經濟部

計畫編號：107-5226904000-07-01

經濟部中央地質調查所

107年度委辦計畫執行期末報告書

（完稿）

「斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（2/4）」

（第2年度）

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本年度計畫：自107年03月至107年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立成功大學、國立台灣大學

中 華 民 國 107 年 12 月

計畫編號：107-5226904000-07-01

經濟部中央地質調查所

107 年度委辦計畫執行期末報告書

（完稿）

「斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層反演評估（2/4）」

（第2年度）

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本 年 度 計 畫：自107年03月至107年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立成功大學、國立台灣大學

中 華 民 國 107 年 12 月

斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（2/4）

（第2年度）

（完稿）

計畫主持人：景國恩

協同主持人：胡植慶

研　究　員：陳宏宇、張午龍、鄭凱謙、莊昀叡

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立成功大學、國立台灣大學

中　華　民　國　107　年　12　月

目錄

目錄 ...I
表目錄 ...IV
圖目錄 ...V
摘要 ...XVII
Abstract ...XVIII

第一章、緒　論 ...1
1-1 計畫整體概述 ...1
1-2 研究目的 ...2
1-3 本年度工作概述 ...6
1-4 前一年工作成果 ...8
1-4-1 GPS 及精密水準測量 ...8
1-4-1-1 GPS 移動站資料分析 ...8
1-4-1-2 精密水準測量精度分析 ...8
1-4-1-3 全臺速度場 ...9
1-4-2 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR） ...14
1-4-2-1 中部地區 PS-InSAR 成果資料分析 ...14
1-4-2-2 衛星影像時間序列分析 ...16
1-4-3 中部地區斷層模型建置 ...18

第二章、大地測量資料分析 ...21
2-1 GPS 連續站解算成果分析 ...21
2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略 ...21
2-1-2 GPS 資料品質檢測 ...22
2-1-3 GPS 連續站時間序列分析 ...23
2-2 今年度 GPS 移動站與精密水準測量外業督導與檢核分析 ...28
2-2-1 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析 ...28
2-2-2 精密水準測量精度分析 ...30
2-3 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 解算成果比較 ...32
2-4 台灣各分區之 GPS 移動站與精密水準觀測成果分析 ...34
2-4-1 地表速度場之推求 ...34
2-4-2 臺北地區觀測成果分析 ...36
2-4-3 桃竹苗地區觀測成果分析 ...49
2-4-4 中部地區觀測成果分析 ...64
2-4-5 嘉南地區觀測成果分析 ...84
2-4-6 高屏地區觀測成果分析 ...102
2-4-7 恆春地區觀測成果分析 ...114
2-4-8 東部地區觀測成果分析 ...124
2-4-9 宜蘭地區觀測成果分析 ...140

2-4-10 全臺速度場 143

第三章、北部地區雷達影像分析 148

3-1 北部地區 PS-InSAR 成果資料分析 149
3-1-1 ERS1/2 (1996/1~1999/7) 149
3-1-2 ENVISAT (2004/3~2008/6) 153
3-1-3 ALOS (2007/1~2011/3) 154
3-1-4 SENTINEL-1 (2015/4~2018/8) 156

3-2 GPS 連續站周圍 PS 點之時間序列 159

3-3 北部地區 PS-InSAR 技術時間序列分析 161
3-3-1 湖口斷層 161
3-3-2 新竹斷層 162
3-3-3 新城斷層 163
3-3-4 屯子腳斷層 163

第四章、北部地區地表速度場分析 164

4-1 GPS 與 InSAR 觀測資料整合 164
4-1-1 資料整合方法 164
4-1-2 三維速度場結果與分析 169

4-2 北部地區應變速率分布 180
4-2-1 應變計算方法 180
4-2-2 應變計算結果 181
4-2-3 應變計算結論 183

4-3 大屯火山與大臺北地區主要構造之地表變形分析 185
4-3-1 區域地表變形與應變率分析 185
4-3-2 地表運動與活動構造的關聯 188
4-3-2-1 台北盆地 188
4-3-2-2 山腳斷層 189
4-3-2-3 大屯火山區 192

第五章、斷層模型建置 193

5-1 斷層幾何參數設定 193
5-1-1 山腳斷層 193
5-1-2 湖口斷層 194
5-1-3 新竹斷層及新城斷層 197
5-1-4 獅潭斷層 200
5-1-5 三義斷層 202
5-1-6 屯子腳斷層 204
5-1-7 宜蘭北部構造及宜蘭南部構造 206
5-1-8 大甲–彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔–雙冬斷層 206
5-1-9 梅山斷層 209
5-1-10 九芎坑斷層及大尖山斷層 210
5-1-11 觸口斷層 212

5-2 BLOCKS 斷層模型 214
5-2-1 斷層模型原理 214
5-2-2 斷層幾何參數設定(斷層模擬使用參數) 214
5-2-3 斷層模擬結果 217
5-3 DEFNODE 斷層模型 221
5-3-1 斷層模型原理 221
5-3-2 斷層模擬結果 225
5-4 基線應變反演模型(Baseline Inversion Model) 235
5-4-1 斷層模型原理 235
5-4-2 斷層模擬結果 237
5-5 北部地區之斷層滑移速率 242

第六章、台灣西南部 GPS 單頻資料計算成果 246

第七章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果 250
7-1 花蓮近海地震簡介 250
7-1-1 花蓮近海地震震源區地質簡介 253
7-2 花蓮近海地震同震地表位移場 256
7-2-1 GPS 連續站同震位移場 256
7-2-2 GPS 移動站同震觀測資料分析 259
7-2-3 精密水準同震觀測資料分析 266
7-2-4 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場 269
7-2-4-1 Sentinel-1 及 ALOS-2 雷達衛星之同震位移場 270
7-3 花蓮近海地震震源模型 272
7-3-1 斷層錯位模型 272
7-3-2 斷層模型結果 275

第八章、結論 278

參考文獻 280
期中委員審查意見 285
期末委員審查意見 288

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1] 107 年期末_CGPS 時間序列
[附錄 2] 107 年期末_CGPS 速度表
[附錄 3] 107 年期末_GPS 移動站時間序列
[附錄 4] 107 年期末_GPS 移動站速度表
[附錄 5] 107 年期末_精密水準時間序列
[附錄 6] 107 年期末_精密水準速度表
[附錄 7] 107 年期末_單頻 GPS 時間序列
[附錄 8] 107 年斷層模型教育訓練

表目錄

表 A：預期進度甘梯圖（Gantt Chart）：計畫進度控制及檢討之依據。 XIII
表 B：預期進度查核點（Check Point）：計畫進度控制及檢討之依據。 XIV
表 C：期末須交付之各項工作項目。 XVI
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。.....3
表 5-1.1：本節中 16 條斷層之幾何參數。黃色網底表示最終選用的參數。 213
表 5-2.1：斷層模擬初始值；斷層幾何與地質滑移速率(Shyu et al., 2016) 216
表 5-2.2：模擬成果之各斷層滑移速率。 218
表 5-3.1：圖 5-3.1 中所示 17 條斷層之幾何參數。 224
表 5-3.2：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。 233
表 5-3.3：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及平均滑移速率。 234
表 5-4.1：模型之斷層滑移速率平均值、標準差（mm/yr） 238
表 5-5.1：斷層模型(BLOKES、DEFNODE、Baseline Inversion)所使用斷層參數得到的擬合結果。 244
表 7-2.1：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之 GPS 移動站同震位移值。 265
表 7-2.2：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之精密水準測線同震位移值。 268

圖目錄

圖 1-1.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。 4
圖 1-1.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。 5
圖 1-1.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。 5
圖 1-4.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。 12
圖 1-4.2：2002 年至 2017 全臺垂直速度場。 13
圖 1-4.3：中部地區之衛星影像視衛星方向上年平均變動量。 15
圖 1-4.4：中部地區使用之剖面線位置圖。 17
圖 1-4.5：C1 剖面時間序列。 17
圖 1-4.6：C2 剖面時間序列。 17
圖 1-4.7：C3 剖面時間序列。 17
圖 1-4.8：C4 剖面時間序列。 18
圖 1-4.9：C5 剖面時間序列。 18
圖 1-4.10：BLOCKS 模型斷層模擬面總滑移速率。 19
圖 1-4.11：DEFNODE 模型的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。圖上的黑體字為該模型之擬合參數結果。 19
圖 1-4.12：基線應變模型的斷層滑移虧損率。 20
圖 2-1.1：連續 GPS 測站 GS30 與 GS63 利用 GAMIT（藍色）與 GIPSY/OASIS（紅色）解算之時間序列。 21
圖 2-1.2：MESN 測站資料接收度低於 80%。 22
圖 2-1.3：SANI 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。 23
圖 2-1.4：整合歷史資料至 2018 年 09 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常之年速度場。 25
圖 2-1.5：整合歷史資料至 2018 年 09 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常之年速度場 26
圖 2-1.6：GS90 測站資料受現地環境影響之時間序列。 27
圖 2-2.1：臺灣地表變形監測網。 29
圖 2-2.2：2002-2017 年及 2018 年截至 4 月底 GPS 點位坐標殘差分布圖。 30
圖 2-2.3：2002-2016 年及 2017 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 30
圖 2-3.1：北部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2018 年 GPS 水平方向速度場。 32
圖 2-3.2：北部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2018 年 GPS 垂直方向速度場。 32
圖 2-3.3：移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果。 33
圖 2-3.4： 兩種軟體解算的速度估值的差值(Gamit 結果減去 Bernese 結果).....33
圖 2-4.1：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖。 35
圖 2-4.2：臺北地區 GPS 移動站 GA98 周圍環境圖。 36
圖 2-4.3：臺北地區 GPS 移動站 GA98 坐標時間序列。 36
圖 2-4.4：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 37
圖 2-4.5：2002-2018 年臺北地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）

之坐標時間序列圖。 37
圖 2-4.7：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。 38
圖 2-4.8：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較。 38
圖 2-4.9：石門至萬里測線之時間序列。 39
圖 2-4.10：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 40
圖 2-4.11：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較。 41
圖 2-4.12：士林至三芝測線之時間序列。 41
圖 2-4.13：士林至三芝測線水準高程變化圖。 42
圖 2-4.14：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。 43
圖 2-4.15：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之間序列比較。 43
圖 2-4.16：淡水至士林測線之時間序列。 43
圖 2-4.17：淡水至士林測線水準高程變化圖。 44
圖 2-4.18：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。 45
圖 2-4.19：五股至台北測線之時間序列。 46
圖 2-4.20：五股至台北測線水準高程變化圖。 47
圖 2-4.21：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場。 48
圖 2-4.22：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場。 48
圖 2-4.23：桃竹苗地區 GPS 連續及移動測站分布情。 49
圖 2-4.24：2002~2016 年桃竹苗地區 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。 50
圖 2-4.25：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較。 51
52
圖 2-4.26：新屋至童話世界測線之間序列 52
圖 2-4.27：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 53
圖 2-4.28：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較。 54
圖 2-4.29：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較。 54
圖 2-4.30：水準點位 T001 與連續站 GS02 之時間序列比較。 55
55
圖 2-4.31：新竹至五峰測線之時間序列 55
圖 2-4.32：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。 56
圖 2-4.33：水準點位 G416 現地情形。 56
圖 2-4.34：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較。 57
圖 2-4.35：新竹至峨眉測線之時間序列。 58
圖 2-4.36：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。 59
圖 2-4.37：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較。 60
圖 2-4.38：苗栗至南庄測線之時間序列。 61
圖 2-4.39：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。 62
圖 2-4.40：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。..63
圖 2-4.41：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2018 年垂直方向速度場。 63
圖 2-4.42：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 64
圖 2-4.43：2002~2018 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。 65
圖 2-4.44：2002-2018 年中部地區 GPS 移動站相對於 S01R 測站坐標時間序列。

.....66
圖 2-4.45：王功-草屯-埔里精密水準測線相對於 S01R 測站之坐標時間序列。..66
圖 2-4.46：左圖為 GPS 連續站 FUNY、PINT 與 YUNL 之坐標時間序列。 67
圖 2-4.47：中部地區 GPS 連續站 GS82 及精密水準測站 B283 周圍環境圖。 67
圖 2-4.48：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較。 68
圖 2-4.49：大安至東勢測線之時間序列。 68
圖 2-4.50：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 69
圖 2-4.51：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較。 70
圖 2-4.52：水準點位 G929 與連續站 GS40 之時間序列比較。 70
圖 2-4.53：龍井至太平測線之時間序列。 71
圖 2-4.54：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 72
圖 2-4.55：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較。 73
圖 2-4.56：五光至黃竹測線之時間序列。 74
圖 2-4.57：五光至黃竹水準高程變化圖。 75
圖 2-4.58：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較。 76
圖 2-4.59：王功至草屯測線及草屯至埔里測線之時間序列。 77
圖 2-4.60：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。 78
圖 2-4.61：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較。 79
圖 2-4.62：北斗至水里測線之時間序列。 80
圖 2-4.63：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。 81
圖 2-4.64：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....82
圖 2-4.65：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。 83
圖 2-4.66：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 84
圖 2-4.67：2002~2018 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。 85
圖 2-4.68：2002~2018 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。 86
圖 2-4.69：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。 87
圖 2-4.70：水準點位 G742 與連續站 S103 之間序列比較。.....87
圖 2-4.71：金湖至瑞峰測線之時間序列。 88
圖 2-4.72：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。 89
圖 2-4.73：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較。.....90
圖 2-4.74：北門至楠西測線之時間序列。。 91
圖 2-4.75：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。 92
圖 2-4.76：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較。 93
圖 2-4.77：善化至關廟測線之時間序列。 94
圖 2-4.78：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 95
圖 2-4.79：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較。 96
圖 2-4.80：安平至龍崎測線之時間序列。 97
圖 2-4.81：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。 98
圖 2-4.82：玉井至新化測線之時間序列。 99
圖 2-4.83：台 20_新化至玉井測線路線圖。 100
圖 2-4.84：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。....101
圖 2-4.85：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 101

圖 2-4.86：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....102
圖 2-4.87：2002~2018 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。.....103
圖 2-4.88：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較。.....104
圖 2-4.89：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較。.....104
圖 2-4.90：路竹至茂林測線之時間序列。.....105
圖 2-4.91：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。.....106
圖 2-4.92：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較。.....107
圖 2-4.93：岡山至安坡測線之時間序列。.....108
圖 2-4.94：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。.....109
圖 2-4.95：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。.....110
圖 2-4.96：佳冬至七佳測線之時間序列。.....111
圖 2-4.97：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。.....112
圖 2-4.98：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。....113
圖 2-4.99：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。.....113
圖 2-4.100：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....114
圖 2-4.101：2002~2018 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之坐標時間序列圖。.....115
圖 2-4.102：恆春地區 GPS 移動站 G669 及連續站 HENC 周圍環境全景圖。....115
圖 2-4.103：精密水準測點 Q052 現場圖。.....115
圖 2-4.104：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（恆春西台地-佳樂水）時間序列分析圖。.....116
圖 2-4.105：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較。.....117
圖 2-4.106：恆春西台地至佳樂水測線之時間序列。.....118
圖 2-4.107：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較。.....119
圖 2-4.108：南樹林至鵝鑾鼻測線之時間序列。.....119
圖 2-4.109：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。.....120
圖 2-4.110：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。.....121
圖 2-4.111：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。..122
圖 2-4.112：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2017 年之 GPS 垂直方向速度場。.....123
圖 2-4.113：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....124
圖 2-4.114：2004~2018 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。.....125
圖 2-4.115：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（紅葉-靜浦）時間序列分析圖。.....126
圖 2-3.116：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。。.....127
圖 2-4.117：嶺頂至瀧澗之時間序。.....128
圖 2-4.118：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。.....129
圖 2-4.119：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較。.....130
圖 2-4.120：光復至豐濱測線之時間序列。.....131
圖 2-4.121：光復至豐濱水準高程變化圖。.....132
圖 2-4.122：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較。.....133

圖 2-4.123：紅葉至靜浦測線之時間序列。 134
圖 2-4.124：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 135
圖 2-4.125：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較。 136
圖 2-4.126：東成至富岡測線之時間序列。 137
圖 2-4.127：東成至富岡測線水準高程變化圖。 138
圖 2-4.128：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。..139
圖 2-4.129：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。..139
圖 2-4.130：宜蘭地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 140
圖 2-4.131：2004~2018 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。 141
圖 2-4.132：宜蘭地區 2004-2018 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 142
圖 2-4.133：宜蘭地區 2004-2018 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。 142
圖 2-4.134：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。 145
圖 2-4.135：2002 年至 2018 全臺垂直速度場。 147
圖 3.1：本團隊北部地區 SAR 影像圖資示意圖。 149
圖 3-1.1：ERS（1996/1~1999/7）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 150
圖 3-1.2：ERS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。 150
圖 3-1.3：ERS（1996/1~1999/7）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）、水準測線位置及剖面位置。 151
圖 3-1.4：A 及 B 剖面速度場圖。 152
圖 3-1.5：C 剖面速度場圖。 152
圖 3-1.6：ENVISAT（2004/3~2008/6）衛星軌道 461，像幅編號 3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 153
圖 3-1.7：ENVISAT 影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。 154
圖 3-1.8：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 444、445 及 446，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 155
圖 3-1.9：ENVISAT 影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。 155
圖 3-1.10：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）升軌軌道 69，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 156
圖 3-1.11：SENTINEL-1 升軌軌道影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。 157
圖 3-1.12：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）降軌軌道 105，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 158
圖 3-1.13：SENTINEL-1 升軌軌道影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。 158
圖 3-2.1：ERS（1996/1~1999/7）時期及 ENVISAT（2004/3~2008/6）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 159
圖 3-2.2：ERS（1996/1~1999/7）時期、ENVISAT（2004/3~2008/6）時期及 ALOS（2007/1 ~ 2011/3）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 160
圖 3-3.1：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列。 161
圖 3-3.2：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列。 161
圖 3-3.3：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列。 162

圖 3-3.4：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列。.....162
圖 3-3.5：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列。.....163
圖 3-3.6：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列。.....163
圖 3-3.7：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列。.....163
圖 4-1.1：本研究中所使用的北台灣 GPS 連續站三維速度場。.....170
圖 4-1.2：本研究中所使用的原始 PSInSAR 位移速度場。.....171
圖 4-1.3：觀測點與網格三頂點示意圖(王淳璟，2015)。.....172
圖 4-1.4：本研究中經 Quadtree 減點後之 PSInSAR 位移速度場。 173
圖 4-1.5：以 ALOS 衛星資料與 GPS 連續站資料(相對澎湖白沙站)估算北台灣之速度場結果。 175
圖 4-1.6：以 ENVISAT 衛星資料與 GPS 連續站資料(相對澎湖白沙站)估算北台灣之速度場結果。 177
圖 4-1.7：以 ERS 衛星資料與 GPS 連續站資料(相對澎湖白沙站)估算北台灣之速度場結果。 179
圖 4-2.1：北部地區應變場圖。.....182
圖 4-2.2：北部地區剪應變場圖。.....182
圖 4-2.3：北部地區之旋轉率分佈圖。.....183
圖 4-3.1：2003.11-2008.06 GPS 連續站與 PSInSAR (Envisat 衛星)比對結果。....186
圖 4-3.2：2007.01-2011.01 年 GPS 連續站與 PSInSAR (ALOS 衛星)比對結果。..187
圖 4-3.3：大台北地區主應變速率場。.....187
圖 4-3.4：2007-2010 年間利用 ALOS 衛星影像及 PSInSAR 技術所觀測之台北盆地的地表運動變化(近垂直向)。.....189
圖 4-3.5：2003-2008(左)與 2007-2011(右)年間地調所精密水準測量與 PSInSAR 比對結果。 190
圖 4-3.6：2003-2008(左)與 2007-2011(右)年間水準測線與 PSInSAR 速度剖面比對結果。 191
圖 5-1.1：台北盆地北半部岩盤之縱深剖面(王乾盈與孫志財，1999)。.....193
圖 5-1.2：台灣北部之海域震測剖面(羅聖宗等，2007)。.....194
圖 5-1.3：台灣北部之三維地形圖及構造平衡剖面(陳冠宇，2014)。.....194
圖 5-1.4：湖口背斜至觀音鑽井的構造剖面(湯振輝，1963)。.....195
圖 5-1.5：湖口斷層地質剖面圖。.....195
圖 5-1.6：橫跨湖口–楊梅背斜的地質剖面(Suppe and Namson, 1979)。 196
圖 5-1.7：橫跨湖口–楊梅背斜的地質構造剖面(黃旭燦等，2004)。.....196
圖 5-1.8：新竹青草湖和寶山背斜的地質構造剖面。 197
圖 5-1.9：新竹地區之地質構造與地震活動分布剖面圖。 198
圖 5-1.10：新竹地區的地震定位結果(蒲新杰，2010)。.....198
圖 5-1.11：中油油氣探勘調查於新竹地區的震測剖面。 199
圖 5-1.12：新竹–苗栗地區北部的構造剖面。 199
圖 5-1.13：橫跨新竹地區之地質平衡剖面(黃旭燦等，2004)。.....200
圖 5-1.14：獅潭斷層之有限元素模型(Huang and Yeh, 1992)。.....201
圖 5-1.15：台灣西北部的地質平衡剖面(Lin, 2005)。.....201
圖 5-1.16：1935 年新竹–台中地震之餘震紀錄及 1973 年至 2003 年地震目錄。 202
圖 5-1.17：三義–卓蘭地區微震震央分布情況。 203

圖 5-1.18：三義斷層系統沿線相關震測線位置圖及震測剖面。 203
圖 5-1.19：三義斷層及車籠埔斷層北側之地質平衡剖面。 204
圖 5-1.20：跨越屯子腳斷層之震測線位置圖及震測剖面。 205
圖 5-1.21：苗栗–台中地區地震及震源機制之剖面分布及 Vp 速度層析影像。 205
圖 5-1.22：宜蘭北部構造及宜蘭南部構造的三維幾何示意圖。 206
圖 5-1.23：以集集地震之震間與同震位移所推求的中部構造模型。 208
圖 5-1.24：以集集地震主震及地表破裂所推求的斷層模型。 208
圖 5-1.25：中部震測剖面及其構造解釋。 208
圖 5-1.26：以集集地震序列資料及斷層面解所推得之中部斷層幾何。 209
圖 5-1.27：以鑽井、重力、地震資料及薄皮構造模型所推得之中部構造幾何。 209
圖 5-1.28：橫跨雲林嘉義一帶之地質平衡剖面。 210
圖 5-1.29：以震測剖面及地震資料推估之中部斷層構造。。 210
圖 5-1.30：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質構造剖面。 211
圖 5-1.31：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質平衡剖面。 211
圖 5-1.32：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之區域地質構造剖面與震源分布。 211
圖 5-1.33：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質平衡剖面。 212
圖 5-1.34：橫跨九芎坑斷層及觸口斷層之地質構造剖面。 212
圖 5-1.35：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質構造剖面。 213
圖 5-2.1：斷層模擬初始值。 215
圖 5-2.2：模擬成果之傾向滑移速率。 219
圖 5-2.3：模擬成果之走向滑移速率。 219
圖 5-2.4：模擬成果之總滑移速率。 220
圖 5-3.1：(a)臺灣北部及中部三維塊體模型及活動斷層分布。 (b)GPS 資料所觀測到的平均水平速度場。 223
圖 5-3.2：(a)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）。(b) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。 228
圖 5-3.3：(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。 230
圖 5-3.4：(a) GPS 觀測速度場。(b) 最佳塊體模型所預估的地表速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。 231
圖 5-3.5：各塊體內之內部形變應變大小。 232
圖 5-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。 237
圖 5-4.2：臺灣北部與中部地區 2002-2017 年相對於測站 S01R 之地表速度場。 239
圖 5-4.3：因主應變速率產生相對於 S01R 測站之水平速度場。 239
圖 5-4.4：smoothing parameter 之測試結果.....240
圖 5-4.5：模型之觀測值、計算值與殘差值結果。 240
圖 5-4.6：斷層滑移虧損率分布圖。 241
圖 5-4.7：斷層滑移虧損率分布圖。 241
圖 5-5.1：地表速度場正演模擬成果。 242
圖 6-1.1：西南部單頻 GPS 站點位分布。 246

圖 6-1.2：西南部單頻 GPS 站解算成果時間序列。.....247
圖 6-1.3：西南部單頻 GPS 站觀測值與擬合值之殘差標準差結果。.....248
圖 6-1.4：西南部單頻 GPS 站解算相對澎湖測站 S01R 水平速度場分布圖.....248
圖 6-1.5：西南部單頻 GPS 站解算相對澎湖測站 S01R 垂直速度場分布圖.....249
圖 7-1.1：中央氣象局 20180206 地震事件報告.....251
圖 7-1.2：中央氣象局 20180206 花蓮近海地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果。.....252
圖 7-1.3：臺灣東部地區地質圖。.....253
圖 7-1.4：1951 年花蓮台東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖。.....255
圖 7-2.1：測站 HUAL 與 PEPU 動態解算時間序列。.....257
圖 7-2.2：花蓮地震 GPS 同震位移，地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。.....257
圖 7-2.3：花蓮地震 GPS 每日解（後五天平均坐標減前五天平均坐標）同震位移。.....258
圖 7-2.4：測站 HUAP 與 NSAN 每日解時間序列。.....259
圖 7-2.5：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列。.....261
圖 7-2.6：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列。.....262
圖 7-2.7：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之同震位移場解算成果比較。.....263
圖 7-2.8：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之 GAMIT 及 Bernese 同震位移場解算成果殘差比較。.....263
圖 7-2.9：GPS 移動站 E549 現場環境圖。.....264
圖 7-2.10：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 解算之同震位移場。....265
圖 7-2.11： 花 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 之同震位移場。.....266
圖 7-2.12：花蓮地區嶺頂-龍澗精密水準測線之坐標時間序列。.....267
圖 7-2.13：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。.....269
圖 7-2.14：Sentinel-1 與 ALOS-2 東西方向與垂直方向花蓮地震同震地表變形場。.....271
圖 7-3.1：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型擬合結果。.....273
圖 7-3.2：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型 DInSAR 擬合結果。.....274
圖 7-3.3：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型與主震餘震序列比較結果。.....275
圖 7-3.4：花蓮近海地震多滑移量斷層模型擬合結果。.....276
圖 7-3.5：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 升軌擬合結果。.....277
圖 7-3.6：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 降軌擬合結果。.....277

表 A：預期進度甘梯圖（Gantt Chart）：計畫進度控制及檢討之依據。

計畫名稱：斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（2/4）													
月次 工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	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 移動站及單頻站資料檢核及分析 (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)													
北部地區斷層之斷層幾何參數 (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 衛星影像分析 (由臺大工作團隊負責)													
整合並綜合分析觀測資料 (由成大工作團隊負責)													
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）：計畫進度控制及檢討之依據。

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. 彙整以往 PS-InSAR 成果資料	三月三十一日	契約書與工作計畫書修正，第一期請款(金額)。
2	（第二季查核點） 1.工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻站及水準資料查核2-4 月 b. GPS 連續站計算及時序分析2-4 月 c. 處理連續 GPS 站周圍 PS 點之時間序列	六月三十日	第二季工作進度報告與繳交文件
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	期中報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況、第二期請款(金額)
4	（第三季查核點） 1.工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻及水準資料查核5-7 月 b. GPS 連續站計算及時序分析至5-7 月 c. 處理PSInSAR 時間序列分析	九月三十日	第三季工作進度報告與繳交文件
5	（期末報告） 1.工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻站及水準資料8-9 月查核及分析 b. GPS 連續站計算及時序分析 8-9 月 c. 彙整北部地區活動斷層及潛在活動構造之斷層幾何	十一月三十日	期末報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況

	參數各活動斷層的滑移虧損率 d. 綜合分析觀測資料 2.期末報告書面資料初稿		
6	（第四季查核點，驗收） 1. 正式研究成果報告書30 份 2. 正式研究成果報告書電子檔10份 3. 會計報表 4. 尾款請款收據	十二月三十一日	清點所有交付項目與教育訓練等契約承諾、尾款請款(金額)

查核點共計六個請標示於甘梯圖上(包括以季為單位之工作進度報告表、期中簡報及期末簡報)。
本欄內文字僅為範例，可依據個案狀況酌予修正內容。

表 C：期末須交付之各項工作項目。

	工作項目	章節
測量外業督導與檢核	1. 在測量外業督導部分，GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段，共計 42 測段。以上數據以 2018 年度測量公司承辦之業務範圍為準。 2. 在測量外業檢核部分，抽樣 GPS 移動站分區測量數量 10%（小數點以下四捨五入）進行檢核測量，並針對 GPS 移動站測量成果與抽測結果進行基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。	2-2
連續 GPS 觀測站資料解算分析	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（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場，並提供週期性變化結果（以超過兩年以上之資料做分析）。	2-1
移動式 GPS、精密水準測量及單頻 GPS 觀測網成果解算分析	1. 2018 年 GPS 移動站與精密水準測量成果解算誤差及成果分析。 2. 完成全台 GPS 移動站與精密水準資料之時序分析，提供全台不同時期之加密水平與垂直速度場。 3. 解算西南部地區單頻 GPS 觀測網之成果與精度，並評估其取代 GPS 移動站之可行性。	2-3
北部地區雷達影像分析	1. 利用分析之 PS-InSAR 成果資料，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。並配合規劃區域，利用 PS-InSAR 技術時間序列分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊。（規劃區域與委託機關溝通協調後決定）。	3-1 3-2
北部地區地表速度場分析與斷層參數求解	1. 整合 GPS 連續站、移動站及精密水準測量資料，求得區域性不同時期之三維變形資訊。 2. 完成北部地區應變速率場之推求。 3. 提供活動斷層及潛在的活動構造之斷層滑移虧損率及最佳斷層幾何參數等資訊。 4. 分析活動斷層地質敏感區之活動特性，提供中央地質調查所劃設建議。	4-1 4-2 4-3 5-1 5-2 5-3 5-4 5-5
陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果報告	1. 利用單點定位技術（PPP）發展連續 GPS 近即時觀測，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一週內完成連續 GPS 速度場之解算工作（包含地調所提供之 GPS 連續觀測站高頻資料），並配合地調所測量外業等資料（GPS 移動站及精密水準測量），在完成所有觀測工作 3 週內提出分析成果報告。	7-1 7-2 7-3
臺灣西南部地區單頻 GPS 觀測網成果分析		第六章
舉辦至少一場數日之斷層模型教育訓練。		
提供成果報告書內圖片「300dpi 以上清晰圖檔(電子檔)」以及計畫參與 人員運用計畫執行成果發表之相關著作電子檔。		
成果報告書 30 份、光碟片 10 份。		

摘要

本計畫分析臺灣全島近十數年來的 GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準測線及 PS-InSAR 資料，提供全臺地表速度場，接著透過斷層模型之建立，推估斷層短期滑移速率及滑移虧損率等資訊。今年度計畫主要執行重點地區為臺灣北部地區之活動斷層及潛在活動構造。在 GPS 連續站資料處理方面，本計畫解算全臺近 495 站連續全球定位系統測站，資料累積至 2018 年 9 月。除分析測站線性速率外，還加入分析週期性與震後衰減之效應。並只挑選資料累積超過 1 年的測站進行速度場分析。本報告解算累積歷史資料至今之平均速度場結果與過去長期解算結果比較並無重大差異。GPS 移動站部分共完成 739 站的施測，精密水準則完成共計 29 條測線之施測。比較採用 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 在北部地區的 GPS 移動站解算成果，顯示兩者之水平速度場相關係數達 0.99 以上，垂直速度場相關係為 0.84，速度估值的差異皆 <1 mm/yr，故本計畫 GPS 移動站之解算成果是可靠的。PSInSAR 主要工作除彙整臺灣北部地區過去的成果外，另加入分析 93 張升軌及 77 張降軌 Sentinel-1 影像（2015 年 4 月至 2018 年 8 月）得到 202 張升軌及 174 張降軌干涉圖。在時間序列方面，無論是早期的 ERS 衛星或是近期的 Sentinel-1 衛星影像都顯示跨過斷層無明顯的速度差異。在斷層模型建置方面，本期研究以北台灣的 9 條活動構造作為塊體邊界斷層，以 BLOCKS 程式、DEFNODE 程式與基線應變模型計算各斷層的加權平均滑移虧損速率，結果顯示山腳斷層為 1.9 mm/yr，湖口斷層為 1.8 mm/yr，新竹斷層為 1.1 mm/yr，新城斷層為 1.3 mm/yr，三義斷層為 5.9 mm/yr，屯子腳斷層為 1.7 mm/yr，獅潭斷層為 5.2 mm/yr，宜蘭北部構造為 7.4 mm/yr，宜蘭南部構造為 6.1 mm/yr。本計畫也求解 2018 年 2 月 6 日規模 6.0 花蓮近海地震之地表同震位移場，指出米崙斷層與嶺頂斷層有發生錯動。最後本計畫完成西南部 2017 年 5 月 15 日至 2018 年 9 月 3 日間 15 個單頻 GPS 點位資料解算，結果指出各單頻測站之速度場與周圍雙頻測站在此一時期之速度場相當一致。

關鍵詞：全球衛星定位系統、精密水準、PS-InSAR、斷層模型

Abstract

We analyze the geodetic data from the island-wide continuous and campaign GPS network, precise leveling lines and PS-InSAR to provide the surface velocity field in this project. The main target area in this year is northern Taiwan. Current project adopts the continuous GPS data in comparison with the PS-InSAR image. By the September of 2018, the daily solutions and the time series from 495 continuous GPS stations were calculated with the model of Nikolaidis for removing coseimic, post-seismic and periodic motion, and only the data from the stations working over 1 years were analyzed for velocity field. As a result, the velocity field shows a similar trend with the previous one with the long-term estimation The comparison of GPS calculation results using Bernese and GAMIT software indicates that the velocity differences from these two pieces of software are all less than 1 mm/yr and the correlations of horizontal and vertical velocities are 0.99 and 0.84, respectively. As a result, the velocity field shows a similar trend with the previous estimation. In the work of PS-InSAR (Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar), 202 ascending and 174 descending interferograms were acquired from 93 and 77 images of Sentinel-1A (2015.4 - 2018.8) adopted additionally in the current stage of this project. Both ERS and Sentinel-1 time series represent minor difference across faults in northern Taiwan, indicates less activity of faults there. For the fault model constructions, 9 active structures are selected as the target faults in northern Taiwan. The BLOCKS, DEFNODE and baseline inversion models were used in this project to evaluate the fault slip rates or fault slip rate deficit distribution on the faults. The slip deficit rate of the Shanchiao fault is 1.9 mm/yr; Houkou fault as 1.8 mm/yr; Hsinchu fault as 1.1 mm/yr; Hsincheng fault as 1.3 mm/yr; Sanyi fault as 1.9 mm/yr; Tuntzuchiao fault as 1.7 mm/yr; Shihtan fault as 6.1 mm/yr; Northern Yilan structure as 7.4 mm/yr and Southern Yilan structure as 6.1 mm/yr. We estimated the coseismic displacements of 2018 M_L 6.0 Hualien offshore earthquake as well. The Milun fault and Linding fault were moved during the earthquake. Finally, the velocity field derived from 15 single frequency GPS stations during 15 May 2017 - 3 September 2018 is comparable to the velocity field from the neighboring double frequency GPS stations in SW Taiwan.

KEYWORDS: GPS, precise leveling, PS-InSAR, fault model

Introduction

In order to understand the characteristics of crustal deformation in the Taiwan mountain belt and its implication for seismic hazard, we analyze the geodetic data from the island-wide continuous and campaign GPS network, precise leveling lines and PS-InSAR to provide the surface velocity field in this project. We estimated the vertical velocity field not only from the continuous GPS data and leveling data but also from the campaign-surveyed GPS observations. Combining with the PS-InSAR results, the spatiotemporal variation of the 3D surface deformation field in Taiwan was inferred. The slip deficit rates on the active faults and potential active structures were evaluated by inverting the surface velocity field using three fault models. Finally, the coseismic displacement field of the 2018 Hualien earthquake was calculated in this project. In addition, the main target area in this year is northern Taiwan.

Continuous and Campaign-mode GPS Data

Current project adopts the continuous GPS data in comparison with the PS-InSAR image. By the September of 2018, daily solutions and time series from 495 continuous GPS stations were calculated with the model of Nikolaidis for removing coseimic, post-seismic and periodic motion, and only the data from the stations working over 1 years were analyzed for velocity field. As a result, the velocity field shows a similar pattern with the previous one with the long-term estimation.

Total 739 campaign-mode GPS stations were re-surveyed again in Taiwan in this year while the 25 precise leveling routes were also re-measured across the major active faults in Taiwan in this year. The comparison of GPS calculation results using Bernese and GAMIT software indicates that the velocity differences from these two pieces of software are all less than 1 mm/yr and the correlations of horizontal and vertical velocities are 0.99 and 0.84, respectively. As a result, the velocity field shows a similar trend with the previous estimation.

The major velocity gradients are shown across the Longitudinal fault system, the Western Foothills, and the deformation front in the horizontal velocity field. The land subsidence is represented in the Western Coastal Plain, the Pingtung plain, the Ilan plain, the eastern flank of Central Range, and the northern Coastal Range. The land subsidence in the Western Coastal Plain could be casued by the groundwater withdrawal. The subsidence in the Pingtung plain and the Ilan plain could result from

both normal faulting and groundwater pumping. The land subsidence in the northern Coastal Range may reflect the northward plate subduction of the Philippine Sea plate. The major uplift areas are in the Western Foothills and the Central Range.

Finally, the velocity field derived from 15 single frequency GPS stations during 15 May 2017 - 3 September 2018 is comparable to the velocity field from the neighboring double frequency GPS stations in SW Taiwan.

PS-InSAR

In the work of PS-InSAR (Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar), 202 ascending and 174 descending interferograms were acquired from 93 and 77 images of Sentinel-1A (2015.4 - 2018.8) adopted additionally in the current stage of this project. Both ERS and Sentinel-1 time series represent minor difference across faults in northern Taiwan, indicates less activity of faults there.

Fault Slip Deficit Rates

For the fault model constructions, 9 active structures are selected as the target faults in northern Taiwan. The BLOCKS, DEFNODE and baseline inversion models were used in this project to evaluate the fault slip rates or fault slip rate deficit distribution on the faults. The fault geometry parameters were fixed based on the geological study in another project of the Central Geological Survey. The slip deficit rate of the Shanchiao fault is 1.9 mm/yr; Houkou fault as 1.8 mm/yr; Hsinchu fault as 1.1 mm/yr; Hsincheng fault as 1.3 mm/yr; Sanyi fault as 1.9 mm/yr; Tuntzuchiao fault as 1.7 mm/yr; Shihtan fault as 6.1 mm/yr; Northern Yilan structure as 7.4 mm/yr and Southern Yilan structure as 6.1 mm/yr.

2018 M_L 6.0 Hualien offshore earthquake

We estimated the coseismic displacements of 2018 M_L 6.0 Hualien offshore earthquake as well. We collected the geodetic data from 24 continuous GNSS stations, 16 campaign-mode GNSS stations, a precise leveling route, and SAR images from Sentinel-1A & 1B satellites to estimate the coseismic surface displacement fields. The horizontal coseismic displacements are approximately 6.6-519.8 mm, indicating that the MLNF and LNDF are both left-lateral strike-slip faults. The vertical displacement pattern from leveling measurements indicate the major fault dipping to the west. The optimized modeling result shows two major fault planes, a deep west-dipping fault and

a shallow east-dipping fault. These fault geometries are also comparable to the main shock and aftershock distribution of this event. Coseismic slip is concentrated at the depth of about 10 km with maximum slip of about 650 mm. The geodetic moment of the deep west-dipping fault is 7.35 x 10^{25} dyne-cm, corresponding to a moment magnitude of M_w 6.54 while the geodetic moment along the MLNF and LNDF is 9.41 x 10^{24} dyne-cm and M_w 5.95.

Conclusions

By the September of 2018, daily solutions from 495 continuous GPS stations were calculated. Total 739 campaign-mode GPS stations were re-surveyed again in Taiwan in this year while the 25 precise leveling routes were also re-measured across the major active faults in Taiwan in this year. As a result, the velocity field shows a similar trend with the previous estimation. In the work of PS-InSAR, 202 ascending and 174 descending interferograms were acquired from 93 and 77 images of Sentinel-1A (2015.4 - 2018.8) adopted additionally in the current stage of this project. Both ERS and Sentinel-1 time series represent minor difference across faults in northern Taiwan, indicates less activity of faults there. For the fault model constructions, nine active structures are used as the target faults in northern Taiwan. The BLOCKS, DEFNODE and baseline inversion models were adopted to evaluate the fault slip rates or fault slip rate deficit distribution on the faults. The slip deficit rate of the Shanchiao fault is 1.9 mm/yr; Houkou fault as 1.8 mm/yr; Hsinchu fault as 1.1 mm/yr; Hsincheng fault as 1.3 mm/yr; Sanyi fault as 1.9 mm/yr; Tuntzuchiao fault as 1.7 mm/yr; Shihtan fault as 6.1 mm/yr; Northern Yilan structure as 7.4 mm/yr and Southern Yilan structure as 6.1 mm/yr. We estimated the coseismic displacements of the 2018 M_L 6.0 Hualien offshore earthquake as well. The Milun fault and the Linding fault were moved during the earthquake. Finally, the velocity field derived from 15 single frequency GPS stations during 15 May 2017 - 3 September 2018 is comparable to the velocity field from the neighboring double frequency GPS stations in SW Taiwan.

第一章、緒　論

1-1 計畫整體概述

發生於 2011 年 3 月 11 日 M_w 9.0 日本宮城外海地震，提醒我們兩件重要的事情：（1）辨識已知與未知高發震潛勢構造的位置及（2）評估其所蘊含之地震潛能。這些高發震潛勢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，因此瞭解活動斷層現今之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。此外，由於臺灣地區都市化程度的日益升高，未來因斷層潛移活動直接導致之建物破壞與經濟損失，以及斷層鎖定所引致的地震災損可能更為嚴重。故對於活動斷層的加強調查與持續性觀測，以及瞭解活動斷層的運動特性與危害度分析就顯得非常急迫與重要。

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，逐年在臺灣陸上活動斷層帶設置全球定位系統（Global Positioning System，簡稱 GPS）監測網與精密水準測線。於 96–99 年「地震地質與地變動潛勢分析」計畫中，除了逐步累積 GPS 與精密水準之觀測成果，並開始嘗試各種斷層模型建置之測試，試圖藉由斷層模型來擷取地表變形資訊所顯示之斷層運動特性。在 98–101 年「斷層活動性觀測研究第二階段－斷層監測與潛勢分析研究」與 102–105 年「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」計畫中，已完成 86 站 GPS 連續站（表 1-1.1）、773 站 GPS 移動站及 42 條精密水準路線（含 29 條長測線及 13 條短測線）之設置（圖 1-1.1），並藉由高精度的 GPS 與水準觀測數據分析，瞭解各斷層於間震、同震以及震後的變形型態變化，進一步計算出間震期的斷層滑移速率與同震及震後的斷層面滑移特性。另外，PS-InSAR 衛星影像分析技術也在這一時期之計畫工作中被引進（圖 1-1.2 與圖 1-1.3），可針對大範圍的地表地形變化進行觀測，快速地獲得大區域面狀之地殼變形資訊。因此經由過去近十年之大地測量監測資料，我們觀測到包含東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部等數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域。

另一方面，在 98–101 年之「斷層活動性觀測研究第二階段－斷層監測與潛

勢分析研究」計畫中，特別針對臺灣 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、池上斷層和小岡山斷層）嘗試進行斷層活動度及地震潛能分析，逐步研究詳細的斷層參數並評估其地震發生機率。在 102–105 年「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」計畫中，透過蒐集與分析地調所及國內既有之 33 條活動斷層資料，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。然而在此工作中，並未很好的將大地測量監測資料引用至此斷層活動潛勢分析工作中。因此，在本階段之工作中，將試圖找到合適之方法將大地測量監測資料引用至斷層活動潛勢分析的工作中。

1-2 研究目的

本階段「斷層活動性觀測研究第四階段－地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」計畫的研究目的，(1) 將著重在活動斷層模型的建置工作上，利用近十數年來的地表變形觀測結果，同時針對活動斷層及潛在的活動構造，採用三種以上的斷層模型進行參數反演，推估斷層短期滑移速率或滑移虧損率等資訊，並結合 102－105 年「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」計畫與後續計畫中所提出的斷層幾何參數進行評估，找出最佳的斷層幾何參數組合結果，其相關結果也將納入斷層潛勢分析計畫整體評估，作為製作臺灣活動斷層潛勢圖的重要參考依據。此外，(2) 由於過去礙於大地測量資料蒐集時間長度之不足，特別是 GPS 移動站資料，難以對垂直速度場有足夠的解析能力，然而在蒐集近十數年的大地測量監測資料後，本階段計畫除持續分析中央地質調查所活動斷層觀測網之資料外，還將進一步解析這些數量龐大的大地測量監測資料，嘗試建立臺灣地區三維地表速度場之時空變化，並檢核其精度。(3) 本階段計畫另嘗試利用單點定位技術（PPP）發展連續 GPS 近即時資料解算技術，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一周內完成連續 GPS 同震位移場之解算工作。

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	GS48	警光山莊	2009/04/01
GS02	新竹高工(2015.08.17 廢站)	2004/10/21	GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01
GS03	工研院	2004/10/19	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS04	大埔美農場 (2009.11.11 廢站)	2004.10.16	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS52	新發國小	2009/12/18
GS06	民和國中	2004/10/21	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS07	培英國小	2004/10/21	GS54	大洲國中(2013.7.12 廢站)	2009/12/15
GS08	興華國小	2005/08/15	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS57	石門國小(2016.12.27 廢站)	2009/12/15
GS11	北投國小	2005/08/15	GS58	高士國小	2009/12/14
GS12	樂善國小(2018.3.8 廢站)	2005/09/06	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS13	國光國小	2005/08/16	GS60	永港國小	2009/12/18
GS14	西門國小	2005/09/13	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS63	太興國小	2010/09/24
GS17	太平國小	2005/09/14	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS65	茶山國小(2011.7.28 廢站)	2010/10/14
GS19	保長國小(2012.5.25 廢站)	2006/07/12	GS66	達邦	2010/09/28
GS20	龜山島	2006/08/04	GS67	新美國小	2010/09/28
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS68	三和國小	2010/12/17
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS23	五光國小	2006/05/30	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS73	新光國小	2012/11/02
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS74	內門國小	2012/11/02
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS76	新興國小	2012/11/02
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS77	深水國小	2012/11/14
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS78	溪洲國小	2013/10/22
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS79	中路國小	2013/10/16
GS33	永華國小	2006/06/22	GS80	田寮國中	2013/10/16
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS81	嘉興國中	2013/10/16
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS82	卓蘭實驗高中	2014/12/16
GS36	德化國小	2006/10/21	GS83	土城國小	2014/12/22
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS84	水里國中	2014/12/17
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2015/01/08
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS86	水美國小	2015/09/15
GS40	龍峰國小(2016.11.7 廢站)	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS42	東原國中	2007/11/23	GS89	新化國中	2015/09/14
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS90	新埔工作站	2016/09/02
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS91	香山高中	2016/09/02
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS46	來義國小	2009/01/06	GS93	七星山	2017/01/01
GS47	台電南展館 (2013.7.25 廢站)	2009/01/05	GS94	中湖	2017/12/28
			GS95	八煙	2017/12/28

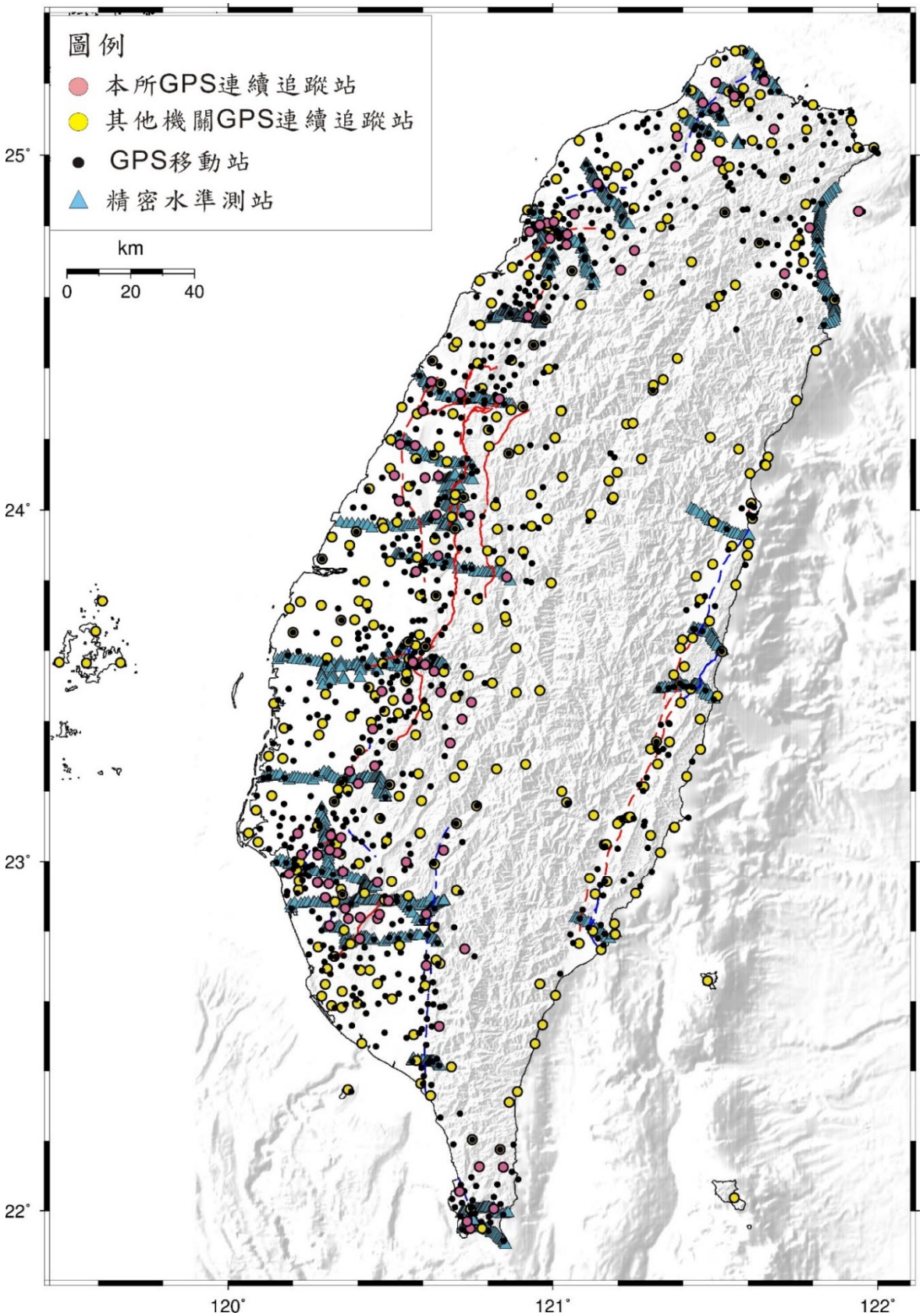


圖 1-1.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。包含 86 站 GPS 連續站、773 站 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。

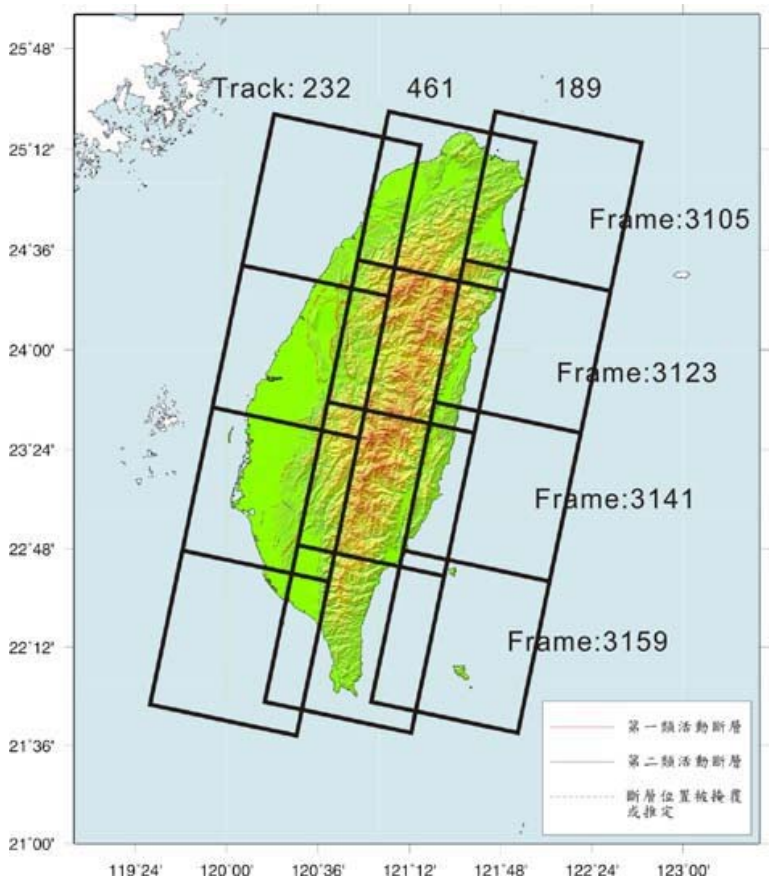


圖 1-1.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

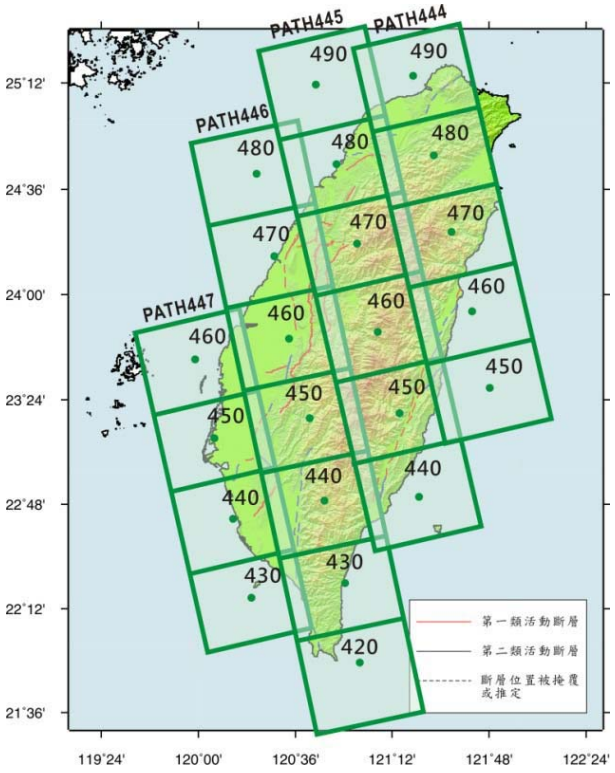


圖 1-1.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。

1-3 本年度工作概述

1. 測量外業督導與檢核（成功大學工作團隊負責）
   a. 在測量外業督導部分，GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段。以上數據以各年度測量公司承辦之業務範圍為準。
   b. 在測量外業檢核部分，抽樣 GPS 移動站分區測量數量 10%（小數點以下四捨五入）進行檢核測量，並針對 GPS 移動站測量成果與抽測結果進行基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。
2. 連續 GPS 觀測站資料解算分析（台灣大學工作團隊負責）
   處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場，並提供週期性變化結果（以超過兩年以上之資料做分析）。
3. 移動式 GPS 及精密水準測量成果解算分析（成功大學工作團隊負責）
   完成全台 GPS 移動站與精密水準資料之時序分析，由連續 GPS 坐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，提供全台不同時期之加密水平與垂直速度場。
4. 北部地區雷達影像分析（台灣大學工作團隊負責）
   利用分析之 PS-InSAR 成果資料，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。並配合規劃區域，利用 PS-InSAR 技術時間序列分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊。
5. 北部地區地表速度場分析與斷層參數求解（成功大學工作團隊負責）
   a. 整合 GPS 連續站、移動站及精密水準測量資料，求得區域性不同時期之三維變形資訊
   b. 利用速度場推求北部地區應變速率之空間分布情形。
   c. 利用至少三種不同的斷層模型，使用斷層潛勢分析計畫提供之斷層幾何，反演斷層滑移虧損率及最佳斷層幾何參數等資訊，並進行整合分析，提供相關斷層參數供斷層潛勢分析工作所需。
   d. 分析活動斷層地質敏感區之活動特性，提供中央地質調查所劃設建議。
6. 連續 GPS 近即時資料解算技術（台灣大學工作團隊負責）
   利用單點定位技術（PPP）發展連續 GPS 近即時資料解算技術，針對陸地上

規模大於 6 的地震事件，在一周內完成連續 GPS 同震位移場之解算工作（包含中央地質調查所提供之 GPS 連續觀測站高頻資料），本年度計畫工作中，若截至期末簡報前仍無規模大於 6 的陸域地震事件，本團隊會提供本年度重要地震事件之分析成果。此外，成功大學工作團隊會配合中央地質調查所測量外業等資料（GPS 移動站及精密水準測量），在完成所有觀測工作 3 週內提出分析成果報告。

7. 臺灣西南部地區單頻 GPS 觀測網成果分析（成功大學工作團隊負責）
解算西南部地區單頻 GPS 觀測網之成果與精度，並評估其取代 GPS 移動站之可行性。

1-4 前一年工作成果

1-4-1 GPS 及精密水準測量

1-4-1-1 GPS 移動站資料分析

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，並在坐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，我們採用坐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。坐標殘差（residual）分析是將各站每次測量所獲得之坐標觀測值與擬合曲線上之坐標計算值相減，將所獲得之坐標殘差值進行統計。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。

在 2002-2016 年資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.2 ± 4.1 mm（2 倍標準差）、E 方向為-0.2 ± 5.0 mm 及 H 方向為-0.2 ± 15.7 mm。在 2017 年的資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.3 ± 2.9 mm、E 方向為-0.4 ± 4.8 mm 及 H 方向為 0.2 ± 14.6 mm。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。由統計結果可看出 2002-2016 年水平方向之均方根誤差平均值為 9.3 mm，在垂直方向的平均值為 21.7 mm，及 2017 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.6 mm，垂直方向的平均值為 22.5 mm。

1-4-1-2 精密水準測量精度分析

至 2017 年 11 月底前所獲得共計 577 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 568 個測段，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 97.7 %（564 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 99.7 %（575 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 1071 個測段達測段達 98.4 %顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

1-4-1-3 全臺速度場

藉由檢視 GPS 連續站及精密水準測量之坐標時間序列可發現，地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此我們針對 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震等，以及發生速度場變化之轉折點，分別為 2007 年 1 月（中部地區）、2009 年 1 月（東部地區）、2010 年 4 月（恆春地區）、2015 年 1 月（恆春地區），分為九個時間段分別解算速度場，結果如圖 1-4.3 及圖 1-4.4。

由解算結果可知臺灣地區 GPS 水平速度分布，在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。

根據圖 1-4.4，大臺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，除跨湖口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，而高雄地區的路竹-茂林測線同樣也在龍船斷層南接之車瓜林斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，岡山-安坡測線在小岡山斷層西側約有-10 mm/yr，東側則約在-3 至 0 mm/yr，由於此一系列地表垂直速度場之空間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，所以和龍船斷層或車瓜林斷層的具體關聯性，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。屏東地區之佳冬–七佳測線，在潮州斷層以西約有-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 2017 年，在恆春斷層以東有些微的抬升現象，速率約 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）。

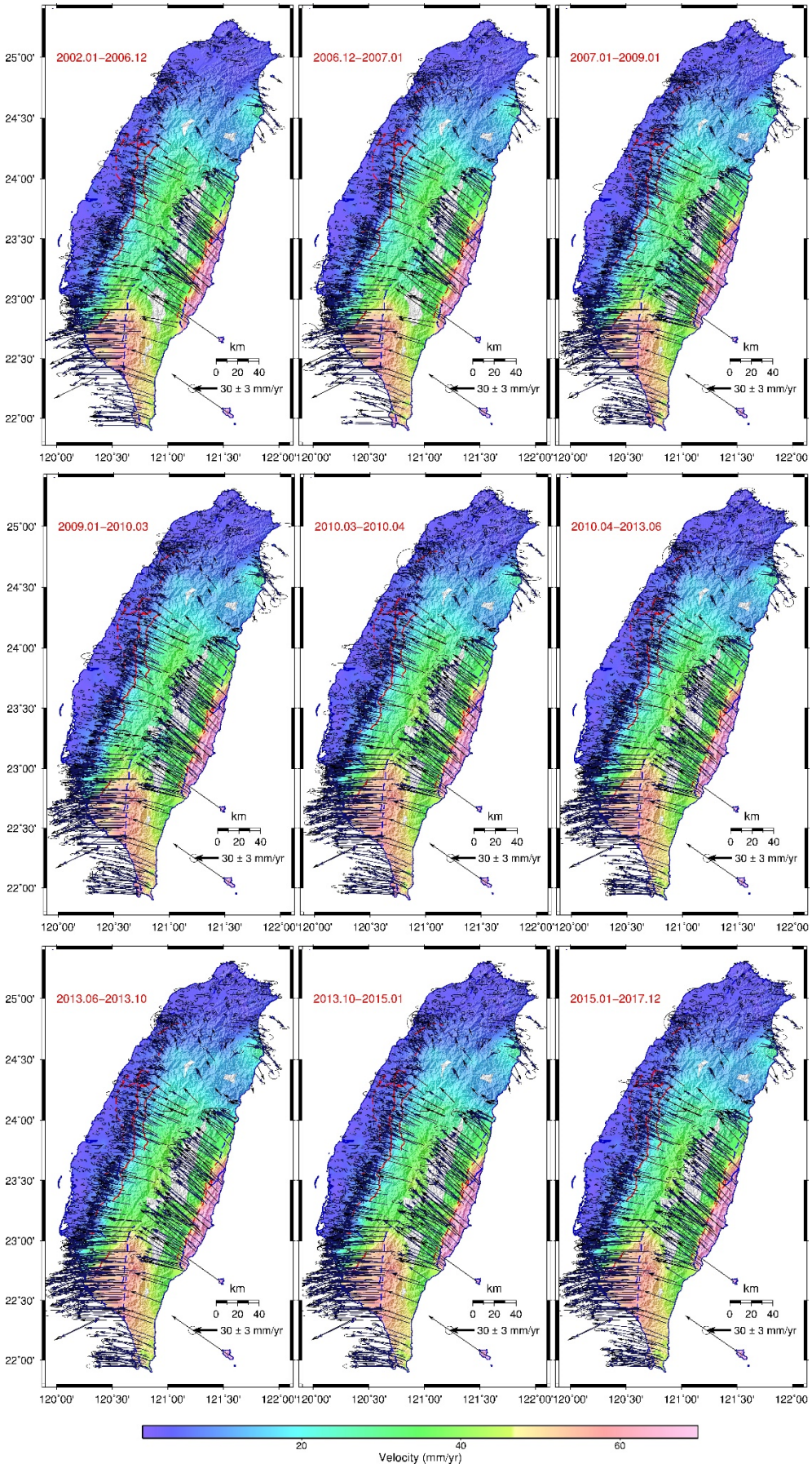


圖 1-4.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。

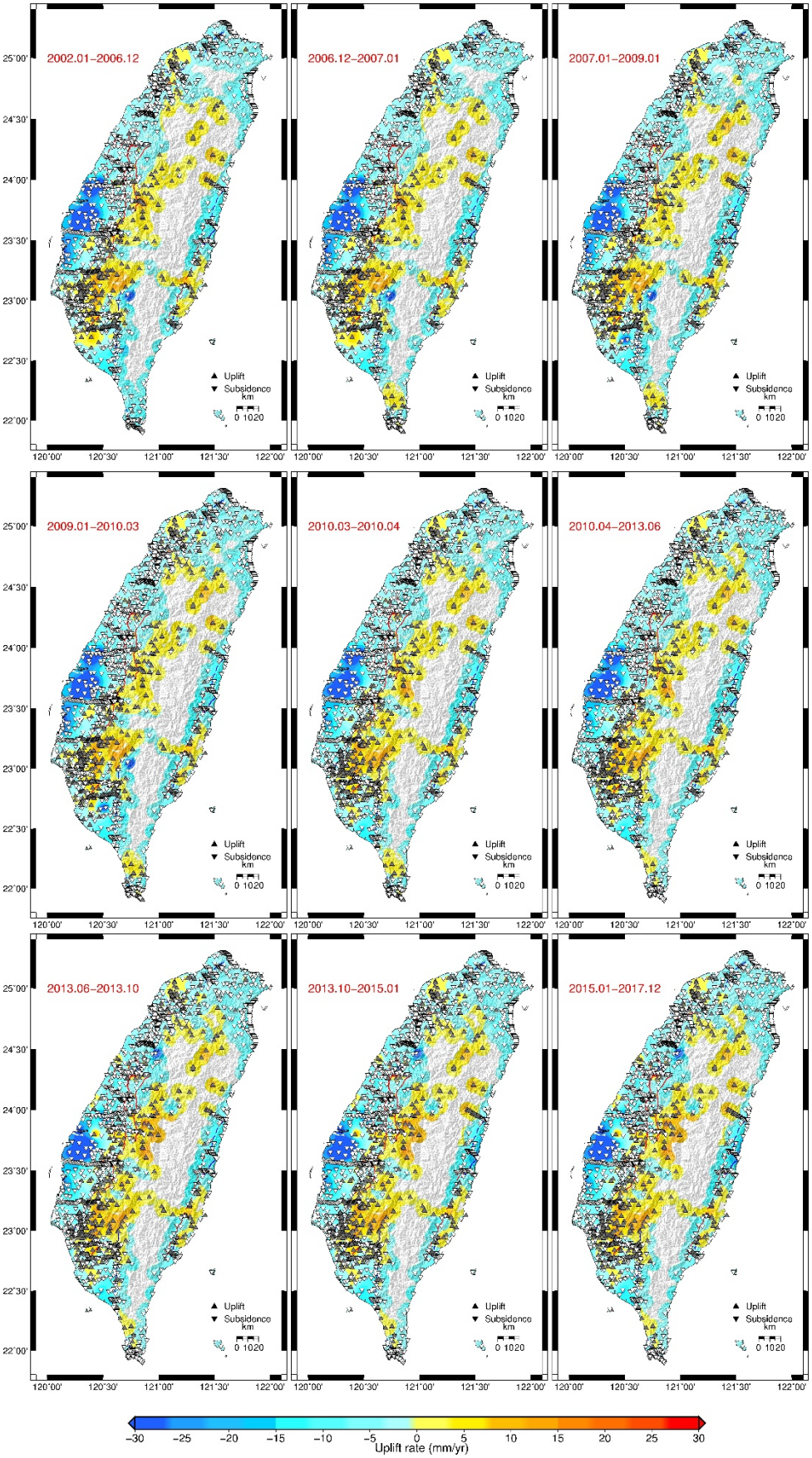


圖 1-4.2：2002 年至 2017 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

1-4-2 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR）

1-4-2-1 中部地區 PS-InSAR 成果資料分析

圖 1-4.3 左上即為 ERS 影像在此期間（1996/1-1999/7）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。分析永久散射點的結果，可以得到在這段期間，整體而言，八卦山以南的彰化沿海地區與濁水溪以南雲林地區有明顯下陷，下陷率大約 40-50 mm/yr 左右，並且與連續 GPS 測站速率相當吻合，與 Huang et al.（2016）及 Tung and Hu（2012）結果相同。說明此資料的可信度高，提供了早期全面性的地表變形速率。主要較明顯的跨斷層速度梯度差異呈現在跨過南段彰化斷層處，有輕微視衛星速度縮短，位置約符合八卦山背斜。

圖 1-4.3 右上為 ENVISAT 影像在此期間（2007/6-2008/6）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。從圖中可見，在這段期間，濁水溪以北的溪湖、二林，以南的褒忠、土庫及元長地區為明顯下陷地區，相較於早期 ERS 時期，此時期的下陷區域更為集中且向內陸移動，下陷率大約 40-50 mm/yr 左右。此外，在臺中市南區也可觀察到大約 20-30 mm/yr 的下陷速率。與 ERS 衛星相同，在跨過南段彰化斷層處輕微視衛星速度縮短，位置約符合八卦山背斜。

圖 1-4.3 左下即為 ALOS 衛星影像在此期間（2006/12-2011/2）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。從圖中可見，在這段期間，濁水溪以北的溪湖、二林，以南的褒忠、土庫及元長地區為明顯下陷地區，下陷率大約 45 mm/yr 左右。同樣，在跨過南段彰化斷層處輕微視衛星速度縮短，位置約符合八卦山背斜。

圖 1-4.3 右下即為 Sentinel-1A 衛星影像在此期間（2015/03-2016/02）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。從圖中可見，在這段期間，濁水溪以北的溪湖、二林及溪洲，以南的虎尾地區為明顯下陷地區，而下陷速率較早期影像資料減緩，推測為當初測試影像配對處理時只選用了 2015 年 3 月至 2016 年 2 月的資料，對比當時的 GPS 結果也確實顯示此時間段的下陷量較少。下陷率大約 30 mm/yr 左右。而向東跨過南段彰化斷層處有明顯視衛星速度縮短，目前推測為大氣效應的影響，而非構造活動。

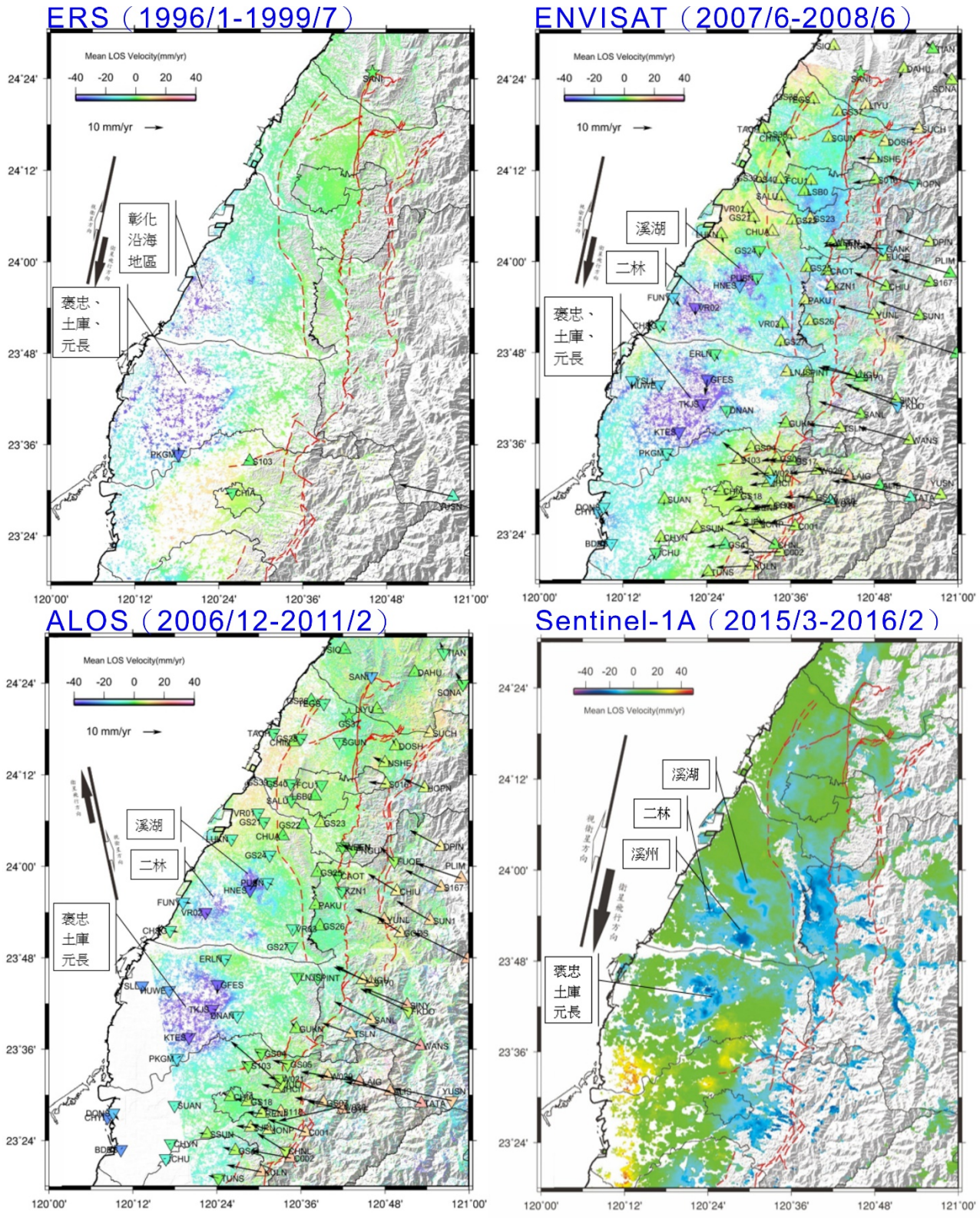


圖 1-4.3：中部地區之衛星影像視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 SANI，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

1-4-2-2 衛星影像時間序列分析

C1 剖面跨越彰化斷層，由衛星影像時間序列分析來看，根據圖 1-4.5，在 ERS 衛星時期，跨斷層速度變化並不顯著，而 ENVISAT 影像時期（921 地震後）則顯示有近 4 mm/yr 的速度差異。並且整體來說 921 地震後變形速度都增加。

C2 剖面跨越車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，由圖 1-4.6 ENVISAT 時間序列速率則顯示上下盤速率最大將近 10 mm/yr。繼續向東跨過大茅埔-雙冬斷層則轉換為視衛星方向遠離的速度梯度差異，由 ENVISAT 時間序列速率顯示此遠離視衛星方向速率最大約為 40 mm/yr。此變形行為也與地形上的大橫屏向斜吻合，因此可能為構造活動行為所造成。

C3 剖面跨越彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，根據圖 1-4.7 ENVISAT 時間序列結果，921 地震後跨彰化斷層並無明顯改變，呈現視衛星方向縮短，速率差異約為 1-2 mm/yr，繼續向東跨過車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層速率差異越來越大，為 5 mm/yr。而 ERS 則無明顯差異，且最東側無可靠散射點。

C4 剖面跨越梅山斷層，根據圖 1-4.8 衛星影像時間序列，則以 921 地震後的 ENVISAT 時期有明顯跨斷層速率差異，約為 25 mm/yr，但主要速率增加時期為 2008 年後，應該為當地構造活動而非集集地震觸發。

C5 剖面跨越九芎坑斷層及大尖山斷層，根據圖 1-4.9，ENVISAT 衛星時間序列顯示出跨過大尖山斷層至 GPS 測站 GS17 有約 20 mm/yr 的速率，而近斷層的變形行為則是偏向於鎖住。

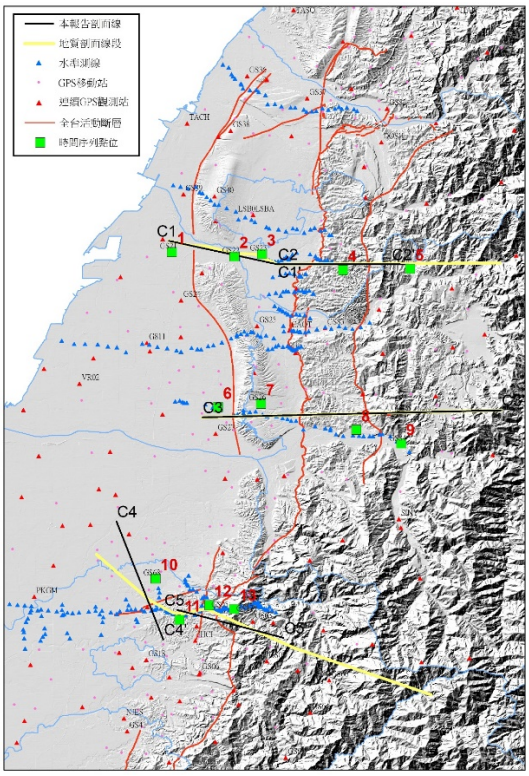


圖 1-4.4：中部地區使用之剖面線位置圖。

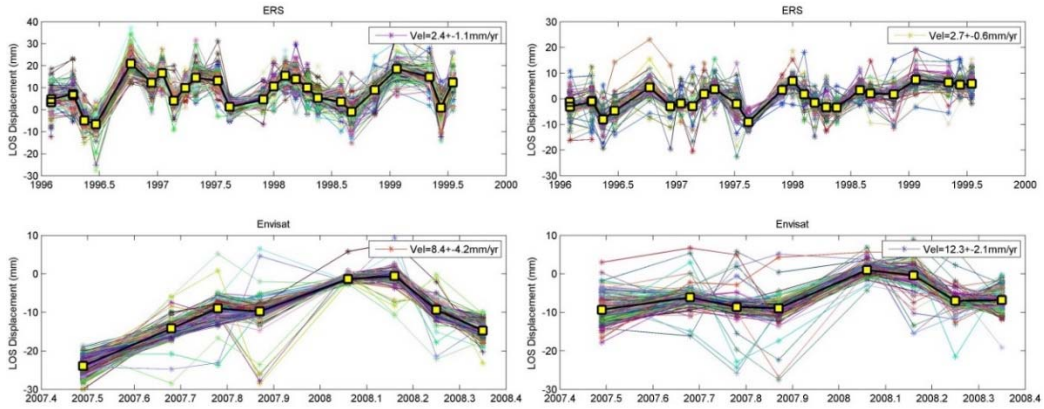


圖 1-4.5：C1 剖面時間序列，（左）彰化斷層西側；（右）彰化斷層東側。（位置如圖圖 1-4.4 綠色方框 1~2）

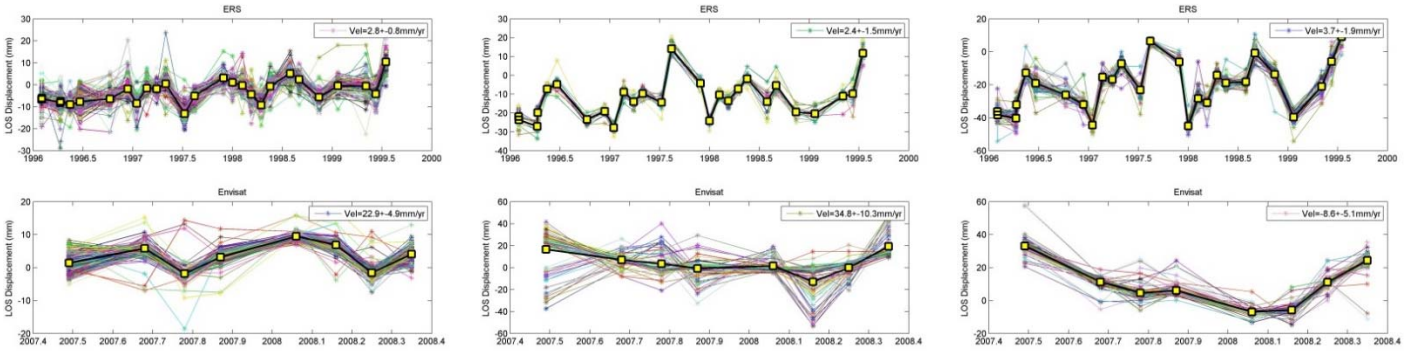


圖 1-4.6：C2 剖面時間序列，（左）車籠埔斷層西側；（中）車籠埔斷層東側與大茅埔-雙冬斷層西側；（右）大茅埔-雙冬斷層東側。（位置如圖 1-4.4 綠色方框 3~5）

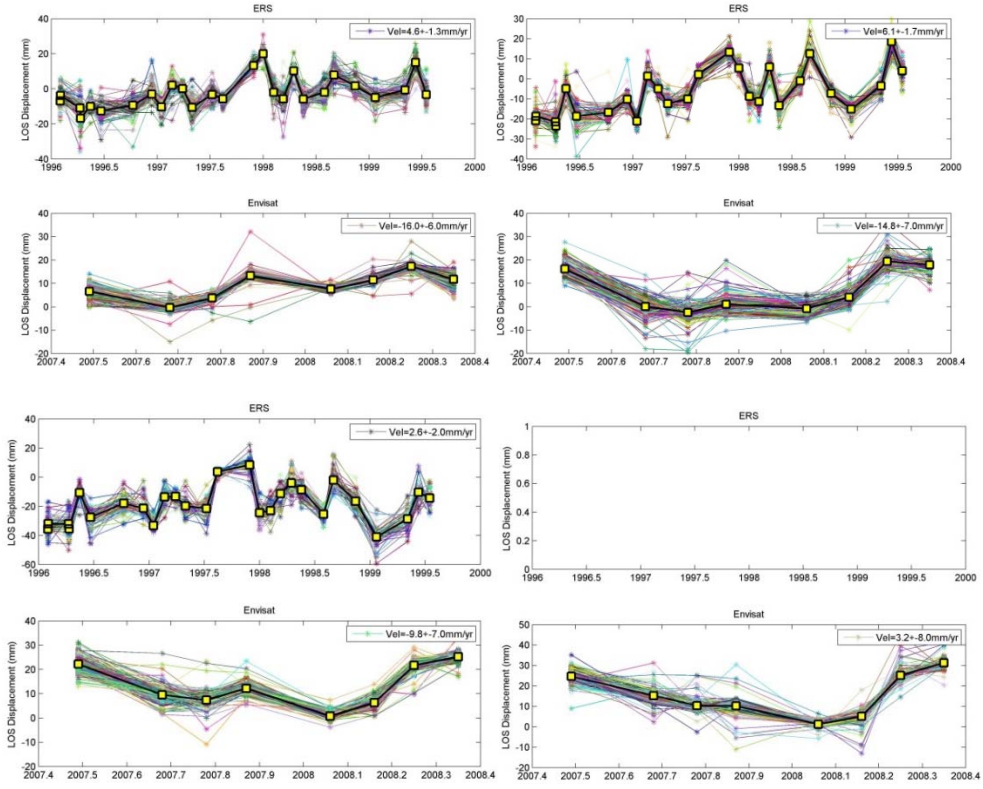


圖 1-4.7：C3 剖面時間序列，（左上）彰化斷層西側；（右上）彰化斷層東側與南段車籠埔斷層西側；（左下）南段車籠埔斷層東側與大茅埔-雙冬斷層西側；（右下）大茅埔-雙冬斷層東側。（位置如圖 1-4.4 綠色方框 6~9）

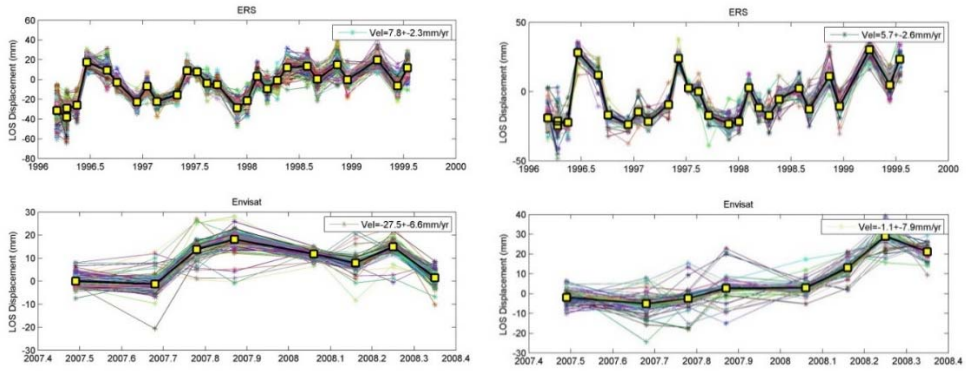


圖 1-4.8：C4 剖面時間序列，（左）梅山斷層北側；（右）梅山斷層南側與九芎坑斷層西側。（位置如圖 1-4.4 綠色方框 10~11）

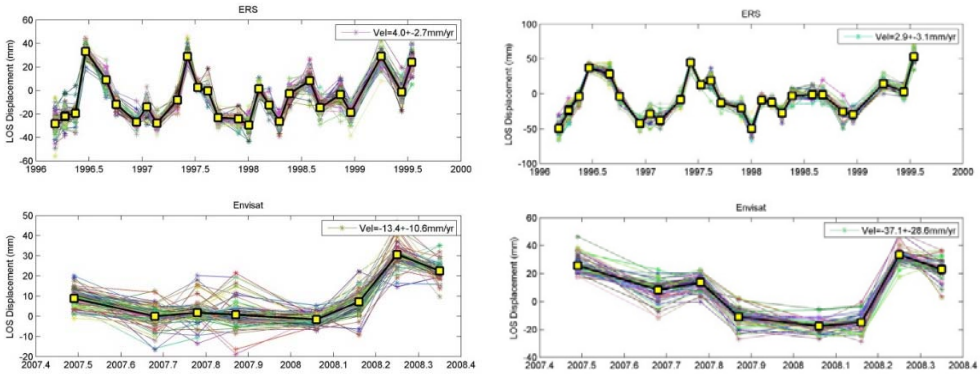


圖 1-4.9：C5 剖面時間序列，（左）九芎坑斷層東側與大尖山斷層西側；（右）大尖山斷層東側。（位置如圖 1-4.4 綠色方框 12~13）

1-4-3 中部地區斷層模型建置

在斷層模型建置方面，本期研究主要以 BLOCK、DEFNODE 與基線應變模型三個不同的斷層模型（圖 1-4.10 至圖 1-4.12），評估中臺灣七條活動斷層之斷層滑移速率或滑移虧損速率。比較三個不同斷層模型在三組不同斷層幾何參數的不符值差異，同時參考地質與地球物理資料所判斷之最佳權重，本計畫提供後續最佳之斷層幾何參數。此外，三個不同斷層模型所提供之斷層滑移虧損速率顯示，大甲－彰化斷層（~4.6 mm/yr）在 DEFNODE 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率；車籠埔斷層（~10.3 mm/yr）在 BLOCKS 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率；大茅埔－雙冬斷層（5.5±2.3 mm/yr）、梅山斷層（5.8±2.7 mm/yr）、九芎坑斷層（6.8±2.4 mm/yr）、大尖山斷層（7.9±2.4 mm/yr）與觸口斷層（5.9±1.7 mm/yr）在三個斷層模型間的推估量差異並不特別顯著。上述之滑移虧損速率將提供後續地震潛勢評估所需之斷層參數。

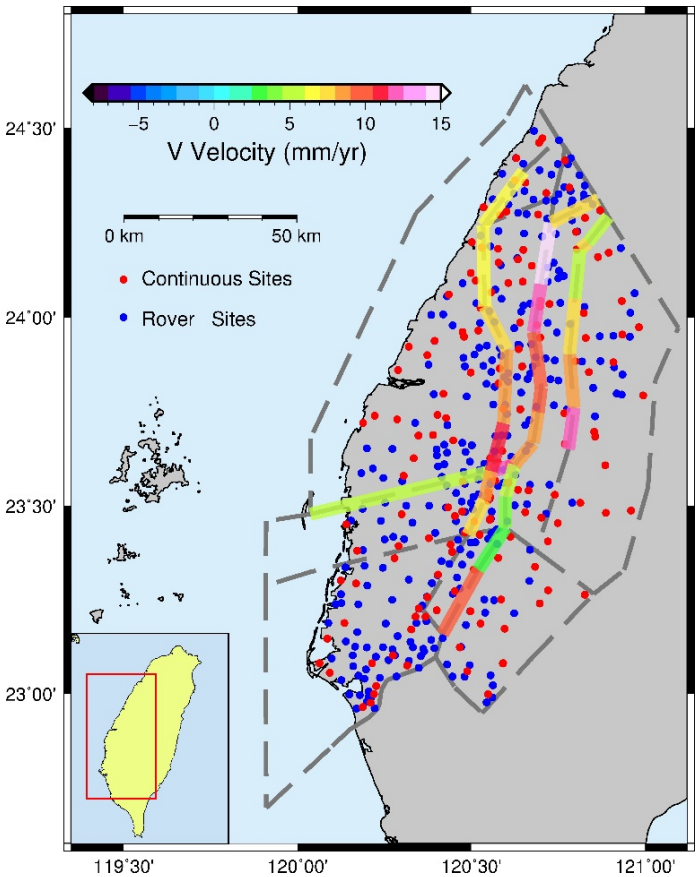


圖 1-4.10：BLOCKS 模型斷層模擬面總滑移速率。斷層總體滑移速率最大的為車籠埔斷層北段，總滑移量約為 14.3 mm/yr，為圖中縱向斷層中間粉紅色至橘紅色段落；平均滑移速率最小的為觸口斷層中段約 3.3 mm/yr，圖中為縱向斷層中間中南段最淺的綠色處。

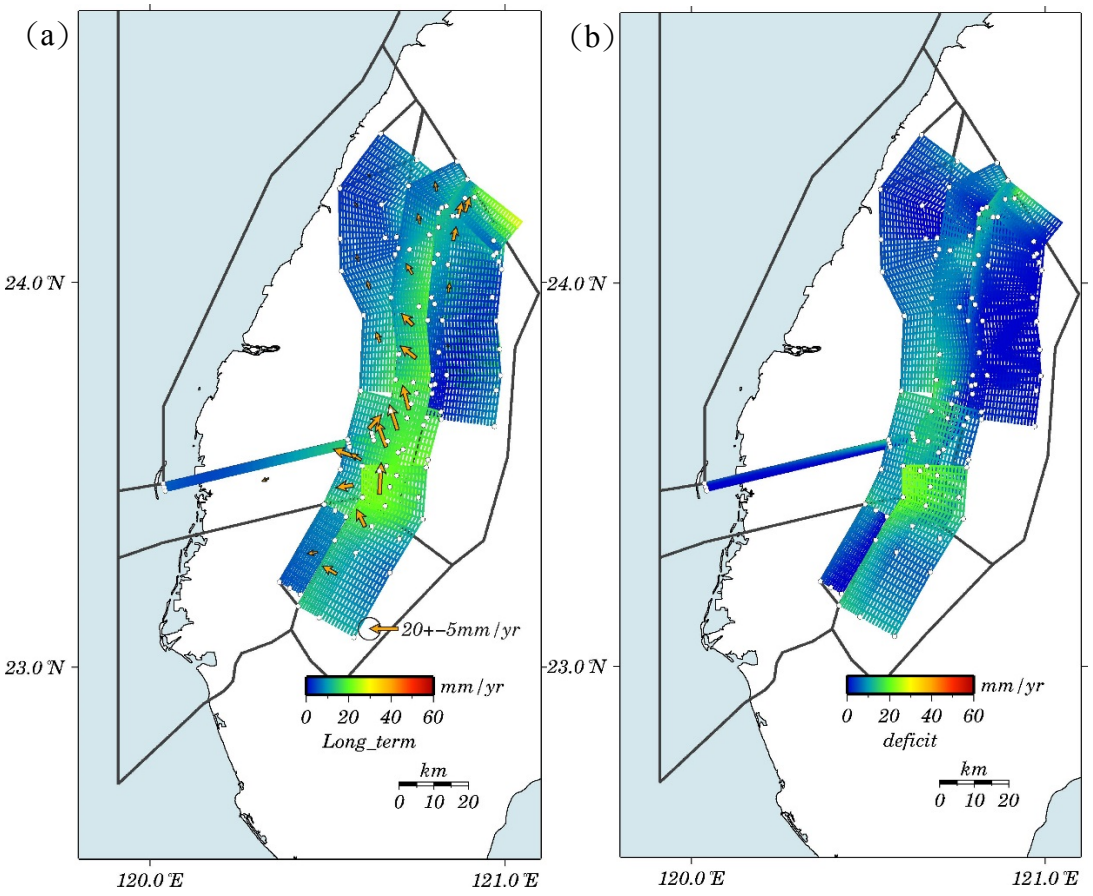


圖 1-4.11：DEFNODE 模型的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。圖上的黑體字為該模型之擬合參數結果。

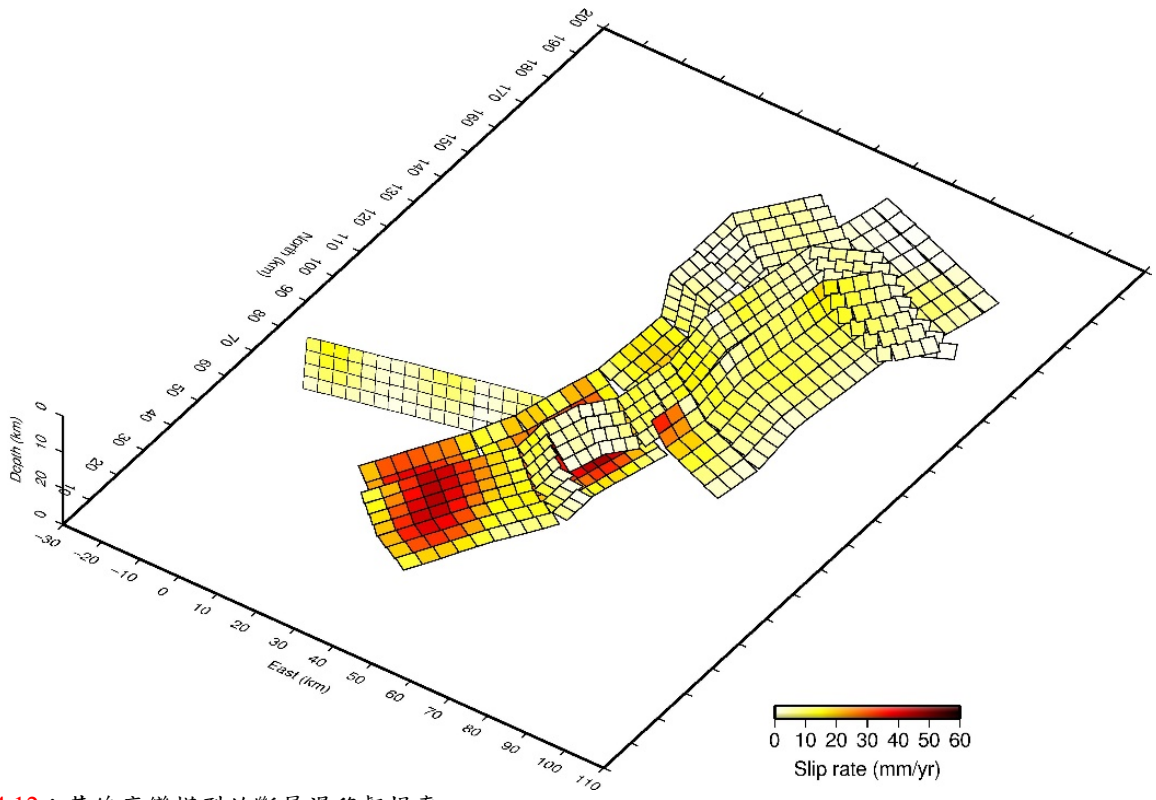


圖 1-4.12：基線應變模型的斷層滑移虧損率。

第二章、大地測量資料分析

2-1 GPS 連續站解算成果分析

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、中央研究院、中央氣象局、內政部、國土測繪中心、中正大學及經濟部水利署等單位，約 495 站。以下為計算每日坐標解之方法與流程。

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坐標。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。由圖 2-1.1 為以 GS30 與 GS63 為例，可看出利用 GAMIT 與 GIPSY/OASIS 軟體解算之結果大致相同，顯示使用 GIPSY/OASIS 解算結果之可靠度。

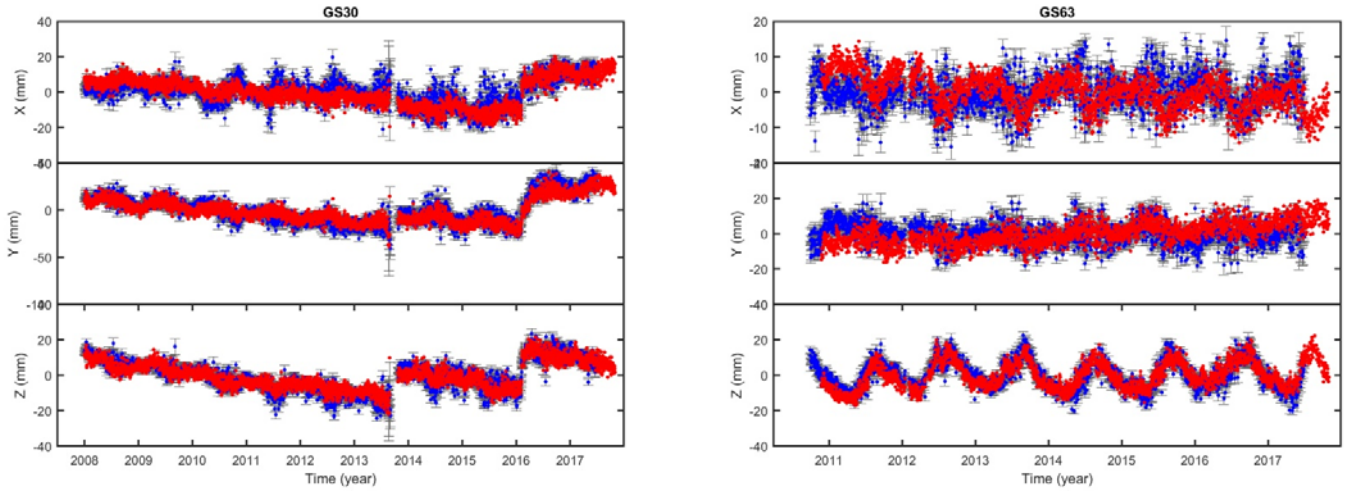


圖 2-1.1：連續 GPS 測站 GS30 與 GS63 利用 GAMIT（藍色）與 GIPSY/OASIS（紅色）解算之時間序列。

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坐標及精度估計。而這裡的數據處理採取了以下步驟：

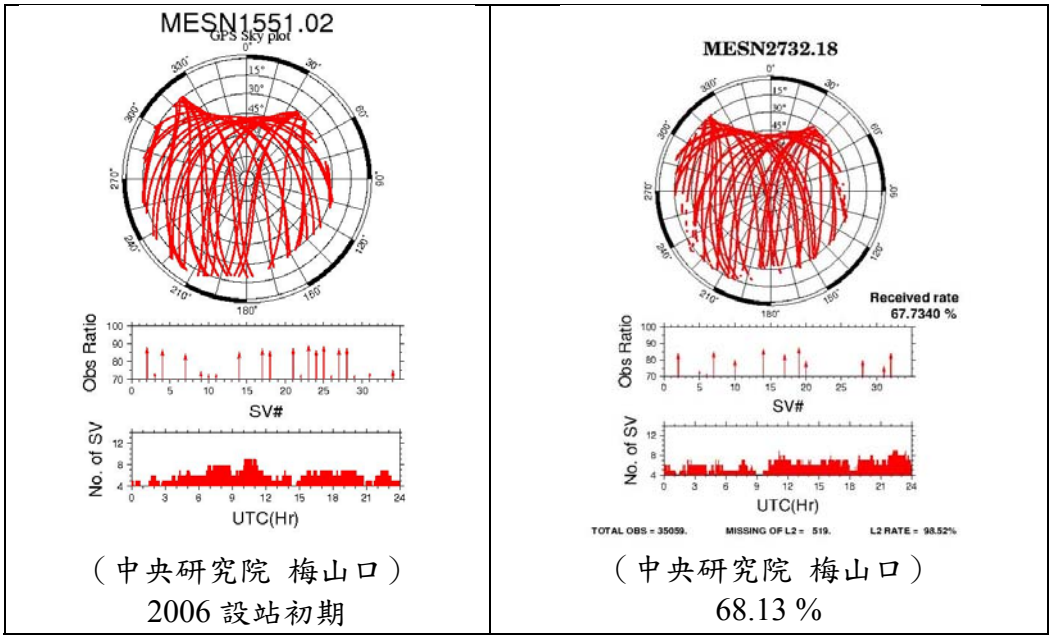
（1）在 International GPS Service（IGS）網站上獲取相應觀測日的精密衛星軌道、精密

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，獲得各點的單日坐標解，然後將所有本地站的單日坐標解合併，獲得本地網坐標及協方差矩陣的單日鬆弛約束解。自 PPP 解出之測站坐標與變方協變方矩陣中取出坐標與時間，形成測站坐標之時間序列，並轉換至地理坐標上。

2-1-2 GPS 資料品質檢測

以圖 2-1.2 中央研究院連續 GPS 測站 MESN 為例，由 2018 年 09 月 30 日點位透空圖可見得此測站東方有建築物的遮罩，而西南方則有疑似因植被遮罩而產生的資料接收不連續，相較設站初期可明顯看出衛星軌跡的不連續。



（中央研究院 梅山口）
2006 設站初期

（中央研究院 梅山口）
68.13 %

圖 2-1.2：MESN 測站資料接收度低於 80%。

此外，由圖 2-1.3 中央氣象局測站 SANI 之時間序列可明顯看出 2010 年開始因為遮蔽增加導致坐標解算產生較大之跳動進而影響速度計算，以及 PUSN 測站 2014 年後 L2 接收率下降同樣導致坐標解算產生較大之跳動影響速度計算。因此目前認為測站環境與儀器運作正常為兩個影響時間序列分析的重要因子。

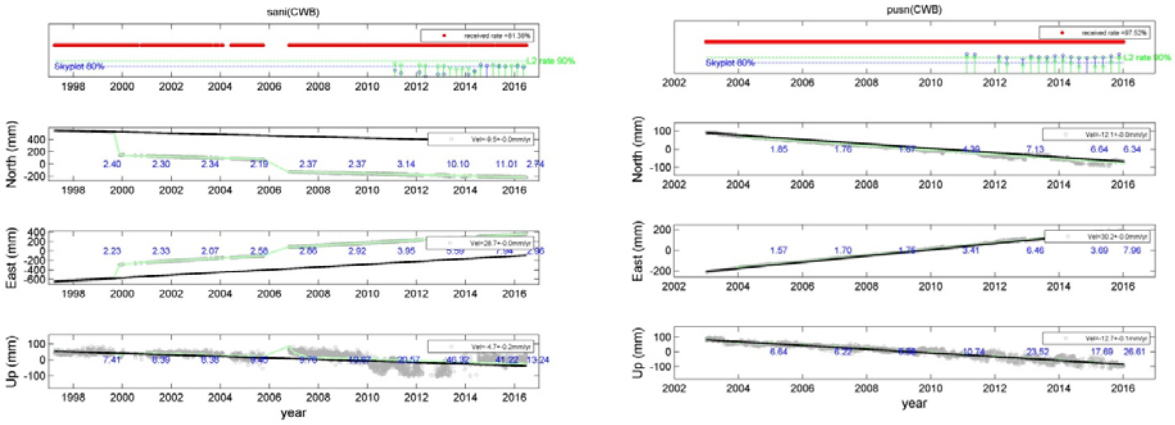


圖 2-1.3：SANI 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。

2-1-3 GPS 連續站時間序列分析

時間序列（time series）和速度場（velocity field）是 GPS 資料處理的主要成果，而其表現是地表與地下構造的運動情形，並提供有關更多地殼形變的訊息。本年度報告分析 1993 年至 2018 年 09 月的資料，輔以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。為了對觀測資料做有效的時間序列分析，首先需要對所有的 GPS 觀測數據辨別雜訊並加以剔除，如此才能真正地觀測時間序列上的微小變動，藉以瞭解斷層活動的特性。由於觀測值中的離群點會影響時間序列模型擬合的結果，因此在進行時間序列分析之前，我們針對每日解坐標誤差大於 1 cm 的資料先剔除，剩餘的坐標資料才進行進一步的時間序列分析。此外，篩選出資料時間至少兩年以上的測站進行速度場分析。對於 GPS 時間序列資料之分析，本年度我們加入考慮長時間的地殼變動、週期性之變化、以及地震引發的同震與震後活動。諸歸於此類的時間序列模式可以用下式表示（Nikolaidis, 2002）：

$$y(t_i) = a + bt_i + c\cos(2\pi t_i) + d\sin(2\pi t_i) + e\cos(4\pi t_i) + f\sin(4\pi t_i)$$
$$+\sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_{eq}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot \exp^{-(t_i - T_{eq})/\tau_j} + v_i$$

其中，a 為觀測初始坐標，b 為間震期（inter-seismic period）地殼運動速率；係數 c、d 為年週期（annual period）變化之震幅；係數 e、f 為半年週期（semi-annual period）變化之震幅；g 表示時間序列中的不連續跳動，可能為地震造成的同震位移或是人為天線更換；h 為震後線性速率改變量；k 為震後變形呈指數衰減的現象；最後 v 為殘差項；其中 H 為階梯函數（Heaviside step function），τ 為鬆弛時間（relaxation time），代表震後變形衰減至總變形量的 1/e 所需時間。

圖 2-1.4 及圖 2-1.5 為彙整歷史資料至 2018 年 09 月相對澎湖白沙站（S01R）之年速度場結果。由解算結果顯示，水平速度場在跨越縱谷斷層系統、西部麓山帶和變形前緣的速度梯度變化較大，與主要活動構造的分布吻合。臺南以南地區，新化斷層南北兩盤的水平速速

場變化較大；在新化斷層以南地區，測站速率約 3-5 cm/yr，向西或西南運動，速度場呈現逆時針旋轉，前人研究指出（Ching et al., 2007; Hu et al., 2007）此速度場逆時針旋轉，可能與構造側向擠出有關。另外北部地區則呈順時針旋轉，速度場由西北向逐漸轉向北和東北向，在宜蘭地區則由東北向漸轉至向東和東南向，且速度場由北往南漸增，其變形模式以橫移伸張（transtensional）變形為主，前人研究此變形模式主要受控於板塊碰撞和隱沒作用板塊後撤的綜合影響（Hu et al., 2001, 2002; Rau et al., 2008; Hou et al., 2009），或是構造側向擠出有關（Angelier et al., 2009）。垂直速度場方向上則以西部彰雲地區、宜蘭平原、屏東平原、中央山脈東翼以及海岸山脈北段為主要下陷區域。西部彰雲地區的地表沉降主要受超抽地下水影響（e.g., Tung and Hu, 2012）；屏東平原和宜蘭平原則可能同時受構造作用和地下水位升降所影響（e.g., Hu et al., 2006; Hsieh et al., 2011; Su et al., 2017）；海岸山脈北段下陷則可能與菲律賓海板塊向北隱沒作用往下沉有關（Wu et al., 2009）。主要的構造抬升區，以西部麓山帶和中央山脈為主，此結果與過去只使用線性迴歸結果約略相同。

