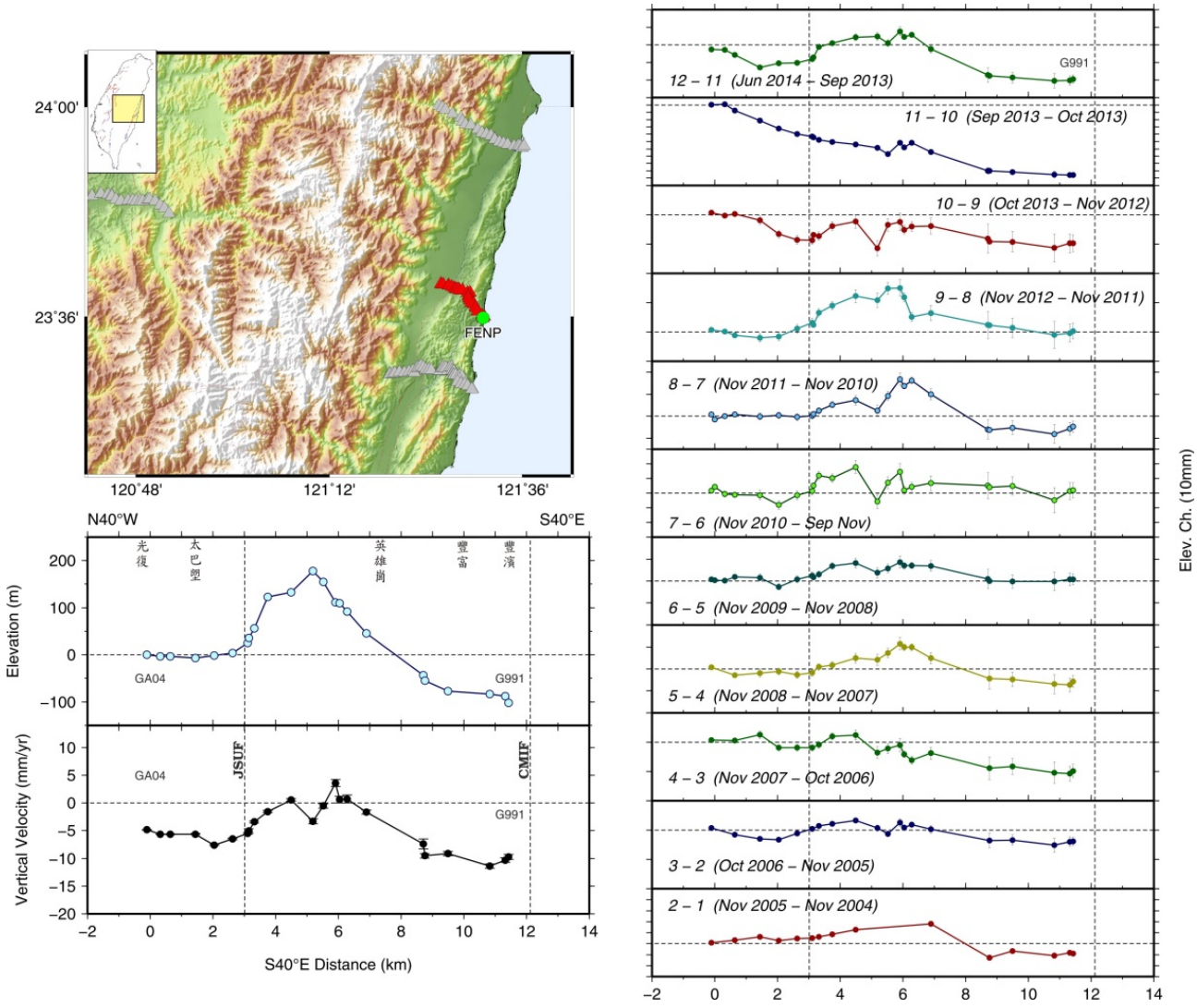


圖 2-3.21：光復至豐濱測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。JSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

2-3-15 紅葉至靜浦測線

本測線橫跨奇美斷層、瑞穗斷層及玉里斷層，測線長 18 公里，分別於 2005-2012 年的 11 月、2004 與 2013 年 10、11 月及 2014 年 6 月、進行共 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（1.29 mm/yr），作為控制點 GA22 之垂直速率。在 GA34 至 GA22（瑞穗牧場至瑞穗鄉猴仔山）之間，水準抬升速率的變化（8.8 mm/yr）可說明瑞穗斷層與玉里斷層之活動（圖 2-3.22）。同時，跨越奇美斷層之區域（GA14 至 GA08，阿魯鷲至亂石）由水準抬升速率變化有明顯之下陷區（-10.2mm/yr）。

從歷年高程變化來看，水準點位 W044（花 64 線道 14.8 公里處）之基座已遭破壞，無法固定於路面，造成近一年有近 4 公分的抬升，應用此資料時須特別注意。建議重新埋設此點。（圖 2-3.23）

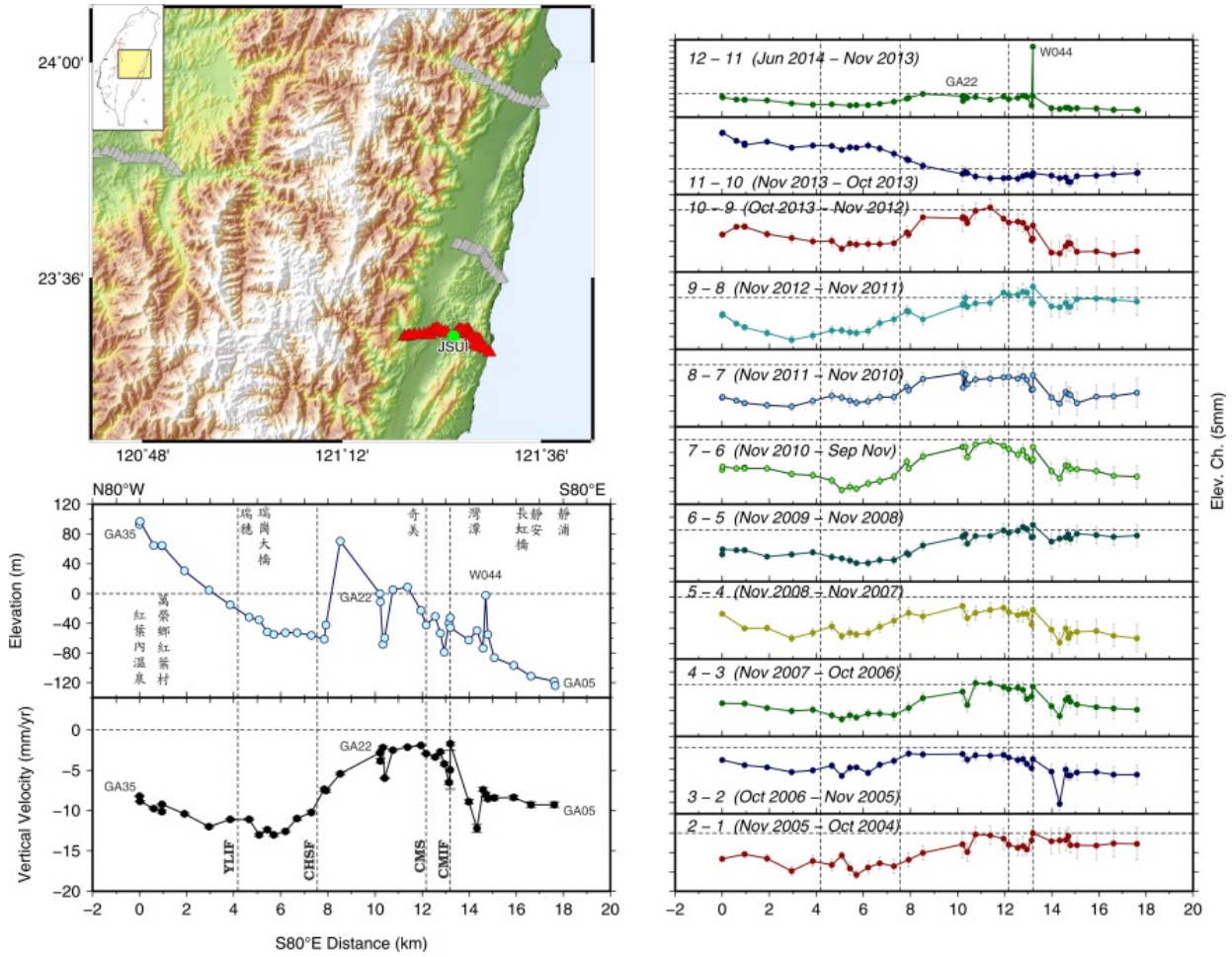


圖 2-3.22：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、CHSF 為池上斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。



圖 2-3.23：水準點位 W044 現地情形。

2-3-16 跨車籠埔斷層之測線

經濟部中央地質調查所在車籠埔斷層沿線，設置了 5 條橫跨斷層之水準測線，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 2013 年止，其間共計施測 7 次，2014 年只施測五光至黃竹。從高程變化圖（圖 2-3.24）來看，跨車籠埔斷層之短測線，近幾年並無明顯之變化，呈現相對穩定的狀態。

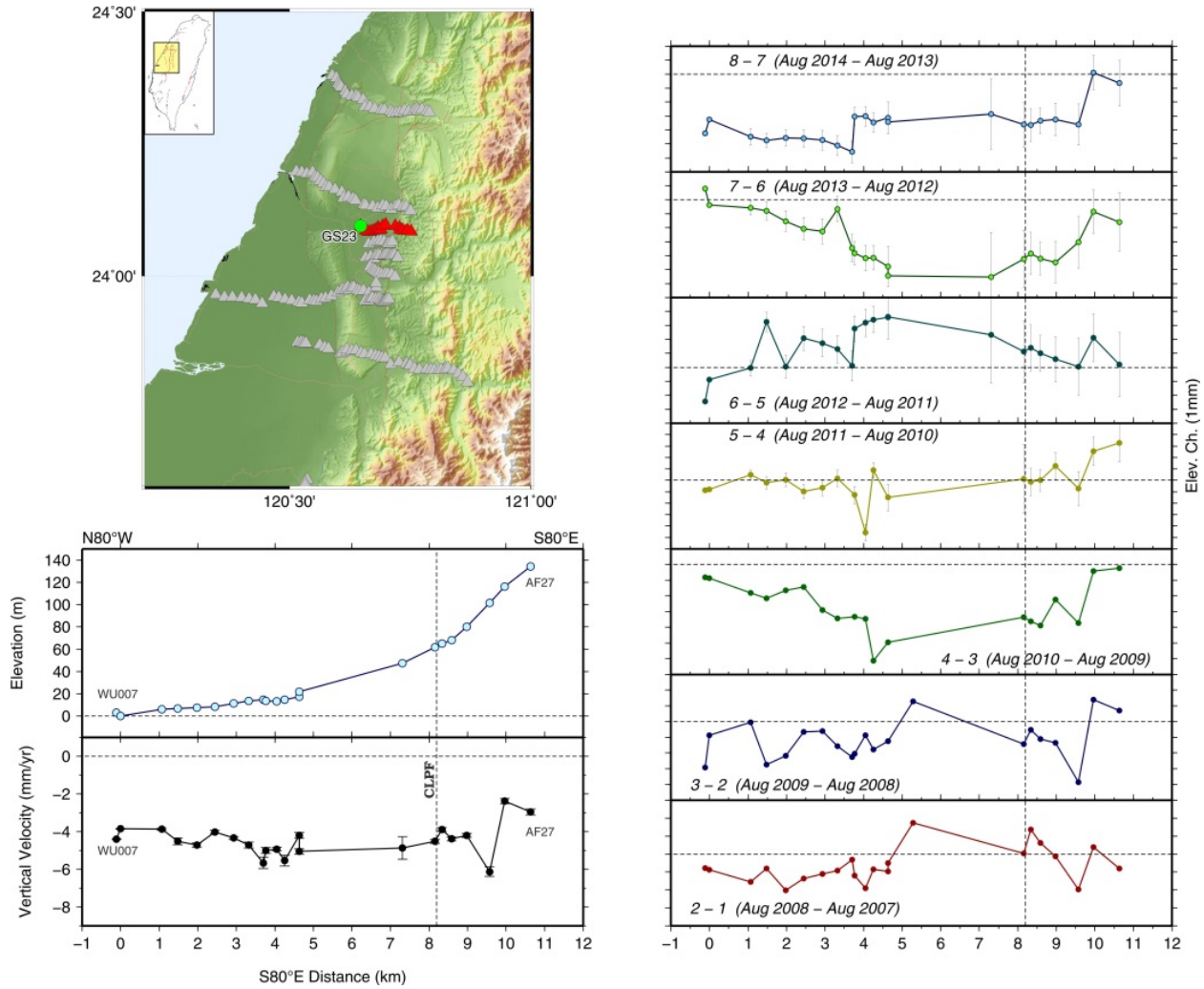


圖 2-3.24：五光至黃竹水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。右側欄中每個刻度代表 1 mm 的變化量。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-17 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 31 公里，從 2004 年至 2014 年共計有 10 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS36 之垂直速率（-1.71 mm/yr），作為控制點 G896 之垂直速率。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，且自外埔（G905）至后里（G912）間的垂直速度呈現下滑的趨勢，通過三義斷層後又上揚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。另海墘（G091）至大甲東（G901）之間的高程變化於 2004 至 2012 年呈現規律之起伏，說明該段區域有以年為週期的變化。（圖 2-3.25）

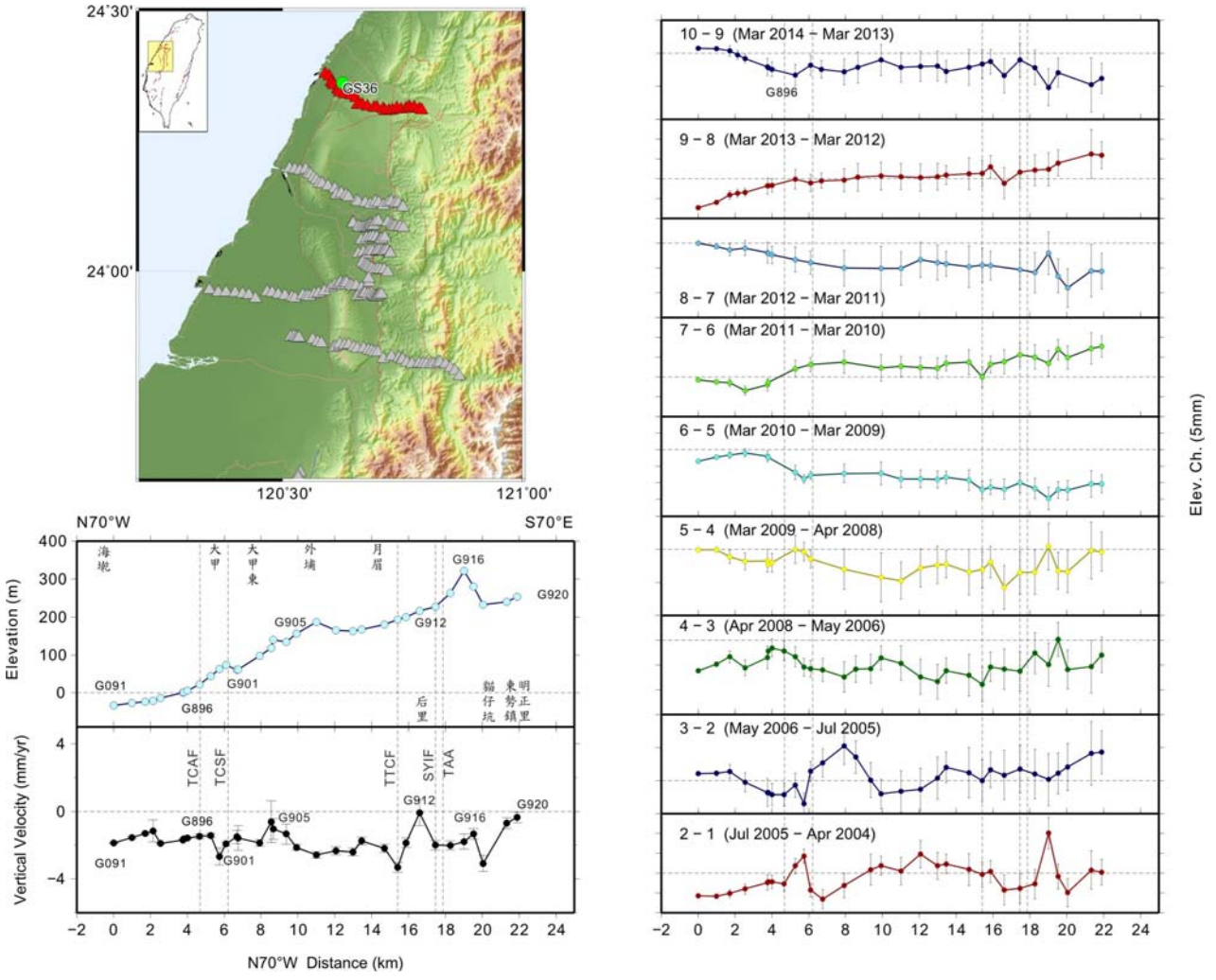


圖 2-3.25：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、TAA 為大安背斜。

2-3-18 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 63 公里，從 2002 年至 2014 年共計有 11 次施測。本測線以 GPS 連續站 CAOT 之垂直速率（-4.56 mm/yr），作為控制點 T075 之垂直速率。員林（X112）以西一帶可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速度最大可達-75 mm/yr（圖 2-3.26）。自彰化斷層以東區域之垂直速度均約在-10 ~ 0 mm/yr 之間，然通過車籠埔斷層區域（X115 至 C009）有-10 ~ 0 mm/yr 之垂直速度變化，相對於大茅埔－雙冬斷層地區（C014 至 C015）之變化在-3 ~ -1 mm/yr 之間，橫跨車籠埔斷層之改變較為顯著。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，點位 X112 以東之地表垂直變化相對而言較不顯著。

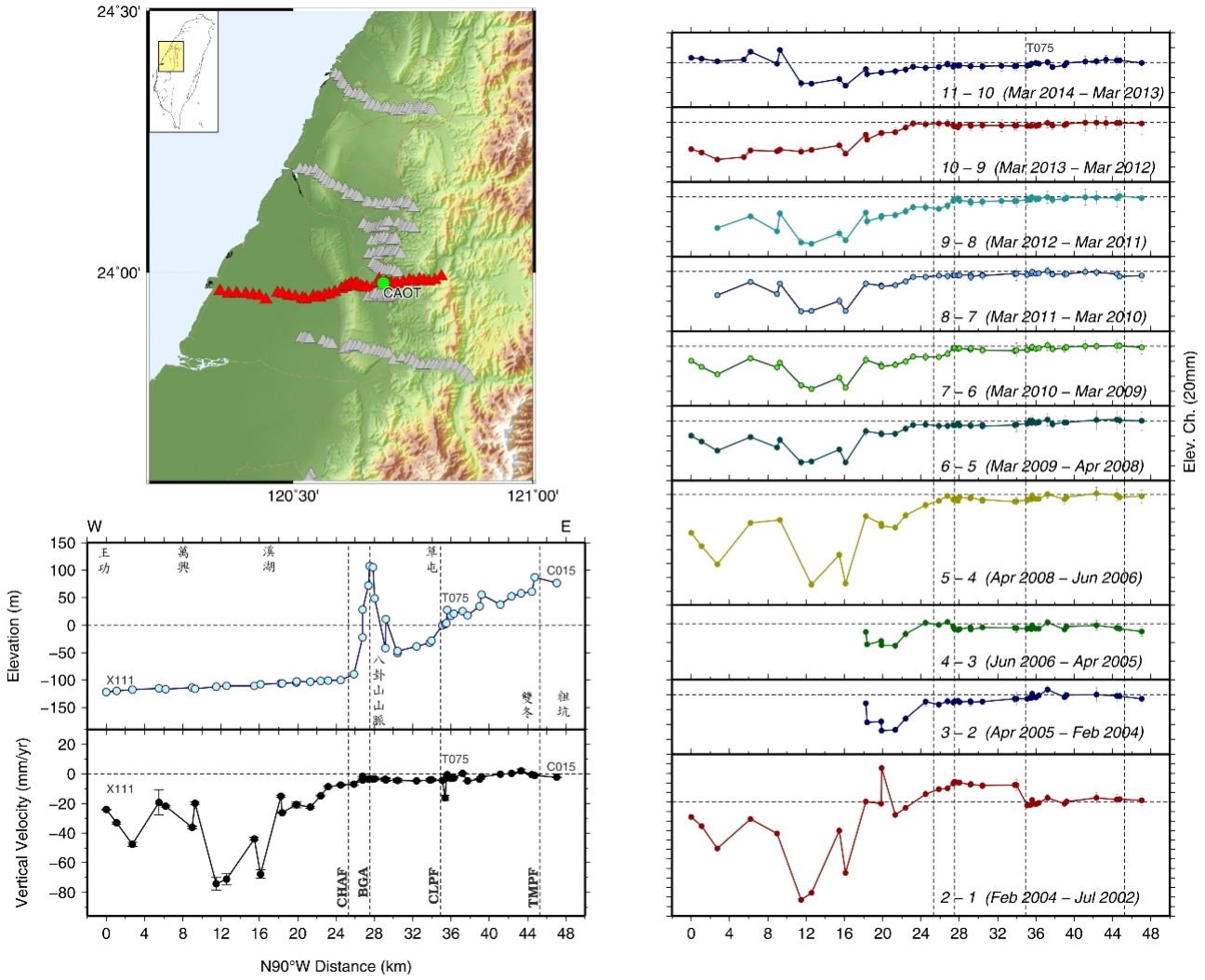


圖 2-3.26：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 為八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

2-3-19 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 45 公里，從 2002 年至 2014 年共計有 11 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS26 之垂直速率（-3.12 mm/yr），作為控制點 G296 之垂直速率。本測線彰化斷層以西（點位 1107，北斗）之垂直速度不似縣 148 台 14 測線可見明顯的地層下陷現象（圖 2-3.27）。而自彰化斷層以東地表有顯著的抬升趨勢，通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的 12 km 區段（X117 至 F006，名間至集集），該地表抬升的狀況更為明顯（約由-5 ~ 8 mm/yr），然而於通過大茅埔－雙冬斷層地區（G279 至 X118，水里隧道至頂崁）轉為下陷之趨勢（由 12 ~ 7 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。比較於本測線北方之縣 148 台 14 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，兩者有明顯的差異存在，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。

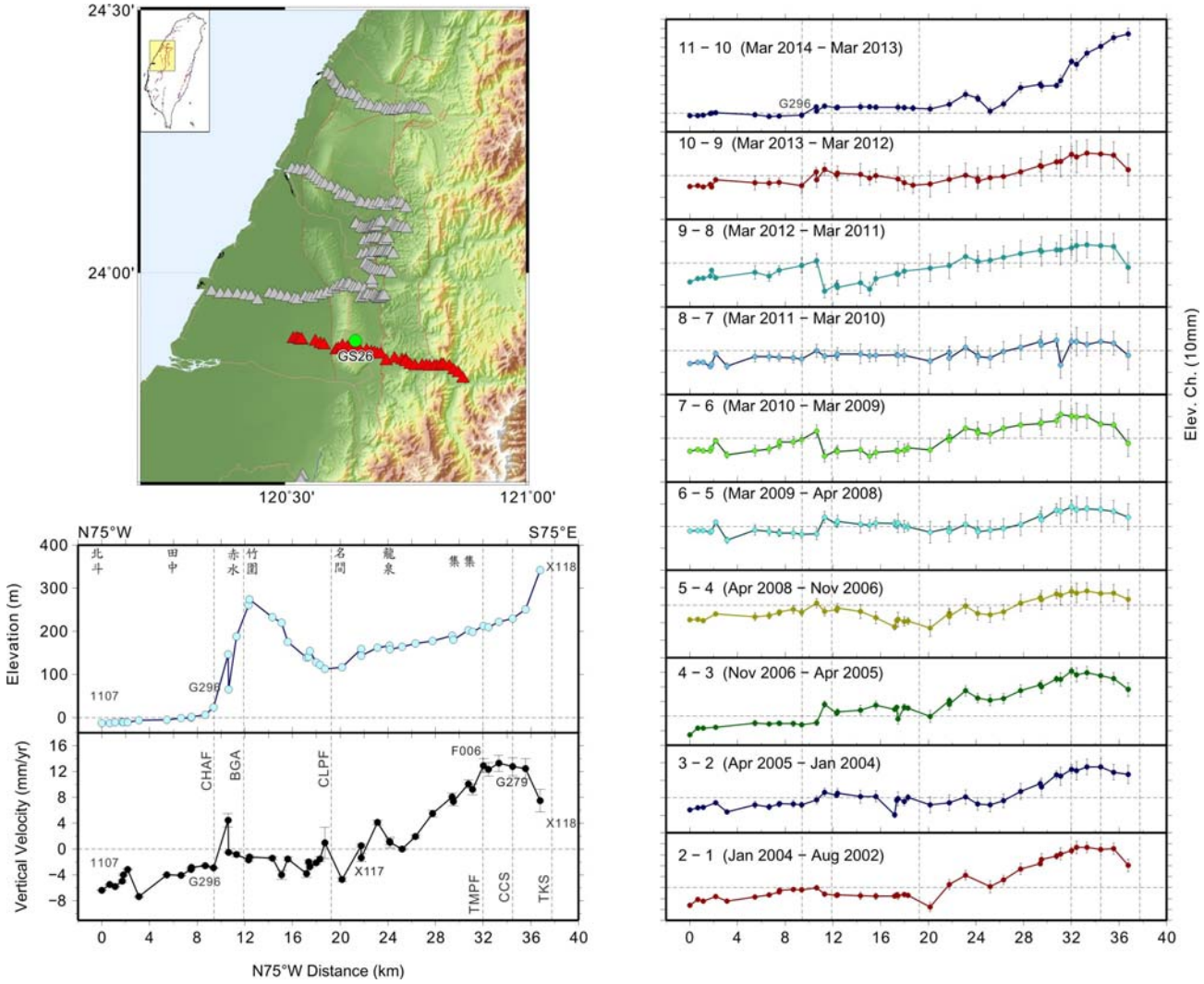


圖 2-3.27：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層、CCS 集集大山向斜、TKS 為頂崁向斜。

2-3-20 縣 174_北門至楠西測線

本測線橫跨六甲斷層及觸口斷層，測線長約 66 公里，從 2003 年至 2014 年共計有 11 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS44 之垂直速率（8.76 mm/yr），作為控制點 I088 之垂直速率。因與內政部一等二級水準路線重複，故有 31 個點位（46%）和內政部一等二級水準點位重複。在通過六甲斷層之地區（I086）至觸口斷層以西之間的 5 公里內有達 10 mm/yr 以上的垂直抬升速度（圖 2-3.28），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（張憲卿，2008）為一活動構造。本測線自 G816（水庫管理局）起，點位的高程時間變化趨勢線變得較陡，顯示自進入山區地段（即六甲斷層以東），地表高程活動性增加。

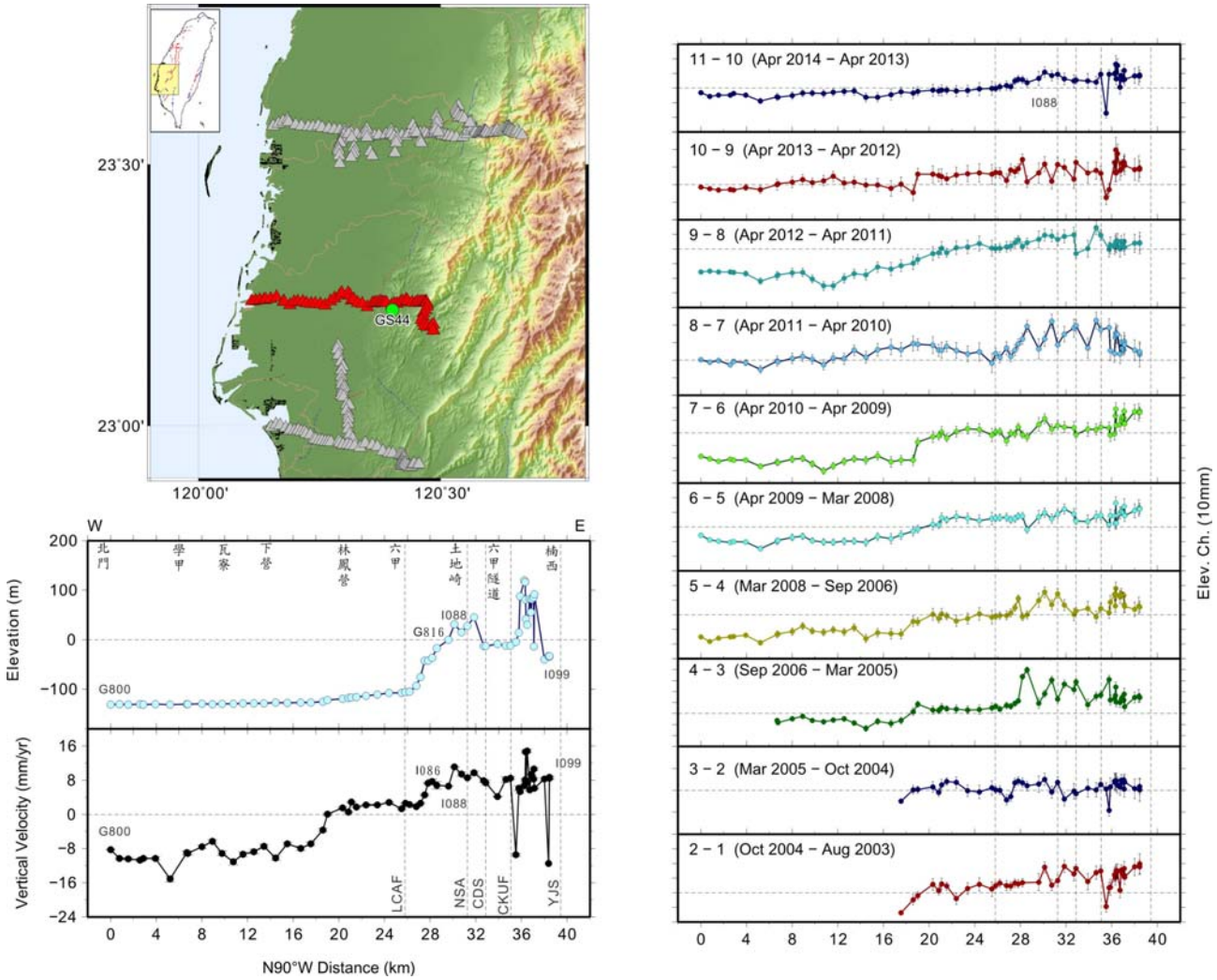


圖 2-3.28：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、NSA 為牛山背斜、CDS 為前大埔向斜、CKUF 為觸口斷層、YJS 為玉井向斜。

2-3-21 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 42 公里，從 2001 年至 2014 年共計有 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 CK01 之垂直速率（2.59 mm/yr），作為控制點 TN04 之垂直速率。不論由地形剖面、高程相鄰兩次變化及垂直抬升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），且台地之東緣隨時間而有往東延伸之趨勢；在臺南台地的西緣（臺南市中西區）開始，至台地的東緣（虎尾寮、仁德）止，由水準高程變化可發現該區域有穩定的 3 ~ 7 mm/yr 之地表抬升速率趨勢，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兩個點之抬升速率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 2-3.29），此現象或可說明後甲里斷層為一活躍之活動構造，然因垂直速度變化量均在 1 cm/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。

此外，水準點位 G435（勝利國小）在 2012 年至 2013 年間抬升約 60 mm，主要原因為該校於 2013 年初進行操場整建工程，造成水準點位移動及外露，建議暫停測量或重新埋設此點位。（圖 2-3.30）

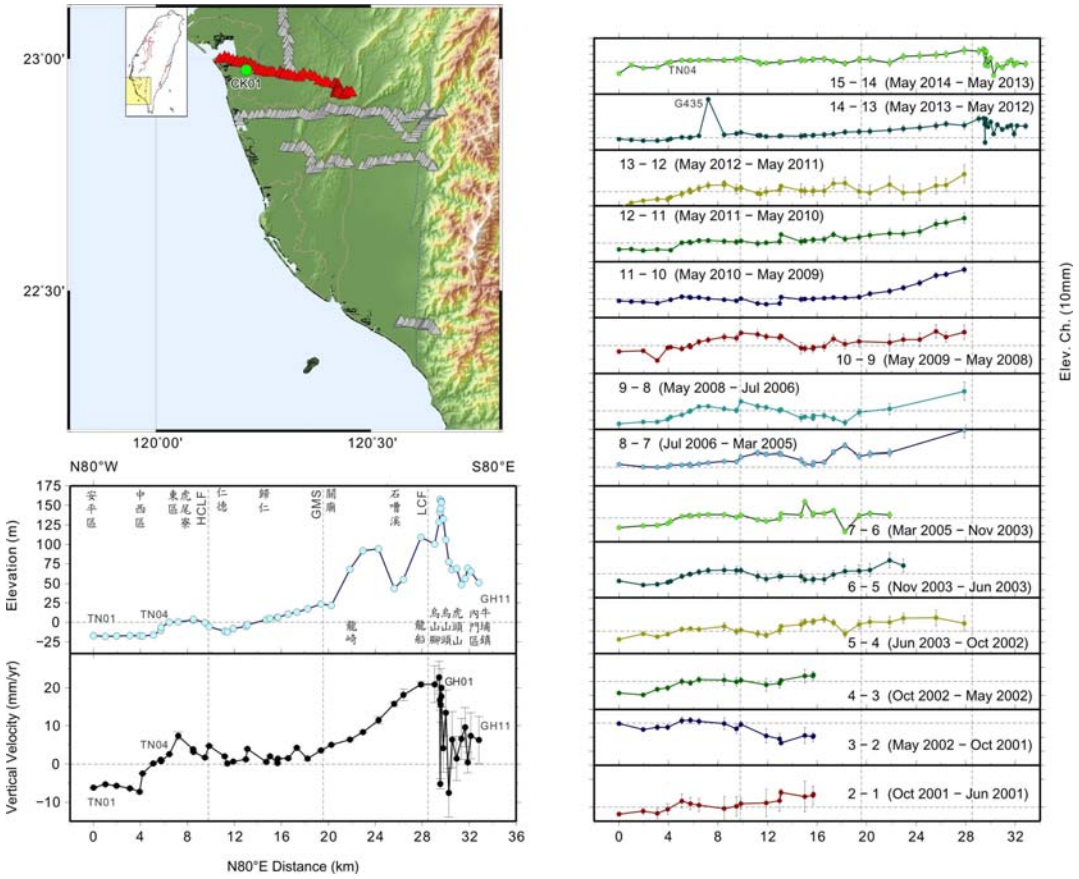


圖 2-3.29：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、GMS 為關廟向斜、LCF 為龍船斷層。



圖 2-3.30：水準點位 G435 現地情形。

2-3-22 台 28_路竹至茂林測線

本測線橫跨小崗山、旗山斷層及潮州斷層，路線長約 90 公里，從 2002 年至 2014 年共計有 11 次施測。本測線以 GPS 連續站 NEMN 之垂直速率(8.919 mm/yr)，作為控制點 G3027 之垂直速率。縣 184_路竹至茂林測線於中壇（B232）分成北（縣 184_路竹至茂林主線）與南（台 27_路竹至茂林副線）兩條水準測線。由圖 2-3.31 顯示，縣 184_路竹至茂林主線於 G471 至 G474（阿蓮至田寮鄉崇德國小）垂直速度場及水準高程變化均持續增加（垂直速度約 6 mm/yr），與地形剖面比較，垂直抬升速率增加之處與地形高區並不吻合，此地表抬升現象可能與小崗山斷層的活動有關。台 27_路竹至茂林副線顯示跨越潮州斷層區域（R013 以東，高樹鄉大津至茂林國小一帶）略有地表沉陷速率變化（由約-1 mm/yr 降至-9 mm/yr），此變化與地形起伏並不相符，可能與該測段位於濁口溪曲流攻擊坡上，造成邊坡滑動有關。另由水準高程時間序列分析，自旗山至竹子門地區，歷年來均呈現沉陷的趨勢，而稍南邊的副線卻未有相同的表現，此現象可能反映旗山斷層下盤區域的地表沉陷情形。

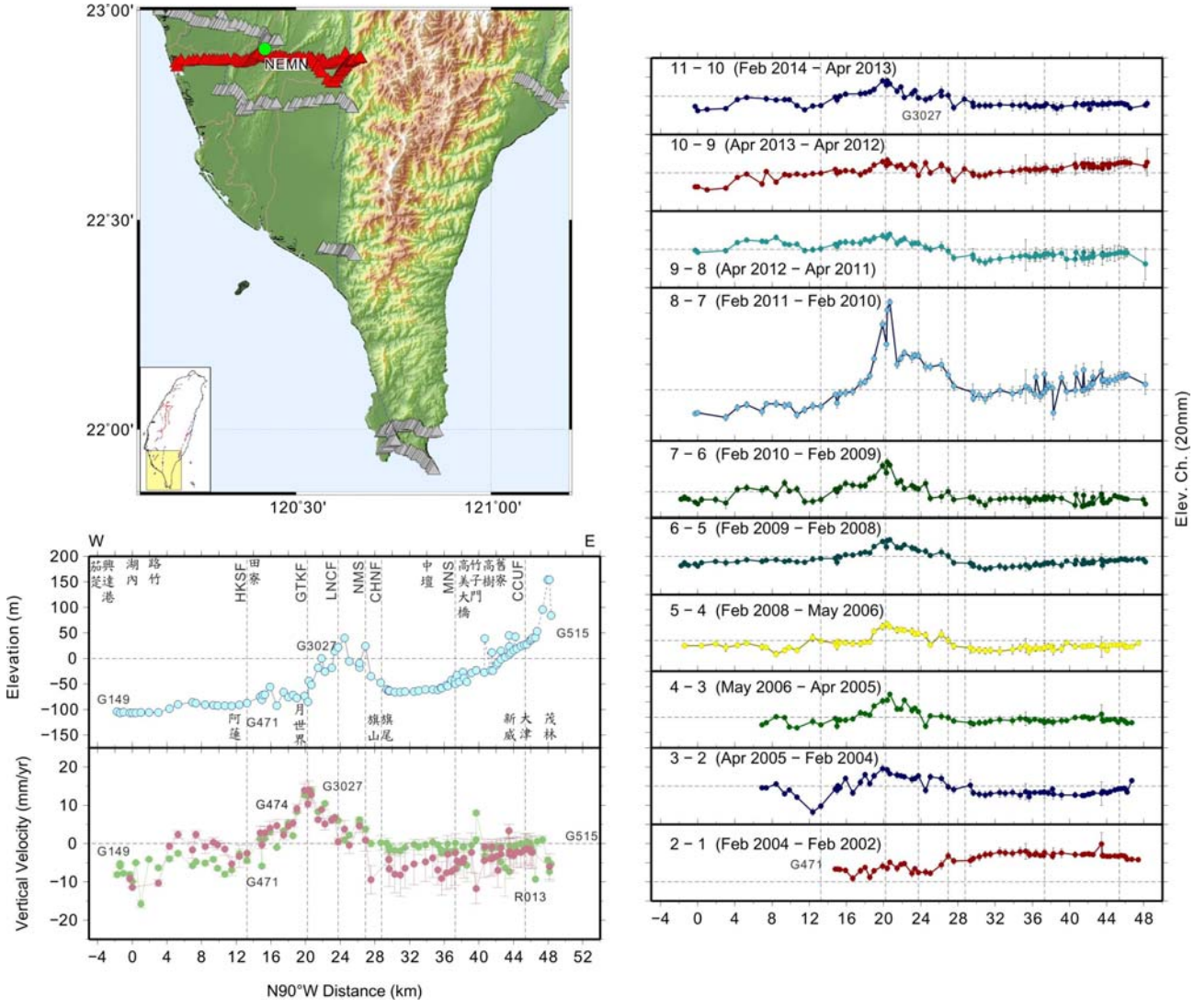


圖 2-3.31：縣 184_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。左下欄中之淡綠色為 2002 ~ 2010 年甲仙地震震前垂直速度，淡紅色為 2010 ~ 2014 年甲仙地震震後垂直速度。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、GTKF 為古亭坑斷層、LNCF 為龍船斷層、NMS 為內門向斜、CHNF 為旗山斷層、MNS 為美濃向斜、CCUE 為潮州斷層。

2-3-23 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 50 公里，從 2004 年至 2014 年共計 10 次施測。本測線以 GPS 連續站 AKND 之垂直速率(4.81 mm/yr)，作為控制點 G525 之垂直速率。在橫跨潮州斷層區域(G562 至 G570)，水準高程變化並未有明顯之變化量(約 2 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(圖 2-3.32)。

另由各相鄰兩次之高程差變化圖可看出，在嶺口至泰山之間有與地形剖面不同之地表下陷趨勢，並在載興至新南勢之間有最大的下陷量(-6.8 mm/yr)；該地為跨越紅橋溪之高樹大橋，由測量資料可發現高樹大橋有逐年下陷的現象。在垂直速度上， G533(橫山國小)至里嶺大橋及里港一帶均為地表高程逐年下陷之趨勢，然在跨過潮州斷層以東(泰山國小，R020)，其下陷趨勢減緩。

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 2-3.33)

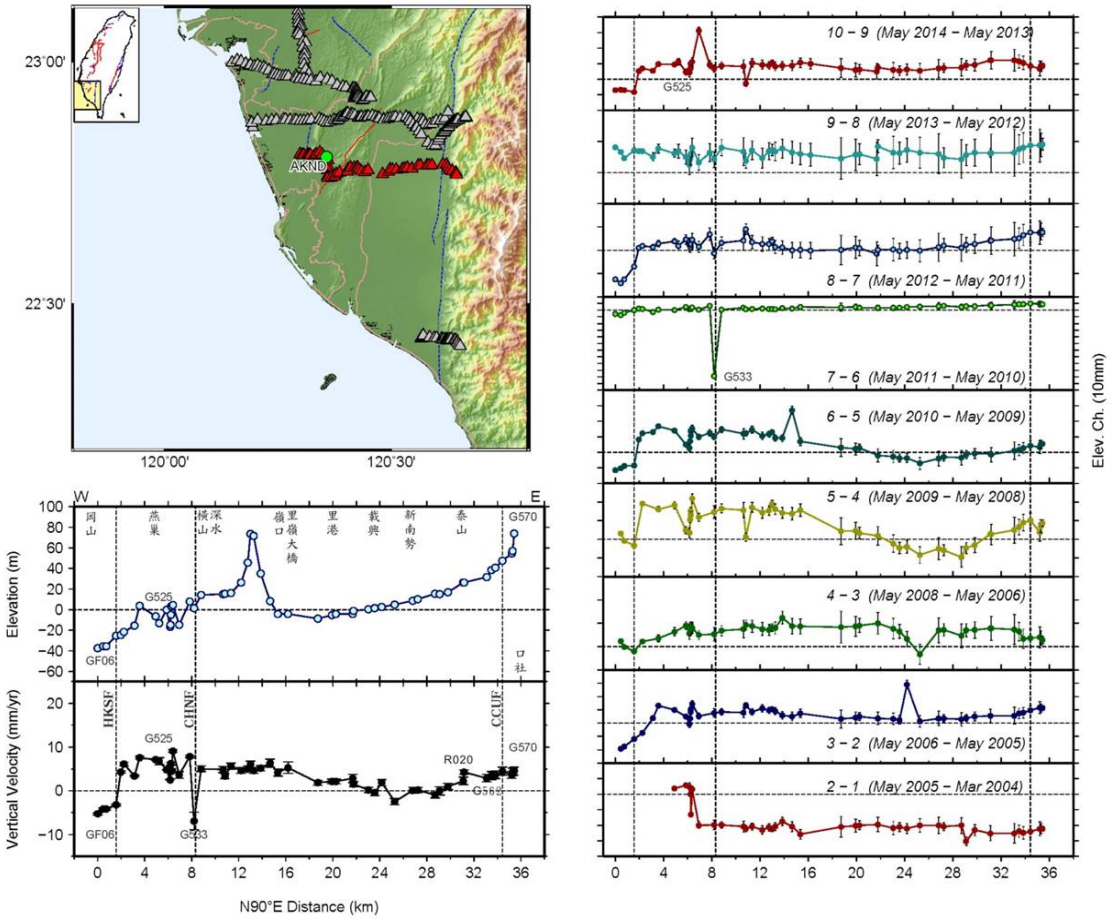


圖 2-3.32：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。



圖 2-3.33：水準點位 G533 現地情形。

2-3-24 恆春半島地區測線

恆春半島地區精密水準測量共規劃有 2 條長度大於 10 公里的長測線，以及 1 條台 26_恆春至鵝鑾鼻測線的副線，為主測線向西的延伸。至 2014 年 5 月 31 日止，共計施測並檢核恆春西台地至佳樂水及台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線等 3 條水準測線的測量資料。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（-2.08 mm/yr）及震後垂直速率（-10.79 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（4.92 mm/yr）及震後垂直速率（7.65 mm/yr），作為控制點 Q014 之垂直速率。

恆春西台地至佳樂水（長約 19 公里）、台 26_恆春至鵝鑾鼻主線（長約 19 公里）及恆春至鵝鑾鼻副線（長約 5 公里）等三條測線 2006 年以前在橫跨恆春斷層時水準高程變化並無明顯之改變（圖 2-3.34 至圖 2-3.35），顯示 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 M_W 7.0 的災害性地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層西側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月期間，在德和至恆春一帶有最大約 80 mm 的沉陷現象，而在南灣以西地區也有約 60 mm 的沉陷；相對斷層東側無明顯的高程變化，在西側有相對的下陷發生（南樹林至馬鞍山一帶），說明在 2006 年的地震後，恆春斷層的活動範圍僅限於恆春谷地（德和至恆春、馬鞍山至南灣一帶），而恆春地區主要的震後變形為恆春斷層西側的沉陷。此外，2010 年至 2013 年的高程變化量之變化型態已與 2006 年至 2010 年間不同，可能說明自 2010 年起恆春半島的地表垂直變形已脫離同震位移的影響。

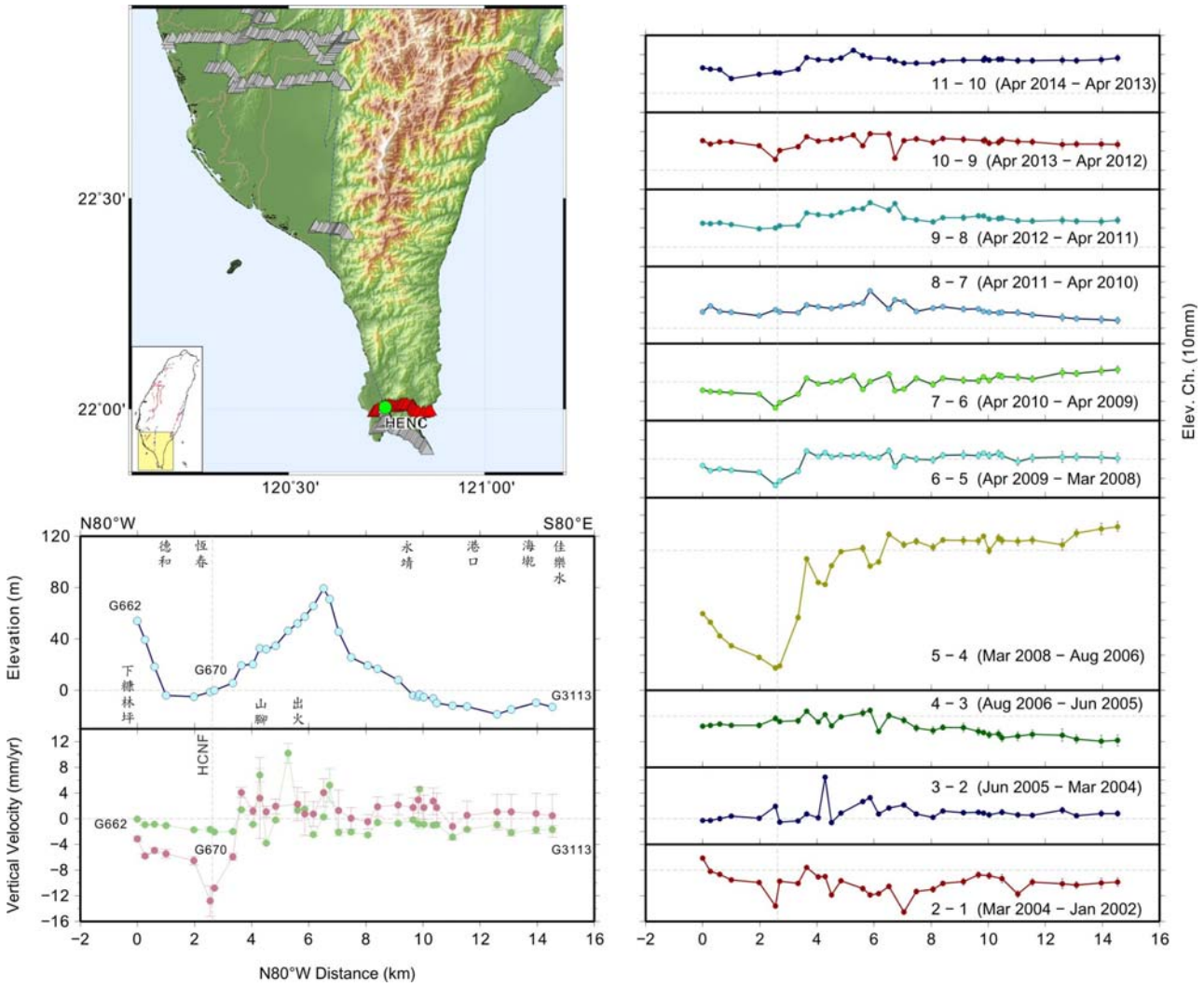


圖 2-3.34：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。左下欄中之淡綠色為 2002 ~ 2006 年恆春地震震前垂直速度，淡紅色為 2006 ~ 2014 年恆春地震震後垂直速度。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

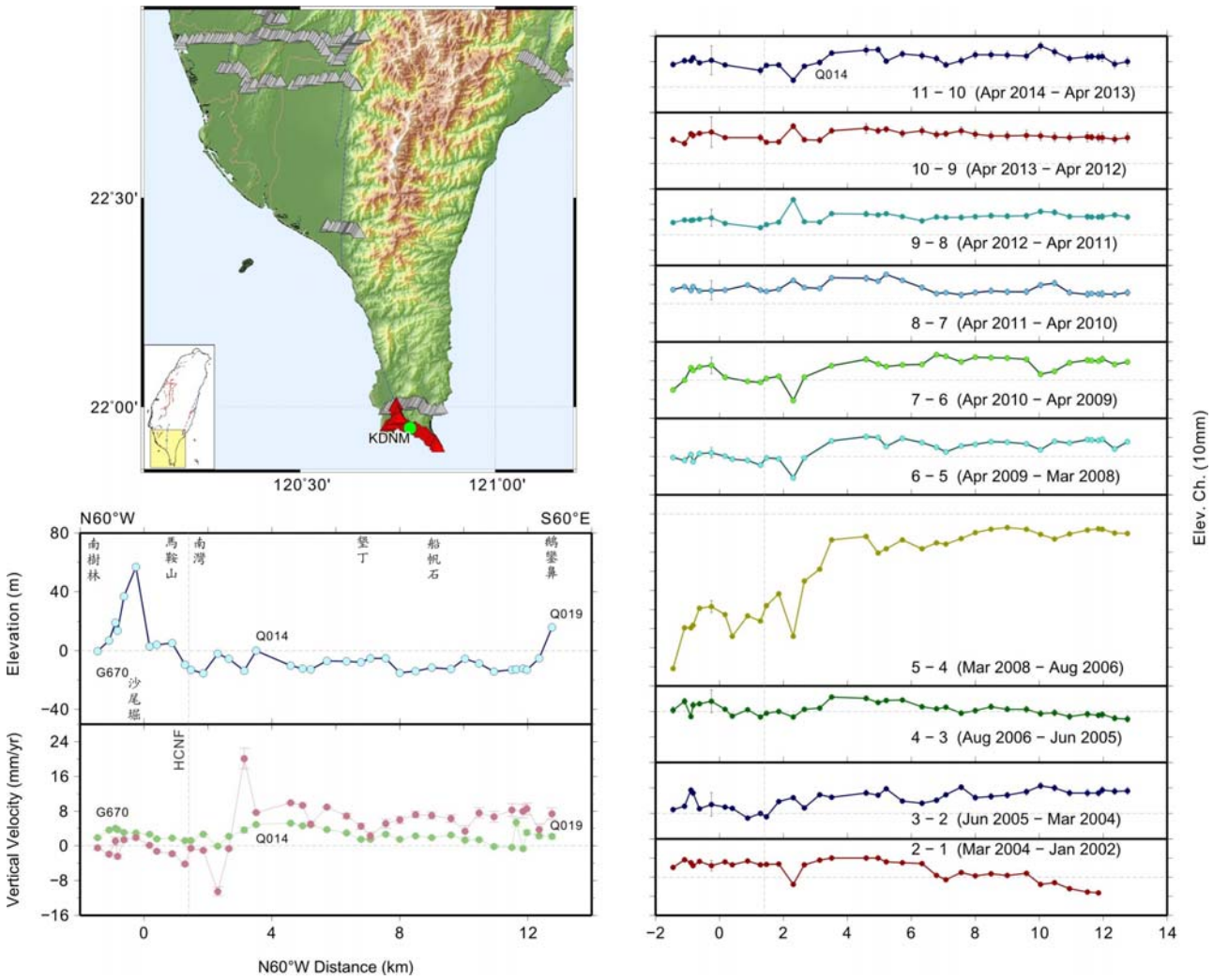


圖 2-3.35：台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。左下欄中之淡綠色為 2002 ~ 2006 年恆春地震震前垂直速度，淡紅色為 2006 ~ 2014 年恆春地震震後垂直速度。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HNCF 為恆春斷層。

2-3-25 台 19 甲_善化至關廟測線

橫跨新化斷層的台 19 甲_善化至關廟水準測線，測線長度約為 22 公里。此測線共有 10 次水準測量，分別於 2002 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 11 月、2007-2014 年的 10 月進行。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（2.84 mm/yr），作為控制點 1157 之垂直速率（圖 2-3.36）。

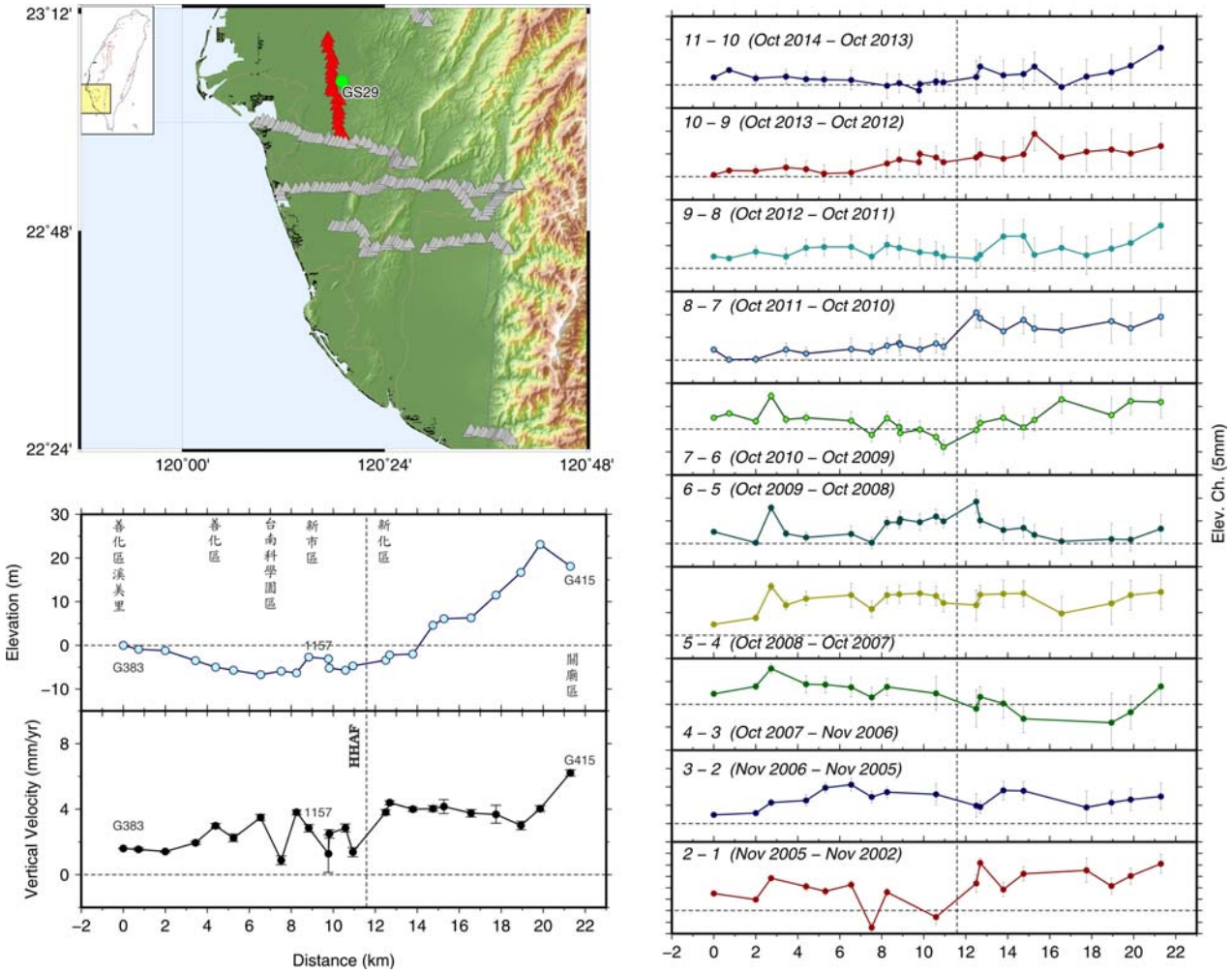


圖 2-3.36：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

2-3-26 東成至富岡測線

本測線橫跨利吉斷層及鹿野斷層，測線長 14 公里，分別於 2009-2012 年的 11 月、2013 與 2014 年 10 月進行共 6 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 和 PENL 之垂直速率（分別為-3.27 及-5.24 mm/yr），作為控制點 A086 和 S265 之垂直速率。該測線在岩灣至富岡段之地形高度改變大，呈現較明顯之沉陷（垂直速度最高達-12 mm/yr），且鹿野斷層以西之垂直速度呈現下降的趨勢，與地形變化不一致。（圖 2-3.37）。

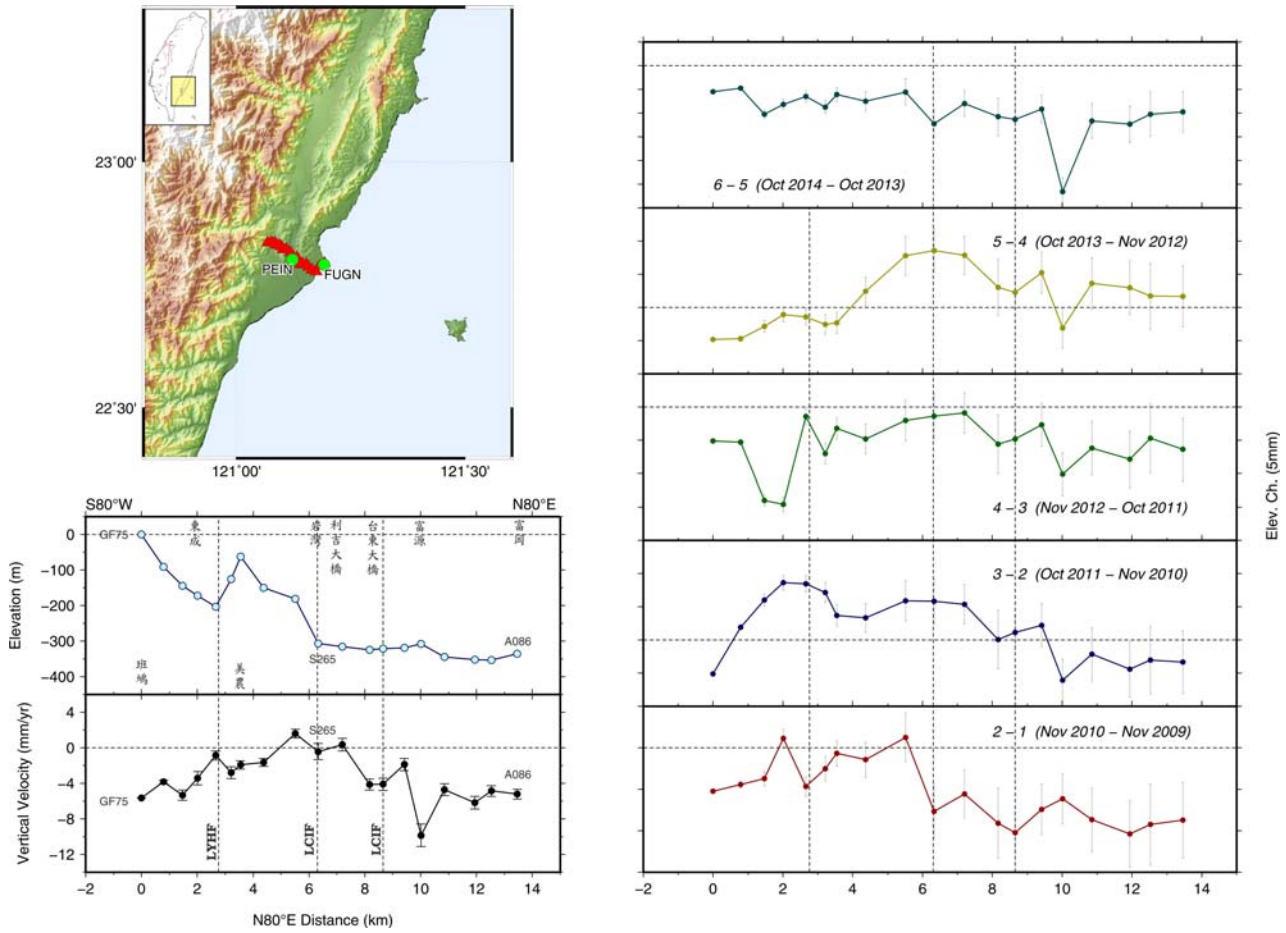


圖 2-3.37：東成至富岡測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

2-3-27 台 2_梗枋至東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長 44 公里，於 2001 與 2007 年 7 月、2011-2014 年的 10 月進行共 4 次的施測。本測線以 GPS 連續站 SUAO 之垂直速率（2.13 mm/yr），作為控制點 GG83 之垂直速率。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。在梗枋至南方澳港一帶皆為蘭陽平原地區，地形起伏較小；南方澳港至東澳嶺一帶為丘陵及山地地形，有明顯的起伏；此測線終點站東澳一帶為三角洲，因此過東澳嶺一帶地形呈現下降的趨勢。（圖 2-3.38）

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，建議另尋地基較穩固之處重新埋設此點，在運用資料時排除該點數據。（圖 2-3.39）。

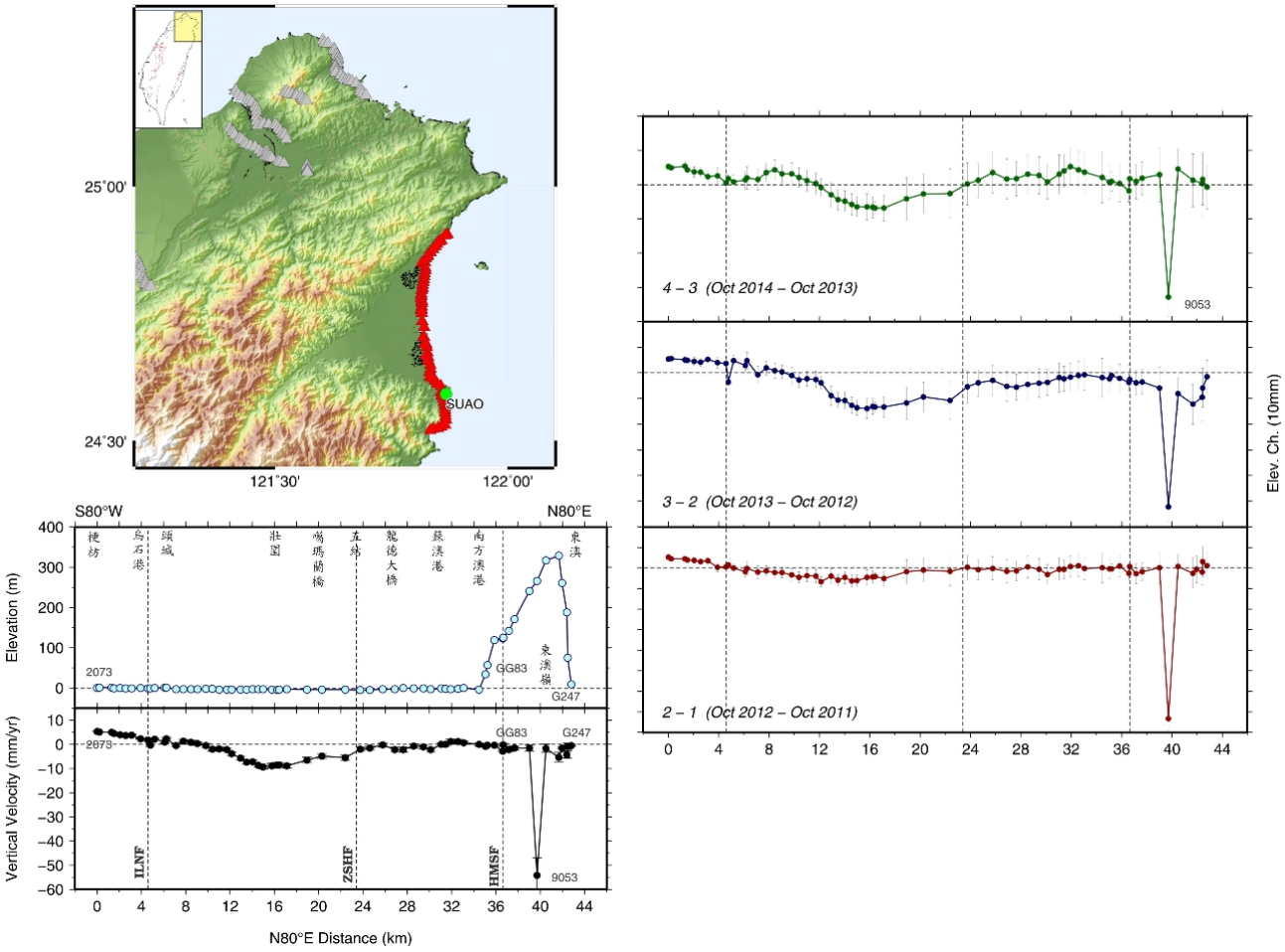


圖 2-3.38：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水-梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。



圖 2-3.39：水準點位 9053 現地情形。

2-3-28 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 2-3.40 至圖 2-3.66 顯示，所有連續站與精密水準點位之時間續序列走向大致一致，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	2-3.40
2	士林至三芝	YMSM	GB06	0.6	2-3.41
3	淡水至士林	GS10	GA69	0.2	2-3.42
4	五股至台北	WUKU	G225	0.3	2-3.43
5	縣 115_新屋至童話世界	YAME	GG03	3.3	2-3.44
6	縣 122_新竹至五峰	TCMS	HCCA	0.6	2-3.45
7	縣 117_新竹至峨眉	GS14	GB72	0.1	2-3.46
8	縣 136_龍井至太平	LSB0	G937	10	2-3.47
9	苗栗至南庄	PENL	GD97	0.02	2-3.48
10	五光至黃竹	GS23	AF15	0.03	2-3.49
11	金湖至瑞峰	GS17	G776	0.02	2-3.50
12	佳冬至七佳	CLON	GC85	0.5	2-3.51
13	嶺頂至瀧澗	YENL	G971	2.11	2-3.52
14	豐濱至光復	FENP	G991	0.006	2-3.53
15	靜浦至紅葉	JSUI	GA22	0.7	2-3.54
16	縣 132_大安至東勢	GS36	G896	1.6	2-3.55
17	縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里段	CAOT	T075	0.3	2-3.56
18	縣 150-台 16_北斗至水里	GS26	G296	4.1	2-3.57
19	縣 174_北門至楠西	GS44	XI088	0.9	2-3.58
20	縣 182_安平至龍崎	CK01	TN04	1.4	2-3.59
21	台 28_路竹至茂林	GS55	R016	0.05	2-3.60
22	台 22_岡山至安坡	AKND	G525	0.2	2-3.61
23	恆春西台地至佳樂水	HENC	G670	0.1	2-3.62
24	台 26_恆春至鵝鑾鼻	KDNM	Q014	0.2	2-3.63
25	台 19 甲_善化至關廟測線	GS29	1157	1.4	2-3.64
26	東成至富岡	FUGN	A086	0.3	2-3.65
27	台 2_梗枋至東澳	SUAO	GG83	0.8	2-3.66

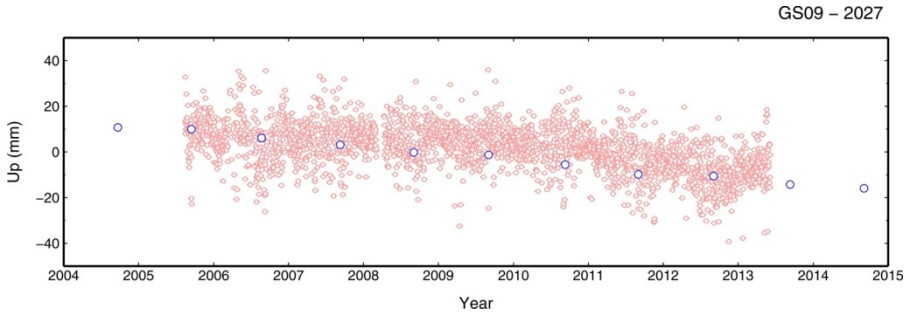


圖 2-3.40：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。

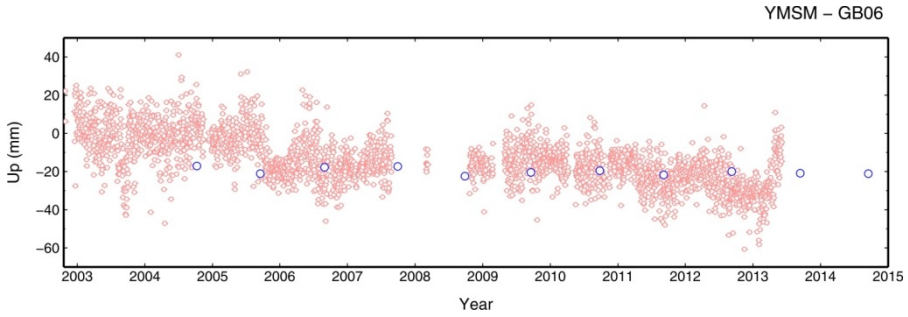


圖 2-3.41：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較。

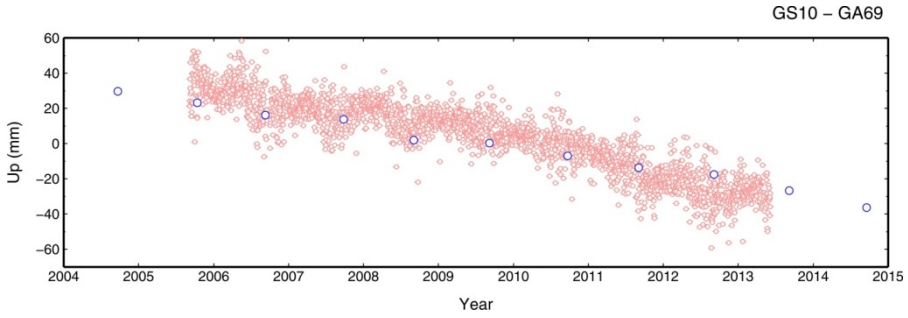


圖 2-3.42：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。

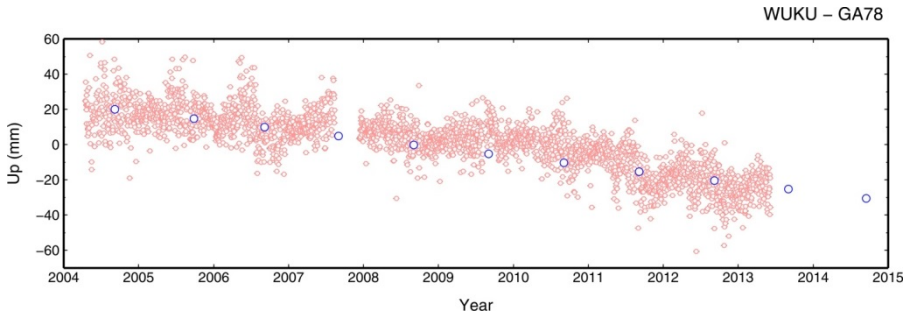


圖 2-3.43：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。

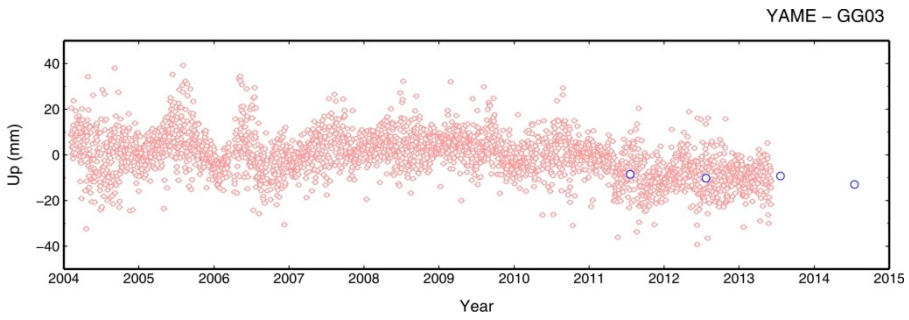


圖 2-3.44：水準點位 GG03 與連續站 YAME 之間序列比較。

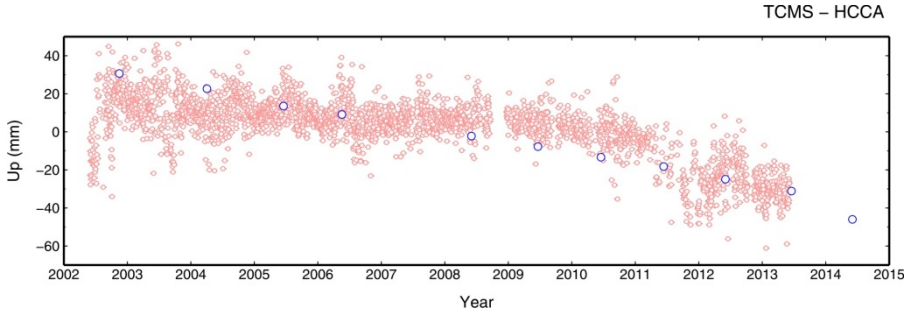


圖 2-3.45：水準點位 HCCA 與連續站 TCMS 之間序列比較。

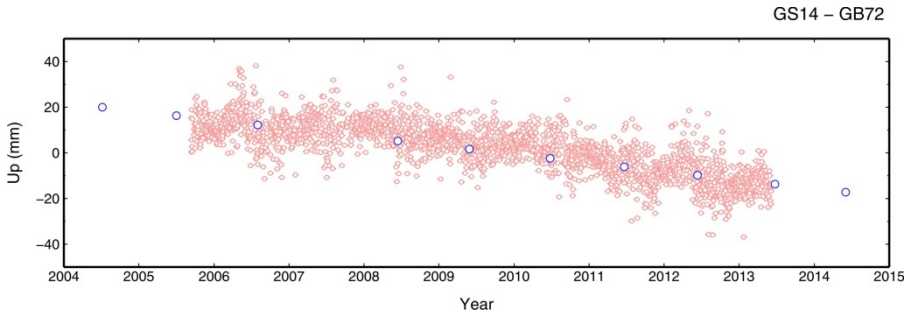


圖 2-3.46：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之間序列比較。

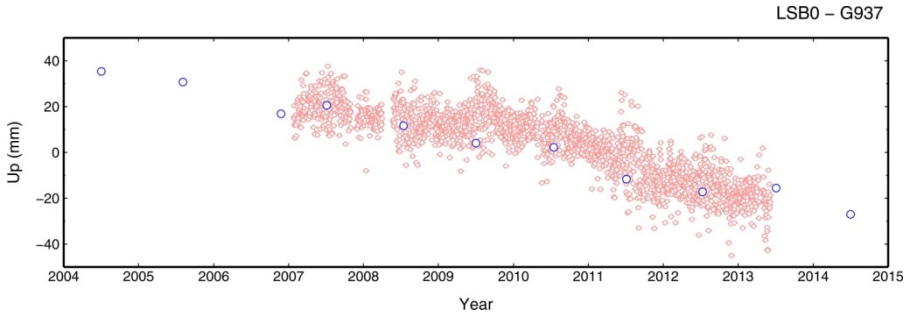


圖 2-3.47：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之間序列比較。

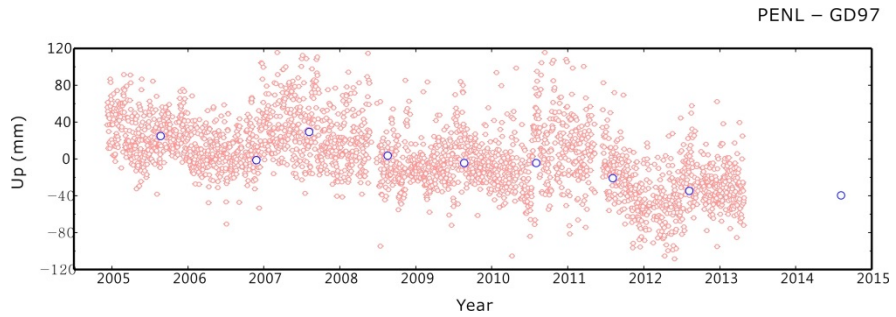


圖 2-3.48：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之間序列比較。

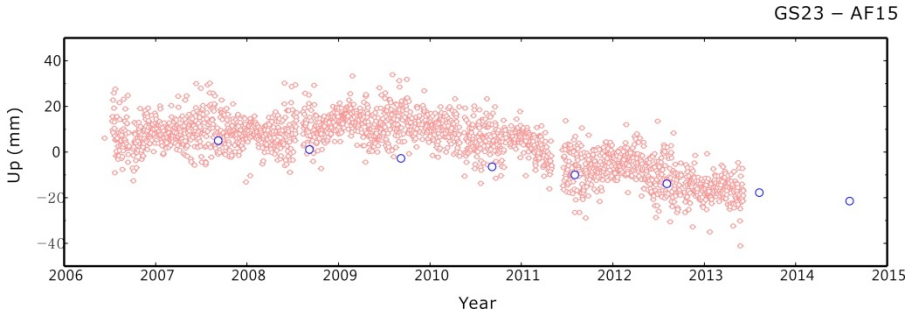


圖 2-3.49：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之間序列比較。

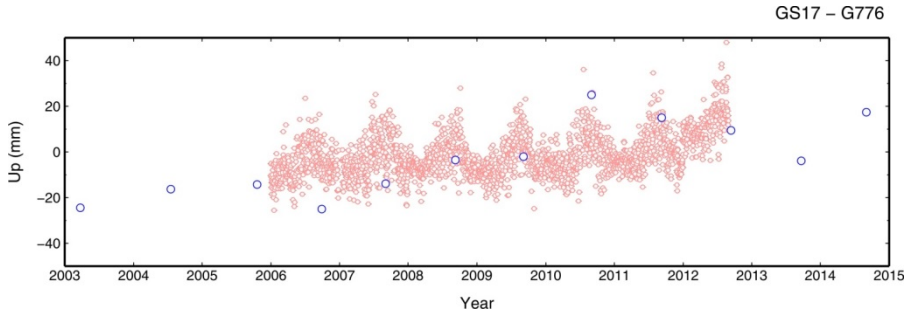


圖 2-3.50：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。

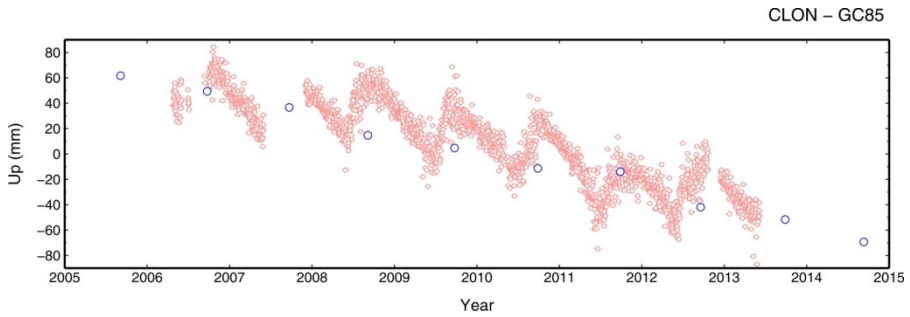


圖 2-3.51：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。

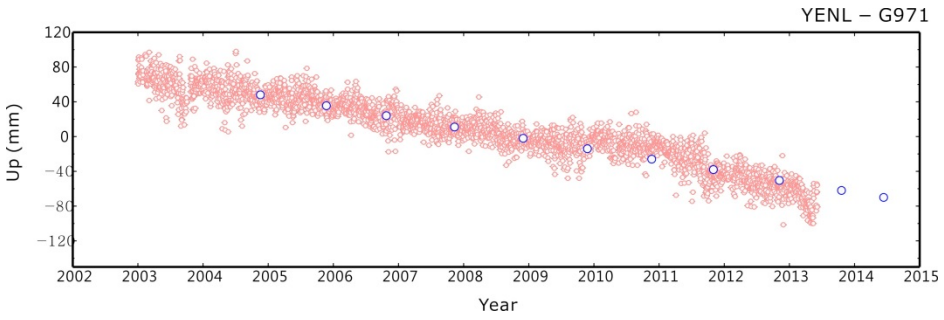


圖 2-3.52：水準點位 G971 與連續站 YENL 之間序列比較。

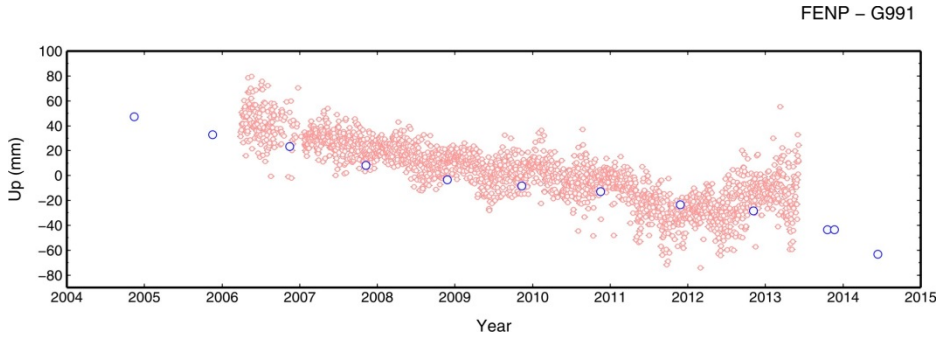


圖 2-3.53：水準點位 G991 與連續站 FENP 之間序列比較。

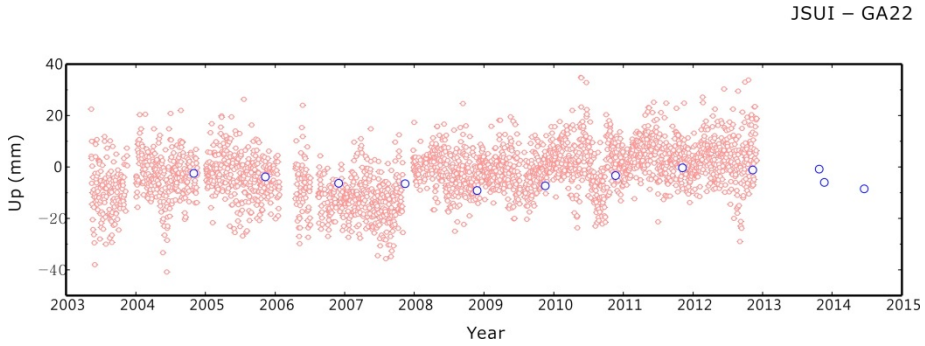


圖 2-3.54：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之間序列比較。

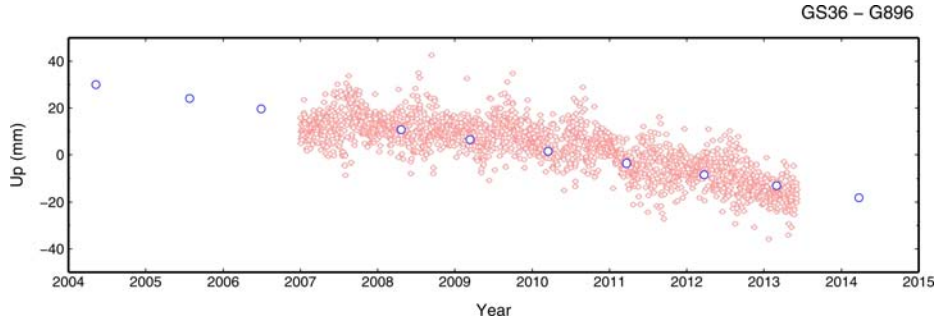


圖 2-3.55：水準點位 G896 與連續站 GS36 之間序列比較。

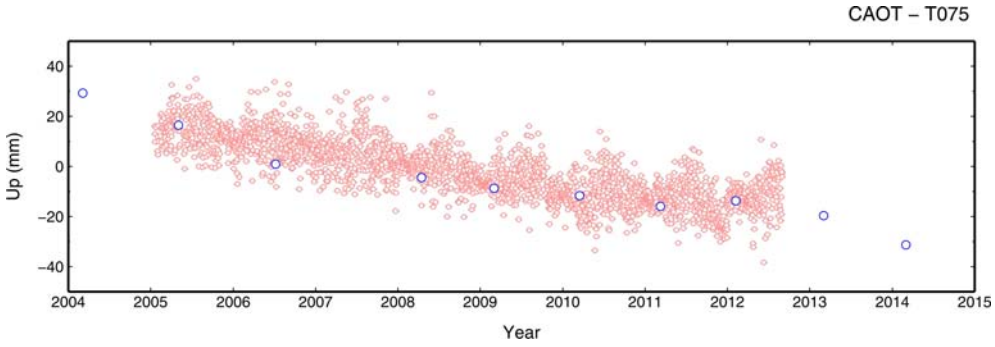


圖 2-3.56：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之間序列比較。

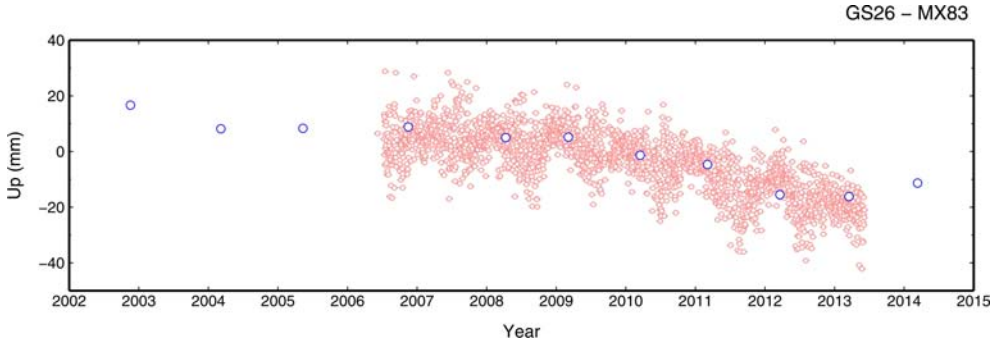


圖 2-3.57：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之間序列比較。

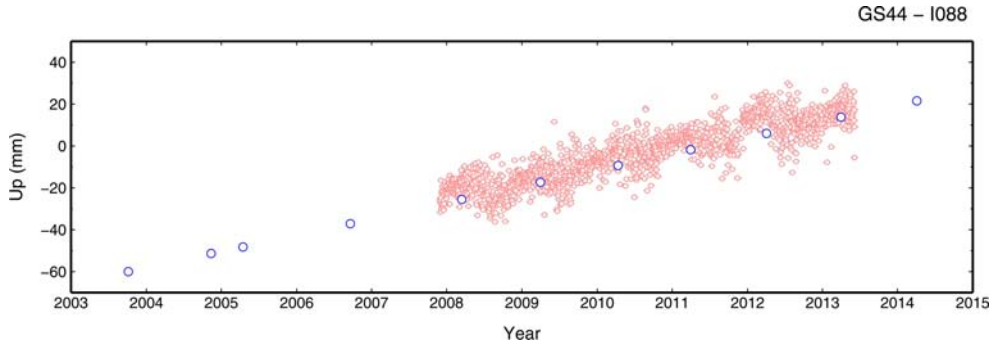


圖 2-3.58：水準點位 I088 與連續站 GS44 之間序列比較。

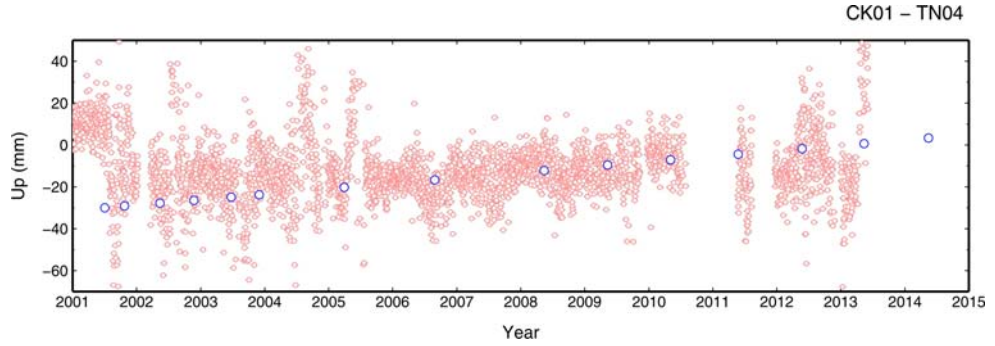


圖 2-3.59：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之間序列比較。

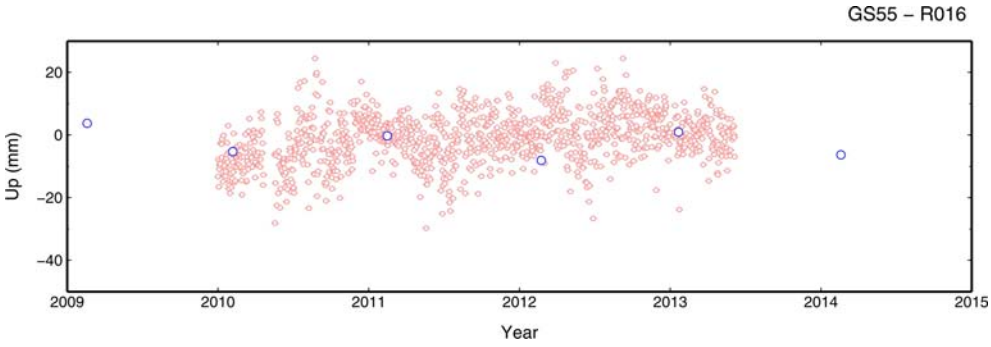


圖 2-3.60：水準點位 R016 與連續站 GS55 之間序列比較。

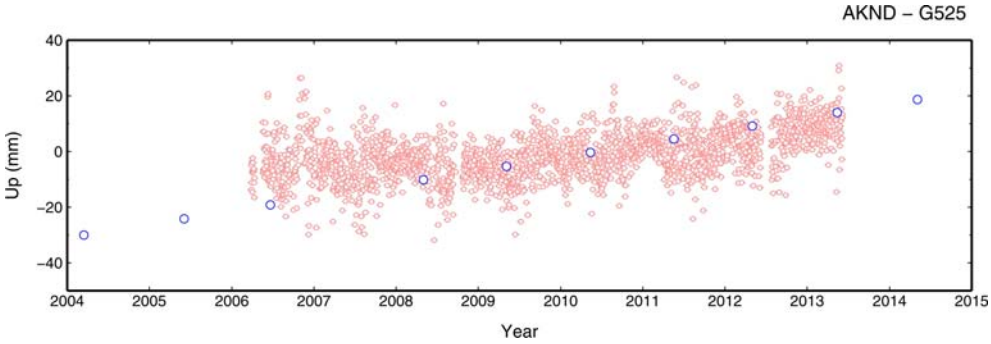


圖 2-3.61：水準點位 G525 與連續站 AKND 之間序列比較。

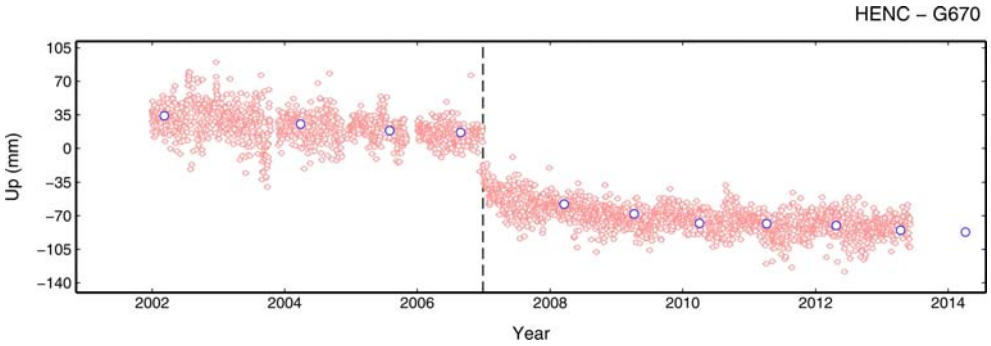


圖 2-3.62：水準點位 G670 與連續站 HENC 之間序列比較。

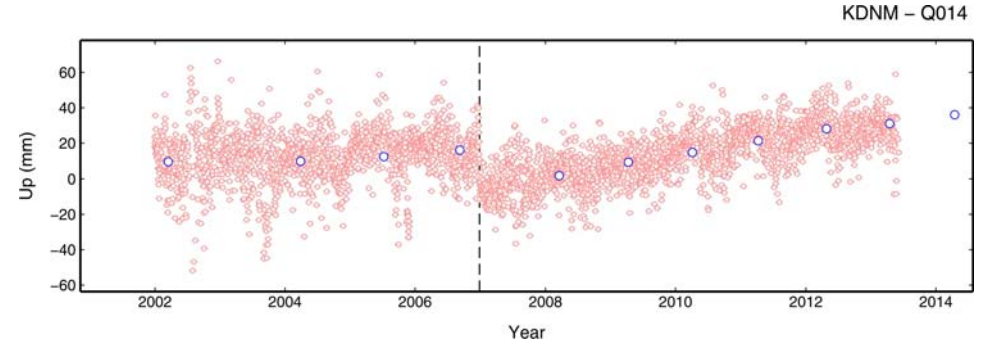


圖 2-3.63：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之間序列比較。

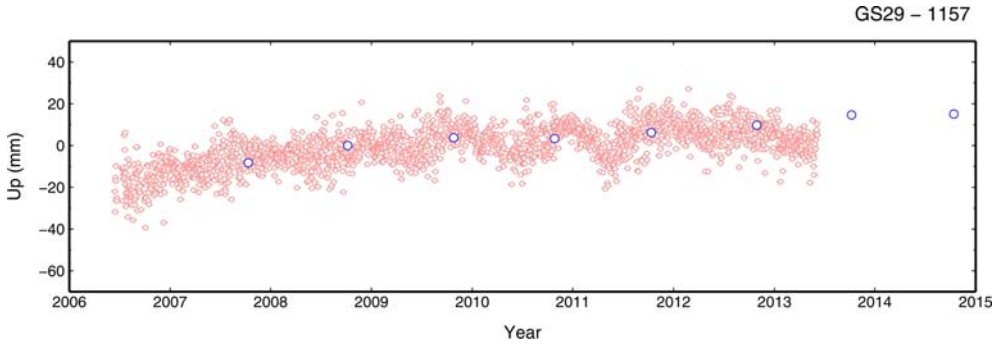


圖 2-3.64：水準點位 1157 與連續站 GS29 之間序列比較。

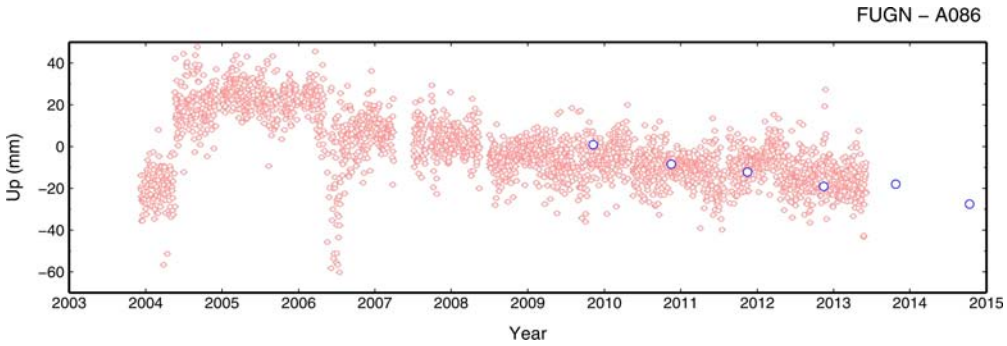


圖 2-3.65：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之間序列比較。

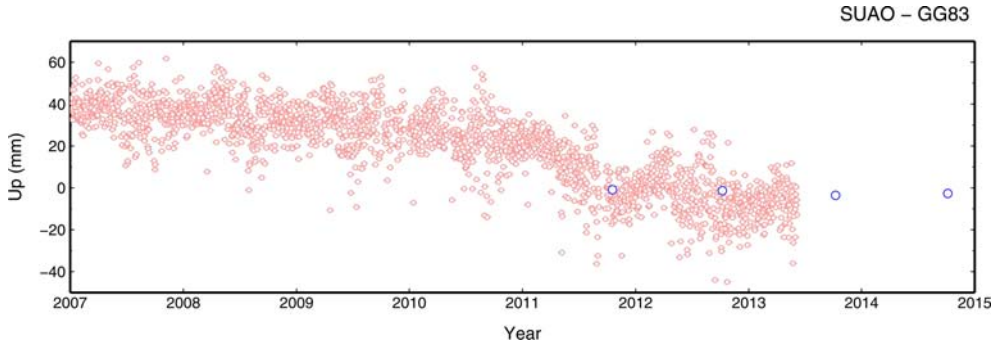


圖 2-3.66：水準點 GG83 與連續站 SUAO 之間序列比較。

2-3-29 全台精密水準速度場

根據圖 2-3.67 所示，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-10 mm/yr 至-15 mm/yr 之間。

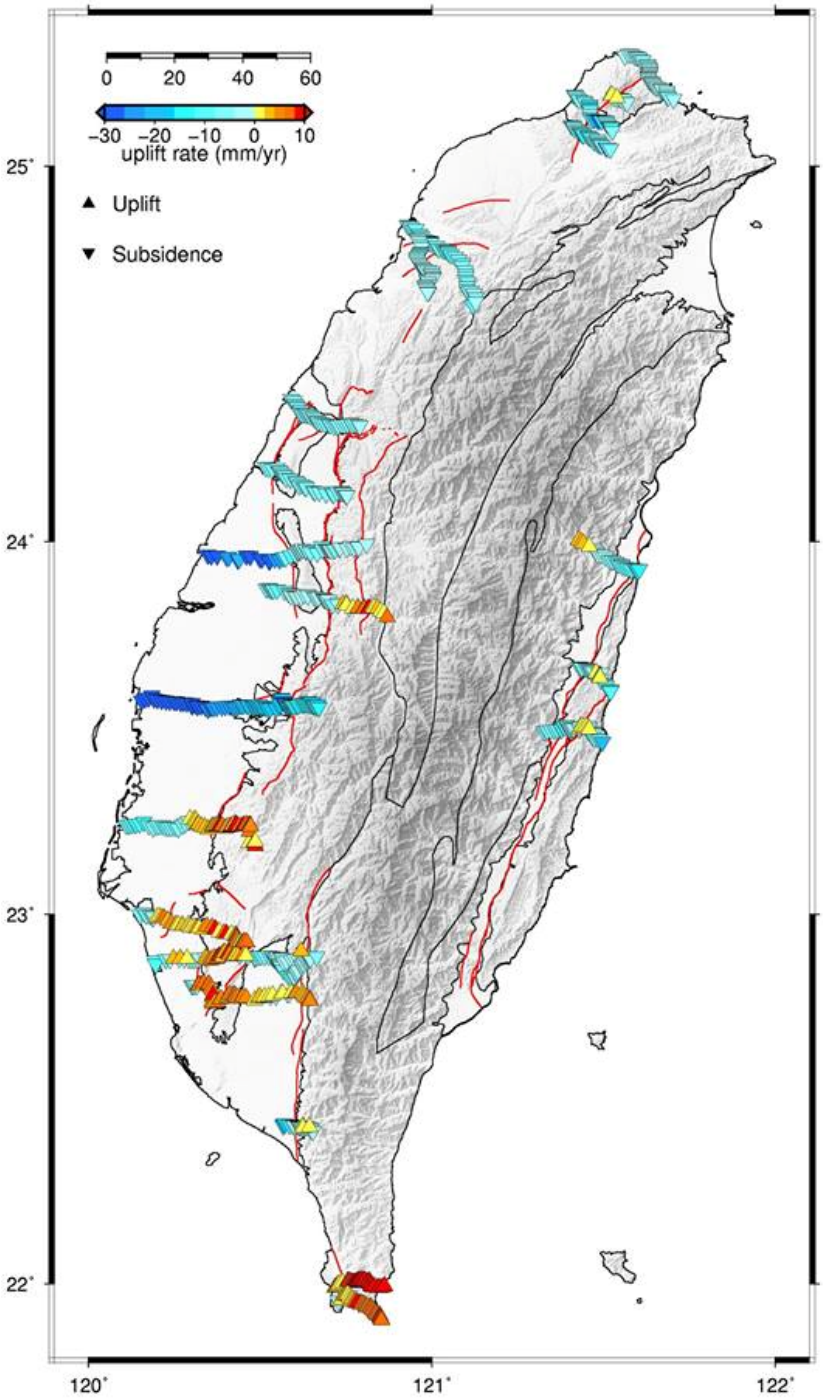


圖 2-3.67：全臺精密水準速度場。三角形方向代表抬升或沉降，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。

2-3-30 2014 年鳳林地震

根據中央氣象局公告，地震發生於 2014 年 5 月 21 日上午 8 點 21 分，芮氏規模 5.9，震央接近花蓮縣鳳林鎮（北緯 23.74 度、東經 121.45 度），地震深度 18 公里。中央地質調查所於 6 月 12 至 18 日進行「嶺頂至瀧澗」、「光復至豐濱」及「紅葉至靜浦」三條東部精密水準測線之施測。（圖 2-3.68）

根據解算結果，「嶺頂至瀧澗」測線之水準點位大部分為沉陷，僅少數點位抬升，其同震量值約由-6 至 1 mm；「光復至豐濱」測線在海岸山脈兩側有不同的變化，西側之同震量值約由 1 至 14 mm、東側同震量值約由-4 至-6 mm；「紅葉至靜浦」測線大部分點位為沉降，同震量值約-11 至 0 mm，少部分點位抬升同震量值約 0 至 3 mm。

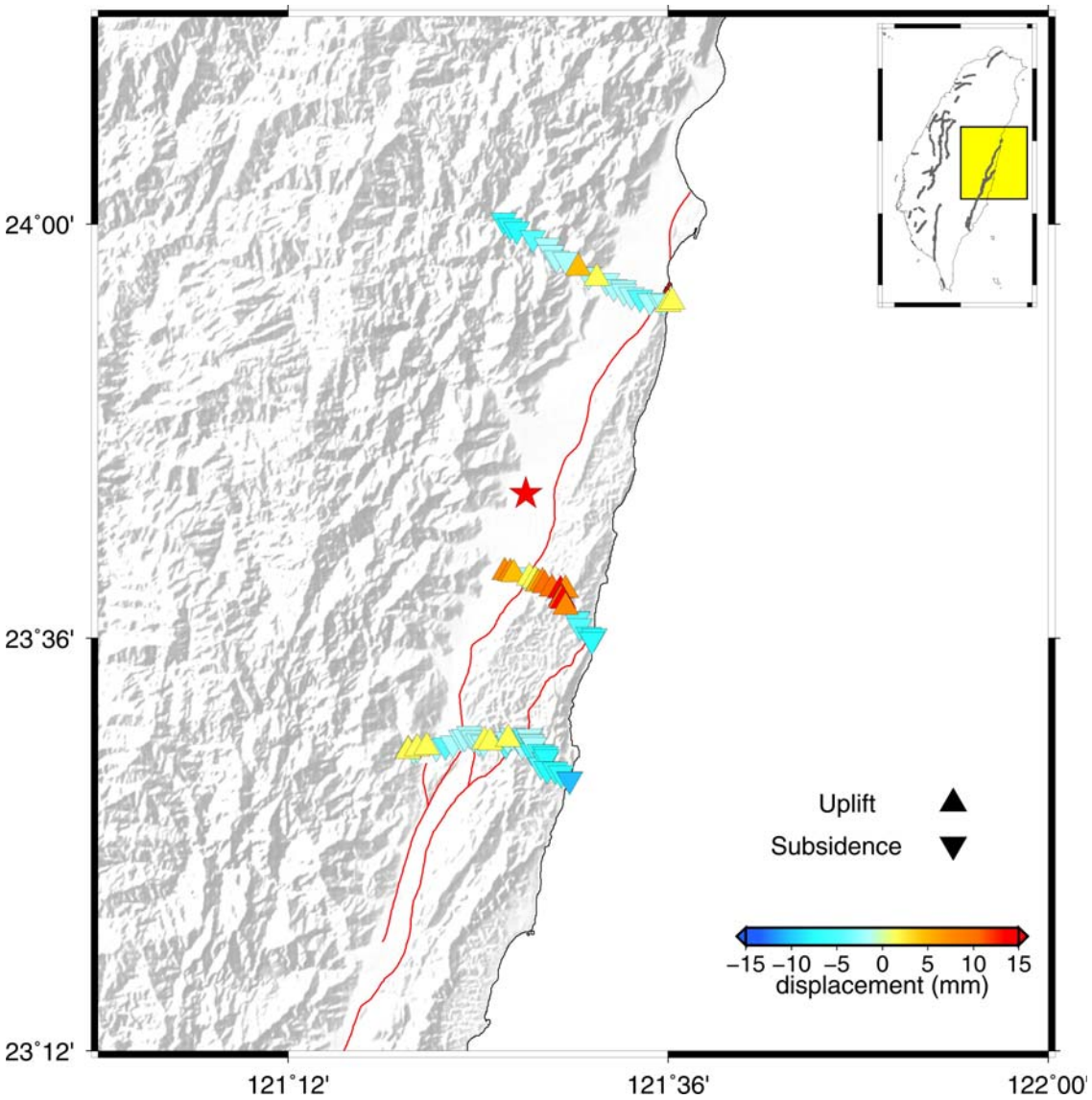


圖 2-3.68：鳳林地震震央與東部水準測線分布圖。紅色星號表示震央位置，三角形方向代表抬升或沉降，暖色系表示抬升，冷色系表示沉降。最上方為「嶺頂至瀧澗」測線、中間為「光復至豐濱」測線、最下方為「紅葉至靜浦」測線。

2-4 地表速度場分析

2-4-1 六甲-木屐寮斷層

2-4-1-1 水平速度場

從 2002 年開始，經濟部中央地質調查所（CGS）在臺灣西南部多次設置測量站不到 5 公里間距的 GPS 網(圖 2-4.1(a))。這些 GPS 站是由各種機構組成，包含中央氣象局(CWB)、國際全球導航衛星系統服務（IGS）、內政部（MOI）、中央研究院（AS）、 經濟部中央地質調查所（CGS）還有國立成功大學（NCKU)。從 2002-2009 年之間，GPS 連續站的資料收集中，109 個站內 77%有 5 ~ 7 個時段，19%有 3 ~ 4 個時段以及 4%有 2 個時段。每個時段超過六個小時。我們僅使用在我們的解算策略中觀察到時段的站，因為這些站位於重要位置並且跨越了 3 ~ 4 年。

我們使用 Bernese 軟體 v.5.0 進行 GPS 連續站及移動站的資料解算，以獲得測站座標（Dach et al., 2007)。處理過程中使用 IGS 提供精確且固定的星曆。109 個 GPS 移動站及 61 個 GPS 連續站的監測是參考在國際框架下（ITRF2000）四個全球 IGS 基準站（TSKB、GUAM、TID2 和 WUHN)（Altamimi et al., 2002)。結果表示：GPS 移動站測站坐標的水平方向不確定性是 3 ~ 4 毫米，垂直方向不確定性是 10 ~ 40 毫米。由於在移動站下，垂直速度相對較大的不確定性，本研究的垂直變形將使用精密水準測量資料及 GPS 連續站觀測來做討論。

我們採用最小二乘法，並假設在位置的線性趨勢，隨著時間的推移估計 2002 年和 2011 年之間的長期水平速度從坐標時間序列數據的 GPS 站。為速度場的標準偏差，我們按比例從速度的最小二乘估計通過量 $\boldsymbol{k} = (\boldsymbol{mis}/2)^2$ 得到正規的不確定性(σ_{ls})。$\boldsymbol{k}$ 是每日坐標變化的坐標時間序列呈現，其中 ***mis*** 是計算和觀察值的殘差的坐標上東西方向、南北方向和垂直分量的時間序列分別的效果。然後速度之不確定性 σ 為被重新估計，經驗方程 σ = (σls2 × k) 1/2（Ching et al., 2011c)。在臺灣西南部 170 個 GPS 水平速度場都是相對於澎湖白沙 S01R(圖 2-4.1a)。

在我們的研究區域，水平速度向量的方位角主要是 257°至 293°之間（圖 2-4.1(a))。一般情況下，在海岸線附近的速度幅度逐漸向西減小，從超過 35 mm/yr 的東南地區幾乎沒有變形（~1 mm/yr)。最大水平速度在我們研究區域的東南方約 47 mm/yr。 另外，在觸口斷層與六甲-木屐寮斷層之間約 4 公里，有個明顯的速度梯度從 25 ~ 10 mm/yr。另外，在西部沿海平原海岸線東邊 7 ~ 8 公里處，可能存在一個模糊不連續的速度。

2-4-1-2 垂直速度場

為了監測臺灣西南部觸口斷層及六甲-木屐寮斷層垂直變形，經濟部地質調查所自 2003 年起在臺灣西南部從海岸線向東進入西山麓向東設置 66 公里長的精密水準路線，包含 63 個水準點（圖 2-4.1(b))。相鄰基準點之間的平均間距約 1 公里。這條水準路線每年調查一次。因此最多八個水準點是從 2003 ~ 2011 年測得的。許多設置是按照標準內政部第一等第一級水準的規範之下，並應用到水準點的數據收集程序，以減少或消除測量誤差（Chen et al., 2011)。 各種系統誤差從測量結果中除去，如從對標準、殷鋼桿校正熱膨脹、曲率校正、準直誤差和小行星折射誤差模型殷桿校正（Chen et al., 2011)。

使用由經濟部地質調查所收集 2003 至 2011 年的水準點計算垂直速度場，首先採用最小

二乘法，並假設在位置的線性趨勢，計算最佳擬合的平均基準速度相對於這個水準路線的最西端站的時間。而 30 個垂直速度相對於澎湖白沙 S01R （Ching et al., 2011b）這是重疊的兩條水準線被用來計算參考點的差值。此研究使用經濟部地質調查所 63 個水準點垂直速度場（圖 2-4.1(b)）。然而經濟部地質所在臺灣西南部地區的水準路線的垂直數據覆蓋面過於稀疏，因此我們在這項研究中也使用內政部從 2000 至 2008 年收集 325 個第一等第一級和第一等第二級的水準測量還有觀測 2000 至 2009 年的 GPS 連續站（Ching et al., 2011b）以提高數據的覆蓋。

在這項研究中，使用臺灣西南部 388 個相對於澎湖白沙 S01R 的測站。一般情況下，抬升速率位於山麓和山脈的東部和沉降顯著在海岸和沿海平原到西部。沿北北東走向的六甲-木屐寮斷層，斷層線將一個邊界隆起區與塌陷區分開來。抬升速率逐漸東移增加至 14 mm/yr。在沿海平原，一個明顯地下降 60 mm/yr，大量下降速度是人工抽取地下水的影響。

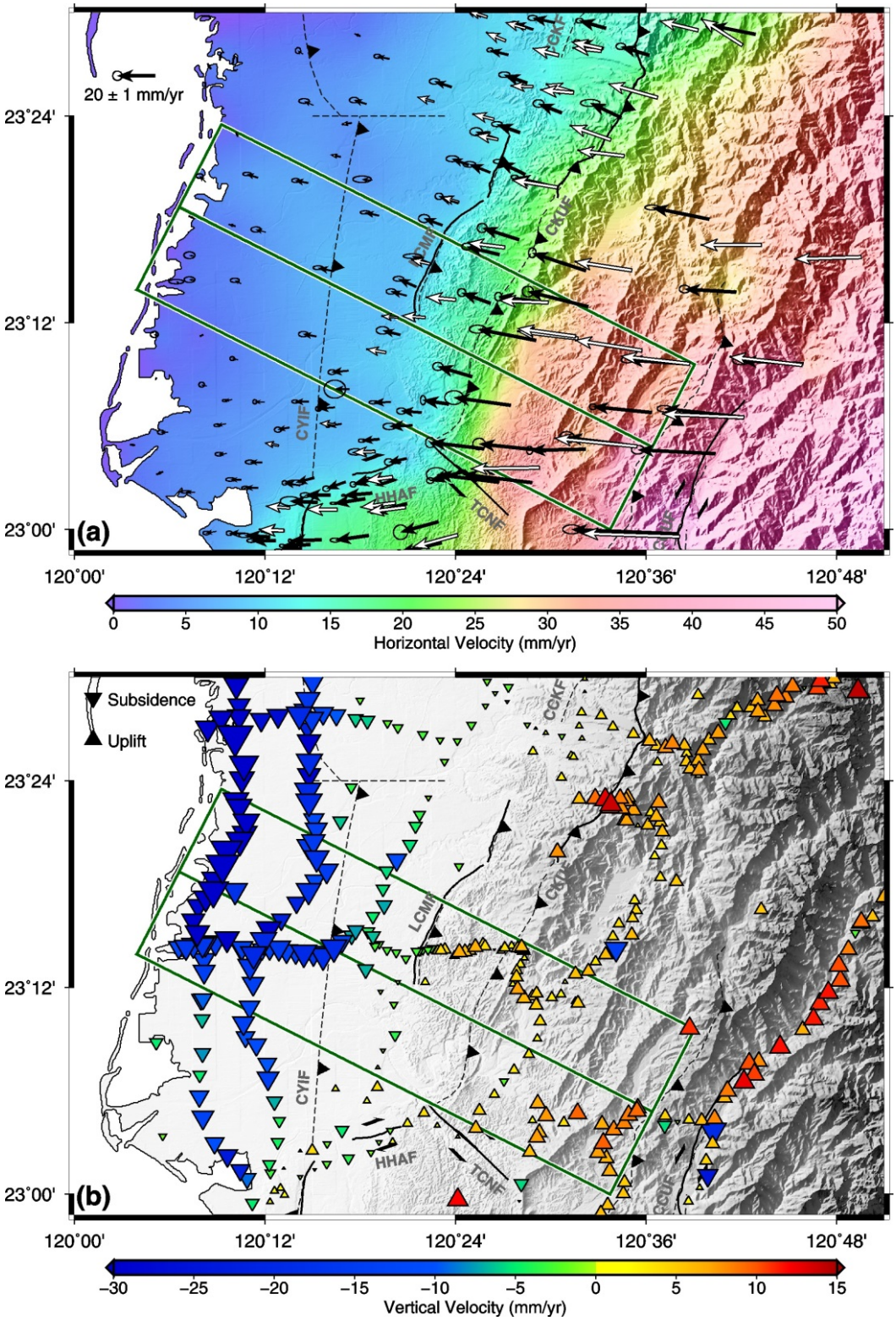


圖 2-4.1：（a）臺灣西南部相對於澎湖白沙 S01R 的水平速度場。95%可信度誤差橢圓顯示在每個速度箭頭的頂端。白色箭頭來自於 GPS 連續站的資料，而黑色箭頭來自於 GPS 移動站的資料。黑色實線為活動斷層。 綠色實線矩形為速度剖面。（b）臺灣西南部相對於澎湖白沙 S01R 的垂直速度場。暖色系的正三角形為抬升；冷色系的倒三角形為下降。下方色級尺規為速度場量大小。

2-4-1-3 二維斷層模型

為了了解臺灣西南部主要斷層的現今運動學和估算地震潛能，本研究利用二維彈性半空間位錯模型以反演選定的速度剖面的地表變形（圖 2-4.2(a)）以及有關活動斷層的幾何參數和滑動。

為了建構斷層的幾何形狀，從相同的地震剖面推斷出六種不同的平衡地質剖面被收集在本研究中（Suppe, 1980; Chang et al., 1996; Hung et al., 1999; Mouthereau et al., 2001; Huang et al., 2004; Yang, 2007）。然而，從這些剖面的結構的解釋是都不同，除了用表面地質深層鑽探井 NS-27（Hu and Sheen, 1989）證明一個在六甲-木屐寮斷層東邊的背斜通過。在這項研究中，我們只能假設斷層的初始位置並通過蒙地卡羅（Monte Carlo）法反演搜索所有其他斷層參數（Fukuda and Johnson, 2008）。

為了不要受抽取地下水的影響，在此速度剖面我們忽略垂直六甲-木屐寮斷層向西的速度場（圖 2-4.2(b)）。 從西到東，沿著 10 公里至 20 公里的剖面觀察到些微的水平速度梯度，顯示了在西部沿海平原嘉義斷層的運動（圖 2-4.2(b)）。而在速度剖面中可以明顯地看到水平速度場梯度及垂直速度變化，這表示在速度剖面的 28 ~ 40 公里處六甲-木屐寮斷層及觸口斷層有明顯地運動（圖 2-4.2(b)）。除此之外，經過多次試驗，我們注意到觸口斷層的東邊抬升速率的增加可能反映滑脫面的傾角或滑動速率變化。 一個完全鎖住且具有 90°傾角需要達到本研究先前假設的模型結構。

根據最佳解的模型 （圖 2-4.2(b)），在這邊我們注意到嘉義斷層（3.1 公里）、六甲-木屐寮斷層（1.3 公里）和觸口斷層（0.3 公里）的鎖定深度都是淺的（圖 2-4.1b）。而嘉義斷層（9.6 mm/yr）、六甲-木屐寮斷層（7.3 mm/yr）和觸口斷層（6.9 mm/yr）的滑移速率也不高。然而，在虛擬斷層中，32.9 mm/yr 滑移速率是非常顯著的。

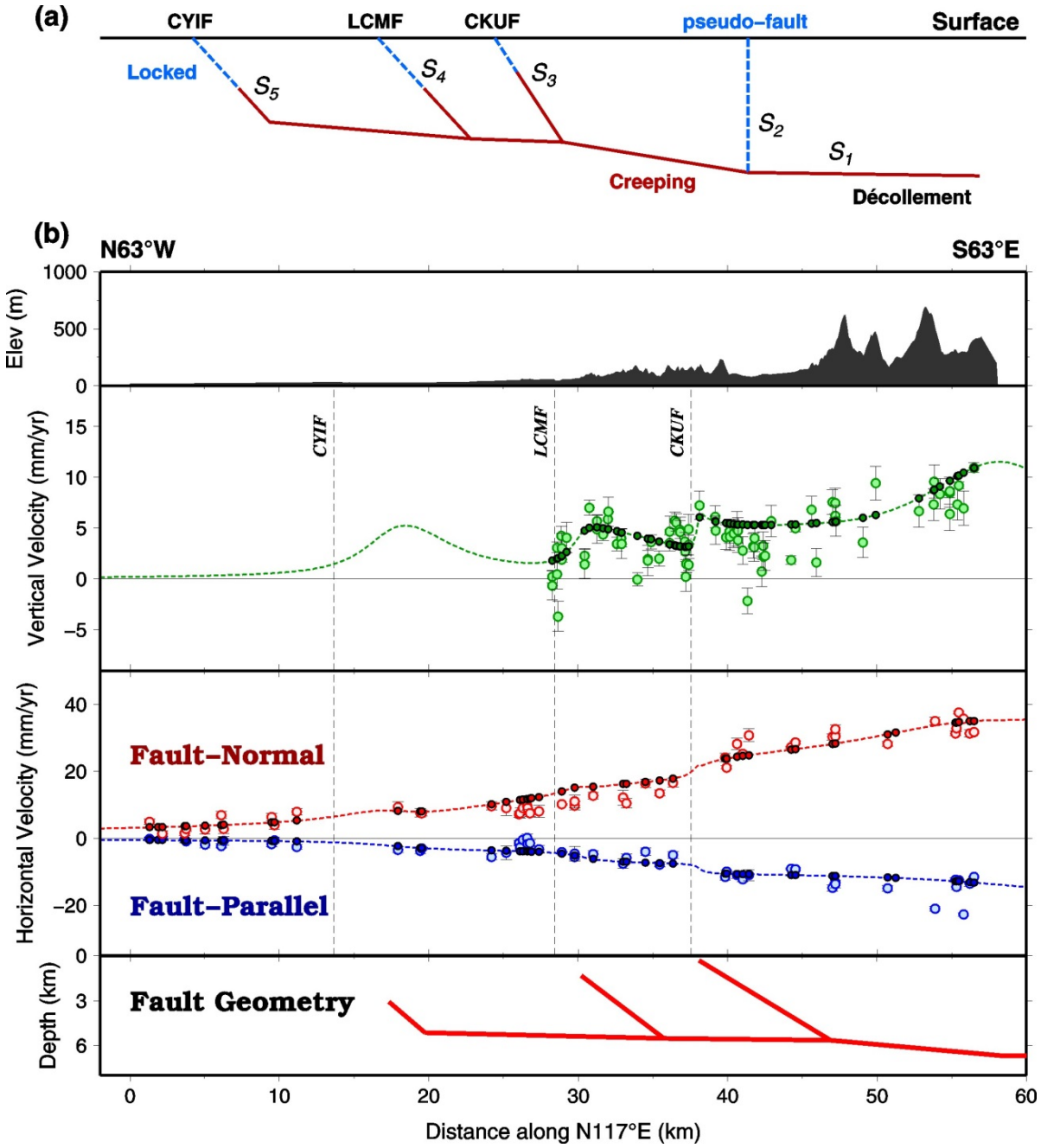


圖 2-4.2：（a）二維斷層模型示意圖。（b）橫跨速度剖面的模型結果。最上方的剖面顯示高程。第二剖面是垂直速度。第三面板是水平速度。最下方的剖面代表斷層的幾何構造。空心圓圈為有誤差的觀測值，實心圓圈為模型預測值。虛線表示延伸到地表的主要斷層的位置。CYIF：嘉義斷層；LCMF：六甲-木屐寮斷層系統；CKUF：觸口斷層。

2-4-2 龍船斷層

2-4-2-1 水平速度場

台灣世曦工程顧問股份有限公司（台灣世曦）為了監測國道三號中寮隧道與田寮二號高架橋一帶之地殼變形特性，自 2011 年底開始，至今已蒐集 GPS 連續站、大地變位監測點（GPS 移動站）及導線點約 2 年半（2011/11 ~ 2014/04）的觀測資料，藉由座標時間序列分析產生速度場後進行討論。基於不同之資料類型及蒐集頻率之高低，GPS 連續站及大地變位監測點的速度場成果最為可靠，其次為隧道外導線點之速度場，再其次為隧道內導線點之速度場。

在此首先探討工作區域內於 ITRF 框架下的水平速度場，如圖 2-4.3。由圖 2-4.3 可發現本計畫測區之點位速度場，其速度向量之大小和方向在龍船斷層和旗山斷層的南北側有所不同，因此本計畫將此區域劃分為三個塊體：龍船斷層以北（即龍船斷層之下盤）為塊體一（block I）、龍船斷層以南至旗山斷層以北（即龍船斷層之上盤、旗山斷層之下盤）為塊體二（block II）、旗山斷層以南（即旗山斷層之上盤）為塊體三（block III）。

由圖 2-4.3、圖 2-4.4 與圖 2-4.5 可知各塊體的速度量和速度量誤差，塊體一主要以 14 ~ 41 mm/yr 之速度量朝西南方向移動並且具有逆時針旋轉之特性。塊體二主要朝西北方向移動並且在高架橋兩側略有速度差異，高架橋左側速度量在 34 ~ 55 mm/yr，高架橋右側速度量在 43 ~ 62 mm/yr。圖 2-4.5 中，作為塊體二和塊體三交界的中寮隧道北出口一帶，兩個塊體運動速度量有所不同，塊體二朝西北方向移動，而塊體三除了 Q058、Q059 和 GPS3 外，其餘點位以 24 ~ 52 mm/yr 之速度量朝西南方向移動。圖 2-4.3 中，位於塊體三隧道內的速度量以 28 ~ 48 mm/yr 之速度量朝西南方向移動，隧道內點位的速度量誤差明顯大於隧道外。

由以上速度量成果可知，三個塊體各自有其移動方向與移動速度量，顯示出龍船斷層與旗山斷層的活動造成地表的變形。

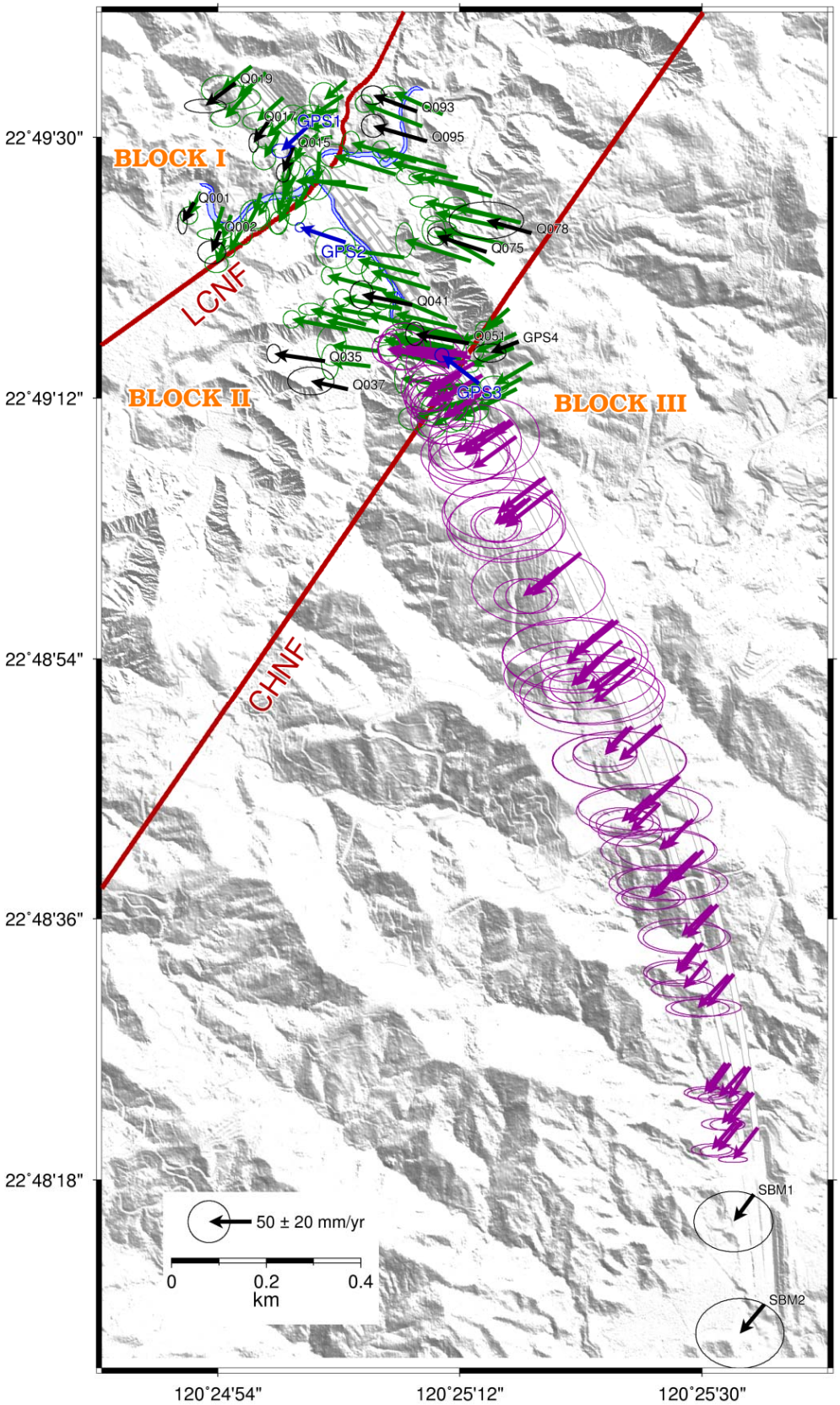


圖 2-4.3：連續站、大地變位監測點和導線點參考於 ITRF 之水平速度場。藍色、黑色箭頭分別代表連續站和大地變位監測點推求之速度向量。紫色、綠色箭頭分別代表隧道內、隧道外導線點推求之速度向量。95%可信區間之誤差橢圓位於各速度向量頂端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮遂道之位置。藍色區域為河流。紅色線條為斷層之位置。LCNF：龍船斷層，CHNF：旗山斷層。

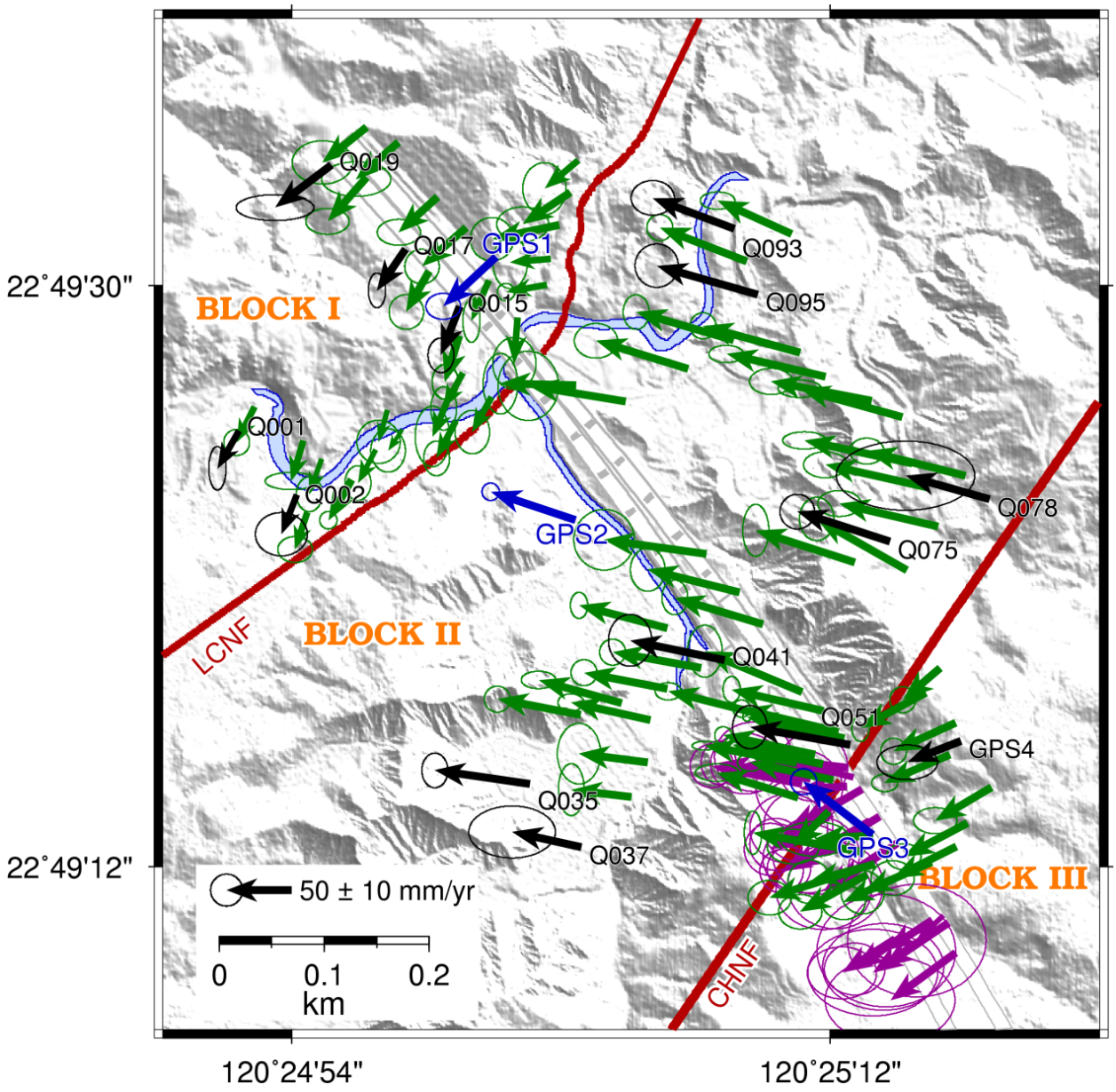


圖 2-4.4：連續站、大地變位監測點和導線點參考於 ITRF 之水平速度場（隧道北口至高架橋一帶）。藍色、黑色箭頭分別代表連續站和大地變位監測點資料推求之速度向量。紫色和綠色箭頭分別代表隧道內、外導線點推求之速度向量。95%可信區間之誤差橢圓位於各速度向量頂端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮遂道之位置。藍色區域為河流。紅色線條為斷層之位置。LCNF：龍船斷層，CHNF：旗山斷層。

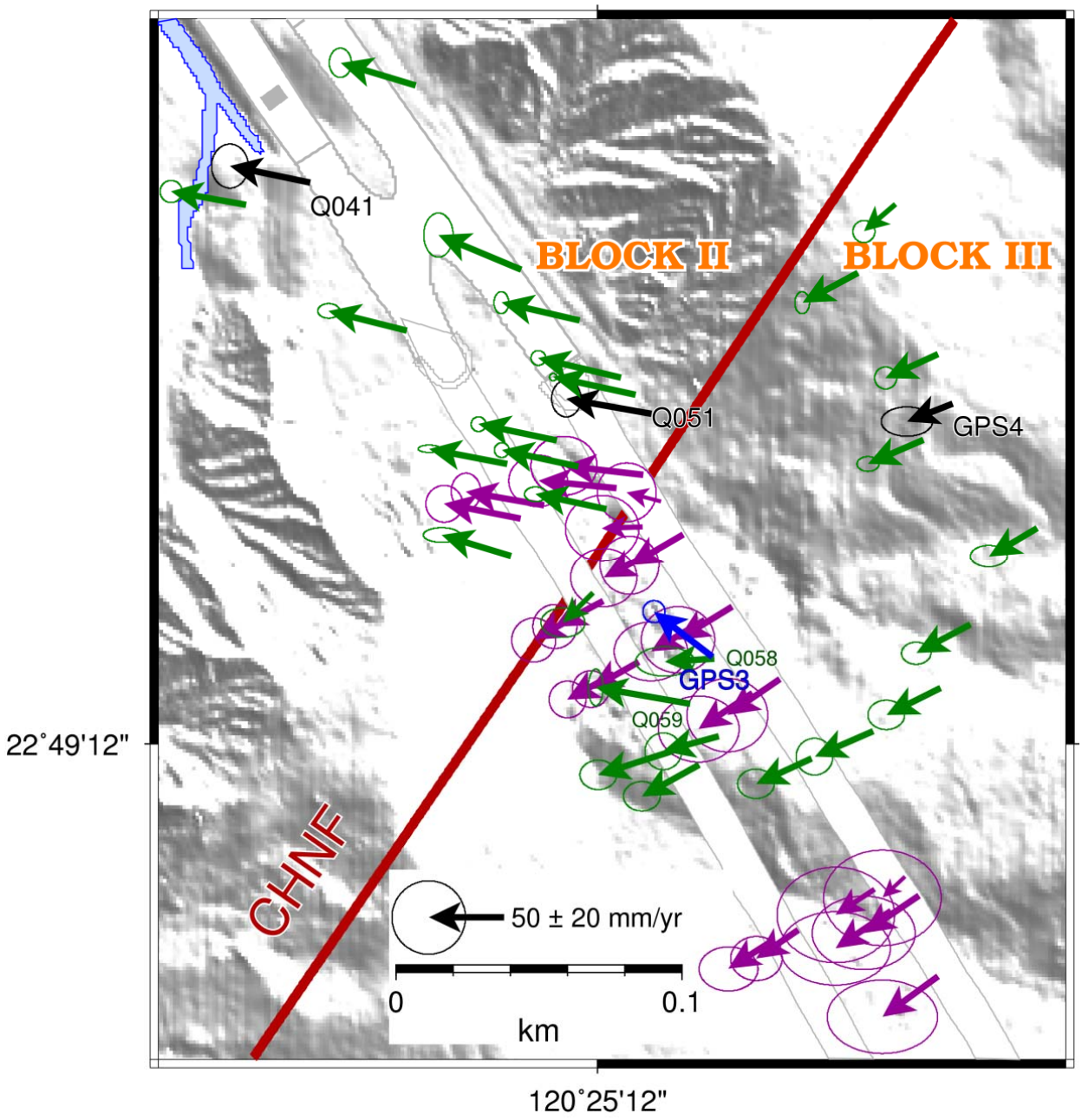


圖 2-4.5：連續站、大地變位監測點和導線點參考於 ITRF 之水平速度場（隧道北口）。藍色、黑色箭頭分別代表連續站和大地變位監測點資料推求之速度向量。紫色、綠色箭頭分別代表隧道內、隧道外導線點推求之速度向量。95%可信區間之誤差橢圓位於各速度向量頂端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮遂道之位置。紅色線條為斷層之位置，CHNF：旗山斷層。

