中央地質調查所報告第 105-02 號
計畫編號：105-5226904000-01-01

經濟部中央地質調查所

105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（4/4）」（第四年度）

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

中央地質調查所報告第 105-02 號
計畫編號：105-5226904000-01-01

經濟部中央地質調查所

105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（4/4）」（第四年度）

全 程 計 畫：自102年4月至105年12月止
本年度計畫：自105年1月至105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 105 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（4/4）
（第四年度）

計畫主持人：胡植慶

協同主持人：劉啟清、景國恩、鄭錦桐

研　究　員：陳宏宇、郭明錦、饒瑞鈞、李元希、張午龍、
邵國士、林柏伸、顏銀桐、謝銘哲

副 研 究 員：李易叡

博士後研究員：黃鐘、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　105　年　12　月

目錄

目錄 I
表目錄 VII
圖目錄 IX
摘要 XXVII
Abstract XXIX
第一章、緒　論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2 研究目的 11
1-2-1 移動式 GPS 及精密水準測量 11
1-2-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS） 16
1-2-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR） 17
1-2-4 活動斷層發生潛勢圖建置 19
1-2-5 井下應變儀資料分析 21
1-2-6 地球化學及地下水觀測 22
1-2-7 整合觀測資料分析 22
1-3 本年度工作內容概述 23
第二章、大地測量資料分析 25
2-1 連續 GPS 站解算成果分析 25
2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略 25
2-1-2 GPS 資料品質檢測 25
2-1-3 GPS 連續站時間序列分析 27
2-2 2016 GPS 測量資料分析檢核 29
2-2-1 資料品質檢核 29
2-2-2 GPS 觀測資料分析方法 31
2-2-3 臺灣地區各分區 GPS 觀測成果分析 35
2-2-4 2016 年 2 月 6 日美濃地震 62
2-3 精密水準測量精度分析 70
2-3-1 垂直速度場之推求 70
2-3-2 台 2_石門至萬里測線 71
2-3-3 士林至三芝測線 74
2-3-4 淡水至士林測線 76
2-3-5 五股至台北測線 78
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 84
2-3-8 縣 117_新竹至峨眉測線 87
2-3-9 苗栗至南庄測線 90
2-3-10 縣 132_大安至東勢測線 93
2-3-11 縣 136_龍井至太平測線 96
2-3-12 跨車籠埔斷層之短測線 99
2-3-13 縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線 102
2-3-14 縣 150-台 16_北斗至水里測線 106
2-3-15 縣 164_金湖至瑞峰測線 109
2-3-16 縣 174_北門至楠西測線 112
2-3-17 台 19 甲_善化至關廟測線 115
2-3-18 縣 182_安平至龍崎測線 119
2-3-19 台 28_路竹至茂林測線 122
2-3-20 台 22_岡山至安坡測線 125
2-3-21 佳冬至七佳測線 128
2-3-22 恆春半島地區測線 131
2-3-23 台 20_新化至玉井測線 137
2-3-24 嶺頂至瀧澗測線 139
2-3-25 光復至豐濱測線 142
2-3-26 紅葉至靜浦測線 144
2-3-27 東成至富岡測線 146
2-3-28 梗枋-東澳測線 148
2-4 全台地表速度場分析 151
2-4-1 GPS 觀測成果分析 151
2-4-2 精密水準觀測成果分析 155
2-5 東部地區應變矩率及地震矩率之分析討論 159
2-5-1 東部地區 GPS 速度場 159
2-5-2 東部地區 GPS 應變率場 160
2-5-3 東部地區大地測量矩率分布圖 161
2-5-4 東部地區地震矩率 162
2-6 PS-InSAR 166
2-6-1 ERS1/2 (1995/6~1999/9) 167
2-6-2 ENVISAT (2006/3~2009/6) 171
2-6-3 ALOS (2007/1~2010/12) 174
2-7 斷層剖面分析 178
2-7-1 米崙斷層（E1）、嶺頂斷層（E2） 178

2-7-2 瑞穗斷層（E3）、奇美斷層（E3）.....181
2-7-3 玉里斷層（E4）、池上斷層（E4、E5）.....184
2-7-4 鹿野斷層（E6）、利吉斷層（E6）.....187
2-8 斷層面滑移速率及虧損率評估.....190
2-8-1 臺灣活動斷層幾何參數及塊體模型設定.....190
2-8-2 活動斷層長期滑移速率及虧損率.....193
2-8-3 斷層之測地矩率及未來發震規模.....201
2-8-4 小結.....203
第三章、活動斷層發生潛勢圖建置.....205
3-1 米崙斷層.....205
3-1-1 米崙斷層參數表之建立及說明.....205
3-1-2 米崙斷層破裂模式及邏輯樹權重分配.....216
3-1-3 米崙斷層特徵地震模式.....217
3-1-4 米崙斷層發震機率之推估.....218
3-2 嶺頂斷層.....219
3-2-1 嶺頂斷層參數表之建立及說明.....219
3-2-2 嶺頂斷層破裂模式及邏輯樹權重分配.....227
3-2-3 嶺頂斷層特徵地震模式.....228
3-2-4 嶺頂斷層發震機率之推估.....229
3-3 瑞穗斷層.....230
3-3-1 瑞穗斷層參數表之建立及說明.....230
3-3-2 瑞穗斷層破裂模式及邏輯樹權重分配.....240
3-3-3 瑞穗斷層系統特徵地震模式.....241
3-3-4 瑞穗斷層系統發震機率之推估.....243
3-4 奇美斷層.....244
3-4-1 奇美斷層參數表之建立及說明.....244
3-4-2 奇美斷層破裂模式及邏輯樹權重分配.....251
3-4-3 奇美斷層特徵地震模式.....252
3-4-4 奇美斷層發震機率之推估.....253
3-5 玉里-池上斷層系統.....254
3-5-1 玉里斷層參數表之建立及說明.....254
3-5-2 池上斷層參數表之建立及說明.....267
3-5-3 玉里-池上斷層系統破裂模式及邏輯樹權重分配.....282
3-5-4 玉里-池上斷層系統特徵地震模式.....285
3-5-5 玉里-池上斷層系統發震機率之推估.....292
3-6 鹿野-利吉斷層系統.....293

3-6-1 鹿野斷層參數表之建立及說明 293
3-6-2 利吉斷層參數表之建立及說明 304
3-6-3 鹿野-利吉斷層系統破裂模式及邏輯樹權重分配 311
3-6-4 鹿野-利吉斷層系統特徵地震模式 313
3-6-5 鹿野-利吉斷層系統發震機率之推估 316
3-7 小結 317
第四章、井下應變儀資料分析 325
4-1 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷 325
4-1-1 影響應變儀資料變化的因素 325
4-1-2 檢視井下應變儀資料中異常事件 337
4-1-3 井下應變儀應變異常判釋統計 349
4-2 井下應變儀數值絕對量的校正 350
4-3 地震對於應變儀軸差應變之計算 353
4-4 利用獨立成分分析法萃取應變儀中水壓訊號 356
第五章、地球化學觀測與研究 359
5-1 緒論 359
5-1-1 觀測站分布位置 360
5-1-2 觀測站相關地震選擇依據 361
5-1-3 利用時序分析方法處理觀測資料 363
5-2 土壤氣體觀測結果 364
5-3 地下水壓觀測結果 376
5-4 地下水水氡觀測結果 383
5-4-1 社頂站之地下水水氡觀測結果 383
5-4.2 美濃地震地下水水氡異常下降前兆 385
5-5 沄水溶解氣體觀測站 386
第六章、整合觀測資料分析 391
6-1 異常記錄與大地震活動之關係 393
6-2 GPS 應變與井下應變儀的共同解釋 396
6-3 連續觀測資料的共同解釋 398
6-4 台南、高雄地區長期 GPS 應變 401
第七章、結論與後續工作 411
參考文獻 415
委員審查意見 427

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1-1] 105 年期末_連續 GPS 觀測站基本資料

[附錄 1-2] 105 年期末_井下應變儀與地下水位監測井站基本資料

[附錄 1-3] 105 年期末_井下應變儀基本設計、測量原理、分析理論與資料校正

[附錄 1-4] 105 年期末_土壤氣體觀測站之選址依據與相關背景

[附錄 1-5] 105 年期末_土壤氣體觀測站之儀器使用

[附錄 1-6] 105 年期末_水氡監測站之區域地質背景

[附錄 1-7] 105 年期末_地下水水氡量測分析方法

[附錄 1-8] 105 年期末_地球化學觀測之研究方法

[附錄 2-1] 105 年期末_CGPS 時間序列

[附錄 2-2] 105 年期末_CGPS 速度表

[附錄 2-3] 105 年期末_GPS 移動站時間序列+美濃地震

[附錄 2-4] 105 年期末_GPS 移動站速度表+美濃地震

[附錄 2-5] 105 年期末_精密水準時間序列

[附錄 2-6] 105 年期末_精密水準速度表

[附錄 3-1] 105 年期末_活動斷層地震潛勢評估方法論

[附錄 3-2] 105 年期末_邏輯樹專家諮詢會議

[附錄 3-3] 105 年期末_地質調查評估手冊疑義列表_各類技師訪談意見彙整

[附錄 4-1] 105 年期末_井下應變儀資料分析結果

[附錄 5-1] 105 年期末_土壤氣體觀測站每月連續觀測資料

[附錄 5-2] 105 年期末_地下水壓逐月觀測資料

[附錄 5-3] 105 年期末_地下水水氡觀測結果

[附錄 7-1] 105 年期末_GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準及井下應變儀之變動值異常分析月報

[附錄 7-2] 20160206 高雄美濃地震分析報告

[附錄 7-3] 105 年期末_計畫參與人員運用計畫執行成果所發表之相關著作電子檔

[附錄 7-4] 105 年期末_成果報告內圖片「300dpi 以上清晰圖檔（電子檔）」

表目錄

表 A：本年度預期進度甘梯圖（GANTT CHART）。 XIX
表 B：預期進度查核點（CHECK POINT）。 XXI
表 C：期末須交付之各項工作項目。 XXIII
表 1-1.1：中央地質調查所建置的 GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。 7
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。 8
表 1-1.3：土壤氣體觀測站資料接收起始時間表。 8
表 1-1.4：地下水水氡觀測站資料接收起始時間表。 8
表 1-1.5：地下水位觀測站資料接收起始時間表。 8
表 1-1.6：全程計畫預期進度甘梯圖（GANTT CHART）。 10
表 2-1.1：測站殘差大於 3MM 一覽表。 28
表 2-3.1：台 20_新化至玉井測線點位資訊表。 137
表 2-8.1：圖 2-8.1 中所示 33 條斷層之幾何參數。 192
表 2-8.2：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。 196
表 2-8.3：斷層之地質滑移速率約束值及平均滑移速率。 197
表 2-8.4：斷層之滑移虧損與推估規模。 202
表 3-1.1：米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 210
表 3-1.2：米崙地區碳 14 定年及珊瑚礁高程。 210
表 3-1.3：米崙台地北邊臨海區域定年資料。 211
表 3-1.4：米崙斷層各調查方法及抬升速率推估。 212
表 3-1.5：米崙斷層參數表。 214
表 3-1.6：米崙斷層各破裂事件規模及權重。 216
表 3-1.7：米崙斷層淨滑移速率換算。 216
表 3-1.8：米崙斷層發生機率評估。 218
表 3-2.1：嶺頂斷層幾何形貌相關文獻。 224
表 3-2.2：嶺頂斷層參數表。 225
表 3-2.3：嶺頂斷層之中值各破裂事件規模及權重。 227
表 3-2.4：嶺頂斷層發生機率評估。 229
表 3-3.1：瑞穗斷層幾何形貌相關文獻。 233
表 3-3.2：秀姑巒溪階地採樣資料及下切速率計算結果。 236
表 3-3.3：瑞穗斷層長期滑移速率相關文獻彙整。 236
表 3-3.4：瑞穗斷層參數表。 238
表 3-3.5：瑞穗斷層之破裂事件規模及權重。 240
表 3-3.6：瑞穗斷層淨滑移速率換算。 241
表 3-3.7：瑞穗斷層發生機率評估。 243
表 3-4.1：奇美斷層幾何形貌相關文獻。 247
表 3-4.2：奇美斷層參數表。 249
表 3-4.3：奇美斷層之中值各破裂事件規模及權重。 251
表 3-4.4：奇美斷層發生機率評估。 253
表 3-5.1：玉里斷層幾何形貌相關文獻。 262
表 3-5.2：玉里斷層參數表。 265
表 3-5.3：池上斷層幾何相關文獻彙整。 272
表 3-5.4：池上斷層短期滑移速率相關文獻彙整。 275
表 3-5.5：池上地區階地年代及推估之斷層垂直滑移速率。 276
表 3-5.6：池上斷層長期滑移速率相關文獻彙整。 277
表 3-5.7：池上斷層參數表。 279
表 3-5.8：玉里-池上斷層系統各破裂事件規模及權重。 284
表 3-5.9：玉里斷層滑移速率評估。 284
表 3-5.10：玉里-池上斷層系統發生機率評估。 292
表 3-6.1：鹿野斷層幾何形貌相關文獻 298
表 3-6.2：鹿野斷層長期滑移速率相關文獻彙整 301
表 3-6.3：鹿野斷層參數表 302

表 3-6.4：利吉斷層幾何相關文獻彙整 307
表 3-6.5：利吉斷層參數表 309
表 3-6.6：鹿野-利吉斷層系統之破裂事件規模及權重。 312
表 3-6.7：鹿野-利吉斷層系統發生機率評估。 316
表 3-6.8：鹿野斷層發生機率評估。 316
表 3-6.9：利吉斷層系統發生機率評估。 316
表 3-7.1：活動斷層參數表。 318
表 4-1.1：井下應變儀氣壓影響評估方法之比較。 336
表 4-1.2：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。 336
表 4-1.3：2015 年 12 月至 2016 年 11 月，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄到之應變異常事件。 338
表 4-1.4：2015 年 12 月至 2016 年 11 月，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄無法判斷前兆之事件。 338
表 4-1.5：井下應變儀前兆判釋統計表。 349
表 4-2.1：理論地潮振幅與井下應變儀實測振幅比較。 351
表 4-2.2：原始面應變要調整至平均氣壓反應的比例。 351
表 4-3.1：井下應變儀觀測站的各頻道氣壓響應因子。 354
表 5-1.1：地球化學既有觀測站的座標。。 361
表 5-2.1：單一地震與多個土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。 365
表 5-2.2：甲仙地震與美濃地震土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。 366
表 5-2.3：各測站氣體異常反應之地震比率。 373
表 5-2.4：各測站規模＞5 的地震，其在反應圈內、外有前兆的成功比率。 373
表 5-2.5：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率。 374
表 5-2.5：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率（續）。 375
表 5-3.1：地震事件對測站水位影響列表。 377
表 6-1.1：2009 年 1 月至 2016 年 11 月規模大於五之地震事件列表。 393
表 6-4.1：TAID 網的年面應變率。 402
表 6-4.2：TAIE 網的年面應變率。 404
表 6-4.3：TW05 網的年面應變率。 406
表 6-4.4：TW06 網的年面應變率。 407

圖目錄

圖 1-1.1：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全臺分布圖。 2
圖 1-1.2：臺灣活動斷層分布圖與本計畫擬定之研究區域。 3
圖 1-1.3：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-臺北網分布圖。 4
圖 1-1.4：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-新竹網分布圖。 4
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。 5
圖 1-1.6：圖 1-1.3~圖 1-1.5 構造線圖例說明。 6
圖 1-1.7：斷層活動性觀測研究第三階段之架構。 9
圖 1-2.1：GPS 連續觀測站分布圖（中央地質調查所）。 11
圖 1-2.2：GPS 與精密水準測量監測點位分布圖。 12
圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場。 13
圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 14
圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖。 15
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。 16
圖 1-2.7：2003 年成功地震 CGPS 30 秒解。 17
圖 1-2.8：ERS-1/2、ENVISAT C 波段影像升軌、降軌之像幅編號與衛星軌道圖。 18
圖 1-2.9：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。 18
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。 19
圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌。 20
圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹。 20
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。 20
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。 21
圖 2-1.1：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖。 26
圖 2-1.2：整合歷史資料至 2016 年 10 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場。 27
圖 2-1.3：今年觀測資料扣除去年觀測資料，並修正同震位移及測站異常之年速度場。 28
圖 2-2.1：2002-2015 年及 2016 年 GPS 點位座標殘差分布圖。 30
圖 2-2.2：2002-2015 年及 2016 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 30
圖 2-2.3：未受地震影響之 GPS 點位時間序列。 32
圖 2-2.4：受地震影響且震後之地表位移速率並無發生改變之 GPS 點位時間序列。 32
圖 2-2.5：受地震影響且震後之地表位移速率亦發生改變之 GPS 點位時間序列。 32
圖 2-2.6：受地震影響並記錄到震後非線性地表位移之 GPS 點位時間序列。 32
圖 2-2.7：臺灣西南部 2002~2016 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。 33
圖 2-2.8：臺灣西南部 2012~2016 年垂直方向速度場。 34
圖 2-2.9：臺灣西南部 2012~2016 年 GPS 垂直方向速度場和水準垂直速度場。 34
圖 2-2.10：臺北地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 35
圖 2-2.11：臺北地區相對於澎湖白沙站 2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 36
圖 2-2.12：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 36
圖 2-2.13：2002-2016 年臺北地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 37
圖 2-2.14：恆春地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 38
圖 2-2.15：恆春地區相對於澎湖白沙站 2002~2006 年之 GPS 垂直方向速度場。 39
圖 2-2.16：恆春地區相對於澎湖白沙站 2006~2010 年之 GPS 垂直方向速度場。 39
圖 2-2.17：恆春地區相對於澎湖白沙站 2010~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 40
圖 2-2.18：2002~2016 年恆春地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站之座標時間序列圖。 40
圖 2-2.19：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 41
圖 2-2.20：2002~2016 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 41
圖 2-2.21：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 42
圖 2-2.22：桃竹地區相對於澎湖白沙站 2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 43
圖 2-2.23：桃竹地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 43
圖 2-2.24：2002~2016 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 44
圖 2-2.25：嘉南地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 45
圖 2-2.26：嘉南地區相對於澎湖白沙站 2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 46
圖 2-2.27：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 47

圖 2-2.28：2002~2016 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 48
圖 2-2.29：2002~2016 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 49
圖 2-2.30：高屏地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 50
圖 2-2.31：高屏地區相對於澎湖白沙站 2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 51
圖 2-2.32：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 51
圖 2-2.33：2002~2016 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 52
圖 2-2.34：中部地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 53
圖 2-2.35：中部地區相對於澎湖白沙站 2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 54
圖 2-2.36：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 54
圖 2-2.37：2002~2016 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 55
圖 2-2.38：東部地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 56
圖 2-2.39：東部地區相對於澎湖白沙站 2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 57
圖 2-2.40：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 58
圖 2-2.41：2004~2016 年花東地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 59
圖 2-2.42：宜蘭地區相對於澎湖白沙站之 GPS 水平方向速度場。 60
圖 2-2.43：宜蘭地區相對於澎湖白沙站之 GPS 垂直方向速度場。 60
圖 2-2.44：宜蘭地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 61
圖 2-2.45：2004~2016 年宜蘭地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站之位移-時間序列圖。 61
圖 2-2.46：美濃地震水平方向之同震位移分布情形。 62
圖 2-2.47：美濃地震高程方向之同震位移分布情形。 63
圖 2-2.48：高雄台南地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 63
圖 2-2.49：雲嘉南及高屏地區 GPS 連續及移動測站之位移-時間序列圖。 64
圖 2-2.50：雲嘉南及高屏地區 GPS 連續及移動測站之位移-時間序列圖。 65
圖 2-2.51：美濃地震同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場。 66
圖 2-2.52：美濃地震同震 GPS 垂直方向震後修正之垂直位移改正量。 67
圖 2-2.53：美濃地震同震 GPS 和水準垂直方向震後修正之垂直位移改正量。 67
圖 2-2.54：美濃地震去除震後效應之同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場。 68
圖 2-2.55：美濃地震去除震後效應之同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場。 68
圖 2-2.56：美濃地震去除震後效應之同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場。 69
圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。 70
圖 2-3.2：台北地區之水準垂直速度場。 71
圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。 71
圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較。 71
圖 2-3.5：石門至萬里測線之時間序列。 72
圖 2-3.6：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 73
圖 2-3.7：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較。 74
圖 2-3.8：士林至三芝測線之時間序列。 74
圖 2-3.9：士林至三芝測線水準高程變化圖。 75
圖 2-3.10：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。 76
圖 2-3.11：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之間序列比較。 76
圖 2-3.12：淡水至士林測線之時間序列。 76
圖 2-3.13：淡水至士林測線水準高程變化圖。 77
圖 2-3.14：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。 78
圖 2-3.15：五股至台北測線之時間序列。 79
圖 2-3.16：五股至台北測線水準高程變化圖。 80
圖 2-3.17：桃竹地區之水準垂直速度場。 81
圖 2-3.18：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較。 81
圖 2-3.19：新屋至童話世界測線之間序列 82
圖 2-3.20：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 83
圖 2-3.21：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較。 84
圖 2-3.22：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較。 84
圖 2-3.23：水準點位 T001 與連續站 GS02 之時間序列比較。 84
圖 2-3.24：新竹至五峰測線之時間序列。 85
圖 2-3.25：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。 86
圖 2-3.26：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較。 87
圖 2-3.27：新竹至峨眉測線之時間序列。 88

圖 2-3.28：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。 89
圖 2-3.29：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較。 90
圖 2-3.30：苗栗地區之水準垂直速度場。 90
圖 2-3.31：苗栗至南庄測線之時間序列。 91
圖 2-3.32：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。 92
圖 2-3.33：台中地區之水準垂直速度。 93
圖 2-3.34：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較。 93
圖 2-3.35：大安至東勢測線之時間序列。 94
圖 2-3.36：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 95
圖 2-3.37：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較。 96
圖 2-3.38：水準點位 G929 與連續站 GS40 之時間序列比較。 96
圖 2-3.39：龍井至太平測線之時間序列。 97
圖 2-3.40：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 98
圖 2-3.41：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較。 99
圖 2-3.42：五光至竹測線之時間序列。 100
圖 2-3.43：五光至黃竹水準高程變化圖。 101
圖 2-3.44：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震前）。 102
圖 2-3.45：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震後至今）。 103
圖 2-3.46：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較。 103
圖 2-3.47：王功至草屯測線及草屯至埔里測線之時間序列。 104
圖 2-3.48：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。 105
圖 2-3.49：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較。 106
圖 2-3.50：北斗至水里測線之時間序列。 107
圖 2-3.51：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。 108
圖 2-3.52：嘉義地區之水準垂直速度場。 109
圖 2-3.53：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。 109
圖 2-3.54：水準點位 G742 與連續站 S103 之間序列比較。 109
圖 2-3.55：金湖至瑞峰測線之時間序列。 110
圖 2-3.56：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。 111
圖 2-3.57：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震前）。 112
圖 2-3.58：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震後至今）。 112
圖 2-3.59：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較。 113
圖 2-3.60：北門至楠西測線之時間序列。 113
圖 2-3.61：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。 114
圖 2-3.62：南部地區之水準垂直速度場（2010 甲仙地震前）。 115
圖 2-3.63：南部地區之水準垂直速度場（2010 甲仙地震後至今）。 116
圖 2-3.64：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較。 116
圖 2-3.65：善化至關廟測線之時間序列。 117
圖 2-3.66：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 118
圖 2-3.67：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較。 119
圖 2-3.68：安平至龍崎測線之時間序列。 120
圖 2-3.69：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。 121
圖 2-3.70：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較。 122
圖 2-3.71：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較。 122
圖 2-3.72：路竹至茂林測線之時間序列。 123
圖 2-3.73：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。 124
圖 2-3.74：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較。 125
圖 2-3.75：岡山至安坡測線之時間序列。 126
圖 2-3.76：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。 127
圖 2-3.77：佳冬-七佳之水準垂直速度場。 128
圖 2-3.78：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。 128
圖 2-3.79：佳冬至七佳測線之時間序列。 129
圖 2-3.80：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。 130
圖 2-3.81：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年恆春地震前）。 131
圖 2-3.82：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年恆春地震後至 2010 年速度發生變化）。 132
圖 2-3.83：恆春半島之水準垂直速度場（2010 年速度發生變化後至今）。 132

圖 2-3.84：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較。 133
圖 2-3.85：恆春西台地至佳樂水測線之時間序列。 133
圖 2-3.86：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較。 134
圖 2-3.87：南樹林至鵝鑾鼻測線之時間序列。 134
圖 2-3.88：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。 135
圖 2-3.89：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。 136
圖 2-3.90：台 20_新化至玉井測線路線圖。 137
圖 2-3.91：花東地區之垂直速度場。 139
圖 2-3.92：水準點位 G971 與連續站 YENL 之時間序列比較。 140
圖 2-3.93：嶺頂至瀧澗之時間序。 140
圖 2-3.94：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。 141
圖 2-3.95：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較。 142
圖 2-3.96：光復至豐濱測線之時間序列。 142
圖 2-3.97：光復至豐濱水準高程變化圖。 143
圖 2-3.98：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較。 144
圖 2-3.99：紅葉至靜浦測線之時間序列。 144
圖 2-3.100：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 145
圖 2-3.101：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較。 146
圖 2-3.102：東成至富岡測線之時間序列。 146
圖 2-3.103：東成至富岡測線水準高程變化圖。 147
圖 2-3.104：宜蘭地區之水準垂直速度場。 148
圖 2-3.105：水準點位 GG83 與連續站 SUAO 之時間序列比較。 149
圖 2-3.106：梗枋至東澳測線之時間序列。 149
圖 2-3.107：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。 150
圖 2-3.108：水準點位 9053 現地狀況。 150
圖 2-4.1：2002 至 2016 年臺灣地區 GPS 移動測站及連續站相對於澎湖白沙站之速度場分布圖。 152
圖 2-4.2：台灣地質圖及 2002 至 2016 年臺灣地區 GPS 移動站及連續站相對於澎湖白沙站之水平速度場分布圖。。 153
圖 2-4.3：2003 至 2016 年臺灣地區 GPS 移動站及連續站相對於澎湖白沙站主要地震事件分段時間段速度場分布情形。 154
圖 2-5.1：東部地區相對於澎湖白沙之 GPS 水平方向速度場。 159
圖 2-5.2：東部地區應變率場分布圖。 160
圖 2-5.3：最小大地測量矩率分布圖。 161
圖 2-5.4：2002~2016 年之地震資料品質展示。 162
圖 2-5.5： 2003 年 12 月 10 日成功地震。 163
圖 2-5.6：地震矩率分布圖。 164
圖 2-5.7：臺灣東部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。 165
圖 2-5.8：臺灣東部地區矩率綜合分析圖。 165
圖 2-6.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。 166
圖 2-6.2：ERS-1/2 衛星選取區域涵蓋圖。 167
圖 2-6.3：ERS-1/2 影像時間與垂直基線相對關係。 167
圖 2-6.4：利用 ERS-1/2 差分干涉圖之結果。 168
圖 2-6.5：ERS-1/2 影像時間與垂直基線相對關係。 168
圖 2-6.6：利用 ERS-1/2 差分干涉圖之結果。 169
圖 2-6.7：ERS-1/2 視衛星方向上年平均變動量。 170
圖 2-6.8：ENVIAST 衛星選取區域涵蓋圖。 171
圖 2-6.9：ENVISAT 影像時間與垂直基線相對關係。 171
圖 2-6.10：ENVISAT 差分干涉圖之結果。 172
圖 2-6.11：ENVISAT 視衛星方向上年平均變動量。 173
圖 2-6.12：ALOS 衛星選取區域涵蓋圖。 174
圖 2-6.13：ALOS 影像時間與垂直基線相對關係。 174
圖 2-6.14：ALOS 差分干涉之結果。 175
圖 2-6.15：ALOS 影像時間與垂直基線相對關係。 175
圖 2-6.16：ALOS 差分干涉之結果。 176
圖 2-6.17：ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 177
圖 2-7.1：E1 及 E2 之水平速度場、垂直速度場及剖面位置圖。 178

圖 2-7.2：E1 及 E2 剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 179
圖 2-7.3：E1 及 E2 剖面速度場圖。 180
圖 2-7.4：E3 之水平速度場、垂直速度場及剖面位置圖。 181
圖 2-7.5：E3 剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 182
圖 2-7.6：E3 剖面速度場圖。 183
圖 2-7.7：E4 及 E5 之水平速度場、垂直速度場及剖面位置圖。 184
圖 2-7.8：E4 及 E5 剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 185
圖 2-7.9：E4 及 E5 剖面速度場圖。 186
圖 2-7.10：E6 之水平速度場、垂直速度場及剖面位置圖。 187
圖 2-7.11：E6 剖面區域之 ERS、ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。 188
圖 2-7.12：E6 剖面速度場圖。 189
圖 2-8.1：(A)本研究所使用的臺灣三維塊體模型及活動斷層分布。(B)利用 2005-2015 年 GPS 連續站及 GPS 移動站資料所觀測的水平地表速度場。 191
圖 2-8.2：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 EULER POLE 所在的位置及誤差範圍。 194
圖 2-8.3：（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。 195
圖 2-8.4：（A）推求的斷層長期滑移速率。（B）各斷層面的鎖定係數（COUPLING COEFFICIENT）分布。（C）各斷層面的滑移虧損率。（D）由（A）圖減去（C）圖，得到斷層面上的間震期滑移速率。 198
圖 2-8.5：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。 199
圖 2-8.6：各塊體內之內部形變應變大小。 200
圖 3-1.1：米崙斷層條帶地質圖。 205
圖 3-1.2：A.花蓮地區數值模型地形圖。B.利用坡度與高程差分析所得米崙台地上階地分佈圖。 206
圖 3-1.3：花蓮區活動構造分布圖。 206
圖 3-1.4：米崙斷層外海延伸推估。 207
圖 3-1.5：花蓮地區震測剖面及地質剖面圖。 208
圖 3-1.6：（A）臺灣東部地區 1991-2002 之地震（B）N110°E 方向之地震深度分布投影剖面。 208
圖 3-1.7：（A）地震震源剖面分析之剖面位置以及投影寬度圖。（B）剖面 A 地震的震源分布。 209
圖 3-1.8：美崙台地區域之東西向的震源剖面分析。 209
圖 3-1.9：（A）米崙台地地貌分布圖。（B）米崙台地東北角地形剖面圖。 211
圖 3-1.10：（A） 美崙台地區域地形描繪及北邊臨海區域定年樣本的位置分布圖。（B）美崙台地北部之地質剖面圖。 211
圖 3-1.11：1951 年花蓮地區地震破壞圖。 212
圖 3-1.12：1951 年花蓮地震震央分布及震源機制解。 213
圖 3-1.13：米崙斷層邏輯樹。 217
圖 3-1.14：米崙斷層特徵地震模式。 217
圖 3-1.15：米崙斷層之規模-權重分布圖。 218
圖 3-1.16：米崙斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖。 218
圖 3-2.1：縱谷斷層分段。 219
圖 3-2.2：嶺頂斷層條帶地質圖。 220
圖 3-2.3：花蓮地區 1983-1988 三邊測量網及反演模型參數表。 221
圖 3-2.4：景國恩等人建立之東部地區塊體模型。 222
圖 3-2.5：嶺頂斷層地電阻影像剖面圖。 222
圖 3-2.6：嶺頂斷層地質剖面圖。 222
圖 3-2.7：（A）臺灣東部地區 1991-2002 之地震（B）N110°E 方向之地震深度分布投影剖面。 223
圖 3-2.8：利用重定位地震及震源機制解推斷縱谷斷層北段三維模型。 223
圖 3-2.9：中央氣象局 1991-2010 地震矩規模 3 以上地震深度分布圖。 223
圖 3-2.10：（A）臺灣地體架構及地震站分布（B）跨越縱谷斷層北段 C03 速度構造剖面。 224
圖 3-2.11：嶺頂斷層邏輯樹。 227
圖 3-2.12：嶺頂斷層之特徵地震模式。 228
圖 3-2.13：嶺頂斷層之規模-權重分布圖。 228
圖 3-2.14：嶺頂斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖。 229
圖 3-3.1：瑞穗斷層條帶地質圖。 230
圖 3-3.2：1951 年玉里池上地震地表破裂及主要地質構造圖。 231
圖 3-3.3：1951 年地震瑞穗地區地表破裂分布圖。 231
圖 3-3.4：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面。 232

圖 3-3.5：瑞穗斷層地質剖面圖。 232
圖 3-3.6：中央氣象局 1900-2010 地震矩規模 3 以上地震深度分布圖。 232
圖 3-3.7：（A）臺灣地體架構及地震站分布（B）跨越縱谷斷層北段 C02 速度構造剖面。 233
圖 3-3.8：瑞穗斷層地面分布圖。 233
圖 3-3.9：瑞穗斷層大富 2 號槽溝北牆。 234
圖 3-3.10：瑞穗斷層復興 1 號槽溝北牆。 234
圖 3-3.11：瑞穗斷層安定橋 2 號槽溝北牆。 235
圖 3-3.12：瑞穗斷層安定橋 1 號槽溝北牆。 235
圖 3-3.13：（A）德武及猴子山河階地之圈繪（B）秀姑巒溪所有河階之定年資料及高程投影在 N80W 的平面。 235
圖 3-3.14：上圖為 1972 年 4 月 24 日花蓮瑞穗地震及餘震震央分布圖，下圖為震源深度剖面圖。 237
圖 3-3.15：瑞穗斷層三個槽溝之古地震。 237
圖 3-3.16：參考速度構造剖面及地震分布推估瑞穗斷層幾何面。 240
圖 3-3.17：瑞穗斷層邏輯樹。 241
圖 3-3.18：瑞穗斷層特徵地震模式。 242
圖 3-3.19：瑞穗斷層破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖。 242
圖 3-3.20：瑞穗斷層破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖。 242
圖 3-4.1：奇美斷層分布圖。 244
圖 3-4.2：泰林地區地電阻影像剖面結果圖。 245
圖 3-4.3：海岸山脈中段橫跨瑞穗斷層與奇美斷層地質剖面圖。 246
圖 3-4.4：奇美斷層剖面圖。 246
圖 3-4.5：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面。 246
圖 3-4.6：奇美斷層與全新世沖積層分布圖。 247
圖 3-4.7：奇美斷層露頭剖面。 248
圖 3-4.8：參考速度構造剖面及地震分布推估奇美斷層幾何面。 251
圖 3-4.9：奇美斷層邏輯樹。 252
圖 3-4.10：奇美斷層之特徵地震模式。 252
圖 3-4.11：奇美斷層之規模-權重分布圖。 253
圖 3-4.12：奇美斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖。 253
圖 3-5.1：1951 年花蓮-台東系列地震主震之時空分布。 255
圖 3-5.2：1951 年玉里池上地震地表破裂及主要地質構造圖。 255
圖 3-5.3：1951 年花東縱谷地震玉里地區地表破裂分布圖。 256
圖 3-5.4：玉里斷層條帶地質圖，座標系統 TWD67。 256
圖 3-5.5：左圖為瑞穗到玉里地區 LOS PS 速度場分布圖。 257
圖 3-5.6：左圖為玉里到富里地區南邊 LOS PS 速度場分布圖。 257
圖 3-5.7：玉里斷層之破裂模式及權重分配。 258
圖 3-5.8：玉里斷層反射震測探勘結果剖面圖。 259
圖 3-5.9：玉里斷層地電阻測勘結果剖面圖。 260
圖 3-5.10：玉里斷層淺層震測剖面圖構造解釋圖。 260
圖 3-5.11：位於舞鶴台地之東西向構造剖面。 261
圖 3-5.12：地震層析法（TOMOGRAPHIC SECTION）速度剖面。 261
圖 3-5.13：左圖：長良測站（S039）在玉里地區對其他測站 1995-1999 的水平方向相對速度圖。 262
圖 3-5.14：靜浦至紅葉測線水準垂直速度圖。 263
圖 3-5.15：2001-2011 年花蓮地區相對於澎湖白沙（S01R）GPS 速度場，藍色箭頭為速度量值。 263
圖 3-5.16：玉里國小地表破裂位移照片。 264
圖 3-5.17：池上斷層條帶地質圖。 268
圖 3-5.18：（A）2003 年成功地震餘震分布及斷層面解（B）A-B 剖面餘震深度分布。 268
圖 3-5.19：池上、玉里斷層系統分段、破裂模式及權重分配。 269
圖 3-5.20：富里富池橋東方鱉溪露頭照片。 270
圖 3-5.21：（A）池上斷層及附近之地震分布。 270
圖 3-5.22：（A）池上斷層於錦園地區之平面分布圖（B）結合地表破裂及鑽井資料描繪之錦園地區池上斷層地下幾何形貌二維地質剖面圖。 271
圖 3-5.23：（A）臺灣地體架構及地震站分布（B）跨越縱谷斷層南段 S02 速度構造剖面。 271
圖 3-5.24：（A）池上斷層地形圖及斷層變形量測點位分布圖（B）跨池上斷層 1986-1997 變形量量測。 . 273
圖 3-5.25：（A）池上斷層位置分布圖。（B）將 GPS 位移速度場投影到 PROFILE A 方向之速度變化。 . 273
圖 3-5.26：1998-2009 錦園地區潛變儀記錄，C3、C4 及 C5 位置。 274

圖 3-5.27：利用 PALASR 得到之縱谷地區視衛星方向速度分布圖。 274
圖 3-5.28：利用 PALASR 得到之縱谷地區視衛星方向速度分布圖。 275
圖 3-5.29：左圖為池上斷層上盤階地群圈繪及分布圖，右圖為富里-富南階地群及剖面圖。 276
圖 3-5.30：池上鄉錦園村的萬安一號槽溝北牆。 277
圖 3-5.31：錦園三號槽溝，2003 年成功地震造成地表垂直錯移量約 10 公分。 277
圖 3-5.32：玉里-池上斷層系統分段、破裂模式及權重分配。 283
圖 3-5.33：本計畫玉里-池上斷層系統幾何形貌剖面圖。 283
圖 3-5.34：玉里-池上斷層系統邏輯樹。 285
圖 3-5.35：美國 UCERF3 潛移速率/滑移速率比例與震矩折減之關係。 286
圖 3-5.36：A 事件特徵地震模式。 286
圖 3-5.37：B 事件特徵地震模式。 286
圖 3-5.38：C 事件特徵地震模式。 287
圖 3-5.39：D 事件特徵地震模式。 287
圖 3-5.40：E 事件特徵地震模式。 287
圖 3-5.41：F 事件特徵地震模式。 288
圖 3-5.42：G 事件特徵地震模式。 288
圖 3-5.43：玉里-池上斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖。 289
圖 3-5.44：玉里-池上斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖。 291
圖 3-5.45：玉里-池上斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖。 291
圖 3-5.46：玉里-池上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。 291
圖 3-6.1：鹿野斷層條帶地質圖。 293
圖 3-6.2：縱谷南部構造剖面示意圖。 294
圖 3-6.3：都巒山火山岩層 TL 向西北擠壓造成南北構造逃脫。 294
圖 3-6.4：鹿野斷層沿卑南山南側向東延伸，銜接利吉斷層，西側則發育中央山脈斷層。 294
圖 3-6.5：（A）鹿野斷層條帶地質圖（B）永安淺層震測剖面（C）龍田淺層震測西側剖面。 296
圖 3-6.6：06P-LYH-BL01、06P-LYH-BL02 震測剖面與鹿野地區縱谷大尺度影像套疊。 296
圖 3-6.7：（A）鹿野 07P-LYHF-LT-1 測線位置圖，（B）淺層震測剖面圖。 297
圖 3-6.8：（A）2006 臺東地震系列重新定位及震源機制解，（B）臺東地震剖面圖，圖中左側粗紅線為中央山脈斷層，上部紅虛線為鹿野斷層位置，右側淡藍色多邊形為利吉斷層位置。 297
圖 3-6.9：（A）2006 年 4/1-4/30，CWBSN 在臺東地區所記錄到的地震事件，（B）2006 年 4 月臺東地區地震序列剖面圖，利用 HYPODD 重新定位。 297
圖 3-6.10：利用同震地表位移估計鹿野斷層近地表傾角。 298
圖 3-6.11：（A）溝槽與鑽井位置分布圖（B）永安槽溝北牆剖面（C）永安槽溝南牆剖面。 299
圖 3-6.12：溝槽古地震恢復圖。 300
圖 3-6.13：高臺至馬背 1 號井，東西向地質剖面圖示意圖。 300
圖 3-6.14：（A）鹿野高臺階地劃分圖，（B）龍田階地剖面圖。 300
圖 3-6.15：利吉斷層條帶地質圖。 304
圖 3-6.16：鹿野北部到縱谷最南端之 PS 速度場分布圖。 305
圖 3-6.17：利吉斷層與全新世斷層活動位置。 305
圖 3-6.18：（A）臺灣地體架構及地震站分布（B）跨越縱谷斷層南段 S02 速度構造剖面（C）跨越縱谷斷層南段 S01 速度構造剖面。 306
圖 3-6.19：利吉斷層構造模型。 306
圖 3-6.20：鹿野高臺階地地區地貌特徵及活動構造分布圖。 307
圖 3-6.21：鹿野斷層破裂模式及權重分配。 311
圖 3-6.22：利吉斷層破裂模式及權重分配。 312
圖 3-6.23：參考速度構造剖面及地震分布推估鹿野斷層及利吉斷層幾何面。 312
圖 3-6.24：鹿野-利吉斷層系統邏輯樹。 313
圖 3-6.25：鹿野 A 事件之特徵地震模式。 314
圖 3-6.26：鹿野 B 事件之特徵地震模式。 314
圖 3-6.27：利吉 A 事件之特徵地震模式。 314
圖 3-6.28：利吉 B 事件之特徵地震模式。 314
圖 3-6.29：鹿野-利吉斷層系統之規模-權重分布圖。 315
圖 3-6.30：鹿野-利吉斷層系統之地震復發間隔時間-權重分布圖。 315
圖 3-6.31：（A）鹿野-利吉斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（B）鹿野-利吉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。 315
圖 3-7.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。 321

圖 3-7.2：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。 322
圖 3-7.3：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。 323
圖 4-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。 326
圖 4-1.2：井下應變儀中地潮分量的評估。 326
圖 4-1.3：嘉義地區地下水變化。 327
圖 4-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花測站（PFMT）地下水位持續下降。 327
圖 4-1.5：臺北地區地下水各測站水位資料。 328
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。 328
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。 329
圖 4-1.8：嘉義網中興測站（TSUN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 330
圖 4-1.9：嘉義網太興測站（TAIS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 330
圖 4-1.10：臺北網錦和測站（JING）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 331
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。 331
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。 332
圖 4-1.13：達邦測站（DARB）CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較）。 333
圖 4-1.14：達邦測站（DARB）觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較。 334
圖 4-1.15：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。 334
圖 4-1.16：大坪測站（BMMT）CH0 氣壓影響計算值比較。 335
圖 4-1.17：觀測應變去除氣壓響應後的結果。 335
圖 4-1.18：2015 年 12 月至 2016 年 11 月規模大於 5 的地震事件之位置及震源機制圖。 339
圖 4-1.19：臺北網錦和測站（JING）於 2016 年 2 月 2 日臺灣東北外海地震前的應變資料。 340
圖 4-1.20：臺北網錦和測站（JING）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。 341
圖 4-1.21：新竹網梅花測站（PFMT）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。 341
圖 4-1.22：2016/02/06 美濃地震前 3 個月井下應變儀資料。 342
圖 4-1.23：新竹網梅花測站（BMMT）於 2016 年 5 月 12 日宜蘭縣東方地震前的應變資料。 343
圖 4-1.24：台北網錦和測站（JING）於 2016 年 5 月 12 日宜蘭縣東方地震前的應變資料。 344
圖 4-1.25：2016 年 1 月至 3 月嘉義網達邦測站（DARB）之應變資料。 345
圖 4-1.26：2016 年 4 月 27 日花蓮縣近海地震前後臺北網錦和測站（JING）之應變資料。 346
圖 4-1.27：2016 年 3 月至 5 月嘉義網達邦測站（DARB）之應變資料。 347
圖 4-1.28：2016 年 5 月至 10 月嘉義網達邦測站（DARB）之應變資料。 348
圖 4-2.1：新竹網梅花測站（PFMT）面應變長期 M2 地潮分潮。 350
圖 4-2.2：嘉義網井下應變儀應變與 GPS 應變。 352
圖 4-2.3：新竹網井下應變儀應變與 GPS 應變。 352
圖 4-3.1：在均質等向的理想環境下，應變儀受力後的水平張量變化情形。 353
圖 4-3.2：2014 年 2 月 12 日於臺北市士林區發生規模 4.2 的有感地震。 355
圖 4-3.3：錦和測站（JING）利用軸向差應變的計算，可比面應變更易解讀出地震前之前兆異常現象。 355
圖 4-4.1：達邦測站（DARB）2012~2014 年之應變資料（藍）與共站地下水資料（紅）。 357
圖 4-4.2：應變儀當中地下水相關之獨立成分與觀測地下水連續資料。 357
圖 4-4.3：應變儀當中降雨相關之獨立成分與觀測降雨資料。 358
圖 5-1.1：觀測站分布位置。 360
圖 5-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。 362
圖 5-2.1：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。 364
圖 5-2.2：2016/1/11 花蓮近海地震與各測站觀測情形。 367
圖 5-2.3：2016/01/19 臺東外海地震與各測站觀測情形。 368
圖 5-2.4：2016/02/06 高雄美濃地震與各測站觀測情形。 369
圖 5-2.5：2010/03/04 高雄甲仙地震與各測站觀測情形。 370
圖 5-2.6：2016/02/18 臺東海端地震與各測站觀測情形。 371
圖 5-2.7：新竹大平地站之土壤氣體觀測結果與宜蘭外海地震之關聯。 372
圖 5-3.1：嘉義太興站 2 月水位異常圖示。 378
圖 5-3.2：台北站群今年同震現象示意圖。 379
圖 5-3.3：新竹站群今年同震現象示意圖。 380
圖 5-3.4：嘉義站群同震現象示意圖。 381
圖 5-3.5：2010 甲仙地震與 2016 美濃地震太興站水位比較圖。 382
圖 5-4.1：社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。 383
圖 5-4.2：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較圖。 383
圖 5-4.3：地下水水氡濃度與地下水位比較圖。 384

圖 5-4.4：本年度社頂站地下水水氡觀測結果圖。 384
圖 5-4.5：2016/02/06 M_L 6.6 美濃地震發生前後之地下水水氡濃度變化。 385
圖 5-5.1：嘉義沄水測站內管線配置簡圖。 386
圖 5-5.2：沄水測站主要溶解氣體濃度變化，2016 年 2 月 1 日至 2016 年 11 月 30 日。 387
圖 5-5.3：沄水站主要溶解氣體各氣體濃度變化，2016 年 2 月 1 日至 2016 年 9 月 30 日。 388
圖 5-5.4：5/22 六龜地震，沄水站溶解氣體出現同震現象。 389
圖 5-5.5：9/16 地震，沄水站溶解氣體中 CH_4、H_2O 及 CO_2 於震前驟升。 390
圖 6-1.1：2015 年 12 月至 2016 年 11 月規模大於五的地震事件之位置及震源機制圖。 394
圖 6-1.2：2009 年 1 月至 2016 年 11 月規模大於五的地震事件之異常記錄對應比較圖。 395
圖 6-2.1：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。 396
圖 6-2.2：GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013/07~2016/08 的觀測換算成應變量的變化。 397
圖 6-2.3：ALIS-W029-WANS 所形成的 GPS 三角網在 2013/07~2016/08 的觀測換算成應變量的變化。 397
圖 6-3.1：嘉義地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀太興測站（TAIS）資料的變化。 399
圖 6-3.2：嘉義地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀達邦測站（DARB）資料的變化。 399
圖 6-4.1：GPS 測站的名稱及位置、斷層、地震震央。 401
圖 6-4.2：TAID 網的應變資料，部分網有同震應變。 402
圖 6-4.3：TAID 網的應變資料，在修正同震應變後。 403
圖 6-4.4：TAID 網較低年面應變率（'X'族群）三角網的面應變資料分布。 403
圖 6-4.5：TAIE 網的應變資料，其中部分有同震應變。 404
圖 6-4.6：TAIE 網的應變資料，在修正同震應變後。 405
圖 6-4.7：TAID 與 TAIE 兩個分析區域在 2007~2012 年間的應變率圖。 405
圖 6-4.8：較高年面應變率（'O'族群）及較低年面應變率（'X'族群）三角網的面應變資料分布。 406
圖 6-4.9：中度面應變率（'V'族群）三角網的面應變資料分布。 407
圖 6-4.10：TW06 網較高年面應變率（'O'族群）三角網的面應變資料分布。 408
圖 6-4.11：TW06 網中度（'V'族群）及較低（'X'族群）年面應變率三角網的的面應變資料分布。 409
圖 6-4.12：TW05 與 TW06 兩個分析區域在 2013~2016 年間的應變率圖。 409

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（4/4）													
月 次 工 作 項 目　月 份	第 1 月 (1)	第 2 月 (2)	第 3 月 (3)	第 4 月 (4)	第 5 月 (5)	第 6 月 (6)	第 7 月 (7)	第 8 月 (8)	第 9 月 (9)	第 10 月 (10)	第 11 月 (11)	第 12 月 (12)	備註
第一季查核點													
第二季查核點													
期中報告													
第三季查核點													
期末報告													
第四季查核點													
GPS 移動站資料檢核及分析 (由成大工作團隊負責)													
GPS 及水準測量規劃、督導 (由成大工作團隊負責)													
地殼矩率及大地測量矩率分析 (由成大工作團隊負責)													
GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算(由臺大工作團隊負責)													
PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 (由臺大工作團隊負責)													
活動潛勢評估方法論研究 (由中興工程顧問社負責)													
米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層活動特性參數表 (由中興工程顧問社負責)													
建立米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)													
米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)													
玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層活動特性參數表 (由中興工程顧問社負責)													
建立玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)													
玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)													
全臺灣活動斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)													
地質法之活動斷層敏感區執行面問題相關問題與解決對策說明表彙整 (由中興工程顧問社負責)													
地質法之活動斷層敏感區執行面問題專家座談會議 (由中興工程顧問社負責)													
月 次	第	第	第	第	第	第	第	第	第	第	第	第	備

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

表 B：預期進度查核點（Check Point）。

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第一季查核點） 1. 修正後之契約書與工作計畫書 2. 第一期款請款收據 3. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 12-1 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 11-1 月 c. 彙整東部地區 SAR 影像對 d. 米崙、嶺頂斷層活動特性參數表 e. 井下應變儀資料校正 12-2 月 f. 既有氣體觀測站 12-2 月資料分析 g. 既有水位觀測站 12-2 月資料分析 h. 既有水氡觀測站 12-2 月資料分析	三月三十一日	第一季工作進度報告 第一期款請款
2	（第二季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 2-4 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 2-4 月 c. 製作東部地區干涉影像 d. 瑞穗、奇美斷層活動特性參數表 e. 米崙、嶺頂、瑞穗、奇美斷層三維幾何形貌 f. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 g. 井下應變儀資料校正 3-5 月 h. 既有氣體觀測站 3-5 月資料分析 i. 既有水位觀測站 3-5 月資料分析 j. 既有水氡觀測站 3-5 月資料分析	六月三十日	第二季工作進度報告
3	（期中報告） 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 期中報告簡報資料 4. 會計報表 5. 第二期款請款收據	七月三十一日	期中報告書面與簡報資料 會議記錄與委員意見辦理狀況 第二期款請款
4	（第三季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 5-7 月 b. GPS 連續站計算及時序分析至 5-7 月 c. 處理 PSInSAR 平均視衛星方向位移之數值資料 d. 玉里、池上、鹿野、利吉斷層活動特性參數表 e. 玉里、池上、鹿野、利吉斷層三維幾何形貌 f. 井下應變儀資料校正及計算分析 6-8 月 g. 既有氣體觀測站 6-8 月資料分析 h. 既有水位觀測站 6-8 月資料分析 i. 既有水氡觀測站 6-8 月資料分析	九月三十日	第三季工作進度報告

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
5	（期末報告） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料 8-9 月查核及分析 b. 地殼矩率及大地測量矩率分析 c. GPS 連續站計算及時序分析 8-9 月 d. PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 e. 東部地區 8 條活動斷層斷層活動潛勢評估 f. 東部地區 8 條活動斷層之斷層面的震間滑移速率 g. 各活動斷層的滑移虧損率 h. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 i. 井下應變儀資料校正及計算分析 9-10 月 j. 既有氣體觀測站 9-10 月資料分析 k. 既有水位觀測站 9-10 月資料分析 l. 既有水氡觀測站 9-10 月資料分析 m. 綜合分析觀測資料 2. 期末報告書面資料初稿	十一月三十日	期末報告書面初稿與簡報資料 會議記錄與委員意見辦理狀況
6	（第四季查核點，驗收） 1. 正式研究成果報告書 30 份 2. 正式研究成果報告書電子檔 10 份 3. 第三階段總結報告書 10 份 4. 會計報表 5. 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 第三階段總結報告書 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 42 測段。以上數據將以 2016 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、水準測量成果閉合差檢核及歧異點檢測。	2-2 2-3
	2. 藉由 GPS 移動站（依據透空度及距斷層遠近規劃測量點位）與核心連續站（以解算移動站座標框架時所需約制者為限）及精密水準測量資料，計算地表位移向量，以推求地表水平與垂直方向的速度場，並提供區域之應變速率分析。	2-4 2-5
	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，並與前一年速度場比較。	2-1
	2. 完成地調所全台連續 GPS 測量資料之時序分析，提供週期性變化結果（以超過一年以上之資料做分析）。GPS 連續站資料分析包含各測站的雜訊特性、週期性效應與自然界影響因子分析。	2-1
	3. 交付東部地區雷達影像之原始格式（RAW），單觀點複數影像（SLC: Single Look Complex）和 PS-InSAR 技術所得之平均視衛星方向位移之數值資料，套疊在 5 米或 LiDAR 數值地形資料。	2-6
	4. 將 PSInSAR 資料與 GPS、水準資料和構造剖面比較，確定 PSInSAR 資料的可信度，並應用在其他大地測量密度較低之地區，獲得該區域完整的地表變形資訊，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。	2-7 2-8
活動斷層發生潛勢圖建置	1. 召開第 3 次活動斷層參數表及邏輯樹專家討論會議，針對斷層分段特性、三維幾何形貌、最近一次活動時間、長期滑移速率、可能引致地震規模等參數不確定性，進行邏輯樹架構與參數權重之合理性探討。	附錄 3-2
	2. 蒐集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	3-1-1 3-2-1 3-3-1 3-4-1 3-5-1 3-5-2

	地震規模。	3-6-1 3-6-2
	3. 蒐集包含槽溝、地形或是地球化學定年之相關研究成果，推估活動斷層之長期滑移速率。	2-7
	4. 利用 GPS 連續觀測站以及其他測地學的觀測資料所記錄的地表運動場（速度及應變率）來推測斷層面的震間滑移速率。並將測地學所得之變形反演斷層面震間滑移分布及滑移虧損（slip deficit），分析短期及長期滑移速率及其在活動斷層潛勢分析上的意義，進一步推算斷層的能量累積率與發生特徵地震規模間的關係。	2-7
	5. 完成東部地區 8 條活動斷層（米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層）之錯動機率評估。其項目包括：(a) 建立活動斷層之特徵地震模式、(b) 評估活動斷層未來發生機率、(c) 製作活動斷層發生機率潛勢圖。	3-1-3 3-1-4 3-2-3 3-2-4 3-3-3 3-3-4 3-4-3 3-4-4 3-5-4 3-5-5 3-6-4 3-6-5 3-7
	6. 地質法之活動斷層敏感區執行面問題研析，包括地質法子法及調查手冊中關於活動斷層部份之執行面問題，以及地質法與相關法令銜接性問題，會舉辦至少一次專家座談會議進行探討，並提出子法及調查手冊之具體改進建議。	附錄 3-3
井下應變儀資料分析	1. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係；並進行面應變、剪應變分析。	附錄 4-1
	2. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。並經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。	4-1-2
	3. 持續維護及更新井下應變儀資料庫。	完成
地球化學觀測與研究	1. 嘉義沄水溶解氣體觀測站 2015 年 12 月至 2016 年 11 月溶解氣體之甲烷、水氣、氮氣、氧氣、氬氣、二氧化碳、氡氣氣體觀測結果。	5-5
	2. 新竹大平地、雲林古坑、屏東屏科大、台東池上、花蓮東華站 2015 年 12 月至 2016 年 11 月土壤氣體之氡氣氣體觀測結果。	5-2、附錄 5-1
	3. 既有水位觀測站 2015 年 12 月至 2016 年 11 月水位觀測結果。	5-3、附錄 5-2
	4. 墾丁社頂站 2015 年 12 月至 2016 年 11 月地下水水	5-4、附錄 5-3

	氡觀測結果。	
	5. 墾丁社頂站 2015 年 12 月至 2016 年 11 月定期採樣地下水水氡分析結果。	5-4、附錄 5-3
	6. 將觀測資料同步轉移至委託單位之伺服器。	完成
整合觀測資料分析	1. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站及地下水資料加以比較，找出其相關性。	6-1
	2. 以井下應變儀時間點為主，分析連續 GPS 資料的相同或相異性，理解影響其異同的因素、以進一步解釋應變異常。	6-2
	3. 選擇一個較大之異常事件做高頻 GPS 分析，從地殼位移與地殼應變的觀點來解釋斷層的活動性。	6-3 及 6-4
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。	附錄 7-1
	2. 對於國內陸地上地震規模大於六的地震，在地震後 6 個星期內，運用 GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準測量、井下應變儀及地球化學觀測等資料（GPS 移動站及精密水準測量需配合測量公司於震後一周內完成測量並提供資料）提出分析報告。	附錄 7-2
	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 7-3
	4. 提供成果報告內圖片「300dpi 以上清晰圖檔（電子檔）」。	附錄 7-4
	5. 提供共同參考點所解算後之 GPS 觀測資料數值檔。	附錄 2-1
	6. 整合本階段性計畫成果和針對 33 條活動斷層在斷層潛勢分析部份採取一致性的處理原則與標準來進行更新；斷層剖面部分，參考地質剖面及本計畫資料來做更新，匯整上述資料製作成第三階段總結報告書，並繳交 10 份(包含紙本與光碟)。	完成
	7. 成果報告 30 份（包含紙本與光碟）。	完成

摘要

本年度計算至 2016 年 10 月全臺連續全球定位系統測站共 476 站，除彙整時間序列外，並將歷史資料測站資訊更新後重新計算歷史速度場。此外，也利用天空圖分析各測站透空率，統計出遮蔽較嚴重測站資訊。本年度計算累積歷史資料至今之速度場結果與過去長期解算結果約略相同。位於西南部地區測站，受美濃地震影響，在同震時期有明顯的同震位移，目前以線性迴歸方式移除。因受震後變形會有些微影響導致速度場改變，預計資料須再多累積至少一年後便可完全去除同震效應。截至期末報告，精密水準已完成 29 條測線共 1,100 個測段之施測及查核；GPS 亦完成台北地區 80 點、桃竹苗地區 107 點、中部地區 152 點、嘉南地區 158 點、高屏地區 102 點、花東地區 68 點、恆春地區 32 點、宜蘭地區 34 點及因美濃地震而施測的 95 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 主要工作為彙整臺灣東部地區成果，ERS 衛星影像結果顯示主要在中段能較明顯看出玉里斷層與池上斷層間有明顯的視衛星方向遠離，以及跨過更南側的池上斷層向東也有相當明顯的速度梯度差異，轉換為視衛星方向拉近。ENVISAT 在像對所組成中幾乎一半的影像對皆可以得到大面積的干涉成果。不過由於總影像數只有 9 張，以及 C 波段影像波長較短，跨過幾條主要斷層都無法呈現明顯的速度梯度差異。L 波段的 ALOS 衛星在像對所組成的干涉圖中表現最為良好，儘管進入中央山脈區域，幾乎所有的影像對還是可以得到部分的干涉成果。結果顯示北段向東跨過嶺頂斷層呈現為視衛星方向遠離，速度梯度差異約為 10 mm/yr。而跨過池上斷層則有每年約 20~35 毫米的速度梯度差異，且有明顯的分界，能有效的萃取出池上斷層在地表上的位置。向南則顯示出向東跨過鹿野斷層也有速度梯度差異，約為 10 mm/yr。相較於 C 波段的衛星影像，L 波段的 ALOS 干涉結果較適合用來監測臺灣東部的活動斷層。

本研究藉由三維塊體模型 DEFNODE，針對臺灣地區由 GPS 所觀測到的現今水平地表變形速率進行運動學分析（2005-2015 連續站及移動站）。模型中將此區共分為 34 個塊體，並將地調所公佈的活斷層（義竹斷層與梅嶺斷層除外）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。本階段研究成果的 8 條東部斷層中，瑞穗斷層、玉里斷層及鹿野斷層的平均滑移虧損率約為 6~8 mm/yr，而米崙斷層、嶺頂斷層、奇美斷層、池上斷層與利吉斷層的平均滑移虧損率則約為 1~4 mm/yr。總結來說，東臺灣以縱谷中段的瑞穗斷層、玉里斷層及中央山脈的鹿野斷層具有較高的平均滑移虧損率，其餘斷層上反應的滑移虧損則相對較低。

斷層潛勢評估目的是建立臺灣 33 條活動斷層潛勢評估流程，本年度以東部 8 條活動斷層進行評估。首先建立活動斷層參數表，透過本計畫建立之活動斷層潛勢評估方法論，了解斷層的重複間隔相關資訊後，以機率法評估活動斷層未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率。米崙斷層最後一次發生時間為西元 1951 年，採用 BPT 模式，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 30.4%、45.6%及 70.1%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 24.0%、37.6%及 60.8%。嶺頂斷層最後一次發生時間可能為西元 1951 年，因此本計畫分別採用 BPT 模式及 Poisson 進行評估，以 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 9.1%、15.7%及 30.4%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 7.0%、12.6%及 25.7%。以 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 11.6%、18.3%及 32.2%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 9.9%、15.8%及 28.1%。瑞穗斷層最後一次發生時間為西元 1972 年，採用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 31.1%、49.4%及 76.7%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 23.8%、40.5%及 66.8%。奇美斷層以 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 5.8%、9.3%及 17.5

%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 1.8%、2.9%及 5.5%。玉里-池上斷層系統最後一次發生時間為西元 2003 年，採用 BPT 模式，未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率未折減為 33.3%、53.4%及 80.2%，考慮震矩折減為 25.8%、45.4%及 74.6%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率未折減為 27.0%、46.5%及 72.6%，考慮震矩折減為 13.8%、27.6%及 48.9%。鹿野斷層以 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 7.8%、12.2%及 20.7%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 3.3%、5.2%及 9.4%。利吉斷層 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 16.5%、23.9%及 35.3%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 10.1%、15.1%及 23.5%。

井下應變儀部份，分別處理臺北網、新竹網及嘉義網的測站資料，目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，嘗試建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式並做修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。在 2015 年 12 月至 2016 年 11 月期間，分別在嘉義網觀測到 1 個應變異常事件，該應變異常事件為 2016/02/06 M_L 6.6 高雄美濃地震；新竹網觀測到 4 個應變異常事件，該應變異常事件則為 2016/02/06 M_L 6.6 高雄美濃地震與 2016/05/12~13 宜蘭縣政府東方的三起地震；臺北網觀測到 4 個應變異常事件，該應變異常事件則為 2016/02/02 M_L 6.7 臺灣東北部海域地震與 2016/05/12~13 宜蘭縣政府東方的三起地震。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至 2016 年 10 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：70%、85%與 76%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：30%、15%與 24%；地震前沒有前兆訊號的機率為：44%、53%與 38%。

地球化學觀測部份，本年度觀測期間，2016/01/11 M_L 5.3 花蓮近海地震、2016/01/19 M_L 5.8 台東外海地震、2016/02/06 M_L 6.6 高雄美濃地震、2016/02/16-18 M_L 5-5.3 台東海端地震，皆同時有兩座以上的測站觀察到顯著的氡氣異常，可視為地震的前兆訊息，並根據出現異常的測站位置進而評估可能的地震發生位置。而在地下水位監測的部分，在三區的測站之中均未觀察到明顯的震前水位異常現象；不過，嘉義網太興站在美濃地震時受一系列群震影響而出現明顯的水位上升現象。此外，2016/02/06 M_L 6.6 美濃地震發生前，社頂站地下水水氡濃度從背景濃度的 113 ± 23 pCi/L，從 2016/01/26 開始下降至 64 ± 3 pCi/L，明顯低於背景值 1.5 倍標準差，這同時間於土壤氡氣古坑站、屏東站和池上站所觀察濃度升高的變化，可能為美濃地震的地震前兆。

另外，GPS 應變雖然雜訊較大，對於較小地震的變化訊息無法明確顯現，但它有明確的絕對量以及長期的穩定性，井下應變儀可用 GPS 應變來做尺度標準。在這一期的觀測中，針對高雄美濃地震附近地區，做了一個完整的長期 GPS 應變分析，在 2016/01/19 地震前 17 天由壓縮轉舒張，然後到地震後再突然轉壓縮，整個嘉義地區的 GPS 應變與太興國小的井下應變都有同步的變化。另外使用 2007~2016 共計 9 年的資料，發現 2010 年甲仙地震只釋放了甲仙地區的累積能量，而對於台南地區後甲里斷層附近的地殼，反而是加重並加速地殼應變的速率，所以才在這一次美濃地震產生較大的災情。

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

Abstract

We calculate the daily solution and time series of 476 continuous GPS stations in Taiwan from December of 2015 to October of 2016. In addition, we also use skyplot to estimate penetration condition of GPS stations which may cause poor accuracy or error during time series estimations. The present velocity field shows a similar trend with long-term estimation. However, some stations demonstrate the opposite trends due to the post seismic behavior of 0206 Meinong earthquake. This postseismic deformation will be removed for analysis of interseismic deformation in the future. For the 2016 final-term report, we have achieved the examinations of results from 29 precise leveling routes with 1,100 sessions and from 80 campaign-mode GPS stations in Taipei area , 107 campaign-mode GPS stations in Taochumiao area , 152 campaign-mode GPS stations in central area , 158 campaign-mode GPS stations in Chianan area , 102 campaign-mode GPS stations in Kaoping area, 68 campaign-mode GPS stations in Huatung area, 32 campaign-mode GPS stations in Hengchun area , 34 campaign-mode GPS stations in Ilan area, 95 campaign-mode GPS stations for Meinong EQ that have been measured up-to-date. After comparing the coordinates from campaign-mode GPS sites and precise leveling benchmarks with the time series from continuous GPS stations, the velocity field is consistent with previous measurement which show the reliability of observation.

For the PS-InSAR works in Easten Taiwan. According to the result of ERS in the period of 1995-1999 shows discontinouity between Yuli Fault and Chihshang Fault. However the result of ENVISAT show nothing when cross the faults due to lack of images. The significant LOS velocity gradients can be observed in the result of ALOS images in the period of 2007-2011. A sharp gradient of 20~35 mm/yr along the LOS across the Chihshang Fault and 10 mm/yr velocity gradient can be observed across the Luyeh Fault. Compare with C-band SAR images, L-band is more suitable for active faults observation in Easten Taiwan.

This research evaluated the slip rate and slip deficit rate of active faults in eastern 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 2005-2015 average horizontal velocities measured by GPS continuous and campaign networks in Taiwan. By employing the DEFNODE technique, we invert these GPS velocities for the best-fit block rotation rates, long term slip rates and slip deficit rates. Our results show that the slip deficit rates of the Milun, Lingding, Chimei, Chihshang and Lichi faults are about 1~4 mm/yr, whereas the slip deficit rates of the Rueisui, Yuli and Luyeh faults are relatively higher with values about 6~8 mm/yr.

The purpose of probability analysis of active faults is to establish the flow chart of 33 active faults in Taiwan. This year, we need to assess 8 active faults in eastern Taiwan, including the Milun Fault, the Lingding Fault, the Rueyshui Fault, the Chimei Fault, the Yuli Fault, the Chihshang Fault, the Luyeh Fault and the Lichi Fault. The BPT model was used for the Milun fault and the last event is set at year 1951. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 30.4%, 45.6%, and 70.1% respectively, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 24.0%, 37.6%, and 60.8%, respectively. For the Lingding fault, the last event may be set at year 1951. For instance, it still has debate about the last event time, both BPT model and Poisson model were used. By using BPT model, the probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 9.1%、15.7% and 30.4% respectively, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 7.0 %、12.6% and 25.7%, respectively. By using Poisson model, the probabilities for the Mw

≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 11.6%、18.3% and 32.2%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 9.9%、15.8% and 28.1%, respectively. The BPT model was used for the Rueyshui fault and the last event is set at year 1972. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 31.1%, 49.4%, and 76.7%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 23.8%, 40.5%, and 66.8%, respectively. The Poisson model was used for the Chimei fault. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 5.8%, 9.3% and 17.5%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 1.8%, 2.9%, and 5.5%, respectively. The Yuli fault and Chihshang fault, which may rupture together, can be considered as a Yuli－Chihshang fault system. The BPT model was used for the Yuli－Chihshang fault system and the last event is set at year 2003. This project also considered the moment reduction of the Yuli－Chihshang fault system because of its creeping behavior. The probabilities without moment reduction for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 33.3%, 53.4%, and 80.2% respectively, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 27.0%, 46.5%, and 72.6%, respectively. If we considered the moment reduction of the Yuli－Chihshang fault system, the probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 25.8%, 45.4%, and 74.6% respectively, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50, and 100 years are 13.8%, 27.6%, and 48.9%, respectively. The Poisson model was used for the Luyeh fault. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 7.8%, 12.2% and 20.7%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 3.3%, 5.2%, and 9.4%, respectively. The Poisson model was used for the Lichi fault. The probabilities for the Mw≧6.5 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 16.5%, 23.9% and 35.3%, and the probabilities for the Mw≧7.0 earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 10.1%, 15.1%, and 23.5%, respectively.

Several significant barometric changes were used to remove the environmental effects from strain data in 10 borehole strainmeters located in Taipei, Hsinchu and Chiayi networks. From December 2015 to October 2016, totally 1, 4 and 4 strain anomalies are found in Chiayi, Hsinchu and Taipei networks respectively. In Chiayi network, 1 strain anomaly is related to 2016/02/06 M_L 6.6 Meinong earthquake. In Hsinchu network, 4 strain anomalies are related to 2016/02/06 M_L 6.6 Meinong earthquake and 2016/05/12-13 Yilan earthquakes. In Taipei network, 4 strain anomalies are related to 2016/02/02 M_L 6.7 offshore northeast Taiwan earthquake and 2016/05/12-13 Yilan earthquakes. The probability for successful investigation of strain anomaly with corresponding earthquake in Chiayi, Hsinchu and Taipei networks is 67%, 84% and 81% respectively. The probability of no significant stain anomaly found prior to a significant earthquake is 44%, 56% and 40%.

The geochemical monitoring observations during the period from December 2015 to October 2016, the precursory signals are observed simultaneously at two or more stations can reflect the preparation stage for four large earthquakes and also can conduce to expect the approximate location. These earthquakes are 2016/01/11 (M_L5.3), 2016/01/19 (M_L5.8), 2016/02/06 (M_L6.6), 2016/02/16-18 (M_L5.0-5.3). Concerning the water-level monitoring data, no significant precursory anomaly was observed this year. The significant increase in water-level was observed at TAIS after 2016/02/06 Meinong earthquake. The concentration of groundwater radon decreased from background levels of 113 ± 23 pCi/L to a minimum of 64 ± 3 pCi/L prior to the 2016 Meinong earthquake. The above-observed anomalous decrease in radon concentration at KT and increase in soil radon concentration at GK, PT and CS could be the precursor for the 2016 Meinong earthquake.

The noise of GPS strain is relative large in comparision with other observations. Even

though, GPS strain owns some distiguish characters such as absolute values and long term stability. Borehole strain observation can use GPS strain for scale calibration. In this study period, we demonstrated long term GPS strain in Kaoshiung and Tainan area over 2007~2015. The coeiseismic strain of the Jia-Shian earthquake in 2010 release some accumulated strain in vicinity of Jia-Shian, but put additional loading over the nearby region, like Hochiali fault. It did put some additional strain, not only the coseismic strain jump, but also the increase of strain accumulating rate. That is why the Tainan city got more serious damages more than Meinong area. Long term GPS strain rate can monitor the detail crustal strain in Taiwan area.

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 86 站、10 口井下應變儀及地球化學觀測站共 11 站（圖 1-1.1 和表 1-1.1~表 1-1.5）。而從 98 年至 101 年的「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究」四年計畫研究當中，已藉由高精度的水準與大地測量瞭解各斷層的活動特徵；藉由連續 GPS 觀測的時間序列分析除可瞭解各斷層於間震、同震以及震後的變形型態變化，尚可計算出間震期短期的滑移速率，以及利用同震及震後的斷層面滑移特性推導地表下斷層面的滑移特性。利用地球化學方法與地下水位觀測斷層活動性，當斷層錯動引發地震發生前，常伴隨周遭環境流體的物理性質、氣體成分、液體化學成分和同位素組成發生改變，會出現異常現象。在整合性地表變形觀測的手段中，針對各孕震構造的觀測的重點在於是否可以觀測到災害性地震前的應變異常訊號，由過去四年井下應變儀分析的經驗得知，井下應變儀可以觀測到極小的應變率變化，但此應變速率變化亦可能由環境因子所引起。這些環境因子包含地下水位升降、降雨、氣壓變化（一般是颱風引起）和潮汐。有些應變速率異常與慢地震（slow earthquake）和長微震（tremor）有關，有些極可能與規模大於 5.5 以上的地震前應變異常相關。然而，2011 年 3 月 11 日發生於日本 Mw 9.0 宮城外海的地震，深深地提醒我們下列兩件事之重要性：（1）辨識已知與未知高發震潛能構造的位置及（2）評估其所蘊含之地震潛能。這些高發震潛能構造不一定會通過主要城市，然其引發之重大地震卻會對周遭城市造成慘重之災情。經由過去近十年之大地測量監測資料，我們觀測到數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域，例如：東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部。因此，本計畫將利用整合性大地測量技術所獲得之地表運動觀測值，期望得到：（1）辨識臺灣地區已知與未知高發震潛能構造的位置；（2）推估這些區域地殼內能量之變化及（3）探討大地測量觀測資料在地震災害分析上的應用。

過去 98~101 年針對臺灣 8 條活動斷層（瑞穗斷層、車籠埔斷層、山腳斷層、新城斷層、六甲斷層、木屐寮斷層、池上斷層和小崗山斷層）做了斷層活動度及地震潛能分析，針對孕震構造與活動斷層逐步進行了詳細的參數研究及地震發生機率評估。然而，在本階段的計畫裡，欲透過蒐集與分析地調所及國內既有之 33 條活動斷層資料（圖 1-1.2），並參考日本地震研究推進本計畫及美國加州之經驗方法，將各孕震構造之活動特性予以統計數量化，以製作臺灣地區第一版之斷層活動潛勢圖。經由本計畫系統性地研究各活動斷層之活動特性，建立全國之活動斷層發生機率潛勢圖，以及可能引致之地震規模，據此成果可後續再完成鄰近斷層地區之震度，可充分利用地調所研究之活動斷層與孕震構造之地質資訊，逐步充實我國地震防災整備資訊內容，並可使我國之地震與活動斷層研究與世界先進國家水準並駕齊驅。102 年度已完成中部地區 7 條活動斷層（彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、觸口斷層）之錯動機率評估。103 年度已完成北部地區 9 條活動斷層（山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層）之錯動機率評估。104 年度已完成南部地區 9 條活動斷層（木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層）之錯動機率評估。

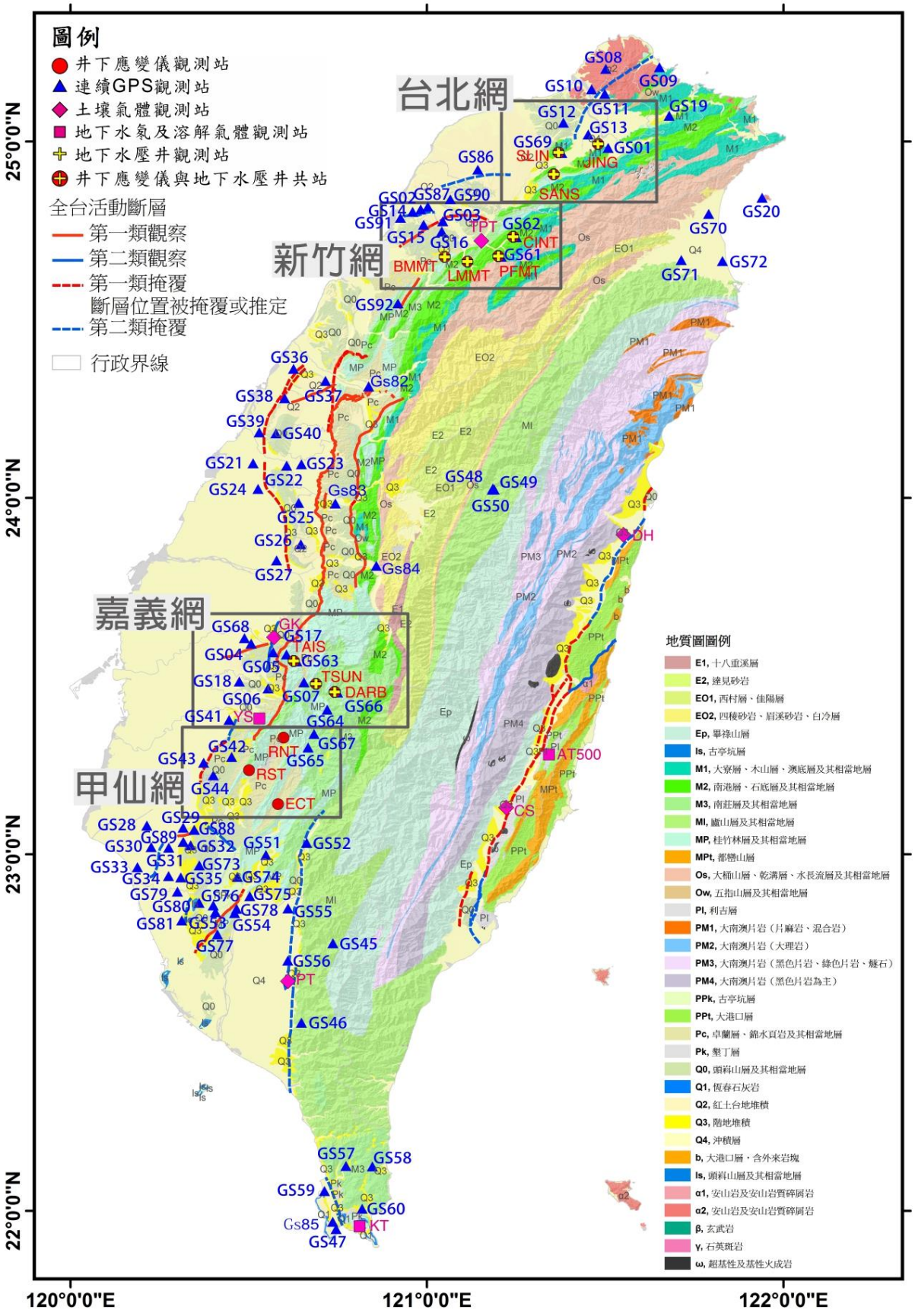


圖 1-1.1：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全臺分布圖。

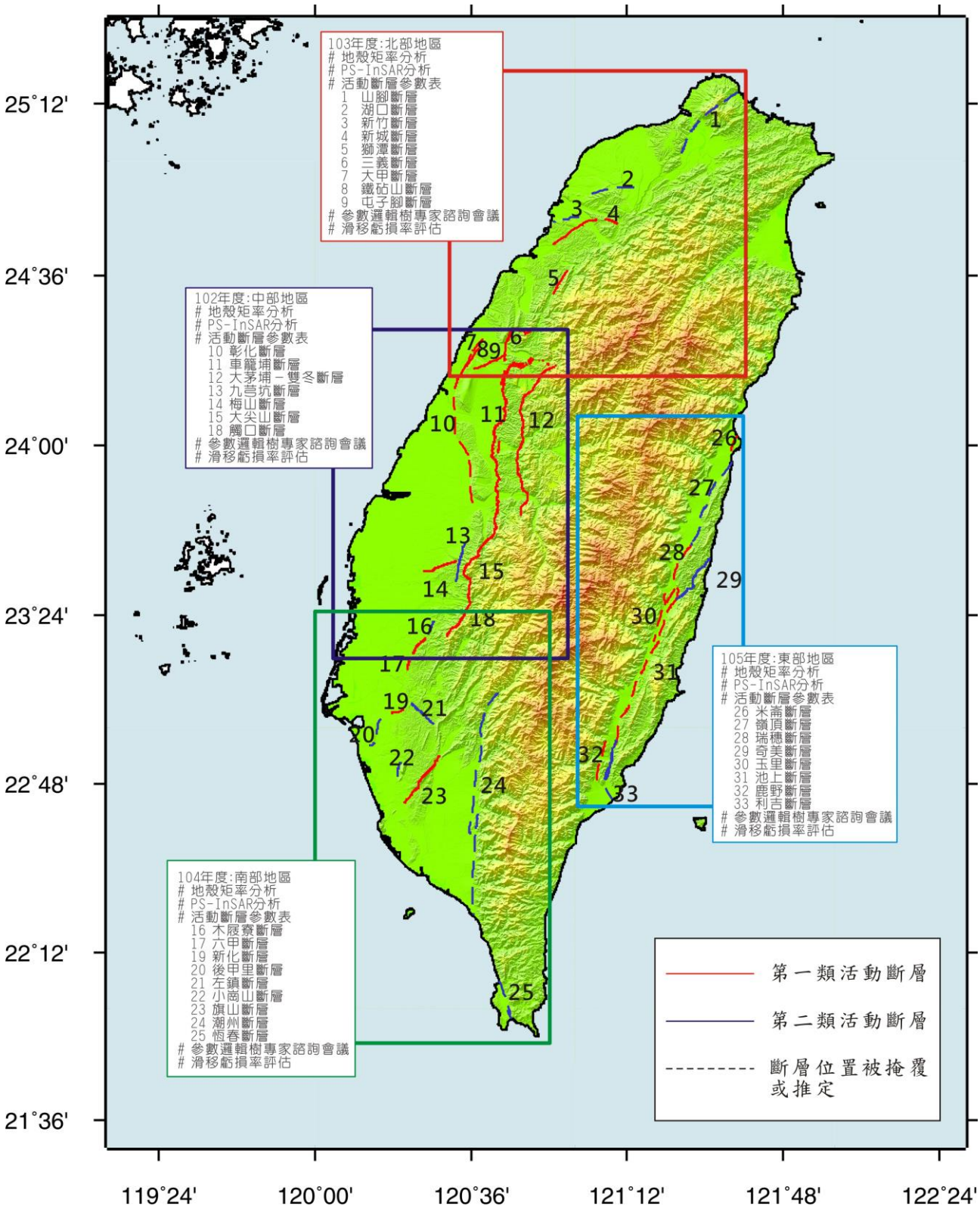


圖 1-1.2：臺灣活動斷層分布圖與本計畫擬定之研究區域。

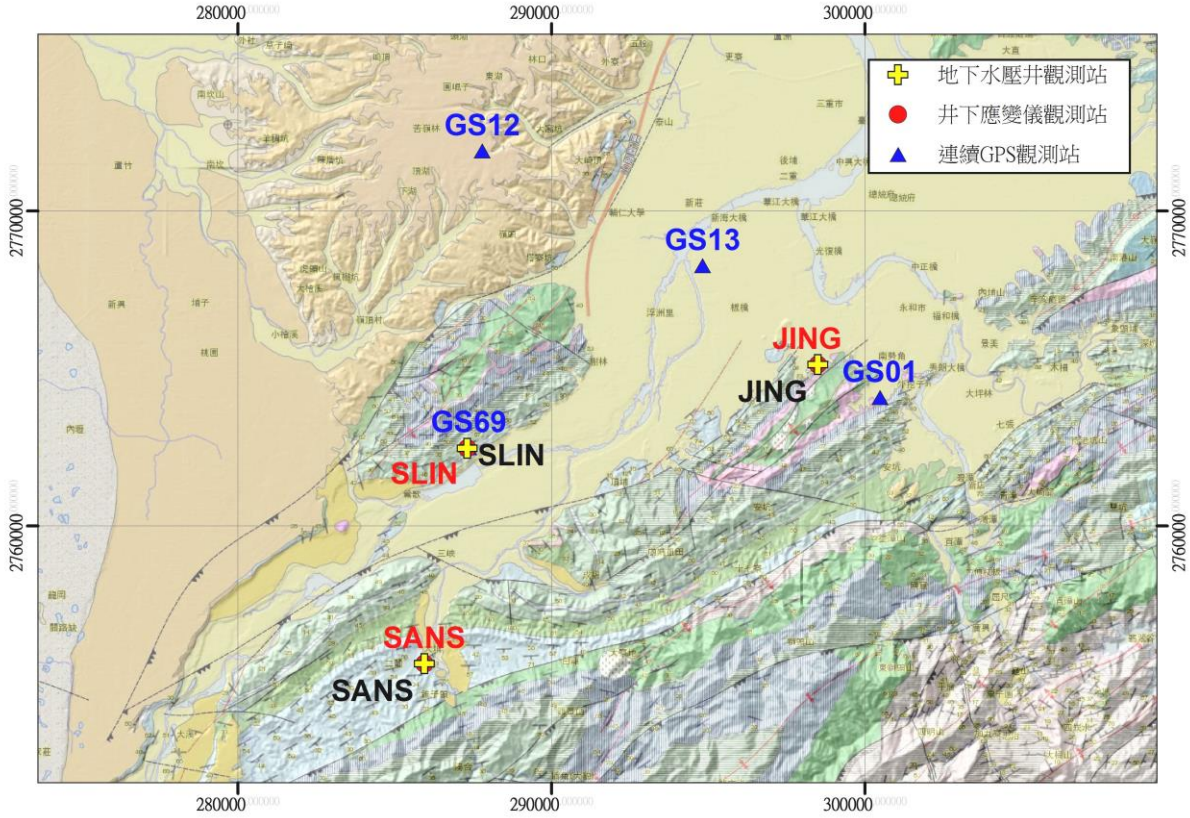


圖 1-1.3：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-臺北網分布圖。黑色站名為地下水壓井觀測站。

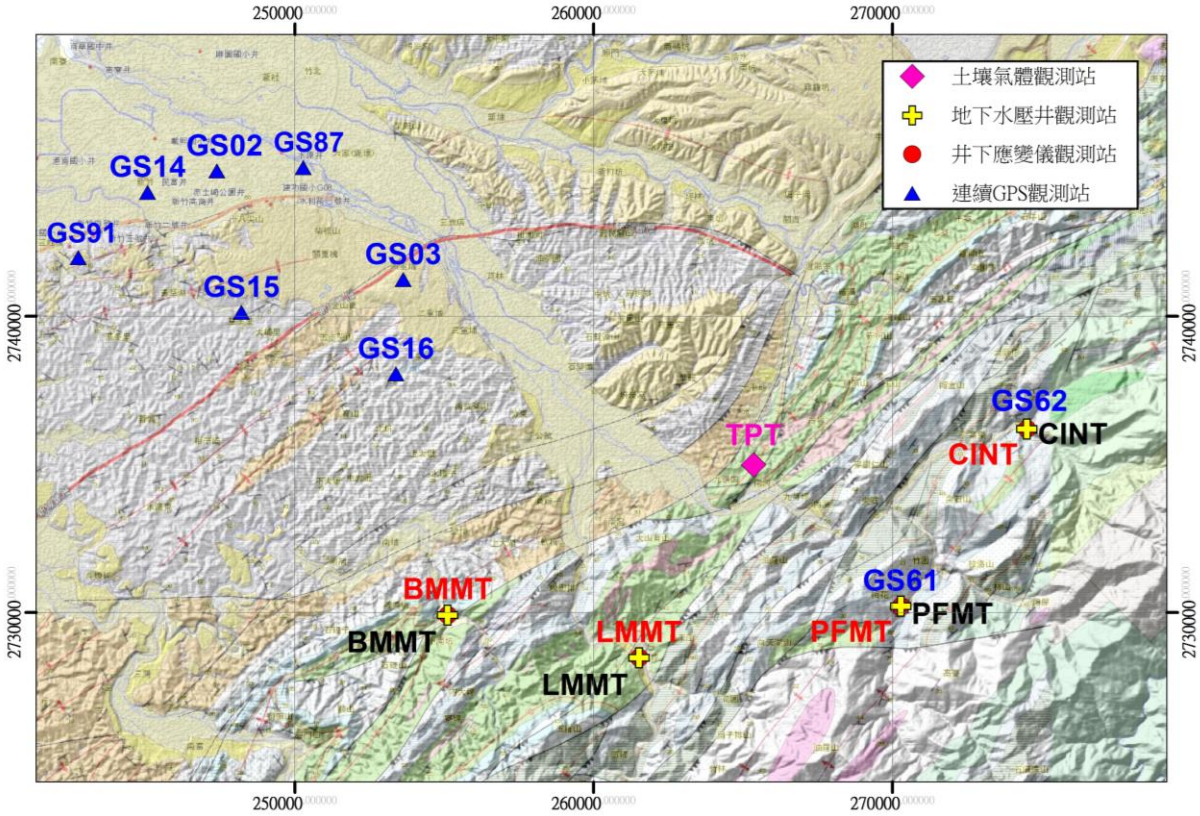


圖 1-1.4：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-新竹網分布圖。黑色站名為地下水壓井觀測站。

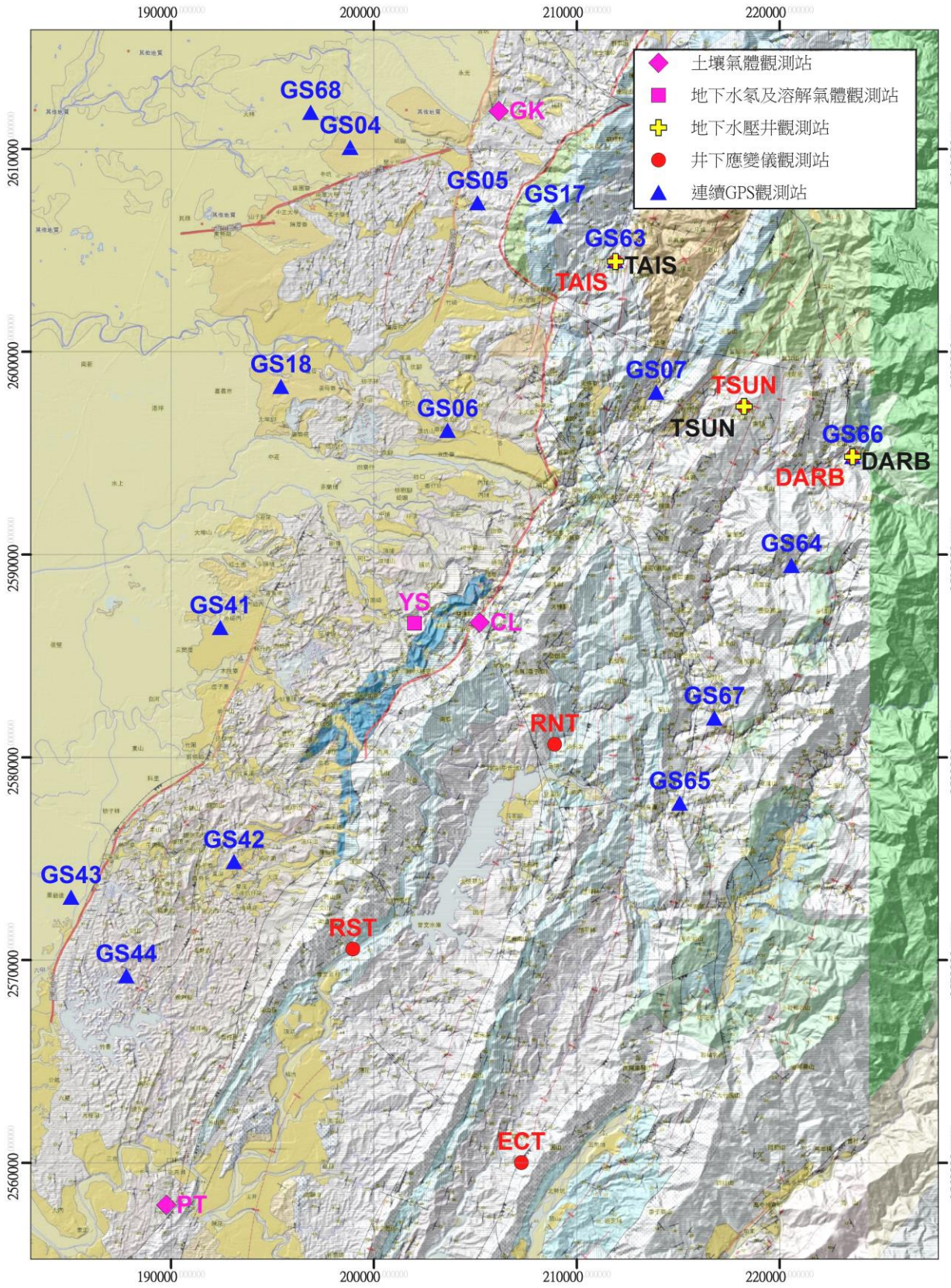


圖 1-1.5：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站-嘉義網及甲仙網分布圖。黑色站名為地下水壓井觀測站。

構造線圖例說明

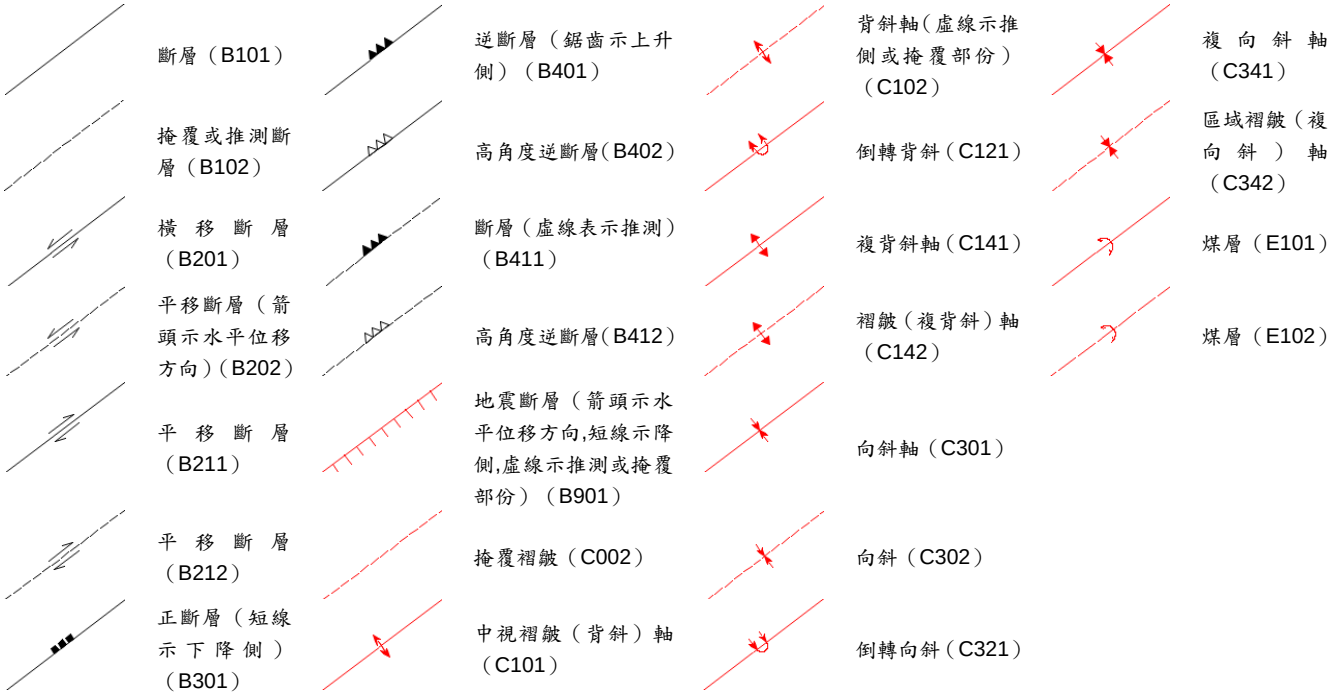


圖 1-1.6：圖 1-1.3~圖 1-1.5 構造線圖例說明。

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

測站代碼	測站名稱	接收起始時間	測站代碼	測站名稱	接收起始時間
GS01	地調所	2002/06/17	GS47	台電南展館 (2013.7.25 廢站)	2009/01/05
GS02	新竹高工(2015.08.17 廢站)	2004/10/21	GS48	警光山莊	2009/04/01
GS03	工研院	2004/10/19	GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01
GS04	大埔美農場 (2009.11.11 廢站)	2004.10.16	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS06	民和國中	2004/10/21	GS52	新發國小	2009/12/18
GS07	培英國小	2004/10/21	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS08	興華國小	2005/08/15	GS54	大洲國中(2013.7.12 廢站)	2009/12/15
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS11	北投國小	2005/08/15	GS57	石門國小	2009/12/15
GS12	樂善國小	2005/09/06	GS58	高士國小	2009/12/14
GS13	國光國小	2005/08/16	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS14	西門國小	2005/09/13	GS60	永港國小	2009/12/18
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS17	太平國小	2005/09/14	GS63	太興國小	2010/09/24
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS19	保長國小(2012.5.25 廢站)	2006/07/12	GS65	茶山國小(2011.7.28 廢站)	2010/10/14
GS20	龜山島	2006/08/04	GS66	達邦	2010/09/28
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS67	新美國小	2010/09/28
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS68	三和國小	2010/12/17
GS23	五光國小	2006/05/30	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS73	新光國小	2012/11/02
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS74	內門國小	2012/11/02
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS76	新興國小	2012/11/02
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS77	深水國小	2012/11/14
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS78	溪洲國小	2013/10/22
GS33	永華國小	2006/06/22	GS79	中路國小	2013/10/16
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS80	田寮國中	2013/10/16
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS81	嘉興國中	2013/10/16
GS36	德化國小	2006/10/21	GS82	卓蘭實驗高中	2014/12/16
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS83	土城國小	2014/12/22
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS84	水里國中	2014/12/17
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2015/01/08
GS40	龍峰國小	2006/10/21	GS86	水美國小	2015/09/15
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS87	水源國小	2015/09/08
GS42	東原國中	2007/11/23	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS89	新化國中	2015/09/14
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS90	新埔工作站	2016/09/02
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS91	香山高中	2016/09/02
GS46	來義國小	2009/01/06	GS92	獅潭國中	2016/09/05

表 1-1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起始時間表。

觀測網	觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間	資料停止接收時間
臺北網	JING	錦和	2007/11/20	
	SANS	明德中學	2007/11/12	
	SLIN	樹林焚化廠	2009/09/11	
新竹網	PFMT	梅花國小	2005/06/04	2016/03 故障
	LMMT	瑞峰國小	2005/06/07	2012/10 (2013 年 4 月撤站)
	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	2016/08 故障
	TSUN	中興國小	2006/03/01	2014/06 (2016 年 8 月撤站)
	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 (2011 年 12 月撤站)

表 1-1.3：土壤氣體觀測站資料接收起始時間表。

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

表 1-1.4：地下水水氡觀測站資料接收起始時間表。

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

表 1-1.5：地下水位觀測站資料接收起始時間表。

觀測網	原 觀測站代碼	新 觀測站代碼	站　名	資料接收 起始時間	資料接收停止時間
臺北網	JH	JING	錦和	2007/11/16	2014/05/23
	MD	SANS	明德中學	2007/11/16	2013/07/15
	SLN	SLIN	樹林焚化廠	2009/11/01	
新竹網		PFMT	梅花國小	2008/11/01	2011/07/02
		LMMT	瑞峰國小	2009/09/30	2012/04/02
	DP	BMMT	大坪國小	2013/01/15	2013/08/22 故障 2014/05/21 復井
	SL	CINT	新樂國小	2006/12/15	
嘉義網	DB	DARB	達邦	2006/12/05	2013/06/26
	CS（2）	TSUN	中興國小	2012/12/19	2014/05/28
	TS（2）	TAIS	太興國小	2012/12/19	
		YS	沄水國小	2008/11/01	2014/04/28(改氣體站)

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

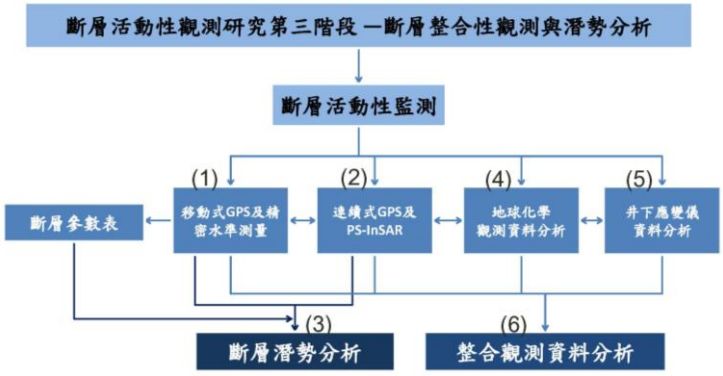


圖 1-1.7：斷層活動性觀測研究第三階段之架構。

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="3">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="3">GPS 移動站資料檢核及分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">GPS 及水準測量規劃、督導</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">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="2" 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="3">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="2">資料校正及計算分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">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="2">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="2">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="2">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="2">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="2">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>苗栗臺中地區</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="3">整合觀測資料分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">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 86 座 GPS 連續觀測站（表 1-1.1）(藉由資料交換機制，可取得其它單位約 316 個連續觀測站資料（圖 1-2.1）、約 788 座 GPS 移動站（圖 1-2.2）及 42 條精密水準路線（含 29 條長測線及 13 條短測線)（圖 1-2.2）。由觀測 GPS 連續站、GPS 移動站以及精密水準的時間序列可以得知地殼三維活動隨時間變化的情形。根據監測資料估算之地表水平（圖 1-2.3）與垂直位移向量（圖 1-2.4），可推求斷層的短期滑移速率與近斷層區域的應變分布（圖 1-2.5）。由於地表速度場的變化可以反映出斷層活動的特徵，故分析 GPS 速度場及水準垂直速度場資料，可以協助我們判定活動斷層的位置，並闡明該斷層之活動特性。

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

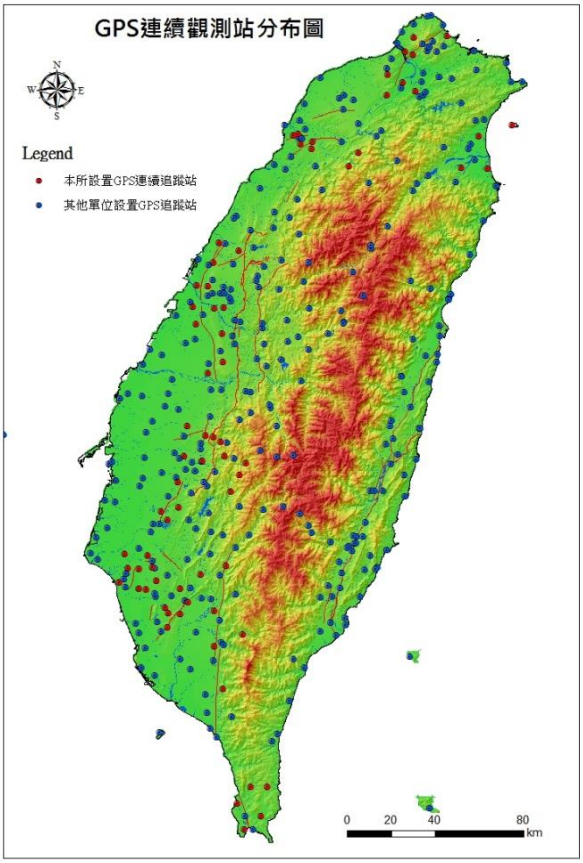


圖 1-2.1：GPS 連續觀測站分布圖（中央地質調查所）。

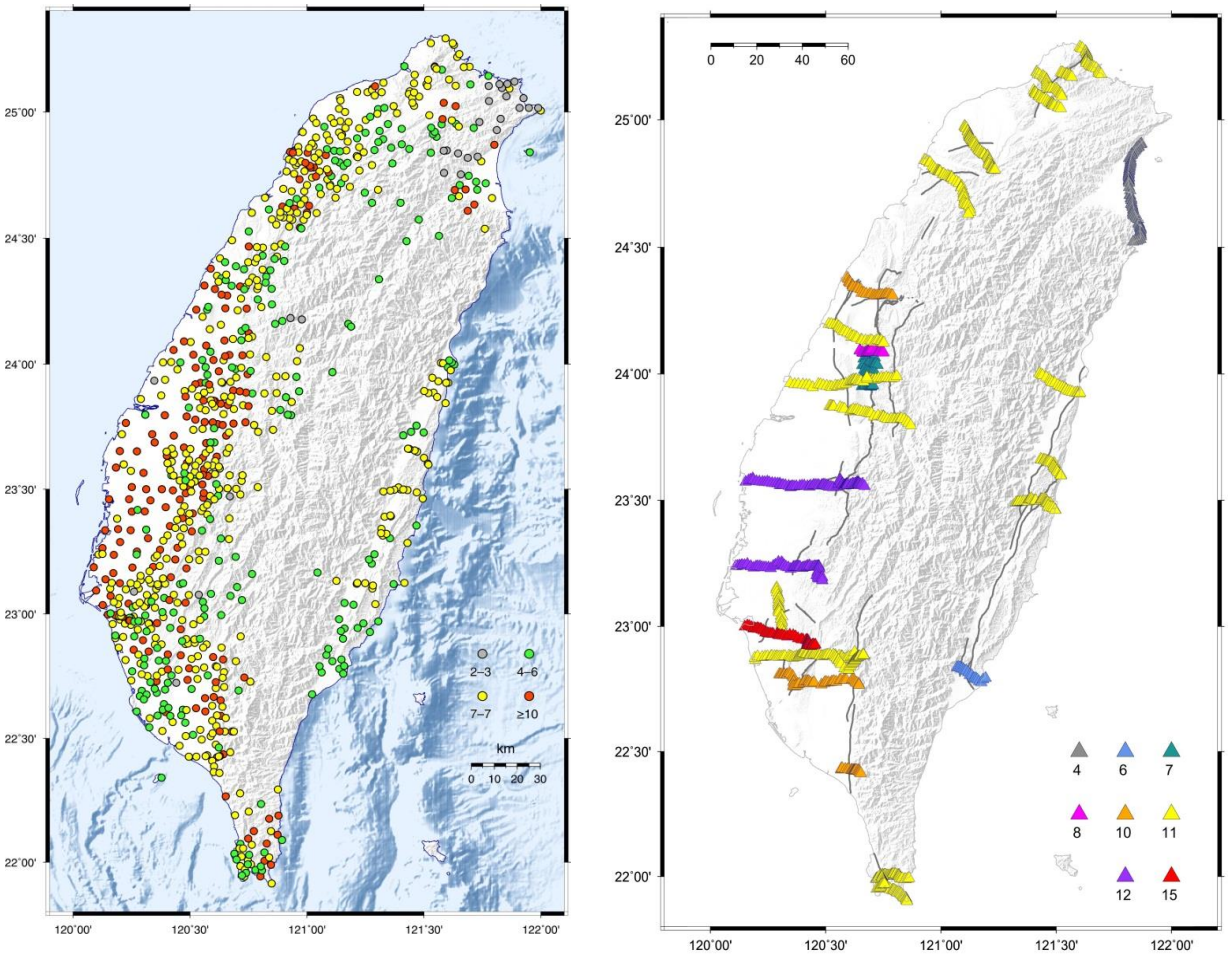


圖 1-2.2：GPS 與精密水準測量監測點位分布圖，共有約 788 座 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。右圖點位之顏色表示該測線施測的次數。

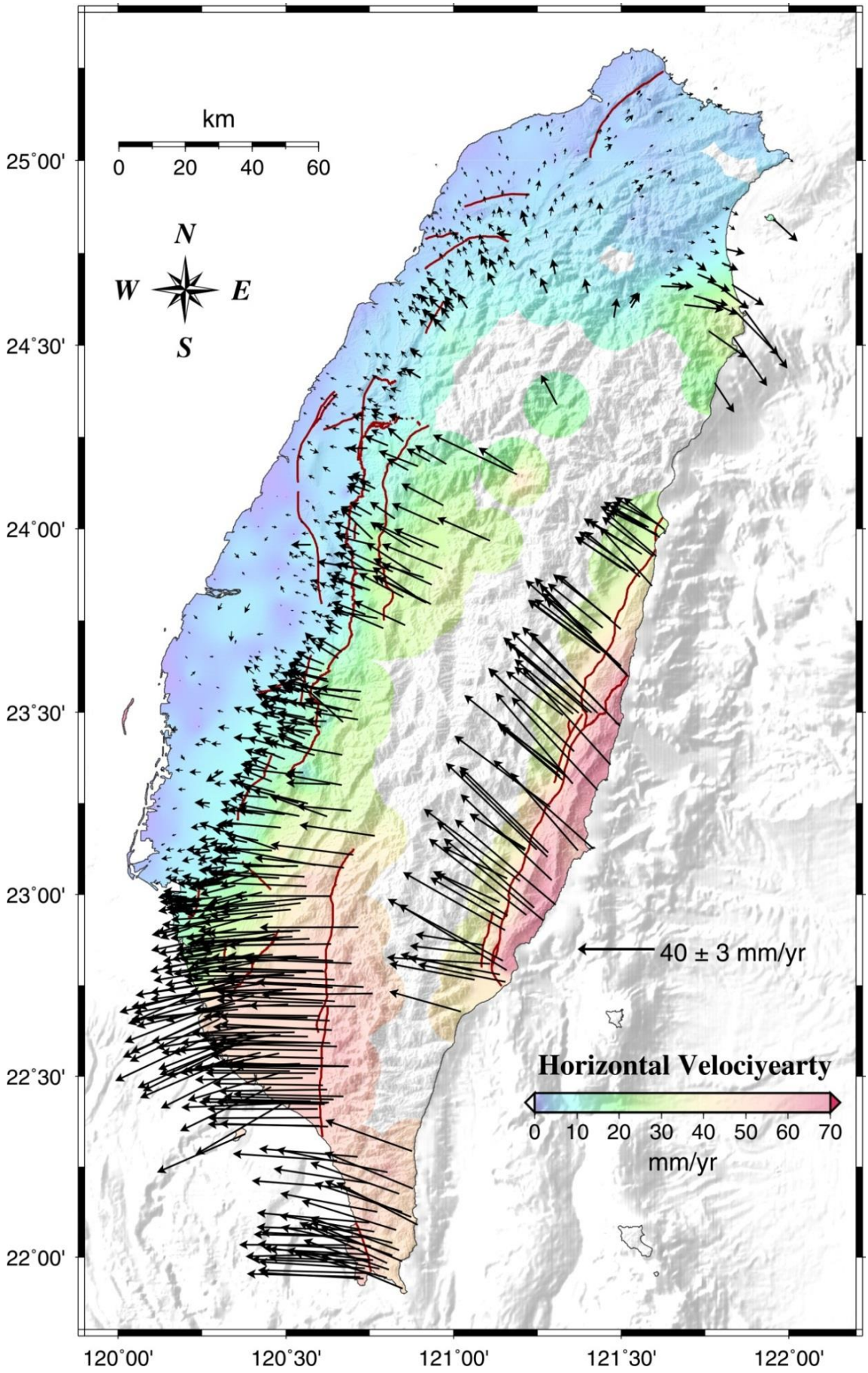


圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場（2002~2015 年）。

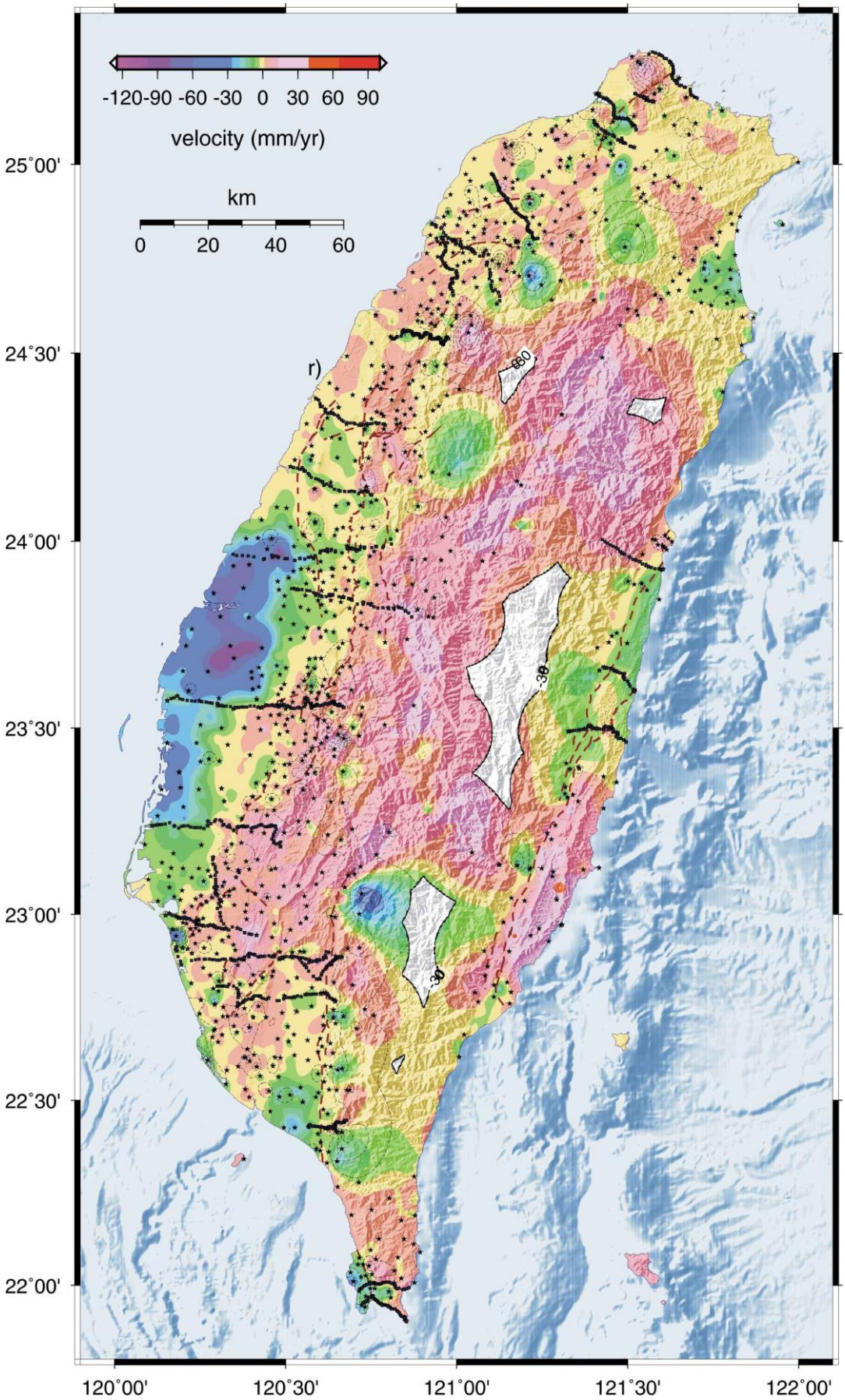


圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場（2002~2015 年）。

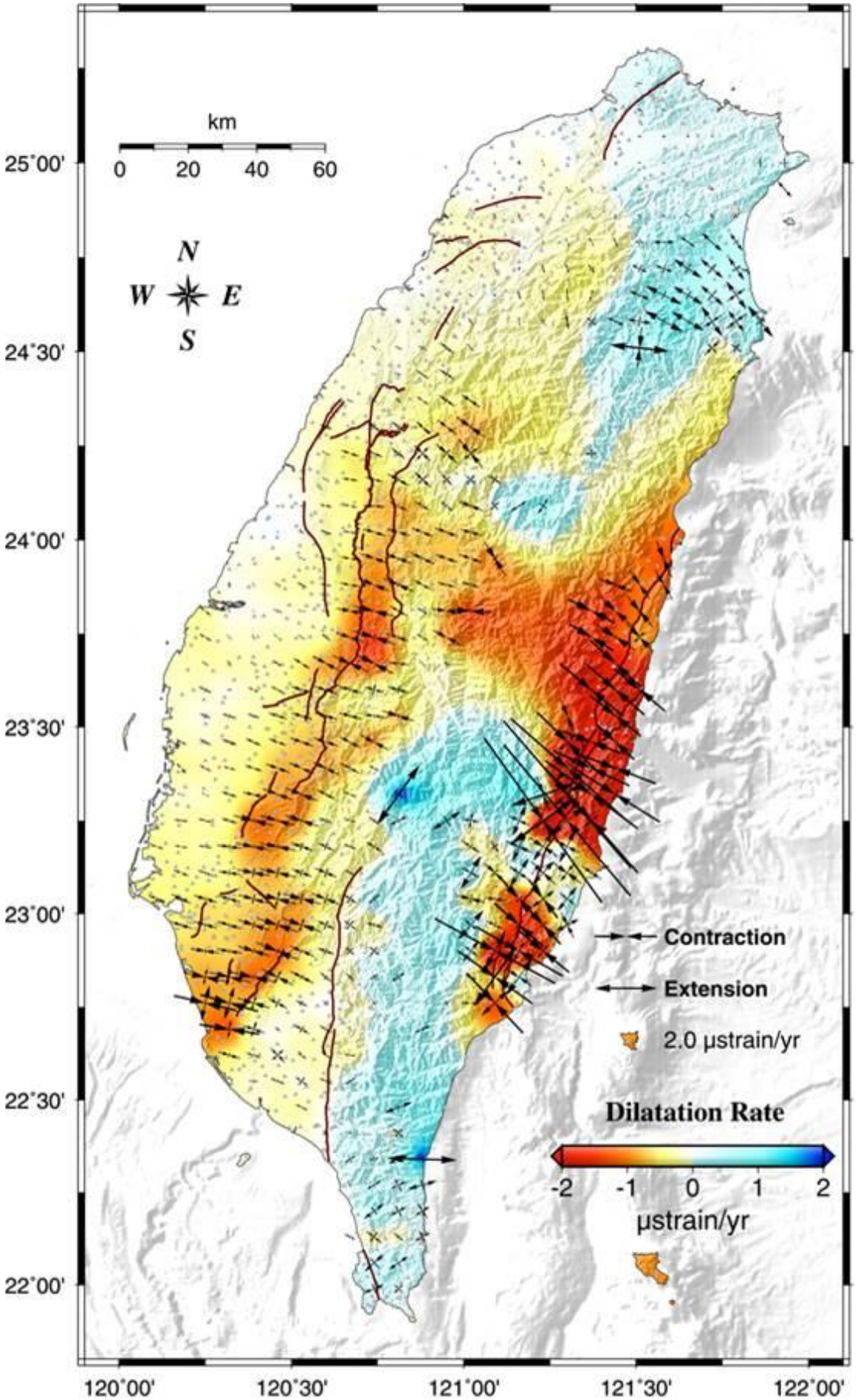


圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖（2002~2015 年）。

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，進而了解其背後的機制。

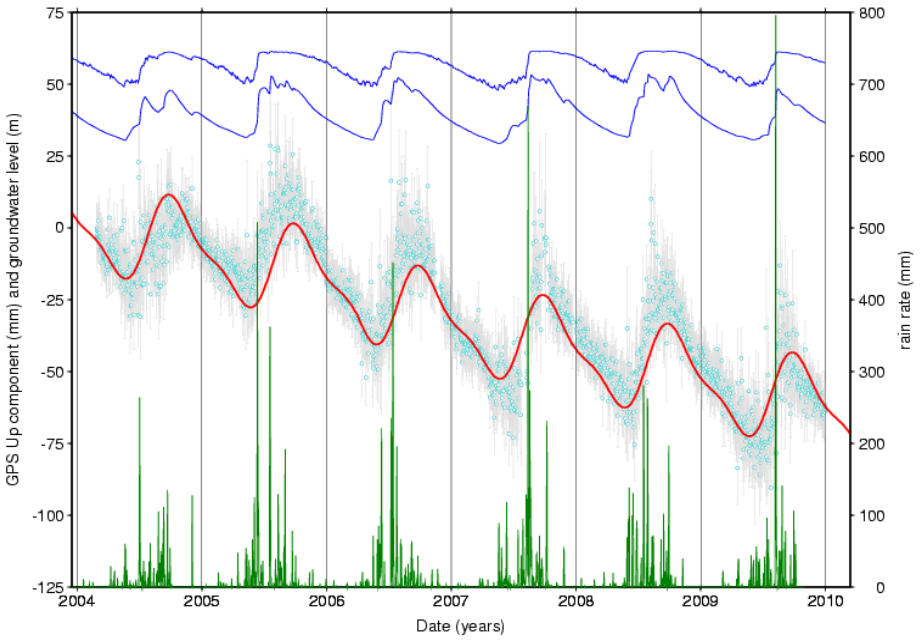


圖 1-2.6：屏東平原 NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。圖中時間序列、地下水位以及日雨量分別以紅線、藍線及綠線表示（胡植慶等，2012）。

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。然而，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比對分析，了解是否有相互關連性。

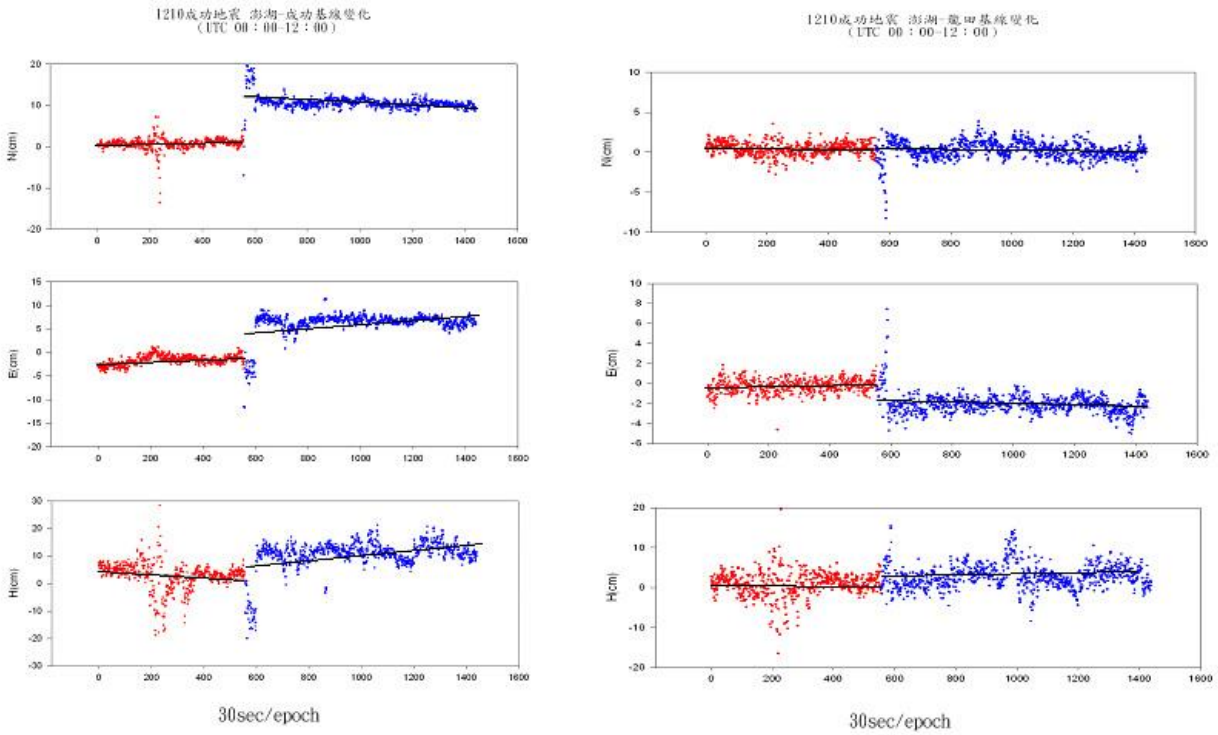


圖 1-2.7：2003 年成功地震 CGPS 30 秒解。（a）成功站相對於澎湖之變化（b）龍田站相對於澎湖之變化。

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無法有效率的監測。目前臺灣利用持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（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。

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，掌握震間期地表變形速率，監測地表短期變形速率，了解斷層滑移趨勢並提供斷層出露在地表較明確的位置。

雷達差分干涉技術（Differential InSAR）是用來量測地表微小移動的技術，方法為利用不同時期產生的干涉圖中移除地形效應後，得到純粹因變形所產生的相位干涉圖，此項技術可提供至公分級或更小尺度的相對精度。相對於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，並擁有面狀資訊、

主動式、穿透性及高精度等四項主要的優勢。儘管 DInSAR 於現今已經是非常成熟且廣泛地被使用，但在雷達差分干涉技術之中，許多因素會使得干涉結果產生雜訊及誤差而無法形成明顯的干涉環。例如：地表物特徵、大氣效應、基線常誤差、數值高程模型誤差以及時間性誤差等等。並且，一般來說 DInSAR 較適合應用於平原都會地區，山區及植被較厚的地區因地表特徵物會隨著時間而變化，使得干涉結果不易獲得。

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

PS-InSAR 在多張 SAR 影像之中尋找穩定點，即為在各影像中高相關性或高反射訊號的點位，也就是永久散射體，再將永久散射體的相位於一時間序列上的影像之中萃取出來，並進行相位回復（unwrapping），進而得到長時間地表位移量，以及得到點位在時間序列上的地表位移速率。一般情況來說，PS 點位數量於都會區域每平方公里都可取得數十個點以上，而郊區部份也可達每平方公里數點，這樣的資料密度，已經遠超過臺灣的 GPS 站及日本等國家的高 GPS 密度區域的站位密度。此外，將 PS 點位資料於空間上經內插計算後可獲得全面性的資料。

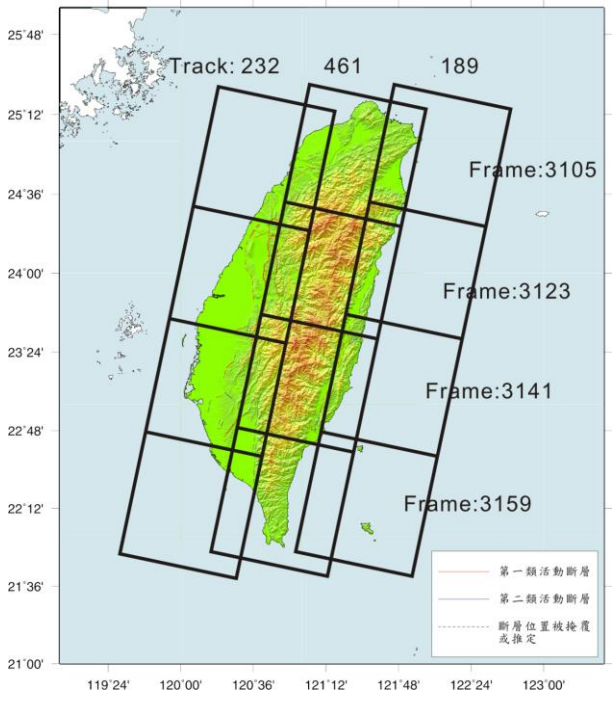


圖 1-2.8：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之像幅編號（Frame）與衛星軌道（Track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km×110 km。

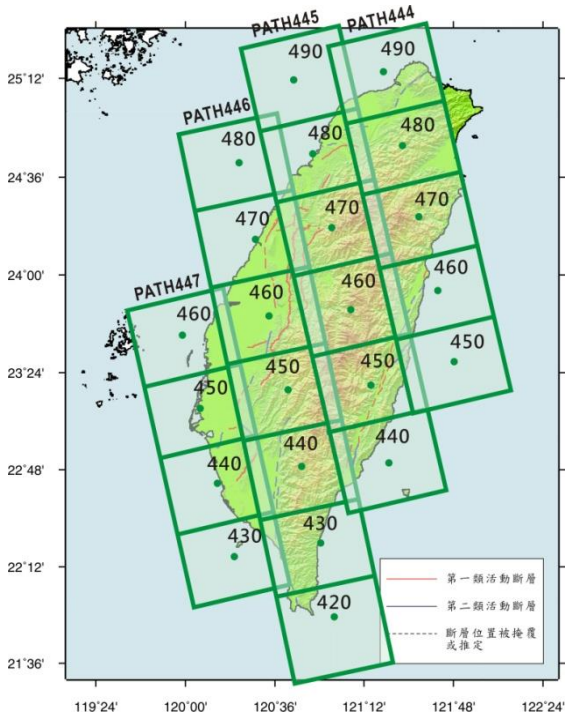


圖 1-2.9：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。

1-2-4 活動斷層發生潛勢圖建置

根據美國 WG07（2008）針對加州地區之活動斷層及孕震構造所做的地震潛勢評估經驗，可將孕震構造活動潛勢評估工作分為四大流程：斷層幾何形貌（Fault Models）、斷層變形模式（Deformation Models）、地震發生率模型（Earthquake-Rate Models）及總體機率模型（Probability Models），如圖 1-2.10 所示。

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

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

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

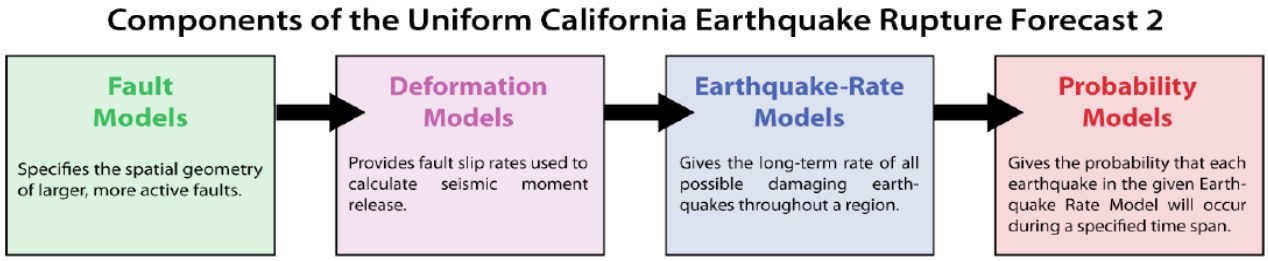


圖 1-2.10：美國加州地區活動斷層與孕震構造潛勢評估之四大流程（摘錄自 WG07, 2008）。

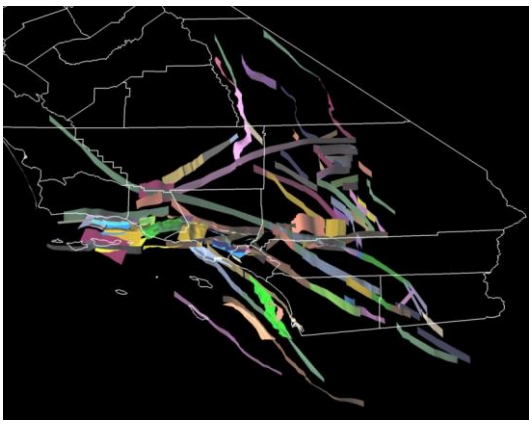


圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌（WG07, 2008）。

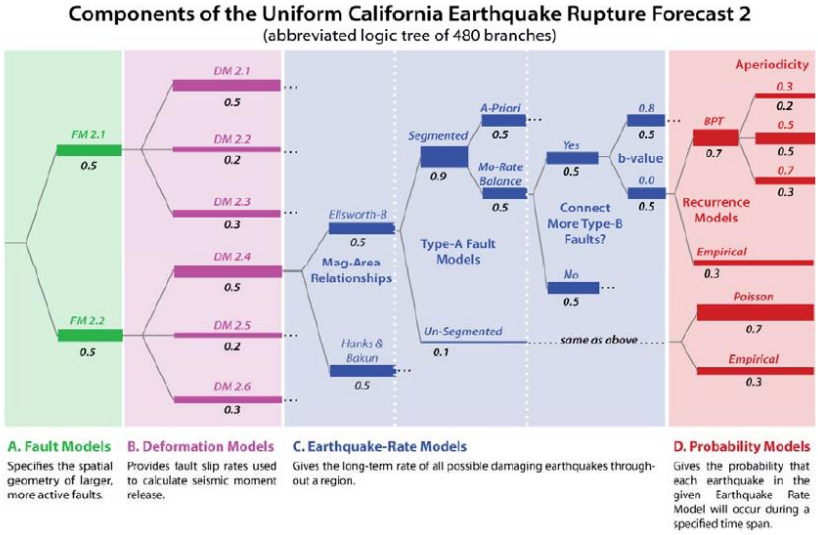


圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹（摘錄自 WG07, 2008）。

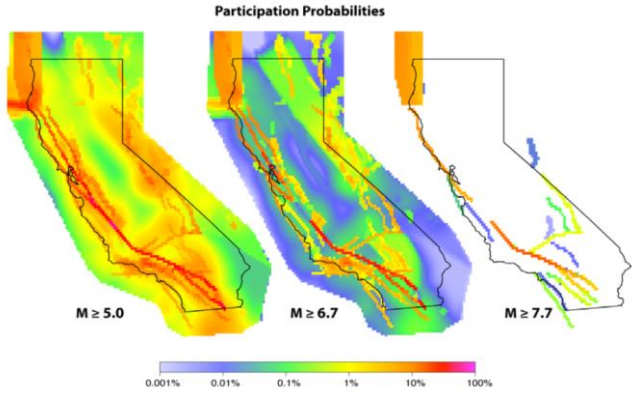


圖 1-2.13：加州地區未來 30 年發生地震規模為 5、6.7、7.7 以上之機率分布圖。網格為 0.1 × 0.1 度，此圖為整合各類型之孕震構造（區域震源+活動斷層）所呈現之機率分布圖（WG07, 2008）。



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

1-2-5 井下應變儀資料分析

井下應變儀設置於深入地下深處約 200 公尺，有效降低地表人為雜訊的干擾，又緊密接觸地下厚實且未經風化之堅硬岩盤，在精度上可量測到小至 10^{-8} 的地潮應變訊號（可感測 10^{-9}~10^{-12} 之微細應變），取樣頻率最高可達 100Hz，並可連續監測數十年，對於短、中、長期甚至數十年以上的構造變化，都可作為良好的監測工具，並填補地震儀與 GPS 觀測不到的訊號範圍。井下應變儀若能結合連續 GPS 觀測，對於數個月至數十個 Hz 的範圍內之微細地殼應變研究，提供另一更有力的工具，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。第一年之前半年，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需要二至三年才得以恢復。同時也容易受到環境因素所影響，其中影響較大的因素包括：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，建立各測站正確的應變異常修正模式，藉此修正移除各種環境效應，地殼變動的訊號即突顯在最後較乾淨的訊號中，其次藉由與地震相關的變化，試圖從這訊號中找出與地震斷層活動相關的應變資訊。

藉由高精度 GPS 與井下應變儀資料處理與分析，可研究地表變形、區域應變並進一步瞭解斷層活動的狀況，分析斷層的滑移速率，瞭解間震、同震與震後斷層活動的型態。

1-2-6 地球化學及地下水觀測

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

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

在本計畫透過多種大地測量的方法對斷層活動進行不同時空分布的觀測，其中包括 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 觀測等。這些資料詳細地記錄了地表或近地表的地殼變形活動，各有著不同的時間與空間解析力，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有十多站的連續觀測資料；固定時段沿斷層分布觀測的 GPS 及精密水準測量的測站，每年觀測次數 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，資料點則依地面可當做雷達波散射體的地表人工結構體或天然岩石露頭呈散彈狀的區域分布。因此上述資料的綜合分析解釋須要利用各別的基本特性進行整合，通常以井下應變儀資料為主軸，因其精度最高，頻率響應最廣，可在 10 Hz 至無窮大，但因井下應變儀敏感度太高，雜訊較大，若是長期的觀測分析仍以 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，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，同時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、抽測與異常點位清查。
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東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，藉以探討東部地區內能量蘊含之盈虧空間分布。

（2） 連續式 GPS 及 PS-InSAR （臺灣大學工作團隊負責）

a. 規劃當年度新設連續 GPS 監測樁位置。
b. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及坐標與高程差解算，獲得地表水平與垂直方向的位移量及速度場之初解，並與前一年速度場比較。
c. 經由連續 GPS 站提供時間序列中是否受到地震影響所造成之同震變形與震後變形及其他擾動所造成地表變化，確認不同時期連續 GPS 速度場是否受相同影響而改變並加以修正之。GPS 連續站資料分析包含各測站的雜訊特性、週期性效應與自然界影響因子分析。
d. 蒐集東部地區 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。
e. 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 3 次活動斷層參數表及邏輯樹專家討論會議，針對斷層分段特性、三維幾何形貌、最近一次活動時間、長期滑移速率、可能引致地震規模等參數不確定性，進行邏輯樹架構與參數權重之合理性探討。
b. 蒐集臺灣陸域構造平衡剖面資料以及重定位地震資料，建立活動斷層三維幾何形貌、並研究活動斷層之活動特性與地震規模尺度，建立活動斷層特性之參數表。包含：斷層名稱、分段資訊、斷層長度與破裂深度、面積、斷層機制、傾角、錯動量及分布、長短期滑移速率、再現週期、最近一次活動時間、可能最大地震規模。
c. 蒐集包含槽溝、地形或是地球化學定年之相關研究成果，推估活動斷層之長期滑移速率。
d. 利用 GPS 連續觀測站以及其他測地學的觀測資料所記錄的地表運動場(速度及應變率）來推測斷層面的震間滑移速率。並將測地學所得之變形反演斷層面震間滑移分布及滑移虧損率（slip deficit），分析短期及長期滑移速率及其在活動斷層潛勢分析上的意義，進一步推算斷層的能量累積率與發生特徵地震規模間的關係。
e. 完成東部地區 8 條活動斷層（米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層）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。

f. 地質法之活動斷層敏感區執行面問題研析，包括地質法子法及調查手冊中關於活動斷層部份之執行面問題，以及地質法與相關法令銜接性問題，會舉辦至少一次專家座談會議進行探討，並提出子法及調查手冊之具體改進建議。

（4） 井下應變儀資料分析 （臺灣大學工作團隊負責）

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

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

c. 經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。

d. 持續維護及更新井下應變儀資料庫。

（5） 地球化學及地下水觀測 （臺灣大學工作團隊負責）

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

b. 於 1 座水氡觀測站（社頂站），進行地下水水氡採樣分析。

c. 比較不同時序分析方法對於異常值辨識的差異。

d. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析既有地球化學土壤氣體、地下水水氡含量與地下水位異常變化的情形，評估與當地斷層、地震活動之關聯性。

e. 綜合評估本階段氣體成份與水位觀測結果，及斷層、地震活動之可能前兆因子。

（6） 整合觀測資料分析 （臺灣大學工作團隊負責）

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

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

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

d. 針對較近的異常事件在各種資料上相同或不同的表現作綜合解釋。

第二章、大地測量資料分析

2-1 連續 GPS 站解算成果分析

本次報告所使用之 GPS 連續站資料係由經濟部中央地質調查所所提供，連續站所屬機構包括中央地質調查所、中央氣象局、中央研究院、內政部、國土測繪中心、中正大學等單位，共 476 站。以下為計算每日座標解之方法與流程。

2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略

本研究利用美國 NASA 噴射推進研究室（JPL）所開發之 GIPSY-OASIS 解算軟體計算求解精密之測站座標。GIPSY 是一種精密單點定位之技術，其優點相較 GAMIT/GLOBK 是不需要分小網方式解算，解算速度快約數十倍，且各站的解算結果有獨立性，不會受到資料較差的測站干擾。其最突出的特點為利用非差分精密單點定位（Precise Point Positioning，PPP）方式處理數據，在參數上採用 JPL 的 Gerald Bierman 改進的卡曼濾波算法，該算法不但計算快速，而且數據穩定、精確。而其缺點在於不能像雙差方法消除共同誤差源的部份，在使用參數處理誤差方面較為麻煩。不過可使用 Ambizap 利用雙差方法的優點，消除共同誤差改善精度，解算成果略優於 GAMIT 或 BERNESE。

GIPSY 數據處理流程主要分為數據預處理、軌道計算和參數解算三個階段，最終從相位或偽距觀測數據中計算得出測站座標及精度估計。而這裡的數據處理採取了以下步驟：

（1）在 International GNSS Service（IGS）網站上獲取相應觀測日的精密衛星軌道、精密衛星時鐘改正、衛星掩蔽信息及有關地球的時間、極移、旋轉和極軸方向等資料。這些資料在數據處理中當作已知，不再進行解算。

（2）採用精密單點定位方法對本地網各觀測日的所有站點進行單獨處理，獲得各點的單日座標解，然後將所有本地站的單日座標解合併，獲得本地網座標及協方差矩陣的單日鬆弛約束解。自 PPP 解出之測站座標與變方協變方矩陣中取出座標與時間，形成測站座標之時間序列，並轉換至地理座標上。

2-1-2 GPS 資料品質檢測

圖 2-1.1 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的區域，建議應定期清理測站周圍環境，以避免測站遮蔽過度嚴重導致資料品質隨時間變差。

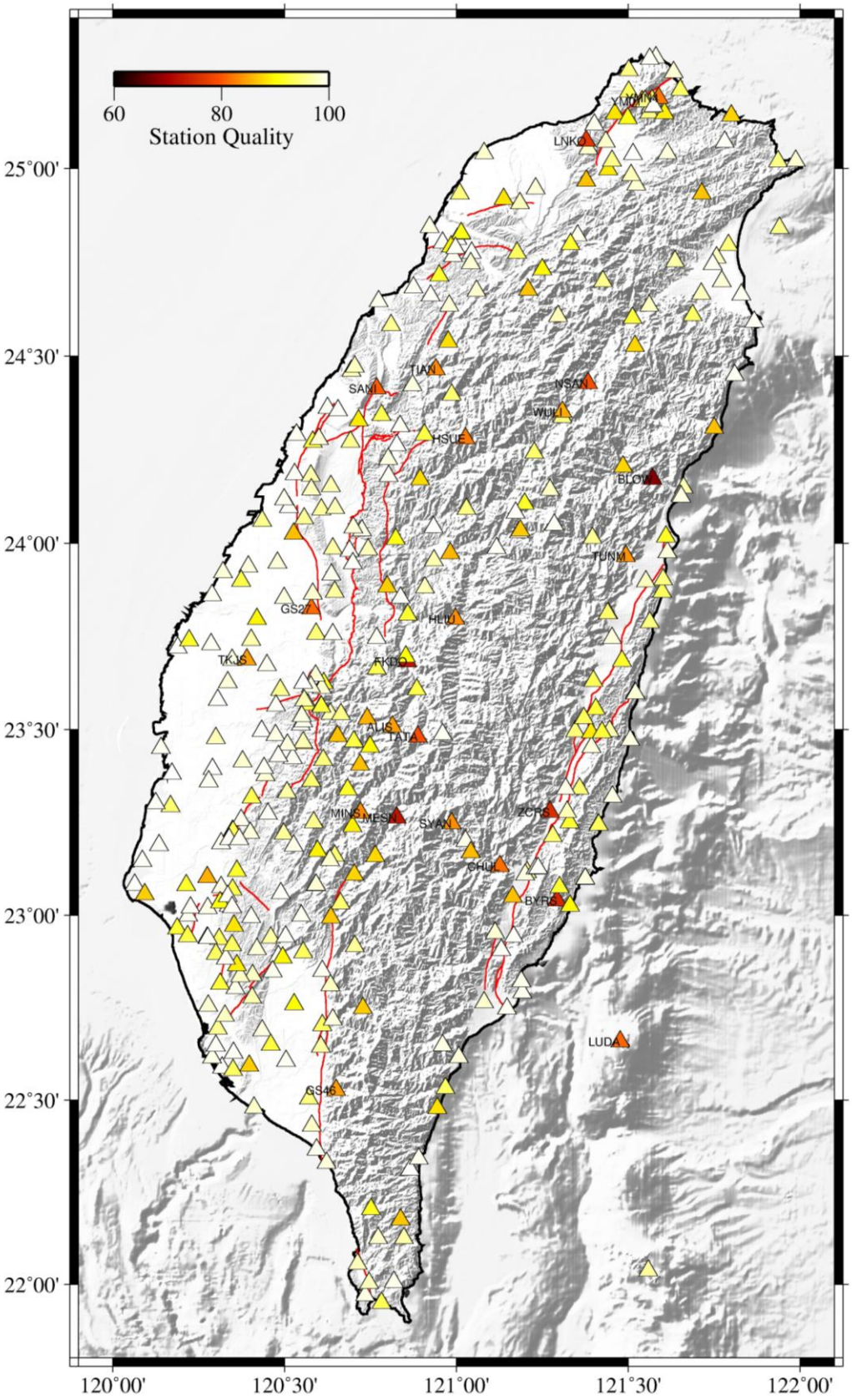


圖 2-1.1：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。

2-1-3 GPS 連續站時間序列分析

本期末報告接續去年報告，持續分析 2015 年 11 月至 2016 年 10 月的資料，並結合各測站從設站以來長時間資料解算的結果，就測站移動速度場或地震跳階影響加以探討。

圖 2-1.2 為彙整歷史資料至 2016 年 10 月年速度場之結果。由解算結果顯示水平速度場相對澎湖白沙站，中南部測站多為東南東往西北西移動，臺南以南地區多呈現東北往西南移動；另外北部地區則是由南往北移動，在宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為；垂直速度場方向上則以西部地區為主要下陷區域，中央山脈則呈現以抬升為主的變形行為，此結果與過去長期解算結果約略相同。

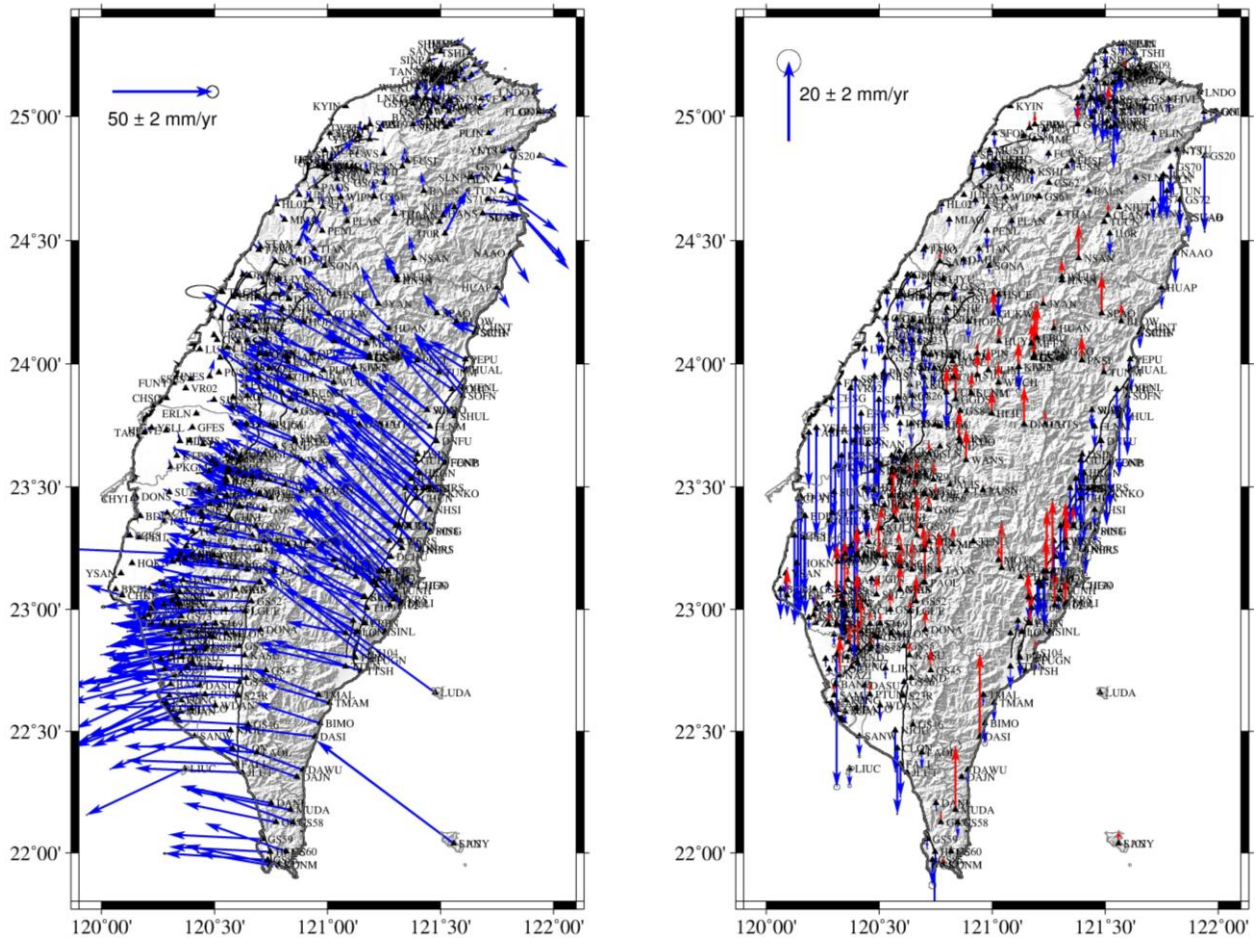


圖 2-1.2：整合歷史資料至 2016 年 10 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

圖 2-1.3 為扣除累積歷史資料至 2016 年底速度場之殘差。結果顯示，水平方向上誤差多介於 0 到 2 mm/yr，且多小於 1 mm/yr。垂直方向上誤差則介於 0 到 3 mm/yr，大多在 1 mm/yr 左右。代表新增本年度資料後，與歷史速度場沒有太大的差異，也就是說這一年來在構造運動方面，並沒有明顯的改變。而垂直方向上的誤差比水平方向上的誤差較大，則是因為 GPS 本身解算在垂直方向上的準確性較低所導致。分析後發現擁有較大誤差的測站多位於西南部的區域，其原因可能為 2016 年 2 月於西南部地區發生美濃地震，且部分測站設立於 2015 年初（GS82-GS89），除了記錄到美濃地震同震變形外，還持續記錄到震後變形，導致這些測站 2016 年速度場受到影響。表 2-1.2 為誤差較大測站。所有測站詳細的時間序列請參照附錄 2-1。

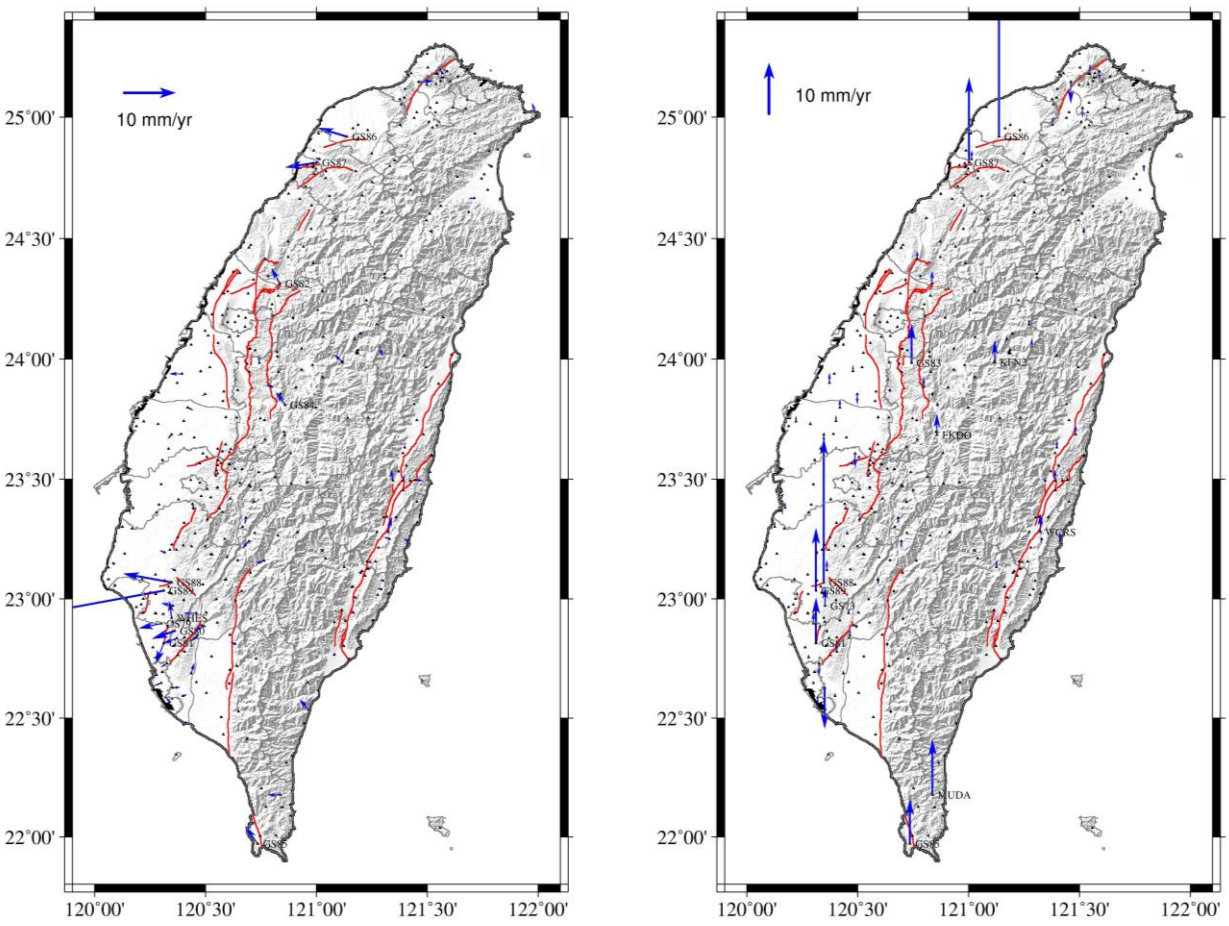


圖 2-1.3：今年觀測資料（歷史資料至 2016 年 10 月）扣除去年觀測資料（歷史資料至 2015 年 12 月），並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場差，右圖為垂直方向速度場差。

表 2-1.1：測站殘差大於 3mm 一覽表。

測站名稱	水平方向誤差	垂直方向誤差	可能原因
GS89	30.4	12.0	資料時間過短，並受美濃地震影響。
GS88	9.5	27.6	資料時間過短，並受美濃地震影響。
GS87	6.1	16.3	資料時間過短。
GS86	5.9	27.5	資料時間過短。
GS80	4.6	-	資料時間過短，並受美濃地震影響。
GS81	4.4	8.7	資料時間過短，並受美濃地震影響。
GS79	4.3	-	資料時間過短，並受美濃地震影響。
GS85	4.2	8.6	資料時間過短。
GS82	3.3	-	資料時間過短，並受美濃地震影響。
WHES	3.2	-	資料缺失，待補齊。
GS84	3.0	-	資料時間過短，並受美濃地震影響。
MUDA	-	10.7	資料時間過短。
GS83	-	7.5	資料時間過短，並受美濃地震影響。
FKDO	-	4.1	植被影響嚴重。
KFN2	-	4.1	資料時間過短。
GS73	-	3.6	資料時間過短，並受美濃地震影響。

2-2 2016 GPS 測量資料分析檢核

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 資料品質檢核

2-2-1-1 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。

2-2-1-2 座標殘差分析

由圖 2-2.1 可知 2002-2015 年及 2016 年 GPS 觀測資料之座標殘差分布情形。2002-2015 年資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.0 ± 3.9 mm（2 倍標準差）、E 方向為-0.1 ± 4.9 mm 及 H 方向為-0.3 ± 15.5 mm。在 2016 年的資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 2.6 mm、E 方向為-0.2 ± 4.6 mm 及 H 方向為 0.2 ± 14.2 mm。

2-2-1-3 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 2002-2015 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 23.6 mm，及 2016 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.1 mm，垂直方向的平均值為 20.7 mm。

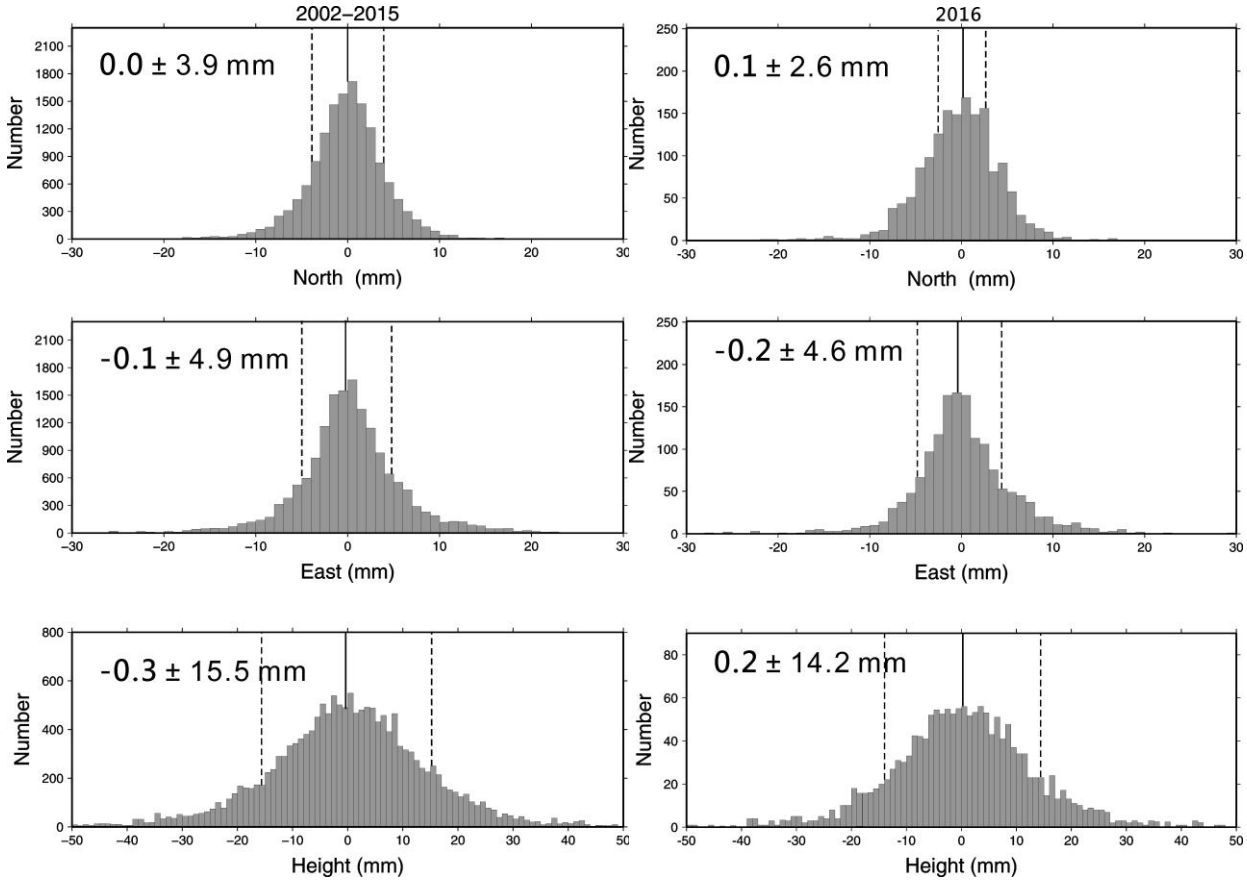


圖 2-2.1：2002-2015 年及 2016 年 GPS 點位座標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95%信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

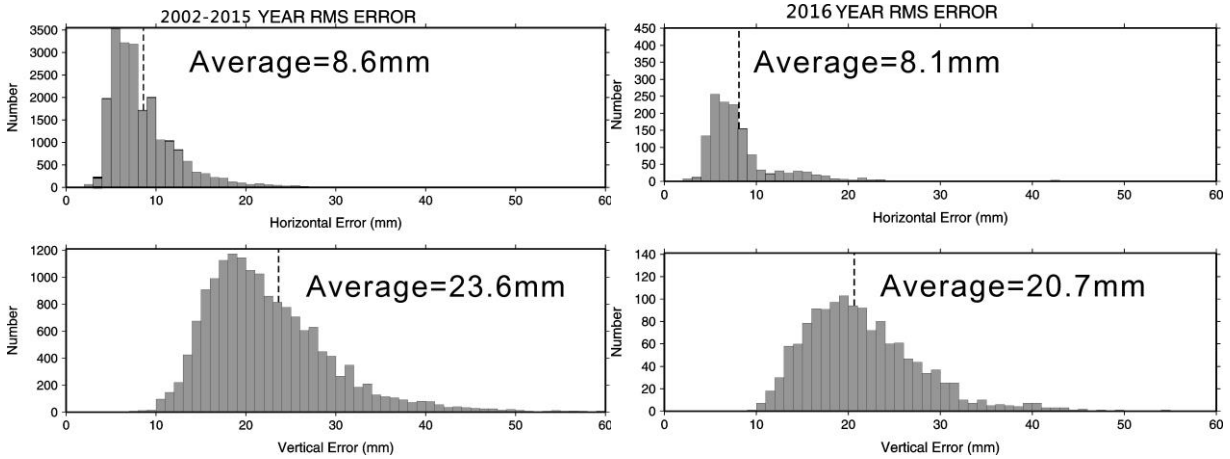


圖 2-2.2：2002-2015 年及 2016 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

2-2-2 GPS 觀測資料分析方法

為了探討臺灣地區斷層活動及地殼變形行為，我們利用歷年每日 GPS 觀測座標的成果，進行各個測站速度之評估。在考慮地震對地表位移所造成的影響，我們根據時間序列的型態，分別利用下述 4 個方程式，針對第 n 個測站的第 i 個座標分量之時間序列進行擬合。（1）首先是針對 GPS 觀測期間並無地震造成明顯地表位移的測站（圖 2-2.3），我們利用

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + v_n^i$$

（式 2-2.1）

進行擬合。其中 a_n^i 為截距，b_n^i 為測站速率，v_n^i 為殘差值。（2）部分測站於觀測期間雖然有地震造成明顯同震位移，但是震後之地表位移速率並無發生改變（圖 2-2.4），因此，我們利用

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + \sum_{j=1}^{n_c} c_{nj}^i H(t - T_{cj}) + v_n^i$$

（式 2-1.2）

進行擬合。其中 c_{nj}^i 為地震造成之同震位移，H 為階層函數。（3）此外，部分測站於觀測期間不但有地震造成明顯同震位移，且震後之地表位移速率亦發生改變，因此，我們利用

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + \sum_{j=1}^{n_c} c_{nj}^i H(t - T_{cj}) + \sum_{j=1}^{n_d} d_{nj}^i H(t - T_{dj}) t + v_n^i$$

（式 2-2.3）

進行擬合。其中 d_{nj}^i 為地震震後地表位移之改變速率。（4）最後，極少數之測站於觀測期間，不但地震造成了明顯的同震位移，震後之地表位移速率亦發生改變，同時也記錄到非線性之震後變形。因此，我們利用

$$x_n^i(t) = a_n^i + b_n^i t + \sum_{j=1}^{n_c} c_{nj}^i H(t - T_{cj}) + \sum_{j=1}^{n_d} d_{nj}^i H(t - T_{dj}) t_i + \sum_{j=1}^{n_e} e_{nj}^i \log(t - T_{ej}) H(t - T_{dj}) + v_i$$

（式 2-2.4）

進行擬合。其中 d_{nj}^i 為地震震後地表位移之改變速率。

於本計畫中，我們利用最小二乘法，將上述方法應用到各個測站的各個座標分量，評估各測站相對於穩定大陸邊緣測站（S01R）之速度場。此外，考慮影響速度場之主要地震，可由時間序列分布情形評估地震主要之影響範圍，且依照該地震前後累積之觀測量，利用式 2-2.1 至式 2-2.4 來評估該地震所造成之同震影響。如 2003 年成功地震所造成之同震變形主要集中在臺灣南部及東南部地區。

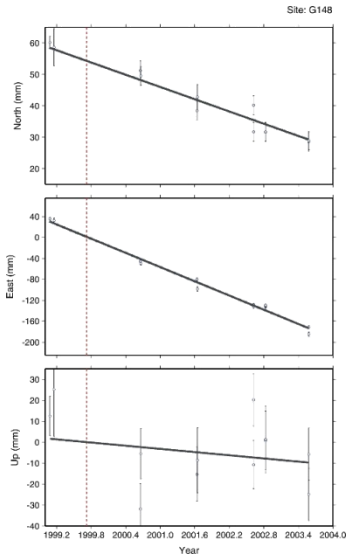


圖 2-2.3：未受地震影響之 GPS 點位時間序列。

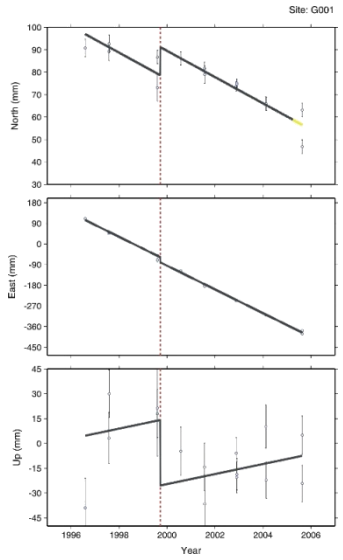


圖 2-2.4：受地震影響且震後之地表位移速率並無發生改變之 GPS 點位時間序列。

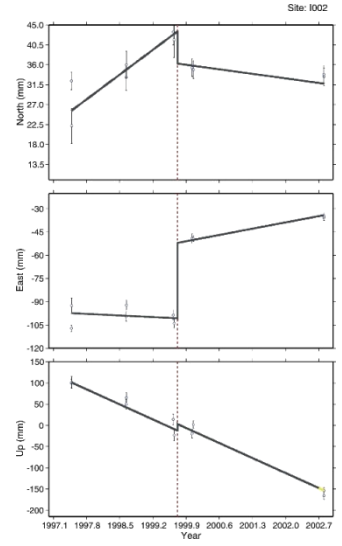


圖 2-2.5：受地震影響且震後之地表位移速率亦發生改變之 GPS 點位時間序列。

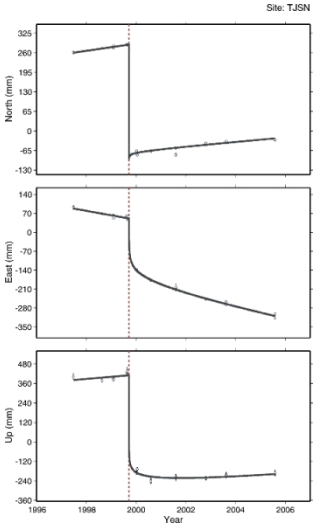


圖 2-2.6：受地震影響並記錄到震後非線性地表位移之 GPS 點位時間序列。

此外，在速度場誤差評估方面，經由最小二乘法所獲得各速度值之誤差量主要是反映全頻等幅雜波（white noise）。然而，當我們考慮各速度值的誤差時，我們還必須同時考慮時間序列中和時間相關（time-correlated 或 colored）的誤差，即布朗運動（Brownian motion 或 random walk noise），所造成的影響。根據 GPS 連續站長期觀測資料所獲得的經驗值（Langbein and Johnson, 1997），我們知道布朗運動（σR）在各個速度分量上的值分別為 0.9、1.0 和 3.0 mm/yr$^{1/2}$。因此，在估算速度場誤差時，我們同時考慮布朗運動（σ_R）和最小二乘法所獲得各速度值之全頻等幅雜波（σ_W）的貢獻量，以$\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_W^2}$計算速度場誤差。根據經驗值（Langbein and Johnson, 1997），水平方向之布朗運動值為 1.0 mm/yr$^{1/2}$，垂直方向之布朗運動值則為 3.0 mm/yr$^{1/2}$。

2-2-2-1 GPS 移動站資料垂直速度場

為了檢核 GPS 移動站垂直速度場資料可用性，我們利用以下機制來進行移動站垂直速度資料檢驗。首先，檢查此區域所有連續站垂直速度場時間列，確認連續站時間序列穩定性。在確認完此區域所有連續站後，我們假設連續站反映出了地表的真實垂直運動速度。

以台南高屏地區 2002 至 2016 年 GPS 移動站為例，依據解算 GPS 移動站垂直速度資料時的 Misfit 數值，我們將移動站分組，綠色為 67 個 Misfit < 20 mm 的移動站，紅色為 27 個 Misfit > 20 mm 的移動站，藍色則為連續站（圖 2-2.7）。利用連續站資料內差 67 個 Misfit < 20 mm 的移動站，再將內插的移動站結果以檢驗方式:三倍中誤差>內插後資料和觀測資料的殘差，符合則通過檢驗。67 個 Misfit < 20 mm 的移動站只有 4 個站沒有通過檢驗，但是考量到此 4 站位於沿海地層下陷區，所以全數予以保留。

經檢驗過的 67 個移動站也被我們假設反映出了地表的真實垂直運動速度，於是我們利用連續站和經檢驗過的 67 個移動站資料內差 Misfit > 20 mm 的移動站。將內插的移動站結果以檢驗方式:內插後資料和觀測資料的殘差/觀測值 < 0.5，符合則通過檢驗。在 27 個 Misfit > 20mm 的移動站中剔除 18 個站後，移動站與連續站解算成果之垂直速度場分布型態趨於吻合（圖 2-2.8）。

將檢核過的 GPS 連續站和移動站垂直速度場加上水準垂直速度場，我們可以利用更多可信的資料分析地表垂直運動行為。例如在西南部垂直速度圖（圖 2-2.9）上可見到臺灣西南部沿海均有地層下陷的趨勢，而臺南台地之存在也顯而易見。最明顯的抬升現象為在關廟以東之區域，抬升速率一路上升至 20 mm/yr，並在通過龍船斷層後，抬升速率就立即下降。

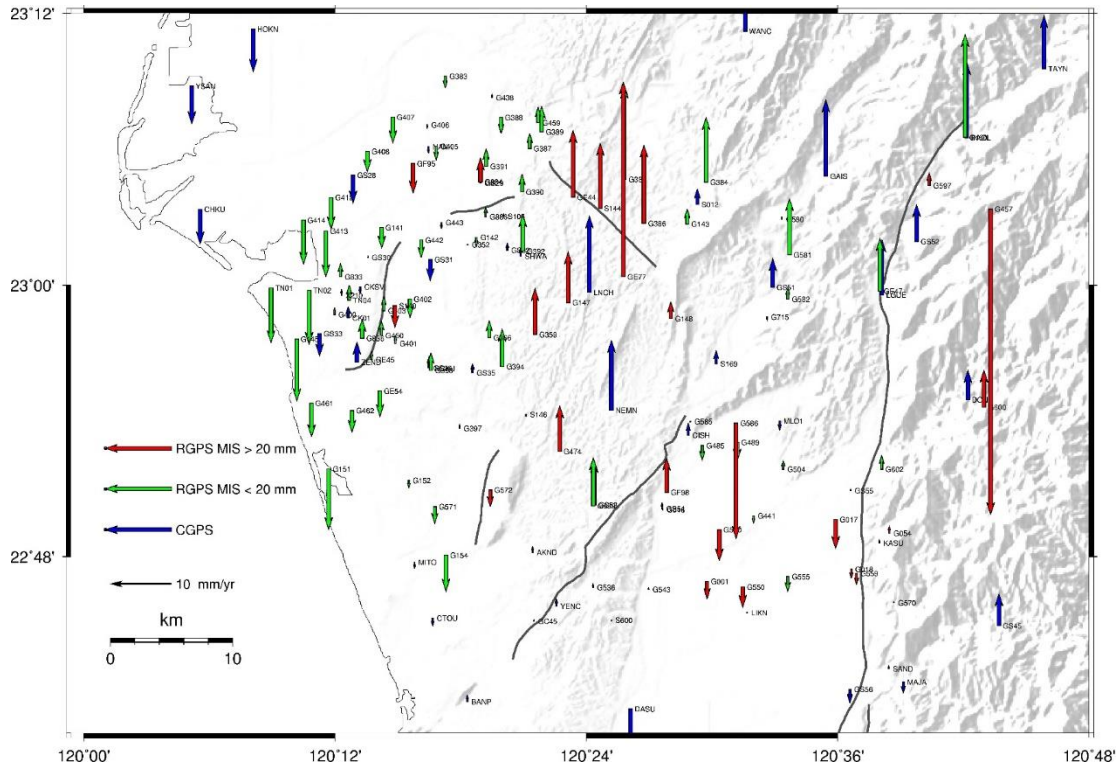


圖 2-2.7：臺灣西南部 2002~2016 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，藍色箭頭表示 GPS 連續站，綠色箭頭表示 Misfit < 20 mm 的 GPS 移動站，紅色箭頭表示 Misfit > 20 mm 的 GPS 移動站。

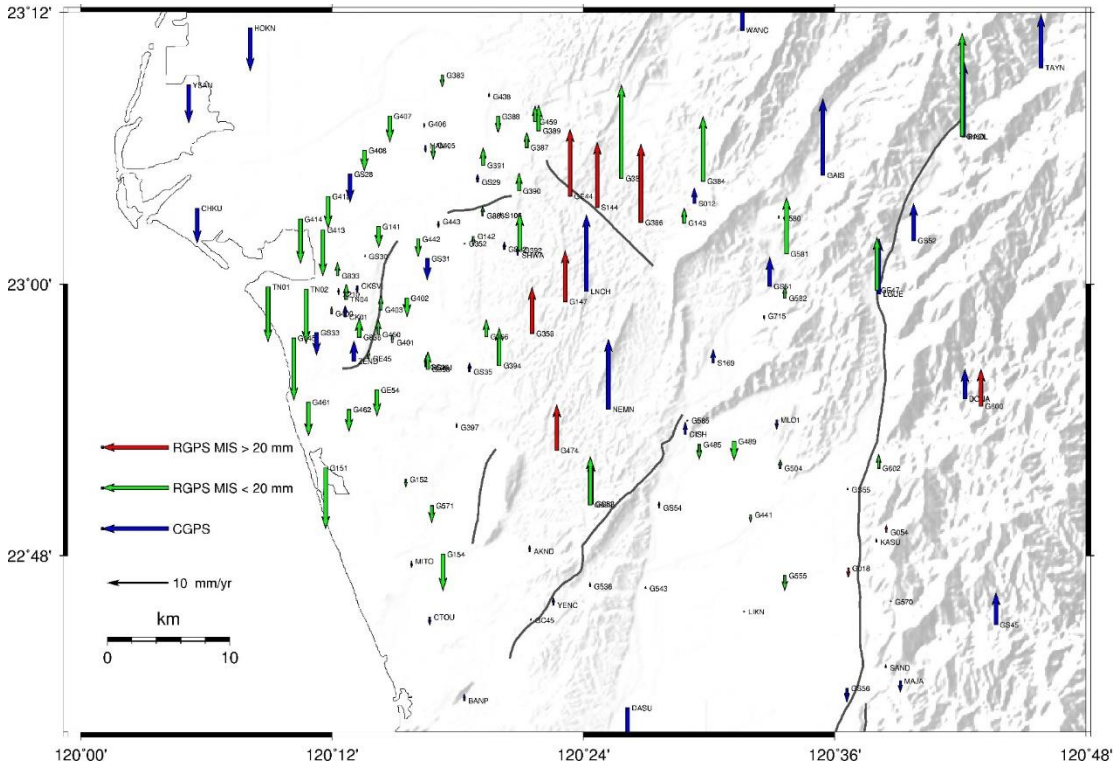


圖 2-2.8：臺灣西南部 2012~2016 年垂直方向速度場，藍色箭頭表示 GPS 連續站，綠色箭頭表示 Misfit < 20 mm 的 GPS 移動站，紅色箭頭表示 Misfit > 20 mm 的 GPS 移動站。

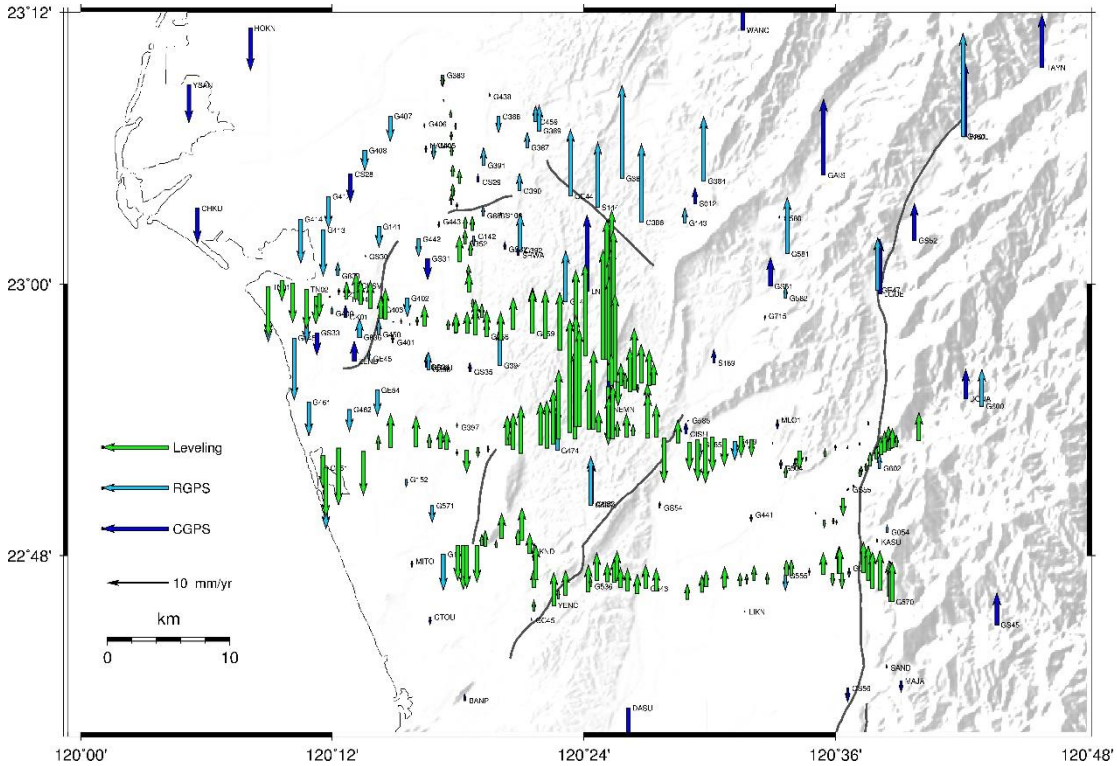


圖 2-2.9：臺灣西南部 2012~2016 年 GPS 垂直方向速度場和水準垂直速度場，藍色箭頭表示 GPS 連續站，青色箭頭表示 GPS 移動站，綠色箭頭表示水準測線。

2-2-3 臺灣地區各分區 GPS 觀測成果分析

2-2-3-1 臺北地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之臺北地區觀測資料進行分析，臺北地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.10 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2016 年之速度場，速度量值 0.2 ~ 6.7 mm/yr，其中 GF94、TC29~TC31 以及 GG39~GG57 等點位加進本次觀測後共計有 5 次觀測資料（2012~2016 年），其解算誤差隨著測量次數的累積而減少，且速度場分布亦逐漸與該地區整體趨勢相符。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.11）可知北部地區垂直速度場大致呈現下陷，值約 0.0 ~ 11.3 mm/yr。

針對山腳斷層，由 GPS 及精密水準觀測結果可知，斷層南側在水平方向有較明顯的左移分量，垂直方向則由西到東呈現下陷的變化梯度，而斷層北側在水平方向則呈現帶有左移分量的擴張量，垂直方向在跨斷層的變化則並不顯著。

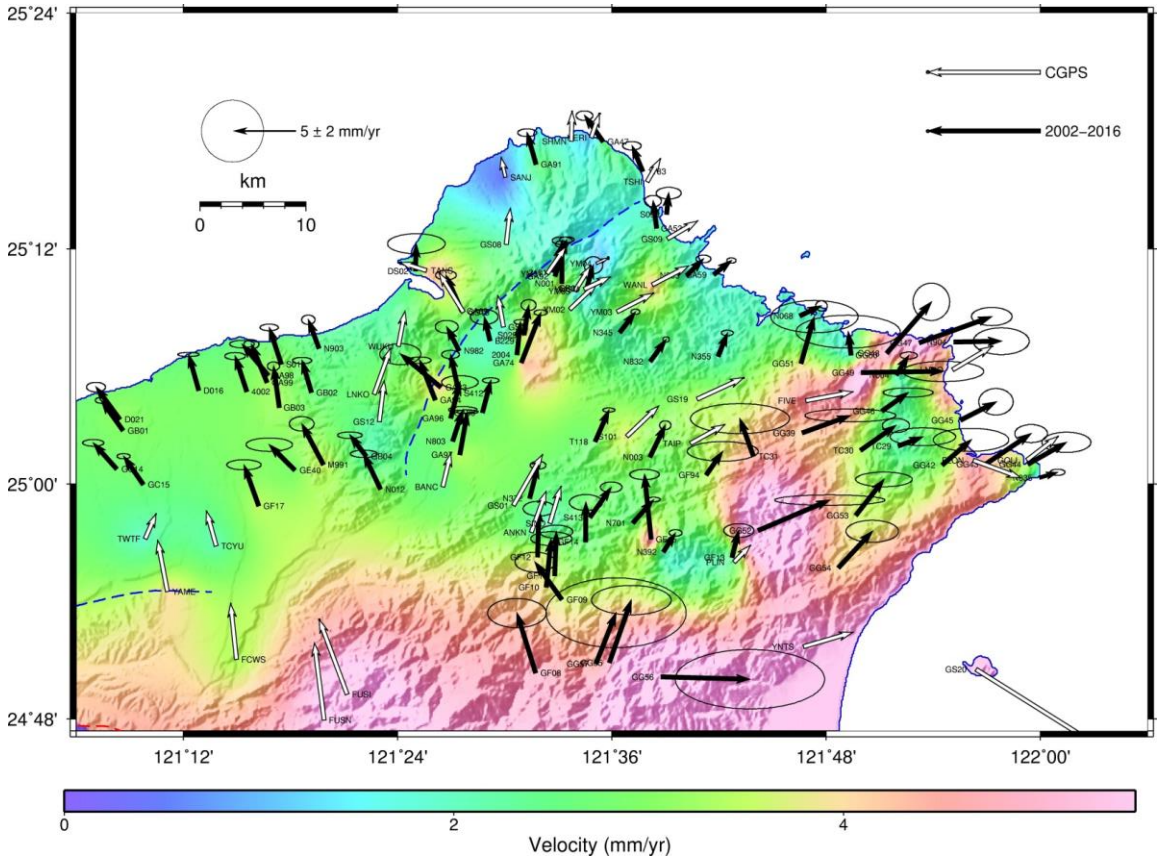


圖 2-2.10：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2016 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

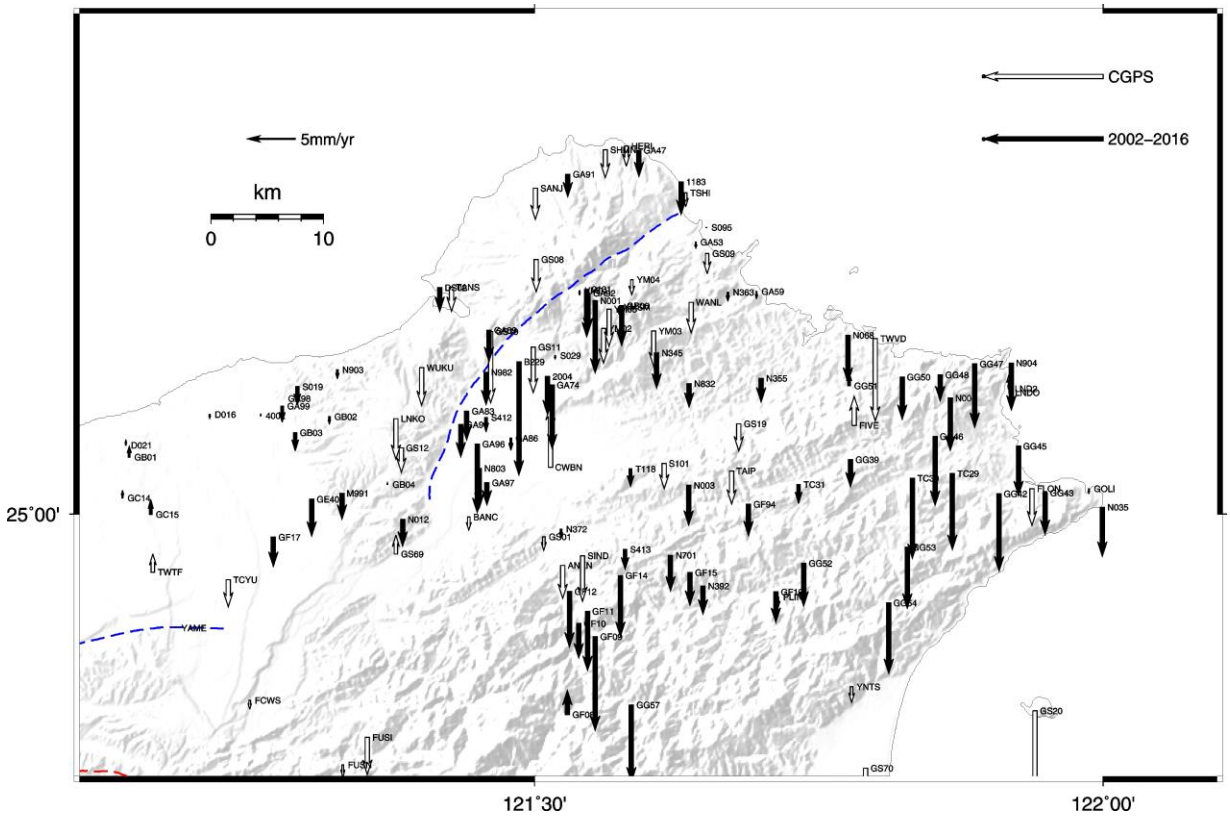


圖 2-2.11：臺北地區相對於澎湖白沙站(S01R)2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

藉由高時間解析之 GPS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GPS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之座標時間序列。本計畫首先挑選最近的移動站與連續站進行比較。臺北地區（圖 2-2.12）可比對座標時間序列之組合為 GOLI-GG44、PLIN-GF13、GS10-GA69、GS13-GA97、YM01-2101 及 YMSM-GB05 六組，由座標時間序列比對可知，移動站與連續站座標時間序列型態皆相符（圖 2-2.13）。

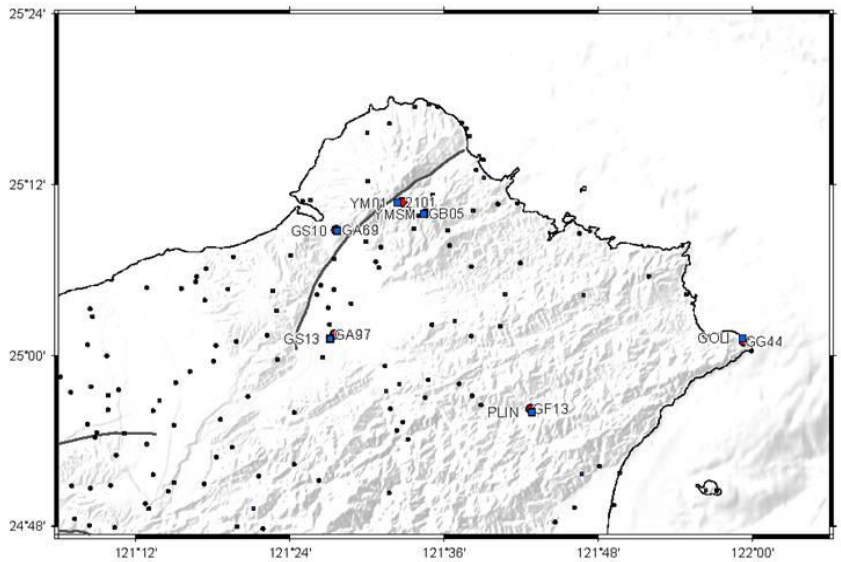


圖 2-2.12：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

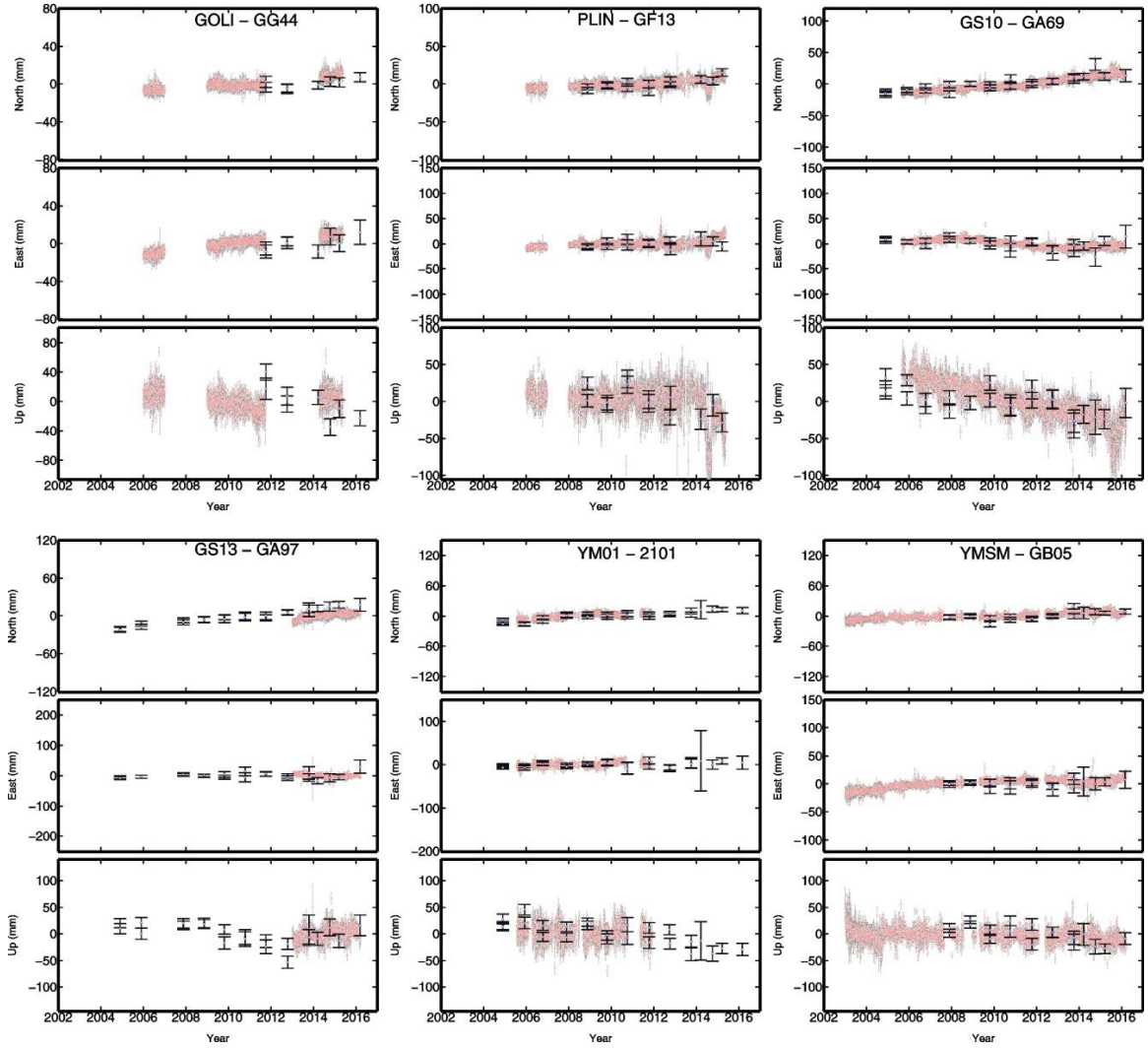


圖 2-2.13：2002-2016 年臺北地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-3-2 恆春地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之恆春地區觀測資料進行分析，由於 2006 年 12 月 26 日發生屏東外海地震對恆春地區之 GPS 速度場造成影響，觀察本區各站之時間序列可得地震前後之速度場略有不同，由於本區在地震後已有 8 次 GPS 觀測資料，且透過 2002 至 2016 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 2016 年速度場分為三個時間段討論（圖 2-2.18）。

恆春地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.14 所示，藍色箭頭表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，速度量值 41.3 ~ 59.5 mm/yr，紅色箭頭表示屏東外海地震後 2006~2010 年速度場，速度量值 34.5 ~ 73.2 mm/yr，黑色箭號表示 2010~2016 年之速度場，速度量值 31.1 ~ 55.9 mm/yr。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.15~17）可知恆春地區垂直速度場在第一時間段斷層兩側大致呈現下陷，值約 0.4 ~ 19.7 mm/yr，第二時間段斷層東側呈現抬升，而西側呈現下陷，值約 0.6 ~ 13.3 mm/yr，第三時間段斷層兩側大致呈現下陷，值約 0.0 ~ 14.5 mm/yr。

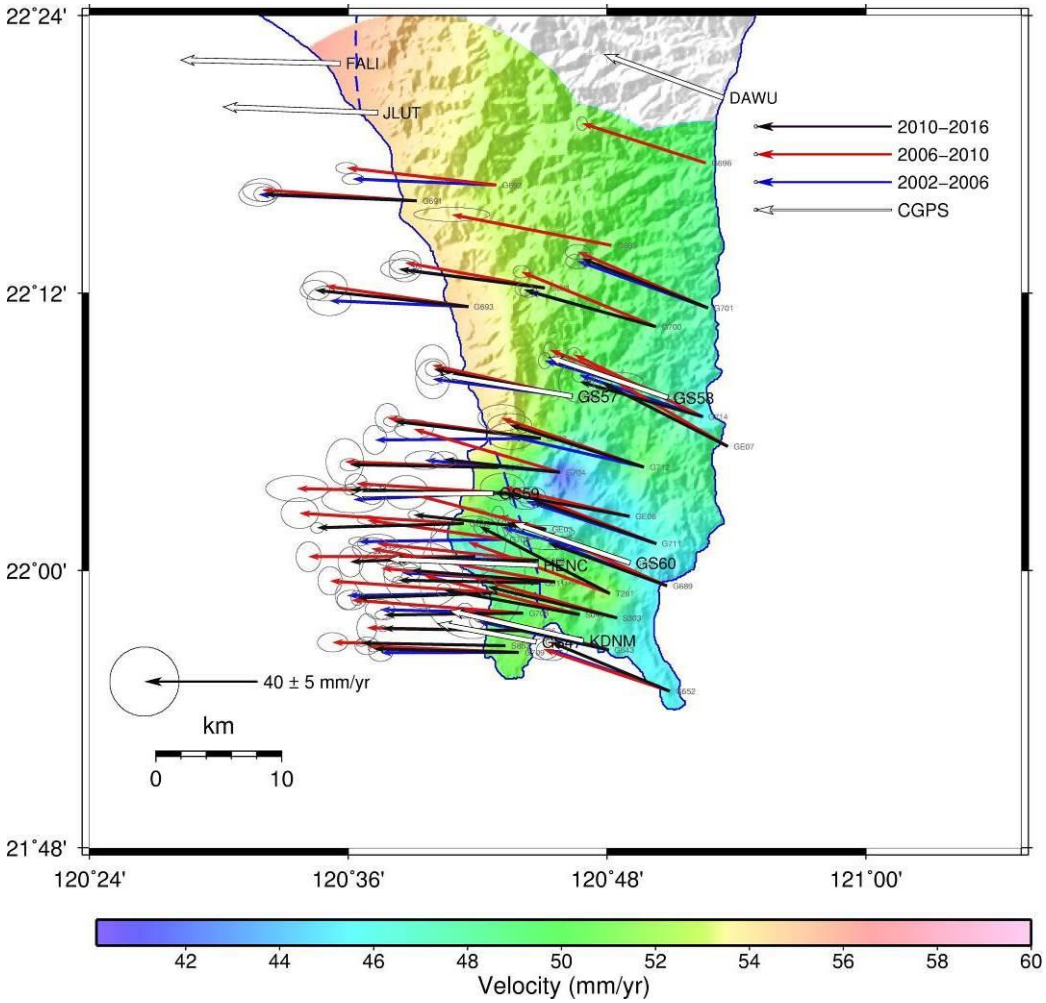


圖 2-2.14：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，藍色箭頭表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，紅色箭頭表示震後 2006~2010 年速度場，黑色箭頭表示震後 2010~2016 年速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場，彩色色階為 2010~2016 年資料所解算之速度場分布色階圖。

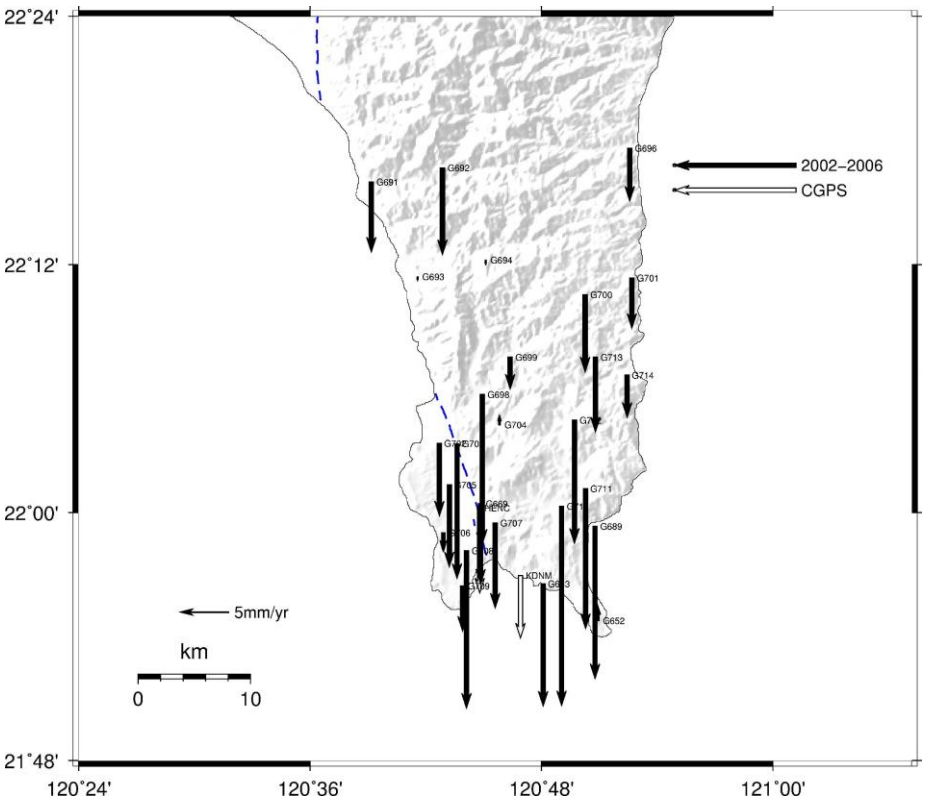


圖 2-2.15：恆春地區相對於澎湖白沙站(S01R)2002~2006 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2002~2006 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2006 年連續站速度場。

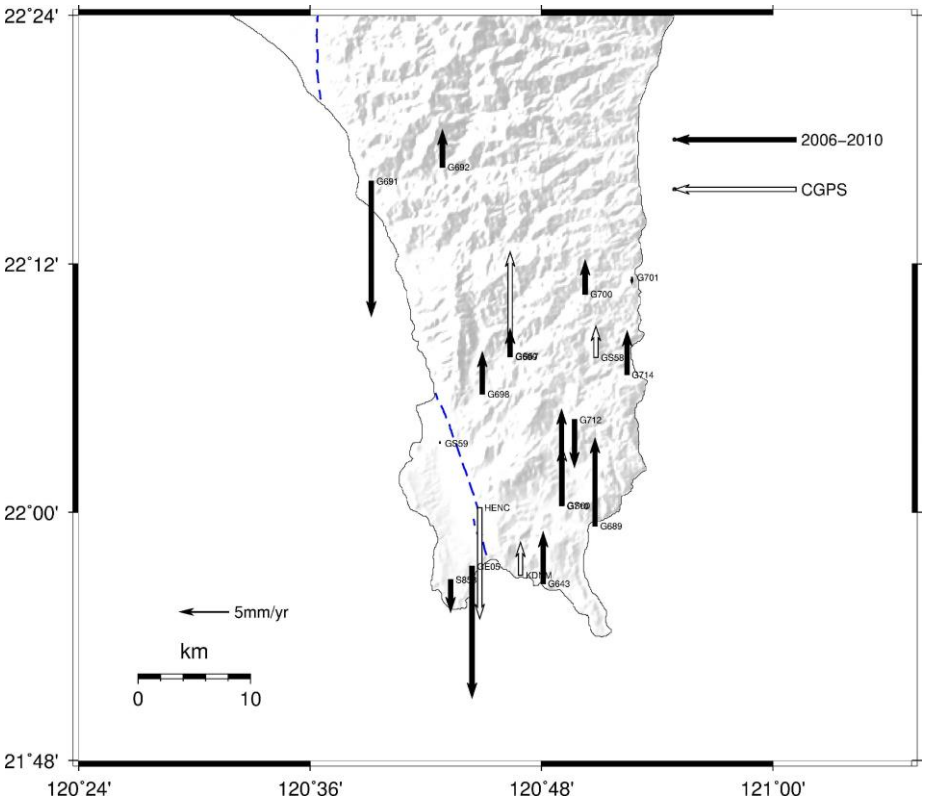


圖 2-2.16：恆春地區相對於澎湖白沙站(S01R)2006~2010 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2006~2010 年移動站速度場，白色箭號為 2006~2010 年連續站速度場。

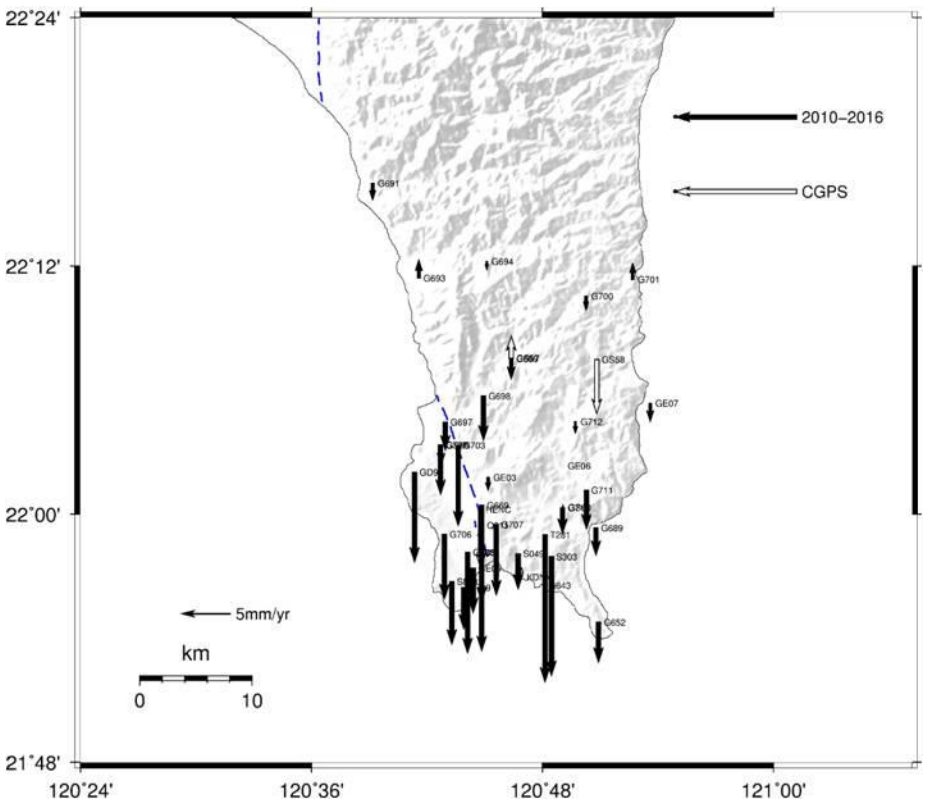


圖 2-2.17：恆春地區相對於澎湖白沙站(S01R)2010~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2010~2016 年移動站速度場，白色箭號為 20010~2016 年連續站速度場。

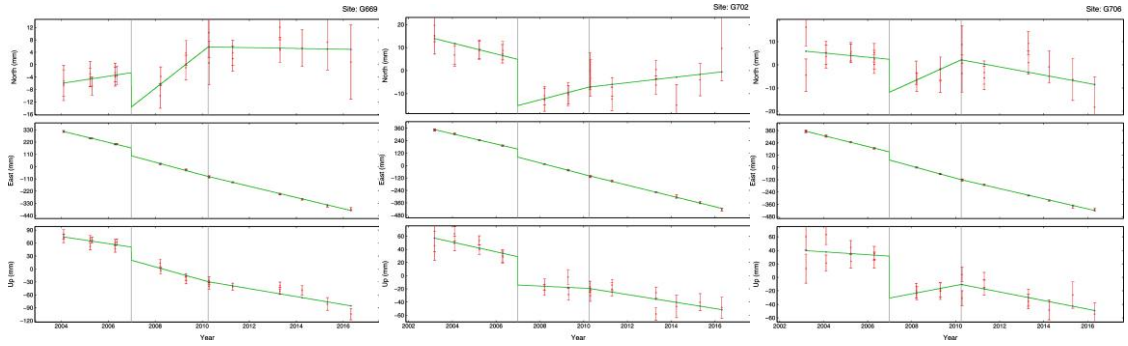


圖 2-2.18：2002~2016 年恆春地區 GPS 移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之座標時間序列圖。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。恆春地區（圖 2-2.19）可比對座標時間序列之組合為 GS57-G699、GS59-G702、GS60-G710、GS47-GE05、HENC-G669 五組，由座標時間序列比對可知，除 GS47（台電南展館）、GE05（阿利海產）在水平及高程方向速度皆有顯著差異（圖 2-2.20），以及 HENC 站（恆春氣象站）及 G669 站（恆春國小）在高程方向可發現 2006 年底恆春地震之後移動站座標時間序列與 HENC 連續站型態分布不同，震前高程速度值亦有所差異。其餘各組移動站與連續站座標時間序列型態相符（圖 2-2.20）。