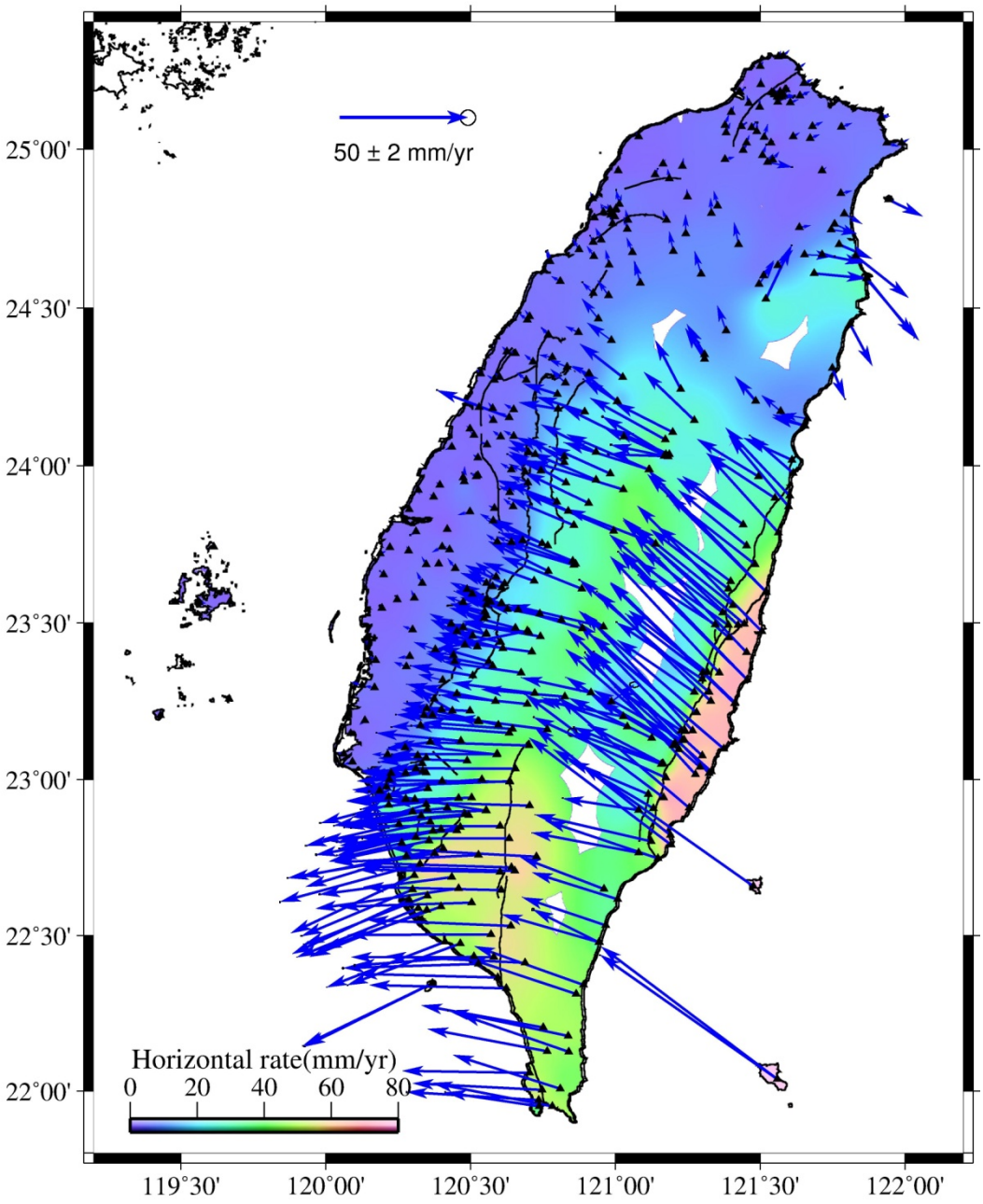


圖 2-1.4：整合歷史資料至 2018 年 09 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。

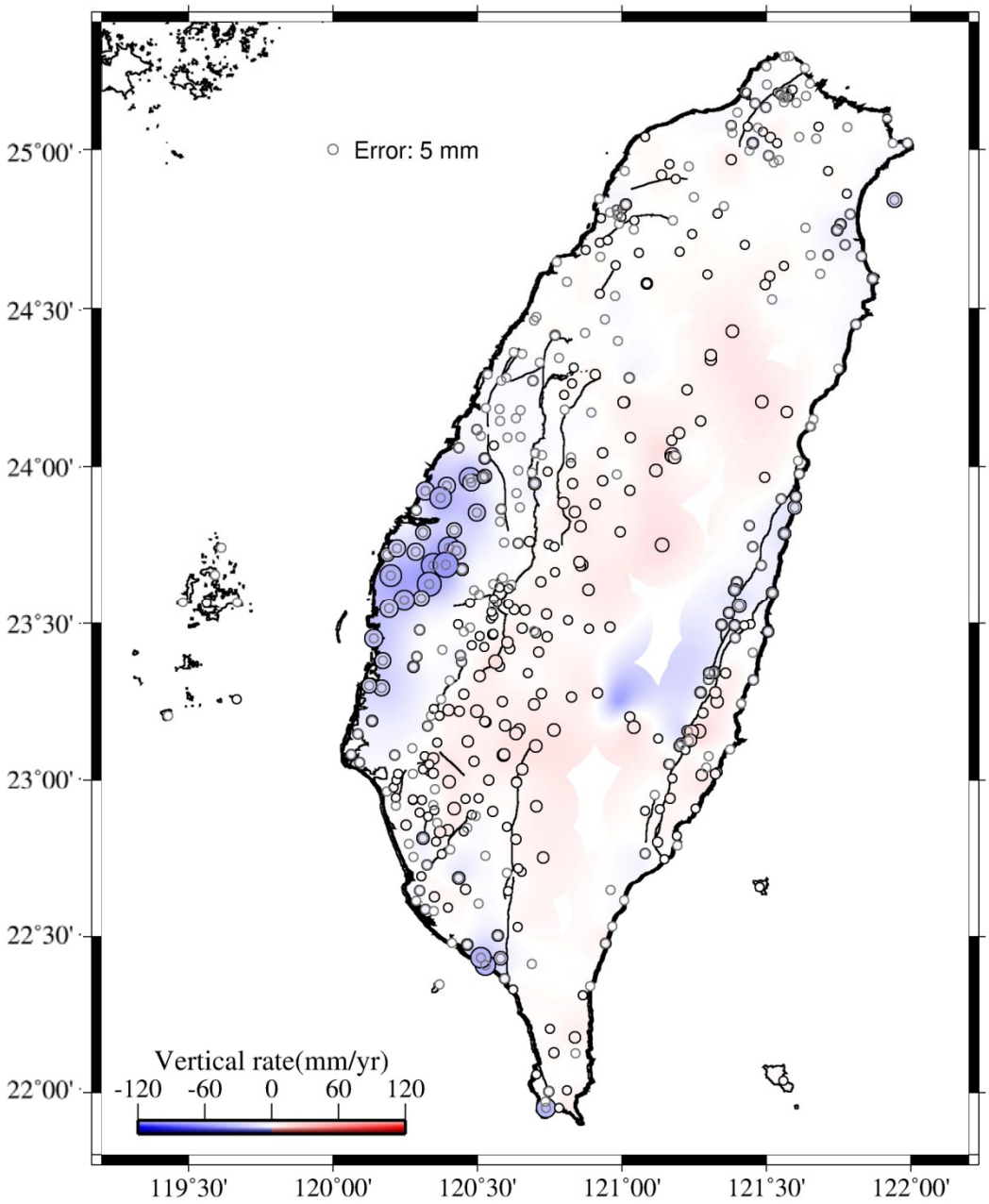


圖 2-1.5：整合歷史資料至 2018 年 09 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）（垂直方向速度場）。圓圈代表速度場誤差值的大小。

此外，中央地質調查所於 2016 年 9 月於新埔工作站架設依連續 GPS 站 GS90，經過 2 年的坐標時間序列分析（圖 2-1.6），此測站與周圍連續站運動方式截然不同，可能為現地環境的因素，建議此測站位置應重新評估。

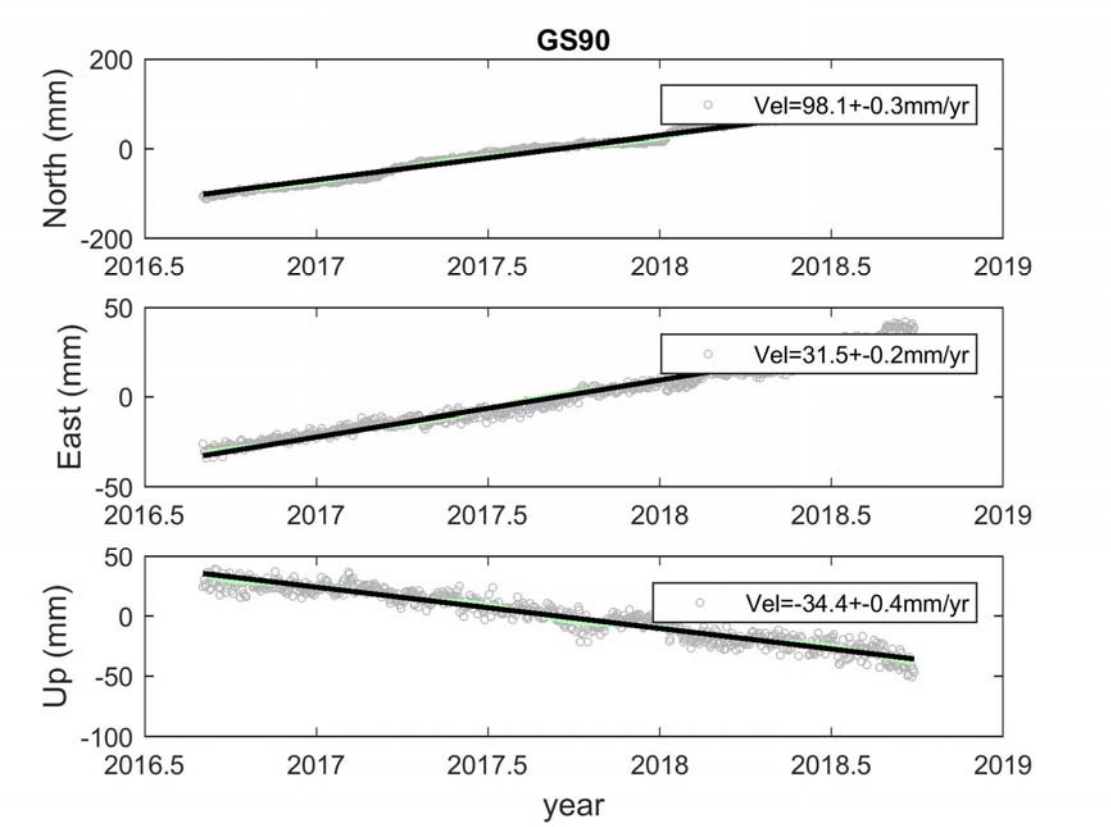


圖 2-1.6：GS90 測站資料受現地環境影響之時間序列。

2-2 今年度 GPS 移動站與精密水準測量外業督導與檢核分析

本年度至 9 月底為止，GPS 移動站部分共完成花蓮震後施測 16 個點位施測，台北地區於 3 月 5 日至 16 日完成 77 個點位施測、恆春地區於 4 月 10 日至 13 日完成 32 個點位施測、桃竹地區於 5 月 16 日至 25 日完成 104 個點位施測、嘉南地區於 6 月 4 日至 24 日完成 171 個點位施測、高屏地區於 7 月 9 日至 23 日完成 106 個點位施測、中部地區於 8 月 8 日至 30 日完成 151 個點位施測、花東地區於 9 月 3 日至 9 日完成 67 個點位施測、宜蘭地區於 10 月 8 日至 11 日完成 31 個點位施測，共計完成 739 點 GPS 移動站的施測，精密水準於 2 月花蓮地震震後進行嶺頂-瀧澗測線之加測，以及 3-9 月完成路竹-茂林主線及副線等共計 25 條測線之施測。

2-2-1 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析

為了和臺灣坐標基準有比較的基礎，本計畫資料解算採用最小約制金門連續站（KMNM）於 TWD97[2010]基準下之坐標，求解各測站於 TWD97[2010] 基準下之坐標。然而，為了確保 KMNM 站坐標時間序列之可靠度與穩定性，同時也將 KMNM 站資料與 5 個 IGS（International GPS Service）連續站資料進行聯合解算（圖 2-2.1），求解 KMNM 於 ITRF 框架之坐標時間序列。5 個 IGS 連續站分別為日本筑波連續站（TSKB）、澳洲柏斯連續站（PERT）、俄羅斯伊爾庫斯克連續站（IRKT）、美國關島連續站（GUAM）及印度班加羅爾連續站（IISC）（圖 2-2.1）。我們利用 IGS 公告各連續站於 ITRF 坐標框架下之坐標及速度場，以線性關係式推出各個連續站於任一觀測時刻之坐標，並約制此 5 個國際連續站之坐標，求解 KMNM 站於 ITRF 坐標系之坐標時間序列，確認 KMNM 站坐標時間序列之可靠度與穩定性。

在 GPS 移動站資料解算流程部分，採用 Bernese 軟體求解各測站之坐標。資料處理所需的衛星軌道資料是直接採用 IGS 提供的精密星曆，極運動改正是採用 IERS（International Earth Rotation Service）的 Bulletin B 公佈值，將 UTC 與 UT1 之差值加以修正，並將坐標值由瞬間極坐標系統修正至 J2000 平均極（CIO）坐標系統。接著利用電碼資料進行測站單點定位及接收儀時鐘改正量計算。計算出的時鐘改正量會在利用相位觀測量進行定位的步驟中被採用，使接收儀之時間能準確至 10^{-6} 至 10^{-7} 秒。下一步，將所有測站依觀測量數目的多寡，選擇兩測站間共同觀測量最多之測站組何組成基線並進行一次差分。再透過三次差分對精密星曆與衛星時錶資料進行資料編修、週波脫落之補正、時錶差修正、錯誤觀測量之移除。最後，將篩選過之相位觀測量，利用無電離層線性組合信號（L3）來解算週波未定值，並組成二次差觀測量以求解坐標參數。為避免低仰角觀測時伴隨之較大雜訊，本計畫僅處理仰角 15°以

上的觀測資料。因對流層折射效應對於 GPS 的高程定位精度有著顯著的影響，本計畫採用 Saastamoinen model（Saastamoinen, 1973），以海平面標準氣象資料推求各測站的對流層改正起始值，並引用大氣資料進行對流層折射影響量的改正參數。以各測站每 2 小時增加 1 個參數之方式加以吸收殘留的對流層折射誤差。

由於環境變化與隨機誤差的存在，使得 GPS 坐標時間序列會呈現離散跳動的型態，因此本計畫採用坐標殘差及均方根誤差分析兩種方式來查核資料計算結果的穩定性。坐標殘差（residual）分析是將各站每次測量所獲得之坐標觀測值與擬合曲線上之坐標計算值相減，將所獲得之坐標殘差值進行統計，在測量學中又稱為外部誤差。在理想狀況下，如果坐標計算成果是穩定的，此殘差值會近乎等於零；均方根誤差（RMS error）分析為針對各測站每次坐標解算時所產生的均方根誤差量進行統計，在測量學中又稱為內部誤差。

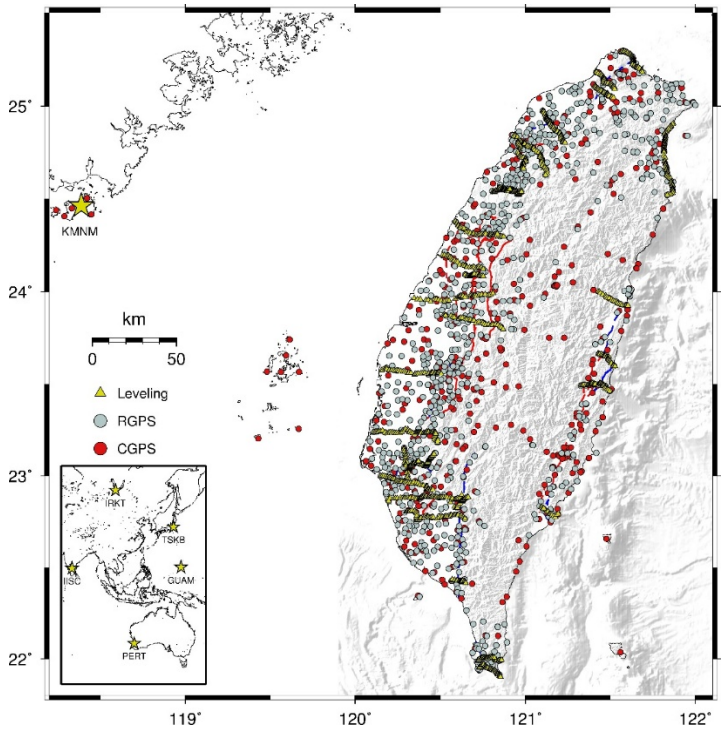


圖 2-2.1：臺灣地表變形監測網。灰色圓圈為 GPS 移動站，紅色圓圈為 GPS 連續站，黃色三角形為精密水準點位，黃色星號為金門連續站。紅色實線與藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層分布位置。左下圖黃色星號為本研究使用之 IGS 連續站。

根據 GNSS 坐標殘差之分布情形指出（圖 2-2.2），2002－2017 年 N 方向之殘差值 95% 信賴區間為 0.3 ± 4.2 mm；E 方向為-0.1 ± 4.9 mm；H 方向為-0.1 ± 15.6 mm，2018 年截至 9 月底為止 N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.3 ± 2.7 mm；E 方向為-0.3 ± 3.8 mm；H 方向為 0.1 ± 16.3 mm。而 2002－2017 年平面坐標之均方根誤差平均值為 9.8 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 22.1 mm，2018 年平面坐標之均方根誤差平均值為 8.6 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 21.3 mm（圖 2-2.3）。換言之，GNSS 移動站坐標的平面精度約在 10 mm 左右，高程精度約在 20 mm 至 30 mm 左右。

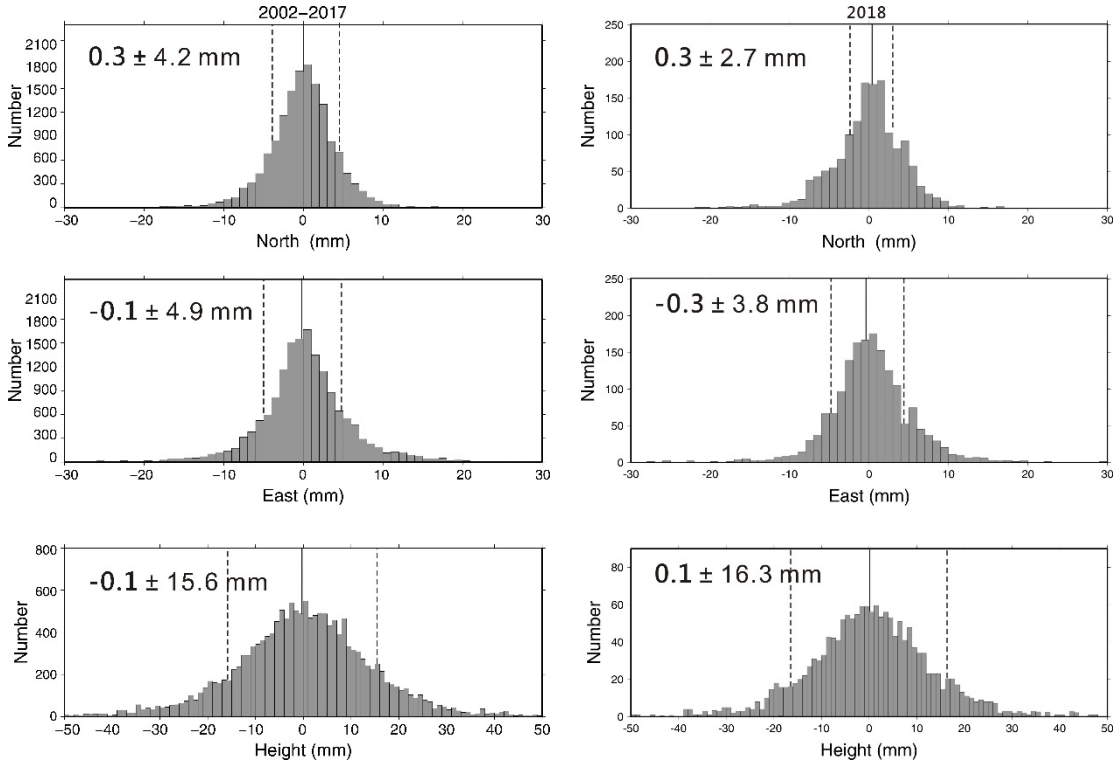


圖 2-2.2：2002-2017 年及 2018 年截至 4 月底 GPS 點位坐標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95% 信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

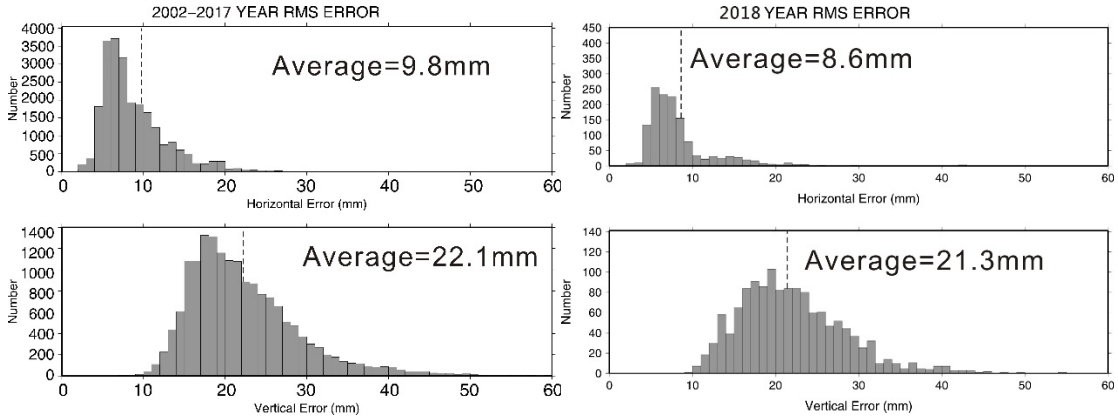


圖 2-2.3：2002-2016 年及 2017 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

2-2-2 精密水準測量精度分析

水準測量是一門古老但卻是高精度獲得相對高程的測量方法，其使用的儀器相當簡單，僅是在一望遠鏡上裝置有一水平氣泡，而透過此一保持水平的望遠鏡讀取前後二根有刻劃的水準尺，而用以估計此兩根水準尺之立足點間的高程差。至今除了在水準尺刻劃的精度，尺的熱膨脹係數，水準儀氣泡的精度以及其架裝微米尺來改進讀數的精度外，其他均無任何改變。

水準測量誤差來源分為儀器誤差、觀測誤差及受外界因素影響的自然誤差。按其影響的性質則分為偶然誤差（隨機誤差）和系統誤差兩類。對系統誤差而言，有些可通過選線或觀

測的安排加以消除或減弱 （許榮欣和高書屏，1996）。在精密水準測量中，最常注意的系統誤差包括有：（1）視準軸誤差、（2）折射誤差、（3）地球曲率改正、（4）水準尺溫度改正、（5）水準尺刻劃改正與（6）正高改正。這些系統誤差在嚴格的精密測量程序中，如：規定往返測必須在不同的環境中進行、相鄰兩測站採用不同之觀測次序、每測段的總測站為偶數等方法，均可消除一些系統性誤差的影響。然而，縱使依照如此嚴格的觀測程序，最後仍會存有部分的系統誤差必須依靠儀器之校準與修正模式來消除或降低（劉啟清，1986）。這些系統誤差的修正方法，主要參照 Ching et al. （2011b）使用的方式。其中，因為本研究分析水準資料的目的在於求取垂直速度場，在此計算過程中，正高改正量會因為是定值而被移除掉，所以不進行正高改正的系統誤差修正。

2018 年 12 月底前所獲得共計 700 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 694 個測段（圖 2-2.4a），佔所有測段比例之 99.1 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 97.0 %（679 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 99.9 %（699 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 674 個測段達測段達 96.3 %（圖 2-2.4b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

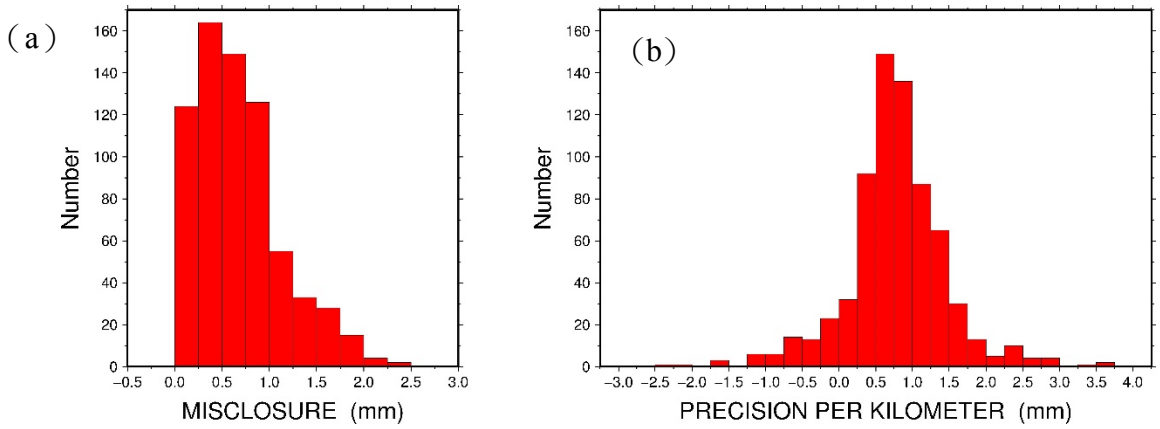


圖 2-2.4：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。（a）為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.25 ~ 0.5 mm 上。（b）為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

2-3 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 解算成果比較

我們比較採用 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 分別解算的移動站每日解，計算各移動站的水平、垂直速率估值（圖 2-3.1，圖 2-3.2），剔除不合理的移動站，例如：時間涵蓋長度有明顯差異者，發現：整體而言，兩種軟體的結果相當類似，水平方向的相關係數達 0.99 以上，垂直方向相關係為 0.84，相關性稍低於水平方向。計算相關係數時兩種解的自由度相同，都為 231。移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果如圖 2-3.3。速度估值的差異在南北、東西、垂直三分量上平均分別為-0.37、0.87、-0.14 mm/yr，如圖 2-3.4。顯示兩種解算軟體的速度估值差值都< 1 mm/year，造成此速度差值的原因之一是殘餘的系統誤差，因為大部份軟體在解算 GPS 資料時，雖然都有提供若干選項，但同時也在內部有許多處理方法沒有開放給使用者調整，例如在多路徑效益、天線相位中心、非長期線性（nonsecular）的地表信號等（Belwitt, 2015），導致不同軟體的解算結果存在少量的系統性。然而因數量級不大，對於後續的逆推影響並不顯著。

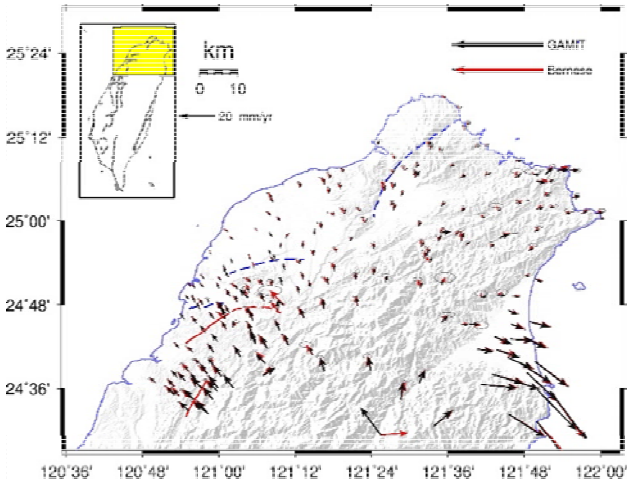


圖 2-3.1：北部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2018 年 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示 Bernese 解算速度場，黑色箭頭表示 GAMIT 解算速度場。

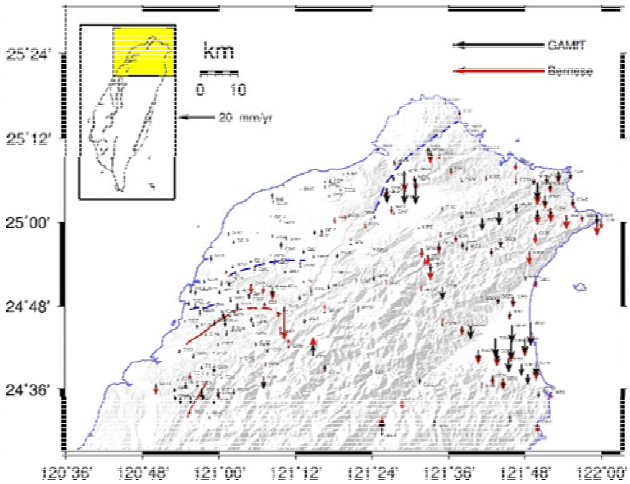


圖 2-3.2：北部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2018 年 GPS 垂直方向速度場，紅色箭頭表示 Bernese 解算速度場，黑色箭頭表示 GAMIT 解算速度場。

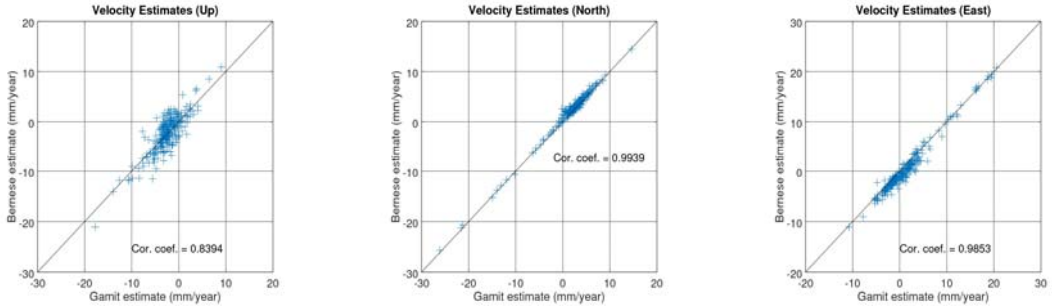


圖 2-3.3：移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果。

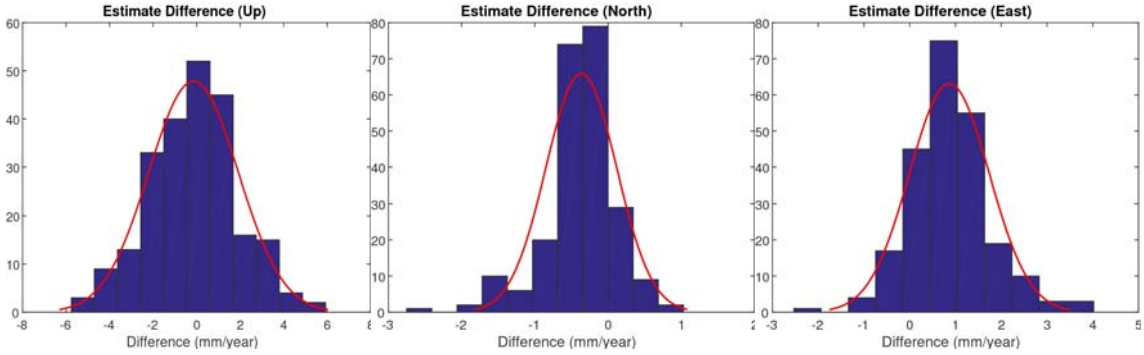


圖 2-3.4： 兩種軟體解算的速度估值的差值(Gamit 結果減去 Bernese 結果)，差值在南、北、東西、垂直三分量上平均分別為-0.37、0.87、-0.14 mm/year

2-4 台灣各分區之 GPS 移動站與精密水準觀測成果分析

2-4-1 地表速度場之推求

本計畫主要是利用坐標時間序列分析的方式來推估 GPS 與精密水準資料之速度場。由於 GPS 移動站與精密水準的觀測頻率為每年一次，因此在時間序列擬合上，並無考慮年週期或半年週期的影響。接著，在考慮地震對地表位移所造成的影響，本研究根據時間序列的型態特性，分別利用下述 3 個方程式，針對第 n 個測站的第 i 個坐標分量時間序列，採用最小二乘法進行擬合，評估各測站之速度場。

（1）若觀測期間並無地震造成之明顯地表位移，本研究採式 2.1 進行擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + v \qquad （式 2\text{-}4.1）$$

其中 a 為截距，b 為測站速率，v 為殘差值，t_i 為時間。

（2）若觀測期間內，有地震造成明顯之同震位移，但是地震前後之速度量並無明顯改變，本研究採用式 2.2 進行擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_i) + v \qquad （式 2\text{-}4.2）$$

其中 c_j 為地震造成之永久位移量，n_c 為有產生永久位移量之總地震數，T_j 為地震發生時間，H 為階層函數。

（3）若觀測期間內，不但有因為地震造成的明顯同震位移，且地震前後之速度量也不一致，本研究則採用式 2.3 進行擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_i) + \sum_{j=1}^{n_d} d_j H(t_i - T_i) + v$$

（式 2-4.3）

其中 d_j 為地震後之速度改變量，n_d 為有產生地震後速度改變量之總地震數。

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（Langbein and Johnson, 1997）。根據 GPS 站長期觀測資料所獲得的經驗值，本計畫根據 Ching et al. （2011a）提供的經驗式重新估算由最小二乘法所獲得各速度值之誤差量。

就精密水準的測量成果而言，同樣是利用式 2.1-式 2.3 來擬合水準坐標時間序列，推估精密水準資料之垂直速度場。由於精密水準獲得之高程坐標為相對高程值，會受到參考點高程設定之不同而變化。此外參考點坐標時間序列的穩定性，也會因誤差傳播的效應，影響其

他水準點位之速度精度。因此，本計畫會先測試不同參考點之時間序列穩定性，挑選最佳之參考點來計算該測線之相對垂直速度場。然而，在討論水平速度場時，根據 Yu et al. （1997）的建議，本計畫水平速度場採用之參考站為澎湖白沙 S01R 站。因此，為了讓臺灣地表速度場有統一的參考點，且澎湖白沙站相對於地心也確實近乎不動，本計畫採用以下的策略，重新計算各水準垂直速度場相對 S01R 測站之速度值。首先，假設 GPS 連續站與水準點共點，則兩者之垂直速度差異，即是兩個速度場參考點的速度差異，因此可直接將水準垂直速度場修正至相對 S01R 測站之速度值。若該水準測線上並無和 GPS 連續站共點之水準點，我們可以合理地假設，如果 GPS 連續站和水準點位間的距離越接近，則兩者的垂直速度將越一致。因此，本計畫會尋找距離水準點位最接近且坐標時間序列較穩定的 GPS 連續站，假設該站與其最近之水準點為共點，來進行速度場參考站之轉換，獲得相對於測站 S01R 的垂直速度場，截至 2018 為止，已增設 19 點精密水準測線與連續站（圖 2-4.1），惟部分 GPS 連續站因架設時間較晚且該地區發生速度變化，因此僅在較穩定之區域約制該共點站速度。

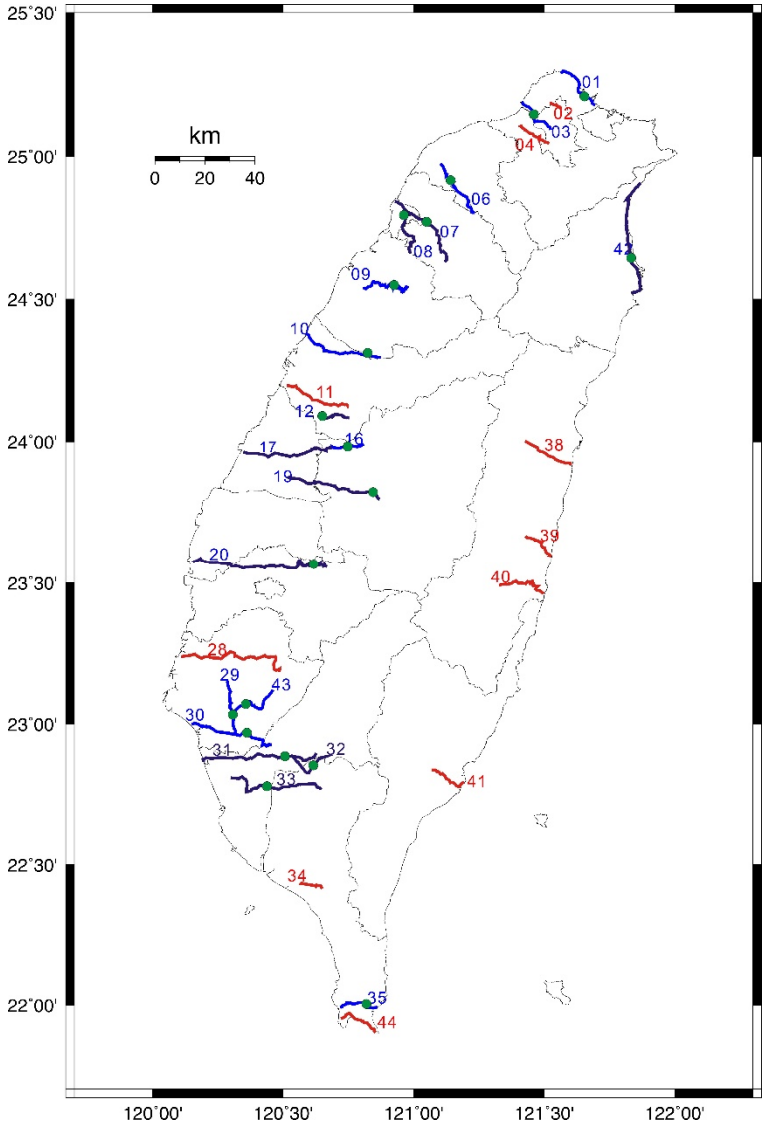


圖 2-4.1：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖，藍色表示新增共點之測線，紅色表示尚未新增之測線，綠色點位表示共點點位位置。

2-4-2 臺北地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之臺北地區觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 77 點位施測，檢查各點坐標時間序列可發現，GA98（山腳二號橋）解算結果與歷年差異較大，現地勘查可知該點位受場址影響產生位移（圖 2-4.2），但椿位尚稱穩固，將在速度場求取時針對此一事件進行修正（圖 2-4.3），並關注後續坐標位移變化，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坐標時間序列。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 2-4.4）可比對坐標時間序列之組合為 GOLI-GG44、PLIN-GF13、GS10-GA69、GS13-GA97、YM01-2101 及 YMSM-GB05 六組，由坐標時間序列比對可知，除 GS10-GA69 竹圍國小及竹圍國中兩點高程方向差異較顯著外，其餘移動站與連續站坐標時間序列型態皆相符（圖 2-4.5），而兩點皆位於大屯山山腳，GS10 位於土堤圍牆上方，可能是垂直速度差異較大的原因。



圖 2-4.2：臺北地區 GPS 移動站 GA98 周圍環境圖。

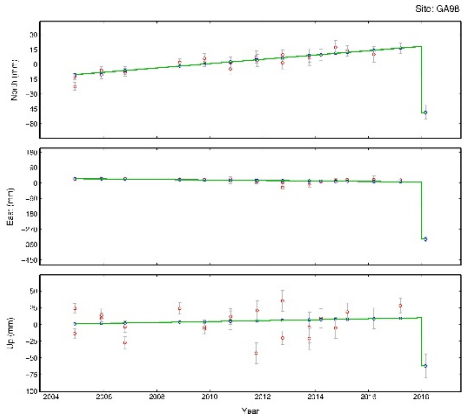


圖 2-4.3：臺北地區 GPS 移動站 GA98 坐標時間序列。

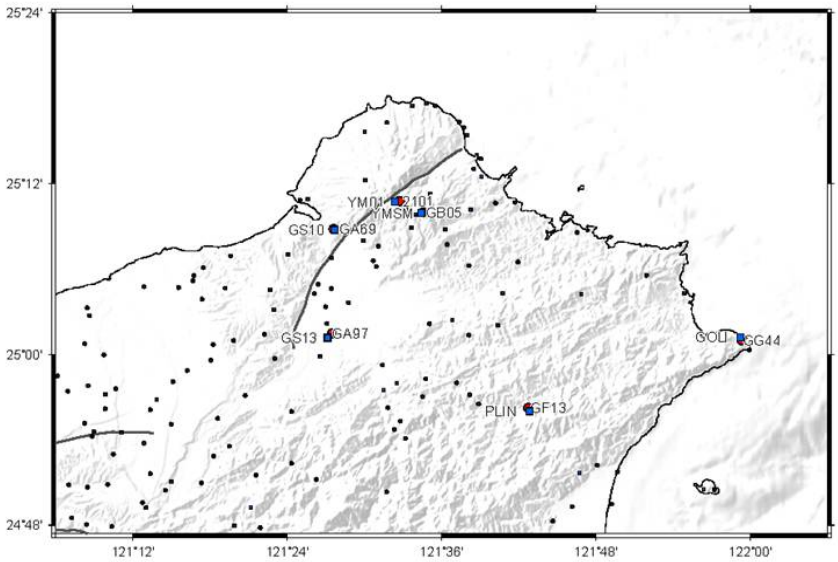


圖 2-4.4：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

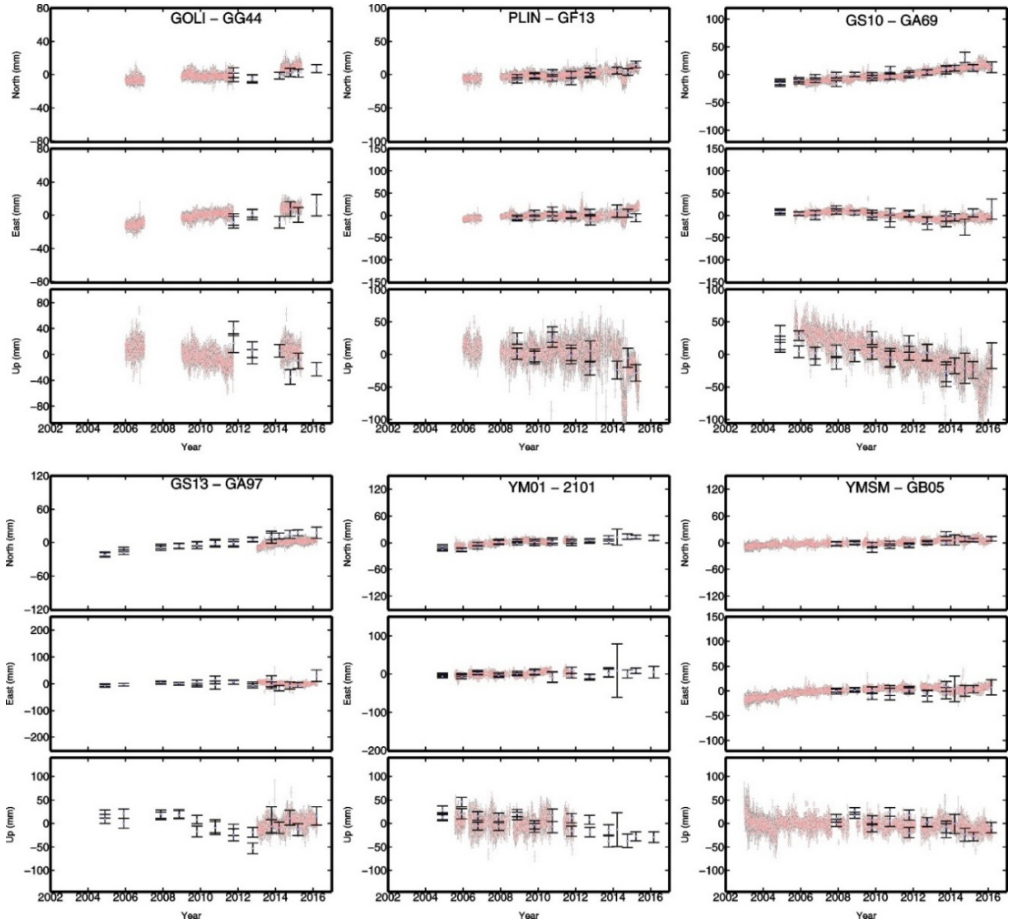


圖 2-4.5：2002-2018 年臺北地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之坐標時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之坐標時間序列分布情形。

臺北地區的水準測線包含台 2_石門至萬里、士林至三芝、淡水至士林、五股至台北共四條，其中台 2_石門至萬里測線橫跨山腳斷層，測線長約 20 公里，2004 至 2018 年間共進行 15 次施測，該測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-2.1 mm/yr 與-2.1 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 2-4.7 及圖 2-4.8）。

根據圖 2-4.10，該測線垂直速度均落在 -6 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。

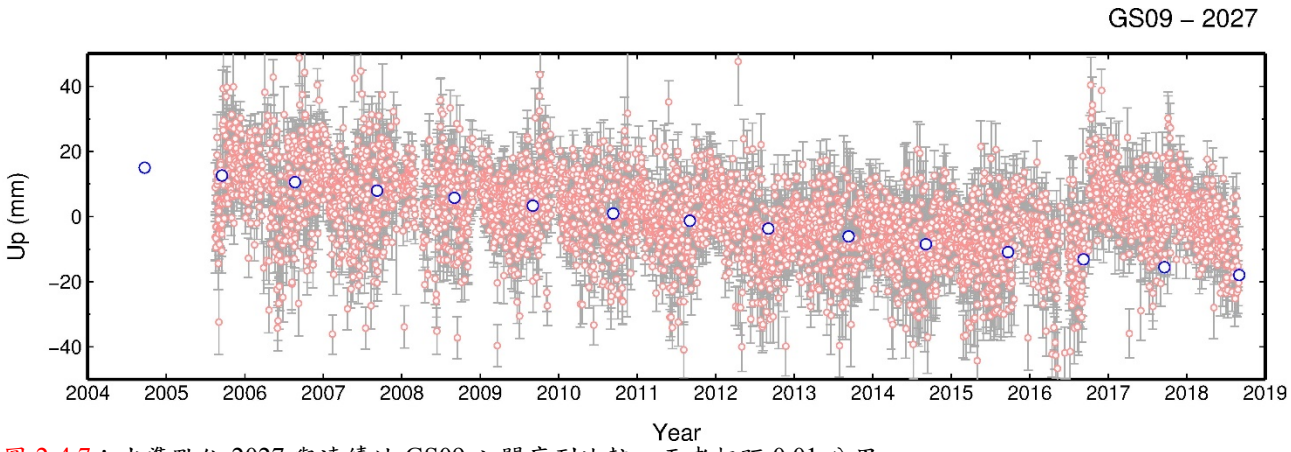


圖 2-4.7：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

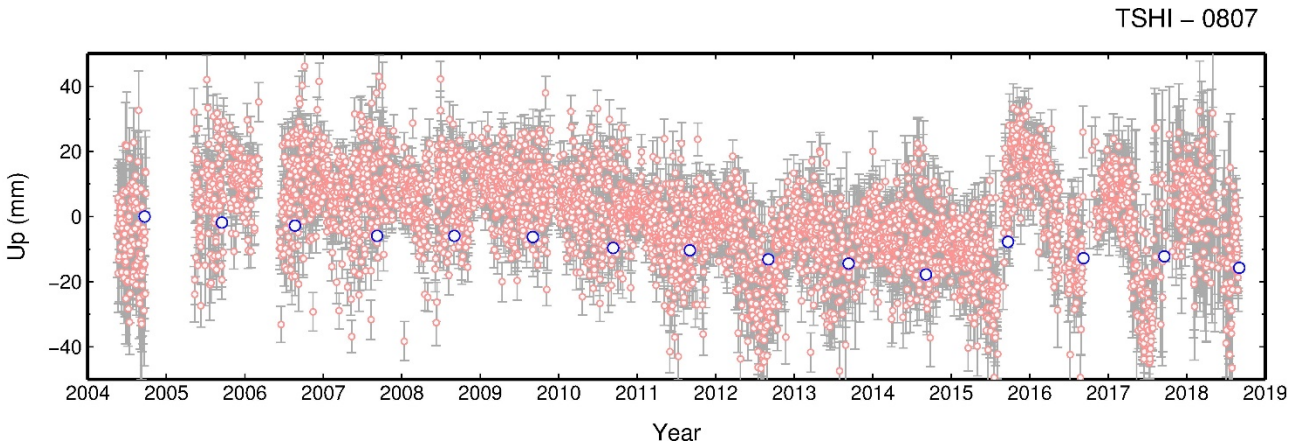


圖 2-4.8：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較，兩者相距 0.08 公里。

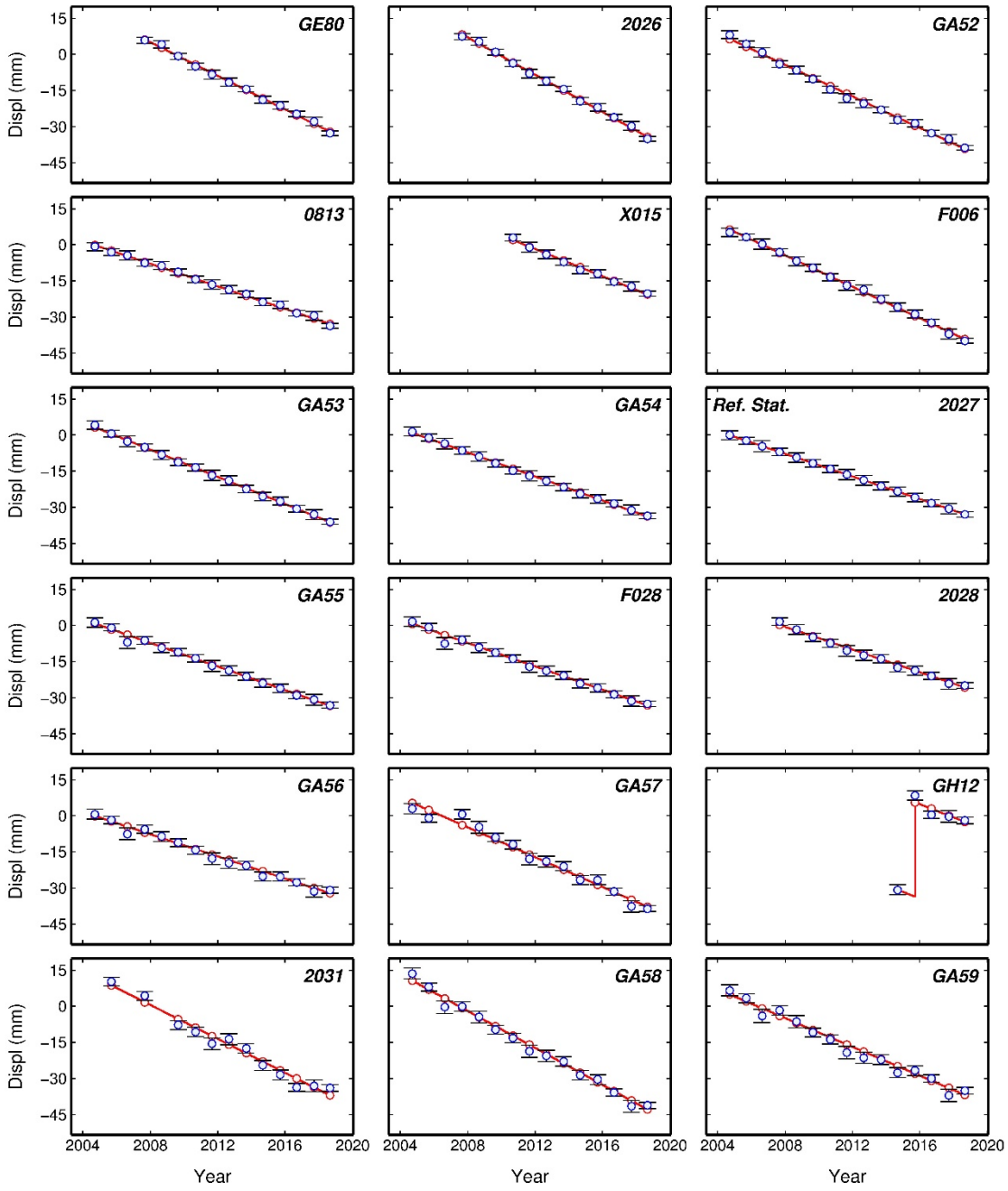


圖 2-4.9：石門至萬里測線之時間序列。

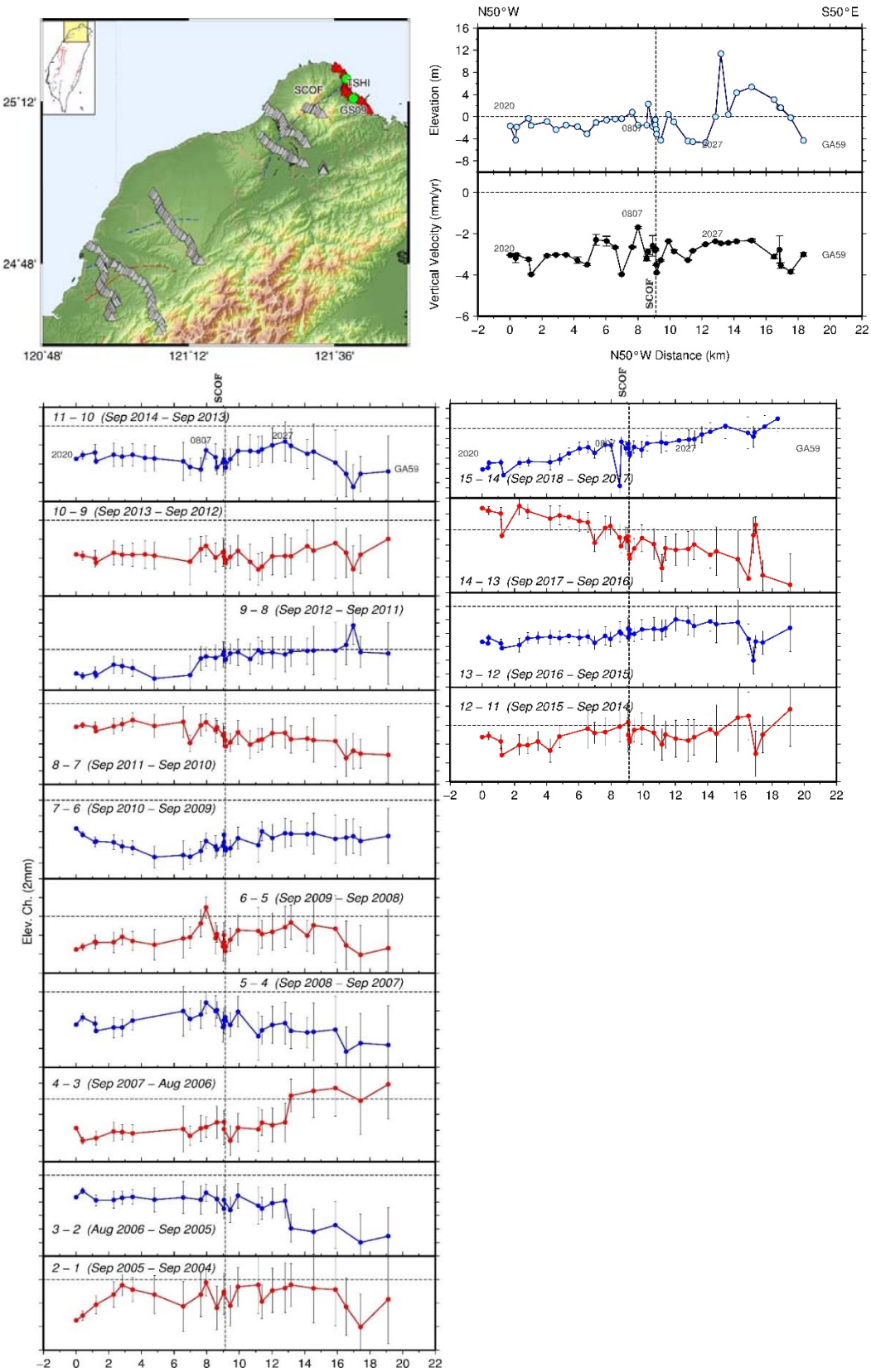


圖 2-4.10：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

士林至三芝測線跨越山腳斷層，測線長約 5 公里。該測線 2004 至 2018 年間共進行 15 次測量。本測線以 GPS 連續站 YMSM 之垂直速率（-0.6 mm/yr），作為約制點來校正 GB06 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.13）。

根據圖 2-4.13，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。跨斷層之垂直速度變化非常不明顯（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。

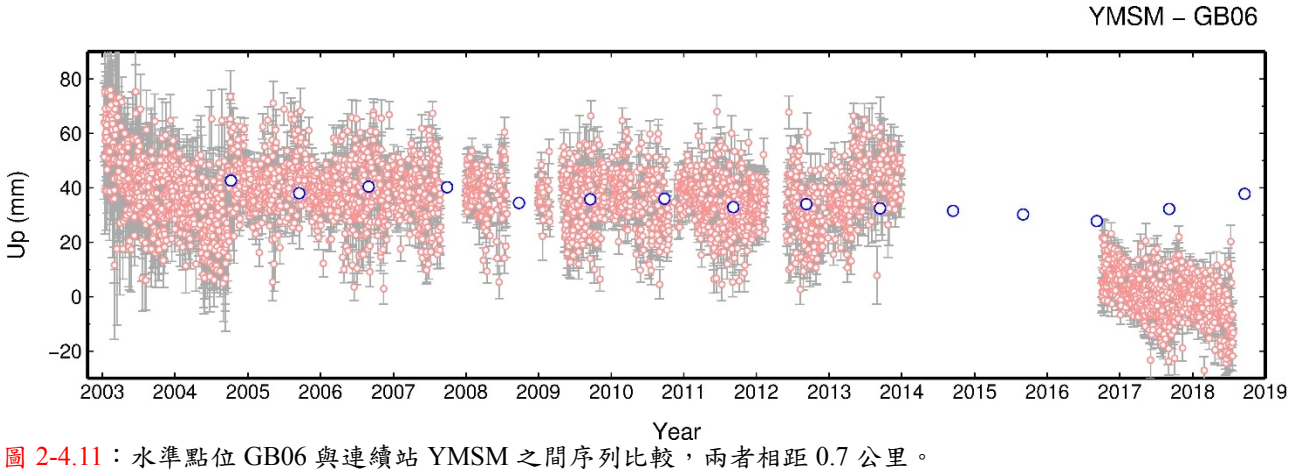


圖 2-4.11：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較，兩者相距 0.7 公里。

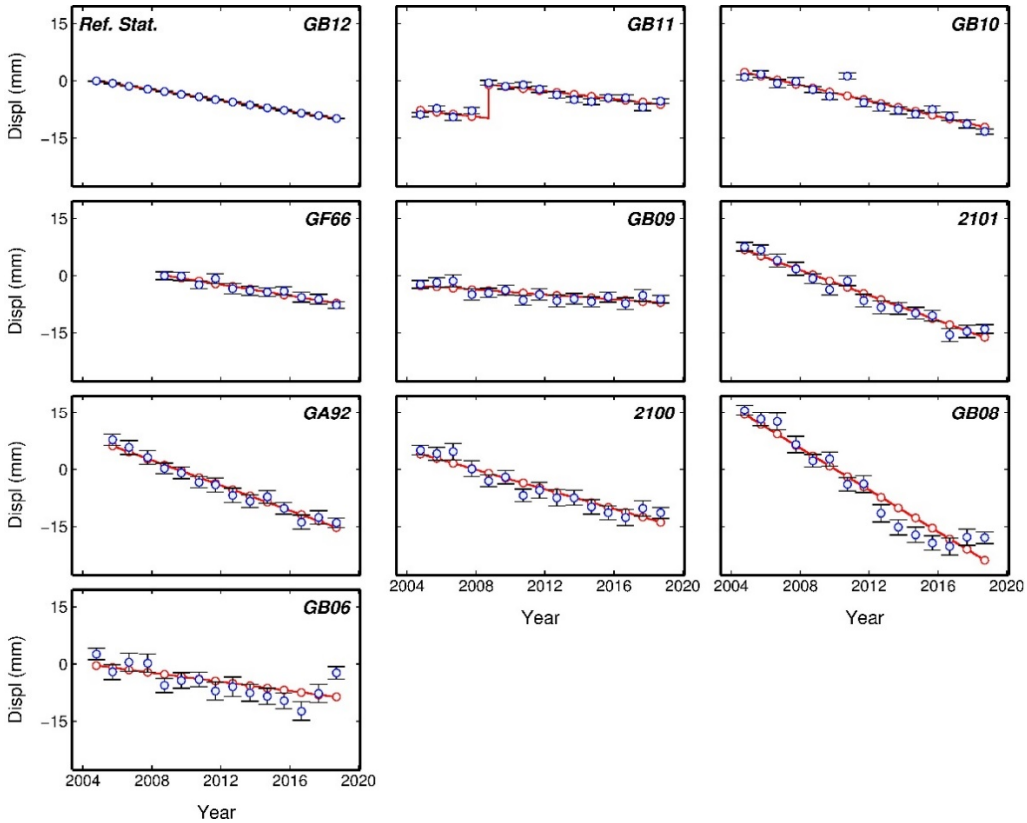


圖 2-4.12：士林至三芝測線之時間序列。

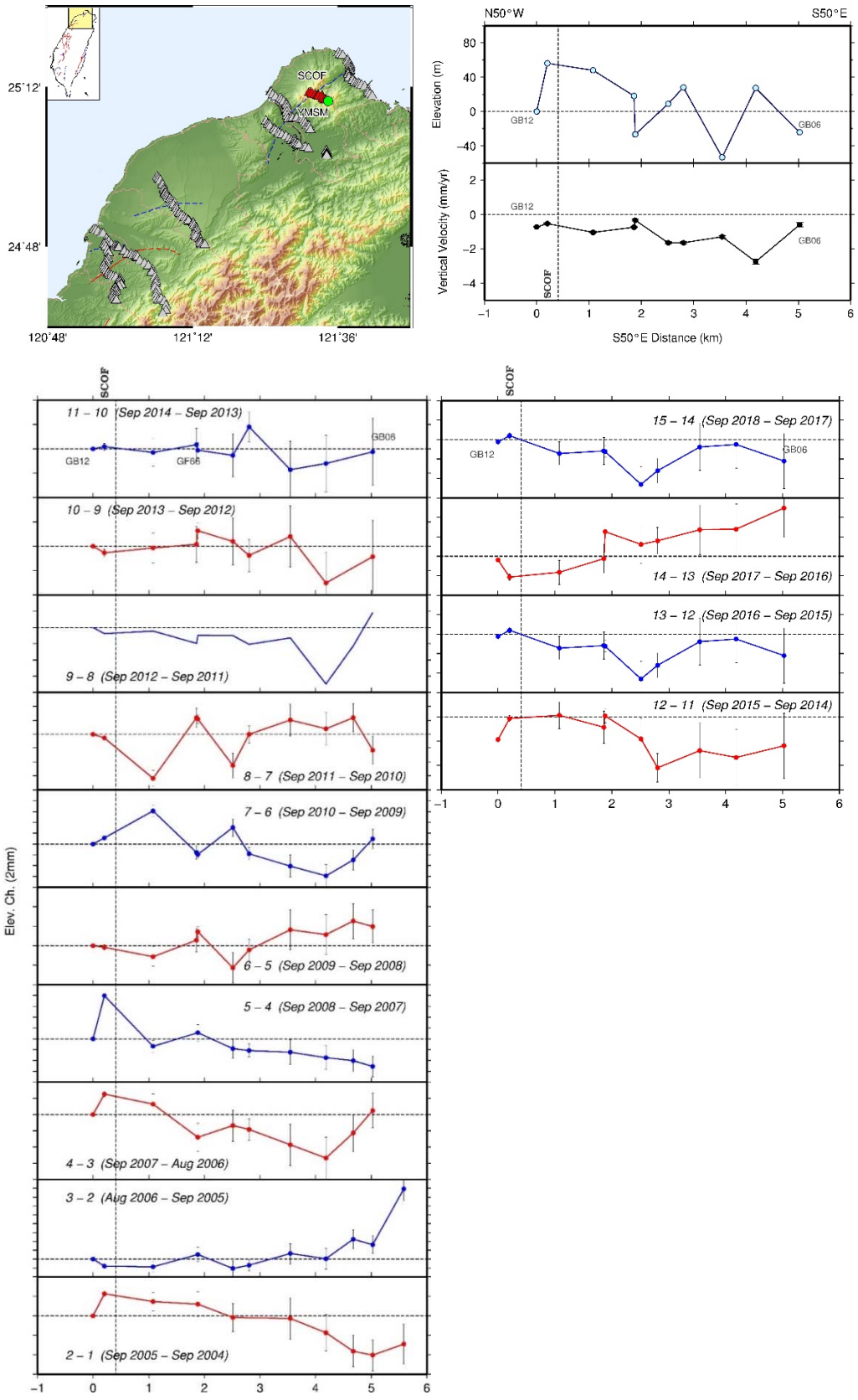


圖 2-4.13：士林至三芝測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

淡水至士林測線橫跨山腳斷層，測線長約 16 公里，在 2004 至 2018 年間進行共 15 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 及 TANS 之垂直速率（-7.5 mm/yr 及-3.3 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 2-4.14 及圖 2-4.15）。

根據圖 2-4.17，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 2007~2018 之歷年高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由-30 mm 至-10 mm，顯示山腳斷層東側之沉陷量有逐年減少的趨勢。

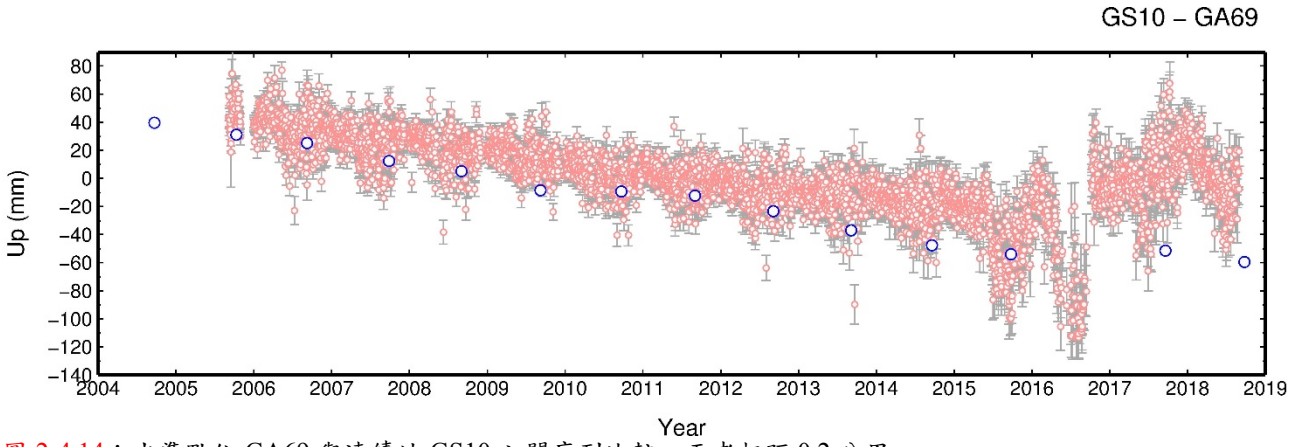


圖 2-4.14：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較，兩者相距 0.2 公里。

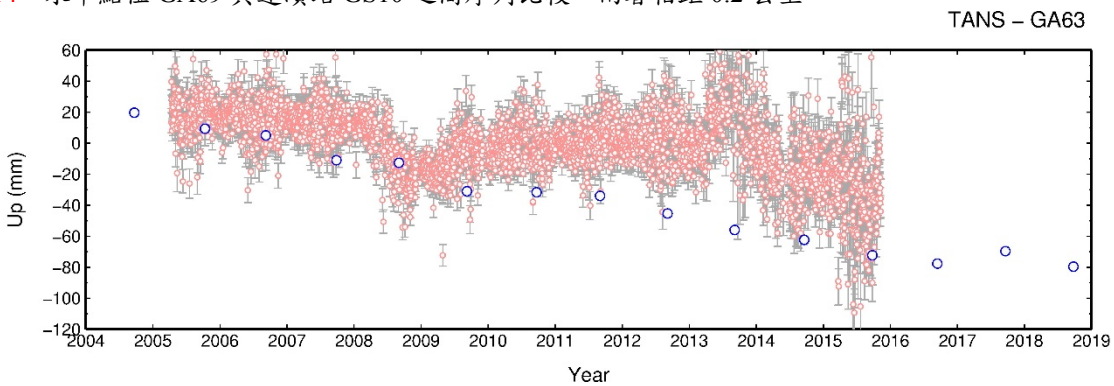


圖 2-4.15：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之間序列比較，兩者相距 0.7 公里。

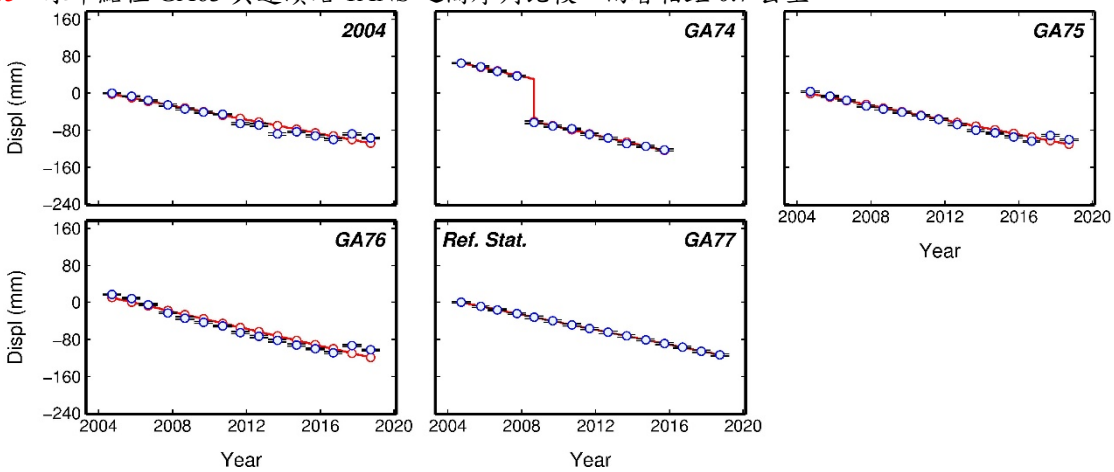


圖 2-4.16：淡水至士林測線之時間序列。

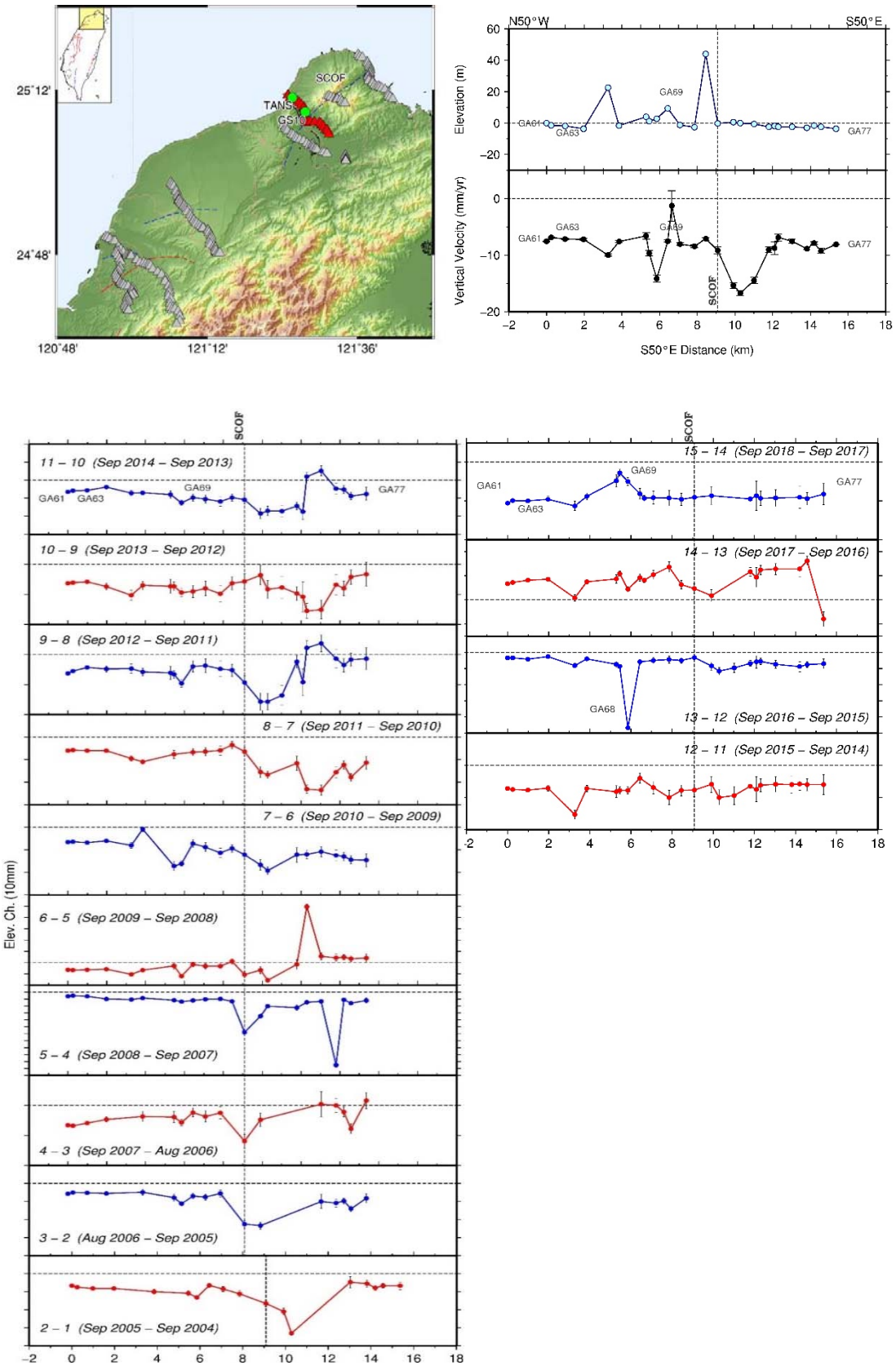


圖 2-4.17：淡水至士林測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

五股至台北測線橫跨山腳斷層，測線長約 14 公里。此水準測線於 2004 至 2018 年間共進行 15 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率（-3.9 mm/yr），作為約制點來校正 GA78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.18）。

根據圖 2-4.20，此測線之垂直速度在跨斷層約有 8 mm/yr 的變化量，在山腳斷層以東約 4-5 公里處，有達約 16.5 mm/yr 的最大垂直沉降速度，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 2018 年在山腳斷層東側有週期性的抬升及沉降現象。

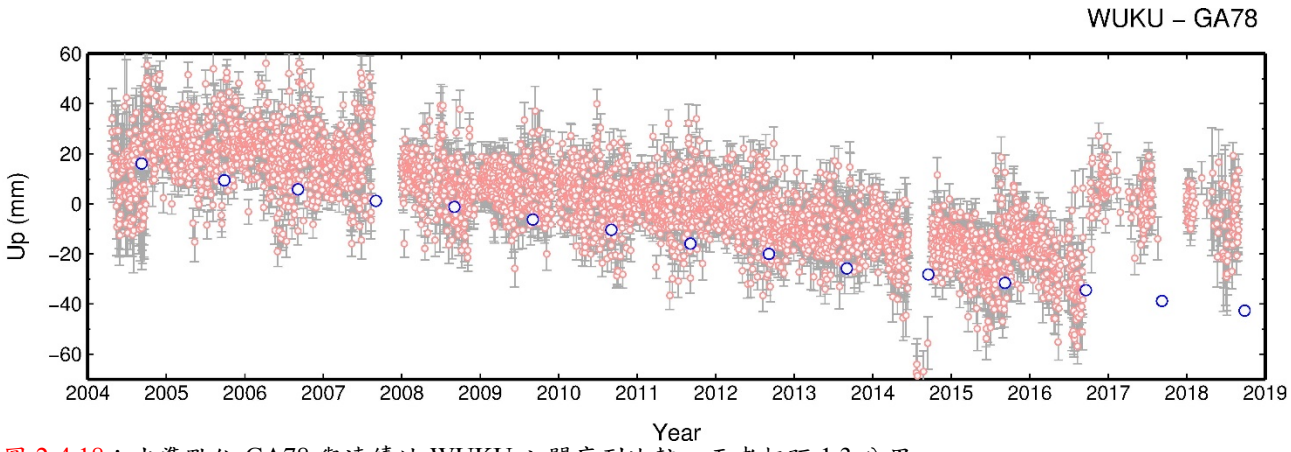


圖 2-4.18：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較，兩者相距 1.3 公里。

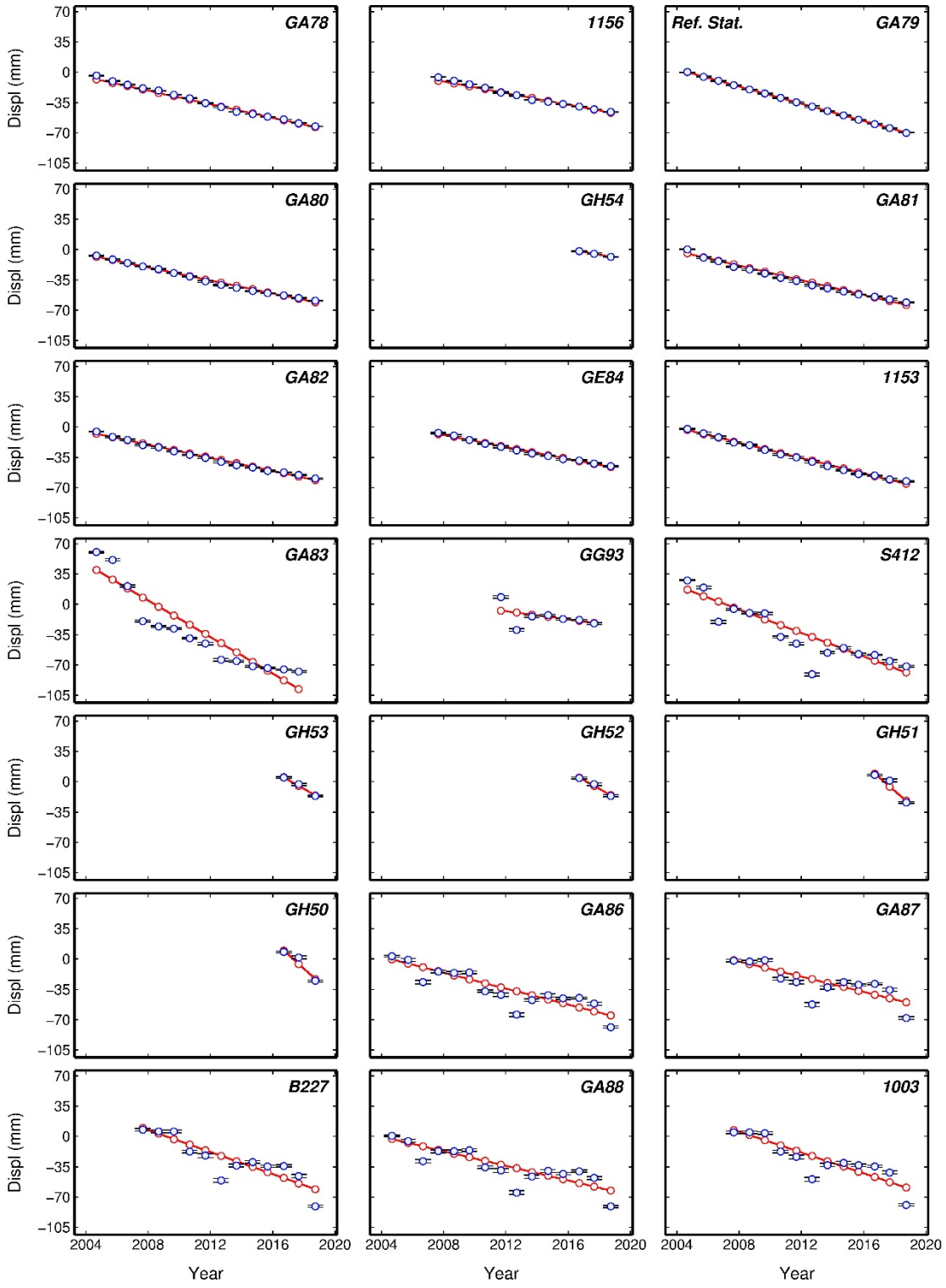


圖 2-4.19：五股至台北測線之時間序列。

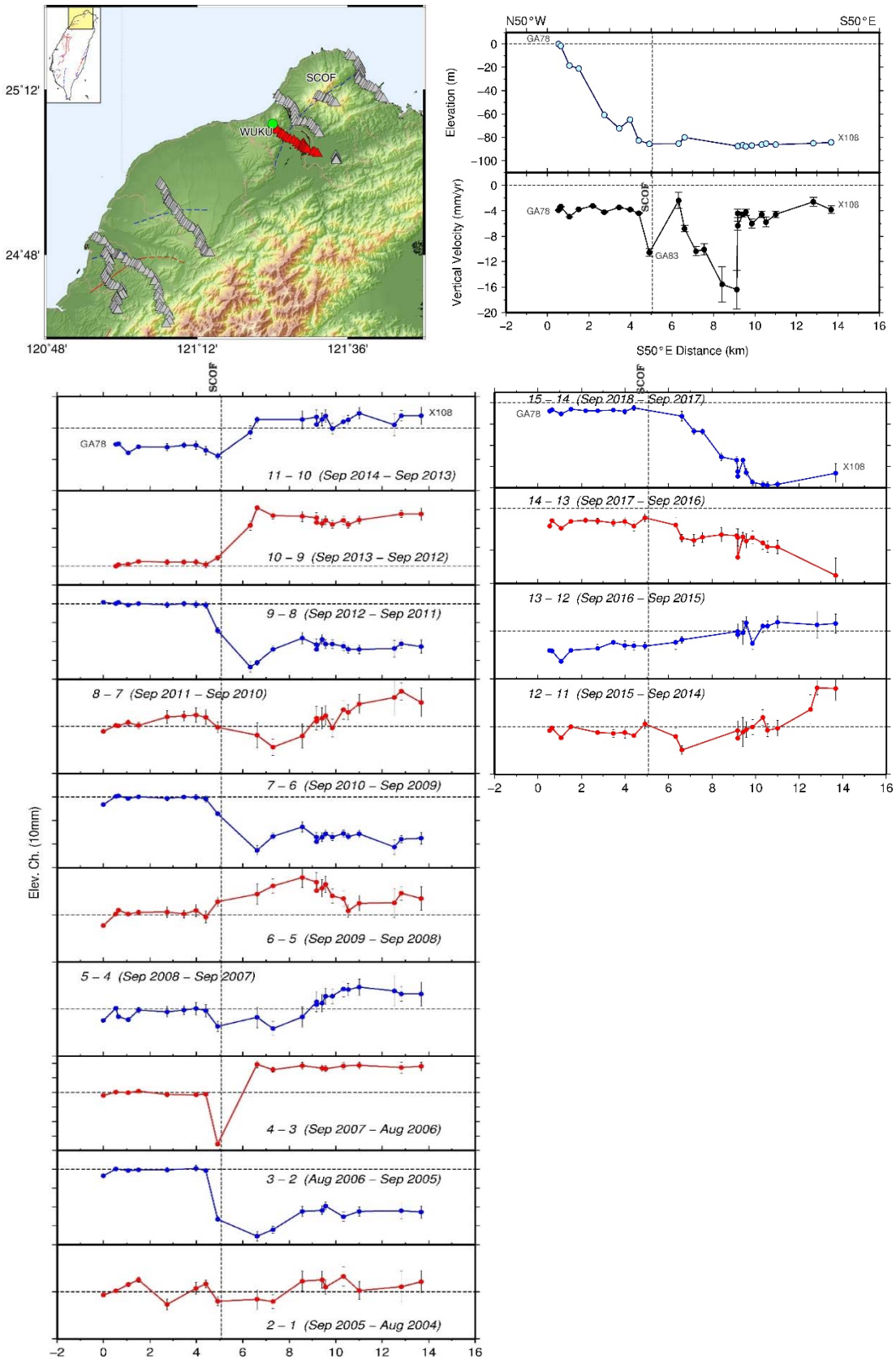


圖 2-4.20：五股至台北測線水準高程變化圖。上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

臺北地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.21 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2018 年之 GPS 移動站速度場，由結果可知本區速度場 2002－2018 大致朝西北向運動為主，由南向北略呈順時針旋轉，速度量值 1.7 - 6.0 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-4.22 所示，由結果可知本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 10 mm/yr 內。

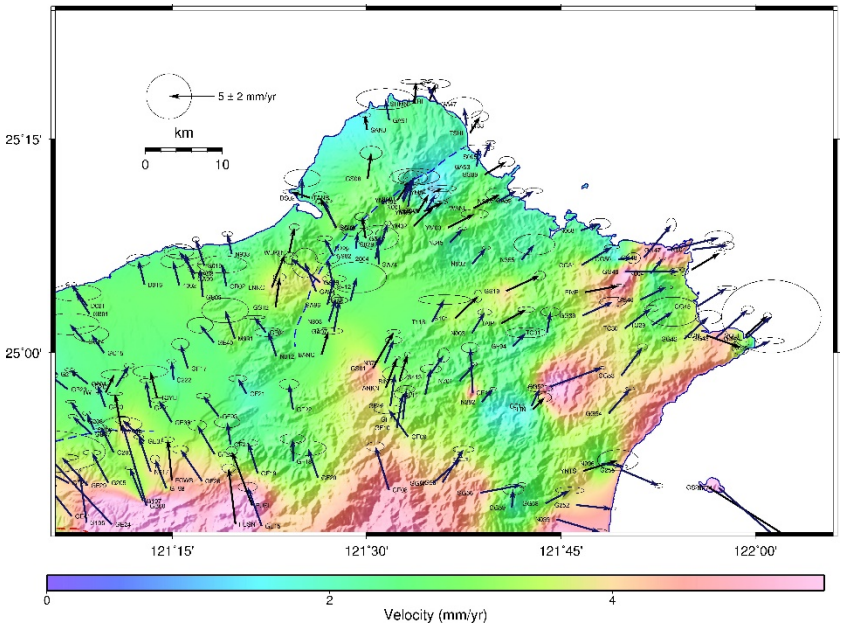


圖 2-4.21：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場，彩色色階為 2002~2018 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 2002~2018 年 GPS 移動站速度場，白色箭號為 2002~2018 年 GPS 連續站速度場。

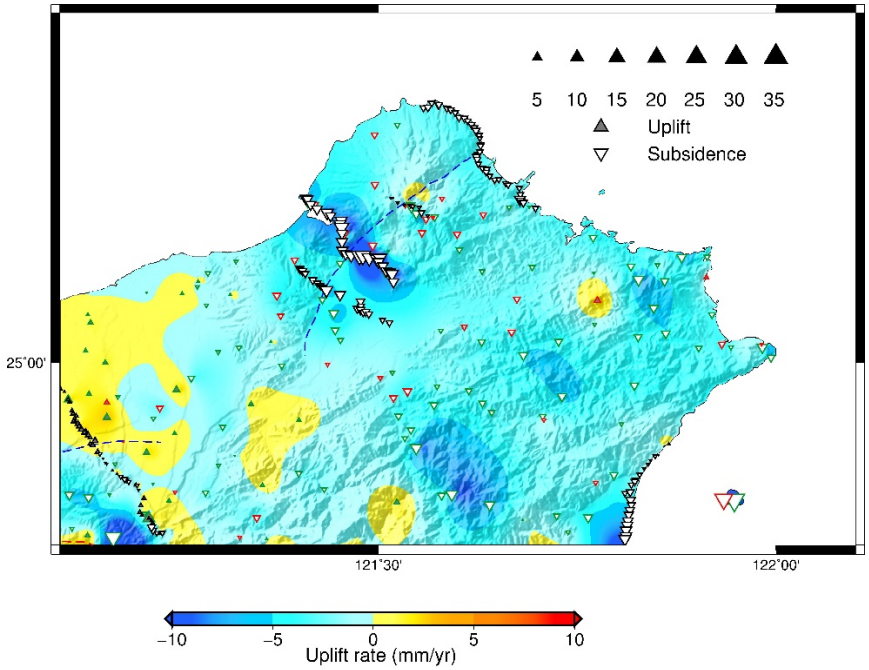


圖 2-4.22：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站，GPS 站觀測時間為 2002-2018 年，精密水準站觀測時間為 2004-2018 年。

2-4-3 桃竹苗地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之桃竹苗地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 104 點，以及 4 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，桃竹地區（圖 2-4.23）可比對坐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，由坐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（建物已拆除撤站），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坐標時間序列型態皆相符（圖 2-4.24）。

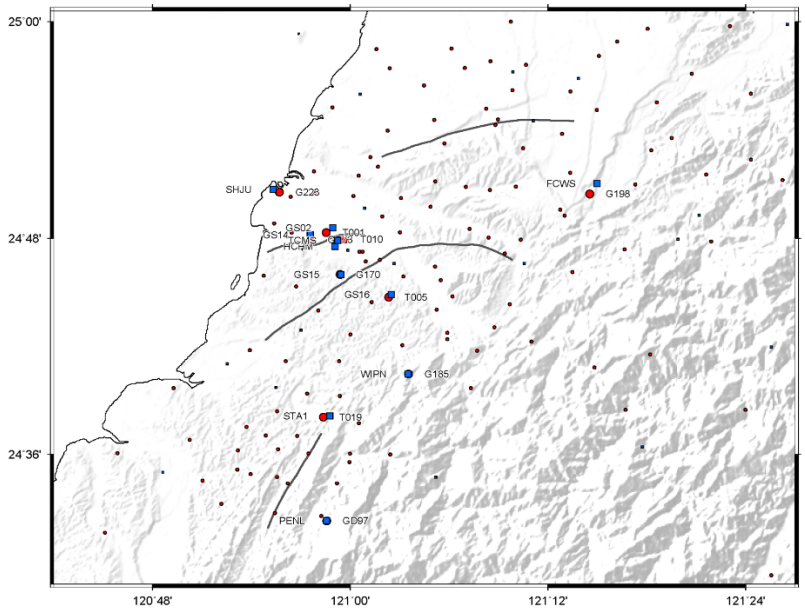


圖 2-4.23：桃竹苗地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

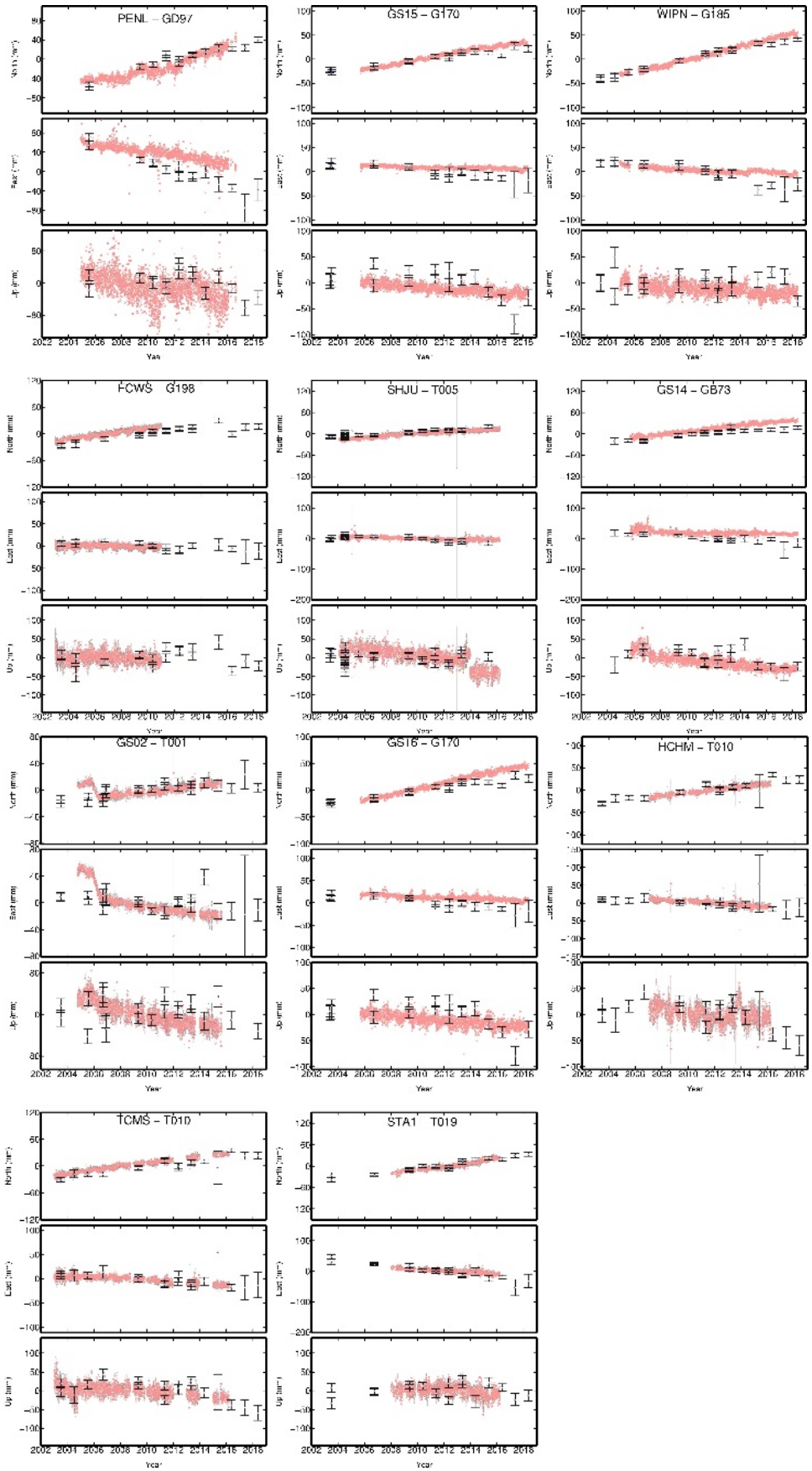


圖 2-4.24：2002~2016 年桃竹苗地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

桃竹苗地區的水準測線包含縣 115_新屋至童話世界、縣 122_新竹至五峰、縣 117_新竹至峨眉、苗栗至南庄共四條，其中縣 115_新屋至童話世界測線主要橫跨湖口斷層，測線長約 24 公里(投影至剖面的長度)，分別於 2004 至 2018 年間進行 15 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 2-4.25）。

根據圖 2-4.27，此測線之垂直速度跨湖口斷層由北約 1-2 mm/yr 之抬升速率至斷層南側約 0 mm/yr，有約 2 mm/yr 的變化量。

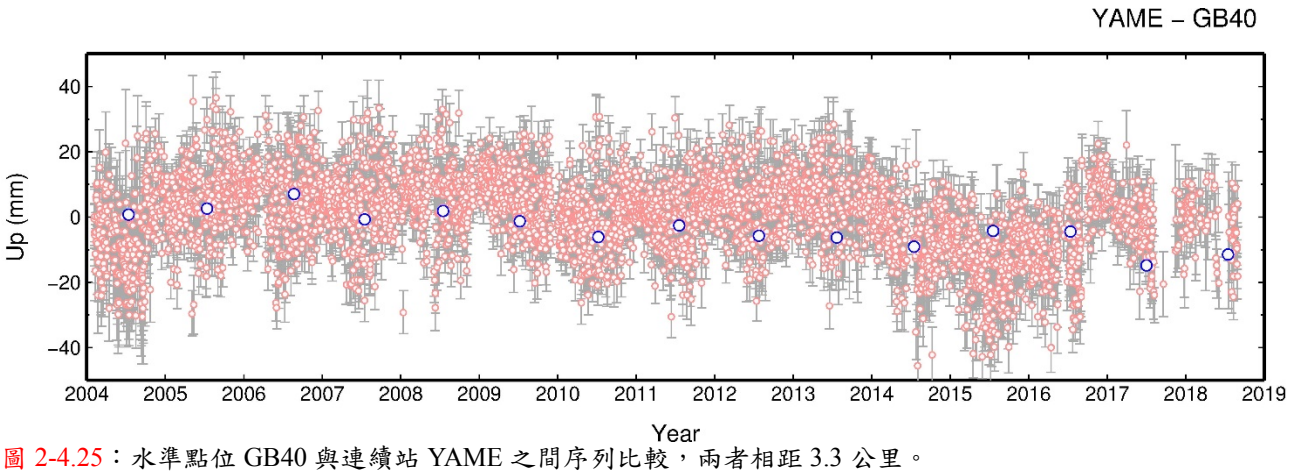


圖 2-4.25：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較，兩者相距 3.3 公里。

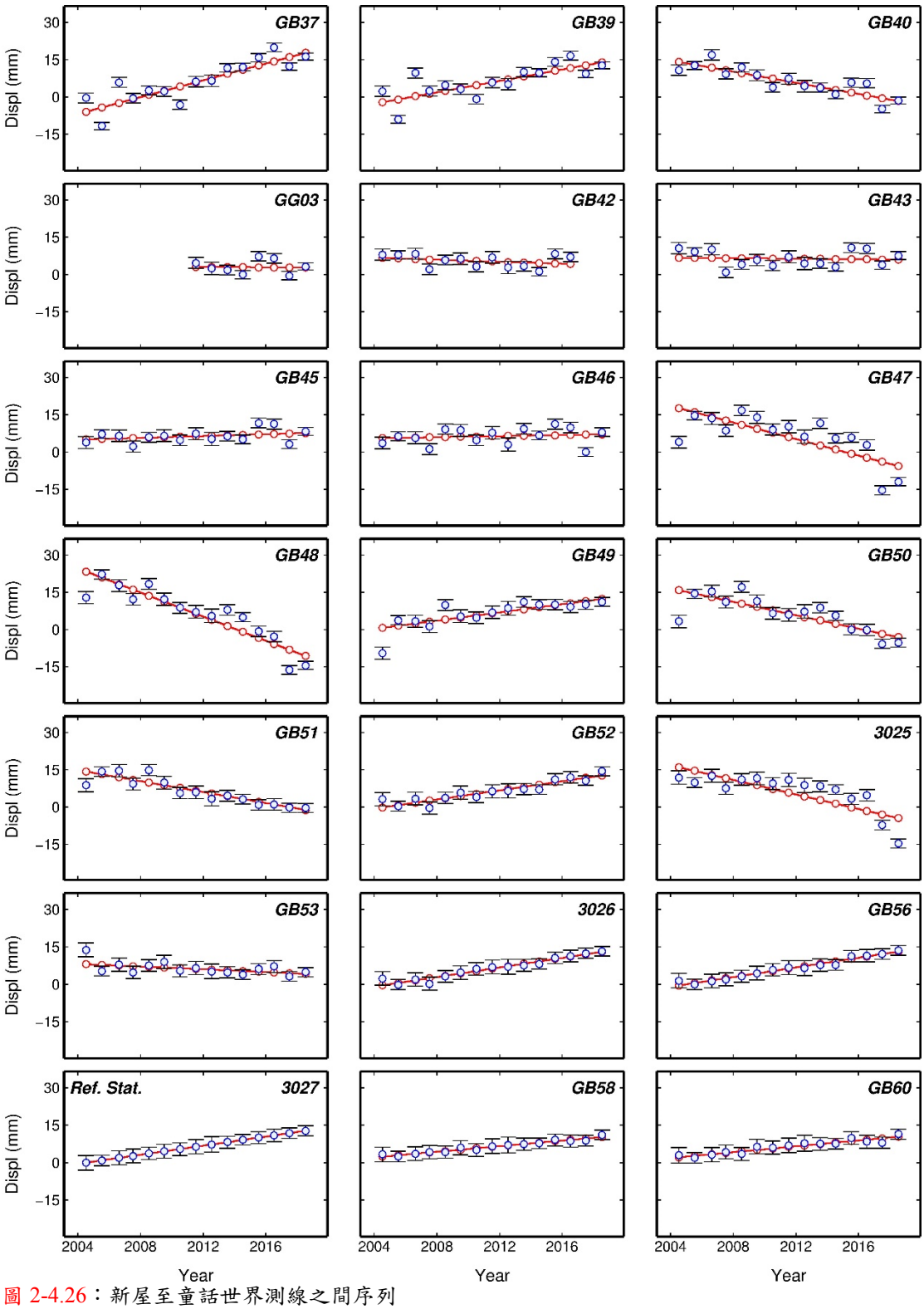


圖 2-4.26：新屋至童話世界測線之間序列

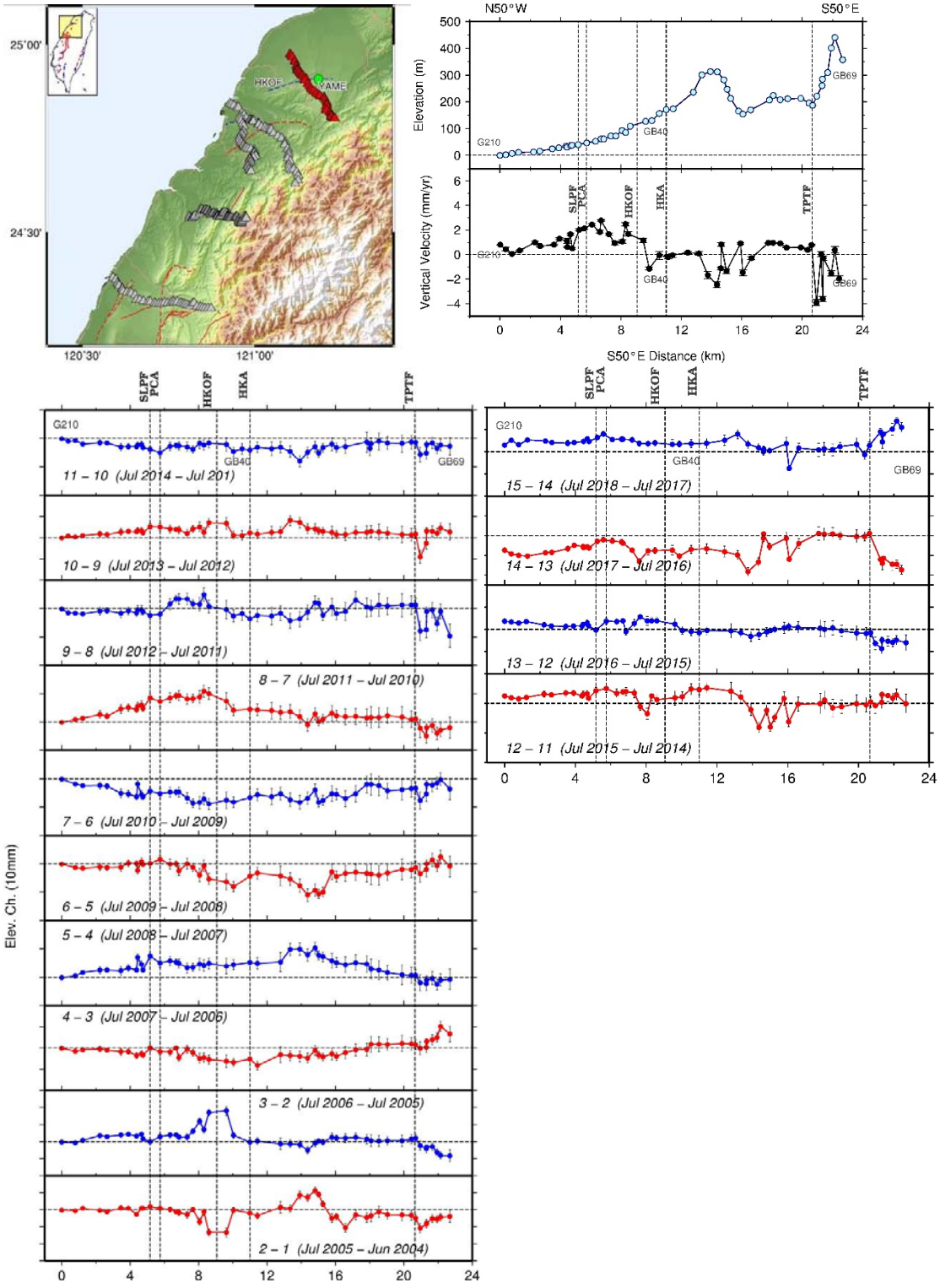


圖 2-4.27：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SLPF 為雙連坡斷層、PCA 為平鎮背斜、HKOF 為湖口斷層、HKA 湖口背斜、TPTF 為大平地斷層。

縣 122_新竹至五峰測線橫跨新竹斷層及新城斷層，測線長約 31 公里(投影至剖面的長度)。2002 年至 2018 年間，共進行 15 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、-4.71 mm/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 2-4.28~30）。

根據圖 2-4.32，此測線跨新竹斷層之垂直速度並無顯著變化，變化量皆<2 mm/yr，但在跨新城斷層有約 4 mm/yr 的變化量（約-4.0 至 0.0 mm/yr）。從歷年高程變化來看，水準點位 G416（五峰國小）近 2013 至 2014 年間年下陷約 2.1 cm，而此點 GPS 之觀測資料也與鄰近地區之速度型態不一致。經實地勘查後發現，點位本身並無損壞，由於該校位於山坡地，因此這段時間的變位是否和該地區的邊坡運動有關，需要進一步分析與討論。不過長期來看，此點建議仍然可以繼續觀測，但在資料使用上須要特別注意。(圖 2-4.33)

另外，根據此測線 G429、T004、T003、6020 四個點位之時間序列顯示（圖 2-4.31），在工研院竹東院區附近，其時間序列變化明顯與鄰近點位不同，根據實地勘驗結果，需要注意此區域是否有地滑現象。