2-4-2-2 垂直速度場

在垂直速度場方面，台灣世曦至今已蒐集 GPS 連續站、大地變位監測點（GPS 移動站）及水準點約 2 年半（2011/11 ~ 2014/04）的觀測資料，並藉由座標時間序列分析產生速度場後進行討論。基於不同之資料類型及蒐集頻率之高低，水準點的高程變化速度最為可靠，其次為 GPS 連續站之速度場，再其次為大地變位監測點之速度場。

由 GPS 連續站、大地變位監測點和水準點於 ITRF 框架下的垂直速度場指出，塊體三的速度量最小，其次是塊體一，塊體二的速度量最為顯著，如圖 2-4.6、圖 2-4.7 及圖 2-4.8。塊體一至塊體二的速度量變化為逐漸遞增，至中寮隧道北出口附近為最大值。塊體二至塊體三的速度量在中寮隧道北出口附近有相當顯著的差異，而塊體三本身的速度量變化並不明顯。

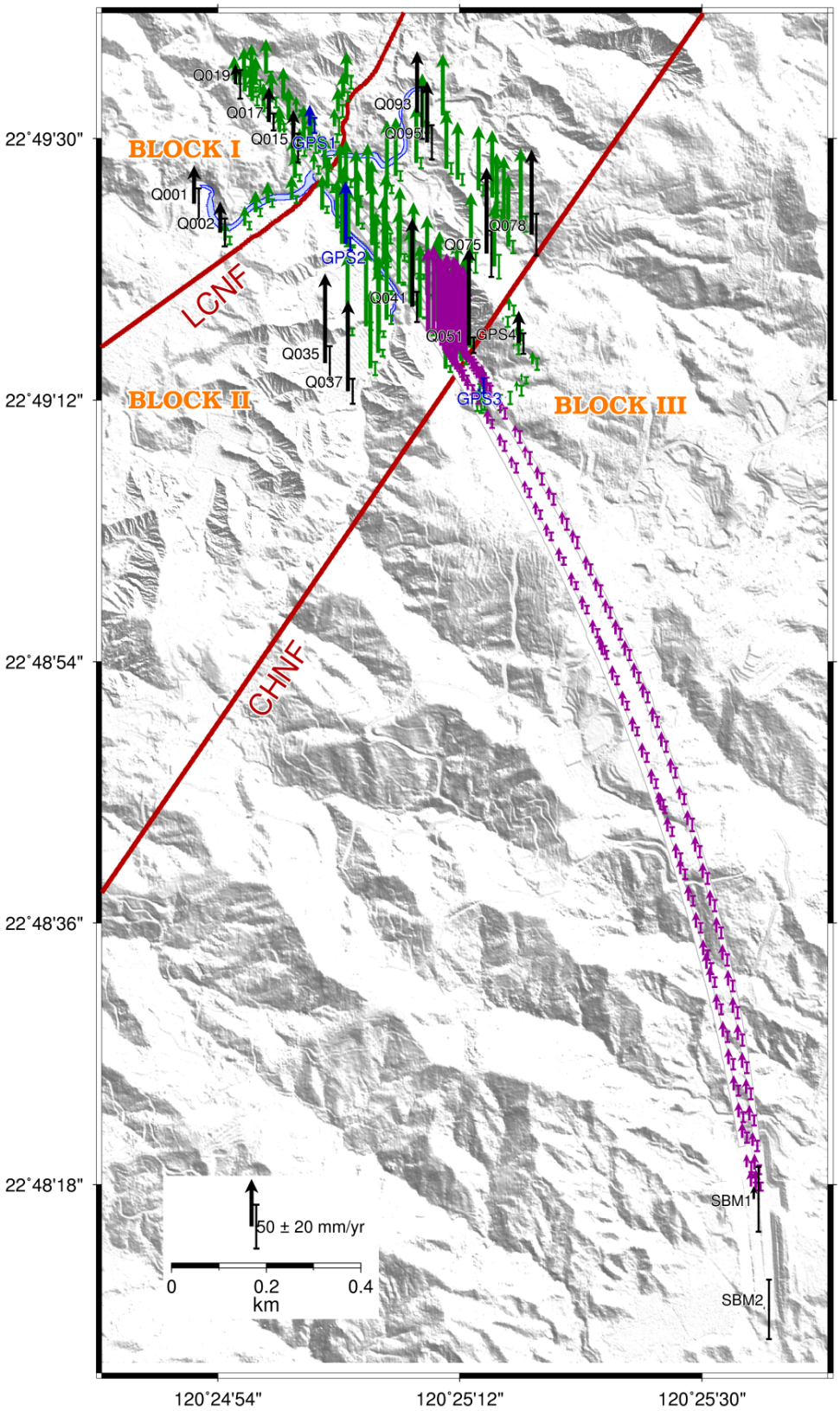


圖 2-4.6：連續站、大地變位監測點和水準點參考於 ITRF 之垂直速度場。藍色、黑色箭頭分別代表連續站、大地變位監測點推求之速度向量。綠色、紫色箭頭分別代表隧道外、隧道內水準點推求之速度量。95%可信區間之誤差範圍位於各速度向量底端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮遂道之位置。藍色區域為河流。紅色線條為斷層之位置。LCNF：龍船斷層，CHNF：旗山斷層。

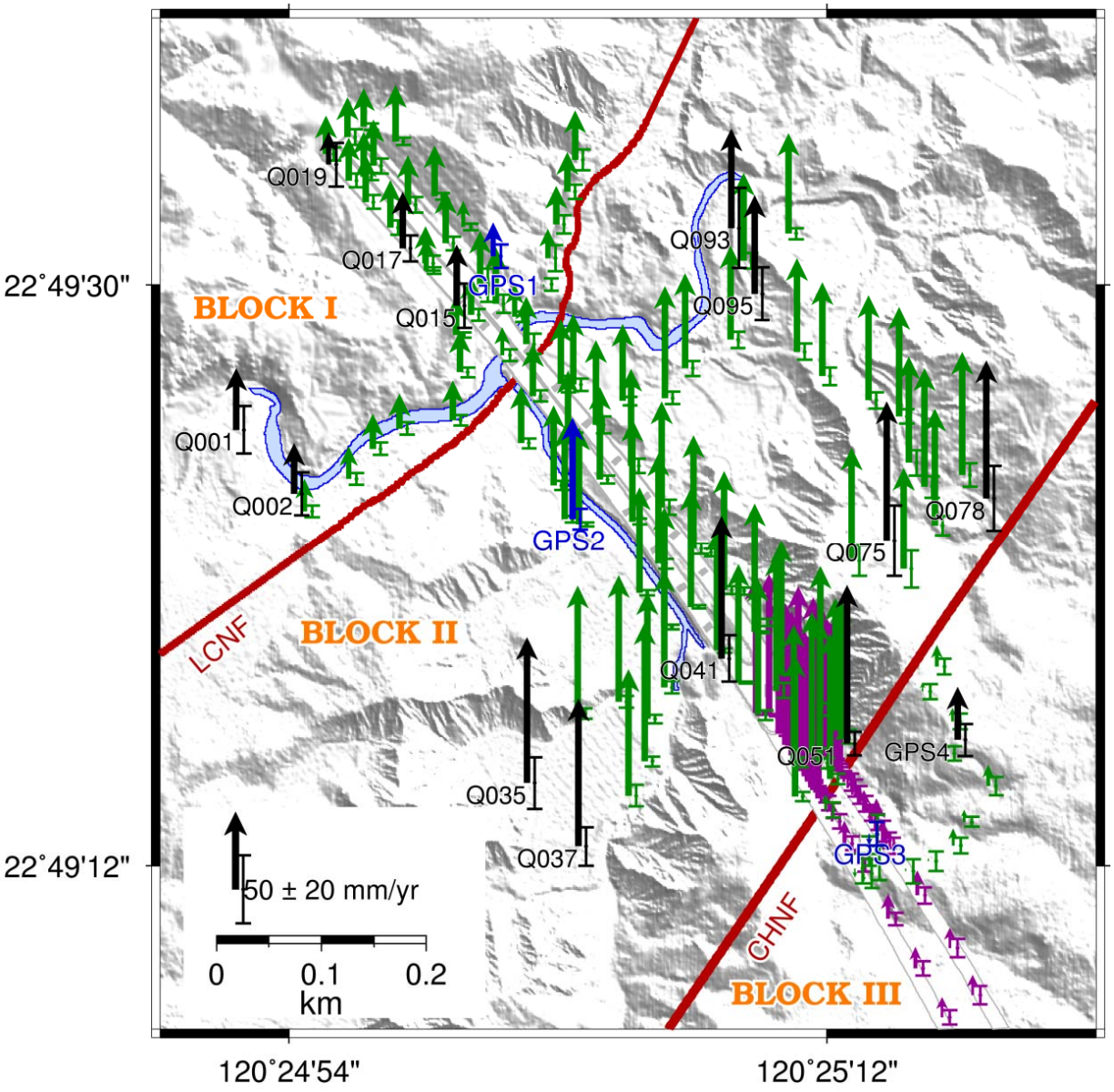


圖 2-4.7：連續站、大地變位監測點和水準點參考於 ITRF 之垂直速度場（隧道北口至高架橋一帶）。藍色、黑色箭頭分別代表連續站、大地變位監測點之速度向量。綠色、紫色箭頭分別代表隧道外、隧道內水準點推求之速度量。95%可信區間之誤差範圍位於各速度向量底端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮遂道之位置。藍色區域為河流。紅色線條為斷層之位置。LCNF：龍船斷層，CHNF：旗山斷層。

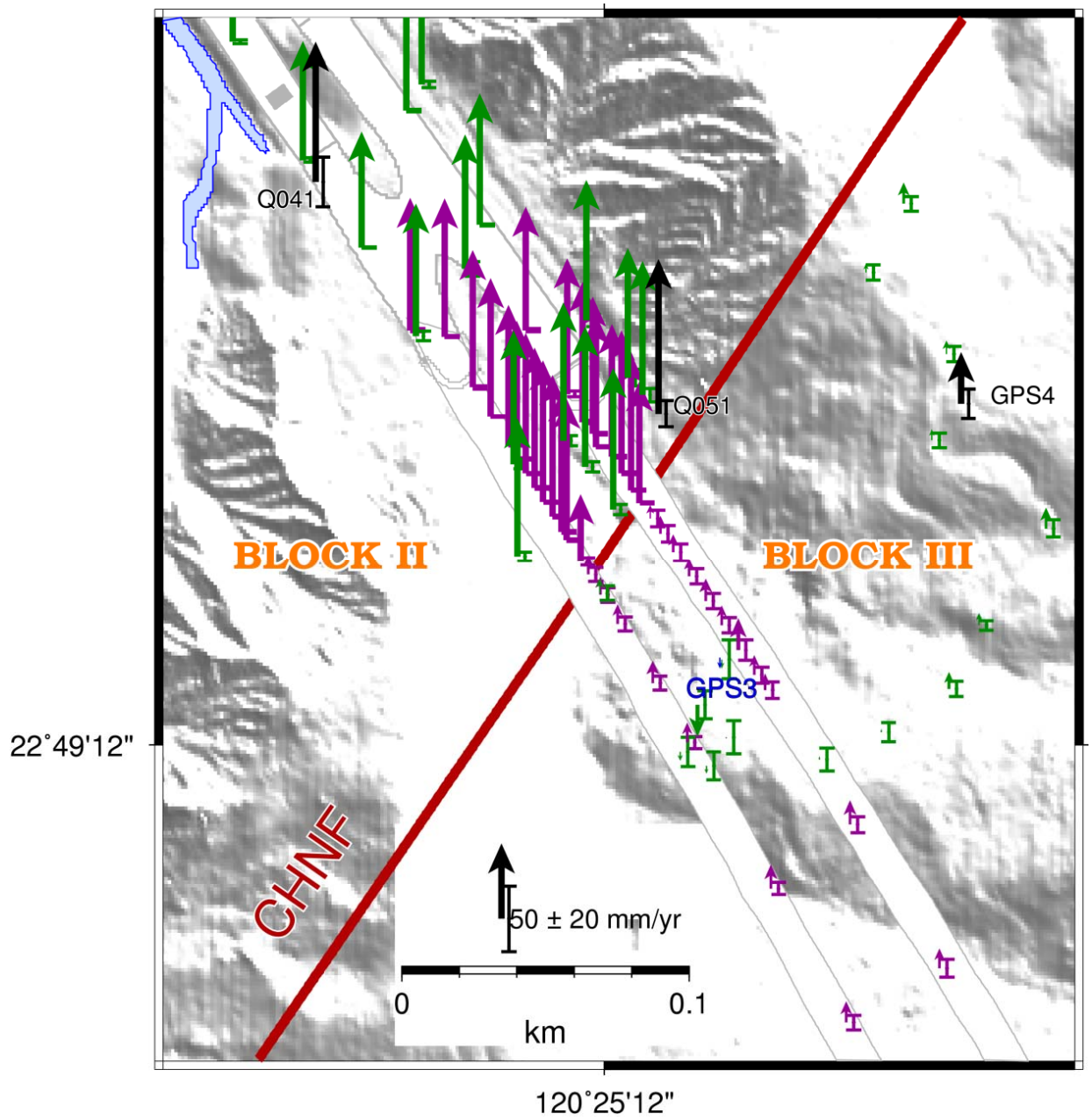


圖 2-4.8：連續站、大地變位監測點和水準點參考於 ITRF 之垂直速度場（隧道北口）。藍色、黑色箭頭分別代表連續站、大地變位監測點之速度向量。綠色、紫色箭頭分別代表隧道外、隧道內水準點推求之速度量。95%可信區間之誤差範圍位於各速度向量底端。長條形為國道三號田寮三號高架橋和中寮遂道之位置。紅色線條為斷層之位置。CHNF：旗山斷層。

2-4-2-3 三維速度剖面

為了瞭解斷層活動造成塊體間的速度量差異，本節將水平速度量分解為平行斷層走向與垂直斷層走向，連同垂直速度量得到三維速度剖面，如圖 2-4.9 和圖 2-4.10。

在龍船斷層方面，平行斷層走向分量在塊體一的 0.0 至 0.27 公里由 38 mm/yr 緩緩降至 23 mm/yr，塊體二的平均速度則是 19 ± 5 mm/yr，兩塊體間之速度量差異並不明顯；而垂直斷層走向分量在塊體一的平均速度為 1 ± 9 mm/yr，塊體二則是 49 ± 6 mm/yr，顯示跨越斷層有約 48 mm/yr 之速度量差異；垂直速度在塊體一的平均速度為 26 ± 9 mm/yr，速度量在跨越斷層進入塊體二開始遞增，在 0.3 至 0.4 公里由 34mm/yr 明顯上升至 70 mm/yr，在 0.4 至 0.75 公里由 70 mm/yr 上升至 95 mm/yr。

而在旗山斷層方面，平行斷層走向分量在塊體二的平均速度是 19 ± 5 mm/yr，塊體三則是 33 ± 8 mm/yr，兩塊體間之速度量差異為 14 mm/yr；而垂直斷層走向分量在塊體二的平均速度為 49 ± 6 mm/yr，塊體三則是 17 ± 5 mm/yr，顯示跨越斷層有約 32 mm/yr 之速度量差異；垂直速度在跨越斷層有約 80 mm/yr 之顯著速度量差異。

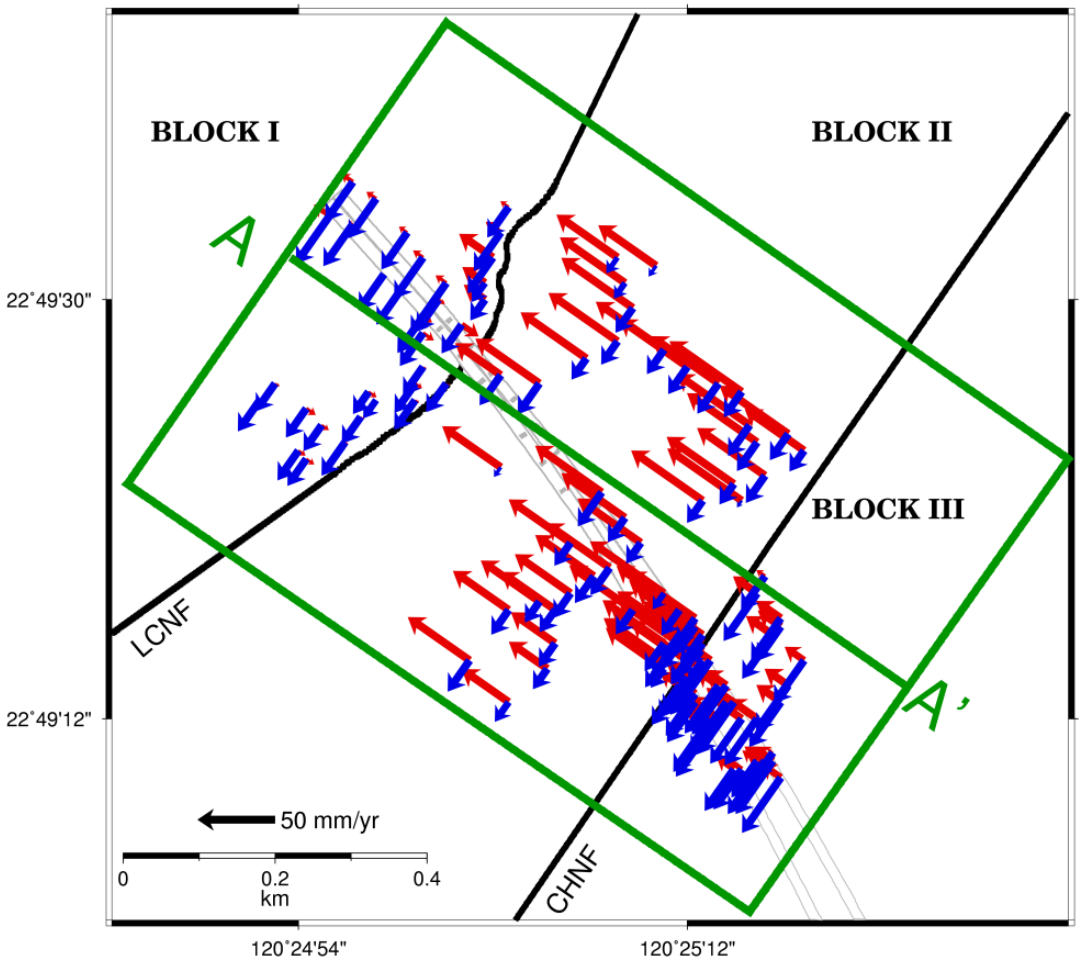


圖 2-4.9：水平速度場之速度剖面圖（沿龍船斷層與旗山斷層）。綠色方框為速度剖面的範圍，方框內的點位速度量投影至 A-A'剖面上，產生平行和垂直斷層方向的速度量。平行斷層走向分量以朝西南方向為正，垂直斷層走向分量以朝西北方向為正。

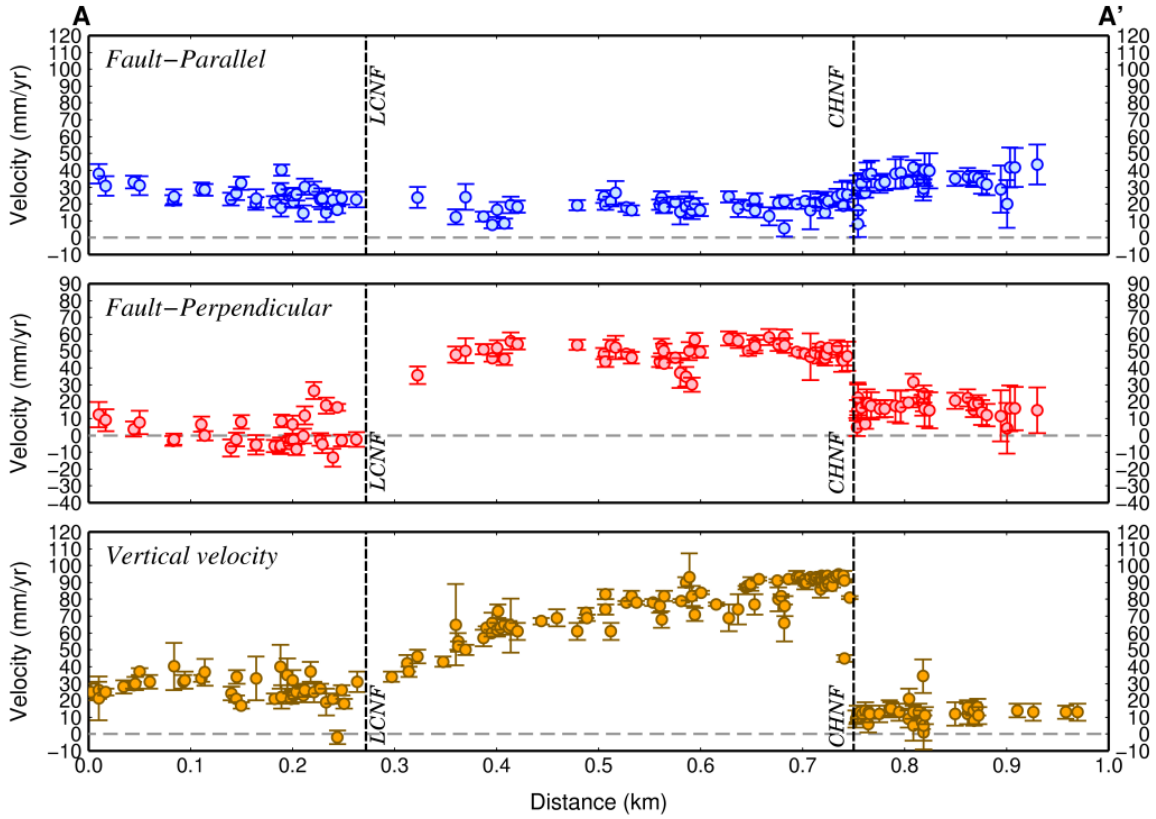


圖 2-4.10：三維速度剖面圖（沿 A-A'剖面）。上方為平行斷層走向之速度分量，中間為垂直斷層走向之速度分量，下方為垂直速度量。X 軸為沿 A-A'剖面之投影距離。

2-4-3 鳳山斷層

2-4-3-1 臺灣西南部水平速度場

從水平速度（圖 2-4.11）可以看出旗山斷層為臺灣西南部速度差異的分界。旗山斷層以西存在一顯著的速度梯度，速度由東南往西北從 30 mm/yr 遞減到 10 mm/yr，而旗山斷層以東的速度平均約為 50 mm/yr，方向約 N 268°。就速度方向而言，在旗山斷層以西的屏東平原沿海地區和高雄地區，其速度方位角逐漸轉向 N 245°。同時，速度方位角的改變也顯示了旗山斷層兩側的差異，斷層東側的速度向量方位角呈逆時針旋轉，反之其西側為順時針旋轉。須注意的是，後甲里斷層、小崗山斷層和旗山斷層都坐落在速度梯度的邊界。跨後甲里斷層之速度梯度變化約為 15 mm/yr ~ 20 mm/yr，跨小崗山斷層之速度梯度變化約 20 mm/yr ~ 30 mm/yr，跨旗山斷層之速度梯度變化約為 40 mm/yr ~ 50 mm/yr。

2-4-3-2 臺灣西南部應變速率場

在計算應變速率時，本研究首先採用組成三角網的方式，計算各三角網之應變量，再根據鄰近三角網應變量之相似度，將臺灣西南部重新區分為 29 個小網以獲得更可靠的應變分布型態（圖 2-4.12）。一般來說，主應變速率在主要斷層沿線有顯著的特徵，在鳳山轉換斷層中南段有~0.8 μstrain/yr 的最大伸張速率，而~1.2 μstrain/yr 的最大擠壓速率分布在旗山斷層和潮州斷層中段。就鳳山轉換斷層，有西北西-東南東方向約 0.8 μstrain/yr 的壓縮量，在斷層中段有北北東-南南西方向約 0.2μstrain/yr 的伸張量，在斷層南段則有北北東-南南西方向約 0.7 μstrain/yr 的伸張量（圖 2-4.12）。就後甲里斷層，其東側有約 0.7 μstrain/yr 的東-西向擠壓量，其西側有約 0.2 μstrain/yr 的東北-西南方向的伸張。就小崗山斷層，有約 0.3 μstrain/yr 的東-西擠壓量。就旗山斷層，有約 2.0 μstrain/yr 的西北-東南擠壓。最後，就潮州斷層，其北段和中段區域有約 1.0 μstrain/yr 的東-西擠壓量，而南段則有約 0.2 μstrain/yr 的西北-東南向伸張量（圖 2-4.12）。

剪切應變速率場顯示（圖 2-4.13），~3.0 μstrain/yr 之較大剪切應變率主要集中於鳳山轉換斷層和旗山斷層，而其他地區剪切應變速率多小於 2.0 μstrain/yr。鳳山轉換斷層北段具有約 1.3 μstrain/yr 的左剪應變率，中段有約 3.5 μstrain/yr 的左剪應變率，南段則有約 2.4 μstrain/yr 的左剪應變率。而沿旗山斷層具有約 4.0 μstrain/yr 之右剪應變速率，沿潮州斷層有約 0.5-1.0 μstrain/yr 的較低剪應變速率。最後，後甲里斷層和小崗山斷層之剪應變速率約為 1.0 μstrain/yr。

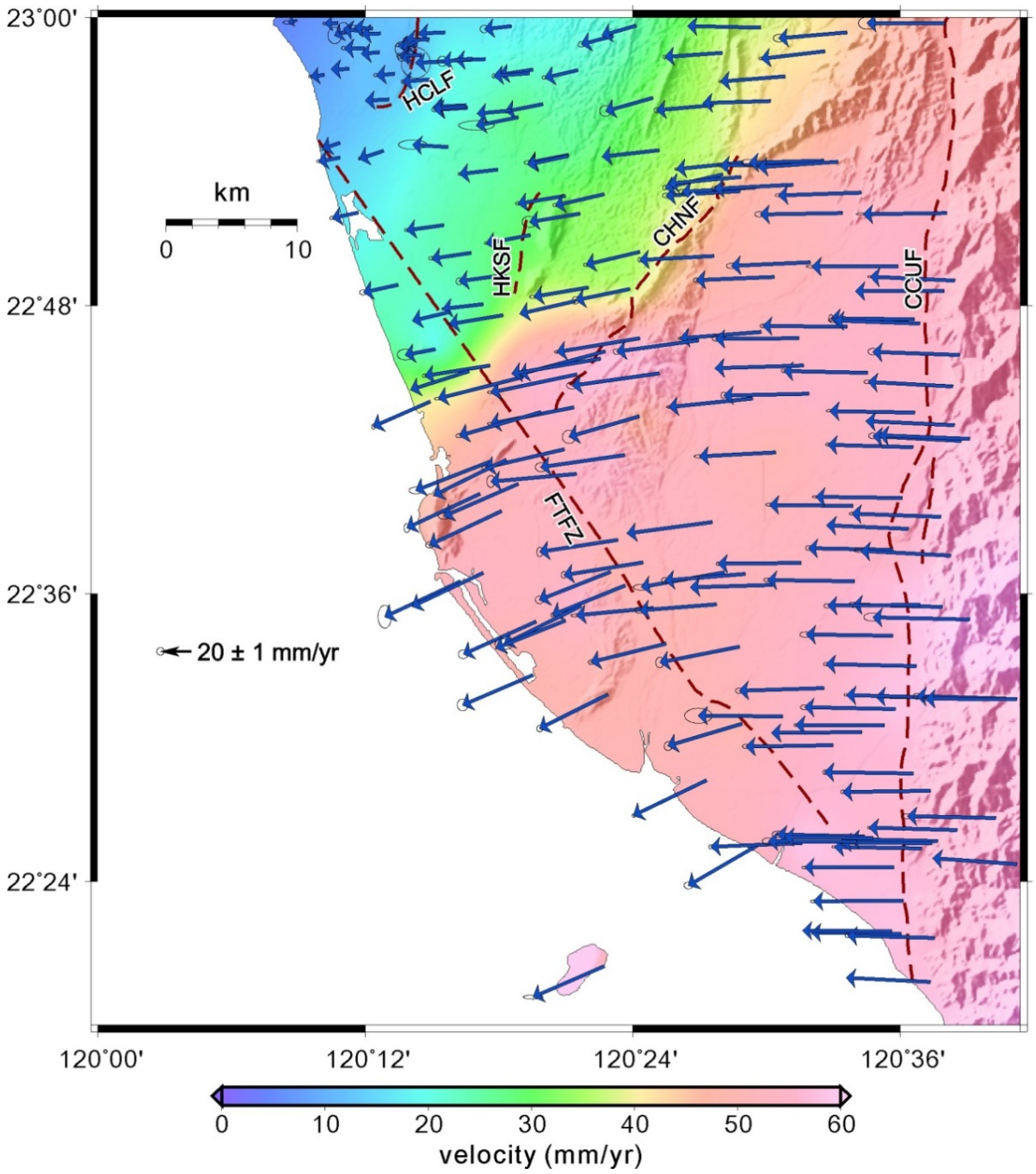


圖 2-4.11：臺灣西南部相對於澎湖之 GPS 水平速度場。藍色的箭頭為速度向量，紅色虛線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層，HKSF：小崗山斷層，CHNF：旗山斷層，CCUF：潮州斷層，FTFZ：鳳山轉換斷層。

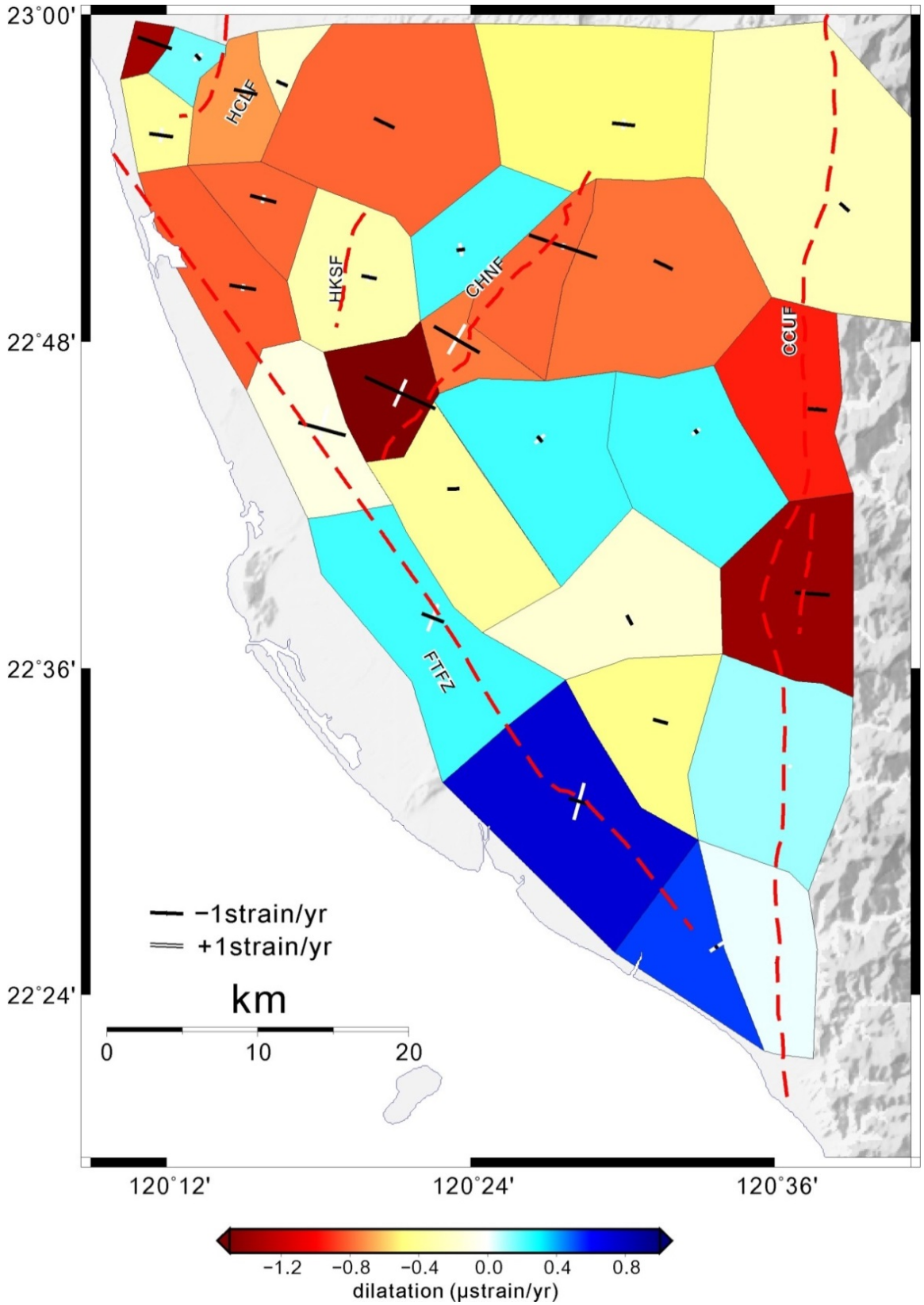


圖 2-4.12：臺灣西南部主應變率分布圖。黑色線段代表擠壓，白色代表伸張。色階變化表示面膨脹率的大小，正值為伸張，負值為壓縮。紅色虛線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層，HKSF：小崗山斷層，CHNF：旗山斷層，CCUF：潮州斷層，FTFZ：鳳山轉換斷層。

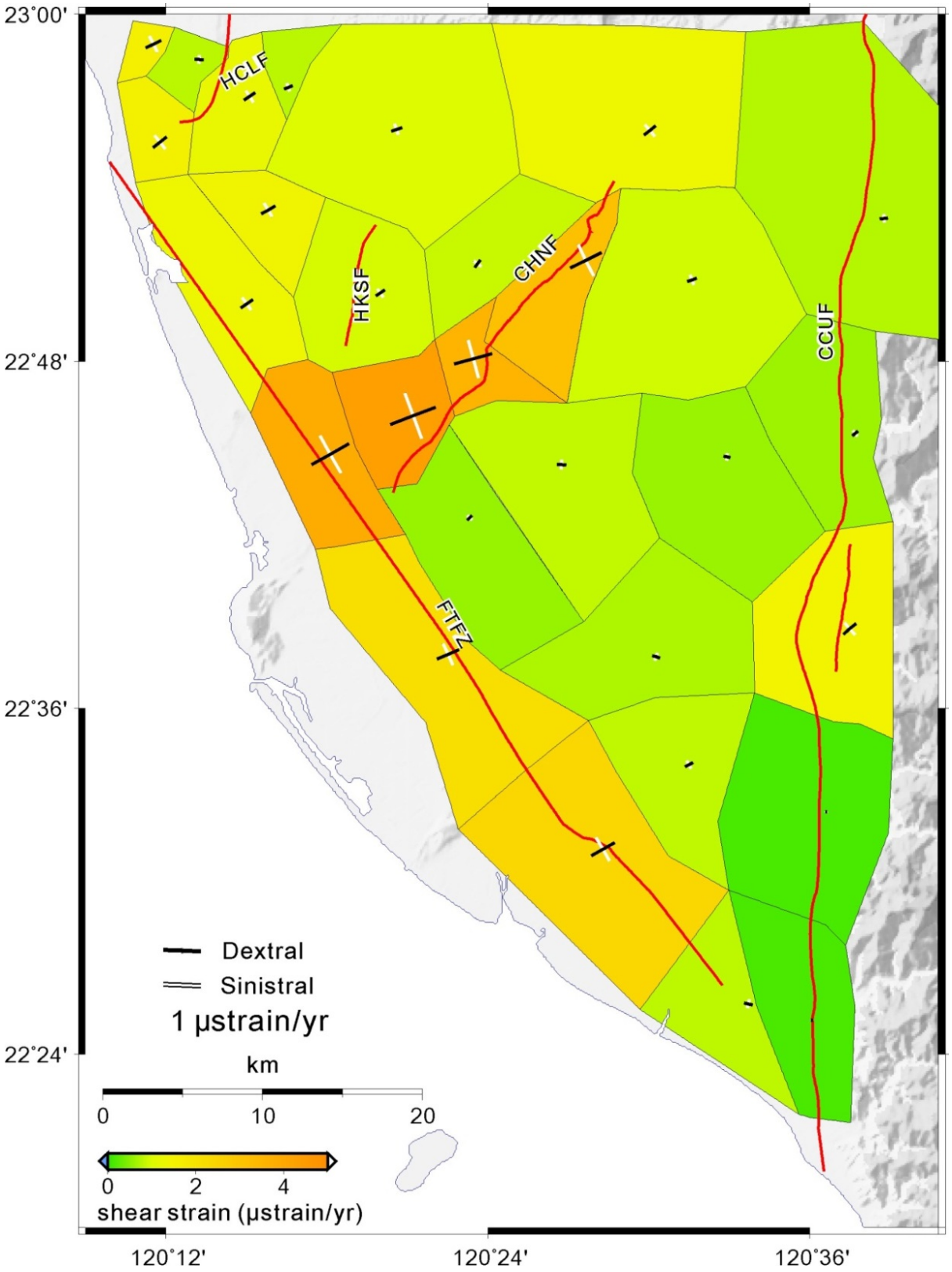


圖 2-4.13：臺灣西南部剪應變率分布圖。圖中粗線段反映剪應變率的數量及方向；黑色線段為右剪應變，白色線段為左剪應變。色階標示剪應變率大小。紅色實線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層，HKSF：小崗山斷層，CHNF：旗山斷層，CCUF：潮州斷層，FTFZ：鳳山轉換斷層。

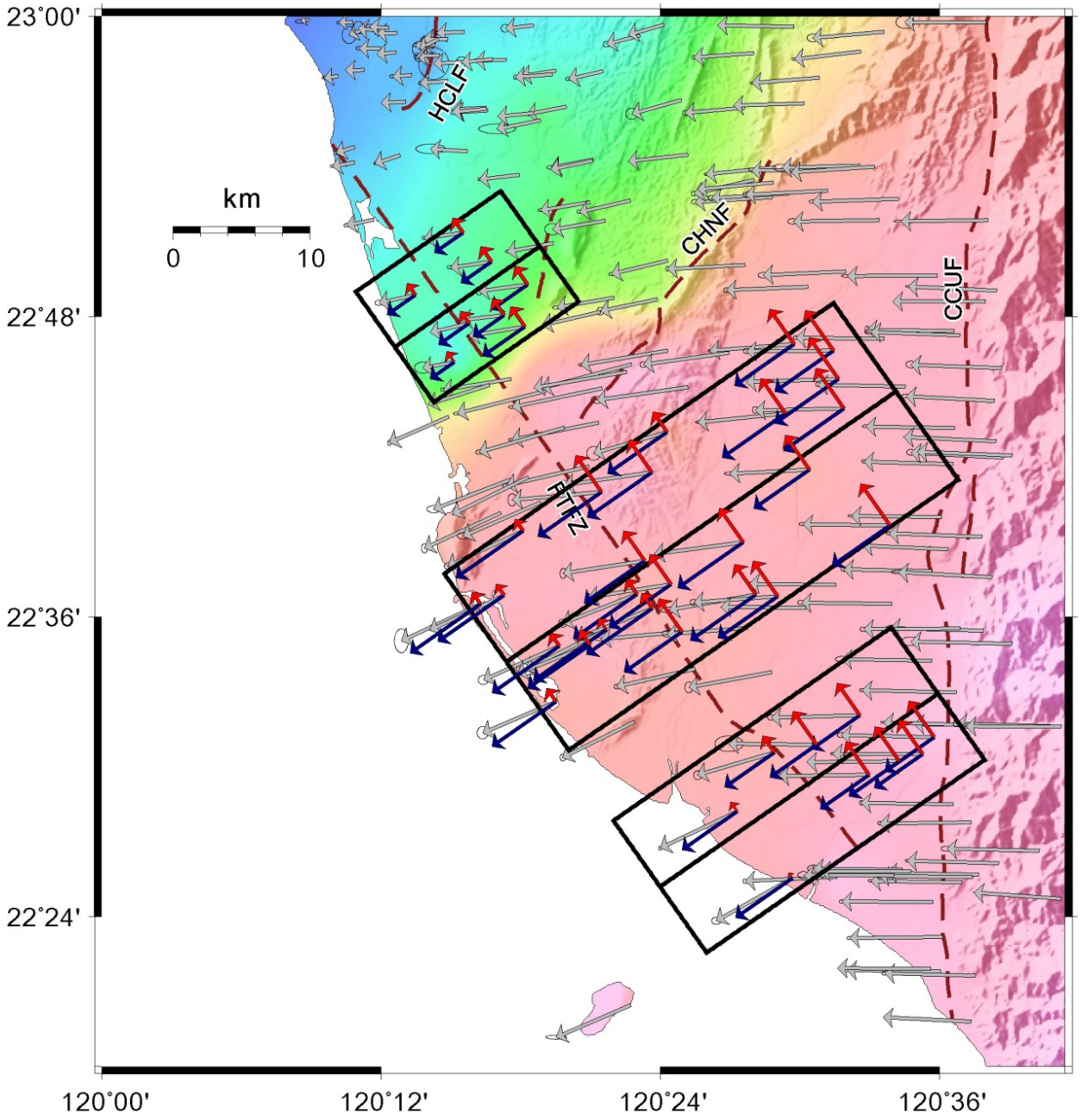


圖 2-4.14：鳳山轉換斷層北、中、南三段之速度剖面位置圖。藍色箭頭為垂直斷層走向分量，紅色箭頭為平行斷層走向分量。紅色虛線為活動斷層位置，HCLF：後甲里斷層、CCUF：潮州斷層、FTFZ：鳳山轉換斷層帶。

2-4-3-3 二維斷層模型

由於地表速度場沿斷層走向方向往往會有空間上的差異，因此本研究在鳳山轉換斷層的北、中、南三個區段分別選取跨斷層之速度剖面（圖 2-4.14），將水平速度分解成平行斷層走向及垂直斷層走向兩個分量進行分析，其中垂直斷層走向分量之正值為東北東方向，負值則為西南西方向；平行斷層走向分量之正值為北北西方向，負值為南南東方向（圖 2-4.14）。同時，本研究亦利用二維斷層模型反演各剖面之水平速度向量以求得斷層滑移速率及斷層幾何參數。此斷層模型假設震間地表速度場是由塊體運動（block motion）和反向滑移模型（back-slip model）所組成。塊體運動是指因板塊運動導致之塊體長期運動行為；反向滑移模型是指因斷層面上摩擦力所產生之地表速度變化。由於缺乏地震事件及其他斷層幾何資訊的數據，故本研究採用蒙地卡羅（Monte Carlo）法搜尋最佳之斷層參數（斷層之傾角、深度、斷層位置）。由於斷層滑移速率可能沿斷層深度而有所變化，所以本研究將北段和南段剖面的斷層劃分成 15 的小斷層（patch），將中段剖面的斷層劃分為 10 個小斷層，並採用平滑參數約制不同小斷層間斷層滑移速率的相關性。

1. 斷層北段模擬結果

斷層北段在跨越斷層約 4 公里的寬度間有約 1.6 mm/yr 之左移分量速率變化及約 1.9 mm/yr 的擠壓速率。其模擬結果指出（圖 2-4.15(a)），平行斷層走向分量有約 4.1 mm/yr 的差異（misfit），而垂直斷層走向分量則有約 1.7 mm/yr 之差異。斷層幾何之最佳解顯示（圖 2-4.15(b)），斷層傾角為 50°，斷層深度約 7.9 km。

斷層滑移速率分布顯示（圖 2-4.15(c)），斷層長期走向滑移速率為 17.7 mm/yr，逆衝分量為 14.6 mm/yr。斷層的反向走向滑移速率在深度 7.1 km 處是 2.3 mm/yr，同時，其反向傾向滑移速率是 2.0 mm/yr。因此，最大震間走向滑移分量約為 15.4 mm/yr，最大震間傾向滑移速率約為 12.6 mm/yr。此外，近地表之震間斷層滑移速率皆為零。

2. 斷層中段模擬結果

斷層中段在跨越斷層約 4 公里的寬度間有約 20.9 mm/yr 的明顯左移分量速率變化及約 1.0 mm/yr 的伸張速率。其模擬結果指出（圖 2-4.16(a)），平行斷層走向分量有約為 11.2 mm/yr 的差異（misfit），而垂直斷層走向分量則有約 1.8 mm/yr 之差異。斷層幾何之最佳解顯示（圖 2-4.16(b)），斷層傾角為 48°，斷層深度為約 13.2 km。

斷層滑移速率分布顯示（圖 2-4.16(c)），斷層長期走向滑移速率為 25.8 mm/yr，正向滑移分量為 2.7 mm/yr。斷層的反向走向滑移速率在深度 13.2 km 處是 2.5 mm/yr，而其反向傾向滑移速率是 0.0 mm/yr。所以，最大震間走向滑移分量約為 23.3 mm/yr，最大震間傾向滑移速率約為 2.7 mm/yr。在近地表處，則有約 10.0 mm/yr 之震間走向滑移速率及約 2.5 mm/yr 之震間傾向滑移速率。

3. 斷層南段模擬結果

斷層南段在跨越斷層約 8 公里的寬度間有約 23.4 mm/yr 之明顯左移分量速率變化及約 4.5 mm/yr 的伸張速率。其模擬結果指出（圖 2-4.17(a)），平行斷層走向分量有約 22.9 mm/yr 的差異（misfit），垂直斷層走向分量則有約 4.67 mm/yr 之差異。斷層幾何之最佳解顯示（圖 2-4.17(b)），斷層傾角為 50°，斷層深度約為 7.8 km。

斷層滑移速率分布顯示（圖 2-4.17(c)），斷層長期走向滑移速率為 26.2 mm/yr，正向滑移分量為 9.7 mm/yr。斷層的反向走向滑移速率在深度 7.8 km 處是 0.8 mm/yr，而其反向傾向滑移速率為 0.6 mm/yr。故最大震間走向滑移分量約為 25.4 mm/yr，而最大震間傾向滑移速率約為 9.2 mm/yr。在近地表處，則有約 20.0 mm/yr 之震間走向滑移速率及約 5.7 mm/yr 之震間傾向滑移速率。

(a)

(b)

(c)

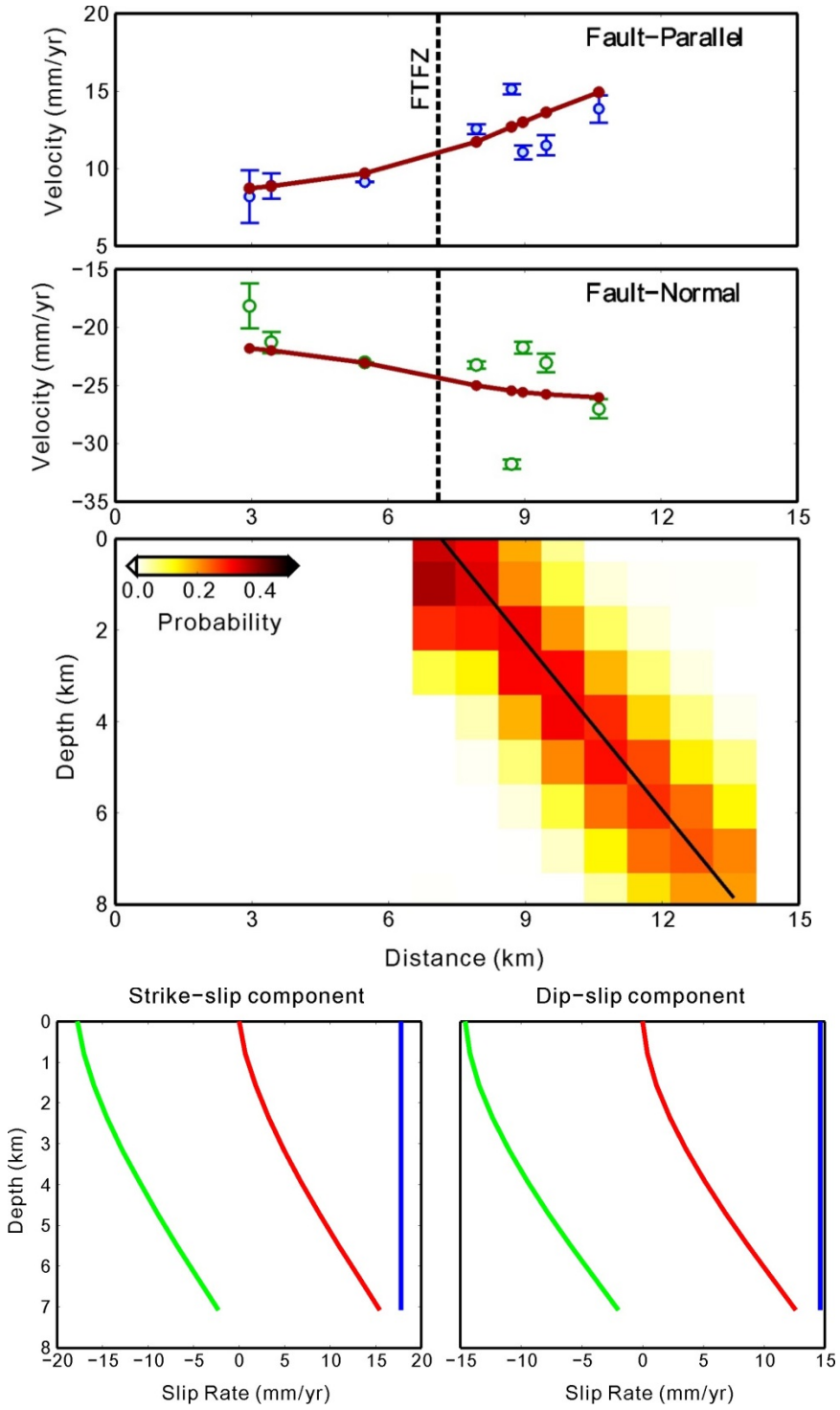


圖 2-4.15：斷層北段模型剖面及滑移速率分布。（a）為模擬結果及觀測量之比較值。藍點為觀測值，紅點為模擬結果。（b）為推測之斷層幾何。色階背景為斷層可能之分布位置。（c）為滑移速率分布。藍線為長期滑移速率，紅線為震間滑移速率；綠線為反向滑移速率。

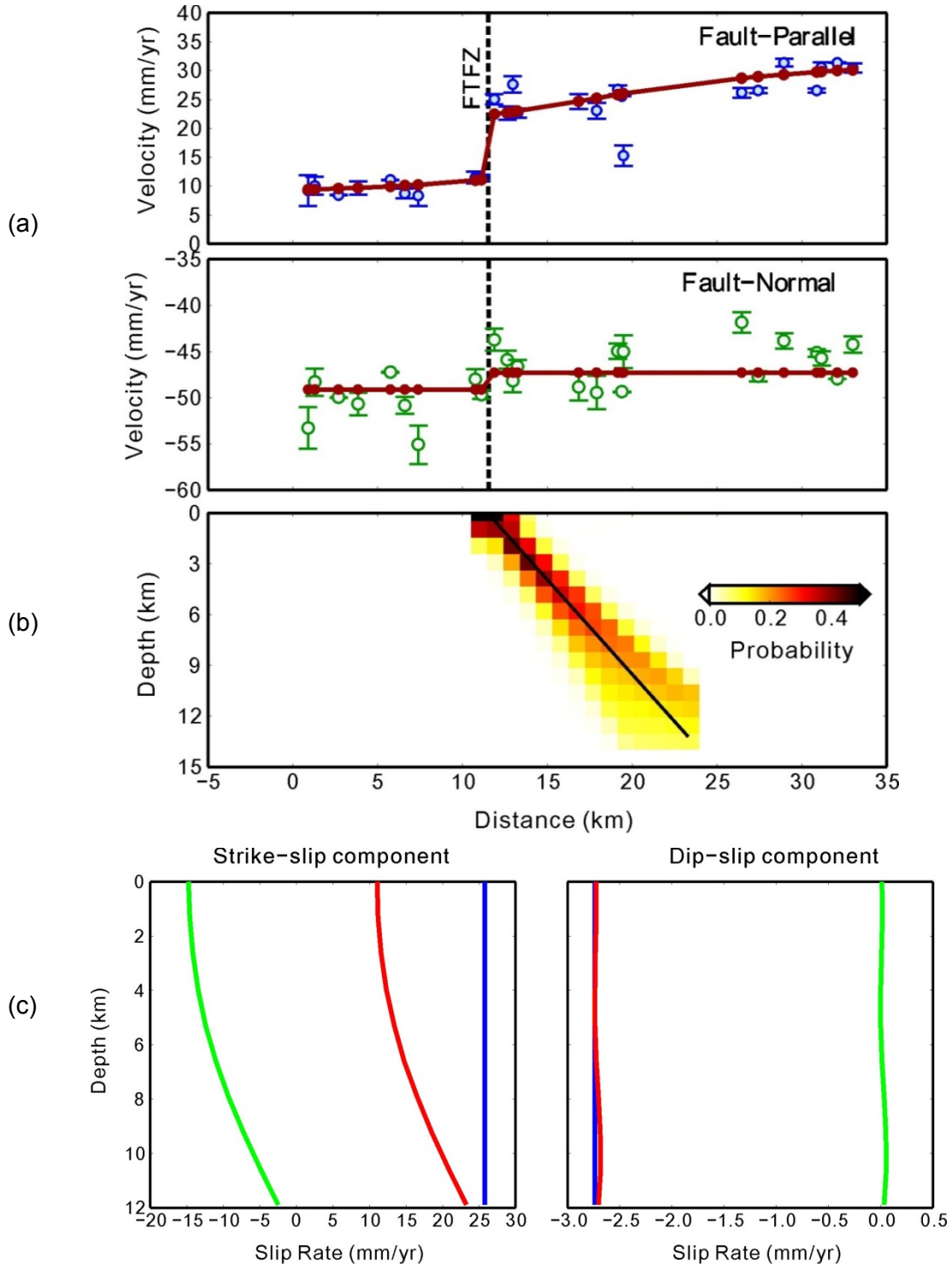


圖 2-4.16：斷層中段模型剖面及滑移速率分布。（a）為模擬結果及觀測量之比較值。藍點為觀測值，紅點為模擬結果。（b）為推測之斷層幾何。色階背景為斷層可能之分布位置。（c）為滑移速率分布。藍線為長期滑移速率，紅線為震間滑移速率；綠線為反向滑移速率。

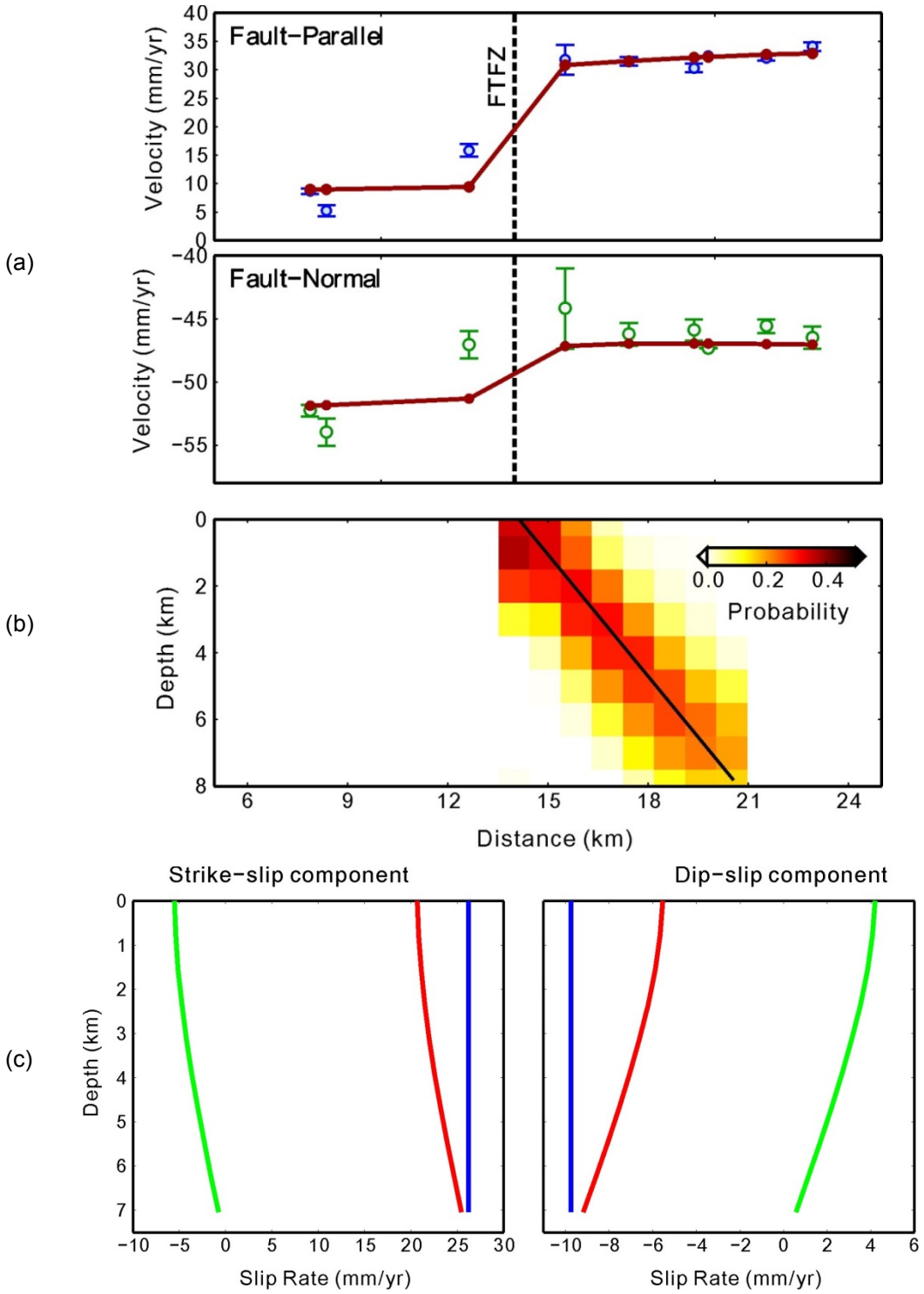


圖 2-4.17：斷層南段模型剖面及滑移速率分布。（a）為模擬結果及觀測量之比較值。藍點為觀測值，紅點為模擬結果。（b）為推測之斷層幾何。色階背景為斷層可能之分布位置。（c）為滑移速率分布。藍線為長期滑移速率，紅線為震間滑移速率；綠線為反向滑移速率。

2-4-4 恆春斷層

在三條精密水準測線各水準點的時間序列圖中，可以看到在 2006 年屏東外海地震後，水準點位皆有明顯永久位移，另外在 2010 年初也有一明顯的斜率改變（圖 2-4.18、圖 2-4.19）。在 GPS 觀測站的座標時間序列中，也能觀察到同樣的位移型態（圖 2-4.20）。為進一步分析此速率變化，本研究依據前述之永久位移和斜率改變之時間點將時間序列分成三個時間段（2002 年~2006 年 12 月、2006 年 12 月~2010 年 4 月、2010 年 4 月~2013 年 6 月），使用最小二乘法計算 E（east）分量、N（north）分量和垂直分量相對於測站 S01R 之速度場。

2-4-4-1 水平速度場

由 2002 年 1 月至 2013 年兩站連續站（KDNM、HENC）及 37 站移動站的資料所求算的三個時期水平速度場顯示，2006 年屏東西南外海 M_L 7.0 地震之前（2002 年 1 月至 2006 年 12 月），在恆春半島西南部區域的水平速度量值在東西分量約為向西 53 ~ 57 mm/yr，南北分量約為向北 2 ~ 5 mm/yr；恆春半島東部區域則分別約為向西 45 ~ 50 mm/yr 以及向北 14 ~ 17 mm/yr。在地震發生後（2006 年 12 月至 2010 年 4 月），西南部區域的水平速度東西分量約為向西 53 ~ 56 mm/yr，南北分量約為向南 0 ~ 1mm/yr；東部地區則分別為向西 43 ~ 49 mm/yr，向北 16 ~ 20 mm/yr。而後在 2010 年 4 月至 2013 年 6 月期間，恆春半島水平速度場回復到與震前相似的形態，西南部區域東西分量約向西 50 ~ 53 mm/yr，南北分量約向北 2 ~ 5 mm/yr；東部地區則分別為向西 42 ~ 47 mm/yr，向北 12 ~ 16 mm/yr。

觀察恆春半島的速度場形態可以指出，地震發生前後半島西部區域測站速度在東西分量差異不大，南北分量則減少約 5 mm/yr，方位角約由 275°轉至 270°；東部區域則是東西分量減少約 3 mm/yr，南北分量增加約 4 mm/yr，方位角約由 290°轉至 294°（圖 2-4.21）。而 2006 年 12 月地震後到 2013 年 6 月之間的水平速度變化，在 2010 年 4 月左右為分界，可以發現西部區域東西分量減少 3 mm/yr，南北分量增加 3 mm/yr，方位角由 270°轉至 274°；東部區域則是東西分量減少約 2 mm/yr，南北分量減少約 4 mm/yr，方位角約由 294°轉至 292°（圖 2-4.22）。

2-4-4-2 垂直速度場

透過 2002 至 2013 年精密水準測線共 10 次觀測記錄以及 GPS 連續站所求得三個時期的垂直速度場可以發現，此區域高程方向的時間序列在 2006 年屏東西南外海 M_L 7.0 地震前後有明顯的垂直速率變化，在 2010 年之後又發生一次顯著之垂直速率改變。在 2006 年屏東外海地震發生前，恆春半島相對於澎湖的垂直速度接為下陷，北邊測線下陷量約為 4 mm/yr，南邊測線下陷量約為 1 ~ 2 mm/yr。在震後的 4 年期間，垂直速度在恆春斷層東西側有明顯的差異，西側為平均 3 ~ 4 mm/yr 的沉陷速率，東側則是在北部及南部分別有 1 ~ 2 mm/yr 以及 5 mm/yr 的抬升。在 2010 年到 2013 年期間，恆春半島西側的下陷量轉為約 0.1 mm/yr 的抬升，東側則是在北部及南部分別轉變為 3 ~ 4 mm/yr 以及 2 mm/yr 的抬升（圖 2-4.23）。從水準高程差變化也可以看到同樣的變化形態。與 2006 年 8 月以前相較，在 2006 年 8 月~2008 年 3 月的期間，測線的高程產生了明顯的變化，此變化一直持續到 2010 年 4 月~2011 年 4 月才再度回復到穩定的狀態(圖 2-4.24)。

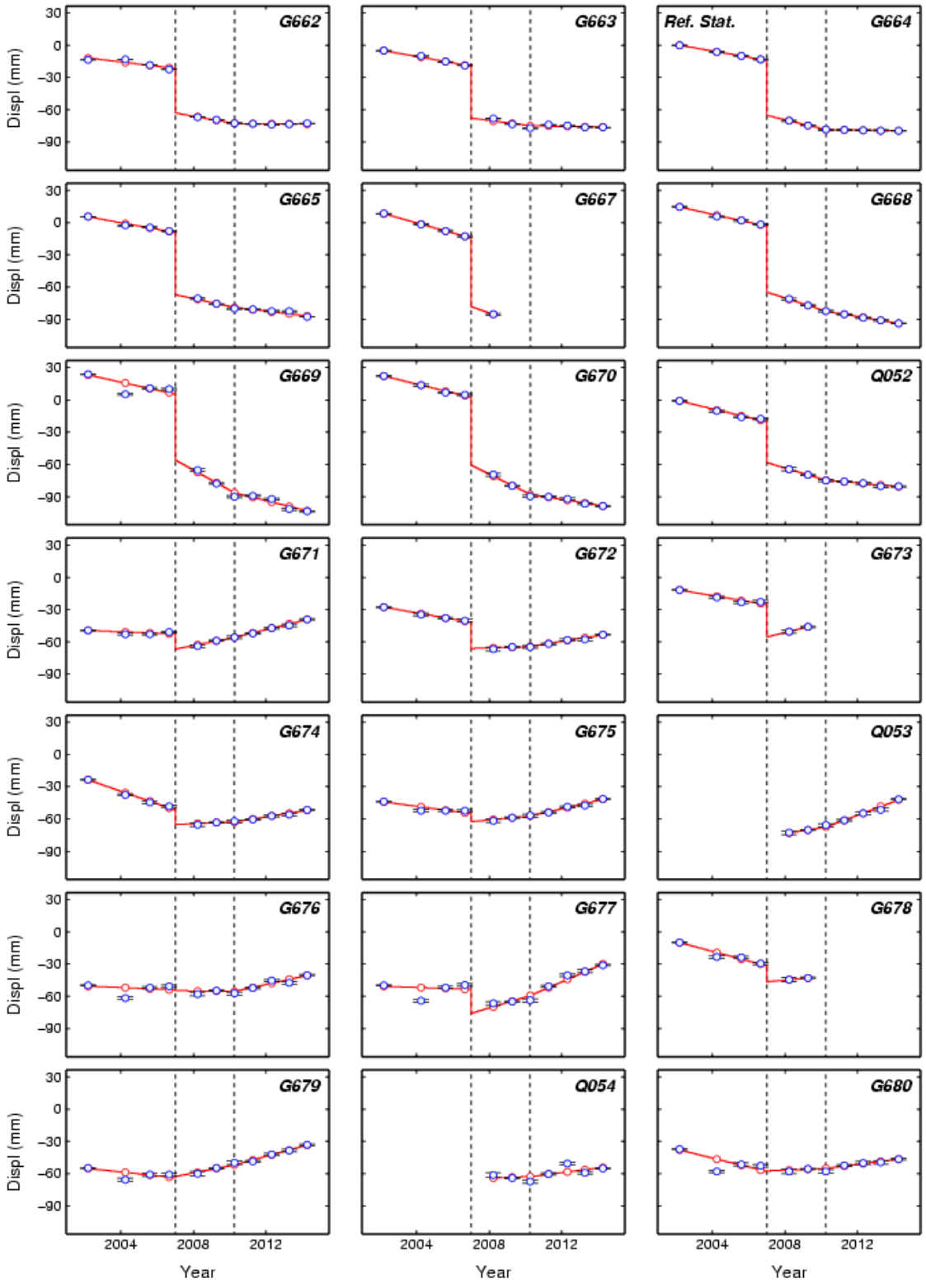


圖 2-4.18：西台地-佳樂水水準測線 2002~2013 年時間序列圖。

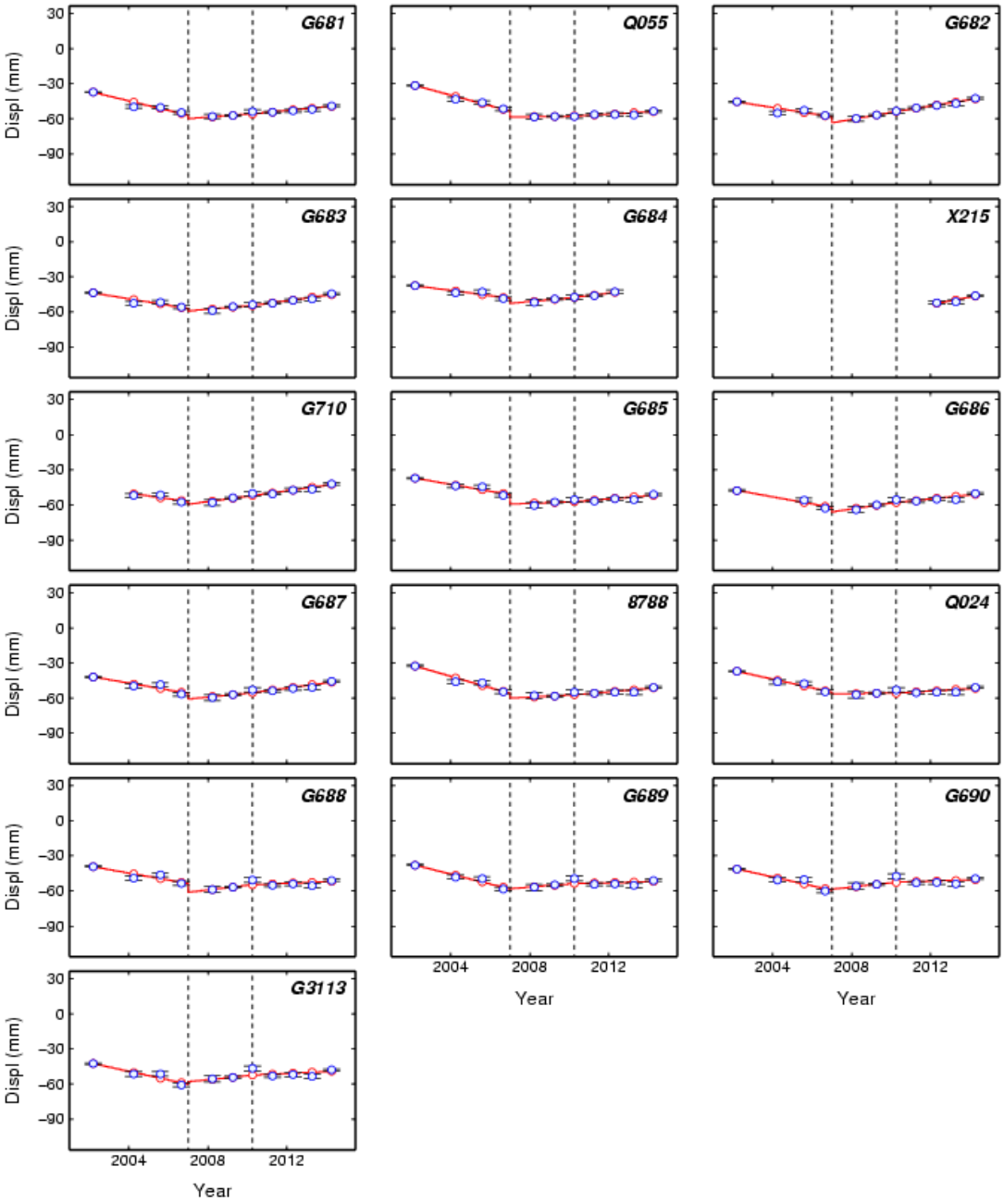


圖 2-4.18（續）：西台地-佳樂水水準測線 2002~2013 年時間序列圖。

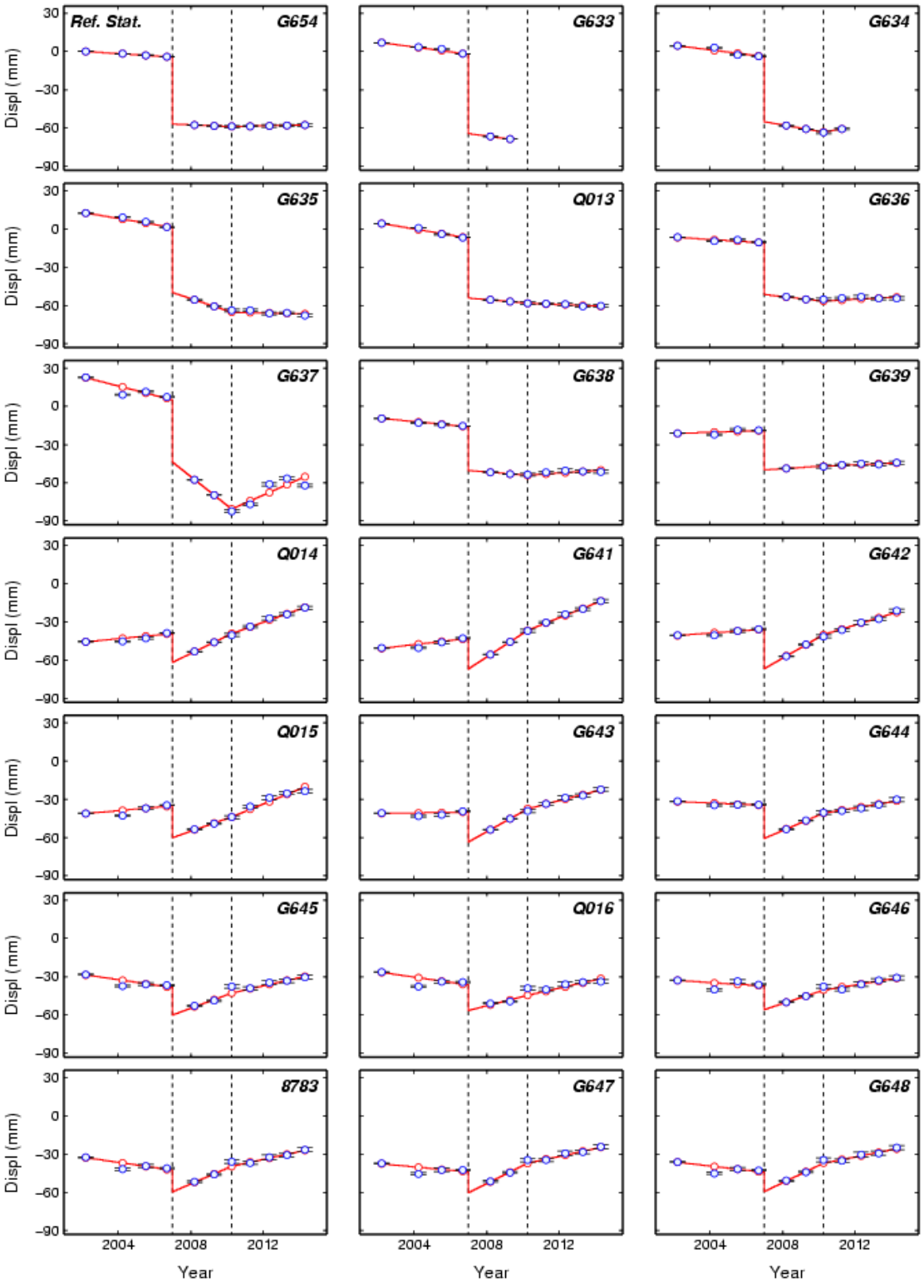


圖 2-4.19：墾丁-鵝鑾鼻水準測線 2002~2013 年時間序列圖。

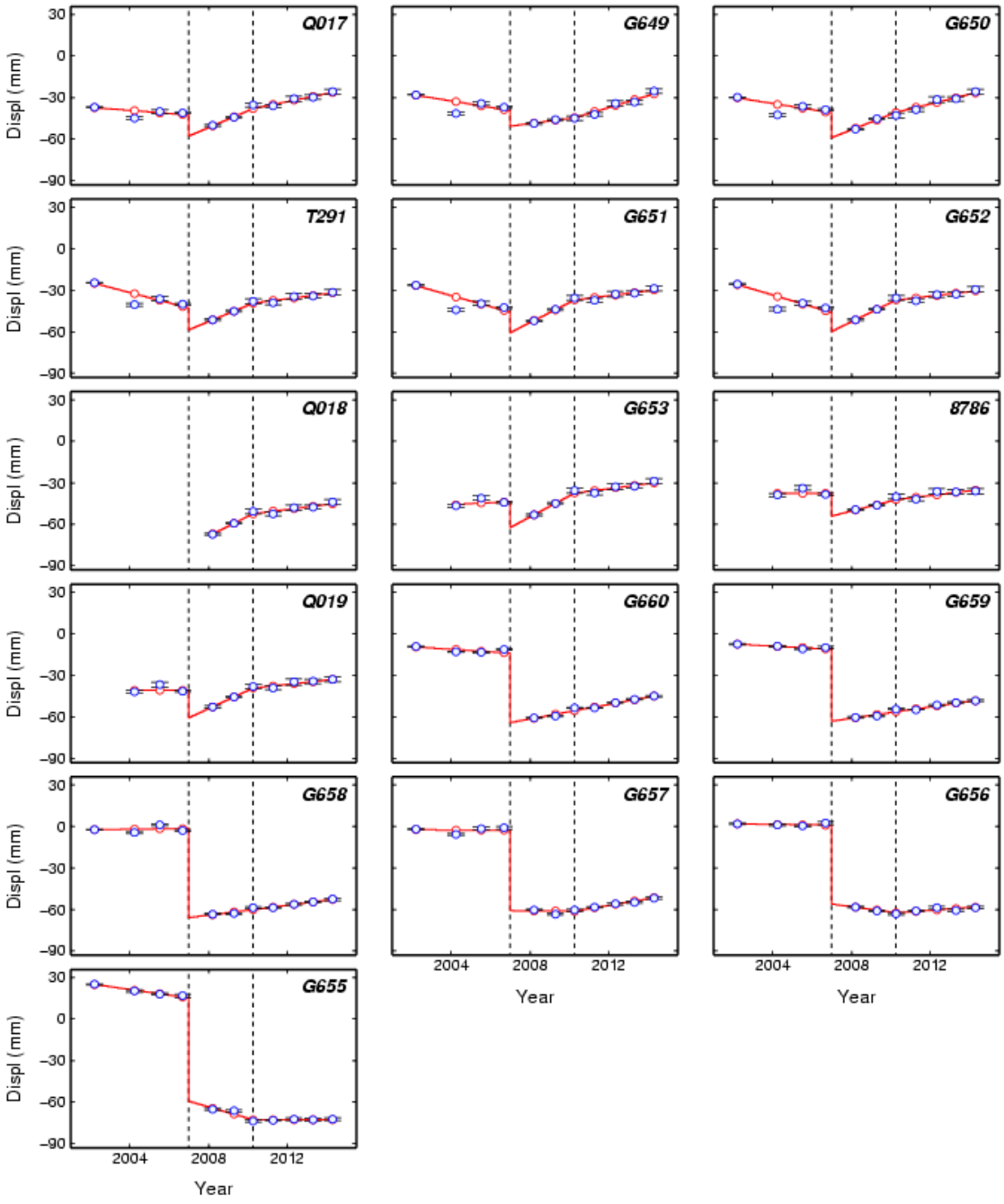


圖 2-4.19（續）：墾丁-鵝鑾鼻水準測線 2002~2013 年時間序列圖。

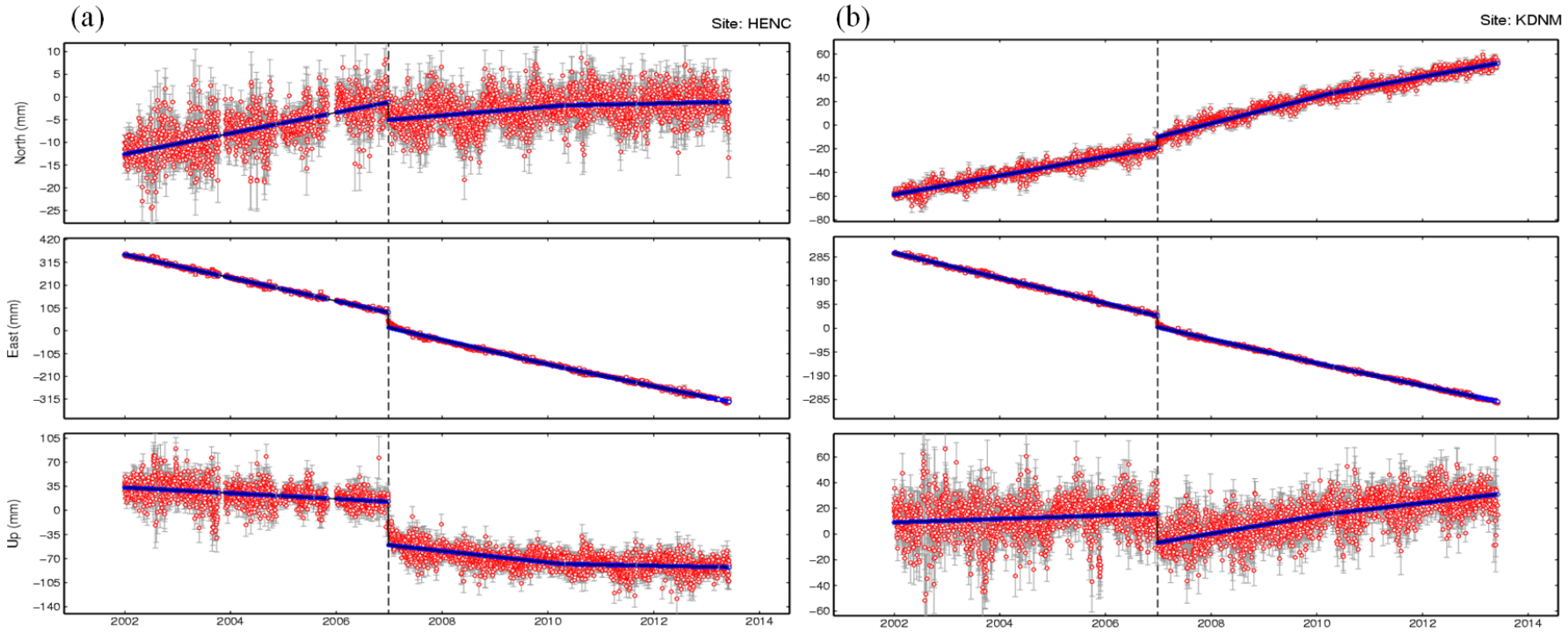


圖 2-4.20：（a）恆春 GPS 連續站（HENC） 2002~2012 年時間序列圖。（b）墾丁 GPS 連續站（KDNM） 2002~2012 年時間序列圖。

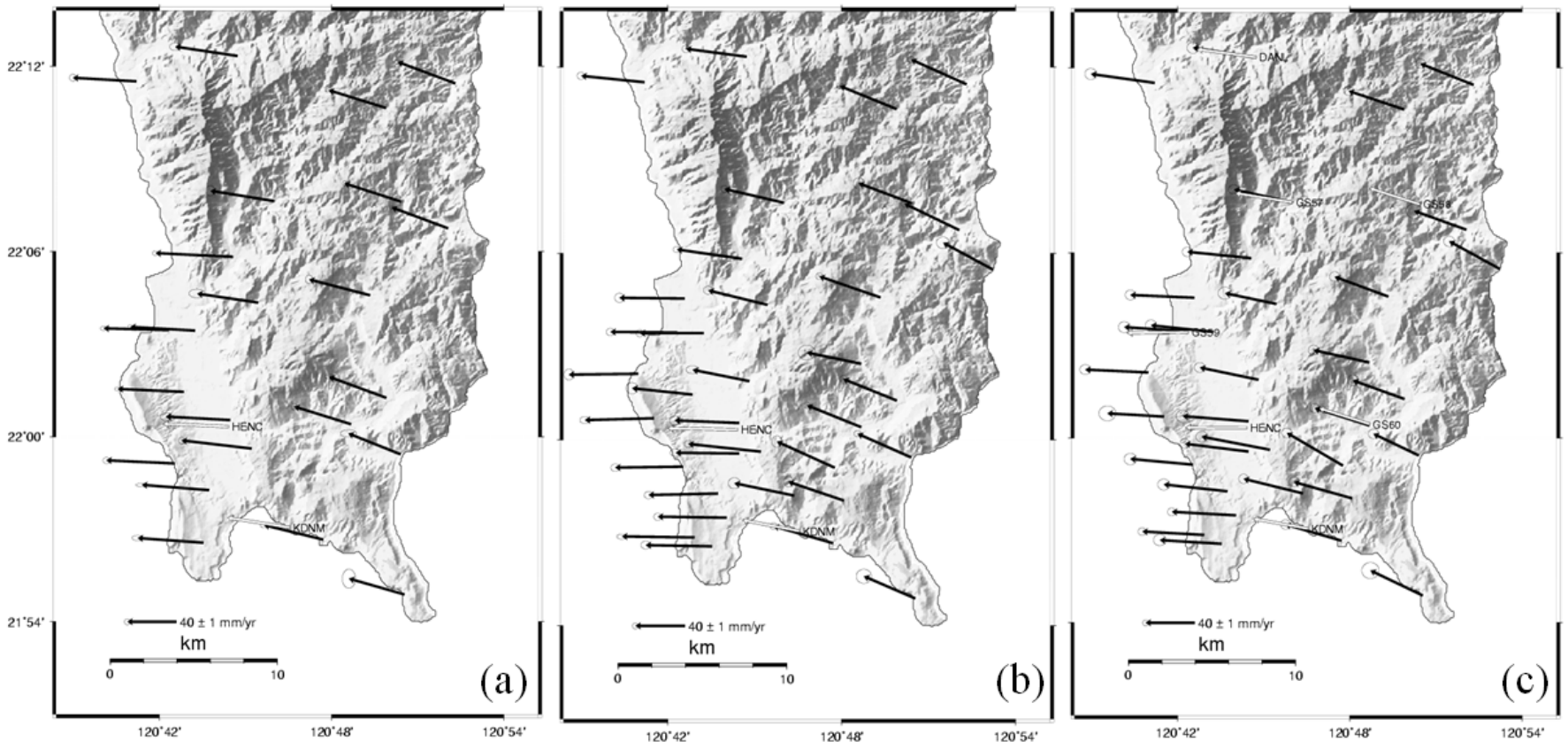


圖 2-4.21：恆春半島水平速度場（a）2002 年 4 月~2006 年 12 月 （b）2006 年 12 月~2010 年 4 月 （c）2010 年 4 月~2012 年 7 月。

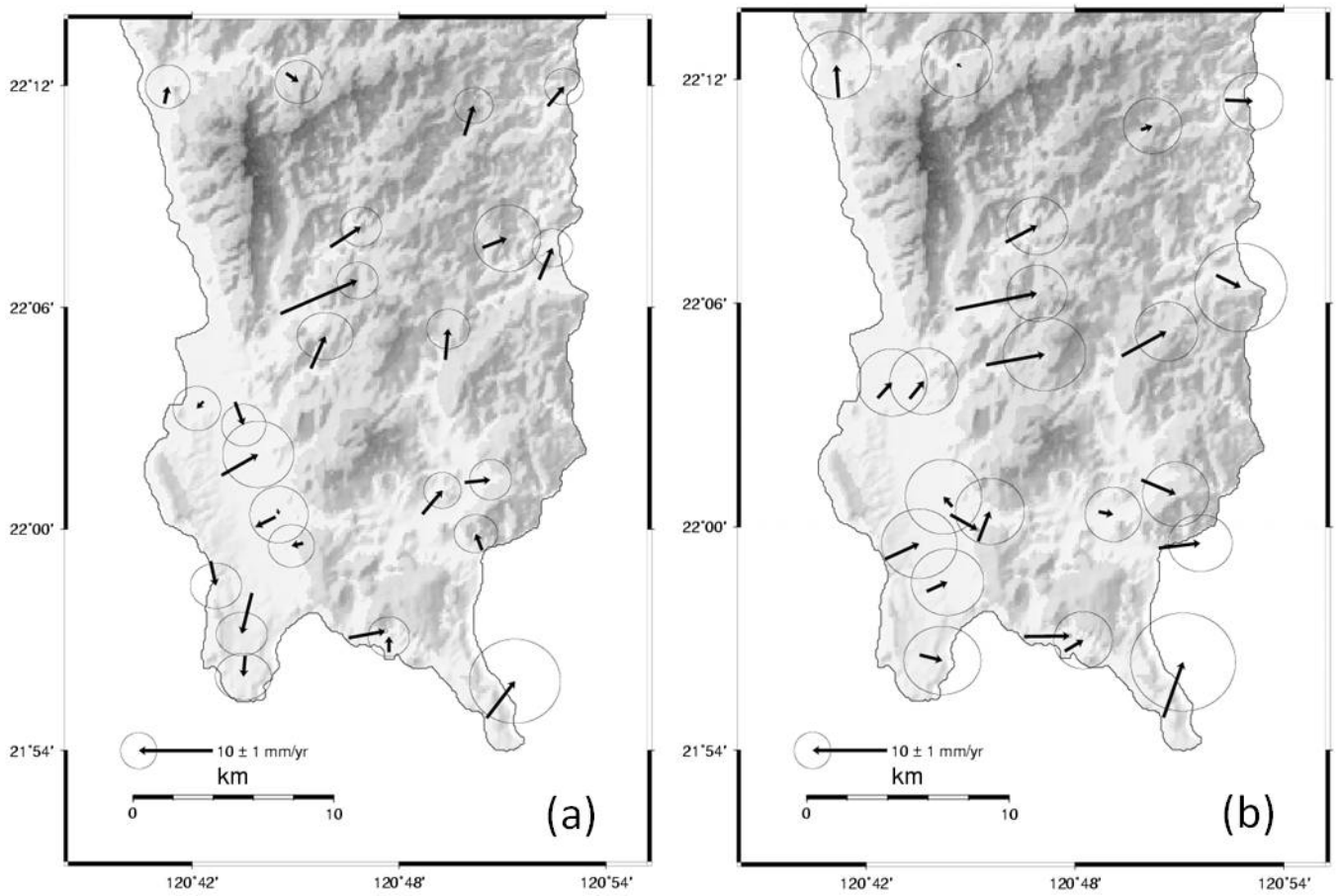


圖 2-4.22：恆春半島水平速度場變化量（a）2006 年 12 月~2010 年 4 月相對 2002 年 3 月~2006 年 12 月（b）2010 年 4 月~2013 年 4 月相對 2002 年 3 月~2006 年 12 月。

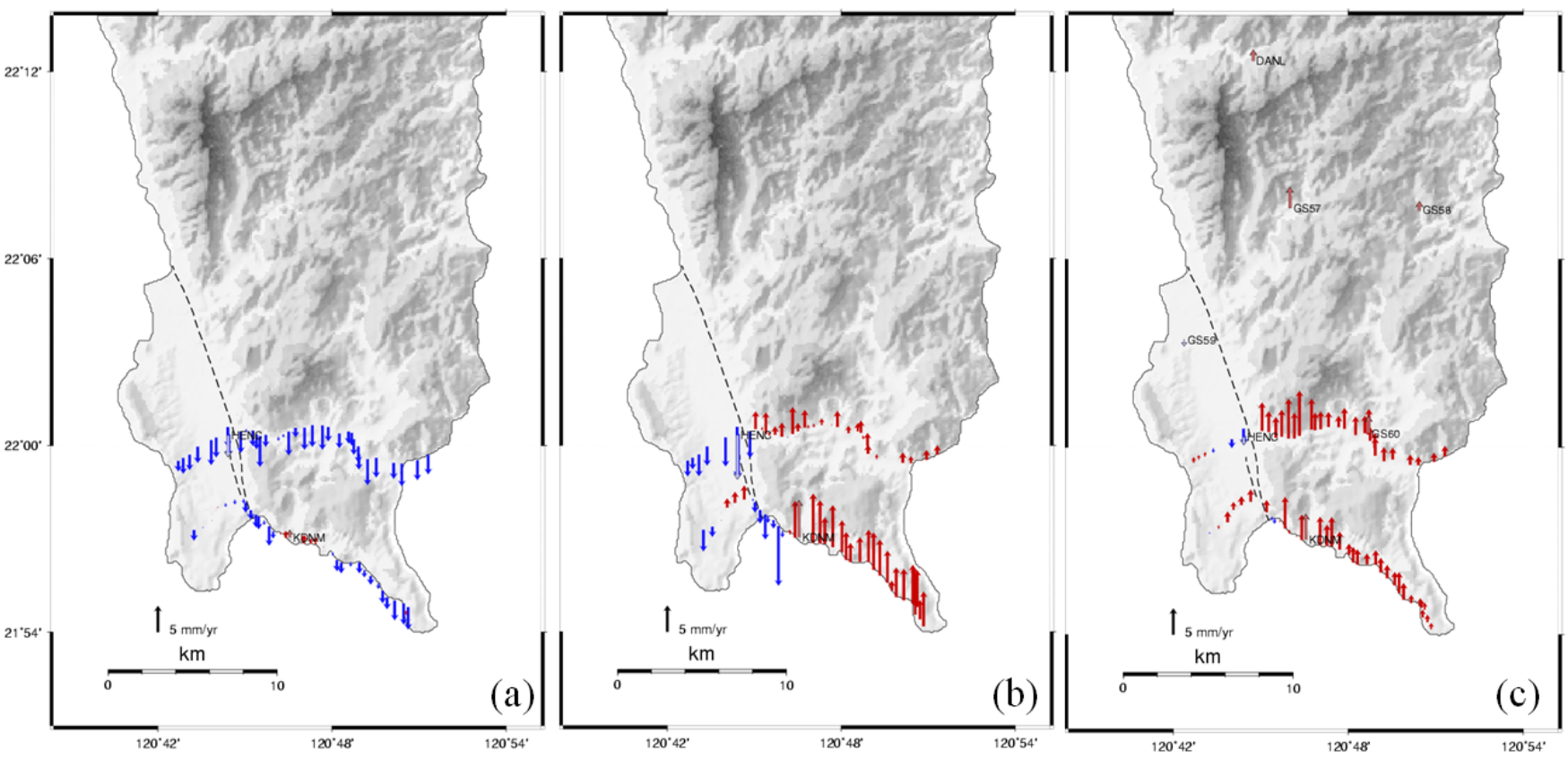


圖 2-4.23：恆春半島垂直速度場（a）2002 年 3 月~2006 年 12 月 （b）2006 年 12 月~2010 年 4 月 （c）2010 年 4 月~2013 年 4 月。

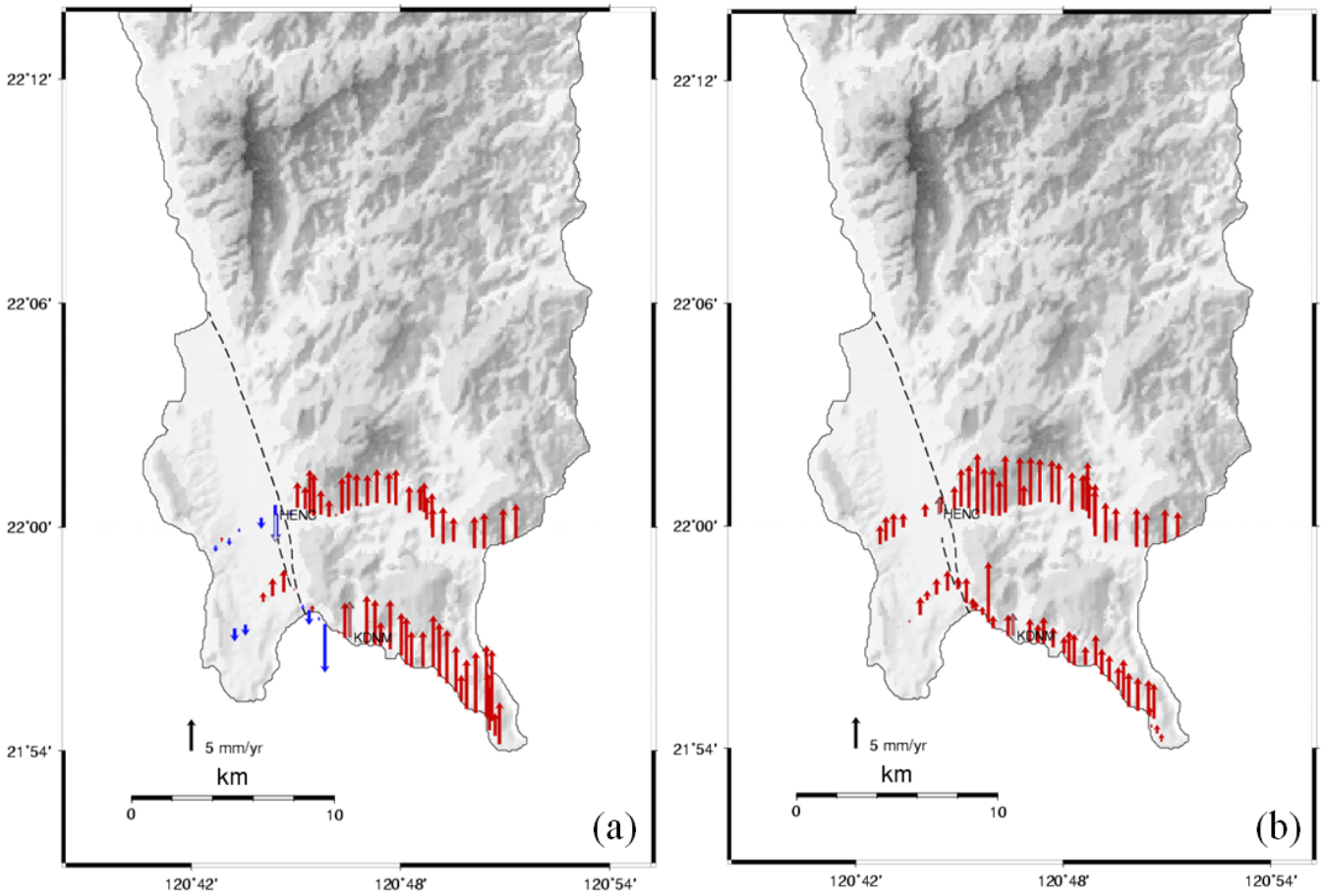


圖 2-4.24：恆春半島垂直速度場變化量 （a）2006 年 12 月~2010 年 4 月相對 2002 年 3 月~2006 年 12 月 （b）2010 年 4 月~2013 年 4 月相對 2002 年 3 月~2006 年 12 月。

2-5 北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，依序展示北部地區之速度場、應變率場以及大地測量矩率分布。

2-5-1 北部地區 GPS 速度場

分析北部地區 GPS 水平速度場結果發現（圖 2-5.1），整個北部地區（不包含中部地區北端及宜蘭地區）由西到東大致上是呈現扇形分佈，速度場方位角由 270°至 88°，此地區之速度值介於 0.4 mm/yr 至 13.1 mm/yr。宜蘭地區之速度場顯示，速度變化由西向東南呈順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，速度場方位角由 5°至 179°，此地區之速度值介於 3.5 mm/yr 至 37.4 mm/yr。桃竹苗地區在獅潭斷層東側速度場約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場降為約 7 mm/yr。

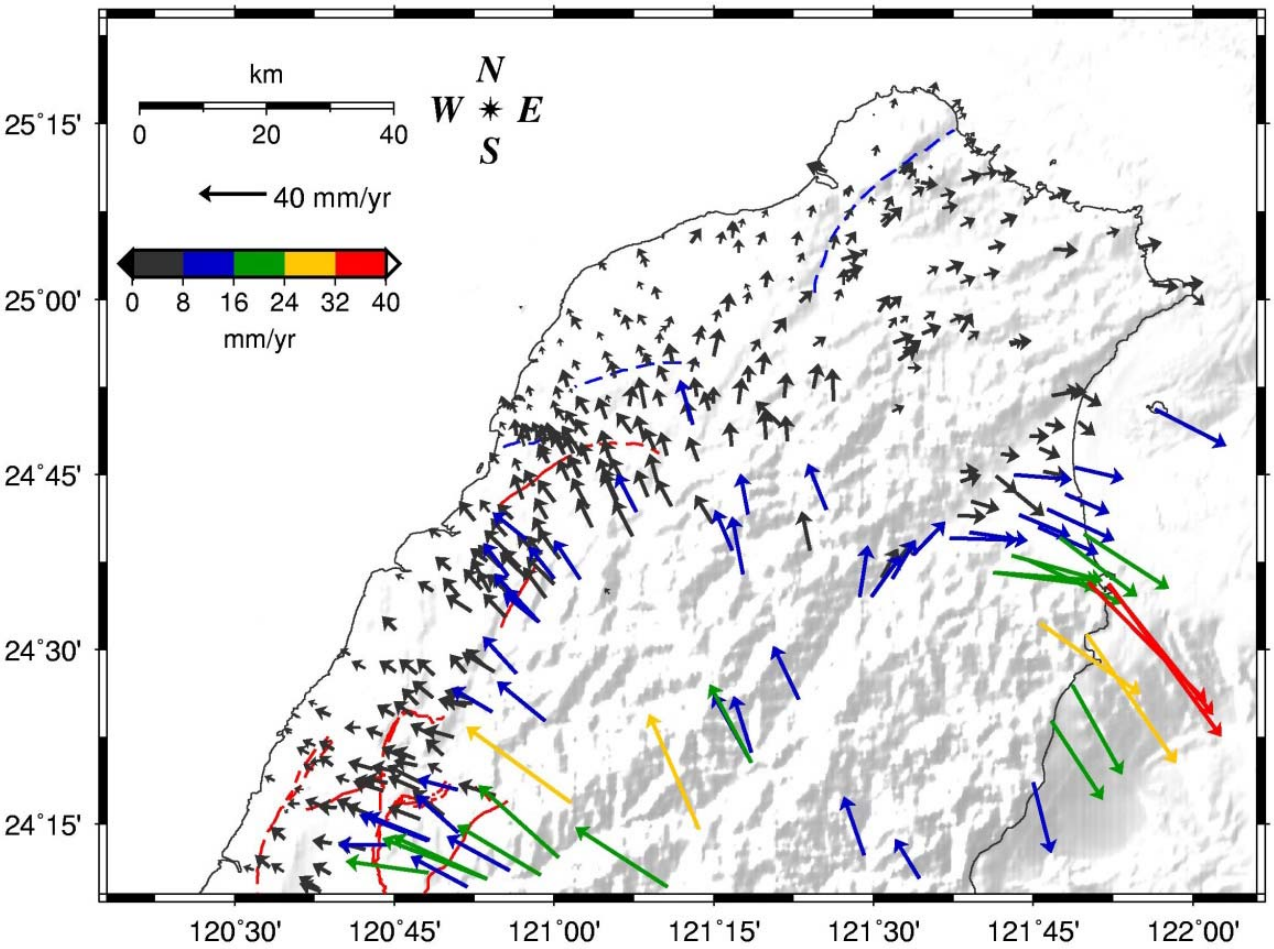


圖 2-5.1：北部地區相對於澎湖白沙（S01R）之 GPS 水平方向速度場。

2-5-2 北部地區 GPS 應變率場

北部地區之應變率最大的區域主要集中在東南方之宜蘭平原沿海一帶介於-1.28 至 1.26 μstrain/yr，其他的區域皆小於 0.50 strain/yr 以下，應變形態由西至東分別從桃園、新竹一帶為西北-東南擠壓，經過山腳斷層系統轉為近乎東西方向伸張，方向越往東北方應變量與應變型態逐漸不明顯，到了宜蘭平原呈現西北-東南方向的伸張型態（圖 2-5.2）。

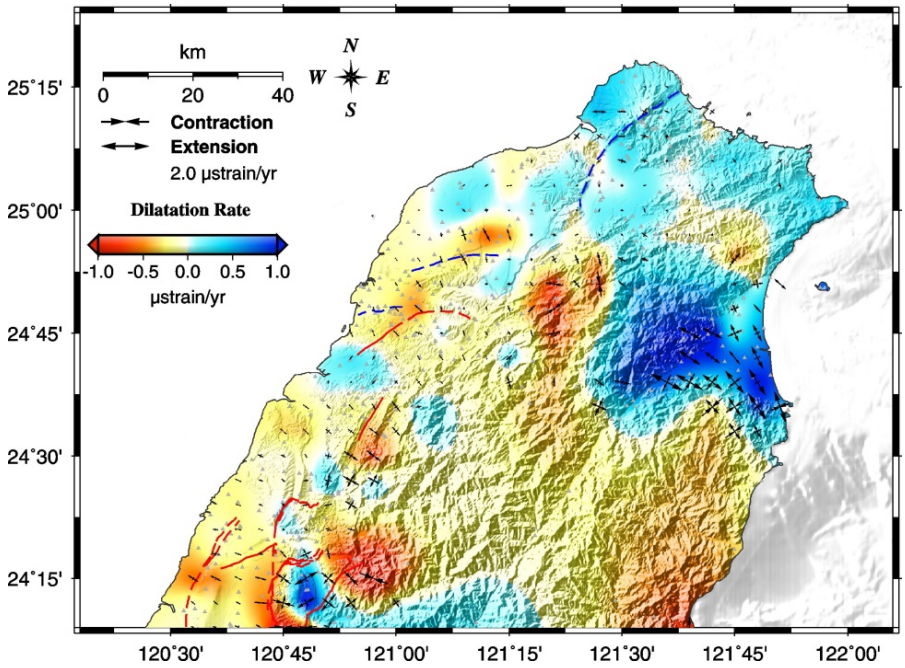


圖 2-5.2：北部地區應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

2-5-3 大地測量矩率分布圖

最小大地測量矩率（minimum geodetic moment rate）（圖 2-5.3）指出，北部地區（不包含中部地區北端及宜蘭地區）其矩率值集中在 4×10^{15} - 5×10^{16} Nm/yr 之間。最大量值（8×10^{16} Nm/yr）主要顯示在宜蘭地區以南，介於 6×10^{16} - 9×10^{16} Nm/yr 之間。圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑為 10 km。

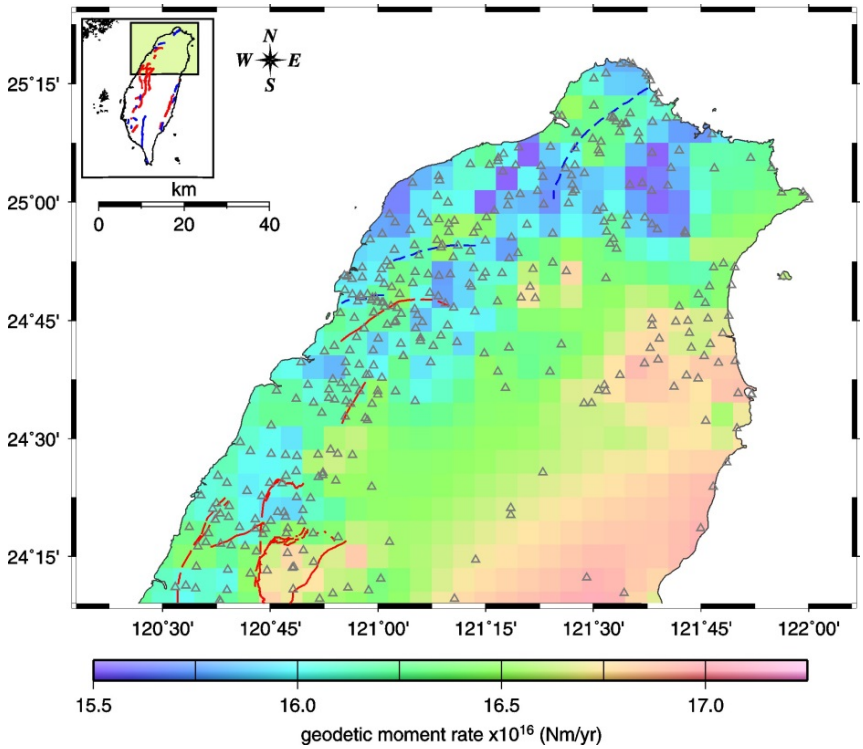


圖 2-5.3：最小大地測量矩率分布圖。三角形顯示 GPS 測點之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察之易讀性，故求其指數值以色階表示。

2-5-4 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。

2-5-4-1 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，臺灣北部地區自 2002-2014 年之地震事件一共是 123,947 筆。圖 2-5.4 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北部地區之地殼發震深度為 30 km，將 123,947 筆地震事件，再以深度＜30 km 及 M_W ≧3 之條件進行篩選，最終剩下 4,300 筆地震，視為臺灣北部地區發震深度內之主要發震事件。

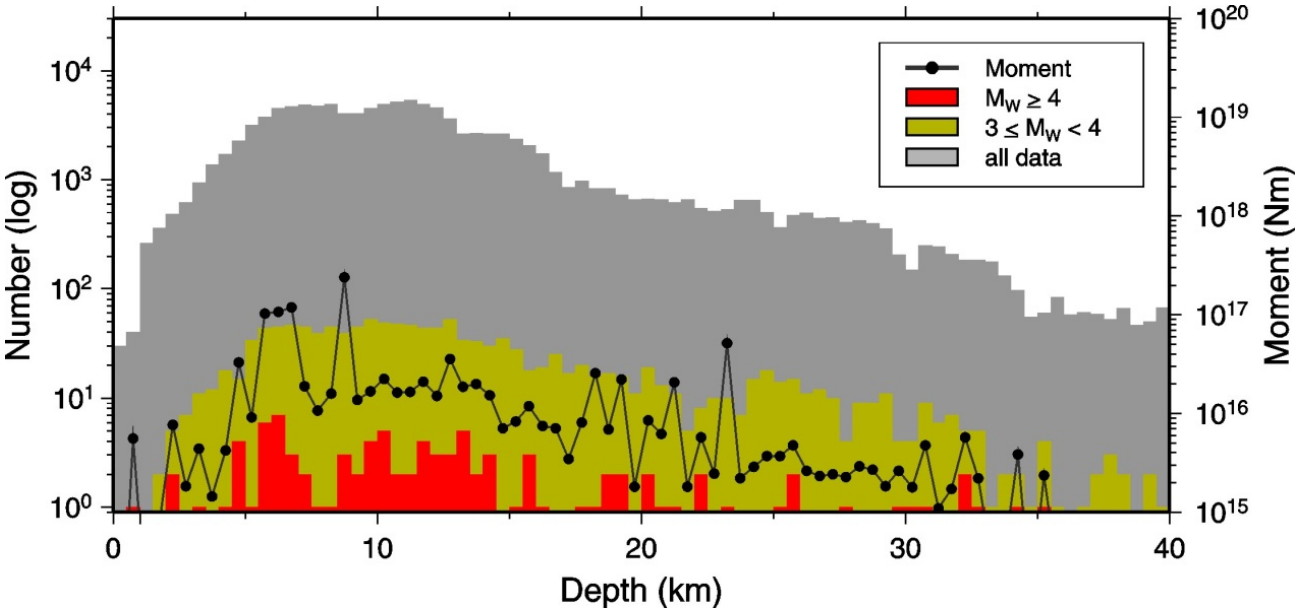


圖 2-5.4：2002-2014 年之地震資料品質展示。長條圖顯示地震數量在深度之分布情形；折線圖反映地震矩率在各個深度區間累積之情形。

2-5-4-2 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 2-5.5 和圖 2-5.6）。

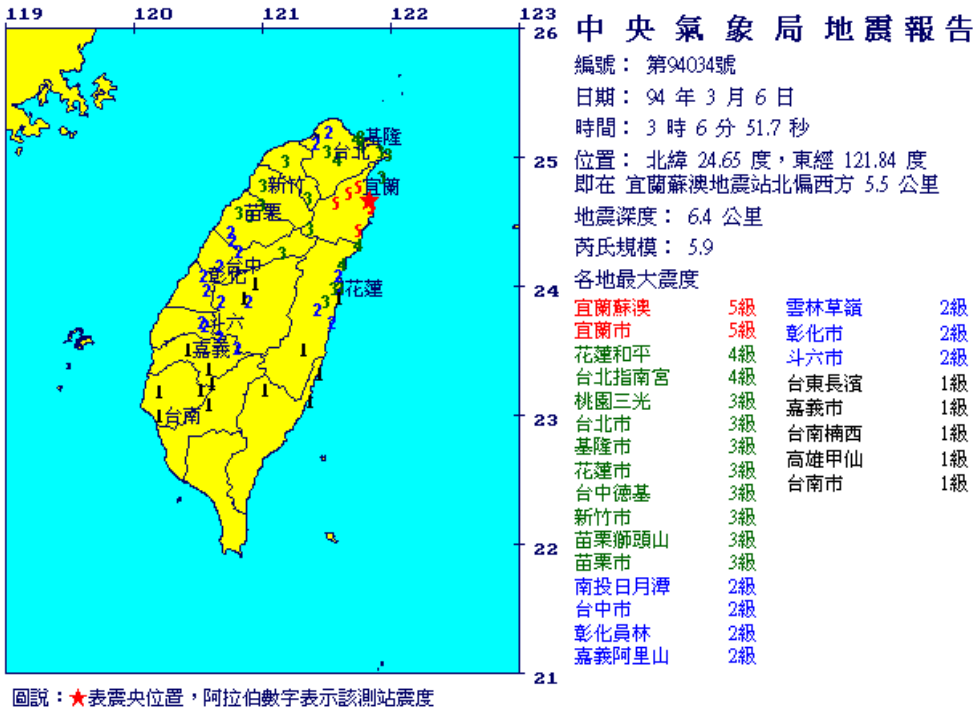


圖 2-5.5：2005 年 3 月 6 日宜蘭地震，規模 5.9，深度 6.4 公里。資料來源：中央氣象局。

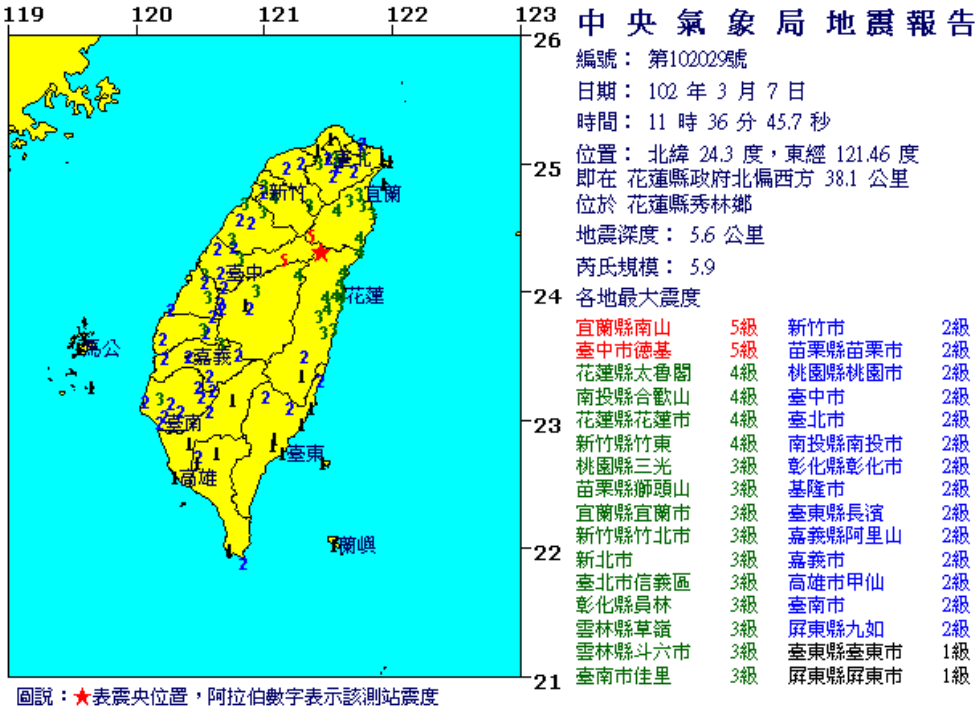


圖 2-5.6：2013 年 3 月 7 日花蓮地震，規模 5.9，深度 5.6 公里。資料來源：中央氣象局。

使用公式如下：

$$M_W = (0.931 \pm 0.017) M_L - (0.107 \pm 0.081) \quad \text{（式 2-5-1）}$$

$$M_W = 2/3 \times \log_{10} M_0 - 6.0 \quad \text{（式 2-5-2）}$$

$$\dot{M}_0 = \sum M_0 / \Delta t \quad \text{（式 2-5-3）}$$

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（2-5-1），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（2-5-2）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 $\dot{M}_0$（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（2-5-3）式即可求得地震矩率，Δt = 12 年為地震目錄時間長度（2012 ~ 2014 年）。

2-5-4-3 地震矩率分布圖

為了計算地震矩率 $\dot{M}_0$（seismic moment rate），以等間距地震矩率（seismic moment rate）（圖 2-5.7）呈現，研究區域中其矩率值在 8×10^{11} - 4×10^{16} Nm/yr 之間，地震矩率最大高達為 1×10^{17} Nm/yr，位置位於宜蘭蘇澳地震站附近和花蓮秀林鎮，圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑 10 km。

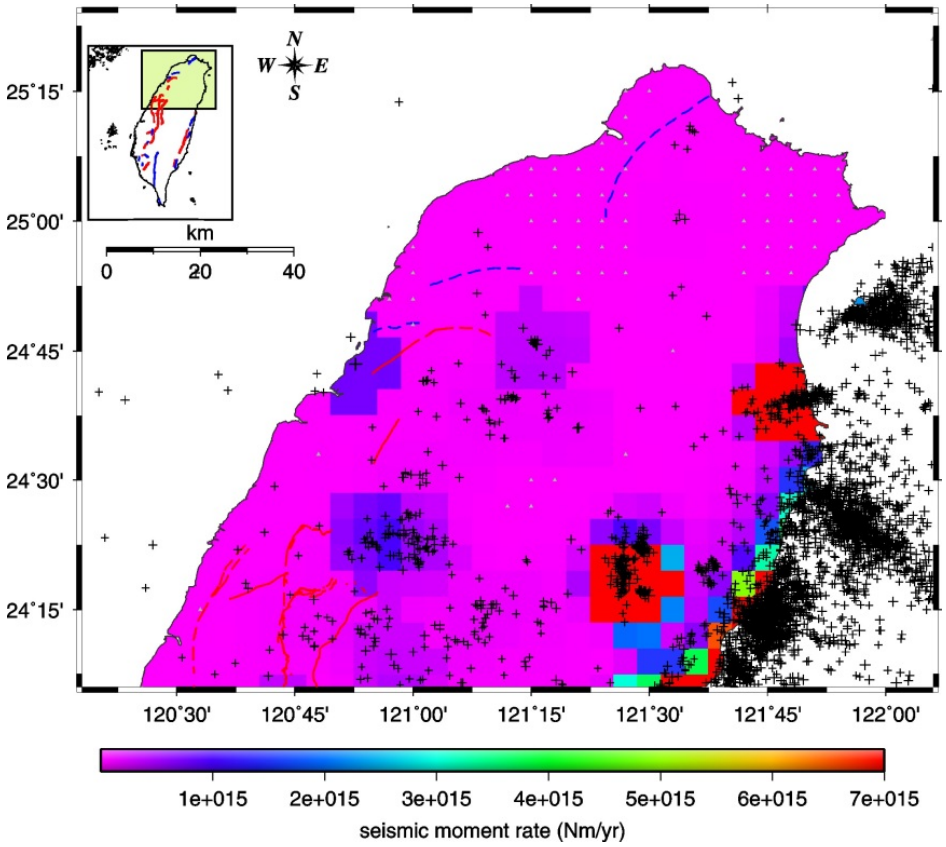


圖 2-5.7：地震矩率分布圖。灰色三角為無地震發生區域，黑色十字顯示地震之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察的易讀性，故求其指數值以色階表示之。

兩種矩率依照取樣格點統計，如圖 2-5.8 所示，最小大地測量矩率之量值主要集中於 4×10^{15} - 5×10^{16} Nm/yr，地震矩率則介於 8×10^{11} - 4×10^{16} 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，顯示臺灣北部地區在觀測期間，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，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。圖 2-5.9 左圖即為矩率虧損圖，其分布形態與最小大地測量矩率圖（圖 2-5.3）極為相似，矩率虧損之最大量值主要分布在宜蘭花蓮一帶。將兩種矩率相除，可求得矩率比值（ratio of moment rate），矩率比值圖（圖 2-5.9 右圖）之分布形態近似於地震矩率圖（圖 2-5.7）。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。

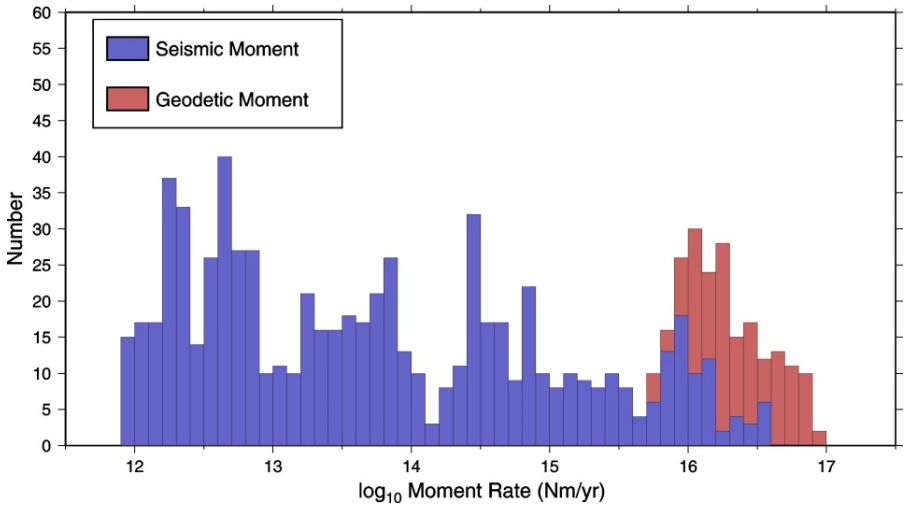


圖 2-5.8：臺灣北部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。

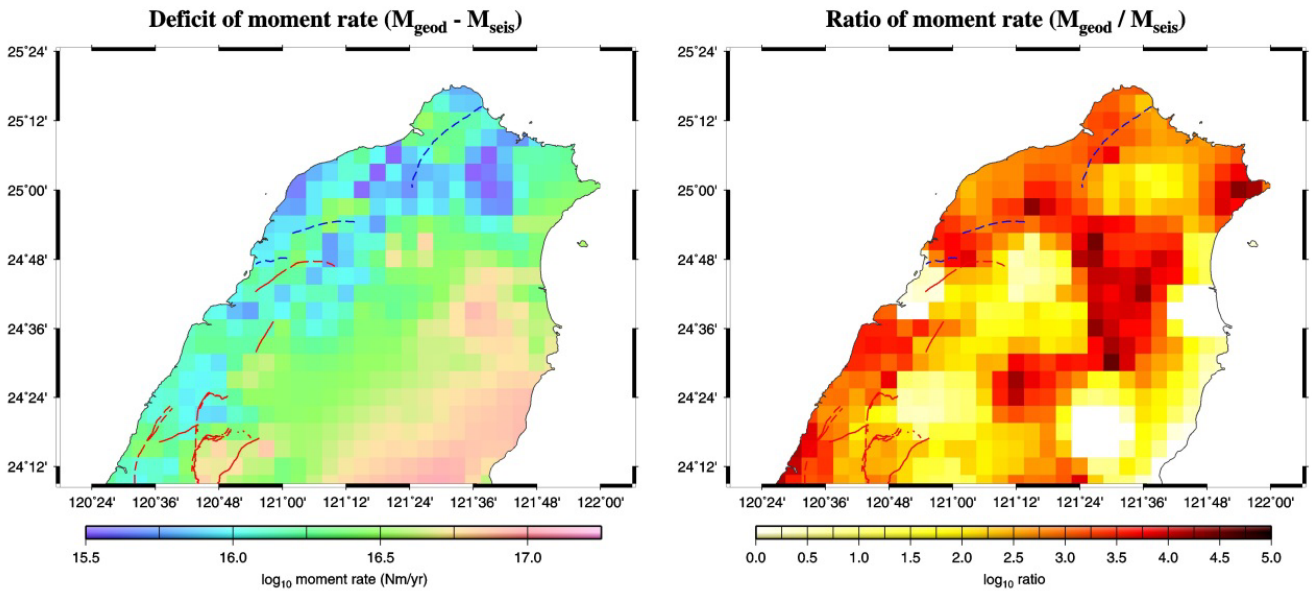


圖 2-5.9：臺灣北部地區矩率綜合分析圖：（左圖）矩率虧損圖，由最小大地測量矩率扣除地震矩率。（右圖）矩率比值圖，由最小大地測量矩率除以地震矩率。

2-6 PS-INSAR

本計畫彙整臺灣北部地區，由 ERS (European Remote Sensing Satellite)-1/2、ENVISAT (Environmental Satellite)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 2-6.1 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 影像數量及時間：
共 29 幅。時間涵蓋從 1996 年 1 月至 1999 年 12 月。

（2） C 波段之 **ENVISAT** 衛星 SAR 影像數量及時間：
共 30 幅。時間涵蓋從 2003 年 04 月至 2008 年 6 月。

（3） L 波段之 **ALOS** 衛星 SAR 影像數量及時間：
共 21 幅。時間涵蓋從 2007 年 1 月至 2011 年 3 月。

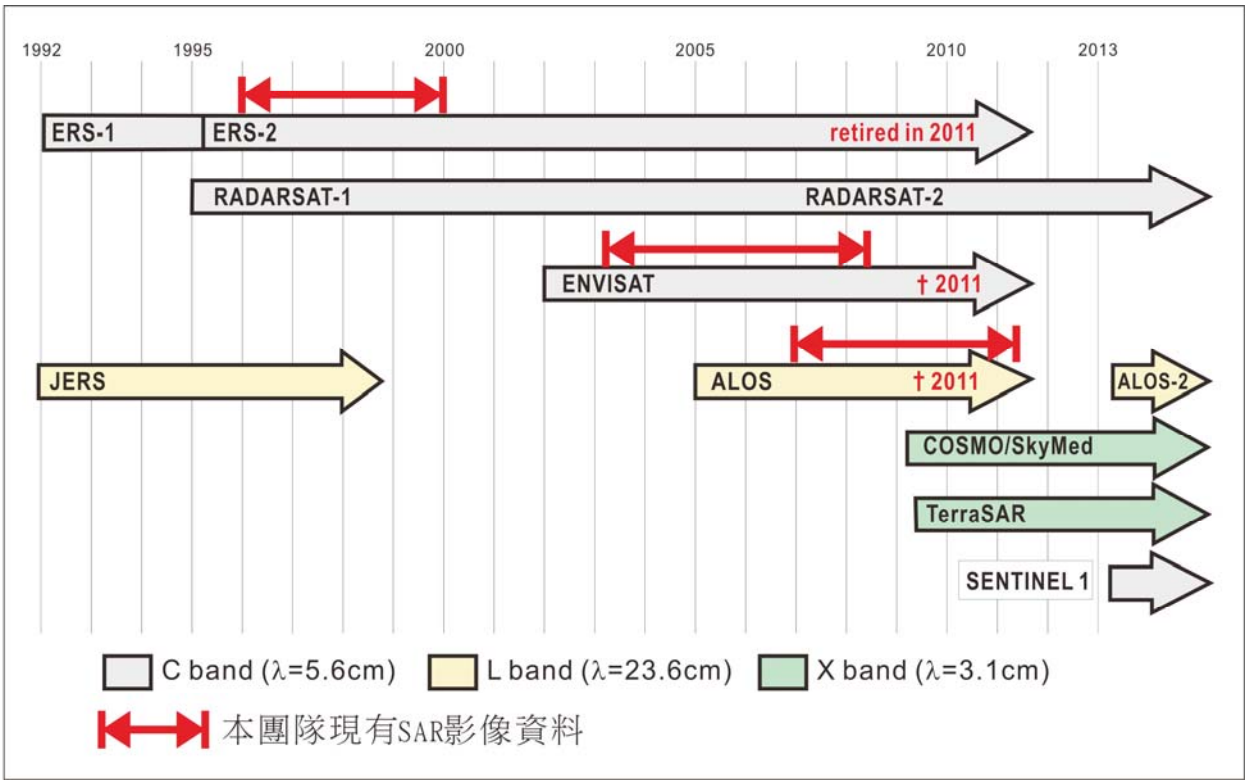


圖 2-6.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。

2-6-1 ERS1/2 (1996/1~1999/12)

本計畫選取 ERS-1/2 衛星 SAR 影像區域為 Track 461，Frame 3105，如圖 2-6.2 所示。本區域範圍一共有 29 張影像，影像時間從 1996 年 1 月至 1999 年 12 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 1997 年 8 月 30 日作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-6.3 與表 2-6.1 所示。

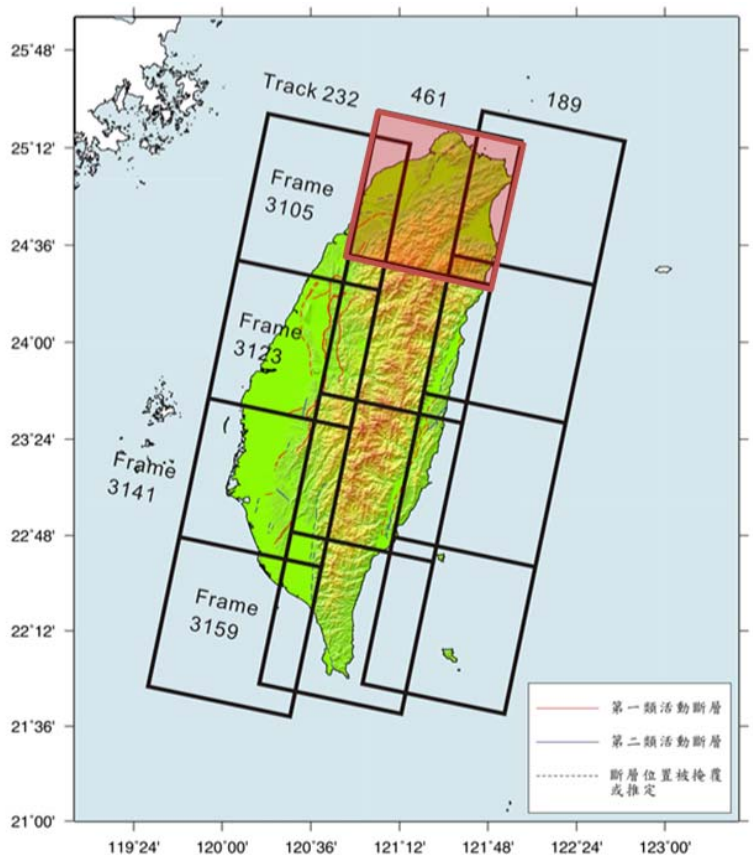


圖 2-6.2：ERS-1/2 衛星選取區域涵蓋圖，Track 461，Frame 3105。

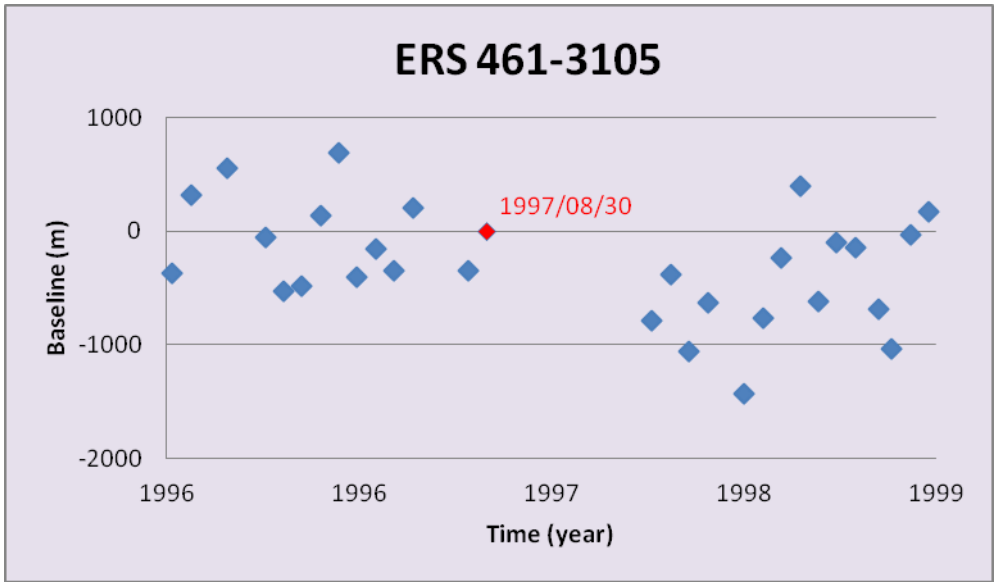


圖 2-6.3：ERS-1/2 Track 461，Frame 3105 影像時間與垂直基線相對關係。

表 2-6.1：ERS-1/2 Track 461，Frame 3105 詳細影像資訊與相對垂直基線。

影像日期	垂直基線長（公尺）	都普勒中心頻率	影像日期	垂直基線長（公尺）	都普勒中心頻率
1996/01/12	-365.4	195.1	1998/08/15	-379.0	-27.6
1996/02/16	317.3	142.8	1998/09/19	-1056.6	-30.1
1996/04/26	554.9	244.2	1998/10/24	-624.5	-41.6
1996/07/06	-57.2	-39.8	1999/01/02	-1431.4	-23.9
1996/08/10	-524.8	-85.9	1999/02/06	-764.9	-59.8
1996/09/14	-482.2	-66.8	1999/03/13	-236.8	52.1
1996/10/19	136.4	-105.7	1999/04/17	398.6	20.2
1996/11/23	688.2	-87.3	1999/05/22	-622.0	14.2
1996/12/28	-398.3	-81.8	1999/06/26	-93.3	2.8
1997/02/01	-150.5	-73.2	1999/07/31	-139.6	7.9
1997/03/08	-347.7	-23.3	1999/09/14	-682.4	-68.2
1997/04/12	205.0	-36.5	1999/10/09	-1036.7	-35.9
1997/08/30	0.0	-105.2	1999/11/13	-28.2	-121.2
1997/07/26	-349.5	-45.0	1999/12/18	172.7	-8.9
1998/07/11	-788.8	-0.4			

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 29 張影像製作出 28 張干涉條紋圖（圖 2-6.4）。

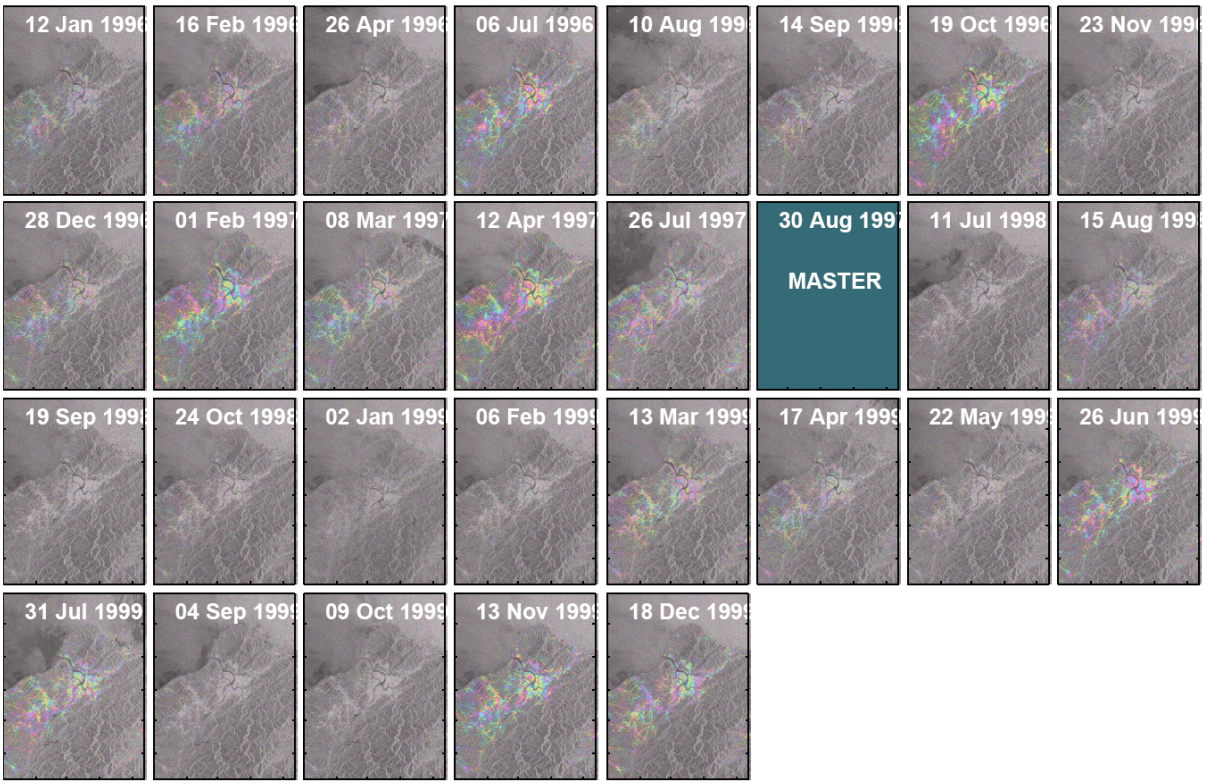


圖 2-6.4：利用 ERS Path 461，Frame 3105 共 29 幅影像，以 1997/08/30 為主影像所獲得 28 幅差分干涉圖之結果。

由圖 2-6.4 可見，影像中干涉條紋大多產生於臺北盆地內以及西側的林口台地區域，而北邊的大屯火山群以及南邊的中央山脈區域則因為植被過重而無法產生干涉條紋。除此之外，約有將近一半的影像對並未見到明顯的干涉條紋，若後續 PSI 結果雜訊過大，也可針對此部分影像做刪減來探討。