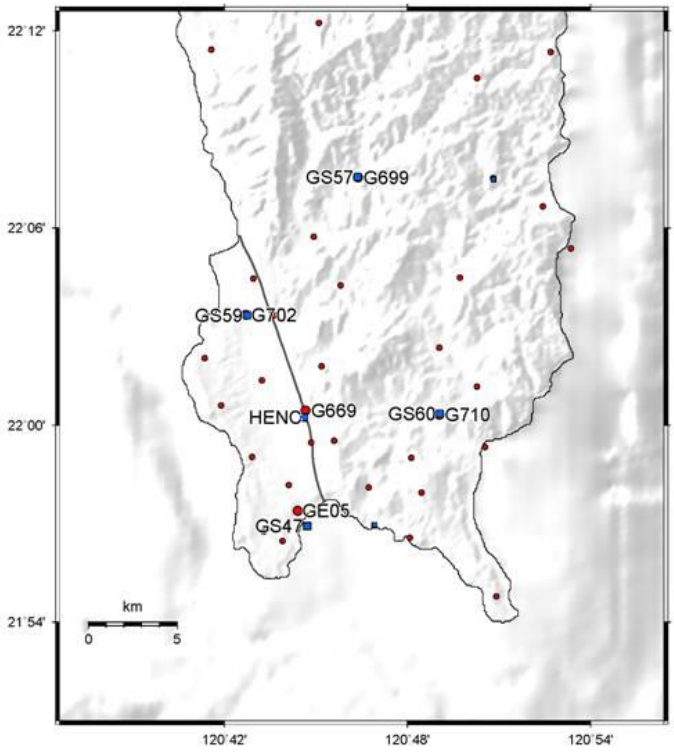


圖 2-2.19：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

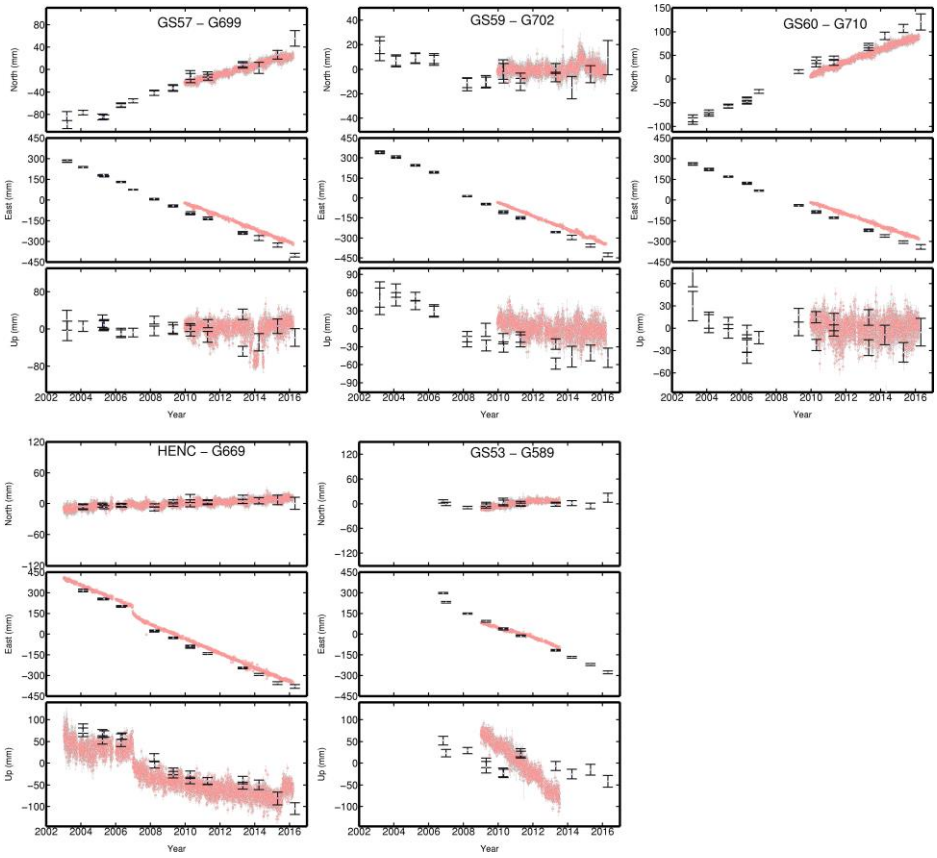


圖 2-2.20：2002~2016 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-3-3 桃竹苗地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之桃竹地區觀測資料進行分析，桃竹地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.21 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2016 年之速度場，速度量值 2.5 ~ 22.6 mm/yr，其中除 T007（園區內）及 G416（五峰國小）之原速度場與該地區趨勢不符合外，其餘點位速度場分布亦與該地區整體趨勢相符。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.22）可知桃竹地區垂直速度場在新城斷層以北與湖口斷層以南之間大致呈現下陷，湖口斷層以北則轉為抬升，新城斷層以南在垂直方向位移速度則不顯著，獅潭斷層東西兩側則皆為下陷，整體值約 0.1 ~ 10.8 mm/yr。

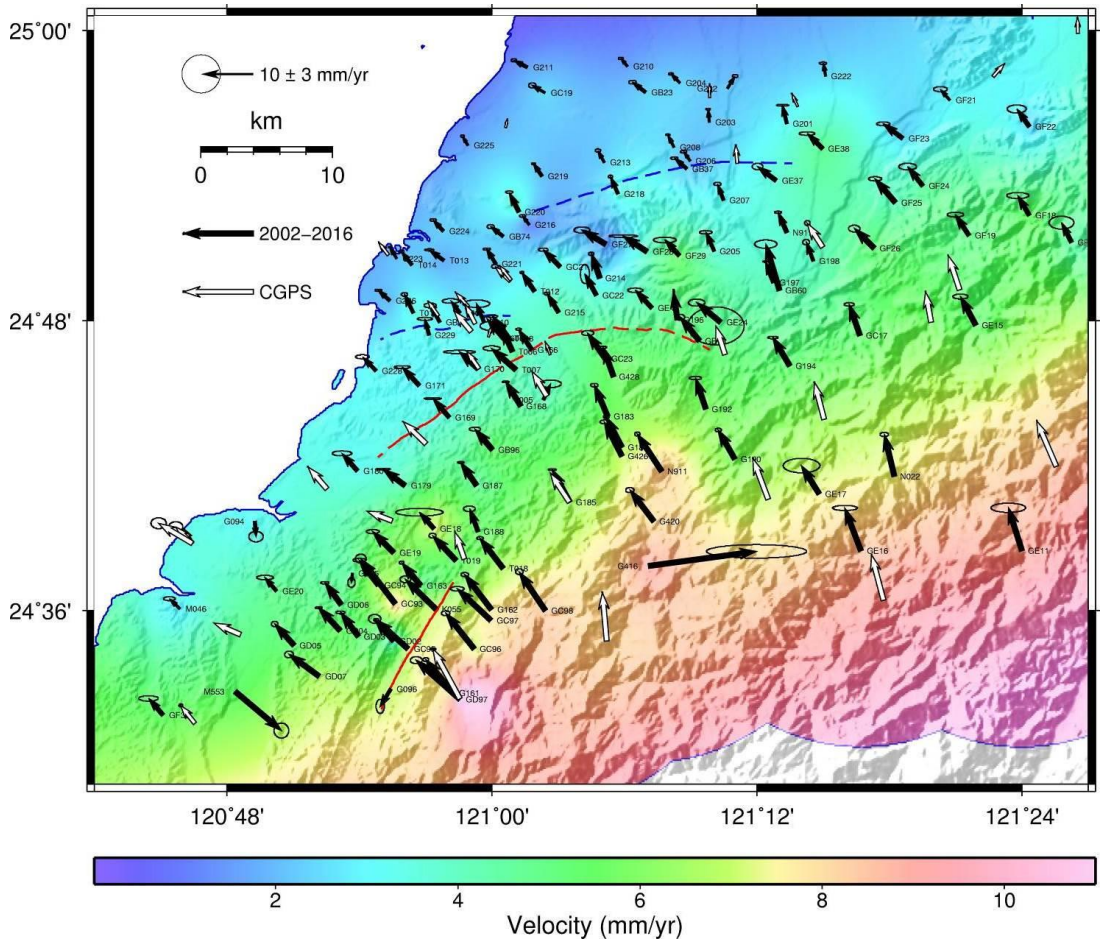


圖 2-2.21：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2016 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

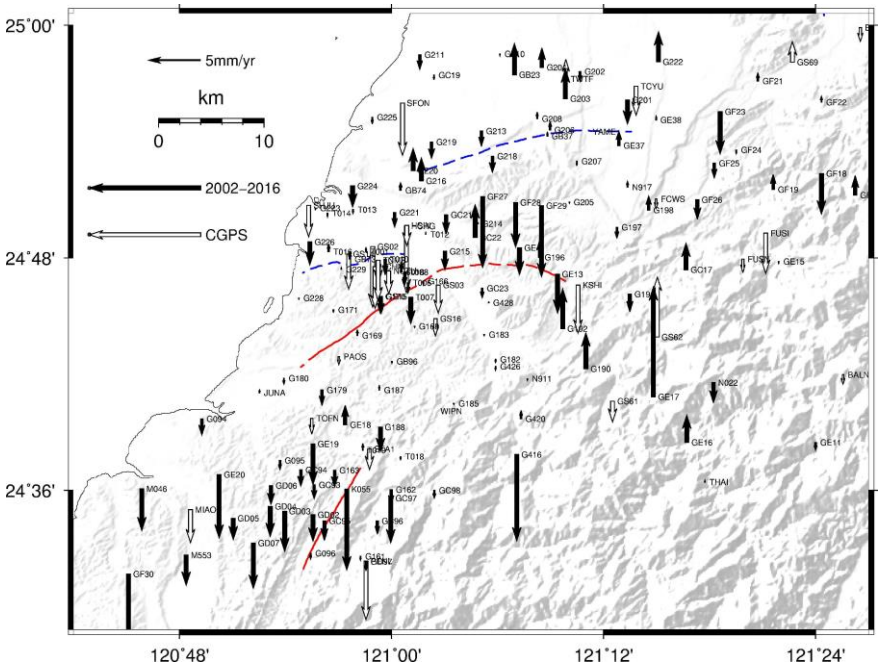


圖 2-2.22：桃竹地區相對於澎湖白沙站(S01R)2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

藉由高時間解析之 GPS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GPS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之座標時間序列。本計畫首先挑選最近的移動站與連續站進行比較。桃竹地區（圖 2-2.23）可比對座標時間序列之組合為 GS02-T001、GS16-G170、HCHM-T010、TCMS-T010、STA1-T019、PENL-GD97、GS15-G170、WIPN-G185、FCWS-G198、SHJU-T005 及 GS14-GB73 等十一組，由座標時間序列比對可知，除新竹高工（GS02）因新建大樓造成建物傾斜，導致時間序列失真而與相近移動站不同外，其餘移動站與連續站座標時間序列型態皆相符（圖 2-2.24）。

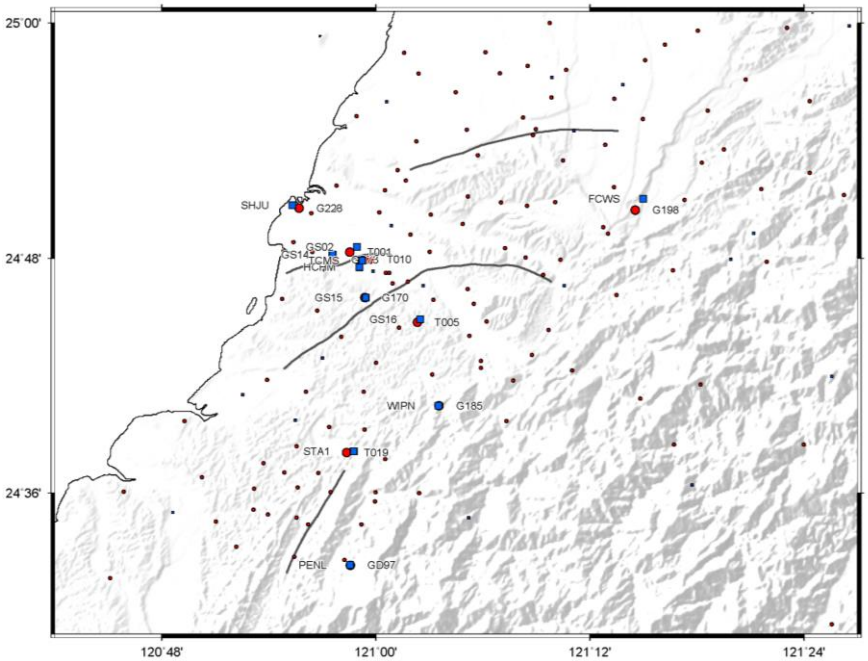


圖 2-2.23：桃竹地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

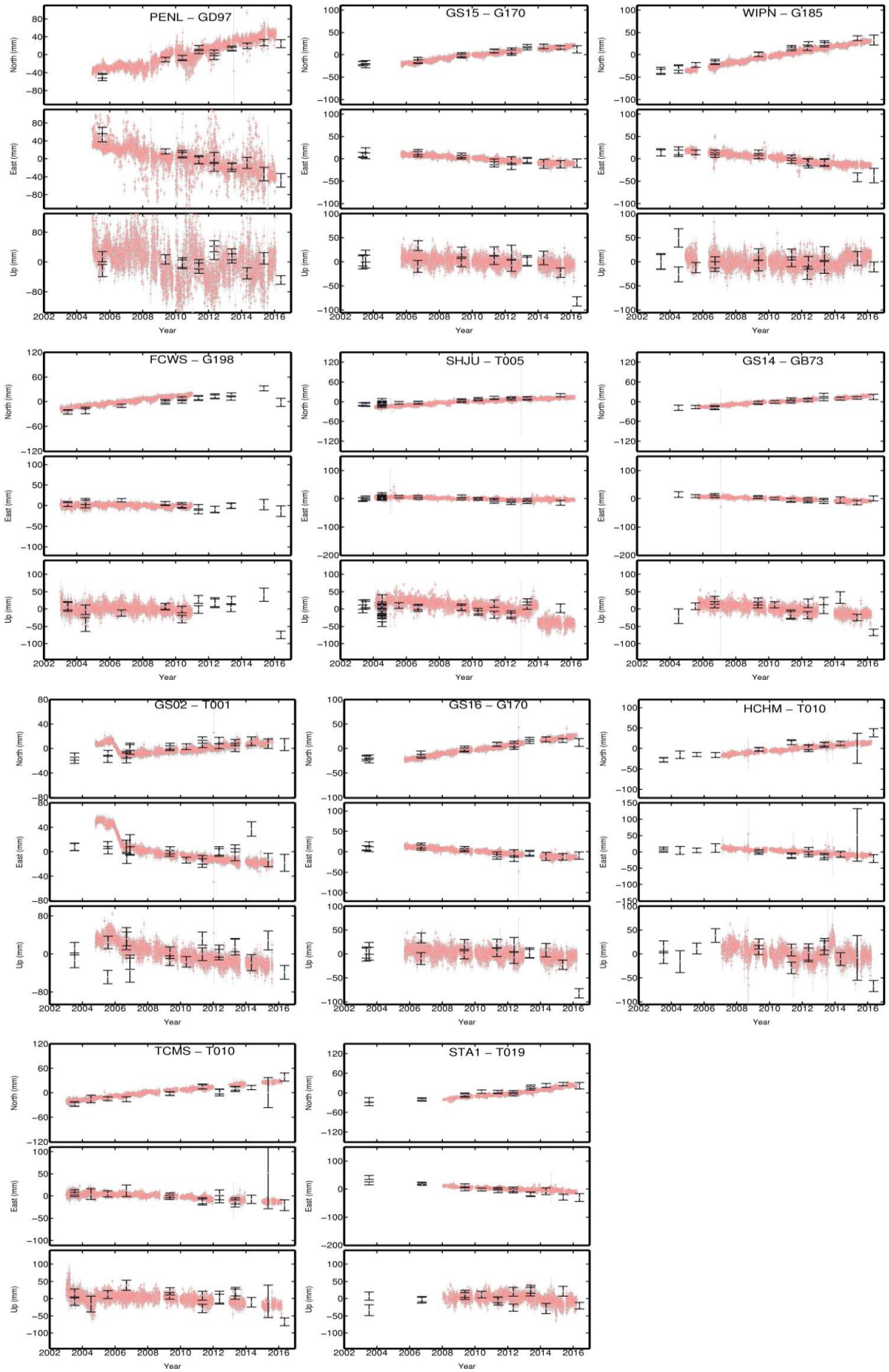


圖 2-2.24：2002~2016 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-3-4 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，各觀測點位之速度值如圖 2-2.25 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2016 年之速度場，速度量值 0.4 ~ 37.1 mm/yr，其中 GB13 位於阿里山青年活動中心，於 2009 年可見由莫拉克颱風造成的瞬間永久位移，經過速度修正後該點位速度仍然與該地區速度分布不符，顯示該點速度主要反應該地地滑現象。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.26）可知嘉南地區垂直速度場在嘉義、雲林及北台南沿海地層下陷區呈現明顯沉陷，麓山帶以大尖山-觸口-木屐寮-六甲斷層系統為界，西側呈下陷而東側則轉為抬升，整體值約 0.0 ~ 55.4 mm/yr。

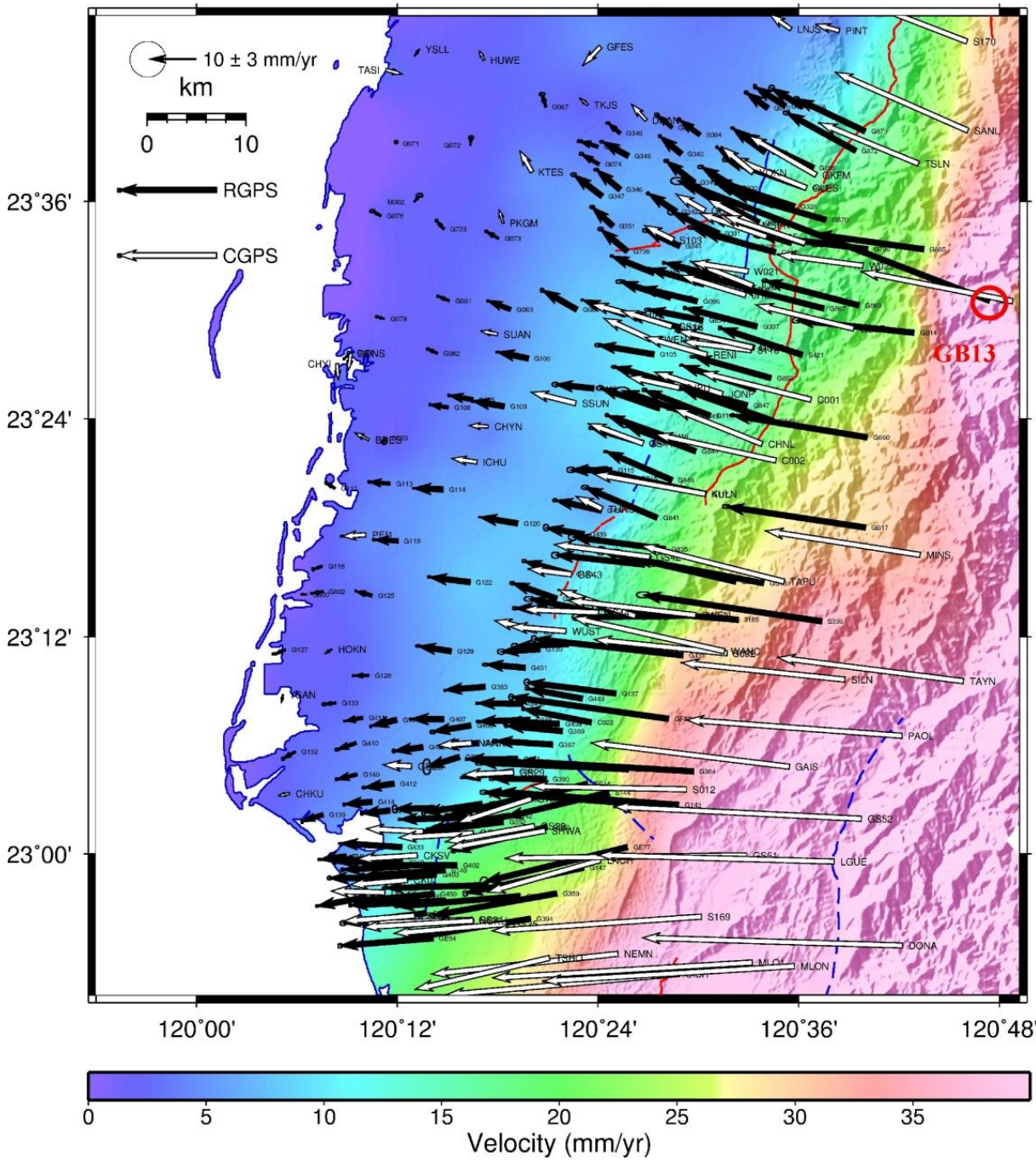


圖 2-2.25：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

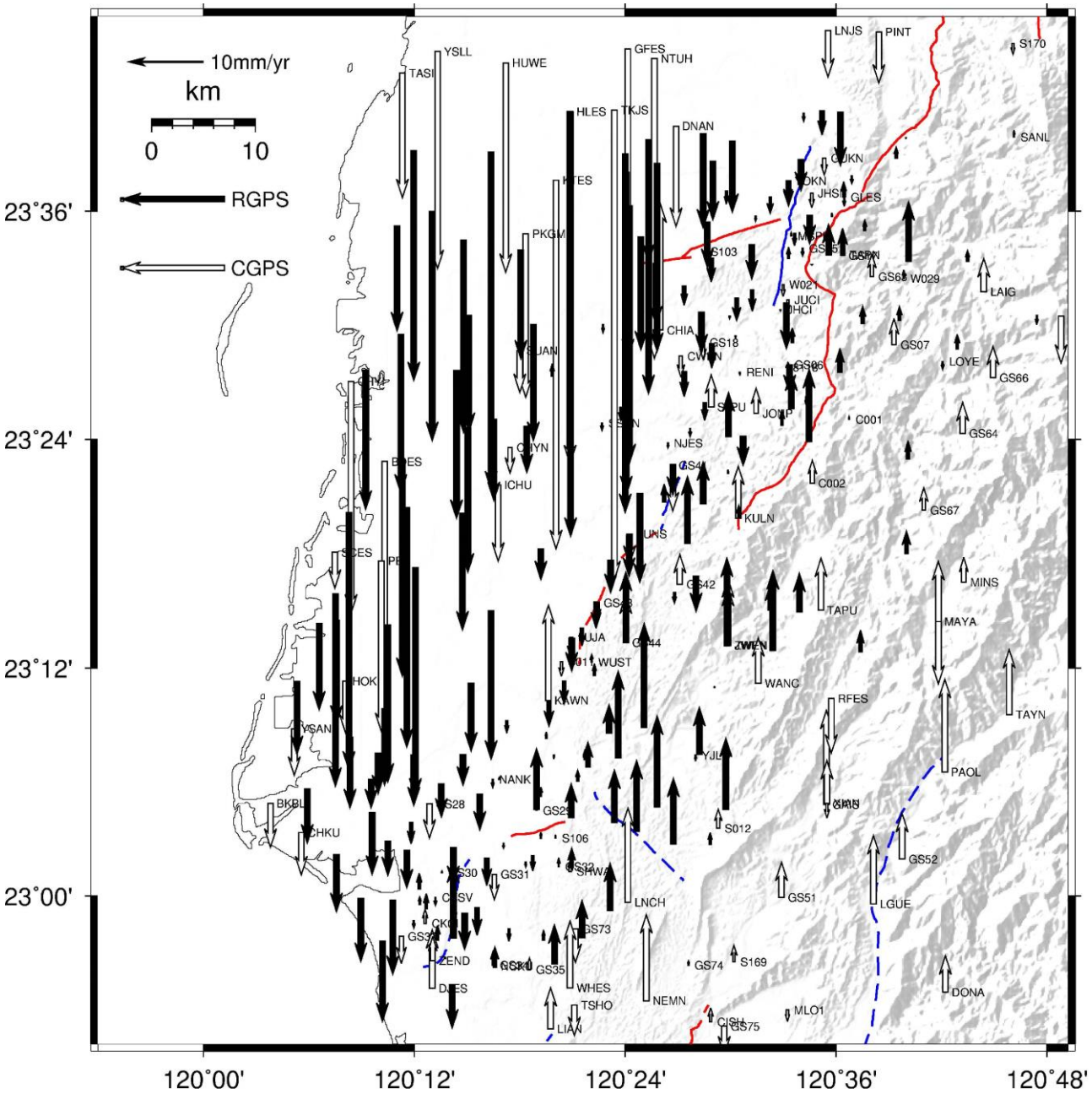


圖 2-2.26：嘉南地區相對於澎湖白沙站(S01R)2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。嘉南地區（圖 2-2.27）可比對座標時間序列之組合為 GS29-G884、GS34-G398、GS41-G846、GS42-G124、GS43-G123、GS44-G447、KULN-G117、NANK-G405、NCKU-G398、SHWA-G392、SJPU-G842、TUNS-G430、ZWEN-G888、8118-G107、CHIA-G338、GS06-G107、GS17-G776、GS18-G336、JHCI-G087、S103-G344 等二十組，由座標時間序列比對可知（圖 2-2.28、圖 2-2.29），移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

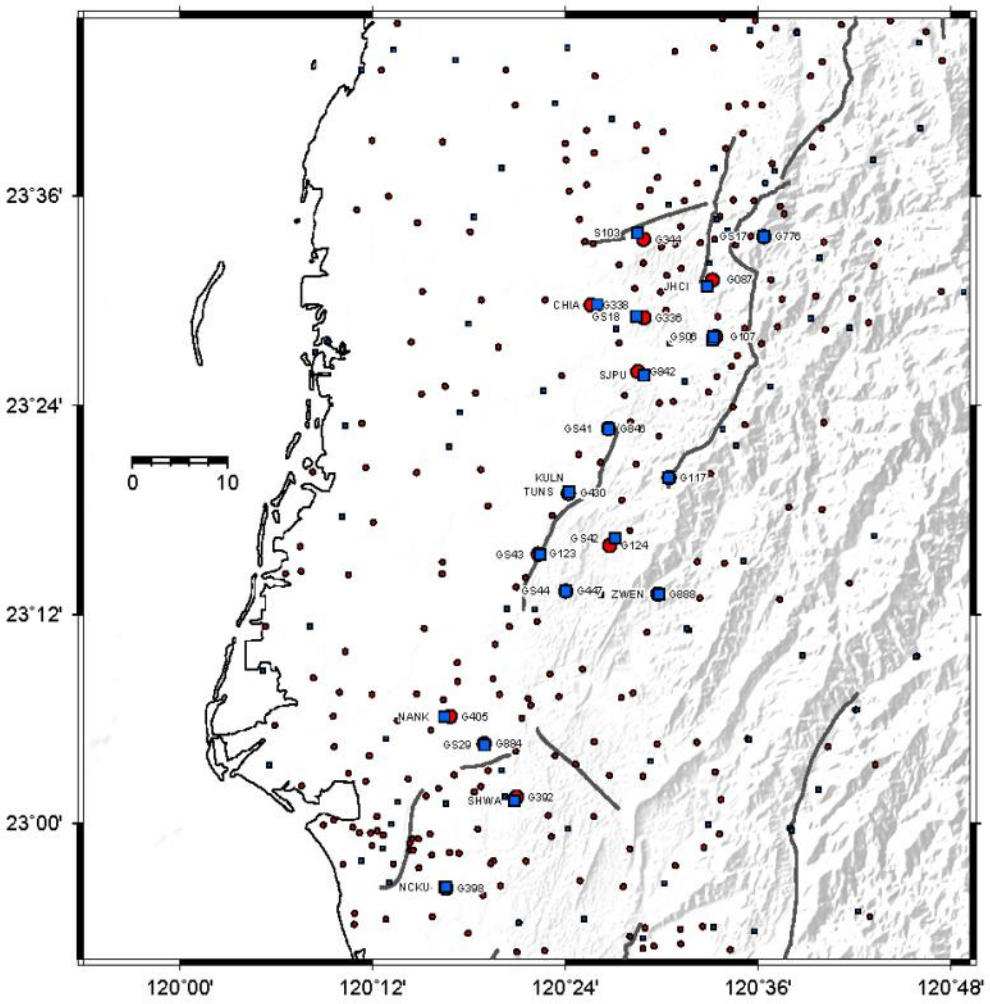


圖 2-2.27：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

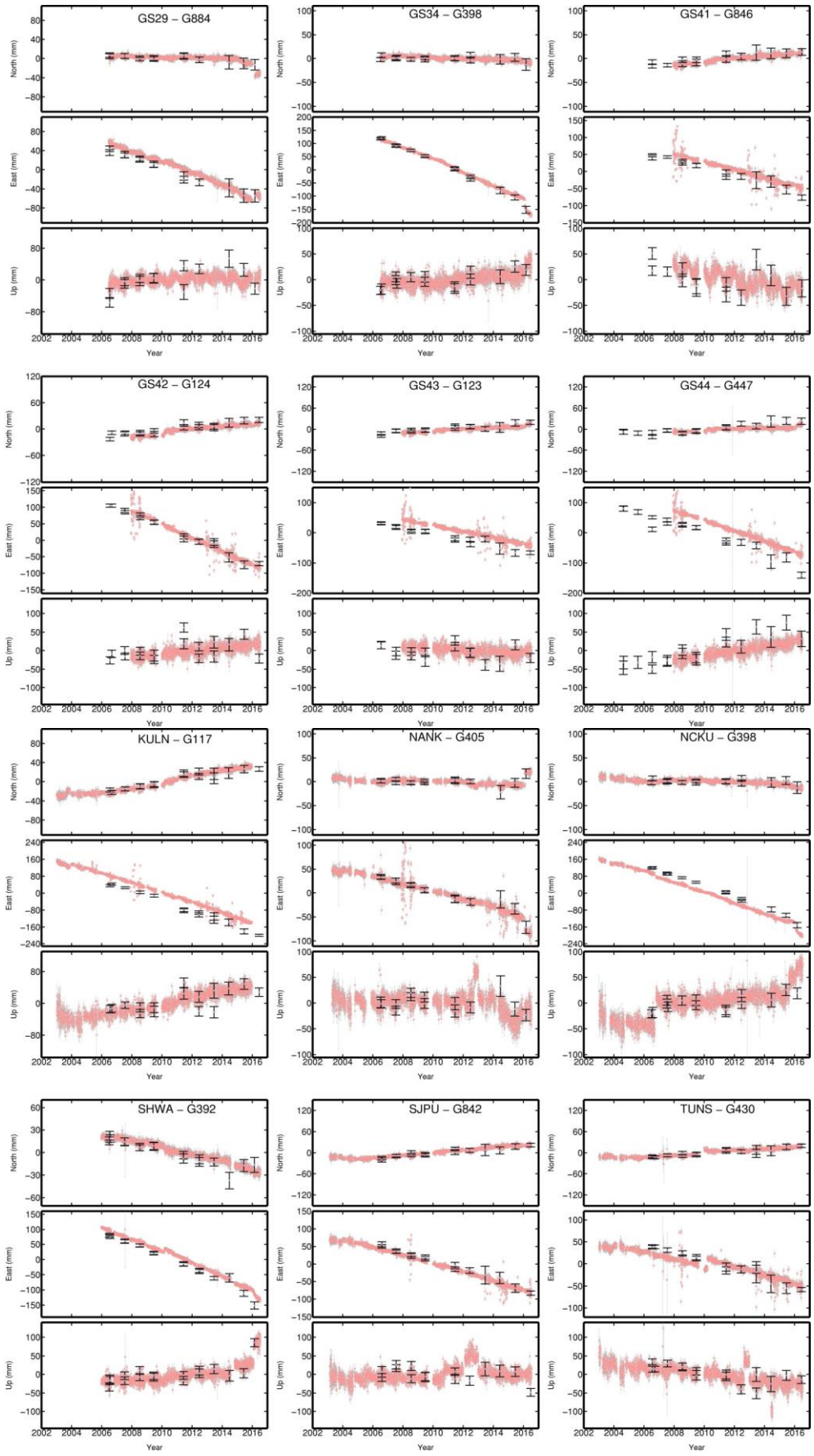


圖 2-2.28：2002~2016 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

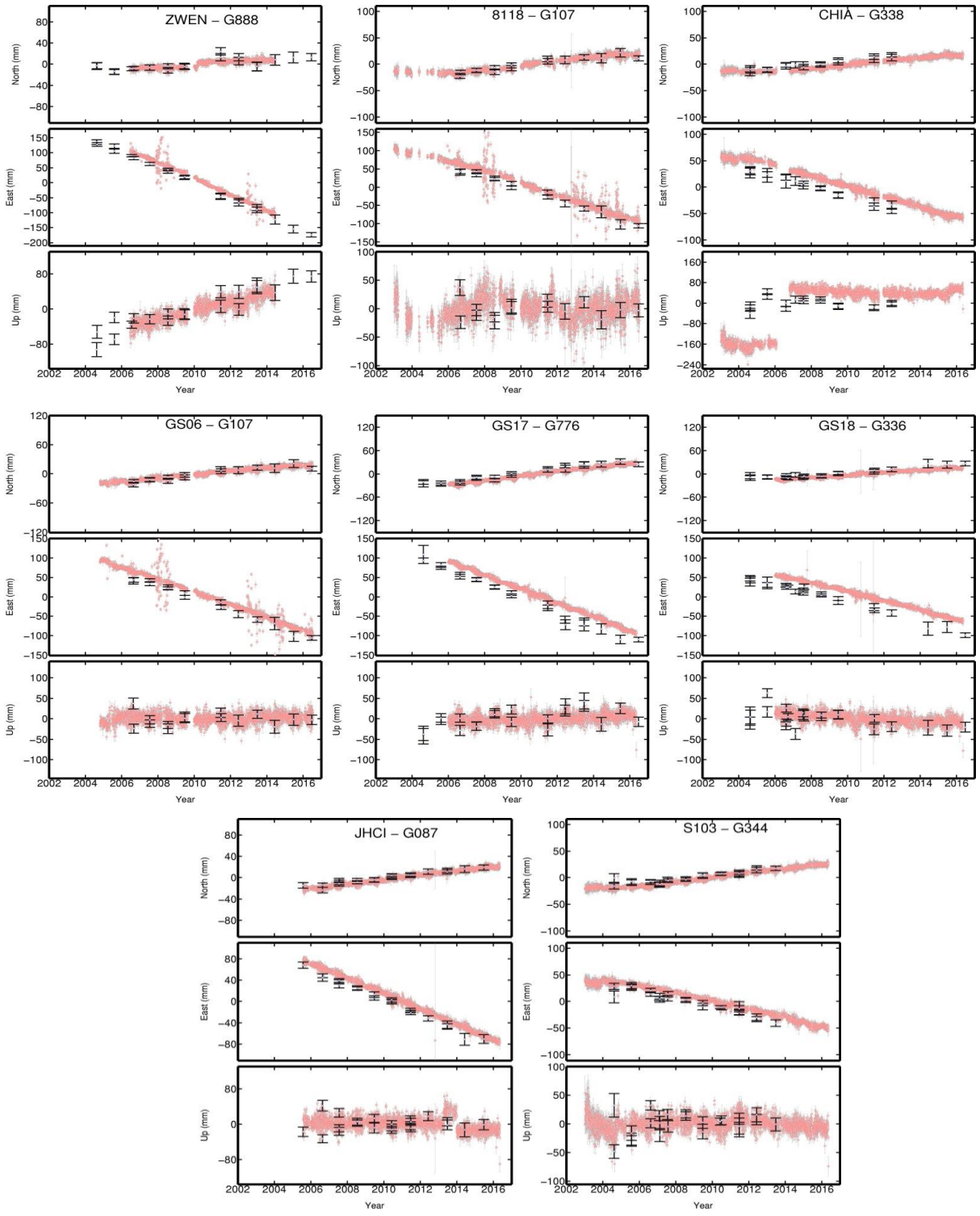


圖 2-2.29：2002~2016 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-3-5 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，各觀測點位之速度值如圖 2-2.30 示，黑色箭號表示 2002 年至 2016 年之速度場，速度量值 12.9 ~ 97.5 mm/yr，其中 G614 位於屏東縣泰武鄉舊部落泰武國小操場上，於 2009 年莫拉克颱風後遷村，經過速度修正後該點位速度仍然與該地區速度分布差異極大，顯示該點速度主要反應該地地滑現象；GC66 點位旁擋土牆，可見明顯裂縫，顯示該點速度主要反應該地地滑現象。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.31）可知高屏地區垂直速度場在小崗山斷層以及旗山斷層之間呈現抬升，其餘地區大致呈下陷，顯著下陷區有永安及枋寮一帶，整體值約 0.0 ~ 20.0 mm/yr。

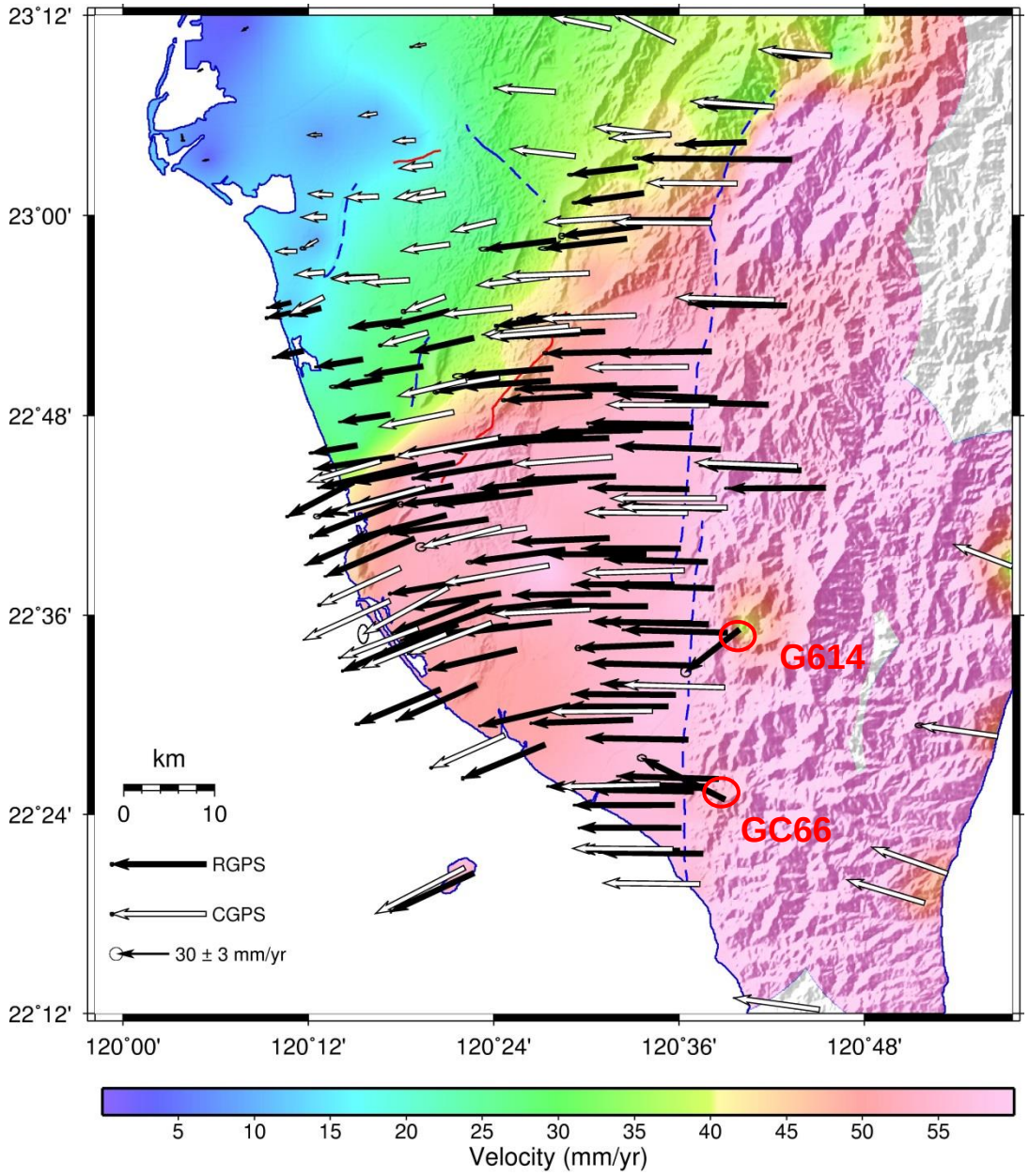


圖 2-2.30：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

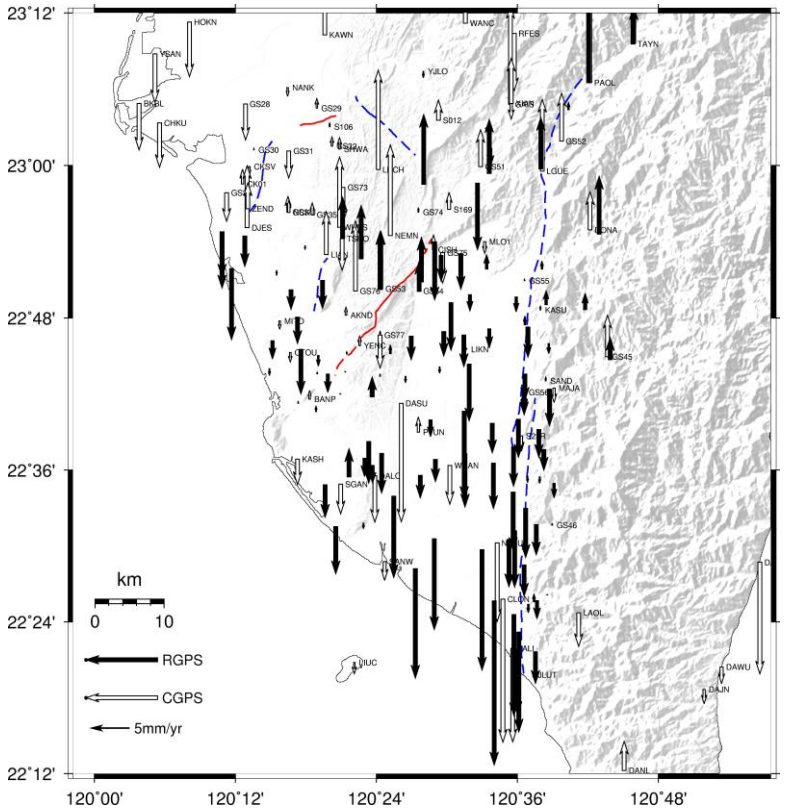


圖 2-2.31：高屏地區相對於澎湖白沙站(S01R)2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。高屏地區（圖 2-2.32）可比對座標時間序列之組合為 GS56-G003、DONA-G600、KASU-G054、PAOL-G460、GS53-G589、TAYN-G595、GS45-G607、MAJA-G609、LIUC-S041 等九組，由座標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.33）。

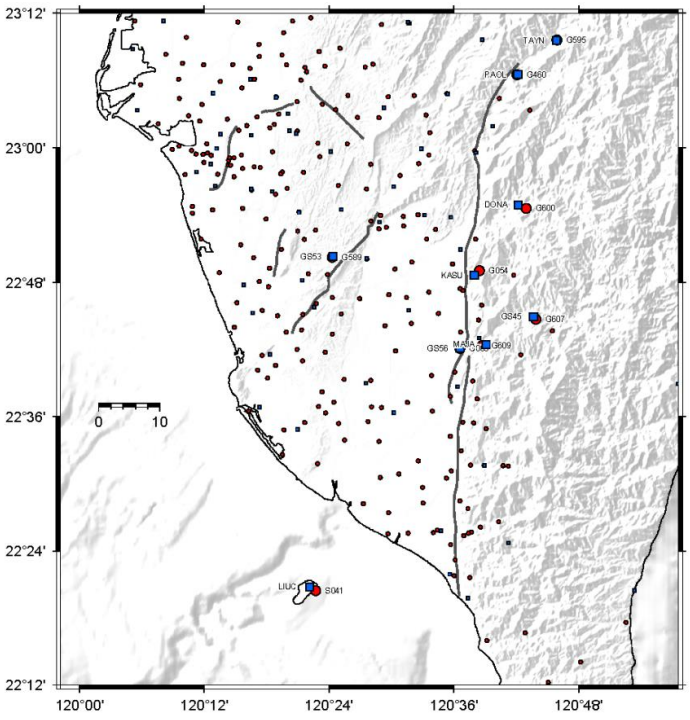


圖 2-2.32：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

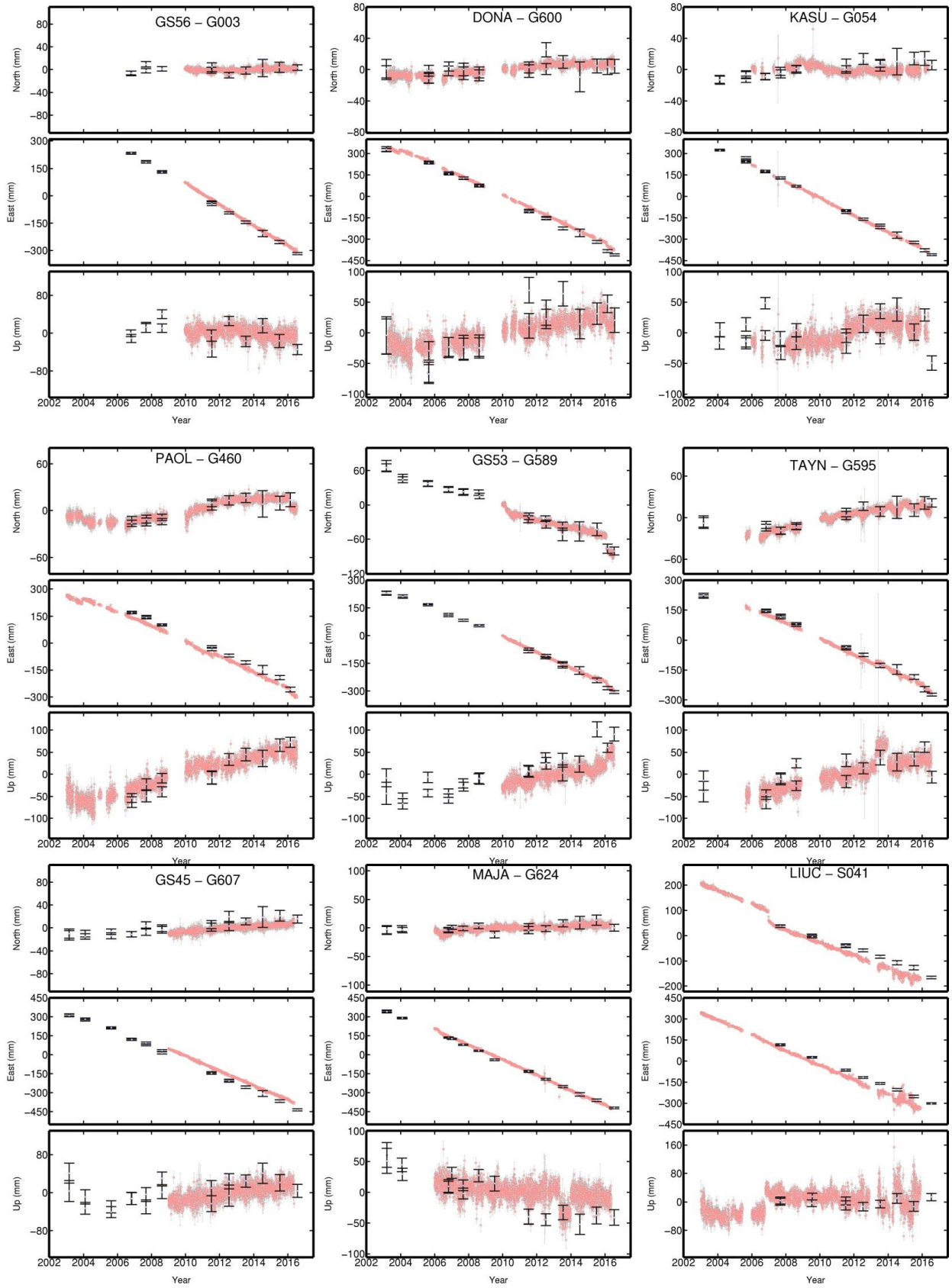


圖 2-2.33：2002~2016 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-3-6 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，各觀測點位之速度值如圖 2-2.34 所示，黑色箭號表示 2002 年至 2016 年之速度場，速度量值 1.3 ~ 46.7 mm/yr，其中 GF35 位於苗栗縣大湖鄉東興國小操場上,操場於 2011 年整修，樁位經重新埋設，經過速度修正後該點位速度符合該地區速度分布，建議可持續監測；M007 為內政部一等衛星控制點，由時間序列可知 2012 年至 2013 年之間發生明顯位移，可能為 2013 年的南投地震所誘發，經修正後速度符合本區速度分布，建議持續觀測。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.35）可知中部地區垂直速度場在大茅埔-雙冬斷層以東呈抬升，斷層以西則呈現下陷，整體值約 0.0 ~ 50.2 mm/yr。

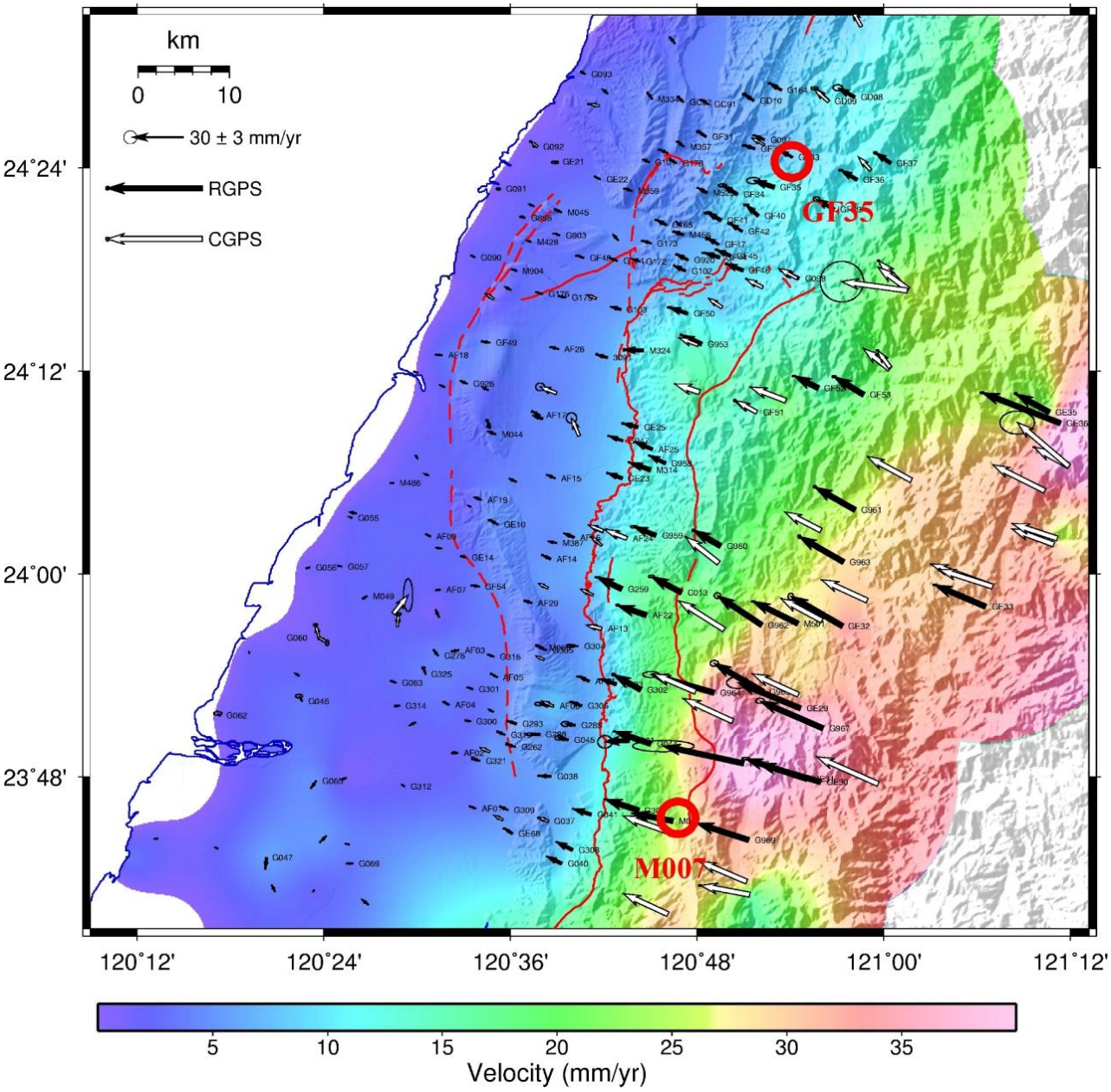


圖 2-2.34：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

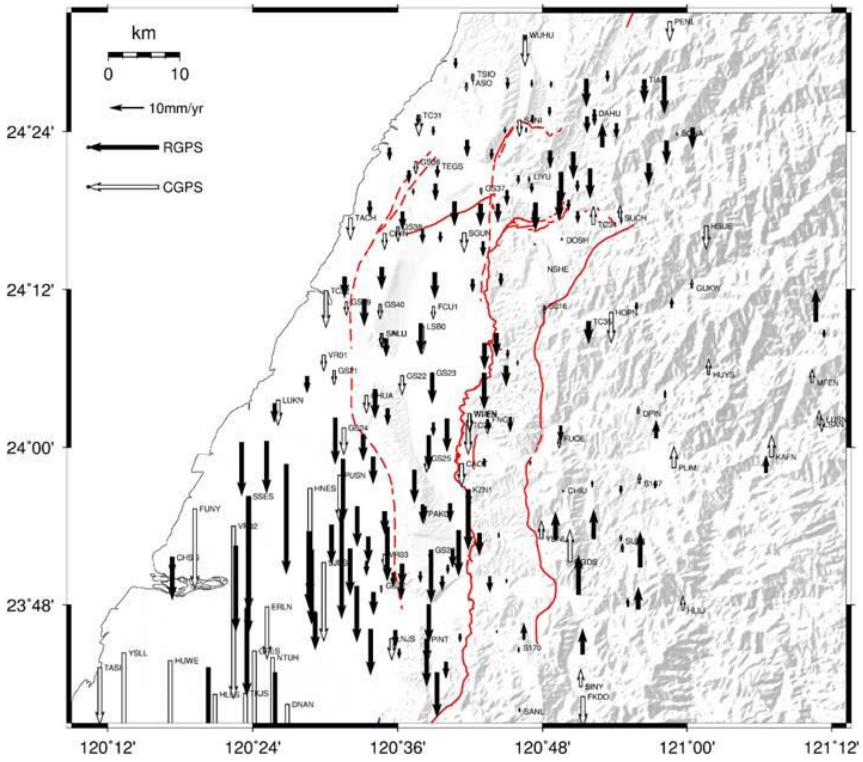


圖 2-2.35：中部地區相對於澎湖白沙站(S01R)2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2002~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。中部地區（圖 2-2.36）可比對座標時間序列之組合為 GS27-AF06、KZN1-AF13、GS23-AF15、LSB0-AF17、FNGU-AF24、PINT-G037、LUKN-G055、G062-CHSG、DAHU-G097、SUCH-G098、HNSN-M031、SALU-M044 等十二組，由座標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.37）。

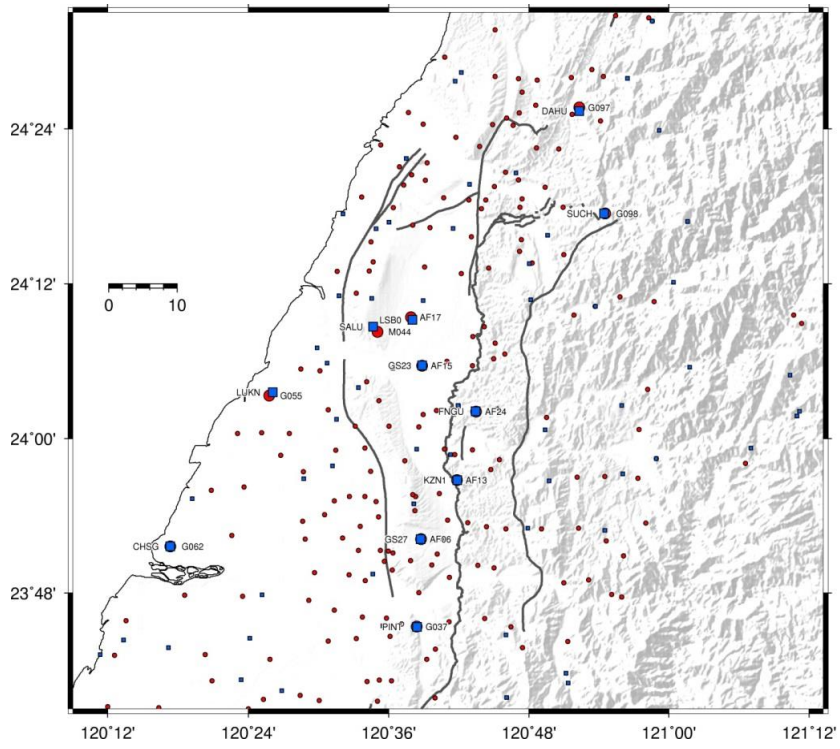


圖 2-2.36：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

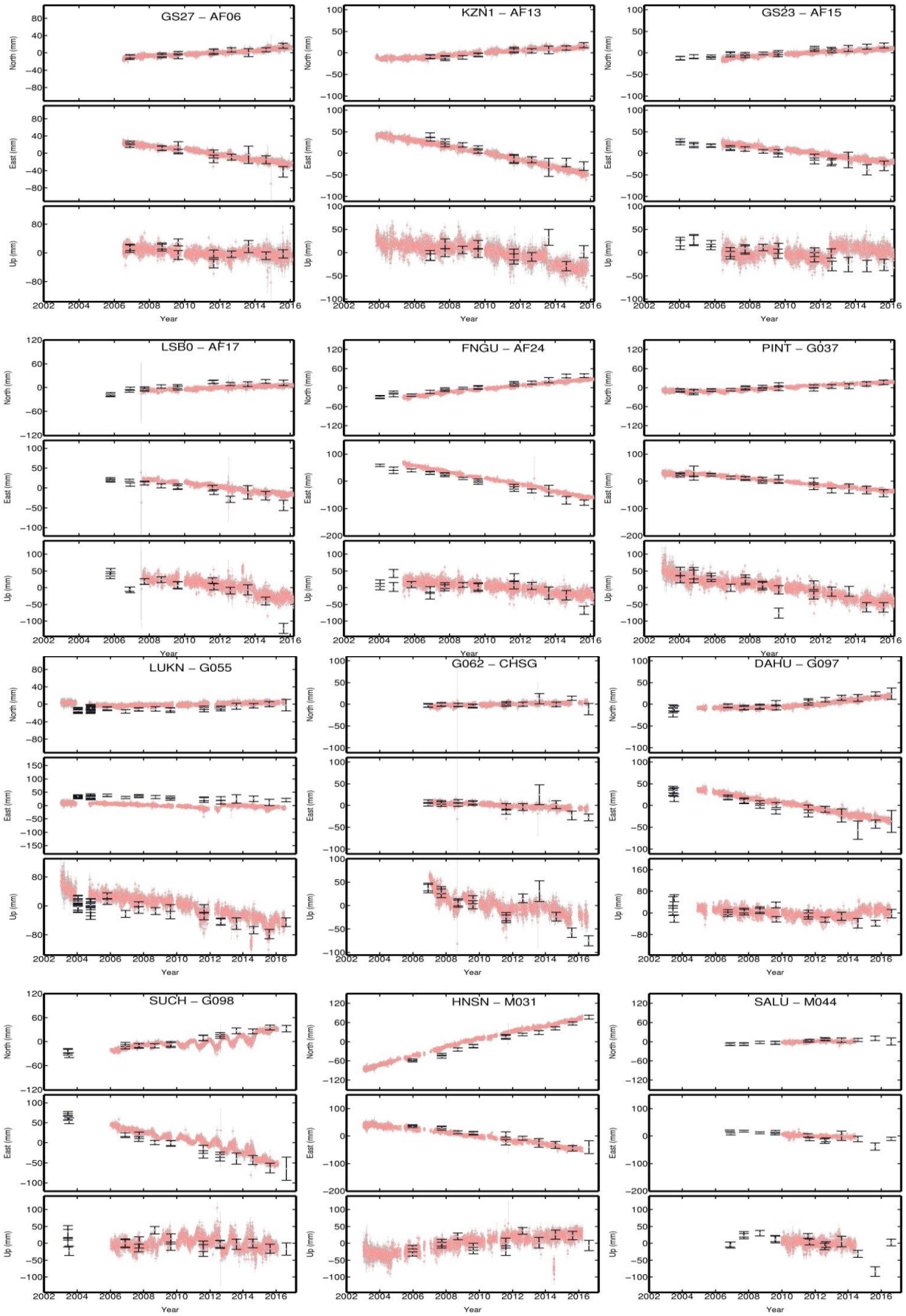


圖 2-2.37：2002~2016 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-3-7 東部地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之東部地區觀測資料進行分析，各觀測點位之速度值如圖 2-2.38 所示，黑色箭號表示 2004 年至 2016 年之速度場，速度量值 21.4 ~ 70.2 mm/yr。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.39）可知東部地區，除海岸山脈以東南段沉陷顯著較不顯著垂直速度場大致呈現下陷，整體值約 0.0 ~ 50.2 mm/yr。

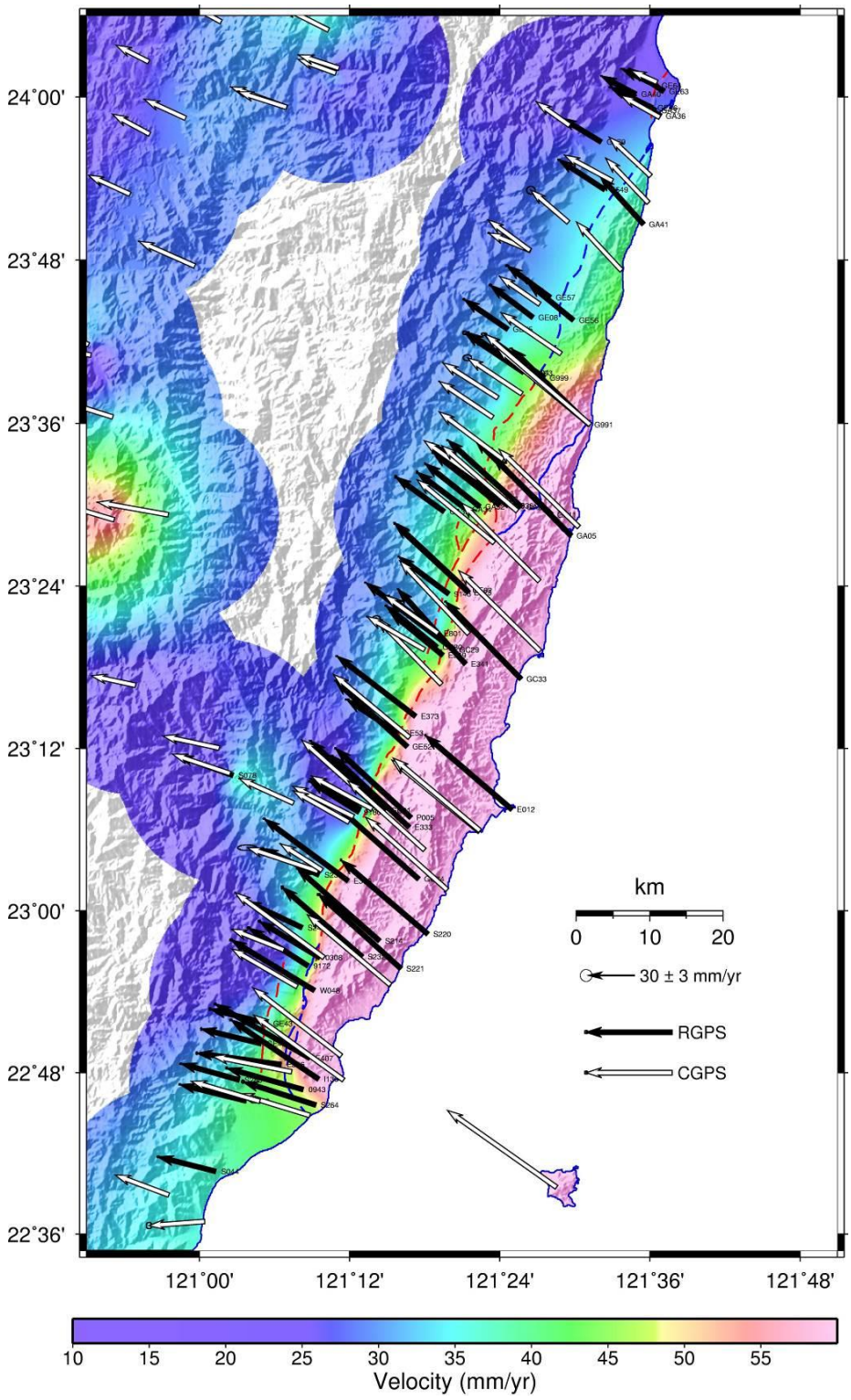


圖 2-2.38：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭號為 2004~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

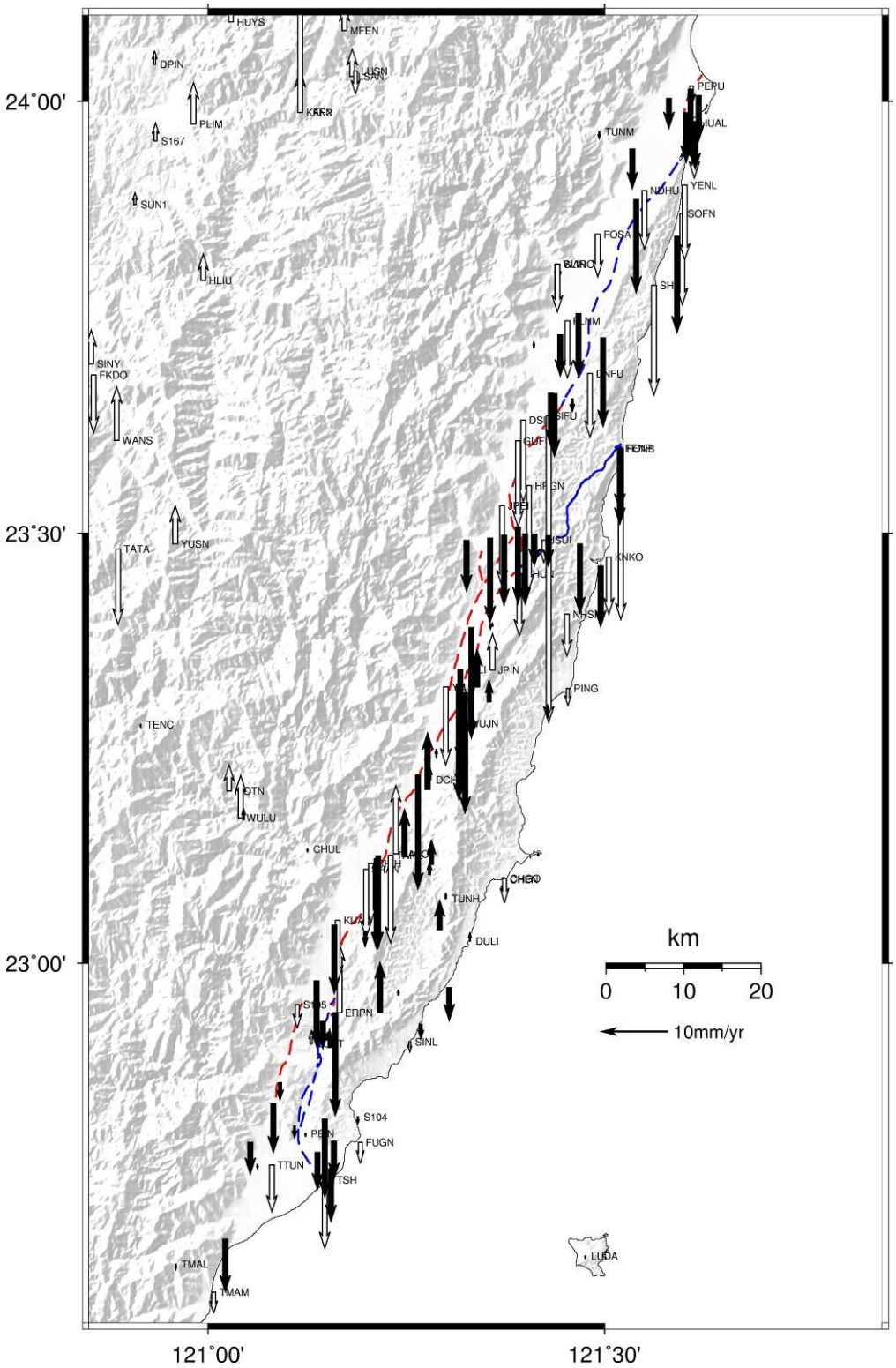


圖 2-2.39：東部地區相對於澎湖白沙站(S01R)2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭號為 2004~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。花東地區（圖 2-2.40）可比對座標時間序列之組合為 ERPN-0308、CHIH-9160、JULI-E801、FENP-G991、KUAN-S233、PEPU-GE64 等六組，由座標時間序列比對可知，連續站 ERPN 及移動站 0308 間存在明顯速度梯度，推測為縱谷斷層通過兩測點間所造成，其餘移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.41）。

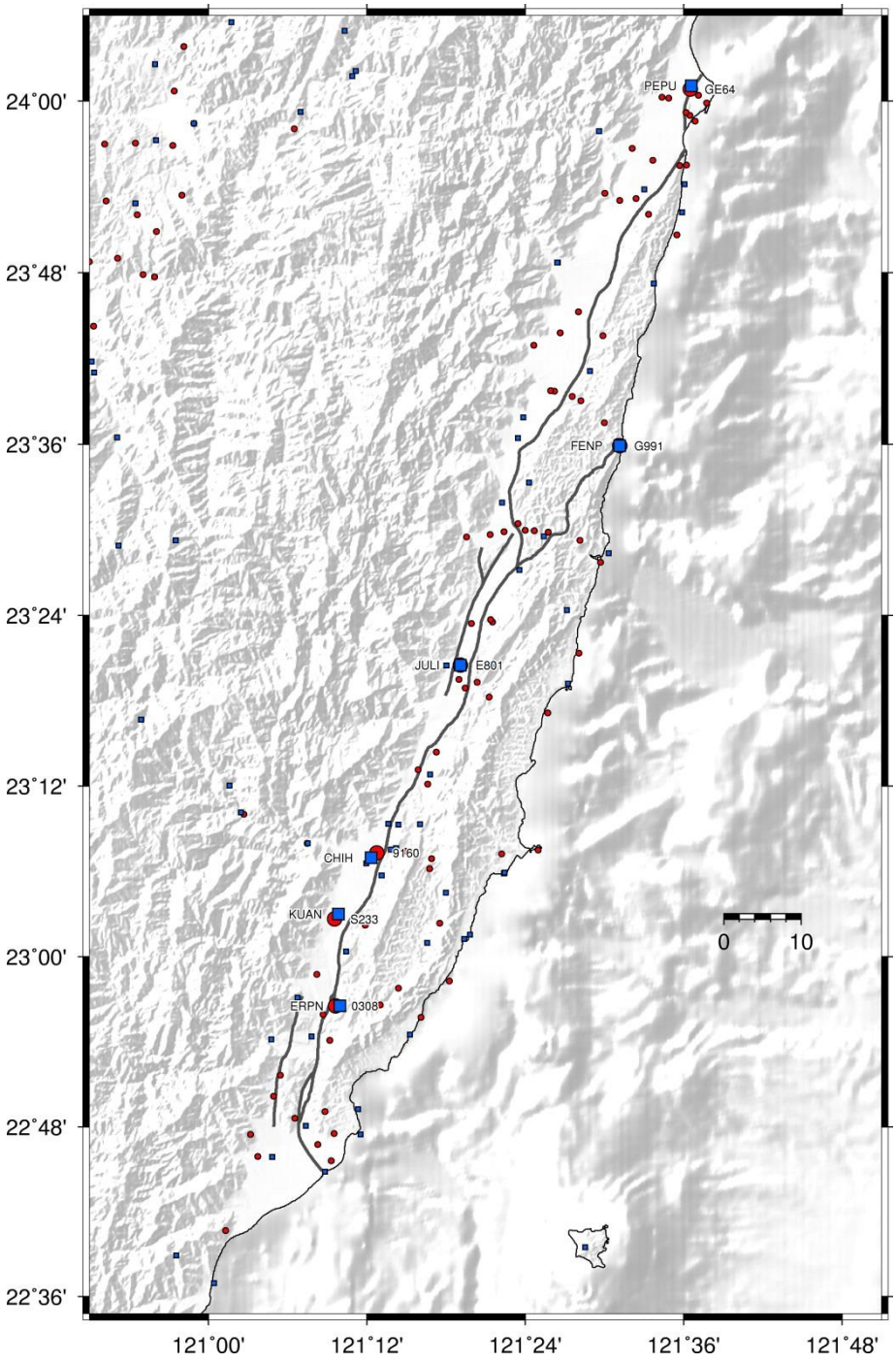


圖 2-2.40：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

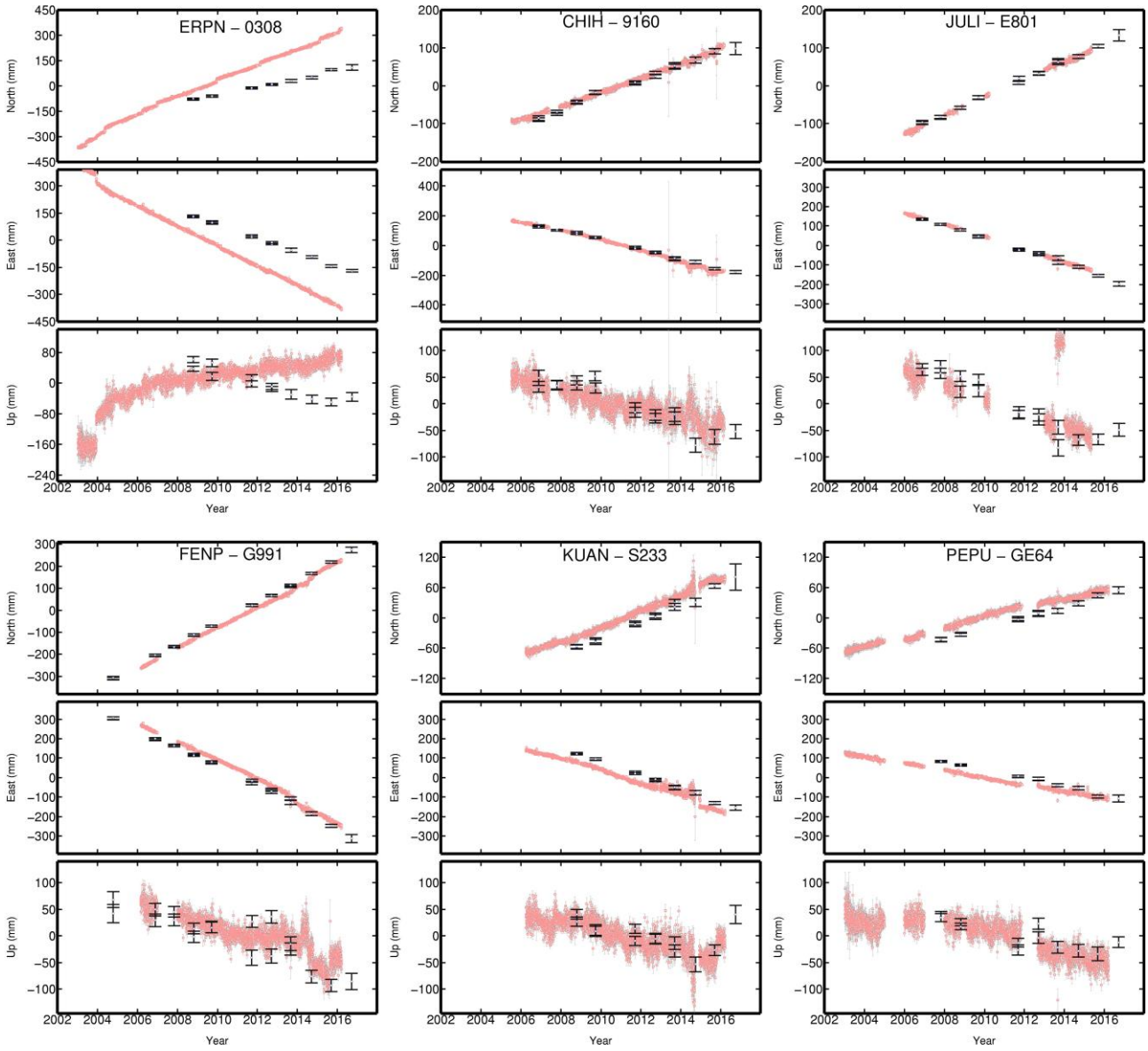


圖 2-2.41：2004~2016 年花東地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-3-8 宜蘭地區 GPS 觀測成果分析

宜蘭地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2016 年，各觀測點位之速度值如圖 2-2.42 所示，黑色箭號表示 2004 年至 2016 年之速度場，速度量值 1.9 ~ 36.2 mm/yr。

經過篩選機制處理後，由結果（圖 2-2.43）可知宜蘭地區，在蘭陽平原垂直方向大致為沉陷，其沉陷量由北至南先增加後再減少，往南至南澳亦呈現沉陷，整體值約 0.1 ~ 25.8 mm/yr。

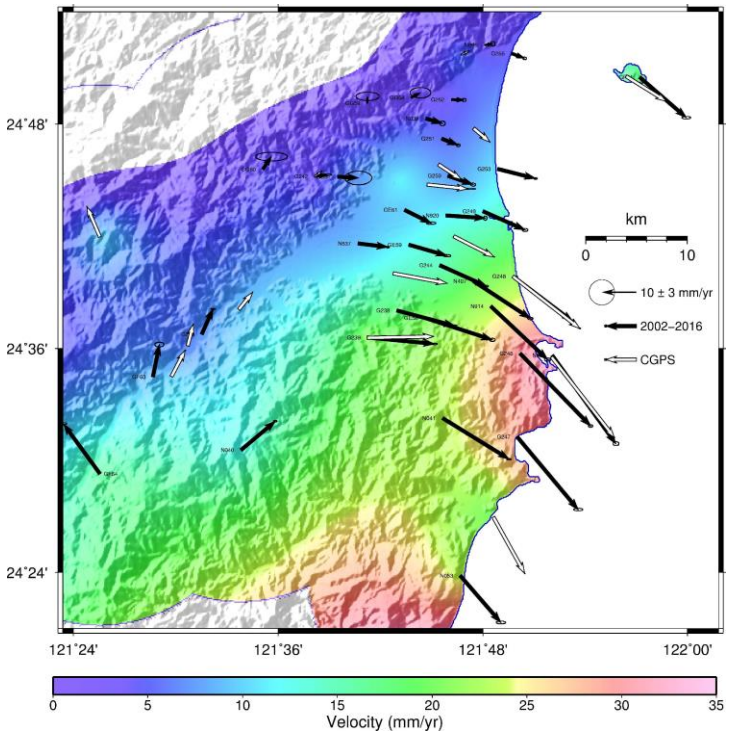


圖 2-2.42：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，黑色箭號為 2004~2016 年移動站速度場，白色箭號為 2002~2016 年連續站速度場。

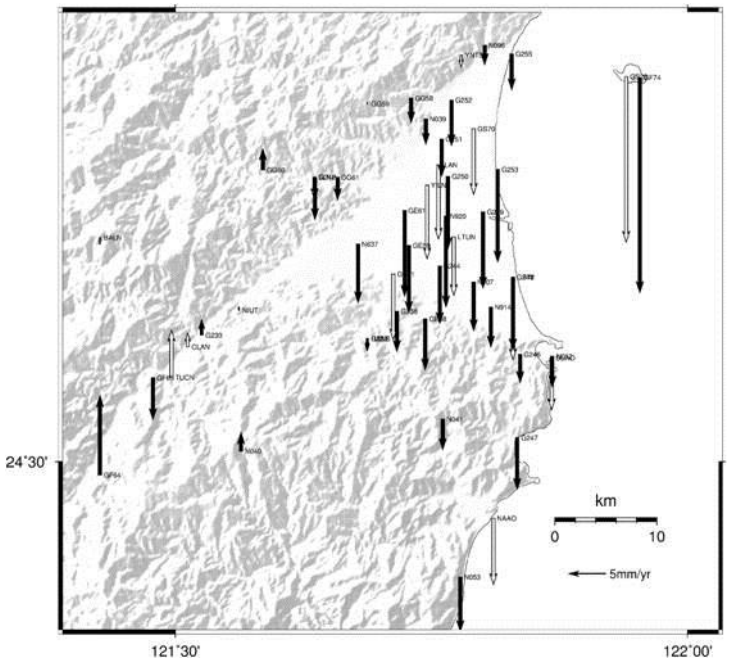


圖 2-2.43：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，黑色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2004~2016），白色箭頭表示該區連續站 2002~2016 年速度場解算結果。

於移動站點位中挑選最近的移動站與連續站進行比較。宜蘭地區（圖 2-2.44）可比對座標時間序列之組合為 GS20-GF74、SLNP-G242、HANS-G239、SUAO-N052 等四組，由座標時間序列比對可知，移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合（圖 2-2.45）。

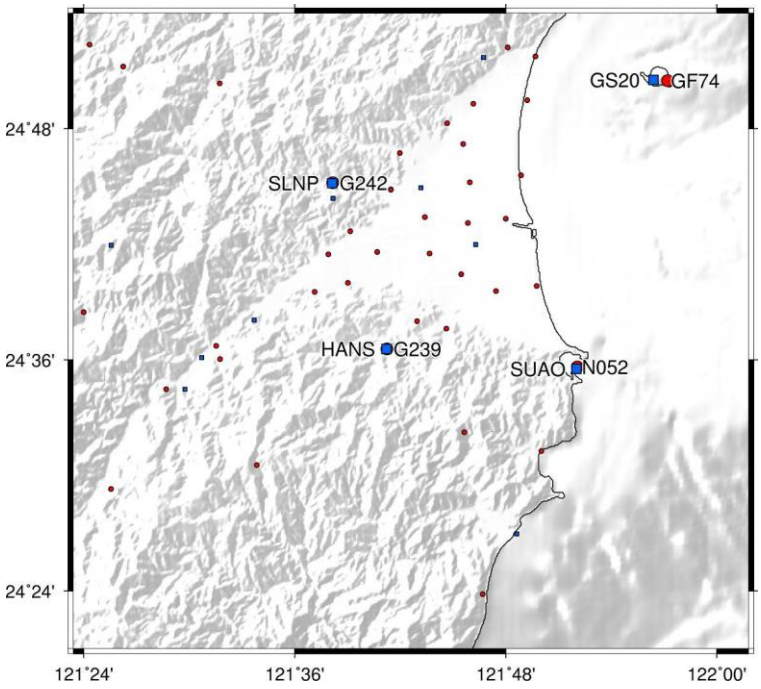


圖 2-2.44：宜蘭地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

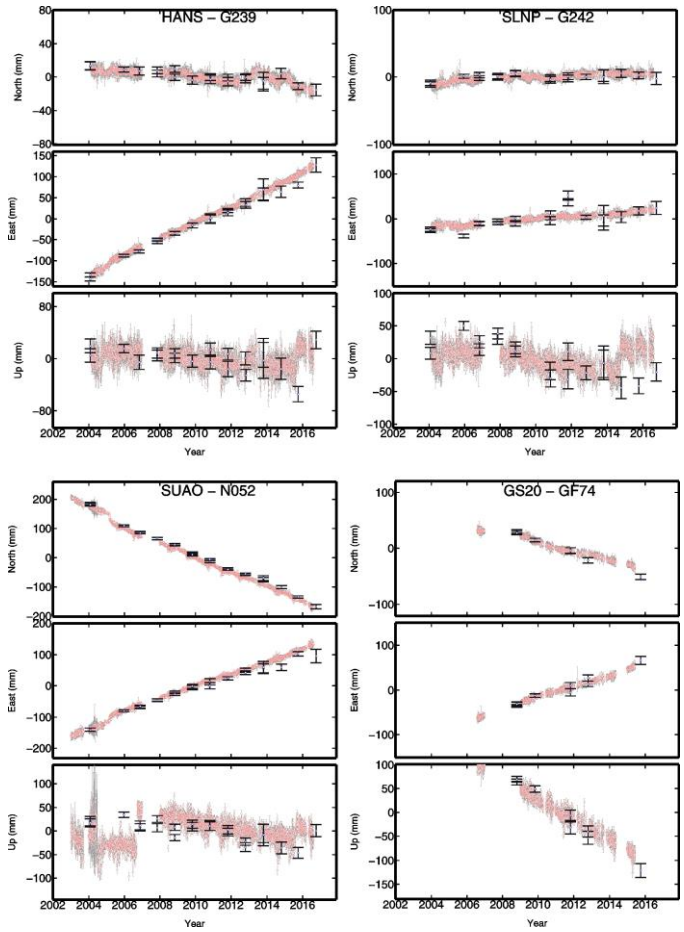


圖 2-2.45：2004~2016 年宜蘭地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-4 2016 年 2 月 6 日美濃地震

2-2-4-1 美濃地震同震位移觀測成果分析

今年 2 月 6 日於高雄市美濃區發生規模 6.6、深度 14.6 km 之地震，藉由分析 GPS 連續站之座標時間序列，以最小二乘法擬合地震前後速度，可求得地震之同震位移場（圖 2-2.46、圖 2-2.47）。

此外於震後 2 月 22 日至 3 月 4 日，進行本區域之 GPS 移動站測量工作，並且利用震前累積的觀測資料求得該點位之同震值，由結果可知 GPS 移動站約有 2.6 mm ~ 97.2 mm 的水平同震量，在垂直方向則有-72.5 mm ~ 121.7 mm 的同震量；由於移動站測量無法精確顯示同震變形的瞬時位移，因此本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，加進連續站之同震位移場結果，比較移動站與該地區連續站解算結果之座標時間序列，以求得更精確及高密度的同震位移場，由比對結果可知除移動站 G884（大門口）與連續站 GS29（儲水槽上）皆位於潭頂自來水廠，以及移動站 G392（口碑國小操場）與連續站 GS32（虎頭埤壩堤）兩組比對組合，其同震位移量在水平方向及高程方向皆有明顯差異，其餘各組比對結果大致吻合（圖 2-2.48~圖 2-2.50）。

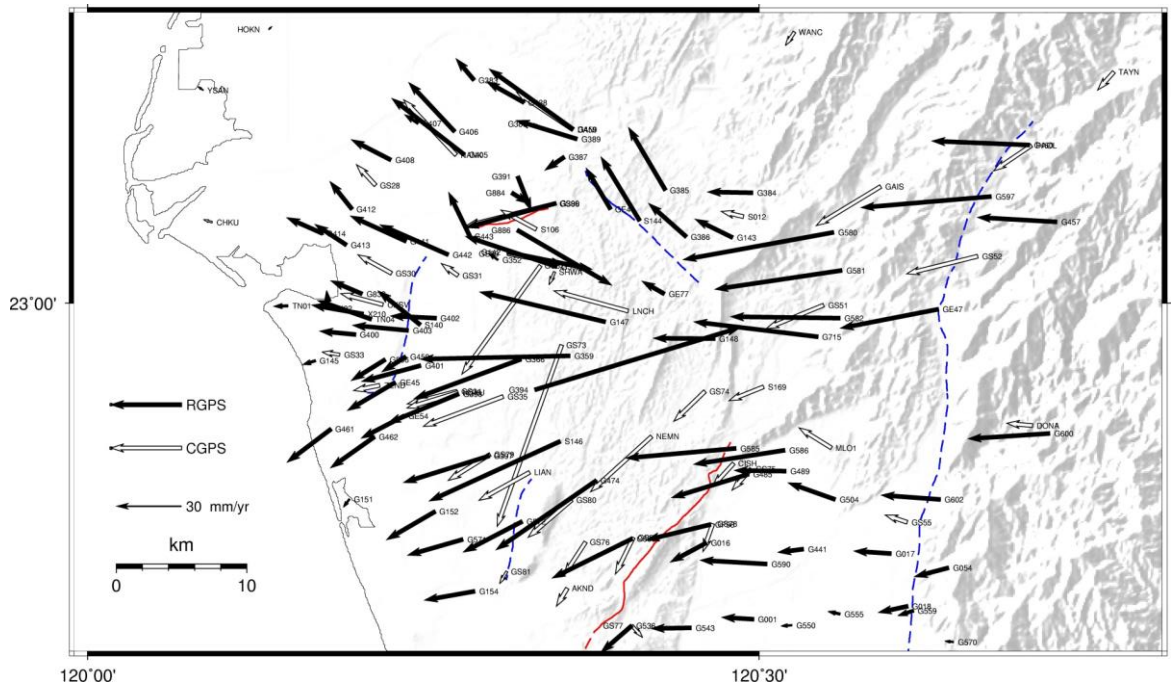


圖 2-2.46：美濃地震水平方向之同震位移分布情形。

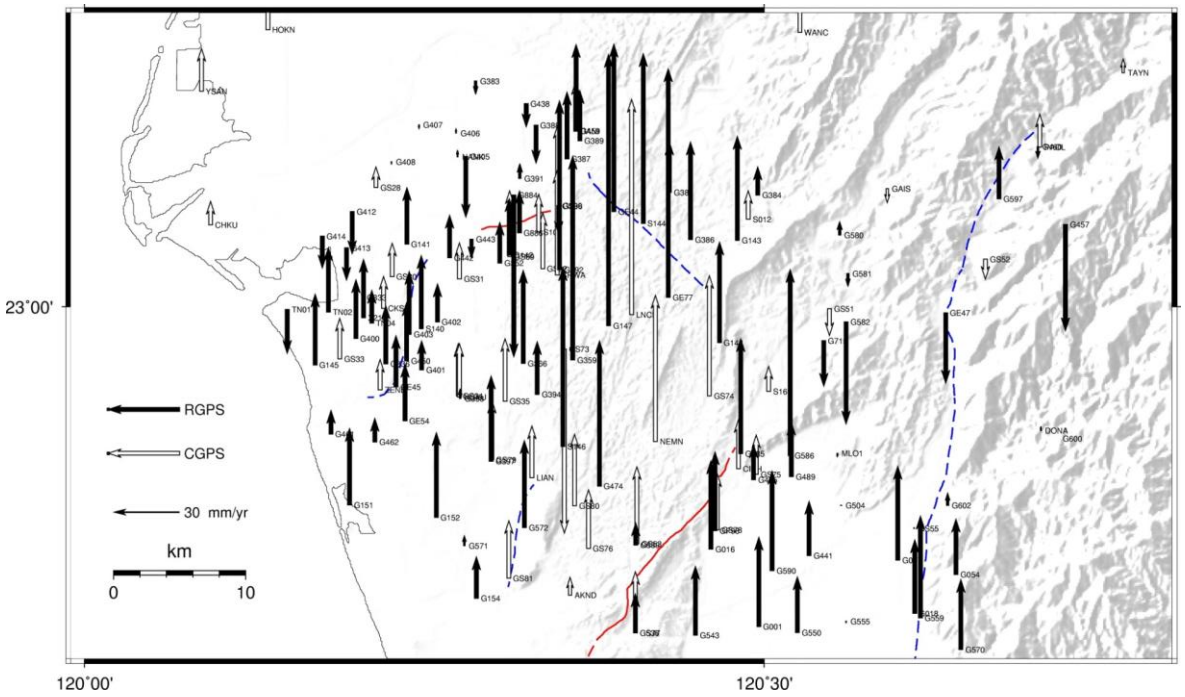


圖 2-2.47：美濃地震高程方向之同震位移分布情形。

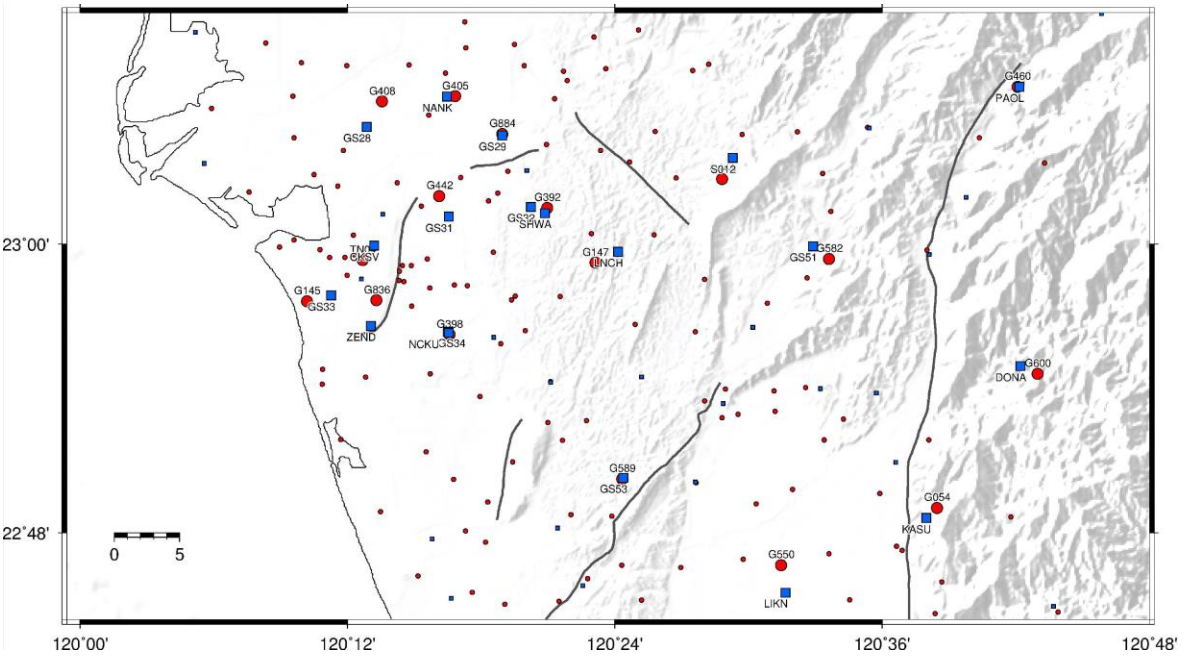


圖 2-2.48：高雄台南地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

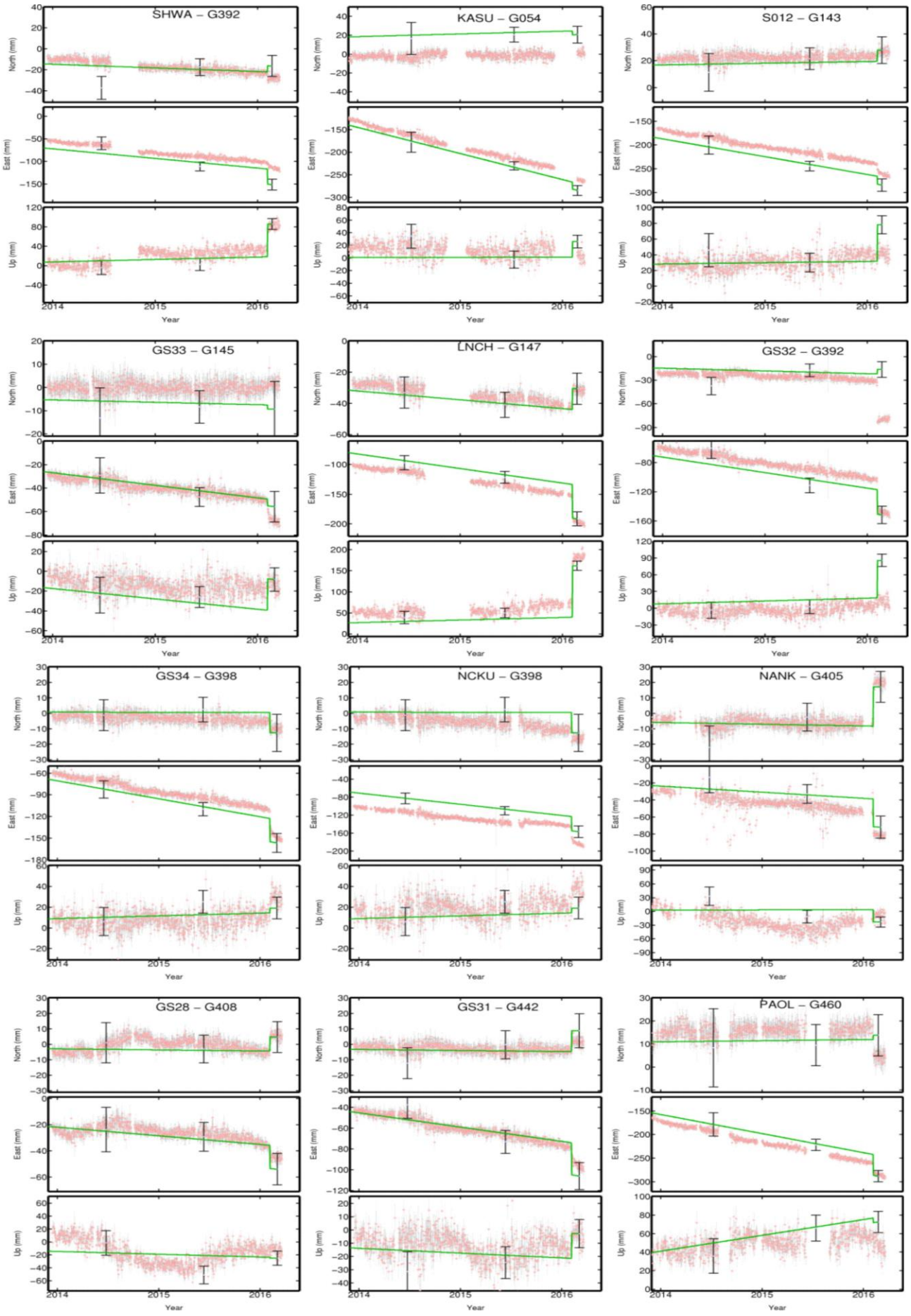


圖 2-2.49：雲嘉南及高屏地區 GPS 連續及移動測站之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

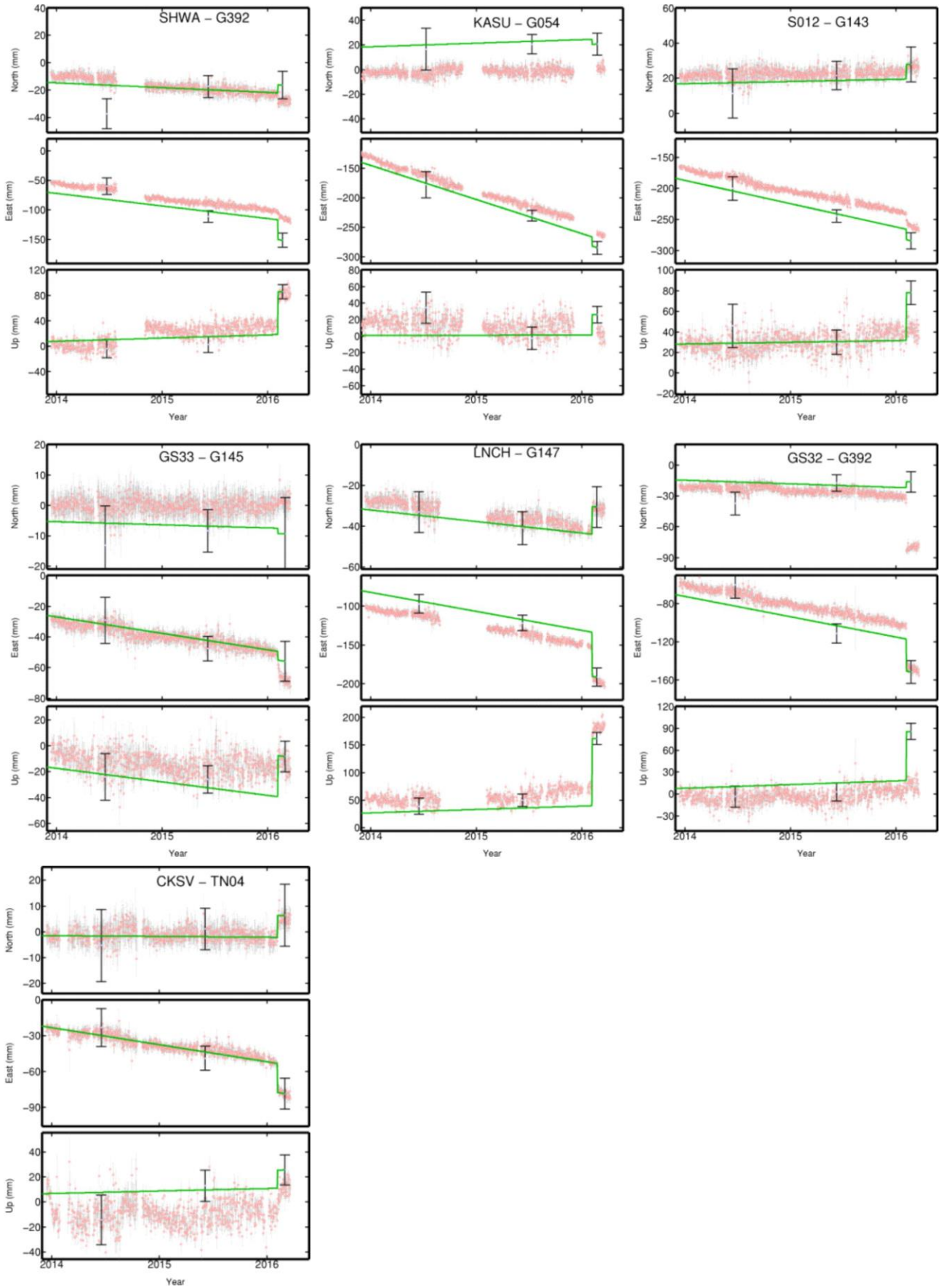


圖 2-2.50：雲嘉南及高屏地區 GPS 連續及移動測站之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2-4-2 美濃地震同震 GPS 及水準資料垂直位移場及震後效應修正

一般而言，地震同震位移場經常會受到震後效應影響，往往會造成高估或是低估地震同震的位移數值，難免無法反應出真實地震同震的位移形態。所以我們希望通過以下步驟消除震後效應對同震位移場的影響。

以同震垂直位移場為例（圖 2-2.51），當 GPS 連續站資料解算完畢後，濾除雜訊和季節性周效應後，我們將地震後的 GPS 連續站時間序列進行震後線性擬合。於擬合曲線上分別以 GPS 移動站和水準測量時間求出各站同震之震後修正量。

由於 GPS 移動站是地震後約於第 20 天施測完畢，所以在計算同震之震後修正量時，是取 GPS 連續站震後時間序列擬合線上第 20 天的數值和同震的位移差，再將這些位移差內插出 GPS 移動站的震後垂直位移改正量（圖 2-2.52）。水準測量則是約在地震後第 76 天施測完畢，所以在計算同震之震後修正量時，是取 GPS 連續站震後時間序列擬合線上第 76 天的數值和同震的位移差，再將這些位移差內插出水準測線的震後垂直位移改正量（圖 2-2.53）。

去除震後效應之同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場（圖 2-2.54），乍看之下和未修正的同震 GPS 和水準垂直位移場沒有顯著差別，因為最大的修正量未超過 10 mm，而大部分的修正量都大約 5 mm。大致上可看出沿旗山斷層走向以東的修正量都為負值，沿旗山斷層走向以西至後甲里斷層以東為正值。但是路竹茂林水準測線東側和岡山安坡水準測線東側不論是震後效應修正前後，GPS 移動站和水準測量的結果趨勢並不一致。

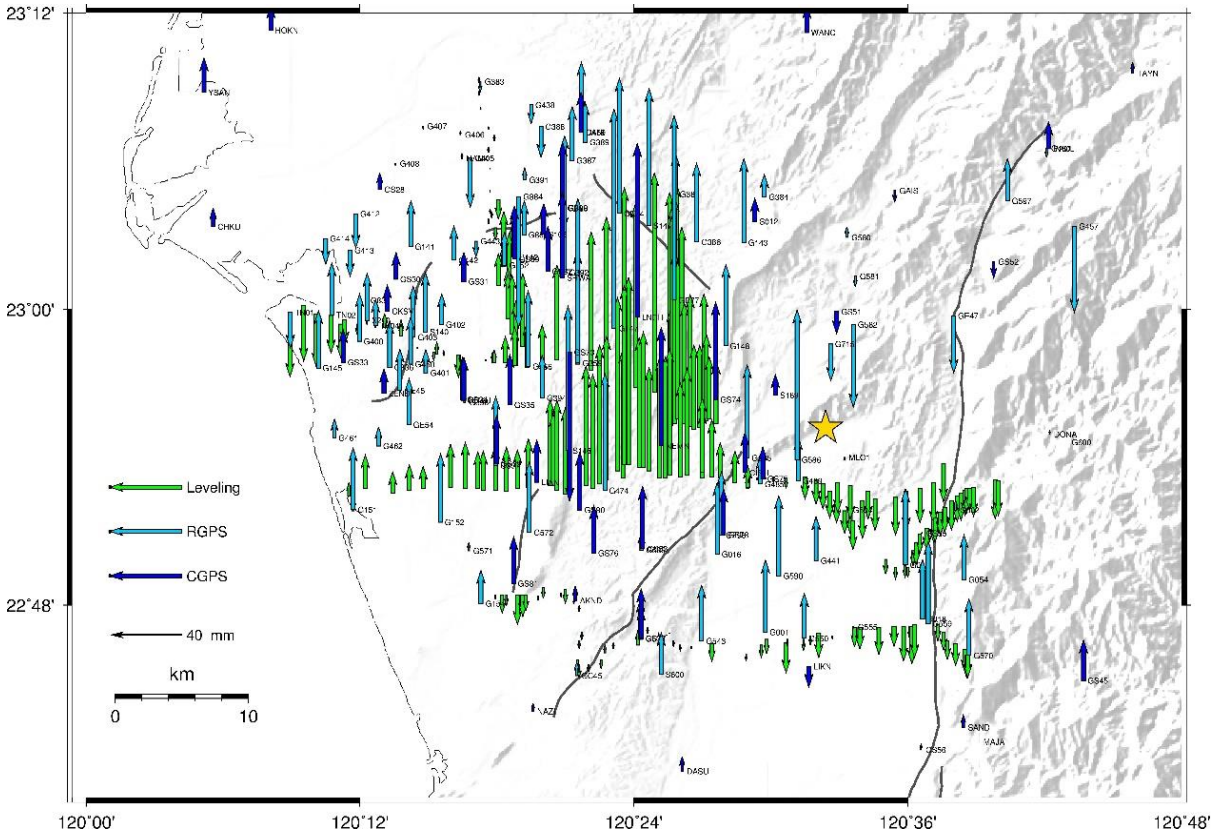


圖 2-2.51：美濃地震同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場，黃色星號表示震央，藍色箭頭表示 GPS 連續站，青色箭頭表示 GPS 移動站，綠色箭頭表示水準測線。

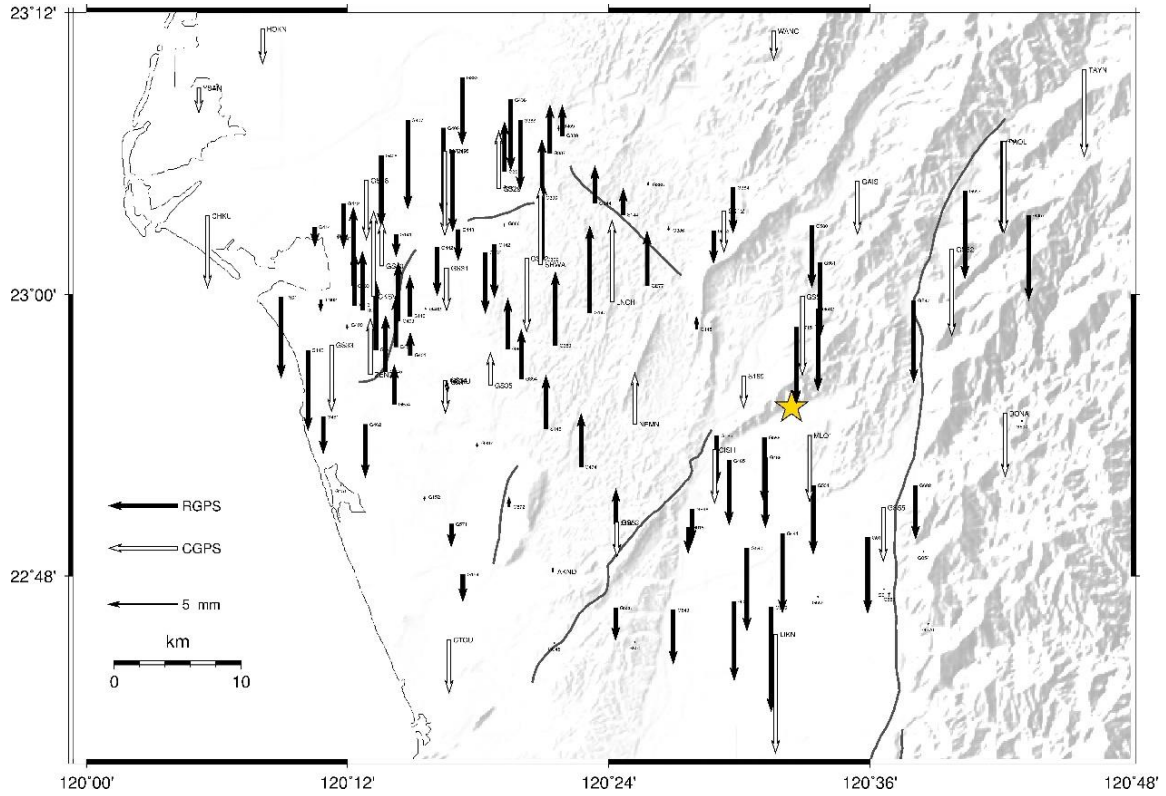


圖 2-2.52：美濃地震同震 GPS 垂直方向震後修正之垂直位移改正量，黃色星號表示震央，白色箭頭表示 GPS 連續站在地震後第 20 天的垂直位移改正量，黑色箭頭表示 GPS 移動站在地震後第 20 天的內插垂直位移改正量。

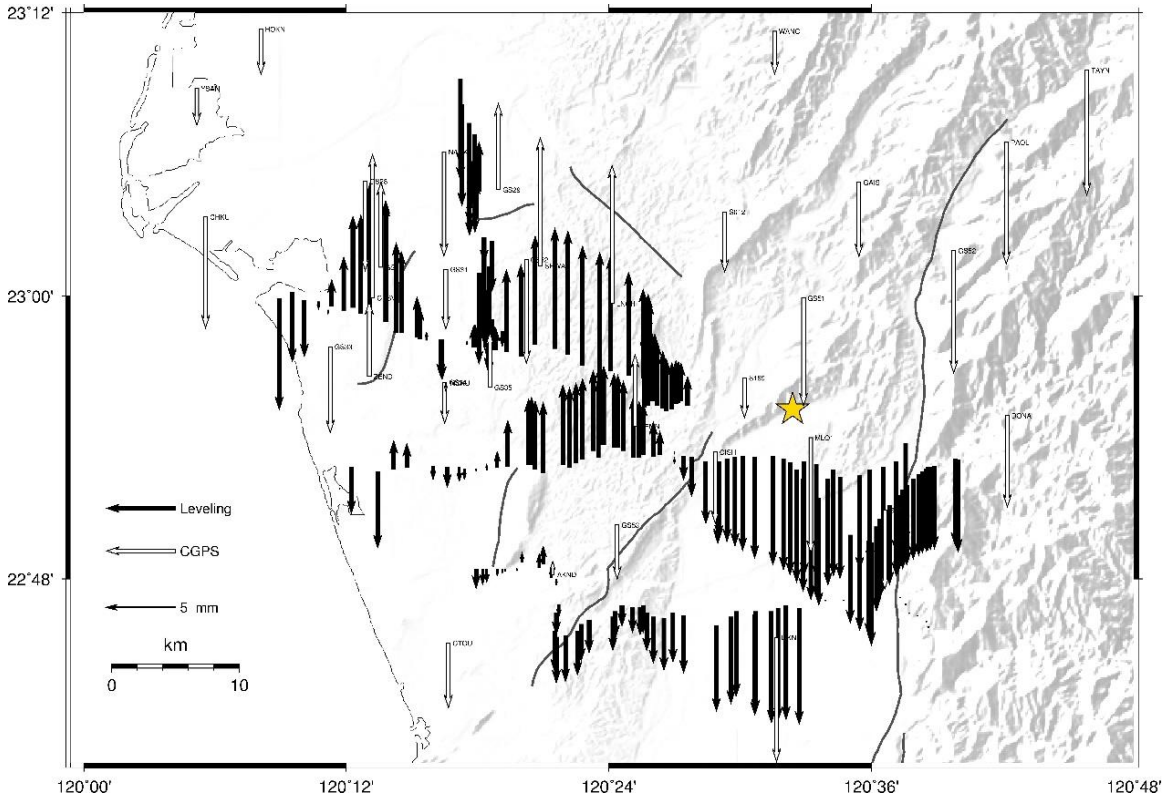


圖 2-2.53：美濃地震同震 GPS 和水準垂直方向震後修正之垂直位移改正量，黃色星號表示震央，白色箭頭表示 GPS 連續站在地震後第 39 天的垂直位移改正量，黑色箭頭表示水準測線在地震後第 39 天的內插垂直位移改正量。

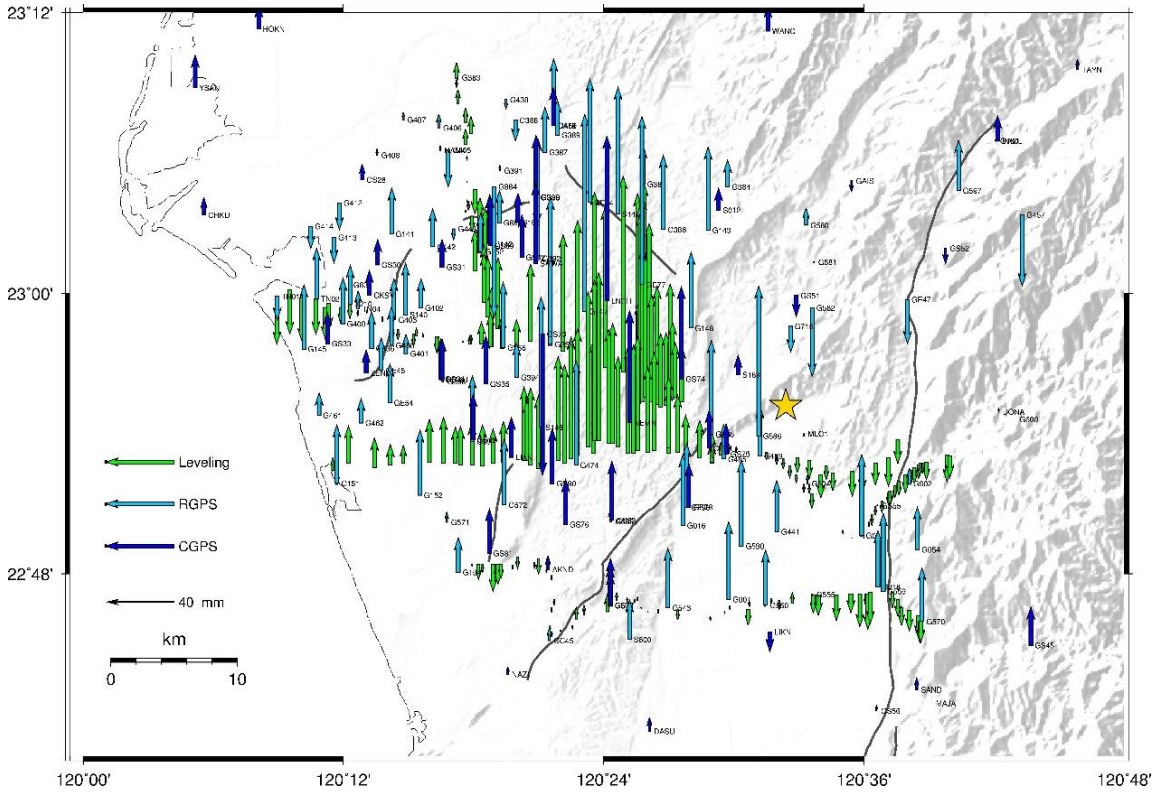


圖 2-2.54：美濃地震去除震後效應之同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場，黃色星號表示震央，藍色箭頭表示 GPS 連續站，青色箭頭表示 GPS 移動站，綠色箭頭表示水準測線。

依此完成移動站水平及垂直方向、精密水準垂直方向之震後效應修正後，水平及垂直方向結果分別如圖 2-2.55 及圖 2-2.56。

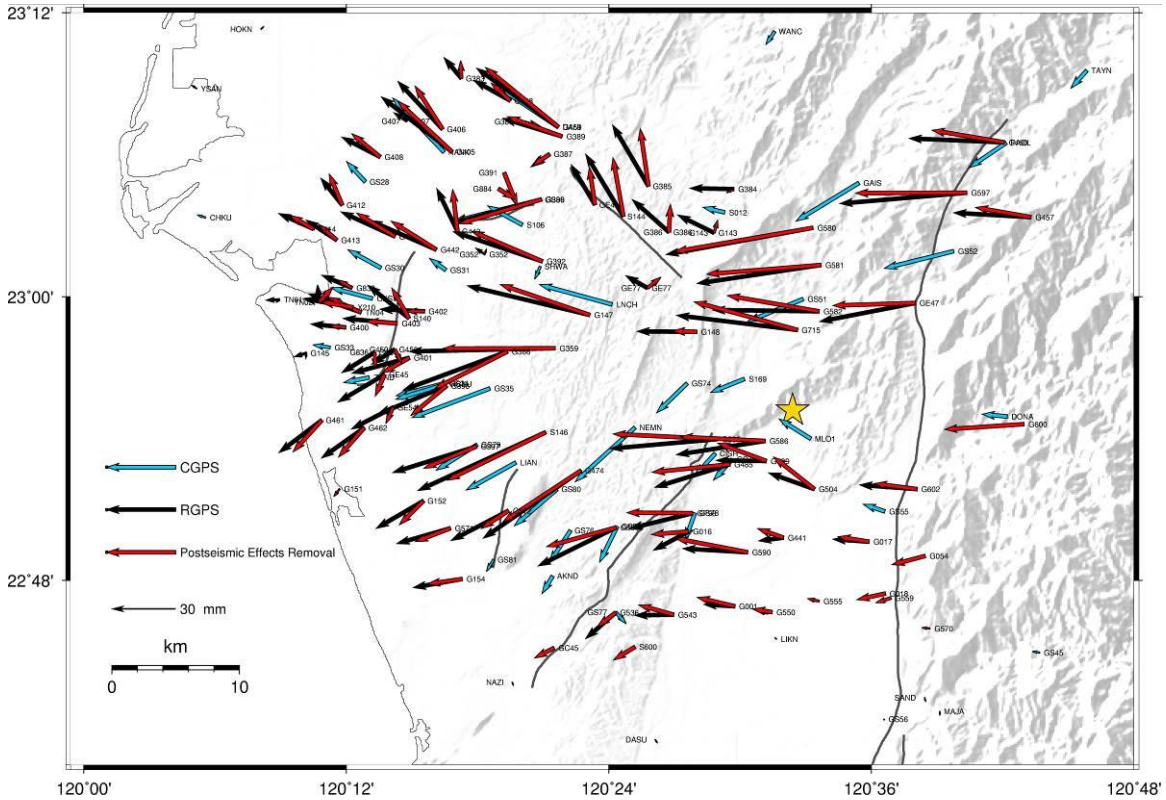


圖 2-2.55：美濃地震去除震後效應之同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場，黃色星號表示震央，藍色箭頭表示 GPS 連續站，黑色箭頭表示 GPS 移動站原始同震量，紅色箭頭表示 GPS 移動站修正震後效應後之同震量。

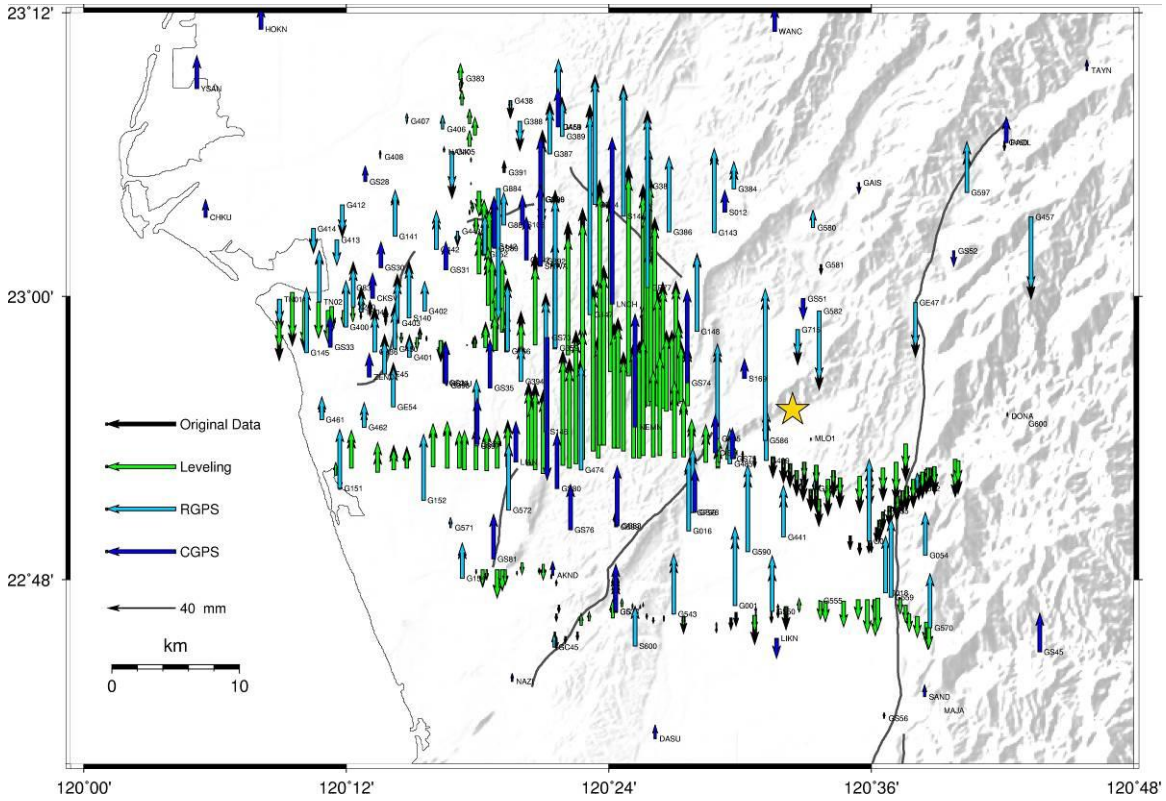


圖 2-2.56：美濃地震去除震後效應之同震 GPS 垂直方向位移場和水準垂直位移場，黃色星號表示震央，藍色箭頭表示 GPS 連續站，黑色箭頭表示 GPS 移動站及水準原始同震量，紅色箭頭表示 GPS 移動站修正震後效應後之同震量。

2-3 精密水準測量精度分析

截至 2016 年 10 月底前所獲得之精密水準測量資料包含「台 2_石門至萬里測線」、「士林至三芝測線」、「淡水至士林測線」、「五股至臺北測線」、「縣 115_新屋至童話世界測線」、「縣 122_新竹至五峰測線」、「縣 117_新竹至峨眉測線」、「苗栗至南庄測線」、「縣 132_大安至東勢測線」、「縣 136_龍井至太平測線」、「縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線」、「縣 150-台 16_北斗至水里測線」、「縣 164_金湖至瑞峰測線」、「縣 174_北門至楠西測線」、「縣 182_安平至龍崎測線」、「台 28_路竹至茂林主、副線」、「台 22_岡山至安坡測線」、「佳冬至七佳測線」、「恆春西台地至佳樂水測線」、「台 26_南樹林至鵝鑾鼻」、「台 19 甲_善化至關廟」、「台 20_新化至玉井測線」、「嶺頂至瀧澗測線」、「光復至豐濱測線」、「紅葉至靜浦測線」、「東成至富岡測線」和「梗枋至東澳測線」共 29 條主、副測線，以及跨車籠埔斷層之「五光至黃竹測線」。

2016 年 10 月底前所獲得共計 1,100 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 1,082 個測段（圖 2-3.1a），佔所有測段比例之 98.4 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 95.6 %（1,052 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 99.4 %（1,093 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 1,071 個測段達測段達 97.4 %（圖 2-3.1b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

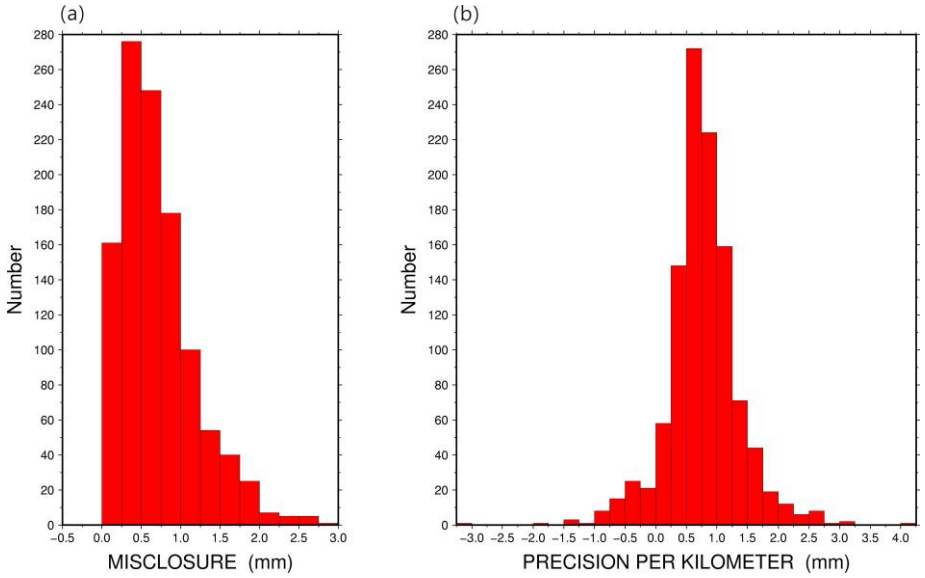


圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。（a）為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.25~ 0.5 mm 上。（b）為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

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 2016 年間共進行 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-2.07 mm/yr 與-2.07 mm/yr），作為約制點來校正 2027 和 0807 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.3 及圖 2-3.4）。

根據圖 2-3.5，本測線垂直速度均落在 -4 至-1 mm/yr 之間，而跨斷層點位之垂直速度變化< 1 mm/yr，此結果說明近幾年山腳斷層在該區域並未有明顯之活動跡象。另在地形高程變化部分，在橫跨斷層區域約有 3~ 5 m 的跨斷層地形高度的變化量，可能是因山腳斷層及其分支斷層長期活動所導致。

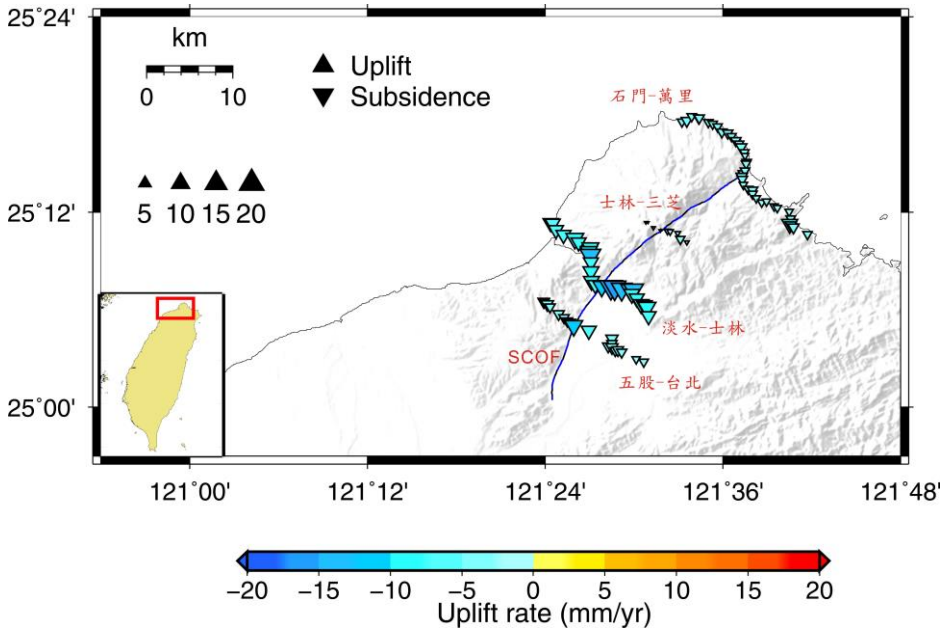


圖 2-3.2：台北地區之水準垂直速度場。SCOF 為山腳斷層。

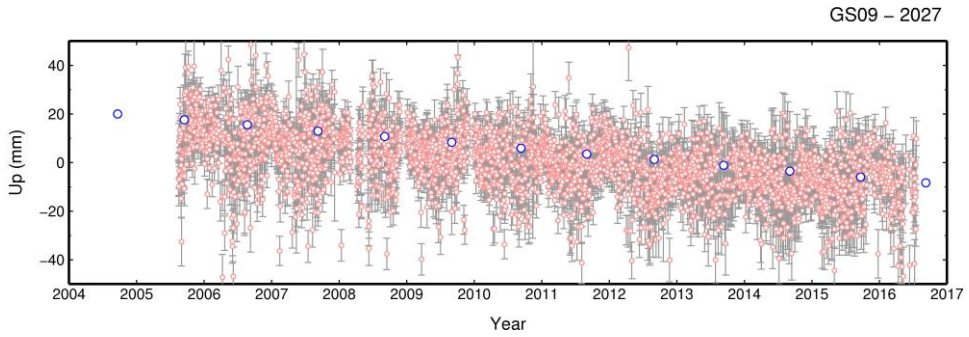


圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

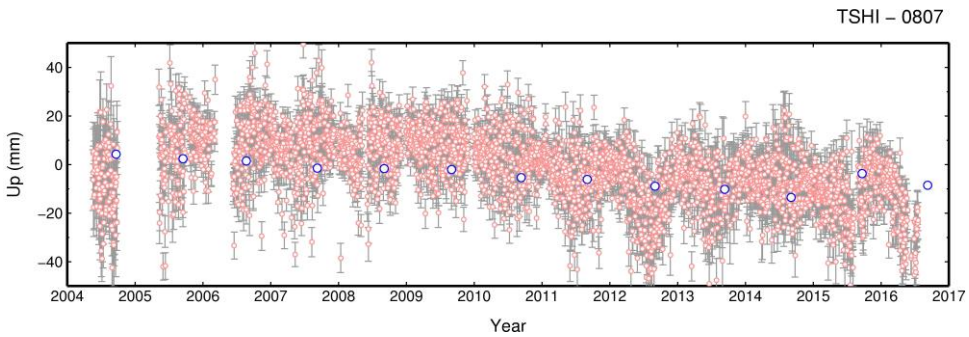


圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較，兩者相距 0.08 公里。

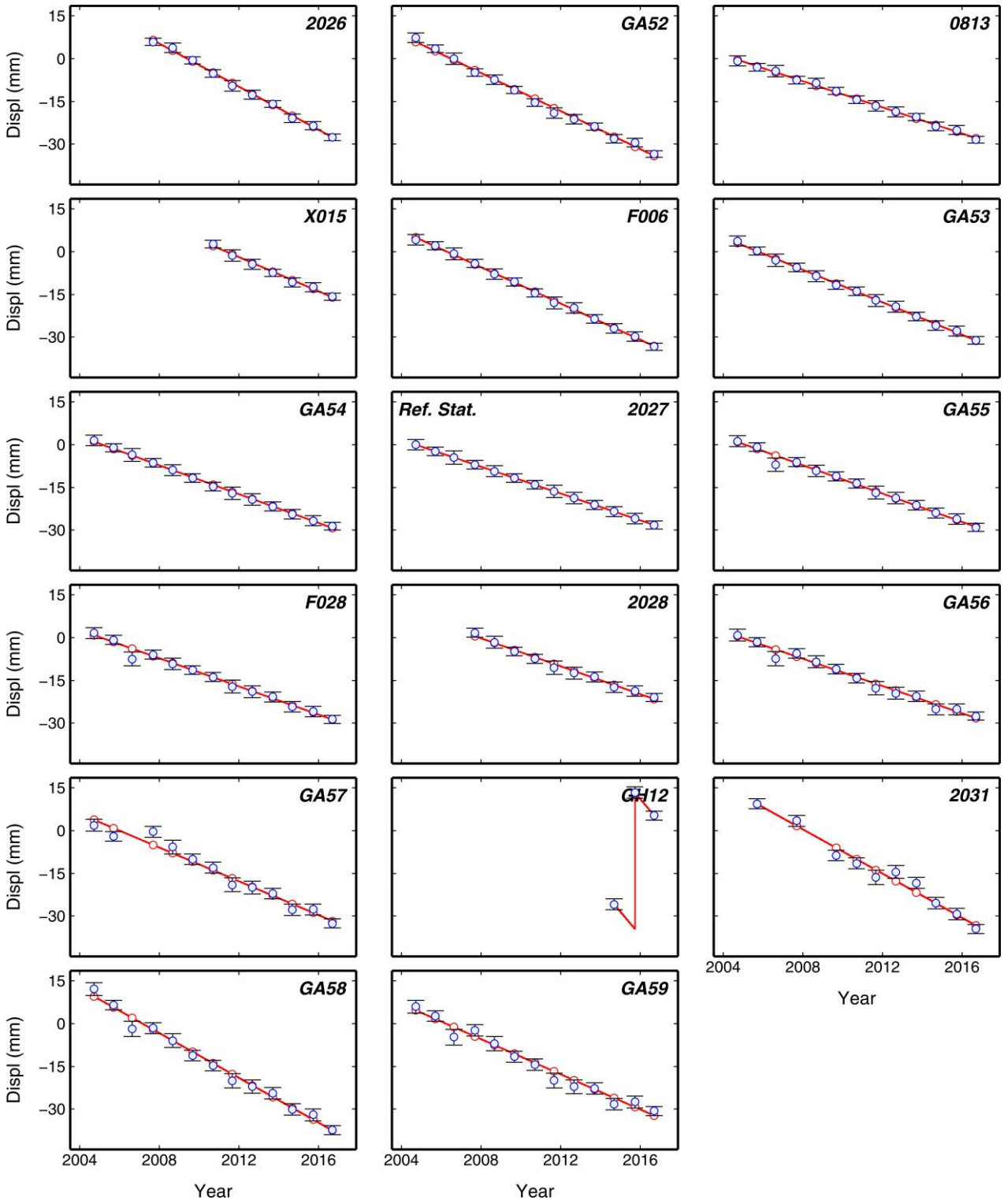


圖 2-3.5：石門至萬里測線之時間序列。

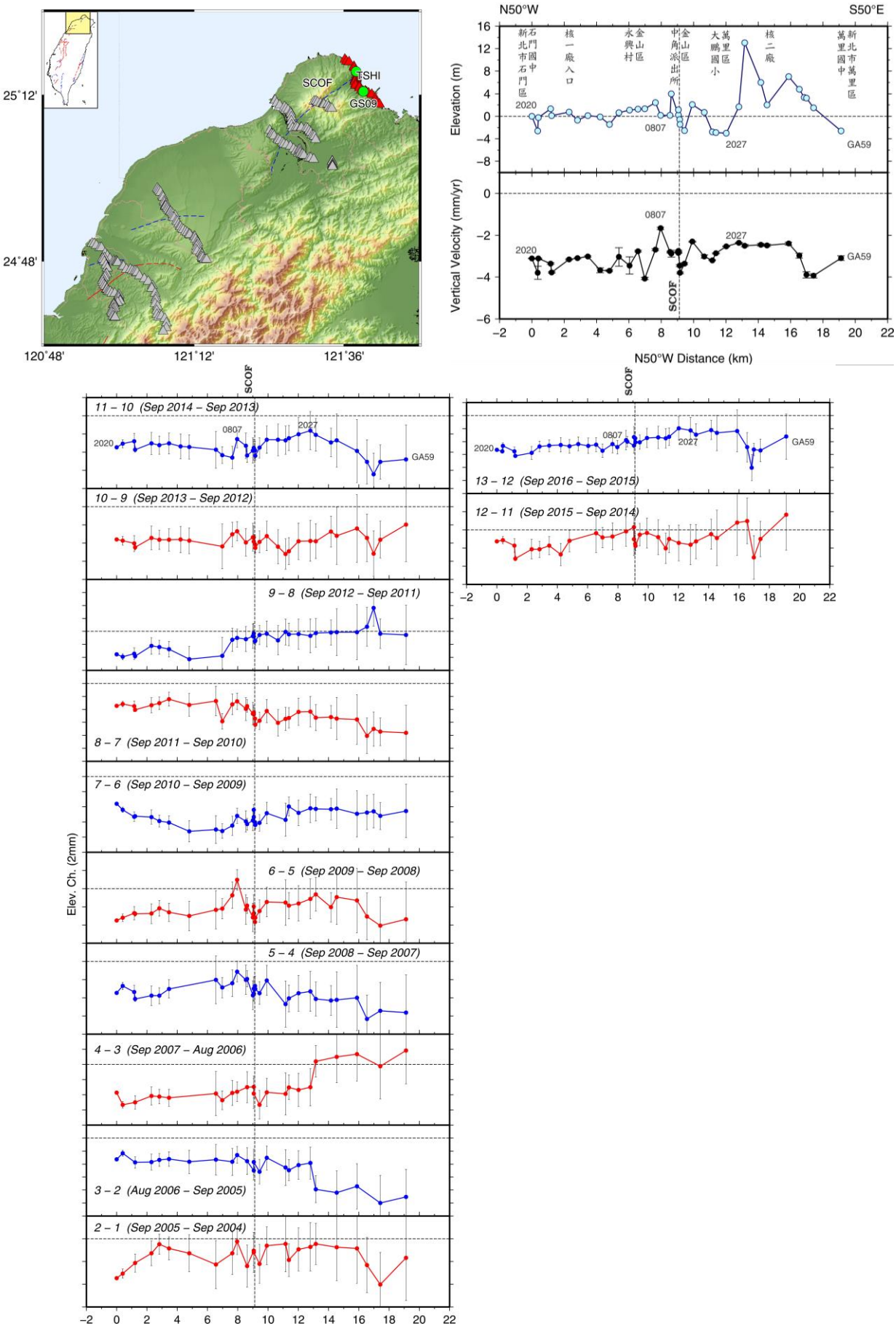


圖 2-3.6：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-3 士林至三芝測線

本測線跨越山腳斷層，測線長約 5 公里。該測線 2004 至 2016 年間共進行 13 次測量。本測線以 GPS 連續站 YMSM 之垂直速率（-0.59 mm/yr），作為約制點來校正 GB06 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.7）。

根據圖 2-3.9，此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側，整條水準的垂直速度均介於 -4 至 0 mm/yr 之間。跨斷層之垂直速度非常不明顯(約 0 至 1 公里之測段)，僅有約 0.3 mm/yr 的變化量，在 2 到 5 公里之測段稍有變化。據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能較為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要更長時間的監測以及與其他相關資料的佐證。

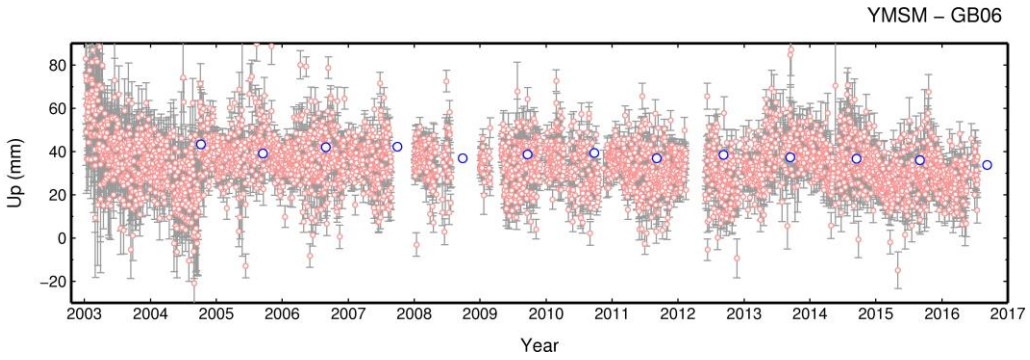


圖 2-3.7：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較，兩者相距 0.7 公里。

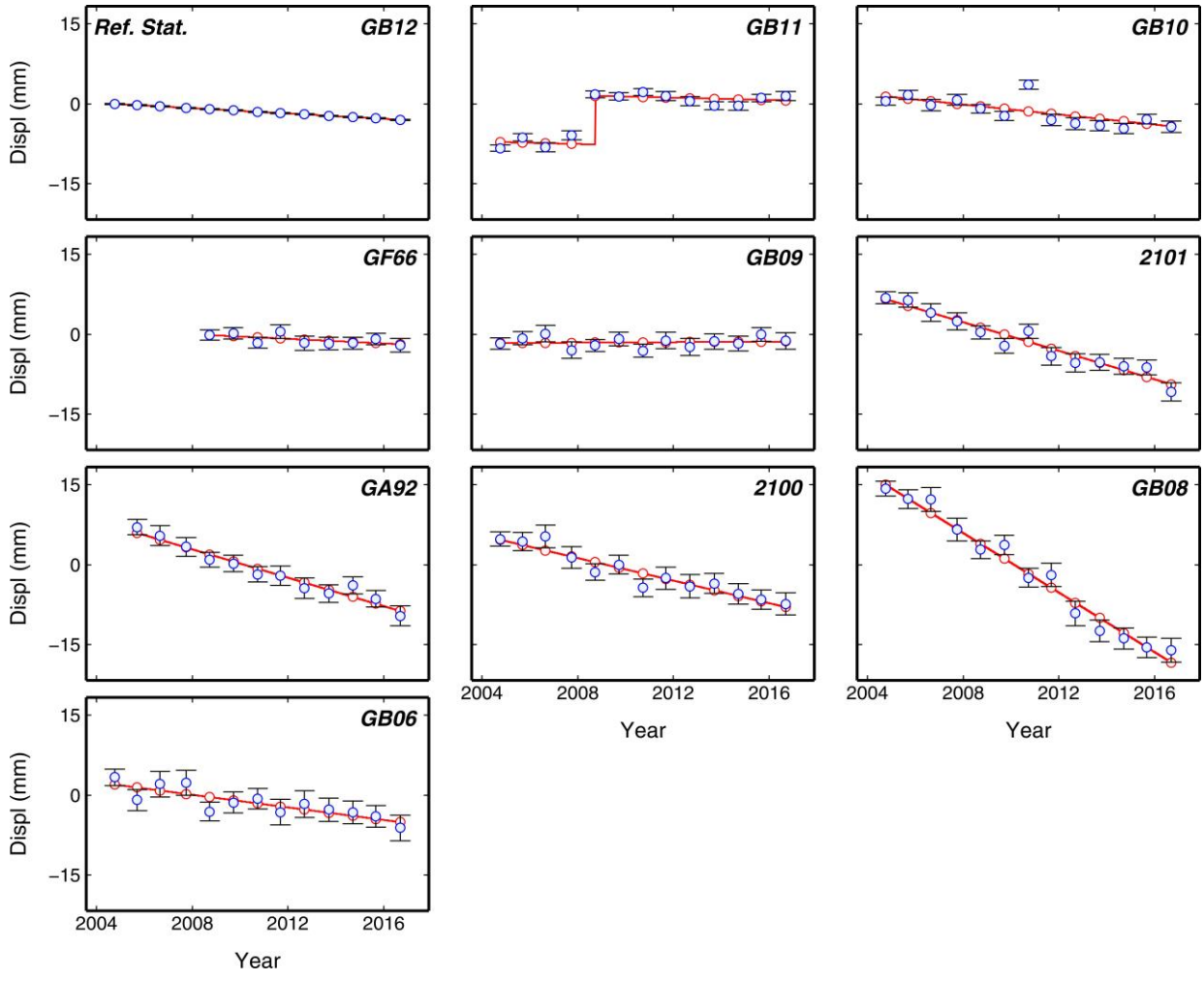


圖 2-3.8：士林至三芝測線之時間序列。

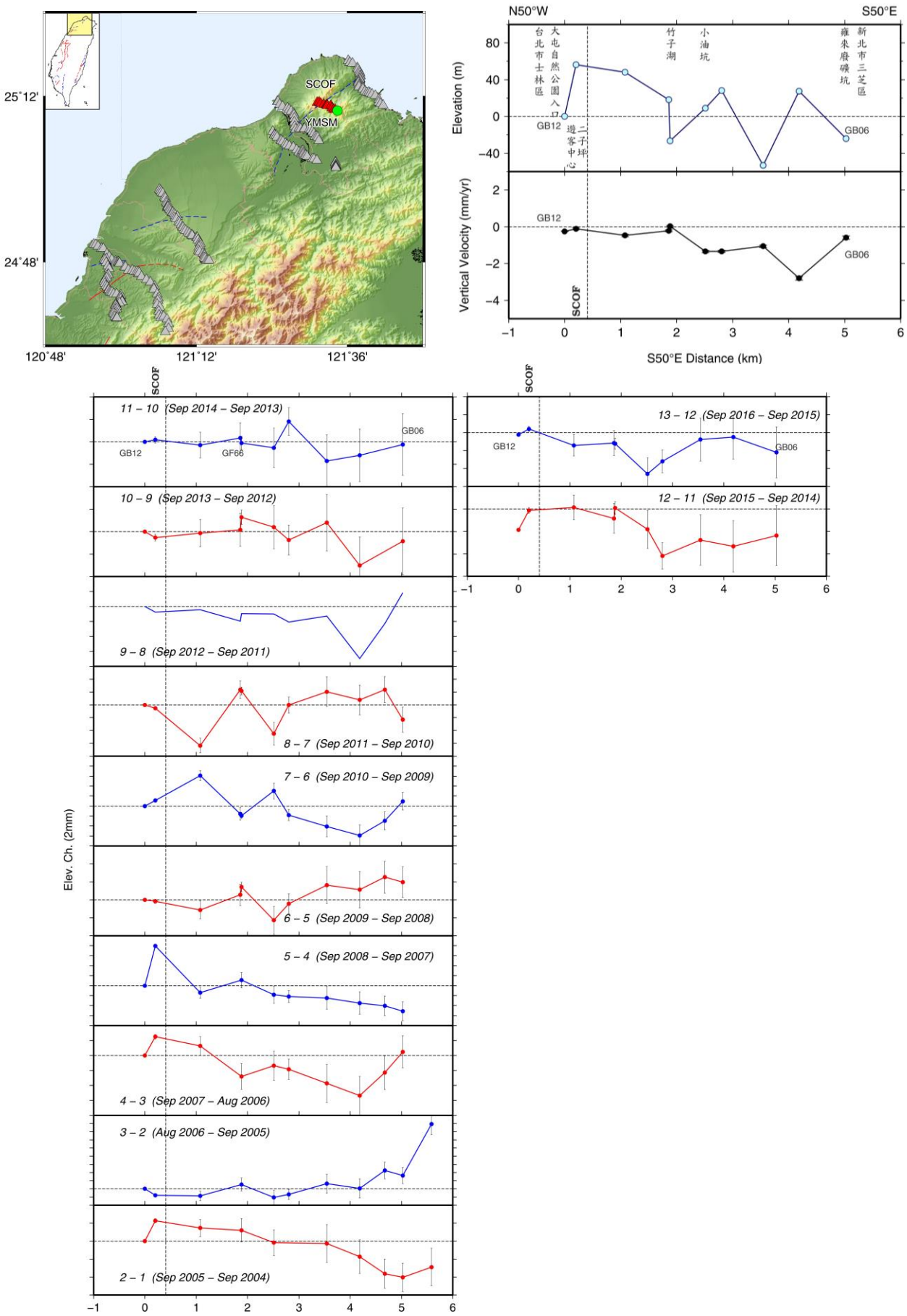


圖 2-3.9：士林至三芝測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-4 淡水至士林測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 16 公里，在 2004 至 2016 年間進行共 13 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 及 TANS 之垂直速率（-7.54 mm/yr 及-3.28 mm/yr），作為約制點來校正 GA69 與 GA63 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.10 及圖 2-3.11）。

根據圖 2-3.13，此測線之垂直速度在跨斷層有 10 mm/yr 的變化量，最大值達-16.3 mm/yr；在斷層東側的高程變化呈現緩步下陷的趨勢。觀察 2004~2006 及 2007~2014 之歷年高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由-30 mm 至-10 mm，顯示跨山腳斷層之沉陷有逐年減少的趨勢。由於該區位於基隆河與淡水河的匯流處，屬於河流下游沙洲的一部分，此明顯的變化應與該區域因地表未固結岩體之壓密與固結岩層之排水結合高密度人為活動，以及部分斷層活動而產生的地表沉陷有關。

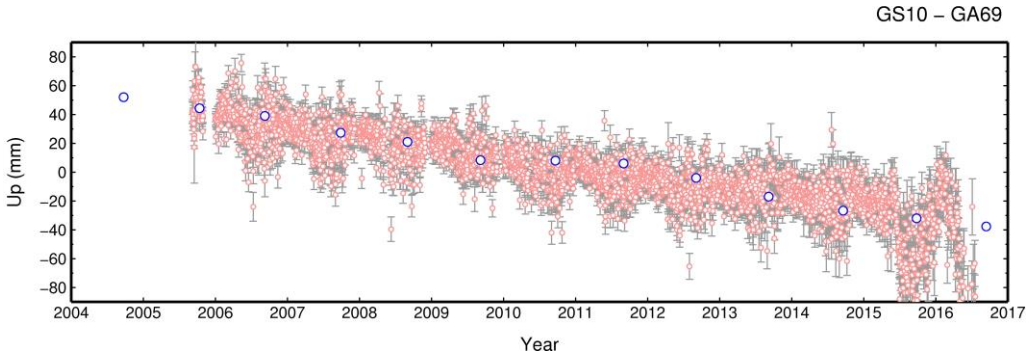


圖 2-3.10：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較，兩者相距 0.2 公里。

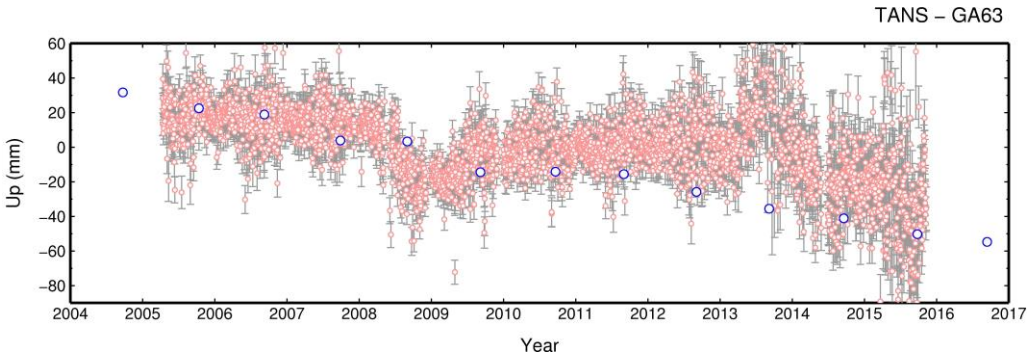


圖 2-3.11：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之間序列比較，兩者相距 0.7 公里。

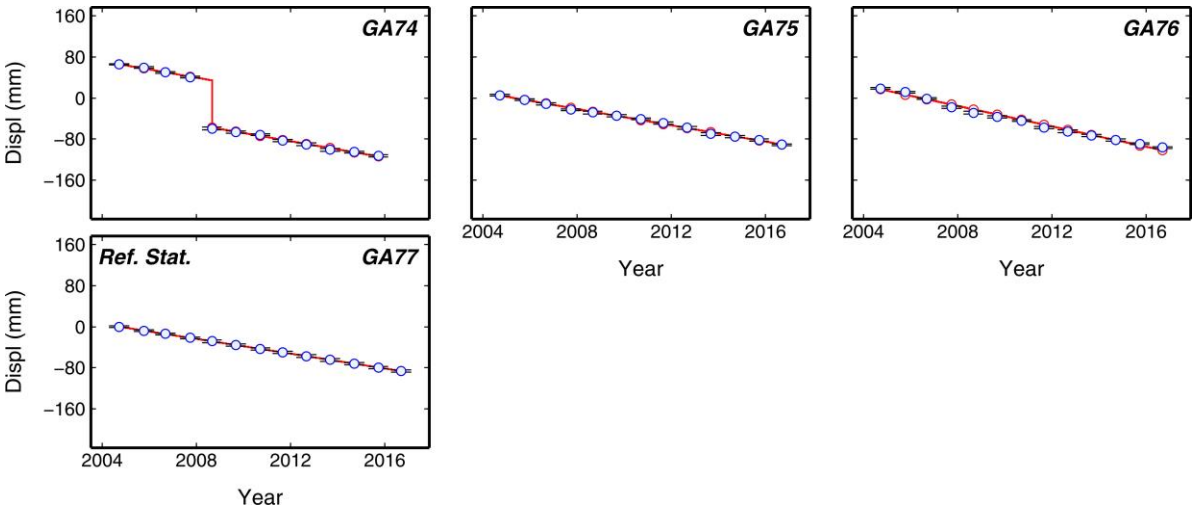


圖 2-3.12：淡水至士林測線之時間序列。

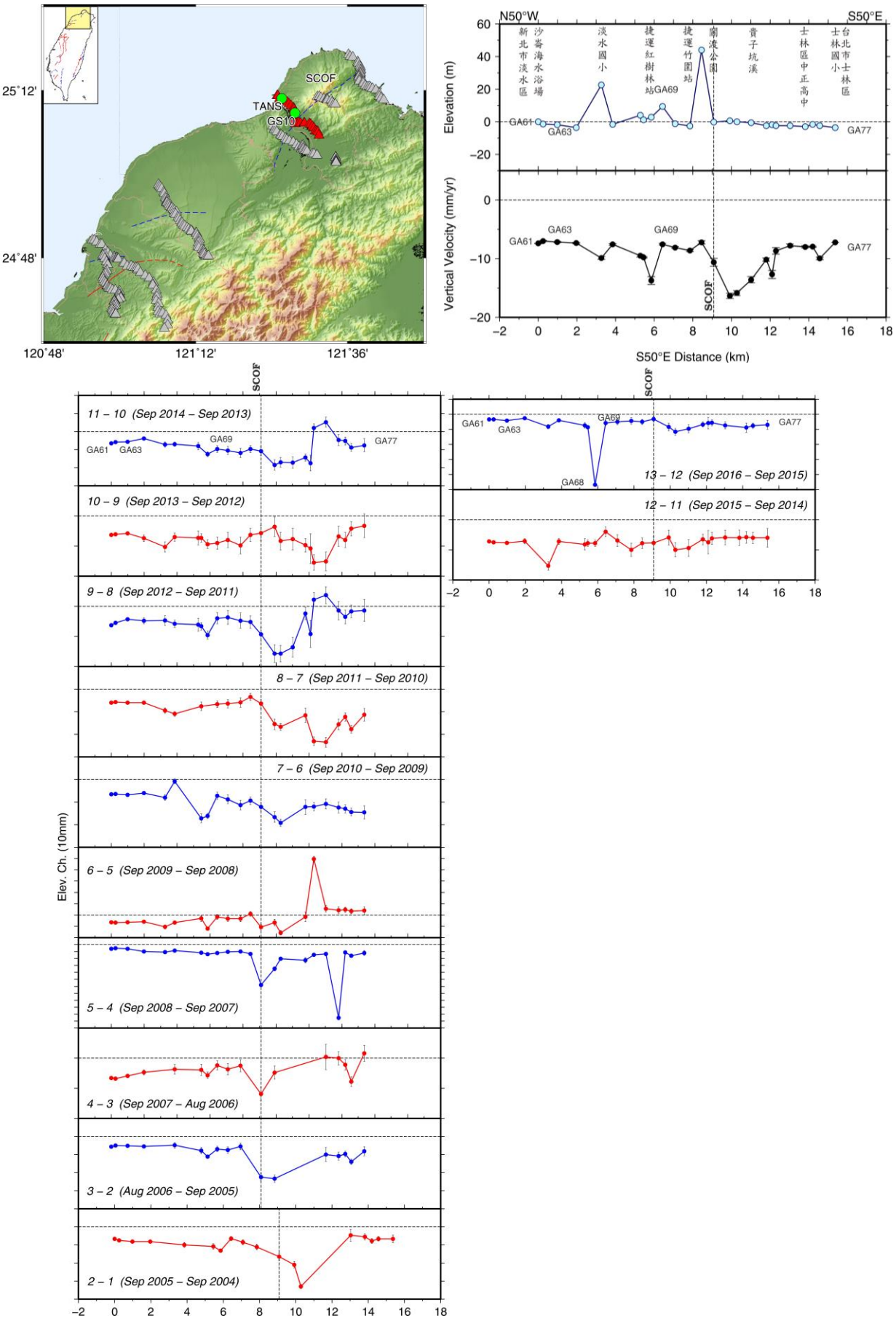


圖 2-3.13：淡水至士林測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-5 五股至台北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 14 公里。此水準測線於 2004 至 2016 年間共進行 13 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率(-3.91 mm/yr)，作為約制點來校正 GA78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.14）。

根據圖 2-3.16，此測線之垂直速度在跨斷層約有 6 mm/yr 的變化量，在疏洪親水公園一帶為本測線沉陷較大的區域，最大垂直速度達 7.1 mm/yr，此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。另從歷年高程變化來看，2008 年至 2013 年在山腳斷層東側有週期性的抬升及沉降現象，2014 年起至今變化則較不明顯。

此外，點位 GA83 之時間序列之形態與其他點位相較明顯不同，沉陷速率也較大。該點為水準與 GPS 移動站共同監測點位，其 GPS 觀測結果也與該區速度場趨勢不符。根據實地勘驗，由於該點位於台 107 甲（新五路二段）與市道 108（中興路四段）高架聯絡道下方交會處，，推測可能原因為該地該架工程載重及五股溼地地質影響。(工程於 2006 年開工，2009 年竣工)

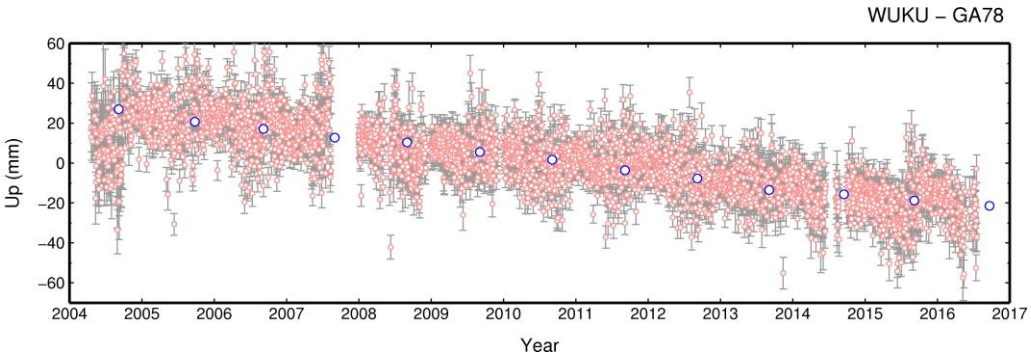


圖 2-3.14：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較，兩者相距 1.3 公里。

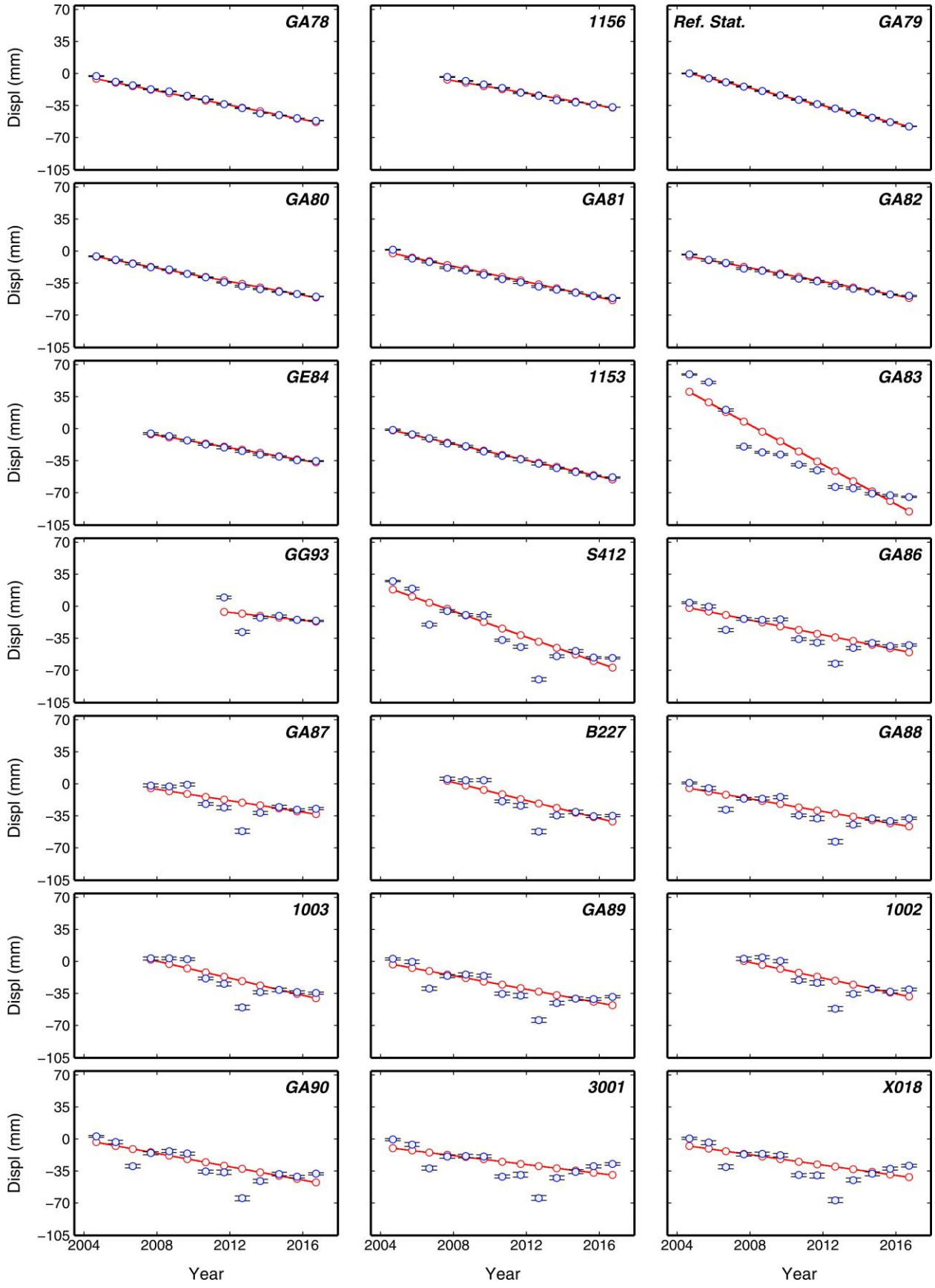


圖 2-3.15：五股至台北測線之時間序列。

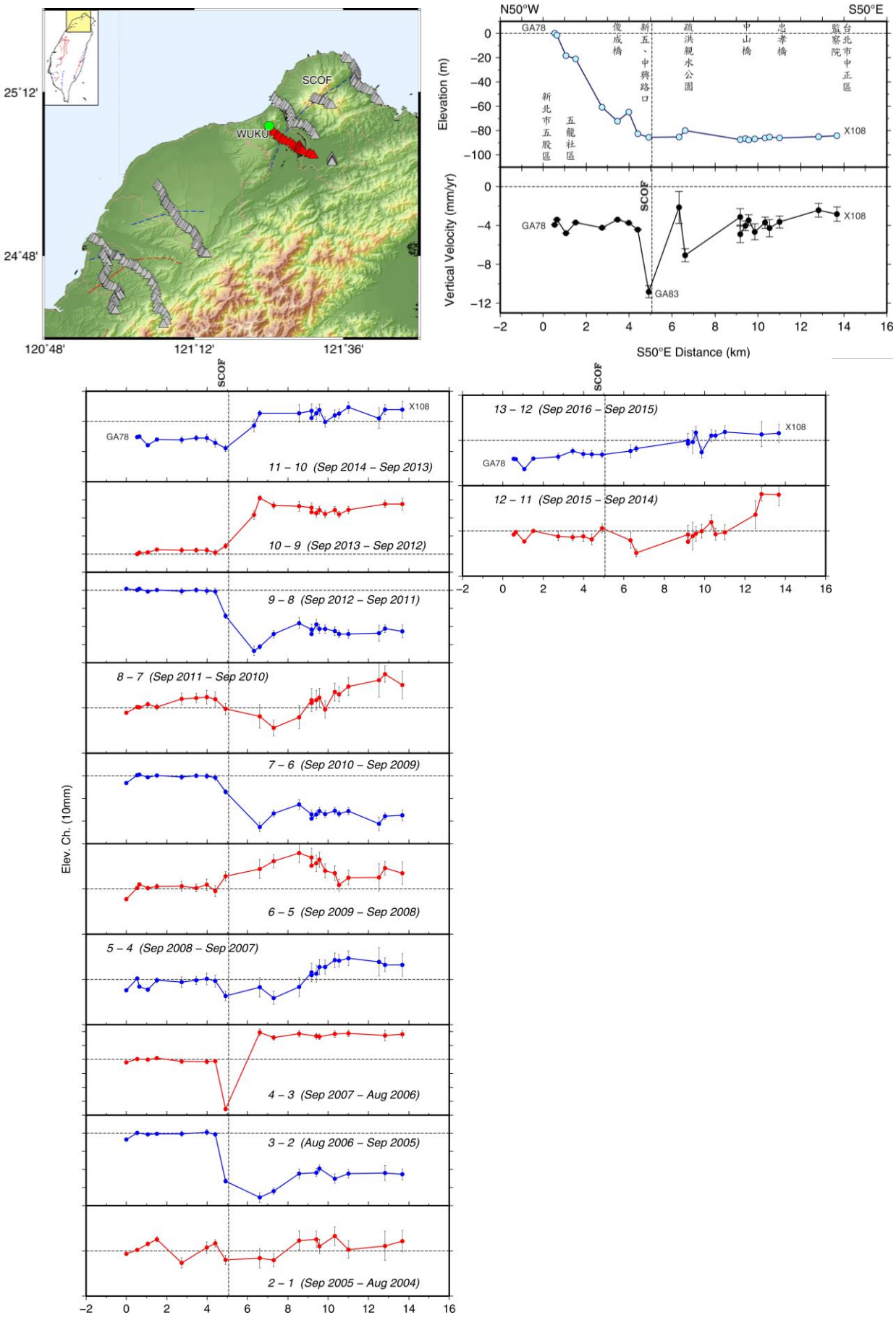


圖 2-3.16：五股至台北測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-6 縣 115_新屋至童話世界測線

本測線橫跨雙連坡斷層、湖口斷層與大平地斷層，測線長約 24 公里，分別於 2004 至 2016 年間進行 13 次的施測作業。本測線以 GPS 連續站 YAME 之垂直速率（-1.12 mm/yr），作為約制點來校正 GB40 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.18）。

根據圖 2-3.20，此測線之垂直速度在跨雙連坡斷層區域未有顯著變化，變化量< 1 mm/yr，說明近幾年來雙連坡斷層並不活躍。跨湖口斷層之垂直速度則約有 3 mm/yr 的變化量。而跨大平地斷層則有較大之垂直速度變化（~4 mm/yr）。

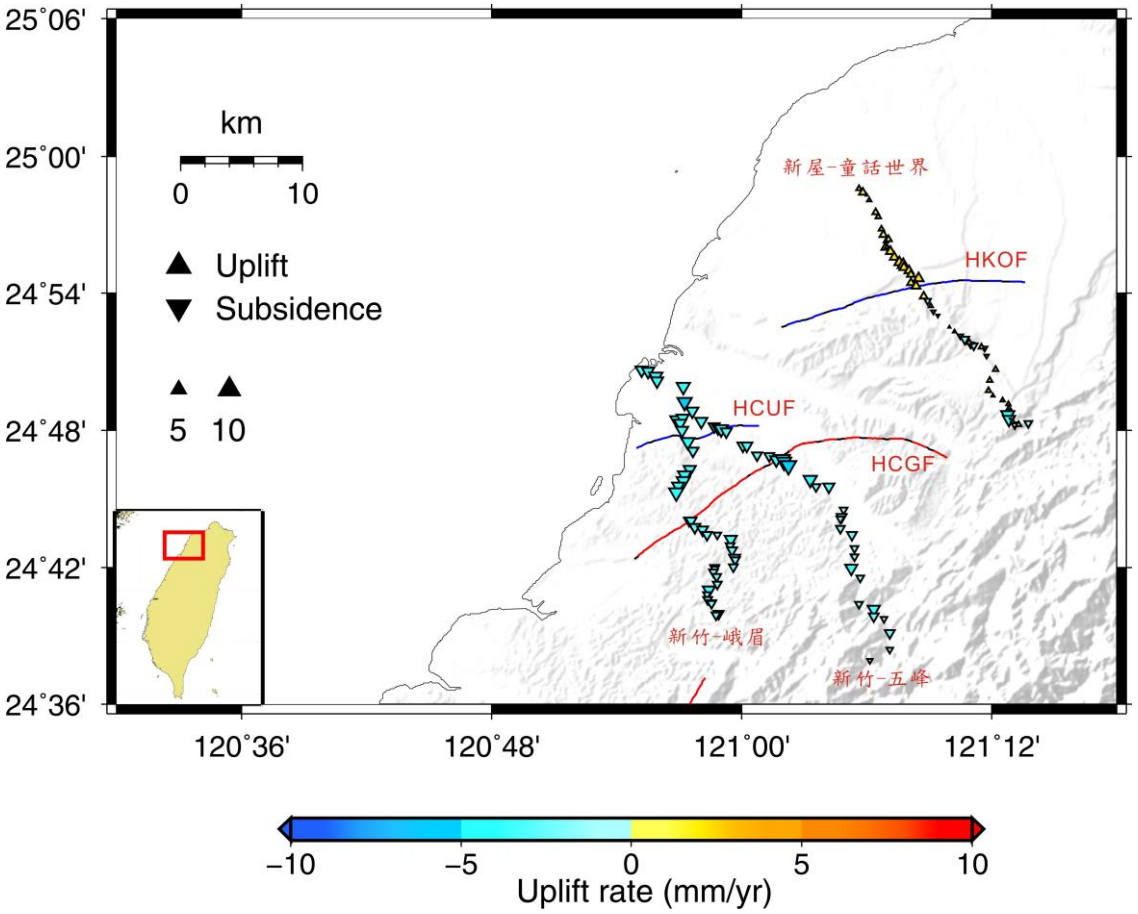


圖 2-3.17：桃竹地區之水準垂直速度場。HKOF 為湖口斷層、HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

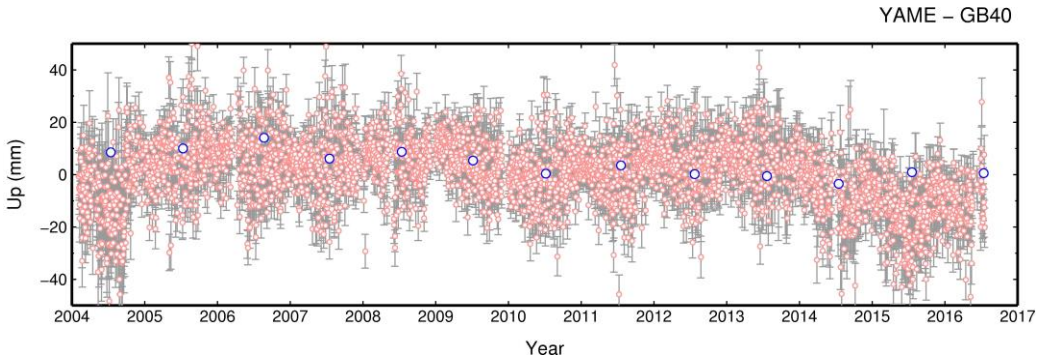


圖 2-3.18：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較，兩者相距 3.3 公里。

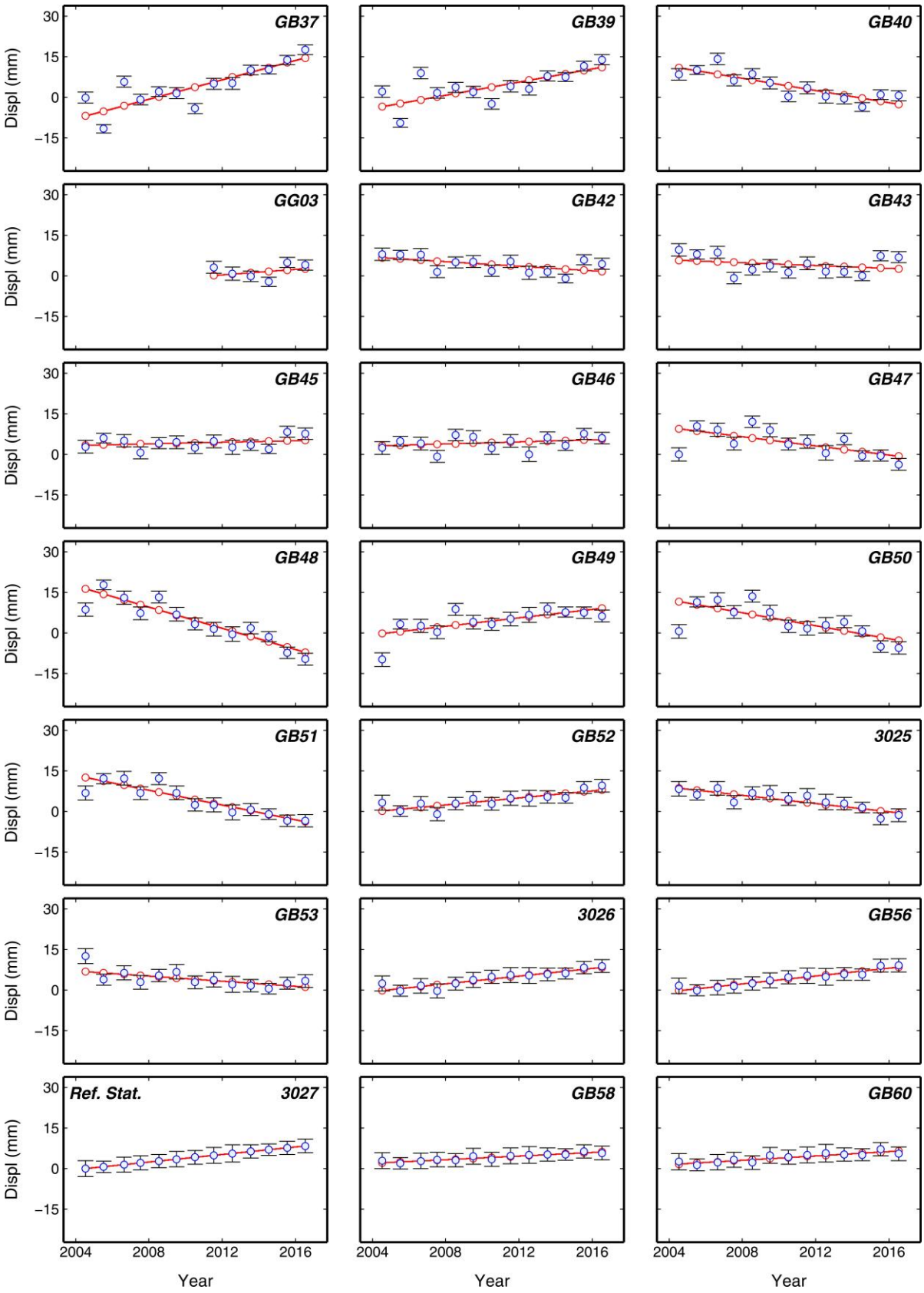


圖 2-3.19：新屋至童話世界測線之間序列

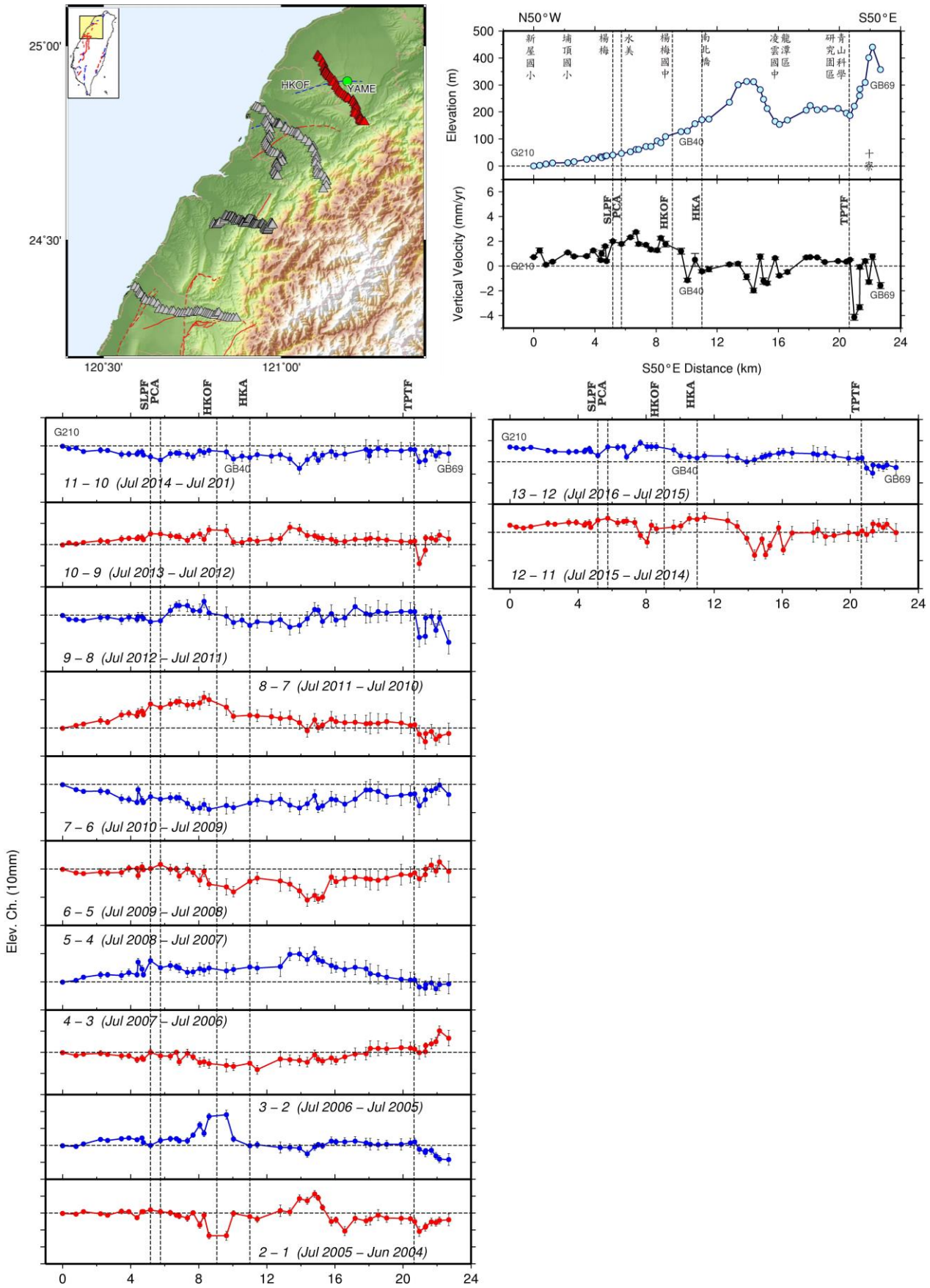


圖 2-3.20：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SLPF 為雙連坡斷層、PCA 為平鎮背斜、HKOF 為湖口斷層、HKA 湖口背斜、TPTF 為大平地斷層。

2-3-7 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，測線長約 31 公里。2002 年至 2016 年間，共進行 13 次的施測。本測線分別以連續 GPS 站 TNML、GS03、GS02 之垂直速率(-2.04 mm/yr 、-2.61 mm/yr、-4.71mm/yr)，作為約制點來校正 HCCA、T004、T001 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率之垂直速率（圖 2-3.21~23）。

根據圖 2-3.25，此測線之垂直速度在跨新竹斷層和跨平地斷層皆未有顯著變化，變化量皆< 2 mm/yr，但在跨新城斷層有約 5 mm/yr 的變化量（約-5.05 至 0 mm/yr）。

根據此測線之時間序列（圖 2-3.24），其中 G429、T004、T003、6020 四個點位皆位於工研院竹東院區內或周遭，其時間序列變化明顯與鄰近點位不同，根據實地勘驗結果，推測該區域可能有地滑現象，應多加留意。

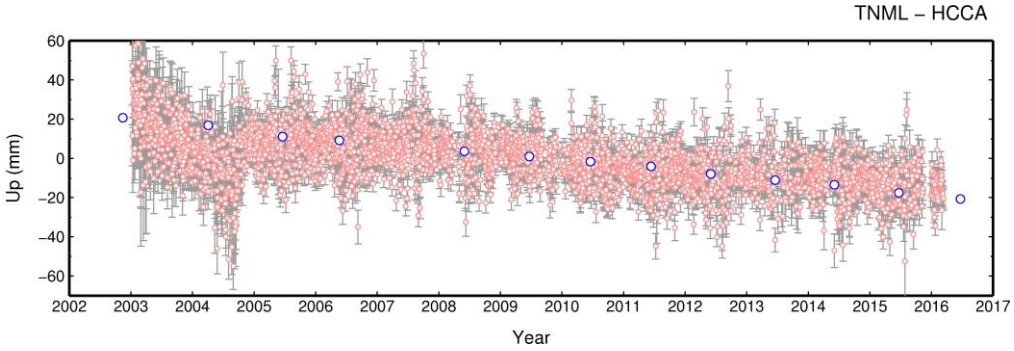


圖 2-3.21：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

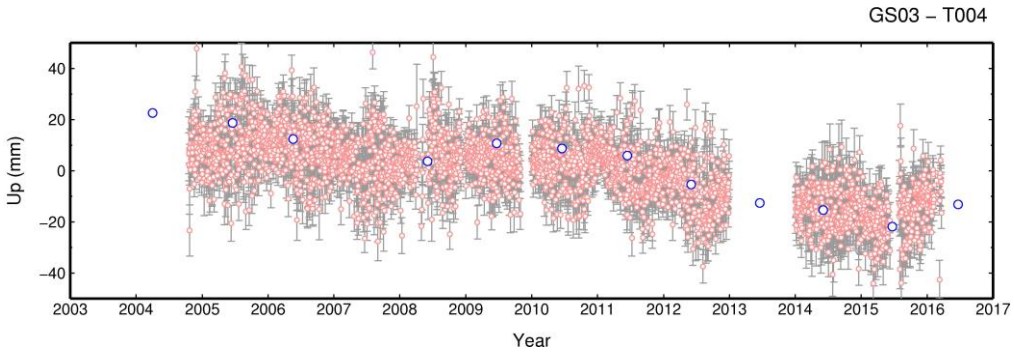


圖 2-3.22：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。

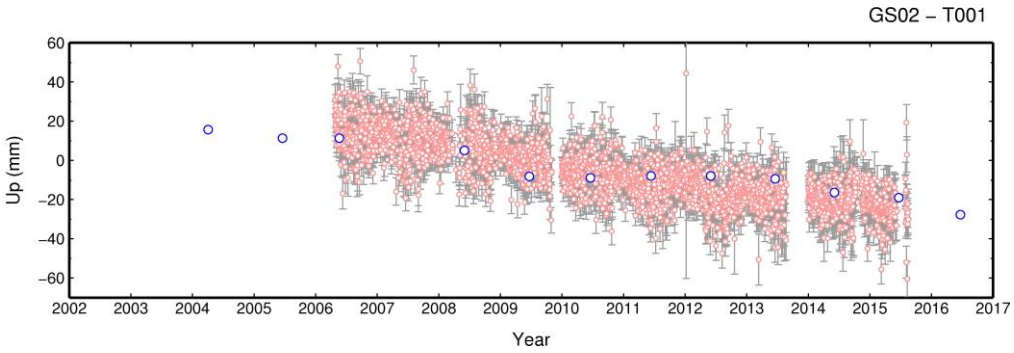


圖 2-3.23：水準點位 T001 與連續站 GS02 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

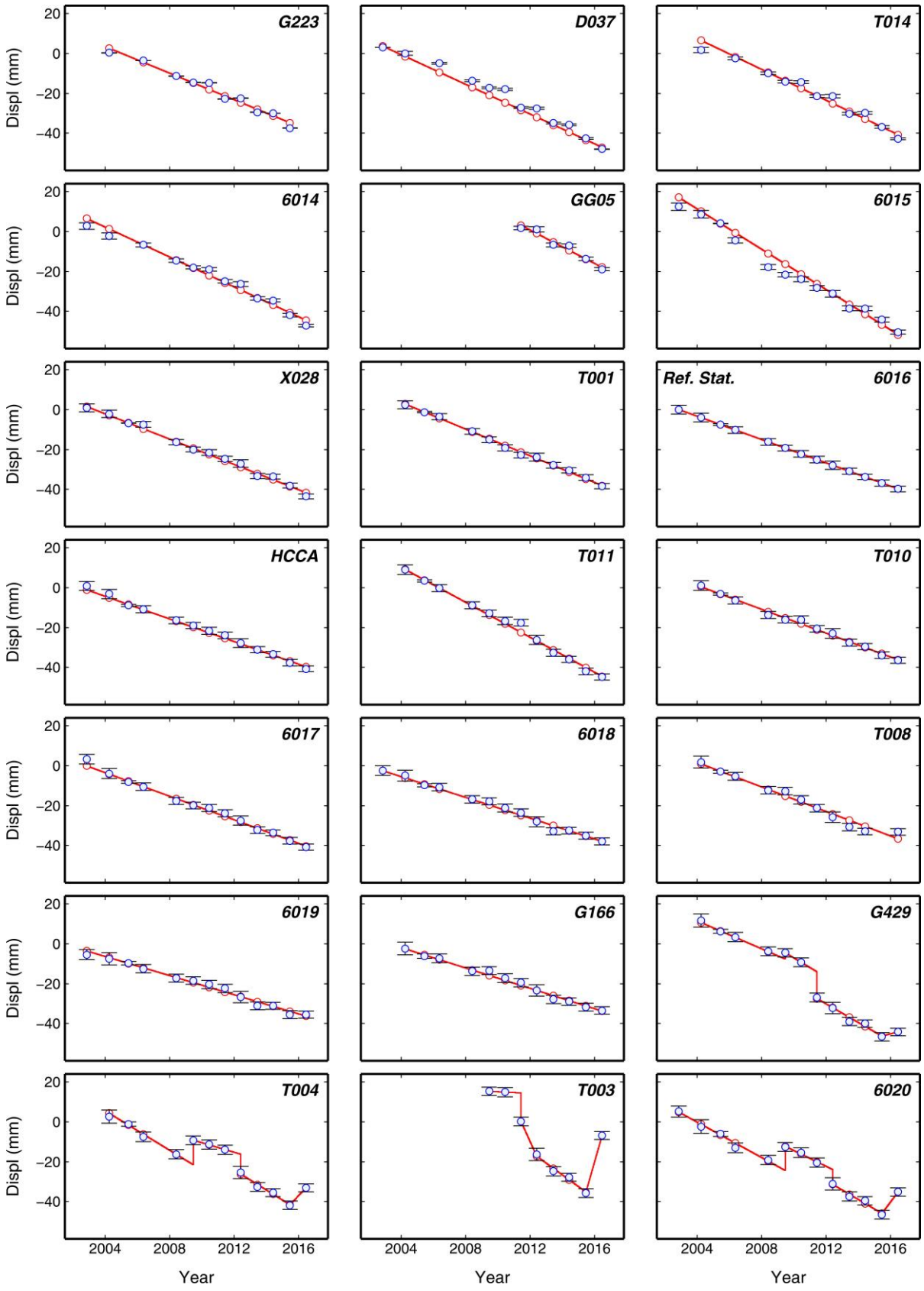


圖 2-3.24：新竹至五峰測線之時間序列。

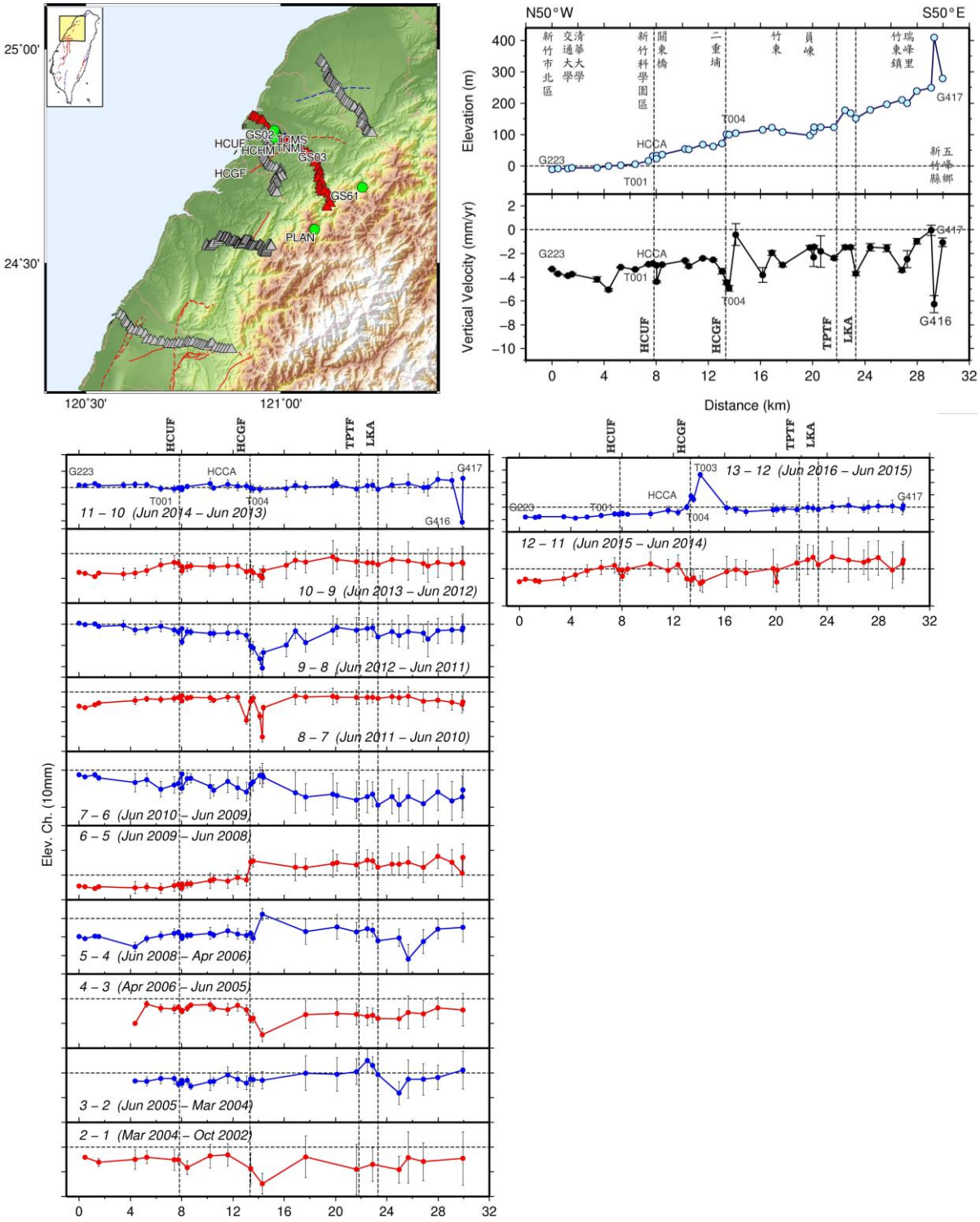


圖 2-3.25：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層、TPTF 為大平地斷層、LKA 為鹿廚坑背斜。

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 16 公里。此測線於 2004 至 2016 年間進行共 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS14 之垂直速率（-3.27 mm/yr），作為約制點 GB72 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.26）。

根據圖 2-3.28，此測線的垂直速度在跨新竹斷層和新城斷層皆未有顯著的變化，變化量皆< 1 mm/yr，而跨斗煥坪斷層則有約 2 mm/yr 的變化量。另 2005~2006 年間之高程變化與其他時段（2004~2005、2006~2010）不同，疑與 2006 年 7 月凱米颱風（KAEMI）之降雨有關（颱風警報期間：7/23~7/26；水準測量期間：7/10~8/01）。

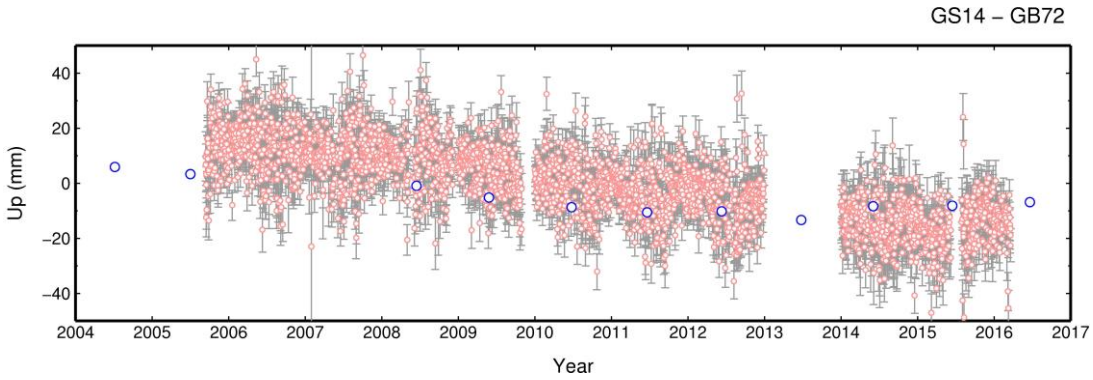


圖 2-3.26：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。

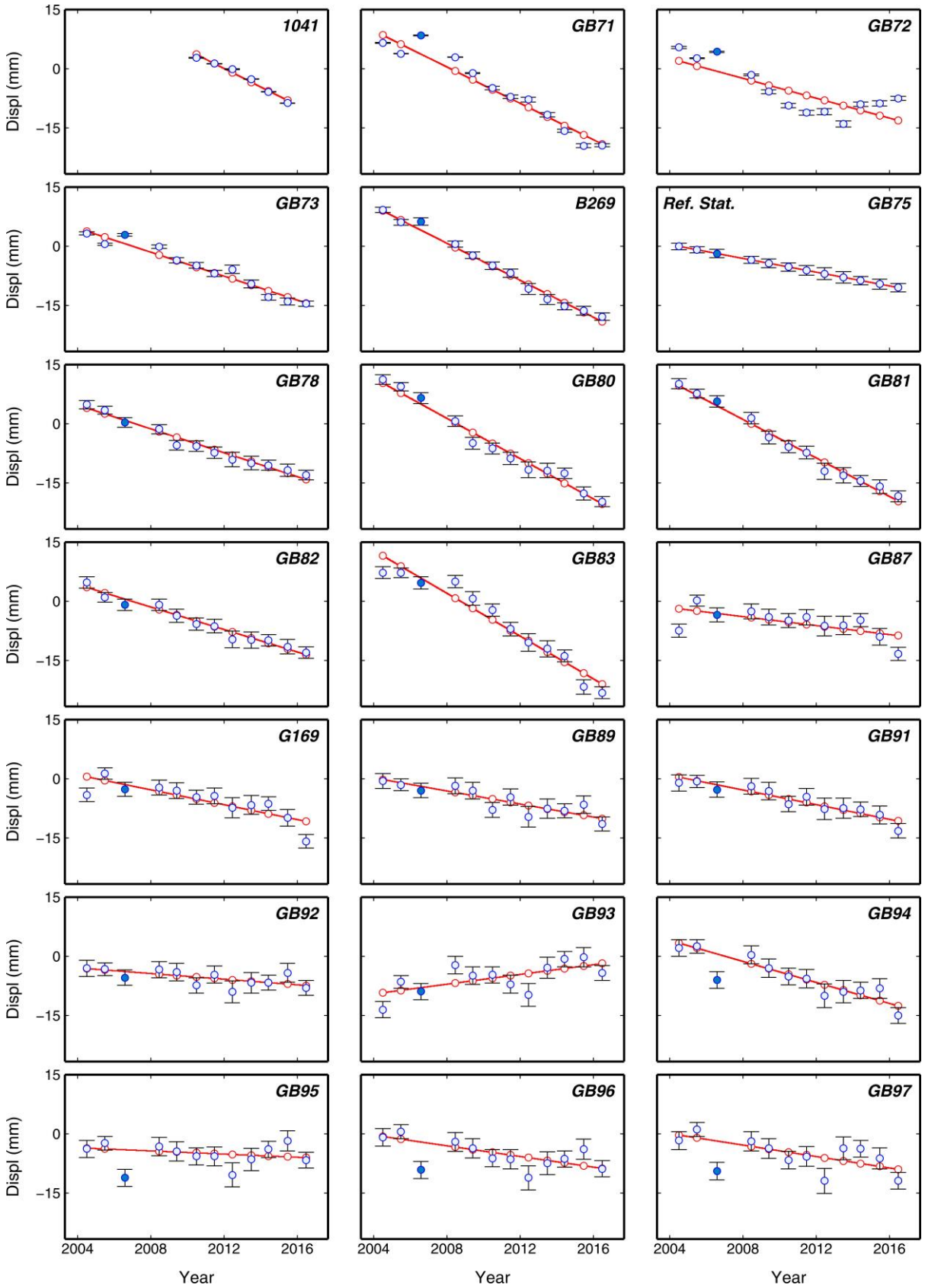


圖 2-3.27：新竹至峨眉測線之時間序列。其中藍點為第三次施測（2006 年），因其明顯與整體趨勢不符，故暫時不將該次結果列入垂直速度計算。

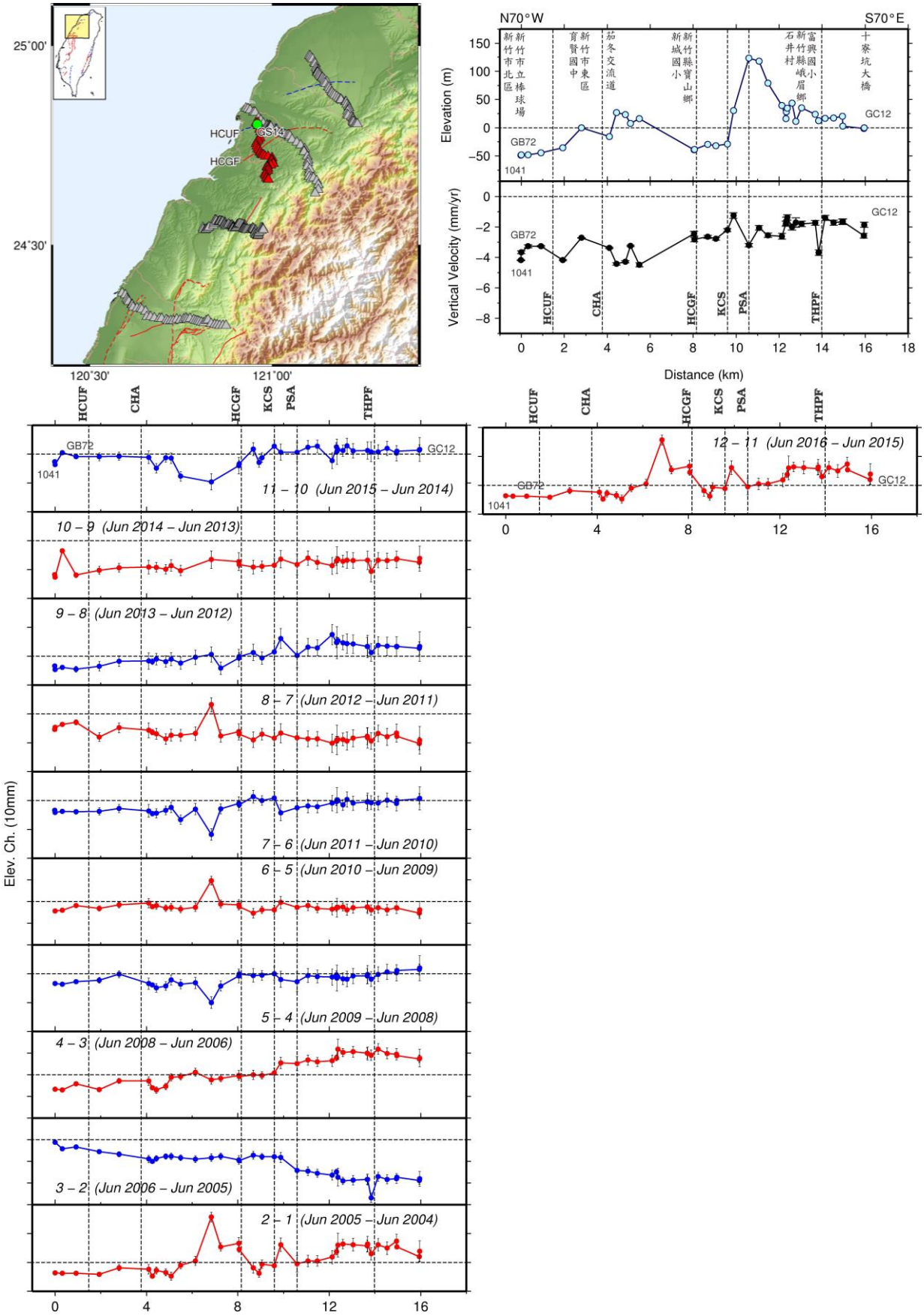


圖 2-3.28：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、CHA 為青草湖背斜、HCGF 為新城斷層、KCS 為柑子崎向斜、PSA 為寶山背斜、THPF 為斗煥坪斷層。

2-3-9 苗栗至南庄測線

本測線橫跨獅潭斷層，測線長約 17 公里，此測線於 2005 至 2016 年間共進行 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 之垂直速率（-5.47 mm/yr），作為約制點 GD95 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.29）。

根據圖 2-3.32，整條測線的水準垂直速度大多在-4 至-7 mm/yr 之間，跨獅潭斷層之區域之變化並不顯著（變化量< 1 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。從歷年高程變化來看，除 2009~2010 年間之高程變化接近地形變化外，2005~2009 年及 2010~2016 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。此結果或許說明此地區之斷層滑移量主要是集中在滑脫面上。