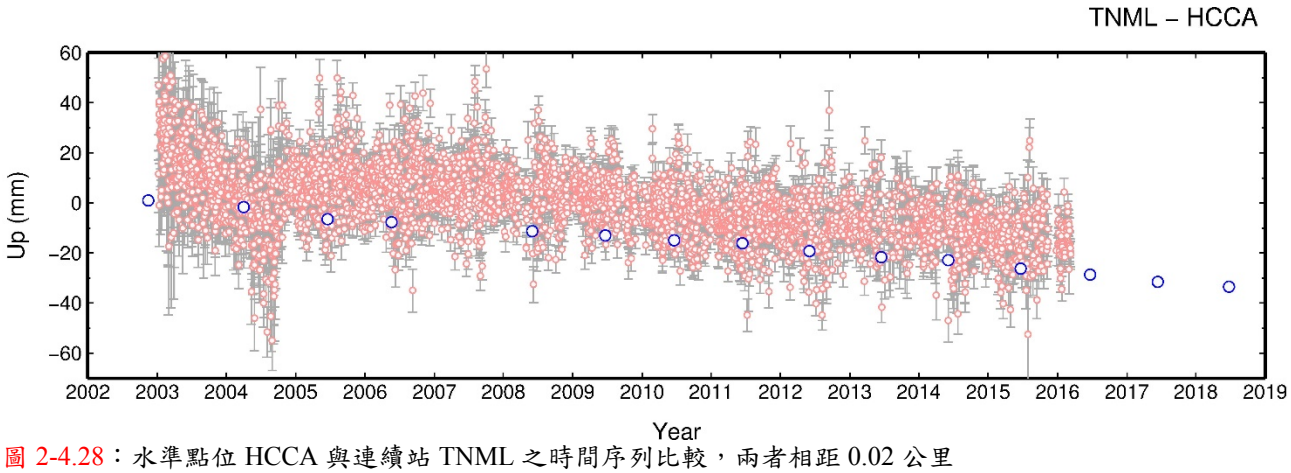


圖 2-4.28：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里

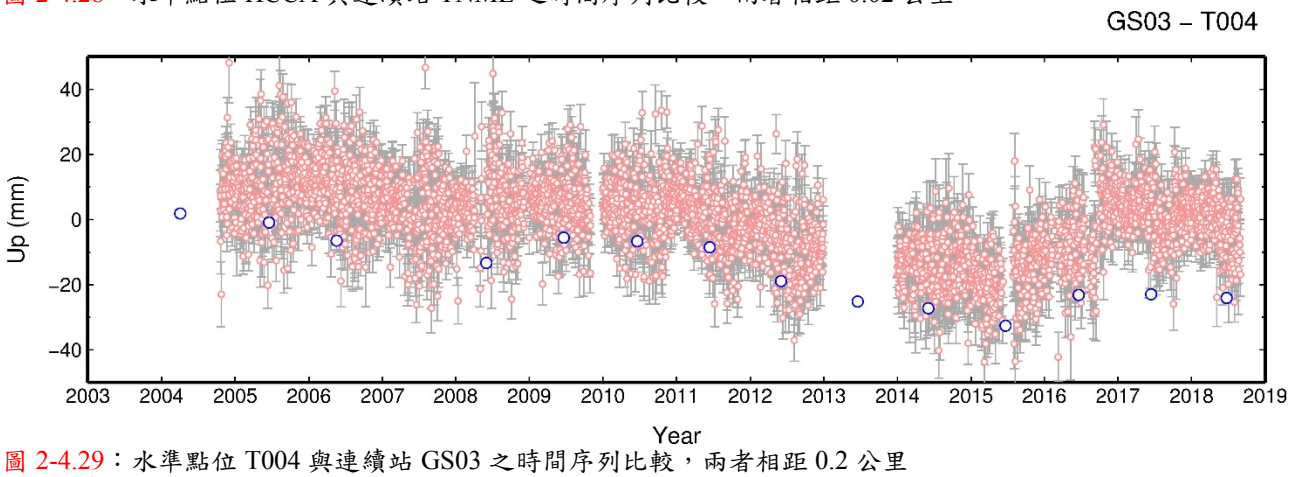


圖 2-4.29：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里

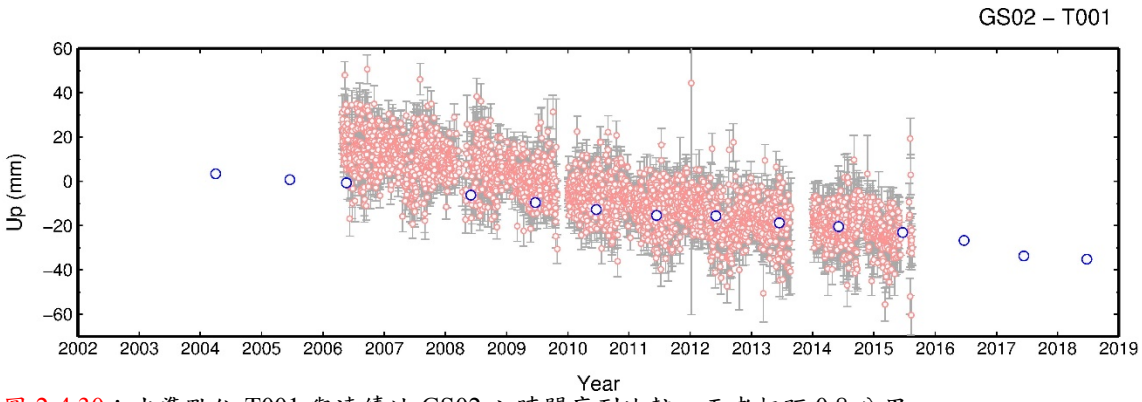


圖 2-4.30：水準點位 T001 與連續站 GS02 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里

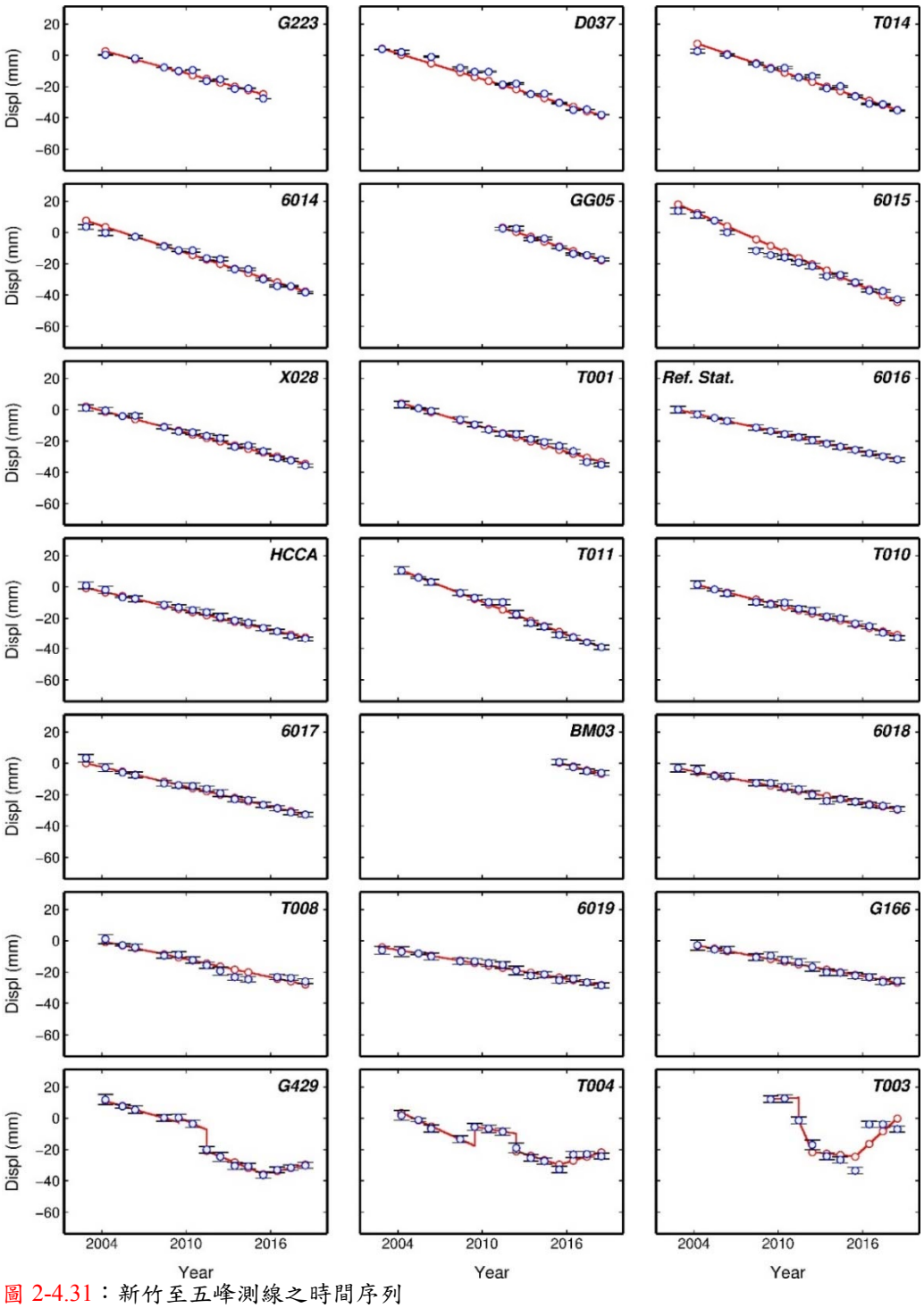


圖 2-4.31：新竹至五峰測線之時間序列

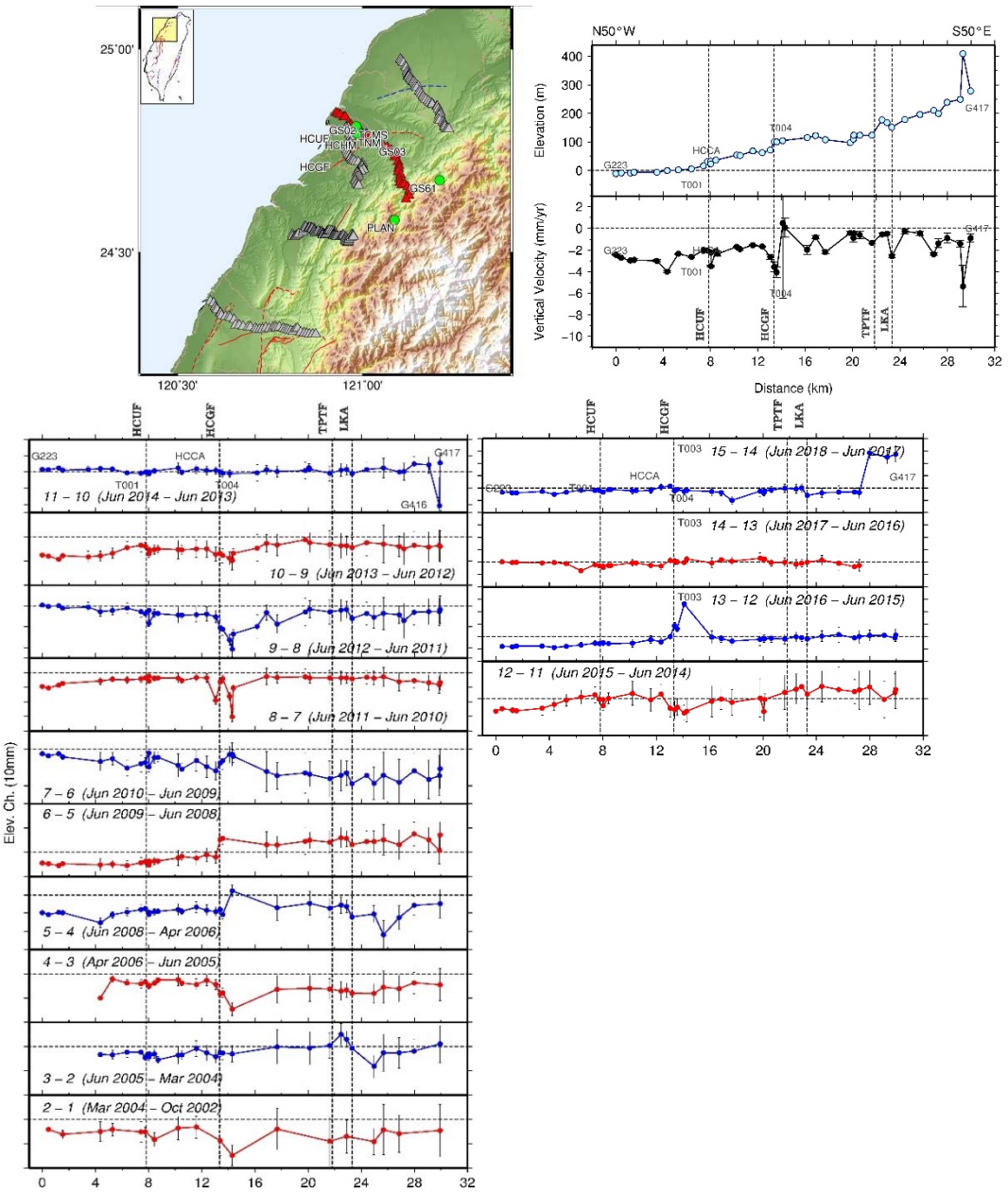


圖 2-4.32：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層、TPTF 為大平地斷層、LKA 為鹿廚坑背斜。



圖 2-4.33：水準點位 G416 現地情形。

縣 117_新竹至峨眉測線跨新竹斷層及新城斷層，測線長 16 公里(投影至剖面的長度)。此測線於 2004 至 2018 年間進行共 13 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 2-4.34）。

根據圖 2-4.36，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。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）。

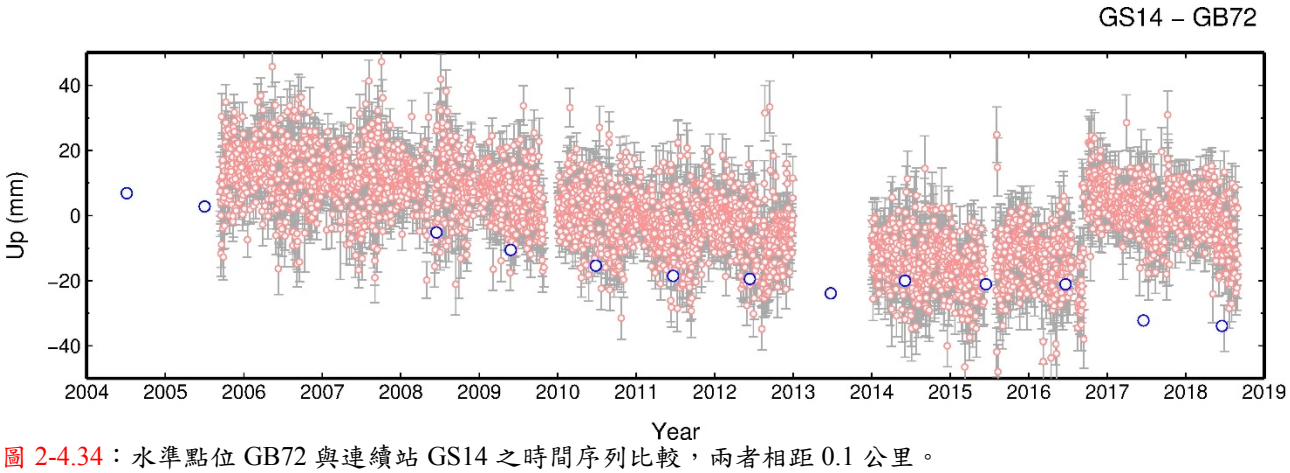


圖 2-4.34：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。

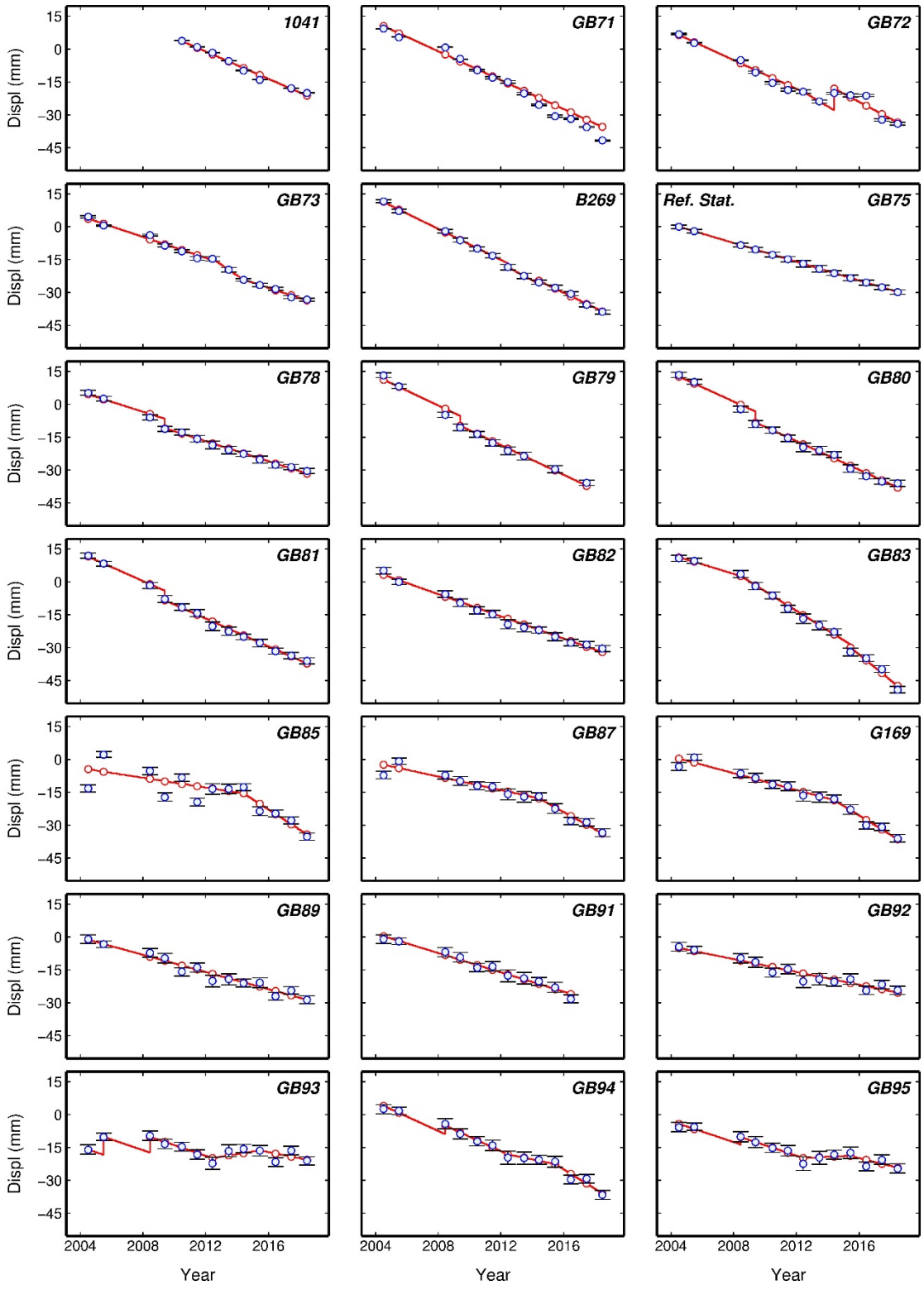


圖 2-4.35：新竹至峨眉測線之時間序列。

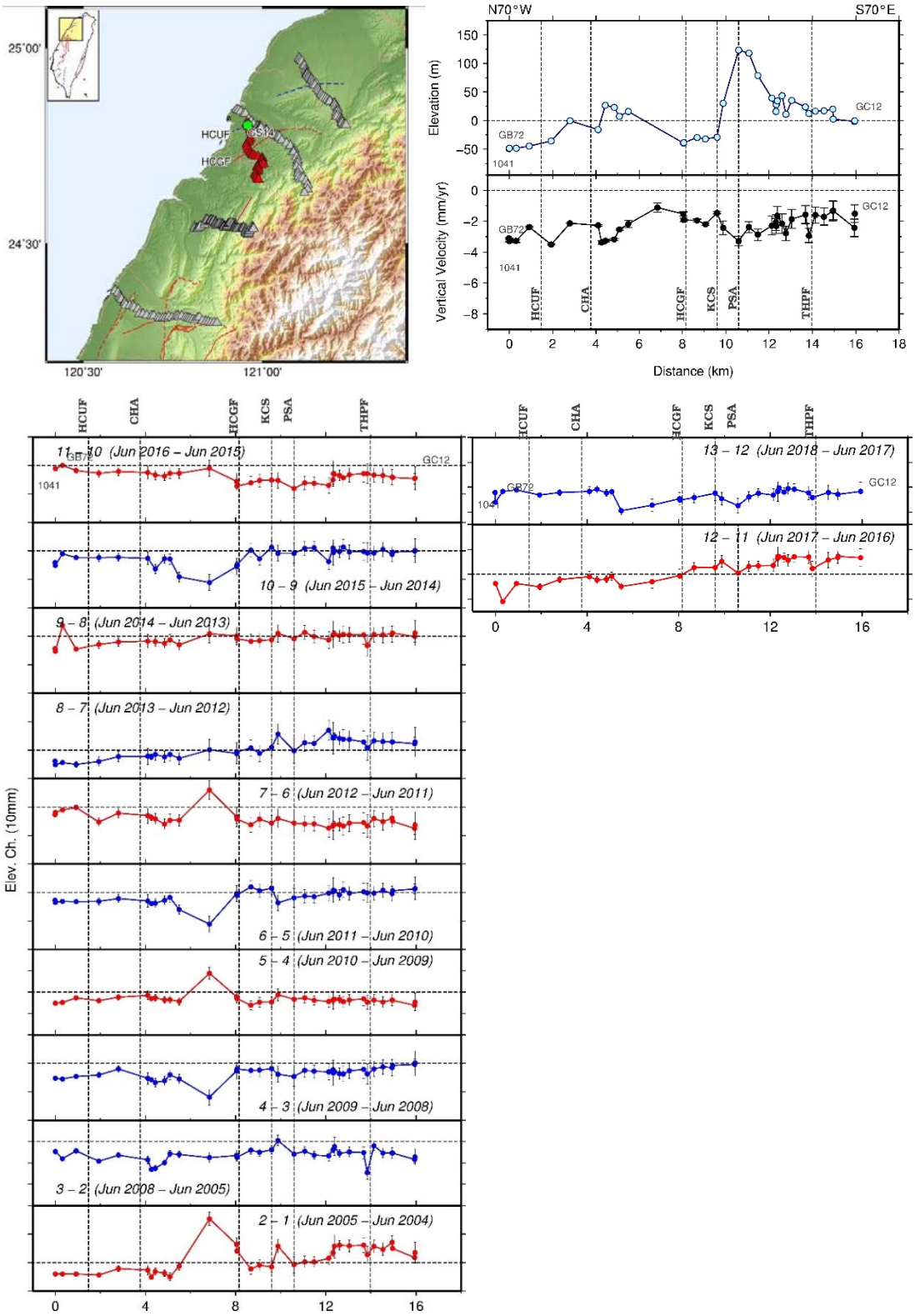


圖 2-4.36：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、CHA 為青草湖背斜、HCGF 為新城斷層、KCS 為柑子崎向斜、PSA 為寶山背斜、THPF 為斗煥坪斷層。

苗栗至南庄測線橫跨獅潭斷層，測線長約 17 公里，此測線於 2005 至 2018 年間共進行 14 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 之垂直速率（-5.5 mm/yr），作為約制點 GD95 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.37）。

根據圖 2-4.39，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顯著之運動。從歷年高程變化來看，在 2005~2009 年及 2010~2018 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。

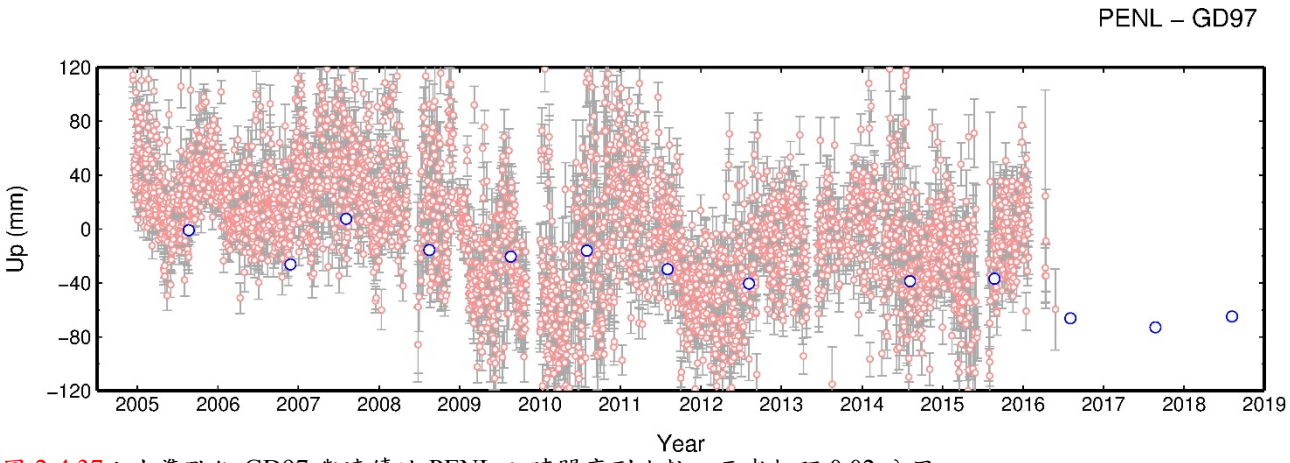


圖 2-4.37：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

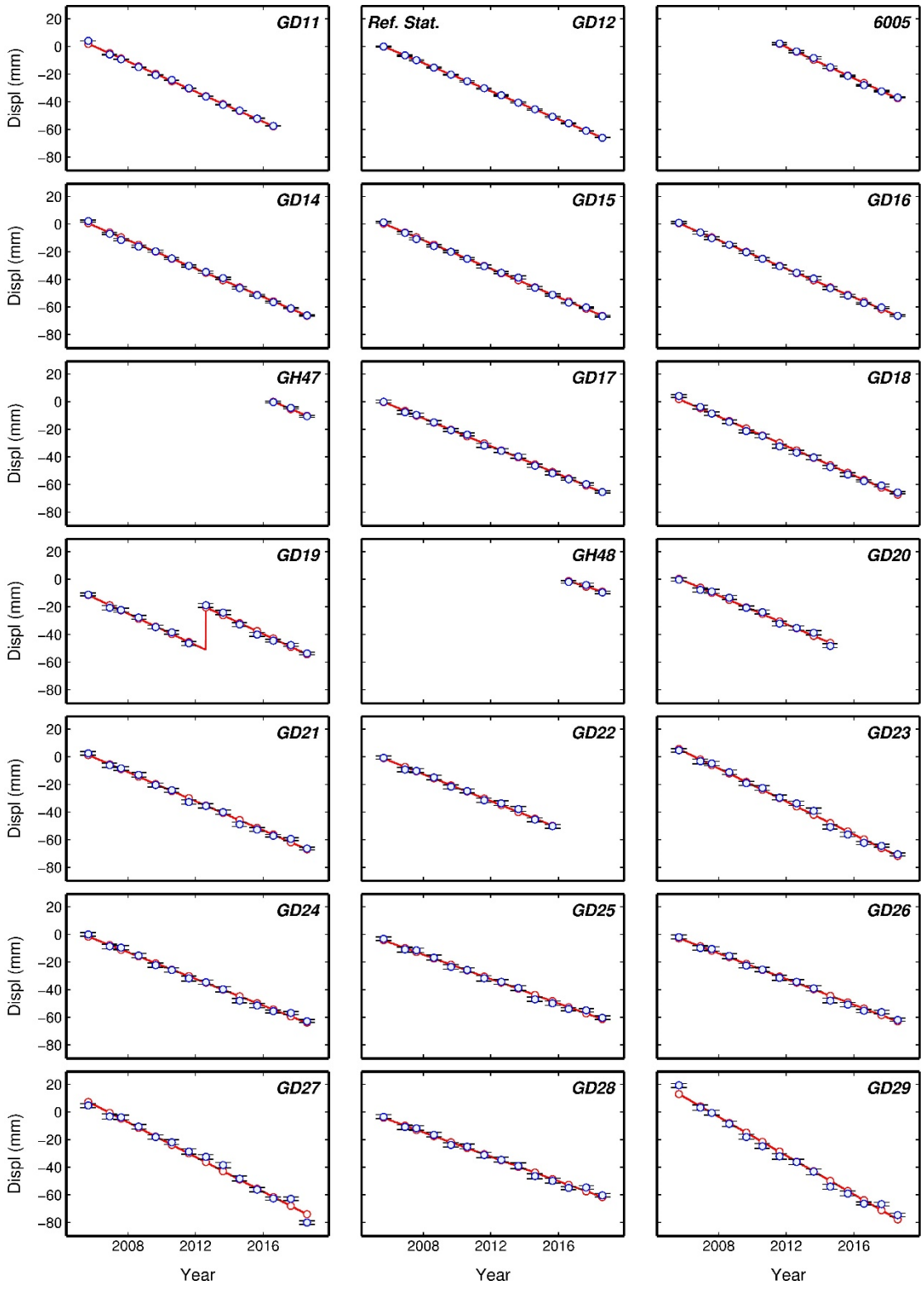


圖 2-4.38：苗栗至南庄測線之時間序列。

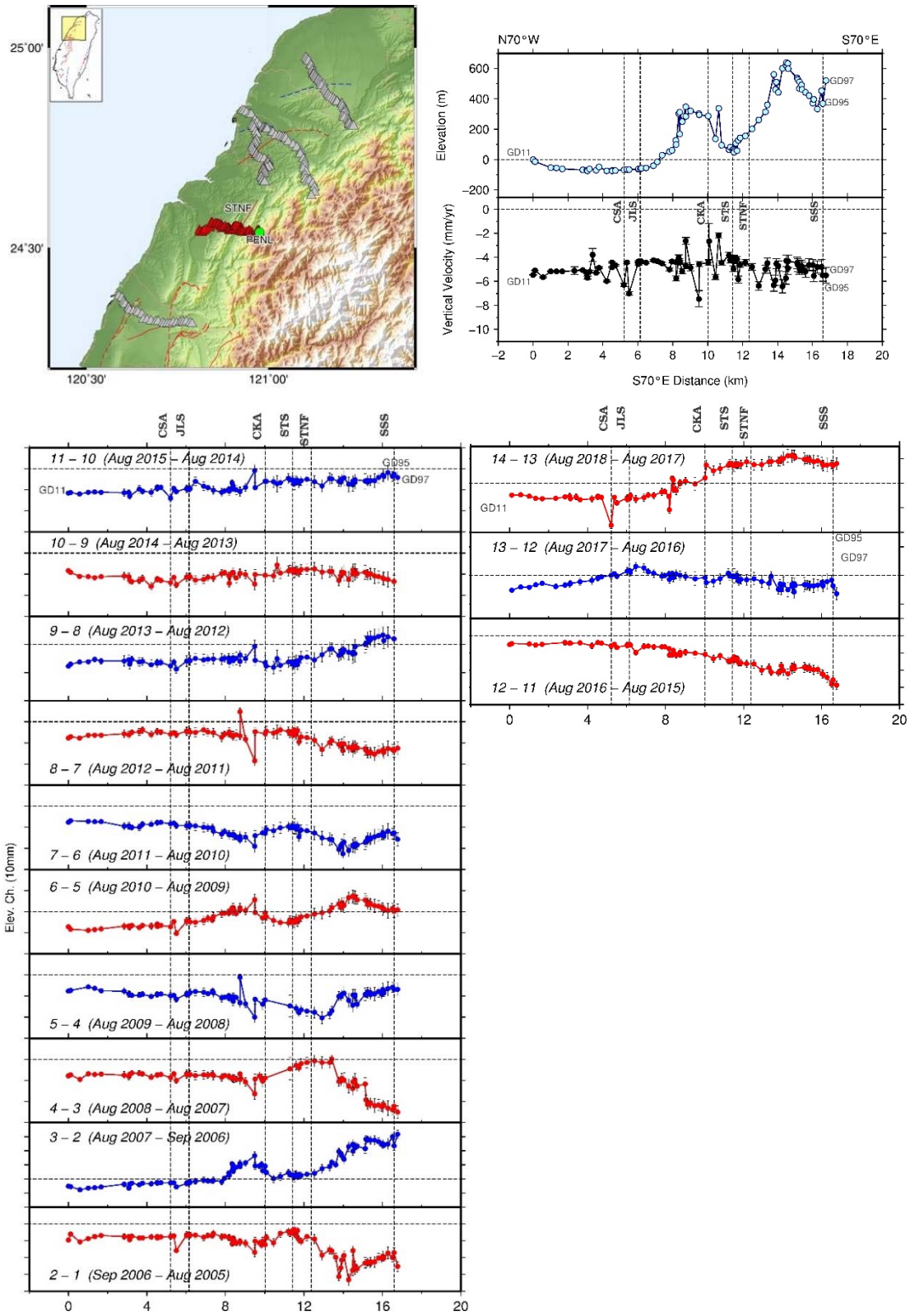


圖 2-4.39：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每欄刻度均代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CSA 為錦水背斜、JLS 為仁隆向斜、CKA 為出磺坑背斜、STS 為獅潭向斜、STNF 為獅潭斷層、SSS 為神社向斜。

桃竹苗地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.40 所示，由結果可知本區速度場 2002－2018 年間朝西北向運動為主，量值約為 2.5～22.6 mm/yr（圖 2-4.40）。

垂直速度場如圖 2-4.41 所示，由結果可知本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 10 mm/yr 內。

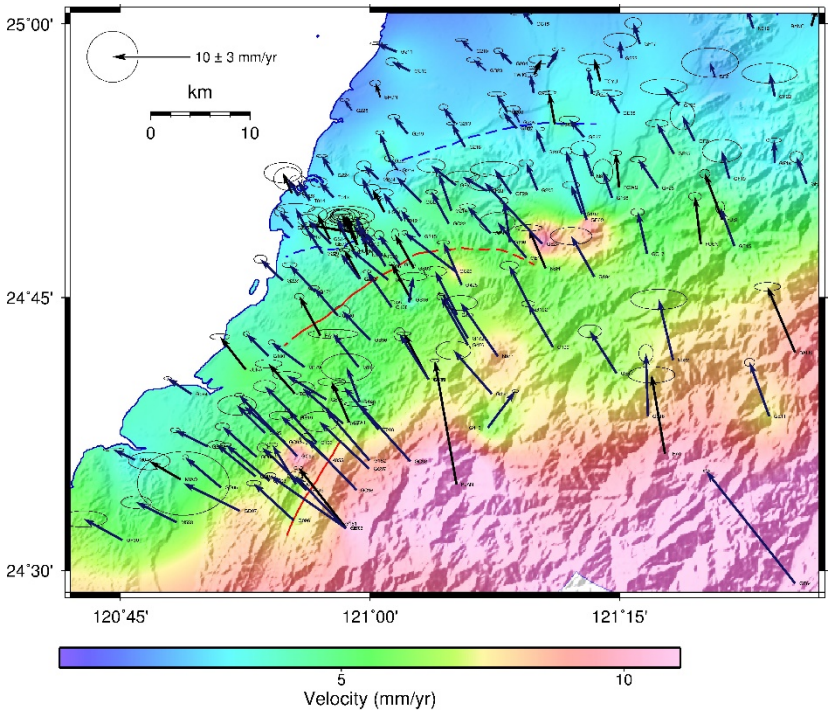


圖 2-4.40：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2018 年資料所解算之速度場分布色階圖。

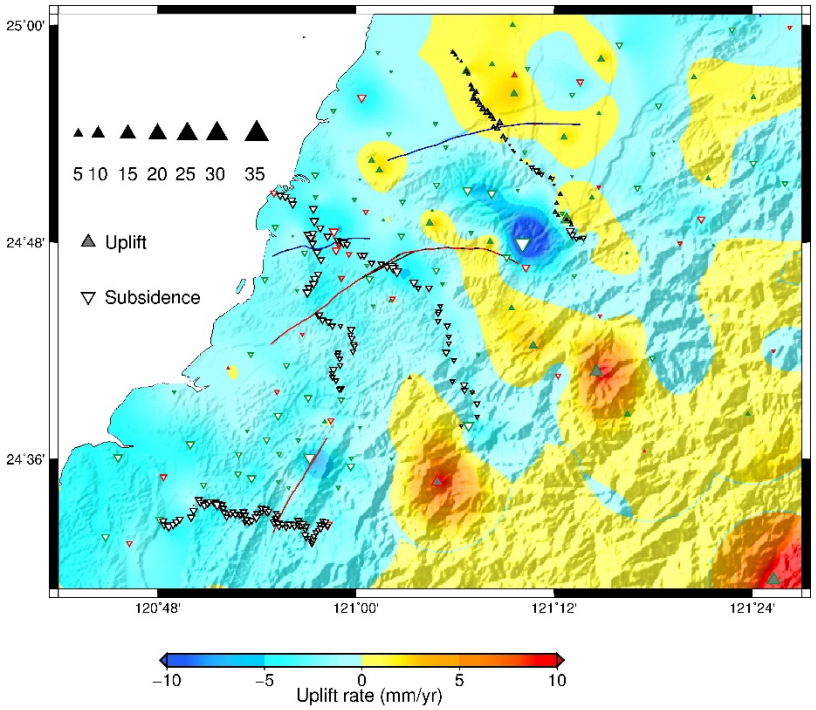


圖 2-4.41：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2018 年垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-4-4 中部地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之中部地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 151 點，以及 5 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，中部地區（圖 2-4.42）可比對坐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，由坐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 2-4.43）。

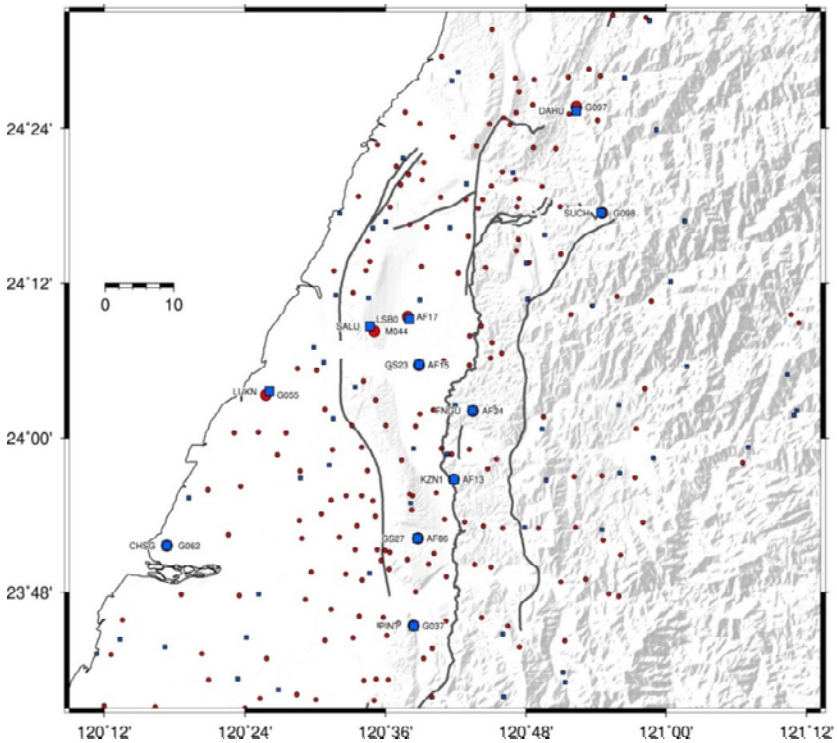


圖 2-4.42：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

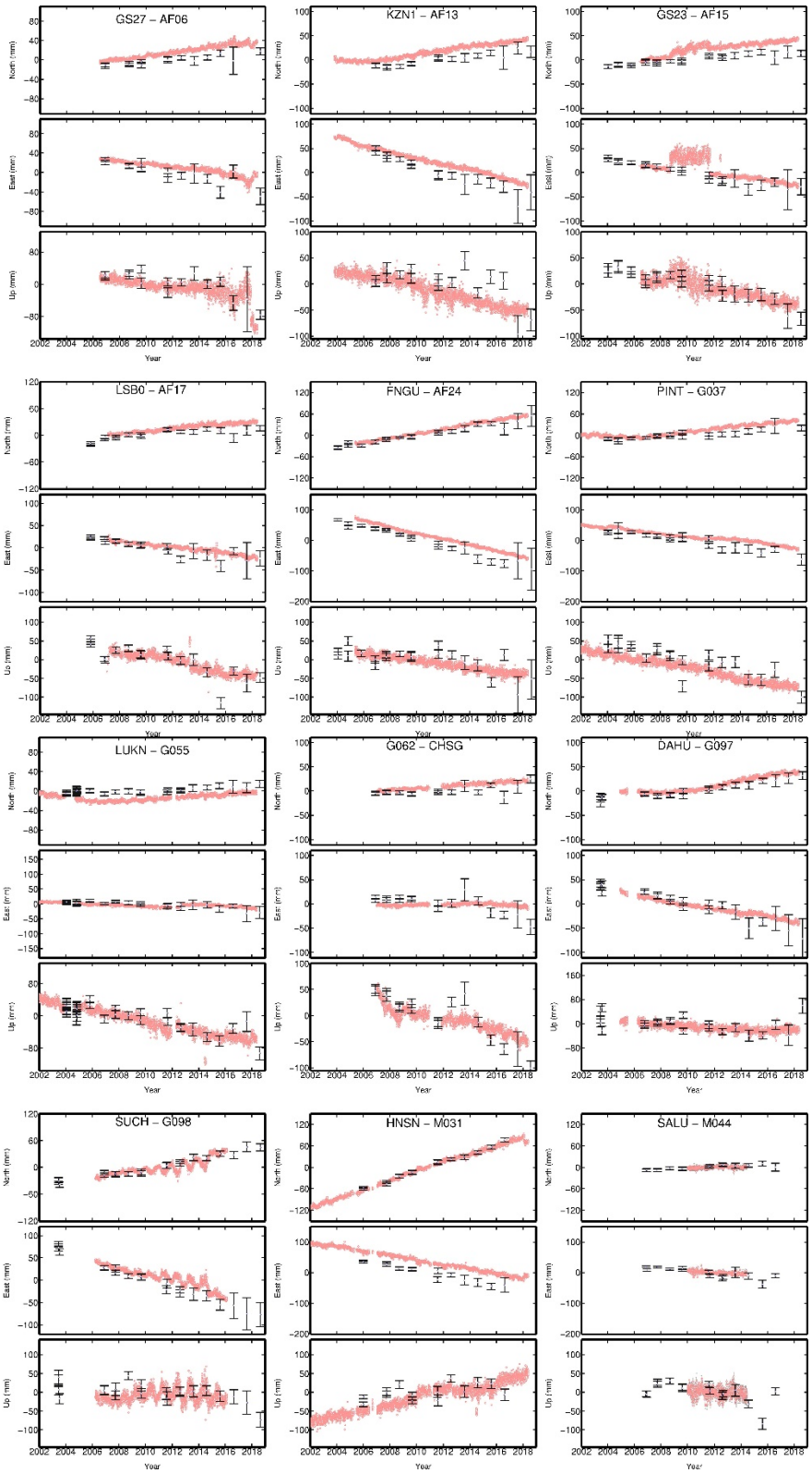


圖 2-4.43：2002~2018 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

檢視中部地區 GPS 移動站坐標時間序列，可發現位於三義斷層與車籠埔斷層北段交接處以及車籠埔斷層南段下盤等南北兩處之點位，在 2007 年出現速度改變的型態（圖 2-4.44），同時比對該地區之 GPS 連續站時間序列及精密水準時間序列結果（圖 2-4.45），亦可發現在 2007 年出現速度改變的型態。另外，2013 年 6 月 ML 6.5 之南投地震，也改變了本地區之速度場。因此在估算臺灣中部地區速度場時，本研究將 2002－2018 年分為 2002－2007 年、2007－2013 年以及 2013－2018 年三個時間段，分別估算速度場。

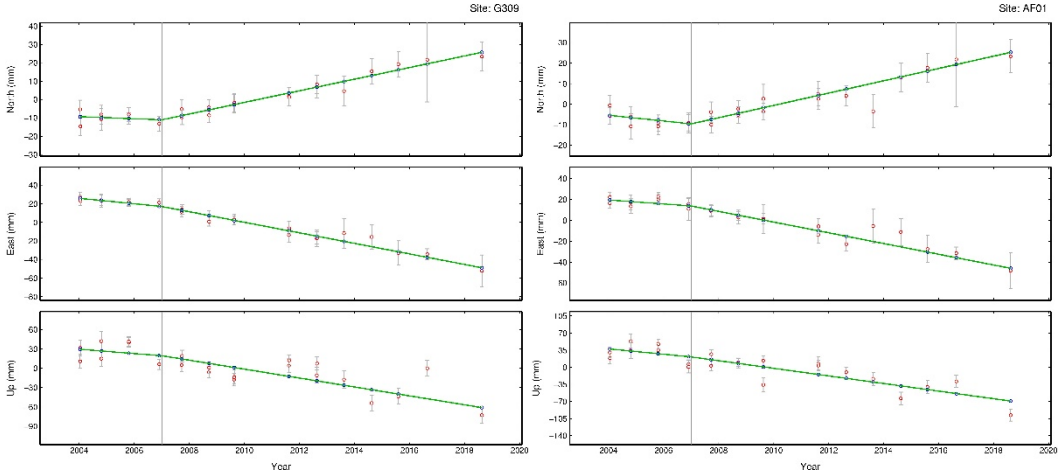


圖 2-4.44：2002-2018 年中部地區 GPS 移動站相對於 S01R 測站坐標時間序列。

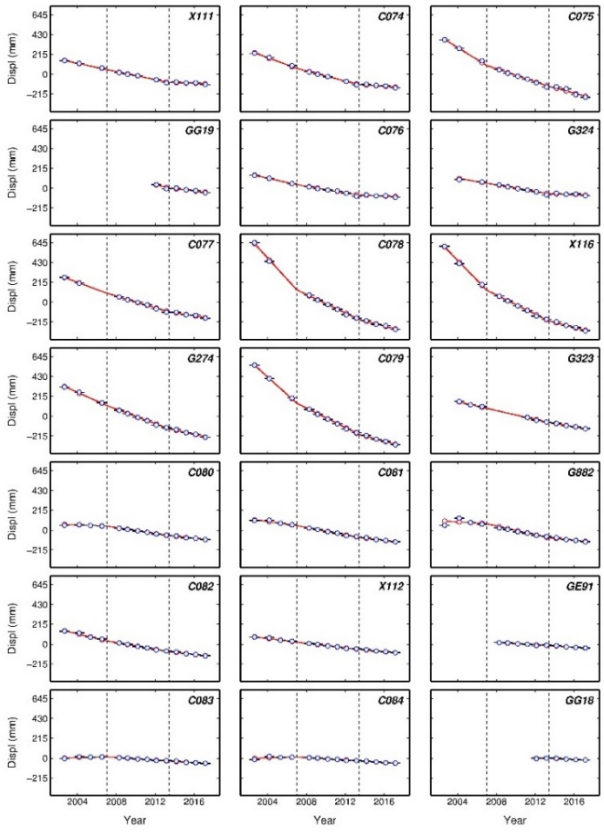


圖 2-4.45：王功-草屯-埔里精密水準測線相對於 S01R 測站之坐標時間序列。虛線為 2007 年 1 月 1 日及 2013 年 6 月 2 日南投地震。

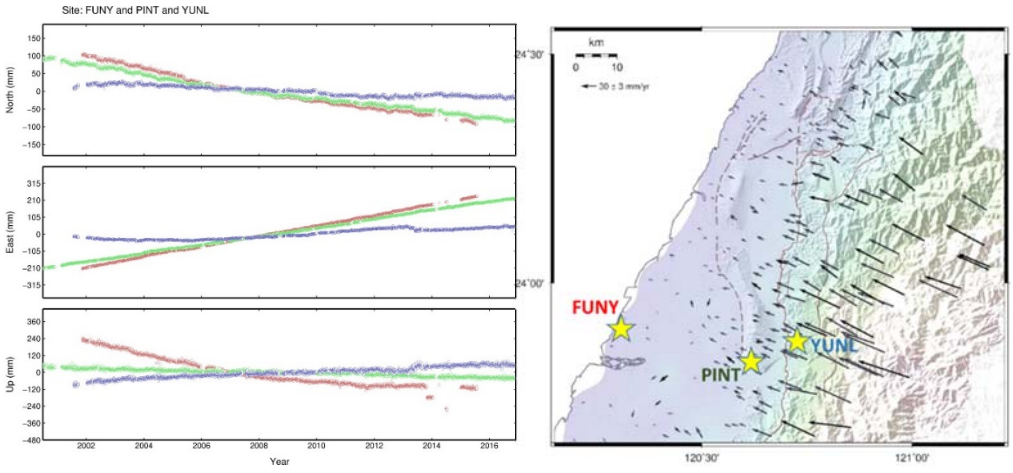


圖 2-4.46：左圖為 GPS 連續站 FUNY、PINT 與 YUNL 之坐標時間序列。右圖星號指出此三個測站的位置。

中部地區完成的精密水準測線分別為大安-東勢、龍井至太平、跨車籠埔斷層之短測線、王功-草屯-埔里及北斗-水里測線，其中大安-東勢測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 30 公里(投影至剖面的長度)，並於 2015 年後段新設 14 個測站，從 2004 年至 2018 年止共計有 14 次施測。2015 年起由 GF44（卓蘭國小）延伸測線至 B283（卓蘭實驗高中），該點位位於連續站 GS82 天線盤支架結構體上（圖 2-4.47），因此使用連續站 GS82 之垂直速率（-0.90 mm/yr）作為約制點，來校正 B283 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。



圖 2-4.47：中部地區 GPS 連續站 GS82 及精密水準測站 B283 周圍環境圖。

根據圖 2-4.50，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，而 G920 以東之水準點因測量次數過少建議持續監測。且自鐵砧山至屯子腳斷層間（東陽國小至內埔國小）的下陷速率呈現增加的趨勢（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 2018 年呈現規律之起伏，說明該段區域有年週期的變化。

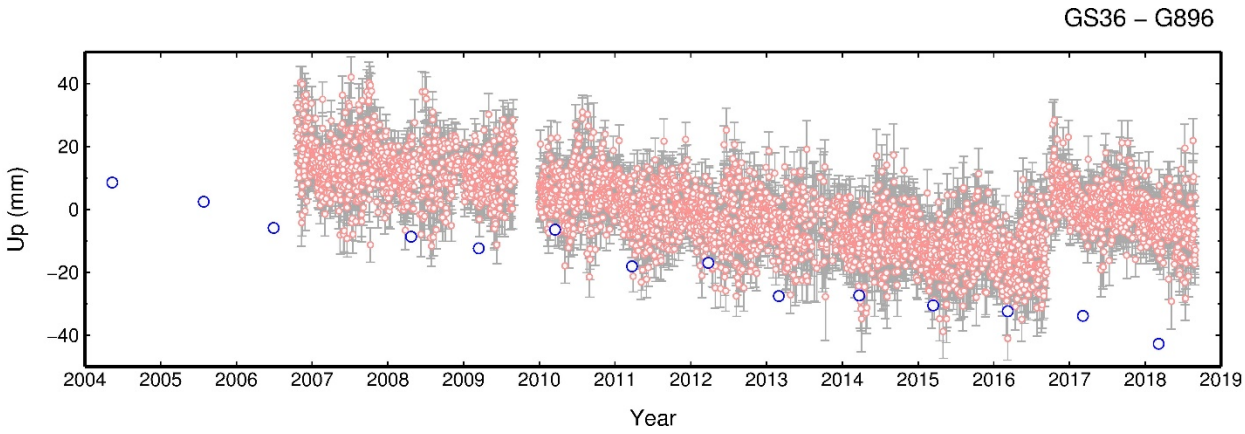


圖 2-4.48：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。

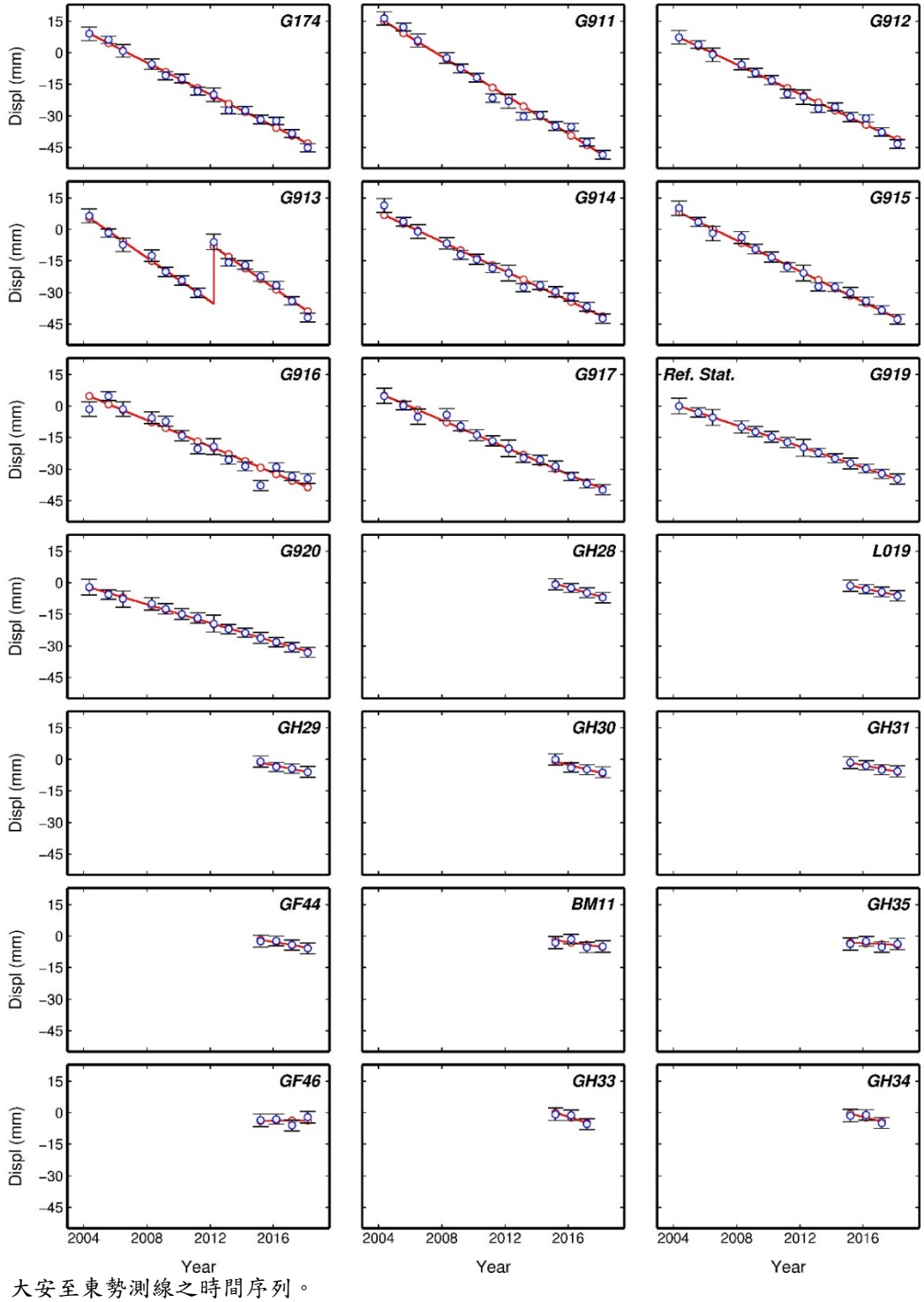


圖 2-4.49：大安至東勢測線之時間序列。

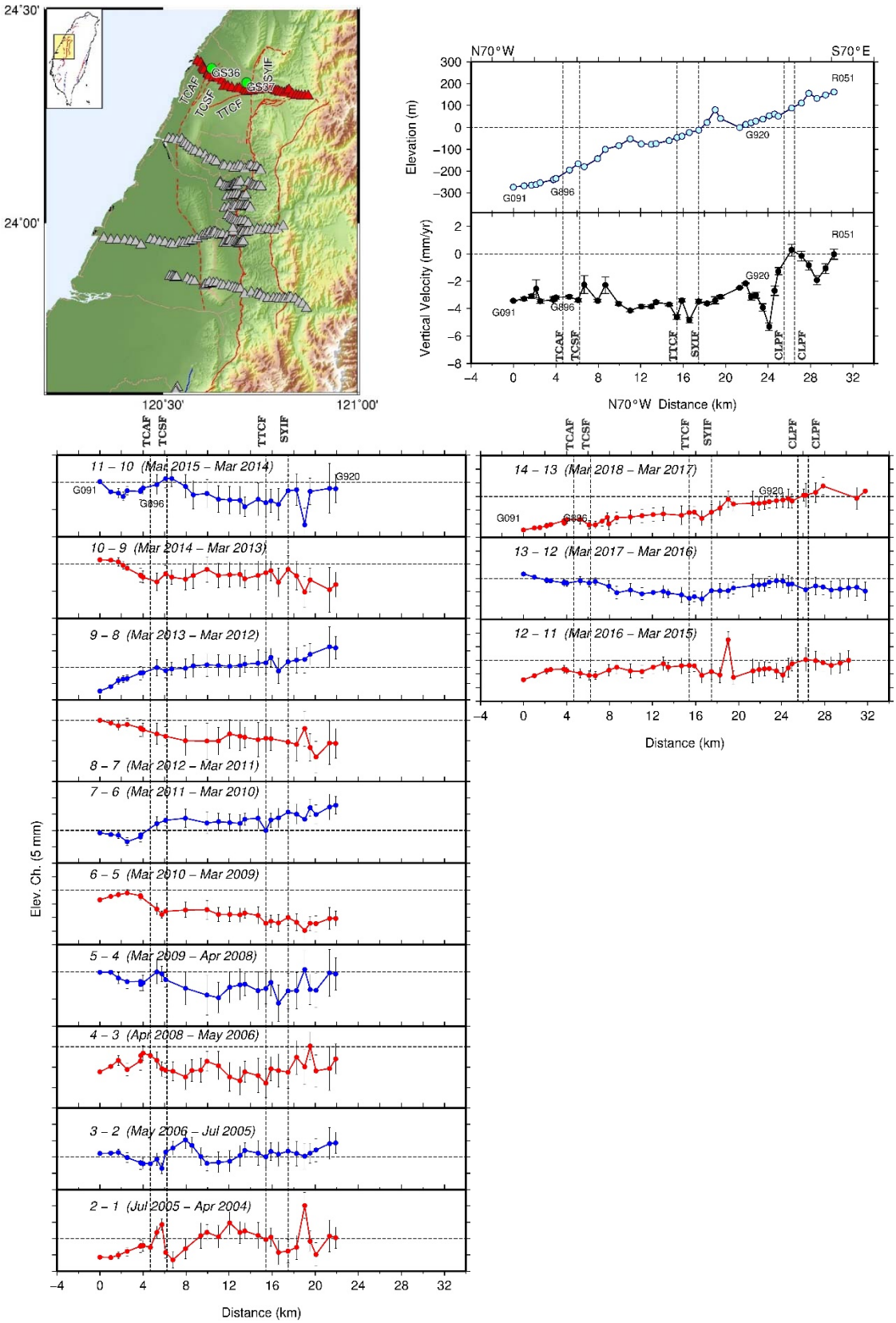


圖 2-4.50：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層 CLPF 車籠埔斷層。

龍井至太平測線橫跨清水斷層和車籠埔斷層，測線長約 25 公里(投影至剖面的長度)，於 2004 至 2018 年間，共進行 15 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 2-4.51 及圖 2-4.52）。

根據圖 2-4.54，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-3.8 mm/yr 到-2.9 mm/yr），右側至大肚山背斜則為下降（最大達-5.9 mm/yr），兩側最大變化量達 3.0 mm/yr；在跨車籠埔斷層區域之垂直速度也有 3.0 mm/yr 的變化，均可說明跨越此兩斷層之區域在 1999 年集集地震後有持續性的運動。

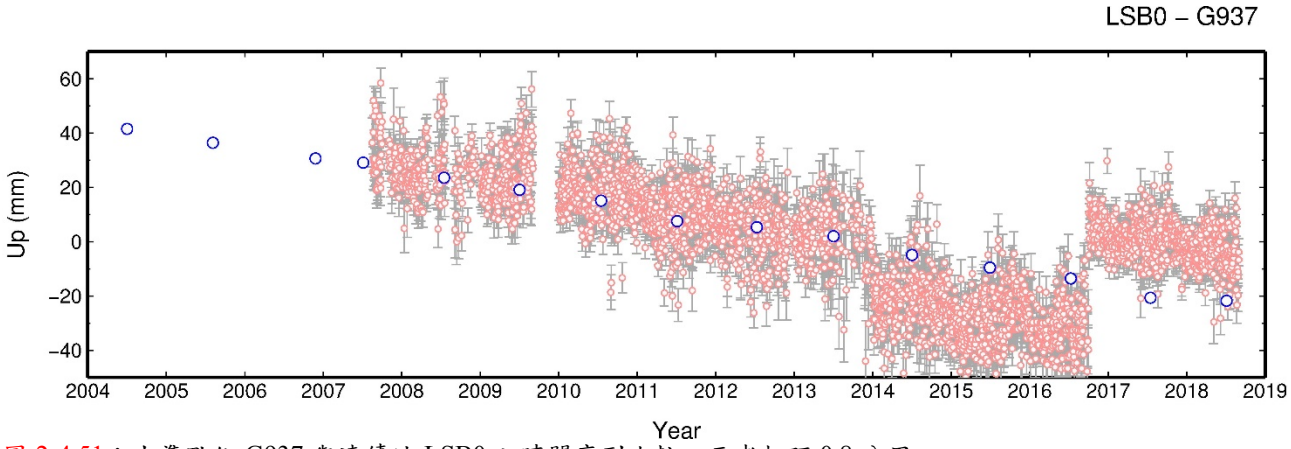


圖 2-4.51：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

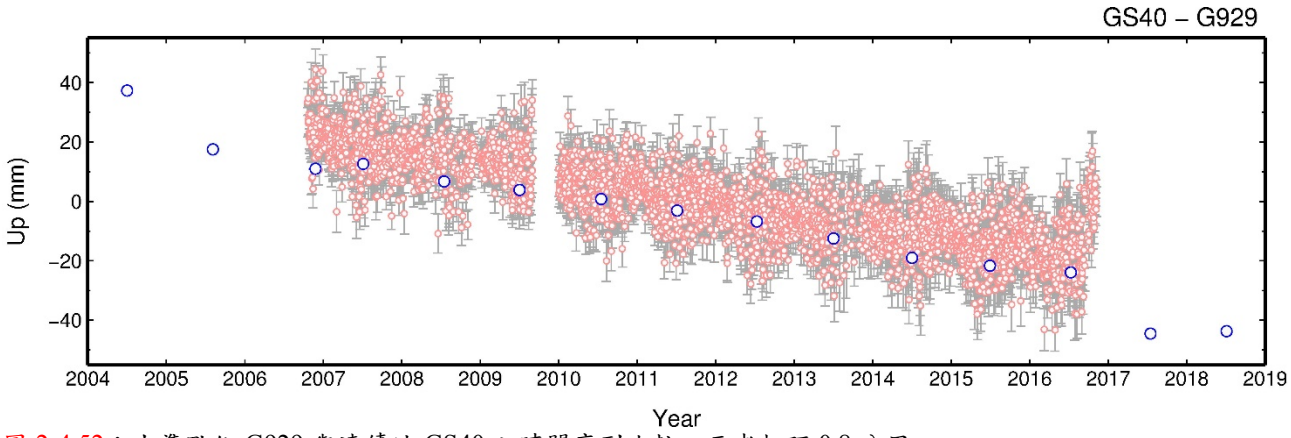


圖 2-4.52：水準點位 G929 與連續站 GS40 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

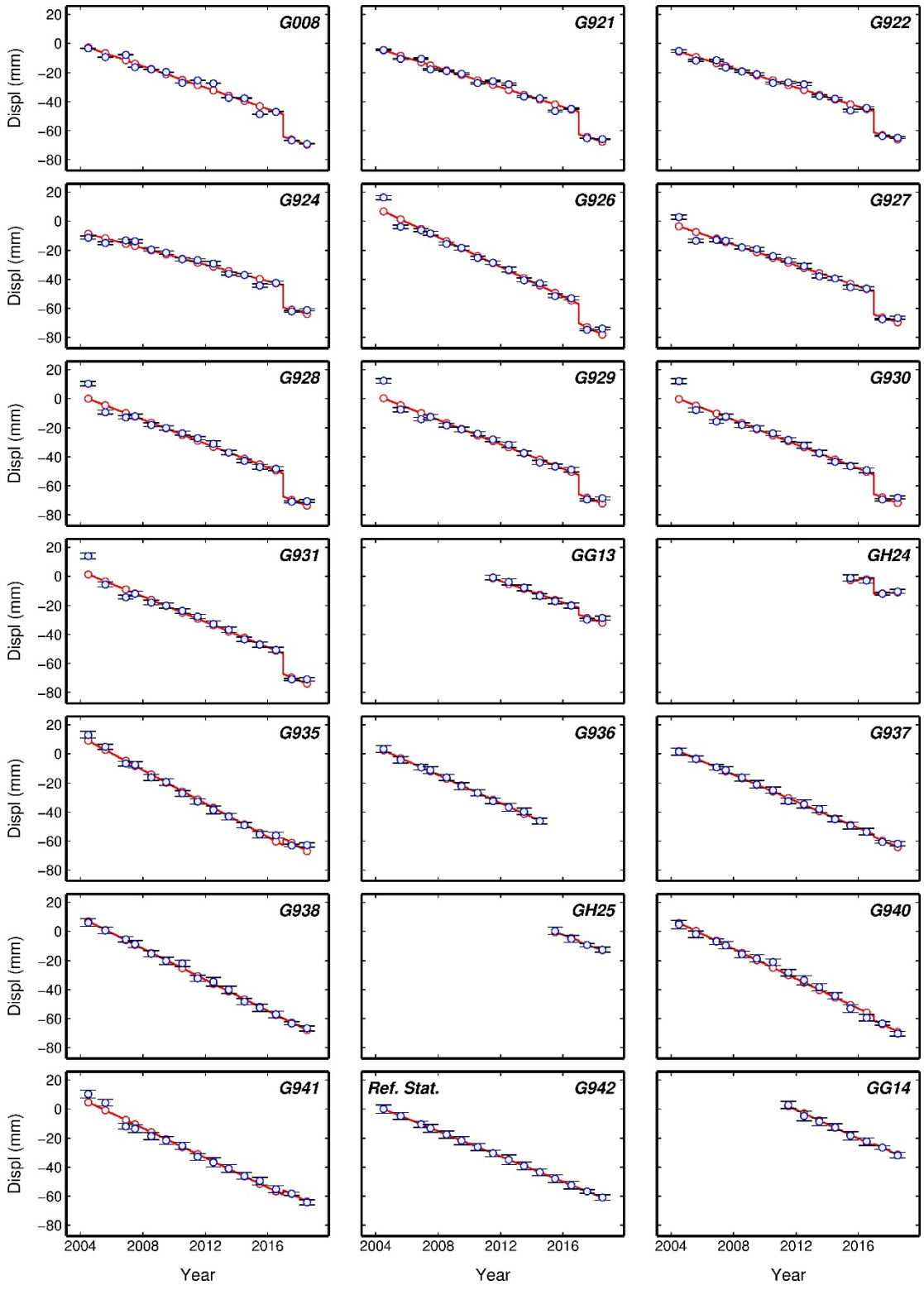


圖 2-4.53：龍井至太平測線之時間序列。

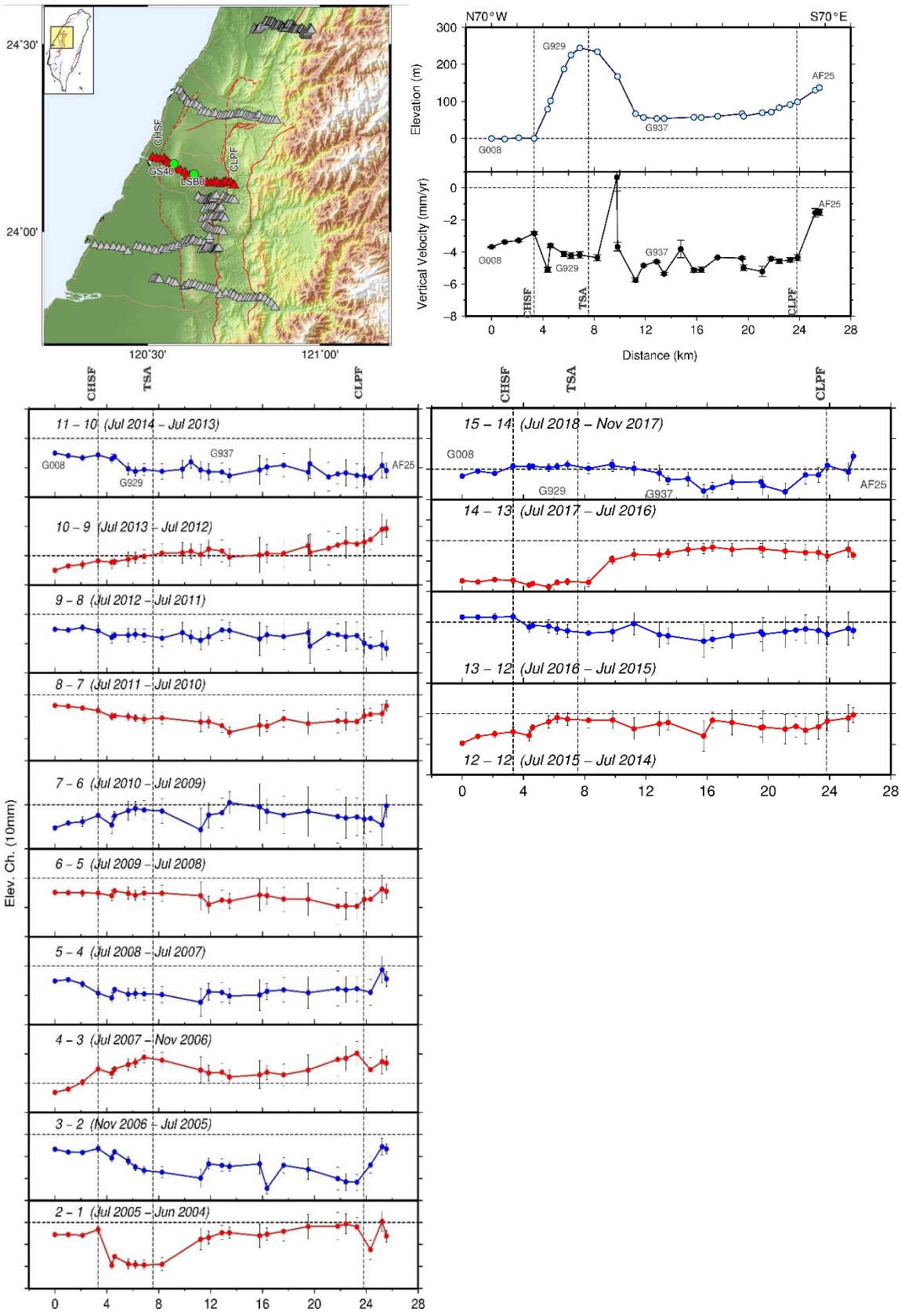


圖 2-4.54：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

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 年後僅施測五光至黃竹，自 2007 至 2018 年止共計施測 11 次。根據圖 2-4.57 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。

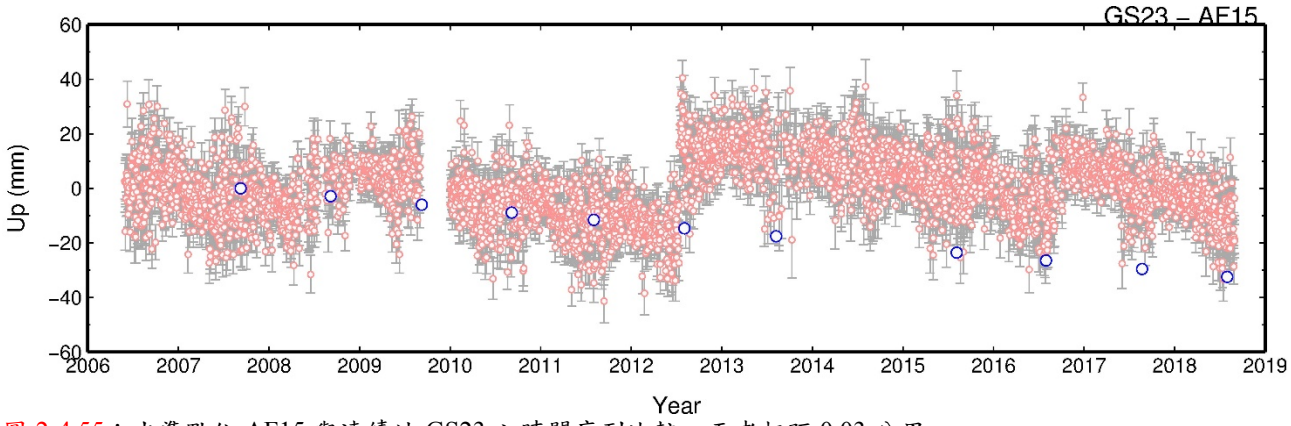


圖 2-4.55：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。

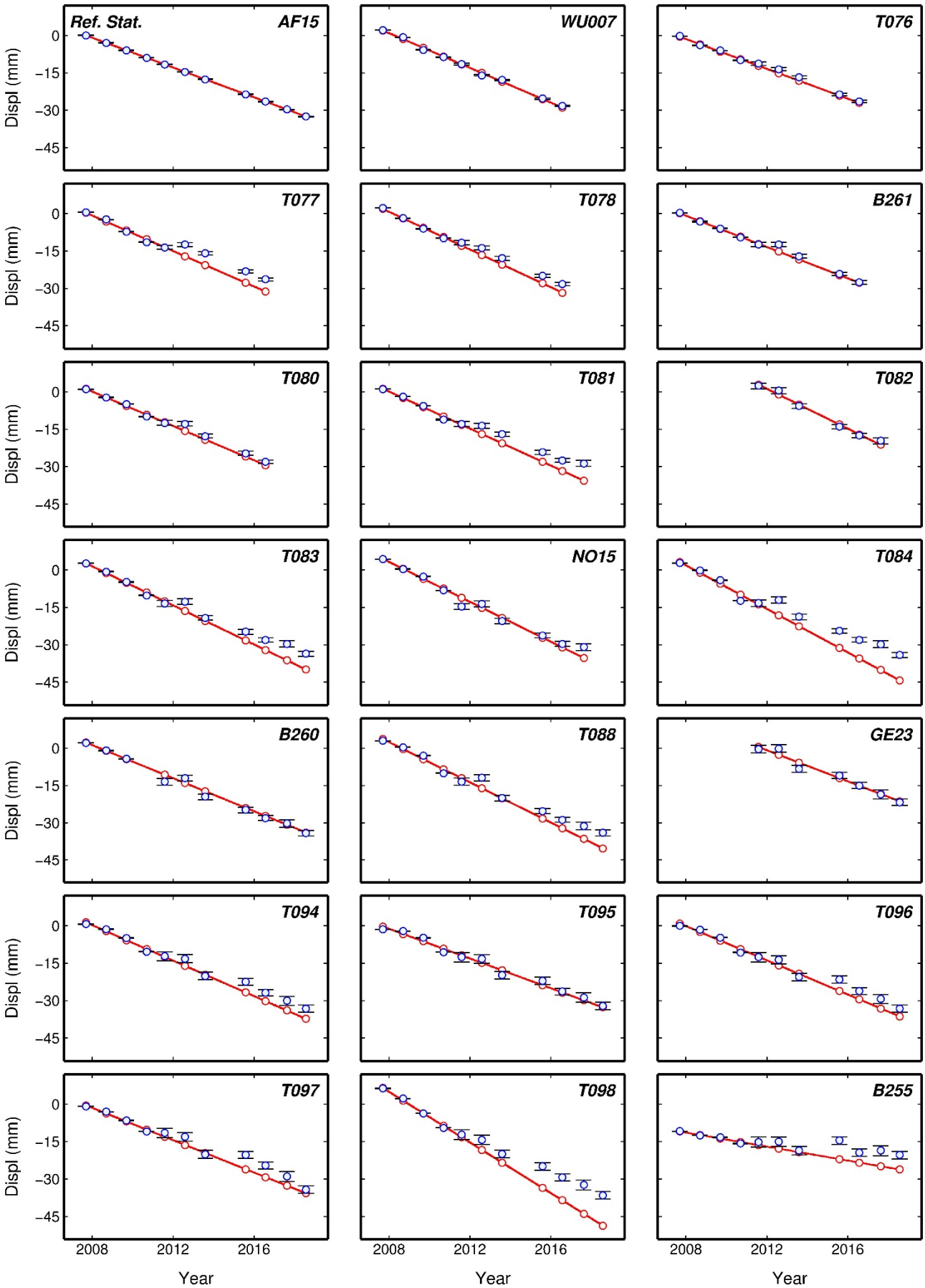


圖 2-4.56：五光至黃竹測線之時間序列。

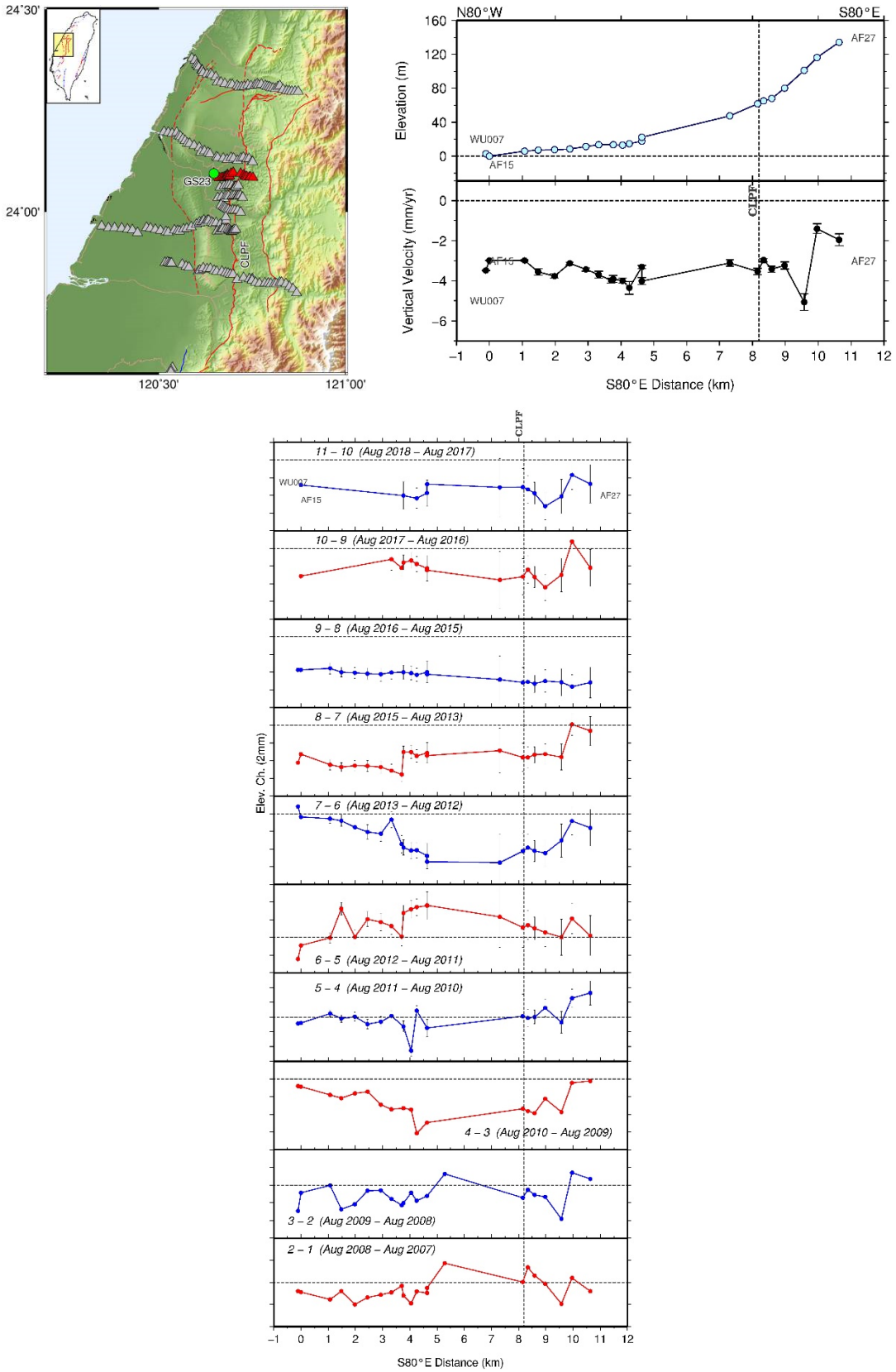


圖 2-4.57：五光至黃竹水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

王功-草屯-埔里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，總長約 47 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2018 年共計有 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 CAOT 之垂直速率（-4.9 mm/yr)，作為約制點來校正 T075 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.58 及圖 2-4.59)。

由精密水準時間序列得知本測線以及相鄰的光復-豐濱、紅葉-靜浦在 2009 年以及 2013 年瑞穗地震後發生速度變化，因此以 2009 年 1 月及 2013 年 10 月為分界分別求取三段之速度場，根據圖 2-3.60，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2002 年 8 月至 2004 年 3 月、藍色為 2004 年 3 月至 2013 年 6 月、紅色為 2013 年 6 月至 2018 年 3 月。

根據圖 2-3.59，由精密水準時間序列得知本測線於 2007 年發生速度變化，因此以 2007 年 1 月 1 日為速度變化分界；南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模 6 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，其同震位移量在-4.5 mm 到 5.5 mm 之間，因此在估算垂直速度時需考慮南投地震同震位移之影響。

根據圖 2-3.60，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。

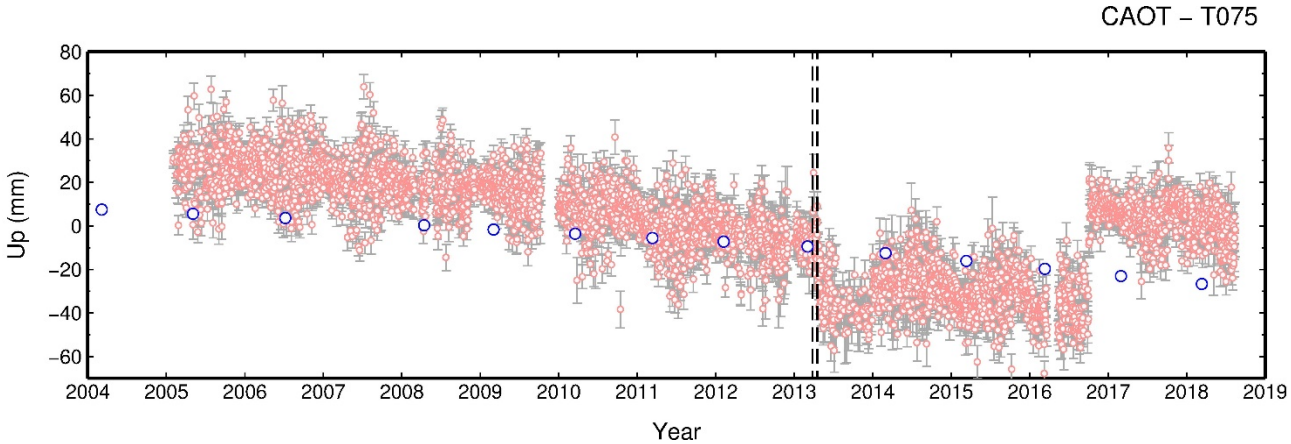


圖 2-4.58：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

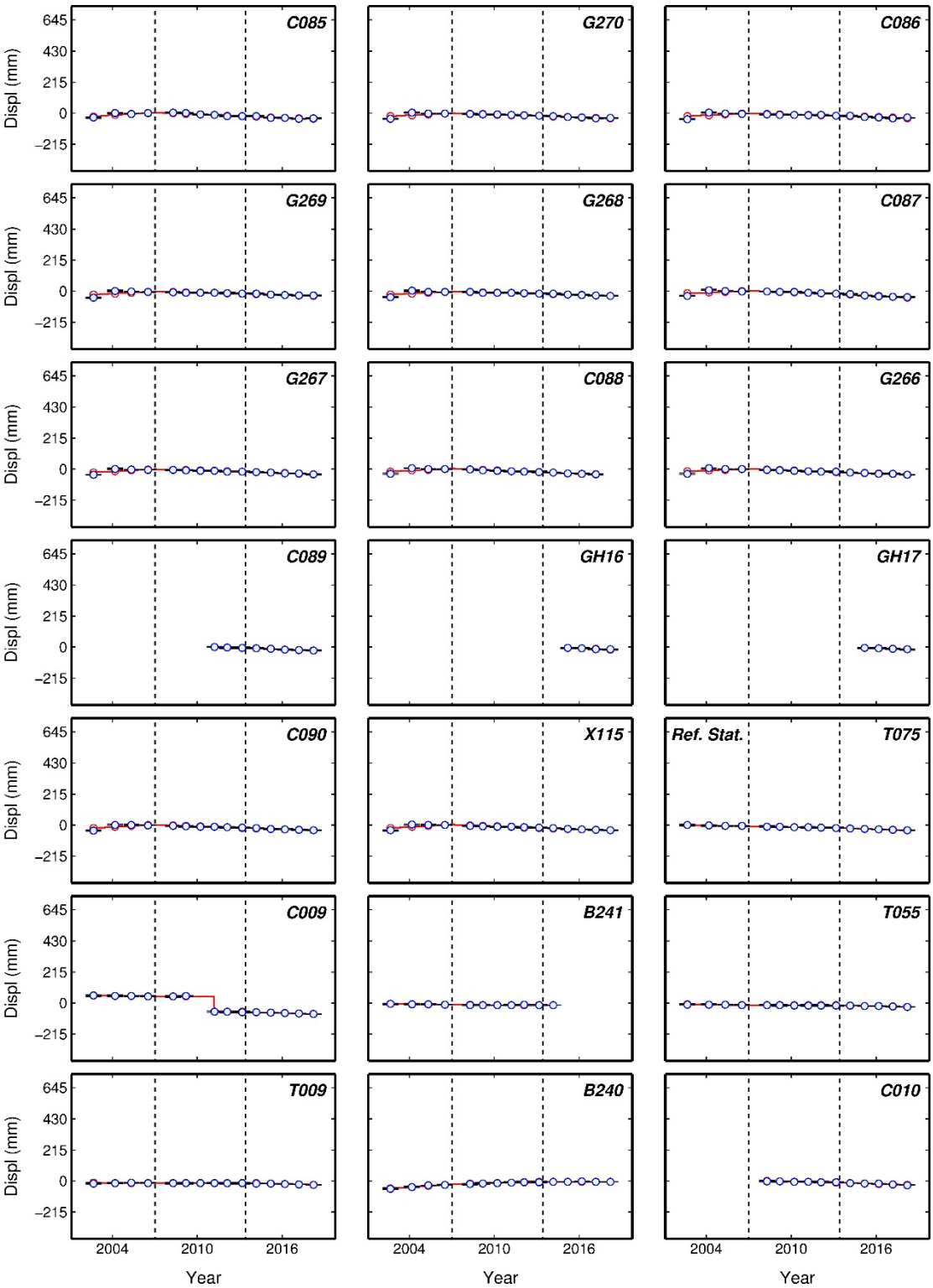


圖 2-4.59：王功至草屯測線及草屯至埔里測線之時間序列。虛線為 2007 年 1 月 1 日速度變化事件與 2013 年 6 月 2 日南投地震。

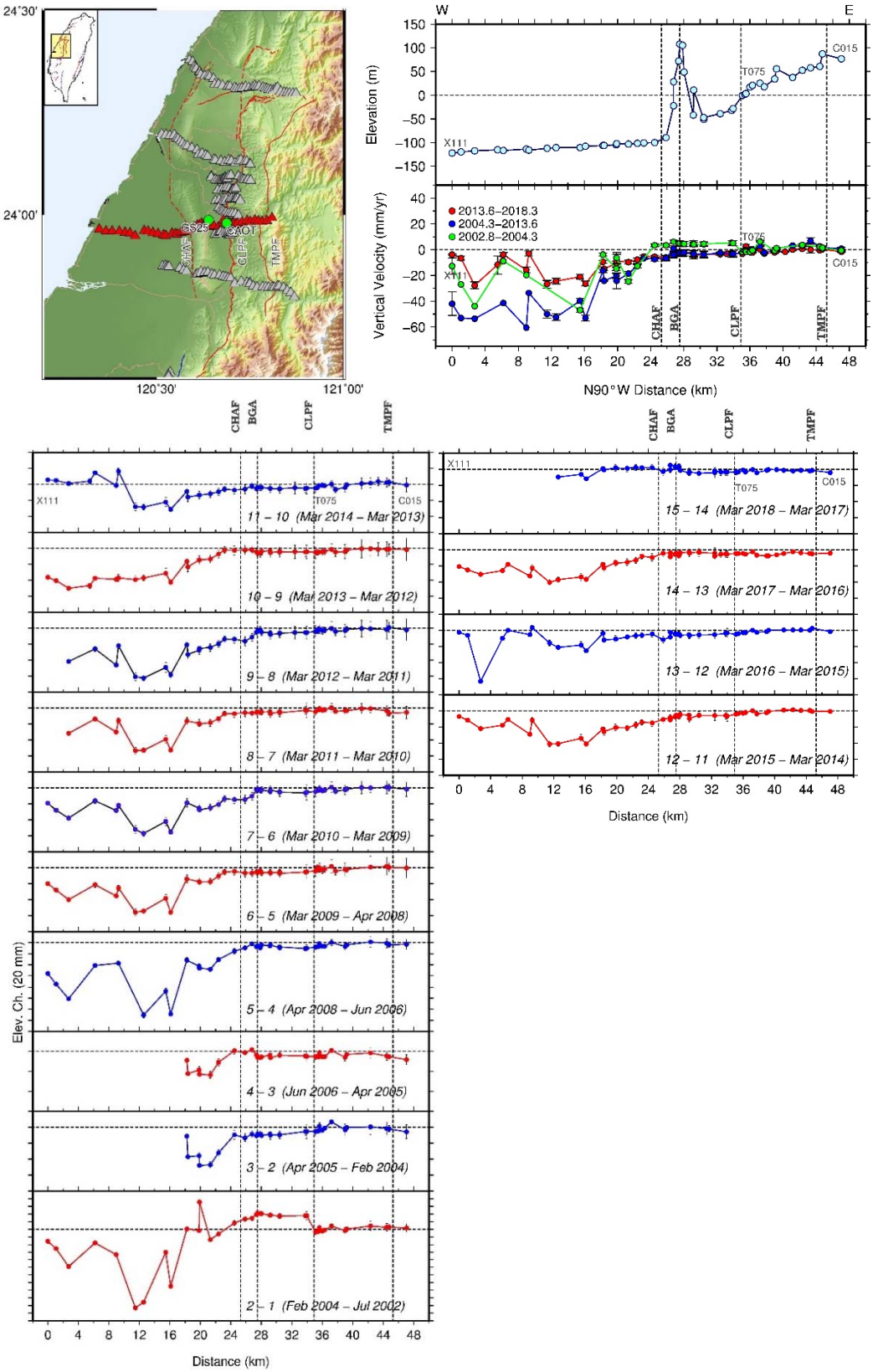


圖 2-4.60：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2004 年之垂直速度、藍色為 2004 - 2013 年南投地震震後垂直速度、紅色為 2013 年至今之垂直速度。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 為八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

北斗-水里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 38 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2018 年共計有 15 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 2-4.61 及圖 2-4.62)，此外根據圖 2-3.63，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2002 年 11 月至 2007 年 1 月、藍色為 2007 年 1 月至 2013 年 6 月、紅色為 2013 年 6 月至 2018 年 3 月。

在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模 6 以上的南投地震，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坐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 2-3.63 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，此結果可能暗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。

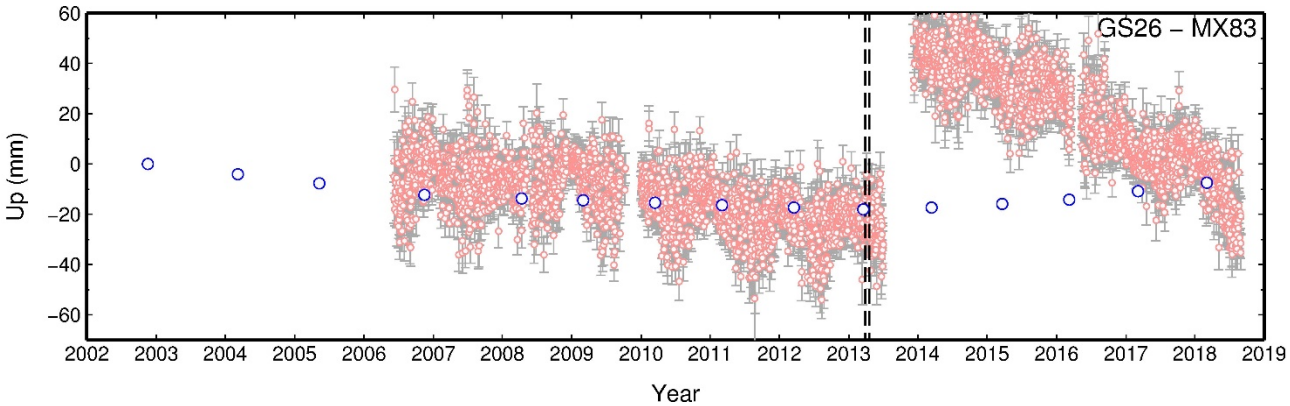


圖 2-4.61：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

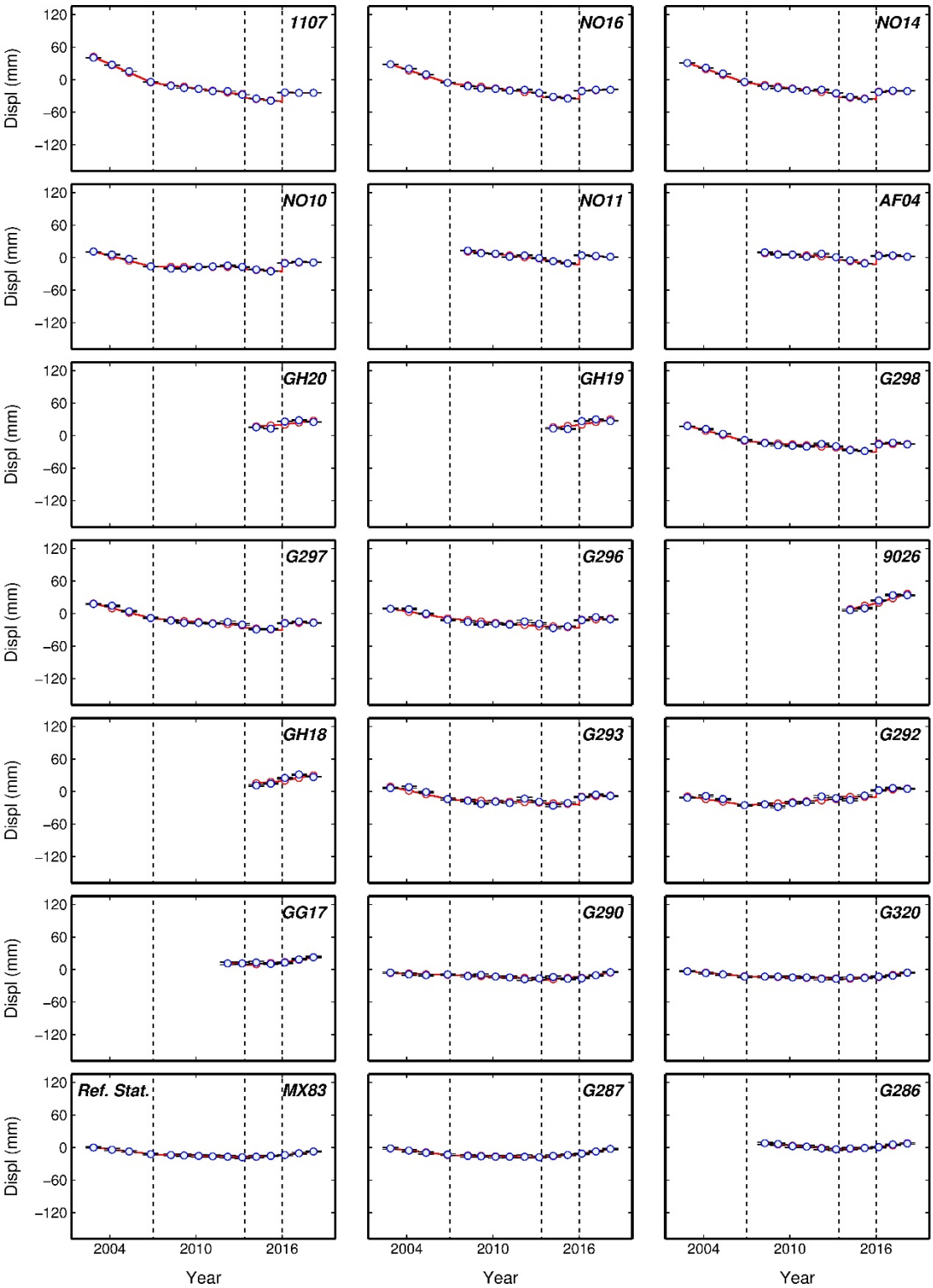


圖 2-4.62：北斗至水里測線之時間序列。虛線為 2007 年 1 月 1 日速度變化事件與 2013 年 6 月 2 日南投地震。

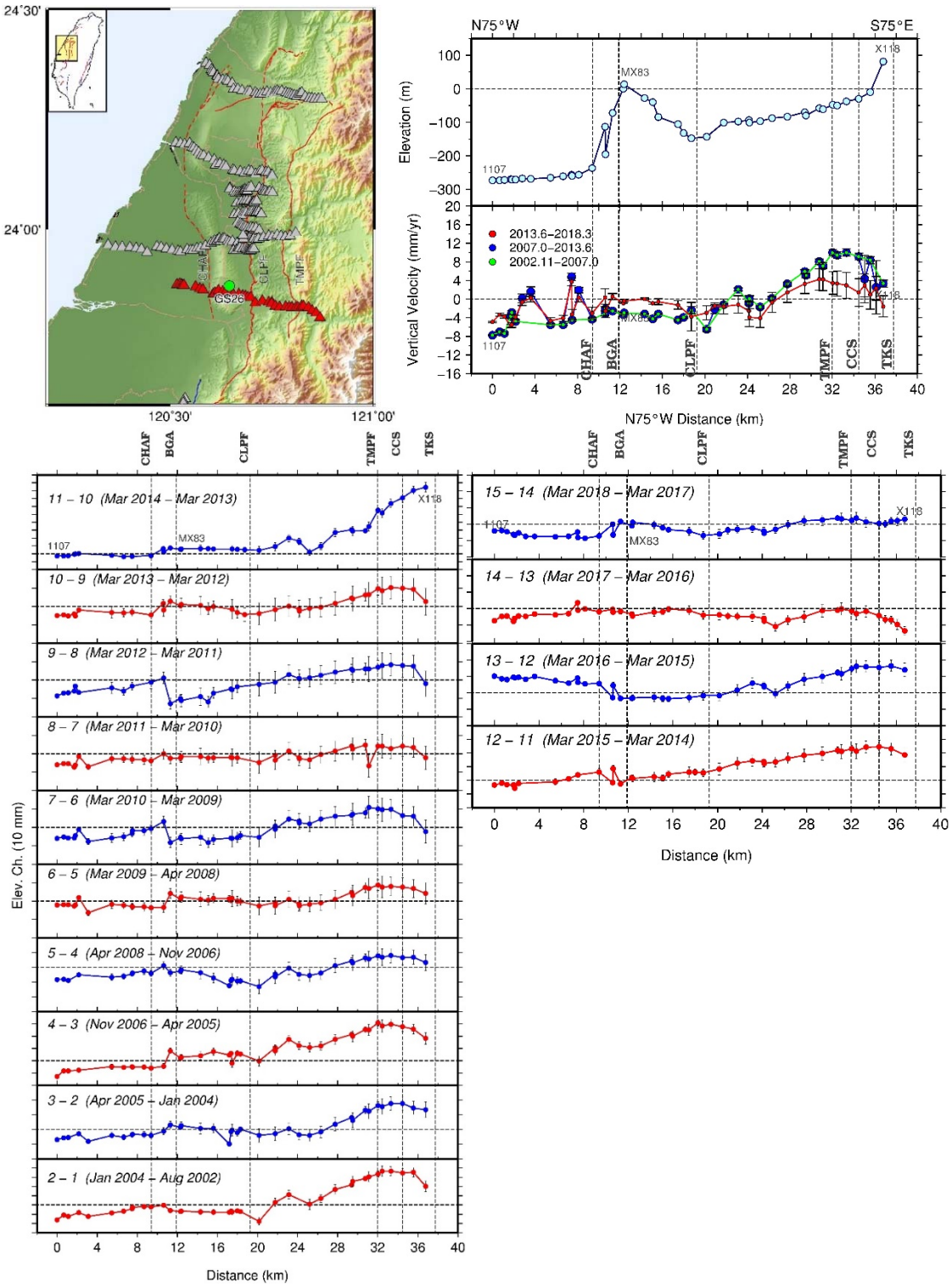


圖 2-4.63：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層、CCS 集集大山向斜、TKS 為頂崁向斜。

中部地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.64 所示，由結果可知本區速度大致朝西北向運動，2002-2007 年速度約為 2.5～9.6 mm/yr，2007-2013 年速度約為 4.9～12.0 mm/yr，2013-2018 年速度約為 4.4～12.5 mm/yr 量。

垂直速度場如圖 2-4.65，台中地區跨斷層之垂直速度並無明顯變化。彰化、南投地區在沿海一帶有相當大的沉陷量，第一段速度值約為 38.9～107.5 mm/yr，第二段速度值約為 28.5～51.9mm/yr，第三段速度值約為 3.8～28.3 mm/yr。進入南投山區則呈抬升，第一段速度值約為 12.7～16.5 mm/yr，第二段速度值約為 7.5～9.1mm/yr，第三段速度值約為 5.8～6.5 mm/yr。

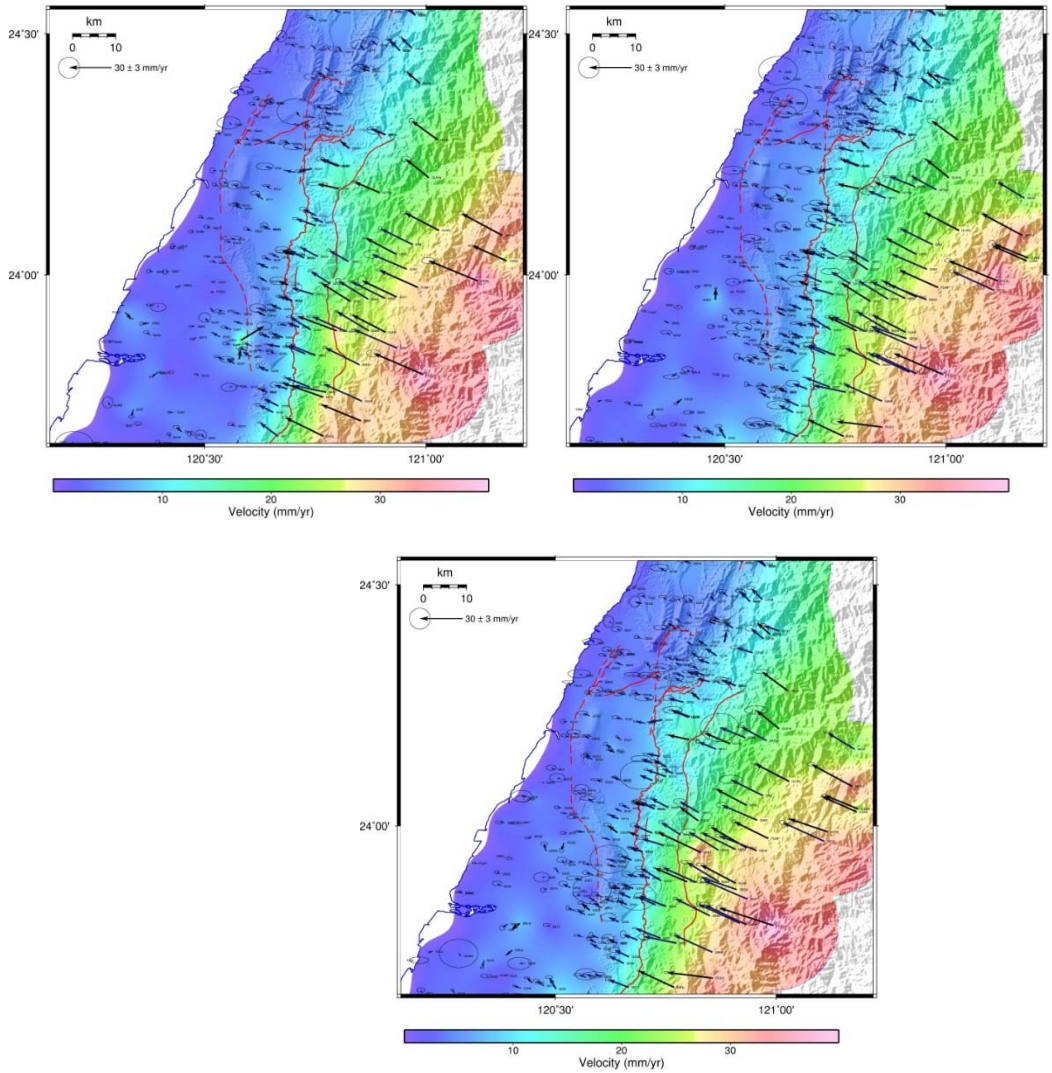


圖 2-4.64：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上表示 2002~2007 年速度場，右上表示震後 2007~2013 年速度場，下圖表示 2013~2018 年速度場。