完成所有影像對的干涉結果後，本計畫利用 StaMPS 軟體進行 PS-InSAR 流程解算，圖 2-6.5 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。並以綠色三角圓圈標示位置連續 GPS 測站 S101 為參考點位，對所有 PS 點做校正。從圖 2-6.5 中可見，儘管在影像對干涉結果中，有將近一半的影像對並未獲得良好的干涉條紋，但分析永久散射點的結果，還是可以得到在這段期間（1996~1999），臺北盆地主要以向視衛星方向抬升的運動為主，最大抬升速率為位於士林、北投地區的 8 mm/yr。而土城地區則有最大下陷速率，約為 5 mm/yr。

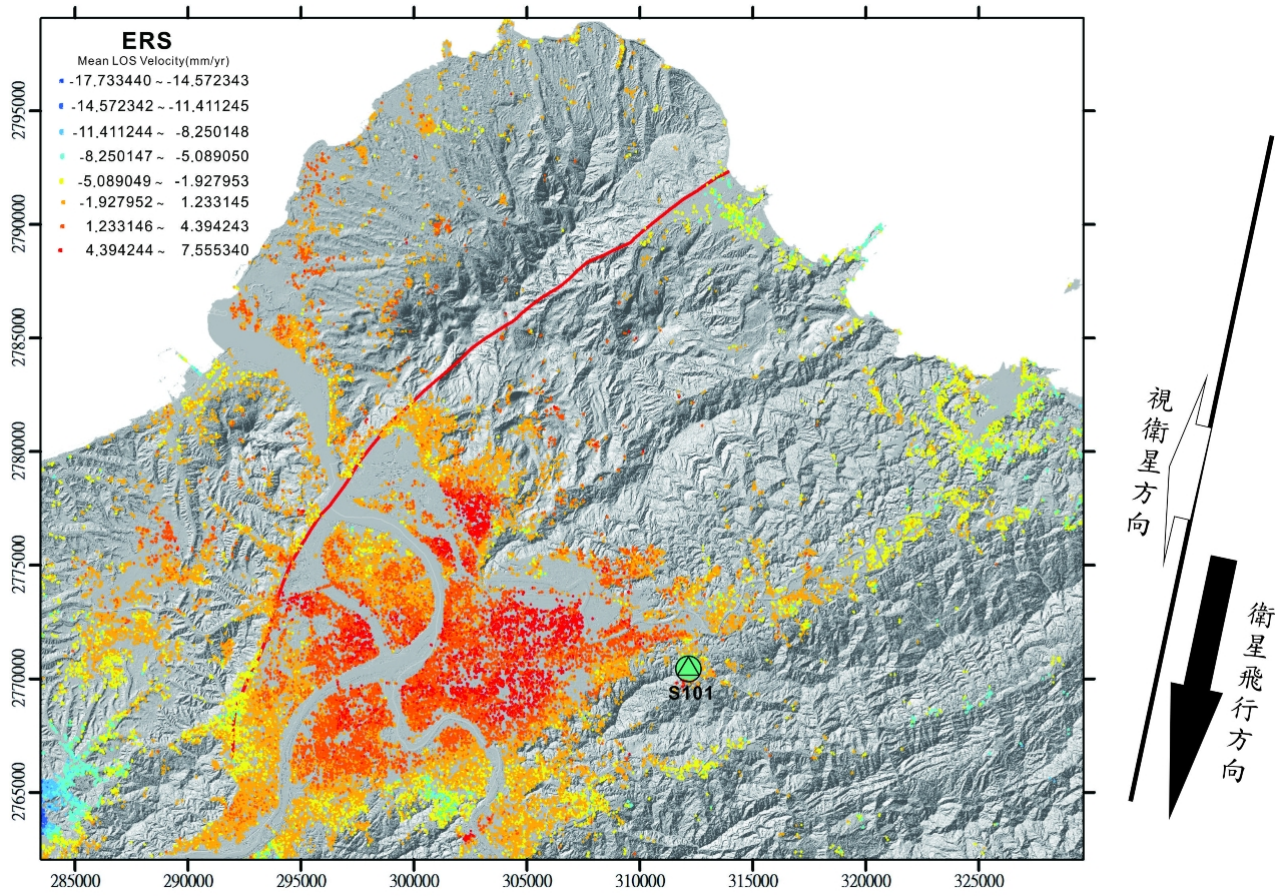


圖 2-6.5： ERS Path 461，Frame 3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考點位為連續 GPS 測站 S101（綠色三角圓圈）。

2-6-2 ENVISAT (2003/4~2008/6)

ENVISAT 衛星影像區域跟 ERS-1/2 衛星影像區域一樣，為 Track 461，Frame 3105，如圖 2-6.2 所示。本區域範圍一共有 30 張影像，影像時間從 2003 年 04 月至 2008 年 6 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 2005 年 11 月 26 日作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-6.6 與表 2-6.2 所示。

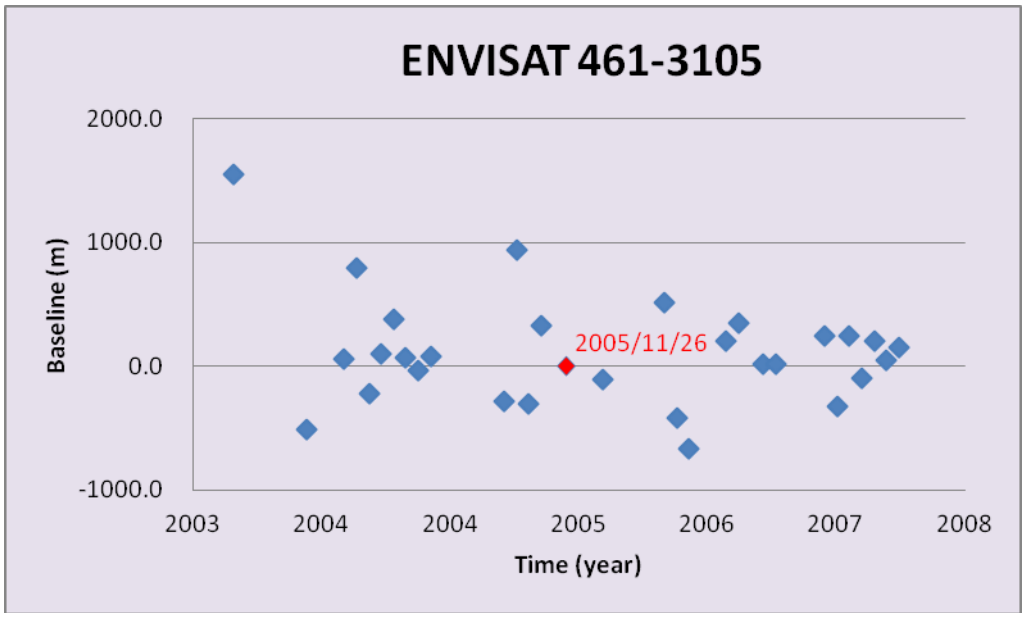


圖 2-6.6：ENVISAT Track 461，Frame 3105 影像時間與垂直基線相對關係。

表 2-6.2：ENVISAT Track 461，Frame 3105 詳細影像資訊與相對垂直基線。

影像日期	垂直基線長（公尺）	都普勒中心頻率	影像日期	垂直基線長（公尺）	都普勒中心頻率
2003/04/26	1554.7	57.7	2006/03/11	-111.4	-19.6
2003/11/22	-505.8	-46.4	2006/09/02	514.6	-5.2
2004/03/06	56.3	-38.6	2006/10/07	-416.1	-15.7
2004/04/10	790.8	-31.3	2006/11/11	-667.0	-35.7
2004/05/15	-217.1	-32.7	2007/02/24	202.8	-31.9
2004/06/19	101.9	-31.4	2007/03/31	351.2	-11.0
2004/07/24	379.0	-29.9	2007/06/09	21.9	-24.9
2004/08/28	65.7	-30.3	2007/07/14	19.2	-12.3
2004/10/02	-32.1	-42.3	2007/12/01	242.2	-26.2
2004/11/06	75.6	-38.9	2008/01/05	-325.1	-23.5
2005/06/04	-285.8	-42.5	2008/02/09	247.5	-17.8
2005/07/09	936.7	-34.5	2008/03/15	-91.2	-19.1
2005/08/13	-306.6	-45.8	2008/04/19	202.6	-30.6
2005/09/17	328.0	-18.7	2008/05/24	48.0	-22.9
2005/11/26	0.0	-11.4	2008/06/28	154.3	-13.9

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 30 張影像製作出 29 張干涉條紋圖（圖 2-6.7）。

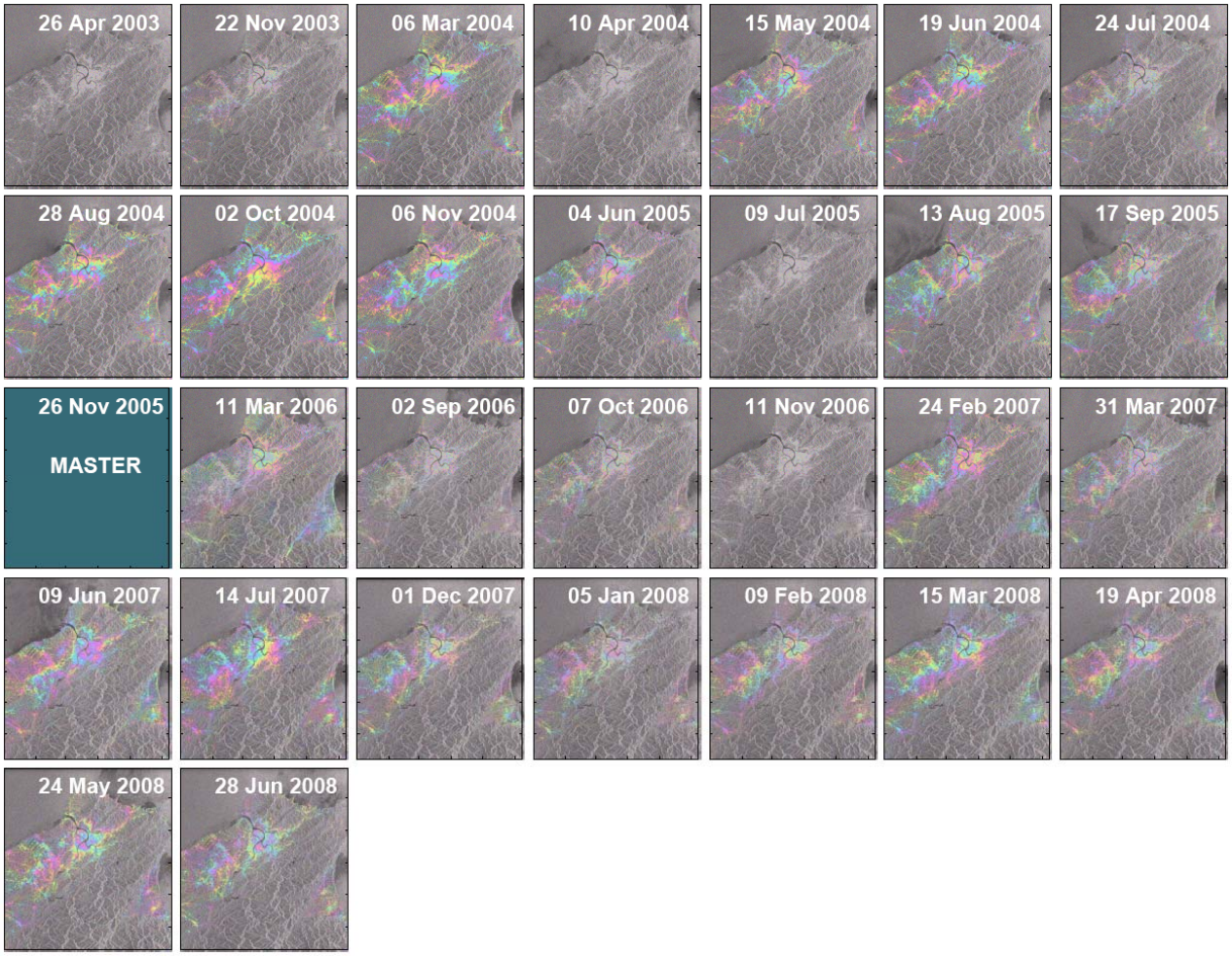


圖 2-6.7：ENVISAT Path 461，Frame 3105 共 30 幅影像，以 2005/11/26 為主影像所獲得 29 幅差分干涉圖之結果。

圖 2-6.7 可見，相較於圖 2-6.4 的 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臺北盆地內、西側的林口台地區域以及宜蘭地區，北邊的大屯火山群也有部分的干涉條紋，南邊的中央山脈區域則因為植被過重而無法產生干涉條紋。大約只有 1/5 的影像對並未見到明顯的干涉條紋，若後續 PSI 結果雜訊過大，也可針對此部分影像做刪減來探討。

完成所有影像對的干涉結果後，本計劃利用 StaMPS 軟體進行 PSInSAR 流程解算，圖 2-6.8 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。並以綠色三角圓圈標示位置連續 GPS 測站 WUKU 為參考點位，對所有 PS 點做校正。從圖 2-6.8 可見，在這段期間（2003-2008），臺北盆地主要以往視衛星方向下陷的運動為主，最大下陷速率為位於泰山、五股地區的 9 mm/yr，而盆地西側則為平均 3~4 mm/yr 的下陷速率。

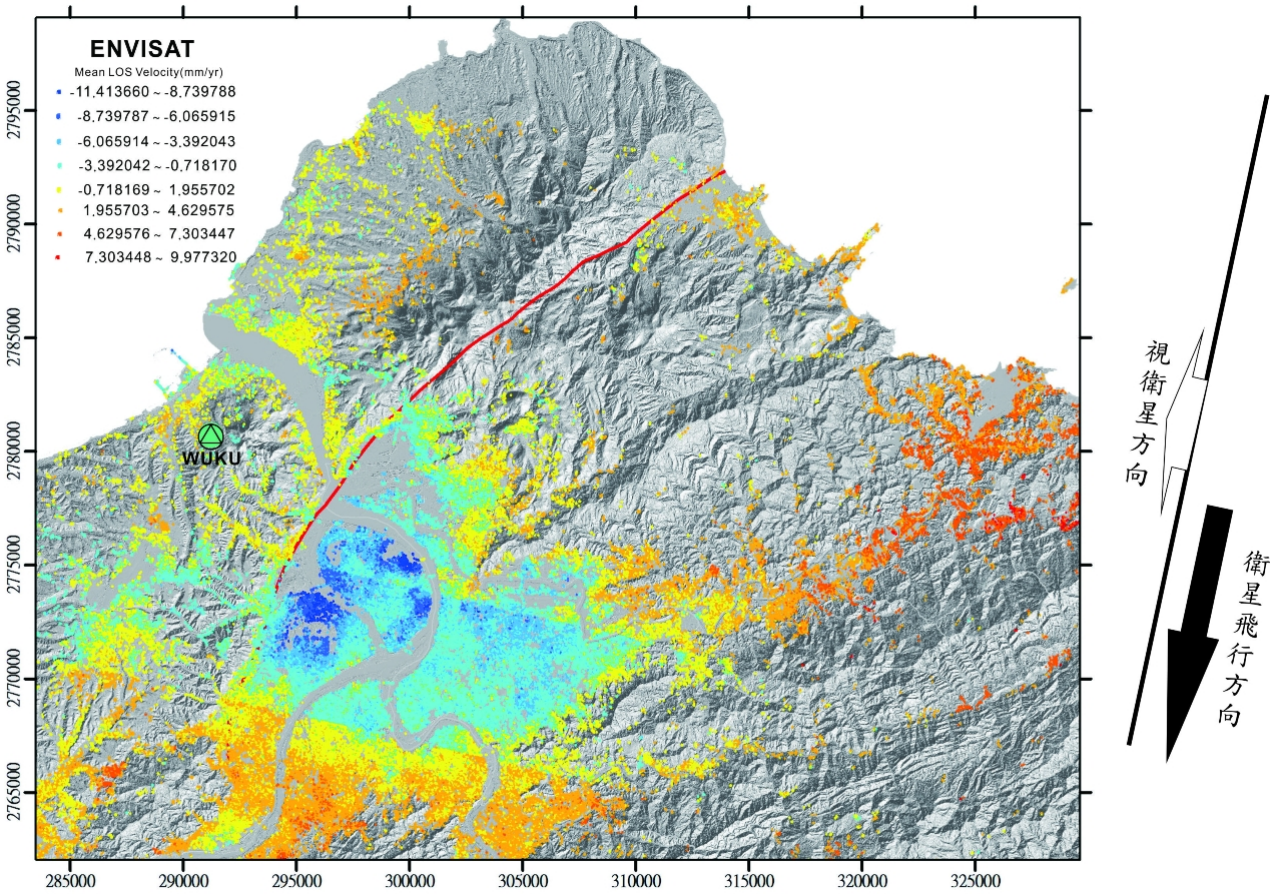


圖 2-6.8： ENVISAT Path 461，Frame 3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考點位為連續 GPS 測站 WUKU（綠色三角圓圈）。

2-6-3 ALOS (2007/1~2011/3)

本計畫選取 ALOS 衛星 SAR 影像區域為 Track 444，Frame 480 及 490，如圖 2-6.9 所示。本區域範圍一共有 21 張影像，影像時間從 2007 年 1 月至 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 2007 年 11 月 30 日作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-6.10 與表 2-6.3 所示。

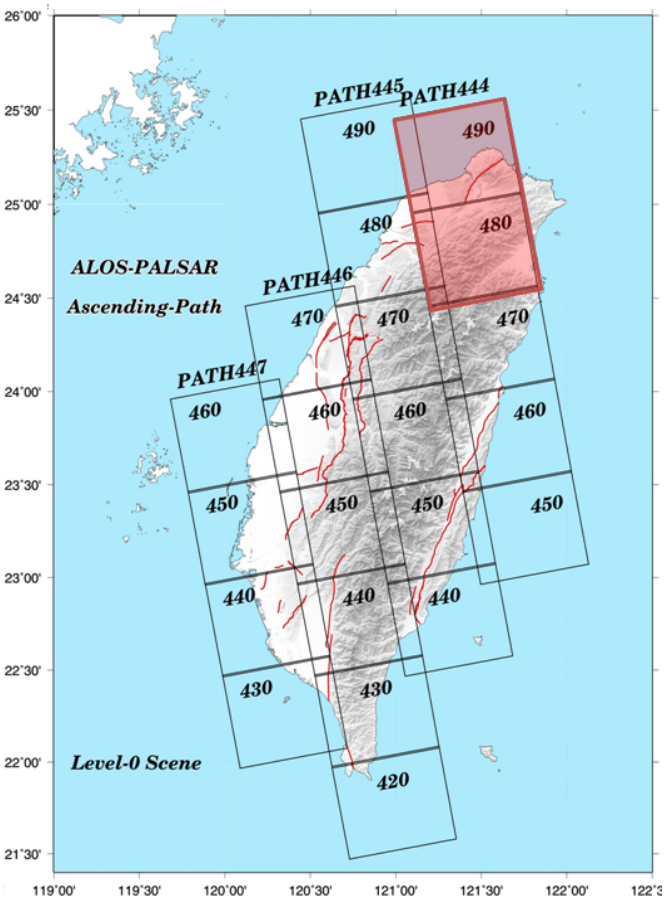


圖 2-6.9：ALOS 衛星選取區域涵蓋圖，Track 444，Frame 480、490。

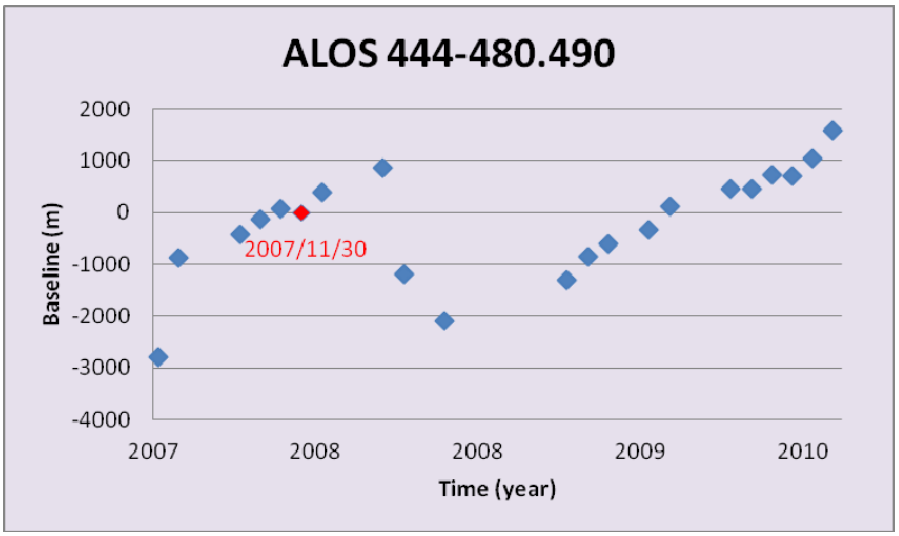


圖 2-6.10：ALOS Track 444，Frame 480、490 影像時間與垂直基線相對關係。

表 2-6.3：ALOS Track 444，Frame 480、490 詳細影像資訊與相對垂直基線。

影像日期	垂直基線長（公尺）	都普勒中心頻率	影像日期	垂直基線長（公尺）	都普勒中心頻率
2007/01/12	-2789.6	39.3726	2009/09/04	-854.3	50.3251
2007/02/27	-876	58.3462	2009/10/20	-610.9	47.6647
2007/07/15	-422.1	69.5151	2010/01/20	-329.1	43.4507
2007/08/30	-122.8	66.4013	2010/03/07	121.7	53.0489
2007/10/15	68.8	37.1727	2010/07/23	467.7	78.6086
2007/11/30	0	51.3435	2010/09/07	453.5	65.0284
2008/01/15	391	44.7578	2010/10/23	727.4	56.6952
2008/06/01	872.8	69.8756	2010/12/08	714	46.4512
2008/07/17	-1195.1	77.5965	2011/01/23	1054.4	46.0172
2008/10/17	-2079.8	45.2579	2011/03/10	1581.5	55.6790
2009/07/20	-1296.2	66.0992			

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 21 張影像製作出 20 張干涉條紋圖（圖 2-6.11）。

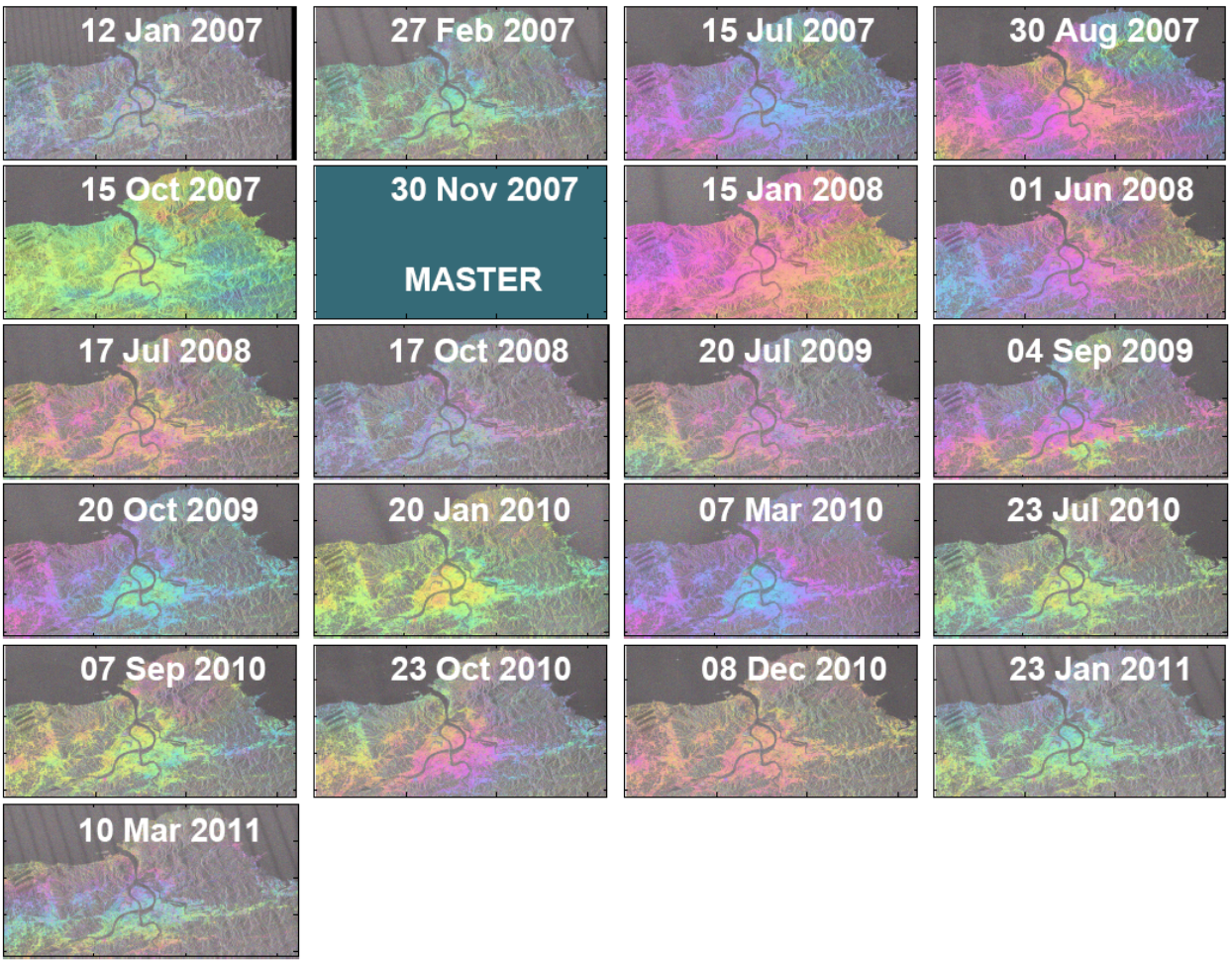


圖 2-6.11：ALOS Path 444，Frame 480、490 共 21 幅影像，以 2007/11/30 為主影像所獲得 20 幅差分干涉之結果。

圖 2-6.11 可見，相較於圖 2-6.4 的 ERS 衛星及圖 2-6.7 的 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，所有的影像對皆可以得到大面積的干涉成果。影像中干涉條紋除了產生於臺北盆地內與西側的林口台地區域外，部分影像中，在北邊的大屯火山群也有明顯的干涉條紋。

完成所有影像對的干涉結果後，本計劃利用 StaMPS 軟體進行 PSInSAR 流程解算，圖 2-6.12 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。並以綠色三角圓圈標示位置連續 GPS 測站 WUKU 為參考點位，對所有 PS 點做校正。從圖 2-6.12 可見，在這段期間（2007-2011），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。

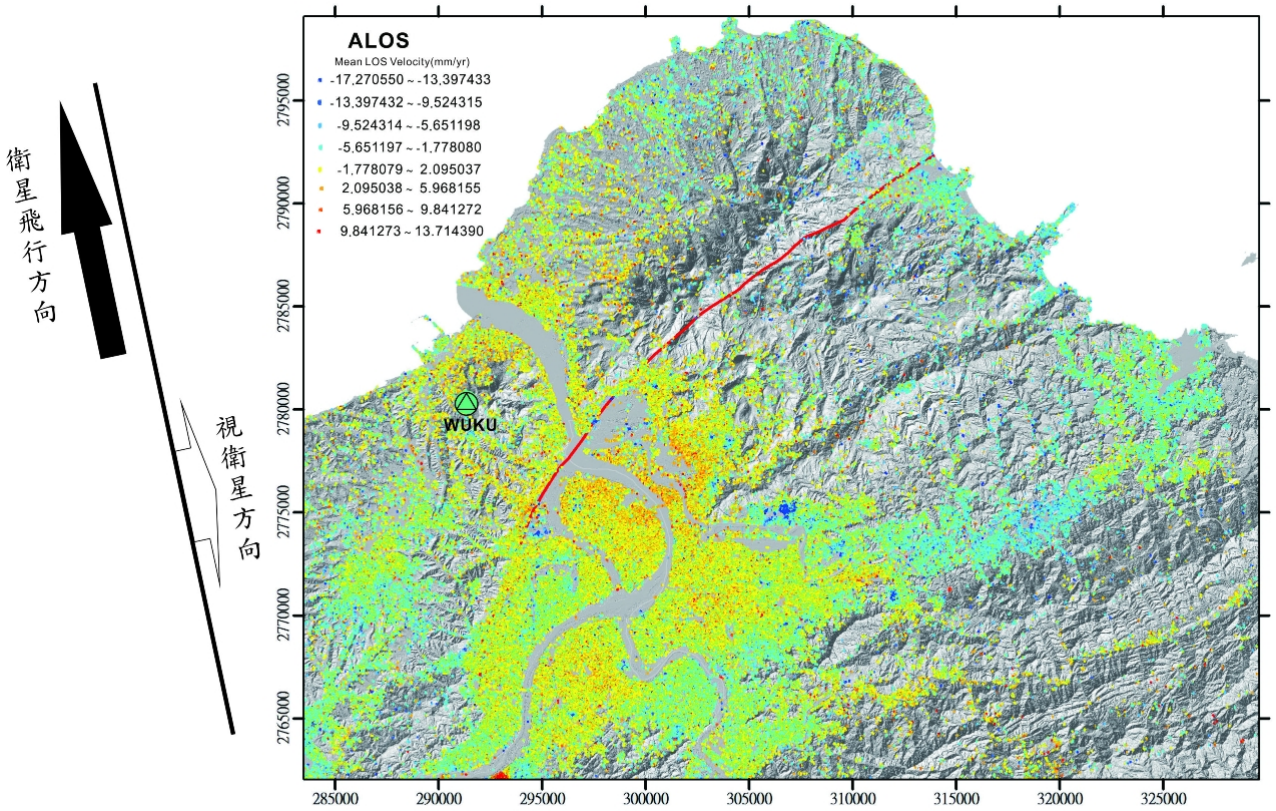


圖 2-6.12： ALOS Path 444，Frame 480、490 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。參考點位為連續 GPS 測站 WUKU（綠色三角圓圈）。

第三章、活動斷層發生潛勢圖建置

3-1 三義斷層

3-1-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：地調所（林啟文等，2008）劃設之三義斷層全長約 33 公里，分為兩段（圖 3-1.1），北邊之分段呈東西走向，長約 8 公里；南邊之分段呈南北走向，長約 25 公里（丹桂之助，1936；張麗旭，1951；Meng, 1963）。另陳文山等人（Chen et al., 2007）認為三義斷層往南可能延伸至草湖溪附近（圖 3-1.2），南段延伸部分為 11 公里。本計畫據此將三義斷層分為走向東西向之北段、中段主斷層段及南段延伸段，建立 4 種可能之破裂模式（圖 3-1.3），其中 A 為中段破裂，B 為北+中段破裂，C 為中+南段破裂，D 為北+中+南段破裂，其權重分配將於下節詳述。

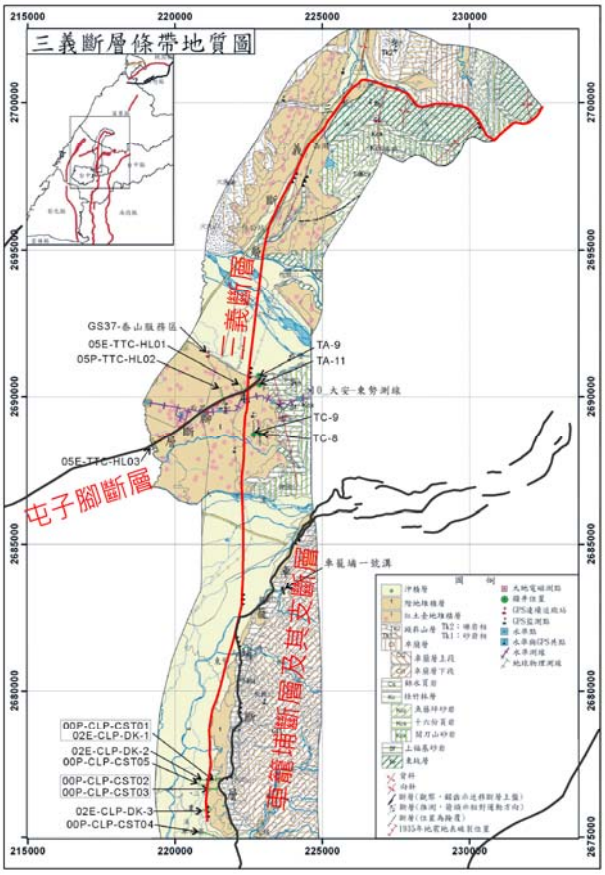


圖 3-1.1：三義斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。

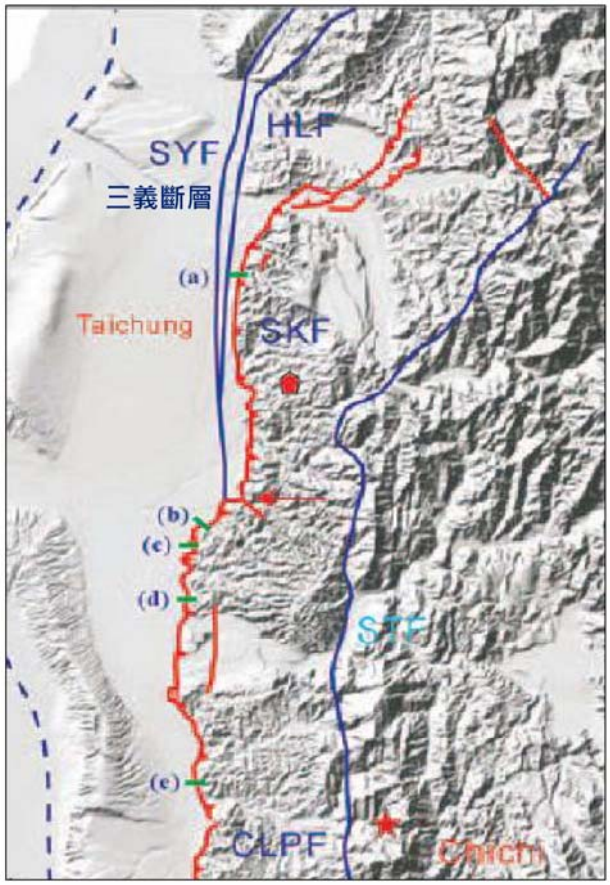


圖 3-1.2：三義斷層南段延伸部分，圖中 SYF 之藍色線段即三義斷層（修改自 Chen et al., 2007）。

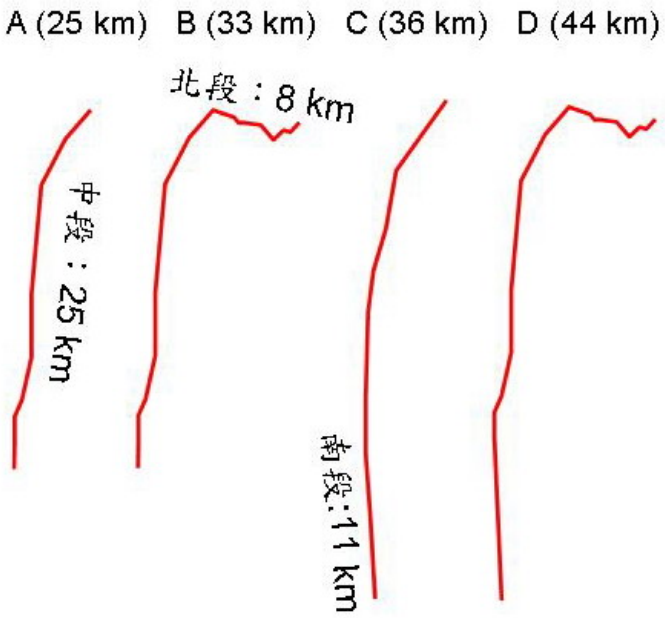


圖 3-1.3：本計畫三義斷層 4 種破裂模式。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：本計畫彙整三義斷層幾何形貌相關之研究，整理如表 3-1.1 中，在淺部幾何形貌上，以震測剖面為主要的參考資料。若要討論深部幾何形貌，主要會以地質構造剖面或平衡剖面為參考依據。另外，本計畫蒐集西元 1973-2010 年之地震目錄，統計三義斷層區域中之地震深度與數量之關係（圖 3-1.4），由圖 3-1.4 中之地震深度-數量統計圖可知，三義斷層區域中之地震主要在 12.5 公里之範圍內。彙整以上之參數，本計畫提出三義斷層之幾何參數，在傾角上約為 20 到 30 度左右；深度 7~11 公里，詳細的權重分配將於下一節中詳述之。

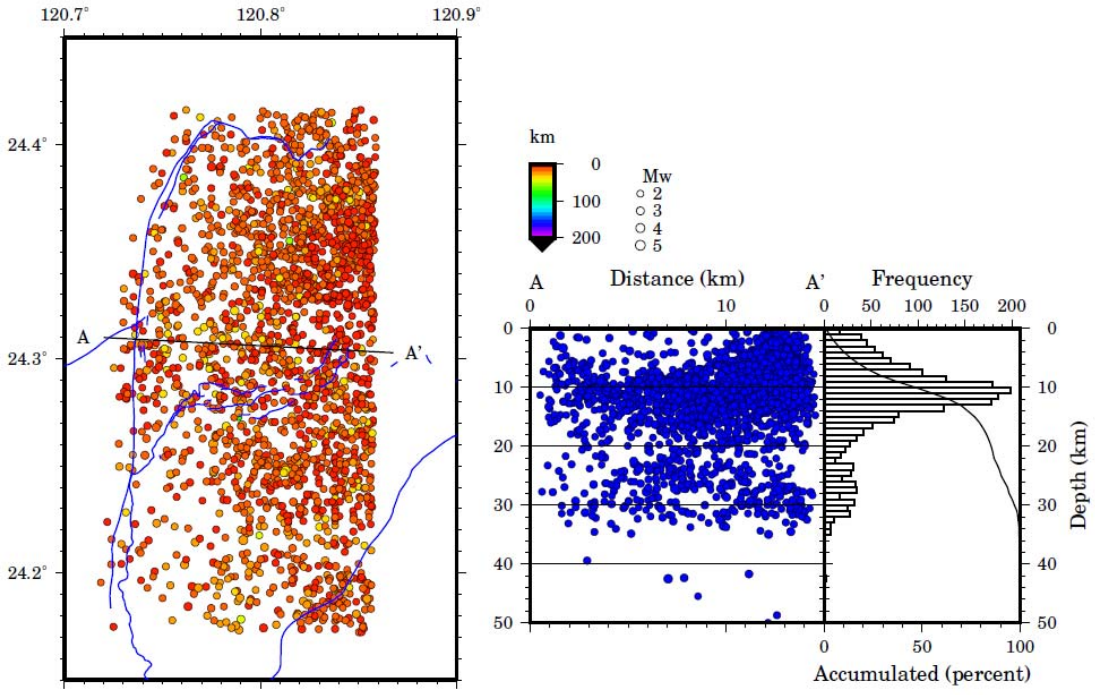


圖 3-1.4：左圖為三義斷層西元 1973-2010 地震分布圖，右圖為地震深度-數量統計圖。

表 3-1.1：三義斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

作者	方法	傾角	深度
邱華燈，1962	震測剖面	約 20 度	
Lin et al., 1989	震波資料逆推地下速度構造		9 公里
Hung and Wiltschko, 1993	中油鑽井、大範圍反射震測資料、平衡剖面	約 20 度，沿東坑層底部逆衝	4.5~9 公里
Mouthereau, 1995（未發表資料）	平衡剖面	傾角約在 25~30 度之間	8~10 公里
洪智賢，2001	淺層反射震測法	傾角約在 20~25 度之間	
陳太山與蘇福欽，2002	深部震測剖面	逆衝的角度從很緩變成接近 45 度角	
楊耿明等，2003	平衡剖面		5~8 公里
李奕亨，2009	震測剖面	約 30 度	
本計畫推估	1973-2010 地震深度分布		12.5 公里之範圍

3. 斷層機制：丹桂之助（1936）與大塚彌之助（1936）觀察三義斷層的南段，屬於低傾角的逆衝斷層。
4. 短期滑移速率：參照參數表表 3-1.2。
5. 長期滑移速率：洪日豪及魏其珂（Hung and Wiltschko, 1993）由平衡剖面之斷層面位移量及地層年代，推估三義斷層長期滑移速率約 2 mm/yr ~ 3.6 mm/yr。另外，也可從野外地形崖及階地年代推估，后里槽溝位於圖 3-1.5（a）中點 1 之處，從圖 3-1.5（b）照片顯示其紅土化程度，推估年代約 10 萬年到 50 萬年間，另后里馬場位於圖 3-1.5（a）中點 2 之處，該處地形崖如圖 3-1.5（c）照片所示，從 DEM 地形剖面中可量得地形崖約 80 公尺高（圖 3-1.6），利用地形崖高度除以上盤之紅土化階地年代，得到抬升速率介於 0.16~0.80 mm/yr，以斷層面傾角 25 度換算，則斷層面長期滑移速率約為 0.4~1.9 mm/yr。

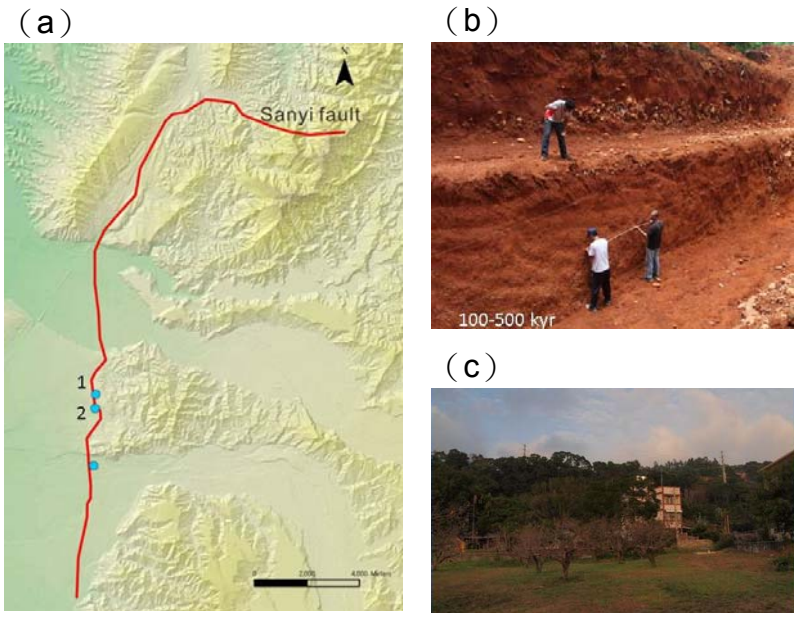


圖 3-1.5：（a）三義斷層（紅色實線）沿線構造線形平面位置及野外點位（藍色實心圓圈）分布；（b）后里槽溝照片，位於（a）之點 1 中；（c）后里馬場地形崖，位於（a）之點 2 中。

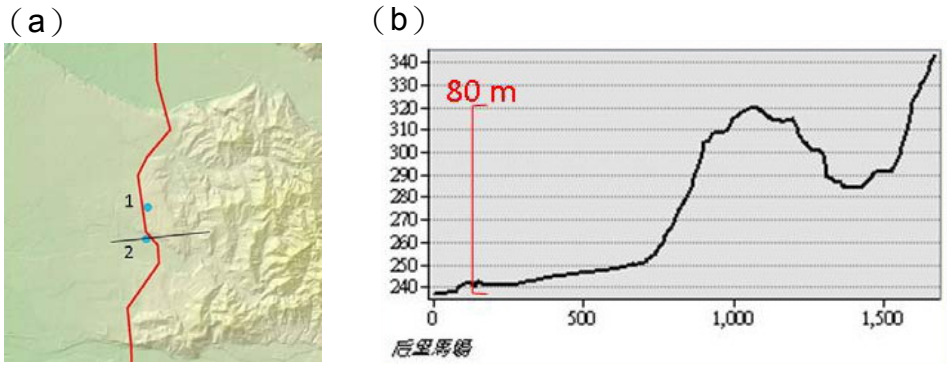


圖 3-1.6：（a）三義斷層（紅色實線）沿線地形剖面位置分布；（b）地形剖面圖，剖面位置為（a）中之黑色實線。

6. 單一事件變位量：未知。本計畫藉由 Wells and Coppersmith (1994)之規模-地表最大錯動量推估，地表錯動量為 1.34~1.55 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：湯振輝（Tang，1969）由航照判釋結果認為，斷層南側為樹枝狀水系，北側為格子狀水系，並研判出磺坑構造形成之後三義斷層才開始活動。李錦發（1994）由三義地區紅土台地面的傾動，研判紅土地形面形成以後斷層仍有活動。於大安溪南岸的調查結果顯示，三義斷層截切低位河階面（劉彥求、李奕亨，2006），斷層可能在全新世有活動現象。林啟文等（2008）也由三義斷層截切低位的河階礫石層與河床上的土壤層，研判斷層在全新世曾經活動。

彙整前人對於三義斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-1.2 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 3-1.2：三義斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
三義斷層	斷層分段與破裂事件	A 中段破裂	遙測影像判釋、地形、地下構造	丹桂之助，1936； 張麗旭，1951；Meng, 1963； 林啟文等人，2008；Chen et al., 2007
		B 北+中段破裂		
		C 中+南段破裂		
		D 北+中+南段破裂		
	長度（km）	A：25 km　B：33 km C：36 km　D：44 km		
	寬度（km）	21.3 km	深度/sin 傾角 （以深度 9 公里，傾角 25 度計算）	
	破裂深度（km）	9 km	震波資料逆推地下速度構造	Lin et al., 1989
		4.5~9 km	中油鑽井、大範圍反射震測資料、平衡剖面	Hung and Wiltschko, 1993
		8~10 km	平衡剖面	Mouthereau ，1995
		5~8 km	平衡剖面	楊耿明等，2003
		12.5 km	1973-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積（km^2）	A：532　B：703 C：767　D：937	長度×寬度 （以深度 9 公里，傾角 25 度計算）	
	走向	北段延伸段：東西走向 主斷層段：南北走向 南段延伸段：南北走向	地形、遙測影像判釋	丹桂之助，1936； 張麗旭，1951；Meng, 1963； 林啟文等人，2008；Chen et al., 2007
	傾斜角度（度）	約 20 度	震測剖面	邱華燈，1962
		約 20 度，沿東坑層底部逆衝	中油鑽井、大範圍反射震測資料、平衡剖面	Hung and Wiltschko, 1993
		傾角約在 25~30 度之間	平衡剖面	Mouthereau ，1995
		傾角約在 20~25 度之間	淺層反射震測法	洪智賢，2001
		逆衝的角度從很緩變成接近 45 度角	深部震測剖面	陳太山與蘇福欽，2002
		約 30 度	震測剖面	李奕亨，2009

	斷層機制	逆移斷層	地質調查	丹桂之助，1936；大塚彌之助，1936；張麗旭，1951
	短期滑移速率（mm/yr）	5 公厘/年以下	（2004~2006）GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
		速度場變化並不明顯	（2004~2010）精密水準測量	饒瑞鈞等，2010
	長期滑移速率（mm/yr）	2.0~3.6 mm/yr	平衡剖面推估	Hung and Wiltschko, 1993
		0.4~1.9 mm/yr	野外地形崖及上盤紅土階地年代推估（地形崖高差 80 公尺除以紅土階地年代約 10 萬年到 50 萬年，抬升速率以斷層面 25 度換算至斷層面長期滑移速率）	本計畫野外調查推估
	滑移虧損率（slip deficit rate）（mm/yr）	11.4±3.6	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 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）	1.34~1.55	log D= 0.29Mw-1.84 σ=0.42 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模（Mw）	A：6.8　B：6.9　C：6.9　D：7.0	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.7　B：6.8　C：6.9　D：7.0	$M=\log A+\frac{2}{3}\log\frac{\max\left(1,\sqrt{\frac{A}{\pi R^2}}\right)}{\left[1+\max\left(1,\frac{A}{\pi R^2}\right)\right]/2}+\text{const.}$	Yen and Ma, 2011
	地震復發隔間（年）	100-400	特徵地震模式權重最高之 3 個時間區間（圖 3-1.15）	本計畫推估
	最近一次活動時間	推測於全新世曾經活動	航照判釋、野外地質調查	Tang，1969； 李錦發，1994； 劉彥求與李奕亨，2006； 林啟文等，2008

3-1-2 三義斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估三義斷層之破裂，由於北段及南段的延伸與否可分為 4 種破裂事件來探討，A 為中段破裂，B 為北+中段破裂，C 為中+南段破裂，D 為北+中+南段破裂，權重分配為 A（0.5），B（0.2），C（0.2），D（0.1），如圖 3-1.7 所示。

三義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，本計畫認為傾角權重為 20 度（0.3），25 度（0.4），30 度（0.3），破裂深度權重為 7 公里（0.2），9 公里（0.6），11 公里（0.2）。

三義斷層之滑移速率上節中提到有平衡剖面推估及野外地形崖/階地年代推估兩種方法，本計畫將此兩種方法所得到的滑移速率上下限值給予相同的權重，分別為 0.4（0.25），1.9（0.25），2.0（0.25），3.6（0.25）。

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 3-1.3 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。

三義斷層各節點權重的分配詳如圖 3-1.8 所示。

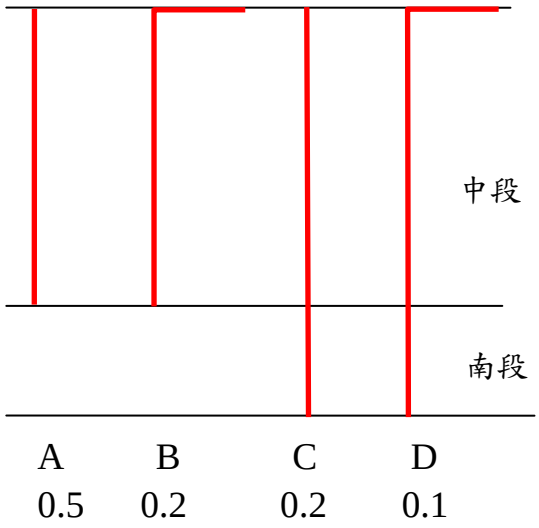


圖 3-1.7：三義斷層之破裂模式及權重分配。

表 3-1.3：三義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 Coppersmith, 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	25	9	21.3	25	532	6.5	6.8	7.0	6.7
B	33	9	21.3	25	703	6.6	6.9	7.1	6.8
C	36	9	21.3	25	767	6.7	6.9	7.2	6.9
D	44	9	21.3	25	937	6.8	7.0	7.3	7.0
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

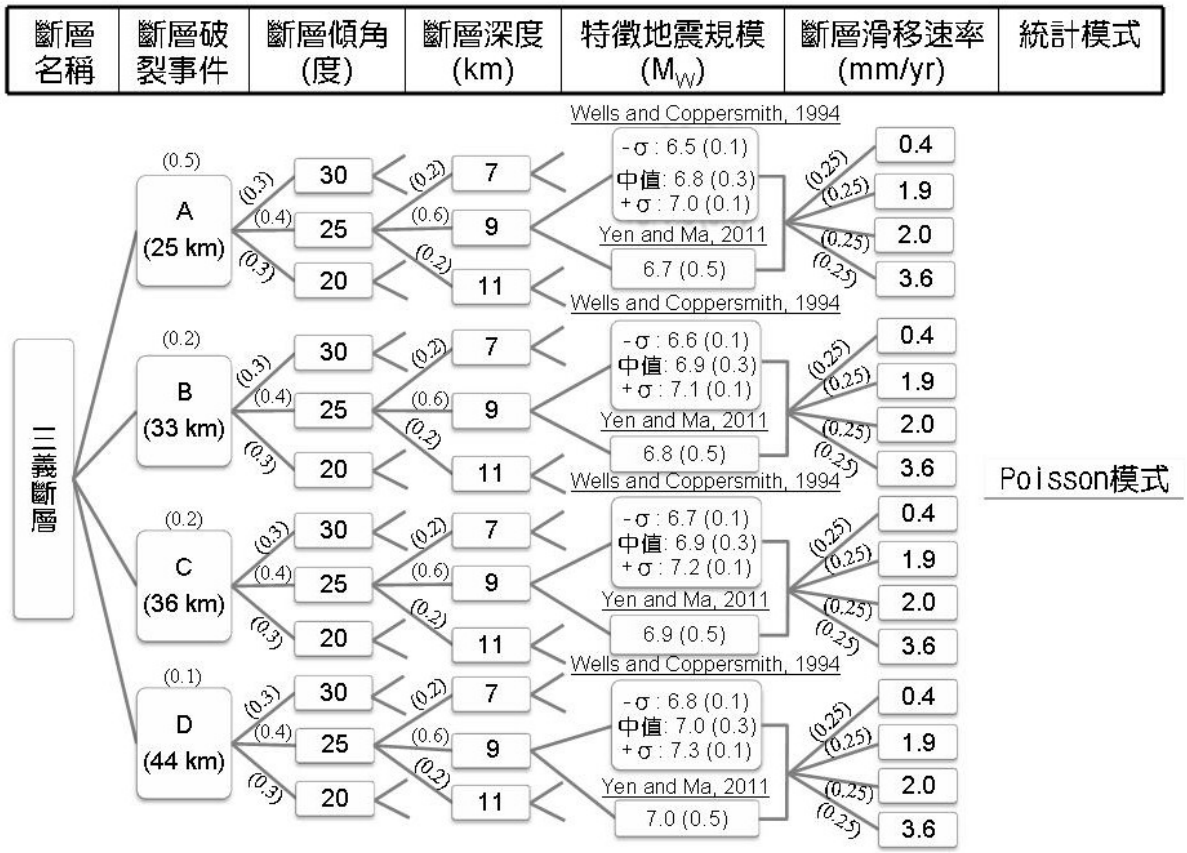


圖 3-1.8：三義斷層邏輯樹。

3-1-3 三義斷層特徵地震模式

三義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 3-1.9~圖 3-1.12 為 4 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 3-1.8 之三義斷層邏輯樹可得到 576 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-1.13 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 6.8 之權重最高，6.9 次之；破裂模式 C 以規模 6.9 之權重最高，7.0 次之；破裂模式 D 以規模 7.0 之權重最高，6.9 和 7.1 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-1.14 為 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，4 種破裂模式在地震復發間隔時間 100 年~400 年間均有較高之權重。

將四種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-1.15（a）之三義斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-1.15（b）之三義斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

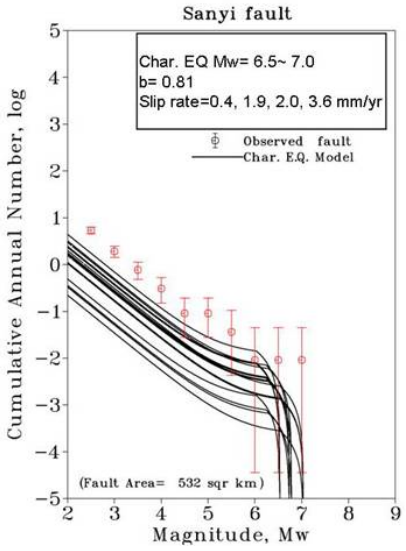


圖 3-1.9：A 事件特徵地震模式。

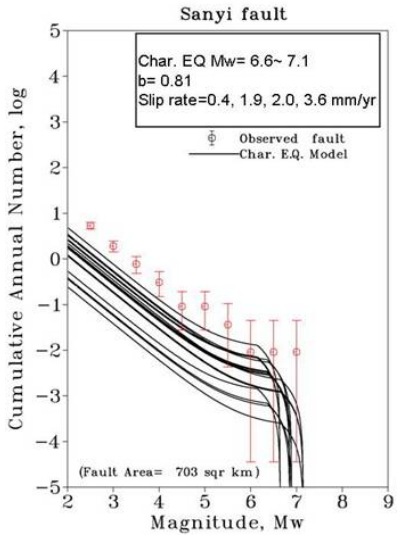


圖 3-1.10：B 事件特徵地震模式。

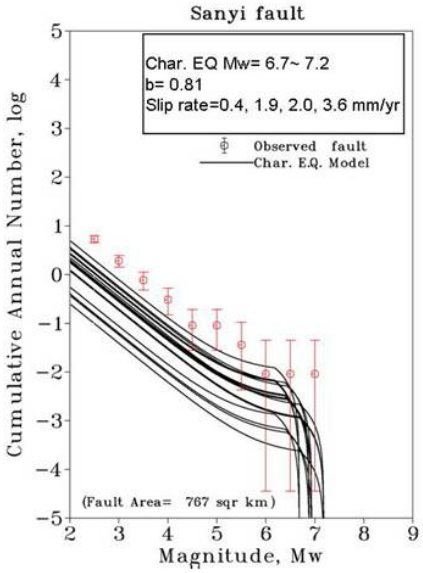


圖 3-1.11：C 事件特徵地震模式。

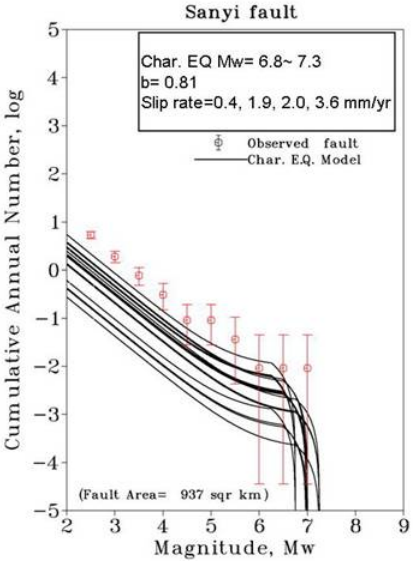


圖 3-1.12：D 事件特徵地震模式。

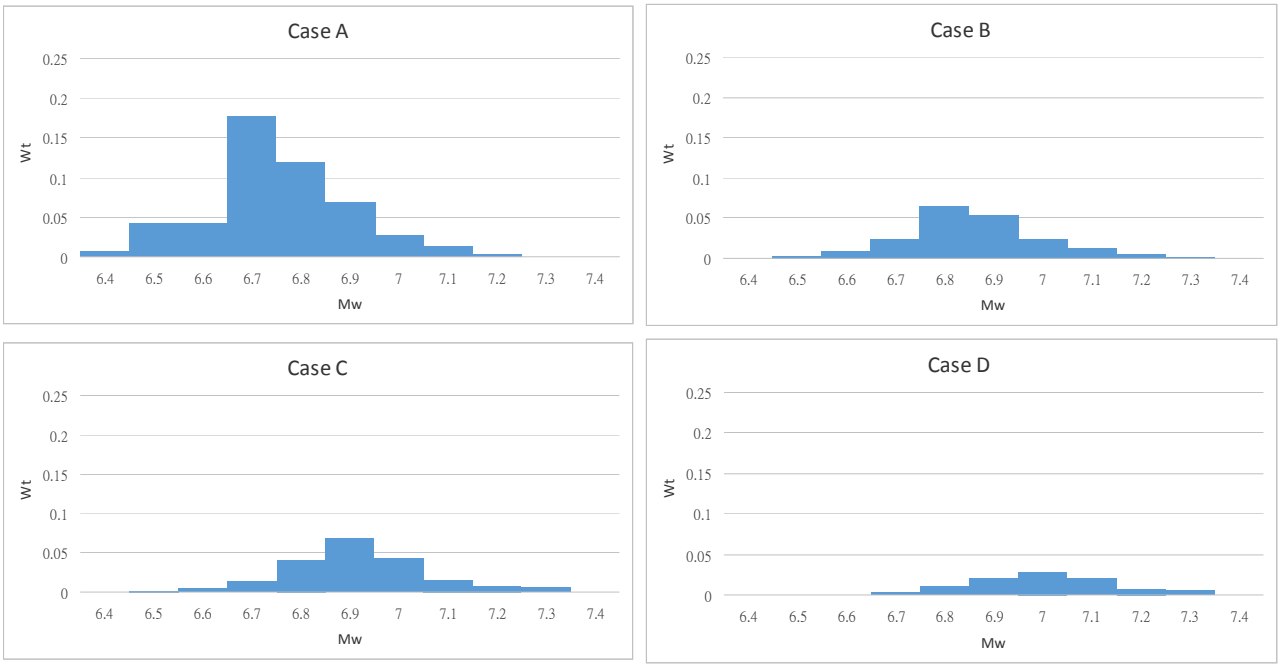


圖 3-1.13：三義斷層 4 種破裂事件之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

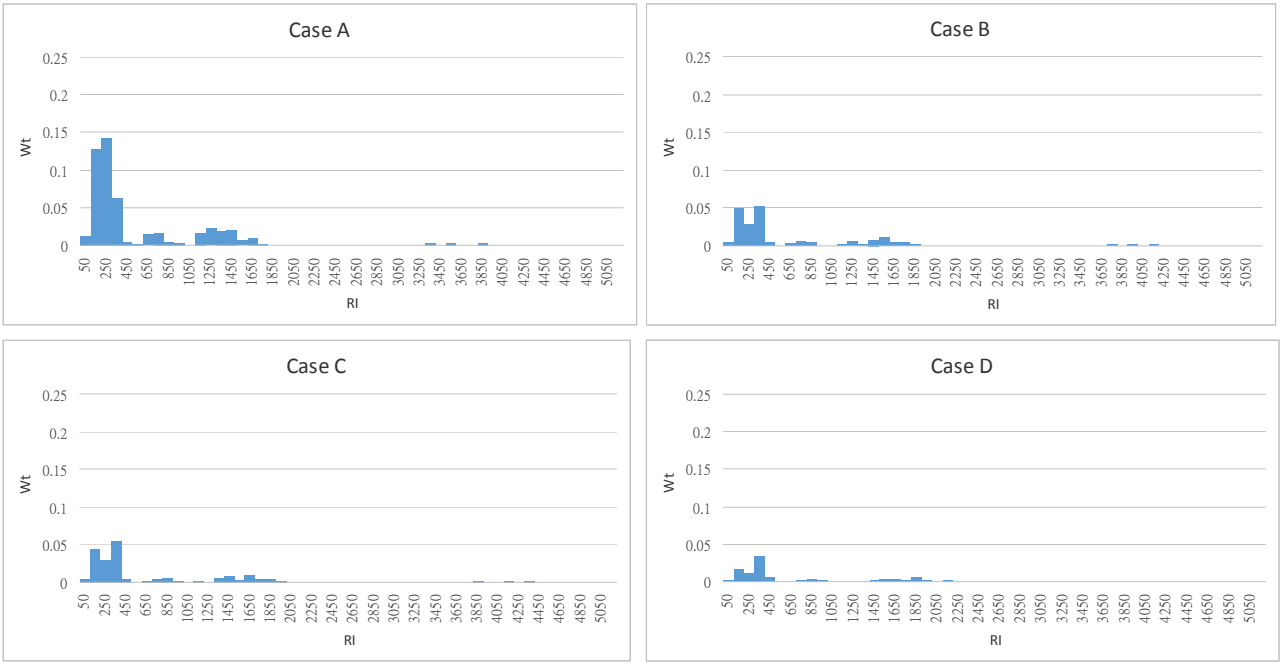


圖 3-1.14：三義斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，橫軸座標數值 RI＝250 代表 200 年≦地震復發間隔時間<300 年，其餘以此類推，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

（a）　　（b）

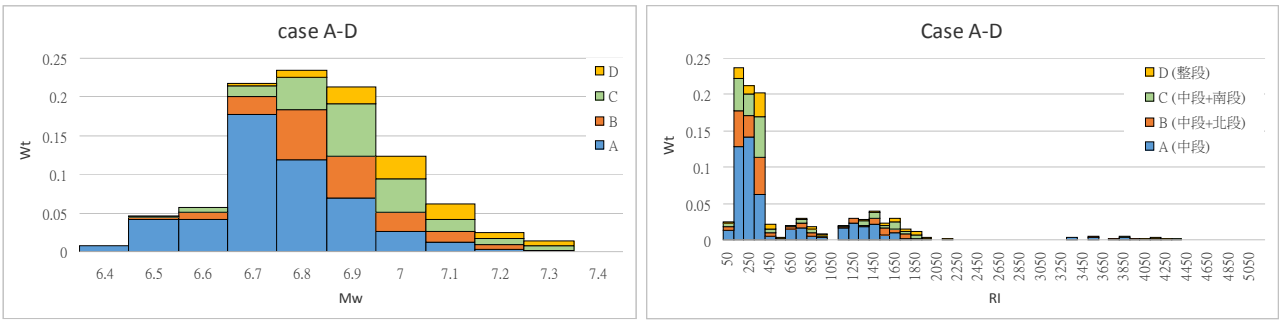


圖 3-1.15：（a）三義斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）三義斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸座標數值 RI＝250 代表 200 年≦地震復發間隔時間<300 年，其餘以此類推。

3-1-4 三義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）估算三義斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，三義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 3-1.4 為三義斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2014 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.4~7.4 之機率為 10.0%、15.8%及 28.1%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 9.9%、15.6%及 27.7%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 1.4%、2.2%及 4.1%。

表 3-1.4：三義斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.4 ≦ M ≦7.4	10.0%	15.8%	28.1%
M ≧ 6.5	9.9%	15.6%	27.7%
M ≧ 7.0	1.4%	2.2%	4.1%

3-2 大甲—彰化斷層系統

3-2-1 大甲-彰化斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

由地調所繪製的活動斷層條帶地質圖中（圖 3-2.1），大甲斷層北起苗栗通霄附近，往南經大甲、甲南、清水、沙鹿延伸至臺中縣大肚，總長約 30 公里（林啟文等，2008）。前人文獻指出大甲斷層可能繼續往南延伸，沿著八卦台地西緣與彰化斷層相連（楊貴三，1986；Shyu et al., 2005）。彰化斷層以南延伸方式有不同看法：

（1） Shyu et al. (2005)及 Ota et al. (2002)認為往南沿清水溪，最遠至南投縣竹山鎮西緣，全長約 85 公里（圖 3-2.2）

（2） 陳文山（本計畫訪問）則認為往南延伸是連接至桐樹湖斷層，並被古坑斷層所截切（圖 3-2.2），全長約 84 公里。

雖彰化斷層與大甲斷層為兩個不同名稱之斷層，於地形上兩者間相隔著烏溪，但以烏溪為界，地層上南北兩側無差異，也無分界斷層界於兩者之間，因此應考慮兩斷層同時破裂的可能性，並將大甲斷層、彰化斷層合為一斷層系統進行分析。



圖 3-2.1：大甲與鐵砧山斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。



圖 3-2.2：大甲與鐵砧山斷層地形圖與周邊斷層分布圖。紅線與黑線為地調所發布之斷層分布，藍線為 Shyu et al. (2005)所繪之彰化斷層。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：將地質觀察及物理探勘所獲得的斷層幾何資訊彙整如表 3-2.1，彙整以上之參數，本計畫提出大甲斷層之幾何參數，在傾角上有 10 到 45 度的範圍；深度 6~10 公里；彰化斷層之幾何參數，在傾角上約為 20 到 30 度左右；深度 6~10 公里，詳細的權重分配將於下一節中詳述之。

表 3-2.1：大甲斷層與彰化斷層傾角及深度資料與文獻列表。

作者	方法	斷層分段	傾角	深度
Chen (1978)	震測資料	彰化斷層	向東傾斜 18°~45°	
Suppe (1985)、黃旭燦（2003）	八卦台地南部震測資料、鑽井資料	彰化斷層	斷坡角度約 20 度。	6 公里
	濁水溪震測資料、鑽井資料	彰化斷層	斷坡角度約 30-40 度。	7.5 公里
吳榮章等（2002）	鑽井資料	彰化斷層	約 13°（井深 370m 之資料）	
董倫道等（2006）	大安溪南岸震測資料	大甲斷層	45 度向東	
Yue et al. (2005)	后里台地平衡剖面	大甲斷層	9 度向東	10 公里

3. 斷層機制：大甲斷層在地形上有明顯的線性崖，由震測剖面及鑽井資料研判大甲斷層為向東傾的逆移斷層（董倫道等，2006；陳文山等，2008）。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-2.2。
5. 長期滑移速率：參閱參數表表 3-2.2。
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：彰化斷層為逆移的盲斷層，在地表並沒有斷層露頭出露。雖有證據指出彰化斷層在北段已破裂至地表，但仍被山麓堆積物、沖積物等覆蓋。本計畫藉由 Wells and Coppersmith (1994)之規模-地表最大錯動量推估，地表錯動量為 1.36~1.71 公尺。。
8. 最近一次活動時間：歷史文獻記載過去臺中彰化一帶曾發生兩起大地震，分別為 1845 年臺中地震，規模 6.0，及 1848 年彰化地震，規模 7.2。由 1848 年地震災害分布區域圖推斷此地震可能與大甲—彰化斷層活動有關（圖 3-2.3）（Tsai, 1985; Lee and Lin, 2004）。

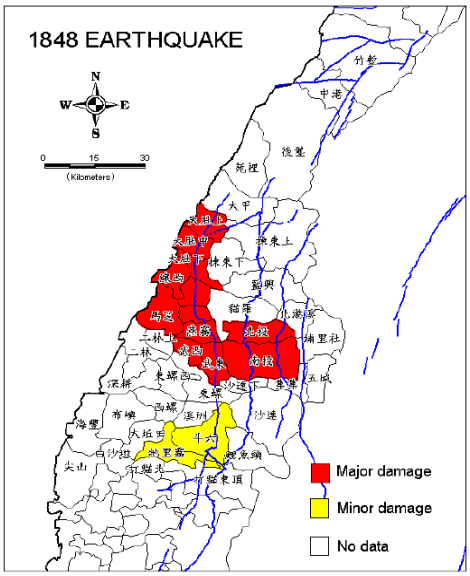


圖 3-2.3：1848 年歷史地震災害分布圖地震災害主要沿彰化斷層分布，推斷地震與彰化斷層活動有關（Lee and Lin, 2004）。

彙整前人對於彰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：大甲、彰化斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據			研究方法	參考文獻
大甲、彰化斷層	斷層分支	北段	A 大甲斷層		地形	林啟文等, 2008；Shyu et al., 2005
		南段	B 彰化斷層 C 彰化斷層+竹山段 D 彰化斷層+桐樹湖斷層			
		整段	E 大甲斷層+彰化斷層 F 大甲斷層+彰化斷層+竹山段 G 大甲斷層+彰化斷層+桐樹湖斷層			
	長度（km）	A：30 km B：36 km C：51 km D：50 km E：70 km F：85 km G：84 km				
	寬度（km）	A~D：18.9（以深度 8 公里，傾角 25 度計算） E~G：16（以深度 8 公里，傾角 30 度計算）			深度/sin 傾角	
	深度（km）	大甲	10		平衡剖面	Yue et al., 2005
		彰化	6		八卦台地南部震測資料	Suppe, 1985；黃旭燦，2003
			7.5		濁水溪震測資料	
	面積（km^2）	A：568 B：681 C：965 D：946 E：1120 F：1360 G：1344			長度×寬度	
	走向	大甲：北北東走向；彰化：北北西走向			地形、遙測影像判釋	林啟文等, 2008；Shyu et al., 2005
	傾斜角度	大甲	45 度向東		震測資料	董倫道等，2006
			9 度向東		后里台地平衡剖面	Yue et al., 2005
		彰化	18-45 度向東		震測資料	Chen, 1978
			斷坡角度約 20 度		八卦台地南部震測資料	Suppe, 1985；黃旭燦，2003
			斷坡角度約 20-40 度		濁水溪震測資料	
			~13 度（井深 370 公尺之資料）		鑽井資料	吳榮章等，2002
	斷層機制	逆移斷層			地質調查	Chang, 1971；楊貴三，1986
	短期滑移速率（mm/yr）	1996-1999（集集震前）	北段	平行斷層走向分量 1.3（右移）	GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
				垂直斷層走向分量 3.7（壓縮）		

				高程方向為 5.7（下陷）		
			南段	平行斷層走向分量 0.9（左移）		
				垂直斷層走向分量 0.5（壓縮）		
				高程方向為 10.2（下陷）		
		2002-2006（集集震後）	北段	平行斷層走向分量 3.1（左移）		
				垂直斷層走向分量 3.7（伸張）		
				高程方向為 5.2（抬升）		
			南段	平行斷層走向分量 0.8（右移）		
				垂直斷層走向分量 0.5（壓縮）		
				高程方向為 3.2（抬升）		
	長期滑移速率（mm/yr）	大甲		垂直滑移速率 1.7-5.5	大肚台地鑽井資料	陳文山等，2008
		彰化		垂直滑移速率 4.3-10.3	八卦台地鑽井資料	陳文山等，2008
				縮短速率 16.3±4.1	階地定年與 fault-tip folding model	Simoes et al., 2007
				200-400 ka，縮短速率約 4 mm/yr 105 ka，縮短速率 6.5 mm/yr 28 ka，縮短速率 22.8 mm/yr	階地定年與 shear fault-bend folding	Siame et al., 2012
				縮短速率 21±5.8 mm/yr	階地定年與 shear fault-bend folding	Yue et al., 2011
	滑移虧損率（slip deficit rate）（mmyr）	大甲斷層 2.7±1.8 彰化斷層 2.8±2.4			三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 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)	1.36~1.71			log D= 0.29Mw-1.84 σ=0.42	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模（M_W）	A：6.8 B：6.9 C：7.1 D：7.0 E：7.1 F：7.2 G：7.2			Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		A：6.8 B：6.9 C：7.0 D：7.0 E：7.1 F：7.2 G：7.2			$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔（年）	100-200			特徵地震模式權重最高之時間區間（圖 3-2.15）	本計畫推估
	最近一次活動時間	西元 1848 年（？）			歷史紀錄	Tsai, 1985

3-2-2 鐵砧山斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：鐵砧山斷層位於大甲斷層東側，自臺中縣大甲鎮鐵砧山北緣往南延伸至沙鹿後併入大甲斷層，長約 13 公里（圖 3-2.1），可能是大甲斷層的背衝斷層，又名大甲東斷層（林朝棨，1957）。鐵砧山斷層屬於大甲斷層的背衝斷層，不會有單獨破裂之可能性，且斷層長度僅 13 公里，不會造成大規模的地震，因此不列入邏輯樹評估當中。
2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：將地質觀察及物理探勘所獲得的斷層幾何資訊彙整如表 3-2.3。

表 3-2.3：鐵砧山斷層長度、傾角資料與文獻列表。

作者	方法	長度	傾角
林啟文等（2008）	地形判釋	13 公里	
李元希與石瑞銓（2008）	鐵砧山野外露頭		20-30 度向西
Chen （1990）	地電阻		35 度向西

3. 斷層機制：鐵砧山斷層是位在大甲斷層上盤處，地形上有明顯的反斜崖（range-facing scarp），由野外露頭及地電阻影像研判鐵砧山斷層為低角度向西傾的逆斷層（李元希與石瑞銓，2008；Yang et al., 2005；Chen, 1990），並形成西高東低的地形，屬大甲斷層的背衝斷層。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-2.4。
5. 長期滑移速率：參閱參數表表 3-2.4。
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：尚未發現指準地層等確認一次事件變位量。本計畫藉由 Wells and Coppersmith (1994)之規模-地表最大錯動量推估，地表錯動量為 1.03±0.42 公尺。
8. 最近一次活動時間：未知。

彙整前人對於鐵砧山斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-2.4 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 3-2.4：鐵砧山斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
鐵砧山斷層	斷層分支	整段		地形、航照判釋	林朝棨，1957；沈淑敏等，2005；林啟文等，2008
	長度（km）	13 km			
	寬度（km）	15 km（以深度 7.5 公里，傾角 30 度計算）		深度/sin 傾角	
	深度（km）	7.5 km		平衡剖面	黃旭燦等，2004
	面積（km^2）	195		長度×寬度	
	走向	北北東走向		地形、遙測影像判釋	林啟文等, 2008
	傾斜角度	20-30 度向西		鐵砧山野外露頭	李元希與石瑞銓，2008
		35 度向西		地電阻	Chen, 1990
	斷層機制	逆移斷層		地質調查	Sun, 1965；Hsu and Chang, 1979；Yang et al., 2005；李元希與石瑞銓，2008
				地電阻影像	Chen, 1990
	短期滑移速率（mm/yr）	1996-1999（集集震前）	平行斷層走向分量 1.3（右移）	GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
			垂直斷層走向分量 3.7（壓縮）		
			高程方向為 5.7（下陷）		
		2002-2006（集集震後）	平行斷層走向分量 3.1（左移）		
			垂直斷層走向分量 3.7（伸張）		
			高程方向為 5.2 （抬升）		
	長期滑移速率（mm/yr）	參考大甲斷層垂直抬升速率 1.7-5.5		大肚台地鑽井資料	陳文山等，2008
	滑移虧損率（slip deficit rate）（mmyr）	-		-	-
	單一事件變位量（m）	1.03, σ=0.42		log D= 0.29Mw-1.84 σ=0.42 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模（M_W）	6.4		Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		6.3		$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔（年）	-		-	-
	最近一次活動時間	未知			

3-2-3 大甲—彰化斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

鐵砧山斷層屬於大甲斷層的背衝斷層，不會有單獨破裂之可能性，且斷層長度僅 13 公里，不會造成大規模的地震，因此鐵砧山斷層不列入邏輯樹中。專家學者們認為大甲、彰化斷層有同時破裂的可能性，必須整體考慮為大甲—彰化斷層系統。彰化斷層向南延伸段有兩種看法，一為與桐樹湖斷層相連，終止於古坑斷層；二為連接至竹山段。

大甲—彰化斷層系統分段可分為北段（模式 A）、南段（模式 B、C、D）、整段（模式 E、F、G），北段與南段破裂權重相等，各為 0.4；整段破裂權重 0.2。七種破裂模式中，A 為大甲斷層破裂，B 為彰化斷層破裂，C 為彰化+竹山段破裂，D 為彰化+桐樹湖斷層破裂，E 為大甲+彰化斷層破裂，F 為大甲+彰化+竹山段破裂，G 為大甲+彰化+桐樹湖斷層破裂（圖 3-2.4）。南段破裂又可區分破裂事件終止於彰化斷層（模式 B，權重 0.6），或繼續向南延伸（模式 C、D），破裂事件延伸至桐樹湖斷層或竹山段權重相等，各為 0.2。整段破裂權重分配原則同上。

大甲、彰化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，本計畫認為北段傾角權重為 10 度（0.4），25 度（0.4），45 度（0.2），因 45 度為淺部資料，故給予較小的權重；南段傾角權重為 20 度（0.2），25 度（0.6），30 度（0.2）；整段傾角權重為 20 度（0.2），30 度（0.6），40 度（0.2）。破裂深度權重為 6 公里（0.2），8 公里（0.6），10 公里（0.2）。

大甲斷層之滑移速率上節中提到由鑽井資料推估，以 30 度之傾角換算至斷層面上，滑移速率上下限值給予相同的權重，分別為 11（0.5），3.4（0.5）；彰化斷層之滑移速率由鑽井資料、平衡剖面、階地定年推估，此三種方法所得到的滑移速率慢者 4 mm/yr，快者達 26.8 mm/yr，差異相當大，專家學者們認為以歐亞—菲律賓海板塊每年 70-80 mm/yr 碰撞速率而言，大甲—彰化斷層系統佔將近三分之一碰撞速率並不合理，且近 3 萬年來滑移速率才突然增快至 20 mm/yr 以上，應以更長時間尺度之滑移速率評估較合理，因此降低滑移速率 20 mm/yr、15 mm/yr 之權重至 0.1、0.2，並增加滑移速率 5 mm/yr、10 mm/yr 之權重至 0.3、0.4。

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 3-2.5 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。

大甲—彰化斷層系統各節點權重的分配詳如圖 3-2.5 所示。

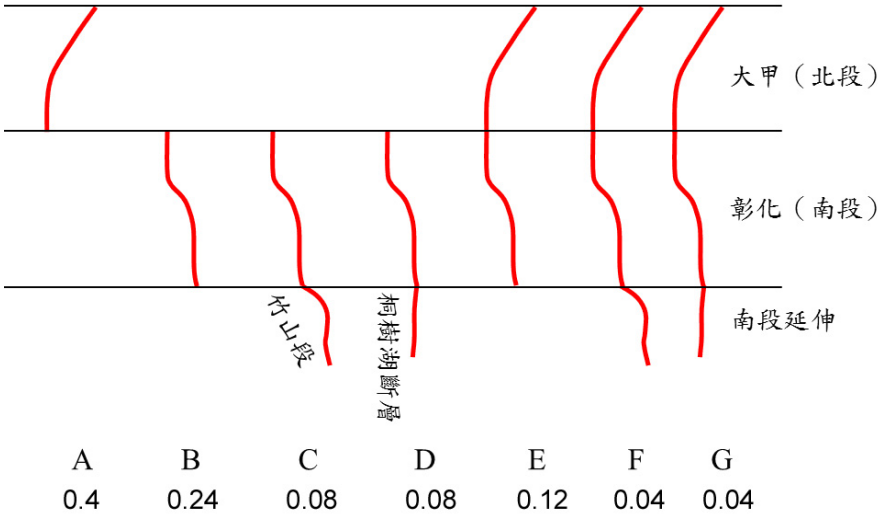


圖 3-2.4：大甲—彰化斷層系統之破裂模式及權重分配。

表 3-2.5：大甲—彰化斷層系統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	
北段	A	30	8	18.9	25	568	6.6	6.8	7.1	6.8
南段	B	36	8	18.9	25	681	6.6	6.9	7.1	6.8
	C	51	8	18.9	25	965	6.8	7.0	7.3	7.0
	D	50	8	18.9	25	946	6.8	7.0	7.3	7.0
整段	E	70	8	16.0	30	1120	6.8	7.1	7.3	7.0
	F	85	8	16.0	30	1360	6.9	7.2	7.4	7.1
	G	84	8	16.0	30	1344	6.9	7.1	7.4	7.1
	權重						0.1	0.3	0.1	0.5

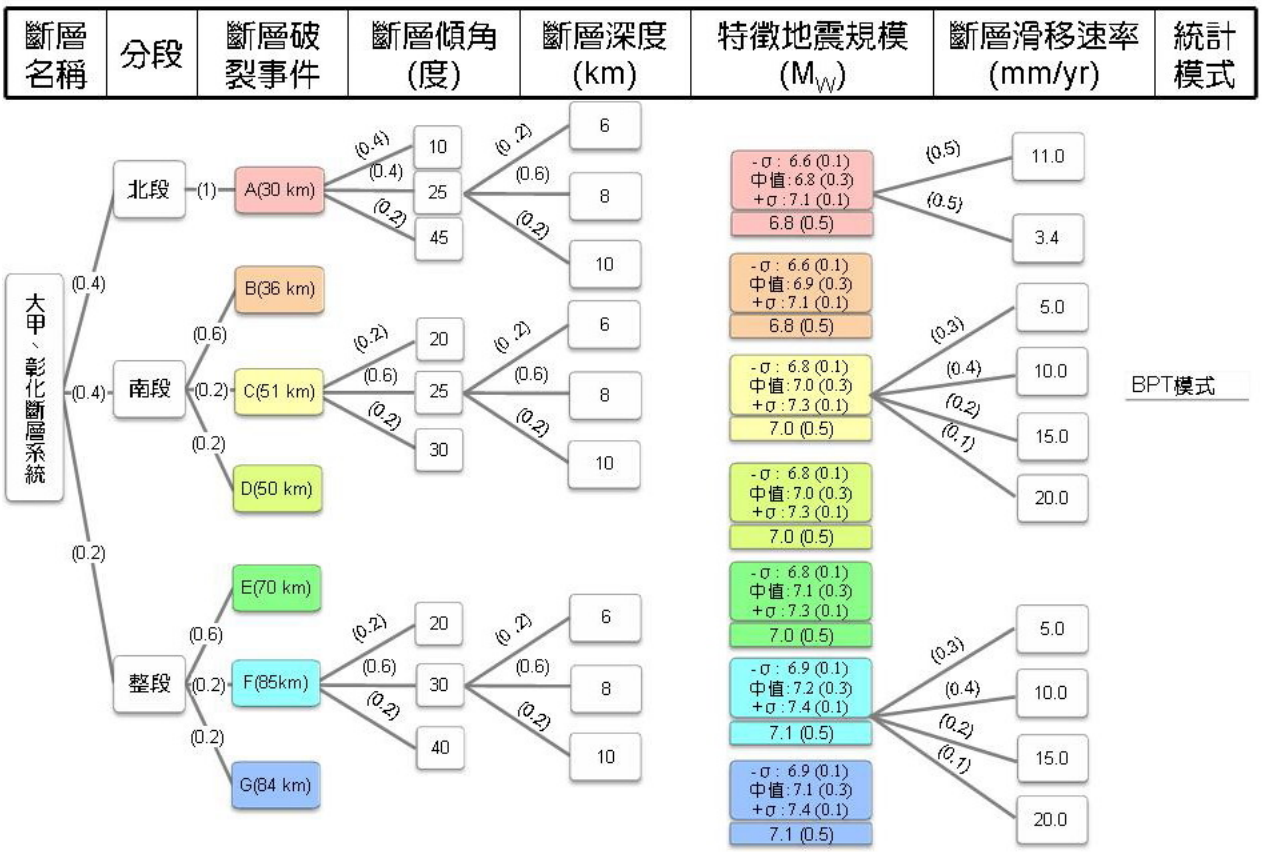


圖 3-2.5：大甲—彰化斷層系統邏輯樹。

3-2-4 大甲—彰化斷層系統特徵地震模式

大甲—彰化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 3-2.6~圖 3-2.12 為 7 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 3-2.5 之大甲—彰化斷層邏輯樹可得到 936 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-2.13 為 7 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 以規模 6.8 之權重最高，7.2 次之；破裂模式 B 以規模 6.9 之權重最高，7.0 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 7.0 之權重最高， 7.1 次之；破裂模式 E 以規模 7.1 之權重最高，7.0 次之；破裂模式 F 以規模 7.2 之權重最高，7.3 次之；破裂模式 G 以規模 7.2 之權重最高，7.3 次之。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-2.14 為 7 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，7 種破裂模式在地震復發間隔時間 100 年~400 年間均有較高之權重。

將七種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-2.15（a）之大甲—彰化斷層規模-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）之大甲—彰化斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

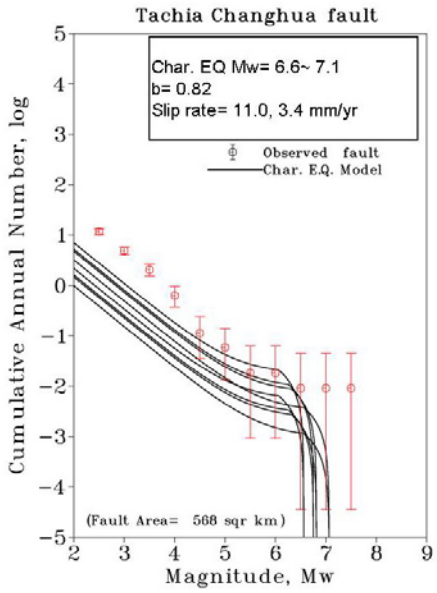


圖 3-2.6：A 事件特徵地震模式。

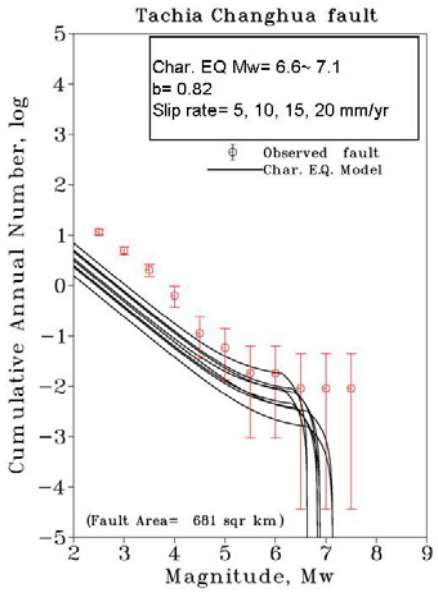


圖 3-2.7：B 事件特徵地震模式。

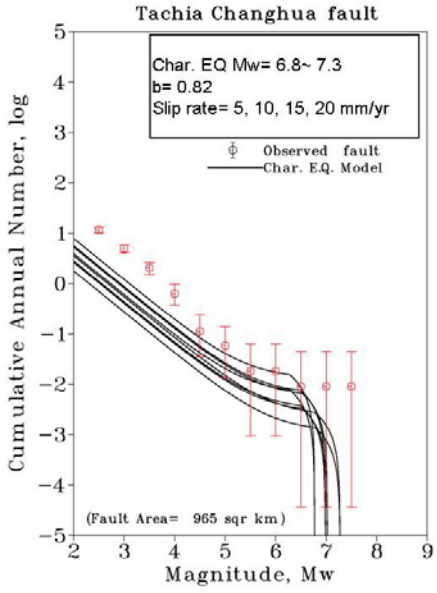


圖 3-2.8：C 事件特徵地震模式。

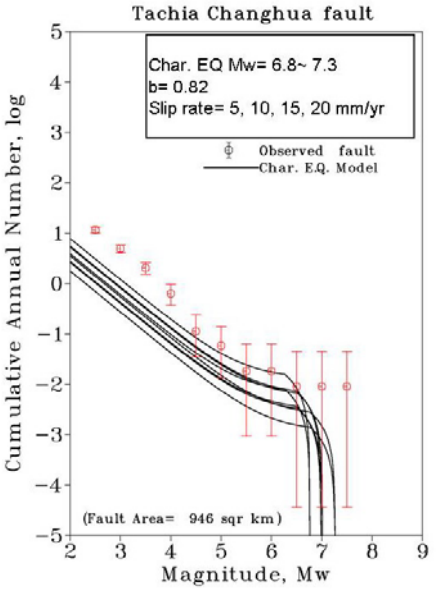


圖 3-2.9：D 事件特徵地震模式。

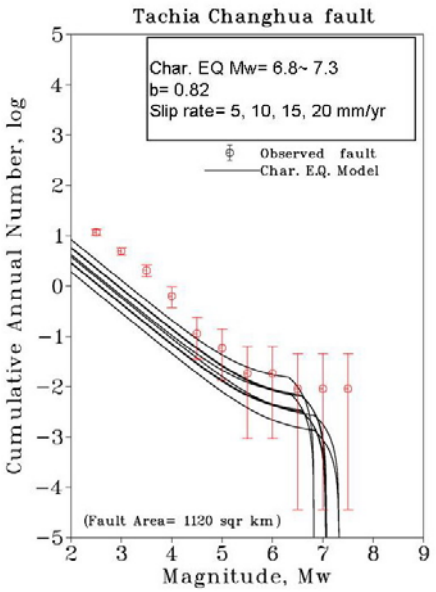


圖 3-2.10：E 事件特徵地震模式。

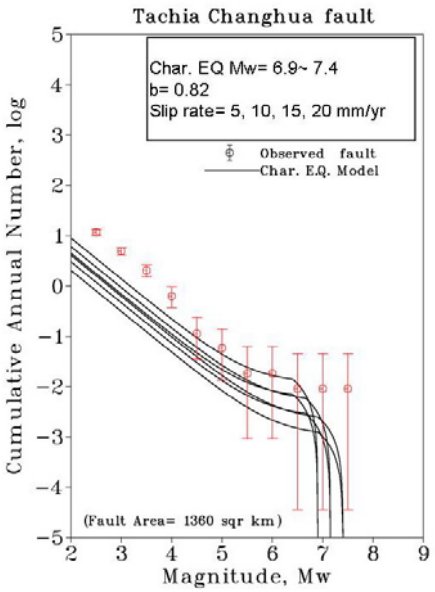


圖 3-2.11：F 事件特徵地震模式。

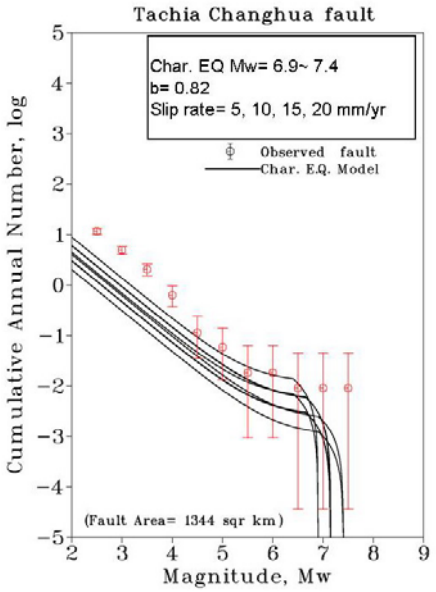


圖 3-2.12：G 事件特徵地震模式。

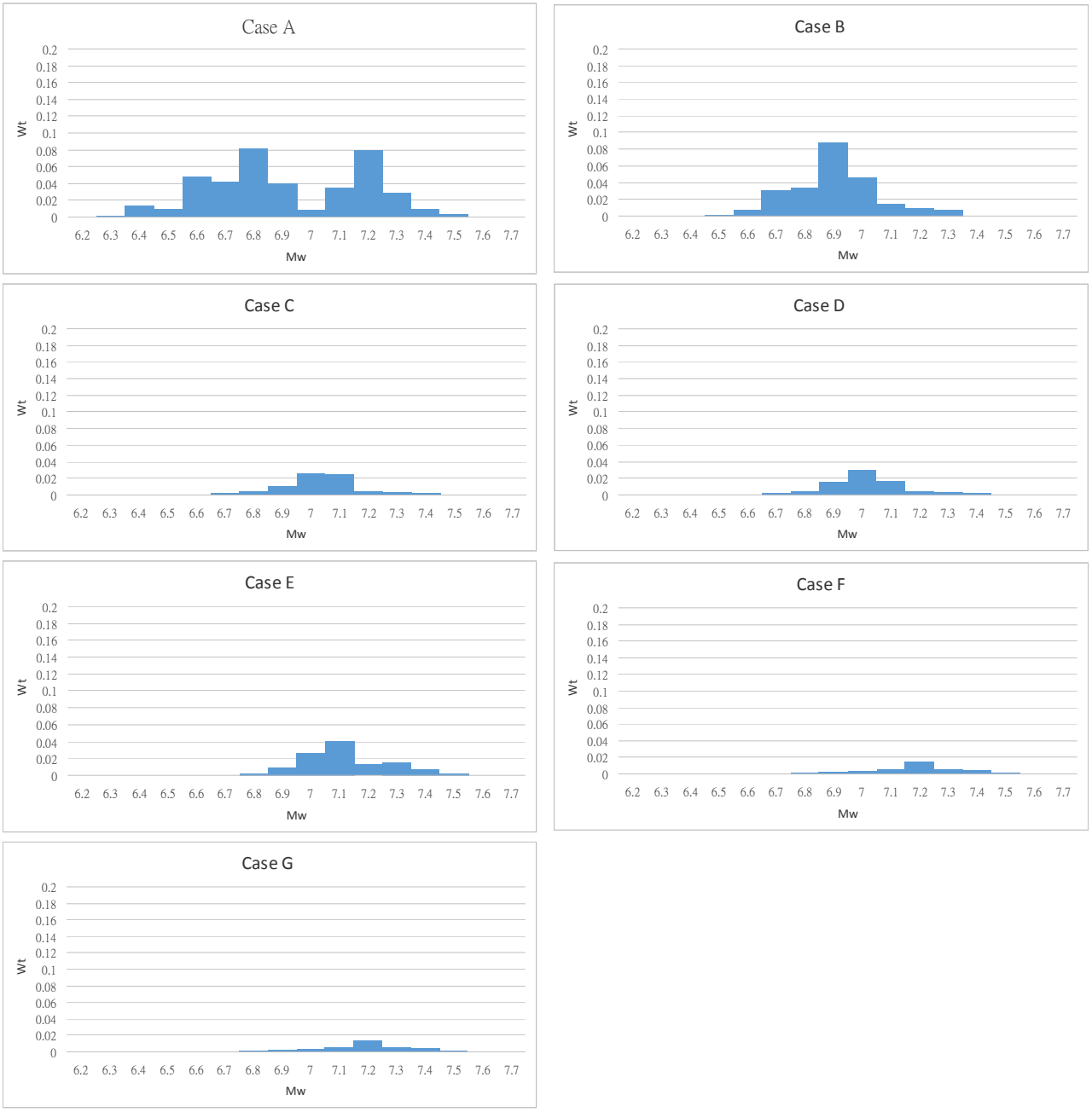


圖 3-2.13：大甲—彰化斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

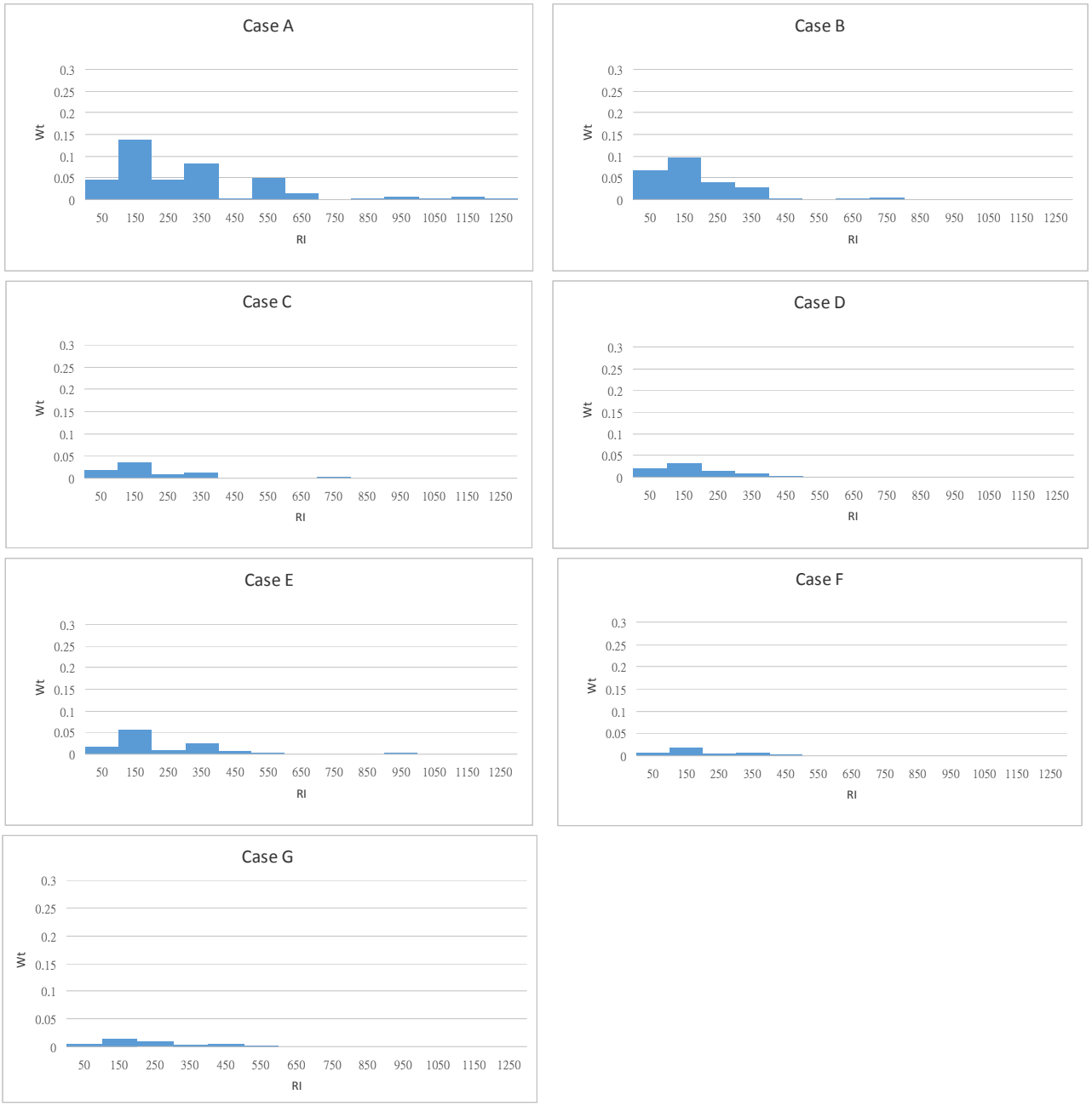


圖 3-2.14：大甲—彰化斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，橫軸座標數值 RI＝150 代表 100 年≦地震復發間隔時間<200 年，其餘以此類推，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。

（a）　　（b）

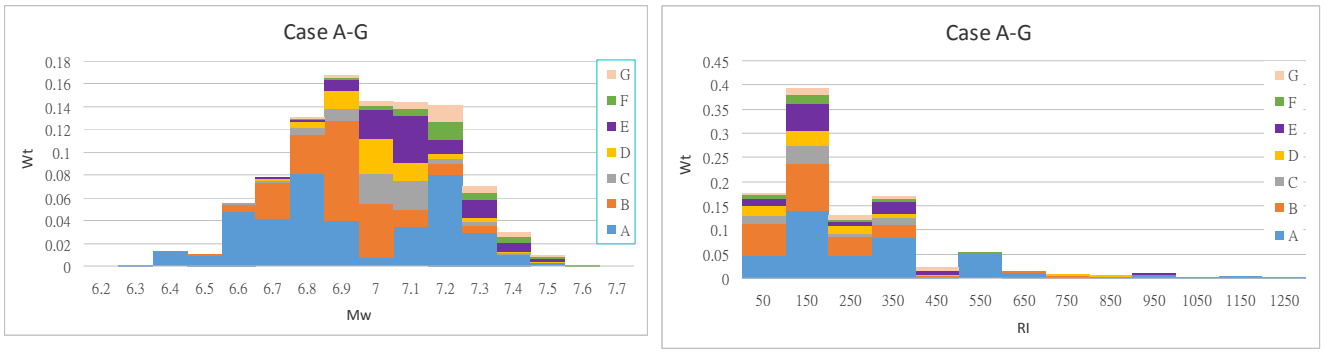


圖 3-2.15：（a）大甲—彰化斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）大甲—彰化斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸座標數值 RI＝150 代表 100 年≦地震復發間隔時間<200 年，其餘以此類推。

3-2-5 大甲—彰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 模式估算大甲—彰化斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，大甲—彰化斷層系統最後一次發生時間為 1848 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 3-2.6 為大甲—彰化斷層系統 BPT 模式評估之結果，以西元 2014 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.2~7.6 之機率為 27.7%、39.9%及 58.9%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 26.8%、38.6%及 57.3%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 9.6%、14.5%及 23.1%，發生地震矩規模 7.5 以上之機率為 0.1%、0.1%及 0.2%。

表 3-2.6：大甲—彰化斷層系統發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	BPT	BPT	BPT
6.2~7.6	27.7%	39.9%	58.9%
M ≧6.5	26.8%	38.6%	57.3%
M ≧7.0	9.6%	14.5%	23.1%
M ≧7.5	0.1%	0.1%	0.2%

3-3 獅潭-屯子腳斷層系統

3-3-1 屯子腳斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：1935 年 4 月 21 日發生之新竹-臺中地震，是由規模 7.1（臺北觀測所，1936；東京帝國大學地震研究所，1936； Sheu et al., 1982； 鄭世楠，1995； Chen and Tsai, 2008； Lin et al., 2013）及規模 6.8（Sheu et al., 1982； Lin, 2005； Lin et al., 2013）的兩個主震引發（圖 3-3.1），屯子腳斷層為主要地表破裂之一，圖 3-3.2 為地震造成之屯子腳斷層地表破裂分布圖（大塚彌之助，1936），地表破裂長度約為 12 公里，地調所（2008）將屯子腳斷層由臺中縣后里向西南延伸經過下后里、內埔（屯子腳）至清泉崗屯子腳，長 14 公里，如圖 3-3.3 屯子腳斷層紅色實線部份，然而該地表破裂距離震央仍有一段距離，因此本計畫推估屯子腳斷層應有向東西方向延伸，只是未出露地表。根據沿斷層線的震測剖面觀察，屯子腳斷層東北端應力作用及變形量最大，向西南逐漸減弱，遇大甲斷層前應已終止，本計畫據此推測斷層繼續向西延伸之可能性不高。林玉儂（Lin, 2005）由此區之震測資料中發現，在屯子腳斷層往三義斷層下方的延伸方向有正斷層構造的存在，推論新竹-臺中地震很可能肇因於舊有正斷層構造受到前陸造山擠壓之影響而以右移的型態再度活動，本計畫推測屯子腳斷層會向東延伸，而向西延伸則止於大甲斷層，如圖 3-3.3 屯子腳斷層紅色虛線部份。本計畫依以上前人文獻將屯子腳斷層分為（A）大甲斷層及三義斷層之間的地震破裂段 17 公里及（B）地震破裂段+東部延伸段，總長 40 公里，破裂模式及其權重分配將於下節詳述。

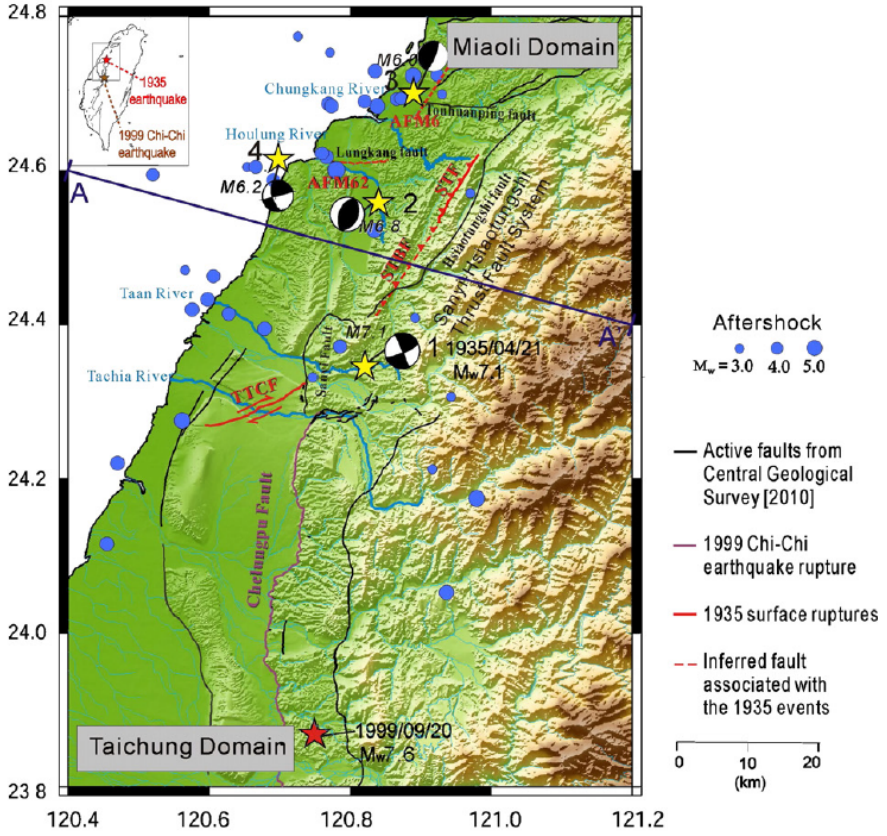


圖 3-3.1：1935 年地震系列主要地震分布及構造線地圖，其中黃色星號為當時之主震及規模 6 以上之餘震，藍色圈圈為 1935/4/21~1935/7/20 之餘震，規模範圍 3.0 ≦ M＜ 6.0，TTCF 為屯子腳斷層，STF 為獅潭斷層（Lin et al., 2013）。

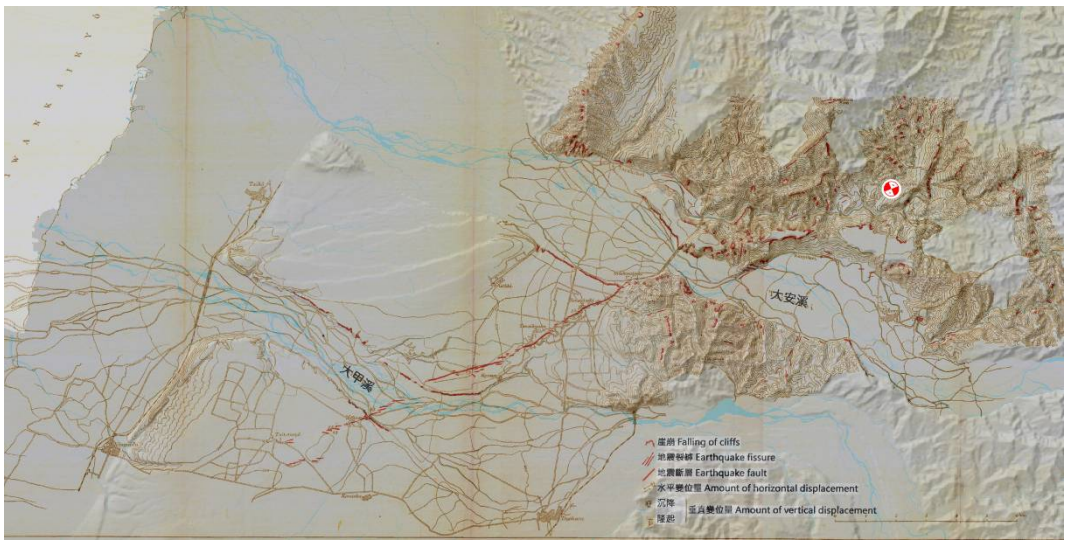


圖 3-3.2：臺灣中部地震（1935）崖崩、地震裂隙、屯子腳地震斷層分布圖（修改自大塚彌之助，1936）。

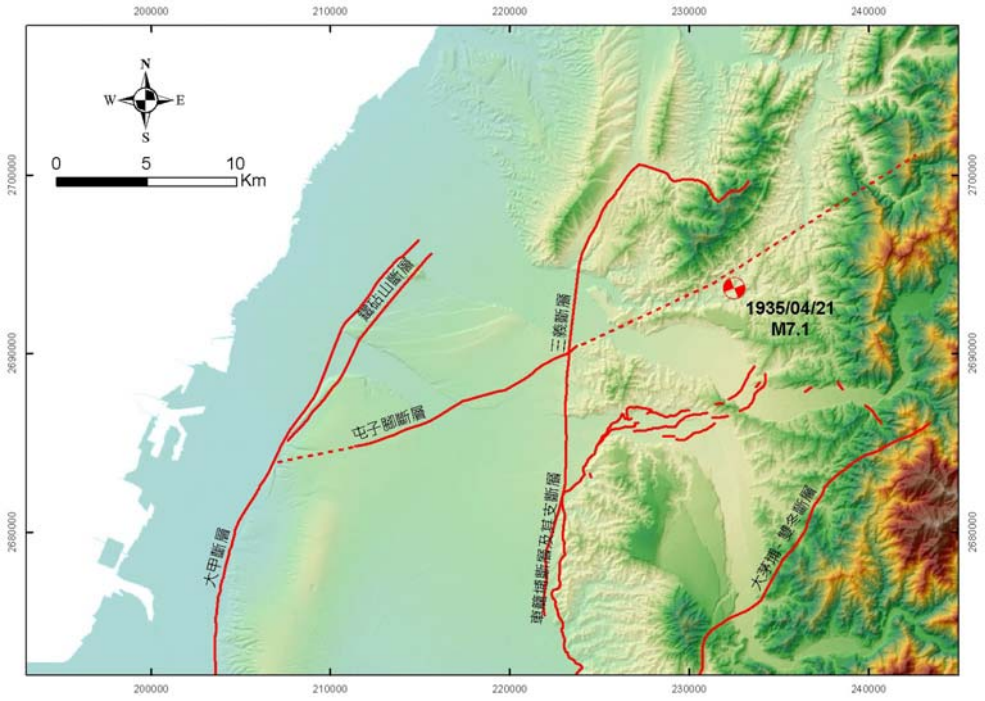


圖 3-3.3：屯子腳斷層地表破裂位置（紅色實線），與推測之斷層延伸（紅色虛線）位置圖。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：參考跨越屯子腳斷層震測剖面（李奕亨，2009），顯示在屯子腳斷層處為開花狀構造形貌，屬高角度的斷層形貌。另外，經由地震及 Vp/Vs 比值分布之分析結果推斷，在苗栗-臺中地區之下存在有基底滑脫構造，其深度約在 8-10 公里（吳逸民與張建興，2007）。本計畫蒐集西元 1973-2010 年之地震目錄，統計屯子腳斷層區域中之地震深度與數量之關係（圖 3-3.4），由圖 3-3.4 中之地震深度-數量統計圖可知，屯子腳斷層區域中之地震主要分布在 12.5 公里以內之深度。綜合上述研究推論，屯子腳斷層為一高角度斷層，近地表處呈開花構造，本計畫設定傾角為 65~85 度，另屯子腳斷層為走向滑移斷層，深度應不受基底滑脫面深度影響，本計畫設定其破裂深度最深可達 15 公里。

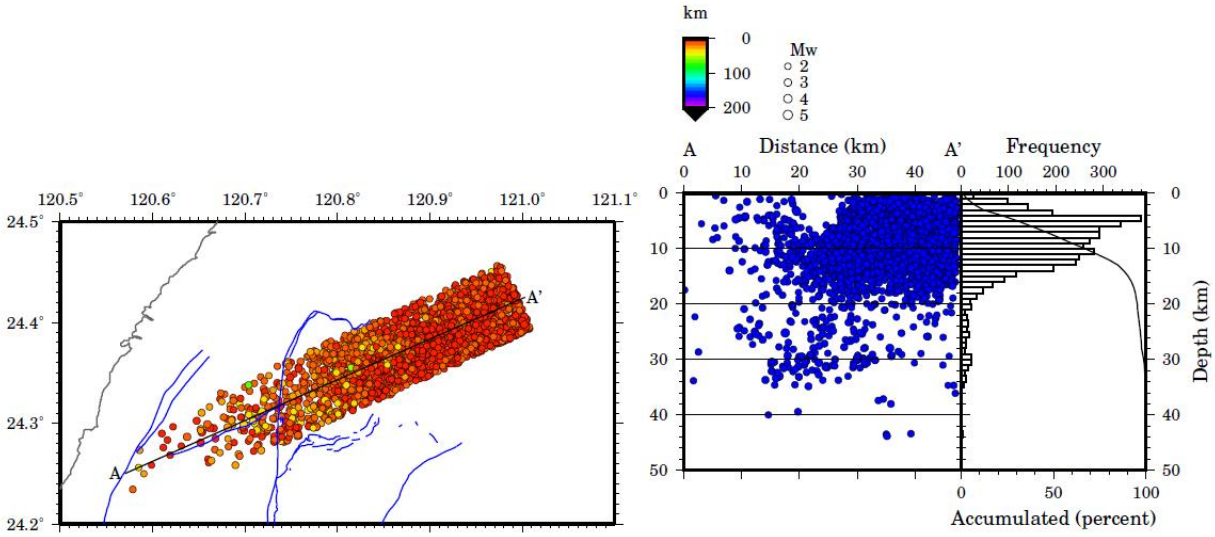


圖 3-3.4：左圖為屯子腳斷層西元 1973-2010 地震分布圖，右圖為地震深度-數量統計圖。

3. 斷層機制：屯子腳斷層為 1935 年 4 月 21 日新竹-臺中地震所造成的主要地表破裂之一，呈現右移形式之破裂。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-3.1。
5. 長期滑移速率：參考本計畫塊體模型推估之長期滑移速率為 5.2±3.6 mm/yr。
6. 單一事件變位量：1935 年 4 月 21 日臺灣中部發生大地震，在屯子腳斷層處，除了東北端 1 公里長的部份為西北側上升外，其餘部份皆為東南側上升，最大縱移量 1 公尺，最大右移量 1.5 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。本文提到之規模均為地震矩規模。
8. 最近一次活動時間：1935 年 4 月 21 日的新竹—臺中地震為臺灣地震紀錄史以來災害最大的地震，當時地震產生了右移的地表破裂稱為屯子腳斷層，斷層跡延伸約 12 公里（大塚彌之助, 1936）。

彙整前人對於屯子腳斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-3.1 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 3-3.1：屯子腳斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
屯子腳斷層	斷層分段	未分段	地形、地表破裂；地震分布	大塚彌之助，1936； 林啟文等, 2008
	長度（km）	破裂模式 A：17 km 破裂模式 B：40 km		
	寬度（km） （以傾角 75°）	13.5	深度/sin 傾角 （以深度 13 公里，傾角 75 度計算）	
	破裂深度（km）	苗栗、臺中地區滑脫面 10-12 km	Vp 速度構造推估	吳逸民等，2007
		12.5 km	1973-2010 地震深度分布	本計畫推估
	面積（km^2）	破裂模式 A： 229 破裂模式 B： 538	長度×寬度	
	走向	呈東北東走向	地形、地表破裂	大塚彌之助，1936 ；林啟文等, 2008
	傾斜角度（度）	淺部呈開花狀構造 （本計畫推測為 65-85 度）	震測剖面；地電剖面	董倫道等，2005
			震測剖面	李奕亨，2009
	斷層機制	右移斷層	歷史地震地表錯動；震源機制	大塚彌之助，1936； Lin, 2005； 林啟文等, 2008
	短期滑移速率（mm/yr）	平行斷層走向分量-3.2 mm/yr（右移） 垂直斷層走向分量 1.5 mm/yr（壓縮） 高程方向抬升量 0.1 mm/yr	（2004~2006）GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
		無明顯位移差異	（2002~2010）GPS 資料	饒瑞鈞等，2010
	長期滑移速率（mm/yr）	5.2±3.6	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	滑移虧損率（slip deficit rate）（mm/yr）	1.1±1.5	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 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）	除了東北端 1 公里長的部份為西北側上升外，其餘部份皆為東南側上升，最大縱移量 1 公尺，最大右移量 1.5 公尺	1935 年臺灣中部地震地表破裂	大塚彌之助，1936
	最大可能地震規模	A：6.4 B：6.8	Mw =3.98+1.02 log A σ=0.23 （平移斷層）	Wells and Coppersmith, 1994

	（M_w）	A：6.4　B：6.7	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔（年）	0-200	特徵地震模式權重最高之 2 個地震復發間隔時間區間（圖 3.3-17）	本計畫推估
	最近一次活動時間	西元 1935 年	歷史地震紀錄	臺北觀測所，1936；東京帝國大學地震研究所，1936； Sheu et al., 1982；鄭世楠，1995； Chen and Tsai, 2008； Lin et al., 2013

3-3-2 獅潭斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

根據地調所條帶地質圖（林啟文等，2008），獅潭斷層由苗栗縣獅潭鄉竹木村向北延伸至三灣鄉大河村的上十股，長約 12 公里（圖 3-3.5）（大江二郎，1936），本斷層也稱為紙湖地震斷層（大塚彌之助，1936；顏滄波，1985）。1935 年之新竹、臺中地震，其中 M=6.8 的地震（位置如圖 3.3-1 所示）使獅潭斷層於地表破裂 15 公里的長度（圖 3-3.6）（大塚彌之助，1936）。

圖 3-3.7 之（a）即為 1935 年之新竹、臺中地震地表破裂。另外，林燈河（1987）利用地震資料反演獅潭斷層之幾何模型，如圖 3-3.7 之（b）所示，（b）模式顯示在 15 公里長之獅潭斷層南邊有盲斷層之延伸，長度約為 5 公里。Huang and Yeh (1992)使用有限元素模型，認為斷層面為鏟形較能符合觀測資料，傾角從近地表之 55 度漸漸變緩，至斷層面底部變為 30 度，長度則如圖 3-3.7（c）。Sheu et al. (1982)使用 1917-1937 的三角測網及水準資料（Military Land Survey, 1937），認為最佳化的獅潭斷層模型長度為 35 公里，如圖 3-3.7（d），傾角為 50W，斷層寬度為 10 公里。Lin (2005)根據地形之證據，使用幾個斷層分段使其符合 1917-1937 的三角測網，其中兩個獅潭斷層未出露的分段，會往南延伸至屯子腳斷層東延之端點，如圖 3-3.7（e）。

Lin et al. (2013)彙整以上前人提出之五種斷層模型，獅潭斷層各模型之長度及幾何面參數整理如表 3-3.2 所示。

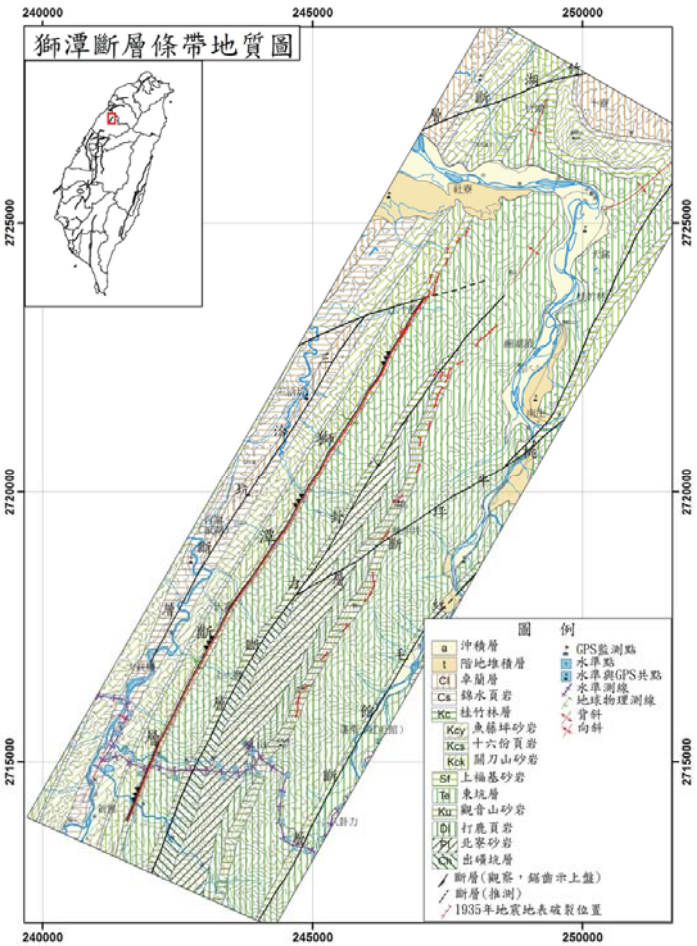


圖 3-3.5：獅潭斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。



圖 3-3.6：臺灣中部地震（1935）崖崩、地震裂隙、獅潭地震斷層分布圖（大塚彌之助，1936）。

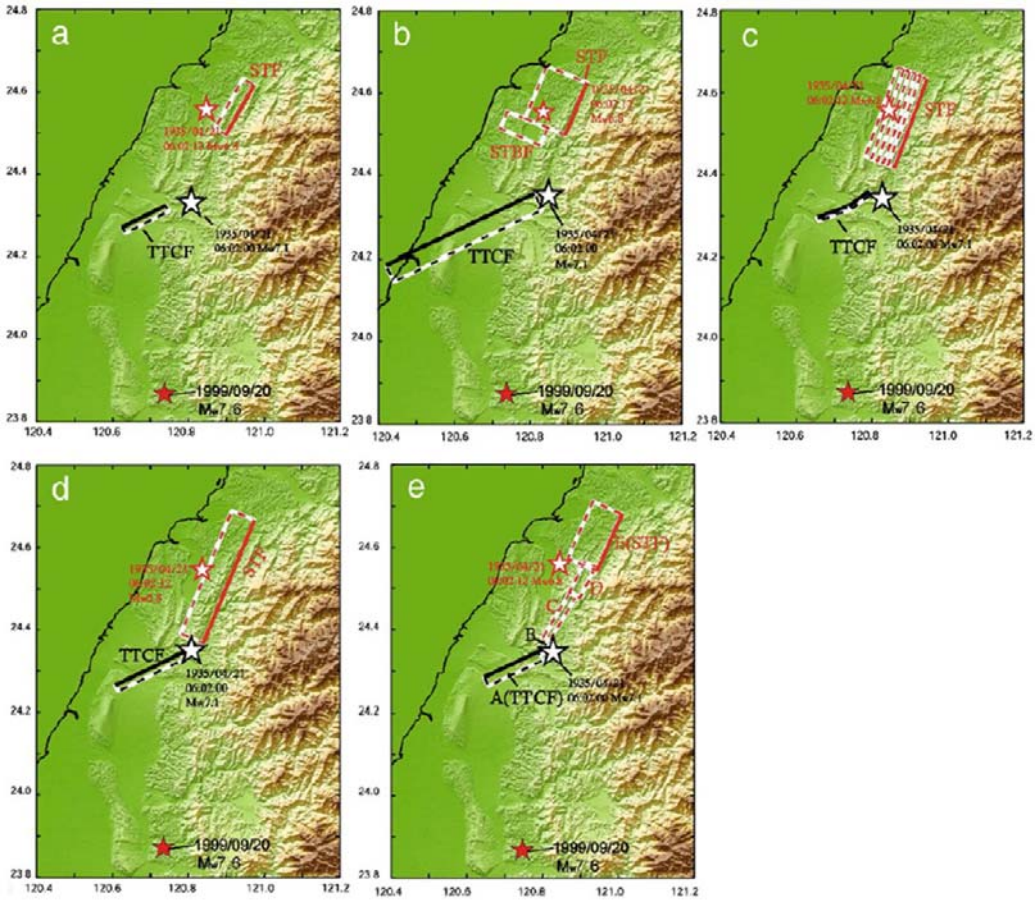


圖 3-3.7：Lin et al. (2013)彙整斷層模型之五種模式(a~e)，獅潭斷層之參數詳如表 3-3.2 所示，1935 年新竹、臺中地震 Mw 7.1 之主震及 Mw 6.8 之餘震以白色星號表示。

表 3-3.2：獅潭斷層 a~e 模式參數表（改自 Lin et al., 2013）。

模式	分段	走向	傾角	長度	寬度	參考資料
a		210°	-	15	10	大塚彌之助，1936
b	STBF（盲斷層）	203°	40	5	15	林燈河，1987
	STF 獅潭斷層			15	15	
c		200°	30-55	25	11	Huang and Yeh, 1992
d		203°	50	35	10	Sheu et al., 1982
e	（C）STBF（盲斷層）	211°	75	14	7.5	Lin, 2005
	（D）STBF（盲斷層）	206.5°	65	9	7.5	
	（E）STF 獅潭斷層	203°	45	16	11.7	

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：獅潭斷層之幾何形貌參數，可參考表 3-3.2 所描述之五種模式，各調查方法及斷層參數彙整於表 3-3.3，本計畫據此推估斷層傾角（權重）為 40 度（0.2）、50 度（0.6）、60 度（0.2），破裂深度（權重）為 6 公里（0.2）、8 公里（0.6）、10 公里（0.2）。

表 3-3.3：獅潭斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

參考文獻	方法	傾角	深度	寬度
Otsuka, 1936	現地調查			
Sheu et al., 1982	大地測量	約 50 度		10 km
林燈河，1987	震波資料逆推地下速度構造	傾角約 40 度		15 km
Huang and Yeh, 1992	大地測量	約 30-55 度		11 km
Lin, 2005	平衡剖面	傾角約 45 度	10km	7.5~11.7 km

3. 斷層機制：獅潭斷層為逆衝斷層，走向為 N30E（Lin et al., 2013）。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-3.4。
5. 長期滑移速率：由於獅潭斷層無槽溝開挖及階地定年相關資料，因此參考 block model 推估之長期滑移速率為 5.2±2.8 mm/yr。
6. 單一事件變位量：獅潭斷層於 1935 年地震在地表形成 0.3~3 公尺不等的垂直錯移量（大塚彌之助，1936）。
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：1935 年 4 月 21 日的新竹—台中地震，為臺灣地震紀錄史以來災害最大的地震。

彙整前人對於獅潭斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-3.4 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 3-3.4：獅潭斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
獅潭斷層	斷層分段與破裂事件	a	1935 年新竹、臺中地震地表破裂	大塚彌之助，1936
		b	地震資料反演斷層之幾何模型	林燈河，1987
		c	有限元素反演斷層模型	Huang and Yeh, 1992
		d	使用 1917-1937 的三角測網及水準資料 ，反演斷層幾何模型	Sheu et al., 1982
		e		Lin, 2005
	長度(km)	a: 15	1935 年新竹、臺中地震地表破裂	大塚彌之助，1936
		b: 20	地震資料反演斷層之幾何模型	林燈河，1987
		c: 25	有限元素反演斷層模型	Huang and Yeh, 1992
		d: 35	使用 1917-1937 的三角測網及水準資料 ，反演斷層幾何模型	Sheu et al., 1982
		e: 39		Lin, 2005
	寬度(km)	10.4	深度/sin 傾角（以深度 8 公里，傾角 50 度計算）	
	破裂深度(km）	6~10 公里	地質平衡剖面，地震深度分布	Lin, 2005
	面積(km^2)	a：157、 b：209、 c：261、 d：366 、e：407	長度×寬度 （以深度 8 公里，傾角 50 度計算）	
	走向	約 N30E	1935 年新竹、臺中地震地表破裂	大塚彌之助，1936
	傾斜角度(度)	約 50 度	使用 1917-1937 的三角測網及水準資料 ，反演斷層幾何模型	Sheu et al., 1982
		傾角約 40 度	地震資料反演斷層之幾何模型	林燈河，1987
		約 30-55 度	有限元素反演斷層模型	Huang and Yeh, 1992
		傾角約 45 度	根據地形之證據，使用 1917-1937 的三角測網及水準資料 ，反演斷層幾何模型	Lin, 2005
	斷層機制	逆斷層	1935 年新竹、臺中地震地表破裂情形；地震震源機制解	大塚彌之助，1936 ；Lin et al., 2013

	短期滑移速率（mm/yr）	平行斷層分量-4.5 mm/yr，呈右移形式 垂直斷層分量 5.5 mm/yr，呈壓縮形式 抬升速率 3.6 mm/yr	(2002~2006)GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
		在獅潭斷層東側速度場值約為 10 mm/yr，斷層西側速度場值降為 7 mm/yr	2003 至 2010 年桃竹苗地區之 GPS 資料	饒瑞鈞等，2010
	長期滑移速率(mm/yr)	5.2±2.8	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	2.0±2.5	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 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)	0.3~3 公尺不等的垂直錯移量	1935 年臺灣中部地震地表破裂	大塚彌之助，1936
	最大可能地震規模 (M_w)	a: 6.3　b: 6.4　c: 6.5　d: 6.6　e: 6.7	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		a: 6.2　b: 6.3　c: 6.4　d: 6.6　e: 6.6	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	0-200	特徵地震模式權重最高之 2 個地震復發間隔時間區間（圖 3.3-17）	本計畫推估
	最近一次活動時間	西元 1935 年	歷史地震紀錄	臺北觀測所，1936；東京帝國大學地震研究所，1936； Sheu et al., 1982；鄭世楠，1995； Chen and Tsai, 2008； Lin et al., 2013

3-3-3 獅潭—屯子腳斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

獅潭斷層與屯子腳斷層為西元 1935 年新竹、臺中烈震之地震斷層，需考慮兩條斷層為一個系統同時破裂的可能性，在邏輯樹中，破裂模式分為三種，分別為屯子腳斷層單獨破裂、獅潭斷層單獨破裂及獅潭-屯子腳系統。其中由於獅潭斷層屬於背衝形式之逆斷層，是被地震誘發形成之地震斷層，單獨破裂之可能性較低，因此權重上給其 0.2，獅潭-屯子腳系統雖然有系統連動破裂之可能性，但是兩條斷層機制不同，斷層幾何面也難以連接，發生系統破裂的可能性更低，因此權重上給其 0.1，屯子腳斷層單獨破裂的權重則給其 0.7，如圖 3-3.8 所示。本計畫在評估屯子腳斷層之破裂，是以長度不確定性來區分破裂事件，分別為 A 主斷層段破裂（長度 17 公里），以及 B 主斷層段+延伸段破裂（長度 40 公里），權重設定為 A（0.6）、B（0.4）。獅潭斷層之破裂模式可簡化為三種斷層模型之長度，分別為（C）西元 1935 年地表破裂 15 公里、（D）Huang and Yeh (1992)模擬之 25 公里及（E）往南延伸至屯子腳斷層之 35 公里，權重比為 C（0.6）、D（0.2）、E（0.2）。獅潭-屯子腳系統則是獅潭斷層往南延伸達 35 公里及屯子腳斷層往東延伸達 40 公里，分段破裂模式及權重如圖 3-3.8 所示。

屯子腳斷層之傾角及破裂深度，根據所蒐集到之震測剖面、地物剖面及地震深度分布等資料，本計畫認為傾角權重為 65 度（0.2）、75 度（0.6）、85 度（0.2），破裂深度權重為 11 公里（0.2）、13 公里（0.6）、15 公里（0.2）。獅潭斷層之傾角及破裂深度，根據所蒐集到之平衡剖面資料及地震深度分布等資料，本計畫認為傾角權重為 40 度（0.2）、50 度（0.6）、60 度（0.2），破裂深度權重為 6 公里（0.2）、8 公里（0.6）、10 公里（0.2）。

屯子腳斷層之滑移速率以 Block model 推估約 5.2±3.6 mm/yr，本計畫將屯子腳斷層長期滑移速率權重設定為 1.6（下限）（0.3）、5.2（平均值）（0.4）、8.8（上限）（0.3）。獅潭斷層之滑移速率以 Block model 推估約 5.2±2.8 mm/yr，本計畫將獅潭斷層長期滑移速率權重設定為 2.4（下限）（0.3）、5.2（平均值）（0.4）、8.0（上限）（0.3）。獅潭-屯子腳系統之長期滑移速率權重則採用兩斷層滑移速率之最小值和最大值作為上下限，平均值作為邏輯樹中值，得到之值及權重為 1.6（下限）（0.3）、5.2（平均值）（0.4）、8.8（上限）（0.3）。

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 3-3.5 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。