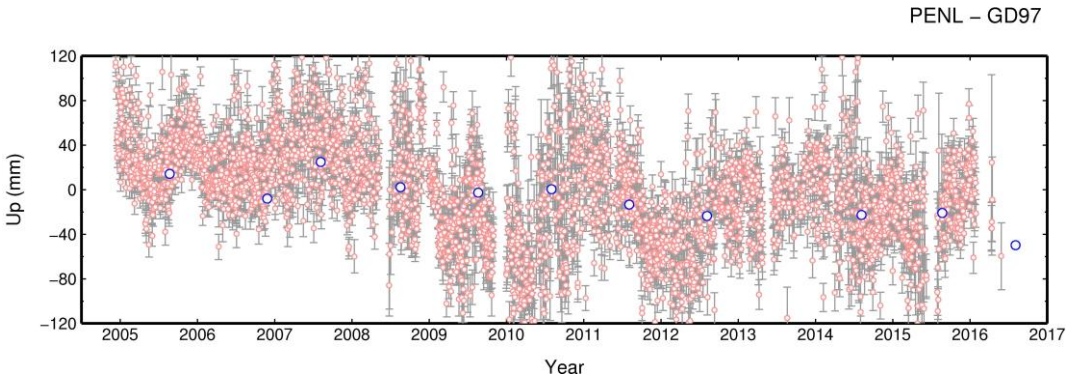


圖 2-3.29：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

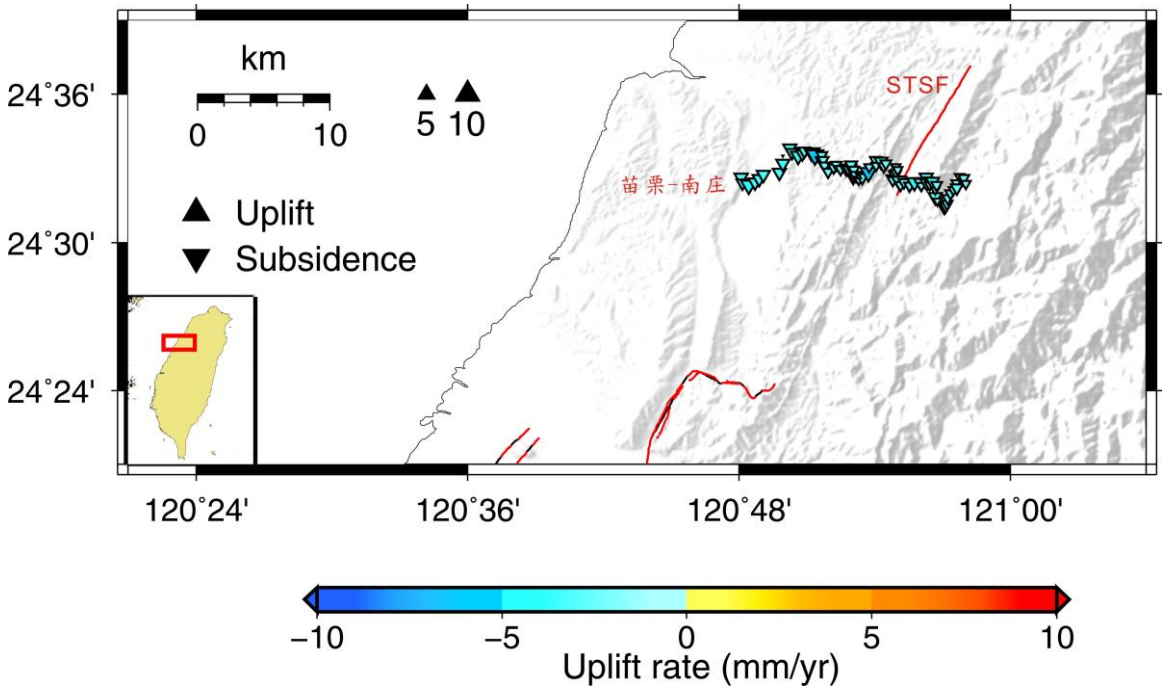


圖 2-3.30：苗栗地區之水準垂直速度場。STNF 為獅潭斷層。

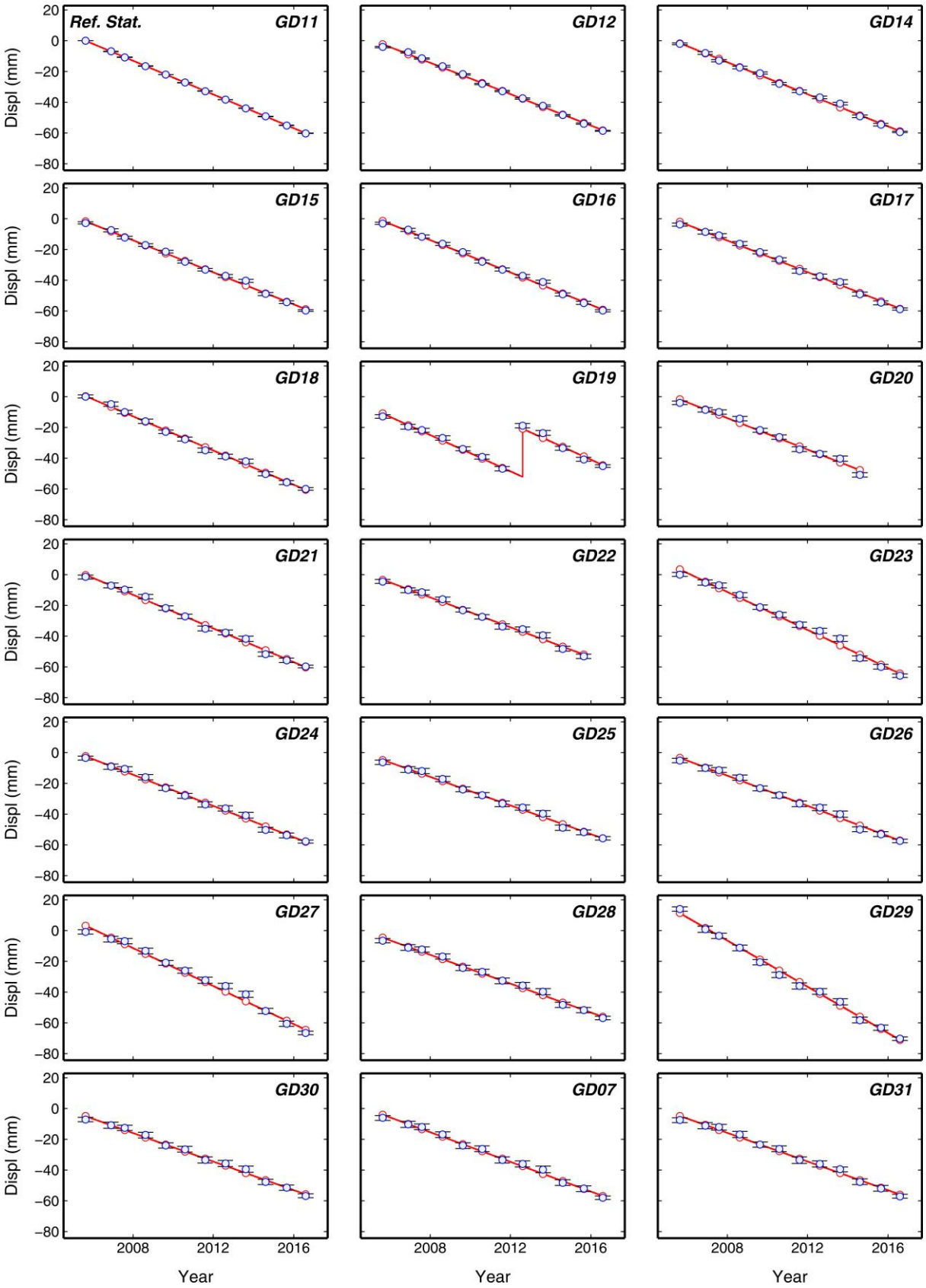


圖 2-3.31：苗栗至南庄測線之時間序列。

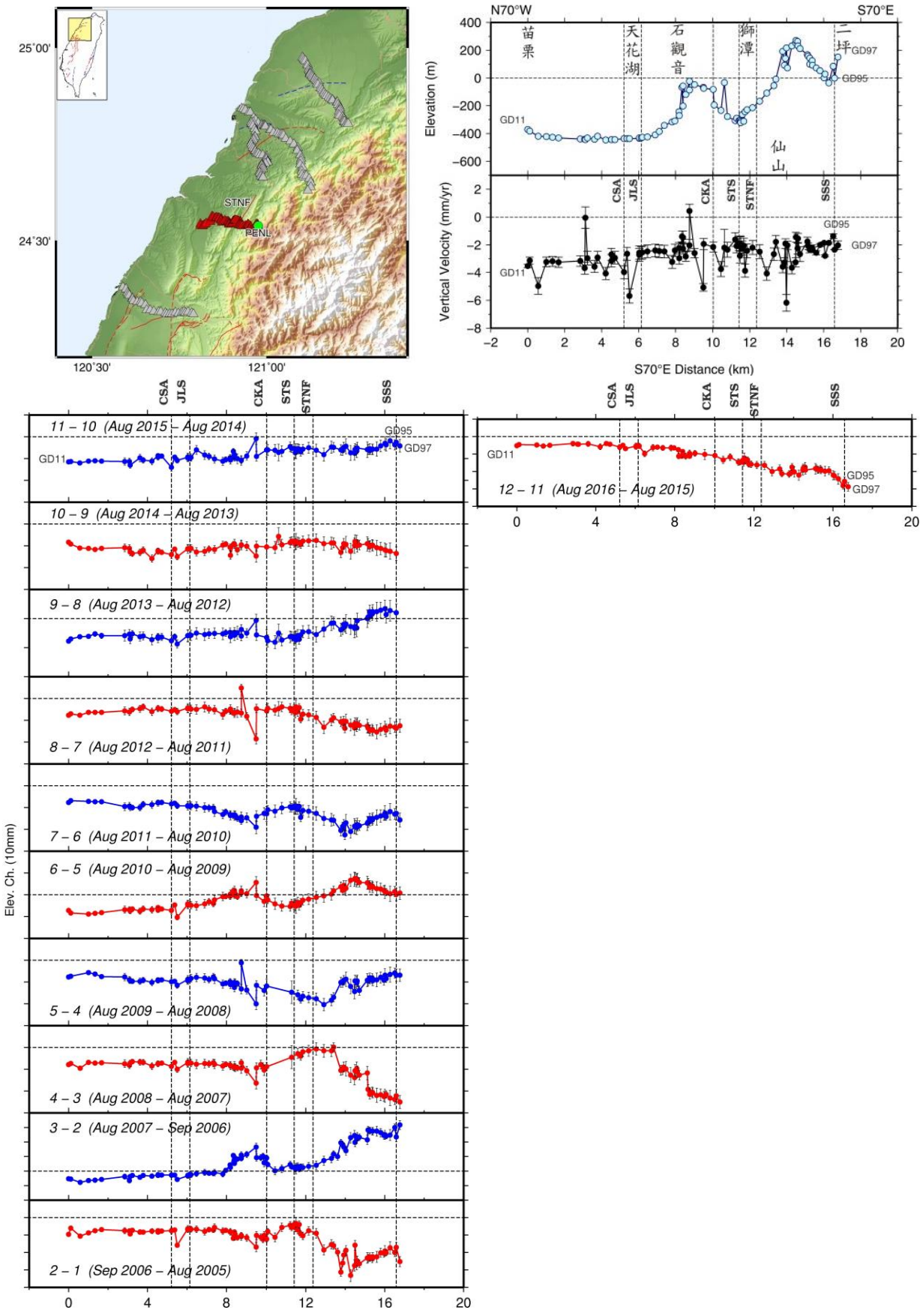


圖 2-3.32：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每欄刻度均代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CSA 為錦水背斜、JLS 為仁隆向斜、CKA 為出磺坑背斜、STS 為獅潭向斜、STNF 為獅潭斷層、SSS 為神社向斜。

2-3-10 縣 132_大安至東勢測線

本測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 22 公里，從 2004 年至 2016 年止共計有 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS36 之垂直速率（-3.34 mm/yr），作為約制點來校正 G896 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.34）。

根據圖 2-3.36，就垂直速度而言，各水準點之垂直速度多在-5.0 mm/yr 至-2.0 mm/yr 間，且自鐵砧山至屯子腳斷層間（東陽國小至內埔國小）的垂直速度呈現下滑的趨勢（約-2.2 ~ -4.6 mm/yr），但高程地形卻是逐漸抬升。在通過三義斷層後的垂直速度（貓仔坑至明正國小）逐漸抬升至測線末端，顯示屯子腳斷層北側有略微下陷的現象，而三義斷層的上盤相對其下盤正持續抬升。此外，海墘國小至大甲運動場間之歷年高程變化於 2004 至 2016 年呈現規律之起伏，說明該段區域有年週期的變化。

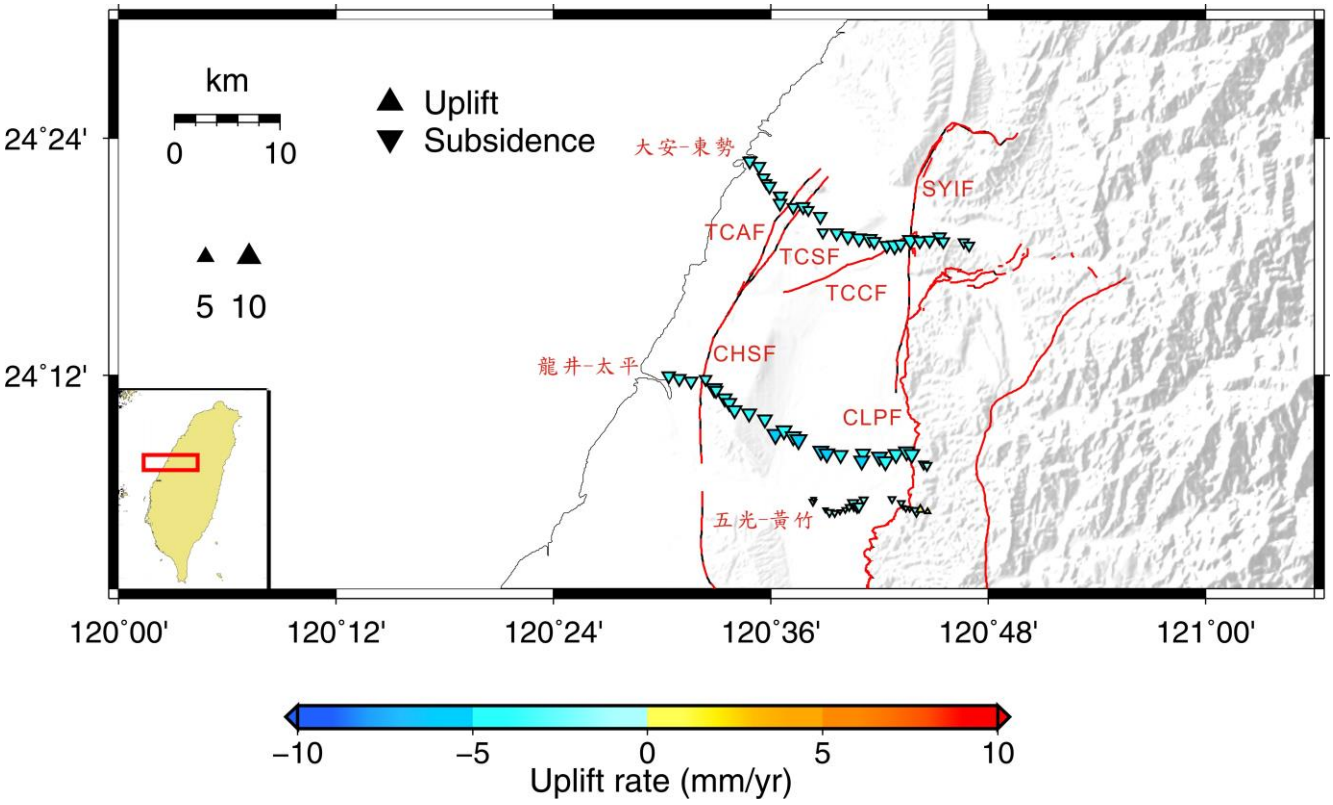


圖 2-3.33：台中地區之水準垂直速度。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

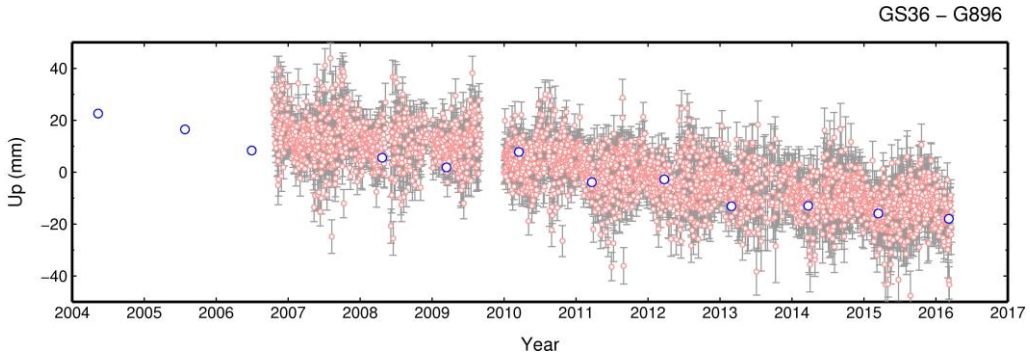


圖 2-3.34：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。

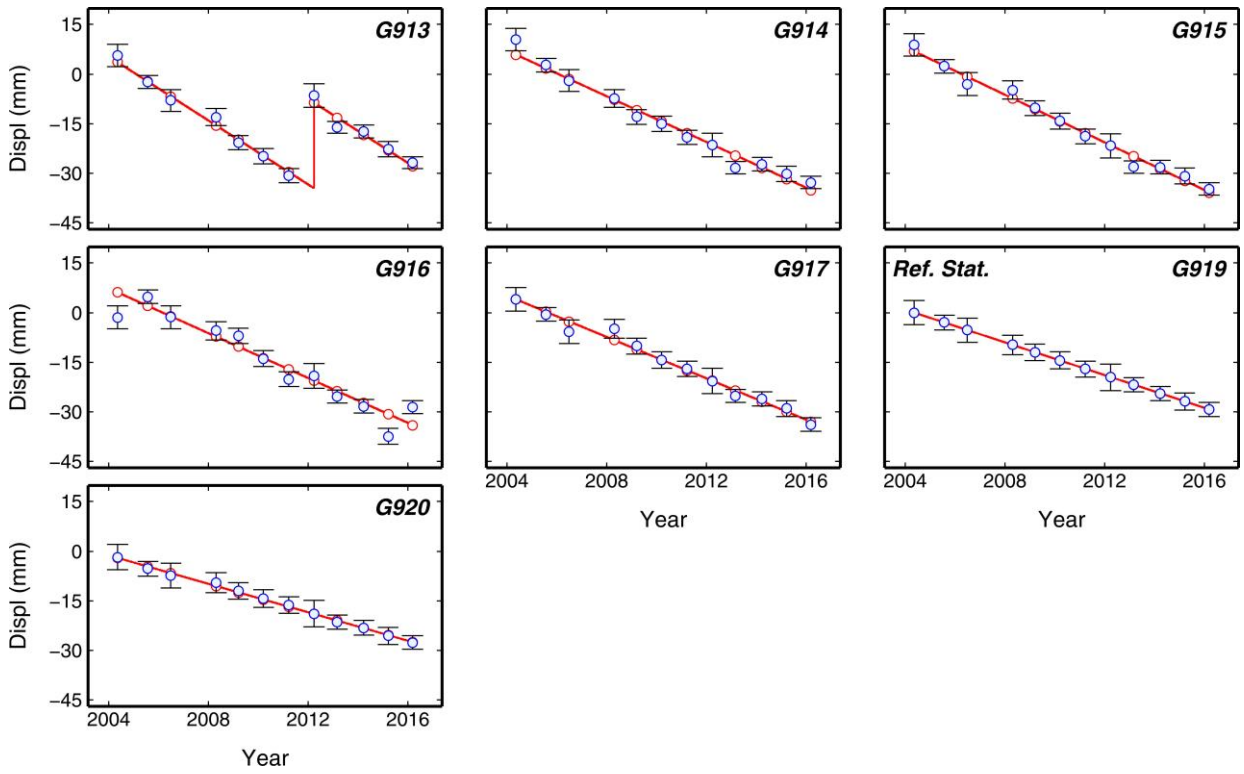


圖 2-3.35：大安至東勢測線之時間序列。

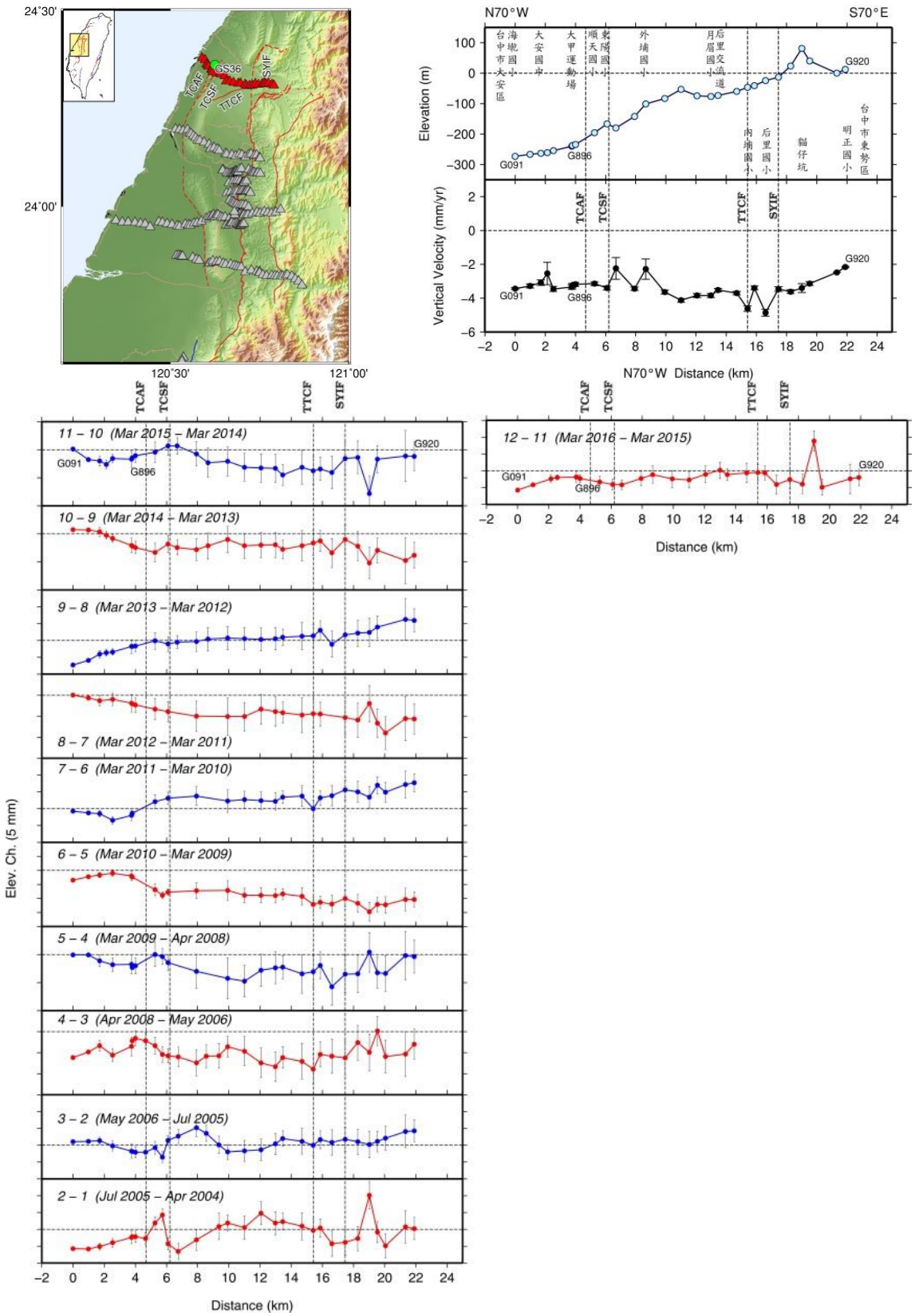


圖 2-3.36：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層。

2-3-11 縣 136_龍井至太平測線

本測線橫跨清水斷層和車籠埔斷層，測線長約 25 公里，於 2004 至 2016 年間，共進行 13 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 和 GS40 之垂直速率（-4.73 mm/yr 和-4.22 mm/yr），作為約制點 G937 及 G929 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.37 及圖 2-3.38）。

根據圖 2-3.40，此測線之垂直速度在兩個斷層間之垂直速率大多落在-6 到-4 mm/yr 之間，無顯著變化；在清水斷層兩側則呈現不同的趨勢，左側為逐步抬升（由-3.76 mm/yr 到-2.93 mm/yr），右側至大肚山背斜則為下降（最大達-5.87 mm/yr），兩側最大變化量達 3 mm/yr；在跨車籠埔斷層區域之垂直速度也有 3 mm/yr 的變化，均可說明此兩斷層有持續性的活動現象。

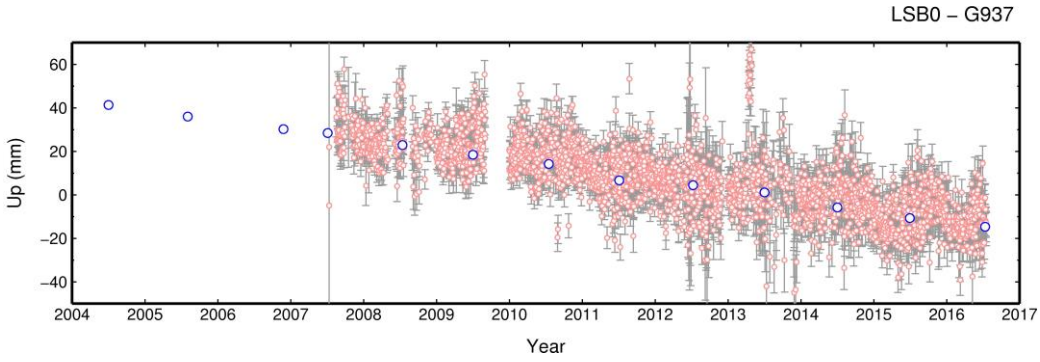


圖 2-3.37：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

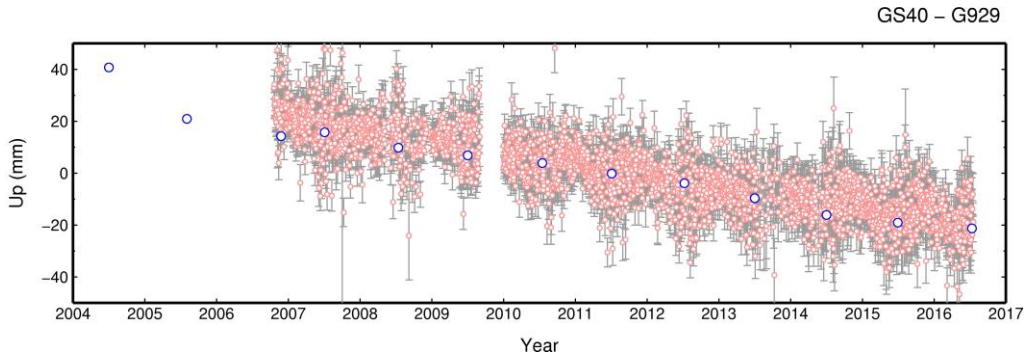


圖 2-3.38：水準點位 G929 與連續站 GS40 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

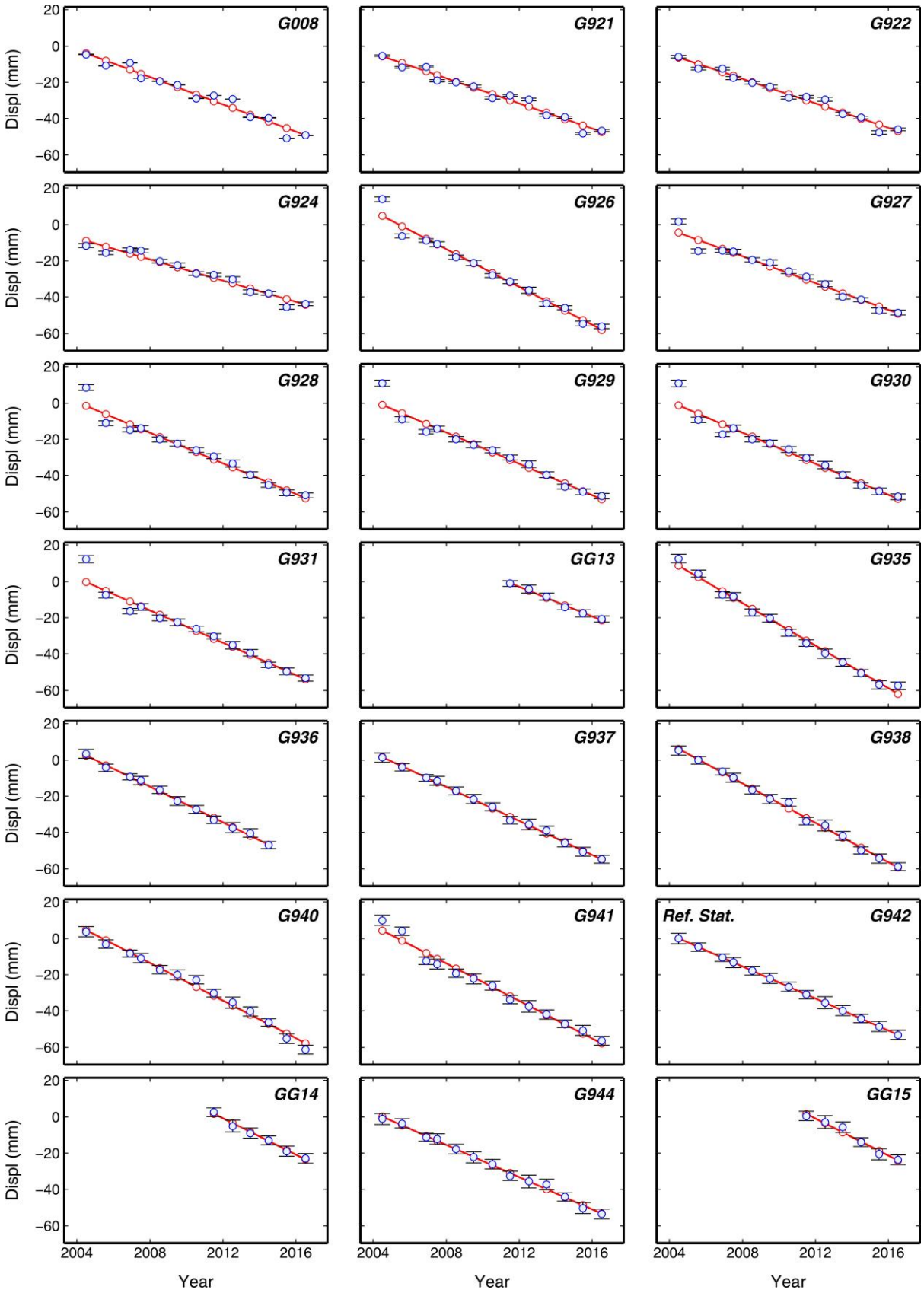


圖 2-3.39：龍井至太平測線之時間序列。

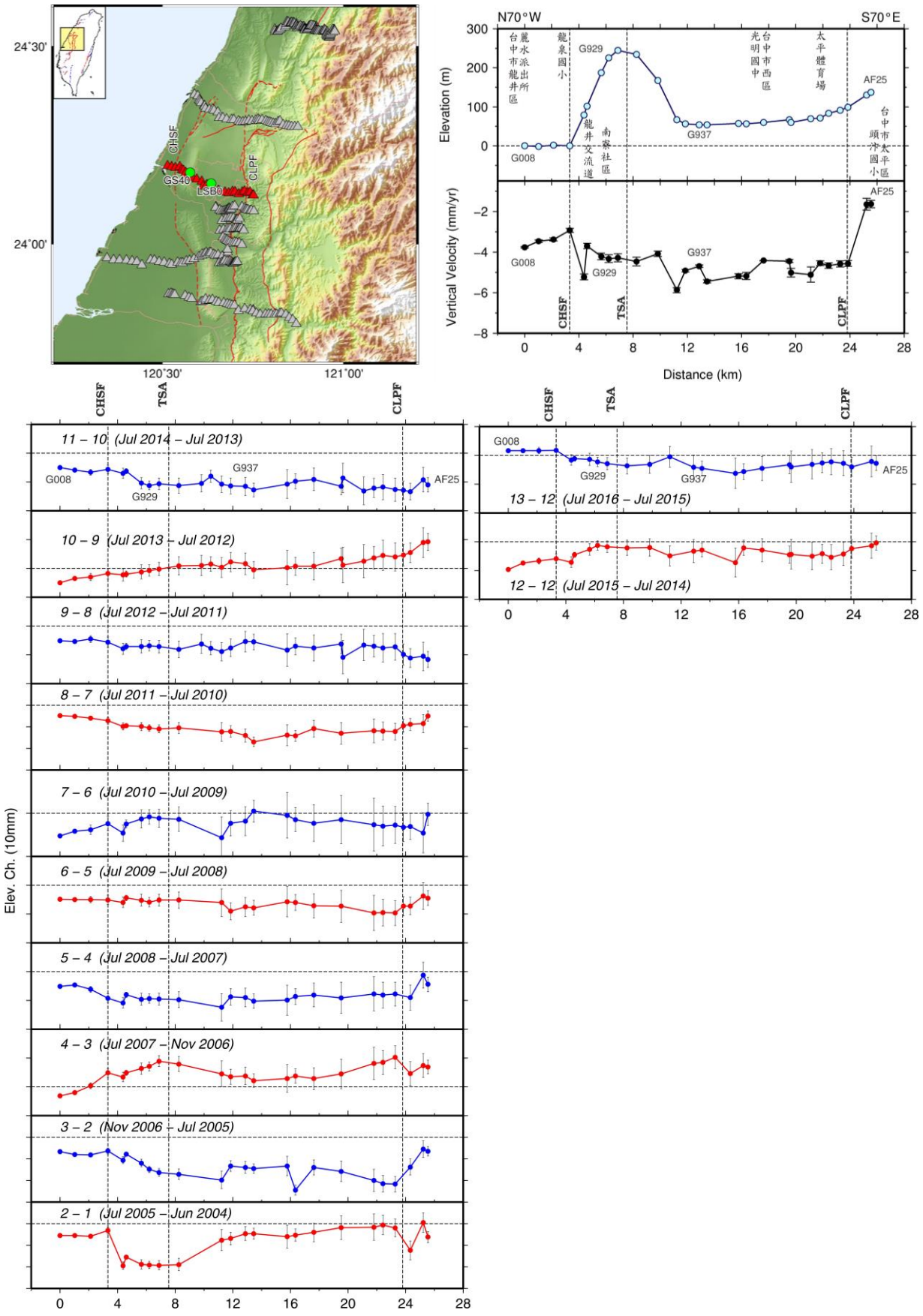


圖 2-3.40：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-12 跨車籠埔斷層之短測線

經濟部中央地質調查所從 2007 年起在車籠埔斷層沿線，設置了 5 條橫跨斷層之水準測線，由北至南分別為五光至黃竹、曾厝至霧峰、北勢至峰谷、烏溪南岸及中興新村。2016 年僅施測五光至黃竹，自 2007 至 2016 年止共計施測 9 次。根據圖 2-3.41 之垂直速度及歷年高程變化來看，跨車籠埔斷層之五條短測線，近幾年並無明顯之變化，呈現相對穩定的狀態。

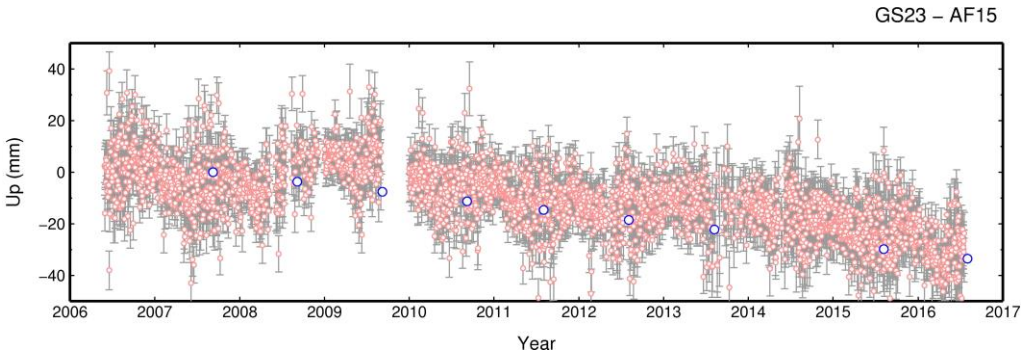


圖 2-3.41：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。

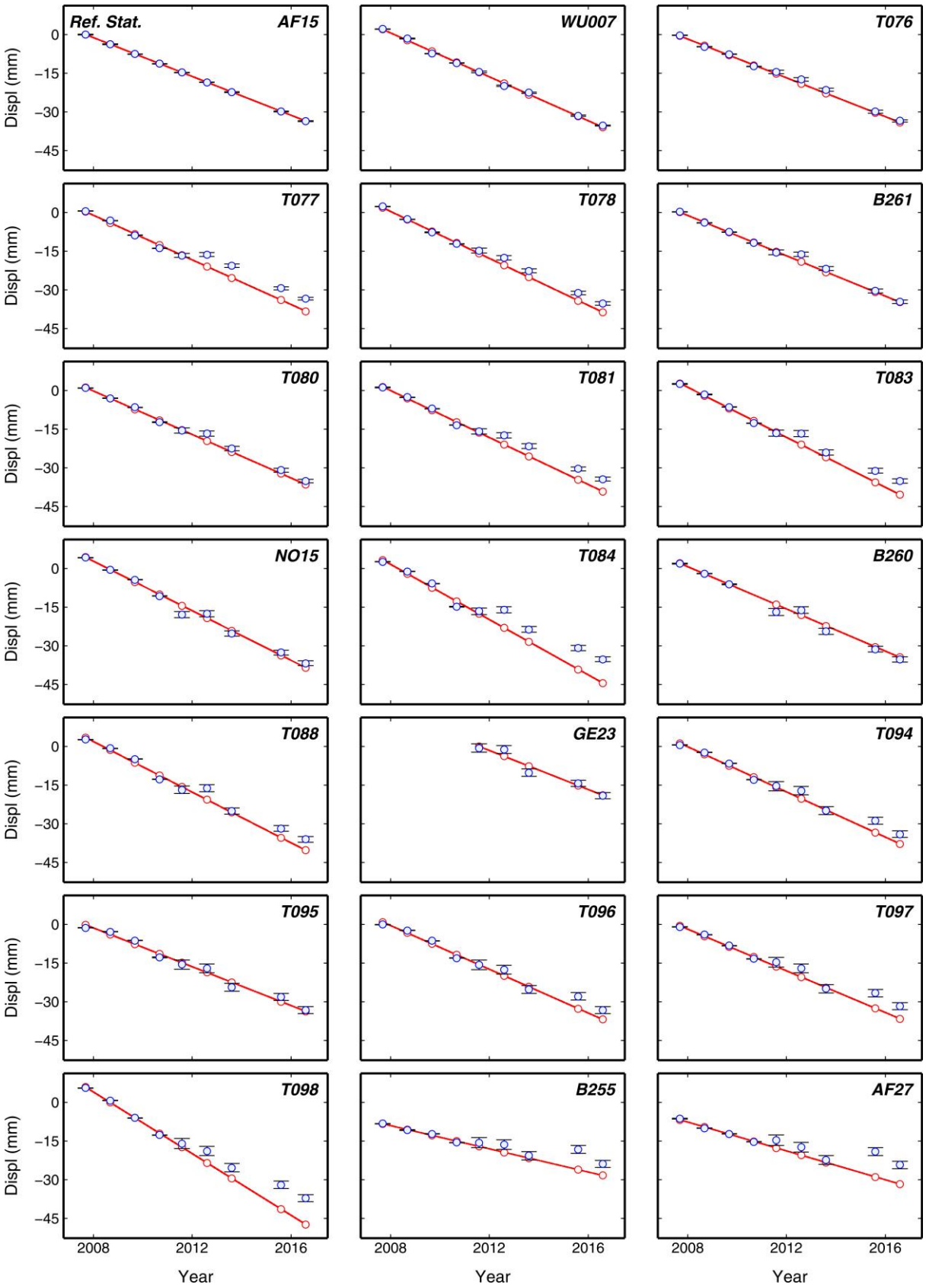


圖 2-3.42：五光至竹測線之時間序列。

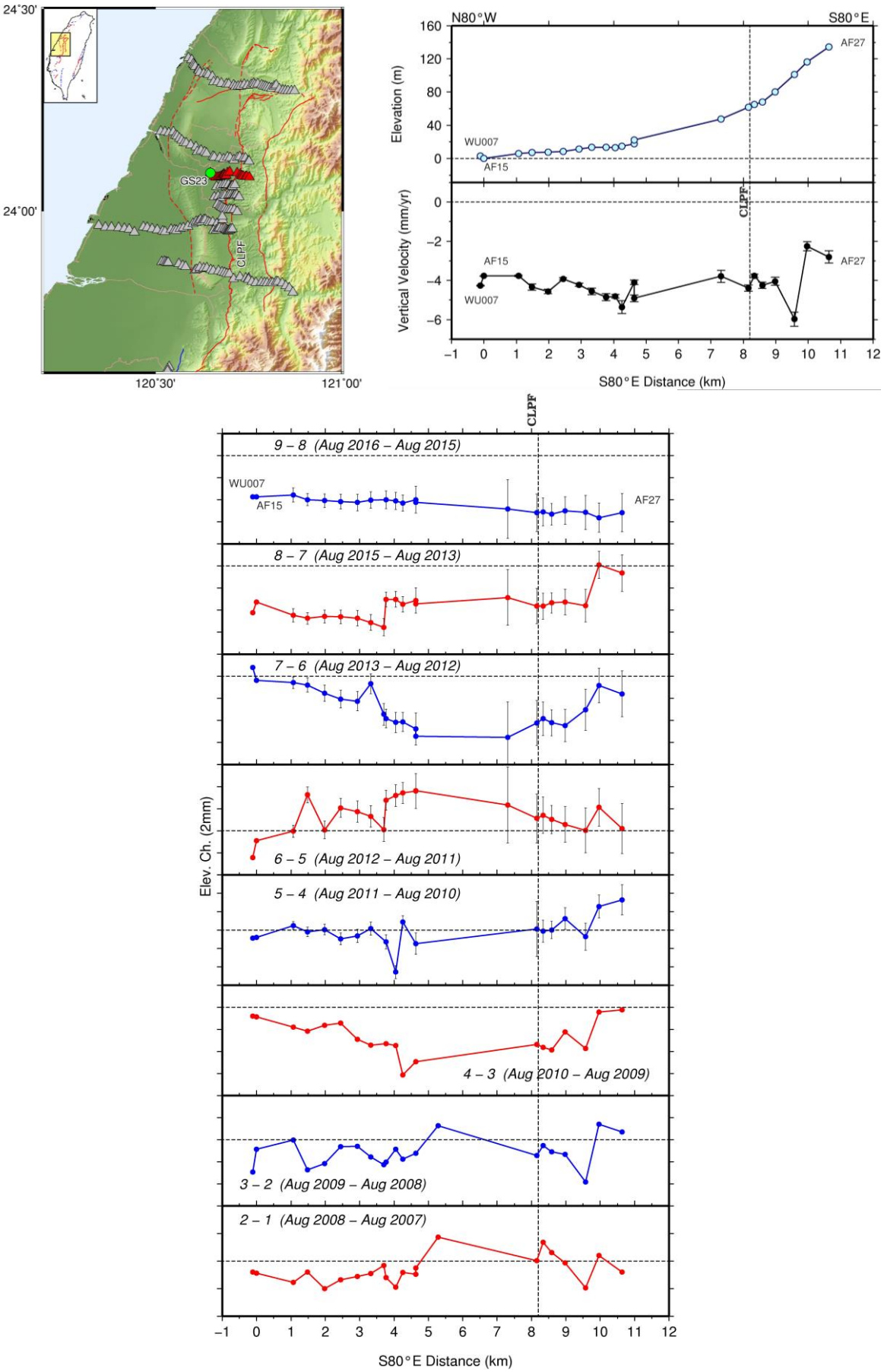


圖 2-3.43：五光至黃竹水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-13 縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，總長約 46 公里，從 2002 年至 2016 年共計有 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 CAOT 之垂直速率（-4.91 mm/yr），作為約制點來校正 T075 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.46）。

南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模六以上的地震，但在 2013 年至 2014 年之歷年高程差方面未有明顯的變化；而在跨車籠埔斷層以東至測線末端的點位，其同震位移量僅落在-4.5 mm 到 5.5 mm 之間，此結果說明這兩次地震對本測線的影響未如較南邊的北斗至水里測線顯著。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮南投地震同震位移之影響。

根據圖 2-3.48，彰化斷層以西（王功至員東國小）可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速率最大可達約-55.0 mm/yr，但高程地形卻沒有太大的變化；彰化斷層以東跨車籠埔斷層至大茅埔－雙冬斷層一帶（八卦山山脈至雙冬國小），平均垂直速度均約在-10.0 ~ 0.0 mm/yr 之間，雖然八卦山背斜一帶地形較高，但垂直速度未有明顯變化。相較於彰化斷層西側，東側之垂直速度變化並不顯著。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，彰化斷層以東之垂直速度變化相對而言較不顯著。

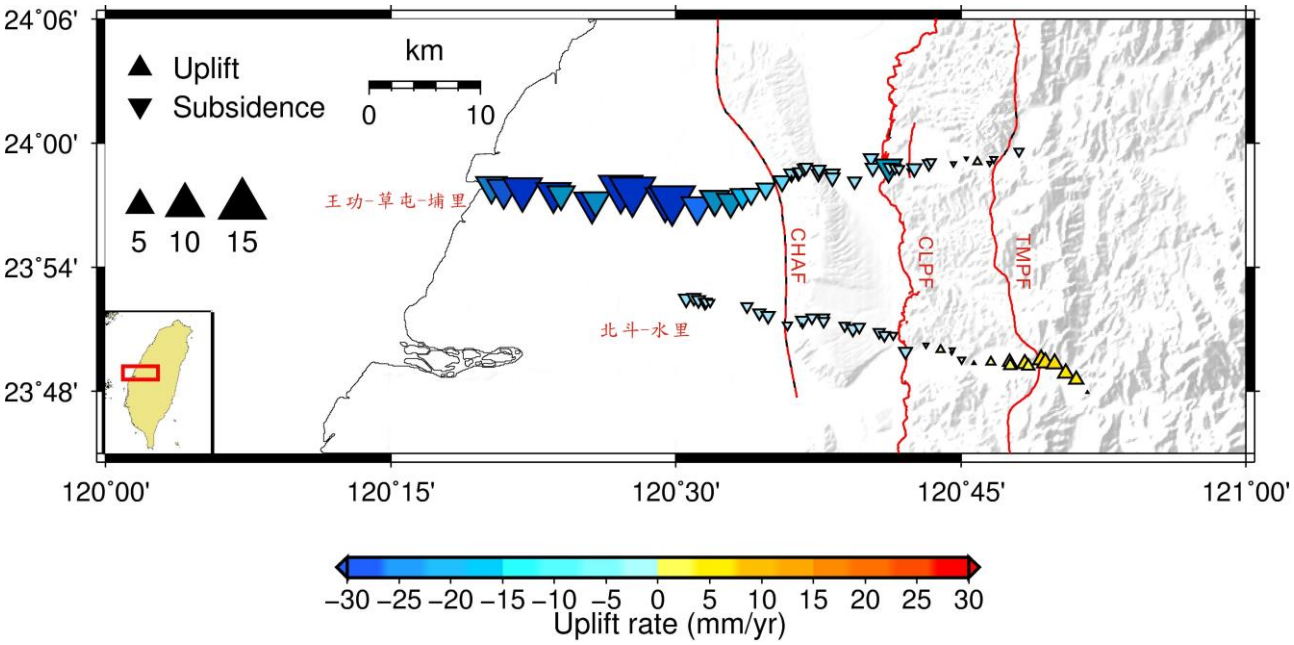


圖 2-3.44：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震前）。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

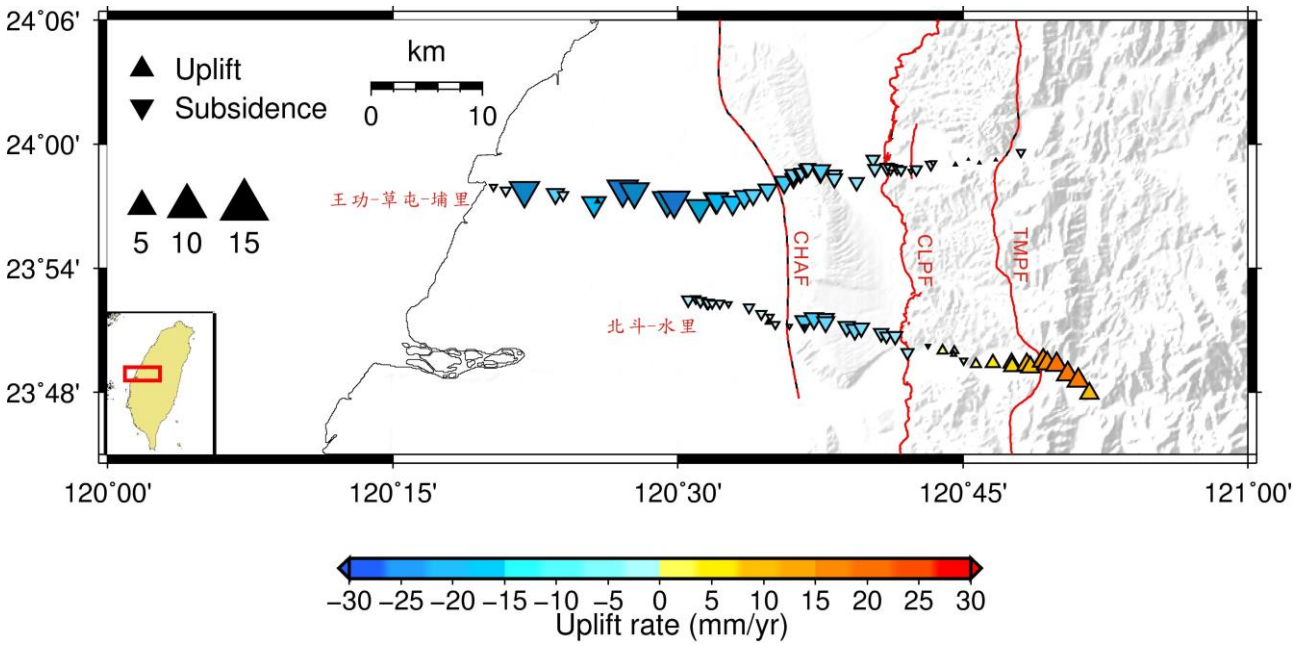


圖 2-3.45：彰投地區之水準垂直速度場(2013 年南投地震後至今)。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

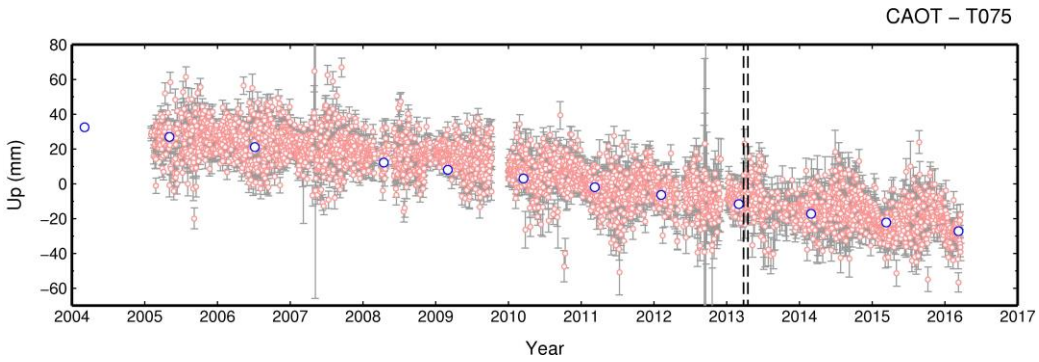


圖 2-3.46：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。虛線為 2013 年南投地震。

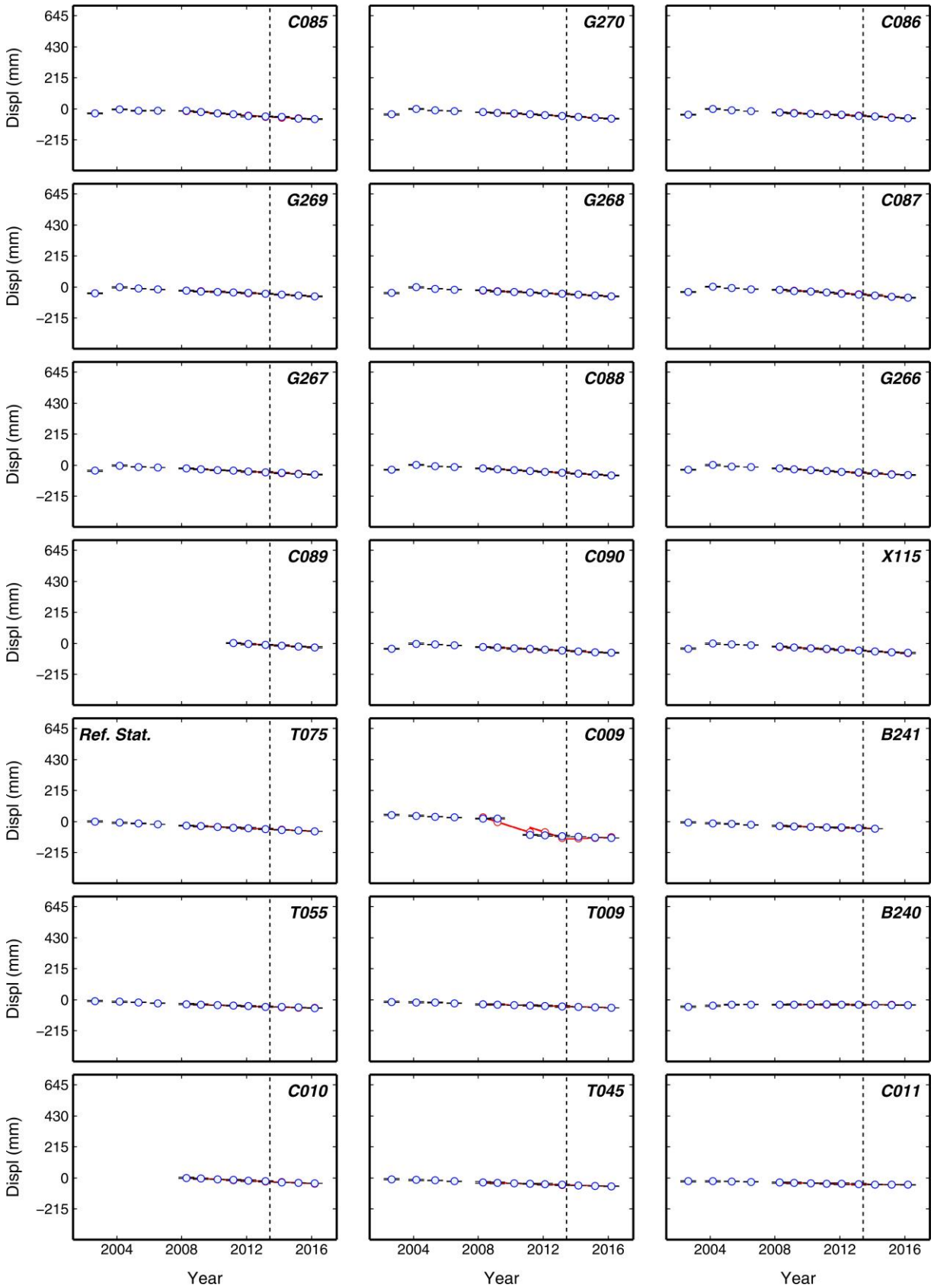


圖 2-3.47：王功至草屯測線及草屯至埔里測線之時間序列。虛線為 2013 年南投地震。

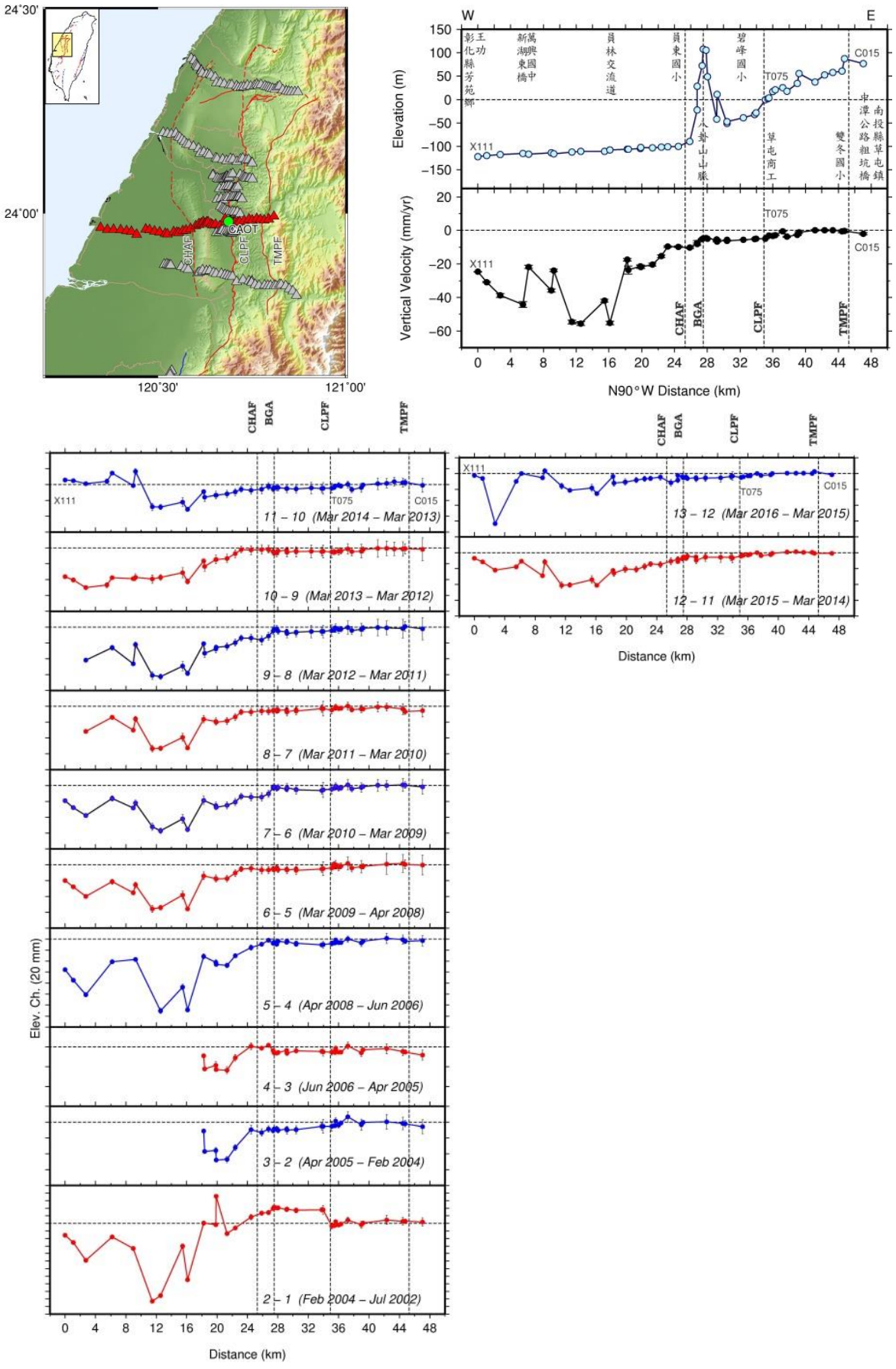


圖 2-3.48：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 為八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

2-3-14 縣 150-台 16_北斗至水里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 38 公里，從 2002 年至 2016 年共計有 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS26 之垂直速率（-3.36 mm/yr），作為約制點來校正 MX83 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.49）。

此外，南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模六以上的地震，造成此測線各點位有 64.0 mm 到 138.0 mm 的同震位移量，2013 年至 2014 年之歷年高程差在大茅埔－雙冬斷層上盤也有顯著的抬升，最大值達 85.0 mm。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮南投地震同震位移之影響。

根據圖 2-3.51 來看，彰化斷層以西之垂直速度雖為沉陷（最大值約-8.0 mm/yr），但不似王功至埔里測線可見明顯的地層下陷現象（最大值約-80.0 mm/yr）。而彰化斷層以東至赤水派出所一帶，高程地形有顯著抬升，但垂直速度變化不大。通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的區段（名間國小至水里隧道），高程地形與垂直速度抬升的狀況更為明顯（約由 -7.0 ~ 10.0 mm/yr），然而通過大茅埔－雙冬斷層後之地區，其抬升速率由 10.0 mm/yr 下降至 3.5 mm/yr，此結果可能顯示斷層滑移量於集集地震過後約 10 年仍然集中於車籠埔斷層以東之滑脫面。

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

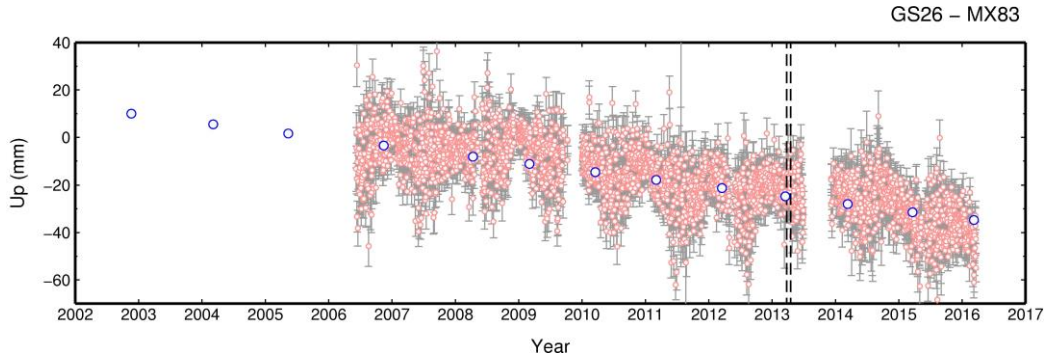


圖 2-3.49：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年南投地震。

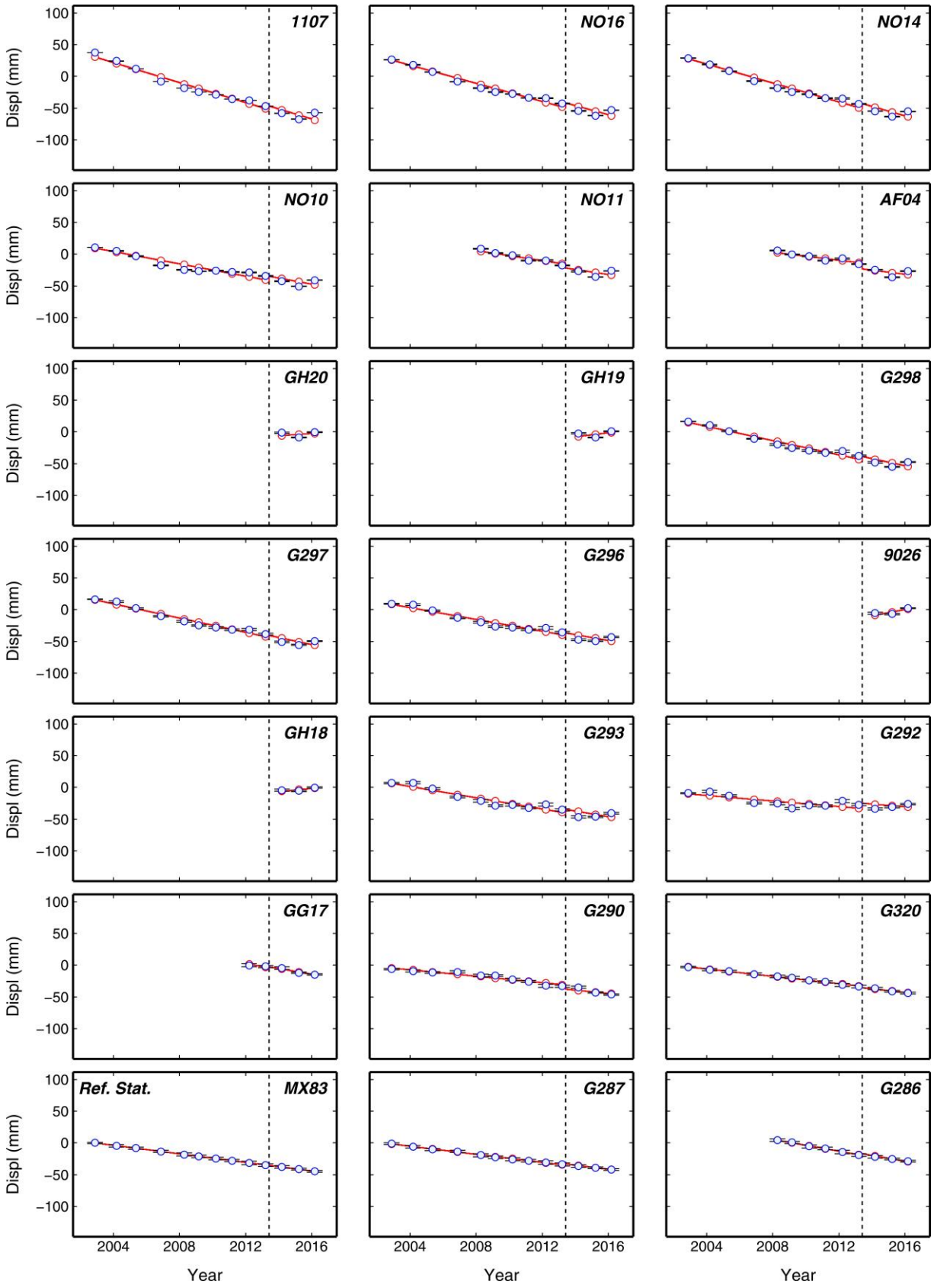


圖 2-3.50：北斗至水里測線之時間序列。虛線為 2013 年南投地震。

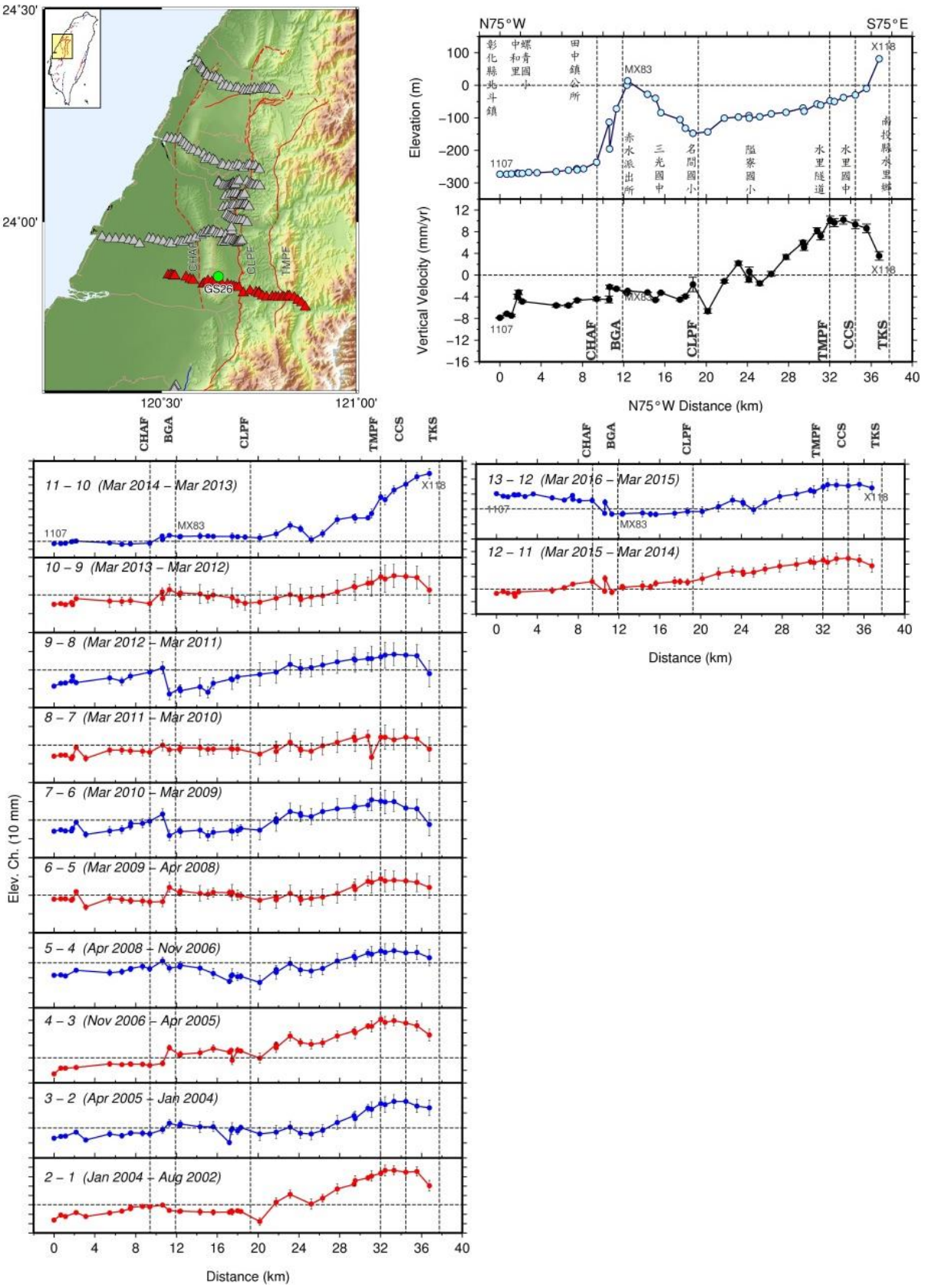


圖 2-3.51：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層、CCS 集集大山向斜、TKS 為頂崁向斜。

2-3-15 縣 164_金湖至瑞峰測線

本測線橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層，總長約 54 公里， 2003 年至 2016 年間共進行 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS17、TAPN 及 S103 之垂直速率（1.31 mm/yr、0.58 mm/yr 及-0.11 mm/yr），作為約制點來校正 G776、G758 和 G742 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.53 及圖 2-3.54）。

根據圖 2-3.56，梅山斷層以西之垂直速度變化較大，最大達-26 mm/yr，以東到九芎坑斷層則大多介在-2 至 0 mm/yr 之間；在跨九芎坑斷層與觸口斷層之區域（約 40~46 公里處），垂直速率雖然未有顯著變化（變化量<2 mm/yr），但至測線末段之整體趨勢為逐步抬升（約從 0 到 4 mm/yr）。在地形高程部分，梅山斷層以西為平原地區，因此較無變化，而在九芎坑斷層以東則有顯著的地形起伏，或許可說明九芎坑斷層與觸口斷層仍有活動的跡象。

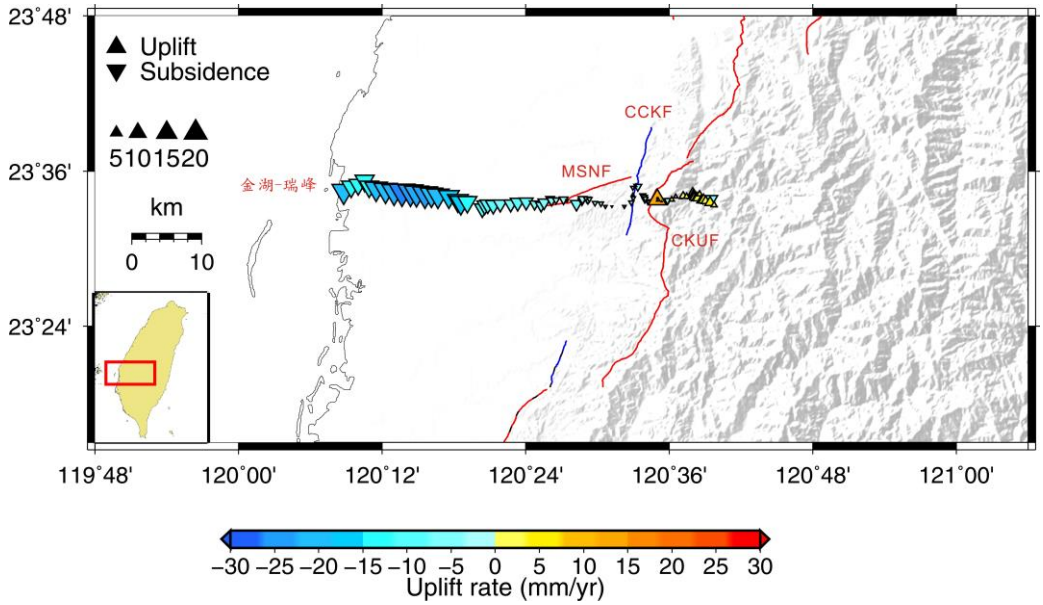


圖 2-3.52：嘉義地區之水準垂直速度場。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

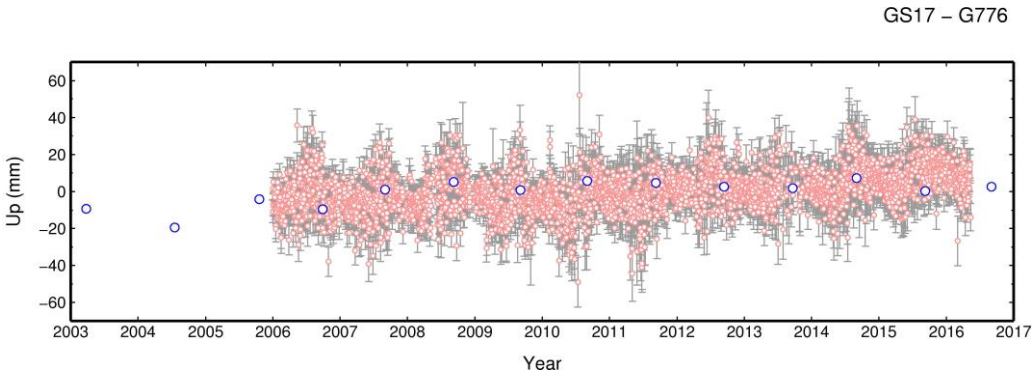


圖 2-3.53：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

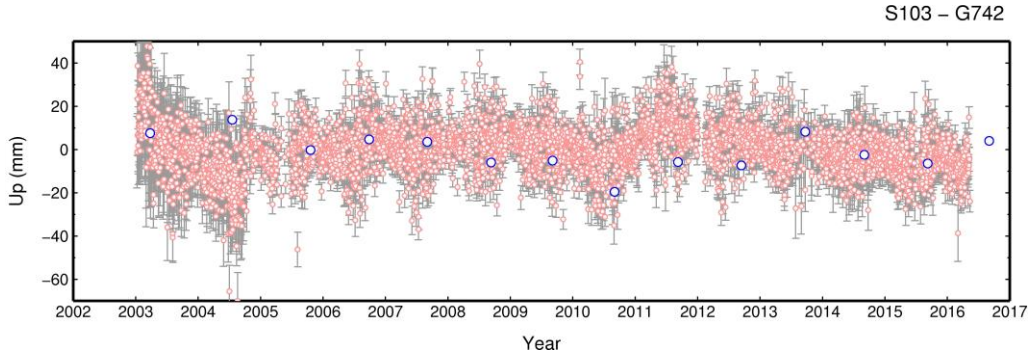


圖 2-3.54：水準點位 G742 與連續站 S103 之間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

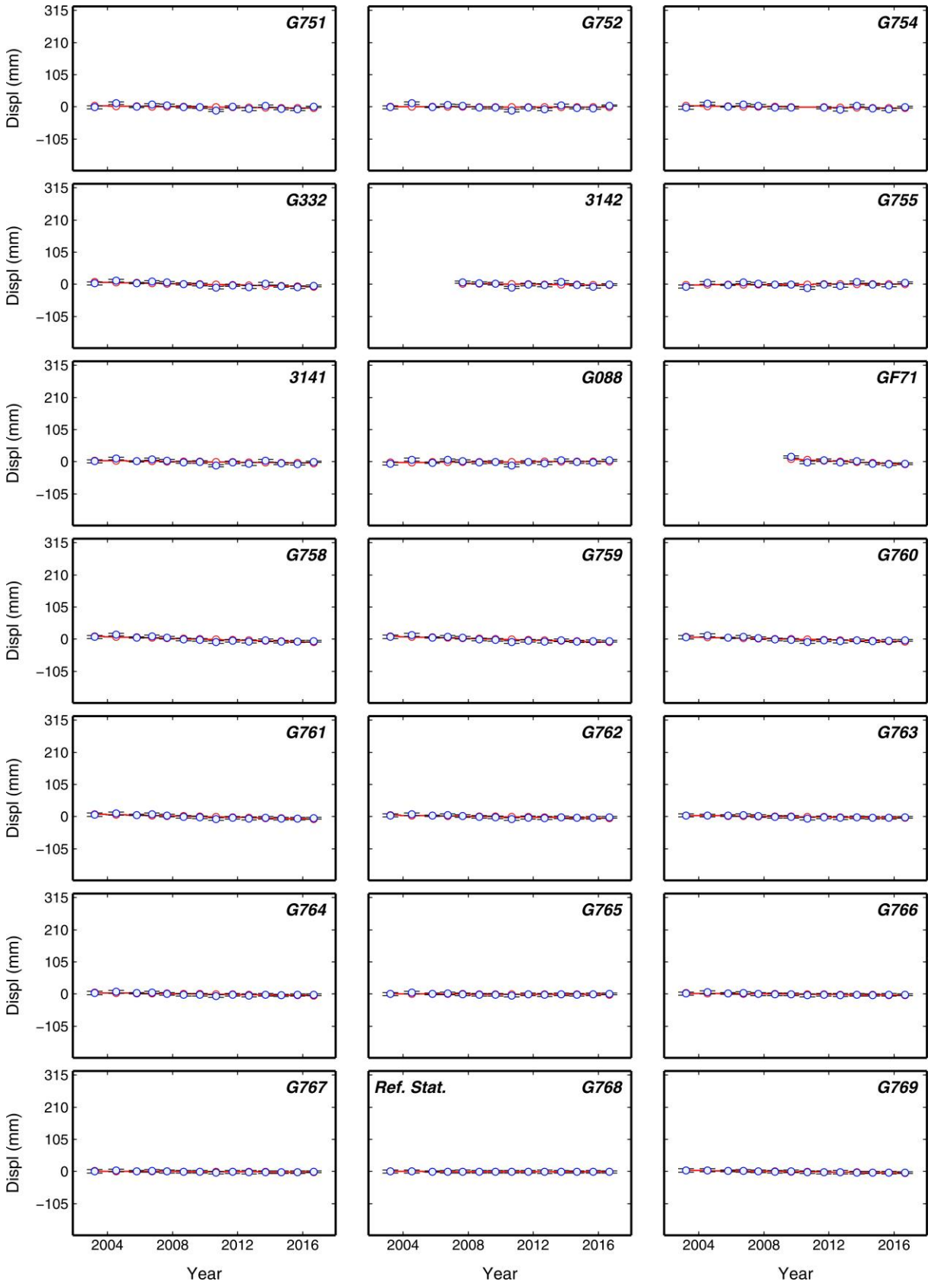


圖 2-3.55：金湖至瑞峰測線之時間序列。

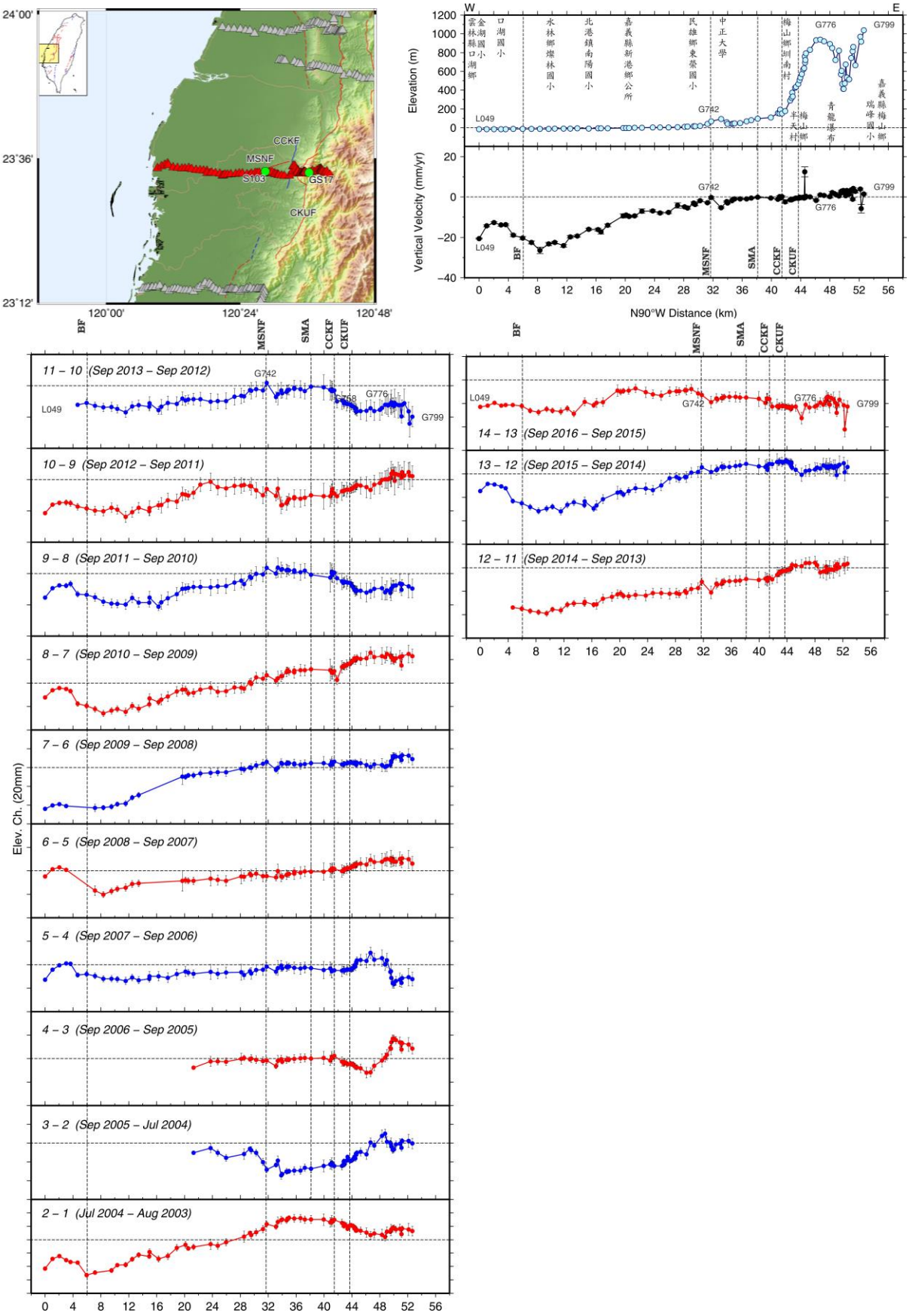


圖 2-3.56：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。BF 為 B 斷層、MSNF 為梅山斷層、SMA 為小梅背斜、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

2-3-16 縣 174_北門至楠西測線

本測線橫跨六甲斷層與觸口斷層，測線長約 40 公里，從 2003 年至 2016 年共計有 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS44 之垂直速率（5.94 mm/yr），作為約制點來校正 I088 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.59）。

根據圖 2-3.61，六甲斷層以西的高程地形變化雖較和緩，但垂直速率卻有逐步抬升的趨勢（約-16.0 ~ 4.0 mm/yr），在通過六甲斷層至觸口斷層之間有達 10.0 mm/yr 以上的垂直抬升速度，此結果若非反應六甲斷層在此 10 年內均保持著活動性，即表示六甲斷層與觸口斷層間存在的北勢坑斷層為一活動構造。本測線自六甲斷層以東，點位的高程地形變化趨勢變得較顯著，顯示自進入山區地段，地表高程活動性增加。

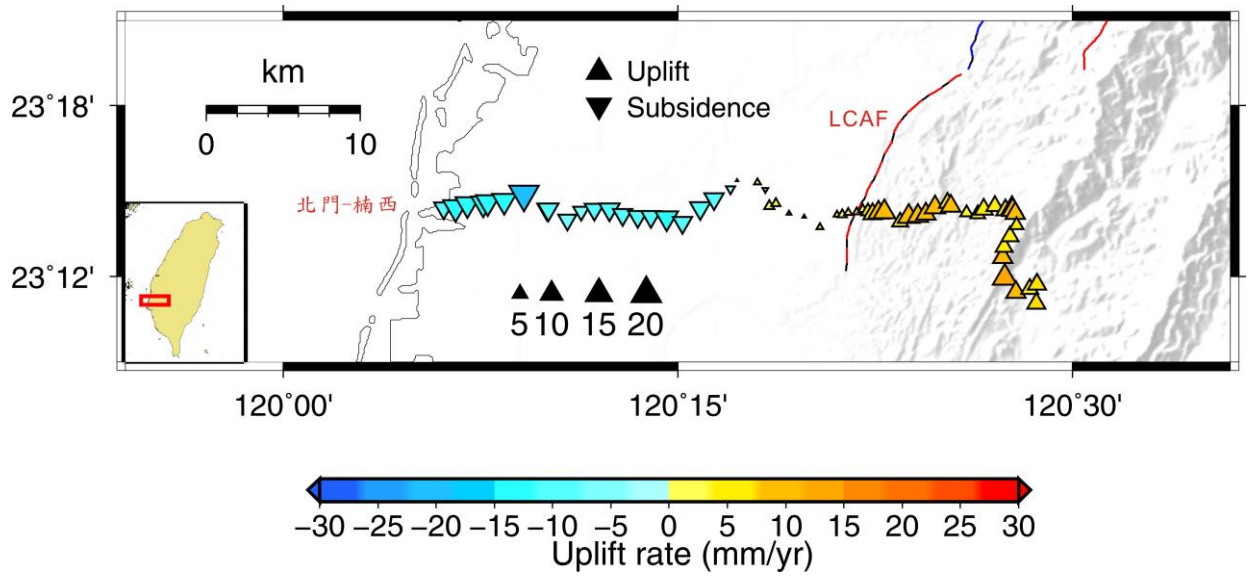


圖 2-3.57：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震前）。LCAF 為六甲斷層。

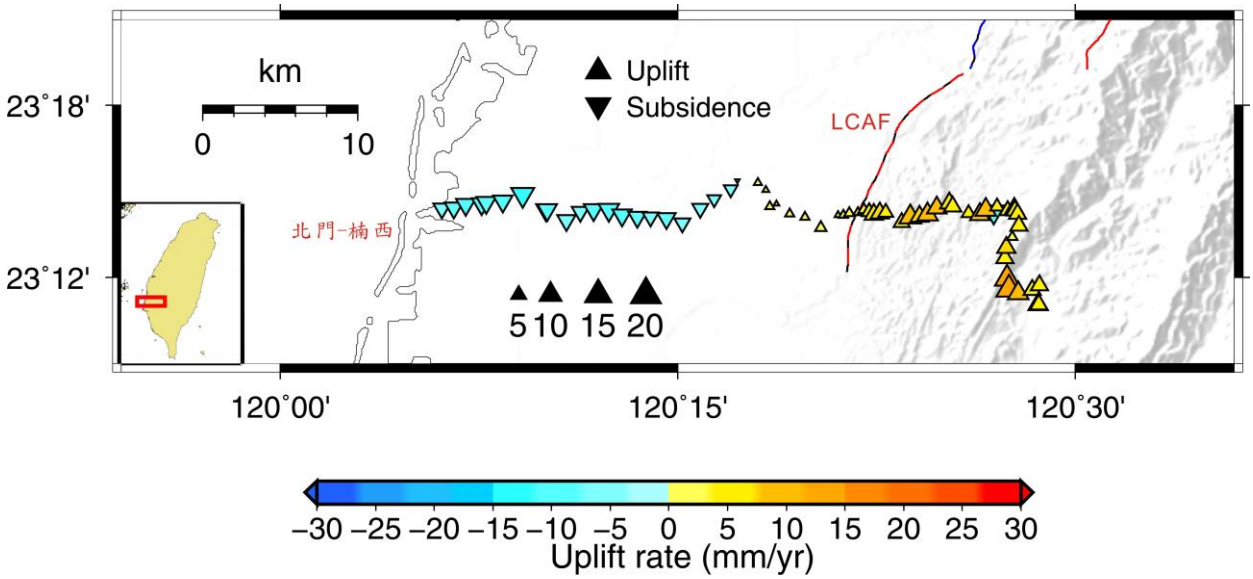


圖 2-3.58：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震後至今）。LCAF 為六甲斷層。

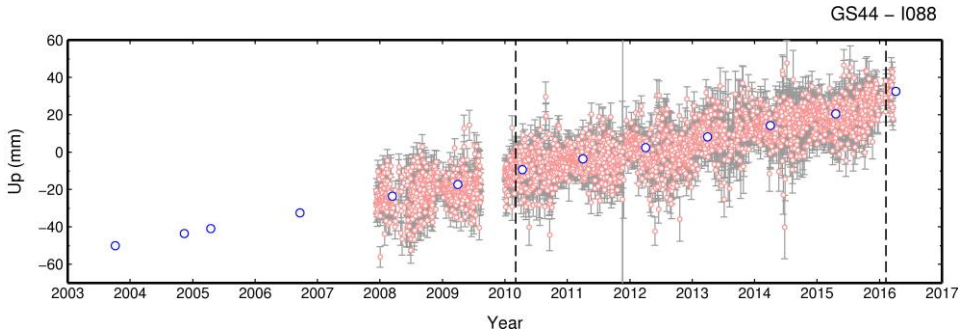


圖 2-3.59：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

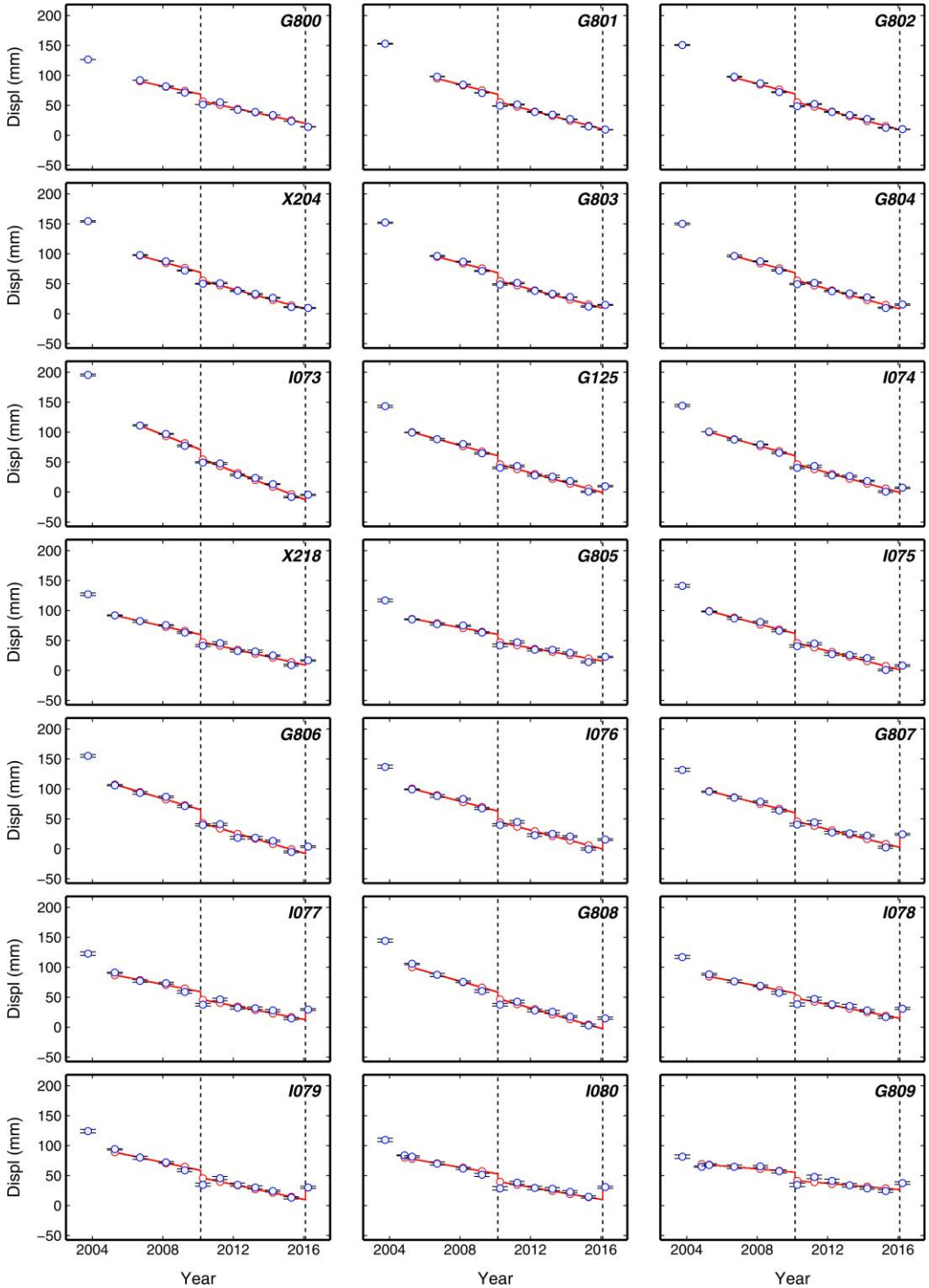


圖 2-3.60：北門至楠西測線之時間序列。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

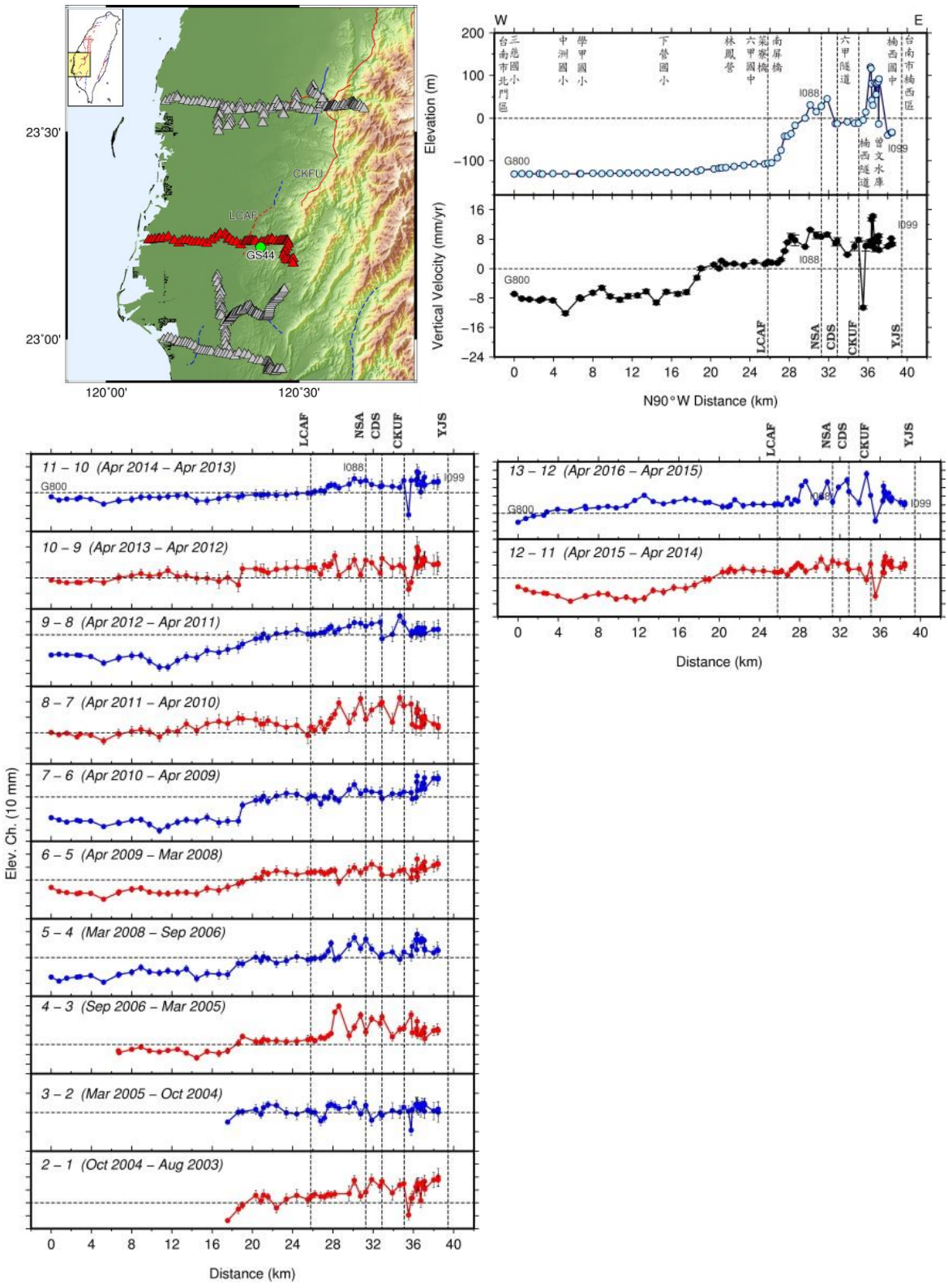


圖 2-3.61：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、NSA 為牛山背斜、CDS 為前大埔向斜、CKUF 為觸口斷層、YJS 為玉井向斜。

2-3-17 台 19 甲_善化至關廟測線

本測線由北往南走橫跨新化斷層，測線長約 22 公里，從 2003 年至 2016 年共計有 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（1.17 mm/yr），作為約制點來校正 G374 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.64）。

根據圖 2-3.66，此測線北段（新化斷層以北）之垂直速度約落在 0.0 mm/yr 到 2.0 mm/yr 之間，南段（新化斷層以南）垂直速度則約落在 1.0 ~ 4.5 mm/yr 之間，地形高程在跨越斷層後也有約 25 m 之抬升現象（新化高中至關廟區）。另從歷年高程變化來看，此測線在 2009 年至 2015 年在跨越斷層皆後有抬升的趨勢，約有 20.0 mm 變化量。

2016 年 2 月芮氏規模 6.4 的美濃地震，造成此水準測線點位有-13.0 ~ 38.0 mm 之同震位移量。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在測線南段（約新化區至關廟區一帶）最大變化量達 35.0 mm。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮地震之同震位移之影響。

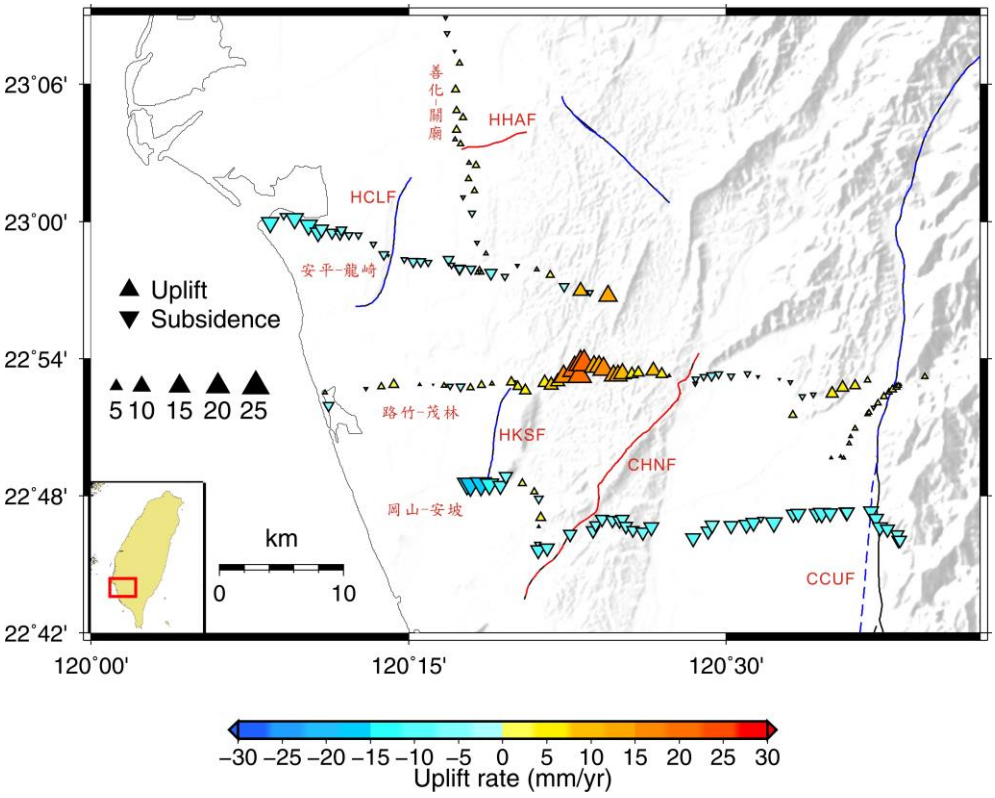


圖 2-3.62：南部地區之水準垂直速度場(2010 甲仙地震前)。HHAF 為新化斷層、HCLF 為後甲里斷層、HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為觸口斷層。

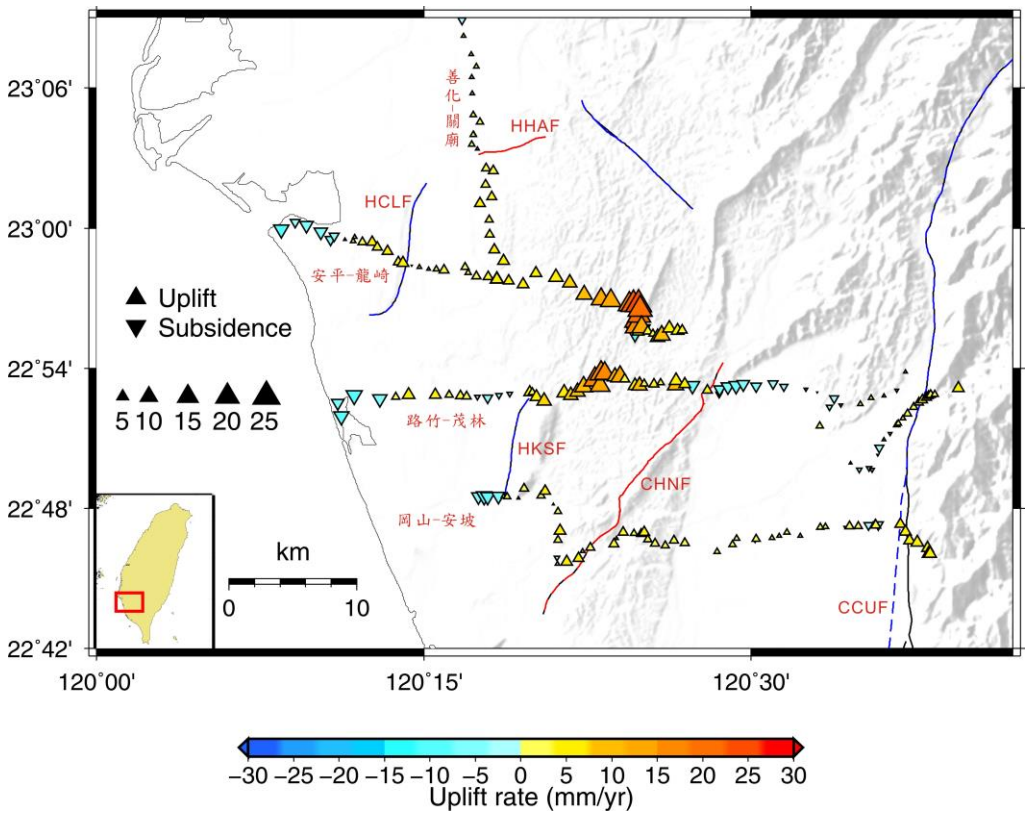


圖 2-3.63：南部地區之水準垂直速度場（2010 甲仙地震後至今）。HHAF 為新化斷層、HCLF 為後甲里斷層、HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為觸口斷層。

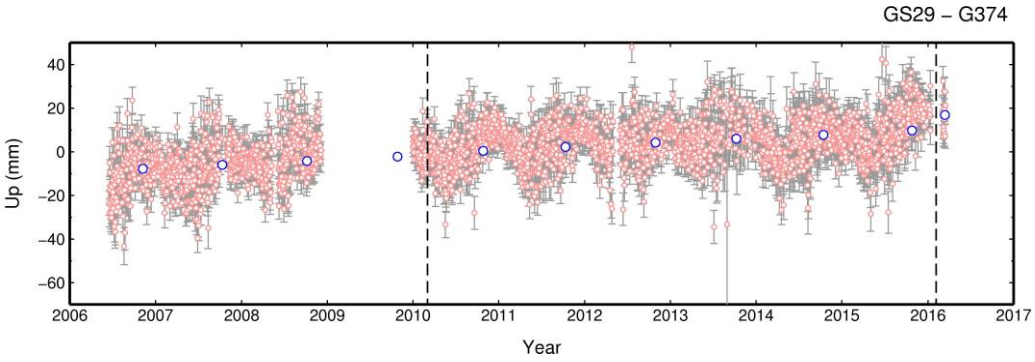


圖 2-3.64：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

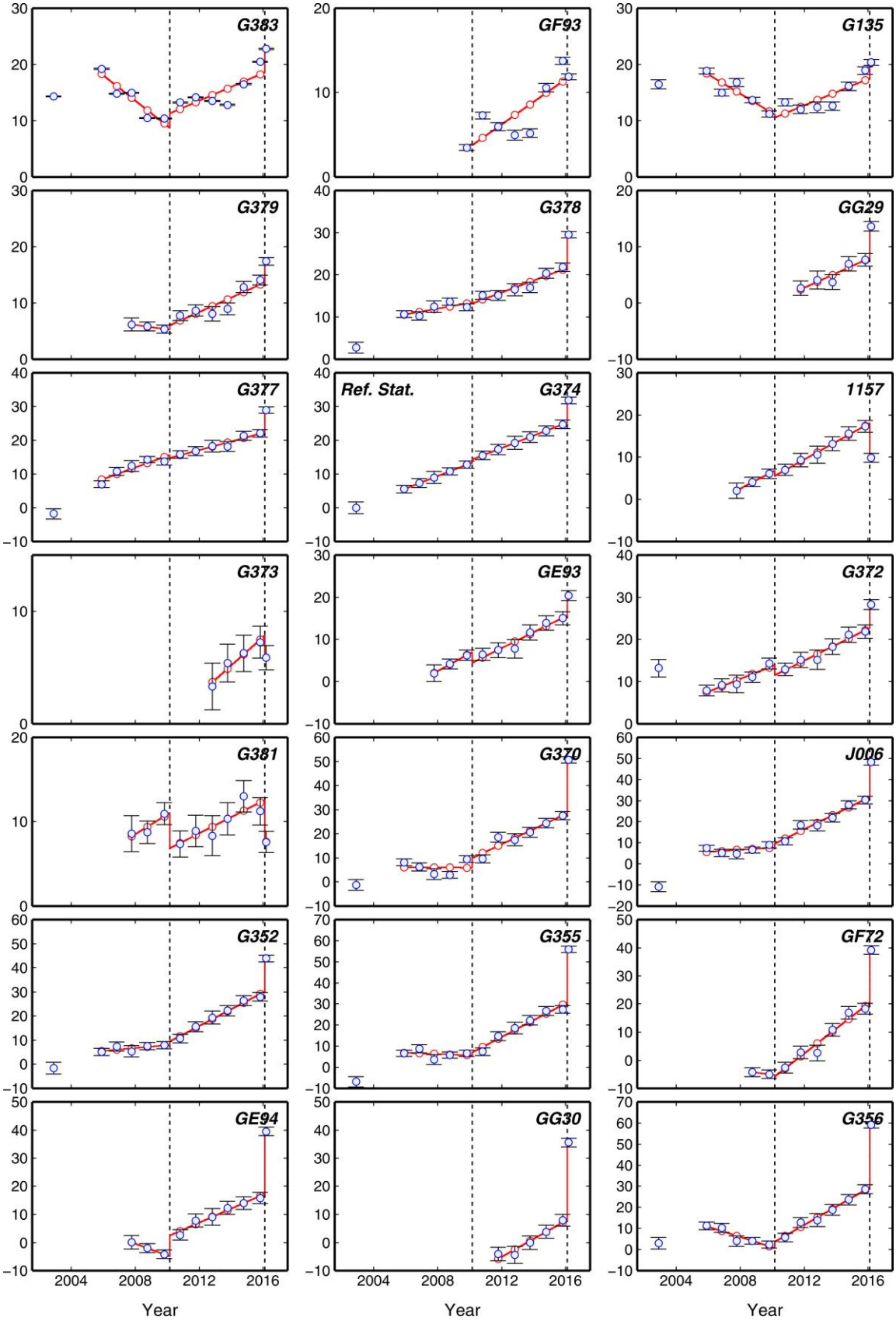


圖 2-3.65：善化至關廟測線之時間序列。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

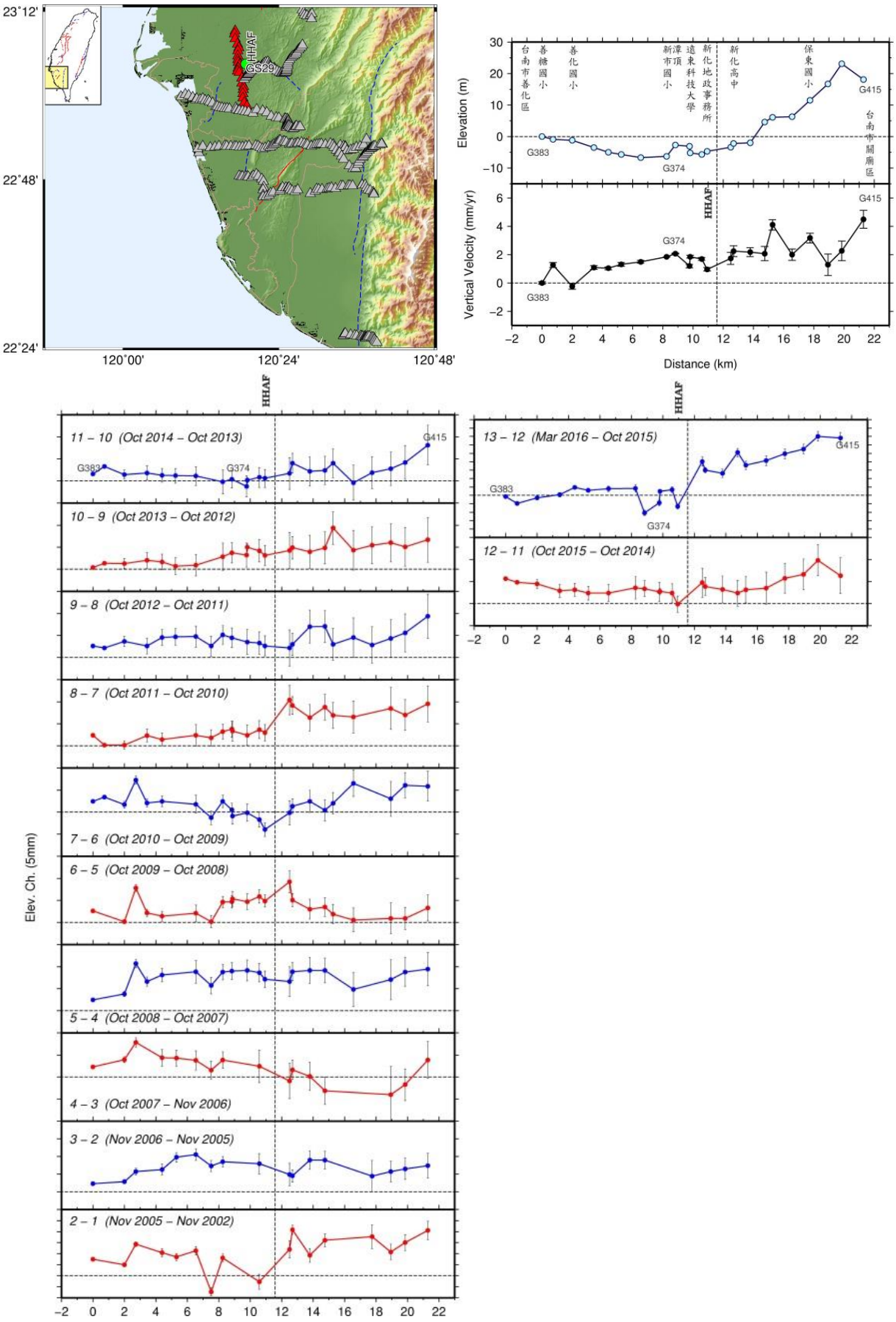


圖 2-3.66：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

2-3-18 縣 182_安平至龍崎測線

本測線橫跨臺南台地、後甲里斷層與龍船斷層，從臺南安平區至龍崎區，2013 年起延伸至高雄市內門區，全長約 33 公里，從 2001 年至 2016 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 CKSV 之垂直速率（2.97 mm/yr），作為約制點來校正 TN04 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.67）。

根據圖 2-3.69，不論由地形剖面、高程歷年變化及垂直速率圖上均可明顯見到臺南台地之存在（中西區至仁德區一帶），且台地之東緣有往東延伸之趨勢。測線最西側（安平區至中西區）有約-7.0 至 0.0 mm/yr 之沉陷速率；而臺南台地的西緣（中西區）至台地的東緣（虎尾寮、仁德區）由水準高程變化可發現該區域有穩定的之地表抬升速率趨勢（約 0.4 ~ 5.3 mm/yr），但整體的地表垂直變化量並不明顯。在虎尾寮地區跨後甲里斷層至仁德區，垂直速度在跨斷層有顯著的變化，約由 5.0 mm/yr 降至-1.0 mm/yr，暗示後甲里斷層為一活躍之活動構造。

另外在後甲里斷層至關廟向斜之間的地形高程呈現逐漸抬升趨勢，平均速率約落在 0.0 – 6.0 mm/yr；關廟向斜至龍船斷層間之垂直速度明顯的抬升，約由 4.0 mm/yr 升至 23.0 mm/yr；而跨龍船斷層後至測線末端，垂直速度則逐漸下降，約由 20.0 mm/yr 降至 2.5 mm/yr。

2016 年 2 月芮氏規模 6.6 的美濃地震，造成此水準測線點位有-35.0 ~ 115.0 mm 之同震位移量。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在關廟向斜至龍船斷層一帶有明顯的同震現象，龍船斷層附近尤其顯著。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮地震之同震位移之影響。

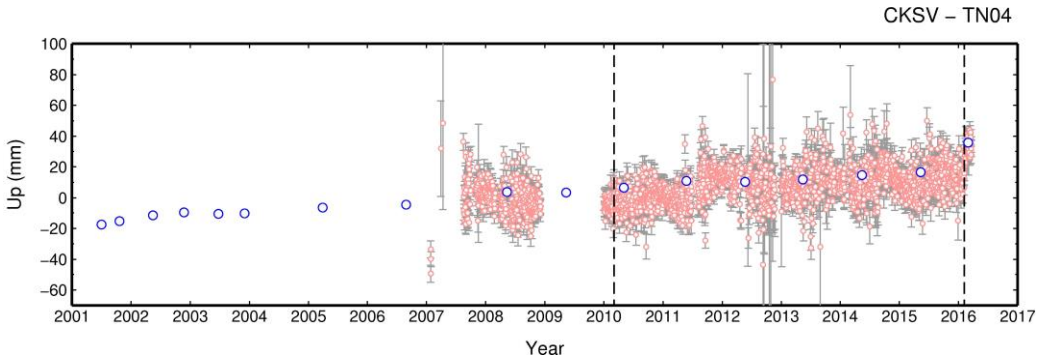


圖 2-3.67：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

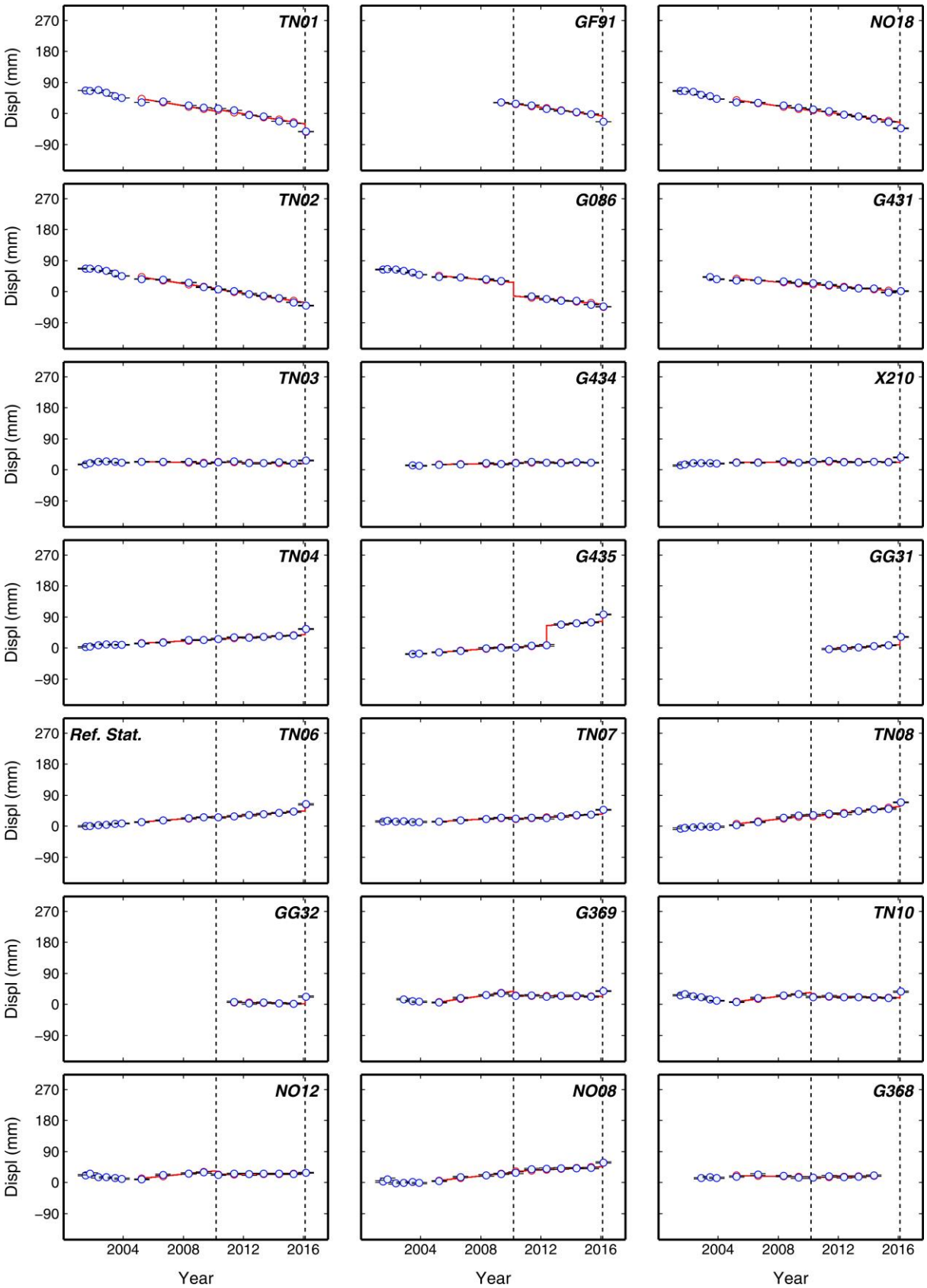


圖 2-3.68：安平至龍崎測線之時間序列。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

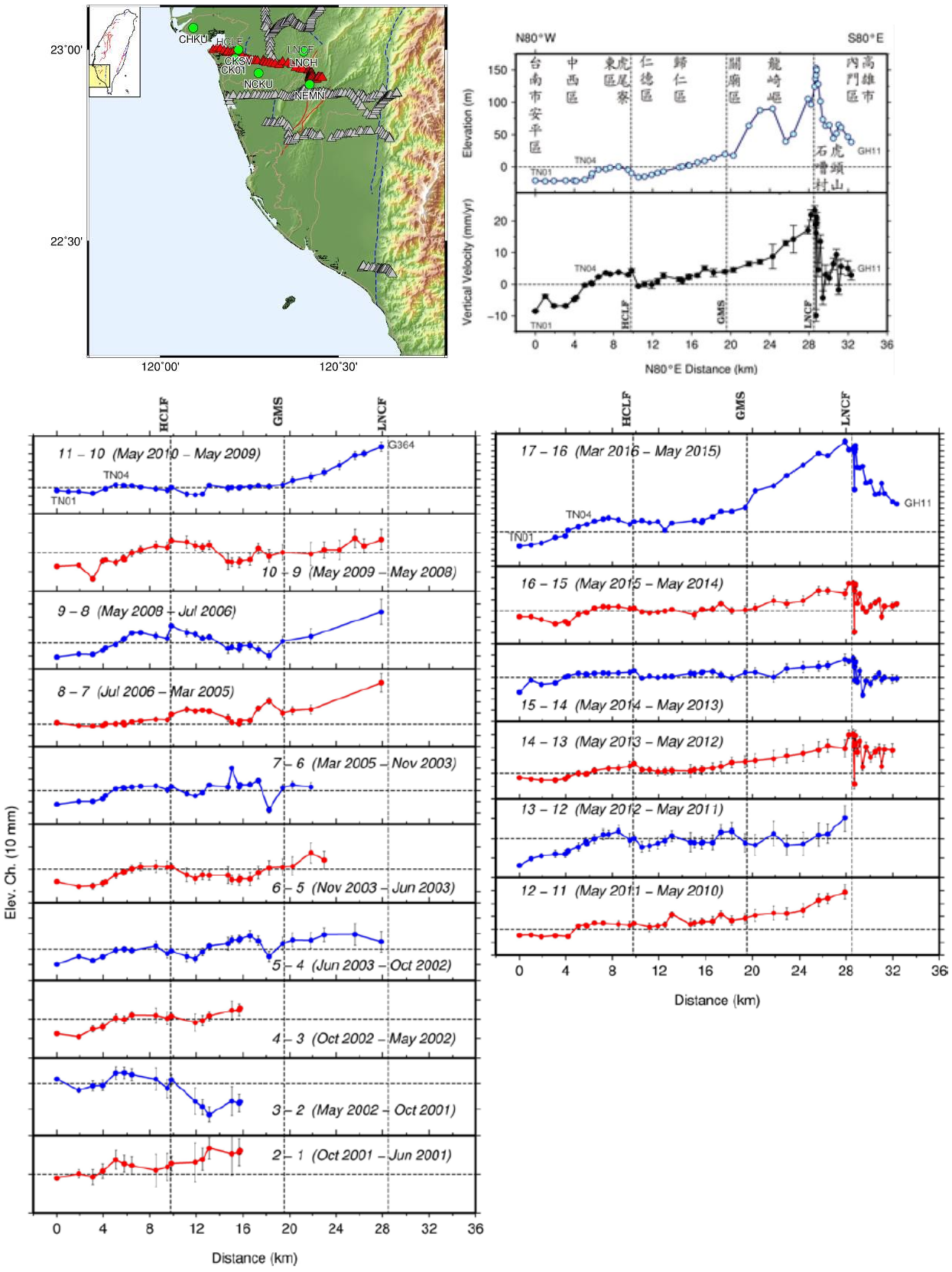


圖 2-3.69：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、GMS 為關廟向斜、LCF 為龍船斷層。

2-3-19 台 28_路竹至茂林測線

本測線橫跨小崗山、龍船、旗山及潮州斷層，路線長約 50 公里，從 2002 年至 2016 年共計有 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS55 和 CISH 之垂直速率（0.08 及 0.75 mm/yr），作為約制點來校正 R016 與 J116 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.70 及圖 2-3.71）。

2010 年 3 月芮氏規模 6.4 的甲仙地震及 2016 年 2 月芮氏規模 6.6 的美濃地震，分別造成此水準測線點位有-5.0 ~ 95.0 mm 與-21.0 ~ 104.0 mm 之同震位移量。由歷年高程變化圖可知，兩次地震在小岡山斷層與旗山斷層間有明顯的同震現象，龍船斷層附近尤其顯著。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

台 28_路竹至茂林測線於中壇附近分成北（縣 184 主線）與南（台 27 副線）兩條水準測線。由圖 2-3.73 顯示，主線於小崗山斷層與龍船斷層之間的垂直速率持續增加（約 0.0 ~ 20.0 mm/yr），與地形剖面比較，此區域（月世界一帶）垂直速率增加之處與地形高程變化並不吻合，推測此地表抬升現象可能與小崗山斷層的活動或是泥貫入體有關。

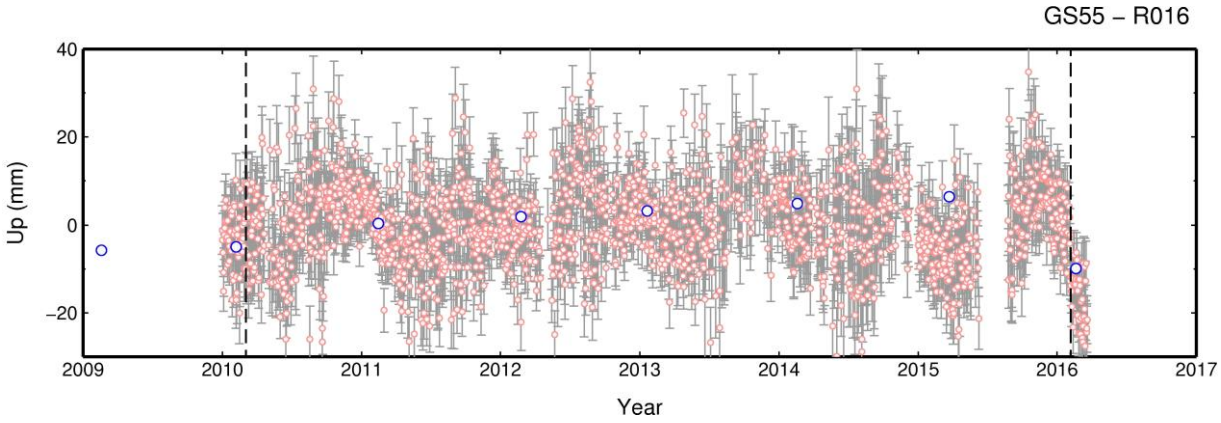


圖 2-3.70：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

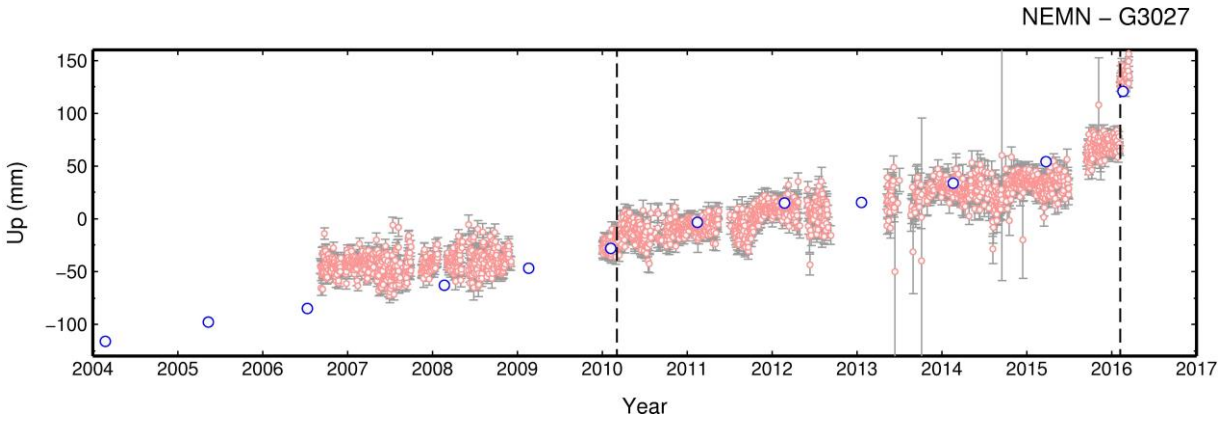


圖 2-3.71：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較，兩者相距 1.9 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

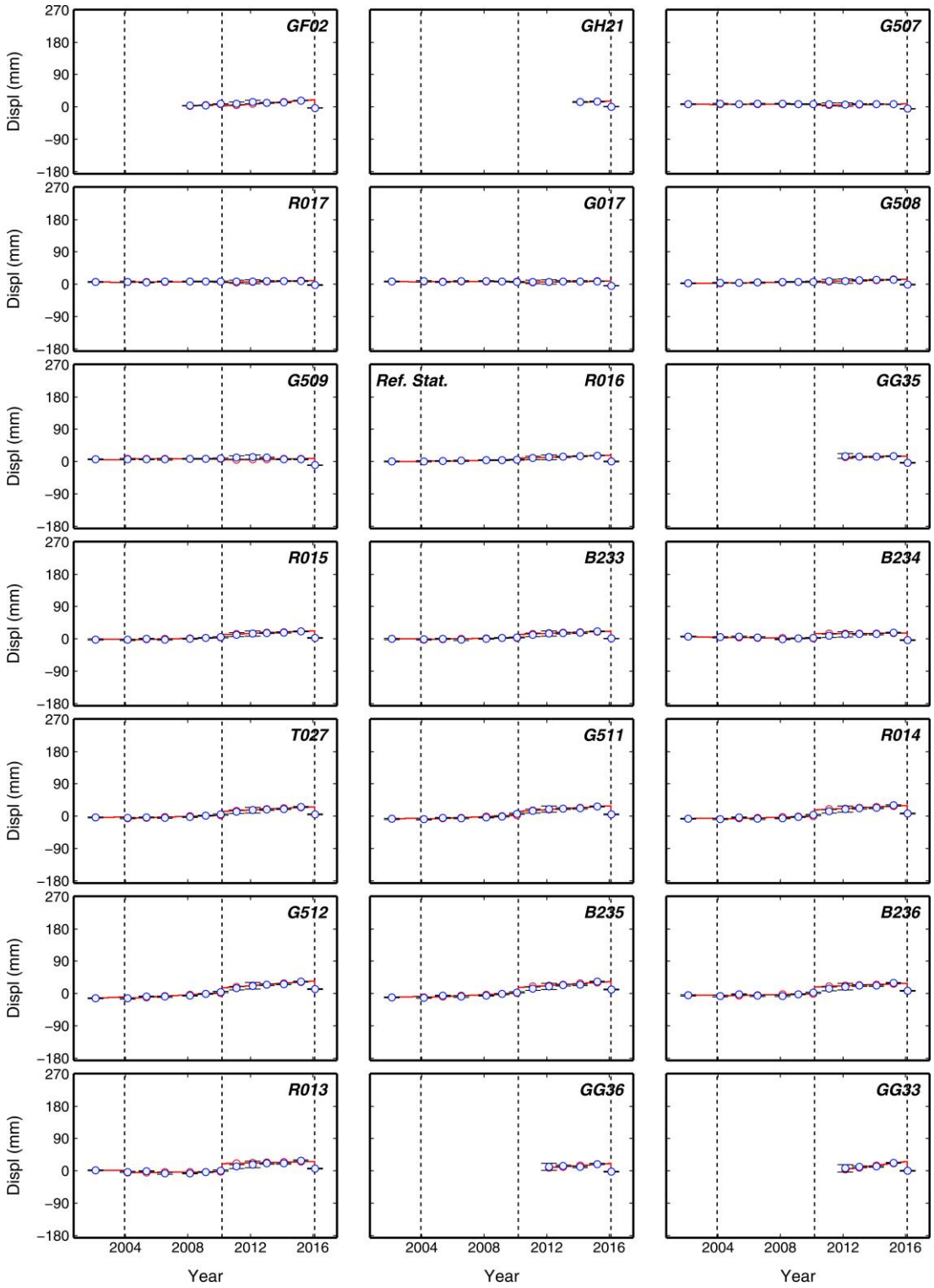


圖 2-3.72：路竹至茂林測線之時間序列。虛線分別為 2003 年成功地震、2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

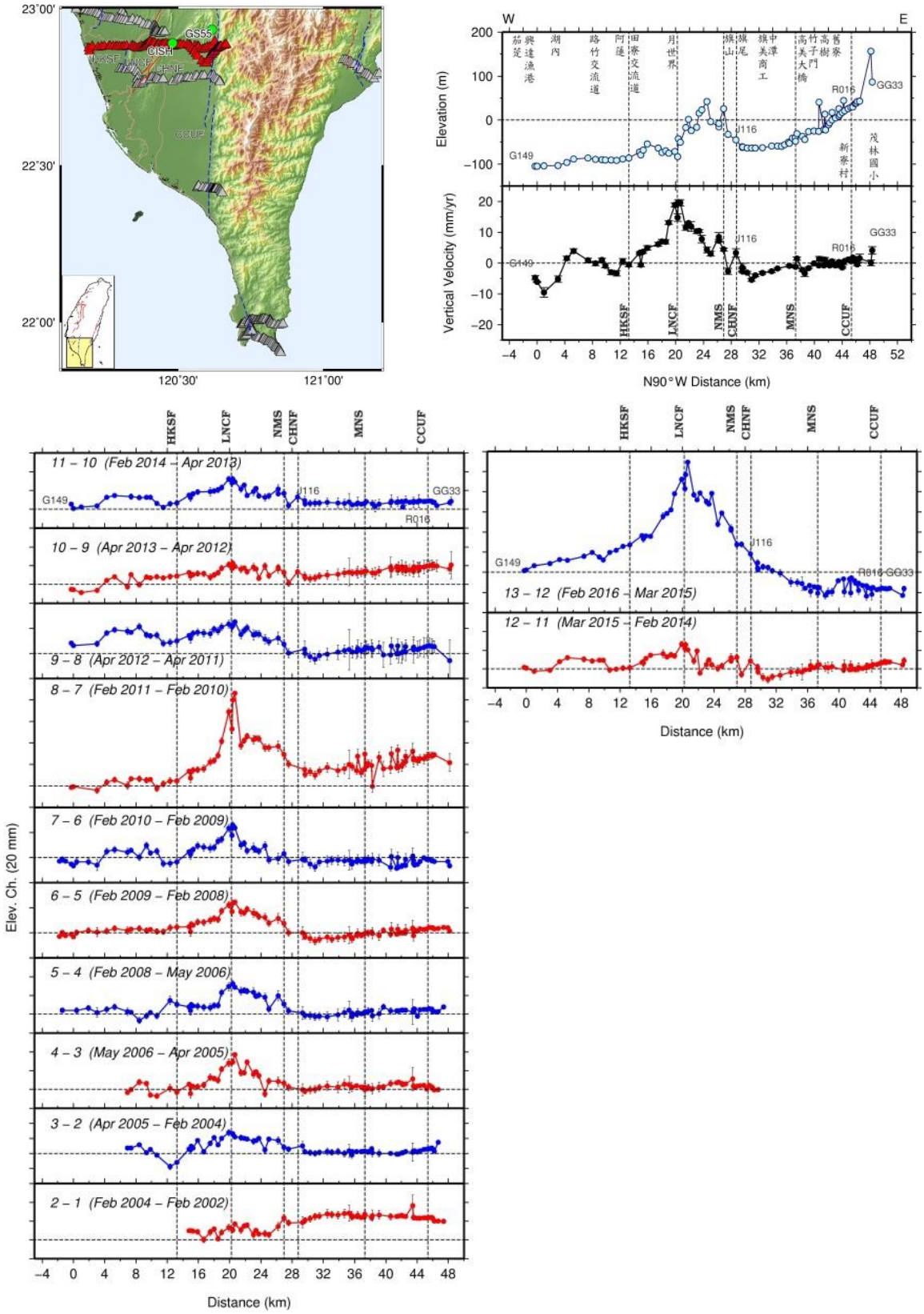


圖 2-3.73：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、LNCF 為龍船斷層、NMS 為內門向斜、CHNF 為旗山斷層、MNS 為美濃向斜、CCUF 為潮州斷層。

2-3-20 台 22_岡山至安坡測線

本測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層，測線長約 36 公里，從 2004 年至 2016 年共計 12 次施測。本測線以 GPS 連續站 AKND 之垂直速率（2.49 mm/yr），作為約制點來校正 G526 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.74）。

根據圖 2-3.76，垂直速度在跨越小崗山斷層至旗山斷層之間有明顯的抬升現象，約由 -12.5 mm/yr 抬升至 3.2 mm/yr；而旗山斷層至潮州斷層之間，速度呈現緩降的趨勢，大致由 -1.8 mm/yr 緩降至-7.5 mm/yr；在橫跨潮州斷層區域，垂直速率並未有明顯之變化量（約在-1.0 mm/yr 左右），或許可說明潮州斷層在本區域中並未有明顯之活動發生。

2016 年 2 月芮氏規模 6.6 的美濃地震，造成此水準測線點位有-11.0 ~ 25.0 mm 之同震位移量。從歷年高程變化來看，此測線 2015 至 2016 年之變化並未如較北邊之路竹至茂林測線顯著，變化量約在 4.0 mm 到 30.0 mm 之間。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

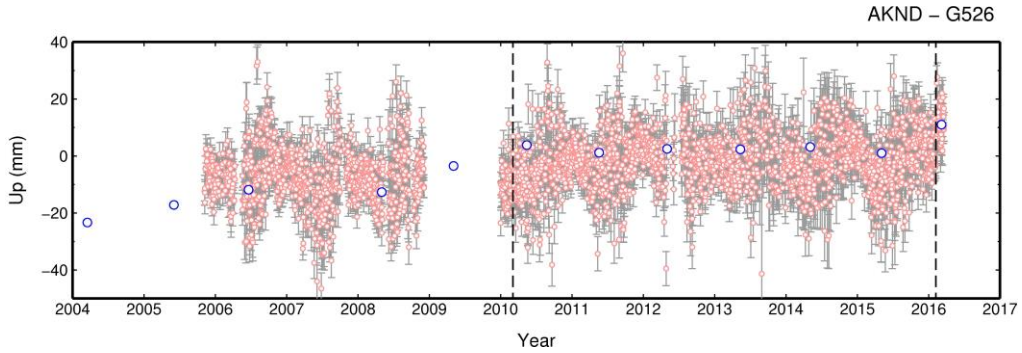


圖 2-3.74：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

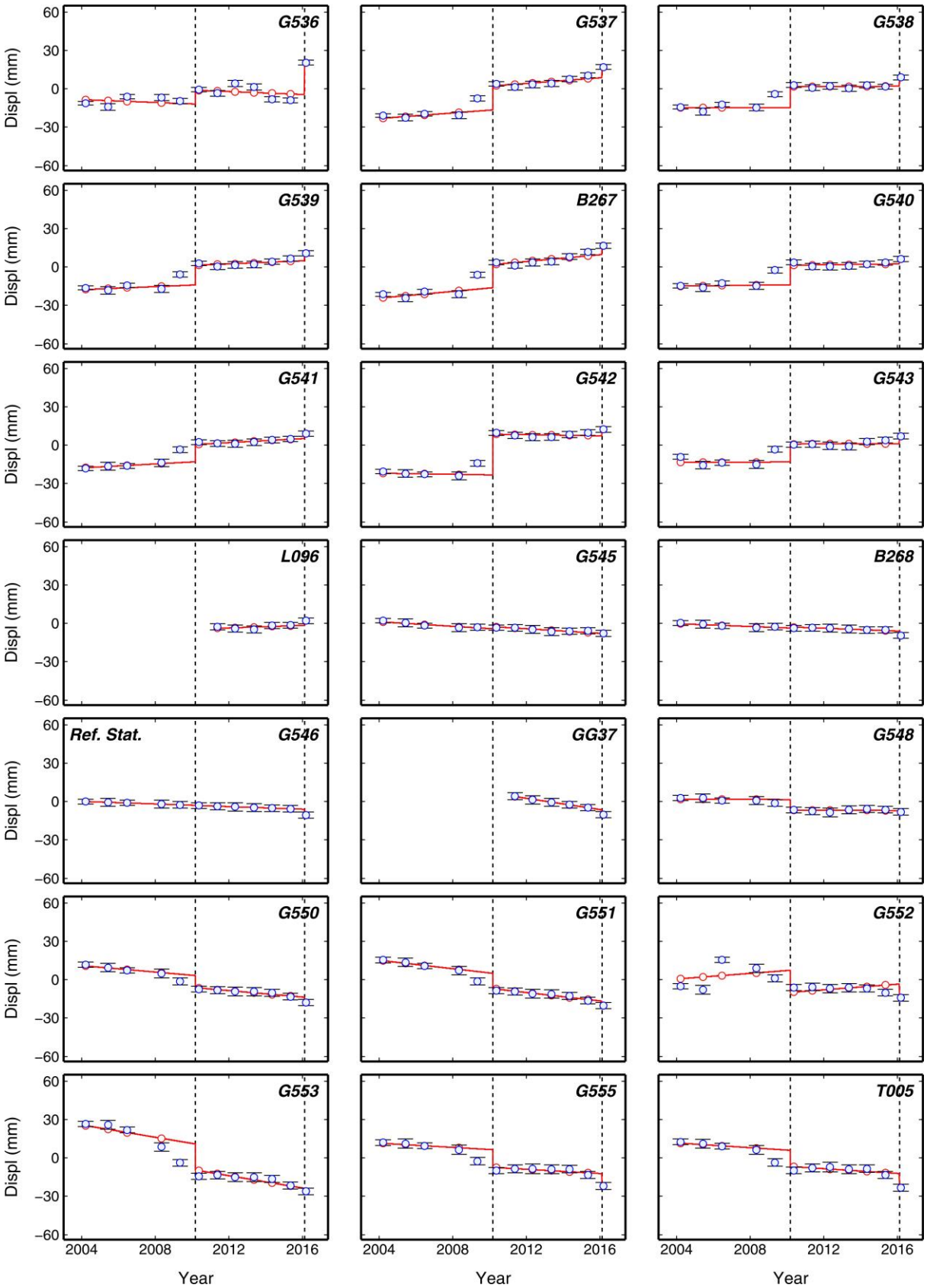


圖 2-3.75：岡山至安坡測線之時間序列。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

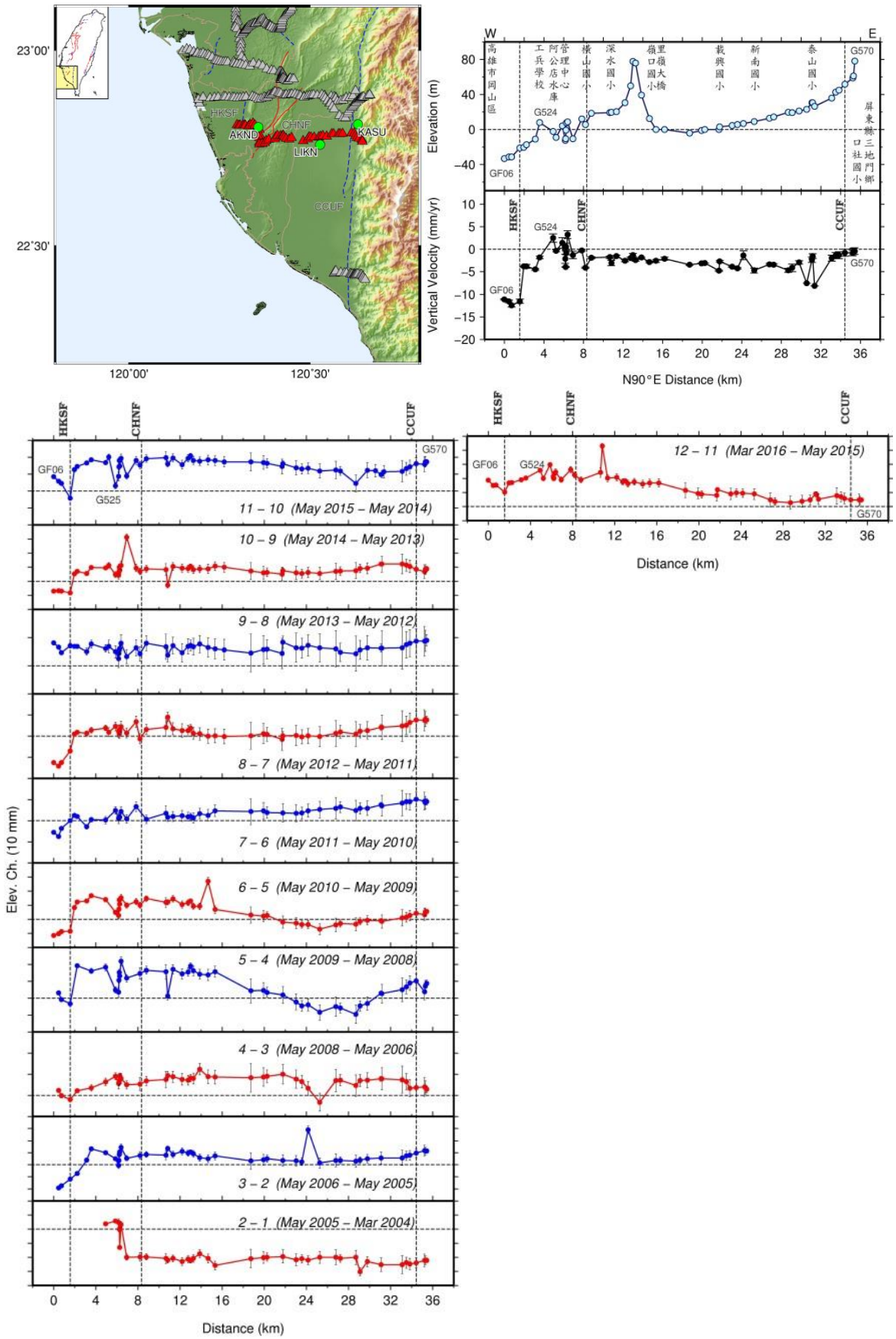


圖 2-3.76：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

2-3-21 佳冬至七佳測線

本測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里，於 2005 至 2016 年間共進行了 12 次的施測，主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。本測線以 GPS 連續站 CLON 之垂直速率（-14.84 mm/yr），作為約制點來校正 GC85 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.78）。

根據圖 2-3.80，該測線於 2007~2008 年間之高程變化與其他時段（2005~2007 年、2008~2010 年）不同，疑與 2008 年 8 月如麗颱風（NURI）之降雨有關（警報期間：8/19~8/21；水準測量期間：9/04~9/09）。潮州斷層西側之垂直速度變化較明顯，最大值達-20 mm/yr；斷層東側 2 公里內之變化較小，垂直速度落在 -0.2 至 1 mm/yr 之間，說明潮州斷層近期仍有活動跡象。

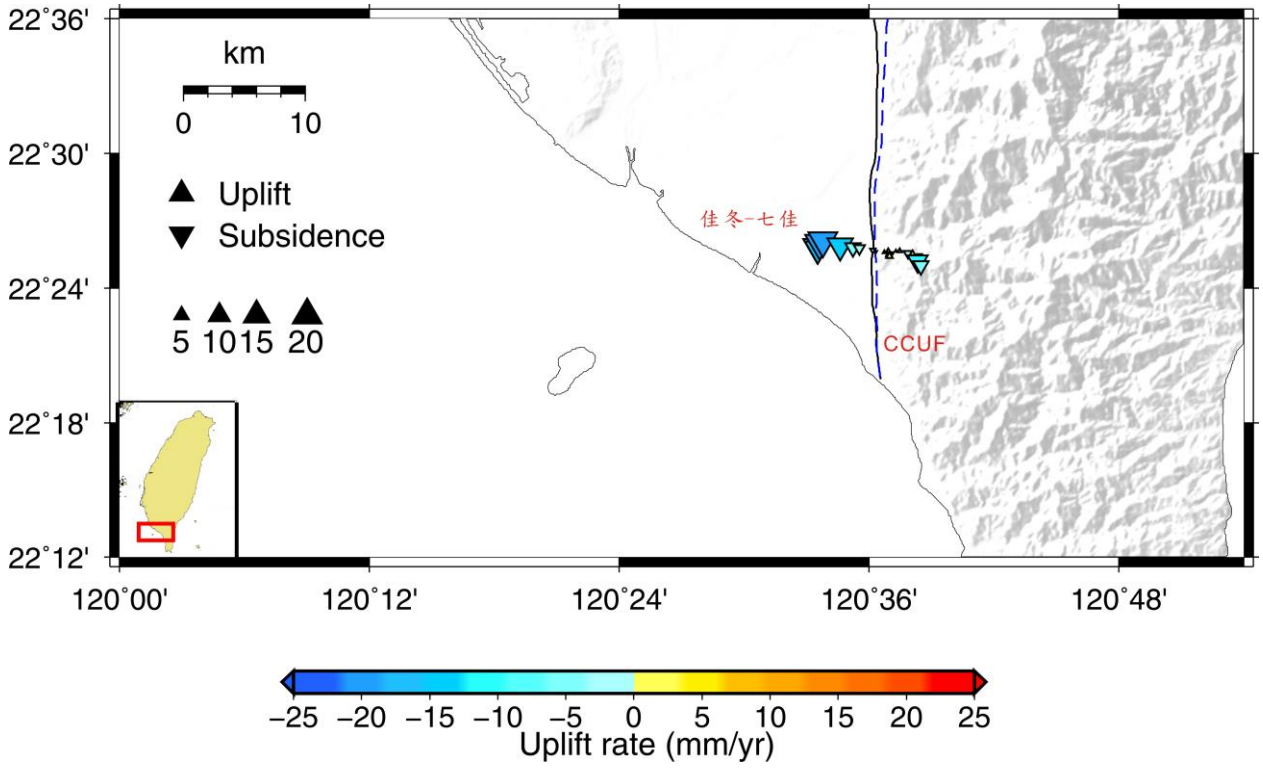


圖 2-3.77：佳冬-七佳之水準垂直速度場。CCUF 為潮州斷層。

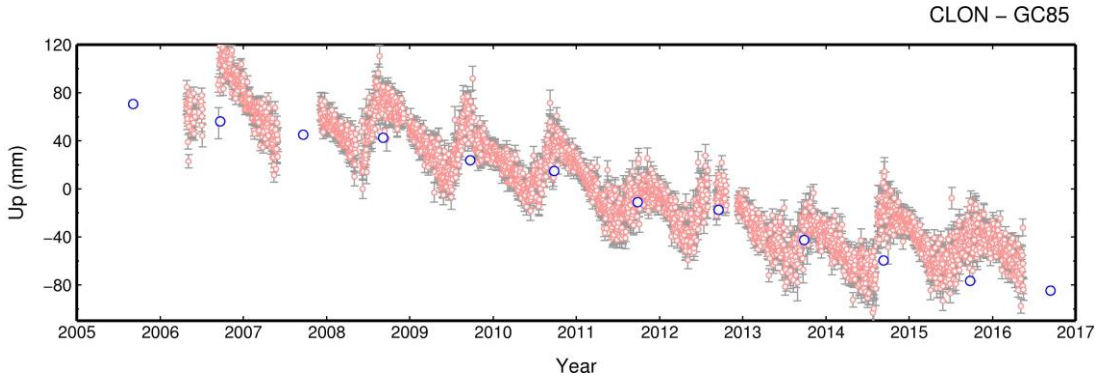


圖 2-3.78：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較，兩者相距 0.5 公里。

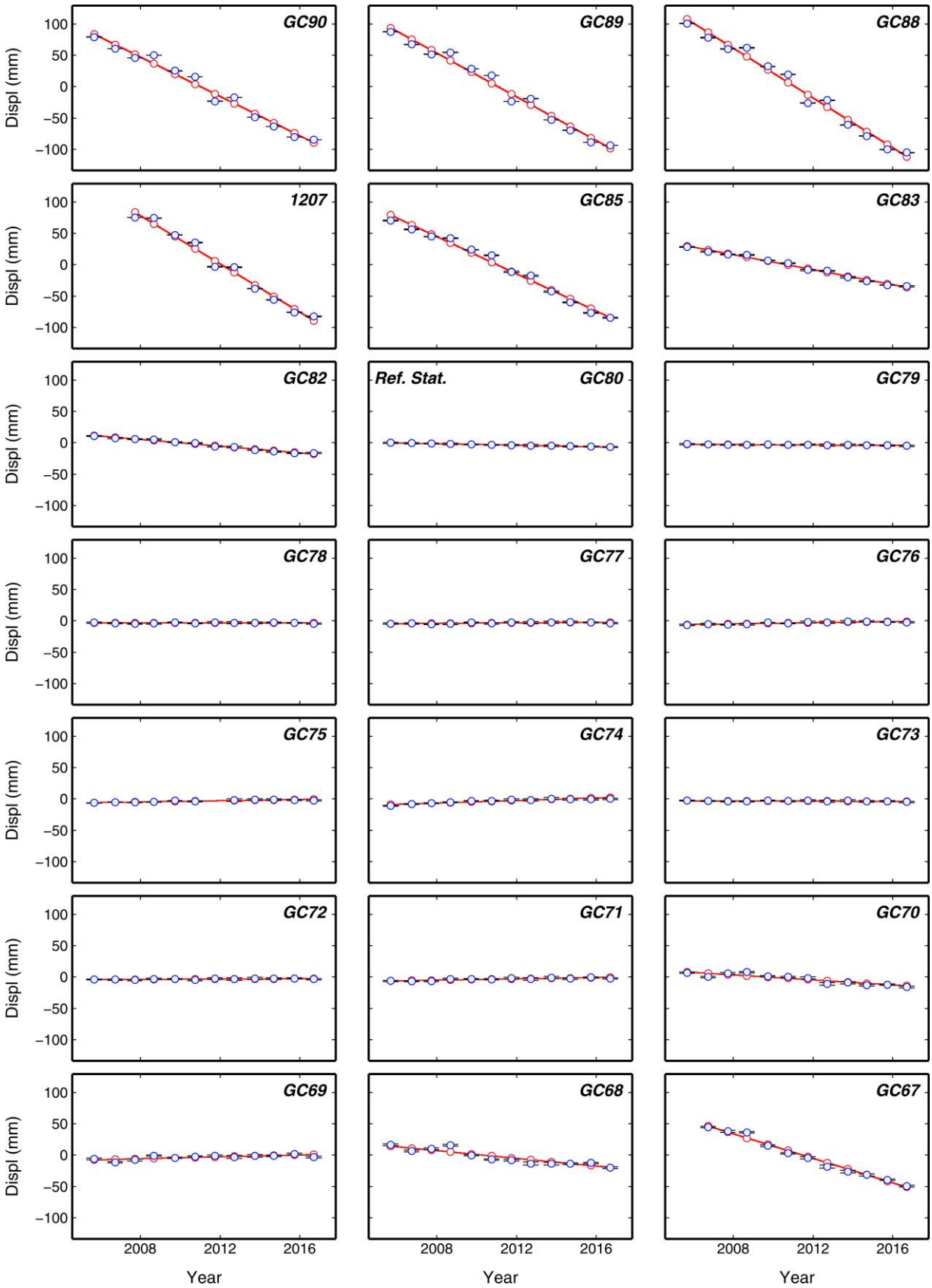


圖 2-3.79：佳冬至七佳測線之時間序列。

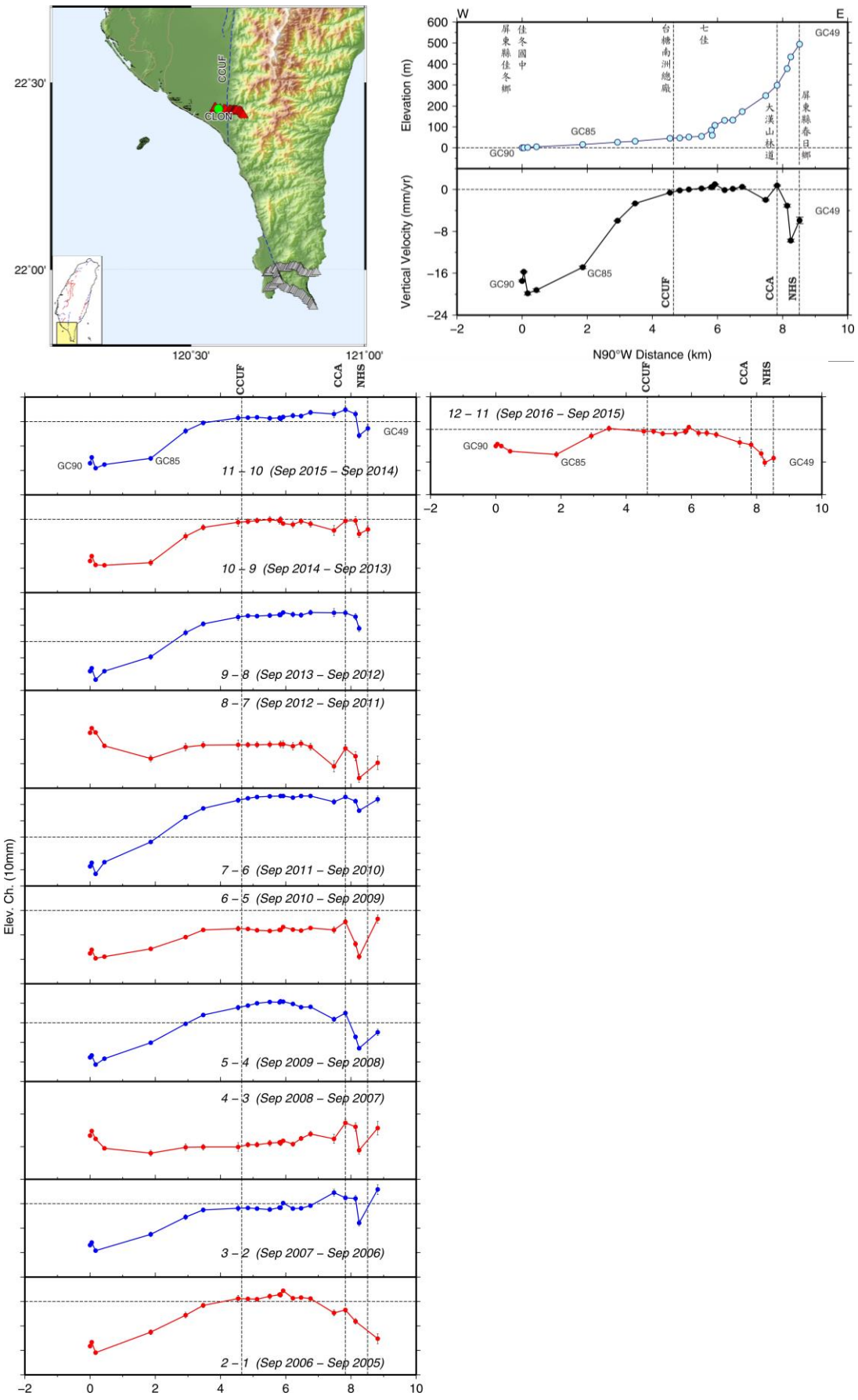


圖 2-3.80：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層、CCA 為七佳背斜、NHS 為南和向斜。

2-3-22 恆春半島地區測線

恆春半島地區共規劃有 2 條橫跨恆春斷層的精密水準測線，分別是北邊的恆春西台地至佳樂水測線（長約 15 公里）以及南邊地台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線（長約 13 公里）。至 2016 年止，各有 13 次的測量資料。

恆春西台地至佳樂水測線以 GPS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-4.21 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（-11.99 mm/yr）及 2010 年至今之垂直速率（-5.65 mm/yr），作為約制點來校正 G670 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.84 及圖 2-3.85）。

台 26_南樹林至鵝鑾鼻則以 GPS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（-4.31 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（4.47 mm/yr）與 2010 年至今之垂直速率（1.04 mm/yr），作為約制點來校正 Q014 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.86 及圖 2-3.87）。

根據圖 2-3.89 與圖 2-3.90，在歷年高程變化的部分，恆春半島的兩條水準測線在 2006 年以前均無明顯變化，說明 2006 年以前恆春斷層並無顯著之活動性。但在 2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化。恆春西台地至佳樂水測線支點位，最大同震量達-63.1 mm；南樹林至鵝鑾鼻測線，最大同震量達-76.1 mm。因此速度之估算是藉由座標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

在垂直速率部分，以斷層東邊約兩公里為分界，兩條測線在震後均呈現不同的運動型態（紅色及藍色部分），西側為沉陷、東側為抬升。其中較南邊的南樹林至鵝鑾鼻測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為 3.7 mm/yr（紅色部分），2010 年至今的平均速率約為-0.9 mm/yr（藍色部分）；較北邊的恆春西台地至佳樂水測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為-1.9 mm/yr（紅色部分），2010 年至今的平均速率約為-0.5 mm/yr（藍色部分），此現象或許可說明在 2006 年震後至 2016 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北傳遞的現象。

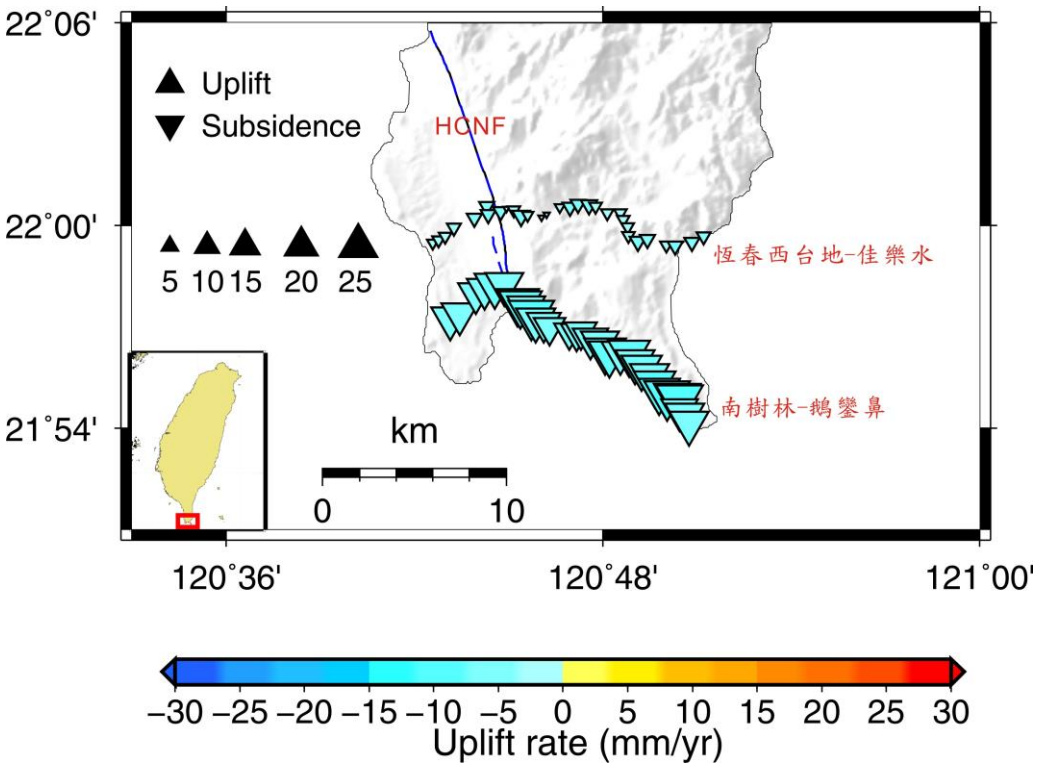


圖 2-3.81：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年恆春地震前）。HCNF 為恆春斷層。

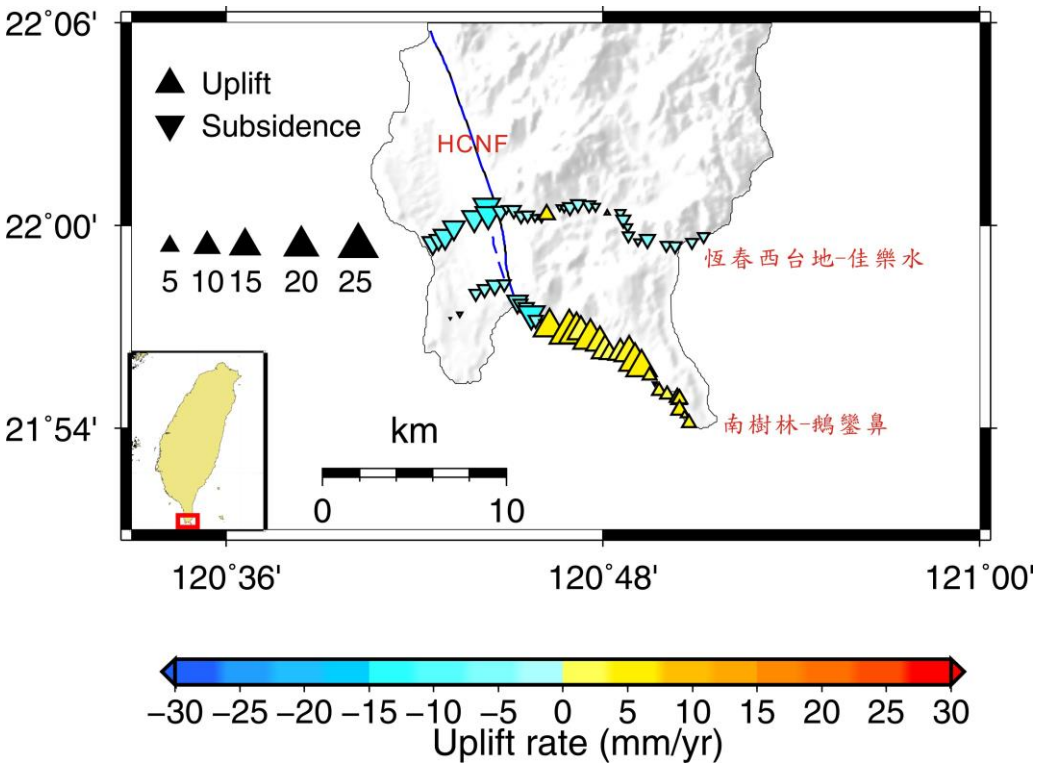


圖 2-3.82：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年恆春地震後至 2010 年速度發生變化）。HCNF 為恆春斷層。

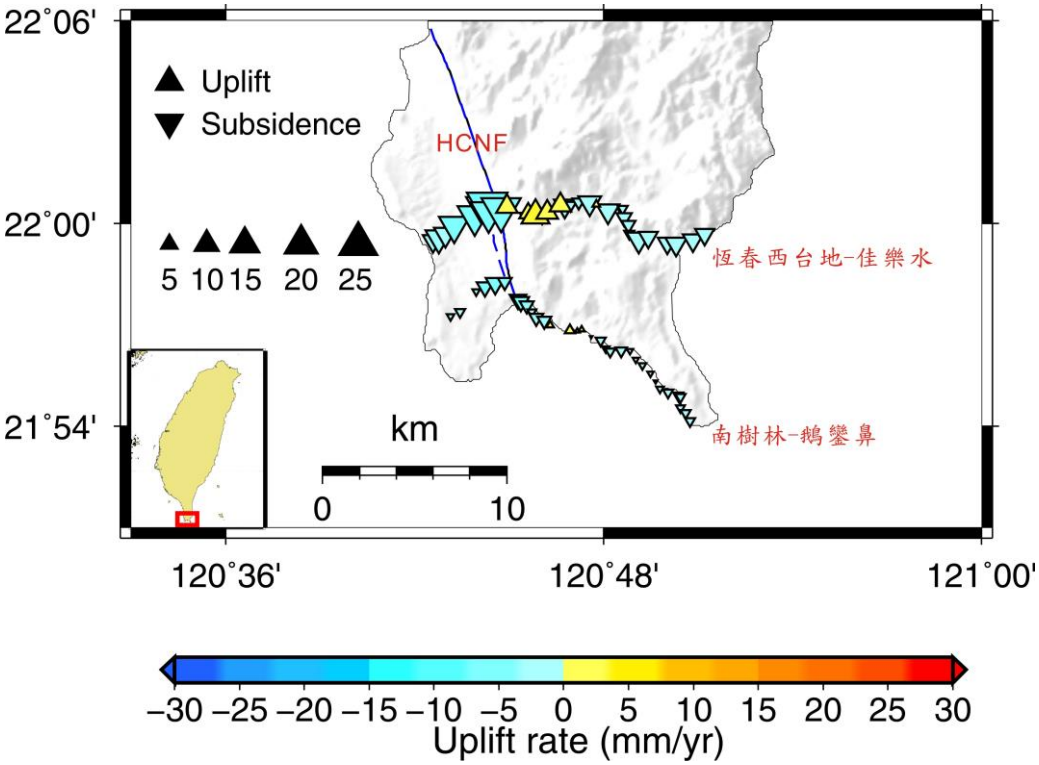


圖 2-3.83：恆春半島之水準垂直速度場（2010 年速度發生變化後至今）。HCNF 為恆春斷層。

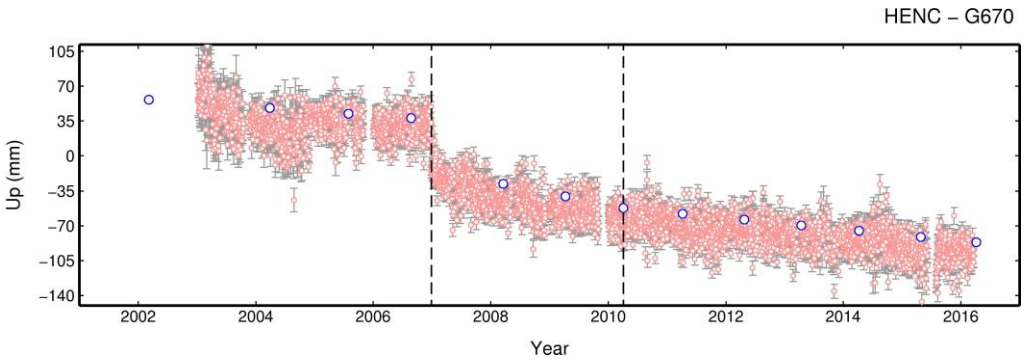


圖 2-3.84：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年恆春地震及 2010 年速度發生變化。

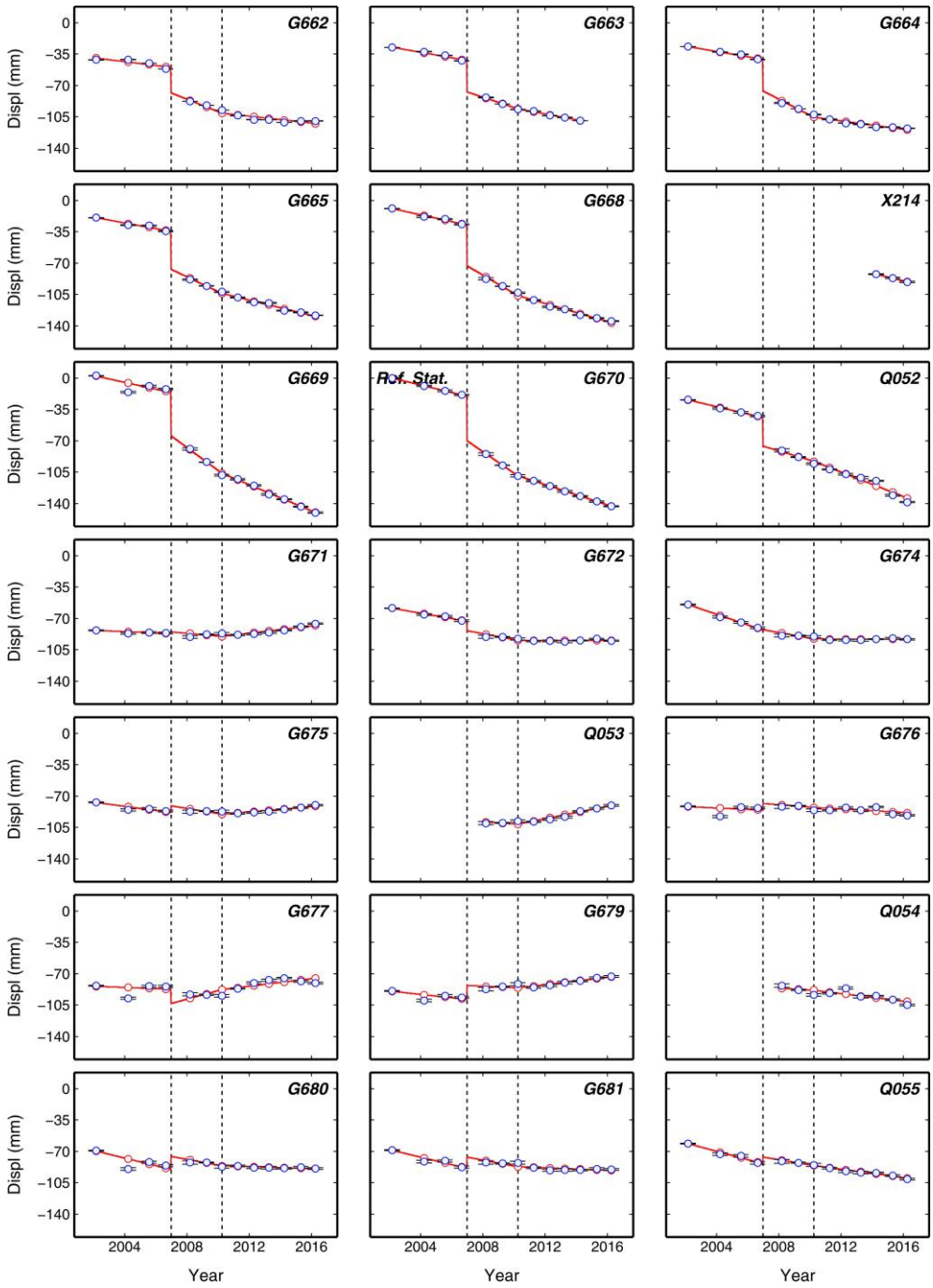


圖 2-3.85：恆春西台地至佳樂水測線之時間序列。虛線分別為 2006 年恆春地震及 2010 年速度發生變化。

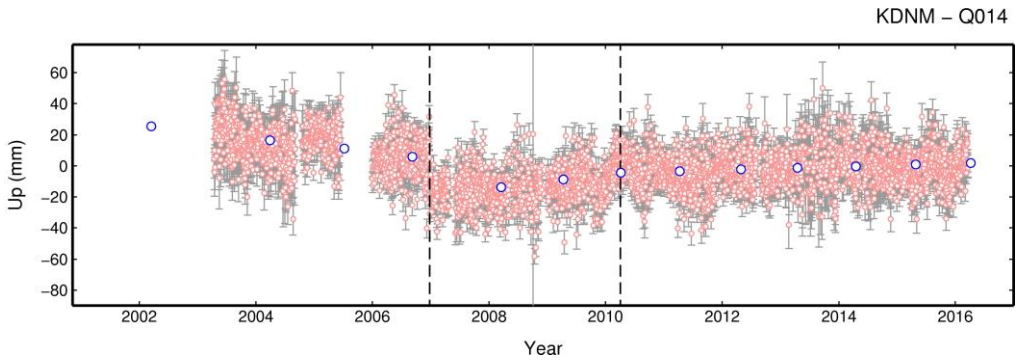


圖 2-3.86：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。虛線分別為 2006 年恆春地震及 2010 年速度發生變化。

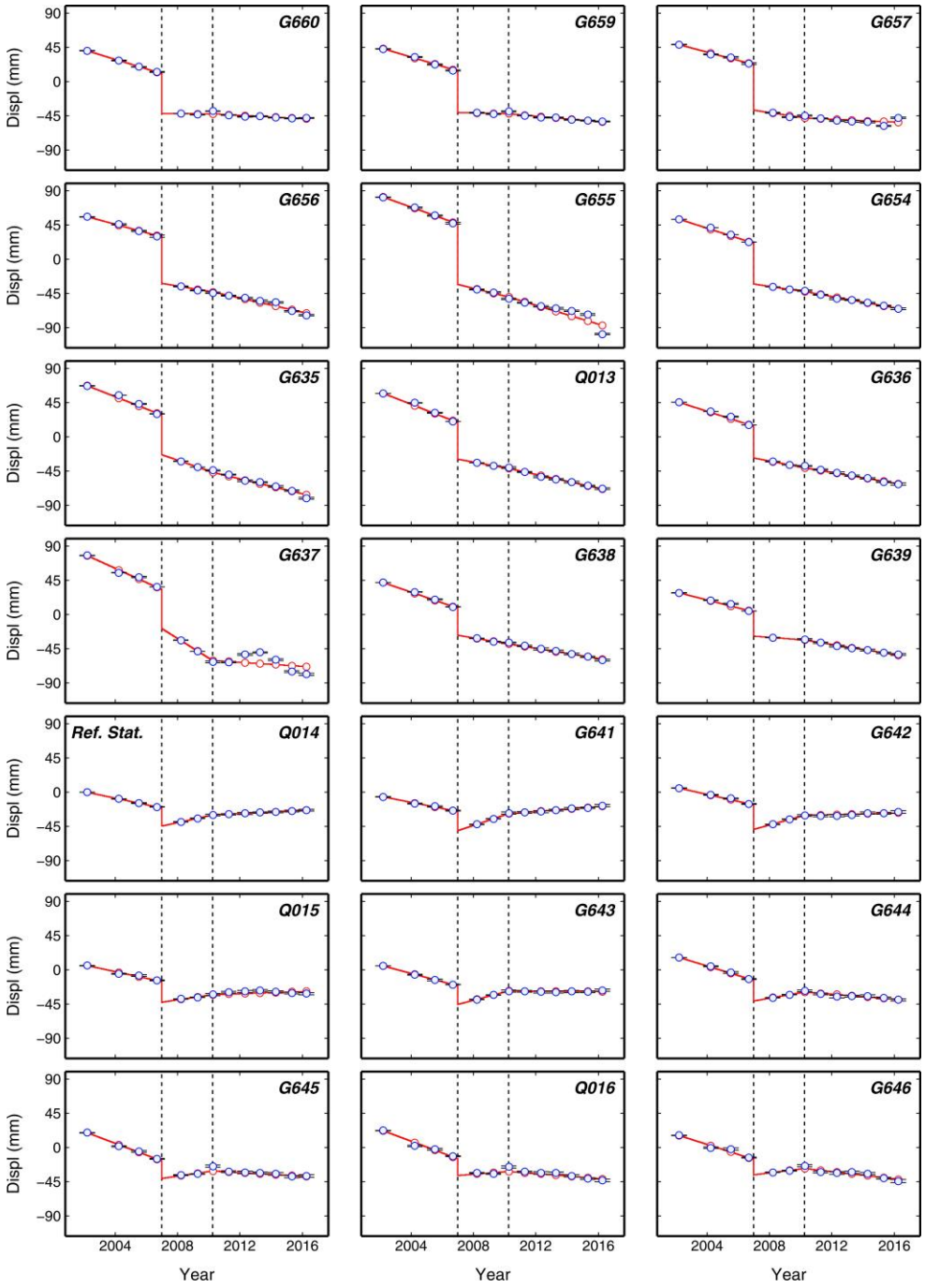


圖 2-3.87：南樹林至鵝鑾鼻測線之時間序列。虛線分別為 2006 年恆春地震及 2010 年速度發生變化。

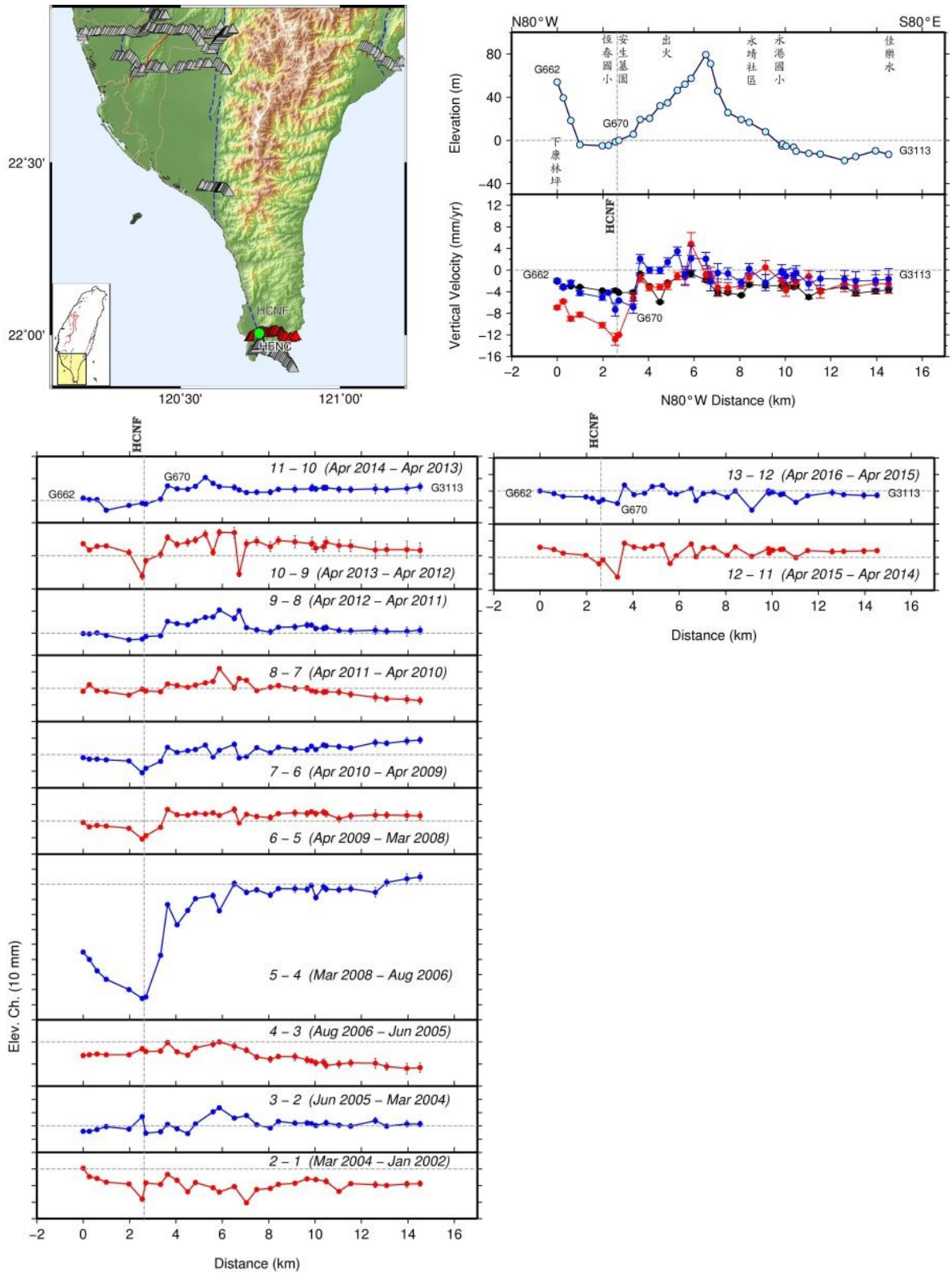


圖 2-3.88：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。上欄右側中之黑色 2002~2006 年恆春地震震前垂直速度、紅色為 2006~2010 年恆春地震震後垂直速度、藍色為 2010 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

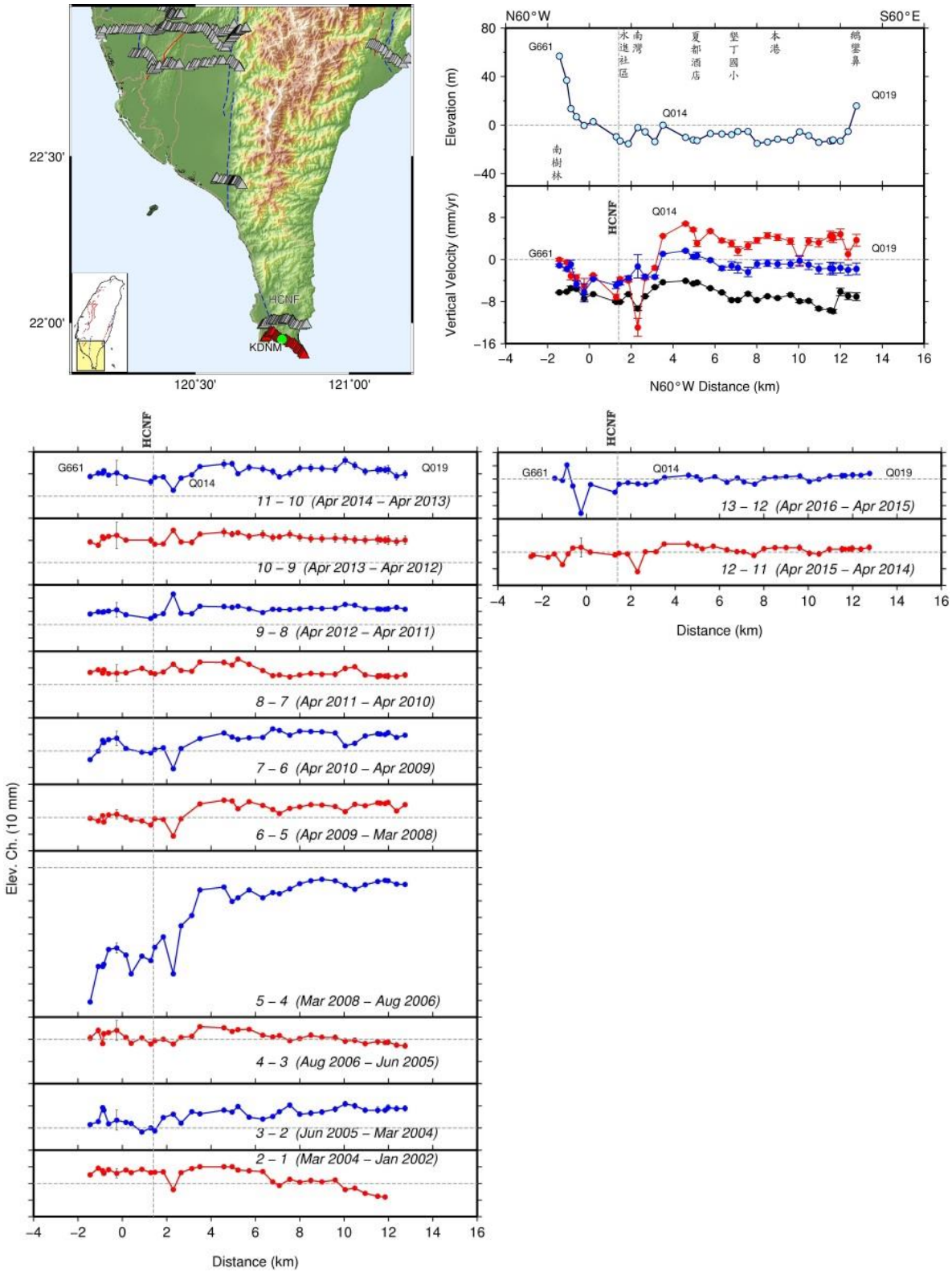


圖 2-3.89：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。上欄右側中之黑色為 2002~2006 年恆春地震震前垂直速度、紅色為 2006~2010 年恆春地震震後垂直速度、藍色為 2010 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HNCF 為恆春斷層。

2-3-23 台 20_新化至玉井測線

經濟部中央地質調查所於 2016 年 5 月新增橫跨新化斷層與左鎮斷層之台 20_新化至玉井精密水準測線，路線長約 25 公里，包括 55 個點位（圖 2-3.90）。此測線的 J006（新化高中）與善化至關廟測線共點，所以台 20_新化至玉井測線、善化至關廟與安平至龍崎測線可以組成更好的垂直速度場監測網。

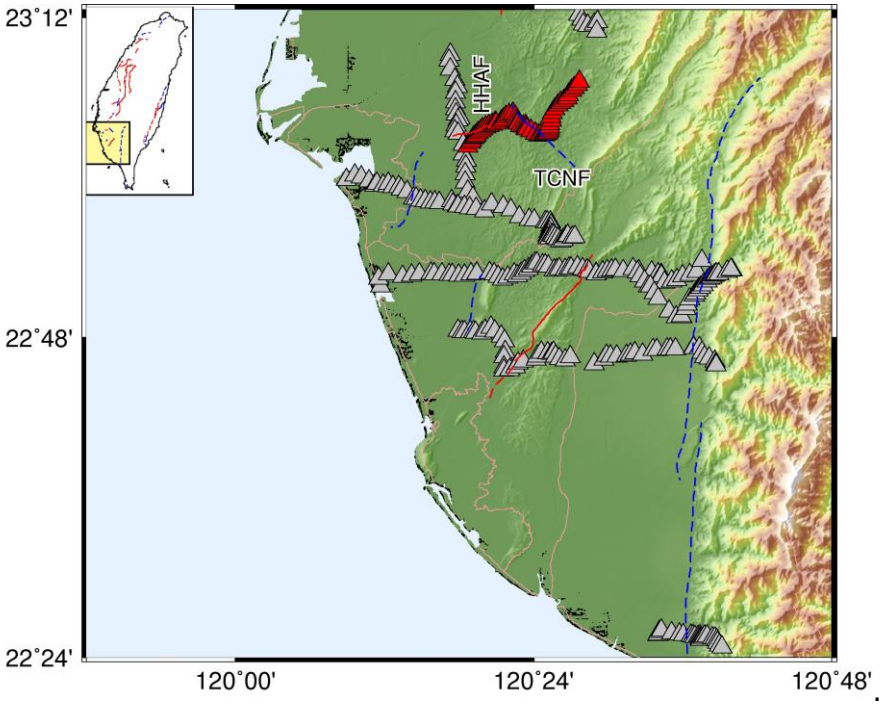


圖 2-3.90：台 20_新化至玉井測線路線圖。紅色三角形為水準路線圖、HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

表 2-3.1：台 20_新化至玉井測線點位資訊表。

點號	經度（°）	緯度（°）	累積高程值（m）	標準差（mm）
J006	120.311400	23.039672	1.71	0.33
GH56	120.315489	23.044330	2.39	0.41
GH57	120.317273	23.046695	2.91	0.49
N8535	120.319735	23.049857	2.57	0.50
J007	120.319737	23.049828	2.79	0.51
G886	120.319850	23.050408	2.96	0.55
GH58	120.321503	23.051535	3.68	0.59
GH59	120.323183	23.053132	6.38	0.65
GH60	120.325882	23.055952	7.93	0.71
GH61	120.328855	23.058601	10.89	0.76
J008	120.331561	23.061362	13.33	0.81
GH62	120.335994	23.063472	18.31	0.86
GH63	120.339947	23.065375	24.78	0.91
GH64	120.344887	23.066859	30.30	0.96
N8537	120.348423	23.068300	29.31	0.98

點號	經度（°）	緯度（°）	累積高程值（m）	標準差（mm）
G390	120.348751	23.068769	29.98	1.00
J009	120.349718	23.068061	34.81	1.06
GH65	120.356873	23.070602	29.13	1.09
R057	120.359077	23.073022	44.47	1.13
GH66	120.362967	23.076044	51.63	1.17
J010	120.367081	23.078441	38.13	1.21
GH67	120.372611	23.079957	26.52	1.25
GH68	120.376152	23.076323	20.82	1.28
GH69	120.376809	23.071314	19.79	1.30
J011A	120.378546	23.069189	18.19	1.31
GH70	120.379223	23.068469	18.27	1.34
GH71	120.382567	23.064843	27.21	1.37
GH72	120.386513	23.064163	28.27	1.40
GE44	120.389532	23.064817	18.86	1.42
GH73	120.390037	23.061883	21.95	1.43
GH74	120.391155	23.060687	35.52	1.47
GH75	120.396668	23.058586	26.53	1.51
J012	120.402415	23.055158	30.45	1.54
GH76	120.406958	23.053197	29.34	1.55
GH77	120.409387	23.053459	38.05	1.57
J013	120.412790	23.053612	38.58	1.58
GH78	120.415056	23.053426	39.23	1.59
GH79	120.416945	23.054399	40.43	1.61
GH80	120.418978	23.055978	38.55	1.63
GH81	120.420664	23.058739	40.20	1.64
GH82	120.420614	23.061303	48.08	1.66
J014	120.421651	23.063538	56.04	1.68
GH83	120.421836	23.067665	74.88	1.71
GH84	120.423869	23.071610	71.20	1.73
GH85	120.423597	23.075988	84.43	1.76
J015	120.425404	23.080869	80.43	1.79
GH86	120.428356	23.086119	95.69	1.82
GH87	120.433169	23.090363	88.34	1.85
GH88	120.436600	23.093933	63.82	1.87
J016	120.440843	23.096375	53.94	1.90
GH89	120.445128	23.099680	49.47	1.92
GH90	120.446822	23.103153	41.28	1.95
J017	120.451044	23.108666	42.43	1.98
GH91	120.454956	23.112194	41.91	2.00
GH92	120.458453	23.116604	50.24	2.03
X206	120.461774	23.120304	1.71	0.33

2-3-24 嶺頂至瀧澗測線

本測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 20 公里，從 2004 年至 2016 年共計有 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 YENL 之垂直速率(-10.59 mm/yr)，作為約制點來校正 G971 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。(圖 2-3.92)

根據圖 2-3.94，此測線在斷層西側之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在斷層東側則不一致。跨斷層之垂直速度為沉降趨勢，速度約由-9.5 mm/yr 降至-10.5 mm/yr，地表高程則約有 2 m 的抬升量。

此外，今年（2016 年）因道路坍方部分測段無法施測，故測線起點改由 N670（銅門國小）。因此在垂直速度與地表高程部分資料只計算至 2015 年，明年要視道路修復狀況才能決定是否繼續施測。

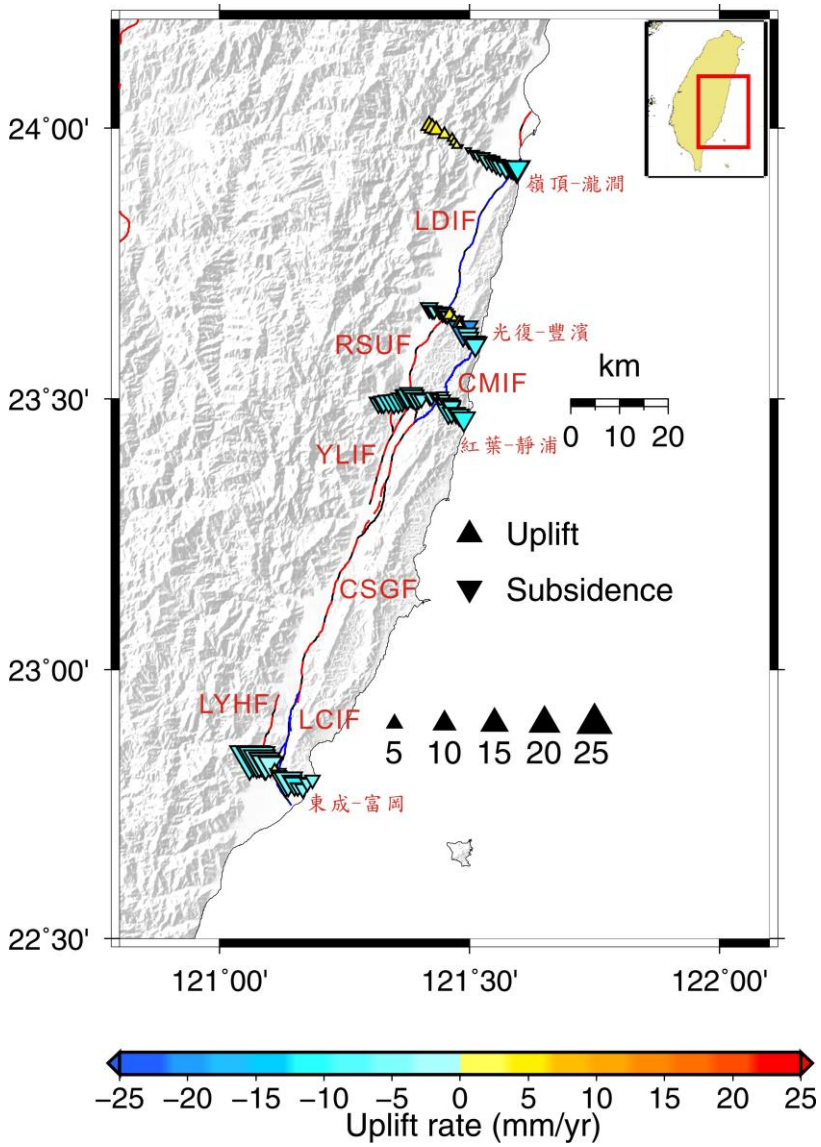


圖 2-3.91：花東地區之垂直速度場。LDIF 為嶺頂斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層、YLIF 為玉里斷層、CSGF 為池上斷層、LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

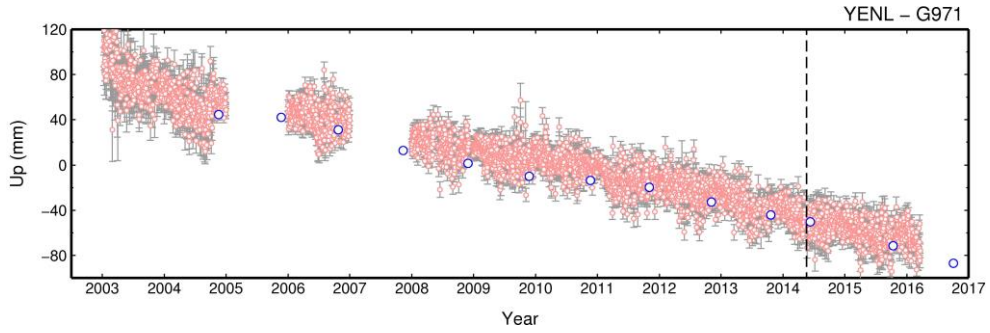


圖 2-3.92：水準點位 G971 與連續站 YENL 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線為 2014 年鳳林地震。

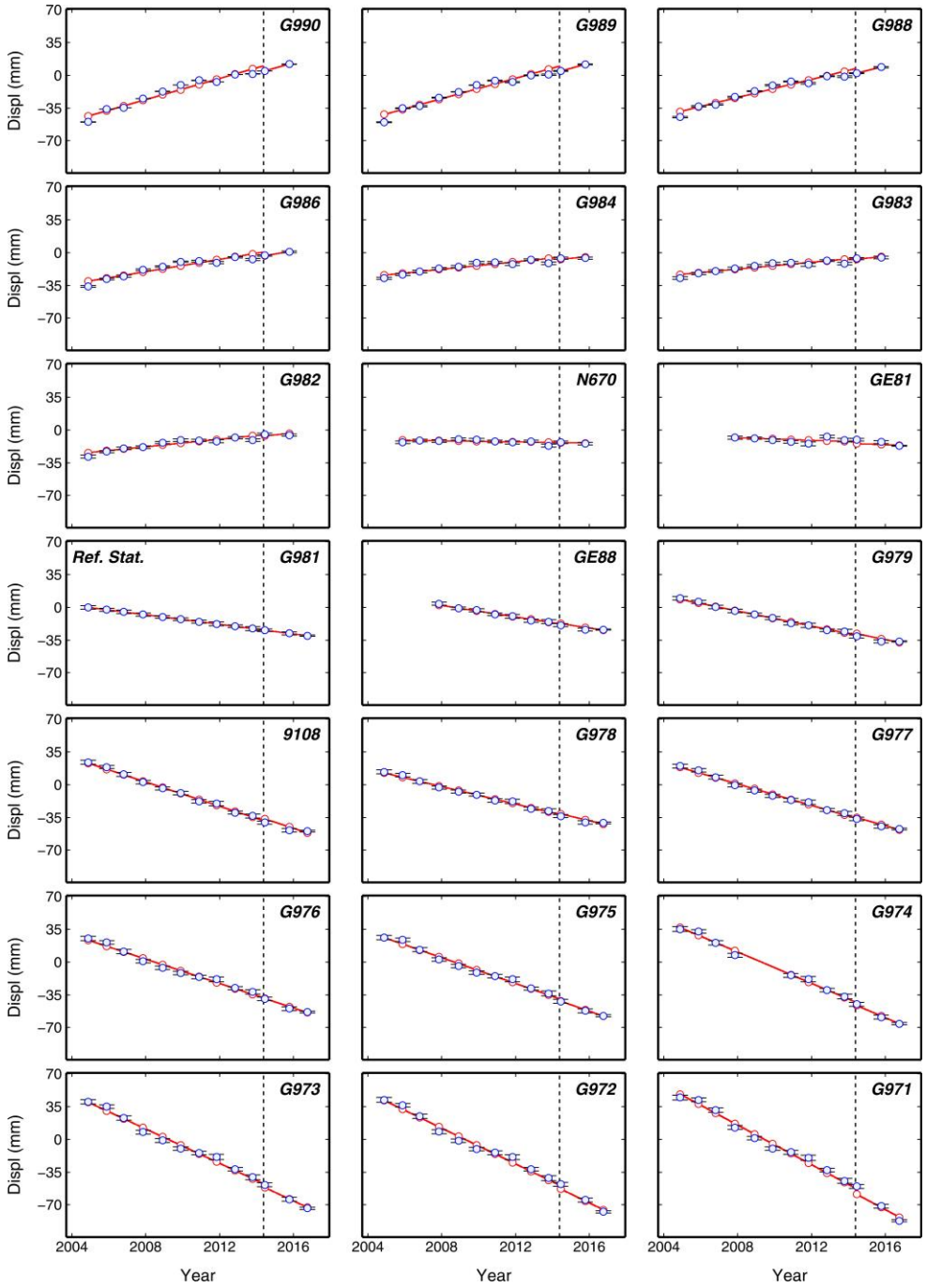


圖 2-3.93：嶺頂至瀧澗之時間序。虛線為 2014 年鳳林地震。

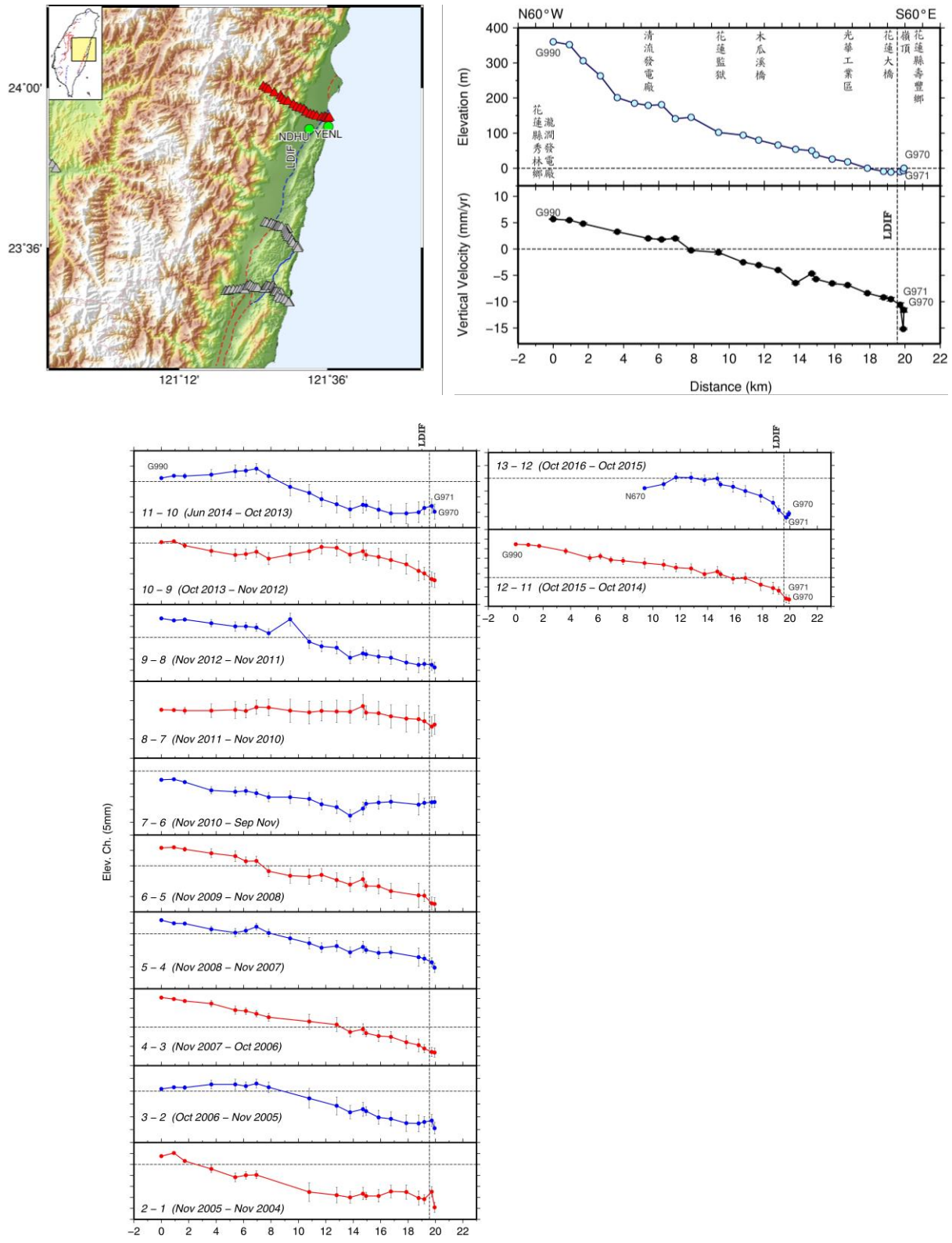


圖 2-3.94：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

2-3-25 光復至豐濱測線

本測線橫跨瑞穗及奇美斷層，測線長約 12 公里，從 2004 年至 2016 年共計有 14 次施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 FENP 之垂直速率（-9.03 mm/yr），作為約制點來校正 G991 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3.95）

根據圖 2-3.97，此測線在奇美斷層以西之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在奇美斷層東側則不一致。在跨奇美斷層後之地表高程約有 4.5 m 的沉陷量，而垂直速度則從-10.7 mm/yr 緩升至-9.6 mm/yr。另在瑞穗斷層西側之垂直速度約落在-6.5 mm/yr 至-3.8 mm/yr，跨斷層後則逐漸抬升至 3.8 mm/yr。另外，根據歷年高程變化（Sep 2013 - Oct 2013）可知，2013 年 10 月 31 日瑞穗地震在奇美斷層西側造成顯著抬升，同震位移量達 100 mm，抬升量較南邊的紅葉-靜浦測線大（20 mm）。

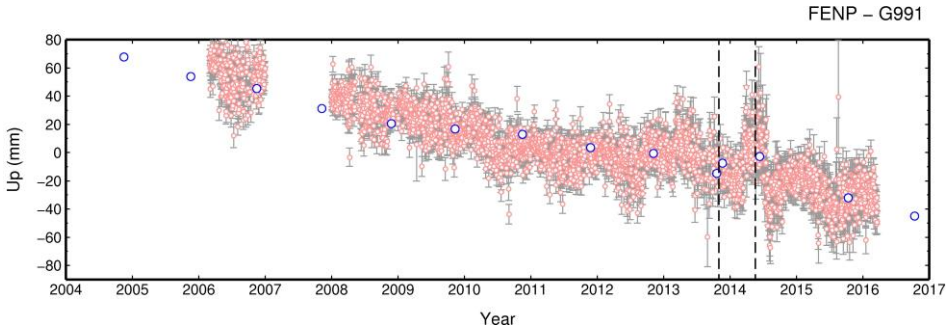


圖 2-3.95：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2013 年瑞穗地震；右邊虛線為 2014 年鳳林地震。

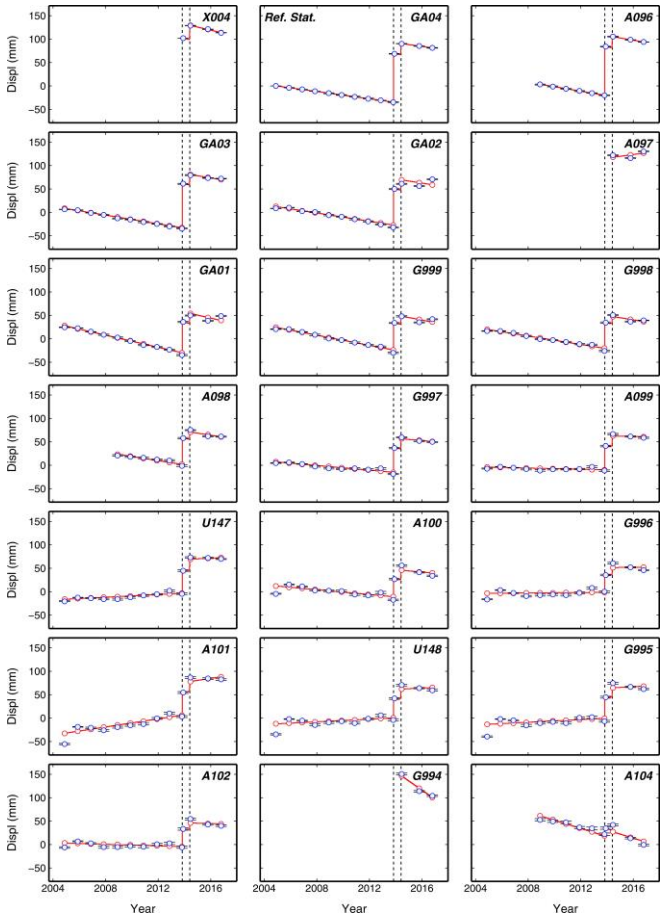


圖 2-3.96：光復至豐濱測線之時間序列。左邊虛線為 2013 年瑞穗地震；右邊虛線為 2014 年鳳林地震。

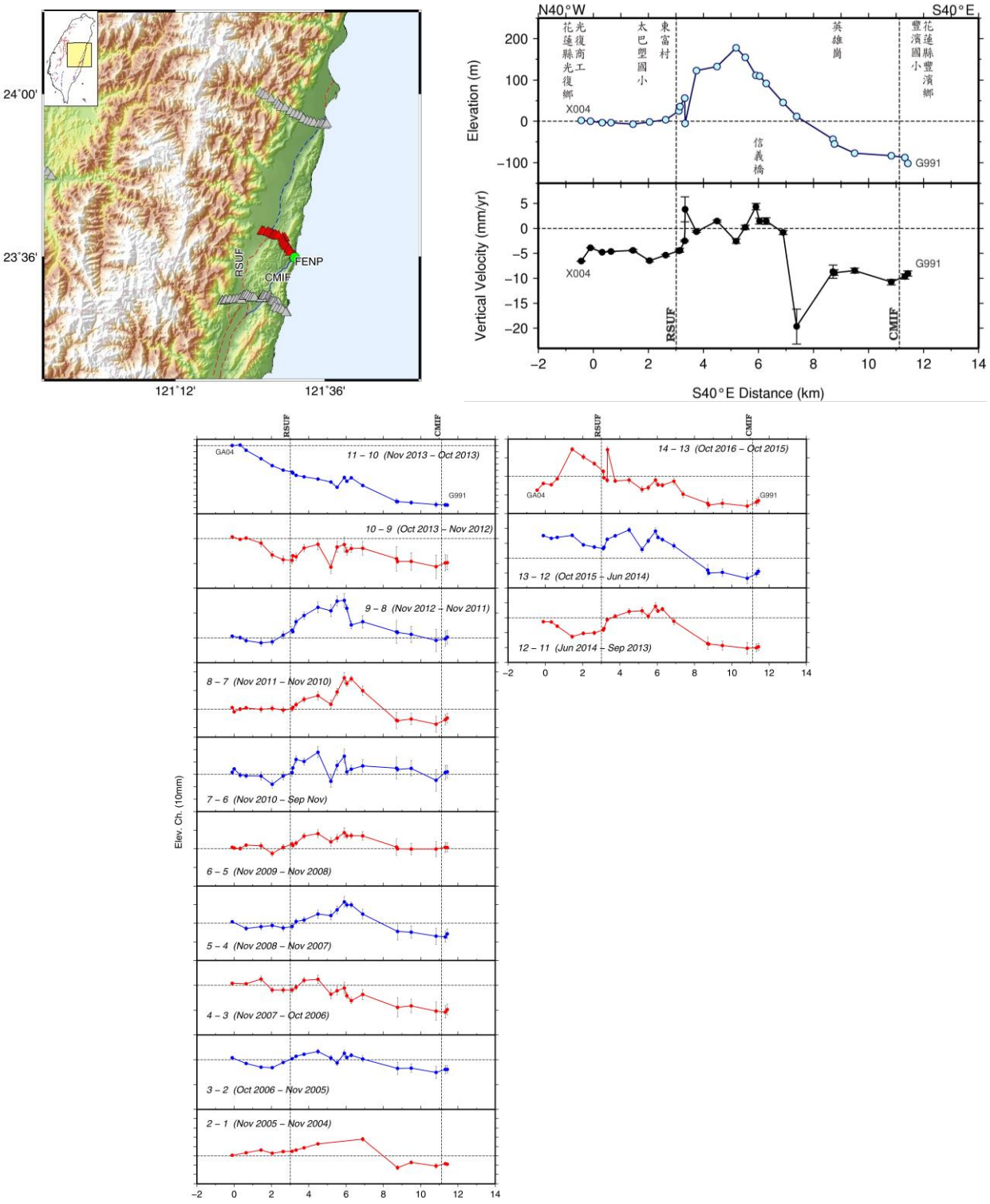


圖 2-3.97：光復至豐濱水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

2-3-26 紅葉至靜浦測線

本測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層，測線長約 18 公里，2004 年至 2016 年間進行共 14 次的施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（-2.01 mm/yr），作為控制點來校正 GA22 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3. 98）