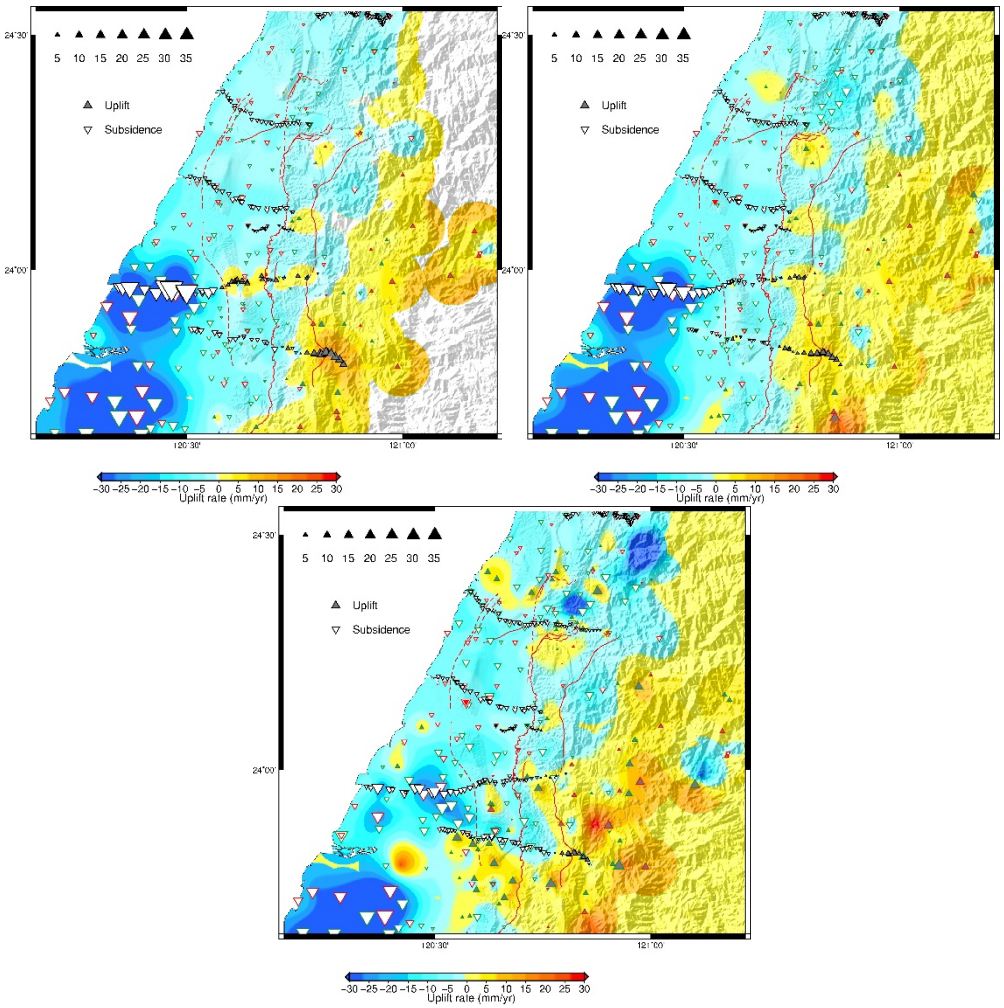


圖 2-4.65：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。左上表示 2002-2007 年速度場，右上表示 2007-2013 年速度場，下圖表示 2013-2018 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站。

2-4-5 嘉南地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之嘉南地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 171 點，以及 5 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，嘉南地區（圖 2-4.66）可比對坐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，由坐標時間序列比對可知（圖 2-4.67、圖 2-4.68），移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

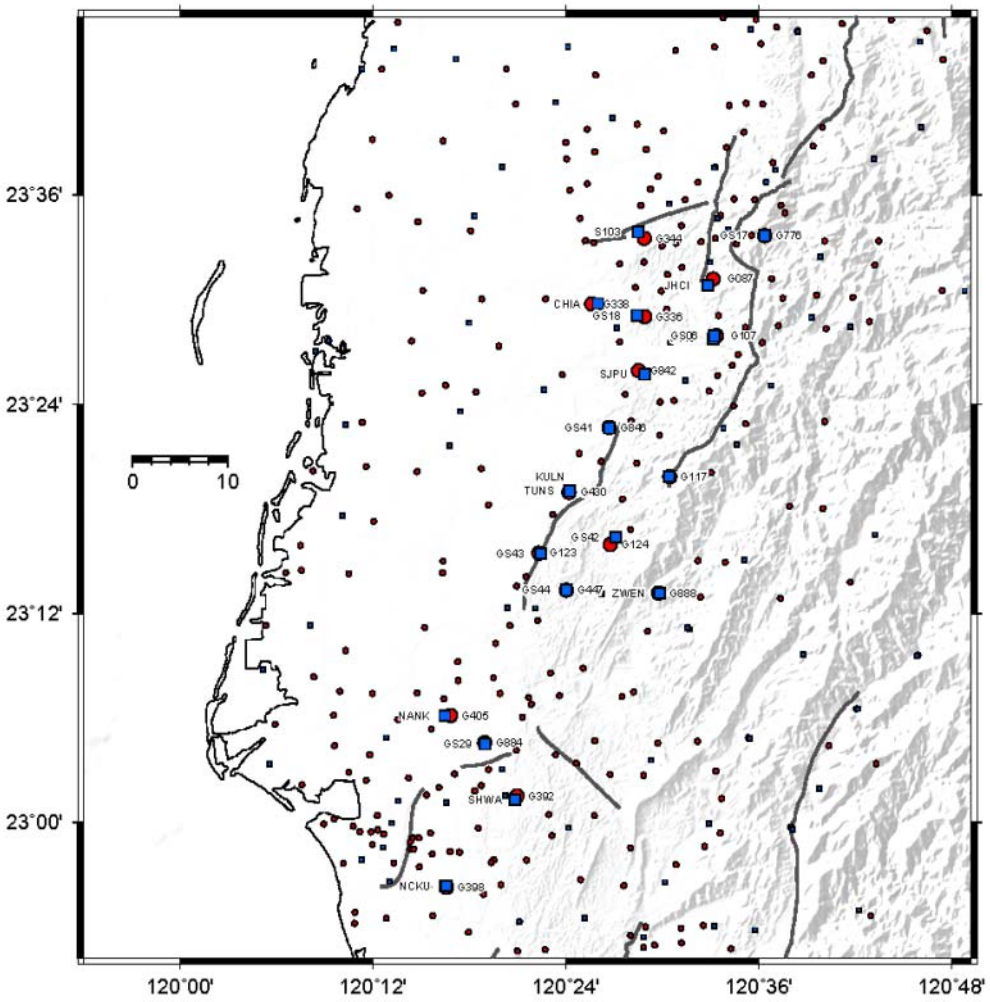


圖 2-4.66：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

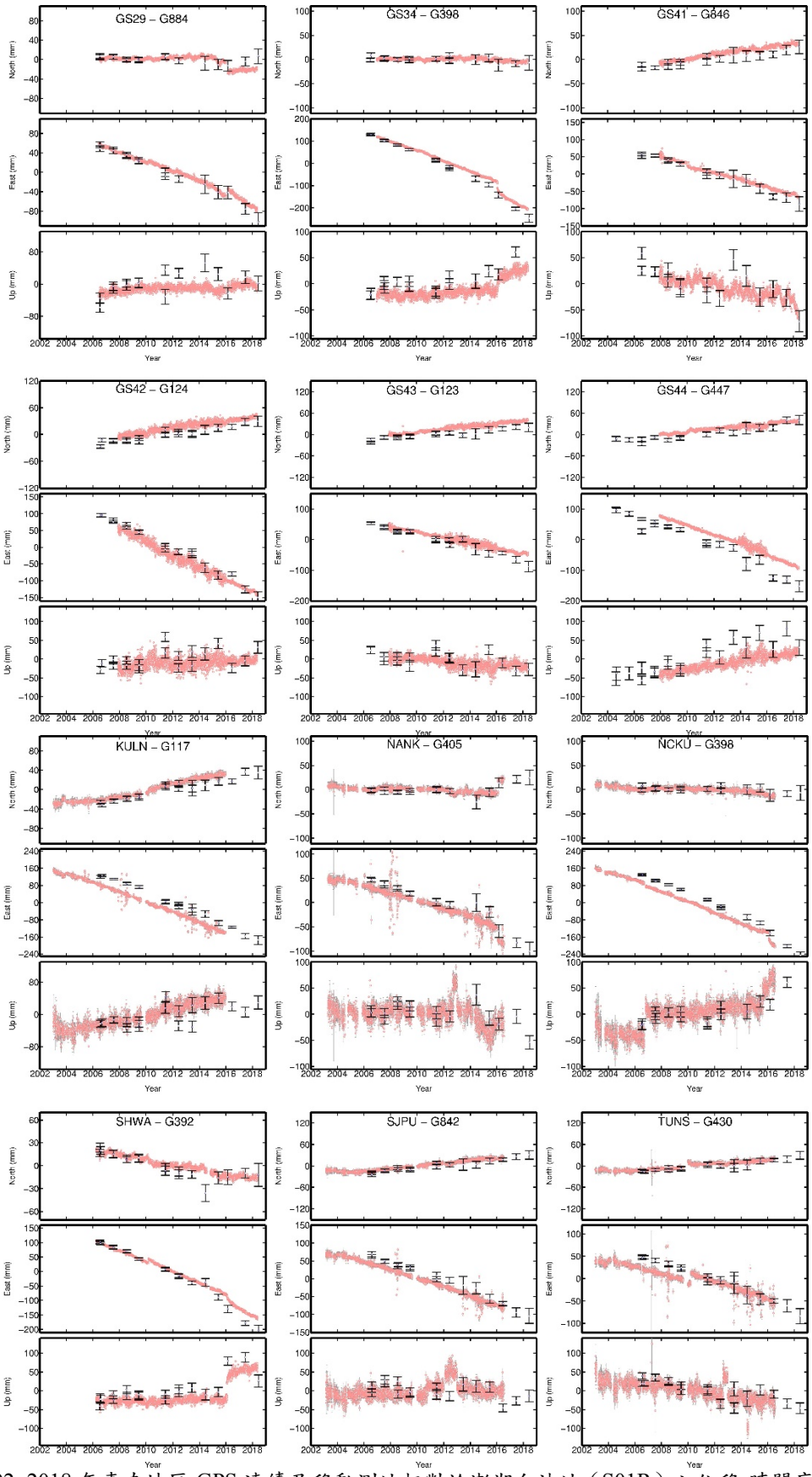


圖 2-4.67：2002~2018 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

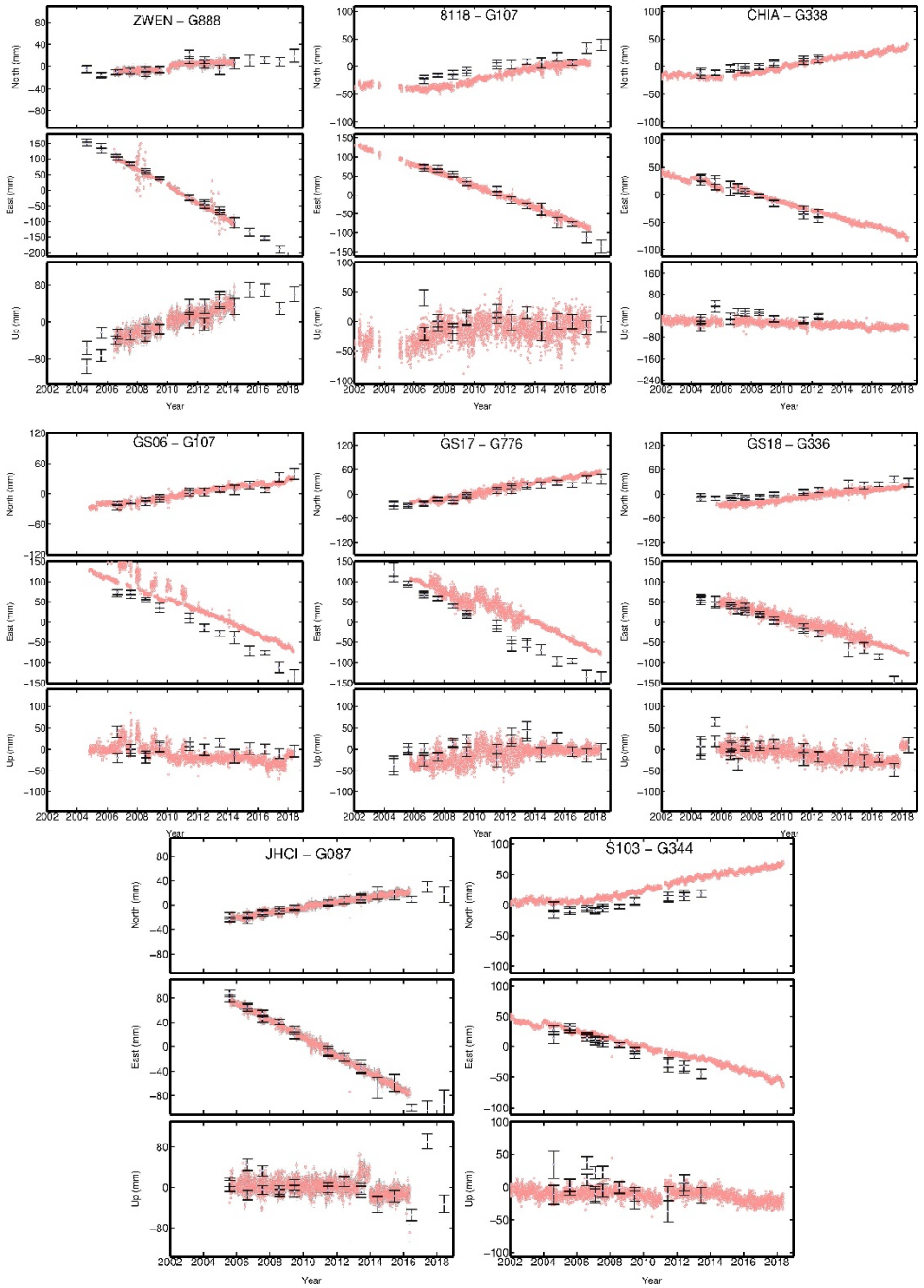


圖 2-4.68：2002~2018 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

金湖至瑞峰測線橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層，總長約 54 公里， 2003 年至 2018 年間共進行 16 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS17、TAPN 及 S103 之垂直速率（1.3 mm/yr、0.6 mm/yr 及-0.1 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 2-4.69 及圖 2-4.70）。

根據圖 2-4.72，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。

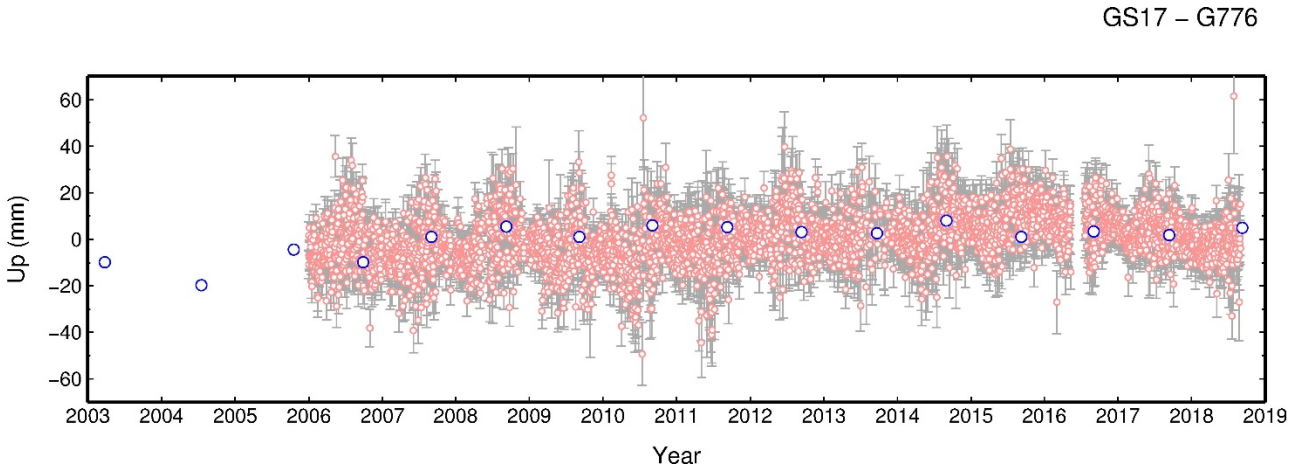


圖 2-4.69：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

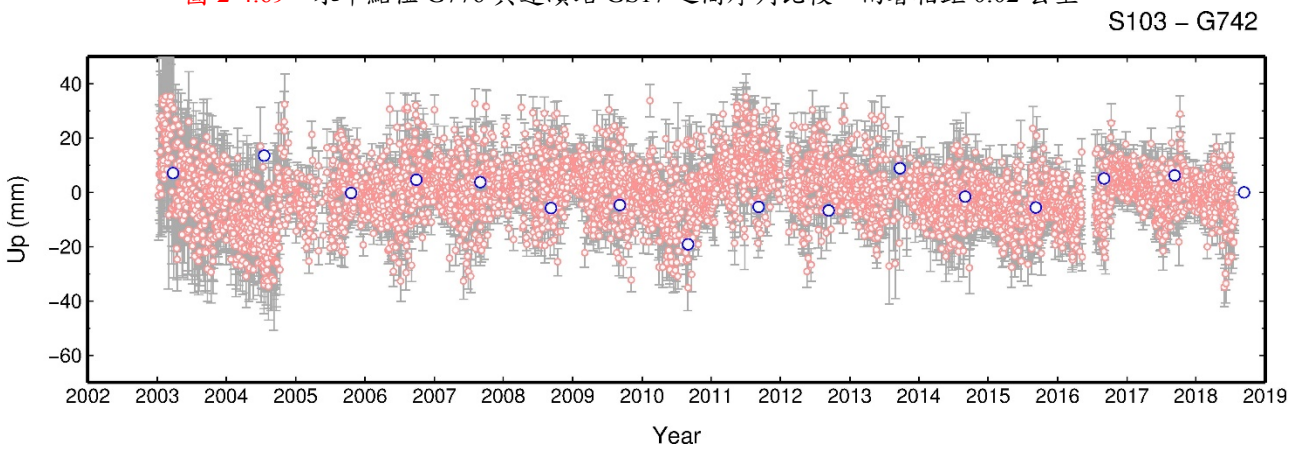


圖 2-4.70：水準點位 G742 與連續站 S103 之間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

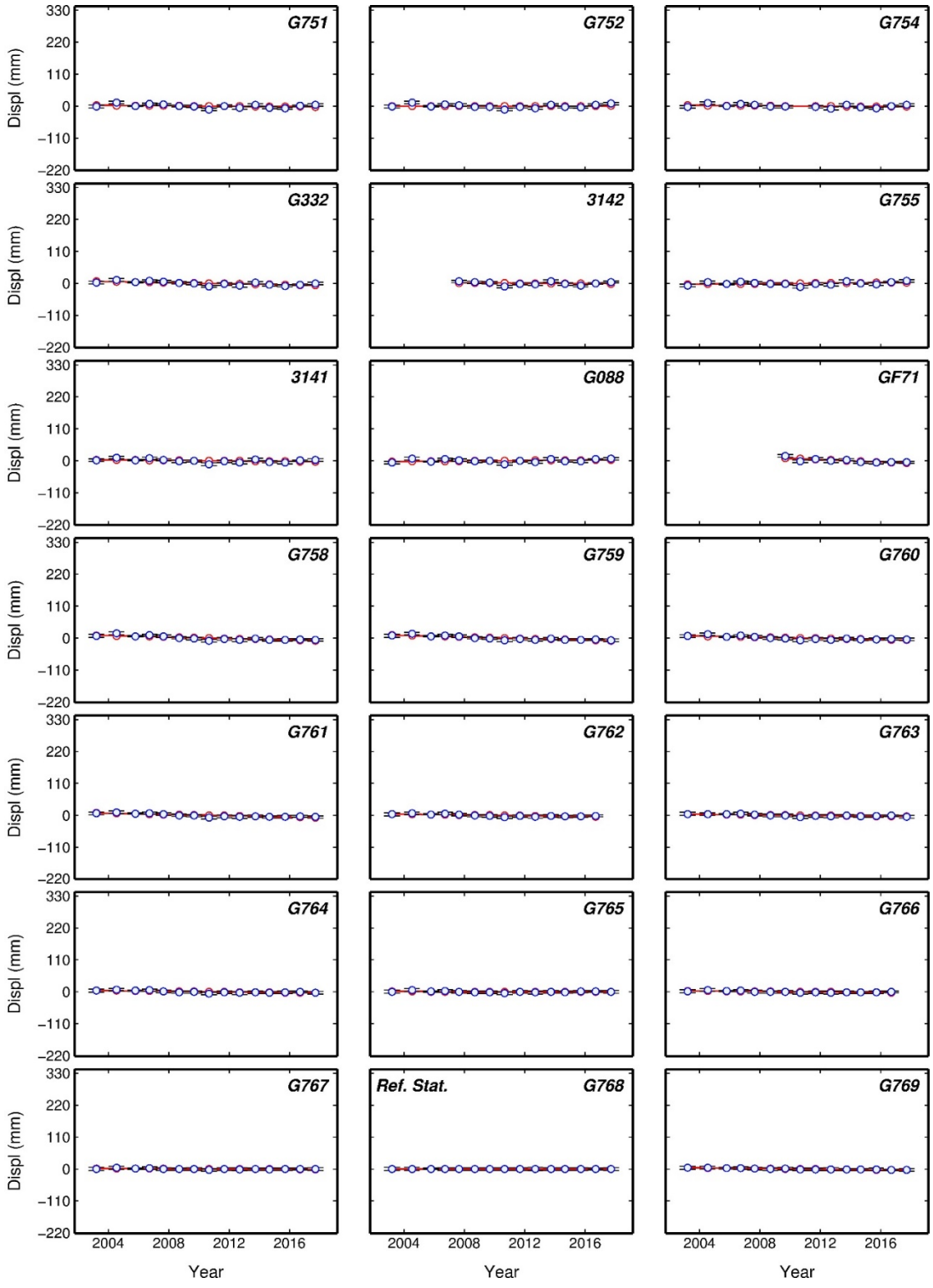


圖 2-4.71：金湖至瑞峰測線之時間序列。

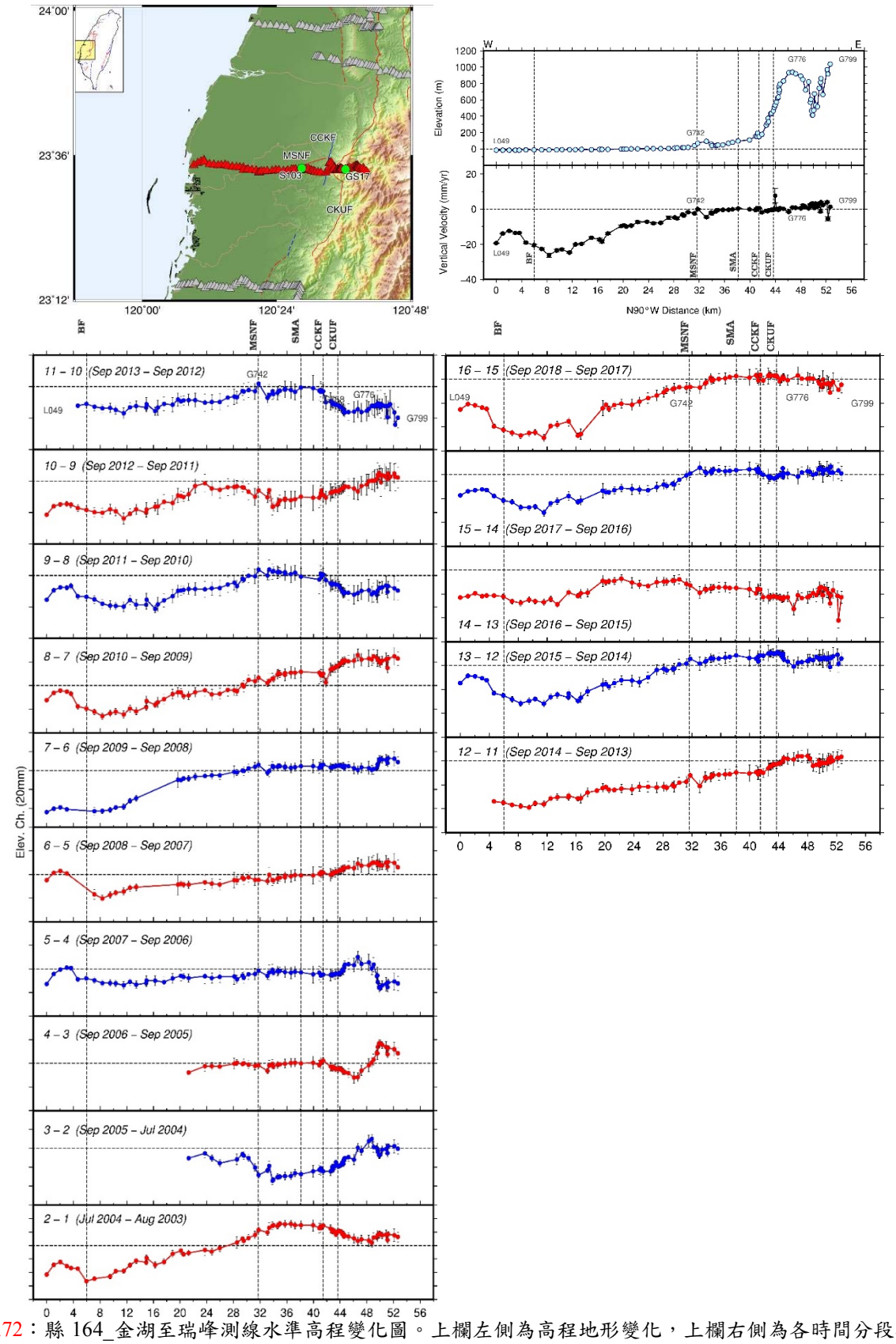


圖 2-4.72：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。BF 為 B 斷層、MSNF 為梅山斷層、SMA 為小梅背斜、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

北門-楠西測線橫跨六甲斷層與觸口斷層，測線長約 40 公里(投影至剖面的長度)，從 2003 年至 2018 年共計有 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS44 之垂直速率（5.9 mm/yr），作為約制點來校正 I088 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.73 及圖 2-4.74）。

根據圖 2-4.75，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2003 年 10 月至 2010 年 3 月甲仙地震震前垂直速度、藍色為 2010 年 3 月至 2018 年 4 月之垂直速度，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。由於本測線自六甲斷層以東，點位的地形變化趨勢變得較顯著，顯示自進入山區地段，地表垂直運動活動性增加。

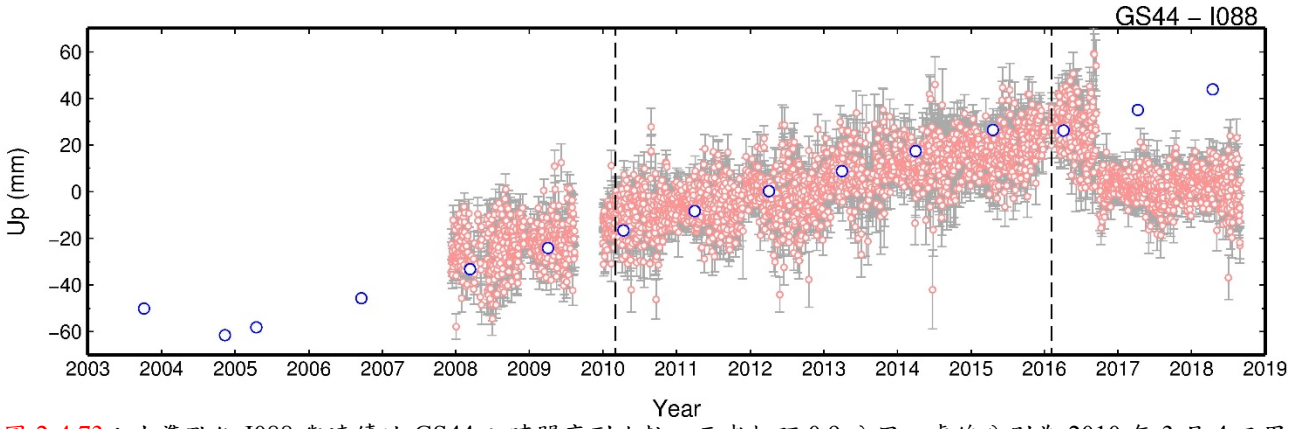


圖 2-4.73：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

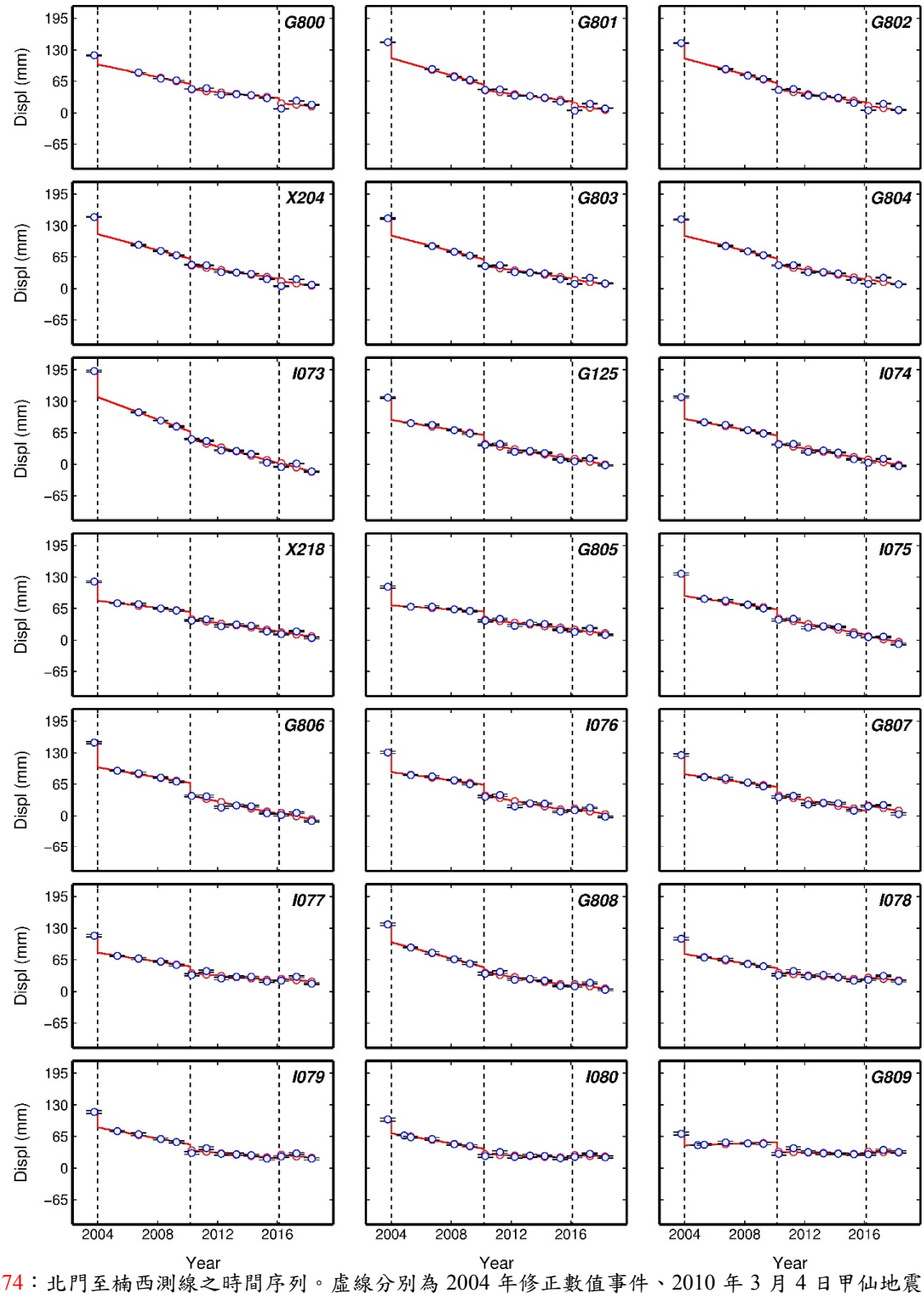


圖 2-4.74：北門至楠西測線之時間序列。虛線分別為 2004 年修正數值事件、2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 6 月 2 日美濃地震。

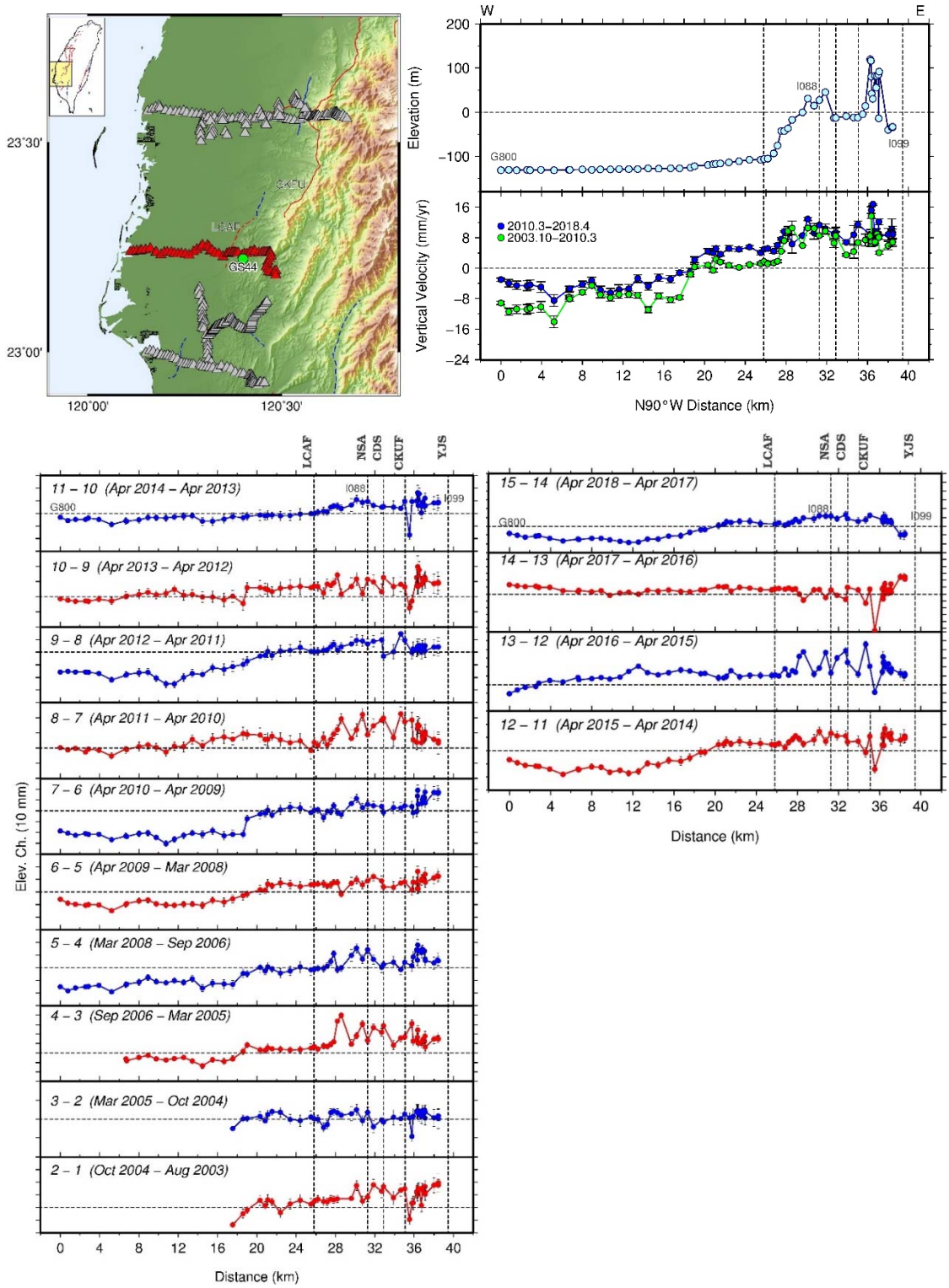


圖 2-4.75：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、藍色為 2010 至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、NSA 為牛山背斜、CDS 為前大埔向斜、CKUF 為觸口斷層、YJS 為玉井向斜。

善化至關廟測線由北往南走橫跨新化斷層，測線長約 22 公里，從 2003 年至 2018 年共計有 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（1.2 mm/yr），作為約制點來校正 G374 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.76）。

根據圖 2-4.78， 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 25.0 m 之抬升現象（新化高中至關廟區）。

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坐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。

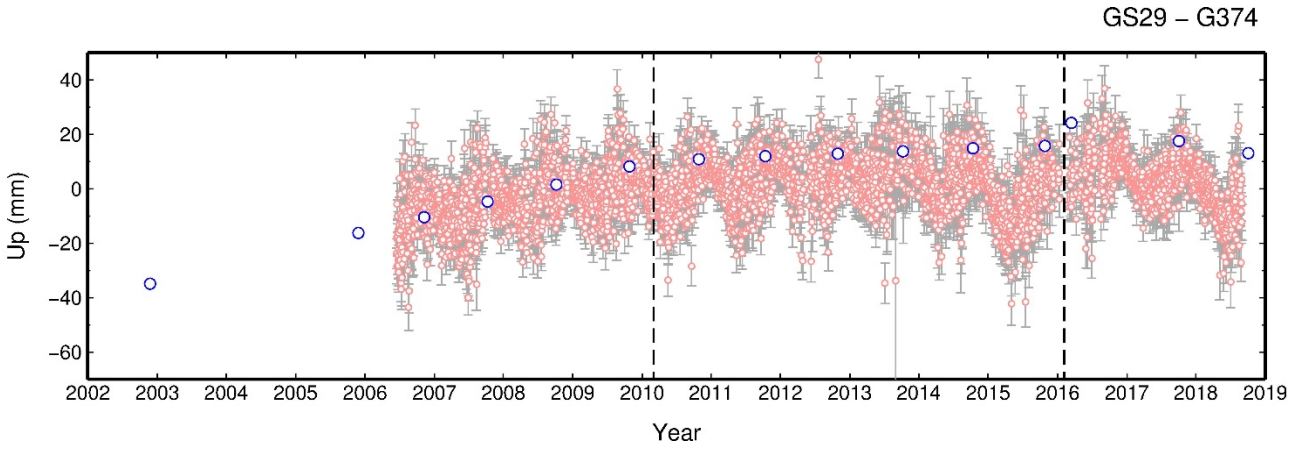


圖 2-4.76：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

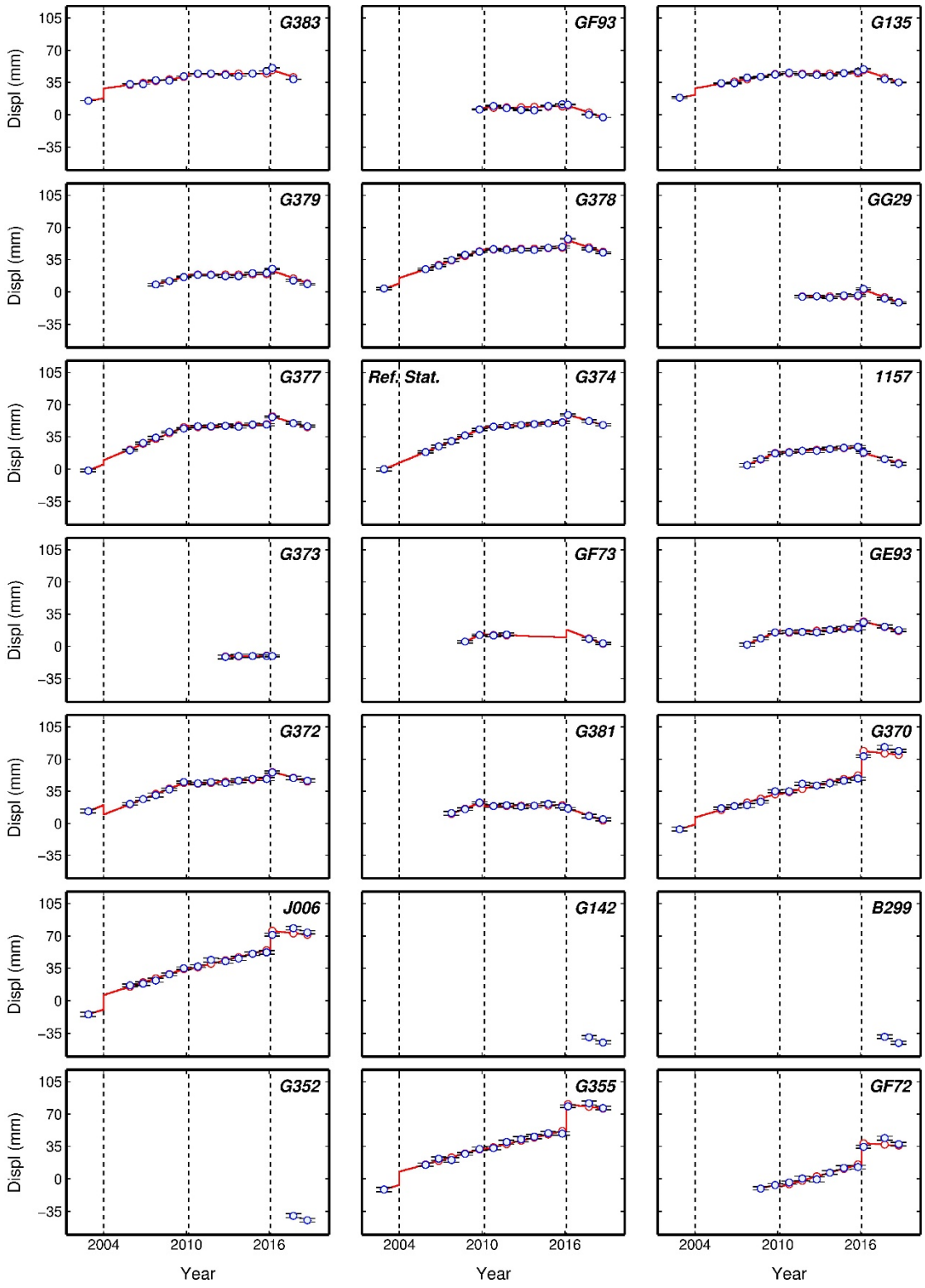


圖 2-4.77：善化至關廟測線之時間序列。虛線分別為 2004 年數值修正事件、2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

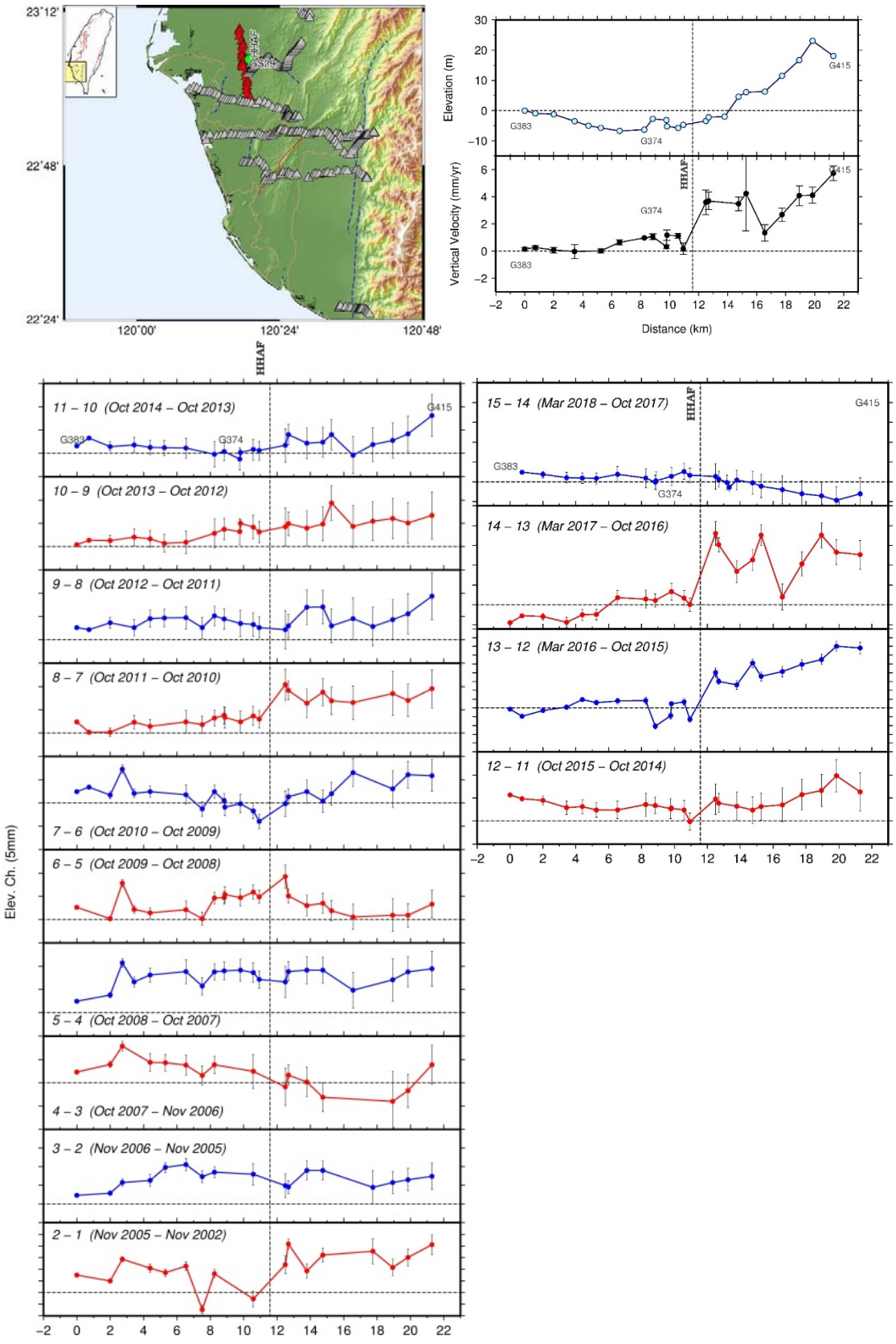


圖 2-4.78：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

安平至龍崎測線橫跨臺南台地、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 2018 年共計有 19 次施測。本測線以 GPS 連續站 CKSV 之垂直速率（3.0 mm/yr），作為約制點來校正 TN04 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.79）。

根據圖 2-4.81，各時間分段之水準平均抬升速率圖中藍色為 2001 年 7 月至 2016 年 2 月美濃地震震間垂直速度，紅色為 2016 年 2 月至 2018 年五月之垂直速度，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。

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，垂直速度則快速約由 20.0 mm/yr 降至-10.5 mm/yr，向東延伸再緩慢增加至約 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附近有產生同震現象。因此速度之估算是藉由坐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。

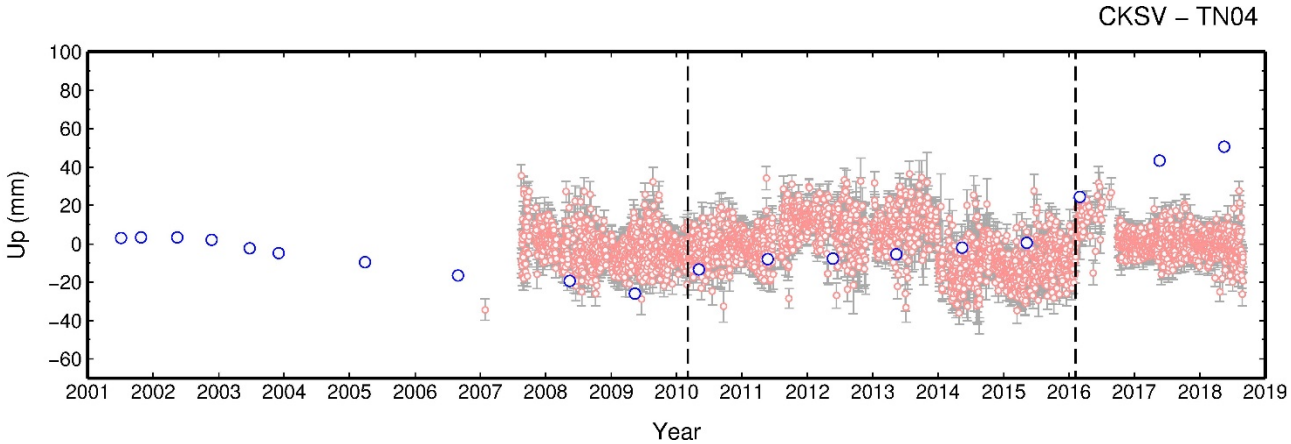


圖 2-4.79：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

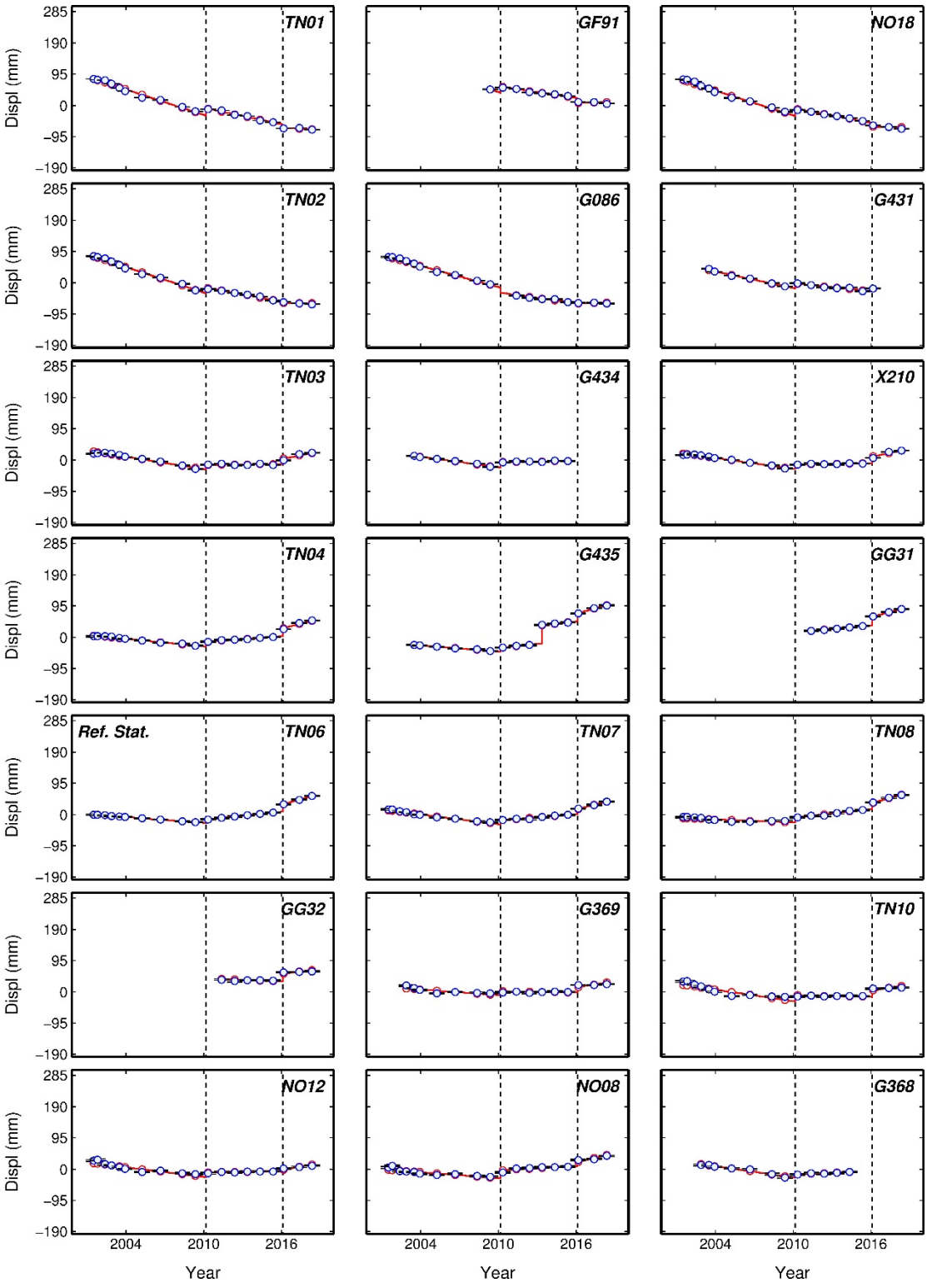


圖 2-4.80：安平至龍崎測線之時間序列。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

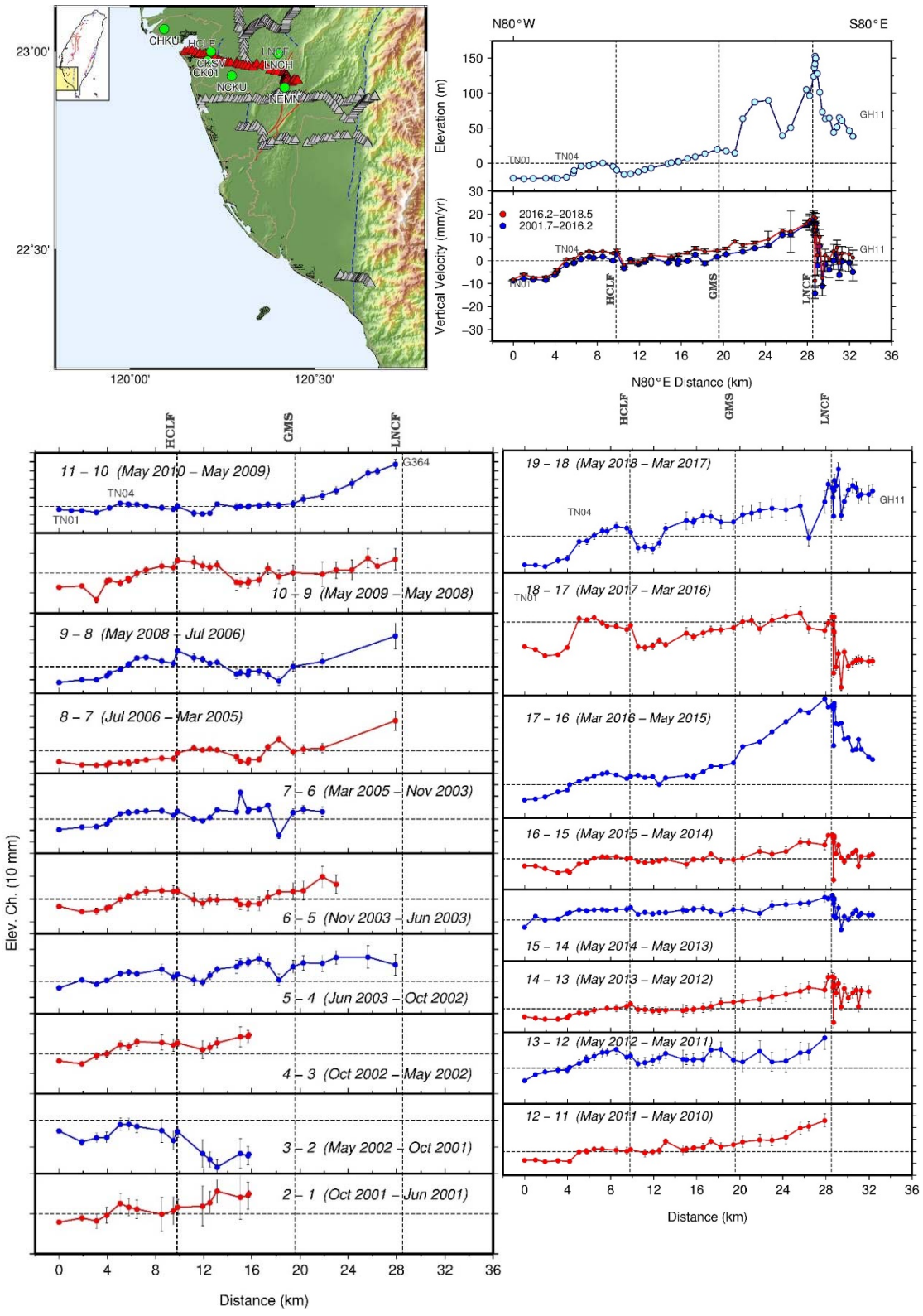


圖 2-4.81：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，藍色為 2001 - 2016 年美濃地震震間垂直速度，紅色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、GMS 為關廟向斜、LCF 為龍船斷層。

玉井至新化精密水準測線，路線長約 25 公里，包括 55 個點位（圖 2-4.83）。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。

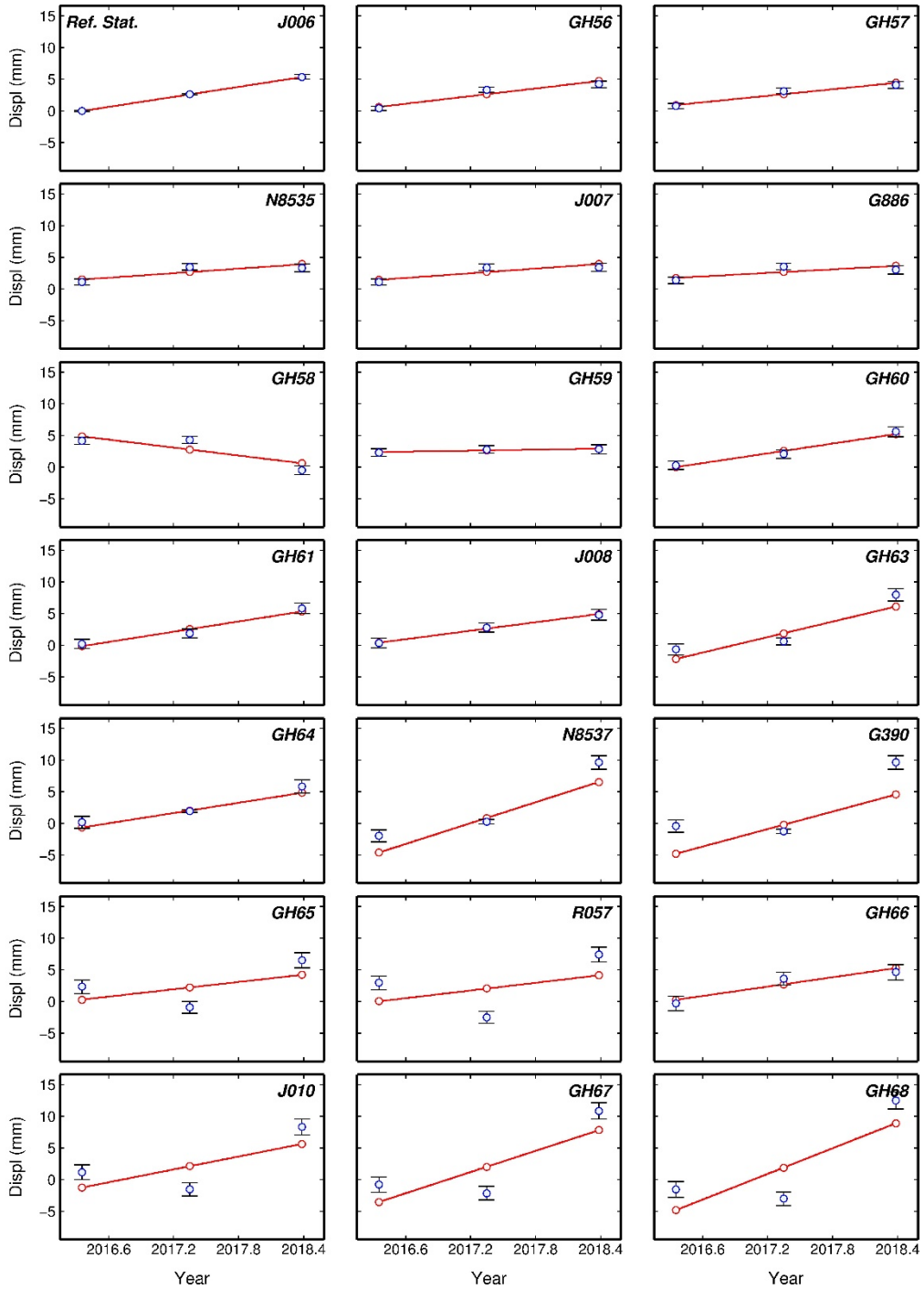


圖 2-4.82：玉井至新化測線之時間序列

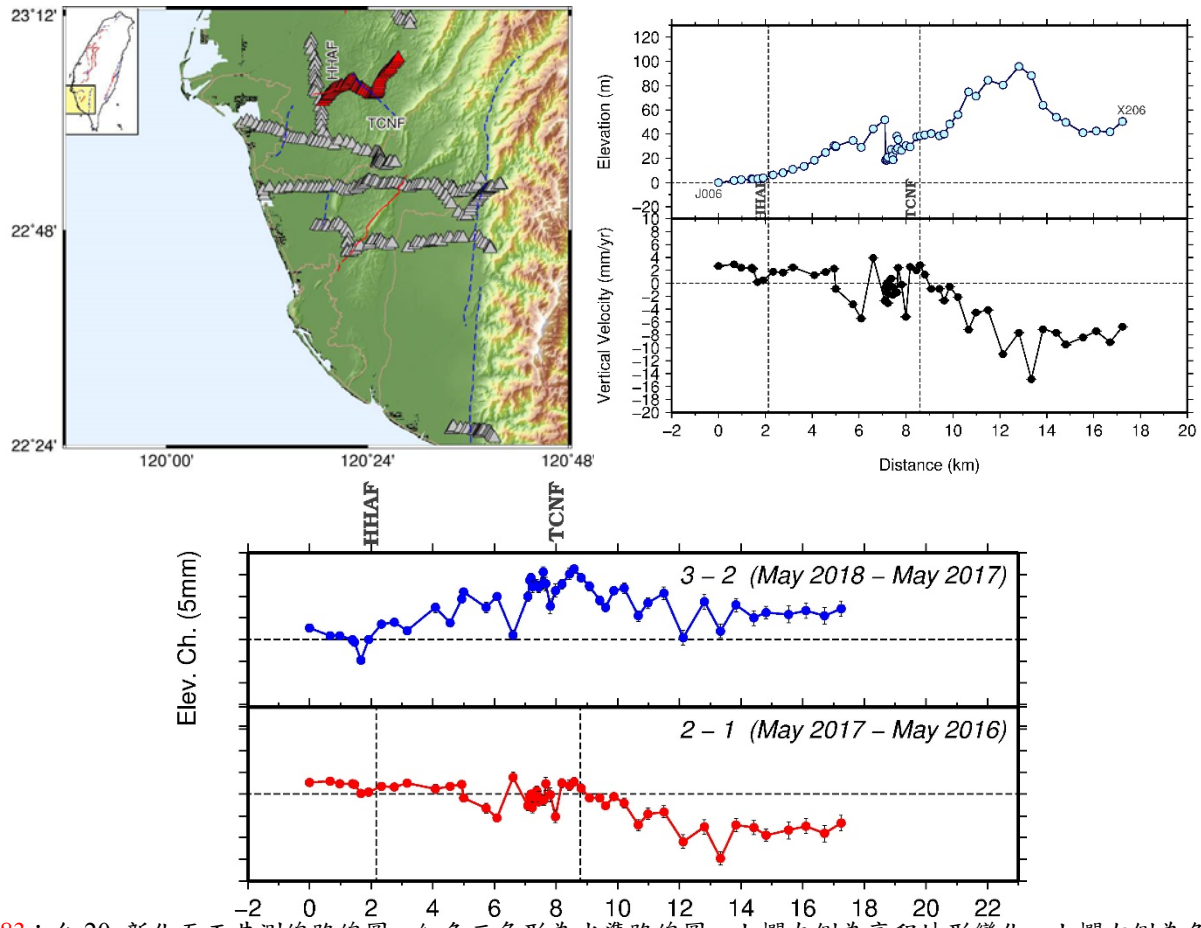


圖 2-4.83：台 20_新化至玉井測線路線圖。紅色三角形為水準路線圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

由精密水準時間序列分析結果可知，安平-龍崎及路竹茂林測線東段在 2010 年甲仙地震後發生速度變化，因此將本區及高屏地區之 GPS 資料以 2010 年 3 月為分界，分別求取兩段之速度場，此外，雖然 2016 年美濃地震後同樣也造成嘉南地區的速度場改變，但是因為資料累積不足，所以本計畫目前尚未進行 2016 年美濃地震後的速度場評估。

嘉南地區各觀測點位之垂直速度場如圖 2-4.85，雲林、嘉義地區在沿海一帶的垂直沉降速度約為 15 至 20 mm/yr，進入山區則有約 3 mm/yr 的抬升速度。台南地區之沿海也呈現約 10 mm/yr 之平均沉陷速率，山區則有約 7 mm/yr 的平均抬升速率。善化-關廟地區之垂直速度約在 0-4 mm/yr 之間，在龍船斷層附近則約有 20 mm/yr 的抬升速度。

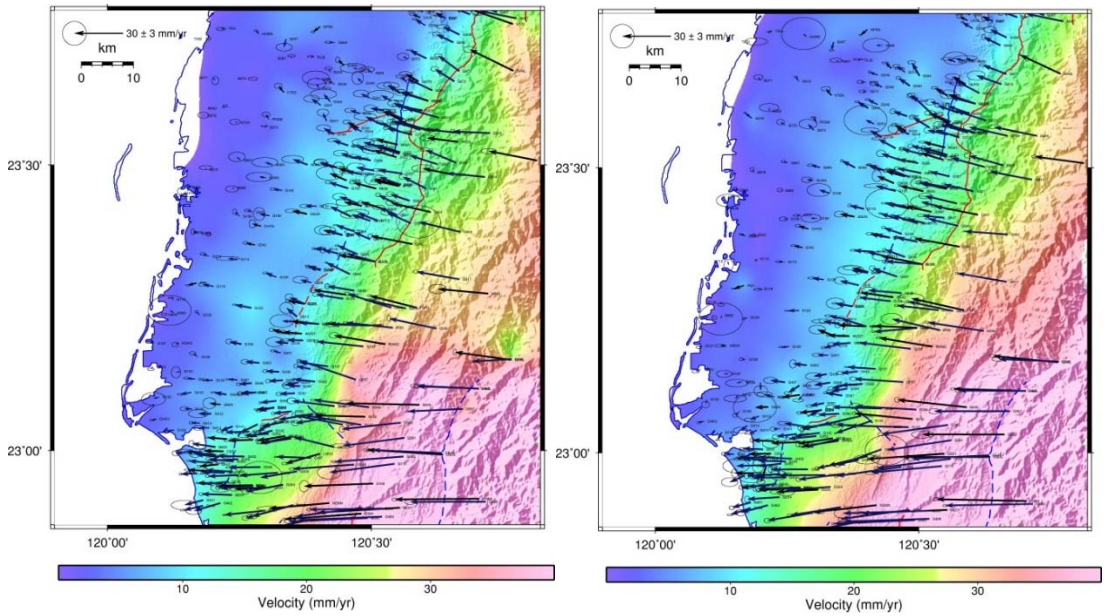


圖 2-4.84：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2017 年速度場。

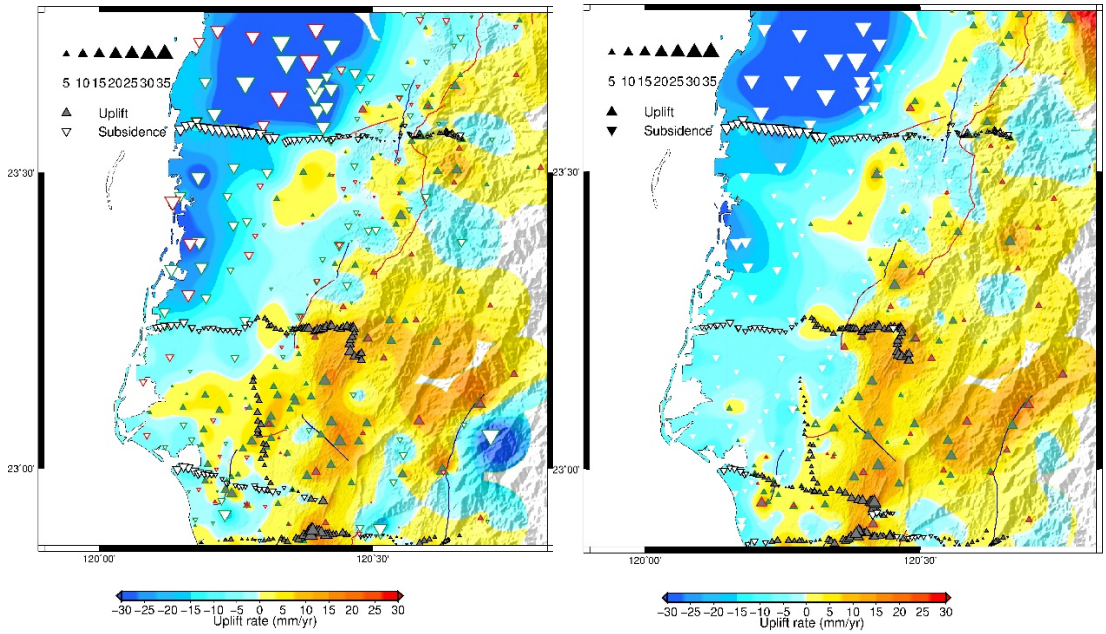


圖 2-4.85：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2018 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-4-6 高屏地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之高屏地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 106 點，以及 3 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，高屏地區（圖 2-4.86）可比對坐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，由坐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 2-4.87）。

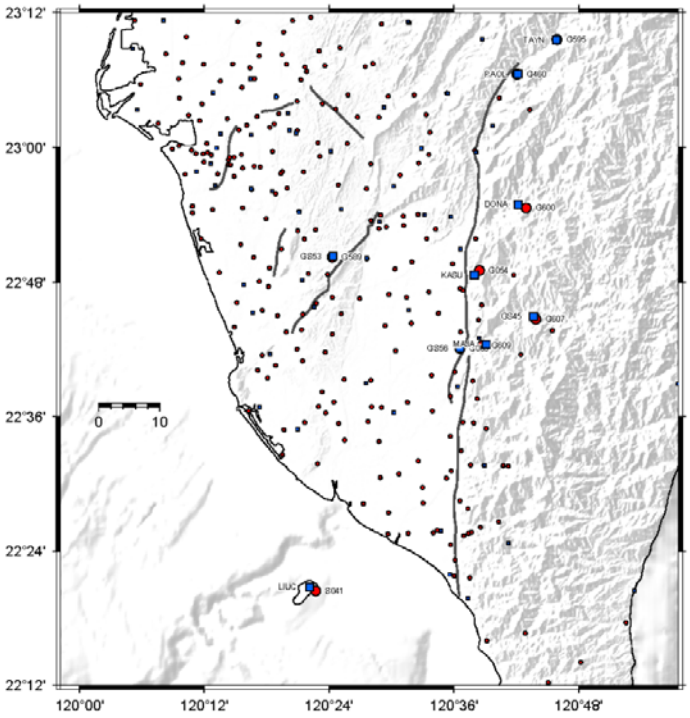


圖 2-4.86：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

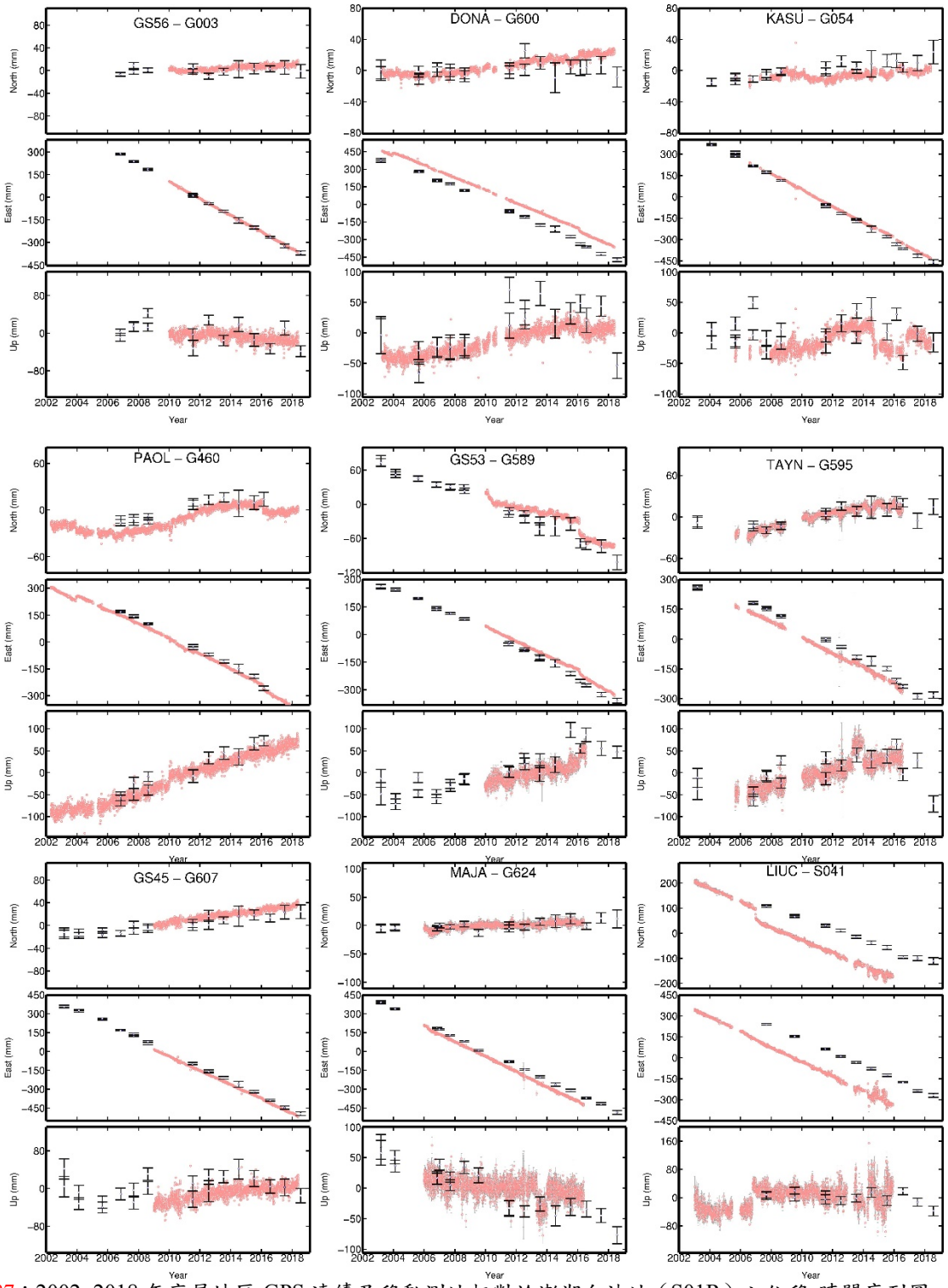


圖 2-4.87：2002~2018 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

路竹-茂林測線橫跨小岡山、龍船、旗山及潮州斷層，路線長約 50 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2018 年共計有 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS55 和 NEMN 之垂直速率（0.1 及 0.8 mm/yr），作為約制點來校正 R016 與 G3027 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.88、圖 2-3.89 及圖 2-4.90）。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。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坐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 2-4.91 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2002 年 2 月至 2003 年 12 月、藍色為 2003 年 12 月至 2010 年 3 月、紅色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、黑色為 2016 年 2 月至 2018 年 2 月，主線於小岡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，目前對於此結果的解釋仍然沒有定論，可能與小岡山斷層的運動、活動背斜的活躍或是泥貫入體的發育有關。

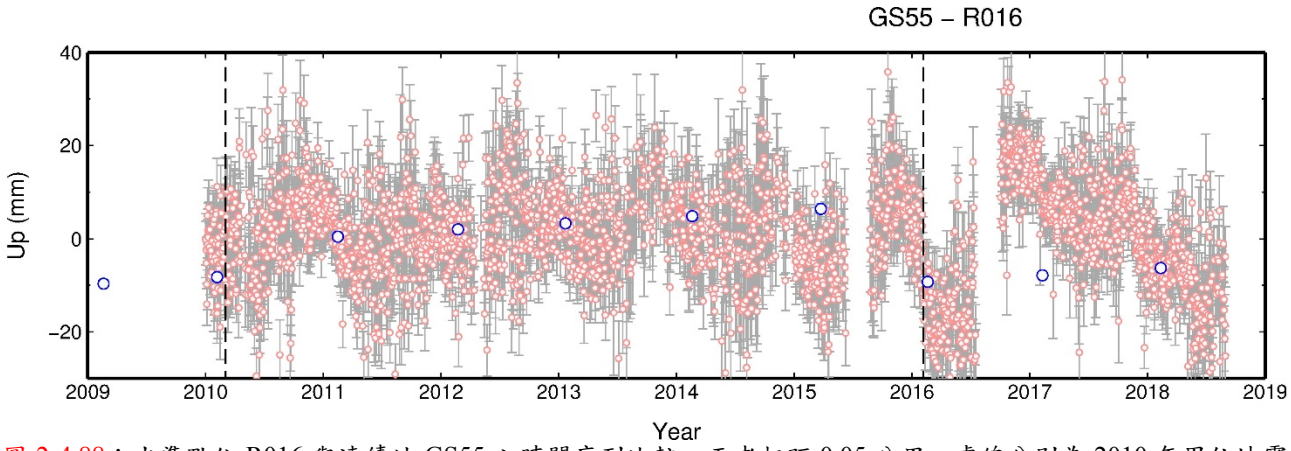


圖 2-4.88：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

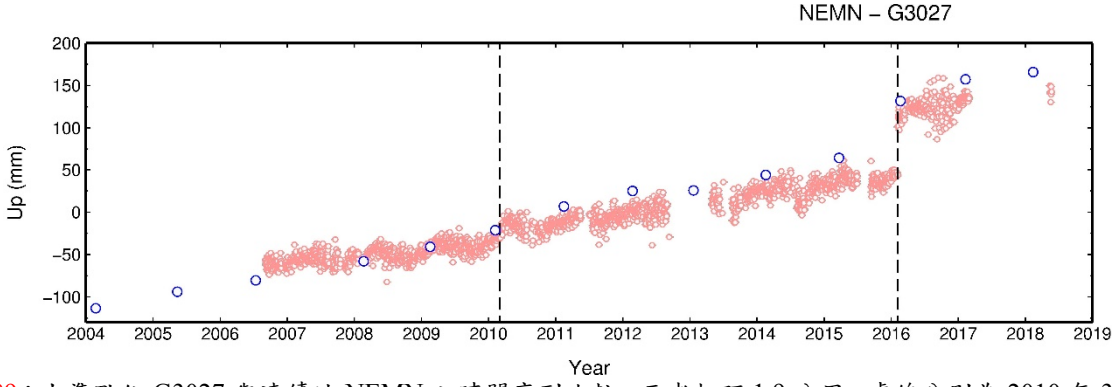


圖 2-4.89：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較，兩者相距 1.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

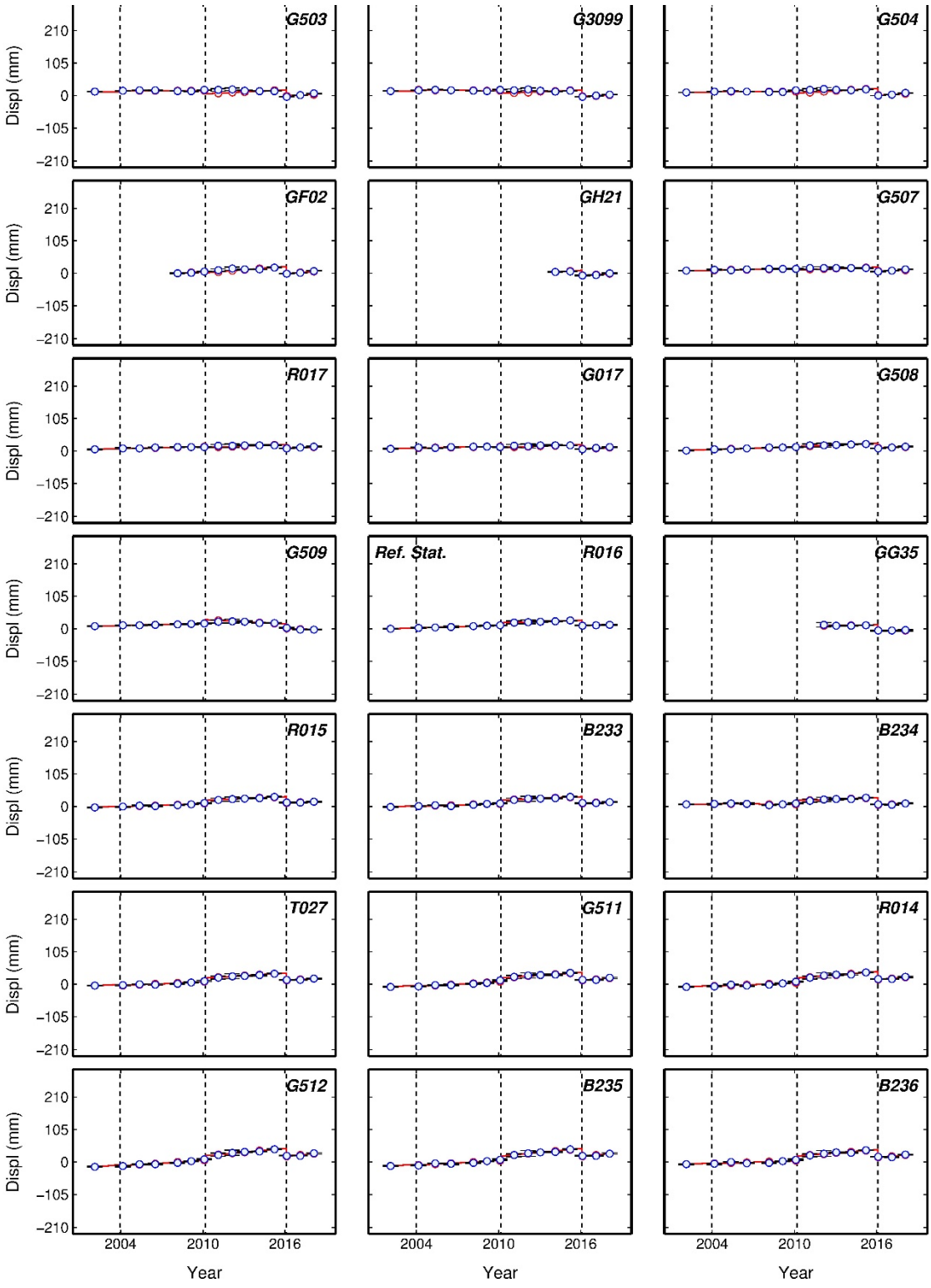


圖 2-4.90：路竹至茂林測線之時間序列。虛線分別為 2003 年 12 月 10 日成功地震、2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

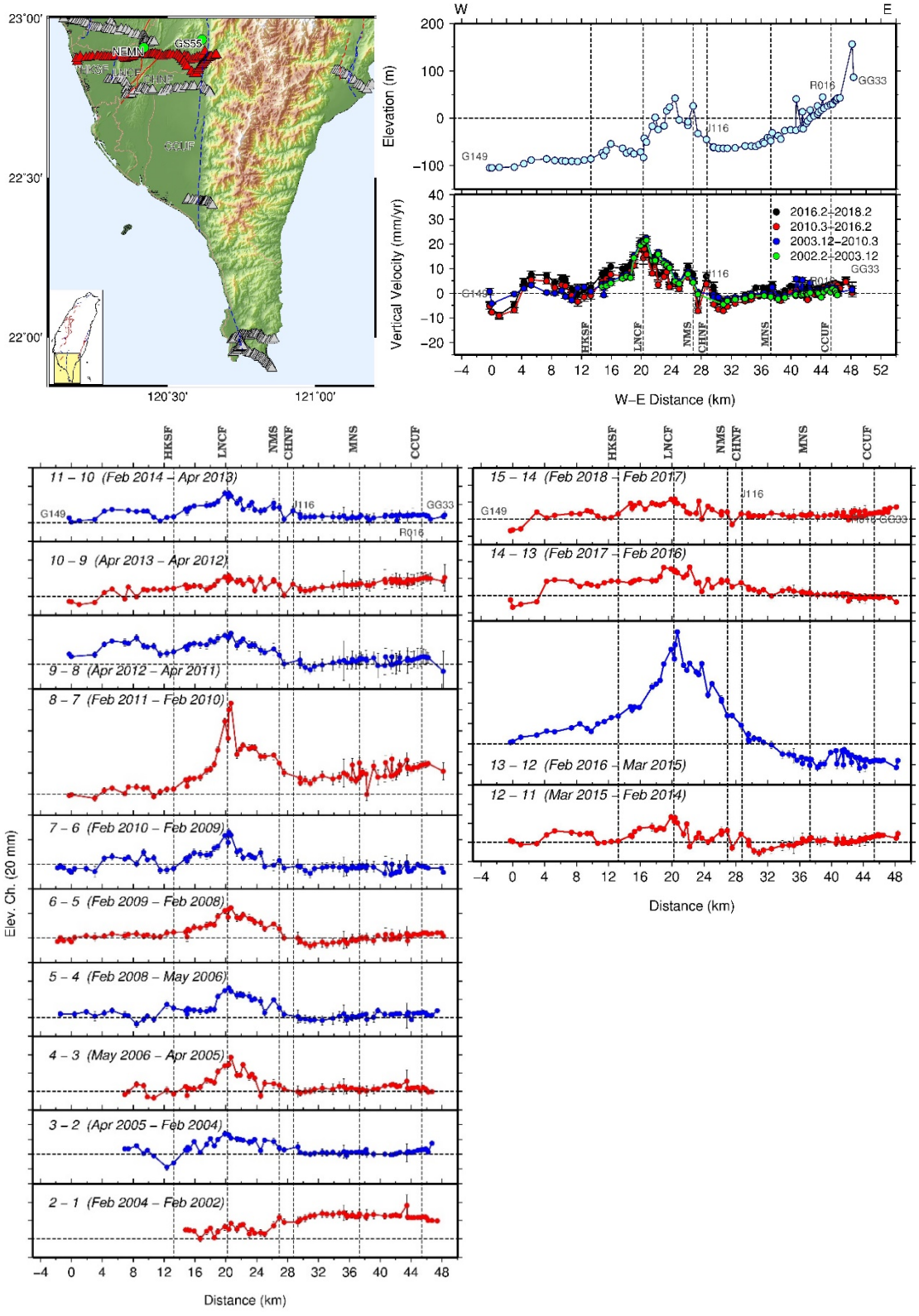


圖 2-4.91：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2003 年成功地震震前垂直速度、藍色為 2003 - 2010 年成功地震與甲仙地震震間垂直速度、紅色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度，黑色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、LNCF 為龍船斷層、NMS 為內門向斜、CHNF 為旗山斷層、MNS 為美濃向斜、CCUF 為潮州斷層。

岡山至安坡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 2018 年共計 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 AKND 之垂直速率（2.5 mm/yr），作為約制點來校正 G526 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.92）。

根據圖 2-4.94，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2004 年 3 月至 2010 年 3 月、藍色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、紅色為 2016 年 2 月至 2018 年 5 月。在 2004 年 3 月至 2010 年 3 月間，垂直速度在跨越小崗山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坐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。

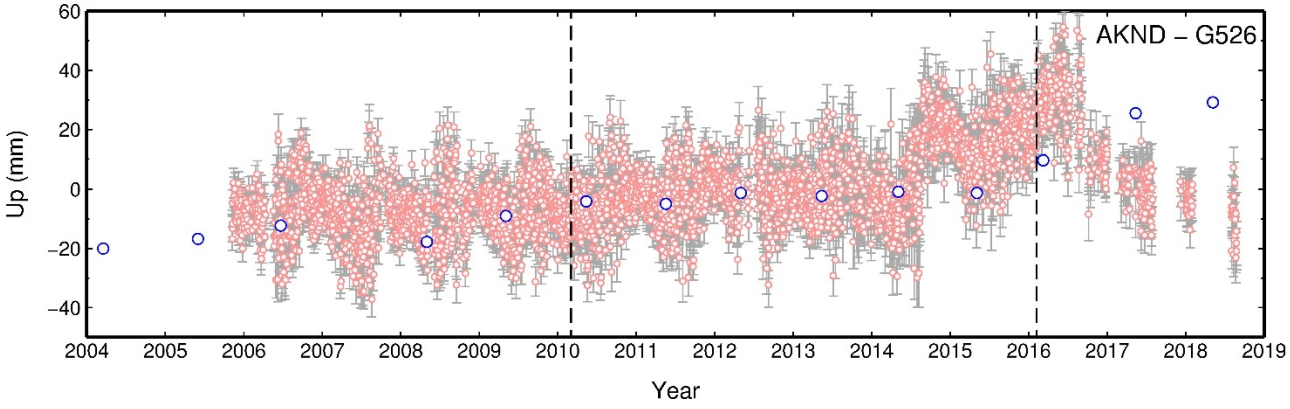


圖 2-4.92：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

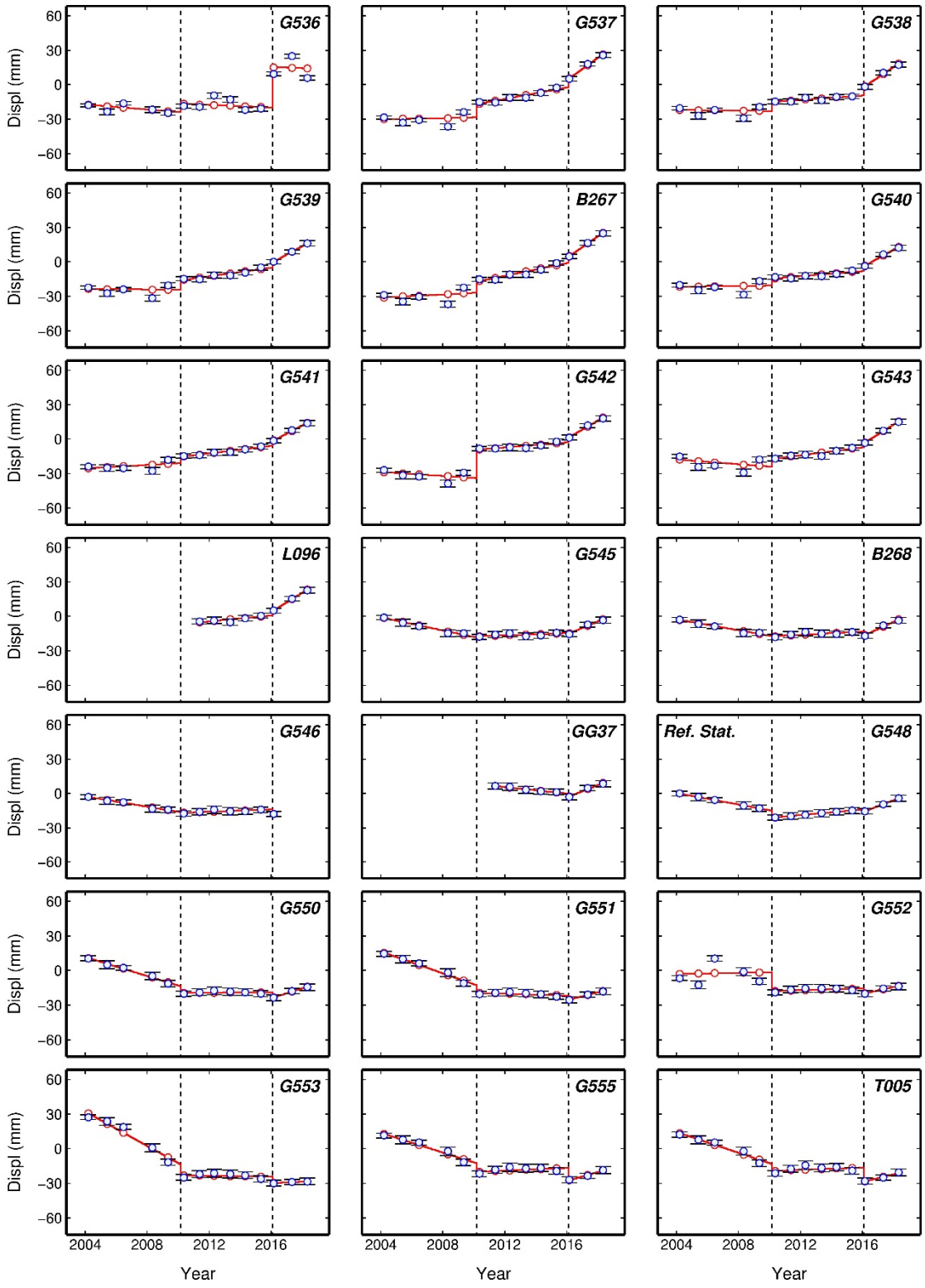


圖 2-4.93：岡山至安坡測線之時間序列。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

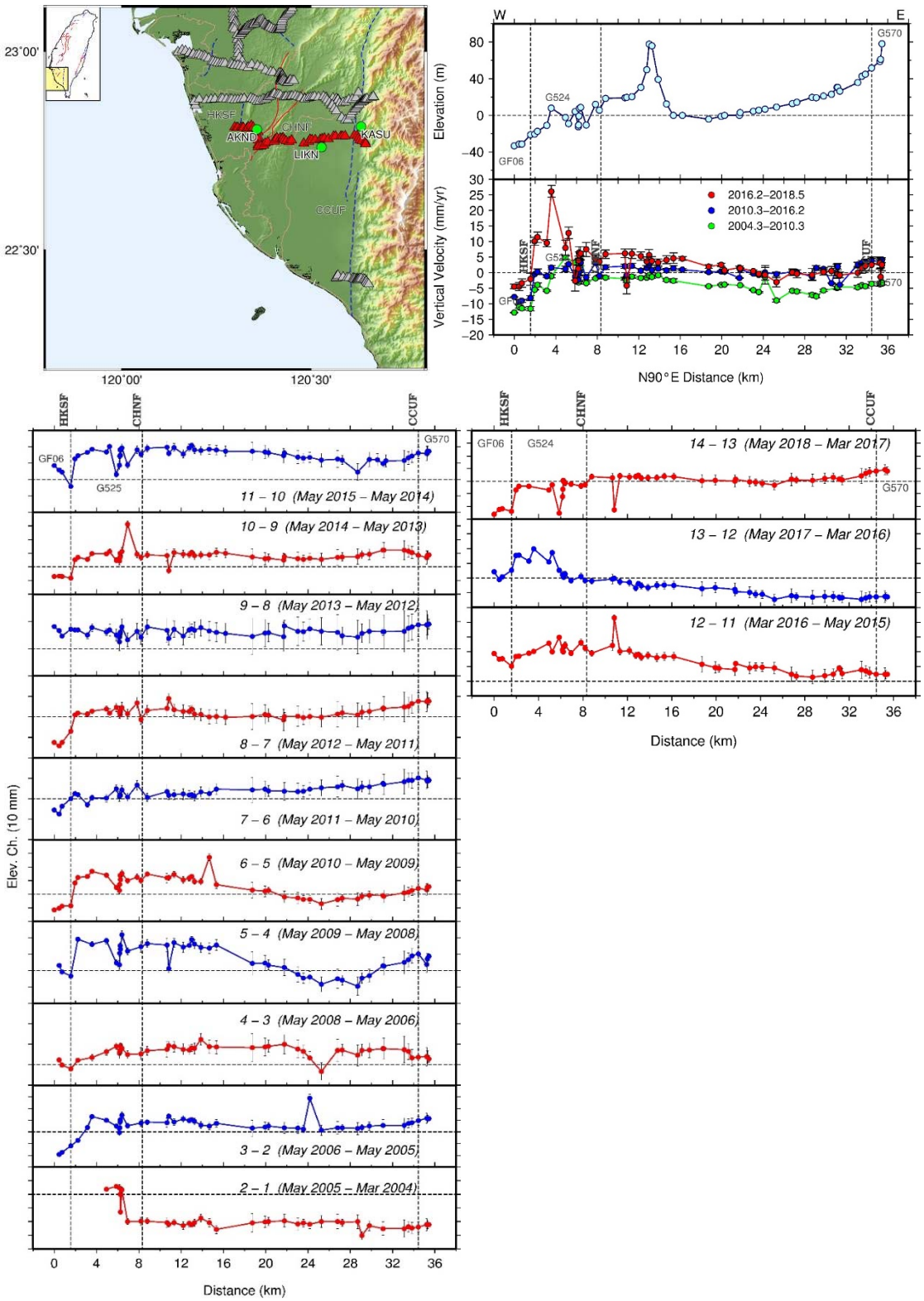


圖 2-4.94：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，所示綠色為 2004 - 2010 年甲仙地震震間垂直速度、藍色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度、紅色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里，於 2005 至 2018 年間共進行了 14 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（-14.8 mm/yr），作為約制點來校正 GC85 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.95）。

根據圖 2-4.97，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。

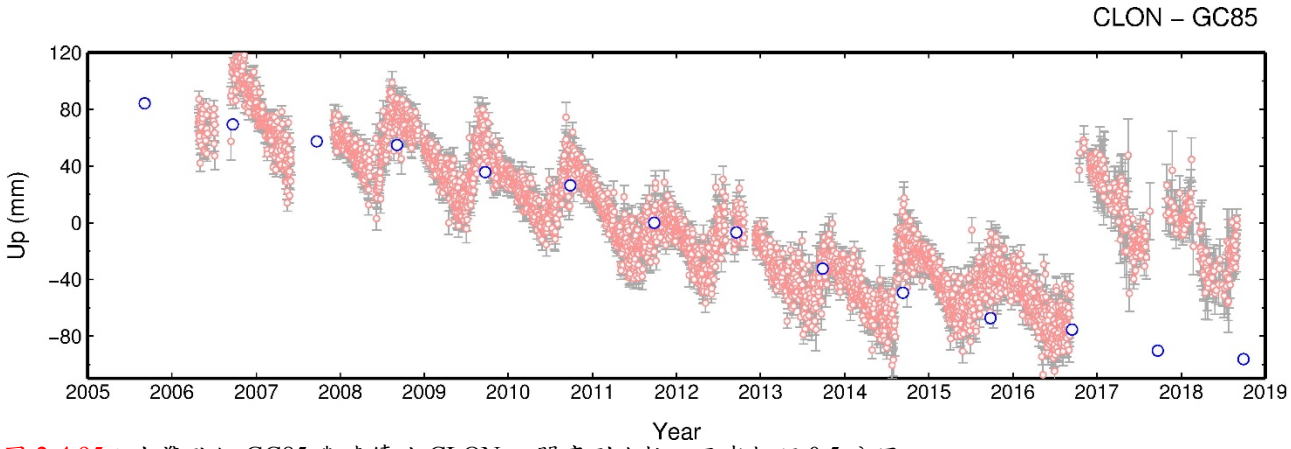


圖 2-4.95：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較，兩者相距 0.5 公里。

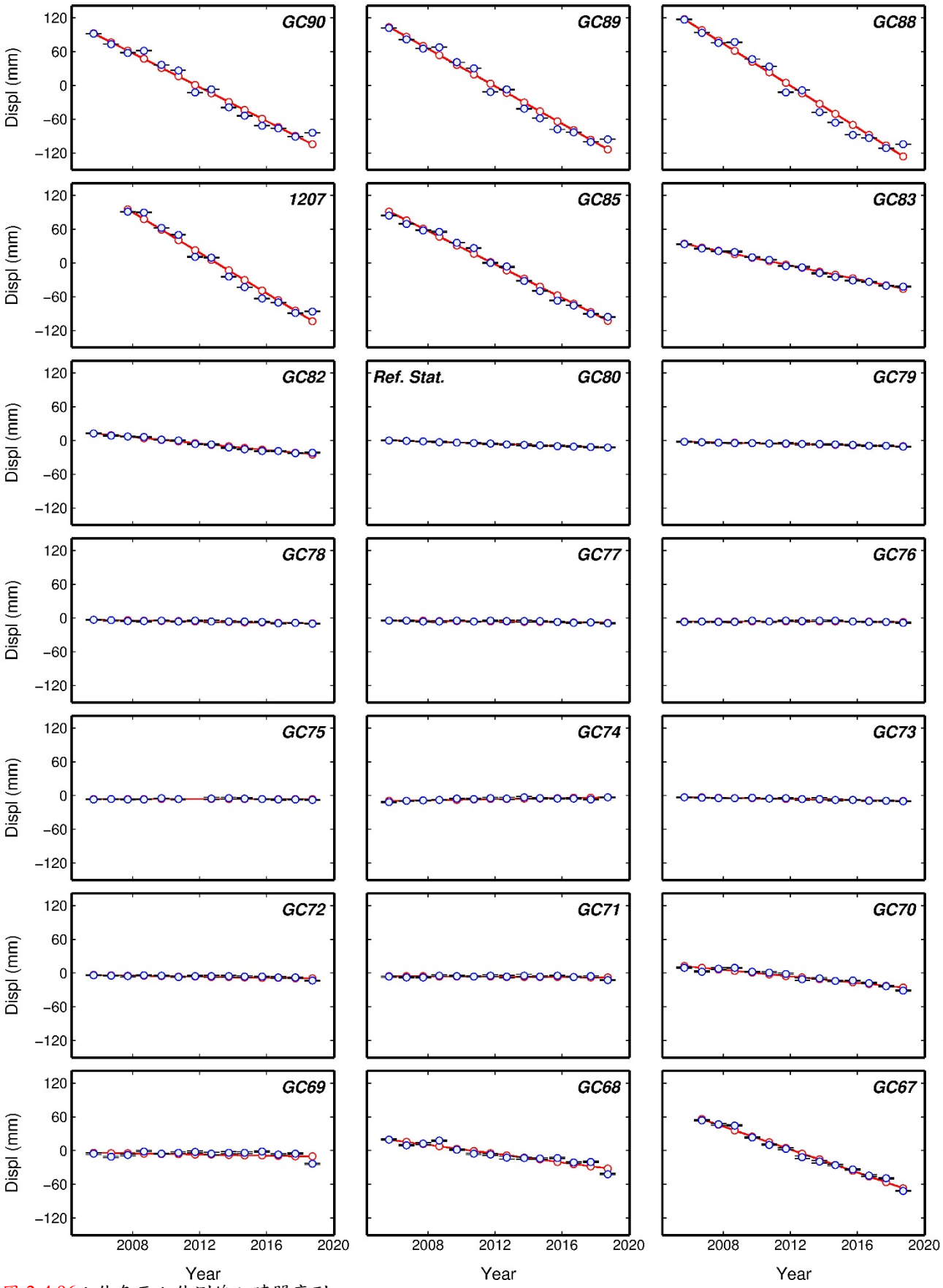


圖 2-4.96：佳冬至七佳測線之時間序列。

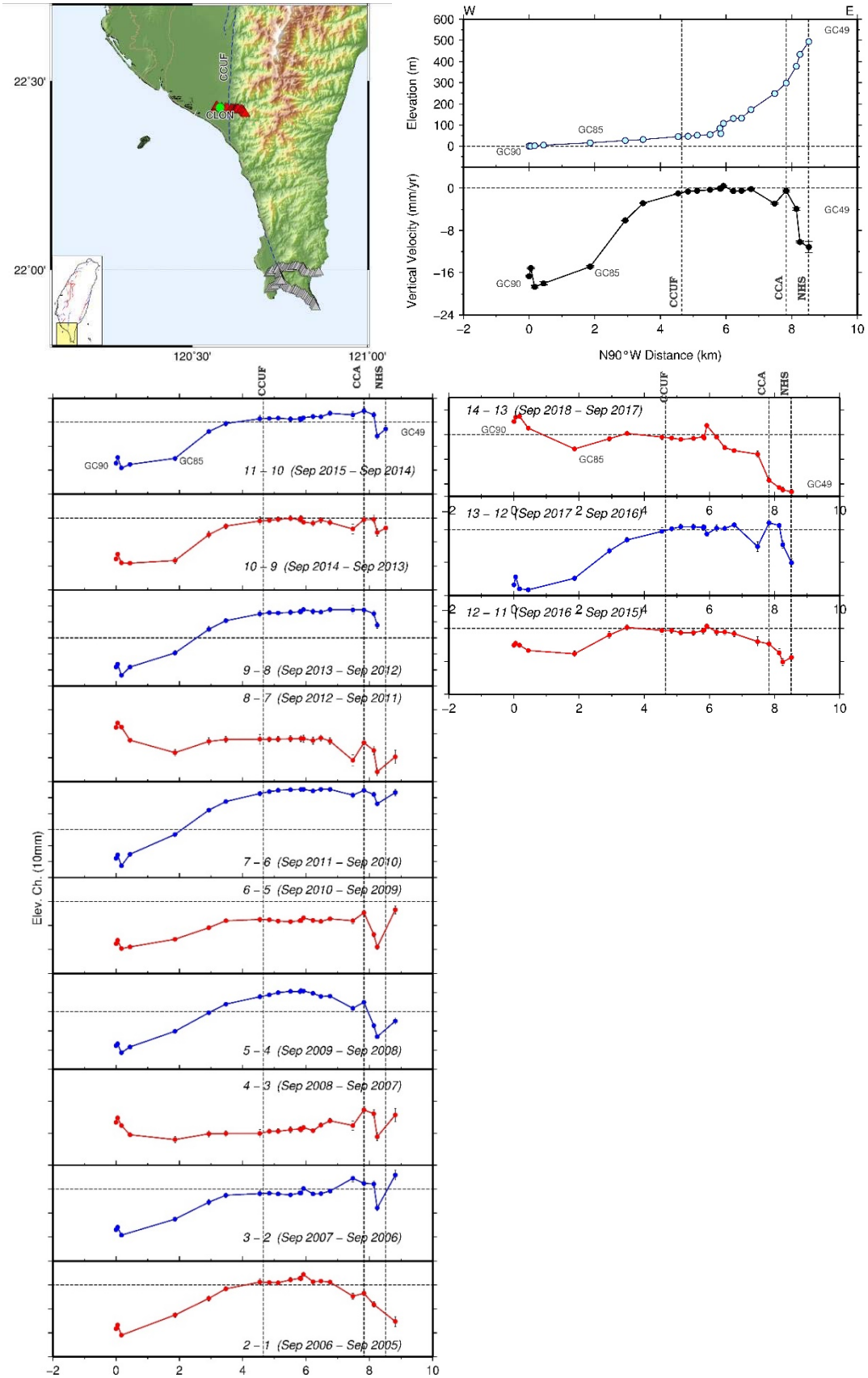


圖 2-4.97：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層、CCA 為七佳背斜、NHS 為南和向斜。

高屏地區各觀測點位之垂直速度場如圖 2-4.99，高雄地區的車瓜林斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，小岡山斷層西側有約 10 mm/yr 的沉降速率，東側之沉降速率則降至 0 至 3 mm/yr。屏東地區在潮州斷層以西約有約 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 2017 年，在恆春斷層以東有些微的抬升現象，速率約 3 mm/yr。