獅潭-屯子腳斷層系統各節點權重的分配詳如圖 3-3.9 所示。

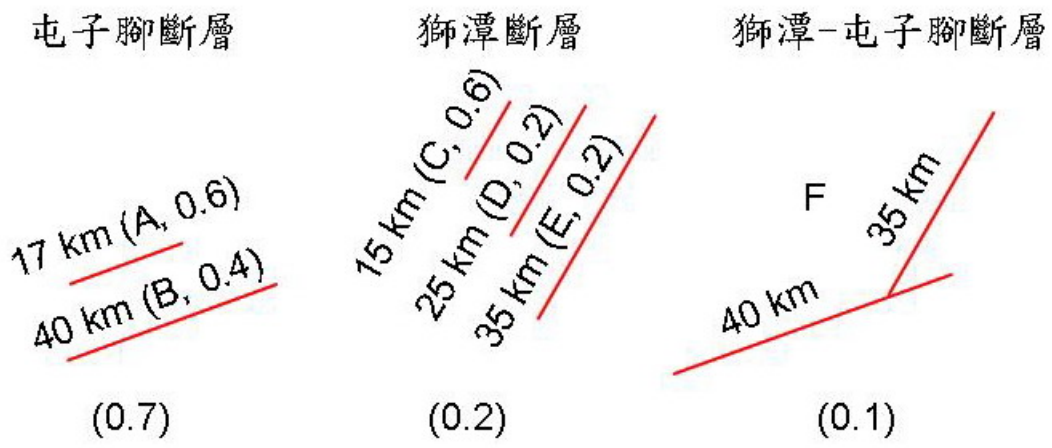


圖 3-3.8：獅潭-屯子腳斷層系統破裂模式及權重分配。

表 3-3.5：獅潭-屯子腳斷層系統各破裂事件規模計算。

	破裂事件	長度(km)	深度(km)	寬度(km)	傾角(度)	面積(km^2)	Wells and Coppersmith, 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	
屯子腳斷層	A	17	13	13.5	75	229	6.2	6.4	6.6	6.4
	B	40	13	13.5	75	538	6.5	6.8	7.0	6.7
獅潭斷層	C	15	8	10.4	50	157	6.1	6.3	6.6	6.2
	D	25	8	10.4	50	261	6.3	6.5	6.8	6.4
	E	35	8	10.4	50	366	6.4	6.6	6.9	6.6
	破裂事件	長度(km)					兩條斷層 Mw 轉換為 M_0，相加後再轉換為地震矩規模(Mw)			
獅潭-屯子腳斷層	F	屯子腳斷層 40 km 獅潭斷層 35 km					6.7	6.9	7.2	6.9

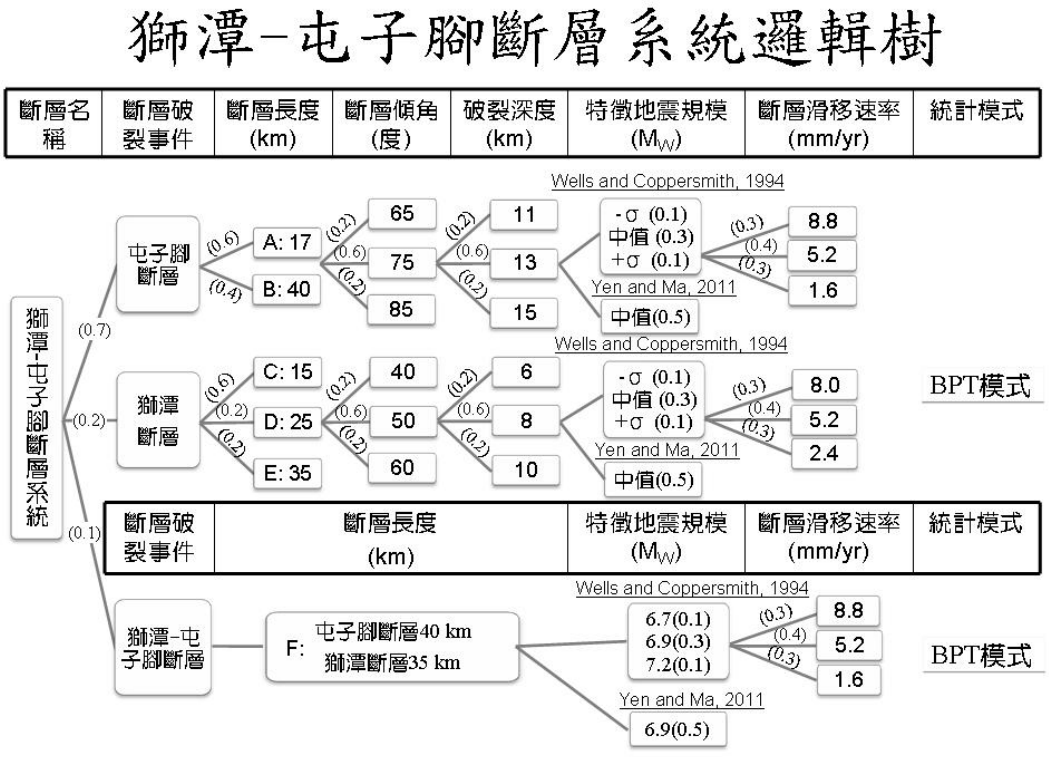


圖 3-3.9：獅潭-屯子腳斷層系統邏輯樹。

3-3-4 獅潭—屯子腳斷層系統特徵地震模式

獅潭—屯子腳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~圖 3-3.15 為 6 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 3-3.9 之獅潭—屯子腳斷層邏輯樹可得到 552 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-3.16 為 6 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 之權重最高；破裂模式 B 以規模 6.8 之權重最高；破裂模式 C 以規模 6.3 之權重最高；破裂模式 D 以規模 6.5 之權重最高；破裂模式 E 以規模 6.6 之權重最高；破裂模式 F 以規模 6.9 之權重最高。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-3.17 為 6 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將 6 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-3.18（a）之獅潭—屯子腳斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-3.18（b）之獅潭—屯子腳斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

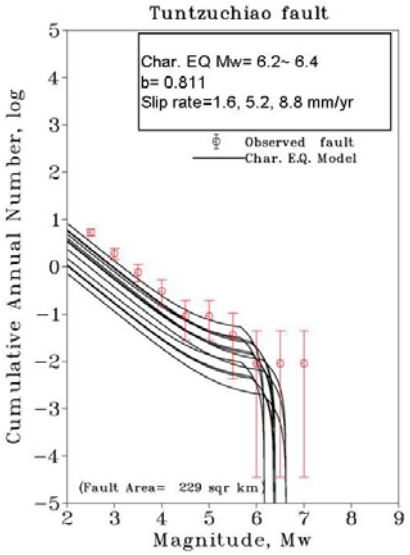


圖 3-3.10：A 事件特徵地震模式。

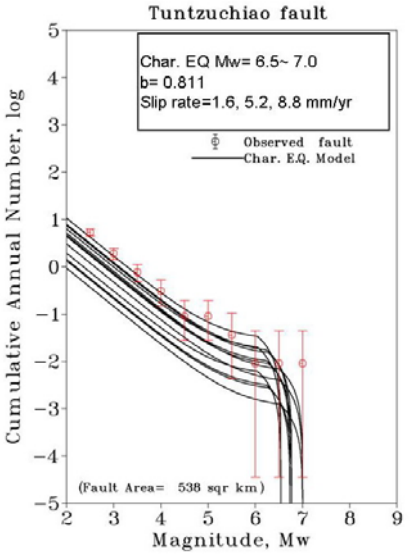


圖 3-3.11：B 事件特徵地震模式。

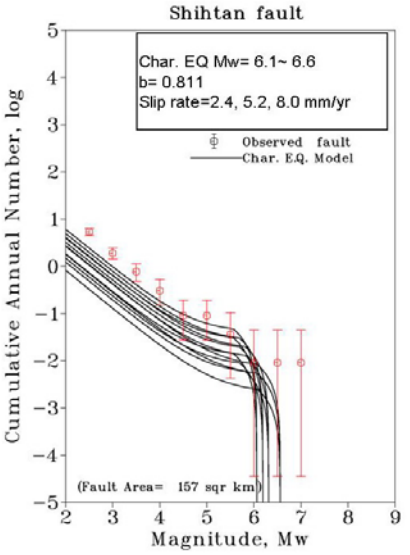


圖 3-3.12：C 事件特徵地震模式。

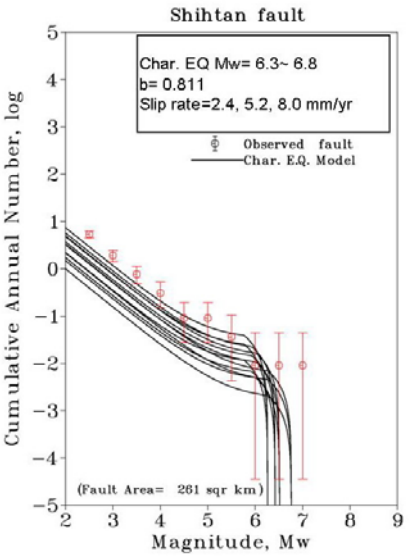


圖 3-3.13：D 事件特徵地震模式。

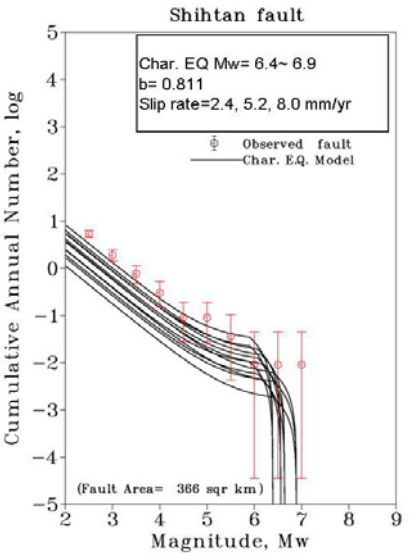


圖 3-3.14：E 事件特徵地震模式。

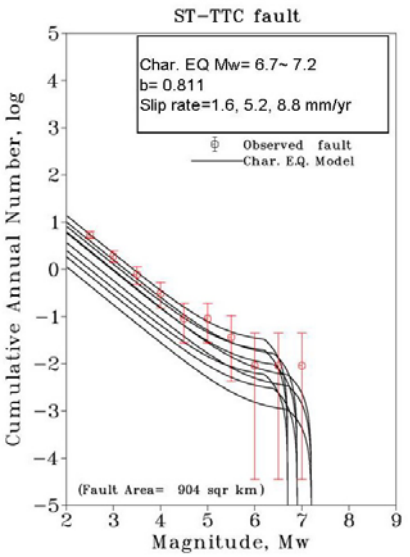


圖 3-3.15：F 事件特徵地震模式。

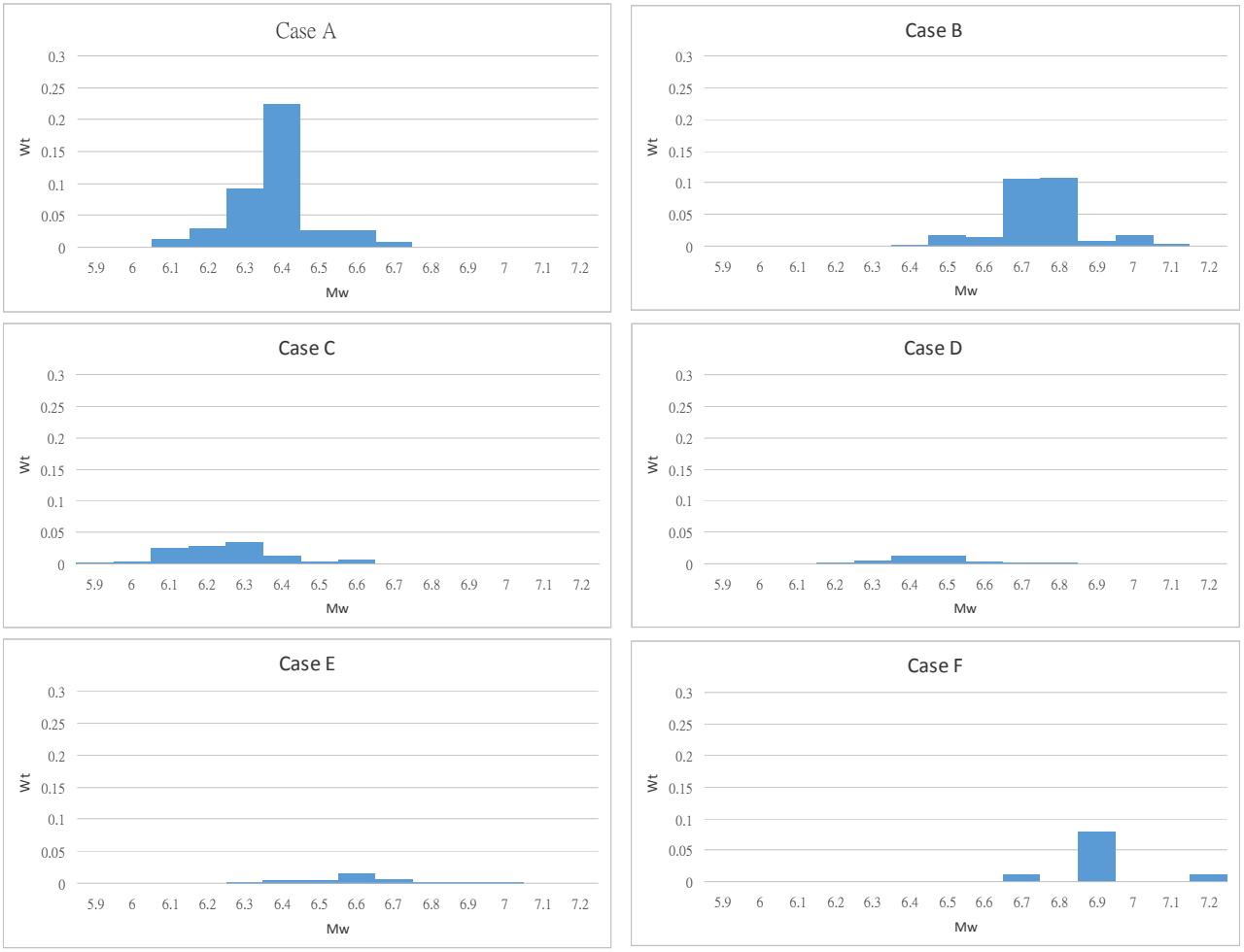


圖 3-3.16：獅潭一屯子腳斷層系統 6 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

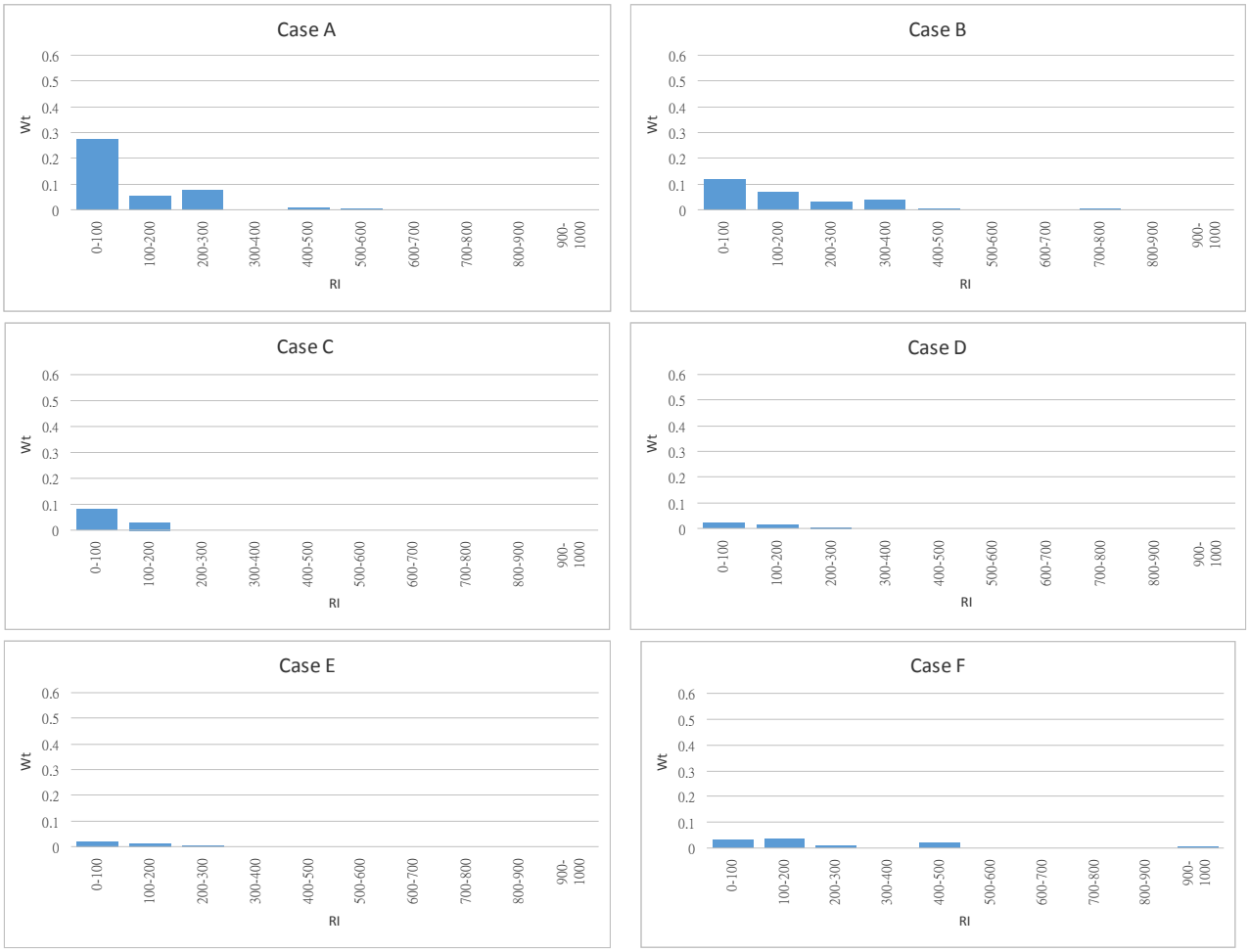
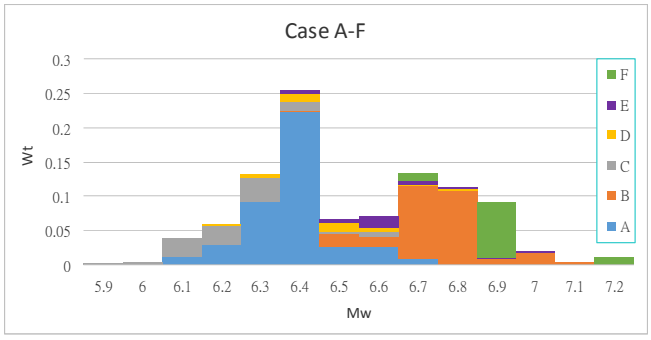


圖 3-3.17：獅潭—屯子腳斷層系統 6 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。

（a）



（b）

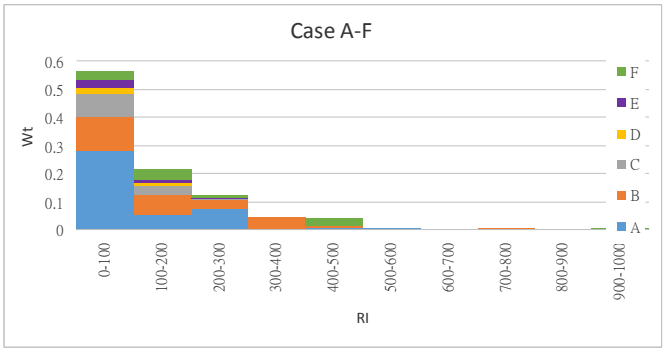


圖 3-3.18：（a）獅潭—屯子腳斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）獅潭—屯子腳斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-3-5 獅潭—屯子腳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 模式估算獅潭—屯子腳斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，獅潭—屯子腳斷層系統最後一次發生時間為西元 1935 年，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 3-3.6 為獅潭—屯子腳斷層系統 BPT 模式評估之結果，以西元 2014 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 5.9~7.2 之機率為 45.2%、58.6%及 74.9%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 17.1%、23.6%及 32.8%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.3%、0.5%及 1.1%。

表 3-3.6：獅潭—屯子腳斷層系統發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	BPT	BPT	BPT
5.9~7.2	45.2%	58.6%	74.9%
M ≧6.5	17.1%	23.6%	32.8%
M ≧7.0	0.3%	0.5%	1.1%

3-4 新城斷層

3-4-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：在地調所出版之「臺灣北部的活動斷層」特刊第 19 號（林啟文等，2007），新城斷層以頭前溪為界分為兩段，南段由新竹縣竹東鎮頭前溪附近向南延伸，經頭前溪南岸階地群、竹東丘陵、中港溪北岸階地，至苗栗縣頭份東北方，長約 16 公里；北段地形有別於南段，頭前溪北岸未有其對應的階地發育，推測斷層沿著岩性邊界轉而向東延伸，最後被竹東斷層截切，長約 12 公里。北段為東西走向，南段則為東北走向，總長 28 公里（圖 3-4.1）（Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1990；張徽正等，1998；林啟文等，2005）。Shyu et al. (2005)所繪製之新城斷層則是自頭前溪北岸向南延伸，經頭前溪南岸階地群，至寶山鄉雙溪村，全長約 13 公里（圖 3-4.2）。

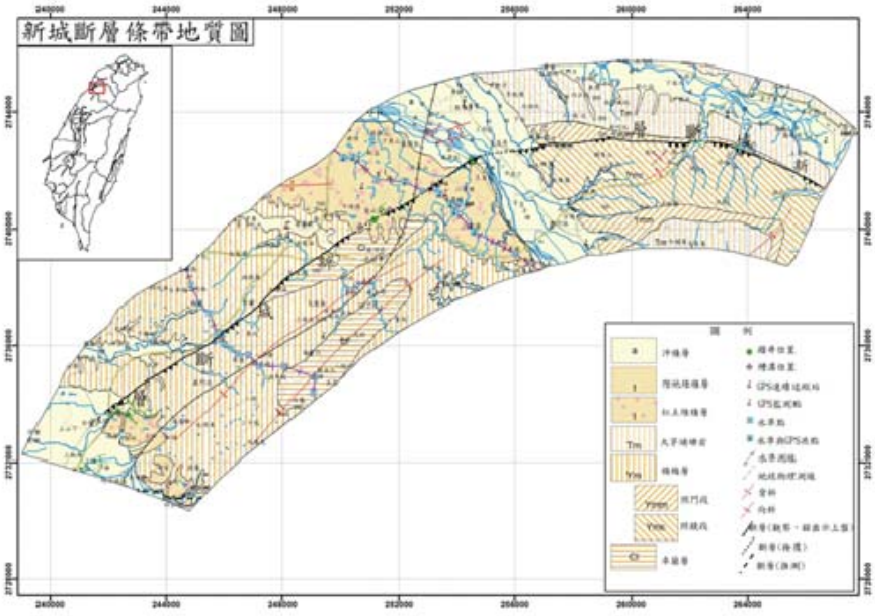


圖 3-4.1：新城斷層條帶地質圖（林啟文等, 2007）。

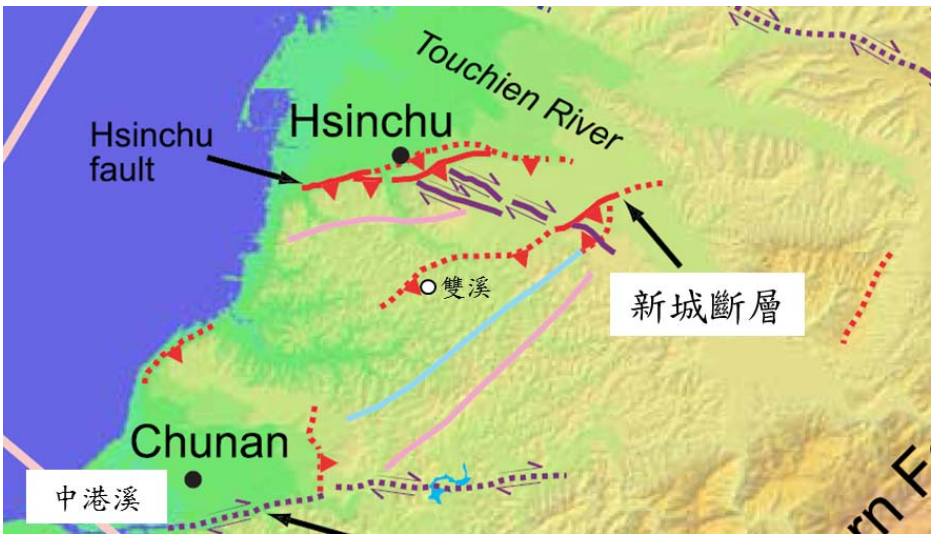


圖 3-4.2：新城斷層分布圖（Shyu et al., 2005）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：斷層幾何相關研究資料整理於表 3-4.1。彙整以上之參數，

本計畫提出新城斷層之幾何參數，在傾角上約為 30 到 50 度左右；深度 8~12 公里，詳細的權重分配將於下一節中詳述之。

表 3-4.1：新城斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度
郭泰融，1990	震測剖面		
Wang et al., 1991	淺層反射震測	60 度	
Yang et al., 1994; 1996	平衡剖面	40~50 度	
Namson, 1984	平衡剖面	30~40 度	>6 km
黃旭燦等，2004	平衡剖面		>6 km
蒲新杰，2010	微震分布		~12 km
黃宣維，2012	地震分布		10~14 km
本計畫推估	由黃立勝（1990）地溫梯度資料推估		12.5 km

3. 斷層機制：由地形判釋、野外地質調查、地物探勘、槽溝等資料顯示新城斷層為逆移斷層（Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1990；張徽正等，1998；林啟文等，2005）。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-4.3。
5. 長期滑移速率：長期滑移速率相關研究資料彙整於表 3-4.2，滑移速率之選取與權重將於下節中詳述。

表 3-4.2：新城斷層長期滑移速率相關文獻（橘色表格表示年代老於 10 萬年）。

文獻	方法	位置	年代	垂直滑移速率(mm/yr)	淨滑移速率(mm/yr)
劉力豪，2004；陳文山等，2003	階地槽溝定年	頭前溪 Lt3	66.9 ka	1.27	2.3[1]
丁權，2012	階地定年	頭前溪 Ft2	23 ka	1.0	1.8[1]
丁權，2012	階地定年	頭前溪 Lt1	33.3 ka	1.1	2.0[1]
丁權，2012	階地定年	頭前溪 Lt3	66.9 ka	1.4	2.5[1]
石同生等，2003	階地定年	頭前溪 Lt2	400 ka	0.088-0.88	0.16-1.6[1]
石同生等，2003	鑽井資料	科學園區	28.5 ka	0.73	>1.3[1]
石同生等，2003	鑽井資料	科學園區	28.5 ka	0.37	>0.65[1]
石同生等，2003	震測資料		1.24 Ma	0.88	1.0[1]
石同生等，2003	震測資料		0.8 Ma	0.56	1.6[1]
丁權，2012	鑽井資料	中港溪 Lt1	43.7 ka	0.32	0.76[2,3]
Chen et al., 2004	震測資料		2 Ma		0.7

註 1：淨滑移速率以頭前溪露頭斷層傾角 34 度換算。

註 2：淨滑移速率以鑽井資料斷層傾角 25 度換算。

註 3：調查位置為新城斷層線南端，滑移速率相較頭前溪階地區域低，推測因位在斷層末端而速率減低，不足以代表斷層整段之滑移速率，固不採入邏輯樹參數設定中。

6. 單一事件變位量：由地調所於新城斷層開挖的 3 座槽溝資料（陳文山等，2003），1 號槽溝中礫石層上下盤之垂直移距約 1.8 公尺； 2 號槽溝剖面中沙岩與泥岩互層計算上下盤

的垂直移距約 1.3 公尺；3 號溝中斷層兩側的垂直移距約 1.85 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：由槽溝中可以觀察到 2 次的古地震事件，但是由於地表受到人為擾動的影響，無法從槽溝資料得知新城斷層最近一次活動時間，另由階地定年之結果，新城斷層最近一次活動約在距今 300 年內。

彙整前人對於新城斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-4.3 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 3-4.3：新城斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
新城斷層	斷層分段與破裂事件	A 整段破裂 B 南段破裂	地形判釋、野外地質調查、地物探勘	Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1991；張徽正等，1998；林啟文等，2005
	長度 (km)	A：28 km B：16 km		
	寬度 (km)	15.6	深度/sin 傾角（以深度 10 公里，傾角 40 度計算）	
	破裂深度 (km)	>6 km	平衡剖面	Namson, 1984
		>6 km	平衡剖面	黃旭燦等，2004
		~12 km	微震分布	本計畫由蒲新杰(2010)微震分布推估
		10~14 km	地震分布	黃宣維，2012
		12.5 km	地溫梯度	本計畫由黃立勝(1990)地溫梯度資料推估
	面積 (km^2)	A：436 B：249	長度×寬度（以深度 10 公里，傾角 40 度計算）	
	走向	北段東北東 南段東北	地形判釋、野外地質調查、地物探勘	Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1991；張徽正等，1998；林啟文等，2005
	傾斜角度 (度)	30~40 度向東。	平衡剖面	Namson, 1984
		40~50 度向東。	平衡剖面	Yang et al., 1994;1996
	斷層機制	逆斷層	地形判釋、野外地質調查、地物探勘、槽溝資料	Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1991；張徽正等，1998；林啟文等，2005
	短期滑移速率(mm/yr)	平行斷層走向的分量-0.7 （右移） 垂直斷層走向的分量 1.5（壓縮） 高程方向沉陷量為 1.9 為鎖定狀態	2002~2006 GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
	長期滑移速率(mm/yr)	2.3	階地槽溝定年	劉力豪，2004；陳文山等，2003
		1.8~2.5	階地定年	丁權，2012
		0.65~1.6	階地定年、鑽井、震測資料	石同生等，2003
		0.76	鑽井資料	丁權，2012
		0.7	震測資料	Chen et al., 2004
	滑移虧損率 (slip deficit	0.9±1.8	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
	rate)(mm/yr)			
	單一事件變位量(m)	1.30~1.85	槽溝古地震研究	陳文山等，2003
	最大可能地震規模(M_W)	A：6.7±0.25 B：6.5±0.25	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.6 B：6.4	$M_W = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max\left(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}}\right)}{\left[1+\max\left(1, \frac{A}{H^2\beta}\right)\right]/2} + \text{const.}$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)	1020~1460	槽溝古地震研究	劉力豪，2004
		100-300	特徵地震模式權重最高之 2 個地震復發間隔時間區間（圖 3.4-9）	本計畫推估
	最近一次活動時間	約距今300 年內	頭前溪Ft1 階地定年	陳文山等，2003

3-4-2 新城斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估新城斷層之破裂模式，綜合地調所（林啟文等，2007）與 Shyu et al. (2005)的看法，將新城斷層以頭前溪為界分為南段及北段。頭前溪以南，頭前溪南岸階地群及中港溪北岸階地皆有錯動跡象，確實度較高，有獨立破裂之可能性；頭前溪以北，地形上無斷層錯動跡象，但仍可能沿著岩性邊界錯動，獨立破裂之可能性較低，因此視為斷層之延伸段。斷層南端位置地調所（林啟文等，2007）與丁權（2012）雖有不同看法，但兩者距離僅相差 1 公里，總長度一樣，因此視為同一種破裂模式。因此本計畫評估新城斷層破裂模式，共分為 2 種事件來探討，A 為整段破裂（權重為 0.4），B 為南段破裂（權重為 0.6），如圖 3-4.3 所示。

本計畫評估新城斷層之幾何形貌，如上節所述，是彙整前人研究利用震測資料、平衡剖面、地震深度分布等資料進行評估。淺層震測資料顯示斷層傾角為 60 度，但根據平衡剖面資料，斷層應在深處轉為層間滑動，傾角轉緩至約 20~30 度。對整體斷層而言，傾角大致上應為 30~50 度，因此本計畫設定傾角 30 度權重 0.2、40 度為 0.6、50 度為 0.2；另外，破裂深度權重為 8 公里（0.2）、10 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 3-4.4 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。

新城斷層之滑移速率，如上節所述，是彙整前人研究利用階地定年、鑽井資料、層位落差等方法計算所得，其中部分年代老於 10 萬年的資料（石同生等，2003；Chen et al., 2004），不足以代表活動斷層現今的活動速率，因此不納入邏輯樹參數設定中；另外，位於斷層末端之滑移速率值（丁權，2012）明顯低於斷層其他位置，不足以代表整段斷層之滑移速率，因此也不納入邏輯樹參數設定中；而石同生等（2003）由鑽井資料推估滑移速率，僅得到保守估計之下限值，僅作參考對照用。因此，本計畫依據丁權（2012）、劉力豪（2004）、陳文山等（2003）利用頭前溪階地定年所得之滑移速率設定邏輯樹之參數值，其速率為 1.8~2.5 mm/yr，取其最慢 1.8 mm/yr 為邏輯樹下界，權重佔 0.3，最快 2.5 mm/yr 為上界，權重佔 0.3，中間值 2.1 mm/yr，權重佔 0.4。

新城斷層各節點權重的分配詳如圖 3-4.4 所示。

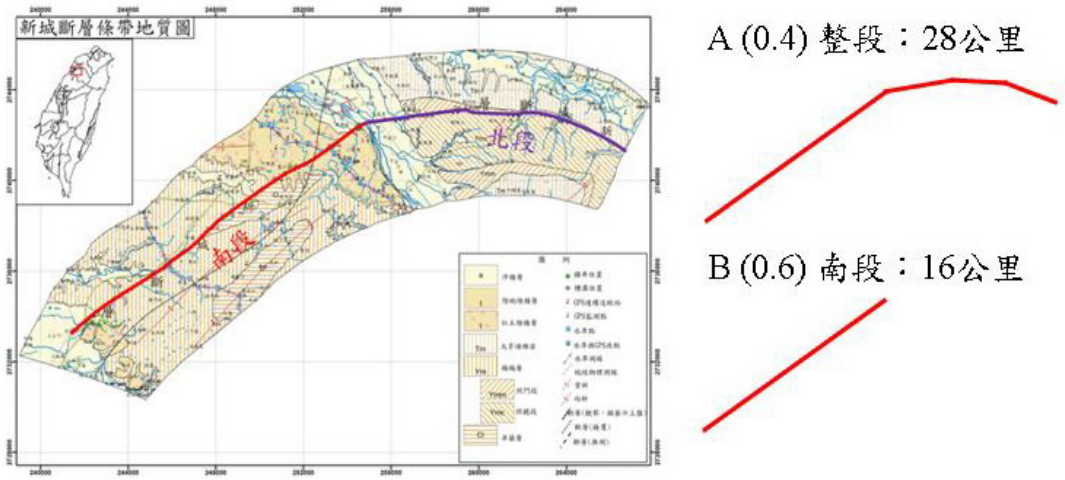


圖 3-4.3：新城斷層之破裂模式及權重分配。

表 3-4.4：新城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	28	10	15.6	40	436	6.5	6.7	7.0	6.6
B	16	10	15.6	40	249	6.2	6.5	6.7	6.4
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

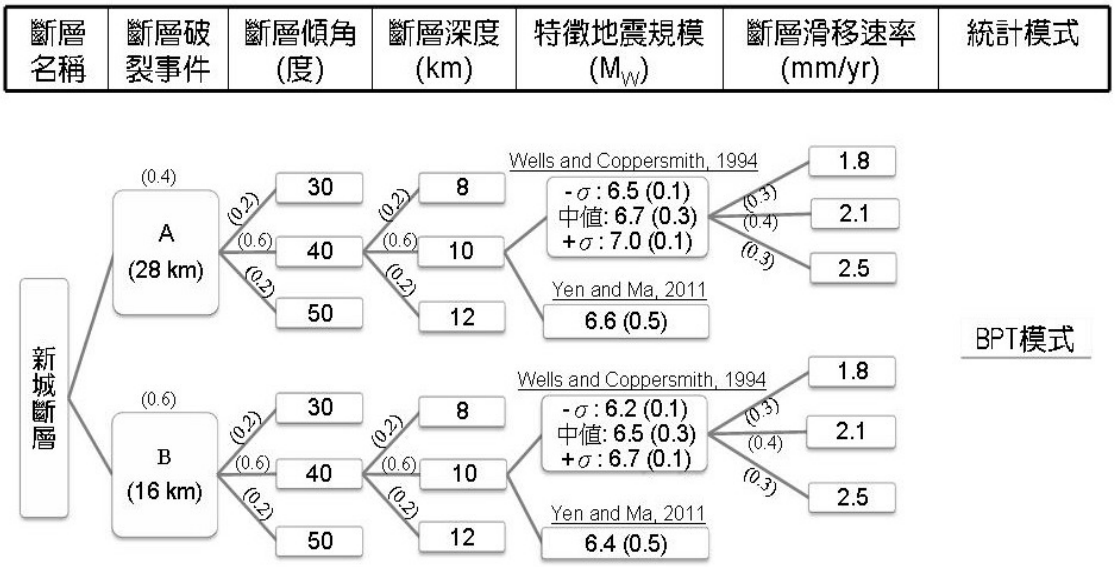


圖 3-4.4：新城斷層邏輯樹。

3-4-3 新城斷層特徵地震模式

新城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 3-4.5 及圖 3-4.6 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 3-4.4 之新城斷層邏輯樹可得到 216 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-4.7 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，6.7 次之；破裂模式 B 以規模 6.4 之權重最高，6.5 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-4.8 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~300 年間有較高之權重，破裂模式 B 在地震復發間隔時間 100~300 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 3-4.9（a）之新城斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-4.9（b）之新城斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

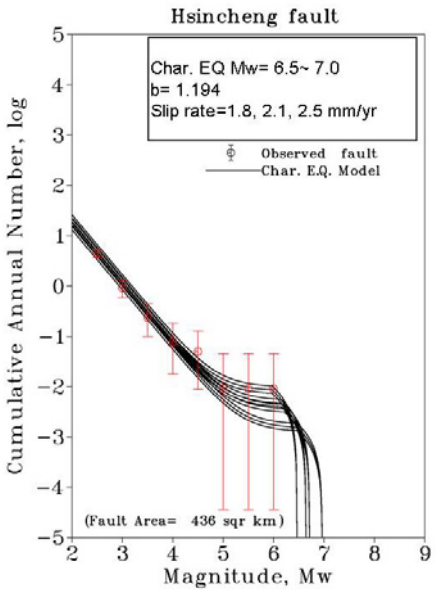


圖 3-4.5：A 事件之特徵地震模式。

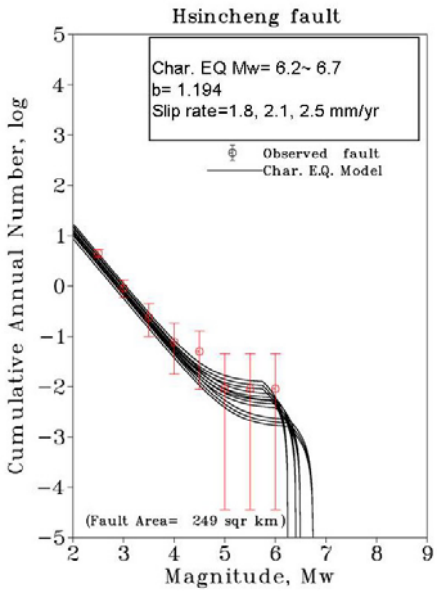


圖 3-4.6：B 事件之特徵地震模式。

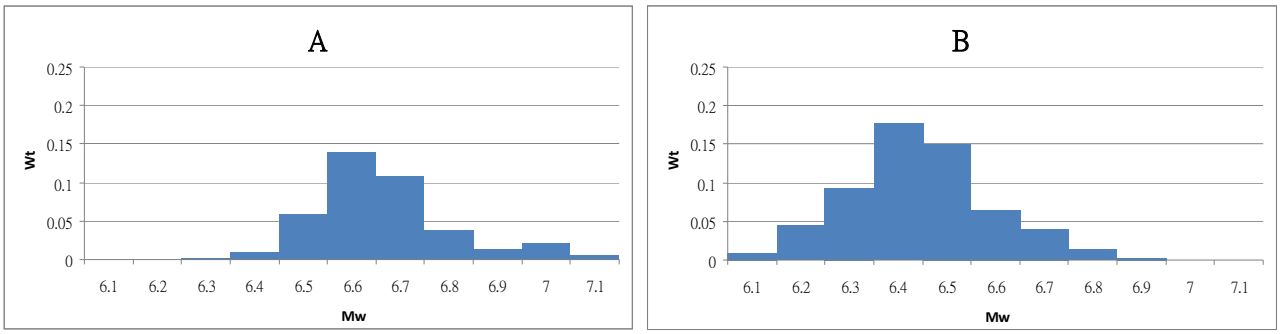


圖 3-4.7：新城斷層 2 種破裂事件之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

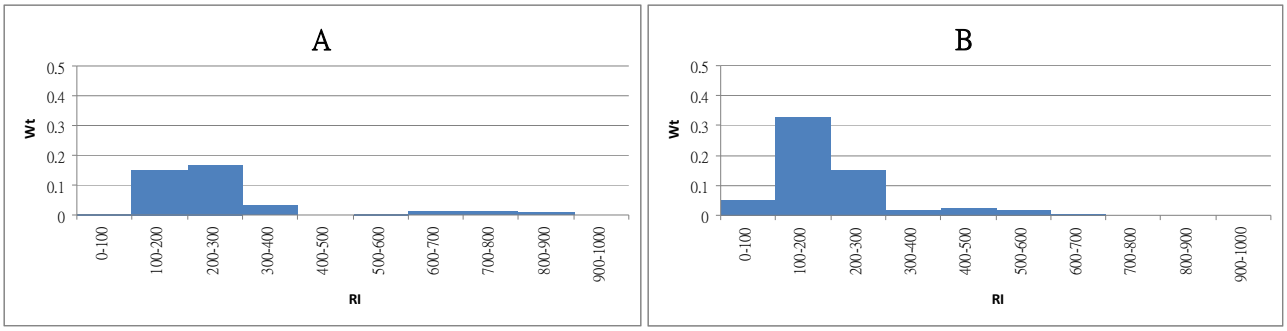


圖 3-4.8：新城斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

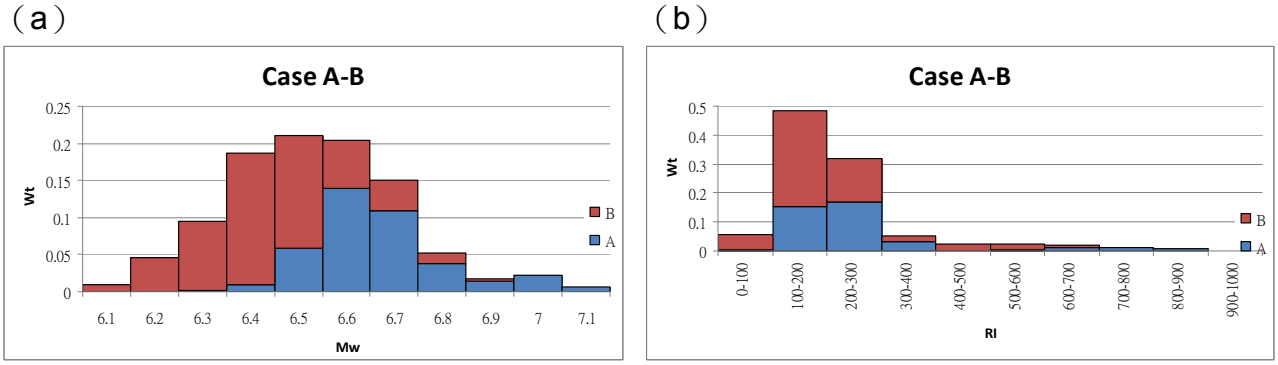


圖 3-4.9：（a）新城斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）新城斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-4-4 新城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）估算新城斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，新城斷層最後一次發生時間為 300 年前左右，因此本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 3-4.5 為新城斷層 BPT 模式評估之結果，以西元 2014 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.1~7.1 之機率為 28.1%、41.6%及 63.9%，發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 15.3%、23.3%及 37.6%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.1%、0.2%及 0.4%。

表 3-4.5：新城斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	BPT	BPT	BPT
6.1 ≦ M ≦7.1	28.1%	41.6%	63.9%
M ≧ 6.5	15.3%	23.3%	37.6%
M ≧ 7.0	0.1%	0.2%	0.4%

3-5 新竹斷層

3-5-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：根據地調所條帶地質圖（林啟文等，2007），新竹斷層由新竹市西方向東延伸至頭前溪南岸，長約 9 公里（圖 3-5.1）。然而，倪明倫（2004）在頭前溪河床北岸河堤進行的淺層震測（位於圖 3-5.1 藍線處），可清楚看見新竹斷層以高角度在此往南傾斜（圖 3-5.2），由本剖面的斷層可能出露位置依走向往東延伸恰可連接至此，推斷新竹斷層應在此通過頭前溪北岸。另外，根據陳于高等人（Chen et al., 2004）描繪的階地及斷層崖（圖 3-5.3），認為新竹斷層向東應通過頭前溪北岸與新城斷層相連，圖 3-5.4 即為陳于高等人（Chen et al., 2004）所描繪的主要斷層及褶皺分布圖。沈玟劭（2008）於新竹外海之震測剖面則顯示有褶皺及高角度的逆斷層（圖 3-5.5），推測為新竹斷層之海域延伸。綜合上述，本計畫推估新竹斷層之位置如圖 3-5.6，主斷層長度為 17 公里（紅色線段），東側新城斷層北段可為新竹斷層之西部延伸段，長度 12 公里（黃色虛線），西側海域延伸為 17 公里（藍色虛線）。



圖 3-5.1：新竹斷層條帶地質圖（林啟文等，2007）。

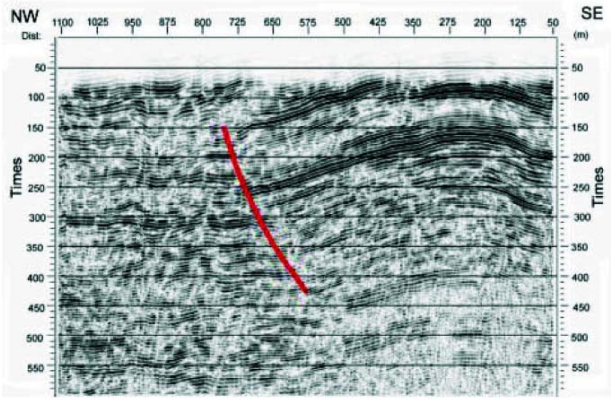


圖 3-5.2：HCU02-7 震測剖面，位置位於圖 3-5.藍線處（倪明倫，2004）。

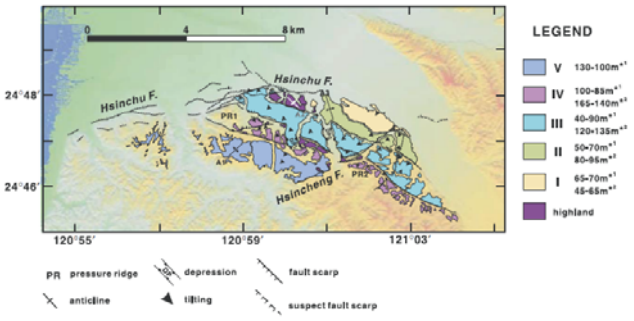


圖 3-5.3：新竹斷層階地及斷層崖線形描繪（Chen et al., 2004）。

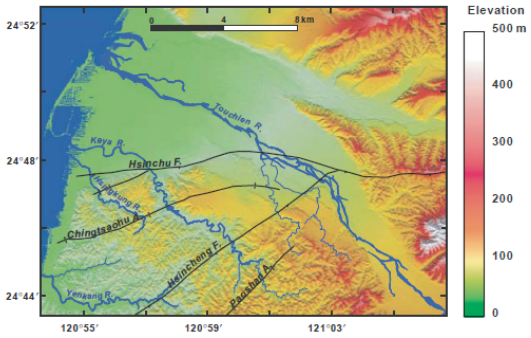


圖 3-5.4：40 公尺數值高程模型（DEM）彩繪陰影地形圖，頭前溪南岸的地形與主要構造線形的關係密切（Chen et al., 2004）。

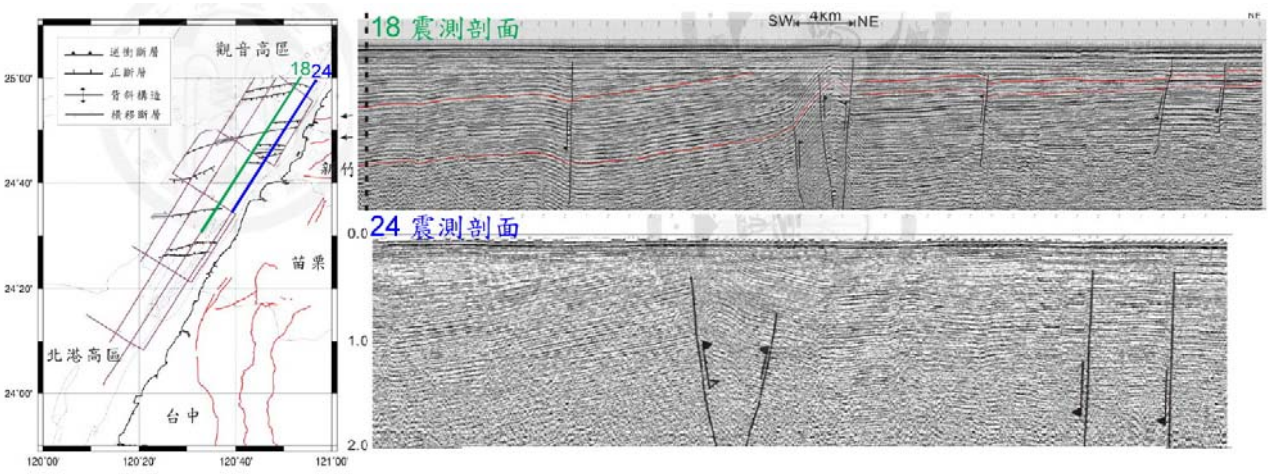


圖 3-5.5：新竹地區海域震測剖面（沈玟劭，2008）。

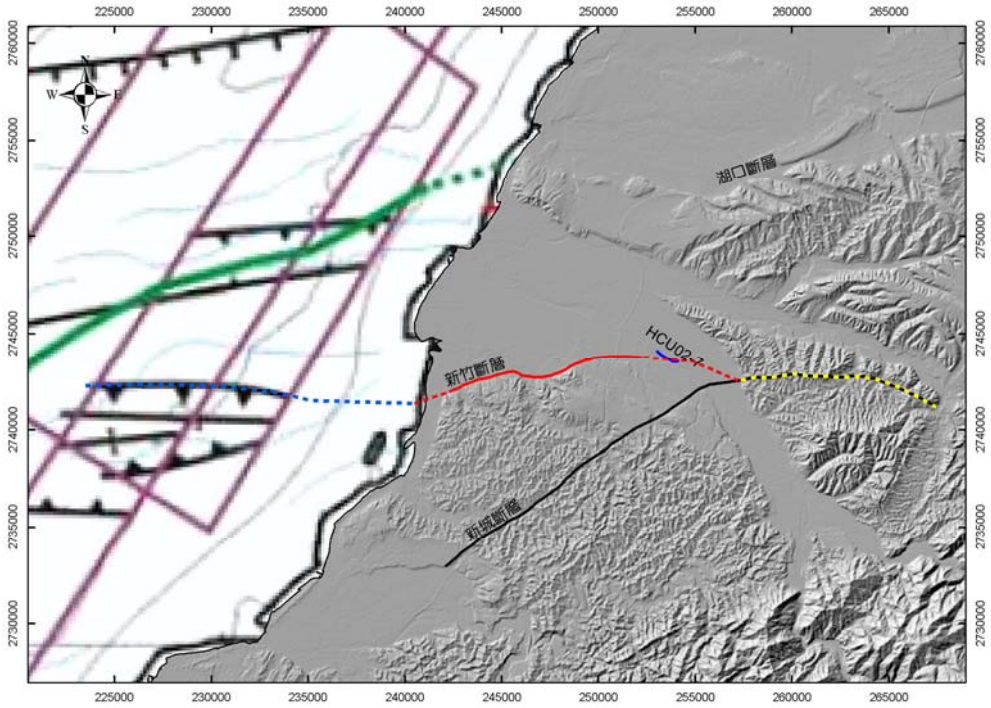


圖 3-5.6：本計畫推估新竹斷層之延伸位置，海域線形取自沈玟劭（2008）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：新竹斷層幾何面各調查方法及斷層參數整理於表 3-5.1。彙整以上之參數，本計畫提出新竹斷層之幾何參數，在傾角上約為 40 到 60 度左右；深度 8~12 公里，詳細的權重分配將於下一節中詳述之。

表 3-5.1：新竹斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

作者	方法	傾角	深度
Tang and Hsu, 1970	鑽井剖面	50~60	
Chiu, 1971	鑽井剖面	50S	
Yang et al.,1994; 1996	震測剖面	40~50 度	斷坡至少 5 公里
黃旭燦等，2004	平衡剖面	Line 5：65 度 Line 6：50 度 （圖 3-5.7）	至少 8 公里（推測）
蒲新杰，2010	微震分布		~12 km
丁權，2012 江婉綺與陳柏村，2012	淺層鑽井剖面	BB'剖面 40S CC'剖面 20~30S	-

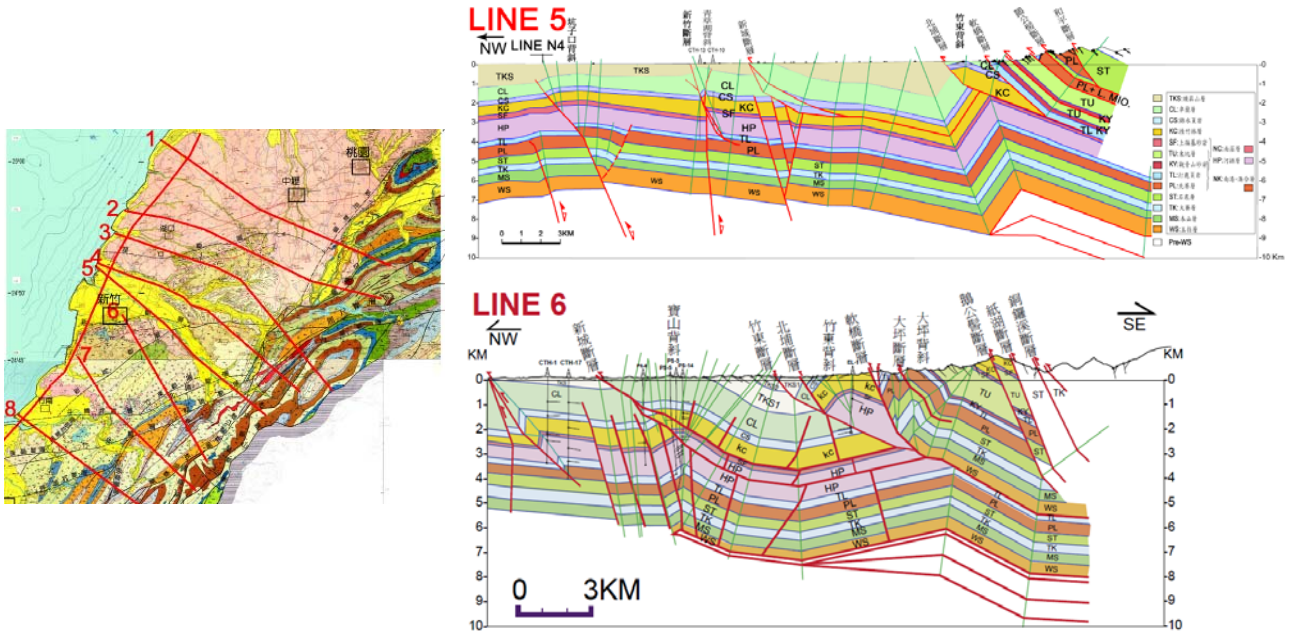


圖 3-5.7：左圖為地質圖及平衡剖面位置圖，右圖則為 LINE 5 及 LINE 6 兩條平衡剖面（地質圖摘自中油公司桃園、苗栗、臺中地質圖）（黃旭燦等，2004）。

3. 斷層機制：孟昭彝（Meng, 1965）認為新竹斷層是南側隆起的逆移斷層，然而根據近期地殼變形測量顯示，新竹斷層兼具右移與逆移特性（鍾瑋等，2005；饒瑞鈞等，2006）。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-5.2。
5. 長期滑移速率：丁權（2012）由鑽井所記錄的全新世海相沖積層之中共有 4 個碳十四年代（圖 3-5.8（B））可供計算地殼變動速率。在下盤區域僅有一個樣本，垂直變動速率為 -0.1 mm/yr；上盤區域的 3 口井垂直變動速率平均為 1.1 mm/yr。計算上下盤地殼變動速率的差為 1.1-(-0.1)=1.2 mm/yr（圖 3-5.8（C）），代表新竹斷層尖端位置的垂直錯移速率。根據丁權（2012）淺層鑽井剖面，斷層傾角為 20~40 度，換算至斷層面上，則長期滑移速率為 1.9~3.5 mm/yr，由於新竹斷層上盤屬於斷層擴展褶皺，在深部之速率會較地表及淺部大，此滑移速率可能會有低估之虞。

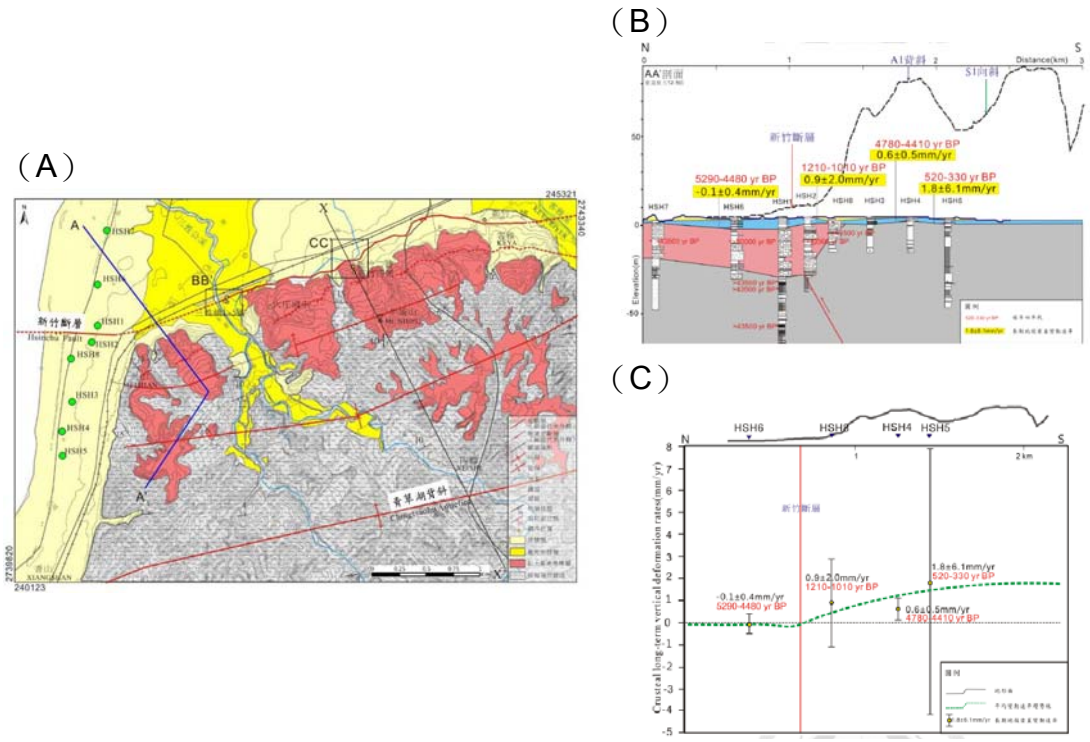


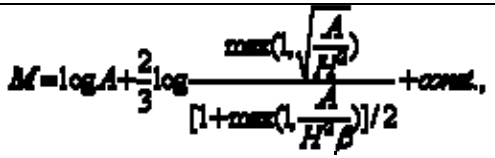
圖 3-5.8：（A）美山－客雅區域地質圖，AA'剖面圖位置為圖中藍色線段（B）AA'地殼垂直變動速率剖面圖。正值代表抬升，負值代表沉降，（C）新竹斷層兩側地殼垂直變動速率圖（摘自丁權，2012）。

6. 單一事件變位量：未知。本計畫藉由 Wells and Coppersmith (1994)之規模-地表最大錯動量推估，地表錯動量為 1.07~1.38 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：由地質鑽探結果顯示，斷層截切更新世晚期的地層。

彙整前人對於新竹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，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：新竹斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
新竹斷層	斷層分段與破裂事件	A 中段破裂 B 中段破裂+東側延伸 C 海域延伸+中段破裂 D 海域延伸+中段破裂+東側延伸	遙測影像判釋、地形、地下構造	Pan, 1965；石再添等，1985；丁信修等，1995；倪明倫，2004；Chen et al., 2004；林啟文等，2007；沈玟劭，2008；江婉綺與陳柏村，2012
	長度(km)	A：17 km　B：29 km C：34 km　D：46 km		
	寬度(km)	13.1	深度/sin 傾角 （以深度 10 公里，傾角 50 度計算）	
	破裂深度（km）	5~8 公里	平衡剖面	黃旭燦等，2004
		12 公里	微震分布	蒲新杰，2010
	面積(km^2)	A：222　B：379 C：444　D：600	長度×寬度 （以深度 10 公里，傾角 50 度計算）	
	走向	約呈東西走向	地形、遙測影像判釋	Ku, 1963；Tang and Hsu, 1970；石再添等，1985
	傾斜角度(度)	50~60S	鑽井剖面	Tang and Hsu, 1970；Chiu, 1971
		40~50S	震測剖面	Yang et al., 1994； 1996
		Line 5：65S Line 6：50S	平衡剖面	黃旭燦等，2004
		BB'剖面 40S CC'剖面 20~30S	淺層鑽井剖面	丁權，2012；江婉綺與陳柏村，2012
	斷層機制	逆移斷層	地質調查、地下構造	Meng, 1965；林啟文等，2007
		兼具右移與逆移特性	近期地殼變形測量	鍾瑋等，2005；饒瑞鈞等，2006
	短期滑移速率（mm/yr）	平行斷層的分量-2.3mm/yr，呈右移形式， 垂直於斷層的分量為 3.1mm/yr，呈壓縮的形式	(2002~2006)GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
		斷層屬於閉鎖的狀態	精密水準測量	林燕慧等，2010

	長期滑移速率(mm/yr)	1.9~3.5 mm/yr	上下盤鑽井定年，計算垂直變動速率，以傾角 20 度及 40 度換算至斷層面上	丁權，2012
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	0.3±0.4	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 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)	1.07~1.38, σ=0.42	log D= 0.29Mw-1.84 σ=0.42 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模(Mw)	A：6.4 、B：6.7、 C：6.7、 D：6.8	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.3 、B：6.6、 C：6.6、 D：6.8		Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)	100-200	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間（圖 3.5-17）	本計畫推估
	最近一次活動時間	更新世晚期	地質鑽探	林啟文等，2007

3-5-2 新竹斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估新竹斷層之破裂，由於東側延伸及西側海域的延伸與否可分為 4 種破裂事件來探討，A 為中段破裂，B 為中段破裂+東側延伸，C 為海域延伸+中段破裂，D 為海域延伸+中段破裂+東側延伸破裂，權重分配為 A（0.5）、B（0.2）、C（0.2）、D（0.1），如圖 3-5.9 所示。

推估斷層傾角（權重）為 40 度（0.2）、50 度（0.6）、60 度（0.2），破裂深度（權重）為 8 公里（0.2）、10 公里（0.6）、12 公里（0.2）。

新竹斷層之滑移速率上節中提到有丁權（2012）利用上下盤鑽井定年之結果，換算至斷層面上為 1.9~3.5 mm/yr，本計畫取其為上下限值以及平均值，權重設定為 1.9（0.3）、2.7（0.4）、3.5（0.3）。

新竹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 3-5.3 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。

新竹斷層各節點權重的分配詳如圖 3-5.10 所示。

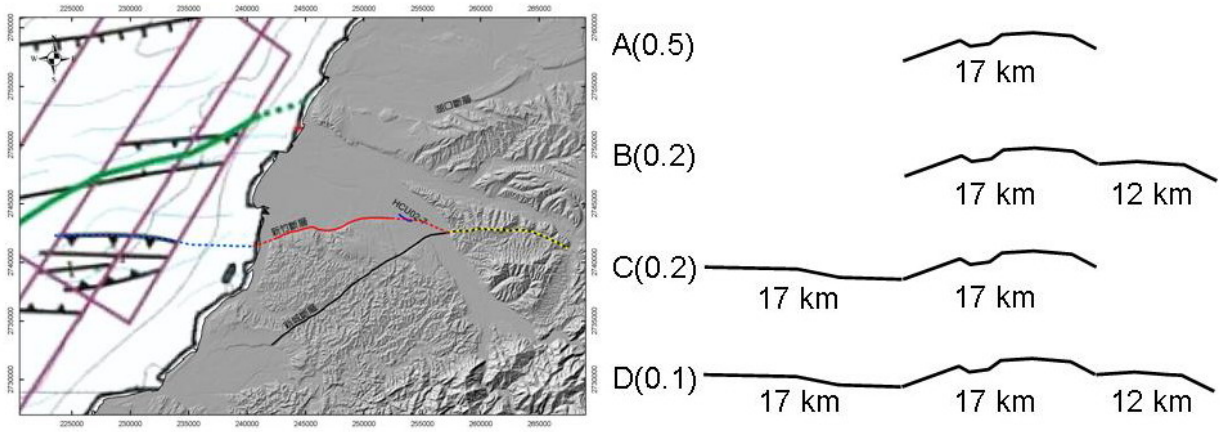


圖 3-5.9：新竹斷層之破裂模式及權重分配。

表 3-5.3：新竹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	17	10	13.1	50	222	6.2	6.4	6.7	6.3
B	29	10	13.1	50	379	6.4	6.7	6.9	6.6
C	34	10	13.1	50	444	6.5	6.7	7.0	6.6
D	49	10	13.1	50	600	6.6	6.8	7.1	6.8
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

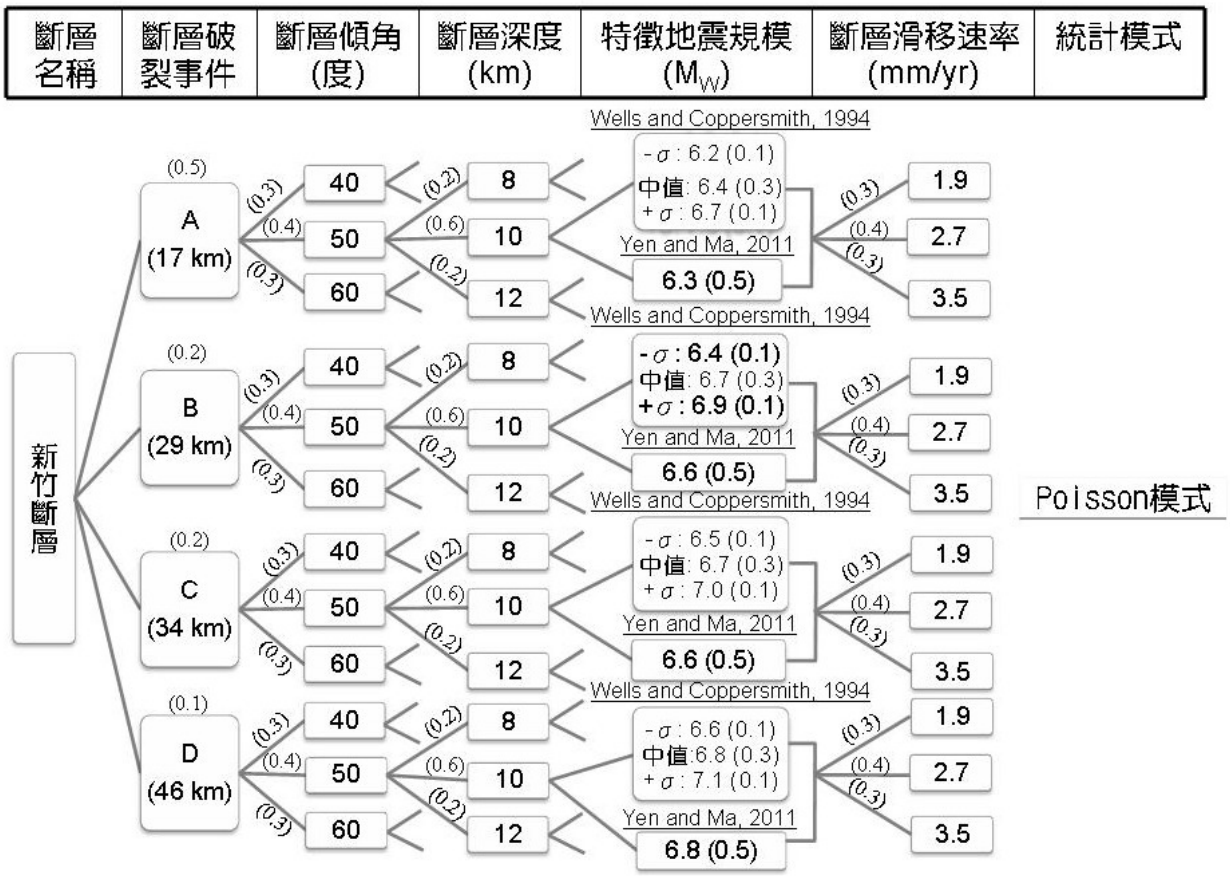


圖 3-5.10：新竹斷層邏輯樹。

3-5-3 新竹斷層特徵地震模式

新竹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 3-5.11~圖 3-5.14 為 4 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 3-5.10 之新竹斷層邏輯樹可得到 432 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-5.15 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 6.4 之權重最高，6.3 次之；破裂模式 B 以規模 6.7 之權重最高，6.6 次之；破裂模式 C 以規模 6.6 之權重最高，6.7 次之；破裂模式 D 以規模 6.8 之權重最高，6.9 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-5.16 為 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，4 種破裂模式在地震復發間隔時間 100~200 年間均有較高之權重。

將四種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-5.17（a）之新竹斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-5.17（b）之新竹斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

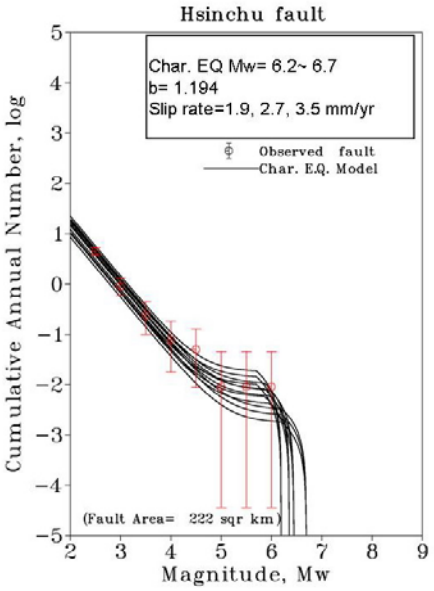


圖 3-5.11：A 事件特徵地震模式。

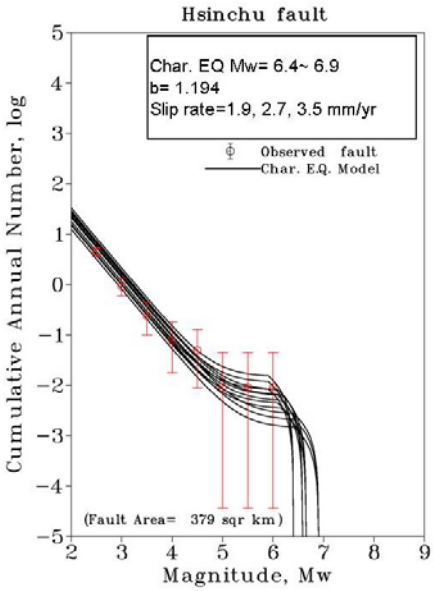


圖 3-5.12：B 事件特徵地震模式。

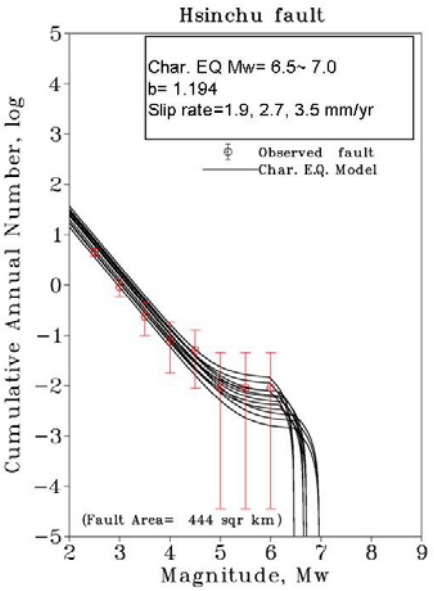


圖 3-5.13：C 事件特徵地震模式。

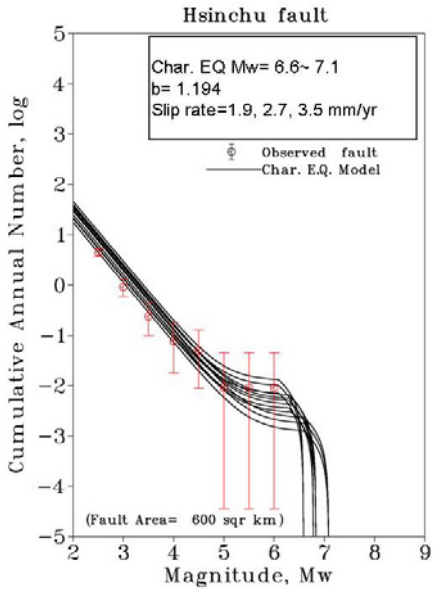


圖 3-5.14：D 事件特徵地震模式。

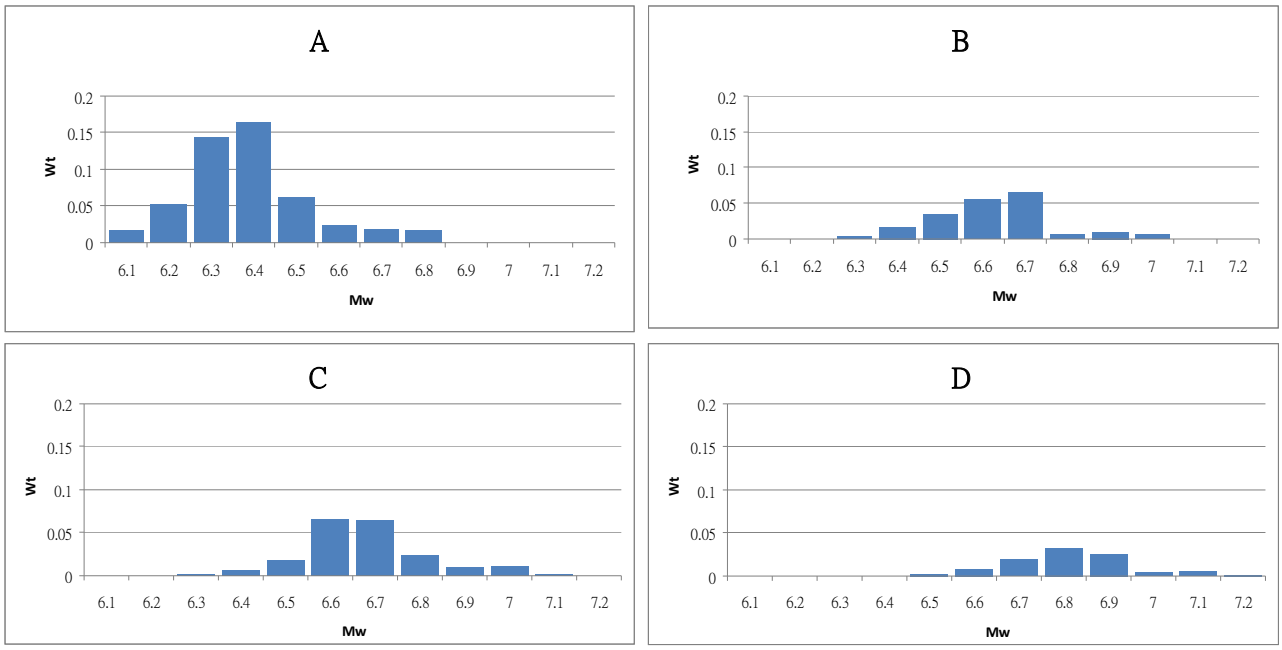


圖 3-5.15：新竹斷層 4 種破裂事件之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

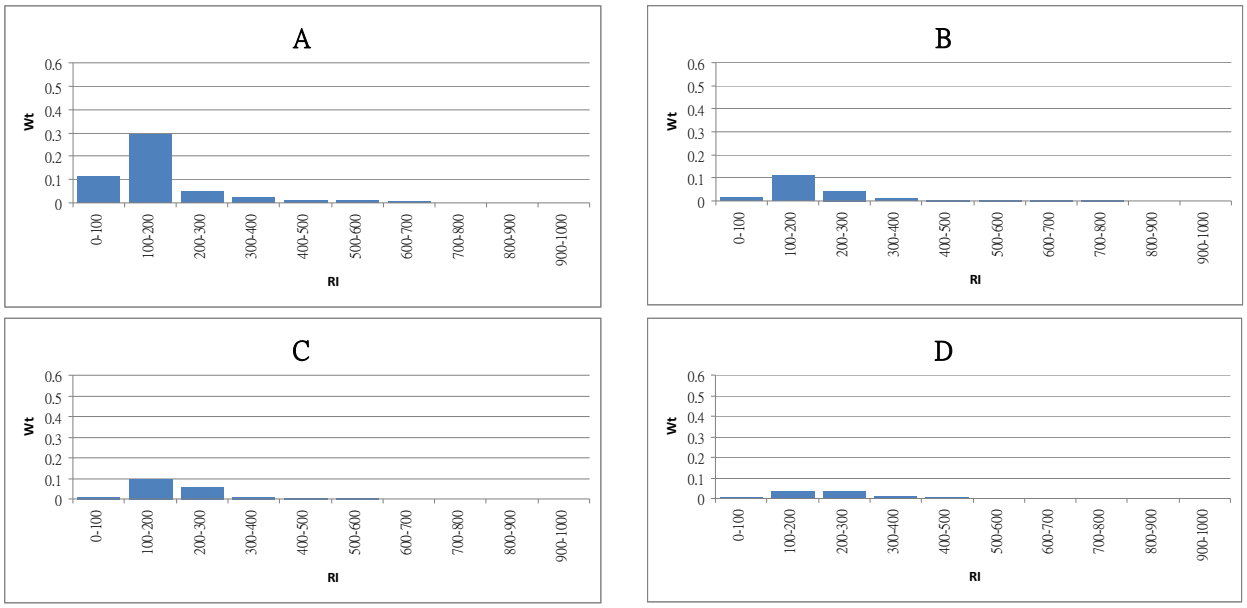
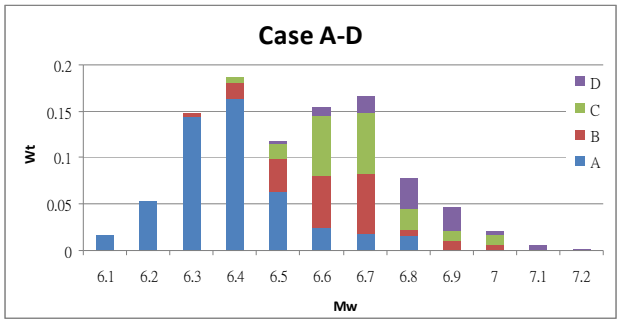


圖 3-5.16：新竹斷層 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

（a）



（b）

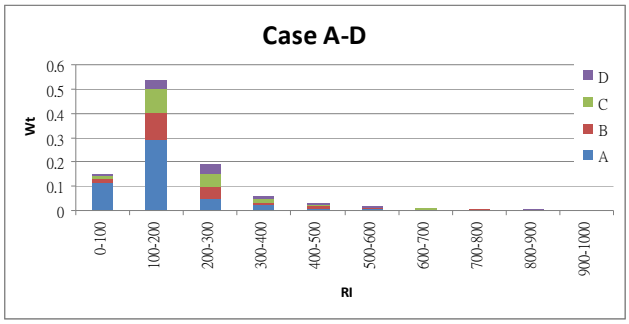


圖 3-5.17：（a）新竹斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）新竹斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-5-4 新竹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）估算新竹斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，新竹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 為新竹斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2014 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.1~7.2 之機率為 18.4%、28.3%及 47.3%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 8.5%、13.4%及 23.4%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.2%、0.3%及 0.5%。

表 3-5.4：新竹斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.1 ≦ M ≦7.2	18.4%	28.3%	47.3%
M ≧ 6.5	8.5%	13.4%	23.4%
M ≧ 7.0	0.2%	0.3%	0.5%

3-6 湖口斷層

3-6-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：地調所劃設之湖口斷層，東起桃園縣平鎮，西至新竹縣湖口，斷層呈東北東走向，全長約 21 公里（林啟文等，2007；花井重次，1930；中國石油公司，1978）（圖 3-6.1）。潘玉生（Pan, 1965）依據重力及震測資料結果認為湖口斷層延伸至坑子口海岸附近。湖口斷層在地形上存在線性崖，線性崖最遠亦可延伸至坑子口海岸附近，其西部延伸段長約 9 公里（圖 3-6.2）。湖口斷層早期稱為楊梅南斷層（石再添等，1983；張徽正等，1998），後改名為湖口斷層（林啟文等，2000），屬第二類活動斷層。王昱（2003）由地形判釋認為西部延伸段為右移斷層系統，而非湖口斷層的延伸。此右移斷層系統截切湖口斷層（楊梅南斷層），造成湖口斷層的線性崖右移，也造成牛欄河及打鐵坑溪上游錯斷形成斷頭河（圖 3-6.3）。本計畫依以上前人文獻將湖口斷層分為（1）地調所劃設之湖口斷層（段）及（2）西部延伸段（圖 3-6.4），破裂模式及其權重分配將於下節詳述。

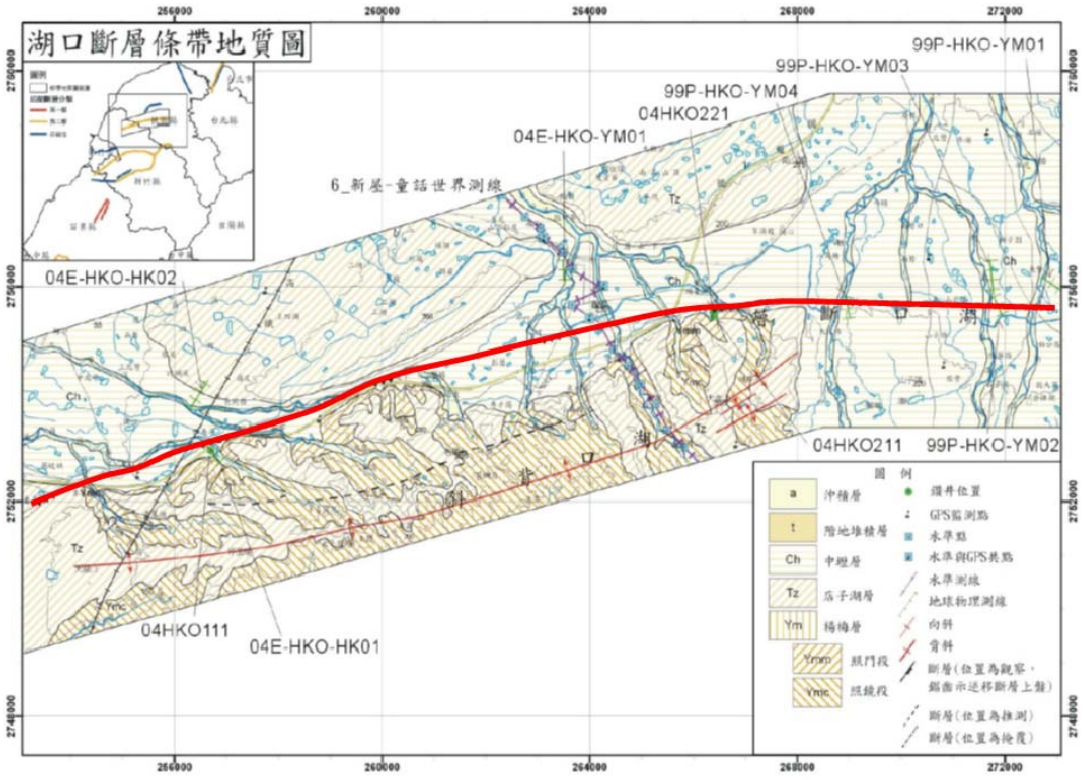


圖 3-6.1：湖口斷層條帶地質圖（林啟文等，2007）。

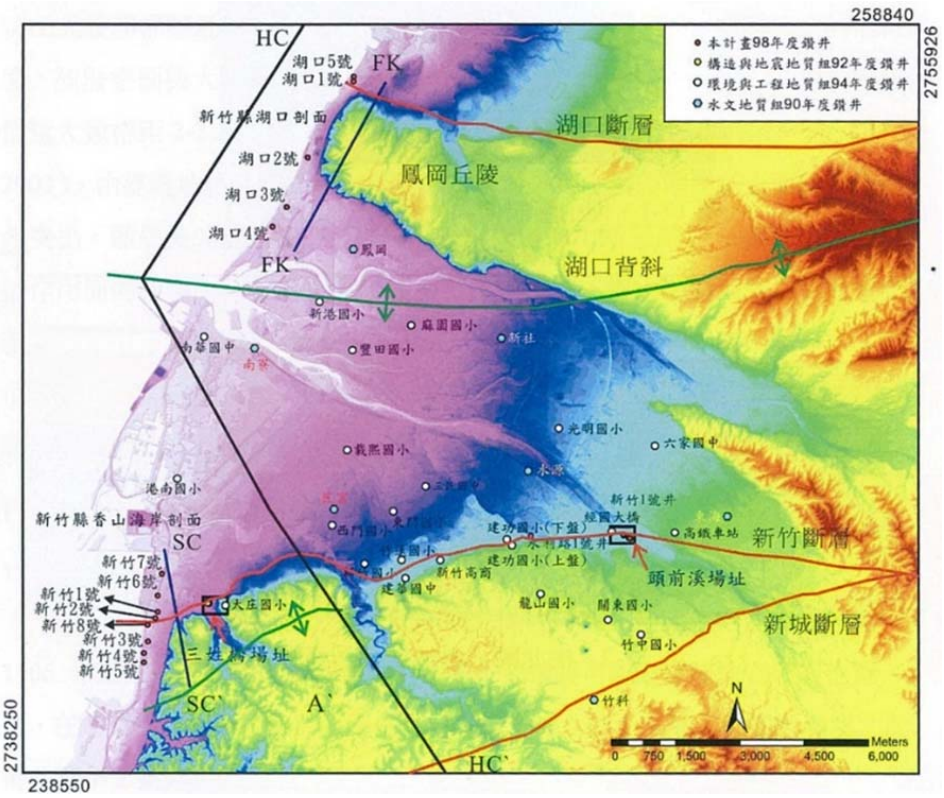


圖 3-6.2：湖口斷層西部延伸段地形（陳文山，2010）。

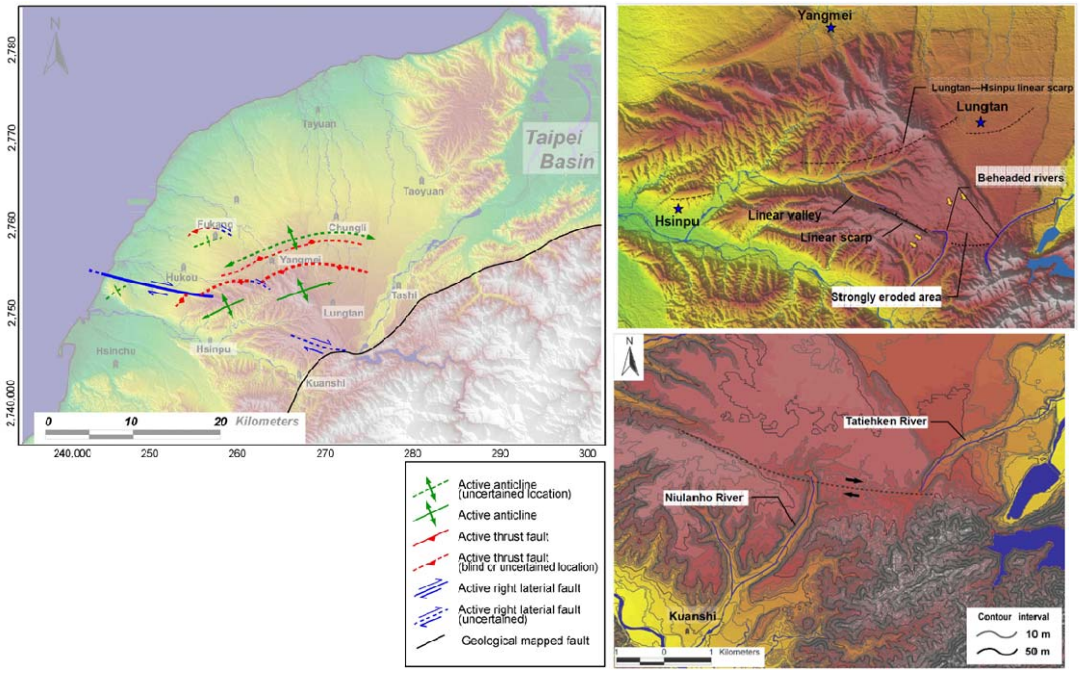


圖 3-6.3：湖口斷層西部延伸段地形（王昱，2003）。

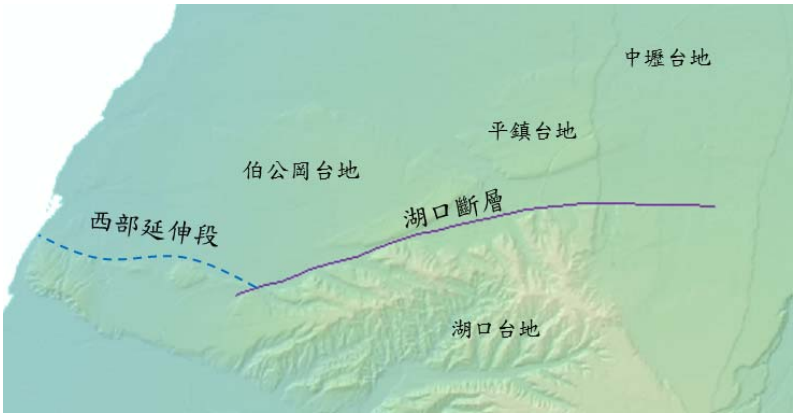


圖 3-6.4：湖口斷層分段模式。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：由林良安（1999）淺層反射震測結果顯示斷層屬未出露地表的盲斷層。湯振輝（Tan,1963）由震測資料研判湖口斷層截切湖口背斜北翼，斷層面向南傾斜約 60 度，層位落差 200 公尺。林啟文等（2007）依據地表露頭與岩心觀察繪製地質剖面圖，推算斷層傾角為 40 度。黃旭燦等（2004）、Suppe and Namson (1979)、王昱（2003）認為湖口—楊梅背斜下方存在一低角度滑移斷層系統，湖口斷層僅為一向斜軸的軸面。Suppe and Namson (1979)利用斷層彎曲褶皺理論（fault-bend fold）計算滑移系統之斷坡為 28-29º，由鑽井 HK4 得知斷層角度為 25-38º，顯示觀測值與理論值一致。王昱（2003）將滑移系統之滑移面置於石底層，深度約 5 公里，利用 Shear fault-bend fold 計算出滑移系統之斷坡角度為 32 度。黃旭燦等（2004）則認為滑移系統位於湖口—楊梅背斜下方深度約 6 至 7.5 公里處。儘管以上平衡剖面解釋湖口斷層為發育於向斜軸部的逆移盲斷層，斷層滑移尚未發育至地表，但朱傚祖等（2012）認為大金山下 1 號井，地下 80~102 公尺處楊梅層砂頁岩互層中，13 組以上的密集剪裂帶，是湖口斷層延伸至地表的證據。以上斷層幾何相關研究資料彙整於表 3-6.1。此外，朱傚祖等（2012）於湖口背斜處，發現楊梅層逆衝至紅壤礫石層之上的斷層露頭，認為此為湖口斷層的背衝斷層，而紅壤礫石層年代可能為全新世或晚更新世。

表 3-6.1：湖口斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

作者	方法	傾角	深度
湯振輝，1963	震測剖面	60 度	
林良安，1999	淺層震測		
Suppe and Namson, 1979	平衡剖面	滑脫面斷坡 28-29 度	
林啟文等，2007	地表露頭與鑽井資料，以斷層擴展褶皺推測。	40 度	
王昱，2003	平衡剖面	滑脫面斷坡 32 度	5 km
黃旭燦等，2004	平衡剖面	60 度	6-7.5 km

3. 斷層機制：由地形地質調查、鑽探及震測資料結果（衣德成等，2004；湯振輝，1963）研判湖口斷層為沿湖口背斜前翼之向斜軸部發育的逆移斷層盲斷層。潘玉生（Pan, 1965）認為湖口斷層延伸至坑子口海岸附近，西部延伸段仍屬逆移斷層，王昱（2003）依據地形地質調查成果提出西部延伸段應為右移的斷層系統。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-6.2。
5. 長期滑移速率：陳文山（2010）由湖口背斜軸部的南寮國小井計算垂直抬升速率為 1.7±0.8

mm/yr（圖 3-6.5、圖 3-6.6），顯示斷層尖端位置的垂直變動速率無明顯變化，大部分的變形量消耗於褶皺作用。

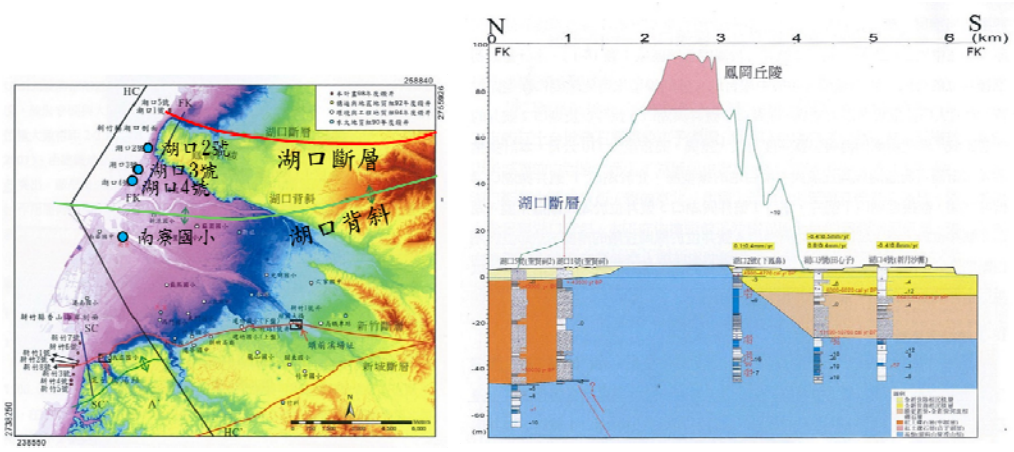


圖 3-6.5：湖口斷層鑽井位置與鑽井資料（陳文山，2010）。

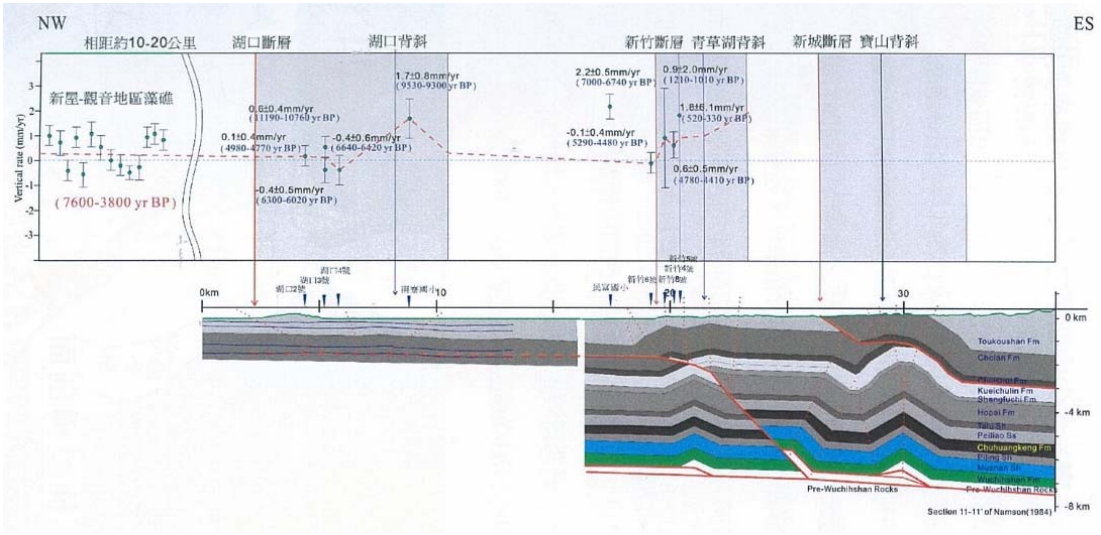


圖 3-6.6：湖口斷層兩側地殼平均垂直變動速率圖（陳文山，2010）。

6. 單一事件變位量：未知。本計畫藉由 Wells and Coppersmith (1994)之規模-地表最大錯動量推估，地表錯動量為 1.11±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。
8. 最近一次活動時間：謝凱英（1995）以崖坡發育估算階地下切年代，認為湖口斷層最後活動時間約距今 33,000 年以前。王昱（2003）由精密地形測量得知湖口斷層線性崖延伸至桃園面，而桃園面形成年代推測應在三萬年前後，因此認為湖口背斜在近三萬年內仍有活動。

彙整前人對於湖口斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-6.2 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 3-6.2：湖口斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
湖口斷層	斷層分段與破裂事件	A：湖口斷層破裂 B：湖口斷層+西部延伸段破裂	地形、震測資料	林啟文等，2007；花井重次，1930；中國石油公司，1978
	長度(km)	A：21 km　B: 30 km		
	寬度(km)	19.6 km	深度/sin 傾角 （深度 0~7 公里傾角 60 度，7~9 公里傾角 10 度計算）	
	破裂深度（km）	大於 5 km	平衡剖面	王昱，2003
		大於 7.5 km	平衡剖面	黃旭燦等，2004
	面積(km^2)	A：412　B：588	長度×寬度	
	走向	湖口斷層呈東北東走向， 西部延伸段呈西北西走向。	地形、震測資料	林啟文等，2007；花井重次，1930；中國石油公司，1978
	傾斜角度(度)	約 40 度向南。	鑽井資料	林啟文等，2007
		約 60 度向南。	震測剖面	湯振輝，1963
	斷層機制	逆移斷層	地形地質調查、鑽探資料、震測資料	衣德成等，2004；湯振輝，1963
		西部延伸段可能為右移的斷層系統	地形地質調查	王昱，2003
	短期滑移速率(mm/yr)	平行斷層走向的分量-1.2（右移） 垂直斷層走向的分量 5.2（壓縮） 高程方向沉陷量為 0.7	2002~2006 GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
		速度場變化並不明顯	2004~2006 精密水準測量	饒瑞鈞等，2006
	長期滑移速率(mm/yr)	3.4±1.6	鑽井資料	陳文山，2010
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	0.6±0.7	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 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)	1.07~1.25, σ=0.42	log D= 0.29Mw-1.84 σ=0.42 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模(Mw)	A: 6.7±0.25　B: 6.8±0.25	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A: 6.6　B: 6.8	$M=\log A+\frac{2}{3}\log\frac{\cos(1,\sqrt{\frac{A}{\pi H^2}})}{[1+\cos(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2}+\text{const.}$	Yen and Ma, 2011

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
	地震復發間隔(年)	100-200	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間（圖 3.6-13）	本計畫推估
	最近一次活動時間	推測約三萬年以來曾經活動	地形與階地年代	謝凱英，1995；王昱，2003

3-6-2 湖口斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估湖口斷層之破裂，可分為 2 種破裂事件來探討，A 為湖口斷層（東段）單獨破裂，B 為湖口斷層與西部延伸段同時破裂，權重為 A（0.6）、B（0.4），如圖 3-6.7 所示。

湖口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、野外露頭、鑽井等資料進行評估。儘管平衡剖面解釋湖口斷層為發育於向斜軸部的逆移盲斷層，斷層滑移尚未發育至地表，但淺層震測資料（林良安，1999）顯示向斜軸部地層並不連續，仍有擾動跡象，且鑽井資料及野外露頭顯示斷層已發育至地表（朱傚祖等，2012），因此本計畫認為，斷層可能沿軸面破裂至地表，而非僅侷限於滑脫面的破裂。因此，本計畫認為破裂面應設定為 7 公里（五指山層深度，參考黃旭燦等，2004）以上為 60 度（向斜軸角度，參考湯振輝，1963），7 公里以下為 10 度（整體滑脫面傾角）。斷層深度由前人文獻（王昱，2003；黃旭燦等，2004）得知為 5~7.5 km，受限於地物探測深度的極限，無法得知斷層更深部的樣貌，因此斷層深度以保守值 7 km 為下界，權重為 0.2；11 km 為上界，權重為 0.2；9 km 為中間值，權重為 0.6。換算破裂面寬度分別為 8.1 km（權重 0.2）、19.6 km（權重 0.6）、31.1 km（權重 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 3-6.3 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。

湖口斷層之滑移速率，上節中提到是利用鑽井資料，計算其抬升速率而得，其抬升速率為 1.7±0.8 mm/yr。鑽井資料位於湖口背斜軸部，代表褶皺軸之垂直抬升速率；而湖口背斜屬斷層彎曲褶皺，褶皺是因受滑脫面斷坡影響而隆起，因此本計畫採用滑脫面斷坡角度 30 度換算沿斷層面之滑移速率為 3.4±1.6 mm/yr。取其誤差上下限為邏輯樹參數上下界，分別為 1.8 mm/yr 權重 0.3；5.0 mm/yr 權重 0.3；中間值 3.4 權重 0.4。

湖口斷層各節點權重的分配詳如圖 3-6.8 所示。

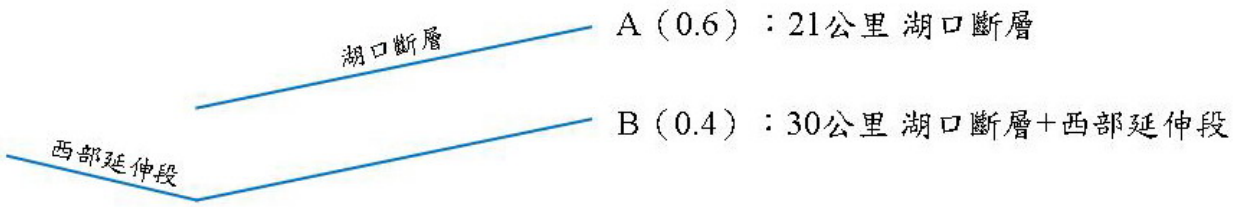


圖 3-6.7：湖口斷層之破裂模式及權重分配。

表 3-6.3：湖口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	21	9	19.6	412	6.4	6.7	6.9	6.6	A
B	30	9	19.6	588	6.6	6.8	7.1	6.8	B
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

斷層名稱	斷層破裂事件	斷層傾角(度)	斷層寬度(km)	特徵地震規模(M_W)	斷層滑移速率(mm/yr)	統計模式

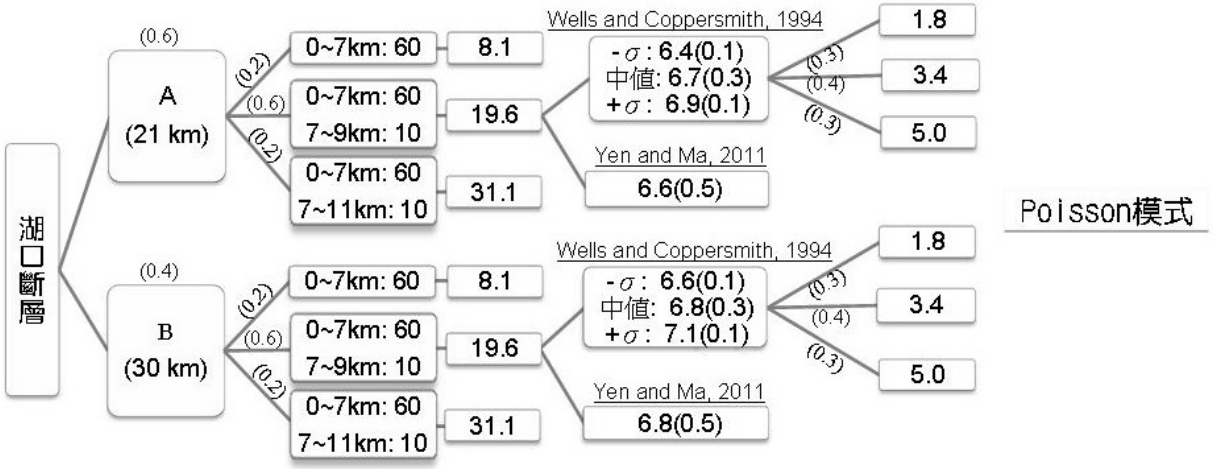


圖 3-6.8：湖口斷層邏輯樹。

3-6-3 湖口斷層系統特徵地震模式

湖口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 3-6.9~ 圖 3-6.10 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 3-6.8 之湖口斷層邏輯樹可得到 72 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-6.11 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，6.7 次之；破裂模式 B 以規模 6.8 之權重最高，7.0 次之。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-6.12 為 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布，2 種破裂模式在地震復發間隔時間 100~200 年間均有較高之權重。

將 2 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-6.13（a）之湖口斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-6.13（b）之湖口斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

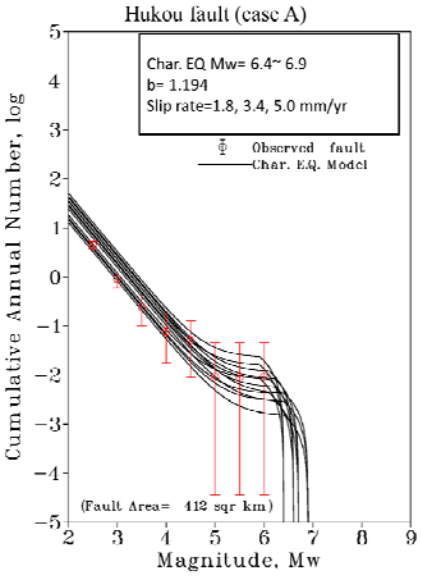


圖 3-6.9：A 事件特徵地震模式。

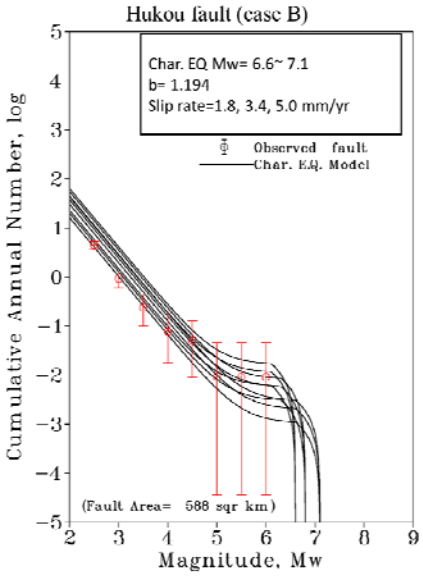


圖 3-6.10：B 事件特徵地震模式。

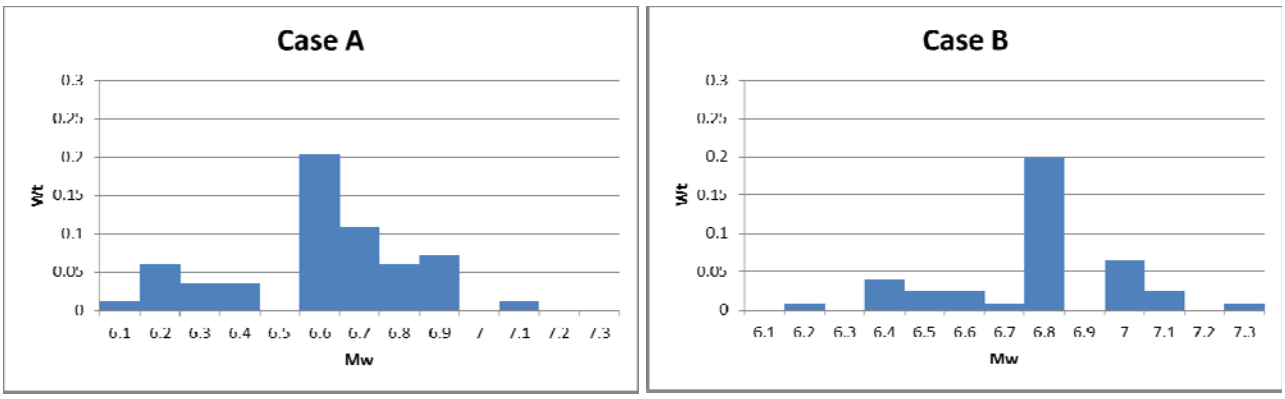


圖 3-6.11：湖口斷層 2 種破裂事件之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

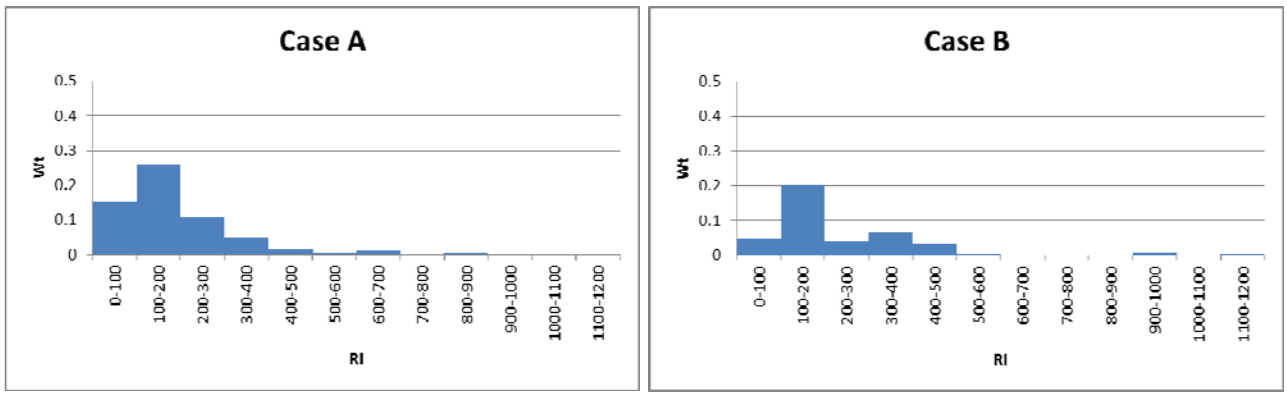


圖 3-6.12：湖口斷層 2 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

（a）　　（b）

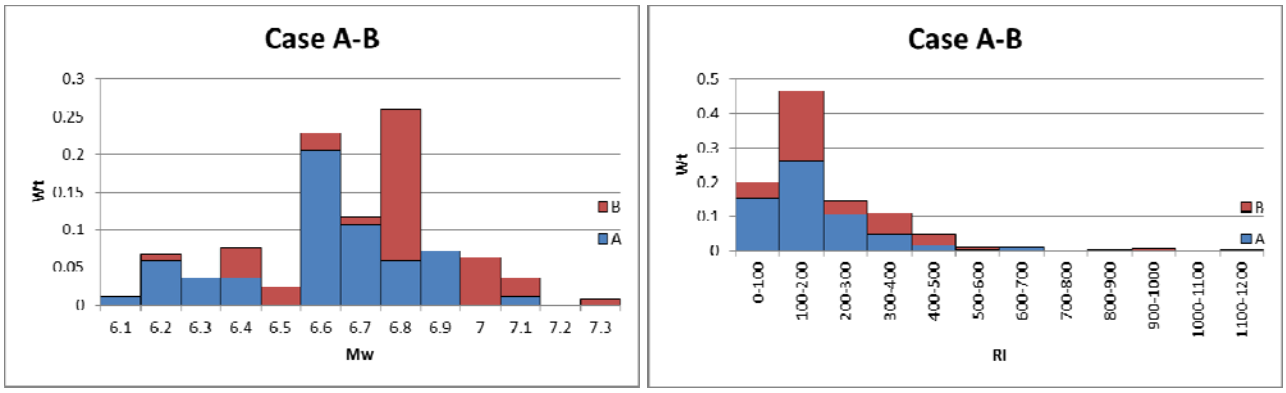


圖 3-6.13：（a）湖口斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）湖口斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-6-4 湖口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 模式估算湖口斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，湖口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 3-6.4 為湖口斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2014 年為基準，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.1~7.3 之機率為 19.6%、29.8%及 48.7%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 13.5%、21.0%及 35.5%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 1.1%、1.8%及 3.2%。

表 3-6.4：湖口斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_W）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
6.1 ≦ M ≦7.3	19.6%	29.8%	48.7%
M ≧ 6.5	13.5%	21.0%	35.5%
M ≧ 7.0	1.1%	1.8%	3.2%

3-7 山腳斷層

3-7-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：

根據地調所 2007 年出版之特刊第十九號「臺灣北部的活動斷層」(林啟文等，2007)，山腳斷層可分為南、北兩段。南段自臺北縣樹林向北延伸至台北市北投區，長約 13 公里；北段由北投向北延伸至臺北縣金山，長約 21 公里，斷層線跡位置如圖 3-7.1。另外，圖 3-7.2 為大屯山地區空載 LiDAR 掃描之 DTM，可得知山腳斷層確實有延伸至大屯火山區，但斷斷續續呈雁行排列(詹瑜璋等，2005)，可作為分段之依據，張國禎等人(2011)經由 LiDAR DTM 資料判讀關渡至金山沿線地區，得到較為確定的斷層線分布（圖 3-7.3）。

本計畫認為大屯火山是好的分段點，從歷史文獻記載中，1693 年的地震似乎未從臺北破裂到金山地區，1867 年的地震也未從金山外海及金山地區破裂到臺北，也顯示了分段破裂的行為。本計畫將大屯火山區中斷層線形呈現雁形排列及明顯跳階處作為分段點，即圖 3-7.3 中竹子湖地區。

北段延伸部分，王天楷等（2007）針對臺灣東北海域進行了密集之震測施測，如圖 3-7.4 所示。圖中顯示山腳斷層有往外海延伸之可能性。中興公司（2012）針對臺灣東北部海域之多音束水深調查獲得海底地形，並描繪出構造線形可能之位置，如圖 3-7.5 所示，認為山腳斷層往海外可能延伸 40 公里之長度。

南段延伸部分，柑園橋位於山腳斷層之南邊，其位置如圖 3-7.6（A）所示，在柑園橋之上游 500 公尺處之河床出露為岩盤(圖 3-7.6(B))，而在柑園橋下游則出露近代之礫石層(圖 3-7.6（C))，根據此處岩性的變化推斷山腳斷層南段延伸部分可能通過柑園橋附近，造成柑園橋下游岩盤之陷落。本計畫推估山腳斷層南段延伸部分應與臺北斷層相接，如圖 3-7.6(A)所示，延伸長度約 9 公里，山腳斷層南段長度則為 30 公里。

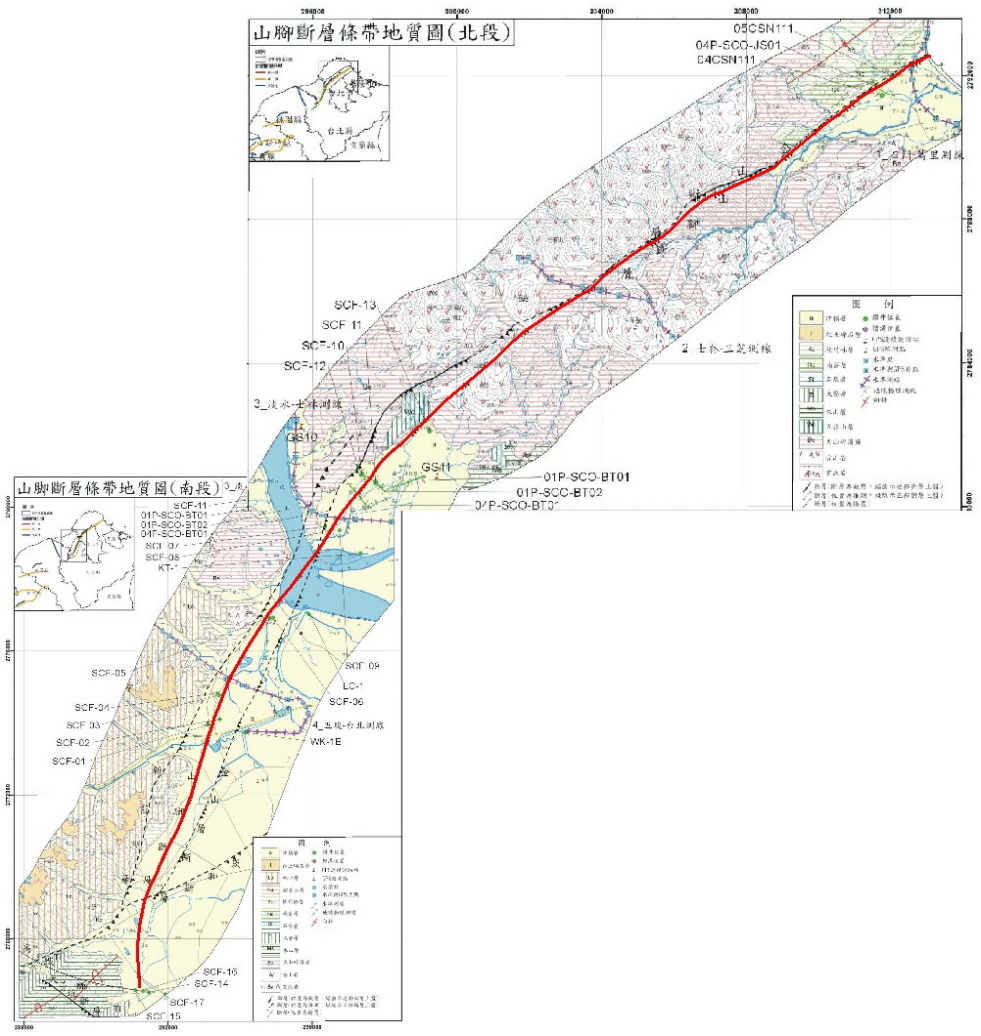


圖 3-7.1：山腳斷層條帶地質圖（林啟文等，2007）。

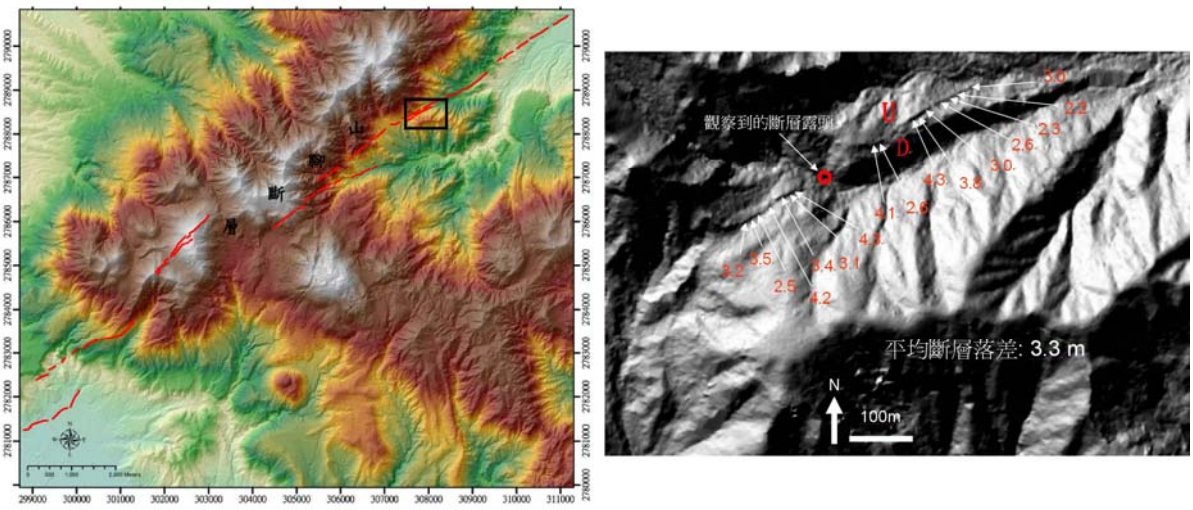


圖 3-7.2：大屯山地區之 LiDAR DTM，觀察之線形呈現雁行排列，北段觀察到之斷層線形，平均落差為 3.3 m（詹瑜璋等，2005）。

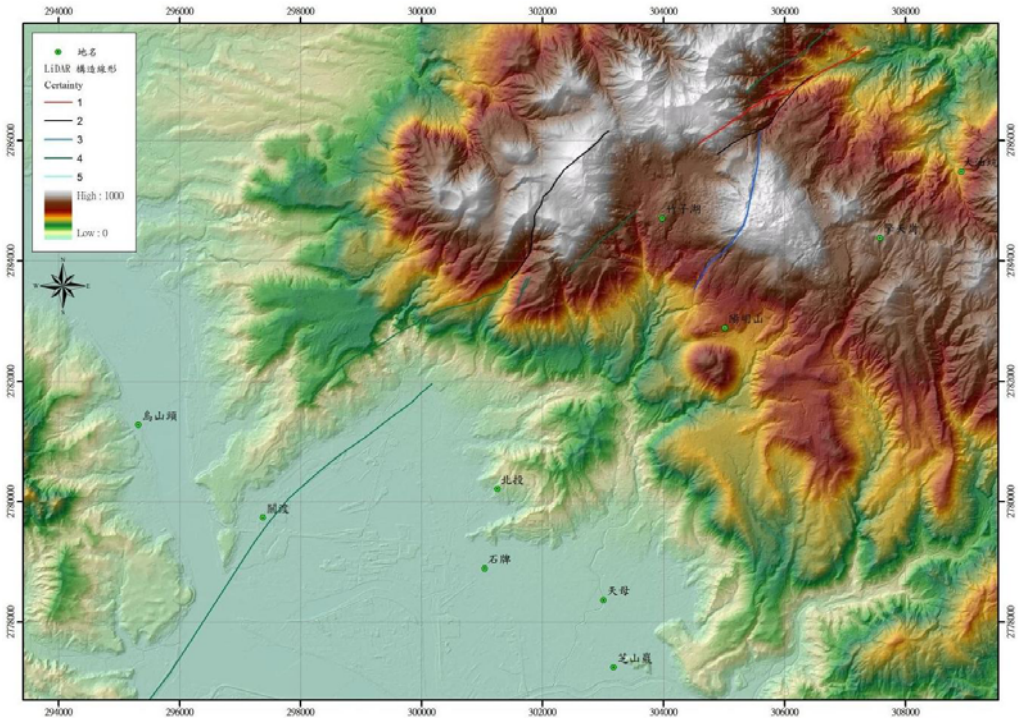


圖 3-7.3：大屯山地區之 LiDAR DTM 及構造地形分析及判釋（張國楨等，2011）。

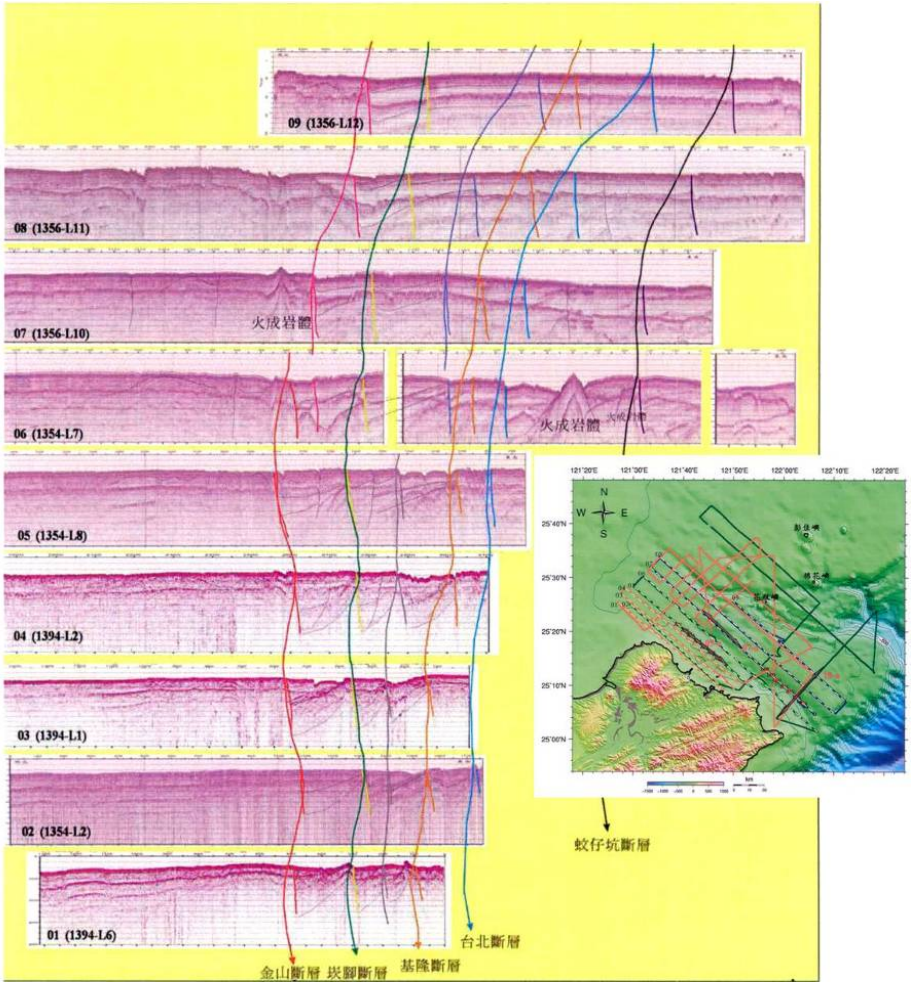


圖 3-7.4：臺灣東北部海域震測分布及震測剖面斷層延伸位置對比圖（王天楷等，2007）。

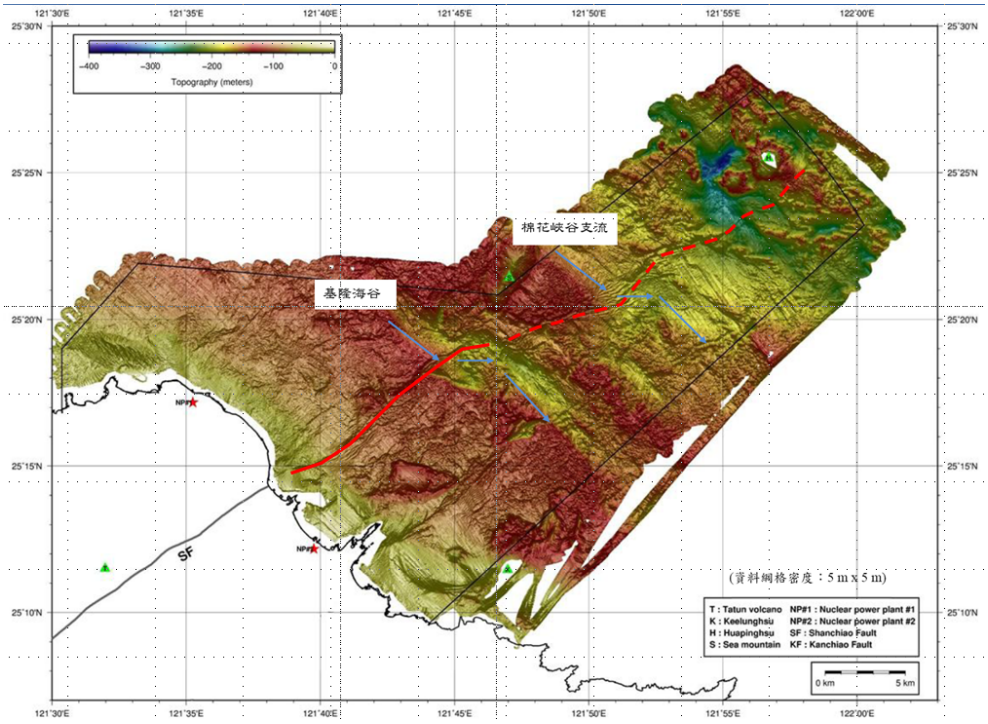
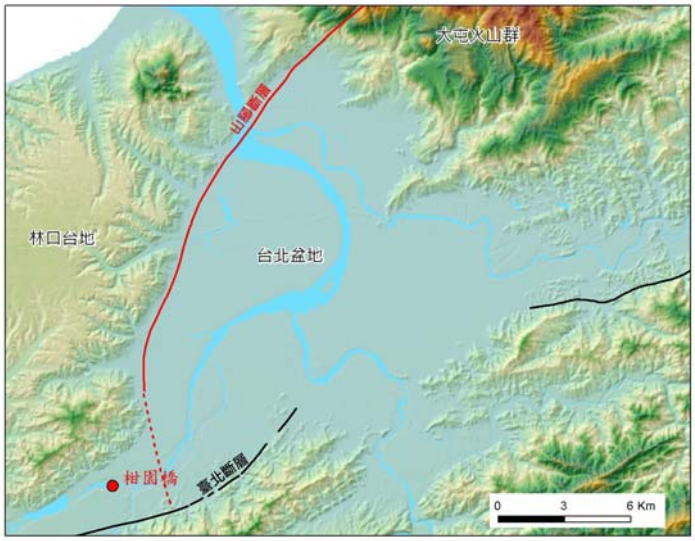


圖 3-7.5：北部海域多音束水深調查-海底地形光影圖（中興公司，2012）。

（A）



（B）



（C）



圖 3-7.6：（A）柑園橋位置及山腳斷層南段延伸推估（B）柑園橋上游照片（C）柑園橋下游照片（中興公司，2012）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：本計畫整理之斷層幾何相關研究資料整理於表 3-7.1。彙整以上之參數，本計畫提出山腳斷層之幾何參數，在傾角上可能為 50 到 80 度；深度 10~15 公里，詳細的權重分配將於下一節中詳述之。

表 3-7.1：山腳斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

作者	方法	傾角	深度
劉桓吉等，2000；蘇泰維等，2003	臺北盆地鑽井剖面	高角度	
蕭力元等，1998；王天愷等，2007	海域震測剖面	高角度	
石瑞銓，2003	關渡平原的淺層震測	高角度	
簡志宇，2008	五股蘆洲地區震測剖面	50-60	
陳致同等，2012	根據景美礫石層頂部深度變化模擬解析山腳斷層之幾何形貌	0-3 km：70~85 度 3-8 km：15 度 （9km 以下:60 度）	
中興公司，2012	金山地區鑽井剖面	82	
黃柏壽等，2007	微震深度分布		15 公里以內

3. 斷層機制：由位於臺北盆地內之成子寮剖面排鑽（劉桓吉等，2000；蘇泰維等，2003）顯示，山腳斷層東側之盆地區基盤明顯較深，如圖 3-7.7，顯然是由於山腳斷層之陷落而造成，屬於東傾之正斷層。在其它跨山腳斷層之排鑽均有發現類似東側基盤明顯下降的情形，如泰山、關渡、五股及樹林等剖面。

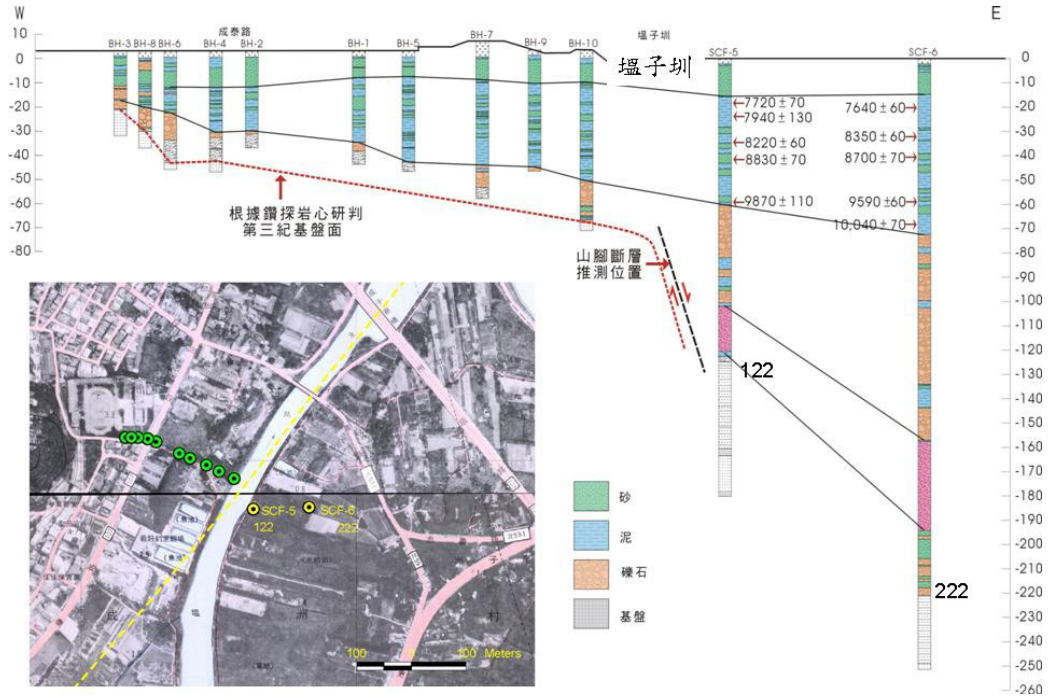


圖 3-7.7：臺北盆地的地下剖面，成子寮剖面（劉桓吉等，2000；蘇泰維等，2003）。

4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-7.3。
5. 長期滑移速率：長期滑移速率相關研究資料彙整於表 3-7.2，方法說明參閱參數表表 3-7.3。

表 3-7.2：山腳斷層長期滑移速率相關文獻。

區域	垂直滑移速率 (mm/yr)	滑移速率 (傾角 65 度)(mm/yr)	資料	參考文獻
南段	1.1~2.4	1.2~2.6 (9 萬年)	五股 1 號井	Wei et al., 1998
	1.2~2.1	1.3~2.3 (22 萬年)	五股 1 號井板橋層	
	0.69~1.8	0.8~2.0 (1.1 萬年)	SCF-1, 2, 5, 6, 14, 15, 16, 17	Huang et al., 2007
	1.2~1.5	1.3~1.7 (1.1 萬年)	蘆洲 1 號，五股 1 號	陳文山等，2008a
	1.3~2.3	1.4~2.5 (2 萬年)	SCF-1， SCF-2，五股 1 號	Chen et al., 2010
北段	0.1±0.61	0.1±0.61（約 9 千年）	LNB-3 號井定年	中興公司，2012
	0.0165~0.165	0.02~0.17 (2~20 萬年)	大屯火山地形崖除以火山活動年代	Song et al. ,2000 Chen and Lin, 2002 詹瑜璋等，2005

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，並於表中加入徐澔德（J. Bruce H. Shyu et al., 2005）及王錦華（Jeen-Hwa Wang, 2008）評估之結果做為對照參考。本文提到之規模均為地震矩規模。
7. 最近一次活動時間：目前並無記錄到和山腳斷層活動有關之大規模地震紀錄，也無槽溝開挖之古地震資料，僅能從鑽探資料或歷史文獻中推測之。根據黃韶怡（Huang et.al., 2007）分析地調所鑽井的結果，得知臺北盆地內最近一次活動時間約在 8400~8600 年前。歷史記載則根據郁永河（1697）所著『裨海記遊』中提到，臺北盆地於 1694 年由於發生地震而陷落，形成「康熙臺北湖」。林朝棨（1957）認為該次地震地面陷落約 5 公尺，因此推斷該次地震為山腳斷層最近一次之活動。然而李錦發等（1999）考證康熙臺北湖的淹沒範圍與文獻資料，無法確定與山腳斷層有關。徐明同（1983）根據淡水廳志等文獻，認為 1867 年 12 月 18 日臺北與基隆地區曾有地震事件，鄭世楠（2013）認為 1867 年發生於臺灣北部之海嘯事件是由基隆外海地震引發。游能悌等（2014）利用鑽井岩芯進行金山平原地層與沈積相分析，各鑽孔高程在海拔 2-10 公尺之間，距海岸 1.5 公里以內。依據這些初步的分析結果顯示在海口附近，石英砂層能反映海灘與砂丘的物源，塊狀產狀反映快速堆積過程，此石英砂層可能與 1867 年海嘯事件有關，值得進一步分析釐清。