根據圖 2-3.100，此測線在玉里斷層左側之垂直速度約由-6 mm/yr 降至-11 mm/yr，在玉里斷層東側至奇美斷層西側，速度變化約由-12 mm/yr 緩升至-1 mm/yr，可說明此測線跨過的三條斷層仍有地質活動。另外，根據歷年高程變化（Nov 2013 - Oct 2013）可知，2013 年 10 月 31 日之瑞穗地震在奇美斷層西側造成顯著抬升，同震位移量達 20 mm，抬升量較北邊光復-豐濱測線小（100 mm）。

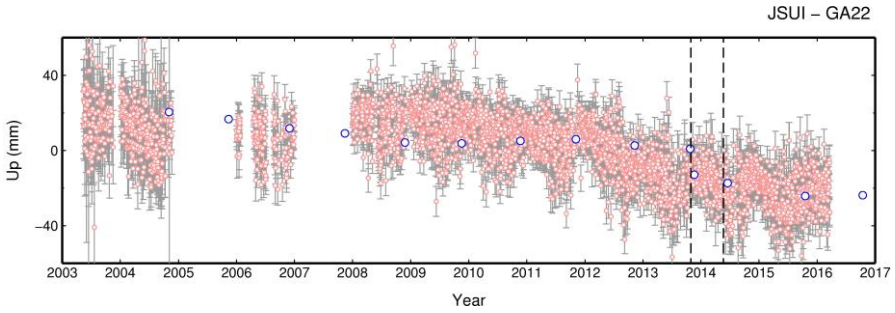


圖 2-3.98：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2013 年瑞穗地震；右邊虛線為 2014 年鳳林地震。

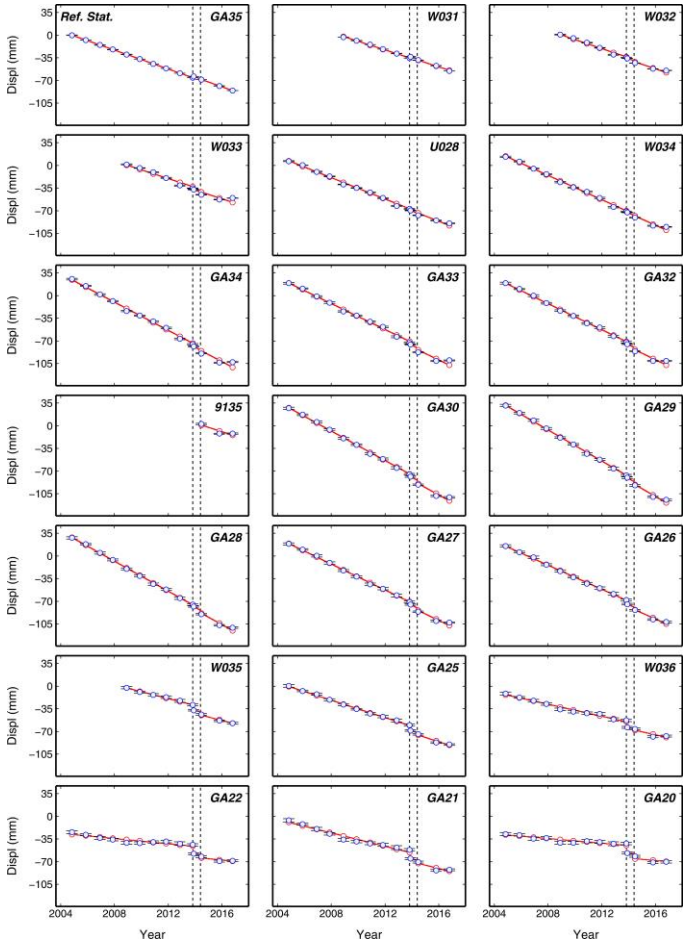


圖 2-3.99：紅葉至靜浦測線之時間序列。左邊虛線為 2013 年瑞穗地震；右邊虛線為 2014 年鳳林地震。

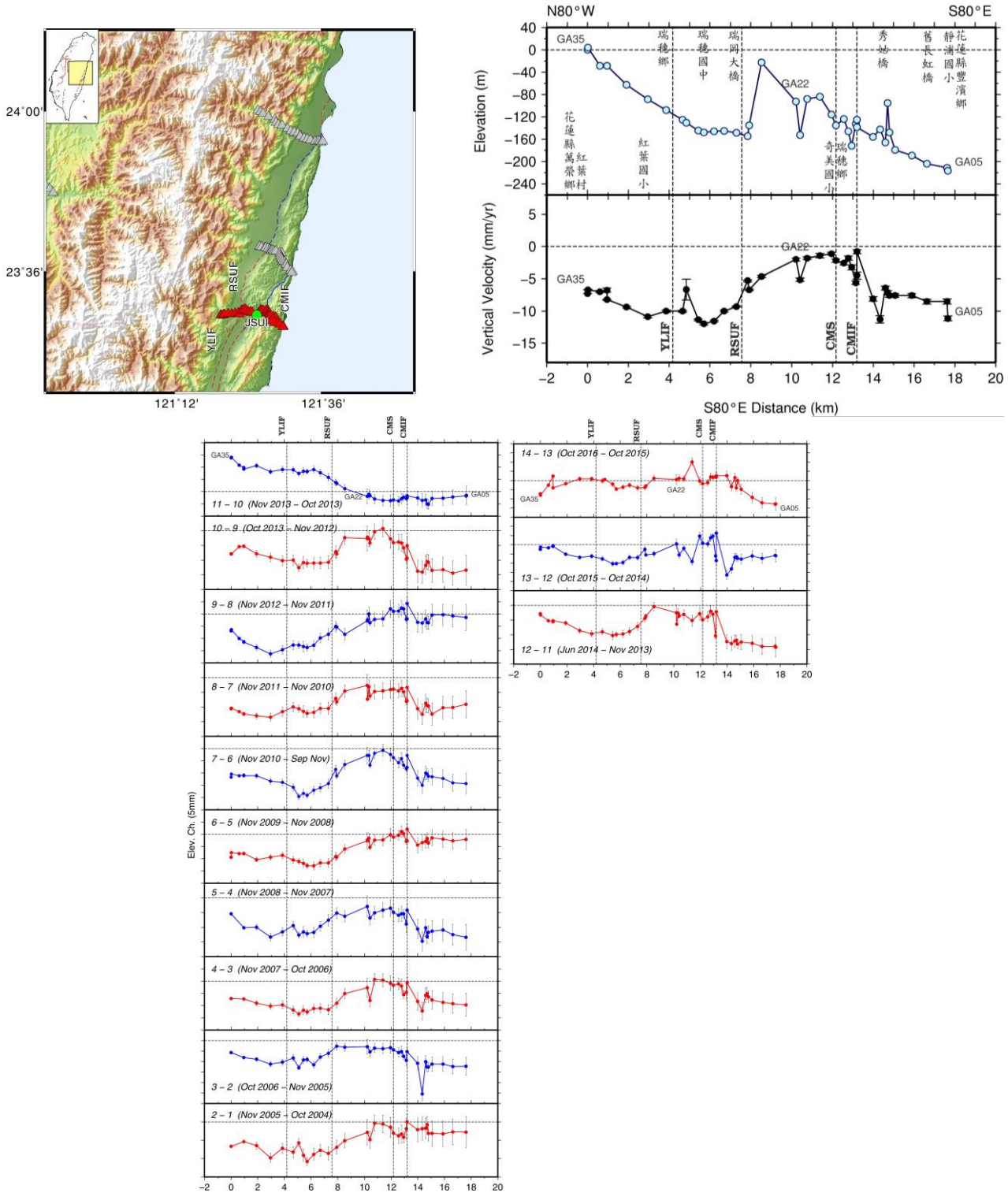


圖 2-3.100：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

2-3-27 東成至富岡測線

本測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層，測線長約 14 公里，2009 年至 2016 年間共進行 8 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 之垂直速率（-4.86 mm/yr），作為控制點來校正 A086 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3. 101）

根據圖 2-3.103，此測線之垂直速度在利吉斷層兩側有不同的形態，西側從東成跨過鹿野斷層到岩灣國小一帶，垂直速度約由-8 mm/yr 上升至 0.3 mm/yr；東側（岩灣國小至富岡）則約由 0 mm/yr 下降至-4.8 mm/yr。此外，從歷年高程變化來看，2014 年至 2015 年間，鹿野斷層以東有顯著的抬升，最大變化量達 25 mm；2015 年至 2016 年間，在鹿野斷層以西約 2 公里處則約有 20mm 的變化量，或許可說明鹿野斷層近期仍有活動。

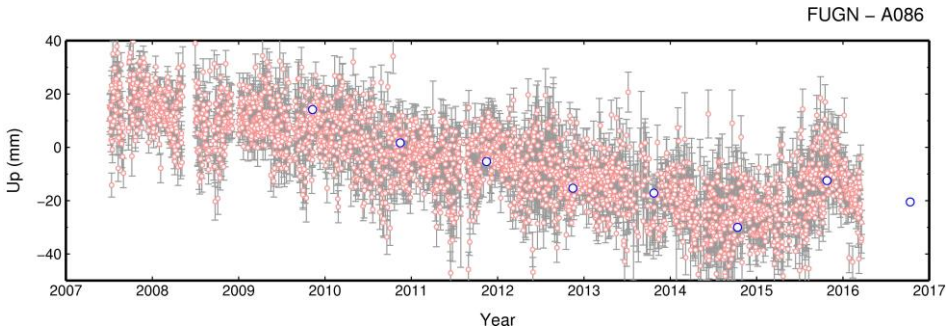


圖 2-3.101：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。

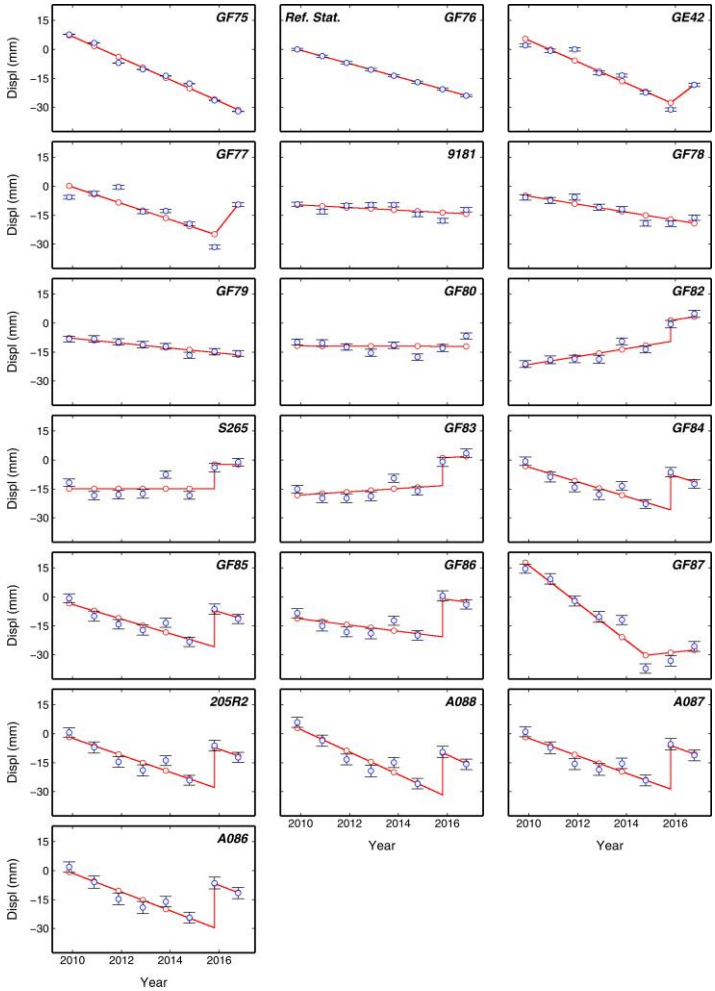


圖 2-3.102：東成至富岡測線之時間序列。

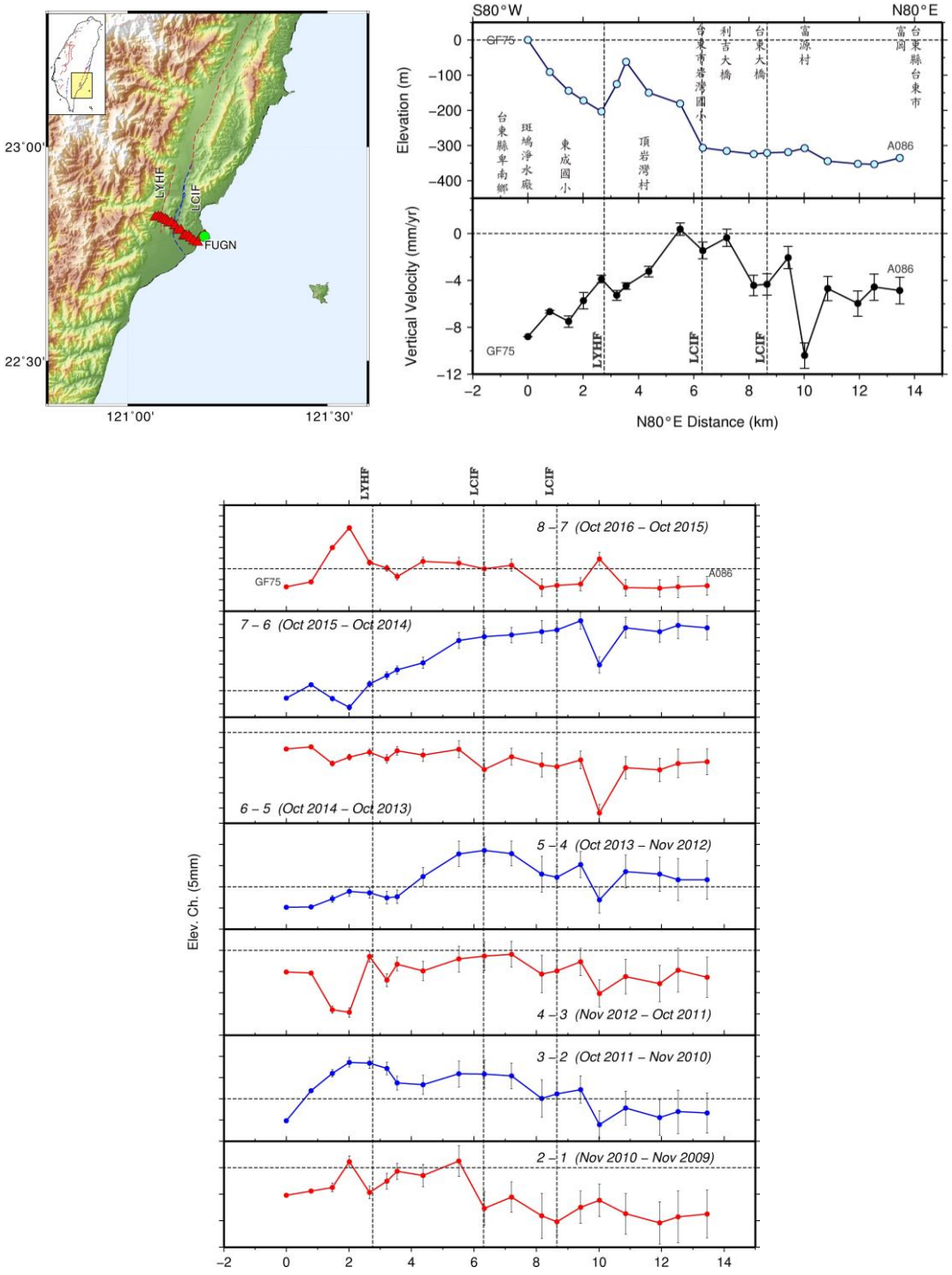


圖 2-3.103：東成至富岡測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

2-3-28 梗枋-東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長約 44 公里，2011 年至 2015 年間共進行 5 次施測。本測線以 GPS 連續站 SUAO 之垂直速率（-6.87 mm/yr），作為控制點來校正 GG83 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3. 105）

根據圖 2-3.107，該測線由宜蘭縣頭城鎮沿台 2 線至蘇澳鎮再轉接台 9 線至南澳鄉東澳村。在梗枋至蘭陽隧道前皆為蘭陽平原地區，故地表高程起伏較小，但自頭城鄉烏石港至五結鄉傳藝中心一帶，垂直速度約從 0 mm/yr 降至-15 mm/yr，，歷年高程（Oct 2015 – Oct 2014）也有 20 mm/yr 的變化量，顯示該區有地層下陷之情形。通過蘭陽隧道至東澳嶺一帶為丘陵及山地地形，因此地表高程有明顯的起伏。測線終點東澳一帶為三角洲，因此過東澳嶺一帶地形呈現下降的趨勢，垂直速度約在-5 mm/yr 至-13 mm/yr 之間。

水準點位 9053（永平橋）位於蘇花公路 116 公里處，近幾年有 3 ~ 7 公分的下陷。（圖 2-3.108）經現地勘查發現，該處有坍方情況發生，建議停止測量此點並另尋地基較穩固之處重新埋設此點，避免測量人員危險，另在運用資料時排除該點數據。

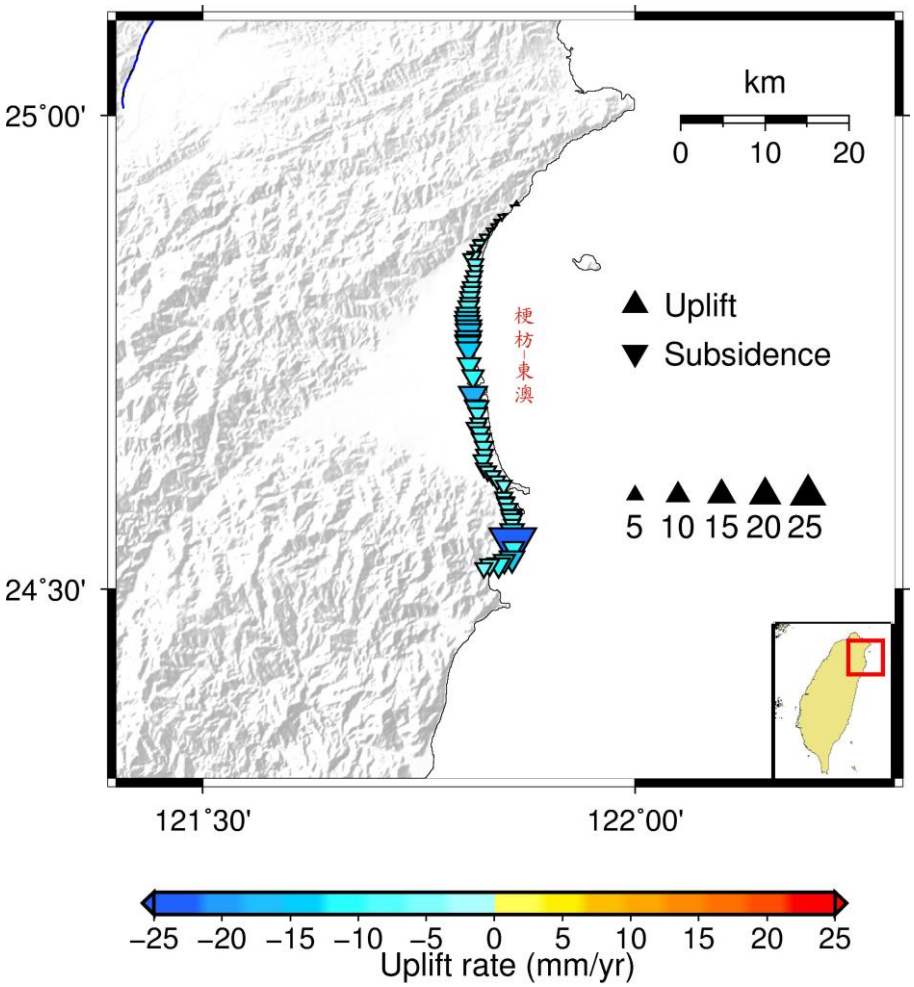


圖 2-3.104：宜蘭地區之水準垂直速度場。

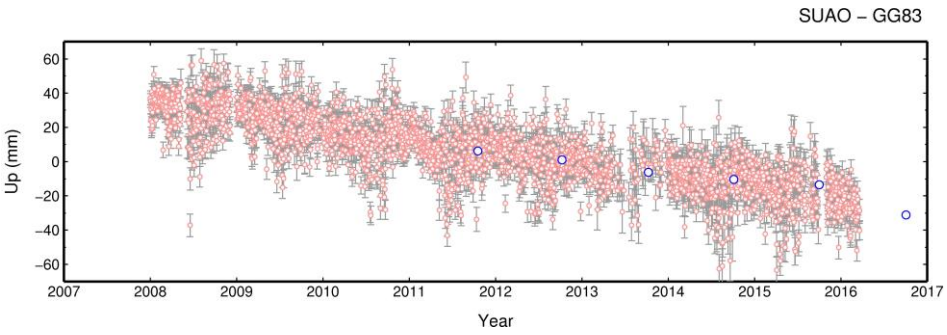


圖 2-3.105：水準點位 GG83 與連續站 SUAO 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

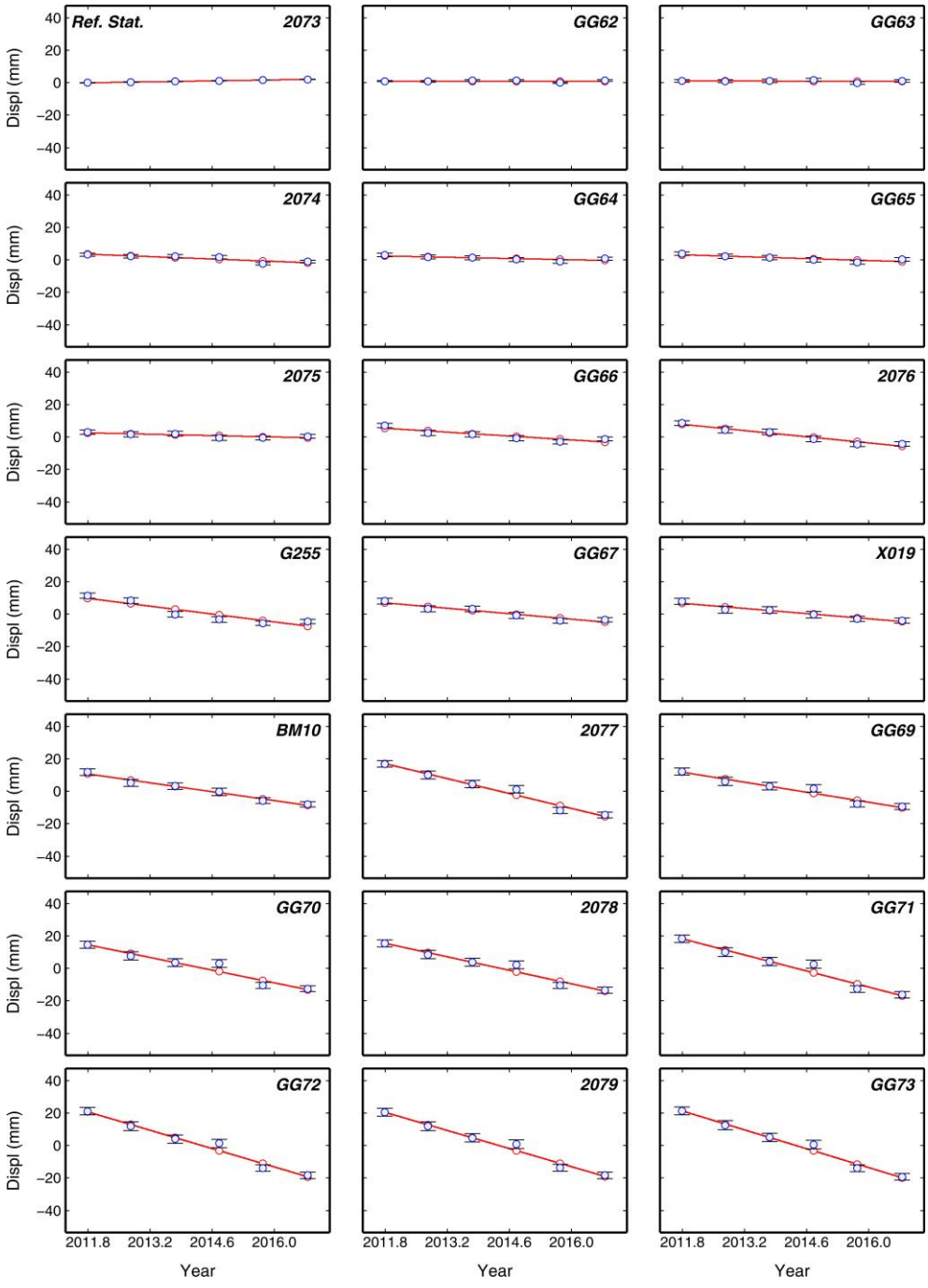


圖 2-3.106：梗枋至東澳測線之時間序列。

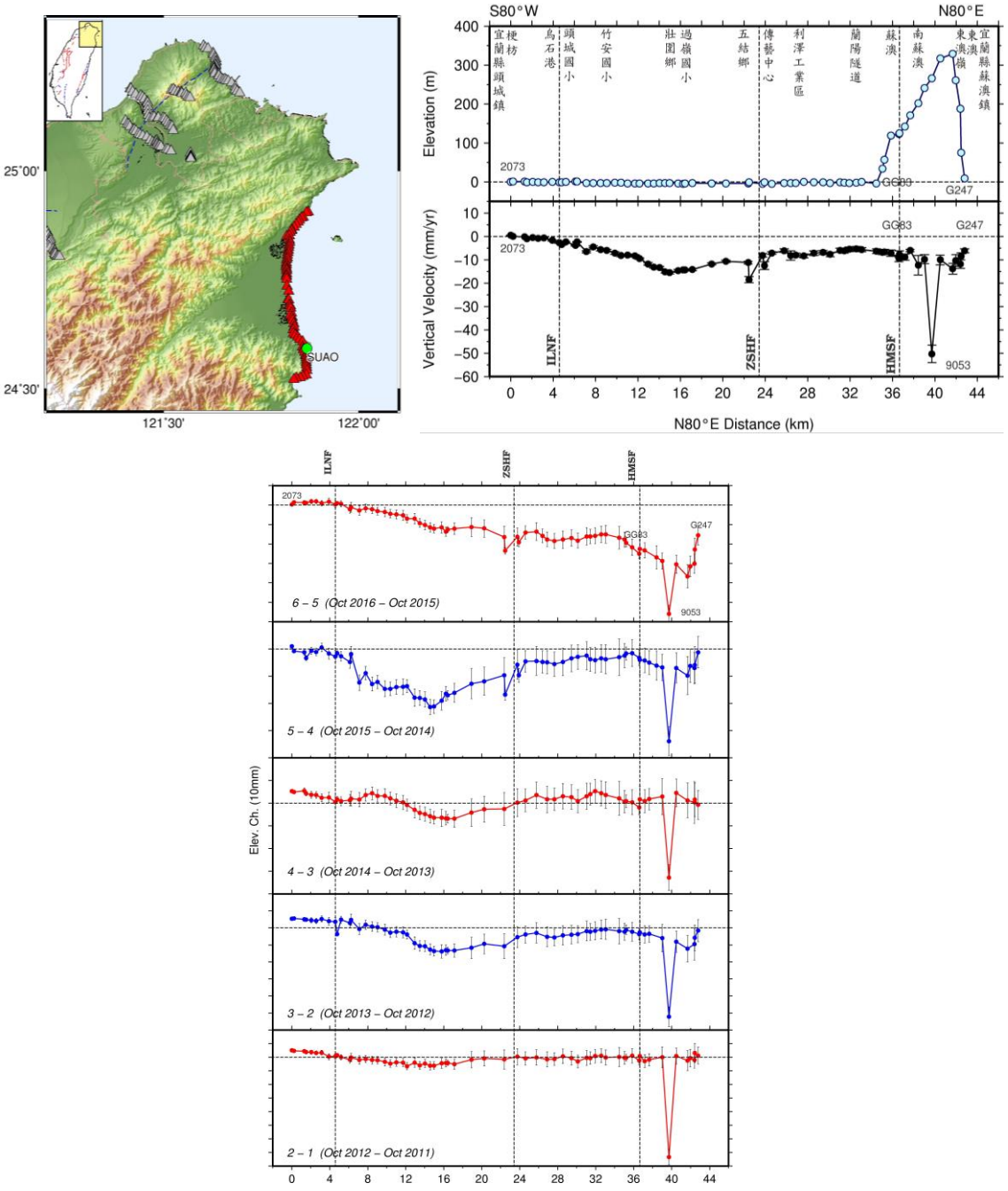


圖 2-3.107：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-3.2 所示。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水-梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。



圖 2-3.108：水準點位 9053 現地狀況。

2-4 全台地表速度場分析

2-4-1 GPS 觀測成果分析

由解算結果可知臺灣地區 2002~2016 年連續站水平速度分布如圖 2-4.1 及圖 2-4.2，桃竹苗地區在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0~10 mm/yr。

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

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

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

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

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

由 GPS 連續站時間序列可發現觀測期間所發生之主要地震，會影響地表位移速度場分布情形，因此我們針對 2003 年成功地震、2006 年卑南地震、2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震、2016 年美濃地震，分為六個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-4.3。

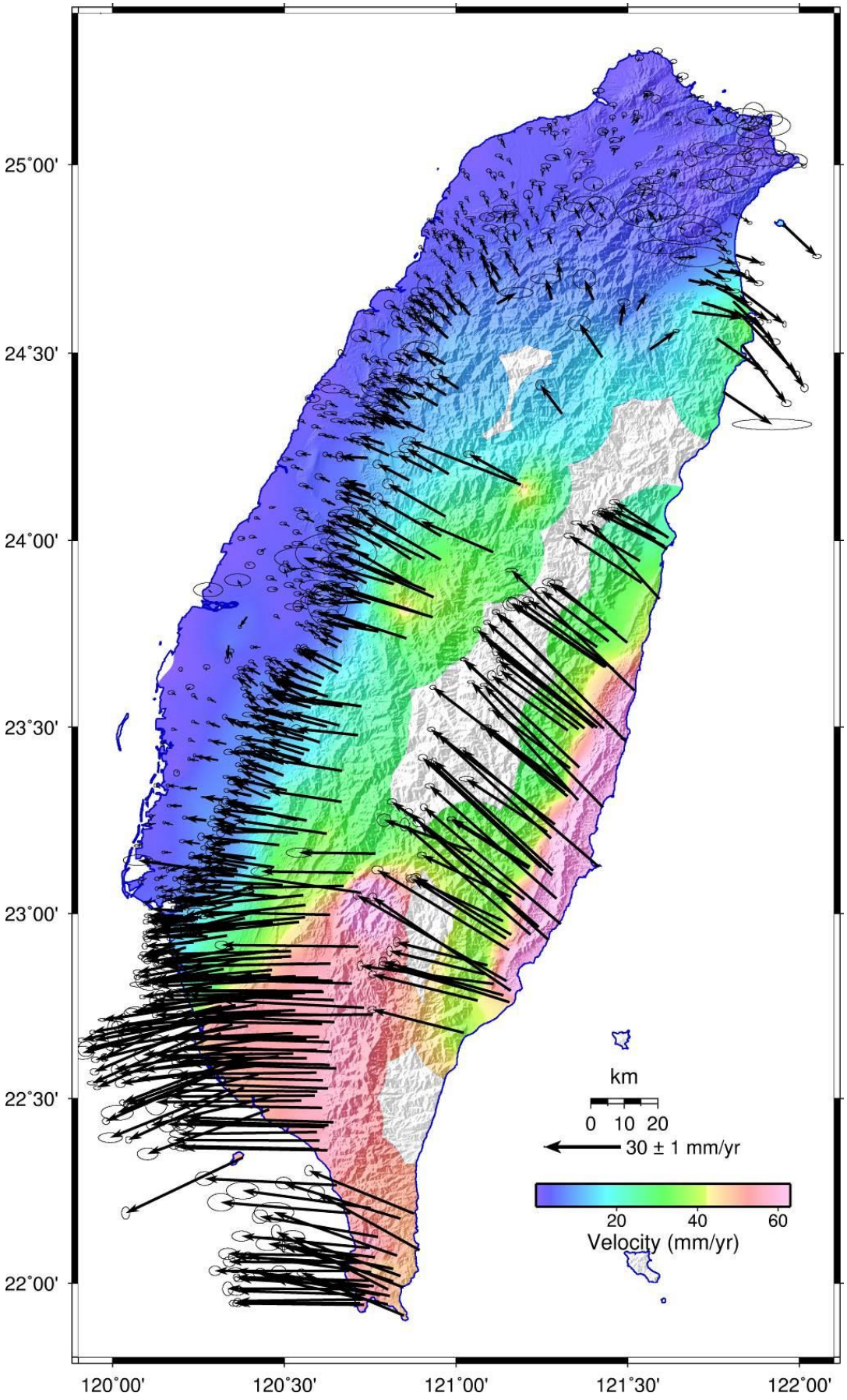


圖 2-4.1：2002 至 2016 年臺灣地區 GPS 移動測站及連續站相對於澎湖白沙站（S01R）之速度場分布圖。

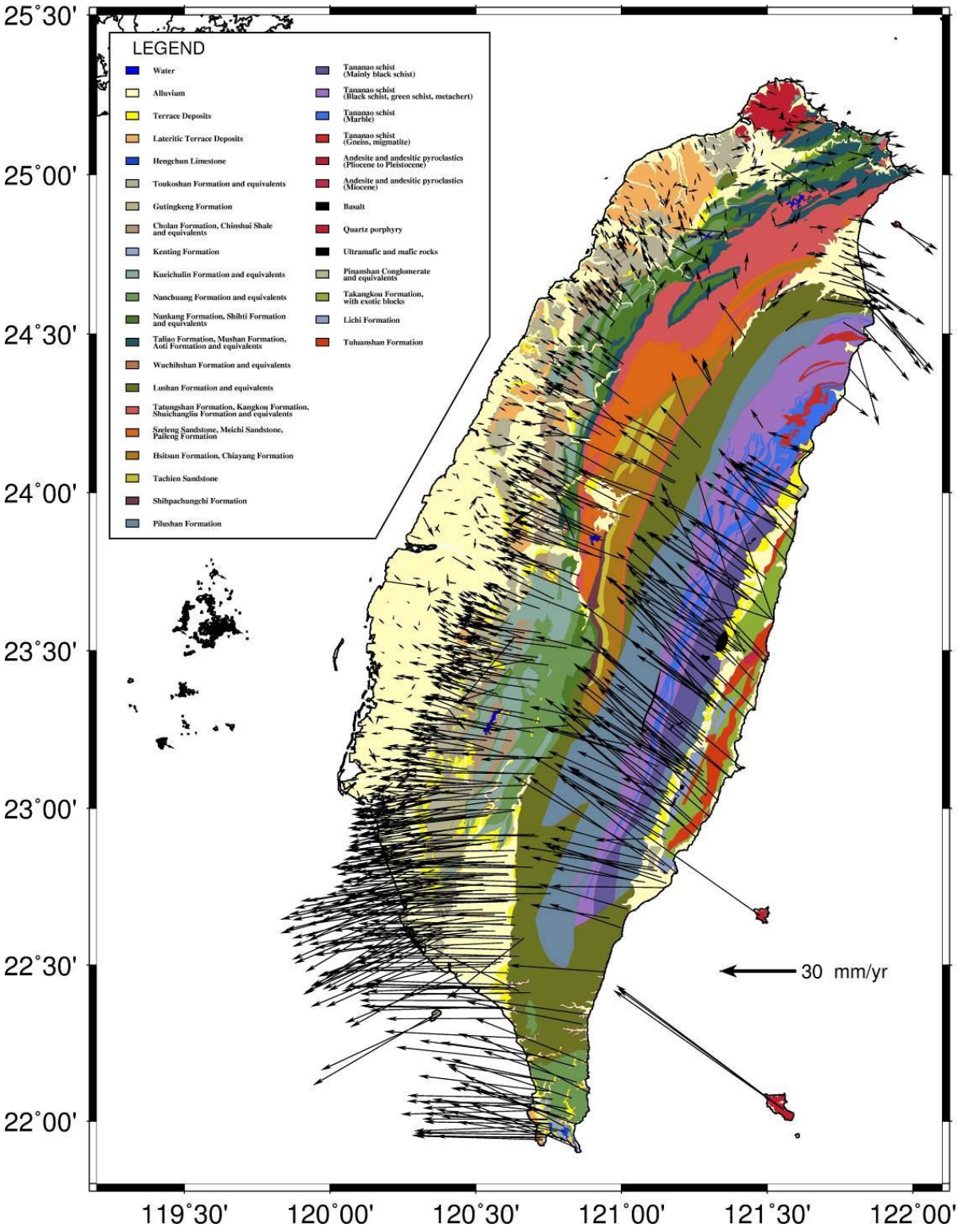


圖 2-4.2：台灣地質圖及 2002 至 2016 年臺灣地區 GPS 移動站及連續站相對於澎湖白沙站（S01R）之水平速度場分布圖。。

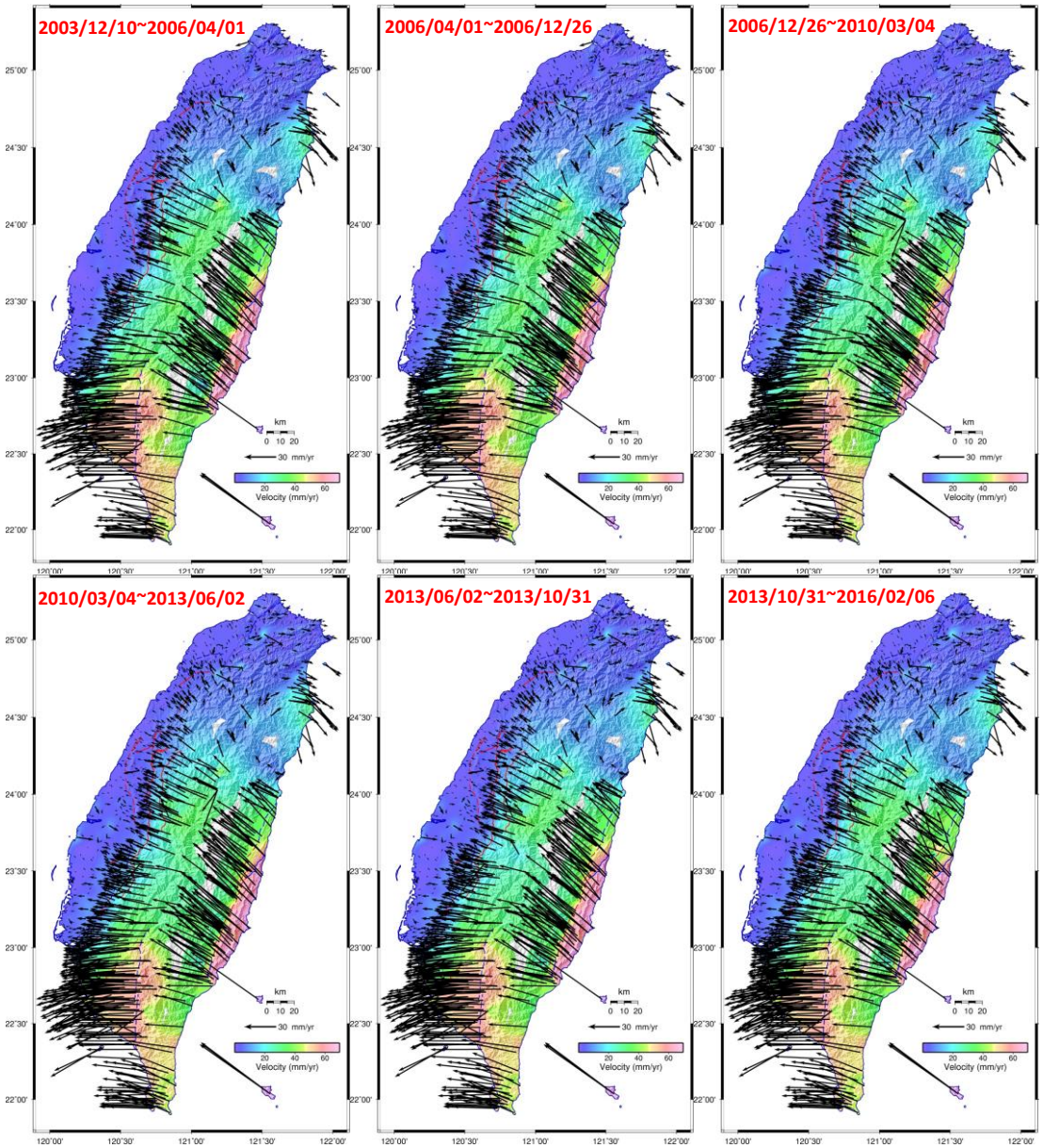


圖 2-4.3：2003 至 2016 年臺灣地區 GPS 移動站及連續站相對於澎湖白沙站（S01R）主要地震事件分段時間段速度場分布情形。

2-4-2 精密水準觀測成果分析

根據圖 2-4.4 與圖 2-4.5，大台北地區之四條精密水準，皆為穩定沉陷，垂直速度大約落在-10 mm/yr 內。桃園地區之精密水準，除跨獅潭斷層附近點位有些微的抬升速度(約 0 至 1 mm/yr)，其餘點位之垂直速度約在-2 至 0 mm/yr。新竹地區之兩條精密水準在跨斷層速度並無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。苗栗地區之精密水準在跨斷層變化也不顯著，速度皆約在-5 mm/yr 上下。台中地區之兩條精密水準在跨斷層也無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。彰化、南投地區之精密水準在沿海一帶有相當大的沉陷量，最大沉陷速度達到-40 mm/yr，而進入南投山區最大有約 10 mm/yr 的抬升速度。雲林、嘉義地區之精密水準，在沿海一帶的垂直速度約為-20 至-15 mm/yr，而進入山區則約有 3 mm/yr 的抬升速度。台南地區之北門-楠西測線，也是呈現沿海沉陷、山區抬升的現象，平均垂直速度分別為-10 mm/yr 與 7 mm/yr；善化-關廟測線除少數點位沉陷，其餘大多落在 0-4 mm/yr 之間；安平-龍崎測線在龍船斷層附近約有 20 mm/yr 的速度變化，由於此變化有可能是受到背衝斷層、活動褶皺或是泥貫入體的影響所造成，所以和龍船斷層的具體關聯性，需要其他更多的地球物理觀測，如高精度之地震層析成像、地電、重力等，來協助解析。。而高雄地區的路竹-茂林測線同樣也在龍船斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，或許可說明龍船斷層仍有活動；岡山-安坡測線在小崗山斷層西側約有-10 mm/yr，東側則約在-3 至 0 mm/yr。屏東地區之佳冬-七佳測線，在觸口斷層以西約有-20 mm/yr 的沉陷速度，東側則無顯著變化。恆春半島地區的時間段為 2010 至 2016 年，在恆春斷層以東有些微的抬升現象，速率 3 mm/yr。宜蘭地區之梗枋-東澳測線在頭城鎮至五結鄉一帶，垂直速度最大達-18 mm/yr，進入蘇花公路(蘇澳至東澳段)，垂直速度則約在-10 mm/yr。花蓮地區之嶺頂-瀧澗測線之垂直速度，由西向東一路遞減，約由 5 mm/yr 降至-10 mm/yr；光復-豐濱測線僅在跨瑞穗斷層後在海岸山脈一帶約有 5 mm/yr 之抬升速度；紅葉-靜浦測線之垂直速度皆為負值，但在跨瑞穗斷層後由約由-10 mm/yr 升至-1 mm/yr。台東地區之東成-富岡測線之垂直速度在利吉斷層兩側有不同的運動型態，西側為抬升（約由-8 mm/yr 上升至 0.3 mm/yr），東側為沉降（0 mm/yr 下降至-4.8 mm/yr）。

由 GPS 連續站、移動站及精密水準之垂直速度場可發現觀測期間所發生之主要地震，會影響地表垂直速度場變化情形，因此我們針對 2003 年成功地震、2006 年卑南地震、2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震、2016 年美濃地震，分為六個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-4.6。

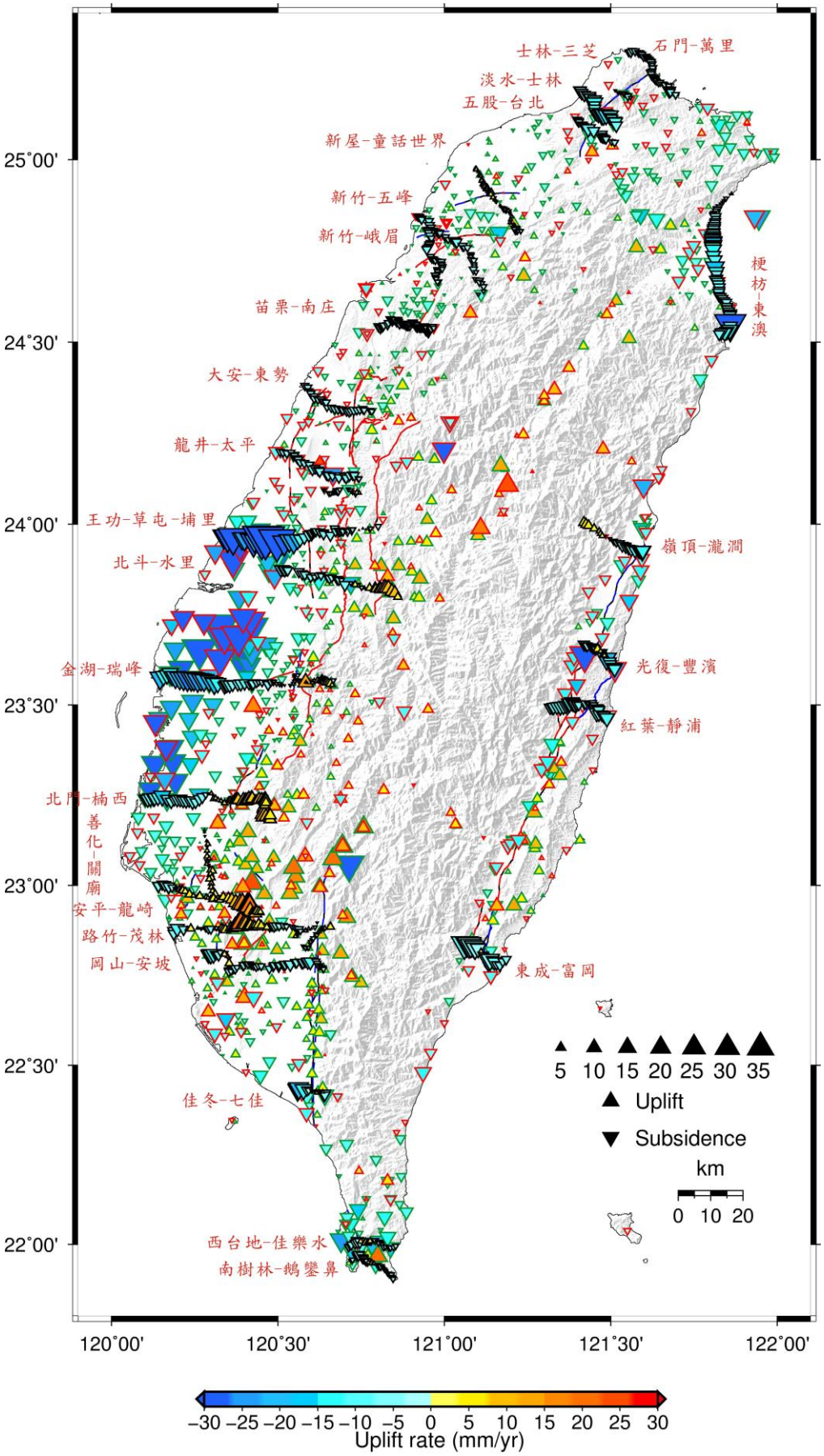


圖 2-4.4：2002 年至 2016 年全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示連續站、紅色邊框表示移動站。

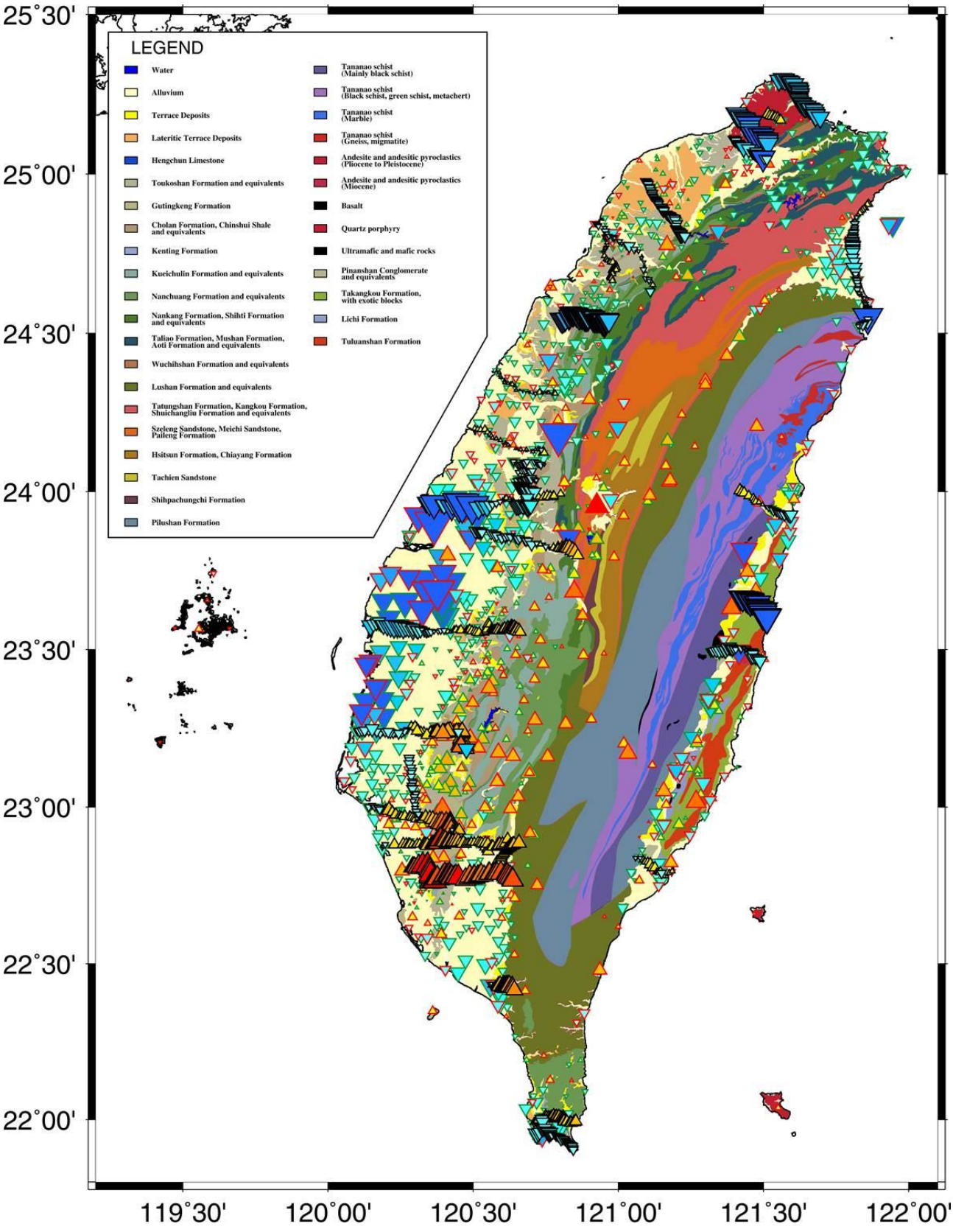


圖 2-4.5：全臺地質圖及 2002 年至 2016 年垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示連續站、紅色邊框表示移動站。

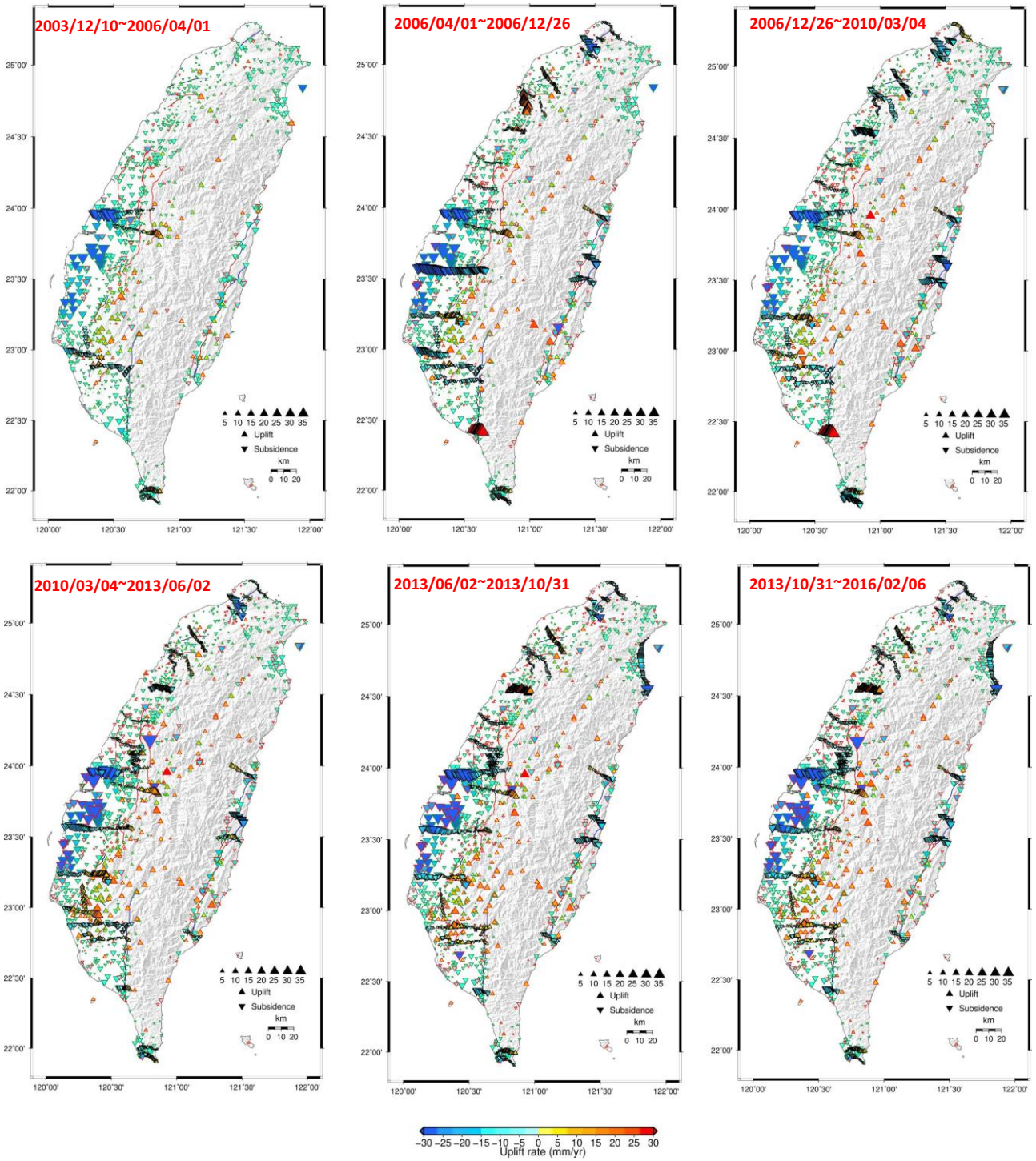


圖 2-4.6：2003 年至 2016 年全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示連續站、紅色邊框表示移動站。

2-5 東部地區應變矩率及地震矩率之分析討論

2-5-1 東部地區 GPS 速度場

分析東部地區 GPS 水平速度場結果發現（圖 2-5.1），整個東部地區（包含花蓮地區），由北至南分段解釋，以嶺頂斷層為分界，東西兩側有速度變化約 10 mm/yr。在奇美斷層－池上斷層－利吉斷層系統之間，縱谷斷層系統兩側沿線間有顯著的速度梯度變化，其速度值由約 60~70 mm/yr 降至約 40~50 mm/yr。

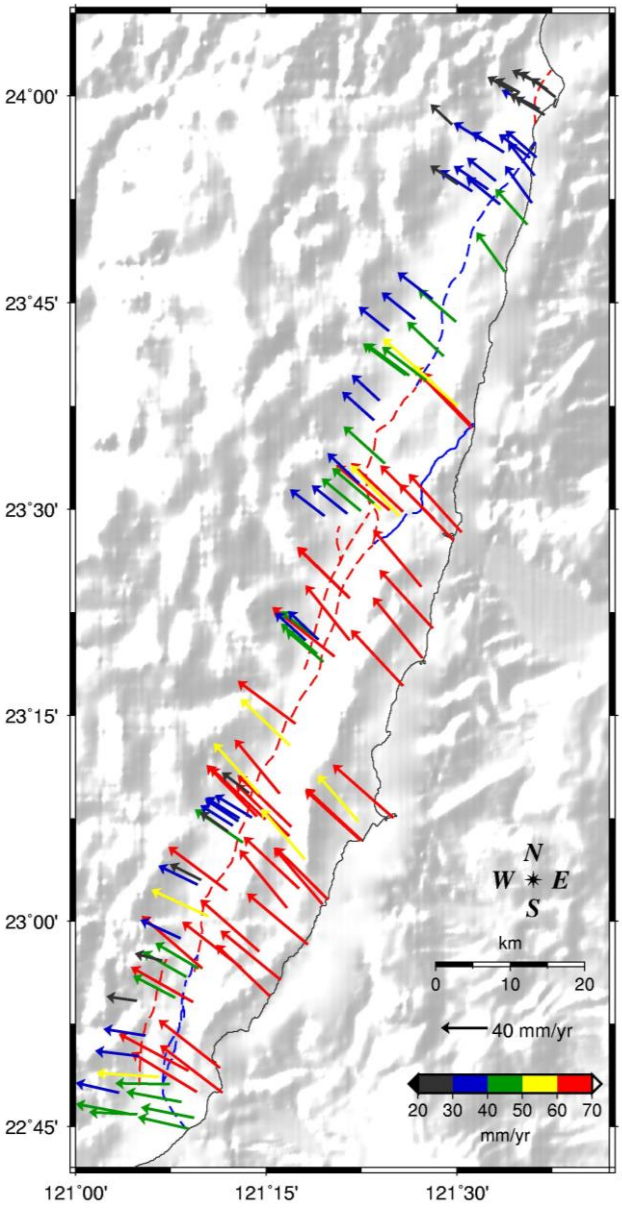


圖 2-5.1：東部地區相對於澎湖白沙（S01R）之 GPS 水平方向速度場。

2-5-2 東部地區 GPS 應變率場

東部地區之應變率最大的區域主要集中在瑞穗斷層－玉里斷層－池上斷層之間西側沿線一帶，最大值介於-5.11 μstrain/yr（圖 2-5.2）。

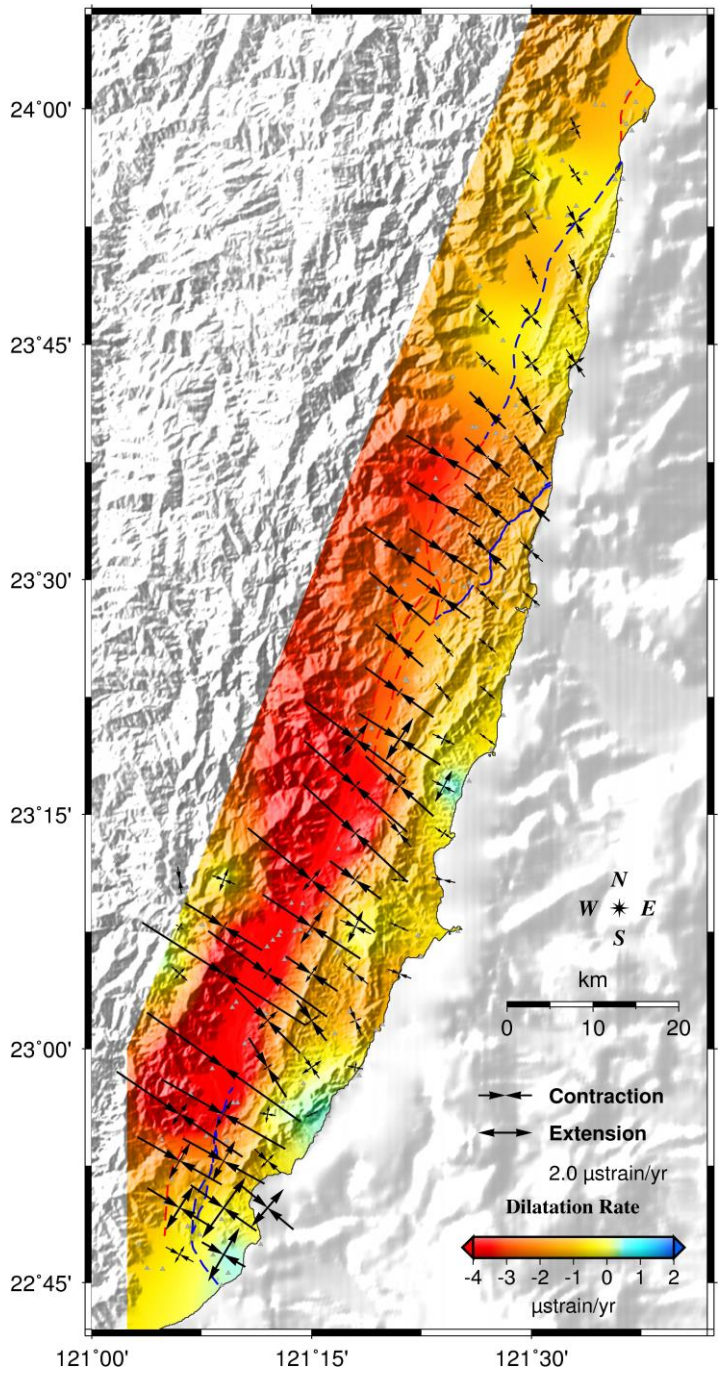


圖 2-5.2：東部地區應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

2-5-3 東部地區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，其矩率值集中在 4×10^{16} ~ 3.6×10^{17} Nm/yr 之間，最大量值（4.2×10^{17} Nm/yr）主要顯示在瑞穗斷層－玉里斷層－池上斷層之間西側沿線一帶。圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑為 15 km。

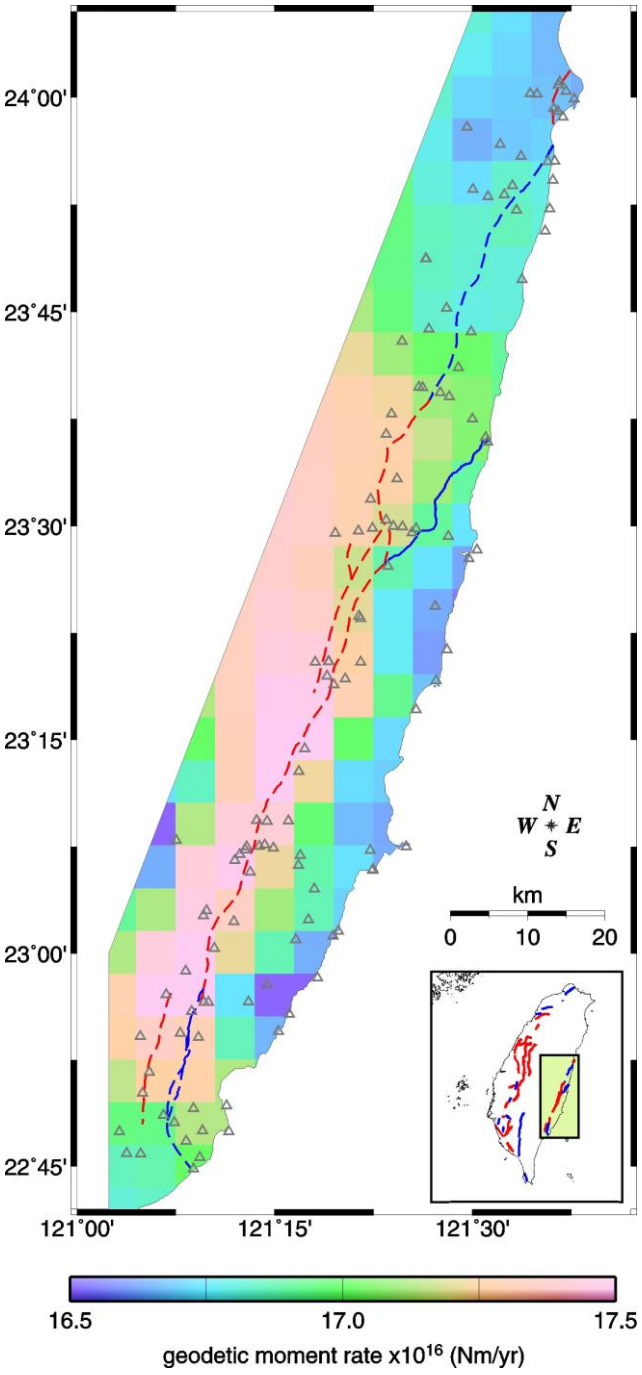


圖 2-5.3：最小大地測量矩率分布圖。三角形顯示 GPS 測點之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察之易讀性，故求其指數值以色階表示。

2-5-4 東部地區地震矩率

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 2002~2016 年臺灣地區偵測到之有感地震事件，總計 348,166 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，臺灣東部地區自 2002~2016 年之地震事件總計 63,682 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 0~50 km。亦即深度 50 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）。因此，本研究假設臺灣東部地區之地殼發震深度為 50 km，將 63,682 筆地震事件，再以深度＜50 km 及 Mw ≧3 之條件進行篩選，最終選出 6,362 筆地震，並將其視為臺灣東部地區發震深度內之主要發震事件。

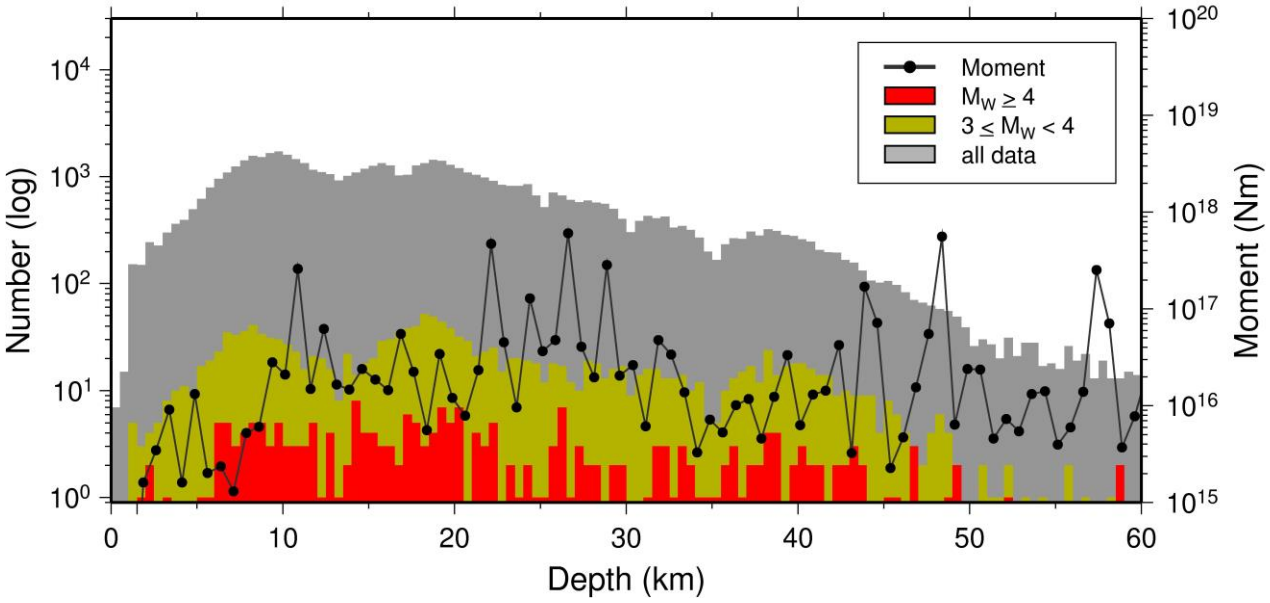


圖 2-5.4：2002~2016 年之地震資料品質展示。長條圖顯示地震數量在深度之分布情形；折線圖反映地震矩率在各個深度區間累積之情形。

2-5-4-2 地震矩率計算

圖 2-5.5 顯示東部地區於 2002~2016 年期間受地震影響最大的一起地震報告。

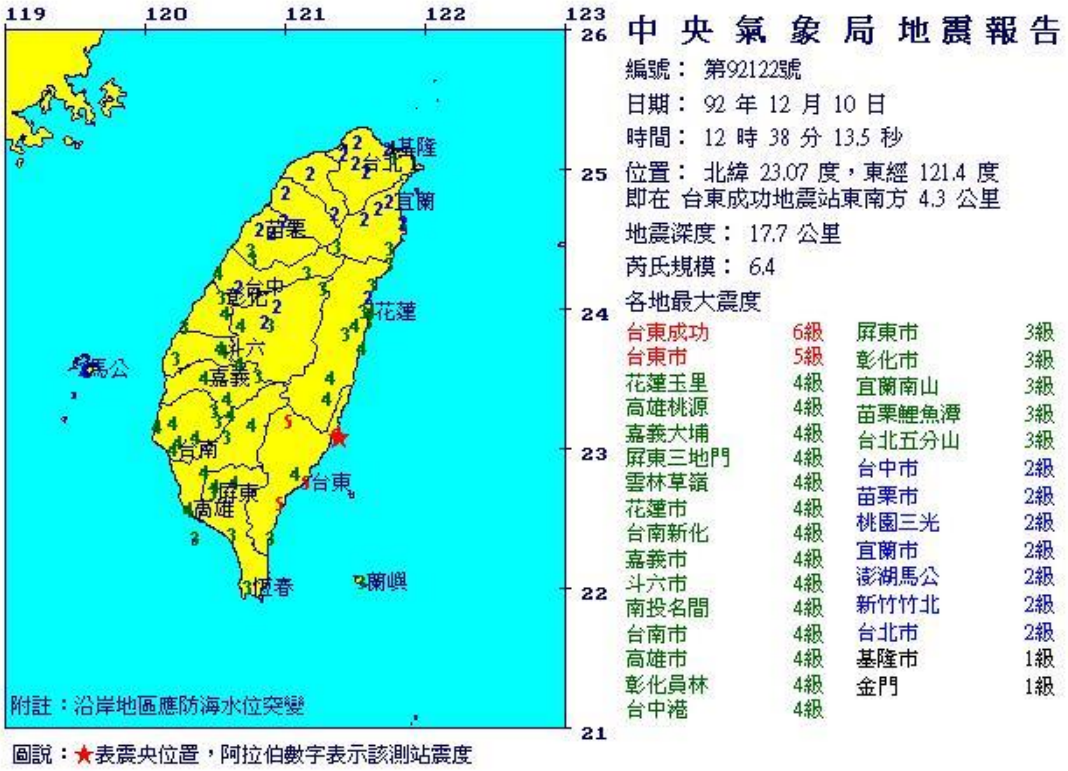


圖 2-5.5： 2003 年 12 月 10 日成功地震，規模 6.4，深度 17.7 公里。資料來源：中央氣象局。

計算震矩規模、地震矩率使用公式如下：

$$M_W = (0.931 \pm 0.017) M_L - (0.107 \pm 0.081) \quad \text{（式 2-5.1）}$$

$$M_W = 2/3 \times \log_{10} M_0 - 6.0 \quad \text{（式 2-5.2）}$$

$$\dot{M}_0 = \sum M_0 / \Delta t \quad \text{（式 2-5.3）}$$

採用氣象局所記錄之芮氏地震規模 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），將每筆地震之 M_L 轉換為地震矩規模 M_W（moment magnitude scale），再將獲得的 M_W 經由 Kanamori（1977）提出之經驗公式（2-5.2）換算為地震矩 M_0（seismic moment），M_0 代表每筆地震所釋放之能量量值。為了計算地震矩率 $M_{0\,rate}$（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（2012~2016 年）。

2-5-4-3 地震矩率分布圖

為了計算地震矩率 $M_{0\,rate}$（seismic moment rate），以等間距地震矩率（seismic moment rate）（圖 2-5.6）呈現，研究區域中其矩率值集中在 1×10^{14} - 2×10^{17} Nm/yr 之間，地震矩率最大值介於為 8×10^{16} Nm/yr - 2.2×10^{17} Nm/yr，位置位於臺東成功一帶，圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑 15 km。

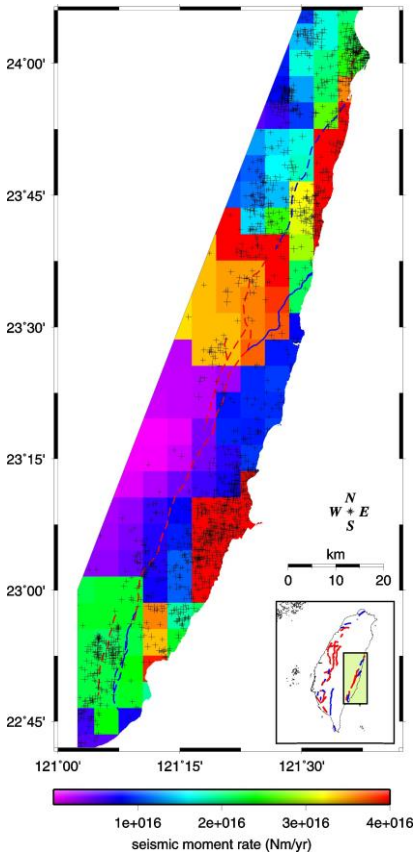


圖 2-5.6：地震矩率分布圖，黑色十字顯示地震之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察的易讀性，故求其指數值以色階表示之。

兩種矩率依照取樣格點統計，如圖 2-5.7 所示，最小大地測量矩率之量值主要集中於 4×10^{16} ~ 3.6×10^{17} Nm/yr，地震矩率則介於 1×10^{14} ~ 2×10^{17} 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，顯示臺灣東部地區在觀測期間，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 moment rate），代表能量在地殼中所承載與發震釋放之差距。圖 2-5.8（A）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瑞穗斷層－玉里斷層－池上斷層之間西側沿線一帶。將兩種矩率相除，可求得矩率比值（ratio of moment rate），矩率比值圖（圖 2-5.8（B））之分布形態近似於地震矩率圖（圖 2-5.6）。若把矩率虧損視為最小大地測量矩率與地震矩率之絕對相差量，則矩率比值可視為相對之相差量。兩者差距之能量可能在未來以地震形式來釋放－能量累積於彈性地殼中，瞬間釋放造成地震，或是以無震（aseismic）形式釋放－能量隨著塑性地殼之形變逐漸釋放。由目前的速度變化形態分析結果暗示，這些能量差異可能是以無震（aseismic）的形式進行釋放。

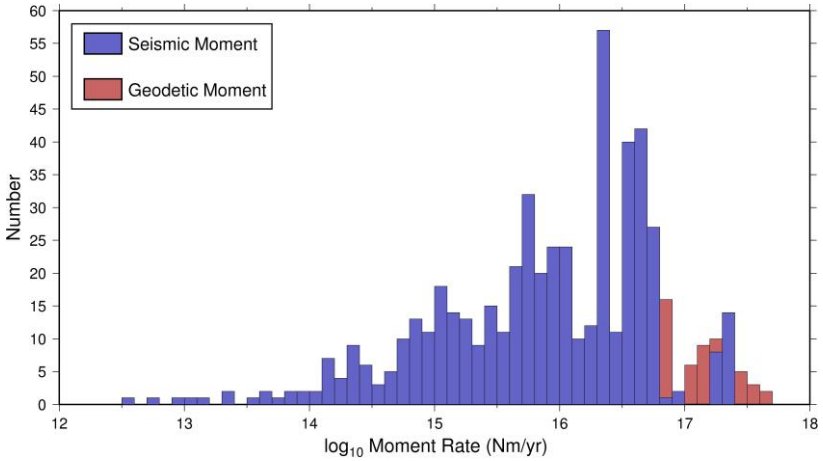


圖 2-5.7：臺灣東部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。

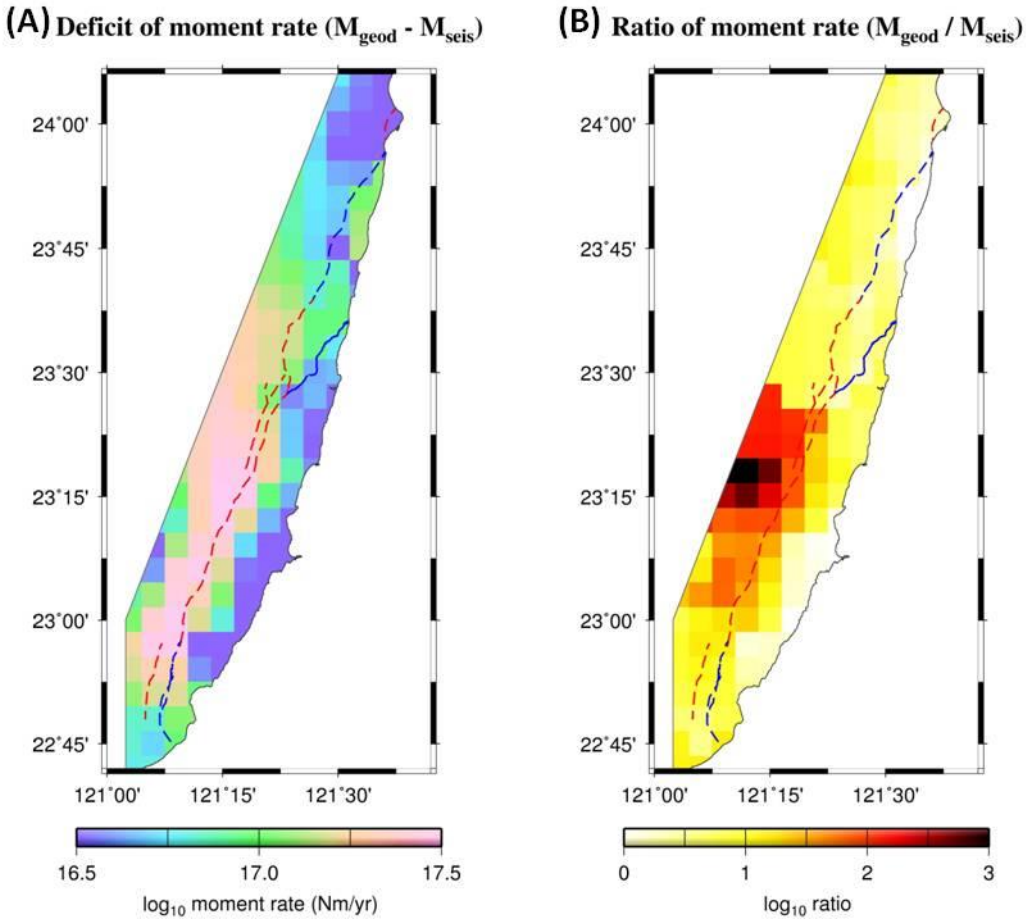


圖 2-5.8：臺灣東部地區矩率綜合分析圖：（A）矩率虧損圖，由最小大地測量矩率扣除地震矩率。（B）矩率比值圖，由最小大地測量矩率除以地震矩率。

2-6 PS-INSAR

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

歐洲太空總署（European Space Agency，ESA）於 1991 年 7 月發射 ERS-1 衛星，並於 1995 年發射同系列的 ERS-2 衛星，波長為 C 波段。ENVISAT 為 ERS-1/2 後續繼承任務的衛星，於 2002 年發射，同樣為 C 波段。此外，ALOS 衛星於 2006 年 1 月 24 日發射，並於 2006 年 2 月 16 日拍攝第一幅影像，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。

本計畫針對所有衛星所拍攝的 SAR 影像都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。

本研究團隊目前使用於地殼變形監測之雷達影像分別有以下衛星、波段（圖 2-6.1）及所使用的時間區間：

（1） C 波段之 **ERS-1/2** 衛星 SAR 影像時間：
時間涵蓋從 1995 年 6 月至 1999 年 9 月。

（2） C 波段之 **ENVISAT** 衛星 SAR 影像時間：
時間涵蓋從 2006 年 3 月至 2009 年 6 月。

（3） L 波段之 **ALOS** 衛星 SAR 影像時間：
時間涵蓋從 2007 年 1 月至 2010 年 12 月。

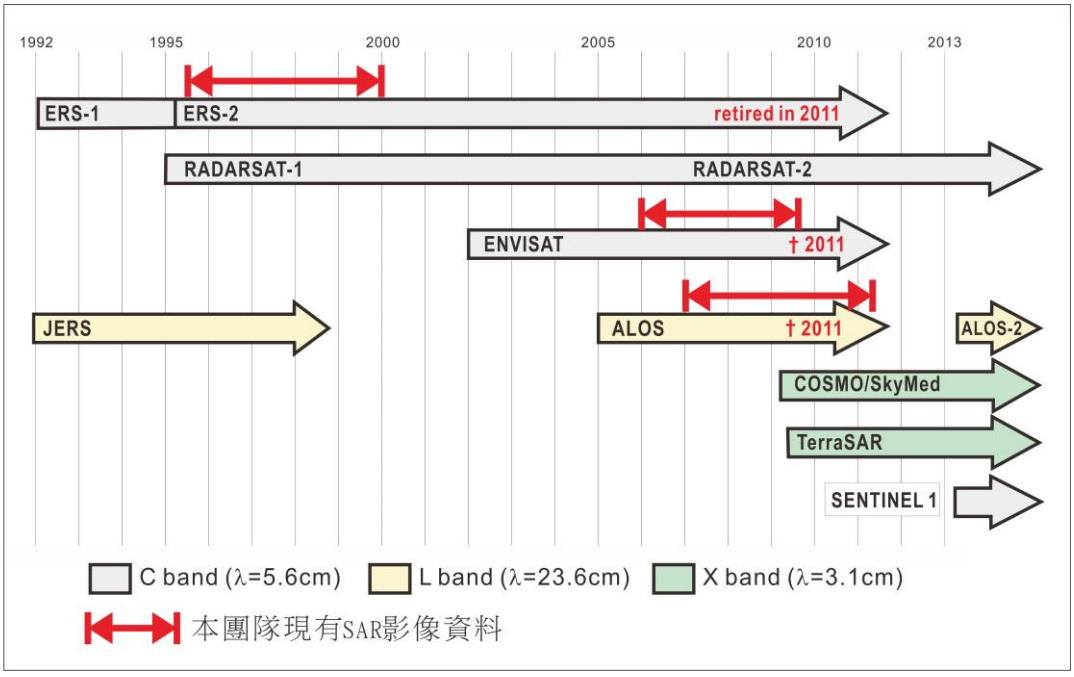


圖 2-6.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。

2-6-1 ERS1/2 (1995/6~1999/9)

本計畫選取 ERS-1/2 衛星 SAR 影像區域為衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123 和 3141，如圖 2-6.2 所示。影像時間從 1995 年 6 月至 1999 年 9 月。本研究利用時間基線、空間垂直基線、都普勒中心頻率及熱雜訊挑選出適當影像作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-6.3 與圖 2-6.5 所示。在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將影像製作出 N-1 張干涉條紋圖（圖 2-6.4 與圖 2-6.6）。

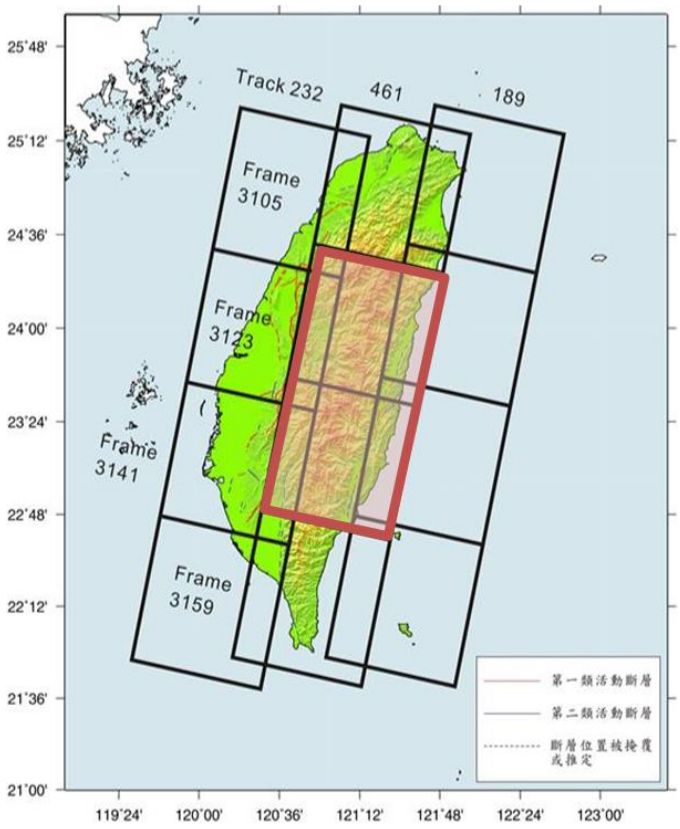


圖 2-6.2：ERS-1/2 衛星選取區域涵蓋圖，衛星軌道 461，像幅編號 3123 和 3141。

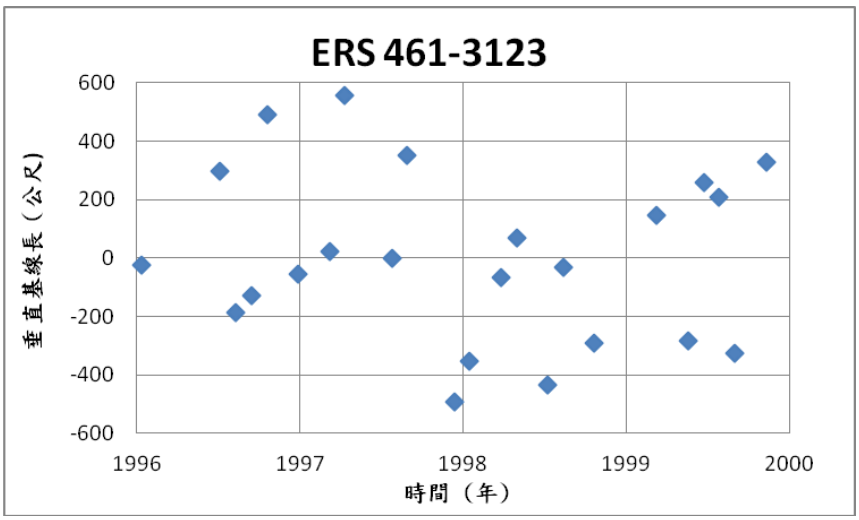


圖 2-6.3：ERS-1/2 衛星軌道 461，像幅編號 3123 影像時間與垂直基線相對關係。

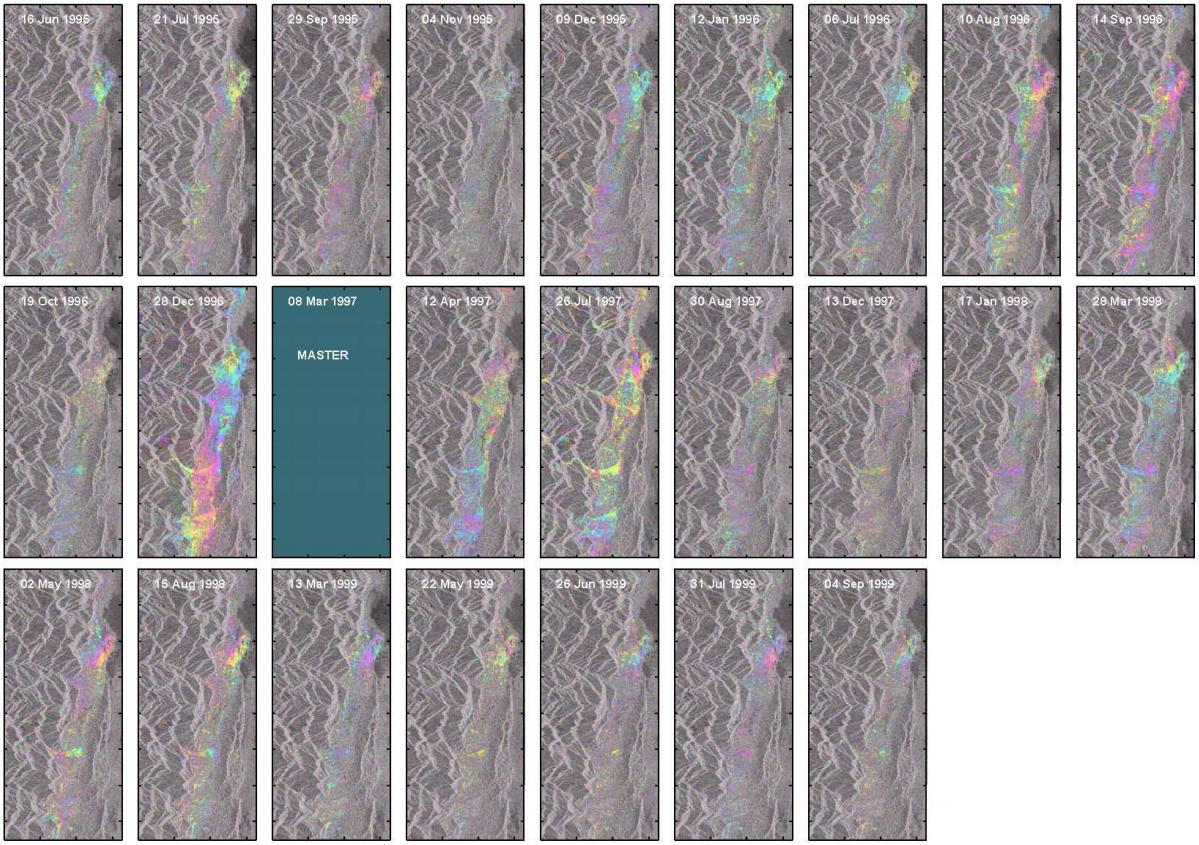


圖 2-6.4：利用 ERS-1/2 衛星軌道 461，像幅編號 3123 共 25 幅影像，以 1997/03/08 為主影像所獲得 24 幅差分干涉圖之結果。

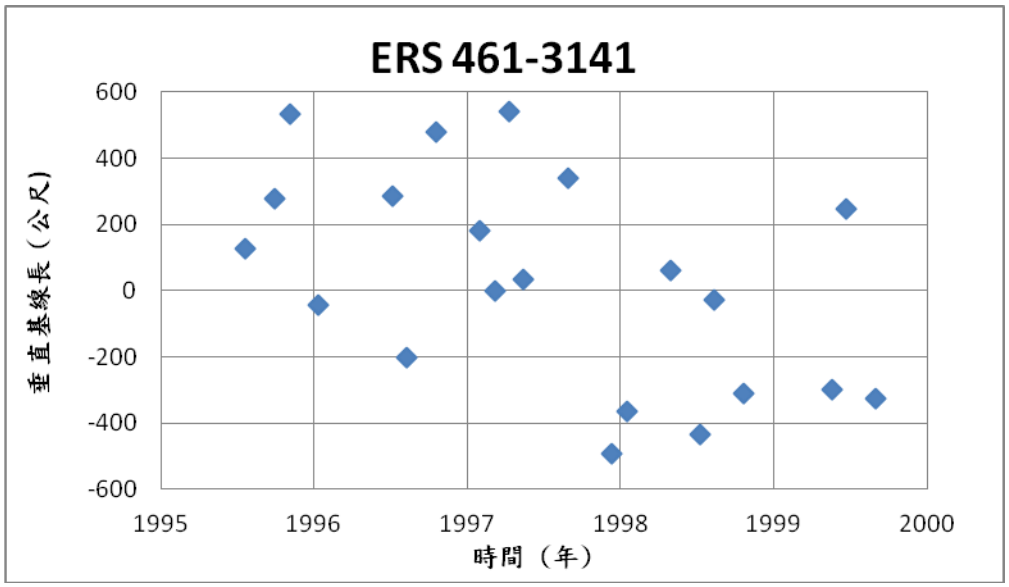


圖 2-6.5：ERS-1/2 衛星軌道 461，像幅編號 3141 影像時間與垂直基線相對關係。

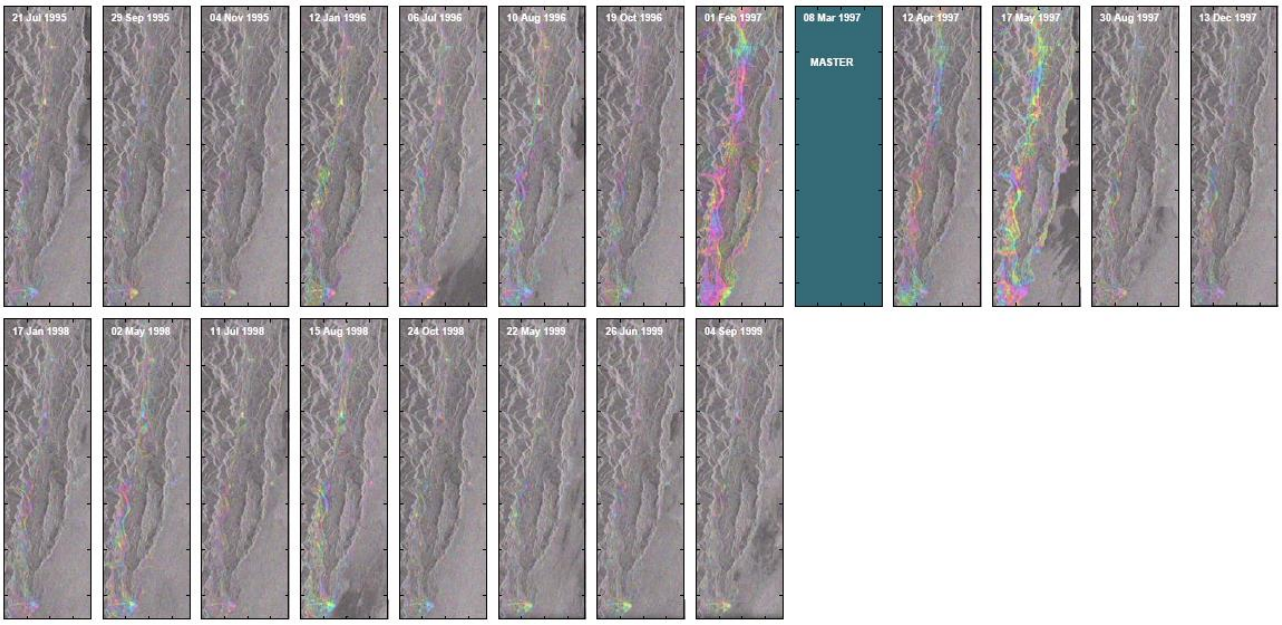


圖 2-6.6：利用 ERS-1/2 衛星軌道 461，像幅編號 3141 共 21 幅影像，以 1997/03/08 為主影像所獲得 20 幅差分干涉圖之結果。

首先經由時間基線、空間垂直基線、都普勒中心頻率挑選出 1997 年 3 月 8 日為主影像，並篩選垂直基線小於 600 公尺，做為後續計算速度場的影像資料。由於東部地區除縱谷外，多為高山或植被所覆蓋，故 ERS 衛星所使用的 C 波段波長較短無法穿透來形成較好的干涉訊號。由圖 2-6.4 可見，影像中干涉條紋大多產生於東部地區北邊接近花蓮市區、壽豐溪谷及鳳林鎮區域，中央山脈山區則無法產生明顯的干涉條紋。圖 2-6.6 顯示南邊干涉結果普遍比北邊較差，干涉成果主要集中在臺東市區，只有部分影像在縱谷區域有清晰可見的干涉條紋。

圖 2-6.7 即為 ERS 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。結果顯示北段花蓮地區由西向東呈現視衛星方向速度由接近 0 慢慢轉為負值，但跨過斷層並無明顯的速度梯度差異。而中段則明顯看出玉里斷層與池上斷層間有明顯的視衛星方向遠離及跨過更南側的池上斷層向東也有相當明顯的速度梯度差異，轉換為視衛星方向拉近。往南到利吉斷層與鹿野斷層速度梯度差異雖變小，跨過利吉斷層還是可見速度梯度差異，與池上斷層類似，約有將近 10 mm/yr。

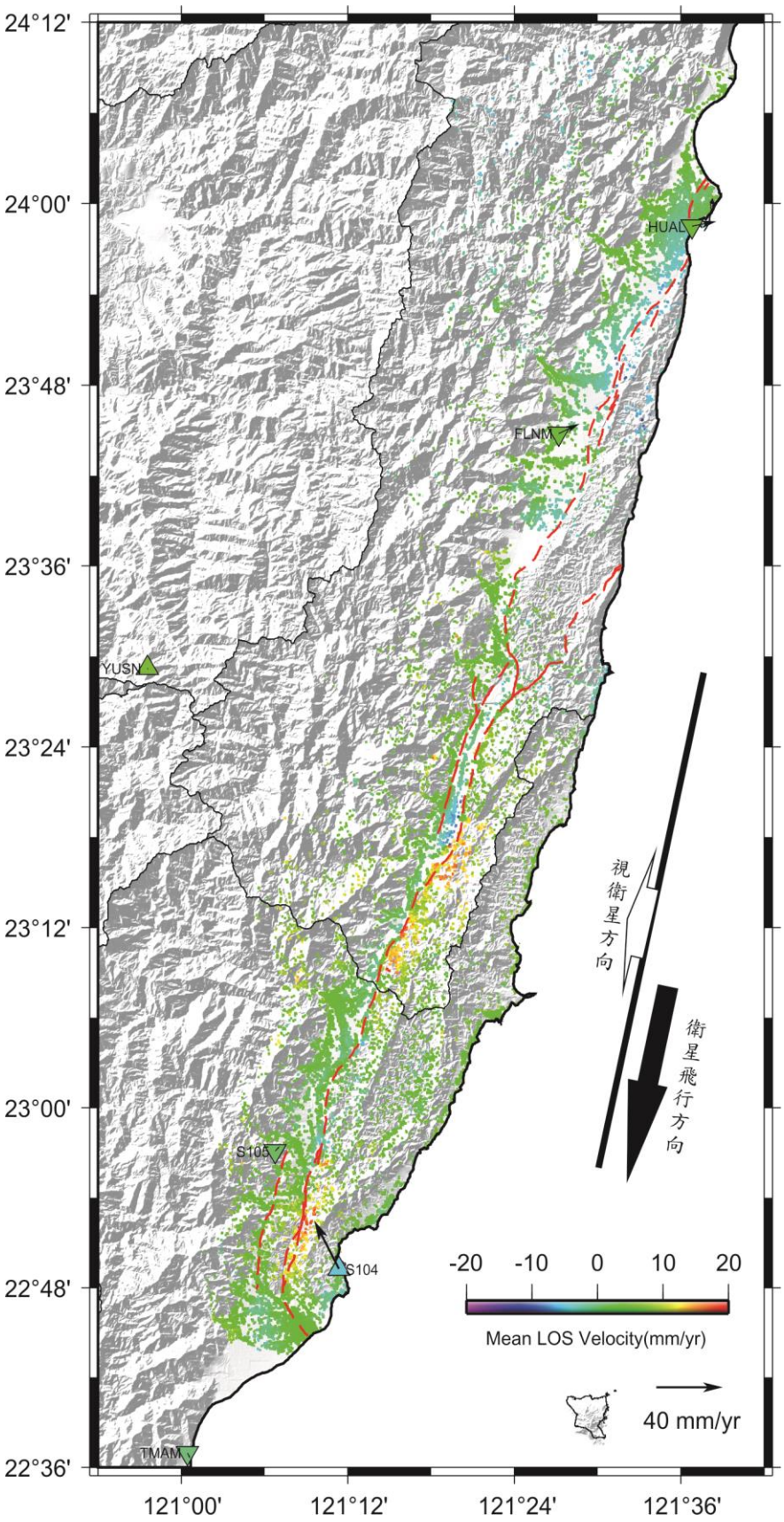


圖 2-6.7：ERS-1/2 衛星軌道 461，像幅編號 3123 和 3141 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。控制點為連續 GPS 站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場在 ITRF2008 框架下的速度方向。

2-6-2 ENVISAT (2006/3~2009/6)

ENVISAT 衛星影像為衛星軌道 461，像幅編號 3123 和 3141，如圖 2-6.8 所示。本區域範圍一共有 9 張影像，影像時間從 2006 年 3 月至 2009 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挑選出 2007 年 12 月 1 日作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-6.9 所示。在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將 9 張影像製作出 8 張干涉條紋圖（圖 2-6.10）。

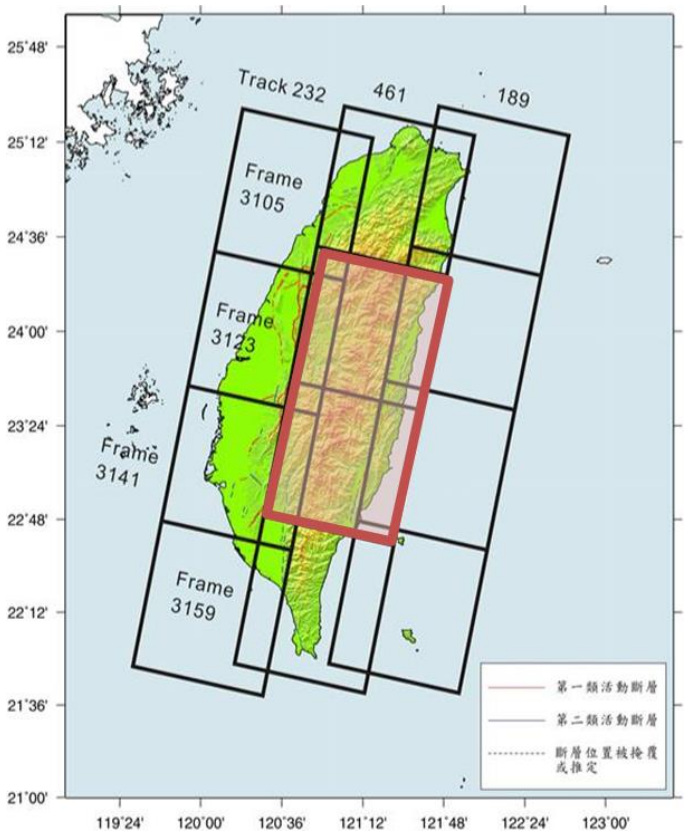


圖 2-6.8：ENVIAST 衛星選取區域涵蓋圖，衛星軌道 461，像幅編號 3123 和 3141。

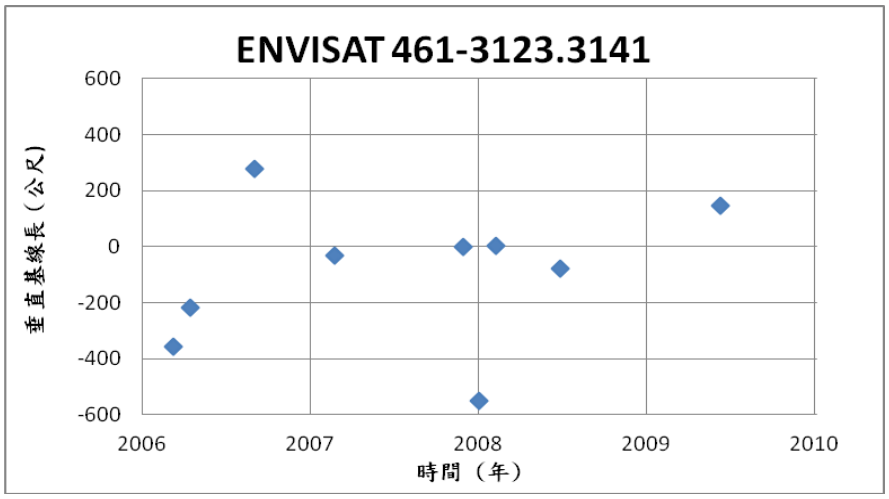


圖 2-6.9：ENVISAT 衛星軌道 461，像幅編號 3123 和 3141 影像時間與垂直基線相對關係。

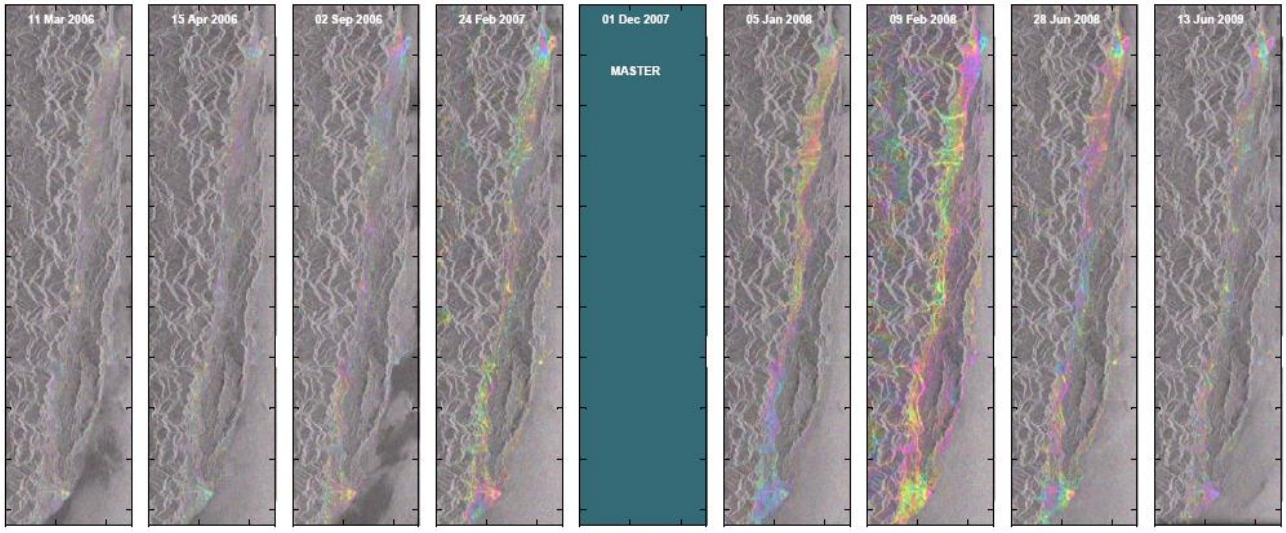


圖 2-6.10：ENVISAT 衛星軌道 461，像幅編號 3123 和 3141 共 9 幅影像，以 2007/12/01 為主影像所獲得 8 幅差分干涉圖之結果。

圖 2-6.10 可見，相較於 ERS 衛星差分干涉結果，ENVISAT 在像對所組成的干涉圖中表現較為良好，幾乎一半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縱谷區域，中央山脈山區較無法產生明顯的干涉條紋。不過由於總影像數只有 9 張，以及 C 波段影像波長較短，經由 StaMPS 軟體進行 PSInSAR 流程解算後，圖 2-6.11 顯示跨過幾條主要斷層都沒有明顯的速度梯度差異。整體來說，只有北側向東跨過嶺頂斷層有些微的轉變為視衛星方向遠離與在卑南臺地向東跨過利吉斷層有較明顯視衛星方向拉近的速度梯度差異，約為 5 mm/yr。反而在跨過池上斷層並無明顯的速度梯度差異，可能為影像數目不夠導致干涉結果不好而造成。

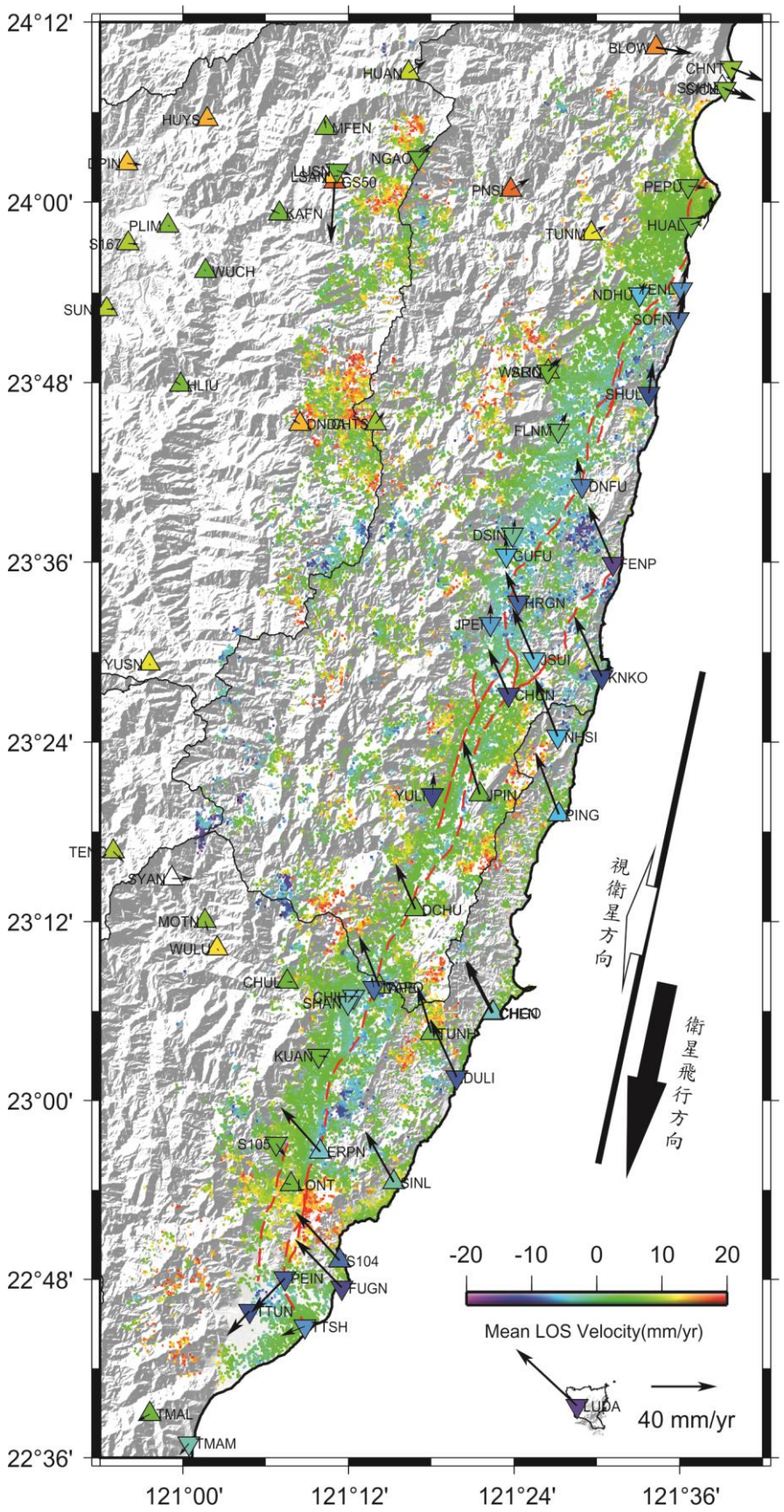


圖 2-6.11：ENVISAT 衛星軌道 461，像幅編號 3123 和 3141 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。控制點為連續 GPS 站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場在 ITRF2008 框架下的速度方向。

2-6-3 ALOS (2007/1~2010/12)

本計畫選取 ALOS 衛星 SAR 影像區域為衛星軌道（Path）444，像幅編號 460 和 470 及衛星軌道 445，像幅編號 440 和 450，如圖 2-6.12 所示。影像時間從 2007 年至 2010 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挑選出適當影像作為主影像，詳細影像資訊與相對垂直基線如圖 2-6.13 與圖 2-6.15 所示。在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將影像製作出 N-1 張干涉條紋圖（圖 2-6.14 與圖 2-6.16）。

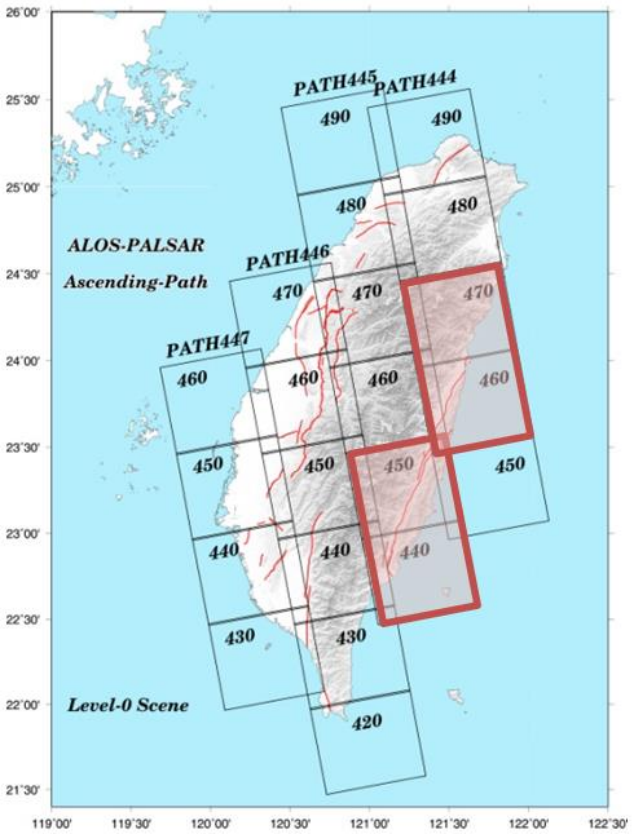


圖 2-6.12：ALOS 衛星選取區域涵蓋圖，衛星軌道 444，像幅編號 460 和 470 及衛星軌道 445，像幅編號 440 和 450。

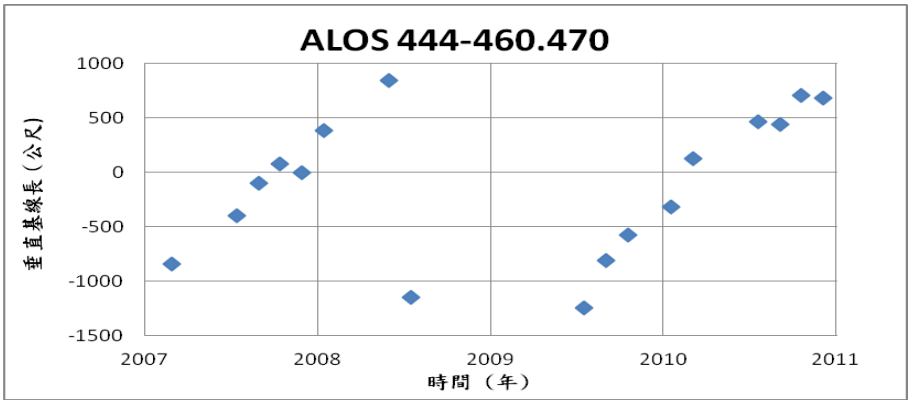


圖 2-6.13：ALOS 衛星軌道 444，像幅編號 460 和 470 影像時間與垂直基線相對關係。

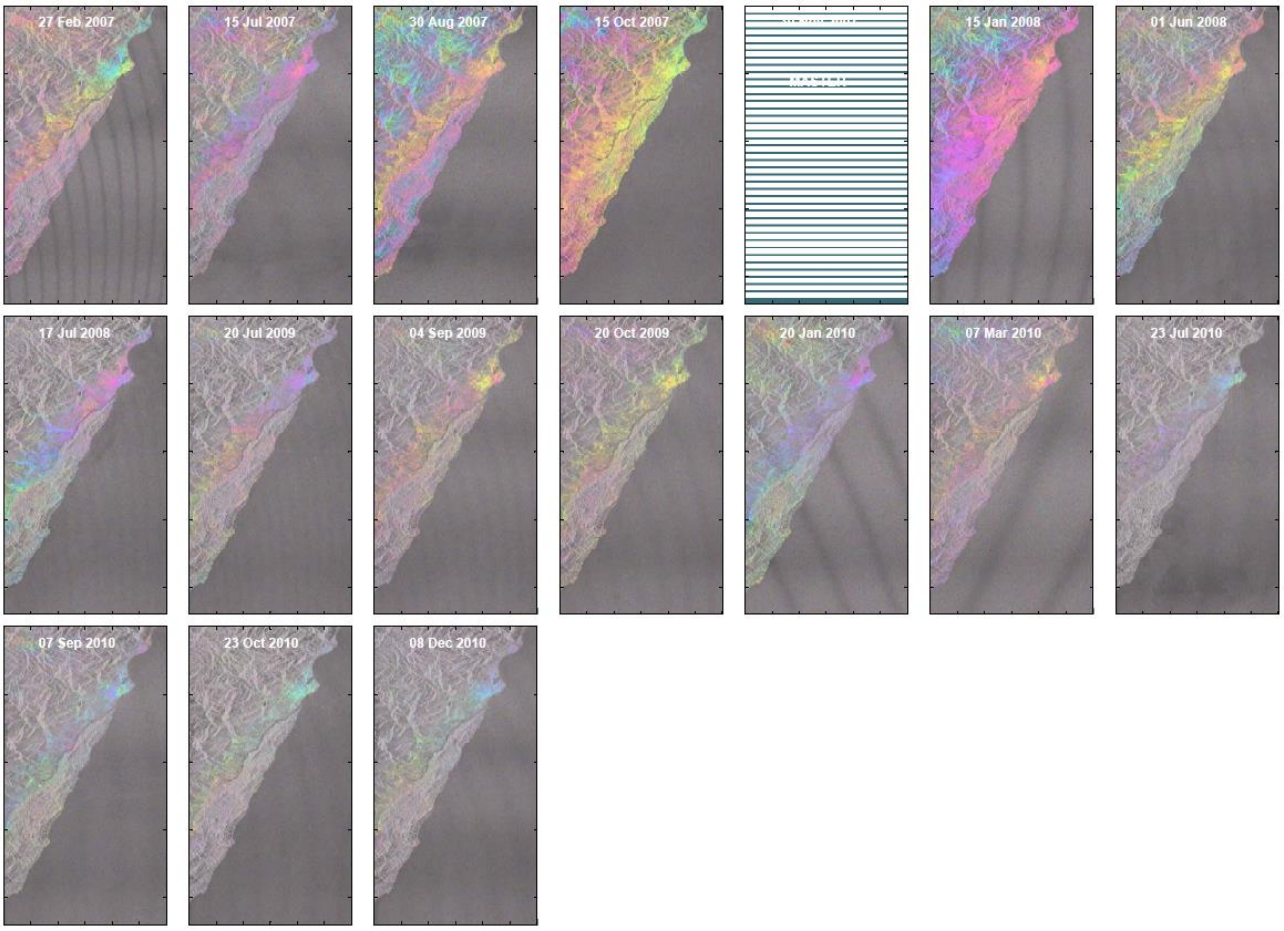


圖 2-6.14：ALOS 衛星軌道 444，像幅編號 460 和 470 共 17 幅影像，以 2007/11/30 為主影像所獲得 16 幅差分干涉之結果。

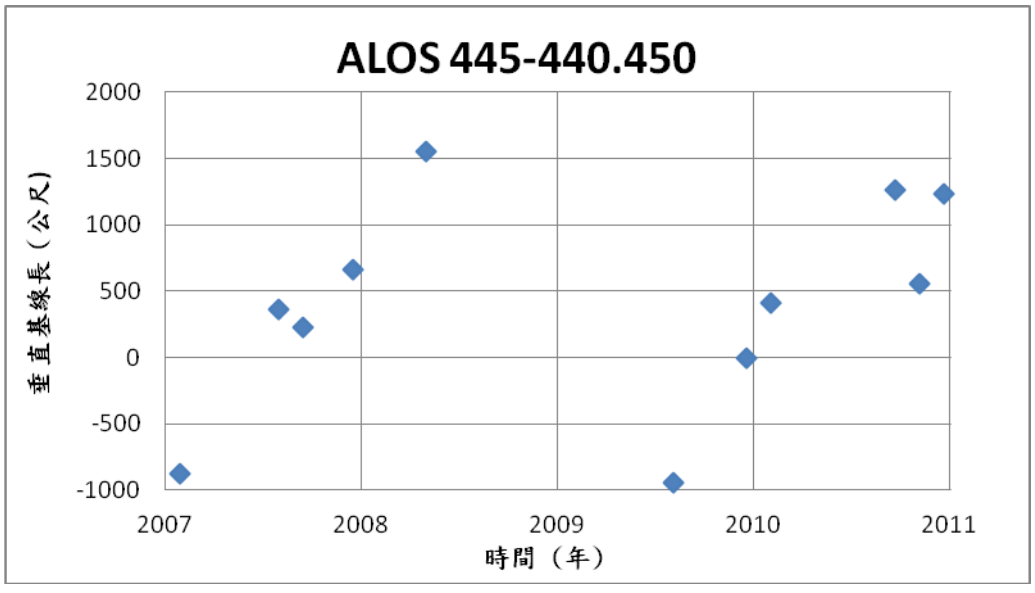


圖 2-6.15：ALOS 衛星軌道 445，像幅編號 440 和 450 影像時間與垂直基線相對關係。

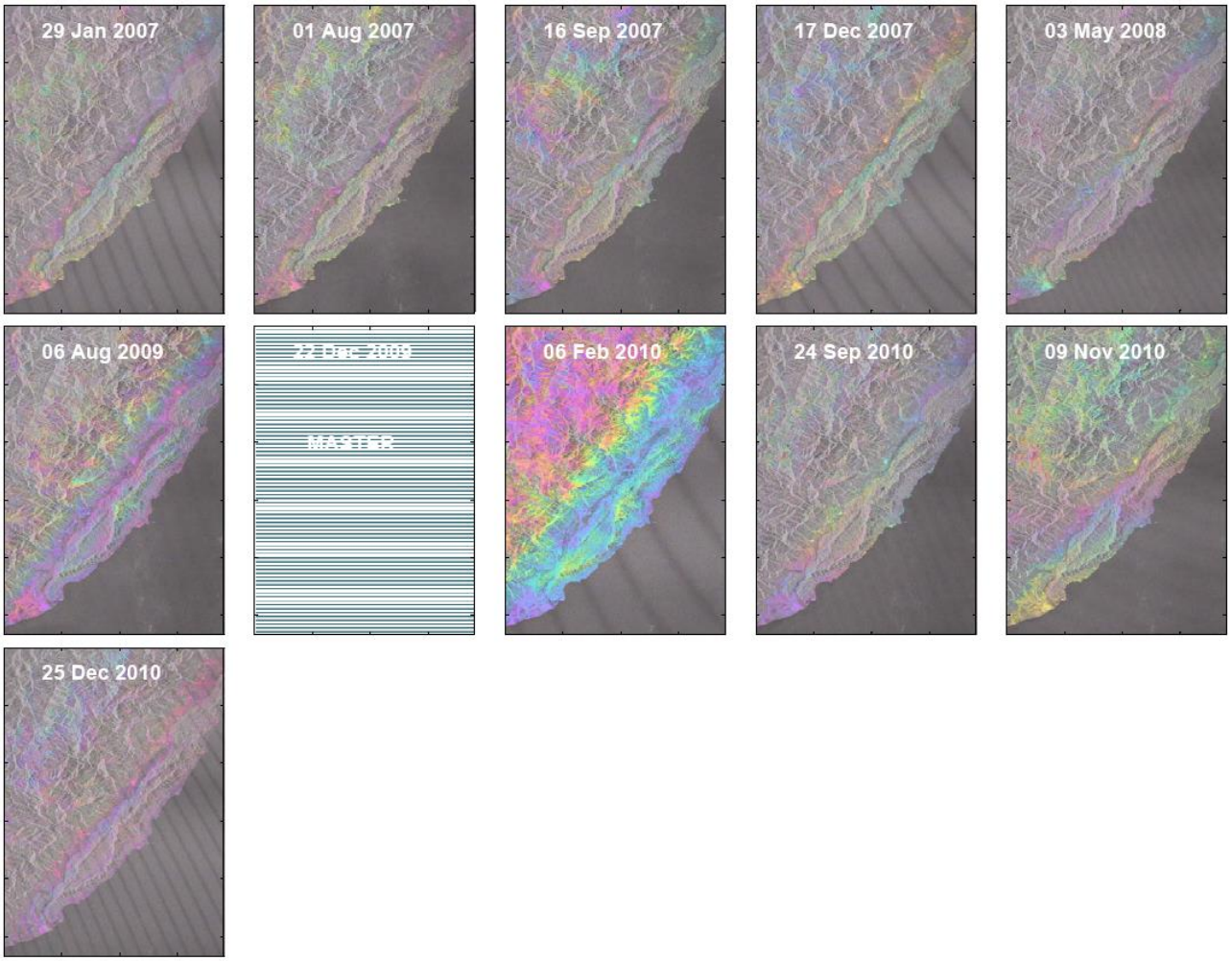


圖 2-6.16：ALOS 衛星軌道 445，像幅編號 440 和 450 共 11 幅影像，以 2009/12/22 為主影像所獲得 10 幅差分干涉之結果。

圖 2-6.14 及圖 2-6.16 可見，相較於 ERS 衛星及 ENVISAT 衛星差分干涉結果，L 波段的 ALOS 衛星在像對所組成的干涉圖中表現最為良好，儘管進入中央山脈區域，幾乎所有的影像對還是可以得到部分的干涉成果。完成所有影像對的干涉結果後，本計畫利用 StaMPS 軟體進行 PSInSAR 流程解算，得到初步結果（圖 2-6.17）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。結果顯示北段向東跨過嶺頂斷層呈現為視衛星方向遠離，速度梯度差異約為 10 mm/yr。而跨過池上斷層則有每年約 20~35 毫米的速度梯度差異，且有明顯的分界，能有效的萃取出池上斷層在地表上的位置。向南則顯示出向東跨過鹿野斷層也有速度梯度差異，約為 10 mm/yr。相較於 C 波段的衛星影像，L 波段的 ALOS 干涉結果較適合用來監測臺灣東部的活動斷層。

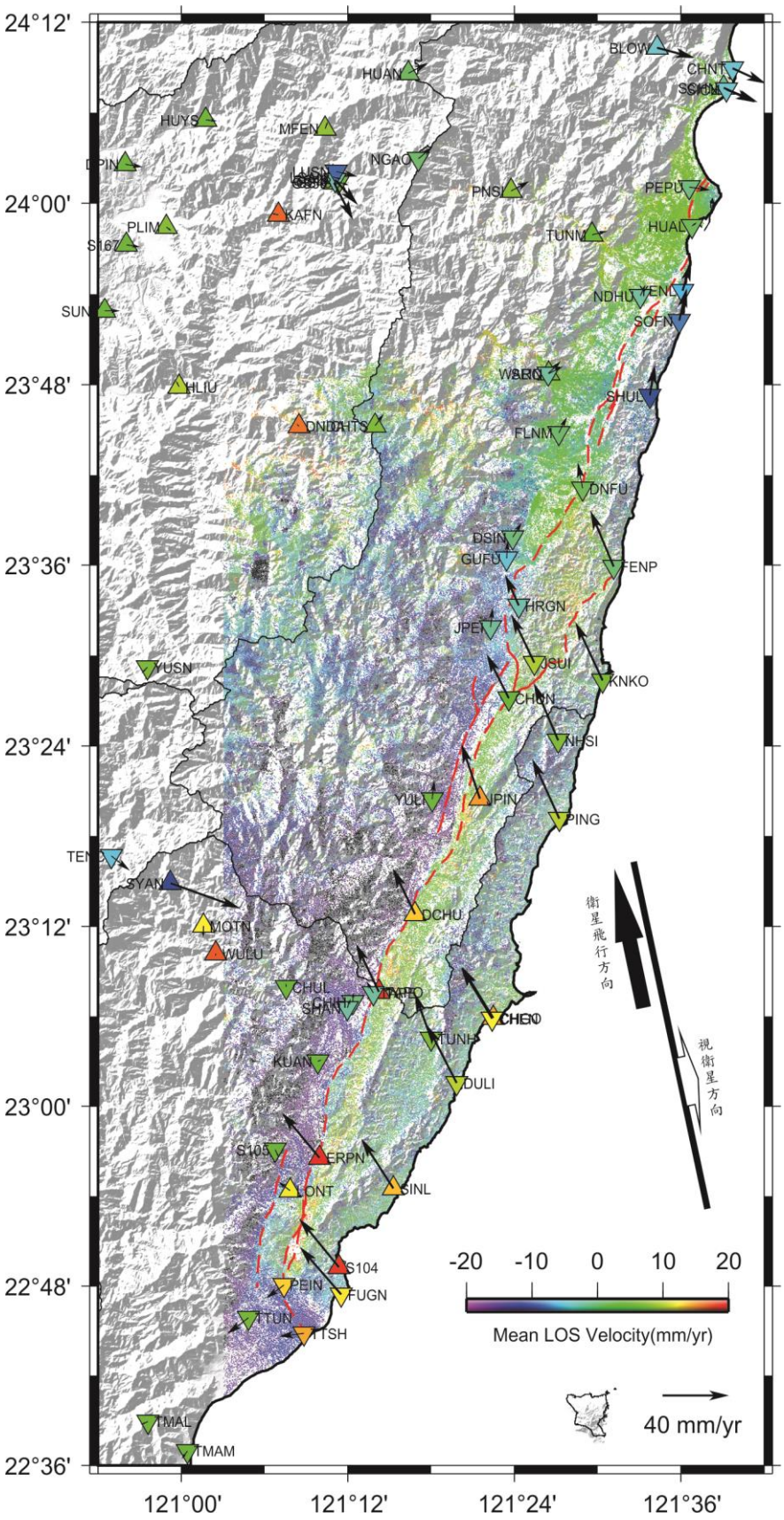


圖 2-6.17：ALOS 衛星軌道 444，像幅編號 460 和 470 及衛星軌道 445，像幅編號 440 和 450 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。控制點為連續 GPS 站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場在 ITRF2008 框架下的速度方向。

2-7 斷層剖面分析

2-7-1 米崙斷層（E1）、嶺頂斷層（E2）

2-7-1-1 地表變形觀測

PS-InSAR 分析結果顯示從整體變形行為看來，三種影像在跨過米崙斷層處均沒有明顯的速度梯度差異。但可看出米崙斷層北段及南段變形速度有所差異，其分界位置大概位於 E1 剖面的位置。而跨過嶺頂斷層東側因植被茂密，影像無法取得有效永久散射點，因此無法明顯看出是否有跨斷層的速度梯度差異。反倒是在出中央山脈到海岸山脈之間能觀察到一較明顯之速度不連續。三種衛星都顯示出由西向東視衛星方向速度遞減。

2-7-1-2 構造解釋

E1 剖面跨越米崙斷層，長度 9 公里、半寬 3 公里、剖面走向 120°。E2 剖面跨越嶺頂斷層，長度 25 公里、半寬 7.5 公里、剖面走向 140°。根據圖 2-7.3，三種時期的衛星資料結果都顯示在 E1 及 E2 剖面跨米崙斷層以及嶺頂斷層並無明顯的速度梯度差異。由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，E1 剖面在跨米崙斷層垂直速度無觀測資料；而跨斷層水平速度在平行分量約有 5 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量則無顯著變化，變化量＜1 mm/yr；而 E2 剖面在跨嶺頂斷層東側垂直速度無觀測資料；而跨斷層水平速度在平行分量約有 2.5 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量則約有 8.5 mm/yr 的縮短量。

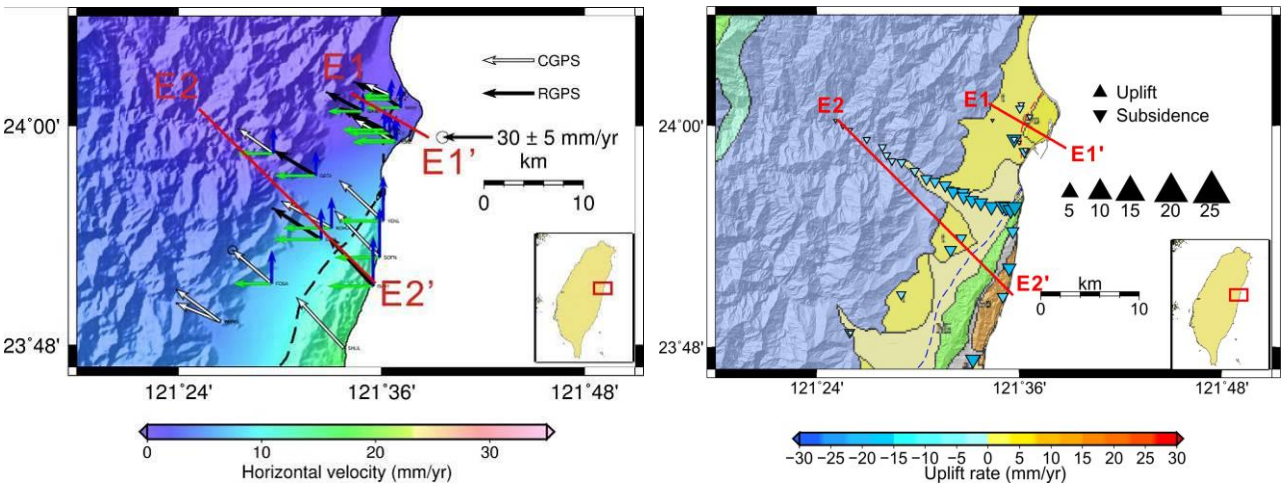


圖 2-7.1：E1 及 E2 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。

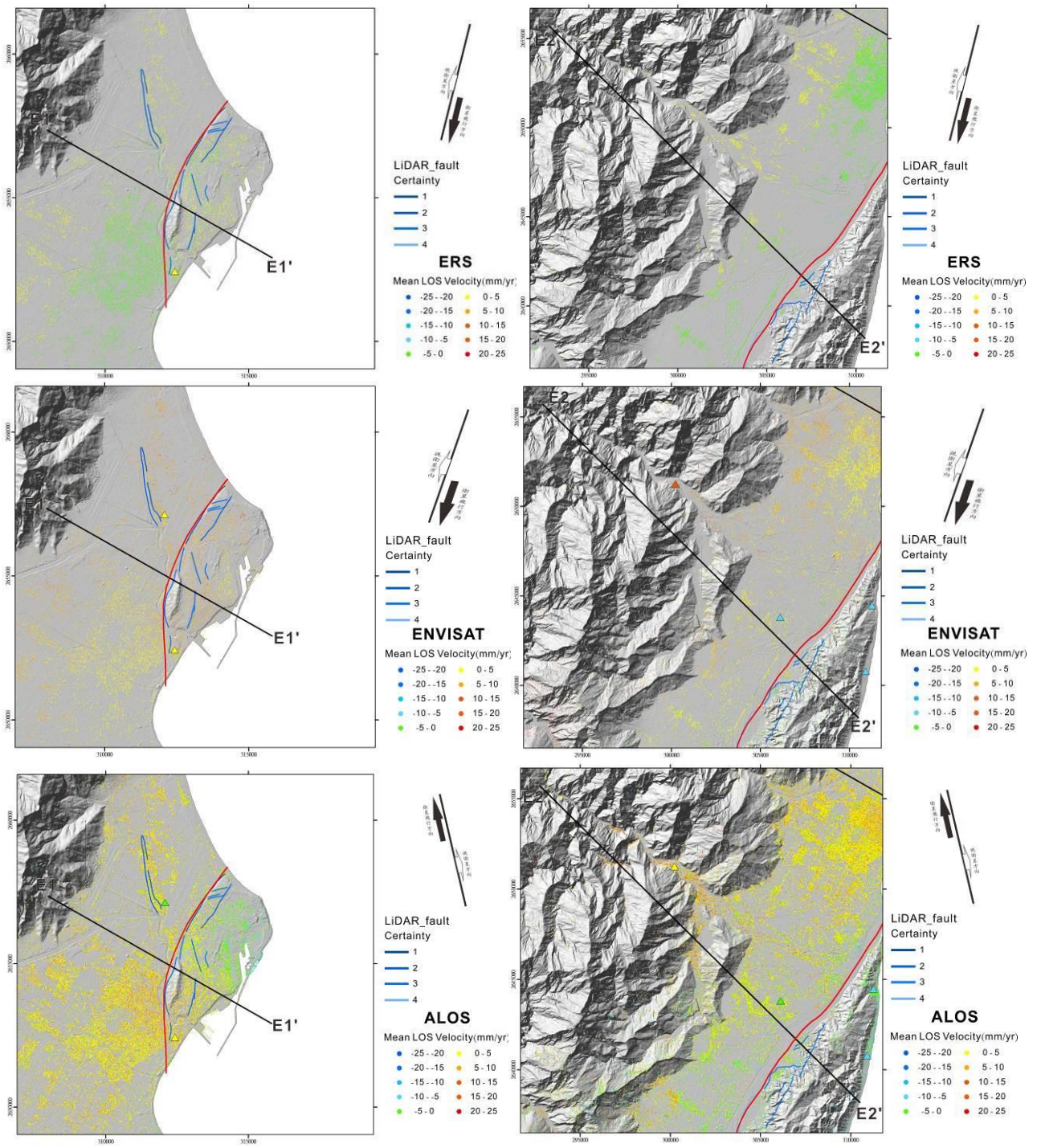


圖 2-7.2：E1（左圖）及 E2（右圖）剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。LiDAR_線形 1：可完全指示構造之活動位置、特性等，於今日之地表位置或資料庫明確者；LiDAR_線形 2：就文獻中，尚無詳細之地表露頭證據、或無相關之資料者，亦或尚無精細之構造線形位置記錄，但在 LiDAR 地形資料上，其構造地形上有詳細而明確的地形特徵或證據指出地表線形確為構造活動所引致；LiDAR_線形 3：其線段之地形特性同地形線形 2 所描述者，但本線形經由野外查核中，可或因地形受人為開發而破壞、或其他因素影響，而未能直接於野外觀察到本線段之地表真實構造特徵者；LiDAR_線形 4：文獻中無詳細之地表露頭證據、或無相關之資料者，亦或尚無精細之構造線形位置記錄，但在 LiDAR 之地形資料上，其構造地形上之地形特徵證據推測本地表線形可能為構造活動所影響。（張國禎，2014）

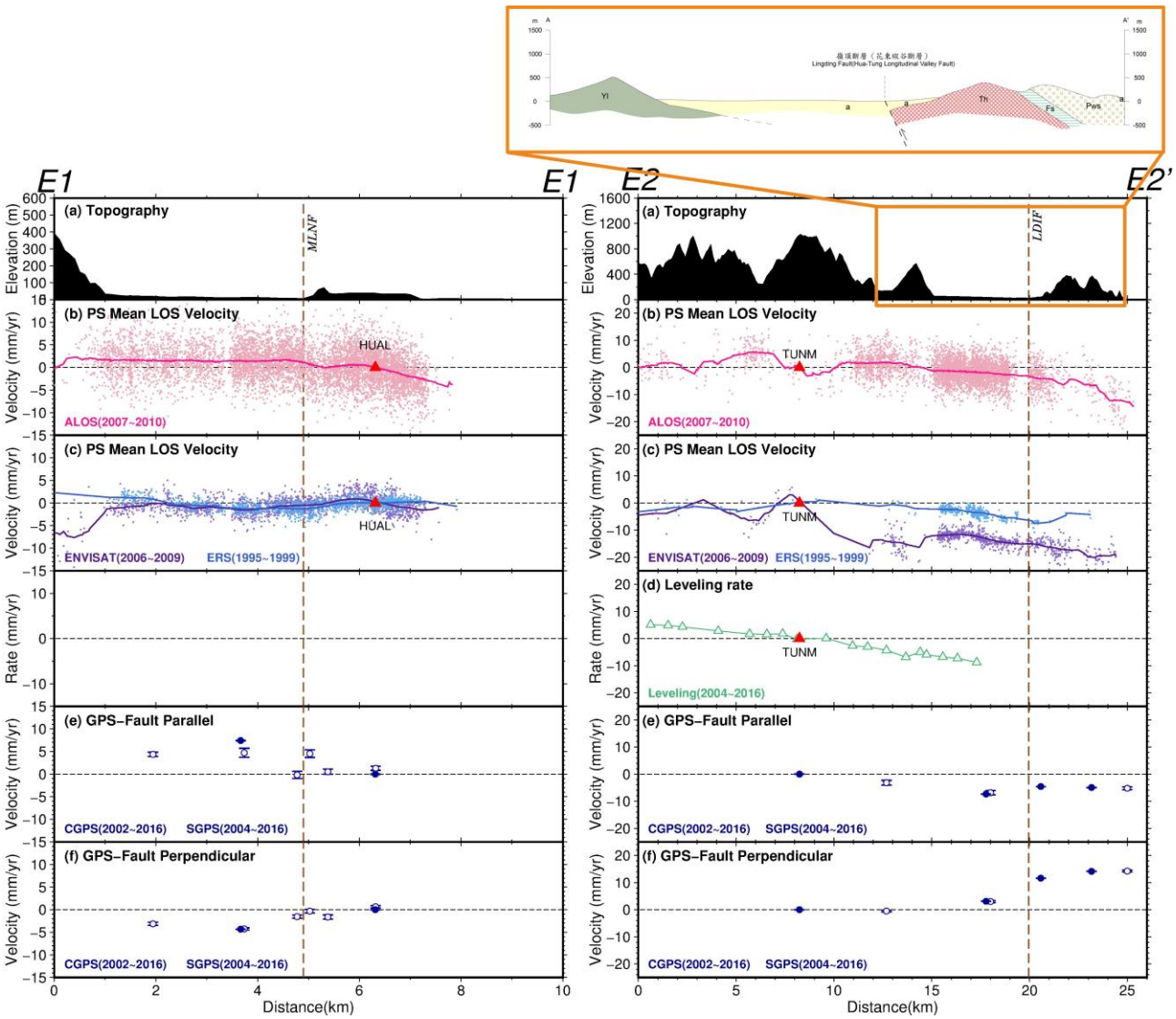


圖 2-7.3：E1（左圖）及 E2（右圖）剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。MLNF 為米崙斷層，LDIF 為嶺頂斷層。地質剖面圖（陳文山等，2010）。

2-7-2 瑞穗斷層（E3）、奇美斷層（E3）

2-7-2-1 地表變形觀測

PS-InSAR 分析結果顯示從整體變形行為看來，C 波段的 ERS 以及 ENVISAT 影像跨過瑞穗斷層東側因植被茂密，影像無法取得有效永久散射點，因此無法明顯看出是否有跨瑞穗斷層或是奇美斷層的速度梯度差異。而 L 波段的 ALOS 衛星則可明顯看出由西向東視衛星方向速度漸增，並且在跨過瑞穗斷層後有較大幅度的增加，速度梯度差異約為 10-15 mm/yr。再持續向東跨過奇美斷層則轉為視衛星方向速度減少，速度梯度差異也可達 10 mm/yr。

2-7-2-2 構造解釋

E3 剖面跨越瑞穗斷層與奇美斷層，長度 28 公里、半寬 9 公里、剖面走向 100°。根據圖 2-7.6，E3 剖面的 ALOS 衛星資料結果顯示，瑞穗斷層東側約 1.5 公里處及奇美斷層西側約 1 公里處擁有最明顯的速度不連續。與水準測線結果一致。由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，在跨兩個斷層垂直速度變化量皆＜1 mm/yr；而跨瑞穗斷層水平速度在平行分量約有 10 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量則約有 10 mm/yr 的縮短量；在跨奇美斷層水平速度在平行及垂直斷層的分量上皆並無顯著變化，變化量皆＜1 mm/yr。

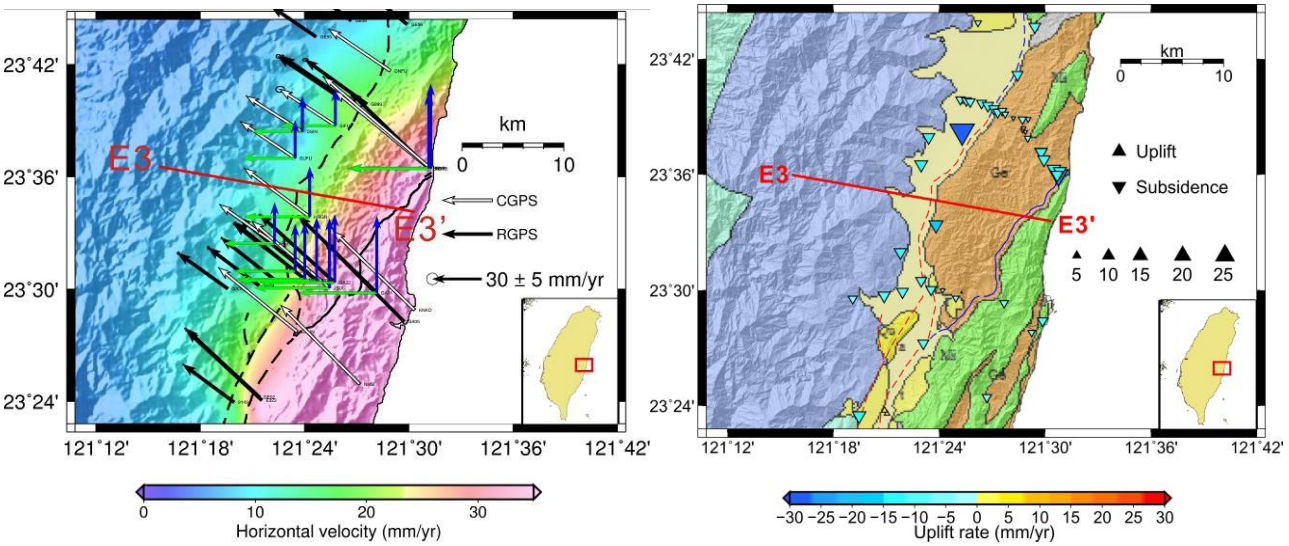


圖 2-7.4：E3 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。

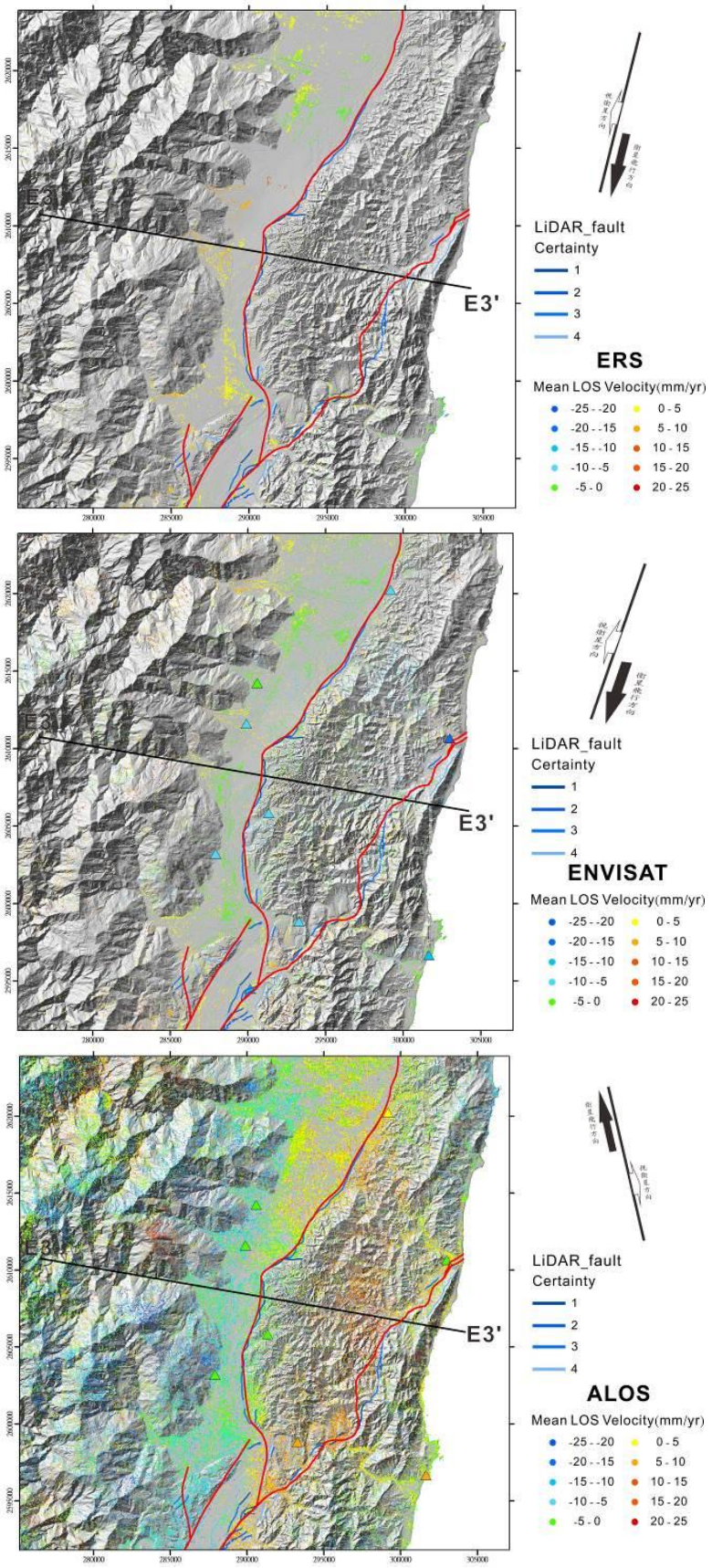


圖 2-7.5：E3 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。LiDAR 線形說明如圖 2-7.2 所示。

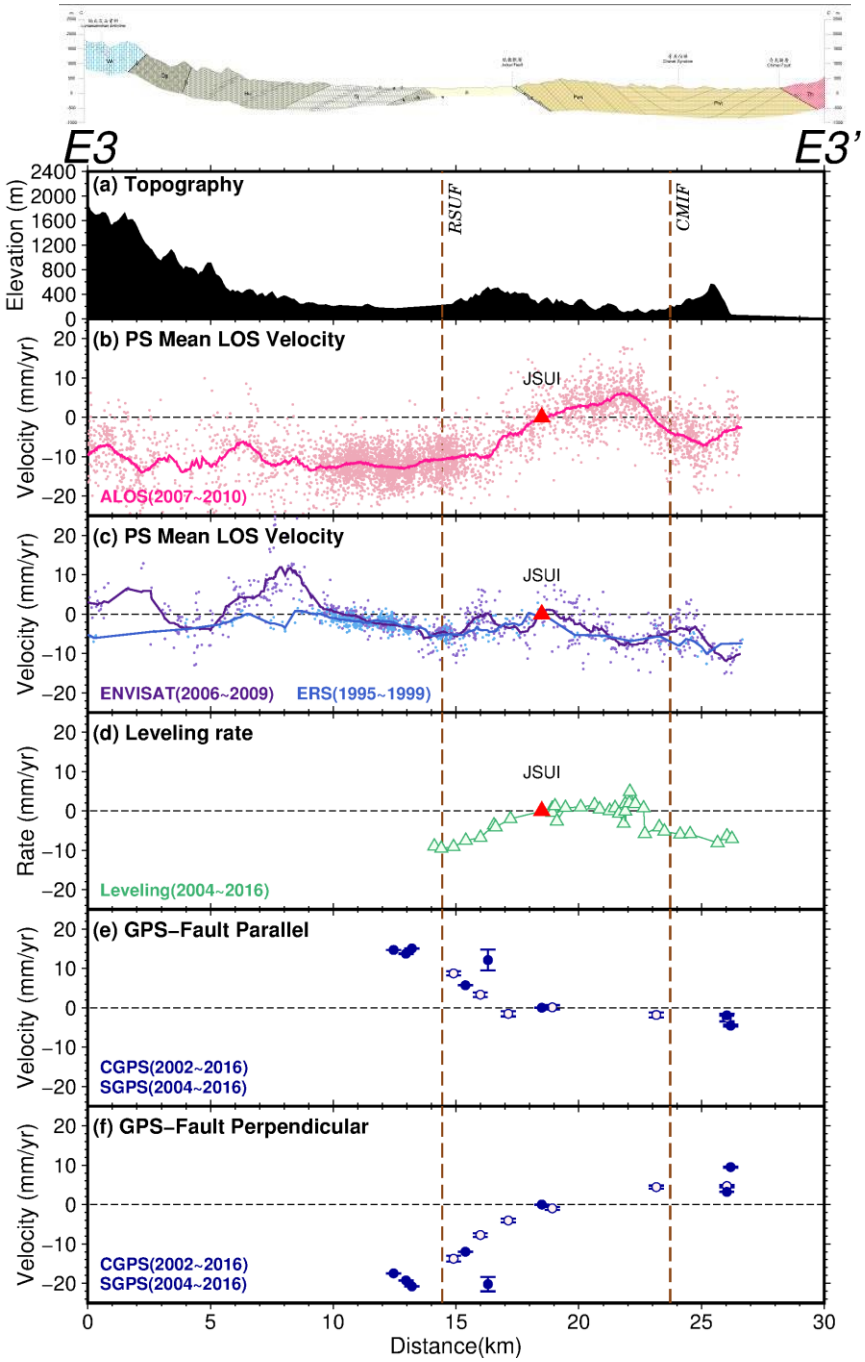


圖 2-7.6：E3 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。RSUF 為瑞穗斷層，CMIF 為奇美斷層。地質剖面圖（衣德成等，2012）。

2-7-3 玉里斷層（E4）、池上斷層（E4、E5）

2-7-3-1 地表變形觀測

由圖 2-7.8 的三種衛星資料結果顯示，其中只有 ERS 衛星由西向東跨過玉里斷層可觀察到輕微的速度梯度差異，ENVISAT 及 ALOS 衛星則無法明顯看出是否有跨玉里斷層的速度梯度差異。持續向東則可看出三種衛星影像在跨過池上斷層都有明顯的視衛星速度增加，在 C 波段的影像中約可觀察到約 10 mm/yr 的速度梯度增加，而在 ALOS 影像中速度梯度增加幅度大約為 20-30 mm/yr。

2-7-3-2 構造解釋

E4 剖面跨越玉里斷層、池上斷層與永豐斷層，長度 24.1 公里、半寬 5 公里、剖面走向 102°。E5 剖面跨越池上斷層，長度 23.8 公里、半寬 5 公里、剖面走向 105°。根據圖 2-7.9，跨過玉里斷層均呈現輕微的視衛星速度減少，約 2-3 mm/yr。主要的變化都集中在向東跨過池上斷層。由 ALOS 衛星影像可觀察到視衛星速度在約 200 公尺以內的距離增加 20-30 mm/yr。並且也同樣在 ERS 衛星中觀察到相同的變形行為。由此可知池上斷層主要為一以潛移方式活動的逆斷層。而在兩個剖面中，ENVISAT 資料卻呈現與 ERS 資料相反方向的變動，其資料正確性需要進一步分析討論。而由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，E4 剖面在跨斷層垂直速度無觀測資料；跨斷層系統水平速度在平行分量約有 10 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量則約有 25 mm/yr 的縮短量。E5 剖面在跨池上斷層垂直速度無觀測資料；跨斷層系統水平速度在平行分量約有 15 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量則約有 30 mm/yr 的縮短量。

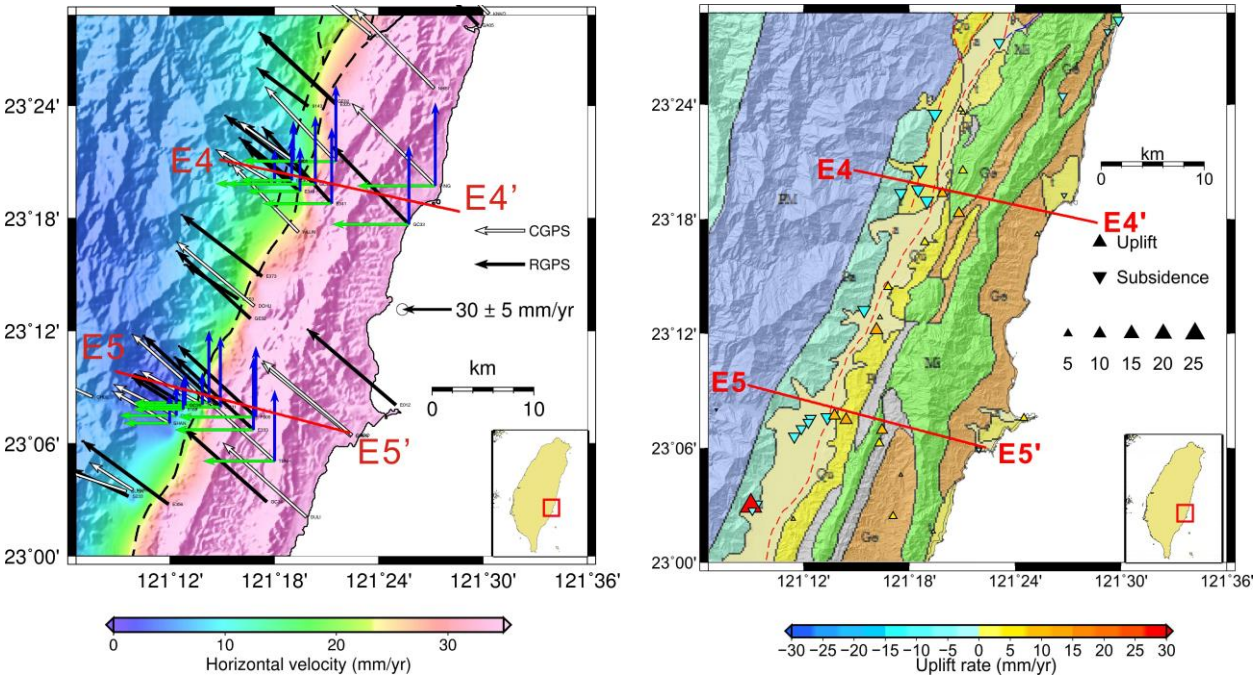


圖 2-7.7：E4 及 E5 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。

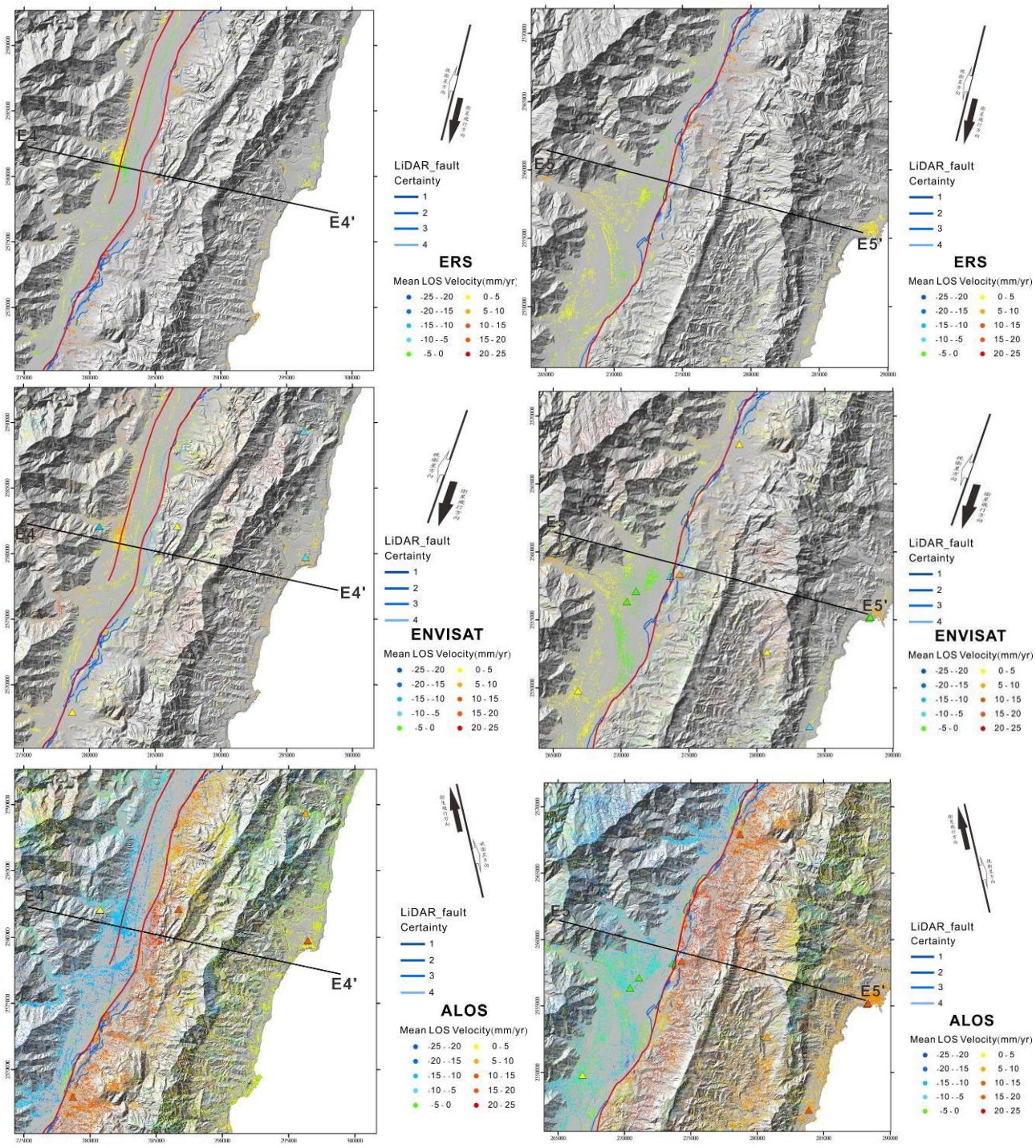


圖 2-7.8：E4（左圖）及 E5（右圖）剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。LiDAR 線形說明如圖 2-7.2 所示。

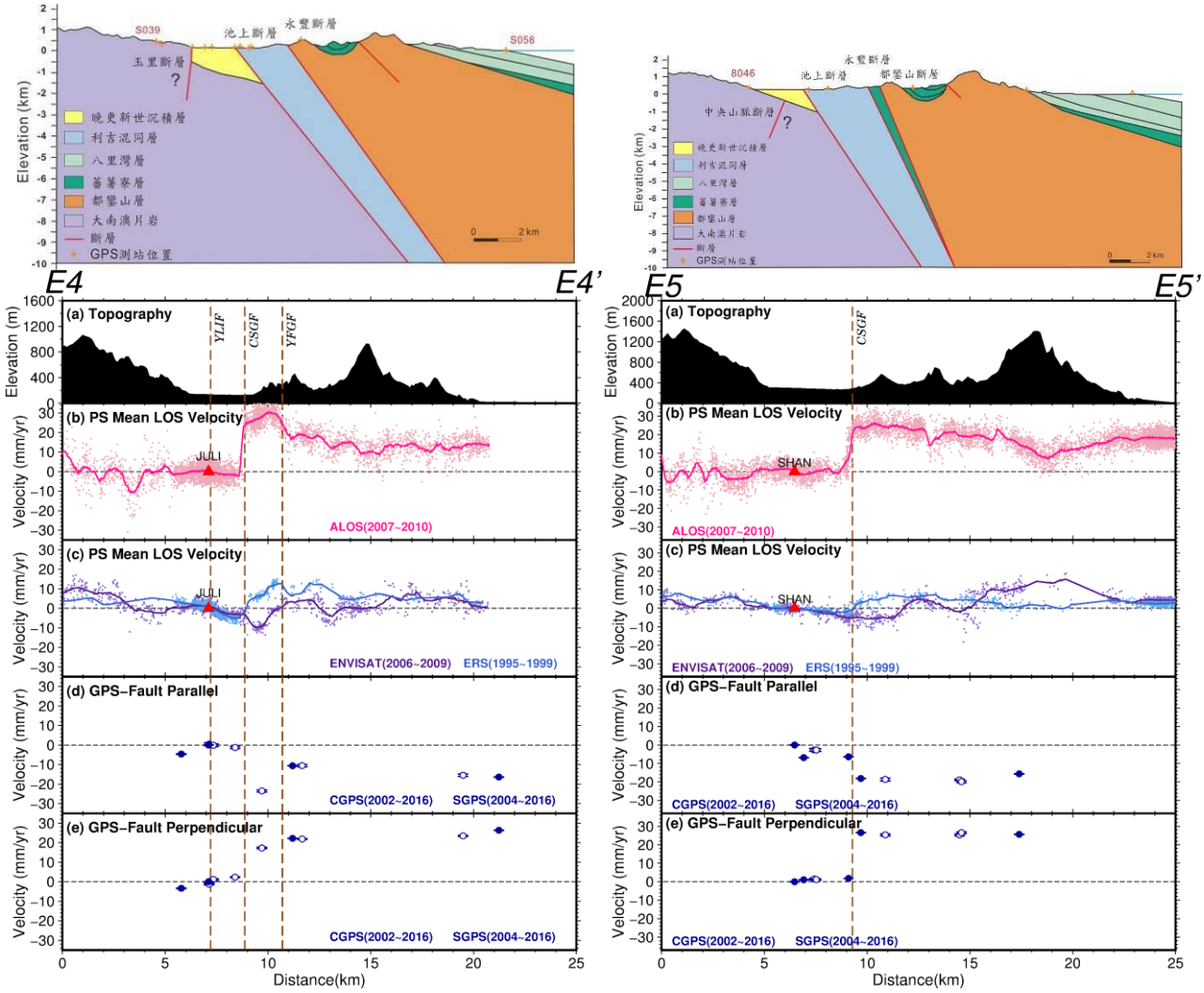


圖 2-7.9：E4（左圖）及 E5（右圖）剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。YLIF 為玉里斷層，CSGF 為池上斷層，YFGF 為永豐斷層。地質剖面圖（陳文山等，2008）。

2-7-4 鹿野斷層（E6）、利吉斷層（E6）

2-7-4-1 地表變形觀測

PS-InSAR 分析結果顯示從整體變形行為看來，C 波段的 ERS 以及 ENVISAT 影像在此區域因植被茂密，影像無法取得有效永久散射點，因此無法明顯看出是否有跨鹿野斷層或是利吉斷層的速度梯度差異。而 L 波段的 ALOS 衛星則可明顯看出由西向東視衛星方向速度漸增，並且在跨過鹿野斷層後有一明顯視衛星方向速度的增加，速度梯度差異約為 10 mm/yr。再持續向東跨過利吉斷層後另有一明顯視衛星方向速度的增加，速度梯度差異最大可達 20 mm/yr。

2-7-4-2 構造解釋

E6 剖面跨越鹿野斷層、卑南山斷層與利吉斷層，長度 20 公里、半寬 9 公里、剖面走向 90°。根據圖 2-7.12，ALOS 衛星資料結果顯示，此區域主要速度梯度較大的地方位於跨過鹿野斷層，速度梯度約為 10 mm/yr；跨過卑南山斷層，速度梯度約為 10-20 mm/yr。另外則是利吉斷層東側約 1 公里處有一明顯的在範圍約 300 公尺以內的視衛星速度減少，與水準測量觀測結果相同。因此，相對於鹿野斷層應該為在淺部鎖住的逆衝斷層，而利吉斷層則為一條以潛移方式移動的斷層，並且其位置可以再分析討論修正。由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，在跨斷層系統垂直整體約有 5 mm/yr 的變化量；跨斷層系統水平速度在平行分量約有 20 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量則約有 5 mm/yr 的縮短量。

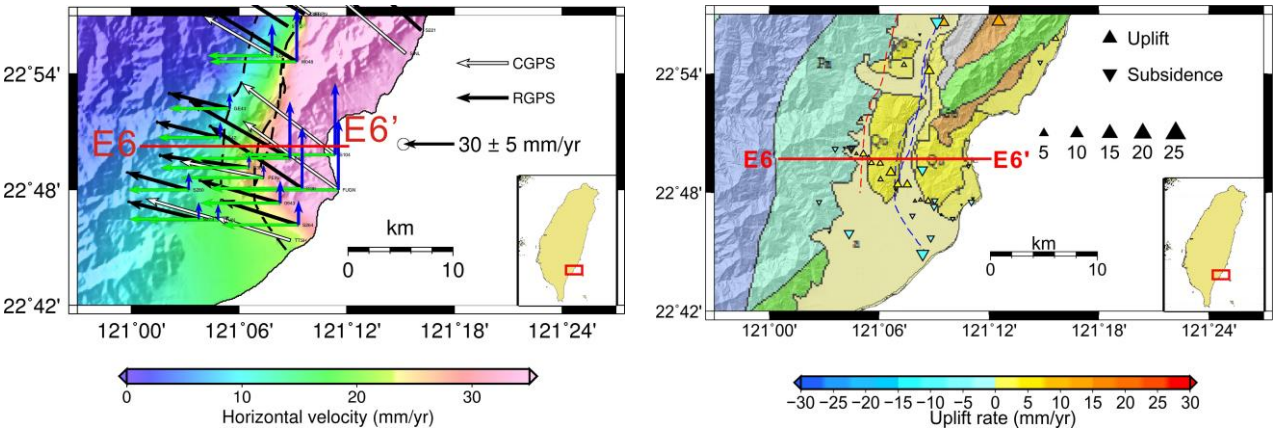


圖 2-7.10：E6 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。

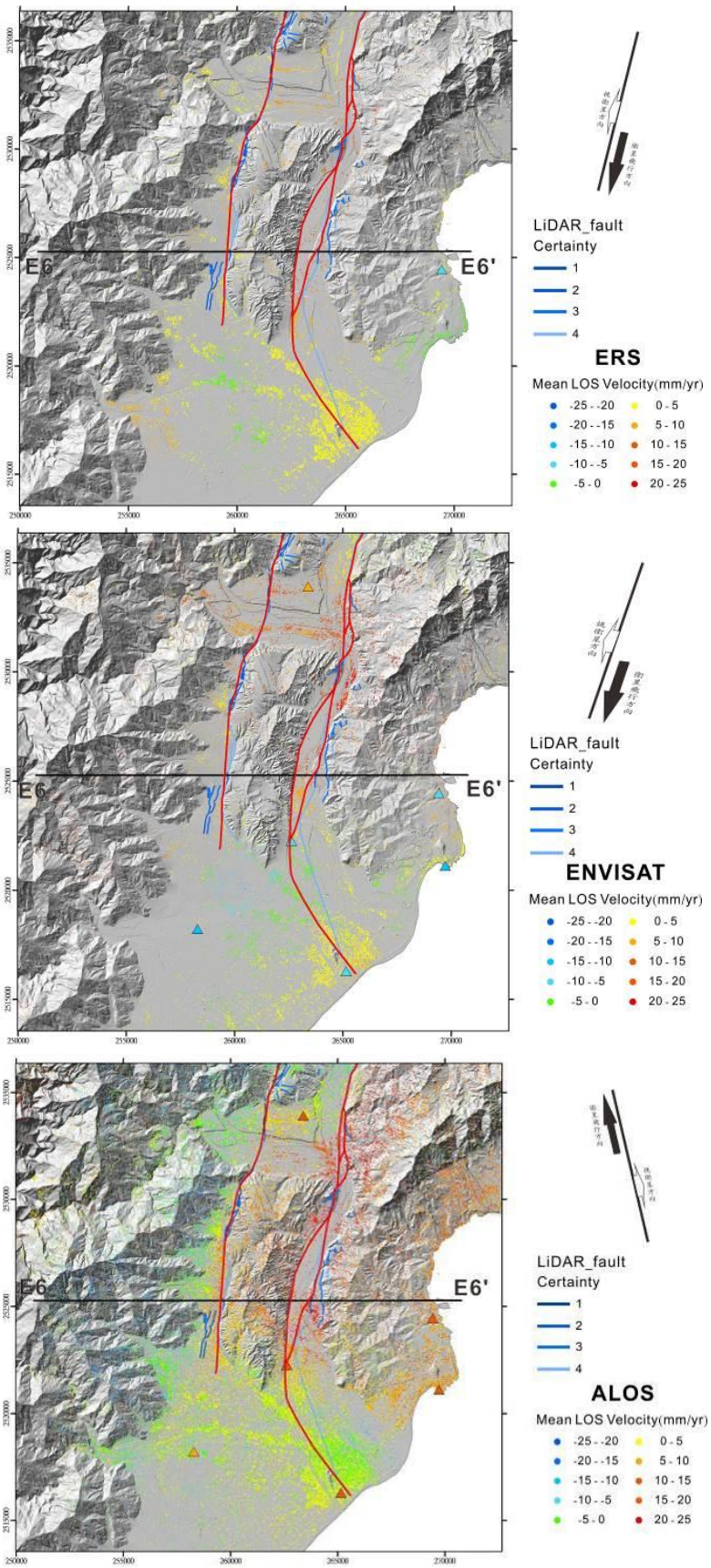


圖 2-7.11：E6 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。LiDAR 線形說明如圖 2-7.2 所示。

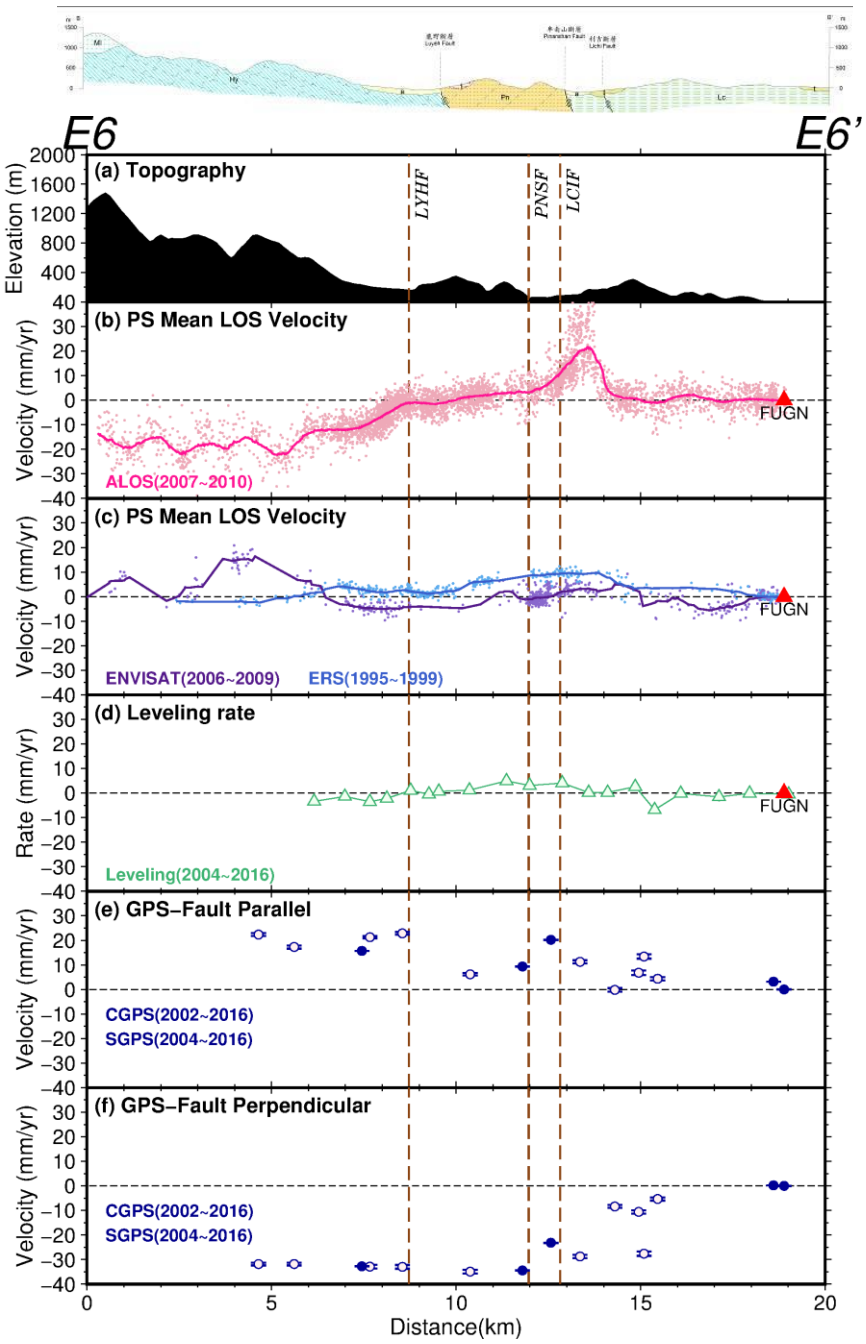


圖 2-7.12：E6 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。LYHF 為鹿野斷層，PNSF 為卑南山斷層，LCIF 為利吉斷層。地質剖面圖（林偉雄等，2008）。

2-8 斷層面滑移速率及虧損率評估

2-8-1 臺灣活動斷層幾何參數及塊體模型設定

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

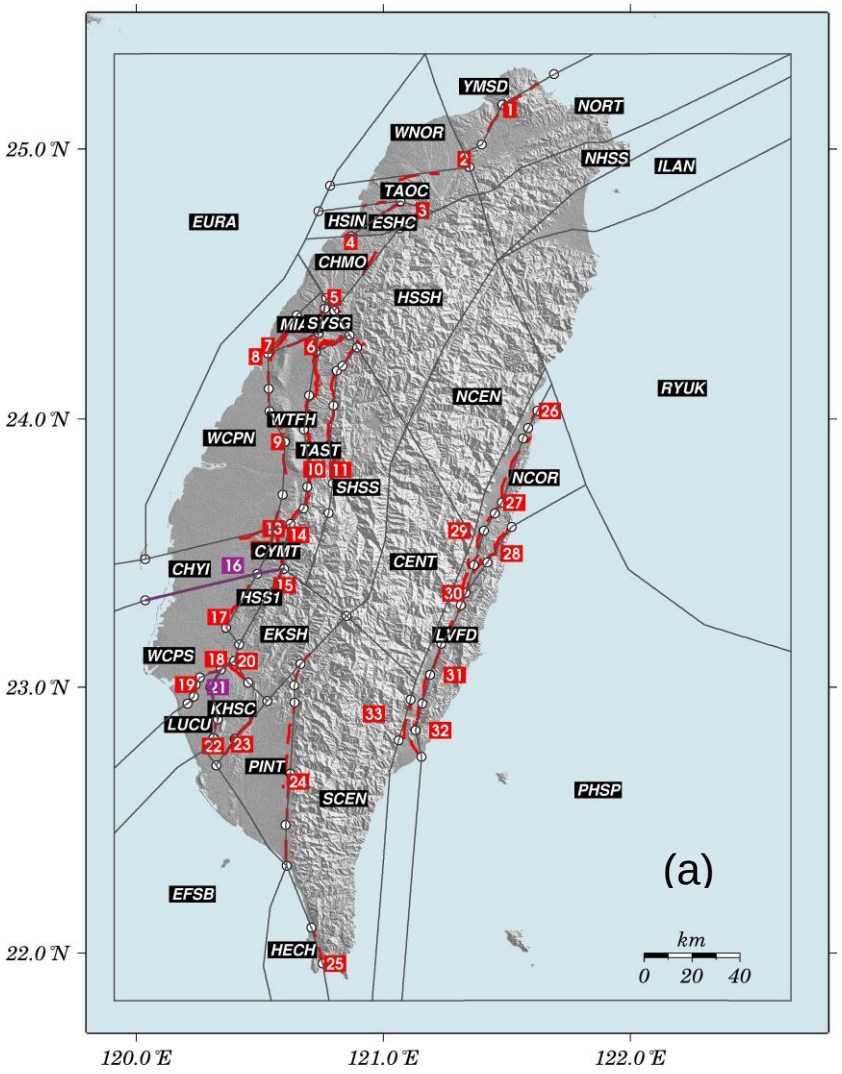
本研究藉由 Rob McCaffrey 提出的三維塊體模型 DEFNODE（McCaffrey, 2005）來進行斷層現今滑移率及虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每個斷層都位於兩個轉動塊體（block）的邊界上。Ching et al.（2011）曾將臺灣地區幾個重要的斷層視為塊體邊界，再利用塊體模型來探討臺灣現今的地殼運動情形。本研究針對地質調查所於 2012 年公佈的臺灣活斷層位置，並參考本計畫之斷層參數資料（表 2-8.1），建構了本研究區域的塊體邊界模型（圖 2-8.1）。為了符合地調所公布的活動斷層分布資料，我們修正了 Ching et al.（2011）的模型，除了另外加入 HSS1、HECH 塊體外，並修改 LUCU、WCPS、EKSH、SCEN、NCOR、LVFD、PHSP 等塊體幾何，分別對應後甲里斷層、木屐寮-六甲斷層、觸口斷層、恆春斷層、米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、玉里斷層、池上斷層、利吉斷層及鹿野斷層，以符合其塊體邊界（圖 2-8.1），因木屐寮斷層及六甲斷層地理位置相當接近，且我們收集到兩條斷層的深度、傾角等斷層參數相當接近，為了模型簡化，因此在本模型中將木屐寮斷層及六甲斷層視為同一條斷層構造。在模型中，除了地調所公佈的活斷層外，另外加入了 Ching et al.（2011）所提出的梅嶺斷層，以呈現更完整的地表活動。其中梅嶺斷層雖然不是地調所所公佈的活斷層，但此構造可能對台南台地的孕震潛勢有一定程度的影響，因此加入塊體模型的邊界。

本研究使用 EURA 做為參考塊體（圖 2-8.1a），並假設參考塊體是不旋轉的，因此其餘塊體上的水平速度皆是相對於 EURA 的運動。DEFNODE 再以此計算各塊體的剛體轉動速度場及斷層面（塊體邊界）上各節點的滑移速率以及虧損率。除此之外，由於斷層潛勢評估需要知道表 2-8.1 上所列各斷層段的長期滑移速率、間震期滑移速率及滑移虧損率，因此我們將塊體模型所得之各斷層節點上的值取平均，可以得到各個速率的平均值及標準差。由此可知，若沿斷層面的滑移速率分布較不平均 ，則所得的速率標準差也會相對較大。

由圖 2-8.1a 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。本研究經由整理臺灣東部活斷層的各種地質及地球物理文獻及證據，建立了本文研究範圍內的斷層幾何參數表（表 2-8.1）。注意除了如圖 2-8.1a 中所示的地表節點外（深度為 0 km），沿著斷層傾角也分別在一半斷層深度及斷層底部各設一個節點。本文下一節中斷層面上的滑移量分佈皆是由這些節點上的值進行內插所得。

本次研究中在模型反演過程中加入塊體內部形變，此時各塊體將不再是剛性塊體，塊體內部的速度梯度可產生內部形變，較符合臺灣目前大地構造，並加入地質研究方法所推估的斷層滑移速率（表 2-8.3；Shyu et al., 2016）作為反演時的約束值，以得到更佳的擬合結果。



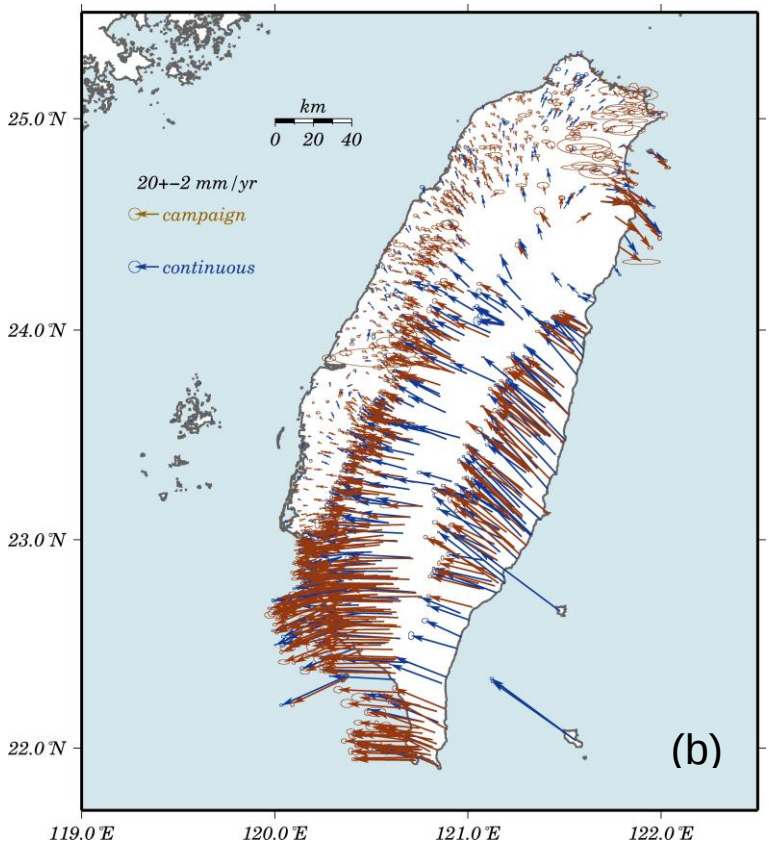


圖 2-8.1：（a）本研究所使用的臺灣三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公佈之活斷層，紅色虛線表示推測或隱伏斷層，紫色實線表示非地調所公佈之活斷層。數字代表之斷層分別為：1. 山腳斷層; 2. 湖口斷層; 3. 新竹斷層; 4. 新城斷層; 5. 獅潭斷層; 6. 三義斷層; 7. 大甲斷層; 8. 屯子腳斷層; 9. 彰化斷層; 10. 車籠埔斷層; 11. 大茅埔－雙冬斷層; 12. 九芎坑斷層; 13. 梅山斷層; 14. 大尖山斷層; 15. 觸口斷層; 16. 義竹斷層; 17. 木屐寮－六甲斷層; 18. 新化斷層; 19. 後甲里斷層; 20. 左鎮斷層; 21. 梅嶺斷層; 22. 小崗山斷層; 23. 旗山斷層; 24. 潮州斷層; 25. 恆春斷層; 26. 米崙斷層; 27. 嶺頂斷層; 28. 奇美斷層; 29. 瑞穗斷層; 30. 玉里斷層; 31. 池上斷層; 32. 利吉斷層; 33. 鹿野斷層。（b）利用 2005-2015 年 GPS 連續站（藍色箭頭）及 GPS 移動站（橘紅色箭頭）資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站）。

表 2-8.1：圖 2-8.1 中所示 33 條斷層之幾何參數。

	斷層名稱	傾角（degree）	斷層底部深度（km）
1	山腳	65.0	12.5
2	湖口	50.0	9.0
3	新竹	50.0	10.0
4	新城	40.0	10.0
5	獅潭	50.0	8.0
6	三義	30.0	8.0
7	大甲	25.0	8.0
8	屯子腳	80.0	10.0
9	彰化	25.0	10.0
10	車籠埔	北段：25.0;南段：35.0	10.0
11	大茅埔ㄧ雙冬	45.0	12.0
12	九芎坑	30.0	7.0
13	梅山	75.0	12.5
14	大尖山	45.0	10.0
15	觸口	40.0	10.0
16	義竹	70.0	10.0
17	木屐寮ㄧ六甲	40.0	6.0
18	新化	80.0	12.5
19	後甲里	65.0	4.0
20	左鎮	70.0	10.0
21	梅嶺	30.0	7.0
22	小崗山	45.0	10.0
23	旗山	58.0	13.0
24	潮州	60.0	17.5
25	恆春	57.5	16.0
26	米崙	65.0	30.0
27	嶺頂	65.0	30.0
28	奇美	85.0	25.0
29	瑞穗	65.0	30.0
30	玉里	51.0	10.0
31	池上	60.0	0.0 – 20.0
		25.0	20.0 – 27.0
32	利吉	55.0	0.0 – 22.0
		40.0	22.0 – 30.0
33	鹿野	30.0	5.0

2-8-2 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 2005-2015 所觀測的連續測站及移動站之平均水平速度場，包含了 442 個連續測站及 804 個 campaign 測站資料（圖 2-8.1）。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 2-8.2 及圖 2-8.3a、b；表 2-8.2），圖 2-8.2 中顯示各塊體皆位於臺灣周圍，由我們所推求的水平速度（圖 2-8.3b），可看出部份塊體旋轉速率較大（圖 2-8.3a），圖 2-8.4a、b、c 分別顯示本區域的斷層長期滑移速率、滑移虧損率及間震期滑移速率等值。圖 2-8.5 則顯示本研究區域的三種水平速度場，分別是 GPS 觀測值(a)、塊體模型所預測的值(b)，以及上述兩者的差別(殘差值, c)。由此圖可知，在大部分地區，觀測值和塊體模型預估的水平運動有很好的一致性，而預估較差的部分則落在瑞穗斷層至利吉斷層兩側的塊體，推測此現象可能是因為該區塊體幾何較複雜，且較多大規模地震發生於此，較易受到震後效應的影響，使本區塊體模型的預測結果不如預期。

除此之外，為了評估各塊體可能存在的內部變形（internal deformation），我們利用 block modeling 來推算南部塊體的內部應變率（internal strain rate）。結果如圖 2-8.6，顯示臺灣的塊體主應變軸以東西向壓縮應變、南北向伸張應變為主，平均應變率約為 200 nanostrain/yr。這個結果和一些前人直接由 GPS 觀測值求得的應變速率場相似，間接說明了 block modeling 的正確演算過程。

在此針對本階段 8 條東臺灣的斷層─米崙、嶺頂、奇美、瑞穗、玉里、池上、利吉及鹿野斷層進行探討，結果陳述如下。

表 2-8.3 顯示此 8 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。

間震期滑移速率為長期滑移速率減去滑移虧損率，由於斷層深部設定成自由滑動的，本研究將地表及斷層一半深度的滑移虧損率作平均，得到米崙斷層之平均滑移虧損率為 1.77 mm/yr，嶺頂斷層的平均長期滑移速率雖有 10.95 mm/yr，但其平均滑移虧損率僅 3.40 mm/yr，表示其間震期鎖定程度偏低；而瑞穗斷層的平均長期滑移速率分別為 17.25 mm/yr，比北端的米崙斷層及嶺頂斷層的平均長期滑移速率高，因為此區的速度場在跨斷層有明顯變化（圖 2-8.4a），這樣的速度變化使瑞穗斷層上有較大的滑移虧損，奇美斷層的平均長期滑移速率及平均滑移虧損率偏低，各為 3.68 mm/yr 及 1.62 mm/yr。縱谷南部地區中，鹿野斷層、玉里斷層及池上斷層的平均長期滑移速率較高，依序為 20.46 mm/yr、17.79 mm/yr 及 16.82 mm/yr，而平均滑移虧損率則分別為 6.60 mm/yr、6.00 mm/yr 及 3.81 mm/yr，顯示池上斷層於間震期之鎖定程度比另外兩條斷層低（圖 2-8.4b），與此斷層已知的震間潛移（interseismic creeping）行為吻合。利吉斷層的平均長期滑移速率及平均滑移虧損率雖僅有 3.68 mm/yr 及 1.62 mm/yr，但由滑移虧損分布仍可看出斷層淺部的鎖定程度比深部高（圖 2-8.4c）。此外，模型所估算的鹿野斷層測地長期滑移速率明顯較地質滑移速率為高，可能是因為此區較窄的 GPS 測網展距（aperure）所引入的反演偏差，也可能和 1951 年臺東地震（M_L=6.0）的震後效應有關。

本研究假設所有斷層近地表處皆為鎖定狀態，故大部份斷層面上間震期滑移速率在地表附近都接近 0（圖 2-8.4d）。由於滑移虧損率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，本研究中平均滑移虧損率較大的地區落在瑞穗斷層、玉里斷層及鹿野斷層，各為 7.61 mm/yr、6.00 mm/yr 及 6.60 mm/yr。以上研究顯示在本階段臺灣東部地區以瑞穗、玉里及鹿野斷層有較大的滑移虧損，而其餘斷層的滑移虧損相對較小。

模型結果顯示，瑞穗斷層的滑移虧損率較其北邊的米崙與嶺頂斷層為高，而玉里、利吉及鹿野斷層考慮到一半深度時也有較高的滑移虧損率，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，而由於跨米崙斷層與利吉斷層的水平速度場變化很小，因此這兩條斷層的滑移虧損也就偏低。

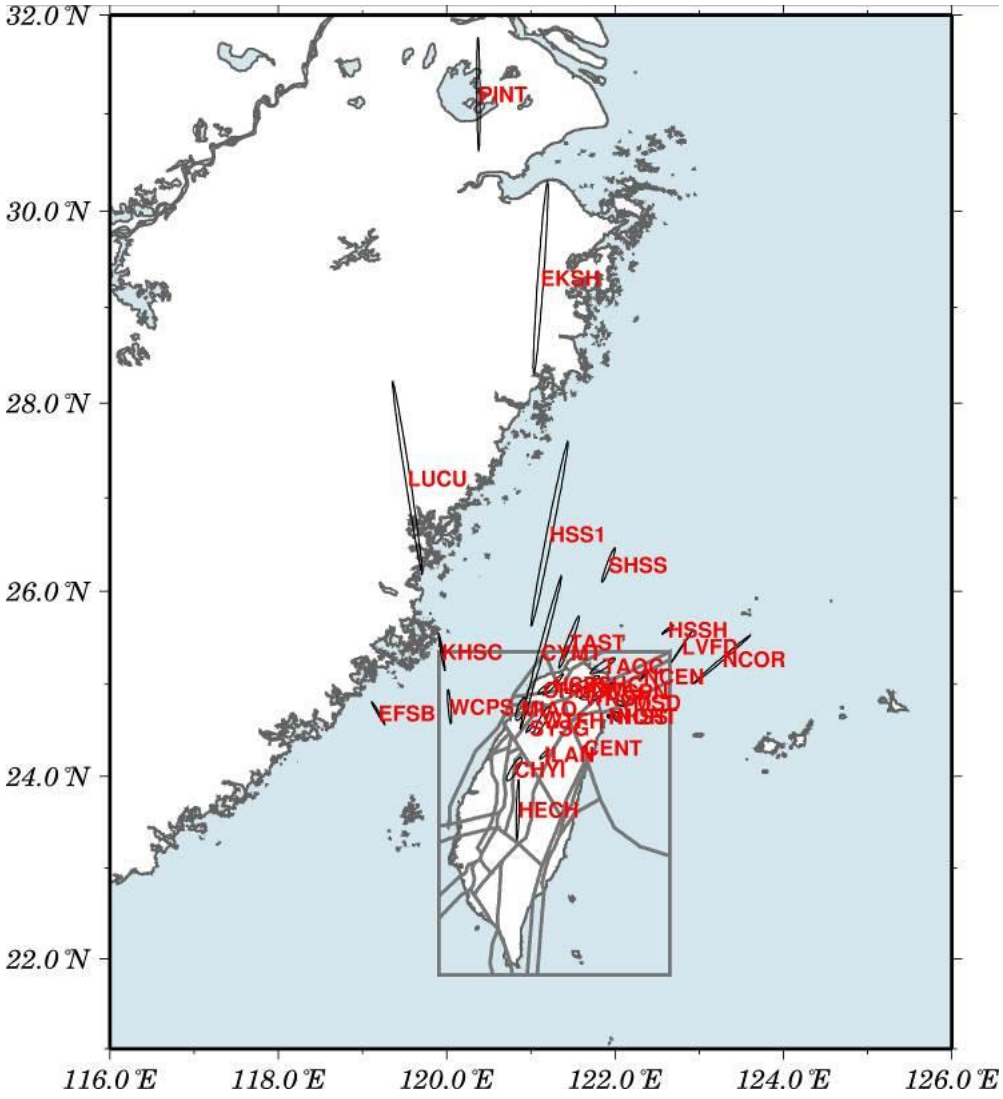


圖 2-8.2：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 2-8.1）。

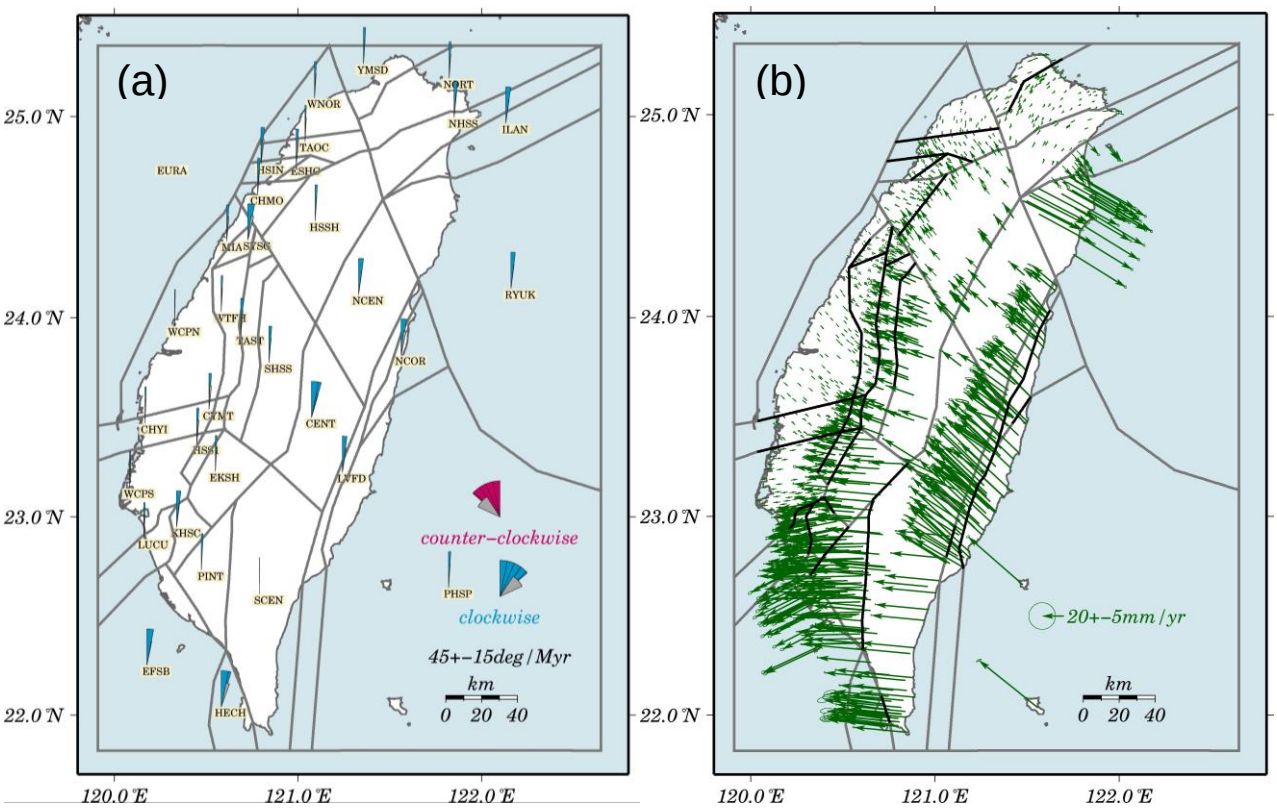


圖 2-8.3：（a）最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler's pole 為軸的旋轉角速度。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15º/My 的角速度。（b）以圖 a 中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。

表 2-8.2：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	180.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	180.00
CHYI	120.79	23.99	-2.35	0.55	0.27	0.08	34.71
WCPS	119.95	24.78	-1.75	0.26	0.39	0.03	173.09
EKSH	121.10	29.11	-2.73	0.62	1.92	0.07	4.02
LUCU	119.35	26.83	-2.15	0.72	1.88	0.05	167.97
KHSC	119.93	25.41	-7.23	0.83	0.42	0.02	170.34
PINT	120.35	31.23	-3.17	0.31	1.18	0.04	179.39
EFSB	119.16	24.70	-11.08	0.82	0.28	0.02	149.47
SCEN	114.57	-40.35	0.50	0.16	45.17	0.34	6.76
CYMT	121.15	25.39	-3.95	2.52	1.75	0.05	15.52
HSS1	121.16	26.84	-3.88	1.57	2.05	0.06	9.56
HECH	120.96	23.60	-16.42	4.59	0.63	0.04	5.42
WCPN	121.74	25.00	-1.11	0.14	0.29	0.07	48.00
WTFH	121.02	24.52	-2.56	0.80	0.27	0.07	23.31
MIAO	120.76	24.70	-3.40	1.54	0.23	0.07	4.39
SHSS	121.97	26.37	-4.66	0.49	0.42	0.04	20.87
CHMO	121.07	24.97	-4.04	0.87	0.13	0.04	37.93
HSSH	122.61	25.57	-3.59	0.25	0.16	0.02	51.97
TAST	121.51	25.54	-4.54	1.18	0.66	0.05	21.41
SYSG	120.96	24.56	-11.04	3.41	0.11	0.03	29.29
TAOC	121.89	25.28	-2.22	0.63	0.33	0.06	55.81
WNOR	121.60	24.87	-3.14	0.48	0.09	0.03	95.17
HSIN	121.31	24.95	-5.17	1.79	0.24	0.05	50.96
ESHC	121.31	25.08	-3.98	1.92	0.29	0.06	36.94
YMSD	121.73	24.66	-3.42	0.59	0.13	0.03	153.03
NORT	121.98	24.72	-2.70	0.47	0.09	0.05	170.60
NHSS	121.92	24.65	-5.45	0.50	0.04	0.02	170.13
CENT	121.61	24.31	-16.53	0.63	0.06	0.01	25.57
ILAN	121.03	24.21	-7.94	0.67	0.15	0.04	46.77
RYUK	119.43	20.81	-7.12	0.28	0.26	0.04	29.56
NCEN	122.35	25.08	-8.26	0.29	0.07	0.01	43.04
LVFD	122.99	25.57	-8.00	1.13	0.57	0.02	35.05
PHSP	129.33	30.25	-3.35	0.54	2.41	0.11	46.20
NCOR	123.37	25.30	-9.55	2.80	0.94	0.04	50.41

表 2-8.3：斷層之地質滑移速率約束值（Shyu et al, 2016）及平均滑移速率。

斷層名稱	地質長期滑移速率最小值 (mm/yr)	地質長期滑移速率最大值 (mm/yr)	測地長期平均滑移速率（mm/yr）	標準差	平均滑移虧損率（mm/yr）	標準差
山腳	1.09	2.60	1.46	0.83	1.05	0.97
湖口	0.32	2.00	0.47	2.51	0.39	1.92
新竹	0.24	1.17	2.26	1.54	2.26	1.54
新城	0.60	3.00	1.26	3.43	1.25	3.41
獅潭	0.62	3.11	2.82	4.04	2.17	3.23
三義	0.62	3.09	5.05	2.75	1.74	2.76
大甲			3.27	2.61	3.27	2.61
屯子腳	0.33	1.68	4.08	4.29	1.40	2.76
彰化	1.13	5.66	2.66	6.73	1.20	2.45
車籠埔	0	6.94	6.53	1.69	2.24	3.46
大茅埔—雙冬	0.66	3.34	3.08	1.78	0.66	1.01
九芎坑	2.40	12.00	8.45	6.40	1.85	3.01
梅山	0	2.51	3.06	5.44	0.24	2.45
大尖山			11.10	1.32	4.43	5.28
觸口			17.23	12.06	5.95	7.93
義竹			9.97	9.97	9.69	9.75
木屐寮—六甲	4.40	7.10	3.90	5.80	1.34	3.39
新化	0.80	4.50	1.15	1.87	0.78	1.30
後甲里	0	7.07	2.57	0.96	0.81	1.32
左鎮			1.72	3.11	0.61	2.24
梅嶺			15.48	4.54	7.34	7.51
小崗山	1.10	5.50	19.59	5.74	5.09	7.91
旗山	0.73	1.46	2.96	5.02	1.65	2.87
潮州	0.59	2.93	3.26	1.92	1.11	2.03
恆春	5.86	6.44	6.47	4.41	4.15	5.98
米崙	10.12	10.19	9.28	28.33	1.77	2.71
嶺頂	5.60	17.10	10.95	5.38	3.40	5.50
瑞穗	5.60	17.10	17.25	2.19	7.61	9.13
奇美			3.68	2.68	1.62	2.50
玉里	5.60	17.10	17.79	1.02	6.00	9.05
池上	5.60	17.10	16.82	1.78	3.81	5.58
利吉	5.60	17.10	3.68	2.68	1.62	2.50
鹿野	6.17	6.51	20.46	1.63	6.60	10.23