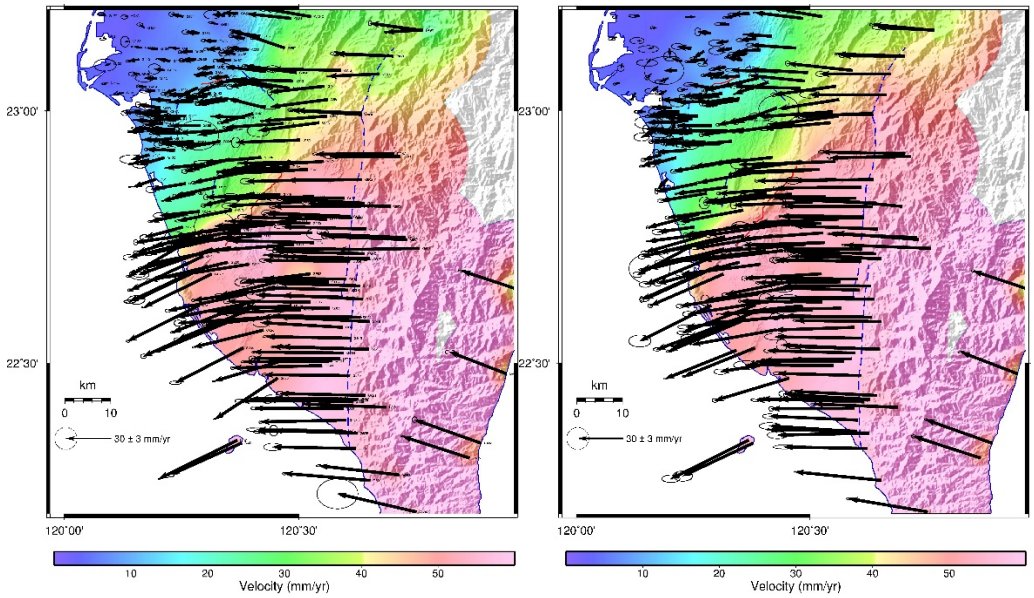


圖 2-4.98：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2016 年速度場。

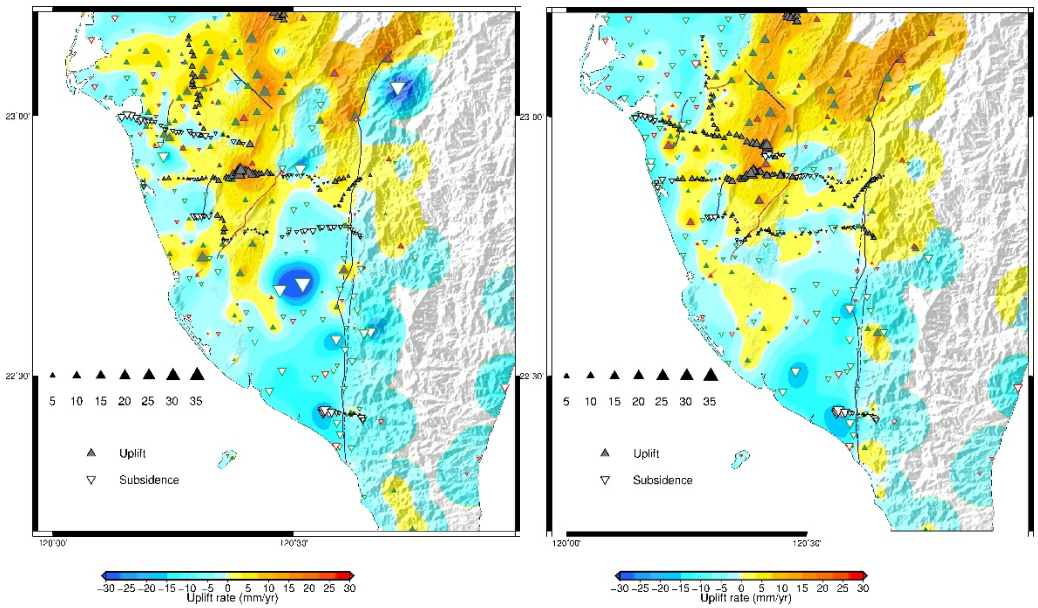


圖 2-4.99：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2016 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站。

2-4-7 恆春地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之恆春地區觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 32 點以及 2 條精密水準測線，藉由移動站與該地區連續站解算結果之座標時間序列可知，恆春地區（圖 2-4.100）可比對坐標時間序列之組合為 GS57-G699、GS59-G702、GS60-G710、HENC-G669 五組，由坐標時間序列比對可知，HENC 站（恆春氣象站）及 G669 站（恆春國小）同位於斷層西側下盤，由資料解算結果可知移動站解算結果（圖 2-4.101）在水平方向速度場符合連續站趨勢，然而在高程方向可發現 2006 年底恆春地震之後移動站坐標時間序列與 HENC 連續站型態分布不同，震前高程速度值亦有所差異。由於兩站同位於墾丁混同層，而移動站 G669 站較靠近東邊地形抬升處（圖 2-4.102 及圖 2-4.103 位於精密水準點位 Q052 附近），推測造成高程方向時間序列的差異可能是由於此二測站皆位於斷層帶上，又由於垂直分量之變化對於傾向滑移斷層之活動相當敏感，因此短距離之差異就有可能產生不同之高程變化。其餘各組移動站與連續站坐標時間序列型態相符（圖 2-4.101）。

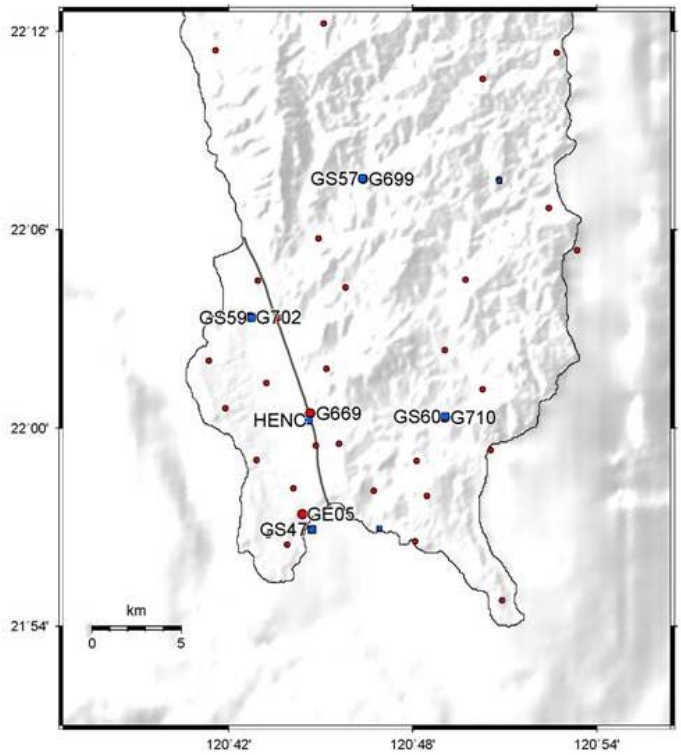


圖 2-4.100：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

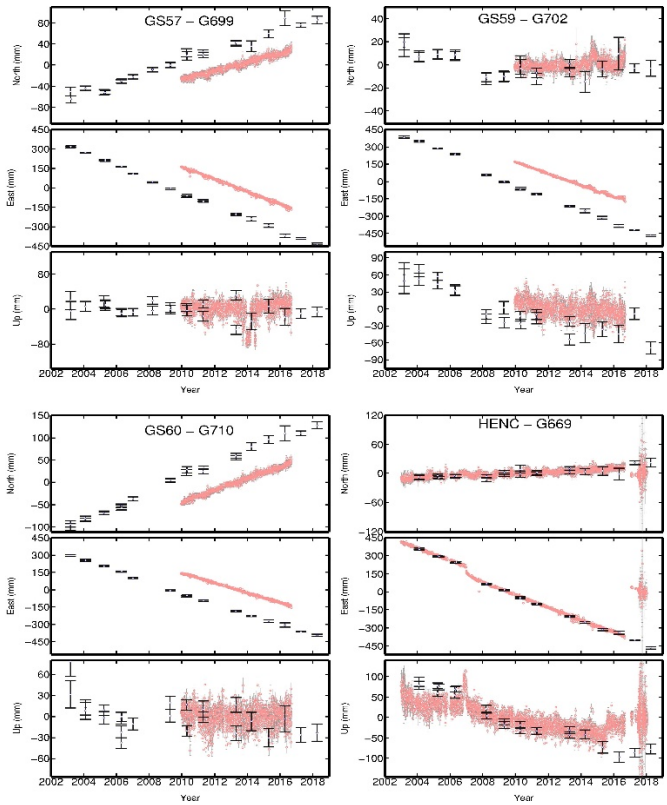


圖 2-4.101：2002~2018 年恆春地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之坐標時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之坐標時間序列分布情形。



圖 2-4.102：恆春地區 GPS 移動站 G669 及連續站 HENC 周圍環境全景圖。



圖 2-4.103：精密水準測點 Q052 現場圖。

經由精密水準坐標時間序列分析結果可知（圖 2-4.104），此區速度場在 2006 年屏東西南外海 ML 7.0 地震前後有明顯的速率變化，在 2010 年中及 2015 年初又發生兩次顯著之速率改變，故本章節將恆春地區 2002 至 2018 年速度場分為四個時間段討論。

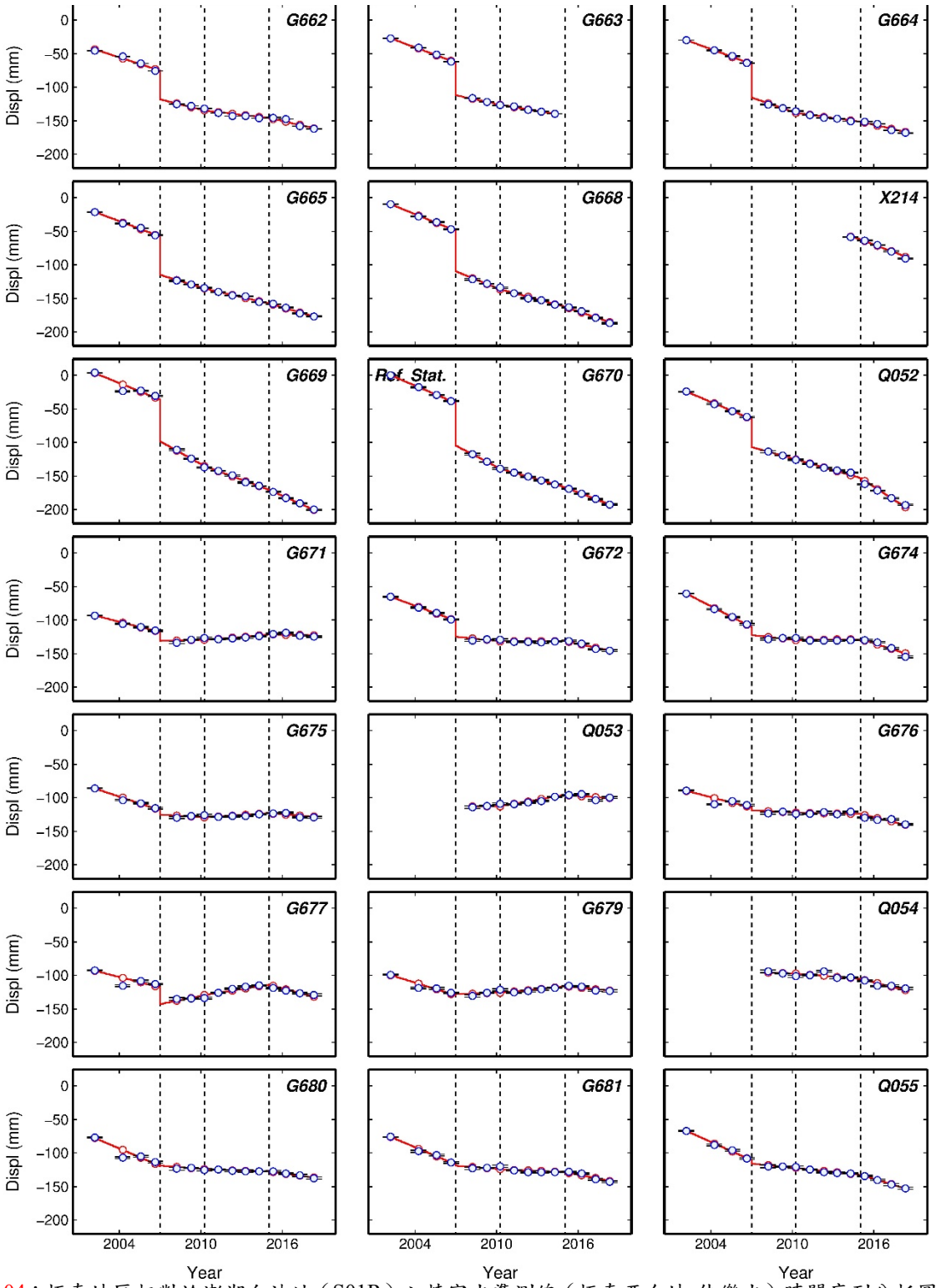


圖 2-4.104：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（恆春西台地-佳樂水）時間序列分析圖，虛線之時間分隔點為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年 4 月 1 日及 2015 年 1 月 1 日。

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（投影至剖面的長度約 15 公里）以及南邊的台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線（投影至剖面的長度約 13 公里）。至 2018 年止，各有 15 次的測量資料。

精密水準資料處理時，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（-8.63 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 2-4.105 及圖 2-4.106）。

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 2-4.107 及圖 2-4.108）。

由圖 2-4.109 及圖 2-4.110 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2002 年 3 月至 2006 年 12 月、藍色為 2006 年 12 月至 2010 年 4 月、紅色為 2010 年 4 月至 2015 年 1 月、黑色為 2015 年 1 月至 2018 年 4 月。

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之點位，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坐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。

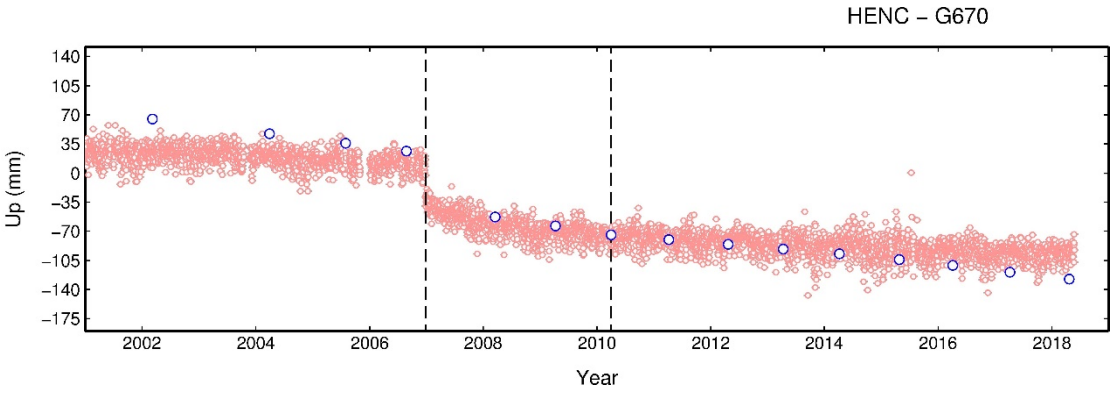


圖 2-4.105：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

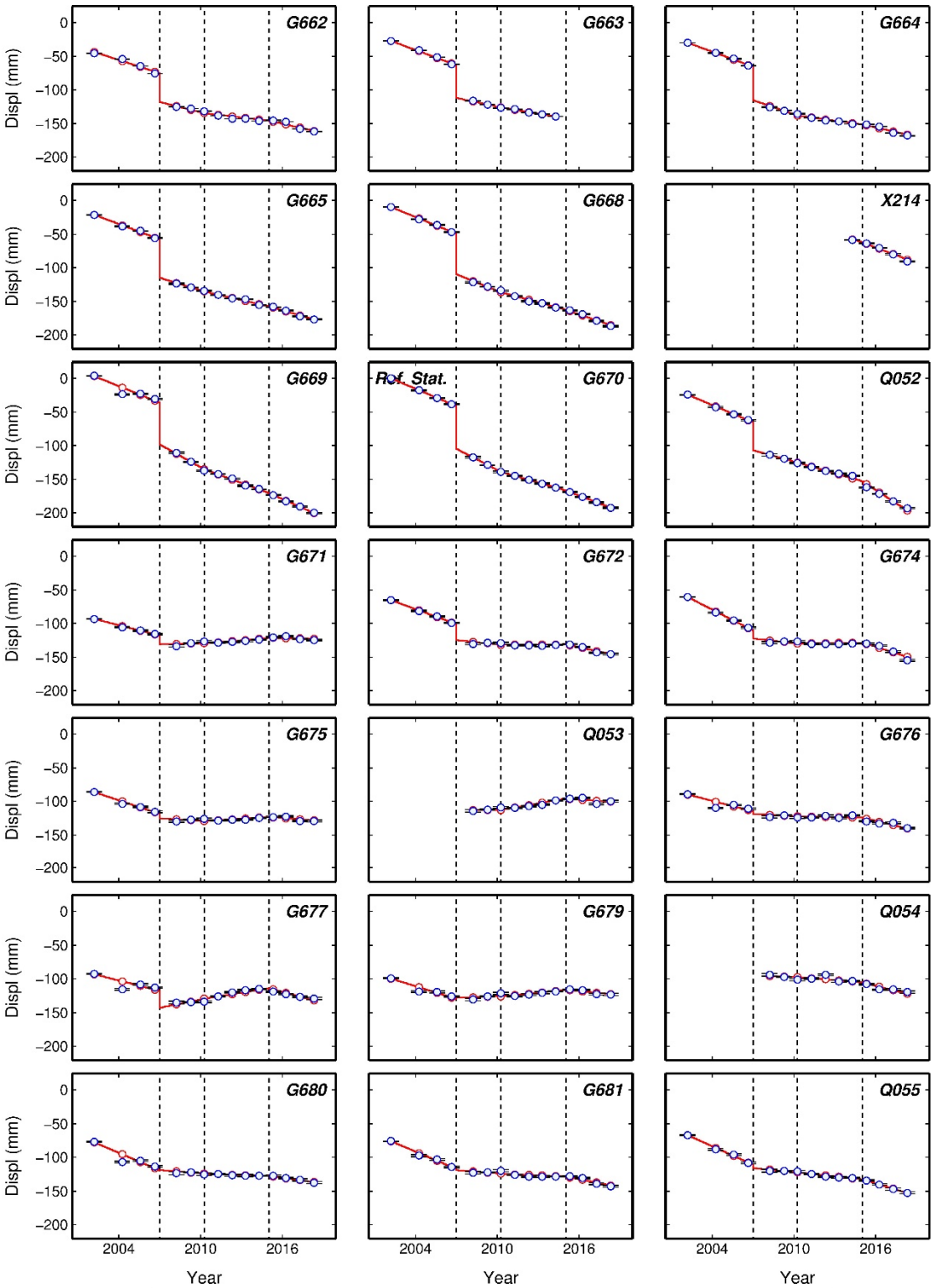


圖 2-4.106：恆春西台地至佳樂水測線之時間序列。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

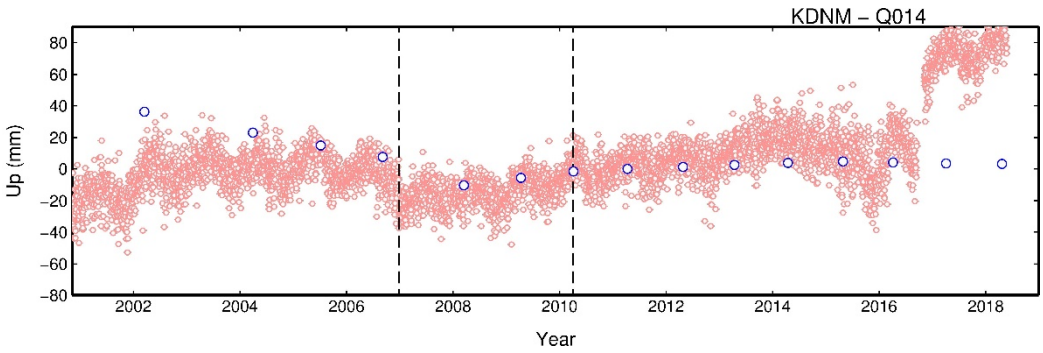


圖 2-4.107：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。虛虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

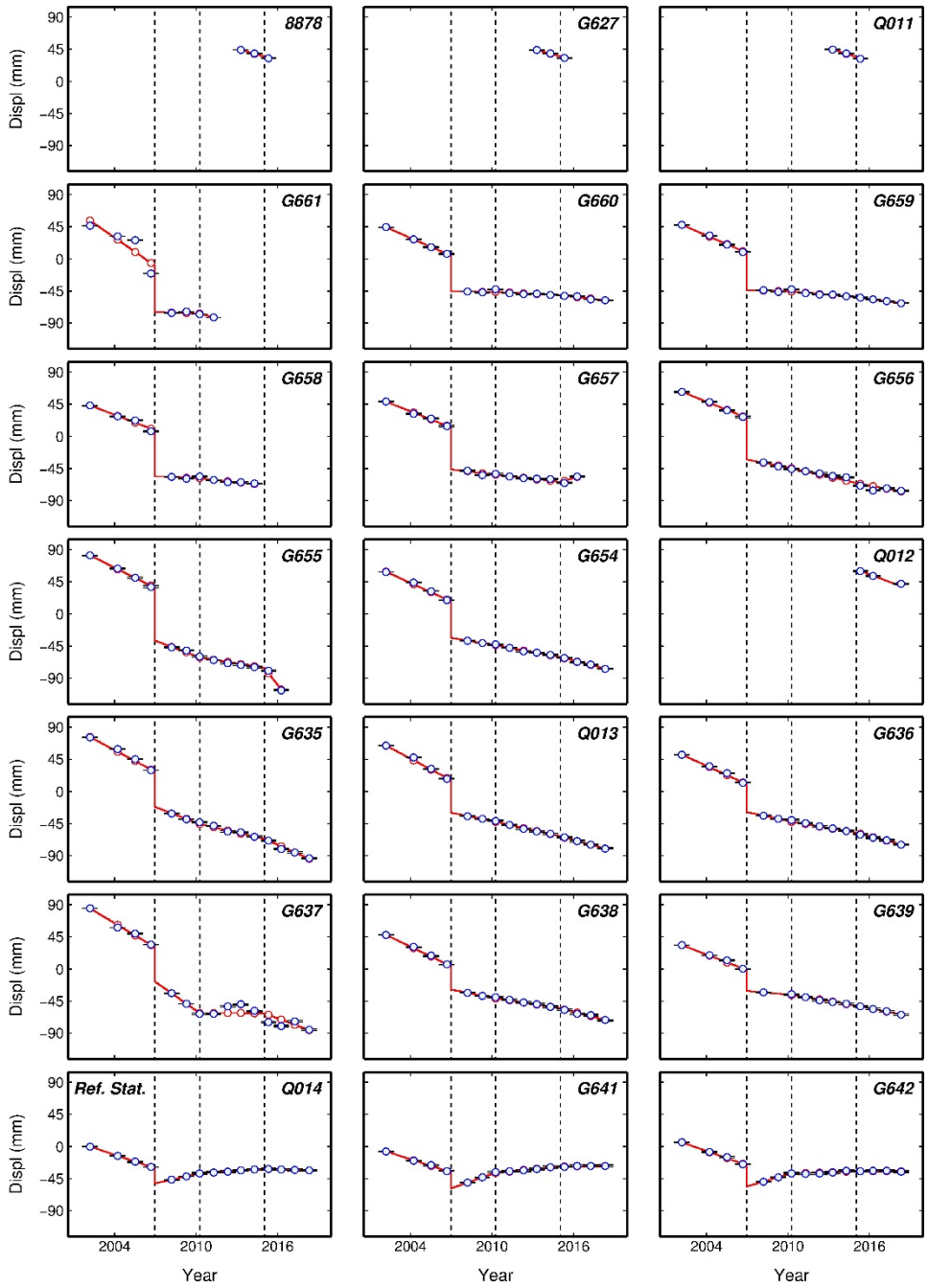


圖 2-4.108：南樹林至鵝鑾鼻測線之時間序列。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

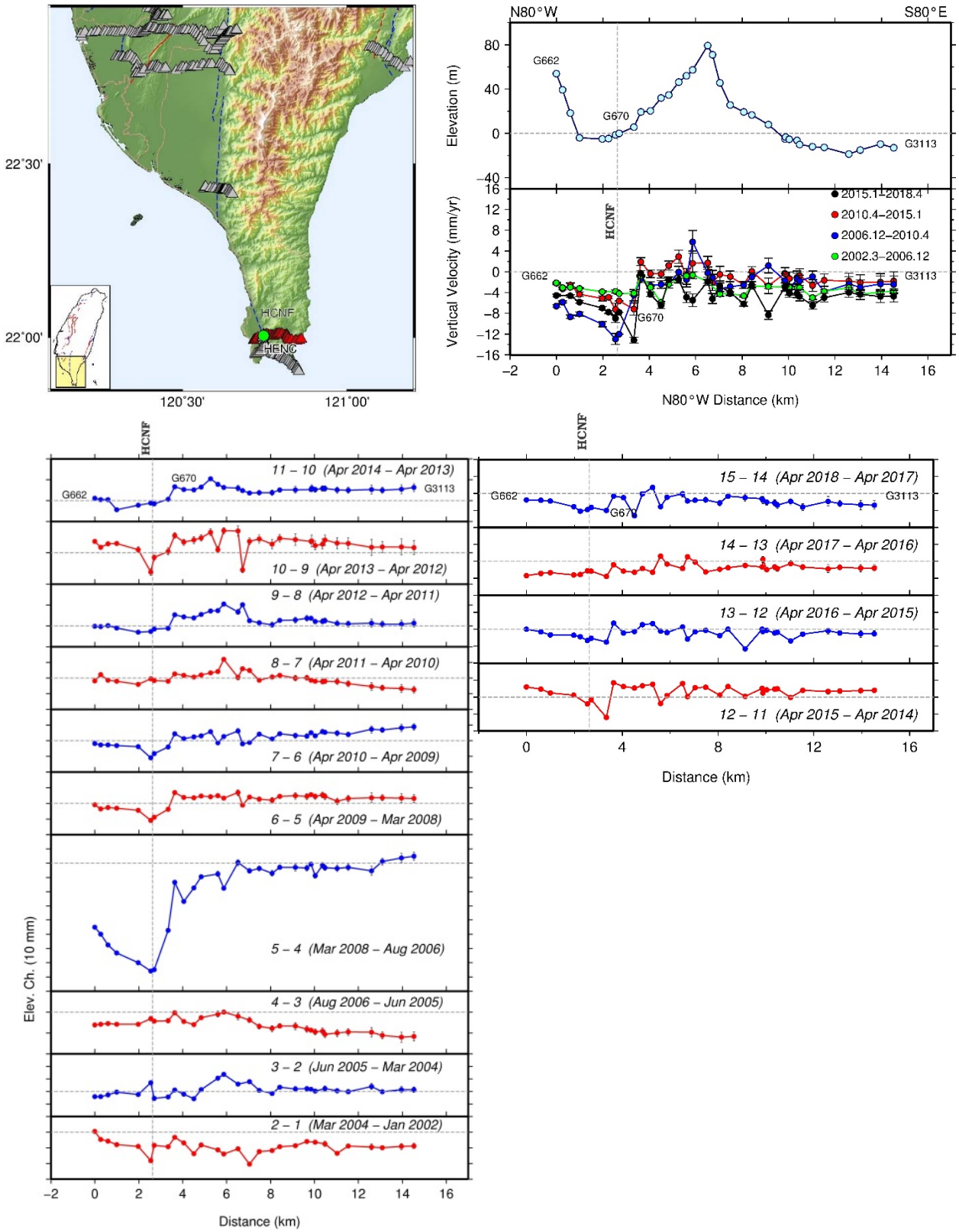


圖 2-4.109：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

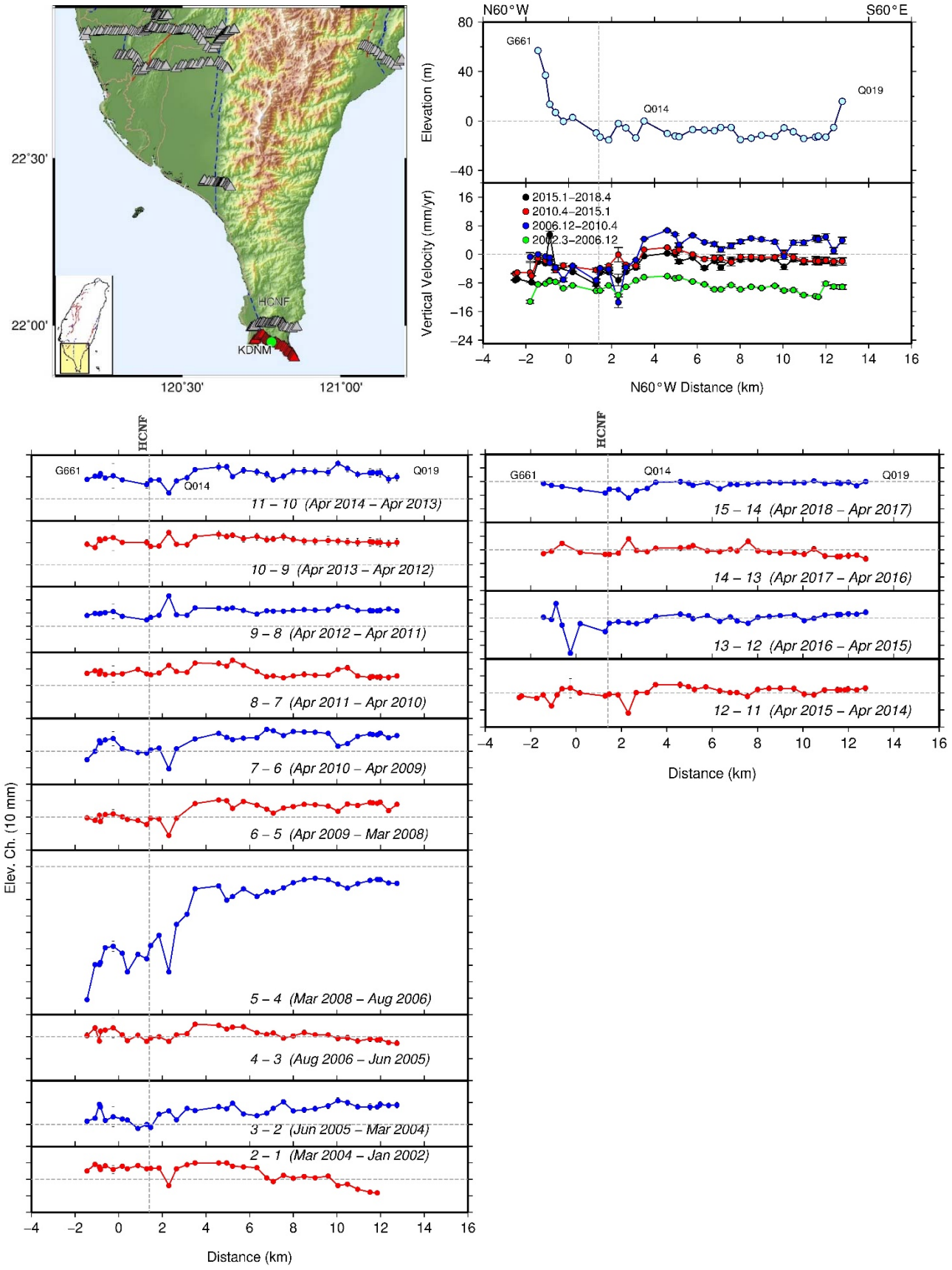


圖 2-4.110：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HNCF 為恆春斷層。

恆春地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.111，屏東外海地震前2002~2006 年速度場，速度量值 41.3～59.5 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年中的速度場，速度量值 34.5 ～ 73.2 mm/yr， 2010 年中至 2015 年之速度場，速度量值 36.1～56.5 mm/yr，2015 年之後之速度場，速度量值 41.9～54.6 mm/yr，唯第四段之觀測次數僅 4 次尚需更多觀測資料進行精確分析。

恆春地區各觀測點位之垂直速度場如圖 2-4.112，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，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，2010 年至今的平均速率約為-0.9 mm/yr；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，2010 年至今的平均速率約為-0.5 mm/yr，此現象或許可說明在 2006 年震後至 2018 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象。

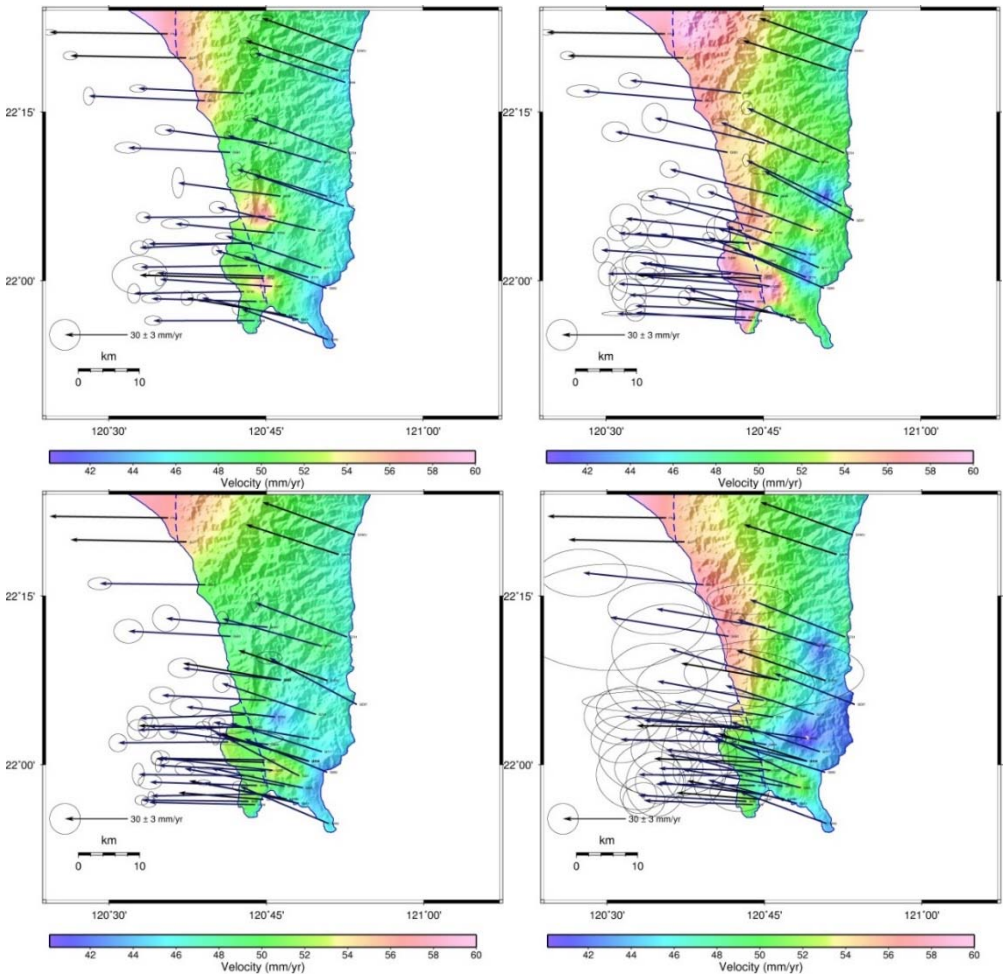


圖 2-4.111：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，右上表示震後 2006~2010 年速度場，左下表示震後 2010~2015 年速度場，右下為 2015~2018 年速度場。

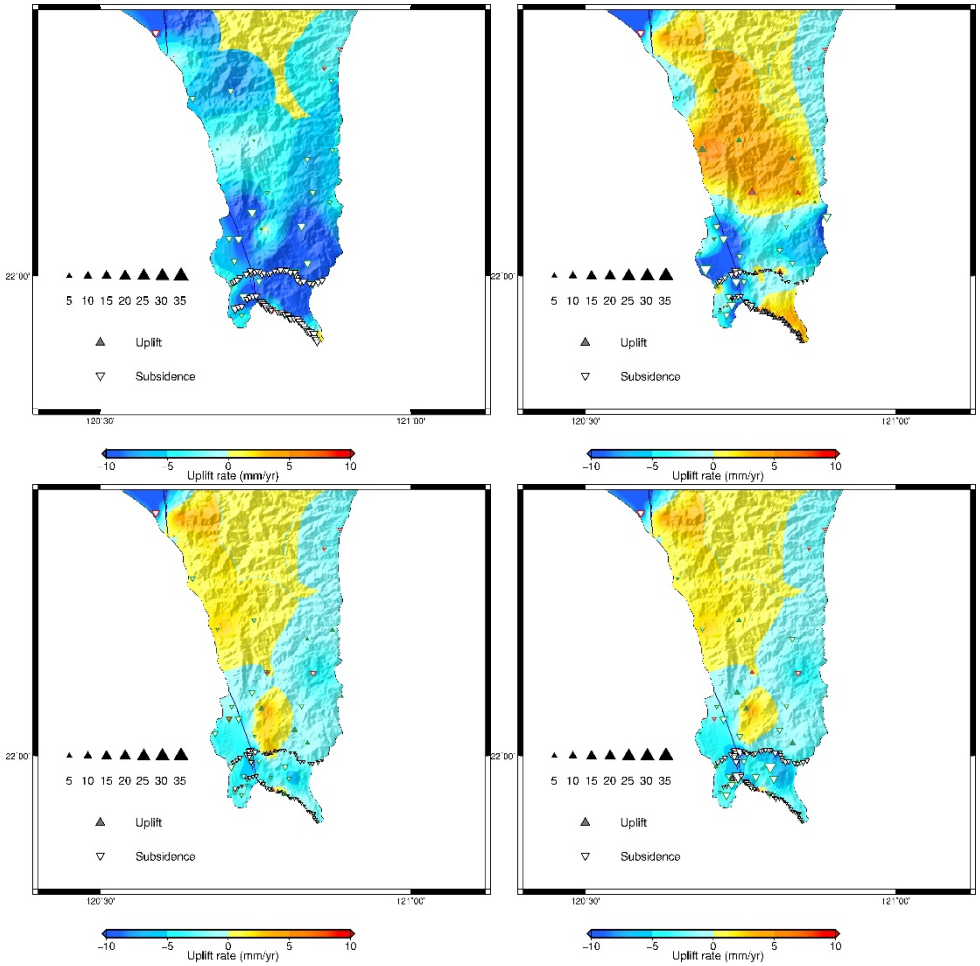


圖 2-4.112：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2017 年之 GPS 垂直方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，右上表示震後 2006~2010 年速度場，左下表示震後 2010~2015 年速度場，右下為 2015~2018 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-4-8 東部地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之東部地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 67 點以及 4 條精密水準測線，花東地區（圖 2-2.113）可比對坐標時間序列之組合為 ERPN-0308、CHIH-9160、JULI-E801、FENP-G991、KUAN-S233、PEPU-GE64 等六組，由坐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 2-2.114）。

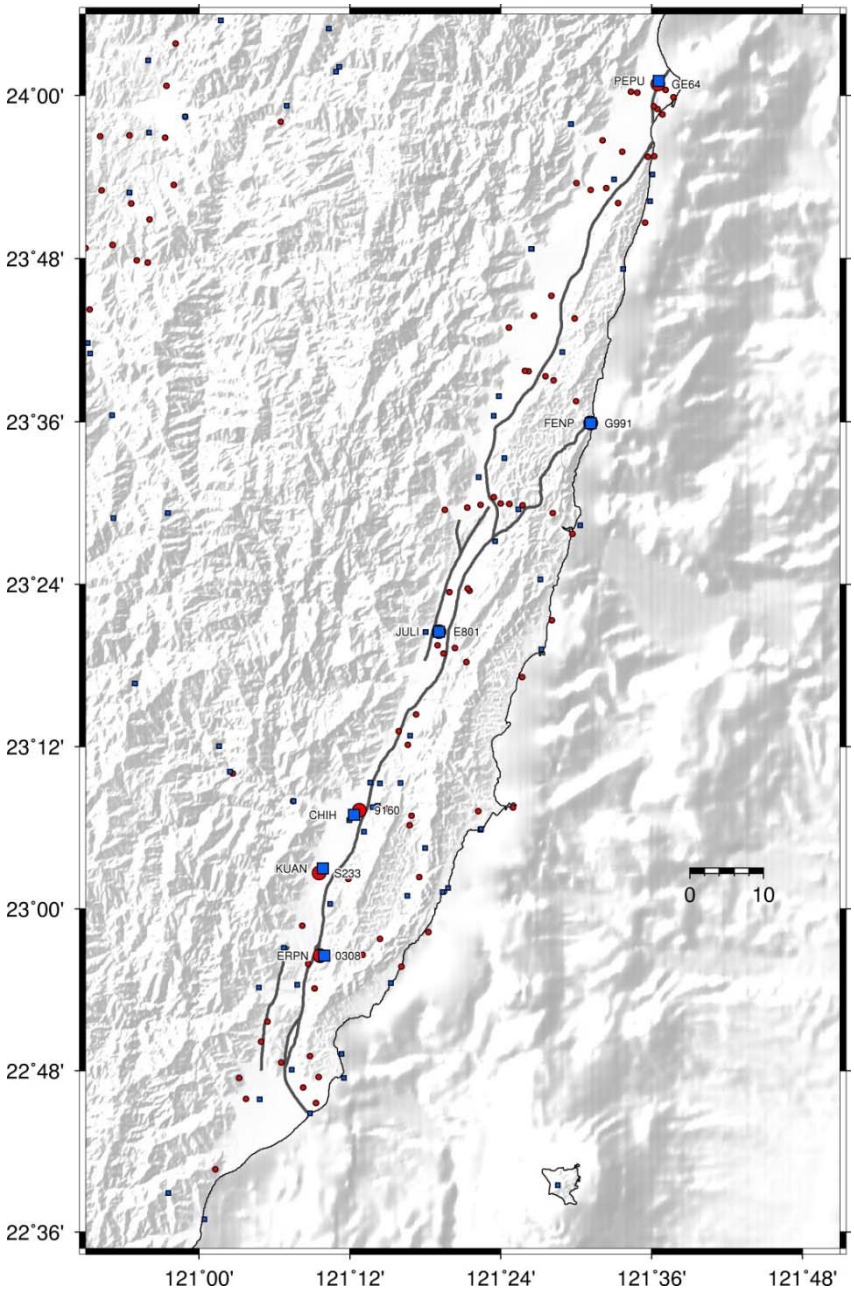


圖 2-4.113：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

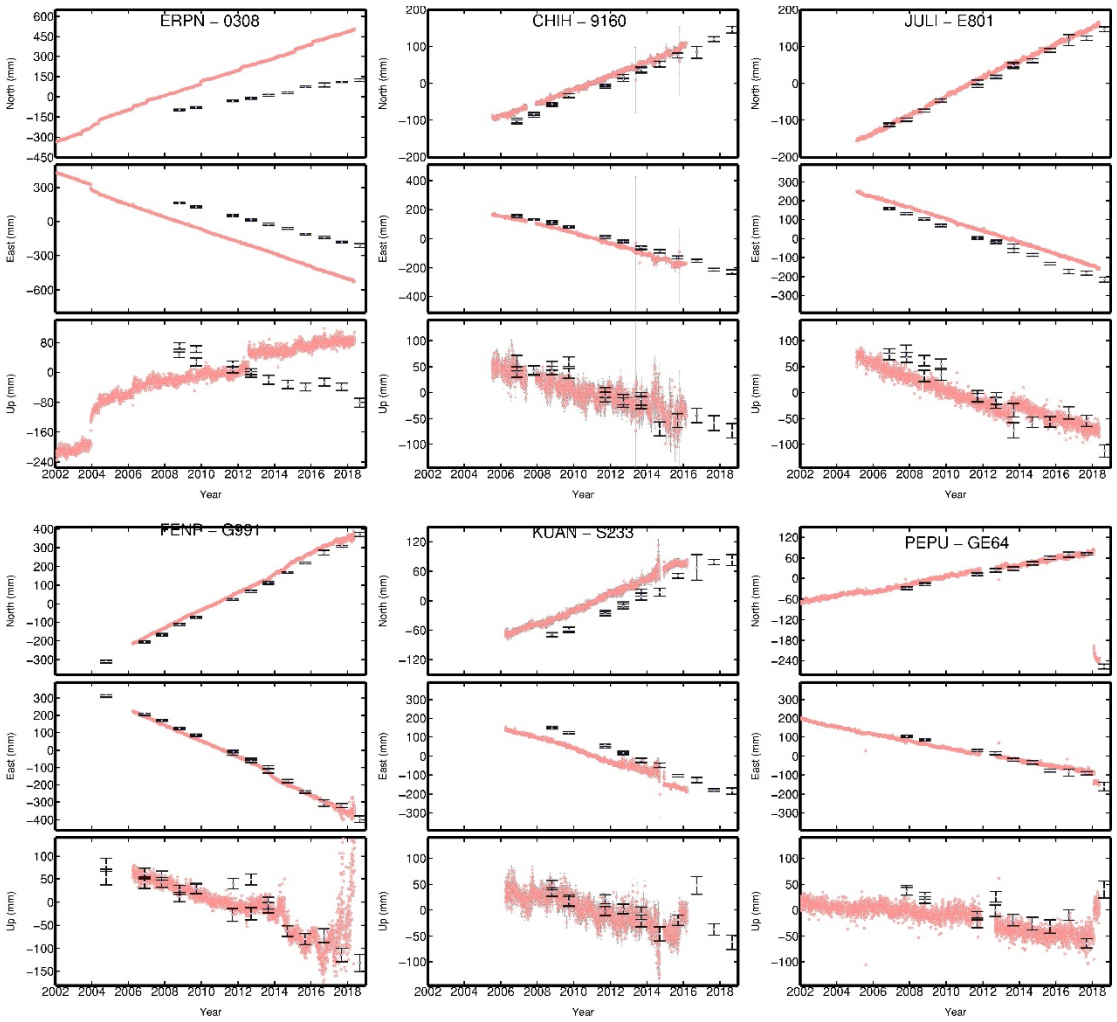


圖 2-4.114：2004~2018 年花東地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

由精密水準時間序列分析結果可知，紅葉-靜浦（圖 2-4.115）、嶺頂-瀧澗（圖 2-4.117）及光復-豐濱測線（圖 2-4.120）在 2009 年以及 2013 年瑞穗地震後發生速度變化，因此將本區之 GPS 資料以 2009 年 1 月及 2013 年 10 月為分界，分別求取三段之速度場。由圖 2-4.128 可知 2002 至 2009 年速度量值 21.4 ~ 70.2 mm/yr，2009 至 2013 年速度量值 13.2 ~ 52.3 mm/yr，2013 至 2017 年速度量值 9.6 ~ 63.2 mm/yr。由圖 2-4.129 可知東部地區，除海岸山脈南段沉陷較不顯著外，垂直速度場大致呈現下陷，整體值約 0.6～30.2 mm/yr，其中光復-豐濱測線在 2013 年瑞穗地震後沉陷速度變大，值約 13.9～34.8 mm/yr。

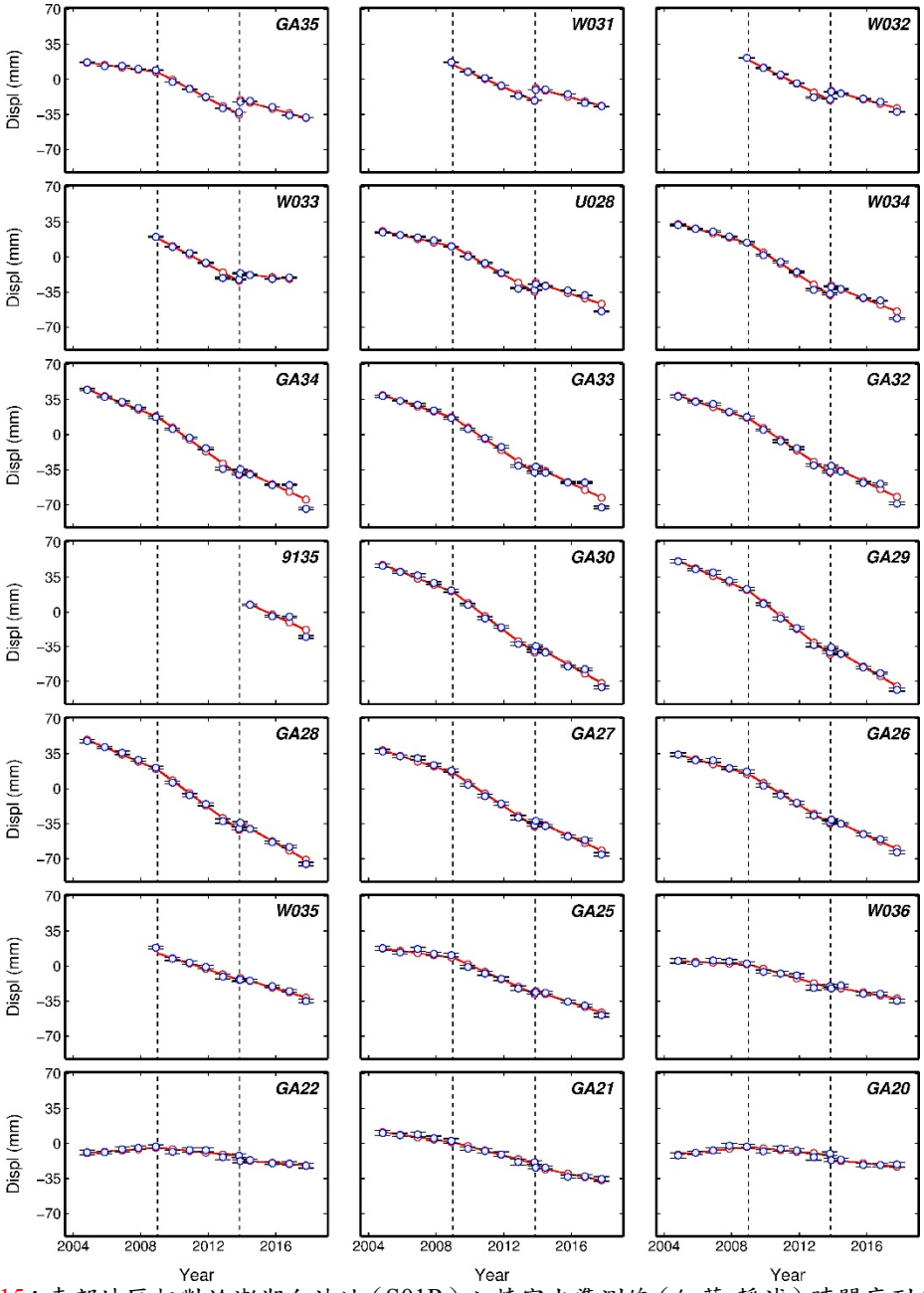


圖 2-4.115：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（紅葉-靜浦）時間序列分析圖，虛線之時間分隔點為 2009 年 1 月 1 日及 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 20 公里，從 2004 年至 2018 年共計有 16 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 2-4.116）。根據圖 2-4.118 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2004 年 11 月至 2009 年 1 月、藍色為 2009 年 1 月至 2013 年 10 月、紅色為 2013 年 10 月至 2018 年 2 月。

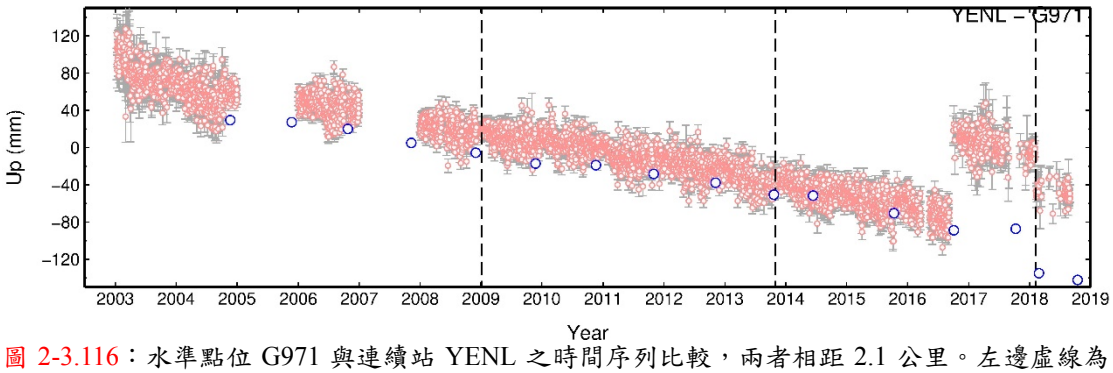


圖 2-3.116：水準點位 G971 與連續站 YENL 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

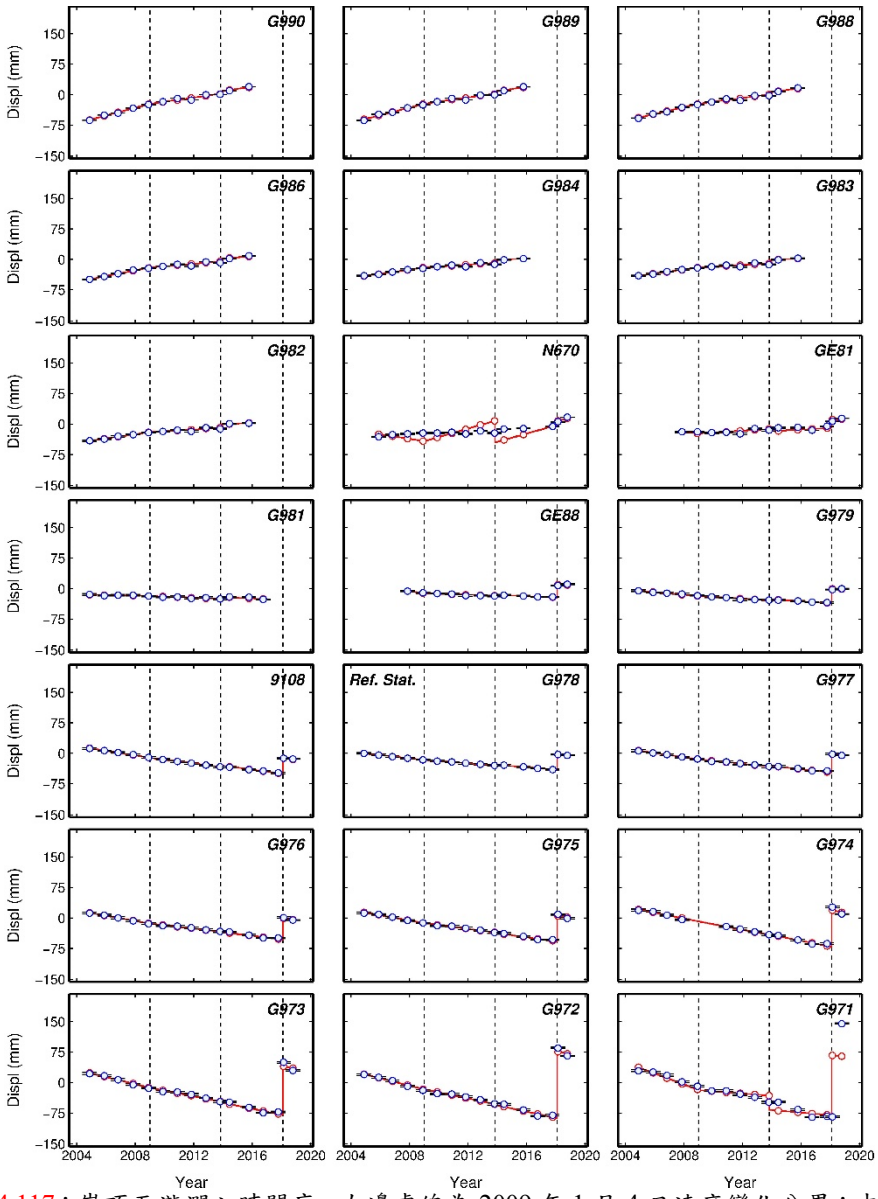


圖 2-4.117：嶺頂至瀧澗之時間序。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

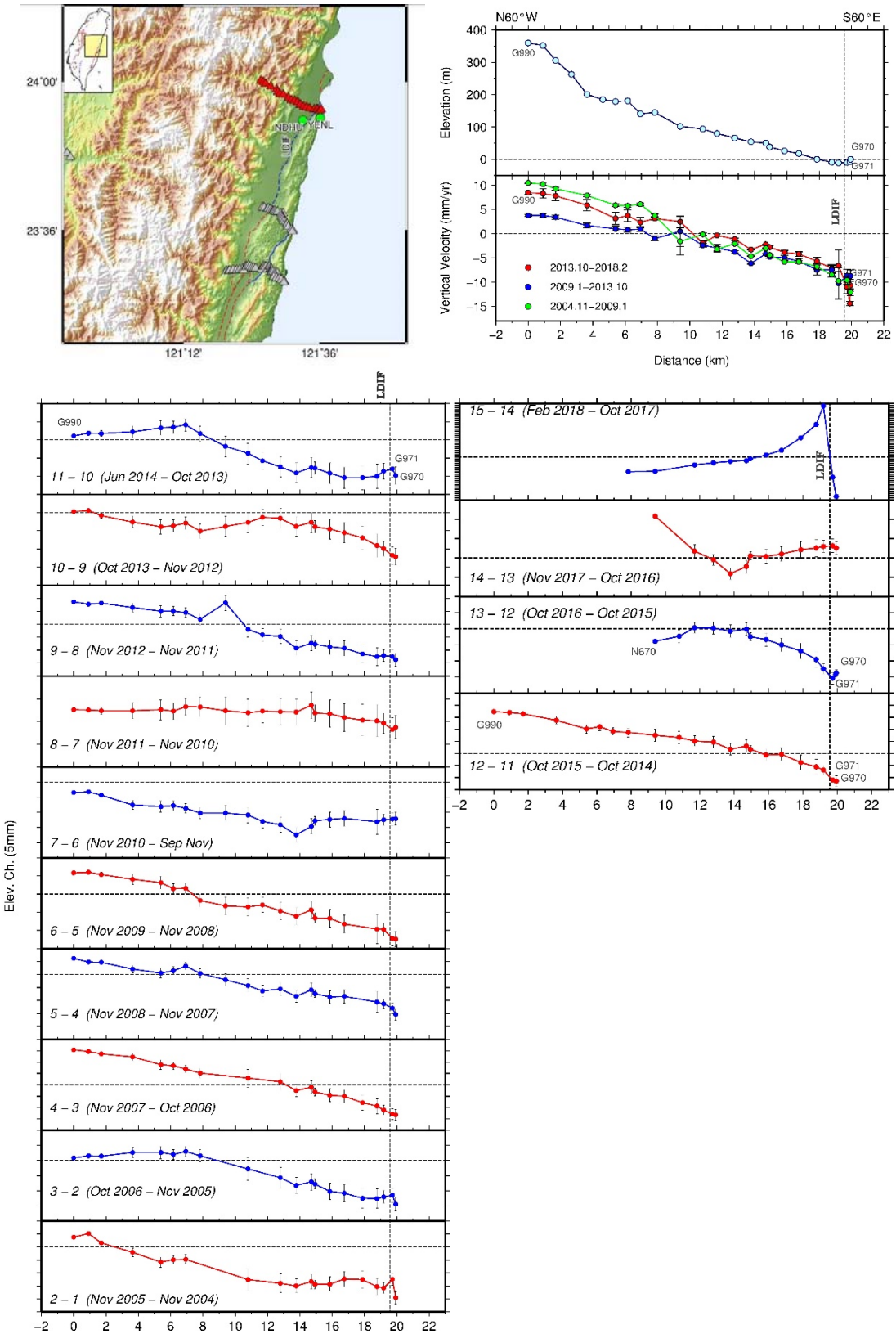


圖 2-4.118：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地直購造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層（圖 2-4.121），測線長約 12 公里，從 2004 年至 2018 年共計有 16 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 2-4.119）。各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2004 年 11 月至 2009 年 1 月、藍色為 2009 年 1 月至 2013 年 10 月、紅色為 2013 年 10 月至 2018 年 10 月(圖 2-4.121) 。

根據圖 2-4.121，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。2004 年 11 月至 2009 年 1 月期間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）。

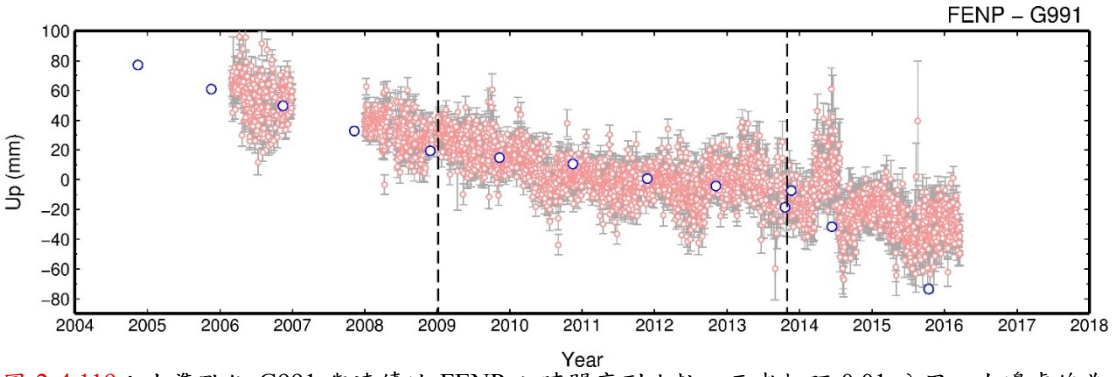


圖 2-4.119：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月

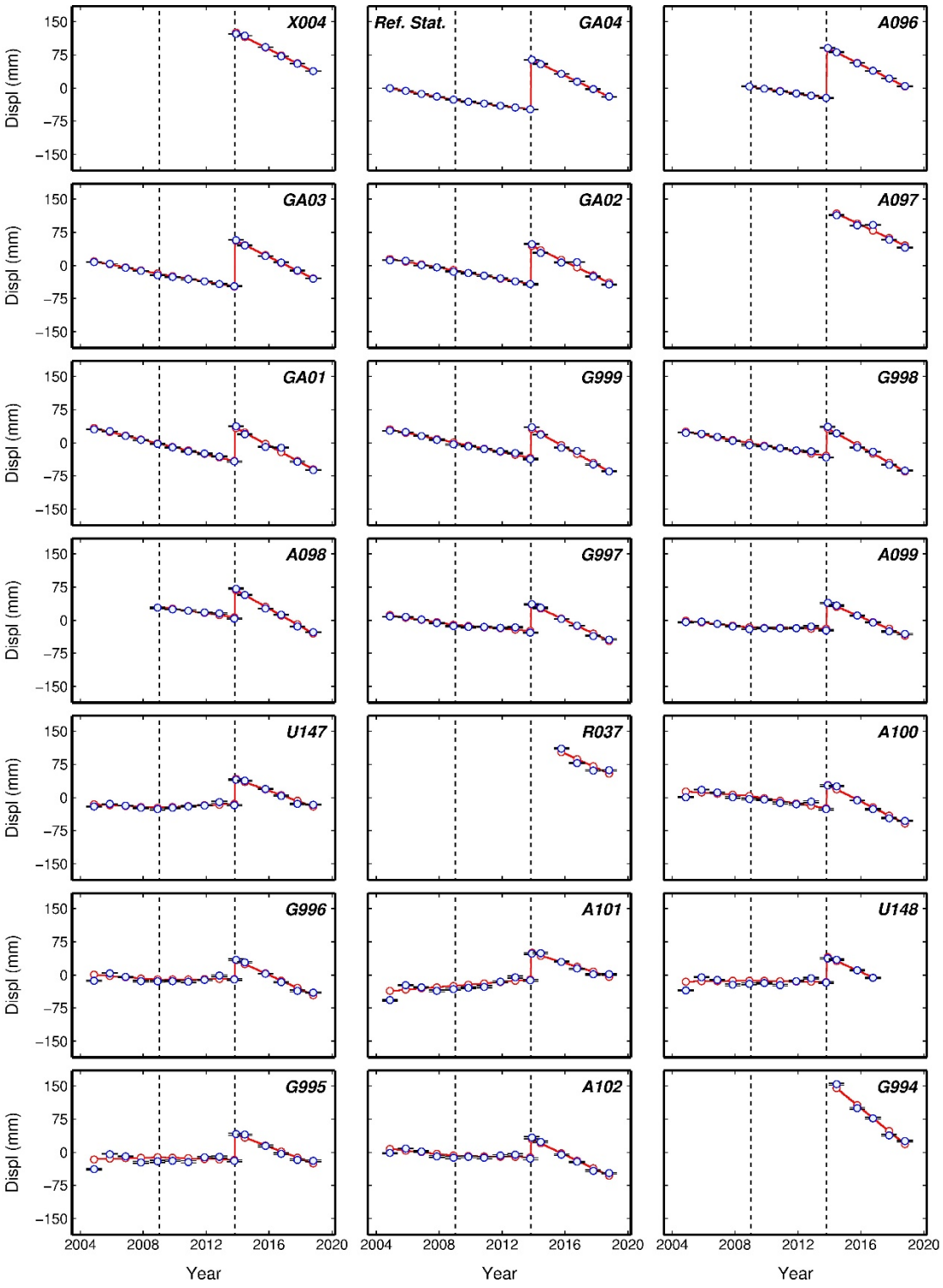


圖 2-4.120：光復至豐濱測線之時間序列。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

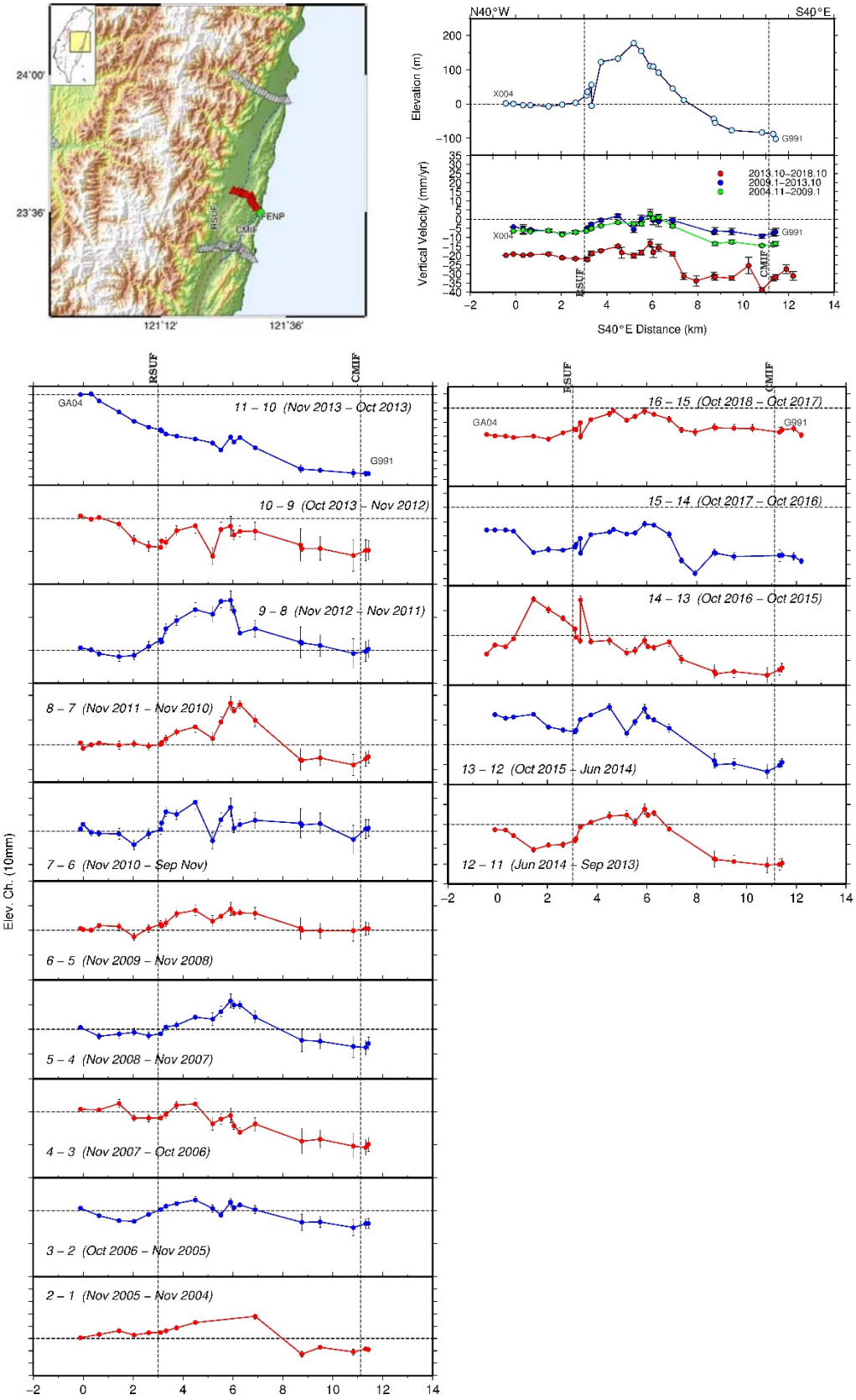


圖 2-4.121：光復至豐濱水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

紅葉至靜浦測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層（圖 2-4.124），測線長約 18 公里，2004 年至 2018 年間進行共 16 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 2-4.122）。各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2004 年 11 月至 2009 年 1 月、藍色為 2009 年 1 月至 2013 年 10 月、紅色為 2013 年 10 月至 2018 年 2 月(圖 2-4.124)。。

根據圖 2-4.124，在 2004 年 11 月至 2009 年 1 月間，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）。

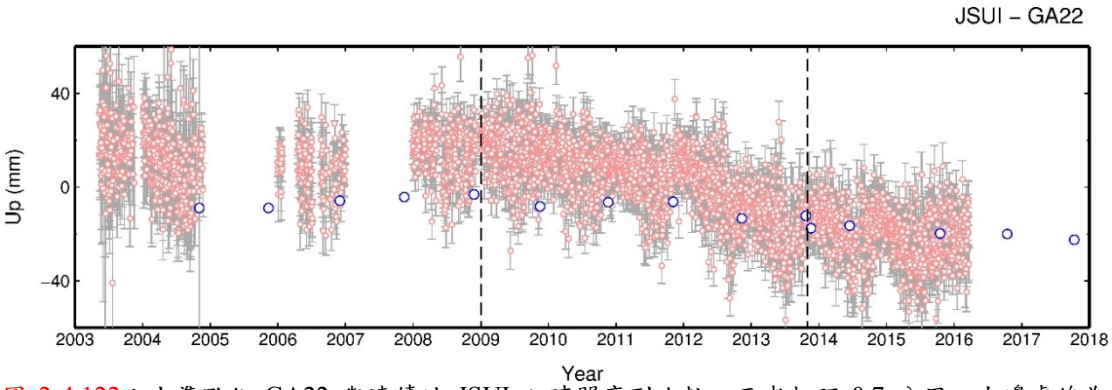


圖 2-4.122：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

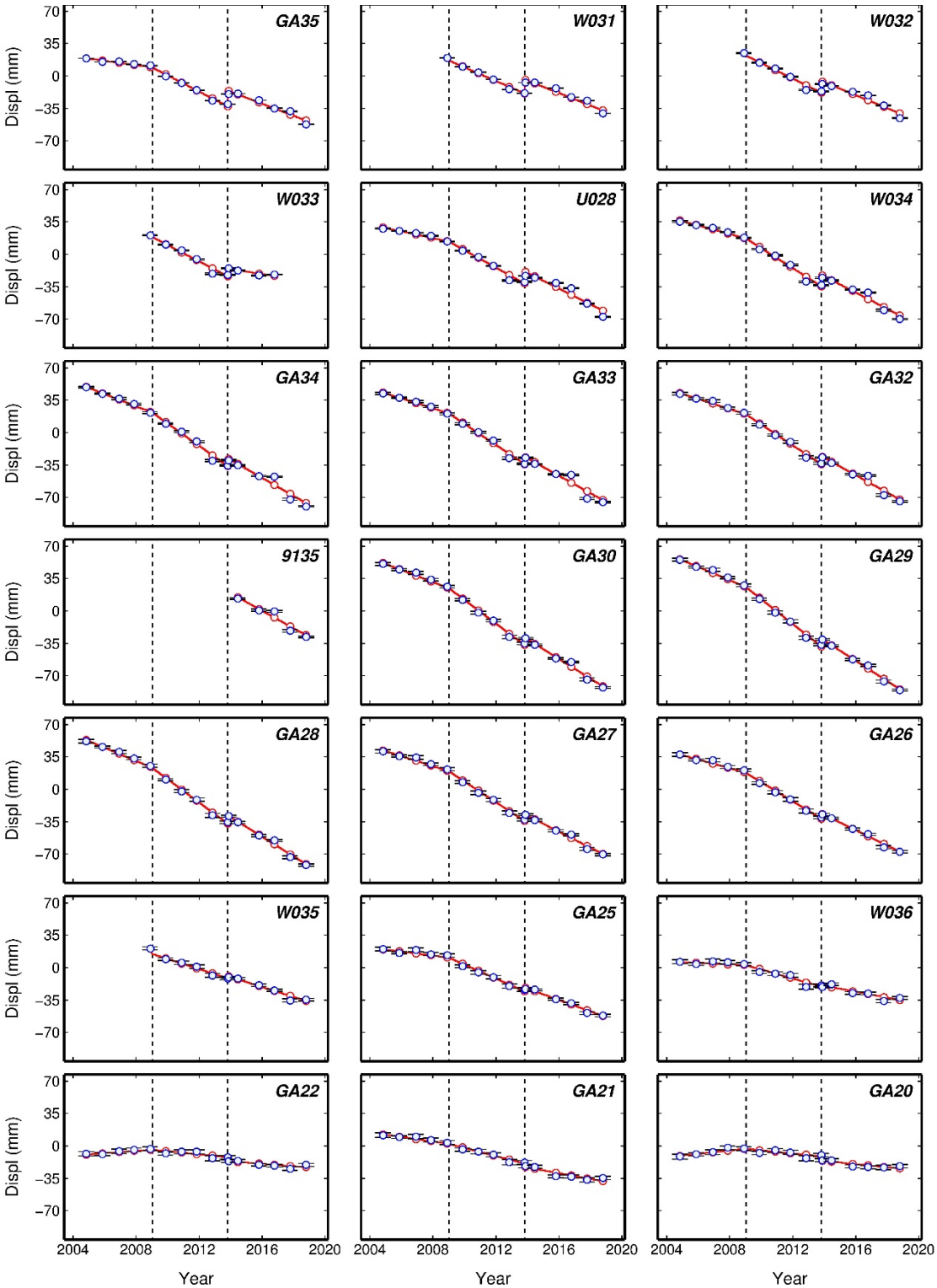


圖 2-4.123：紅葉至靜浦測線之時間序列。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

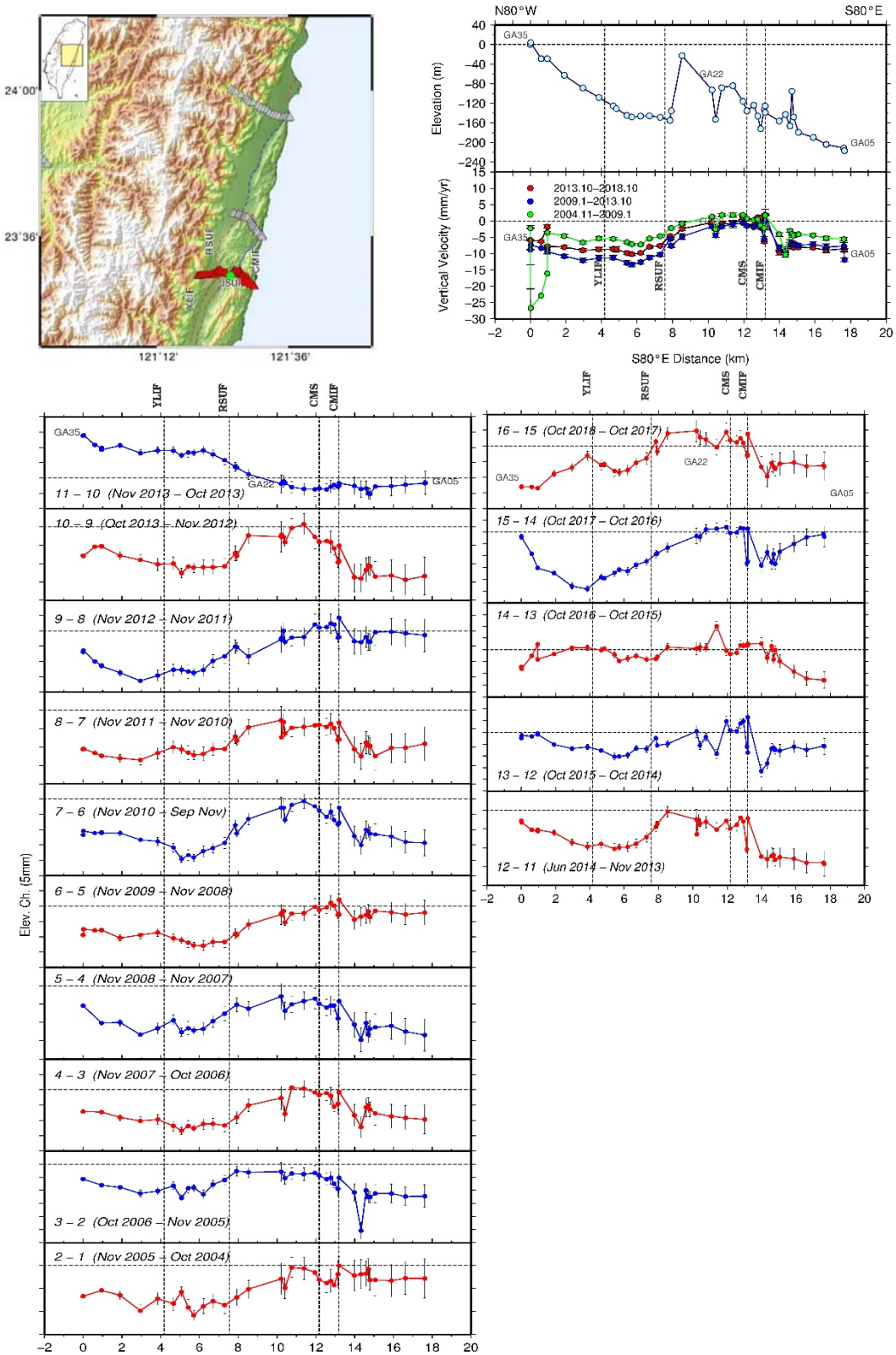


圖 2-4.124：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

東成至富岡測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層(圖 2-4.127)，測線長約 14 公里，2009 年至 2018 年間共進行 10 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 2-4.125）。各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2004 年 11 月至 2009 年 1 月、藍色為 2009 年 1 月至 2013 年 10 月、紅色為 2013 年 10 月至 2018 年 2 月(圖 2-4.127)。

根據圖 2-4.127，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。

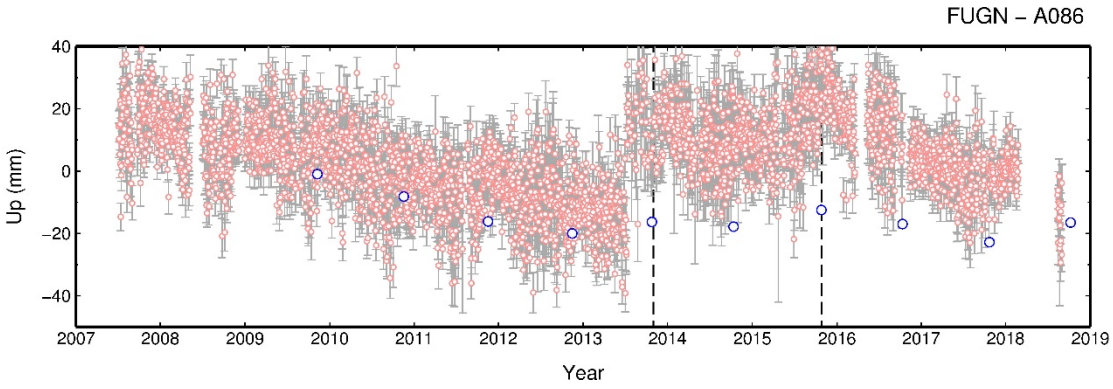


圖 2-4.125：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為一速度變化分界。

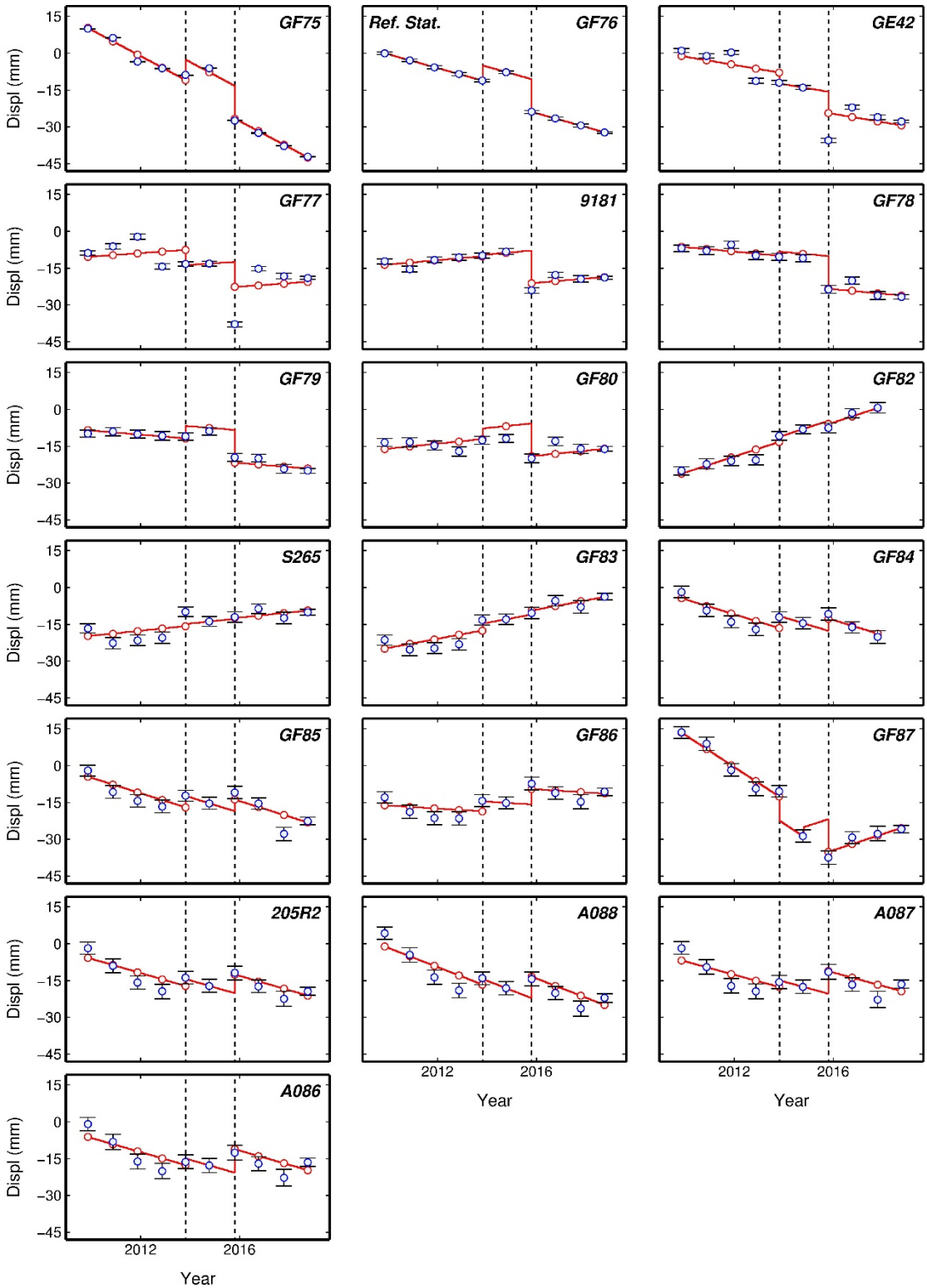


圖 2-4.126：東成至富岡測線之時間序列。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為一速度變化分界。

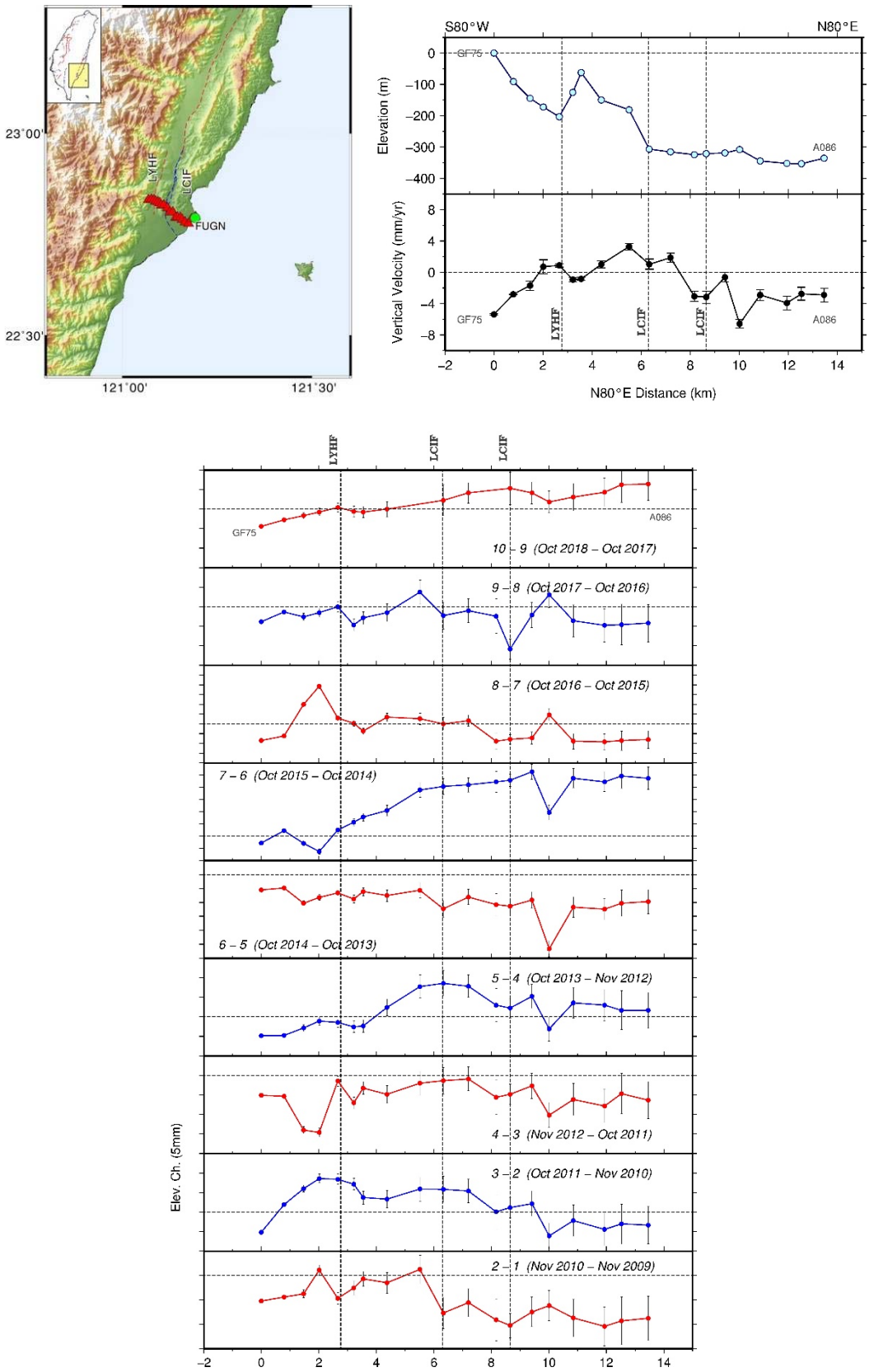


圖 2-4.127：東成至富岡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

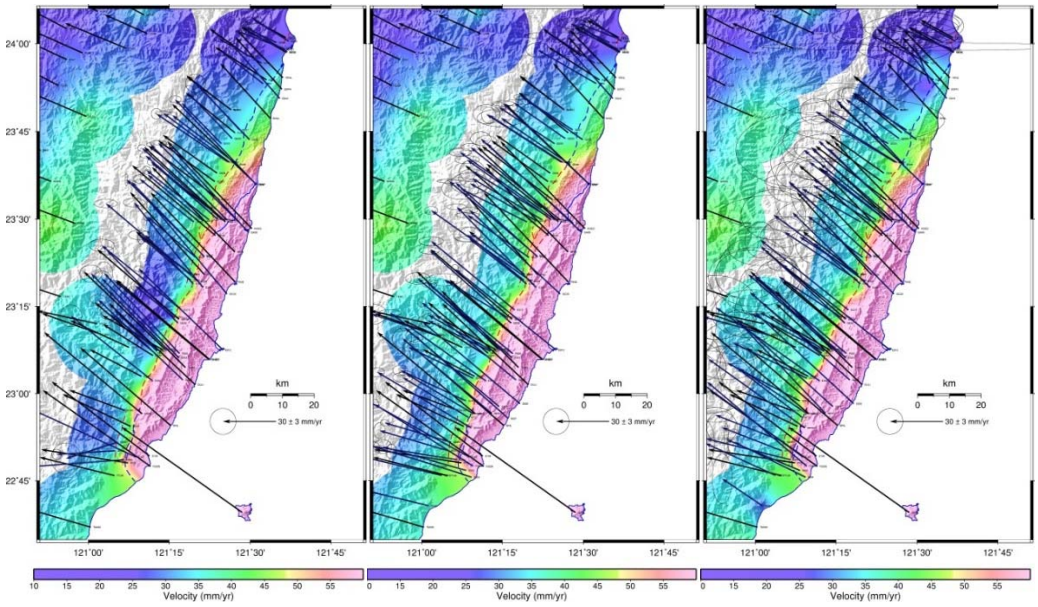


圖 2-4.128：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2003~2009 年速度場，中間表示 2009~2013 年速度場，右圖表示 2013~2018 年速度場。

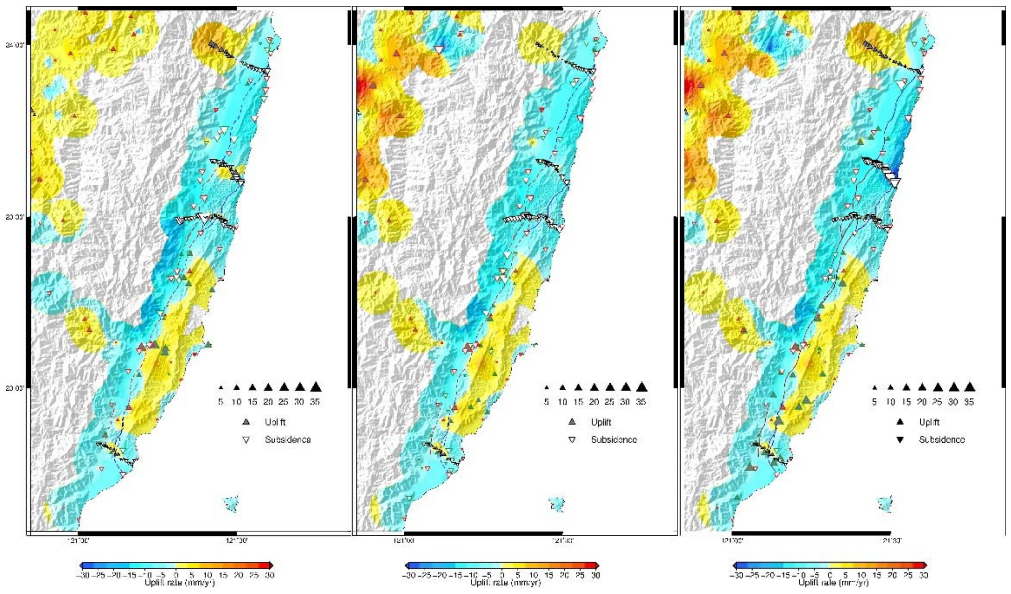


圖 2-4.129：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，左圖表示 2003~2009 年速度場，中間表示 2009~2013 年速度場，右圖表示 2013~2018 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-4-9 宜蘭地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之東部地區觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 32 點以及 1 條精密水準測線，宜蘭地區（圖 2-4.130）可比對坐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 2-4.131）。

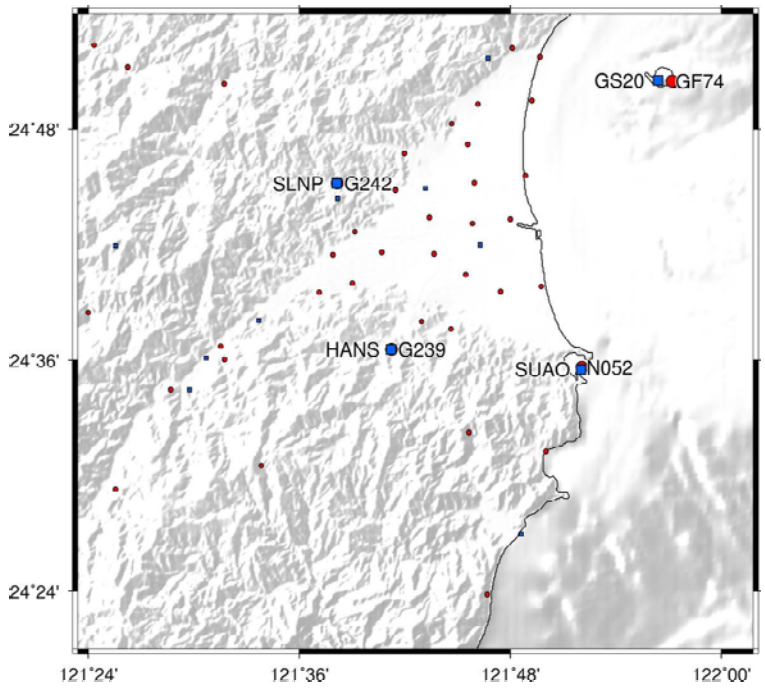


圖 2-4.130：宜蘭地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

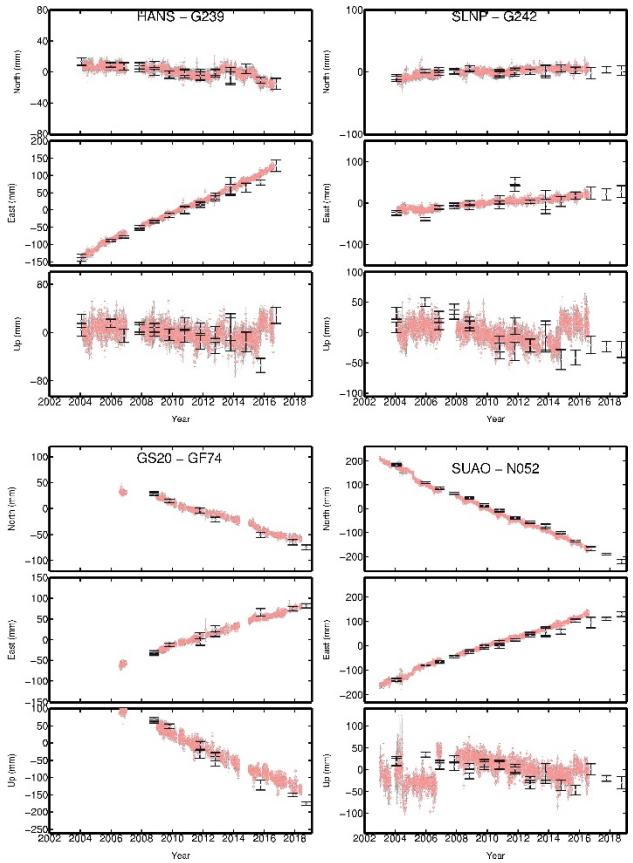


圖 2-4.131：2004~2018 年宜蘭地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位代表連續站，黑色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

宜蘭地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.132，2004 至 2018 年速度量值 1.8 ~ 36.0 mm/yr 。

垂直速度場如圖 2-4.133，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 0.2 ~ 25.5 mm/yr。

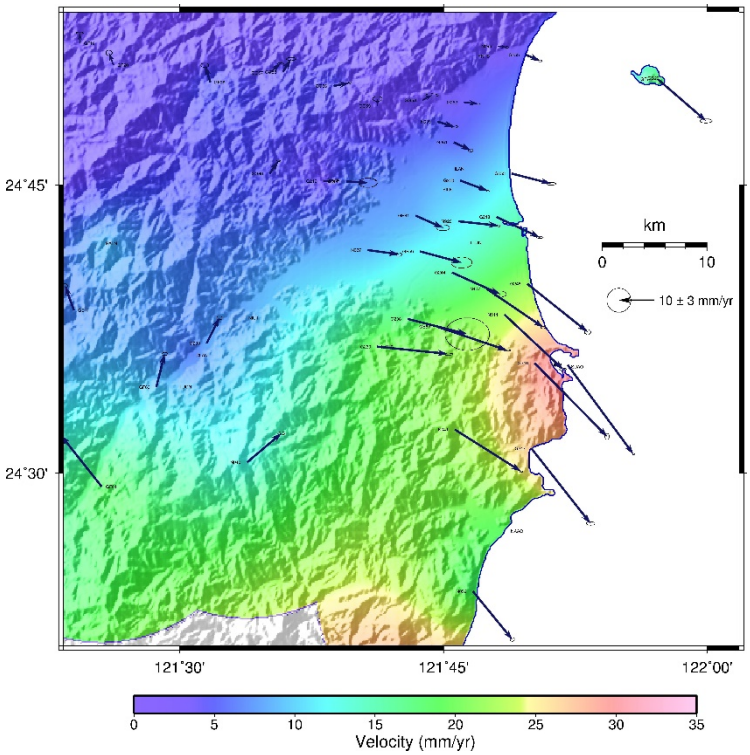


圖 2-4.132：宜蘭地區 2004-2018 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。

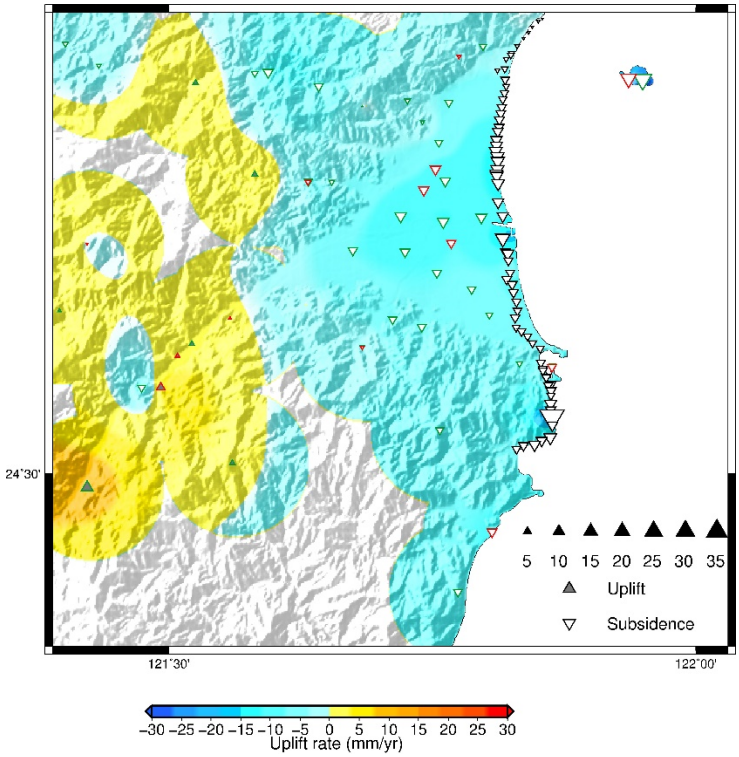


圖 2-4.133：宜蘭地區 2004-2018 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-4-10 全臺速度場

藉由檢視 GPS 連續站及精密水準測量之坐標時間序列可發現，地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此我們針對 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震等，以及發生速度場變化之轉折點，分別為 2007 年 1 月（中部地區）、2009 年 1 月（東部地區）、2010 年 4 月（恆春地區）、2015 年 1 月（恆春地區），分為九個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-4.134 及圖 2-4.135。

由解算結果可知臺灣地區 GPS 水平速度分布，在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。

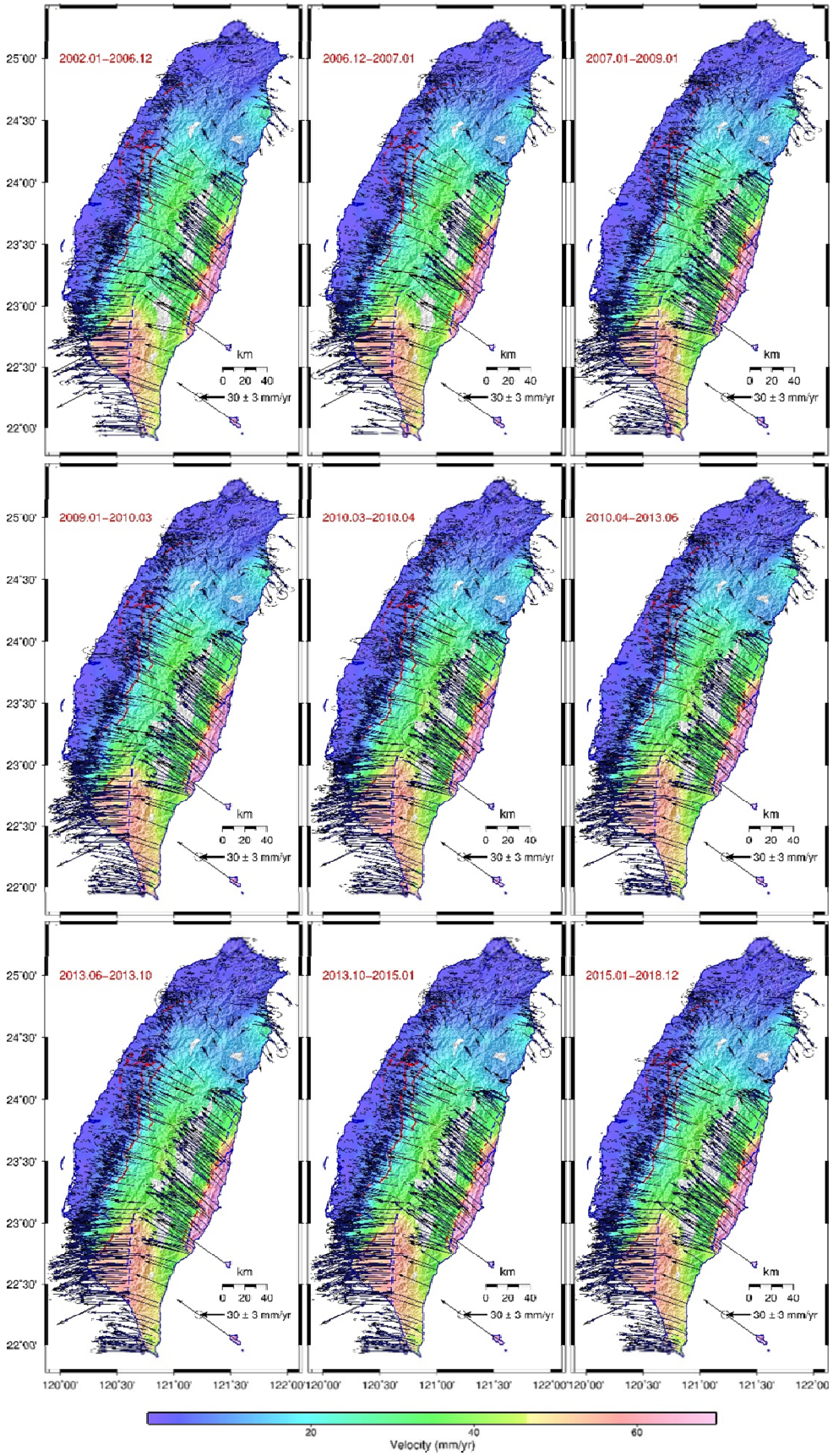


圖 2-4.134：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。

根據圖 2-4.135，大臺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，除跨湖口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，而高雄地區的路竹–茂林測線同樣也在龍船斷層南接之車瓜林斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，岡山-安坡測線在小岡山斷層西側約有-10 mm/yr，東側則約在-3 至 0 mm/yr，由於此一系列地表垂直速度場之空間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，所以和龍船斷層或車瓜林斷層的具體關聯性，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。屏東地區之佳冬-七佳測線，在潮州斷層以西約有-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 2017 年，在恆春斷層以東有些微的抬升現象，速率約 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）。

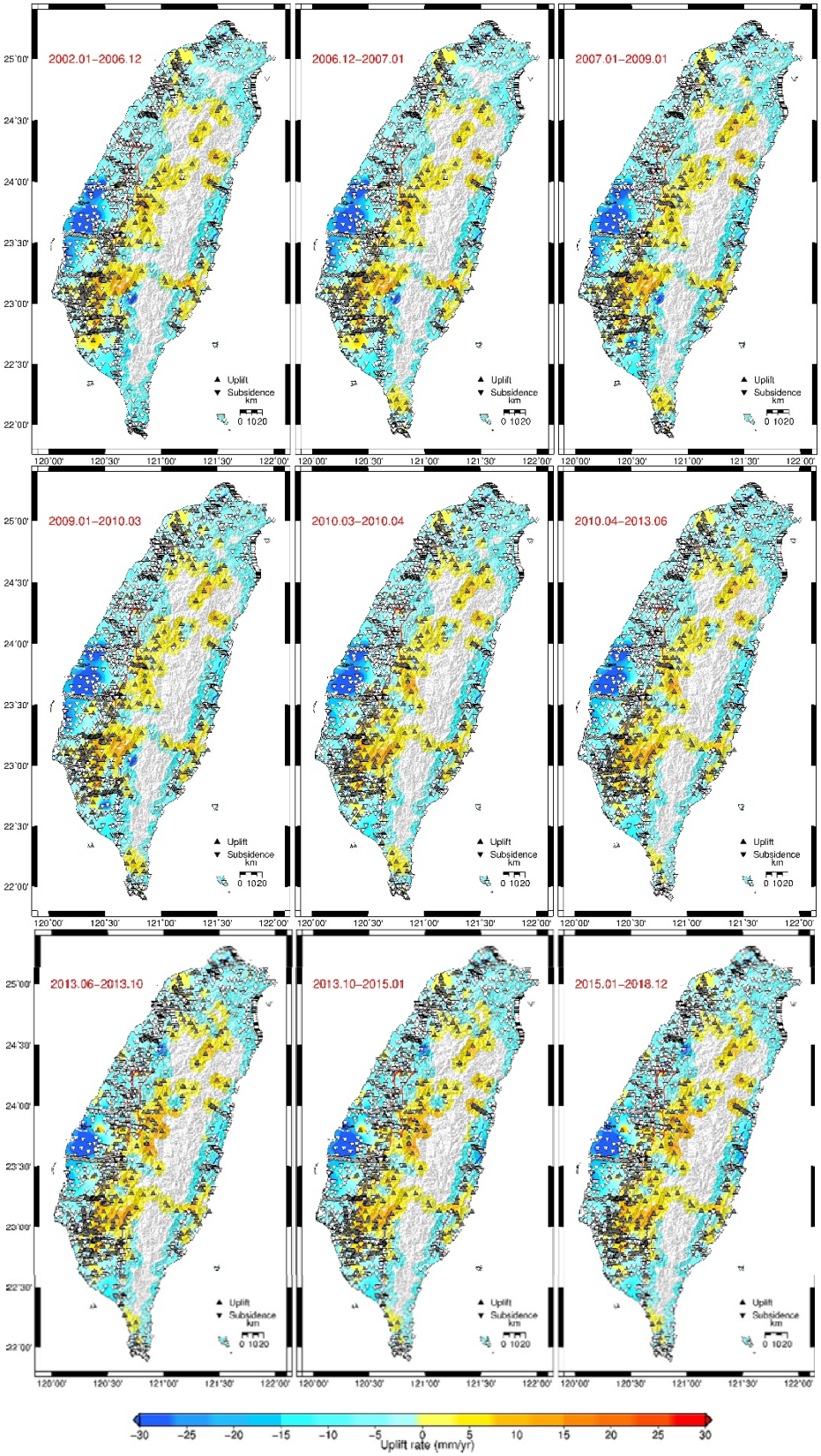


圖 2-4.135：2002 年至 2018 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

第三章、北部地區雷達影像分析

本計畫彙整臺灣地區，由 ERS（European Remote Sensing Satellite）-1/2、ENVISAT（Environmental Satellite）、ALOS（Advanced Land Observing Satellite）以及 Sentinel-1A 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；Sentinel-1A 衛星於 2014 年發射，同樣為 C 波段。而 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，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）。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。完成所有影像對的干涉結果後，本計畫利用 StaMPS 軟體進行 PS-InSAR 流程解算，獲得永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。