彙整前人對於山腳斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-7.3 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 3-7.3：山腳斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
山腳斷層	斷層分段與破裂事件	A 整段、B 北段、C 南段	地形判釋、野外地質調查、地物探勘	丹桂之助，1939；林朝棨，1957；王執明等，1978；林朝宗，2005；林啟文，2007；中興公司，2012
	長度(km)	A：83(海域 40) B：53(海域 40) C：30	海上震測反射剖面	王天愷等，2007
			多音束地形推測	中興公司，2012
			LiDAR DTM 判釋、野外地質調查、根據地表線形跳階現象分段	張國禎等，2011；本計畫推估
	寬度(km)	13.8	深度/sin 傾角 （以深度 12.5 公里，傾角 65 度計算）	
	破裂深度(km)	15 公里	臺北地區地震深度分布剖面	黃柏壽等，2007
	面積 (km^2)	A:1145、B：731、C：414	長度×深度/sin(傾角) (假設傾角 65 度，深度 12.5 公里計算)	
	走向	北段：N60E 南段：N30E	地形、航照判釋、地震地表破裂判釋	林啟文等，2000 ；中興公司，2012
	傾斜角度 (度)	高角度	臺北盆地鑽井剖面	劉桓吉等，2000；蘇泰維等，2003
		高角度	海域震測剖面	蕭力元等，1998；王天愷等，2007
		高角度	關渡平原的淺層震測	石瑞銓，2003
		50-60	五股蘆洲地區震測剖面	簡志宇，2008
		0-3 km：70~85 度 3-8 km：15 度 （9km 以下：60 度）	根據景美礫石層頂部深度變化模擬解析山腳斷層之幾何形貌	陳致同等，2012
		82	金山地區鑽井剖面	中興公司，2012
	斷層機制	正斷層	1.跨山腳斷層鑽井資料 2.遙測地形判釋	林朝棨，1957；王執明等，1978；林啟文等，2000；林朝宗，2005 ；詹瑜璋等，2005；詹瑜璋等，2006；饒瑞鈞等，2006。

	短期滑移速率（mm/yr）	北段	平行斷層走向 1.1(左移) 垂直斷層走向 3.1(壓縮) 抬升率 5.5	GPS2002~2006 之速度場分析	饒瑞鈞等，2006
		南段	平行斷層走向 3.8(左移) 垂直斷層走向 0.1(壓縮) 沉陷率 8.5		
			平行斷層走向差異不大 垂直斷層走向 0~-4(伸張)	GPS2004~2010 之速度場分析	饒瑞鈞等，2010
	長期滑移速率（mm/yr）	南段（垂直滑移速率下陷量）	1.2~2.1（過去 22 萬年） 1.1~2.4 （過去 9 萬年）	分析五股 1 號井板橋層定年及古海水面推估	Wei et al., 1998
			0.69~1.8（過去 1.1 萬年）	分析山腳斷層兩側的鑽井岩芯紀錄與定年資料	Huang et.al., 2007
			1.2~1.5 （過去 1.1 萬年內）	分析臺北盆地內鑽井岩芯紀錄與定年資料	陳文山等，2008a
			1.3~2.3(主斷層段)	分析五股剖面的鑽井岩芯紀錄與定年資料	Chen et al., 2010
		北段（垂直滑移速率下陷量）	0.1±0.61	金山沖積平原鑽井定年及古海水面推估	中興公司，2012
			0.0165~0.165	斷層線形崖平均落差為 3.3 公尺/大屯火山群最後一次噴發 2~20 萬年	Song et al. ,2000 Chen and Lin, 2002 詹瑜璋等，2005
	滑移虧損率 (slip deficit rate) (mm/yr)	1.8±1.7		三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網在 2002-2012 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)	2.3~4.5 公尺的垂直位移量		分析山腳斷層兩側的鑽井岩芯紀錄與定年資料。	Huang et.al., 2007
	最大可能地震規模(M_W)	7.0		估計 1694 年地震	徐明同，1983
		山腳斷層	6.6	M= (4.86± 0.34)＋ (1.32± 0.26)× log(L)（正斷層） M= (5.00± 0.22)＋ (1.22± 0.16)× log(L)（逆斷層）	Wang, 2008
		金山斷層	6.7		
		山腳-金山斷層系統	7.0		
		只有臺北盆地西側	6.52	M_W =3.93+1.02 log A，面積 346.41 km^2	Shyu et al., 2005
		延伸至金山	6.88	M_W =3.93+1.02 log A，面積 779.42 km^2	

		整段 7.0	北段 6.9 南段 6.6	M_W =3.93+1.02 log A, σ=0.25	Wells and Coppersmith, 1994（正斷層）
		整段 7.1	北段 6.9 南段 6.6	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震重複週期(年)	整段 200-300 北段 1000-2000 南段 200-300		各破裂事件特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間（圖 3.7-14）	本計畫推估
	最近一次活動時間	北段：西元 1867 年(？)		根據淡水廳志等文獻，認為 1867 年 12 月 18 日臺北與基隆地區曾有地震事件	徐明同，1983
				1867 年發生於臺灣北部之海嘯事件是由基隆外海地震引發	鄭世楠等，2012
				利用鑽井岩芯進行金山平原地層與沈積相分析。初步的分析結果顯示在海口附近石英砂層可能與 1867 年海嘯事件有關	游能悌等，2014
		南段：西元 1694 年(？)		歷史文獻《裨海記遊》記載，康熙臺北湖之古地震事件	郁永河，1697；徐明同，1983

3-7-2 山腳斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估山腳斷層之破裂，可分為 3 種破裂事件來探討，A 為整段破裂，B 為北段破裂，C 為南段破裂，本計畫認為整段之破裂，比北段及南段之破裂可能性低，因此給予較低之權重，權重分配為 A（0.2）、B（0.4）、C（0.4）如圖 3-7.8 所示。

山腳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，本計畫認為傾角權重為 50 度（0.2）、65 度（0.6）、80 度（0.2），破裂深度權重為 10 公里（0.2）、12.5 公里（0.6）、15 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 3-7.4 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。

山腳斷層之滑移速率，上節中提到臺北盆地中主要是利用鑽井剖面計算層位落差，或是推估古沉積環境之高度及年代，計算地層垂直滑移速率，將垂直滑移速率以 65 度換算至斷層面之長期滑移速率，如表 3-7.2 所示，可得到長期滑移速率範圍，南段介於 0.8~2.6 mm/yr，本計畫設定南段參數及權重為 0.8（0.3）、1.7（0.4）、2.6（0.3）。北段根據火山區線崖與噴發年代推估，介於 0.02~0.17 mm/yr，本計畫取 0.1 mm/yr 做為下限值，中興公司（2012）鑽井最高約 0.7 mm/yr，作為本計畫之上限值，因此北段參數及權重設為 0.1(0.3)、0.4(0.4)、0.7(0.3)。整段 0.1(0.3)、1.3(0.4)、2.6(0.3)。

山腳斷層各節點權重的分配詳如圖 3-7.9 所示。

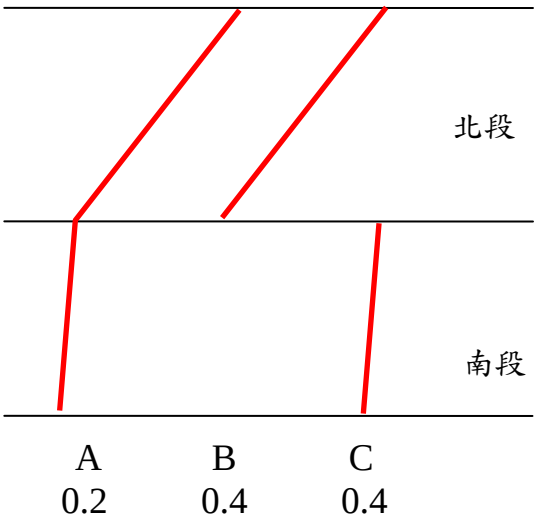


圖 3-7.8：山腳斷層之破裂模式及權重分配。

表 3-7.4：山腳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	83	12.5	13.8	65	1145	6.8	7.0	7.3	7.1
B	53	12.5	13.8	65	731	6.6	6.9	7.1	6.9
C	30	12.5	13.8	65	414	6.3	6.6	6.8	6.6
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

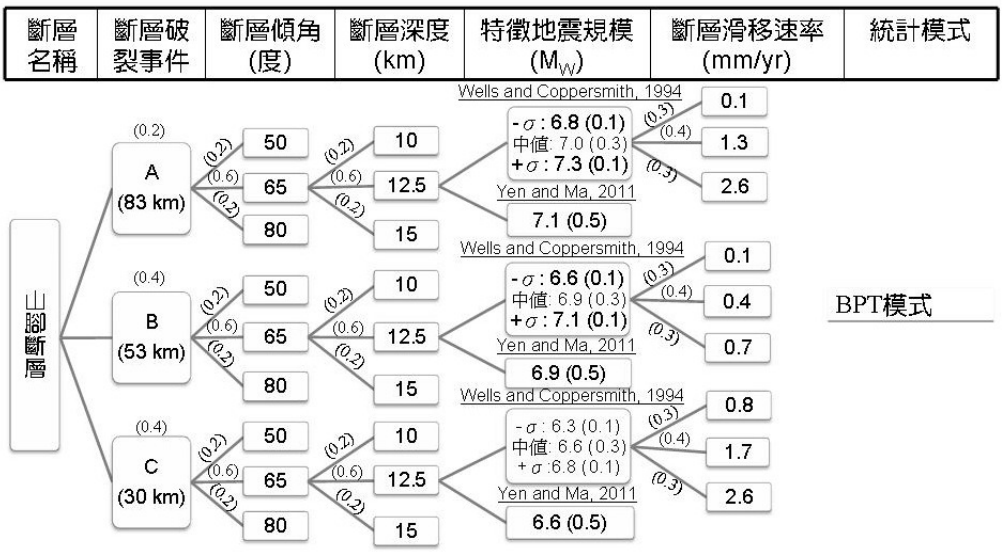


圖 3-7.9：山腳斷層邏輯樹。

3-7-3 山腳斷層系統特徵地震模式

山腳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 3-7.10~圖 3-7.12 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 3-7.9 之山腳斷層邏輯樹可得到 324 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-7.13 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 7.1 之權重最高；破裂模式 B 以規模 6.9 之權重最高；破裂模式 C 以規模 6.6 之權重最高。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-7.14 為 3 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 200~300 年間有較高之權重，破裂模式 B 在地震復發間隔時間 1000~2000 年間有較高之權重，破裂模式 C 在地震復發間隔時間 200~300 年間有較高之權重。

將三種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-7.15（a）之山腳斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-7.15（b）之山腳斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

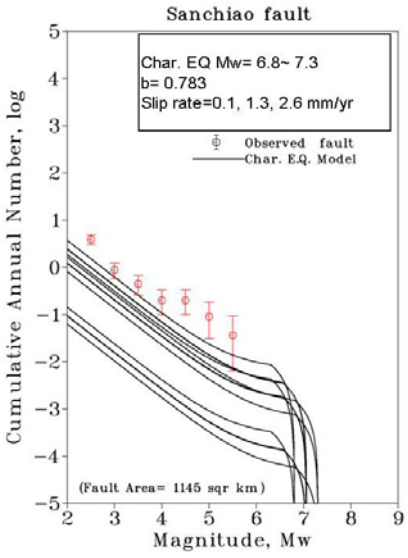


圖 3-7.10：A 事件特徵地震模式。

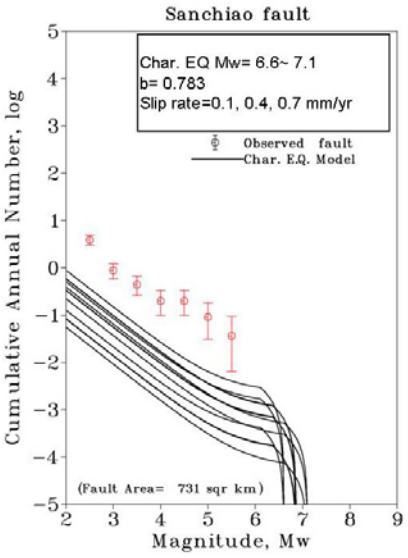


圖 3-7.11：B 事件特徵地震模式。

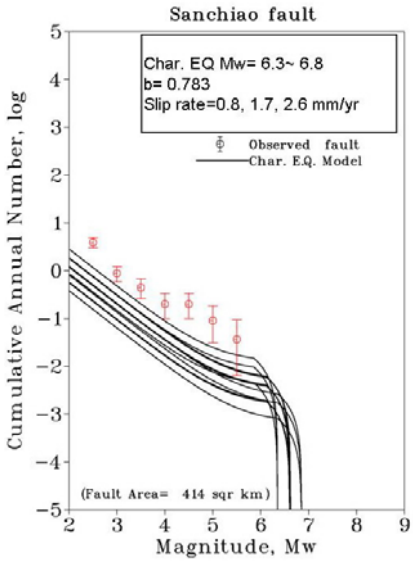


圖 3-7.12：C 事件特徵地震模式。

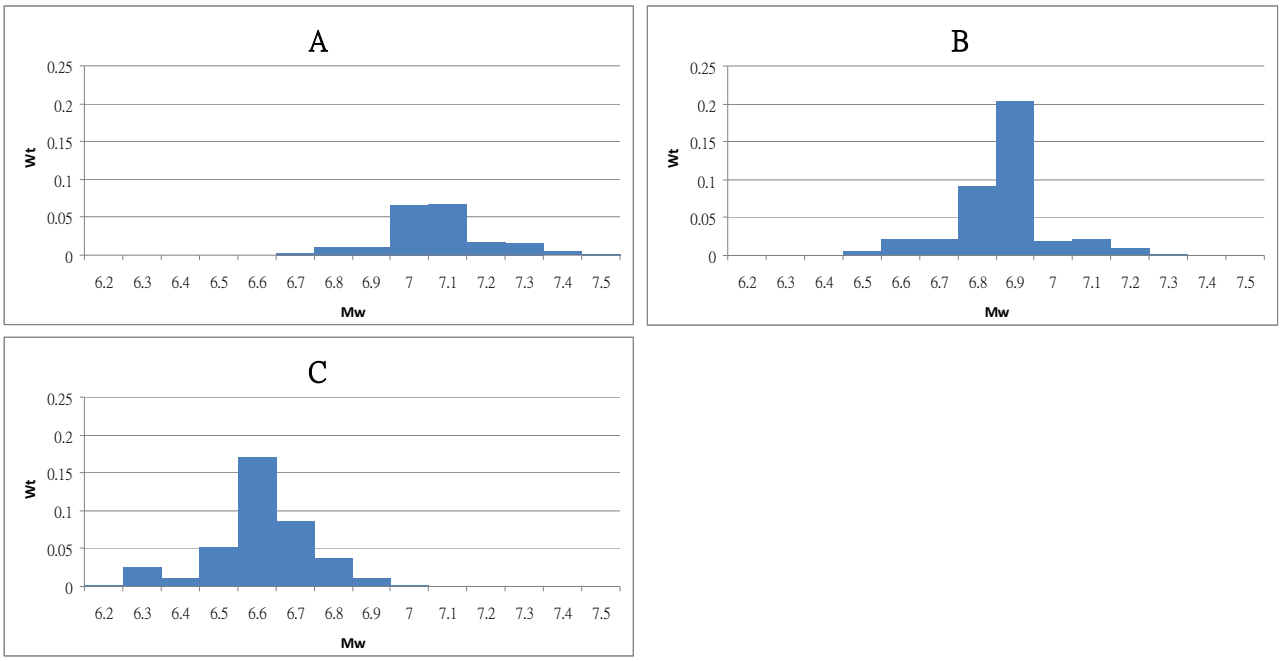


圖 3-7.13：山腳斷層 3 種破裂事件之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

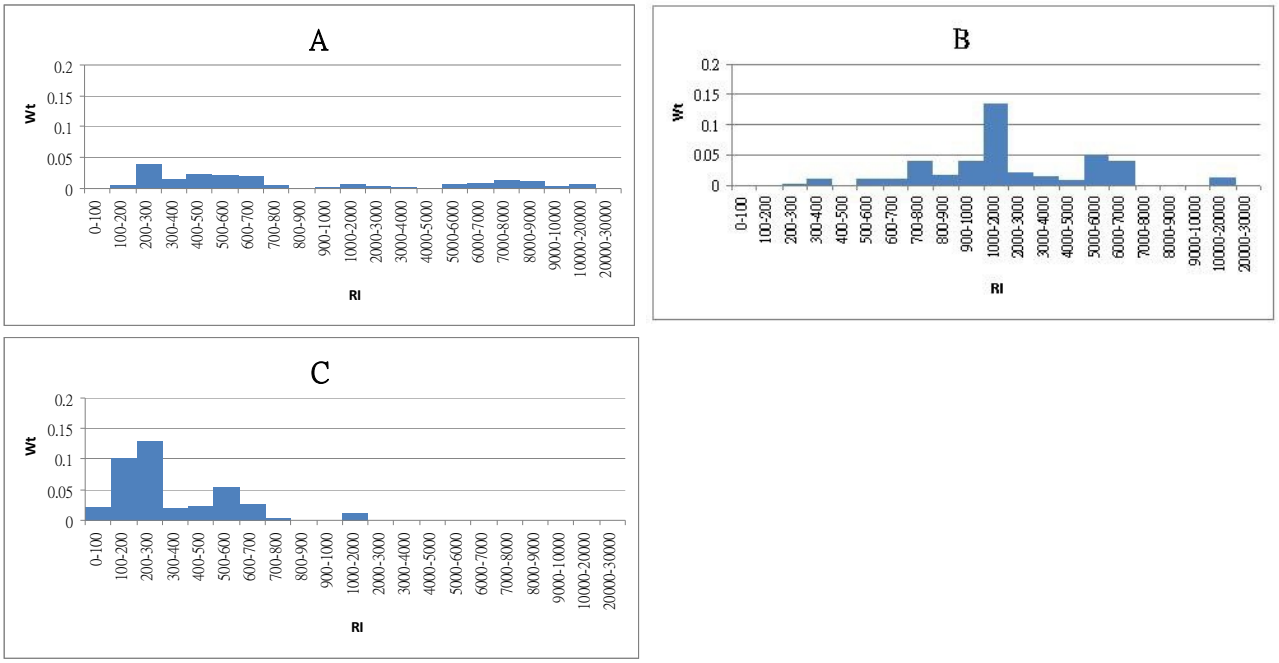
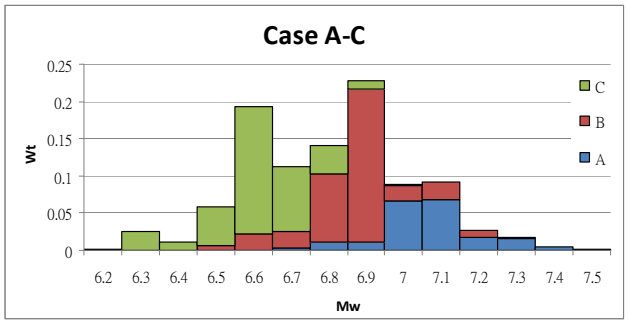


圖 3-7.14：山腳斷層 3 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

（a）



（b）

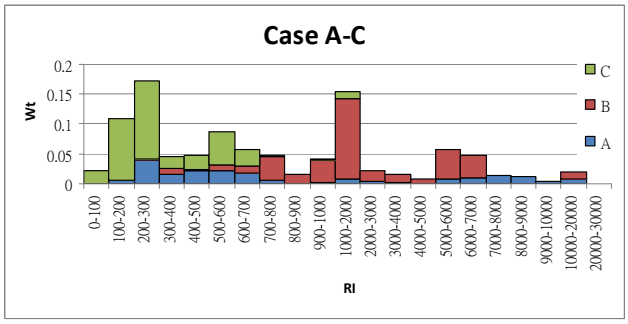


圖 3-7.15：（a）山腳斷層之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）山腳斷層之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-7-4 山腳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）估算山腳斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，根據歷史文獻，假設山腳斷層北段最後一次發生時間為西元 1867 年，南段為 1694 年，因此本計畫採用 BPT 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-7.5 為山腳斷層 BPT 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 6.2~7.5 之機率為 9.9%、15.0%及 24.6%；發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 8.1%、12.5%及 21.4%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 0.7%、1.1%及 2.4%。

表 3-7.5：山腳斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	BPT	BPT	BPT
6.2 ≦ M ≦7.5	9.9%	15.0%	24.6%
M ≧ 6.5	8.1%	12.5%	21.4%
M ≧ 7.0	0.7%	1.1%	2.4%

3-8 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3-8.1中。
2. 圖3-8.1~圖3-8.3除了展示臺灣活動斷層之分布外，同時標示了以西元2014年為基準之活動斷層未來30年、50年、100年發生地震矩規模6.5以上之機率，圖3-8.4~圖3-8.6則標示了以西元2014年為基準之活動斷層未來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. 本計畫在評估三義斷層之破裂，由於北段及南段的延伸與否可分為4種破裂事件來探討，A為中段破裂，B為北+中段破裂，C為中+南段破裂，D為北+中+南段破裂。三義斷層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6.4~7.4之機率為10.0%、15.8%及28.1%；發生地震矩規模6.5以上之機率為9.9%、15.6%及27.7%；發生地震矩規模7.0以上之機率為1.4%、2.2%及4.1%。
4. 鐵砧山斷層屬於大甲斷層的背衝斷層，不會有單獨破裂之可能性，且斷層長度僅13公里，不會造成大規模的地震，因此鐵砧山斷層不列入邏輯樹中。大甲、彰化斷層有同時破裂的可能性，必須整體考慮為大甲—彰化斷層系統。彰化斷層向南延伸段有兩種看法，一為與桐樹湖斷層相連，終止於古坑斷層；二為連接至竹山段。
5. 大甲—彰化斷層系統分段可分為北段（模式A）、南段（模式B、C、D）、整段（模式E、F、G），七種模式中，A為大甲斷層破裂，B為彰化斷層破裂，C為彰化+竹山段破裂，D為彰化+桐樹湖斷層破裂，E為大甲+彰化斷層破裂，F為大甲+彰化+竹山段破裂，G為大甲+彰化+桐樹湖斷層破裂。BPT模式評估之結果，以西元2014年為基準，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.2~7.6之機率為27.7%、39.9%及58.9%，發生地震矩規模6.5以上之機率為26.8%、38.6%及57.3%，發生地震矩規模7.0以上之機率為9.6%、14.5%及23.1%，發生地震矩規模7.5以上之機率為0.1%、0.1%及0.2%。
6. 獅潭斷層與屯子腳斷層為西元1935年新竹、台中烈震之地震斷層，需考慮兩條斷層為一個系統同時破裂的可能性，在邏輯樹中，破裂模式分為三種，分別為屯子腳斷層單獨破裂、獅潭斷層單獨破裂及獅潭-屯子腳系統。在評估屯子腳斷層之破裂，是以長度不確定性來區分破裂事件，分別為A主斷層段破裂（長度17公里），以及B主斷層段+延伸段破裂（長度40公里），獅潭斷層之破裂模式可簡化為三種斷層模型之長度，分別為（C）15公里、（D）25公里及（E）35公里，獅潭-屯子腳系統（F）則是獅潭斷層往南延伸達35公里及屯子腳斷層往東延伸達40公里。BPT模式評估之結果，以西元2014年為基準，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模5.9~7.2之機率為45.2%、58.6%及74.9%，發生地震矩規模6.5以上之機率為17.1%、23.6%及32.8%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.3%、0.5%及1.1%。
7. 在評估新城斷層之破裂模式，以頭前溪為界分為南段及北段，破裂模式共分為2種事件來探討，A為整段破裂，B為南段破裂。新城斷層最後一次發生時間為300年前左右，因此本計畫採用BPT模式進行評估。以西元2014年為基準，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.1~7.1之機率為28.1%、41.6%及63.9%，發生地震矩規模6.5以上之機率為15.3%、23.3%及37.6%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.1%、0.2%及0.4%。
8. 新竹斷層之破裂可能會連接至新城斷層北段，也有可能往西側外海延伸，破裂模式分為4種：A為中段破裂，B為中段破裂+東側延伸，C為海域延伸+中段破裂，D為海域延伸+中段破裂+東側延伸破裂，新竹斷層Poisson模式評估之結果，以西元2014年為基準，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.1~7.2之機率為18.4%、28.3%及47.3%；發生

地震矩規模6.5以上之機率為8.5%、13.4%及23.4%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.2%、0.3%及0.5%。

9. 在評估湖口斷層之破裂，可分為2種破裂事件來探討，A為湖口斷層（東段）單獨破裂，B為湖口斷層與西部延伸段同時破裂，湖口斷層Poisson模式評估之結果，以西元2014年為基準，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.1~7.3之機率為19.6%、29.8%及48.7%；未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為13.5%、21.0%及35.5%；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為1.1%、1.8%及3.2%。
10. 在評估山腳斷層之破裂，可分為3種破裂事件來探討，A為整段破裂，B為北段破裂，C為南段破裂。山腳斷層BPT模式評估之結果，以西元2014年為基準，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9.9%、15.0%及24.6%；發生地震矩規模6.5以上之機率為8.1%、12.5%及21.4%；發生地震矩規模7.0以上之機率為0.7%、1.1%及2.4%。

表 3-8.1：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) 15(0.2)	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		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)

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。

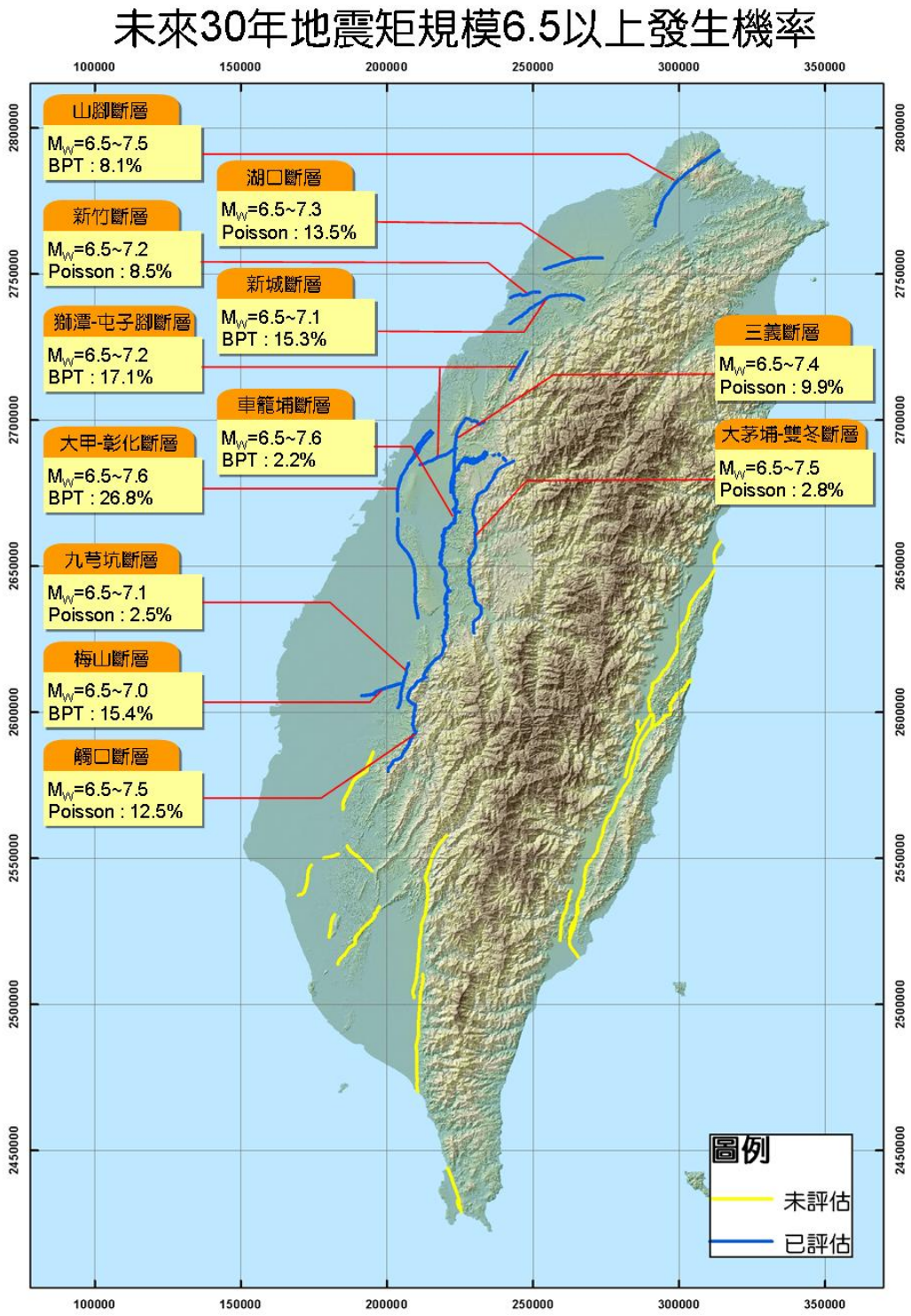


圖 3-8.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 6.5 以上之發生機率。

(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。

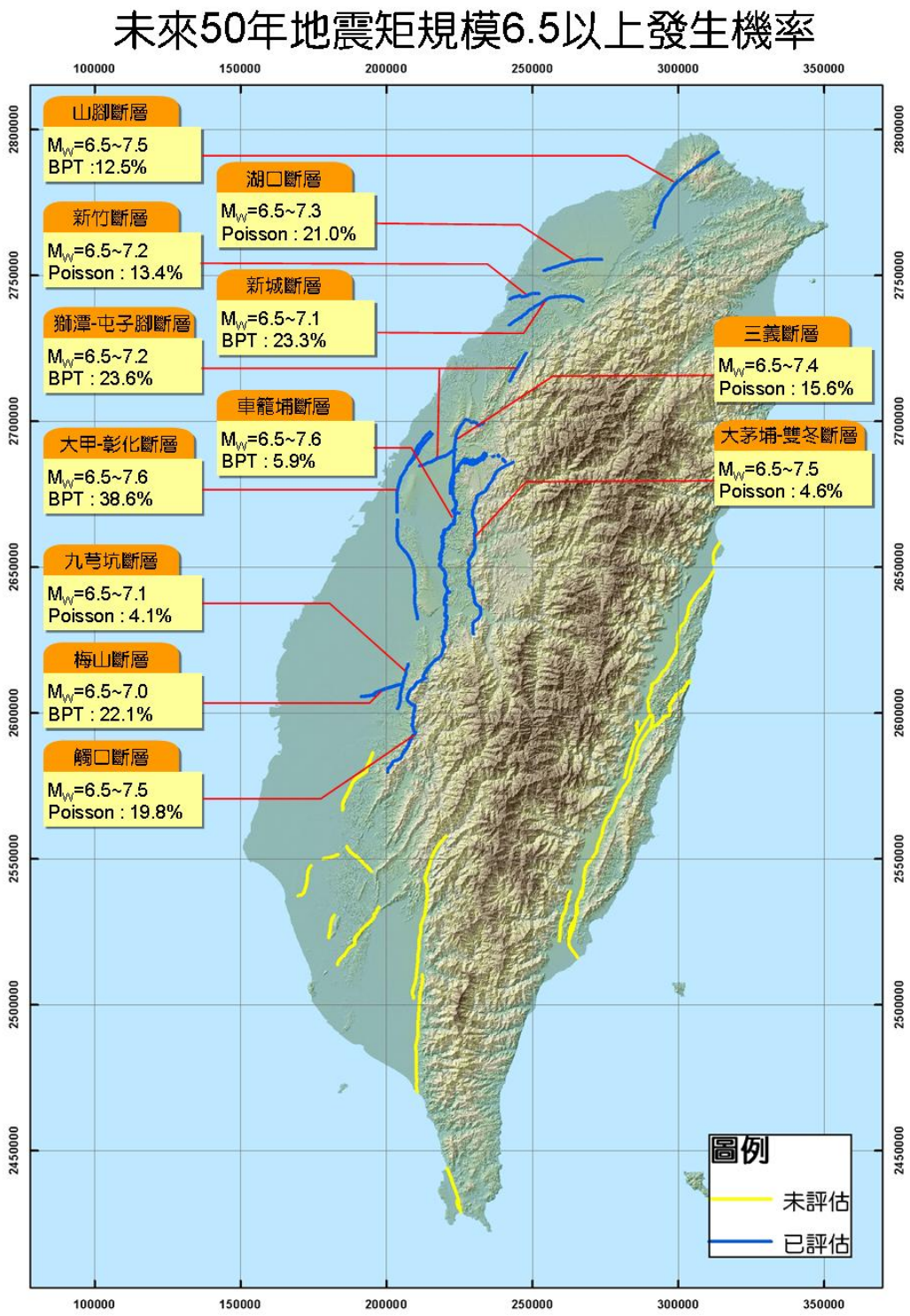


圖 3-8.2：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(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。

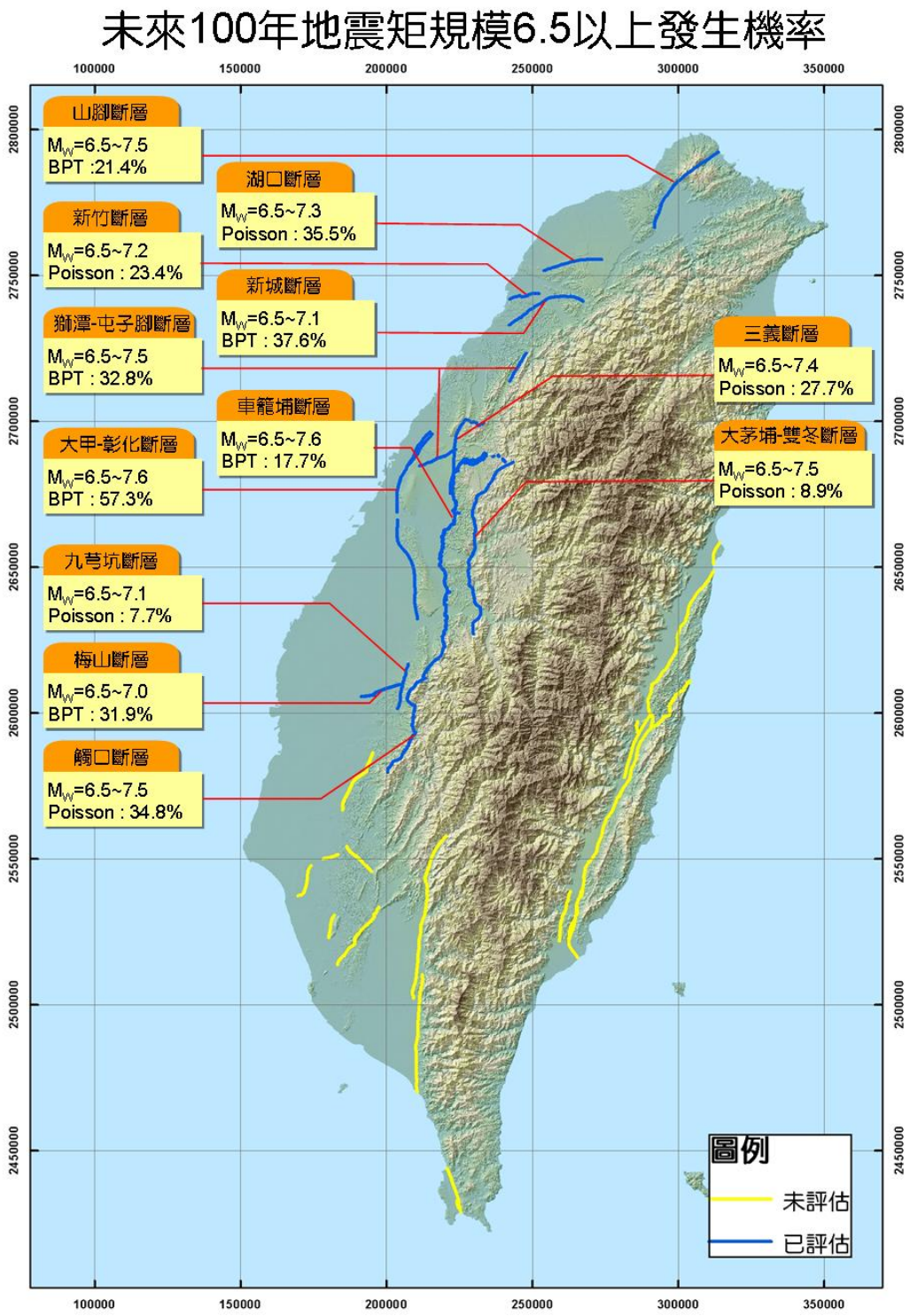


圖 3-8.3：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(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。

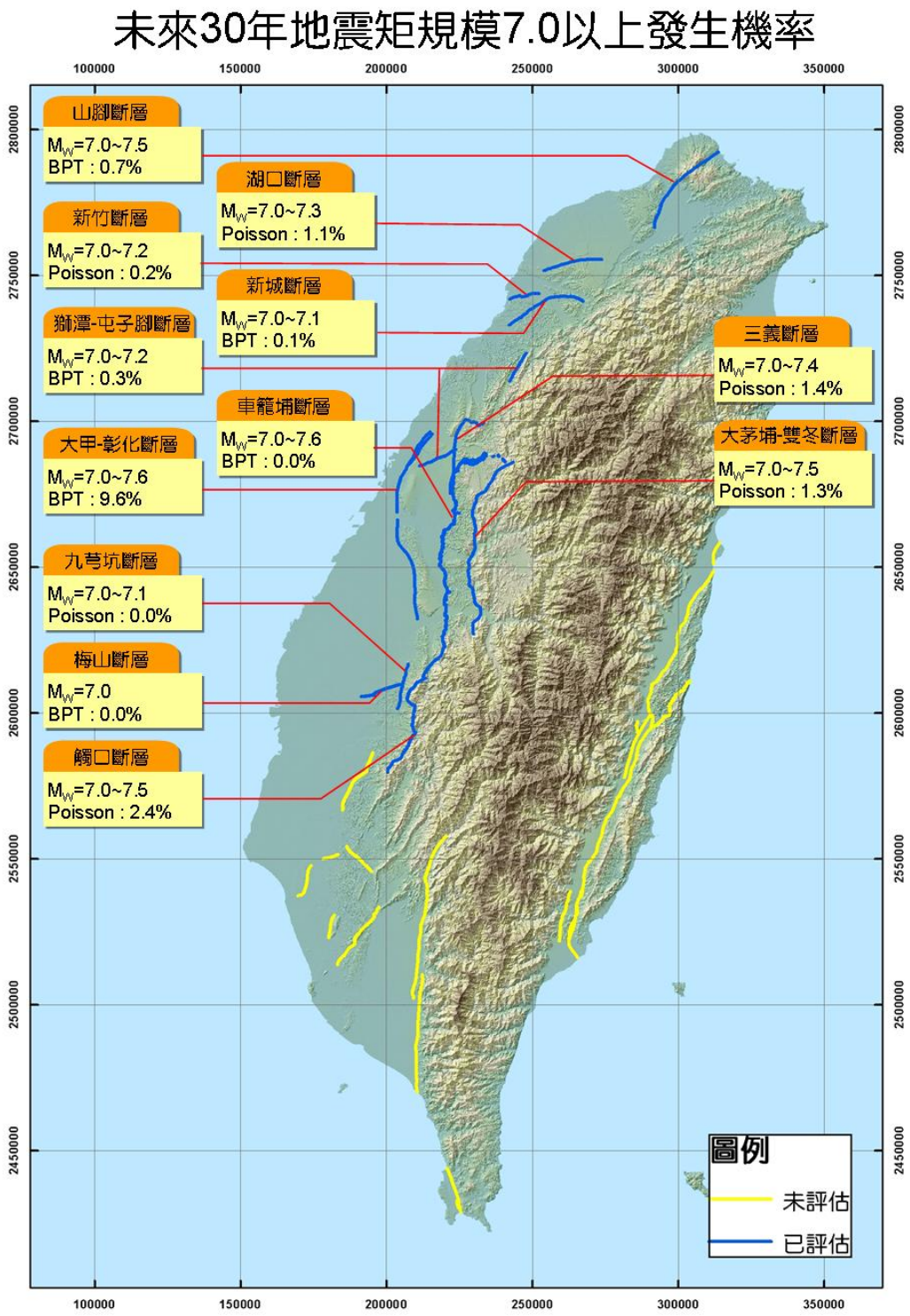


圖 3-8.4：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 7.0 以上之發生機率。

(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。

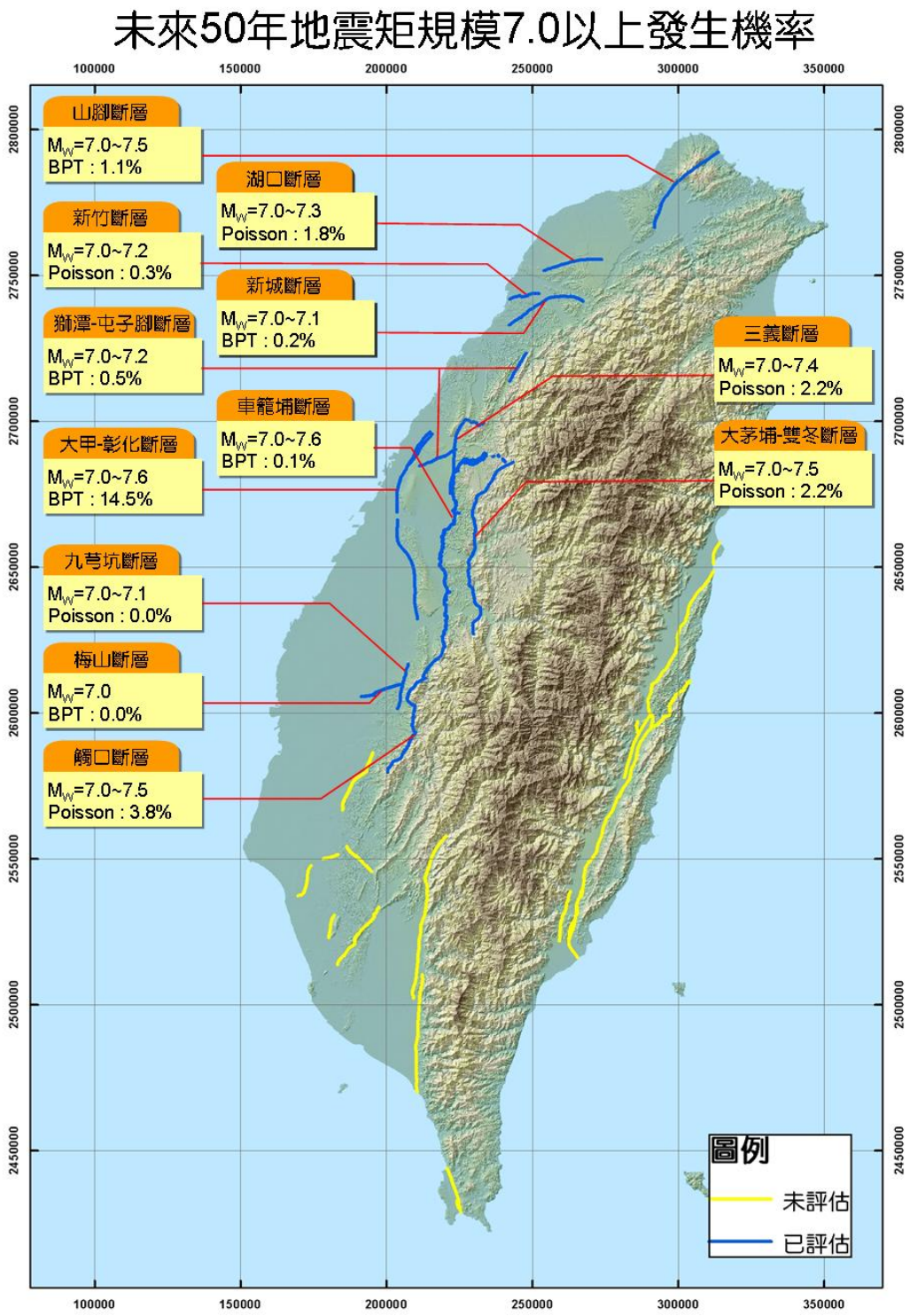


圖 3-8.5：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。

(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。

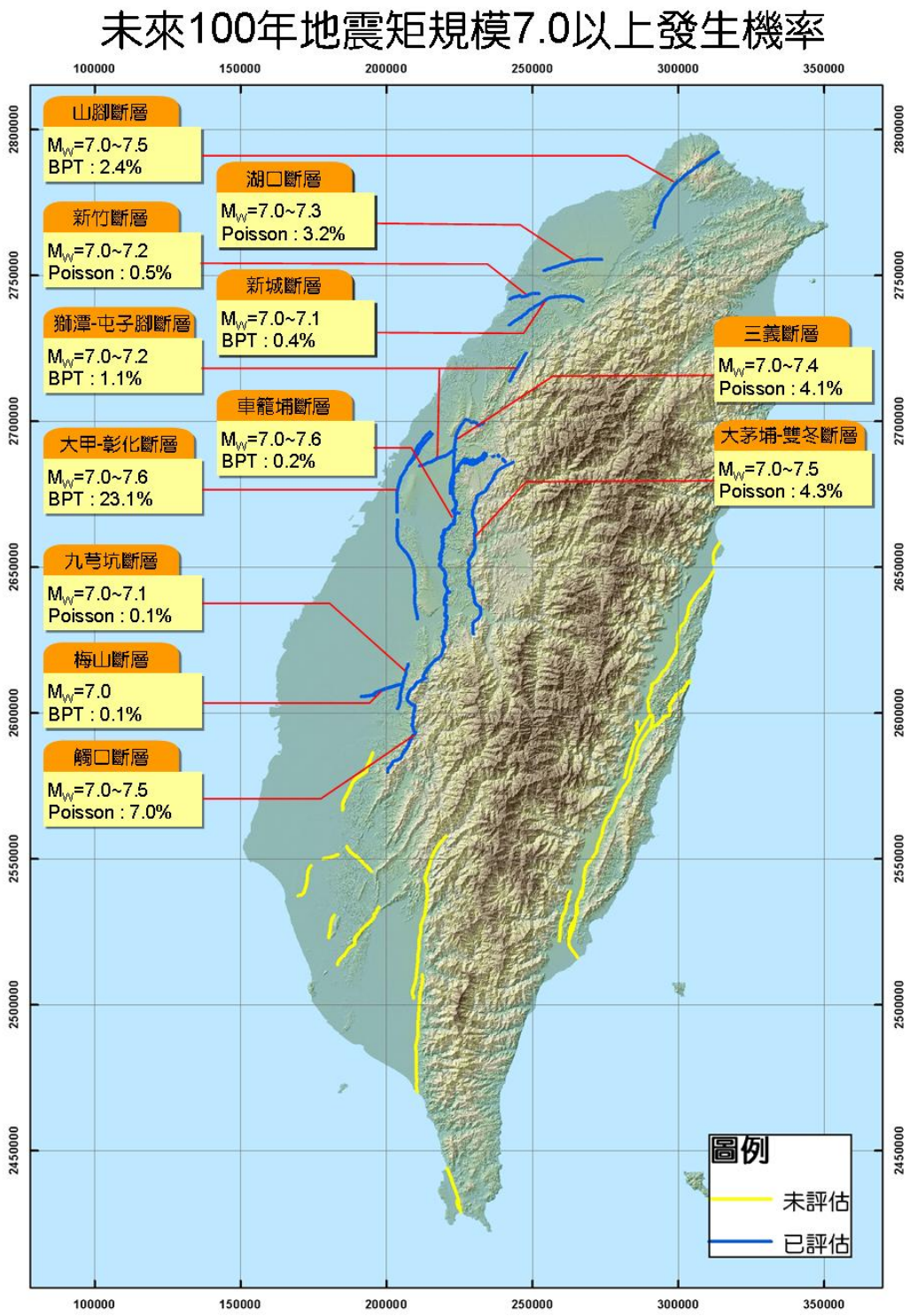


圖 3-8.6：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震矩規模 7.0 以上發生機率。

(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），大坪國小測站（BMMT）無地下水的觀測資料，瑞峰國小測站（LMMT）的地下水資料與其井下應變儀資料一樣，不太完全，新樂國小測站（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，梅花國小測站（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。

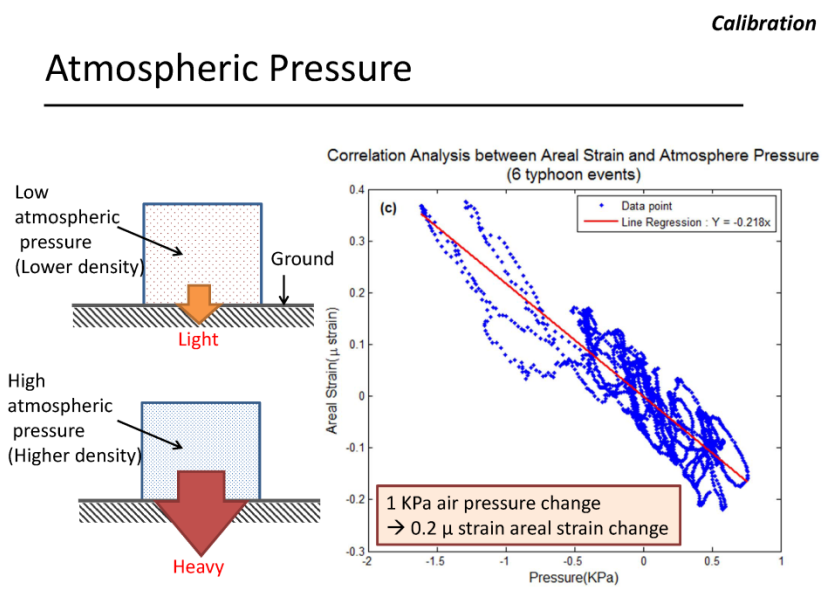
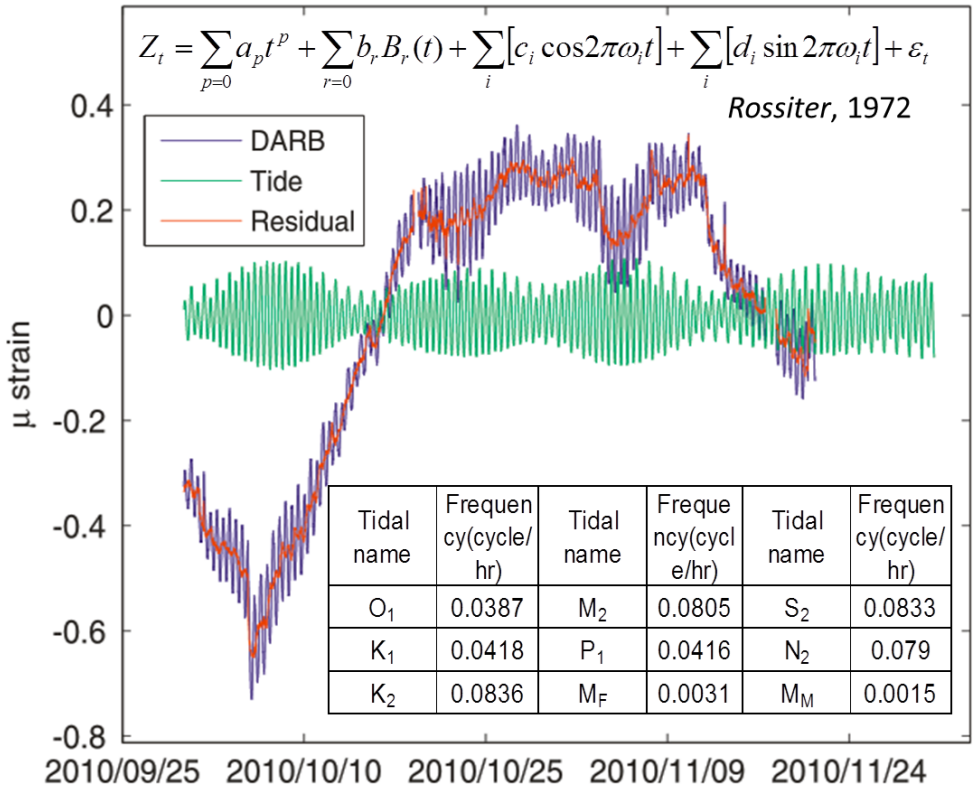


圖 4-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。氣壓的上升對應變儀面應變造成重荷而產生壓縮，因此氣壓的變化與面應變的變化是負相關。



Tidal name	Frequency(cycle/hr)	Tidal name	Frequency(cycle/hr)	Tidal name	Frequency(cycle/hr)
O_1	0.0387	M_2	0.0805	S_2	0.0833
K_1	0.0418	P_1	0.0416	N_2	0.079
K_2	0.0836	M_F	0.0031	M_M	0.0015

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、綠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。

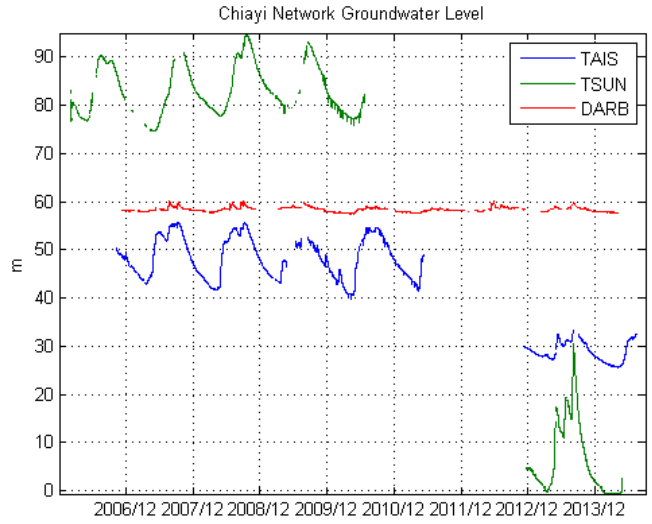


圖 4-1.3：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。

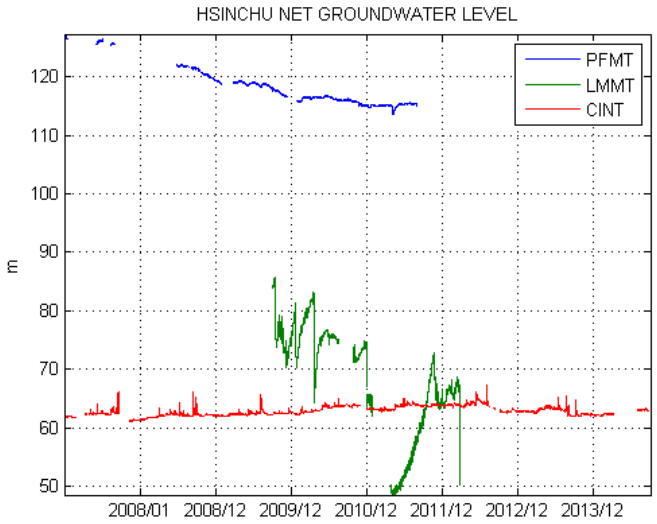


圖 4-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小測站（PFMT）地下水位持續下降。

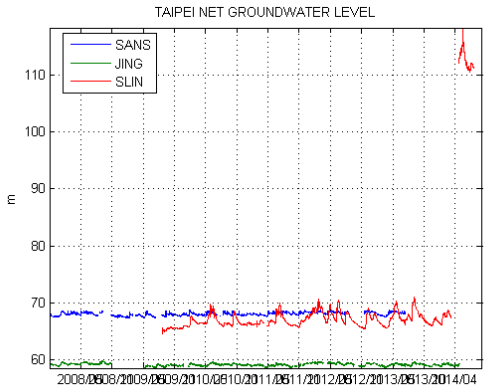


圖 4-1.5：臺北地區地下水各測站水位資料。

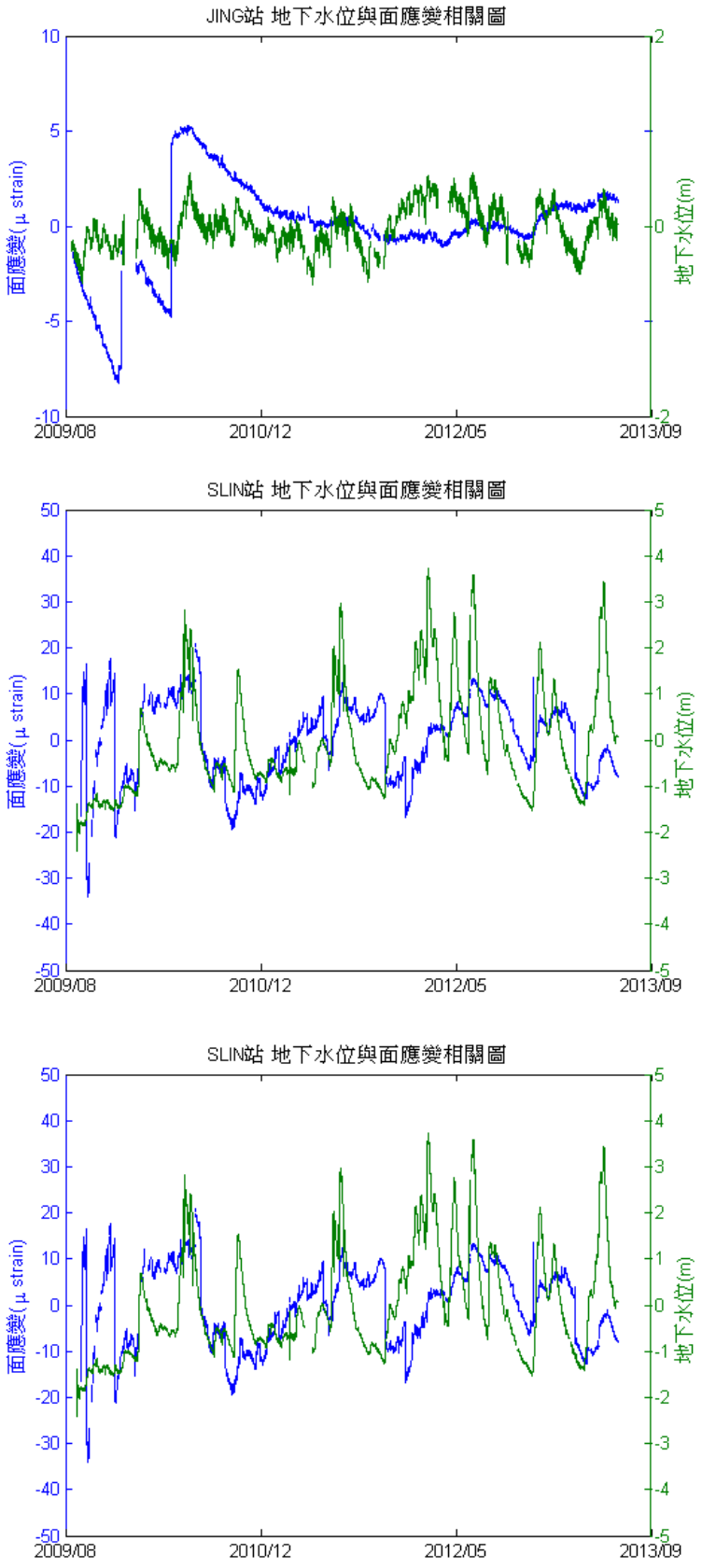


圖 4-1.6：臺北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。

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）、中興國小（TSUN）與太興國小（TAIS）三測站的地下水影響係數分別為：7.33、0.73 與 8.99（圖 4-1.7 至圖 4-1.9）。

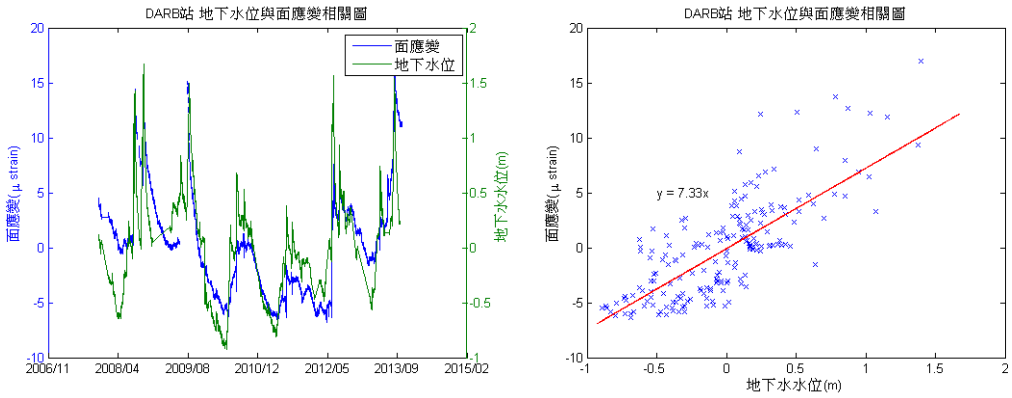


圖 4-1.7：嘉義網達邦測站（DARB）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

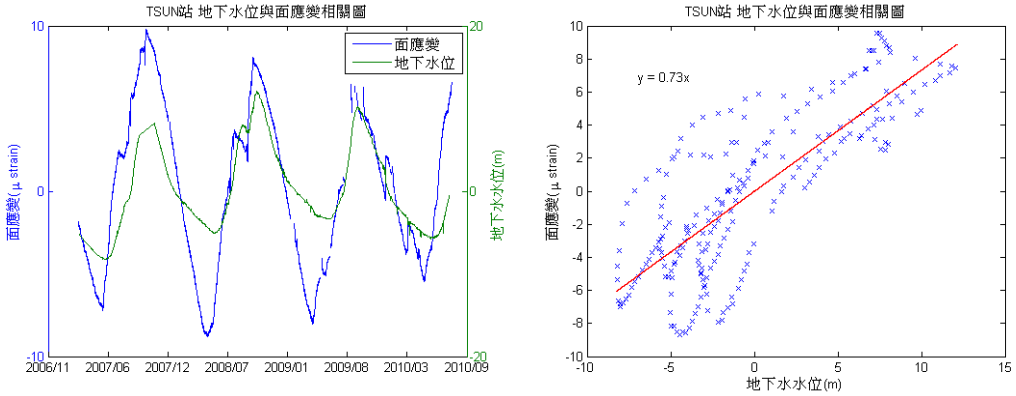


圖 4-1.8：嘉義網中興國小測站（TSUN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

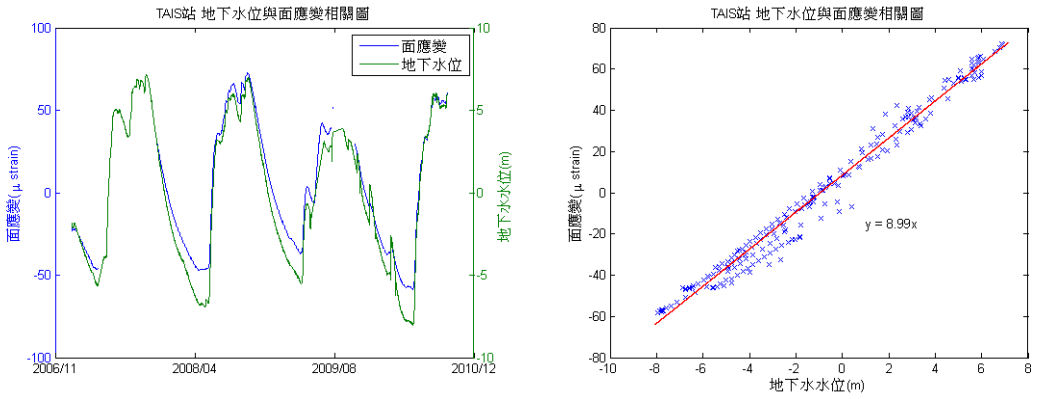


圖 4-1.9：嘉義網太興國小測站（TAIS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

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：2.32、6.14 與 3.40（圖 4-1.10 至圖 4-1.12）。

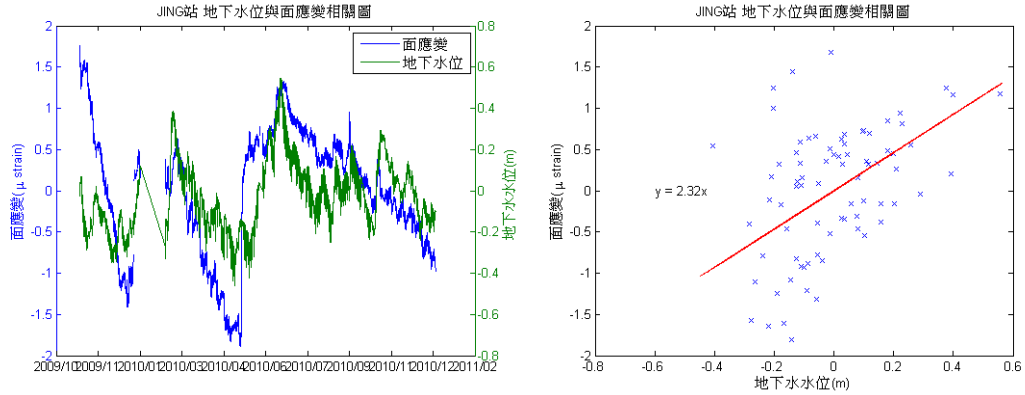


圖 4-1.10：臺北網錦和國小測站（JING）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

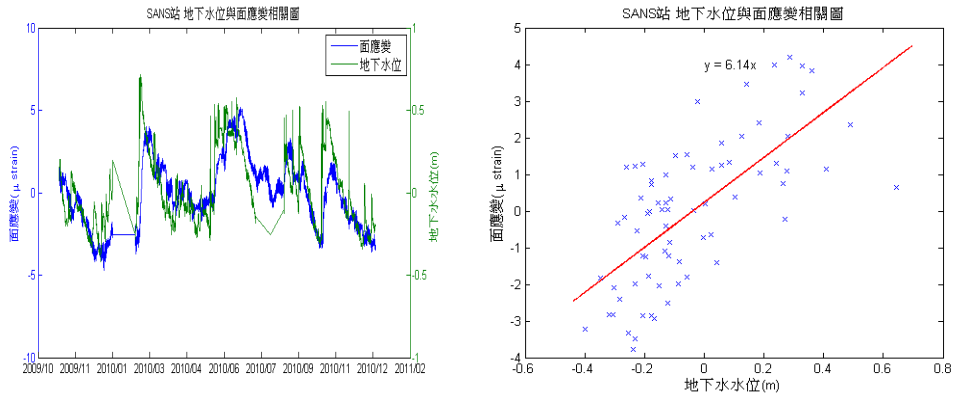


圖 4-1.11：臺北網明德中學測站（SANS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

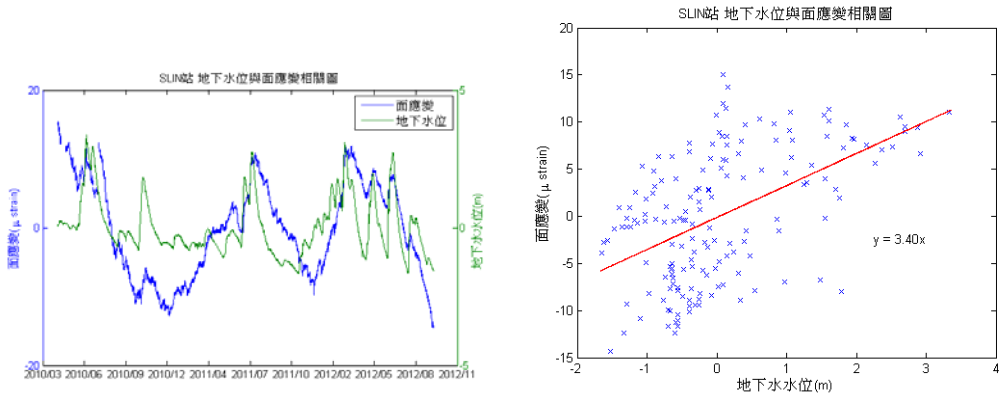


圖 4-1.12：臺北網樹林測站（SLIN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

（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：

$$Pxx=\frac{2}{n_d N\Delta t}\sum_{k=1}^{nd}\left|Xi(f_k)\right|^2 \quad k=0,1,2....,\frac{N}{2} \qquad \text{（式 4-1.2）}$$

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 40μHz 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 40μHz，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）。

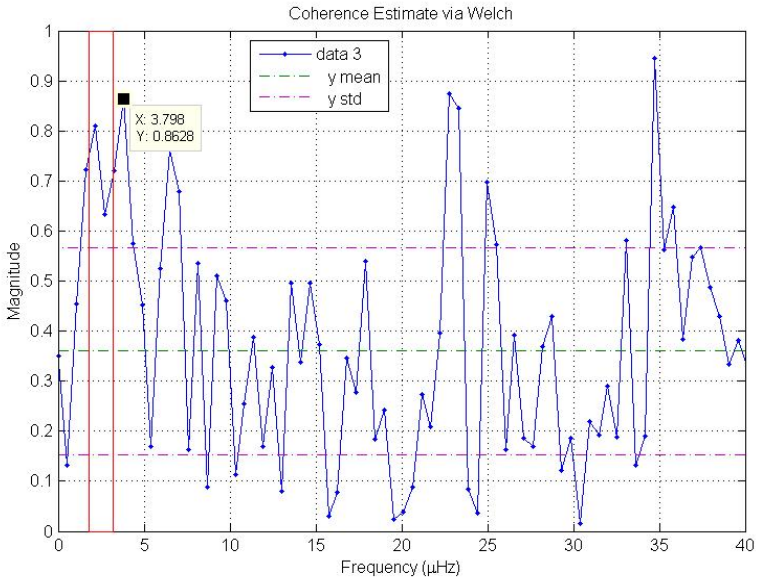


圖 4-1.13：達邦站 CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較（0-40μHz）。

達邦站的其他 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）。

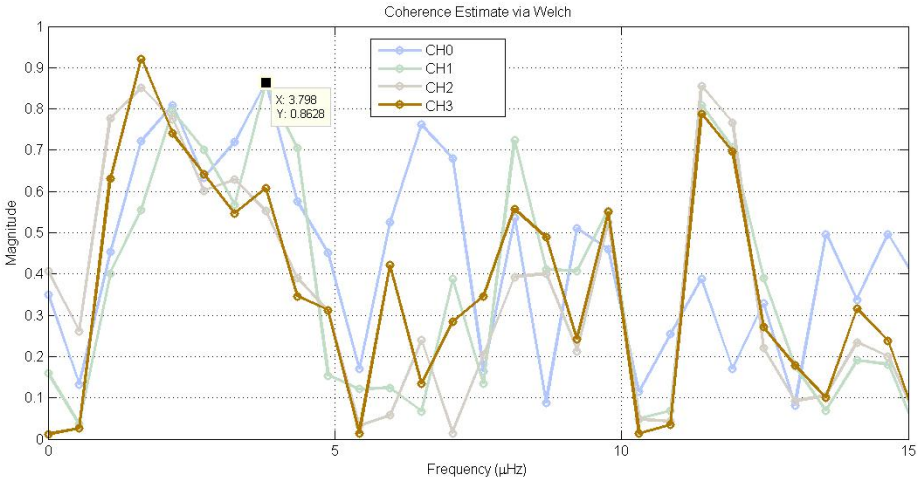


圖 4-1.14：達邦站觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較，可見在 3-7 天的週期間隔兩者有較高的相干性。

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 BMMT CH0 在 2007 年 8 月聖帕颱風的資料來看（圖 4-1.16），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 4-1.1），並藉此對氣壓影響做校正。

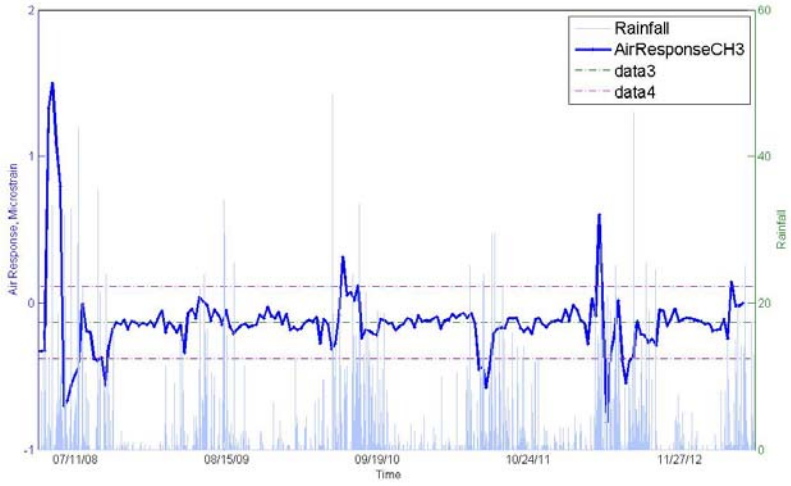


圖 4-1.15：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。

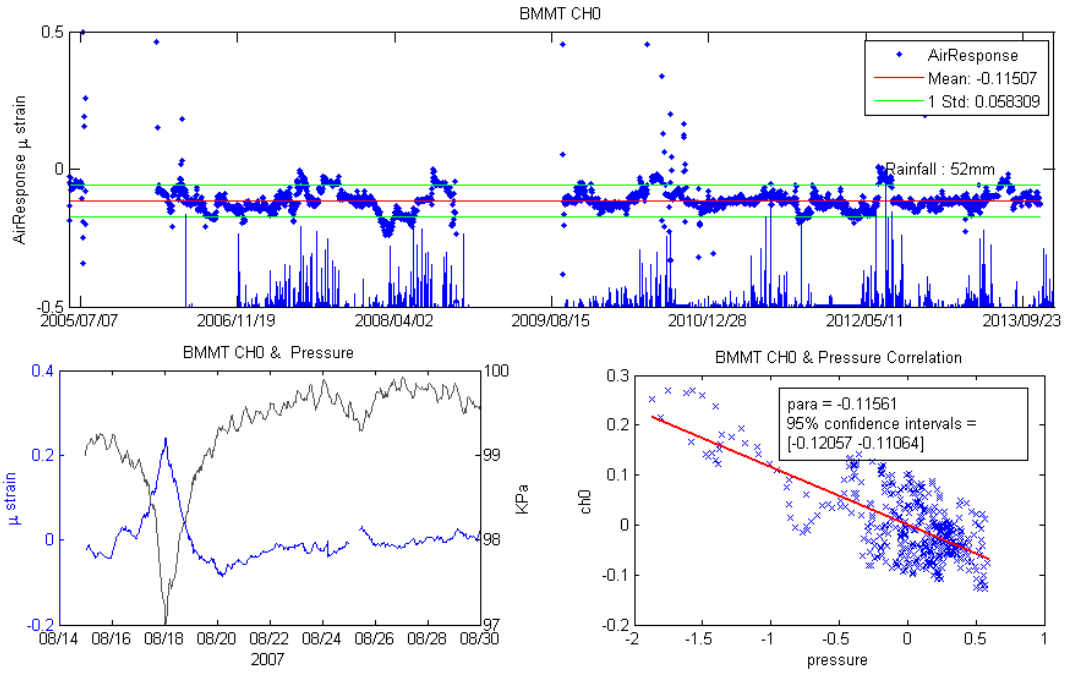


圖 4-1.16：BMMT CH0 氣壓影響計算值比較。上圖表是由 Roeloffs（2010）方法計算的長期氣壓影響量：-0.11507 μstrain/KPa，下方兩圖表示由 2007 年 8 月聖帕颱風期間資料計算之氣壓影響量：-0.11561 μstrain/KPa。

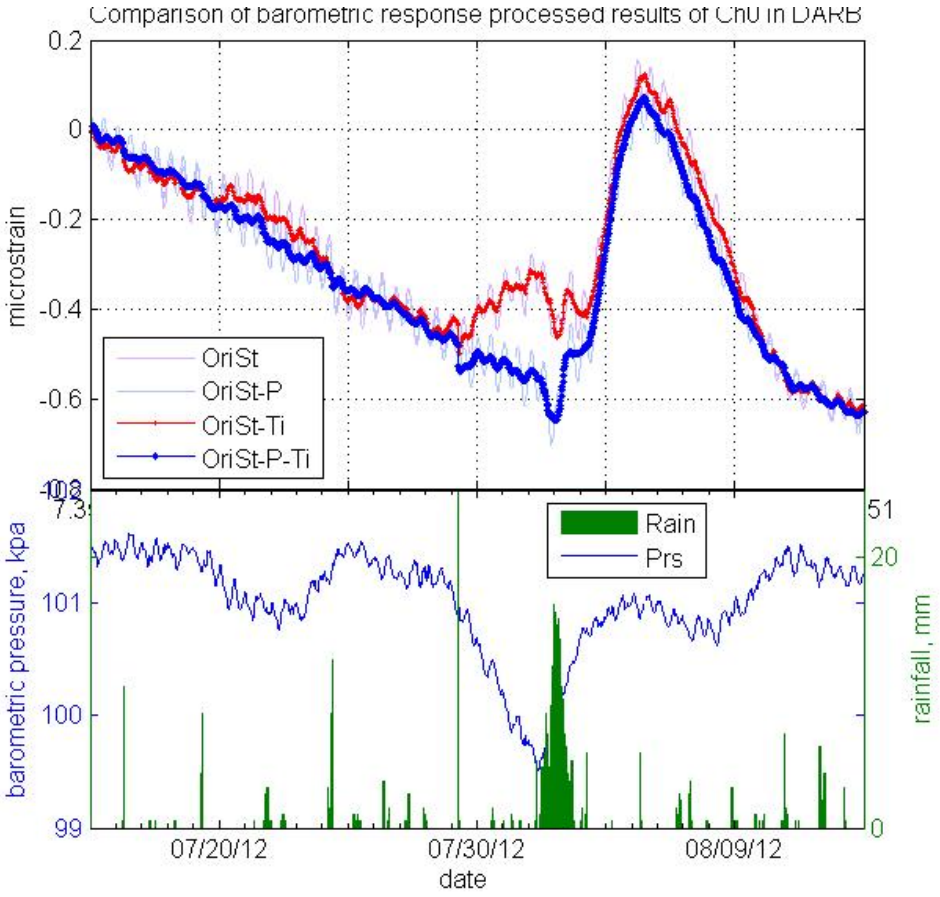


圖 4-1.17：觀測應變去除氣壓響應後的結果。

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**
RNT	-0.021	-0.041	-0.022	-0.007	-0.005
RST	-0.040	nan	-0.053	-0.065	-0.042
DARB	-0.124	-0.312	-0.108	-0.120	-0.375
TAIS	-0.163	-0.143	-0.135	-0.121	-0.233
TSUN	-0.157	-0.110	-0.144	-0.136	-0.258
PFMT	-0.060	-0.092	-0.053	-0.050	-0.130
BMMT	-0.114	-0.132	-0.096	-0.059	-0.189
CINT	-0.175	-0.116	-0.103	-0.165	-0.236
SANS	-0.201	-0.392	-0.526	-0.174	-0.772
SLIN	-0.223	-0.185	-0.233	-0.282	-0.379
JING	-0.148	-0.115	-0.123	-0.125	-0.247

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，由於新竹網的大坪國小測站（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。

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。如圖 4-1.18 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，以下分別針對有應變前兆反應的地震事件進一步列舉說明。

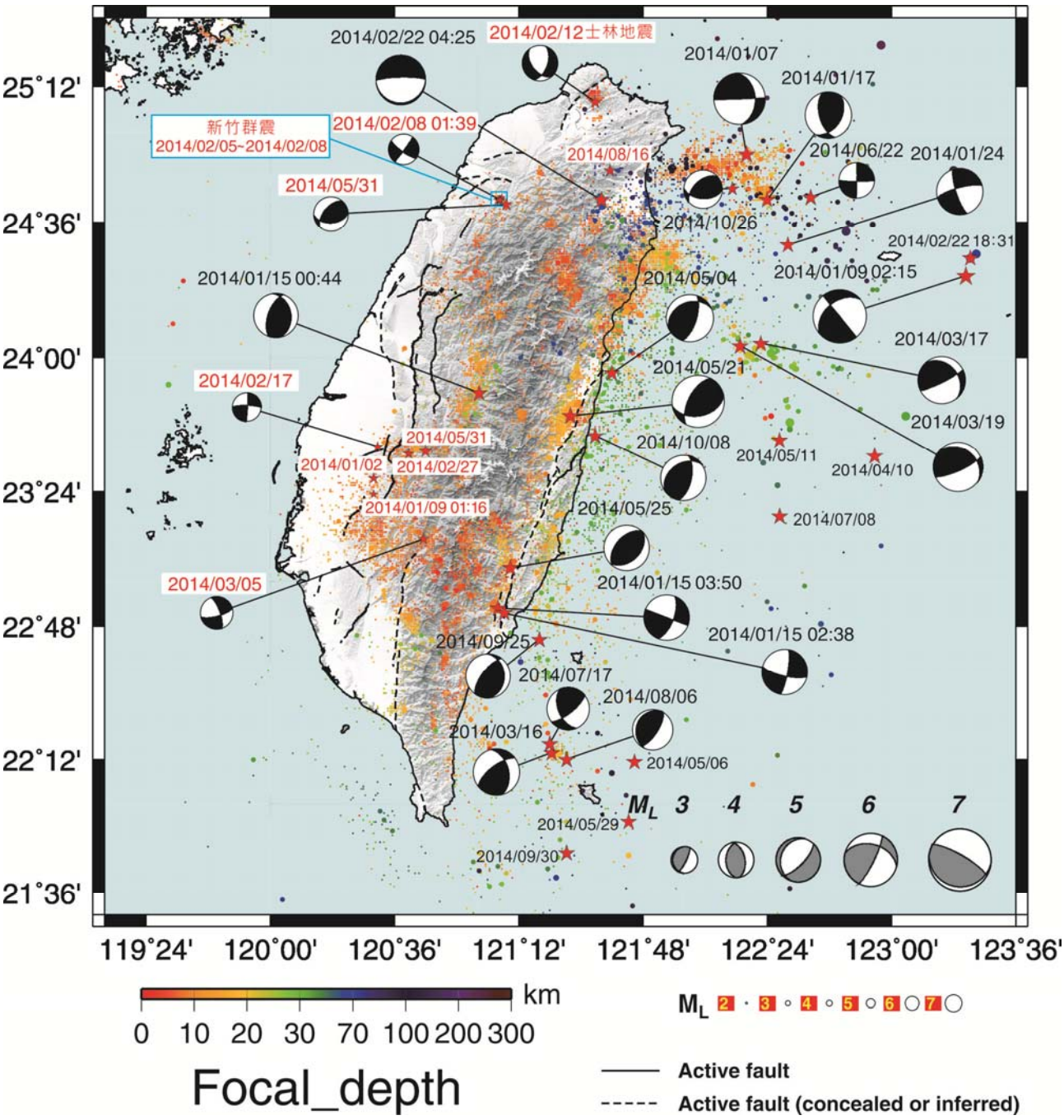


圖 4-1.18：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件（白底紅字表示）之位置及震源機制圖。2014/11/21 地震事件已於圖框外無秀出。

（1）2014/2/12 陽明山地震（M_L 4.2）

今年 2 月陽明山的地震距離臺北網最近，初步觀測臺北網的資料，經過環境因素校正後，在面應變與剪切應變都有明顯的應變率異常，剪切應變在地震前約 23 天開始有明顯變化，而面應變大約在地震前 8 天有壓縮的應變。這個變化由於無法由環境變數所解釋，可能為地震前的應變異常訊號（圖 4-1.19）。

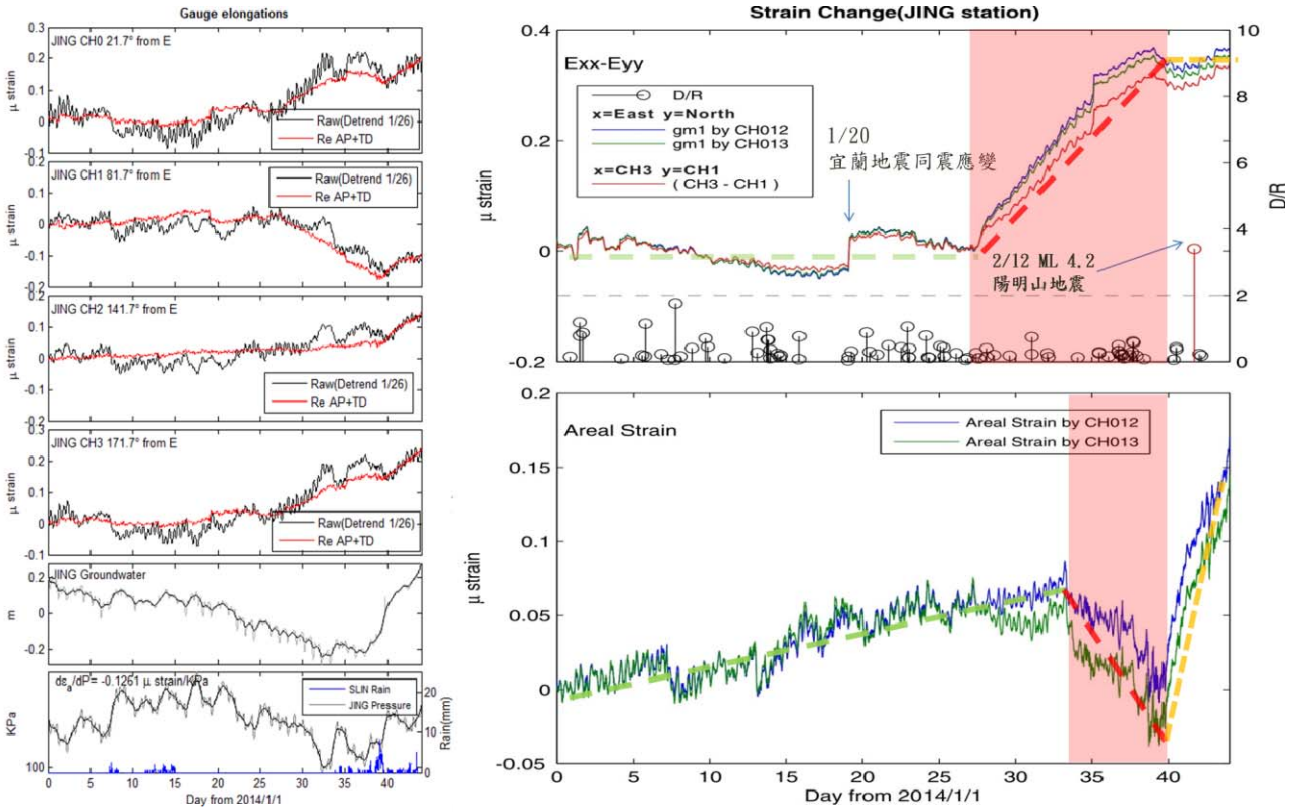
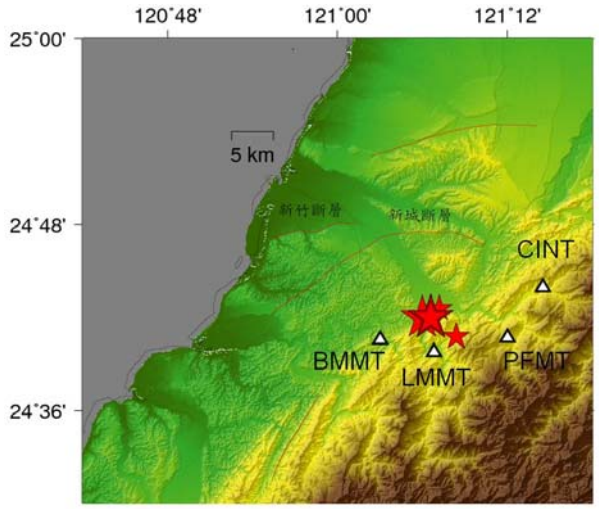


圖 4-1.19：臺北網錦和測站(JING)於 2014 年 2 月陽明山地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪切應變與平面應變。

（2）2014/2/5~2/8 新竹橫山群震（M_L 2.3~3.4）

在 2012 年 6 月的新竹地震群之後，今年 2 月新竹也於 5 日至 8 日發生了連續 10 起芮氏規模 2.3 ~ 3.4 的地震（圖 4-1.20）。將這段時間的應變儀分析，移除環境影響之後，發現地震前大約 1/23，在剪切應變與面應變都有異常應變上升，又於 2/1 往下降，緊接著發生群震，這很有可能是地震前的應變異常訊號（圖 4-1.21）。



日期	時間 (GMT+8)	緯度	經度	深度	規模
2014/2/5	19:14	24.7	121.11	10.9	2.7
2014/2/5	19:17	24.7	121.1	10.9	2.6
2014/2/7	01:05	24.7	121.11	11.3	2.8
2014/2/7	02:00	24.7	121.11	9.6	2.8
2014/2/7	07:04	24.7	121.11	9	2.3
2014/2/7	07:04	24.68	121.14	6.7	2.3
2014/2/7	07:26	24.71	121.12	6.6	2.4
2014/2/7	19:14	24.7	121.11	11.3	2.3
2014/2/7	23:01	24.7	121.11	10.6	2.7
2014/2/8	01:39	24.7	121.11	8.4	3.4

圖 4-1.20：2014 年 2 月新竹群震基本資料。2 月 5 日至 8 日間，新竹寶山鄉地區發生共 10 起芮氏規模 2.3 ~ 3.4 的地震。

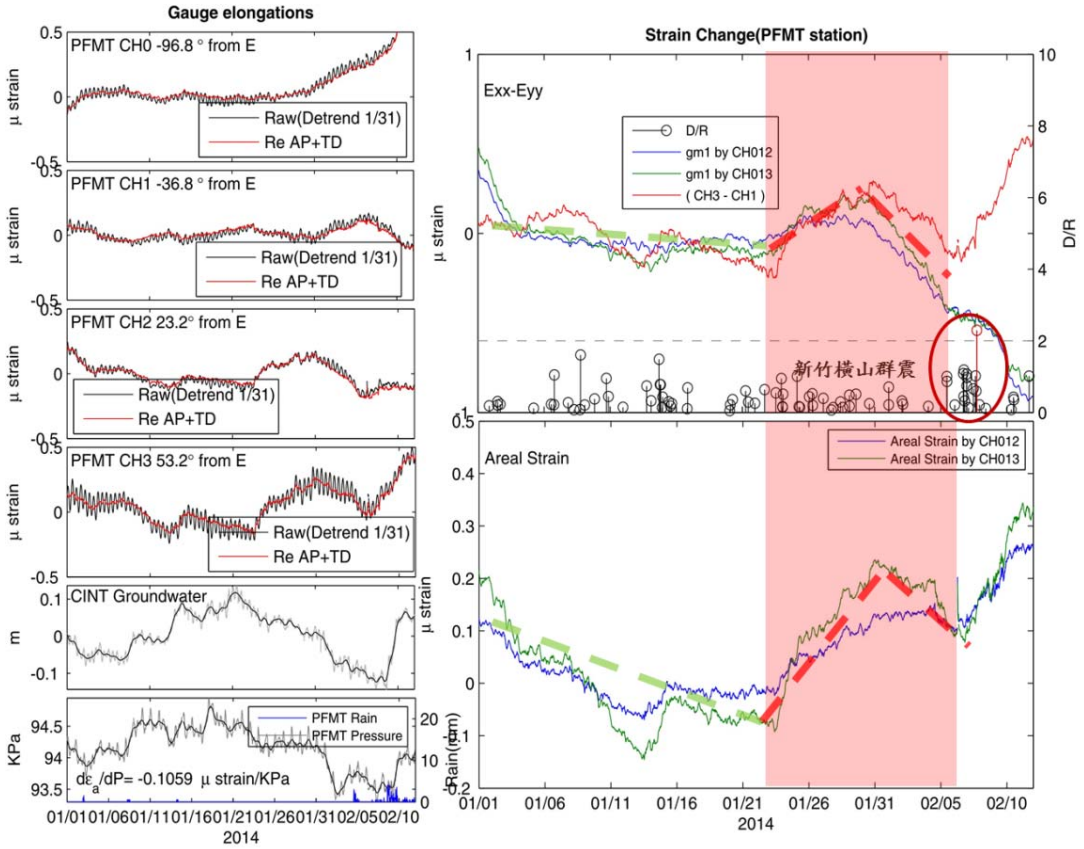


圖 4-1.21：2014 年 2 月新竹群震前後新竹網井下應變儀梅花站應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪切應變與平面應變。

（3）2014/5/21 花蓮鳳林地震（M_L 5.9）

5 月 21 日的花蓮地震對於嘉義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 與 5/15 ~ 5/19，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。因此，這樣的應變異常訊號可能為地震前的前兆訊號（圖 4-1.22）。

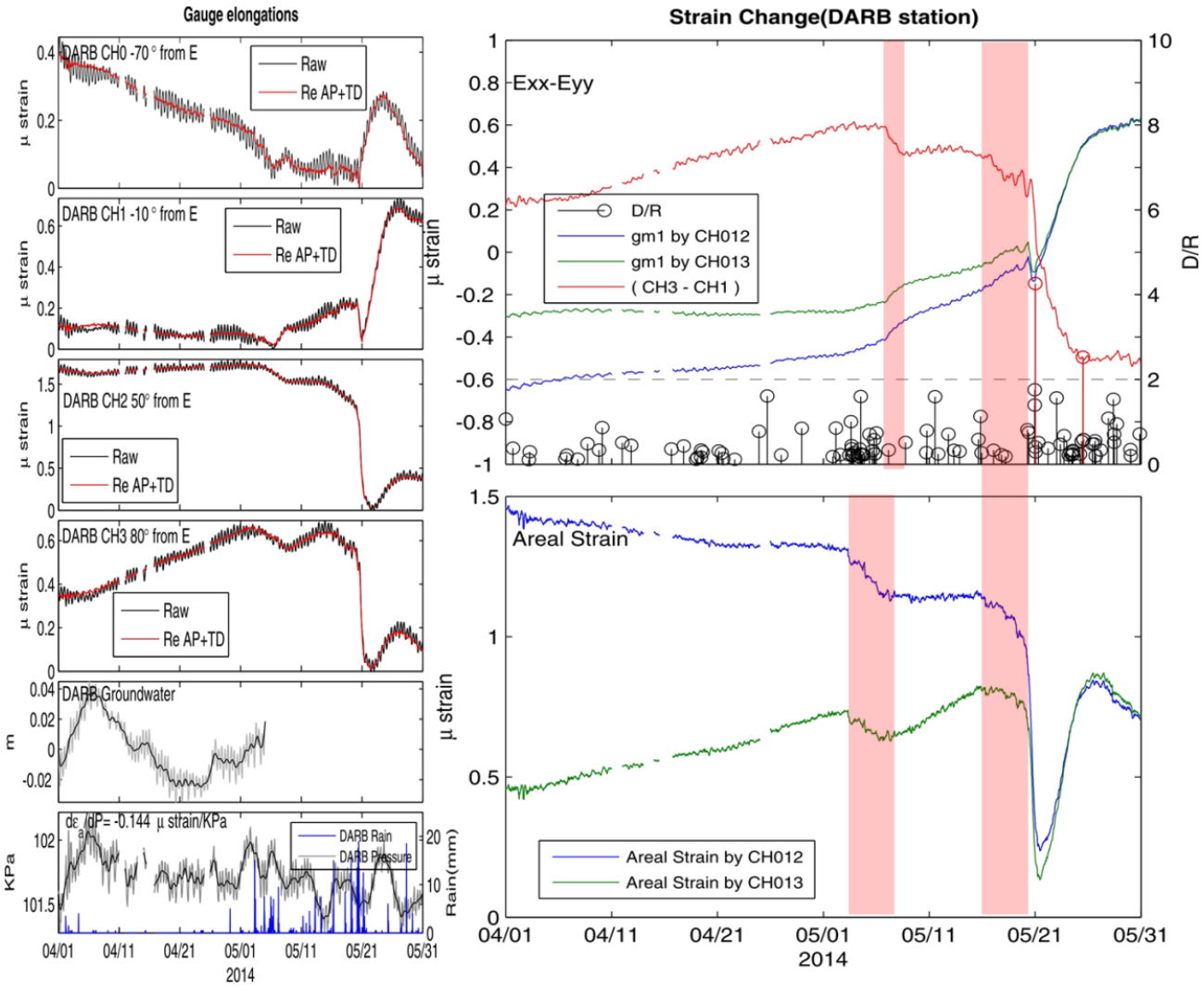


圖 4-1.22：2014 年 5 月花蓮地震前嘉義網達邦站井下應變儀資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪切應變與平面應變。

（4）2014/8/16 新北市烏來區地震（M_L 3.8）

8 月 16 日於新北市烏來區的地震雖然規模只有 3.8，但由於相當鄰近臺北測網（約 24 km），也由於過去曾利用臺北測網 CINT 站剪應變特性來探討今年 2 月 12 日臺北士林區規模 4.2 的地震，因此我們也將其列入探討，看井下應變儀的剪應變對於鄰近地震是否有前兆訊號。結果顯示剪應變於地震前約 9 天，應變突然上升約 0.39 μstrain，這個突然的應變上升在約在一天之內造成，但相對的在平面應變上卻沒有看到明顯的應變異常。剪應變的異常目前可以對應到 9 天後發生的新美是烏來區地震，該地震的 D/R 值大約 1.7，該值代表應變半徑（D）與測站距震源的距離（R）的比值。目前初步判斷這個應變異常應該為該地震的前兆訊號（圖 4-1.23）。

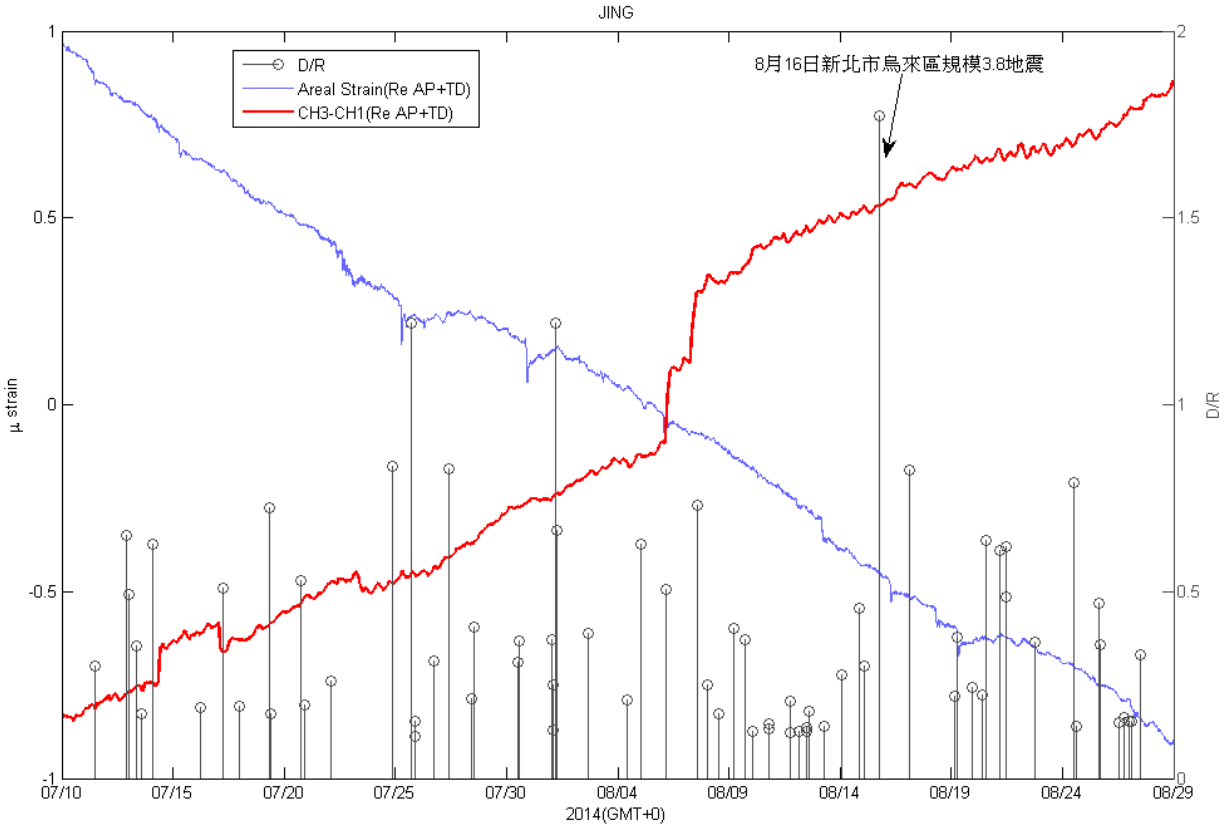


圖 4-1.23：2014 年 8 月新北市烏來區地震前臺北網錦和站(JING)井下應變儀資料。應變儀應變資料(藍色:CINT 平面應變;紅色:CINT 剪應變），D/R 為測站距震源的距離的比值，資料皆移除氣壓、地潮影響。地震發生 9 天前有異常應變上升約 0.39 μstrain。

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(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 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往、新竹網與臺北網分別為：40%、71%與 67%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：60%、29%與 33%；地震前沒有前兆訊號的機率為：0%、29%與 25%。

表 4-1.2：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
前兆判斷成功機率	40%		71%		67%	
前兆判斷誤判機率	60%		29%		33%	
無前兆機率	0%		29%		25%	

4-2 時頻圖分析案例

4-2-1 井下應變儀資料時頻分析

本章節針對 2013 年 10 月～2014 年 5 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析，以新竹網：大坪國小（BMMT）、新樂國小（CINT）、梅花國小（PFMT）三測站為研究對象，了解各個測站面應變資料之不同頻段時頻圖變化情形，如圖 4-2.1 ~ 圖 4-2.3 所示，詳細之各月份分析結果於附錄 4-4 呈現。

分析流程則是利用疊帶高斯濾波器(Iterative Gaussian Filter)，先去除面應變資料的趨勢變化，並進行短時距傅立業轉換時頻圖的繪製，頻率範圍分別是全頻（0.0~0.5Hz）、高頻（0.15~0.5Hz）、中頻（0.07~0.15Hz）以及低頻（0.0~0.07Hz），再對各個頻段之面應變資料的時間積分（Marginal Time），其結果顯示該頻段之能量隨時間變化的情形。頻率範圍分類分方式除了全頻之外，其他頻段分類皆是，在面應變去除趨勢後，利用有限脈衝響應（Finite Impulse Response）濾波器進行資料前處理，濾出特定頻段之面應變資料，透過頻譜圖呈現各個頻率與時間點中較細節的能量變化。

時頻圖分析之結果中，大坪國小測站（BMMT）在中頻 0.1Hz 附近的橫線出現，新樂國小（CINT）測站有 0.05、0.09、0.107Hz，此橫線代表各站之特徵頻率，此特徵頻率係因震動觸發，由於儀器、環境條件等材料條件不同，每個測站各有其基本的自然頻率，當受到任何震盪觸發，便會在時頻圖上以橫線表現。這裡提到自然頻率的概念，簡單說明如下，舉例來說，由於材質的不同，木板、塑膠板各有其自然頻率，當給予敲擊時，不論用什麼東西敲、敲得或快或慢，聽到的聲響都相同，其發出的聲音頻率便是其自然頻率，等同於在井下應變儀資料中看到 0.05~0.09Hz 與 0.1Hz 附近的橫線，因此，若將一個站井視為一個系統，此自然頻率即為該站之特徵頻率。高頻（0.15~0.5Hz）頻段於此時段間有雲狀頻率變化，雲狀頻率變化發生原因，目前資料不足尚無法確定。

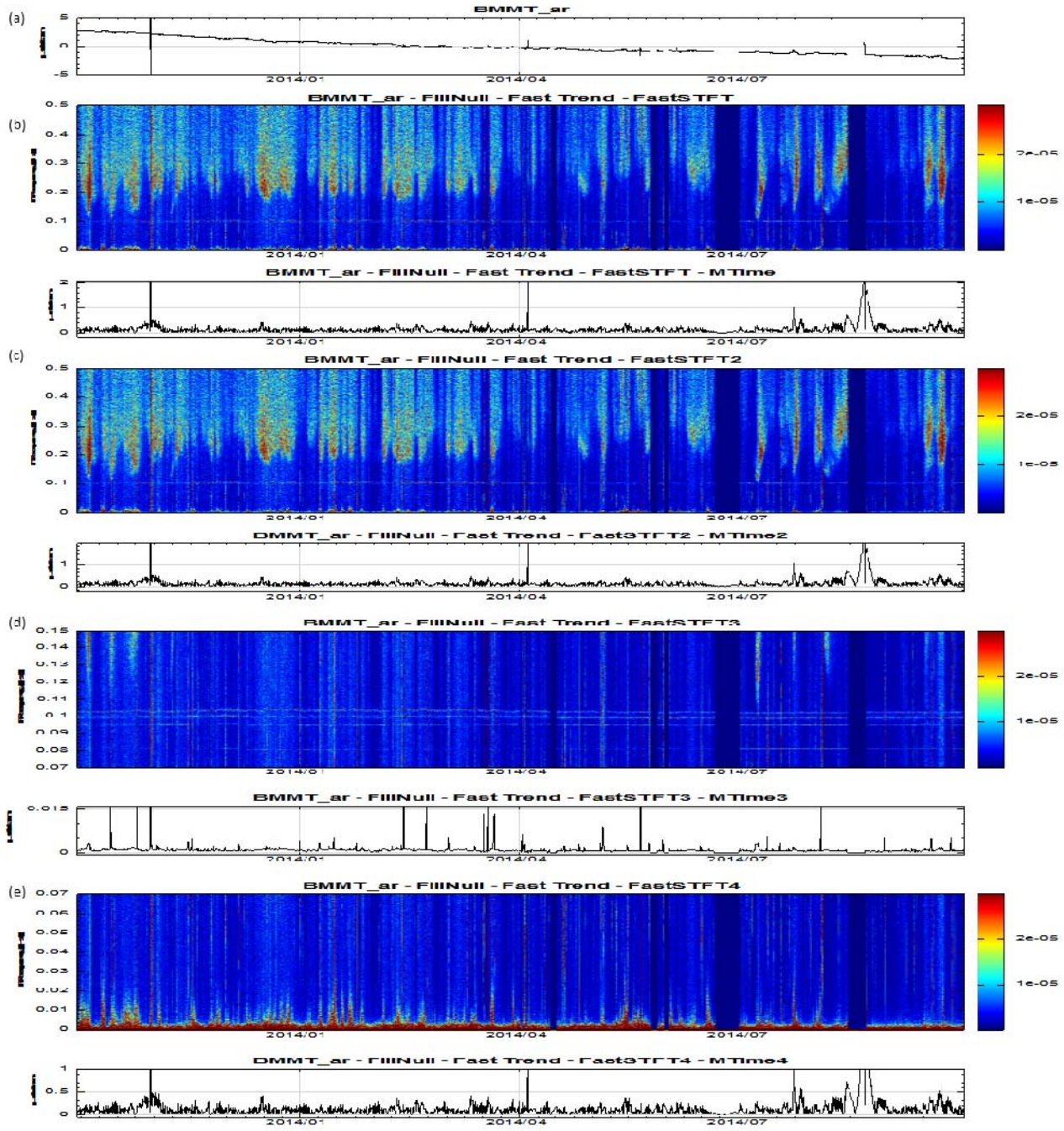


圖 4-2.1：2013 年 10 月~2014 年 10 月大坪國小測站（BMMT）面應變資料時頻圖與能量變化。（a）原始面應變時間序列、（b）全頻 0.0~0.5Hz）、（c）高頻（0.15~0.5Hz）、（d）中頻（0.07~0.15 Hz）、（e）低頻（0.0~0.07Hz）。

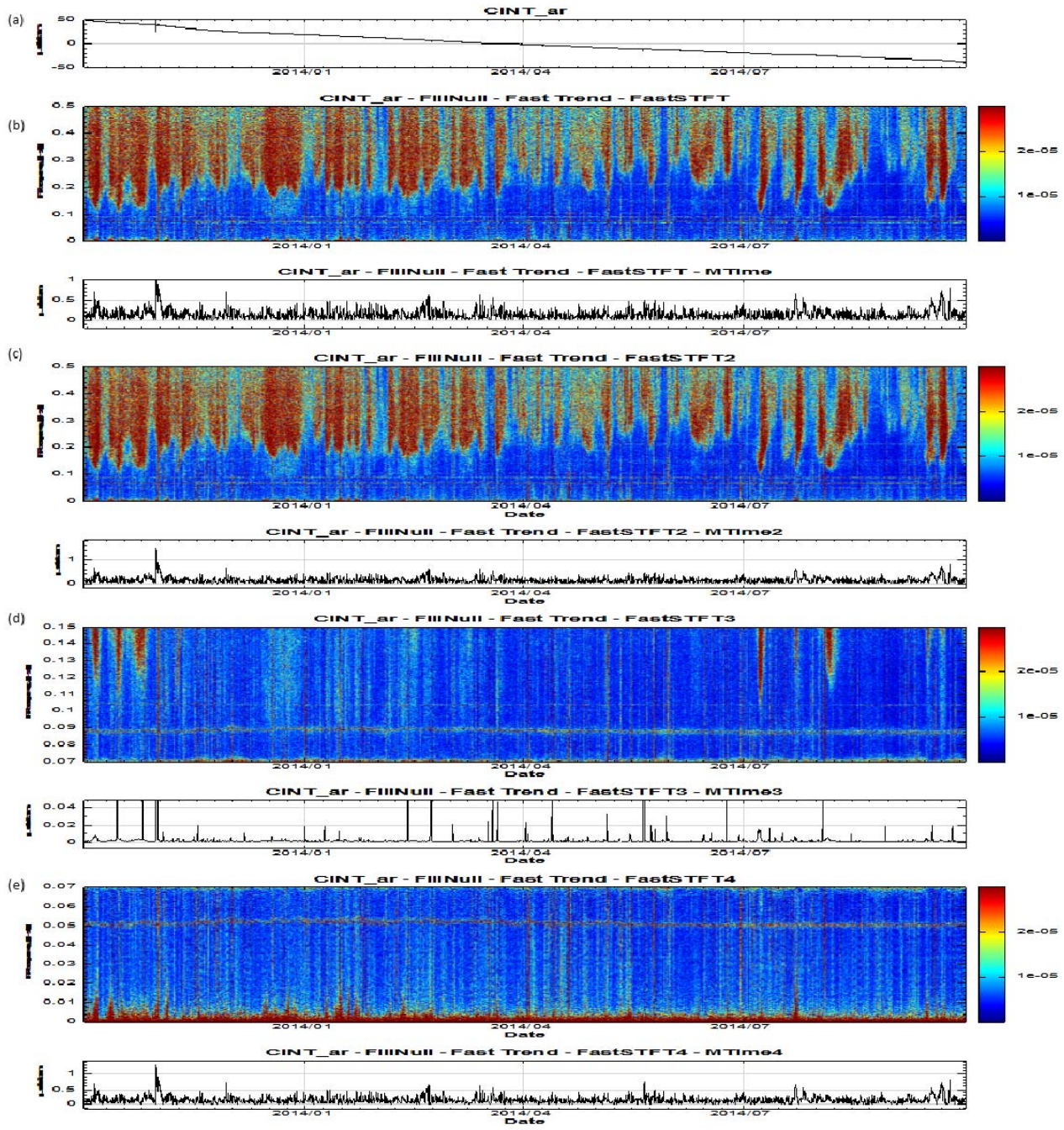


圖 4-2.2：2013 年 10 月~2014 年 10 月新樂國小測站（CINT）面應變資料時頻圖與能量變化。（a）原始面應變時間序列、（b）全頻 0.0~0.5Hz）、（c）高頻（0.15~0.5Hz）、（d）中頻（0.07~0.15 Hz）、（e）低頻（0.0~0.07Hz）。

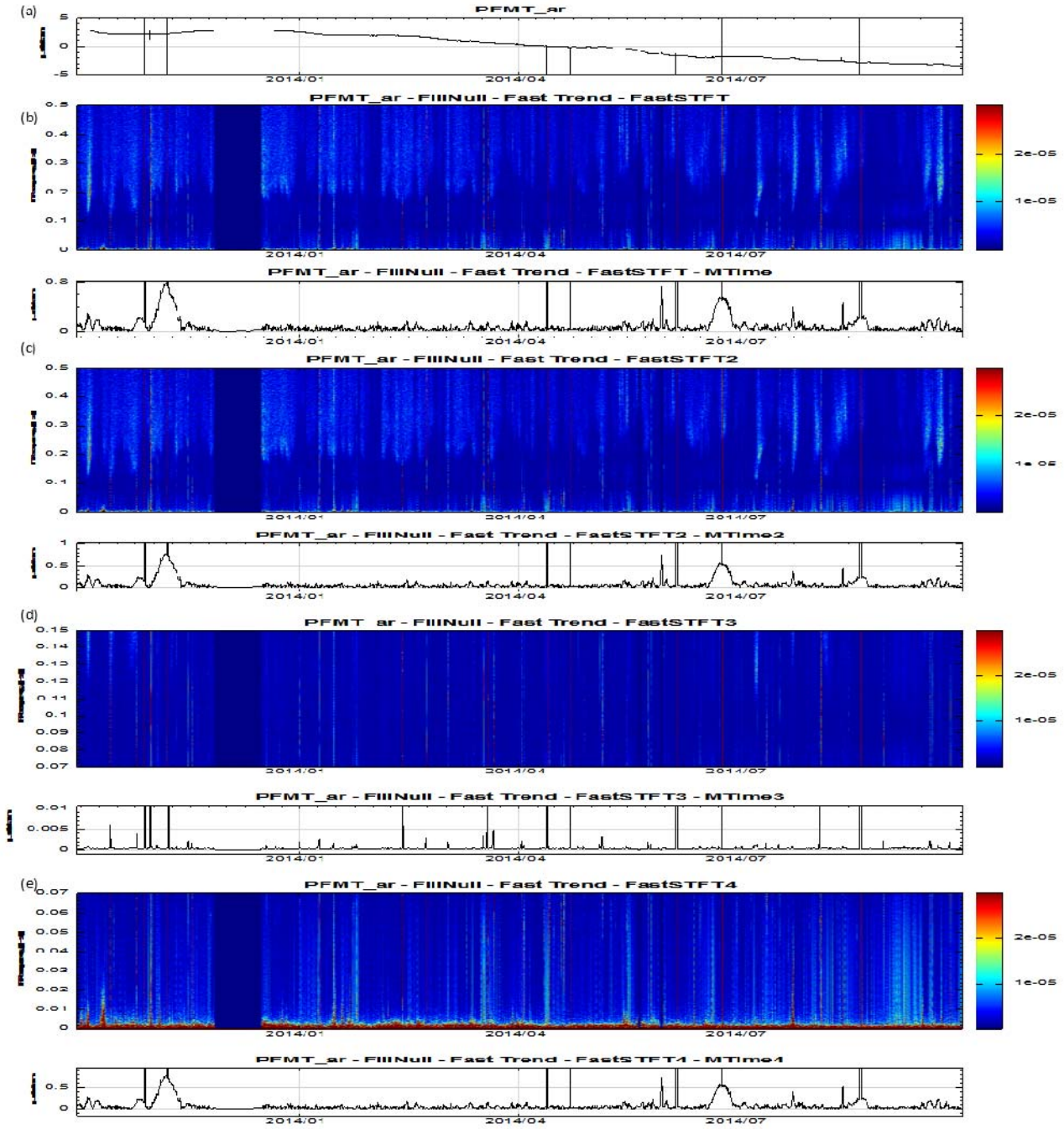


圖 4-2.3：2013 年 10 月~2014 年 5 月梅花國小測站（PFMT）面應變資料時頻圖與能量變化。（a）原始面應變時間序列、（b）全頻 0.0~0.5Hz）、（c）高頻（0.15~0.5Hz）、（d）中頻（0.07~0.15 Hz）、（e）低頻（0.0~0.07Hz）。

4-2-2 自然事件案例分析

本研究挑選 2008 年汶川地震、2010 年甲仙地震、2011 年日本東北 311 地震、2013 年 3 月南投地震、2014 年 2 月新竹群震、2014 年 2/12 陽明山地震、2014 年 5/21 花蓮地震等七個事件，並選取可能記錄到該次事件的新竹網井下應變儀測站，針對面應變的時間序列進行時頻分析。成果如下，各站有其特徵頻率及特殊事件產生之異常頻率，後續仍須分析更長時間之紀錄，觀察特殊頻率是否僅在颱風或地震事件前後出現，並可定義出各站之特徵頻率。

分析計算過程中，若面應變資料具有異常跳動值，將會對其組成 ch0、ch1、ch2、ch3 以上四個分量進行修正，去除異常跳動值、補齊空值後，重新計算面應變資料，再去除趨勢變化，進行短時傅立葉分析，得到時頻圖。下列討論中包含面應變原始應變量時間序列、時頻圖、30 分鐘累積雨量資料、地下水水位變化與氣壓時間序列，而以時頻圖為主，進行雨量、地下水水位與氣壓變化間的相關討論，而部分測站地下水水位數值，於事件發生時無相關記錄，故無法呈現數值變化。

不同事件之頻譜圖中，大坪國小（BMMT）測站與新樂國小（CINT）測站於時頻圖分析結果中均有出現持續不斷的能量分布，其中大坪國小自 2008 年地震事件至 2014 年地震事件時頻圖中固定有 0.1Hz 的頻率，新樂國小（CINT）設站則是以 0.05、0.09Hz 為主，根據上一節自然頻率相關說明，此頻率即為大坪國小（BMMT）測站與新樂國小（CINT）測站之特徵頻率。梅花測站（PFMT）則明顯的特徵頻率在各個事件之時段中皆有出現雲狀的頻率變化（0.2 ~ 0.5Hz），該特徵可能由氣壓或降雨事件造成，特別是在降雨出現的前後，均能觀察到此雲狀頻率頻段增加的現象，而氣壓變化與頻率強度變化之關係，部分事件中為氣壓位於高點時，頻率強度較強；而其他事件則為相反之關係，實際之影響因素，仍須後續的研究驗證。

（1）汶川地震

地震發生臺灣時間為 2008 年 5 月 12 日 14 時 28 分，震央在中國四川省內，芮氏規模 7.9，地震深度 10 公里，距臺灣約 1,800 公里，有三個站紀錄到汶川地震的訊號，分別為大坪國小 BMMT、新樂國 CINT、梅花國小 PFMT。進行時頻分析後可見各站之特徵頻率不同，分別為大坪國小測站如圖 4-2.4，為 0.1Hz，新樂國小測站如圖 4-2.5，為 0.05、0.09、0.16、0.27Hz、梅花測站如圖 4-2.6 無顯著的特徵頻率。除以上特徵頻率外，3 個測站於分析時段內有 0.2~0.5Hz 之強度變化，因其分布型態如天空中雲朵般，故稱之為雲狀頻率，雲狀頻率於 5/12 前後，從 0.2 ~ 0.5Hz 擴大至 0.1 ~ 0.5Hz。中國四川發生地震時，臺灣新竹地區則有降雨的現象，該頻率變化之成因與降雨是否有關仍待討論。雲狀頻率之強度變化與氣壓高低相比，當氣壓為低點時（5/9、5/18、5/28），雲狀頻率強度較弱，甚至消失，因此較高頻之雲狀頻率是否受到氣壓變化引起，可進一步討論。地震發生時，新樂國小（CINT）測站的地下水位有上升的情形，應是受到降雨影響，非共震引起的水位變化。

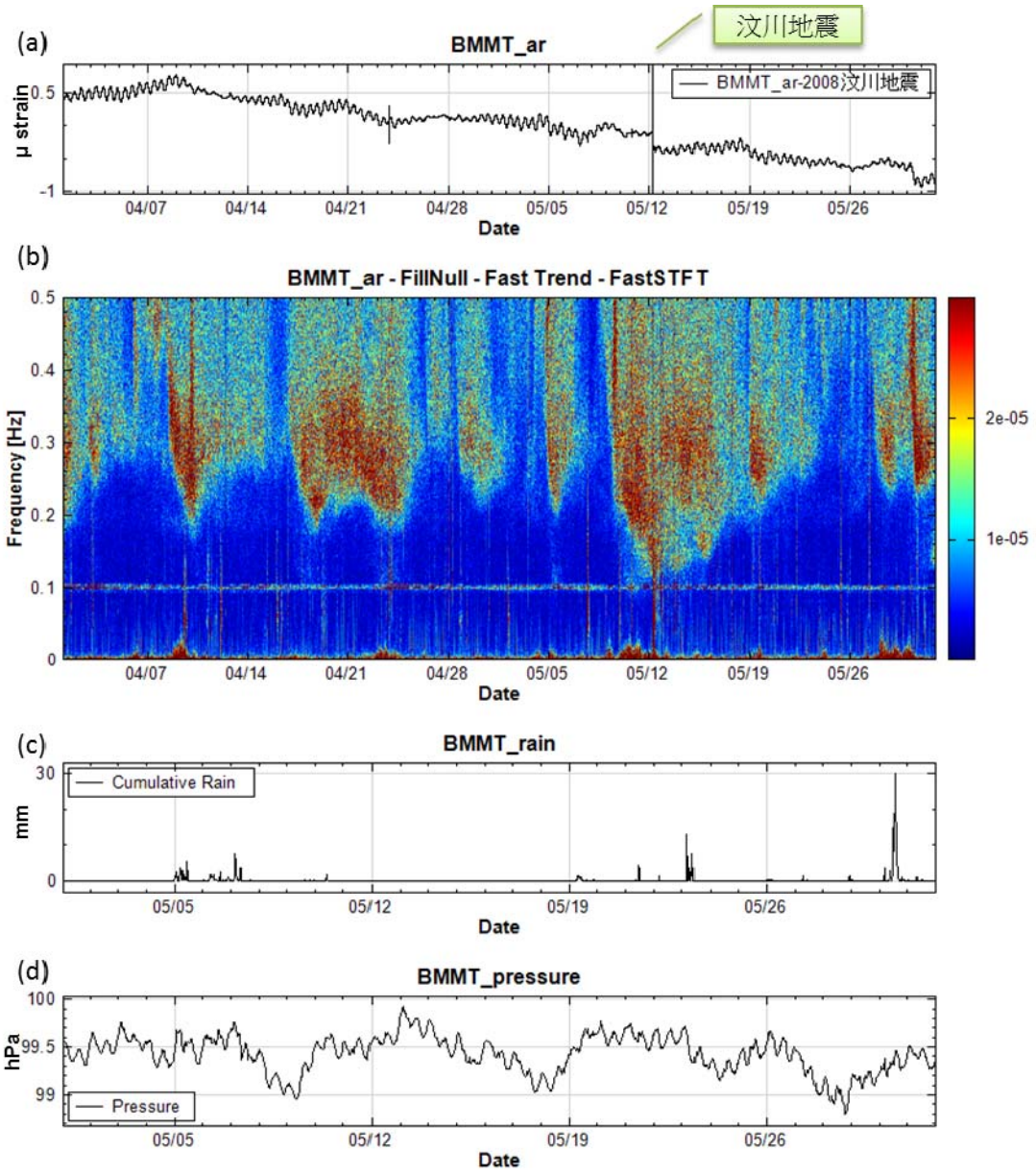


圖 4-2.4：大坪國小（BMMT）測站汶川地震前後面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

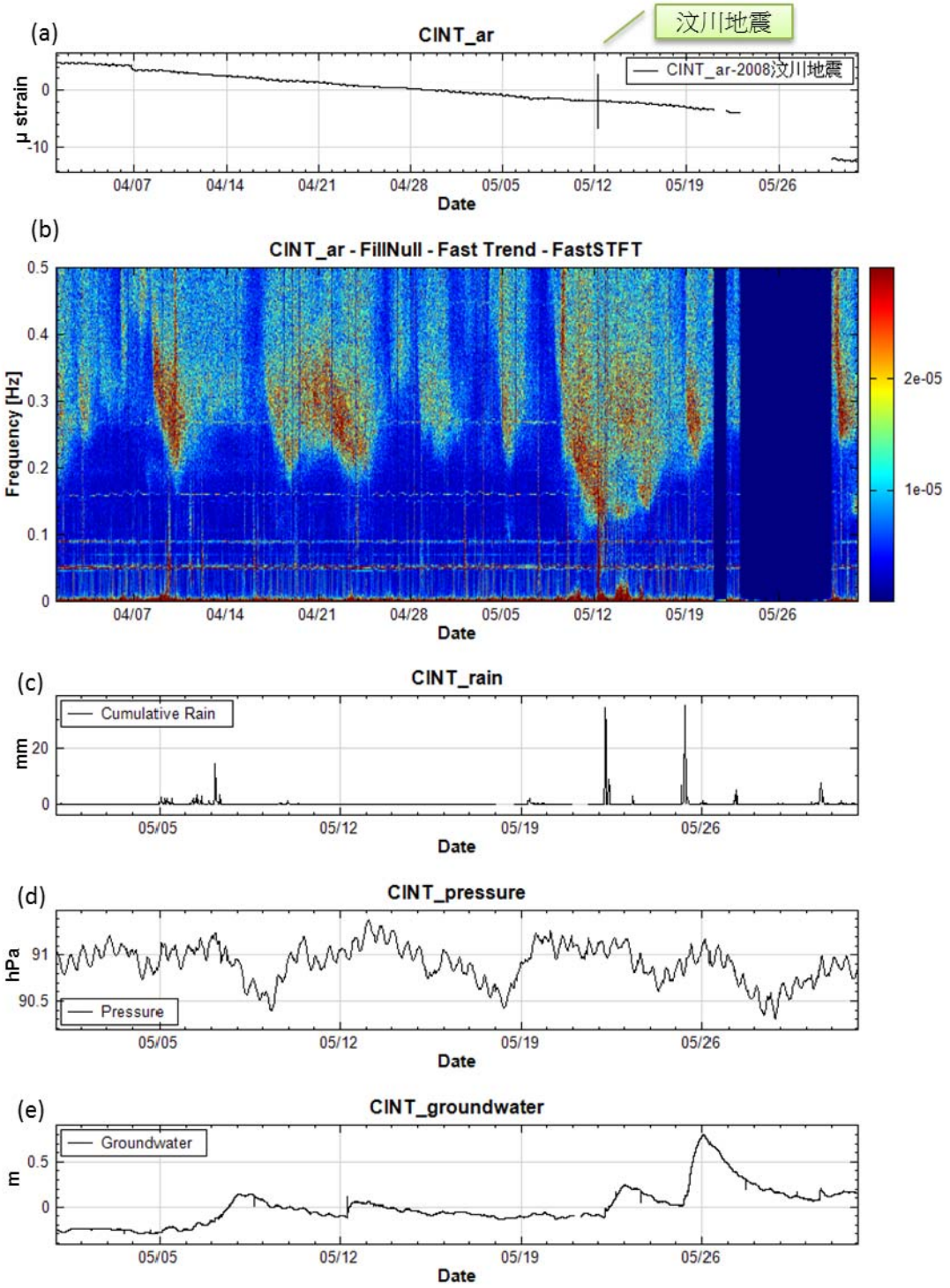


圖 4-2.5：新樂國小（CINT）測站汶川地震前後面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d） 大氣壓力時序變化、（e） 地下水位時序變化。

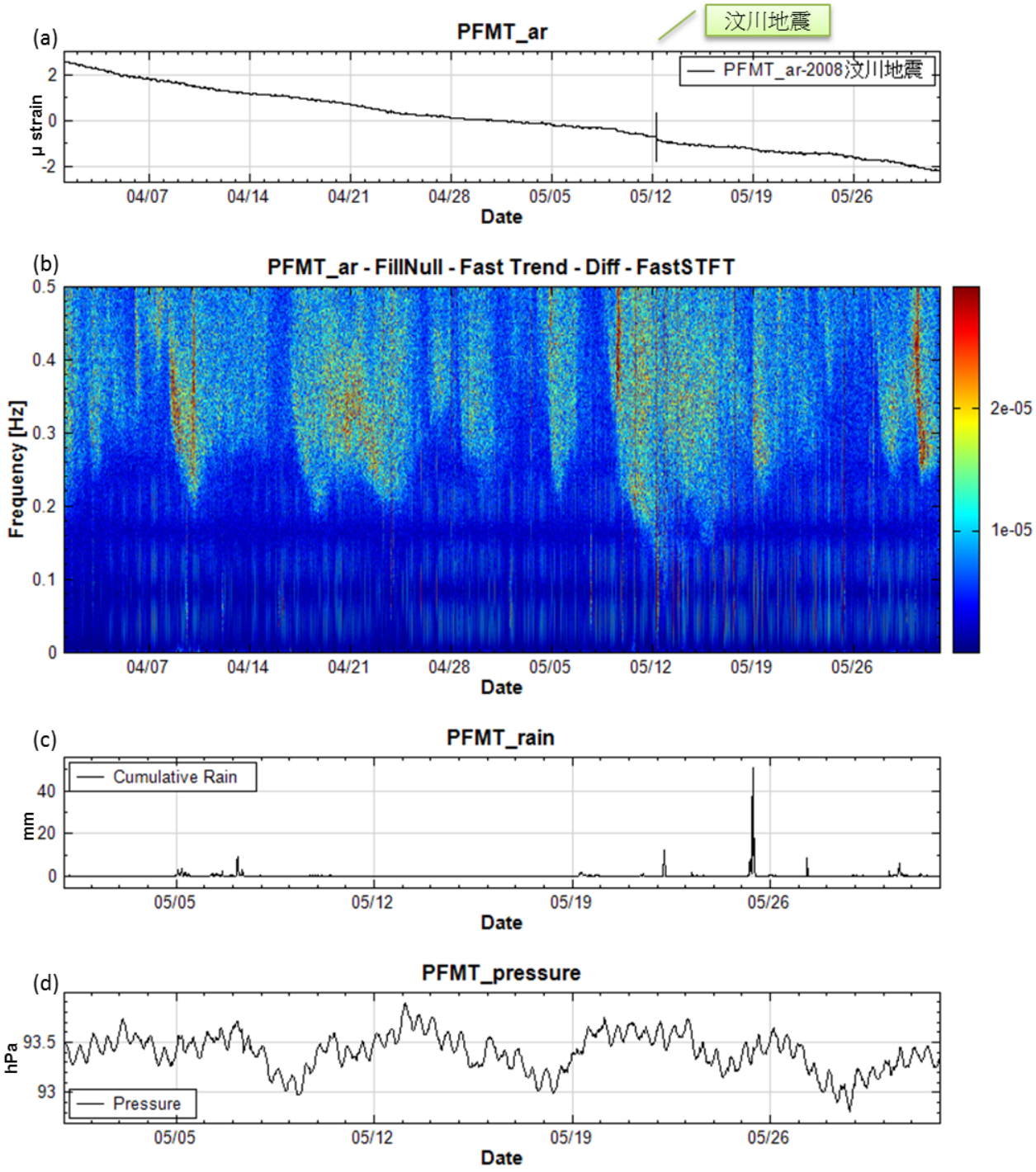


圖 4-2.6：梅花國小（PFMT）測站汶川地震前後面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d） 大氣壓力時序變化。

（2）甲仙地震

地震發生時間為 2010 年 3 月 4 日 8 時 18 分，震央在高雄縣桃源鄉和茂林鄉的交界處，芮氏規模 6.4，地震深度 22.64 公里，有三個站紀錄到甲仙地震的訊號，分別為大坪國小（BMMT）、新樂國小（CINT）、梅花國小（PFMT）。進行時頻分析後可見各站之特徵頻率不同，分別為大坪國小（BMMT）如圖 4-2.7，為 0.1Hz，新樂（CINT）如圖 4-2.8，為 0.05、0.09、0.16、0.27Hz、梅花測站（PFMT）如圖 4-2.9 則無類似的時頻圖特徵。3/8 前後，在 0.1 ~ 0.5Hz 間之頻率有明顯的強度變化，3/9 則有降雨的現象；但在 3/13 日降雨時並無顯著之雲狀頻率出現，該頻率變化之成因與降雨是否有關仍待討論，雲狀頻率於其他時段分布範圍為 0.2 ~ 0.5Hz。甲仙地震事件前後之氣壓高點於 3 月 9 日，此時雲狀頻率分布之頻率範圍最廣（0.1 ~ 0.5Hz）。3 月 4 日地震發生時，新樂國小（CINT）測站的地下水位有上升約 0.02m 左右，而梅花國小（PFMT）地下水位資料呈鋸齒狀之跳動，不確定其正確性，故不參與討論。