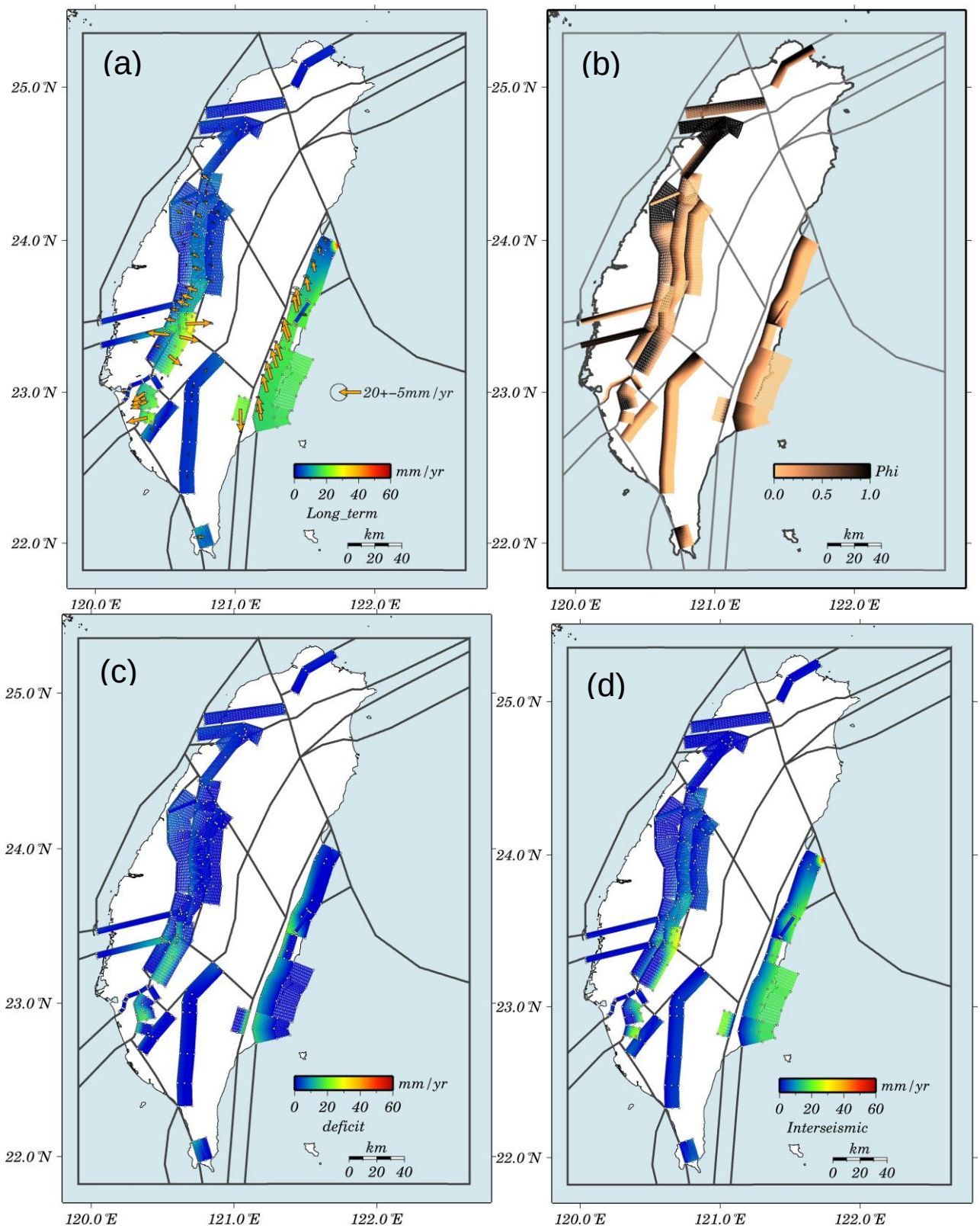


圖 2-8.4：（a）推求的斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層的地表位置。橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。（b）各斷層面的鎖定係數（coupling coefficient）分布。（c）各斷層面的滑移虧損率。（d）由（a）圖減去（c）圖，得到斷層面上的間震期滑移速率。

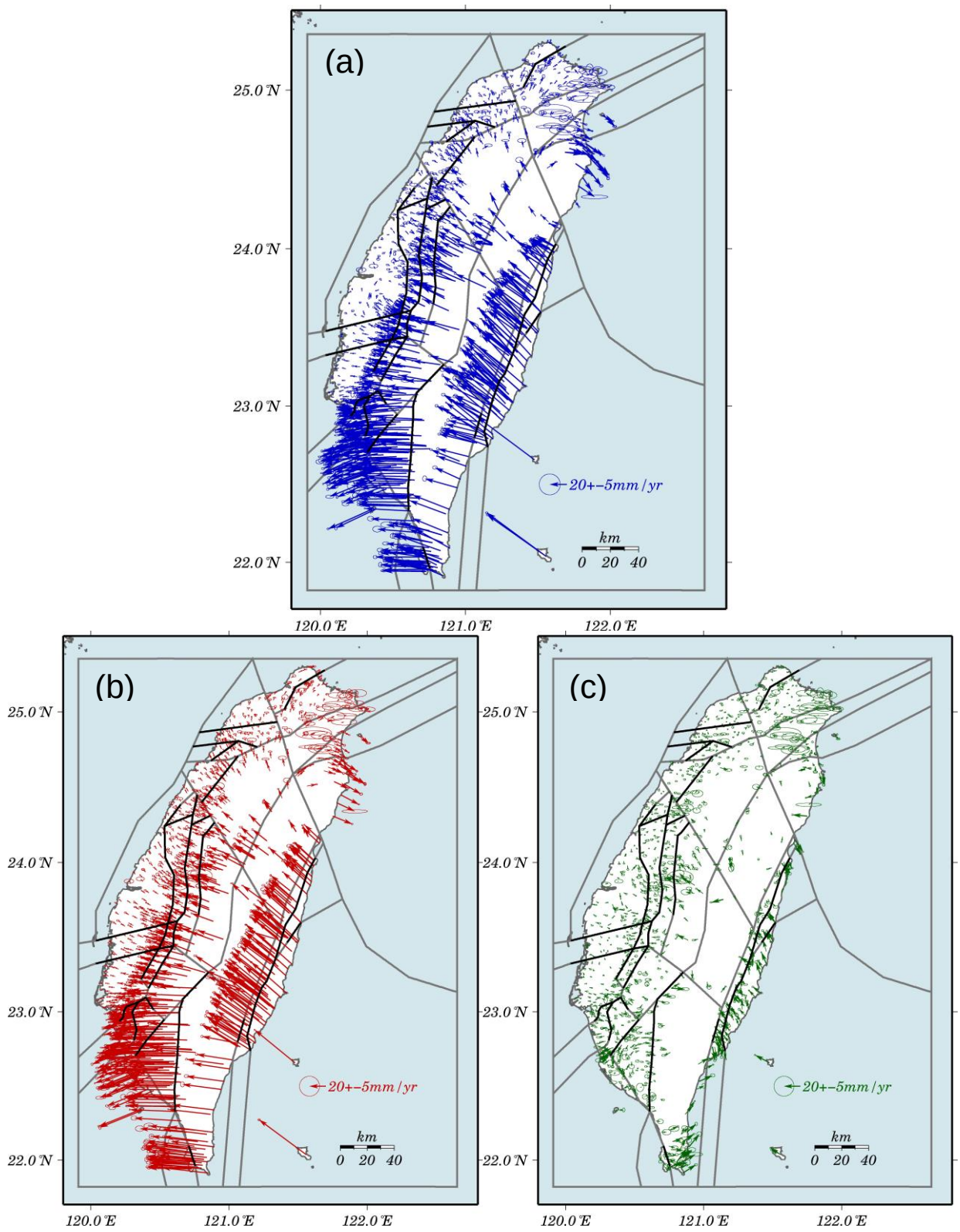


圖 2-8.5：比較 GPS 觀測速度場（圖 a）以及本研究所得之最佳塊體模型所預估的地表運動（圖 b）。圖 c 表示模型預估的殘差值，其對應之 reduced χ^2 為 152.489，黑線代表各斷層的地表位置。

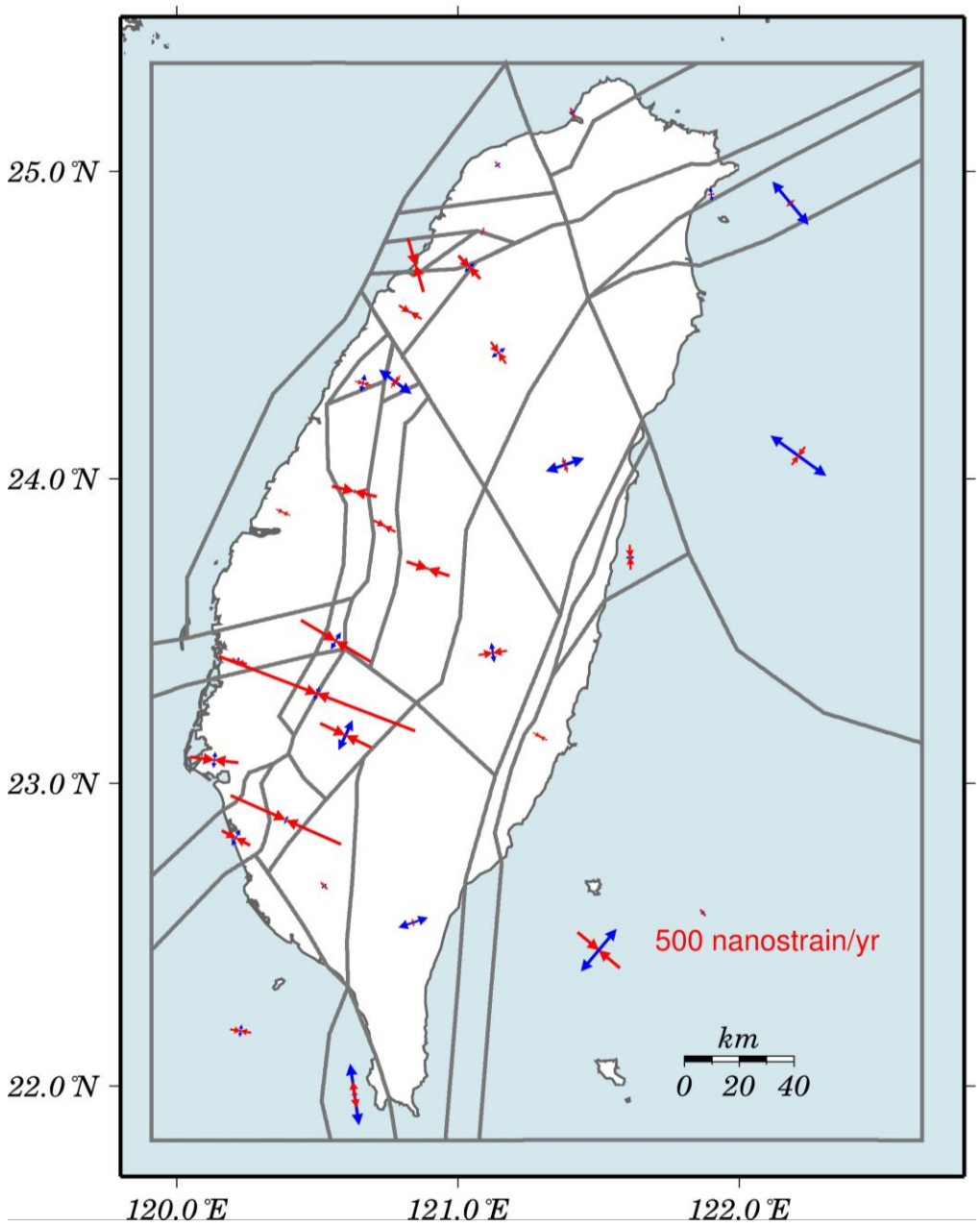


圖 2-8.6：各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

2-8-3 斷層之測地矩率及未來發震規模

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

$$\dot{M} = \mu A \dot{D} \qquad \text{（式 2-8.1）}$$

$$M_0 = \dot{M} \times T \qquad \text{（式 2-8.2）}$$

$$M_w = \frac{2}{3}(\log M_0 - 9.1) \qquad \text{（式 2-8.3）}$$

注意的是，以上的估算是假設未來各斷層滑移虧損率不隨時間變化，也就是維持相同的值。然而利用測地資料進行斷層潛勢評估的優勢，即在於所評估的結果可隨時間更新修正。由於臺灣位處板塊邊緣，地殼活動相對劇烈，因此由測地資料所得地表速度場應會隨時間有可觀測的變化。因此表 2-8.4 中估算的未來地震規模也可能會隨時間而有所修正。另外，為了考慮每條斷層自上一次活動至今所累積的應變能，本研究彙整了數篇針對各斷層上一次活動的文獻，並計算上一次活動至今小於 10,000 年的斷層地震潛勢，將結果列於表 2-8.4。

表 2-8.4：斷層之滑移虧損與推估規模。

	斷層長度 (km)	平均滑移虧損率 (mm/yr)	標準差	測地矩率 Mw (N-m)	測地矩率標準差	上一次活動至未來 30 年 Mw	上一次活動至未來 50 年 Mw	上一次活動距今時間 (yr)
山腳	42.7	1.05	0.97	2.67×10^{16}	1.21×10^{15}	6.38	6.41	149
湖口	57.3	0.39	1.92	2.47×10^{16}	1.20×10^{15}	NA	NA	30000
新竹	33.7	2.26	1.54	4.10×10^{16}	1.06×10^{15}	NA	NA	晚更新世
新城	39.1	1.25	3.41	5.06×10^{16}	9.05×10^{14}	6.74	6.76	300
獅潭	43.1	2.17	3.23	5.02×10^{16}	5.78×10^{14}	6.43	6.48	81
三義	22.4	1.74	2.76	2.10×10^{16}	5.00×10^{14}	NA	NA	全新世
大甲	34.1	3.27	2.61	8.05×10^{16}	5.42×10^{14}	6.73	6.75	168
屯子腳	22.4	1.40	2.76	9.57×10^{15}	5.50×10^{14}	5.95	6.00	81
彰化	45.2	1.20	2.45	5.41×10^{16}	3.87×10^{14}	6.62	6.65	171
車籠埔	71.5	2.24	3.46	8.23×10^{16}	7.57×10^{14}	6.32	6.42	17
大茅埔-雙冬	71.7	0.66	1.01	2.91×10^{16}	1.77×10^{15}	6.02	6.12	17
九芎坑	34.3	1.85	3.01	3.34×10^{16}	4.22×10^{14}	NA	NA	18540
梅山	61.6	0.24	2.45	2.59×10^{16}	1.04×10^{15}	6.31	6.35	110
大尖山	27.3	4.43	5.28	6.61×10^{16}	3.76×10^{14}	6.26	6.36	17
觸口	45.5	5.95	7.93	2.68×10^{17}	2.17×10^{14}	NA	NA	38000
義竹	58.9	9.69	9.75	1.86×10^{17}	5.47×10^{14}	NA	NA	NA
木屐寮-六甲	25.9	1.34	3.39	1.78×10^{16}	3.59×10^{14}	7.44	7.44	10000
新化	16.0	0.78	1.30	6.82×10^{15}	6.78×10^{14}	5.82	5.88	70
後甲里	12.3	0.81	1.32	1.34×10^{15}	1.45×10^{14}	5.53	5.56	154
左鎮	10.7	0.61	2.24	4.67×10^{15}	5.74×10^{14}	NA	NA	晚更新世
梅嶺	22.2	7.34	7.51	8.64×10^{16}	1.14×10^{14}	NA	NA	NA
小崗山	7.9	5.09	7.91	1.85×10^{16}	1.37×10^{14}	NA	NA	NA
旗山	34.2	1.65	2.87	2.03×10^{16}	1.08×10^{15}	7.38	7.38	7189±160
潮州	111.8	1.11	2.03	9.41×10^{16}	2.10×10^{15}	NA	NA	全新世
恆春	15.7	4.15	5.98	4.66×10^{16}	7.70×10^{14}	7.48	7.48	4450-4310
米崙	8.1	1.77	2.71	2.11×10^{16}	8.26×10^{14}	6.14	6.19	65
嶺頂	38.0	3.40	5.50	1.30×10^{17}	1.52×10^{15}	NA	NA	NA
奇美	17.8	1.62	2.50	3.24×10^{16}	1.12×10^{15}	NA	NA	晚更新世
瑞穗	23.1	7.61	9.13	2.10×10^{17}	1.05×10^{15}	6.52	6.67	65
玉里	17.5	6.00	9.05	4.10×10^{16}	2.77×10^{14}	6.33	6.38	65
池上	44.0	3.81	5.58	2.32×10^{17}	9.61×10^{14}	6.83	6.88	65
利吉	22.8	1.62	2.50	1.69×10^{17}	8.46×10^{14}	7.58	7.58	1690-1530
鹿野	17.7	6.60	10.23	3.56×10^{16}	5.34×10^{14}	7.19	7.19	2110-1890

2-8-4 小結

本期報告加入 33 條活動斷層作為塊體邊界斷層，其中臺灣東部的活動斷層包含米崙、嶺頂、奇美、瑞穗、玉里、池上、利吉及鹿野等 8 條斷層，本研究將各構造線作為塊體邊界以符合現在地調所公布之活動斷層分布。針對本階段的 8 條東部斷層來討論，DEFNODE 估算的結果，顯示米崙斷層與嶺頂斷層上的平均滑移虧損率相對較低，分別為 1.77 mm/yr 與 3.40 mm/yr，在瑞穗斷層則計算出 7.61 mm/yr 的平均滑移虧損率，奇美斷層之平均長期滑移速率（3.68 mm/yr）與平均滑移虧損率（1.62 mm/yr）則偏低，而縱谷南部地區中，鹿野斷層、玉里斷層及池上斷層的平均長期滑移速率約介於 16~20 mm/yr，但池上斷層之平均滑移虧損率（3.81 mm/yr）卻較另外兩條斷層（約 6 mm/yr）低，顯示池上斷層於間震期之鎖定程度較低，而利吉斷層之平均長期滑移速率及平均滑移虧損率則各為 3.68 mm/yr 及 1.62 mm/yr。本階段東臺灣之活斷層以瑞穗、玉里及鹿野斷層之滑移虧損率較高，米崙、嶺頂、奇美、池上及利吉斷層斷層面上反應的滑移虧損相對較低，而跨過瑞穗、玉里及鹿野斷層的速度梯度較大，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（6~8 mm/yr）。總結來說，本階段臺灣東部以瑞穗斷層、玉里斷層與鹿野斷層具有相對較高的滑移虧損累積，而米崙、嶺頂、奇美、池上及利吉斷層的構造活動度較低，反應在斷層面上之滑移虧損也較低。

第三章、活動斷層發生潛勢圖建置

3-1 米崙斷層

3-1-1 米崙斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：

米崙斷層又稱為花蓮斷層（林朝棨，1962）或美崙斷層（楊貴三，1986）。由花蓮縣七星潭海岸向南延伸至花蓮市美崙山西南側，長約 8 公里（Hsu, 1956），如圖 3-1.1 所示，鍾令和（2003）將南米崙階地群以高程差異分為 9 個階地群，研判可能是多次大地震所造成的抬升，如圖 3-1.2 所示。

另外，由海底地形圖及震測剖面可判斷米崙斷層出七星潭後拐向東北方外海（何邦碩，1974），Bonilla（1977）認為米崙斷層為延伸至海底的逆衝斷層。Shyu et al.（2005）提到美崙台地出海後，有一海底山往外海延伸約 10 公里，並描繪出花蓮區及米崙斷層外海可能的活動構造分布（圖 3-1.3）。

考慮 1951 年花蓮地震可產生規模 7 以上的地震，米崙斷層的破裂模式應不只 8 公里。參考 Shyu et al.（2005）米崙斷層外海可能的活動構造分布（圖 3-1.3），本計畫推估米崙斷層在東北海域延伸長度可達 25 公里，而南邊出海後延伸約 2 公里，總長度為 35 公里（圖 3-1.4）。



圖 3-1.1：米崙斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。

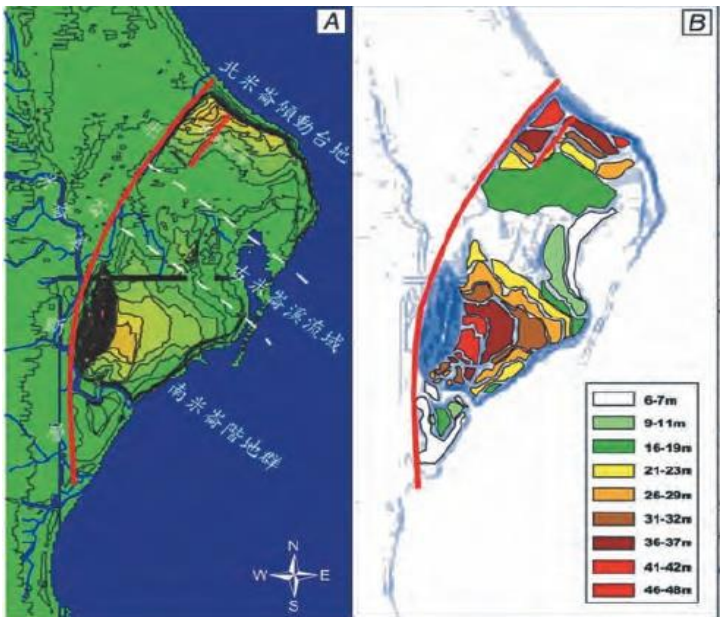


圖 3-1.2：A.花蓮地區數值模型地形圖。B.利用坡度與高程差分析所得米崙台地上階地分佈圖（鍾令和，2003）。

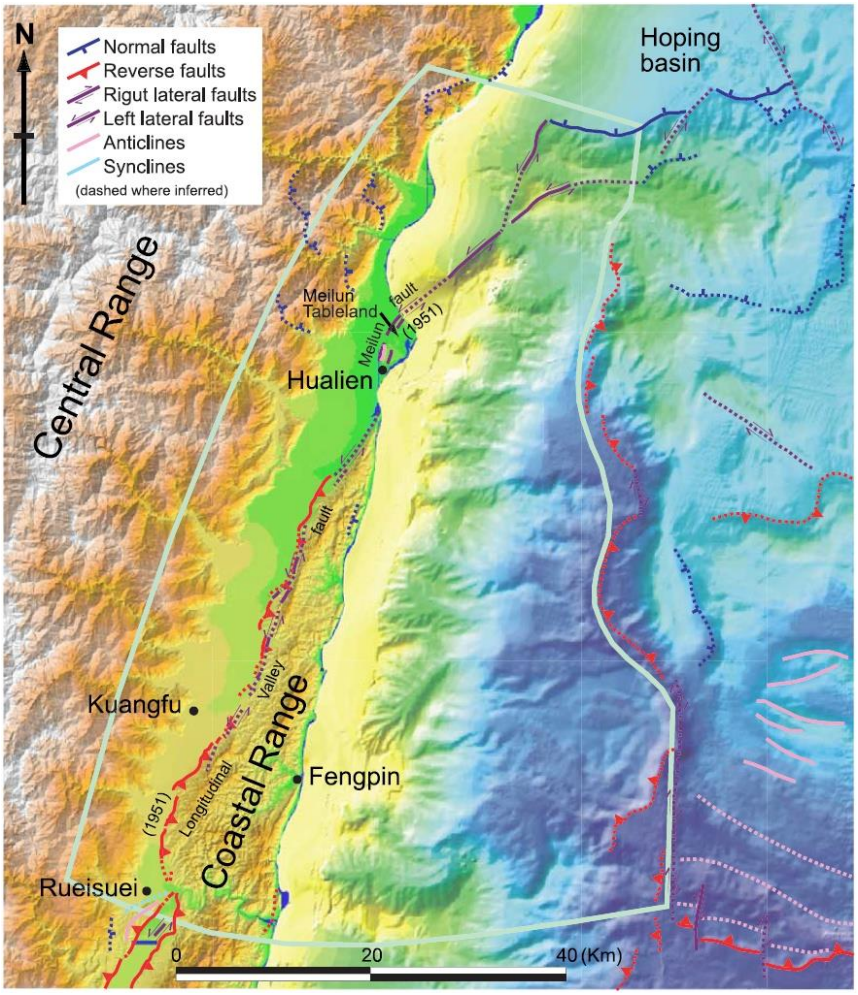


圖 3-1.3：花蓮區活動構造分布圖（Shyu et al., 2005）。

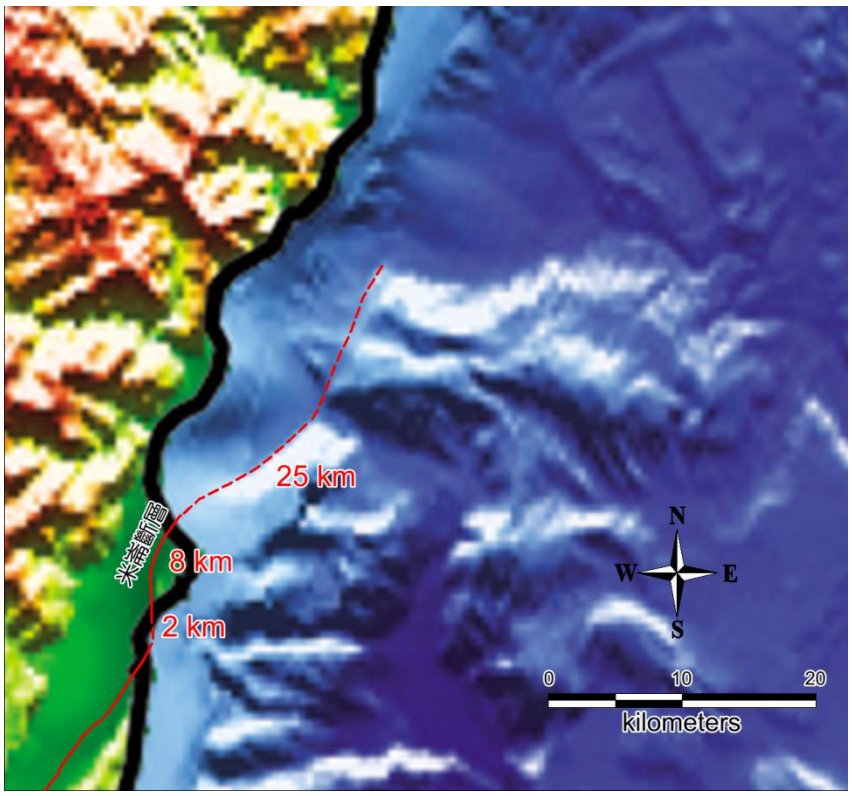


圖 3-1.4：米崙斷層外海延伸推估。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 余水倍等人（Yu et al., 1990）經斷層運動學模擬分析顯示，將米崙台地視為海岸山脈的一部份，所得模擬之最佳值顯示斷層向東傾 51.4 度。

(2) 圖 3-1.5 為花蓮地區之淺層震測剖面及推估之地質剖面（朱傚祖與游明聖，1996），由 A2 震測剖面推估米崙斷層淺部為高角度斷層，B3 震測剖面則顯示民意斷層為向西傾斜的斷層。推斷民意斷層為米崙斷層之背衝斷層，如圖 3-1.5 之 AA'地質剖面所示。

(3) 圖 3-1.6 為臺灣東部地區利用 hypoDD 重定位之 1991-2002 地震分布（Kuochen et al., 2004），其中 B 剖面即位於米崙斷層所在位置，在米崙斷層處 10 公里深度有地震密集區。

(4) 陳俊甫（2013）選取西元 1991 年至 2010 年間的地震目錄資料，經過 3DCOR 重定位後，其深度分布如圖 3-1.7 所示，圖 3-1.7（b）的群集 1 位於美崙台地區域，圖 3-1.8 則為美崙台地區域之地震東西向震源剖面分析。從圖 3-1.8 之剖面中可看到明顯的構造線，但是該構造線延伸至地表並非位於米崙斷層之地表位置。而位於米崙斷層下方並沒有任何向東傾的線性分布，代表著米崙斷層在近 20 年間並沒有任何的地震活動。

米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-1.1。

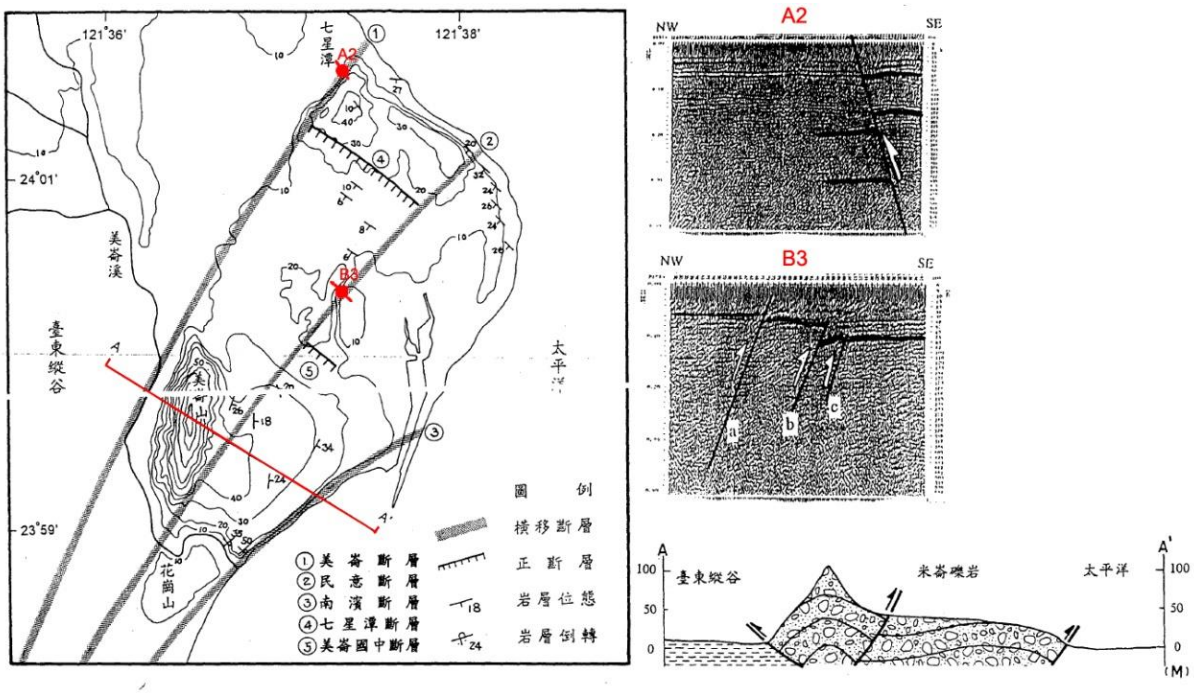


圖 3-1.5：花蓮地區震測剖面及地質剖面圖（修改自朱傚祖與游明聖，1996）。

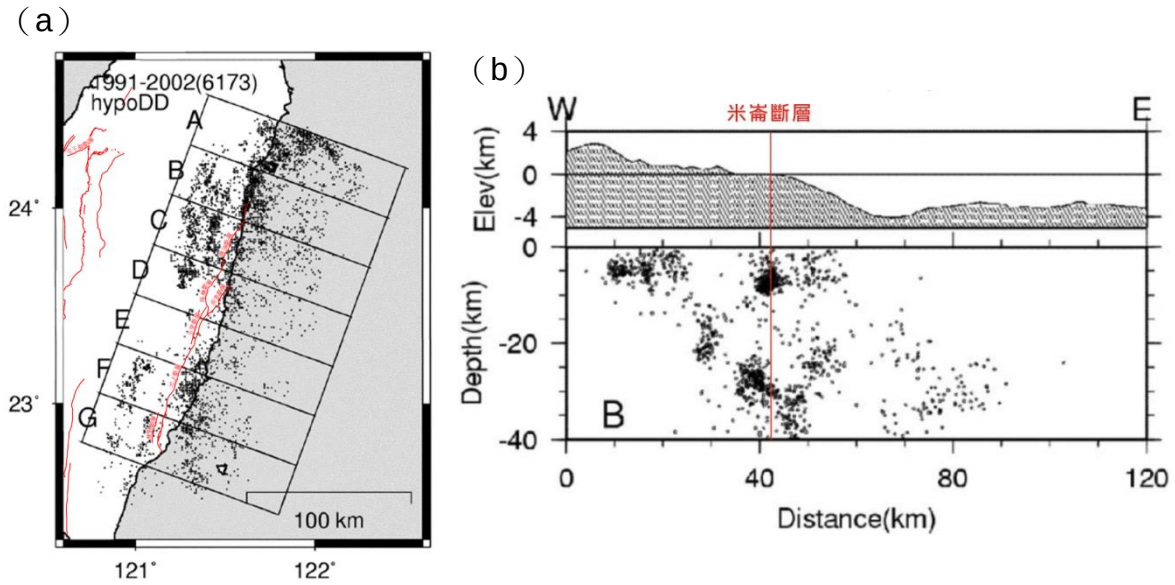


圖 3-1.6：（a）臺灣東部地區 1991-2002 之地震，利用 hypoDD 重定位，紅色線段為斷層線（b）N110°E 方向之地震深度分布投影剖面，剖面中選取之地震為（a）中之 B 矩形內之地震（修改自 Kuochen et al., 2004）。

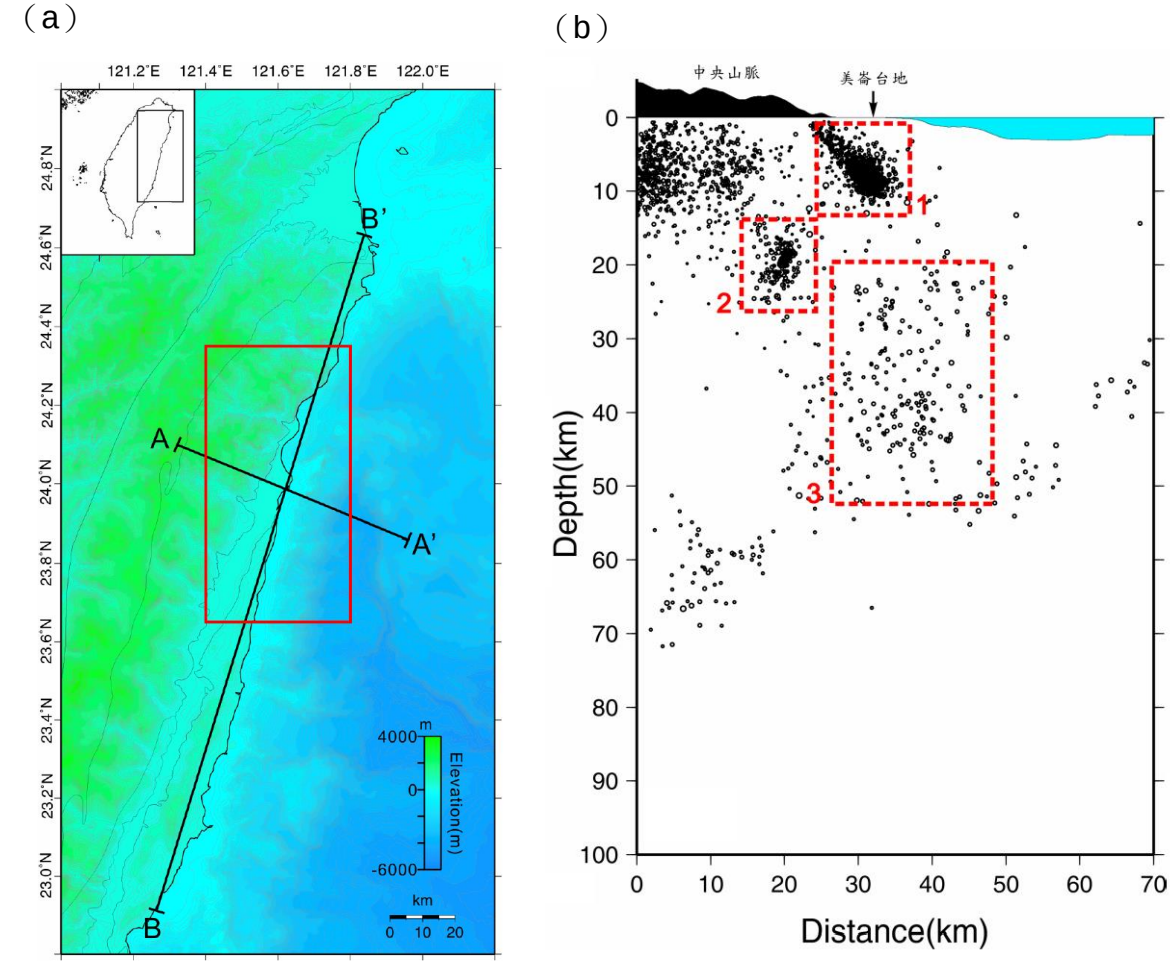


圖 3-1.7：（a）地震震源剖面分析之剖面位置以及投影寬度圖。（b）剖面 A 地震的震源分布。圖上紅色虛線方框為定位後地震震源分布較密集的區域（陳俊甫，2013）。

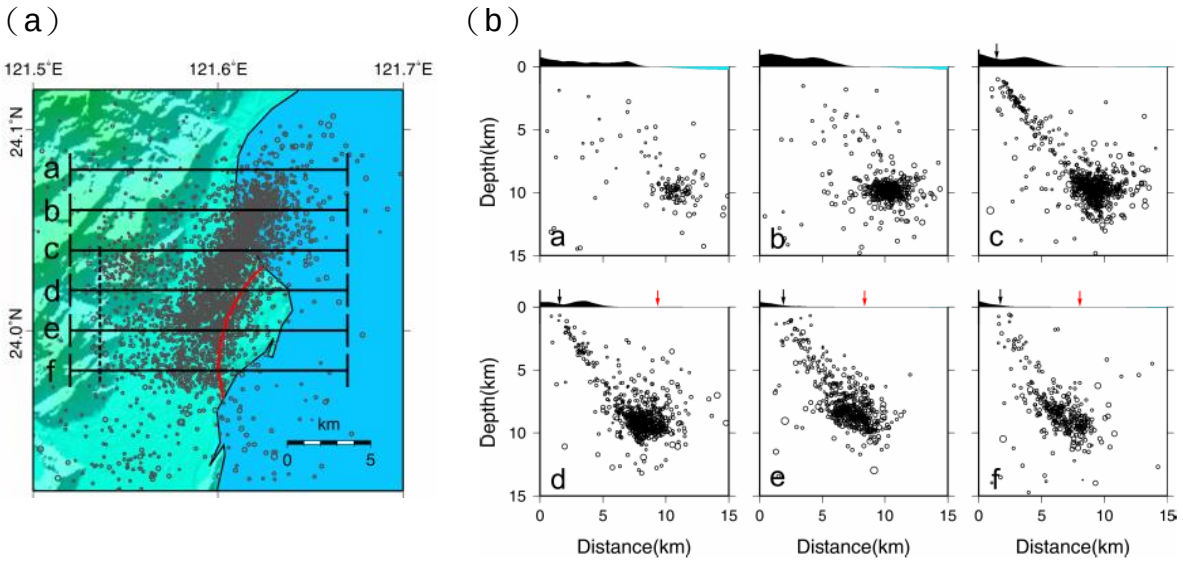


圖 3-1.8：美崙台地區域之東西向的震源剖面分析。（a）震央分布圖和東西向剖面的位置以及投影寬。黑色虛線為地震資料顯示之構造線延伸至地表的位置，紅色實線為米崙斷層的位置。（b）東西向震源剖面 a 至 f 的結果。震源分布可以對應到圖 3-1.7 的群集 1，黑色箭頭為構造線可能出露的位置，紅色箭頭為米崙斷層的地表可能出露的位置（陳俊甫，2013）。

表 3-1.1：米崙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
Yu et al., 1990	斷層運動學模擬分析	51.4±5.8 度	
朱傚祖與游明聖，1996	淺層震測剖面	淺部為高角度斷層	
Kuochen et al., 2004	利用 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	NA	在 10 公里深度有一地震密集區
陳俊甫，2013	1991-2010 地震深度分布	NA	地震群非米崙斷層構造線

3. 斷層機制：綜合 1951 年花蓮地震地表破裂與米崙斷層的長期活動位移型態來看，基本上都是以左移滑移為主、逆衝為輔。
4. 短期滑移速率：參照表 3-1.5。
5. 長期滑移速率：
   (1) Konishi et al.（1968）針對米崙台地上的珊瑚礁樣本進行碳 14 及 U/Th 定年，碳 14 定年得到的年代為 2880±115 Y.B.P.，U/Th 定年得到的年代為 4200±370 Y.B.P.。
   (2) Lin(1969)針對米崙台地上的兩個樣本進行碳 14 定年,得到的年代分別為 3991±269 Y.B.P.及 3200±300 Y.B.P.。
   (3) Peng et al.（1977）彙整上述兩者之定年資料以及樣本之高程，得到如表 3-1.2 之資料。
   (4) Yamaguchi and Ota（2004）利用碳 14 定年米崙斷層上盤台地之珊瑚樣本 HT28，其位置如圖 3-1.9 所示，年代為 2297-2618 Y.B.P.。
   (5) 陳俊甫（2013）在美崙台地北部海邊採珊瑚樣本進行 U/Th 定年，樣本位置及高程如圖 3-1.10 所示，樣本定年資料及高程推估詳如表 3-1.3。

彙整前人定年之資料,並推估台地的抬升量,即可評估米崙台地之抬升速率,詳如表 3-1.4 所示，其中早期的碳 14 定年資料（Konishi et al., 1968；Lin, 1969；Peng et al., 1977）因未經校正，在本計畫中不予考慮。而本計畫認為米崙台地之抬升是由米崙斷層所貢獻，因此米崙台地之抬升速率可表示米崙斷層之長期抬升速率。

表 3-1.2：米崙地區碳 14 定年及珊瑚礁高程（改自 Peng et al., 1977）。

樣本名稱	碳 14 定年年代 (yr BP)	高程 (公尺)	變動海平面 (公尺)	最小抬升量 (公尺)	文獻
N407	2880±115	25	-2	27	Konishi et al., 1968
NTU13	3200±300	14	-2	16	Lin, 1969
NTU5	3991±269	20	-3	23	Lin, 1969

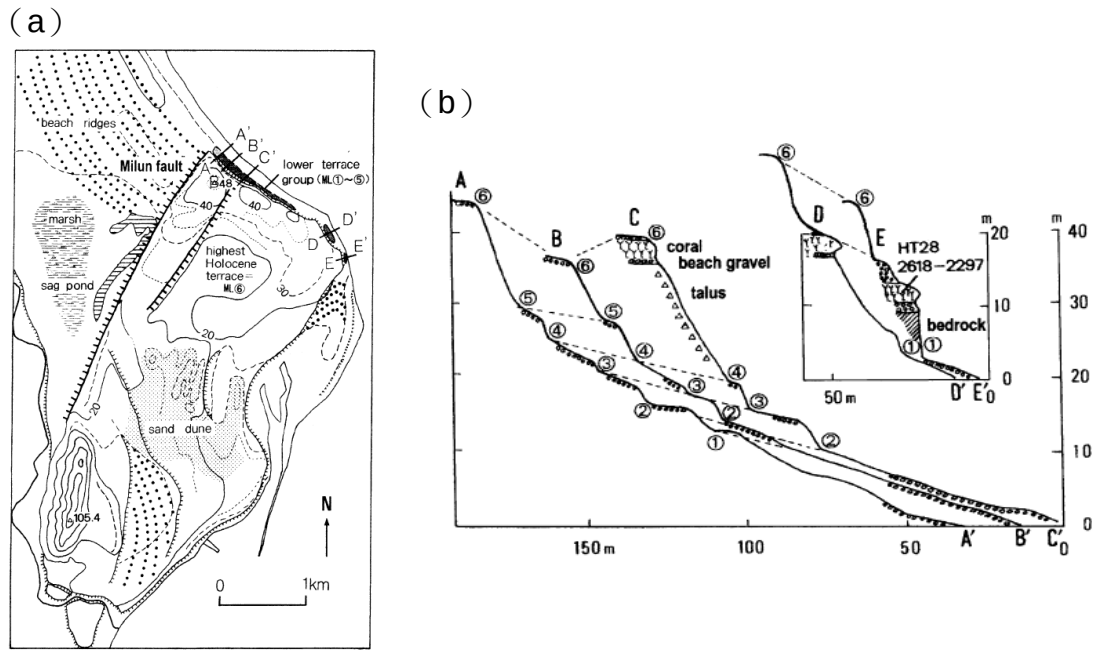


圖 3-1.9：（a）米崙台地地貌分布圖。（b）米崙台地東北角地形剖面圖（Yamaguchi and Ota, 2004）。

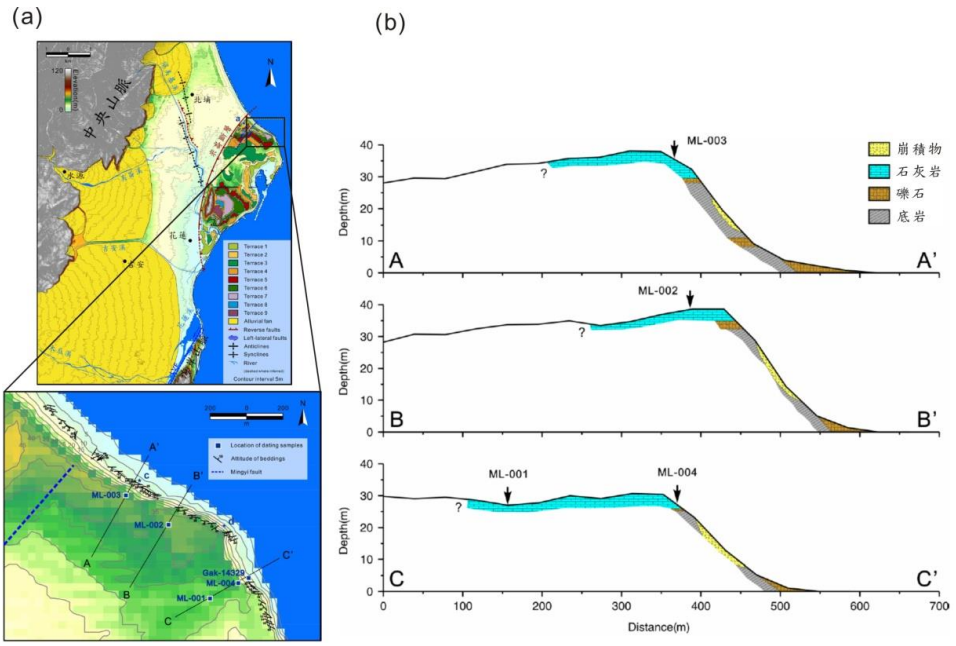


圖 3-1.10：（a） 美崙台地區域地形描繪及北邊臨海區域定年樣本的位置分布圖。（b）美崙台地北部之地質剖面圖，剖面位置詳如圖 3-1.10（a）下圖（陳俊甫，2013）。

表 3-1.3：米崙台地北邊臨海區域定年資料（陳俊甫，2013）。

樣本	方法	年代 (Y.B.P.)	高程 (公尺)	高程校正 (海水面) (公尺)
ML-001	U/Th 定年	6206±110	26.5	25.907
ML-002	U/Th 定年	6207±1561	38	37.668
ML-003	U/Th 定年	6441±142	36	35.579
ML-004	U/Th 定年	3936±16	28	27.292

表 3-1.4：米崙斷層各調查方法及抬升速率推估。

文獻	樣本	方法	年代 (Y.B.P.)	高程 (公尺)	抬升量 (考慮古海水面) (公尺)	抬升速率 (mm/yr)
Konishi, 1968 Peng et al., 1977	N407	碳 14 定年	2880±115	25	27	9.38
		U/Th 定年	4200±370			5.91-7.05
Lin, 1969 Peng et al., 1977	NTU-5	碳 14 定年	3991±269	20	23	5.76
Lin, 1969 Peng et al., 1977	NTU-13	碳 14 定年	3200±300	14	16	5.0
Yamaguchi and Ota, 2004	HT28	碳 14 定年	2297-2618	12	12	4.58-5.22
陳俊甫，2013	ML-001	U/Th 定年	6206±110	26.5	25.907	4.10-4.25
陳俊甫，2013	ML-002	U/Th 定年	6207±1561	38	37.668	4.85-8.11
陳俊甫，2013	ML-003	U/Th 定年	6441±142	36	35.579	5.4-5.65
陳俊甫，2013	ML-004	U/Th 定年	3936±16	28	27.292	6.91-6.96

6. 單一事件變位量：臺灣省氣象所（1951）指出 1951 年地震，花蓮機場東側抬升 50 公分，七星山抬升 120 公分，七星潭東側抬升 40 公分，在加禮彎路基上斷層東側向北移動 40 公分。林朝棨（1962）指出當年地震時斷層於七星潭，斷層東側向北移動 2.0 公尺，垂直上升 1.2 公尺，詳細的地震破裂分布詳圖 3-1.11 所示（朱傚祖與游明聖，1996）。

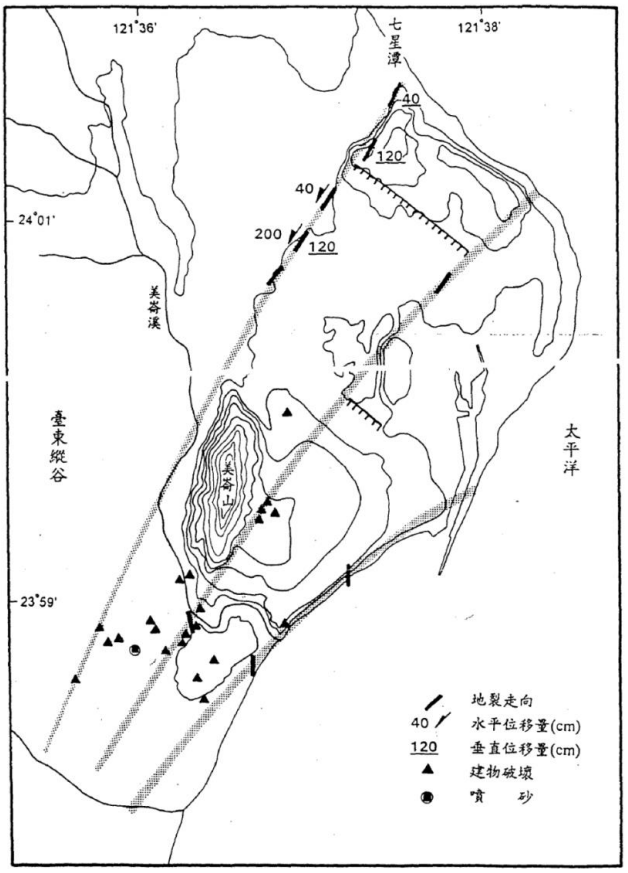


圖 3-1.11：1951 年花蓮地區地震破壞圖（朱傚祖與游明聖，1996）。

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：西元 1951 年 10 月 22 日與 11 月 25 日分別於花蓮及台東地區發生強震，1951 年 10 月 22 日花蓮地區分別於 05 時 34 分及 11 時 30 分發生兩次強震（臺灣省氣象所，1951）。兩次地震經重新定位指出：第一起地震震央位置位於花蓮東方外海（23.925°N, 121.725°E），震源深度 9 公里，表面波規模 Ms=7.4；第二起地震震央位置位於七星潭北部外海（24.100°N, 121.700°E），震源深度 30 公里，表面波規模 Ms=7.2（鄭世楠，1995），震央分布及斷層面解詳圖 3-1.12 所示。造成自七星潭海岸起，向南經花蓮市的地表破裂，地表破裂分布詳如圖 3-1.1。

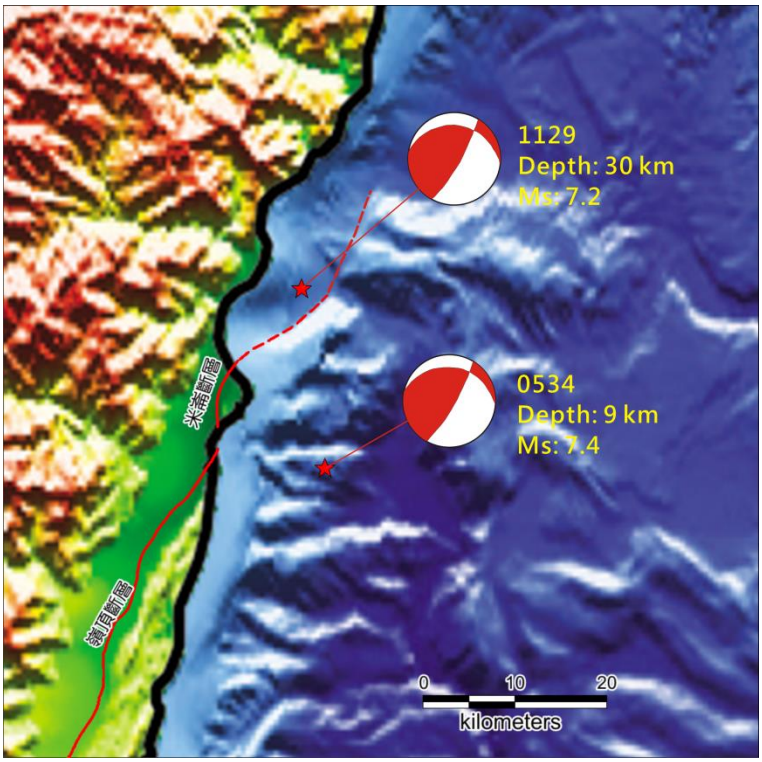


圖 3-1.12：1951 年花蓮地震震央分布及震源機制解（資料取自鄭世楠，1995）。

彙整前人對於米崙斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-1.5 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 3-1.5：米崙斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
米崙斷層	斷層分段與破裂事件	南段海域延伸 2 公里+陸域 8 公里+東北海域延伸 25 公里	遙測影像判釋、地形判釋、地震地表破裂	Hsu, 1956；林朝棨，1962；楊貴三，1986；何邦碩，1974；Bonilla, 1977；Shyu et al., 2005；林啟文等，2009
	長度(km)	35 km		
	寬度(km)	33.1	深度/sin 傾角 （以深度 30 公里，傾角 65 度計算）	
	破裂深度(km）	在 10 公里深度有一地震密集區	利用 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	Kuochen et al., 2004
		12 公里深度有地震群，但構造非屬米崙斷層	1991 -2010 年間的地震目錄，經過 3DCOR 重定位	陳俊甫，2013
	面積(km^2)	1159	長度×寬度	
	走向	陸域 N25E 海域 N40E	地形、遙測影像判釋，地表地質調查、地震地表破裂	Hsu, 1956；林朝棨，1962；楊貴三，1986；何邦碩，1974；Bonilla, 1977；Shyu et al., 2005；林啟文等，2009
	傾斜角度(度)	51.4±5.8 度	斷層運動學模擬分析	Yu et al., 1990
		淺部為高角度斷層	淺層震測剖面	朱傚祖與游明聖，1996
	斷層機制	左移斷層兼逆移分量	1951 年地震地表破裂	林朝棨，1962
			1983-1988 年的三邊測量網及水準測量資料	Yu et al., 1990
	短期滑移速率（mm/yr）	米崙台地相對西側縱谷，抬升量 4.4±3.3mm/yr，水平位移是以接近正北的方位，以 28.5±3.0mm/yr 移動	1983-1988 年的三邊測量網及水準測量資料	Yu et al., 1990
		S093: 16.4 mm/yr（方位 314 度） MELN: 27.7 mm/yr（方位 312 度）	GPS 量測 1992-1999 年相對澎湖白沙站的水平位移速度	Yu and Kuo, 2001

		米崙斷層上下盤的錯動量不顯著，不到 1mm/yr	PsInSAR(2004-2008)的影像比對	顏君毅等，2012
	長期滑移速率(mm/yr)	5.91-7.05（抬升）	米崙台地 N407 U/Th 定年	Konishi, 1968；Peng et al., 1977
		4.58-5.22（抬升）	米崙台地 HT28 的碳 14 定年	Yamaguchi and Ota, 2004
		4.10-4.25（抬升）	米崙台地 ML-001 U/Th 定年	陳俊甫，2013
		4.85-8.11（抬升）	米崙台地 ML-002 U/Th 定年	陳俊甫，2013
		5.4-5.65（抬升）	米崙台地 ML-003 U/Th 定年	陳俊甫，2013
		6.91-6.96（抬升）	米崙台地 ML-004 U/Th 定年	陳俊甫，2013
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	1.77	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網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)	花蓮機場東側抬升 50 公分，七星山抬升 120 公分，七星潭東側抬升 40 公分，在加禮彎路基上斷層東側向北移動 40 公分	1951 年地震地表破裂	臺灣省氣象所，1951
		於七星潭，斷層東側向北移動 2.0 公尺，垂直上升 1.2 公尺		林朝棨，1962；朱傚祖與游明聖，1996
	最大可能地震規模 (M_w)	7.1	Mw =3.98+1.02 log A σ=0.23（平移斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		7.1	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	100~150 年	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間	本計畫推估
	最近一次活動時間	西元 1951 年	歷史地震	臺灣省氣象所，1951；鄭世楠等，1995

3-1-2 米崙斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估米崙斷層系統之破裂，考慮一種破裂情形，米崙斷層南段海域延伸 2 公里+陸域 8 公里+東北海域延伸 25 公里，總長度 35 公里，詳圖 3-1.4。

米崙斷層之傾角及破裂深度，根據震測剖面及地震深度分布等資料，以傾角 60 度、65 度、70 度作為邏輯樹數值，其權重分別為 0.2、0.6、0.2。深度上，由於西元 1951 年米崙斷層發生規模 7 以上的地震，評估深度需達 30 公里才能產生此規模之地震，且縱谷斷層破裂深度也可達 30 公里，因此以 30 公里為邏輯樹中值，並加減 5 公里做為邏輯樹上下界。其權重分別為 25 公里（0.2）、30 公里（0.6）、35 公里（0.2）。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-1.6 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。

米崙斷層之滑移速率，上節中提到主要是利用階地定出抬升速率，詳如表 3-1.4，其中早期的碳 14 定年資料（Konishi et al., 1968；Lin, 1969；Peng et al., 1977）因未經校正，在本計畫中不予考慮。將所有樣本之抬升速率平均之後，得到抬升速率平均值為 5.29~6.21 mm/yr，本計畫以傾角 65 度換算至斷層面上之滑移速率。另外，參考西元 1951 年地表破裂及震源機制解，考慮斷層面滑移角 30±10 度之情形，得到淨滑移速率範圍為 9.08~20.03 mm/yr，詳如表 3-1.7 所示，本計畫以 9.08 mm/yr 及 20.03 mm/yr 作為邏輯樹上下界，兩者的平均值 14.56 mm/yr 作為邏輯樹中值，權重為 9.08（0.2），14.56（0.6）及 20.03（0.2）。

米崙斷層各節點權重的分配詳如圖 3-1.13 所示。

表 3-1.6：米崙斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and 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	
米崙斷層	A	35	30	33.1	65	1159	6.9	7.1	7.3	7.1
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

表 3-1.7：米崙斷層淨滑移速率換算，淨滑移速率=[抬升速率/sin(傾角)]/sin(滑移角)。

	抬升速率 (mm/yr)	傾角(度)	滑移角(度)	淨滑移速率 (mm/yr)
米崙斷層	5.29	65	20(斜向滑移)	17.07
	6.21			20.03
	5.29		30(斜向滑移)	11.67
	6.21			13.70
	5.29		40(斜向滑移)	9.08
	6.21			10.66

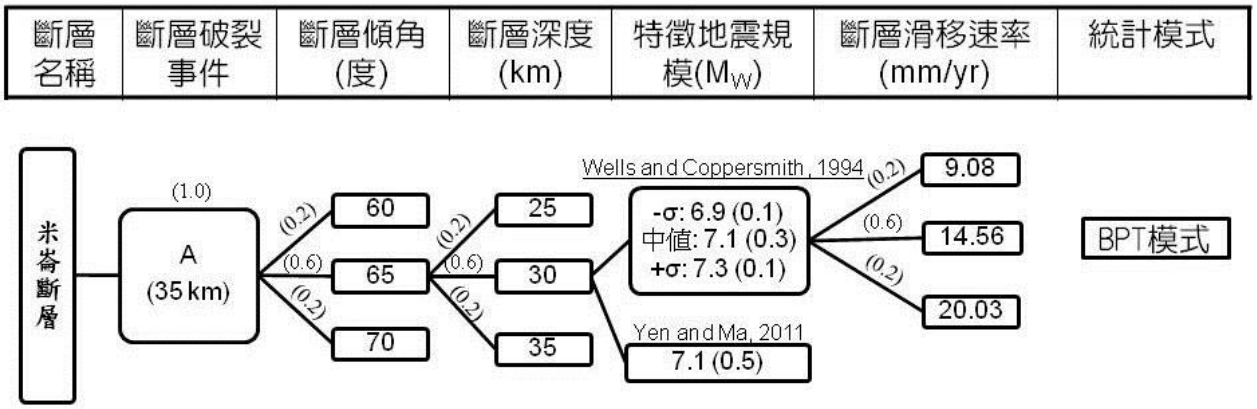


圖 3-1.13：米崙斷層邏輯樹。

3-1-3 米崙斷層特徵地震模式

米崙斷層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 3-1.14 為破裂事件取邏輯樹傾角及深度中間值之特徵地震模式分布情形。

圖 3-1.13 之米崙斷層邏輯樹可得到 108 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-1.15 為米崙斷層之規模-權重分布圖，以規模 7.1 之權重最高，7.2 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-1.16 為米崙斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，在地震復發間隔時間 100 年~150 年間有較高之權重。

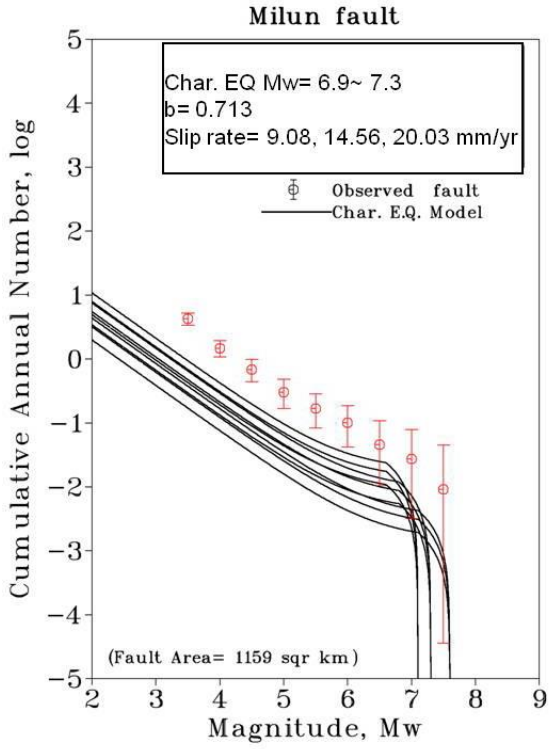


圖 3-1.14：米崙斷層特徵地震模式。

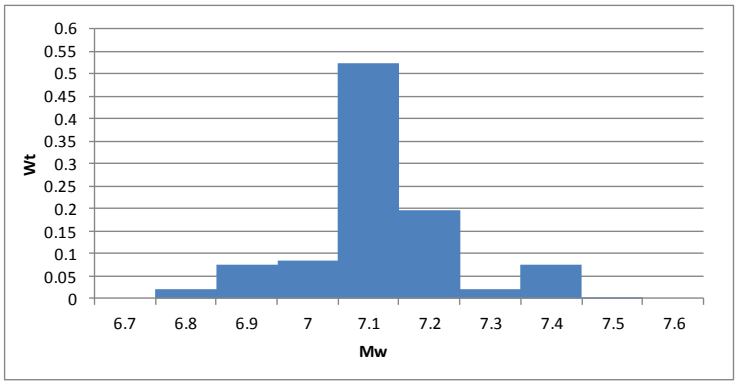


圖 3-1.15：米崙斷層之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

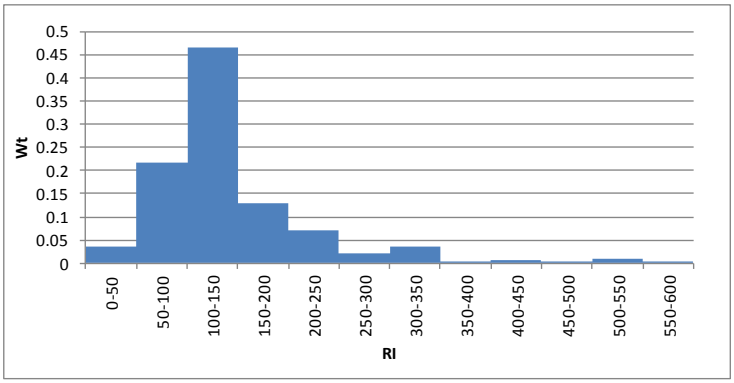


圖 3-1.16：米崙斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

3-1-4 米崙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）估算米崙斷層斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率。米崙斷層最後一次發生時間為西元 1951 年，因此本計畫採用 BPT 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-1.8 為米崙斷層 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 6.5 以上之機率為 30.4%、45.6%及 70.1%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 24.0%、37.6%及 60.8%。

表 3-1.8：米崙斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	BPT	BPT	BPT
M ≧ 6.5	30.4%	45.6%	70.1%
M ≧ 7.0	24.0%	37.6%	60.8%

3-2 嶺頂斷層

3-2-1 嶺頂斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：陳文山等（2008）將長度 150 公里的縱谷斷層分為四段，由北而南為嶺頂斷層、瑞穗斷層、池上斷層與利吉斷層（圖 3-2.1）。圖 3-2.2 為嶺頂斷層之條帶地質圖（林啟文等，2009），圖中的月眉線形、米棧線形及山興線形為石再添等（1983）依據地形特徵在此區域定義之構造線型，由於這些線狀崖呈斷續出現，最早統稱為月眉斷層（張徽正等，1998；林啟文等，2000），不過這些線形均位於海岸山脈的都鑾山層中，而不是位於板塊邊界之縱谷斷層，陳文山等（2008）為了讓縱谷斷層和早期石再添等（1983）命名之月眉斷層有所區別，建議將縱谷斷層最北段命名為嶺頂斷層。嶺頂斷層由花蓮溪出海口的嶺頂岬向南延伸，經月眉向南延伸至富南，長度 32 公里。

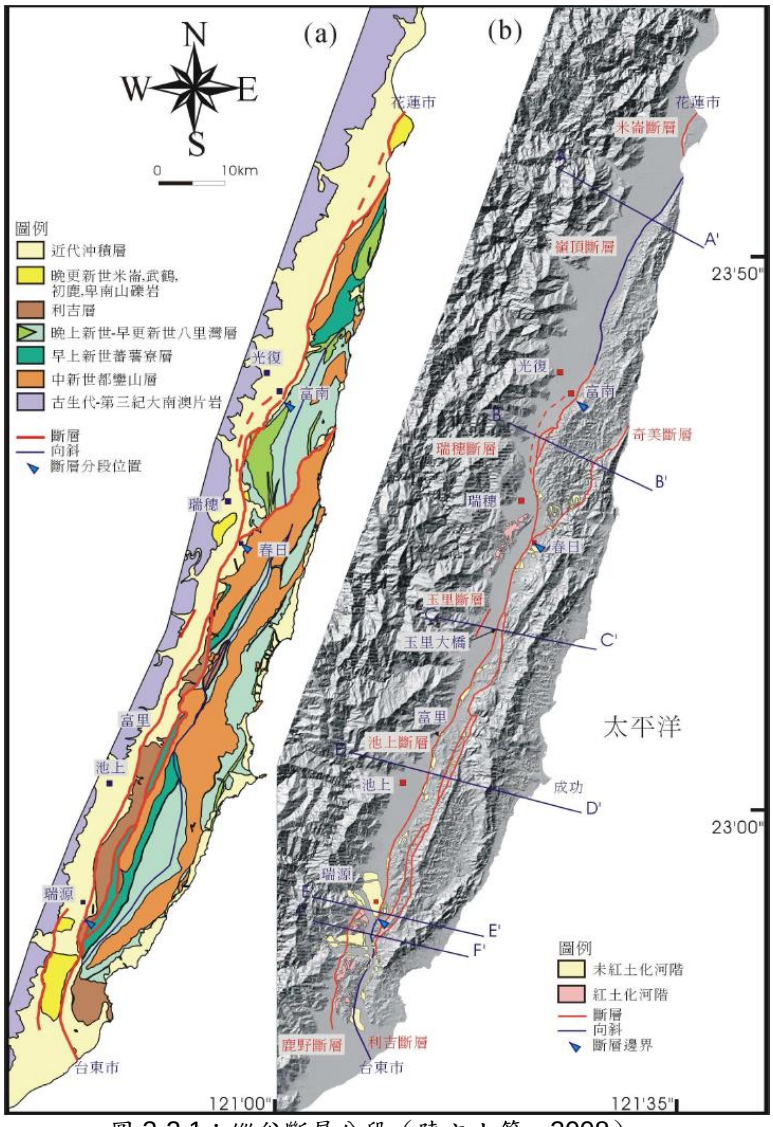


圖 3-2.1：縱谷斷層分段（陳文山等，2008）。

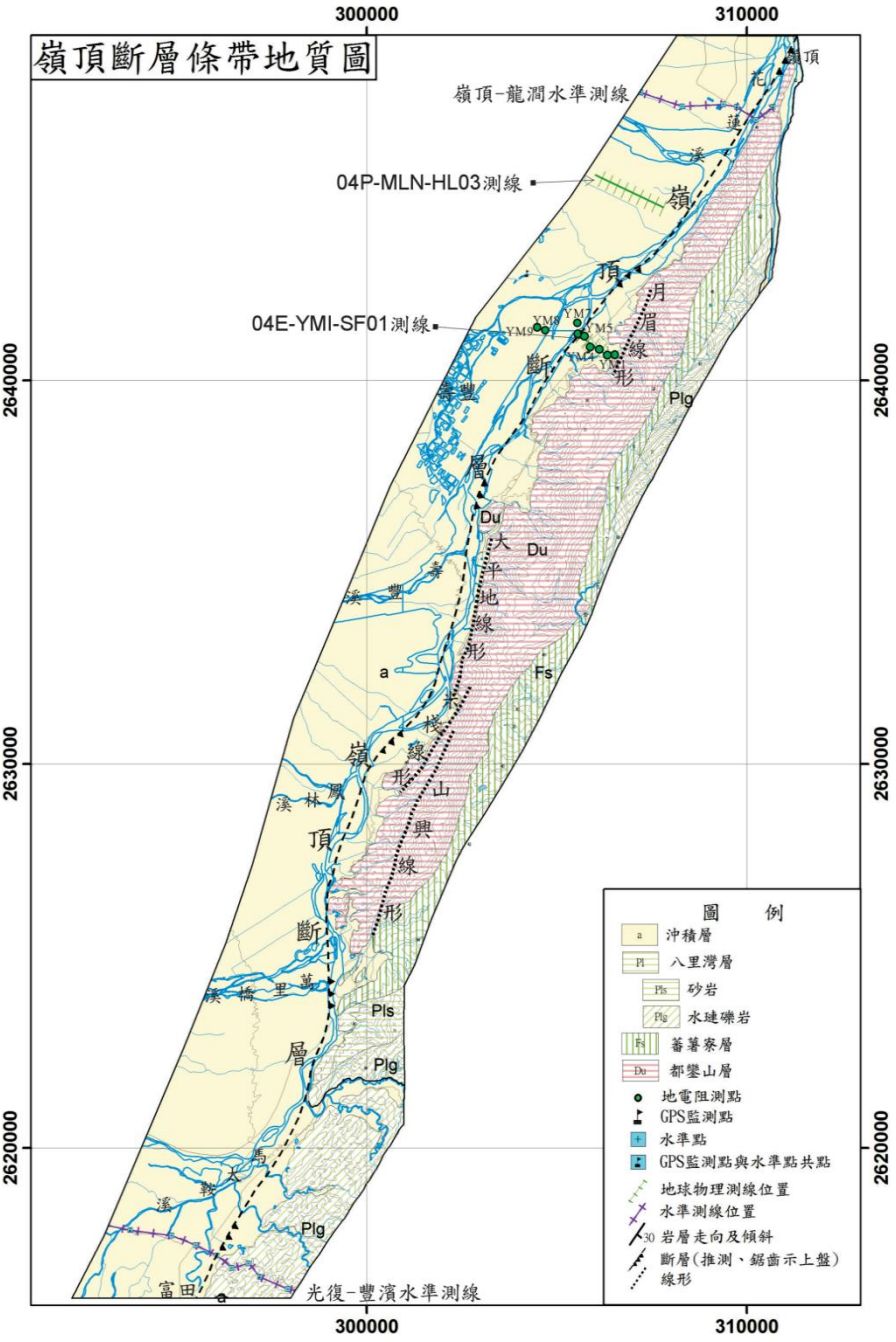


圖 3-2.2：崙頂斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：

(1) 余水倍等人（余水倍，1989 ；Yu et al., 1990）經斷層運動學模擬分析，其中花蓮網是將米崙台地視為海岸山脈的一部份（圖 3-2.3），所得模擬之最佳值顯示斷層傾角 51.4 度。

(2) 景國恩等（Ching et al., 2011）建立之塊體模型，縱谷斷層北段參數採用深度 20 公里，傾角 75 度（圖 3-2.4）。

(3) 石瑞銓等（2004）跨崙頂斷層的地電阻測線顯示，崙頂斷層上盤處存在低電阻率帶，研判是斷層破碎帶（圖 3-2.5），呈高角度分布。

(4) 陳文山等（Chen et al., 2007）根據 Kuochen et al.（2004）的模型推斷崙頂斷層位態為 N20°E/50°E，並描繪海岸山脈北段區域橫跨崙頂斷層的地質剖面圖（圖

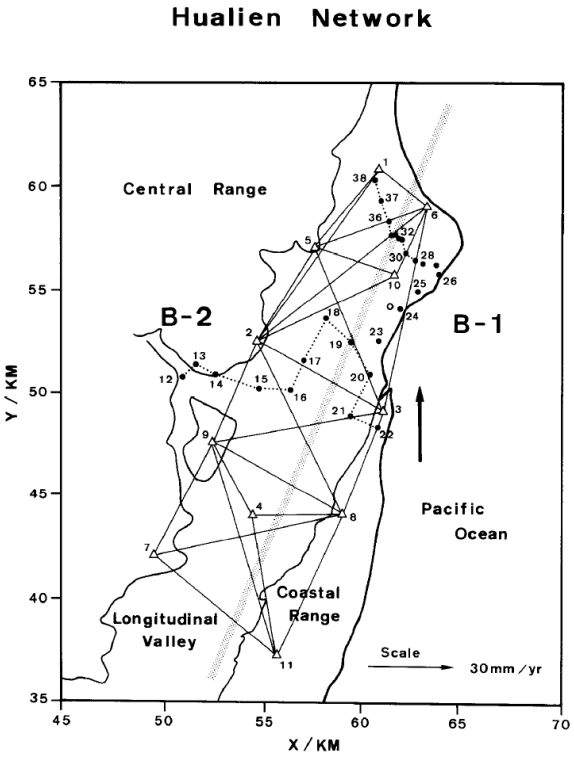
3-2.6）。不過陳文山等（2008）提到地震定位無法明確顯示縱谷斷層北段區域的地下形貌，只是約略存在一向東傾斜的地震帶。

(5) 圖 3-2.7 為臺灣東部地區利用 hypoDD 重定位之 1991-2002 地震分布（Kuochen et al., 2004），其中 C 剖面即位於嶺頂斷層所在位置。Kuochen et al.（2004）利用重定位地震及震源機制解推斷縱谷斷層北段三維模型，如圖 3-2.8 所示，兩板塊邊界為一向東傾的面，震源機制解顯示為逆斷層，位態約為 N20°E/50°E，不過本計畫認為此邊界面延伸至中央山脈地區，且深度達 40 公里左右，非屬於縱谷斷層。

(6) 圖 3-2.9 中選取嶺頂斷層上盤之地震深度分布，在位於 30-40 公里深度的地震應已屬於 Kuochen et al.（2004）所提到的板塊邊界地震，因此不易從地震深度分布中判斷嶺頂斷層幾何及破裂深度。

(7) Kuochen et al.（2012）建立全臺灣之速度構造剖面，其中跨越縱谷斷層北段 C03 速度構造剖面如圖 3-2.10 所示。從速度構造剖面也不易觀察斷層面的延伸。

嶺頂斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-2.1。



Model parameters of Hualien network

Parameters	Prior data	Final estimates	Resolution (%)
Fault			
D_U	25±20	16.0±3.1	87
D_H	30±20	21.7±3.4	87
δ	60±15	51.4±5.8	24
W	10±10	1.3±0.3	99
Block 1			
V_{x1}	−10±20	−0.0±1.4	99
V_{y1}	30±20	24.9±2.1	94
V_{z1}	5±15	12.3±2.6	24
Block 2	Fixed		

δ in degrees, W in km, and other parameters in mm/yr.

圖 3-2.3：花蓮地區 1983-1988 三邊測量網及反演模型參數表，黑色箭頭為 B-1 相對於 B-2 塊體的水平速度，表中 δ 即為傾角（Yu et al., 1990）。

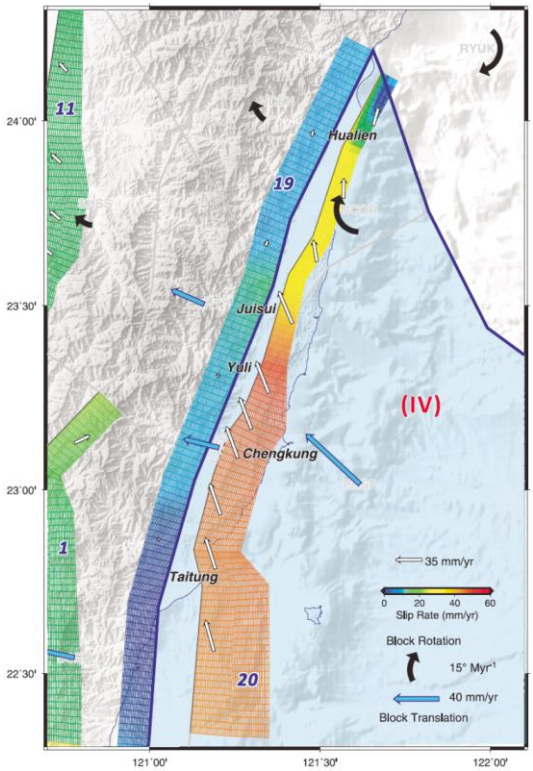


圖 3-2.4：景國恩等人建立之東部地區塊體模型，白色箭頭為斷層面上之滑移速率方位及大小（Ching et al., 2011）。

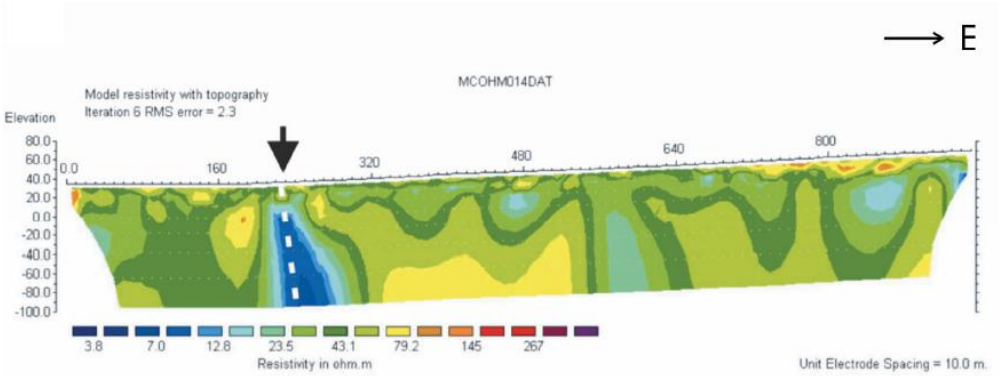


圖 3-2.5：嶺頂斷層地電阻影像剖面圖，剖面位置位於圖 3-2.2 之 04E-YMI-SF01 測線（石瑞銓等，2004）。

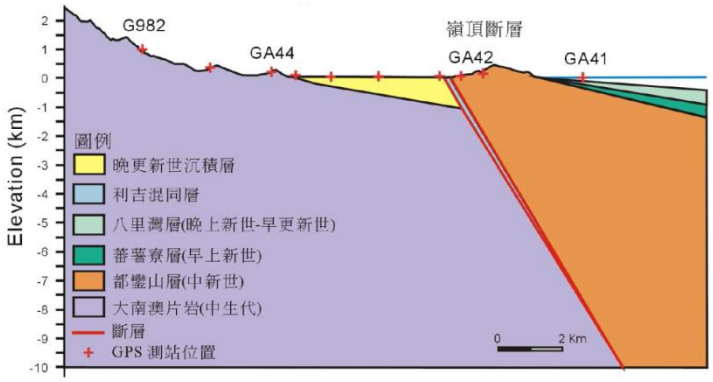


圖 3-2.6：嶺頂斷層地質剖面圖，剖面線位置詳如圖 3-2.1 之 A-A'剖面（陳文山等，2008）。

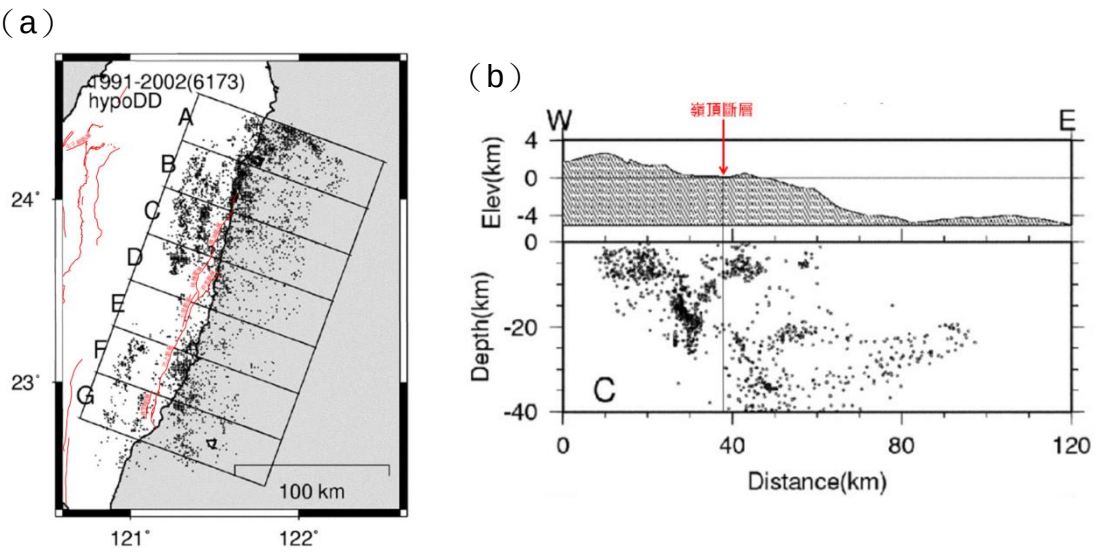


圖 3-2.7：（a）臺灣東部地區 1991-2002 之地震，利用 hypoDD 重定位，紅色線段為斷層線（b）N110°E 方向之地震深度分布投影剖面，剖面中選取之地震為（a）中之 C 矩形內之地震（修改自 Kuochen et al., 2004）。

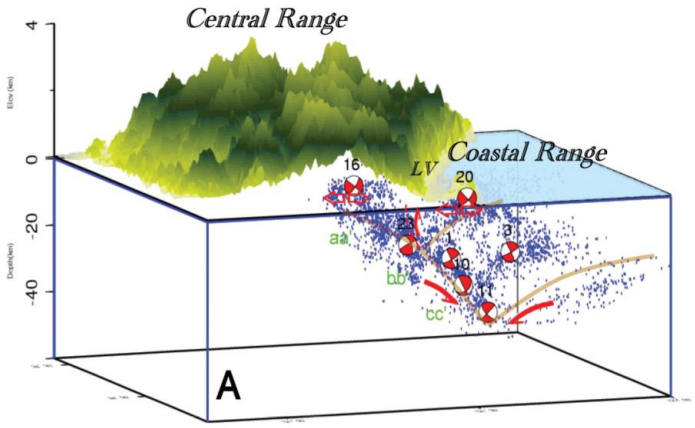


圖 3-2.8：利用重定位地震及震源機制解推斷縱谷斷層北段三維模型（Kuochen et al., 2004）。

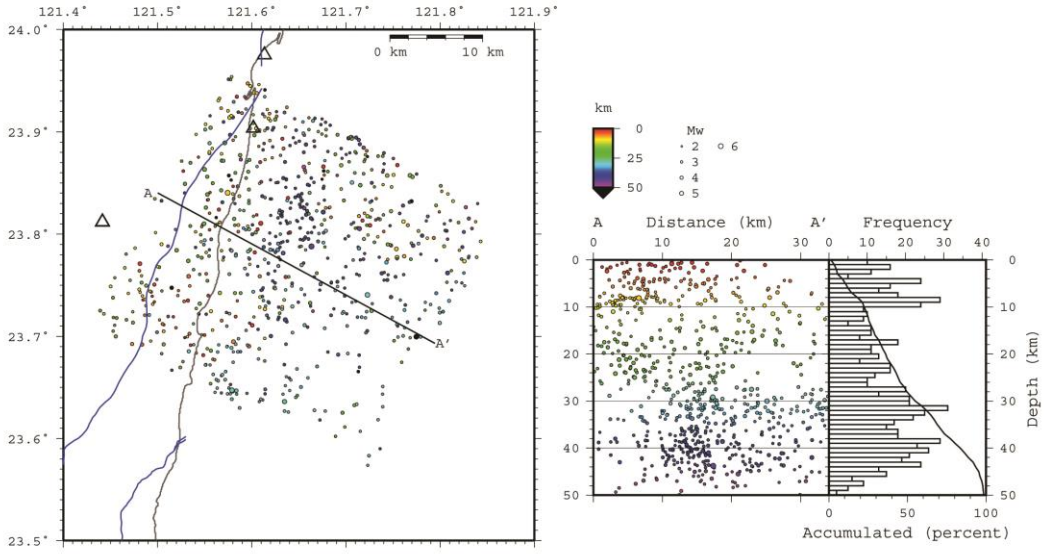


圖 3-2.9：中央氣象局 1991-2010 地震矩規模 3 以上地震深度分布圖，嶺頂斷層上盤剖面。

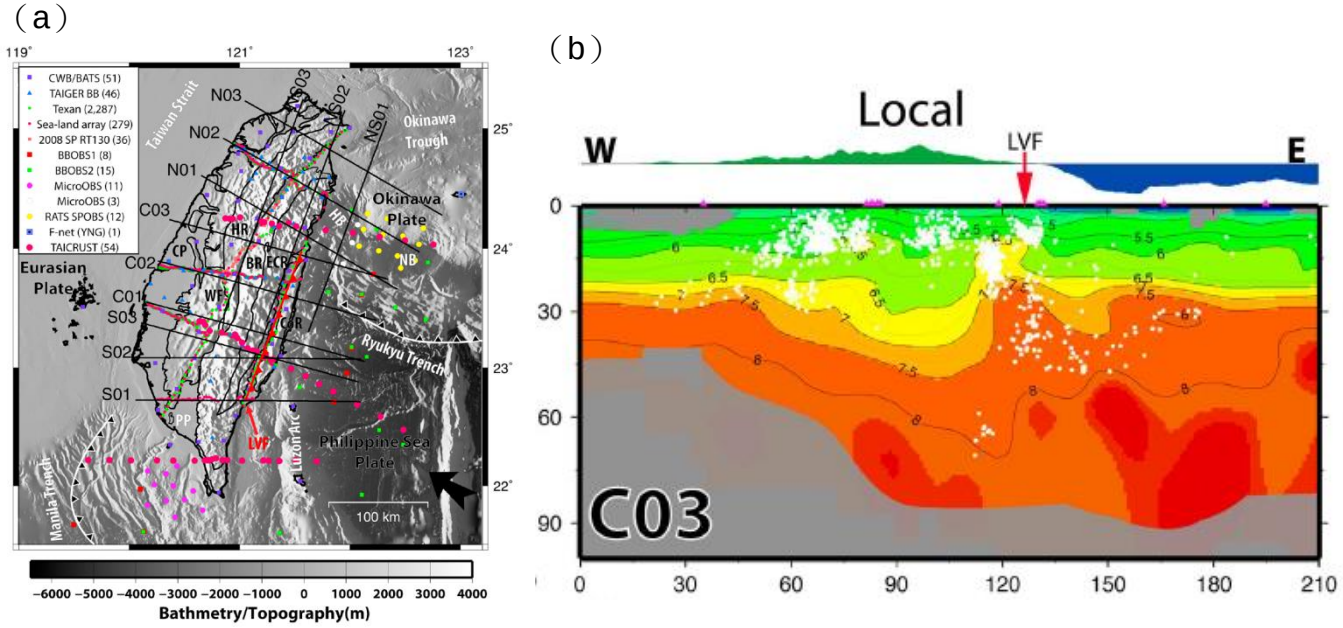


圖 3-2.10：（a）臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布（b）跨越縱谷斷層北段 C03 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012）。

表 3-2.1：嶺頂斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度（km）
余水倍，1989 Yu et al., 1990	斷層運動學模擬	51.4E	
Ching et al., 2011	縱谷斷層北段塊體模型參數	75 度	20 公里
石瑞銓等，2004	地電阻剖面	高角度	-
Chen et al., 2007 陳文山等，2008	地質剖面圖	50E	-
Kuochen et al., 2004	利用 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	高角度	NA
本計畫推估	1991-2010 地震矩規模 3 以上地震深度分布	NA	NA
Kuochen et al., 2012	速度構造剖面及地震分布	NA	NA

3. 斷層機制：從大地測量資料與斷層走向位態來看，嶺頂斷層應屬於左移斷層兼具逆移性質（陳文山等，2008；林啟文等，2009）。
4. 短期滑移速率：參照表 3-2.2。
5. 長期滑移速率：本計畫藉由塊體模型推估嶺頂斷層之斷層面平均長期滑移速率為 10.95 mm/yr，平均滑移虧損率為 3.40 mm/yr。
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：未知。本計畫藉由 Wells and Coppersmith（1994）之規模-地表最大錯動量推估，規模以 Mw=7.1，地表錯動量為 1.92±0.34 公尺。
8. 最近一次活動時間：未知。可考慮最近一次活動時間是西元 1951 年的情形進行評估。

彙整前人對於嶺頂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：嶺頂斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
嶺頂斷層	斷層分段與破裂事件	整段	地表地形、縱谷斷層北段	陳文山等，2008；林啟文等，2009
	長度 (km)	32 km		
	寬度 (km)	33.1	深度/sin 傾角 （以深度 30 公里，傾角 65 度計算）	
	破裂深度 (km)	地震主要集中於 15 km，少數達到 20 km	速度構造剖面及地震分布	Kuochen et al., 2012
		20	縱谷斷層北段塊體模型參數	Ching et al., 2011
	面積 (km^2)	1059	長度×寬度	
	走向	北北東	地表地形	石再添等，1983；楊貴三，1986；張徽正等，1998；林啟文等，2000；陳文山等，2008；林啟文等，2009
	傾斜角度(度)	51.4E	斷層運動學模擬	余水倍，1989 ；Yu et al., 1990
		高角度	利用 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	Kuochen et al., 2004
		50E	地質剖面	陳文山等，2008
		75	縱谷斷層北段塊體模型參數	Ching et al., 2011
	斷層機制	左移斷層兼具逆移性質	大地測量資料推估	陳文山等，2008；林啟文等，2009
	短期滑移速率 (mm/yr)	水平位移：28.5±3.0mm/yr 抬升量：4.4±3.3mm/yr	1983-1988 三邊測量網	Yu et al., 1990
		位於斷層上盤之 G970 及 GA42 兩站具有 9.74 mm/yr 及 10.94 mm/yr 的水平錯移速率	2004-2006 的 GPS 測量	中央地質調查所
		平行斷層走向分量 8.4 mm/yr(左移) 垂直斷層走向分量 5.6 mm/yr(壓縮) 高程方向抬升量為 8.7 mm/yr(抬升)	2004~2008 的 GPS 測量分析	饒瑞鈞等（2008）

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
		跨嶺頂斷層上下盤高程抬升速率最大約 10 mm/yr	2004~2009 的豐濱至光復的精密水準測量	饒瑞鈞等（2010）
	長期滑移速率(mm/yr)	10.95	塊體模型	本計畫推估
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	3.40	塊體模型	本計畫推估
	單一事件變位量(m)	1.92	log D= 1.03Mw-7.03 σ=0.34 （平移斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
	最大可能地震規模(Mw)	7.1	Mw =3.98+1.02 log A σ=0.23 （平移斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		7.0	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)	150~200 年	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間	本計畫推估
	最近一次活動時間	可能為西元 1951 年	-	-

3-2-2 嶺頂斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

根據地調所對於縱谷斷層的分段，本計畫僅考慮嶺頂斷層整段破裂之模式，長度為 32 公里。

斷層傾角與深度部分，參考地物測量資料應為高角度斷層，然而從目前蒐集之地震分布不易協助判斷斷層面的傾角及破裂深度。本計畫認為可參考位於嶺頂斷層南側之瑞穗斷層的幾何設定，以傾角 60 度、65 度、70 度作為邏輯樹數值，權重分別為 0.2、0.6、0.2。深度部分以 25 公里、30 公里、35 公里為邏輯樹數值，權重分別為 0.2、0.6、0.2。

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

目前未有相關地質調查資料可供計算嶺頂斷層之長期滑移速率。本計畫參考塊體模型分析結果，嶺頂斷層長期平均滑移速率為 10.95 mm/yr，滑移虧損率為 3.40 mm/yr，本計畫將邏輯樹滑移速率數值設定為 10.95 mm/yr（權重 0.5）、3.40 mm/yr（權重 0.5）。

嶺頂斷層各節點權重的分配詳如圖 3-2.11 所示。

表 3-2.3：嶺頂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	32	30	33.1	65	1,059	6.9	7.1	7.3	7.0
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

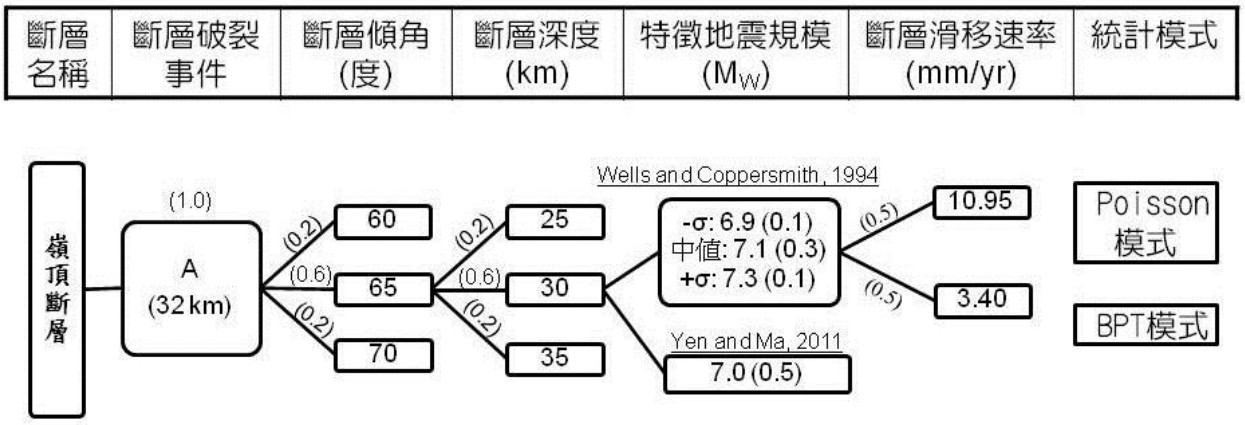


圖 3-2.11：嶺頂斷層邏輯樹。

3-2-3 嶺頂斷層特徵地震模式

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

圖 3-2.11 之嶺頂斷層邏輯樹可得到 72 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-2.13 為嶺頂斷層之規模-權重分布圖，以規模 7.1 之權重最高。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-2.14 為嶺頂斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，在地震復發間隔時間 150 年~200 年間有較高之權重。

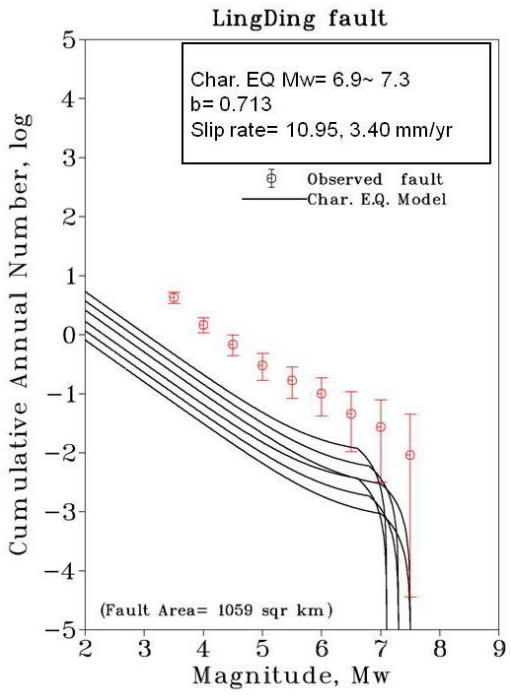


圖 3-2.12：嶺頂斷層之特徵地震模式。

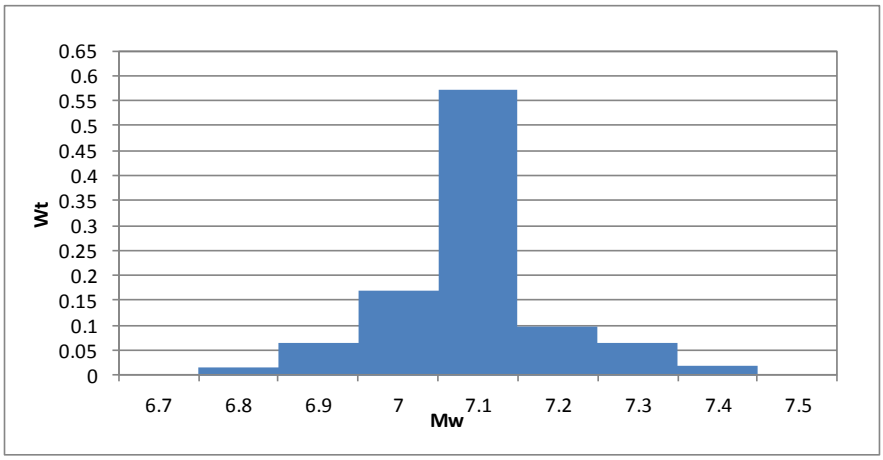


圖 3-2.13：嶺頂斷層之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

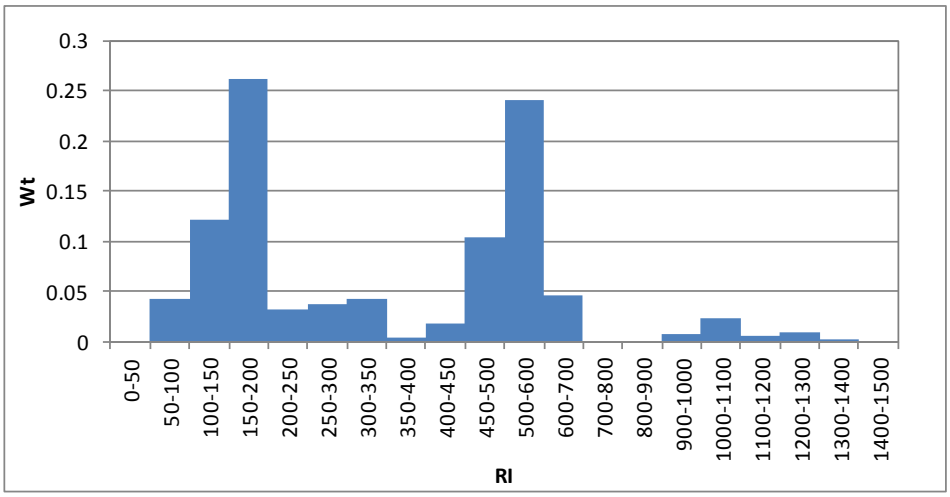


圖 3-2.14：嶺頂斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

3-2-4 嶺頂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 模式估算嶺頂斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，嶺頂斷層最後一次發生時間可能為西元 1951 年，本計畫分別採用 BPT 模式及 Poisson 進行評估。

表 3-2.4 為嶺頂斷層評估之結果，以 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 9.1%、15.7%及 30.4%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 7.0%、12.6%及 25.7%。以 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 11.6%、18.3%及 32.2%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 9.9%、15.8%及 28.1%。

表 3-2.4：嶺頂斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（M_w）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
M ≧6.5	9.1%	11.6%	15.7%	18.3%	30.4%	32.2%
M ≧7.0	7.0%	9.9%	12.6%	15.8%	25.7%	28.1%

3-3 瑞穗斷層

3-3-1 瑞穗斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

瑞穗斷層從花蓮縣光復鄉南富往南延伸 33 公里至花蓮縣玉里鎮春日（圖 3-3.1）。瑞穗斷層與南部池上斷層分段，一是由於瑞穗斷層南段被奇美斷層所截切；二是瑞穗斷層與池上斷層震間活動行為之差異，池上斷層是具潛移特性的斷層，而瑞穗斷層則呈現鎖定狀態（陳文山等，2008）。瑞穗斷層與北部嶺頂斷層分段，則是由於兩斷層機制有所差異，瑞穗斷層主要是逆移斷層，而嶺頂斷層主要是以左移為主（陳文山等，2008），另外根據 1951 年縱谷地震的地表破裂情形(圖 3-3.2)，圖中紅色線形為 1951 年花東縱谷地震出現之地表破裂。圖 3-3.3 則為 Shyu et al.（2007）描繪的 1951 年瑞穗斷層地表破裂，破裂範圍北至自強監獄，南至鶴岡，而嶺頂斷層則未發現地表破裂之情形。

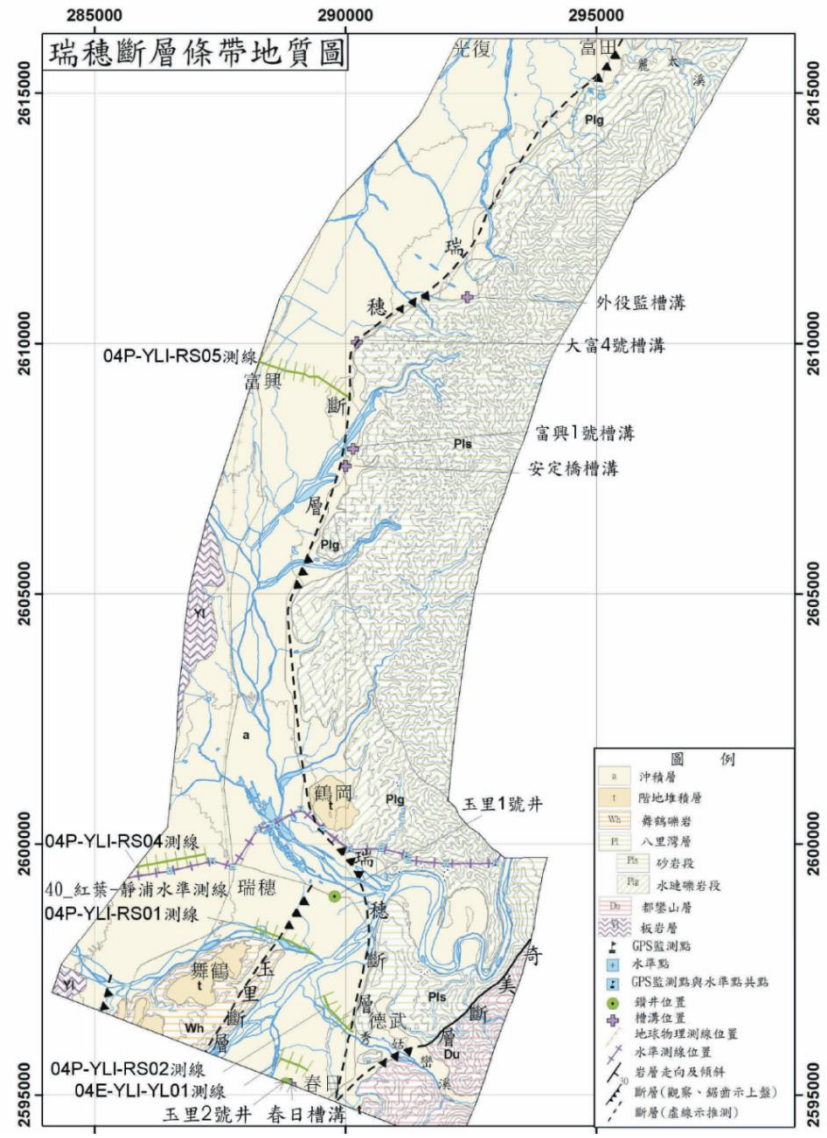


圖 3-3.1：瑞穗斷層條帶地質圖（引自林啟文等，2009）。

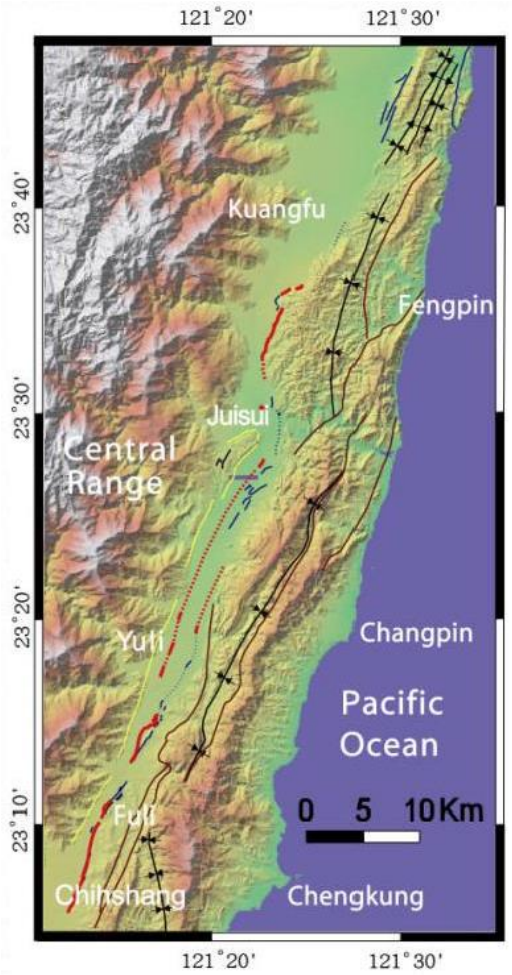


圖 3-3.2：1951 年玉里池上地震地表破裂及主要地質構造圖。紅色線代表地表破裂，藍線代表花東縱谷可能之活動斷層地表調查位置，黃線代表中央山脈斷層（引自鍾令和，2003）。

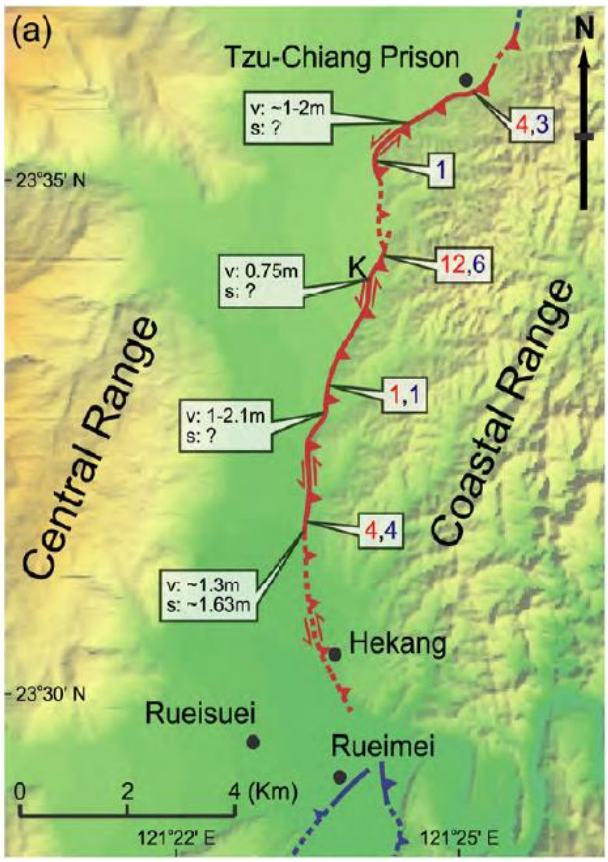


圖 3-3.3：1951 年地震瑞穗地區地表破裂分布圖。紅色線代表地表破裂，藍線代表 1951 年未產生地表破裂之活動構造（引自 Shyu et al., 2007）。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：

(1) 圖 3-3.4 為臺灣東部地區利用 hypoDD 重定位之 1991-2002 地震分布(Kuochen et al., 2004)，其中 D 剖面即位於瑞穗斷層所在位置。假設圖 3-3.4（b）中斷層面（紅色虛線）符合地震分布，瑞穗斷層在深度 0-25 公里傾角為 75 度，25-40 公里傾角為 45 度。

(2) 陳文山等（2008）描繪海岸山脈橫跨瑞穗斷層的地質剖面圖（圖 3-3.5），推估瑞穗斷層傾角為 40°E。

(3) 由 1991-2010 地震深度分布圖顯示此區域地震主要集中於 30 公里左右（圖 3-3.6）。

(4) Kuochen et al.（2012） 建立全臺灣之速度構造剖面，其中跨越縱谷斷層中段 C02 速度構造剖面如圖 3-3.7 所示。位於縱谷斷層地震深度達到 30 km，假設斷層面符合地震分布，則斷層傾角為 65 度。

瑞穗斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-3.1。

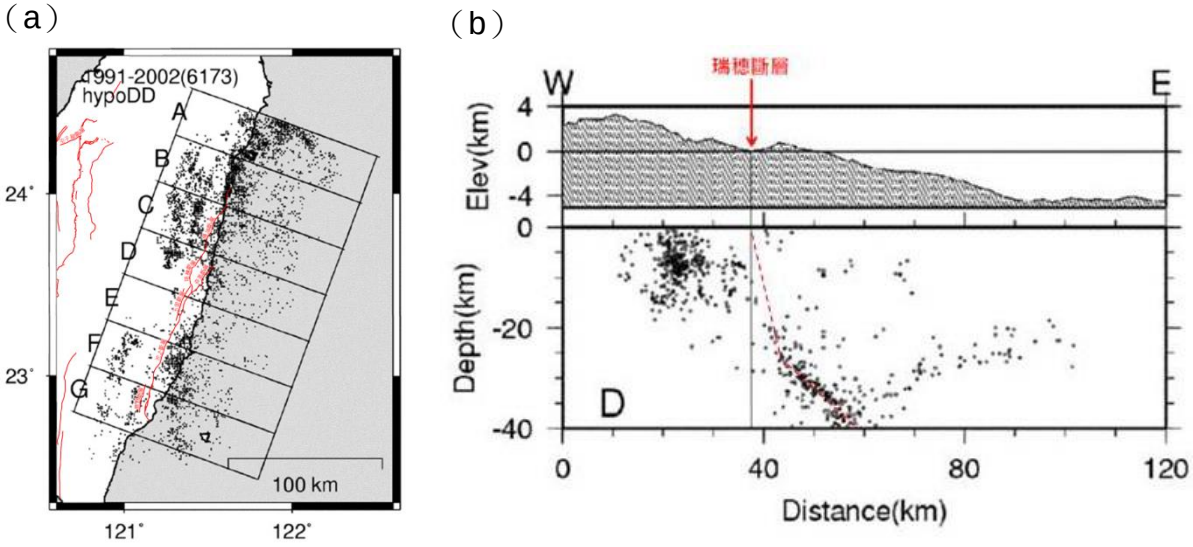


圖 3-3.4：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面，其中 D 剖面即瑞穗斷層通過之處，剖面於 25~35 公里深處有明顯之地震富集（修改自 Kuochen et al., 2004）。

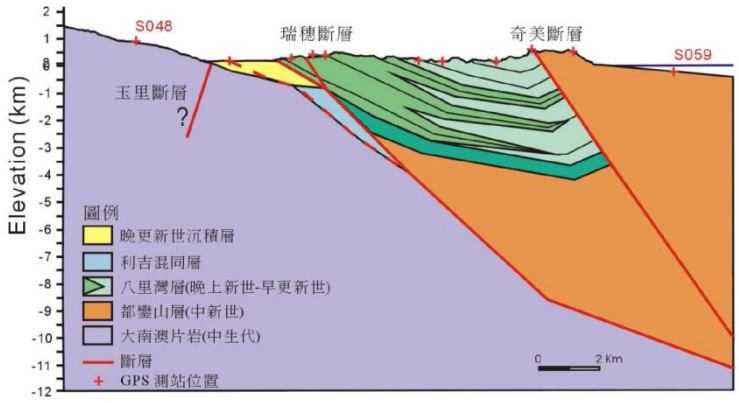


圖 3-3.5：瑞穗斷層地質剖面圖，剖面線位置詳如圖 3-2.1 之 B-B'剖面（陳文山等，2008）。

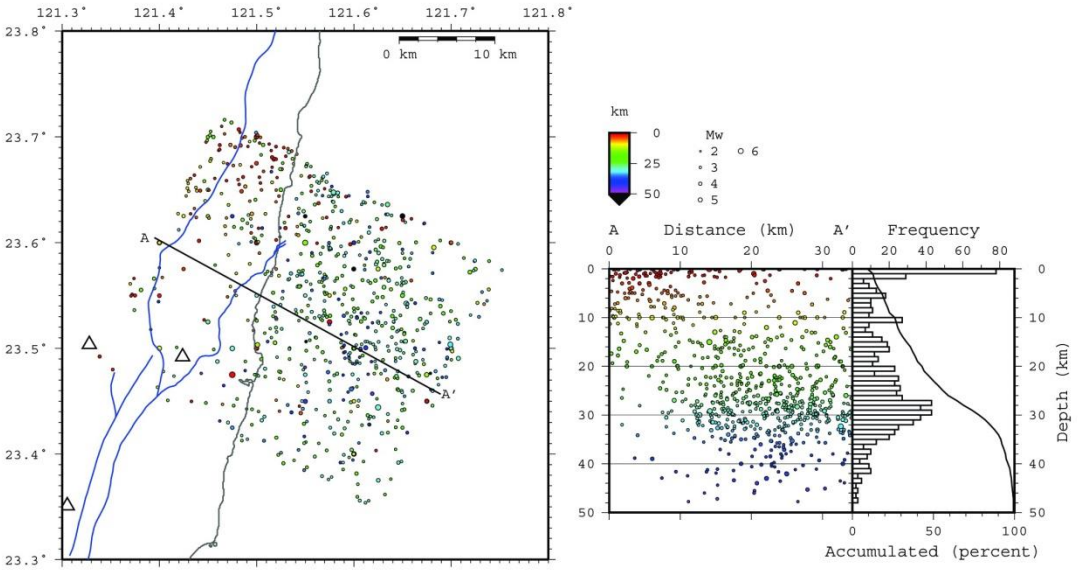


圖 3-3.6：中央氣象局 1900-2010 地震矩規模 3 以上地震深度分布圖，瑞穗斷層上盤剖面。

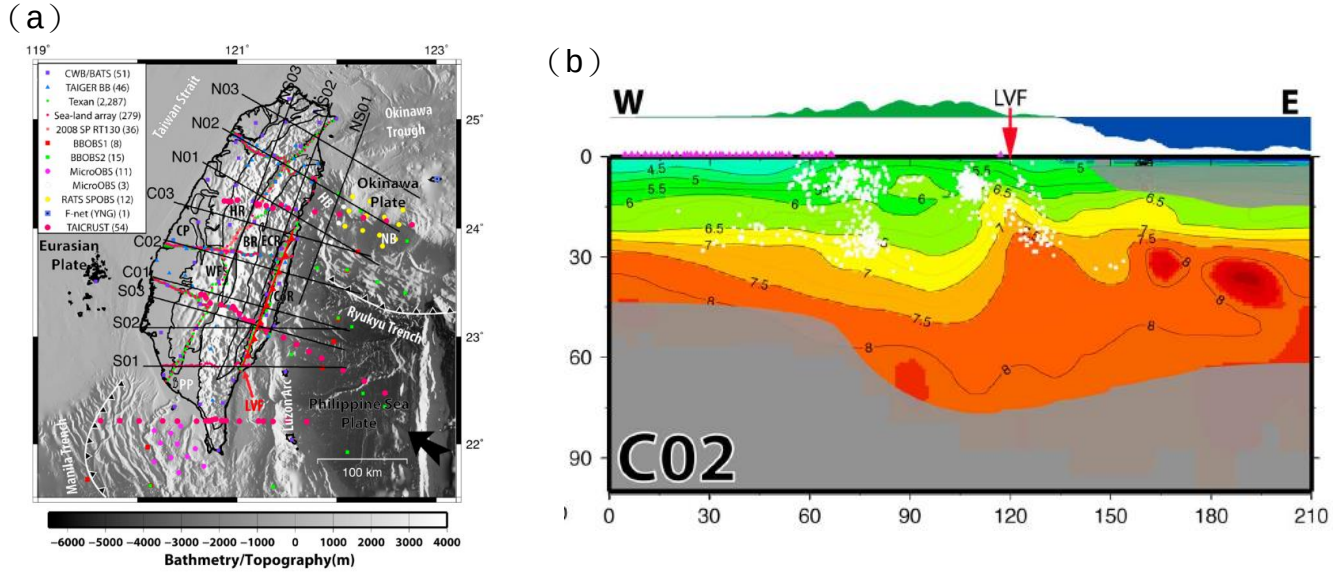


圖 3-3.7：（a）臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布（b）跨越縱谷斷層北段 C02 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012）。

表 3-3.1：瑞穗斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度
Kuochen et al., 2004	利用 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	0-25 公里，75 度 25-40 公里，45 度	可達 40 公里
Chen et al., 2007 陳文山等，2008	地質剖面圖	40E	-
本計畫推估	1991-2010 地震矩規模 3 以上地震深度分布	NA	集中於 30 公里左右
Kuochen et al., 2012	速度構造剖面及地震分布	65 度	30 公里左右

3. 斷層機制：由跨斷層剖面速度場變化分析結果，海岸山脈帶以 284-294°向中央山脈推擠（Yu and Kuo, 2001）（圖 3-3.8），顯示斷層為逆斷層，具左移分量。

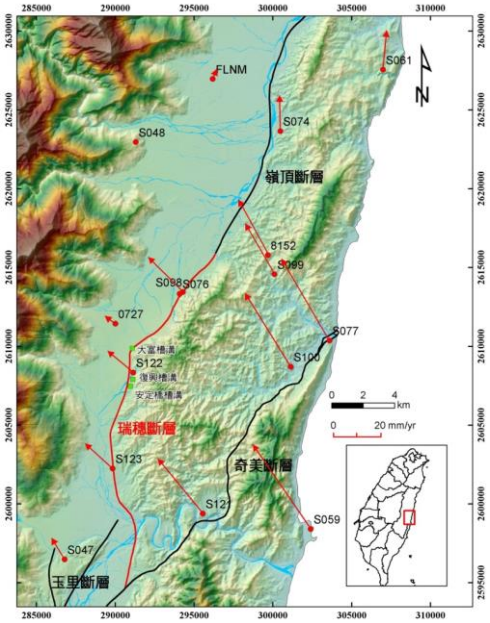


圖 3-3.8：瑞穗斷層地面分布圖。圖中綠色方框為槽溝開挖位置，紅色點為 GPS 測站位置，GPS 速度場為相對於 S048 點位之速度變化，瑞穗斷層則以紅色線段表示其地面之分布（修改自 Yu and Kuo, 2001 及 Chen, et al., 2007）。

4. 短期滑移速率：短期滑移速率各調查方法及斷層參數彙整於表 3-3.4。
5. 長期滑移速率：

(1) 陳文山在瑞穗斷層有三處的槽溝開挖（Chen et al.,2007），位置分布如圖 3-3.1 或圖 3-3.8 所示，分別為大富、復興及安定橋槽溝（圖 3-3.9~圖 3-3.12），從這三處槽溝中可發現，在過去 700 年中有至少四次之古地震事件（包含 1951 年的花蓮地震），將各槽溝之古地震事件變位量除以定年資料，可獲得瑞穗斷層之長期抬升速率為 12.5~16.0 mm/yr。

(2) 徐澔德等人（Shyu et al., 2006）將位於瑞穗斷層上盤秀姑巒溪河谷之河階分為 8 階，由年輕到老依序為 Terrace 1 ~ Terrace 8（簡稱 T1~T8），圖 3-3.13（a）為德武及猴子山河階地之圈繪及分布，圖上紅色圓點代表採樣定年之點位，圖 3-3.13（b）則是將所有河階之定年資料及高程投影在 N80W 的平面上進行比較，圖中不同的顏色代表 Shyu et al.（2006）圈繪的不同階地。得知各河階地與河道之高程差以及階地定年資料，即可推估下切速率，表 3-3.2 為 Shyu et al.（2006）計算之各採樣點下切速率結果，本計畫採用瑞穗斷層上盤之德武台地 2,000 年以上之定年樣本，得到下切速率範圍為 15.1~19.3 mm/yr。

瑞穗斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-3.3。

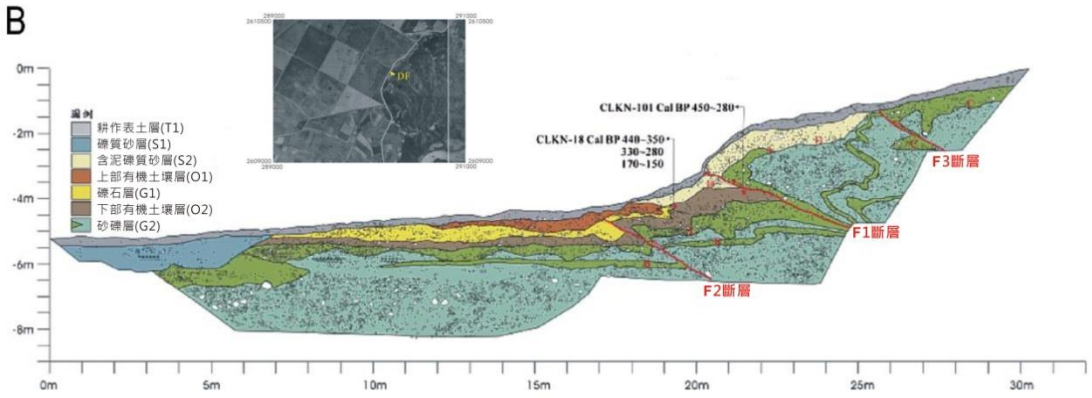


圖 3-3.9：瑞穗斷層大富 2 號槽溝北牆（Chen, et al., 2007）。

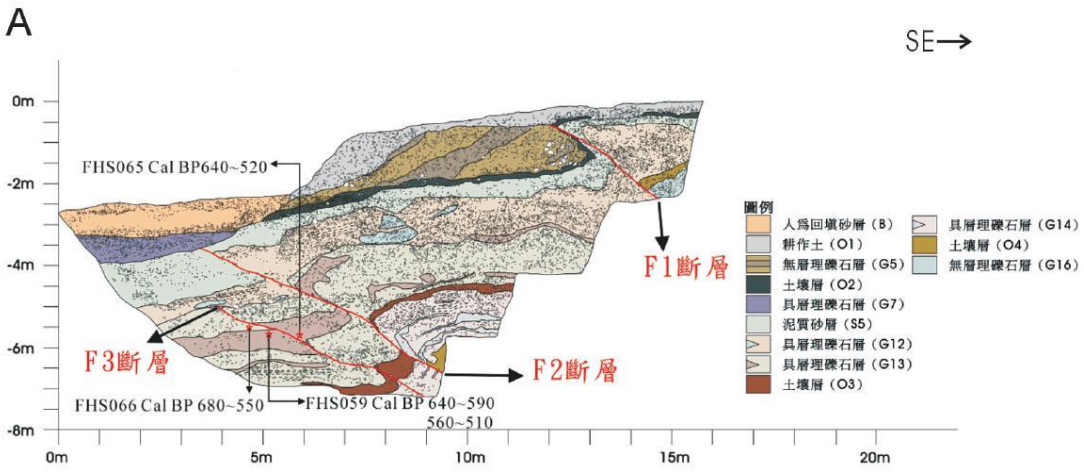


圖 3-3.10：瑞穗斷層復興 1 號槽溝北牆（Chen et al., 2007）。

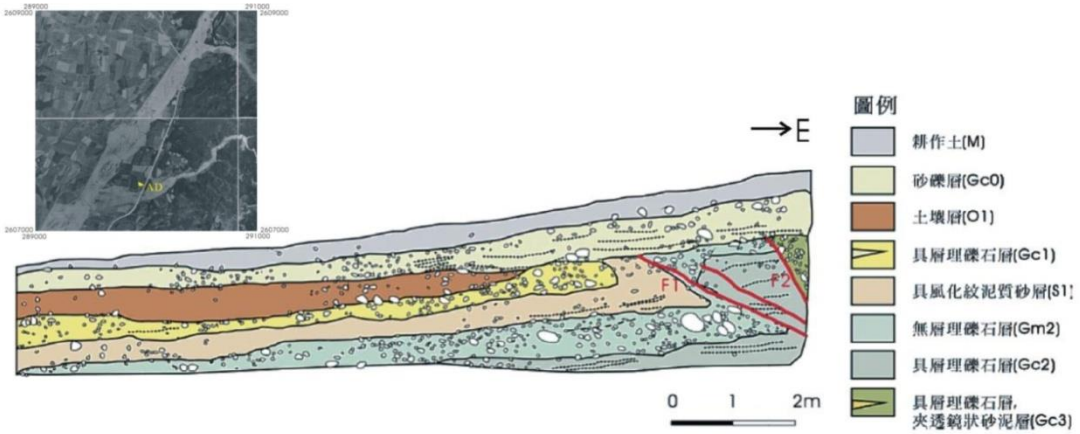


圖 3-3.11：瑞穗斷層安定橋 2 號槽溝北牆（Chen et al., 2007）。

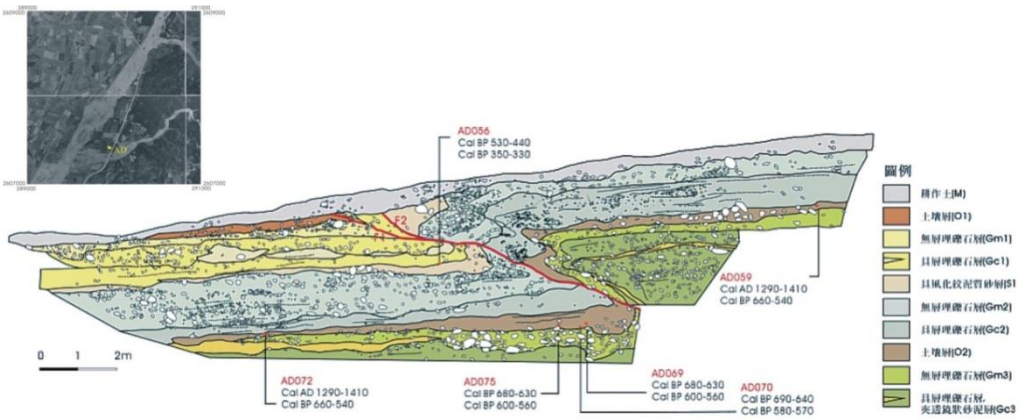
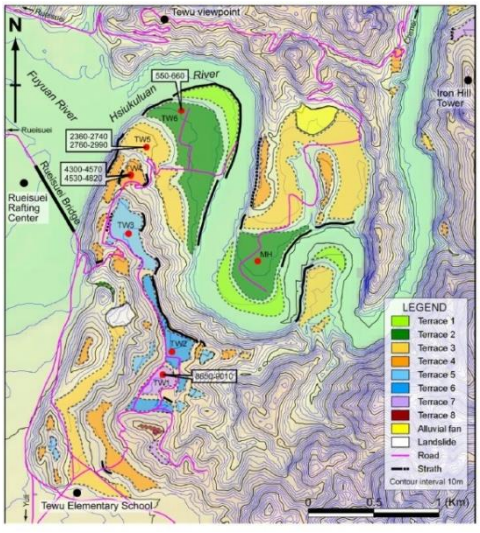


圖 3-3.12：瑞穗斷層安定橋 1 號槽溝北牆（Chen et al., 2007）。

（a）



（b）

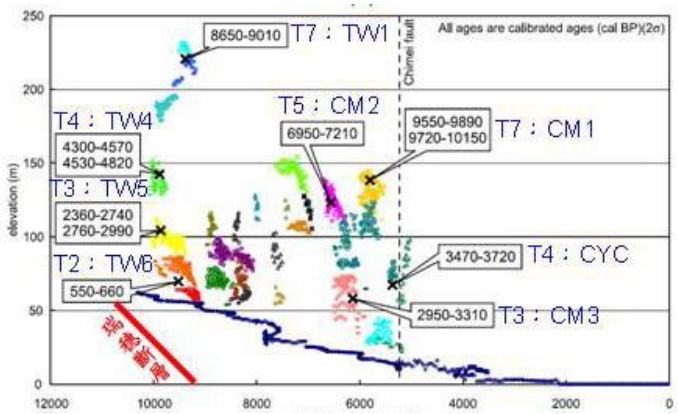


圖 3-3.13：（a）德武及猴子山河階地之圈繪，圖上紅色圓點代表採樣定年之點位（b）秀姑巒溪所有河階之定年資料及高程投影在 N80W 的平面，圖中 TW4~TW7 是位於德武階地之樣本，T1~T7 為 Terrace 1~Terrace7 的簡稱，不同的顏色代表 Shyu et al.（2006）所圈繪的不同階地（修改自 Shyu et al., 2006）。

表 3-3.2：秀姑巒溪階地採樣資料及下切速率計算結果（修改自 Shyu et al., 2006）。

階地簡稱	採樣點	校正定年結果 (cal B. P.)	與河道之高差 (m)	下切速率 (mm/yr)
T7	TW1	8650-9010	>158	>17.5-18.3
T4	TW4	4530-4820	~83	~17.2-18.3
		4300-4570	~83	~18.2-19.3
T3	TW5	2360-2740	~45	~16.4-19.1
		2760-2990	~45	~15.1-16.3
T2	TW6	550-660	~15	~22.7-27.3
T7	CM1	9550-9890	>102	>10.3-10.7
		9720-10150	>102	>10.0-10.5
T5	CM2	6950-7210	~90	~12.3-12.9
T3	CM3	2950-3310	~37	11.2-12.5

表 3-3.3：瑞穗斷層長期滑移速率相關文獻彙整。

作者	方法	抬升速率(mm/yr)
Chen et al., 2007	槽溝之古地震事件變位量除以定年資料	12.5-16.0
Shyu et al., 2006	德武台地2,000年以上定年樣本，計算下切速率	15.1-19.3

6. 單一事件變位量：從槽溝開挖資料中，F1 斷層為 1951 年地震形成的破裂，F2 斷層為距今 400±100~150 年前，F3 斷層為距今 595±45~500 年前之間，其中大富槽溝礫石層 F1（西元 1951 年）變位量 1.0 公尺（圖 3-3.9），復興槽溝 F1 錯移量 1.2 公尺（圖 3-3.10），安定橋 2 號槽溝 F1 錯移量 0.75 公尺（圖 3-3.11）。大富槽溝 F2 錯移量 1.22 公尺（圖 3-3.9），復興槽溝 F2 錯移量 1.06 公尺（圖 3-3.10），安定橋 1 號槽溝 F2 錯移量 1.75 公尺（圖 3-3.12），大富槽溝 F3 錯移量 0.65 公尺（圖 3-3.9），復興槽溝 F3 錯移量 0.7 公尺（圖 3-3.10）。
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：西元 1951 年，花東縱谷從北而南發生一系列大地震，在一個月內發生了包括規模 7.2 花蓮地震、規模 7.1 玉里地震、規模 6.2 池上地震、規模 5.8 鹿野地震。而規模 7.1 的玉里地震造成瑞穗斷層破裂。

西元 1972 年 4 月 24 日，在花蓮瑞穗發生規模 6.6 之地震（呂新民等，1976），其主餘震震央分布及震源深度如圖 3-3.14 所示（詹軍威與王錦華，1990）。中央氣象局公告的震源深度為 15 公里，規模為 6.9。

從槽溝開挖之古地震事件，推估瑞穗斷層再現週期為 190~210 年（圖 3-3.15）。

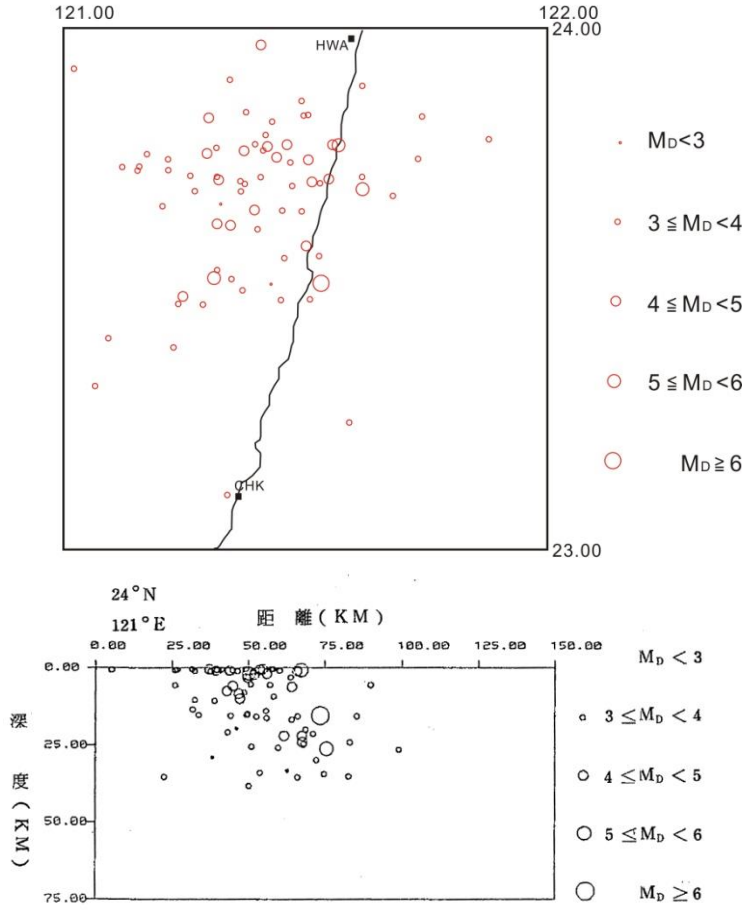


圖 3-3.14：上圖為 1972 年 4 月 24 日花蓮瑞穗地震及餘震震央分布圖，下圖為震源深度剖面圖（改自詹軍威與王錦華，1990）。

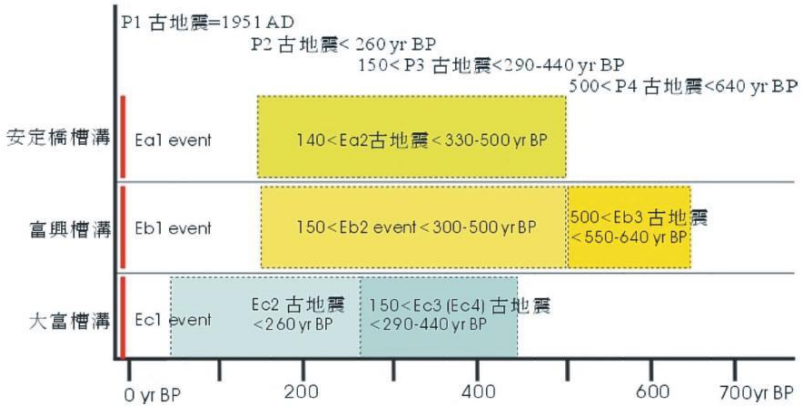


圖 3-3.15：瑞穗斷層三個槽溝之古地震，最左側紅色線段表示 1951 年之台東系列地震，方框則是各槽溝古地震事件的分布年代（改自 Chen et al., 2007）。

彙整前人對於瑞穗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，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：瑞穗斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
瑞穗斷層	斷層分段與破裂事件	無分段	地形、航照判釋、1951 年地表破裂	Chen et al., 2007；Shyu et al., 2007；陳文山等，2008；林啟文等，2009
	長度(km)	33 公里		
	寬度(km)	33.1	深度/sin 傾角 （以深度 30 公里，傾角 65 度計算）	
	破裂深度（km）	可達40 公里	利用 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	Kuochen et al., 2004
		30 公里左右	速度構造剖面及地震分布	Kuochen et al., 2012
		集中於30 公里左右	1991-2010 地震矩規模 3 以上地震深度分布	本計畫以中央氣象局地震目錄推估
	面積(km^2)	1092	長度×寬度	
	走向	N20E	地形、航照判釋、1951 地震地表破裂判釋	Chen et al., 2007；Shyu et al., 2007；陳文山等，2008；林啟文等，2009
	傾斜角度(度)	0-25 公里，75 度 25-40 公里，45 度	利用 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	Kuochen, et al., 2004
		40E	地質剖面圖	Chen et al., 2007 ；陳文山等，2008
		65 度	從速度構造剖面及地震分布推估	Kuochen et al., 2012
	斷層機制	具左移分量的逆斷層	GPS 觀測顯示，海岸山脈帶以 284-294°向中央山脈推擠	Yu and Kuo, 2001
	短期滑移速率（mm/yr）	水平滑移量為 13.3~20.4mm/yr，方向為 309~314 度	GPS (1996~1999)跨斷層水平移動速度	Yu and Kuo, 2001
		V 剖面：垂直及平行斷層走向的速度分量均約 15 mm/yr	GPS (2004-2008) 跨斷層速度場	饒瑞鈞等，2008
		W 剖面：平行斷層走向分量 14.5 mm/yr 垂直斷層走向分量 5.6 mm/yr 高程方向抬升速率 13.2 mm/yr		
		抬升速率 7.6~9.9 mm/yr	靜浦至紅葉的水準測線(2004-2010)	饒瑞鈞等，2010

	長期滑移速率 (mm/yr)	12.5~16（抬升速率）	槽溝之古地震事件變位量除以定年資料	Chen et al., 2007
		15.1-19.3 （下切速率）	德武台地定年 2,000 年以上樣本，計算河流下切速率	Shyu et al., 2006
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	7.61	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網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)	0.75，1.2，1.0	安定橋 2 號槽溝 F1，復興槽溝 F1，大富槽溝礫石層 F1(西元 1951 年)變位量	Chen et al., 2007
		1.75，1.06，1.22	安定橋 1 號槽溝 F2，復興槽溝 F2，大富槽溝 F2(400±100~150 年前)古地震變位量	
		0.7，0.65	復興槽溝 F3，大富槽溝 F3(595±45~500 年前)古地震變位量	
	最大可能地震規模 (Mw)	7.1	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		7.0	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)	190~210	大富槽溝、復興槽溝、安定橋槽溝古地震事件	Chen et al., 2007
		50~100	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間	本計畫推估
	最近一次活動時間	西元 1951 年	玉里地震，規模 7.1	歷史地震紀錄
		西元 1972 年	瑞穗強震，中央氣象局公告的震源深度為 15 公里，規模為 6.9	歷史地震紀錄

3-3-2 瑞穗斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估瑞穗斷層之破裂模式，採用整段破裂模式，無分段破裂情形。

斷層傾角部分，本計畫主要參考地震重定位結果及 Kuochen et al.（2012）速度構造剖面，以傾角 65 度作為邏輯樹中值（圖 3-3.16），並加減 5 度作為邏輯樹上下界，權重分別為 60（0.2），65（0.6）及 70（0.2）。深度部分主要也是參考地震重定位結果，因此深度以 25、30、35 公里為邏輯樹數值，權重分別為 0.2、0.6、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 3-3.5 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。

瑞穗斷層之抬升速率根據槽溝開挖資料為 12.5~16 mm/yr（Chen et al., 2007）；根據德武台地 2,000 年以上樣本，計算河流下切速率為 15.1~19.3 mm/yr。本計畫以傾角 65 度換算至斷層面上之滑移速率。另外，參考斷層上盤速度場方位角，推估斷層面滑移角為 70±10 度，得到淨滑移速率範圍為 14.00~24.59 mm/yr（表 3-3.6），本計畫以 14.00 mm/yr 及 24.59 mm/yr 作為邏輯樹上下界，兩者的平均值 19.30 mm/yr 作為邏輯樹中值，權重為 14.00（0.2），19.30（0.6）及 24.59（0.2）。

瑞穗斷層之邏輯樹建立如圖 3-3.17 所示。

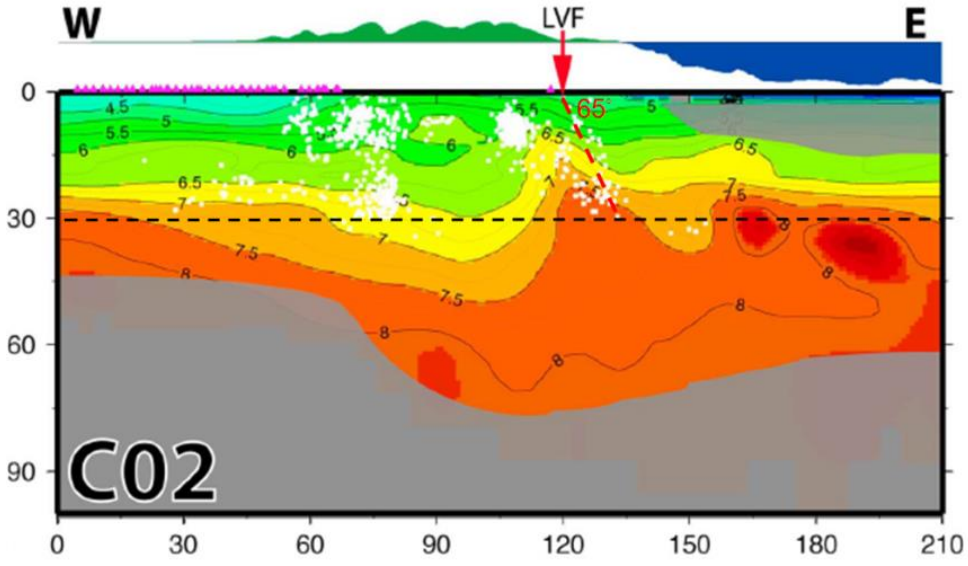


圖 3-3.16：參考速度構造剖面及地震分布推估瑞穗斷層幾何面。

表 3-3.5：瑞穗斷層之破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
A	33	30	33.1	65	1,092	6.8	7.1	7.3	7.0
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

表 3-3.6：瑞穗斷層淨滑移速率換算，淨滑移速率=[抬升速率/sin(傾角)]/sin(滑移角)。

	抬升速率 (mm/yr)	傾角 (度)	滑移角 (度)	淨滑移速率 (mm/yr)
瑞穗斷層	12.5	65	60	15.93
			70	14.68
			80	14.00
	16		60	20.39
			70	18.79
			80	17.93
	15.1		60	19.24
			70	17.73
			80	16.92
	19.3		60	24.59
			70	22.66
			80	21.62

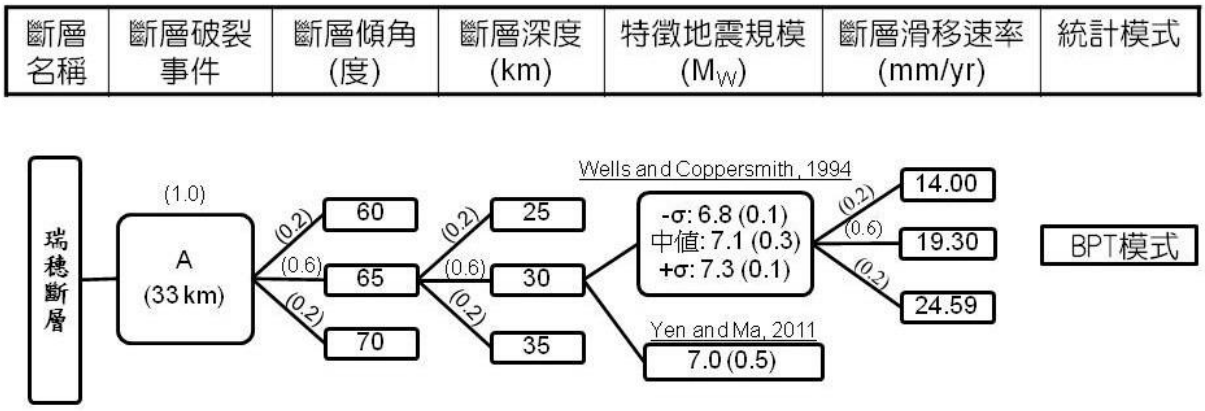


圖 3-3.17：瑞穗斷層邏輯樹。

3-3-3 瑞穗斷層系統特徵地震模式

瑞穗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 3-3.18 為瑞穗斷層之特徵地震模式分布情形。

圖 3-3.17 之瑞穗斷層邏輯樹可得到 108 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-3.19 為破裂事件之規模-權重分布圖，以規模 7.1 之權重最高。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-3.20 為破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，在地震復發間隔時間 50 年~100 年間有較高之權重。

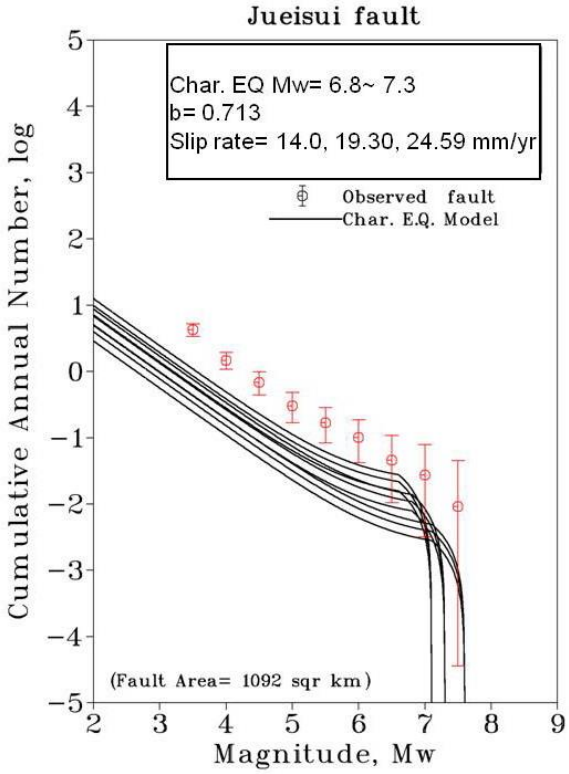


圖 3-3.18：瑞穗斷層特徵地震模式。

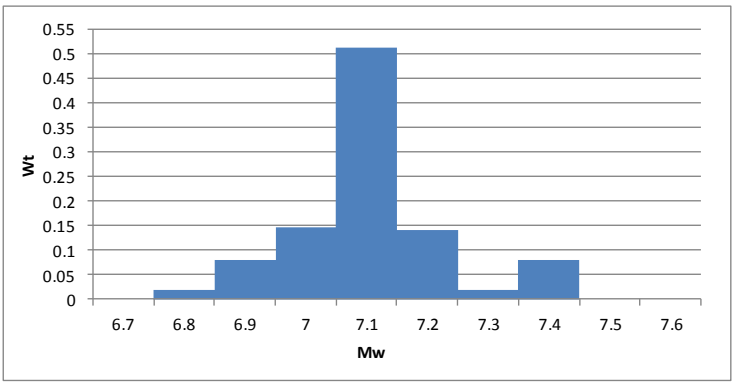


圖 3-3.19：瑞穗斷層破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

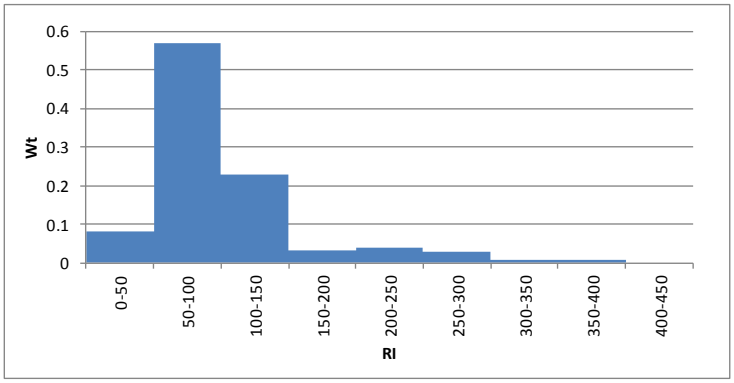


圖 3-3.20：瑞穗斷層破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和。

3-3-4 瑞穗斷層系統發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以BPT 模式估算瑞穗斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，瑞穗斷層最後一次發生時間為西元 1972 年，本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 3-3.7 為瑞穗斷層評估之結果，以 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 31.1%、49.4%及 76.7%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 23.8%、40.5%及 66.8%。

表 3-3.7：瑞穗斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	BPT	BPT	BPT
M ≧6.5	31.1%	49.4%	76.7%
M ≧7.0	23.8%	40.5%	66.8%

3-4 奇美斷層

3-4-1 奇美斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：奇美斷層位於海岸山脈中段，是唯一斜穿海岸山脈之斷層，屬第二類活動斷層，上盤都鑾山層逆衝至下盤八里灣層之上（圖 3-4.1 左圖），是海岸山脈中最大錯距的斷層（陳文山等人，2008）。徐鐵良（Hsu, 1956）描述奇美斷層北起豐濱附近，向南南西延伸，經貓公山、奇美與春日等地，進入台東縱谷後為沖積層所掩覆，長約 30 公里。根據林啟文等（2009）發表的條帶地質圖，奇美斷層並非在縱谷被沖積層所掩覆，而是於春日里附近向西南連接瑞穗斷層的南側端點，並與池上斷層連接（圖 3-4.1 右圖）。奇美村附近、福音、觀音、松埔與豐濱等地，出現階地反傾斜的現象，以及階面 8~10 公尺的高差線形，認為是奇美斷層經過所造成（張瑞津等，1992；羅偉與楊昭男，2004）。秀姑巒溪以南地區有壓力脊、三角錐面、變位河階與錯斷河等地形特徵，在八里灣溪出海口的海階上也有奇美斷層的線型出現（林啟文等，2009）。陳文山等（2006）研判在豐濱附近有一奇美斷層的分支斷層截切更新世晚期河階礫石層，斷層位態為 N40°E/80°E，斷層帶寬約 1 公尺。

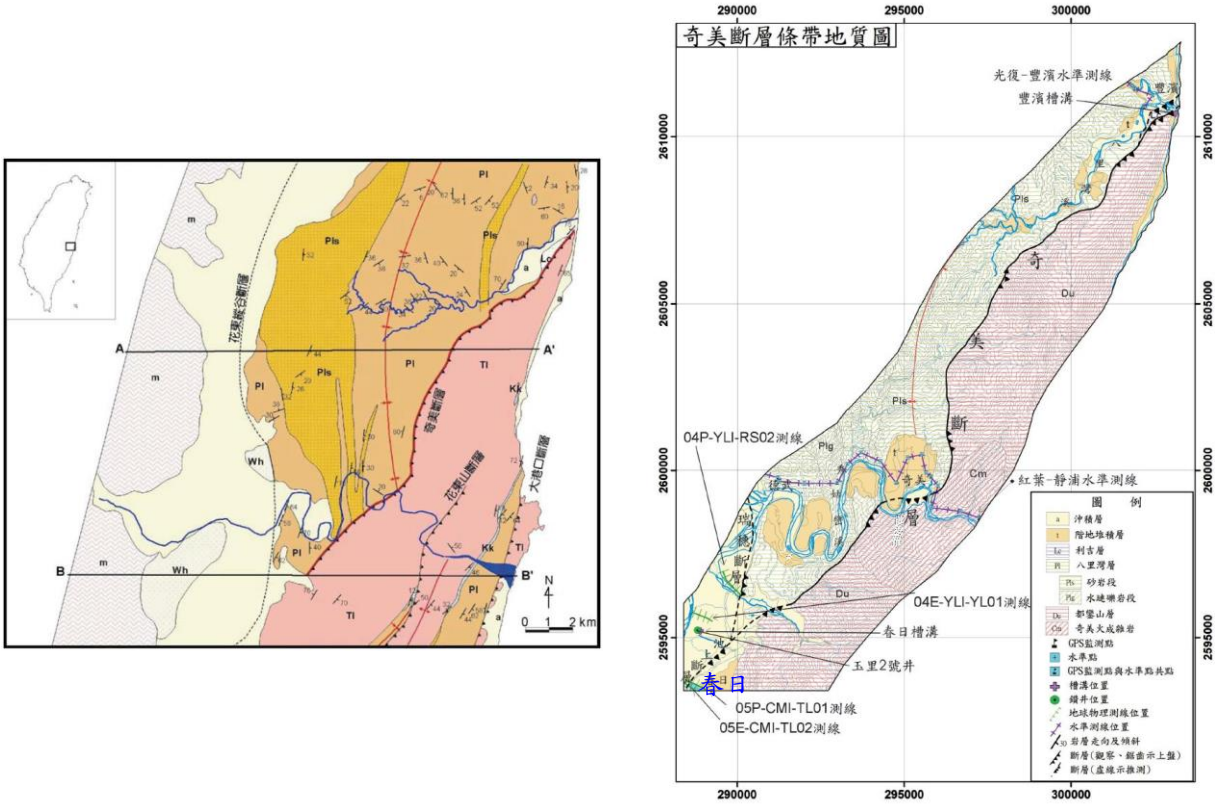


圖 3-4.1：奇美斷層分布圖，左圖：奇美斷層沿線地質圖（陳與王，1996），右圖：奇美斷層條帶地質圖（林啓文等，2009）。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：
   (1) 賴文基（1995）在奇美村附近的秀姑巒溪河谷的觀察結果，安山岩逆衝於大港口層（八里灣層）之上，斷層面位態為 N81°E/75°S，擦痕顯示逆滑兼具左滑性質。

(2) 鄭文弘（1996）在奇美村附近的露頭量測斷層面上有 2 組擦痕，一組為逆衝性質，另一組為左移性質。

(3) 羅偉與楊昭男（2004）的調查結果，在奇美村附近的秀姑巒溪有 3 個奇美斷層的露頭，都鑾山層的火成岩逆衝至八里灣層砂頁岩互層之上，斷層面位態為 N70-80°E/70°S，斷層帶中斷面擦痕的傾向補角（rake）分別為 80°與 16°，為逆滑形式兼具左移分量。

(4) 董倫道等人（2005）利用大地電磁波進行探勘，在春日以南泰林地區三條剖面線的地電阻影像整合剖面判讀結果，奇美斷層為逆衝斷層，傾角約為 80 度，如圖 3-4.2。

(5) 陳文山等人（2008）利用野外調查資料繪製瑞穗斷層與奇美斷層地質剖面圖，奇美斷層底部在深度大約 10.5 公里處，可能與瑞穗斷層底部相連，剖面圖中的奇美斷層傾角約為 55°S，如圖 3-4.3。

(6) 徐澔德等人（Shyu et al., 2006）利用 GPS 量測資料與現地調查進行地形分析，建構瑞穗斷層（縱谷斷層）與奇美斷層幾何模型，依據該模型剖面圖，奇美斷層傾角約為 80°S，且推測奇美斷層於地下深度約 4.5 公里處，與瑞穗斷層（縱谷斷層）的底部相連接，如圖 3-4.4。

(7) 郭陳澔等人（Kuochen et al., 2004）利用 hypo-DD 法重定位東臺灣 1991-2002 年的地震分布，由經過奇美斷層的 D 剖面顯示，剖面於 25~35 公里深處有明顯之地震密集，如圖 3-4.5。

奇美斷層幾何形貌相關文獻彙整於表 3-4.1 中。

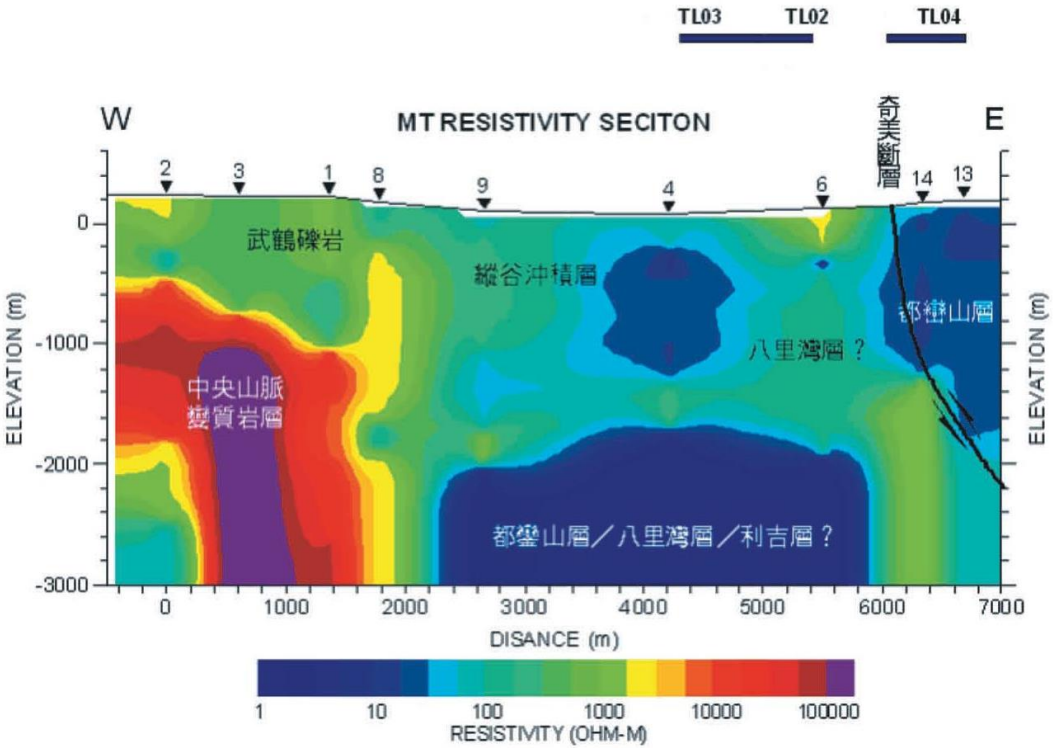


圖 3-4.2：泰林地區地電阻影像剖面結果圖（董倫道等人，2005）。

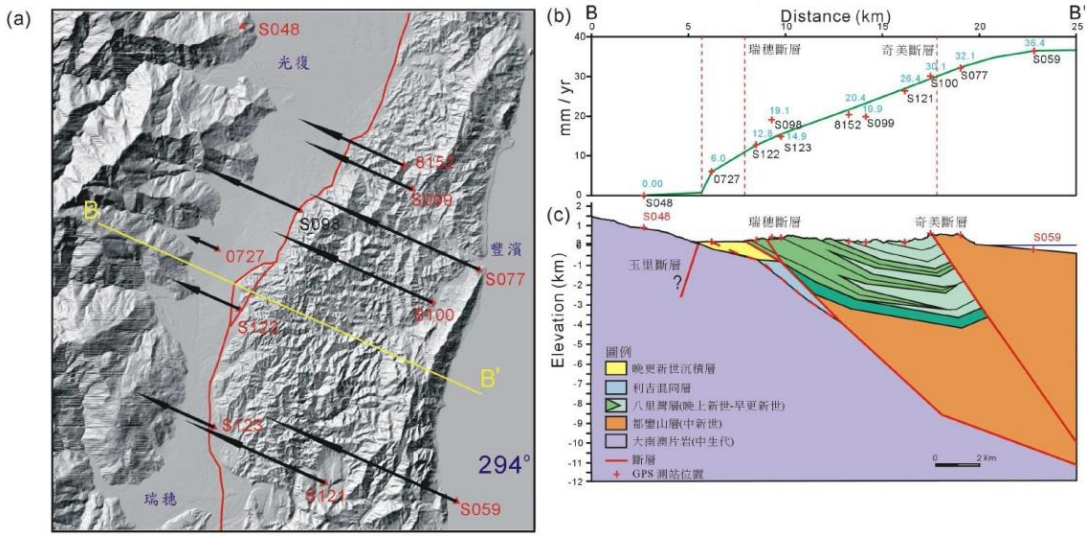


圖 3-4.3：海岸山脈中段橫跨瑞穗斷層與奇美斷層地質剖面圖（陳文山等人，2008）。

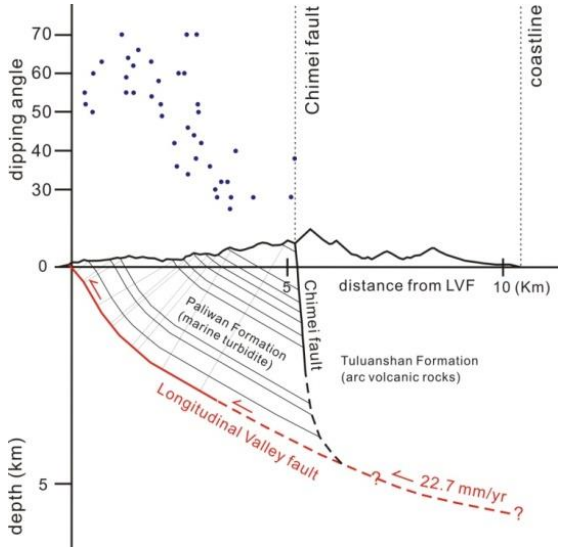


圖 3-4.4：奇美斷層剖面圖，推測底部約在 4.5 公里處與瑞穗斷層（縱谷斷層）底部相連（Shyu et al., 2006）。

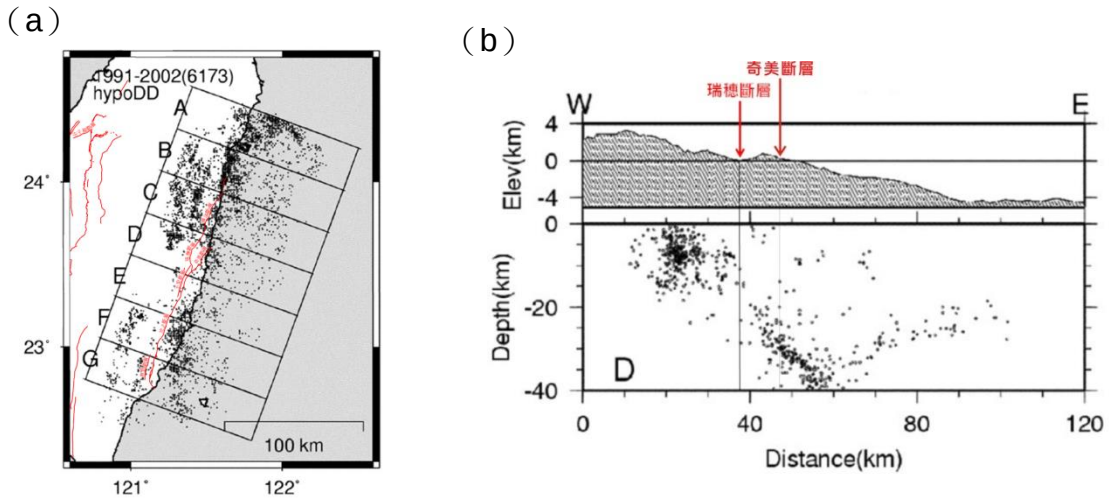


圖 3-4.5：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面，其中 D 剖面即奇美斷層通過之處，剖面於 25~35 公里深處有明顯之地震密集（修改自 Kuochen et al., 2004）。

表 3-4.1：奇美斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度
賴文基，1995	現地調查	75 度	--
羅偉與楊昭男，2004	現地調查	80 度	--
董倫道等，2005	大地電磁波探勘	80 度	--
陳文山等人，2008	現地調查與模型重建	55 度	約 11 公里
Shyu et al., 2006	現地調查與模型重建	80 度	4.5 公里
Kuochen et al., 2004	Hypo-DD 地震重定位(1991-2002 年)	--	25~35 公里

3. 斷層機制：
   (1) 逆衝斷層兼具左移分量，走向為 N70-80°E/70°S（羅偉與楊昭男，2004）。
   (2) 走向接近東西向之處以逆斷層為主，兼具極少的走向滑移分量；走向與花東縱谷斷層接近平行之處則，以走向滑移型態為主，兼具傾向滑移分量（林慶偉，1997）。
4. 短期滑移速率：參閱參數表表 3-4.2。
5. 長期滑移速率：楊與陳（2005）於豐濱進行奇美斷層露頭開挖，開挖位置標示於圖 3-4.6 中，結果發現斷層並未錯移全新世河階礫石層，也無明顯位移現象（圖 3-4.7）。張瑞津等人(1992)認為秀姑巒溪奇美村一帶的河階階面受奇美斷層影響而變位，徐澔德等人(Shyu et al., 2006）於此地區之奇美斷層下盤採集標本進行碳 14 定年，河階定年標本位置標示於圖 3-4.6 中，定年結果為 2950-3310 yr B.P.。本計畫藉由塊體模型推估奇美斷層之斷層面平均長期滑移速率為 3.68 mm/yr，平均滑移虧損率為 1.62 mm/yr。

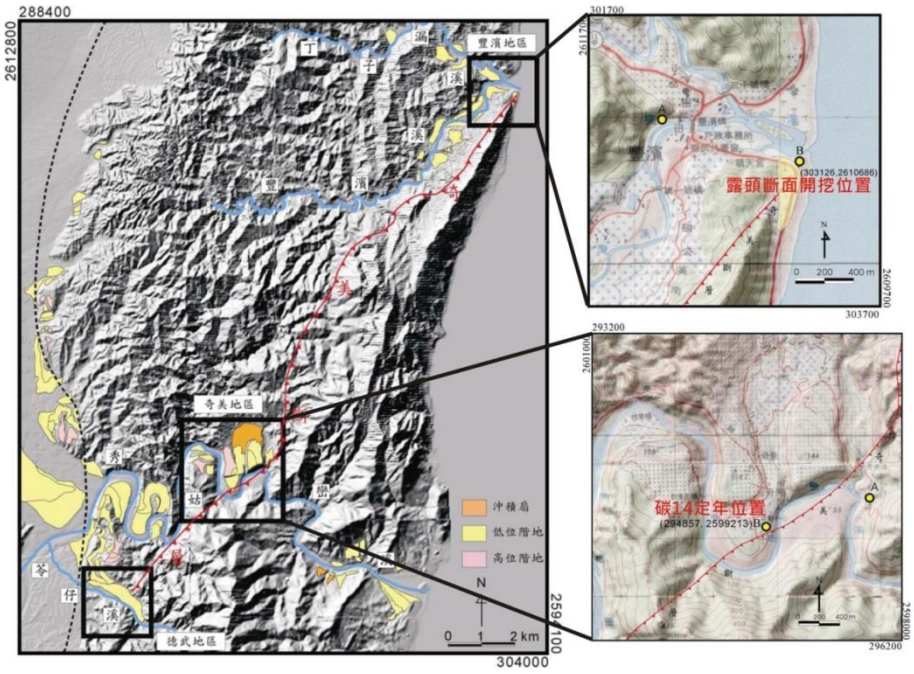


圖 3-4.6：奇美斷層與全新世沖積層分布圖（楊與陳，2005）。

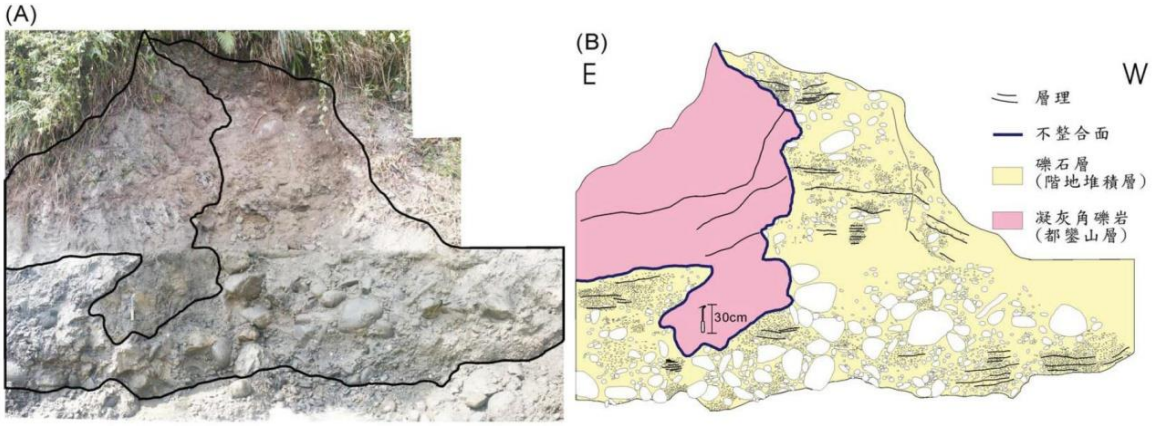


圖 3-4.7：奇美斷層露頭剖面，位置詳圖 3-4.6，（A）剖面開挖照片（B）剖面顯示階地礫石層沉積不整合在都鑾山層的凝灰角礫岩之上（楊與陳，2005）。

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，規模以 Mw=6.9，地表錯動量為 1.45±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：由地層分布來分析，因奇美斷層活動年代至少在八里灣層沉積之後，然而並未擾動或截切全新世河階礫石層，所以確認為更新世晚期活動的斷層。

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

表 3-4.2：奇美斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
奇美斷層	斷層分段與破裂事件	未分段	GPS 資料、地表地形、岩層分布	Hsu, 1956；羅偉與楊昭男，2004；林啟文等，2007；陳文山等，2008；林啟文等，2009
	長度(km)	30 公里		
	寬度(km)	約 25.1 公里	深度/sin 傾角 (以深度 25 公里，傾角 85 度計算)	--
	破裂深度(km)	約 4.5 公里	野外調查資料重建模型	Shyu et al., 2006
		約 10.5 公里	野外調查資料重建模型	陳文山等人，2008
		25~35 公里	Hypo-DD 地震重定位(1991-2002 年)	Kuochen et al., 2004
	面積(km^2)	約 753 平方公里	長度×寬度	--
	走向	呈東北一西南走向	地表地形、岩層分布。	Hsu, 1956；林啓文等，2009
	傾斜角度(度)	75 度	現地調查	賴文基，1995
		80 度	現地調查	羅偉與楊昭男，2004
		80 度	大地電磁波探勘	董倫道等，2005
		55 度	現地調查與模型重建	陳文山等人，2008
		80 度	現地調查與模型重建	Shyu et al., 2006
	斷層機制	逆衝斷層兼具左移分量	岩層分布、構造地形特徵	林慶偉，1997；羅偉與楊昭男，2004
	短期滑移速率(mm/yr)	平行斷層走向分量 13.0 mm/yr(左移) 垂直斷層走向分量 1.0 mm/yr(壓縮) 高程方向抬升量 3.9 mm/yr	(2004~2008)GPS 資料	林啟文等，2007；饒瑞鈞等，2010
		跨奇美斷層上下盤高程抬升率變化有明顯的下陷區-12.8 mm/yr	(2004~2010)靜浦至紅葉的精密水準測量	饒瑞鈞等，2010
		奇美斷層東側相對西側有接近 10 mm/yr 的地表位移速率	(2004~2008)PS-InSAR	顏君毅等，2012
	長期滑移速率(mm/yr)	更新世以來曾經活動，全新世階地無錯動跡象。目前無相關可推估長期滑移速率之文獻。	野外露頭調查	楊志成與陳文山，2005
		3.68	塊體模型	本計畫推估

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	1.62	塊體模型	本計畫推估
	單一事件變位量(m)	1.45±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)	6.9	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 (逆斷層)	Wells and Coppersmith, 1994
		6.9	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)	300~500	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間	本計畫推估
	最近一次活動時間	更新世晚期	野外露頭調查	楊志成與陳文山，2005

3-4-2 奇美斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

綜合目前既有的奇美斷層調查文獻，皆無提出奇美斷層有分段或是被其他斷層截切之可能，因此本計畫評估奇美斷層僅有一種破裂模式，其長度為 30 公里。

奇美斷層傾角主要參考野外露頭觀察、地球物理推估及地震分布，本計畫以高傾角 80 度、85 度、90 度作為邏輯樹數值，其權重分別為 0.2、0.6、0.2。深度則參考 Kuochen et al.（2012）速度構造剖面，如圖 3-4.8 所示，奇美斷層以東傾 85 度向下延伸，約在深度 25 公里處與瑞穗斷層相交，因此邏輯樹中值設為 25 公里，並加減 5 公里做為邏輯樹上下界。其權重分別為 20 公里（0.2）、25 公里（0.6）、30 公里（0.2）。

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

目前未有相關地質調查資料可供計算奇美斷層之長期滑移速率。本計畫參考塊體模型分析結果，奇美斷層長期平均滑移速率為 3.68 mm/yr，滑移虧損率為 1.62 mm/yr，本計畫將邏輯樹滑移速率數值設定為 3.68 mm/yr（權重 0.5）、1.62 mm/yr（權重 0.5）。

奇美斷層各節點權重的分配詳如圖 3-4.9 所示。

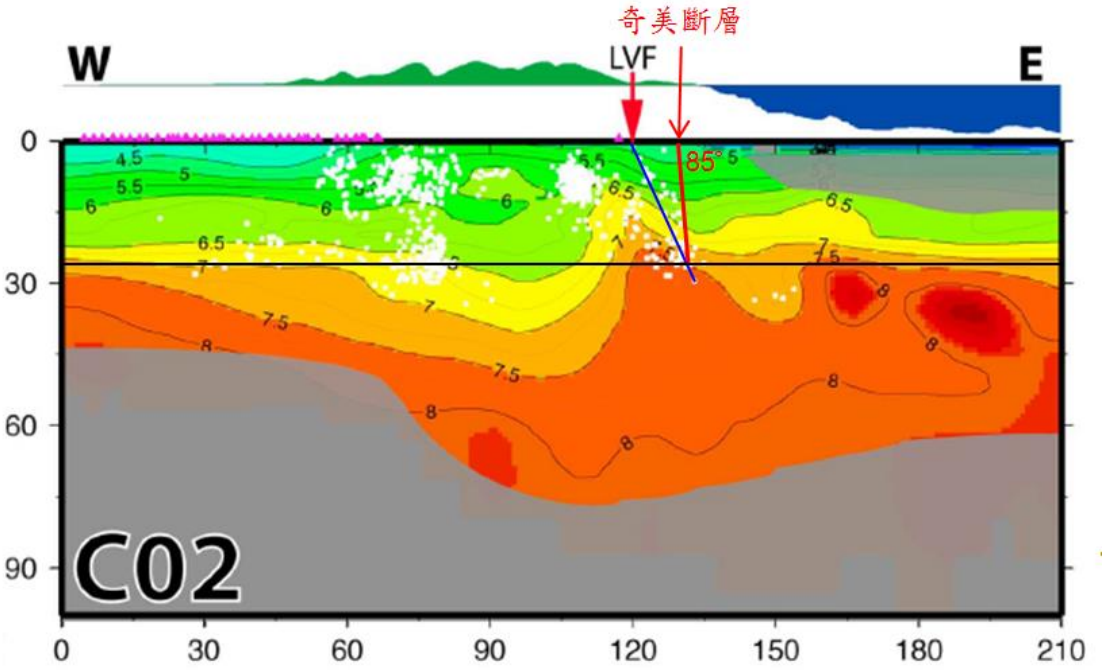


圖 3-4.8：參考速度構造剖面及地震分布推估奇美斷層幾何面。

表 3-4.3：奇美斷層之中值各破裂事件規模及權重。

破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994 (破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011 (破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
A	30	25	25.1	85	753	6.6	6.9	7.2	6.9
	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)	斷層深度(km)	特徵地震規模(M_W)	斷層滑移速率(mm/yr)	統計模式

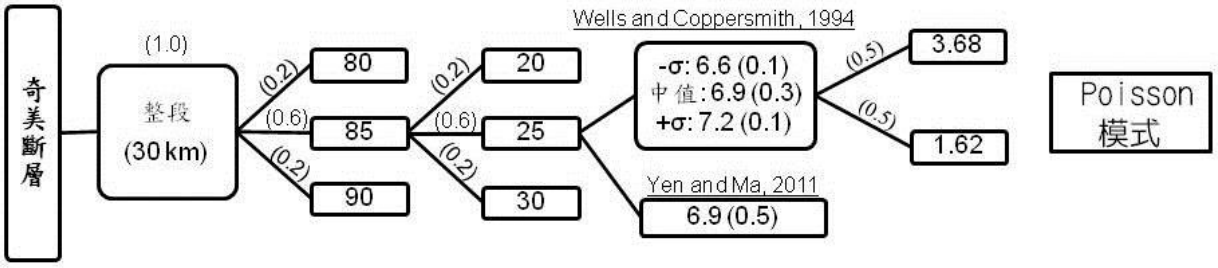


圖 3-4.9：奇美斷層邏輯樹。

3-4-3 奇美斷層特徵地震模式

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

圖 3-4.9 之奇美斷層邏輯樹可得到 72 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-4.11 為奇美斷層破裂事件之規模-權重分布圖，其中以規模 6.9 之權重最高，7.0 次之。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-4.12 為地震復發間隔時間-權重分布圖，破裂模式在地震復發間隔時間 300 年~500 年間有較高之權重。

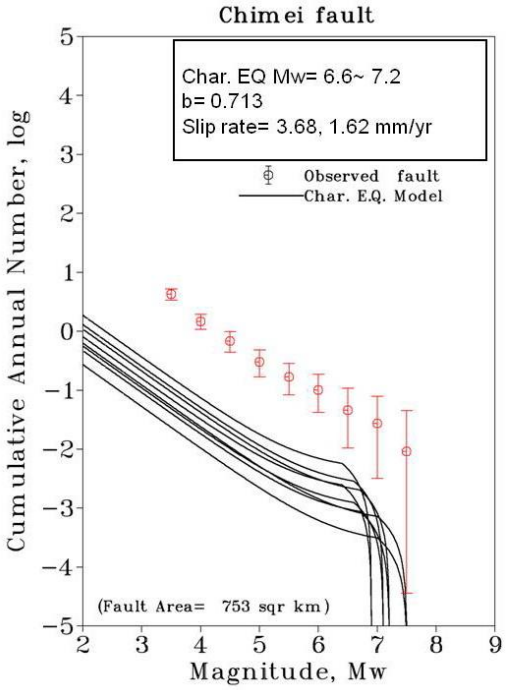


圖 3-4.10：奇美斷層之特徵地震模式。

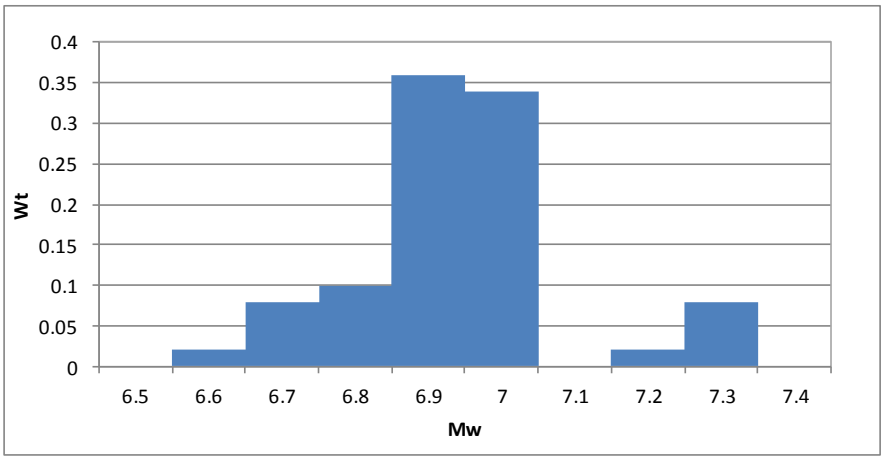


圖 3-4.11：奇美斷層之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

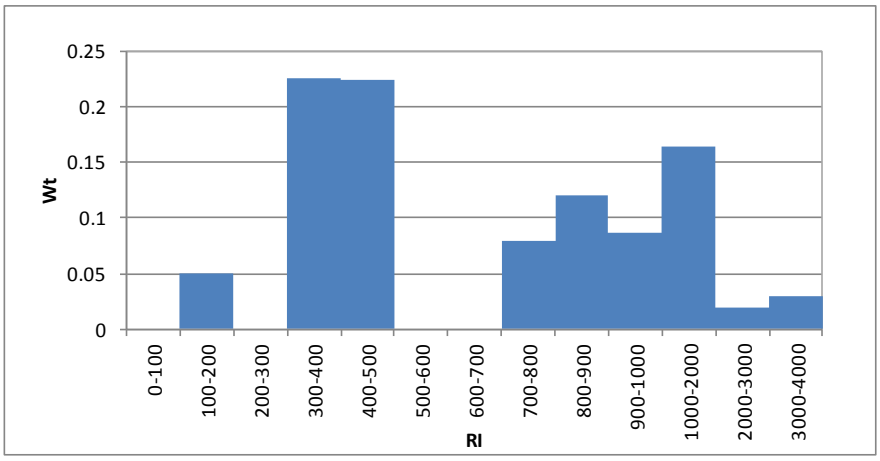


圖 3-4.12：奇美斷層之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

3-4-4 奇美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）估算奇美斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，奇美斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式（詳附錄 3-1）進行評估。

表 3-4.4 為奇美斷層 Poisson 模式評估之結果，得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 5.8%、9.3%及 17.5%；發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 1.8%、2.9%及 5.5%。

表 3-4.4：奇美斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
M ≧ 6.5	5.8%	9.3%	17.5%
M ≧ 7.0	1.8%	2.9%	5.5%

3-5 玉里-池上斷層系統

3-5-1 玉里斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

1951 年花東縱谷地區發生多起地震，震央分布如圖 3-5.1 所示，其中 11 月 25 日編號 11 之地震造成玉里斷層的地表破裂，Cheng et al.（1996）推估主震規模為 Ms=7.1。圖 3-5.1 中黑色實線 YF 為 Hsu（1962）根據縱谷地區地表破裂所連接而成，長度為 43 公里。

鍾令和（2003）描繪出 1951 年地表破裂之分布情形，如圖 3-5.2 所示，圖中地表破裂可分為瑞穗斷層、玉里斷層及池上斷層。Shyu et al.（2007）詳細描繪 1951 年玉里斷層地表破裂（圖 3-5.3），得到玉里斷層破裂位於花東縱谷中，北起春日以西的鍋蓋樑，南至玉里，破裂長度約 20 公里，在玉里地區則是玉里斷層和池上斷層呈現副平行破裂之情形，兩斷層地表破裂距離 1.5 公里。

根據地調所條帶地質圖，玉里斷層北起花蓮縣瑞穗鄉瑞良村，向南延伸至玉里鎮客城里，長約 23 公里（徐鐵良，1955），如圖 3-5.4 所示。玉里斷層呈北北東走向，為東側上升之逆移斷層（Hsu, 1962），兼具左移分量（游明聖，1997）。

從 Champenois et al.（2012）瑞穗至富里南邊的 PSInSAR 結果（圖 3-5.5、圖 3-5.6），在間震期縱谷斷層的活動性十分明顯，而玉里斷層的活動性則不顯著。然而從 1951 年地震地表破裂及地物探勘資料中，仍可發現玉里斷層存在的證據。

玉里斷層為地震斷層的其他證據包括：（1）楊蔭清（1953）指出 1951 年花蓮臺東地震地表斷層線由大富沿海岸山脈山腳，向南南西延展，經過富興、鶴岡、瑞美、麻汝、玉里等；而玉里國小內斷層東側花壇上升 10 至 30 公分，東側教室向北移動 40 公分；（2）徐鐵良（Hsu, 1962）指出富興斷層崖於 1951 年臺東地震時有東側上衝，縱移 131 公分，左移 163 公分的斷層擦痕；（3）顏滄波（1983）於溪東斷層南延三民國小開挖時，發現中央山脈變質岩與舞鶴礫岩呈高角度接觸；（4）朱傚祖與游明聖（1995）指出 1972 年瑞穗地震所產生的地裂現象，皆分布於瑞美斷層、瑞良斷層與掃叭斷層之上，因此推測該次地震亦同時引發玉里斷層的再度活動。

本計畫考慮玉里斷層及池上斷層為系統破裂模式，其中玉里斷層又可考慮兩種破裂情形，A 模式為斷層，長度 23 公里，B 模式為 Shyu et al.（2007）描繪之 1951 年地表破裂，長度 20 公里，詳如圖 3-5.7 所示。

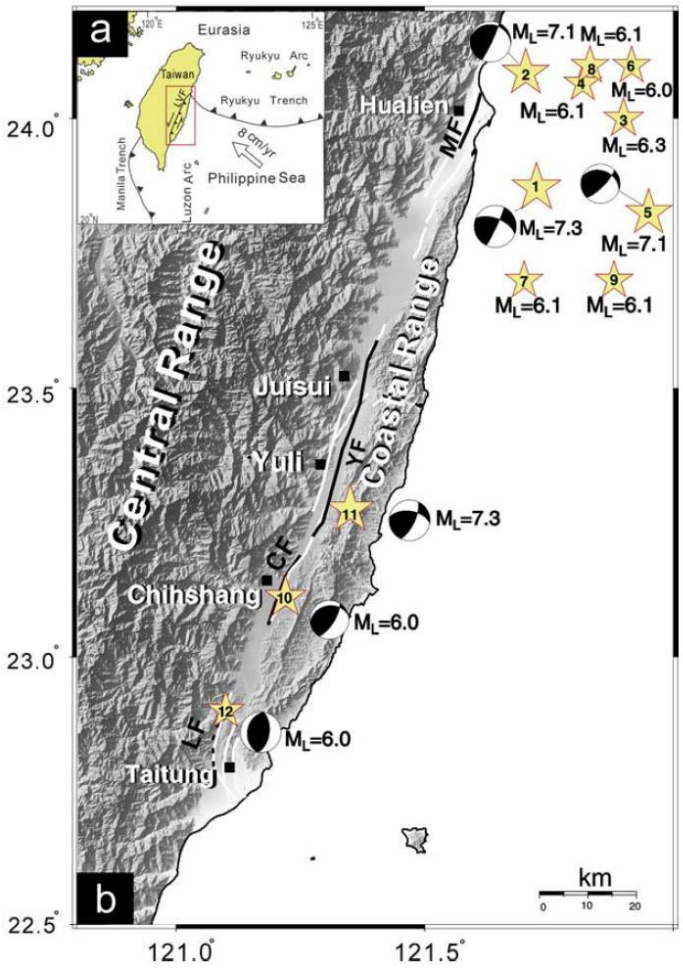


圖 3-5.1：1951 年花蓮-台東系列地震主震之時空分布（Chen et al., 2008），CF 為池上斷層，YF 為玉里斷層。

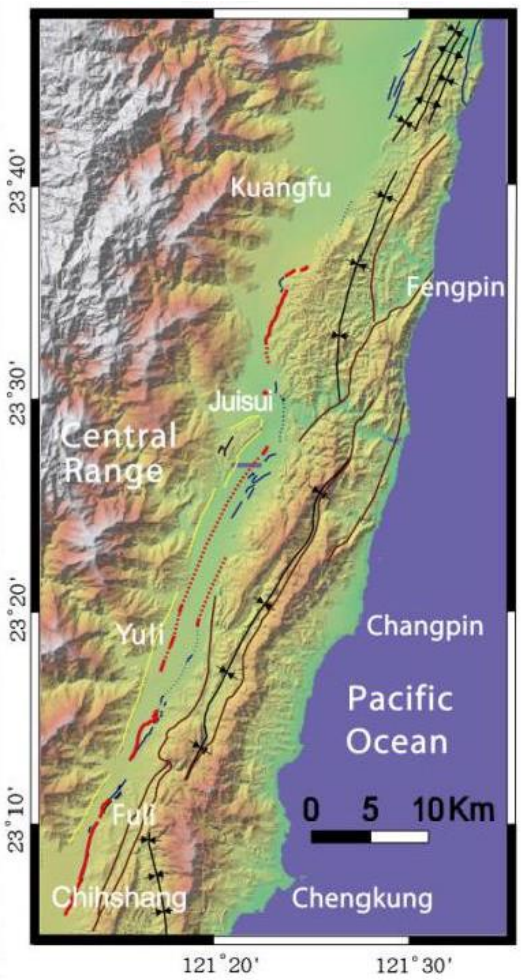


圖 3-5.2：1951 年玉里池上地震地表破裂及主要地質構造圖。紅色線代表地表破裂，藍線代表花東縱谷可能之活動斷層地表調查位置，黃線代表中央山脈斷層（引自鍾令和，2003）。

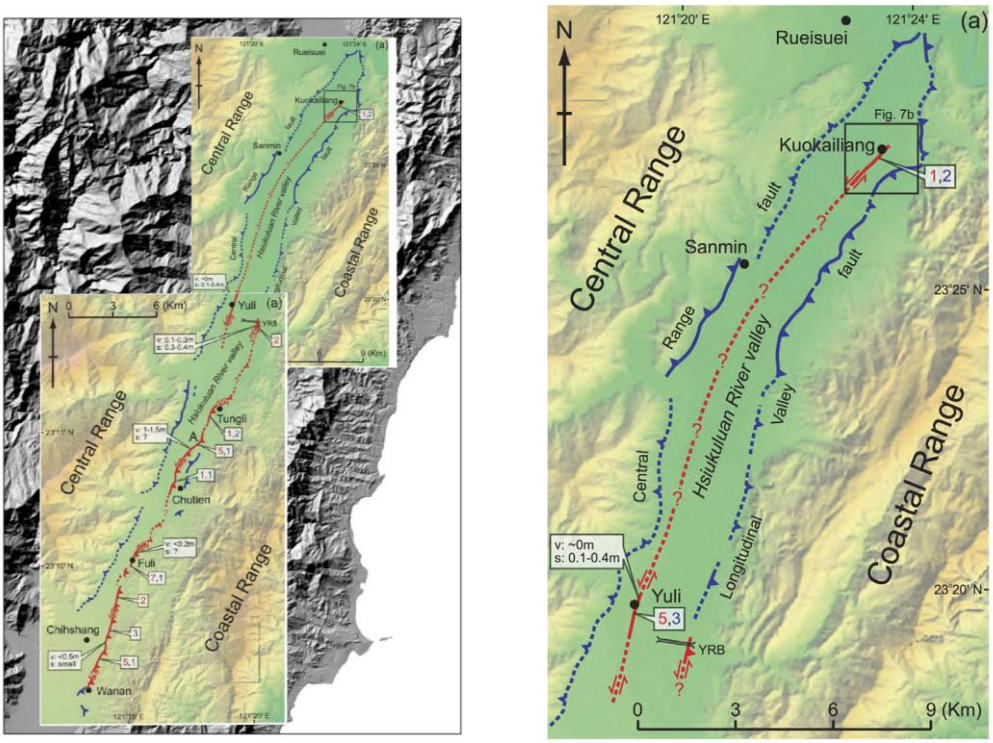


圖 3-5.3：1951 年花東縱谷地震玉里地區地表破裂分布圖。紅色線代表地表破裂，藍線代表 1951 年未產生地表破裂之活動構造（引自 Shyu et al., 2007）。

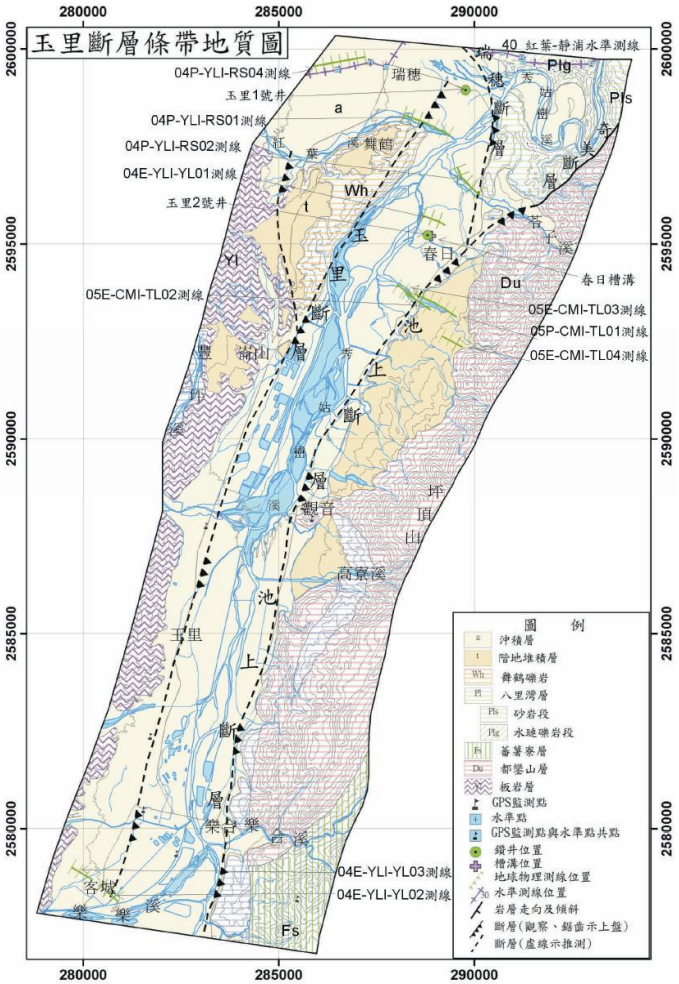


圖 3-5.4：玉里斷層條帶地質圖，座標系統 TWD67（林啓文等，2009）。

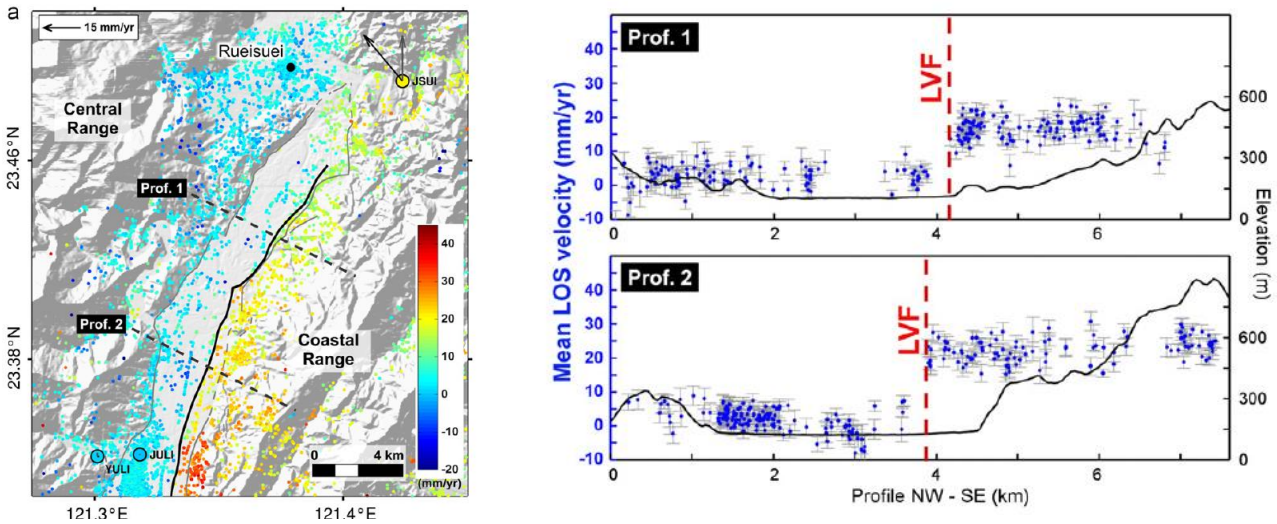


圖 3-5.5：左圖為瑞穗到玉里地區 LOS PS 速度場分布圖，觀測時間為 2007 年 1 月到 2010 年 2 月，黑色實線為縱谷斷層線形，右圖為剖面 1 及剖面 2 之 PS 速度場剖面圖，剖面中之黑色實線為地形高程，藍色圓點為 LOS 速度（引自 Champenois et al., 2012）。

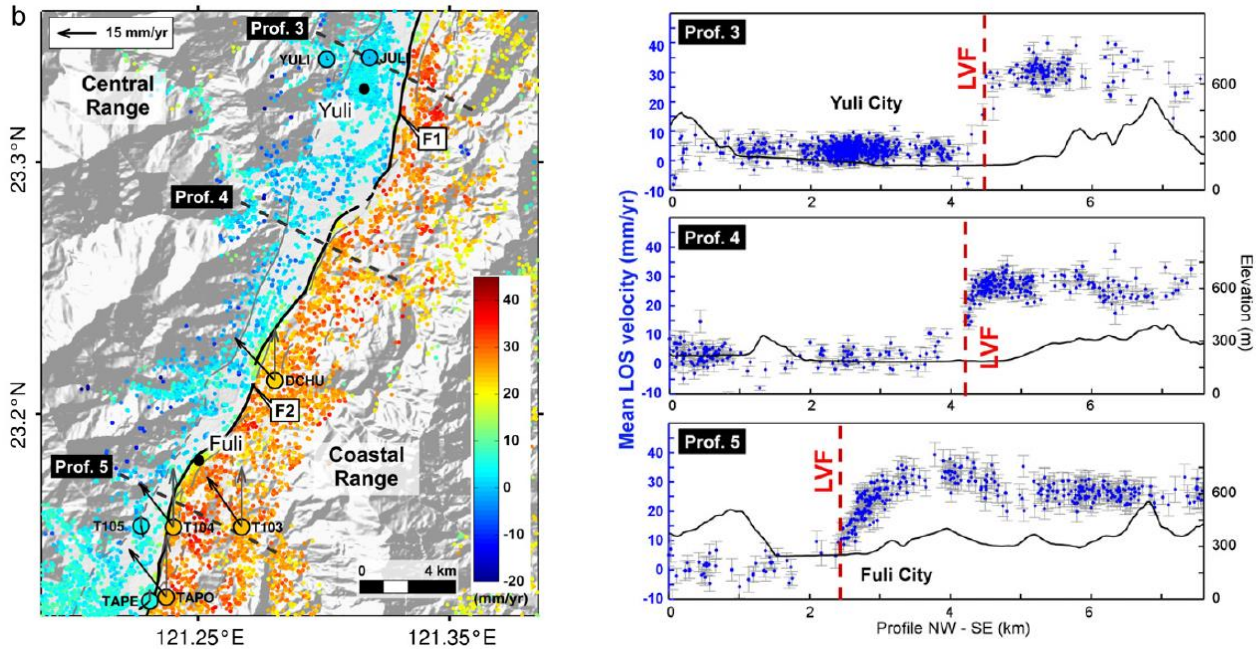


圖 3-5.6：左圖為玉里到富里地區南邊 LOS PS 速度場分布圖，觀測時間為 2007 年 1 月到 2010 年 2 月，黑色實線為縱谷斷層線形，右圖為剖面 3~剖面 5 之 PS 速度場剖面圖，剖面中之黑色實線為地形高程，藍色圓點為 LOS 速度（引自 Champenois et al., 2012）。

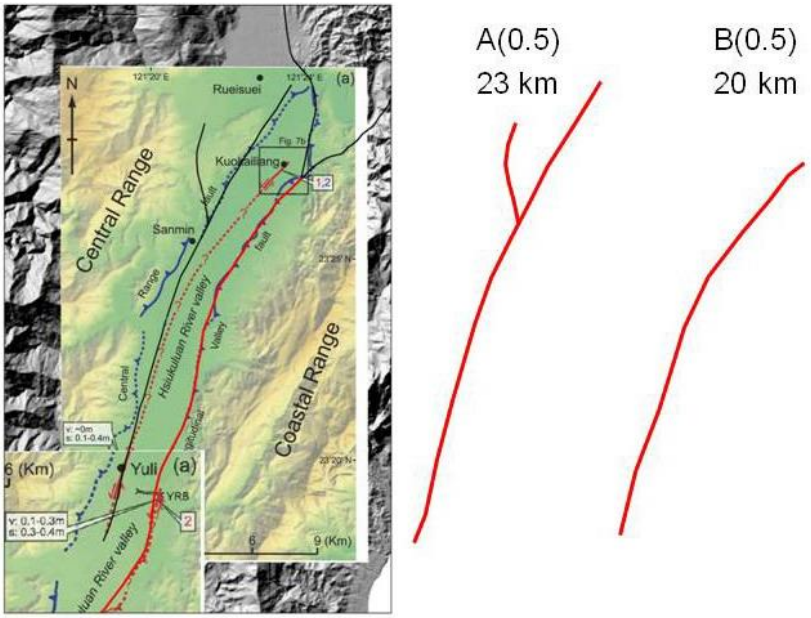


圖 3-5.7：玉里斷層之破裂模式及權重分配。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：

(1) 石瑞銓等人（2004）實施 2 條震測測線，A 測線為 04P-YLI-RS01（位置詳圖 3-5.4），位於舞鶴台地東北側，跨越舞鶴台地東北側斷層露頭，剖面顯示反射訊號由表層至深度約 700 公尺均相當清晰，西側剖面為向東緩傾且層狀訊號連續，東側訊號則顯示地層受到褶皺彎曲或錯動，如圖 3-5.8A；B 測線為 04P-YLI-RS04（位置詳圖 3-5.4），位於瑞穗溫泉路北側，剖面西側下方反射訊號呈近水平，反射面可能是中央山脈板岩與沖積層的交界，深度約 140 公尺以下無層狀訊號，而東側至深度 450 公尺有良好層狀反射訊號，兩側影像明顯不同，可能是地層界線或斷裂帶。由探測結果，玉里斷層東傾約 75 度，如圖 3-5.8。

(2) 石瑞銓等人（2004）實施 2 條地電阻測線，A 測線為 04E-YLI-YL03（位置詳圖 3-5.4），位於玉里鎮南方的客城，剖面影像岩層約呈水平，電阻率連續，沒有構造存在的跡象。B 測線為 04E-YLI-YL02（位置詳圖 3-5.4），位於 A 測線的東南方，剖面呈現高-低-高的層狀構造，但在西北端中層尖滅，顯示可能有斷層存在，如圖 3-5.9 所示。

(3) 張竝瑜等人（2015）於玉里斷層實施淺層震測，發現在深部的地層明顯向東傾斜，且有主要為逆移的地層反射面錯動。利用淺層反射層面的相對位移研判，東側層面相對於西側有因斷層錯動而產生抬升的現象，研判此一造成主要地層錯動之斷層可能代表了玉里斷層之主錯動帶，但深度仍不確定，如圖 3-5.10 所示。

(4) 徐澔德等人（Shyu et al., 2007）利用 GPS 量測資料與現地調查進行地形分析，建構位於舞鶴台地縱谷地區之東西向構造剖面，依據該模型剖面圖，玉里斷層傾角約為 75°E，深度可能超過 5 公里，但並未確定，如圖 3-5.11 所示。

(5) 郭陳澔等人（Kuochen et al., 2012）利用地震層析法（tomographic section）剖面重定位東臺灣地震分布，由 C01 剖面顯示，縱谷斷層地震密集帶向東傾約 55 度，如圖 3-5.12。