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 3.1）及所使用的時間區間：

（1） C 波段之 **ERS-1/2** 衛星 SAR 影像時間：從 1996 年 1 月至 1999 年 7 月。

（2） C 波段之 **ENVISAT** 衛星 SAR 影像時間：從 2004 年 3 月至 2008 年 6 月。

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

（4） C 波段之 **SENTINEL-1A** 衛星 SAR 影像時間：從 2015 年 4 月至 2018 年 8 月。

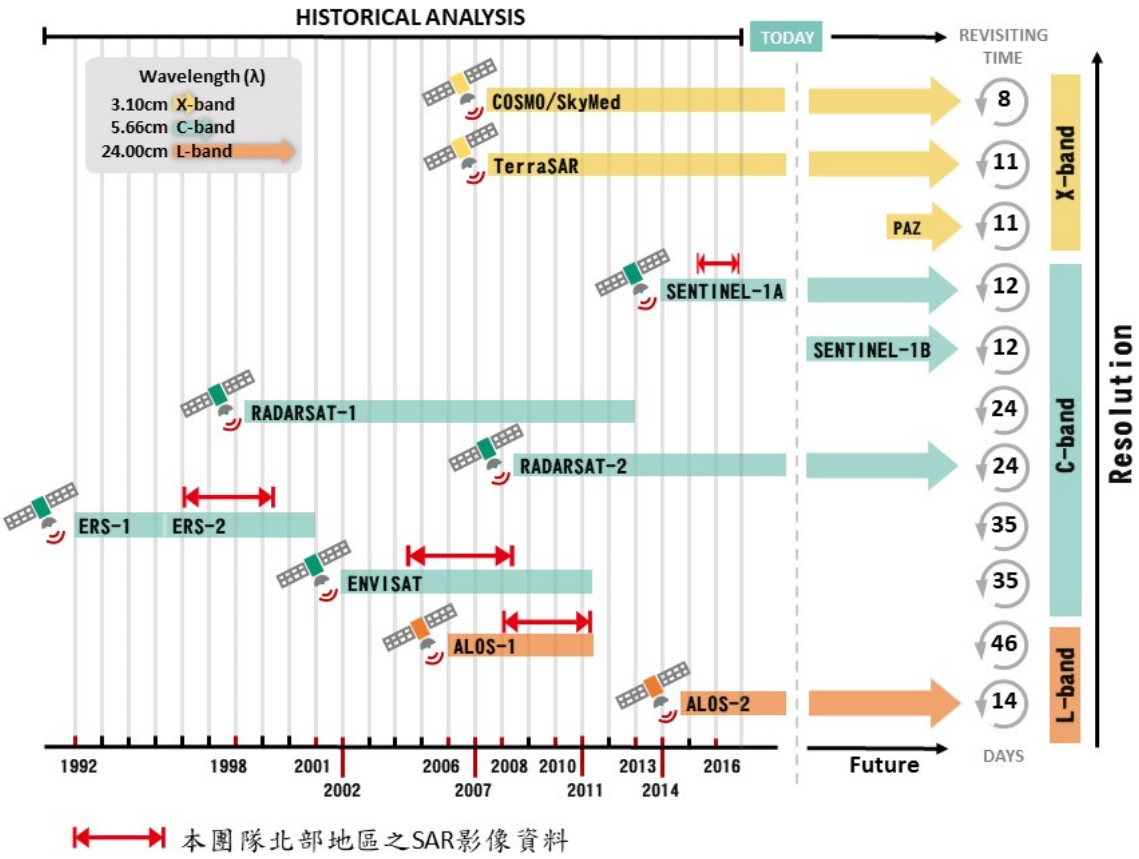


圖 3.1：本團隊北部地區 SAR 影像圖資示意圖。

3-1 北部地區 PS-InSAR 成果資料分析

3-1-1 ERS1/2 (1996/1~1999/7)

圖 3-1.1 即為 ERS 影像在此期間（1996/1~1999/7）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。分析永久散射點的結果，可以得到在這段期間，臺北盆地主要以向視衛星方向抬升的運動為主，最大抬升速率為位於士林、北投地區的 8 mm/yr。而桃園工業區則有最大下陷速率，約為 20 mm/yr。

圖 3-1.2 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖。由圖可得到本結果之 ERS 影像與連續 GPS 測站所測得的速率有高度相關性（0.8899），顯示本結果可信度相當高。

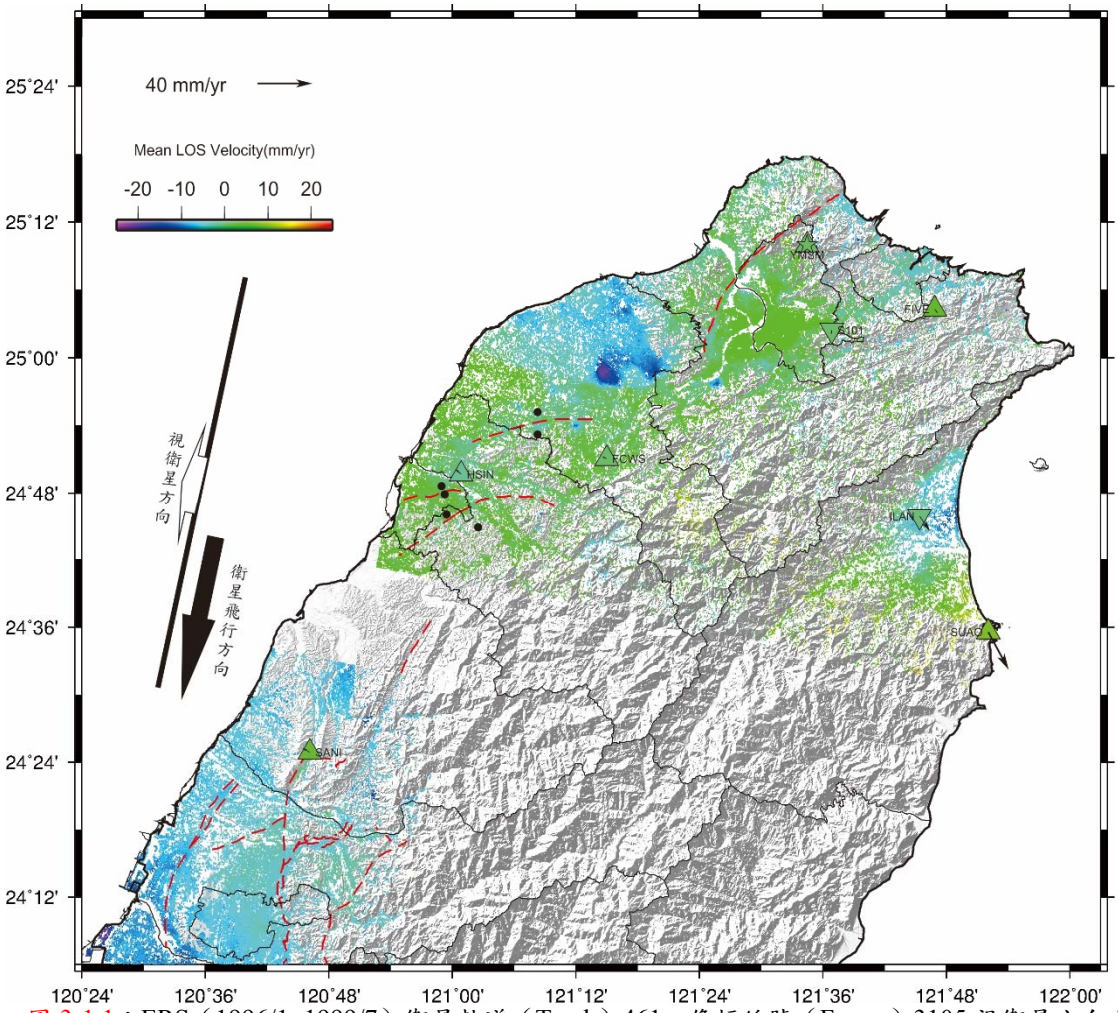


圖 3-1.1：ERS（1996/1~1999/7）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

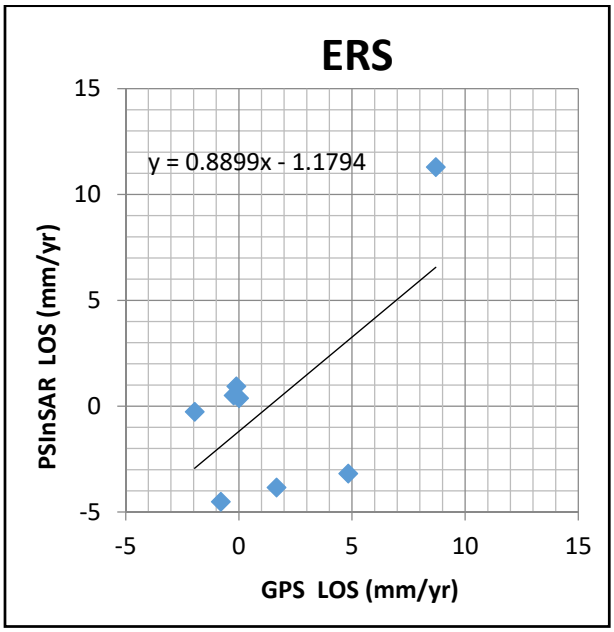


圖 3-1.2：ERS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。

另將 ERS 衛星影像在此期間（1996/1~1999/7）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量結果與中央地質調查所報告「都會區地下地質與工程環境調查研究-台北都會區-活動斷層及地盤下陷水準測量」（86 年度~88 年度）之三條水準資料轉到視衛星方向進行比對（圖 3-1.3），分別為金山水準測線、關渡短水準測線、五股水準測線。其中金山水準測線及關渡短水準測線由於永久散射點較少無法正確進行比對（圖 3-1.4），ERS 衛星資料與五股水準測線資料以水準測站 S411 作為參考點，兩者同樣呈現一致往東南跨山腳斷層有輕微抬升的現象（圖 3-1.5）。

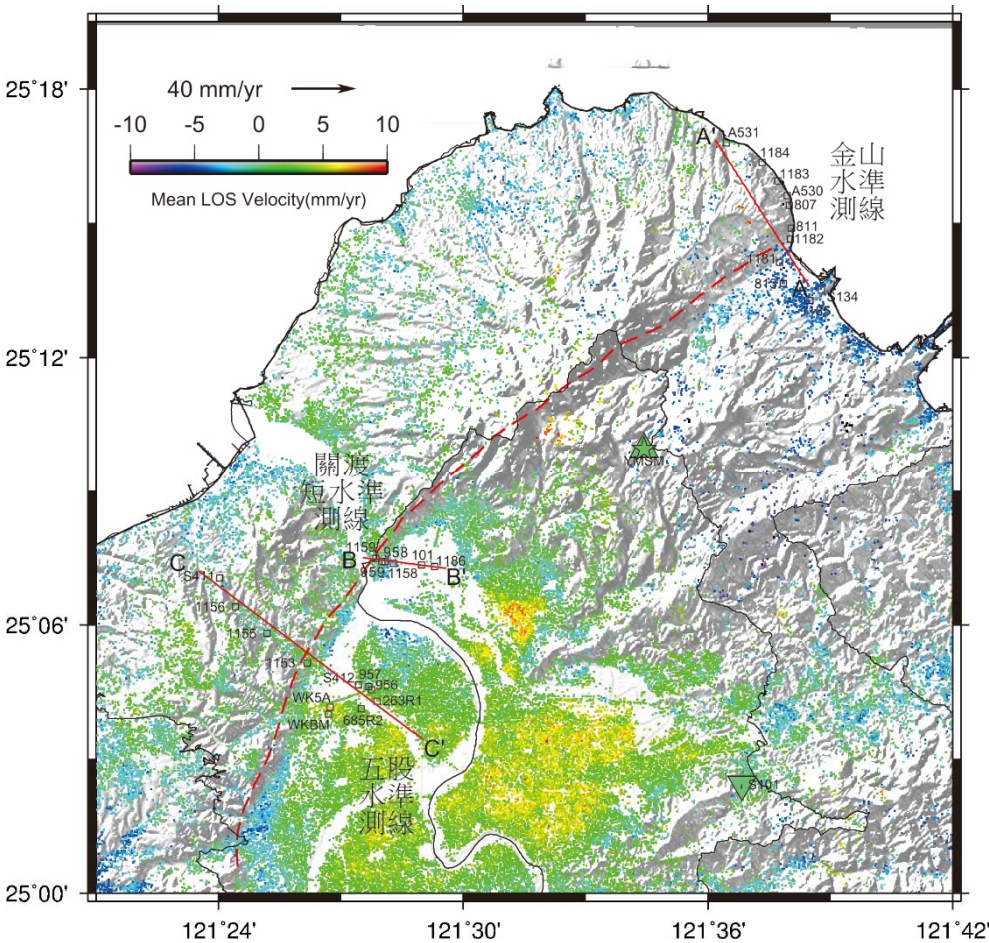


圖 3-1.3：ERS（1996/1~1999/7）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）、水準測線位置及剖面位置。

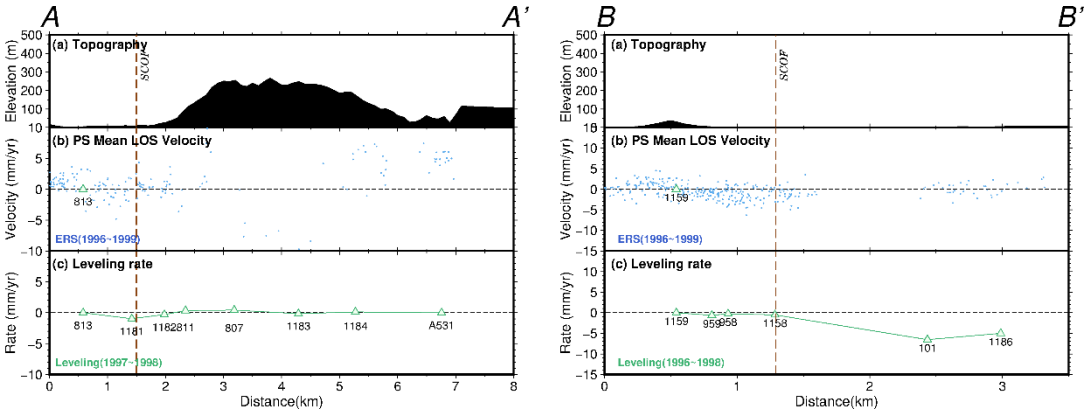


圖 3-1.4：A 及 B 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b) C 波段 ERS 視衛星方向速度變化；(c)水準測量資料。SCOF 為山腳斷層。

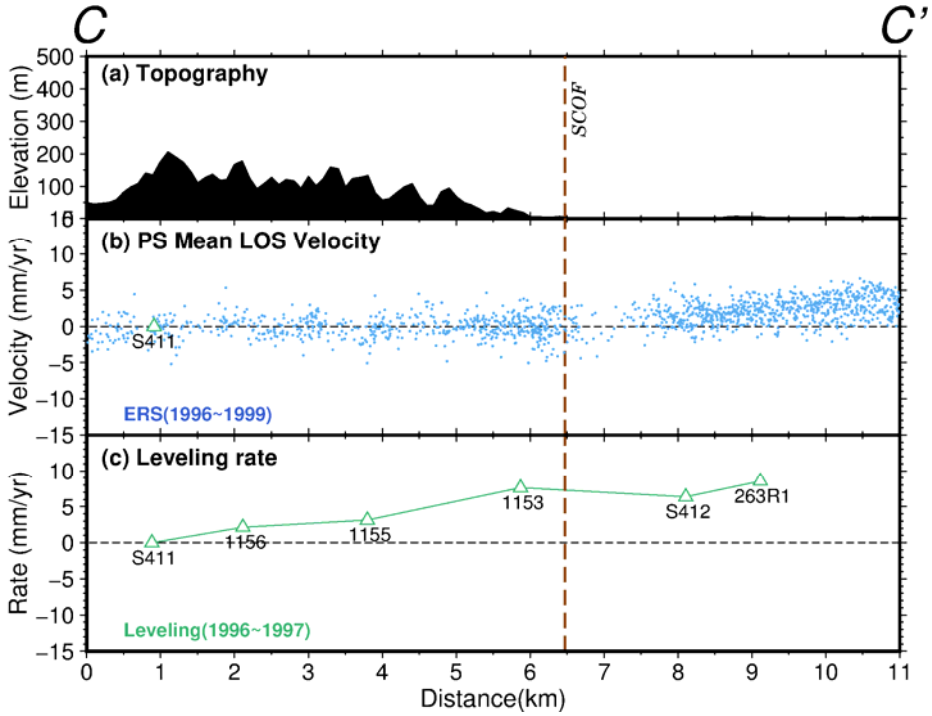


圖 3-1.5：C 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b) C 波段 ERS 視衛星方向速度變化；(c)水準測量資料。SCOF 為山腳斷層。

3-1-2 ENVISAT (2004/3~2008/6)

圖 3-1.6 為 ENVISAT 影像在此期間（2004/3~2008/6）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。從圖中可見，在這段期間，臺北盆地主要以往視衛星方向下陷的運動為主，最大下陷速率為位於泰山、五股地區的 9 mm/yr，而盆地西側則為平均 3-4 mm/yr 的下陷速率。另一明顯下陷區位於台中市西區與南區，速率可達 20 mm/yr。

圖 3-1.7 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖。由圖可得到本結果之 ENVISAT 影像與連續 GPS 測站所測得的速率相關性為 0.6214，其可信度略低於 ERS 衛星的結果，其原因可能為 ENVISAT 於這四年期間影像數較少，導致永久散射點的計算較容易受到其他誤差影響。

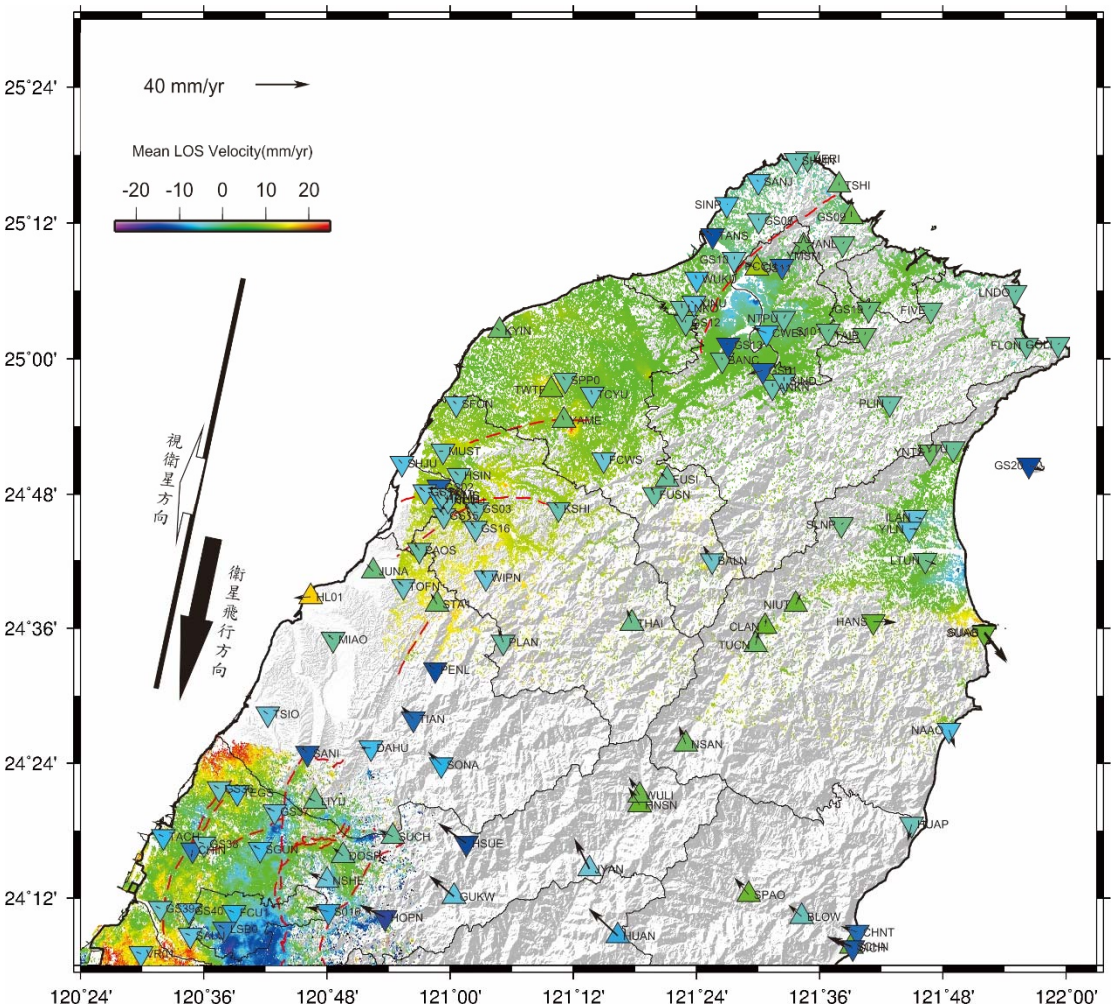


圖 3-1.6：ENVISAT（2004/3~2008/6）衛星軌道 461，像幅編號 3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

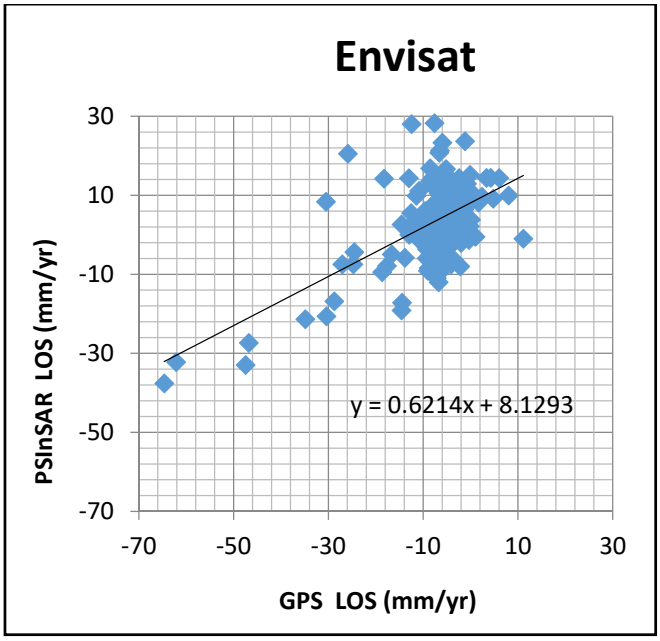


圖 3-1.7：ENVISAT 影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。

3-1-3 ALOS (2007/1~2011/3）

圖 3-1.8 即為 ALOS 衛星影像在此期間獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。從圖中可見，在這段期間（2007/1~2011/3），臺北盆地主要以往視衛星方向輕微抬升或不動的運動為主；宜蘭地區則有較明顯的視衛星方向遠離，約為 10 mm/yr。

圖 3-1.9 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖。由圖可得到本結果之 ALOS 影像與連續 GPS 測站所測得的速率相關性為 0.3231，其可信度較低，其原因可能為 ALOS 衛星影像是由多個不同軌道拼接時造成的誤差，或是大氣效應誤差。

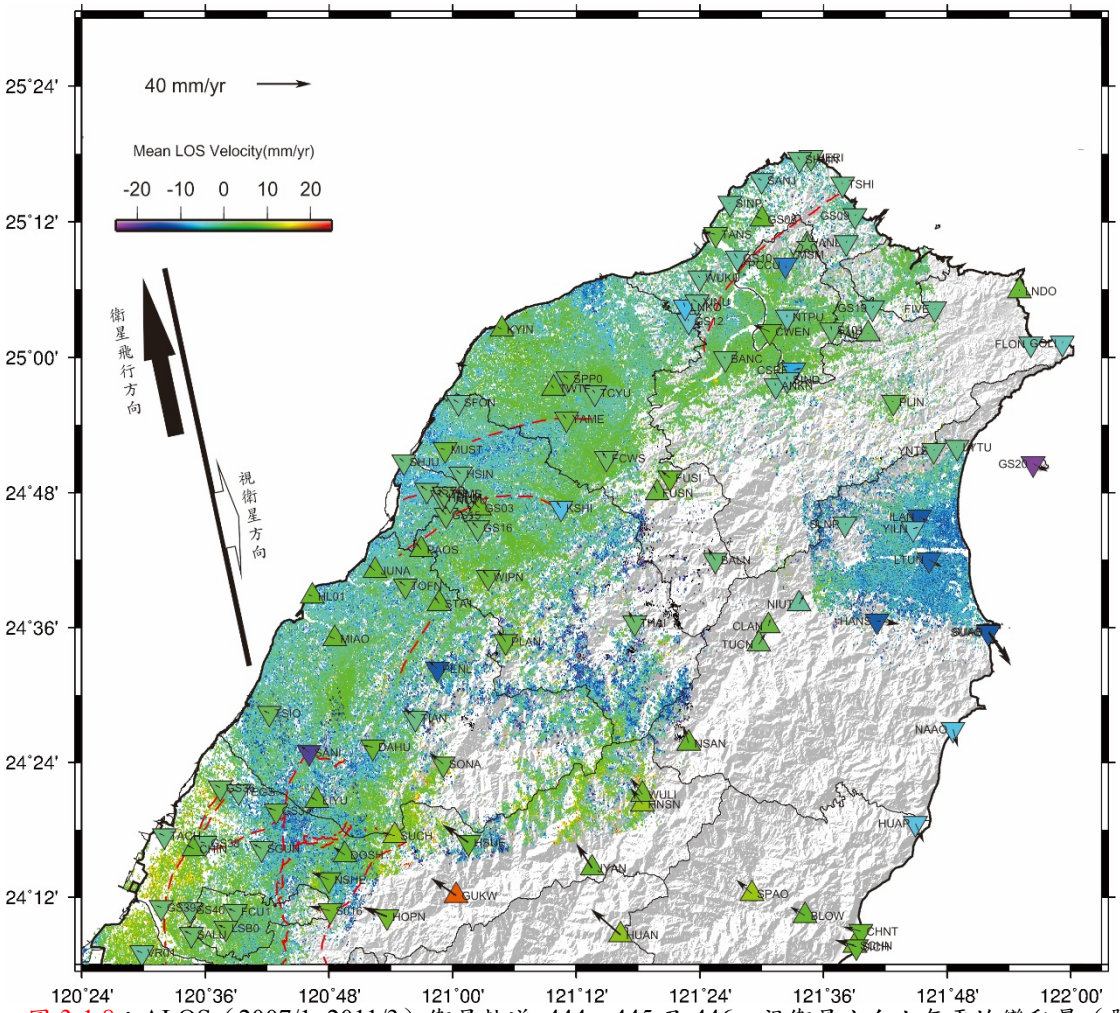


圖 3-1.8：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 444、445 及 446，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

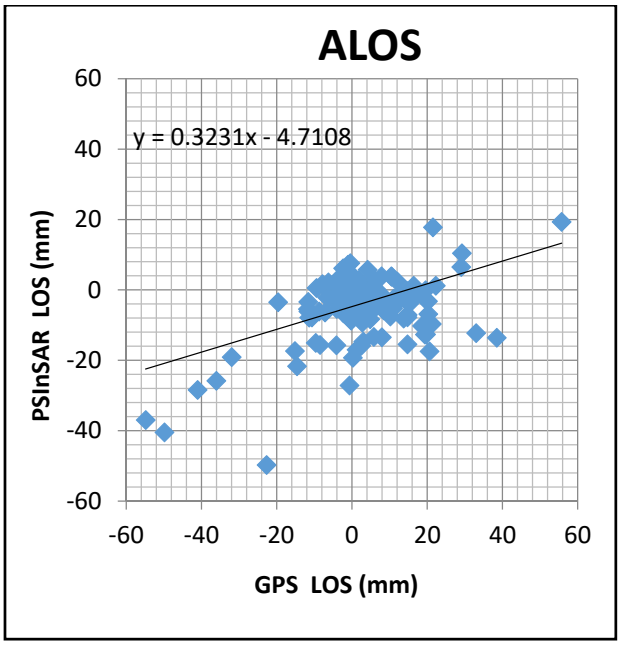


圖 3-1.9：ENVISAT 影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。

3-1-4 SENTINEL-1（2015/4~2018/8)

圖 3-1.10 為 Sentinel-1 升軌影像在此期間（2015/4~2018/8）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。整體而言，北部地區地表變形不明顯，而宜蘭地區則是呈現是衛星方向遠離的運動，以升軌影像而言，此運動方向應該是由宜蘭地區順時針旋轉的水平運動造成的。並且經由圖 3-1.11 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖得到其相關係數高達 0.87，顯示此結果相當可信。

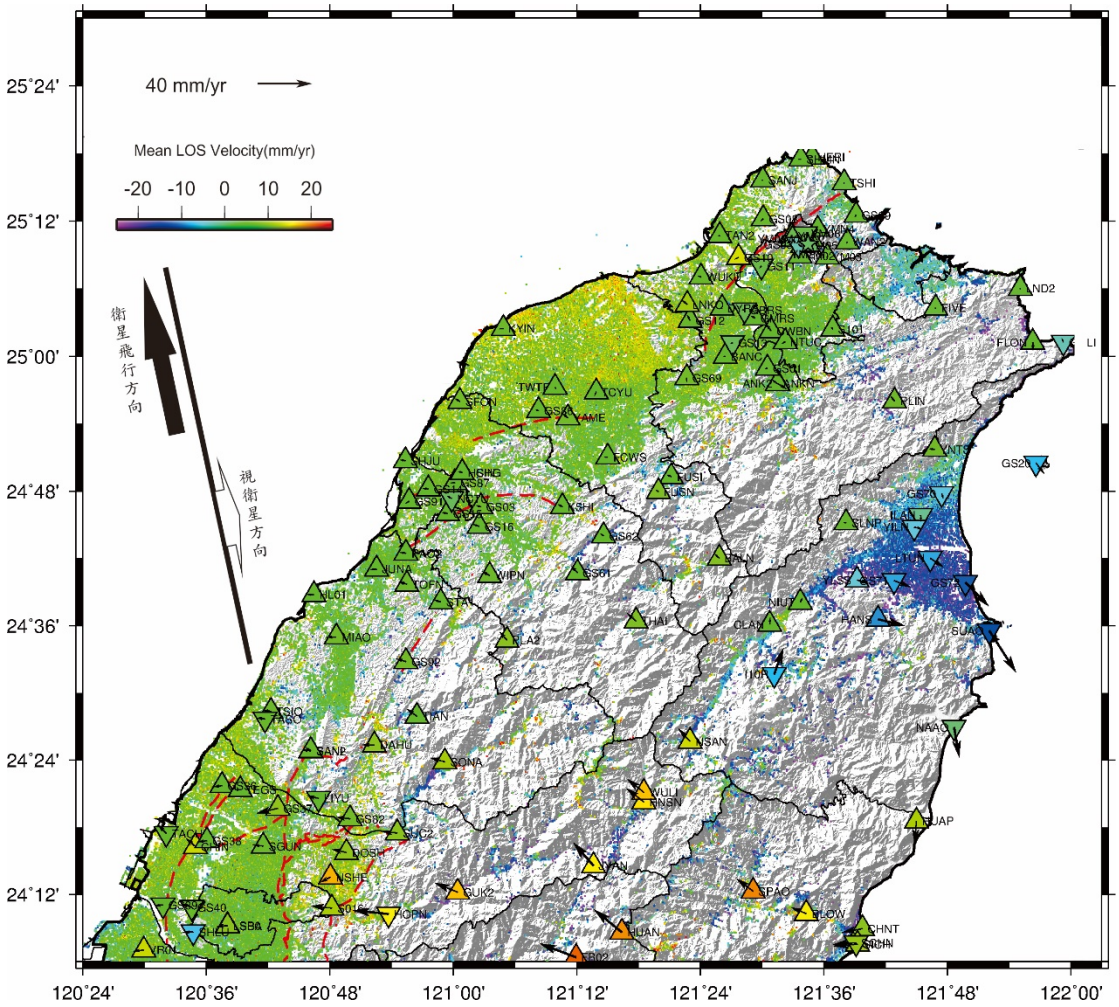


圖 3-1.10：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）升軌軌道 69，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

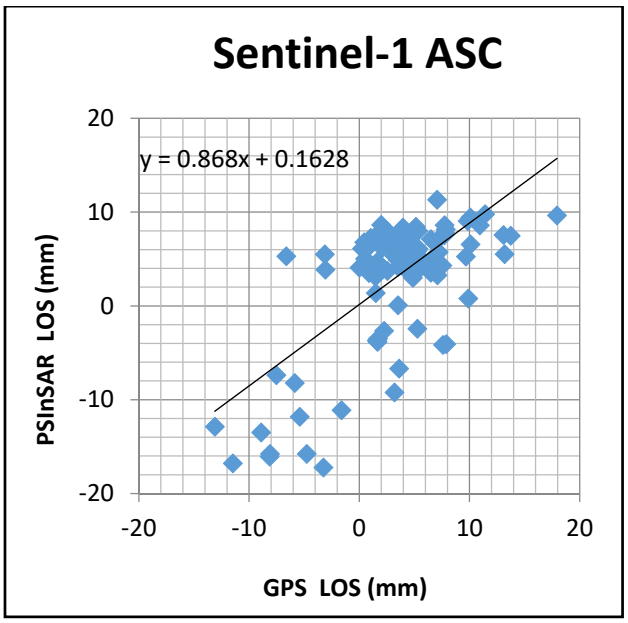


圖 3-1.11：SENTINEL-1 升軌軌道影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。

圖 3-1.12 則為 Sentinel-1 降軌影像在此期間（2015/4~2018/8）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以綠色星星標示連續 GPS 測站為參考點位，對所有 PS 點做校正。整體而言，北部地區地表變形以不動或是輕微朝視衛星方向接近為主，而台中沿海地區則是能觀察到輕微的視衛星方向遠離的運動，可能為此區域向西之水平運動所造成。另外，宜蘭地區呈現較明顯的視衛星方向靠近的運動可能為相位回覆錯誤，後續可加入更多影像及配對來改善此結果。其連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖得到其相關係數高達 0.99，同樣顯示此結果相當可信（圖 3-1.13）。

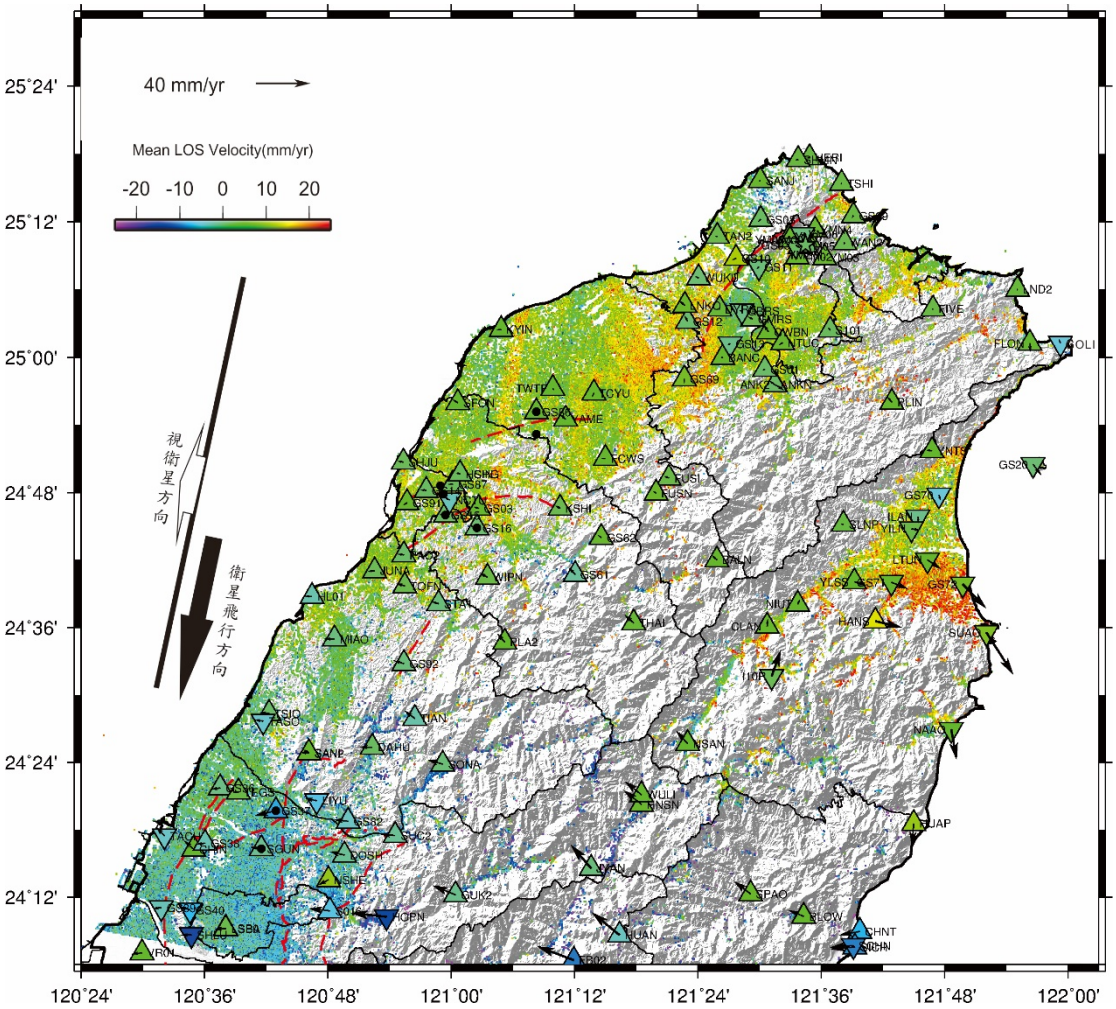


圖 3-1.12：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）降軌軌道 105，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

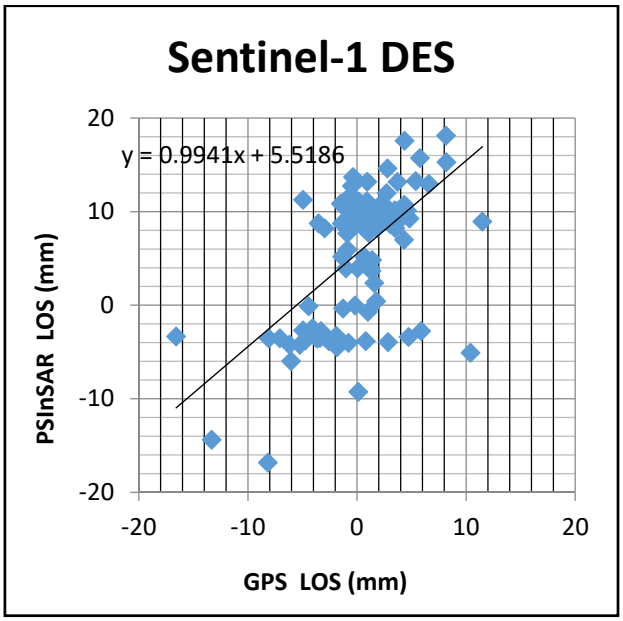
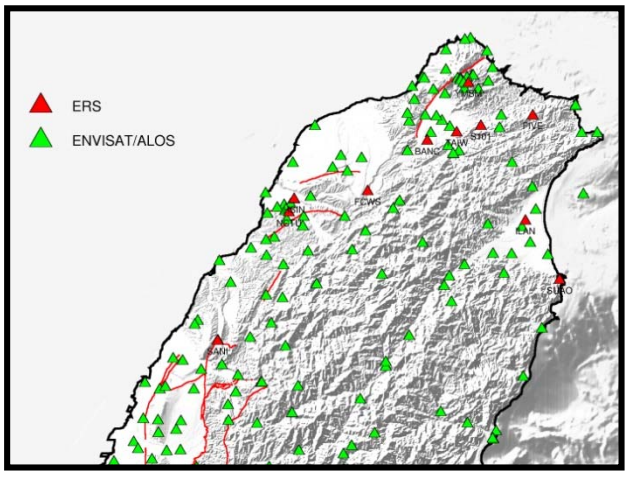


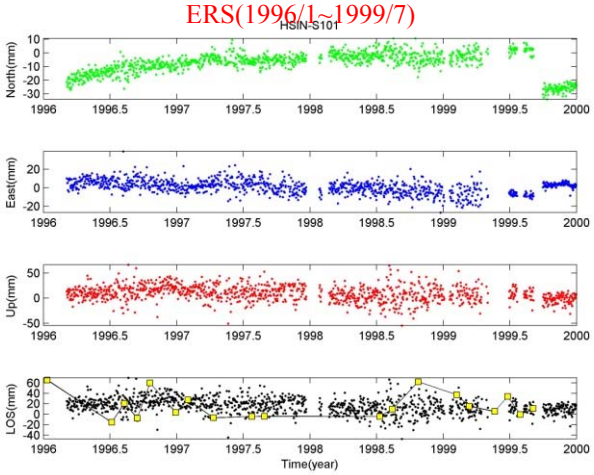
圖 3-1.13：SENTINEL-1 升軌軌道影像的永久散射點與連續 GPS 測站相關性。

3-2 GPS 連續站周圍 PS 點之時間序列

由圖 3-2.1 右下連續 GPS 測站時間圖可看出北部地區大部分的連續 GPS 測站都架設於 1999 年 921 集集地震之後（綠色三角測站），因此大部分測站都無法與 ERS 衛星時期做比較。本期中報告首先挑選北部地區中央氣象局位於新竹之連續 GPS 測站（HSIN）以中央研究院 S101 測站為參考點進行測試比較。由於 PSInSAR 獲得之時間序列為對視衛星方向（LOS）上的變化，圖 3-2.1 為利用衛星與地面的幾何關係將 GPS 時間序列之 ENU 三個方向上的變化（藍色、綠色及紅色）轉換至 LOS 方向上（黑色），並截取與衛星拍攝同時期之比較。圖中顯示出 ERS 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有較好的關聯性，而 ENVISAT 影像相對而言則跳動幅度較大。而 ALOS 衛星影像則因為此兩 GPS 測站不屬於同一張影像，因此無法對比。



ERS(1996/1~1999/7)



ENVISAT(2004/3~2008/6)

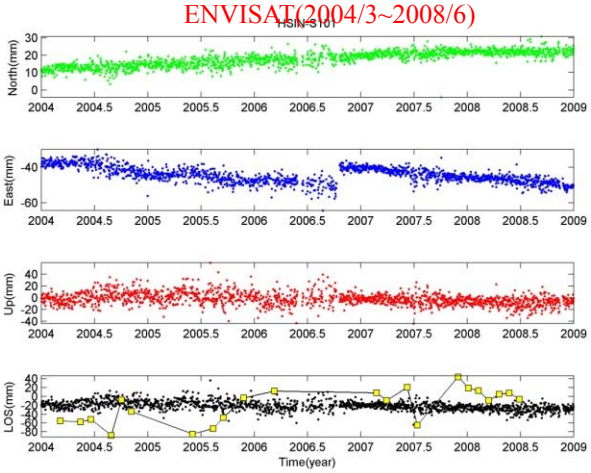


圖 3-2.1：ERS（1996/1~1999/7）時期及 ENVISAT（2004/3~2008/6）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

除連續 GPS 測站 HSIN 外，我們同時也比較了國土測繪中心位於陽明山的 YMSM 測站，由圖 3-3.2 顯示出三種衛星影像之時間序列與 GPS 時間序列有較好的關聯性，只有少數張影像可能因為受到大氣影響而有較大的跳動。因此在大屯山區建議可嘗試移除受大氣影響較嚴重之影像，再重新製作時間序列以供分析。

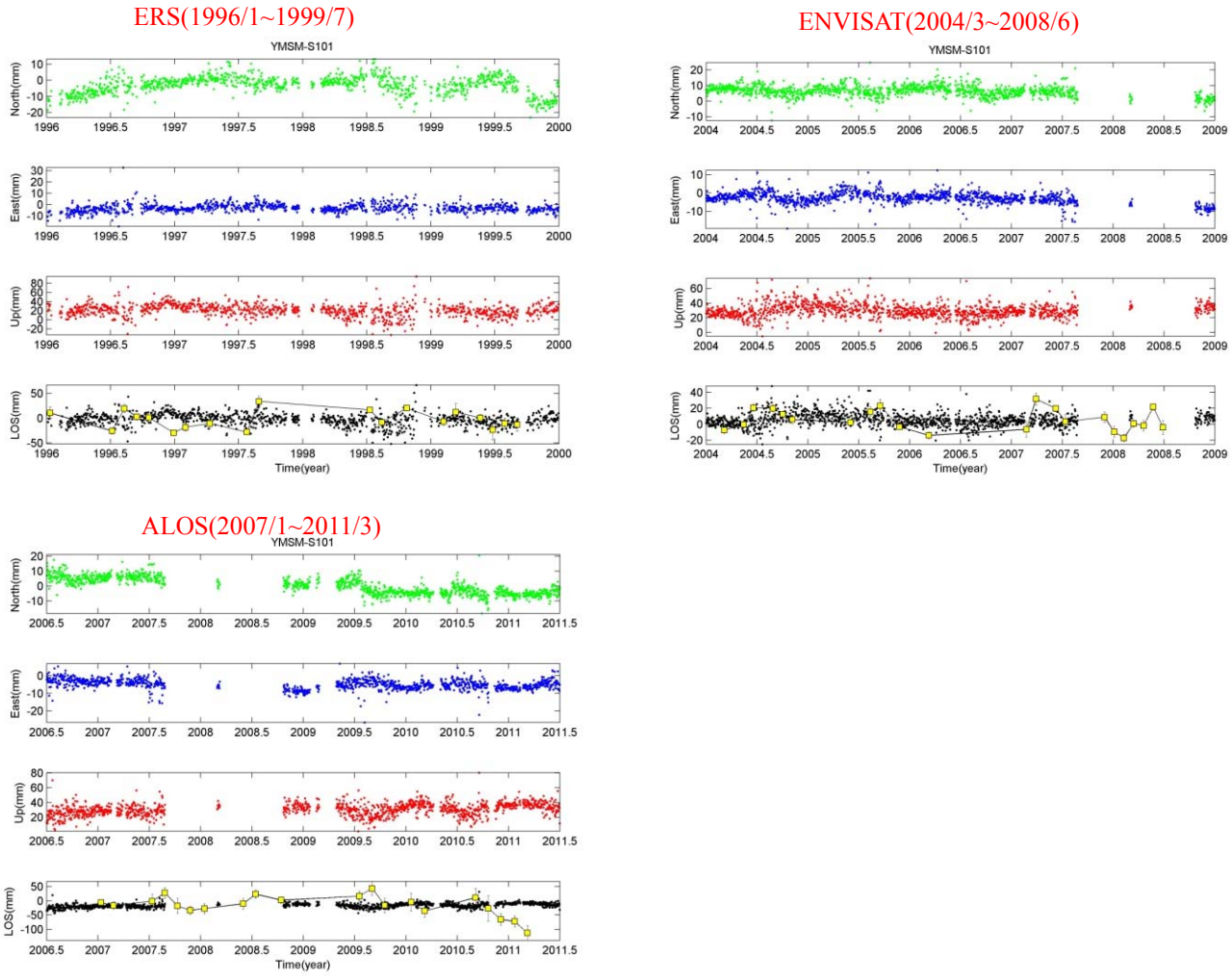


圖 3-2.2：ERS（1996/1~1999/7）時期、ENVISAT（2004/3~2008/6）時期及 ALOS（2007/1～2011/3）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

3-3 北部地區 PS-InSAR 技術時間序列分析

根據期中報告的評估，本期末階段利用 ERS 影像（1996/1~1999/7）及 SENTINEL-1（2015/4~2018/8）降軌影像，針對北部地區斷層進行 PS-InSAR 技術時間序列分析。選擇斷層東西兩側各一點位進行分析，點位位置詳見圖 3-1.1 及圖 3-1.12 之黑色圓點。

3-3-1 湖口斷層

根據圖 3-3.1 及圖 3-3.2 衛星時間序列結果顯示，在 ERS 衛星時期（1996/1~1999/7）跨湖口斷層速度變化並不顯著，而 SENTINEL-1 衛星時期（2015/4~2018/8）跨湖口斷層速度變化亦不顯著，約 1 mm/yr 的速度差異。兩種衛星時期比較，呈現相較於早期 ERS 衛星影像而言，近期此區域視衛星方向縮短運動速率增加，有 7~8 mm/yr 的速度差異。

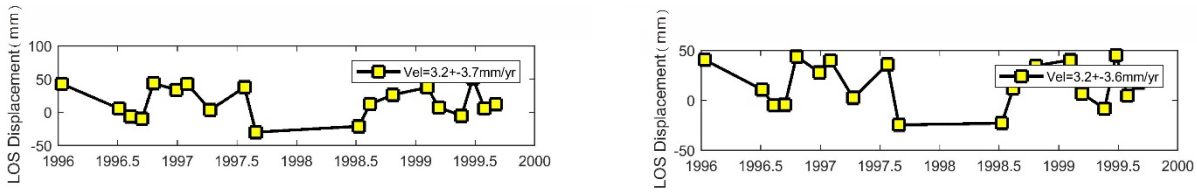


圖 3-3.1：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）湖口斷層西側；（右）湖口斷層東側。

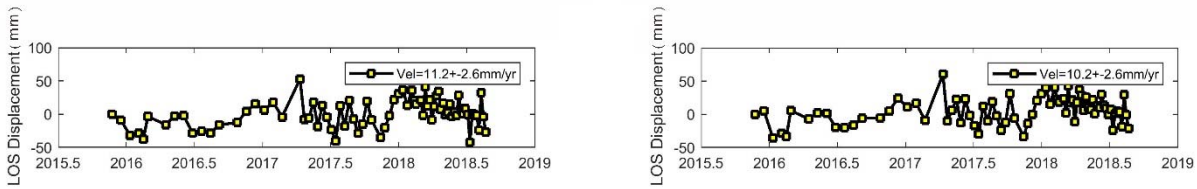


圖 3-3.2：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）湖口斷層西側；（右）湖口斷層東側。

3-3-2 新竹斷層

根據圖 3-3.3 及圖 3-3.4 衛星時間序列結果顯示，與湖口斷層相似，在 ERS 衛星時期（1996/1~1999/7）與 SENTINEL-1 衛星時期（2015/4~2018/8）跨新竹斷層速度變化並不顯著，約只有 1 mm/yr 的速度差異。兩種衛星時期比較，相較於早期 ERS 衛星影像而言，呈現視衛星方向輕微縮短，有 3~4 mm/yr 的速度差異。

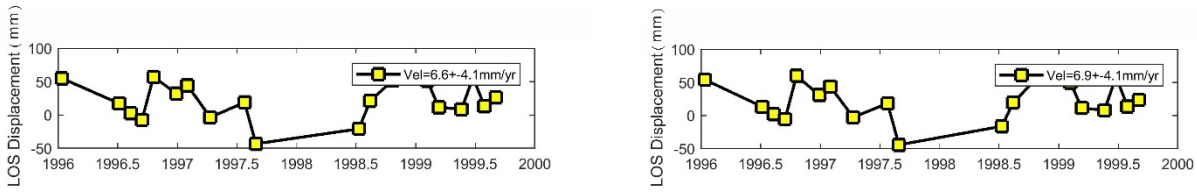


圖 3-3.3：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新竹斷層西側；（右）新竹斷層東側。

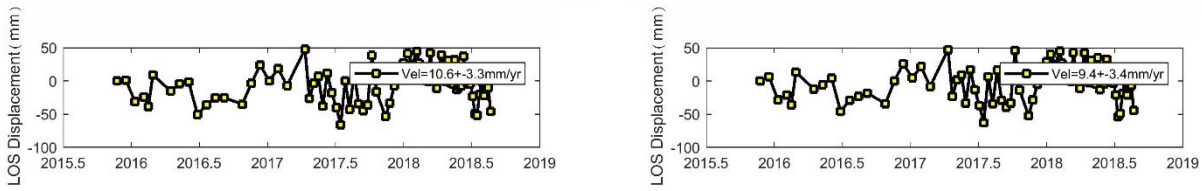


圖 3-3.4：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新竹斷層西側；（右）新竹斷層東側。

3-3-3 新城斷層

根據圖 3-3.5 及圖 3-3.6 衛星時間序列結果顯示，在 ERS 衛星時期（1996/1~1999/7）跨新城斷層速度變化並不顯著，約 0.5 mm/yr 的速度差異，而 SENTINEL-1 衛星時期（2015/4~2018/8）跨新城斷層則約有 2 mm/yr 的速度差異。兩種衛星時期比較，相較於早期 ERS 衛星影像而言，呈現視衛星方向縮短，有 6~7 mm/yr 的速度差異。

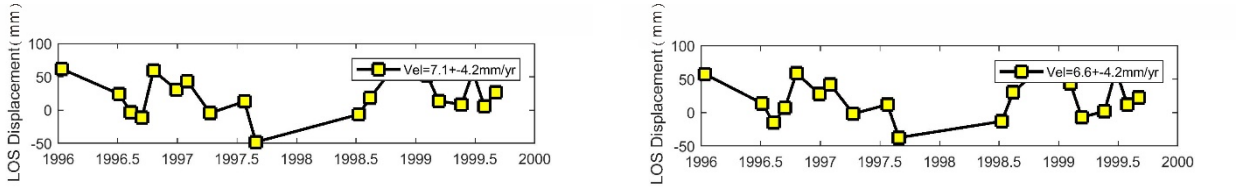


圖 3-3.5：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新城斷層西側；（右）新城斷層東側。

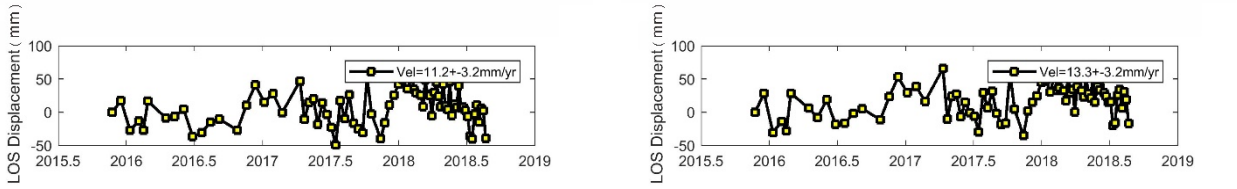


圖 3-3.6：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新城斷層西側；（右）新城斷層東側。

3-3-4 屯子腳斷層

根據圖 3-3.7 衛星時間序列結果顯示，ERS 衛星時期由於 PS 點位不足無法觀察跨斷層的現象。而 SENTINEL-1 衛星時期（2015/4~2018/8）跨屯子腳斷層速度差異不明顯，呈現約 2 mm/yr 的速度差異。

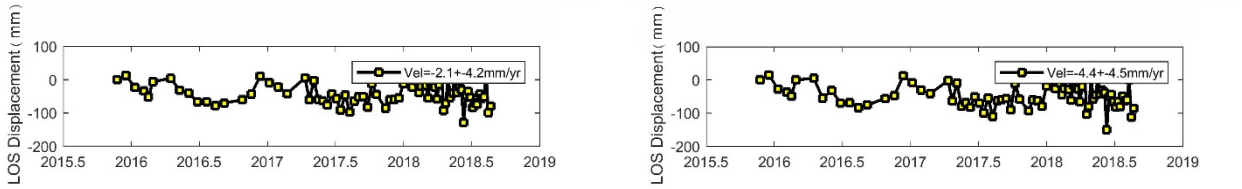


圖 3-3.7：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）屯子腳斷層西側；（右）屯子腳斷層東側。

第四章、北部地區地表速度場分析

4-1 GPS 與 InSAR 觀測資料整合

4-1-1 資料整合方法

近年來各種大地測量方式廣泛應用於監測北台灣地區之地表變形，且這些方法各有優勢，如精密水準測量、GPS 測量及雷達差分干涉技術。本研究利用雷達差分干涉技術觀測北台灣地區近期地表變形，相較於僅能獲得點狀資料的 GPS 測量及線狀資料的精密水準測量，雷達差分干涉技術優勢在於不需大量人力、物力即可獲得大範圍面狀資料點，且空間解析度達每像素 25 公尺、測量精度達公厘級，能更有效獲得全區域之地表變形資訊。而測量精度同樣達公厘級的 GPS 測量，雖然空間分布較為稀疏，但時間取樣密集，且提供三維測量，水平及高程方向測量一次完成，坐標系統一致。

觀測地表變形的方法眾多，且各方法之基準框架皆不同，因此希望以三角網格進行線性內插，結合不同的測地資料，以獲取分布更廣闊、更貼近真實之地表變形形貌。

本研究所使用的資料包含 2002 年至 2017 年的 152 個 GPS 連續站三維速度場(圖 4-1.1)、2006 年 12 月至 2011 年 2 月之 ALOS、2007 年 6 月至 2008 年 6 月之 ENVISAT 及 1996 年 1 月至 1999 年 7 月之 ERS-1/2 衛星影像(圖 4-1.2)，因 GPS 移動站之時間序列較不連續，故本研究僅使用連續站資料來進行估算，並以資料誤差為權重。王淳璟(2015)曾結合 GPS 及 PSInSAR 觀測資料，並透過三角網格的內插方法，以求得台灣北部地區之三分量速度場，並與 GPS 觀測資料及精密水準測量比對，其吻合程度高，證實其資料的可信度。因此本研究參考其估算方法，結合 GPS 及 PSInSAR 觀測資料，求取北台灣的三維速度場，並更進一步分析討論其地表變形成因。

Wang et al. (2012)和 Walters et al. (2014)曾提出利用三角網格進行線性內插，用以結合高精度的 GPS 三分量觀測資料及分布廣泛的 InSAR 單分量觀測值，以推求研究區域之三分量速度場。本方法將研究區域分為三角形網格，並假設速度場沿經度、緯度呈線性變化，因此網格內任意一觀測點與網格三節點的

關係可由線性內插公式(Shape function，N)表示：

$$N_m = a_m + b_m x + c_m y \quad \text{(式 4.1.1)}$$

x、y：網格內觀測點之坐標

a_m、b_m、c_m：節點 m 與另兩個節點相關的係數，假設三節點 1、2、3 的坐標分別為(x_1,y_1)、(x_2.y_2)、(x_3,y_3)，如圖 4-1.3 所示，以節點 1 為例：

$$\begin{aligned} a_1 &= (x_2 y_3 - x_3 y_z)/\Delta \\ b_1 &= (y_2 - y_3)/\Delta \\ c_1 &= (x_3 - x_2)/\Delta \end{aligned} \quad \text{(式 4.1.2)}$$

$$\Delta = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \text{ (三角形面積)}$$

由此推廣可得網格內觀測點與網格三節點關係式 N_1、N_2、N_3。因此若已知三頂點速度場，且速度場沿經度、緯度呈線性變化，則可藉由 Shape function 求得觀測點速度場，表示為：

$$U(x,y) = \sum_{m=1}^{3} N_m u_m \quad \text{(式 4.1.3)}$$

N_m、u_m 分別為節點 m 之 Shape function 以及其三分量速度

可將 4.1.3 式改寫為

$$U(x,y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad \text{(式 4.1.4)}$$

應用 4.1.4 式，由 Wang et al. (2012)提出的計算公式為：

$$\begin{bmatrix} G_{sar} & G_{orb} & G_{atm} \\ G_{gps} & 0 & 0 \\ k^2\nabla^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vet} \\ m_{orb} \\ m_{atm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{sar} \\ d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{(式 4.1.5)}$$

G_{sar} 為與 InSAR 相關的格林函數，包含觀測點與節點的 shape function N，以及將三分量速度值合成至 LOS 方向的單位向量。

G_{gps} 為與 GPS 相關的格林函數，為觀測點與節點的 shape function N。

G_{orb}、G_{atm} 為與 InSAR 觀測資料中軌道殘差以及大氣效應相關的格林函數。

m_{vet}、m_{orb}、m_{atm} 分別為節點三分量速度場模型、軌道殘差模型以及大氣效應模型。

d_{sar}、d_{gps} 分別為 InSAR 觀測值、GPS 觀測值。

k^2 為控制節點速度平滑程度的參數。

∇^2 為拉普拉斯運算子(Laplacian smoothing operator, Desbrun et al., 1999)

$$L(u_i) = \frac{2}{\sum_{j \in N_1(i)} |e_{ij}|} \sum_{j \in N_1(i)} \frac{u_j - u_i}{|e_{ij}|} \qquad \text{(式 4.1.6)}$$

u_j 、u_i 分別為節點 j 與節點 i 速度，$|e_{ij}|$ 為節點 i 與節點 j 間距離，$N_1(i)$ 為與節點 i 相連的各節點的集合。

在此我們假設經 StaMPS 計算後，大氣效應及軌道殘差已被成功扣除，因此將 4.1.5 式改寫為：

$$\begin{bmatrix} G_{sar} \\ G_{gps} \\ k^2\nabla^2 \end{bmatrix} [m_{vet}] = \begin{bmatrix} d_{sar} \\ d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(式 4.1.7)}$$

其中

$$G_{sar} = \begin{bmatrix} S_{11E} & S_{11N} & S_{11U} & S_{12E} & S_{12N} & S_{12U} & & & S_{1nE} & S_{1nN} & S_{1nU} \\ S_{21E} & S_{21N} & S_{21U} & S_{22E} & S_{22N} & S_{22U} & \cdots & \cdots & S_{2nE} & S_{2nN} & S_{2nU} \\ S_{31E} & S_{31N} & S_{31U} & S_{32E} & S_{32N} & S_{32U} & & & S_{3nE} & S_{3nN} & S_{3nU} \\ & & \vdots & & & & & & & \vdots & \\ S_{k1E} & S_{k1N} & S_{k1U} & S_{k2E} & S_{k2N} & S_{k2U} & \cdots & \cdots & S_{knE} & S_{knN} & S_{knU} \end{bmatrix}.$$

(式 4.1.8)

S_{kn*} 為第 k 筆 LOS 觀測資料與第 n 個節點於*方向之 shape function 與合成至 LOS 方向的單位向量(P)乘積。

而三分量速度場合成至 LOS 方向之公式為：

$$LOS = [\cos\theta \quad -\sin\theta\cos\alpha \quad -\sin\theta\sin\alpha] \begin{bmatrix} V_U \\ V_E \\ V_N \end{bmatrix} \qquad \text{(式 4.1.9)}$$

其中 α 為與衛星軌跡方向之方位角，θ 為 LOS 方向和與地面垂直法線之夾角。

由 4.1.9 式，合成單位向量 P 表示為：

$$P = [\cos\theta \quad -\sin\theta\cos\alpha \quad -\sin\theta\sin\alpha] = [P_U \quad P_E \quad P_N] \qquad \text{(式 4.1.10)}$$

則

$$S_{kn*} = N_{kn*} * P_* \qquad \text{(式 4.1.11)}$$

N_{kn*} 為第 k 筆資料與第 n 個節點於*方向之 shape function。

$$G_{gps}=\begin{bmatrix} N_{11E} & 0 & 0 & N_{12E} & 0 & 0 & & & N_{1nE} & 0 & 0 \\ 0 & N_{11N} & 0 & 0 & N_{12N} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & N_{1nN} & 0 \\ 0 & 0 & N_{11U} & 0 & 0 & N_{12U} & & & 0 & 0 & N_{1nU} \\ & & \vdots & & & & & & & \vdots & \\ N_{m1E} & 0 & 0 & N_{m2E} & 0 & 0 & & & N_{mnE} & 0 & 0 \\ 0 & M_{m1N} & 0 & 0 & N_{n2N} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & N_{mnN} & 0 \\ 0 & 0 & N_{m1U} & 0 & 0 & N_{m2U} & & & 0 & 0 & N_{mnU} \end{bmatrix}$$

(式 4.1.12)

N_{mnU} 為第 m 筆 GPS 觀測資料與第 n 個節點於*方向之 shape function。

$$m_{vel}=\begin{bmatrix} m_{1E} \\ m_{1N} \\ m_{1U} \\ m_{2E} \\ m_{2N} \\ m_{2U} \\ \vdots \\ \vdots \\ m_{nE} \\ m_{nN} \\ m_{nU} \end{bmatrix} \qquad \text{(式4.1.13)}$$

m_{vet} 為各節點三分量速度場矩陣，m_{n*}為第 n 個節點於*方向之速度。

而觀測資料為：

$$d_{gps}=\begin{bmatrix} V_{1E} \\ V_{1N} \\ V_{1U} \\ V_{2E} \\ V_{2N} \\ V_{2U} \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{mE} \\ V_{mN} \\ V_{mU} \end{bmatrix}, \quad d_{sar}=\begin{bmatrix} LOS_1 \\ LOS_2 \\ LOS_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ LOS_k \end{bmatrix} \qquad \text{(式 4.1.14)}$$

m、k 分別為 GPS 及 InSAR 觀測資料數量。

本研究使用加權最小二乘法(weighted least-square)估算節點三分量速度場(m_{vel})，首先分別利用 PSInSAR 標準差與 GPS 資料誤差製造對角權重矩陣(diagonal weighting matrix，4.1.15 式)並將權重矩陣加入 4.1.7 式，便可求得符合觀測值的節點三分量速度場。

$$W_{sar}=\begin{bmatrix}\frac{1}{s_1} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \frac{1}{s_k}\end{bmatrix},\ W_{gps}=\begin{bmatrix}\frac{1}{\sigma_1} & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma_m}\end{bmatrix} \qquad \text{(式 4.1.15)}$$

上式s與σ分別代表 PSInSAR 標準差與 GPS 資料誤差，分別有 k 及 m 筆資料，將 4.1.15 式代入 4.1.7 式中，便可得到下式：

$$\begin{bmatrix}W_{sar}G_{sar}\\ W_{gps}G_{gps}\\ k^2\nabla^2\end{bmatrix}\left[m_{vel}\right]=\begin{bmatrix}W_{sar}d_{sar}\\ W_{gps}d_{gps}\\ 0\end{bmatrix} \qquad \text{(式 4.1.16)}$$

上列公式可改寫成：

$$G_w m = d_w \qquad \text{(式 4.1.17)}$$

即可得到加權最小二乘之解：

$$m=(G_w^T G_w)^{-1}G_w^T d_w \qquad \text{(式 4.1.18)}$$

估算後即可得到北台灣地區三分量速度場相對於參考站的結果，此結果及其分析將於 4-1-2 節中詳述。

為了進一步了解 InSAR 資料品質對三維速度場估算結果的影響，本研究利用 Quadtree 方法將 PSInSAR 觀測資料實施減點(downsampling)，另外減點後可將區域內大量的 PSInSAR 觀測資料減量，可一次估算大區域的三維速度場，提升解算效率。

Quadtree 方法是先將區域分為四等分，視網格內資料變異程度決定是否遞迴持續進行分割，即若網格內之觀測數值愈一致則停止分割，並取一平均值表示整個網格的值；倘若變異程度大則會再將該網格一分為四，一直重複直至網格內所有數值接近到一設定值為止。資料經過 Quadtree 處理後，除了達到減少觀測值相近的資料點外，原本的雜訊也會因平均而使測量值趨於平滑。進行計算時以網格中心代表資料點位置，且以 Quadtree 的面積大小做為權重，面積愈

大權重愈高。計算結果顯示大致上趨勢與未使用 Quadtree 之 PSInSAR 資料結果相近(圖 4-1.4)，經過平滑化的 PSInSAR 資料可以降低 GPS 觀測值與預測值的殘差，但垂直向速度場因過於平滑而無法突顯細節(圖 4-1.4)。研判此 InSAR 處理方法過於平滑，其中有些資訊因此被隱藏，因此將來若要對 InSAR 資料進行篩選，必須避免資料過於平滑的情形發生。

4-1-2 三維速度場結果與分析

在 4-1-1 節中敘述了 GPS 觀測資料有密集的時間觀測紀錄，在時間上的解析精度優於 InSAR，而其空間分布密度則不及可一次獲得大面積變形資訊的 InSAR。因此本研究結合 GPS 及 PSInSAR 觀測資料，並透過三角網格點的內插方法，以求得北台灣地區的三分量速度場。

本研究先利用 Quadtree 方法將 PSInSAR 觀測資料實施減點(downsampling)，再將減點後的 PSInSAR 觀測資料與 GPS 觀測速度場進行三角網格內插方法。由連續站觀測資料可知北台灣地區大部分 GPS 連續站之水平向速度大於垂直向速度(圖 4-1.1)，而 InSAR 衛星 LOS 方向的觀測值大多來自垂直方向，因此加入 InSAR 資料應可增加對垂直方向的控制，可獲得較接近真實的三分量速度場。

圖 4-1.5、圖 4-1.6 及圖 4-1.7 分別展示了北台灣以 ALOS、ENVISAT 及 ERS 衛星資料結合 GPS 觀測資料的節點三分量速度場、網格殘差值、GPS 預估值與殘差值。為評估各節點結果可信度，本研究計算各網格內觀測值與模型預測殘差，並以之為判斷節點結果可信度依據(圖 4-1.5c、圖 4-1.6c 及圖 4-1.7c)。如下式所示：

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(d_{ob}^{i} - d_{pre}^{i})^{2}}{n}} \qquad \text{(式 4.1.19)}$$

n 為資料數量，d_{ob}^{i} 及 d_{pre}^{i} 分別為第 i 筆觀測值與模型預測值。

本研究中藉由網格內資料點與節點間的 shape function，將資料點的觀測速度值內插於節點上。因為節點通常為鄰近網格之共點，節點內插值會受到周圍其他網格內觀測值的約制，而非僅受單一網格的影響。因此若網格內觀測值的空間不連續性較大(如：突大或突小)，這種與周圍資訊一致性較低的高頻訊號便

會被抑制，達到類似低通濾波(low-pass filter)的效果。此外，在原本沒有 GPS 測站的區域，也能藉由 InSAR 觀測資料與鄰近節點的三維速度估算值內插而得到該處的地表三維運動資訊。雖然此方法會減少 PSInSAR 的觀測量，犧牲其短波長、小範圍的變形資訊，但也可藉此去除小區域的影響，進而了解較大範圍的構造活動所引起的地表變形。

在本研究區域中，以澎湖白沙站(S01R)為模型估算之參考站，解算之速度場趨勢主要為由西向東遞增的順時針方向(圖 4-1.5a、圖 4-1.6a 及圖 4-1.7a)，本研究中 GPS 觀測速度場及模型估算出的速度場大致吻合(圖 4-1.5b、圖 4-1.6b 及圖 4-1.7b)，ALOS 衛星資料及 GPS 速度場之估算結果顯示北台灣西側主要為抬升作用，東側較無 PSInSAR 資料點分布於此，因此東側速度場主要受到 GPS 資料控制(圖 4-1.5a、b)；ENVISAT 衛星資料與 GPS 之內插速度場則呈現出西側抬升、東側下陷的區域特徵(圖 4-1.6a)，與桃園林口一帶的抬升、宜蘭區域之板塊隱沒等構造特徵相符；而 ERS 衛星資料與 GPS 之內插結果則顯示北台灣變形以下陷作用為多，僅在台北桃園南端有部分區域抬升的情形(圖 4-1.7a)。

本研究所劃設的三角網格範圍較大，橫跨至鄰近縣市，未來可逐步控制範圍大小及三角網格之疏密程度，結合 GPS 觀測速度場進行解算。另外在使用 Quadtree 方法進行減點時選用之篩選參數，也會影響所得資料點空間分布及擬合誤差之平滑程度，控制好上述之因素，便可獲得更真實的區域地表變形結果。

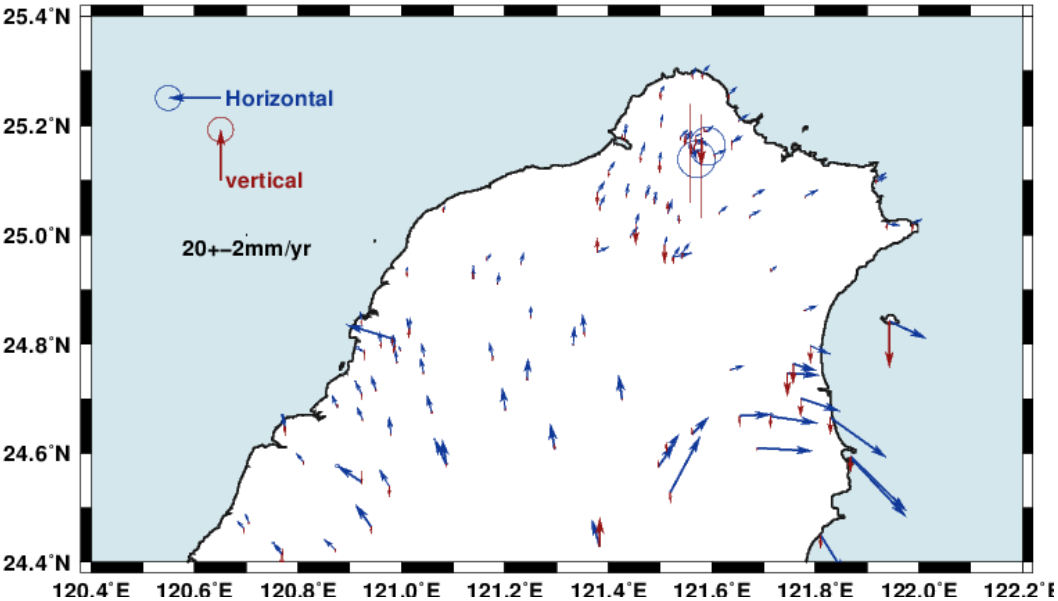


圖 4-1.1：本研究中所使用的北台灣 GPS 連續站三維速度場(相對澎湖白沙站)。

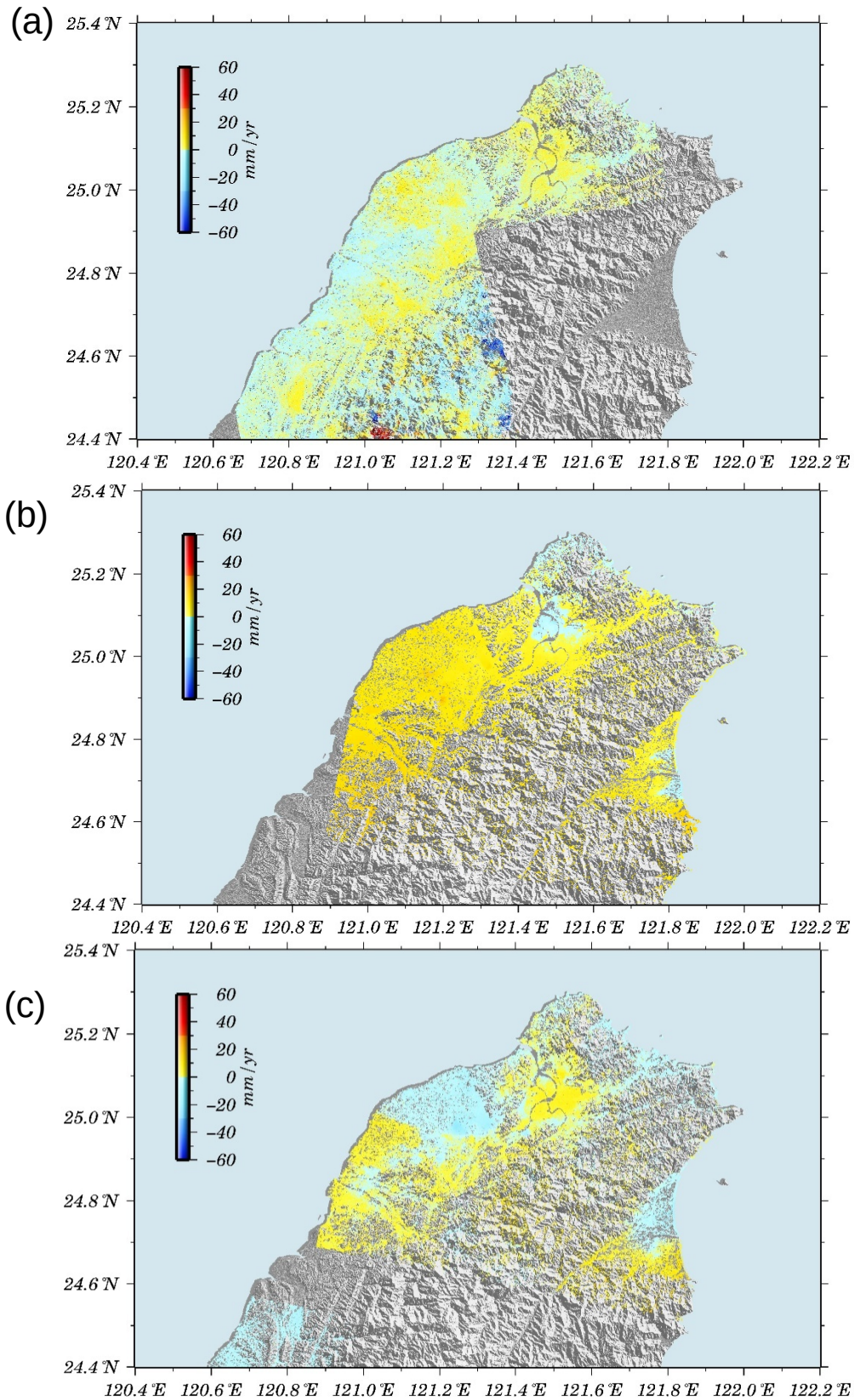


圖 4-1.2：本研究中所使用的原始 PSInSAR 位移速度場。(a)ALOS 衛星影像位移速度場。(b)ENVISAT 衛星影像位移速度場。(c)ERS 衛星影像位移速度場。

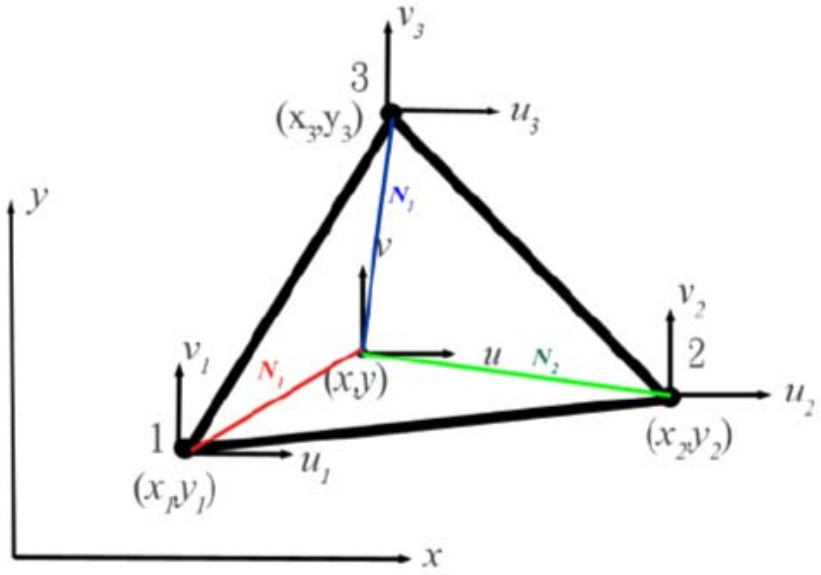


圖 4-1.3：觀測點與網格三頂點示意圖(王淳璟，2015)。

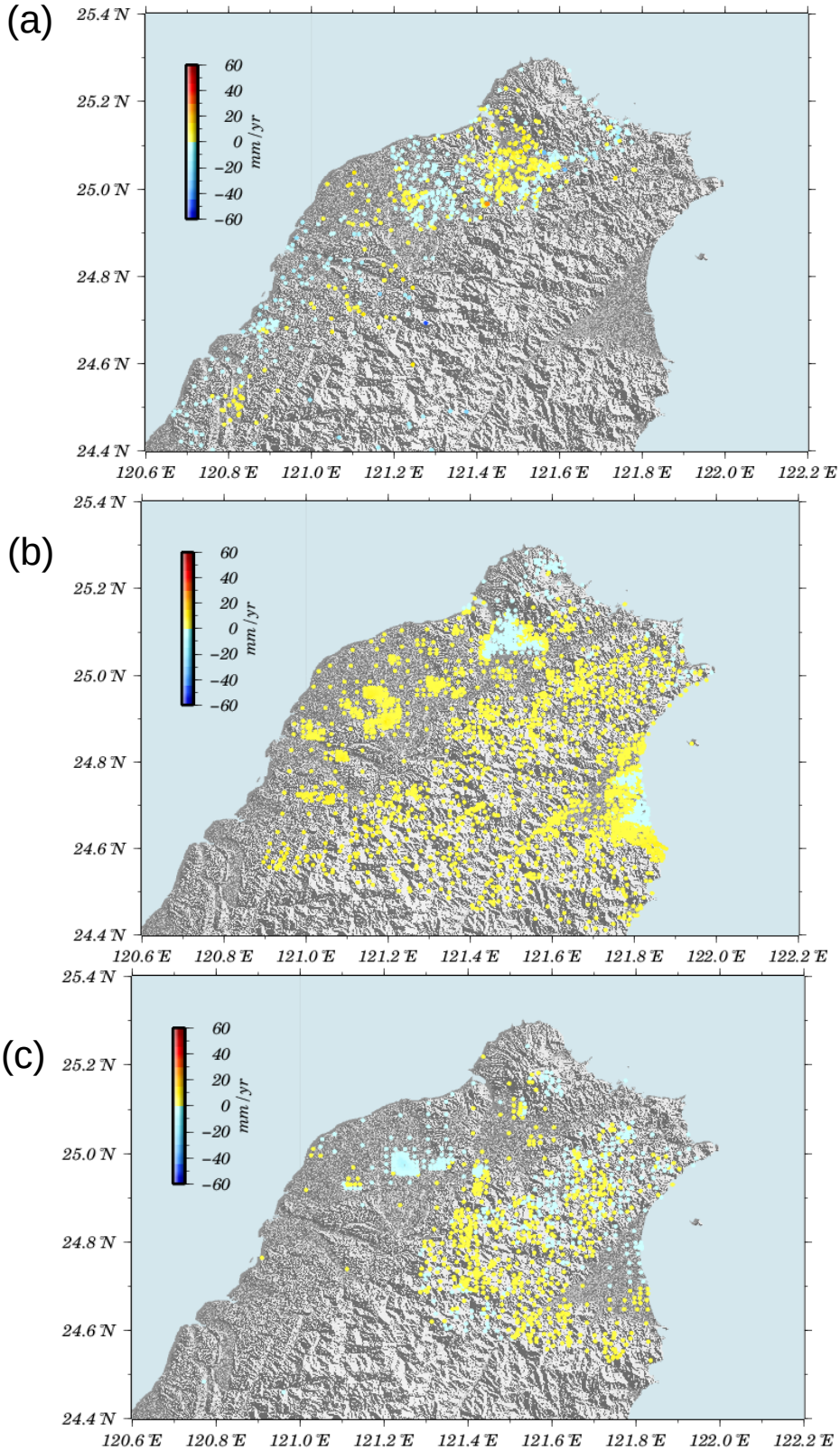
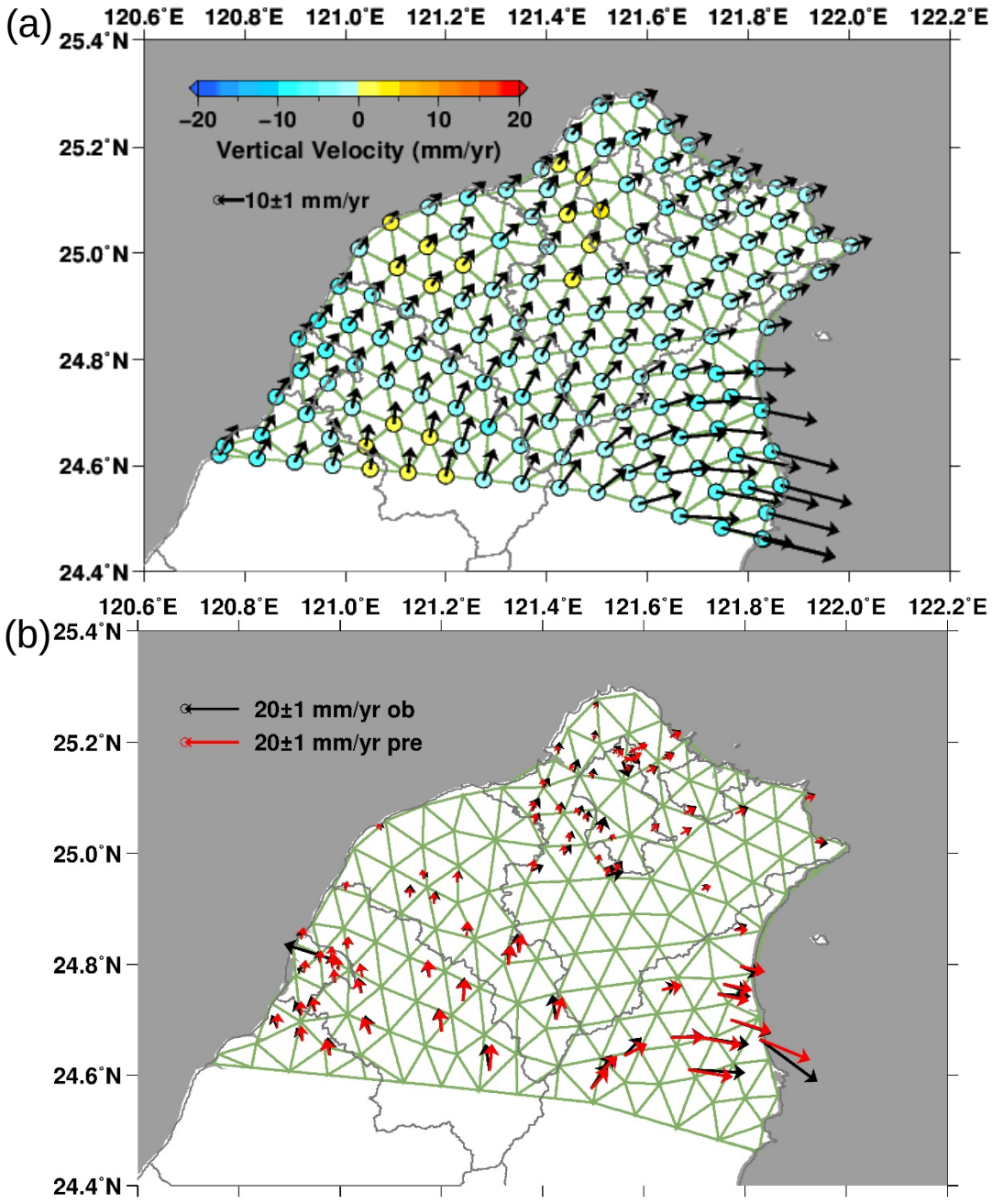


圖 4-1.4：本研究中經 Quadtree 減點後之 PSInSAR 位移速度場。(a)ALOS 衛星影像位移速度場。(b)ENVISAT 衛星影像位移速度場。(c)ERS 衛星影像位移速度場。


(a)
120.6°E
120.8°E
121.0°E
121.2°E
121.4°E
121.6°E
121.8°E
122.0°E
122.2°E
25.4°N
25.2°N
25.0°N
24.8°N
24.6°N
24.4°N
−20
−10
0
10
20
Vertical Velocity (mm/yr)
10±1 mm/yr
(b)
20±1 mm/yr ob
20±1 mm/yr pre

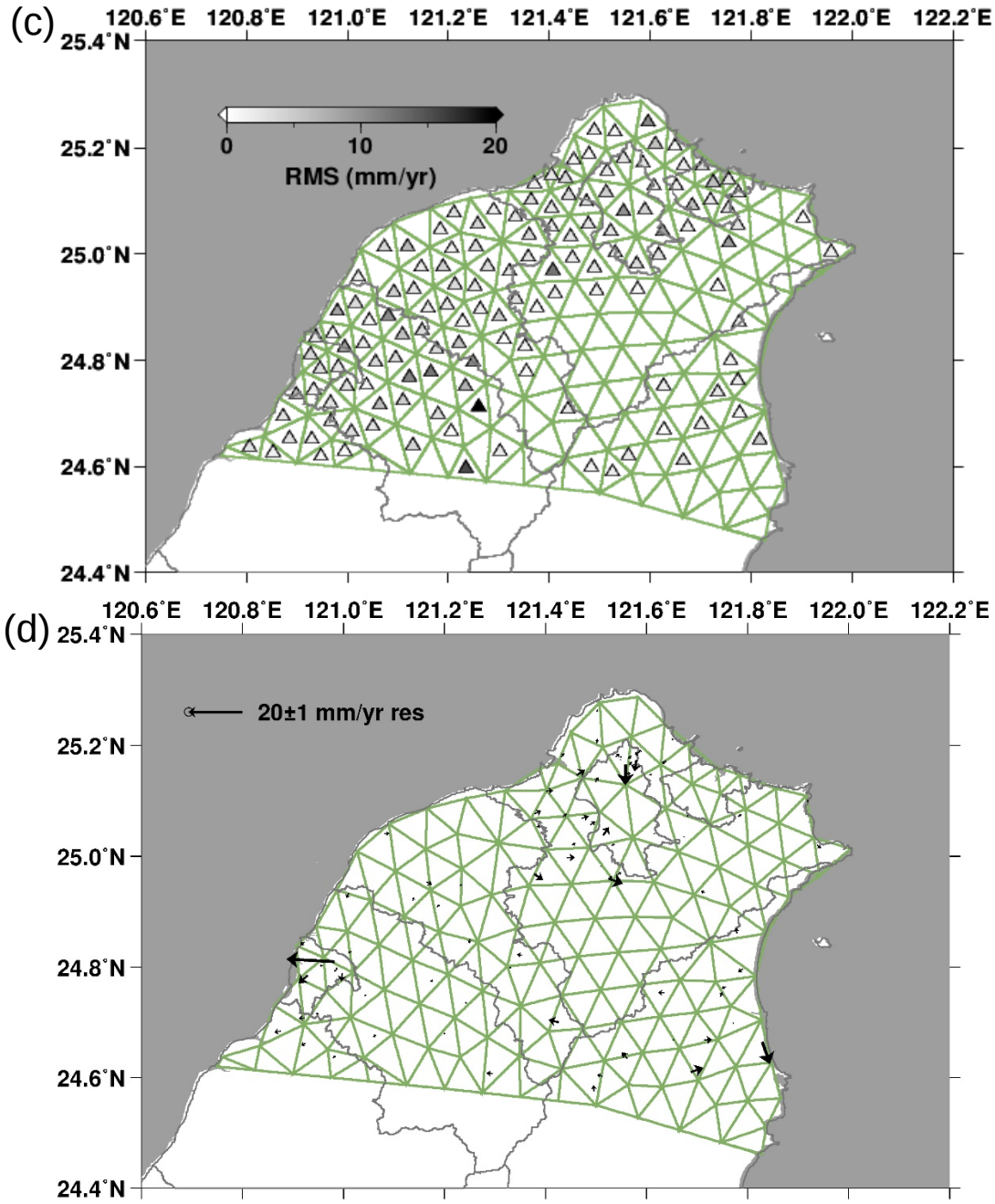
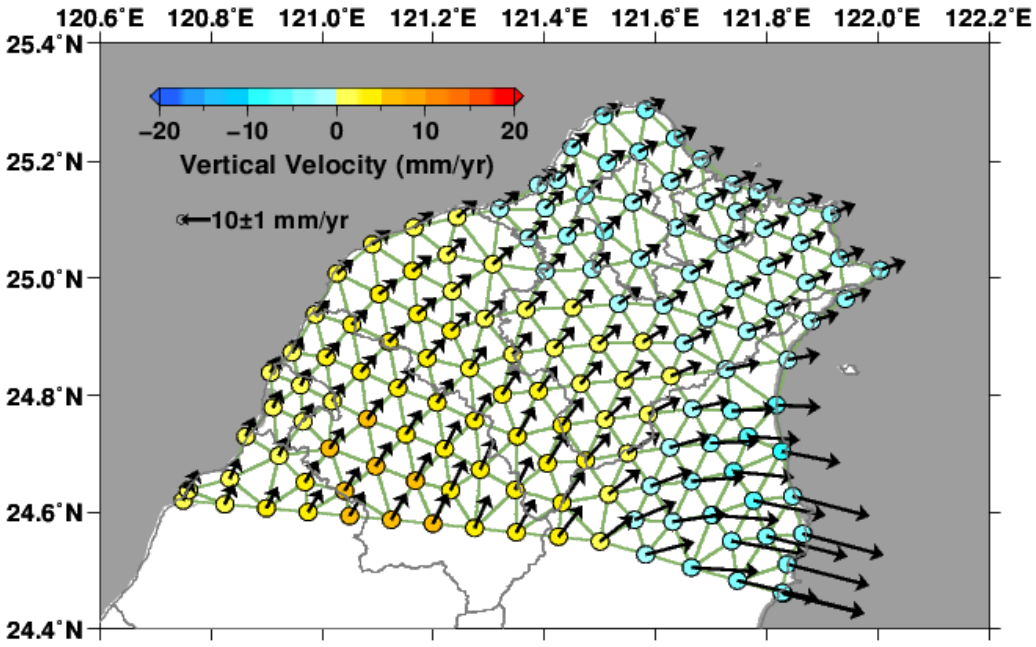
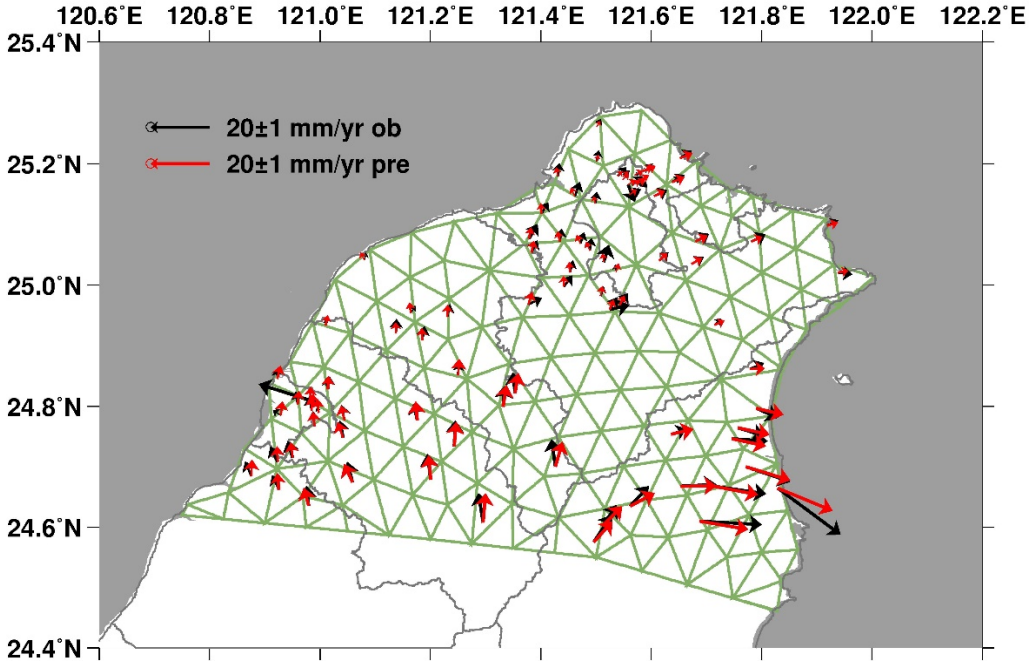


圖 4-1.5：以 ALOS 衛星資料與 GPS 連續站資料(相對澎湖白沙站)估算北台灣之速度場結果。(a)節點三分量速度場，黑色箭號為水平速度，圓點為垂直速度，暖色為抬升，冷色為下陷，綠色線為網格分布，灰色線為行政區域圖。(b)GPS 速度場之擬合結果，黑色箭號為 GPS 水平觀測值，紅色箭號為模型預估值。(c)各網格觀測值扣除預估值後的殘差值。三角形為該網格殘差值，網格內若無三角形則表示該網格內無任何觀測資料。(d)GPS 觀測值扣除模型預估值之殘差值。

(a)


120.6°E
120.8°E
121.0°E
121.2°E
121.4°E
121.6°E
121.8°E
122.0°E
122.2°E
25.4°N
25.2°N
25.0°N
24.8°N
24.6°N
24.4°N
−20
−10
0
10
20
Vertical Velocity (mm/yr)
10±1 mm/yr

(b)


120.6°E
120.8°E
121.0°E
121.2°E
121.4°E
121.6°E
121.8°E
122.0°E
122.2°E
25.4°N
25.2°N
25.0°N
24.8°N
24.6°N
24.4°N
20±1 mm/yr ob
20±1 mm/yr pre

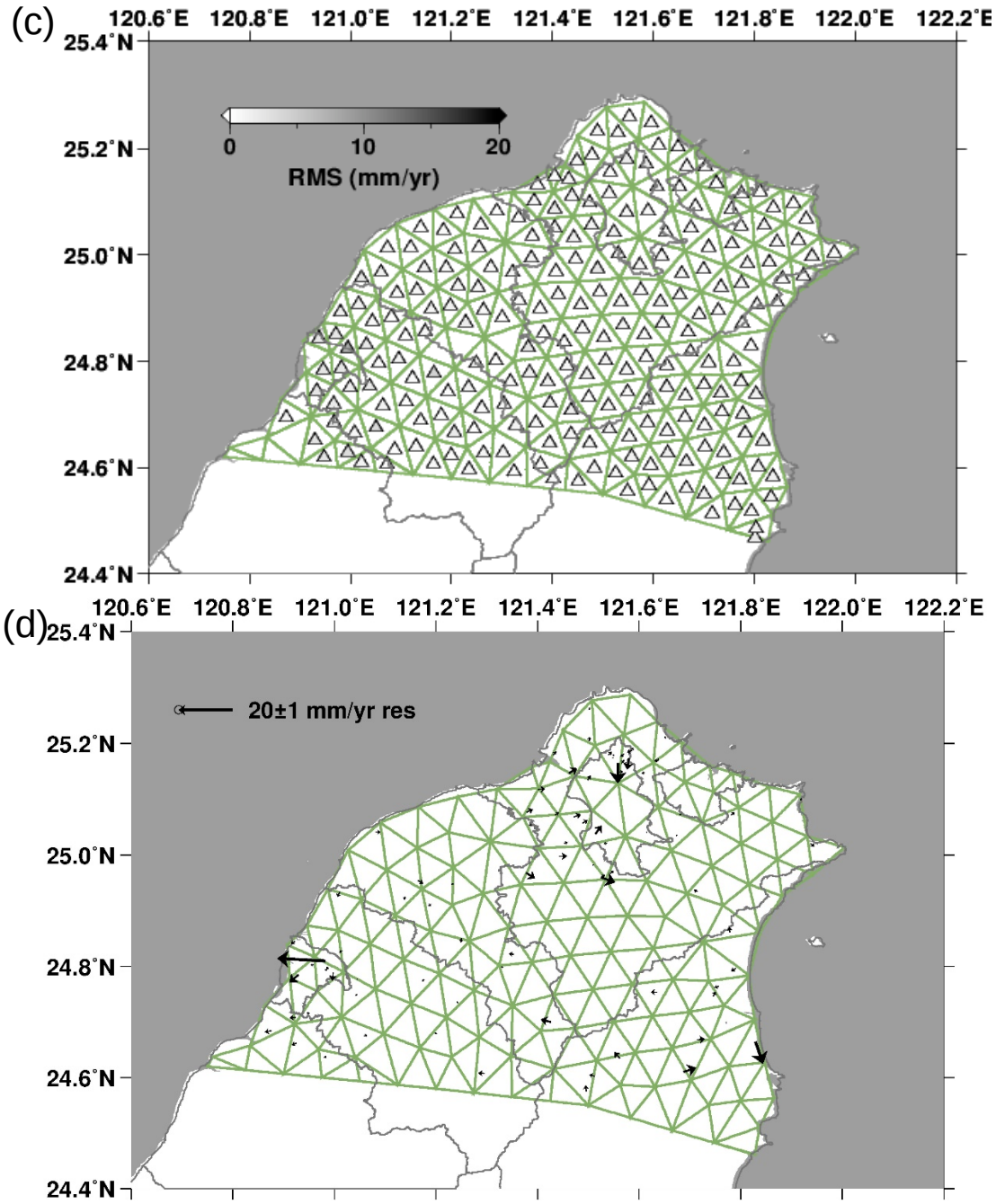
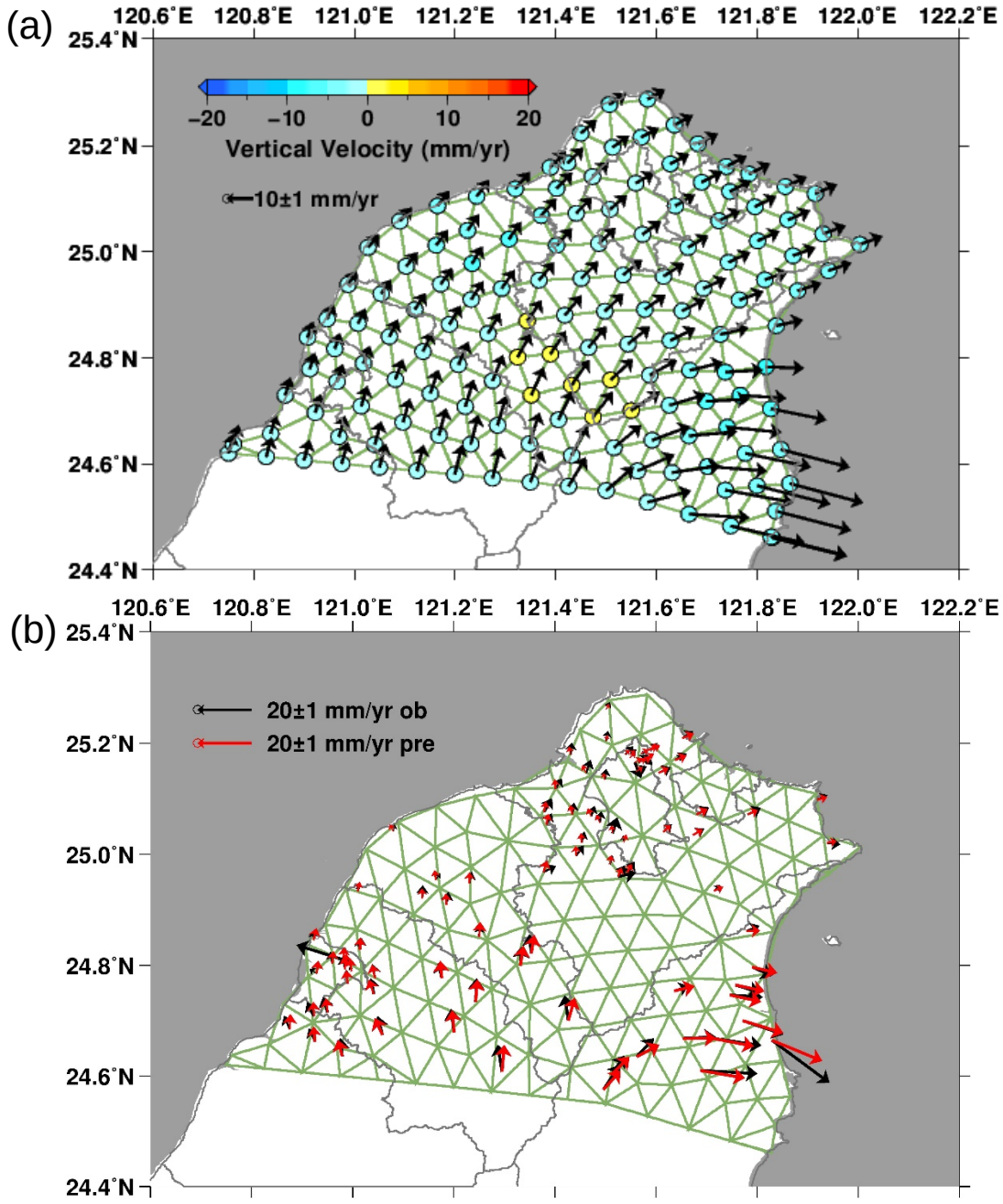


圖 4-1.6：以 ENVISAT 衛星資料與 GPS 連續站資料(相對澎湖白沙站)估算北台灣之速度場結果。(a)節點三分量速度場，黑色箭號為水平速度，圓點為垂直速度，暖色為抬升，冷色為下陷，綠色線為網格分布，灰色線為行政區域圖。(b)GPS 速度場之擬合結果，黑色箭號為 GPS 水平觀測值，紅色箭號為模型預估值。(c)各網格觀測值扣除預估值後的殘差值。三角形為該網格殘差值，網格內若無三角形則表示該網格內無任何觀測資料。(d)GPS 觀測值扣除模型預估值之殘差值。