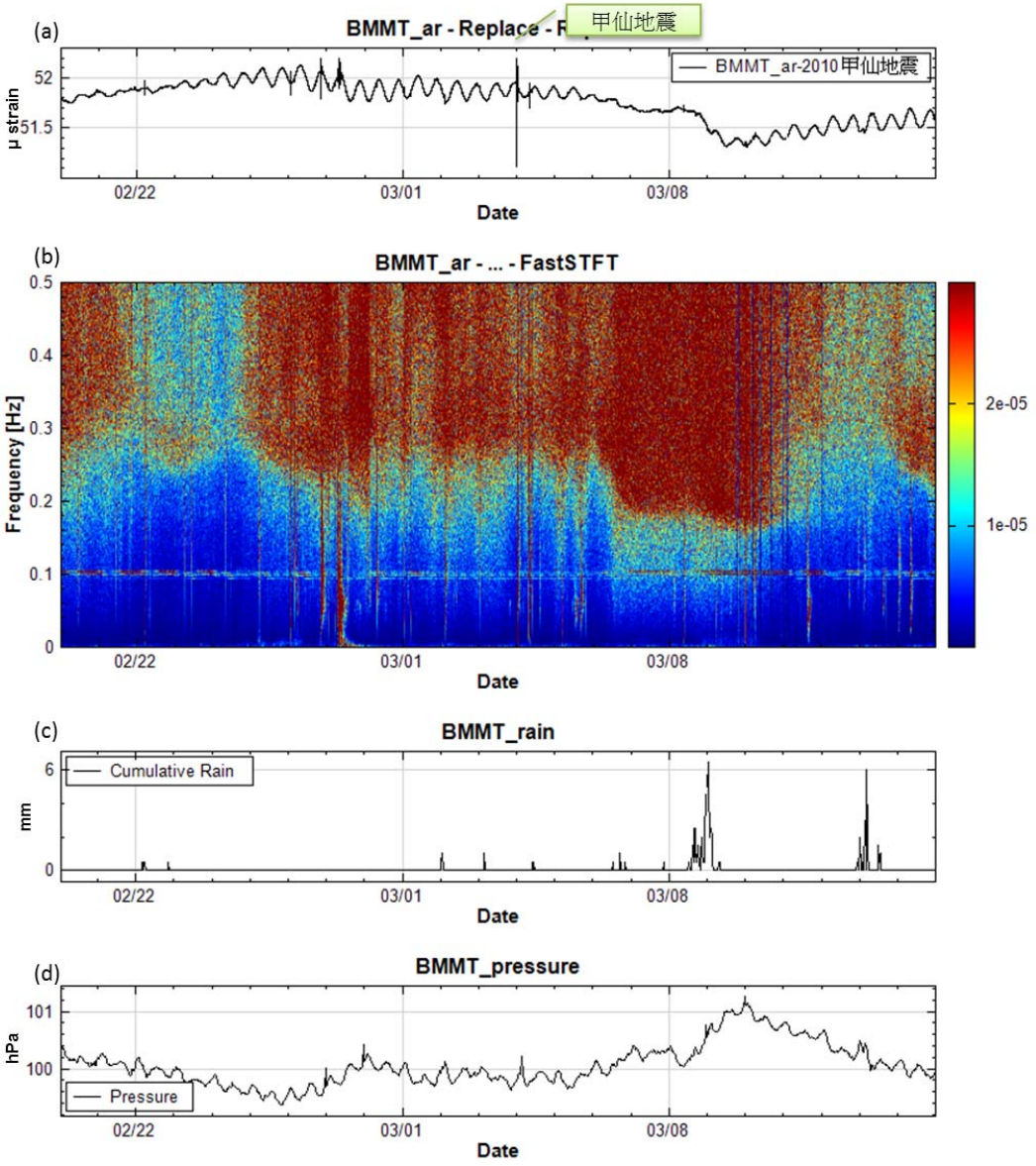


圖 4-2.7：甲仙地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

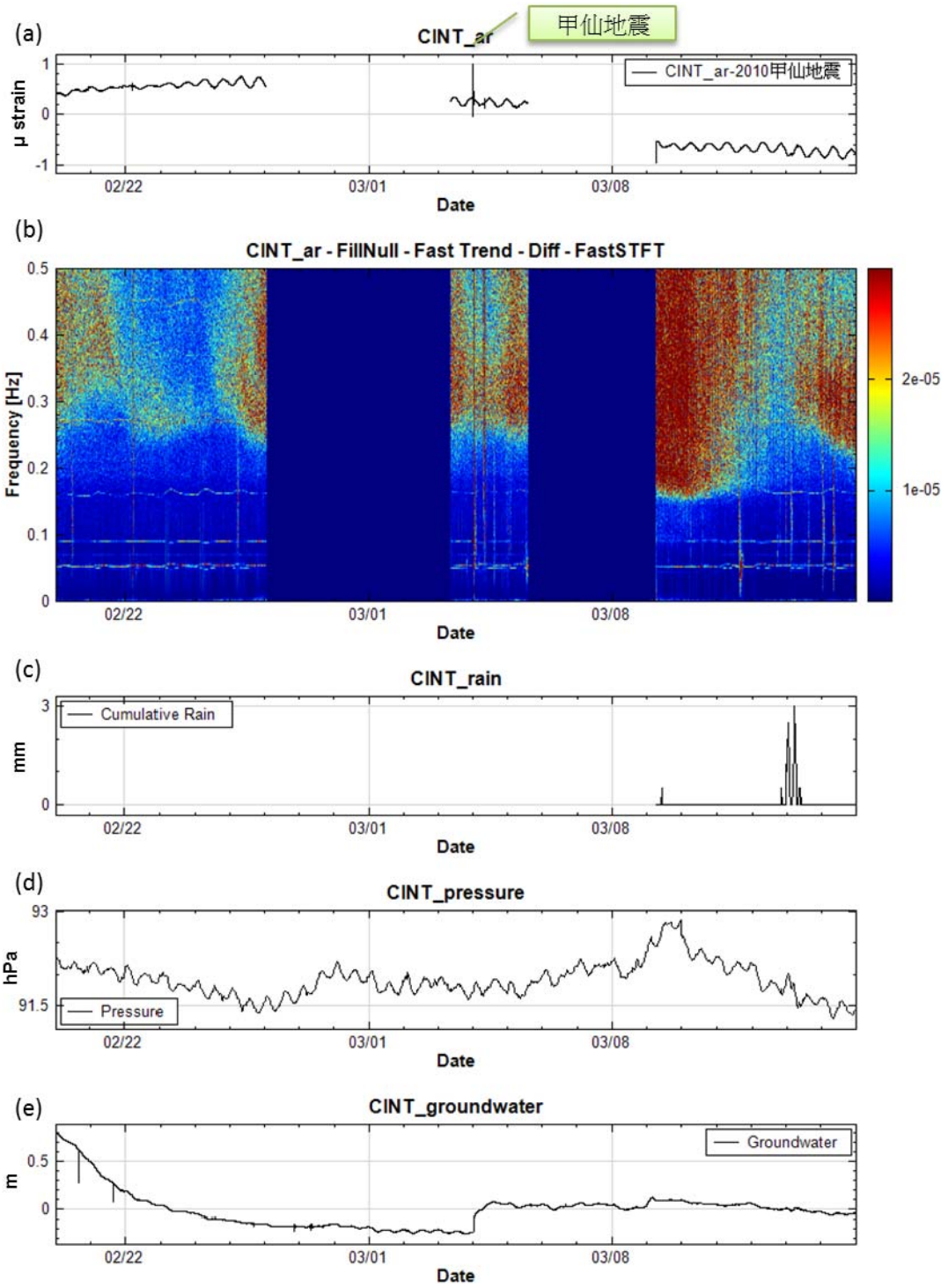


圖 4-2.8：甲仙地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化、（e）地下水位時序變化。

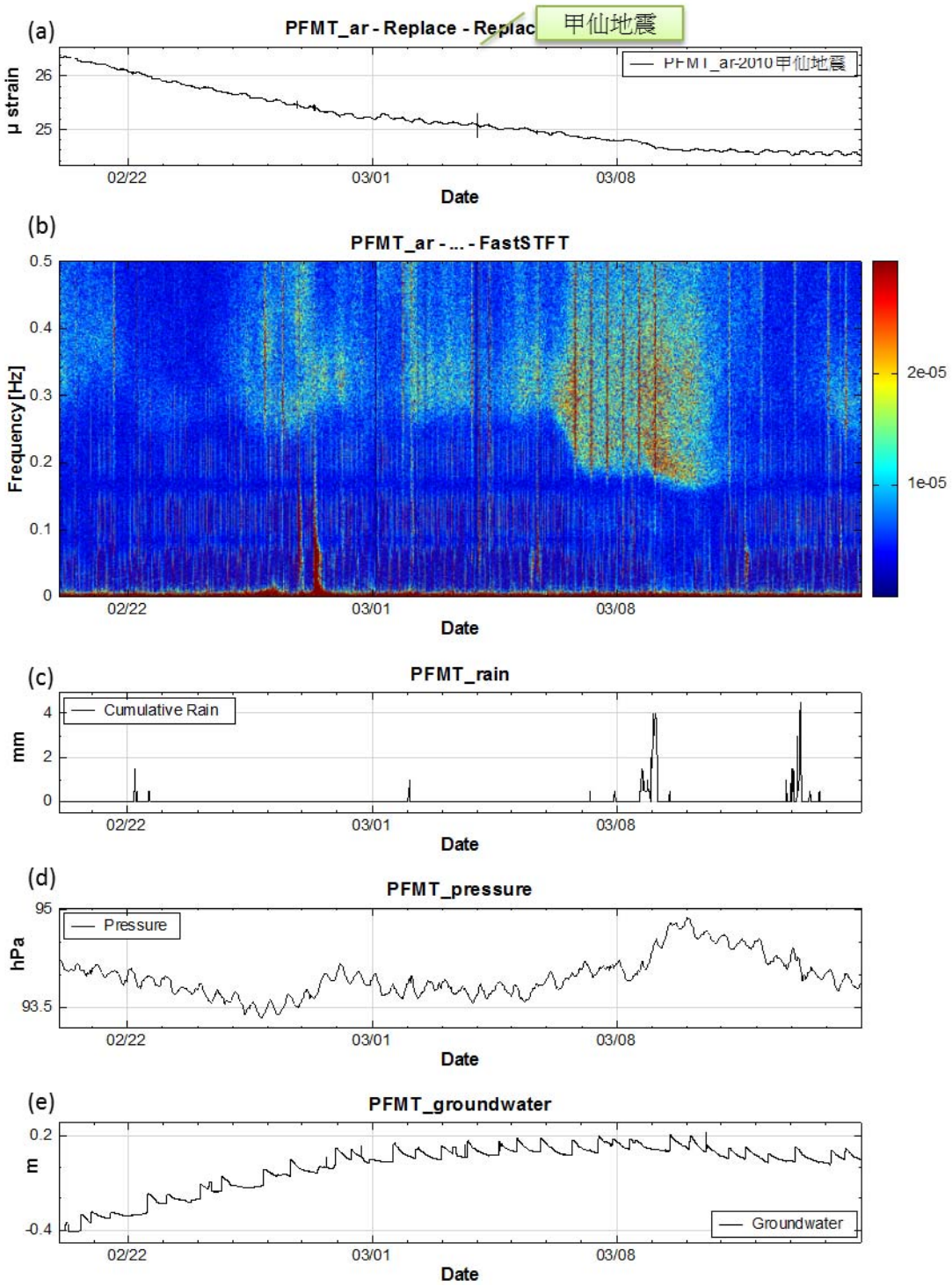


圖 4-2.9：甲仙地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化、（e）地下水位時序變化。

（3）日本東北地震

日本東北地震之震央位於日本宮城縣首府仙台市以東的太平洋海域，地震矩震級規模9.0，為一大型逆衝區地震，地震發生時間為當地時間 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分，即臺灣時間 13 時 46 分，震源深度為 24.4 公里，並引發最高 40.1 公尺的海嘯。研究區域內紀錄到 311 地震的訊號，分別為大坪國小（BMMT）、新樂國小（CINT）、梅花國小（PFMT）。進行時頻分析後，大坪測站如圖 4-2.10，有 0.1Hz 的特徵頻率，新樂測站如圖 4-2.11，有 0.05、0.07、0.09、0.16Hz 的特徵頻率、梅花測站如圖 4-2.12，無持續出現的特徵頻率。於 311 地震前後 3 個月間，在 0.2 ~ 0.5Hz 間之頻率有明顯的強度變化，該頻率變化之成因仍待討論，在 0.1Hz 以下則有較多頻段較廣的垂直線段分布，本研究討論的其他地震事件中並無此現象，日本東北地震之震源與測站之距離較遠，而地震矩震級規模遠大於其他地震事件，同時引發海嘯，推估此原因為地震發生時板塊破裂與餘震引起率反應。此時段之降雨於 2011 年 5 月，當雲狀頻率自 0.2 ~ 0.5Hz 變化為 0.1 ~ 0.5Hz 時，並非雨量最大或氣壓為極值點時，與汶川地震、甲仙地震產生的現象不同，產生之因素為何，須進一步討論。

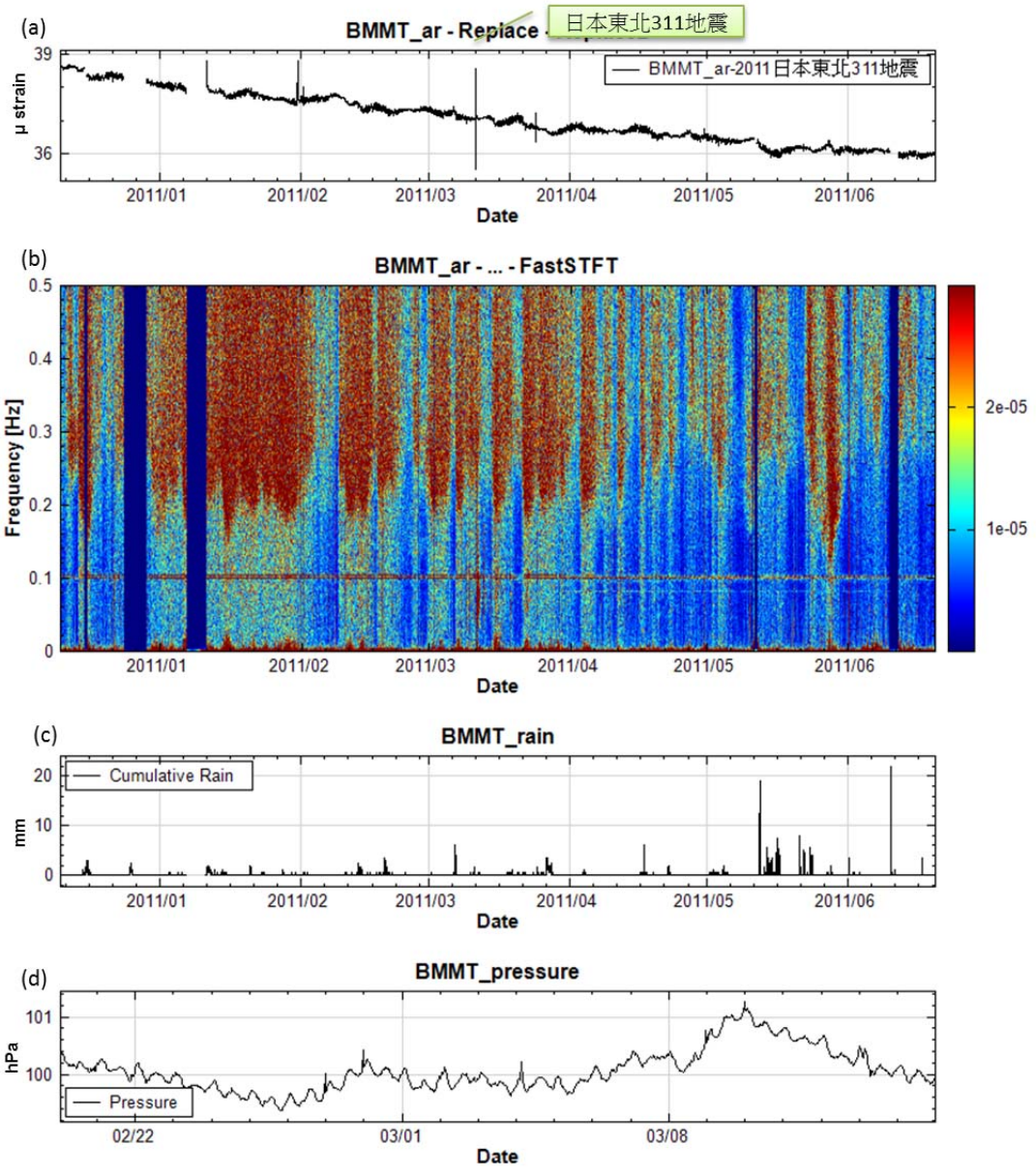


圖 4-2.10：日本東北地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

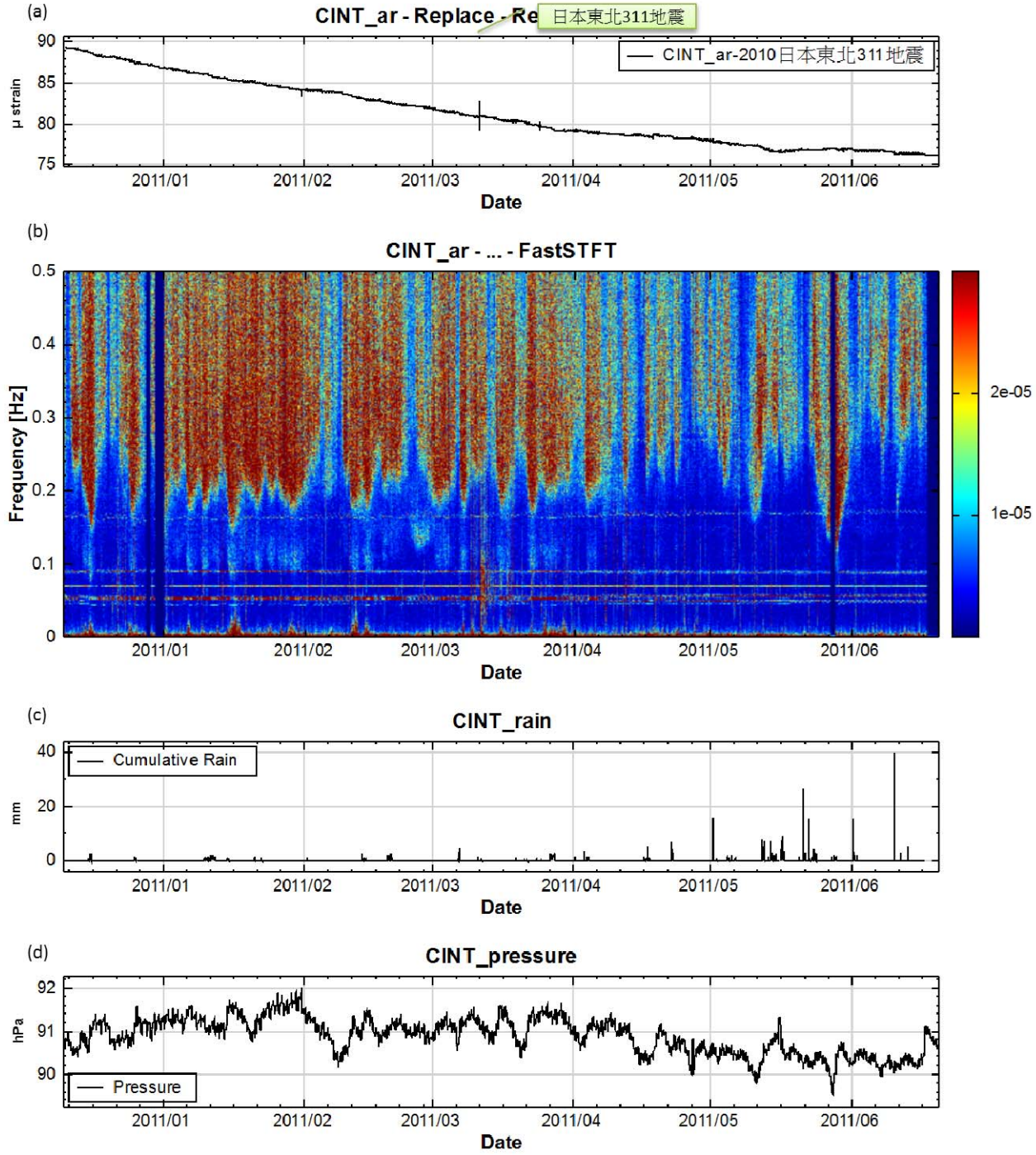


圖 4-2.11：日本東北地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

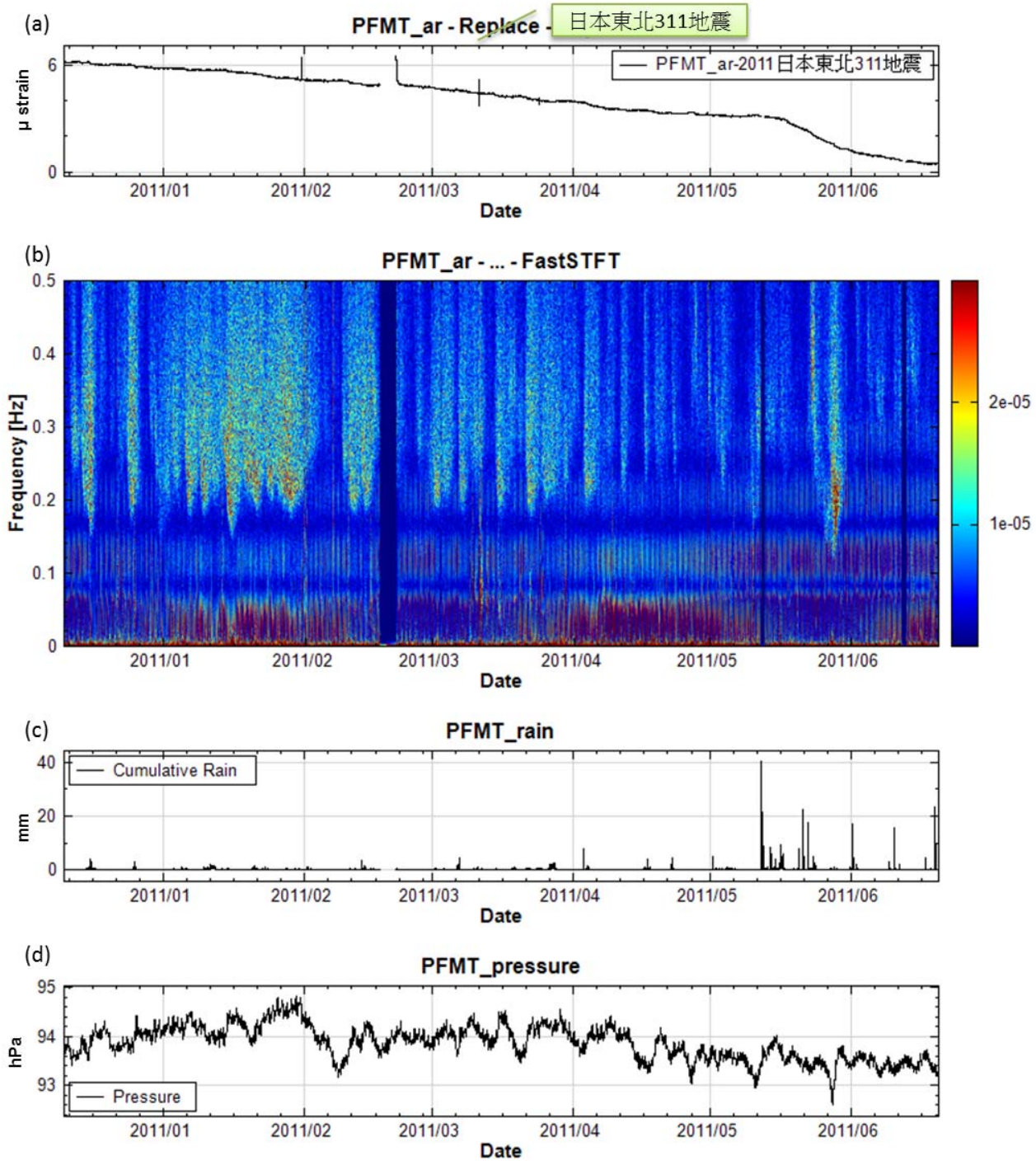


圖 4-2.12：日本東北地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

（4）2013 年 3 月地震

2013 年 3 月總共有兩起震央位於臺灣陸地，且規模大於 5 的地震事件，分別為臺灣時間 3 月 7 日 11 時 36 分，芮氏規模 5.9，地震深度 5.6 公里，震央於花蓮縣秀林鄉及 3 月 27 日 10 時 3 分，芮氏規模 6.2，地震深度 19.4 公里，震央於南投縣仁愛鄉。研究區域內有一個測站紀錄到 3 月兩起地震影響的訊號，為大坪國小（BMMT）測站、新樂國小（CINT）測站與梅花國小（CINT）測站訊號品質較差，經重新計算個分量之組合並無法改善，因此於此案例中不加入討論。進行時頻分析後，大坪國小（BMMT）測站如圖 4-2.13，有 0.1Hz 的特徵頻率。於兩起地震事件前後，在 0.2 ~ 0.5Hz 中皆有能強度變化，成因目前尚未明確。4 月 2 日有降雨現象，且為氣壓最低點，其雲狀頻率分布頻段自 0.2 ~ 0.5Hz 變成 0.15 ~ 0.5Hz，較其他時段廣一些，產生此現象之因素為氣壓或雨量，仍待進一步確認。

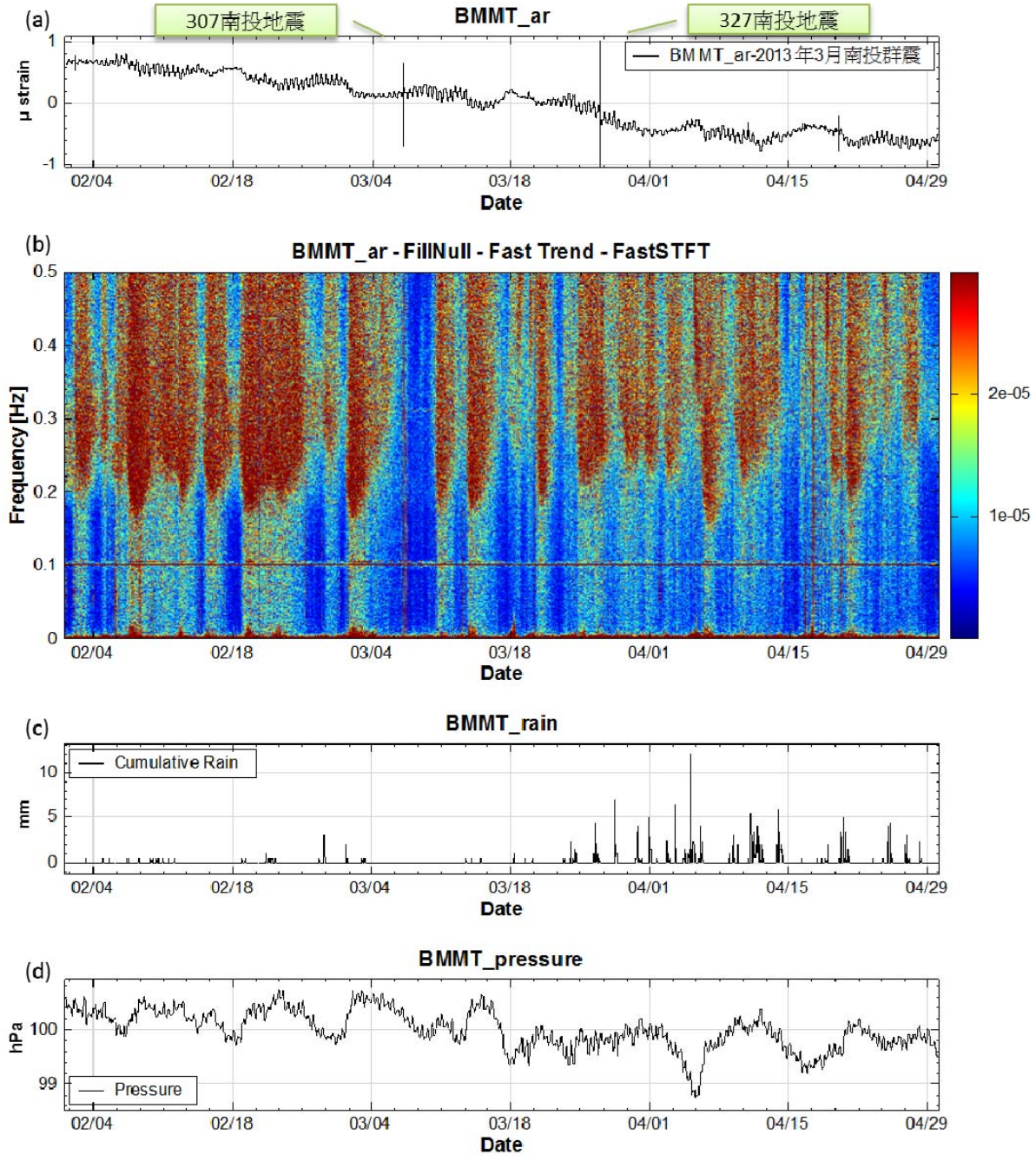


圖 4-2.13：2013 年 3 月地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

（5）2014 年 2 月新竹群震與 2 月 12 日陽明山地震

2014 年 2/5 ~ 2/8 於新竹橫山鄉接連發生規模 2.3 ~ 3.4 的地震事件，震源深度落在於 6~10 公里，共有 10 件，將其稱之為新竹群震。2/12 00:31 於臺北士林區發生規模 4.2 之地震，編號第 024 號，稱之為陽明山地震，詳細資訊請參閱表 4-2.1。

研究區域內有三個站紀錄兩起事件之應變訊號，分別為大坪國小（BMMT）測站、新樂國小（CINT）測站與梅花國小（PFMT）。進行時頻分析後，大坪國小（BMMT）測站如圖 4-2.14，有 0.1Hz 的特徵頻率，新樂國小（CINT）測站如圖 4-2.15，主要為 0.05、0.07、0.09、0.1Hz 的特徵頻率，梅花國小（PFMT）測站並無顯著之特徵頻率出現，如圖 4-2.16 所示。於兩起地震事件前後，在 0.2 ~ 0.5Hz 中皆有能強度變化，成因目前尚待討論。觀察時頻圖、雨量與氣壓時序變化，並無其他事件中當降雨或氣壓降低時，時頻圖雲狀頻率頻段增加得的情形。

表 4-2.1：2014 年新竹群震與陽明山地震詳細資訊（資料來源：中央氣象局）。

地震編號	臺灣時間	經度	緯度	深度（公里）	規模	震央位置
小區域	2 月 05 日 19 時 14 分	121.11	24.70	10.9	2.7	新竹縣政府東南方 17.1 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 05 日 19 時 17 分	121.10	24.70	10.9	2.6	新竹縣政府東南方 16.4 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 07 日 01 時 05 分	121.11	24.70	11.3	2.8	新竹縣政府東南方 16.9 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 07 日 02 時 00 分	121.11	24.70	9.6	2.8	新竹縣政府東南方 17.2 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 07 日 07 時 04 分	121.11	24.70	9.0	2.3	新竹縣政府東南方 17.4 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 07 日 07 時 04 分	121.14	24.68	6.7	2.3	新竹縣政府東南方 21.0 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 07 日 07 時 26 分	121.12	24.71	6.6	2.4	新竹縣政府東南方 17.2 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 07 日 19 時 14 分	121.11	24.70	11.3	2.3	新竹縣政府東南方 17.3 公里（位於新竹縣橫山鄉）
小區域	2 月 07 日 23 時 01 分	121.11	24.70	10.6	2.7	新竹縣政府東南方 17.2 公里（位於新竹縣橫山鄉）
第 022 號	2 月 08 日 01 時 39 分	121.11	24.70	8.4	3.4	新竹縣政府東南方 17.1 公里（位於新竹縣橫山鄉）
第 024 號	2 月 12 日 00 時 31 分	121.57	25.13	6.4	4.2	臺北市政府北方 10.5 公里（位於臺北市士林區）

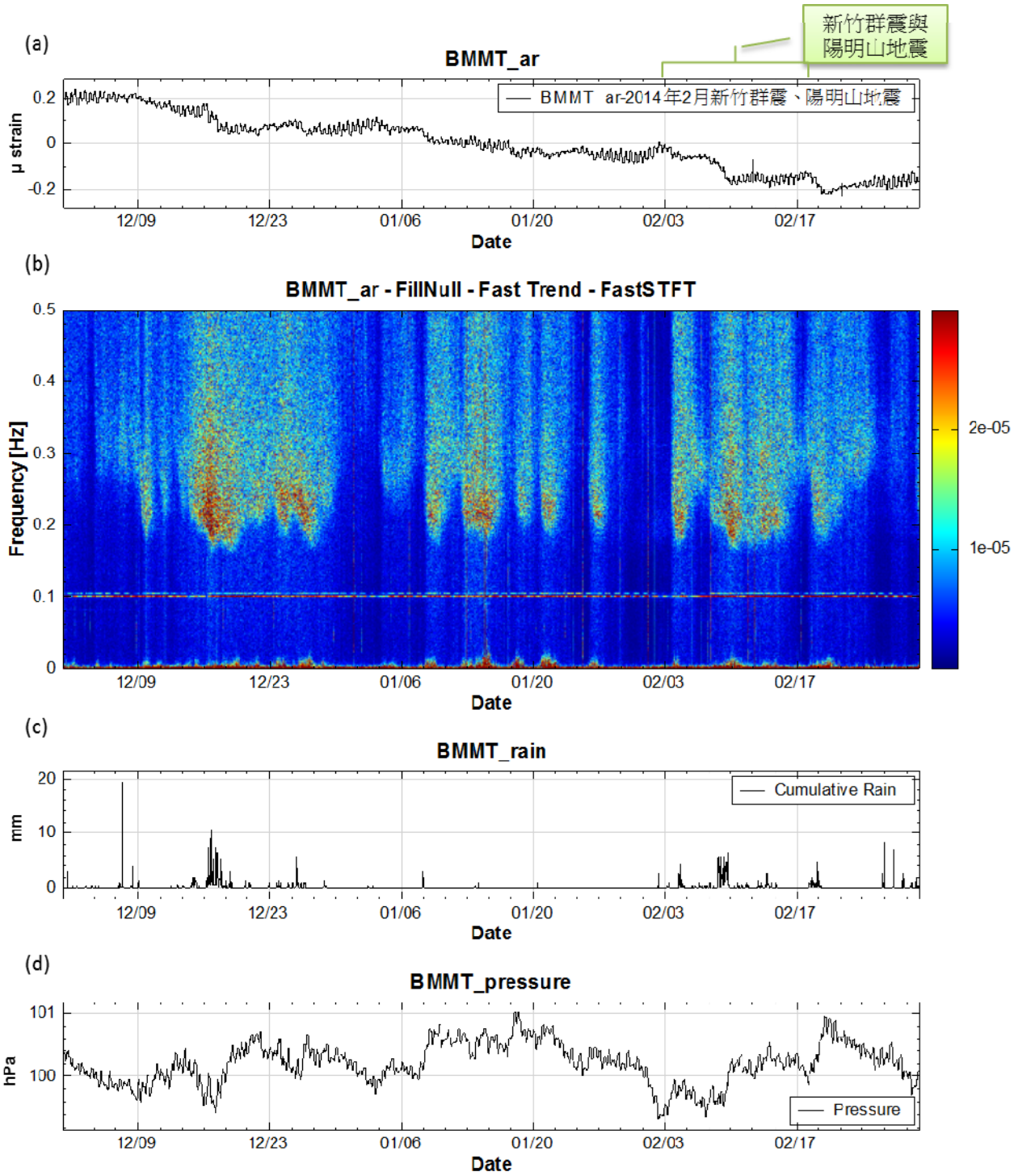


圖 4-2.14：2014 年 2 月地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

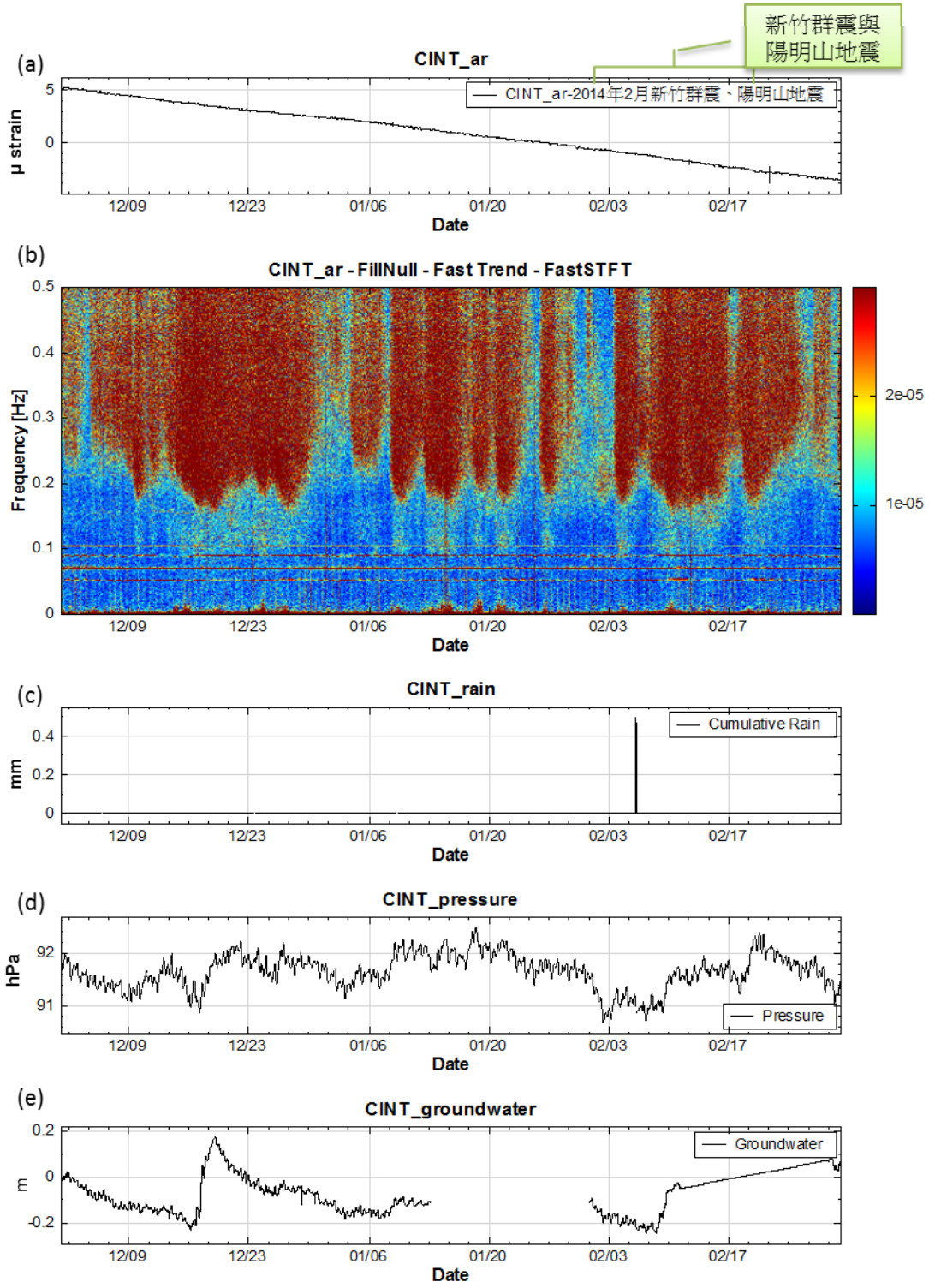


圖 4-2.15：2014 年 2 月地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化、（e）地下水位時序變化。

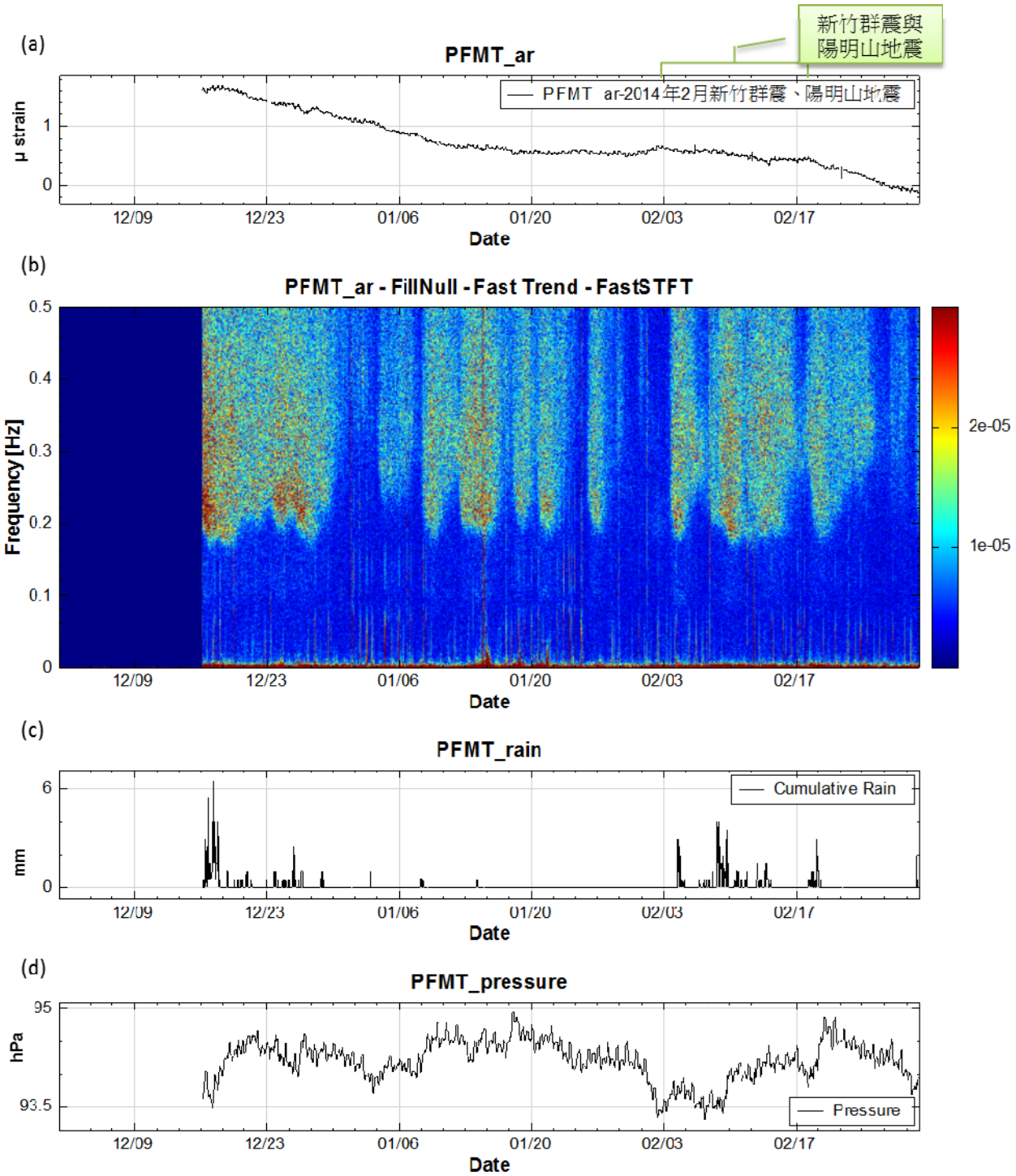


圖 4-2.16：2014 年 2 月地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

（6）2014 年 5 月 21 日花蓮地震

2014 年 5 月 21 日 8 時 21 分於花蓮縣鳳林鎮發生規模 5.9 的地震事件，震源深度為 5.9 公里，地震發生後同一天於萬榮鄉發生 3 件規模 3 左右的地震。。

井下應變儀中紀錄到 521 花蓮地震的訊號，分別為大坪國小（BMMT）測站與新樂國小（CINT）測站，梅花國小（PFMT）測站於 5 月 20 日至 21 日清晨訊號短缺，並無顯著之地震引起的應變量變化。大坪國小（BMMT）測站面應變資料進行時頻分析之後，其結果如圖 4-2.17 有 0.1Hz 的特徵頻率；新樂國小（CINT）測站之結果如圖 4-2.18，有 0.05、0.07、0.09、0.1、0.21Hz 的特徵頻率；梅花國小（PFMT）測站之結果如圖 4-2.19，並無持續出現的徵頻率。此時段之時頻圖皆於於 0.2 ~ 0.5 Hz 處有強度變化，而大坪測站與梅花測站於 5/14 日氣壓最低點時，時頻圖中 0.2 ~ 0.5 Hz 之強度變化大於其他時段，新樂國小測站之雨量紀錄與其他測站不相似，需進一步判定其正確性。

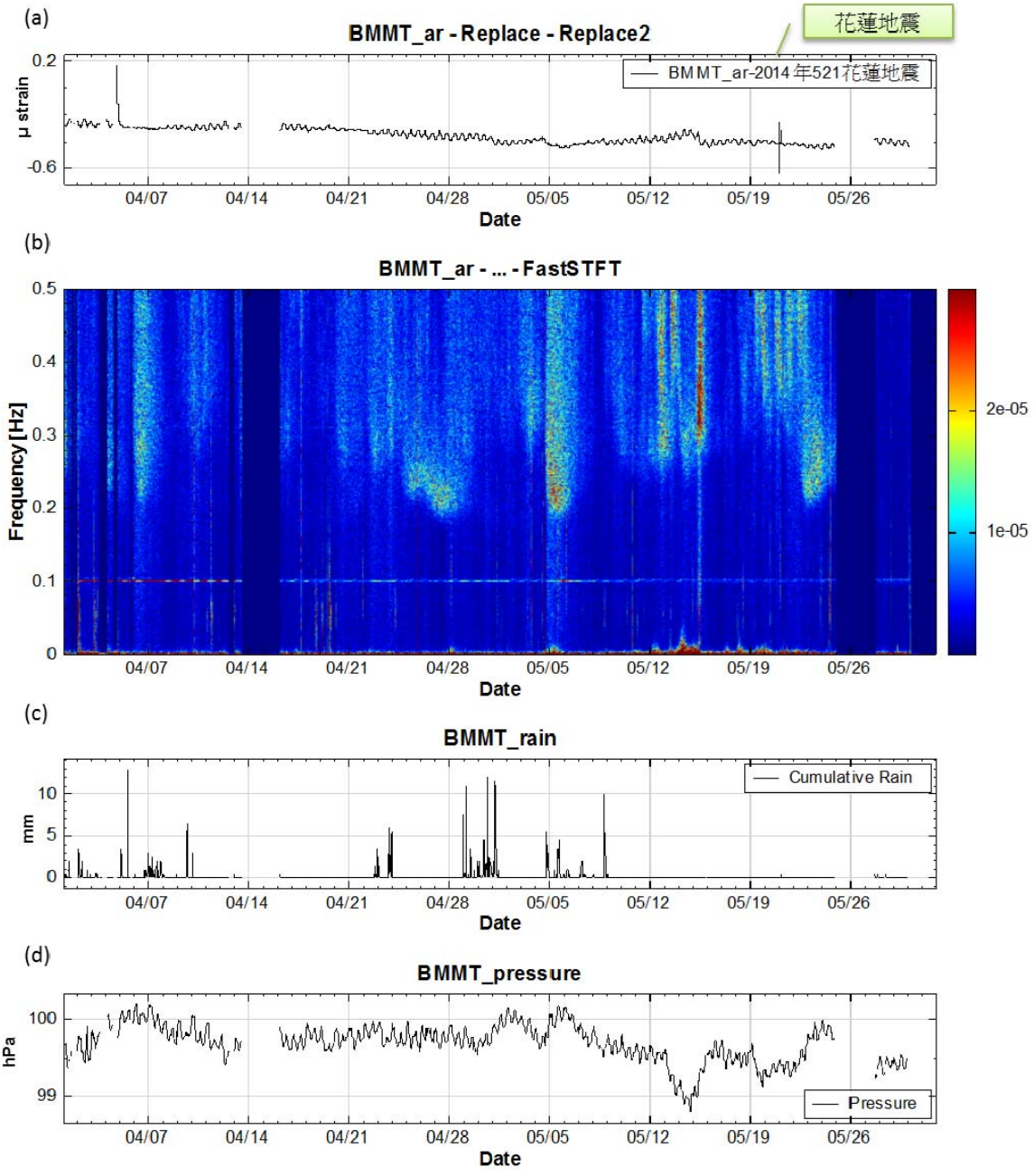


圖 4-2.17：2014 年 5 月 21 日花蓮地震前後大坪國小（BMMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

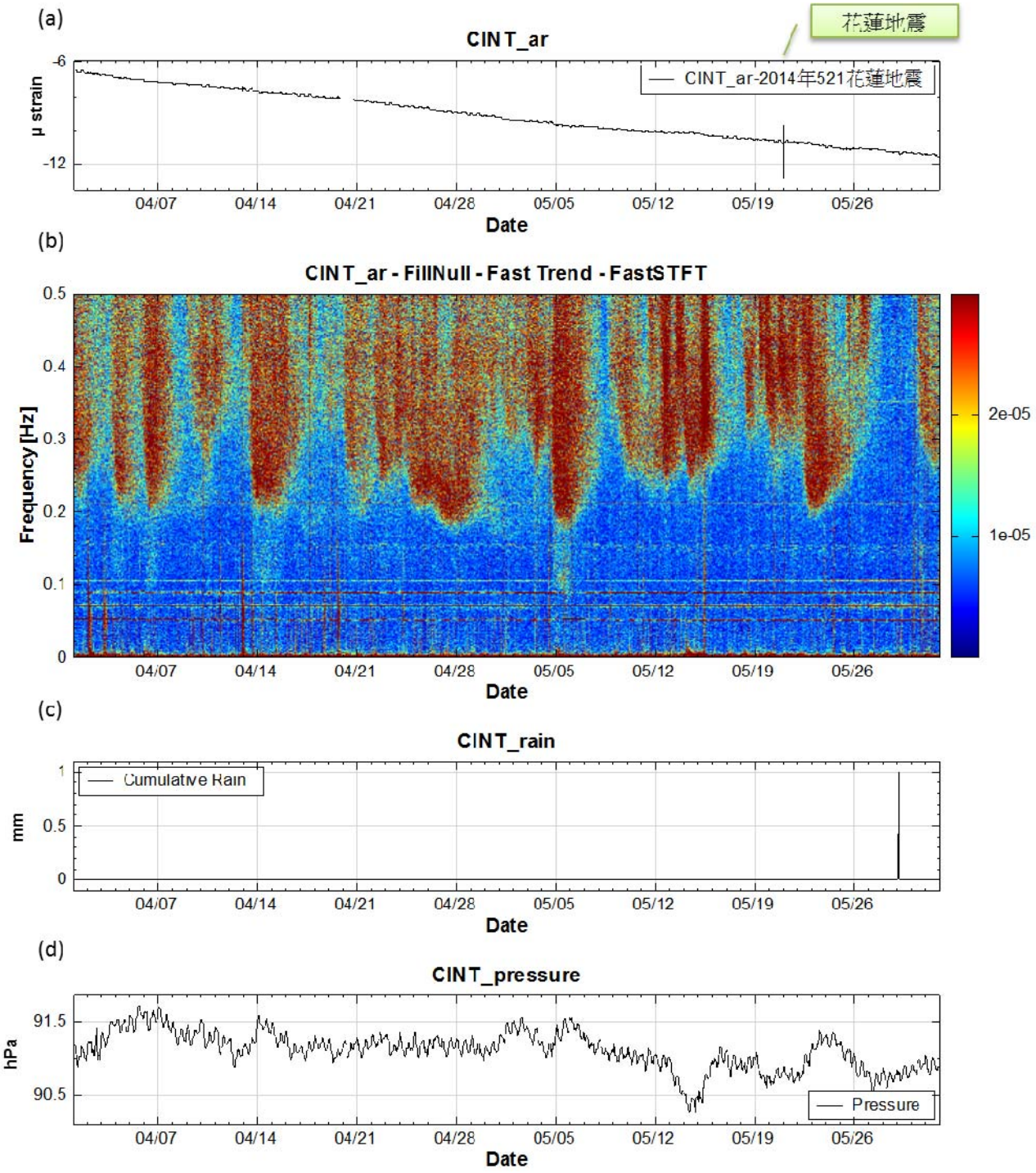


圖 4-2.18：2014 年 5 月 21 日花蓮地震前後新樂國小（CINT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

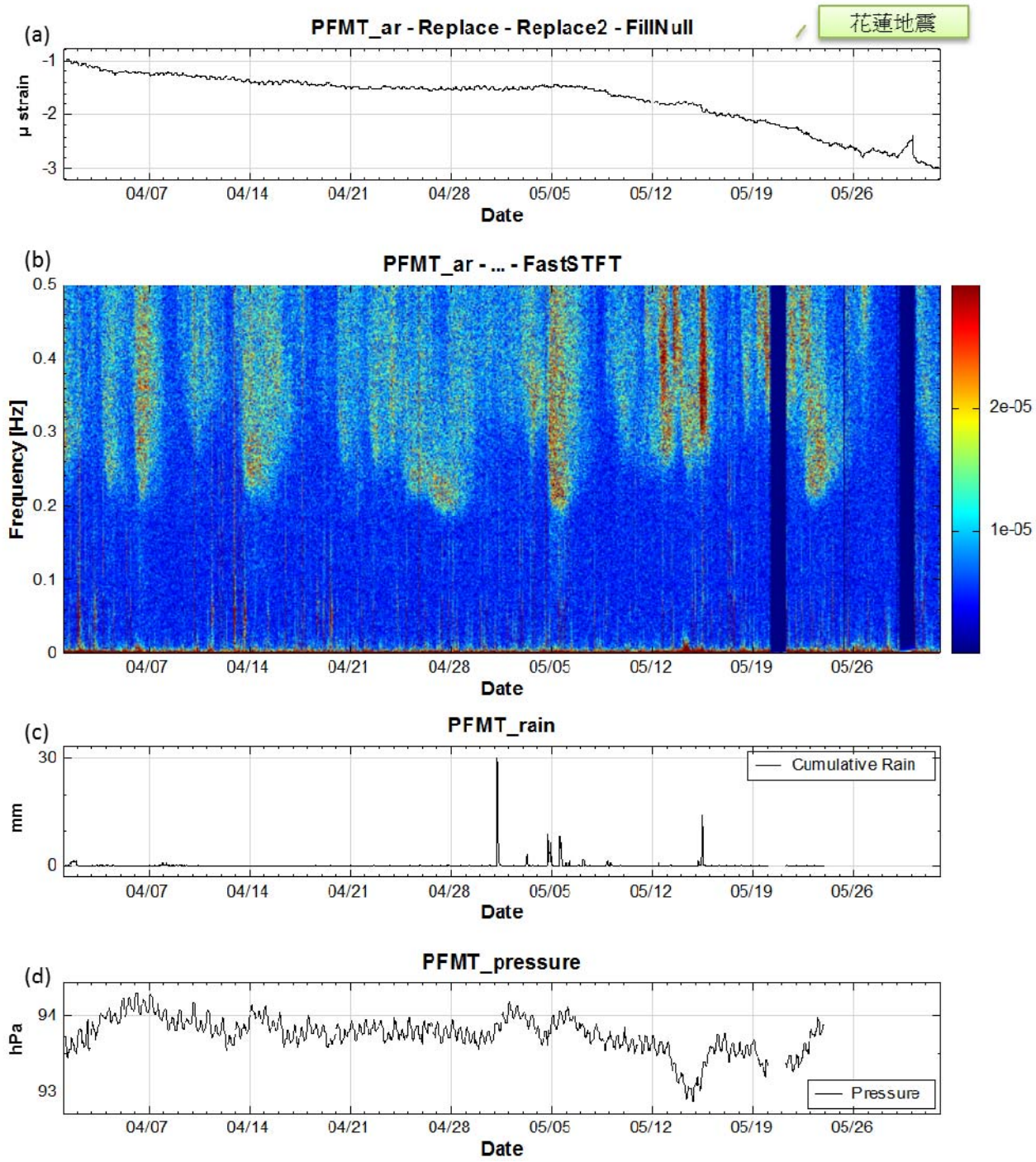


圖 4-2.19：2014 年 5 月 21 日花蓮地震前後梅花國小（PFMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）面應變資料時頻圖、（c）累積雨量時序變化、（d）大氣壓力時序變化。

4-2-3 綜合討論

於 4-2-1 節與 4-2-2 節中，透過應變儀低、中、高各頻段強度變化與地震、颱風事件對於應變儀影響中有異同的反應，來觀察應變儀面應變頻率變化有無重複出現的現象。發現 BMMT 與 CINT 具有氣特徵頻率。而 PFMT 在各個事件之時段中皆有出現雲狀的頻率變化(0.2 ~ 0.5Hz)，該特徵可能由氣壓或降雨事件影響而成。

為進一步討論應變儀與地震之關聯性，本節中將討論 0.03Hz 以下之面應變訊號其強度變化與地震的關係，並選擇花蓮萬榮地震（M_L6.4）、宜蘭大同地震（M_L4.4）、新竹橫山群震（M_L2.3 ~ 3.4）、陽明山地震（M_L4.2）、花蓮鳳林地震（M_L5.9）等五起地震事件進行比較，地震事件詳細資訊於表 4-2.2 所列。應變儀面應變分析流程先利用中位數濾波器（Median Filter）去除趨勢變化，再針對 0.03Hz 以下之訊號進行短時距傅立葉分析，將短實據傅立葉分析結果積分之後，經由中位數濾波器（Median Filter）匯出 0.03Hz 以下之強度趨勢變化，觀察各測站強度變化與地震發生時間之關係。應變儀面應變分析結果如圖 4-2.20 至圖 4-2.22 所示，圖中（a）為面應變原始訊號、(b）0 ~ 0.03Hz 短時距傅立葉時頻圖、(c）0 ~ 0.03Hz 強度變化，觀察圖中（c）0 ~ 0.03Hz 強度變化，地震發生前，0.03Hz 以下之面應變量會累積，當地震發生後，能量得到釋放而下降。新竹網中以 BMMT 與 CINT 之反應特別顯著，推測 0.03Hz 以下之面應變訊號與地震引起之能量累積有關，故持續觀察 0.03Hz 以下之面應變強度變化，了解於其他觀測網與地震事件有無顯著關聯性。

表 4-2.2：地震事件詳細資訊（資料來源：中央氣象局）。

地震名稱	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
花蓮萬榮地震	2013 年 10 月 31 日 20 時 02 分	121.35	23.57	15	6.4	花蓮縣政府南偏西方 54.6 公里(位於花蓮縣萬榮鄉)
宜蘭大同地震	2013 年 12 月 22 日 12 時 18 分	121.7	24.61	41.8	4.4	宜蘭縣政府南偏西方 14.7 公里(位於宜蘭縣大同鄉)
新竹橫山群震	2014 年 2 月 05 日 19 時 14 分	121.11	24.7	10.9	2.7	新竹縣政府東南方 17.1 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 05 日 19 時 17 分	121.1	24.7	10.9	2.6	新竹縣政府東南方 16.4 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 07 日 01 時 05 分	121.11	24.7	11.3	2.8	新竹縣政府東南方 16.9 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 07 日 02 時 00 分	121.11	24.7	9.6	2.8	新竹縣政府東南方 17.2 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 07 日 07 時 04 分	121.11	24.7	9	2.3	新竹縣政府東南方 17.4 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 07 日 07 時 04 分	121.14	24.68	6.7	2.3	新竹縣政府東南方 21.0 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 07 日 07 時 26 分	121.12	24.71	6.6	2.4	新竹縣政府東南方 17.2 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 07 日 19 時 14 分	121.11	24.7	11.3	2.3	新竹縣政府東南方 17.3 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 07 日 23 時 01 分	121.11	24.7	10.6	2.7	新竹縣政府東南方 17.2 公里（位於新竹縣橫山鄉）
	2014 年 2 月 08 日 01 時 39 分	121.11	24.7	8.4	3.4	新竹縣政府東南方 17.1 公里（位於新竹縣橫山鄉）
陽明山地震	2014 年 2 月 12 日 00 時 31 分	121.57	25.13	6.4	4.2	臺北市政府北方 10.5 公里(位於臺北市士林區)
花蓮鳳林地震	2014 年 5 月 21 日 08 時 21 分	121.43	23.74	16.5	5.9	花蓮縣政府西南方 34.2 公里(位於花蓮縣鳳林鎮)

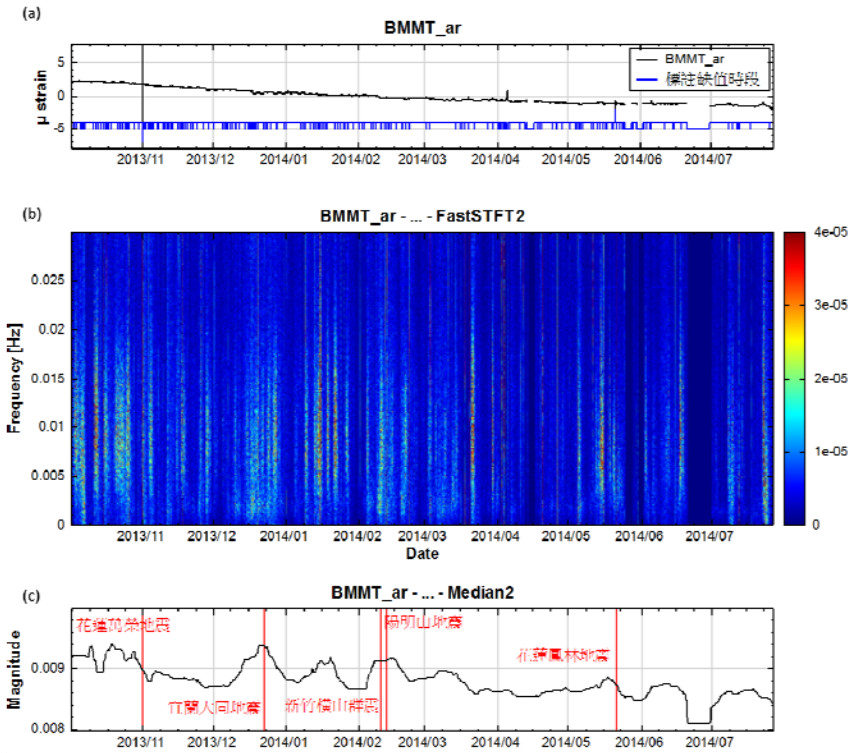


圖 4-2.20：2013 年 10 月 1 日至 2014 年 7 月 27 日大坪測站（BMMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）0 ~ 0.03Hz 面應變資料時頻圖、（c）0 ~ 0.03Hz 強度變化。

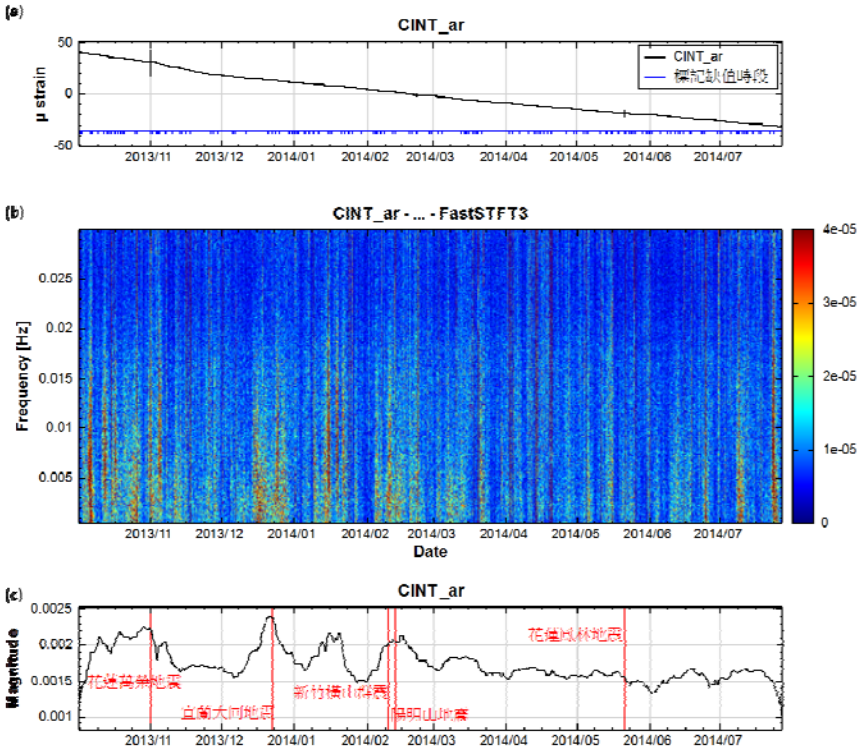


圖 4-2.21：2013 年 10 月 1 日至 2014 年 7 月 27 日新樂國小測站（CINT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）0 ~ 0.03Hz 面應變資料時頻圖、（c）0 ~ 0.03Hz 強度變化。

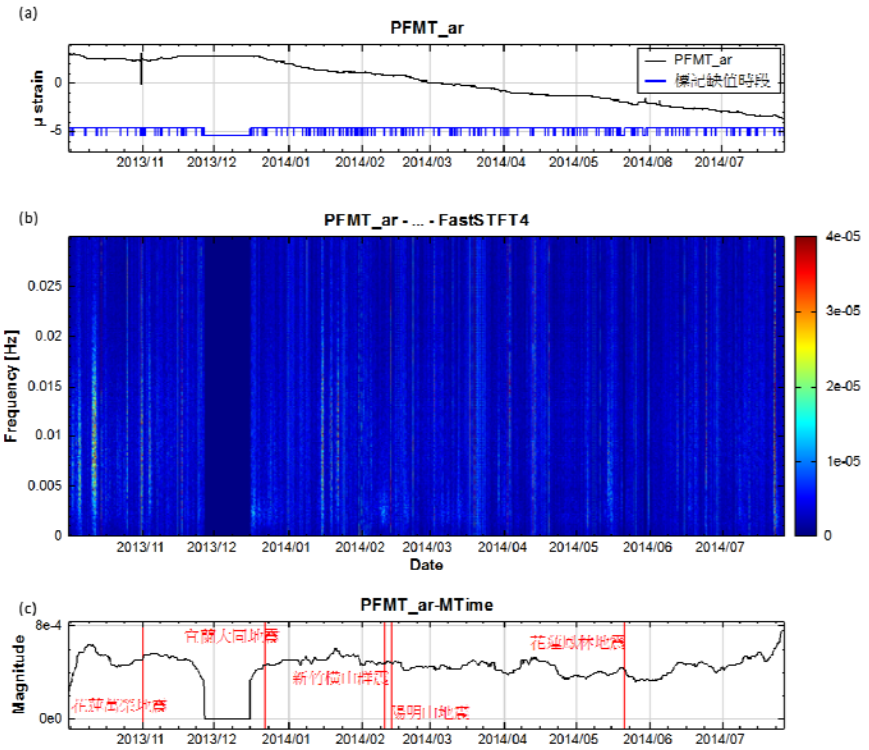


圖 4-2.22：2013 年 10 月 1 日至 2014 年 7 月 27 日梅花國小測站（PFMT）測站面應變時頻分析結果。（a）面應變資料時序變化、（b）0 ~ 0.03Hz 面應變資料時頻圖、（c）0 ~ 0.03Hz 強度變化。

4-2-4 地震地下水資料分析

嘉義網井下應變儀易受到地下水變化影響，故本節蒐集中央氣象局花蓮地震地下水測站（HWA：緯度 23.9769 度、經度 121.6047 度）所紀錄之水位變化進行時頻分析，資料長度:2013/9/12 至 2014/11/02，水位記錄頻率為一秒鐘 1 次，利用短時距傅立葉轉換（STFT）繪製時頻圖，如圖 4-2.23 所示，發現地下水位於部分時段，有穩定之頻率出現，但會不定期的改變，針對其中 10 起頻率改變之時間點，比對中央氣象局地震事件紀錄，其頻率變化前後皆有地震事件發生，對應之地震事件如表 4-2.3 所示，多數地震事件之震央位置發生於宜蘭花蓮地區，但引起地下水位頻率變化之物理機制仍待討論。

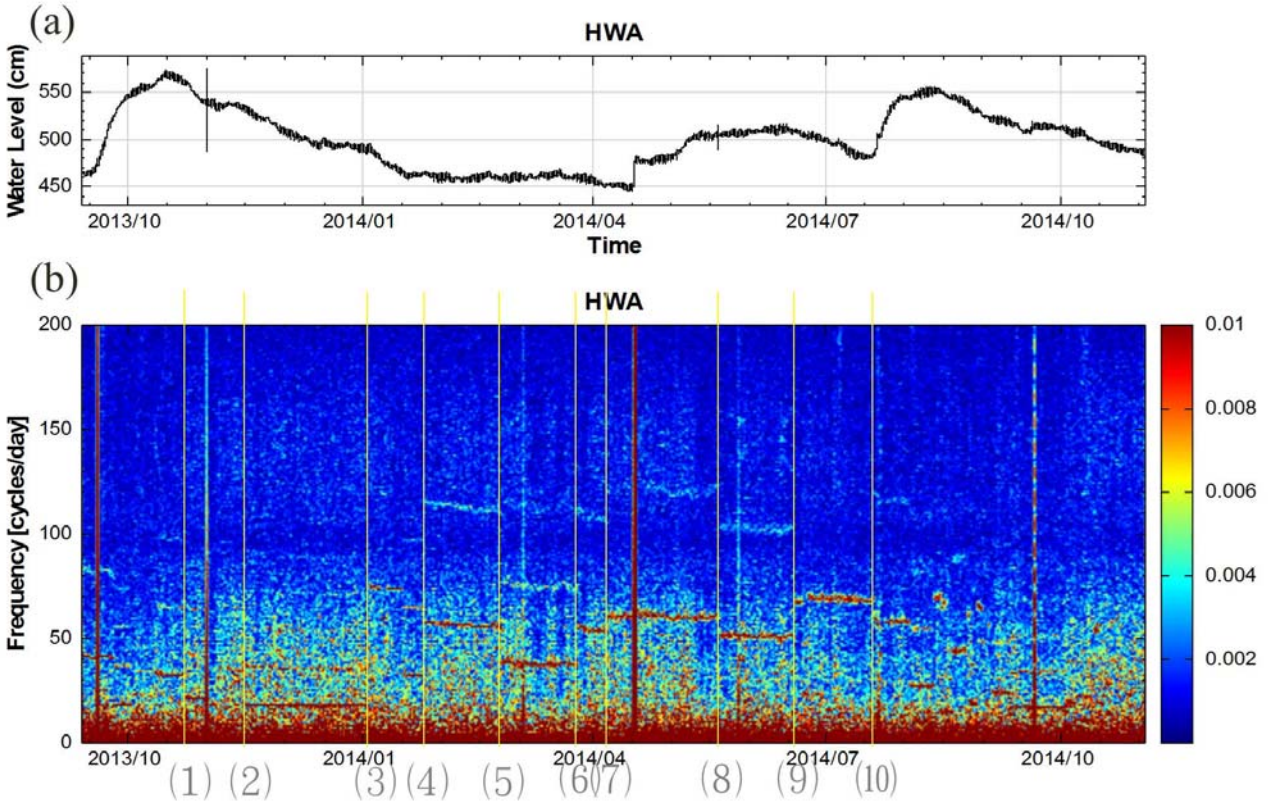


圖 4-2.23：2013 年 9 月 12 日至 2014 年 11 月 2 日花蓮地震地下水測站(HWA)時頻分析結果。（a）地下水位資料時序變化、（b）地下水資料時頻圖。

表 4-2.3：對應花蓮地震地下水地震事件詳細資訊（資料來源：中央氣象局）。

事件編號	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
1	2013 年 10 月 22 日 09 時 59 分	121.58	23.81	27.7	4	花蓮縣政府南方 20.9 公里 (位於花蓮縣近海)
	2013 年 10 月 22 日 20 時 08 分	121.9	24.45	20.6	4.2	宜蘭縣政府南偏東方 34.4 公里 (位於宜蘭縣近海)
2	2013 年 11 月 15 日 11 時 26 分	120.98	23.95	13.3	4	南投縣政府東方 30.2 公里 (位於南投縣埔里鎮)
3	2014 年 1 月 02 日 19 時 44 分	121.57	25.06	9.4	2.9	臺北市政府北偏東方 2.2 公里 (位於臺北市內湖區)
	2014 年 1 月 02 日 19 時 46 分	121.57	25.06	9.8	2.5	臺北市政府北偏東方 2.6 公里 (位於臺北市內湖區)
	2014 年 1 月 03 日 00 時 34 分	121.57	25.06	9.8	2.6	臺北市政府北偏東方 2.6 公里 (位於臺北市內湖區)
4	2014 年 1 月 25 日 16 時 20 分	121.42	23.75	20.9	2.8	花蓮縣政府西南方 33.5 公里 (位於花蓮縣鳳林鎮)
5	2014 年 2 月 24 日 23 時 55 分	121.41	23.69	17.8	3.1	花蓮縣政府西南方 40.2 公里 (位於花蓮縣鳳林鎮)
6	2014 年 3 月 25 日 11 時 20 分	121.81	24.35	9.8	3.2	宜蘭縣政府南方 42.8 公里 (位於宜蘭縣近海)
7	2014 年 4 月 06 日 23 時 15 分	121.59	24.56	5.5	3	宜蘭縣政府西南方 25.5 公里 (位於宜蘭縣大同鄉)
8	2014 年 5 月 21 日 08 時 21 分	121.43	23.74	16.5	5.9	花蓮縣政府西南方 34.2 公里 (位於花蓮縣鳳林鎮)
9	2014 年 6 月 18 日 03 時 49 分	121.97	24.5	61.8	4.8	宜蘭縣政府東南方 32.6 公里 (位於臺灣東部海域)
	2014 年 6 月 18 日 05 時 13 分	121.54	23.76	5.4	3.5	花蓮縣政府南偏西方 26.6 公里 (位於花蓮縣壽豐鄉)
10	2014 年 7 月 19 日 17 時 30 分	121.44	23.74	19.3	3.1	花蓮縣政府西南方 33.9 公里 (位於花蓮縣鳳林鎮)

4-3 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 4-3.1），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 4-3.1）。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，只有兩個測站 RST 與 PFMT 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。

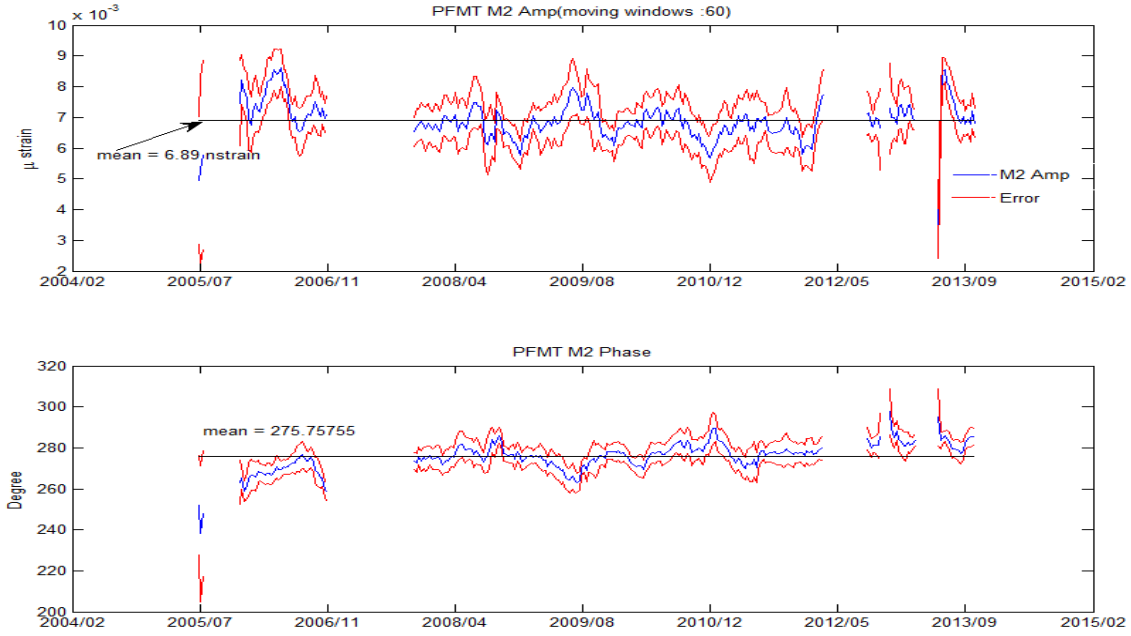


圖 4-3.1：PFMT 站平面應變長期 M2 地潮分潮。

表 4-3.1：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**

4-4 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。

以圖為例，e_i 表示第 i 個頻道的軸向伸張量，圖 4-4.1a 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 4-4.1b），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 4-4.1c）。

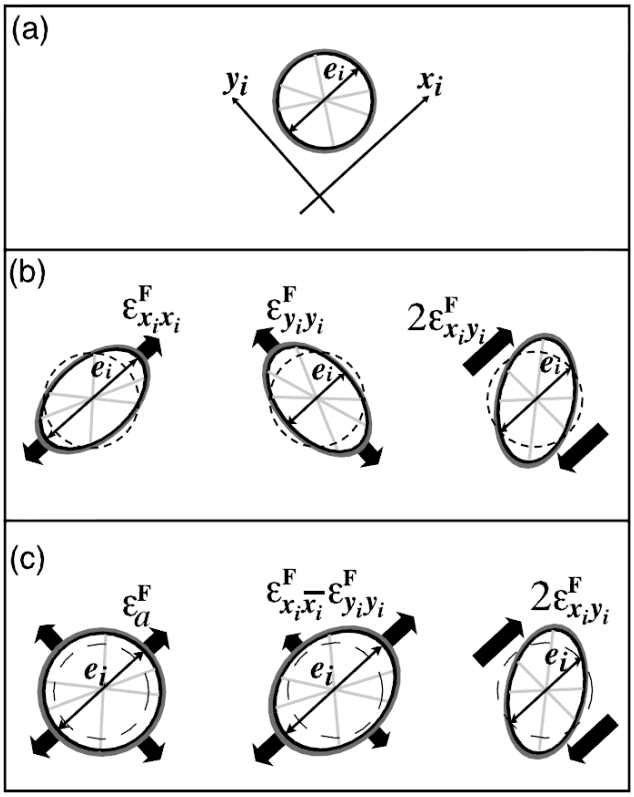


圖 4-4.1：在均質等向的理想環境下，應變儀受力後的水平張量變化情形（Roeloaffs, 2010）。

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：

$$\frac{g_1e_1+g_3e_3}{2}=C\varepsilon_a^F \qquad \text{（式 4-4.1）}$$

$$(g_1e_1-g_3e_3)=D(\varepsilon_{x1x1}-\varepsilon_{y1y1})^F \qquad \text{（式 4-4.2）}$$

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 4-4.1 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 4-4.1：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	-0.021	-0.041	-0.022	-0.007	-0.005
RST	-0.040	nan	-0.053	-0.065	-0.042
DARB	-0.124	-0.312	-0.108	-0.120	-0.375
TAIS	-0.163	-0.143	-0.135	-0.121	-0.233
TSUN	-0.157	-0.110	-0.144	-0.136	-0.258
PFMT	-0.060	-0.092	-0.053	-0.050	-0.130
BMMT	-0.114	-0.132	-0.096	-0.059	-0.189
CINT	-0.175	-0.116	-0.103	-0.165	-0.236
SANS	-0.201	-0.392	-0.526	-0.174	-0.772
SLIN	-0.223	-0.185	-0.233	-0.282	-0.379
JING	-0.148	-0.115	-0.123	-0.125	-0.247

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 4-4.2），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站（JING）資料來檢視，從表 4-4.1 可以得知錦和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，因此我們利用錦和站的觀察結果來進行差應變的計算（式 4-4.2），以減少計算的誤差，結果如圖 4-4.3 所示。在圖 4-4.3 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，由於錦和站各頻道氣壓響應的結果接近，我們可視錦和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 4-4.2，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，以錦和站觀測為例，對於距離 10 公里左右的 0212 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。

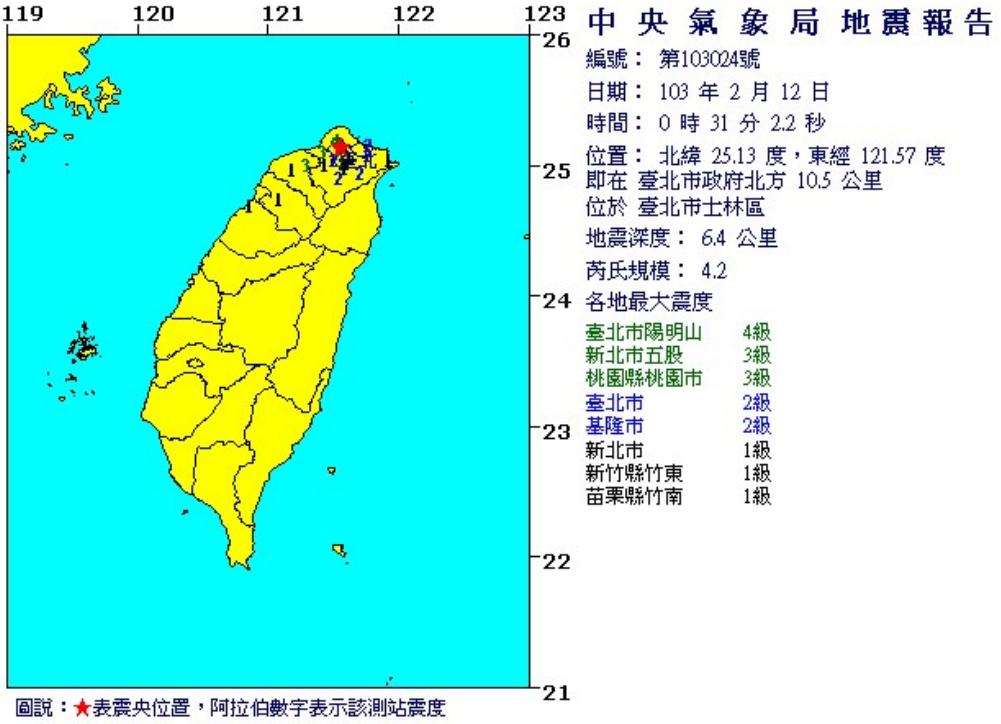


圖 4-4.2：2014 年 2 月 12 日於臺北市士林區發生規模 4.2 的有感地震。

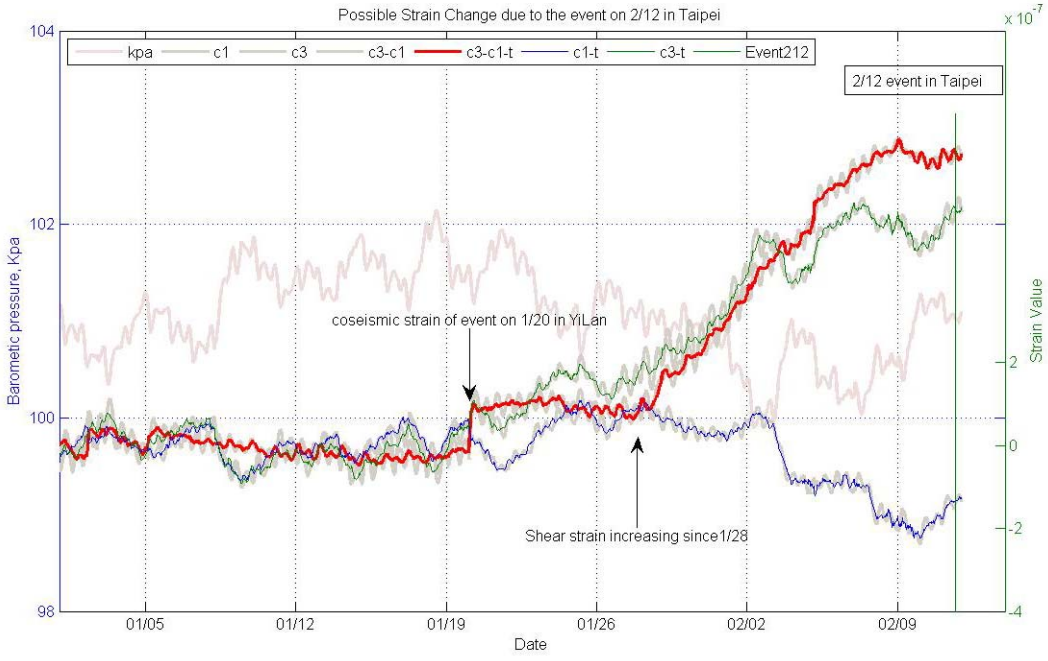


圖 4-4.3：錦和國小利用軸向差應變的計算，可比面應變更易解讀出地震前之前兆異常現象。圖上橫軸為時間 2014 年 1/3-2/12，左邊縱軸表示氣壓大小，右邊縱軸表示應變變化值，利用 CH3（綠線）與 CH1（藍線）間的差值（CH3-CH1）計算出沿 CH3 方向之差應變。

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（2014）年度，對於新竹大平地、雲林古坑、嘉義中崙濁水潭、屏東屏科大、臺東池上、花蓮東華共六座已設置之土壤氣體連續觀測站；以及新竹大坪國小地下水位觀測井與地調所設置之七座地下水位觀測井持續進行觀測，另外原來的嘉義沄水地下水觀測站於今年改設為地下水溶解氣體觀測站；此外在東部池上斷層附近之安通溫泉及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，以期於全島能夠建立較為完整之觀測網，利於往後對於分析資料之判讀。此外，亦於宜蘭地區進行土壤氣體的調查探勘，以期於將來設站之參考。

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，本研究已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，修正後的成果將於本章地下水壓觀測部分詳細說明。

本年度彙整各土壤氣體、地下水位、地下水氡觀測站之觀測結果，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連性，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

本計畫分別有六座既有的土壤氣體觀測站（新竹大平地、雲林古坑、嘉義中崙、屏東屏科大、臺東池上及花蓮東華）。另外，本計畫亦觀察八口由中央地質調查所提供之地下水觀測井：臺北明德、錦和、樹林及新竹新樂與大坪，以及嘉義中興、太興及達邦。另外原來的嘉義沄水地下水觀測站於今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東部安通站與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。

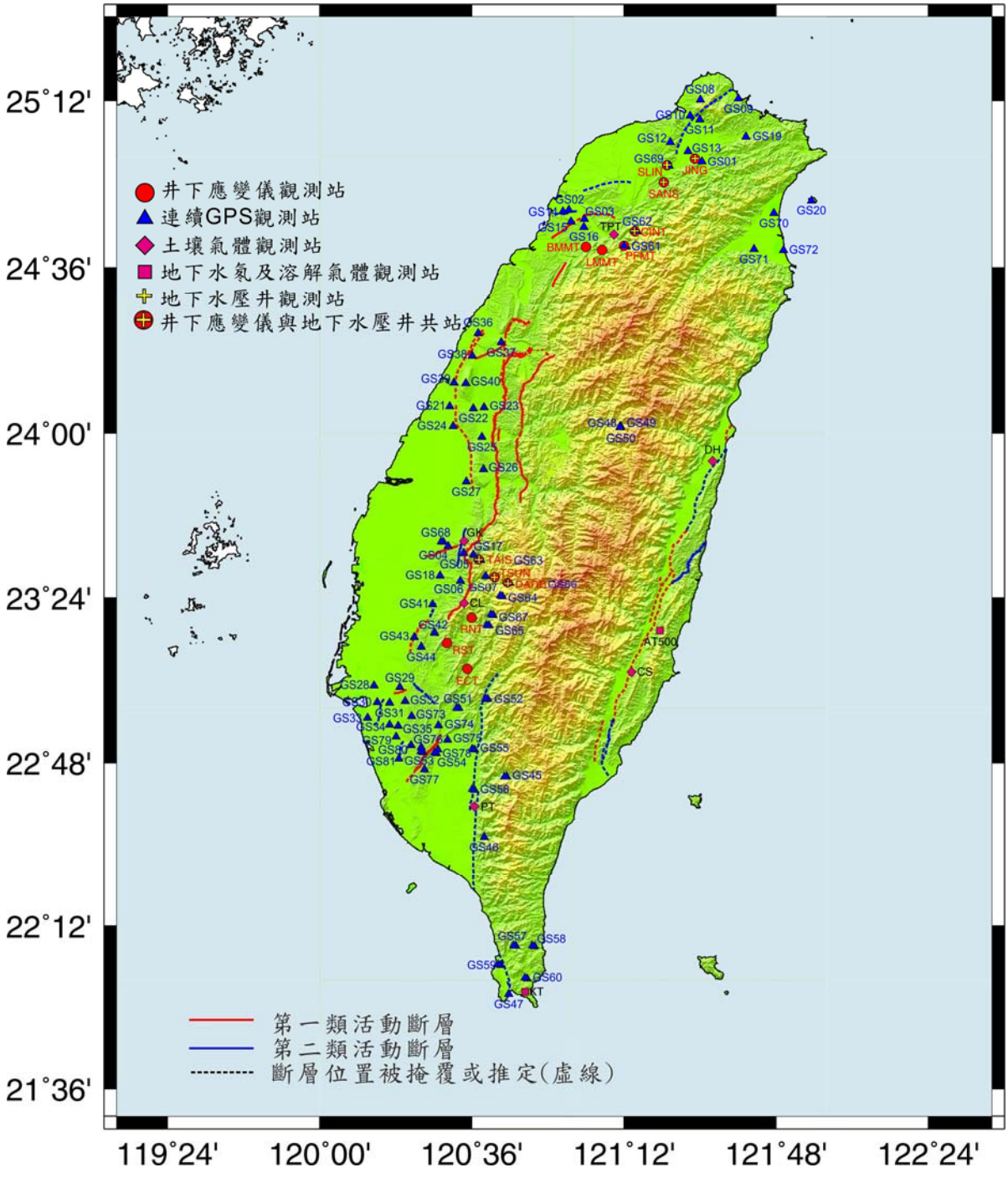


圖 5-1.1：既有觀測站的分布位置。

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
嘉義中崙濁水潭站（CL）	204643	2586520
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		
臺北明德站（SANS）	286119	2755420
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
嘉義中興站（TSUN）	219048	2597145
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
玉里安通站（AT）	284243	2575601
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 2013 年 12 月 1 日至 2014 年 11 月 31 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 20 起、中崙站 24 起、屏科大站 18 起、東華站 30 起與池上站 32 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。

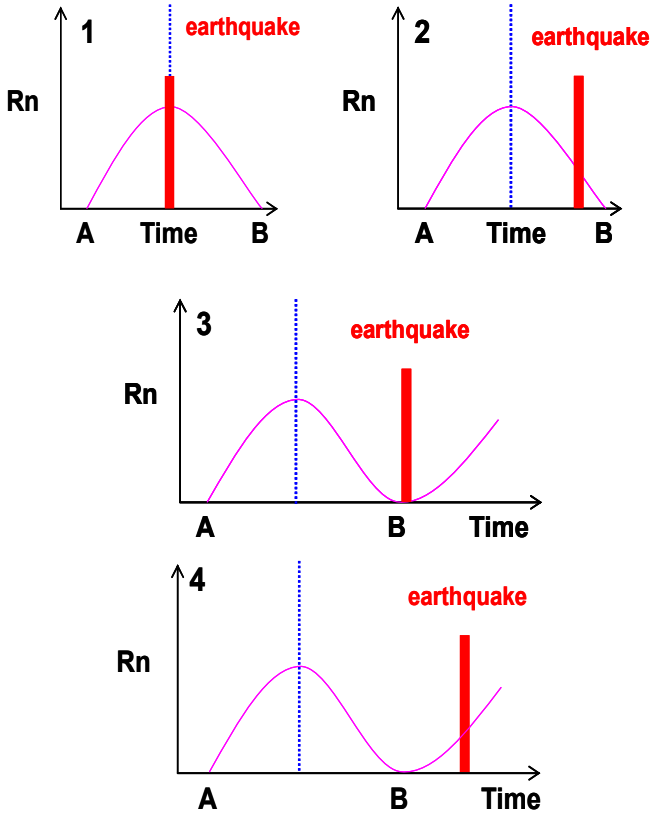


圖 5-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。A 至 B 代表一個完整氣體異常變化區間；垂直虛線為異常出現最高值的時間。(1) 地震發生在氣體異常高點；(2) 地震發生在氣體異常高點下降途中；(3) 地震發生在氣體異常高點後之最低點；(4) 地震發生在氣體異常高點後之最低點後升高途中。(Fu et al., 2009)。

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。在本節中使用三種方法，分別是疊代式高斯平滑法（Iterative Gaussian Smoothing）、希爾博-黃轉換（Hibet-Huang Transform，HHT）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（102/12－103/10）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，再分別以疊代式高斯平滑法（Iterative Gaussian Smoothing）及希爾博－黃轉換（Hibet-Huang Transform，HHT）之經驗模態分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）後將數值標準化（Normalize），選擇大於 N 倍的標準差定義為異常。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，亦可選擇以疊代式高斯平滑法與 14 天的滾動平均值（Rolling average）相減後將數值標準化，同樣的也是定義大於 N 倍標準差為異常。比較圖上 EMD 及 Rolling average 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，選擇地震規模≧5 且深度<100 KM 且震央距離測站≦150 KM；此外，當地震規模＜5 且震度≧2 的地震也會選入本研究的相關地震列表。

氡氣的半衰期是 3.8 天，我們以十倍的氡氣半衰期 38 天作為時序分析方法裡對於 IMF 的選擇依據，只選大於 1.5 天以上的 IMF 內部模態函數和小於或等於 38 天的 IMF 內部模態函數相加，進而得到去除雜訊及趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析以求得到標準差，各測站會因對氡氣敏感度的差異而有不同的標準差，作為辨識異常的門檻。

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，及扣除掉因儀器故障及因雨影響地震數所得之各測站氣體異常反應之地震比率如表 5-1.3 所示。此外我們每週會依據時序分析方法將各測站當週所觀察的數據做分析，並將其與之前的數據做整合，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 2013 年 12 月 1 日至 2014 年 11 月 31 日止共發布 45 週訊息，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 5-1.4 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，10 次」、「氣體有異常且有地震且無研判到，8 次」、「氣體有異常且無地震，12 次」與「氣體無異常且無地震，14 次」共四項，經過計算後得到其誤報率約為 45 %；然而，「氣體有異常且有地震且無研判到」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，若將該項因子同樣視為成功前兆判斷，則誤報率降為 27%。

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	53	25	12（3）跨號內為規模大於 5 的地震數	48%
雲林古坑 GK	58	20	10（3）跨號內為規模大於 5 的地震數	50%
嘉義中崙 CL	65	24	7（2）跨號內為規模大於 5 的地震數	29%
屏東屏科大 PT	40	18	4（2）跨號內為規模大於 5 的地震數	22%
花蓮東華 DH	131	30	1（1）跨號內為規模大於 5 的地震數	3%
臺東池上 CS	67	32	12（4）跨號內為規模大於 5 的地震數	38%
註一：花蓮東華站的地震篩選選擇規模大於 4 的地震，其他測站地震篩選規模為 3 以上。				

表 5-1.3：各測站氣體異常反應之地震比率（扣除因儀器故障與降雨影響）。

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	53	25	12（3）跨號內為規模大於 5 的地震數	48%
雲林古坑 GK	57	19	10（3）跨號內為規模大於 5 的地震數	53%
嘉義中崙 CL	58	17	7（2）跨號內為規模大於 5 的地震數	41%
屏東屏科大 PT	40	18	4（2）跨號內為規模大於 5 的地震數	22%
花蓮東華 DH	114	24	1（1）跨號內為規模大於 5 的地震數	4%
臺東池上 CS	67	32	12（4）跨號內為規模大於 5 的地震數	38%
註一：花蓮東華站的地震篩選選擇規模大於 4 的地震，其他測站地震篩選規模為 3 以上。				

表 5-1.4：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	2013/12/3	池上站	無相關地震	
2	2013/12/10	屏科大站	2013/12/25 台東外海，規模 4.9	有研判到
3	2013/12/17	測站無異常	無相關地震	
4	2013/12/24	測站無異常	無相關地震	
5	2013/12/31	池上站	2014/1/6 台東成功，規模 3.7	有研判到
6	2014/1/7	測站無異常	無相關地震	
7	2014/1/14	大平地站	無相關地震	
8	2014/2/11	測站無異常	無相關地震	
9	2014/2/18	古坑站	2014/2/17 嘉義大林，規模 3.8	有研判到
		屏科大站	2014/2/16 高雄六龜，規模 4.3	有研判到
10	2014/2/25	古坑站	2014/2/17 嘉義大林，規模 3.8	沒有研判
		屏科大站	2014/2/19 屏東霧台，規模 3.5	沒有研判
11	2014/3/4	古坑站	2014/2/27 嘉義梅山，規模 3.3	沒有研判
12	2014/3/11	測站無異常	無相關地震	
13	2014/3/18	測站無異常	無相關地震	
14	2014/3/25	池上站	2014/3/21 台東海端，規模 4.2	有研判到
15	2014/4/1	池上站	無相關地震	
16	2014/4/8	測站無異常	無相關地震	
17	2014/4/15	古坑站	無相關地震	
		中崙站	無相關地震	
		屏科大站	無相關地震	
18	2014/4/22	大平地站	無相關地震	
19	2014/4/29	池上站	2014/4/26 花蓮瑞穗，規模 4.5	沒有研判
		大平地站	2014/5/4 花蓮外海，規模 5.3	有研判到
20	2014/5/6	測站無異常	無相關地震	
21	2014/5/13	測站無異常	無相關地震	
22	2014/5/20	中崙站	2014/5/21 花蓮鳳林，規模 5.9	沒有研判
23	2014/5/27	屏科大站	2014/5/25 台東關山，規模 5.1	沒有研判
24	2014/6/4	測站無異常	無相關地震	
25	2014/6/24	屏科大站	無相關地震	
26	2014/7/1	中崙站	2014/7/17 臺東外海，規模 5.3	有研判到

27	2014/7/8	測站無異常	無相關地震	
28	2014/7/15	測站無異常	無相關地震	
29	2014/7/22	中崙站	2014/7/22 嘉義中埔，規模3.5	有研判到
30	2014/7/29	測站無異常	無相關地震	
31	2014/8/12	東華站	無相關地震	
32	2014/8/19	大平地站	無相關地震	
33	2014/8/26	測站無異常	無相關地震	
34	2014/9/9	大平地站	無相關地震	
35	2014/9/15	大平地站	無相關地震	
36	2014/9/22	大平地站	2014/9/26 宜蘭南噢，規模4.3	有研判到
37	2014/9/30	池上站	2014/9/25 臺東外海，規模5.2	沒有研判
38	2014/10/7	大平地站	2014/10/8 花蓮近海，規模5.2	有研判到
39	2014/10/14	中崙站	2014/10/8 花蓮近海，規模5.2	沒有研判
40	2014/10/21	測站無異常	無相關地震	
41	2014/10/28	大平地站	無相關地震	
42	2014/11/04	測站無異常	無相關地震	
43	2014/11/11	測站無異常	無相關地震	
44	2014/11/18	古坑站	2014/11/12 嘉義阿里山，規模 4.2	沒有研判
45	2014/11/25	測站無異常	無相關地震	

5-2 土壤氣體觀測結果

5-2-1 土壤氣體綜合觀測結果

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。

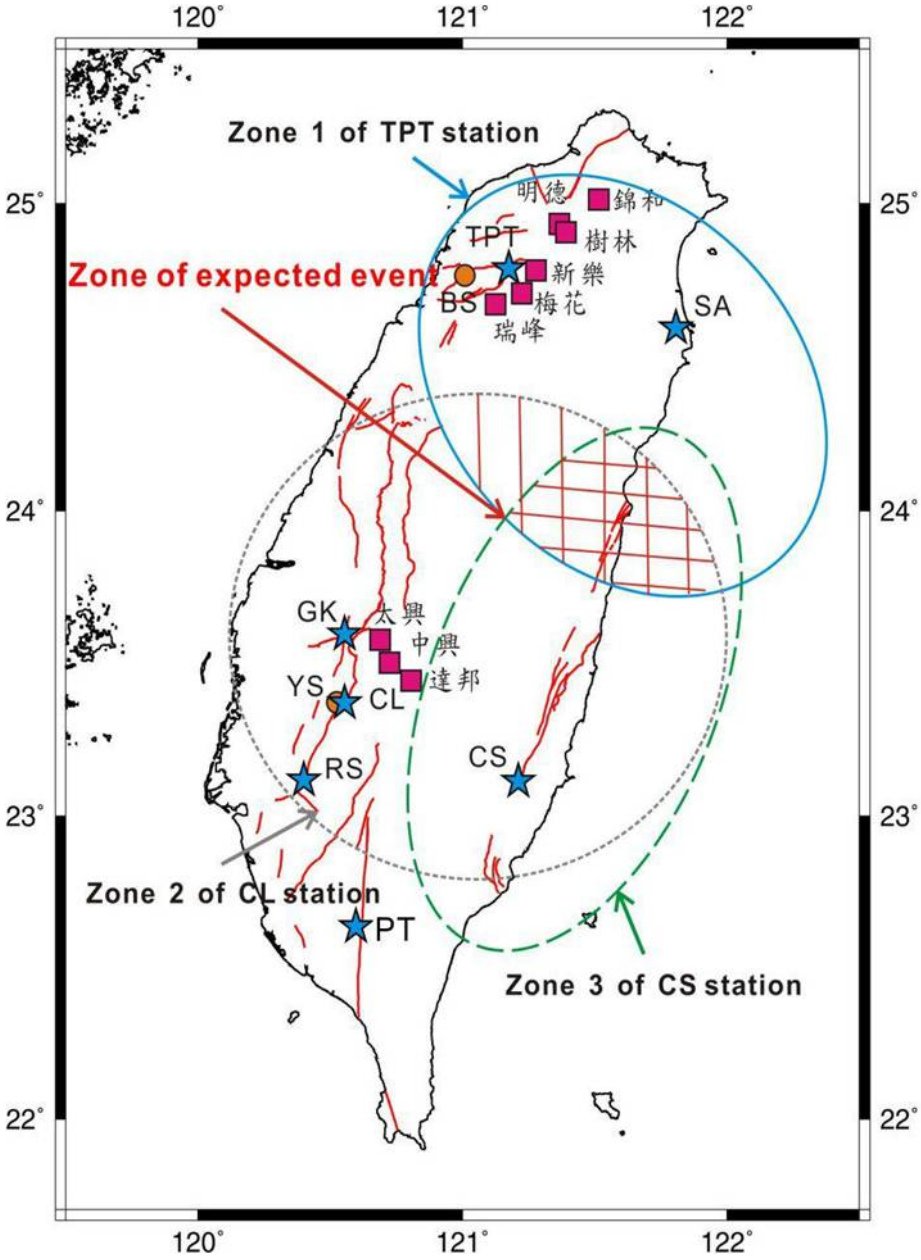


圖 5-2.1：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生地點。

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 5-2.1。以下就規模超過 5 的地震（下表粗體字所示）分別說明。

表 5-2.1：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）			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
1	2013/12/7 14:53	3.4	13	嘉義竹崎				2		2.4	2	4.8	1.8									
2	**2014/1/15 00:44**	**5**	**15**	**南投魚池**			**1.4**	**1**	**2.2**	**2.6**									**1.7**			
3	**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**			
4	**2014/1/15 03:50**	**5.1**	**8.4**	**臺東卑南**						**1.6**				**2**	**4.1**	**2.7**	**3**	**20**	**4.9**			
5	2014/3/5 00:02	4.1	7.6	高雄桃源							1	1.9	2.1						1.1			
6	2014/4/26 00:33	4.7	17.6	花蓮瑞穗							2	3.5	1.2				2	3.4	2			
7	**2014/5/21 08:21**	**5.9**	**16.5**	**花蓮鳳林**							**2**	**6.9**	**3.8**							**5**	**246.6**	**14.5**

此外，在今年 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 5-2.2 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，也於以下圖示說明。

表 5-2.2：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

（1）2014/1/15 南投魚池地震（M_L 5）

如圖 5-2.2 所示，大平地站在 8 天前，古坑站在 20 天前，池上站在 21 天前即有氣體異常反應。三個站的標準差都超過 2 δ 皆超過我們定義的異常門檻。古坑站的變化幅度較大，約 10KBq/m^3；池上站的變化幅度最小，偶有向下趨勢隨即又升高，經由 EMD 及 Rolling average 的運算，我們仍可藉由定義 δ 來看出是否有異常及其與地震的關係。這起地震震央落在圖上三個反應區範圍交集處（圖 5-2.2（B）黃色星號）。

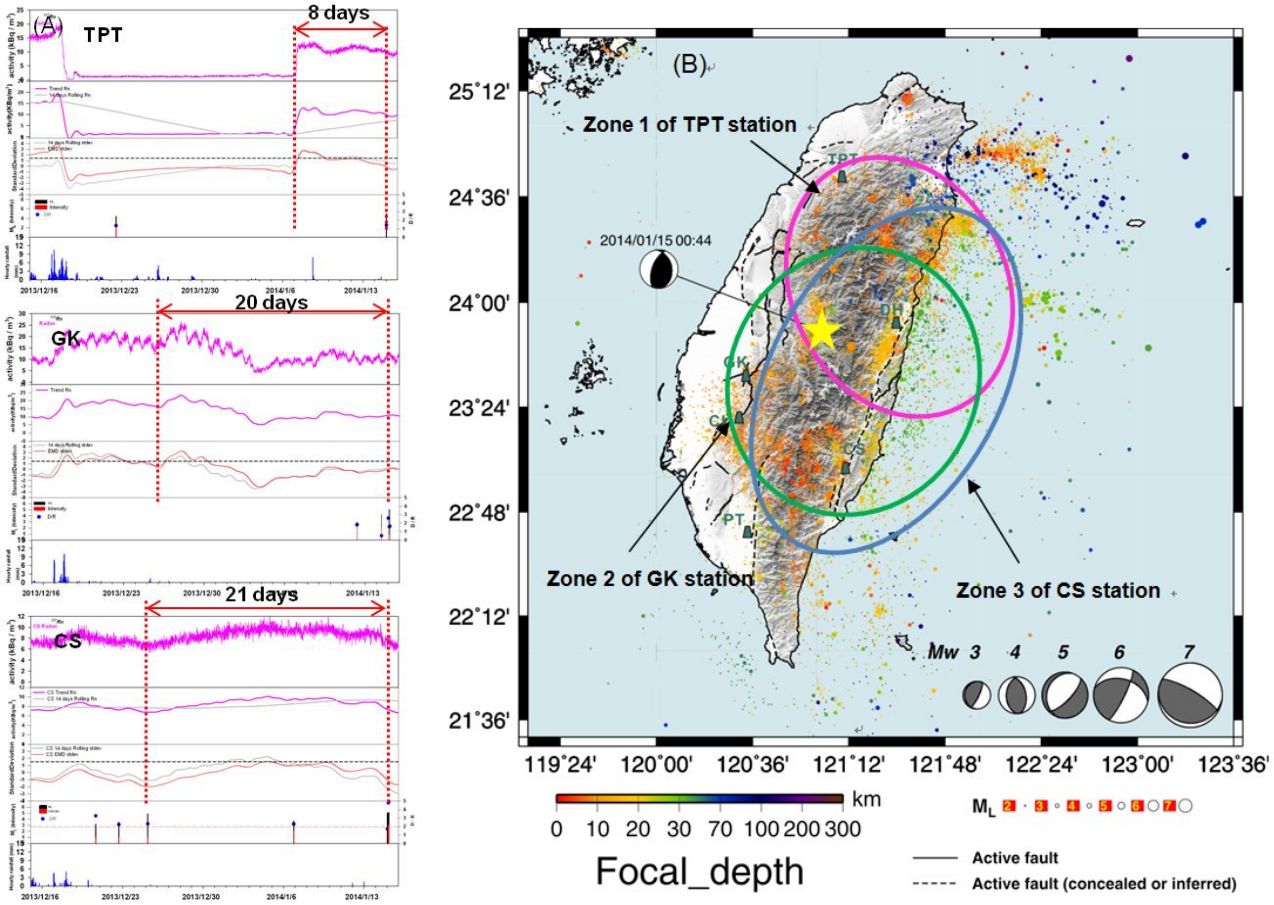


圖 5-2.2：2014/1/15 南投魚池地震與各測站觀測情形，（A）大平地站（TPT）、古坑站（GK）、池上站（CS）土壤氣體觀測結果（2013/12/15-2014/1/15）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示南投魚池地震的震央位置。

（2）2014/1/15 臺東卑南地震（M_L 5.1）有兩起，合併討論

如圖 5-2.3 所示，古坑站在 20 天前，屏科大站在 20 天前，池上站在 21 天前即有氣體異常反應。三個站的氡氣前兆反應時間都很長。除了屏科大站的標準差是切過我們定義的異常門檻，其餘兩站標準差都超過 2 δ，其中又以古坑站的變化幅度最大，約 10KBq/m^3，屏科大站的變化幅度最小，可惜的是之後由於氣體乾燥器故障導致後續沒有堪用的資料，不過經由 EMD 及 Rolling average 的運算，我們仍可藉由定義 δ 來看出是否有異常及其與地震的關係。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）。

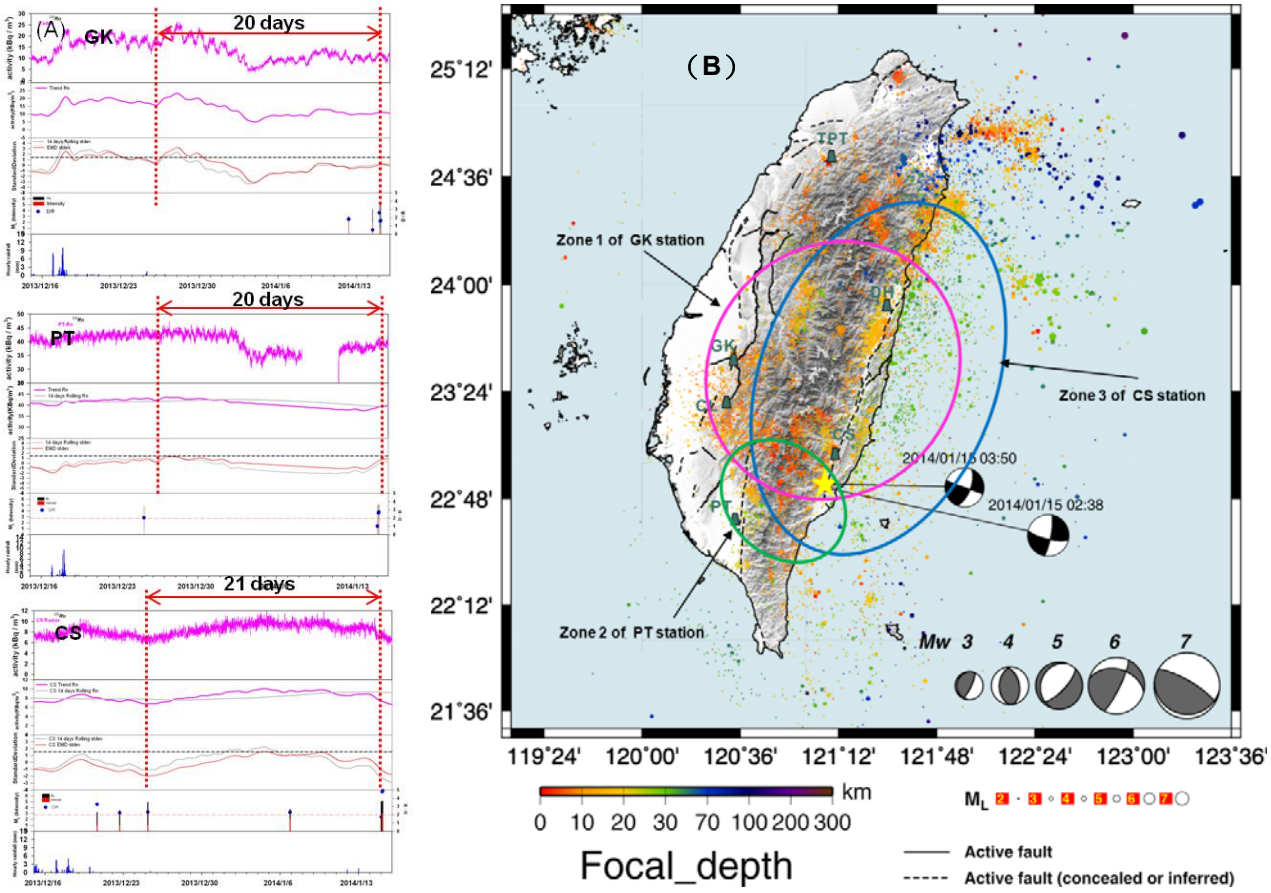


圖 5-2.3：2014/1/15 臺東卑南地震與各測站觀測情形，（A）古坑站（GK）、屏科大站（PT）、池上站（CS）土壤氣體觀測結果（2013/12/15-2014/1/15）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示臺東卑南地震的震央位置。

（3）2014/5/21 花蓮鳳林地震（M_L 5.9）

如圖 5-2.4 所示，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 5-2.4（B）黃色星號）。

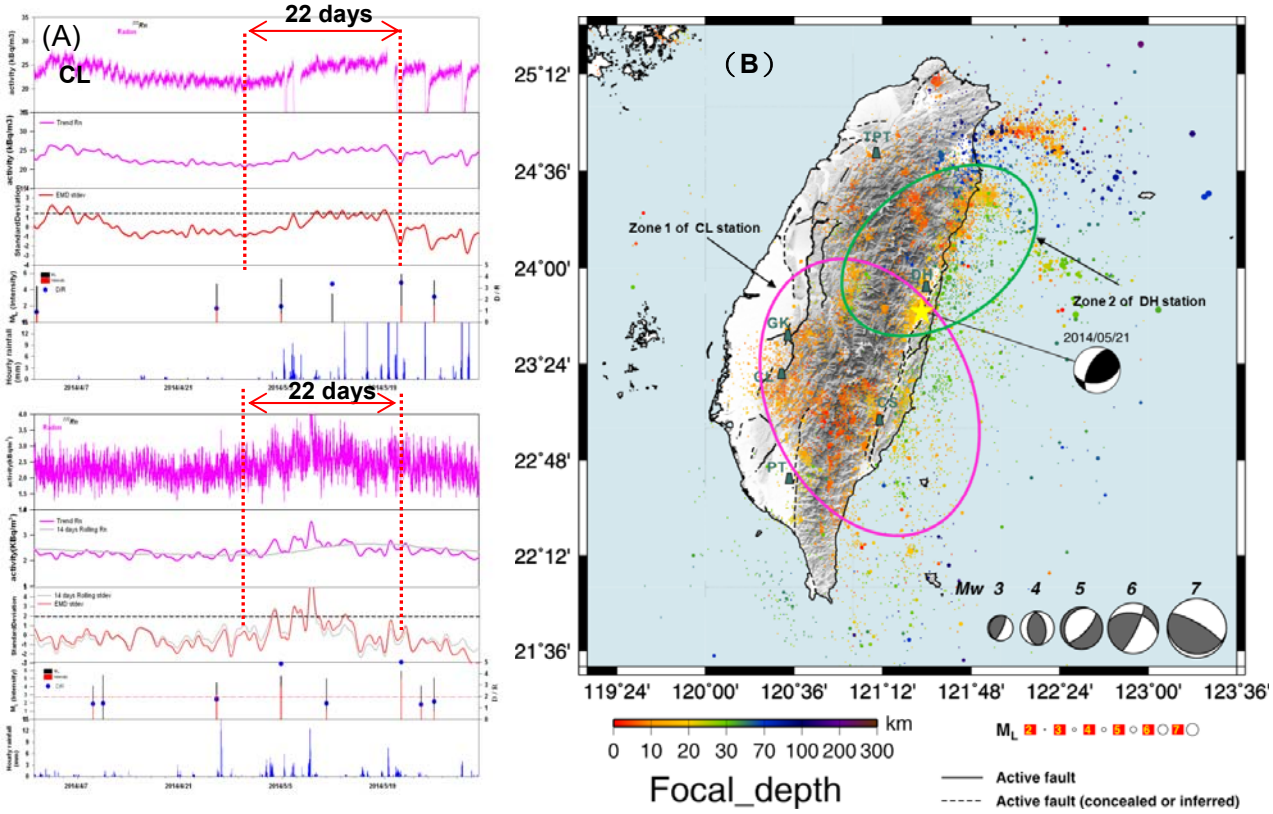


圖 5-2.4：2014/5/21 花蓮鳳林地震與各測站觀測情形，（A）中崙站（CL）、東華站（DH）土壤氣體觀測結果（2014/4/1-2014/5/31）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮鳳林地震的震央位置。

（4）2014/2/5~2/8 新竹橫山群震（M_L 2.3~3.4）

如圖 5-2.5 所示，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 5-2.5（B））。

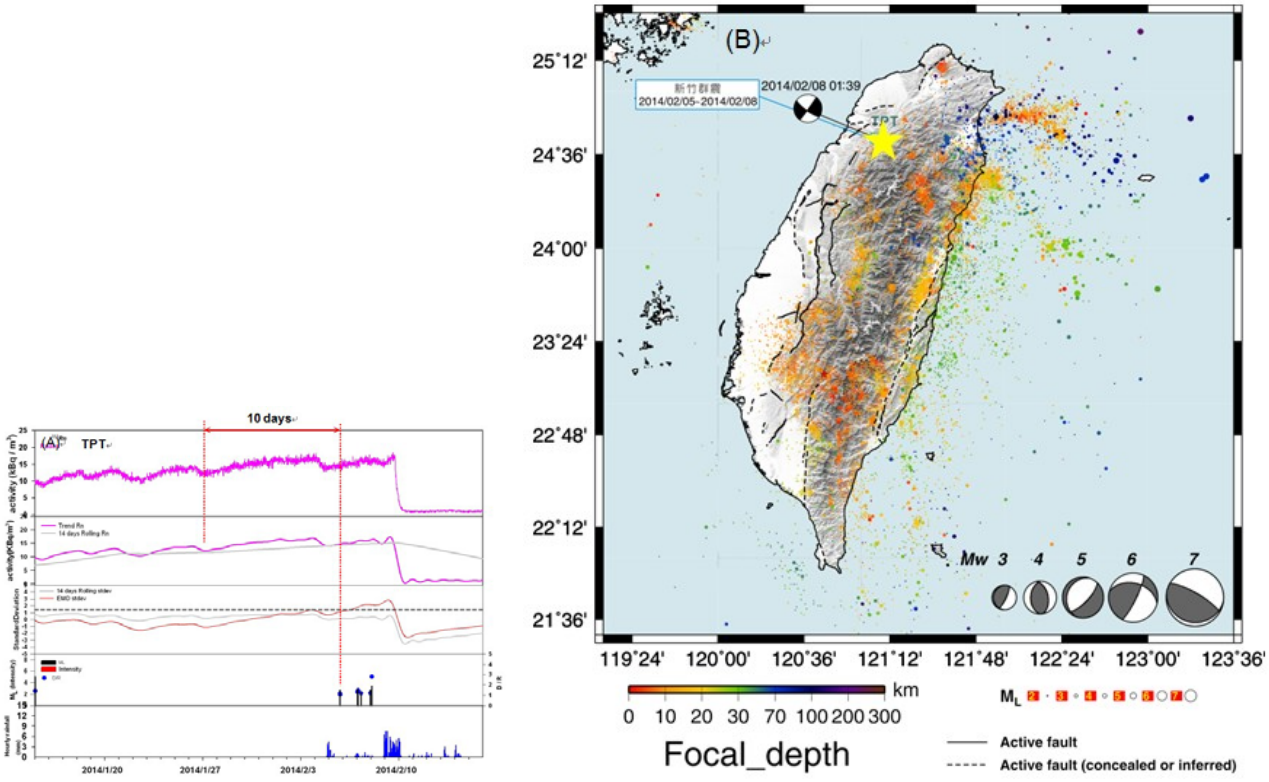


圖 5-2.5：2014/2/5-2014/2/8 新竹橫山地震群與大平地站觀測情形，（A）大平地站（TPT）土壤氣體觀測結果（2014/1/15-2014/2/15）；（B）臺灣地區地球化學觀測站大平地站的相關地震分布示意圖。黃色星號表示新竹橫山群震的震央位置。

5-2-2 新觀測站設置之評選與研究區域

本研究在於對觀測站的設置進行前置的初步探勘，首先利用土壤逸氣調查方法，針對地下氣體的來源及分布情形，用以判斷地表下有無之構造活動或是斷層分布位置。本研究對於宜蘭平原進行調查，找尋敏感及適合的觀測站設置地點。同時與其他地球物理、地質調查的資料互相比較得到更精確的結果，更徹底了解宜蘭地區的新期構造活動與斷層活動性。

利用地球化學中稀有氣體的特性，可偵測地表下活動斷層的分布。因為源於地殼深處與近地表處的氣體組成截然不同，在斷層或破裂帶經過的地方，會形成氣體通道，使氦氣、氡氣、氫氣、二氧化碳與甲烷等揮發性氣體沿著此通道向上遷移逸散，而在近地表處顯示異常高濃度值。利用此原理可判斷該處是否有斷層抑或破裂帶通過，也可用來判定斷層的走向和位置(如 Etiope and Lombardi, 1995; Giammanco and Gurrieri, 1997; Guerra and Lombardi, 2000; Baubron *et al.*, 2002; Etiope and Martinelli, 2002)。而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連；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。

位於構造活動上的某些地區，在氣體成份的變化上，經常與地震活動有明顯關連。宜蘭位處板塊擠壓碰撞帶的邊緣，地震活動非常頻繁，因此扮演推手的角色，使地底下的氣體沿著通道不斷的逸散上來。

5-2-2-1 研究區域

宜蘭平原位於臺灣東北處，為一沖積扇三角洲，緊鄰著南沖繩海槽。在臺灣東北部，菲律賓海板塊沿著琉球海溝向北隱沒至歐亞大陸板塊之下，形成琉球島弧與沖繩海槽之弧溝系統，使得宜蘭地區地震活動頻繁。沖繩海槽向西南延伸至宜蘭平原，因受到海槽擴張作用之影響，宜蘭平原處於橫移伸張變形的環境。

根據地下構造判識以及震測資料，江新春 （1976） 指出在宜蘭平原之下有數條大致呈東北-西南向的構造線，由北而南分別是頭城、鵲子、隘界、宜蘭、坑四、濁水及三星斷層等七條斷層 （圖 5-2.6） 。根據李錫堤等人 （1998） 所繪製之臺灣活斷層圖指出，宜蘭平原北部可能有存疑性活斷層，為礁溪斷層、牛鬥斷層以及宜蘭斷層 （圖 5-2.6） 。而大部分學者認為梨山斷層向東北延伸至宜蘭平原與雪山山脈的交界處。

蔡義本 （1976） 根據微震分佈發現在宜蘭與羅東之間有一寬約 3 公里，長約 30 公里，深約 20 公里的地震密集帶，由震源機制推測是一東北走向的右移活斷層且傾角接近 90 度。在近期地震的研究中，宜蘭平原的東南側有兩條明顯的東西向之地震密集帶，其震源解為橫移破裂的走向滑移機制（Liang et al., 2005）。此外，黃信樺 （2007） 利用三維速度模型並重新定位後發先兩個地震活動帶，分別位於宜蘭平原最北之正斷層序列以及南澳之走向斷層序列。根據上述研究得知，蘭陽平原周圍的發震構造因素複雜，不同深度的地震有不同的變形影響。

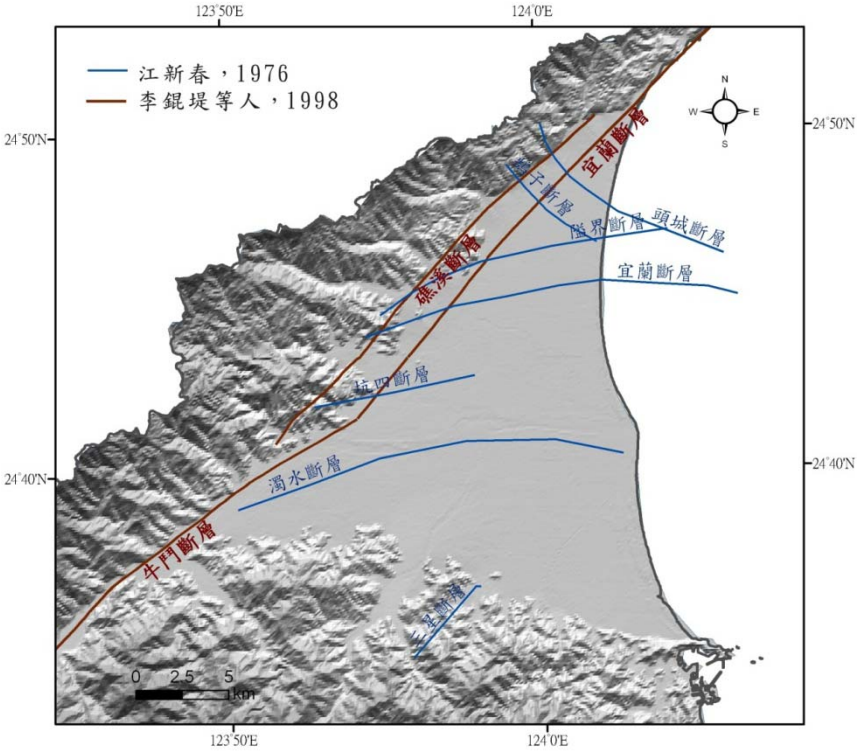


圖 5-2.6：綜合各研究所繪之斷層分布圖。

5-2-2-2 前人研究成果

此區域在 2009 年 4 月間於宜蘭平原利用土壤氣體地球化學方法調查(傅慶州等,2004)，採集了共約 158 個樣本並進行分析，各點位如圖 5-2.7。各點分析結果詳如附錄表 5-1.14。採樣及分析方法詳如附錄 1-4。

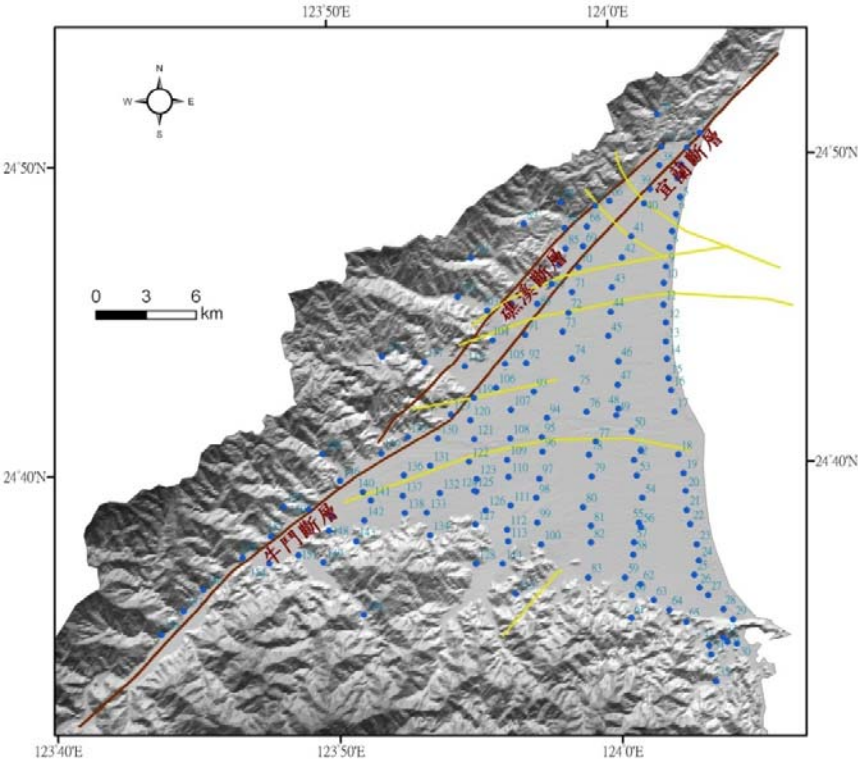


圖 5-2.7：宜蘭平原採樣點分佈圖。

宜蘭地區的初步分析結果顯示，宜蘭平原各地的氣體成份差異很大，在特定區域可看出明顯的高濃度值，圖 5-2.8 到圖 5-2.11 分別為氦氣、氡氣、二氧化碳濃度與二氧化碳通量之等濃度分佈圖，並可發現各氣體濃度和通量皆有由東向西遞減的趨勢，這可能與沖繩海槽擴張有關。由於沖繩海槽持續張裂使得來自地底深處的氣體經由此通道逸散至研究地區，而此趨勢越接近中央山脈則趨於不明顯。

將個別氣體濃度異常值門檻定義為：去除濃度明顯過高的分析值後，將所有分析結果取平均值加上兩倍標準偏差（達 95%的可信度），當分析值高於此門檻者可視為異常值，附錄表 5-1.14 紅色標記部分則代表為異常值。下半年將針對紅色標記地區配合斷層附近學校分布，篩選出適合設置連續觀測站的敏感位置，以定期人工採樣方式持續進行土壤氣體調查，擇一最合適之地點來設置土壤氣體觀測站。

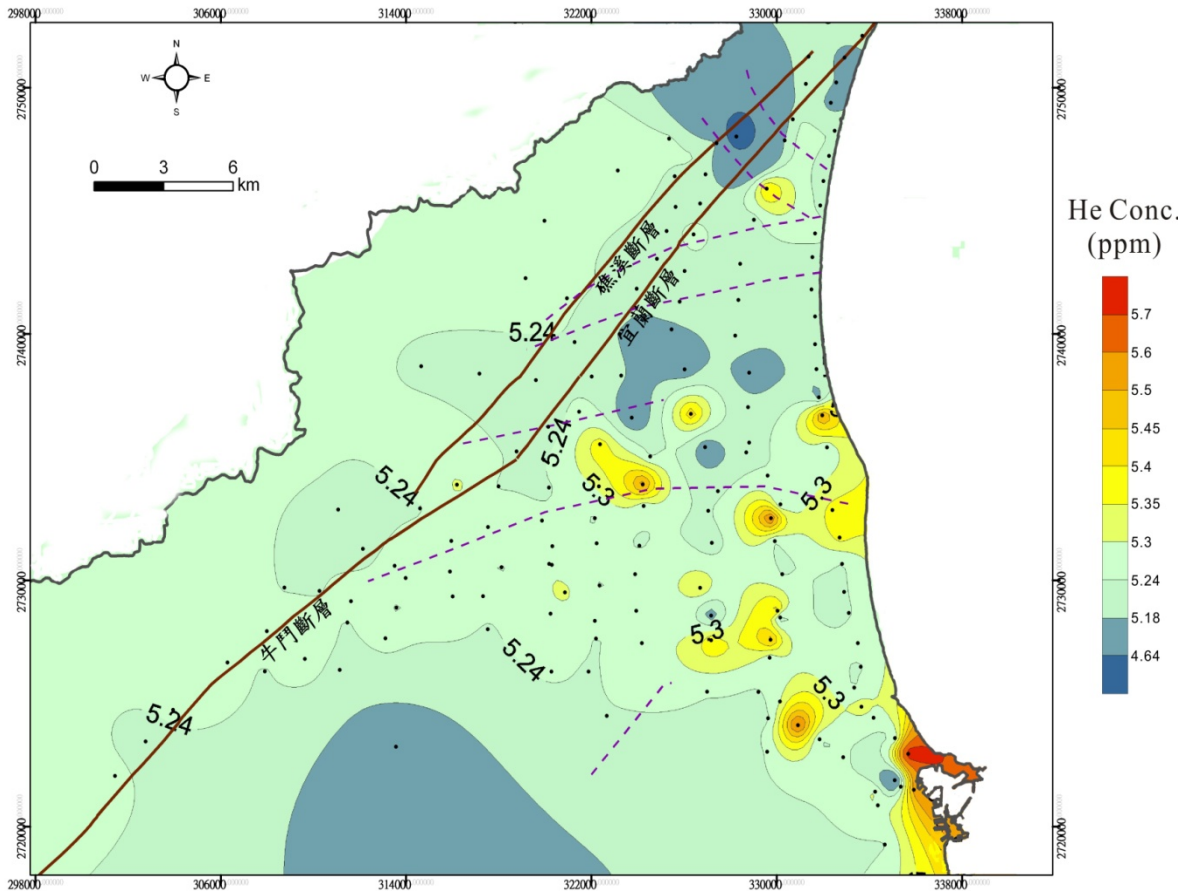


圖 5-2.8：宜蘭平原土壤氣之氦氣等濃度分布圖。

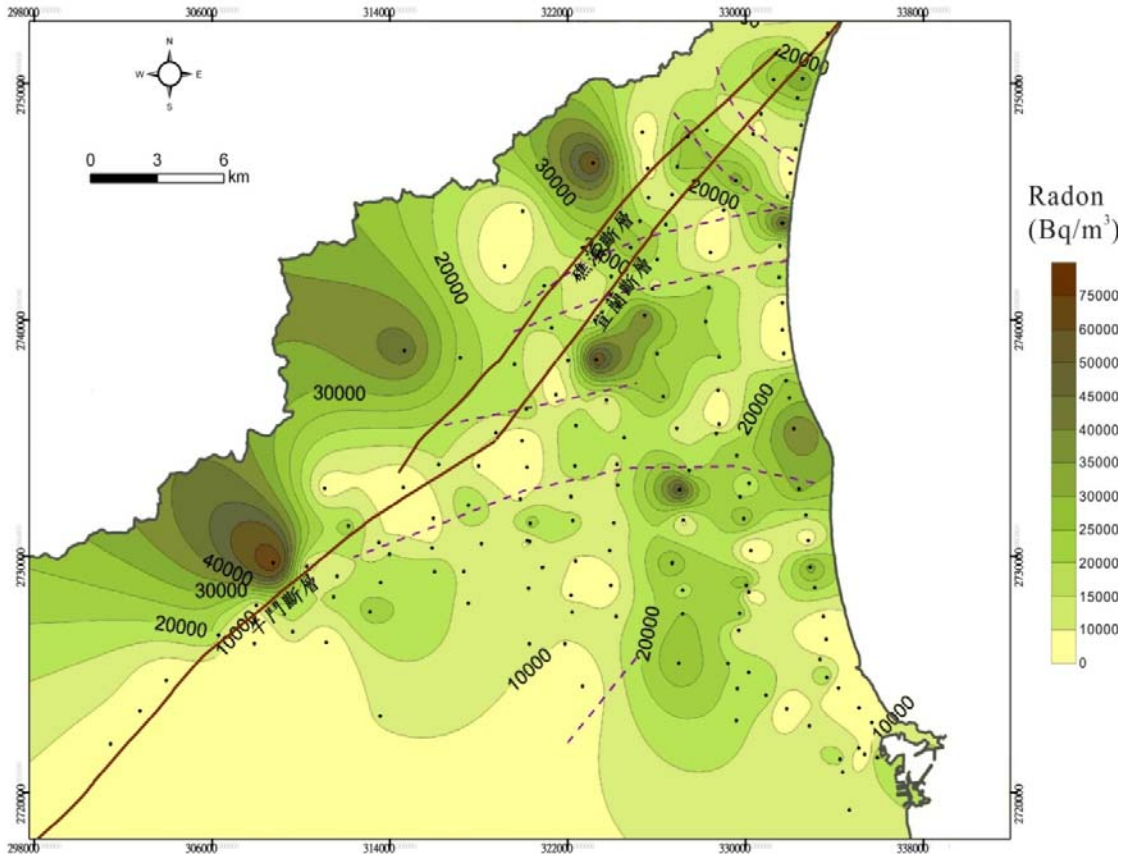


圖 5-2.9：宜蘭平原土壤氣之氡氣等濃度分布圖。

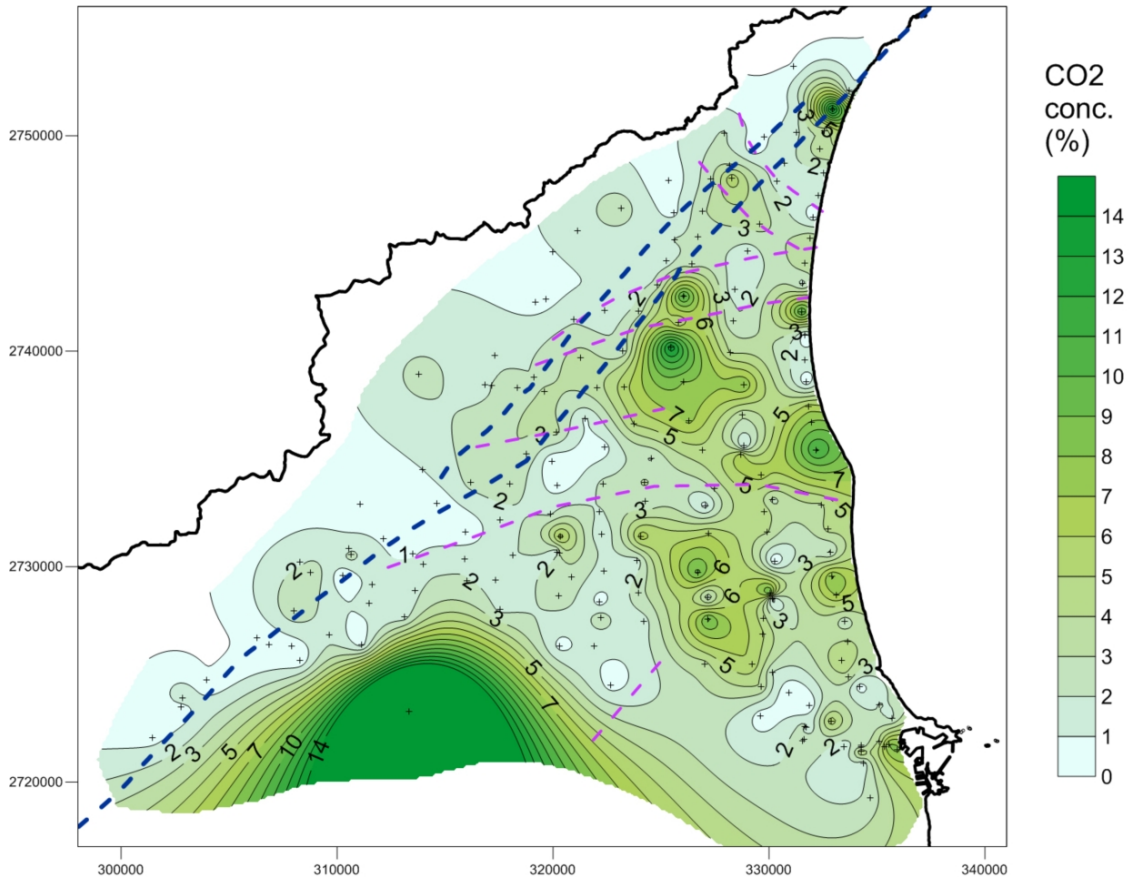


圖 5-2.10：宜蘭平原土壤氣之二氧化碳等濃度分布圖。

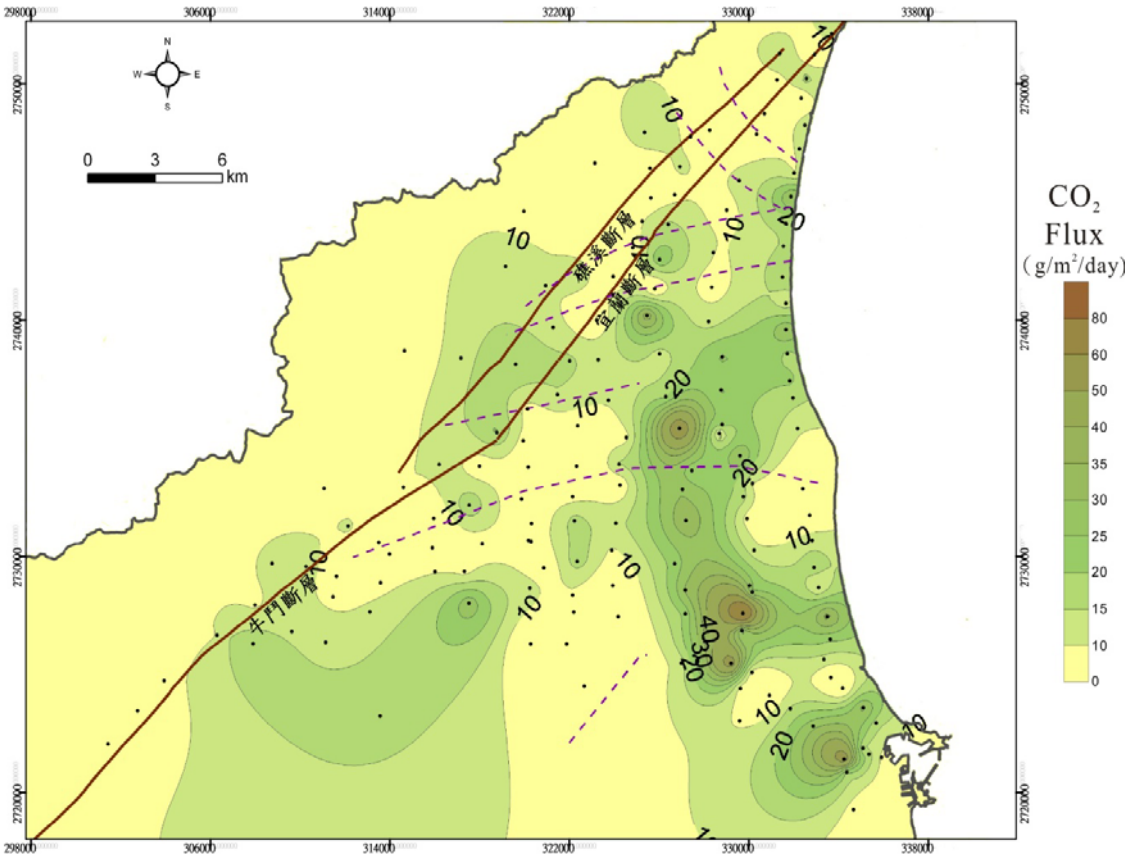


圖 5-2.11：宜蘭平原土壤氣二氧化碳通量之等濃度分布圖。

5-2-2-3 土壤氣體異常固定點採樣結果

根據李錫堤、蔡義本（1997）臺灣省中小學校園附近活動斷層普查及防震對策之研究計畫裡所繪製之臺灣斷層附近學校分布圖，如圖 5-2.12，臺灣北部地區斷層 500 公尺內各級學校分布圖，如圖 5-2.13 及臺灣北部地區斷層 100 公尺內各級學校分布圖，如圖 5-2.14。