玉里斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-5.1。

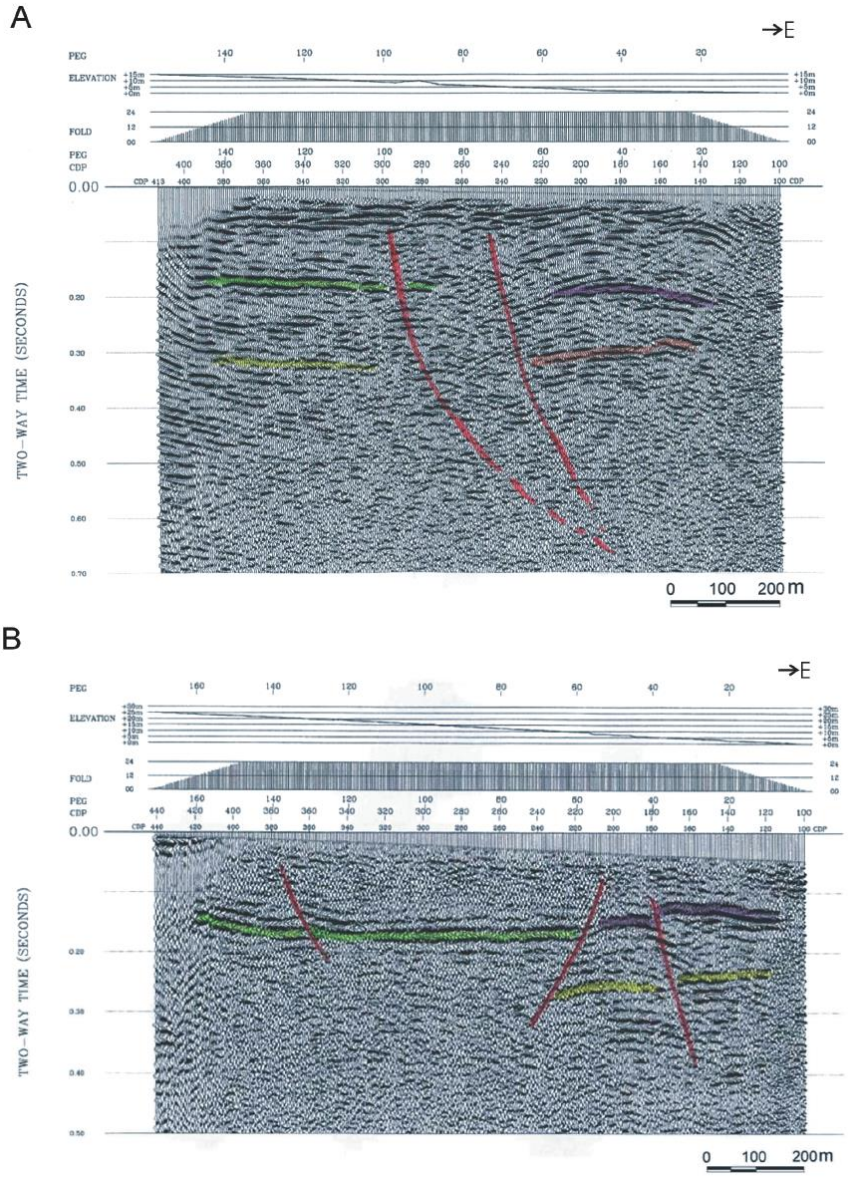


圖 3-5.8：玉里斷層反射震測探勘結果剖面圖（石瑞銓等人，2004）。

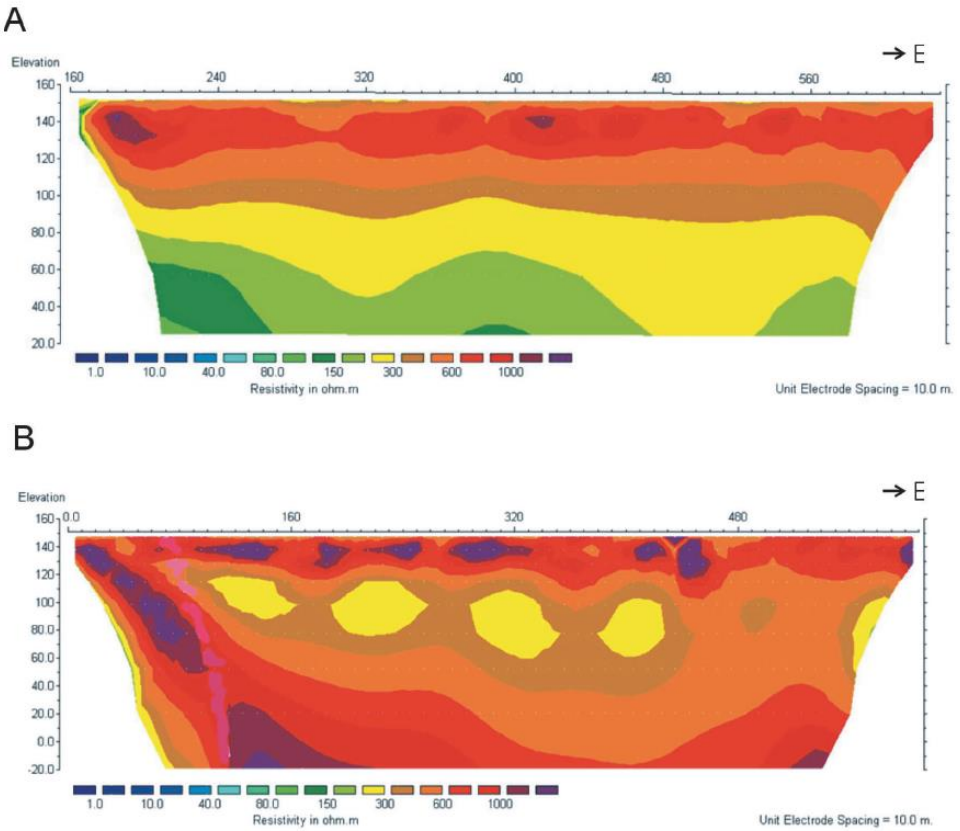


圖 3-5.9：玉里斷層地電阻測勘結果剖面圖（石瑞銓等人，2004）。

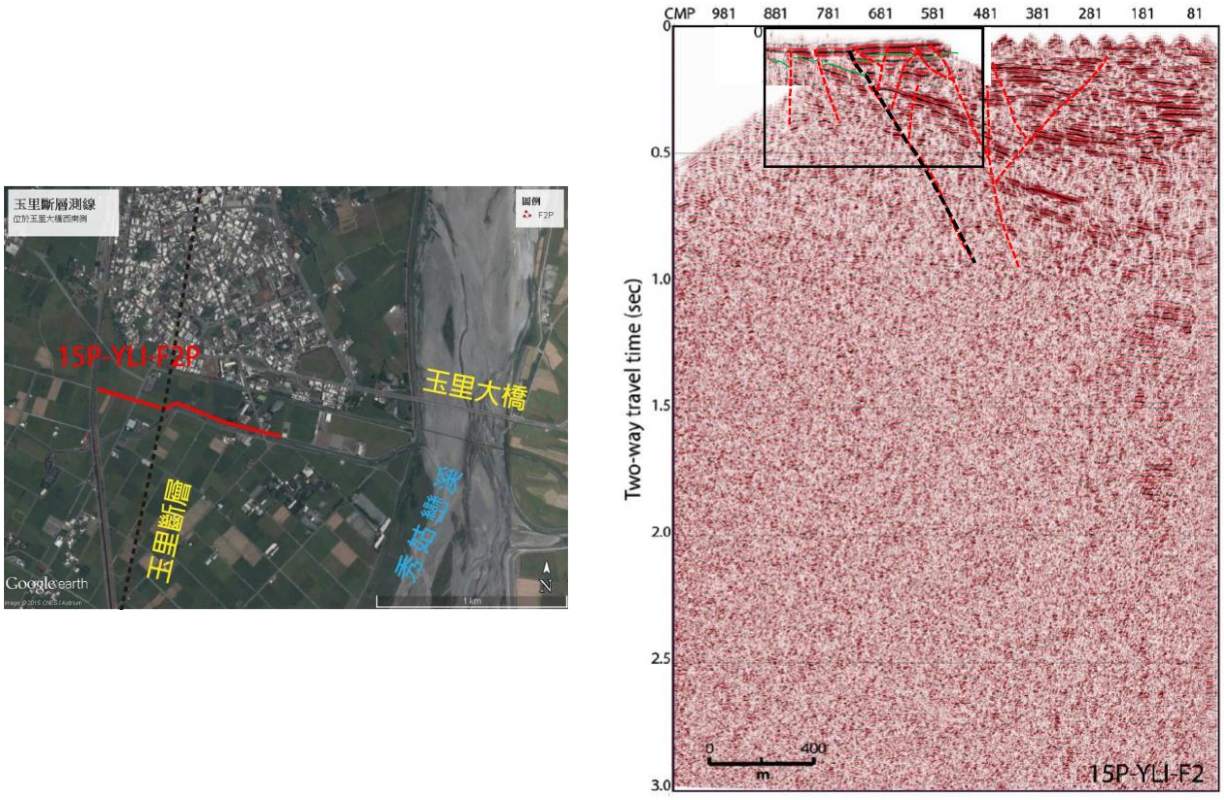
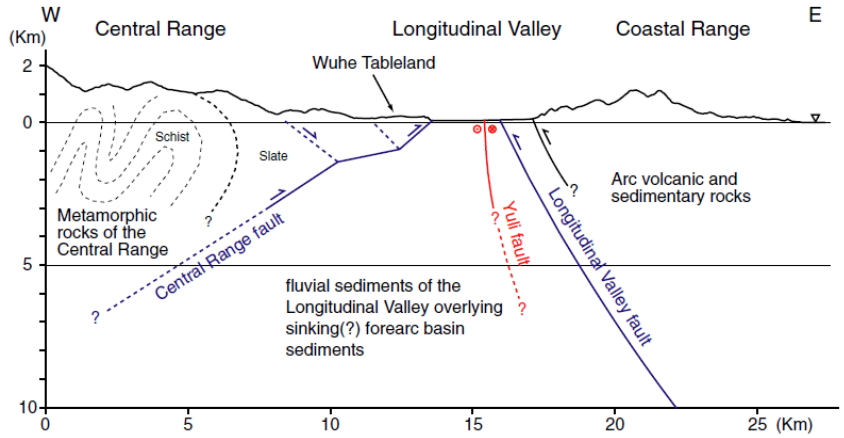


圖 3-5.10：玉里斷層淺層震測剖面圖構造解釋圖（張竝瑜等人，2015）。



c

圖 3-5.11：位於舞鶴台地之東西向構造剖面，玉里斷層發育於縱谷中之沖積層，傾角約為 75 度向東傾，底部未知（Shyu et al., 2007）。

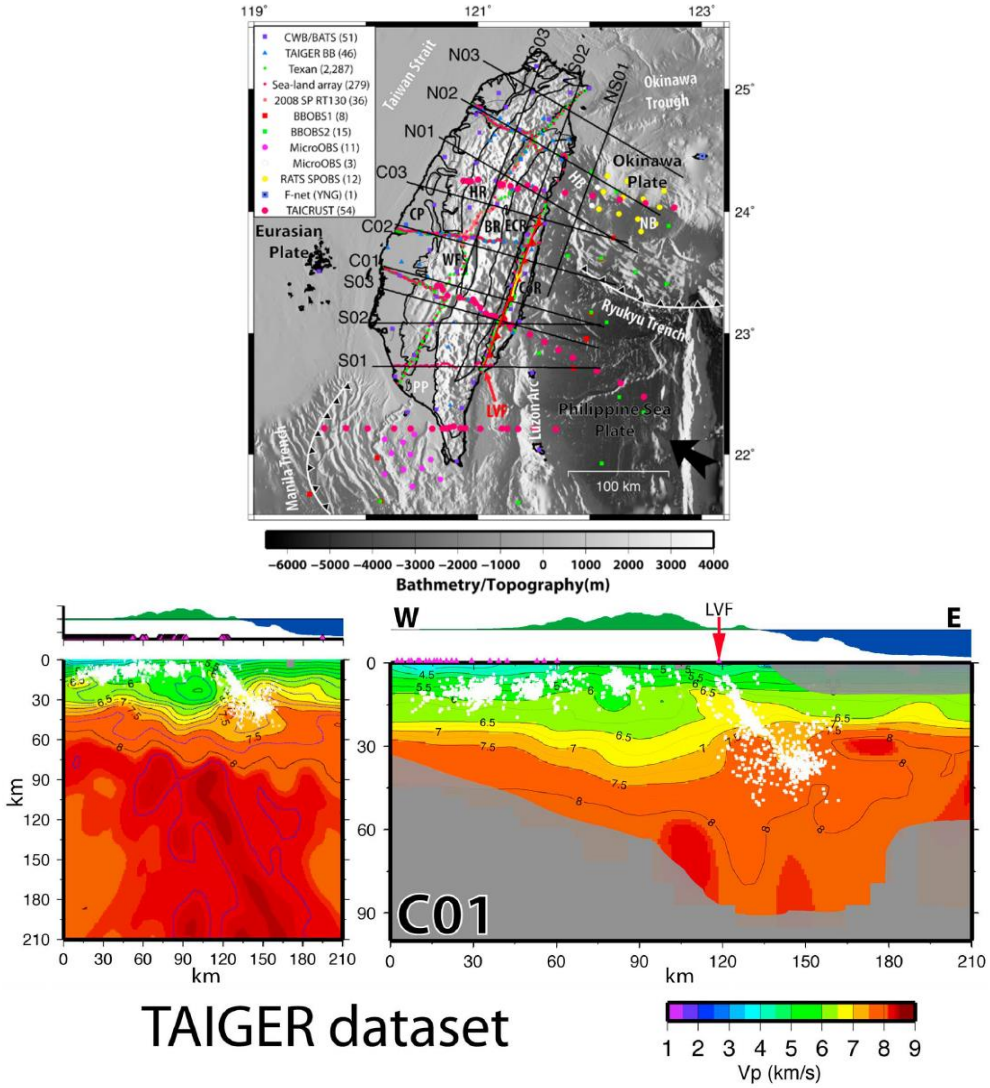


圖 3-5.12：地震層析法（tomographic section）速度剖面，上圖為臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，下圖為跨越縱谷斷層中段 C01 速度構造剖面，白色圓點為重定位之地震分布（Kuochen et al., 2012）。

表 3-5.1：玉里斷層幾何形貌相關文獻。

文獻	方法	傾角	深度
石瑞銓等人，2004	反射震測剖面	約 75 度	--
石瑞銓等人，2004	地電阻 04E-YLI-YL02 剖面	在西北端中層尖滅，顯示可能有斷層存在	
張竝瑜等人，2015	淺層震測剖面	約 60 度	--
Shyu et al., 2007	現地調查與模型重建	75 度	> 5 公里
Kuochen et al., 2012	地震層析法速度剖面	約 55 度	--

3. 斷層機制：
   (1) 左移斷層兼具逆移分量，走向為北北東（徐鐵良，1955）。
   (2) 1951 年玉里地震之地表破裂走向與花東縱谷平行，震源機制解為帶左移分量的高角度逆斷層（鍾令和等，2004）。
4. 短期滑移速率：
   (1) Yu and Kuo(2001)在玉里地區設置量測地殼變形之 GPS 測站，觀測期間自 1995-1999 年，圖 3-5.13 左圖所示為相對於長良測站（S039）水平方向速度場，位於縱谷斷層東側點位速度場為 20.8-27.7 mm/yr，方位角 313-336 度，而玉里斷層上下盤則無顯著變化。而高程變化方面，圖 3-5.13 右圖為 1985-1996 年間水準測線之變化，縱谷東側海岸山脈高程增加 280mm，西側中央山脈高程增加 60mm，縱谷斷層抬升速率為 24.4 ±0.3 mm/y，而玉里斷層上下盤則無顯著變化，反而在玉里斷層西側有抬升現象，研判為中央山脈斷層之抬升。
   (2) 饒瑞鈞等人（2010）於靜浦至紅葉水準測線（長 33 公里）在 2004-2010 年間共進行 7 次施測，本測線跨越玉里斷層、瑞穗斷層與奇美斷層，其中 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（7.7 mm/yr）可說明瑞穗斷層與玉里斷層之間的活動性，然而跨過玉里斷層的抬升量變化不顯著，如圖 3-5.14 所示。
   (3) 林志展（2013）整理 2001-2011 年花蓮地區相對於澎湖白沙（S01R）GPS 速度場，玉里斷層上盤水平方向速度約為朝西北 72.0 mm/yr，下盤水平方向速度約為朝西北 64.0 mm/yr，如圖 3-5.15 所示。

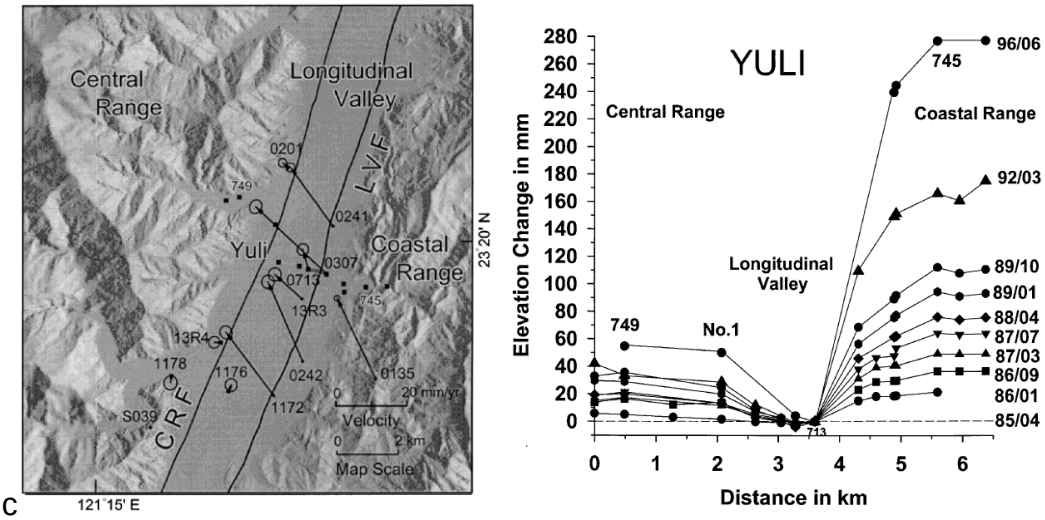


圖 3-5.13：左圖：長良測站（S039）在玉里地區對其他測站 1995-1999 的水平方向相對速度圖；右圖：玉里地區 1985-1996 水準測量地表高程變化紀錄（Yu and Kuo, 2001）。

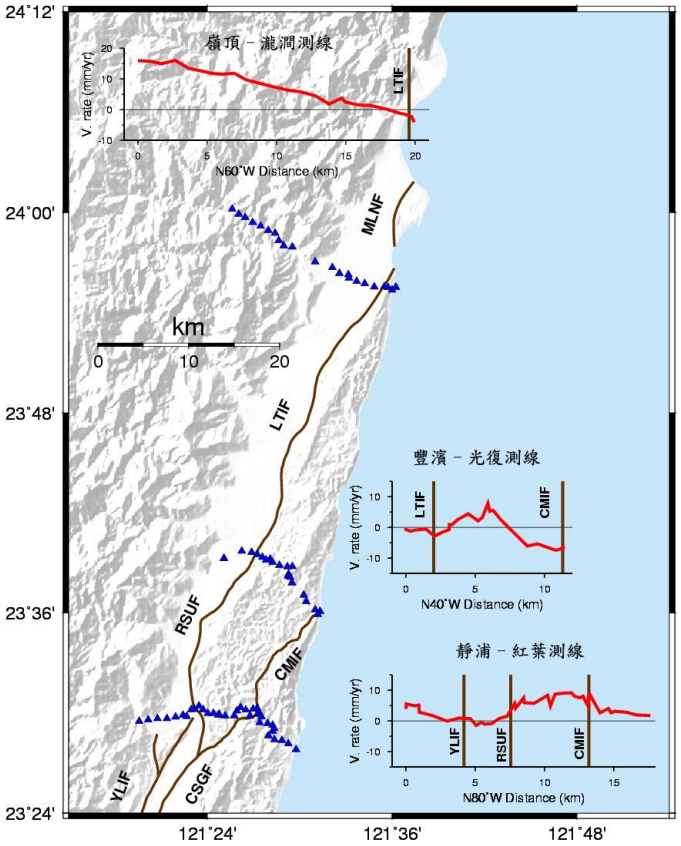


圖 3-5.14：靜浦至紅葉測線水準垂直速度圖（饒瑞鈞等人，2010）。

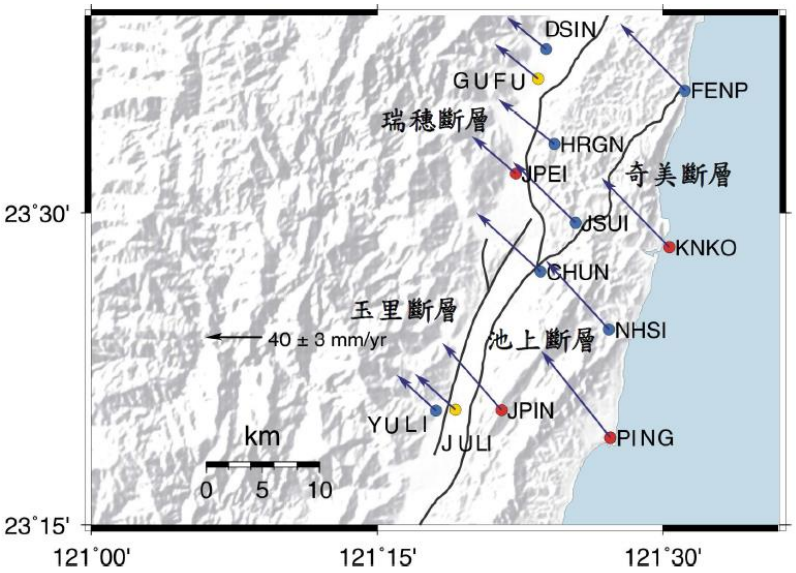


圖 3-5.15：2001-2011 年花蓮地區相對於澎湖白沙（S01R）GPS 速度場，藍色箭頭為速度量值 （林志展，2013）。

5. 長期滑移速率：無相關地質資料可推估長期滑移速率。
6. 單一事件變位量： 1951 年花蓮臺東地震時，玉里國小內斷層東側花壇上升 10 到 30 公分，東側教室向北移動 40 公分，操場外側位移 16 公分（楊蔭清，1953；Shyu et al., 2007），如圖 3-5.16 所示。

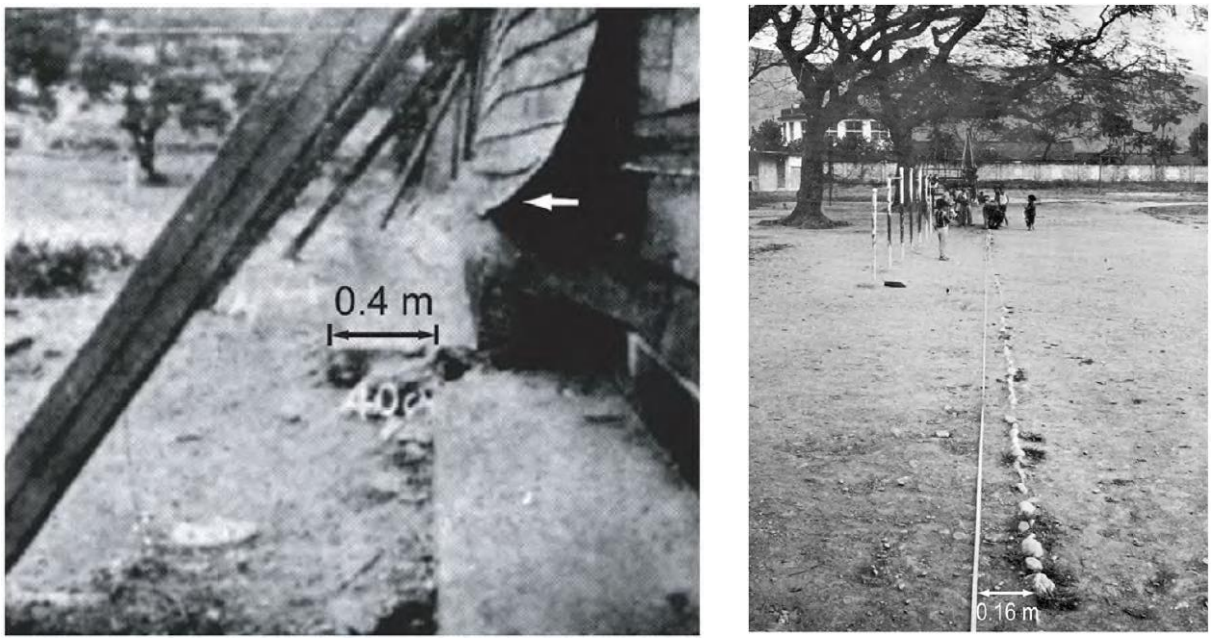


圖 3-5.16：玉里國小地表破裂位移照片，左圖為東側教室，右圖為操場（Shyu et al., 2007）。

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：玉里斷層地表破裂由 1951 年花蓮臺東地震造成，而朱與游（1995）指出 1972 年瑞穗地震所產生的地裂現象，皆分布於瑞美斷層、瑞良斷層與掃叭斷層之上，因此推測該次地震亦同時引發玉里斷層的再度活動。

彙整前人對於玉里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：玉里斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
玉里斷層	斷層分段與破裂事件	無分段 Case A：地調所線形 Case B：1951 地表破裂延伸長度	野外調查、構造地型特徵	Hsu, 1956；Hsu, 1962；徐鐵良，1955；鍾令和等，2004；Shyu et al., 2007
	長度(km)	23 公里	野外調查、構造地形特徵	徐鐵良，1955；林啟文等，2009
		20 公里	1951 年地表破裂	Shyu et al., 2007
	寬度(km)	41.0 公里	深度/sin 傾角 （0~10 km：51 度，10~20 km：60 度，20~27 km：25 度）	--
	破裂深度(km)	約 27 公里	P 波速度構造剖面及地震震源分布	Kuochen et al., 2012
	面積(km^2)	A：942 B：820	長度×寬度	--
	走向	呈東北ㄧ西南走向	野外調查、構造地型特徵	Hsu, 1956；林啓文等，2009
	傾斜角度(度)	約 75 度	反射震測剖面	石瑞銓等人，2004
		約 60 度	淺層震測剖面	張竝瑜等人，2015
		75 度	現地調查與模型重建	Shyu et al., 2007
		約 55 度	地震層析法速度剖面	Kuochen et al., 2012
	斷層機制	逆衝斷層兼具左移分量	野外調查、構造地型特徵	徐鐵良，1955；鍾令和等，2004
		左移斷層	1951 年地表位移	Shyu et al., 2007
	短期滑移速率(mm/yr)	跨玉里斷層無明顯抬升變化	1985-1996 年水準測線	Yu and Kuo, 2001
	長期滑移速率(mm/yr)	因缺乏定年資料，目前無相關可推估長期滑移速率之文獻	春日槽溝中兩期剪切構造，第一期至少大於五萬年，第二期於現生河相沖積層發育前發生	鍾令和等，2004
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	6.00	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網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)	玉里國小內斷層東側花壇上升 10 到 30 公分，東側教室向北移動 40 公分，操場外側位移 16 公分	1951 年地震地表破裂	楊蔭清，1953；Shyu et al., 2007
	最大可能地震規模(Mw)	A：7.0	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
		B：7.0	Mw =3.98+1.02 log A σ=0.23 (平移斷層)	
		A：7.0 B：6.9	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)			
	最近一次活動時間	西元 1951 年	歷史地震、地表破裂調查	Hsu, 1956；Hsu, 1962；徐鐵良，1955；鍾令和等，2004；陳文山等，2004；Shyu et al., 2007

3-5-2 池上斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

池上斷層位於台東縱谷之中南段，長約 65 公里，北自玉里鎮春日里，經台東縣池上鄉萬安，再向南延伸至鹿野鄉瑞源，為菲律賓海板塊碰撞歐亞大陸板塊形成的構造縫合帶斷層，斷層機制為逆移兼具左移分量，斷層分布如圖 3-5.17 所示。

地調所的池上斷層分布圖，主要參照了陳文山等人（Chen et al., 2007）之縱谷斷層分段，然而池上斷層歷經兩次大的地震事件，從這兩次事件中可得到池上斷層有分段破裂之特性，陳卉瑄等人(Chen et al., 2008)針對 1951 年的花蓮-台東系列地震進行研究，發現 1951 年 11 月 24 日在池上斷層引發兩個主震地震，分別是池上地震及三分鐘後玉里之地震，如圖 3-5.1 編號 10 及編號 11 所示，Cheng et al.（1996）評估得到主震規模分別為 Ms=6.8 及 Ms=7.1，陳卉瑄等人將主震畫上並對照後，認為兩個主震分別為池上及玉里之破裂（圖 3-5.1）。根據鍾令和（2003）及徐澔德等人（Shyu et al., 2007）描繪之 1951 年地表破裂分布，池上斷層及玉里斷層在玉里地區呈現副平行破裂之情形，兩斷層地表破裂距離 1.5 公里（圖 3-5.3）。

2003 年之成功地震，參考圖 3-5.18（a）的地震分布後，認為是池上斷層南段之破裂，而且地表破裂可以一直往南延伸到鹿野鄉瑞源。根據兩次歷史地震的破裂模式，得到池上斷層南段破裂長度 38 公里。

本計畫將池上斷層分為南北兩段，以成功地震餘震分布範圍當作池上斷層之南段。根據 1951 年地震地表破裂分布情形，池上斷層有和玉里斷層形成系統破裂之可能性，因此考慮玉里-池上斷層系統，分段及破裂模式詳如圖 3-5.19 所示。其中破裂模式 A、B、C 屬於北段破裂，權重總和為 0.4；破裂模式 D 屬於南段破裂，權重為 0.4；破裂模式 E、F、G 屬於整段破裂，權重總和為 0.2。

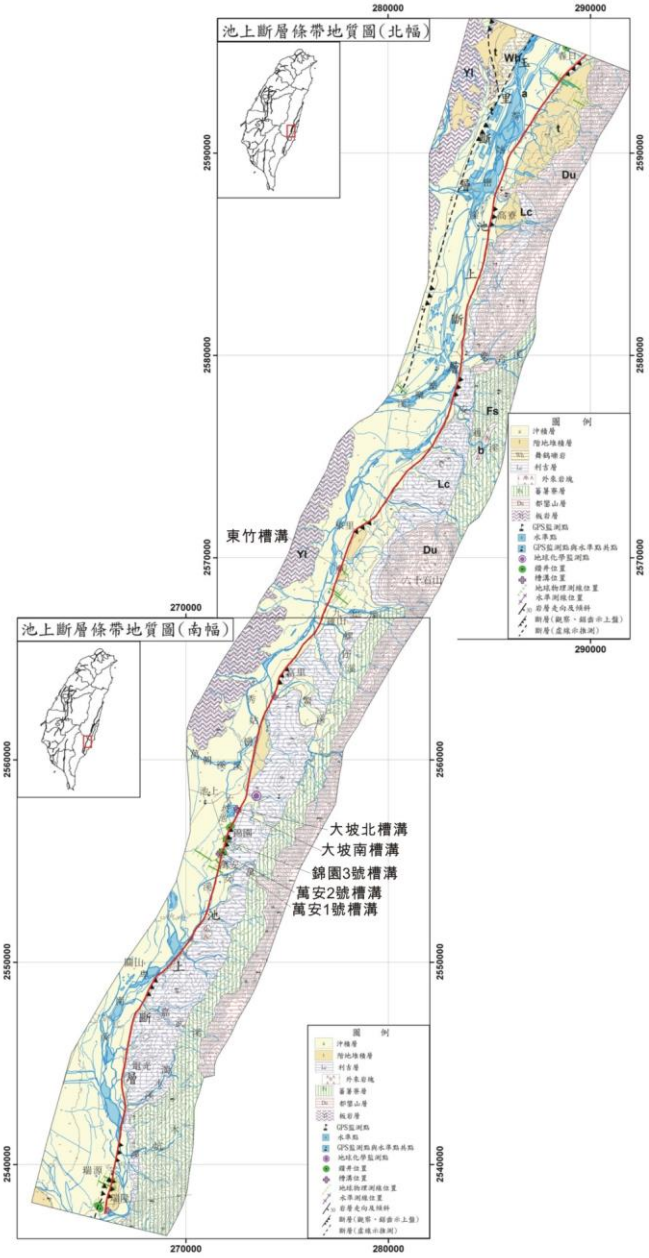


圖 3-5.17：池上斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。

（a）　　（b）

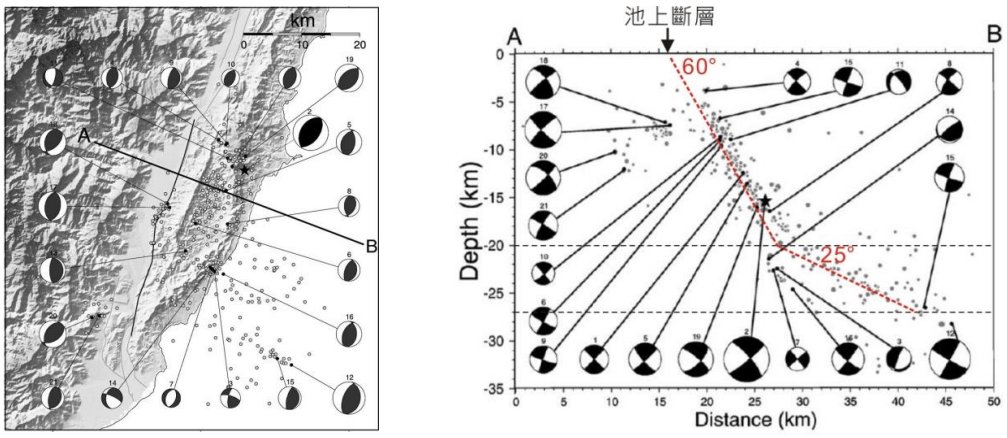


圖 3-5.18：（a）2003 年成功地震餘震分布及斷層面解（b）A-B 剖面餘震深度分布（Cheng et al., 2009）。

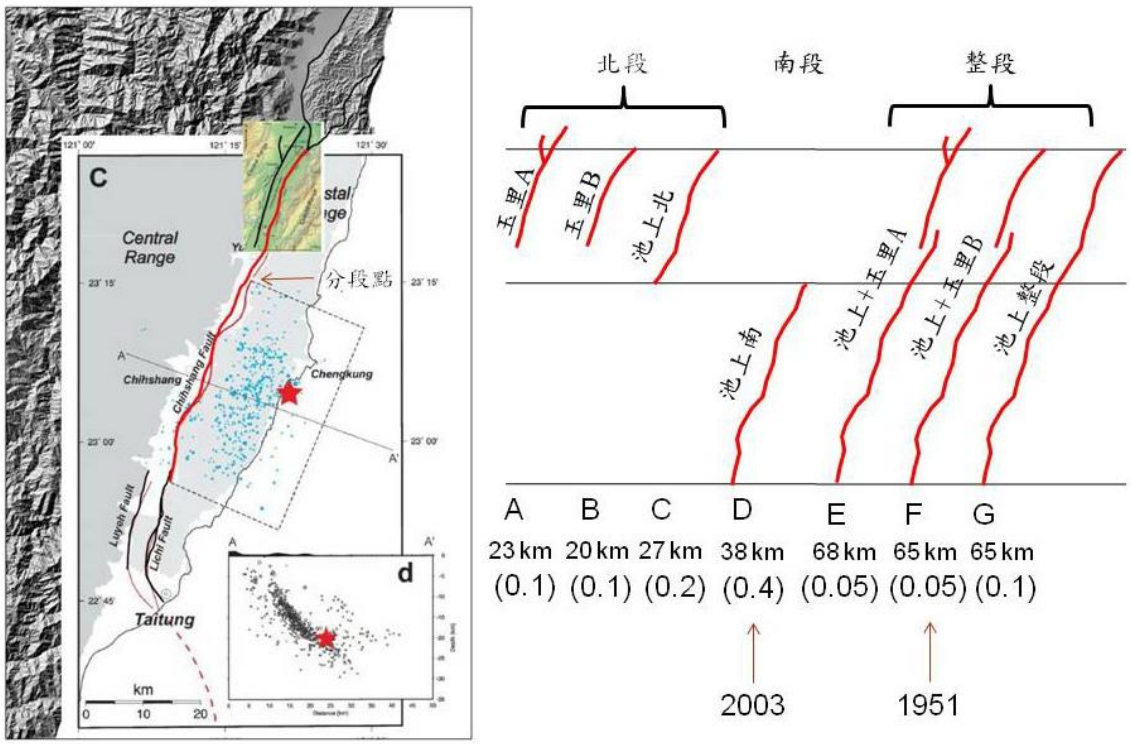


圖 3-5.19：池上、玉里斷層系統分段、破裂模式及權重分配。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：

(1) 由富里富池橋東方之池上斷層露頭可觀察到池上斷層屬於高角度逆衝斷層，如圖 3-5.20 所示，上盤之利吉層向西逆衝至階地礫石之上，斷面位態為北 20 度東，傾角向東 60 度。

(2) Lee et al.（2003）蒐集池上斷層附近 1998-2001 及 1995 年規模 5.4 地震序列之地震記錄（圖 3-5.21），認為地震應是沿著池上斷層之斷層面分布，得到斷層面在 0-10 公里深度傾角約 60-65 度，10-20 公里深度傾角變為 45 度，20-25 公里深度時傾角變為 10 度。

(3) Kuochen et al.（2007）及 Cheng et al.（2009）重定位 2003 年 Mw＝6.8 成功地震之餘震結果，可作為池上斷層幾何形貌之參考，由縱谷東邊的餘震序列分佈可以看出有一明顯的地震帶沿著傾角向東的斷層面分佈。縱谷斷層南段 2003 年成功地震餘震分布及斷層面解，詳如圖 3-5.18，整體而言在深度 0-20 公里斷層面傾角約 60 度，20-27 公里斷層面傾角約 25 度，詳如圖 3-5.18（b）所示。

(4) Mu et al.（2011）在池上斷層錦園地區，藉由鑽井鑽遇之斷層深度對比地表破裂位置推估池上斷層淺部的幾何形貌，如圖 3-5.22 所示，其中 T1 井於深度 12.8-15.6 公尺處鑽遇斷層面，T2 井於 21-26.5 公尺處鑽遇斷層面，得到主斷層面傾角 30-40 度，分支斷層傾角 50-60 度，如圖 3-5.22（b）上圖所示。T3 井於深度 54 公尺處鑽遇斷層面，推估斷層面傾角 45-50 度，如圖 3-5.22（b）下圖所示。

(5) 根據 Kuochen et al.（2012）速度構造剖面及地震震源分布，推估池上斷層傾角 57 度，深度約 27 公里左右（圖 3-5.23 藍線）。

以上斷層幾何相關研究資料彙整於表 3-5.3。

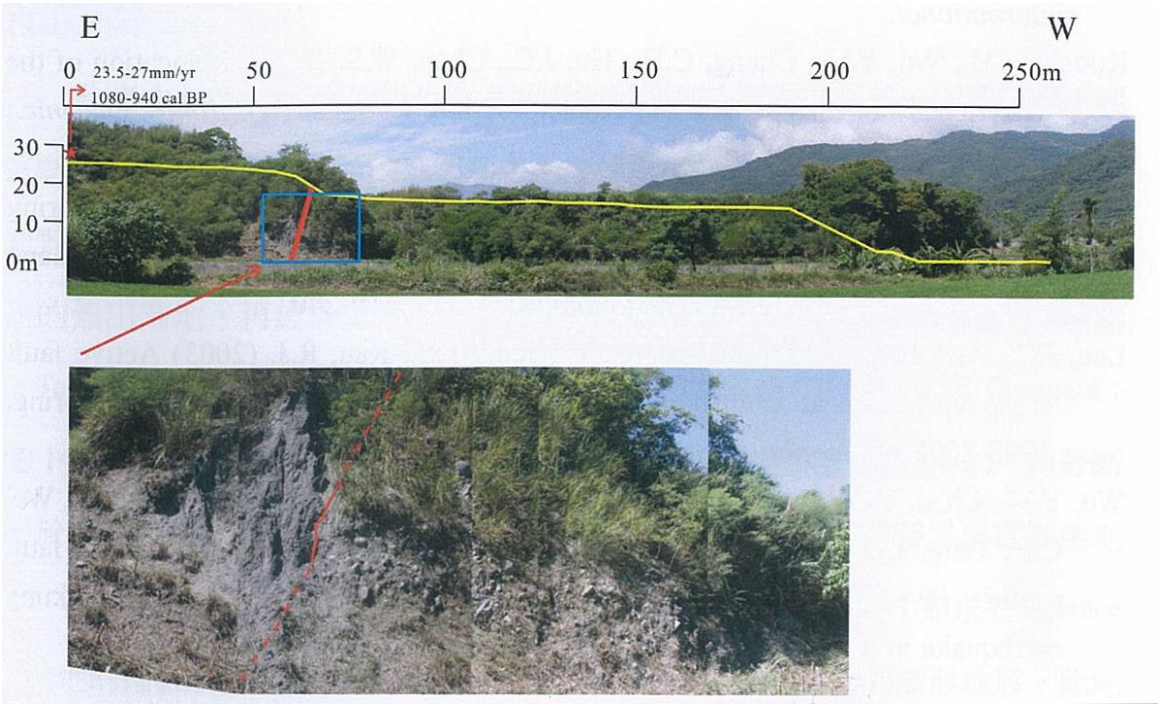


圖 3-5.20：富里富池橋東方鱉溪露頭照片。此露頭為可直接觀察到池上斷層出露的位置。利吉層向西逆衝至第二階階地礫石之上，斷面位態為北 20 度東，傾角向東 60 度（陳文山等，2010）。

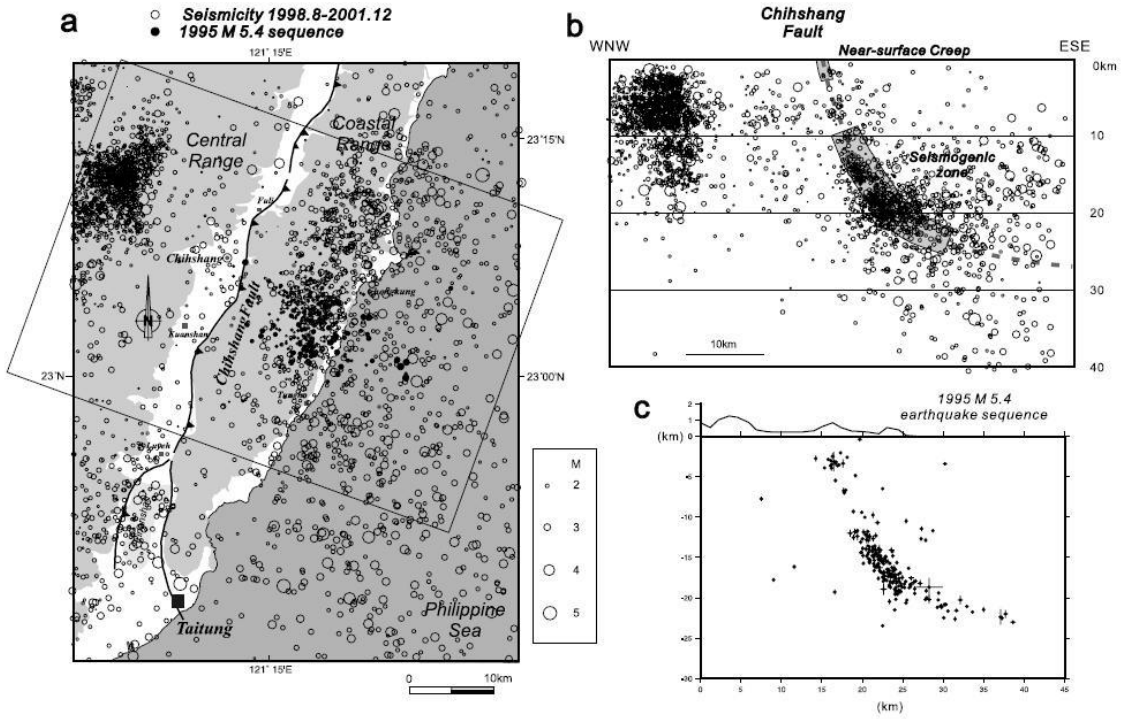


圖 3-5.21：（a）池上斷層及附近之地震分布，空心圓圈為 1998-2001 之地震，黑色實心圓圈為 1995 年 M5.4 地震序列（b）1998-2001 地震深度分布剖面（c）1995 年 M5.4 地震序列深度分布剖面，圖中的十字代表定位誤差（摘自 Lee et al., 2003）。

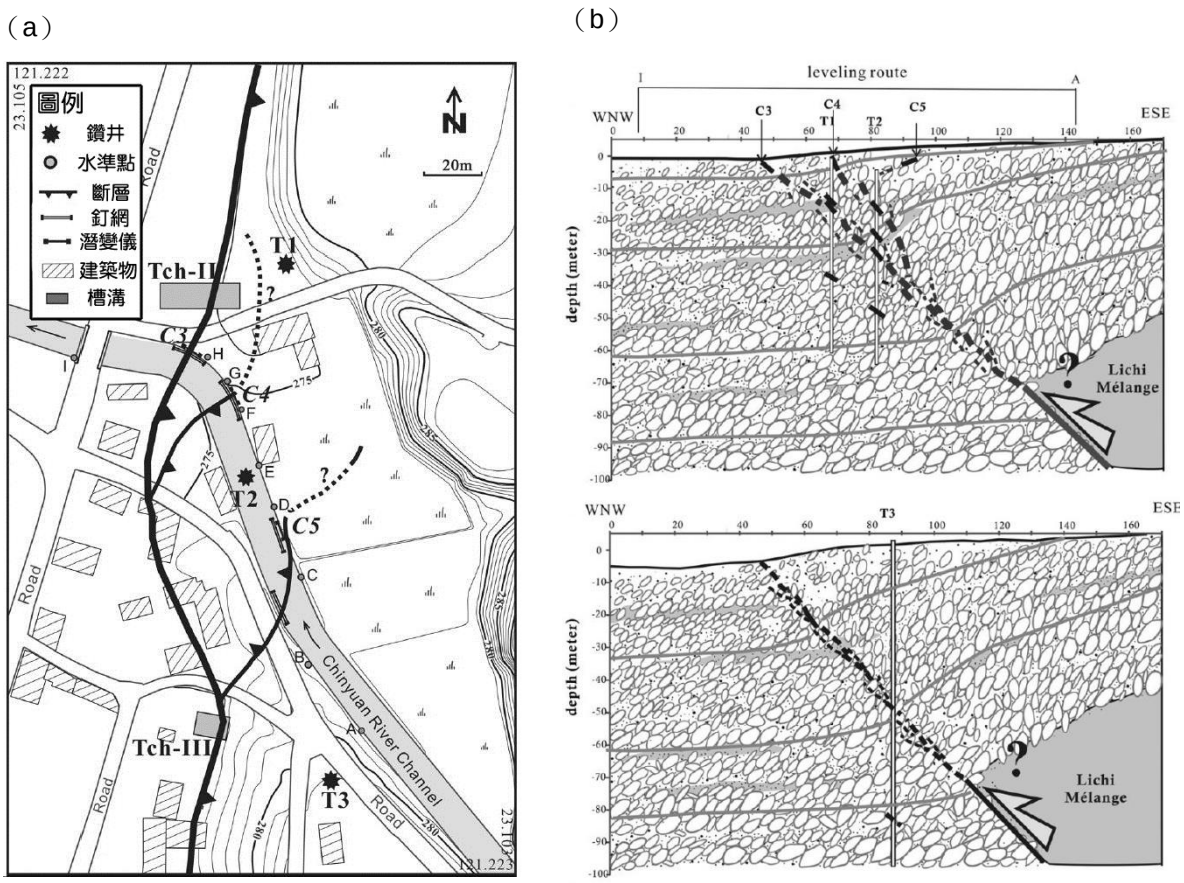


圖 3-5.22：（a）池上斷層於錦園地區之平面分布圖，此處進行了各式測量方法，包括水準測量、潛變儀、GPS、鑽井及槽溝開挖等（b）結合地表破裂及鑽井資料描繪之錦園地區池上斷層地下幾何形貌二維地質剖面圖（Mu et al., 2011）。

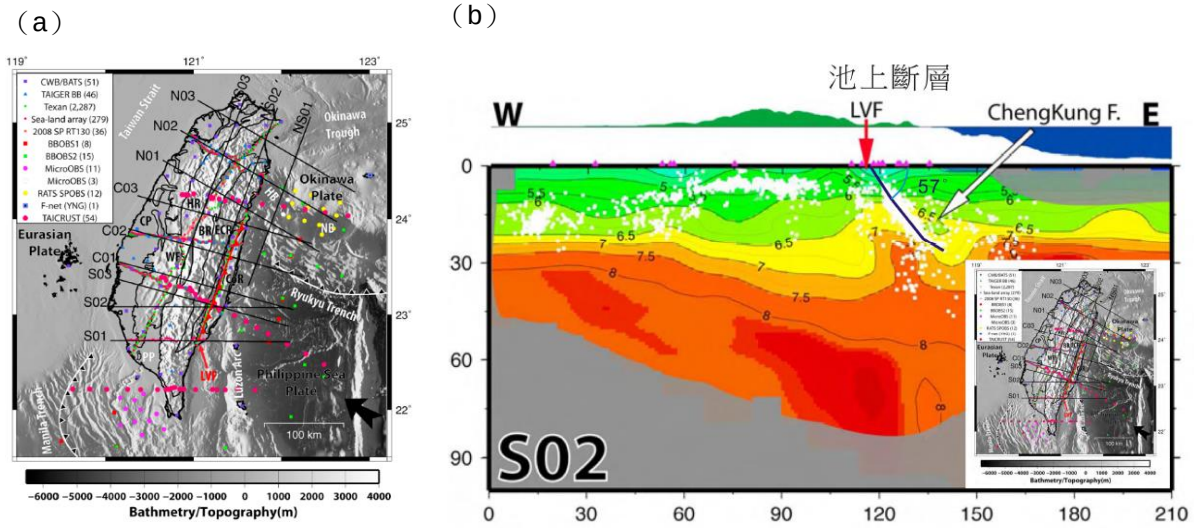


圖 3-5.23：（a）臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布（b）跨越縱谷斷層南段 S02 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012；陳文山等，2014）。

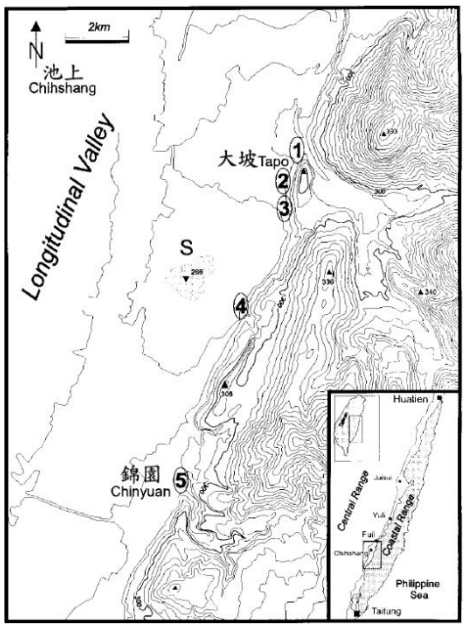
表 3-5.3：池上斷層幾何相關文獻彙整。

參考文獻	方法	傾角		深度
陳文山等，2010	富里富池橋東方之池上斷層露頭	60 度		-
Lee et al., 2003	1.1995 規模 5.6 地震深度分布 2.1998-2001 地震深度分布	0-10 公里：60-65 度 10-20 公里：45 度 20-25 公里：10 度		25 公里
Kuochen et al., 2007 Cheng et al., 2009	2003 年成功地震餘震分布	0-20 公里：60 度 20-27 公里：25 度		27 公里
Mu et al., 2011	錦園地區鑽井資料及地表斷層面推估淺部斷層形貌	Site I	主斷層：30-40 度 分支斷層：50-60 度	-
		Site II	45-50 度	
Kuochen et al., 2012 陳文山等，2014	P 波速度構造剖面及地震震源分布	57 度		27 公里

3. 斷層機制：從大地測量資料及歷史地震機制解，池上斷層屬於帶左移分量的逆衝斷層（Lee and Angelier, 1993；Yu et al., 1997；Yu and Kuo, 2001；Hu et al., 2007；Wu et al., 2006；林啟文等，2009）。
4. 短期滑移速率：
   (1) 安朔葉等（Angelier et al., 2000）1986-1997 釘網監測結果顯示，池上斷層會以潛移的方式活動，在大坡平均每年 2.7 公分的位移量，在錦園一帶平均每年 2.3 公分的位移量，詳如圖 3-5.24 所示。
   (2) 根據 GPS 在 1992-1999 年之測量結果（Yu and Kuo, 2001），將圖 3-5.25（a）之 GPS 站量得之速度場投影到剖面 A 上，如圖 3-5.25（b）所示，可以看到在跨縱谷斷層-池上段之速度場有顯著的變化，上下盤速度場可達 30 mm/yr 之差異。
   (3) 利用池上斷層上盤錦園地區潛變儀量測結果（Lee et al., 2003, 2006; Mu et al., 2011）池上斷層的潛移速率在成功地震前約 1.5-1.8 cm/yr，成功地震有明顯的位移，之後又回到約 2.0 cm/yr 的縮短速率，如圖 3-5.26 所示。
   (4) Champenois et al.（2012）利用衛星影像 PALASR（Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar）方法得到縱谷地區間震期（2007-2010）之 LOS 速度變化，圖 3-5.27 顯示池上斷層除關山地區速度場小於 20 mm/yr，大部分都有 20-30 mm/yr 視衛星方向的位移速率。
   (5) Thomas et al.（2014）利用衛星影像 PALASR（Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar）方法得到縱谷地區間震期之速度變化，如圖 3-5.28 所示，顯示縱谷南段持續潛移的現象，上下盤速度場可達 3 cm/yr 之差異。
   (6) 圖 3-5.13 右圖為 Yu and Kuo（2001）於西元 1985-1996 年間水準測線之變化，縱谷東側海岸山脈高程增加 280mm，西側中央山脈高程增加 60mm，縱谷斷層抬升速率為 24.4 ±0.3 mm/yr。

以上池上斷層短期滑移速率相關研究資料彙整於表 3-5.4。

（a）



（b）

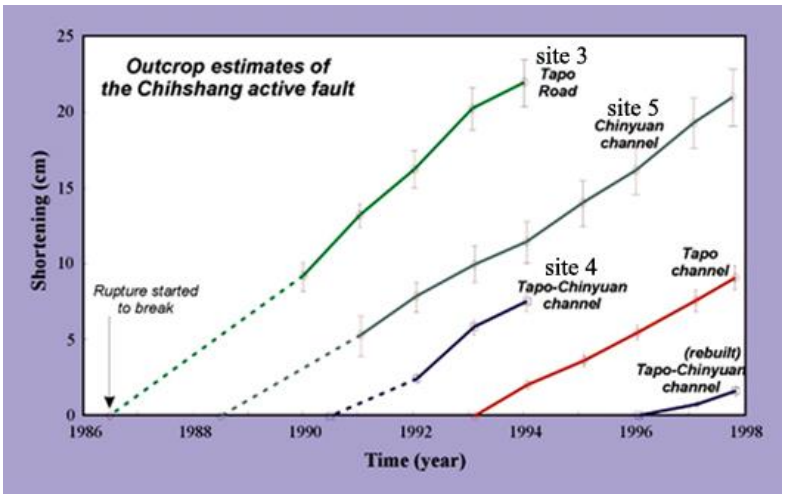
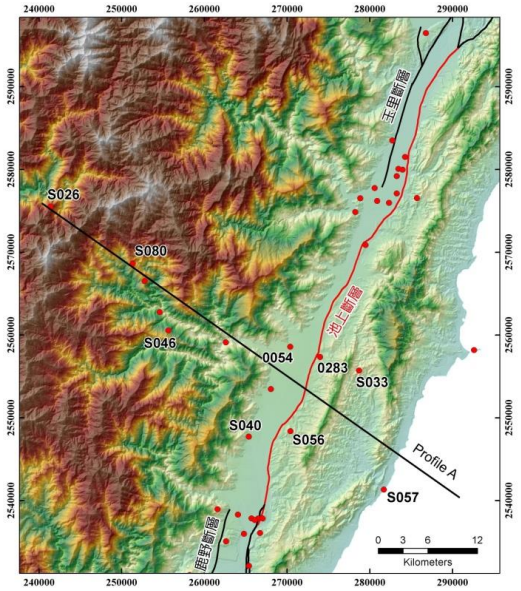


圖 3-5.24：（a）池上斷層地形圖及斷層變形量測點位分布圖，等高線間距維 5 公尺位置，（b）跨池上斷層 1986-1997 變形量量測，各 site 點位對應圖 3-5.24（a）之位置（Angelier et al., 2000）。

（a）



（b）

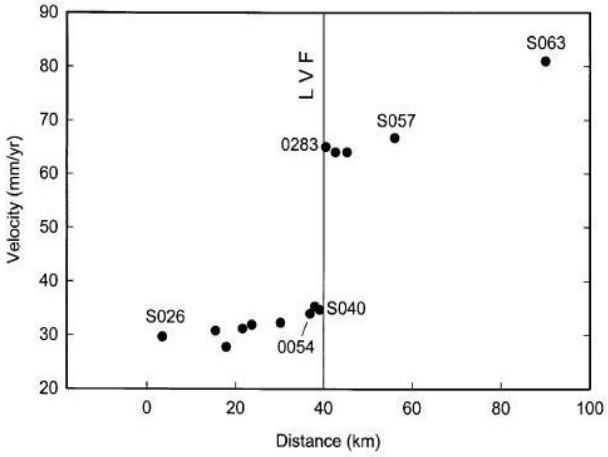


圖 3-5.25：（a）池上斷層位置分布圖。圖中紅色實心為 GPS 點位，綠色方框為槽溝之位置，（b）將 GPS 位移速度場投影到 Profile A 方向之速度變化。GPS 位移速度場是相對於澎湖白沙站（S01R）（摘錄自 Yu and Kuo, 2001）。

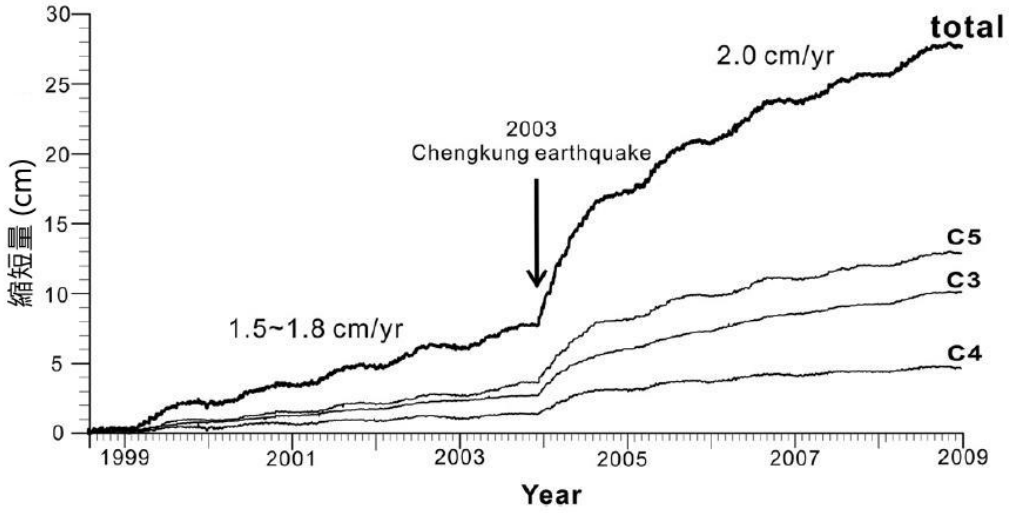


圖 3-5.26：1998-2009 錦園地區潛變儀記錄，C3、C4 及 C5 位置詳如圖 3-1.25（a），成功地震前縮短速率約 1.5-1.8 cm/yr，成功地震有產生明顯的位移，之後又回到約 2.0 cm/yr 的縮短速率（Lee et al., 2003, 2006； Mu et al., 2011）。

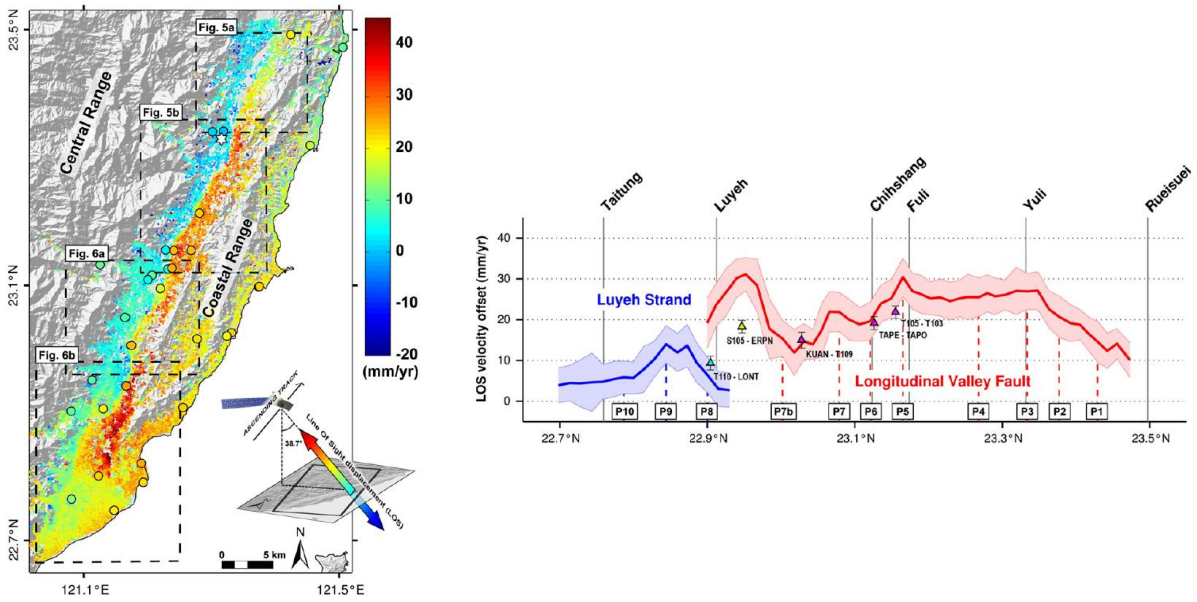


圖 3-5.27：左圖為利用 PALASR（Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar）得到之縱谷地區視衛星方向速度分布圖，時間從 2007 年 1 月到 2010 年 2 月，不同顏色之大點表示連續 GPS 站分布，右下角為 LOS 向量。右圖為跨縱谷斷層（紅線）及鹿野斷層（藍線）LOS 速度變化之空間分布（摘錄自 Champenois et al., 2012）。

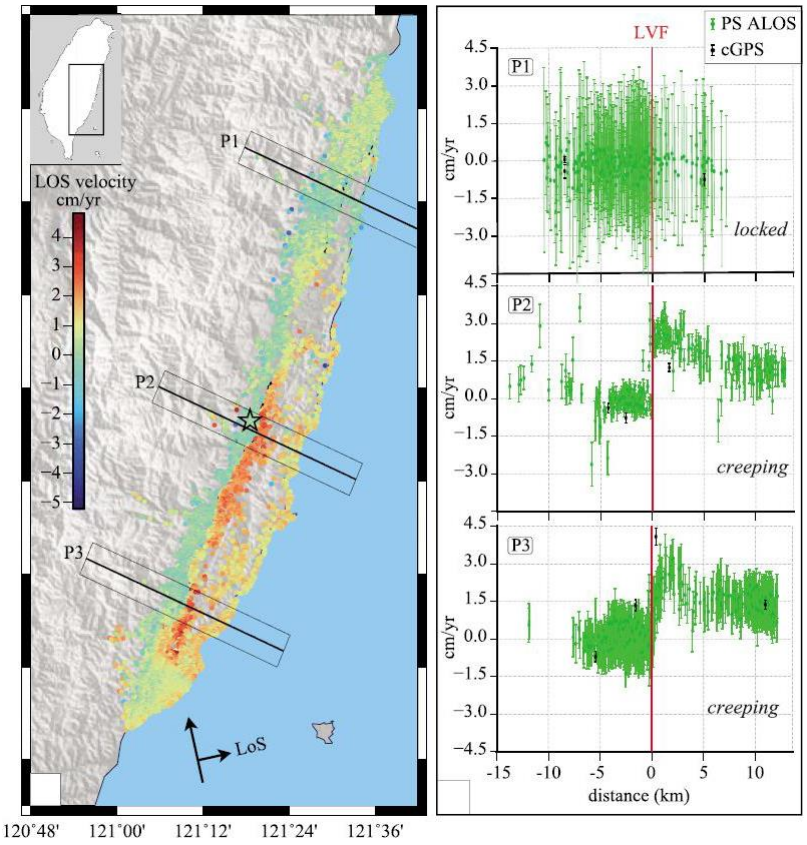


圖 3-5.28：左圖為利用 PALASR（Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar）得到之縱谷地區視衛星方向速度分布圖，時間從 2007 年 1 月到 2010 年 6 月，右圖為左圖中 P1，P2 及 P3 之速度剖面，綠色點為 PS 平均速度值，黑色點則為 GPS 移動站速度，紅色實線則為縱谷斷層地表位置（摘錄自 Thomas et al., 2014）。

表 3-5.4：池上斷層短期滑移速率相關文獻彙整。

參考文獻	方法	短期滑移速率(mm/yr)
Angelier et al., 2000	1986-1997 地表破裂變形釘網測量	大坡 27 mm/yr 錦園 23 mm/yr
Yu and Kuo, 2001	1992-1999GPS 速度場	31 mm/yr
Lee et al., 2003, 2006； Mu et al., 2011	1998-2009 錦園地區潛變儀測量	成功地震前 15-18 mm/yr 成功地震後 20 mm/yr
Champenois et al., 2012	2007-2010 PSInSAR 視衛星方向速度變化	15-18 mm/yr
Thomas et al., 2014	2007-2010 PSInSAR 視衛星方向速度變化	30 mm/yr
Yu and Kuo, 2001	1985-1996 年之水準測線	抬升速率 24.4 ±0.3 mm/yr

5. 長期滑移速率：

(1) 朱曜國（2007）利用池上地區階地的比高及定年結果推估池上斷層之長期滑移速率，採樣點位於富里、富南及錦園地區之階地，詳如表 3-5.5 所示。估算池上斷層在一千年內平均的垂直滑移速率約為 26-27.4 mm/yr。然而 FNC 高位階地計算所得到六千年來平均的垂直滑移速率為 7.6-7.8 mm/yr，明顯比其它一千年內的速率結果小很多，這是否代表池上斷層的活動速率在早全新世比現在慢，或僅是由於定年樣本有誤，則有待驗證。

(2) 陳文山等（2010）研究鱉溪富池橋南岸之池上斷層露頭剖面（圖 3-5.20），量測河階與鱉溪河床比高為 27 公尺，河階礫石層碳 14 定年年代為 1180-940 yr BP，陳文山等

（2010）推論池上斷層之長期抬升速率應與河流的下切速率相當，約為 23.5-27.0 mm/yr。

(3) 張冕(2013)於富南T7階地量得比高為30公尺，富南T7的碳14定年年代為5750-6880 yr BP，其位置詳如圖 3-5.29 所示，得到河流下切速率為 1.4-1.7 cm/yr。

以上池上斷層長期滑移速率相關研究資料彙整於表 3-5.6。

表 3-5.5：池上地區階地年代及推估之斷層垂直滑移速率（朱曜國，2007）。

階地編號	採樣深度 (m)	階面河拔高 (m)	階地校正年代 (2δ)(Cal yr BP)	垂直滑移速率 (mm/yr)
FC	1.61	27	940-1,080	23.5-27
FNC	1.26	50	6,280-6,410	7.6-7.8
SG	1.58	15	290-490	27.4-46.3
CY2	1.19	15	530-660	20.9-26

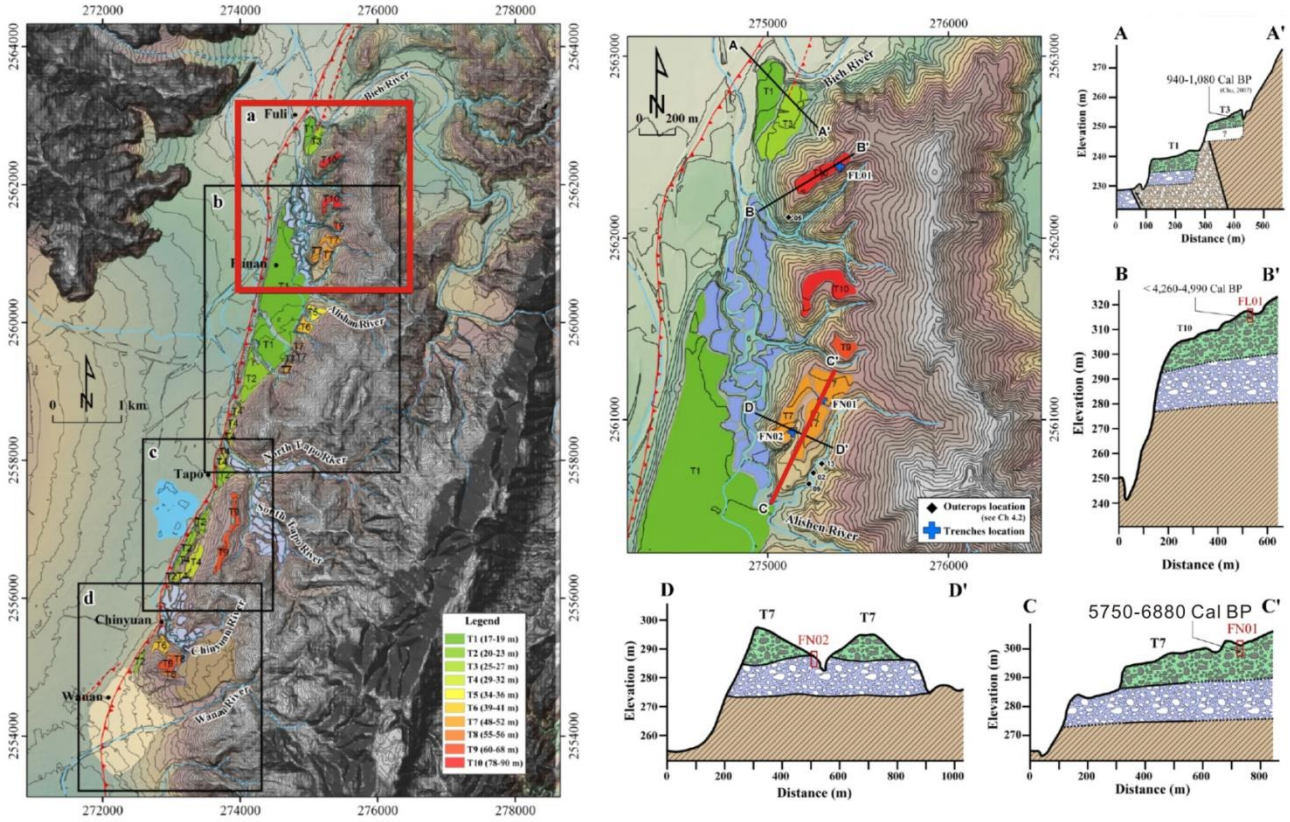


圖 3-5.29：左圖為池上斷層上盤階地群圖繪及分布圖，右圖為富里-富南階地群及剖面圖，其中富南 T7 定年位於 CC'剖面中（摘錄自張冕，2013）。

表 3-5.6：池上斷層長期滑移速率相關文獻彙整。

參考文獻	方法	年代 (Cal yr BP)	長期滑移速率(mm/yr)
朱曜國，2007	富里(FC) 階地定年	940-1080	23.5-27(垂直滑移速率)
	富南(FNC)階地定年	6280-6410	7.6-7.8(垂直滑移速率)
	富南(SG)階地定年	290-490	27.4-46.3(垂直滑移速率)
	錦園(CY2)階地定年	530-660	20.9-26(垂直滑移速率)
陳文山等，2010	量測鱉溪富池橋南岸之池上斷層露頭剖面河階比高並進行碳 14 定年	1180-940	23.5-27.0 (下切速率)
張冕，2013	富南 T7 階地比高並進行碳 14 定年	5750-6880	14-17 (下切速率)

6. 單一事件變位量：顏一勤等（2014）沿池上斷層挖掘槽溝，其中萬安 1 號槽溝（位置在圖 3-5.17）中有 5 次同震錯移，每次同震的垂直變動量從 20 至 65 公分（圖 3-5.30），而 2003 年成功地震在錦園三號槽溝（位置在圖 3-5.17）中造成地表的垂直錯移量約 10 公分（圖 3-5.31）。

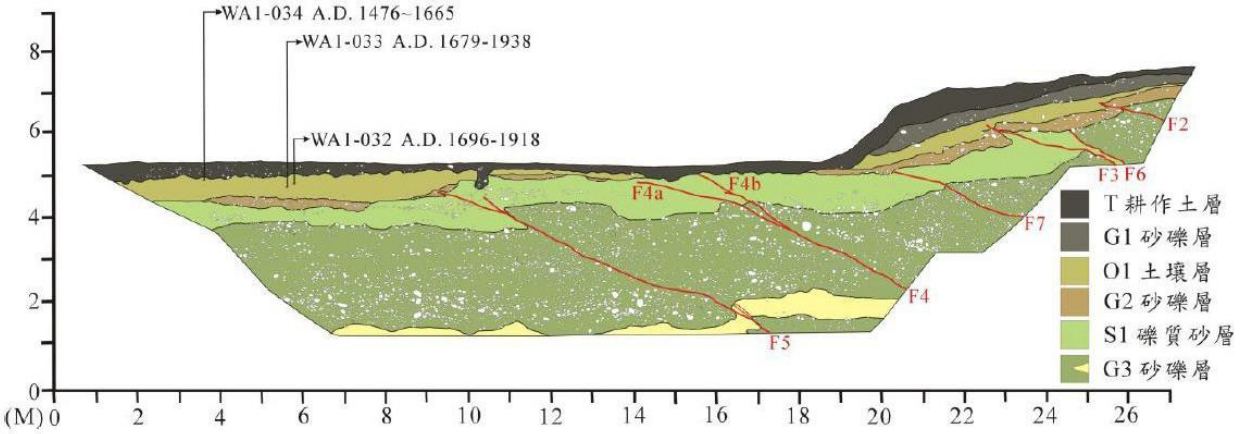


圖 3-5.30：池上鄉錦園村的萬安一號槽溝北牆（摘自顏一勤等，2014）。

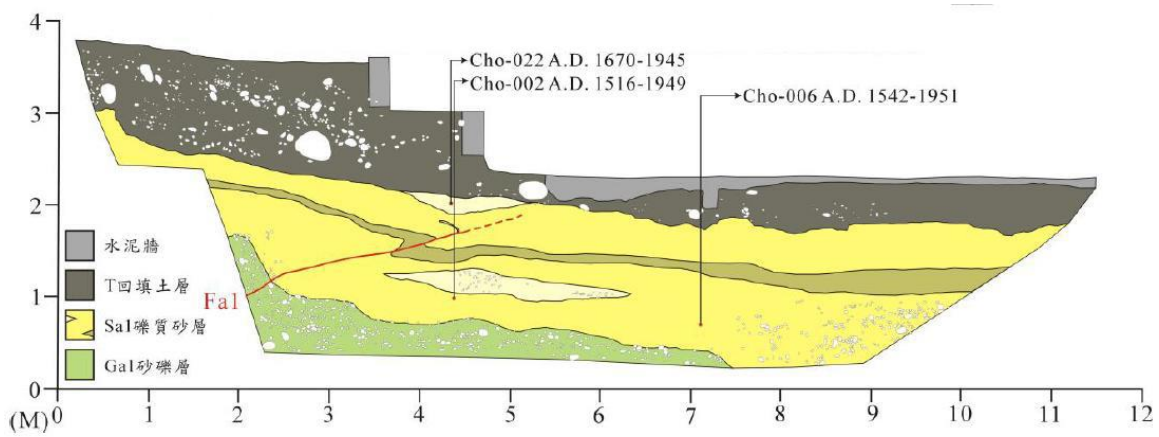


圖 3-5.31：錦園三號槽溝，2003 年成功地震造成地表垂直錯移量約 10 公分（摘自陳文山等，2008）。

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：1951 年 11 月 25 日的臺灣東部的強震，造成與縱谷平行之地表破裂，徐鐵良（Hsu, 1962）認為池上斷層為 1951 年 11 月 25 日的地震斷層，鄭世楠等（Cheng et al., 1996）對地震重新定位，規模為 Ms＝6.8。

1992 年 5 月 29 日在成功附近發生之地震，震源深度約 13.7 公里，規模 ML5.4，由地震初動斷層面解可求出斷層走向 N25°E，傾角 60°SE，兼具逆衝及左移分量（辛再勤與張建興，1992），該地震造成池上、富里一帶地表破裂，應為池上斷層的再活動造成（游明聖等，1994）。

2003 年 12 月 10 日之成功地震規模為 Mw＝6.8，李建成等（Lee et al., 2006）認為該次地震是屬於池上斷層之破裂造成，也造成了部份地表破裂之情形，這兩次歷史地震相隔大約 50 年左右。陳文山等（2008）在池上斷層進行槽溝之古地震研究，初步結果顯示 1000 年以來發現至少有 8 次古地震事件。

彙整前人對於池上斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-5.7 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-5.7：池上斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
池上斷層	斷層分段與破裂事件	A: 玉里 A B: 玉里 B C: 池上北 D: 池上南 E: 池上+玉里 A F: 池上+玉里 B G: 池上整段	地形及航照判釋、1951 年地震地表破裂、斷層潛移破裂位置	Hsu, 1962；石再添等，1986；楊貴三，1986；沈淑敏等，2006；陳文山等，2008；林啟文等，2009
	長度(km)	A：23　B：20　C：27 D：38 E：68　F：65　G：65		
	寬度(km)	池上斷層：39.7 玉里斷層：41.0	深度/sin 傾角 （池上：0-20 公里：60 度，20-27 公里：25 度) （玉里：0~10 km: 51 度，10~20 km: 60 度，20 km 以下 25 度）	
	破裂深度(km）	25	1.1995 規模 5.6 地震深度分布 2.1998-2001 地震深度分布	Lee et al., 2003
		27	2003 年成功地震餘震分布	Kuochen et al., 2007；Cheng et al., 2009
		27	P 波速度構造剖面及地震震源分布	Kuochen et al., 2012；陳文山等，2014
	面積(km^2)	A：942　B：820　C：1072 D：1509 E：2729　F：2607　G：2581	長度×寬度 （池上斷層以寬度 39.7 公里計算，玉里斷層以寬度 41.0 公里計算）	
	走向	北北東	地形及航照判釋、1951 年地震地表破裂、斷層潛移破裂位置	林啟文等，2009
	傾斜角度(度)	60 度	富里富池橋東方之池上斷層露頭	陳文山等，2010

		0-10 公里：60-65 度 10-20 公里：45 度 20-25 公里：10 度	1. 1995 規模 5.6 地震深度分布 2. 1998-2001 地震深度分布	Lee et al., 2003
		0-20 公里：60 度 20-27 公里：25 度	2003 年成功地震餘震分布	Kuochen et al., 2007；Cheng et al., 2009
		Site I：主斷層：30-40 度 分支斷層：50-60 度	錦園地區鑽井資料及地表斷層面推估淺部斷層形貌	Mu et al., 2011
		Site II：45-50 度		
		57 度	P 波速度構造剖面及地震震源分布	Kuochen et al., 2012；陳文山等，2014
	斷層機制	帶左移分量的逆衝斷層	大地測量、歷史地震	Lee and Angelier, 1993；Yu et al., 1997；Yu and Kuo, 2001；Hu et al., 2007；Wu et al., 2006；林啟文等，2009
	短期滑移速率（mm/yr）	大坡 27 mm/yr 錦園 23 mm/yr	1986-1997 地表破裂變形釘網測量	Angelier et al., 2000
		31 mm/yr	1992-1999 GPS 速度場	Yu and Kuo, 2001
		成功地震前 15-18 mm/yr 成功地震後 20 mm/yr	1998-2009 錦園地區潛變儀測量	Lee et al., 2006
		20-30 mm/yr	2007-2010 PSInSAR 視衛星方向速度變化	Champenois et al., 2012
		30 mm/yr	2007-2010 PSInSAR 視衛星方向速度變化	Thomas et al., 2014
		抬升速率 24.4 ±0.3 mm/yr	1985-1996 年之水準測線	Yu and Kuo, 2001
	長期滑移速率 (mm/yr)	23.5-27(垂直滑移速率)	富里(FC) 階地定年	朱曜國，2007
		7.6-7.8(垂直滑移速率)	富南(FNC)階地定年	
		27.4-46.3(垂直滑移速率)	富南(SG)階地定年	
		20.9-26(垂直滑移速率)	錦園(CY2)階地定年	
		23.5-27.0 (下切速率)	量測鱉溪富池橋南岸之池上斷層露頭剖面河階比高並進行碳 14 定年	陳文山等，2010
		14-17 (下切速率)	富南 T7 階地比高並進行碳 14 定年	張冕，2013

	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	3.81	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網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)	0.1	錦園 3 號槽溝，2003 年成功地震錯移	陳文山等，2008；顏一勤等，2014
		0.2、0.38、0.31、0.65、0.66	萬安 1 號槽溝，5 次古地震事件錯移	
	最大可能地震規模(M_w)	A：7.0 B：7.0 C：7.1 D：7.2 E：7.4 F：7.4 G：7.4	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.25 （逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：7.0 B：6.9 C：7.0 D：7.2 E：7.6 F：7.5 G：7.5	$M = \log A + \frac{2}{3}\log \frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)	50~100 年	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間	本計畫推估
	最近一次活動時間	西元 1951 年	池上 M_L6.0（Mw6.59）地震 玉里 M_L7.3（Mw6.95）地震	Hsu, 1962；Cheng et al., 1996；Chen et al., 2008
		西元 1992 年	成功地震，規模為 ML＝5.4，震源深度 13.7 公里	中央氣象局；游明聖等，1994
		西元 2003 年	成功地震，規模為 Mw＝6.8，震源深度 10 公里	中央氣象局

3-5-3 玉里-池上斷層系統破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫將池上斷層分為南北兩段，以成功地震餘震分布範圍當作池上斷層之南段。根據1951 年地震地表破裂分布情形，池上斷層有和玉里斷層形成系統破裂之可能性，因此考慮池上斷層及玉里斷層為一個系統，分段及破裂模式詳如圖 3-5.32 所示。其中破裂模式 A、B、C 屬於北段破裂，權重總和為 0.4；破裂模式 D 屬於南段破裂，權重為 0.4；破裂模式 E、F、G 屬於整段破裂，權重總和為 0.2。

池上斷層之傾角及破裂深度，主要參考 P 波速度構造剖面、地震震源分布、2003 年成功地震餘震分布等資料，本計畫認為傾角可採用雙傾角方式呈現。依據地震震源分布，池上斷層在深度 0-20 公里的傾角約 60 度，上下值各加減 5 度作為邏輯樹上下界，深度 20 公里以下約 25 度，權重分配為「0-20 公里 55 度，20 公里以下 25 度」，權重 0.2；「0-20 公里 60 度，20 公里以下 25 度」，權重 0.6；「0-20 公里 65 度，20 公里以下 25 度」，權重 0.2。池上斷層深度則以 27 公里當作邏輯樹中值，上下加減 2 公里作為邏輯樹上下界，破裂深度權重為 25 公里（0.2）、27 公里（0.6）、29 公里（0.2）。玉里斷層之傾角及破裂深度，本計畫則假設玉里斷層於一定深度與池上斷層相接，如圖 3-5.33 所示，權重分配為「0-10 公里 47 度，10-20 公里 55 度，20 公里以下 25 度」，權重 0.2；「0-10 公里 51 度，10-20 公里 60 度，20 公里以下 25 度」，權重 0.6；「0-10 公里 55 度，10-20 公里 65 度，20 公里以下 25 度」，權重 0.2，斷層深度則以 27 公里當作邏輯樹中值，上下加減 2 公里作為邏輯樹上下界，玉里斷層破裂深度權重為 25 公里（0.2）、27 公里（0.6）、29 公里（0.2）。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-5.8 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。

池上斷層之滑移速率，依據朱曜國（2007）、陳文山等（2010）及張冕（2013）階地定年結果，得到池上斷層最近一千年抬升速率約為 25~30 mm/yr，本計畫以斷層近地表傾角 40 度，50 度，60 度換算至斷層面上，推估池上斷層之淨滑移速率範圍為 28.9~46.7 mm/yr。本計畫設定邏輯樹中值為（28.9+46.7）/2=37.8 mm/yr，上下值則為 28.9 mm/yr 及 46.7 mm/yr。權重分配為 28.9（0.3），37.8（0.4），46.7（0.3）。玉里斷層由於缺少長期滑移速率資料，且短期滑移速率也無明顯變化，本計畫考慮池上斷層滑移速率之走向滑移分量作為玉里斷層之長期滑移速率，池上斷層之滑移速率 28.9 ~46.7 mm/yr，假設滑移角為 60~70 度，則走向滑移分量範圍 10.5~27.0 mm/yr，詳如表 3-5.9，本計畫設定玉里斷層滑移速率邏輯樹中值為（10.5+27.0）/2=18.8 mm/yr，上下值則為 27.0 mm/yr 及 10.5 mm/yr。權重分配為 10.5（0.3），18.8（0.4），27.0（0.3）。

池上、玉里斷層系統各節點權重的分配詳如圖 3-5.34 所示。

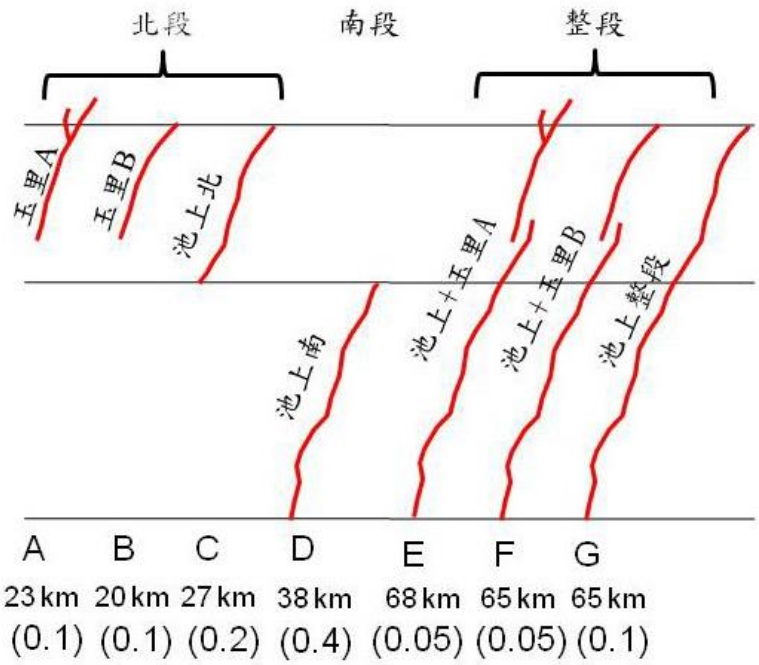


圖 3-5.32：玉里-池上斷層系統分段、破裂模式及權重分配。

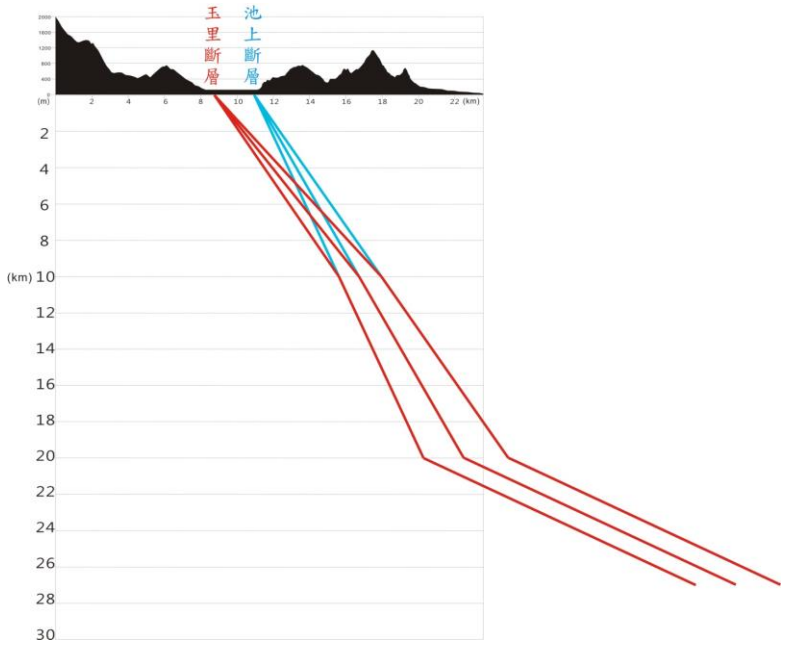


圖 3-5.33：本計畫玉里-池上斷層系統幾何形貌剖面圖。

表 3-5.8：玉里-池上斷層系統各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	面積 (km^2)	Wells & Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen & Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
						-σ	中值	+σ	
玉里 A	A	23	27	41.0	942	6.7	7.0	7.3	7.0
玉里 B	B	20	27	41.0	820	6.8	7.0	7.2	6.9
池上北	C	27	27	39.7	1,072	6.8	7.1	7.4	7.0
池上南	D	38	27	39.7	1,509	6.9	7.2	7.5	7.2
池上+玉里 A	E	68	27	池上：39.7 玉里：41.0	2,729	7.1	7.4	7.7	7.6
池上+玉里 B	F	65	27	池上：39.7 玉里：41.0	2,607	7.1	7.4	7.7	7.5
池上整段	G	65	27	39.7	2,581	7.1	7.4	7.7	7.5
權重						0.1	0.3	0.1	0.5

表 3-5.9：玉里斷層滑移速率評估。

池上斷層滑移速率 (mm/yr)	滑移角(度)	走向滑移分量（玉里斷層） (mm/yr)
28.9	60	16.7
	70	10.5
37.8	60	21.8
	70	13.8
46.7	60	27.0
	70	17.0

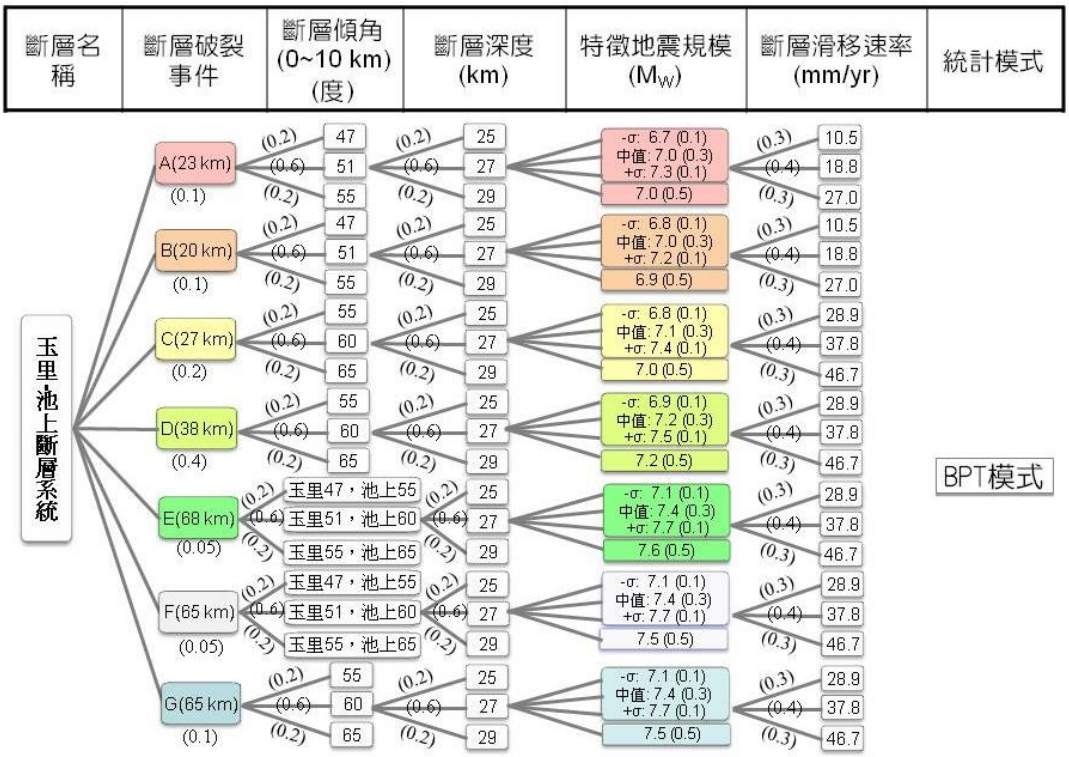


圖 3-5.34：玉里-池上斷層系統邏輯樹。

3-5-4 玉里-池上斷層系統特徵地震模式

池上斷層由於間震期會藉由潛移釋放部分能量，因此需考慮折減地震矩率以符合目前觀測之現況，根據美國 UCERF3（2013）報告中提到潛移速率與長期滑移速率的比例，可決定地震矩率的折減比例，如圖 3-5.35 所示，以池上斷層為例，根據前述蒐集之池上斷層滑移速率量測資料，池上斷層的潛移速率約占長期滑移速率的 0.8，對照圖 3-5.35 需折減 0.5 左右的地震矩率。根據斷層滑移速率（slip rate, S）及地震矩率（seismic moment rate, $\dot{M}_0$）之關係：$\dot{M}_0$ =μ Af S（Anderson, 1979; Anderson and Luco, 1983），本計畫將 Af（面積）×0.7，S（滑移速率）×0.7，如此地震矩率 $\dot{M}_0$ 可折減 0.49，近似於折減 0.5。本計畫會同時計算未折減地震矩率以及折減地震矩率之斷層潛勢作為比較。

玉里-池上斷層系統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 3-5.36～圖 3-5.42 為 7 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

圖 3-5.34 之玉里-池上斷層系統邏輯樹可得到 756 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-5.43 為 7 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式 A 未考慮震矩折減以規模 7.0 之權重最高，考慮震矩折減以規模 6.9 之權重最高；破裂模式 B 未考慮震矩折減以規模 7.0 之權重最高，考慮震矩折減以規模 6.8 之權重最高；破裂模式 C 未考慮震矩折減以規模 7.1 之權重最高，考慮震矩折減以規模 6.9 之權重最高；破裂模式 D 未考慮震矩折減以規模 7.3 之權重最高，考慮震矩折減以規模 7.1 之權重最高；破裂模式 E 未考慮震矩折減以規模 7.5 之權重最高，考慮震矩折減以規模 7.4 之權重最高；破裂模式 F 未考慮震矩折減以規模 7.6 之權重最高，考慮震矩折減以規模 7.4 之權重最高；破裂模式 G 未考慮震矩折減以規模 7.6 之權重最高，考慮震矩折減以規模 7.3 之權重最高。經由特徵地震模式計算之後，圖 3-5.44 為 7 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖。

將 7 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-5.45 之斷層規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖 3-5.46 之斷層地震復發間隔時間-權重分布圖。

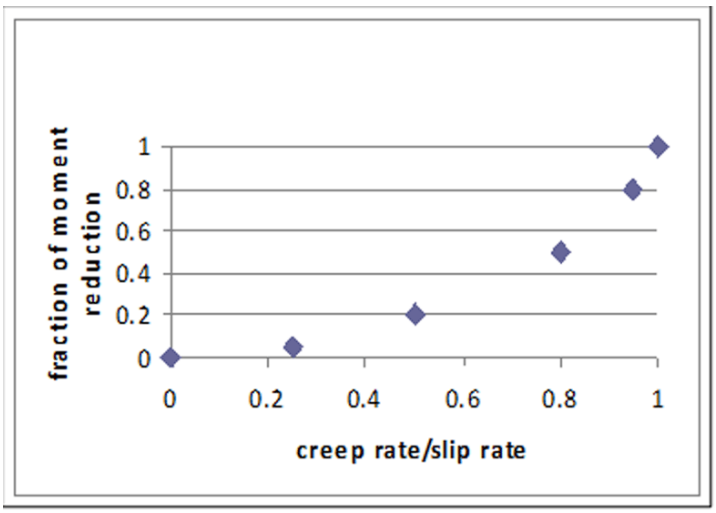


圖 3-5.35：美國 UCERF3 潛移速率/滑移速率比例與震矩折減之關係（UCERF3, 2013）。

未折減　　面積×0.7，滑移速率×0.7

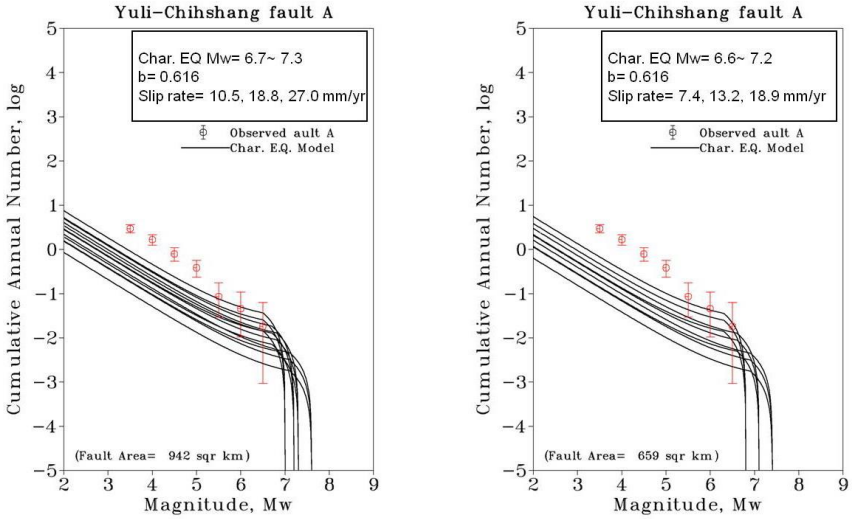


圖 3-5.36：A 事件特徵地震模式，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

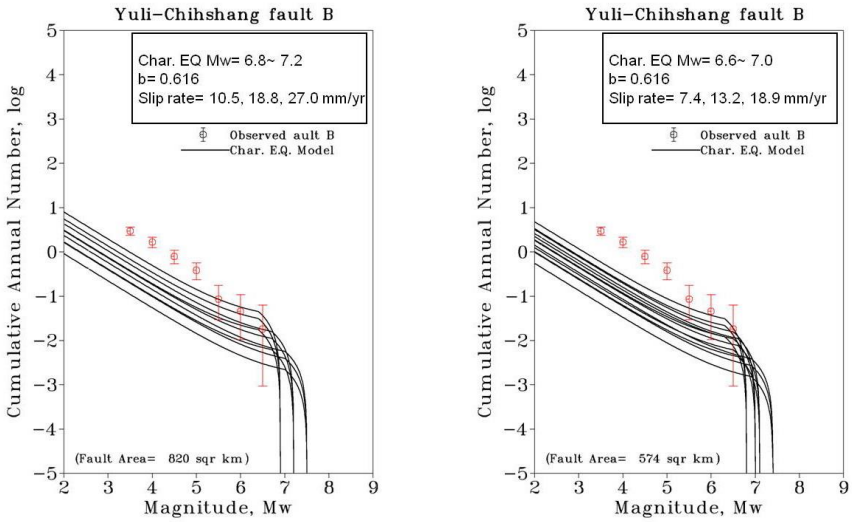


圖 3-5.37：B 事件特徵地震模式，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

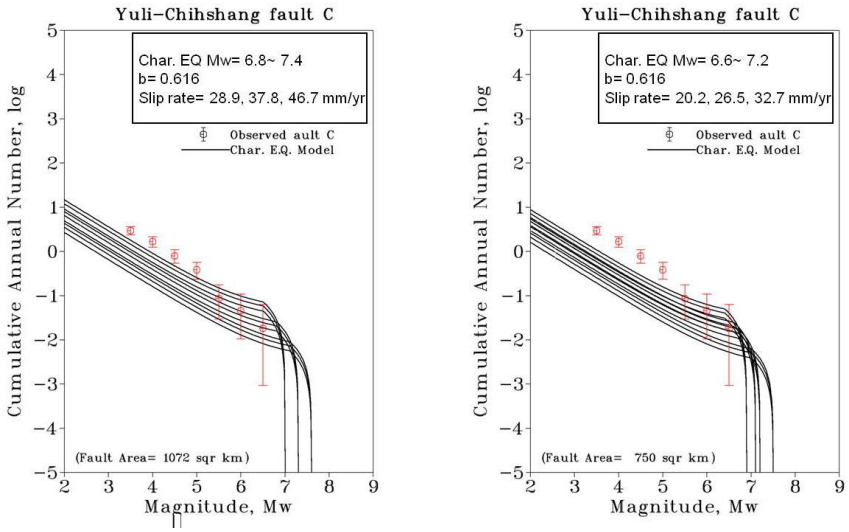


圖 3-5.38：C 事件特徵地震模式，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

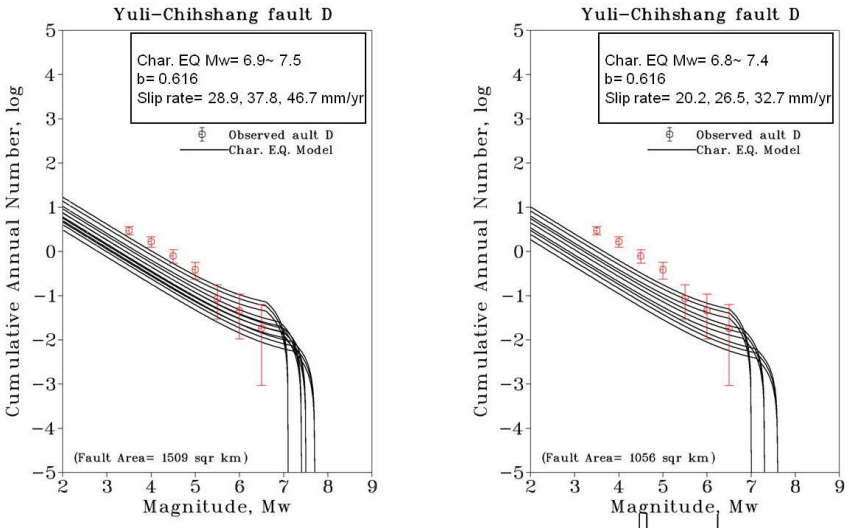


圖 3-5.39：D 事件特徵地震模式，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

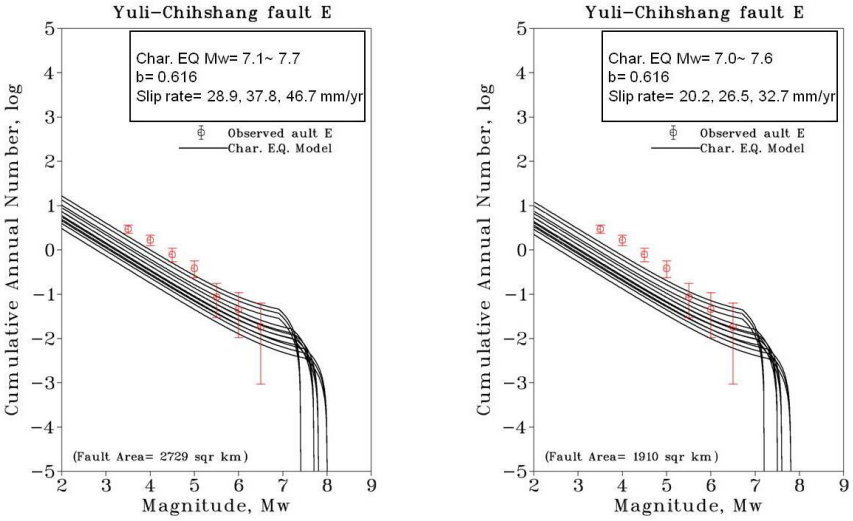


圖 3-5.40：E 事件特徵地震模式，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

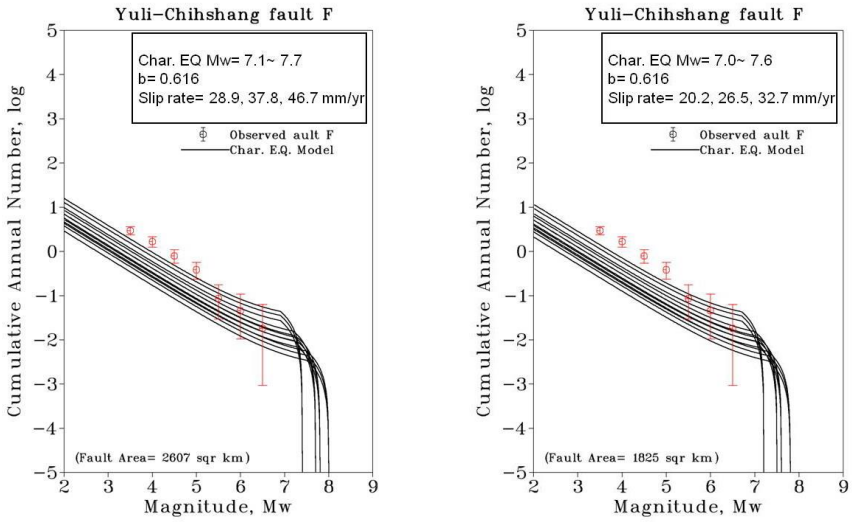


圖 3-5.41：F 事件特徵地震模式，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

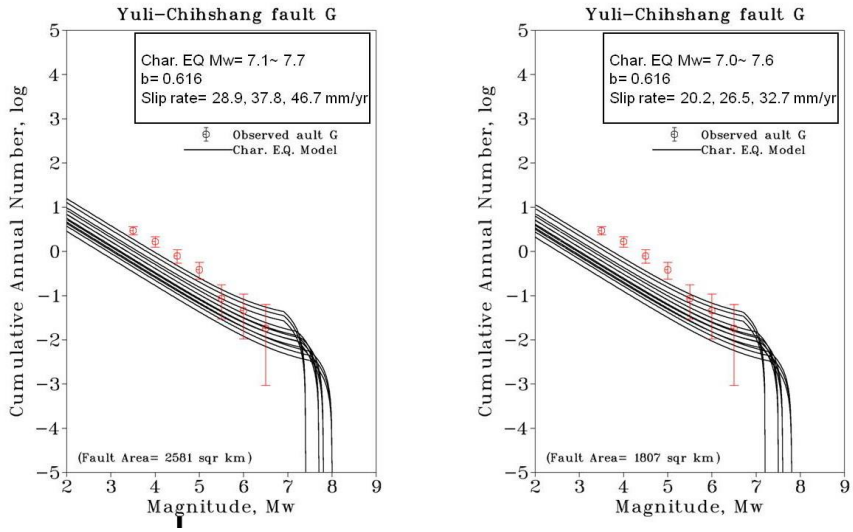
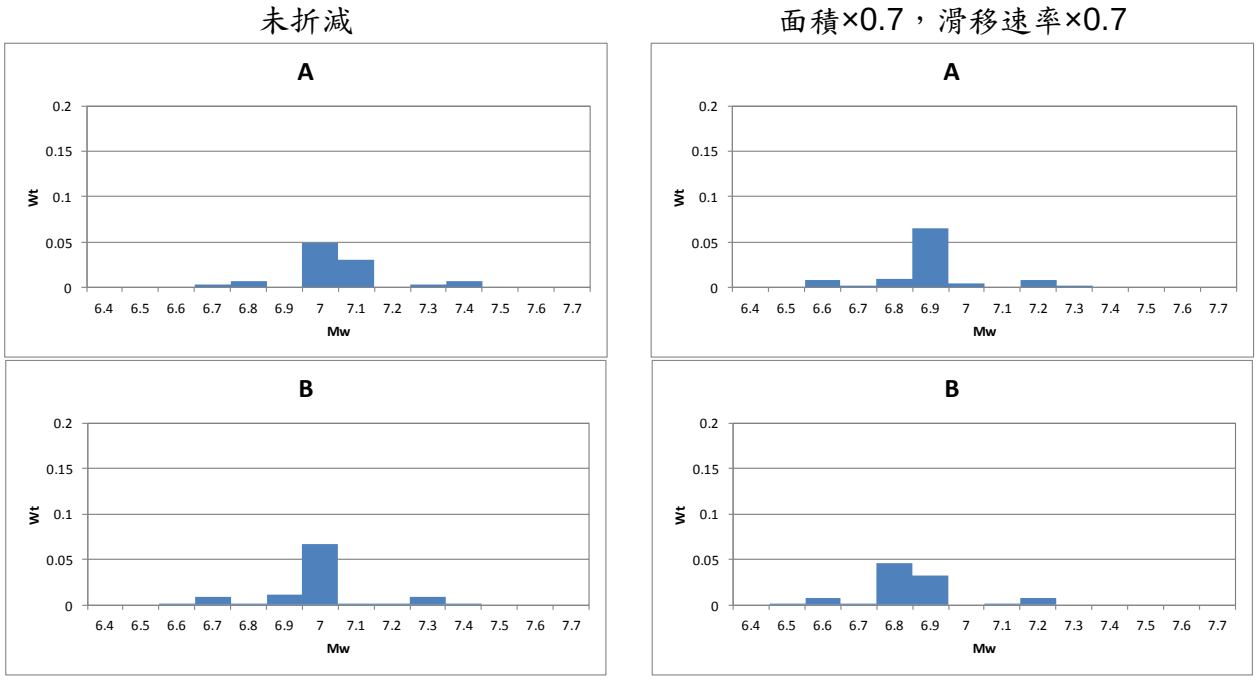


圖 3-5.42：G 事件特徵地震模式，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。



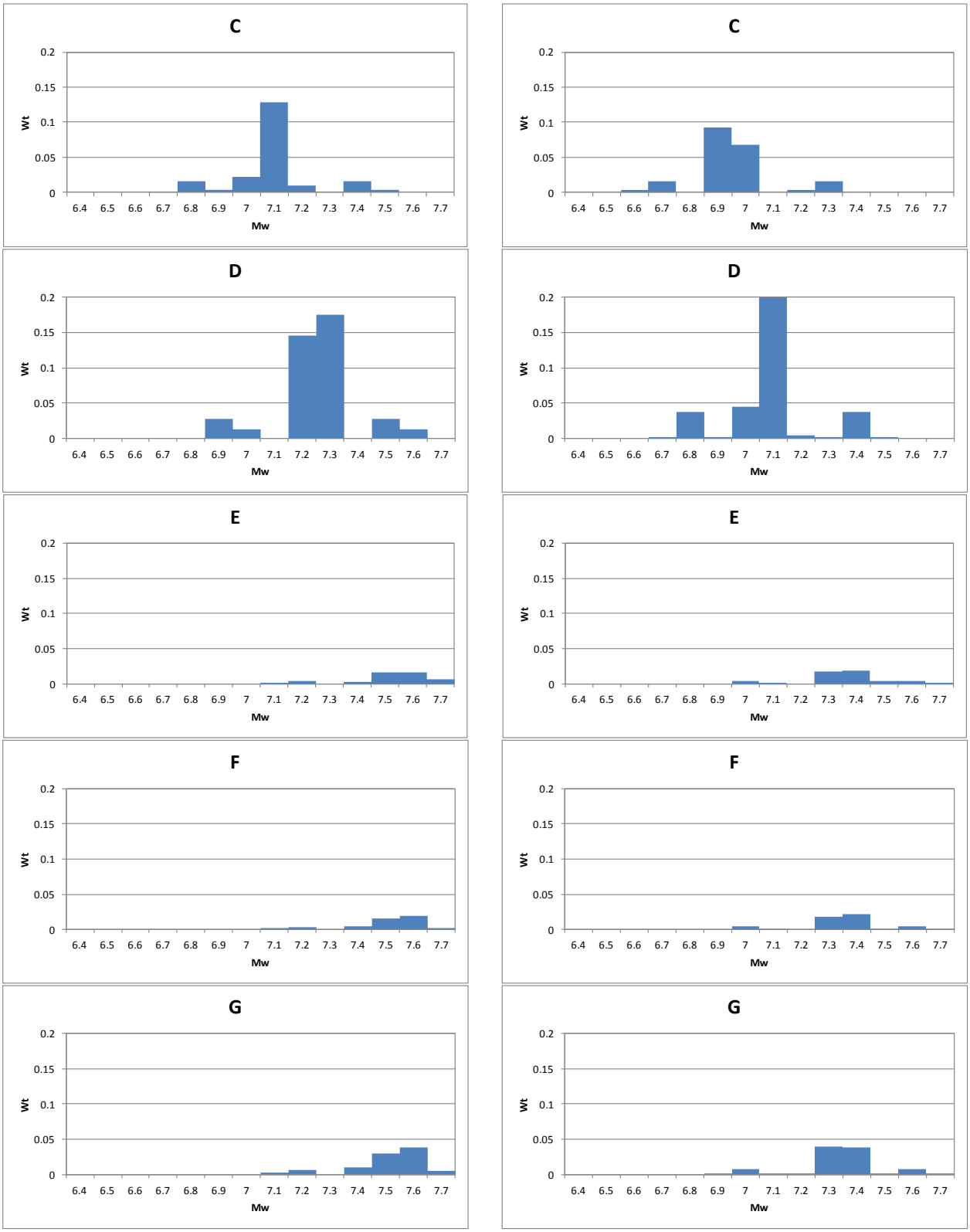
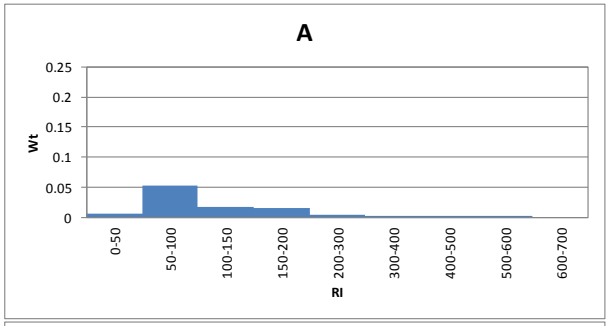
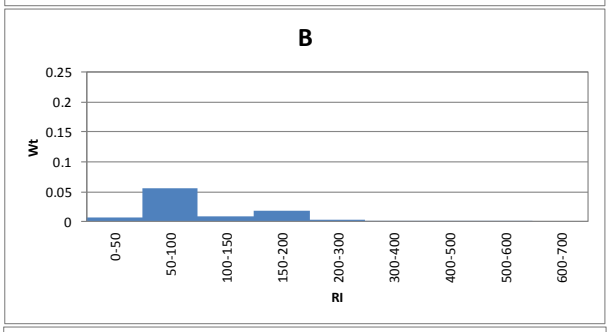
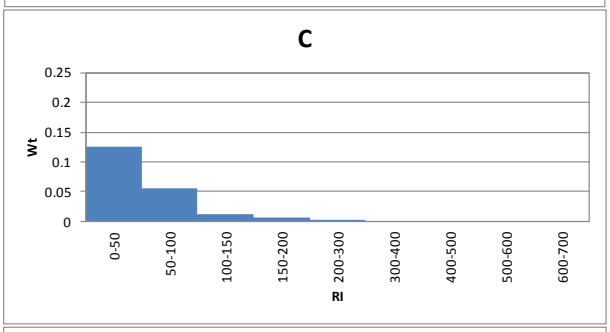


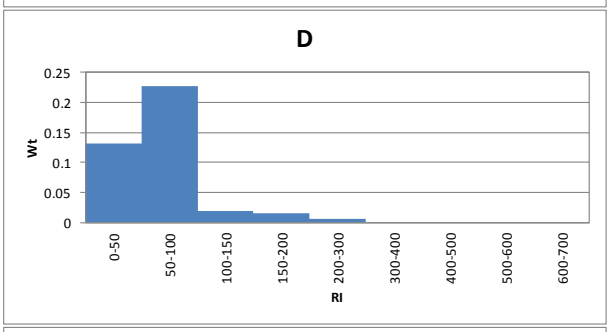
圖 3-5.43：玉里-池上斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

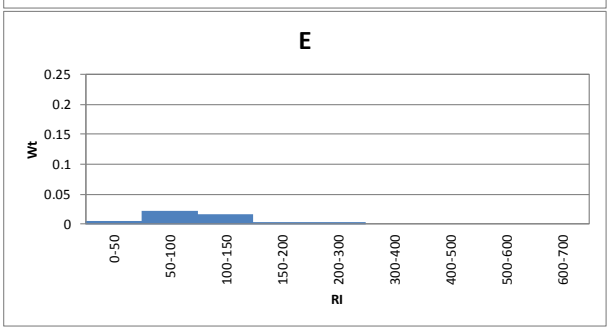
未折減



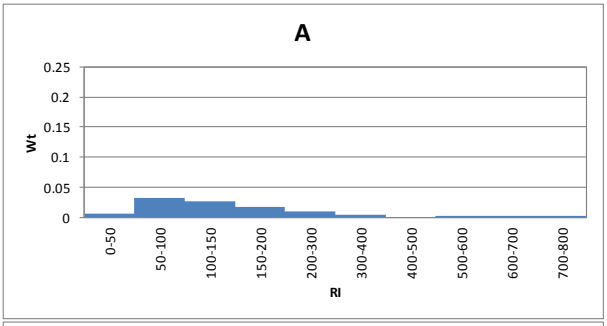


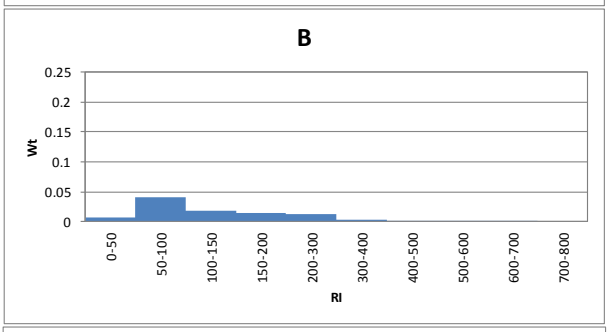


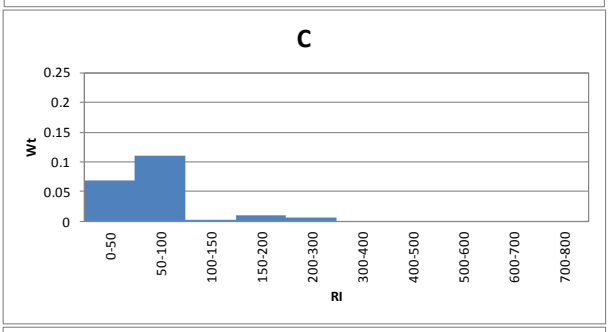


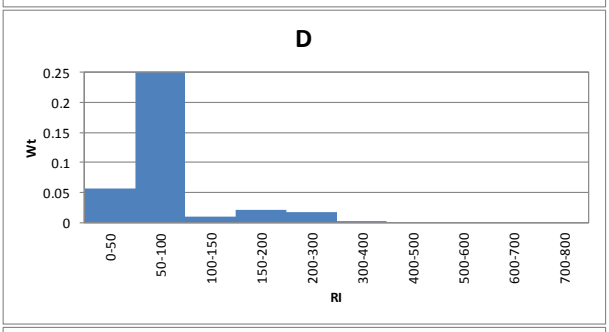


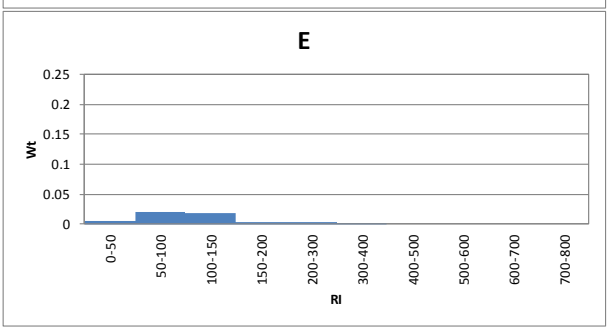
面積×0.7，滑移速率×0.7











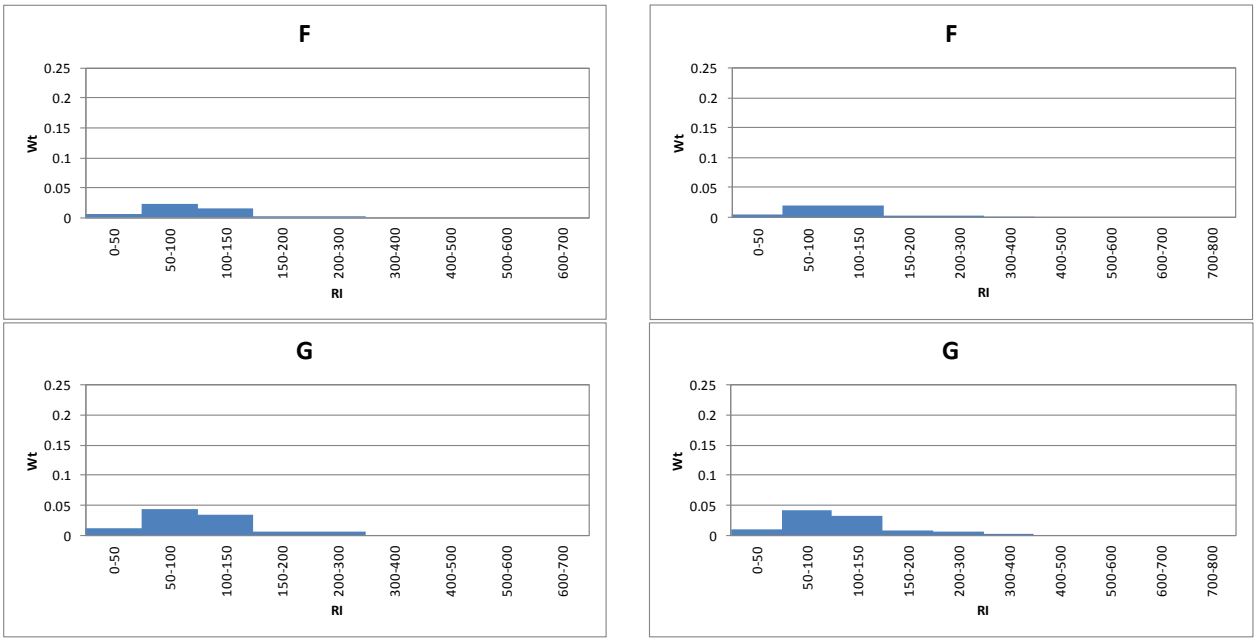


圖 3-5.44：玉里-池上斷層系統 7 種破裂事件之邏輯樹地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間區間之權重總和，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

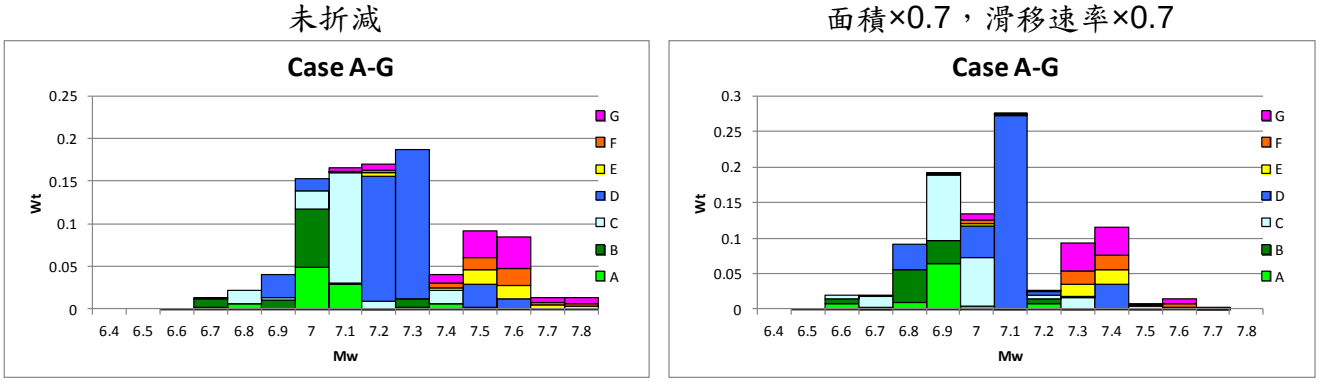


圖 3-5.45：玉里-池上斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

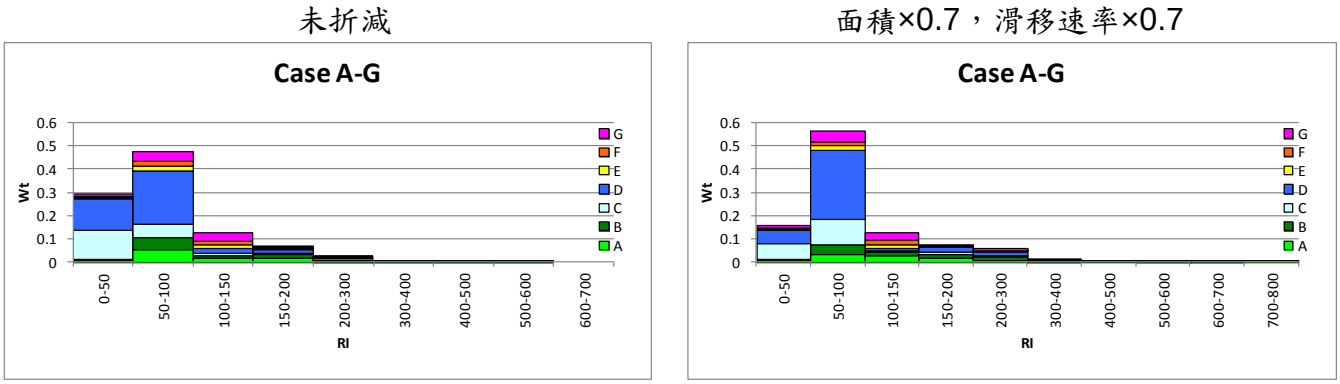


圖 3-5.46：玉里-池上斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖，左圖：未考慮震矩折減；右圖：考慮震矩折減。

3-5-5 玉里-池上斷層系統發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算玉里-池上斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，玉里-池上斷層系統最後一次發生時間為西元 2003 年，本計畫採用 BPT 模式進行評估。

表 3-5.10 為玉里-池上斷層系統評估之結果，以 BPT 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率未折減為 33.3%、53.4%及 80.2%，考慮震矩折減為 25.8%、45.4%及 74.6%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率未折減為 27.0%、46.5%及 72.6%，考慮震矩折減為 13.8%、27.6%及 48.9%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.5 以上之機率未折減為 1.58%、4.49%及 11.71%，考慮震矩折減為 0.01%、0.07%及 0.47%。

表 3-5.10：玉里-池上斷層系統發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
	BPT		BPT		BPT	
	未折減	震矩折減	未折減	震矩折減	未折減	震矩折減
M ≧6.5	33.3%	25.8%	53.4%	45.4%	80.2%	74.6%
M ≧7.0	27.0%	13.8%	46.5%	27.6%	72.6%	48.9%
M ≧7.5	1.58%	0.01%	4.49%	0.07%	11.71%	0.47%

3-6 鹿野-利吉斷層系統

3-6-1 鹿野斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

鹿野斷層約呈南北走向，由台東縣鹿野鄉鹿寮向南延伸至卑南鄉檳榔附近，長約 17 公里（林朝棨，1957）（圖 3-6.1）。由鹿野龍田階面的錯移地形面，或撓曲崖特徵，顯示該階地形成後有再度活動。此外，槽溝挖掘顯示全新世沉積層已受到褶皺與斷層剪切作用（陳文山等，2010），因此鹿野斷層改列第一類活動斷層。林啟文等認為斷層北起上鹿寮，經馬背、龍田、稻葉、初鹿，往南沿著卑南山台地西側延伸，並可能通過台東體育實驗中學東側，全長約 24 公里（林啟文與林燕慧，2006）。

Shyu, et al.（2008）認為鹿野斷層沿著卑南山的西緣向南延伸，在卑南山的最南部變為單斜褶皺，沿卑南山南緣發育，並轉為東西向。鹿野斷層為縱谷斷層最西側的分支，與其東側的利吉斷層可以在深處相連，並接合成縱谷斷層，如圖 3-6.2。

劉瑋恒（2009）由 GPS 水平速度、水平三角測網、野外資料、永久散射體差分干涉結果，判定海岸山脈仍持續向中央山脈擠壓。藉由差分干涉剖面，提出都巒山層火山岩層向西北方向持續擠壓，造成卑南山形成構造逃脫現象，認為鹿野斷層至卑南山南側應分為兩斷層，一為轉向東南的左移斷層，另一為向南持續延伸（圖 3-6.3）。

Chen et al.（2013）由 GPS 速度場分析，認為鹿野斷層經初鹿至檳榔，進入臺東平原時，即沿著卑南山礫岩轉為東西向，並銜接利吉斷層。而鹿野斷層的西側則發育一西傾的中央山脈斷層，沿著中央山脈的山腳，延伸至臺東平原（圖 3-6.4）。

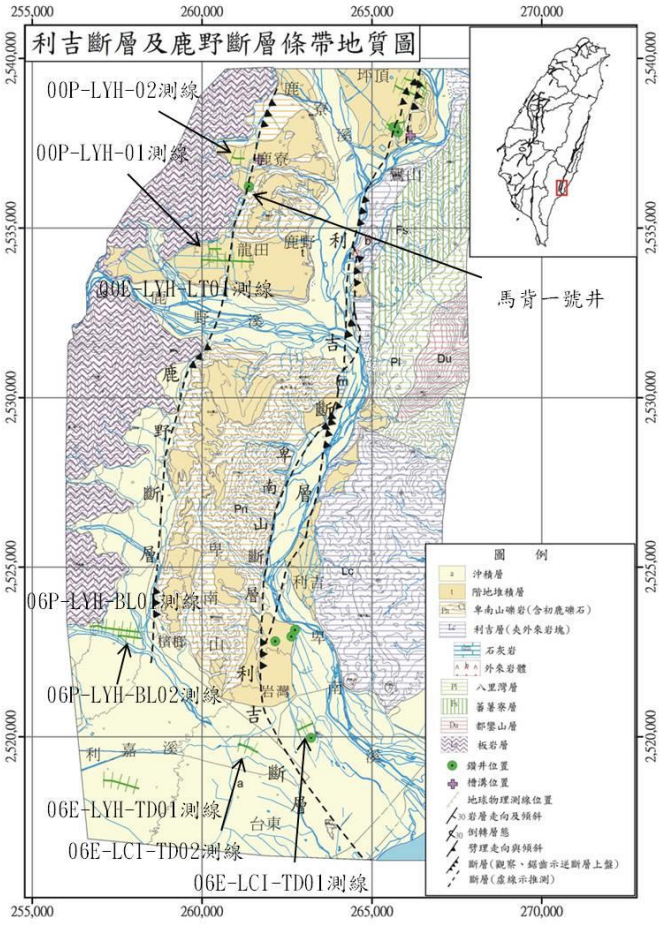


圖 3-6.1：鹿野斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。（座標系統：TWD67）

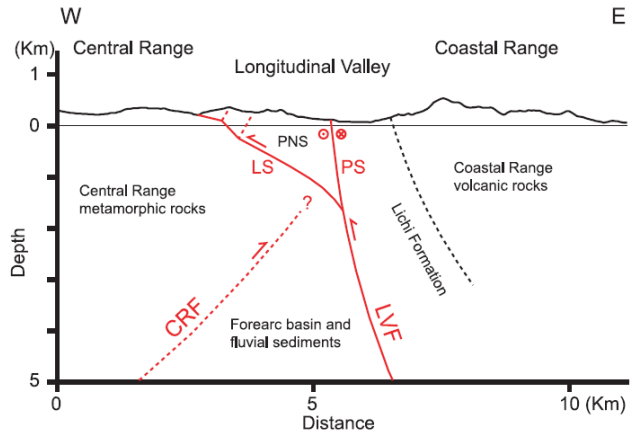


圖 3-6.2：縱谷南部構造剖面示意圖（Shyu et al., 2008）。

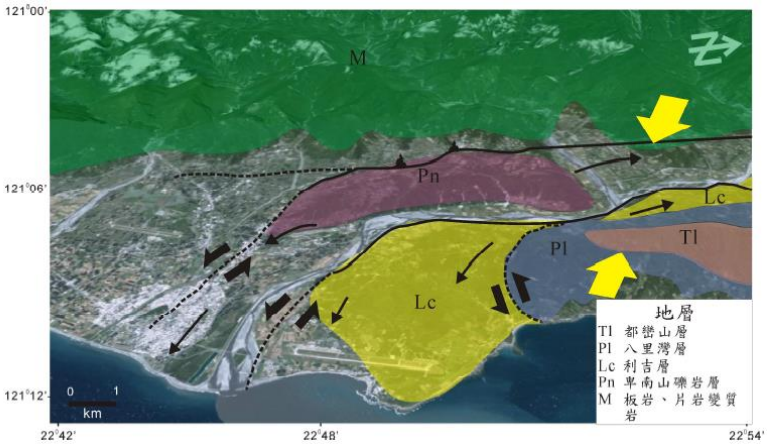


圖 3-6.3：都巒山火山岩層 Tl 向西北擠壓造成南北構造逃脫（劉瑋恒，2009）。

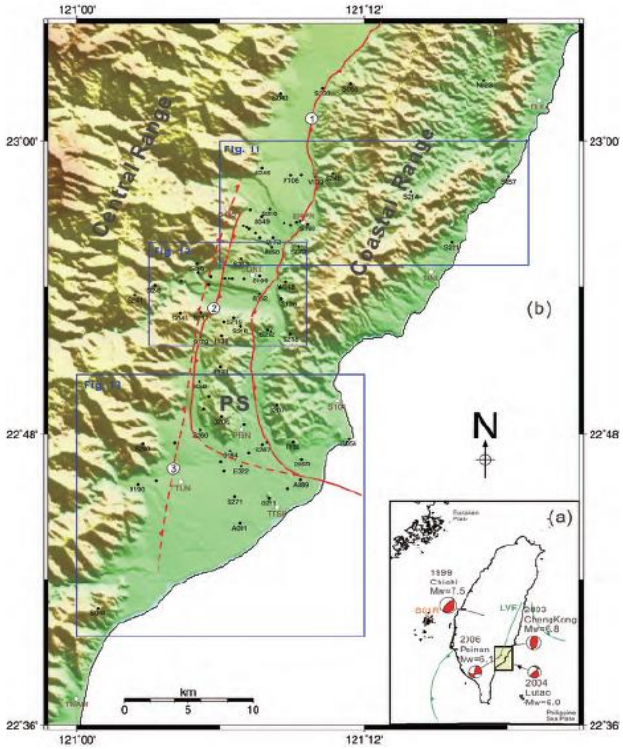


圖 3-6.4：鹿野斷層沿卑南山南側向東延伸，銜接利吉斷層，西側則發育中央山脈斷層（Chen,et al., 2013）。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：

(1) 王執明與王乾盈（1991），在初鹿台地西南方的淺層震測結果，研判鹿野斷層為低角度向東傾斜的斷層，卑南山礫岩向西逆衝於中央山脈板岩之上。

(2) 石瑞銓與陳平護（2001）利用反射震測，在永安（00P-LYH-02）與龍田（00P-LYH-01）地區兩條剖面線的震測影像判讀結果，永安測線重合剖面，如圖 3-6.5（b），經量測斷層傾角約為 58.4°E；龍田測線西段的重合剖面，如圖 3-6.5（c），經量測斷層傾角約為 64.4°E。

(3) 董倫道等（2006），在鹿野斷層南端的檳榔地區有 2 條淺層震測測線（06P-LYH-BL01、06P-LYH-BL02），位置詳圖 3-6.1，其震測剖面與鹿野縱谷大尺度影像套疊解釋中（圖 3-6.6），可大致判別鹿野斷層有往東南延伸的趨勢。經剖面量測斷層傾角約為 74°E。

(4) 王蘭榛等（2010），利用改良淺層震測影像探討鹿野斷層之構造，在龍田階地西側，跨越鹿野斷層位置設置一條測線（07P-LYHF-LT-1）（圖 3-6.7），經剖面量測鹿野斷層傾角約為 47.5°。

(5) Wu et al.（2006）利用 CWBSN 和 TSMIP 於 2006 年四月間在臺東地區（22.50~23.25°N, 120.75~121.50°E）所記錄的 1265 筆地震事件，包含 2006 年 4 月 1 號的臺東地震，重新定位後得到剖面圖。初步描繪中央山脈斷層、鹿野斷層、利吉斷層三者的斷層面，如圖 3-6.8 所示，經量測鹿野斷層傾角約為 42°E。

(6) 顏郁捷（2008）將 2006 年 4 月 1 號臺東地震的主、餘震序列，以及同月 15、16 臺東外海的地震序列，採用 CWBSN 和 BATS 位於東部測站 4/1-4/30 資料，利用 Hypo71、3DCOR、HypoDD 等不同方式重新定位，推估鹿野斷層、中央山脈斷層和縱谷斷層的斷層面空間中幾何分布。此研究亦指出，在鹿野斷層的西側（即中央山脈東麓），有一正在形成的逆斷層，屬於鹿野斷層分支，經量測鹿野斷層傾角為 45°（圖 3-6.9）。

(7) 姜彥麟（2007）利用跨斷層同震時期的地表水平壓縮量和垂直抬升量，估算近地表鹿野斷層傾角約 35~40（圖 3-6.10）。

鹿野斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-6.1。

（b）00P-LYH-02 測線

（a）

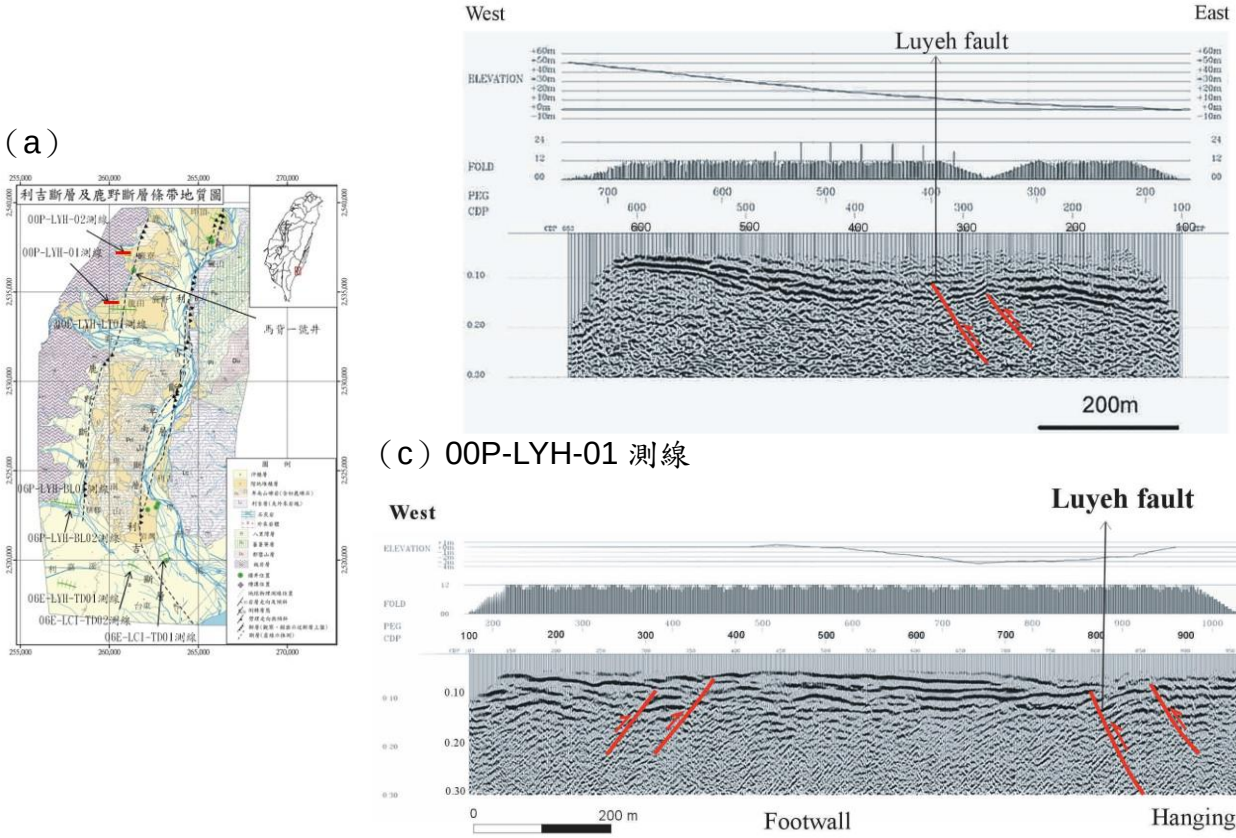


圖 3-6.5：（a）鹿野斷層條帶地質圖，震測線位於紅色實線處，（b）永安淺層震測剖面，（c）龍田淺層震測西側剖面（石瑞銓與陳平護，2001）。

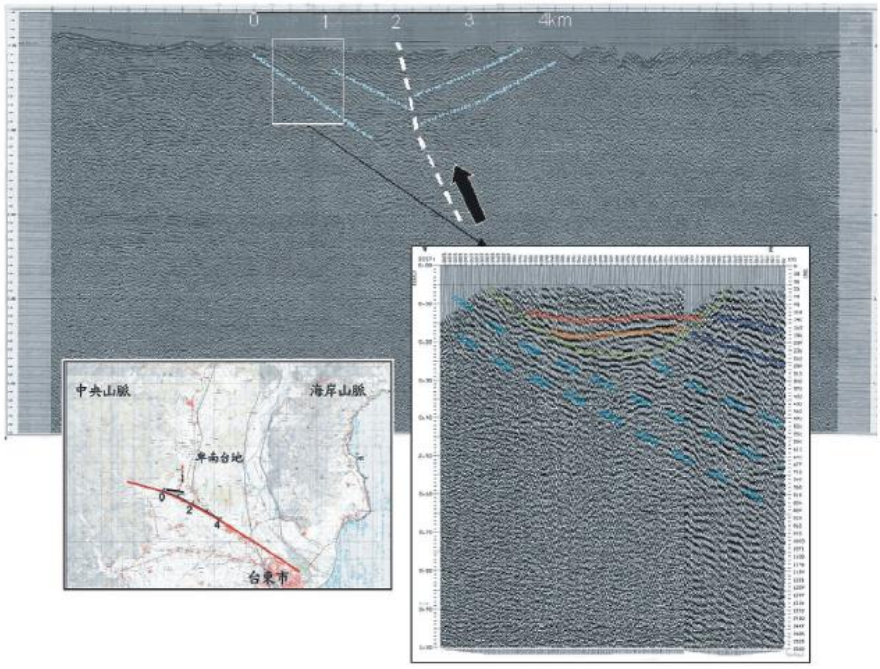
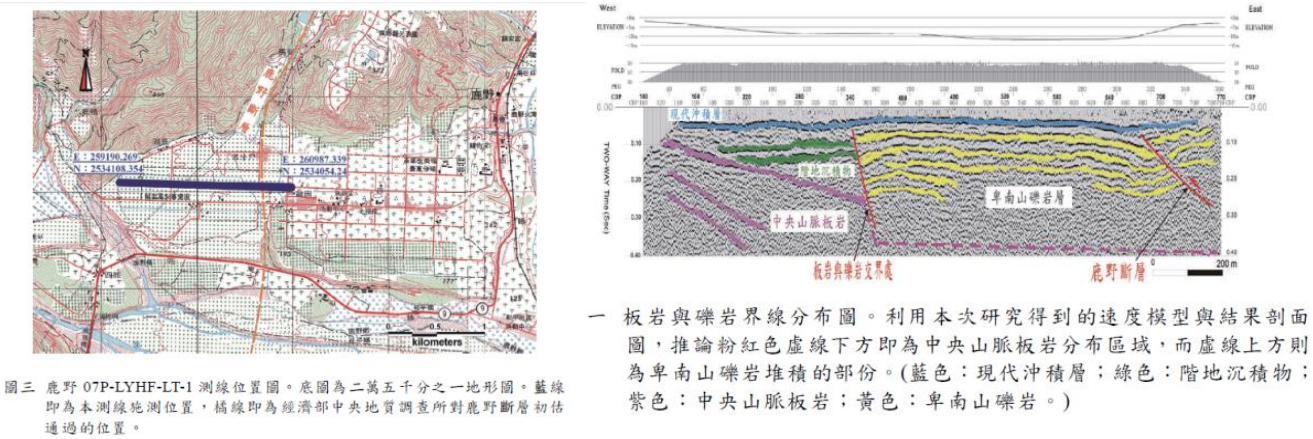


圖 3-6.6：06P-LYH-BL01、06P-LYH-BL02 震測剖面與鹿野地區縱谷大尺度影像套疊（董倫道等，2006）。

（a）　　（b）



圖三 鹿野 07P-LYHF-LT-1 測線位置圖。底圖為二萬五千分之一地形圖。藍線即為本測線施測位置，橘線即為經濟部中央地質調查所對鹿野斷層初估通過的位置。

一 板岩與礫岩界線分布圖。利用本次研究得到的速度模型與結果剖面圖，推論粉紅色虛線下方即為中央山脈板岩分布區域，而虛線上方則為卑南山礫岩堆積的部份。(藍色：現代沖積層；綠色：階地沉積物；紫色：中央山脈板岩；黃色：卑南山礫岩。)

圖 3-6.7：（a）鹿野 07P-LYHF-LT-1 測線位置圖，（b）淺層震測剖面圖（王蘭榛，2010）。

（a）　　（b）

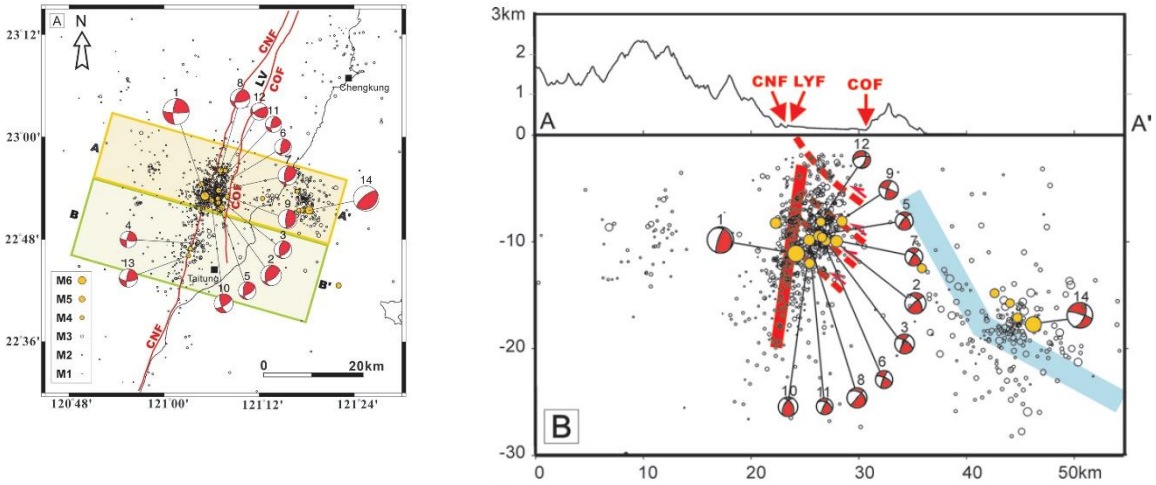


圖 3-6.8：（a）2006 臺東地震系列重新定位及震源機制解，（b）臺東地震剖面圖，圖中左側粗紅線為中央山脈斷層，上部紅虛線為鹿野斷層位置，右側淡藍色多邊形為利吉斷層位置 （Wu et al., 2006）。

（a）　　（b）

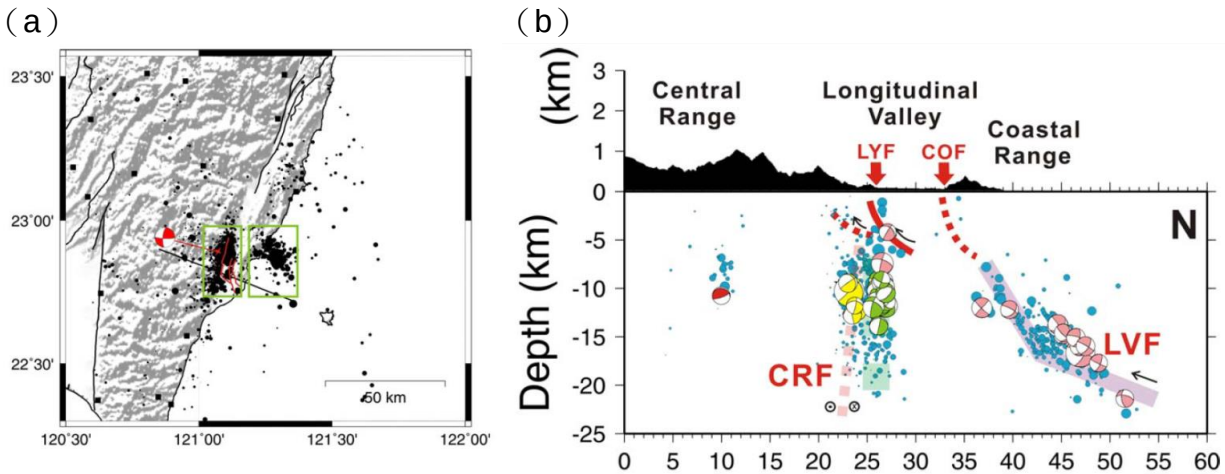


圖 3-6.9：（a）2006 年 4/1-4/30，CWBSN 在臺東地區所記錄到的地震事件，（b）2006 年 4 月臺東地區地震序列剖面圖，利用 HypoDD 重新定位（顏郁捷，2008）。

	抬昇量(mm)	水平壓縮量(mm)	近地表傾角(°)
利吉斷層	15.5	5	70
鹿野斷層	10~11	13	35~40

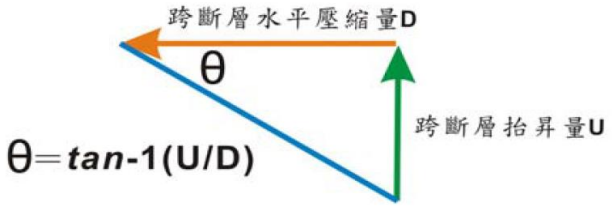


圖 3-6.10：利用同震地表位移估計鹿野斷層近地表傾角（修改自姜彥麟，2007）。

表 3-6.1：鹿野斷層幾何形貌相關文獻

文獻	方法	傾角（度）	深度(km)
王執明與王乾盈（1991）	震測	低角度，向東傾斜	-
石瑞銓與陳平護（2001）	淺層震測剖面	龍田測線 64.4E 永安測線 58.4E	-
董倫道（2006）	震測	74E	-
王蘭榛（2010）	淺層震測剖面	47.5E	-
Wu et al. （2006）	地震重新定位	42E	-
顏郁捷（2008）	利用地震重新定位推估	45E	-
姜彥麟（2007）	同震位移推估	35~40	-

3. 斷層機制：鹿野斷層為東傾的純逆衝斷層（Lee et al., 1998）。鹿野斷層在鹿野溪以北為北西走向之水平壓縮潛移（creeping）活動為主，向南到了高臺，潛移量逐漸減少，鹿野溪以南在近地表有鎖定（lock）的現象。而斷層南段至卑南山南緣，可能轉為東西向，向東延伸，銜接利吉斷層，穿越臺東平原北側（Chen et al., 2013）。
4. 短期滑移速率：短期滑移速率各調查方法及斷層參數彙整於表 3-6.3。
5. 長期滑移速率：
   (1) 陳文山等（2010）在永安沖積扇上的隆起褶皺崖進行槽溝開挖以及淺層鑽探（圖 3-6.11a）。而由槽溝剖面超覆沉積層變形來估算變形前後的垂直高差（圖 3-6.11b，c），以此估算斷層淨滑移速率（net slip rate）為 4.4 mm/yr（北牆/南牆：4.5/4.3 mm/yr）。但有時崖前沉積未必會完全超覆堆積至褶皺崖頂，如此估算會低估實際變動量。故若 G1 礫石層為 N1 事件之後開始變形（4335 yr BP），以其頂面的垂直高差約 8 公尺來估算，長期抬升速率約 1.85 mm/yr，以溝槽發現的剪切面角度 20 度計算，斷層淨滑移速率為 5.4 mm/yr（圖 3-6.12）。
   (2) 陳文山等（2010）在馬背 1 號井（圖 3-6.13）中發現 0-77.1 公尺為剪切強烈的厚層湖相泥層，兩處定年分別為 13,060-12,940 yr BP（10.2 公尺）與 18,510-17,690 yr BP（69.6 公尺），其下伏地層為 46 公尺厚的沖積扇礫石層。根據沉積環境的變化推測可能為鹿野斷層活動所造成，由沉積速率推估泥層底部年代，推測偃塞湖約形成於 18,870 yr BP，也大概是鹿野斷層開始活躍的時間。若馬背 1 號井中礫石層頂面可與 Terrace 6 或 Terrace 7 對比，其垂直高差分別為 92 公尺與 116 公尺，所估算的斷層長期抬升速率分別為 4.9 mm/yr 與 6.1 mm/yr，經傾角 30°轉換得沿斷層面滑移速率

為 9.8~12.2 mm/yr。

(3) 徐澔德等人（Shyu et al., 2008）在鹿野高臺分為 7 階，如圖 3-6.14a 所示。其中在階地 4 的標本定年為 3260-3440yr BP，而階地 4 因鹿野斷層影響，產生 15m 的落差（圖 3-6.14b）。計算鹿野斷層長期垂直抬升速率約是 4.4~4.6 mm/yr，經傾角 30°轉換得沿斷層面滑移速率為 8.8~9.2 mm/yr。

鹿野斷層長期滑移速率各調查方法及斷層參數彙整於表 3-6.2。

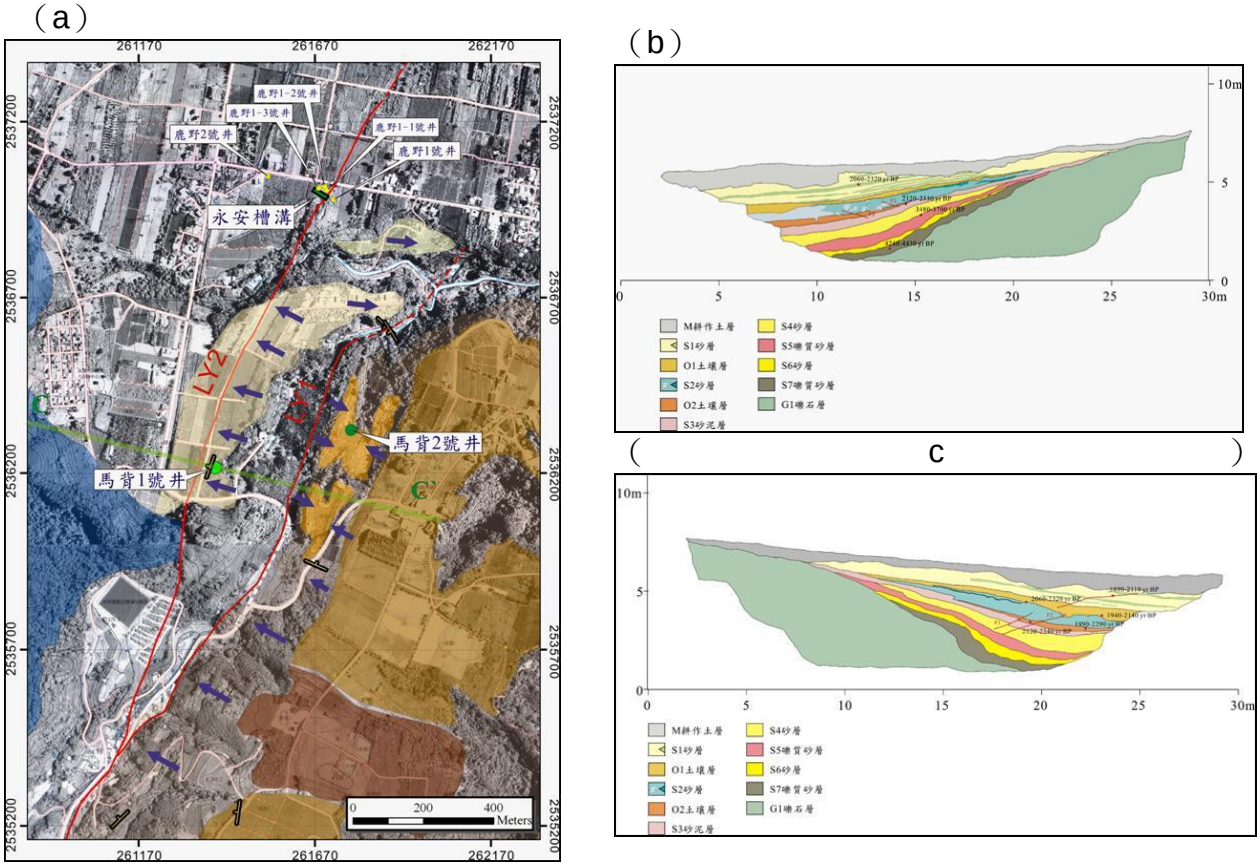


圖 3-6.11：（a）溝槽與鑽井位置分布圖，永安地區扇階受到鹿野斷層作用形成反斜崖地形（TWD67）（b）永安槽溝北牆剖面（c）永安槽溝南牆剖面 （陳文山等，2010）。

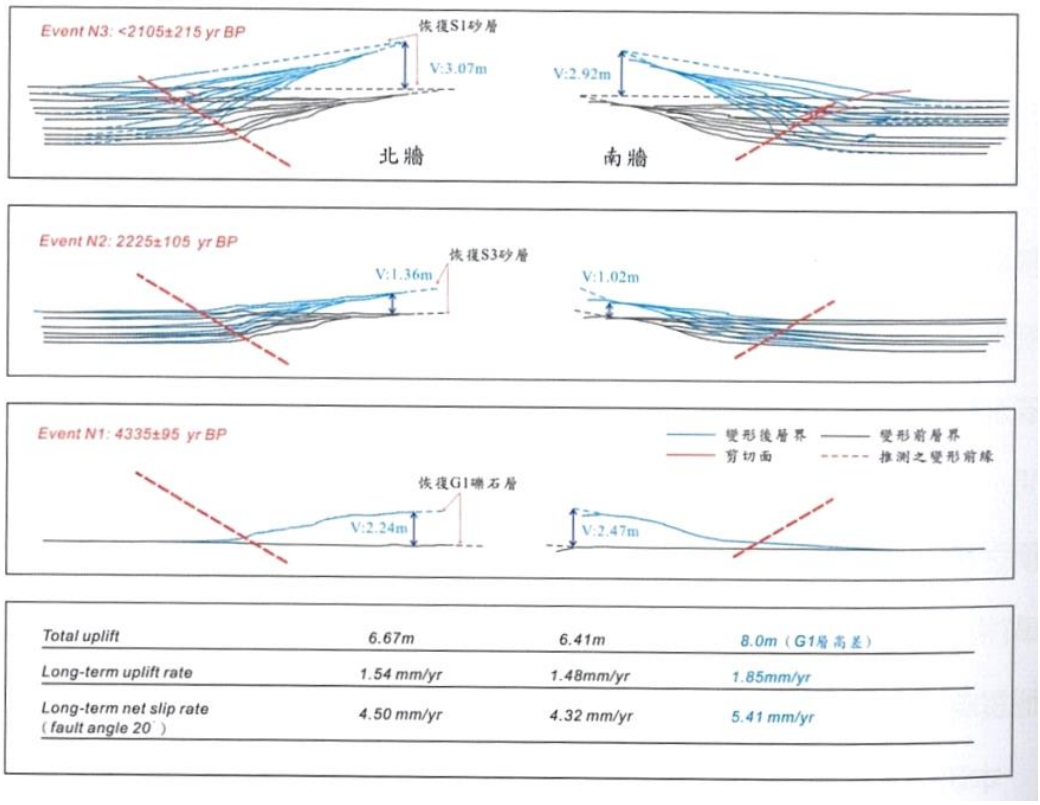


圖 3-6.12：溝槽古地震恢復圖（陳文山等，2010）。

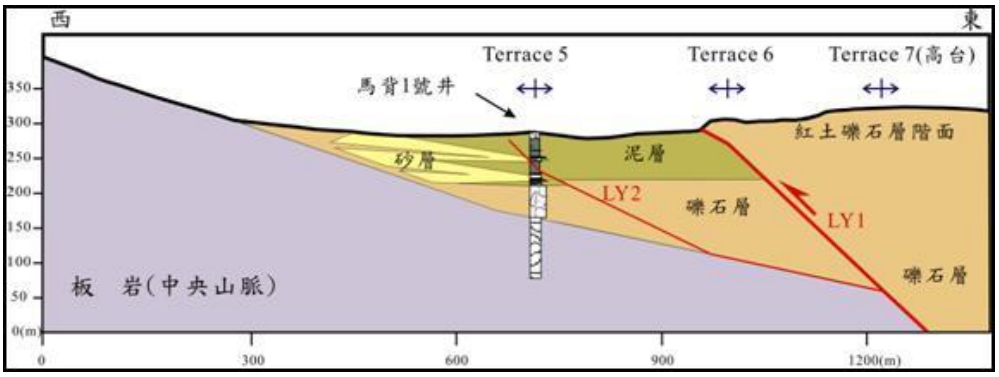
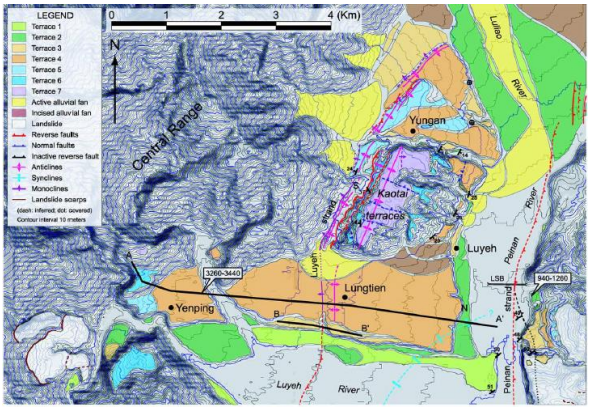


圖 3-6.13：高臺至馬背 1 號井，東西向地質剖面圖示意圖。剖面位置、LY1 與 LY2 斷層跡位置見圖 3-3.15a(陳文山等，2010）。

（a）



（b）

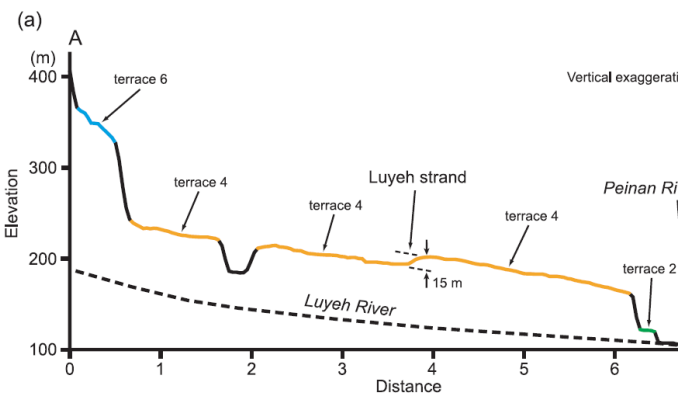


圖 3-6.14：（a）鹿野高臺階地劃分圖，（b）龍田階地剖面圖（Shyu et al., 2008）。

表 3-6.2：鹿野斷層長期滑移速率相關文獻彙整

作者	方法	抬升速率(mm/yr)	淨滑移速率(mm/yr)
陳文山等，2010	永安槽溝剖面定年	1.85	5.4
陳文山等，2010	馬背 1 號井定年資料對比	4.9~6.1	9.8~12.2
Shyu, *et* al., 2008	龍田階地高差及定年推估	4.4~4.6	8.8~9.2

6. 單一事件變位量：陳文山等（2010）在永安沖積扇上的隆起褶皺崖進行槽溝開挖（圖 3-6.11a）。根據生長褶皺變形構造會呈現的超覆沉積、楔形堆積以及向下層面變陡的特徵解出了三次古地震事件。由超覆沉積層變形來估算變形前後的垂直高差，可以獲得 N1 古地震的垂直變動量為 2.24/2.47 公尺（北牆/南牆）、N2 古地震的垂直變動量為 1.36/1.02 公尺（北牆/南牆）、N3 古地震的垂直變動量為 3.07/2.92 公尺（北牆/南牆）。
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：陳文山等（2010）在永安沖積扇上的隆起褶皺崖進行槽溝開挖（圖 3-6.11a）。三次古地震事件由地層的碳十四年代控制可得知三次的事件時間分別為 4240-4430 yr BP（N1）、2110-2340 yr BP（N2）以及< 1890-2110 yr BP（N3）。

彙整前人對於鹿野斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-6.3 所示，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 3-6.3：鹿野斷層參數表

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
鹿野斷層	斷層分段與破裂事件	A：鹿野斷層	地表地形判釋、岩層分布	林啟文與林燕慧，2006；Chen et al., 2013
		B：鹿野斷層+東南延伸破裂		
	長度(km)	A：17 km B：24 km		
	寬度(km)	43.2	深度/sin 傾角 （0~5 km：30 度，下接利吉斷層）	本計畫推估
	深度(km)	30	利用地震重新定位推估	Kuochen et al., 2004
	面積(km^2)	A：734 B：1037	長度×寬度	
	走向	北北東-南南西	地表地質調查	林朝棨，1957
	傾斜角度(度)	低角度，向東傾斜	淺層震測剖面	王執明、王乾盈，1991
		64.4°E、58.4°E	淺層震測剖面	石瑞銓、陳平護，2001
		74°E	淺層震測剖面	董倫道等，2006
		47.5°E	淺層震測剖面	王蘭榛等，2010
		42°E	地震重新定位	Wu et al., 2006
		45°E	地震重新定位	顏郁捷，2008
		35~40°E	同震位移推估	姜彥麟，2007
	斷層機制	逆斷層	鑽井、地物探勘及地表地質調查	林啟文等，2004
	短期滑移速率(mm/yr)	抬升速率約 7-8 mm/yr	鹿野剖面水準測量(2005-2008)	Chen et al., 2012
		整體抬升速率最高約 20 mm/yr，縱谷斷層在此處近地表數公里的距離內，似乎為鎖定的狀態	南卑南山-北臺東剖面水準測量(2006-2009)	
		永安剖面：平行斷層走向約有 10 mm/yr，垂直斷層走向則有 8 mm/yr	1992-2010 地表 GPS 速度場變形測量	Chen et al., 2013
		龍田剖面：平行斷層走向約有 15 mm/yr，垂直斷層走向則有 11 mm/yr		

		北卑南山剖面：平行斷層走向約有 20 mm/yr，垂直斷層走向則有 10 mm/yr		
	長期滑移速率(mm/yr)	5.4 (以斷面傾角 20 度換算)	永安槽溝剖面並進行碳 14 定年	陳文山等，2010
		9.8~12.2 (以斷面傾角 30 度換算)	馬背 1 號井定年資料對比	陳文山等，2010
		8.8~9.2 (以斷面傾角 30 度換算)	龍田階地高差及定年推估	Shyu et al., 2008
	滑移虧損率(slip deficit rate) (mm/yr)	6.60	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網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)	2.24/2.47 公尺(北牆/南牆)	永安槽溝古地震事件	陳文山等，2010
		1.36/1.02 公尺(北牆/南牆)		
		3.07/2.92 公尺(北牆/南牆)		
	最大可能地震規模(Mw)	A：6.9 B：7.0	Mw =4.33+0.90 log A (逆斷層)	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.9 B：7.0	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔 (年)	100~200 年	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間	本計畫推估
	最近一次活動時間	<1,890-2,110 yr BP	永安槽溝	陳文山等，2010

3-6-2 利吉斷層參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：

利吉斷層東北走向轉南南東走向，由台東縣卑南鄉利吉村北方向南延伸，至台東市北方（Hsu, 1956）。本斷層包括位於其東側的分支斷層－卑南山斷層（Hsu, 1956；游明聖，1997）。林啟文等（2004）則認為卑南山斷層與利吉斷層均是發育於所謂「利吉層」內的斷層，利吉層可視為一個構造單位，卑南山斷層可以視為近期活動的西界，而利吉斷層為東界。陳柏村等（2006）在地調所特刊中描述，斷層北起台東縣鹿野鄉瑞隆村的坪頂台地西側，沿海岸山脈西緣向南延伸，經台東縣延平鄉、卑南鄉至台東市北方轉東南方向至海濱，長約 25 公里（圖 3-6.15）。

紀權宥（2006）由地質特徵認為新良地區（坪頂階地地區）應屬池上斷層。而從野外調查及鑽井資料結果認為，利吉斷層於利吉層與卑南山礫岩的斷層面，於部分地區已停止活動，現今的活動斷層（分支斷層）應切入卑南山礫岩中。斷層跡由鸞山至岩灣大致沿著卑南大溪西岸，呈北北東方向；岩灣以南斷層跡轉為東南向，通過貓山西側與鯉魚山東側，於太平溪口出海。

Champenois et al.(2012)使用由 ALOS 衛星拍攝的 PALSAR(Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）影像，分析自 2007 年 2 月至 2010 年 2 月縱谷地區的變形，論文中所繪製的利吉斷層位置，北端從坪頂階地以南開始，尾端位於原斷層位置的上盤中，貼著海岸山脈南緣入海，如圖 3-6.16。

陳文山等（2014）結合野外調查、GPS 速度場資料（取自 Chen et al., 2013），認為全新世活動位置在龍田－山里地區是位在利吉斷層下盤（西），以南大致沿著卑南大溪；至岩灣－利吉區域的全新世斷層活動位置朝東南延伸經臺東大橋，位於斷層上盤中，之後轉向東南東沿卑南大溪進入太平洋。全新世斷層活動位置並未經過岩灣階地，因此階地上未見明顯的新期構造地形，總長約 20 公里（圖 3-6.17）。

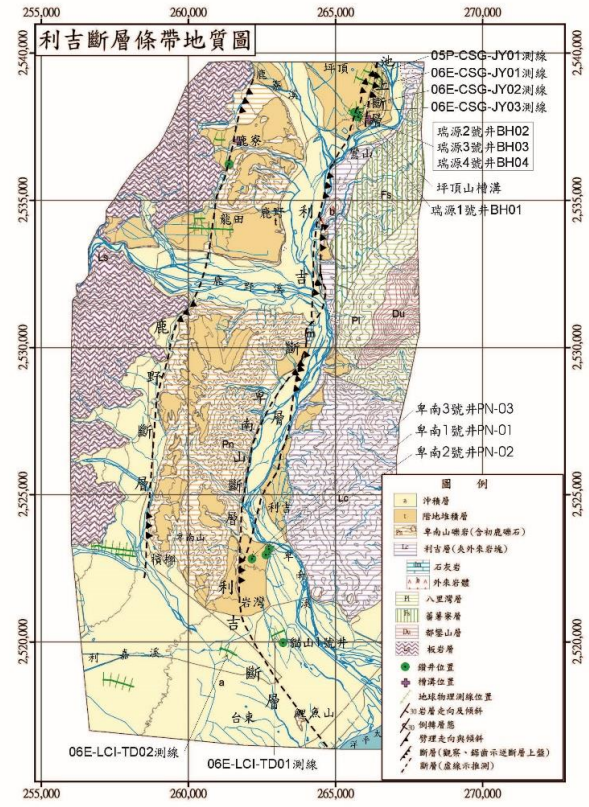


圖 3-6.15：利吉斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）（座標系統：TWD67）。

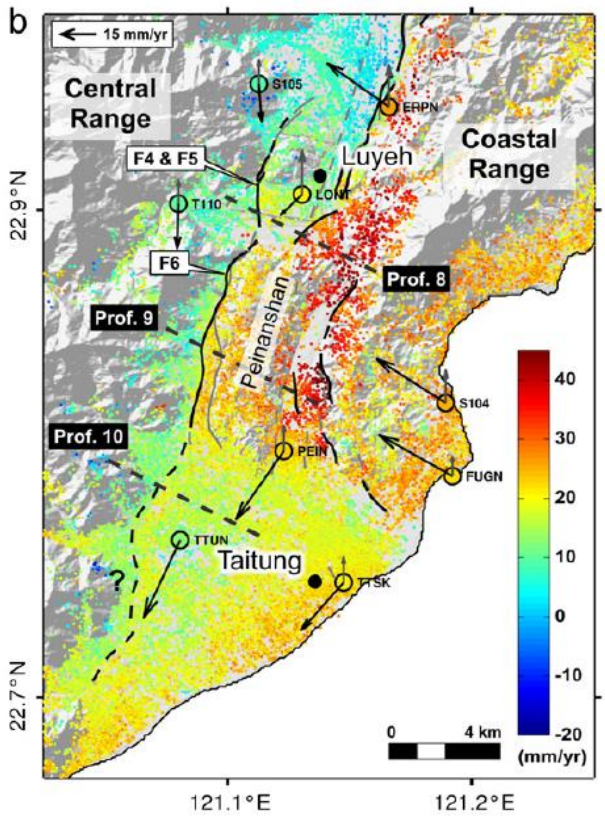


圖 3-6.16：鹿野北部到縱谷最南端之 PS 速度場分布圖，圓點為 GPS 點位，黑色及灰色箭頭分別為 GPS 水平及垂直速度場，黑色線段則為根據 PS 速度場描繪之斷層位置（Champenois et al., 2012）。

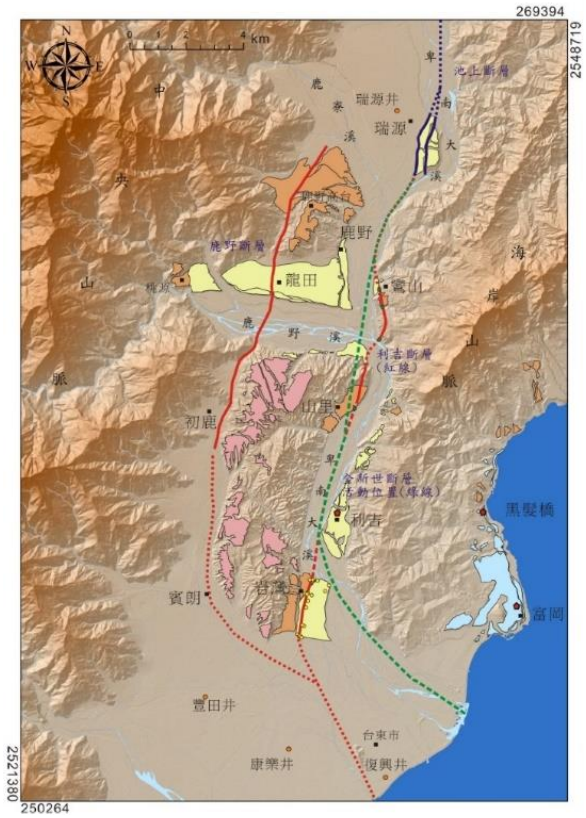


圖 3-6.17：利吉斷層（紅線） 與全新世斷層（綠線）活動位置。紅色五邊形是碳十四採樣位置。淡藍色塊為海階，黃色塊為河階，棕色塊為扇階，粉紅色塊為紅土階地（陳文山等，2014）。

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：

(1) Wu et al.（2006）利用 CWBSN 和 TSMIP 於 2006 年四月間，在臺東地區（22.50~23.25。N, 120.75~121.50。E）所記錄的 1265 筆地震事件，包含 2006 年 4 月 1 號的臺東地震，重新定位後得到剖面圖。經剖面判釋利吉斷層淺部傾角約 60°E，至 18 公里處轉折為 29°E，最深處約 26 公里（圖 3-6.8）。

(2) 顏郁捷（2008）利用 HypoDD 重新定位 2006 年 4 月間臺東地區的地震事件（圖 3-6.9a）。2006 年 4 月 15 日、16 日，在東部近海地震序列的定位結果，呈現淺陡深緩的分布趨勢，推測利吉斷層淺部傾角約 57°E，至 17 公里處轉折為 22°E，最深處約 23 公里（圖 3-6.9b）。

(3) 根據 Kuochen et al.（2012）速度構造剖面及地震震源分布，推估利吉斷層傾角約 55 度，至 22 公里處轉折為 40 度，深度約 30 公里左右（圖 3-6.18）。

(4) 紀權宥（2006）認為利吉斷層為潛移作用為主的活動斷層，故以階地抬升速率代表長期地殼垂直變化速率，及 GPS 水平變化速率代表的長期地殼水平速率，估算斷層面傾角約為 53°，斷層構造模型如圖 3-6.19 所示。

(5) 姜彥麟（2007）利用跨斷層同震時期，地表的水平壓縮量和垂直抬升量，估算近地表利吉斷層傾角約 70°（圖 3-6.10）。

利吉斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 3-6.4。

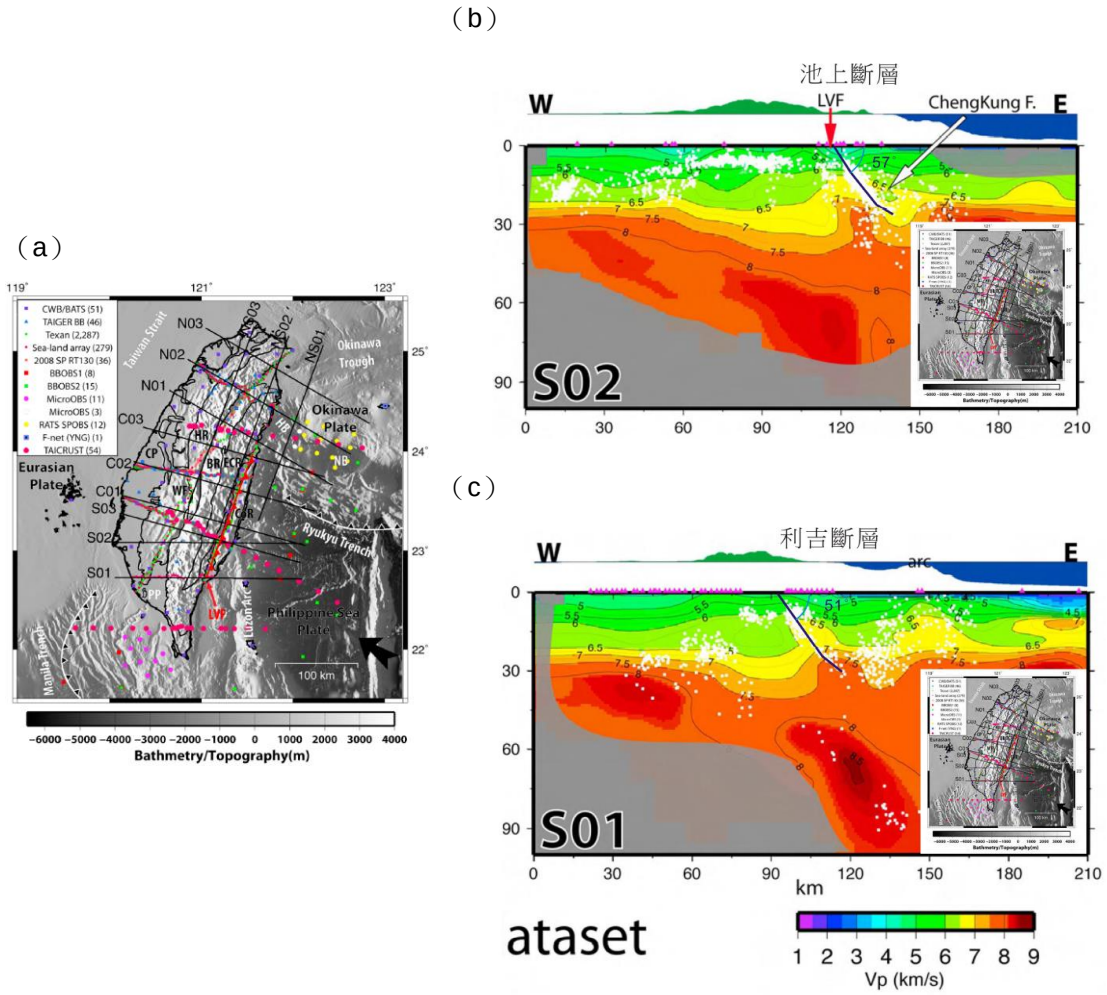


圖 3-6.18：（a）臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，（b）跨越縱谷斷層南段 S02 速度構造剖面，（c）跨越縱谷斷層南段 S01 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012；陳文山等，2014）。

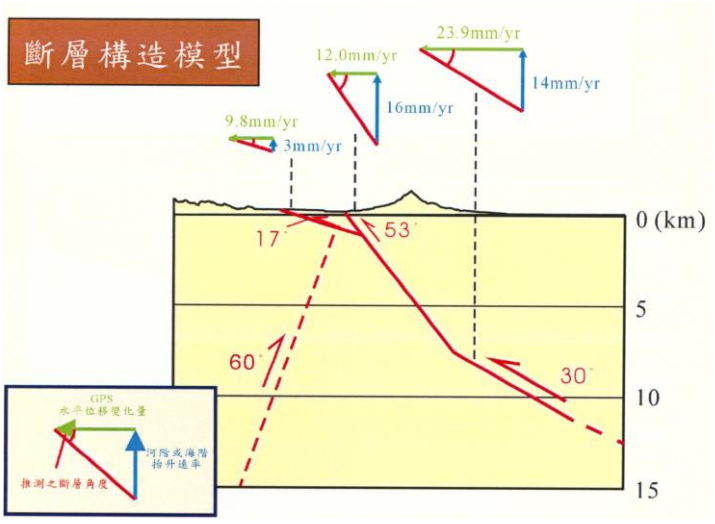


圖 3-6.19：利吉斷層構造模型（紀權宥，2007）。

表 3-6.4：利吉斷層幾何相關文獻彙整

參考文獻	方法	傾角（度）	深度（km）
Wu et al., 2006	地震重新定位	0-18 km 傾角 60 18 km 以下傾角 29	26
顏郁捷，2008	2006 年 4 月間臺東地區的地震重新定位	0-17 km 傾角 57 17 km 以下傾角 22	23
Kuochen et al., 2012；陳文山等，2014	速度構造剖面及地震重定位	0-22 km 傾角 55 22 km 以下傾角 40	30
紀權宥，2006	間震期水平及垂直滑移速率推估	0-8 km 傾角 53 8 km 以下傾角 30	>13
姜彥麟，2007	同震位移推估	70	-

3. 斷層機制：
   (1) 利吉斷層為逆移斷層（Hsu, 1956）。
   (2) 呂宋島弧前進方向約為西北向，斜向碰撞上東北、西南走向的臺灣成為海岸山脈後，會被迫右轉，改向為北北東。在這種出於橫壓迴轉（transpression）（Biq, 1972）的行動中，使得海岸山脈斷層（縱谷斷層，包含利吉斷層在內），成為臺灣最活躍的左移斷層（畢慶昌，1984）。
   (3) Lee et al.（1998）認為當海岸山脈、卑南山礫岩、中央山脈開始碰撞後，在不斷的壓力推擠下，使得利吉斷層和鹿野斷層有明顯的應力分割效應（Strain Partitioning），形成一逆斷層（鹿野斷層）、一走向滑移斷層（利吉斷層）的系統。
   (4) 依據台東地區的水平三角網測量結果（Yu and Lee, 1986），海岸山脈相對卑南山為向北移動，因此卑南山斷層與利吉斷層應是逆移兼具左移特性的斷層（陳柏村等，2006）。
4. 短期滑移速率：短期滑移速率各調查方法及斷層參數彙整於表 3-6.5。
5. 長期滑移速率：Shyu et al.（2008）計算卑南溪岸的河階 2，與現生河床面高差 18 公尺，位於圖 3-6.20 紅圈處，標本定年結果約為 940-1,260 cal BP，計算得利吉斷層抬升速率約 14.3~19.1 mm/yr。以傾角 55 度轉換至斷層面上，約 17.5~23.3 mm/yr。

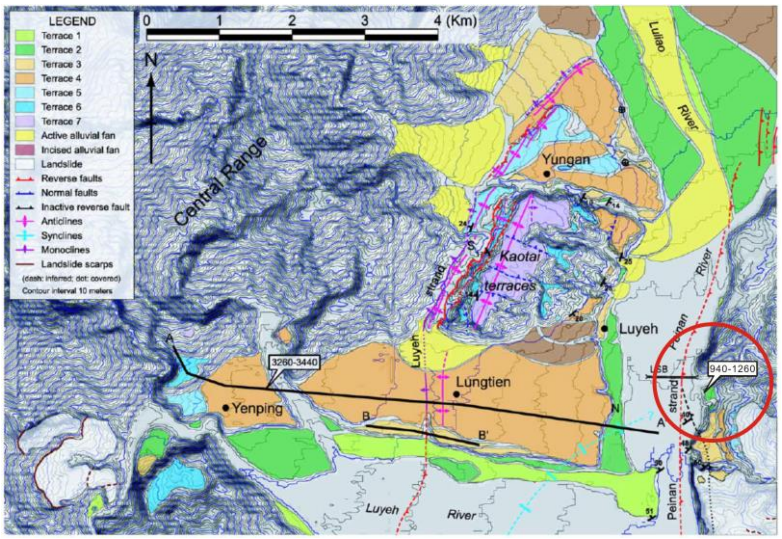


圖 3-6.20：鹿野高臺階地地區地貌特徵及活動構造分布圖，紅圈位置為利吉斷層上盤卑南溪階地及其定年（Shyu et al., 2008）。

6. 單一事件變位量：未知。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）等列於參數表中以供參考。本文提到之規模均為地震矩規模。
8. 最近一次活動時間：未知。

彙整前人對於利吉斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 3-6.5 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 3-6.5：利吉斷層參數表

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
利吉斷層	斷層分段與破裂事件	A：南端貼著海岸山脈南緣入海。 B：北起台東縣鹿野鄉瑞隆村的坪頂台地西側，沿海岸山脈西緣向南延伸，經台東縣延平鄉、卑南鄉至台東市北方轉東南方向至海濱。	地形判釋、地層分布狀況、PS 速度場分布、GPS 速度場資料	Hsu, 1956；游明聖，1997；陳柏村等，2006；Champenois et al., 2012；Chen et al., 2013；陳文山等，2014
	長度(km)	A：20 B：25		
	寬度(km)	39.3	深度/sin 傾角 （0~22 km：55 度，22 km 以下：40 度）	本計畫推估
	破裂深度（km）	26	地震重新定位	Wu et al., 2006
		23	2006 年 4 月間臺東地區的地震重新定位	顏郁捷，2008
		30	速度構造剖面及地震重定位	Kuochen et al., 2012；陳文山等，2014
		>13	間震期水平及垂直滑移速率推估	紀權宥，2006
	面積(km^2)	A：786 B：983	長度×寬度	本計畫推估
	走向	東北走向，進入臺東平原轉為南南西向	地形判釋、PS 速度場分布、GPS 速度場資料	Hsu,1956；陳柏村等，2006；Champenois et al., 2012；Chen et al., 2013
	傾斜角度(度)	0-18km 傾角 60°，18km 以下傾角 29°	地震重新定位	Wu et al.,2006
		0-17km 傾角 57°，17km 以下傾角 22°	2006 年 4 月間臺東地區的地震重新定位	顏郁捷，2008
		0-22km 傾角 55°，22km 以下傾角 40°	速度構造剖面及地震重定位	Kuochen et al.,2012
		0-8km 傾角 53°，8km 以下傾角 30°	間震期水平及垂直滑移速率推估	紀權宥，2006
		70°	同震位移推估	姜彥麟，2007
	斷層機制	逆斷層帶左移分量	大地測量	Yu and Lee,1986；Lee et al.,1998；陳柏村等，2006

	短期滑移速率（mm/yr）	在新良地區跨過利吉斷層約有 15-18mm/yr 的壓縮量；在卑南山臺地南緣，跨過利吉斷層約有 10mm/yr 的壓縮量	GPS 速度場計算	紀權宥，2006
		抬升速率約 7mm/yr	PS 速度場	Peyret et al.,2011
		永安-瑞源剖面：抬升速率約 28-35mm/yr 鹿野剖面：抬升速率約 18 mm/yr 南卑南山-北臺東剖面：抬升速率約 20mm/yr	大地水準測量	Chen et al.,2012
		永安剖面：平行斷層走向約 35mm/yr，垂直斷層走向約 30mm/yr 龍田剖面：平行斷層走向約 27mm/yr，垂直斷層走向則有 8mm/yr 北卑南山剖面：平行斷層走向約 12mm/yr，垂直斷層走向則有 22mm/yr	地表 GPS 速度場變形測量	Chen et al.,2013
	長期滑移速率 (mm/yr)	14.3~19.1（抬升速率）	卑南溪岸的河階定年及高程推估	Shyu et al., 2008
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	1.62	三維塊體模型，資料為臺灣 GPS 觀測網所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量(m)	-	-	-
	最大可能地震規模 (Mw)	A：6.9 B：7.0	Mw =3.98+1.02 log A（逆斷層）	Wells and Coppersmith, 1994
		A：6.9 B：7.0	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1,\sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1,\frac{A}{H^2\beta})]/2} + const.,$	Yen and Ma, 2011
	地震復發間隔(年)	50-100	特徵地震模式權重最高之地震復發間隔時間區間	本計畫推估
	最近一次活動時間	未知	-	-

3-6-3 鹿野-利吉斷層系統破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估鹿野-利吉斷層系統之破裂，鹿野和利吉權重各為 0.5，每條斷層各有兩種破裂模式，共有 4 種破裂事件。鹿野斷層：鹿野 A 為地調所鹿野斷層位置破裂，鹿野 B 為鹿野斷層+東南延伸破裂（圖 3-6.21）；利吉斷層：利吉 A 為利吉斷層近期活動位置破裂，利吉 B 為地調所利吉斷層位置破裂（圖 3-6.22）。鹿野 A 權重為 0.6，鹿野 B 權重為 0.4；而利吉 A 與 B 給予相同權重。所有破裂模式之權重分配如圖 3-6.24 所示。

鹿野-利吉斷層之傾角及破裂深度，主要參考 P 波速度構造剖面、地震震源分布、2006 年臺東地震序列分布等資料（圖 3-6.23）。依據 P 波速度構造剖面及地震震源分布，鹿野斷層在深度 0-5 公里的傾角約 30 度，誤差值加減 5 度作為邏輯樹上下界，而後銜接至利吉斷層。權重分配為「0-3 公里 25 度，3-22 公里 55 度，22 公里以下 40 度，權重 0.2」;「0-5 公里 30 度，5-22 公里 55 度，22 公里以下 40 度，權重 0.6」;「0-7 公里 35 度，7-22 公里 55 度，22 公里以下 40 度，權重 0.2」。利吉斷層在深度 0-22 公里的傾角約 55 度，誤差值加減 5 度作為邏輯樹上下界，深度 22 公里以下約 40 度，權重分配為「0-22 公里 50 度，22 公里以下 40 度，權重 0.2」;「0-22 公里 55 度，22 公里以下 40 度，權重 0.6」;「0-22 公里 60 度，22 公里以下 40 度，權重 0.2」。鹿野-利吉斷層系統深度則以 30 公里當作邏輯樹中值，誤差值 2 公里作為邏輯樹上下界，破裂深度權重為 28 公里（0.2）、30 公里（0.6）、32 公里（0.2）。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith（1994）及 Yen and Ma（2011）之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith（1994）之標準差作為上下之分支，表 3-6.6 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。

鹿野-利吉斷層系統之滑移速率，鹿野斷層長期滑移速率，依據 Shyu et al.（2008）龍田階地定年結果，約 8.8~9.2 mm/yr（平均為 9.0 mm/yr）、陳文山等（2010）永安槽溝開挖為 5.4 mm/yr、鑽井定年結果為 9.8~12.2 mm/yr（平均為 11.0 mm/yr），設定鹿野斷層邏輯樹中值為 9.0 mm/yr（0.4），上下值則為 11.0 mm/yr（0.3）及 5.4mm/yr（0.3）。而利吉斷層部分，依據 Shyu et al.（2008）卑南溪階地定年結果為 17.5~23.3 mm/yr（平均為 20.4 mm/yr），本計畫取邏輯樹中值為 20.4 mm/yr（0.4），上下值則為 23.3 mm/yr（0.3）及 17.5 mm/yr（0.3）。

鹿野-利吉斷層系統各節點權重的分配詳如圖 3-6.24 所示。

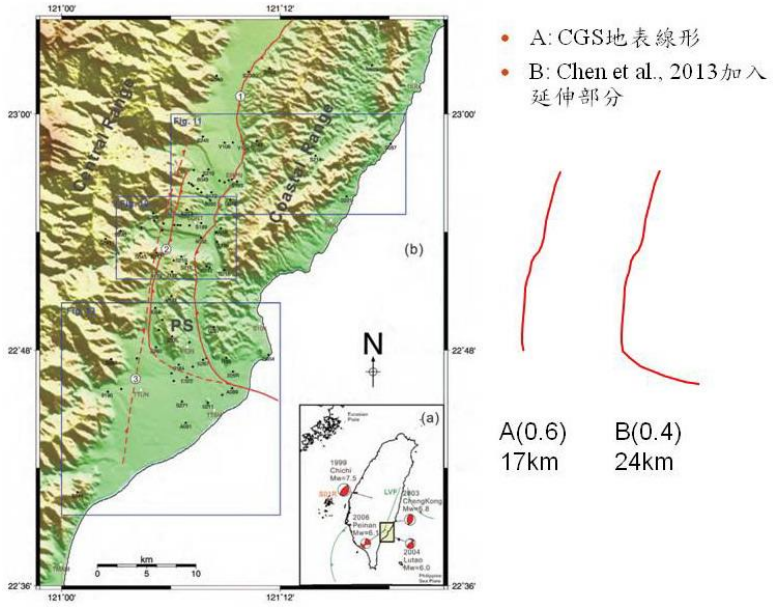


圖 3-6.21：鹿野斷層破裂模式及權重分配。

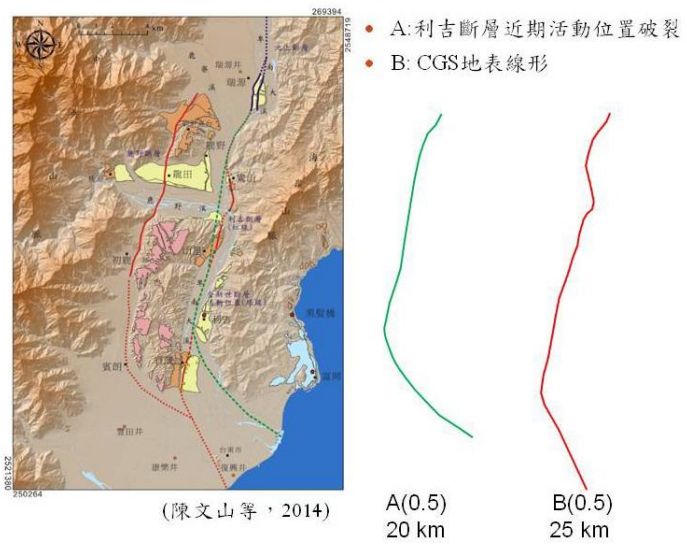


圖 3-6.22：利吉斷層破裂模式及權重分配。

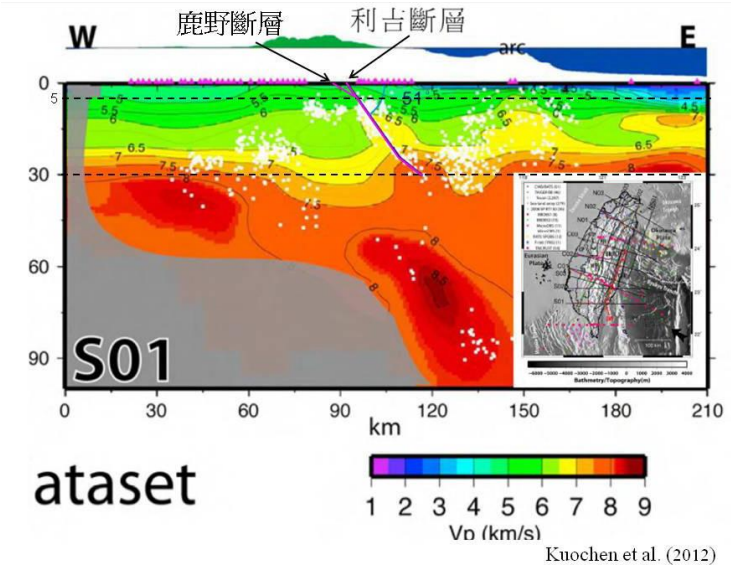


圖 3-6.23：參考速度構造剖面及地震分布推估鹿野斷層及利吉斷層幾何面。

表 3-6.6：鹿野-利吉斷層系統之破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km^2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
							-σ	中值	+σ	
鹿野	A	17	30	43.2	0~5 km：30 度，下接利吉斷層	734	6.6	6.9	7.2	6.9
	B	24	30	43.2	0~5 km：30 度，下接利吉斷層	1037	6.7	7.0	7.3	7.0
利吉	A	20	30	39.3	0~22 km：55 度，22 km 以下：40 度	786	6.7	6.9	7.1	6.9
	B	25	30	39.3	0~22 km：55 度，22 km 以下：40 度	983	6.8	7.0	7.2	7.0
	權重						0.1	0.3	0.1	0.5

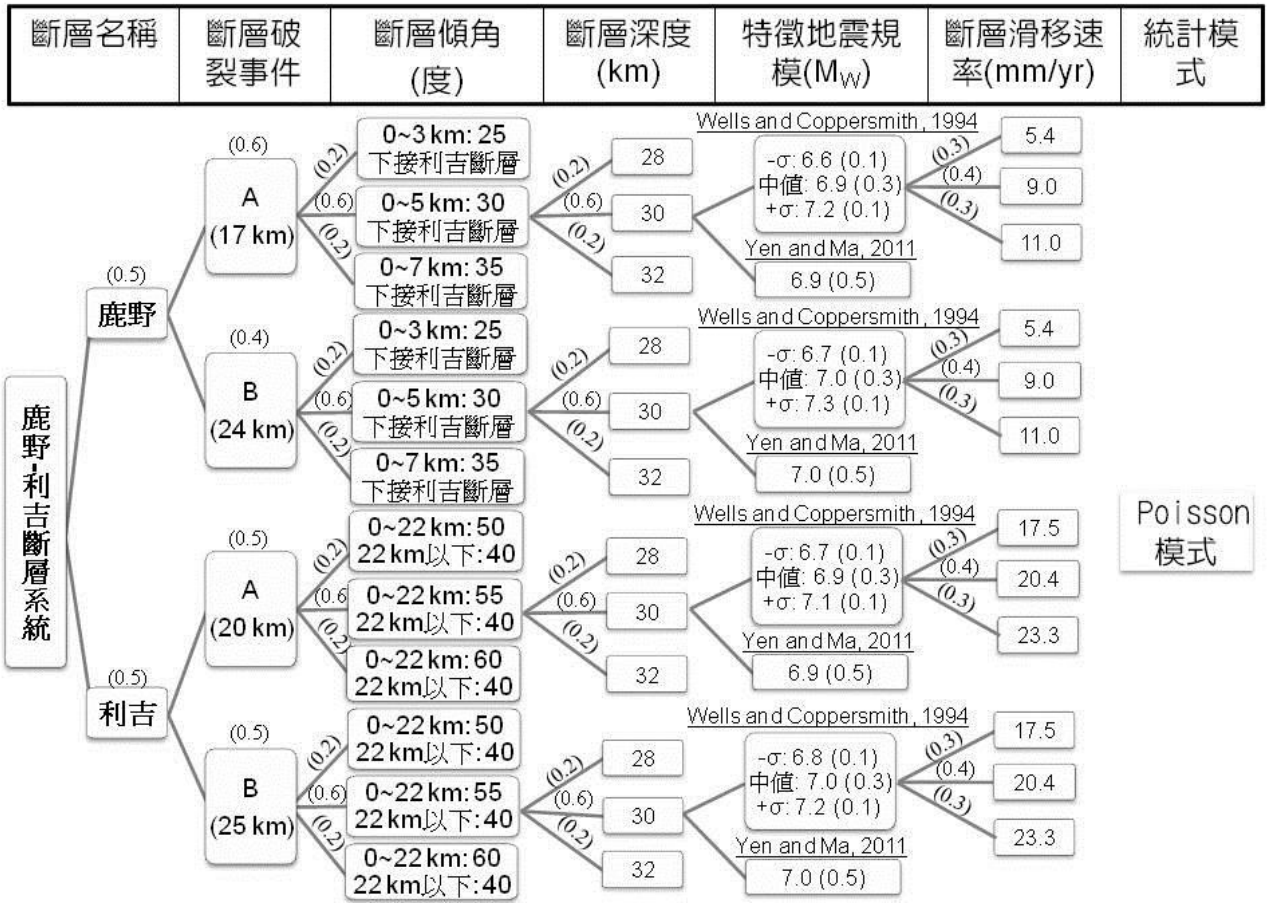


圖 3-6.24：鹿野-利吉斷層系統邏輯樹。

3-6-4 鹿野-利吉斷層系統特徵地震模式

鹿野-利吉斷層系統各破裂事件的參數均可由特徵地震模式（詳附錄 3-1）得到一地震復發間隔時間，圖 3-6.25 至圖 3-6.28 為破裂事件取邏輯樹傾角及深度中間值之特徵地震模式分布情形。

圖 3-6.24 之鹿野-利吉斷層系統邏輯樹可得到 432 個分支，每個分支皆有其權重，初步統計，圖 3-6.29 為 4 種破裂事件之規模-權重分布圖，其中破裂模式鹿野 A 以規模 6.9 之權重最高，破裂模式鹿野 B 以規模 7.1 之權重最高，破裂模式利吉 A 以規模 7.0 之權重最高，破裂模式利吉 B 以規模 7.1 之權重最高。

經由特徵地震模式計算之後，圖 3-6.30 為 4 種破裂事件之地震復發間隔時間-權重分布圖，破裂模式鹿野 A 在地震復發間隔時間 100 年~150 年間有較高之權重，而破裂模式鹿野 B 在地震復發間隔時間 150 年~200 年間有較高之權重，而破裂模式利吉 A 在地震復發間隔時間 50 年~100 年間有較高之權重，而破裂模式利吉 B 在地震復發間隔時間 50 年~100 年間有較高之權重。

將 4 種破裂模式之規模-權重加總即得到圖 3-6.31（a）之鹿野-利吉斷層系統規模-權重分布圖，同理，將地震復發間隔時間-權重加總即得到圖圖 3-6.31（b）之鹿野-利吉斷層系統地震復發間隔時間-權重分布圖。

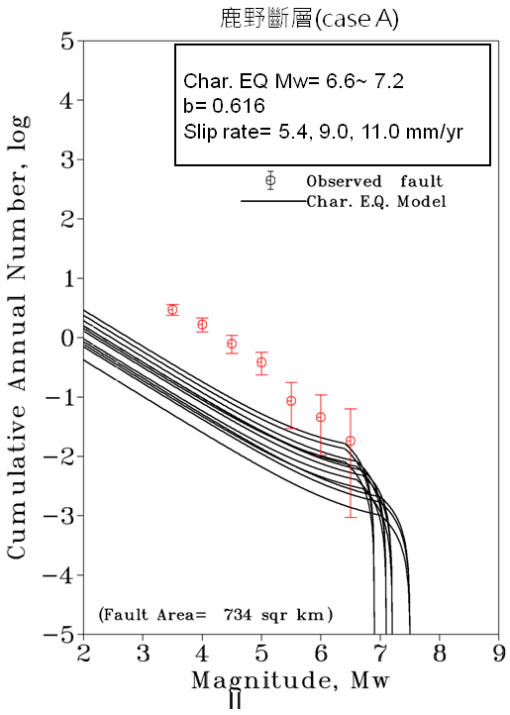


圖 3-6.25：鹿野 A 事件之特徵地震模式。

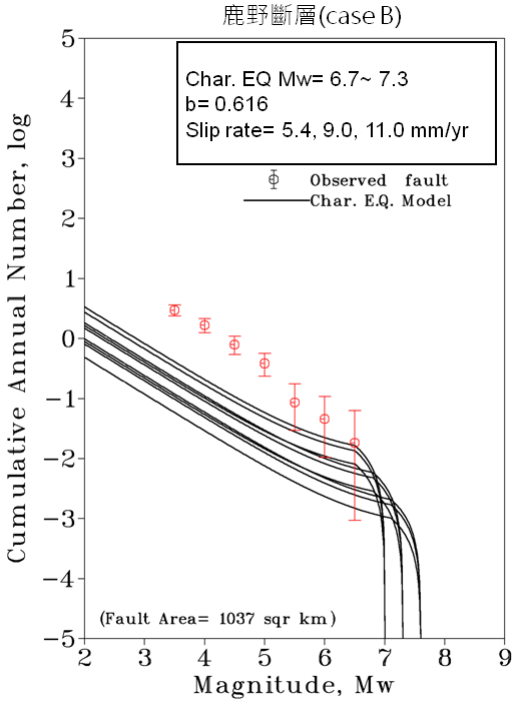


圖 3-6.26：鹿野 B 事件之特徵地震模式。

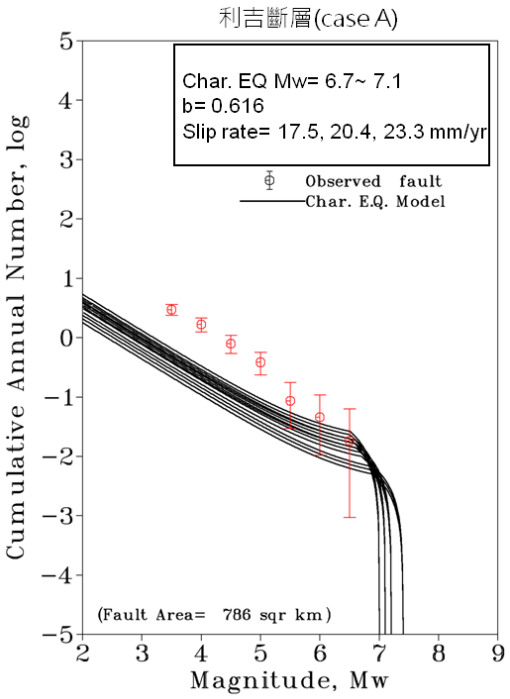


圖 3-6.27：利吉 A 事件之特徵地震模式。

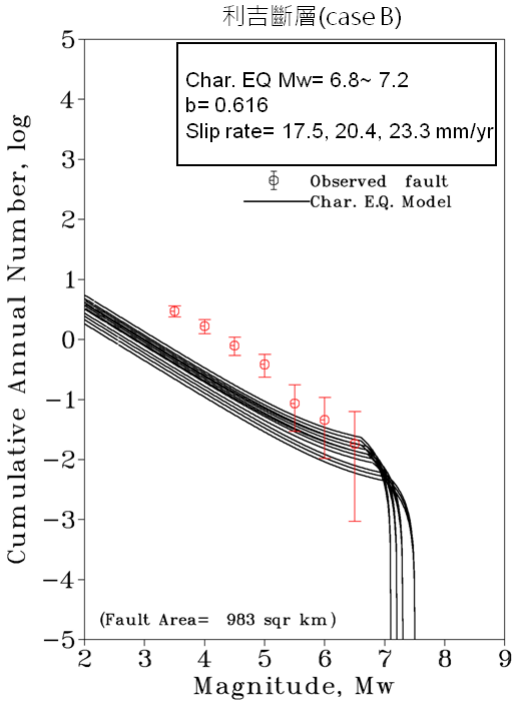


圖 3-6.28：利吉 B 事件之特徵地震模式。

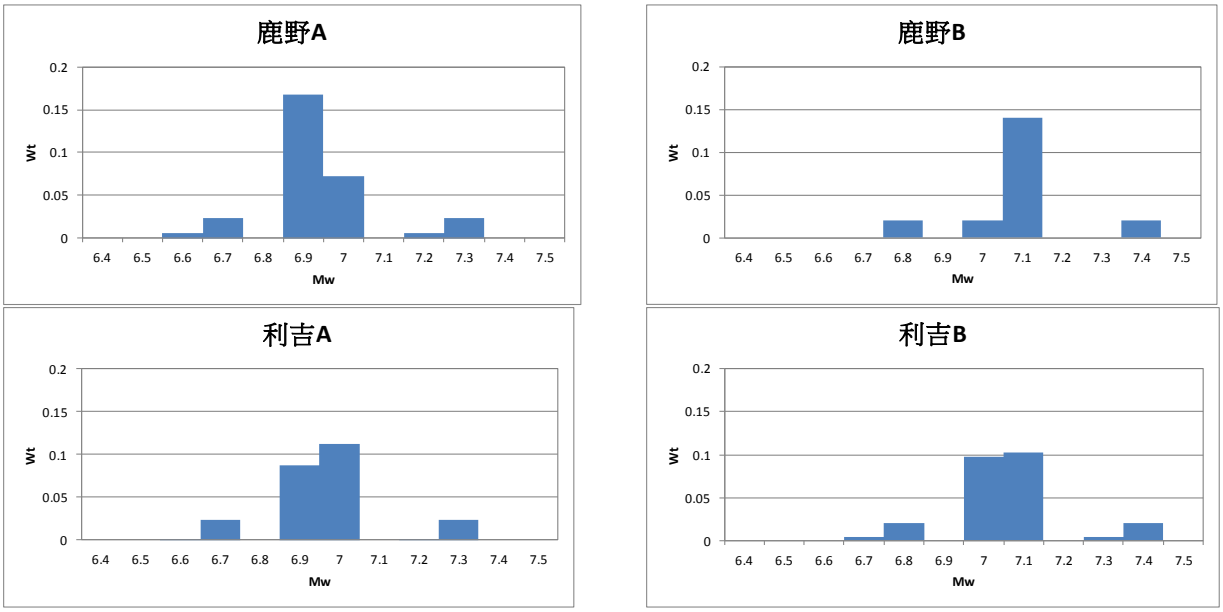


圖 3-6.29：鹿野-利吉斷層系統之規模-權重分布圖，橫軸為地震矩規模，縱軸為各邏輯樹分支位於該規模區間之權重總和。

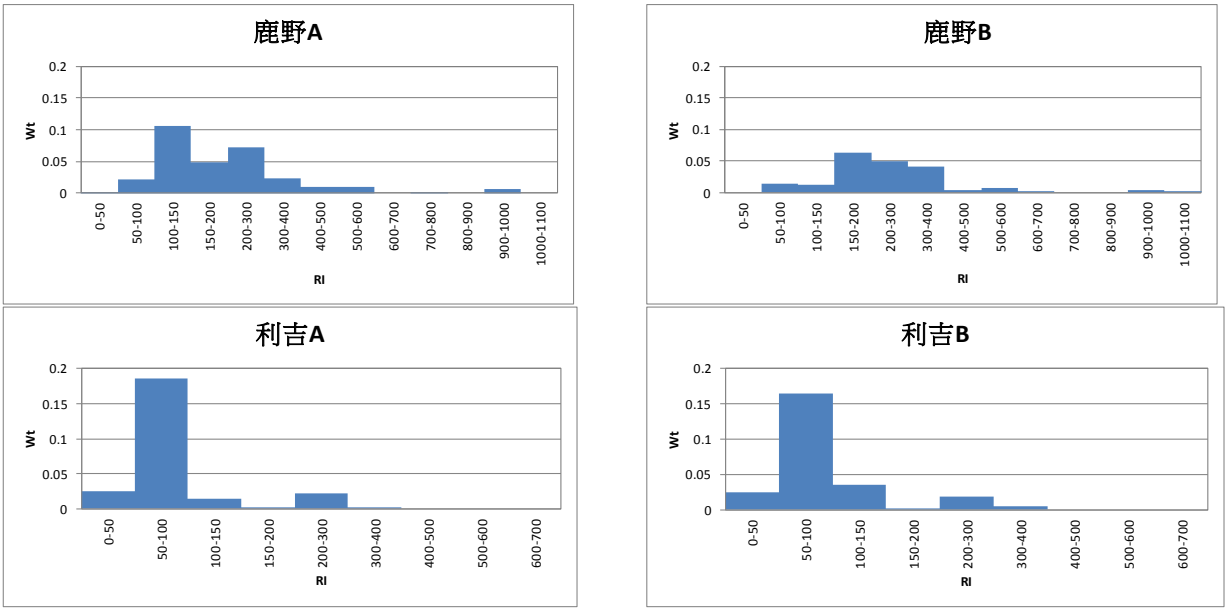


圖 3-6.30：鹿野-利吉斷層系統之地震復發間隔時間-權重分布圖，橫軸為地震復發間隔時間，縱軸為各邏輯樹分支位於該地震復發間隔時間之權重總和。

（a）

（b）

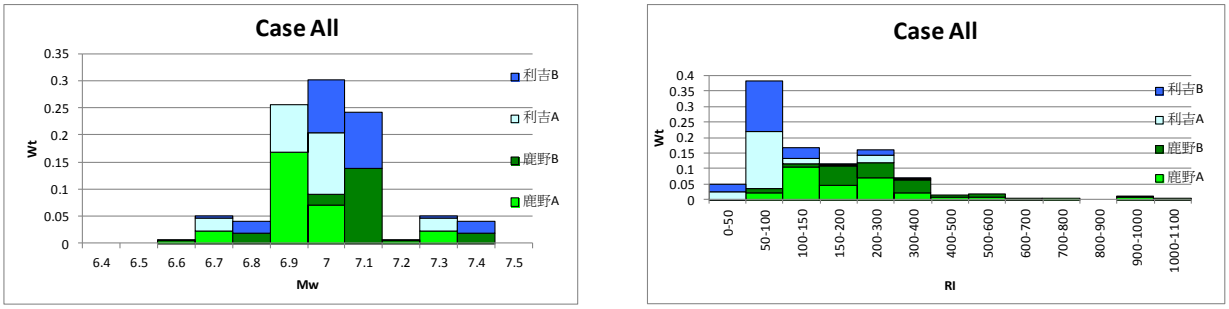


圖 3-6.31：（a）鹿野-利吉斷層系統之全部邏輯樹分支規模-權重分布圖，（b）鹿野-利吉斷層系統之全部邏輯樹分支地震復發間隔時間-權重分布圖。

3-6-5 鹿野-利吉斷層系統發震機率之推估

在獲得各破裂事件之地震復發間隔時間後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算鹿野-利吉斷層系統未來 30、50 及 100 年的發生機率，鹿野-利吉斷層系統最後一次發生時間為未知，本計畫採用 Poisson 模式進行評估。