(a)
120.6°E
120.8°E
121.0°E
121.2°E
121.4°E
121.6°E
121.8°E
122.0°E
122.2°E
25.4°N
25.2°N
25.0°N
24.8°N
24.6°N
24.4°N
−20
−10
0
10
20
Vertical Velocity (mm/yr)
10±1 mm/yr
(b)
20±1 mm/yr ob
20±1 mm/yr pre

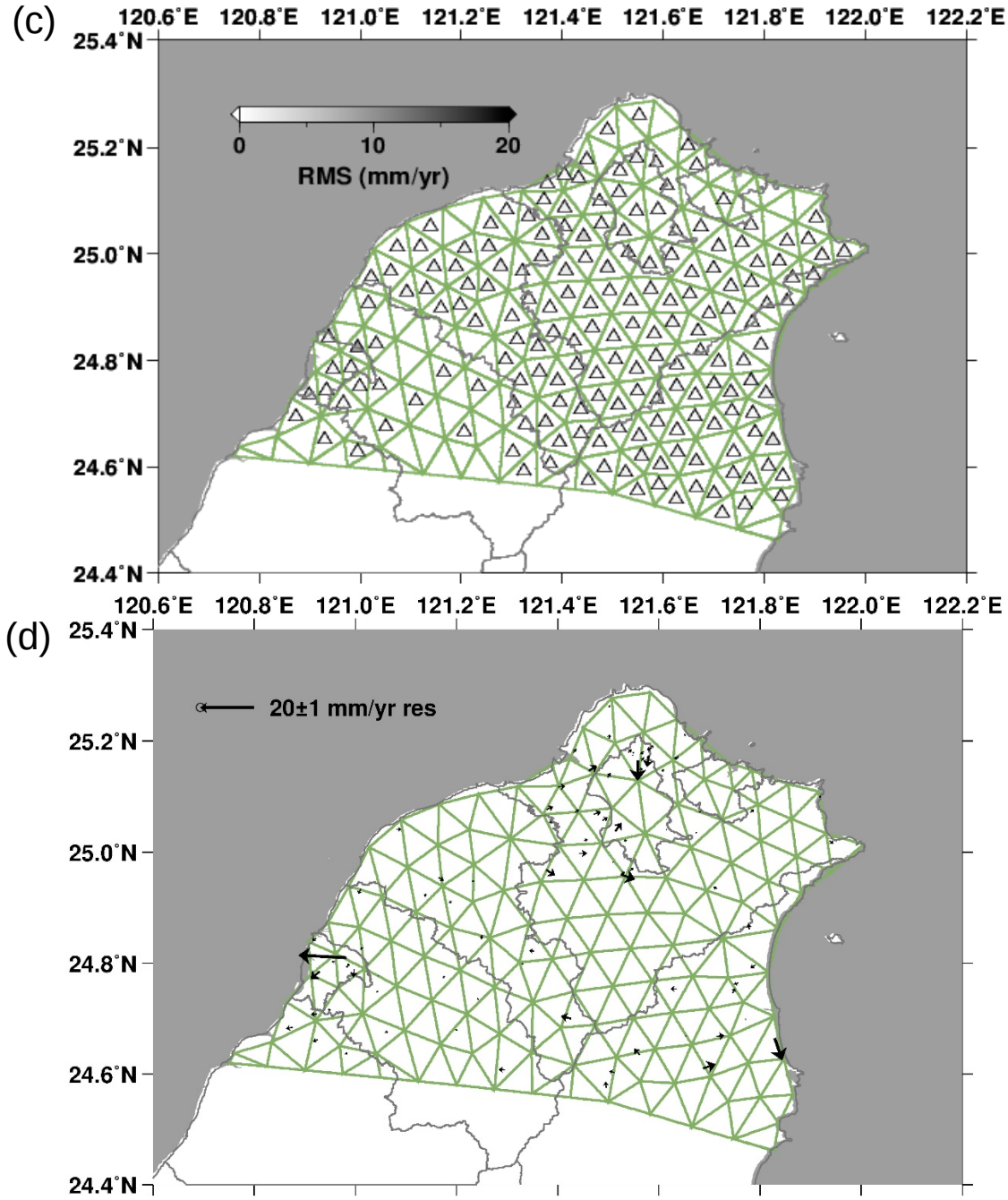


圖 4-1.7：以 ERS 衛星資料與 GPS 連續站資料(相對澎湖白沙站)估算北台灣之速度場結果。(a)節點三分量速度場，黑色箭號為水平速度，圓點為垂直速度，暖色為抬升，冷色為下陷，綠色線為網格分布，灰色線為行政區域圖。(b)GPS 速度場之擬合結果，黑色箭號為 GPS 水平觀測值，紅色箭號為模型預估值。(c)各網格觀測值扣除預估值後的殘差值。三角形為該網格殘差值，網格內若無三角形則表示該網格內無任何觀測資料。(d)GPS 觀測值扣除模型預估值之殘差值。

4-2 北部地區應變速率分布

4-2-1 應變計算方法

地表之速度向量於空間中分布的形貌特性，會因為坐標框架的選擇不同而有所變化。然而，應變速率反映的是各測站間的速度梯度變化，此特性得以使應變速率於空間中分布的型態變化獨立於不同坐標框架的選擇。因此，利用應變速率於空間中分布的特性，可以有效地協助我們討論各個區域應變累積及其地震危害度之問題(Ward, 1994)。

應變速率計算的基本計算原理是基於平面應變的假設,我們考慮一個物體受到應力作用後,應變只反映在x-y 平面上，z 方向則無應變發生，正值表示伸張，負值則表示縮短。早期研究中，應變速率的計算是將測網分成各個多邊形,並計算每個測網內的應變速率。測網內任一測線的應變率（$\dot{\varepsilon}$）可以寫成:

$$\dot{\varepsilon} = (dL / dt) / L$$

其中是L 基線長，是dL 基線長變化量，dt 是時間間距，故dL/dt 為基線長度之變化速率。而應變速率$\dot{\varepsilon}$與應變率張量$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與$\dot{\varepsilon}_{en}$ 之關係為：

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ee}\sin^2\theta + \dot{\varepsilon}_{en}\sin\theta\cos\theta + \dot{\varepsilon}_{nn}\cos^2\theta$$

其中θ為自正北以順時鐘方向量度之測線方位角，應變率張量的參考坐標為e 軸向東、n 軸向北之地平坐標系。$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 之正值表示伸張，負值則表示縮短；$\dot{\varepsilon}_{en}$ 正值表示沿南北方向有左旋剪切應變率。若同一測網內有三條以上不同方向的測線,則可利用最小二乘法求得該測網之應變速率張量$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與$\dot{\varepsilon}_{en}$ (Prescott et al.，1979)。

在本計畫中，為了求得一個符合諧和（compatibility）條件之連續應變速率場，我們首先計算一個在空間上連續之地表速度場,最後再藉由速度的梯度計算應變速率。就連續地表速度場之計算面,我們先在計畫執行區域內進行網格點(內插點）之建立，每一個內插點之速度量是由周圍之 觀測點計算而來(Shen et al.，1996)。

傳統上，我們可以將此逆推問題視為以下形式：

$$d = G(m)s + e$$

G(m)是連結非線性模型參數向量 m、線性模型參數向量 s 與觀測資料向量 d 之核心矩陣，e 則為的觀測與模型的誤差，其平均為零，斜方差距陣（covariance matrix）為 Σ 讓誤差呈常態分佈 e ~ N（0, Σ）。非觀測資料向量 d 之形式為$d = [d_1^T, d_2^T, \cdots, d_n^T]^T$，誤差向量的形式為$e = [e_1^T, e_2^T, \cdots, e_n^T]^T$。通常來說，網格點的總數大於有資料點的網格數，且整個系統合理假設為連續變化，因此有必要對線性模型 s 參數施以正則化（regularization） 以最小化平滑或阻尼運算式$\|Ds\|^2$。D是一階的平滑運算式：

$$D_{x,y}\epsilon_i = \sum_{j=1}^{4} \frac{\epsilon_j - \epsilon_i}{\Delta x, y_{ij}}$$

如此，最佳解就是將下列的目標公式最小化：

$$\Phi(m,s) = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i^2 \left\{ (d_i - G_i(m)s)^T \sum_i^{-1} \left(d - G_i(m)s \right) \right\} + \sum_{j=1}^{k} \beta_j^2 \left\| \left(s \right) \right\|^2$$

γ_i 是不同資料間的權重、β_j 是平滑參數。一般來說，平滑參數通常用經驗選取或自由決定。

4-2-2 應變計算結果

本期計畫所取得之速度場為北台灣連續站資料，故就此資料來進行台灣北部斷層帶的應變率與主應變軸方向分布的計算。本次計算中，先將北台灣區域劃出平行正南北與平行正東西向之 103 個格點，約每五公里選取一網格點，並使其選取格點鄰近十公里之地表速度資料以達資料密度與平滑化之需求，計算中同時估計各網格的應變率矩陣之量值與平滑參數之數值。計算所得之應變場、剪應變場與選轉率分佈如下列 4-2.1 至 4-2.3 圖示所示。

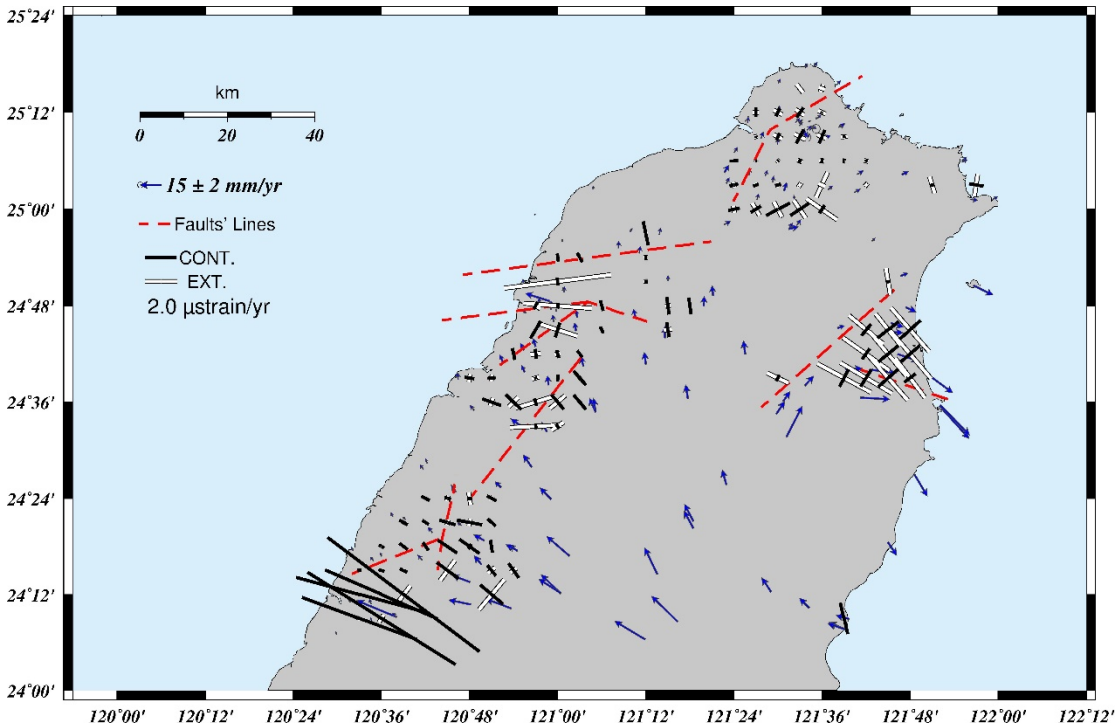


圖 4-2.1：北部地區應變場圖。

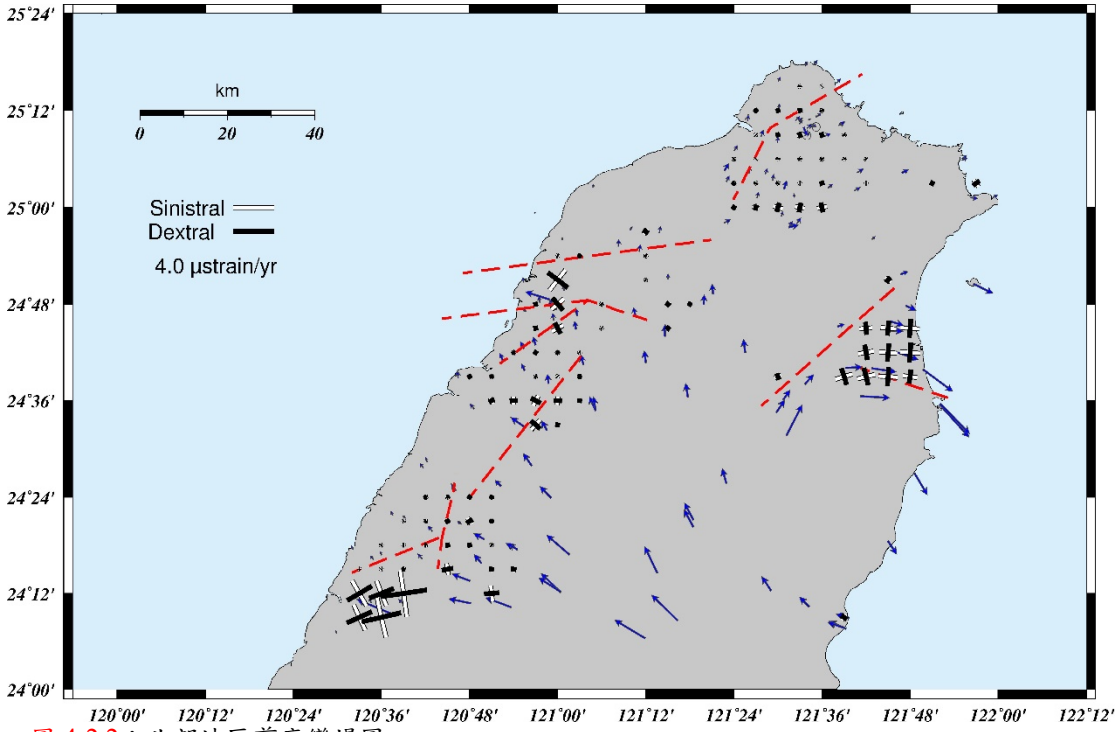


圖 4-2.2：北部地區剪應變場圖。

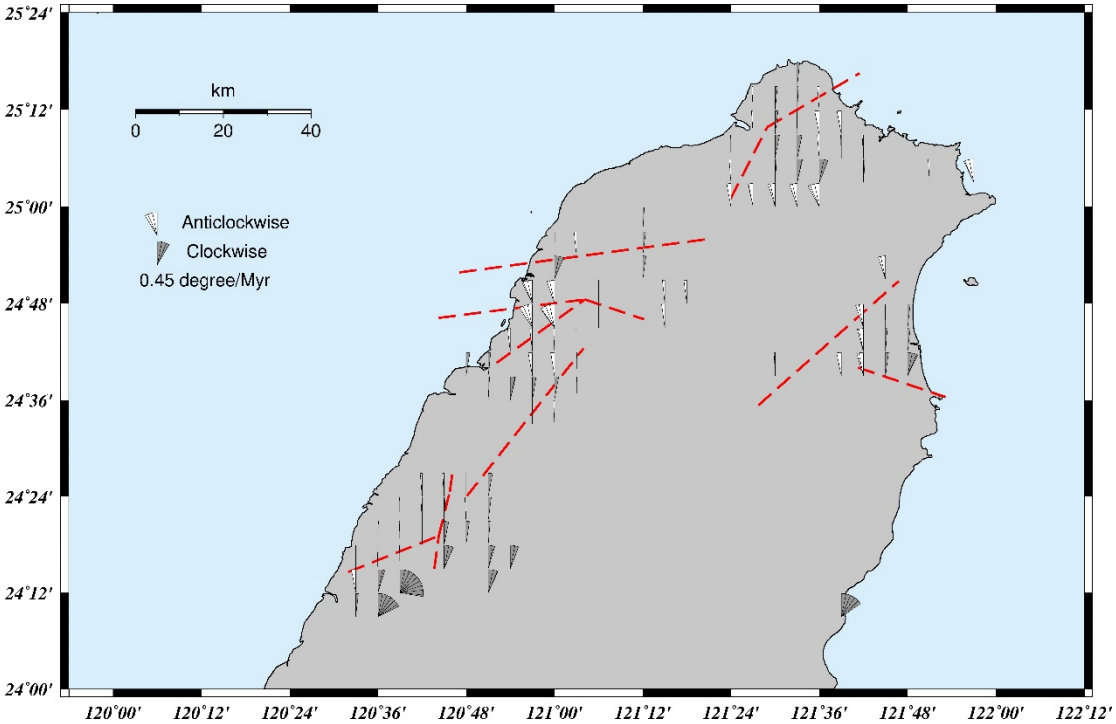


圖 4-2.3：北部地區之旋轉率分佈圖。

4-2-3 應變計算結論

由於測站數較少（圖 4-2.1 藍色箭頭速度場），本次計算之台灣北部應變場之網格點偏稀疏，但整體呈現伸張趨勢，唯屯子腳斷層以南地區顯示明顯壓縮。

從圖 4-2.1 可見應變場的伸張量主要位於宜蘭地區、新竹地區與台北盆地外圍。宜蘭地區伸張走向與宜蘭斷層（北段）垂直，新竹地區則往東西方向伸張，量值趨勢由北至南遞減，北部的台北盆地外圍南邊，伸張量值趨勢由西至東遞增。而屯子腳斷層以南地區的明顯壓縮量介於車籠埔斷層與彰化斷層之間，與地體構造運動方向呼應，但量值突出應受測站分佈影響，因可見圖 4-2.1 中於壓縮區內有一明顯較鄰近速度場為大之速度向量與壓縮方向平行，且更難編尚無選用速度場資料。

剪應變場可見圖 4-2.2，與應變場相呼應的是最明顯的量值由多至少約略為屯子腳斷層以南之台中地區，其次為宜蘭地區、竹苗地區。屯子腳斷層以南有車籠埔斷層與彰化斷層，其與南北近平行的左旋分量及與東西向近平行之右旋分量，顯示中部地區的斷層以逆衝帶左移分量之特性相為呼應。而竹苗地區之斷

層:新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層亦具有相似之逆衝帶左移分量之特性，僅量值相較中部斷層為少，且由北至南更為遞減。宜蘭地區則可見兩條斷層皆以左移為主，宜蘭斷層（南）以逆斷層為主，宜蘭斷層（北）則近為擴張之正斷層分量為主。

旋轉率分布圖（圖 4-2.3）可見北部山腳斷層應以左旋為主，而於台北盆地外圍有右旋分量，應與地形構造較為相關。而屯子腳斷層與三義斷層也可自跨斷層的旋轉率變動看出其皆以左移分量為主。獅潭斷層南段缺乏測站數，而北段則可見具有些為右移分量，新城斷層東段為左移斷層；新竹斷層則略具右移分量。北邊的湖口斷層跨斷層之格點分部不均，但東邊段可見應為左移分量為主。在宜蘭地區之南北兩條斷層之跨斷層以南以北幾乎沒有格點分佈，然而自宜蘭平原之旋轉率分佈可歸納應力沿宜蘭斷層（南）帶來左移分量使斷層呈現右旋運動，而宜蘭斷層（北）則離選轉軸外圍一層呈反向的左旋運動。

4-3 大屯火山與大臺北地區主要構造之地表變形分析

4-3-1 區域地表變形與應變率分析

本節主要針對大台北(含台北、新北、基隆地區)與大屯火山區，利用 4-1 所述的 GPS 與 InSAR 觀測資料進行三維速度場與應變率解算。首先將各站的 GPS 時間序列擷取與 InSAR 影像相符之時間區間，再以最小平方法(least squares)分別擬合 GPS 連續站於 Envisat 時期(2003 年至 2008 年)與 ALOS 時期(2007 年至 2011 年)之三分量速度場後，再將三分量速度合成至 LOS 方向，求得 GPS 觀測於 LOS 方向速度場，最後將所有速度值相對於林口台地 GS12 測站(區域中相對穩定的測站)。結果分別以圖 4-3.1 與 4-3.2 表示。

圖 4-3.1 顯示在 Envisat 時間段(2003.11-2008.06)，InSAR 與 GPS 均觀測到台北盆地與大屯火山區相對於林口台地呈現遠離衛星移動(下沉為主)，而盆地南端板橋一帶及北海岸則有局部抬昇的趨勢，且兩者形變趨勢大致相符。而在 ALOS 觀測時間段(2007.01-2011.01，圖 4-3.2)，原盆地南端的抬升趨勢擴展到盆地北區，且較 2003.11-2008.06 而言大屯火山與周圍區域轉為顯著的抬升，但盆地東北方與大屯火山交界處仍保持與 2003.11-2008.06 間一樣的下沉運動。

綜合而言，相對於林口台地，2003.11-2008.06 間大台北地區以下陷為主，盆地最大達-8mm/yr，淡水至大油坑一帶約為-2.5mm/yr，而山腳斷層兩側垂直向變化並不明顯。在 2007.01-2011.01 時期，淡水一帶仍以下陷為主，但大油坑一帶至基隆火山群則轉為抬升，最大達 5mm/yr，且盆地南部也以 1.5mm/yr 速度抬升。注意的是，雖然盆地內僅有兩 GPS 測站，因此對盆地變形的空間解析未能提供有效控制，但配合 InSAR 的觀測顯示台北盆地的垂直運動多為暫態效應，未顯示可能與區域構造相關的穩定運動模式(例如跨山腳斷層未有明顯的垂直運動變化)。

在應變率分析方面，首先將研究區域網格化，在橫軸以經度為單位每隔 0.05° 畫一個格點，而在縱軸以緯度為單位每 0.05° 畫一個格點，將特徵半徑設定為 10 km 進行搜尋，若於此半徑之內有三個以上的觀測點，則計算該格點的平均主應變率，反之則不予計算。結果如圖 4-3.3，顯示於觀測期間應力主要是來自垂直山腳斷層方向的伸張(應變率約 0.1-0.2 μstrain/yr)，於 Envisat 時期(2003.11-

2008.06)顯示林口台地至盆地受到來自南北向至東北東的壓縮(應變率約 0.08-0.17 μstrain/yr)；ALOS 時期(2007.01-2011.01)則顯示大屯火山區與盆地邊界受到東北東-西南西之壓縮(應變率約 0.08-0.15 μstrain/yr)。

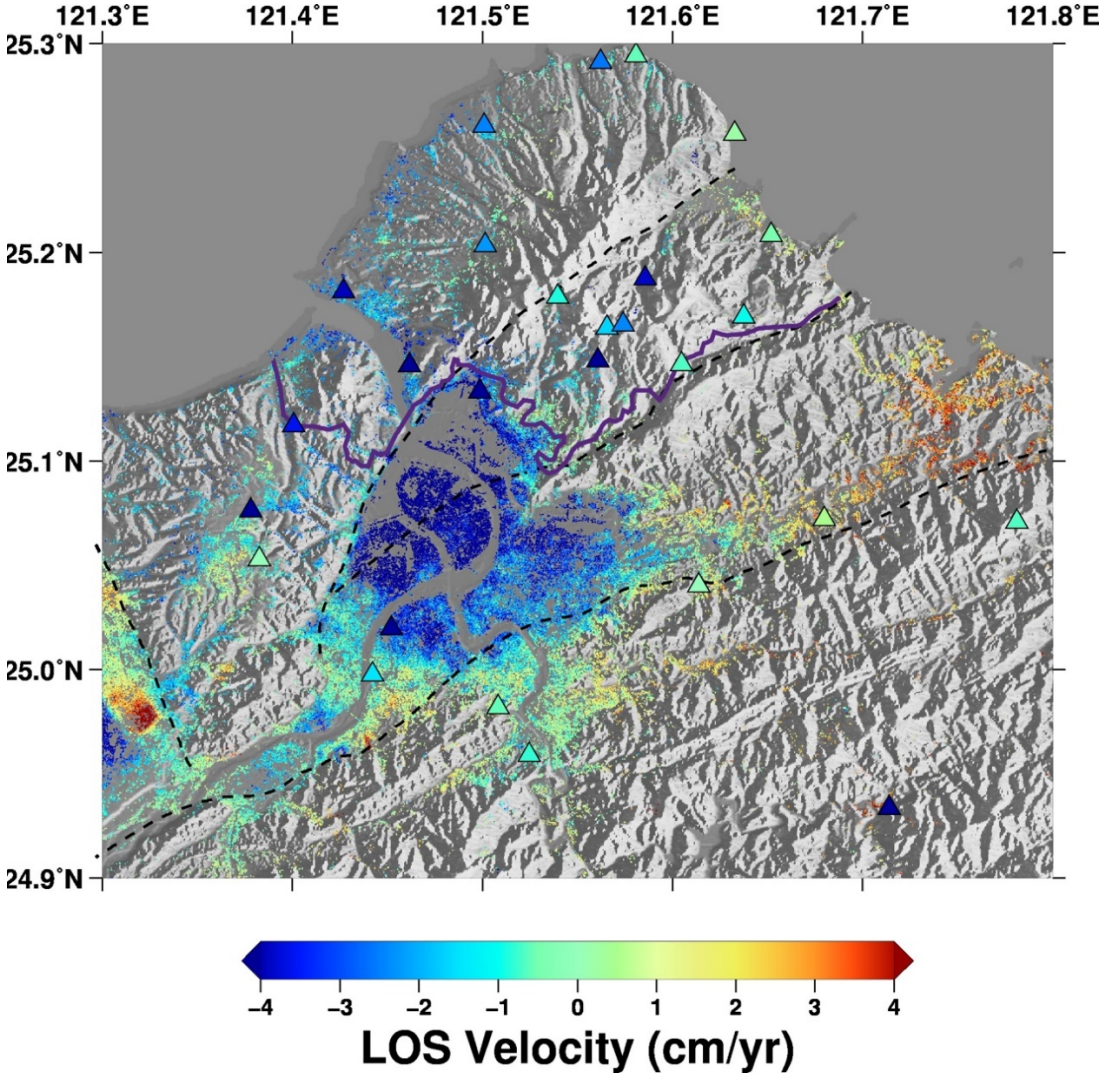


圖 4-3.1：2003.11-2008.06 GPS 連續站與 PSInSAR (Envisat 衛星)比對結果。三角形及其顏色分別代表 GPS 連續站位置及與 LOS 相應之速度值，暖色系代表接近衛星，冷色系則為遠離衛星，紅框三角形為參考點(GS12 GPS 連續站)。

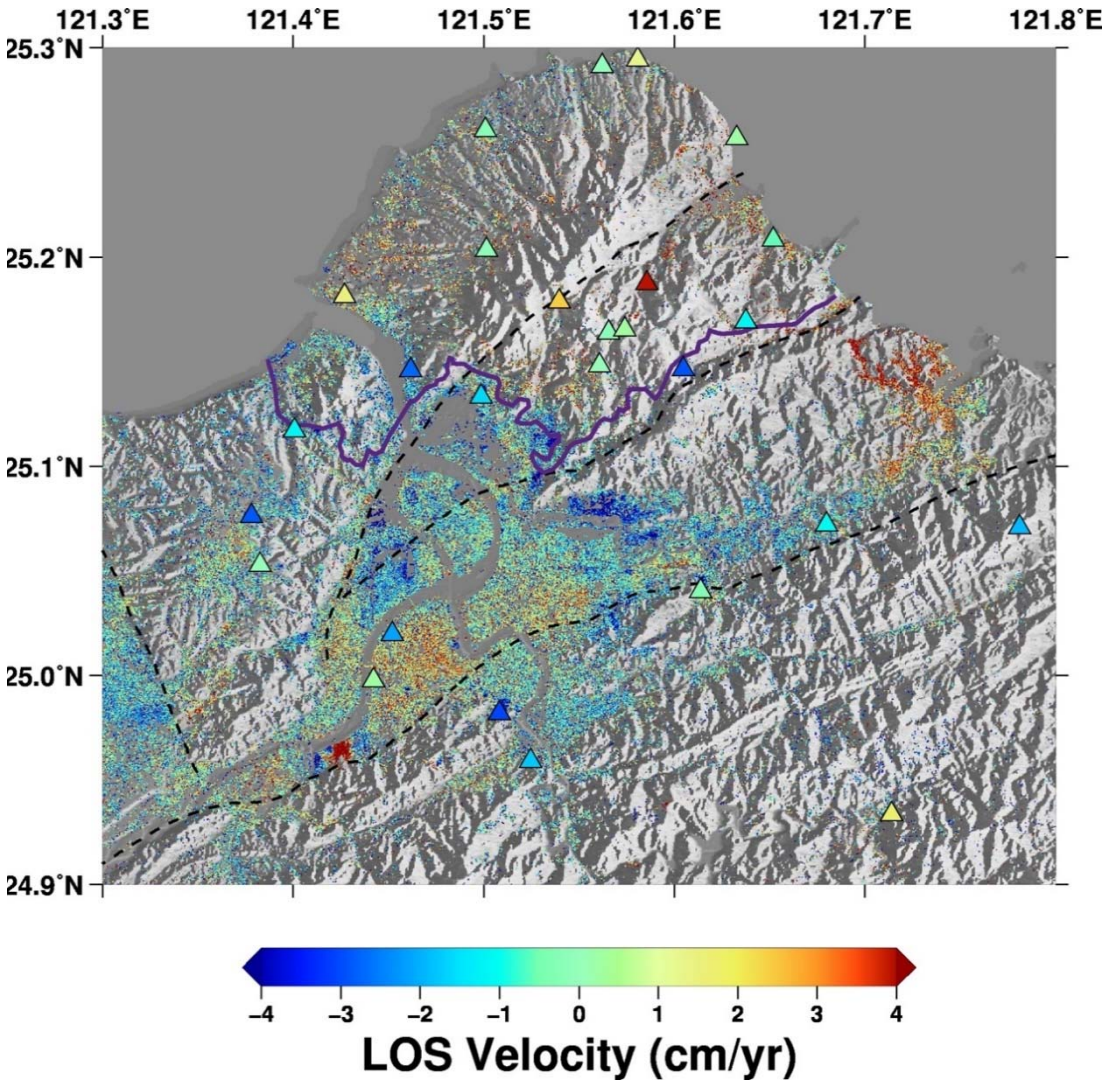


圖 4-3.2：2007.01-2011.01 年 GPS 連續站與 PSInSAR (ALOS 衛星)比對結果。三角形及其顏色分別代表 GPS 連續站位置及與 LOS 相應之速度值，暖色系代表接近衛星，冷色系則為遠離衛星，紅框三角形為參考點(GS12 GPS 連續站)。

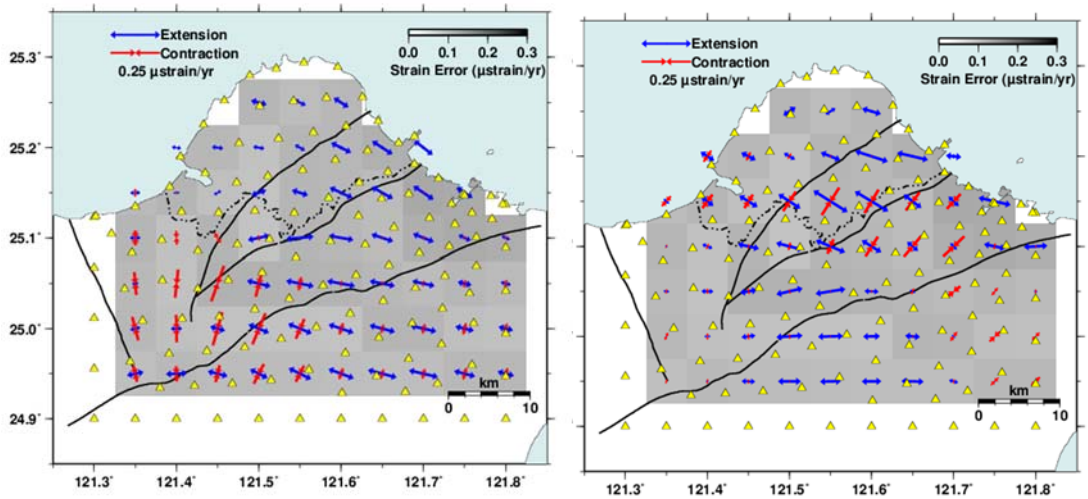


圖 4-3.3：大台北地區主應變速率場。左圖為 Envisat 時期(2003.11-2008.06)，右圖為 ALOS 時期(2007.01-2011.01)。紅色箭頭表示最大（伸張）主應變之大小及方向，藍色箭頭表示最小（壓縮）主應變之大小及方向，灰色背景為主應變率誤差，黃色三角形為節點位置。

4-3-2 地表運動與活動構造的關聯

4-3-2-1 台北盆地

范凱婷(2012)藉由 ERS 衛星影像應用 PSInSAR 監測台北盆地中心的變形情形，提出 1993 年至 2005 年間台北盆地活動以中心抬升、邊緣下陷為主，結合 Chen et al.（2007)發表之 1975-2003 台北盆地內水準測點資料，顯示台北盆地由下陷轉變為抬升的原因可能為盆地地下水取用限制及興建翡翠水庫使得地下水位回升且產生地層回脹的現象。本研究應用 PSInSAR 技術處理 2003 年 11 月至 2008 年 6 月之 Envisat 衛星影像結果與范凱婷(2012)處理結果相符，綜合饒瑞鈞(2010)精密水準測量以及地下水位資料，指出 2003 年至 2008 年間台北盆地內建案及大型建設蓬勃發展，大量抽水致使地下水位面下降，而地表變形情形由前期抬升轉為沉陷。

此外，本研究利用 2007 年至 2011 年 ALOS 衛星影像及 PSInSAR 技術所求取之台北盆地地表運動變化顯示本時期呈現反覆升降的現象(圖 4-3.4)。其中 2007-2008 年因地下水位大幅下降，盆地內 PSInSAR 資料也顯示下陷，速率最大約 1.5 cm/yr （圖 4-3.4a)。2008-2009 年盆地內大部分地區皆有抬升的現象，PSInSAR 觀測於盆地中心呈現 1-2 cm/yr 抬升速率(圖 4-3.4b)。於 2009-2010 年間，PSInSAR 在相同區域的觀測又轉為下陷，且為近期下陷變化最大時期，速率約為 2-3 cm/yr (圖 4-3.4c)。林銘軒(2012)研究同一時期(2007-2010)地下水位面與水準測量高程間的關係，指出台北盆地內高程變化主要由地下水位面升降造成，且與捷運工程有關。Tung et al.（2016)比對台北盆地於 2011-2012 及 2012-2013 的 PSInSAR（COSMO-SkyMed 衛星)地表運動觀測與地下水位變化，也提出盆地內的地表變形主要由地下水位面升降所控制。

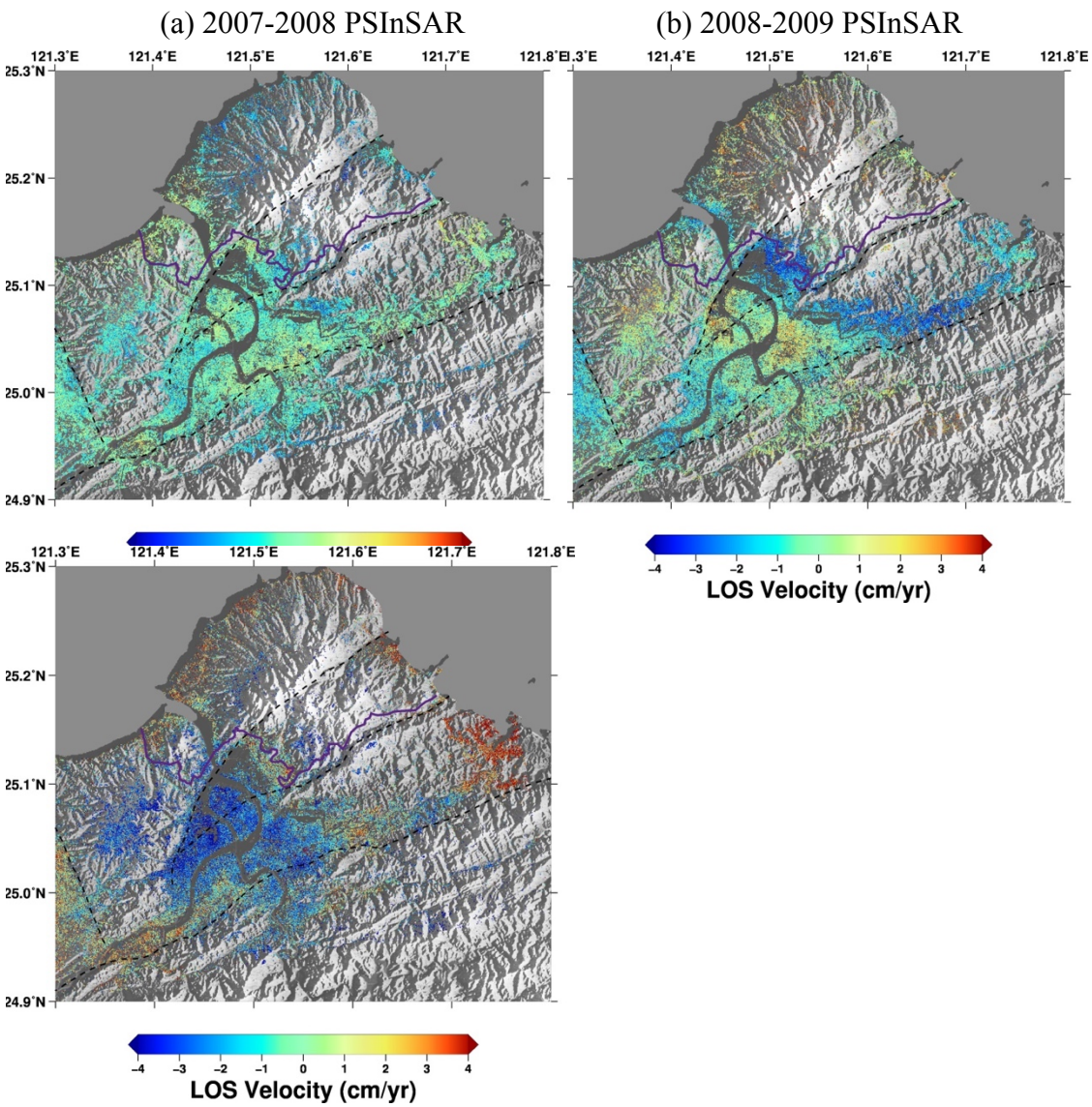


圖 4-3.4：2007-2010 年間利用 ALOS 衛星影像及 PSInSAR 技術所觀測之台北盆地的地表運動變化(近垂直向)：(a) 2007-2008; (b) 2008-2009; (c) 2009-2010。其中暖色系表示抬升，冷色系為下陷。

4-3-2-2 山腳斷層

中央地質調查所於 2004 年開始於全台灣施行精密水準測量，而大台北區域含括三條測線。本研究分別取用 2004-2008 及 2007-2011 年間測量結果計算各水準點之垂直速度場，所有水準結果皆相對於各測線第一個水準點，且相對於 PSInSAR 結果(圖 4-3.5)。結果顯示兩時期水準測量與 PSInSAR 大致上吻合，僅在 Envisat 時期於跨台北盆地之測線三水準測量並未如 PSInSAR 所觀測之下陷。

為了更精確比對兩種觀測結果，本研究沿著水準測線做 PSInSAR 之速度剖面(圖 4-3.6)，結果顯示 Envisat 時期(2003.11-2008.06，圖 4-3.6 左)測線 1 與測

線 2 結果皆落於 PSInSAR 之平均值與一個標準差內，測線 3 雖然觀測值有所差異，但水準測量與 PSInSAR 紀錄相同趨勢。而 ALOS 時期(2007.01-2011.01，圖 4-3.6 右)之 PSInSAR 結果較為離散，但三條測線結果皆落於 PSInSAR 之平均值與一個標準差內，惟測線 2 於山腳斷層東側兩者的觀測速度有較大差異。但由於該群水準點應位於輸洪道的沼澤區，含水量較高，而無法得到穩定 PS 點，故 PSInSAR 無法得到類似結果。

綜合以上結果，位於大屯山區之水準測線 1 顯示 InSAR 觀測及精密水準測量於斷層兩側皆無明顯落差。位於盆地北邊之測線 2 雖顯示 InSAR 及精密水準觀測於斷層兩側有所落差，但與斷層位置有所偏差。盆地南邊的測線 3 顯示下陷趨勢提前於斷層西側出現，進入盆地後下陷情形隨距離逐漸平緩。綜觀兩時期盆地內兩條水準測線(測線 2 與 3)於斷層東側下陷情形皆僅限局部，而斷層東側為鬆軟河床沉積物，因此推論於 2003 年至 2011 年山腳斷層於淡水河以北無明顯的垂直地表運動；盆地內之五股、三重一帶下陷情形推論與未固結沉積物之壓密作用與固結岩層之排水結合高密度人為活動有關。

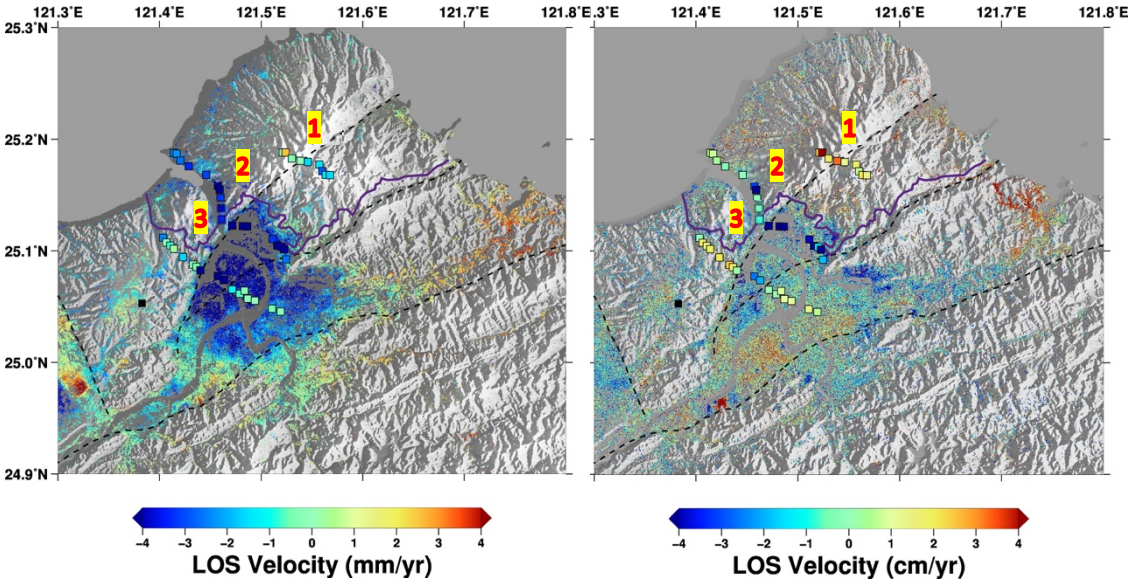


圖 4-3.5：2003-2008(左)與 2007-2011(右)年間地調所精密水準測量與 PSInSAR 比對結果。水準測線由北至南分別為測線 1、測線 2 及測線 3。正方形及其顏色表示水準點位置及與 LOS 相應之速度場。

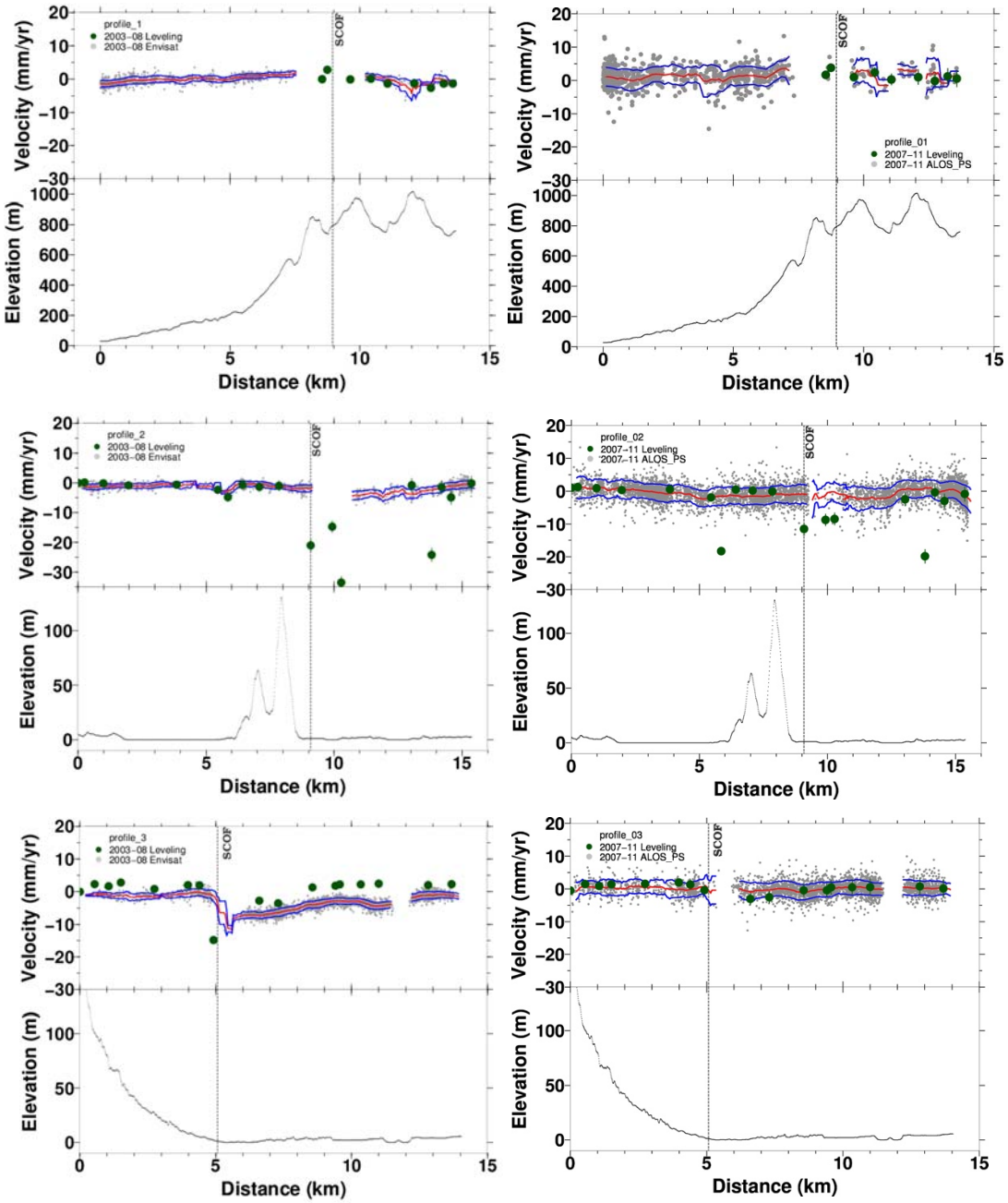


圖 4-3.6：2003-2008(左)與 2007-2011(右)年間水準測線與 PSInSAR 速度剖面比對結果。灰點表示 PSInSAR 資料分布，紅線與藍線分別為 PSInSAR 速度平均值及標準差，綠點為水準測量結果，虛線為山腳斷層位置。(上)測線 1；(中)測線 2；(下)測線 3 (測線位置參考圖 4-3.5)。

4-3-2-3 大屯火山區

Murase et al.（2014）分析 2006 年至 2013 年擎天崗、金山及七星山三條水準測線，指出 2007 年至 2011 年間大油坑呈現抬升，其累積變化量達 10 mm，其中於 2007 年至 2009 年抬升速率約為 8 mm/yr，2009 年至 2011 年抬升速率趨緩約為 4 mm/yr，而 2011 年至 2013 年則趨於靜止；七星山一帶於 2006 年至 2013 年間呈現下陷，最大下陷發生於 2006 年 6 月至 2007 年 8 月，下陷速率達 10 mm/yr，此時期後下陷量減少且以每年 3 mm 速率持續下陷，Murase et al.（2014）並結合地震資料，推論以上的地表變形可能與火山活動及地下熱液變化有關。

本研究之 PSInSAR 觀測顯示於 Envisat 時期(2003.11-2008.06)大屯火山群以 2.5 mm/yr 速率下陷，與 Murase et al.（2014）於七星山測線觀察一致。而 ALOS 時期(2007.01-2011.01)大屯火山群至基隆海岸有 3-5 mm/yr 的抬升速率，尤以基隆一帶最為快速(~5 mm/yr)，且此區跨山腳斷層有明顯的垂直斷層走向的水平運動(圖 4-1.1)，並於大油坑一帶呈現最高達 8 mm/yr 之抬升速度(圖 4-3.2)，與 Murase et al.（2014）擎天崗水準測線結果接近。綜合以上研究，推論 2007 年至 2011 年間 InSAR 於大屯火山區觀測之抬升行為可能與地下熱液作用有密切關係。

第五章、斷層模型建置

5-1 斷層幾何參數設定

5-1-1 山腳斷層

在過去的文獻中(王乾盈與孫志財，1999；羅聖宗等人，2007；陳冠宇，2014)，山腳斷層有三種可能的幾何模式。第一個斷層幾何模式為王乾盈與孫志財(1999)根據基盤深度的模型推估結果，認為山腳斷層深部銜接至基底滑脫面，其斷層幾何為深度 0 至 6 公里傾角 75 度，6 至 15 公里傾角則為 25 度(圖 5-1.1)。第二個斷層幾何模式為依據羅聖宗等人(2007)進行之海域震測剖面分析，推測山腳斷層之形貌似為匙狀(listric)幾何，在專家會議討論後推測，斷層深度在 0 至 9 公里時傾角為 70 度，深度 9 至 15 公里之傾角則為 35 度(圖 5-1.2)。第三個斷層幾何模式則是由陳冠宇(2014)所提出，在他的平衡剖面中，山腳斷層是獨立於造山系統之高角度正斷層，其斷層幾何深度為 20 公里、傾角約 80 度(圖 5-1.3)。

與本計畫合作之單位中興工程顧問社會定期召開專家會議，討論所有可能斷層模式間的權重分配(weighting)，以獲得最後的幾何參數。各模式權重值在 0 與 1 之間，值愈大代表模式正確之機率愈高，但所有模式之權重總和必須為 1，這種權重分配(或機率分配)即稱為斷層幾何模式之邏輯樹(logic tree)。以山腳斷層而言，中興顧問社的邏輯樹指出匙狀幾何具有較大權重，故本計畫選用第二組斷層幾何為山腳斷層的幾何模式。

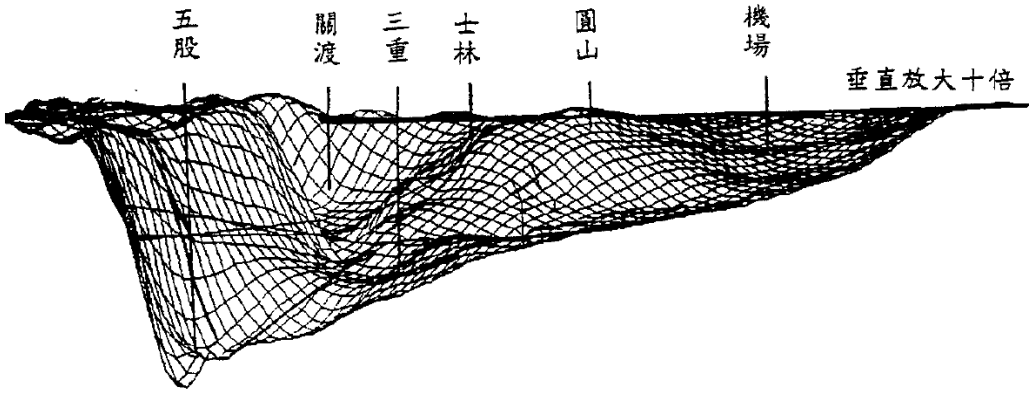


圖 5-1.1：台北盆地北半部岩盤之縱深剖面(王乾盈與孫志財，1999)。

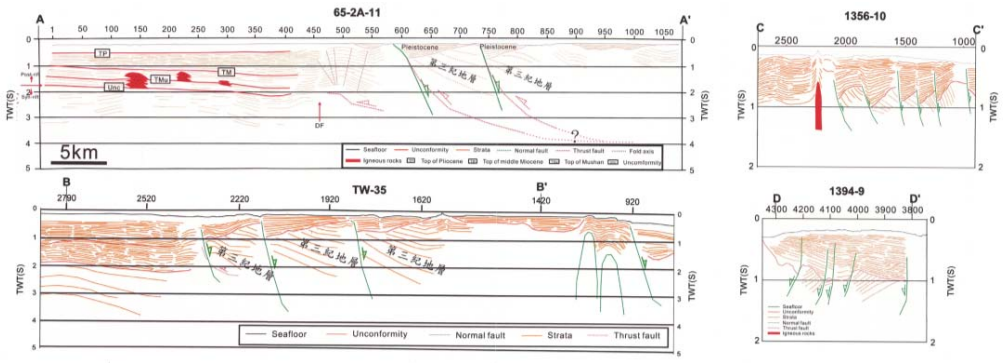


圖 5-1.2：台灣北部之海域震測剖面(羅聖宗等，2007)。

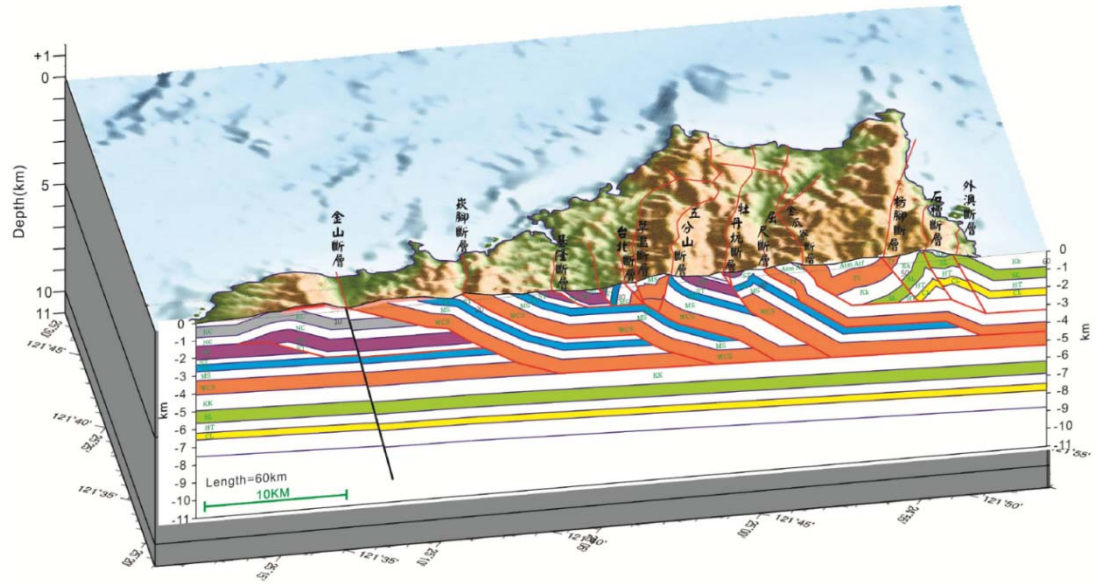


圖 5-1.3：台灣北部之三維地形圖及構造平衡剖面(陳冠宇，2014)。

5-1-2 湖口斷層

在過去的文獻中(Tan, 1963；Suppe and Namson，1979；朱傚祖等人，2012；黃旭燦等人，2004)，湖口斷層有三種可能的幾何模式。第一個斷層幾何模式為 Tan （1963)由震測資料研判的結果，其研究認為湖口斷層截切湖口背斜北翼，斷層面向南傾斜約 60 度，層位落差 200 公尺(圖 5-1.4)。第二個斷層幾何模式為朱傚祖等人(2012)整理野外調查與鑽井之地層層態及剪裂帶資料，利用圓弧與手描併用法(arc method combined with free hand method；Busk，1939)重新繪製湖口斷層地質剖面，得斷層傾角範圍約在 40 至 50 度之間(圖 5-1.5)。第三個斷層幾何模式為 Suppe and Namson(1979)及黃旭燦等人(2004)的判釋結果，他們皆認為湖口–楊梅背斜下方存在一低角度滑移斷層系統，湖口斷層僅為一向斜軸的軸面，不同的是 Suppe and Namson(1979)是以斷層彎曲褶皺理論(fault-bend fold)計算得滑移系統之斷坡為 28 至 29 度，並由鑽井資料得知斷層角度為 25 至

38 度，顯示其觀測值與理論值的一致性(圖 5-1.6)；而黃旭燦等人(2004)則認為滑移系統位於湖口–楊梅背斜下方深度約 6 至 7.5 公里處(圖 5-1.7)。

經本計畫工作團隊商討後，認為深部的低角度構造可能較類似滑脫面，較不屬於斷層部分，故選擇第一組參數為湖口斷層的斷層幾何。

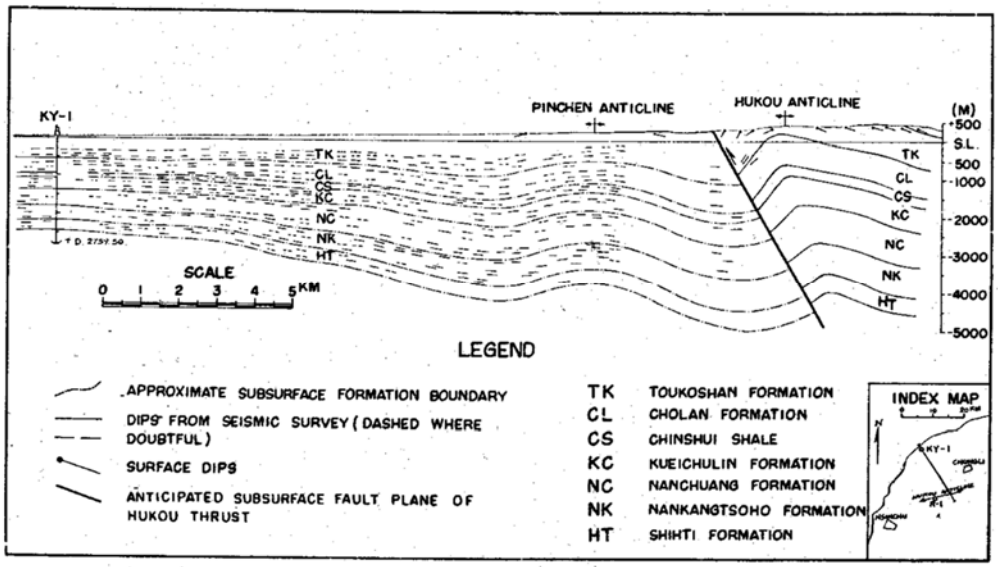


圖 5-1.4：湖口背斜至觀音鑽井的構造剖面(湯振輝，1963)。

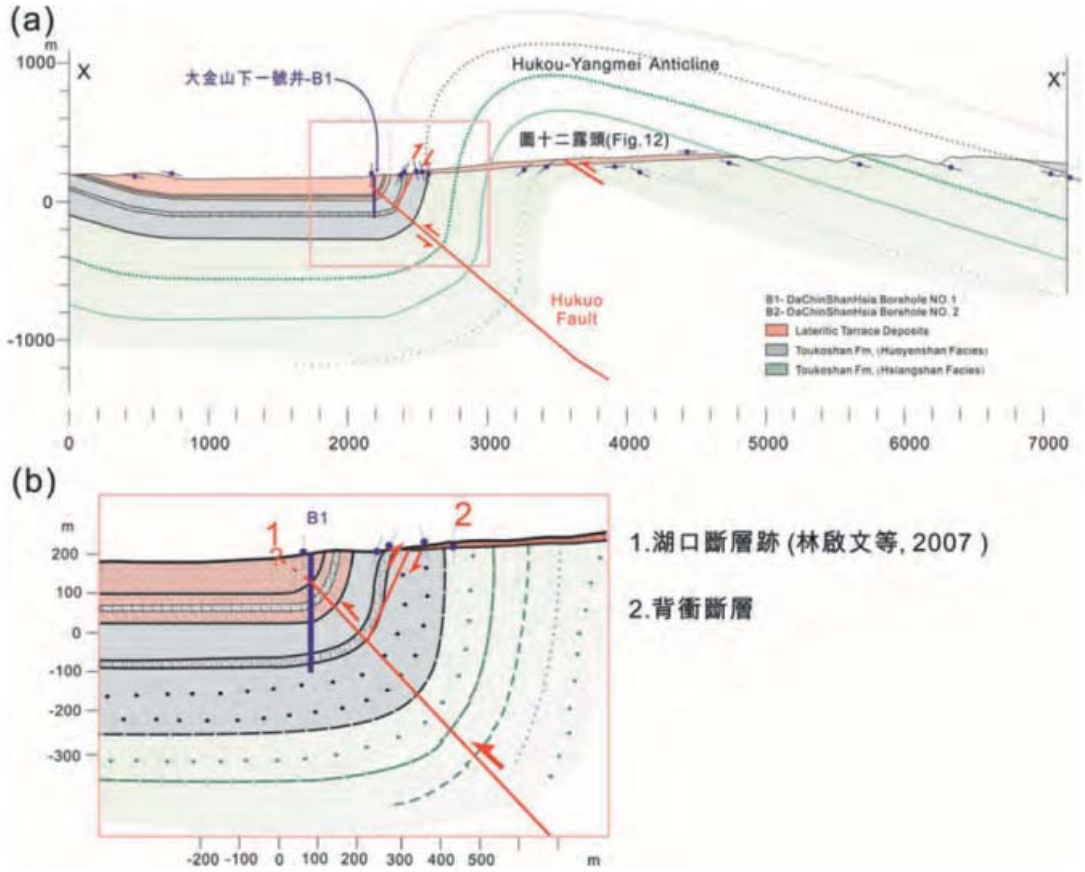


圖 5-1.5：湖口斷層地質剖面圖。(a)大範圍區域剖面，包含湖口斷層上盤之明顯背斜構造。(b)近斷層及淺部近地表之斷層相關變形構造剖面(朱傚祖等，2012)。

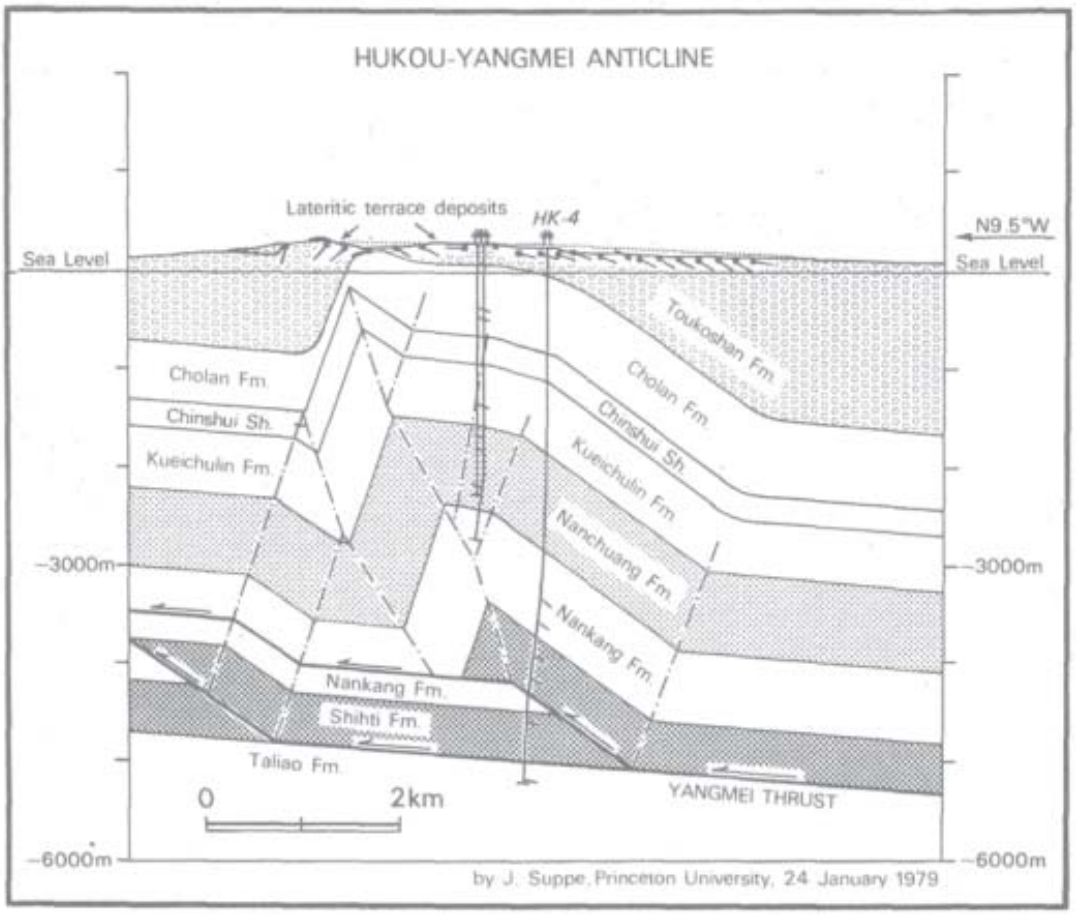


圖 5-1.6：橫跨湖口–楊梅背斜的地質剖面(Suppe and Namson, 1979)。

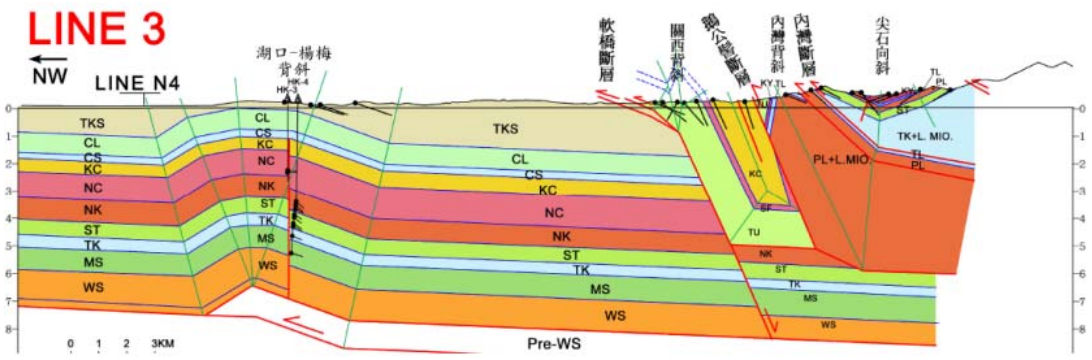


圖 5-1.7：橫跨湖口–楊梅背斜的地質構造剖面(黃旭燦等，2004)。

5-1-3 新竹斷層及新城斷層

在過去的文獻中(Chiu，1971；黃宣維，2012；蒲新杰，2010；Yang et al., 1996；Namson，1984；黃旭燦等人，2004)，新竹斷層及新城斷層有三種可能的幾何模式。第一個斷層幾何模式為 Chiu (1971)利用地質剖面，推得新竹斷層的深度約為 10 公里，傾角約 50 度，新城斷層的深度亦為 10 公里，傾角則為 40 度(圖 5-1.8)。此外黃宣維(2012)使用 1991 年至 2009 年的地震資料，將剖面兩側深度 10 公里以內的地震，投影至平衡剖面上，其結果顯示新竹地區地震活動深度主要集中在 10 公里，暗示基底滑脫面可能延伸至 10 公里(圖 5-1.9)，且與 Chiu (1971)之幾何模型相符，同時亦與蒲新杰(2010)以 TomoDD 地震定位方法計算的結果相同(圖 5-1.10)。第二個斷層幾何模式為 Yang et al. (1996)分析震測剖面，指出新城斷層在淺部是發育於新竹斷層之上，新竹斷層傾角為 40 至 50 度(圖 5-1.11)。第三個斷層幾何模式為 Namson(1984)及黃旭燦等人(2004)所提出，在他們的平衡剖面中，新城斷層發育於新竹斷層之上，且新竹斷層之傾角高於新城斷層，新竹斷層於深度 7 公里內，傾角約為 35 度，深度 7 至 10 公里則約 7.5 度，而新城斷層之深度則為 10 公里，傾角約 20 度(圖 5-1.12 及圖 5-1.13)。

第二組及第三組幾何模式中，新竹斷層在深部皆有低角度構造，此構造可能較類似滑脫面，而非斷層構造的部分，故選擇第一組斷層幾何模式。

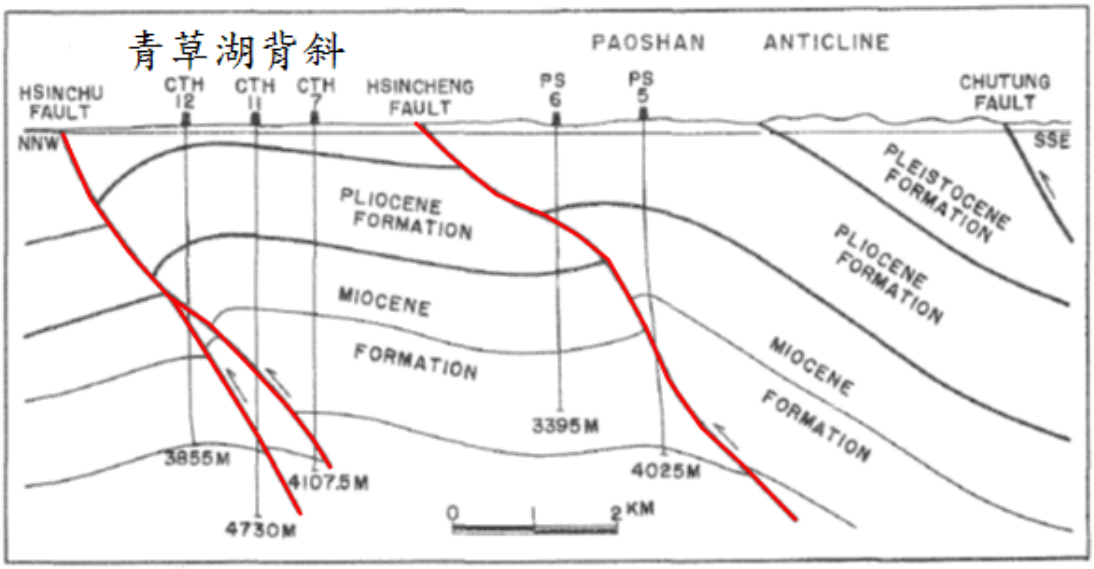


圖 5-1.8：新竹青草湖和寶山背斜的地質構造剖面。左側紅線為新竹斷層，右側為新城斷層(Chiu, 1971)。

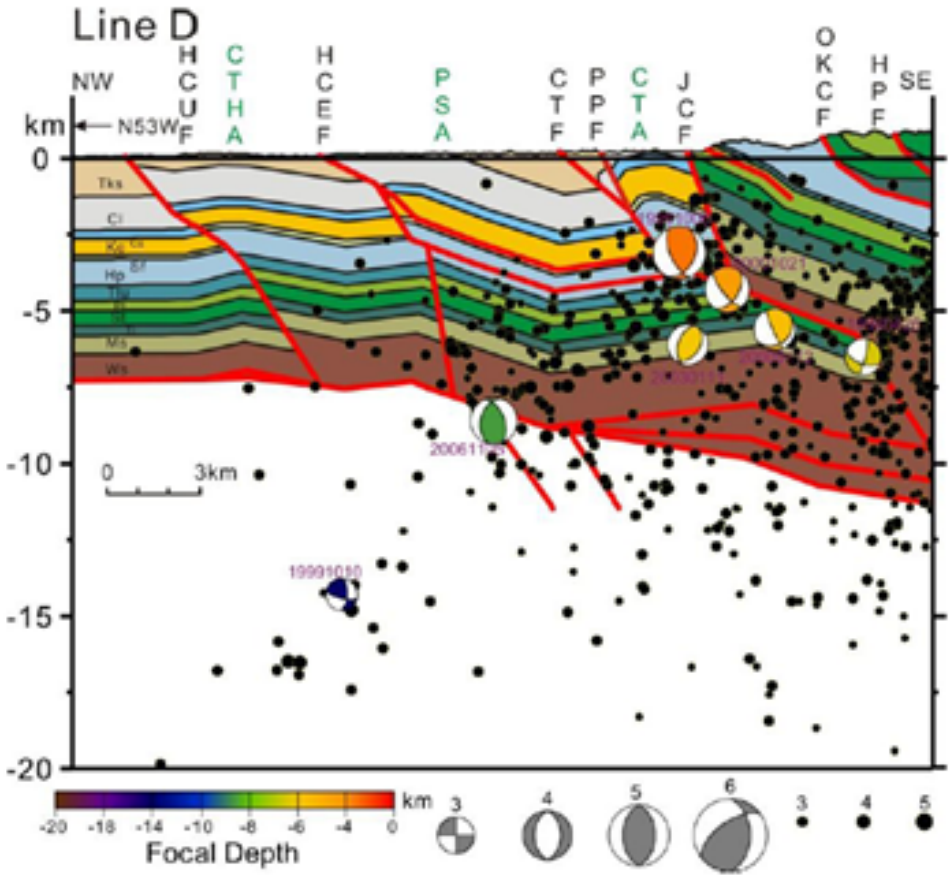


圖 5-1.9：新竹地區之地質構造與地震活動分布剖面圖。HCUF 代表新竹斷層，HCEF 則是新城斷層(黃宣維，2012)。

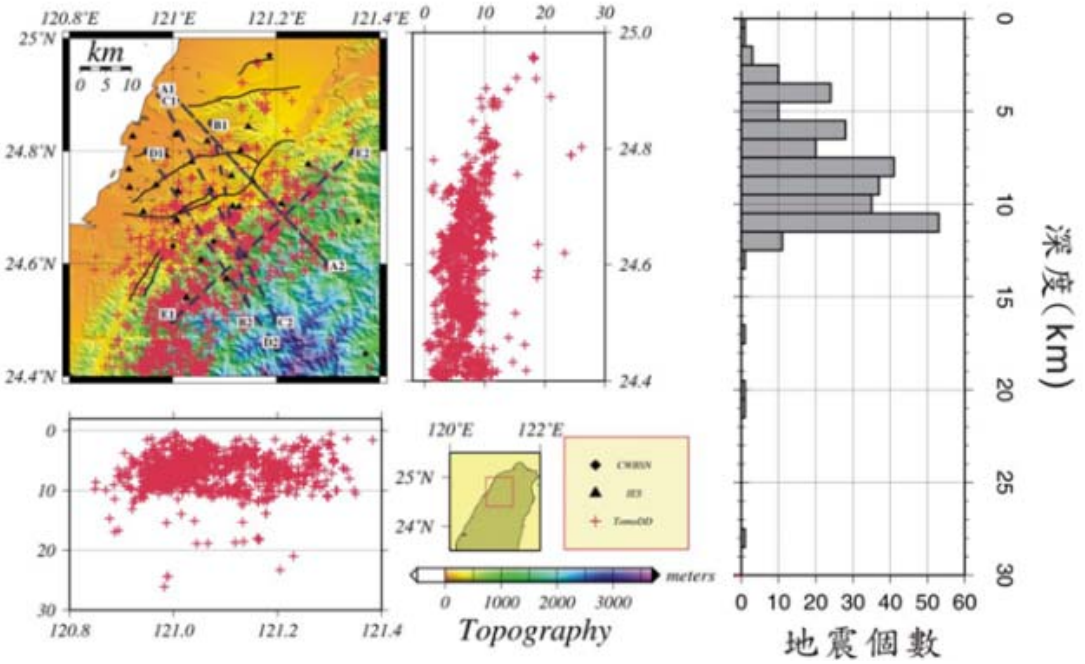


圖 5-1.10：新竹地區的地震定位結果(蒲新杰，2010)。

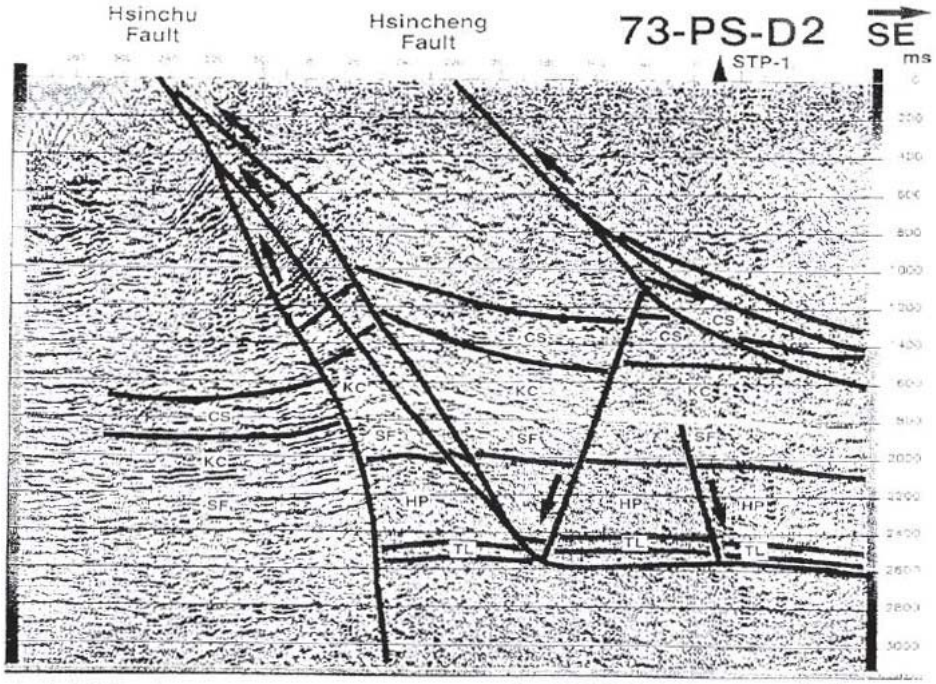


圖 5-1.11：中油油氣探勘調查於新竹地區的震測剖面。左側地表破裂為新竹斷層，右側地表破裂則是新城斷層(Yang et al., 1996)。

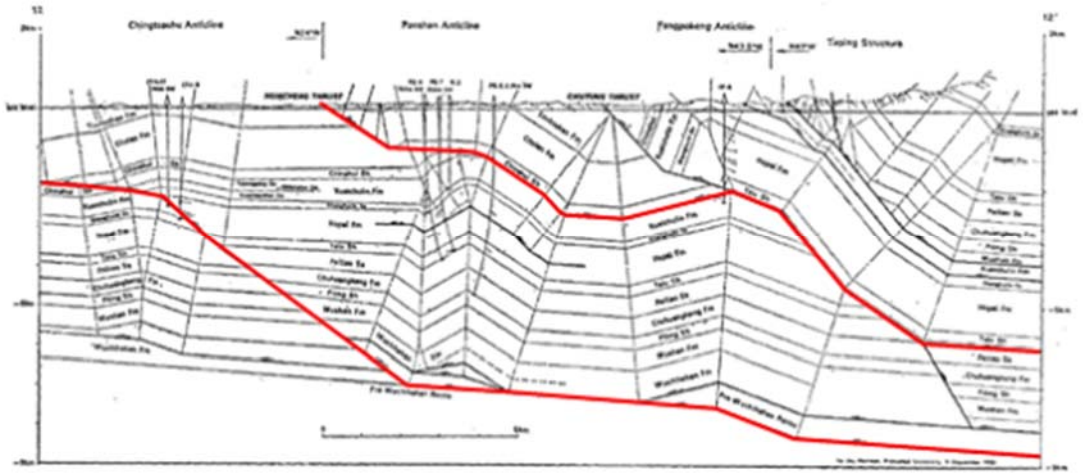


圖 5-1.12：新竹–苗栗地區北部的構造剖面。左側紅線為新竹斷層，右側紅線為新城斷層(Namson, 1984)。

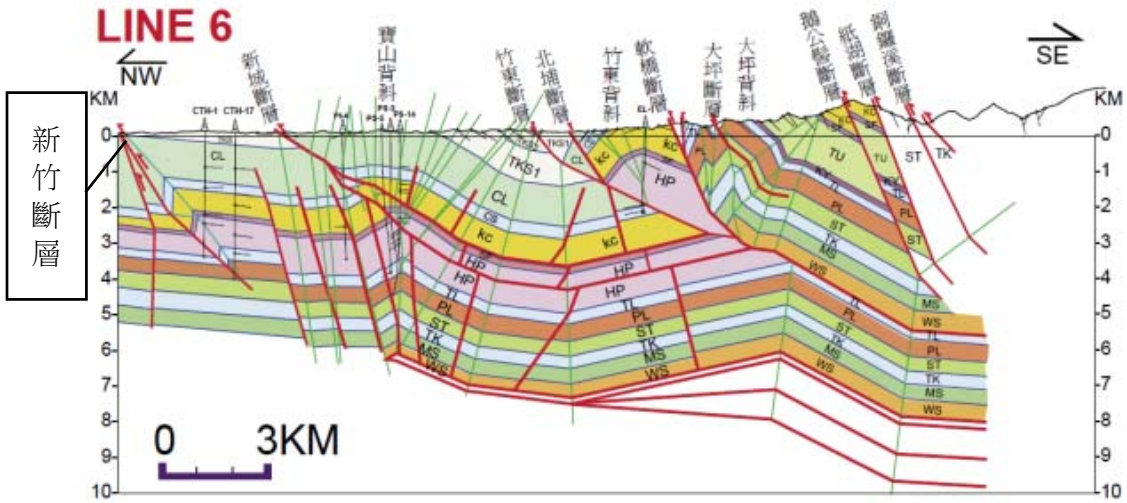


圖 5-1.13：橫跨新竹地區之地質平衡剖面(黃旭燦等，2004)。

5-1-4 獅潭斷層

Huang and Yeh (1992)使用有限元素模型(Finite Element Model)及大地測量資料，認為斷層面為匙狀較能符合觀測資料，斷層傾角從近地表的 55 度漸緩至斷層底部的 30 度(圖 5-1.14)。Lin(2005)根據地形證據，使用數個斷層分段使其擬合 1917 年至 1937 年的三角測網，得到斷層傾角約為 45 度，斷層深度約 8 公里(圖 5-1.15 及圖 5-1.16)。綜合以上文獻結果，本計畫推論出三種可能的獅潭斷層之幾何模式。第一種為傾角 40 度，深度 8 公里；第二種為傾角 50 度，深度 8 公里；第三種為傾角 60 度，深度 8 公里。

依中興工程顧問社利用邏輯樹進行分析的結果指出，深度 8 公里、傾角 50 度的斷層參數具有較大權重，故選用第二組為獅潭斷層的幾何模式。

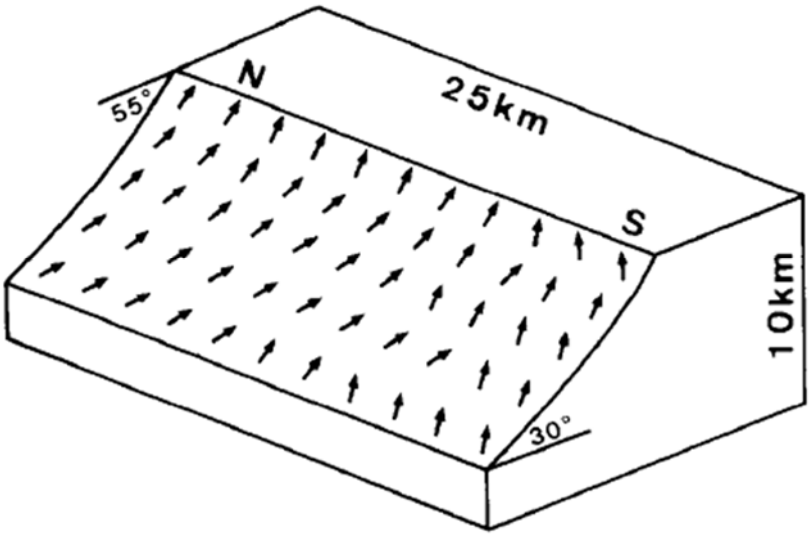


圖 5-1.14：獅潭斷層之有限元素模型(Huang and Yeh, 1992)。

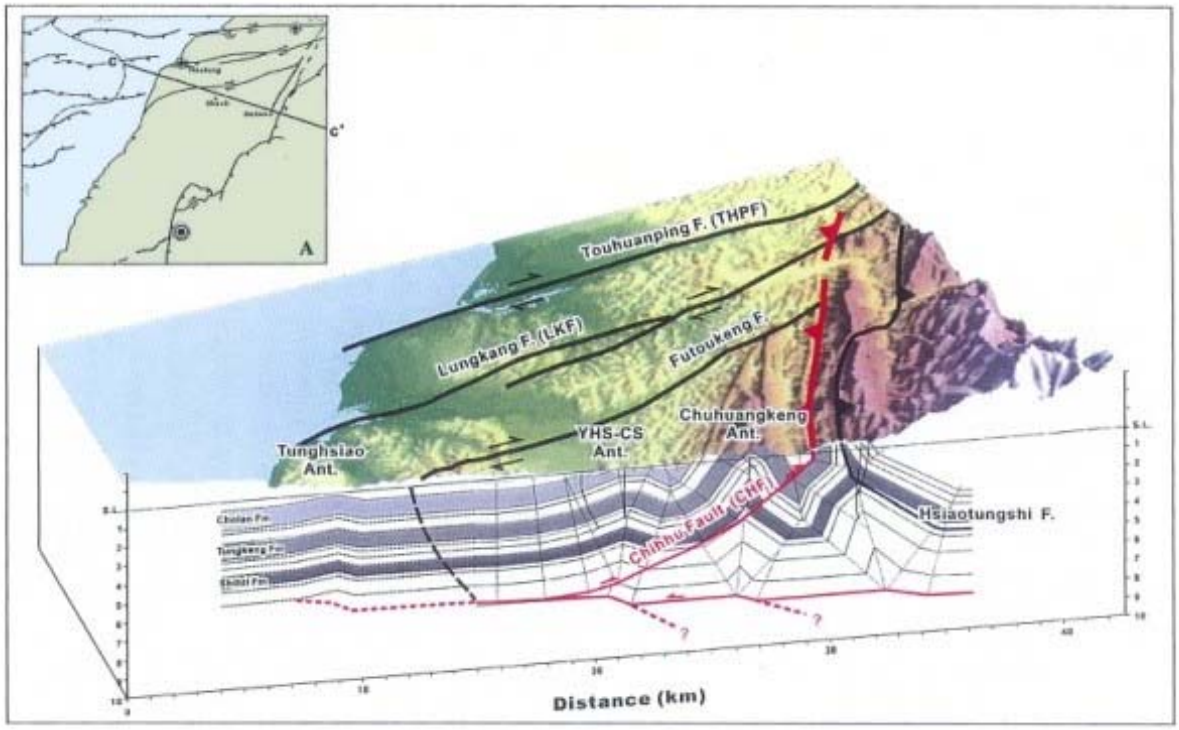


圖 5-1.15：台灣西北部的地質平衡剖面(Lin, 2005)。

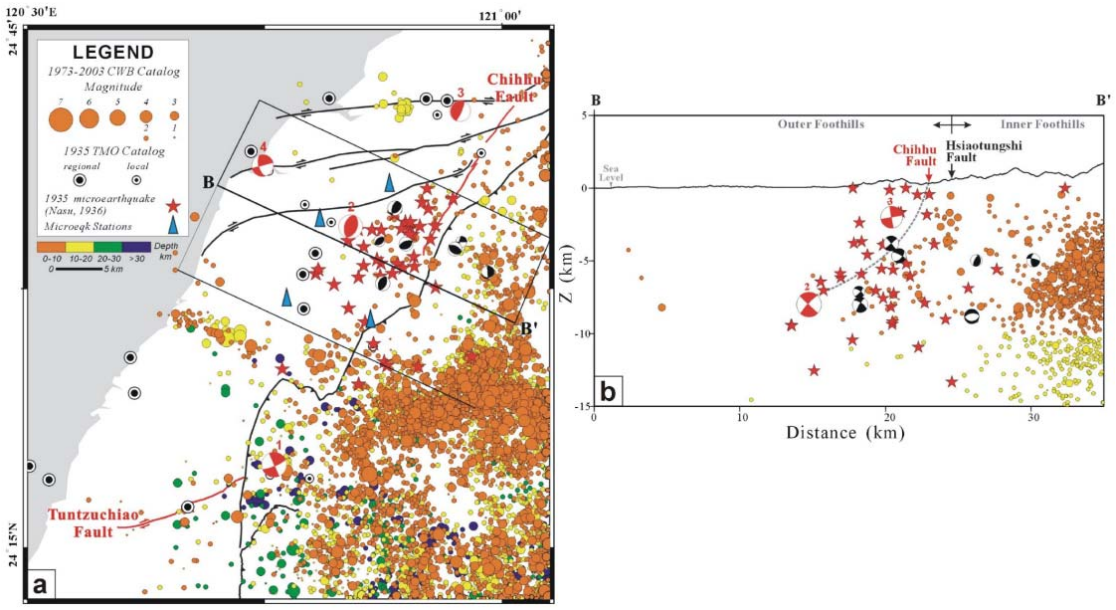


圖 5-1.16：1935 年新竹–台中地震之餘震紀錄及 1973 年至 2003 年地震目錄(Lin, 2005)。

5-1-5 三義斷層

在過去的文獻中(邱華燈，1962；Lin et al.，1989；Hung and Wiltschko，1993；黃旭燦等人，2004；李奕亨，2009)，三義斷層有三種可能的幾何模式。第一個斷層幾何模式為邱華燈(1962)由震測剖面分析獲得，其結果顯示三義斷層傾角約 20 度，與 Hung and Wiltschko(1993)由中油鑽井、反射震測資料及平衡剖面得到的 20 度一致，深度則約 4.5 至 9 公里。第二個斷層幾何模式為 Lin et al.（1989）以震波資料逆推地下速度構造獲得，其推估斷層深度約為 9 公里，傾角約 25 度(圖 5-1.17)。第三個斷層幾何模式為李奕亨(2009)之震測剖面，其得到 30 度的傾角(圖 5-1.18)。另外，黃旭燦等人(2004)的地質剖面 Line 9，也顯示出三義斷層上下盤之構造特徵，三義斷層具有前緣滑離面、斷坪、斷坡及尾緣滑離面，地質剖面 Line 10 及地質剖面 Line 11 則顯示車籠埔斷層北側、三義斷層南緣上下盤之地質構造特徵，由其地質平衡剖面可推估斷層傾角約為 30 度，深度約 9 公里(圖 5-1.19)。

依中興工程顧問社利用邏輯樹進行分析的結果指出，深度 9 公里、傾角 25 度具有較大權重，且此組參數與前階段計畫三義斷層之參數差距較小，故選用第二組斷層幾何。

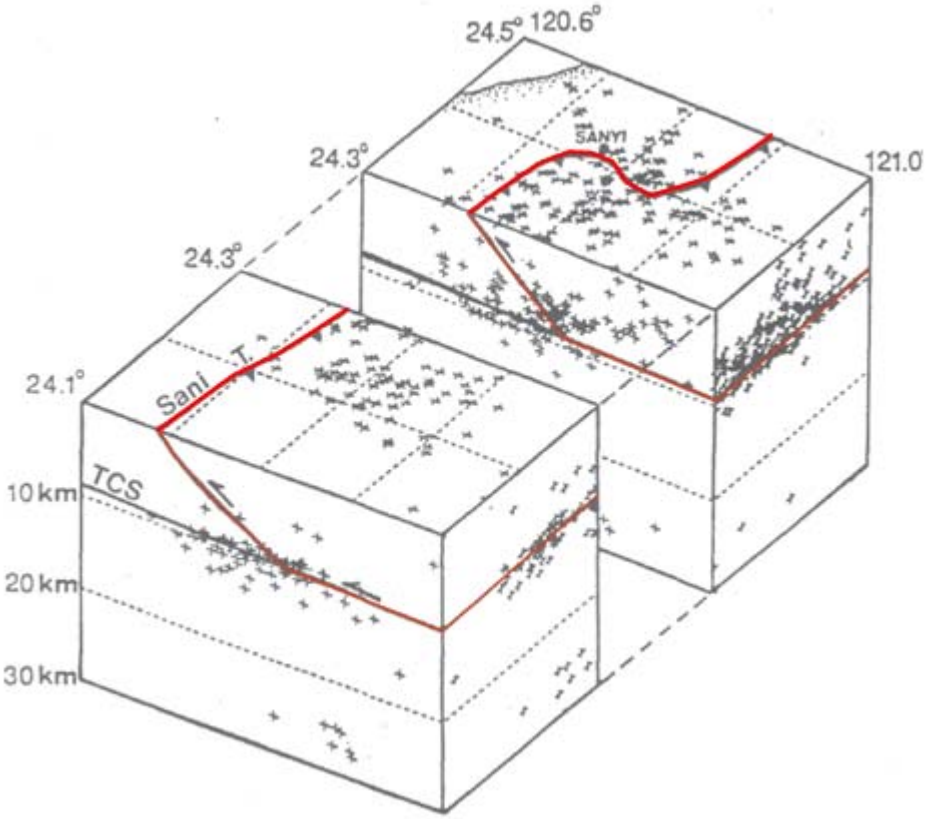


圖 5-1.17：三義–卓蘭地區微震震央分布情況。紅線為三義斷層之位置(Lin et al., 1989)。

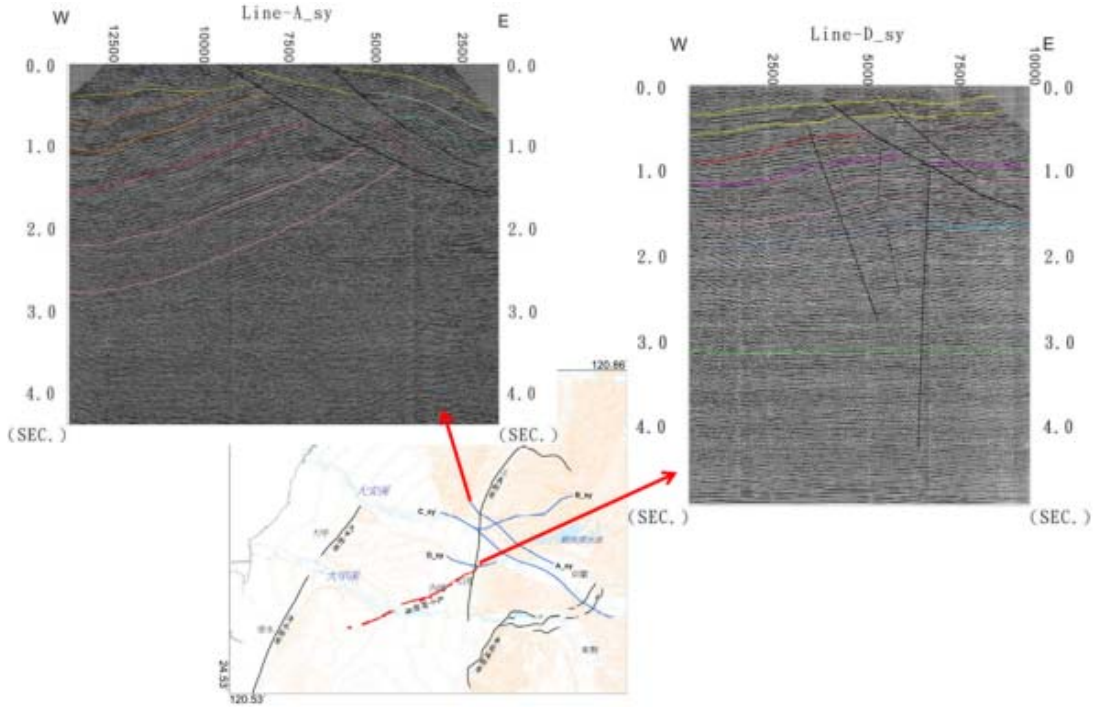


圖 5-1.18：三義斷層系統沿線相關震測線位置圖及震測剖面。(李奕亨，2009)。

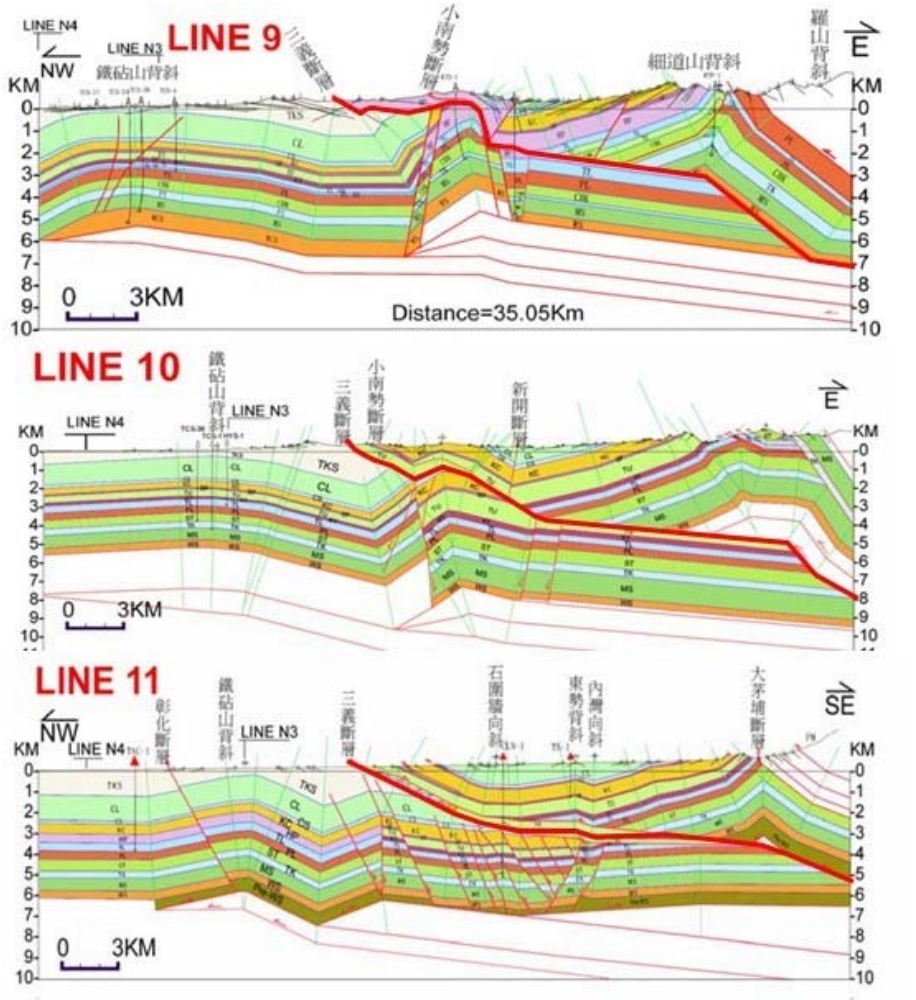


圖 5-1.19：三義斷層及車籠埔斷層北側之地質平衡剖面。(黃旭燦等，2004)。

5-1-6 屯子腳斷層

由震測剖面及地電阻剖面結果(李奕亨，2009)得到屯子腳斷層屬於走向滑移斷層系統的壓縮型開花狀構造，本計畫估計其傾角範圍為 65 至 85 度(圖 5-1.20)。吳逸民等人(2007)以地震重定位、Vp 速度及 Vp/Vs 比值變化帶得斷層深度約介於 8 至 10 公里(圖 5-1.21)。此外，本計畫以 1973 年至 2010 年之地震深度分布，推估斷層深度約 12.5 公里。因此，綜合以上論點與中興工程顧問社所召開之專家會議討論結果，本期計畫推測屯子腳斷層之幾何模式可能為：(1)傾角 70 度、深度 13 公里；(2) 傾角 75 度、深度 13 公里；(3) 傾角 80 度、深度 13 公里。

依本計畫團隊之邏輯樹分析結果，第二組參數具有較大權重，故選用第二組斷層幾何。

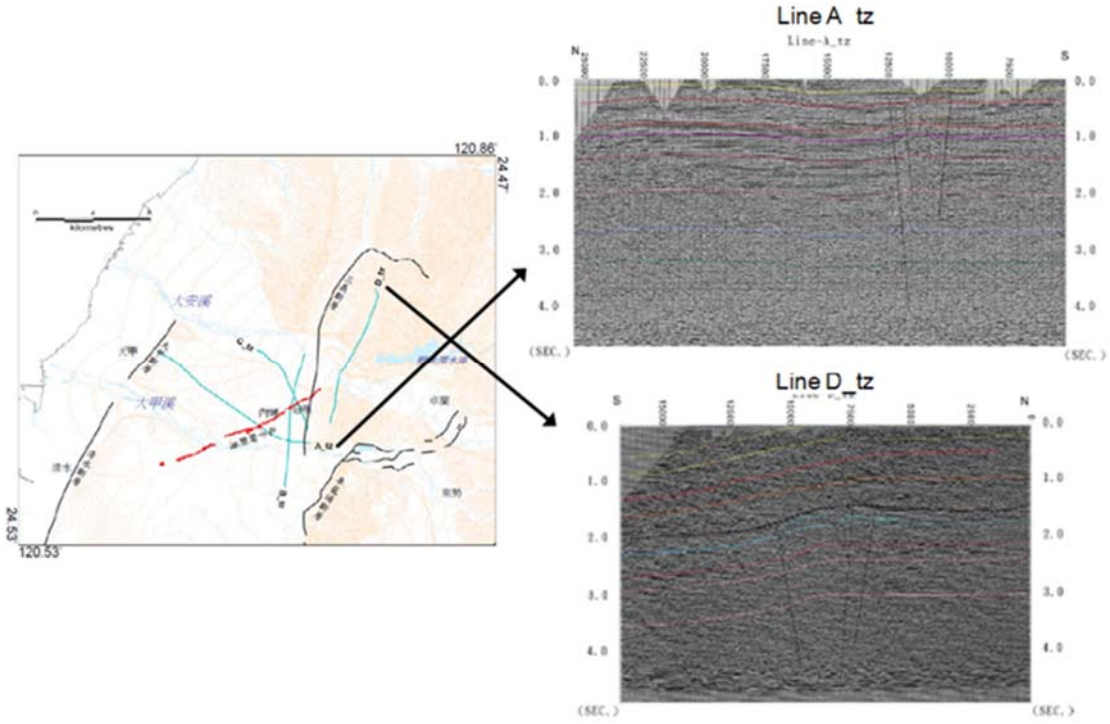


圖 5-1.20：跨越屯子腳斷層之震測線位置圖及震測剖面。由 LineA_tz 震測剖面可看出屯子腳斷層為開花狀構造，LineD_tz 震測剖面中的黑色線為三義斷層，屯子腳斷層在其下發育並改變其地層傾角(李奕亨，2009)。

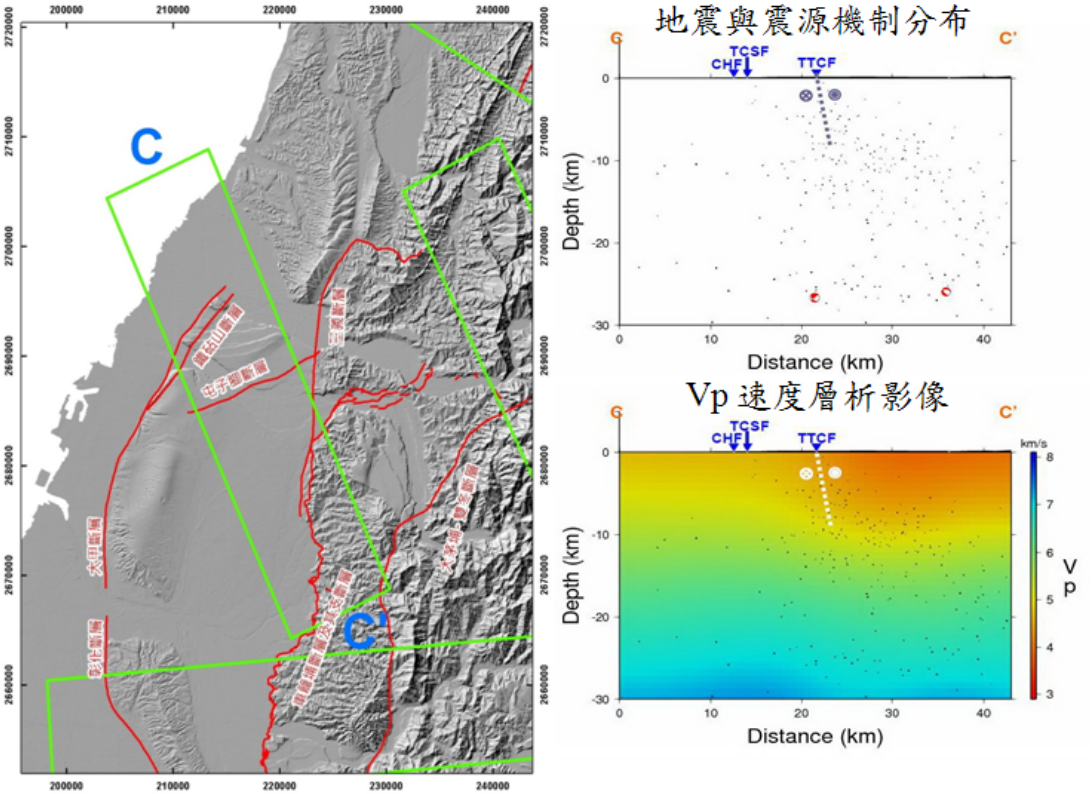


圖 5-1.21：苗栗–台中地區地震及震源機制之剖面分布及 Vp 速度層析影像。CHF 為彰化斷層，TCSF 為鐵砧山斷層，TTCF 為屯子腳斷層(吳逸民等，2007)。

5-1-7 宜蘭北部構造及宜蘭南部構造

宜蘭地區的斷層參數相關研究較少，且地調所並未公布此地區的活斷層。根據 Shyu et al.(2016)參考 Su (2011)的震測剖面結果，推測宜蘭北部構造之傾角為 60 度，斷層深度為 9.4 公里，而宜蘭南部構造之傾角為 60 度，深度為 11.3 公里(圖 5-1.22)。經本計畫團隊商討後，決定選用其參數作為兩條宜蘭斷層構造之幾何模式。