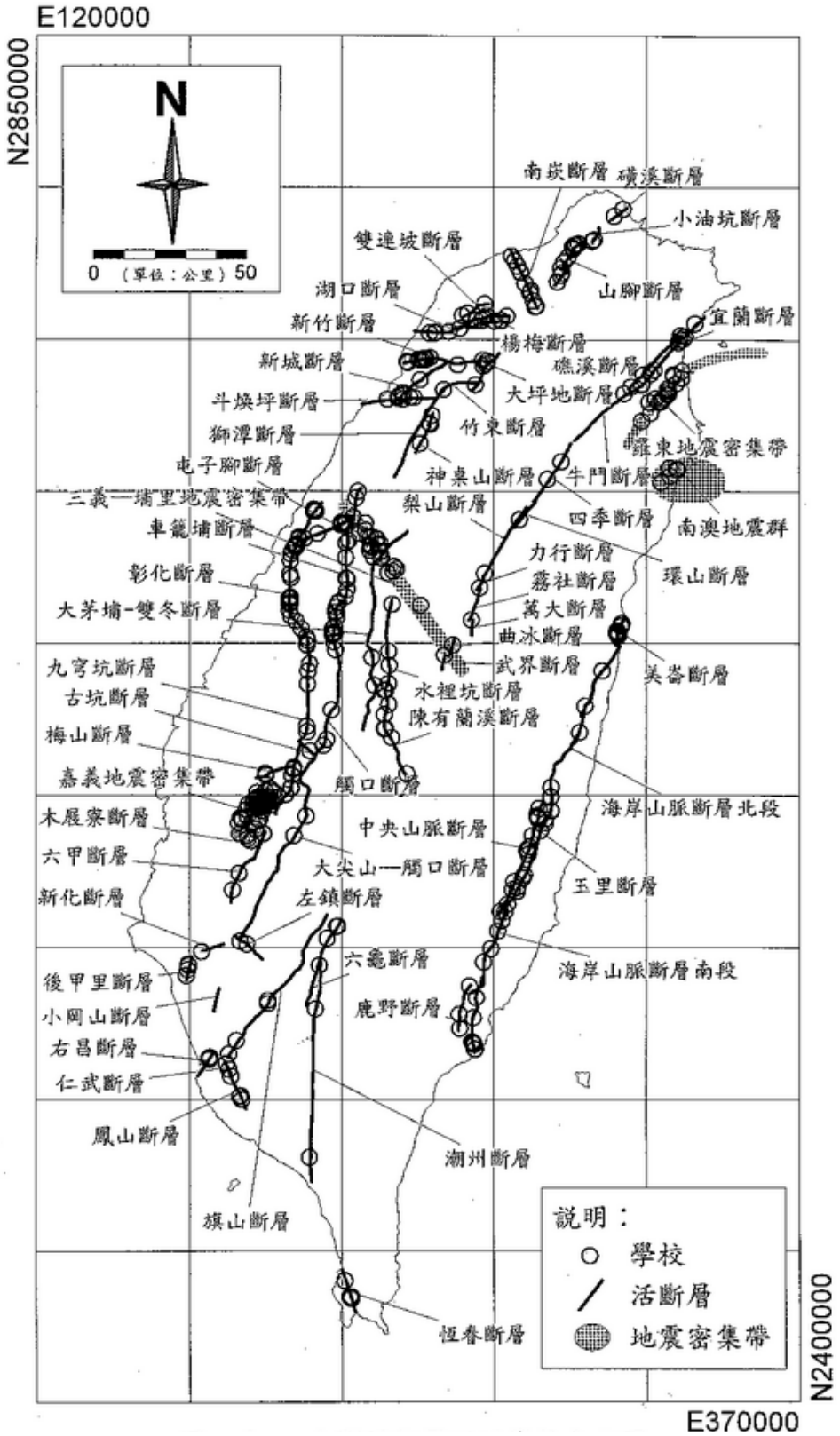


圖 5-2.12：臺灣斷層附近學校分布圖。

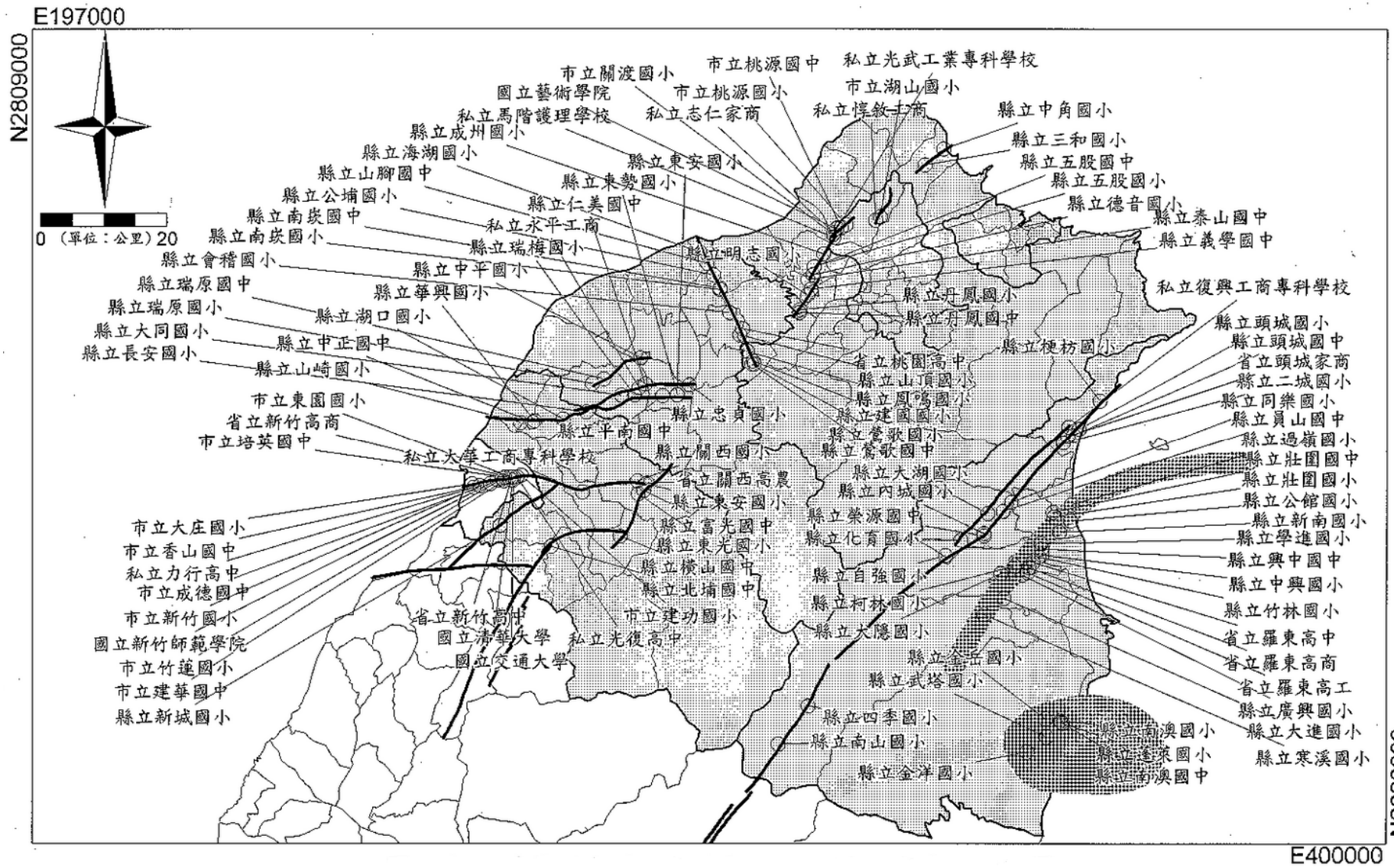


圖 5-2.13：臺灣北部地區斷層 500 公尺內各級學校分布圖。

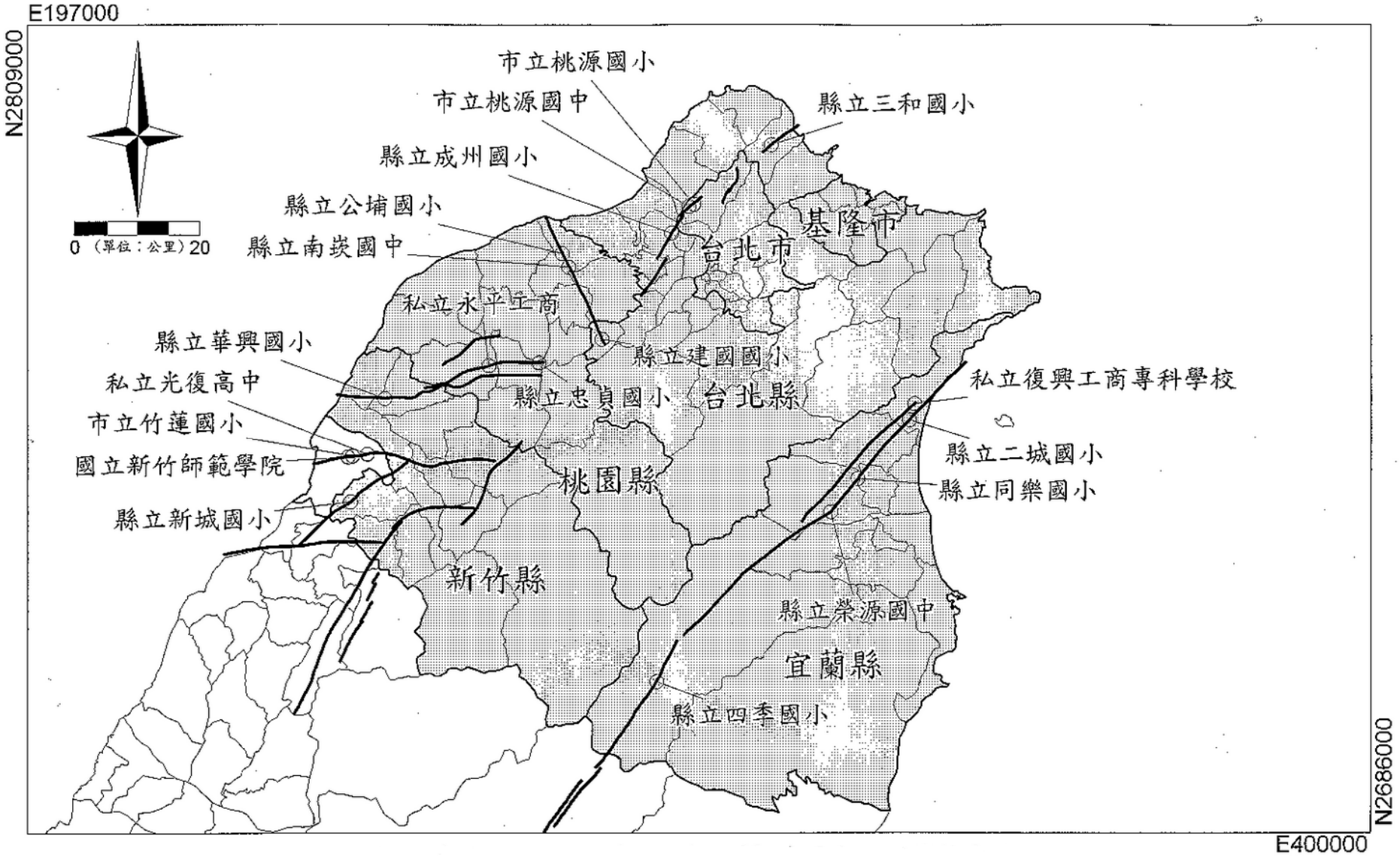


圖 5-2.14：臺灣北部地區斷層 100 公尺內各級學校分布圖。

配合土壤氣體調查資料及臺灣斷層附近學校分布圖，考量未來宜蘭設站位置之電力及網路能快速設置使用、現地有人員可以幫忙處理緊急事項，及用地較民間容易取得之觀測站建置考量，根據上述三張圖，我們選擇了礁溪斷層帶上的私立復興工商專科學校（現改為蘭陽技術學院）；宜蘭斷層帶上的二城國小、同樂國小、榮源國中（現改為內城中學）；四季斷層帶上的四季國小；羅東地震密集帶上由東北至西南選擇過嶺國小、羅東高中、寒溪國小；南澳地震群上南澳溪左岸的南澳國小、碧侯國小，南澳溪右岸的金岳國小、武塔國小等十二校，進行土壤氣固定點採樣調查，如圖 5-2.15 星號所示。採樣結果如表 5-2.3 所示，各項土壤氣體分析相對異常高點以粗黑色字體顯示。

由採樣結果來看，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、氦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、氦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、氦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。

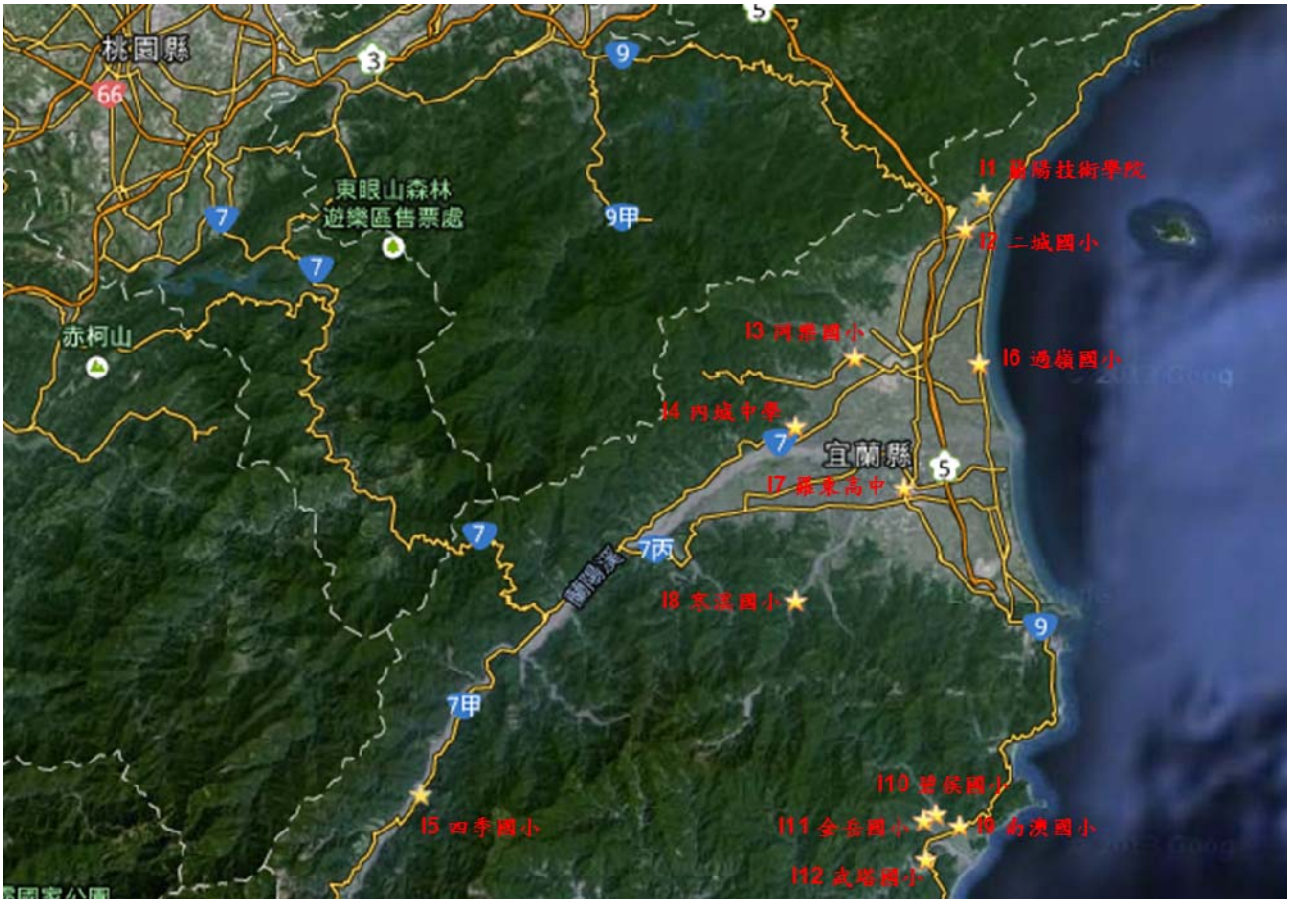


圖 5-2.15：土壤氣固定點採樣分布圖。

表 5-2.3：宜蘭固定點採樣分析結果

Date	Sample No.	He(ppm)	N_2	O_2+Ar	CO_2	CH_4	Rn
2014/9/26 9/30	I1 蘭陽技院	**5.40**	64.88	8.65	**15.27**	**10.12**	**29290**
	I2 二城國小	5.24	74.69	16.08	**8.9**	0.33	**22215**
	I3 同樂國小	**5.47**	81.96	13.44	4.15	0.44	11945
	I4 內城中學	**5.37**	77.8	11.47	**10.69**	0.04	**29075**
	I5 四季國小	5.24	76.07	17.37	6.47	0.1	**42116**
	I6 過嶺國小	5.24	76.75	13.55	**8.94**	0.75	17565
	I7 羅東高中	5.24	77.84	10.83	**10.6**	0.74	**24570**
	I8 寒溪國小	5.24	75.92	19.76	3.64	0.68	5432
	I9 南澳國小	5.24	75.69	18.96	5.31	0.04	9167
	I10 碧侯國小	5.24	76.11	19.78	3.54	0.58	5280
	I11 金岳國小	5.24	75.99	19.65	4.02	0.34	6661
	I12 武塔國小	5.24	76.75	20.95	1.5	0.79	4942
2014/10/8 10/9	I1 蘭陽技院	5.24	76.81	22.64	0.41	0.14	1403
	I2 二城國小	5.24	74.38	18.3	7.22	0.1	**23094**
	I3 同樂國小	5.24	75.03	18.19	6.37	0.41	**22793**
	I4 內城中學	5.24	75.68	19.49	4.34	0.49	13108
	I5 四季國小	5.24	75.52	20.71	3.22	0.56	14116
	I6 過嶺國小	5.24	74.6	20.39	4.98	0.03	10760
	I7 羅東高中	5.24	72.1	12.06	**15.51**	0.33	**24301**
	I8 寒溪國小	5.24	76.08	20.31	3.15	0.45	7932
	I9 南澳國小	5.24	75.66	19.78	4.37	0.18	12021
	I10 碧侯國小	5.24	75.9	20.71	3.33	0.07	6325
	I11 金岳國小	5.24	76.31	21.79	1.86	0.04	1478
	I12 武塔國小	5.24	76.47	22.12	1.1	0.32	2601
2014/10/15 10/16	I1 蘭陽技院	**5.41**	79	9.38	**11.49**	0.13	**63468**
	I2 二城國小	5.24	74.85	18.59	6.28	0.28	**25980**
	I3 同樂國小	5.24	74.24	19.22	6.51	0.02	19520
	I4 內城中學	5.24	75.02	18.71	6.21	0.06	18585
	I5 四季國小	5.24	75.49	20.84	3.48	0.2	18804
	I6 過嶺國小	5.24	74.75	20.53	4.42	0.3	8993
	I7 羅東高中	5.24	72.47	11.02	**16.41**	0.1	**26070**
	I8 寒溪國小	5.24	75.42	19	5.53	0.04	13935
	I9 南澳國小	5.24	75.12	19.9	4.96	0.02	15093
	I10 碧侯國小	5.24	76.4	19.6	3.84	0.16	11800
	I11 金岳國小	5.24	75.76	20.23	3.83	0.19	5684
	I12 武塔國小	5.24	76.59	22.25	1.09	0.07	2461
2014/10/29 10/30	I1 蘭陽技院	**5.36**	78.93	10.35	**10.68**	0.03	**68771**
	I2 二城國小	5.24	75.35	18.61	6.03	0.02	**24088**
	I3 同樂國小	5.24	76.04	19.7	4.23	0.02	17813
	I4 內城中學	5.24	76.42	20.21	3.34	0.03	12027
	I5 四季國小	5.24	76.25	20.54	3.18	0.03	18473
	I6 過嶺國小	5.24	77.1	19.21	3.66	0.03	7116
	I7 羅東高中	5.24	72.9	15.26	**11.79**	0.05	14732
	I8 寒溪國小	**5.32**	76.06	16.62	7.3	0.03	14192
	I9 南澳國小	5.24	76.28	19.1	3.85	0.77	10945
	I10 碧侯國小	5.24	76.13	20.04	3.21	0.62	9604
	I11 金岳國小	5.24	76.58	20.81	2.37	0.24	6513
	I12 武塔國小	5.24	76.84	21.07	1.42	0.67	5603

5-3 地下水壓觀測結果

5-3-1 地下水壓綜合觀測結果

2014 年（2013 年 12 月至 2014 年 11 月）地震資料之中，臺灣地區曾發生多起規模 5.0 以上的地震，但地下水位觀測結果，臺北、新竹、嘉義三站群中僅嘉義的中興測站於 5 月 21 日的花蓮地震前出現異常；取而代之的，今年 5 處水位異常中，4 處與測站當地的地震或群震相關，異常發生的測站與相關地震如表 5-3.1 所列。

表 5-3.1：水位異常測站與地震資訊相對列表。

NO.	地震發生時間	規模	深度（km）	震央位置	新樂（CINT）		中興（TSUN）	
					Int.	D/R	Int.	D/R
1	2014/01/02 04:29	3.4	12.1	嘉義縣番路鄉			2	1.85
2	2014/02/05 ~ 2014/02/08 十起	2.3 ~ 3.4	6.6 ~ 11.3	新竹縣橫山鄉	1 , 2 , 3	1.35 ~ 4		
3	2014/2/17 06:28	3.8	11.1	雲林縣古坑鄉			2	3.24
4	2014/02/27 22:08	3.3	9.3	嘉義線梅山鄉			2	4.06
5	2014/05/21 08:21	5.9	18	花蓮縣鳳林鎮			3	4.00

今年地下水位觀測結果，異常反應主要集中於新竹的新樂站與嘉義的中興站，臺北站群則如以往一般無觀測出異常（今年臺北士林區地震同樣未發現異常），訊息被降雨與氣壓變化所造成的水位波動所掩蓋，目前本團隊嘗試將上述二者的影響濾除，氣壓方面已有相當成果，但降雨所造成的影響仍難以除去。以下將就新竹新樂站及嘉義中興站的異常分述如下：

新竹新樂站的異常說明：

以往新樂站水位異常的型態，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，同時段在土壤氣體觀測站大平地（TPT）以及新竹地區井下應變儀測站也在此一時段出現異常，同樣連結至該群震。新竹新樂站的異常水位型態如圖 5.3-1 所示。

另外，今年 5 月底至 6 月初新竹橫山接連出現規模 4.2 與 3.9 之地震，但因新樂站在該時段儀器故障，故無法進行觀測與判斷。

嘉義中興站的異常說明：

今年中興站在枯水期（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 5-3.2 中顯示。

5 月 21 日花蓮鳳林規模 5.9 的地震，應為上半年度臺灣本島影響最大的地震，土壤氣測站中，中崙（CL）與東華（DH）兩站、嘉義區井下應變儀等觀測資料均出現異常，同樣中興站對於此地震也出現了震前水位異常現象，但是此水位異常型態相當特殊。中興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，如法進行後續的判讀。5 月 21 日花蓮鳳林地震前中興站的異常水位如圖 5-3.3 所示。

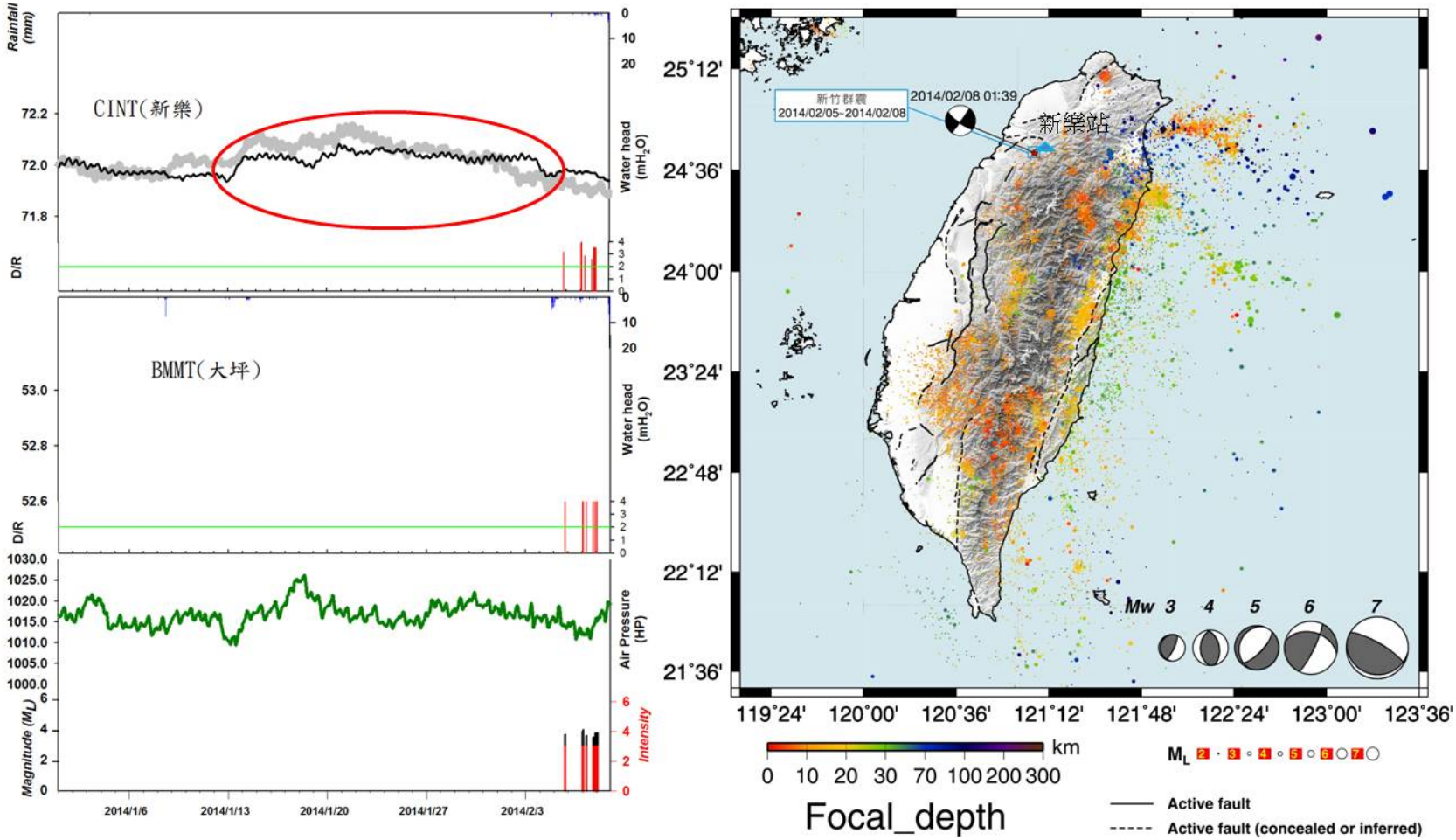


圖 5-3.1：2014 年 2 月新竹橫山群震與新竹新樂站水位異常關係圖。左圖新樂站水位中，淡灰色線代表水位原始資料，黑色線則是經氣壓修正後的數據。新樂站水位於 1 月 13 日小幅上升，維持至 2 月 4 日降回，之後於 2 月 5 日開始發生群震。

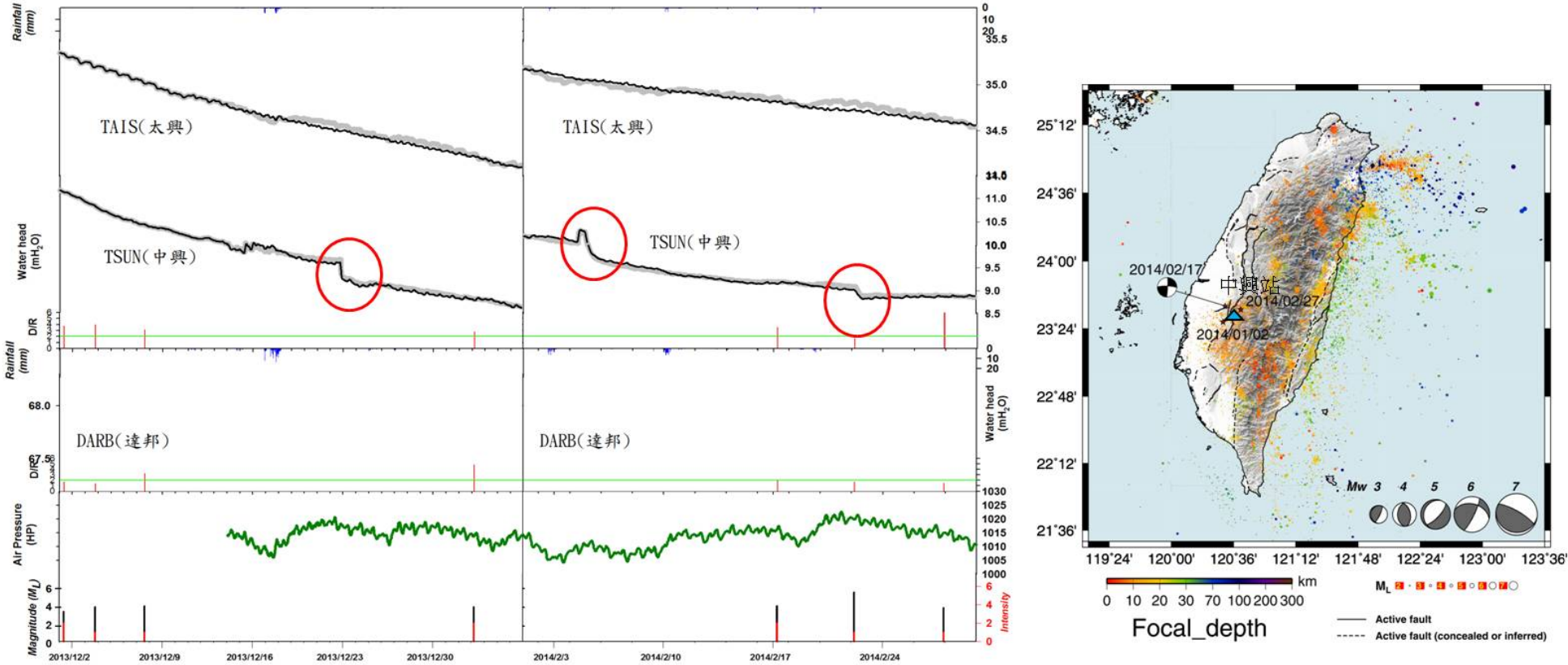


圖 5-3.2：2014 年 1 月、2 月嘉義地區鄰近地震與嘉義中興站水位異常關係圖。左方兩張水位圖中，淡灰色線代表水位原始資料，黑色線則是經氣壓修正後的數據。中興站水位於去年 12 月 22 日、今年 2 月 4 日、2 月 22 日有三次突降記錄，之後均對應到嘉義當地的地震，異常與地震時間間距為 5 到 13 天。

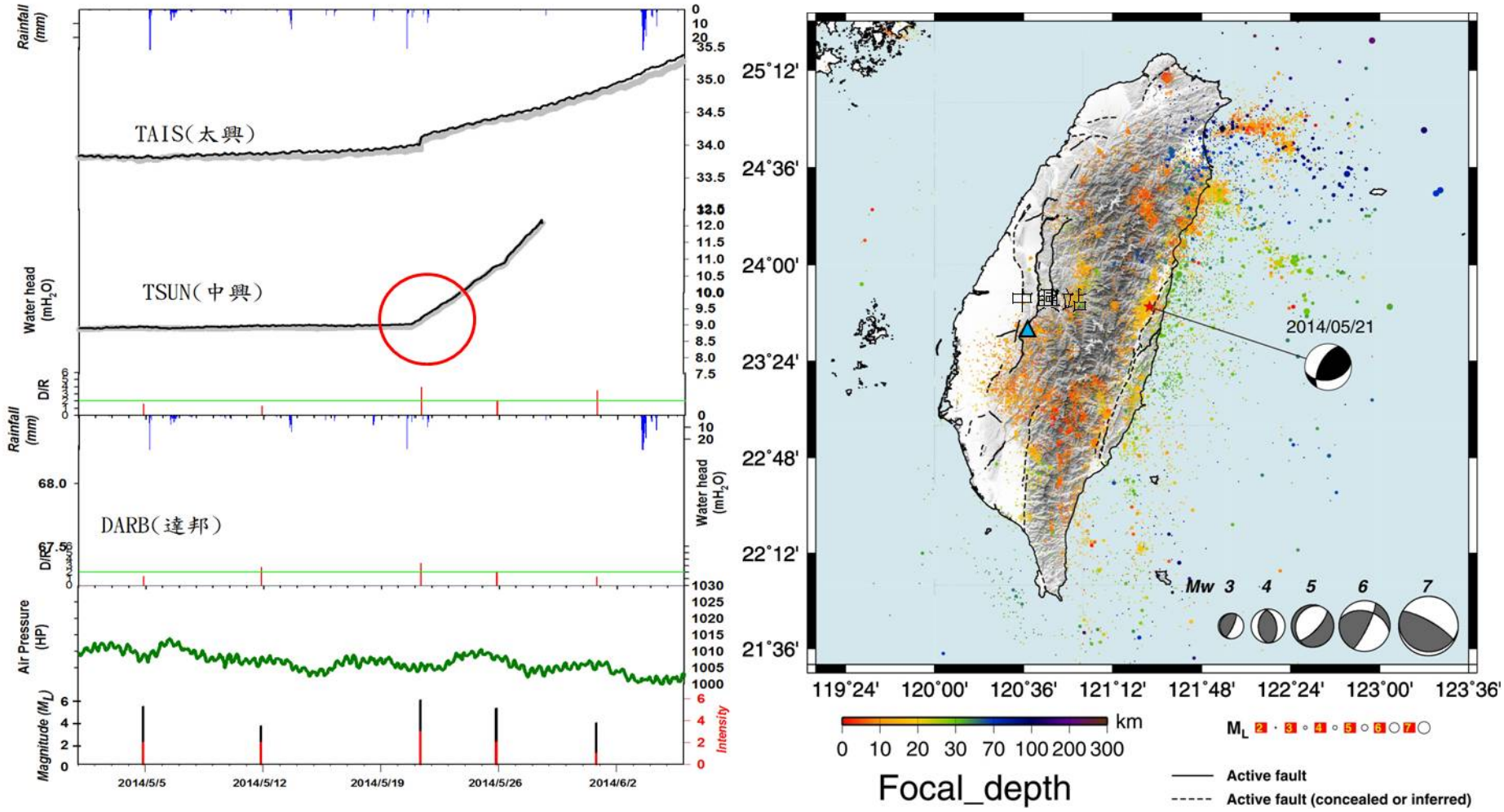


圖 5-3.3：2014 年 5 月 21 日花蓮鳳林地震與嘉義中興站水位異常關係圖。左方水位圖中，淡灰色線代表水位原始資料，黑色線則是經氣壓修正後的數據。中興站水位於 5 月 20 日突然開始上升，約為花蓮鳳林地震發生前 13 小時。

5-3-2 地震誤報率統計與各測站近況

計畫期間，本團隊基本上於每周進行一次震前異常檢討，並寄發簡報給予各位委員參考，然而因間隔時間為一周，有幾處異常與地震時具較短者無法及時通報，故此誤報率均以是否出現異常為準；提報異常的統計所列如表 5-3.2、表 5-3.3 所示。

表 5-3.2：2014 上半年度每周誤報率統計表。

提報日期	符合篩選條件之地震資訊	水位異常測站	研判正確與否
2013.12.03	無相關地震	無	
2013.12.10	2013/12/3 嘉義阿里山，規模 3.5	中興	正確
	2013/12/7 嘉義竹崎，規模 3.4	無	沒有研判到
2013.12.17	無相關地震	無	
2013.12.24	無相關地震	無	
2014.01.07	2014/1/2 嘉義番路，規模 3.4	中興	正確
2014.01.14	無相關地震	無	
2014.02.11	2014/1/15 南投魚池，規模 5.0	無	沒有研判到
	2014/2/5 至 2014/2/8 新竹橫山連續 10 起地震	新樂	正確
2014.02.23	2014/2/12 臺北士林，規模 4.2	無	沒有研判到
	2014/2/17 嘉義大林，規模 3.8	中興	正確
	2014/2/22 宜蘭大同，規模 5.6	無	沒有研判到
2014.03.04	2014/2/27 嘉義梅山，規模 3.3	中興	正確
2014.03.18	無相關地震	無	
2014.04.01	2014/3/19 東部外海，規模 5.8	無	沒有研判到
2014.04.08	無相關地震	無	
2014.04.15	無相關地震	無	
2014.04.22	無相關地震	無	
2014.05.06	2014/5/4 花蓮外海，規模 5.2	無	沒有研判到
2014.05.13	無相關地震	無	
2014.05.20	無相關地震	無	
2014.05.27	2014/5/21 花蓮鳳林，規模 5.9	中興	正確
	2014/5/25 臺東關山，規模 5.0	無	沒有研判到

表 5-3.3：2014 下半年度每周誤報率統計表。

提報日期	符合篩選條件之地震資訊	水位異常測站	研判正確與否
2014.06.10	2014/5/31 新竹橫山，規模 4.2	無	沒有研判到
	2014/6/1 新竹橫山，規模 3.9	無	沒有研判到
2014.06.17	無相關地震	無	
2014.07.08	無相關地震	無	
2014.07.15	無相關地震	無	
2014.07.22	無相關地震	無	
2014.08.12	無相關地震	無	
2014.08.19	無相關地震	無	
2014.09.23	無相關地震	無	
2014.09.30	無相關地震	無	
2014.10.07	無相關地震	無	
2014.10.14	2014/10/8 花蓮近海，規模 5.2	無	沒有研判到
2014.10.21	無相關地震	無	
2014.10.28	無相關地震	無	
2014.11.04	2014/10/26 宜蘭近海，規模 5.0	無	沒有研判到
2014.11.11	無相關地震	無	
2014.11.18	2014/11/12 嘉義阿里山，規模 4.2	無	沒有研判到
2014.11.25	無相關地震	無	

依上兩表所示，每一次地震視為一件，當周無地震者也視為一件，以上共 41 件預報，其中包含 12 個地震沒有判斷到，誤報率為 29%。而此 41 次預報事件當中，有 23 次為當週無符合條件的地震且無水位異常者，故全年 18 次的符合篩選條件的地震事件中，有 6 次成功預報。

目前提高成功率的方法有兩個方向：

一、改善地震篩選條件：

本團隊對於地下水位的地震篩選條件為當地震度 2 以上或 D/R 值 2 以上（符合其中一點即入選），規模已不在考慮範圍內；目前參考土壤氡氣的地震篩選條件，將震源深度納入考慮，正在進行所有入選地震中的震源深度與出現異常的比率統計，若此比率極低或甚至沒有，將會修改篩選條件將過深的地震濾除。

二、增加水位異常的觀察面向：

目前經由氣壓修正之後，異常判斷的精度與可信度已大大提高，但同時也了解水位異常的次數在真實狀況下相當稀少，若單純經由水位高低來進行異常判視似乎已到達瓶頸；目前本團隊正在地下水位資料的頻率域方面進行研究，希望能找到地震之前無論是在高頻或低頻的週期變化出現的細微震前訊息。

至於今年各測站的資料狀況不甚穩定，至五月底僅剩臺北樹林站、新竹大坪站、嘉義中興站三個運作正常，所幸八月新竹的新樂站恢復資料，至 2014 年 11 月底本計畫在臺灣全島僅剩三口地下水位觀測井的資料正常運作。相當可惜的是嘉義較為敏感的太興站於五月底遭雷擊之後資料停擺，建議所方能對良率高的測站進行維修。

5-4 地下水水氡觀測結果

5-4-1 安通地下水水氡觀測站

本計畫 2013 年 12 月至 2014 年 11 月執行期間,持續在海岸山脈南段安通溫泉安通站定期採集水樣，分析地下水水氡濃度。圖 5-4.1 為安通站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。其中，環境因子包含大氣壓力、雨量、溫度等。由於安通站為受限含水層，故地下水水氡濃度並未受到環境因子影響。

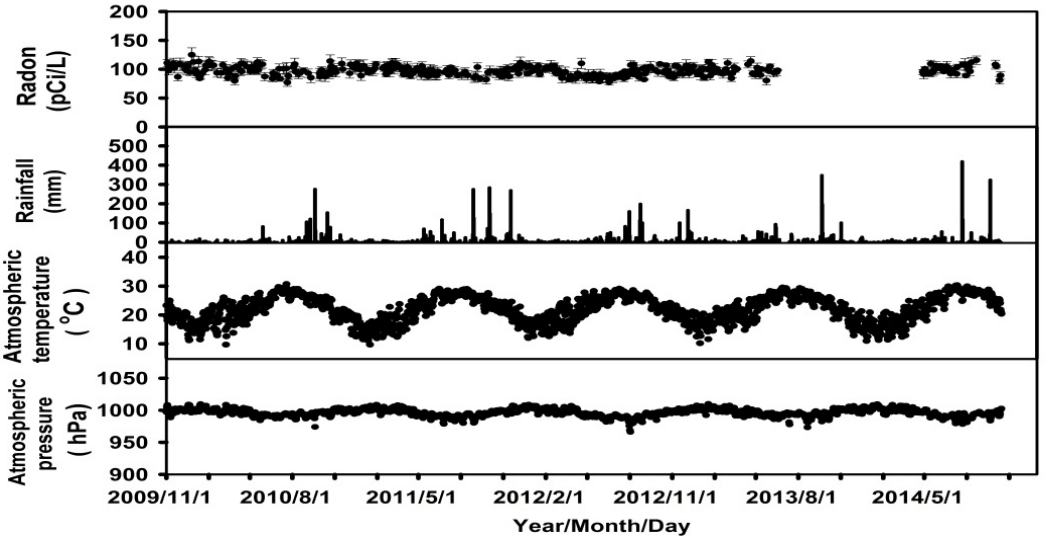


圖 5-4.1：安通站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。

如圖 5-4.2 所示，本年度計畫執行期間，安通站地下水水氡濃度皆無超出由四分位數法統計出之下異常值邊界，趨勢穩定，無異常下降之地震前兆，此期間海岸山脈南段也未發生強震(Mw＞6.0)。

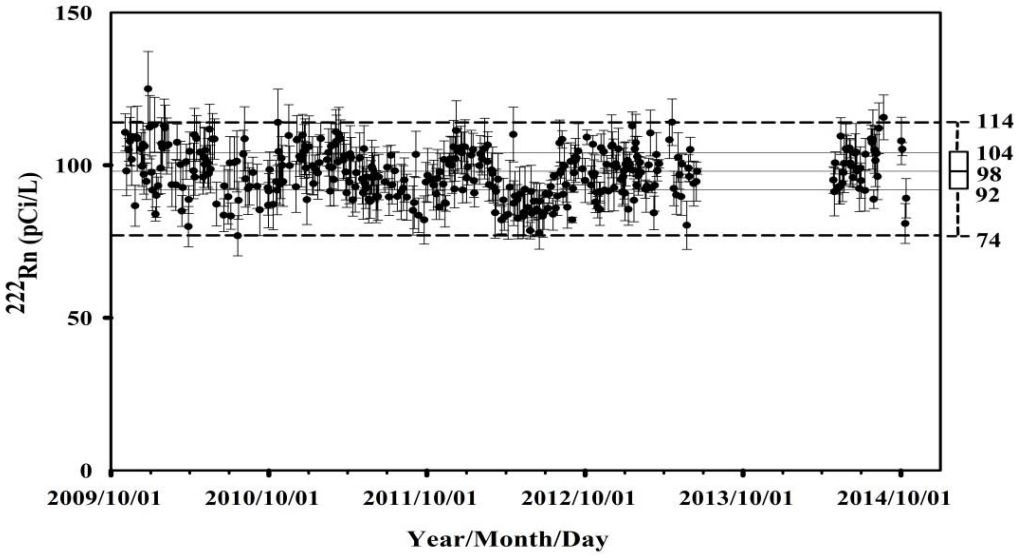


圖 5-4.2：利用四分位數統計分析安通站地下水水氡濃度。

5-4-2 社頂地下水水氡觀測站

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 5-4.3 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一週期變化，與季節性降雨量相關。

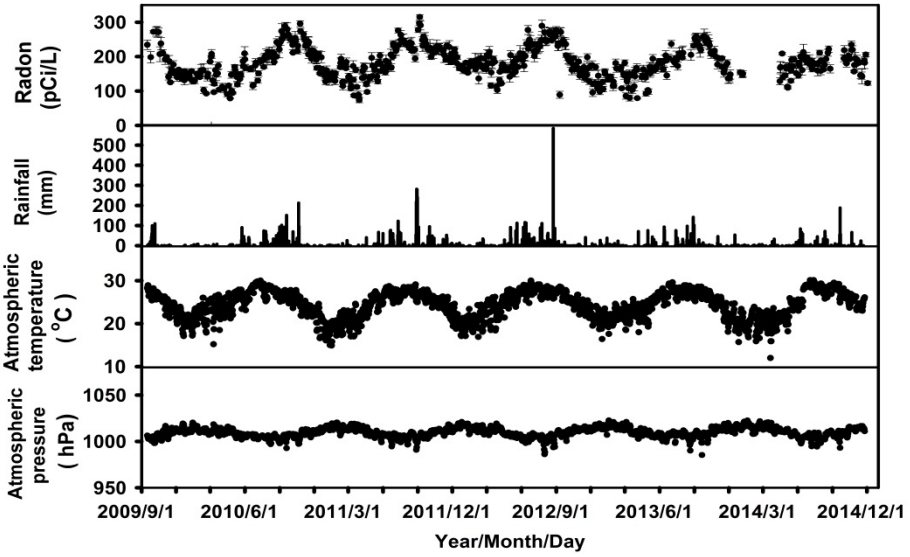


圖 5-4.3：社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。

圖 5-4.4 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。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，且實驗室分析與連續監測數據比對結果相當吻合。

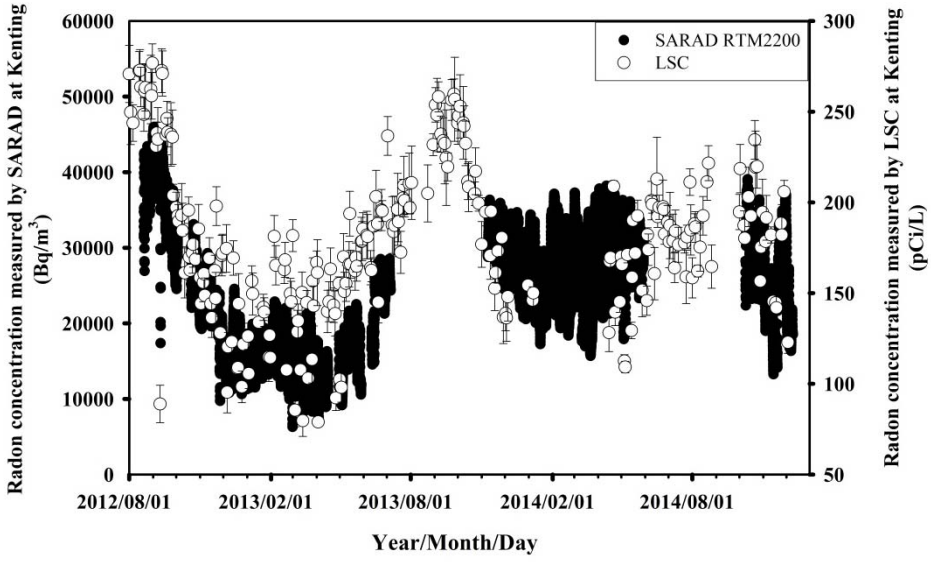


圖 5-4.4：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。

5-5 漂水測站改設之評選與資料呈現

漂水測站位於嘉義縣中埔鄉漂水村並位於中崙測站西邊 3 km 處，鄰近觸口斷層。原屬地下水位觀測站，由於在去年的地下水位變化監測中漂水測站結果並不甚理想，因而建議將其改建為地下水溶解氣測站的計畫，預期能在持續監測地下水位變化並同時增加地下水溶解氣體的觀測。然而，溶解氣體監測系統管線將井水引流後，壓力式水位計顯示之水位即等於溶解氣體監測系統管線內部之平衡壓力，因此，目前地下水位的變化僅為參考之用。

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。

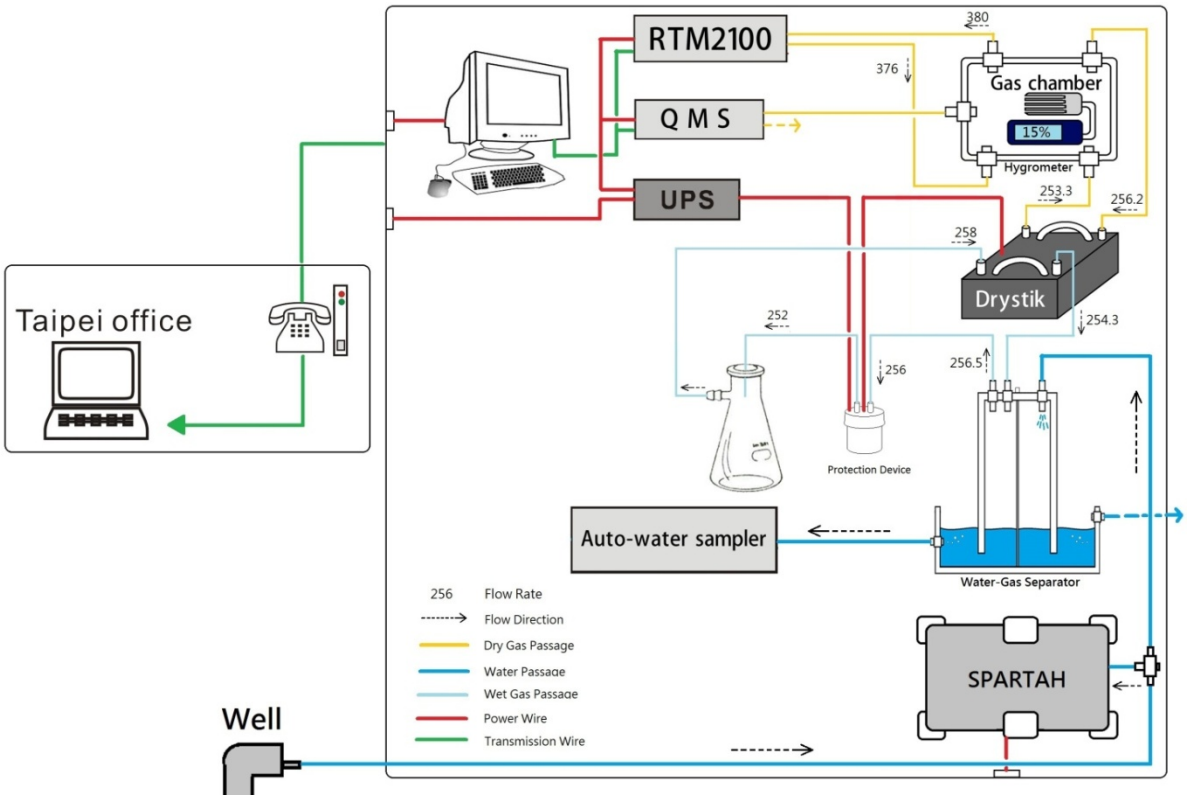


圖 5-5.1：嘉義漂水測站內管線配置簡圖。SPARTAH 為連續採樣之氡同位素樣本採集裝置，其採樣速率為 1 ml / day。其餘井水皆分流至水氣分離裝置進行氣化，並由乾燥器進行除濕後進入氣體分析系統；脫氣水樣依設定時間間距採集水體樣本。

漂水測站之溶解氣體組成主要為甲烷（93%），其餘氣體組成依序為氮氣（4%）、氧氣（1%）與少量二氧化碳、乙烷、氬氣，見圖 5-5.2；根據井水的氡同位素比值（Ra=2.2）顯示水體含有深部流體（20%）與部分地殼訊號（40%）見圖 5-5.3。

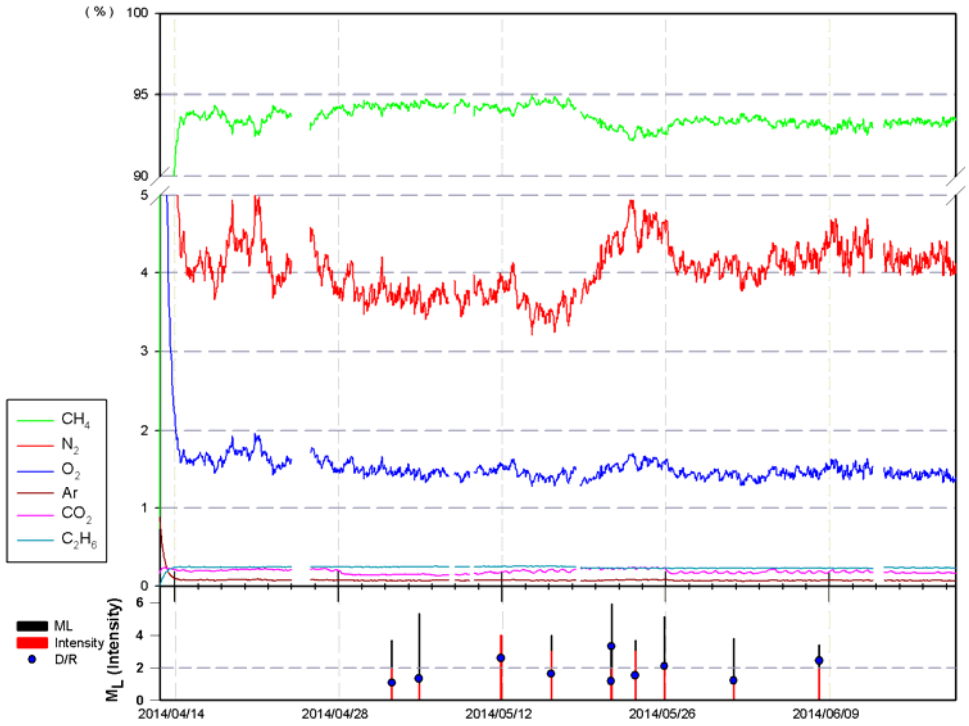


圖 5-5.2：澐水站溶解氣氣體百分比與測站相關地震(D/R > 1)之時間分布(2014/4/12-2014/6/19)。4/12 - 4/14 之間的劇烈變化肇因於管線更動。

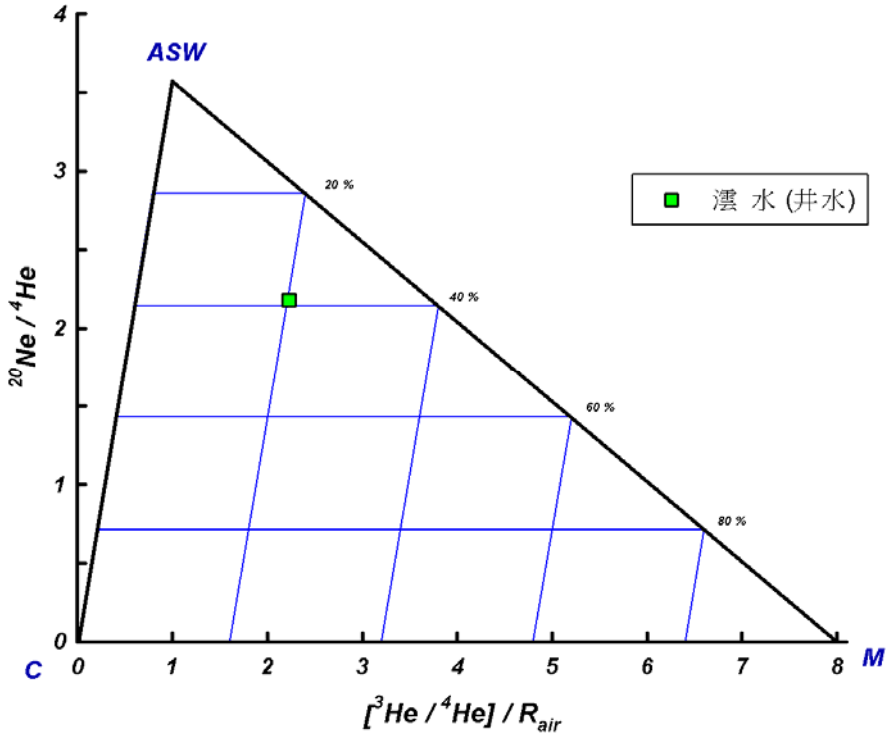


圖 5-5.3：澐水測站水中溶解氣氦同位素比值與氖氦比值。暗示位於深部具地函訊號之流體經由深部裂隙系統遷移至地表並與具地殼訊號之流體進行混染。澐水之井水與深部裂隙構造（觸口斷層系統）有非常高的關聯性。

漯水測站自 103 年 1 月底建成後至 103 年 4 月間進行各項測試，持續進行儀器和管線配置的校調。根據溶解氣體分析資料顯示，漯水測站之溶解氣體中以甲烷／二氧化碳比值、二氧化碳／氬氣比值之變化最為顯著。因 5/18 日進行 QMS 校正以至於各氣體含量比例在 5 月 18 日前後有明顯變化。見圖 5-5.4。

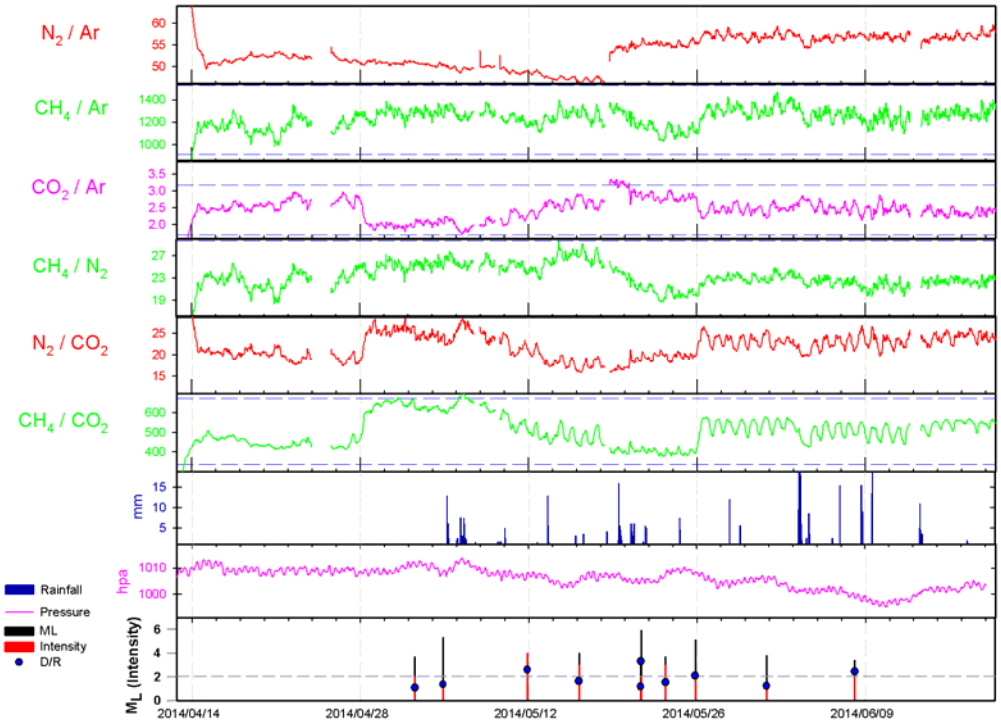


圖 5-5.4：漯水測站各溶解氣體間之比值。（2014/4/12-2014/6/19）。

地下水溶解氡氣變化穩定，濃度約維持在 0.8-1.2 kBq/m^3 如圖 5-5.5 所示。初步研判漯水測站之地下水溶解氣體較不受氣壓、降雨影響且變化顯著。

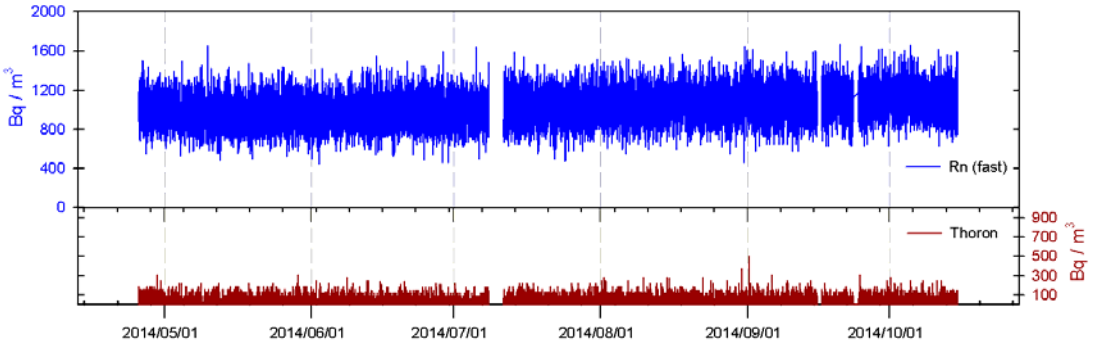


圖 5-5.5：漯水測站水中溶解氡氣。

自 2014 年 4 月至 2014 年 10 月間氡氣背景值有微幅上升的趨勢，推測屬季節影響。另外發現氡氣分析儀(RTM)內部之抽氣幫浦的抽氣速率會明顯的影響四極桿質譜儀之分析結果，比照 RTM 幫浦抽氣速率與溶解氣體背景值後發現兩者發生改變的時間點皆一致。且發現抽氣速率越高則甲烷、乙烷濃度背景值越低；氧、氮、二氧化碳、氬背景值則越高，4 月至 10 月的各氣體濃度如圖 5-5.6 所示。

RTM 抽氣速率（L/min）自 4 月 12 日開始記錄，而後自 7 月 10 至 10 月 20 日共停機 3

次，因此造成三次各氣體濃度劇烈變化（紅框處）。除了二氧化碳之外，氣體濃度越高則隨幫浦抽氣速率變化的幅度也越大。且各氣體背景濃度變化與幫浦抽氣速率變化之相關性皆非常高。9 月 19 日因 RTM 幫浦抽氣速率稍微下降導致個氣體濃度皆發生相對的變化。

氣體資料於 7 月到 9 月期間多次中斷因恰逢颱風季節，造成測站多次斷電（即測站室溫飆高）使得資料缺失。

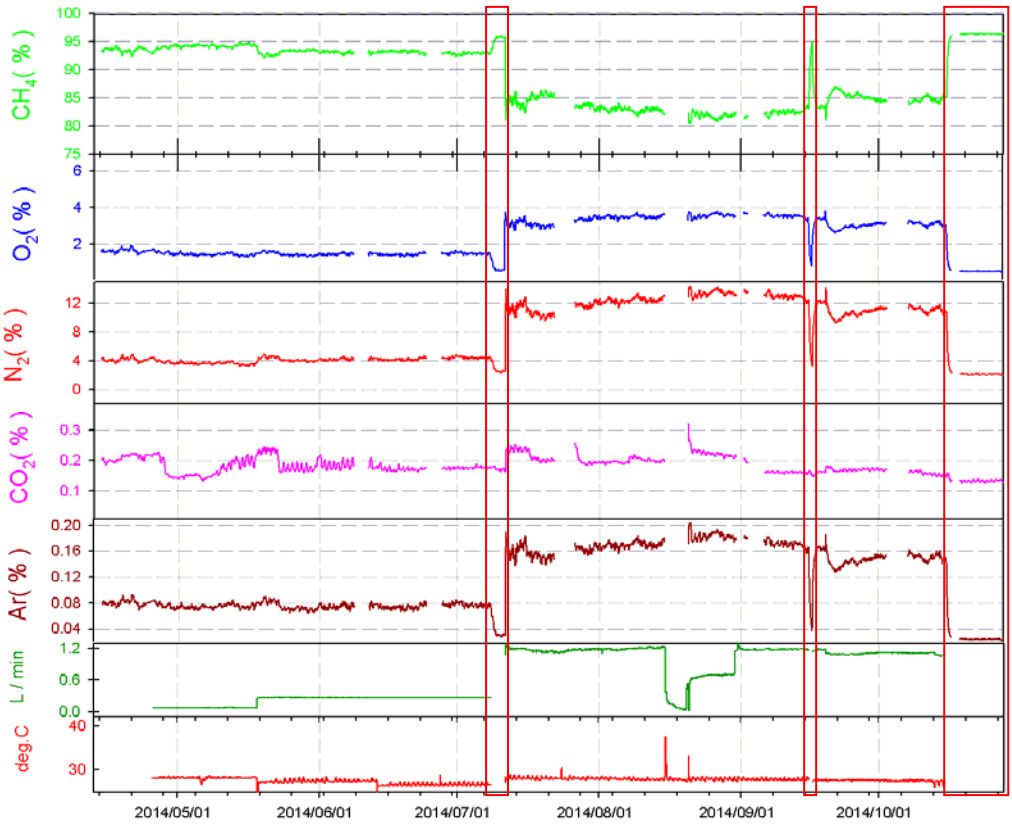


圖 5-5.6：溶解氣體甲烷、氧、氮、二氧化碳、氬與 RTM 幫浦抽氣速率、測站內氣溫。

澐水觀測站與其觀測系統的特性仍持續測試中，目前已能持續穩定接收觀測資料，由於首次同時進行水體與氣體監測，仍有許多需要更深入討論的技術性問題，如設法濾除 RTM 與 QMS 儀器間的干擾情形等。因此，目前以已於實驗室內複製一套相同之監測系統進行各種模擬測試，在能夠充分瞭解澐水觀測站與提升觀測站記錄資料的可信度之前暫時延緩與地震事件之間的討論工作。

5-6 綜合觀測結果

目前的觀察結果顯示，可以發現到在某些較大的地震發生前，有兩個或兩個以上的土壤氣體觀測站或地下水壓觀測站可以發現到異常變化，同時地下水氡亦出現相對應的異常變化，尤其是規模較大的地震，其異常的前兆反應通常更是較為顯著，例如：2010 年 3 月 4 日高雄甲仙地震和 2012 年 2 月 26 日屏東霧台地震。表 5-6.1 顯示 2013 年 12 月至 2014 年 11 月間地震規模大於 5 且土壤氣體有觀測到異常的地震事件與地下水壓、地下水氡觀測結果。其中，2014 年 5 月 21 日花蓮鳳林地震，中崙和東華土壤氣體觀測站和中興地下水壓觀測站同時在地震發生前開始出現異常變化，太興地下水壓觀測站甚至有同震。其餘相關的地震並未觀察到地下水壓和地下水氡有同步顯著的異常出現。此外，2014 年 2 月 5 日至 2 月 8 日發生在新竹地區的群震，大平地土壤氣體觀測站和新樂地下水壓觀測站皆出現前兆異常變化。

表 5-6.1：2013 年 12 月至 2014 年 11 月間，規模大於 5 且多個土壤氣體觀測站有前兆訊號的地震事件與各地球化學觀測站之前兆反應列表。

	地震					土壤氣體觀測站						地下水壓觀測井										溶解氣觀測站	
						TPT	CL	GK	PT	DH	CS	臺北網			新竹網			嘉義網				AT	ST
ID	臺灣時間	經度	緯度	深度（KM）	規模	新竹大平地站	嘉義中崙站	雲林古坑站	屏東屏科大站	花蓮東華站	臺東池上站	錦和站	樹林站	明德站	雙溪站	新樂站	瑞峰站	中興站	太興站	達邦站	汕水站	臺東安通站	墾丁社頂站
1	2014/1/15 00:44	121.01	23.84	15	5	前		前			前												
2	2014/1/15 02:38	121.13	22.86	8.3	5.1			前	前		前												
3	2014/1/15 03:50	121.1	22.88	8.4	5.1			前	前		前												
4	2014/2/5-2/8	新竹地區		6.6-11.3	2.3-3.4	前										前							
5	2014/5/21 08:21	121.45	23.74	18	5.9		前			前								前	同				

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 斷層活動性討論

6-1-1 InSAR 與 GPS 測量比較

由於 InSAR 以及水準都為單一方向分量紀錄，而地表真實變動可藉由 GPS 水平以及高程分量而獲得。依據衛星影像資料所跨越的時間，轉換/投影 GPS 三個分量到衛星方向，與臺北地區 InSAR 的 LOS 方向速度場進行比較，可評估 InSAR 在臺北地區的可信任度，其比較結果如下小節所述。

6-1-1-1 ERS 速度場與 GPS 速度場比較

以連續 GPS 站 S101 為參考點，將 ERS 的 LOS 速率以及 CGPS 的速率皆對其做校正。由於使用之 ENVISAT 衛星影像資料為降軌右視影像，臺北地區主要的水平分量貢獻在 LOS 方向上為正值，此時期（1996/1 ~ 1999/12）臺北盆地主要以抬升運動為主。由圖 6-1.1 可見得，此時期臺北盆地內 CGPS 測站相當少，但 CGPS 測站經由轉換校正後，與 ERS 衛星速度場相當一致，顯示此時期 PS-InSAR 結果的可信度很高，可補足臺北盆地 CGPS 點位不足的空缺。

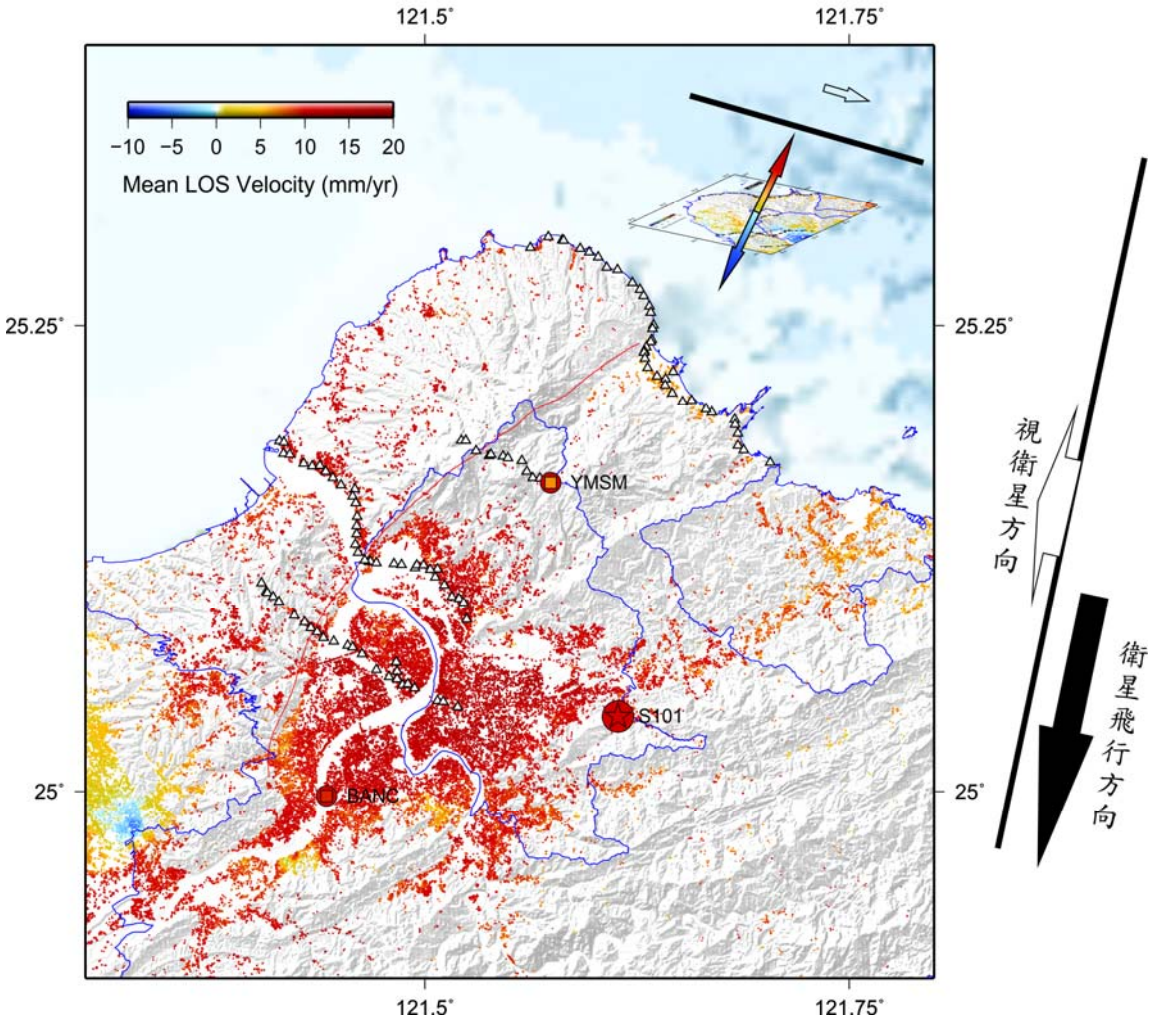


圖 6-1.1：ERS 衛星與 CGPS 視衛星方向上年平均變動量比較。正方形為 CGPS 轉換至 LOS 方向上的年平均變動量，白色三角形為水準路線。

6-1-1-2 ENVISAT 速度場與 GPS 速度場比較

以連續 GPS 站 WUKU 為參考點，將 ENVISAT 的 LOS 速率以及 CGPS 的速率皆對其做校正。由於使用之 ENVISAT 衛星影像資料為降軌右視影像，臺北地區主要的水平分量貢獻在 LOS 方向上為正值，但由於此時期（2003/4 ~ 2008/6）台北盆地下陷速度相對明顯，垂直分量造成的速度場變化還是很容易辨識出。由圖 6-1.2 可見得，整體而言，大部分 CGPS 測站經由轉換校正後，與 ENVISAT 衛星速度場相當一致，顯示此時期 PS-InSAR 結果的可信度很高，可補足臺北盆地中央沒有 CGPS 點位的空缺。

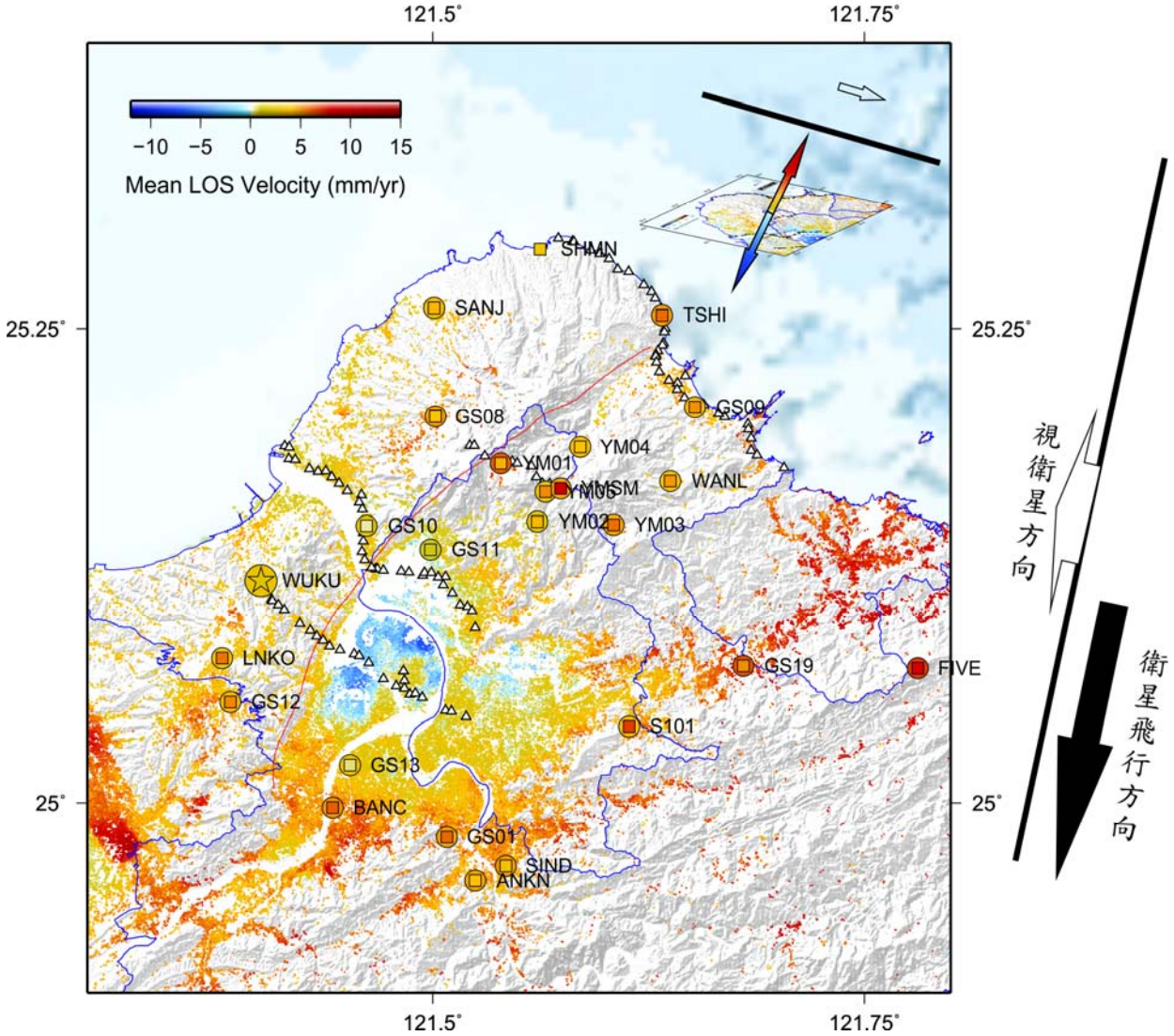


圖 6-1.2：ENVISAT 衛星與 CGPS 視衛星方向上年平均變動量比較。正方形為 CGPS 轉換至 LOS 方向上的年平均變動量，白色三角形為水準路線。

6-1-1-3 ALOS 速度場與 GPS 速度場比較

以連續 GPS 站 WUKU 為參考點，將 ALOS 的 LOS 速率以及 CGPS 的速率皆對其做校正。由於使用之 ALOS 衛星影像資料為升軌右視影像，臺北地區主要的水平分量貢獻在 LOS 方向上為負值，且其水平分量速度值在 ALOS 衛星分析期間有相當程度大於垂直分量。由圖 6-1.3 可見得，整體而言，所有 CGPS 測站經由轉換校正後，與 ALOS 衛星速度場相當一致，顯示此時期（2007/1 ~ 2011/3）PS-InSAR 結果的可信度相當高。

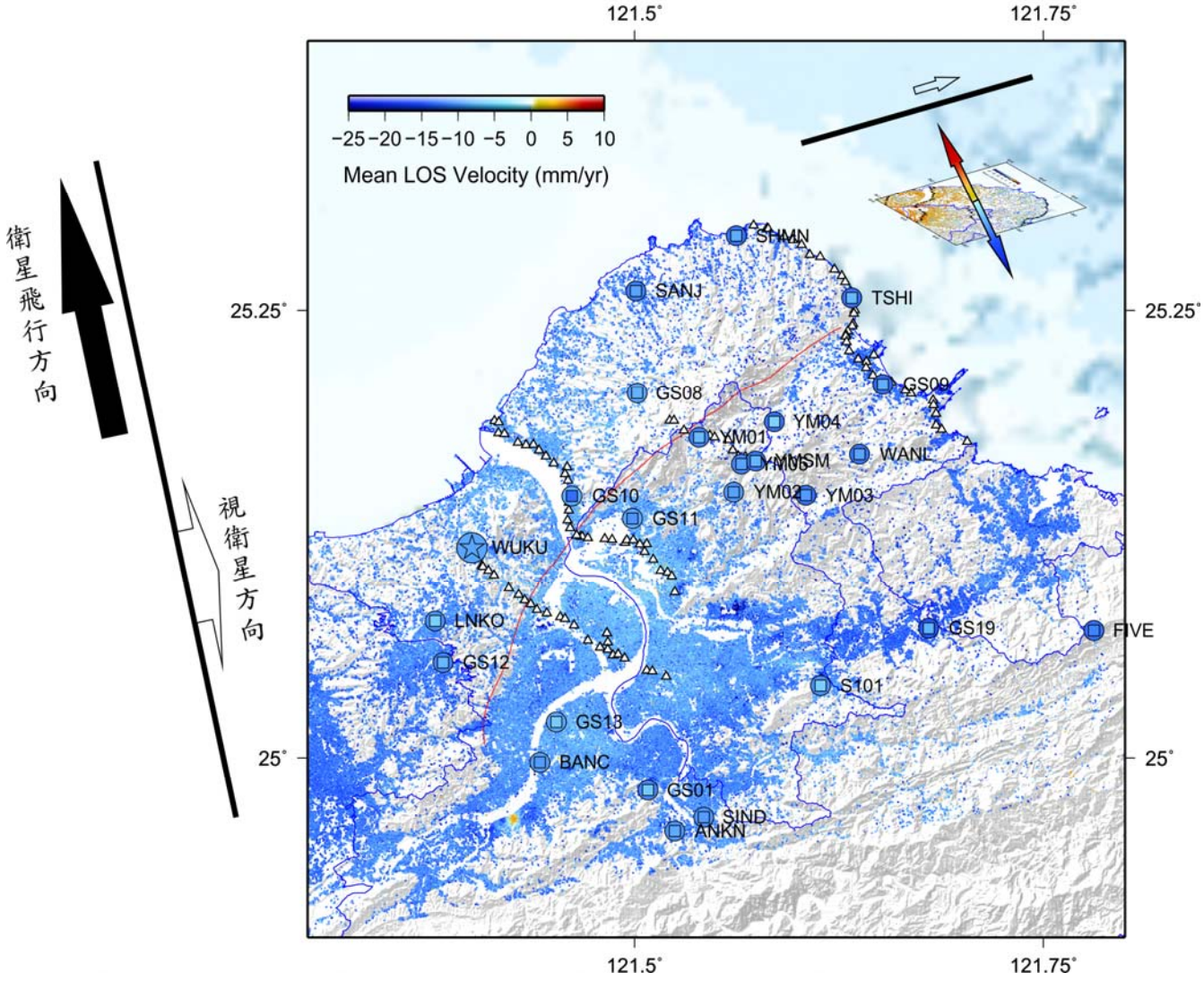


圖 6-1.3：ALOS 衛星與 CGPS 視衛星方向上年平均變動量比較。正方形為 CGPS 轉換至 LOS 方向上的年平均變動量，白色三角形為水準路線。

6-1-2 InSAR 與精密水準測量比較

精密水準資料記錄水準點位每年的變動量，本研究依據衛星影像資料所跨越的時間，選擇每年臺北地區觀測之水準測量結果進行比較，結果如下。

6-1-2-1 ENVISAT 與水準測線編號 01 的速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS09 為參考點，將 ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。由於水準測線編號 01 位於臺灣最北端，植被相對較多，對於雷達衛星而言無法得到良好的面狀結果。但基本上來說，ENVISAT 之平均 LOS 速度場與水準測線編號 01 的速度大致符合(圖 6-1.4)。可惜 PS-InSAR 在山腳斷層西側並無獲得任何可靠的速度值，因此無法明確判釋出山腳斷層的位置。

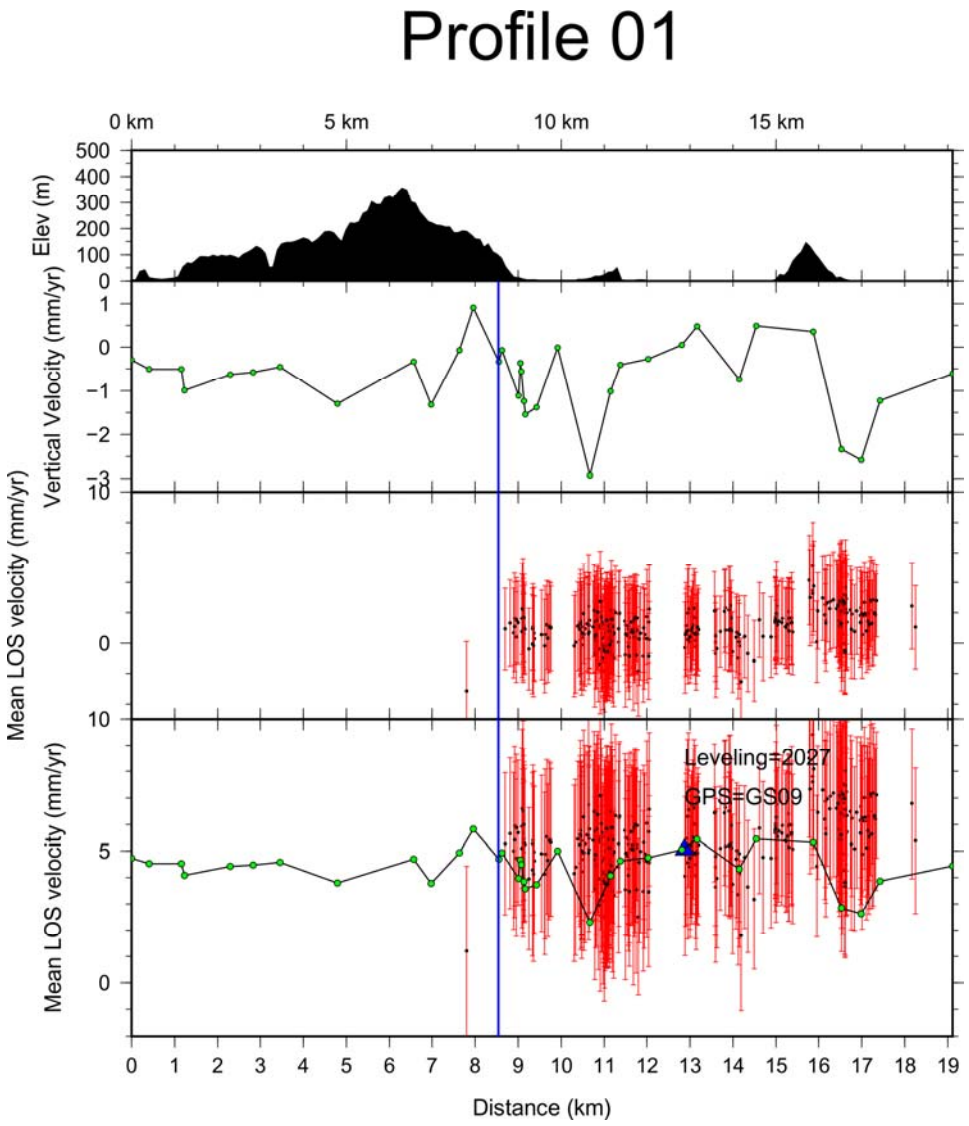


圖 6-1.4：比較 ENVISAT 與編號 01 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-2-2 ENVISAT 與水準測線編號 02 速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 YM02 為參考點，將 ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。由於水準測線編號 02 位於大屯火山區域，植被相當茂密，也缺少人造建物，對於雷達衛星而言無法得到良好的面狀結果。但基本上來說，ENVISAT 之平均 LOS 速度場與水準測線編號 02 的速度大致符合（圖 6-1.5）。在跨過山腳斷層向北延伸兩側，向東有明顯對視衛星方向的抬升量。山腳斷層西側速率約為對視衛星方向下陷 1 ~ 2 mm/yr，而東側則為對視衛星方向抬升 1 ~ 2 mm/yr。

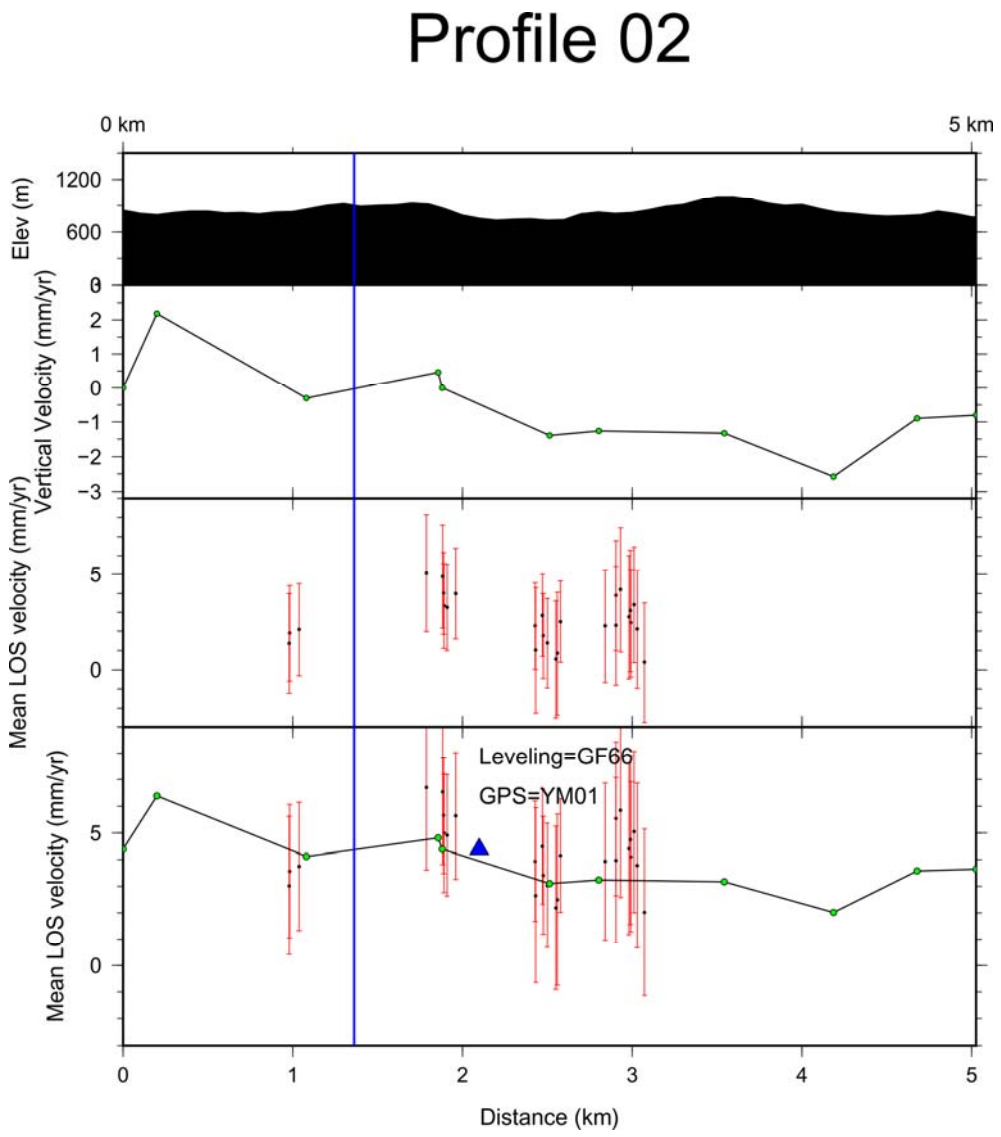


圖 6-1.5：比較 ENVISAT 與編號 02 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-2-3 ENVISAT 與水準測線編號 03 速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS10 為參考點，將 ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的速率皆對其做校正。整體而言，比較 ENVISAT 之平均 LOS 速度場與水準測線編號 03 的垂直速度場 （圖 6-1.6），ENVISAT 資料密度明顯分布不足，但還是能看出跨過山腳斷層向東有稍微對視衛星方向下陷的趨勢，但因密度分布不足的關係，無法明確指出山腳斷層的位置。另外，盆地西側的 PS 速度值比水準的速率值略低，PS 值介於 -5 到 5 mm/yr 之間，而水準則介於 0 到 5 mm/yr 之間，雖然兩種結果有大約 5 mm/yr 的差異，但整體表現是相當一致的。

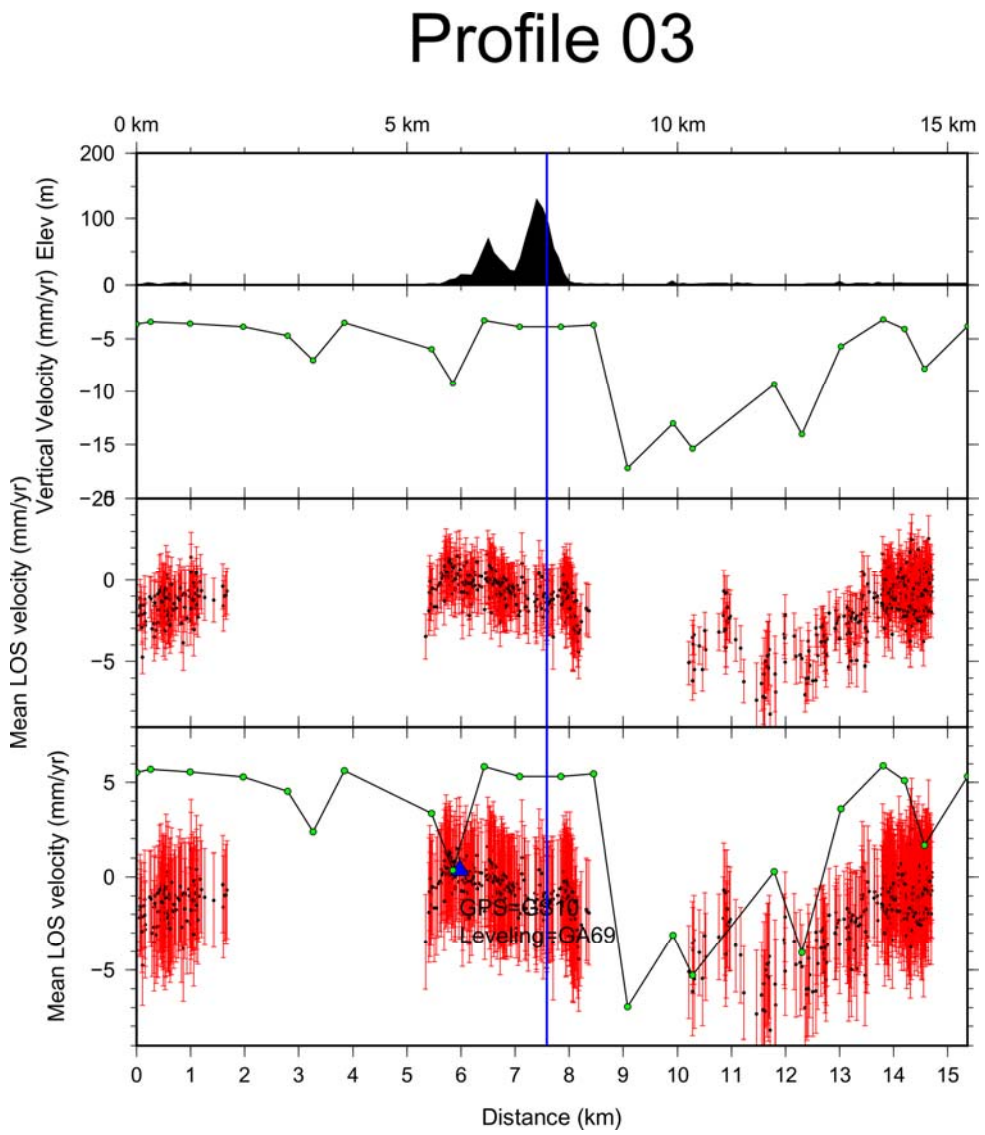


圖 6-1.6：比較 ENVISAT 與編號 03 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-2-4 ENVISAT 與水準測線編號 04 速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 WUKU 為參考點，將 ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。整體而言，ENVISAT 之平均 LOS 速度場與水準測線編號 04 的速度剖面（圖 6-1.7） 都明顯可看出跨過山腳斷層兩側（約 5 公里處）速度不同，由西向東有明顯對視衛星方向下陷的情形。雖然兩種結果有大約 2 ~ 3 mm/yr 的差異，但整體表現是相當一致的。

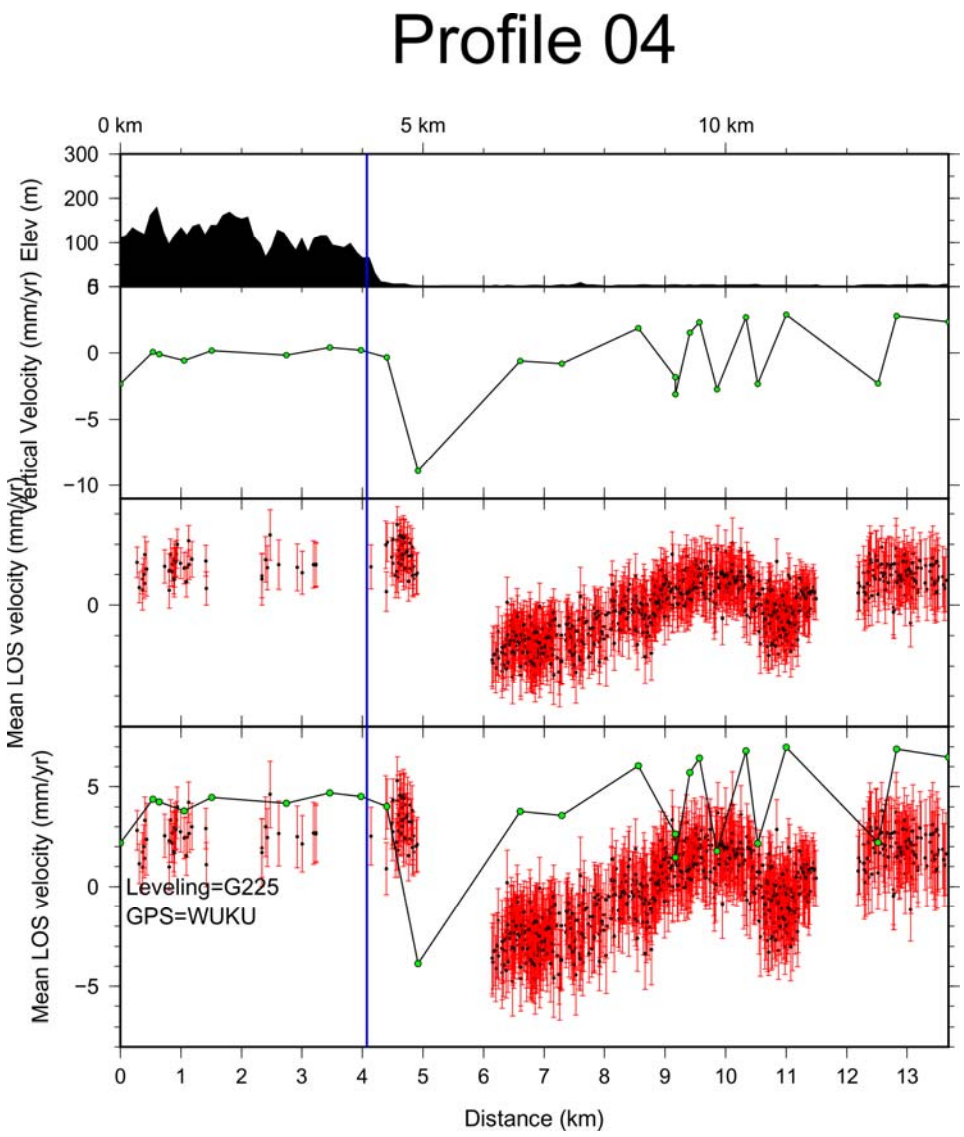


圖 6-1.7：ENVISAT 與編號 04 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-2-5 ALOS 與水準測線編號 01 速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS09 為參考點，將 ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的速率皆對其做校正。由於水準測線編號 01 位於臺灣最北端，植被相對較多，對於雷達衛星而言無法得到良好的面狀結果，儘管其 PS 點比 ENVISAT 多出許多，但整體誤差值卻也相對較大，因此當 PS 與水準結果放在一起比較時，反而無法突顯此剖面的速度變化。

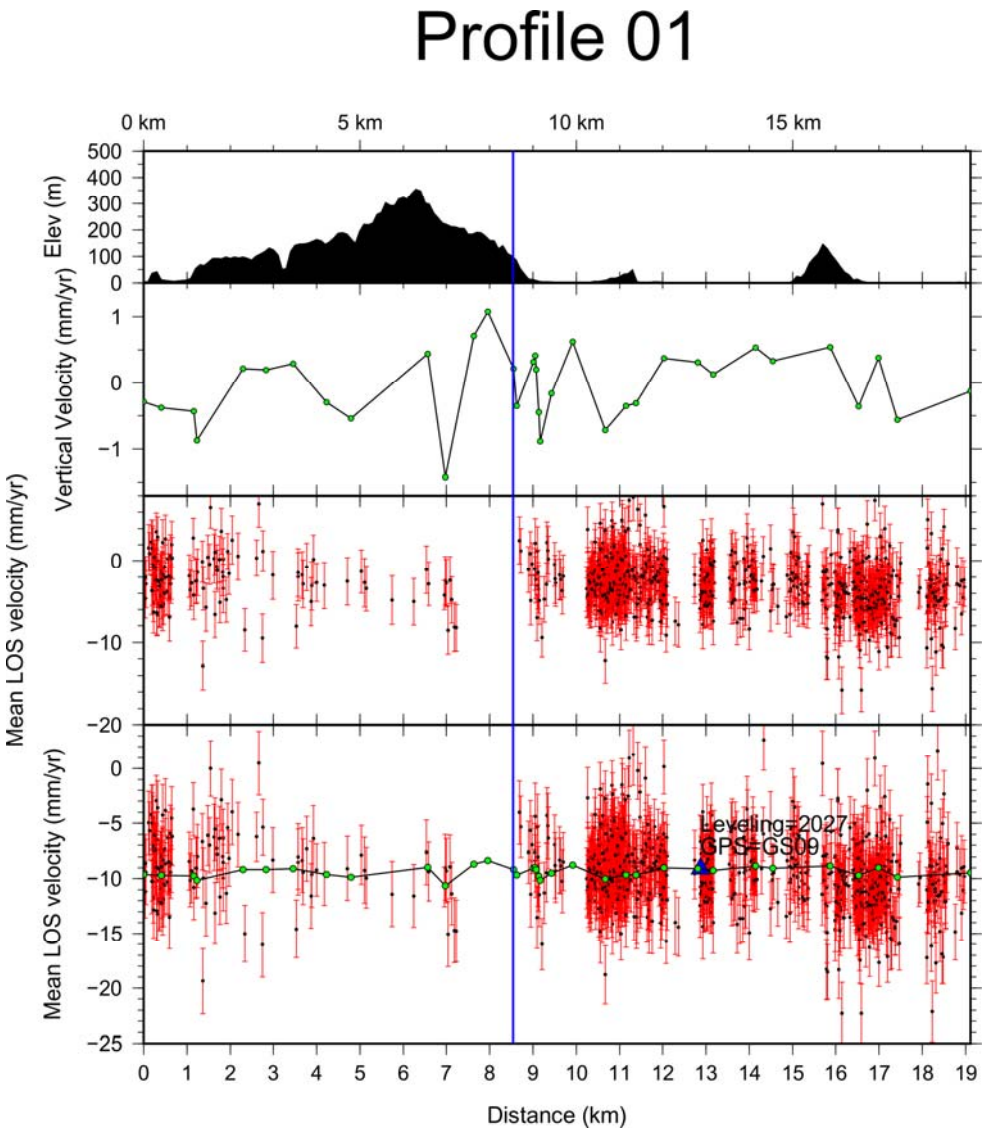


圖 6-1.8：比較 ALOS 與編號 01 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-2-6 ALOS 與水準測線編號 02 速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 YM01 為參考點，將 ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的速率皆對其做校正。由於水準測線編號 02 位於大屯火山區域，植被相當茂密，也缺少人造建物，對於雷達衛星而言無法得到良好的面狀結果。與水準測線編號 01 一樣，儘管其 PS 點比 ENVISAT 多出許多，但整體誤差值卻也相對較大，因此當 PS 與水準結果放在一起比較時，反而無法突顯此剖面的速度變化。

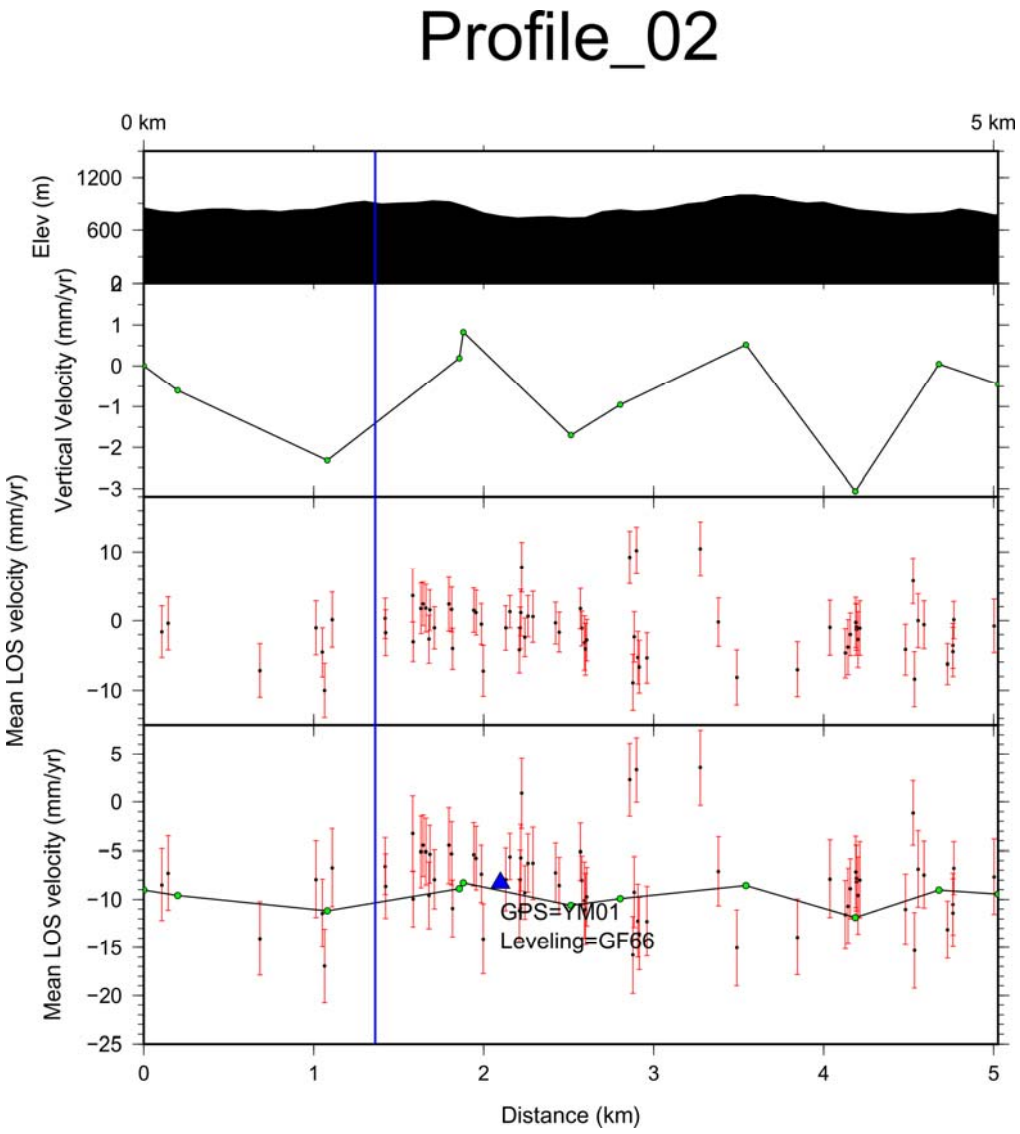


圖 6-1.9：比較 ALOS 與編號 02 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-2-7 ALOS 與水準測線編號 03 速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS10 為參考點，將 ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的速率皆對其做校正。水準資料在跨過山腳斷層有一明顯的下陷速率，約 10 ~ 20 mm/yr，但 PS 點之 LOS 速度在跨過斷層兩側因缺少資料點而沒有明顯下陷情形。

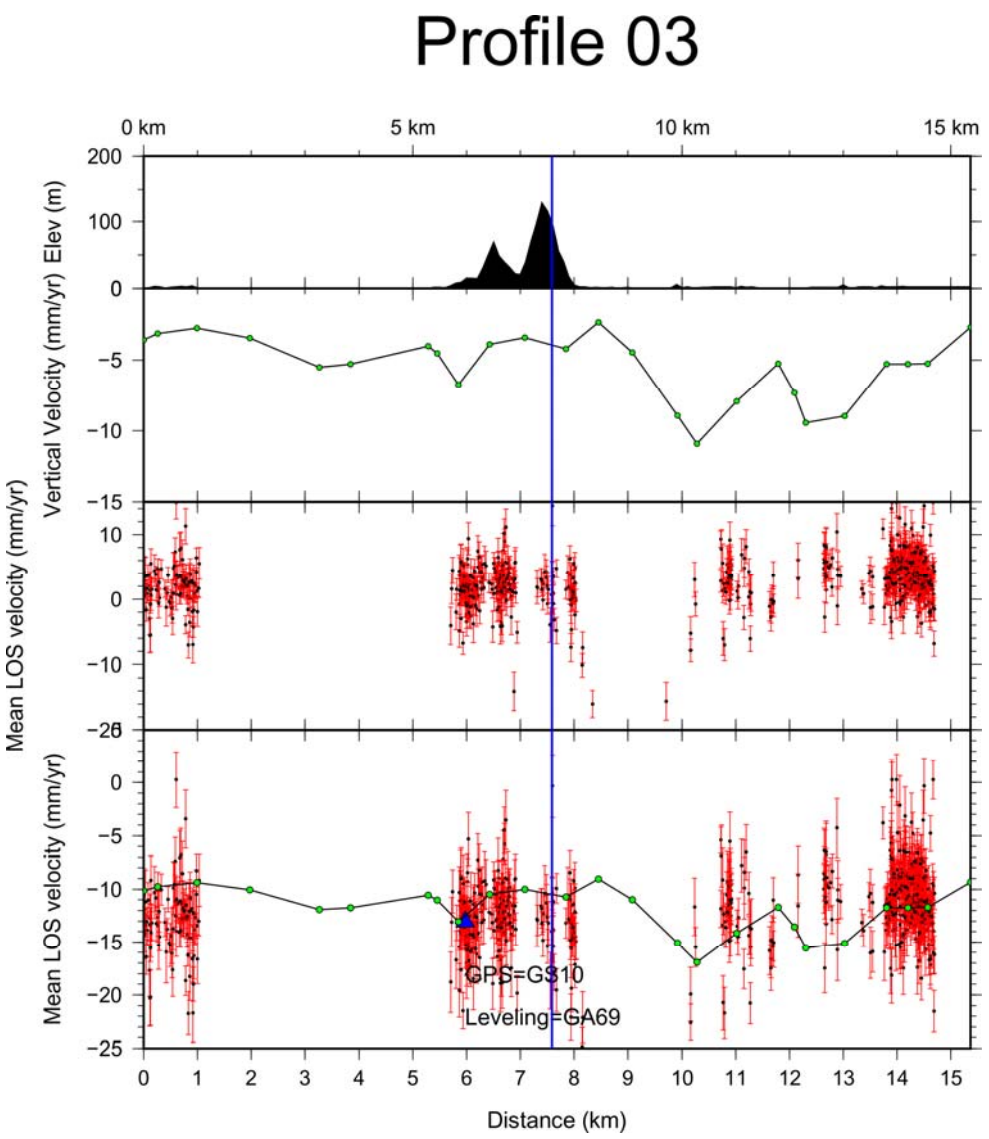


圖 6-1.10：比較 ALOS 與編號 03 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-2-8 ALOS 與水準測線編號 04 速度剖面之比較

本剖面以連續 GPS 站 WUKU 為參考點，將 ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的速率皆對其做校正。整體而言，ALOS 之 LOS 速度場與水準測線編號 04 趨勢大致符合，只有分別在 5 ~ 6 km 以及 12 km 處因為 PS 沒有點位結果而較不符。結果明顯看出此期間臺北盆地較無明顯抬升或下陷。

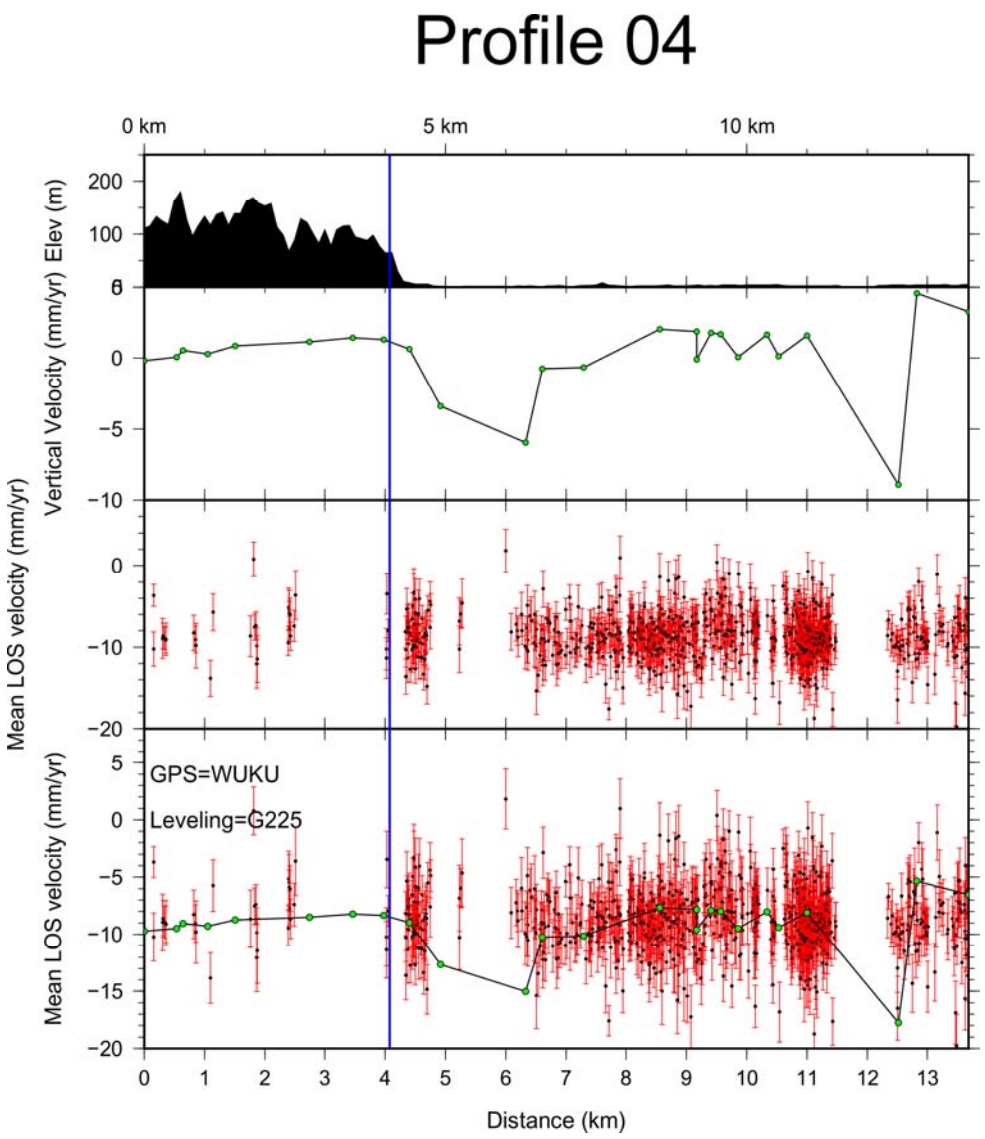


圖 6-1.11：比較 ALOS 與編號 04 精密水準測量視衛星方向變形速率。

6-1-3 InSAR 判釋斷層跡線位置與 LiDAR 判釋構造線形分布比較（以縱谷地區為例）

空載光達（LiDAR）遙測測量對地理資訊之獲取，最重要的特色是快速且精密的取得地面廣大區域的資訊。LiDAR 技術可產製高精度與高解析度的數值高程模型（DTM），接著再利用電腦數值處理將植被分離並去除，即可獲得清晰的地表線型構造。本年度研究中，除了將北部區域 PS-InSAR 結果套疊在 LiDAR 獲得的 DTM 上之外，也嘗試將 PS-InSAR 結果套疊在構造線形相對較多的臺灣東部地區。本研究初步先利用 PS 的地表變形結果與其光達數值地形判識成果、以及林啟文等（2009）出版兩萬五千分之一活動斷層圖地表結果相比較，重新討論縱谷斷層於縱谷平原的斷層分布位置，以及其地表線形特徵和斷層活動性關聯。

根據資料比較結果（圖 6-1.12），確實度高的構造線形通常於地質圖上會被同為判斷斷層線位置，線形明顯的地方也為視衛星方向抬升活躍的區域，具有高度的吻合，然而於構造線形確實度不明顯的地方，斷層跡線判斷會有所出入，地質圖的判斷斷層多緊鄰山脈前緣，而光達地地形判釋可能受到地表侵蝕影響，構造線形也偏向山脈側，然而依照 PS-InSAR 資料比對推測斷層跡應該在更西緣靠近秀姑巒溪溪床處，其前後距離約 800 公尺，由本研究判識斷層跡位置可列為後續地表地質調查重點區域，確認是否具有上覆河床沖積物錯動情形，此外比對余水倍與劉啟清（Yu and Liu, 1989）水準測量資料，池上、玉里地區多可發現到距離狹窄的地方發現快速抬升，由 PS-InSAR 資料結果符合敘述，可見斷層位置值得參考與查核。由於此結果為初步利用 ALOS 衛星的 PS-InSAR 資料與光達數值地形判識成果以及兩萬五千分之一活動斷層圖比較結果，預計第四年度分析東部地區所有影像時，會有更完整的報告。

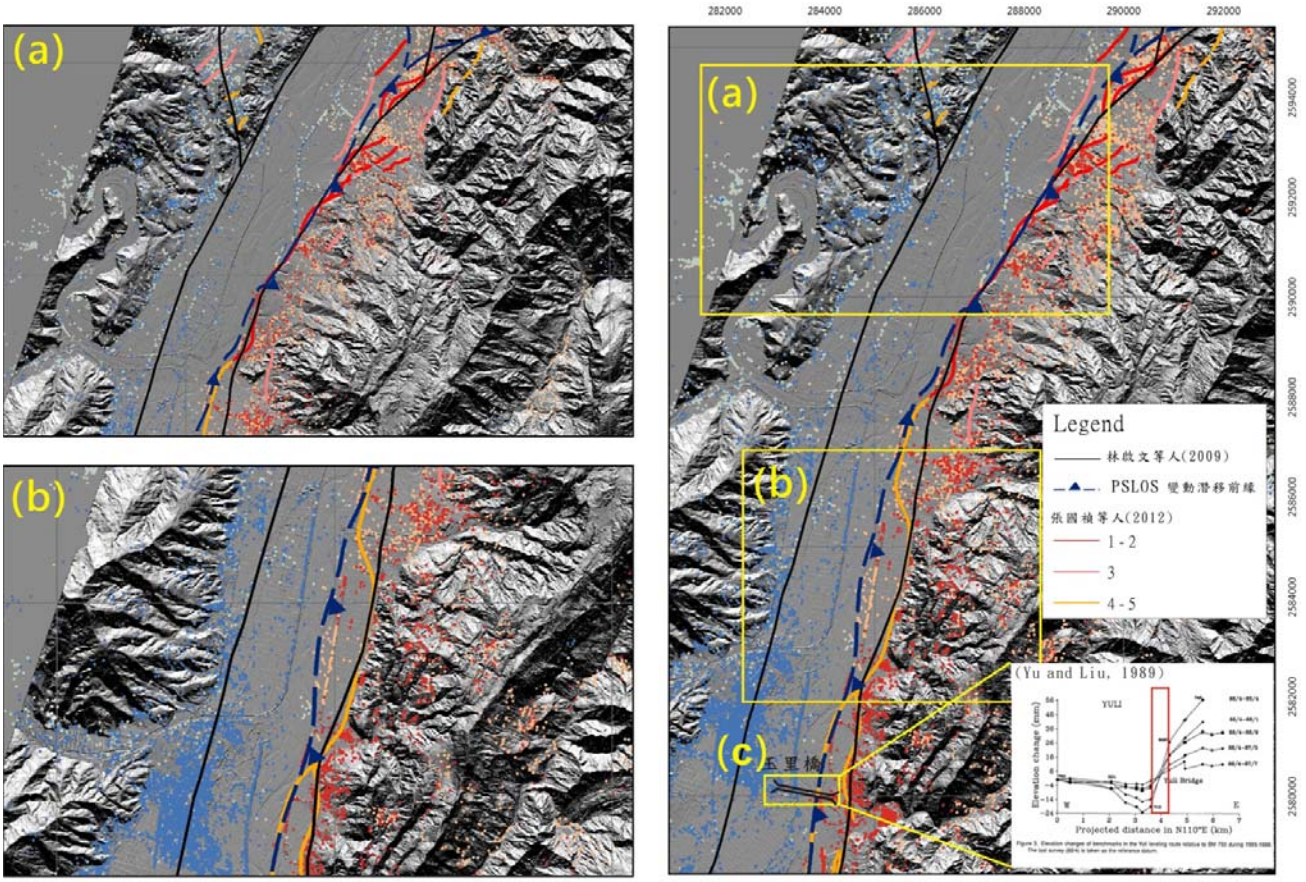


圖 6-1.12：判識斷層跡之比較。黑色線為兩萬五千分之一地質圖標示斷層位置（林啟文等，2009）。藍色線為利用 PS-InSAR 判釋斷層前緣；紅、橘色線為張國禎等（2012）構造線形分布，確實度愈高，線條愈趨於鮮紅色。

6-1-4 GPS 時間序列與地下水觀測資料比較

地下水位起伏（抽取/補注）與地表高程變化有密切關係，本研究利用連續 GPS 測站高程向時間序列與地下水觀測資料比較分析臺北地區地下水時空變化的相關性。本研究本年度第一次將地下水資料使用來與連續 GPS 測站比較，初步挑選連續 GPS 測站 S101 對比於地下水位中和站以及 FCWS 對比於地下水位。由圖 6-1.13 可知，初步觀測此兩地下水位站與連續 GPS 高程向時間序列並無相關性，其原因可能為（1） 地下水位站與 GPS 觀測站非共站；(2） 地下水位高程或 GPS 高程向時間序列包含其他雜訊因子尚未去除；(3） 此兩地下水位觀測站深度與地下水位層關係不密切；(4） GPS 高程向精度較差等等。未來，我們將繼續使用地下水位資料對比於 GPS 測站以及 InSAR 觀測資料，期望得到地表高層與地下水位的互動模式。

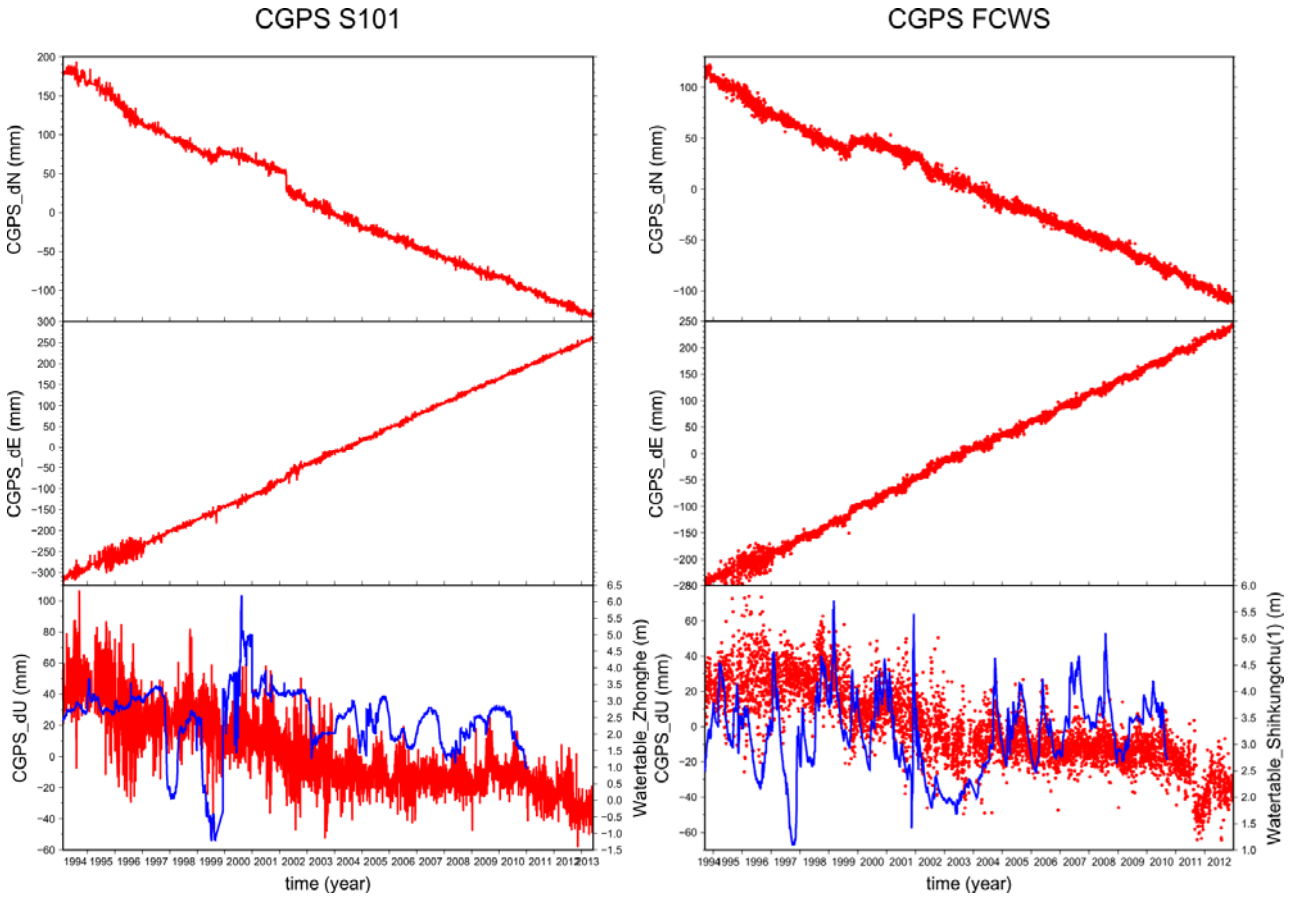


圖 6-1.13：CGPS 測站時間序列與鄰近地下水位站日平均水位線。

6-1-5 林口地區 ENVISAT、ALOS、水準測量以及長期 GPS 應變之比較

在本年度期末報告中，利用本實驗室既有衛星影像生成差分干涉圖以及平均速度場，並針對衛星影像時間與同期間 CGPS 速度場以及水準測線速率比較。

前述於林口地區以 ENVISAT 在 2003 年到 2008 年這段期間的結果來看，臺北盆地主要以對視衛星方向下陷的運動為主(圖 6-1.6 及圖 6-1.7；其中水準測量為長期趨勢)，而在 2007 年到 2011 年間由 ALOS 結果顯示，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 6-1.9 及圖 6-1.10），因此，特地處理此地區於 2005 ~ 2012 年的 GPS 連續站資料，如圖 6-1.14 中的 GS10、GS13 與 LNKO 三個站跨過斷層，以及涵蓋斷層兩邊的水準點。這三個站都是在 2005 年中陸續架設的連續 GPS 觀測站，分析這三個站所形成三角網的長期面積應變，如圖 6-1.15 所示，可看出在 2005 ~ 2008 年間維持平穩或微略伸張的狀態，而在 2008 ~ 2011 年間則呈壓縮狀態，然後再恢復原來伸張的狀態。顯然這一地區地殼在長期為略壓縮的狀態，曾經有一段時間經歷壓縮的過程，而這一個變化可能與臺灣東南部數個大地震有關，這就是在 2009 年 08 月 17 ~ 20 日，於花蓮市地震站東偏南方 200 ~ 240 公里處連續發生了 6 個規模 5.2 ~ 6.8 的地震，雖然地震發生地點遠了點，但這群震每一個規模都在 5.2 以上，深度也在 30 ~ 60 公里，所以預期他們對臺灣地殼的影響一定是整體性的。

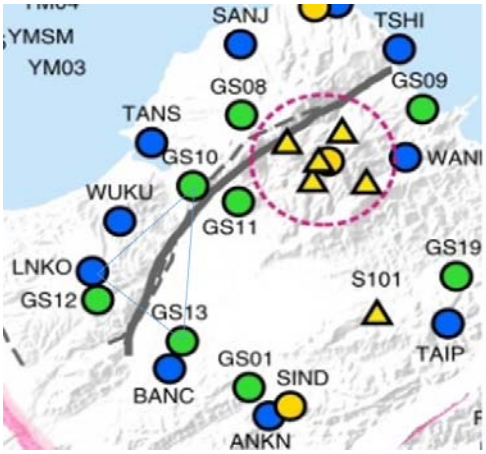


圖 6-1.14：林口地區的 GPS 站分佈。

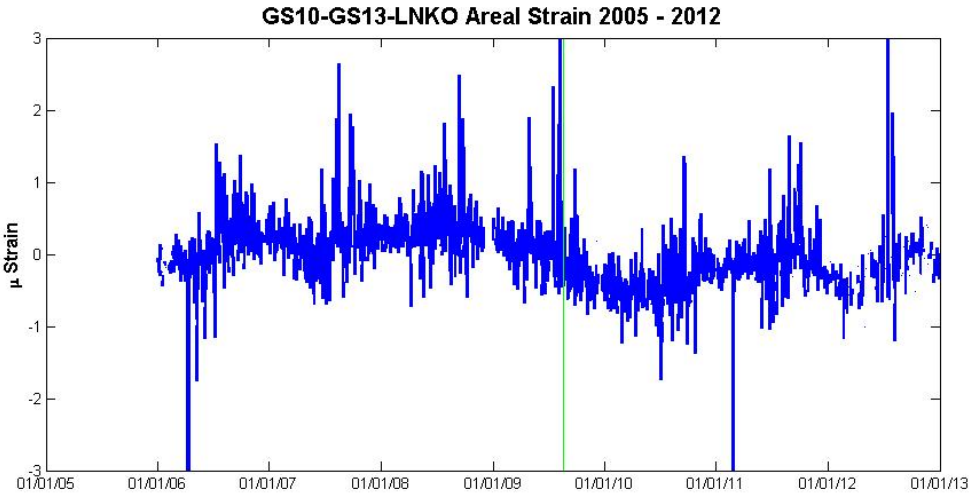


圖 6-1.15：GS10-GS13-LNKO 三角網的長期應變。

表 6-1.1：2009 年 08 月 17～20 日，於花蓮市地震站東偏南方 200～240 公里處連續發生了 6 個規模 5.2～6.8 的地震。

地震編號	日期　時間	經度	緯度	深度	規模	地　　點
第 102 號	2009/08/17 00:05	123.88	23.37	43.3	6.8	花蓮市地震站東偏南方 240.4 公里
第 103 號	2009/08/17 10:10	123.67	23.32	31.6	5.9	花蓮市地震站東偏南方 221.6 公里
小區域	2009/08/17 10:15	123.56	23.36	55.0	5.4	花蓮市地震站東偏南方 210.4 公里
小區域	2009/08/18 13:17	123.63	23.45	49.2	5.3	花蓮市地震站東偏南方 213.9 公里
小區域	2009/08/18 23:47	123.56	23.43	59.6	5.2	花蓮市地震站東偏南方 207.7 公里
小區域	2009/08/20 14:08	123.57	23.53	61.4	5.5	花蓮市地震站東偏南方 205.2 公里

6-2 斷層面滑移速率及虧損率評估

6-2-1 臺灣中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 年公佈的臺灣中部與北部活斷層位置，並參考本計畫之斷層參數資料（表 6-2.1），建構了本地區的塊體邊界模型（圖 6-2.1）。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，除另外加入 TAST、CYMT、HSS1、SYSG、ESHC、HSIN 等塊體外，並修改 SHSS、CHYI、EKSH、WCPN、MIAO、TAOC、WNOR 等塊體幾何，分別對應大茅埔雙冬斷層、大尖山斷層、觸口斷層南段、大甲斷層、三義斷層、新城斷層、新竹斷層及湖口斷層，以為其邊界（圖 6-2.1），因大甲斷層及鐵砧山斷層地理位置相當接近，且水平速度場密度不足，為了模型簡化，因此在本模型中將鐵砧山斷層視為大甲斷層的一部份。在模型中，除了本研究計畫所針對的 10 條斷層外，另向南延伸加入了六甲-木屐寮及義竹等斷層作為塊體邊界，以降低因模型邊界效應所造成的誤差。其中義竹斷層雖然不是地調所所公佈的活斷層，但由於此構造代表了臺灣海峽中生代基盤的南緣，預期會影響現今臺灣西部的地殼變形，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 6-2.1），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 6-2.1 上所列各斷層段的長期滑移速率、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 6-2.1 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。本研究經由整理中、北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 6-2.1）。注意除了如圖 6-2.1 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。

本次研究中在中台灣地區加入塊體內部形變，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，較符合台灣目前大地構造，用以得到更佳擬合結果。

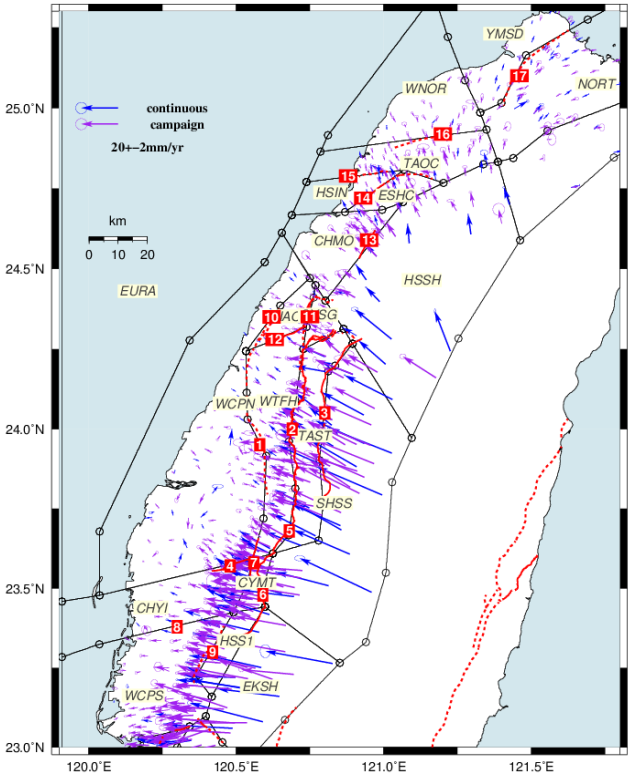


圖 6-2.1：本文所用的臺灣中、北部三維塊體模型及在 2002-2012 期間利用連續 GPS（藍色箭頭）及 campaign GPS（紅色箭頭）資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站）。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。實線表示地調所公佈之活斷層，虛線表示推測或隱伏斷層。數字代表之斷層分別為：1. 彰化斷層; 2. 車籠埔斷層; 3. 大茅埔－雙冬斷層; 4. 梅山斷層; 5. 大尖山斷層; 6. 觸口斷層; 7. 九芎坑斷層; 8. 義竹斷層; 9. 木屐寮－六甲斷層;10. 大甲斷層; 11. 三義斷層; 12. 屯子腳斷層; ; 13. 獅潭斷層 14. 新城斷層; 15. 新竹斷層; 16. 湖口斷層; 17. 山腳斷層。