表 3-6.7 為鹿野-利吉斷層系統評估之結果，以 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 24.4%、36.1%及 56.0%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 13.4%、20.3%及 32.9%。

將鹿野-利吉斷層系統之發生率拆解為鹿野斷層及利吉斷層，可得到各別斷層之發生機率，

表 3-6.8 為鹿野斷層評估之結果，以 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 7.8%、12.2%及 20.7%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 3.3%、5.2%及 9.4%。

表 3-6.9 為利吉斷層評估之結果，以 Poisson 模式得到未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 16.5%、23.9%及 35.3%；未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 7.0 以上之機率為 10.1%、15.1%及 23.5%。

表 3-6.7：鹿野-利吉斷層系統發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
M ≧6.5	24.4%	36.1%	56.0%
M ≧7.0	13.4%	20.3%	32.9%

表 3-6.8：鹿野斷層發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
M ≧6.5	7.8%	12.2%	20.7%
M ≧7.0	3.3%	5.2%	9.4%

表 3-6.9：利吉斷層系統發生機率評估。

特徵地震矩規模 M（Mw）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
	Poisson	Poisson	Poisson
M ≧6.5	16.5%	23.9%	35.3%
M ≧7.0	10.1%	15.1%	23.5%

3-7 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3-7.1中。
2. 圖3-7.1~圖3-7.3除了展示臺灣活動斷層之分布外，同時標示了活動斷層未來30年、50年、100年發生地震矩規模6.5以上之機率。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. 本計畫在評估米崙斷層系統之破裂，考慮1種破裂情形，米崙斷層南段海域延伸2公里+陸域8公里+東北海域延伸25公里，總長度35公里。米崙斷層最後一次發生時間為西元1951年， BPT模式評估之結果，未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為30.4％、45.6％及70.1％；發生地震矩規模7.0以上之機率為24.0％、37.6％及60.8％。
4. 嶺頂斷層僅考慮整段破裂之模式，長度為32公里。嶺頂斷層最後一次發生時間可能為西元1951年，本計畫分別採用BPT模式及Poisson進行評估。以BPT模式得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為9.1％、15.7％及30.4％；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為7.0％、12.6％及25.7％。以Poisson模式得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為11.6％、18.3％及32.2％；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為9.9％、15.8％及28.1％。
5. 在評估瑞穗斷層之破裂模式，採用整段破裂模式，長度33公里。瑞穗斷層最後一次發生時間為西元1972年，本計畫採用BPT模式進行評估，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為31.1％、49.4％及76.7％；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為23.8％、40.5％及66.8％。
6. 本計畫評估奇美斷層僅有一種破裂模式，其長度為30公里。奇美斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用Poisson模式進行評估。得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為5.8％、9.3％及17.5％；發生地震矩規模7.0以上之機率為1.8％、2.9％及5.5％。
7. 池上斷層有和玉里斷層形成系統破裂之可能性，因此考慮池上斷層及玉里斷層為一個系統。由於池上斷層間震期會藉由潛移釋放部分能量，因此需考慮折減地震矩率以符合目前觀測之現況。玉里-池上斷層系統最後一次發生時間為西元2003年，本計畫採用BPT模式進行評估，得到未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率未折減為33.3％、53.4％及80.2％，考慮震矩折減為25.8％、45.4％及74.6％；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率未折減為27.0％、46.5％及72.6％，考慮震矩折減為13.8％、27.6％及48.9％；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.5以上之機率未折減為1.58％、4.49％及11.71％，考慮震矩折減為0.01％、0.07％及0.47％。
8. 本計畫在評估鹿野-利吉斷層系統之破裂，鹿野和利吉權重各為0.5，每條斷層各有兩種破裂模式，共有4種破裂事件。鹿野-利吉斷層系統最後一次發生時間為未知，本計畫採用Poisson模式進行評估，鹿野斷層評估之結果，未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為7.8％、12.2％及20.7％；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為3.3％、5.2％及9.4％。利吉斷層評估之結果，未來30年、50年及100年發生地震矩規模6.5以上之機率為16.5％、23.9％及35.3％；未來30年、50年及100年發生地震矩規模7.0以上之機率為10.1％、15.1％及23.5％。

表 3-7.1：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)
木屐寮-六甲	木屐寮	A	13	10(0.2) 12(0.6) 14(0.2)	423	逆移	0~6km, 35 度(0.3) 40 度(0.4) 45 度(0.3) 6km 以下, 15 度	7.9(0.3) 9.1(0.4) 10.3(0.3)	1 萬年以內	6.4(0.1) 6.7(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	六甲	B	22		715					6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.1(0.1)	6.9(0.5)
	木屐寮+六甲	C	35		1138					6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.1(0.5)
新化	A		12	10(0.2) 12.5(0.6) 15(0.2)	152.4	帶垂直分量的右移	70(0.2) 80(0.6) 90(0.2)	6.27(0.5) 2.72(0.5)	A.D.1946	6.0(0.1) 6.2(0.3) 6.4(0.1)	6.2(0.5)
	B		24		304.8					6.3(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.5(0.5)
台南斷層-後甲里斷層系統	A		12	6(0.2) 10(0.6) 14(0.2)	374	逆移	0~4km, 30 度 4km 以下, 15 度	2.5(0.2) 5.0(0.6) 7.5(0.2)	A.D.1862(?)	6.4(0.1) 6.6(0.3) 6.9(0.1)	6.6(0.5)
	B		30		935					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
左鎮	A		20	8(0.2) 10(0.6) 12(0.2)	212	左移	60(0.2) 70(0.6) 80(0.2)	11.33(0.5) 3.85(0.5)	-	6.1(0.1) 6.4(0.3) 6.6(0.1)	6.3(0.5)
小崗山	A		9	10(0.2) 11(0.6) 12(0.2)	230	逆移	0~10km, 40 度(0.2) 45 度(0.6) 50 度(0.2) 10km 以下, 5 度	2.1(0.3) 2.4(0.4) 2.8(0.3)	更新世晚期	6.2(0.1) 6.5(0.3) 6.7(0.1)	6.4(0.5)
	B		31		794					6.7(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
旗山	A		30	10(0.2) 13(0.6) 16(0.2)	459	逆移	50(0.2) 58(0.6) 65(0.2)	1.1(0.3) 1.5(0.4) 1.8(0.3)	距今 7,189 年	6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.7(0.5)
	B		62		949					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	C		71		1086					6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	D		103		1576					7.0(0.1) 7.2(0.3) 7.5(0.1)	7.2(0.5)
潮州	A		44	15(0.2) 17.5(0.6) 20(0.2)	889	逆移斷層兼具左移	50(0.2) 60(0.6) 70(0.2)	0.46(0.3) 1.39(0.4) 2.31(0.3)	更新世晚期	6.7(0.1) 7.0(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
	B		60		1212					6.9(0.1) 7.1(0.3) 7.4(0.1)	7.1(0.5)
	C		30		606					6.6(0.1) 6.8(0.3) 7.1(0.1)	6.8(0.5)
	D		46		930					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	E		74		1495					6.9(0.1) 7.2(0.3) 7.4(0.1)	7.2(0.5)
	F		90		1819					7.0(0.1) 7.3(0.3) 7.5(0.1)	7.3(0.5)
	G		90		1819					7.0(0.1) 7.3(0.3) 7.5(0.1)	7.3(0.5)
	H		106		2142					7.1(0.1) 7.3(0.3) 7.6(0.1)	7.4(0.5)
恆春	A		18	14(0.2) 16(0.6) 18(0.2)	341	逆移斷層兼具左移	45(0.2) 57.5(0.6) 70(0.2)	1.5(0.3) 4.0(0.4) 6.5(0.3)	更新世晚期	6.4(0.1) 6.6(0.3) 6.9(0.1)	6.5(0.5)
	B		23		436					6.5(0.1) 6.7(0.3) 7.0(0.1)	6.6(0.5)
	C		41		778					6.7(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
米崙	A		35	25(0.2) 30(0.6) 35(0.2)	1159	左移斷層兼逆移	60(0.2) 65(0.6) 70(0.2)	9.08(0.2) 14.56(0.6) 20.03(0.2)	A.D.1951	6.9(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.1(0.5)

嶺頂	A		32	25(0.2) 30(0.6) 35(0.2)	1059	左移斷層兼逆移	60(0.2) 65(0.6) 70(0.2)	10.95(0.5) 3.40(0.5)	A.D.1951(?)	6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
瑞穗	A		33	25(0.2) 30(0.6) 35(0.2)	1092	逆移斷層兼具左移	60(0.2) 65(0.6) 70(0.2)	14.00(0.2) 19.30(0.6) 24.59(0.2)	A.D.1972	6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
奇美	A		30	20(0.2) 25(0.6) 30(0.2)	753	逆移	80(0.2) 85(0.6) 90(0.2)	3.68(0.5) 1.62(0.5)	更新世晚期	6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
玉里-池上斷層系統	玉里 A	A	23	25(0.2) 27(0.6) 29(0.2)	942	逆移	0~10 km, 47 度(0.2) 51 度(0.6) 55 度(0.2) 下接池上斷層	10.5(0.3) 18.8(0.4) 27.0(0.3)	A.D.1951	6.7(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	玉里 B	B	20		820	左移			A.D.1951	6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
	池上北	C	27		1072	逆移斷層兼具左移	0~20 km, 55 度(0.2) 60 度(0.6) 65 度(0.2) 20 km 以下, 25 度	28.9(0.3) 37.8(0.4) 46.7(0.3)	A.D.1951	6.8(0.1) 7.1(0.3) 7.4(0.1)	7.0(0.5)
	池上南	D	38		1509		0~20 km, 55 度(0.2) 60 度(0.6) 65 度(0.2) 20 km 以下, 25 度		A.D.2003	6.9(0.1) 7.2(0.3) 7.5(0.1)	7.2(0.5)
	池上+玉里 A	E	68		2729		同玉里、池上數值		A.D.1951	7.1(0.1) 7.4(0.3) 7.7(0.1)	7.6(0.5)
	池上+玉里 B	F	65		2607		同玉里、池上數值		A.D.1951	7.1(0.1) 7.4(0.3) 7.7(0.1)	7.5(0.5)
	池上全	G	65		2581		0~20 km, 55 度(0.2) 60 度(0.6) 65 度(0.2) 20 km 以下, 25 度		A.D.1951	7.1(0.1) 7.4(0.3) 7.7(0.1)	7.5(0.5)
鹿野-利吉斷層系統	鹿野	A	17	28(0.2) 30(0.6) 32(0.2)	734	逆移	0~3 km, 25 度(0.2) 0~5 km, 30 度(0.6) 0~7 km, 35 度(0.2) 下接利吉斷層	5.4(0.3) 9.0(0.4) 11.0(0.3)	<1,890-2,110 yr BP	6.6(0.1) 6.9(0.3) 7.2(0.1)	6.9(0.5)
		B	24		1037					6.7(0.1) 7.0(0.3) 7.3(0.1)	7.0(0.5)
	利吉	A	20		786	逆移斷層兼具左移	0~22 km, 50 度(0.2) 55 度(0.6) 60 度(0.2) 22 km 以下, 40 度	17.5(0.3) 20.4(0.4) 23.3(0.3)		6.7(0.1) 6.9(0.3) 7.1(0.1)	6.9(0.5)
		B	25		983					6.8(0.1) 7.0(0.3) 7.2(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。

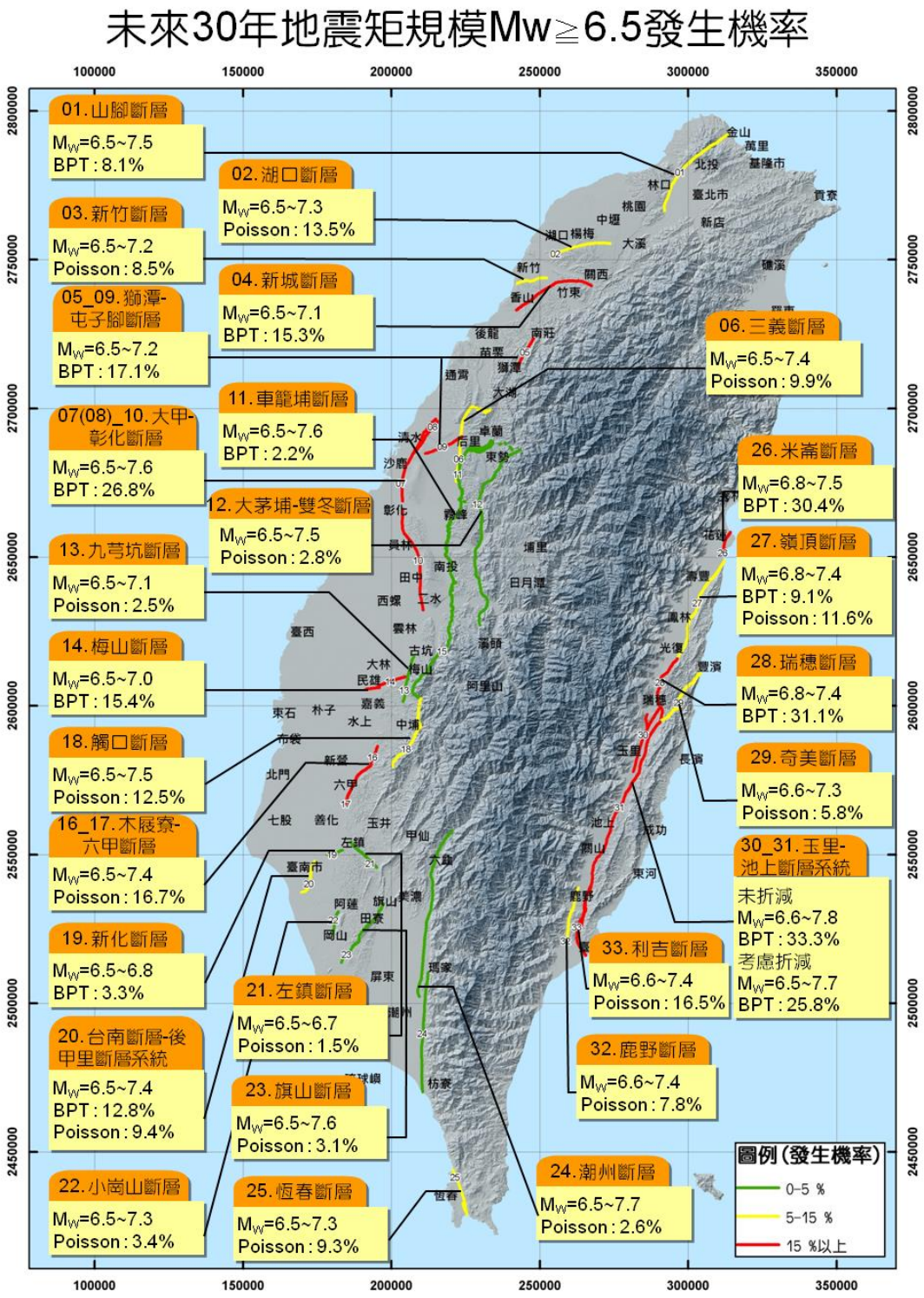


圖 3-7.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析（seismic hazard analysis）始能獲得。

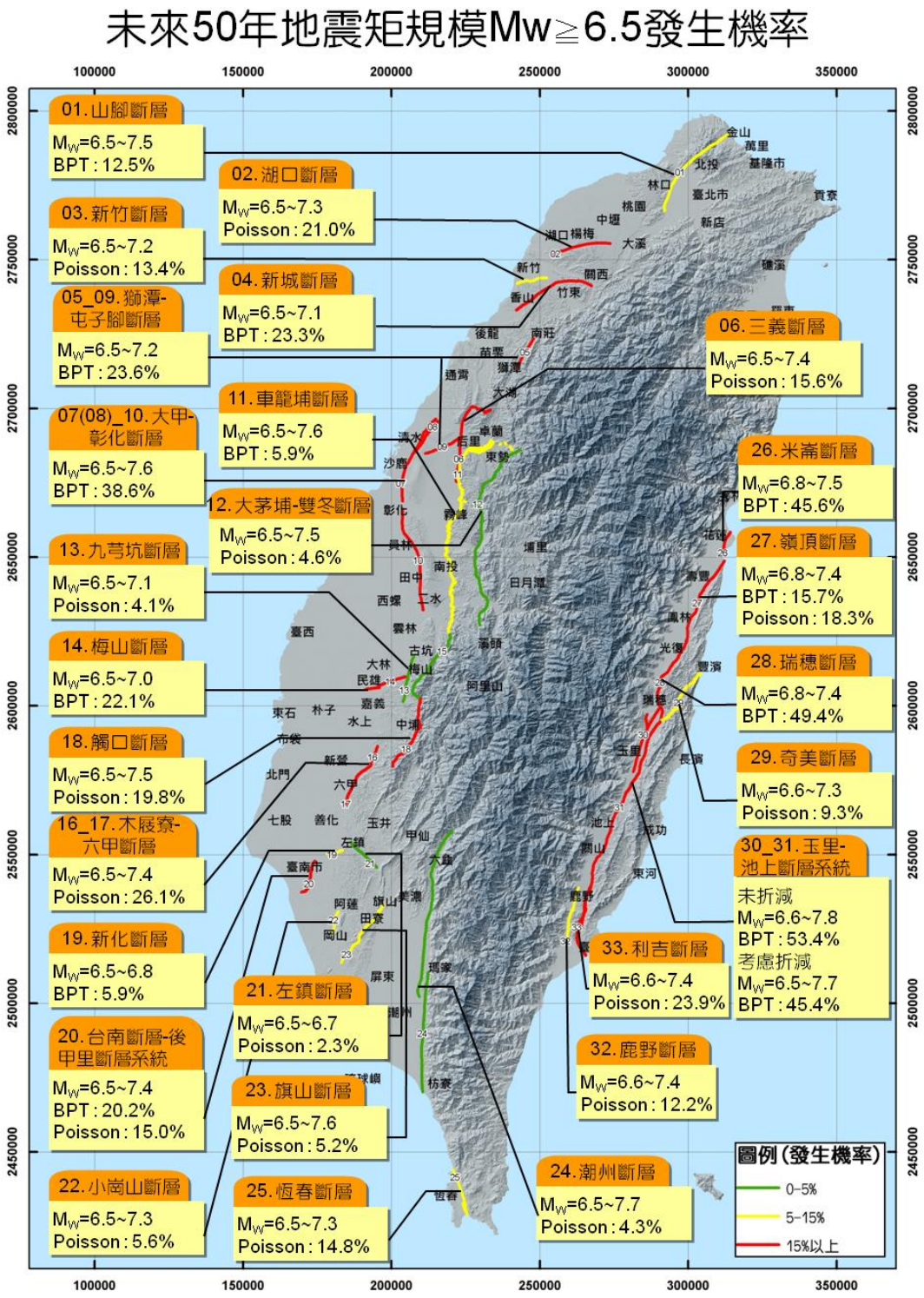


圖 3-7.2：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(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。

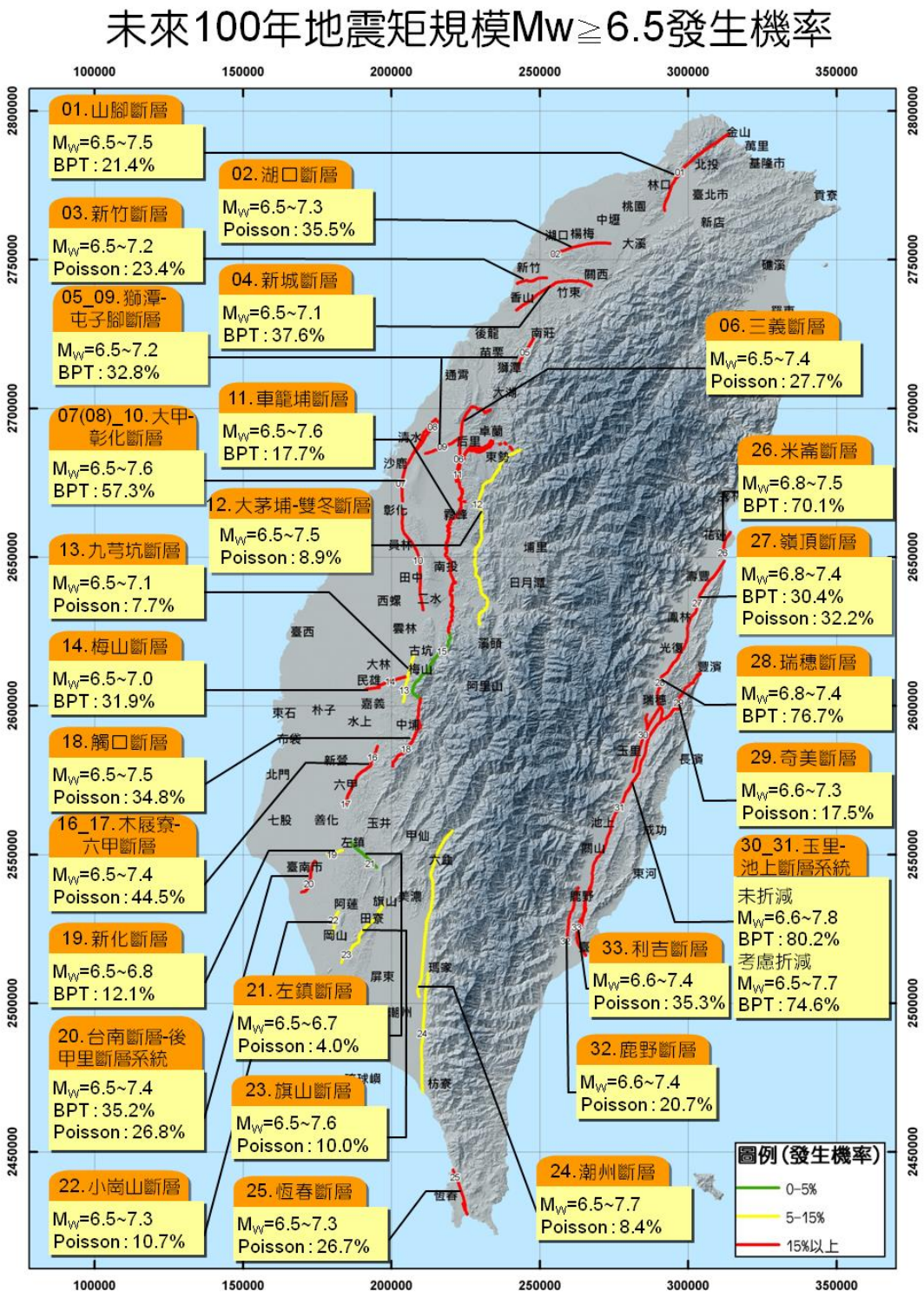


圖 3-7.3：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震矩規模 6.5 以上發生機率。

(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。

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正確的修正模式，希望能將可以移除的各種效應盡量移除，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必先移除地下水效應（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建構，無法套用之前的模式，需要進一步的分析。
2. 新竹地區的地下水資料則較不完全（圖 4-1.4），大坪測站（BMMT）無地下水的觀測資料；瑞峰測站（LMMT）的地下水資料與其井下應變儀資料一樣，不太完全；新樂測站（CINT）的地下水資料變化不大，約在 61~64 公尺之間，其對井下應變儀的效應則約為 4.0 μstrain/meter；梅花測站（PFMT）的地下水變化約在 115~132 公尺之間，於 2005 年至今持續的下降，水位的年變化不大，且無週期性，但這一測站的井下應變儀資料並看不出持續下降的變化，可能是因為在移除井孔效應時，長期的線性變化也一併被移除了。所以對新竹地區的應變資料無法先移除地下水的影響量。
3. 臺北地區的地下水資料較新竹測網的地下水資料完整（圖 4-1.5），各測站水位長期趨勢大致不變，水位變化與井下應變儀資料並沒有像嘉義地區那麼高相關（圖 4-1.6），是否可以直接移除地下水的影響量需要進一步的研究。

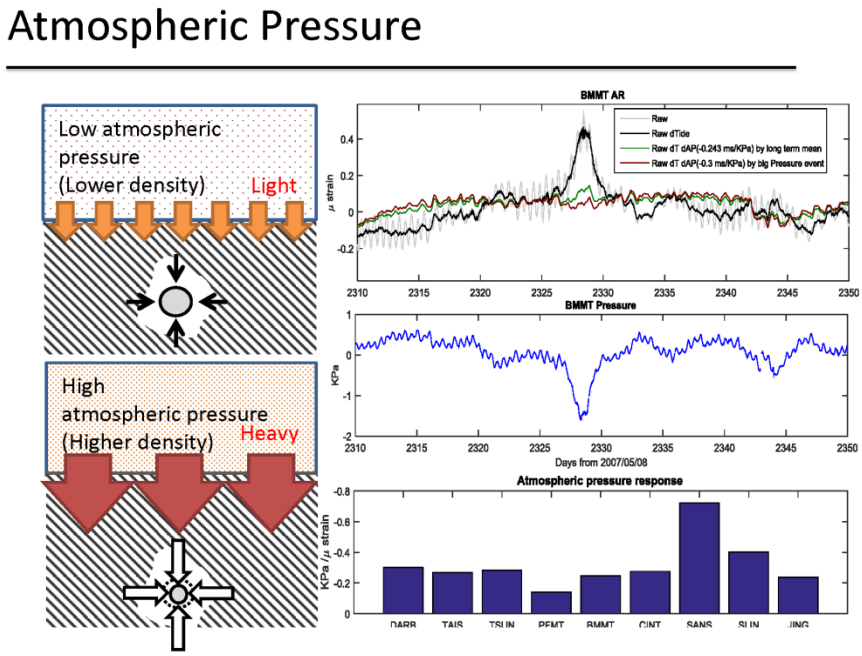


圖 4-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。氣壓的上升對應變儀面應變造成壓力增加而產生壓縮，因此氣壓的變化與面應變的變化是負相關。

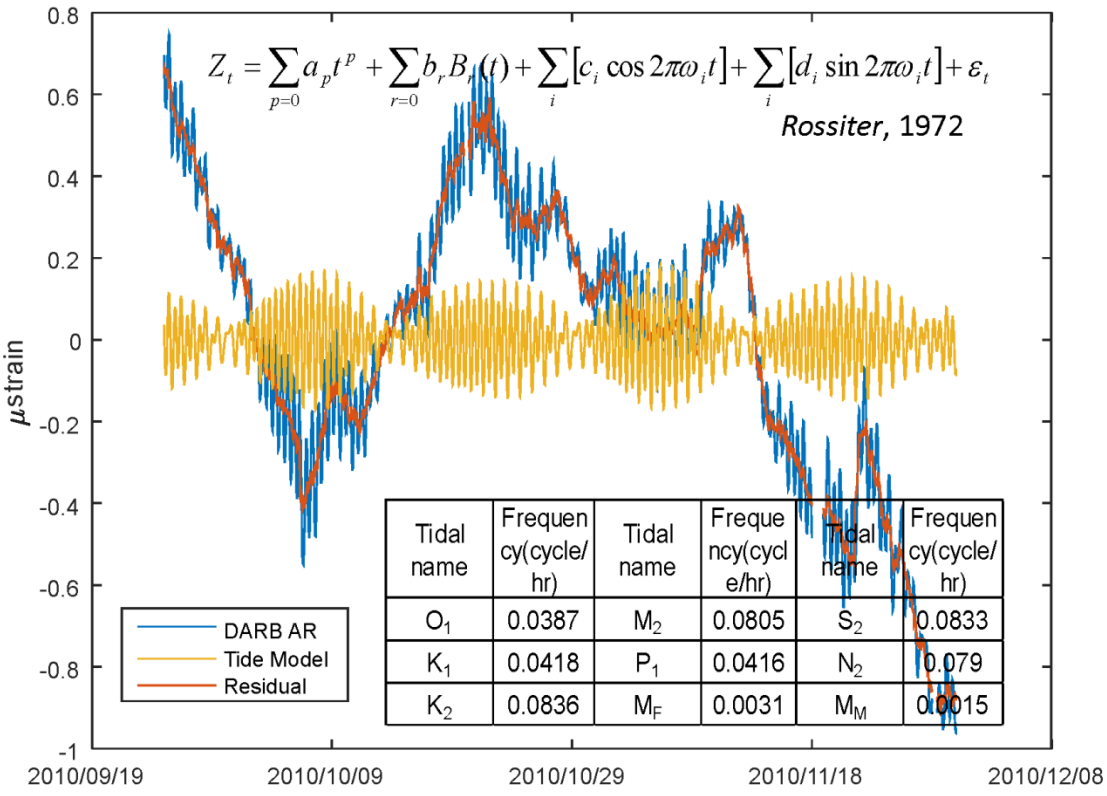


圖 4-1.2：井下應變儀中地潮分量的評估。利用固定幾個主要起潮頻率的正弦函數與餘弦函數所組成的時間序列，再加上氣壓的時間序列，用多變數迴歸法估計每一個時間序列對潮位資料時間序列的響應，詳細理論請參考附錄 1-3。藍色線段是原始面應變資料、黃色線段為所評估出來的地潮分量，而橘色線段為原始面應變扣掉地潮分量後的殘差。

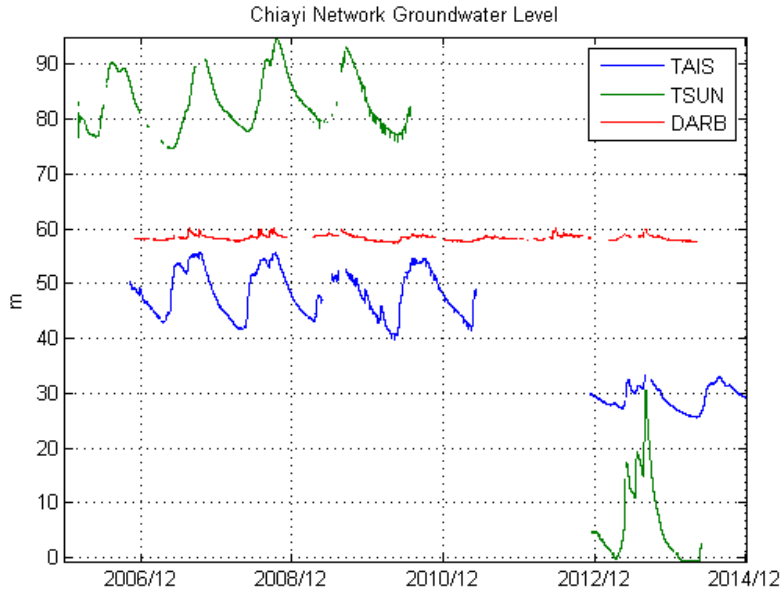


圖 4-1.3：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。

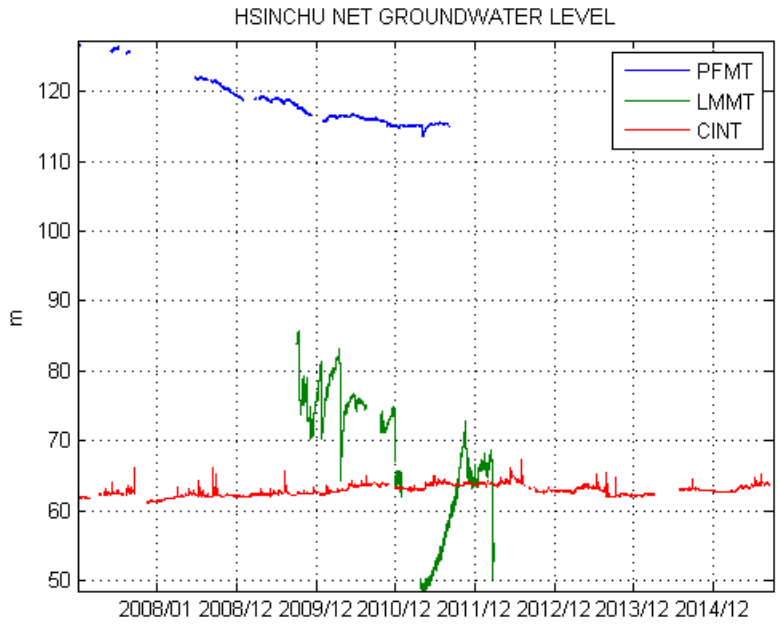


圖 4-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花測站（PFMT）地下水位持續下降。

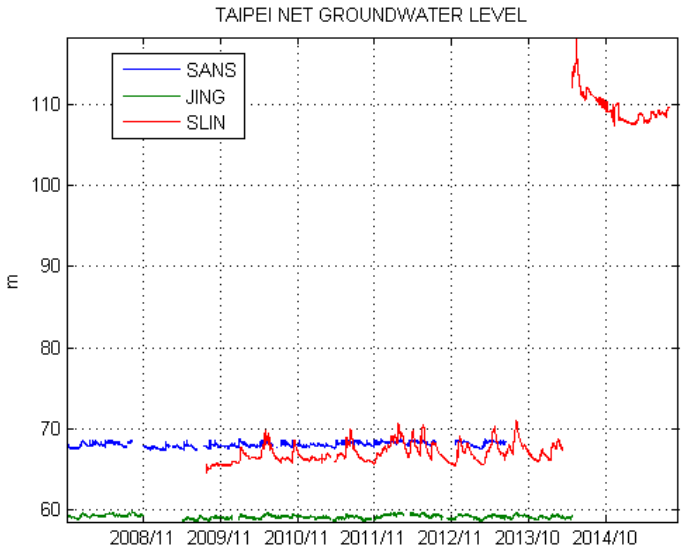


圖 4-1.5：臺北地區地下水各測站水位資料。

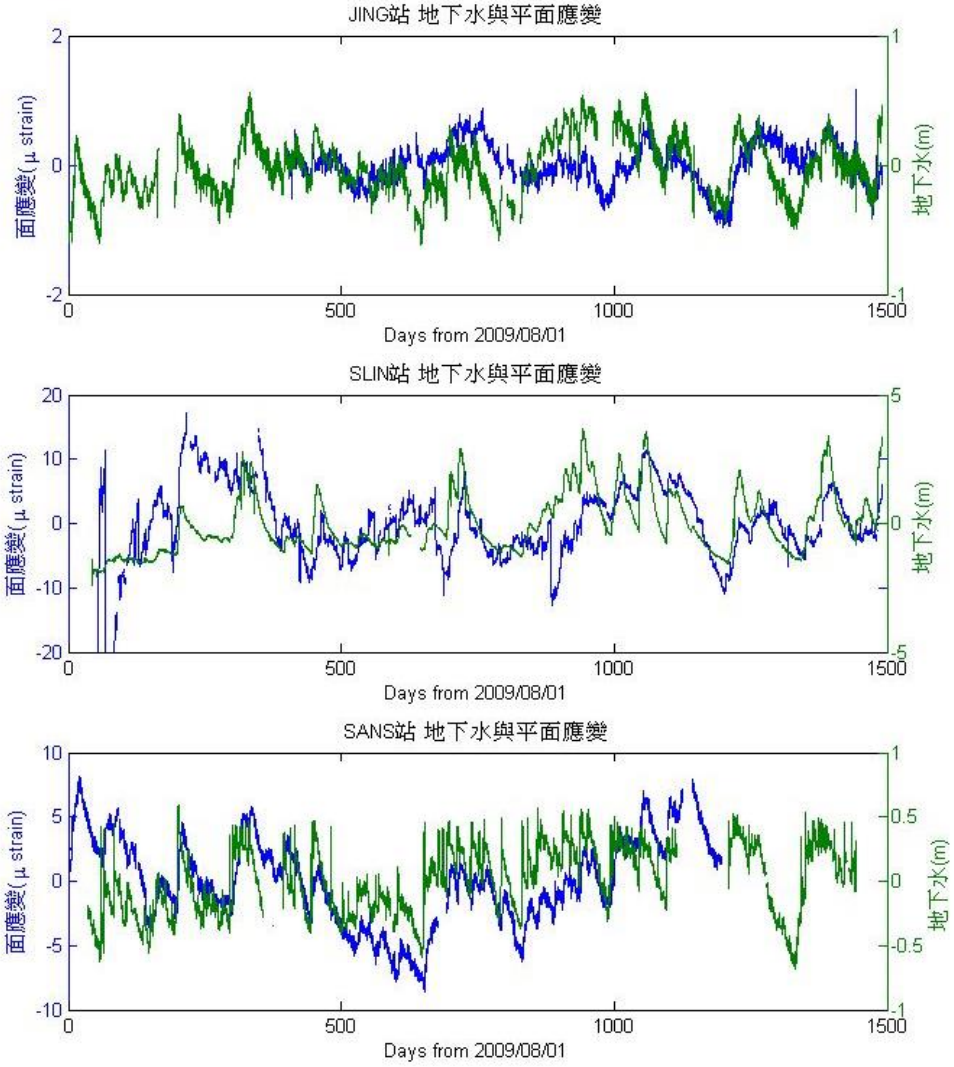


圖 4-1.6：臺北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。

在建立各種修正模式之前，須對其效應做物理性的探討，故下面分別就地下水及氣壓兩方面來進行討論：

（1）地下水效應

由於地下水儀器並非與井下應變儀設置在同一深度，也非同一井孔，所以地下水資料一般是代表儀器周遭岩層的孔隙水壓，以及代表儀器上方地下水的多寡量，前者孔隙水壓增大時，可抵消岩層外來的應力，減少岩層的擠壓應變（或增加其膨脹應變），但後者所代表的物理效應是增加儀器上方的垂直負載，其效應與氣壓變化相同，與孔隙水壓效應相反。由於地下水壓代表這兩種相反的效應，各測站會因為地下水壓計所設置的含水層的位置、水層分布範圍的大小以及水層與地表水的相通程度而有很大的不同反應，當然儀器附近岩層的孔隙率與透水性也是主要的因素。若地下水壓計是設置在封閉的含水層，則其四周岩層的體積應變也會改變水層中的水壓，因此這水壓變化會與井下應變儀同步，如此去除地下水效應也可能移除了真正的岩層應變資訊。不過，實際上難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，理論上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，量值約在0.56~9.05 μstrain/meter 之間。嘉義網達邦（DARB）、中興（TSUN）與太興（TAIS）三測站的地下水影響係數分別為：7.33、0.75 與 8.99（圖 4-1.7 至圖 4-1.9）。

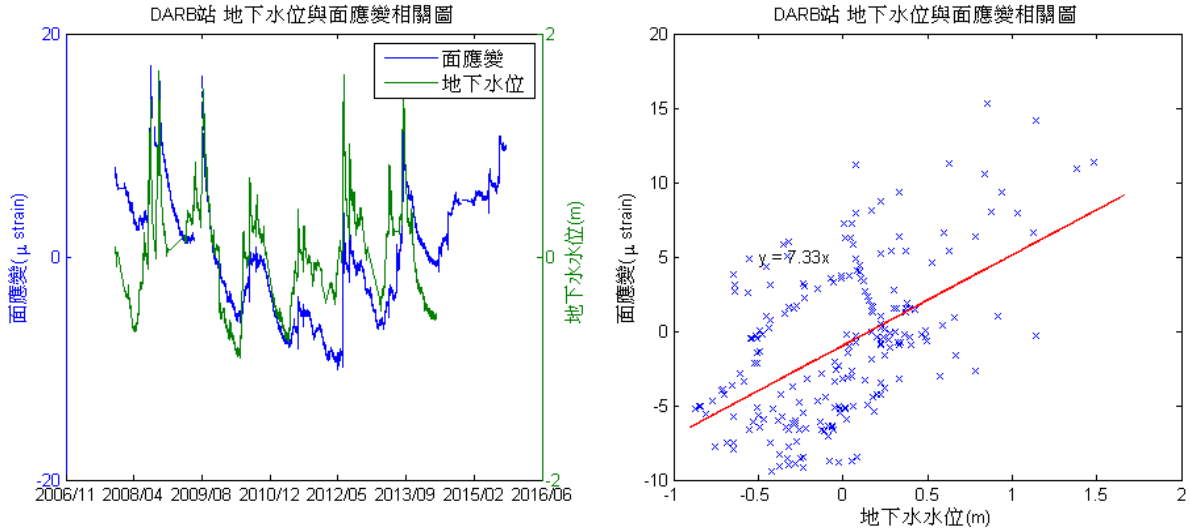


圖 4-1.7：嘉義網達邦測站（DARB）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

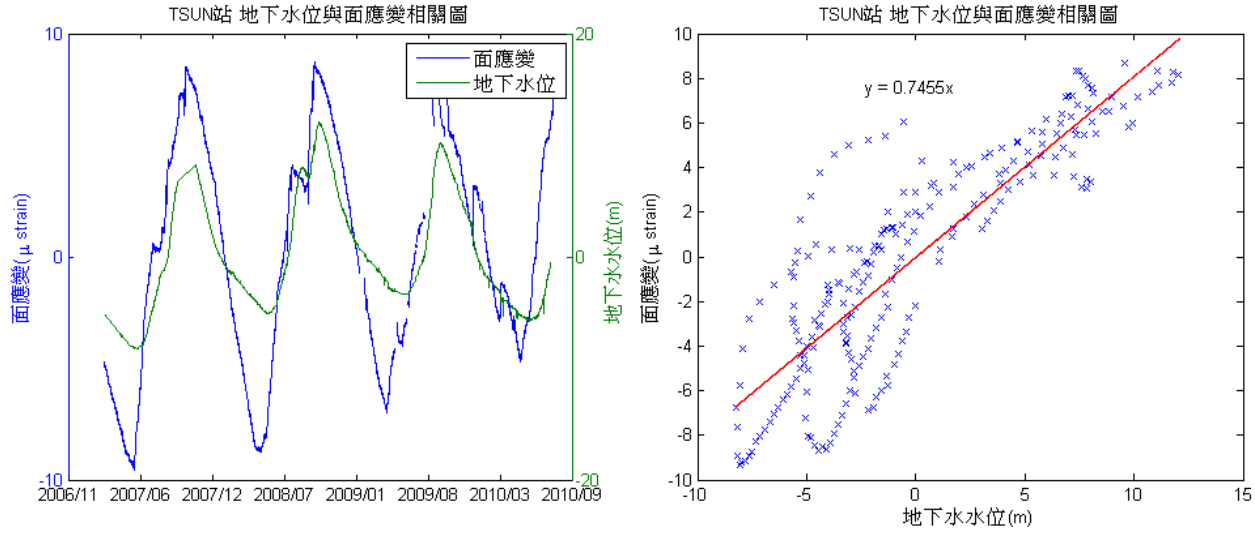


圖 4-1.8：嘉義網中興測站（TSUN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

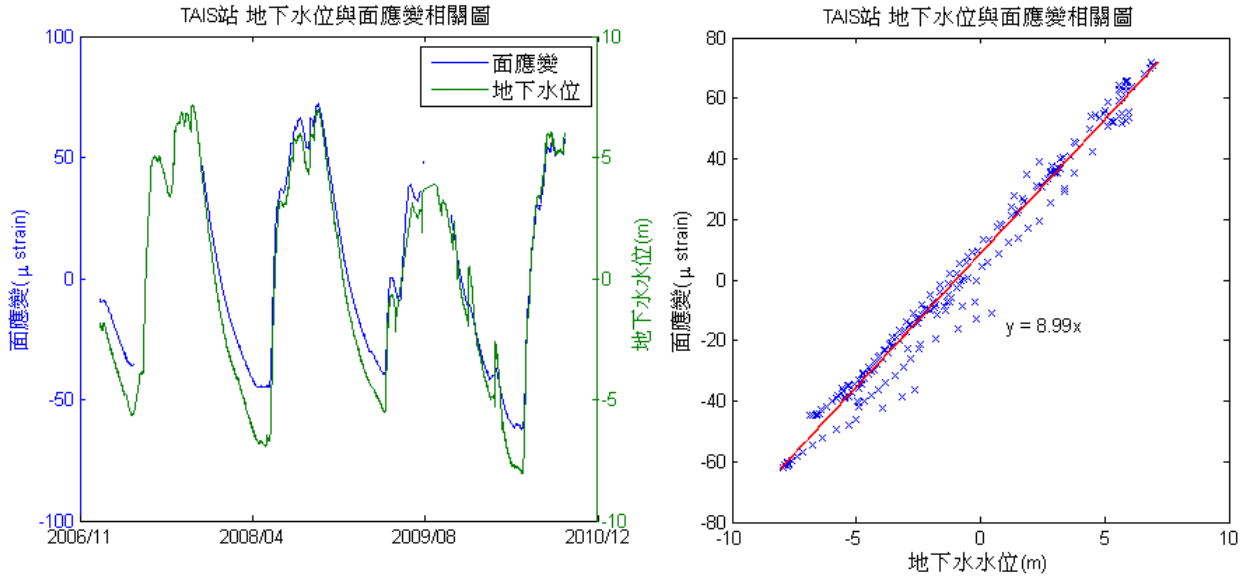


圖 4-1.9：嘉義網太興測站（TAIS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

前文中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並沒有很好的相關性（圖 4-1.6），但當觀察時間較短（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，可能是受其他環境因子影響，因此所求得的參數只是初步的測試。錦和（JING）、明德中學（SANS）與樹林（SLIN）三測站的地下水影響係數分別為：2.58、5.15 與 1.75（圖 4-1.10 至圖 4-1.12）。

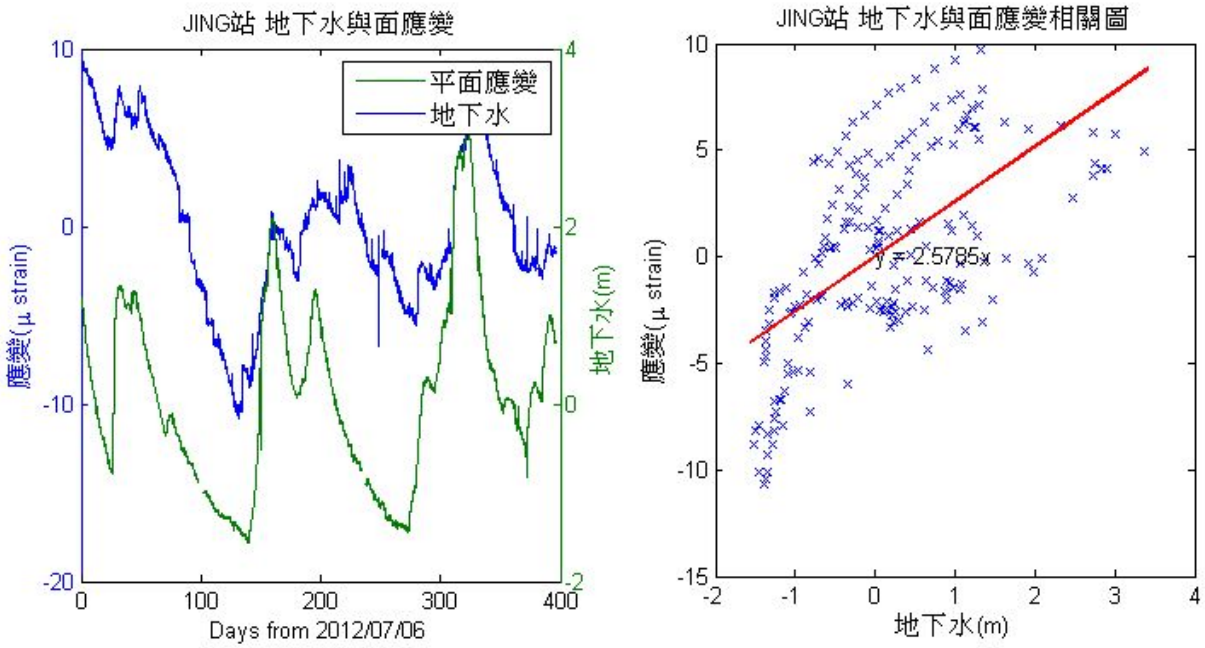


圖 4-1.10：臺北網錦和測站（JING）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

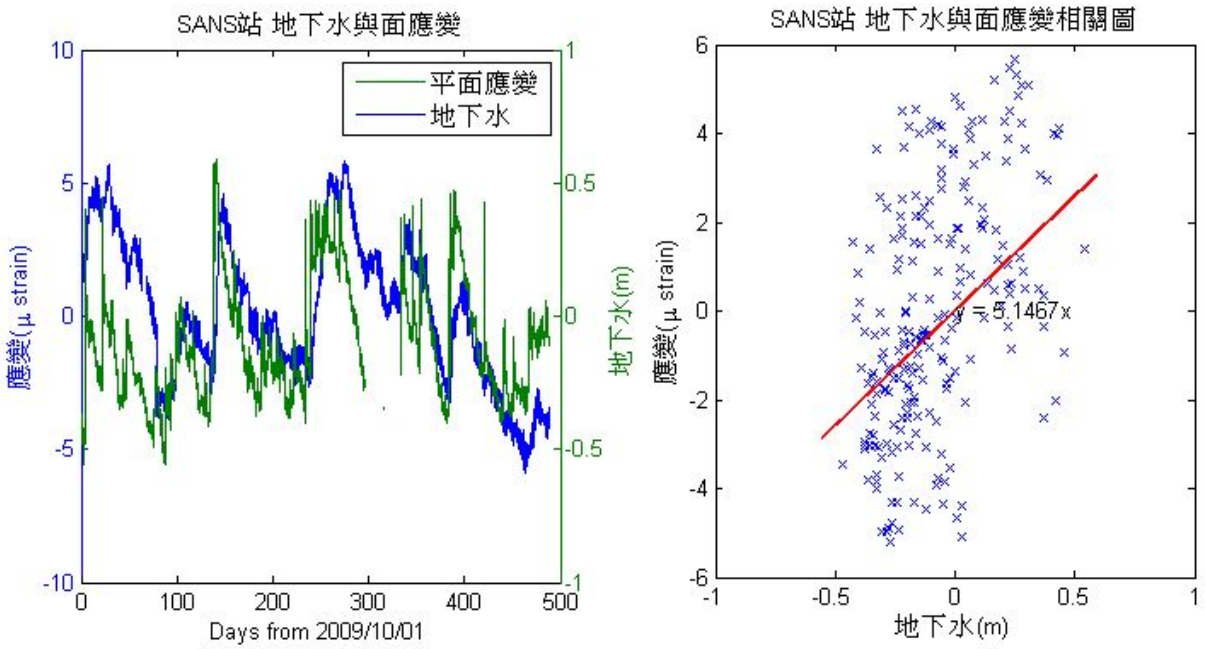


圖 4-1.11：臺北網明德中學測站（SANS）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

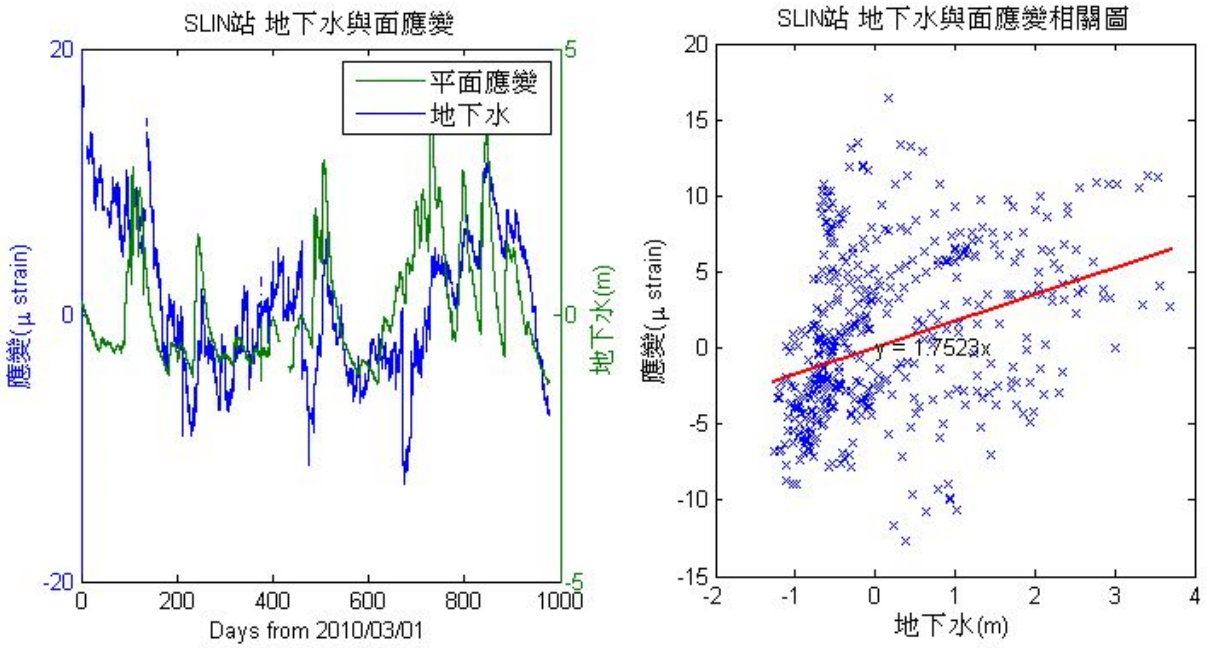


圖 4-1.12：臺北網樹林測站（SLIN）地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

（2）氣壓的影響量

大氣壓力的變化，通常是較大區域的，除了在鋒面邊緣，否則氣壓是均勻的平面垂直壓力，其對井下應變儀的影響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，影響量在大範圍氣壓變化中是一致的，因此這兩者間的關係呈現線性相關，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比較單純的記錄，最後再來計算這段記錄期間內氣壓與應變的關係，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，有助於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，我們以達邦測站（DARB）為例子，來討論氣壓與觀測應變在頻率域上的相關性，找出氣壓對於觀測應變的響應。我們取較少受降雨與其他因素影響的區段，約在每年 10 月至隔年 4 月間的降雨次數與量都相對較小，因此我們取 2008 年 10 月至 2009 年 3 月的應變資料，以一個月長度為觀測視窗，每步驟向前移動重覆取樣 50%，取 1024 頻率區段進行兩者在頻率域上的相干性比較，圖 4-1.13 為 CH0 觀測應變與氣壓在頻率域上 0 至 40 μHz 的相干性比較，較高頻率的相干性較低且越高頻干擾源越多，因此我們僅就 40 μHz，亦即 0.3 天以上週期的訊號來進行比較。比較結果可見其相干性平均值加減標準差為 0.36 ± 0.21，其中在 34.7、22.8、3.8 至 1.6 有較佳的相干性，轉換為週期則為 0.3 天、0.5 天、3 至 7 天，由於 0.3 與 0.5 天的周期與潮汐的半日潮與 1/3 日潮週期相近，但其形成原因卻不相同，頻率相干性雖高卻不能對比，因此還是以 3~7 天的周期區段裡兩者有較高的對比性，而此值包含 Roeloffs 的建議值（4~6 天）。

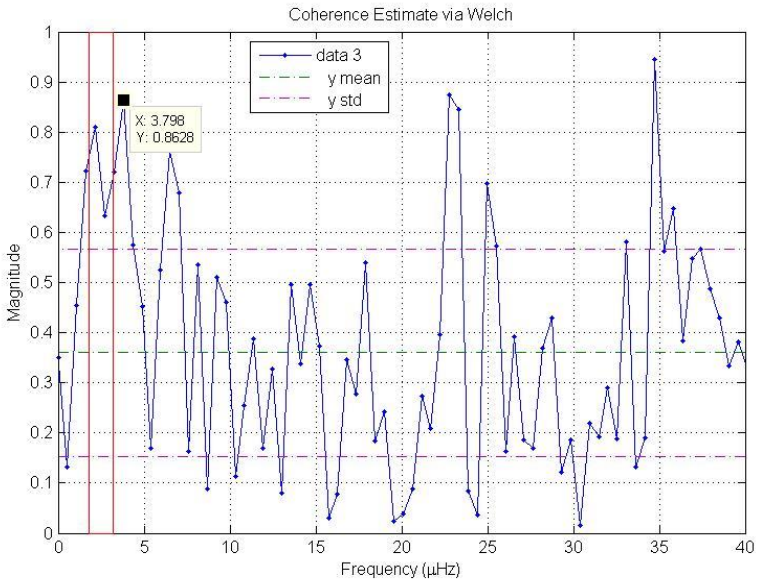


圖 4-1.13：達邦測站（DARB）CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較（0~40 μHz）。

達邦測站（DARB）的其他 channel 與氣壓對比也得出類似的結果，因此可以說利用帶通濾波取週期 3~7 天結果進行比對來取得觀測應變中的氣壓響應因子的方式是合理的（圖

4.1-14）。

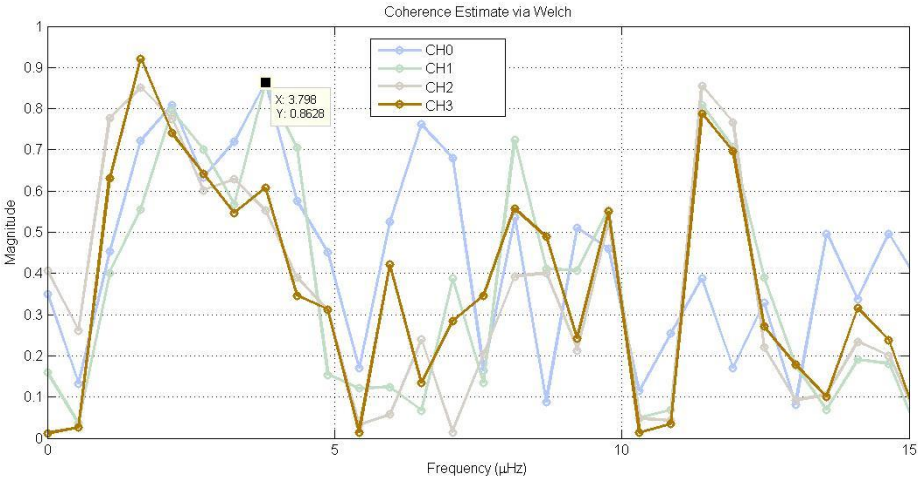


圖 4-1.14：達邦測站（DARB）觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較，可見在 3~7 天的週期間隔兩者有較高的相干性。

再進一步討論，氣壓因子是否會隨著時間不同而有浮動的對應值，利用前述所得結果，先將觀測應變與氣壓資料進行帶通濾波後進行迴歸分析，隨著時間觀察氣壓響應因子的變化。結果顯示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，表示在降雨期間入滲的雨水會促使地下水位上升，影響到觀測應變的大小，造成應變頻率上的干擾，使得氣壓響應因子的計算結果誤差變大。綜上所述，發現氣壓對觀測應變的影響是固定的，並不會隨時間變化而改變，這點也符合理論上的關係，但是計算氣壓時仍需注意地下水位變化的影響，其最直接的指標就是降雨，因此要計算良好穩定的氣壓響應因子，必須先避開降雨密集的時段，才能夠得到相對乾淨穩定的結果。

如果上述方法可得到正確的氣壓影響量，理論上可以與利用大氣壓事件所計算的氣壓影響一致，以大坪測站（BMMT）CH0 在 2007 年 8 月聖帕颱風的資料來看（圖 4-1.16），與表 4-1.1 所列兩方法對於氣壓反應的評估比較，證明 Roeloffs（2010）的方法的確可以應用於臺灣地區的井下應變儀，並得到正確的氣壓影響量。

將計算出來的氣壓響應因子帶入關係式除去氣壓的效應後，結果如圖 4-1.17。最終我們可以得到各測站感應器對於氣壓的反應（表 4-1.2），並藉此對氣壓影響做校正。

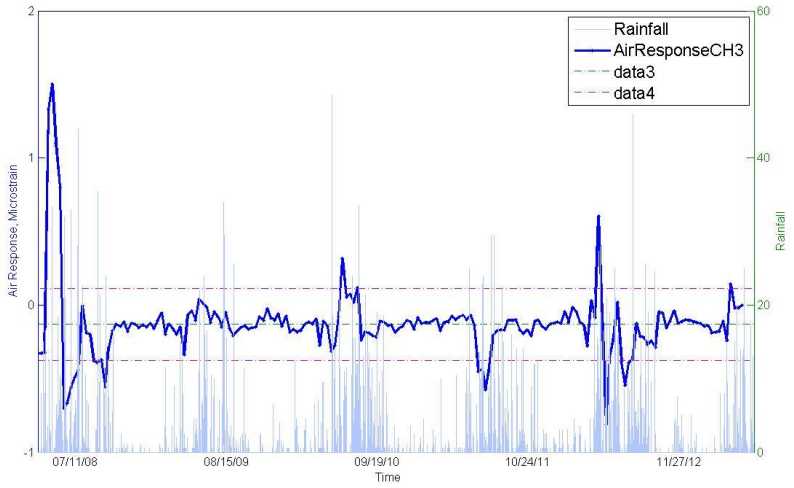


圖 4-1.15：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。

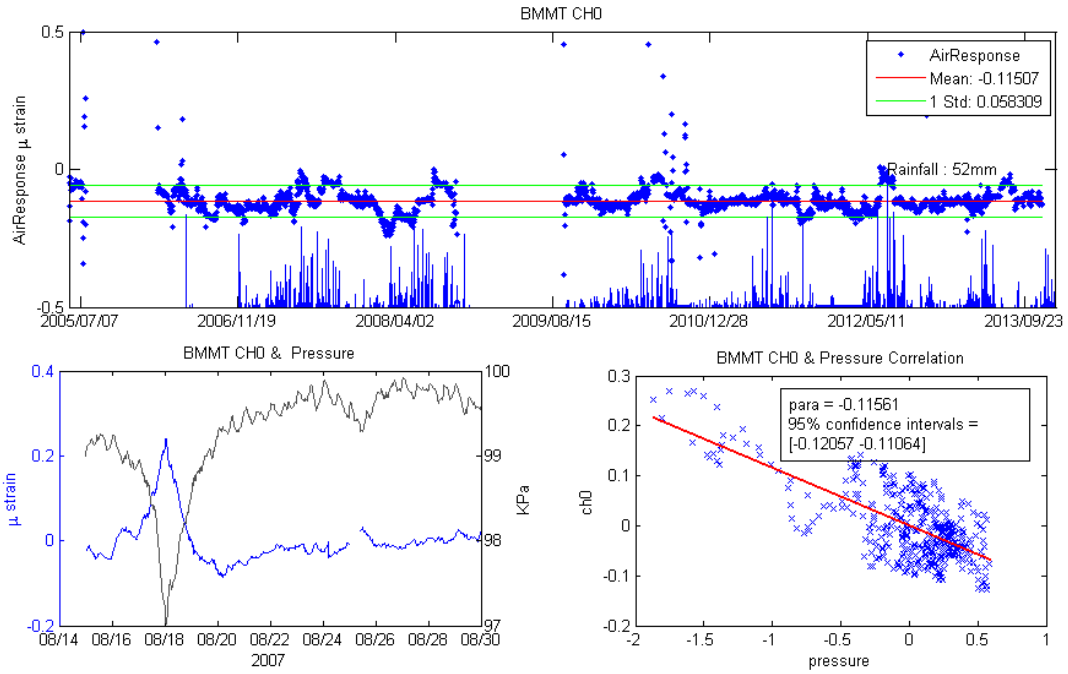


圖 4-1.16：大坪測站（BMMT）CH0 氣壓影響計算值比較。上圖表是由 Roeloffs（2010）方法計算的長期氣壓影響量：-0.11507 μstrain/KPa，下方兩圖表示由 2007 年 8 月聖帕颱風期間資料計算之氣壓影響量：-0.11561 μstrain/KPa。

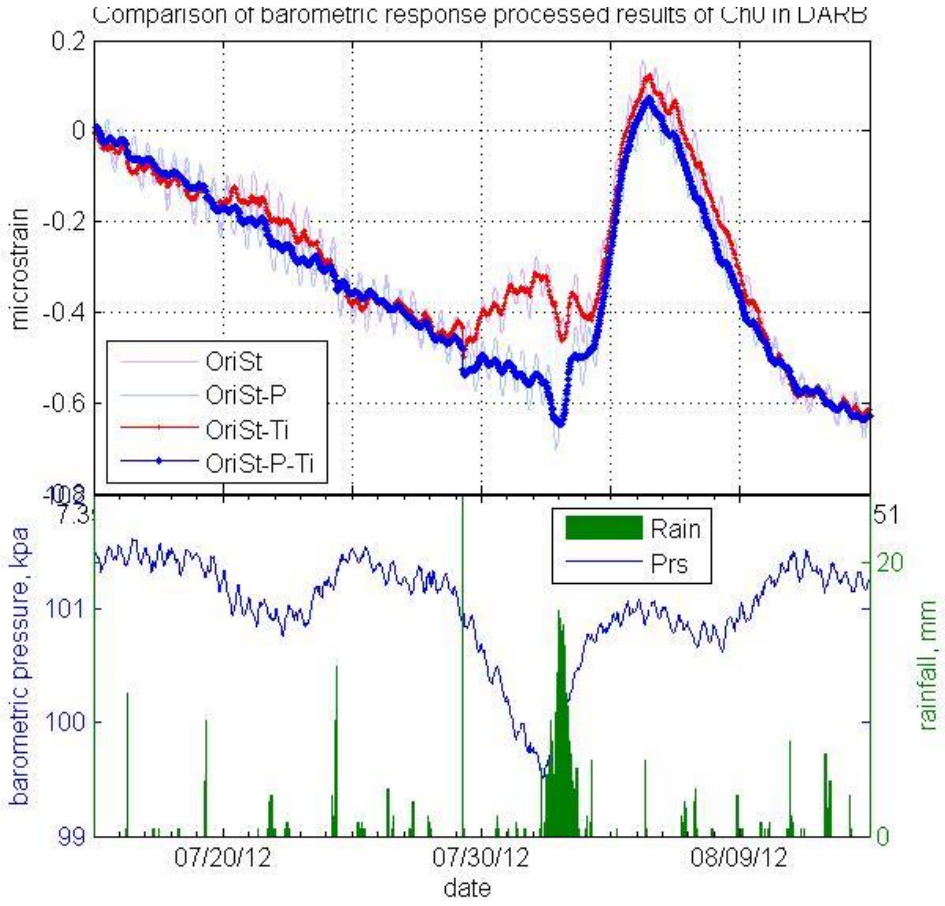


圖 4-1.17：觀測應變去除氣壓響應後的結果。

表 4-1.1：井下應變儀氣壓影響評估方法之比較。

	單位氣壓應變 Areal strain(ms)/KPa	
SITE	**方法一: Big Pressure event**	**方法二: Roeloffs, 2010**
DARB	-0.350	-0.387
TAIS	-0.271	-0.277
TSUN	-0.268	-0.258
PFMT	-0.145	-0.142
BMMT	-0.264	-0.243
CINT	-0.290	-0.285
SANS	-0.652	-0.791
SLIN	-0.375	-0.380
JING	-0.238	-0.255

表 4-1.2：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。

SITE	**氣壓影響係數**（μstrain/KPa）				
	CH0	**CH1**	**CH2**	**CH3**	**AR**
DARB	-0.132	-0.327	-0.107	-0.121	-0.387
TAIS	-0.149	-0.129	-0.130	-0.105	-0.277
TSUN	-0.172	-0.124	-0.135	-0.168	-0.258
PFMT	-0.058	-0.107	-0.061	-0.053	-0.142
BMMT	-0.124	-0.139	-0.104	-0.065	-0.243
CINT	-0.182	-0.101	-0.114	-0.180	-0.285
SANS	-0.207	-0.399	-0.556	-0.184	-0.791
SLIN	-0.233	-0.140	-0.197	-0.251	-0.380
JING	-0.150	-0.117	-0.118	-0.124	-0.255
註：以 Roeloffs, 2010 之方法計算					

4-1-2 檢視井下應變儀資料中異常事件

由於現今對地震前後地殼應變是否會有什麼前兆會出現？多久前會出現？其大小會有多大？哪些地震（多大的或多遠的）會在某一測站出現異常前兆？這些都是我們所關切的，但至今仍無確切的答案。因此，在本計畫中嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

(1) 因為尚未修正降雨的效應，本計畫僅搜尋臺灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，先不考慮降雨期間應變變化的現象。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（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。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。

修正的資料中，由於新竹網大坪測站（BMMT）地下水觀測紀錄損壞，一直都無資料，考慮該地區短時期的地下水變化不大，所以先停止該地區的地下水影響量修正。另外臺北地區的地下水水位與井下應變儀面應變的關係還不明確，也暫不做臺北地區的地下水影響量修正。

2015 年 12 月至 2016 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 5 個事件（表 4-1.3），各測網有記錄到地震前應變異常的記錄事件如下：嘉義網記錄到 1 個應變異常事件為 2016/02/06 美濃地震；新竹網記錄到 4 個異常事件為 2016/02/06 美濃地震

與 2016/05/12 至 05/13 期間宜蘭縣政府東方之 3 起地震;臺北網記錄到 4 個應變異常事件為 2016/02/02 臺灣東北部海域地震與 2016/05/12 至 05/13 期間宜蘭縣政府東方之 3 起地震。圖 4-1.18 為 2015 年 12 月至 2016 年 11 月所有規模大於 5 之地震事件與特別地震事件，紅色海灘球為井下觀測網紀錄到應變異常之地震事件。

表 4-1.3：2015 年 12 月至 2016 年 11 月，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄到之應變異常事件。

No	臺灣時間	規模	經度	緯度	深度 km	震央位置
1	2016/02/02 22:19	6.7	123.54	25.42	203.7	基隆市政府東方 183.2 公里 (位於臺灣東北部海域)
2	2016/02/06 03:57	6.6	120.54	22.92	14.6	屏東縣政府北偏東方 27.1 公里 (位於高雄市美濃區)
3	2016/05/12 11:17	6.1	121.98	24.69	8.9	宜蘭縣政府東方 22.4 公里
4	2016/05/12 12:29	5.7	122.02	24.69	12.0	宜蘭縣政府東方 26.1 公里
5	2016/05/13 16:24	5.2	121.98	24.68	9.8	宜蘭縣政府東偏南方 23.0 公里

另外由於強降雨、資料缺漏與震後應變回復等因素所影響，故有 5 個地震事件無法判斷是否有地震前兆訊號（表 4-1.4）。

表 4-1.4：2015 年 12 月至 2016 年 11 月，針對規模 5 以上的地震，井下觀測網記錄無法判斷前兆之事件。

No	臺灣時間	規模	經度	緯度	深度 km	震央位置
1	2016/02/16 12:04	5.0	120.87	23.01	5.0	臺東縣政府西北方 40.5 公里 (位於臺東縣海端鄉)
2	2016/02/18 09:09	5.3	120.87	23.02	5.4	臺東縣政府西北方 40.9 公里 (位於臺東縣海端鄉)
3	2016/02/18 09:18	5.1	120.88	23.03	4.3	臺東縣政府西北方 41.2 公里 (位於臺東縣海端鄉)
4	2016/04/27 23:17	5.7	121.78	24.24	11.9	花蓮縣政府北偏東方 32.0 公里 (位於花蓮縣近海)
5	2016/04/28 02:19	5.5	121.23	23.28	15.2	臺東縣政府北方 59.1 公里 (位於花蓮縣卓溪鄉)
6	2016/10/06 23:51	6.0	121.40	22.61	20.0	臺東縣政府東偏南方 30.8 公里 (位於臺灣東部海域)

以下分別針對有應變前兆反應的地震事件與無法判斷是否有前兆反應之事件進一步說明。

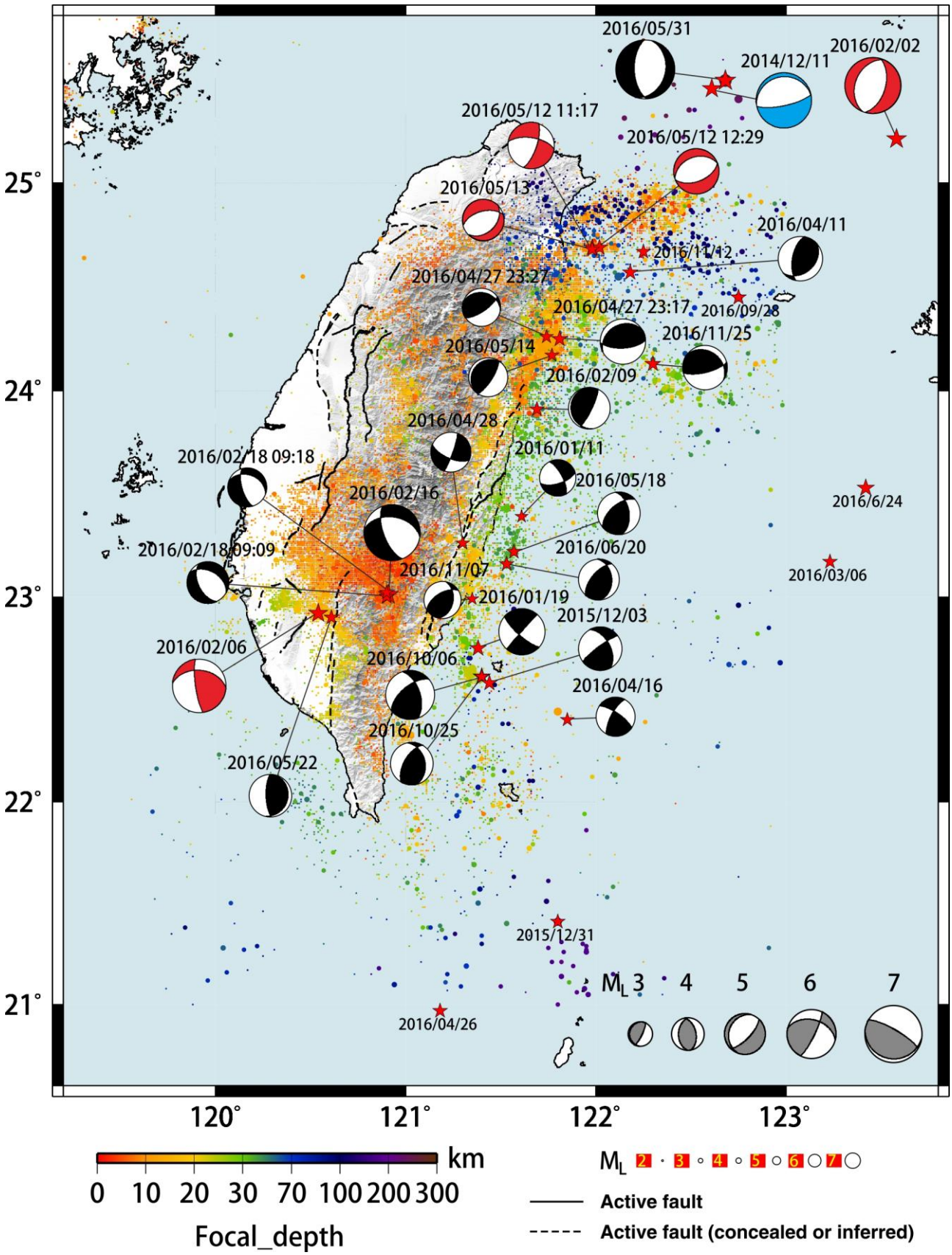


圖 4-1.18：2015 年 12 月至 2016 年 11 月規模大於 5 的地震事件之位置及震源機制圖。紅色海灘球為井下觀測網紀錄到應變異常之地震事件。

（1）2016/02/02 東北部海域地震（M_L 6.7，Depth 203.7 km）

2016 年 2 月 2 日的地震位於東北部外海，雖然是一個震源深度較深的地震，約 203.7 公里，臺北網錦和測站（JING）仍然在地震之前約 10 天有發現一些應變異常的訊號。剪應變有一些突跳為機械特性，主要的異常反應在面應變方面，可由 1 月 22 日看出面應變由相對壓縮的應變轉為相對伸張，這部分可能為地震相關的應變異常訊號（圖 4-1.19）。

近期東北部海域地震還有 2014/12/11（M_L 6.7，Depth 268.6 km）與 2016/05/31（M_L 7.2，Depth 271.3 km）這兩起地震。2014 年的地震於臺北網錦和測站（JING）與新竹網梅花測站（PFMT）在地震前 10 天左右就有發現應變異常訊號（圖 4-1.20-21）。但今年 5 月所發生的地震，卻沒有在地震前發現任何應變異常。

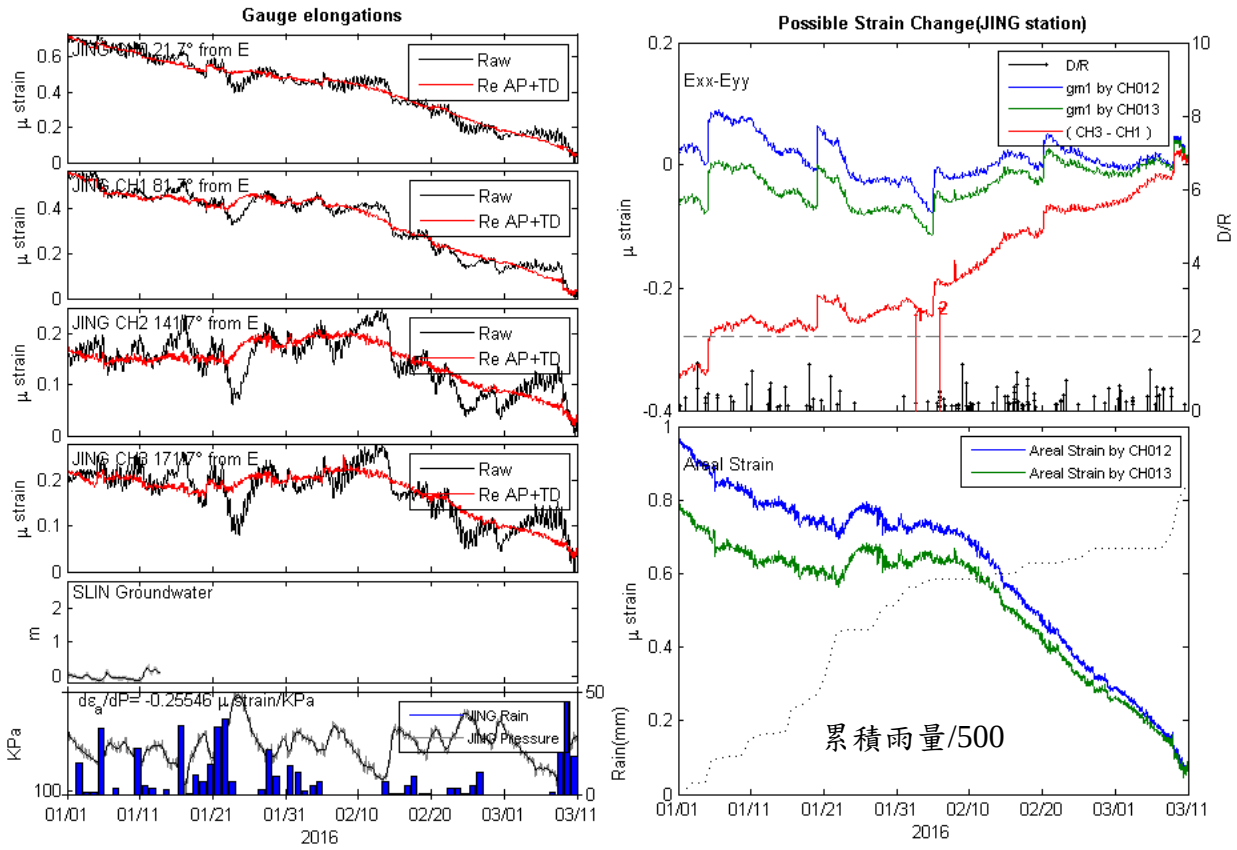


圖 4-1.19：臺北網錦和測站（JING）於 2016 年 2 月 2 日臺灣東北外海地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。右上圖所標示兩個地震分別為：（1）2016/02/02 M_L 6.7 基隆市政府東方 183.2 公里地震與（2）2016/02/06 M_L 6.6 屏東縣政府北偏東方 27.1 公里地震。

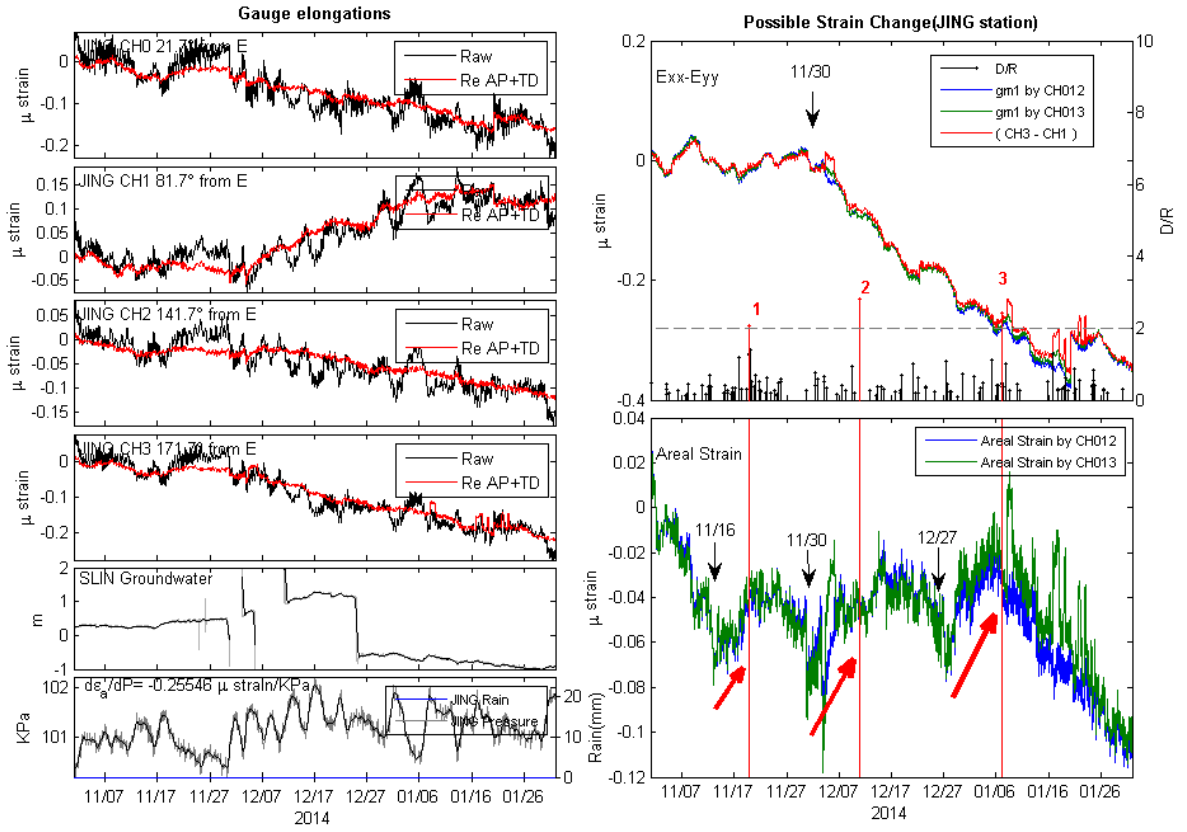


圖 4-1.20：臺北網錦和測站（JING）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。右上圖所標示三個地震分別為：（1）2014/11/19 M_L 4.8 宜蘭縣政府東偏北方 32.0 公里地震、（2）2014/12/11 M_L 6.7 基隆市政府東北方 93.6 公里地震與（3）2015/01/07 M_L 5.5 花蓮縣政府北偏東方 30.6 公里地震。

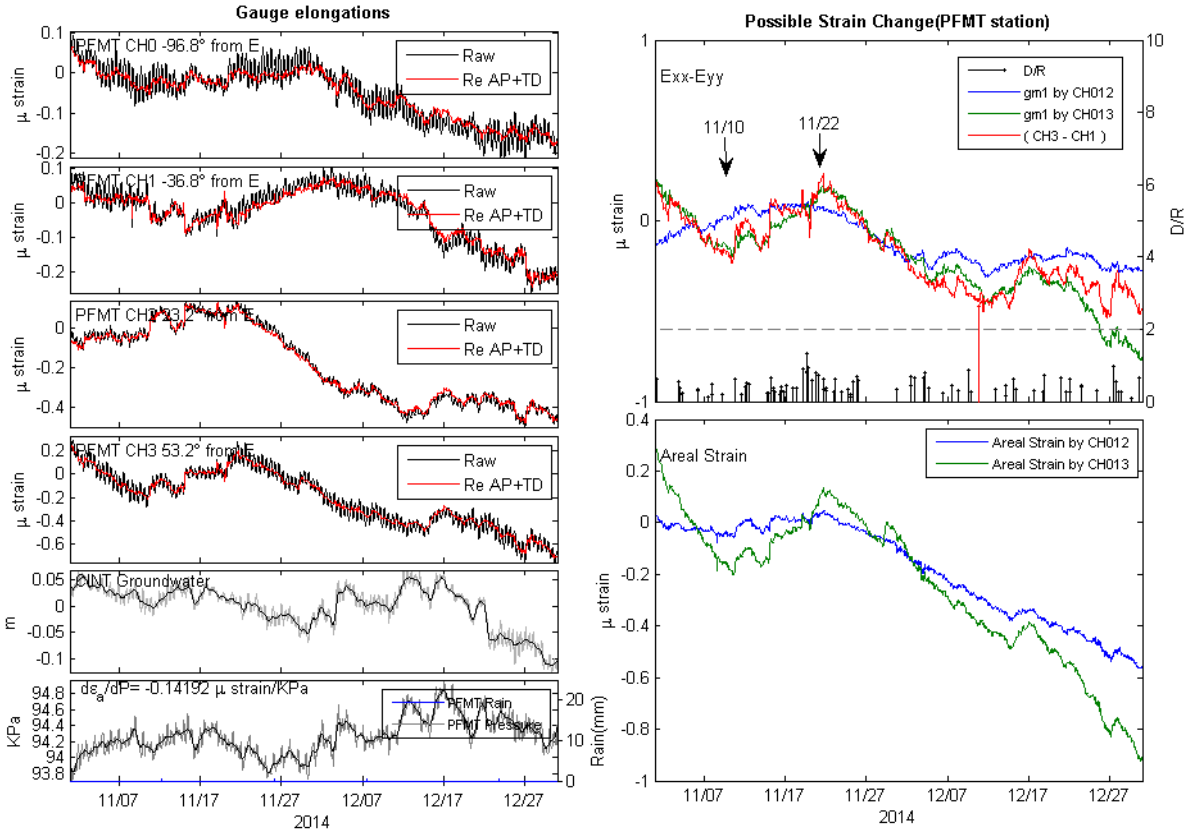


圖 4-1.21：新竹網梅花測站（PFMT）於 2014 年 12 月 11 日基隆外海地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。

（2）2016/02/06 高雄美濃地震（M_L6.6，Depth 14.6 km）

檢視 3 個測網在美濃地震前 3 個月的應變資料，嘉義網達邦測站（DARB）與新竹網梅花測站（PFMT）在 2016/01/04 的剪應變都有明顯應變率的變化，這部分的變化可能與地震相關，而臺北網錦和測站（JING）則沒有明顯的應變異常（圖 4-1.22）。

離地震最近的嘉義網達邦測站（DARB）在地震發生時有明顯的同震反應，但在地震前 2015 年 11、12 月的應變率幾乎沒有甚麼明顯變化，2016 年 1 月後其最明顯的應變率變化發生於 1/4，但整個 1 月期間有明顯的降雨，有些應變率變化也會與降雨紀錄相關，因此 1/4 的應變異常仍不能排除與降雨有關。

新竹網梅花測站（PFMT）平面應變在這段期間似乎沒有受到降雨影響，應變率相當一致，但 2016/01/19 左右突然明顯的轉為相對壓縮的應變，推測應該是受到當天發生於臺東縣東方 17 公里規模 5.8 的地震影響，而剪應變的趨勢在 2016/01/04 左右也有明顯的應變率變化，這應變異常無法由降雨或地下水文資料所解釋，其很可能是 2 月 6 日美濃地震的地震前兆訊號。過去的研究分析，2014 年 12 月至 2015 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的 7 個事件當中，嘉義網記錄到 3 個，臺北網記錄到 4 個，而新竹網能夠顯示到 6 個異常事件，顯示新竹網對於地震的前兆訊號相對靈敏。

臺北網錦和測站（JING）的應變率相當穩定，沒有甚麼太大的變化，比較明顯的變化可以比對到 2016 年初開始下雨的時間，有兩次應變率改變的時間大約在 2016/01/05 與 2016/01/22，而此兩時間點都有明顯降雨。

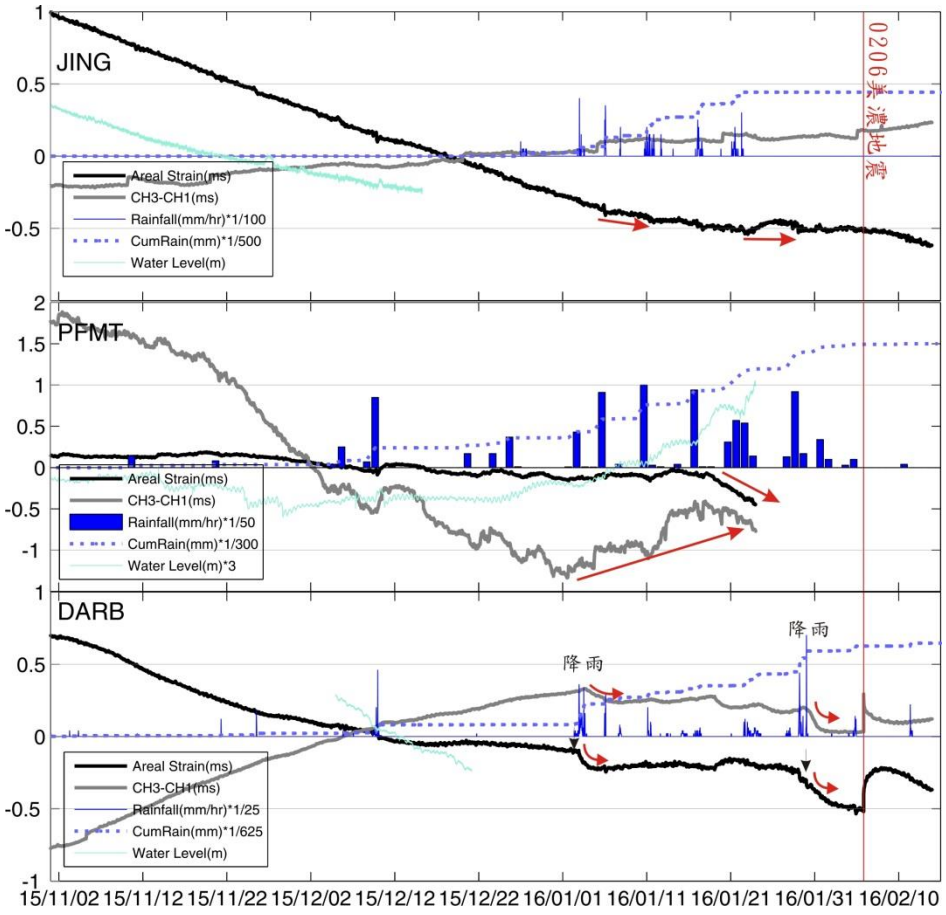


圖 4-1.22：2016/02/06 美濃地震前 3 個月井下應變儀資料。淺藍色線為降雨與累積雨量；淺綠色為地下水水位資料；黑色與灰色分別為面應變與剪切應變。

（3）2016/05/12 宜蘭縣東方地震（M_L6.1，Depth 8.9 km; M_L5.7，Depth 12.0 km 與 M_L5.2，Depth 9.8 km）

2016 年 5 月 12 至 13 日於宜蘭縣發生三起規模大於 5 的地震，新竹網與台北網在震前皆有應變異常訊號出現，新竹網大坪站（BMMT）於地震前兩日（5/10）在剪應變與面應變都有異常的變化，台北網錦和站（JING）的剪應變趨勢於 5/8 就開始有異常變化，面應變於 5/10 有異常訊號，這些異常訊號很有可能是地震前兆訊號（圖 4-1.23 與圖 4-1.24）。

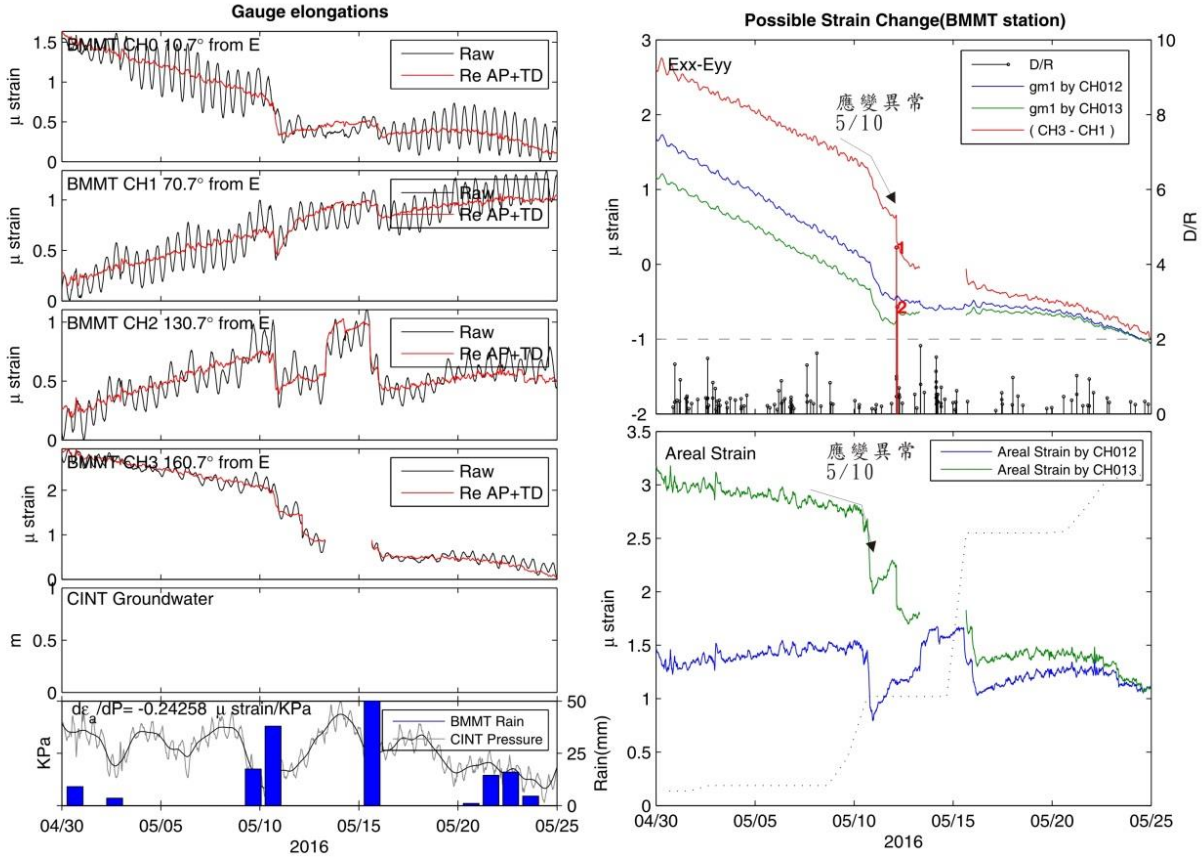


圖 4-1.23：新竹網梅花測站（BMMT）於 2016 年 5 月 12 日宜蘭縣東方地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。（1）2016/05/12 M_L 6.1 宜蘭縣政府東方 22.4 公里地震、（2）2016/05/12 M_L 5.7 宜蘭縣政府東方 26.1 公里地震。

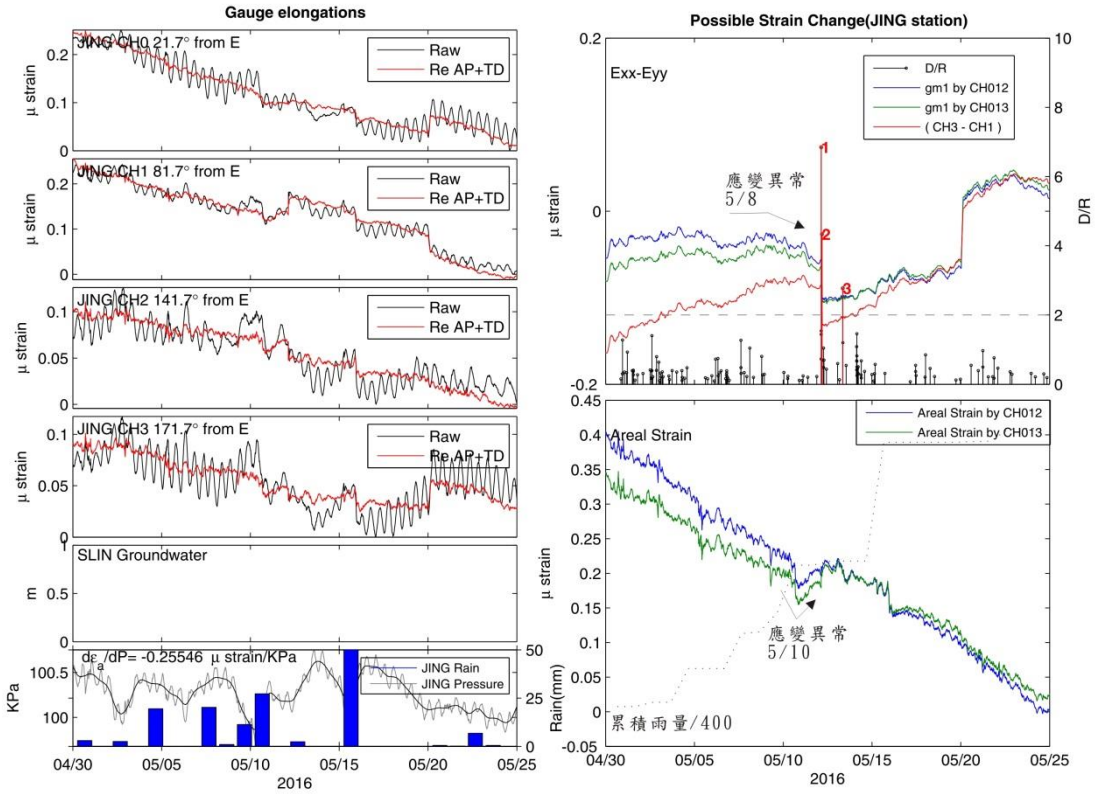


圖 4-1.24：台北網錦和測站（JING）於 2016 年 5 月 12 日宜蘭縣東方地震前的應變資料。左圖為測站 4 個方向應變反應、地下水與氣壓資料，右圖為計算後剪應變與面應變。（1）2016/05/12 M_L 6.1 宜蘭縣政府東方 22.4 公里地震、（2）2016/05/12 M_L 5.7 宜蘭縣政府東方 26.1 公里地震與（3）2016/05/13 M_L 5.2 宜蘭縣政府東偏南方 23.0 公里地震。

另由於強降雨、資料缺漏與震後應變回復等因素所影響，有 6 個地震事件無法判斷其是否為地震前兆訊號，下面也將其列出。

（1）2016/02/16 及 02/18 臺東海端地震（02/16，M_L 5.0，Depth 5 km； 02/18，M_L 5.3，Depth 5.4 km；02/18，M_L 5.1，Depth 4.3 km）

2 月 16~18 日發生於臺東縣海端鄉的三起地震，時間上離 2016/02/06 美濃地震相當接近，受到美濃地震震後應變變化的影響，故無法釐清這三起地震震前的應變變化是否屬於震前應變異常，所以目前排除為該地震的地震前兆（圖 4-1.25）。

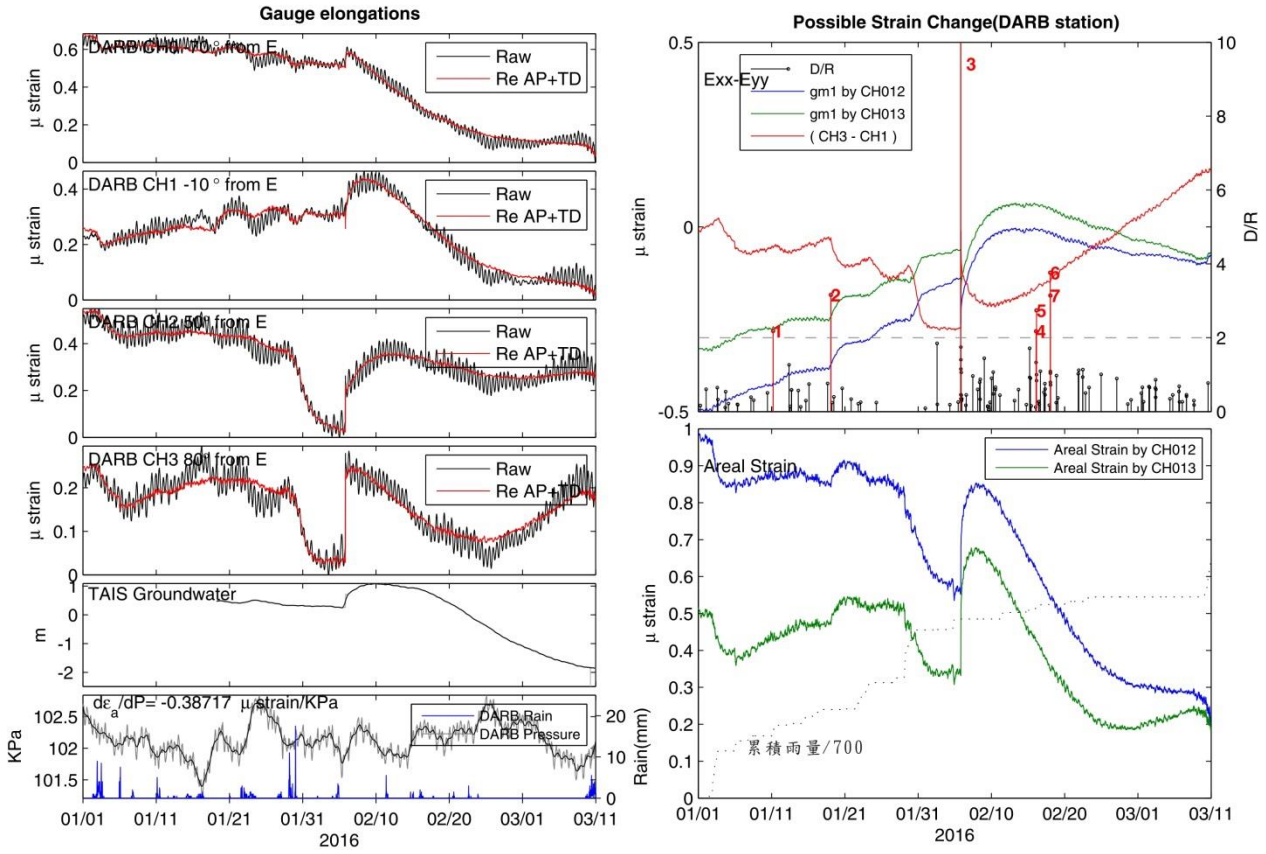


圖 4-1.25：2016 年 1 月至 3 月嘉義網達邦測站（DARB）之應變資料。上圖所標示數字為 D/R 大於 2 之地震，其中（3）2016/02/06 M_L 6.6 高雄市美濃地震，（5）~（7）2016/02/16-2016/02/18 M_L 5.0-5.3 臺東縣海端鄉地震。

（2）2016/04/27 花蓮近海地震（M_L 5.7，Depth 11.9 km）

面應變資料當中顯示臺北網錦和測站（JING）於 4/27 地震前有兩次較大降雨與地下水補助所造成的應變變化，這部分干擾資料而影響震前應變異常之判斷，因此無法辨識是否為該地震之前兆訊號（圖 4-1.26）。

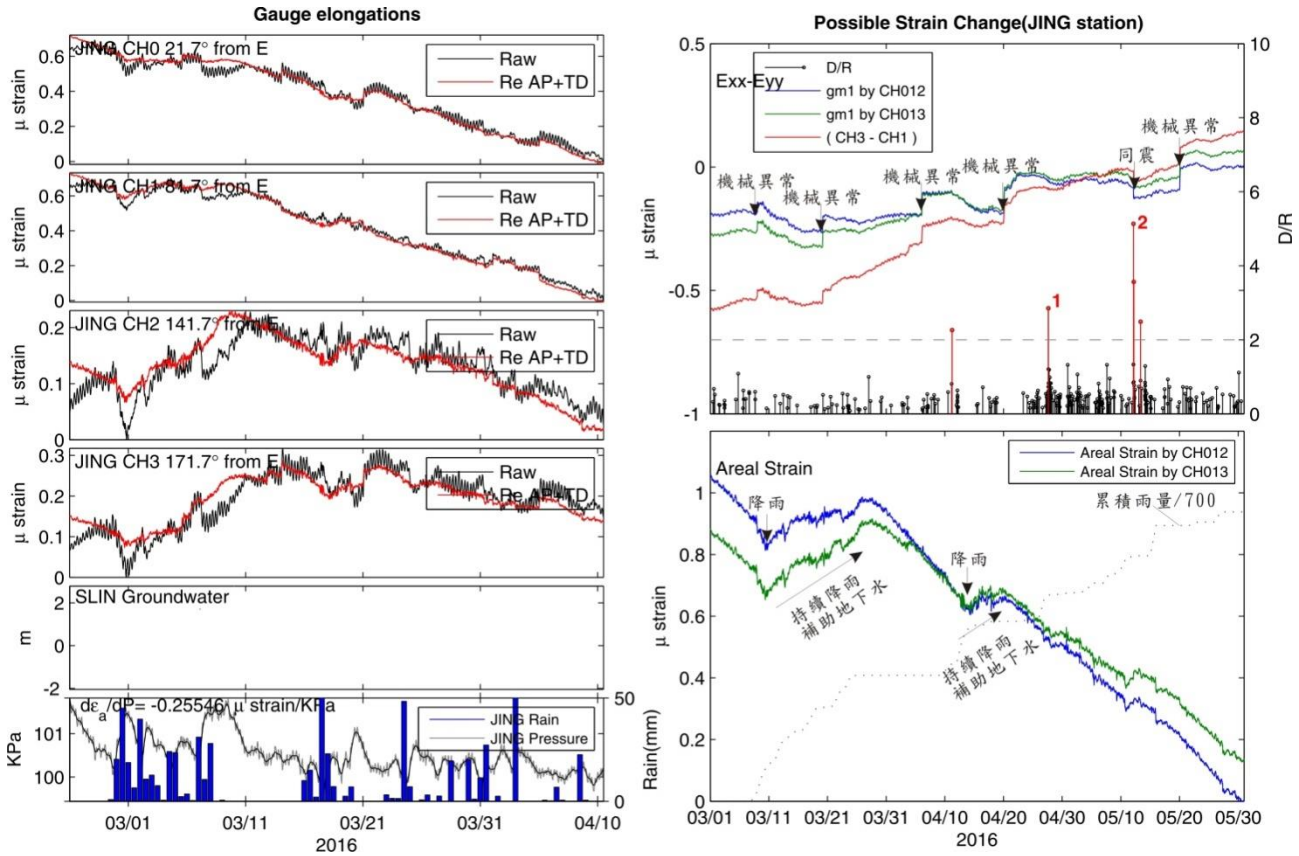


圖 4-1.26：2016 年 4 月 27 日花蓮縣近海地震前後臺北網錦和測站（JING）之應變資料。（1）2016/04/27 花蓮縣近海地震（M_L 5.7，Depth 11.9 km），（2）2016/05/12 臺灣東部海域地震（M_L 5.8，Depth 17.5 km）。

（3）2016/04/28 花蓮卓溪鄉地震（M_L 5.5，Depth 15.2 km）

在嘉義測網中自 4/10 至 4/28 地震前這段期間的應變變化主要受控於降雨，因降雨後地下水與河道負載所影響，其變化的應變尺度也較過往可以觀察到的地震前孕震應變大許多，因此無法辨別是否有地震相關應變異常（圖 4-1.27）。

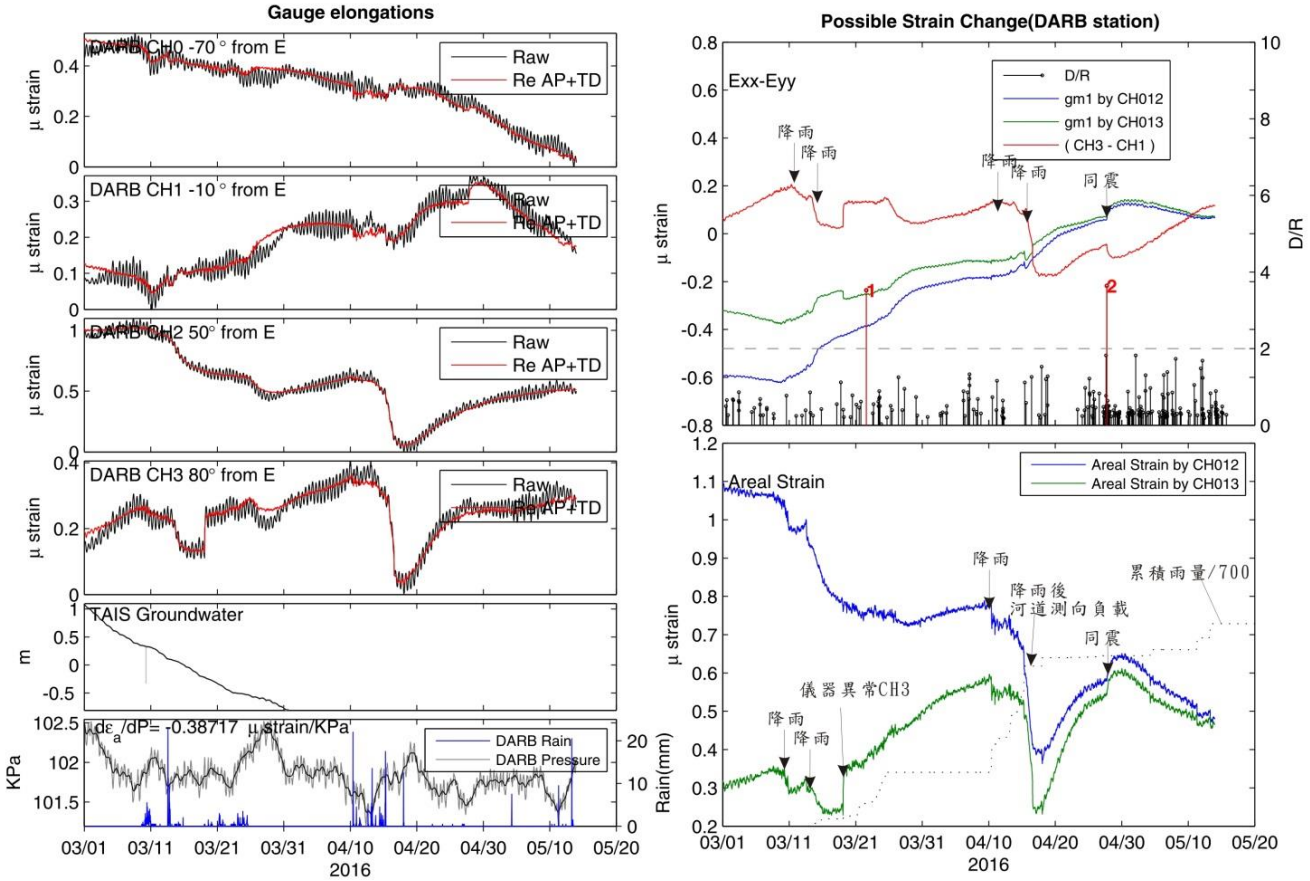


圖 4-1.27：2016 年 3 月至 5 月嘉義網達邦測站（DARB）之應變資料。（1）2016/03/22 嘉義縣阿里山鄉地震（M_L 3.5，Depth 8.6 km），（2）2016/04/28 花蓮縣卓溪鄉地震（M_L 5.5，Depth 15.2 km）。

（4）2016/10/06 臺灣東部海域地震（M_L 6.0，Depth 20.0 km）

在嘉義測網中達邦站（DARB）自 7 月中旬過後資料缺漏，無法辨別是否有地震相關應變異常（圖 4-1.28）。

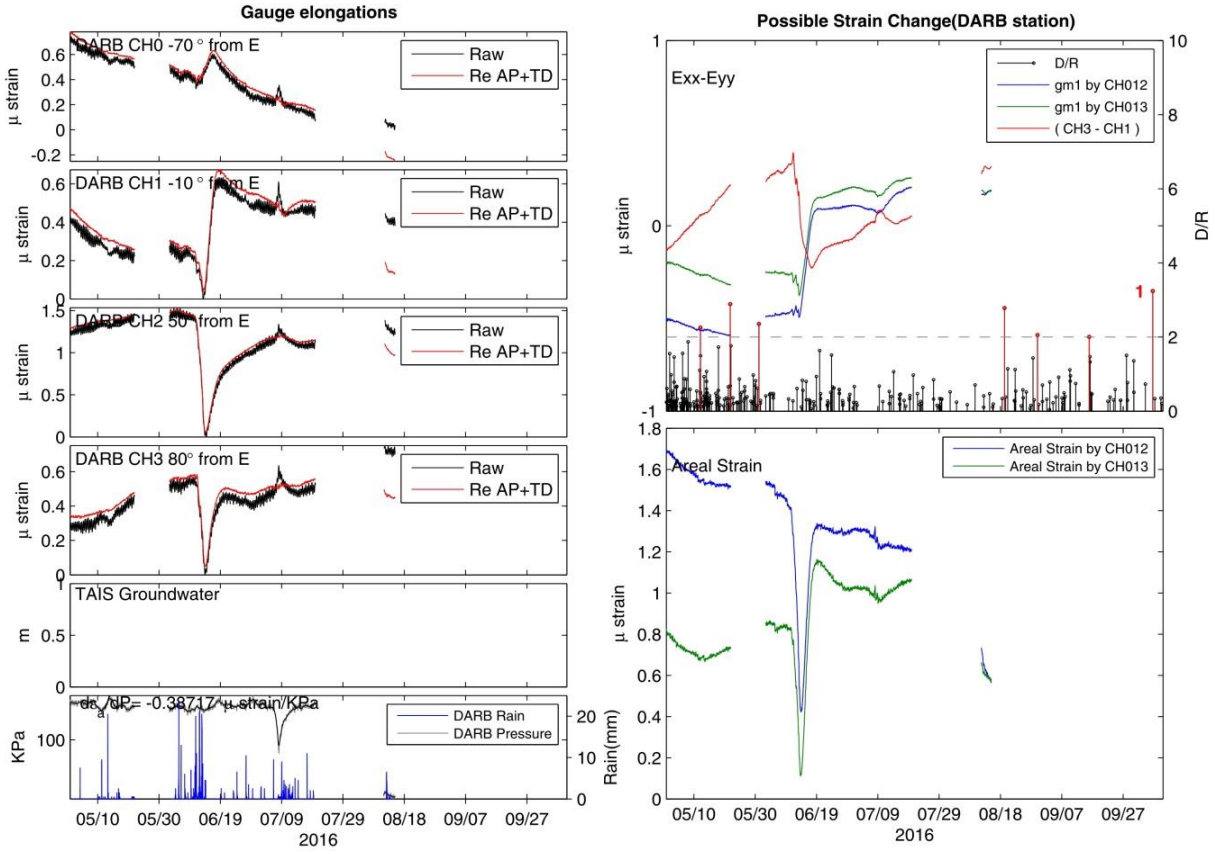


圖 4-1.28：2016 年 5 月至 10 月嘉義網達邦測站（DARB）之應變資料。（1）2016/10/06 臺灣東部海域地震（M_L 6.0，Depth 20.0 km）。

4-1-3 井下應變儀應變異常判釋統計

本計畫每個月會進行一次井下應變儀的資料分析，分析當月前三個月的一整個月資料(例如 10 月初分析 7 月)，資料必須先移除環境變因，如無法移除者，也必須列出環境影響資料，以做為比對之用。當有無法藉由環境因子解釋的應變率變化時，則是為應變儀的應變異常訊號，再藉由比對地震資料後，判斷是否為地震相關的前兆訊號。目前分析至 2016 年 10 月為止，井下應變儀有前兆訊號，也成功對應地震的機率，在嘉義網、新竹網與臺北網分別為：70%、85%與 76%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：30%、15%與 24%；地震前沒有前兆訊號的機率為：44%、53%與 38%。

表 4-1.5：井下應變儀前兆判釋統計表（表列 2013/08-2016/10）。

	嘉義網		新竹網		臺北網	
	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震	應變異常判斷	一個月內是否有對應之地震
2013-08	X	X	O	X	X	X
2013-09	X	X	O	O	O	O
2013-10	O	O	O	O	X	O
2013-11	X	X	X	X	O	X
2013-12	O	X	O	X	X	X
2014-01	X	X	X	O	X	O
2014-02	X	X	O	O	O	O
2014-03	O	X	O	O	O	O
2014-04	O	X	X	X	X	X
2014-05	O	O	X	O	X	X
2014-06	X	X	X	X	X	X
2014-07	X	X	X	X	O	O
2014-08	X	X	X	X	X	X
2014-09	X	X	O	O	O	X
2014-10	X	O	X	O	O	O
2014-11	-	-	O	O	O	O
2014-12	X	X	X	O	X	O
2015-01	O	O	O	X	X	X
2015-02	O	O	O	O	O	O
2015-03	O	O	O	O	O	O
2015-04	O	O	O	O	X	O
2015-05	X	X	O	O	X	X
2015-06	X	X	X	O	O	X
2015-07	X	O	X	O	X	X
2015-08	X	O	X	O	X	O
2015-09	X	O	X	O	O	O
2015-10	X	O	X	X	O	O
2015-11	X	X	O	O	X	X
2015-12	X	O	O	O	X	O
2016-01	X	O	O	O	O	O
2016-02	X	O	O	O	O	O
2016-03	X	O	X	O	X	O
2016-04	X	O	X	O	X	O
2016-05	X	X	O	O	O	O
2016-06	X	X	X	X	X	X
2016-07	-	-	O	O	X	X
2016-08	-	-	X	X	X	X
2016-09	-	-	X	X	X	X
2016-10	O	O	O	O	O	X
前兆判斷成功機率	70%		85%		76%	
前兆判斷誤判機率	30%		15%		24%	
無前兆機率	44%		53%		38%	

4-2 井下應變儀數值絕對量的校正

GTSM 井下應變儀埋設在地底下深處，利用膨脹性水泥將儀器與岩層緊緊耦合以確實反應地下岩層變形的大小，但是由於岩層、水泥與儀器外殼不同彈性係數的關係，儀器記錄的觀測數值要確實反應遠場（far-field）的應變量就必須經過一定的計算與校正，考量這三種不同材質的組合，GTSM 設計者提出了在等向（isotropic）環境下的雙環模型（two-ring model）並計算出實驗室內的關係曲線（Gladwin and Hart, 1985）。但實際上，儀器安裝到地底下後，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 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，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）相關，顯示應變儀資料校正工作的複雜與必要性。

由上可知各觀測站因其周圍岩層與水泥耦合程度的不同而有不同的特性，因此可能造成觀測結果上振幅與相位間的差異，未來需要藉由其他觀測結果或理論潮汐的估算來將原始應變儀數值做一校正，來得到正確的物理絕對量。

以理論地潮來說，可以先藉由應變儀長時間下取移動視窗計算實際地潮分潮的量值（圖 4-2.1），再與軟體 GOTIC2 所計算的理論地潮分潮振幅作為比較，計算出各測站所需校正的比例（表 4-2.1）。應變儀當中較明顯的分潮為 M2 與 O1，因此我們分別計算這兩者的校正量，理論上應該要一致，實際上大部分測站的校正比例在 M2 與 O1 都相近，只有曾文水庫南測站（RST）與梅花測站（PFMT）兩測站的校正量在 M2 與 O1 的差異較大，未來必須進一步分析，其餘測站的校正量，我們偏向採用振幅較大的 M2 分潮的校正量。

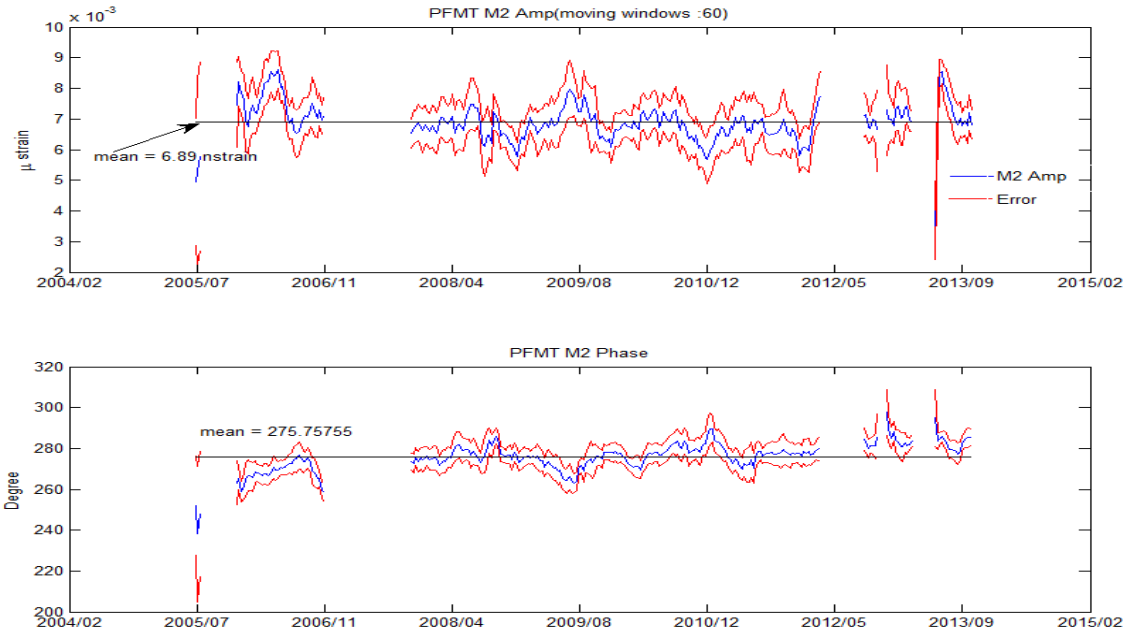


圖 4-2.1：新竹網梅花測站（PFMT）面應變長期 M2 地潮分潮。

表 4-2.1：理論地潮振幅與井下應變儀實測振幅比較。深綠色表示 M2 與 O1 在理論與實測得比值接近，淺綠色表示兩者比值較大，粉色則是差異太大需要進一步分析的測站。

	理論 Amphitude（nstrain）		實測 Amphitude（nstrain）		M2:O1 比例		理論/實測	
	M2	O1	M2	O1	理論	實測	M2	O1
RST	27.51	6.79	7.34	7.54	4.05	0.97	**3.75**	**0.9**
RNT	27	6.73	70.83	17.09	4.01	4.14	**0.38**	**0.39**
TSUN	26.81	6.7	19.6	5.68	4	3.45	**1.37**	**1.18**
TAIS	27.18	6.73	28.8	12.43	4.04	2.32	**0.94**	**0.54**
DARB	26.52	6.68	73.19	14.87	3.97	4.92	**0.36**	**0.45**
BMMT	20.93	7.22	47.44	13.86	2.9	3.42	**0.44**	**0.52**
PFMT	24.22	6.82	6.89	2.78	3.55	2.48	**3.52**	**2.45**
CINT	24.21	6.83	65.51	14.2	3.54	4.61	**0.37**	**0.48**
SANS	22.97	7.12	232.1	57.06	3.23	4.07	**0.1**	**0.12**
JING	23.56	7.37	26.01	5.36	3.2	4.85	**0.91**	**1.37**
SLIN	22.59	7.26	97.47	20.34	3.11	4.79	**0.23**	**0.36**

另外本研究也嘗試利用 GPS 測站基線變化所計算之區域應變來比對該 GPS 應變網內的井下應變儀，試圖將校正井下應變儀的數值。我們第一步先將所有測站的氣壓反應調整至所有測站的平均值（-0.317 ms/KPa），會有第一個調整值（表 4-2.2），接下來再根據 GPS 長期應變來計算井下應變儀所需要校正的比例值。目前已完成嘉義網太興測站（TAIS）與達邦測站（DARB）、新竹網大坪測站（BMMT）與梅花測站（PFMT）（圖 4-2.2 與圖 4-2.3）。初步結果顯示井下應變儀的應變皆需要乘以 0.02~0.16 才能與 GPS 所計算的區域長期應變一致，這顯示原始井下應變儀的應變數值可能是過大不合理的情況，需要進一步校正。

表 4-2.2：原始面應變要調整至平均氣壓反應（-0.317 ms/KPa）的比例。

測站	調整比例
DARB	0.906
TAIS	1.170
TSUN	1.183
PFMT	2.187
BMMT	1.200
CINT	1.095
SANS	0.486
SLIN	0.845
JING	1.332

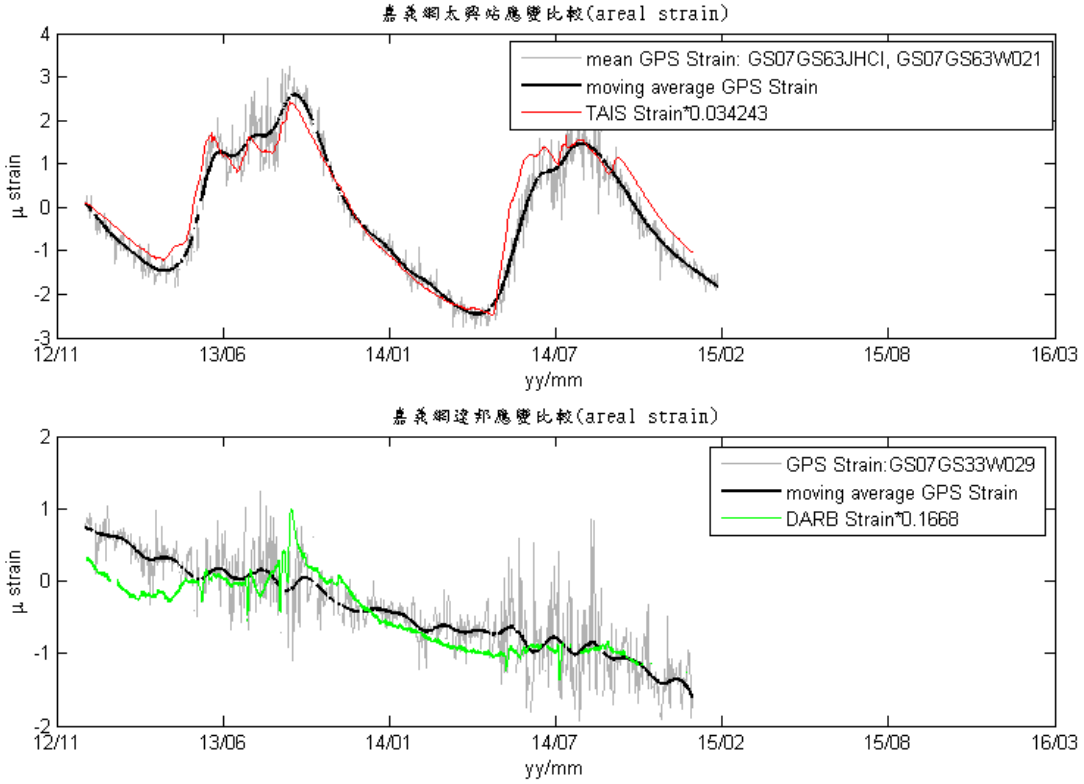


圖 4-2.2：嘉義網井下應變儀應變與 GPS 應變。

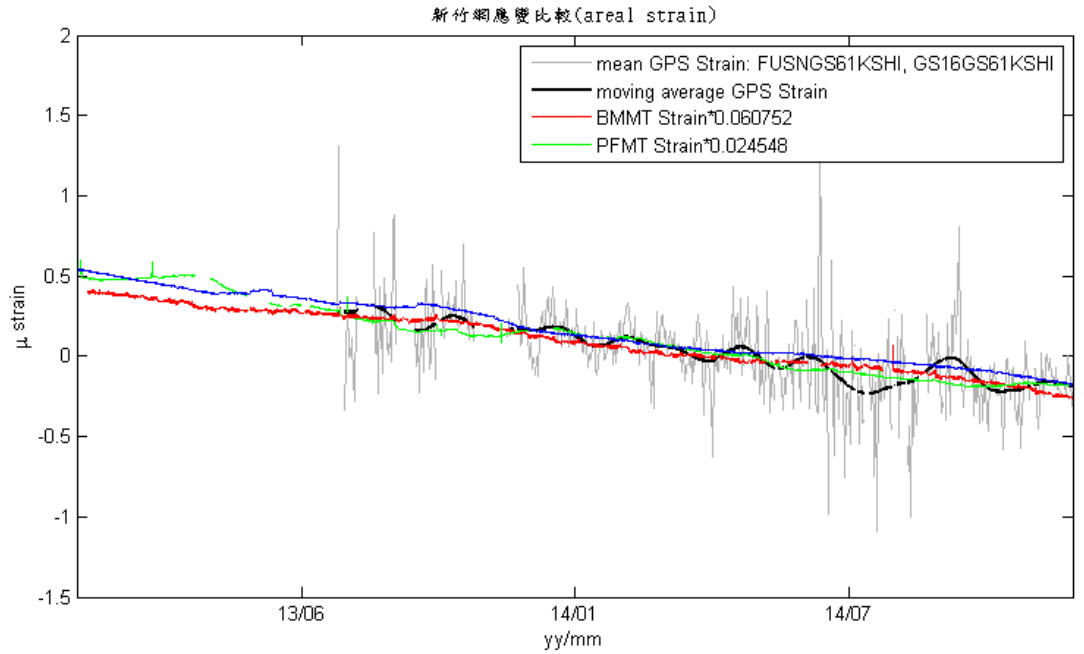


圖 4-2.3：新竹網井下應變儀應變與 GPS 應變。

4-3 地震對於應變儀軸差應變之計算

GTSM 井下應變儀的設計是以四個不同方向的軸向感應器所構成，CH0 的角度在安裝時可以透過井下的方向計量得，CH1 與 CH2 則與 CH0 分別夾 60°與 120°，CH3 則與 CH3 夾 30°，透過這樣的設計，除可提供一個當有頻道損壞不能運作時的後備選擇外，也可透過 CH3 與 CH1 的正交關係來進行資料的檢核。

以圖 4-3.1 為例，e_i 表示第 i 個頻道的軸向伸張量，圖 4-3.1a 中表示平行該頻道之伸張方向之 x_i 軸，正交 x_i 軸方向為 y_i 軸的未變形的座標型態，假設在一個均質等向的環境裡，應變儀受力後會產生幾個不同的水平張量（tensor），一個是沿著 x_i 軸方向伸張的應變量 ε_{xixi}，一個是沿著 y_i 軸方向的應變量 ε_{yiyi}，而一個是剪應變量 $2\varepsilon_{xiyi}$（不影響 i 方向的變化量）。而要表示應變儀受力的行為（圖 4-3.1b），可將其張量分別以面應變（areal strain） $\varepsilon_a=\varepsilon_{xixi}+\varepsilon_{yiyi}$，差應變（differential strain 或 gamma1 shear strain）$\varepsilon_{xixi}-\varepsilon_{yiyi}$ 以及工程剪應變（simple shear 或 gamma2 shear strain） ε_{xiyi} 來表示其變化的行為（圖 4-3.1c）。

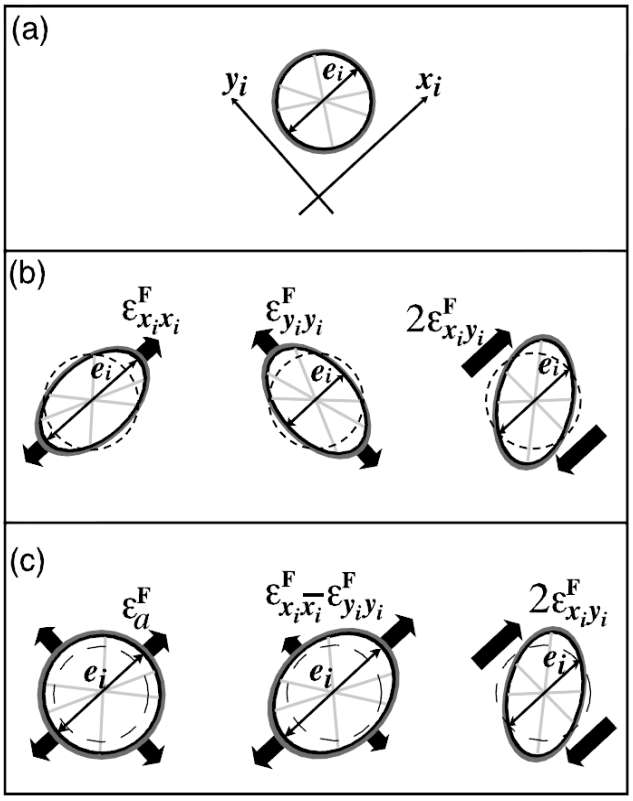


圖 4-3.1：在均質等向的理想環境下，應變儀受力後的水平張量變化情形（Roeloaffs, 2010）。

在均質等向的環境下，觀測應變對應的面應變與剪應變可以透過上面的關係直接計算而得，但是實際的狀況下，儀器設置所在岩層並非均質等向的環境，上述的關係必須改寫為如下：

$$\frac{g_1e_1+g_3e_3}{2}=C\varepsilon_a^F \qquad \text{（式 4-3.1）}$$

$$(g_1e_1-g_3e_3)=D(\varepsilon_{x1x1}-\varepsilon_{y1y1})^F \qquad \text{（式 4-3.2）}$$

其中 g_1 表示各頻道的儀器因子，表示與原始出廠資料值間的差距，C 與 D 分別表示儀器設置的耦合（coupling）因子，表示儀器本體與岩層間的耦合結果，與岩層的性質、灌漿凝固厚度與狀況有關，須透過一系列的校正程序修正來取得。因此在未得到正確的 C、D 值前，

無法推算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比較出其與儀器因子間的關係，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受岩層泊松比（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而言，其壓力應為一致，其不同的響應結果則表示其頻道上的儀器因子的差異。

表 4-3.1 為井下應變儀觀測站各個頻道的氣壓響應因子，可看到同一觀測站在相同的氣壓環境下，各頻道對於氣壓變化的響應也有不同，顯示出各頻道的儀器響應的差異。

表 4-3.1：井下應變儀觀測站的各頻道氣壓響應因子（單位: microstrain/KPa）。

SITE	CH0	CH1	CH2	CH3	AR
RNT	-0.013	-0.017	-0.020	-0.003	-0.026
RST	-0.030	-	-0.052	-0.059	-0.035
DARB	-0.132	-0.327	-0.107	-0.121	-0.387
TAIS	-0.149	-0.129	-0.130	-0.105	-0.277
TSUN	-0.172	-0.124	-0.135	-0.168	-0.258
PFMT	-0.058	-0.107	-0.061	-0.053	-0.142
BMMT	-0.124	-0.139	-0.104	-0.065	-0.243
CINT	-0.182	-0.101	-0.114	-0.180	-0.285
SANS	-0.207	-0.399	-0.556	-0.184	-0.791
SLIN	-0.233	-0.140	-0.197	-0.251	-0.380
JING	-0.150	-0.117	-0.118	-0.124	-0.255

2014 年 2 月 12 日在臺北市士林區發生一規模 4.2 的有感地震，臺北市全區震度可達 4 級（圖 4-3.2），由於臺北地區附近鮮少發生如此規模之地震，無論在新聞界與學術界都引起了不小的討論，而在這個事件中，臺北地區鄰近的觀測站是否能夠捕捉到地震發生前的前兆異常呢?由於利用面應變來判讀地震前兆異常現象常會受到雜訊如氣壓與地下水的變化影響，對於規模較小的地震常不易解析出明顯的異常訊號，利用差應變的檢測方法，理論上應可以減少氣壓、地下水此類靜岩壓力式的等向應力影響，而凸顯出異常應變的變化。我們選取臺北地區週邊的錦和測站（JING）資料來檢視，從表 4-3.1 可以得知錦和測站在各個頻道中的氣壓響應結果都相近，顯示各頻道有類似的儀器響應因子，因此我們利用錦和測站的觀察結果來進行差應變的計算（式 4-3.2），以減少計算的誤差，結果如圖 4-3.3 所示。在圖 4-3.3 中將 CH1 與 CH3 的資料繪製在同一張表上（圖上 c1 與 c3，灰線），時間為 2014/1/3 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，以便於資料判讀。同時除去潮汐的影響（c1-t，藍線；c3-t，綠線），並將氣壓的資料（淡棕線）劃在同一張圖上，在此並未特別先將氣壓從兩個頻道資料上移除，因此仍可以看到氣壓對於各頻道資料的影響。而在均質等向的情形下，氣壓對於各方向施予的壓力應為相同，氣壓的結果在計算差應變時會被去除，由於錦和測站（JING）各頻道氣壓響應的結果接近，可視錦和測站（JING）儀器設置的環境為等向的。差應變的計算利用除去潮汐資料的 c3-t 與 c1-t 之結果來計算，從氣壓響應結果來假設儀器的響應因子均相同，因此 gi 皆為 1 帶入式 4-3.2，可得沿 CH3 方向之差應變 $D(\varepsilon_{x1x1} - \varepsilon_{y1y1})^F$（紅線），其中 D 為常數，計算結果可顯示出地震前差應變的異常變化情形。結果顯示，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 起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資訊，但也發現應變觀測的局限性。以錦和測站（JING）觀測為例，對於距離 10 公里左右的 2/12 地震有良好的反應，但是對於同樣規模 4.0 但距離超過 60 公里的宜蘭地震則僅有同震的反應。

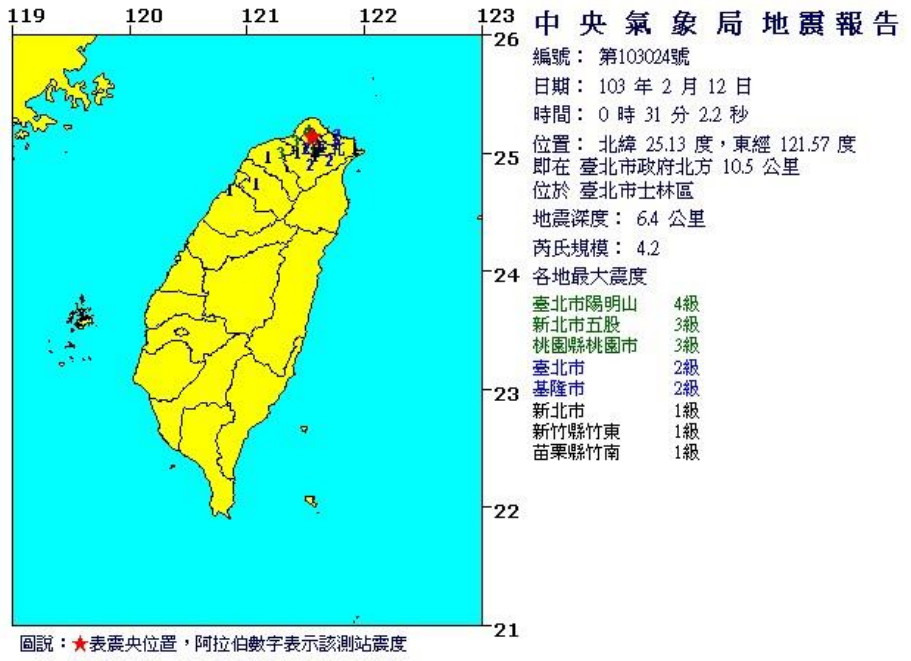


圖 4-3.2：2014 年 2 月 12 日於臺北市士林區發生規模 4.2 的有感地震。

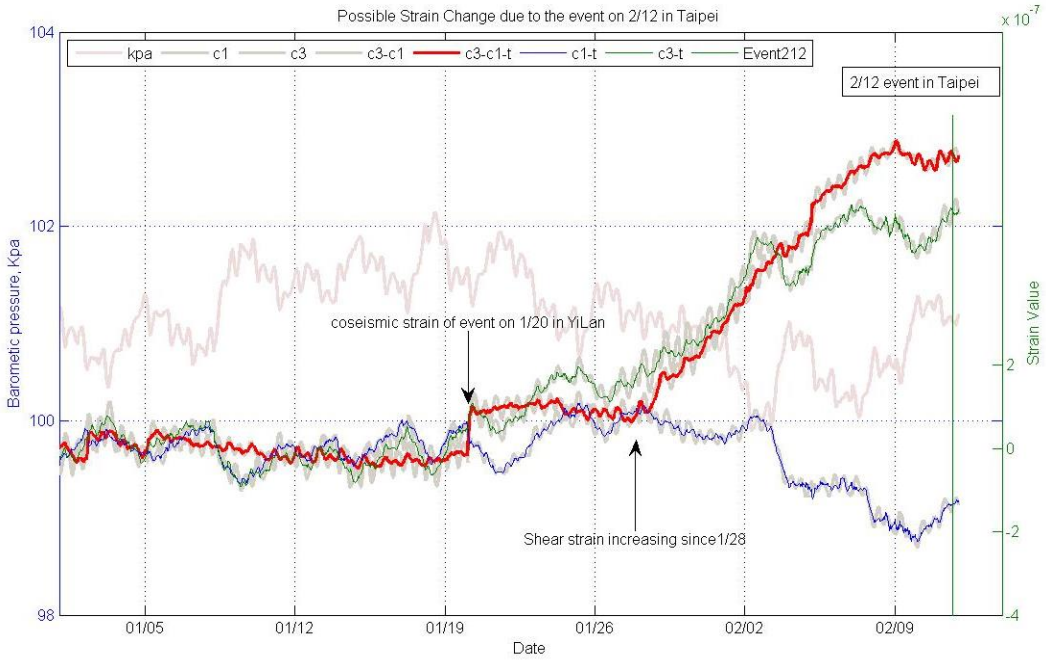


圖 4-3.3：錦和測站（JING）利用軸向差應變的計算，可比面應變更易解讀出地震前之前兆異常現象。圖上橫軸為時間 2014/1/3~2/12，左邊縱軸表示氣壓大小，右邊縱軸表示應變變化值，利用 CH3（綠線）與 CH1（藍線）間的差值（CH3-CH1）計算出沿 CH3 方向之差應變。

4-4 利用獨立成分分析法萃取應變儀中水壓訊號

獨立成分分析法（Independent Component Analysis, ICA）是經常被應用在找出訊號中具有統計獨立和非高斯因子或成分的一種分析方法，它是以非高斯訊號為研究的對象。

獨立成分分析法發展於 90 年代初期，是由法國學者 Jutten 和 Herault 首次所提出的概念，利用類神經網路概念提出一個簡單回饋的調適演算法（adaptive algorithm），便可從兩個混合的訊號中，分離出兩個獨立訊號。之後有許多的學者對此算法的收斂性與穩定性做了更深入研究，並成功解決此問題。而在 1988 年和 1989 年 Linsker 提出了最大交互資訊準則（Maximum Mutual Information），也發表了對盲訊號分離（Blind Sources Separation, BSS）研究具有重要影響的論文。1994 年 Comon 將主成分分析法（Principal component analysis, PCA）加以擴展成為獨立成分分析法，其中闡述了 ICA 的概念，界定了解決盲訊號分離之 ICA 的基本假設與條件，並將對比函數（Contrast Function）的概念應用到 ICA 當中，對 ICA 的對比函數做了定義。

Comon 為盲訊號分離問題描繪出了一個清晰的輪廓，使得 ICA 的算法設計有了明確的理論依據，而盲訊號分離的研究也迅速地發展起來。在 Comon 之後出現的盲訊號分離演算法大多數都是利用 ICA 的方法來運作，將 ICA 利用不同的原理提出各種的對比函數與相對應的優化算法，也就是說 Comon 之後的盲訊號分離研究變成了對 ICA 的對比函數及其優化算法的研究。在 1995 年 Bell 和 Sejnowski 發表一種基於類神經的 ICA 方法，他們提出一種藉由梯度法將非線性網路傳輸的信息量進行最大化，並說明經由對於訊號的超高斯信號進行最大化，會使得輸出訊號之間的互信息最小化並且恢復混合訊號的各分量之統計獨立性，進而實現訊號的分離。此篇論文則被視為 ICA 發展中的一個重要里程碑，因為文中所提出的迭代學習算法成為了後續各種 ICA 算法的基礎。

目前比較熱門的 ICA 算法有兩種，第一種為 Lee 在 1998 年所提出的 InfomaxICA，而另一種則是由 Hyvärinen 於 1999 年所提出的 FastICA，這方法是由類神經的學習法則出發，經由推導後可以使用較簡單的定點演算法來完成，因此其收斂速度比較快，也是其名稱的由來。

我們利用 Hyvärinen（1999）所發展的 FastICA 方法來進行應變儀中水壓訊號的求取，並試著移除其中的水壓響應訊號，提高構造應變訊號的強度。FastICA 提供完整的 Matlab 與其他程式語言的程式碼供學術研究使用，可至 http://research.ics.aalto.fi/ica/fastica/ 下載。

進行 ICA 處理前，必須先要瞭解 ICA 求取資料之特性，首先 ICA 分離出的結果並非絕對量，因為不知道來源與接收器的距離，因此無法得知其中獨立變數的絕對大小；第二點，ICA 分離出來的結果沒有正負號分別，因此可能與實際結果相位完全相反。這兩點的問題不大，主要是在應變儀觀測站有共站設置地下水壓計，也瞭解地下水變化造成的應變響應特性，可透過實際觀測結果校正分離出來的變數。

本研究中先取達邦測站（DARB）的觀測資料做為樣本進行 FastICA 分離地下水響應資訊的檢驗，取 2012~2014 年共 3 年的連續應變觀測與水壓資料（圖 4-4.1），其中水壓的資料可以看到這部分有相當多的不連續，若直接取地下水壓資訊進行修正，除了會有含水層代表性問題外，在資料缺少時段是無法進行水壓響應修正的，因此必須從其他資料來源來取得水壓的相關資訊。

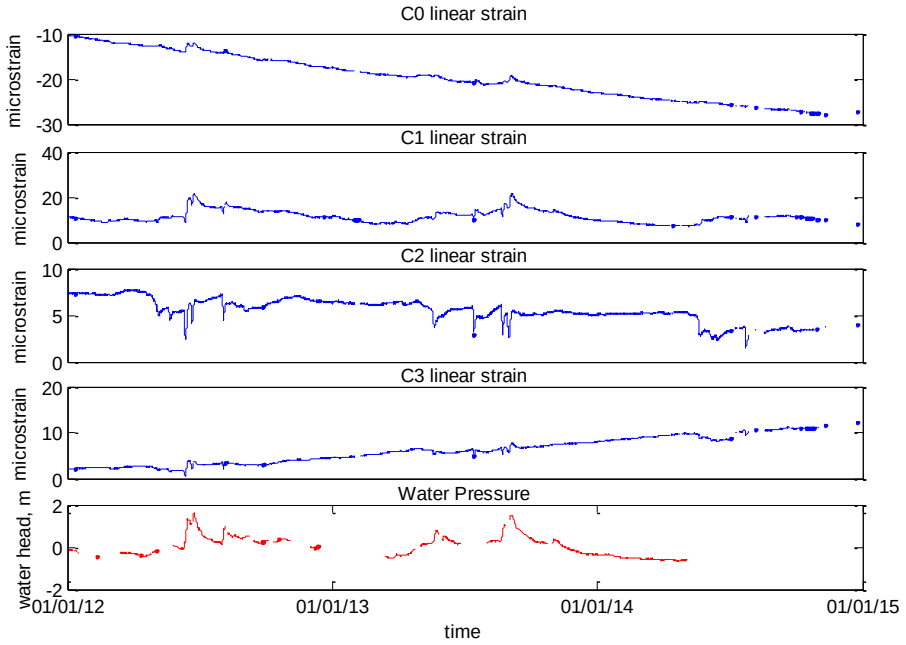


圖 4-4.1：達邦測站（DARB）2012~2014 年之應變資料（藍）與共站地下水資料（紅）。

經過 FastICA 分析，計算之 Eigenvalues 可得資料分為兩個獨立成份，其中一個成份即為地下水變化，圖 4-4.2 中淺藍色為 ICA 計算出與地下水相關的獨立成份，深藍色曲線為觀測所得的地下水壓連續資料，從結果可看出深色的觀測水壓連續性並不好，因受限於儀器故障與妥善率的影響，故地下水資料常見這種不連續的資料漏失。對比計算與觀測結果後發現，兩者的單位並不一致，觀測水壓結果為水頭高度，單位為公尺；而 ICA 係根據應變資料所得，萃取出地下水壓相關的獨立成份，其單位應為應變，但是由於不知道地下水在應變觀測資料中佔有多大比例，因此無法回推地下水頭資料。從呈現的結果來看，不考慮數值大小的情形下，兩者的整體趨勢相當一致，除了中間部份稍有落差外（這可能與一開始應變資料在置中化時以直線去除趨勢有關，如考慮指數曲線進行趨勢去除的話（如圖上紅線），可能能讓結果對比上與觀測水壓結果更為一致），在長期變化與短期波動的對比上都有不錯的結果。雖然我們無法透過 ICA 知道實際地下水壓的絕對變化量，但是如果能夠分離出各觀測應變中的地下水響應量，對於資料訊號強度的提升也可獲得相當大的助益。

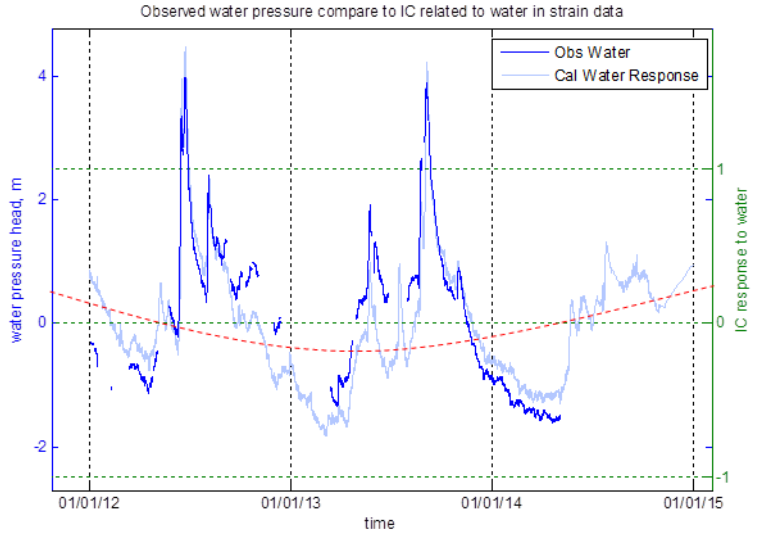


圖 4-4.2：應變儀當中地下水相關之獨立成分與觀測地下水連續資料。

從圖 4-4.3 可以很明顯的看出 ICA 的另外一個獨立成份裡，每個急遽變化的轉折高峰都可以對應到降雨資料中的強降雨事件，顯示反應的就是降雨的應變響應。但是進一步地來看，在各個強降雨事件之間，仍可以看到有一些微幅的起伏變化，表示仍藏著一些擁有相同變化特性的資訊在其中。在以往的降雨對應變觀測影響的研究中，已經知道降雨與氣壓對於應變觀測來說，兩者的響應大小都是一致的，都屬於外來的作用應力，對於各感測計的應力也都屬於靜水狀態，與地下水相反的部分都是屬於短期不排水的反應，因此這個獨立成份若將降雨與氣壓兩者視為同樣的來源是相當合理的，實際上應該為兩者的混合訊號。

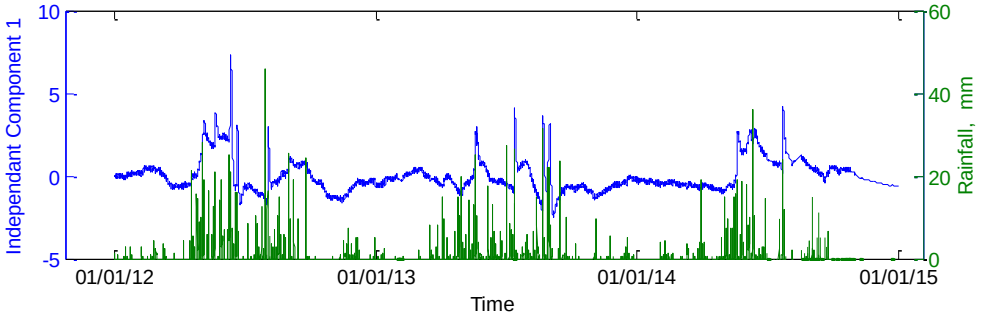


圖 4-4.3：應變儀當中降雨相關之獨立成分與觀測降雨資料。

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（2016）年度，對於新竹大平地、雲林古坑、屏東屏科大、臺東池上、花蓮東華共五座已設置之土壤氣體連續觀測站，配合新改建之沄水地下水溶解氣體觀測站；以及新竹大坪國小地下水位觀測井與地調所設置之五座地下水位觀測井持續進行觀測；此外，在南部的恆春半島進行地下水氡的連續觀測並定期採樣分析，以此地球化學觀測網，進行資料分析與判讀。

然而，地下水位觀測在這兩階段計畫以來，逐步累積大量的連續觀測資料，並且試圖找出震前地下水位異常的規則性，於上一階段結束前，本研究判定出多數震前水位異常，大都在地震發生前之兩周內出現，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，自本階段起已使用氣壓修正刪除大多數 2012 年前誤判的異常事件，本章節所討論之地下水壓觀測結果，皆已進行相關氣壓修正。

本年度彙整各土壤氣體、地下水位和地下水溶解氣體觀測站之觀測結果，比較不同時序分析方法對於異常值辨識的差異，並討論與鄰近地區地震活動之關聯性，歸納出各測站對於地震活動的敏感範圍帶，以期進一步建立流體地球化學所相對應的地震活動模型。

5-1-1 觀測站分布位置

本計畫分別有五座既有的土壤氣體觀測站，包含新竹大平地（TPT）、雲林古坑（GK）、屏東屏科大（PT）、臺東池上（CS）及花蓮東華（DH）；另外，本計畫亦觀察一口新竹大坪國小（BMMT）及五口由中央地質調查所提供之地下水位觀測井，分別為臺北錦和（JING）、樹林（SLIN）及新竹新樂（CINT），以及嘉義太興（TAIS）及達邦（DARB）；並配合嘉義沄水（YS）與墾丁社頂（KT）地下水溶解氣體和水氡觀測站持續進行觀測。各測站之位置如圖 5-1.1 與表 5-1.1。

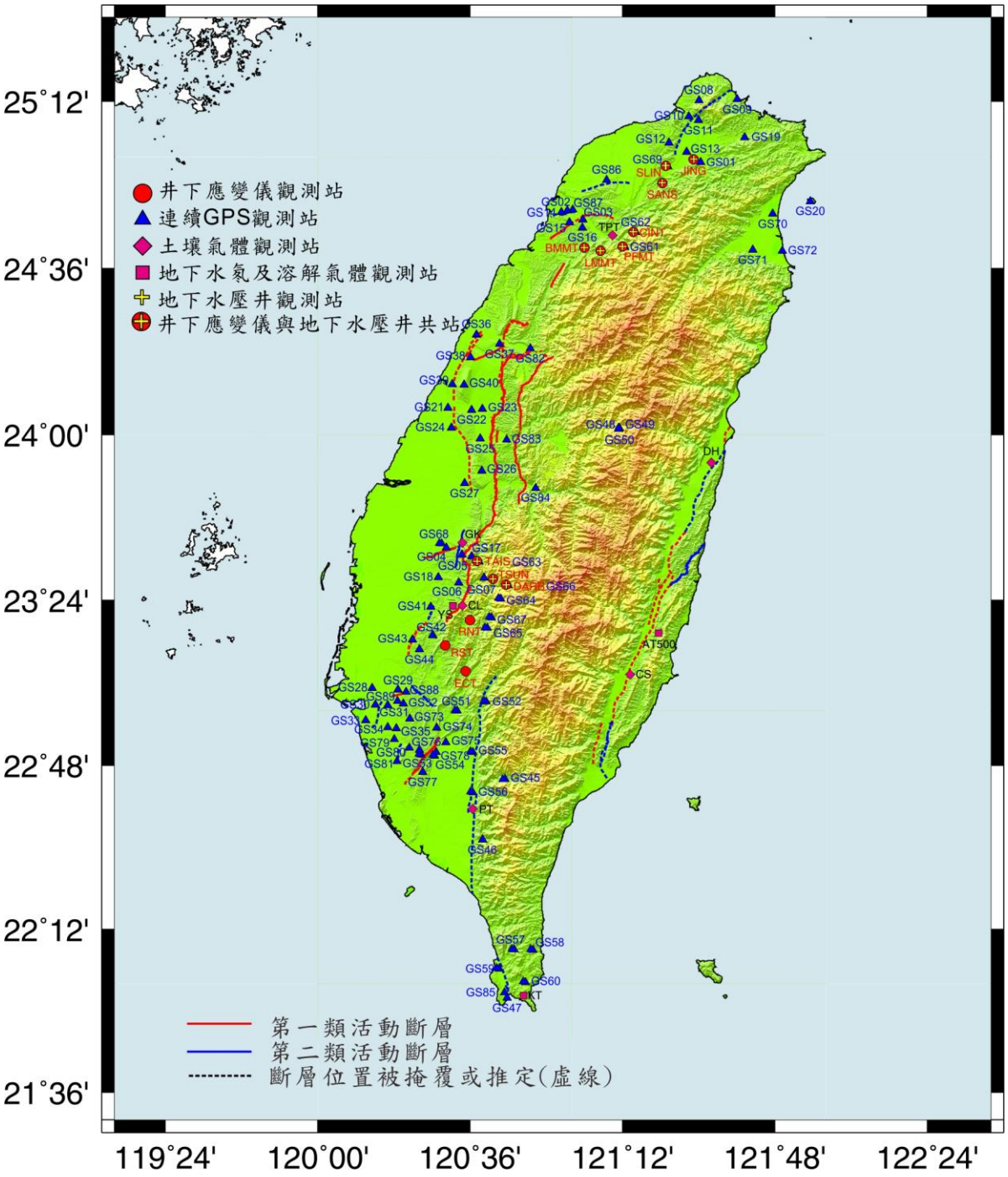


圖 5-1.1：觀測站分布位置。

表 5-1.1：地球化學既有觀測站的座標。座標系統為 TWD67。

	二度分帶（E）	二度分帶（N）
土壤氣體觀測站		
新竹大平地站（TPT）	265637	2736929
雲林古坑站（GK）	206325	2609740
屏東屏科大站（PT）	208060	2505203
花蓮東華站（DH）	305243	2643926
臺東池上站（CS）	273485	2558221
地下水壓觀測站		
臺北錦和站（JING）	298573	2764916
臺北樹林站（SLIN）	288631	2762888
新竹新樂站（CINT）	274564	2736304
新竹大坪站（BMMT）	255932	2729762
嘉義太興站（TAIS）	211814	2604620
嘉義達邦站（DARB）	227706	2592582
地下水溶解氣體觀測站		
嘉義沄水站（YS）	200697	2586171
墾丁社頂站（KT）	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（M_L）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 2015 年 12 月 1 日至 2016 年 11 月 30 日止，各測站依據前述地震篩選原則，各測站相關地震數分別為大平地站 19 起、古坑站 29 起、屏科大站 28 起、東華站 27 起與池上站 40 起。

地震學者經過長期的觀察研究，歸納得知地震發生的可能五個步驟為：（1）板塊擠壓，地殼累積彈性應變；（2）地層發生膨脹和發展微裂隙；（3）斷層帶上有流體侵入和變形；（4）發生地震；（5）餘震後地殼應力突然陡降（Bolt, 1999）。

一般而言，在前三個步驟的地震孕育期中，地殼或多或少可能會有一些徵兆發生。若能對這些前兆的發生有所了解及掌握，則對於地震的即將發生，可能會有所知曉。這些徵兆包括地球物理的前震和地形變化，以及水文地球化學的變化。

綜合以上所述，可以將地震發生與氣體異常的時間關係概略分成四個類型（圖 5-1.2）：（1）地震發生在氣體異常高點；（2）地震發生在氣體異常高點下降途中；（3）地震發生在氣體異常高點後之最低點；（4）地震發生在氣體異常高點後之最低點後升高途中。

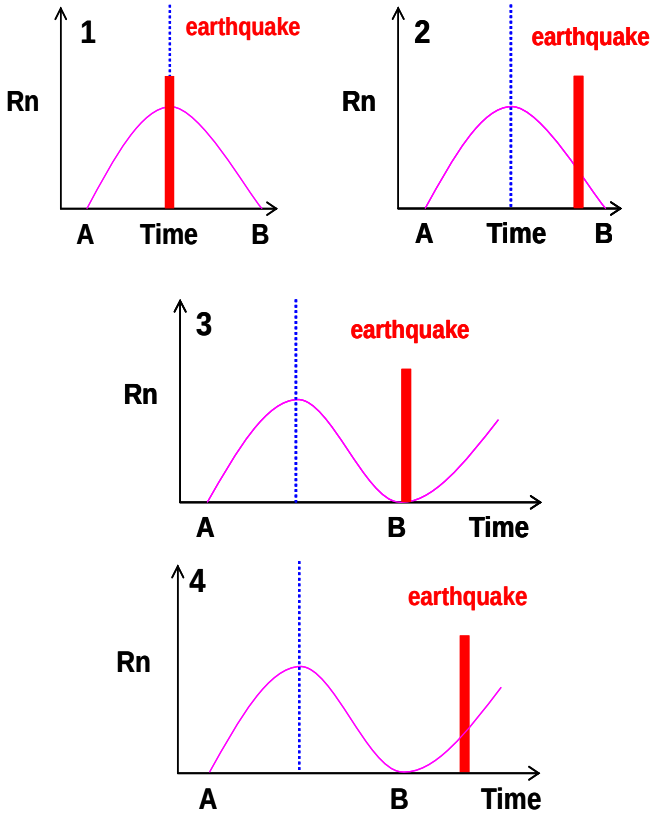


圖 5-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。A 至 B 代表一個完整氣體異常變化區間；垂直虛線為異常出現最高值的時間。（1）地震發生在氣體異常高點；（2）地震發生在氣體異常高點下降途中；（3）地震發生在氣體異常高點後之最低點；（4）地震發生在氣體異常高點後之最低點後升高途中。（Fu et al., 2009）。

5-1-3 利用時序分析方法處理觀測資料

由於有些觀測站所記錄到的數據常受到其它環境因子影響，造成判斷異常值與探討其與地震活動的困難。此外，各觀測站所定義的異常往往是主觀認定，故有時會存在認定之標準的問題，故本小節利用一些統計及數學方法，以較有系統的方式來分析連續觀測結果。

本研究利用 AnCAD 公司所開發的軟體 Visual Signal 進行數據的處理。在本節中使用兩種方法，分別是疊代式高斯平滑法（Iterative Gaussian Smoothing）及滾動統計法（Rolling Statistics）來處理不同測站的資料，分別於附錄 1-8 中詳細介紹。

本小節就今年度（104/12－105/09）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）而導致數據無法連續，會先行將其時段刪除，保留可堪用的數據，此外，為了以現有即時土壤氡氣資料研判未來地震發生的可能趨勢，可選擇以疊代式高斯平滑法與 14 天及 3.8 天的滾動平均值（Rolling average）相減後之殘值計算過去 6 個月之標準差並將其標準化，定義大於 N 倍標準差為異常，且各測站之異常門檻值不一定相同。比較圖上 14 天及 3.8 天之滾動平均值的差異，並探討濾波後的訊號與地震活動的關聯。

每個測站利用時序分析方法將資料短缺或品質不佳遭刪除的時段，補齊數據並根據不同的時序分析法做出其標準差，我們給各站所定義的異常門檻會因測站的敏感度不同及隨著資料的增加而有差異（負標準差在本研究暫不做討論），我們以超出此異常門檻時段與後續發生的地震進行討論與說明。在地震的選擇上，我們則以地震規模較大的地震為主，根據過去的研究，超過門檻的時段常會與地震規模≧5 且震源深度<100 km 且震央距離測站≦150 km 的地震事件有關；而當地震規模＜5 且震度≧2 的地震，也會列入本研究的相關地震列表進行討論。

5-2 土壤氣體觀測結果

數個土壤氣體觀測站對單一地震的異常變化：

根據過去的觀測結果，我們可經由地震活動所造成的異常變化而初步劃分出各觀測站的異常反應範圍，當各測站的反應區間出現交集處，則地震可能將發生在這個區域。例如：當北部的大平地觀測站出現異常且嘉義的中崙測站也出現異常變化時，此時兩個測站的反應區間交集處則可能為地震即將發生的位置；如果東部的池上觀測站也出現異常變化，那則可更提高準確度，如圖 5-2.1 所示。

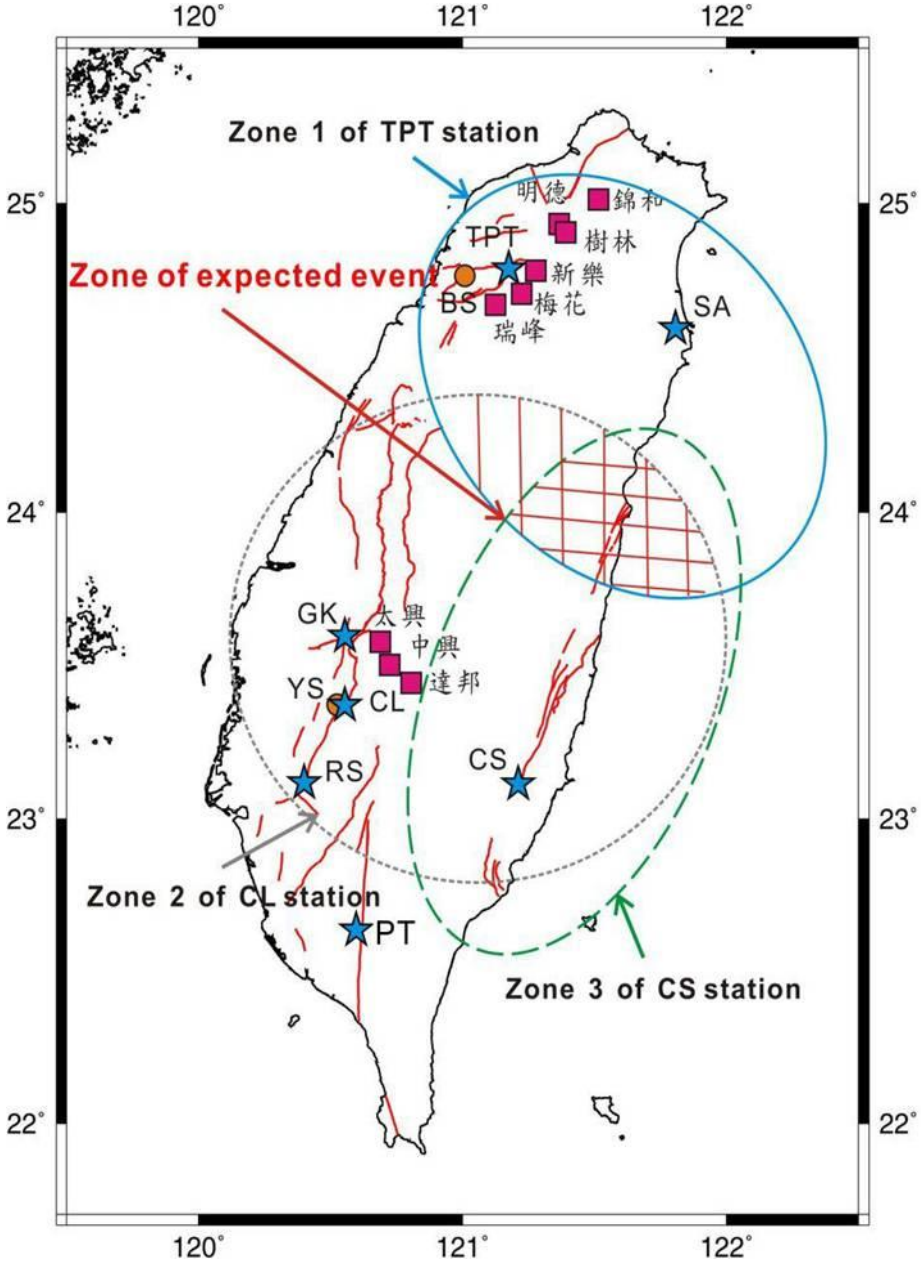


圖 5-2.1：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生地點。

2015 年 12 月至 2016 年 11 月間，有 5 起地震在發生前（下表灰色字體所示），同時有兩個（含）以上的測站土壤氡氣出現顯著的異常前兆反應。此外也列出單一測站針對規模超過 5 有前兆反應的地震。另外，東部的池上站附近，有另一獨立設置之錦園觀測站，當池上站出現異常變化或資料缺失時，可將兩測站資料相互比對與驗證，如表 5-2.1。此外，今年 2 月 6 日於高雄美濃發生規模 6.6 地震，可與 2010 年 3 月 4 日高雄甲仙地震作一比較，因為對於兩起地震有前兆反應的都是古坑站、屏科大站及池上站，如表 5-2.2。

表 5-2.1：單一地震與多個土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。

NO.	西元時間	規模	深度 km	震央位置	大平地（TPT）			古坑（GK）			屏科大（PT）			池上（CS） 錦園（CY）			東華（DH）		
					Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R
1	2016/1/11 12:52	5.3	33.2	花蓮近海			1.2							3	10.3	3.2			
2	2016/1/19 10:13	5.8	29.7	臺東外海				2	6.7	2.4	2	6.5	3.7	4	57.2	5.8			
3	2016/2/6 03:57	6.6	14.6	高雄美濃				5	109.5	9.2	5	105.5	19.2	3	22.6	9.1			
4	2016/2/9 08:47	5.1	5.7	花蓮近海													3	19.6	10.1
5	2016/2/16 12:04	5	5	臺東海端							2	4.6	2.8	3	10.1	4			
6	2016/2/18 09:09 2016/2/18 09:18	5.3 5.1	5.4 4.3	臺東海端							2 2	4.7 4.1	3.8 3	3 3	13.7 10.1	5.1 4.3			
7	2016/4/11 13:45	5.7	59.8	宜蘭外海	2	4.7	2.4												
8	2016/4/16 18:55	5.2	11.8	臺東外海										2	3.6	1.7			
9	2016/4/27 23:17 2016/4/27 23:27	5.7 5.1	11.9 13	花蓮近海	2 1	6.2 1.4	3.3 2												
10	2016/4/28 02:19	5.5	15.2	花蓮富里				2	5.98	2.75									
11	2016/5/12 11:17 2016/5/12 12:29 2016/5/13 16:24	6.1 5.7 5.2	8.9 12 9.8	宜蘭外海	3 3 1	15.79 8.91 4.73	3.81 2.68 1.85												
12	2016/5/22 04:51	5.3	18.1	高雄六龜							5	100	4.9						
13	2016/5/31 13:23	6.9	256.9	基隆外海	2	4.73	1.85												
14	2016/6/20 08:39	5.1	39.4	臺東外海				1	2.39	1.18									
15	2016/11/7 19:56	5	17.9	臺東近海				1	1.97	1.34									
16	2016/11/12 06:25	5.1	21.6	宜蘭外海	1	0.84	1.39												

表 5-2.2：甲仙地震與美濃地震土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。

NO.	西元時間	規模	深度 km	震央位置	大平地（TPT）			古坑（GK）			屏科大（PT）			池上（CS） 錦園（CY）			東華（DH）		
					Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R
1	2010/3/4 08:18	6.4	22.6	高雄甲仙				4	36	8.4	9	99.5	13.6	4		10.6			
2	2016/2/6 03:57	6.6	14.6	高雄美濃				5	109.5	9.2	5	105.5	19.2	3	22.6	9.1			

（1）2016/01/11 花蓮近海地震（M_L 5.3，Depth 33.2 km）

如圖 5-2.2（A）所示，大平地站在 7 天前、錦園站也在 8 天前，有氣體異常的變化趨勢。大平地站在 11 天前氡氣即緩慢上升，有一完整的異常變化，且這段時間內無降雨的干擾。錦園站氡氣上升是在降雨前，因此也可以排除降雨干擾的因素。觀察此兩站原始資料可以得知地震發生在氡氣再次上升之際。不過此起地震位於大平地站原有的敏感反應圈外，仍需繼續觀察大平地站氡氣變化是否仍與此區地震有關。這起地震的震央落在圖上池上反應圈內（圖 5-2.2（B）黃色星號）。

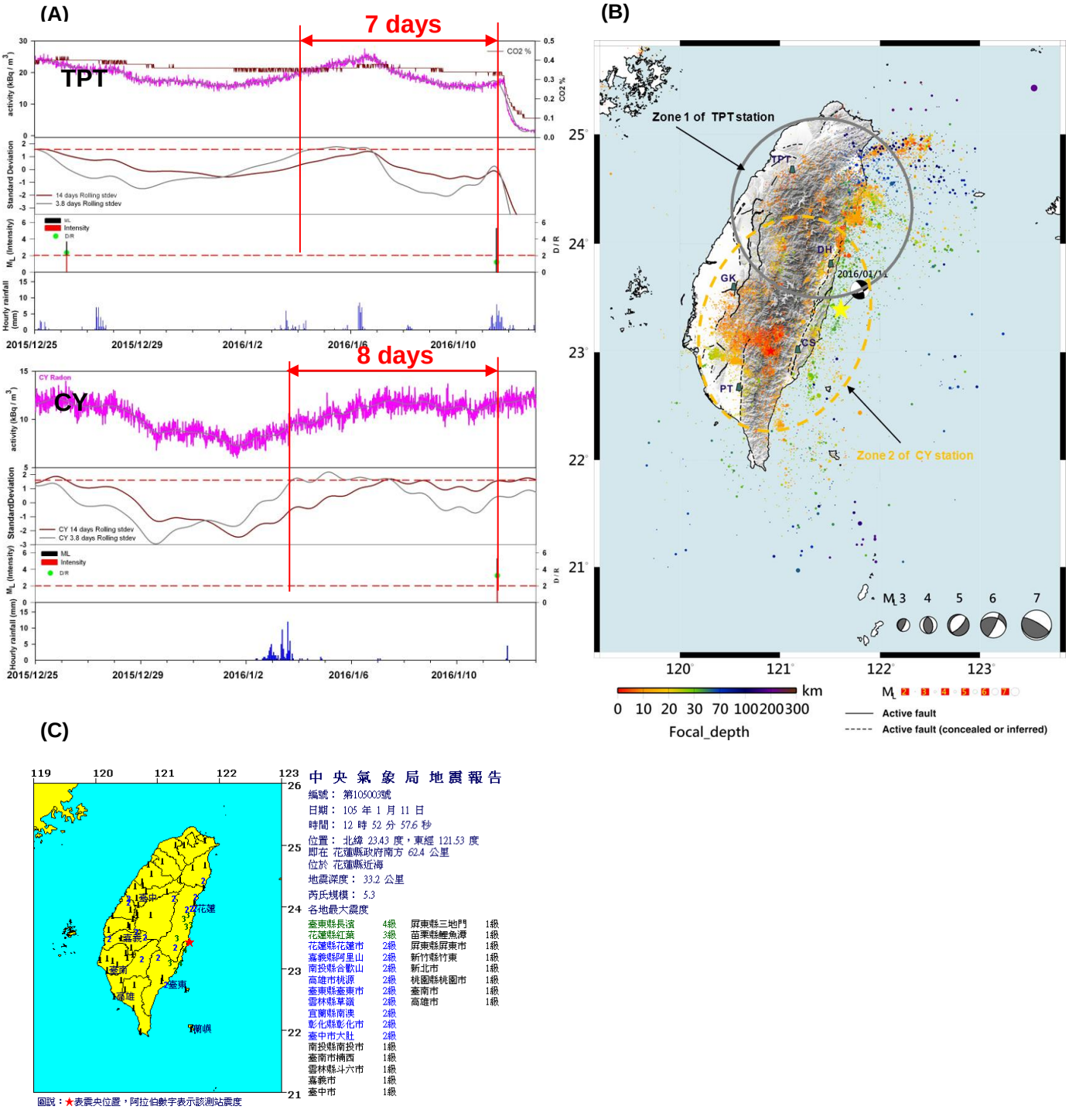


圖 5-2.2：2016/1/11 花蓮近海地震與各測站觀測情形（A）大平地站（TPT）、錦園站（CY）土壤氣體觀測結果（2015/12/25-2016/1/13）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍。黃色星號表示花蓮近海地震的震央位置（C）地震報告圖。

（2）2016/01/19 臺東外海地震（M_L 5.8，Depth 29.7 km）

如圖 5-2.3（A）所示，古坑站在 6 天前，屏科大站在 6 天前，錦園站在 8 天前有氣體異常的變化趨勢。觀察氣體上升附近時日並無明顯雨勢影響，因此可確定是真實的氣體反應。三個測站的原始資料及由時序分析結果都可以看出在地震來之前，氡氣有一明顯的上升下降變化趨勢。不過此起地震位於古坑站原有的敏感反應圈外，仍需繼續觀察古坑站氡氣變化是否仍與此區地震有關。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 5-2.3（B）黃色星號）。

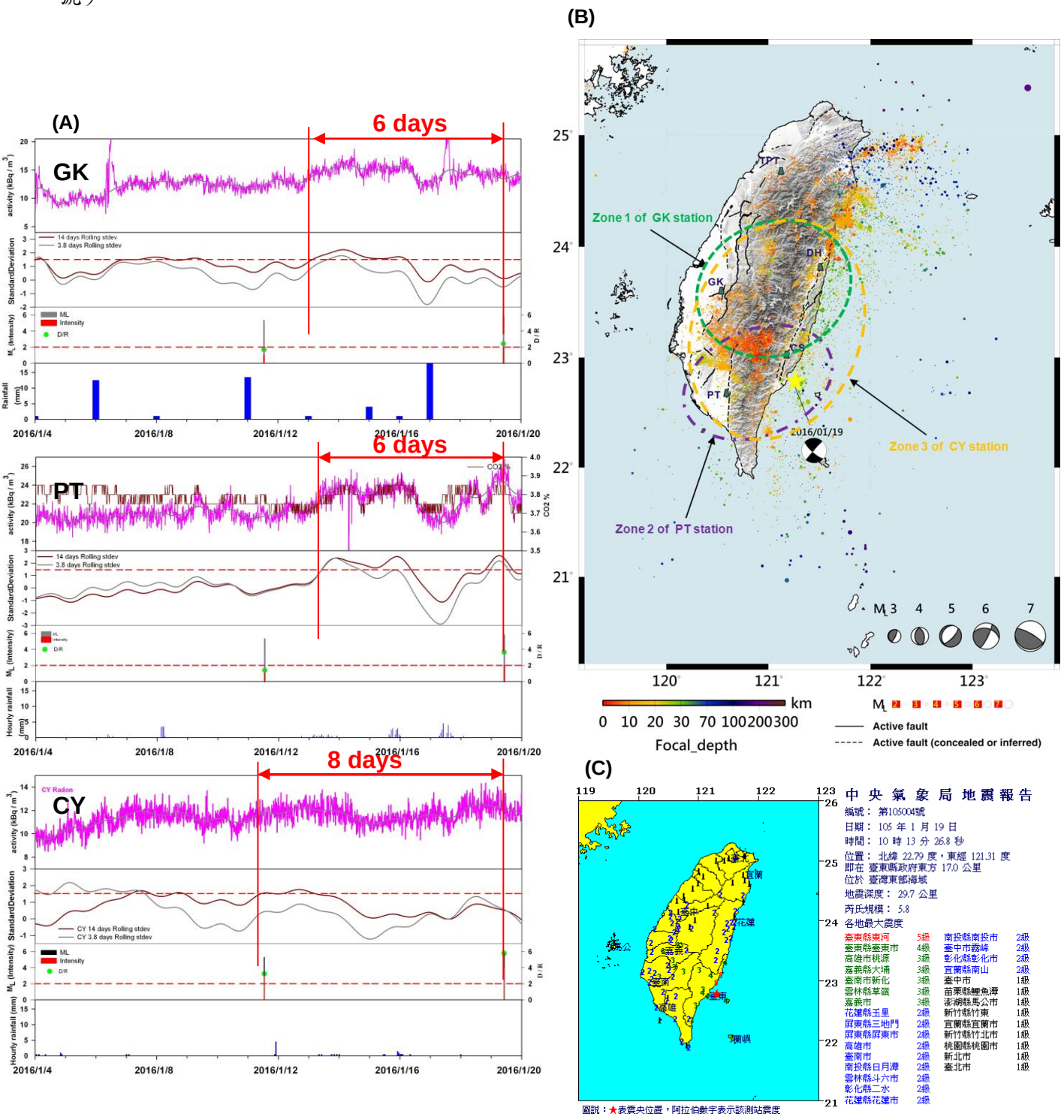


圖 5-2.3：2016/01/19 臺東外海地震與各測站觀測情形，（A）古坑站（GK）、屏科大站（PT）、錦園站（CY）土壤氣體觀測結果（2016/1/4-2016/1/20）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示臺東外海地震的震央位置（C）地震報告圖。

（3）2016/02/06 高雄美濃地震（M_L 6.6，Depth 14.6 km）

如圖 5-2.4（A）所示，古坑站、屏科大站皆在 14 天前、錦園站在 9 天前，有氣體異常的變化趨勢。觀察氣體上升附近時日並無明顯雨勢影響，因此可確定是真實的氣體反應。其中古坑站及屏科大站的變化趨勢雷同，氡氣先在短時間內上升，接著緩慢下降，並於再次上升時發生地震。錦園站則是有一個較明顯的上升下降變化趨勢。不過此起地震位於古坑站原有的敏感反應圈外，仍需繼續觀察古坑站氡氣變化是否仍與此區地震有關。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）。

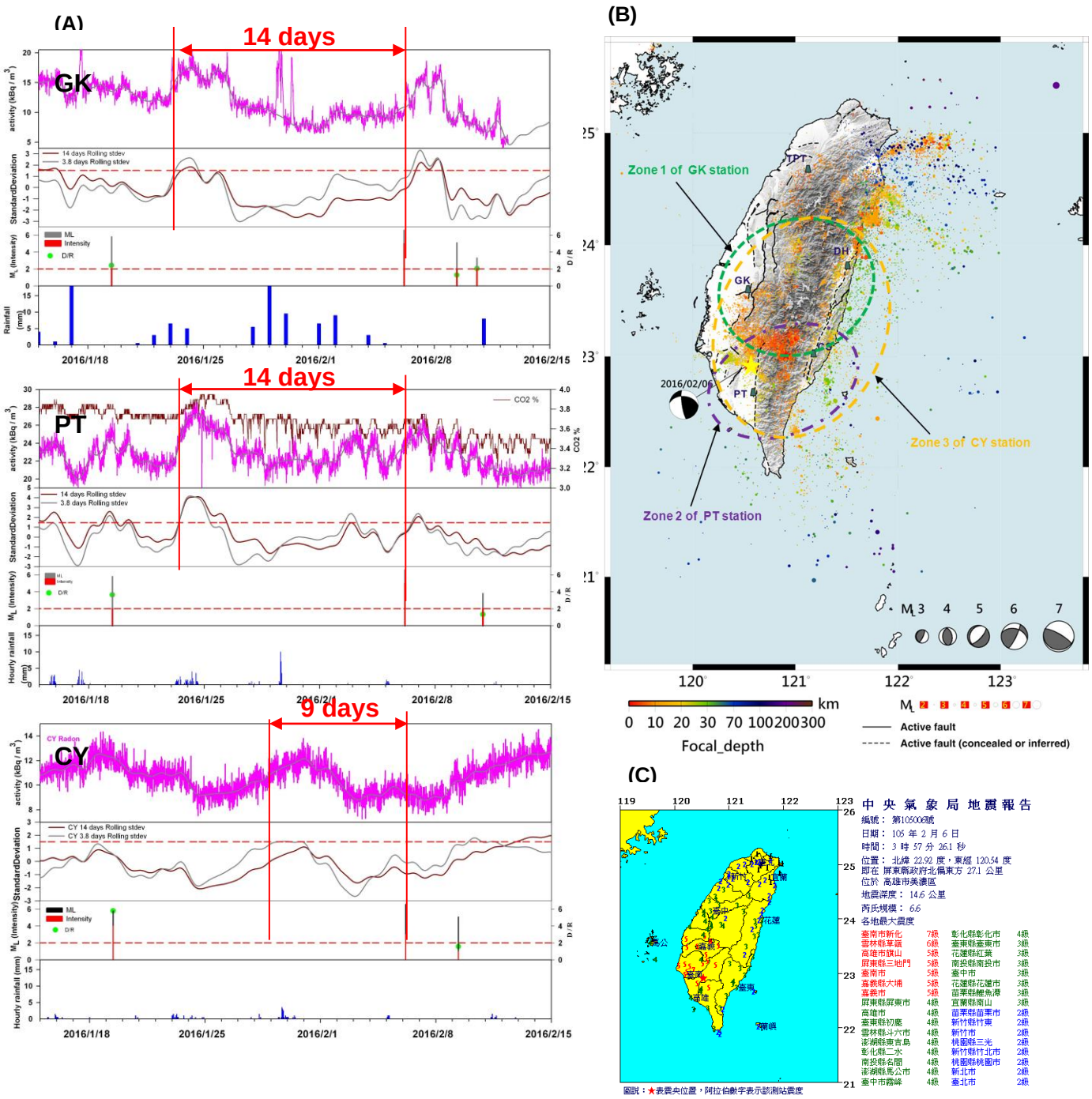


圖 5-2.4：2016/02/06 高雄美濃地震與各測站觀測情形（A）古坑站（GK）、屏科大站（PT）、錦園站（CY）土壤氣體觀測結果（2016/1/15-2016/2/15）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示高雄美濃地震的震央位置（C）地震報告圖。

（4）2010/03/04 高雄甲仙地震（M_L 6.4，Depth 22.6 km）

如圖 5-2.5（A）所示，古坑站在 13 天前、屏科大站在 14 天前，池上站在 10 天前，有氡體異常的變化趨勢。其中古坑站及屏科大站的變化趨勢雷同，氡氣先是持續四天上升，到達高點後下降，直至持續七天的平穩狀態後，發生地震。不過此起地震位於古坑站原有的敏感反應圈外。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 5-2.5（B）黃色星號）。

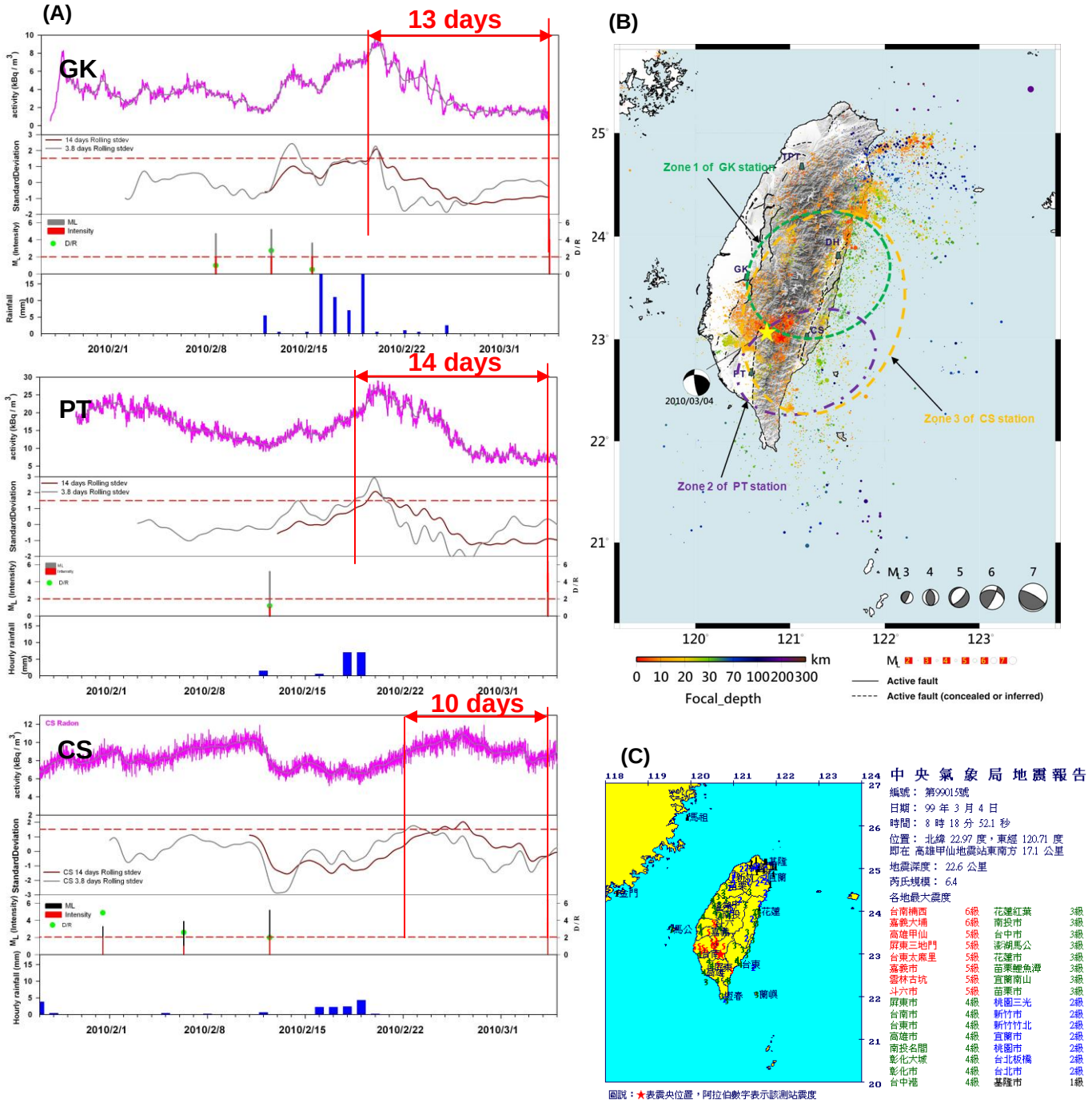


圖 5-2.5：2010/03/04 高雄甲仙地震與各測站觀測情形（A）古坑站（GK）、屏科大站（PT）、池上站（CS）土壤氡體觀測結果（2010/1/27-2010/3/5）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示高雄甲仙地震的震央位置（C）地震報告圖。

（5）2016/02/16 及 02/18 臺東海端地震（02/16，M_L 5.0，Depth 5 km； 02/18，M_L 5.3，Depth 5.4 km；02/18，M_L 5.1，Depth 4.3 km）

如圖 5-2.6（A）所示，屏科大在 3 天前，池上站在 8 天前，有氣體異常的變化趨勢。觀察氣體上升附近時日並無明顯雨勢影響，因此可確定是真實的氣體反應。兩站由原始資料可以看出明顯的氡氣異常變化趨勢，再藉由時序分析結果，更能證實在地震來前即有氣體異常的反應。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 5-2.6（B）黃色星號）。

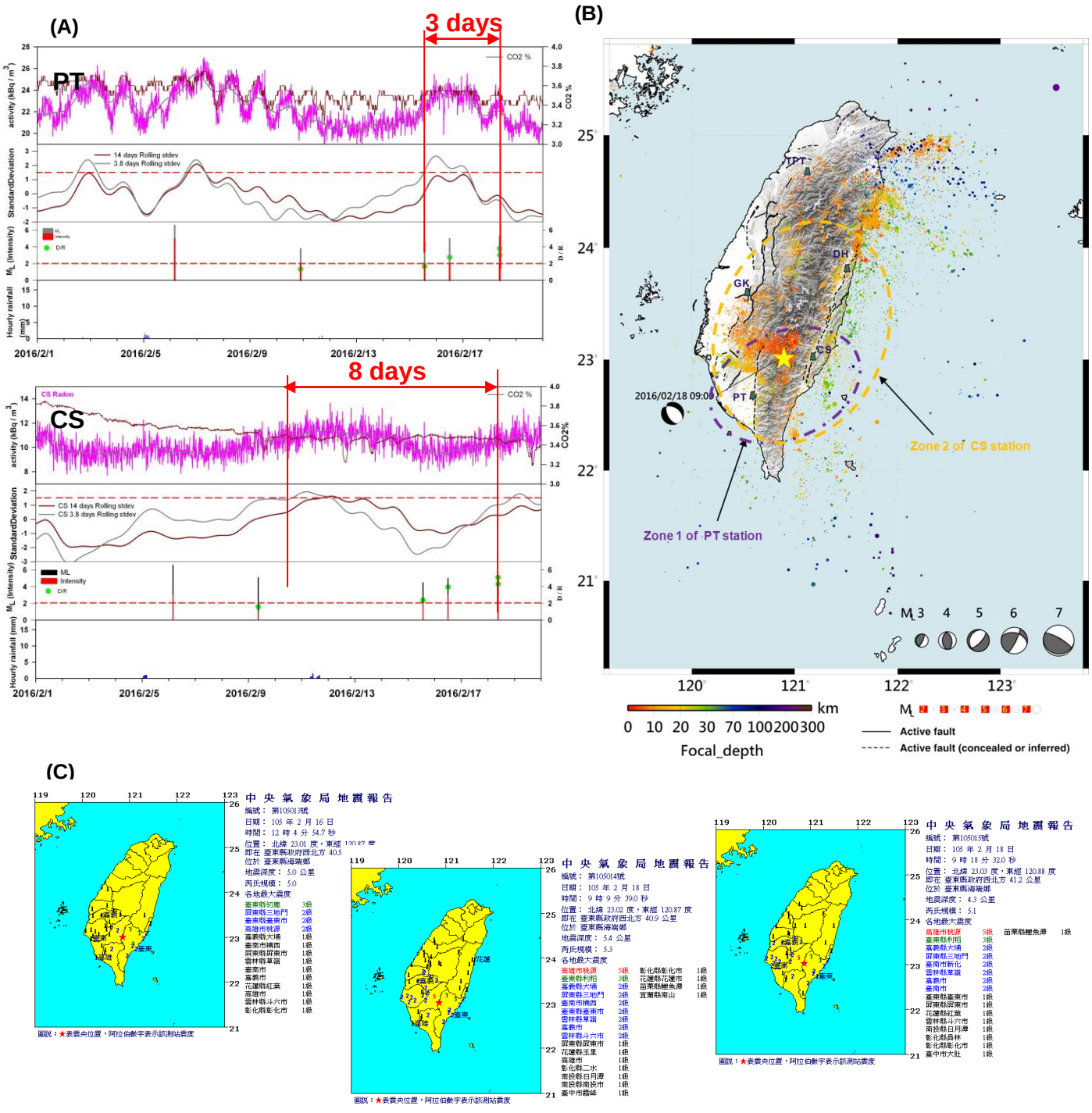


圖 5-2.6：2016/02/18 臺東海端地震與各測站觀測情形（A）屏科大站（PT）、池上站（CS）土壤氣體觀測結果（2016/02/01-2016/02/20）（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示臺東海端地震的震央位置（C）地震報告圖。

（6）2016/04/27、05/12、05/13、05/14 及 05/31 宜蘭外海地震

圖 5-2.7 為 2016 年 4 月 18 日至 6 月 5 日的觀測結果，大平地站在 4 月 22 日有顯升高變化，於 4 月 26 日達到異常門檻，1 天後於宜蘭地區發生規模 5.7 地震事件；5 月 9 日氡氣濃度再度增加並在 11 日達到異常門檻，1 天後陸續在宜蘭外海發生數起規模 5.2 至 6.1 之地震事件；5 月 19 日氡氣濃度持續增加，並於 23 日大幅超過異常門檻，31 日在基隆外海發生規模 6.9 之地震事件，這與 2014 年 12 月 11 日規模 6.7 的地震位置相近，當時同樣在 10 天前觀測到濃度持續升高的變化相似。除了 5 月 31 日的地震之外，其餘震央皆落在該站之反應區範圍內。

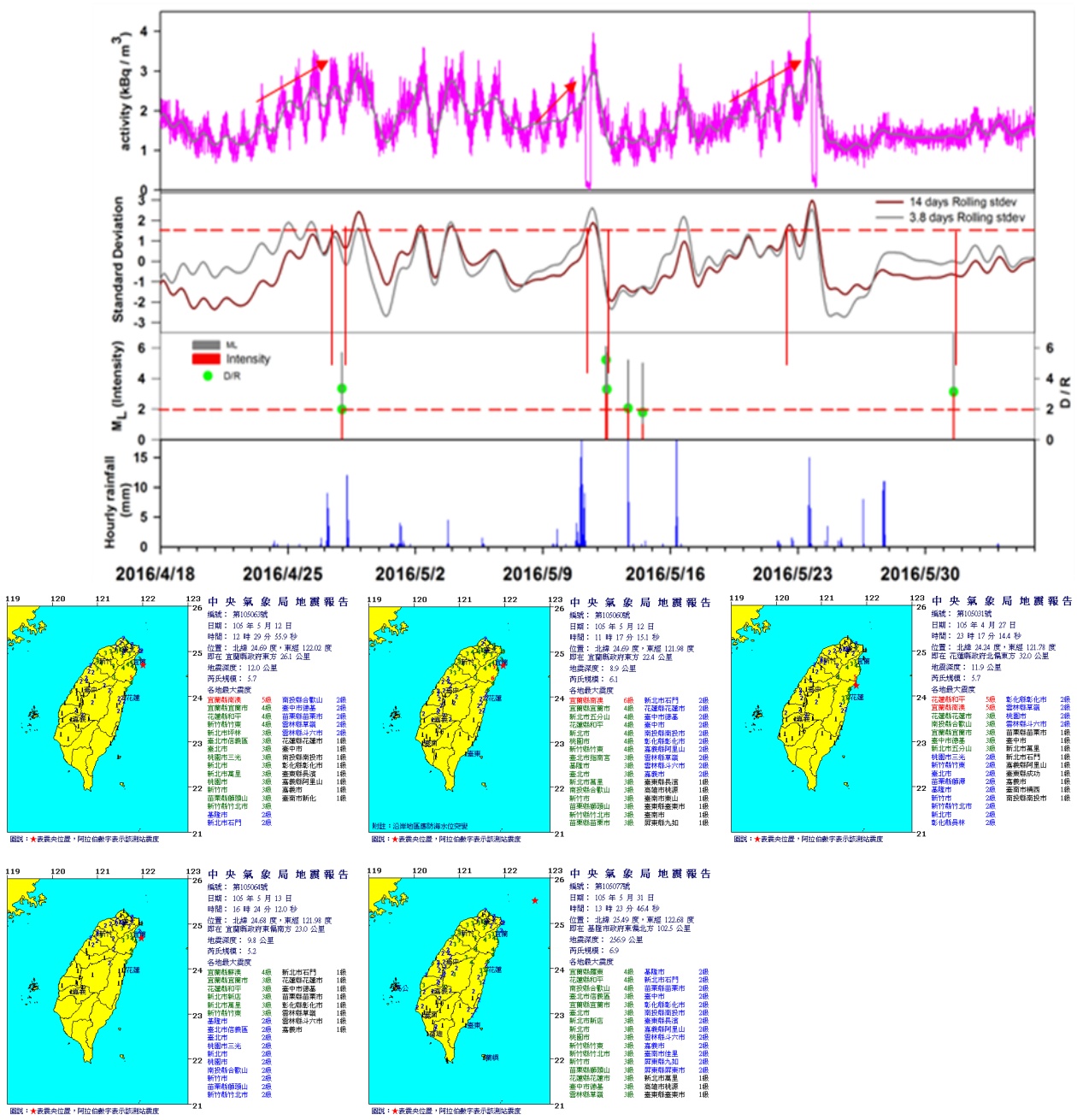


圖 5-2.7：新竹大平地站之土壤氣體觀測結果與宜蘭外海地震之關聯（2016/04/18-2016/06/05）。

截至目前為止，本年度各測站氣體異常反應之地震比率，如下表 5-2.3 所示。此外，根據過去的觀測結果，已初步劃分出各觀測站的較敏感的異常反應範圍，當測站觀測到明顯的異常變化，則地震有很高的機率會發生在這個區域，尤其是規模較大的地震事件（規模大於五）；若僅比較各測站氣體異常和地震規模五以上的地震比率，可發現成功率明顯提升，如下表 5-2.4 所示。不過，由於本年度較大規模之地震事件的發生時間過於接近，且異常地震個數僅列入較早發生或較大規模者。因此，造成統計上的地震基數偏高而使得部分測站的成功比率略為偏低的結果，例如大平地測站，於反應圈內且規模大於五的地震為 8 起，分別為 2/9、4/11、4/27（有 2 起）以及 5/12-5/14（三天內發生 4 起），除了 2/9 的地震之外，該測站皆有觀察到前兆變化，若以上述計算方式，有 7 次前兆反應且基數為 8，則成功比率為 88%(7/8)。

此外，我們每週會依據上述時序分析的流程，將各測站當週所觀察的數據進行分析與討論，並將其與之前的資料整合，用以觀察未來氣體濃度的變化趨勢，發布測站氣體異常訊息。本年度自 2015 年 12 月 1 日至 2016 年 9 月 30 日止共發布 35 週訊息（內含 44 則測站異常與否訊息），其中測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生的誤報率，其內容如表 5-2.5 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，7 次」、「氣體有異常且有地震且無研判，14 次」、「氣體有異常且無地震，7 次」與「氣體無異常且無地震，16 次」共四項，經過計算後得到其誤報率約為 48%；其中，「氣體有異常且有地震且無研判」的原因主要為時效性問題，意指在進行發布之前地震已經發生，但有氣體變化於地震發生前已出現異常，常與發布當週測站資料尚未更新有關。若將該項因子同樣視為成功前兆判斷，則誤報率降為 16%。

表 5-2.3：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	62	19	13（9）跨號內為規模大於 5 的地震數	68%　(69%)
雲林古坑 GK	64	29	9（8）跨號內為規模大於 5 的地震數	31%　(89%)
屏東屏科大 PT	63	28	9（6）跨號內為規模大於 5 的地震數	32%　(67%)
花蓮東華 DH	138	27	3（2）跨號內為規模大於 5 的地震數	11%　(67%)
臺東池上 CS	74	40	14（7）跨號內為規模大於 5 的地震數	35%　(50%)

表 5-2.4：各測站規模＞5 的地震，其在反應圈內、外有前兆的成功比率。

觀測站名稱	與測站相關地震數（規模＞5）	反應圈內的地震數	反應圈外的地震數	反應圈內有前兆的地震數及（成功比率）	反應圈外有前兆的地震數
新竹大平地 TPT	14	10	4	8（80%）	1
雲林古坑 GK	18	5	13	4（80%）	3
屏東屏科大 PT	17	10	7	6（60%）	0
花蓮東華 DH	26	1	25	1（100%）	1
臺東池上 CS	20	15	5	6（40%）	1

表 5-2.5：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	2015/12/1	屏科大站	2015/12/3 臺東外海，規模 5.3	有研判到
		池上站	2015/12/3 臺東外海，規模 5.4	有研判到
2	2015/12/8	池上站	2015/12/12 花蓮玉里，規模 4.6	無研判
3	2015/12/15	古坑站	2015/12/21 台南六甲，規模 3.7	無研判
4	2015/12/22	大平地站	2015/12/26 新竹關西，規模 3.7	無研判
		池上站	2015/12/22 花蓮近海，規模 4.4	無研判
5	2014/12/29	古坑站	無相關地震	
6	2016/1/5	測站無異常	無相關地震	
7	2016/1/12	大平地站	2016/1/11 花蓮外海，規模 5.3	無研判
		屏科大站	2016/1/19 臺東外海，規模 5.8	無研判
8	2016/1/19	古坑站	2016/2/6 高雄美濃，規模 6.7	無研判
		屏科大站	2016/2/6 高雄美濃，規模 6.7	無研判
		池上站	2016/2/6 高雄美濃，規模 6.7	無研判
9	2016/2/13	池上站	2016/2/18 台東海端，規模 5.3	有研判到
		屏科大站	2016/2/18 台東海端，規模 5.3	無研判
10	2016/2/22	池上站	2016/2/27 臺東外海，規模 4.8	有研判到
		屏科大站	2016/2/27 臺東外海，規模 4.8	無研判
11	2016/3/1	池上站	無相關地震	
12	2016/3/8	池上站	無相關地震	
13	2016/3/15	測站無異常	無相關地震	
14	2016/3/22	測站無異常	無相關地震	
15	2016/3/29	測站無異常	無相關地震	
16	2016/4/12	測站無異常	無相關地震	
17	2016/4/18	測站無異常	無相關地震	
18	2016/4/26	大平地站	2016/4/27 花蓮近海，規模 5.7	無研判
19	2016/5/3	測站無異常	無相關地震	
20	2016/5/10	測站無異常	無相關地震	
21	2016/5/16	池上站	2016/5/18 台東外海，規模 5.3	有研判到
		東華站	2016/5/18 台東外海，規模 5.3	有研判到
22	2016/5/25	池上站	無相關地震	
		東華站	無相關地震	
23	2016/5/31	東華站	2016/5/30 花蓮近海，規模 4.7	有研判到
24	2016/6/15	池上站	2016/6/20 花蓮外海，規模 5.1	無研判
25	2016/6/28	池上站	2016/7/9 花蓮富里，規模 3.8	無研判
26	2016/7/12	測站無異常	無相關地震	
27	2016/7/26	池上站	無相關地震	
28	2016/8/9	池上站	無相關地震	
29	2016/8/16	測站無異常	無相關地震	
30	2016/8/22	測站無異常	無相關地震	
31	2016/8/30	測站無異常	無相關地震	
32	2016/9/6	測站無異常	無相關地震	
33	2016/9/13	測站無異常	無相關地震	
34	2016/9/19	測站無異常	無相關地震	
35	2016/9/27	測站無異常	無相關地震	

表 5-2.5：測站土壤氡氣異常變化與後續地震發生誤報率（續）。

NO	預報日期	氡氣有異常的測站	地震	研判正確與否
36	2016/10/4	測站無異常	無相關地震	
37	2016/11/1	大平地站	2016/11/12 宜蘭外海，規模 5.1	有研判到
38	2016/11/8	古坑站	2016/11/7 台東近海，規模 5	無研判
39	2016/11/15	測站無異常	無相關地震	
40	2016/11/22	測站無異常	無相關地震	
41	2016/11/29	測站無異常	無相關地震	

5-3 地下水壓觀測結果

2016 年度（2015 年 12 月至 2016 年 11 月）地震資料之中，地下水位觀測結果，太興站於 2/6 時受美濃地震影響而有水位上升的現象（圖 5-3.1）。

至目前為止仍正常運作的觀測站，分別為臺北的樹林站、新竹的新樂站與大坪站、嘉義的太興站；於 2015 年 12 月至 2016 月 11 月期間，在太興觀測站似乎發現顯著與地震相關聯之震前水位異常。表 5-3.1 列出各測站對地震事件同震現象的反應情況。以下將就目前運作中的各站狀況分述如下：

（1）臺北樹林站

樹林站自設站以來均未發現與地震相關的異常現象，今年 3 月底修復後資料有十多天呈現不穩定狀態，但因為下降後水位平均高度與以往的水位資料吻合，且近期無相關地震，故推斷此為修復後的暫時不穩定現象，但近期疑似因儀器問題而使得資料有時會不連續，造成對地震影響的研判有問題。今年五月間有兩次地震在樹林站出現同震現象（圖 5-3.2）。

（2）新竹新樂站與大坪站

新樂站在今年觀察，地下水位的起伏多與降水有關。三月中該站水位計損壞，於四月修復後，在資料收集上與樹林站一樣有數據中斷的現象，影響對地震反應的觀測。而大坪站今年的水位資料都相當平穩，剔除氣壓變化影響後，水位幾乎維持水平，雨量對該站也幾乎無影響。新樂站於今年的 2/6 美濃地震中出現同震現象，大坪站於今年的 5/31 的基隆外海地震中出現同震現象（圖 5-3.3）。

（3）嘉義太興站

目前的太興水位站為 2013 年 12 月啟用的新站，至今兩年多的資料顯示，太興水位趨勢大致呈現季節性的變化，乾溼季的水位差可至 12 到 15 公尺，然而對短期性的變化因素，如降雨、氣壓等，反應均相當遲鈍。以今年上半年的水位資料而言，幾乎全程依照水位趨勢緩升或緩降。不過，該站今年在幾次地震中，出現了水位同震驟升的現象（圖 5-3.4）。此外，2/6 美濃地震前，太興站在數天前有水位上升的現象，疑似為震前異常；2/6 美濃地震後，太興站水位變化現象與 2010 年甲仙地震時的舊太興站水位變化相似，皆呈現同震上升的變化且升高後逐漸緩降，皆在數週後回復到背景水位變化（圖 5-3.5）。

表 5-3.1：地震事件對測站水位影響列表。

地震 事件	樹林站 距離 (km)	樹林站 變化 (cm)	新樂站 距離 (km)	新樂站 變化 (cm)	大坪站 距離 (km)	大坪站 變化 (cm)	太興站 距離 (km)	太興站 變化 (cm)
2016/1/19 10:13 M_L5.8 Depth 29.7	246	無	220	無	213	無	108	上升 7
2016/2/6 3:57 M_L6.4 Depth 14.6	243	無	213	向上 震盪 6	202	無	69	上升 26
2016/4/28 2:19 M_L5.5 Depth 15.2	190	無	163	無	156	無	67	上升 6
2016/5/12 11:17 M_L5.8 Depth 17.5	57	上升 12	71	無	84	無	185	無
2016/5/31 13:23 M_L7.2 Depth 271.3	113	上升 11	138	無	153	向上 震盪 6.5	272	上升 14

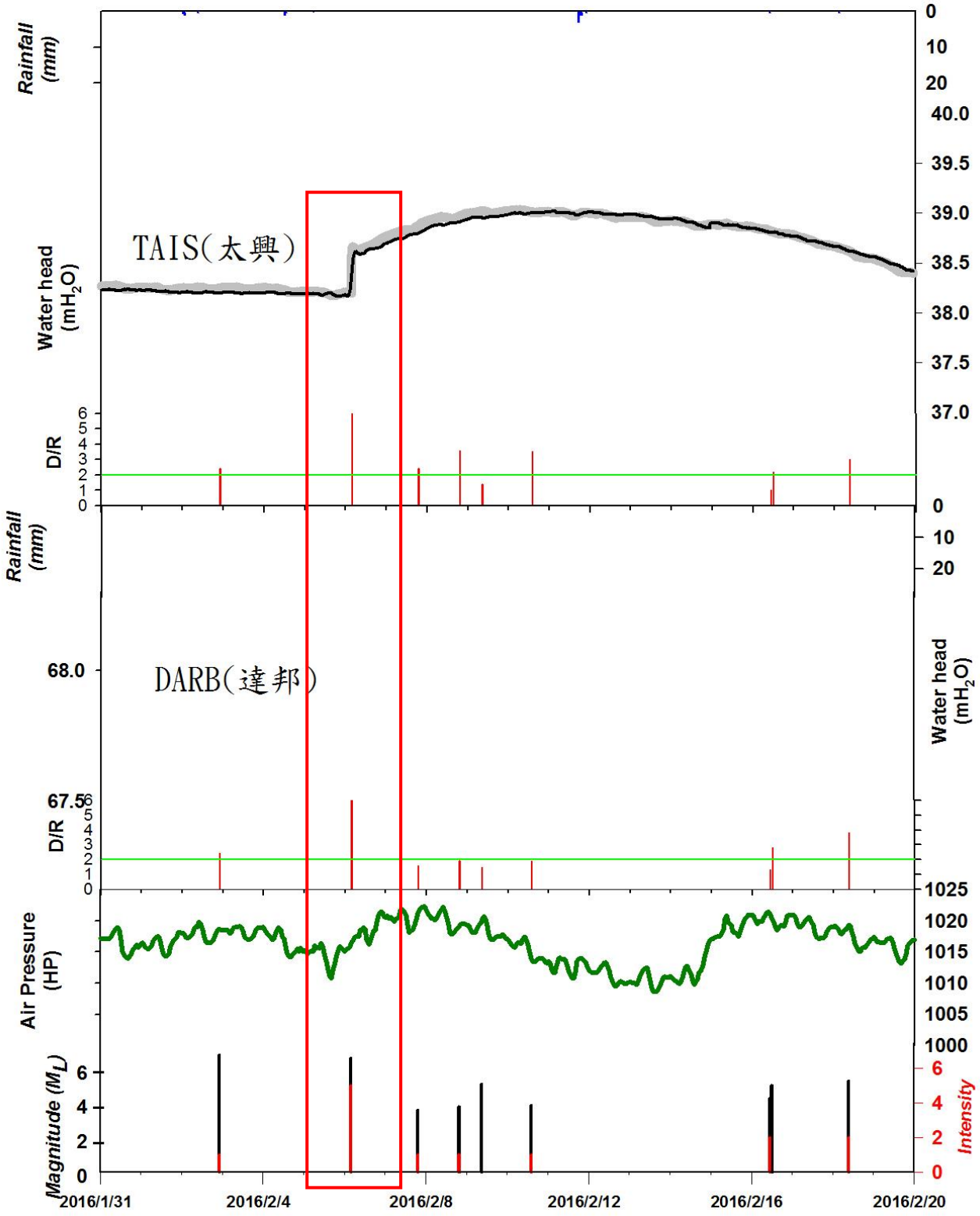


圖 5-3.1：嘉義太興站 2 月水位異常圖示。圖中太興站水位紅框處為異常發生點。

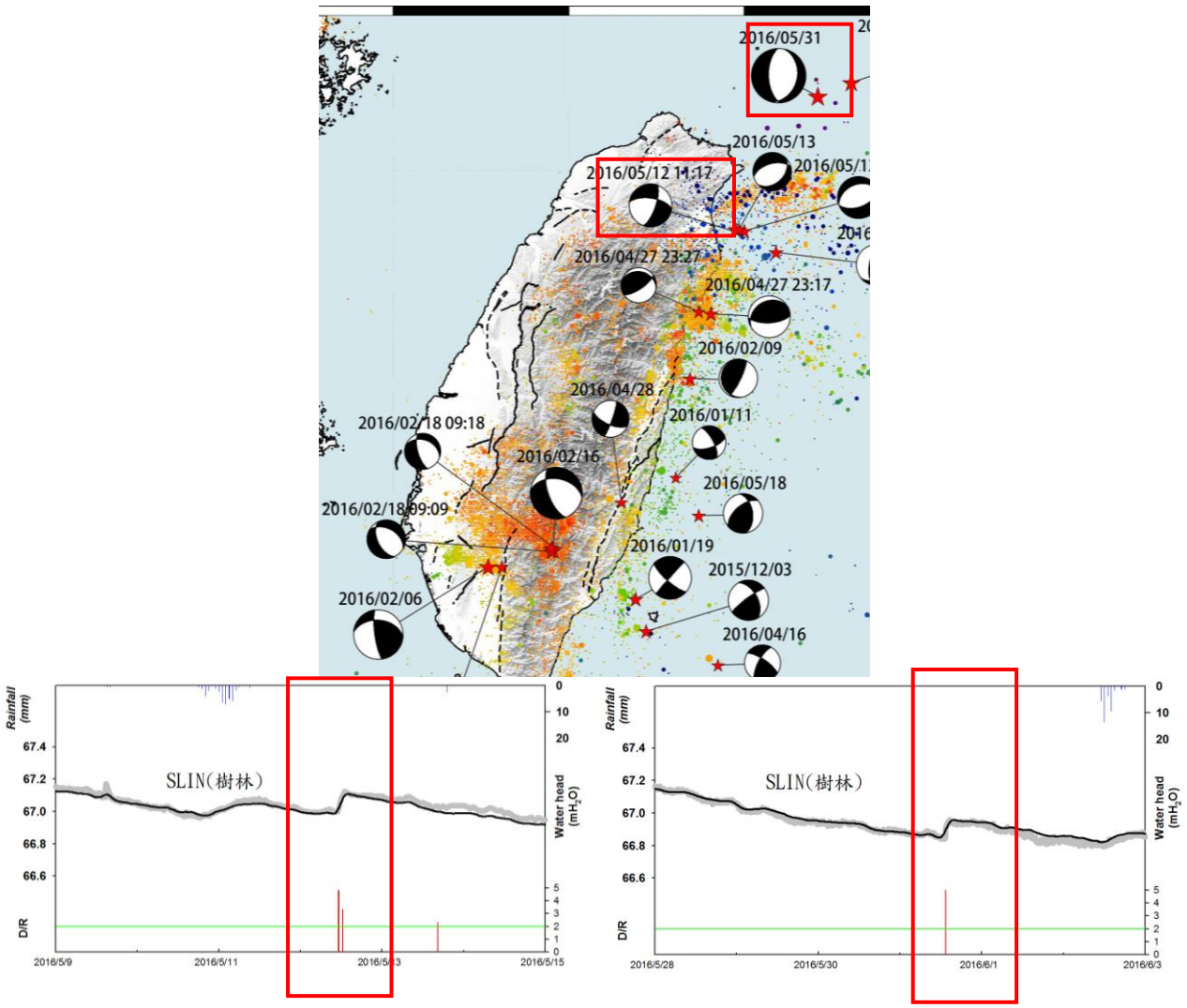


圖 5-3.2：台北站群今年同震現象示意圖。上圖為地震資訊，紅框內為有影響地下水位的地震；下圖紅框由左到右為樹林站於 5/12/地震與 5/31 地震的水位同震現象，灰線為水位原始資料；黑線為移除氣壓效應之水位結果。

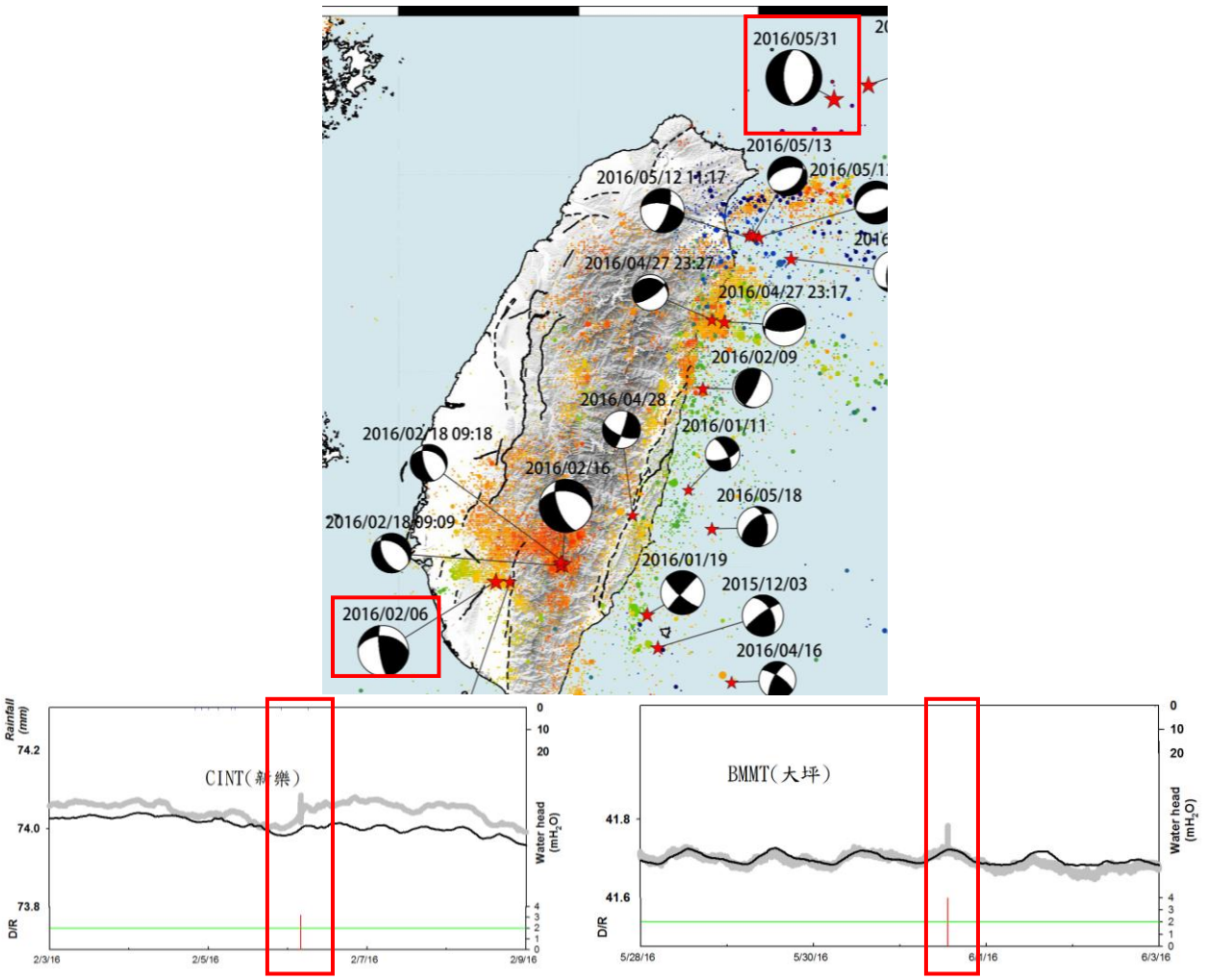


圖 5-3.3：新竹站群今年同震現象示意圖。上圖為地震資訊，紅框內為有影響地下水位的地震；下圖紅框由左到右為新樂站與大坪站於 2/6 美濃地震與 5/31 基隆外海地震的水位同震現象，灰線為水位原始資料；黑線為移除氣壓效應之水位結果。

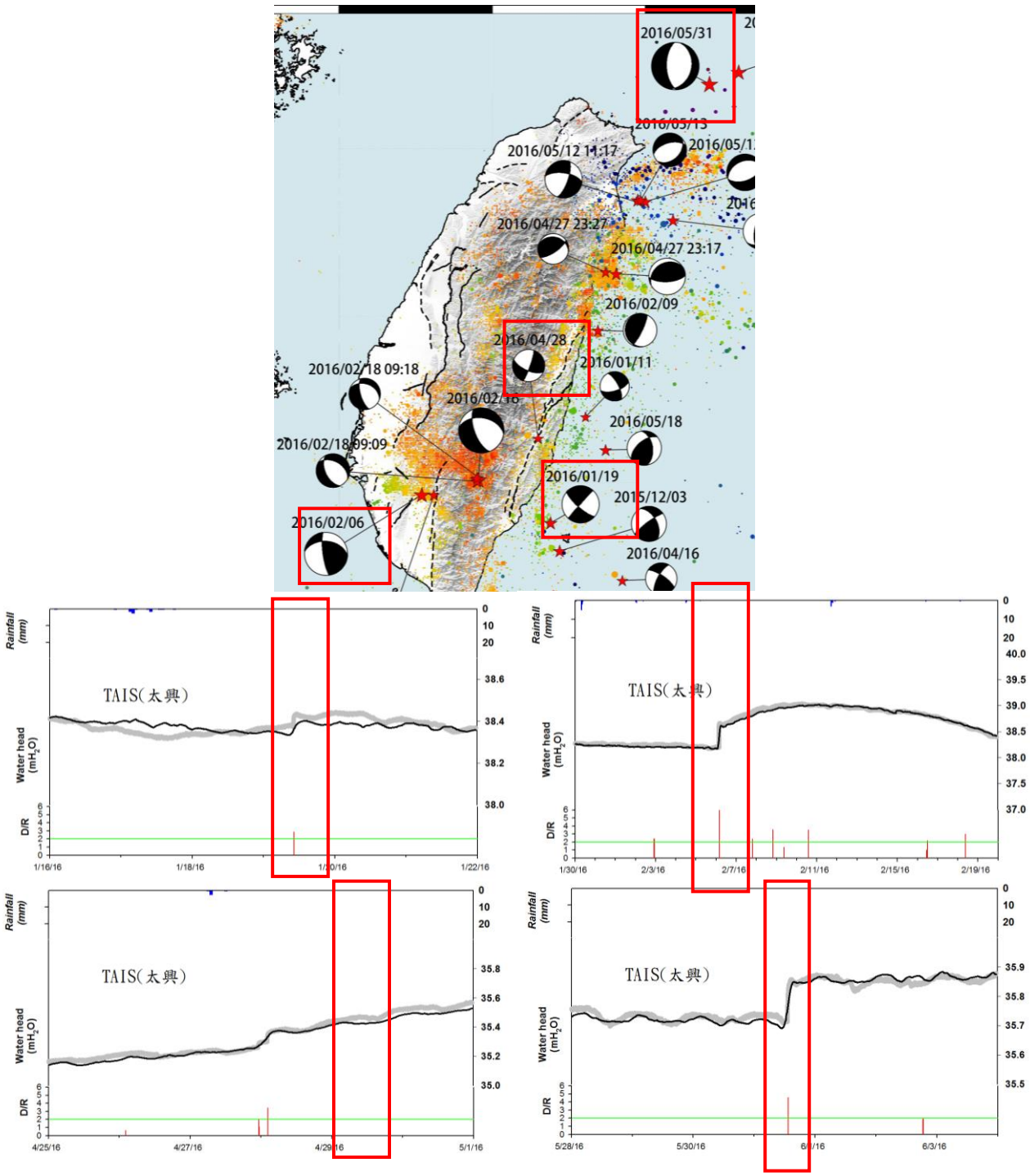


圖 5-3.4：嘉義站群同震現象示意圖。上圖為地震資訊，紅框內為有影響地下水位之地震；下圖為太興站於 1/19、2/6、4/28、5/31 地震的同震現象，灰線為水位原始資料；黑線為移除氣壓效應之水位結果。

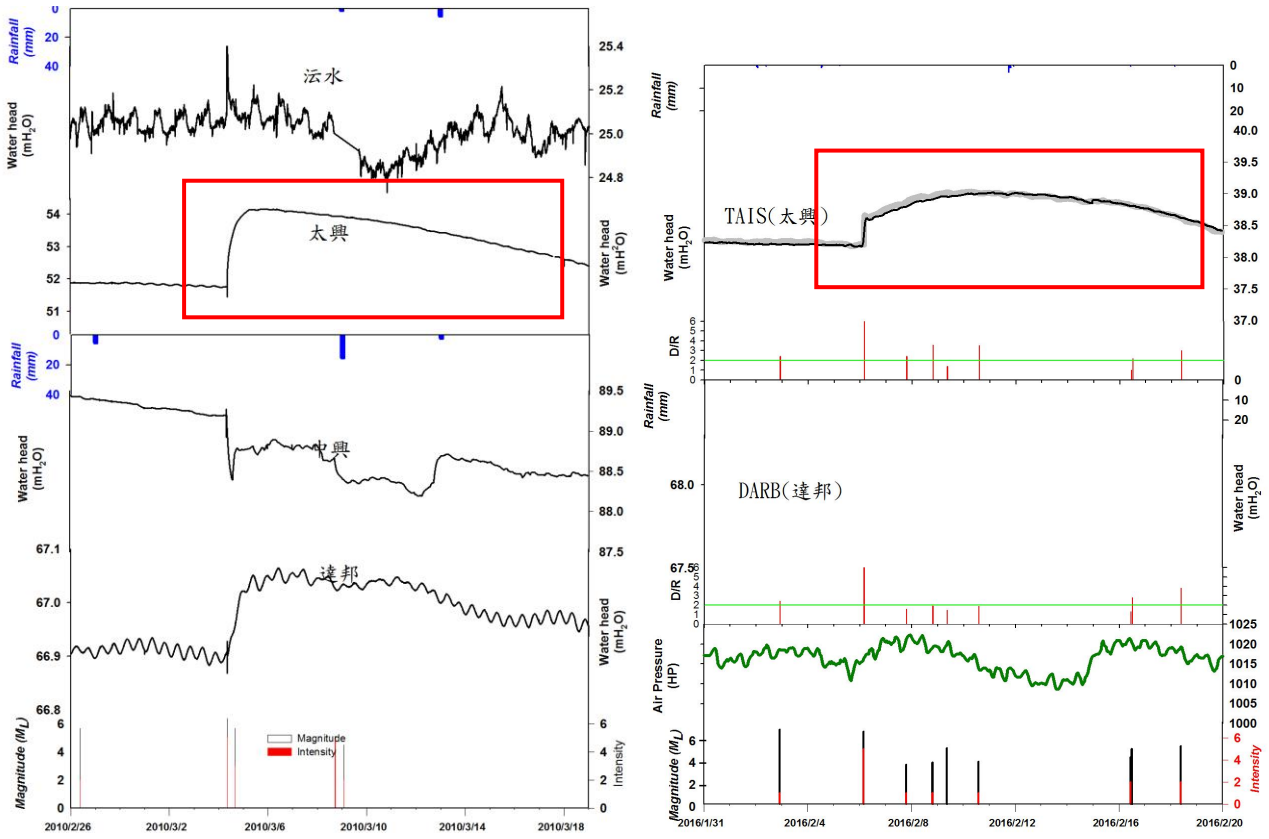


圖 5-3.5：2010 甲仙地震與 2016 美濃地震太興站水位比較圖。紅框內為水位變化，左圖為甲仙地震太興站之水位，右圖為美濃地震太興站之水位。右圖灰線為水位原始資料；黑線為移除氣壓效應之水位結果。

5-4 地下水水氡觀測結果

5-4-1 社頂站之地下水水氡觀測結果

社頂站於 2009 年 9 月開始定期採集水樣，分析地下水水氡濃度。圖 5-4.1 為社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。社頂站屬於自由含水層，地下水水氡濃度存在週期變化，與季節性降雨量相關。

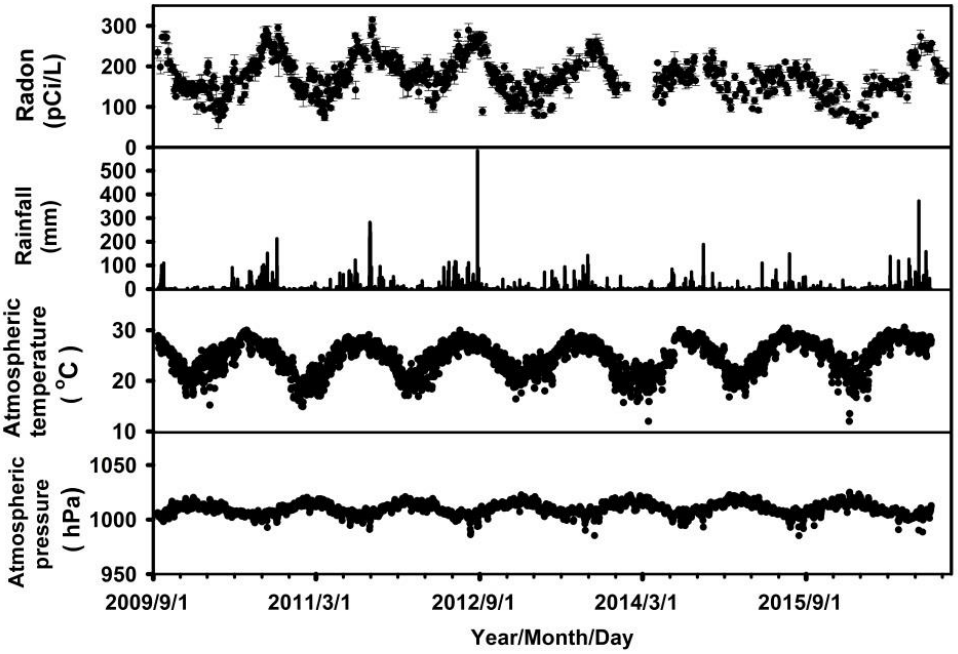


圖 5-4.1：社頂站地下水水氡濃度與各項環境因子關係圖。

圖 5-4.2 為社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。社頂站實驗室分析與連續監測數據比對結果相當吻合。

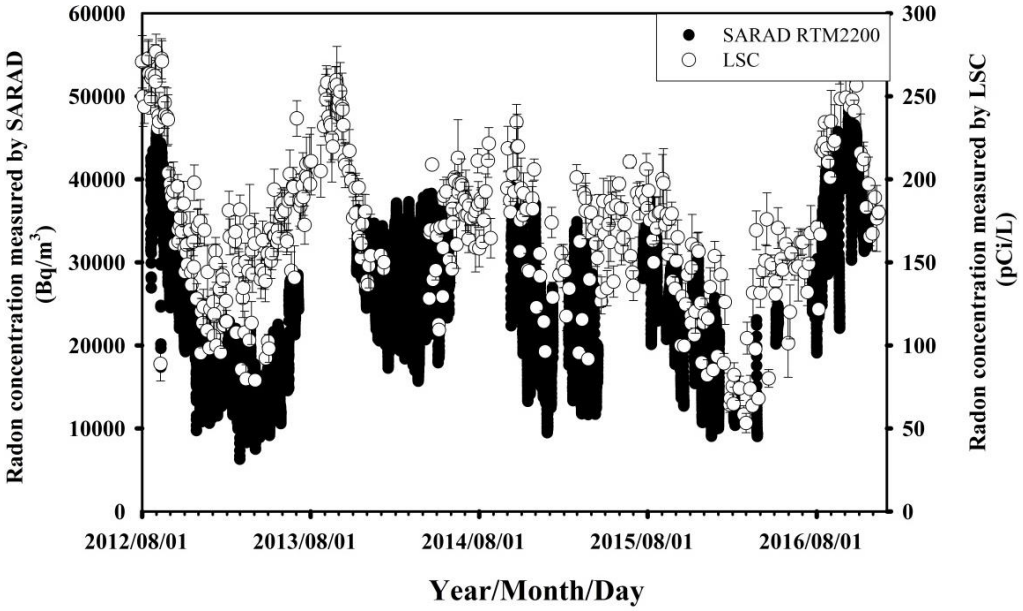


圖 5-4.2：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較圖。

圖 5-4.3 為地下水水氡濃度與地下水位比較圖。社頂站屬於自由含水層，地下水氡濃度隨地下水位有季節性週期變化。枯水期時，地下水水氡濃度背景值較大，須經由實驗室樣本分析輔助判斷有無異常下降之地震前兆發生。

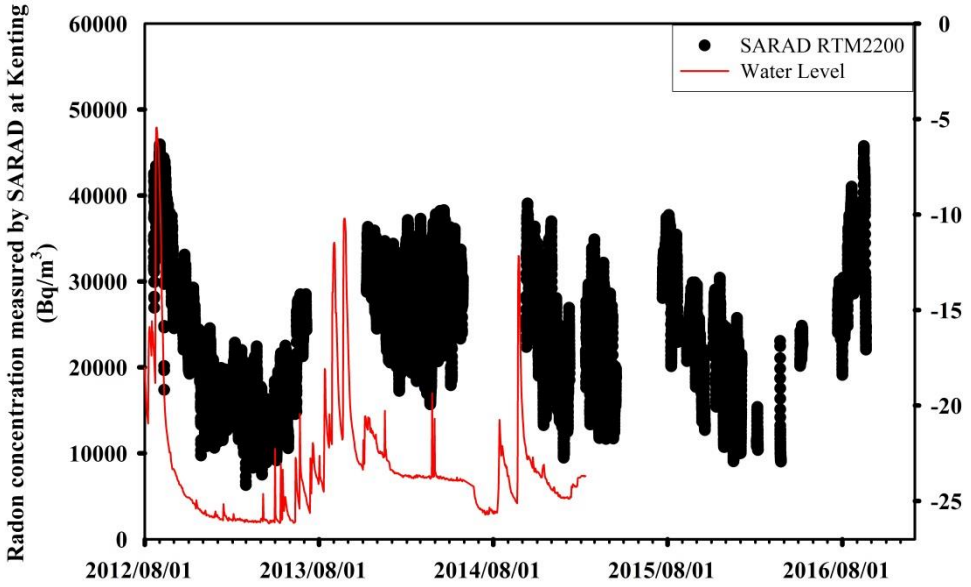


圖 5-4.3：地下水水氡濃度與地下水位比較圖。

圖 5-4.4 本年度社頂站地下水水氡觀測結果圖。本年度計畫執行期間，臺灣西南部地區發生 2016/02/06 M_L 6.6 美濃地震。下章節專題討論美濃地震發生前，社頂站地下水水氡觀測結果。

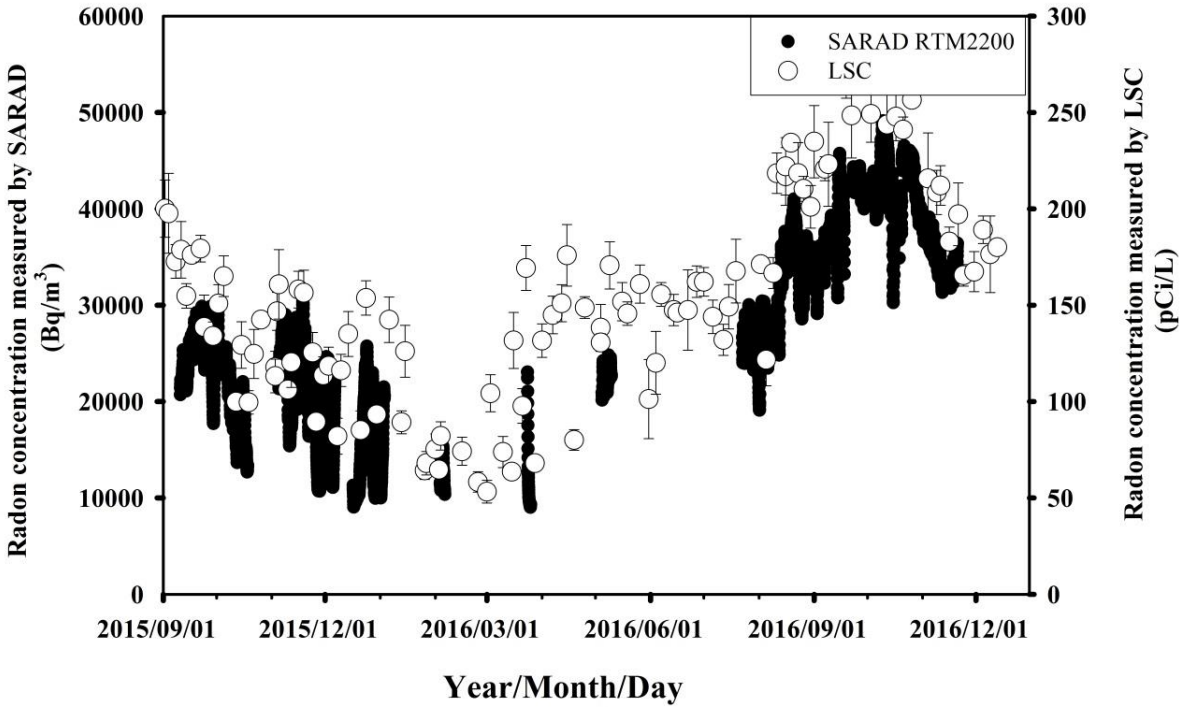


圖 5-4.4：本年度社頂站地下水水氡觀測結果圖。

5-4.2 美濃地震地下水水氡異常下降前兆

社頂站現地連續監測系統由於 2015 年 12 月開始出現現地操作問題，美濃地震發生前後資料點不足。本美濃地震前兆討論主要應用實驗室地下水水氡分析數據。圖 5-4.5 為 2016/02/06 M_L 6.6 美濃地震發生前後之地下水水氡濃度變化。於 2016/02/06 M_L 6.6 美濃地震發生前，地下水水氡濃度維持在 113 ± 23 pCi/L，地下水水氡濃度的 1.5 倍標準差，上下限分別為 148 pCi/L 和 78 pCi/L。但在 2016/1/26 地下水水氡濃度下降至 64 ± 3 pCi/L，此濃度已低於 1.5 倍標準差，故地下水水氡濃度異常下降可能為地震之前兆。

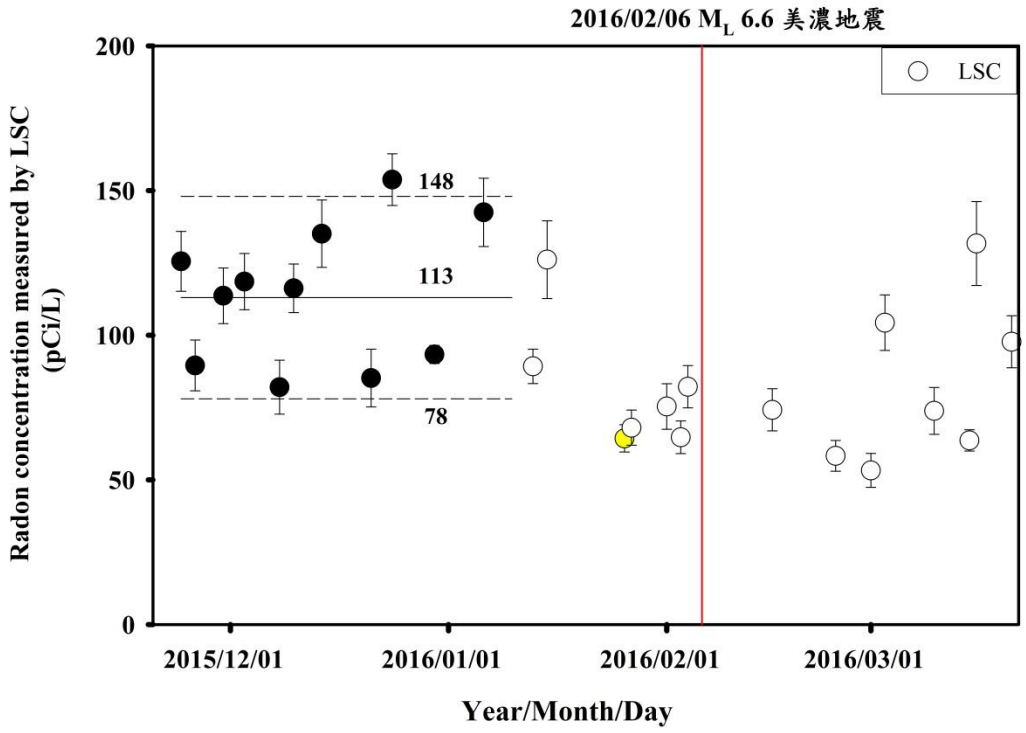


圖 5-4.5：2016/02/06 M_L 6.6 美濃地震發生前後之地下水水氡濃度變化。

5-5 沄水溶解氣體觀測站

沄水測站位於嘉義縣中埔鄉沄水村並位於中崙測站西邊 3 公里處，鄰近觸口斷層。測站配置以四極桿質譜儀（QMS）監測地下水溶解氣體；並配合氡氣分析儀（RTM-2100）量測水中溶解氡氣，使用除溼裝置（Drystik）將管線內濕度維持在 20%，使用自動採水裝置採集每日水樣進行水化學分析。測站配置示意圖，如圖 5-5.1 所示。

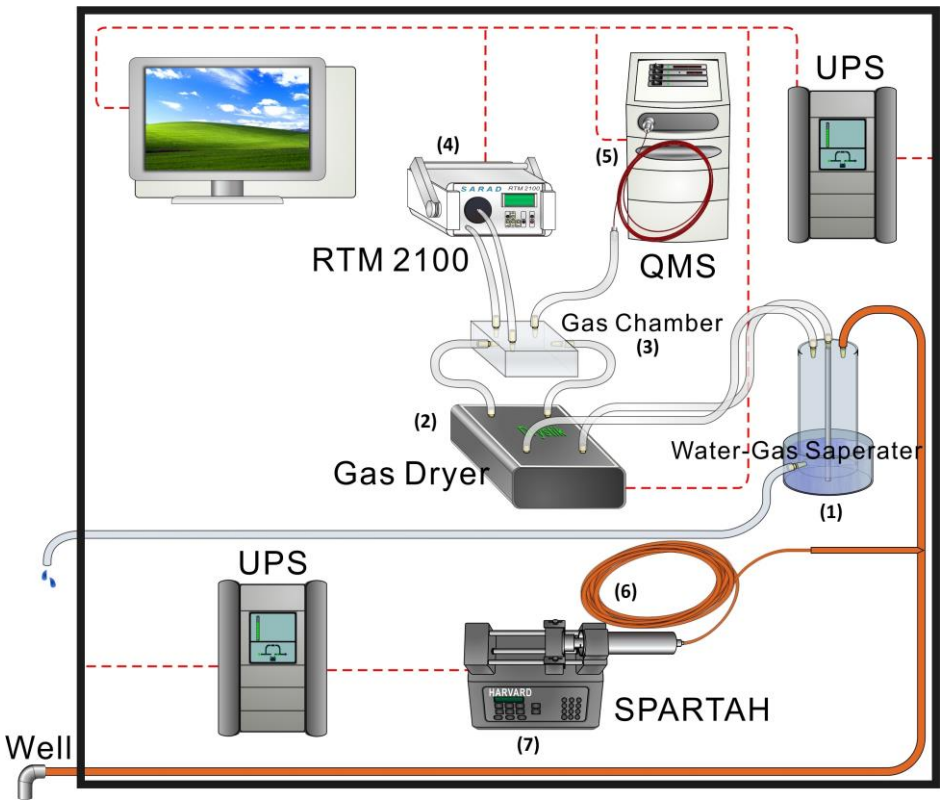


圖 5-5.1：嘉義沄水測站內管線配置簡圖。SPARTAH 為連續採樣之氡同位素樣本採集裝置，其採樣速率為 5 ml / day。其餘井水皆分流至水氣分離裝置進行氣化，並由乾燥器進行除濕後進入氣體分析系統；脫氣水樣依設定時間間距採集水體樣本。

沄水測站能夠同步監測多種氣體個別成分，結合鄰近氣象站資料，紀錄環境因子進行綜合討論。RTM 主要測量 ^{222}Rn 濃度；QMS 測量 CH_4、N_2、O_2、Ar、CO_2 等主要溶解氣體濃度，與 CH_4/CO_2、CH_4/N_2、CO_2/N_2 等比值。環境因子包含氣溫、氣壓、濕度與降雨量變化等。

本測站因儀器故障，於今年 2 月後復站，主要溶解氣體結果（圖 5-5.2）顯示沄水測站以 CH_4 為主（>92%），其次為 N_2（2~6%）、O_2（1~1.8%）、CO_2（0.1~0.2%），CH_4 與 N_2、O_2、Ar 幾乎呈現一至反向的相關性（R^2=0.9998）。溶解氣體及氡氣濃度的變化大致上相當穩定，適合進行長期監測。與符合篩選的地震事件相關性不高，今年只有 1 起與溶解氣體的變化有顯著相關，發生在 5/22 規模 5.2 的六龜地震，導致沄水站溶解氣出現同震現象（圖 5-5.3）；而 2/6 美濃地震該站並未觀察到顯著變化，可能與地震發生和復站得時間太接近，觀測值尚未達到穩定有關。本年度觀測期間，4 月及 9 月下旬時因測站斷電，使得監測資料發生中斷。在 9 月下旬 CH_4、H_2O 及 CO_2 突然驟升，不確定是否與 9/16 的地震有關（圖 5-5.5）。

氡氣資料顯示其濃度介於 900~2000 Bq/m^3，其變化可能有些微的大氣因子影響，長時間尺度下 Rn-222（Radon）及其放射性同位素 Rn-220（Thoron），與大氣氣溫的變化趨勢相似；此外，與雨量資料進行比對，則顯示沄水測站長時間的溶解氣體變化受到當地降雨的影響並不顯著。

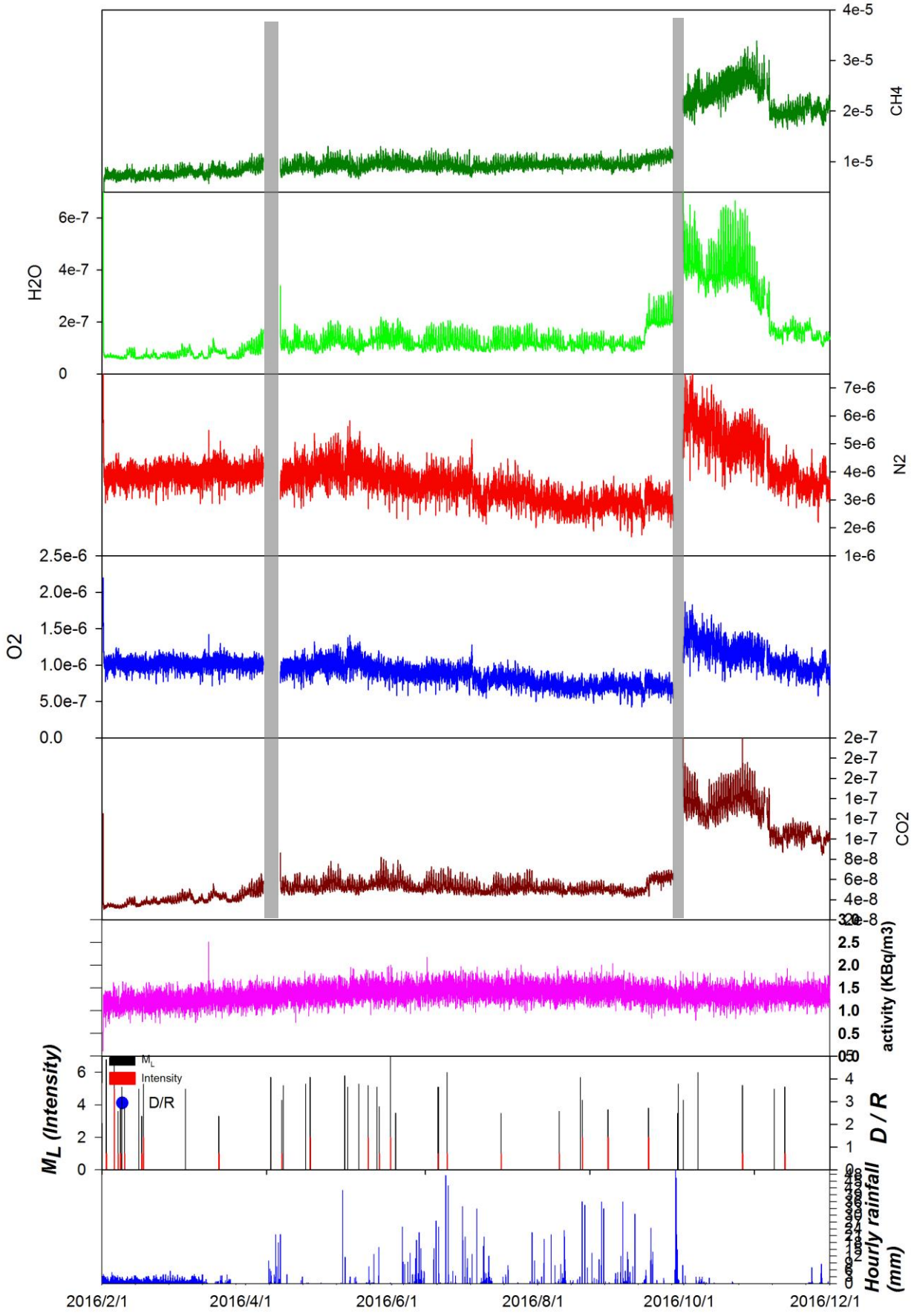


圖 5-5.2：沄水測站主要溶解氣體濃度變化，2016 年 2 月 1 日至 2016 年 11 月 30 日。灰色部分為儀器斷電。

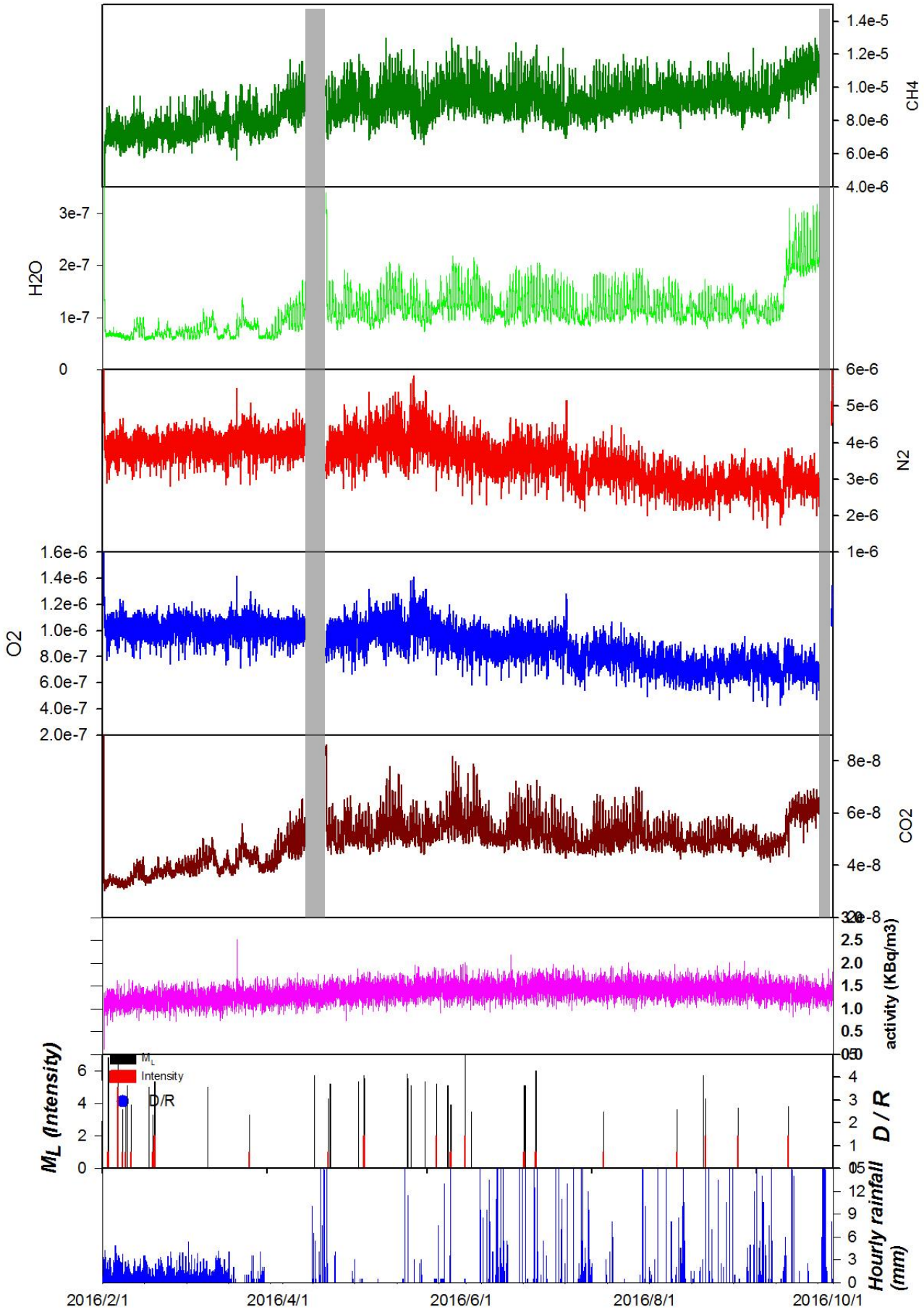


圖 5-5.3：沄水站主要溶解氣體各氣體濃度變化，2016 年 2 月 1 日至 2016 年 9 月 30 日。灰色部分為儀器斷電。

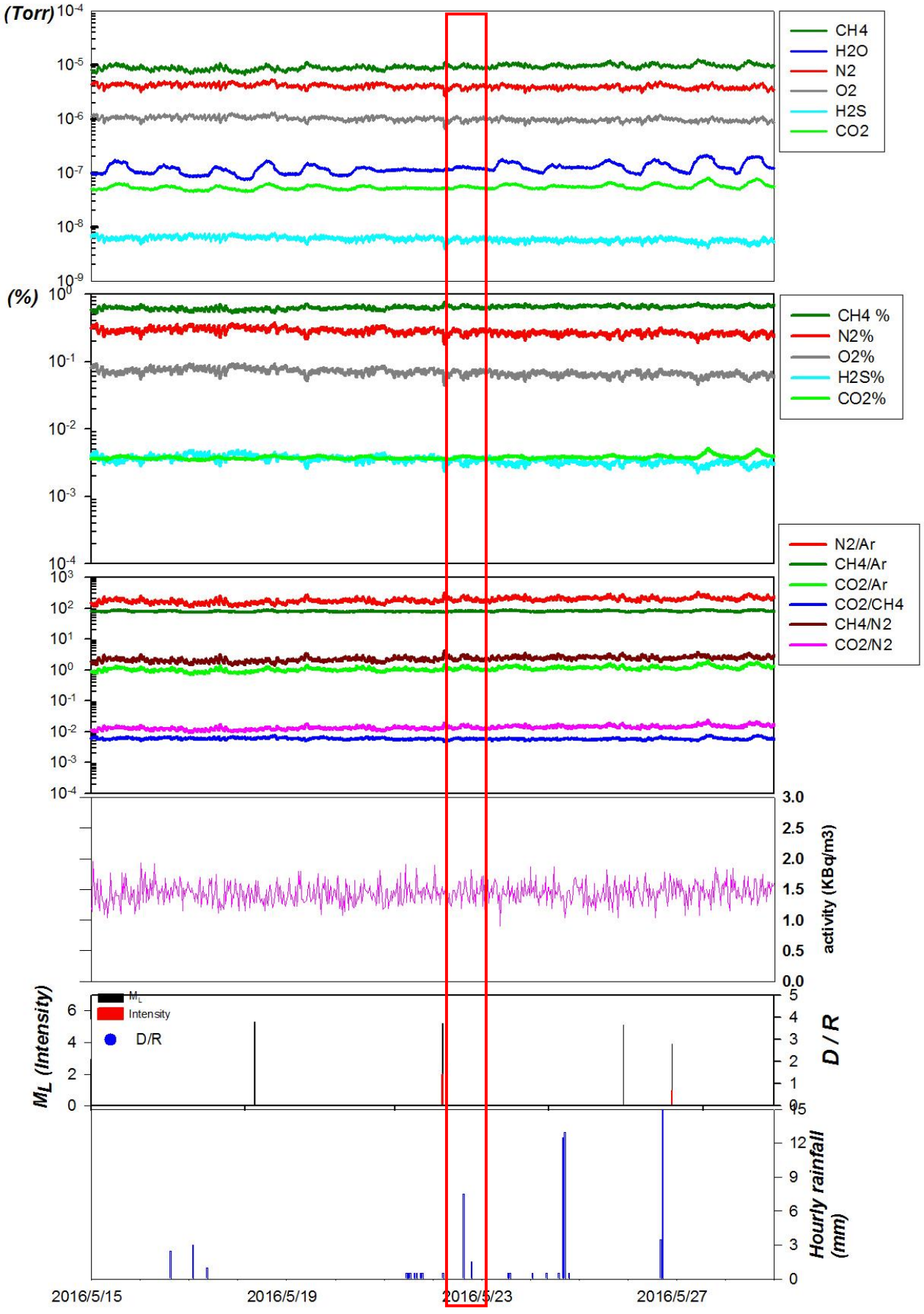


圖 5-5.4：5/22 六龜地震，沄水站溶解氣體出現同震現象。

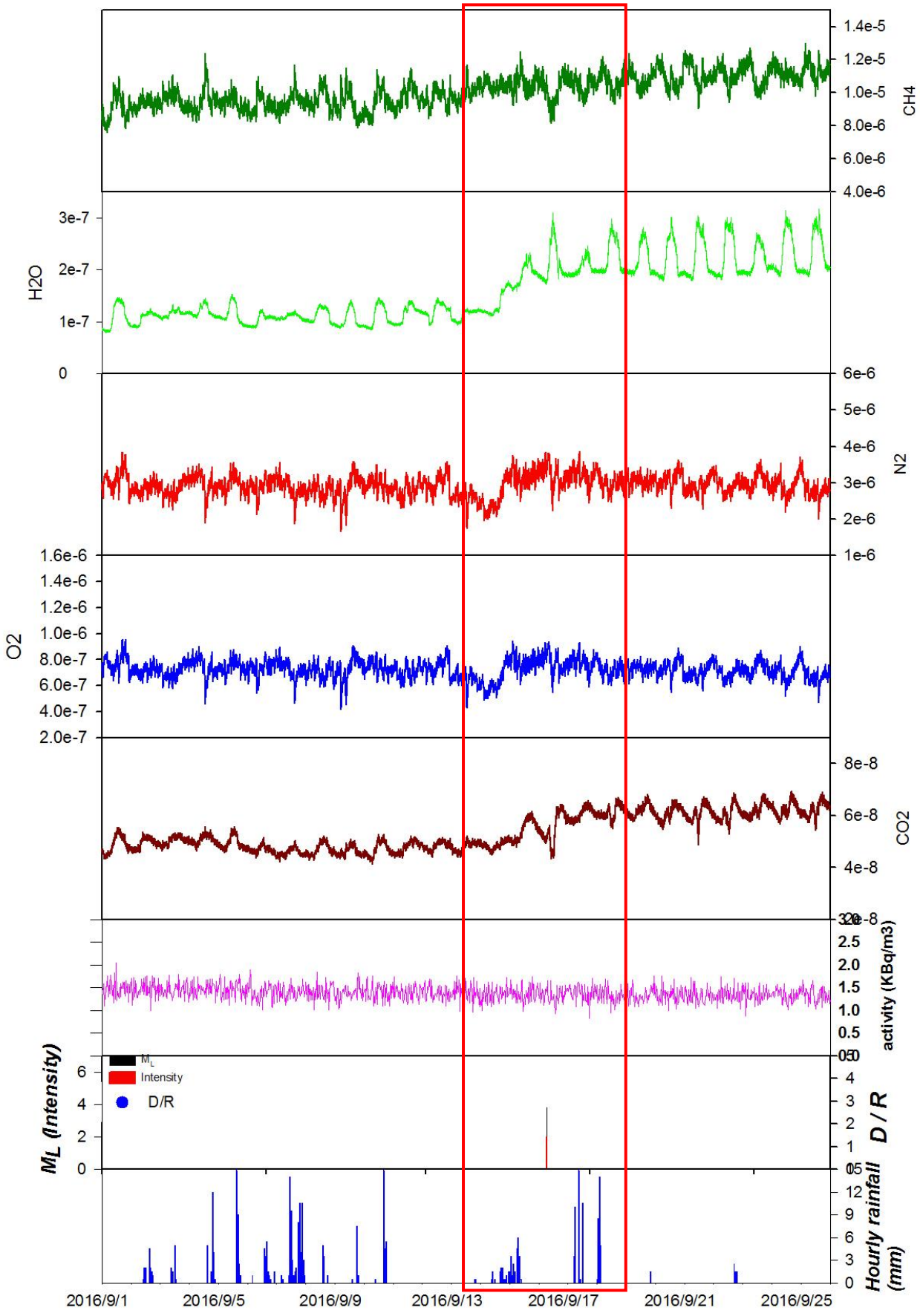


圖 5-5.5：9/16 地震，沄水站溶解氣體中 CH_4、H_2O 及 CO_2 於震前驟升。

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，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，所以在本期團隊會努力蒐集多種觀測的異常變化並尋求有效的模式。

首先，先回顧地震特性，地震的發生簡單描述即原本累積於斷層區域的能量瞬間釋放產生震動。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、震波組成頻率變化等等，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，以掌握所謂的”地震前兆”，來推測是否可能預期災害性地震的發生。

在廿世紀有許多觀測異常訊號的方法，在統計上顯示和附近的地震有所關聯，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。

地震發生時會瞬間釋放大量的能量，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，但由於地殼本身的複雜性，應力的累積與周遭的相對應力也有關係，以週期來預測地震發生不穩定性仍高。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。因此，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，可能會因為不同觀測方法而所有不同。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，因此在該地震的影響範圍內的相對位移量是相當的小，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，每年的變形量通常不大，只能做較長期的觀測。因此在本計畫中，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 公里左右，而規模 6.5 的地震斷層則在 30~40 公里的長度，若以井下應變儀的高敏感度，可能可以感應到兩至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，因為受控於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 公里左右，這也就是爲什麼氣體觀測站與地下水觀測站總是關聯到較多的地震。

可以關聯到較大範圍的觀測異常代表其敏感性較高，但也表示其對所預測地震的可能位置的不確定性較大，但若有兩個以上不同地點的觀測站同時觀測到異常，則其影響範圍的重疊區域也可提高預測的地震位置之精度。多種獨立觀測若同時發生，並指向同一地區，也可以增加前兆的可信度。

6-1 異常記錄與大地震活動之關係

本次報告為 2015 年 12 月至 2016 年 11 月間的異常觀測，這期間共有 32 個規模大於 5.0 的地震（ID=211~242）（表 6-1.1），有 6 個位於陸地上，震源機制海灘球標示於圖 6-1.1 的相關位置中。

累計第二階段至第三階段期間（2009 年 1 月至 2016 年 11 月）臺灣地區（根據中央氣象局地震活動彙整資料庫）共有 242 個規模大於 5 之地震事件。各種觀測的異常記錄標示在相關的地震編號上，如圖 6-1.2 中，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，垂直黃線則代表同一地震事件在三個或以上的觀測網觀測到異常。

其中發生於 2016/02/06 03:57 芮氏規模 6.6 發生在屏東縣政府北偏東方 27.1 公里（位於高雄市美濃區）（ID=216）（如表 6-1.1），同時在三個觀測網觀測到異常，並且在同一個測區同時有三種觀測異常。

表 6-1.1：2009 年 1 月至 2016 年 11 月規模大於五之地震事件列表。

ID	臺灣時間	經度	緯度	規模	深度	震央位置
211	2015/12/03 22:31	121.39	22.60	5.3	25.9	臺東縣政府東偏南方 29.4 公里 （位於臺灣東部海域）
212	2015/12/31 08:53	121.80	21.41	5.0	147.4	臺東縣政府南偏東方 163.6 公里 （位於臺灣東南部海域）
213	2016/01/11 12:52	121.53	23.43	5.3	33.2	花蓮縣政府南方 62.4 公里 （位於花蓮縣近海）
214	2016/01/19 10:13	121.31	22.79	5.8	29.7	臺東縣政府東方 17.0 公里 （位於臺灣東部海域）
215	2016/02/02 22:19	123.54	25.42	6.7	203.7	基隆市政府東方 183.2 公里 （位於臺灣東北部海域）
216	**2016/02/06 03:57**	**120.54**	**22.92**	**6.6**	**14.6**	**屏東縣政府北偏東方 27.1 公里 （位於高雄市美濃區）**
217	2016/02/09 08:47	121.69	23.89	5.1	5.7	花蓮縣政府東南方 13.5 公里 （位於花蓮縣近海）
218	**2016/02/16 12:04**	**120.87**	**23.01**	**5.0**	**5.0**	**臺東縣政府西北方 40.5 公里 （位於臺東縣海端鄉）**
219	**2016/02/18 09:09**	**120.87**	**23.02**	**5.3**	**5.4**	**臺東縣政府西北方 40.9 公里 （位於臺東縣海端鄉）**
220	**2016/02/18 09:18**	**120.88**	**23.03**	**5.1**	**4.3**	**臺東縣政府西北方 41.2 公里 （位於臺東縣海端鄉）**
221	2016/03/06 23:08	123.23	23.17	5.0	68.3	花蓮縣政府東偏南方 187.7 公里 （位於臺灣東部海域）
222	2016/04/11 13:45	122.12	24.55	5.7	59.8	宜蘭縣政府東偏南方 41.7 公里 （位於臺灣東部海域）
223	2016/04/16 18:55	121.80	22.44	5.2	11.8	臺東縣政府東偏南方 75.3 公里 （位於臺灣東部海域）
224	2016/04/26 02:13	121.18	20.97	5.3	58.2	臺東縣政府南方 197.6 公里 （位於臺灣南部海域）
225	2016/04/27 23:17	121.78	24.24	5.7	11.9	花蓮縣政府北偏東方 32.0 公里 （位於花蓮縣近海）
226	2016/04/27 23:27	121.75	24.25	5.1	13.0	花蓮縣政府北偏東方 31.8 公里 （位於花蓮縣近海）
227	**2016/04/28 02:19**	**121.23**	**23.28**	**5.5**	**15.2**	**臺東縣政府北方 59.1 公里 （位於花蓮縣卓溪鄉）**
228	2016/05/12 11:17	121.98	24.69	6.1	8.9	宜蘭縣政府東方 22.4 公里
229	2016/05/12 12:29	122.02	24.69	5.7	12.0	宜蘭縣政府東方 26.1 公里
230	2016/05/13 16:24	121.98	24.68	5.2	9.8	宜蘭縣政府東偏南方 23.0 公里
231	2016/05/14 11:32	121.77	24.17	5	11.6	花蓮縣政府東北方 25.3 公里
232	2016/05/18 08:22	121.57	23.22	5.2	45.8	臺東縣政府東北方 67.0 公里
233	**2016/05/22 04:51**	**120.61**	**22.90**	**5.3**	**18.1**	**屏東縣政府北偏東方 27.3 公里 (位於屏東縣林邊鄉)**
234	2016/05/31 13:23	122.68	25.49	6.9	256.9	基隆市政府東偏北方 102.5 公里
235	2016/06/20 08:39	121.53	23.16	5.1	39.4	臺東縣政府東北方 59.8 公里 (位於臺灣東部海域)
236	2016/06/24 05:05	123.42	23.53	6.1	47.0	花蓮縣政府東偏南方 190.4 公里 (位於臺灣東部海域)

ID	臺灣時間	經度	緯度	規模	深度	震央位置
237	2016/09/28 17:38	122.75	24.45	5.5	96.9	宜蘭縣政府東偏南方 105.1 公里 (位於臺灣東部海域)
238	2016/10/06 23:52	121.34	22.63	6.2	23.7	臺東縣政府東偏南方 24.4 公里 (位於臺灣東部海域)
239	2016/10/25 12:45	121.35	22.65	5.3	23.7	臺東縣政府東偏南方 23.3 公里 (位於臺灣東部海域)
240	2016/11/07 19:56	121.35	22.99	5.0	17.9	臺東縣政府東北方 33.0 公里 (位於臺東縣近海)
241	2016/11/12 06:25	122.25	24.67	5.1	21.6	宜蘭縣政府東方 50.0 公里 (位於臺灣東部海域)
242	2016/11/25 05:55	122.30	24.13	5.5	19.6	花蓮縣政府東方 70.9 公里 (位於臺灣東部海域)

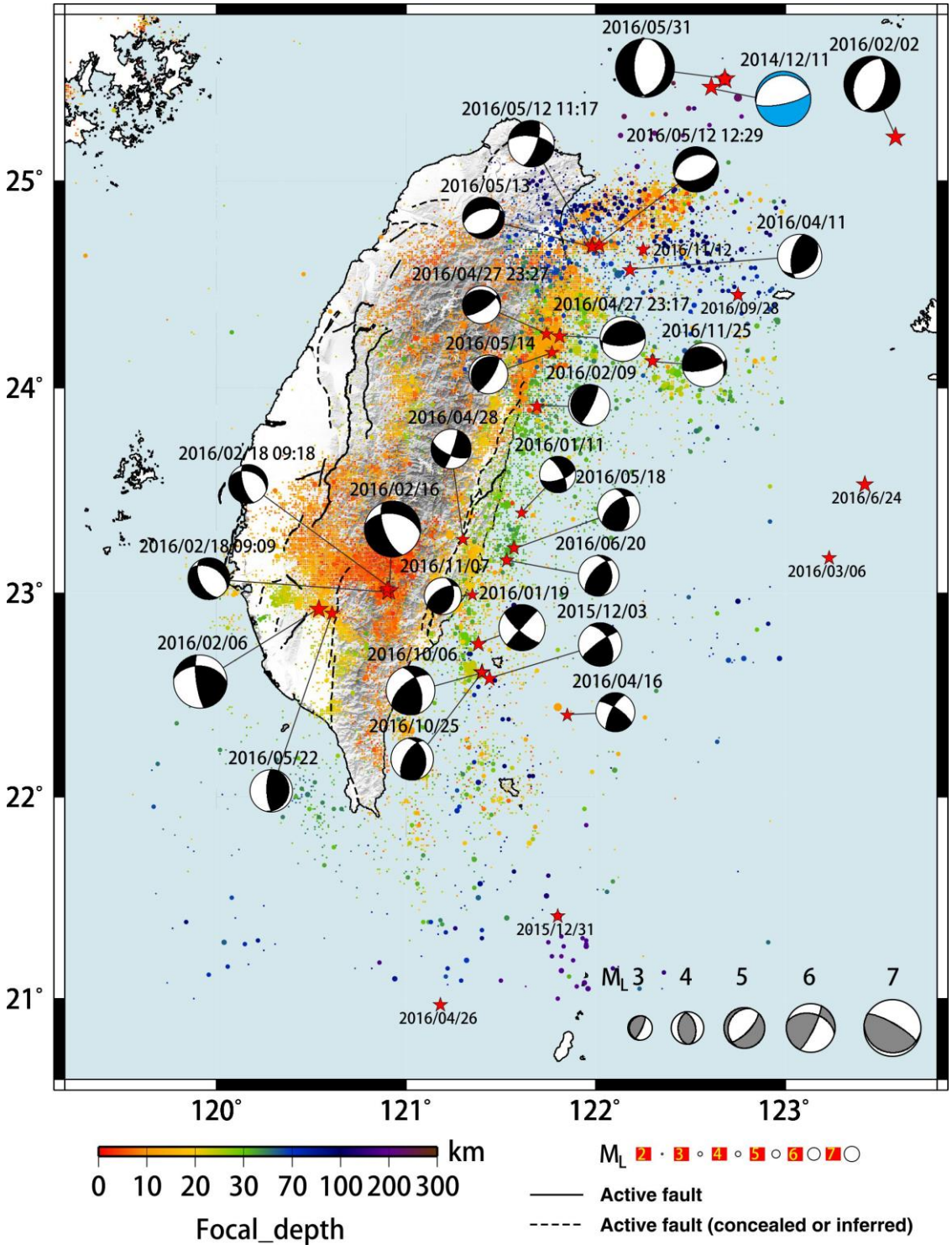


圖 6-1.1：2015 年 12 月至 2016 年 11 月規模大於五的地震事件之位置及震源機制圖。

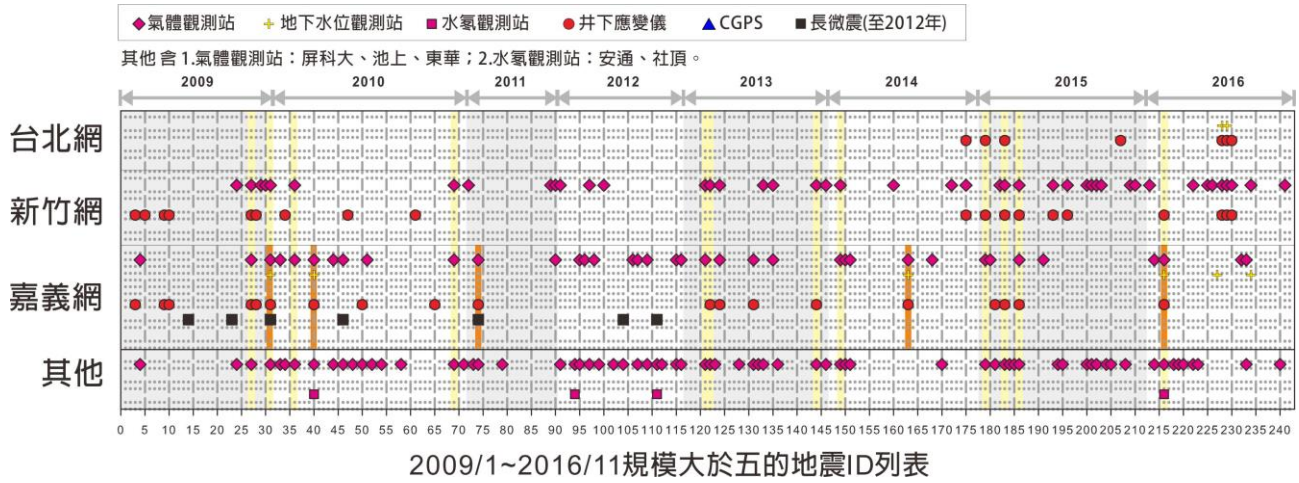


圖 6-1.2：2009 年 1 月至 2016 年 11 月規模大於五的地震事件之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID（表 6-1.1），粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測，垂直黃線則代表同一地震事件在三個或以上的觀測網觀測到異常。

6-2 GPS 應變與井下應變儀的共同解釋

GPS 應變的分析，其實與 Gladwin 應變儀的原理一般，在井下應變儀中，利用四個方向的線性應變來計算地殼中的水平面積應變，若我們選取三個 GPS 連續觀測站，形成一個三角網，其形狀越接近正三角形越好，計算每天的基線常變化，每條基線的變化可計算該方向的地表線性應變，三條基線的夾角各相距約 60 度，可以用來計算地表應變（參閱附錄 4-1），並轉換成區域性的面積應變與剪斜應變。

近年來連續衛星定位追蹤站（CGPS）普遍設置於高地震活動的區域，並交錯的設置了一些高精度的井下應變儀，這兩種儀器都可以用來觀測地殼的微小變形量。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。以嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站，選取兩個三角形網做為分析的例子。如圖 6-2.1 所示，可以將達邦測站（DARB）與中興測站（TSUN）兩個井下應變儀站附近的三個 GPS 連續觀測站如測站 1（GS07）、測站 2（GS66）、測站 3（W029）形成一個三角網，網中每一邊的邊長都可由 GPS 的每日計算中取得，其變化即為線性變形量 e1、e2、e3，根據與井下應變儀的相同計算，可以轉換成該區域的面積變形及剪斜變形量，其結果可與井下應變儀的觀測互相比較。同樣的，測站 1（GS07）、測站 4（GS63）、測站 5（JHCI）也可以組成另一個三角網，與太興測站（TAIS）的觀測互相比較。

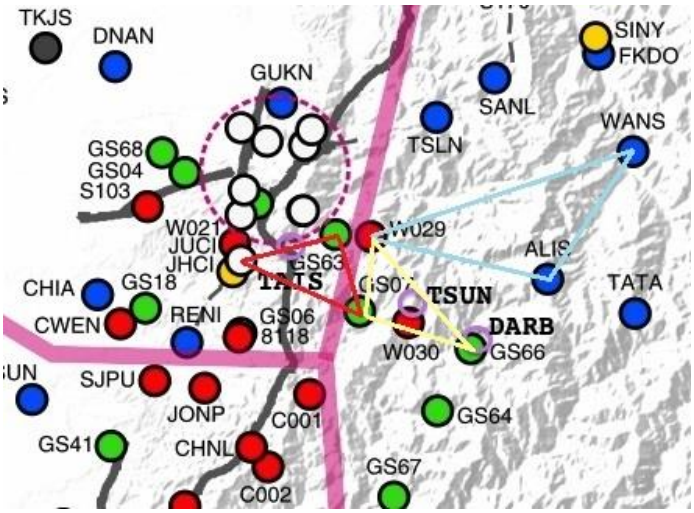


圖 6-2.1：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。

圖 6-2.2 顯示 GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013/07~2016/08 的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為井下應變儀太興測站（TAIS）在 2013/07~2016/03 的面積應變的變化，圖中的垂直線表示地震的時間，由此圖可檢視在井下應變儀變化的時刻，GPS 應變是否也有相同的異常現象。比較兩種資料在面積應變方面，在變化趨勢上有高度的相似性，但 GPS 應變所得到的變化較井下應變儀面積應變的變化為小，約在 1/15 左右，由於井下應變儀的絕對值尚在修正中，GPS 應變也是可用來修正的參考資料之一。在這一時期的觀測中，最明顯的變化就是 2016/01/19（黑垂直線）~2016/06/24（紅垂直線）的多次快速轉折，井下應變儀太興測站（TAIS）也有相同的變化，其中在 2016/01/19（黑垂直線）的快速轉折可能是高雄美濃地震 2016/02/06（紅垂直線） 的前兆。2016 年 2 月底至 3 月初的轉折也可能是 04 月 27 日花蓮北方規模 5.7 與 5.5 的兩個地震的前兆。6 月中開始，所有站都恢復到與前兩年 6 月一般的水準。

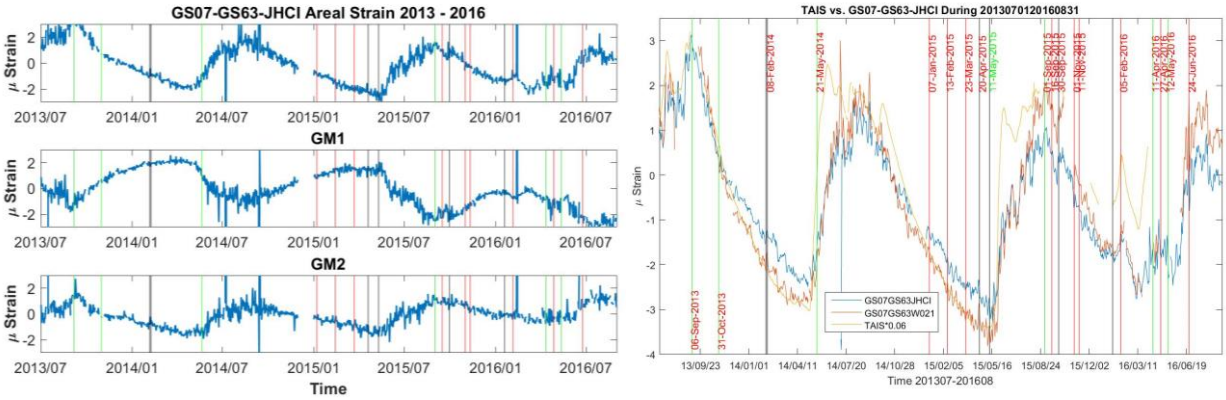


圖 6-2.2：GS07-GS63-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013/07~2016/08 的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為井下應變儀太興測站（TAIS）在 2013/07~2016/08 的面積應變。

圖 6-2.3 顯示 ALIS-W029-WANS 所形成的 GPS 三角網在 2013/07~2016/08 的觀測換算成應變量的變化。此依區域的 GPS 應變與井下應變儀的應變大小一致，面積應變的變化時機與趨勢也大都一致，雖有幾個時刻的變化量略有不同，但仍可表示 GPS 應變是一種可靠的觀測量。一個 GPS 三角網涵蓋範圍約 5~10 平方公里，這與井下應變儀只涵蓋範圍約 0.04 平方公尺的區域，應變在趨勢上可預期有其相似性，但在應變大小及細部變化未必要處處相等。在這一時期的觀測中，最明顯的變化就是 2016/01/19（黑垂直線）~2016/06/24（紅垂直線）的兩次快速轉折，井下應變儀達邦測站（DARB）因前面資料不連續，看不出是否也有相同的變化。

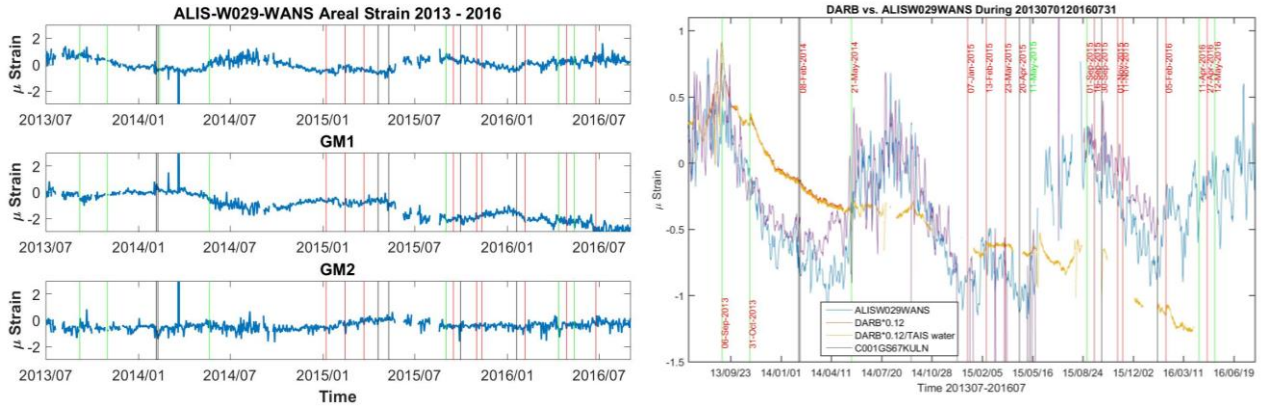


圖 6-2.3：ALIS-W029-WANS 所形成的 GPS 三角網在 2013/07~2016/08 的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變（上）、GM1（中）與 GM2（下）的變化，右圖為井下應變儀達邦測站（DARB）在 2013/07~2016/07 的面積應變。

嘉義地區的 GPS 應變雖然分成兩種型態，但很明顯的具有年周期性，在井下應變儀站太興測站（TAIS）的 GPS 應變變化較大，約有±3.0 μstrain，可與井下應變相對應。而達邦測站（DARB）附近的 GPS 應變在 2014 年與 2015 年 1 月開始到 2016 年 1 月都有較大的變化，而井下應變則未顯示相對應的變化。因此，兩種應變在 2014 年 5 月到 2015 年 1 月間以及 2015 年 5 月至 2016 年 1 月間都有互相分離，但此現象在 2013 年並未發現，所以尚未知是環境變化造成，還是地構造原因所致。但今年一直到 2016 年 4 月底 GPS 應變與井下應變仍持續分離，沒有接近的趨勢，這部分有待持續觀察，確定是否因今年降雨不斷，水庫水壓持續較高的因素。

6-3 連續觀測資料的共同解釋

在這一階段的觀測中，但有一個地震事件同時在三個觀測網觀測到異常。

本次報告為 2015 年 12 月至 2016 年 11 月間的異常觀測，這期間共有 32 個規模大於 5.0 的地震（ID=211~238），有 6 個位於陸地上。其中發生於 2016/02/06 03:57 芮氏規模 6.6 發生在屏東縣政府北偏東方 27.1 公里（位於高雄市美濃區）（ID=216）（如表 6-1.1），同時在三個觀測網觀測到異常，並且在同一個測區同時有三種觀測異常。我們在此將這一個異常事件做一些整理，並與 GPS 應變作一比較。

（1）2016/02/06 高雄美濃地震（M_L 6.6，Depth 14.6 km）（ID=216）

在井下應變儀方面，檢視 3 個測網在美濃地震前 3 個月的應變資料，嘉義網達邦測站（DARB）與新竹網梅花測站（PFMT）在 2016/01/04 的剪應變都有明顯應變率的變化，可能與地震相關，而臺北網錦和測站（JING）則沒有明顯的應變異常（圖 4-1.22）。離地震最近的嘉義網達邦測站（DARB）在地震發生時有明顯的同震反應，地震前 2015 年 11 月與 12 月的應變率幾乎沒有甚麼明顯變化，2016 年 1 月之後最明顯的應變率變化發生於 1/4，但整個 1 月期間，有明顯的降雨，有些應變率變化也能與降雨紀錄能比對，因此 1/4 的應變異常仍不能排除與降雨有關。新竹網梅花測站（PFMT）的平面應變在這段期間似乎沒有受到降雨影響，應變率相當一致，但 2016/01/19 左右突然明顯的轉為相對壓縮的應變應該是受到當天發生於臺東縣東方 17 公里規模 5.8 的地震影響，而剪應變的趨勢在 2016/01/04 左右也有明顯的應變率變化，這應變異常無法由降雨或地下水文資料所解釋，很可能是 2 月 6 日美濃地震的地震前兆訊號。

在地球化學觀測方面，如圖 5-2.4（A）所示，古坑站、屏科大站皆在 14 天前、錦園站在 9 天前，有氣體異常的變化趨勢。觀察氣體上升附近時日並無明顯雨勢影響，因此可確定是真實的氣體反應。其中古坑站及屏科大站的變化趨勢雷同，氡氣先在短時間內上升，接著緩慢下降，並於再次上升時發生地震。錦園站則是有一個較明顯的上升下降變化趨勢。不過此起地震位於古坑站原有的敏感反應圈外，仍需繼續觀察古坑站氡氣變化是否仍與此區地震有關。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）。2016/02/06 M_L 6.6 美濃地震發生前地下水水氡濃度維持 113 ± 23 pCi/L。但在 2016 年 1 月 26 日地下水水氡濃度下降至 64 ± 3 pCi/L（圖 5-4.5），低於地下水水氡濃度背景值 1.5 倍標準差，可能為地下水水氡濃度異常下降之地震前兆，這與古坑、屏東和池上站之土壤氡氣濃度升高的時間大致上吻合，可能為美濃地震的地震前兆。

在 GPS 應變方面，觀察嘉義 GPS 網在過去三年的變化（圖 6-3.1 與圖 6-3.2），在 2013 年 7 月至 2015 年 7 月期間是維持相似的周期性變化，但在 2016 年開始直到 4 月底與往年最大的差異是 GPS 應變與井下應變明顯分離，這可能是今年的雨量充沛，沒有缺水的乾季特徵。最近開始井下應變儀與 GPS 應變開始分離，對於地下水豐盛的嘉義地區而言，可能造成這樣的差異。但若比較 2016 年地殼應變值與往年的差異，地殼應變維持較往年高的位置，尤其在 2016/01/19（黑垂直線）~2016/06/24（紅垂直線）間此一地區 GPS 應變的兩次快速轉折，先在 1/19 由壓縮轉舒張，再於 2/6 由舒張再轉回壓縮，井下應變儀太興測站（TAIS）也有相同的變化，應為高雄美濃地震的前兆與同震變化，在地震前由於應變（力）集中到南邊及西南邊的區域，造成此一區域應變由壓縮轉舒張，然後在美濃地震之後，再回復正常的壓縮狀態。但也可能是因為高雄美濃地震 2016/02/06（紅垂直線） 以及 2016/04/27 花蓮北方規模 5.7 與 5.5 的幾個地震的地殼應力調整影響。在 2016/01/19（黑垂直線）的快速轉折可能是高雄美濃地震 2016/02/06（紅垂直線）的前兆，GPS 應變與井下應變都在地震後又轉向壓縮，並於 04 月 27 日花蓮兩次規模大於 5 的地震之前一個月又同樣的舒張再壓縮。

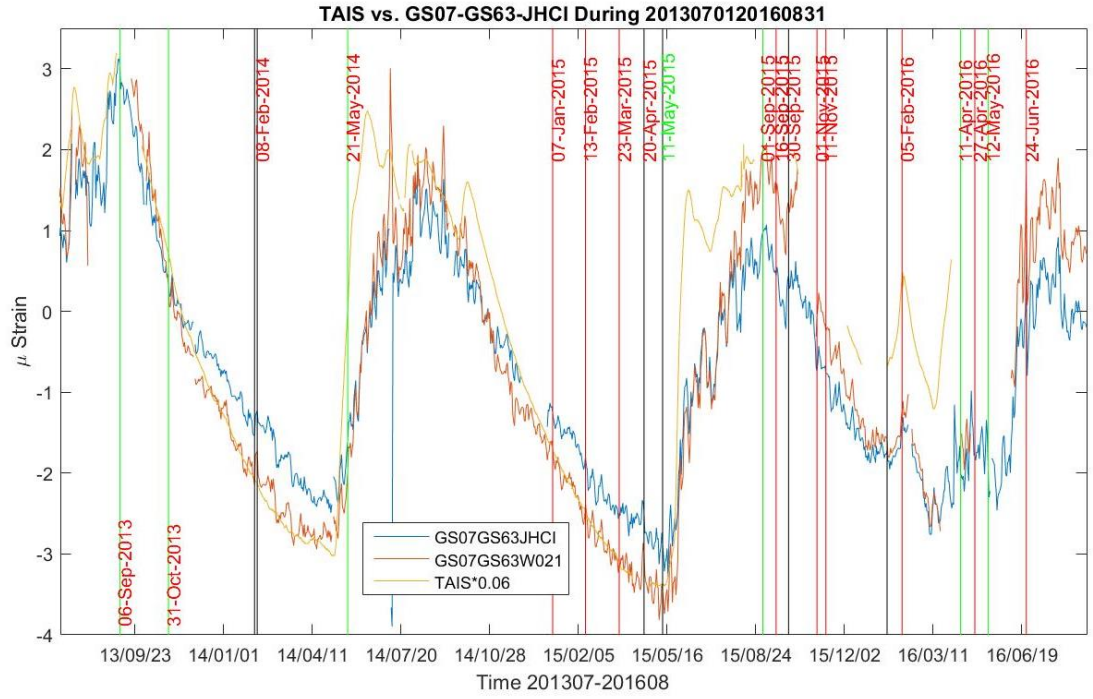


圖 6-3.1：嘉義地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀太興測站（TAIS）資料的變化。

圖 6-3.2 則為嘉義地區的 GPS 應變與鄰近井下應變儀達邦測站（DARB）的共同觀測。在這段期間達邦測站（DARB）剛好沒資料，但 GPS 應變明顯的由前半年約 1.5 μstrain 的總壓縮量在地震約五天前突然轉舒張，應該算是一個明顯的應變異常。DARB 及其附近的 GPS 三角網也與 TAIS 附近區域相同，在高雄美濃地震 2016/02/06（紅垂直線）以及 2016/04/27 花蓮北方幾個地震的地殼應力調整影響，有前兆顯示以及地殼壓縮與舒張的轉折現象。

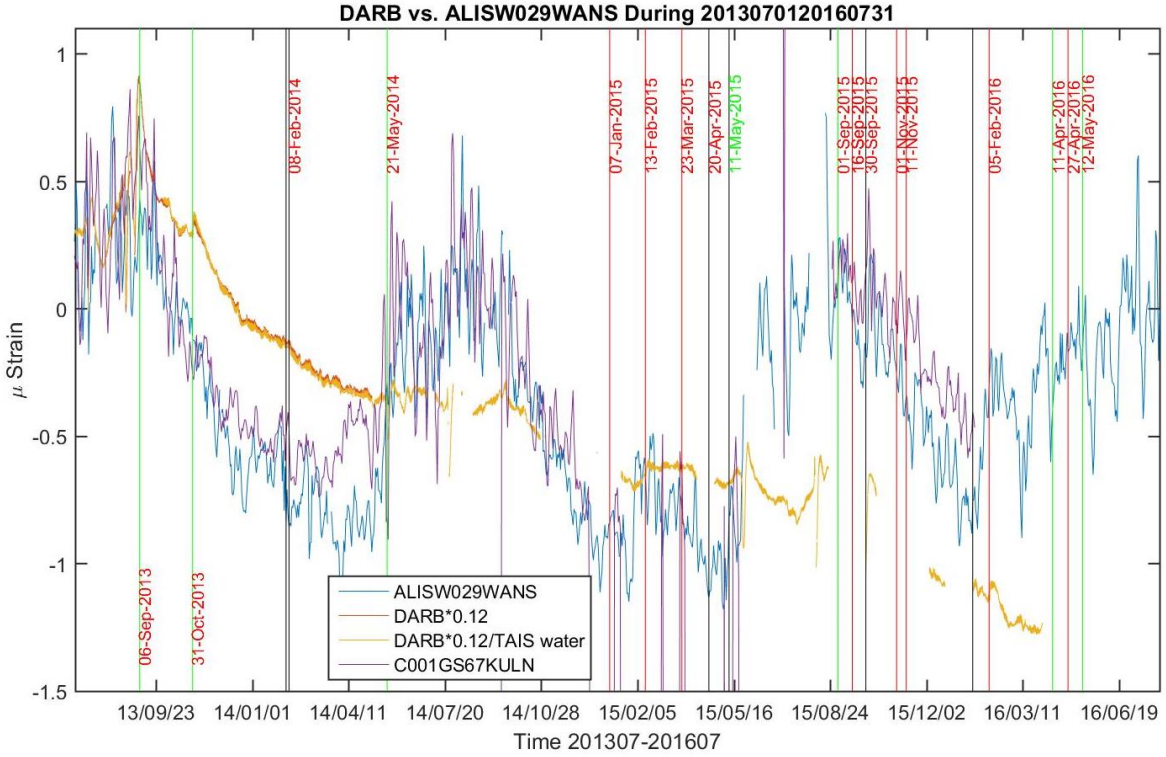


圖 6-3.2：嘉義地區的 GPS 應變與鄰近的井下應變儀達邦測站（DARB）資料的變化。

總觀這個地震的相關觀測異常，嘉義地區的氣體觀測、水氡觀測、井下應變以及 GPS 應變都有明顯的異常現象，井下應變儀嘉義網達邦測站（DARB）與新竹網梅花測站（PFMT）在 2016/01/04 的剪應變都有明顯應變率的變化，可能與地震相關，離地震最近的嘉義網達邦測站（DARB）在地震發生時有明顯的同震反應，新竹網梅花測站（PFMT）的面應變在 2016/01/19 左右突然明顯的轉為相對壓縮，而剪應變的趨勢在 2016/01/04 左右有明顯的應變率變化，很可能是 0206 美濃地震的地震前兆訊號。在地球化學觀測方面，古坑站、屏科大站皆在 14 天前、錦園站在 9 天前，有氣體異常的變化趨勢，可確定是真實的氣體反應。其中古坑站及屏科大站的變化趨勢雷同，氡氣先在短時間內上升，接著緩慢下降，並於再次上升時發生地震。錦園站則是有一個較明顯的上升下降變化趨勢，與古坑、屏東和池上站之土壤氡氣濃度升高的時間大致上吻合，可能為美濃地震的地震前兆。另外 GPS 應變在高雄地區及台南地區也有明顯的變化，因此蒐集此兩地區長期的 GPS 資料另做分析，其結果敘述於 6-4 章節中。

綜觀今年的觀測，地下水觀測雖然有多站與井下應變儀共站，但並不像井下應變儀一般有多站的觀測異常，這可能是地下水觀測儀器保養不易，有多站曾經更換儀器，而且地下水的影響因素較複雜，將繼續追蹤分析。

6-4 台南、高雄地區長期 GPS 應變

本計畫在分析井下應變儀資料的同時，也分析了附近的 GPS 網的應變，一面可當作一種獨立的地殼應變資料，互為印證，並且可用來作為井下應變儀資料的校準用。由於地調所的井下應變儀都位於臺灣西部的嘉義、新竹與台北地區，而大多數的地震還是以臺灣東部為主，所以類似應變、地下水或氣體異常的觀測資料，往往都是觀測資料與震源有相當大的距離，常是異常現象不明確，或是有多個可能的相關地震，增加了異常現象與地震相關連接的不確定性。因此，針對 2016/02/06 高雄美濃地震，特地蒐集了該地區以及台南災區近十年來（2007~2016）的 GPS 資料詳加分析，並組合成 GPS 應變，以討論長期以來這兩個地區的地殼如何的變動。

針對這一次的地震，我們將過去十年來的 GPS 資料作一總整理，在這一區的 GPS 測站相當密集，可以組成相當多的三角形來計算 GPS 應變。圖 6-4.1 顯示 GPS 測站的名稱及位置（圓形及三角形標誌）、斷層（粗紅線）、地震震央（紅星號），由於在 2012 年以後氣象局快速的增加了一些 GPS 測站，所以在 2012 年之前（2007~2012 年）與 2013 年之後所分類的分析網，以及所用的 GPS 測站資料各為不同，所以在以下的分析中，這兩時段各自獨立討論，然後再討論兩時段的差異性。在第一時段中，這一區還有一個顯著的地震，即是在 2010 年 3 月 4 日的高雄甲仙地震，規模 5.7。

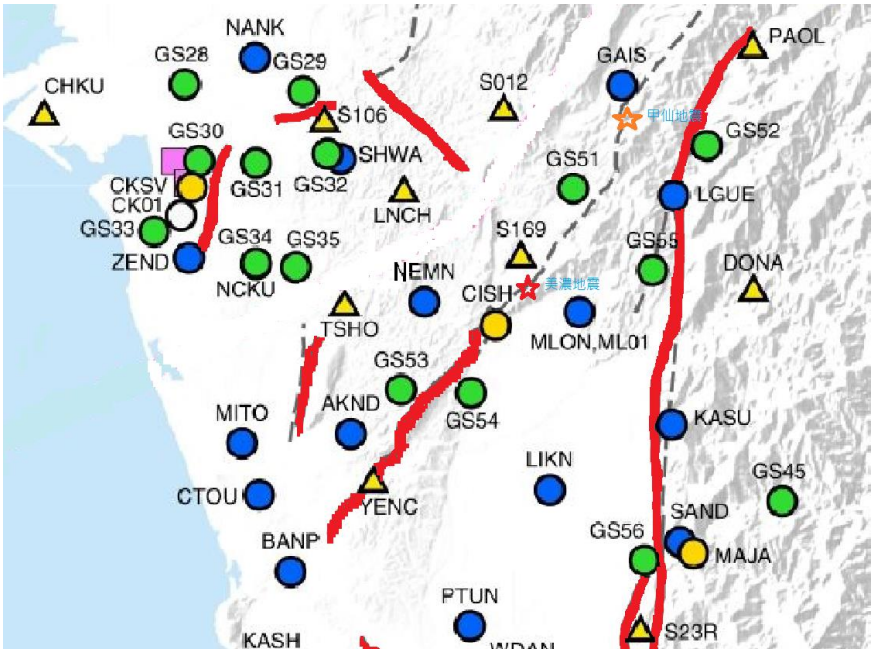


圖 6-4.1：GPS 測站的名稱及位置（圓形及三角形的標誌）、斷層（粗紅線）、地震震央（紅星號）。

● 第一時段：2007~2012 年

此區域附近在 2010 年 3 月 4 日有一個規模 5.7 的甲仙地震，針對 2007~2012 年的 GPS 資料進行分析，分作兩大區域（TAID 與 TAIE），由於當時的 GPS 測站數目較少，雖每一區域分作九個三角網，但是第二區域的部分資料只到 2009 年，實際只有五個三角網做了完整的分析。

表 6-4.1 是 TAID 大區域中九個三角網的分析結果，其中 SS5 三角網位於後甲里斷層西方，面應變速率最快，高達-2.54 μstrain/a，不過這是因為其間受到甲仙地震的同震位移的影響，所以必須要除去同震位移的應變量，再加以分析，列為 SS50 的分析網，年應變率只剩下-0.631 μstrain/a，也列於表的最下方。SS3 三角網也有同樣的狀況，原來高達 1.27

μstrain/a，移去同震應變後，年應變率也只剩下-0.631 μstrain/a，如此一來，此區的年面應變率只有-0.3 與-0.6 μstrain/a 兩種速率，幾個三角網的年應變率在甲仙地震之後，除了同震變形外，應變累積速率也有增加的現象（圖 6-4.4），這表示甲仙地震對此區域雖造成同震應變，但並未釋放此區域的能量，反而加速了此區域的地殼負重。

表 6-4.1：TAID 網的年面應變率。

三角網代號	站名組合	年面應變率 (μstrain/a)	族群分類	特徵
SS1	'GS28GS29GS31'	-0.313436	x	
SS2	'GS28GS29GS33'	-0.313492	x	
SS3	'GS28GS32GS33'	-1.268144	o	Co-seismic Jump
SS4	'GS28GS31GS33'	-0.631494	v	
SS5	'GS31GS32GS35'	-2.540855	o	Co-seismic Jump
SS6	'CHKUGS29GS33'	-0.313586	x	
SS7	'CHKUGS31GS33'	-0.631495	v	
SS8	'CHKUHOKNS106'	-0.631585	v	
SS9	'HOKNS011S106';	0.034667	x	
SS30	'GS28GS32GS33'	-0.631338	v	Co-seismic Removed
SS50	'GS31GS32GS35'	-0.631453	v	Co-seismic Removed

圖 6-4.2 是此區域較高應變三角網的資料分布，可以明顯的看到同震應變，若將同震應變移除，則看到這五個三角網具有很接近的年應變速率-0.6 μstrain/a（圖 6-4.3），而且在甲仙地震之後的面應變速率明顯的加速，這可能就是造成美濃地震的最大原因。圖 6-4.4 是此區域較低面應變率的三個三角網，應變速率都約在 -0.3 μstrain/a。

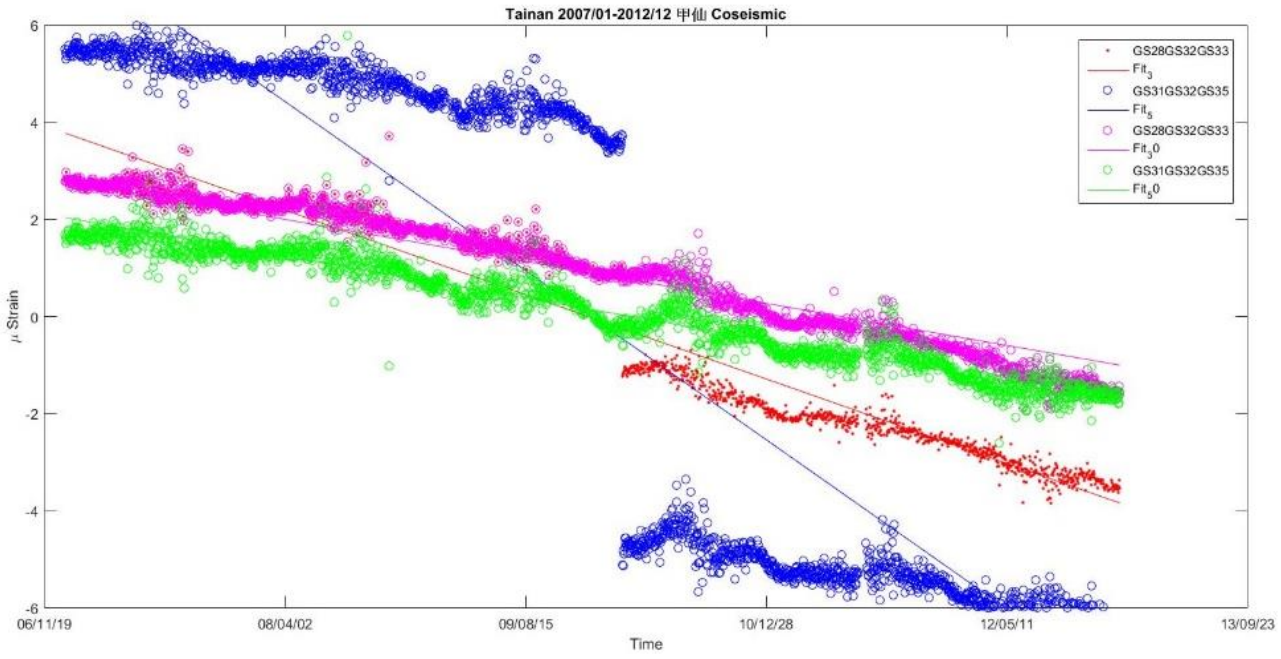


圖 6-4.2：TAID 網的應變資料，部分網有同震應變。

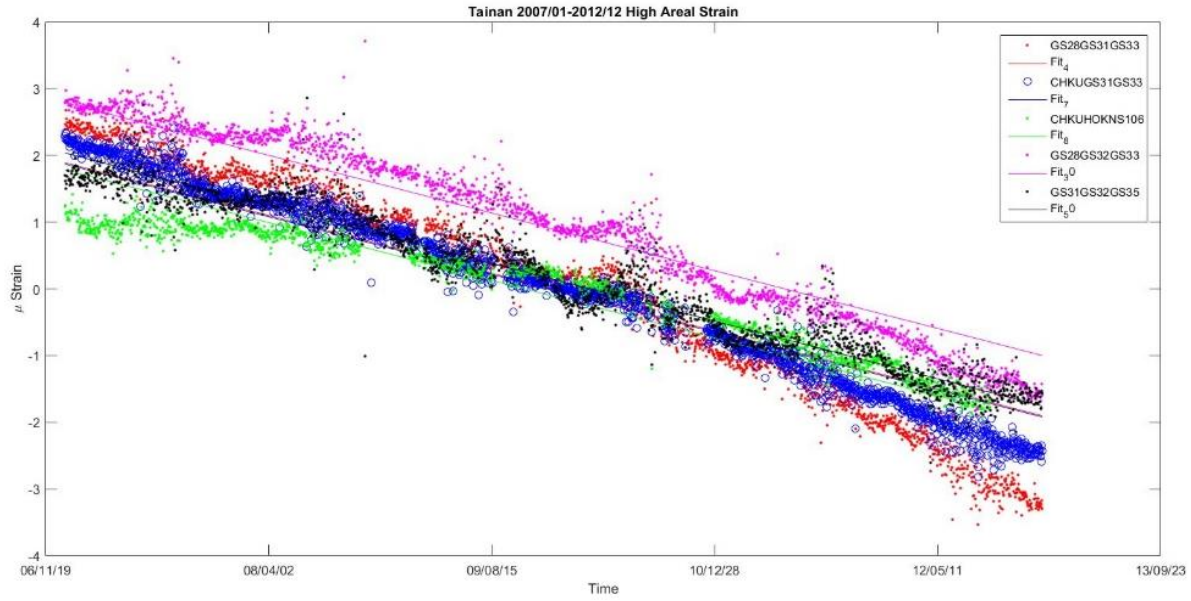


圖 6-4.3：TAID 網的應變資料，在修正同震應變後，仍然可看到甲仙地震的影響，地震後部分三角網的應變累積變快。

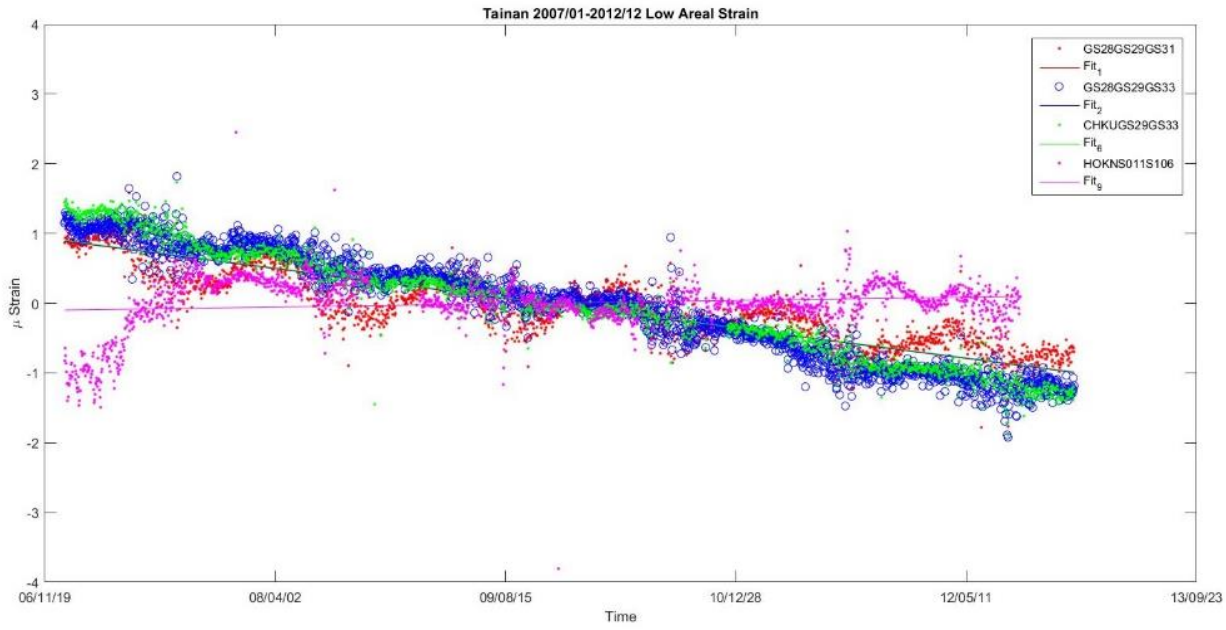


圖 6-4.4：TAID 網較低年面應變率（'x'族群）三角網的面應變資料分布。

表 6-4.2 是 TAIE 大區域中九個三角網的分析結果，其中 SS01、SS02、SS05、SS06 四個三角網的面資料只到 2009 年，所以實際只有五個三角網做了完整的分析。這三角網中 SS1、SS2、SS3、SS4、SS6 五個三角網應變速率最快，其中 SS06 是膨脹應變，其餘都是壓縮應變，另外四個三角網 SS5、SS7、SS8、SS9 四個三角網面應變速率比較慢，而且大部分都是膨脹應變或接近於零。資料如圖 6-4.5 所示，其中 SS07 與 SS09 有明顯的同震應變，在除去同震應變後的資料分布如圖 6-4.6 所示。最值得注意的是在圖 6-4.6 中，SS03（紅色）與 SS04（藍色）在甲仙地震後，面應變壓縮明顯的減緩，所以在之後 2013~2016 年的分析中，此區域的應變已經列為低速應變的區域了（圖 6-4.12）。圖 6-4.7 則是將 TAID（表 6-4.1）與 TAIE（表 6-4.2）兩個分析區域在 2007~2012 年間的應變率，依壓縮速率快慢大致分成三等級，用顏色來代表，紅色最高，綠色次之，灰色最慢，應變累積集中在美濃斷層與後甲里斷層附近，其他地區則應變速率緩和。

表 6-4.2：TAIE 網的年面應變率。

三角網代號	站名組合	年面應變率 (μstrain/a)	族群分類	特徵
SS01	'AKNDMITOYENC'	-1.269313	o	資料只到 2009
SS02	'AKNDCTOUYENC'	-2.543001	o	資料只到 2009
SS03	'AKNDS169LIKN'	-1.267919	o	
SS04	'AKNDCISHLIKN'	-1.267820	o	
SS05	'AKNDLIKNYENC'	0.710671	v	資料只到 2009
SS06	'LIKNSANDYENC'	1.268828	o	資料只到 2009
SS07	'CISHKASULGUE'	0.312961	x	Co-seismic Jump
SS08	'CISHGAISLGUE'	0.631178	v	
SS09	'DONALIKNSAND'	-0.075063	x	Co-seismic Jump
SS070	'CISHKASULGUE'	-0.075189	x	Co-seismic Removed
SS080	' CISHGAISLGUE'	0.014567	x	Co-seismic Removed

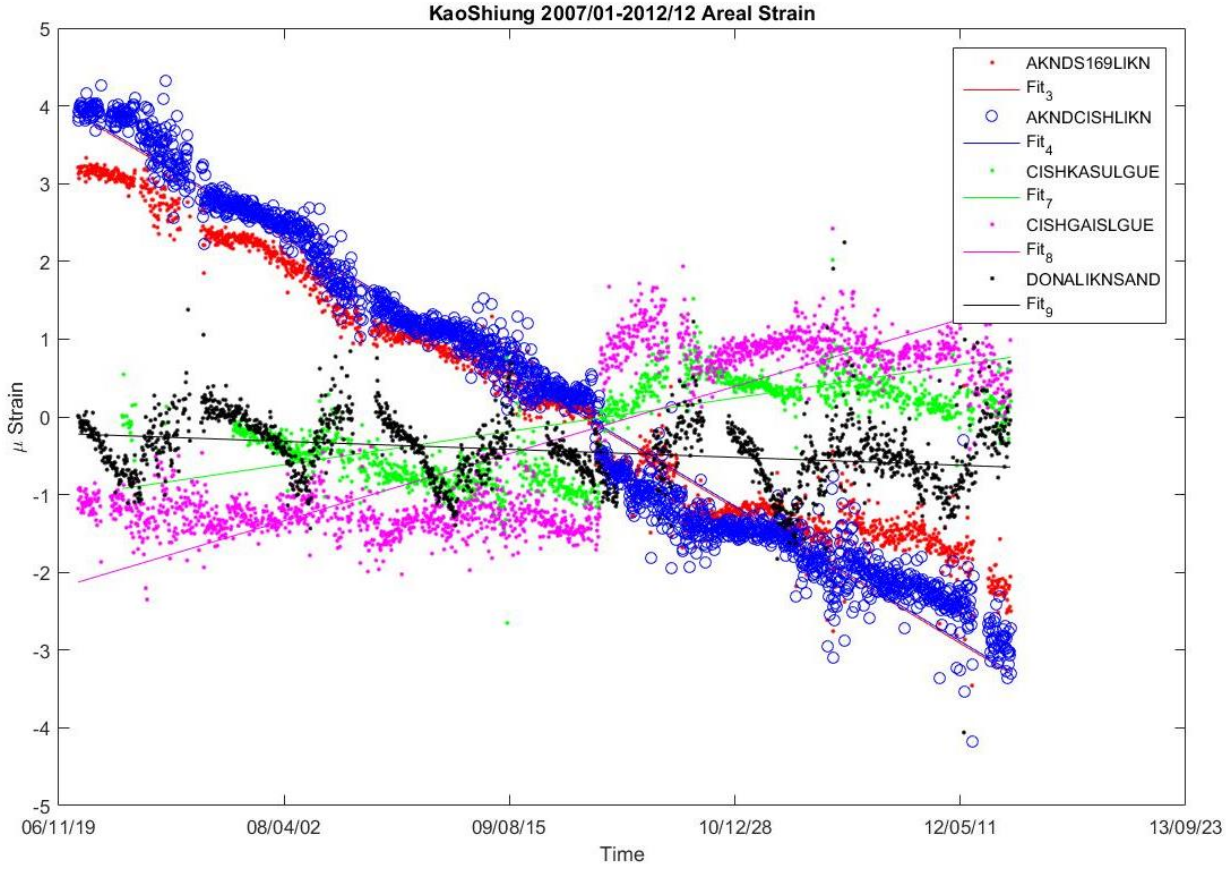


圖 6-4.5：TAIE 網的應變資料，其中部分有同震應變。

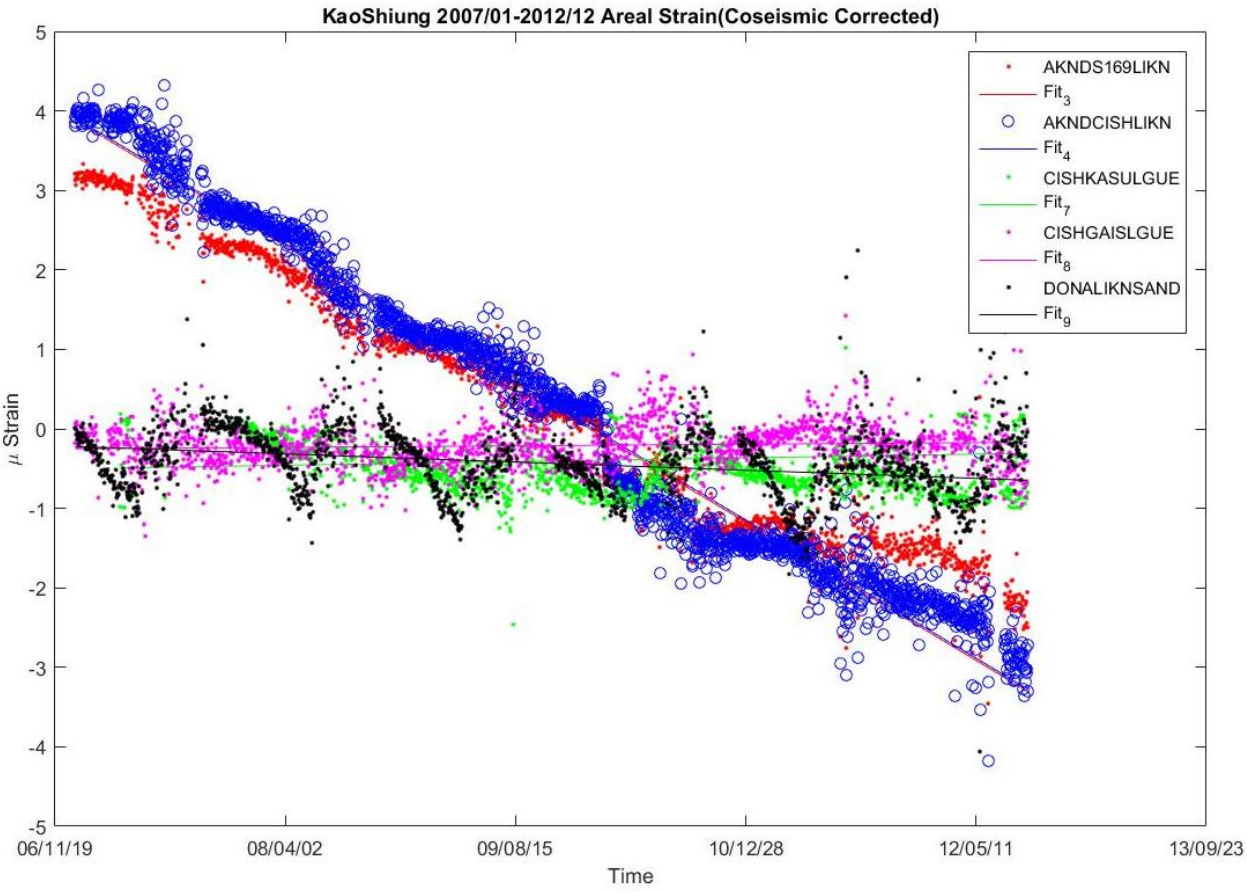


圖 6-4.6：TAIE 網的應變資料，在修正同震應變後，仍然可看到甲仙地震的影響，部分三角網的應變累積變慢。

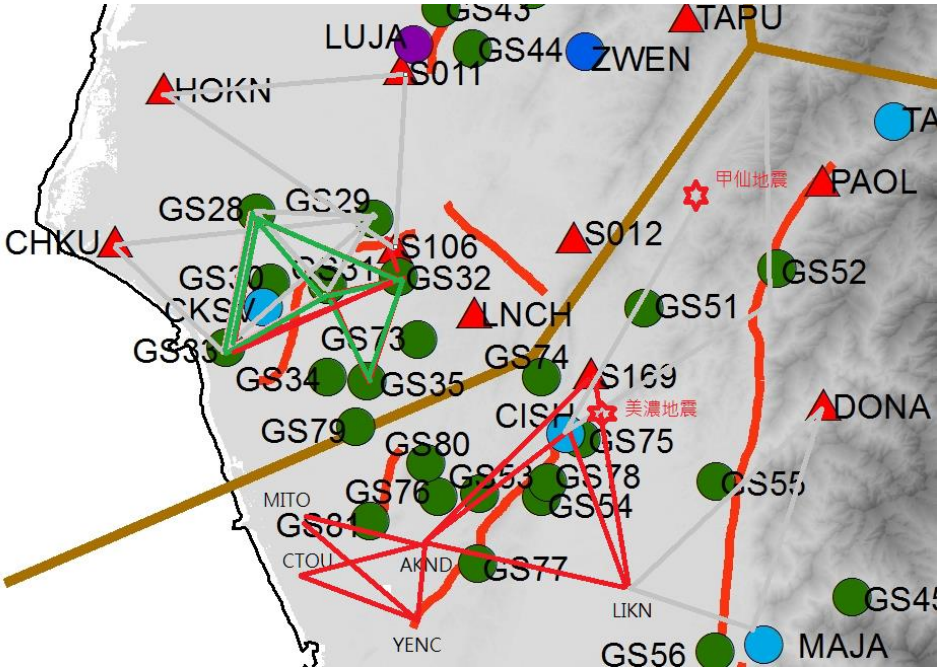


圖 6-4.7：TAID 與 TAIE 兩個分析區域在 2007~2012 年間的應變率圖，三角網依顏色來分辨其面應變速率，紅色最高，綠色次之，灰色最慢。

● 第二時段：2013 年之後

在台南中間地區（TW05 網）我們選擇了資料比較持續的一些站組成了九個三角網，並計算 2013/01/01 ~ 2016/02/05 期間的面應變速率（地震之後的資料不參與面應變速率的估計），如表 6-4.3 所示。表 6-4.3 顯示這九個三角網的代號、站名組合、年面應變率（單位為 μstrain/a），第四欄則為一個分類的代號，'o' 代表該三角網的年面應變率歸類於 1.0 μstrain/a 群組；'v' 代表該三角網的年面應變率歸類於 0.5 μstrain/a 群組；'x' 代表該三角網的年面應變率歸類於 0.1 μstrain/a 或更低的群組；此區有兩個三角網（SS1 及 SS4）被歸類於較高年應變率（'o'族群），六個（SS2、SS3、SS5、SS6、SS7、SS9）歸類於中度年應變率（'v'族群），另一個（SS8）歸類於較低年應變率（'x'族群）。將這些分類的群組的面應變資料表現在圖 6-4.8 及圖 6-4.9 中，此區所有的變化都是壓縮的變化。

表 6-4.3：TW05 網的年面應變率。

三角網名稱	測站名稱	年面應變率 (μstrain/a)	族群分類
SS1	'GS28GS29GS31'	-1.024128	o
SS2	'GS28GS29GS33'	-0.681370	v
SS3	'GS28GS32GS33'	-0.811454	v
SS4	'GS28GS31GS33'	-1.044763	o
SS5	'CHKUGS29GS33'	-0.712690	v
SS6	'CHKUGS31GS33'	-0.630234	v
SS7	'CHKUHOKNS106'	-0.630318	v
SS8	'HOKNS011S106'	-0.105741	x
SS9	'GS32S011S012'	-0.630370	v

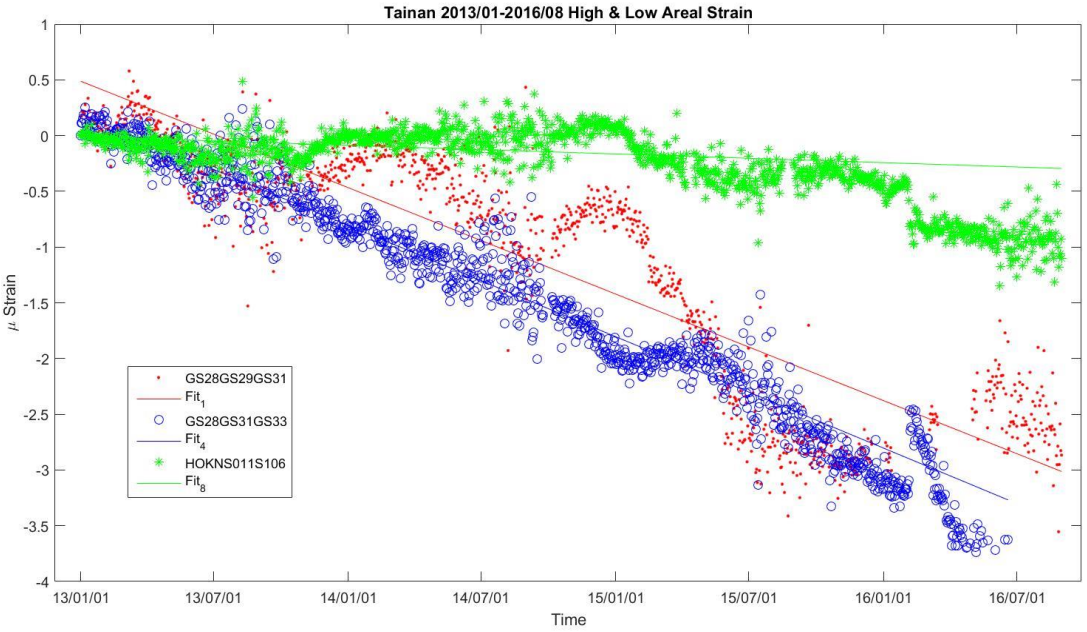


圖 6-4.8：較高年面應變率（'o'族群）及較低年面應變率（'x'族群）三角網的面應變資料分布。

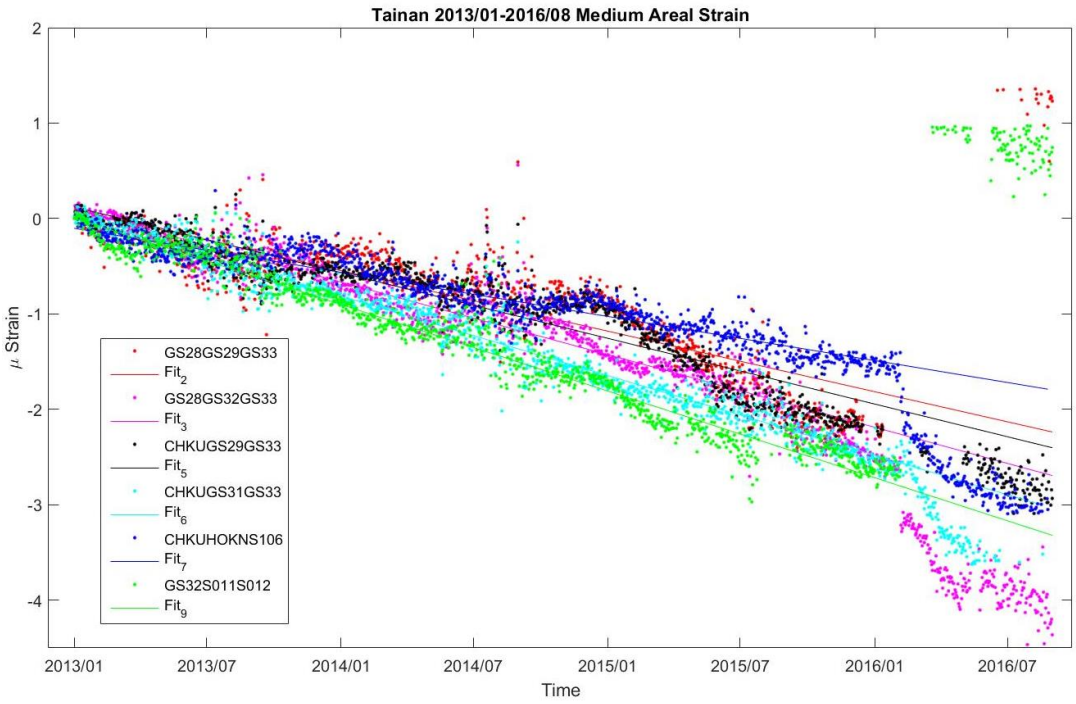


圖 6-4.9：中度面應變率（'v'族群）三角網的面應變資料分布。

圖 6-4.8 顯示的是面應變較高的兩個三角網（'o'族群：SS1 及 SS4）以及最低的一個三角網（'x'族群：SS8）的資料，這一些資料的面應變資料展現相當平穩的趨勢，但在 2014 年 12 月到 2015 年 3 月間有一個轉折的變化，顯示此一區域在這一段期間有異常的地殼活動。圖 6-4.9 顯示的是面應變中間程度變化的六個三角網（'v' 族群：SS2、SS3、SS5、SS6、SS7、SS9）的資料，這一些資料的面應變資料展現較高起伏的變化，不像圖 6-4.8 中資料的平穩，但在 2014 年 12 月到 2015 年 3 月間也約略有一個轉折的變化。總歸台南中區的地殼在這一段期間的面應變變化速率約在 0.6 ~ 1.0 μstrain/a 左右，只有一個位於此區最西邊的網其面應變在 0.1μstrain/a 左右。

接下來分析台南地區東邊以及部分高雄地區（TW06 網），包含此次美濃地震震央區的九個三角網，表 6-4.4 顯示這九個三角網的代號、站名組合、年面應變率（地震之後的資料不參與面應變速率的估計）及族群分類，此區在這一段期間的年面應變率明顯的高於台南中區的年面應變率。此區有五個三角網（SS1、SS2、SS4、SS7、SS8）被歸類於較高年應變率的地區（'o'族群），三個（SS3、SS5、SS9）歸類於中度年應變率（'v'族群），另一個（SS6）歸類於較低年應變率（'x'族群），位於此區的最東南邊。

表 6-4.4：TW06 網的年面應變率。

三角網代號	站名組合	年面應變率 (μstrain/a)	族群分類
SS1	'GS34GS73GS74';	-1.047387	o
SS2	'GS51GS73GS74';	-1.023557	o
SS3	'GS34GS74GS76';	-0.334094	v
SS4	'GS74GS75GS76';	-1.412786	o
SS5	'GS35GS74GS77';	-0.670807	v
SS6	'GS55GS56GS77';	-0.096377	x
SS7	'GS51GS55GS74';	-1.264845	o
SS8	'GS34GS51GS56';	-0.981808	o
SS9	'GS34GS74GS77';	-0.486470	v

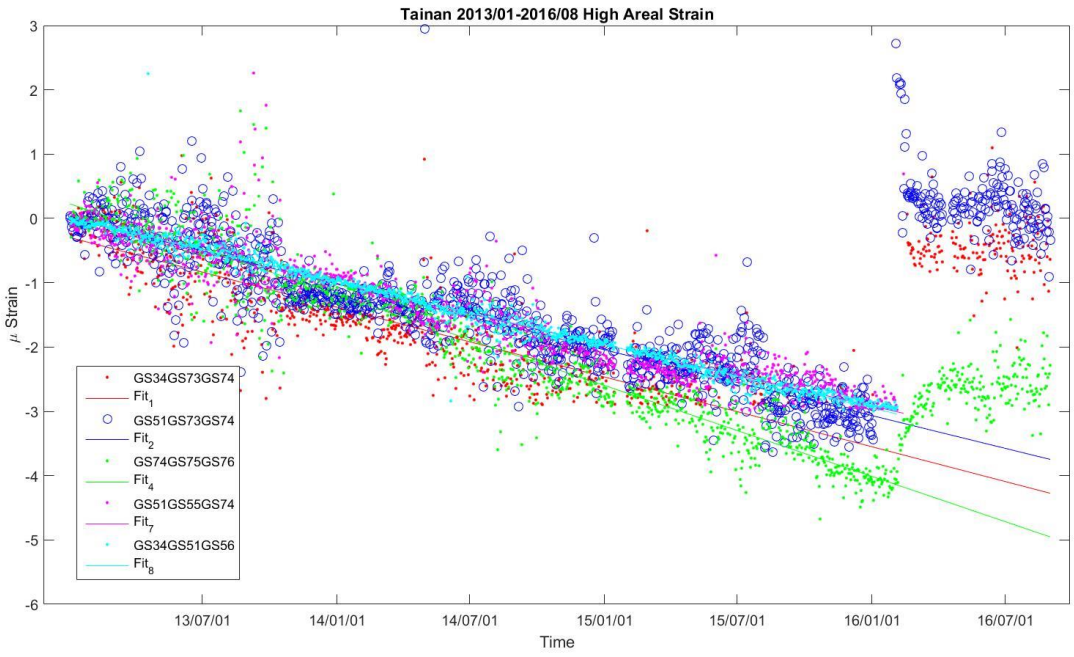


圖 6-4.10：TW06 網較高年面應變率（'o'族群）三角網的面應變資料分布。

圖 6-4.10 顯示較高年應變率的五個三角網的資料，其中 SS7 與 SS8 三角網的變化最平穩，呈均勻（線性壓縮）的變化，其餘的三角網上下起伏較大，這是一件很有趣的現象，因為這一區域（SS7）最接近而且剛好涵蓋了美濃地震的震央區域，並且在這附近的三角網中他的年面應變率最大，高達 1.265 μstrain/a，其物理意義尚不了解，是否震源區在高壓縮下地殼的變化較為穩定？另外，此區域的面應變率遠高於台南中部地區的年應變率，是否也可以視為較高危險的地震潛勢區？在地震之後的面應變趨於平緩，同震加餘震的應變約有 1.5~4.0 μstrain 的變化。

此區域的中度應變速率區及低速應變區資料如圖 6-4.11 所示，各個三角網的變化起伏較大，同震加餘震的面應變約在 0.7~2.0 μstrain 的變化，三個地震前顯示中等應變率（v 族群）的三角網中，SS5 與 SS9 兩個三角網在地震後的面應變率仍有明顯壓縮的現象，而 SS3 三角網在地震後反而呈相反的舒張現象，這是否代表著中等壓縮速率的區域在此地震中並沒有釋放出所有的累積能量。

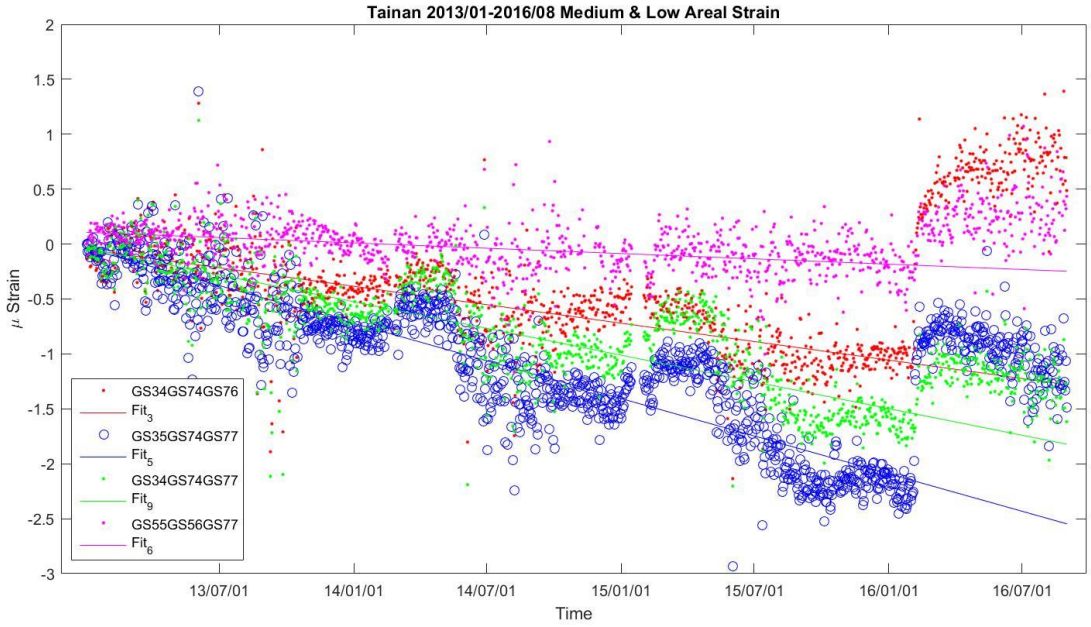


圖 6-4.11：TW06 網中度（'v'族群）及較低（'x'族群）年面應變率三角網的的面應變資料分布。

若以面應變速率的地區分布來看，全部以顏色來區分，繪製於圖 6-4.12 中，紅色三角網代表高應變區（0.7~1.4 μstrain/a），綠色三角網代表中應變區（0.3~0.7 μstrain/a），灰色三角網代表低應變區（0.3 μstrain/a 以下），第一區 TW05 網最低的應變三角網在圖中最西北邊角落，超出區外故未繪製，圖中可看出這兩分析區域的兩端面應變速率最慢，美濃地震震央區附近面應變速率最快，另一較快速應變的區域是在後甲里斷層區域，其介於中應變速率及高應變速率，本次分析剛好在這兩區間有一空隙區未能分析，因其主要是分區邊界，無法形成一個 GPS 三角網，不過，看起來應變的分布並非一定是連續的，斷層的位置對地殼應變的累積也有一定的影響。

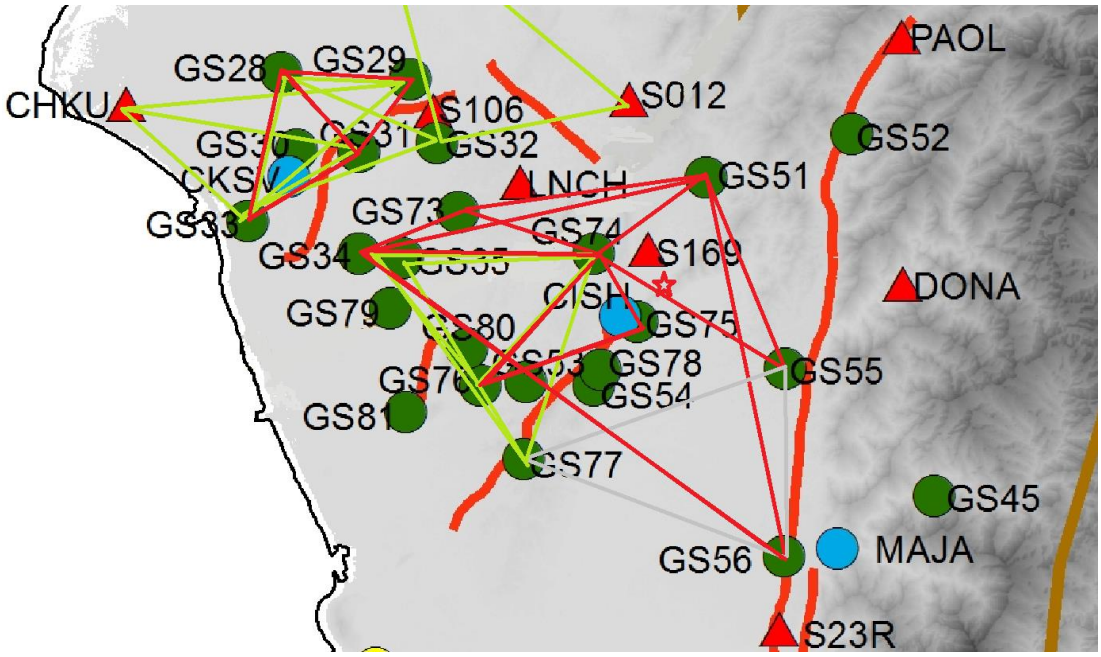


圖 6-4.12：TW05 與 TW06 兩個分析區域在 2013~2016 年間的應變率圖，三角網依顏色來分辨其面應變速率，紅色最高，綠色次之，灰色最慢。

從以上的分析，我們可以看到在 2013~2016 年地震前間，面應變的累積速率全部都是壓縮，離美濃地震震央區越近的面應變速率越快，但後甲里斷層附近也有較明顯的高區，而且從圖 6-4.3 與圖 6-4.5 的資料分布來看，在中低應變區域的應變變化反而在 2015 年間有加速壓縮的趨勢，而在高面應變區反而沒有這一種現象，這種差異性是否也是一種特徵，地殼在高度應力累積接近破裂時，反而沒有調整的空間，繼續增加的應力會累積到鄰近的區域去。

● 小結

這次對過去十年來台南、高雄地區的 GPS 三角網做了一次系統性的應變分析，歷時十年，地調所在此區域陸續增加了許多的 GPS 觀測站，並持續有效率的維護著，保持相當高的資料獲取率，所以可以得到此區域長期的地變分析。在這十年中，因測站陸續增加，所以我們根據資料的持續性，分作兩個時段（2007~2012 年與 2013~2016 年）來分析，第一時段資料較少，測站分布較稀疏，所以每一個三角網的區域較大；第二時段測站數較多、較密集分布，所以形成很多高密的小三角網。每一時段又分成兩個大區域，以方便電腦軟體同時處理，依據原始分析時所用的分區名稱，第一時段分為 TAID 與 TAIE 兩大區域，第二時段分為 TW05 與 TW06 兩大區域。由於兩時段中各有一個顯著地震，即 2010/03/04 的高雄甲仙地震與 2016/02/06 的高雄美濃地震，資料只分析到美濃地震當天，所以尚未知同震與震後的影響，但根據以上的 GPS 應變分析中，可以得到以下的幾點結論：

1. 甲仙地震對這一次美濃地震震區其實並未釋放此區域的能量，而是加速了地殼應變的累積，所以是負的能量釋放。這表示甲仙地震對此區域雖造成同震應變，但並未釋放此區域的能量，反而加速了此區域的地殼負重。
2. 此區域的地殼在十年或更遠以來，面應變持續的累積，在近震央區的累積速率較快，較遠區域則較緩和。不過也有例外，在後甲里斷層附近，雖離美濃震央較遠，但應變累積在近三年也相當快速，顯然是該斷層本身的斷層構造之影響。
3. 此次高雄美濃地震最大震度為臺南市新化 7 級，而不是在震央區域，這與後甲里斷層區域性的較高應變累積有關。
4. 應變的變化趨勢，在 TW06 區域的高應變區 SS7 三角網變化最平穩，呈均勻（線性壓縮）的變化，其餘附近的三角網上下起伏較大，這是否代表震源區在震前高壓縮下，地殼的變化較為穩定？這是否可以當作前兆的一種判識方法。
5. 在 2015 年年間，幾個外圍區域中、低面應變累積速率的三角網有較明顯的應力累積變化，而非發生在較高面應變靠近震央區域，這代表地殼在高度擠壓情況下，會把繼續增加的應變分配到周邊地區，這或許可做為未來判別前兆的方法。

第七章、結論與後續工作

（1）大地測量資料分析：GPS、精密水準測量及 PS-InSAR

本計畫計算歷史累積至 2016 年 10 月全臺連續全球定位系統測站共 476 站，資料計算之速度場結果與過去長期解算結果約略相同，扣除累積歷史資料至 2015 年底速度場之殘差值約為 1 mm/yr，表示新增本年度資料後，與歷史速度場沒有太大的差異，也就是說這一年來在構造運動方面，並沒有明顯的改變。分析後發現擁有較大誤差的測站多位於西南部地區域，其原因可能為 2016 年 2 月於西南部地區發生美濃地震，且部分測站設立於 2015 年初（GS82-GS89），除了記錄到美濃地震同震變型外，還持續記錄到震後變型，導致這些測站 2016 年速度場受到影響，預計再將資料累積至少一年即可移除此效應。精密水準已完成 25 條測線共 933 個測段之施測及查核；GPS 亦完成台北地區 80 點、桃竹苗地區 107 點、中部地區 152 點、嘉南地區 158 點、高屏地區 102 點、恆春地區 32 點、花東地區 68 點及及因美濃地震而施測的 95 點之移動站測量及查核工作。藉由誤差分析及與 GPS 連續站座標時間序列比對後，顯示觀測資料品質符合歷年施測水準且穩定可靠。

由初步干涉影像結果顯示，東部區域因除縱谷地區外多為山脈且植被覆蓋情形嚴重。因此在處理短波長 C 波段影像時，必須先挑選與主影像垂直基線差小於 600 公尺的雷達影像才能生成干涉條紋。此外，C 波段的 ENVISAT 衛星影像於執行任務期間只有 9 張影像拍攝於臺灣東部地區，因此在處理過後發現成果並不理想，無法判斷是否有跨斷層速度差異。而長波長 L 波段的 ALOS 衛星，無論是拍攝模式或是穿透植被部分的能力都相當適合用來分析東部地區的斷層活動。由結果也顯示東部地區縱谷斷層北段跨斷層速度梯度差異較不明顯，而跨過池上斷層則有每年約 20~35 毫米的速度梯度差異。另外也可觀察到跨過鹿野斷層，速度梯度約為 10 mm/yr；以及利吉斷層東側約 1 公里處有一明顯的在範圍約 300 公尺以內的視衛星速度減少，與水準測量觀測結果相同，因此其位置可以再分析討論修正。

關於 GPS、精密水準測量及 PSInSAR 技術的建議如下：

- GPS連續站部分，靠近中央山脈的區域建議應定期清理測站周圍環境，以避免測站遮蔽過度嚴重導致資料品質隨時間變差。
- GPS移動站部分，台北地區速度異常點位為GA83及B229、恆春地區速度異常點位為GE05及G669、桃竹苗地區速度異常點位為G416、T007，經過實地勘驗，除GA83、G669及G416推測為現地地質構造或地形所引起外，其餘皆為人為或工程因素，分析時應特別注意修正其速度值。GPS目前可解析的台灣中部、北部與東部地區因斷層活動造成之地表變形特徵。但GPS對於南部地區之地表變形解析力並不佳，原因可能在於地表變形活躍區域之測站分布密度不足、泥體之變形（如泥基背斜）也是控制此區域地表變形之因素等。
- 精密水準部分，五股至台北測線之水準點GA83、縣122_新竹至五峰測線之水準點G416、G429、T004、T003與6020，前述點位皆有異常變動。經過實地勘驗，除GA83是因大型公共工程所造成外，其餘推測是因為點位附近有地滑現象，建議分析時應特別注意並停止測量或重新設置該點位。原台26_恆春至鵝鑾鼻主測線之點位G670（恆春鎮公所）至點位G654（屏鵝公路與南光路交叉口）之間，今年因許多點位遺失，此測段並未施測，建議重新埋設點位，以利恆春地區有完整的水準觀測網。跨車籠埔斷層之精密水準短測線，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。
- 利用PSInSAR技術除可觀測大面積的變形外，可克服連續GPS測站不足，有極大的潛力觀測隱伏的活動構造及其活動性。並且長波長L波段影像能有效穿越部分植被，以提供未出露斷層位置的校正，建議未來可多利用高解析度以及長波長影像以提供

斷層行為的分析。

（2）斷層面滑移速率及虧損率評估

本研究利用 GPS 觀測資料和三維塊體模型 DEFNODE，針對臺灣東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 34 個塊體，並由地調所公佈的活斷層（梅嶺斷層除外）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。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。

（3）活動斷層潛勢分析

臺灣東部活動斷層主要是縱谷斷層，目前地調所將縱谷斷層分為四條活動斷層，由北而南為嶺頂斷層、瑞穗斷層、池上斷層與利吉斷層，因此本計畫也是以這四條活動斷層分別評估其潛勢，而此四條斷層是否有聯合破裂之可能性，建議可在下一階段潛勢評估中探討。

臺灣東部活動斷層長期滑移速率的量可能非全部藉由地震釋放，一部分可能是藉由潛移的方式消耗，若未考量潛移因素則可能造成所估計之地震週期時間過短，並高估未來 30 年、50 年、100 年的活動機率。因此建議將斷層潛移的分量因素納入評估。部分活動斷層缺乏地質調查的資料評估長期滑移速率，本計畫建議暫時以 GPS 短期滑移速率或是塊體模型之滑移虧損率結果作為長期滑移速率進行評估，然而短期滑移速率是否能取代長期滑移速率，仍應審慎使用。

（4）井下應變儀與地球化學觀測

井下應變儀部分，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"。2015 年 12 月至 2016 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 5 個事件（表 4-1.3、圖 4-1.19~23），統計有記錄到地震前應變異常的井下應變儀測網其分別記錄的事件如下：嘉義網記錄到 1 個應變異常事件為 2016/02/06 美濃地震；新竹網記錄到 4 個異常事件為 2016/02/06 美濃地震與 2016/05/12 至 05/13 期間宜蘭縣政府東方之 3 起地震;臺北網記錄到 4 個應變異常事件為 2016/02/02 臺灣東北部海域地震與 2016/05/12 至 05/13 期間宜蘭縣政府東方之 3 起地震。而在井下應變儀應變異常判釋統計方面，分析至 2016 年 10 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為：70%、85%與 76%；而有前兆訊號卻沒有對應地震的誤判機率分別為：30%、15%與 24%；地震前沒有前兆訊號的機率為：44%、53%與 38%。

井下應變儀的資料分析需要環境監測資料的輔助，來釐清應變的來源，降雨與地下水監測則是兩個非常重要的參考監測資料，過去這些共站監測資料或多或少會發生故障、資料缺漏，造成資料校正上的困擾，這些共站監測如能定期確實維護以保資料品質，對於資料分析是有相當助益。為了克服共站環境監測資料品質不佳的問題，本研究也嘗試利用獨立成分分析（ICA）分析應變儀當中降雨與地下水的影響成分，藉此校正應變儀訊號，目前在達邦測站測試的結果顯示有兩個獨立成分，其中一個與地下水實測資料相當一致，另一個與降雨較為一致，但含有部分大氣的影響，需進一步研究。然而藉此方法，的確有機會直接從應變儀資料中分離出地下水與降雨兩者的影響，對於應變儀資料校正可提供相當的助益。

以土壤氣體異常變化之方法來評估斷層活動性或地震活動之發生，並利用時序分析方法處理不同觀測站的數據，可進一步以較客觀的方式辨識出與地震前兆的異常反應。本年度觀測期間，在 2016/01/11 M_L 5.3 花蓮近海地震、01/19 M_L 5.8 臺東外海地震、02/06 M_L 6.6 高雄美濃地震、02/16~02/18 M_L 5.0~5.3 臺東海端地震，均同時有二至三座土壤氣體觀測站出

現氡氣異常升高的變化。此外，大致上只要較大的地震事件（規模大於五）發生在觀測站的敏感反應範圍內，該測站就有很高的機率於地震發生前，觀察到異常的前兆變化。不過，部分測站也觀察到地震震央雖接近反應圈但並未為包含於內，顯示各測站反應圈可能尚須進行些微調整，利用造成多數測站出現異常之規模較大的地震，若確認為顯著的震前訊號，可供修正各測站反應範圍之用。另外，由於部分測站仍常受到降雨影響，建議各測站未來應全面開挖，重新調整並檢視地下土壤孔隙度，讓氣體能較為順暢的進入管線之中，以增加觀測的穩定度。

地下水位監測方面，多數水位起伏為降雨所致，並於 02/06、05/22、05/31 幾起地震中出現同震現象，但未觀察到顯著的震前水位異常。今年地下水位變化並未觀測到顯著的異常，應與過去較敏感的井無資料有關，因此建議未來能修復以前曾出現異常的井，如中興井、達邦井。目前，沄水溶解氣體觀測站的變化穩定，應適合長期觀測。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，呈現週期變化。豐水期時，地下水位升高時地下水水氡濃度也升高。枯水期時，地下水位下降則地下水水氡濃度也下降。現地連續監測須與實驗室樣本分析互相驗證，以判斷地下水水氡濃度有無異常下降之地震前兆發生。此外，2016/02/06 M_L 6.6 高雄美濃地震發生前地下水水氡濃度維持 113 ± 23 pCi/L，於 2016 年 1 月 26 日地下水水氡濃度下降至 64 ± 3 pCi/L，低於地下水水氡濃度背景值 1.5 倍標準差，可能為地下水水氡濃度異常下降之地震前兆，這與古坑、屏東和池上站之土壤氡氣濃度升高的時間大致上吻合，可能為美濃地震的地震前兆。

（5）GPS 應變與井下應變儀及其他觀測

在去年的觀測中，重新調整了井下應變儀的係數，結果仍可看到相關的變化，但所有的井下應變的變化尺寸相對縮小，但長期的趨勢變化仍然相當一致。GPS 應變對於其他觀測量所觀測到的異常也都有對應的 GPS 應變變化，2016/02/06 的地震也有相對等的變化，在 2016/01/19（地震前 17 天）由壓縮轉舒張，然後到地震後再突然轉壓縮，整個嘉義地區的 GPS 應變與井下應變儀太興測站（TAIS）都有同步的變化，井下應變儀達邦測站（DARB）因一月的資料中斷，無法確動是否有相同的趨勢，但同震的變化依然相同。嘉義地區的地殼應變在 2016/01/19（黑垂直線）~2016/06/24（紅垂直線）間多個 GPS 三角網的應變顯示多次快速轉折，先在 1/19 由壓縮轉舒張，再於 2/6 由舒張再轉回壓縮，井下應變儀太興測站（TAIS）也有相同的變化，應為高雄美濃地震的前兆與同震變化，在 2016/04/27 花蓮北方規模 5.7 與 5.5 的幾個地震前一個月又同樣的舒張再壓縮。GPS 的地表應變與附近的井下應變儀的地底下應變似乎在長期趨勢相當一致，但在短期則有所差異，新竹與嘉義各自的兩個相鄰測站的變化很明顯的不同，但都與各自涵蓋的 GPS 三角網有相同的長期應變，這主要的原因應該是地殼的長期應變（或說應力）的變化應該是控制在整體的地殼應力累積，而區域性的斷層活動則控制著短期、區域的應變，因此，縱使相鄰近的兩個站，會因為在斷層的不同方位而會有不同的應變，甚至與同一地區的 GPS 地表應變有所不同。因此，兩種資料放在一起比較而有所差異時，或是相鄰兩站在做完環境因素修正之後仍有所差異，則可以判斷造成這種差異的因素應該是來自區域性的斷層活動。新調整的井下應變儀資料與 GPS 應變顯然在尺度似乎較為統一， 都在同一個數量級，比以前不同測站相差兩個以上的數量級有很大的改善。但為何新竹地區的井下應變儀在與 GPS 同調後，其變化似乎變化都太小，尚待進一步探討。

在這一期的觀測中，嘉義地區的地殼應變與前幾年的變化有所改變，而且 GPS 應變與井下應變有異常的分離（差異），尚不完全了解其原因，但有可能是去年底到今年初，臺灣有一個充足降雨的冬天，有異於往年乾旱缺水的狀況，而嘉義地區的應變又特別與地下水有較大的反應，或許由此可探討 GPS 應變與井下應變間的關係。由這些長期地殼應變的監測，可以看出其重複性與地震息息相關的複雜性，這也顯示臺灣地區較大較深的地震會造成各地的地殼作應力（應變）的調整。

參考文獻

Angelier, J., Chu, H.T. Lee, J.C. and Hu, J.C. (2000) Active faulting and earthquake hazard: The case study of the Chihshang fault, Taiwan. Journal of Geodynamics, 29, 151-185.

Angelier, J., J.-C. Lee, H.-T. Chu, and J.-C. Hu (2003) Reconstruction of fault slip of the September 21st, 1999, Taiwan earthquake in the asphalted surface of a car park, and co-seismic slip partitioning, J Struct Geol, 25(3), 345-350.

Bardsley, W., and D. Campbell (2000) Natural geological weighing lysimeters: calibration tools for satellite and ground surface gravity monitoring of subsurface water-mass change, Natural Resources Research, 9(2), 147-156.

Baubron, J.-C., Rigo, A. and Toutain, J.-P. (2002) Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). Earth Planetary Science Letter, 196, 69-81.

Biq, C. (1972) Transcurrent buckling, transform faulting and transpression: Their relevance in eastern Taiwan kinematics. Petrol. Geol. Taiwan, 10, p.1-10.

Bock, Y, Abbot RI, Counselman, CharlesC III, King RW. (1986) A demonstration of 1–2 parts in 107 accuracy using GPS. Bulletin g é od é sique. 60:241-254.: Springer-Verlag 10.1007/BF02521056

Bolt, B.A. (1999) Earthquake, 4th edition, W.H. Freeman and Company, New York, 366pp.

Bomford, G. (1985) Geodesy, 4th Ed., Oxford University Press.

Bonilla, M.G. (1977) Summary of Quaternary faulting and elevation changes in Taiwan. Mem. Geol. Soc. China, no. 2, 43-56.

Brace, W.F., Paulding, B.W.Jr. and Scholz, C. (1966) Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. Journal of Geophysical Research, 71, no. 16, 3939-3953.

Champenois, J., Fruneau, B., Pathier, E., Deffontaines, B. Lin, K.-C., Hu, J.-C. (2012) Monitoring of active tectonic deformations in the Longitudinal Valley (Eastern Taiwan) using Persistent Scatterer InSAR method with ALOS PALSAR data. Earth Planet. Sci. Lett., 337-338, 144–155, doi: 10.1016/j.epsl.2012.05.025.

Chang, C.-P., T.-Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J.-C. Lee, and S.-B. Yu (2003) Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data, Earth Planet Sc Lett, 214(1), 115-127.

Chapman, S., and Lindzen, R.S. (1970) Atmospheric Tides, D. Reidel Publishing, Dordrecht-Holland, 200pp.

Chen, C.H., Wang, C.H., Liu, J.Y., Liu, C., Liang, W.T., Yen, H.Y., Yeh, Y.H., Chia, Y.P., and Wang, Y. (2010) Identification of earthquake signals from groundwater level records using the HHT method. Geophysical Journal International, 180, 1231-1241.

Chen, Horng-Yue, Jian-Cheng Lee, Hsin Tung, Shui-Beih Yu, Ya-Ju Hsu, and Hungkyu Lee (2013) A New Velocity Field from a Dense GPS Array in the Southernmost Longitudinal Valley, Southeastern Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol.24, No.5, p.837-862.

Chen, K.H., Toda, S., Rau, R.J. (2008) A leaping, triggered sequence along a segmented fault: The 1951 ML 7.3 Hualien-Taitung earthquake sequence in eastern Taiwan. GJR, Vol. 113, B02304, doi:10.1029/2007JB005048.

Chen, W. S., I. C. Yen, Keegan P. Fengler, Charles M. Rubin, C. C. Yang, H. C. Yang, H. C. Chang, C. W. Lin, W. H. Lin, Y. C. Liu, and Y. H. Lin (2007) Late Holocene paleoearthquake activity in the middle part of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan. Earth Planet. Sci. Lett., 264, 420-437.

Chen, W.S., and Wang, Y. (1996) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Geology of Taiwan 7.

Chen,Horng-Yue, Jian-Cheng Lee, Hsin Tung, Shui-Beih Yu, Ya-Ju Hsu, and Hungkyu Lee (2012) Determination of Vertical Velocity Field of Southernmost Longitudinal Valley in Eastern Taiwan: A Joint Analysis of Leveling and GPS Measurements. Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 23, No. 4, 355-376, August 2012.

Cheng, L.W., J.C. Lee, J.C. Hu, and H.Y. Chen (2009) Coseismic and postseismic slip distribution of the 2003 Mw=6.5 Chengkung Earthquake in eastern Taiwan: elastic modeling from inversion of GPS data. Tectonophysics, 466, 335-343.

Cheng, S. N., Y. T. Yeh, and M. D. Yu (1996), The 1951 Taitung earthquake in Taiwan, J. Geol. Soc. China, 39(3), 267– 285.

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.

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.

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. (1974) Ultrasonic stress monitoring in active sites: observation of the time dependence of stress relief mechanisms in mining pillars, Eos Trans. AGU, 55, 1192.

Gladwin, M.T. (1982) Ultrasonic stress monitoring in underground mining, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 221-228.

Gladwin, M.T. (1984) High precision multi component borehole deformation monitoring, Rev. Sci. Instrum., 55, 2011-2016.

Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., Higbie, J.W. and Hart, R.G. (1991) A medium term precursor to the Loma Prieta earthquake? Geophys. Res. Lett., 18, 1377-1380.

Hanks, T. C. & Kanamori, H. (1979) A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research, 84(B5), 2348-2350.

Hart, R. H. G., M. T. Gladwin, R. L. Gwyther, D. C. Agnew, and F. K. Wyatt (1996) Tidal calibration of borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity, J Geophys Res-Sol Ea, 101(B11), 25553-25571.

Haubrich, R.A. (1965) Earth noise, 5 to 500 millicycles per second, 1, spectral stationarity, normality and nonlinearity, J. geophys. Res.,70, 1415-1427.

Hauksson, E. (1981) Radon content of groundwater as an earthquake precursor: Evaluation of worldwide data and physical basis. Journal of Geophysical Research, 86, no. B10, 9397-9410.

Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky (2006) Massachusetts Institute of Technology: GPS Analysis at MIT, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Release 10.3., September 2006.

Hodgkinson, K., J. Langbein, B. Henderson, D. Mencin, and A. Borsa (2013) Tidal calibration of plate boundary observatory borehole strainmeters, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, n/a-n/a.

Hooper A; Bekaert D; Spaans K; Arikan M (2012) Recent advances in SAR interferometrytime series analysis for measuring crustal deformation, Tectonophysics, 514-517, pp.1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013

Hsu, T.L. (1956) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Bull. Geol. Surv. Taiwan, no. 8, 39-64.

Hsu, T.L. (1962) Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Memoir of the Geological Society of China, 1: 95-102.

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.

Hu, J.-C., Cheng, L.-W. Chen, H.-Y., Wu, Y.-M., Lee, J.-C., Chen, Y.-G., Lin, K.-C., Rau, R.-J., Kuochen, H., Chen, H.-H., Yu, S.-B., and Angelier J. (2007) Coseismic deformation revealed by inversion of strong motion and GPS data: the 2003 Chengkung earthquake in eastern Taiwan. Geophys. J. Int., 169, 667-674.

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.

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.

Konishi, K., Omura, A., Kimura, T. (1968) 234U–230Th dating of some late Quaternary coral limestones from southern Taiwan (Formosa). Geology and Paleontology of Southeast Asia, 5, 211-224.

Kostrov, V. V. (1974) Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rocks. Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth, 1, 23-40.

Kuo, M.C.T., Fan, K., Kuochen, H. and Chen, W. (2006a) A mechanism for anomalous decline in radon precursory to an earthquake. Ground Water, 44, no. 5, 642-647.

Kuo, T., Cheng, W., Lin, C., Fan, K., Chang, G. and Yang, T. (2010b) Simultaneous declines in radon and methane precursory to 2008 Mw 5.0 Antung earthquake: corroboration of in-situ volatilization. Natural Hazards, Vol. 54, 367-372.

Kuo, T., Fan, K., Kuochen, H., Han, Y., Chu, H. and Lee, Y. (2006b) Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung Earthquake. Journal of Environmental Radioactivity, 88, no. 1, 101-106.

Kuo, T., Lin, C., Chang, G., Fan, K., Cheng, W. and Lewis, C. (2010a) Estimation of aseimic crustal-strain using radon Repetitive radon precursors of the 2003 M 6.8, 2006 M 6.1, and 2008 M 5.0 earthquakes in eastern Taiwan. Natural Hazards, 53, no. 2, 219-228.

Kuo, T., Lin, C., Fan, K., Chang, G., Lewis, C., Han, Y., Wu, Y., Chen, W. and Tsai, C. (2009) Radon anomalies precursory to the 2003 Mw=6.8 Chengkung and 2006 Mw=6.1 Taitung earthquakes in Taiwan. Radiation Measurements, 44, no. 3, 295-299.

Kuo, T., 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.

Kuochen Hao, Wu Yih-Min, Chen Yue-Gau, Chen Rong-Yuh (2007) 2003 Mw6.8 Chengkung earthquake and its related seismogenic structures. J. Asian Earth SCI. no. 31 pp. 332–339.

KuoChen, H., Francis T. Wu, Steven W. Roecker (2012) Three-dimensional P velocity structures of the lithosphere beneath Taiwan from the analysis of TAIGER and related seismic data sets. JGR, 117, B06306.

Kuochen, H., Wu, Y.M., Chang, C.H., Hu, J.C., Chen, W.S. (2004) Relocation of Eastern Taiwan Earthquakes and Tectonic Implications, TAO, 15(4), 647-666.

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, J. C. and J. Angelier (1993) Localisation des déformations actives et traitement des données géodésiques: L'exemple de la Faille de la Vallée Longitudinale, Taïwan. Bull. Soc. géol. Fr., 4, 533-540.

Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, F. S. Jeng, and R. J. Rau (2003) Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998–2001, J. Geophys. Res., 108(B11), 2528.

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.

Lee, J.-C., Chu, H.-T., Angelier, J., Hu, J.-C., Chen, H.-Y. and Yu, S.-B. (2006) Quantitative analysis of surface coseismic faulting and postseismic creep accompanying the 2003, MW=6.5, Chengkung earthquake in eastern Taiwan. J. Geophys. Res., 111, B02405, doi:10.1029/2005JB003612.

Lee, Jian-Cheng, Jacques Angelier, Hao-Tsu Chu, Shui-Beih Yu, and Jyr-Ching Hu (1998) Plate-boundary strain partitioning along the sinistral collision suture of the Philippine and Eurasian plates: Analysis of geodetic data and geological observation in southeastern Taiwan. TECTONICS, 17, 6, 859-871.

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. C. (1969) Holocene geology of Taiwan. Acta Geology Taiwan, 13, 83-126.

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.

McCaffrey, R. (2013) Active tectonics of northwestern U.S. inferred from GPS-derived surface velocities, J. Geophys. Res., Vol. 118, 709-723, doi:10.1029/2012JB009473.

Mu, C.H., Angelier, J., Lee, J.C., Chu, H.T., Dong, J.J. (2011) Structure and Holocene evolution of an active creeping thrust fault: the Chihshang Fault at Chinyuan (Taiwan). J. Struct. Geol. 33, 743–755.

Munk, W. H. and D. E. Cartwright (1966) Tidal spectroscopy and prediction. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 259, 533–581.

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.

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.

Peng, T. H., Li, Y. H., Wu, F. T. (1977) Tectonic uplift of Taiwan Island since the early Holocene. Memoir, Geological Society of China, 2, 57-69.

Peyret, M., S. Dominguez, R. Cattin, J. Champenois, M. Leroy, and A. Zajac (2011) Present‐day interseismic surface deformation along the Longitudinal Valley, eastern Taiwan, from a PS‐InSAR analysis of the ERS satellite archives. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 116, B03402.

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-Sol Ea, 115, 25.

Roeloffs, E. (2010) Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole strainmeters: Roles of vertical and shear coupling. J. Geophys. Res., 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. (19880 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.

Segall, P., S. Jónsson, and K. Ágústsson (2003) When is the strain in the meter the same as the strain in the rock?, Geophys Res Lett, 30(19), 1990, doi:10.1029/2003gl017995.

Shyu, J. B. H., K. Sieh, Y. G. Chen, C. S. Liu (2005) Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. Journal of Geophysical Research, Vol. 110, B08402.

Shyu, J. B. H., L. H. Chung, Y. G. Chen, J. C. Lee, K. Sieh (2007) Re-evaluation of the surface ruptures of the November 1951 earthquake series in eastern Taiwan, and its neotectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 31 (3). pp. 317-331.

Shyu, J. B. H., Sieh, K., Avouac, J.P., Chen, W.S. (2006) Millennial slip rate of the Longitudinal Valley fault from river terraces: Implications for convergence across the active suture of eastern Taiwan. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 111, B08403.

Shyu, J. B. H., Sieh, K., Chen, Y. G., Chuang, R. Y., Wang, Y., & Chung, L. H. (2008) Geomorphology of the southernmost longitudinal valley fault: implications for evolution of the active suture of eastern Taiwan. Tectonics, 27.

Shyu, J. B. H., Y. R. Chuang, Y. L. Chen, Y. R. Lee and C. T. Cheng (2016) A New On-Land Seismogenic Structure Source Database by the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences 27, 311-323, doi: 10.3319/TAO.2015.11.27.02(TEM).

Silver, P.G. and Wakita, H. (1996) A search for earthquake precursors. Science, 273, no. 5271, 77-78.

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.

Teng, T.L. (1980) Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. Journal of Geophysical Research, 85, no. B6, 3089-3099.

Thomas, M. Y., J. P. Avouac, J. Champenois, J. C. Lee, and L. C. Kuo (2014) Spatiotemporal evolution of seismic and aseismic slip on the Longitudinal Valley Fault, Taiwan, J. Geophys. Res., 119, doi: 10.1002/2013JB010603.

Toutain, J.P. and Baubron, J.C. (1999) Gas geochemistry and seismotectonics: A review. Tectonophysics, 304, 1-24.

Tung, H., and Hu, J.-C. (2012) Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of centralTaiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. Tectonophys., 578, 126-135.

Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Version 3 (UCERF3) (2013) The Time-Independent Model. USGS Open-File Report 2013–1165, 97 pp.

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.

Ward, S. N. (1998) On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135(3), 1011-1018.

Wells, D. L., and K. J. Coppersmith (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seis. Soc. Am., 84, 974–1002.

Wu, Y. M., Y. G. Chen, T. C. Shin, H. Kuochen, C. S. Hou, J. C. Hu, C. H. Chang, C. F. Wu, and T. L. Teng (2006) Coseismic versus interseismic ground deformations, fault rupture inversion and segmentation revealed by 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake in eastern Taiwan, Geophys. Res. Lett., 33, doi: 10.1029/2005GL024711.

Wu, Y.-Y., Hu, J.-C., Lin, G.-P., Chang, C.-P., Tung, H., Lu, C.-H. (2013) Transient active deformation in Tainan Tableland using Persistent Scatterers SAR interferometry. Bull. Soc. Geol. France, in press.

Wu, Yih-Min, Yue-Gau Chen, Chien-Hsin Chang, Ling-Ho Chung, Ta-Liang Teng, Francis T. Wu, and Chien-Fu Wu (2006) Seismogenic structure in a tectonic suture zone: With new constraints from 2006 Mw6.1 Taitung earthquake. Geophys. Res. Lett., Vol.33, L22305.

Yamaguchi, M. and Y. Ota (2004) Tectonic interpretations of Holocene marine terraces, east coast of Coastal Range, Taiwan. Quaternary International, 115-116, 71-81.

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 Kuo, L. C. (2001) Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333, 199-217.

Yu, S. B. and Lee, C. (1986) Geodetic measurement of horizontal crustal deformation in eastern Taiwan. Tectonophysics, 125, 73-85.

Yu, S. B., H. Y. Chen, and L. C. Kuo (1997) Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics, 274, 41-59.

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.

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.

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。

王執明、王乾盈（1991）卑南文化公園基地附近地質調查。國立臺灣史前文化博物館報告，共 74 頁。

王蘭榛、石瑞銓、林啟文、陳文山（2010）由淺層震測影像探討鹿野斷層之構造。經濟部中央地質調查所特刊，第 24 號，第 1-15 頁。

石再添、張瑞津、黃朝恩、石慶得、楊貴三、孫林耀明（1983）臺灣北部與東部活斷層的地形學研究。臺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、石慶得、楊貴三（1986）台灣活斷層的地形學研究。國立台灣師範大學地理研究報告，12 期，1-44。

石瑞銓、陳平護（2001）活動斷層地球物理探勘計畫(4/5)－台灣東部地區活動斷層地球物理探勘。經濟部中央地質調查所，共 103 頁。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山（2004）地震地質調查及活動斷層資料庫建置：淺層地球物理探勘（3/5）。經濟部中央地質調查所報告第 93-7 號，共 185 頁。

朱傚祖與游明聖（1995）花東縱谷活動斷層調查研究。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。NSC83-0202-M-047-001，共 186 頁。

朱傚祖與游明聖（1996）臺灣花東縱谷新期大地構造：古地震、應力、應變及活動斷層位移之研究。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，NSC85-2111-M-047-001，共 57 頁。

朱曜國（2007）池上斷層的古地震研究。台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 110 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、陳治宇、林慶偉（2012）五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅第 41 號-光復，經濟部中央地質調查所。

何邦碩（1974）花蓮近海海域地球物理初步測勘。海洋彙刊，第 12 期，39-47 頁。

何春蓀（2003）台灣地質概論台灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，130-134。

余水倍（1989）臺東縱谷地區之地殼變形研究。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 117 頁。

呂新民、徐友鎔、施楠（1976）中華民國六十一年六月二十四日花蓮縣瑞穗強震調查報告，中央氣象局。

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。

沈淑敏、張瑞津、楊貴三（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置－活動構造地形判釋及資料建置分析（2/2），經濟部中央地質調查所報告第 93-13 號，共 174 頁。

辛在勤與張建興（1992）1992 年地震回顧，氣象學報，第 38 卷，第 3 號，p218-232。

林志展（2013）利用 GPS 連續站觀測探討縱谷斷層北段之地殼變形。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 122 頁。
林偉雄、林啟文、劉彥求、陳柏村（2008）五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅第 59 及 64 號-臺東.知本，經濟部中央地質調查所。
林啟文、石瑞銓、林燕慧（2004）台東縱谷南段的活動斷層特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 161-174 頁。
林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正（2000）台灣活動斷層概論，第二版。經濟部中央地質調查所，共 122 頁。
林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）台灣東部與南部的活動斷層，二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第二十三號，共 178 頁。
林啟文與林燕慧（2006）經濟部中央地質調查所施政計畫報告－鹿野斷層。
林朝棨（1957）臺灣地形，台灣省通志稿，第一卷，第一冊。臺灣文獻委員會出版，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。
林慶偉（1997）台灣及其鄰近地區隱沒及碰撞作用－(子計畫二)海岸山脈地質構造研究(II)。行政院國家科學委員會計畫。共 62 頁。
姜彥麟（2007）使用橫跨鹿野斷層的水準與 GPS 測量實施大地測量調查。國立台灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共 131 頁。
紀權宥（2007）南段花東縱谷之新期構造研究-利吉斷層與鹿野斷層的活動特性。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文。共 84 頁。
胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞（2012）斷層活動性觀測研究第二階段：斷層監測與潛勢分析研究(4/4)。經濟部中央地質調查所期末報告書，共 366 頁。
徐鐵良（1955）臺灣之地震。臺灣銀行季刊，第 7 卷，第 2 期，第 148-164 頁。
徐鐵良（1976）台灣海岸山脈的利吉混同層。台灣省地質調查所彙刊，第二十五號，87-96。
張竝瑜、陳文山、陳建志、郭陳澔、黃文正、何恭睿、徐漢倫（2015）104 年度重要活動斷層構造特性調查二期─年度重要活動斷層構造特性調查(1/4)。經濟部中央地質調查所報告第 104-6 號，共 211 頁。
張晃（2013）池上斷層沿線全新世河階的演育： 斷層活動與河川沉積之交互作用。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 134 頁。
張國禎（2012）重要活動斷層調查特性研究－近斷層高精度地形資料之判釋與分析(1/4)。經濟部中央地質調查所委辦計畫成果報告書，共 289 頁。
張瑞津、石再添、沈淑敏、張政亮（1992）花蓮縱谷北段河階的地形學研究。師大地理研究報告，第 18 期，第 241-292 頁。
張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998）台灣活動斷層分布圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊第十號，共 103 頁。
畢慶昌（1984）臺東與突尼斯：造山中途的撞點城市。經濟部中央地質調查所特刊，第 3 號，第 141-159 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。
陳文山、王源、楊昭男、楊志成（2010）五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅第 35 號-花蓮，經濟部中央地質調查所。

陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權宥、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生（2008）從古地震研究與 GPS 資料探討縱谷斷層的分段意義。經濟部中央地質調查所特刊，第二十號，第 165-191 頁。

陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權宥、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生、盧詩丁（2008）從古地震研究與 GPS 資料探討縱谷斷層的分段意義。 經濟部中央地質調查所特刊，第二十號，第 165-191 頁。

陳文山、陳于高、楊小青（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置─槽溝開挖與古地震研究計畫（5/5）。經濟部中央地質調查所報告第 95-08-1 號，共 146 頁。

陳文山、游能悌、楊小青（2010）地震地質與地變動潛勢分析計畫－斷層長期滑移速率與再現週期研究（總報告）。經濟部中央地質調查所研究報告 99-9 號，共 141 頁。

陳文山、游能悌、楊小青（2014）重要活動斷層構造特性調查研究計畫-斷層活動特性分析與評估(4/4)。經濟部中央地質調查所報告第 103-5 號，共 80 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、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。

陳文山與王源（1996）台灣東部海岸山脈地質。經濟部中央地質調查所－台灣地質之七，共 101 頁。

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。

陳俊甫（2013）台灣東部縱谷北端區域的地震構造特性。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 112 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。

陳柏村、林偉雄、劉彥求、林燕慧、林啟文（2006）活動斷層調查報告-利吉斷層。經濟部中央地質調查所施政計畫報告。

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。

游明聖（1997）台東縱谷活動斷層研究。國立臺灣大學地質研究所博士論文，共 141 頁。

游明聖、鄭世楠、葉永田（1994）台東縱谷地區斷層分段。地質，14 卷，1 期，97-120 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。

楊志成、陳文山（2005）第三章、奇美斷層。地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫─槽溝開挖與古地震研究計畫(4-5)，第 58-74 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。

楊蔭清（1953）四十一年來之花蓮地震。花蓮文獻，創刊號，第 67-71 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、陳文山、李奕亨（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 221 頁。

董倫道、陳文山、李益亨（2005）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(4/5)。經濟部中央地質調查所報告第 94-09 號，共 176 頁。

詹軍威與王錦華（1990）以 HYPO71 定位程式重定 1969 年 1 月至 1972 年 5 月瑞穗地區之地震的定位誤差範圍及 P 波剩餘值。氣象學報季刊，第 36 卷，第 4 期，第 305-314 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。

臺灣省氣象所（1951）民國四十年地震報告，共 83 頁。

劉瑋恒（2009）台灣東部縱谷南端之活動構造研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。共 97 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。

鄭文弘（1996）臺灣東部海岸山脈北段地質構造特性之研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 186 頁。

鄭世楠（1995）台灣及鄰近地區大地應力分布研究。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 141 頁。

鄭世楠、葉永田、徐明同、辛在勤（1999）台灣十大災害地震圖集。交通部中央氣象局地震測報中心，210-211。

賴文基（1995）台灣東部海岸山脈中段地質構造特性研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 107 頁。

鍾令和（2003）1951 年池上-玉里地震地表破裂與其所指示之新構造意義。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 138 頁。

鍾令和、劉彥求、衣德成（2004）活動斷層調查報告：玉里斷層。經濟部中央地質調查所施政計畫報告。

顏一勤、陳文山、宋時驊、黃能偉、楊志成、劉彥求、林啟文（2014）臺灣東部池上斷層於錦園至萬安地區間的古地震學研究。經濟部中央地質調查所特刊，第二十八號，第 43-70 頁。

顏君毅、陳怡安、張中白、盧志恆（2012）臺灣東部縱谷與海岸山脈北段之現今地表變形─永久散射體差分干涉觀測成果。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，新期構造研究專輯(三)，第 169-186 頁。

顏郁捷（2008）利用寬頻線性地震網資料研究 2006 年臺東地震之發震構造與地震活動。國立臺灣大學理學院地質科學系碩士論文，共 93 頁。

顏滄波（1983）台東縱谷之地質。國立中央大學地球物理系系刊，第四期，第 15-24 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。

羅偉、楊昭男（2004）地震地質調查及活動斷層資料庫建置─奇美斷層條帶地質圖。經濟部中央地質調查所報告第 93-11 號，共 51 頁。

饒瑞鈞、李元希、胡植慶（2010）地震地質與地變動潛勢分析─地變動監測分析（4/4）。經濟部中央地質調查所報告第 99-10 號，共 400 頁。

饒瑞鈞、胡植慶、李元希（2008）地震地質與地變動潛勢分析－地變動監測分析（2/4）。經濟部中央地質調查所報告第 97-10 號，共 270 頁。

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. 本案為第三階段第四年，團隊已有足夠經驗完成本案，且工作安排妥適。本案計畫內容進行方法明確可行，內容分項及預期成果符合需要，工作時程安排合宜。	感謝審查委員們提供寶貴的意見以及給予高度的評價。
2. 有關本計畫四年期總報告，在大地測量方面，建議整合各項觀測成果，進行綜合性分析討論，例如在垂直速度場方面，期能結合內政部一等水準測量成果，於報告中呈現。在活動斷層發生潛勢圖建置方面，期能進行整體性檢視及更新，如篇幅過大，建議可將此章節獨立撰寫成一本報告書。	感謝委員建議，遵照辦理。
3. 在期末總整理時，資料的彙整及結論希望能有收斂的成果。	感謝委員建議，遵照辦理。
4. 今年為本計畫第四年，斷層活動潛勢圖之建置及內容描述建議能有整體性之規劃。	感謝委員建議，遵照辦理。
5. 井下應變儀、地球化學及地下水觀測之異常訊號用來評估地震前兆是否可行？現階段前兆異常成果未來如何應用於實際面上，建議加以說明。	前兆部分目前屬於短期觀測，只能觀測到異常訊號，對於該機制並沒有完全了解，故尚未使用在評估地震前兆方面。
6. 新增項目五：「地質法之活動斷層地質敏感區執行面問題研析」之工作內容宜說明得更為詳細。例如，在敏感區劃設方面，寬達公里級的斷層帶是否劃入？在敏感區執行方面，法規如何同時保障人民安全且讓人民滿意。	感謝委員意見，本計畫主要著重在解決執行面問題，委員所提出之問題本團隊會考慮在座談會中提出討論。除此之外，專家座談會預計邀請六大技師公會代表、大型工程顧問公司代表、營建署、國家災防中心等單位參與，預先諮詢及蒐集彙整各方意見及問題，於專家座談會議中提出解決方案，期能達到執行面上讓各方滿意的程度。
（二） 有關經費編列與架構	
1. 第 145 頁，成功大學經費需求配置中，業務費項下未列出抽樣檢核測量之經費，建議修正。	感謝委員指正，已修正。
2. 第 147 頁，中興工程顧問社經費需求配置中，僅列出 2 次專家會會議經費，然 104 年期末	感謝指正，本計畫經費需求配置將會新增一次專家諮詢會議之項目。

期初審查意見	處理情形
審查意見回覆中，提及將於今年度（105）額外召開一次專家諮詢會議，建議修正。	
3. 本案經費編列與架構合宜。	感謝審查委員們提供寶貴的意見以及給予高度的評價。
（三）參與研究之人力、經驗與能力	
1. 本案各項工作的人力配置合宜，主持人及主要研究人員在本主題領域之研究經驗及成就符合需求，團隊人力與經驗俱佳。	感謝審查委員們提供寶貴的意見以及給予高度的評價。
（四） 有關服務建議書內容及其他意見	
1. 本年度工作區域為東部地區，然而僅針對海岸山脈內（前緣）之斷層進行觀測，對於中央山脈側則未規劃，建議未來應予考慮。	因 PSInSAR 對於山區效果並不明顯，但沿河谷方面有較明顯的成果，故會考慮沿著河谷來進行觀測。
2. 地質敏感區的調查評估暨報告審查將來是由土木等六種技師負責，其可行性令人質疑。目前重點在調查規範及審議規範的修訂，以嚴謹的法規訂定，期能將傷害減至最低。	本計畫將舉辦專家座談會，廣邀六大技師公會及執行相關單位參與討論，期能達成共識，建立符合各方預期之調查規範及審議規範。
3. 因應個人資料保護法施行，服務建議書內有關本計劃人員相關資料，包含之通信地址及電話，建議更正為公司地址及電話。相關個人資料（例如：出生年、畢業證書）建議去識別化。	感謝委員指正，已修正。
4. 本年度出國計畫定於年底（12 月 4 日至 12 月 17 日），請出國人員於於年底計畫結束前繳交出國報告。	感謝委員建議，遵照辦理。
5. 請提供本計畫以共同參考點所解算後之 GPS 觀測資料(.crd 檔)，並列入計畫應交付項目。	已將此項目列入計畫交付項目。
6. 第 12 頁圖 3.6~3.8 及第 43 頁圖 3.39 等速度及應變率場分布圖，應標示出 GPS 觀測資料之時間段。	感謝委員指正，已修正。
7. 第 85~89 頁，公式編號順序(式 4-10~4-113)有誤，請更正。	感謝委員指正，已修正。
8. 第 116 頁，第一年往前處理約三年的資料，應更正為第四年，請修正。	感謝委員指正，已修正。
9. 第 149 頁，背景資料、營業項目及營業狀況等章節，有重複敘述之情況，建議修改。	感謝委員指正，已修正。

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. 請說明全臺灣應變率場分布圖（圖 1-4.2）其大地構造意義及重要斷層之特殊應變現象。	1. 台北、宜蘭與中央山脈地區以伸張為主 2. 東部之擠壓反映板塊縫合帶 3. 西部車籠埔斷層、六甲木屐寮斷層及新化斷層與旗山斷層間有一顯著之擠壓應變帶存在，可能反映較高之發震機率
2. 北部地區 GPS 水平速度場（圖 2-2.3），顯示臺北盆地附近GPS移動方向以東北方向為多，山腳斷層兩側並未顯示正斷層特徵，對以往解釋臺北盆地成因不同，又如何解釋？並建議在期末報告和總報告中，針對臺北地區GPS水平速度場之分布和山腳活動斷層之構造發育和活動趨勢，進一步分析和討論。	感謝委員建議，已修正。
3. 第 78 及 79 頁顯示美濃地震之水平與垂直同震位移，在西北邊有一些異常，如何解釋？	經現場勘查同震位移差異較大點位，觀測範圍西北區域，其中潭頂淨水廠 GS29 點位旁圍牆於 2015 年開挖，可能導致同震量失真並與淨水廠門口移動站 G884 差異顯著；虎頭埤 GS32 位於水庫土堆壩體上，壩體道路於震後出現裂縫，亦可能導致同震量失真；此外在新市出現局部土壤液化現象，亦有可能造成部分點位的同震異常。
4. 第 83 頁之縣 132_大安至東勢測線，第二段有說明垂直速度呈下滑現象，其原因為何？	目前原因仍需要更多觀測資料佐證。
5. 第 84 頁，第三段提及高程地形八卦山背斜有明顯抬升，相較於彰化斷層西側，東側之垂直速度變化並不顯著，前後似互相衝突，請確認相關描述。	感謝委員建議，已修正。
6. 地下水及地球化學觀測中，異常表現的定義，建議在圖表中有清楚的表達。	本研究定義異常的方法如 5-1-3 所述，以疊代式高斯平滑法與 14 天及 3.8 天的滾動平均值（Rolling average）相減後之殘值計算過去 6 個月之標準差並將其標準化，定義大於 N 倍標準差則為異常。例如，圖 5-2.2 中當觀測資料的標準差超過該站的門檻值，且無明顯降雨影響，則認為是異常前兆變化與地震活動有關。
7. 在許多觀測數據都顯示事件發生前數天均	感謝委員建議。

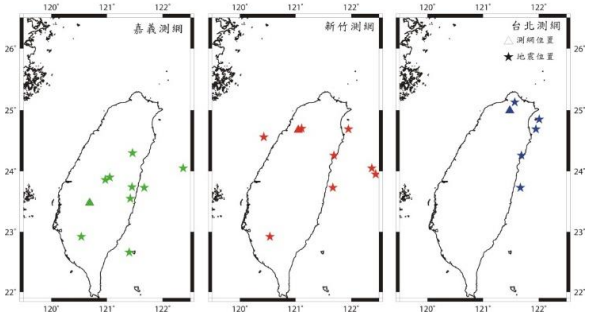
期中審查意見	處理情形
有異常，但皆為事後諸葛，建議未來朝事件發生前預測。	
8. PS-InSAR 分析成果中，池上斷層與玉里斷層 ALOS 剖面採用移動窗格（moving windows）平滑處理，造成斷層線不清楚，建議改善。	感謝委員建議，已修正。
9. 有關池上斷層剖面成果分析宜與中研院地球所池上斷層歷年及現今觀測結果相互比較。	由於本計畫所使用之水準以及 GPS 測站分布過於散佈，而中研院地球所池上斷層觀測資料較為集中，因此不易併入比較。而本研究所使用之雷達衛星資料結果，雖然點位密度提高許多，但三種影像拍攝日期分別為 1995/6~1999/9 、 2006/3~2009/6 以及 2007/1~2010/12，與中研院地球所池上斷層觀測資料時間 1998/1~2006/10 無法吻合。因此在本階段並未納入比較。後續如有更新衛星影像資料或是地球所池上斷層觀測資料可再一起相互比較。
10. 期中簡報針對東部斷層已呈現各斷層剖面成果分析，未列於報告書中，建議增補。	感謝委員建議，遵照辦理。
11. 期中簡報第 64 頁，部分長期滑移速率明顯高估（如小崗山斷層），造成滑移虧損率大於地質證據所計算出之滑移速率不合理現象，可能是本計算未考慮地層內部變形所致，建議設法改善。	模型中已考慮內部變形效應，但水平速度場的擬合上仍在小崗山及鹿野斷層附近出現較大的 misfits。研判是由測地資料所推求的小崗山斷層長期滑移速率偏高，可能和臺灣西南部較為複雜的塊體模型(活動斷層分佈)有關。例如，小崗山斷層的東部及西部分別緊鄰旗山和後甲里斷層，因此將跨過此區的速度梯度(應變率)分配到這三個活動斷層上的模型分析較易出現非唯一性，因此 misfit 也偏高。未來將會利用不同模型方法特別檢視西南部和縱谷南段(鹿野及池上斷層)地區，希望能更嚴謹地推估斷層長期滑移速率。
12. 表 2-6.4 中，多條斷層上一次活動距今時間不合理，建議加以釐清。	表中的斷層活動時間都是根據已發表的論文或報告內容。例如湖口斷層的 580-3,600 年是引用 Suppe and Namson (1979)；山腳斷層的 149 年是考慮其外海延伸段可能和 1867 年的基隆外海地震有關等。我們已將各斷層參數所引用的參考文獻列在表中，供委員們參考，未來也會持續更新這些參數。

期中審查意見	處理情形
13. 建議將水準測線位置及斷層剖面分析之底圖儘量以地質圖呈現，以利分析判讀。	感謝委員建議，遵照辦理。
14. 本計畫針對龍船斷層的變形觀測有許多分析資料，許多工程建設與開發行為位於此斷層附近，引發外界對於此斷層高度關注，建議針對龍船斷層的構造變形模式深入討論。	感謝委員建議。
（二） 斷層活動潛勢分析	
1. 本計畫已接近第三階段收尾，以大方向來說，台灣規模大於 6 的地震，除集集地震外，多與地表活動斷層無直接關係，後續在表現斷層潛勢的地震規模成果上，如何清楚的表達？	目前斷層潛勢評估主要仍以公布之 33 條活動斷層為主，建議後續潛勢評估工作可加入孕震構造的參數進行蒐集彙整，而非僅限於目前公布之活動斷層。
2. 活動斷層在外海延伸段，是否皆列入考慮，需有一致的參考原則。	本計畫活動斷層會依照前人的調查結果，例如海底地形、海底底質剖面或是海域震測剖面等資料考慮其外海延伸之情形及長度。
3. 各斷層長期滑移速率多缺少明確的地質資料做基礎，上一次活動距今時間也有同樣的問題，建議在報告內說明此項弱點，並對成果的可靠性做比較保守的說明。	感謝委員建議，對於長期滑移速率缺少明確地質資料的活動斷層，本計畫目前以塊體模型之滑移速率及虧損率進行評估，建議下一階段可採用不同的地殼變形模型評估各活動斷層之長期滑移速率。而上一次活動距今時間若有不確定性，本計畫會選用 BPT 及 Poisson 兩種統計模式同時呈現，並比較是否有顯著差異。
4. 有關活動斷層潛勢圖之展示方式請仔細考量，是否依據發生機率分級或分類亦請斟酌，也請評估公布此圖資之影響層面及後續效應，提供本所作後續處理的參考。	感謝委員建議，由於潛勢圖資之展示方式及公布後之影響層面及後續效應均需審慎評估，目前日本已公布境內活動斷層未來 30 年之發生機率潛勢圖資，並且也可線上查詢各活動斷層之參數，或許可做為後續公布潛勢圖資工作之參考。
5. 有關瑞穗斷層、奇美斷層之斷層發生潛勢評估所需相關地質參數及斷層描述，請參考近期本所進行上述二條斷層的活動斷層地質敏感區劃定計畫內容。	感謝委員建議，本團隊會參考相關資料納入。
（三） 報告書內容及其他建議事項	
1. 「20160206 地震事件分析報告」中，許多圖資引用漏列參考資料，請補正（如圖 1-2.5，2-1.1 等）。	感謝委員建議，已修正。
2. 表 2-6.3 中，引用 Shyu et al. (2015) 之滑	Shyu et al. (2016)中除了其野外調查結果

期中審查意見	處理情形
移速率等相關數據，請說明其參考依據、計算方法及其代表意義。	外，也參考了其他野外調查、定年及地溫梯度等地質方法之文獻，由野外調查、地溫梯度推測各孕震構造的幾何形貌，再由定年方法得知地層年代，進一步計算各構造之地質長期滑移速率，建立臺灣的孕震構造模型，利用其研究成果可大致對臺灣活動構造之地震潛勢評估提供合理的依據。
3. 本委辦案成果是未來活動斷層調查研究之重要參考資料，期末報告或四年總報告之圖表在解析度和圖例等在編輯上請再加強，勿因縮版過小而無法對照閱讀。	感謝委員建議。
4. 請在摘要及結論中明確說明近年的構造發展活動趨勢及當年度的發現。	感謝委員建議，遵照辦理。
5. 建議期末報告說明本案目標達成度、待解決問題及各工作項目對敏感區劃設之貢獻度並加以排序，以利未來工作規劃聚焦及資源分配，如引入新方法，建議可排除無明顯效果之方法。	感謝委員建議，於期末簡報時說明。
6. 本計畫今年為四年期最後一年，請針對執行四年計畫撰寫總報告，列舉計畫重要結論與檢討，並提出後續調查的建議，提供本所研提新計畫之參據。	感謝委員建議，遵照辦理。
7. 本年度應繳交四年期總報告，活動斷層機率潛勢圖建置部分應進行整體性檢視及更新，並有一致性的處理原則。另各項觀測成果之呈現方式則請力求精簡，並有收斂之成果。	感謝委員建議，遵照辦理。
8. 有關地質法之執行面問題研析部分，因地質法不等同地質學原理，民眾關心的是其生命及財產之保障，期待團隊能找出本所與民眾間地質法之執行介面，並提出可操作之方法。	感謝委員建議，本計畫今年度會邀請地質法執行經驗之相關技師及專家學者進行座談，期望能找出執行面之困難及問題並提出實際可行的解決方法。
9. 往後的調查工作建議加強各斷層的槽溝開挖調查及古地震定年，以確認各斷層的長期滑移速率及上一次活動距今時間。	感謝委員建議，本計畫會在總結報告中建議下一階段需要進行槽溝開挖及古地震定年之活動斷層。然而槽溝開挖並不一定能立即獲得所需參數，建議後續可同時進行槽溝開挖計畫並採用不同的地殼變形模型評估各活動斷層之長期滑移速率。
10. 從圖 1-4.2 來看，臺灣西部地區近年應變率	感謝委員建議。

期中審查意見	處理情形
最大的斷層是木屐寮-六甲斷層及龍船斷層，建議列為日後的調查重點。	
11. 山腳、利吉、恆春及米崙等活動斷層均延伸到海域，希期下一階段之研究能查明其在海域出露的情況。	感謝委員建議。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一） 斷層活動性觀測	
1. 有關 GPS 及應變儀觀測部份，提供相關建議如下：（1）建議列出現階段可解析的區域及現象。（2）如有目前無法解析的現象，其可能的暗示為何？並請提出後續的相關建議。（3）建議列出與地調所 2012 年公布的活動斷層之外的其他構造變形。	成大： （1）GPS 目前可解析的台灣中部、北部與東部地區因斷層活動造成之地表變形特徵。（2）GPS 對於南部地區之地表變形解析力並不佳，原因可能在於地表變形活躍區域之測站分布密度不足、泥體之變形（如泥基背斜）也是控制此區域地表變形之因素等。（3）龍船斷層、右昌斷層、鳳山斷層、車瓜林斷層、滾水坪泥火山與漯底山泥火山之連線。 應變儀： （1）井下應變儀應變異常以對應的地震區域如下圖所示。目前應變儀可解析氣壓、地下水、降雨、潮汐(地潮&海潮)、井孔回復與水泥乾涸、同震與震後所造成的應變，在移除這些環境影響之應變成份後仍有應變率異常變動，並短時間有對應之地震，則視為可能的地震前兆訊號。 井下應變儀應變異常與對應之地震  （2）仍有移除環境影響後之應變異常，且無法對應相關地震的情況，其物理機制不明。其可能暗示有更多造成岩體應變變化的機制在這一階段計畫中未被考慮。建議整備目前已有之井下應變儀共站環境監測儀器，因地震相關應變異常是現階段的研究目標之一，需仰賴穩定且有效的共同環境監測來校正井下應變儀資料才能達到，在此基準上才得以更進一步討論其他未解之應變異常訊號。
2. 計畫總體綜合地球化學等現象觀測，請說明多年來運作的具體成效為何。	經過持續的改善觀測品質與精進分析方法，各觀測站的敏感範圍已建立完成，以及地化異常對於規模 5 以上之地震成功率，從早期的 50%

期末審查意見	處理情形
	不到上升至約 70%(最高)。對於發生在台灣陸上規模大於 6 之地震尤其顯著，可觀測到數個測站同時出現異常的現象，未來可根據此觀測模式，對於大地震提供有效的預警資訊。
3. 報告中的速率分布圖（如圖 1-4.6 及圖 1-4.7），請補充觀測期程之說明。	依據組內意見已將 1-4 章節刪除。
4. 除了縱谷斷層沿線應變及速度場梯度大外，右昌-龍船-旗山斷層沿線應變及速度場梯度亦大，建議加強右昌、龍船及旗山等斷層之監測。	感謝委員建議。
5. 嘉南平原靠山側速度場梯度大，可能表示地底下的盲斷層正在蓄積能量，建議聯合微震網地震觀測資料，加強地震災害潛勢分析。	感謝委員建議。
6. 跨宜蘭斷層兩側速度場梯度大，建議將此斷層列入潛勢分析範圍。	感謝委員建議。
7. 梨山-宜蘭斷層由速度場梯度分布來看，有明顯的右移現象，建議加強梨山斷層之調查，並考慮列入潛勢分析範圍。	感謝委員建議。
8. 潛勢分析的結果顯示彰化斷層、米崙斷層、瑞穗斷層及池上斷層等是未來 30~100 年內大地震發生機率最高的斷層，建議加強上述斷層之監測。	感謝委員建議。
9. 建議以現有 33 條活動斷層參考的滑移速率，得出的平均應變分佈，與 GPS 應變觀測比較，兩者差異最大的區域，可能暗示著其孕震特性為 33 條活動斷層外的構造行為。	感謝委員建議。
10. 有關 2-5-3 及 2-5-4 章節中，分析大地測量矩率及地震矩率之目的為何，請加強說明解釋。	一般而言，大地測量矩率可以用來反映地殼累積能量之區域及多寡；相反地，地震矩率則反映地殼釋放能量之區域及多寡。故比較大地測量矩率與地震矩率分布之差異，是協助我們評估地震潛能的其中一個方法。
11. 第 183 頁提及龍船斷層附近有 20mm/yr 的速度變化，請說明其意義為何？第 212 頁，圖 2-7.9，E4 剖面中，綜合地形及高程速度場呈現永豐斷層為反向逆衝斷層，由西往東逆衝，與地質剖面圖所	對於龍船斷層附近 20 mm/yr 速度變化的意義，由於有可能是受到背衝斷層、活動褶皺或是泥貫入體的影響所造成的，所以具體的和龍船斷層的關聯性，需要其他更多的地球物理觀測，如高精度之地震層析成像、地電、重力等，

期末審查意見	處理情形
示不符；請依據觀測資料，說明龍船斷層與永豐斷層的活動性與幾何形貌為何？	來協助解析。 龍船斷層部分，應為下盤側斷坡的複堆疊構造所形成之活動摺皺，與泥基背斜有相關。 永豐斷層部分，地質剖面圖非本計畫研究內容，僅做為參考使用，依據觀測資料應屬於背衝斷層。
12. 第 209 頁，圖 2-7.6 中，ALOS（2007-2010）之速度變化與 ENVISAT（2006-2009）及 ERS（1995-1999）不同的原因為何？請說明解釋。	由於縱谷地區植被茂密，影像跨過瑞穗斷層東側至奇美斷層間主要為山區，因此 C 波段的 ERS 以及 ENVISAT 影像無法取得有效永久散射點，因此無法明顯看出是否有跨瑞穗斷層或是奇美斷層的速度梯度差異。而 L 波段的 ALOS 衛星波長較長，較有能力穿透植被，且與水準測線相比明顯看出整體變形趨勢相同，因此在此主要以 ALOS 衛星影像分析此剖面的活動構造行為。
13. 第 375 頁，表 4-1.5 應變前兆判釋統計表中，如將每個網下再分別判釋各測站之應變前兆，結果會有何差別？請說明。	原則上各測網應變異常判斷是希望有兩個以上的測站有異常訊號出現，但因測站狀況與資料狀況，當測網只剩一個測站可分析，並有異常訊號，也視為該測網的異常。如果要再分為以各測站做判釋，嘉義測網過去異常主要由達邦站與中興站指示，太興站由於主要應變變化與地下水相關，無法做有效地下水訊號校正時，較不易指示應變異常訊號，因此太興站在應變異常判斷的成功率會較低；新竹測網過去異常判斷大多發生在梅花站與大坪站，這兩站做異常判斷差異不大，但新樂站資料品質較不好，有機械異常的不規則跳動，分析有一定難度，因此在異常判斷的成功率也會較低；台北測網錦和站資料品質最好，台北網主要的應變異常都有出現在錦和站，明德站與樹林站在應變前兆分析的成功率會較低。
（二） 斷層活動潛勢分析	
1. 建議可將活動斷層發生潛勢圖中斷層的長期滑移速率，與 GPS 塊體模型模擬的數值比較並進行表列。	感謝委員建議，本團隊會將該表補充於階段性總結報告中。
2. 活動斷層發生潛勢圖中的長期滑移速率，大部分不是使用塊體模型（Block Modeling）模擬的結果，建議將此章節放在活動斷層發生潛勢圖之後，表示此章	感謝委員建議，由於塊體模型結果與大地測量資料相關，且斷層潛勢評估會引用到塊體模型之結果，不建議進行調換。

期末審查意見	處理情形
節為後續持續發展的方向。	
3. 嶺頂及奇美斷層之潛勢分析中，有將滑移虧損率列入分析，其他斷層則無（米崙、瑞穗、玉里、池上、鹿野、利吉），理由為何？請加強說明。	由於嶺頂斷層及奇美斷層無地質證據可供推估滑移速率，因此才採用塊體模型之滑移速率及滑移虧損率推估其復發間隔，而其他斷層因有地質證據可推估長期滑移速率，因此不需採用塊體模型評估之結果。
4. 依據塊體模型分析結果，東部的瑞穗、玉里及鹿野斷層平均滑移虧損率較大；但依據斷層潛勢分析結果，則是米崙、瑞穗、玉里-池上及利吉斷層未來 30 年斷層活動潛勢較高，二者間的差異有何意義？請說明。	滑移虧損率是由近十幾年之大地測量資料推估而得，代表近期活動斷層之活動性，而潛勢評估通常採用地質資料推估之長期滑移速率進行評估，時間尺度為千年以上。活動斷層在長期和近期的活動性會有所差異，因此虧損率和潛勢評估結果並無太大的相關性，然而虧損率高之斷層確實在近期累積的能量較高，仍需特別注意。
5. 第 219 頁，滑移虧損率為長期滑移速率減去間震期滑移速率而得，請說明間震期滑移速率如何求得。另計畫中假設間震滑移速率在地表為零的原因為何？請加強說明解釋。	由塊體旋轉運動可得到長期滑移速率，而滑移虧損率則表示斷層面於間震期時因摩擦力所累積的應力，未來可能由地震(也可能為潛移或其他方式)所釋放的應變，間震期滑移速率則為長期滑移速率減去滑移虧損率所得。 因地殼淺部屬於脆性材質，於間震期時假設為鎖定狀態，而在同震期時錯動產生位移。因此假設間震期滑移速率在地表為零，以表示斷層之鎖定狀態，另外具有潛移行為的斷層在間震期時於地表則設定為可滑動的。
6. 第 242 頁第 4 段中，有關米崙斷層的滑移角，所指的是 rake 亦或是是 rake 的餘角，請說明。另文中參考震源機制解之情形，未註明其參考文獻出處，請補充。	滑移角主要是參考鄭世楠(1995)針對 1951 年 10 月 22 日花蓮地震之重定位推估之，如圖 3-1.12 所示。
7. 第 236 頁，有關米崙台地的抬升，不一定全部代表米崙斷層上盤的長期抬升速率，也可能包含侵蝕作用，建議於引用資料時於內文中加強說明解釋。	感謝委員建議，本團隊會於內文中補充說明。
8. 第 270 頁，有關奇美斷層之說明請參考活動斷層地質敏感區（F0015 奇美斷層）之劃定計畫書內容，補充近期有關奇美斷層之地質調查資訊。	感謝委員建議，本團隊會參考並納入。
9. 第 277 頁，有關奇美斷層之傾角取 80°、85°及 90°，但由於奇美斷層仍具相	奇美斷層機制初期以逆衝為主，傾角初期為低角度，隨著推力傳遞到海岸山脈西側時，奇美

期末審查意見	處理情形
當的逆衝分量，請考慮斷層角度為垂直是否合理。	斷層角度也逐漸變陡，因此其逆衝分量之活動性，會轉移到西側的縱谷斷層中，從野外地質露頭中，也觀察到奇美斷層屬於高角度斷層。
10. 第 295 及 305 頁，池上斷層傾角是否過於複雜？其原因為何。	本計畫池上斷層傾角主要是參考餘震地震或是成功地震之重定位之分布，因此考慮雙傾角較符合斷層面。
（三） 報告書內容及其他建議事項	
1. 第 96 頁第 2 段第 2 行，「中部地區垂直速度場在大茅埔-雙冬斷層以東抬升，斷層以東則呈現下陷」，語意矛盾，請修正。	感謝委員，已修正。
2. 第 100 頁第 2 段第 1 行，「除海岸山脈以東南段沉陷部顯著較不顯著外，海岸山脈以東南段沉陷部顯著較不顯著垂直速度場大致呈下陷」，語意重複，請修改。	感謝委員，已修正。
3. 第 104-110 頁，建議於 2-2-4 章節中寫出美濃地震的同震位移數值。	感謝委員，已修正。
4. 第 181 頁第 4 段第 3 行，「跨過潮州斷層及恆春斷層的東西向壓縮量極小，值約 60mm/yr……及值約 41~62mm/yr」，請確認差值是否過大。	感謝委員，已修正，應是「高屏地區跨過跨過潮州斷層及恆春斷層的東西向壓縮量極小」。
5. 第 219 頁第 5 段第 7 行「…有較大的平均長期滑移速率」是否為「滑移虧損」，請確認。	感謝委員指正，已更正為滑移虧損，跨斷層較明顯的速度梯度會反應在斷層面的滑移虧損上。
6. 第 227 頁第 1 段及式 2-8.1、式 2-8.2 出現空白字元，請修正為正確之文字。	感謝委員，已修正。
7. 第 280 頁最後 1 段第 2 行「地調所線形」建議修正為「斷層」。	感謝委員，已修正。
8. 第 417 頁，有關異常紀錄與大地震活動關係，建議紀錄起自 2015 年 10 月即可，彙整的表 6-1.1 建議列入總報告。	本年度報告紀錄時段為 2015 年 12 月至 2016 年 11 月，已修正。
9. 期末報告書摘要不易閱讀，敘述細節及數字太多，建議改善並加強前後邏輯關係。另第三階段總報告書初稿（二）之摘要包含大量數字，建議加以改善。	感謝委員建議。
10. 第三階段總報告書內容豐富，然不易找到重點，建議獨立章節以圖表彙整重點，以利讀者快速掌握。	感謝委員建議，請參照第三階段總結報告書（一）前面的「報告書閱讀指引」。

期末審查意見	處理情形
11. 計畫四年來的工作，累積許多觀測資料，但結論與後續工作的表示，仍宜再總整。例如在 GPS 觀測上，明顯看到與 2012 年地調所公布的 33 條活動斷層之外的構造活動；然而塊體模擬是以 33 條活動斷層的進行模擬，兩者在結果上有何具體建議。同時針對斷層活動潛勢分析中長期滑移速率的不確定性及有較高潛勢的斷層或區域，希望亦能提供相關重點或具體建議。	感謝委員建議。
12. 五個子計畫均能有深入之研究，然與主題「整合性觀測」似乎略有不足，請說明五個子計畫間的交集為何？是否能列表呈現並進行檢討，找出最有效的方法組合，供地調所作為日後資源分配之參考。	感謝委員建議，請參照第三階段總結報告書（一）前面的「報告書閱讀指引」。
13. 有關地質法之地質敏感區執行面問題研析，並未在報告書中呈現，請增補相關內容。	地質法之地質敏感區執行面問題研析已置於期末報告附錄 3-3 中。
14. 請說明本計畫如何落實到執行地質法的參考。	有關於落實制執行地質法的部分，請參照光碟中所附本年度期末簡報。
15. 建議未來加強內雪山山脈斷層帶活動性的評估，如水長流斷層、地利斷層、梨山斷層等；在長期滑移速率的評估上，建議增加斷層的槽溝開挖及定年的研究。	感謝委員建議。