表 6-2.1：圖 6-2.1 中所示 17 條斷層之幾何參數。

	斷層名稱	傾角（degree）	斷層底部深度（km）
1	車籠埔	北段：25, 南段：35	10.0
2	梅山	75	12.5
3	大茅埔－雙冬	45	12.0
4	彰化	25	7.5
5	九芎坑	30	7.0
6	大尖山	45	10.0
7	觸口	40	10.0
8	義竹	10	7.0
9	木屐寮－六甲	30	5.0
10	大甲	25	8.0
11	三義	30	9.0
12	屯子腳	80	10.0
13	獅潭	20	8.0
14	新竹	50	10.0
15	新城	40	10.0
16	湖口	50	9.0
17	山腳	65	12.5

6-2-2 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 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場，包含了 207 個連續測站及 592 個 campaign 測站資料（圖 6-2.1）。利用這些速度場及各斷層參數，即可估算出最符合 GPS 觀測資料的塊體旋轉率（圖 6-2.2 及圖 6-2.3; 表 6-2.2），斷層震間期與長期滑移速率（圖 6-2.4a、b），以及滑移虧損率等值（圖 6-2.4c）。圖 6-2.5 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車籠埔與大茅埔-雙冬斷層間的塊體。推測此現象可能和此塊體受到 1999 集集地震的震後影響有關。

除此之外，為了評估各塊體可能存在的內部變形(internal defromation)，我們利用 block modeling 來推算中部塊體的內部應變率(internal strain rate)。結果如圖 6-2.6，顯示台灣中部的塊體主應變軸以東西向的壓應變為主，平均應變率約為 0.5 μstrain/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。

在此針對三條中臺灣的斷層三義斷層、大甲斷層及屯子腳斷層探討，結果陳述如下。

表 6-2. 顯示此三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 geodetic long-term slip rate 的方法，除了和 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 6-2.顯示大甲斷層因斷層兩側速度變化不大，因此斷層面上的長期滑移速率為 7.8 mm/yr，而滑移虧損率為長期滑移速率減去間震期滑移速率，所以滑移虧損率僅 3.0 mm/yr。屯子腳斷層情況與大甲斷層類似，斷層面上的平均長期滑移速率為 1.0 mm/yr，平均滑移虧損率也僅 0.4 mm/yr。三義斷層是車籠埔斷層向北延伸段；從長期滑移速率來看（圖 6-2.4a），因速度場在從西部麓山帶跨越到西部平原時有明顯變化（圖 6-2.4a），這樣的速度變化使得在三義、車籠埔、大尖山、觸口及大茅埔-雙冬斷層上有較大的長期滑移速率，最大值落在大尖山斷層，約 20.9 mm/yr。由於目前在臺灣中部並沒有觀測到斷層潛移情況發生，因此本研究假設所有斷層近地表處皆為鎖定狀態，故斷層面上間震期滑移速率在地表附近都接近 0（圖 6-2.4b）。由於滑移虧損是將長期滑移速率減去間震期滑移速率，因此在這一系列斷層上都有較大的滑移虧損率，平均滑移虧損率最大的地區落在大尖山斷層，約 12.5 mm/yr。三義斷層的平均滑移虧損率同樣的也較高，約 11.4 mm/yr。以上研究顯示在臺灣中部地區這一系列南北向的斷層都有較大的滑移虧損。

模型結果顯示，大甲—彰化斷層的滑移虧損率較其東邊的車籠埔及大茅埔—雙冬斷層為低，這結果和斷層機率潛勢評估中大甲—彰化斷層有較高的破裂機率並不相符，這原因主要是因為潛勢評估中大甲—彰化斷層之長期滑移速率高於塊體模型之滑移虧損率，主要原因可能是評估的時間尺度不同所造成，如上節所述，從短期 GPS 觀測現在的大甲—彰化斷層較不活躍，然而從長期的階地高及定年則反映較高之滑移速率，因此在潛勢評估上會有較高的機率。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，而由於跨彰化斷層的水平速度場變化很小，因此此斷層的滑移虧損也就偏低。注意的是，由於彰化斷層是逆衝斷層，而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，因此無法將可能的垂直速度變化納入滑移虧損計算。未來將會加入垂直速度場的分析，以得到更合理的結果。

除此之外，本期研究範圍向北延伸，並加入五條北部活動斷層進行探討，包含獅潭斷層、

新竹斷層、新城斷層、湖口斷層及山腳斷層，由於北臺灣目前處於造山碰撞後期，因此此區域之 GPS 水平速度相較於中臺灣而言較小，且速度梯度也較小。從塊體模型結果來看，由於速度場在此區域變化不明顯，因此各塊體間相對速度較小，反應到斷層之長期滑移速率來看，北臺灣之斷層平均長期滑移速率最大僅 3.55 mm/yr，落在獅潭斷層上，而北臺灣斷層上之平均滑移虧損則皆小於 2.5 mm/yr，顯示相較於中臺灣應變能的快速累積，北臺灣則是處於構造活動度較小之區域，因此此區域之滑移虧損率較小。

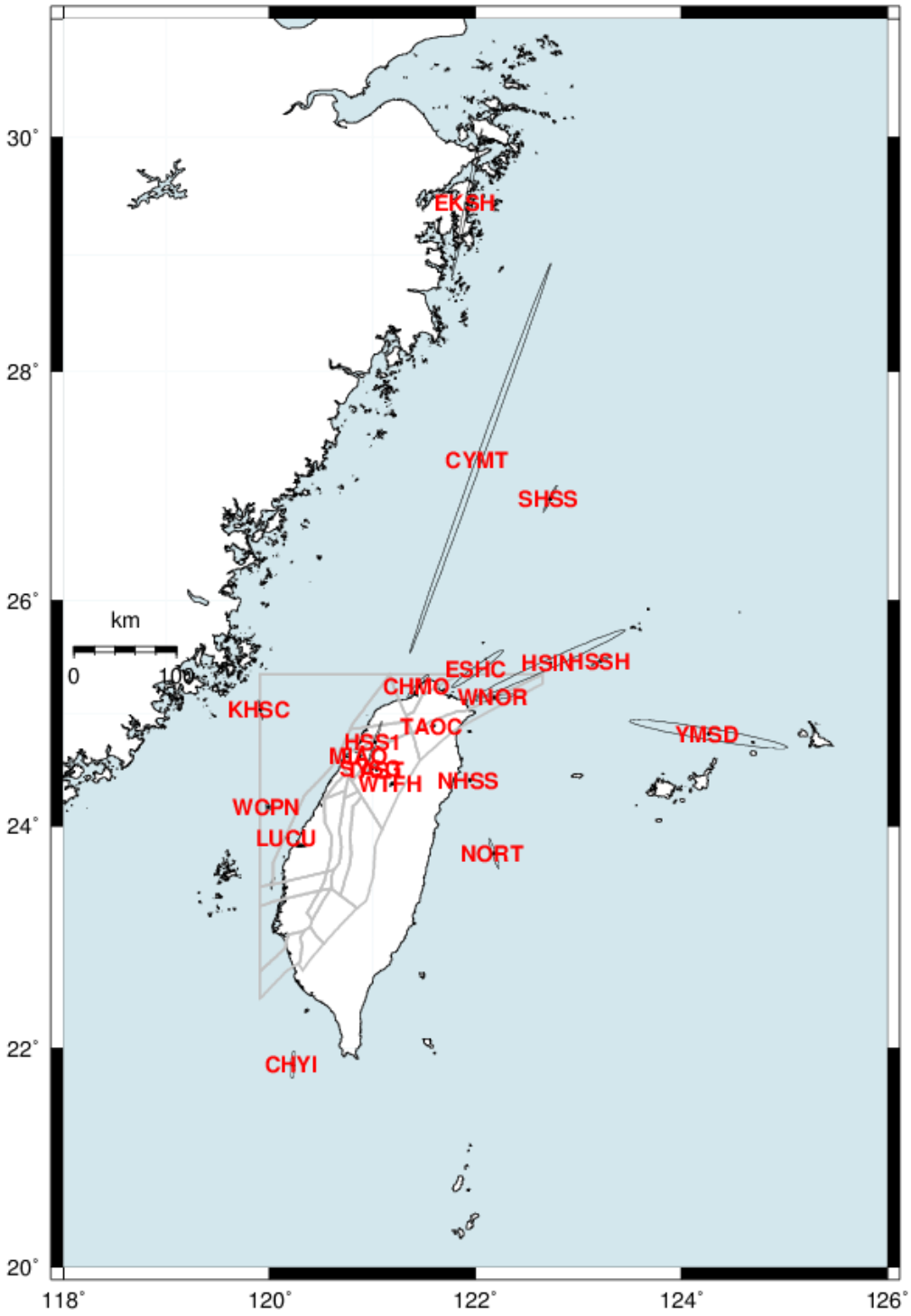


圖 6-2.2：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler's pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 6-2.1）。

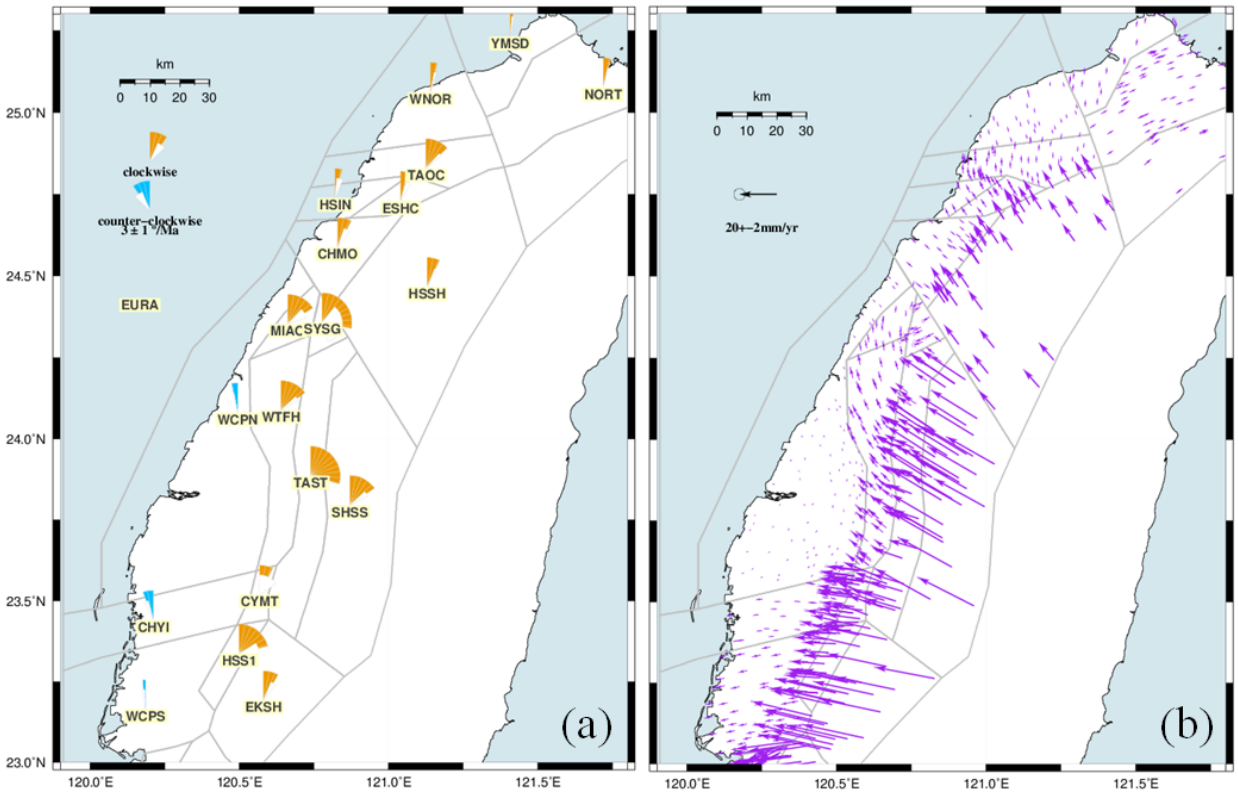


圖 6-2.3：(a)最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler's pole 為軸的旋轉角速度。藍色扇形表示逆時針旋轉，橘色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 1°/My 的角速度。(b)以圖 a 中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。

表 6-2.2：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	誤差橢圓長軸方位角
EURA	180.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.00	0.00	90.00
CHYI	120.3054	22.6858	1.7741	0.5627	0.32	0.09	355.18
WCPS	121.2062	18.6727	0.4985	0.3730	4.70	0.09	348.64
EKSH	122.2275	29.6505	-2.5744	0.6577	2.42	0.08	192.86
LUCU	119.9256	23.7596	-9.3999	0.3894	0.06	0.01	159.71
KHSC	119.9992	25.4915	-6.3005	0.4007	0.23	0.01	172.54
WCPN	119.9766	23.8997	1.0352	0.1415	0.10	0.05	52.69
WTFH	121.2131	24.3398	-4.6647	0.6551	0.11	0.03	232.09
MIAO	121.0230	24.3464	-4.9598	1.2615	0.11	0.04	268.74
SHSS	122.7694	26.6545	-4.8369	0.6726	0.64	0.03	208.45
CHMO	121.3429	25.0888	-2.3584	0.7795	0.31	0.05	226.19
HSSH	123.7262	26.1482	-2.1433	0.2021	0.39	0.03	235.81
TAST	121.0394	24.5066	-9.2362	0.0852	0.01	0.00	202.95
CYMT	121.1657	27.4919	-2.2994	2.5299	6.23	0.12	187.67
HSS1	120.5638	24.7599	-6.5050	1.4589	0.47	0.03	182.75
SYSG	120.6750	24.5722	-8.8373	5.4179	0.23	0.04	149.59
TAOC	121.6149	24.8533	-4.0426	0.3909	0.06	0.02	266.52
WNOR	122.2415	25.1934	-1.1744	0.3151	0.39	0.04	259.19
HSIN	122.8297	25.5219	-1.1921	0.7815	1.70	0.10	244.78
ESHC	122.1544	25.4228	-1.9738	0.6924	0.62	0.07	235.80
YMSD	124.2661	24.8183	-0.6423	0.2481	1.41	0.10	99.70
NORT	122.1795	23.7569	-1.3289	0.2037	0.29	0.03	161.75
NHSS	121.9497	24.4051	-4.2097	0.1682	0.03	0.01	163.80

表 6-2.3：斷層之平均滑移速率。

斷層名稱	長期平均滑移速率（mm/yr）	標準差	震間期平均滑移速率（mm/yr）	標準差	平均滑移虧損率（mm/yr）	標準差
九芎坑	6.49	7.68	5.61	7.84	1.33	2.70
彰化	7.80	9.08	4.99	9.45	2.96	3.38
觸口	9.40	7.59	1.11	3.84	8.49	7.70
車籠埔	6.54	9.53	7.14	8.21	1.48	3.52
新城	0.96	2.54	0.64	1.74	0.44	1.94
新竹	1.70	1.12	0.79	1.14	0.93	1.25
湖口	1.68	1.59	1.01	1.54	0.72	1.31
義竹	5.16	7.67	3.35	6.90	2.11	2.93
六甲-木屐寮	5.51	6.77	5.17	7.04	0.42	0.72
梅山	11.90	9.39	3.27	4.55	8.63	7.91
山腳	3.55	0.22	1.63	1.79	1.92	1.85
獅潭	2.65	5.29	0.41	3.46	2.25	4.25
三義	6.49	7.68	5.61	7.84	1.33	2.70
大甲	7.80	9.08	4.99	9.45	2.96	3.38
大尖山	9.40	7.59	1.11	3.84	8.49	7.70
大茅埔-雙冬	6.54	9.53	7.14	8.21	1.48	3.52
屯子腳	0.96	2.54	0.64	1.74	0.44	1.94

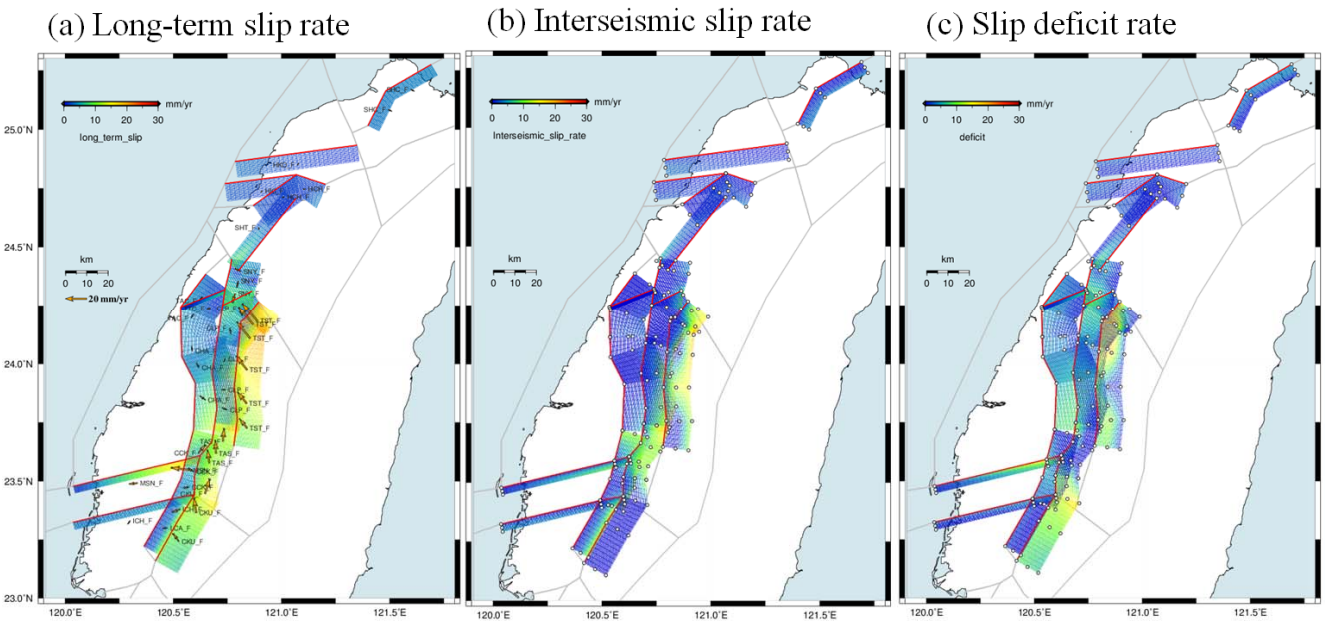


圖 6-2.4：（a）推求的斷層長期滑移速率。紅色線代表個斷層出露地表的位置。橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。（b）各斷層面的震間滑移速率。（c）由（a）圖減去（b）圖，得到斷層面上的滑移虧損率。

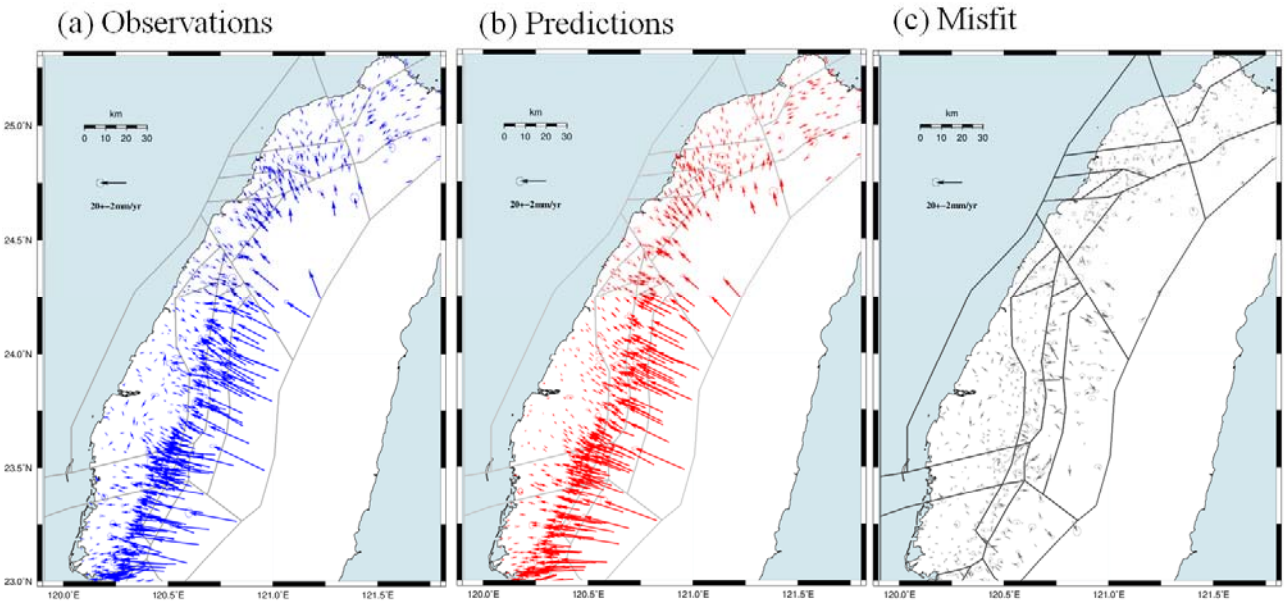


圖 6-2.5：比較 GPS 觀測速度場（圖 a）以及本研究所得之最佳塊體模型所預估的地表運動（圖 b）。圖 c 表示模型預估的殘差值，其對應之 reduced χ^2 為 38.7。

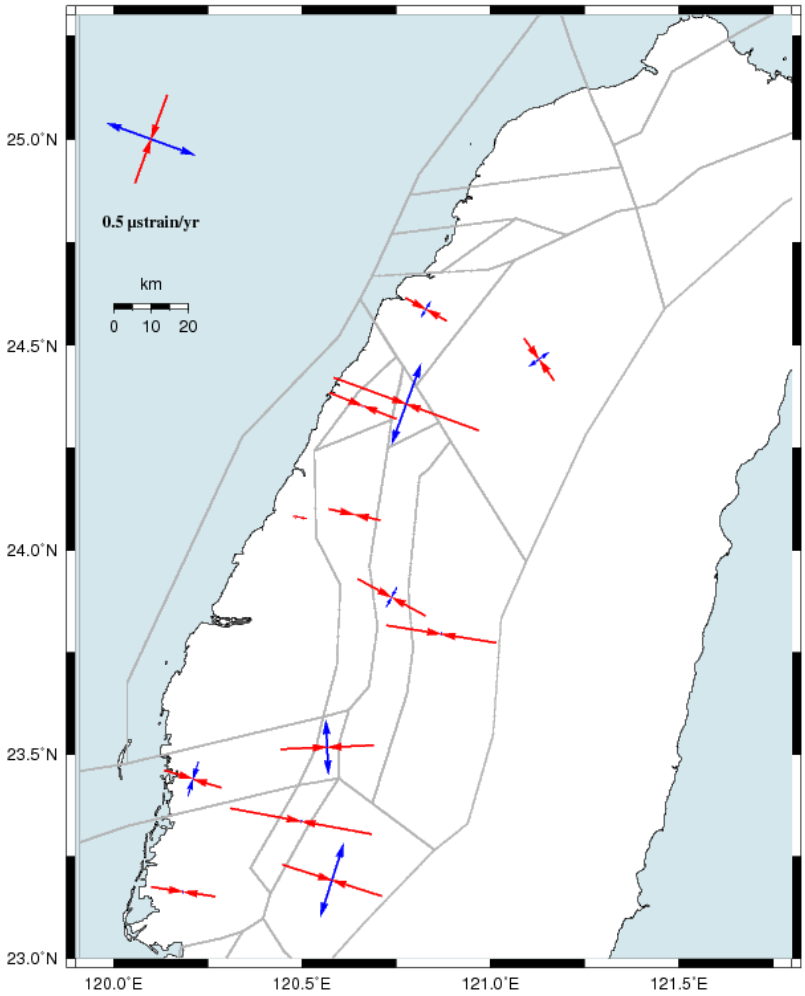


圖 6-2.6：各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

6-2-3 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。在此以車籠埔地震為例，假設台灣地區之 $\mu = 3\times10^{10} Pa$，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)求得測的矩率，乘上再現周期即為地震矩，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未來 30、50 及 100 年可能發生之地震矩規模。

$$\dot{M} = \mu A \dot{D} \tag{1}$$

$$M_0 = \dot{M} \times T \tag{2}$$

$$M_w = \frac{2}{3}(\log M_0 - 9.1) \tag{3}$$

注意的是，以上的估算是假設未來 100 年內斷層的滑移虧損率皆維持相同。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。由於台灣位處板塊邊緣，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 6-2.4 中估算的未來地震規模也可能會隨時間而有所修正。

表 6-2.4：車籠埔斷層之滑移虧損與推估規模。

	破裂事件	面積(km^2)	平均滑移虧損率 (mm/yr)	標準差	測地矩率 (N-m/yr)		Mw	Mw	Mw
						距今(yr)	30	50	100
						距上次地震	45	65	115
車籠埔斷層	A	1836	0.89	5.66	1.70E+17		6.16	6.27	6.43
	B	1522	1.48	3.52	7.36E+16		6.26	6.36	6.53
	C	1590	1.37	5.66	1.59E+17		6.25	6.35	6.52
	D	1276	1.31	3.28	6.60E+16		6.17	6.28	6.44
	E	615	3.23	3.51	1.68E+16		6.22	6.33	6.49
	F	369	3.42	3.1	9.29E+15		6.09	6.19	6.36
	G	1220	2.95	5.46	1.32E+17		6.39	6.50	6.66
	H	907	1.35	2.28	4.97E+16		6.08	6.19	6.35

6-2-4 小結

本期報告加入三條中台灣及五條北台灣的已知的活動斷層作為塊體邊界斷層，分別為大甲斷層、三義斷層、屯子腳斷層、獅潭斷層、新竹斷層、新城斷層、湖口斷層及山腳斷層，本次研究將塊體模型向北延伸，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。DEFNODE 對此新塊體估算的結果，顯示大甲斷層及屯子腳斷層上的平均滑移虧損率皆大約 1-2 mm/yr，因此此兩斷層上累積之滑移虧損較小。在三義斷層部分則計算出 11.4 mm/yr 的高平均滑移虧損率，與車籠埔、大尖山及觸口斷層等一系列麓山帶斷層向南延伸之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場由西往東變小的交界帶，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。往北台灣來看，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 2 mm/yr)，原因可能是北台灣處於造山後期，因造山活動減弱，整體構造活動度下降，所以北台灣斷層上的平均滑移虧損率較低。總結來說，中台灣的麓山帶斷層具有相對較高的滑移虧損累積，而北台灣整體構造活動度低，反應在斷層面上之滑移虧損也較低。

6-3 連續觀測異常資料整合與可能解釋

6-3-1 異常記錄與大地震活動之關係

累計 2009 年 1 月至 2014 年 11 月共 174 個規模大於 5 之地震事件，如表 6-3.1 詳列，而其震源機制海灘球標示於圖 6-3.1~圖 6-3.3 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 6-3.4 中，水平軸的數字代表事件 ID（表 6-3.1），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。本次報告為 2013 年 12 月至 2014 年 11 月間的異常觀測，這期間共有 28 個規模大於 5.0 的地震（ID=147~172），有 6 個位於陸地上，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。

表 6-3.1：2009 年 1 月至 2014 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	宜蘭牛鬥地震站西北方 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 （位於花蓮縣瑞穗鄉）**
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)

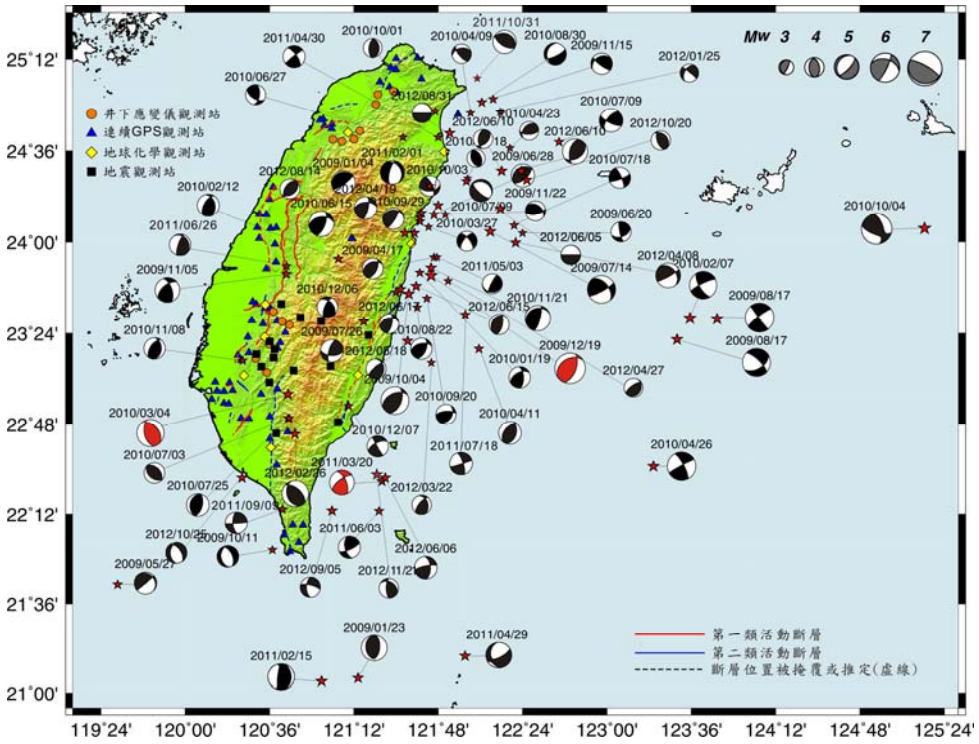


圖 6-3.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。橘色圓圈、藍色三角形、黃色菱形和黑色方形分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、CGPS、地化觀測（氣體和水位）及地震觀測站。紅色海灘球為同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測之地震事件。

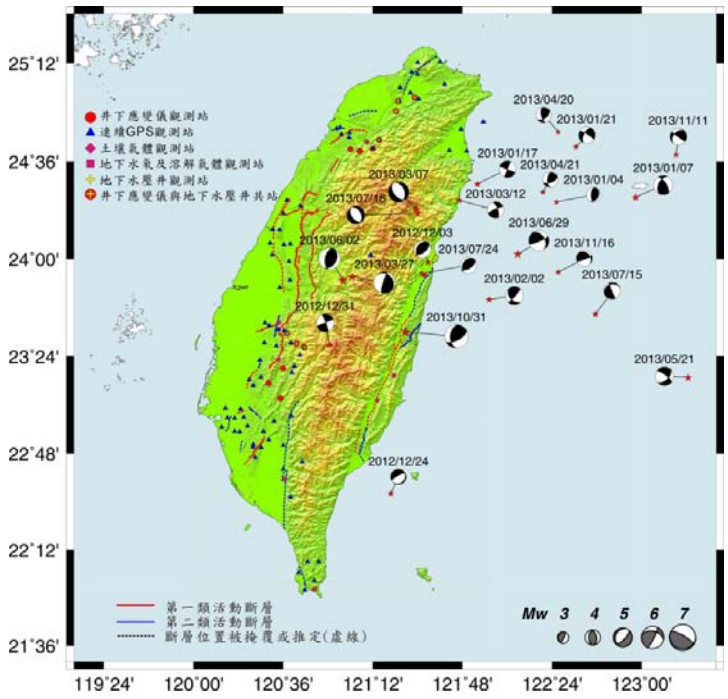


圖 6-3.2：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。紅色圓圈、藍色三角形、粉紅色菱形、粉紅色方形和黃色十字分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、CGPS、地化氣體、地化水氡和地下水位觀測站。

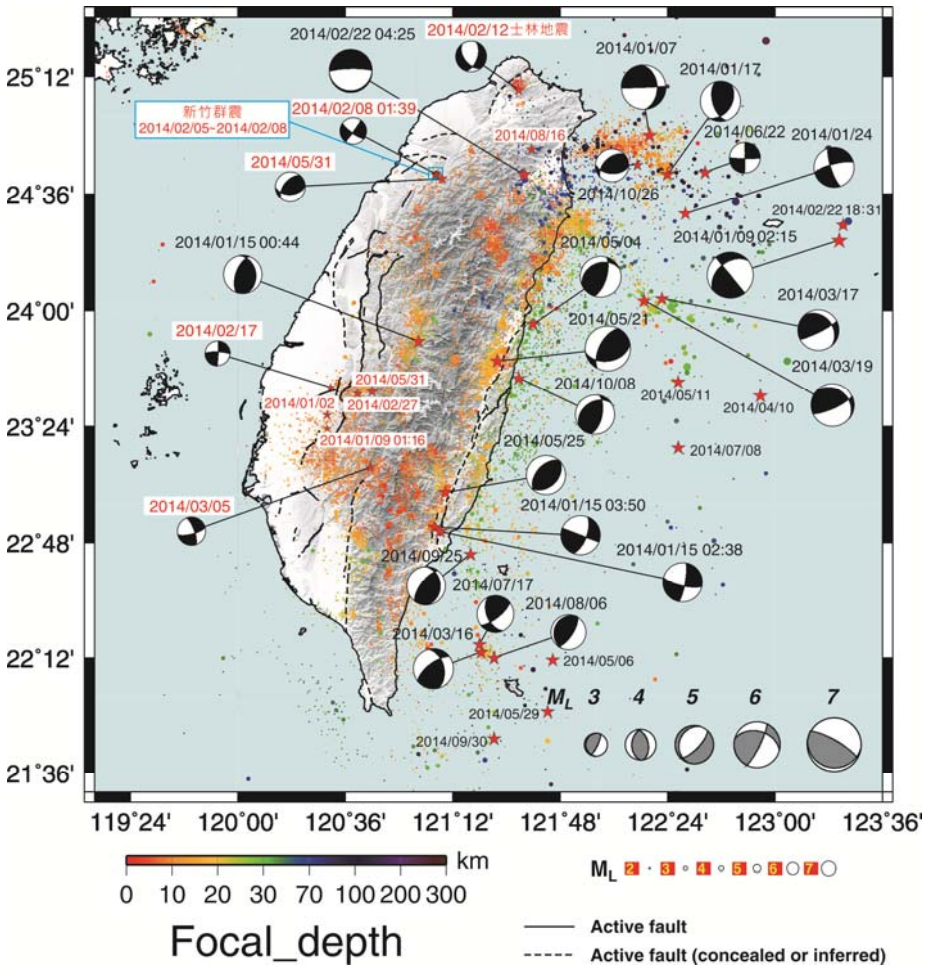


圖 6-3.3：2013 年 12 月至 2014 年 11 月規模大於 5 的地震事件及規模小於 5 的特別地震事件（白底紅字表示）之位置及震源機制圖。（ID155、159、161、162、165、167、171 及 174 地震事件無搜尋到地震機制解。174 地震事件已於圖框外無秀出。）

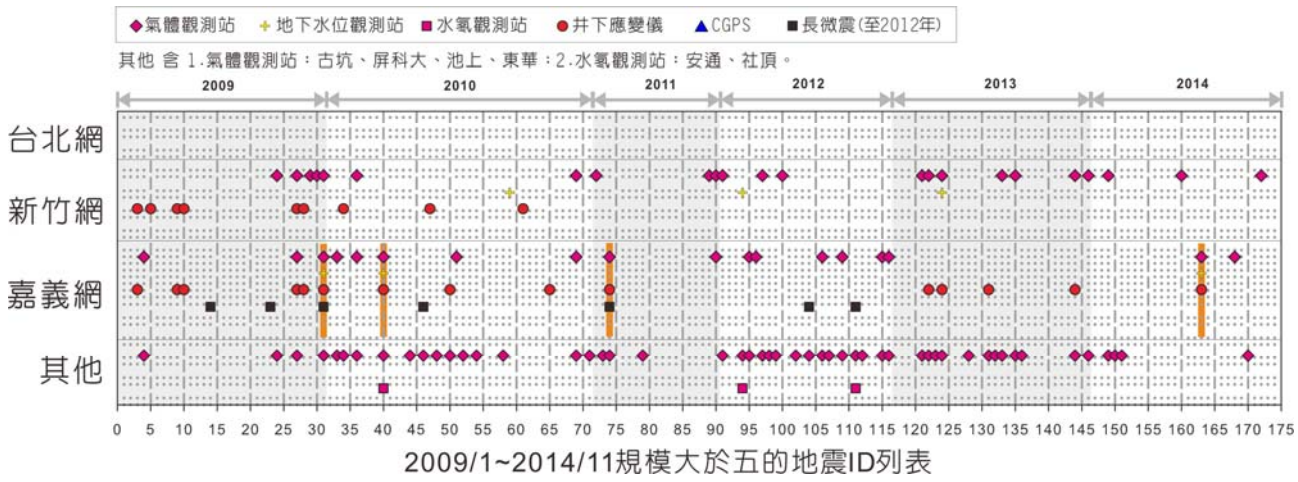


圖 6-3.4：2009 年 1 月至 2014 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID(表 6-3.1），粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。

除了上述的花蓮地震外，在這段期間比較可以注意的有：

(1) 2014/01/15 當日有發生在南投縣魚池鄉規模 5.0 的地震（ID=149）與花蓮縣卓南鄉連續兩個規模 5.1 的地震（ID=150、151），相關聯的土壤氣體觀測異常共有大平地、古坑、池上及屏科大四個站，詳細如第 6 章所述。

(2) 2014/02/05~08 間在新竹地區發生了 10 個規模介於 2.3 ~ 3.4 的地震，有三種以上的觀測量都有異常的徵兆，如新竹地區的井下應變、GPS 地表應變、新竹太平的土壤氣體觀測及新竹 CINT 的地下水觀測。

6-3-2 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，在井下應變儀氣中，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

6-3.5 所示，可以將 DARB 與 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 TAIS 的觀測互相比較。

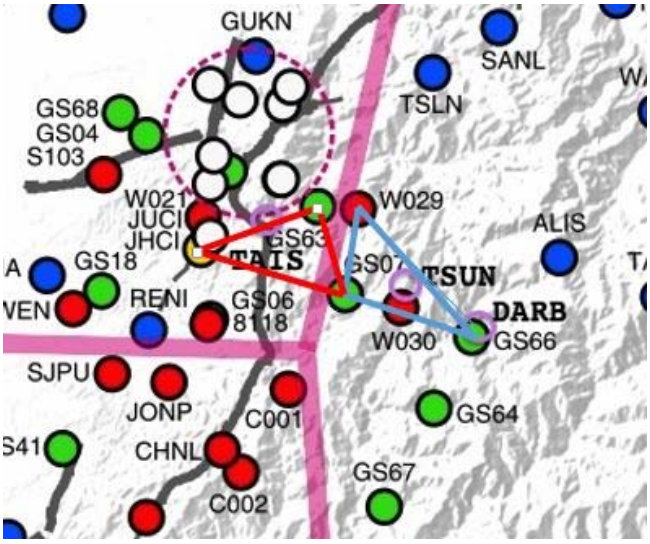


圖 6-3.5：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。

圖 6-3.6 顯示 GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013 ~ 2014 年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，圖中的垂直線表示地震的時間與井下應變儀可能有變化（異常）的時刻，由此變化可看到在井下應變儀變化的時刻，GPS 應變也有相同的異常現象，右圖為 TAIS 井下應變儀站在 2013 ~ 2014 年的面積應變的變化，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 1/5 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。

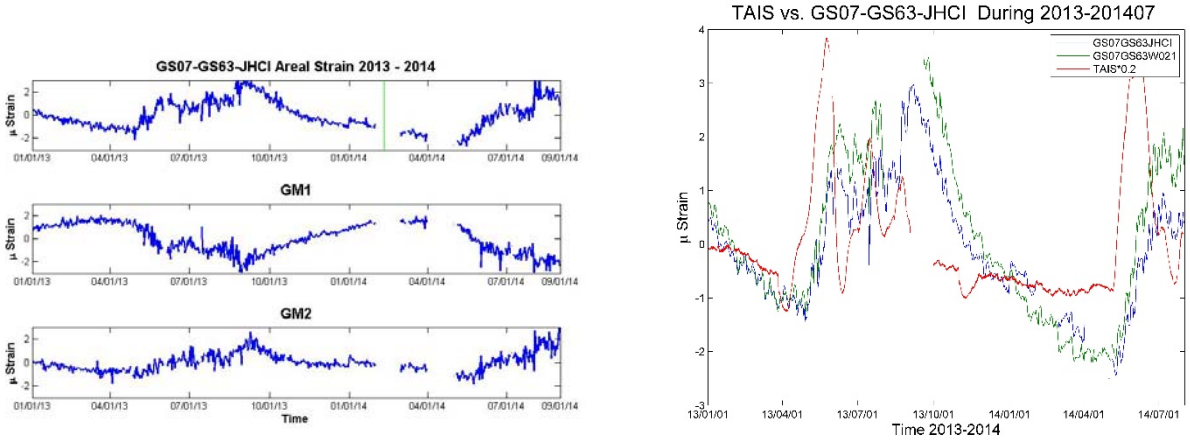


圖 6-3.6：GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013 ~ 2014 年的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為 TAIS 井下應變儀站在 2013 ~ 2014 年的面積應變。

圖 6-3.7 顯示 GS07-GS66-W029 所形成的 GPS 三角網在 2013 ~ 2014 年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。

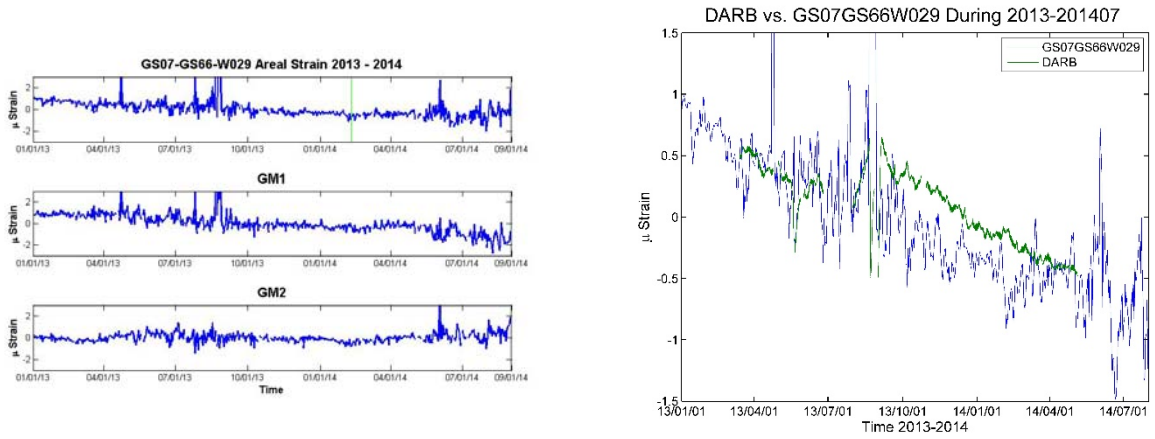


圖 6-3.7：GS07-GS66-W029 所形成的 GPS 三角網在 2013 ~ 2014 年的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為 DARB 井下應變儀站在 2013 ~ 2014 年的面積應變。

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。

6-3-3 連續觀測資料的共同解釋

在這一階段的觀測中，主要可以分為三個時段的異常事件，一是與 2014 年 5 月 21 日發生在花蓮縣鳳林鄉規模 5.9 的地震（ID=163），一是發生在 2014 年 2 月 5~8 日中共有 10 個規模在 2.3~3.4 的新竹群震（如表 4-2.1），以上二個事件都有三種以上不同的觀測異常；另一則是 2014 年 2 月 12 日規模 4.2 陽明山地震，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。

（1）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（圖 4-1.22），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。因此，這樣的應變異常訊號可能為地震前的前兆訊號。在地球化學觀測方面，花蓮鳳林地震期間，嘉義中崙和花蓮東華土壤氣體觀測站和嘉義中興地下水壓觀測站同時在地震發生前開始出現異常變化，太興地下水壓觀測站甚至有同震的變化。

土壤氣測站中，嘉義中崙（CL）與花蓮東華（DH）兩站均出現氡氣的異常，如圖 5-2.4 所示，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。同樣中興站對於此地震也出現了震前水位異常現象，但是此水位異常型態相當特殊。

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。5 月 21 日花蓮鳳林地震前中興站的異常水位如圖 5-3.3 所示。

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 6-3.8 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。

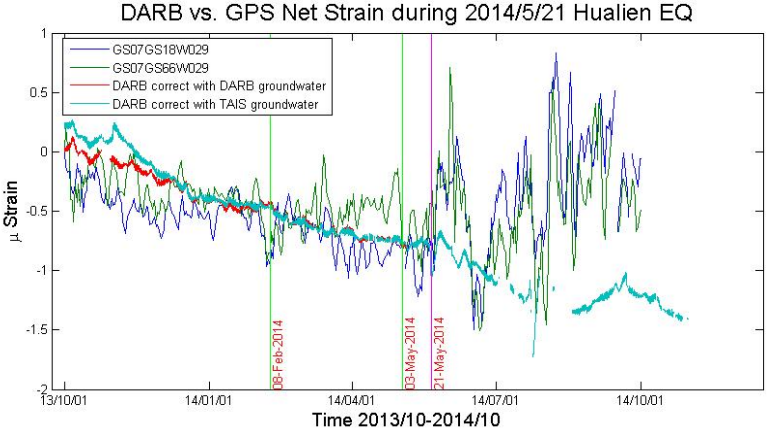


圖 6-3.8：DARB 井下應變與其附近兩個 GPS 網的地表應變的時間序列，圖中並標示了新竹群震 2/8 與井下應變異常起始時間 5/3。

（2）2014/2/5~2/8 新竹橫山群震（M_L 2.3~3.4）

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（圖 5-2.5），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（圖 5-3.1），之後便發生 2 月 5 日開始的新竹橫山群震。

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 0.057μstrain，再到 2/10 升至最高點（圖 4-1.21），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。

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 6-3.9 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 6-3.10 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 6-3.2），最大規模 4.2，其震源機制海灘球可見圖 6-3.3，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 6-3.11）。

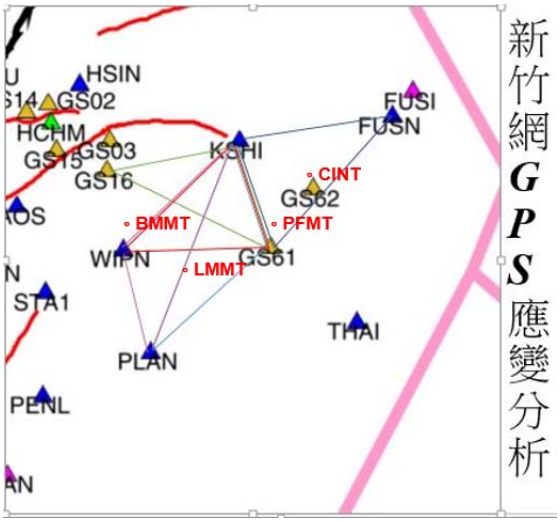


圖 6-3.9：顯示震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHI 與 GS61-PLAN-KSHI，以及井下應變儀觀測站的相關位置。

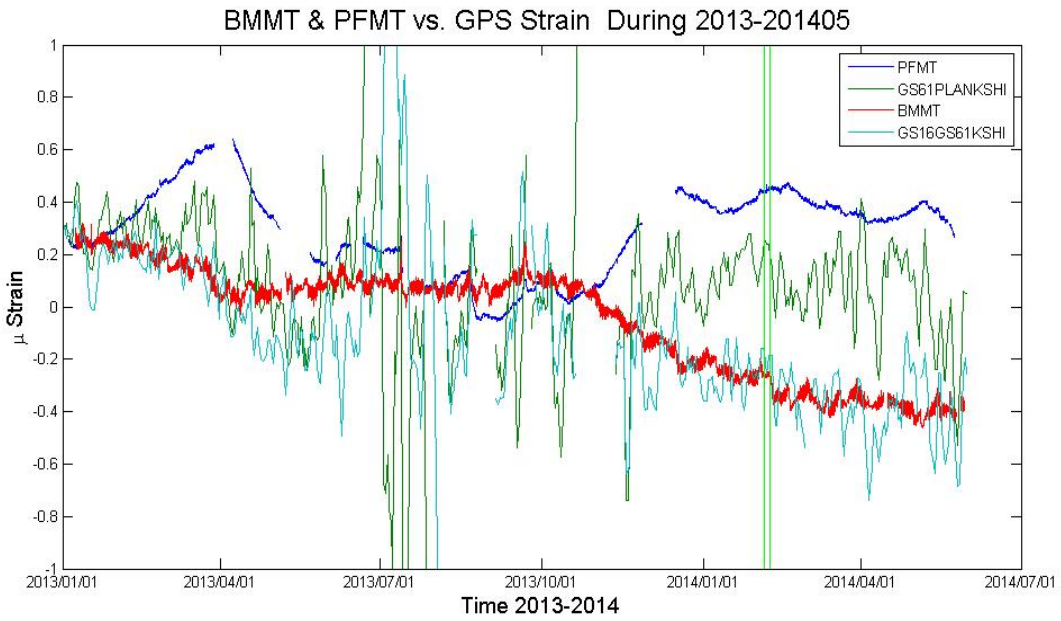


圖 6-3.10：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 與 PFMT 於 2013 ~ 2014 年間的資料與震源附近的 GPS 觀測站三角網，GS16-GS61-KSHU 與 GS61-PLAN-KSHI 的時間序列。

表 6-3.2：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

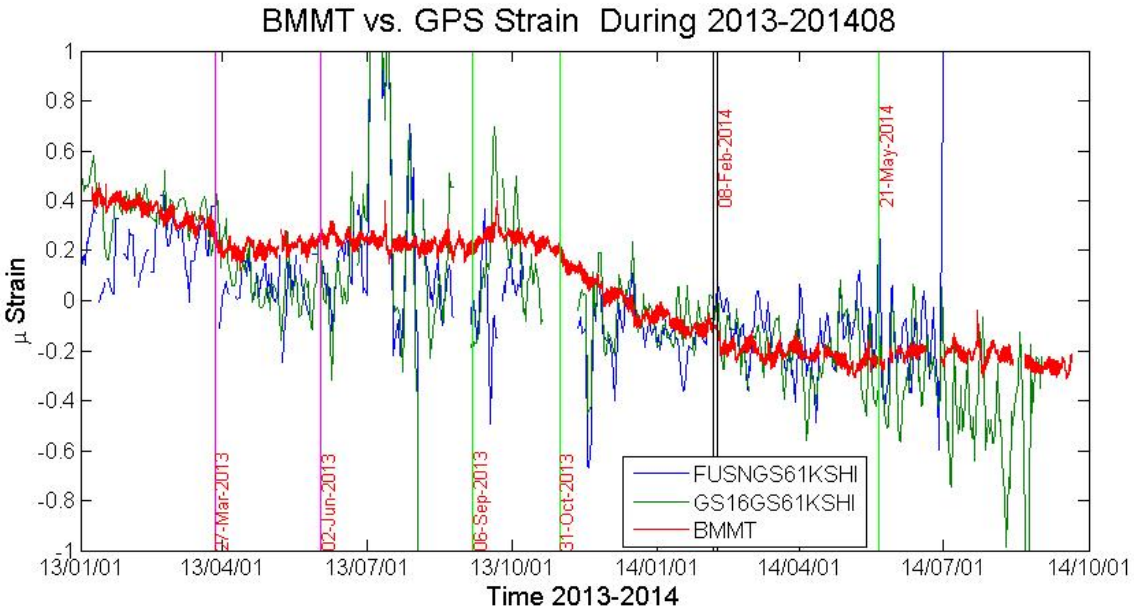


圖 6-3.11：新竹井下應變儀觀測站 BMMT 在 2014 年 2 月群震後，應變仍持續壓縮，至 5 月 31 日再發生兩個地震後才趨平穩。

（3）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（圖 4-4.2），利用錦和國小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 6-3.12 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：

1. GS08-GS11-YMSM
2. GS08-WANL-YMSM

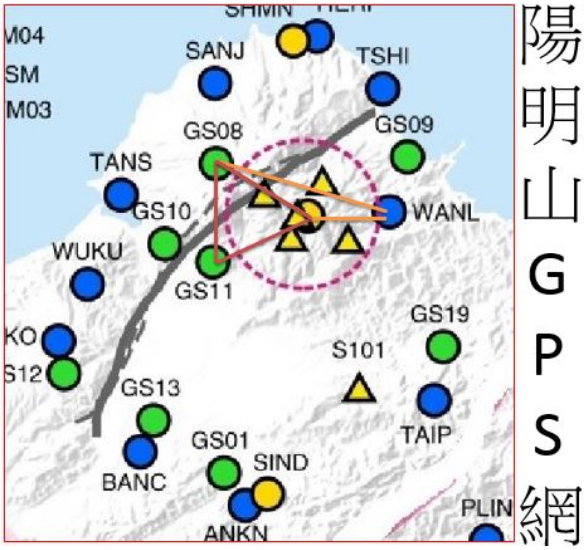


圖 6-3.12：陽明山地區 GPS 連續站網。

圖 6-3.13 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 6-3.14 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。

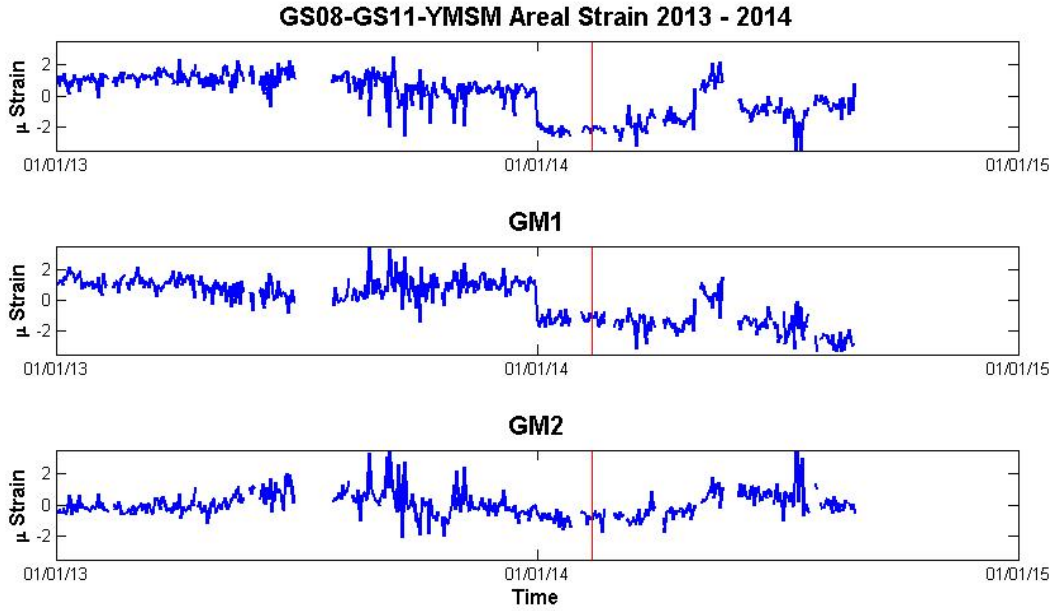


圖 6-3.13：為 GS08-GS11-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果，其中顯示面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下）。

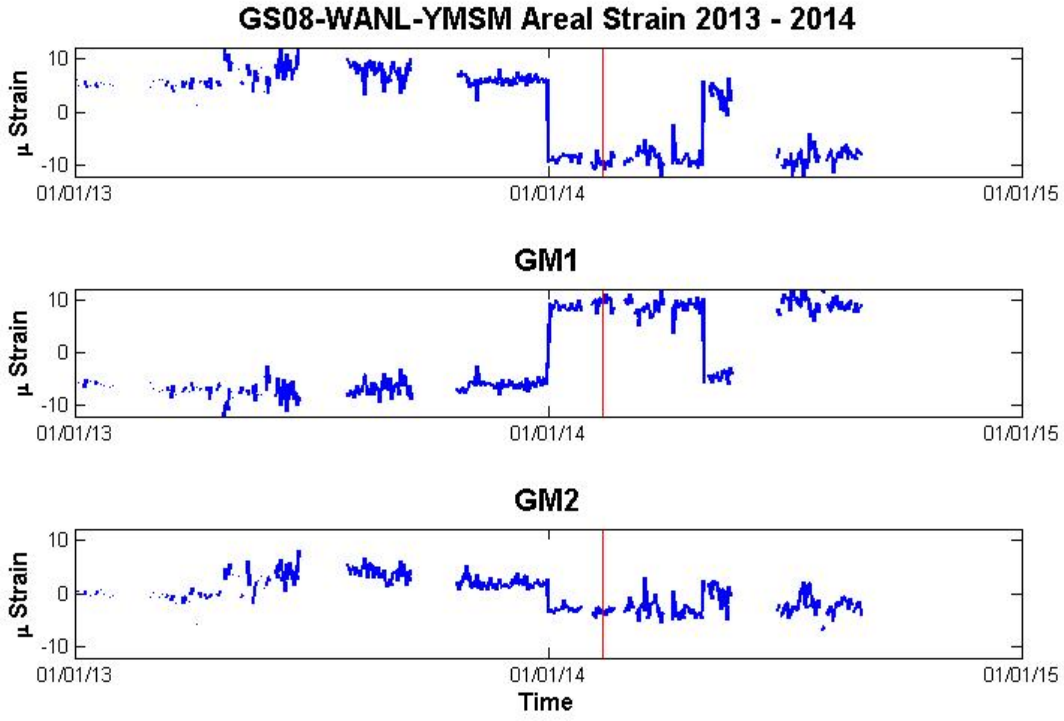


圖 6-3.14：為 GS08-WANL-YMSM 三角網 GPS 應變分析的結果，其中顯示面應變（上）、第一工程剪斜應變（中）、第二工程剪斜應變（下）。

6-3-4 臺灣地區地殼應變與大地震的關係

在過去數年，本計畫的觀測都著重在幾個星期或一個月的異常觀測，所以都會注意到規模較小的地震，這是大多數此類觀測研究通常的做法，畢竟，臺灣已經是世界上地震最頻繁的地區之一，但在臺灣陸地上規模大於六的地震，一年可能平均只有一個，若選擇這樣規模的地震為標的，研究可能難以進行。然而，有災害的地震，畢竟大多數都在規模六以上，大地震的行為與小地震是否有關聯，小地震的前兆模式是否可以應用在大地震的觀測，這仍然是一個未確定的問題。

再說，往往在板塊另一端發生大地震，整個板塊邊緣的人都會擔心自己附近是否將有地震發生，也譬如，在臺灣附近若久沒地震，突然有一大地震發生，好像其他地方也都陸續釋放能量，有人認為這是心理作用，但也有人認為一個深且大的地震，會使一個較大的區域的地殼做應力的調整。因此，本研究團隊將對長期的地殼應變做一較完整、較科學的系統性探討，畢竟我們已經建立了一個多元的地殼觀測網，希望這些資料可以提供我們更多的訊息。

在這一階段，先將 GPS 應變與井下應變的長期資料與臺灣地區的大地震相關聯。在 6-1-5 節中，結合了林口地區的 PS-InSAR、水準測量與 GPS 應變，三種資料都顯示在 2009 年中的異常變化可能與 8 月 17~20 日發生於花蓮市地震站東偏南方 200~240 公里處的連續 6 個規模 5.2 ~ 6.8 的地震有關，這樣的變化若能長期有系統的觀測，則可以掌握臺灣地區的地殼活動，特別是對於引發地震的觀測可能會有所幫助。

圖 6-3.15 顯示 DARB 測站與 GS07-GS66-W029 GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致，尤其是 2013 年 5 月初與 8 月底的快速下降再上升的變化非常的符合。在 2013 年 10 月以後 DARB 資料顯得較 GPS 地表應變值高（地表較為壓縮），2014 年 3 月又追回，並在 4 月維持相同之趨勢。5 月以後無地下水資料，無法修正比較。圖中又同時將這兩年內陸地上規模大於 6.0 的地震都畫直線在相對應的時間軸上。 2013 年 9 月 6 日臺灣南部海域規模 6.7 的地震似乎造成地殼由舒張轉壓縮，而且，在此地震之前一個月，此處的地殼就由原來壓縮轉變成舒張，而且變化量也相當大。

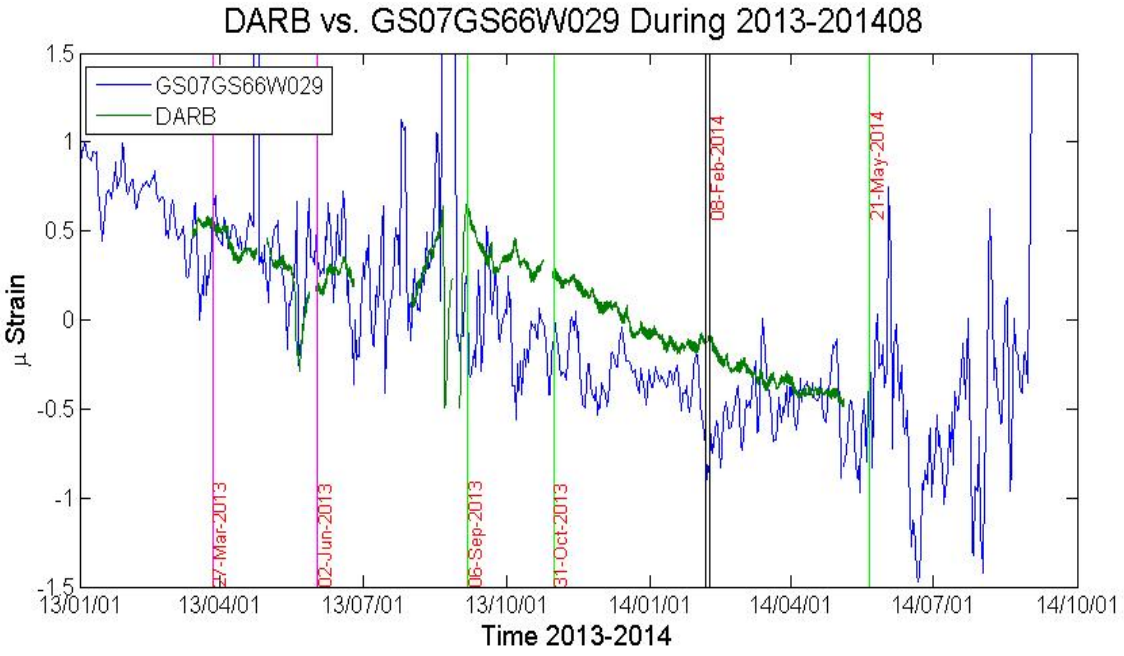


圖 6-3.15：顯示 DARB 測站與 GS07-GS66-W029 GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致，圖中又同時將這兩年內陸地上規模大於 6.0 的地震都畫直線在相對應的時間軸上。

至於在新竹地區，圖 6-3.16 顯示 PFMT 測站與 GS61-PLAN-KSHI 以及 GS61-PLAN-WIPN GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致，圖中又同時將這兩年內陸地上規模大於 6.0 的地震都畫直線在相對應的時間軸上。2013 年中 3 月底與 5 月的轉折相當一致，似乎與上半年南投兩個規模六以上的地震相關，但 GPS 應變在 5 月到 7 月的大幅度跳動則在 PFMT 站並不明顯。8 月以後的幾次週期性跳動轉折，則兩者又相當一致，與東部兩次規模六以上的地震的關係則有點模糊。 2014 年 2 月初新竹有 10 個有感群震（如垂直線），GPS 與井下應變有明顯相反變化，之後維持平穩，在 5 月 21 日鳳林地震的前後都有明顯的轉折。

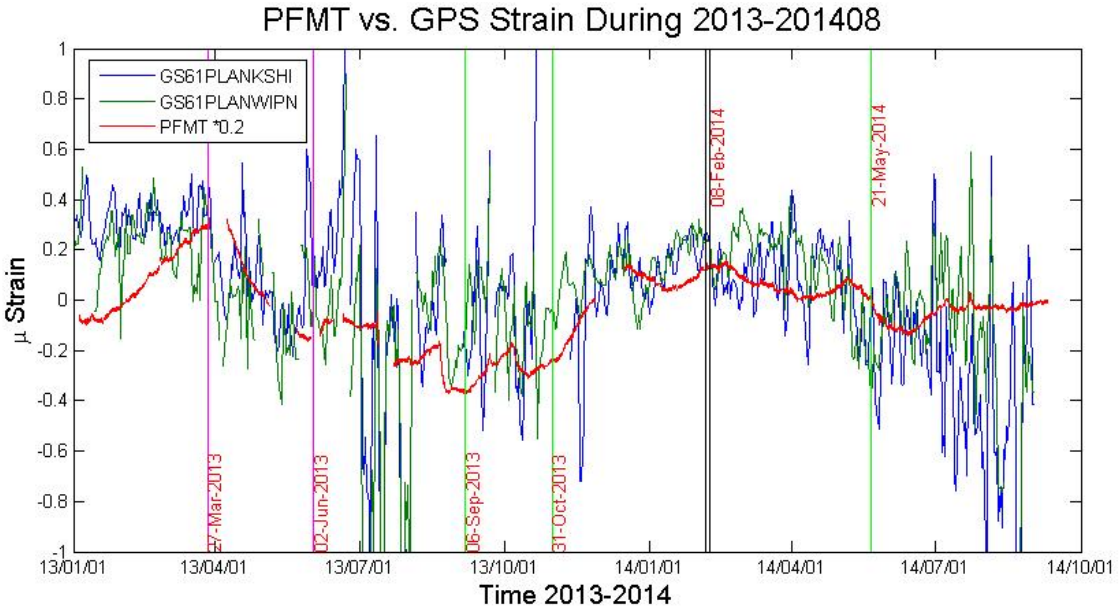


圖 6-3.16：顯示宜蘭地區 PFMT 測站與 FUSN-GS61-KSHI 以及 GS61-PLAN-WIPN GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致，圖中又同時將這兩年內陸地上規模大於 6.0 的地震都畫直線在相對應的時間軸上。

在新竹另外很接近的一站 BMMT 如圖 6-3.17 所示，其應變資料與測站周圍的兩個 GPS 三角網 GS16-GS61-KSHI 以及 FUSN-GS61--WIPN 之應變時序變化趨勢非常一致，圖中又同時將這兩年內陸地上規模大於 6.0 的地震都畫直線在相對應的時間軸上。BMMT 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 3 月底與 5 月的轉折似乎與上半年南投兩個規模六以上的地震相關，6 月到 8 月的大幅度跳動在 BMMT 井下應變資料並無對等的變化。2013 年 9 月 6 日臺灣南部海域規模 6.7 的地震似乎造成地殼由舒張轉壓縮。2014 年 2 月初有 10 個有感群震（如垂直線），GPS 與井下應變有明顯相反變化，GPS 顯示較多伸張，但在 PFMT 測站則相反。

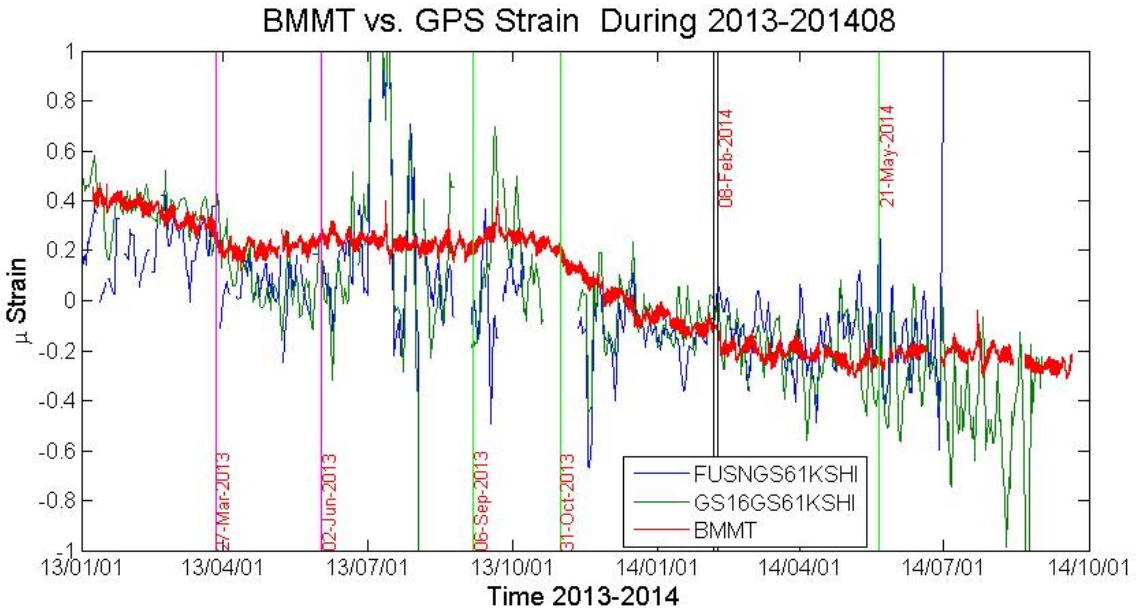


圖 6-3.17：顯示新竹地區 BMMT 測站與 GS16-GS61-KSHI 以及 FUSN-GS61--WIPN 二個 GPS 三角網之應變時序變化趨勢非常一致，圖中又同時將這兩年內陸地上規模大於 6.0 的地震都畫直線在相對應的時間軸上。

從上面的幾個例子可以看出，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。

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 2014 年全臺連續全球定位系統測站共 250 站，由於各測站設置背景不同，利用 GAMIT 計算時所需提供基本資料各有差異，由於某些測站資料精度不佳，造成解算誤差過大而遭剔除。因此今年本研究除彙整時間序列外，也分析各測站遮蔽狀況，來瞭解各測站周遭環境，探討座標跳動與誤差過大的點位，瞭解發生的原因，以利於測站移動速度場分析。在同震變形研究方面，2014 年 5 月 21 日於鳳林地區發生芮氏規模 5.9 的地震，本次期末報告同樣針對該地震分析鄰近測站的同震變形行為。

精密水準的部分已有 30 測線（共計 1,099 測段）完成施測並送審，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穩定且可靠；GPS 亦完成高屏地區 111 點、中部地區 155 點和花東地區 69 點之移動站測量及查核工作。

關於 GPS 及精密水準測量的建議如下：

(1) GPS部分，桃竹地區速度異常點位為G416、T007及GE24、中部地區速度異常點位為G047及GF35，經過實地勘驗，除G416推測為地質構造所引起外，其餘皆為人為因素，分析時應特別注意。非地質構造所引起之異常點位，建議可減少觀測次數。

(2) 精密水準部分，台2_石門至萬里測線之水準點0811、五股至台北測線之水準點1001、縣115_新屋至童話世界測線水準點GB55、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、苗栗至南庄測線之水準點GD56、縣164_金湖至瑞峰測線水準點G757、紅葉至靜浦測線之水準點W044，縣182_安平至龍崎之水準點G435、台22_岡山至安坡測線之水準點G533及和台2_梗枋至東澳測線之水準點9053，前述點位皆有異常變動。經過實地勘驗，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。

(3) 跨車籠埔斷層之五條精密水準短測線，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。

PS-InSAR 工作為彙整本實驗室既有的臺灣北部地區衛星影像，ERS-1/2 衛星 SAR 影像區域為 Track 461，Frame 3105，該區域範圍共有 29 張影像；ENVISAT 衛星 SAR 影像區域跟 ERS-1/2 衛星一樣，則有 30 張影像；ALOS 衛星 SAR 影像區域為 Path 444，Frame 480 及 490，共有 21 幅 SAR 影像。不論使用何種衛星所拍攝的 SAR 影像，本計畫首先利用影像對相關值挑選出主影像干涉配對副影像，產生雷達影像干涉圖，並且與此區域同期間水準測線和連續 GPS 測站得到的變形速率比較。

在本年度期末報告中，利用本實驗室既有衛星影像生成差分干涉圖以及平均速度場，並針對衛星影像時間與同期間 CGPS 速度場以及水準測線速率比較。首先，由 ERS 結果顯示，北部區域於 1996 年到 1999 年之間主要以為對視衛星方向抬升的運動為主（圖 2-6.5），最大抬升速率為位於士林、北投地區的 8 mm/yr。而土城地區則有最大下陷速率，約為 5 mm/yr。將臺北盆地及周圍 CGPS 三分量轉換到 LOS 方向上，其速度值與 PS-InSAR 相當符合。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 2-6.8），最大下陷速率為位於泰山、五股地區的 9 mm/yr，而盆地西側則為平均 3~4 mm/yr 的下陷速率。同樣轉換 CGPS 速率到 LOS 方向上，與此時期 PS-InSAR 得到的速率相符。另外和早期精密水準測量變形速率比較，整體而言，而其 PS 結果與四條由北至南的水準測線比較，雖有部份速率不同但趨勢相當一致，皆為由西向東跨過山腳斷層下陷速率越來越大。最後，由 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 2-6.12）。其速率結果與 CGPS 相當一致。另外，與水準測線比較上，由於此期間地表變動不大，在第一條與第二條測線上因 PSInSAR

誤差較大，無法明確比較兩者異同，而第三條與第四條測線則呈現相同的變形情形。

另外，在與 LiDAR 對比上。本年度除了將 PS-InSAR 速度場套疊在臺北盆地 DTM 上以呈現更精確的 PS-InSAR 選點位置可靠性外，也嘗試將 PS-InSAR 結果套疊在構造線形相對較多的臺灣東部地區。根據資料比較結果，線形明顯的地方也為視衛星方向抬升活躍的區域，具有高度的吻合。依照 PS-InSAR 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 PS-InSAR 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。至於臺北地區地下水位與 CGPS 時間序列關係可能由於（1）地下水位站與 GPS 觀測站非共站；（2）地下水位高程或 GPS 高程向時間序列包含其他雜訊因子尚未去除；（3）選擇之地下水位觀測站深度與地下水位層無密切關係；（4）GPS 高程向精度較差等等因素。於本年度報告中並無觀察到明顯的相關性，未來，我們將繼續使用地下水位資料對比於 GPS 測站以及 InSAR 觀測資料，期望得到地表高層與地下水位的互動模式。

（2）活動斷層潛勢分析

本計畫為「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）」（第二年度）成果，主要進行北部地區 9 條活動斷層潛勢評估，蒐集了活動斷層幾何面及活動性之相關文獻，建立了斷層參數表，並評估活動斷層未來 30、50 及 100 年之發生機率，可做為後續地震危害度分析參考使用。

為了避免重複計算的問題，在未來的潛勢評估中，需考慮以斷層系統的方式，針對可能產生系統性破裂之斷層進行潛勢評估，例如大甲－彰化斷層系統。另外部份斷層是屬於基底滑脫面之變形而形成之被動地震斷層，非主動破裂，例如獅潭斷層，部份斷層則實為前緣斷層之背衝斷層，例如鐵砧山斷層，在未來進行潛勢評估時可降低權重或是甚至不考慮其潛勢。未來則必須考慮底脫面、深部孕震構造及盲斷層系統之影響，納入潛勢評估中。除此之外，為了建立塊體模型與潛勢評估之連結性，建議建立全台灣的斷層模型，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。

最後，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。

（3）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，針對臺灣中部及北部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析。模型中將此區共分為 23 個塊體，並由地調所公佈的活斷層（義竹斷層除外）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）。雖然在定性討論上，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；但如何將此虧損率與地質資料顯示的長期滑移速率結合，來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。另外，GPS 資料及塊體模型均顯示臺灣西北部的地表變形和地底 10 km 附近的低角度 detachment faults 相關。由於整個三維塊體模型在建立這些 detachment faults 時會引入很多參數，降低反演結果的解析度；因此未來將使用二維的 dislocation model，將三維模型分成數個二維剖面來進行分析，並和 DEFNODE 的結果進行比對。

（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"。從 2013 年 12 月至 2014 年 11 月，在嘉義網觀測到 1 個應變異常事件：5 月 21 日芮氏規模 5.9 花蓮地震；新竹網觀測到 1 個應變異常事件：2 月 5 日至 2 月 8 日新竹群震；臺北網觀測到 2 個應變異常事件：2 月 12 日芮氏規模 4.2 陽明山地震和 8 月 16 日芮氏規模 3.8 新北市烏來區地震。針對這四個異常事件進行分析，除了使用原本的平面應變來分析，也嘗試利用剪應變來分析新北市烏來區地震案例，經由剪應變結果來初步判斷出該應變異常為該地震的前兆訊號。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至 2014 年 8 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：40%、71%與 67%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：60%、29%與 33%；地震前沒有前兆訊號的機率為：0%、29%與 25%。在時頻分析方面，由於各測站材質及岩性等材料條件不同，而有不同的特徵頻率發生（0.05、0.09、0.1Hz）。而當颱風影響臺灣，氣壓降低並具有顯著累積雨量及地下水變化時，各站時頻圖中皆在 0.2 ~ 0.5Hz 之間出現有雲狀頻率變化，特殊事件則會產生異常頻率，如降雨或氣壓於極值點時，雲狀頻率之頻段則為 0.1 ~ 0.5Hz 與 0.0 ~ 0.1Hz 之間有局部如山狀的頻率變化，這可能與慢地震有關。規模 6.0 以上的地震發生時，地下水位會有突然上升或下降的變化。0.03Hz 以下之面應變強度變化，能夠反應地震發生前後，應變量開始累績而後釋放的現象。地下水位、氣壓與降雨皆會影響井下應變儀應變量的變化，於井下應變儀分析中水文與氣象資料品質亦重要，儀器保養與數據維護為不可缺少的環節。

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。

中崙濁水潭觀測站由於常受到豪大雨影響而導致逸氣通道受阻或儀器故障且有崩塌的疑慮，故本年度另尋合適地點進行遷站。現已於地下水壓溧水測站原址將其改裝為地下水溶解氣體觀測並完成相關測試，待未來累積較多的觀測資料後，期能對於地震前兆研究有更進一步的瞭解。

整合分析部分，共包括地下水位異常、地化異常、井下應變儀異常和地震訊號異常之整合，整合期間含跨 2009 年整年到 2014 年 11 月間 174 個地震事件。本次報告考慮的異常觀測中，發生於 2014/05/21 規模 5.9 發生在花蓮縣鳳林鎮的地震（ID=163）在嘉義網中同時觀測到地下水位、井下應變儀和地化氣體記錄三樣異常。另外在 2014 年 2 月 5~8 日間在新竹有十個群震，規模在 2.3~3.4 之間，有多種當地的觀測異常。

（5）GPS 應變與井下應變儀及其他觀測

GPS 應變是將距離數公里以上的三個測站資料加以整合，畢竟期間因環境因素的影響，精度遠不及井下應變儀，在空間上也不及其他連續觀測方法的單純，所以在短時期的異常觀

測上可能比較困難，然而，經過這一年的測試，可以證實長期（數個月到數年）與井下應變儀的趨勢相當一致。因此，未來 GPS 地表應變可以作為其他監測方法的佐證，以及作為監測長期地殼應力累積變化的工具。

在這一年的累積經驗，至少證實了井下應變儀監測與 GPS 地表應變監測是真正的反應地殼的應力累積，因為這兩者在長期的趨勢相當一致。另外，也發現了在一些應變改變方向（正或負向）、改變變化速率時（也就是說有異常時），兩者會有差異，初步判斷，這種差異可能來自地區性的斷層活動，因為距離近，所以對不同方位、不同距離或不同深度的觀測站，可能會有不同，甚至完全相反的變化。

在這一年中，也觀察到 GPS 地表應變的長期變化，可能都與臺灣四周的較大地震有關聯，由於臺灣地震相當多，或許每一個變化都可以找到一個地震與它關聯，所以繼續觀察這些現象，並試圖對每一地震，或每一群地震對全臺各地的地殼是否造成合理且系統性的變化，這樣才能更進一步的對這些現象做更合理的判斷。

（5）總結

本次應變整合性的觀測資料包括 PS-InSAR、GPS 應變與高頻 GPS 等觀測，用來配合有大地震或井下應變儀觀測異常時，GPS 可提供應變的觀測，亦可提供獨立觀測，增加觀測的可靠性，也助於應變異常的解釋。在這些觀測中，PS-InSAR 與 GPS 及水準高程測量有趨勢上的一致性，但在精度上，尚待進一步的提升，包括提高衛星軌道精度與大氣誤差修正。GPS 應變則與井下應變儀的觀測量有極高的相似性，但精度略差，可用來做應變儀校準的一種參考資料，但不可忽略的是，GPS 應變所代表的區域是一個數平方公里的區域，與井下應變儀不到一平方公尺的面積大為不同。其所受的誤差與環境影響因素也不同，有待進一步分析。高頻 GPS 也是一個正在發展的方法，目前僅試用 Bernese 與 MIT 的 TRACK 軟體，近年來尚有幾種新發展的軟體，正在聯繫如何取得使用權。高頻 GPS 資料的分析將有助於在地震時或在無地震時的應變異常解釋。

在這一年的觀測中，唯一有多種資料觀測異常的地震是 5/21 的花蓮鳳林地震，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。而且有些資料，高頻的 GPS 資料由於地震較深，附近並無太大的地表應變，GPS 的高頻位移並不太明顯。

參考文獻

Altamimi, Z., P. Sillard, and C. Bouche (2002), ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, J. Geophys. Res., 107, 2214, doi:10.1029/2001JB000561.

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.

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.

Chang, S. L. (1971) Subsurface geologic study of the Taichung Basin, Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.8, 21–45.

Chang, Y.-L., C.-I. Lee, C.-W. Lin, C.-H. Hsu, and E.-W. Mao (1996), Inversion tectonics in the fold-thrust belt of the Foothills of the Chiayi-Tainan area, Southwestern Taiwan, Petrol. Geol. Taiwan, 30, 163-176.

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, C.T., Lee, J.C., Chan, Y. C., and Lu, C.Y. (2010) Growth normal faulting at the western edge of the Metropolitan Taipei Basin since the last glacial maximum, northern Taiwan. Terr. Atmos. Ocean., 21(3), p.409–428.

Chen, C-H. and Lin, S.B. (2002) Eruptions younger than 20Ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Sungshan Formation in Taipei Basin. Western Pacific Earth Sciences, 2, 191-204.

Chen, J.S. (1978) A Comparative Study Of The Refraction And Reflection Seismic Data Obtained On The Changhua Plain To The Peikang Shelf, Taiwan. Petroleum Geology of Taiwa, No.15.

Chen, K.-H., M. Yang, Y.-T. Huang, K.-E. Ching, and R.-J. Rau (2011), Vertical

displacement rate field of Taiwan from geodetic levelling data 2000‐2008, Surv. Rev., 43, 296-302.
Chen, K.P., and Tsai, Y.B. (2008) A catalog of Taiwan earthquakes(1900–2006) with homogenized Mw magnitudes. Bulletin of the Seismological Society of America 98, 483–489.
Chen, P. H. (1990) Electrostratigraphic study of the Quaternary Formations in Houli Tableland: Proc. Geol. Soc. China, Vol. 33, no,2 127–142.
Chen, W.S., and Wang, Y. (1996) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Geology of Taiwan 7.
Chen, W.S., Yang, C.C., Yen, I.C., Lee, L.S., Lee, K.J., Yang, H.C., Chang, H.C., Ota, Y., Lin, C.W., Lin, W.H., Shih, T.S., and Lu, S.T. (2007) Late Holocene paleoseismicity of the southern part of the Chelungpu Fault in central Taiwan: evidence from the Chushan excavation site. Bull. Seism. Soc. Am., 97(1B), 1–13. doi:10.1785/0120050161.
Chen, Y.G., Shyu, J.B.H., Ota, Y., Chen, W.S., Hu, J.C., Tsai, B.W., and Wang, Y.(2004) Active structures as deduced from geomorphic features: a case in Hsinchu Area, northwestern Taiwan. Quat. Int., pp.189–199.
Ching, K. E., R. J. Rau, K. M. Johnson, J. C. Lee, and J. C. Hu (2011c), 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., M.-L. Hsieh, K. M. Johnson, K.-H. Chen, R.-J. Rau, and M. Yang (2011b), Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000-2008, J. Geophys. Res., 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242.
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.
Chiu, H.-T.(1971)Folds in the northern half of western Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, 8, 7-19.
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.
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.
Fukuda, J., and K. M. Johnson (2008), A fully Bayesian inversion for spatial distribution of fault slip with objective smoothing, Bull. Seismol. Soc. Am., 98, 1128-1146.
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 and Applied Geophysics 123(1): 59-80.
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.
Hart, R. H. G., M. T. Gladwin, et al. (1996). "Tidal calibration of borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity." J. Geophys. Res., 101(B11): 25553-25571.
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, 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
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., and Chang, H.C.（1979) Quaternary faulting in Taiwan. Mem. Geol. Soc. China, no. 3, 155–165.
Hsu, T.L..（1956) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Bull. Geol. Surv. Taiwan, no.8, 39-64.
Hu, C. C., and H. C. Sheen (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, K. H.-H. Chen, C.-W. Lin, and M.-H. Huang (2007), Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan, J Asian Earth Sci, 31(3), 287-302.
Huang, B.S., Yeh, Y.T. (1992) Source geometry and slip distribution of the April 21, 1935 Hsinchu–Taichung, Taiwan earthquake. Tectonophysics 210, 77–90.
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, 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.
Huang, S.-T., K.-M. Yang, J.-H. Hung, J.-C. Wu, H.-H. Ting, W.-W. Mei, S.-H. Hsu, and M Lee (2004), Deformation front development at the northeast margin of the Tainan basin, Tainan-Kaohsiung area, Taiwan, Mar. Geophys. Res., 25, 139-156.
Huang, S.Y., Rubin, C.M., Chen, Y.G., and Liu, H.C. (2007) Prehistoric earthquakes along the Shanchiao fault, Taipei Basin, northern Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, 31, p265–276.
Hung, J.H., and Wiltschko, D.V. (1993) Structure and kinematics of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, 28, 59–96.
Hung, J.-H., D. V. Wiltschko, H.-C. Lin, J. B. Hickman, P. Fang, and Y. Bock (1999), Structure and motion of the southwestern Taiwan fold and thrust belt, Terr. Atmos. Ocean. Sci., 10, 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.
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.
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.
Ku, C. C. (1963) Photogeologic study of terraces in northwestern Taiwan, Mem. Geol. Soc. China, 6, 89–92.
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., Lin, C., Su, C., Liu, C., Lin, C.H., Chang, C. and Chiang, C. (2011) Correlating recurrent radon precursors with local earthquake magnitude and crust strain near the Chihshang fault of eastern Taiwan. Natural Hazards, 59, 861-869.
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.
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.
Lee C.T., and Lin P.S. (2004) Active faults and seismic hazards in west central Taiwan. International Conference in Commemoration of 5th Anniversary of the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, 16 pp.
Lee, J.C., Angelier, J., Chu, H.T., Hu, J.C., Jeng, F.S. and Rau, R.J. (2003) Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998-2001. Journal of Geophysical Research, 108, no. B11, 2528-2548.
Liang, W.T., J.C. Lee, and B.Y. Kuo. (2005) Left-lateral strike-slip faulting in Ilan: Lateral extrusion at the transition between Taiwan mountain range and Okinawa Through, Geodynamics and Environment in East Asia International Conference & 5th Taiwan-France Earth Science Symposium, 100-103.
Lin, C.H., Yeh, Y.H., and Roecker, S.W. (1989) Seismic velocity structures in the Sanyi-Fengyuan area, central Taiwan: Proc.Geol. Soc. China, v.32, 101–120.
Lin, D.H., Chen, K.H., Rau, R.J., and Hu, J.C. (2013) The role of a hidden fault in stress triggering: Stress interactionswithin the 1935 Mw7.1 Hsinchu–Taichung earthquake sequence in central Taiwan. Tectonophysics, Vol.601, pp.37–52.
Lin, Y.N., (2005) Surface Deformation and Seismogenic Structure Model of the 1935 Hsinchu–Taichung Earthquake (MGR = 7.1), in Miaoli, Northwestern Taiwan. Master Thesis National Taiwan University, 77 pp.
Liu, C.C., A.T. Linde, and I.S. Sacks. (2009) Slow earthquakes triggered by typhoons, Nature, 459, 833-836.
Liu, K.K., Teng, T.L., Hou, T.Y., Yeh, Y.H. and Tsai, Y.B. (1985) Continuous monitoring of radon emanation as an earthquake precursor at two hot springs in northern Taiwan, Preceedings of the ROC-JAPAN Joint Seminar on Mutiple Hazards Mitigation, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC, March.
Liu, K.K., Yui, T.F., Yeh, Y.H., Tsai, Y.B. and Teng, T.L. (1984/85) Variations of radon content in groundwaters and possible correlation with seismic activities in northern Taiwan. Pure and Applied Geophysics, 122, 231-244.
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.
McCaffrey, R. (2002), Crustal block rotations and plate coupling, in Plate Boundary Zones, Geodyn. Ser., vol. 30, edited by S. Stein and J. Freymueller, pp. 101–122, AGU, Washington, D. C.
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.
Meng, C.Y. (1963) The San-I overthrust. Petrol. Geol. Taiwan, no.2, 1–20.

Meng, C.Y. (1965) Lateral movement in the northern half of western Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, 4, 89–92.
Military Land Survey (1937), Report of revision surveys of 1st, 2nd and 3rd order triangulations and 1st order precise leveling in the Taiwan earthquake zone (in Japanese), 8 pp.
Mouthereau, F., O. Lacombe, B. Deffontaines, J. Angelier, and S. Brusset (2001), Deformation history of the southwestern Taiwan foreland thrust belt: insights from tectono-sedimentary analyses and balanced cross-sections, Tectonophysics, 333, 293-318.
Munk, W. H. and D. E. Cartwright (1966) Tidal spectroscopy and prediction. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 259, 533–581.
Namson, J. (1984) Structure of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan (III): central part. Petrol. Geol. Taiwan, no.20, 35–52.
NOAA (2000) TIDAL DATUMS AND THEIR APPLICATIONS., NOAA Special Publicaation NOS CO-OPS 1.
NOAA (2000) Tidal datums and their applications., NOAA Special Publicaation NOS CO-OPS 1.
Noguchi, M. and Wakita, H. (1977) A method for continuous measurement of radon in groundwater for earthquake prediction. Journal of Geophysical Research, 82, no. 8, 1353-1357.
Ota,Y., Shyu, J.B.H., Chen, Y.G., and Hsieh, M.L. (2002) Deformation and age of fluvial terraces south of the Choushui River, central Taiwan, and their tectonic implications. Western Pacific Earth Sciences 2, 251–260.
Pan, Y.S. (1965) Interpretation and seismic coordination of the Bouguer gravity anomalies obtained in northwestern Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, 4, 287–301.
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.
Roeloffs, E. (1999) Radon and rock deformation. Nature, 399, no. 6732, 104-105.
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., 115: 25.
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.
Scholz, C.H., Sykes, L.R. and Aggarwal, Y.P. (1973) Earthquake prediction: A physical basis. Science, 181, no. 4102, 803-810.
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.
Sheu, H.C., Kosuga, M., and Sato, H. (1982) Mechanism and fault model of the Hsinchu–Taichung (Taiwan) earthquake of 1935. Zisin 2 (35), 567–574 (in Japanese).
Shyu, J.B.H., Sieh, K., Chen, Y.G., and Liu, C.S. (2005) Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes: J. Geophys. Res., Vol.110, B08402.

Siame L.L., Chen, R.F., Derrieux, F., Lee, J.C., Chang, K.J., Bourlès, D.L. Braucher, R., Léanni, L., Kang, C.C., Chang, C.P., and Chu, H.T. (2012) Pleistocene alluvial deposits dating along frontal thrust of Changhua Fault in western Taiwan: The cosmic ray exposure point of view. J. Asian Earth Sci., 51, 1–20.

Silver, P.G. and Wakita, H. (1996) A search for earthquake precursors. Science, 273, no. 5271, 77-78.

Simoes, M., Avouac, J.P., Chen, Y.G., Singhvi, A.K., Wang, C.Y., Jaiswal, M., Chan, Y.C., and Bernard, S. (2007) Kinematic analysis of the Pakuashan fault tip fold, west central Taiwan: shortening rate and age of folding inception. Journal of Geophysical Research 112, B03S14. doi:10.1029/2005JB004198.

Song, S.R., Tsao, S. and Lo, H.J. (2000) Characteristics of the Tatun Volcanic eruptions, north Taiwan: implications for a cauldron formation and volcanic evolution: J. Geol. Soc. China, 43, 361-378.

Sun, S.C. (1965) Geology and petroleum potentialities of the Chingshui-Yuanlin area, Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan, 4, 161–173.

Suppe, J. (1980), Imbricated structure of western foothills belt, south-central Taiwan, Petrol. Geol. Taiwan, 17, 1-16.

Suppe, J. (1985) Principles of Structural Geology: Prentice-Hall International, Inc., London, 537.

Suppe, J., and Namson, J. (1979) Fault-bend origin of frontal folds of the Western Taiwan Fold-and-Thrust belt. Proceedings of the Geological Society of China, No. 16, 1–18.

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., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro (1991), A Procedure for Tidal Analysis with a Bayesian Information Criterion, Geophys J Int, 104(3), 507-516.

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.

Tang, C. H. and Hsu, C. H. (1970) Subsurface geology and petroleum deposits in the Hsinchu area. Petrol. Geol. Taiwan, no.7, 89-101.

Tang, C.H. (1963) Geology and oil potentialities of the Hukou anticline, Hsinchu. Petroleum Geology of Taiwan, No. 2, 241–252.

Tang, C.H. (1968) Photogeological observations on the low hilly terrain and coastal plain area of Hsinchu, Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, no.4, 35–52.

Tang, C.H. (1969) Photogeologic interpretation of the Miaoli area, Taiwan, with special reference to its geologic structures: Proc. Geol. Soc. China, no. 12, 11–19.

Teng, T.L. (1980) Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. Journal of Geophysical Research, 85, no. B6, 3089-3099.

Toutain, J.P. and Baubron, J.C. (1999) Gas geochemistry and seismotectonics: A review. Tectonophysics, 304, 1-24.

Tsai, Y. B. (1985) A study of disastrous earthquakes in Taiwan, 1683–1985. Bull. Inst. Earth Sci. Acad. Sinica, 5, 1–45.

Tung, H., Hu, J.-C., 2012. Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. Tectonophysics, 578, 126-135, Doi:10.1016/j.tecto.2012.08.009. (SCI, Impact Factor: 2.509)

Wakita, H., Igarashi, G. and Notsu, K. (1991) An anomalous radon decrease in groundwater prior to an M6.0 earthquake: A possible precursor? Geophysical Research Letters, 18, no. 4, 629-632.

Wakita, H., Nakamura, Y., Notsu, K., Noguchi, M. and Asada, T. (1980) Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake. Science, 207, no. 4433,

882-883.
Wang, C.Y., Yang, R.K., and Tsai, D.T. (1991) Shallow reflection seismics using firecrackers as the source II: field experiments. TAO, 2(3), 163–185.
Wang, J. H.(2008) The potential earthquakes rupturing the Shangjiao and Chinshan faults in the Taipei Metropolitan Area., TAO, 19(3), 205-212.
Wei, K., Chen, Y.G., and Liu, T.K. (1998) Sedimentary history of the Taipei basin with constraints from thermoluminescence dates. Jour. Geol. Soc. China, 41, 109–125.
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.
Wu, Y.-Y., Hu, J.-C., Lin, G.-P., Chang, C.-P. Tung, H., Lu, C.-H., 2012. Transient active deformation in Tainan Tableland using Persistent Scatterers SAR interferometry. Bull. Soc. Geol. France, accepted.
Yang, C.-C. B., W.-S. Chen, L.-C. Wu, and C.-W. Lin (2007), Active deformation front delineated by drainage pattern analysis and vertical movement rates, southwestern Coastal Plain of Taiwan, J. Asian Earth Sci., 31, 251-264.
Yang, C.H., Yu, C.Y., Guo, T.R., and Tsaur, J.Y. (2005) Verification of the suspected Tachia-tung fault by ground penetrating radar and resistivity image profiling methods: TAO, Vol. 16, no.5, 1045–1059.
Yang, K.M., Wu, J.C., Ting, H.H., Wang, J.B., and Chi, W.R. (1994) Sequential deformation in foothills belt, Hsinchu and Miaoli areas: Implications in hydrocarbon accumulation: Petrol. Geol. Taiwan, no.29, 47–74.
Yang, K.M., Wu, J.C., Wickham, J.S., Ting, H.H., Wang, J.B., and Chi, W.R. (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structure mode and evolution in the foothills belt, northwestern Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, no.30, 111–150.
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.
Yu, S. B. and Liu C. C. (1989) Fault creep on the central segment of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan. Proc. Geol. Soc. China, 32(3), 209-231.
Yu, S.B. and Kuo, L.C. (2001) Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333, 199-217.
Yu, S.B., Jackson, D.D., Yu, G.K. and Liu, C.C. (1990) Dislocation model for crustal deformation in the Longitudinal Valley area, eastern Taiwan. Tectonophysics, 183, 97-109.
Yue, L.F., Suppe, J., and Hung, J.H. (2005) Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw=7.6). J. Struct. Geol., 27, 2058–2083.
Yue, L.F., Suppe, J., and Hung, J.H. (2011) Two contrasting kinematic styles of active folding above thrust ramps, western Taiwan, in K. McClay, J. H. Shaw, and J. Suppe, eds., Thrust fault-related folding: AAPG Memoir, 94, p.153–186.
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.
丁信修、楊耿明、李長之、紀文榮（1995）新竹地區南莊層之逆斷層封閉研究。探採研究彙報，第 18 期，第 248–269 頁。
丁權（2012） 新竹地區活動斷層特性研究。國立臺灣大學地質科學系碩士論文，共 182 頁。
大江二郎（1936）大安溪地震調查報告。礦物及地質調查報告第四號，臺灣總督府殖產局。（日文）
大塚彌之助（1936）昭和 10 年 4 月 21 日台灣中部地方發生之地震所伴生之地震斷層，附地震斷層之諸特徵，東京大學地震研究所彙報別冊，第 3 號， 22–74。

中國石油公司（1978） 十萬分之一台灣地質圖─桃園幅，中國石油公司台灣油礦探勘總處出版。
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。
丹桂之助（1936）三叉衝上斷層とその附近の地質構造に就いて，臺灣地學記事，第 7 卷，第 1–3 號，5–14。
丹桂之助（1939）台北盆地之地質學考察。矢部教授還曆紀念論文集，第 1 卷，371~380 頁。
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。
王天楷、徐春田、李昭興、許樹坤、黃怡陵（2007）大台北地區特殊地質災害調查與監測：地熱流與海域火山活動調查與監測（4/4）。經濟部中央地質調查所報告，96–05 號，共 190 頁。
王昱（2003） 桃園–新竹臺地區構造活動與地形特徵。國立台灣大學地質科學系碩士論文，共 105 頁。
王執明、鄭穎敏、王源（1978）台北盆地之地質及沈積物研究。台灣鑛業，第 30 卷，第 4 期，第 78–108 頁。
石再添、張瑞津、黃朝恩、石慶得、楊貴三、孫林耀明（1983） 台灣北部與東部活斷層的地形學研究。台灣師範大學地理研究所地理研究報告，第 9 期，20–72 頁。
石再添、鄧國雄、張瑞津、楊貴三（1985）竹東台地的活斷層與地形面。國立台灣師範大學地理研究所研究報告，第 12 期，1–44 頁。
石同生、盧詩丁、林偉雄、李元希（2003） 新城斷層定位與斷層活動性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 14 號，第 37–52 頁。
石瑞銓、詹益湘、劉桓吉（2003）山腳斷層於關渡平原之淺層震測調查。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，1–11 頁。
朱傚祖、梁勝雄、李建成、陳建良（2012） 湖口斷層新釋：上盤活動背衝斷層之新發現及露頭構造分析。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，第 31–51 頁。
江婉綺、陳柏村（2012）新竹斷層構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，53–74 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。
衣德成、陳建良、林偉雄、林啟文（2004） 湖口斷層調查報告。經濟部中央地質調查所，未出版報告。
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。
吳逸民，張建興（2007）苗栗台中都會區地震災害潛勢分析--子計畫：苗栗台中都會區地震震源潛勢分析（II），行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，21 頁。
吳榮章等（2002）活動斷層鉆井岩心切割及分析，彰化一號及彰化二號井：經濟部中央地調所研究報告。
李元希、石瑞銓（2008）地震地質與地變動潛勢分析計畫─斷層帶地下構造調查研究（1/4），經濟部中央地質調查所報告，第 96–12 號，128 頁。
李奕亨（2009）以中尺度反射震測法研究屯子腳斷層活動機制及構造上的意義，國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 125 頁。
李錦發（1994）三義斷層及其在新構造上的意義，地質，14，73–96。
李錦發、林朝宗、賴典章、蘇泰維、邱禎龍、曾俊傑（1999）台北盆地成因之探討，經濟部中央地質調查所特刊，第十一號，第 207–226 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。
沈玟劭（2008）新竹外海構造研究，國立台灣大學海洋研究所碩士論文，共 46 頁。
沈淑敏、張瑞津、楊貴三、林雪美、林宗儀（2005）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫:活動構造地形判釋及資料庫建置分析（1/2），經濟部中央地質調查所報告 94–13 號。
東京帝國大學地震研究所（1936）地震研究所彙報別冊－昭和 10 年台灣中部地震論文及報告，第 3 號，238 頁（日文）。
林良安（1999） 湖口斷層淺層反射震測之研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 109 頁。
林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正（2000）臺灣活動斷層概論，五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，第二版，經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，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。
林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）台灣東部與南部的活動斷層，兩萬五千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 23 號，共 178 頁。
林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村（2008）大茅埔–雙冬斷層，經濟部中央地質調查所特刊， 21，148。
林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧（2007） 臺灣北部的活動斷層─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 19 號，共 130 頁。
林啟文、鍾瑋、侯進雄（2005） 臺灣北部新城斷層與新竹斷層的一些構造特性。經濟部中央地質調查所特刊，第 16 號，41–54 頁。
林朝宗（2005）山腳斷層與台北盆地西緣的地質構造。大台北地區火山活動與山腳斷層研討會論文集，191–197。
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。
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。
林燈河（1987）1935 年新竹、台中烈震之震源機制。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
林燕慧、陳盈璇、侯進雄（2010）台灣西北部之地殼變形研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 24 號，171–188 頁。
花井重次（1930）台灣桃園台地之活斷層。地理學評論，vol.6，no.7，226–237 頁。
邱華燈（1962）台中縣大安背斜震波測勘之結果及解釋，中國地質學會專刊，第 1 號，187–188。
洪智賢（2001）三義斷層之逆衝構造研究，中央大學地球物理研究所碩士論文，共 101 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。
郁永河（1697）裨海紀遊。
倪明倫（2004）新竹苗栗地區活動斷層地下構造震測調查研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 107 頁。
徐明同（1983）明清時代破壞性大地震規模及震度之評估，氣象學報，第 21 卷，第 2 期，33–40。
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。
張國楨（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識與分析（1/4）。經濟部中央地質調查所委辦計畫，共 289 頁。

張國楨等人（2011）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報告第 100–10 號，共 289 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 10 號，共 103 頁。
張麗旭（1951）「三叉衝上斷層」及其附近之地質構造，臺灣省地質調查所彙刊，第 3 號，23–34。
郭泰融（1990）新城斷層之地球物理探勘。國立中央大學碩士論文，共 81 頁。
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。
陳太山、蘇福欽（2002）彰化斷層北端之構造形態報告，中油公司。
陳文山（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（總報告）。經濟部中央地質調查所報告第 99–09 總號，共 141 頁。
陳文山、林朝宗、楊志成、費立沅、謝凱旋、龔慧敏、林佩儀、楊小青（2008a）晚期更新世以來台北盆地沉積環境與構造演化的時空演變。經濟部中央地質調查所彙刊，第 21 號，61–106 頁。
陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青（2008b）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（1/4），經濟部中央地質調查所報告第 96–10 號，共 86 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、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞銓、陳于高、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁（2003） 新城斷層的古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊第十四號，第 11–23 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。
陳致同、李建成、詹瑜璋、盧佳遇、鄧屬予（2012）台北都會區山腳斷層之地下形貌建構與分析：先存構造之再活化？101 年地質學會及地球物理學會年會暨學術研討會論文集，第 84 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。
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。
游能悌、顏君毅、劉進興、顏一勤、盧詩丁（2014）台灣北部金山平原古海嘯沈積物初探。103 年地質學會及地球物理學會年會暨學術研討會論文集，第 211 頁。
黃立勝（1990） 臺灣西部晚新生代沉積盆地之地下溫度及地溫梯度之研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第六號，第 117–144 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、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004） 斷層活動性觀測與

地震潛勢評估調查研究 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。經濟部中央地質調查所報告第 93–13 號，共 59 頁。
黃孟涵（2006）以合成孔徑雷達干涉法研究台灣之地殼變形，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 185 頁。
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。
黃宣維（2012） 以三維構造幾何形貌和大地測量分析台灣西北部新竹地區之新期構造活動。國立台灣大學地質科學系碩士論文，共 139 頁。
黃柏壽、陳國誠、劉忠智、溫國樑、黃文紀、林正洪（2007）大台北地區特殊地質災害調查與監測：地球物理微震調查與監測（4/4）期末總結報告書，經濟部中央地質調查所報告; 96–04 號。
塗明寬、陳文政（1990） 中壢圖幅及說明書，五萬分之一台灣地質圖。經濟部中央地質調查所，共 53 頁。
楊耿明、黃旭燦、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2003）斷層活動性關測與地震潛勢評估調查研究，台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（4/5）–台灣中部麓山帶地區，經濟部中央地質調查所，54 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。
董倫道、李奕亨、陳文山（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫─地球物理探勘計畫（5/5），經濟部中央地質調查所報告第 95–09 號，共 187 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。
詹瑜璋、李建成、劉進金、鄭鼎耀、徐偉成、陳文山、胡植慶、陳柔妃（2006）大台北地區特殊地質災害調查與監測─高精度空載雷射掃描（LIDAR）地形測製與構造地形分析（2/3）。經濟部中央地質調查所 95 年研究計畫報告，共 123 頁。
詹瑜璋、李建成、鄭鼎耀、劉進金、陳文山、胡植慶、陳柔妃、徐偉城（2005）大台北地區特殊地質災害調查與監測－高精度空載雷射掃描（LIDAR）地形測製與構造地形分析（1/3）。經濟部中央地質調查所報告 94–06 號，共 143 頁。
臺北觀測所（1936）昭和 10 年 4 月 21 日新竹－台中烈震報告，台北，共 160 頁（日文）。
蒲新杰（2010） 藉由高密度地震網之監測資料探討新竹地區地殼構造的特性。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 159 頁。
劉力豪（2004）竹東丘陵的活動斷層古地震及相關活動性研究。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 90 頁。
劉彥求、李奕亨（2006）三義斷層於大甲溪兩岸剖面與淺層震測結果比對分析，2006 年臺灣地區地球物理學術研討會摘要集，97。
劉桓吉、蘇泰維、李錦發、紀宗吉、林朝宗（2000）山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響，經濟部 89 年度研究發展報告，共 30 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（1995）台灣及鄰近地區大地應力分布的研究，國立中央大學地球物理研究所博士論文，196–207。
鄭世楠、江嘉豪、陳燕玲（2012）臺灣地區歷史地震資料的建置，中央氣象局地震技術報告彙編，第 60 卷，427-448。
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。
蕭力元、黃旭燦、鄧屬予、林國安（1998）台灣新畿褶皺帶南段的構造特徵。台灣石油地質，第 32 期，133–153 頁。
謎凱英（1995） 桃園台地群崖地形之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 144 頁。
鍾瑋、侯進雄、陳于高（2005）臺灣新竹地區近期之地殼變形研究。中國地質學會九十四年年會暨學術研討會大會手冊及論文摘要，第 330 頁。
簡志宇（2008）台北盆地西北深部構造之研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 60 頁。
顏滄波（1985）一九三五年新竹、台中地震調查之回顧。一九三五年新竹－台中大地震五十周年紀念研討會論文集，11-17 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。
蘇泰維、劉桓吉、劉憲德、黃健政（2003）台北盆地西緣山腳斷層調查研究初步成果─環境與工程地質調查研究。91 年度經濟部中央地質調查所年報，第 118–121 頁。
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─活動斷層監測系統計畫(5/5)。經濟部中央地質調查所研究報告 95–10 號，共 241 頁。
饒瑞鈞、李元希、胡植慶（2010）地變動監測分析總報告，中央地質調查所報告第 99–10 總號，403 頁。
饒瑞鈞、李元希、胡植慶（2010）地變動監測分析總報告，中央地質調查所報告第 99–10 總號，403 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. 建議方法上可補充全臺之三維有限元素模型，以彌補塊體模型（BLOCK MODEL ）應用上之不足。	會與相關專家研擬三維有限元素模型建立之可行性、細節及後續之應用。
2. 建議潛勢評估應納入其他計畫完成之資料，包括：河階、地形、斷層開挖、定年等相關研究。	潛勢評估前會進行斷層參數資料蒐集，包括既有的已完成的活動斷層調查工作，而與本計畫同步進行之斷層相關調查工作計畫，會與地調所詢問並納入參數表中。
3. 第 113 頁 GPS 連續站與井下應變儀共同觀測與解釋部份，建議將每週（或每二週或每月）的變動值異常分析發布工作（例如 email 給審查委員）列入計畫應交付項目。	GPS 要得到較精確的結果可能要在三星期之後，井下應變儀資料蒐集與處理也需要時間；地調所與各單位（氣象局、內政部、中研院）交換的 GPS 資料約需一個月，而實際獲得資料的時間往往遲至 50 天；且執行單位須時間計算、分析、繪製成果，因此預計每個月初發布，分析資料為 2 個月以前的一整個月期間之資料，例如 4 月初發布 1 月份的變動值異常分析。已增列於交付項目章節內。
4. 對於地震規模超過 6 的地震，請針對 GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準測量、井下應變儀、溶解氣體觀測、地下水位變化…等整合性觀測結果與分析，建議應列入計畫應交付項目。	已增列於交付項目章節內。
5. 計畫參與人員運用計畫執行成果所發表相關著作，應於期末報告書繳交時提供相關資料或電子檔於附錄中，並列入計畫應交付項目。	已增列於交付項目章節內。
（二） 有關經費編列與架構	
1. 人事費編列偏高，請再審慎估算。	感謝委員指正，已調整。
2. 第 162 頁請依「經濟部及所屬機關委辦計畫預算編列基準」所訂各職級定義（研究員級、副研究員級、助理研究員級、研究助理級）編列。	感謝委員指正，已修正。

期初審查意見	處理情形
3. 第 162 頁所列專家會議請依「經濟部及所屬機關委辦計畫預算編列基準」所訂標準編列並再區分其細項內容（例如出席費、場地租用費、報告印製...等相關費用），均應予以說明清楚。	感謝委員指正，已修正。
4. 經費需求配置所列人員差旅費建議區分出旅費及運費，並應依「經濟部及所屬機關委辦計畫預算編列基準」所訂旅運費原則以每人年 43,500 元為編列標準，其中：國內旅費部分並以每人年 15,000 元為限；如確有需求，請予以說明原因。	感謝委員指正，已修正。
（三） 有關參與人力、經驗與能力	
1. 人事配置方面，計畫內許多研究員及專任助理的工作請再明確區分其工作內容，避免有浮散的感覺。	感謝委員指正，章節八、人力配置有詳細說明每位計畫人員之工作內容。
（四） 有關報告書內容	
1. 第 9 頁倒數第 4 行「全臺已設置了 71 座 GPS 站」，建議修正為「地調所在全臺已設置了 71 座 GPS 連續觀測站」。	感謝委員指正，已修正。
2. 第 18 頁第 6 段第 1 行「多種大地測量的分法」應為「方法」。	感謝委員指正，已修正。
3. 第 43 頁倒數第 4 行「（錯誤！找不到參照來源。）」請查對其內容。	感謝委員指正，已修正。
4. 第 51 頁第 3 段第 2 行「垂直分兩」應為「垂直分量」。	感謝委員指正，已修正。
5. 第 57 頁第 1、2 段有關土壤氣體觀測之說明部分不一致，例如第 1 段說明大平地站對於北部與東北部的地震較為敏感，第 2 段說明大平地站對於北部的地震活動較為敏感；第 1 段說明嘉義中崙濁水潭站對於南部與東南部地區地震活動較為敏感，第 2 段說明嘉義中崙溪觀測站（是否即為中崙濁水潭站？若二者相同，請統一名稱）對於西南部地震活動較為敏感。建議重新檢視相關說明並修正。	感謝委員指正，已修正。
6. 第 57 頁第 2 段與第 60 頁第 3 段文字描述重複，請修正。	感謝委員指正，已修正。
7. 第 77 頁第 2 段第 2 行「作摩托化的觀測」，是否應為「摩托」，並請再確認其描述是	感謝委員指正，已修正。

期初審查意見	處理情形
否有誤。	
8. 第 115 頁有關斷層潛勢評估部分，若利用 BPT 機率密度函數法，變異係數會影響機率密度函數圖形，導致後續計算活動潛勢機率之差異，敘述中提及參考美、日兩國經驗予以假定，但美國與日本的處理方式即有所不同，請進一步說明本計畫選取的方式與理由。	目前臺灣活動斷層多數無槽溝資料，因此無法得知其復發間隔的變異係數。在採用 BPT 機率密度函數法，本計畫建議美、日之假定方式均可當作邏輯樹之分支來評估，其中由於日本地體構造情形與臺灣較為接近，因此建議日本的假定方式可給予較高的權重。
9. 第 121 頁第 4 段「全台連續 GPS 觀測網共 72 個測站的建立」，但第 9 頁文字說明為 71 站，請確認。	感謝委員指正，已修正。
10. 第 128 頁最後一段「P_{total} 為將所有斷層之發生率交集後之發生率」，請確認相關描述是否正確妥適？	相關描述修改為「P_{total} 為所有斷層破裂事件至少發生一次之機率」。

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. 水準測線請將相關構造位置標示出來。	感謝委員指正，已標示。
2. GPS 在新竹地區之資料異常的原因，不能用「可能」是邊坡不穩定造成，應找出具體原因。	感謝委員指正，已於期末報告 2-2-8 中補充說明。
3. 台電許多研究資料皆顯示恆春斷層活動性低，有關恆春斷層長期滑移速率的推估，建議參考核三廠地質槽溝開挖結果。	感謝委員指正，已參考。
4. 恆春斷層在 2006 屏東外海地震後變活躍，值得加密觀測，並將訊息提供台電參考。	感謝委員指正，如需發文會委請地調所協助。
5. 請持續更新本所各觀測站資訊，包含井下應變儀及 GPS 連續追蹤站基本資料。	感謝委員建議，遵照辦理。
6. 為量測鳳林地震的地表變形，本所將花蓮地區三條水準測線提前於 6 月份施測，請將分析結果列於期末報告。	感謝委員指正，已將解算結果寫於期末報告 2-3-13 至 2-3-15 中。
7. 本計畫申請臺北盆地、宜蘭地區、縱谷地區 Lidar 影像資料與現有觀測結果比較分析部分，請於期末報告納入討論。	感謝委員建議，遵照辦理。其中宜蘭地區雖有申請但未使用，因此沒有列入討論。詳見圖 2-6.5、圖 2-6.8、圖 2-6.12 及章節 6-1-3。
8. 今年 5 月向水利署申請水文資料部分，與本計畫現有觀測資料分析比較結果，亦請於期末報告納入討論。	感謝委員建議，遵照辦理。詳見章節 6-1-4。
9. 本年度規劃運用觀測資料推求北部地區應變速率之空間分布情形，探討能量蘊含之盈虧空間分布，請於期末報告書中加強討論。	感謝委員指正，已於期末報告 2-5 中補充。
10. 本計劃應用 GPS 連續站高頻資料於地震前後的分析結果亦請納入期末報告書討論。	感謝委員建議，遵照辦理。詳見章節 2-1-5。
11. 建議計劃團隊當有各種觀測資料結果異常訊號即做出預測，考核其誤報率，並表列	感謝委員建議，遵照辦理。詳見表 4-1.2、表 5-1.4、表 5-3.2 及表 5-3.3。

期中審查意見	處理情形
成果，提高實用率。	
（二） 斷層活動潛勢分析	
1. 請說明斷層分段(segmentation)之原則及與特徵地震(characteristic earthquake)之關係，是否每一斷層分段均有特徵地震？	斷層分段(segmentation)之原則請詳閱附錄 3-2 中 3-2-4 之說明。斷層分段決定斷層的長度（尺度），根據尺度經驗公式，斷層尺度越大，則特徵地震之規模越大。本計畫雖針對活動斷層進行分段，但是在計算特徵地震規模時，是以破裂模式計算其特徵地震規模。若單一分段不會單獨破裂，或是尺度過小不足以引發大規模之地震，或是僅為主要斷層的延伸部分，則不計算其特徵地震規模。
2. 有關屯子腳斷層及 1935 年地震之參考文獻請補充黃柏壽、葉永田之文獻；屯子腳斷層潛勢分析亦須考慮獅潭斷層之影響，建議獅潭斷層與屯子腳斷層以同一個系統考量。	感謝委員意見，將補充說明於期末報告中。另屯子腳及獅潭斷層會考慮為同一系統進行評估。
3. 請說明大甲-彰化斷層的分斷位置？	依據地調所發布之臺灣活動斷層圖，大甲斷層與彰化斷層間相隔著大肚溪，因此本計畫將大甲ㄧ彰化斷層的分段點位置定為大肚溪。
4. 三義斷層長度不明，由其往南延伸，分析之不確定性會較高。	根據陳文山之建議三義斷層南段可延伸 11 公里，本計畫據此採用南延 11 公里之說法。
5. 請說明屯子腳斷層延伸段延伸至何處?	屯子腳斷層向西延伸至大甲斷層，向東延伸至關刀山及出磺坑背斜之東南側。
6. 斷層深度參數的採用，關係到地震規模大小之推估，目前是以微震剖面中次數變低的深度做採定依據，報告書中 10 公里太淺，建議再加上一保守值。	感謝委員意見，本計畫會蒐集地溫梯度或是脆塑性轉換帶深度作為保守值，並納入成為邏輯樹之分支。
7. 不同區域之抬升速率不同，可能有不對稱變形，建議於邏輯樹中採用河階定年等資料。	本計畫會優先採用蒐集河階定年資料。
8. 長期滑移速率之採定，如採錯距除以年代，年代不宜過長，因斷層近期可能已經不活躍，建議年代採 10 萬年內較為恰當。	在沒有槽溝開挖或是階地定年之活動斷層，本計畫會同時考慮斷層沿線 GPS 之地殼變形速率及野外地形崖調查，以錯距除以年代當作是長期滑移速率，同時注意野外地形崖之年代不宜超過 10 萬年。
9. 第 221 頁，表 7-1.3 由塊體模型所計算出的長期平均滑移速率達 10mm/yr，請說明	塊體模型所推估的“長期滑移速率”(or geodetic long-term slip rate)是以震間的測

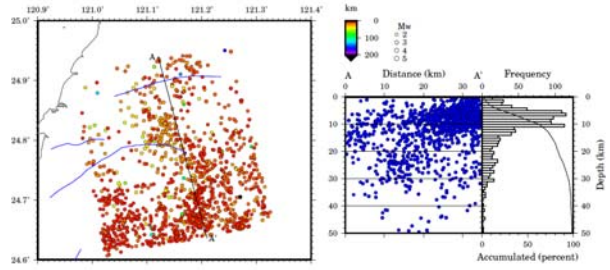
期中審查意見	處理情形
為何與第四章所表列之長期平均滑移速率有較大差異之原因。	地資料為主，而由地質或古地震資料所得的是 geologic long-term slip rate，許多研究顯示這兩種 slip rates 大多存在著相異性，且 geodetic slip rates 多較 geologic slip rates 為高。詳細的原因有很多，主要是因為 geologic slip rates 記錄的是長期平均速率，而且是同震(coseismic)滑移為主。Geodetic slip rate 則是以數年至十數年的地表變形速率所逆推計算而得的地下斷層的平均“震間”(interseismic)滑移速率。因為地震發生時，斷層不一定會釋放掉所有於同震期所累積的滑移量；加上累積的應變能也不一定全部以地震滑移方式所釋放(另外方式如熱能等)，因此 geodetic long-term slip rates 和 geologic long-term slip rates 可能不一定會相等。
10. 第 7-1-3 小結，塊體模型模擬結果以三義、車籠埔、大尖山及觸口斷層等一系向南延伸之斷層孕震潛能最高，然車籠埔斷層近期已有活動，依邏輯推估，應不符合目前實際情況，請加強說明。	這裡所謂的"孕震潛能“是以模型所推估的 fault slip deficit rate 來判定。不像一些機率災害分析，會以上次事件發生至今的時間(elapsed time)為參數，造成越遠離上次地震則有越大的再現機率。Block modeling 沒有考慮這種因素(至少我們現在用的 time-independent modeling 沒有)，因此越容易累積震間滑移的斷層(例如跨斷層的地表 strain rate 較高)都會一直出現高的 slip deficit rate，也代表了較高的孕震潛能。未來將使用 time- dependent block modeling 方法來檢視地震後隨時間改變的 fault slip-deficit rate，也許可以觀察出地震後斷層孕震潛能的演變。
11. 斷層之綜合評估應以實證及邏輯推估為主，電腦模擬固然重要，但只能作為參考之用，不能據以做災害評估，報告中用語尚有修飾的空間。	感謝委員意見，目前 block model 模擬結果僅採用滑移虧損率置於斷層參數表中，其餘結果則做為參考，不納入邏輯樹評估中。後續將考慮其他因素，使模擬結果更趨近真實情形。
12. 斷層活動潛勢分析中各斷層資料多寡不同，可能影響評估結果之可信度，請考慮發生機率，評估資料信心度。	本計畫斷層潛勢之評估結果，暫無準則可評估資料多寡與信心度之關係，建議以參數邏輯樹各分支之權重，評估發生機率之信心度。

期中審查意見	處理情形
13. 建議做出各條活動斷層潛勢評估之機率評估，並表列出機率排序。	感謝委員意見，本團隊會於 33 條活動斷層潛勢評估完成後，針對發生機率進行排序。
（三） 報告書內容及其他建議事項	
1. 第 1 頁第 18 行，慢地震和長微震等名詞宜附加英文。	感謝委員建議，已修正。
2. 第 10 頁第 4 行，可能是區域性的盲斷層所引起？實指地下活動構造包括斷層及摺皺，亦即結合脆性及塑性變質，固此請考慮用「盲構造」的名稱是否適宜。	感謝委員建議，已修正。
3. 第 23 頁第 9 行，Hibet-Hung Transform, HHT，應為 Hibet-Huang Transform。	感謝委員指正，已修正。
4. 第 119 頁，屯子腳斷層之「最大縱移量」建議修改。	感謝委員建議，已修正。
5. 第 129 頁，圖 4-3.6 (b)所引用參考文獻（林啟文等，2008）應指大茅埔-雙冬斷層而非鐵砧山斷層，請修正。	感謝委員指正，已修正。
6. 期中報告書內容充實，未完成部分可在期末報告書中補足。	感謝委員建議，遵照辦理。

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.整合觀測資料分析（第六章）為本計畫之重點，在納入分析的斷層中，期末報告中應加以強調是否有特別需要關心及重視的評估重點，並在結論與建議章節中具體指出。	感謝委員建議，遵照辦理。
2.台灣的西南部在 1999 年集集地震之後，地殼變形的型樣(pattern)有重大的改變，過去每年抬升約 1 公分的臺南台地上升趨勢變緩，而主要抬升現象往東南移到龍船斷層，顯示了龍船斷層的活動性增加而吸收了大部份的區域性地殼變形，使臺南台地的上升速率降低，須注意龍船斷層是否已經進入了活躍期，其變型速率是否有持續增加的現象？是否已達錯動的邊緣？是否應考慮將監測的重點移到此斷層附近？宜慎重考慮。	由於針對龍船斷層的精密水準觀測是近一兩年才開始進行的，對於該斷層是否已進入活躍期及是否達到錯動邊緣，本團隊仍需持續累積觀測資料來進行判釋。目前本團隊已將工作重點移到此斷層上。
3.恆春斷層在 2006 年屏東外海地震後，活動性有明顯增加的現象，請列入加強監測的重點。	目前本團隊已將工作重點移到恆春斷層上。
4.已在研討會中被發表的 InSAR 資料，本研究建議納入評估。例如：龍船斷層及恆春斷層的 InSAR 結果。	感謝委員建議，由於明年度計畫 PS-InSAR 分析區域為南部地區，將再進行統整並對這部分進行評估。
5.跨旗山與龍船斷層之水平速度場向量變化，僅提及觀測結果，其地質意義為何，請加以說明。	對於跨越旗山和龍船斷層地表位移向量變化的地質意義，本團隊仍在探討中，目前傾向朝泥貫入體或是活動褶皺兩個可能性進行探討。預計將在來年之工作中提出說明。
6.台北盆地變形之 GPS 水平速度場(P68)大部份指向東北，與山腳斷層之動向不一致，請提出說明及解釋。	台灣北部地區之速度場是呈現順時針旋轉的趨勢，產生此變形型態之機制及其和山腳斷層之關聯性仍然在研究中。
7.請檢視各項觀測及擺設位置對觀測之斷層的反應狀況，將觀測結果進行統計，以檢討持續觀測之必要性。	感謝委員建議，目前本團隊正在針對各項觀測結果進行統計檢討中。
8.井下應變儀資料前兆訊號的判定條件之一，為必須有同震的應變變化，此方法無法應用至實際觀測異常的前兆預報上，該如何克服，建議加以說明。	未來會修正前兆訊號的研判條件，並將同震的應變此一條件改為事後判斷此前兆是否正確指示的指標，而非前兆訊號的指標。
9.有關 X-band 影像中，請說明環境因子的影響	本團隊目前正著手分析台北盆地因地下水起

期末審查意見	處理情形
是否可去除，而顯示出真實的地形變化？	伏造成地表變化的相關性評估，初步求得地下水降低 10 公尺約會造成地表下陷量為 1 公分~4 公分(取決於土壤儲水係數)。此研究還須更全面性的分析台北盆地因岩層厚度不一以及土壤結構不同而造成的環境異意以去除因地下水造成之地表起伏，獲得真實的地表變化以確定山腳斷層活動的評估。
10. 結論與建議中，有關 GPS 異常點位、跨車籠埔斷層之 5 條精密水準短測線的施測調整方式及缺乏斷層長期滑移速率的處置方法，請與地調所討論，藉以修正後續年度測量案的工作內容與方式。	感謝委員建議，本團隊將與地調所進行討論藉以修正後續年度測量案的工作內容。
（二） 斷層活動潛勢分析	
1.請說明表 6-2.1 斷層底部深度的評估依據，斷層深度的評估仍然太淺，請執行團隊勿局限於薄皮構造之假設，可多方考慮其它理論或方法。	本計畫已嘗試採用微震深度分布或是地溫梯度估算活動斷層之孕震深度，會納入邏輯樹之一個分支中考慮，並評估斷層發生機率潛勢。至於表 6-2.1 中之底部深度是採用邏輯樹中間值，用以建立塊體模型之邊界，塊體模型之邊界目前只考慮斷坡之部分，參數會以震測及地層平衡剖面觀察到的斷層面幾何為主，而不是考慮孕震深度。
2.請說明表 6-2.3 長期平均滑移速率的評估依據。	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。
3.滑移虧損用來估計未來若干年可能發生的地震規模可納入報告，但其基本假定及使用限制須再加以討論，例如：每次地震間的滑移虧損是否為定值，亦或是會有隨時間變化之可能。	滑移虧損估算可能發生的地震規模是假設未來 100 年內斷層的滑移虧損率皆維持相同。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。由於台灣位處板塊邊緣，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 6-2.4 中估算的未來地震規模也可能會隨時間而有所修正。
4.塊體模型算出的台灣西部地區的滑移速率分佈與觀測的滑移速率分佈相差多少？請予說明並列入未來模型參數修正之依據。	塊體模型算出的斷層長期平均滑移速率，和利用地質資料所觀測的長期滑移速率(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

期末審查意見	處理情形
	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, 1998b)。評估 geodetic long-term slip rate 的方法，除了和 geologic long-term slip rate 進行比較外(但如前所述，這種比較並不一定有意義)，也可以由地震活動度等資料來間接進行。
5.各斷層之分段宜根據前人建議的準則確實執行，並交待其分段之依據。	本計畫蒐集前人建議之分段準則已補充於[附錄 3-2]中。
6.活動斷層發生機率潛勢圖中，大甲-彰化斷層之發震機率較其它斷層高出許多，然其滑移虧損率卻無此情況，請說明原因。	潛勢評估中大甲—彰化斷層之長期滑移速率高於塊體模型之滑移虧損率，主要原因可能是評估的時間尺度不同所造成，從短期 GPS 觀測現在的大甲—彰化斷層較不活躍，因此塊體模型會得到較低的虧損率，然而從長期的階地高及定年則反映較高之滑移速率，因此在潛勢評估上會有較高的機率。
7.斷層活動機率及滑移虧損(deficit)評估為此計劃的最大重點，目前為台灣最新並有具體的突破成果，在下一年度計畫應列為重點方向。	遵照辦理，本團隊會在未來嘗試應用滑移虧損率評估之結果於斷層活動機率及潛勢評估當中。
8.湖口地區之觀測值請與 1990-2000 年間在該區呈現之西北東南向密集地震帶之性質(例如：斷層面解)加以討論。	檢視氣象局 1973-2010 年地震目錄，湖口斷層區域地震規模皆小於 5，深度主要分布於 11 公里以內，因而本計畫設定斷層深度最大值為 11 公里。
9.三義斷層與屯子腳斷層皆位於后里台地，請說明兩斷層的活動是否會互相影響與干擾。	由於三義斷層與屯子腳斷層位置相近，因此位於后里台地之微震不易區別，另外，可能其中一條破裂之應力會誘發另一條之破裂。然而 1935 年之地震並沒有使三義斷層產生地表破裂，從震測剖面中則可觀察到屯子腳斷層是從三義斷層面下方通過，長度延伸不會受到三義斷層影響。
10. 1935 年之地震及兩條地表破裂請就參考	1935 年地震發生後，日本地質學者(大塚彌

期末審查意見	處理情形
文獻資料加以討論。	之助，1936；大江二郎，1936；早坂一郎，1936)立刻進行了完整之野外調查及地表破裂之描繪。本計畫已參考當時日本學者調查成果，獅潭斷層及屯子腳斷層之地表破裂長度分別為 15 公里及 12 公里。
11. 三義斷層往南延伸(國道四號以南)情況如何？請加強檢討。	三義斷層是否延伸至國道四號以南仍未有定論，然而國道四號施工單位預計針對活動斷層進行排鑽等相關地下地質調查工作，俟調查結果完成，將可解答三義斷層往南延伸之問題。
12. 有關屯子腳斷層的延伸，向西並無延伸至大甲斷層，向東應未至關刀山，請加強說明檢討。	屯子腳斷層向東的延伸，主要是考慮 1935 年主震若是由屯子腳斷層破裂造成，則屯子腳斷層之延伸應可達震央處，同時總延伸長度達 40 公里，才能造成規模 7 以上之地震，至於向西之延伸雖然在地表沒觀察到延伸至大甲斷層，然而仍須考慮它有可能以地下盲斷層的形式延伸，本計畫會以邏輯樹的方式考慮各種破裂模式之可能性進行評估。
13. 請考慮三義斷層於大甲溪附近，是否受到橫移構造的影響。	「大甲溪兩側三義斷層位置差距約 300 公尺，可能有橫移構造穿過三義斷層」首先需了解此 300 公尺之錯移是斷層帶中的分支或是受到橫移構造之影響。若是橫移構造應會是潛勢評估中三義斷層主要的分段點，然而在日本的分段準則中說明平行斷層線跡需錯移 2 公里以上才能進行分段，另外，依尺度經驗公式，三義斷層以大甲溪分段則各分段不至於產生大規模之地震，因此本計畫暫時不針對此可能之橫移構造進行分段。
14. 第 203 頁新城斷層之「地震復發間隔」有 2 個不同方法之推估值，分別為槽溝開挖的定年結果與特徵地震模式推估，二者差異甚大，在利用 BPT 模式進行發震機率推估時如何計算？特徵地震模式推估之值看似皆偏小，請說明可能原因。	利用特徵地震模式推估地震復發間隔時，滑移速率為最主要的影響因子。本計畫所採用的滑移速率為來自地質資料(如斷層崖，階地定年，槽溝)之長期滑移速率，此速率可能包含斷層潛移的速率，以及在地震中釋放的累積速率。特徵地震模式採用的速率應為單純由地震釋放的速率，若將潛移的速率納入計算，會使滑移速率偏高，並縮短地震復發間隔的時間。本團隊將會考慮地震、地質及大地測量模擬之資料，針對此問題分析與探討。
（三） 報告書內容及其他建議事項	

期末審查意見	處理情形
1.請加以說明圖 1-1.3 至 1-1.5 中黑色代號與紅色代號觀測站之區別及意義為何。	感謝委員建議，已修正。
2.第 30 頁圖 1-4.3 圖說「右圖為扣除 2013 年...」應為「下圖」。	感謝委員建議，已修正。
3.第 41 頁最後 1 段出現 3 次圖 1-4.17，應分別為圖 1-4.18、圖 1-4.19、圖 1-4.20。	感謝委員指正，已修正。
4.第 45 頁、47 頁及 132 頁內文多次提及 MW、ML，應為 M_W、M_L。	感謝委員指正，已修正。
5.第 84 頁第 2 段第 3 行「混擬土」應為「混凝土」。	感謝委員指正，已修正。
6.第 185 頁第 5 行「屯子角斷層」應為「屯子腳」。	感謝委員指正，已修正。
7.354 頁第 2 段第 10 行、第 4 段第 1 行、第 5 段第 3 行皆提及「圖 6-2.」應為「圖 6-2.1」。	感謝委員指正，已修正。
8.第 355 頁 6-2-1 節之表編號現從 6-2.5 起編，應修正為 6-2.1 起編。文章中提及表編號處，請一併確認修正。	感謝委員指正，已修正。
9.第 368 頁第 2 段第 5 行「安裝在全台臺地」應為「各地」。	感謝委員指正，已修正。
10. 第 379 頁第 5 段第 2 行「首先，」之後應不需換行。	感謝委員指正，已修正。
11. 第 111 頁第 3 段最後 1、2 行「一個完全鎖住且具有 90°傾角需要達到本研究先前假設的模型結構。」語法不通順，建議更正為「要達到本研究先前假設的模型結構，需要一個完全鎖住且具有 90°傾角的斷層。」	感謝委員指正，已修正。
12. 第三階段第二年度計畫已漸收斂並有成果展現，尤其是斷層活動機率分析的成果，其他在 GPS、PS-InSAR 也有更具體的目標，地下水、地化及應變分析已屬於較公式性的觀測。依地調所目前積極推動地質敏感區相關業務，可考慮增設一章節，歸納此計劃多年來可能收斂的斷層幾何、所觀測具潛移(creeping)現象之地區以及斷層活動潛勢分析之標示等，供地調所參考。	感謝委員建議，本計畫會在之後增加一章節，歸納與整理多年來可能收斂的斷層幾何、所觀測具潛移(creeping)現象之地區以及標示斷層活動潛勢分析之結果等，供地調所參考。
13. 有關邏輯樹及斷層相關參數的建立是依據專家諮詢會議結論而得，建議將專家諮詢會議之會議紀錄列入報告書附錄，並標示於報告書目錄頁。	請參閱[附錄 3-2] 邏輯樹專家諮詢會議。

期末審查意見	處理情形
14. 參與的主持人及研究員等相當多，有幾位研究員的工作角色並不明顯，建議於明年度重新檢討及調整。	感謝委員建議，遵照辦理。