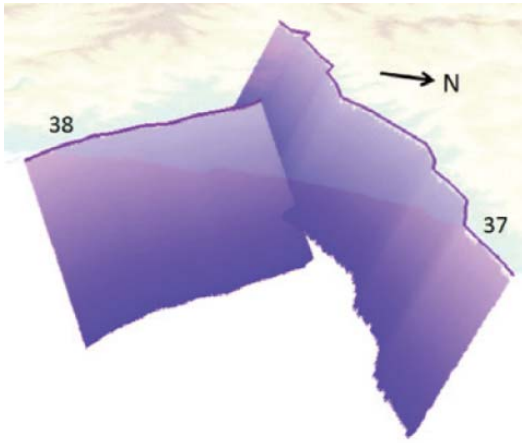


圖 5-1.22：宜蘭北部構造及宜蘭南部構造的三維幾何示意圖(Shyu et al., 2016)。

5-1-8 大甲–彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔–雙冬斷層

Dominguez et al. (2003)以 SPOT 衛星影像、地溫資料及斷層錯位模型推估集集地震的同震位移，並推求得中部地區斷層之斷層幾何，得大甲–彰化斷層北段於深度 5 公里內傾角約為 22.5 度，深度 5 至 8.5 公里傾角則約為 8 度，南段則於深度 7 公里內傾角為 22.5 度，深度 7 至 8.5 公里內傾角則約為 8 度；車籠埔斷層深度 8.5 公里內傾角約為 25 度，深度 8.5 至 12 公里傾角則約為 8 度；而大茅埔–雙冬斷層深度 5 公里內傾角約為 45 度，深度 5 至 12 公里傾角則約為 15 度(圖 5-1.23)。Yue et al. (2005)與 Lee and Shih (2011)所發表的斷層模型及震測剖面則可推估大甲–彰化斷層北段深度 6 公里內傾角約為 25 度，深度 6 至 8 公里之傾角約為 6.5 度，南段深度 7.5 公里內傾角約 25 度，深度 7.5 至 8 公里內傾角約 6.5 度；車籠埔斷層深度 8 公里內傾角約為 35 度，而深度 8 至 10 公里內傾角約 6.5 度；大茅埔–雙冬斷層深度 5 公里內傾角約為 50 度，而深度 5 至

10 公里內傾角約 18 度(圖 5-1.24 及圖 5-1.25)。Kao and Chen (2000)利用集集地震序列資料及斷層面解來模擬中部地區之斷層幾何(圖 26)，其結果與王乾盈等人(Wang et al., 2000)整合薄皮構造模型(Suppe, 1980)、鑽井、重力及地震資料所得到的中部斷層幾何相近(圖 5-1.27)，兩者結果可推得大甲–彰化斷層北段深度 2 至 6.5 公里之傾角為 35 度，深度 6.5 至 11 公里則為 10 度，南段深度 2 至 7 公里傾角為 35 度，深度 7 至 11 公里則為 10 度；車籠埔斷層深度 11 公里內之傾角為 40 度，深度 11 至 15 公里則為 10 度；而大茅埔–雙冬斷層深度 9.5 公里內之傾角為 40 度，深度 9.5 至 15 公里則為 20 度。綜合以上文獻結果，本期計畫整理出以下三組斷層幾何模式：

1. 大甲–彰化斷層北段深度 5 公里內傾角為 22.5 度，深度 5 至 8.5 公里，傾角為 8 度，南段深度 7 公里內傾角為 22.5 度，深度 7 至 8.5 公里之傾角為 8 度；車籠埔斷層深度 8.5 公里內傾角為 25 度，深度 8.5 至 12 公里傾角則為 8 度；大茅埔—雙冬斷層深度 5 公里內傾角為 45 度，深度 5 至 12 公里內傾角為 15 度。
2. 大甲–彰化斷層北段深度 6 公里內傾角為 25 度，深度 6 至 8 公里，傾角為 6.5 度，南段深度 7.5 公里內傾角為 25 度，深度 7.5 至 8 公里之傾角為 6.5 度；車籠埔斷層深度 8 公里內傾角為 35 度，深度 8 至 10 公里傾角則為 6.5 度；大茅埔—雙冬斷層深度 5 公里內傾角為 50 度，深度 5 至 10 公里內傾角為 18 度。
3. 大甲–彰化斷層北段深度 2 至 6.5 公里之傾角為 35 度，深度 6.5 至 11 公里，傾角為 10 度，南段深度 2 至 7 公里內傾角為 35 度，深度 7 至 11 公里之傾角為 10 度；車籠埔斷層深度 11 公里內傾角為 40 度，深度 11 至 15 公里傾角則為 10 度；大茅埔—雙冬斷層深度 9.5 公里內傾角為 40 度，深度 9.5 至 15 公里內傾角為 20 度。

依中興工程顧問社之邏輯樹分析結果指出，第二組斷層幾何具有較大權重，故選用第二組斷層幾何。

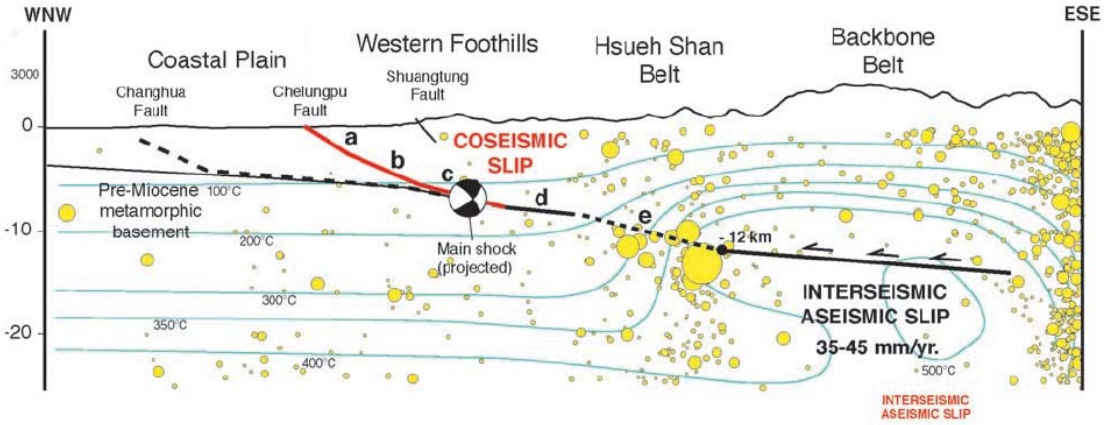


圖 5-1.23：以集集地震之震間與同震位移所推求的中部構造模型。圖中最左側的黑色虛線為大甲–彰化斷層，紅線為車籠埔斷層，往東之黑色實線為大茅埔–雙冬斷層(Dominguez et al., 2003)。

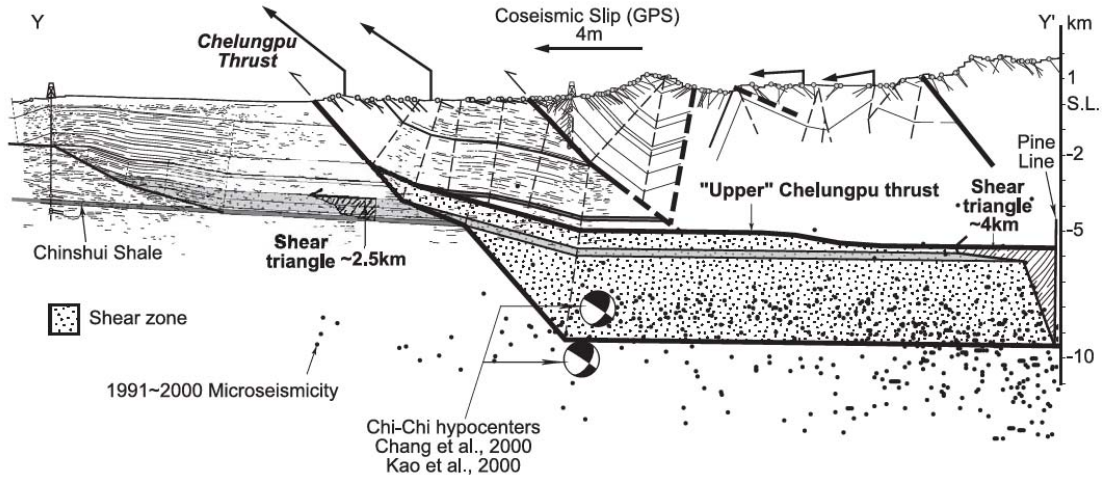


圖 5-1.24：以集集地震主震及地表破裂所推求的斷層模型(Yue et al., 2005)。

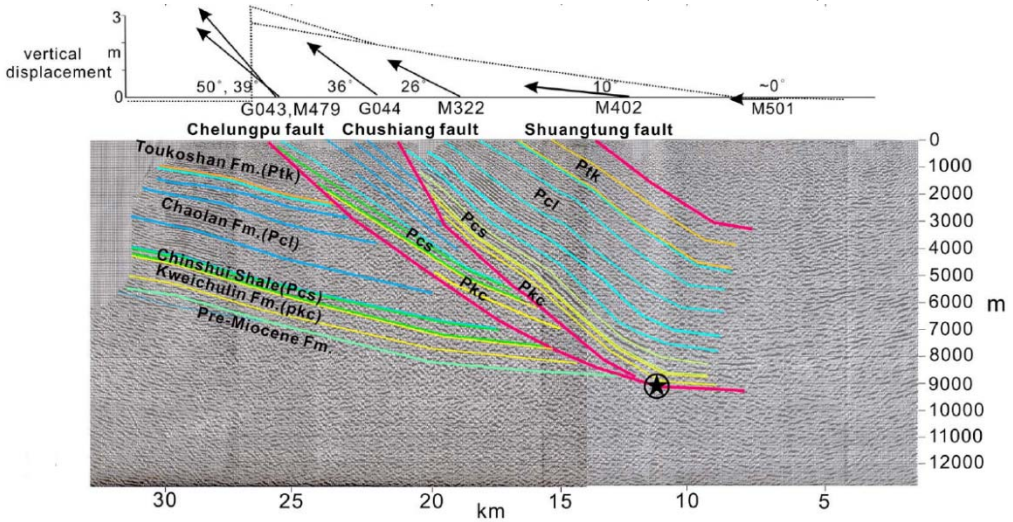


圖 5-1.25：中部震測剖面及其構造解釋。最左側之桃紅色線為車籠埔斷層，最右側之桃紅色線則是雙冬斷層(Lee and Shih, 2011)。

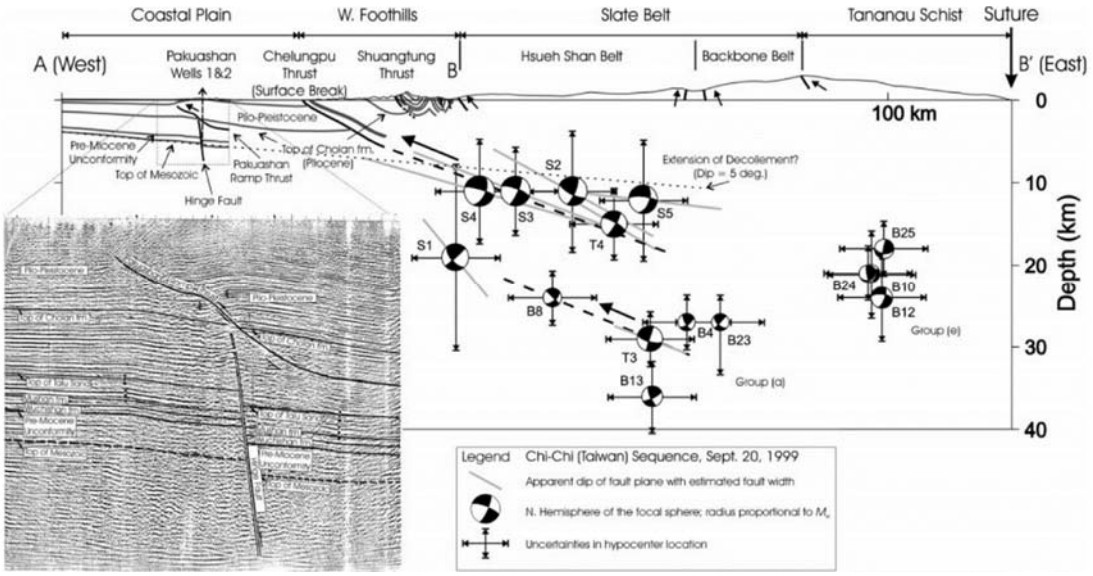


圖 5-1.26：以集集地震序列資料及斷層面解所推得之中部斷層幾何(Kao and Chen, 2000)。

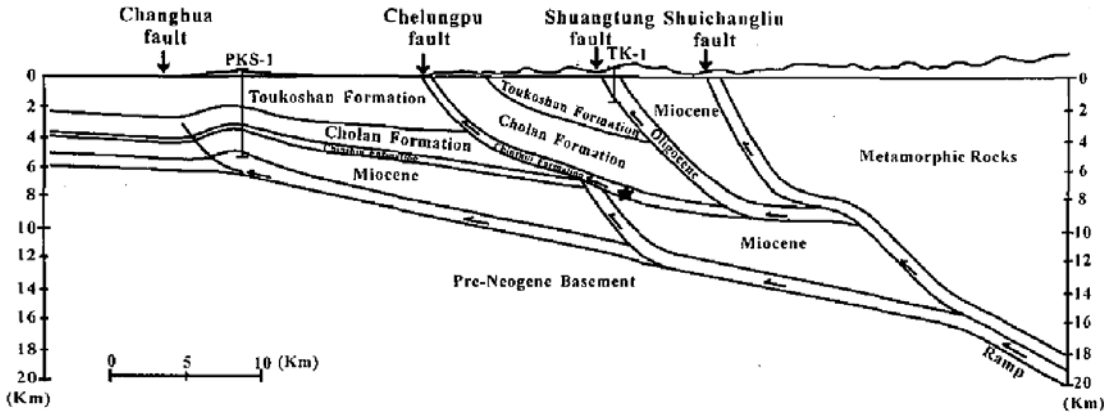


圖 5-1.27：以鑽井、重力、地震資料及薄皮構造模型所推得之中部構造幾何(Wang et al., 2000)。

5-1-9 梅山斷層

黃旭燦等人(2004)以地質平衡剖面推論梅山斷層應為高角度向南傾的正斷層。Yang et al. (2007)利用震測剖面及地震資料亦推估其為高角度斷層，傾角約為 75 至 85 度。經中興工程顧問社召開之專家會議討論後，分析所得之邏輯樹包含下列三組可能的斷層幾何模式：(1) 深度 10 公里，傾角 85 度；(2) 深度 12.5 公里，傾角 80 度；(3) 深度 15 公里，傾角 75 度。

上述三組參數之邏輯樹分析結果中，第二組參數具有較大權重，故選用第二組斷層幾何。

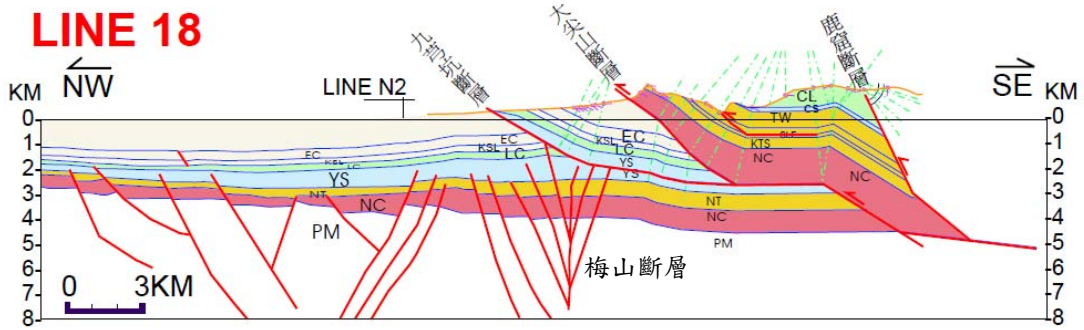


圖 5-1.28：橫跨雲林嘉義一帶之地質平衡剖面(黃旭燦等，2004)。

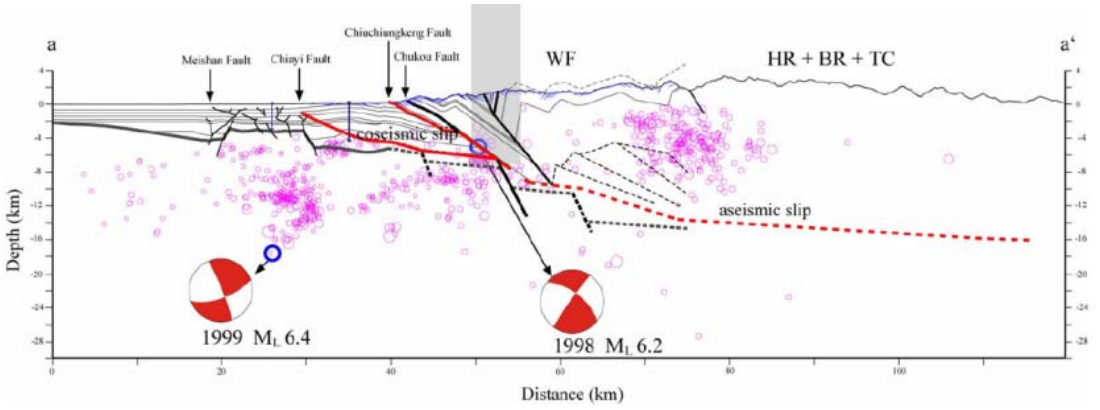


圖 5-1.29：以震測剖面及地震資料推估之中部斷層構造。圖中所指示之斷層由左至右依序為梅山斷層、嘉義斷層、九芎坑斷層及觸口斷層(修改自(Yang, 2007))。

5-1-10 九芎坑斷層及大尖山斷層

數篇前人文獻曾利用地質平衡剖面以探討中部地區之地表構造，其中楊耿明等人(2001)認為九芎坑斷層在深度 7 公里內之傾角為 25 度，深度 7 至 8 公里之傾角則是 6.5 度；大尖山斷層之深度約為 6.5 公里，傾角則為 32.5 度(圖 5-1.30)，而後來一些研究據此並加入其他地質地物資料一起分析，而求得不同平衡剖面之結果。其中黃旭燦等人(2004)認為九芎坑斷層於深度 4 公里內傾角為 27.5 度，深度 4 至 6 公里則為 8.5 度(圖 5-1.31)；大尖山斷層之深度為 5 公里，傾角為 30 度。而黃姝琳(2009)則加入地震資料，推估九芎坑斷層於深度 8 公里內的傾角是 30 度，深度 8 至 10 公里則為 8.5 度；大尖山斷層之深度約 8 公里，斷層傾角則約為 35 度(圖 5-1.32)。

綜合以上文獻結果，本期計畫整理出下列三組斷層幾何模式：

1. 九芎坑斷層深度 7 公里內之傾角為 25 度，深度 7 至 8 公里之傾角則是 6.5 度；大尖山斷層深度約為 6.5 公里，傾角則為 32.5 度。
2. 九芎坑斷層深度 4 公里內傾角為 27.5 度，深度 4 至 6 公里之傾角則為 8.5

度；大尖山斷層深度為 5 公里，傾角為 30 度。

3. 九芎坑斷層深度 8 公里內的傾角是 30 度，深度 8 至 10 公里之傾角則為 8.5 度；大尖山斷層深度約 8 公里，斷層傾角則約為 35 度。

依中興工程顧問社之邏輯樹分析結果指出，第一組參數具有較大權重，故選用第一組斷層幾何。

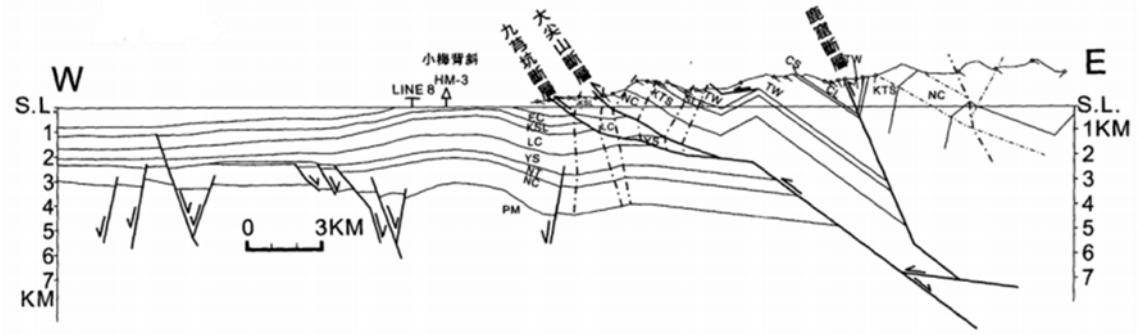


圖 5-1.30：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質構造剖面(楊耿明等，2001)。

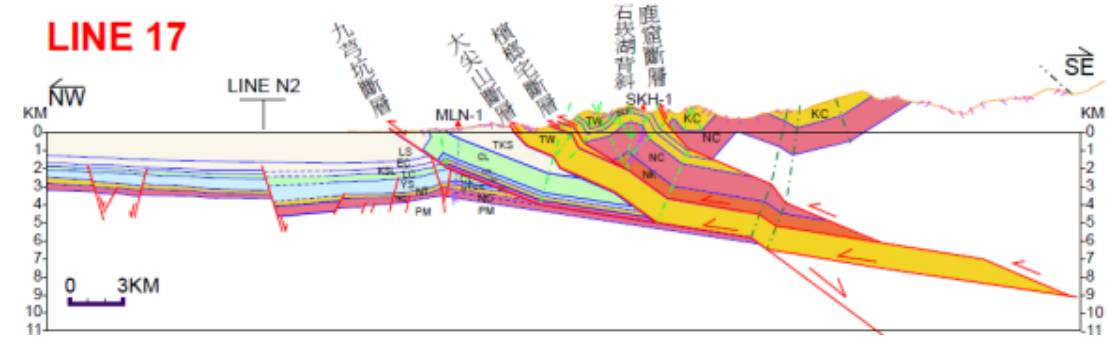


圖 5-1.31：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質平衡剖面(黃旭燦等，2004)。

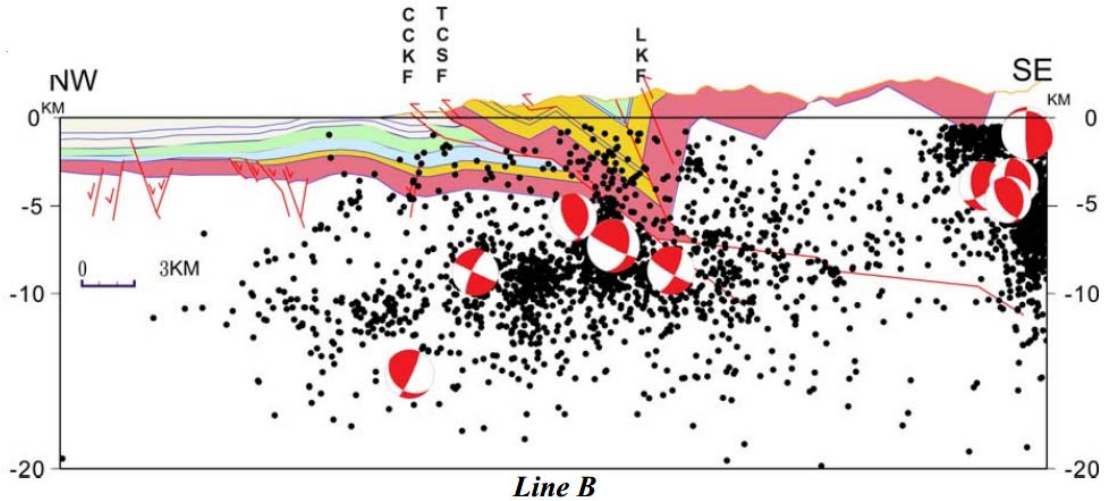


圖 5-1.32：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之區域地質構造剖面與震源分布。CCKF 為九芎坑斷層，TCSF 為大尖山斷層，LKF 則是鹿窟斷層(黃姝琳，2009)。

5-1-11 觸口斷層

數篇前人文獻曾利用地質平衡剖面以研究中部地區之地表構造，指出觸口斷層有三種可能的幾何模式。第一個斷層幾何模式為黃旭燦等人(2004)之平衡剖面，觸口斷層於深度 7 公里內傾角為 45 度，深度 7 至 8 公里則為 5 度(圖 5-1.33)。第二個斷層幾何模式為楊耿明等人(2001)提出，他們認為斷層在深度 9 公里內之傾角為 40 度，深度 9 至 10 公里傾角則是 5 度(圖 5-1.34)。第三個斷層幾何模式則為 Hung et al. (1999)利用台灣中油公司的鑽井資料建立之平衡剖面，他們推估斷層於深度 11 公里內的傾角是 35 度，深度 11 至 12 公里則為 5 度(圖 5-1.35)。上述三組幾何模式中，第二組參數具有較大權重，故選用第二組斷層幾何。

最後，本節所提及之斷層參數組合及最終幾何選擇將彙整於表 5-1.1 以供比較。

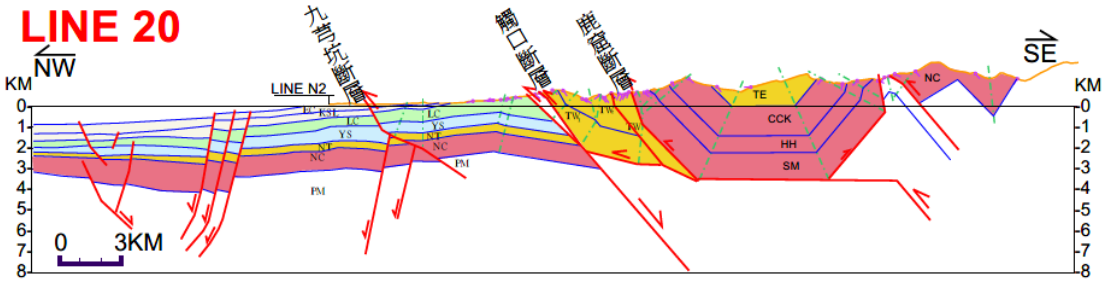


圖 5-1.33：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質平衡剖面(黃旭燦等，2004)。

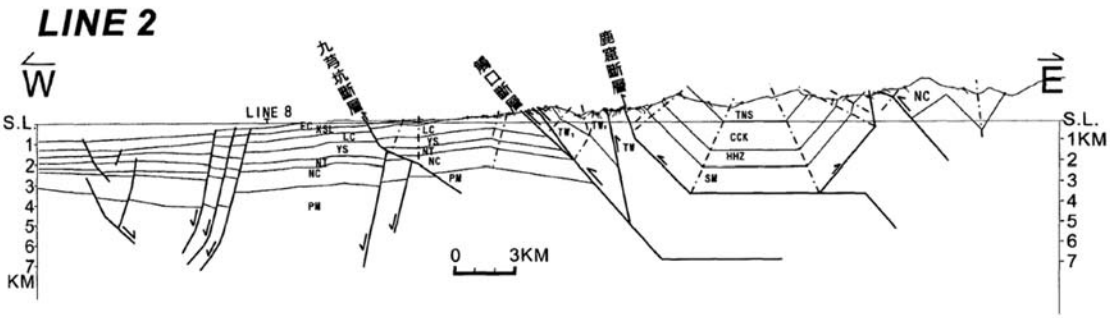


圖 5-1.34：橫跨九芎坑斷層及觸口斷層之地質構造剖面(楊耿明等，2001)。

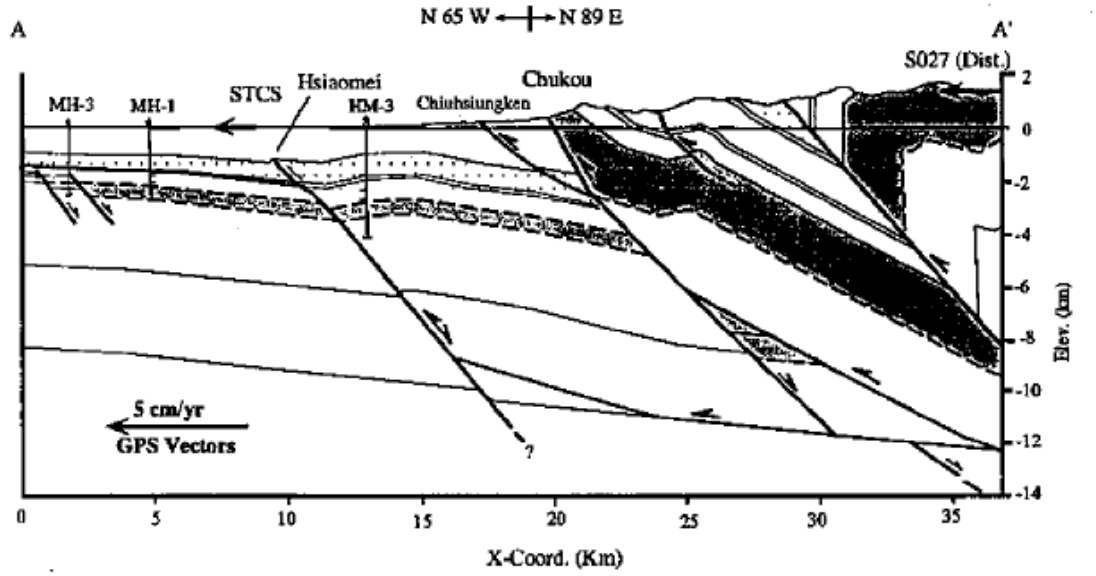


圖 5-1.35：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質構造剖面(Hung et al., 1999)。

表 5-1.1：本節中 16 條斷層之幾何參數。黃色網底表示最終選用的參數。

	斷層名稱	傾角 (degree)	深度 (km)	傾角 (degree)	深度 (km)	傾角 (degree)	深度 (km)
1	山腳斷層	60.0	0.0—6.0	70.0	0.0—9.0	80.0	15.0
		25.0	6.0—15.0	35.0	9.0—15.0		
2	湖口斷層	60.0	7.0	60.0	0.0—7.0	10.0	7.0—11.0
3	新竹斷層	50.0	10.0	50.0	0.0—7.0	35.0	0.0—7.0
				10.0	7.0—10.0	7.5	7.0—10.0
4	新城斷層	40.0	10.0	30.0	10.0	20.0	10.0
5	獅潭斷層	40.0	8.0	50.0	8.0	60.0	8.0
6	三義斷層	20.0	9.0	25.0	9.0	30.0	9.0
7	屯子腳斷層	70.0	13.0	75.0	13.0	80.0	13.0
8	宜蘭北部構造	60.0			9.4		
9	宜蘭南部構造	60.0			11.3		
10	大甲—彰化斷層	北段 22.5	0.0—5.0	25.0	0.0—6.0	35.0	2.0—6.5
		北段 8.0	5.0—8.5	6.5	6.0—8.0	10.0	6.5—11.0
		南段 22.5	0.0—7.0	25.0	0.0—7.5	35.0	2.0—7.0
		南段 8.0	7.0—8.5	6.5	7.5—8.0	10.0	7.0—11.0
11	車籠埔斷層	25.0	0.0—8.5	35.0	0.0—8.0	40.0	0.0—11.0
		8.0	8.5—12.0	6.5	8.0—10.0	10.0	11.0—15.0
12	大茅埔—雙冬斷層	45.0	0.0—5.0	50.0	0.0—5.0	40.0	0.0—9.5
		15.0	5.0—12.0	18.0	5.0—10.0	20.0	9.5—15.0
13	梅山斷層	85.0	10.0	80.0	12.5	75.0	15.0
14	九芎坑斷層	27.5	0.0—4.0	25.0	0.0—7.0	30.0	0.0—8.0
		8.5	4.0—6.0	6.5	7.0—8.0	8.5	8.0—10.0
15	大尖山斷層	30.0	5.0	32.5	6.5	35.0	8.0
16	觸口斷層	40.0	0.0—9.0	45.0	0.0—7.0	35.0	0.0—11.0
		5.0	9.0—10.0	5.0	7.0—8.0	5.0	11.0—12.0

5-2 BLOCKS 斷層模型

5-2-1 斷層模型原理

此斷層模型為 Meade 與 Loveless 所開發的 Block Model（Meade and Hager., 2009），主要的計算原理為將區域視為各斷層作為邊界所劃分而成的塊體，並以地表速度去反推斷層面滑移速度，再以求得之斷層滑移速度推求地表變動速度，使得與真實地表變動速度相互比較驗證模型。相對於基本的錯位模型（Dislocation Model），Block Model 可以較容易的建構三維斷層幾何與較快速的計算，又 Block Motion 只考慮塊體之旋轉，故模擬中無需垂直向資料。

5-2-2 斷層幾何參數設定(斷層模擬使用參數)

延續上期報告，在 BLOCKS 模擬的部份，經專家會議研擬，本次北部地區模擬九條斷層，其中宜蘭地區南北各有一條，故本次九條斷層分別為：山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、三義斷層、屯子腳斷層、獅潭斷層、宜蘭斷層(北)、宜蘭斷層(南)等。各斷層所使用參數如表 5-2.1，所需之鎖定深度、傾角分別如表列，由團隊會議依文獻討論而得；而初始滑移速率則同前期計畫參考 Shyu et al.（2016），並依正/逆斷層或走向滑移斷層等不同型態，分別給予傾向滑移初始速率與走向滑移初始速率(圖 5-2.1)。

此外由於北部斷層-三義斷層、屯子腳斷層已接近中部並與前期中部斷層相接，故本次模擬之塊體同中央大學張午龍老師團隊所繪，總共為十六區塊，分別為 CHMO、ESHC、HSIN、HSSH、ILAN、NHSS、NORT、TAOC、WNOR、YMSD、RYUK、MIAO、SYSG、WTFH、WCPN、TAST(圖 5-2.1)，前十一塊為北部區域新增塊體，後五塊為中部區域模型使用之塊體，另 RYUK 為連接宜蘭斷層(南)之外展塊體，目的為使待模擬斷層不為塊體最邊緣，所有塊體外圍同樣設一點(坐標：112.924，31.867)，使外圍標訂為相對不動之塊體。同時有與塊體再次相接之中部斷層：大甲-彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷層、梅山斷層、九芎坑斷層、大尖山(北段) 斷層、觸口斷層亦加入前期模擬最佳成果所對應之斷層傾角與深度，而滑移速率同本次模擬數值(如表 5-2.1)。

可視為長期地表變動速率速度場則使用前期解算之全台速度場中，為十六

個塊體所涵蓋之 587 站 GPS 測站(圖 5-2.1)，另扣除範圍內 G040、LSBA 兩站明顯具誤差值之速度。

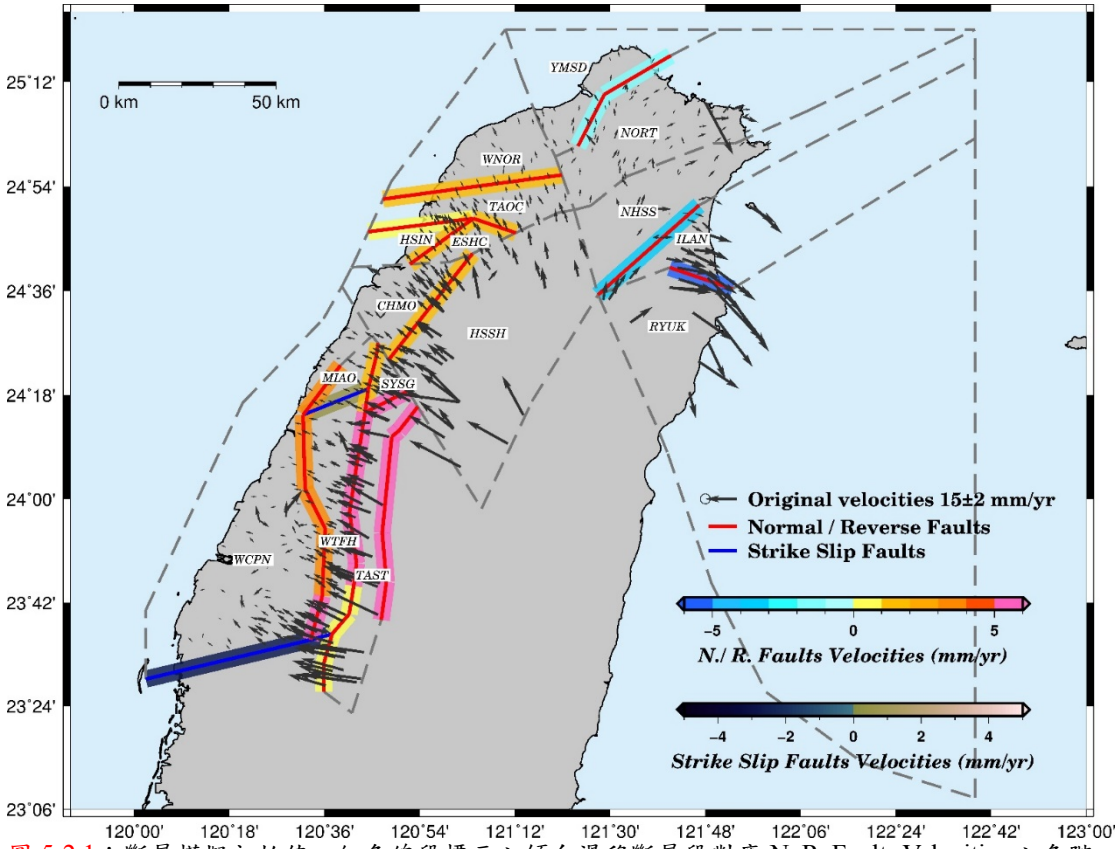


圖 5-2.1：斷層模擬初始值。紅色線段標示之傾向滑移斷層段對應 N. R. Faults Velocities 之色階。藍色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階。

表 5-2.1：斷層模擬初始值；斷層幾何與地質滑移速率(Shyu et al., 2016)，地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

參數項目 / 斷層名稱	輸入初始值			
	鎖定深度 (km)	斷層傾角 (deg.)	地質走滑速率 (s.s. mm/yr)	地質傾滑速率 (d.s. mm/yr)
山腳斷層	9	70	x	-1.85±0.76
湖口斷層	7	60	x	1.16±0.84
新竹斷層	10	50	x	0.7±0.46
新城斷層	10	40	x	1.8±1.2
三義斷層	9	25	x	1.86±1.23
屯子腳斷層	13	75	-1.0±0.68	x
獅潭斷層	8	50	x	1.86±1.24
宜蘭斷層(北)	9.4	60	x	-3.29±2.25
宜蘭斷層(南)	11.3	60	x	-5.48±0.64
大甲-彰化斷層	8	25	x	3.40±2.26
車籠埔斷層	10	35	x	6.94±0.01
大茅埔-雙冬斷層	10	50	x	2.00±1.34
梅山斷層	12.5	80	-2.51±0.01	x
九芎坑斷層	8	25	x	7.20±4.80
大尖山斷層	6.5	32.5	x	x
觸口斷層	8	45	x	x

5-2-3 斷層模擬結果

本次模擬成果中，北部共有九條主要斷層段，中部合算之斷層有七條，各條斷層平均成果如表 5-2.2。走向滑移速率中，正值為左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

北部的模擬成果中，從斷層傾向滑移速率看起，具正斷層分量的宜蘭斷層（南），具有全部北部斷層段最大的正斷層滑移分量-5.5 mm/yr，而最少的正斷層分量為屯子腳斷層，有-0.8 mm/yr 的滑移分量；逆衝分量方面，最小的為新竹斷層的 0.7mm/yr，最大的為三義斷層中段 2.3mm/yr(圖 5-2.2)。此外，本次一起模擬計算的中部斷層，於逆衝型態的傾向滑移分量最大值為車籠埔斷層的 6.9mm/yr，最小值為梅山斷層之西段，為 0.5mm/yr；正斷層運動型態最大值為大茅埔-雙冬斷層南段的 3.0 mm/yr，最小值同為大茅埔-雙冬斷層中段的-0.1mm/yr（圖 5-2.2）。

走向滑移分量中，北部模擬斷層有最大的左移分量 10.9 mm/yr 在宜蘭斷層（南），最小的左移分量 0.1 mm/yr 在三義斷層北段，最大的右移分量-4.0 mm/yr 在湖口斷層，最小的右移分量-0.1 mm/yr 在新城斷層南段(圖 5-2.3)。而中部斷層模擬成果，大甲-彰化斷層中段與觸口斷層有最大的左移分量 3.1 mm/yr，大茅埔-雙冬斷層北段有最小的左移分量 0.3 mm/yr，大尖山斷層中段有最大的右移分量-3.7 mm/yr，車籠埔斷層最南段有最小的右移分量-0.7 mm/yr(圖 5-2.3)。

總滑移速率由傾向滑移分量與走向滑移分量推算而得(圖 5-2.4)，北部九條斷層滑移速率值介於 0.8 mm/yr 至 12.2 mm/yr 之間，新竹斷層的總滑移速率最低，宜蘭斷層(南) 的總滑移速率最高，累積滑移速率主要由宜蘭斷層(南)至湖口斷層方向，往北與往南減少。中部七條斷層滑移速率介於 1.9 mm/yr 至 7.5 mm/yr 之間，故滑移速率最低的斷層分段為大茅埔-雙冬斷層中段，滑移速率最高者為梅山斷層東段，並從圖 5-2.4 可見，變動量主要累積於車籠埔斷層附近。

表 5-2.2：模擬成果之各斷層滑移速率。地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

參數 / 斷層名稱	BLOCKS 模擬成果		
	平均走滑速率 (s.s. mm/yr)	平均傾滑速率 (d.s. mm/yr)	總滑移速率 (mm/yr)
山腳斷層	1.4	-1.9	2.3
湖口斷層	-4.0	1.2	4.2
新竹斷層	-0.3	0.7	0.8
新城斷層	-1.1	1.8	2.2
三義斷層	-0.7	1.9	2.2
屯子腳斷層	-1.0	-0.7	1.2
獅潭斷層	2.5	1.9	3.1
宜蘭斷層(北)	-0.7	-3.3	3.4
宜蘭斷層(南)	10.9	-5.5	12.2
大甲-彰化斷層	2.4	3.0	4.0
車籠埔斷層	-0.6	6.9	7.0
大茅埔-雙冬斷層	1.5	0.7	3.2
梅山斷層	-2.5	3.8	5.0
九芎坑斷層	2.0	1.5	2.5
大尖山斷層	-2.0	5.1	5.7
觸口斷層	3.1	-1.9	3.6

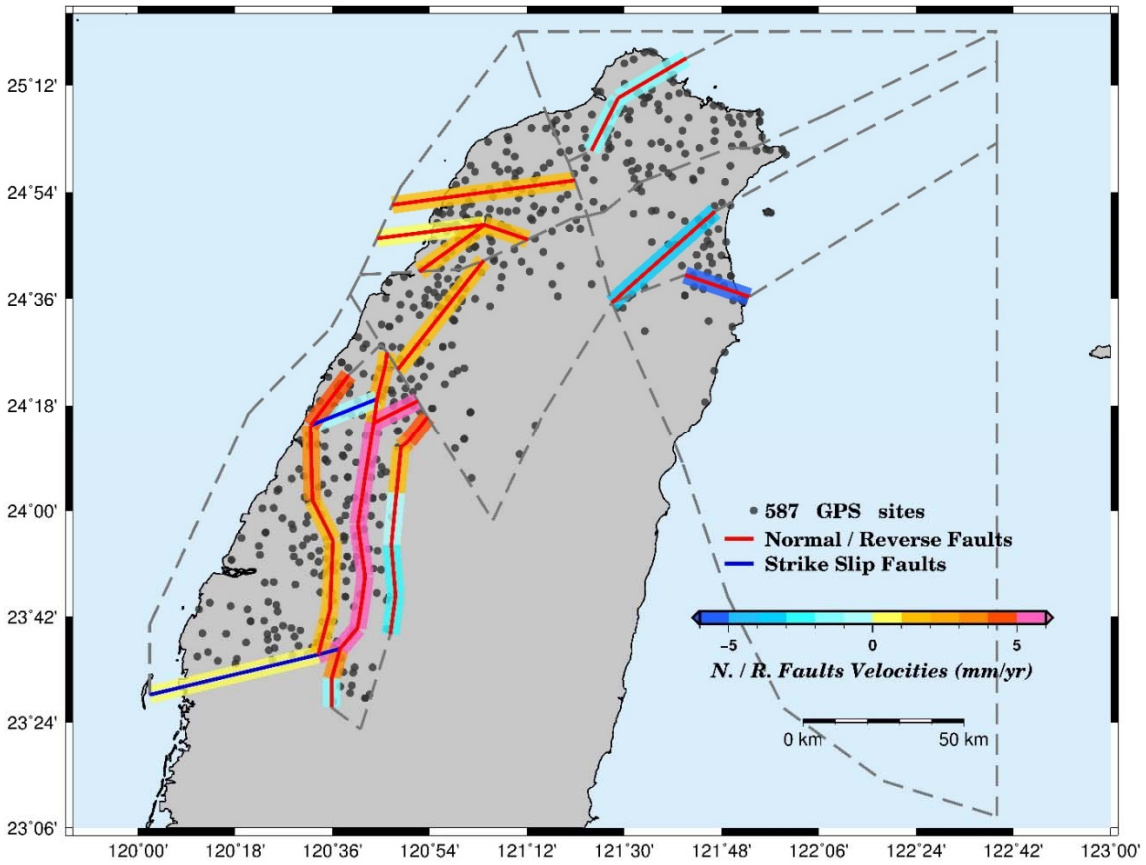


圖 5-2.2：模擬成果之傾向滑移速率。

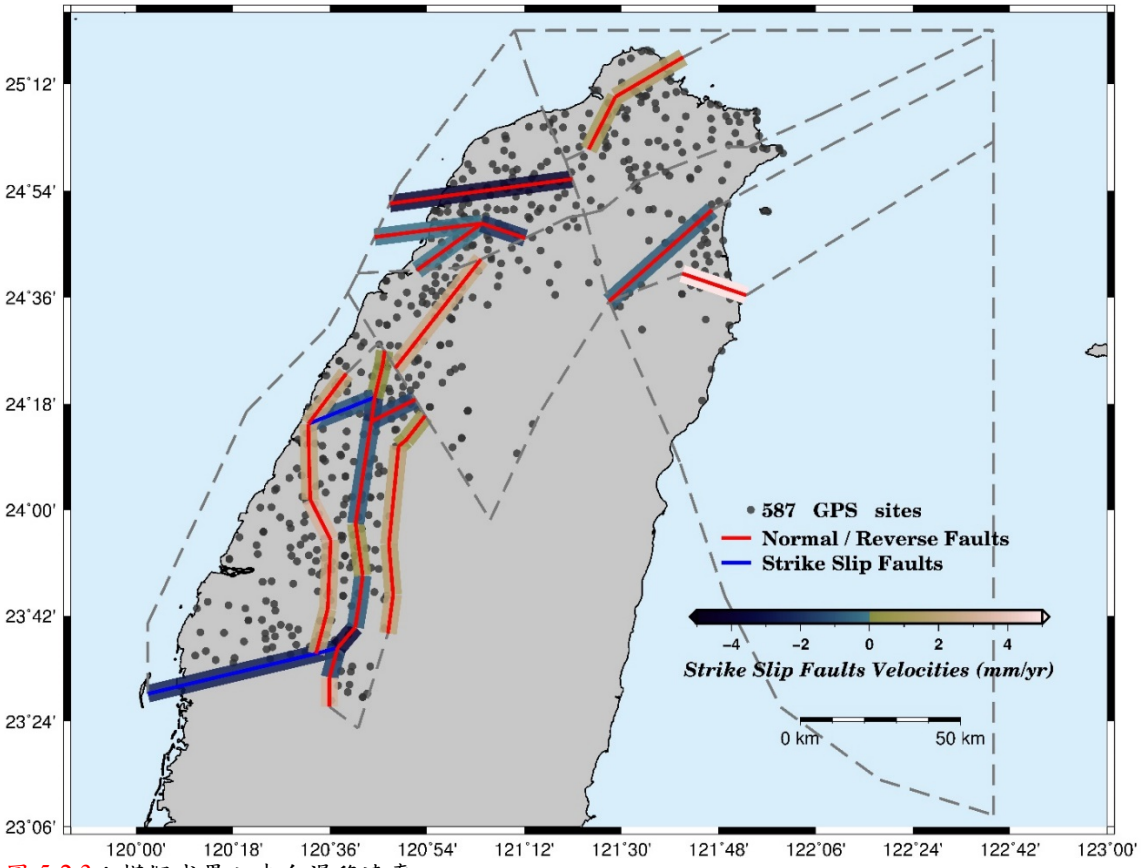


圖 5-2.3：模擬成果之走向滑移速率。

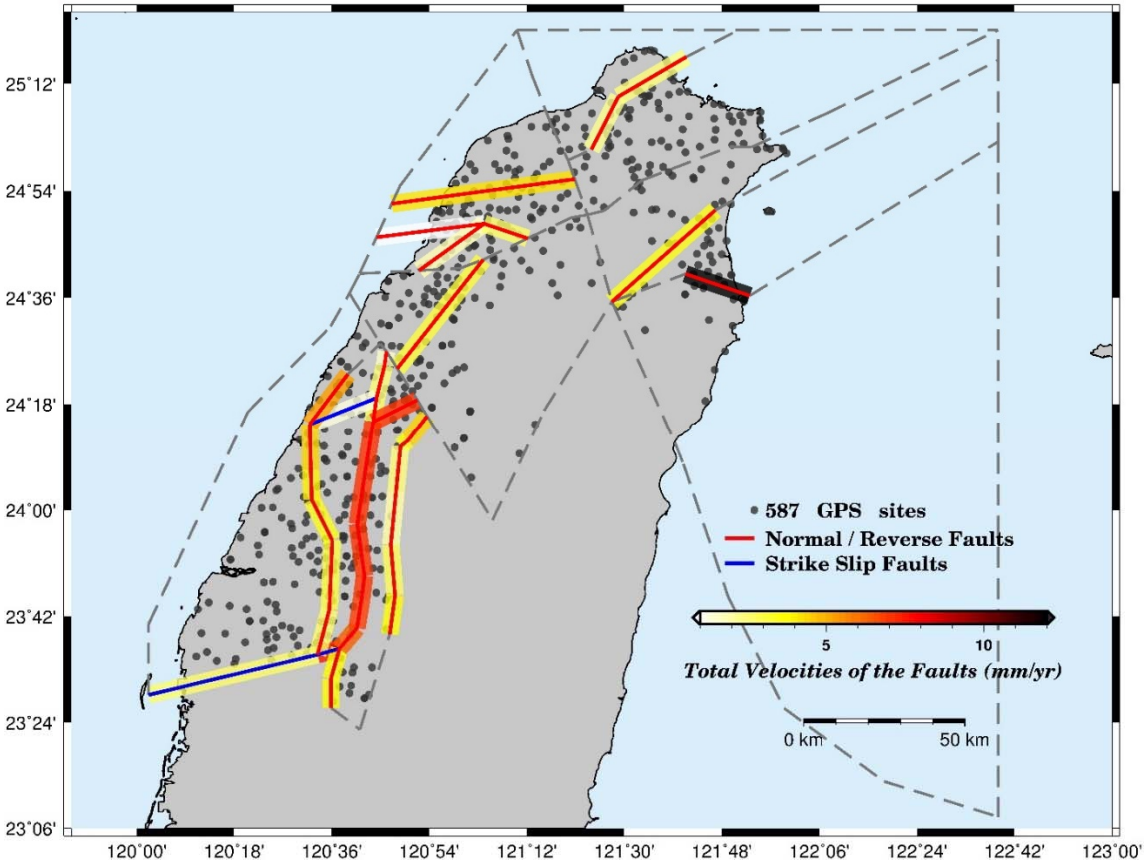


圖 5-2.4：模擬成果之總滑移速率。

5-3 DEFNODE 斷層模型

5-3-1 斷層模型原理

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速率及滑移虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每條斷層都位於兩個轉動塊體（block）的邊界上。Ching et al. （2011）曾將臺灣地區幾條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 5-3.1），建構了本研究區域的塊體邊界模型（圖 5-3.1）。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，除了加入 TAST、CYMT、HSS1、SYSG 等塊體外，並修改 MIAO、WCPN、CHYI、SHSS、EKSH、ILAN、RYUK 等塊體幾何，分別對應大甲斷層、彰化斷層、大尖山斷層、大茅埔—雙冬斷層、觸口斷層南段及宜蘭南部構造，以符合其塊體邊界（圖 5-3.1），因大甲斷層及彰化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，因此在本研究中將大甲斷層及彰化斷層視為同一條斷層構造。由於地調所並未公布宜蘭地區有活斷層，為了探討宜蘭地區的構造活動，本研究加入了 Shyu et al. (2016) 中的宜蘭北部構造及宜蘭南部構造之參數。此外，由嘉義一帶向南延伸，加入木屐寮—六甲斷層作為塊體邊界，以降低因模型邊界效應所造成的誤差，避免地殼變形量過度集中在區域南端的觸口斷層。

本研究使用 EURA 做為參考塊體（圖 5-3.1a），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 5-3.1 上所列各斷層段的長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 5-3.1(a)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間震期滑移速率及滑移虧損率，必須先得到斷層的地下幾何形貌。本研究經由整理台灣中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 5-3.1）。注意除了如圖 5-3.1(a)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，較符合台灣目前大地構造，並加入由地質研究方法推估的斷層滑移速率(表 5-3.3, Shyu et al., 2016)作為反演過程的約束值，以得到更佳的擬合結果。

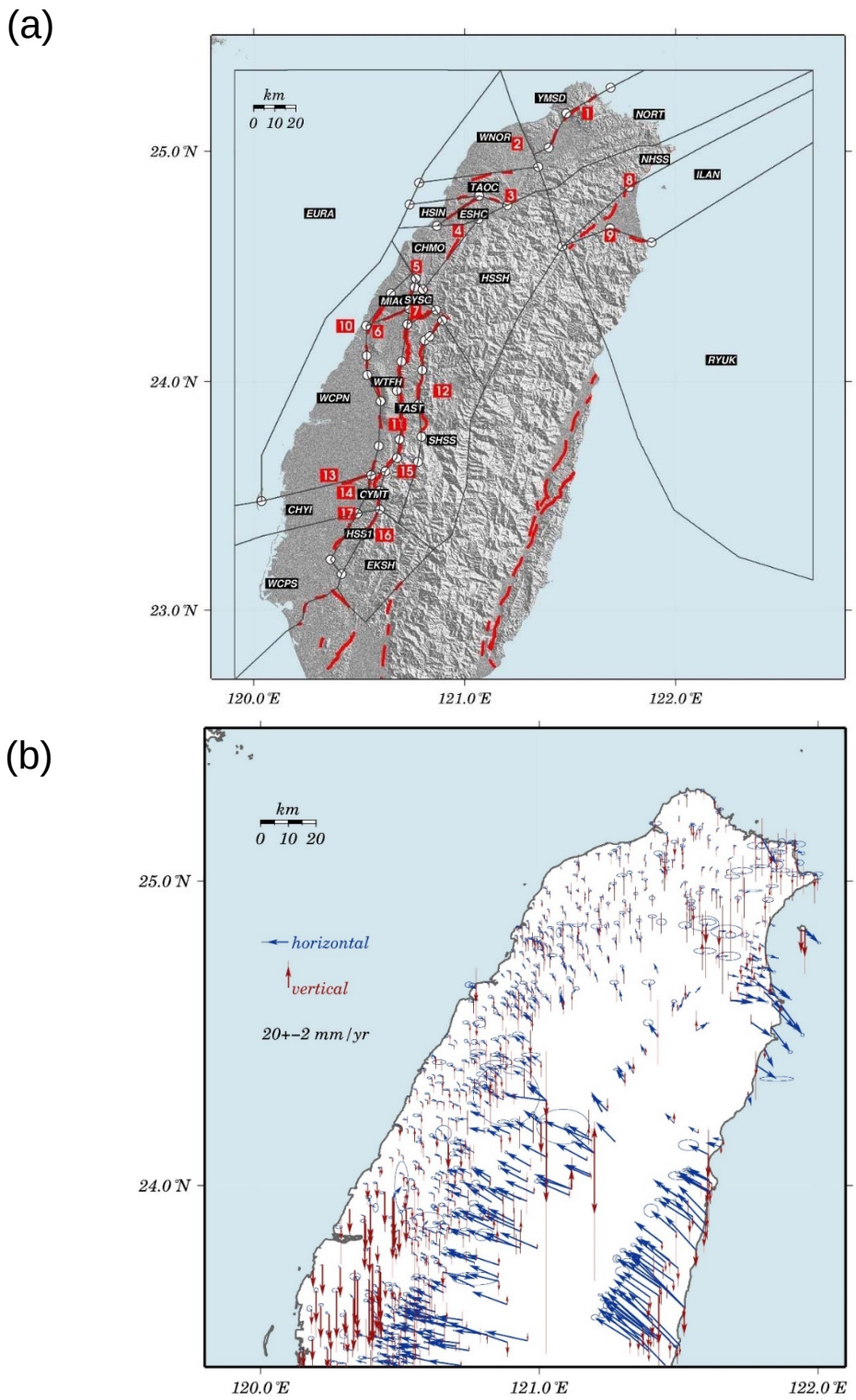


圖 5-3.1：(a)臺灣北部及中部三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公布之活斷層，紅色虛線表是推測或隱伏斷層。紅色數字代表之斷層分別為：1.山腳斷層；2.湖口斷層；3.新竹斷層；4.新城斷層；5.獅潭斷層；6.三義斷層；7.屯子腳斷層；8.宜蘭北部構造；9.宜蘭南部構造；10.大甲—彰化斷層；11.車籠埔斷層；12.大茅埔—雙冬斷層；13.梅山斷層；14.九芎坑斷層；15.大尖山斷層；16.觸口斷層；17.木屐寮—六甲斷層。(b)GPS 資料所觀測到的平均水平速度場(藍色箭號)(相對於澎湖白沙站)及平均垂直速度場(紅色箭號)。

表 5-3.1：圖 5-3.1 中所示 17 條斷層之幾何參數。

	斷層名稱	傾角(degree)		斷層底部深度(km)
1	山腳	70.0		0.0—9.0
		35.0		9.0—15.0
2	湖口	60.0		0.0—7.0
3	新竹	50.0		0.0—10.0
4	新城	40.0		0.0—10.0
5	獅潭	50.0		0.0—8.0
6	三義	25.0		0.0—9.0
7	屯子腳	75.0		0.0—13.0
8	宜蘭北部構造	60.0		0.0—9.4
9	宜蘭南部構造	60.0		0.0—11.3
10	大甲–彰化	北段	25.0	0.0—6.0
			6.5	6.0—8.0
		南段	25.0	0.0—7.5
			6.5	7.5—8.0
11	車籠埔	35.0		0.0—8.0
		6.5		8.0—10.0
12	大茅埔–雙冬	50.0		0.0—5.0
		18.0		5.0—10.0
13	梅山	80.0		0.0—12.5
14	九芎坑	25.0		0.0—7.0
		6.5		7.0—8.0
15	大尖山	32.5		0.0—6.5
16	觸口	45.0		0.0—7.0
		5.0		7.0—8.0
17	木屐寮–六甲	40.0		0.0—6.0

5-3-2 斷層模擬結果

本研究所使用的地表運動資料為臺灣 GPS 觀測網迄至 2018 所觀測到的平均水平速度場及平均垂直速度場，包含了 812 個測站資料（圖 5-3.1b）。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軸及旋轉角速度（圖 5-3.2a、b 及表 5-3.2），圖 5-3.2 中顯示各塊體皆位於台灣周圍，可看出 ILAN 塊體之旋轉速率較大且呈順時針旋轉（圖 5-3.2b），表示其明顯受到該區地表運動的影響(圖 5-3.1b)。圖 5-3.3a、b、c、d 則分別顯示本區域的斷層長期滑移速率、斷層鎖定係數、滑移虧損率及間震期滑移速率等值。圖 5-3.4 則顯示本研究區域的三種水平速度場，分別是 GPS 觀測值(a)、塊體模型之預測值(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，而預估較差的水平部分則落在大茅埔—雙冬斷層及大尖山斷層東側的塊體，推測此現象可能是因為該區測站分布不平均，東邊及南邊山區缺少測站，使本區塊體模型的預測結果不如預期；另外車籠埔斷層之間大甲—彰化斷層以西的塊體也有數筆測站速度擬合不佳，可能是這些測站速度與周圍速度場趨勢差異較大所致；宜蘭南部構造以南的測站主要集中於西側陸地，東側塊體區域皆無資料可擬合，因此殘差值也較大。整體來看，垂直運動的擬合結果則明顯不如水平運動，此現象可能因台灣的地表垂直運動包含了非斷層活動的雜訊(如：地層下陷、地下水位變化…等)，未來將發展其他分析方法來改善此問題。

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 來推算北部及中部塊體的內部應變率(internal strain rate)。結果如圖 5-3.5 所示，北部及中部的塊體主應變軸以東西向壓縮應變、南北向伸張應變為主，而到了宜蘭及其外海一帶則轉為東北—西南向伸張應變為主，平均應變率約為 250 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。

圖 5-3.3 顯示本研究中設置的邊界斷層上各節點之滑移速率平均值，並於表 5-3.3 中展示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。斷層的長期平均滑移速率(geodetic long-term slip rate)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。

在此針對本階段計畫之 9 條台灣北部及 8 條中部的主要斷層或活動構造進行分析討論，結果陳述如下。

圖 5-3.4 顯示北部多數斷層兩側速度變化不顯著，其中獅潭斷層及三義斷層接近活動性較大的中部麓山帶，跨斷層之速度梯度比新竹以北的斷層來得大，平均長期滑移速率分別為 5.4 mm/yr 及 9.2 mm/yr。而宜蘭地區速度場於北部地區偏大，宜蘭的兩條斷層構造亦因斷層兩側水平速度大小及方向皆有明顯變化，其長期滑移速率達 10~11 mm/yr，以宜蘭北部構造之滑移虧損較南部構造高(約 7.9 mm/yr)，南部構造僅 2.5 mm/yr。

以中部斷層來看，大甲—彰化斷層因斷層兩側水平速度變化不大，但垂直速度變化明顯，因此斷層之長期滑移速率為 8.7 mm/yr，而滑移虧損率為長期滑移速率乘以斷層鎖定係數，而因大甲—彰化斷層之鎖定係數較低，故滑移虧損率僅 2.7 mm/yr。從長期滑移速率來看，因水平及垂直速度場在西部麓山帶及西部平原間有明顯變化（圖 5-3.4a)，這樣的速度變化使得在三義斷層、車籠埔斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層這些南北向斷層上有較大的長期滑移速率，整體約介於 9~13 mm/yr，以九芎坑斷層及大尖山斷層較高，平均約 12.5 mm/yr，而因此二條斷層的斷層鎖定係數偏低，平均滑移虧損率僅 3~5 mm/yr。由於目前在臺灣北部及中部並沒有觀測到斷層潛移情況發生，因此本研究假設所有斷層近地表處皆為鎖定狀態，故斷層面上間震期滑移速率在地表附近幾乎都接近 0 （圖 5-3.3d)。整體來看，北台灣的地表應變能較弱，因為斷層平均長期滑移速率多低於 5 mm/yr，以觀測速度值較大的兩條宜蘭斷層構造及三義斷層之滑移速率較高，而中部麓山帶地區一系列南北向的斷層及宜蘭北部構造具有較大的滑移虧損。

塊體模型的滑移虧損率主要由 GPS 所測得之地表水平運動所推求，而本研究中加入了垂直速度場資料，可能因此影響塊體模型估算斷層傾角方向的滑移

速率，而垂直速度場可能紀錄到非構造活動的垂直向地表運動，使得垂直向速度場擬合不如水平向。未來工作將持續探討非構造活動造成的垂直向速度場以及其他測地資料(如：InSAR、精密水準資料)對塊體模型模擬結果的影響。

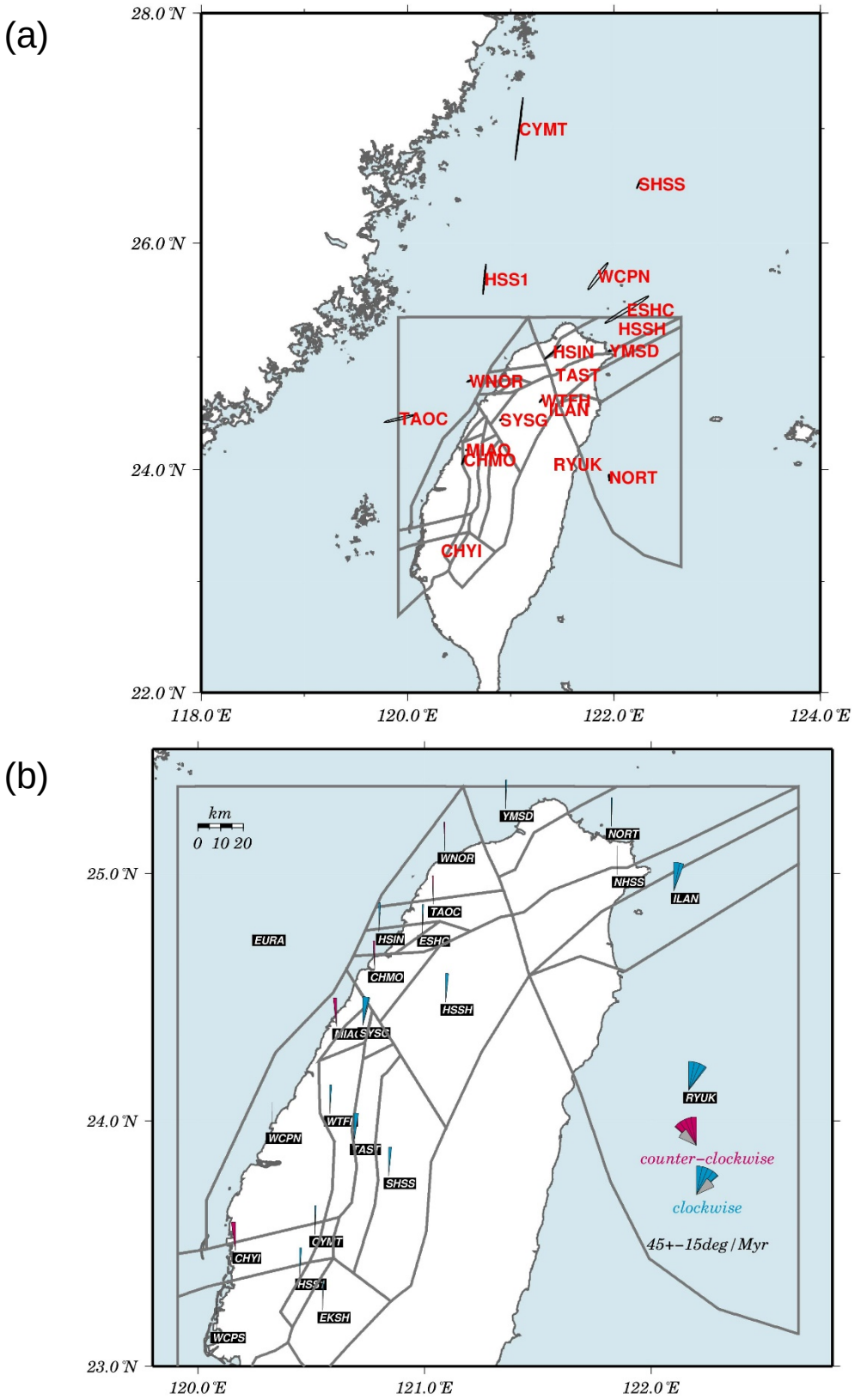
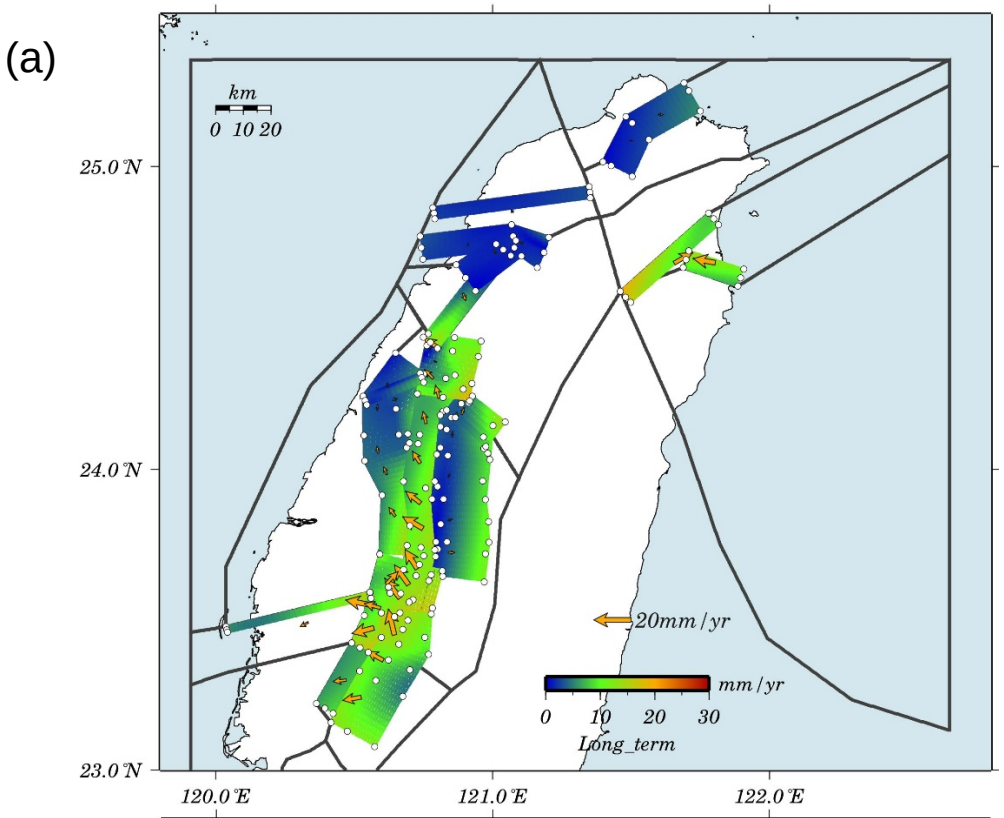
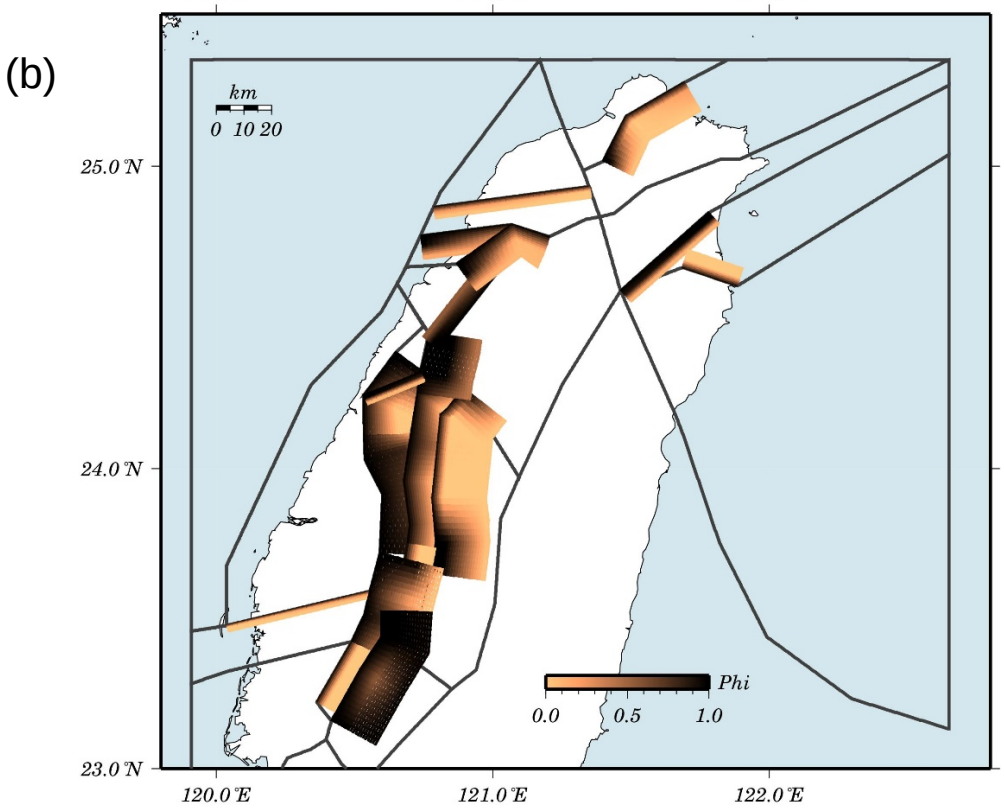


圖 5-3.2：(a)最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 5-2.1）。(b) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15°/My 的角速度。


(a)
km
0 10 20
25.0°N
24.0°N
23.0°N
120.0°E
121.0°E
122.0°E
20mm/yr
mm/yr
0 10 20 30
Long_term


(b)
km
0 10 20
25.0°N
24.0°N
23.0°N
120.0°E
121.0°E
122.0°E
Phi
0.0 0.5 1.0

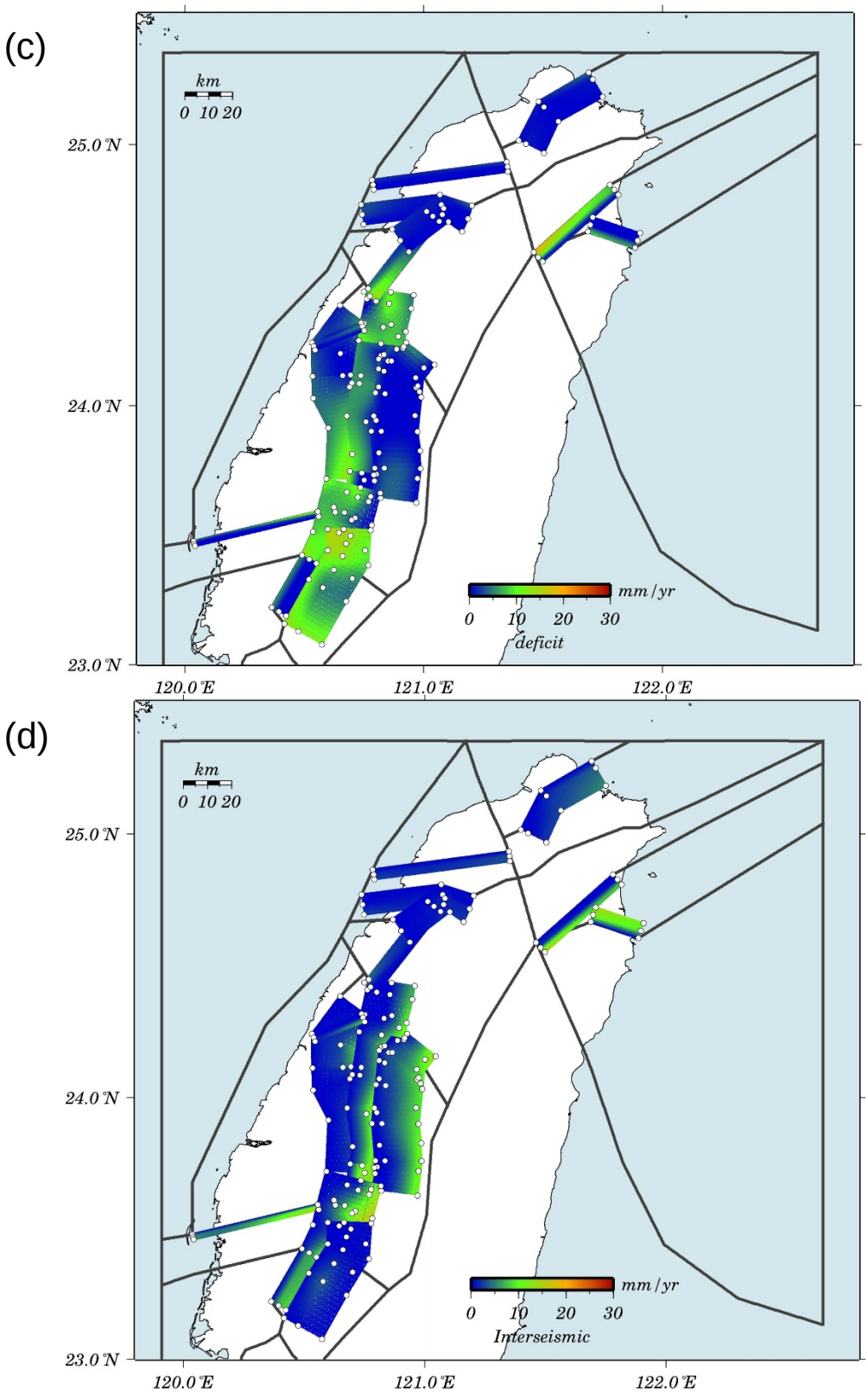


圖 5-3.3：(a) 推求的斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層的地表位置，橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向，暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的間震期滑移速率。

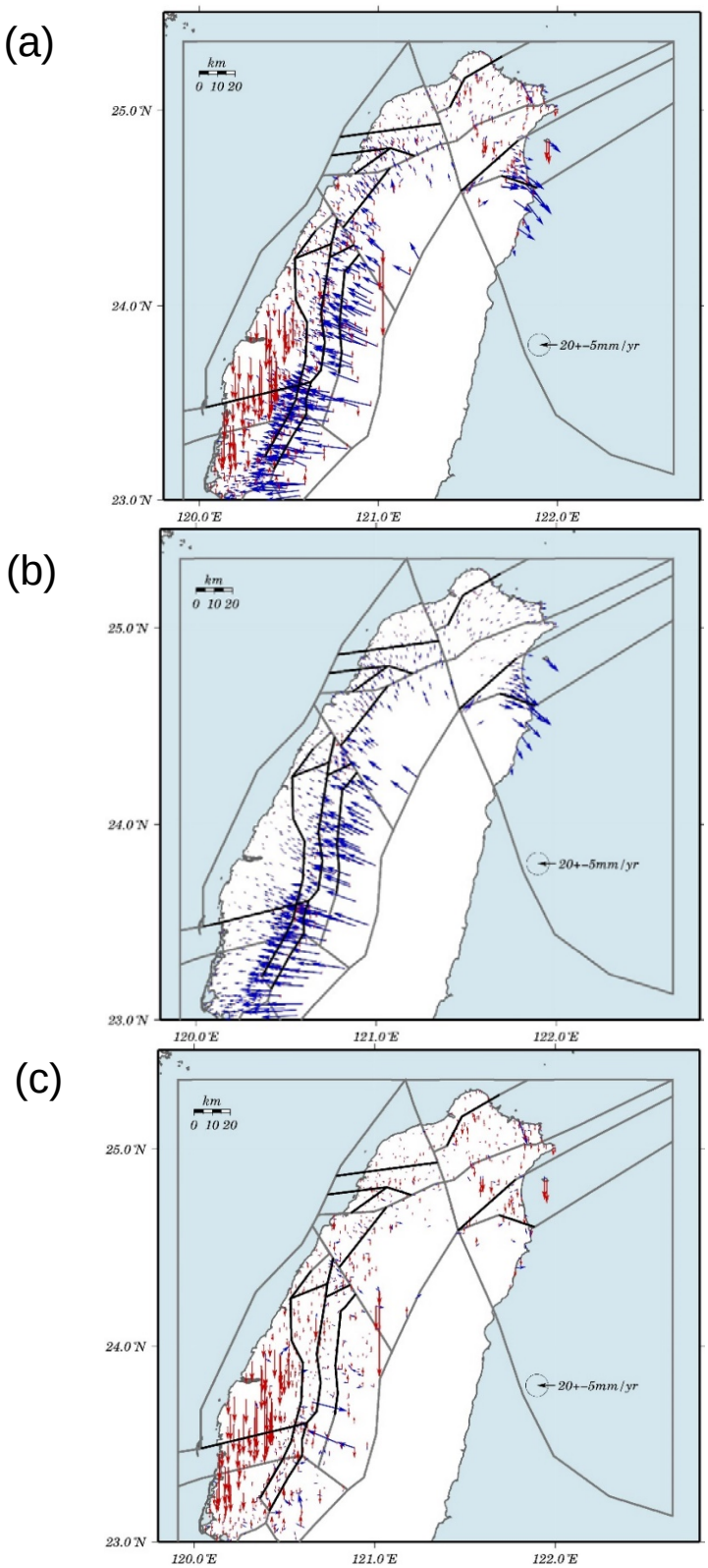


圖 5-3.4：(a) GPS 觀測速度場，藍色及紅色箭號各為水平及垂直速度場，黑線代表各斷層的地表位置。(b) 最佳塊體模型所預估的地表速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。

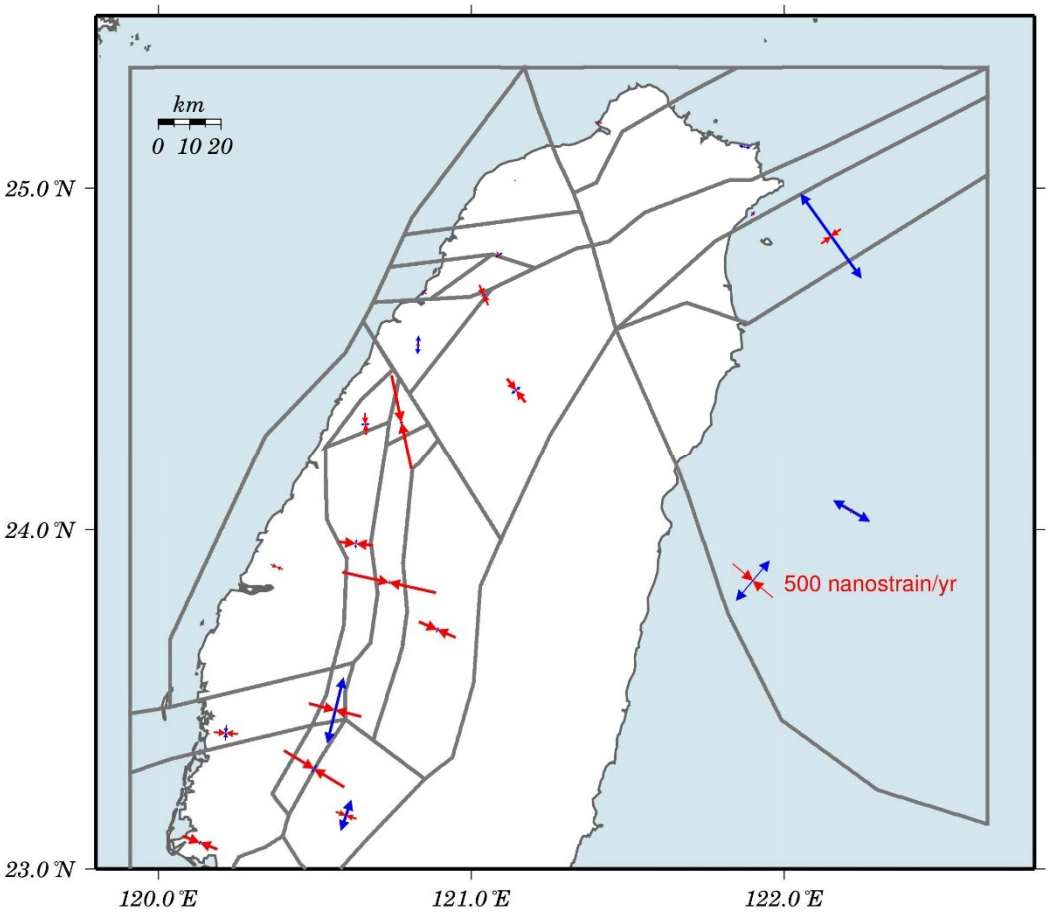


圖 5-3.5：各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

表 5-3.2：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（deg/my）	誤差橢圓長軸長（deg）	誤差橢圓短軸長（deg）	誤差橢圓長軸方位角
CHYI	120.32	23.28	9.34	0.09	0.00	0.00	171.71
WCPS	123.19	13.45	0.29	0.03	1.33	0.02	163.83
EKSH	121.43	32.02	-2.16	0.13	0.78	0.01	3.80
CYMT	121.08	27.00	-3.21	0.35	0.54	0.01	7.12
HSS1	120.75	25.68	-4.40	0.34	0.26	0.01	5.42
WCPN	121.84	25.71	-0.21	0.02	0.29	0.03	36.08
WTFH	121.29	24.61	-4.36	0.14	0.04	0.01	40.16
MIAO	120.57	24.18	6.79	0.31	0.01	0.01	54.17
SHSS	122.24	26.52	-5.69	0.10	0.08	0.01	22.29
CHMO	120.54	24.09	3.39	0.36	0.09	0.01	23.80
HSSH	122.04	25.25	-6.39	0.04	0.01	0.00	42.87
TAST	121.43	24.84	-9.56	0.22	0.04	0.00	31.72
SYSG	120.90	24.44	-15.29	1.54	0.02	0.01	40.72
TAOC	119.92	24.45	1.69	0.29	0.27	0.02	76.09
WNOR	120.60	24.79	2.19	0.13	0.04	0.01	67.20
HSIN	121.41	25.05	-3.32	0.67	0.19	0.01	48.98
ESHC	122.12	25.42	-2.53	0.64	0.45	0.03	58.04
YMSD	121.96	25.05	-2.57	0.08	0.02	0.01	98.60
NORT	121.95	23.93	-2.14	0.08	0.06	0.01	175.94
NHSS	123.79	15.85	-0.17	0.11	8.70	0.07	169.29
ILAN	121.37	24.53	-21.30	0.22	0.01	0.00	51.01
RYUK	121.41	24.05	-39.82	0.11	0.00	0.00	42.53

表 5-3.3：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	1.1	2.6	2.5	1.9	0.8	1.4
湖口	0.3	2.0	1.7	2.4	0.6	1.6
新竹	0.2	1.2	1.6	2.1	1.0	1.8
新城	0.6	3.0	0.6	2.4	0.3	2.0
獅潭	0.6	3.1	5.4	8.0	4.9	7.4
三義	0.6	3.1	9.2	7.0	5.8	4.8
屯子腳	0.3	1.7	2.5	4.7	1.1	3.5
宜蘭北部構造	1.0	5.5	11.5	9.0	7.9	9.0
宜蘭南部構造	4.9	6.1	10.0	3.8	2.5	4.2
大甲–彰化	1.1	5.7	8.7	6.1	2.7	4.2
車籠埔	0.0	6.9	11.1	5.3	2.6	4.2
大茅埔–雙冬	0.7	3.3	4.1	5.7	0.7	2.2
梅山	0.0	2.5	10.3	10.3	3.9	7.6
九芎坑	2.4	12.0	12.5	10.3	3.5	7.5
大尖山			12.6	4.2	5.2	6.3
觸口			7.5	10.3	7.2	10.2
木屐寮–六甲	4.4	7.1	6.5	3.0	1.9	3.3

5-4 基線應變反演模型(Baseline Inversion Model)

5-4-1 斷層模型原理

本計畫使用 Johnson（2013）基於 Okada（1985，1992）彈性半無限空間斷層錯位模型所開發的基線應變模型。基本原理和塊體模型近乎一致，在塊體模型中假設震間速度場是由於塊體旋轉和斷層鎖定造成之地表速度梯度所組成。為了簡化模型之建置，本模型先透過應變速率的推求（Shen et al.，1996），移除非斷層鎖定造成之地表速度梯度。再計算測站間之基線應變值，最後逆推地表基線應變值估算滑移虧損率分布（Johnson，2013）。

斷層錯位模型是基線應變模型的基礎是採用根據彈性錯動理論（Steketee，1958）所建立之斷層錯位模型（Okada，1985，1992），其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量。假設地球為表面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間，介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體（Poisson solid），即彈性模量(elastic modulus)（λ）等於剪切模量(shear modulus)（μ）之彈性體。沿著斷層（fault patch/fault element）的斷層滑移量Δu_j（ξ_1，ξ_2，ξ_3）會使均質均向的彈性體表面產生位移場Δu_i（x_1，x_2，x_3），其關係如式 5-4.1 所列。

$$u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]\nu_k d\sum \qquad (式\ 5\text{-}4.1$$

其中，F 為施力點之作用力；δ_{jk}為克羅內克函數（Kronecker delta），當 j＝k 時，δjk＝1，否則為 0；ν_k為正交於地表單位（surface element）$d\sum$之餘弦函數方向。Δui 和Δuj 的單位是一致的，如果是模擬地表速度場，則常見的單位為 mm/yr；如果是模擬同震位移場，則常見的單位為 mm 或是 m。根據式 5-4.1，亦即每一個斷層面單位（patch/element）上的斷層滑移量，會在任一地表單位產生對應之地表位移量；而任一地表單位之位移量，會等於所有斷層單位上滑移量作用在該地表單位位移量的總和。

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。其中，斷層位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層面下緣的深度（圖 5-4.1）。斷層滑移量（fault slip）包含三個方向的分量[S1, S2, S3]，分別以左移(left-lateral strike slip)、逆衝(reverse

dip slip）及伸張（tensile slip）為正方向。在進行對雙偶合震源之斷層活動分析時，一般只會考慮走向滑移量（S1，strike slip）與傾向滑移量（S2，dip slip）；在進行火山之岩漿沿岩脈運動分析時，才會採用伸張滑移量（S3）。斷層滑移角（rake）指示斷層上盤相對於下盤之運動方向，其和斷層滑移量之關係為 tan(rake) = S2 / S1。地表位移量（displacement）同樣也包含三個方向的分量[U1, U2, U3]，分別以東（East）、北（North）與上（Up）為正方向。水平位移量（horizontal displacement）則為 sqrt($U_1^2 + U_2^2$)。

在基線應變正演模型中，假設是「地表的應變率是來自於斷層鎖定所造成之彈性變形」，因此基於彈性錯動理論可以估算斷層滑移虧損速率所造成各測站之速度場，進一步可以計算個測站間之基線應變率（Johnson，2013）。測站間基線之建立採用建立德勞內三角形（Delaunay triangle）的方式，對各測站之坐標計算後而得。各基線之伸長率（elongation rate）定義，為將基線兩端測站速度差異向量，投影至基線方向之向量，亦即每年該基線長度之變化量，最後再除以原基線長（式 5-4.2）（Johnson，2013）。

$$e = \Delta L / L_0 \qquad \text{（式 5-4.2）}$$

其中 e 為伸長率；ΔL 為每年基線長度之變化量，亦即基線兩端測站速度差異向量在基線上之投影量；L_0 為基線原始長度。

就基線應變反演模型，本計畫給定斷層幾何參數，地表基線伸長率與斷層滑移虧損率間之格林函數 G 由 Okada（1985，1992）所提供之方程式求得，斷層滑移虧損速率矩陣為 s，地表基線伸長率矩陣為 d，則地表速度及斷層滑移虧損率間之關係式以 Gs = d 來表示。本研究以地表速度場誤差之倒數為權重，利用最小二乘法計算式 3 之最小值來求得斷層滑移虧損率之最佳解。

$$\boldsymbol{F(s)} = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (\boldsymbol{Gs} - \boldsymbol{d}) \right\|^2 \qquad \text{（式 5-4.3）}$$

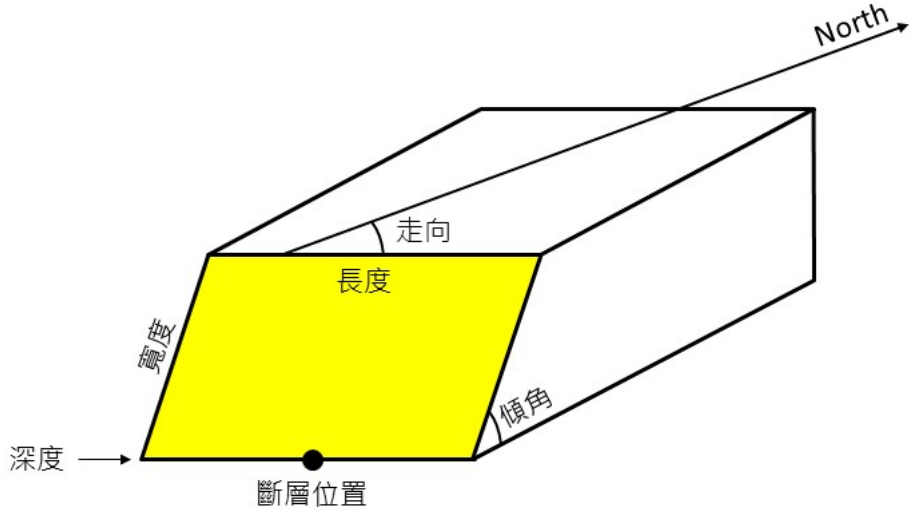


圖 5-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。黃色面為斷層面。斷層幾何參數包含：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。

5-4-2 斷層模擬結果

本研究主要為臺灣北部地區，共有九條主要斷層，與中部地區七條斷層合算，使用臺灣北部及中部地區 2002-2018 年精密水準資料與 GPS 連續站、移動站之水平速度場成果（圖 5-4.2），進行臺灣北部地區活動斷層及其潛在活動構造斷層模擬，推求此地區主要活動斷層斷層滑移虧損速率分布。由於水平速度場所蘊含資訊含括了應變率及旋轉率，在本研究中僅採用因主應變率造成之水平速度分量（圖 5-4.3），利用基線應變模型反演此水平速度分量，計算臺灣北部地區各斷層滑移虧損率平均值（表 5-4.2）。圖 5-4.4 為模型參數所進行平滑參數（smoothing parameter）之測試結果，參數從-1.5 到 0 逐漸減小，最佳值為-1 所得到的不符值（misfit）結果作為最佳模型。本研究藉由基線應變反演模型之建立，避開傳統塊體模型難以估算塊體運動量的困難，直接求取可以用來評估地震潛勢之斷層滑移虧損速率。

模型結果顯示不符值為 310.8 mm/yr（圖 5-4.5）。北部多數斷層兩側速度變化不顯著（圖 5-4.2），此區域的斷層滑移虧損率主要集中在山腳斷層、獅潭斷層、宜蘭北部構造及宜蘭南部構造 （圖 5-4.6、圖 5-4.7）。山腳斷層之平均滑移虧損率為 3.4mm/yr，主要集中於斷層 10 公里處，獅潭斷層之平均滑移虧損率為

9.8mm/yr，主要集中於斷層 8 公里處。而宜蘭地區速度場於北部地區偏大，宜蘭的兩條斷層構造亦因斷層兩側水平速度大小及方向皆有明顯變化，宜蘭北部構造之平均滑移虧損率為 9.1 mm/yr，主要集中於北段約 6 公里處。宜蘭南部構造平均滑移虧損率為 6.7 mm/yr，主要集中於北段約 10 公里處。

中部斷層因水平及垂直速度場在西部麓山帶及西部平原間有明顯變化（圖 5-4.2），這樣的速度變化使得在車籠埔斷層、九芎坑斷層、觸口斷層有較大的滑移虧損率累積，九芎坑斷層及觸口斷層較高，九芎坑斷層平均滑移虧損率為 4.5 mm/yr，主要集中於斷層 8 公里處。觸口斷層平均滑移虧損率為 30.4 mm/yr，主要集中於斷層 8 公里處。

表 5-4.1：模型之斷層滑移速率平均值、標準差（mm/yr）

	斷層名稱		斷層滑移速率平均值	標準差
北部	山腳斷層		3.4	2.1
	湖口斷層		1.9	0.9
	新竹斷層		1.5	0.5
	新城斷層		1.4	1.3
	三義斷層		7.8	3.3
	屯子腳斷層		2.9	1.3
	獅潭斷層		9.8	2.4
	宜蘭北部構造		9.1	6.1
	宜蘭南部構造		6.7	4.8
中部	大甲－彰化斷層	北段	2.9	3.8
		南段	0.7	1.6
	車籠埔斷層		2.4	0.3
	大茅埔－雙冬斷層		5.6	2.1
	梅山斷層		3.2	3.9
	九芎坑斷層		4.5	2.6
	大尖山斷層		6.9	3.3
	觸口斷層		30.4	15.7
	木屐寮-六甲斷層		15.8	8.5

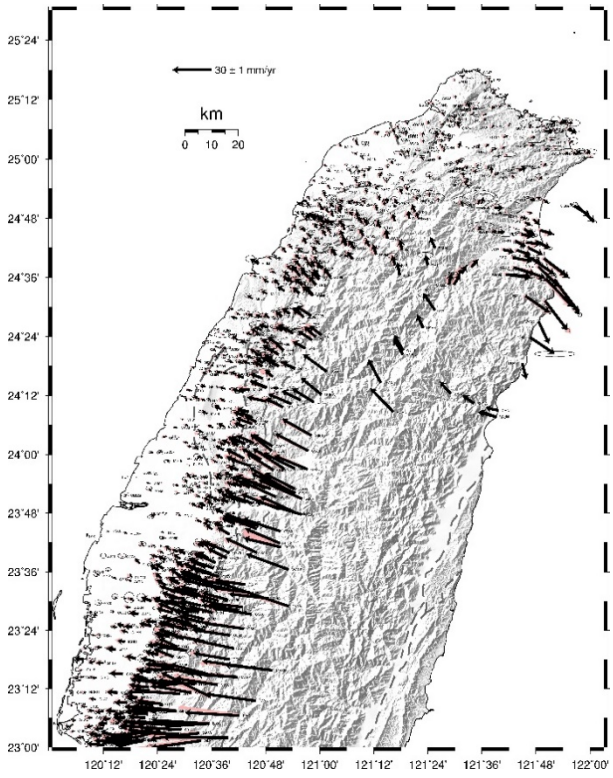


圖 5-4.2：臺灣北部與中部地區 2002-2017 年相對於測站 S01R 之地表速度場。黑色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層。(a)為 GPS 連續站、移動站之水平速度場，黑色箭頭為原本觀測值，粉色箭頭為計算觀測值。

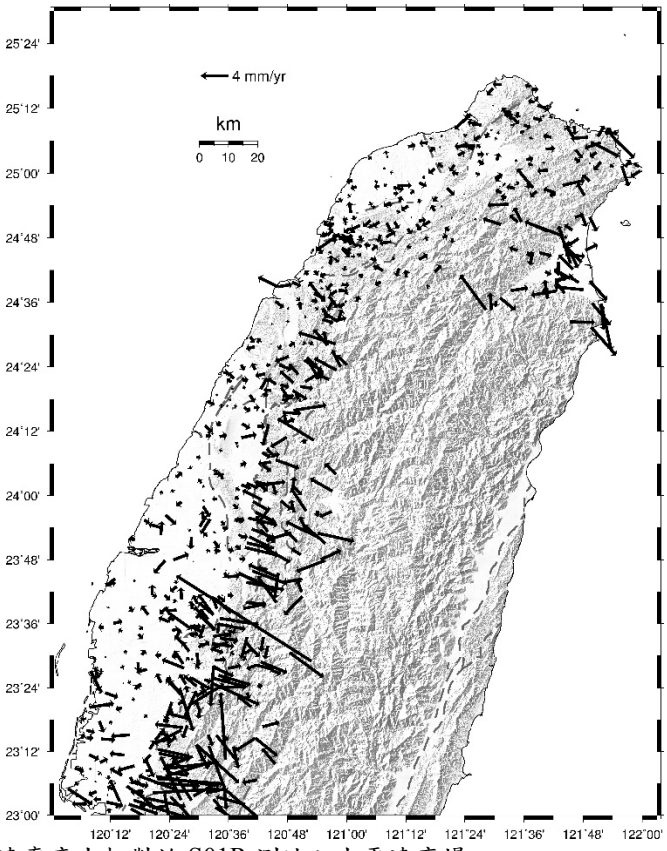


圖 5-4.3：因主應變速率產生相對於 S01R 測站之水平速度場。

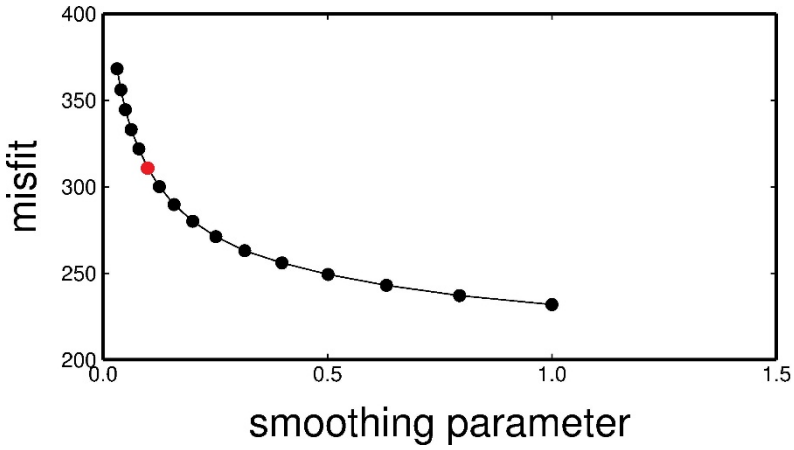


圖 5-4.4：smoothing parameter 之測試結果，參數從-1.5 到 0 逐漸減小，紅色圓點為最佳值-1 所得到的不符值（misfit）結果作為最佳模型

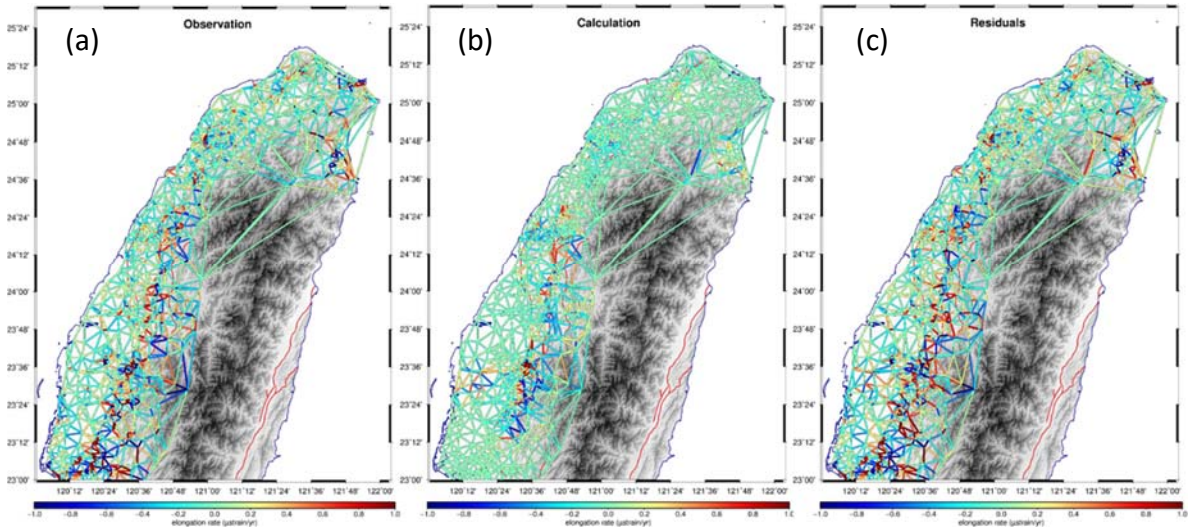


圖 5-4.5：模型之觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值。(b) 水平速度場計算值。(c) 水平速度場殘差。

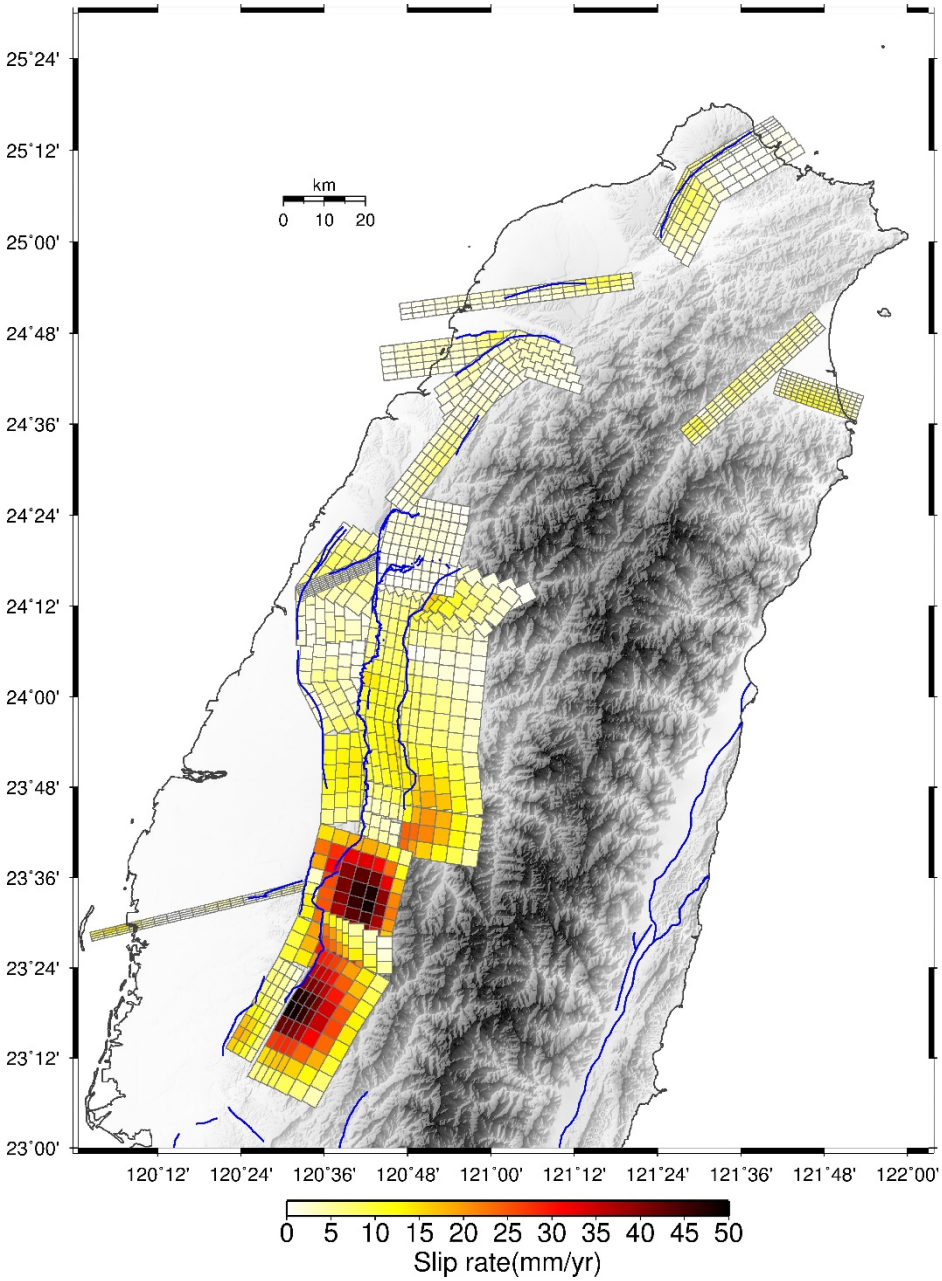


圖 5-4.6：斷層滑移虧損率分布圖。

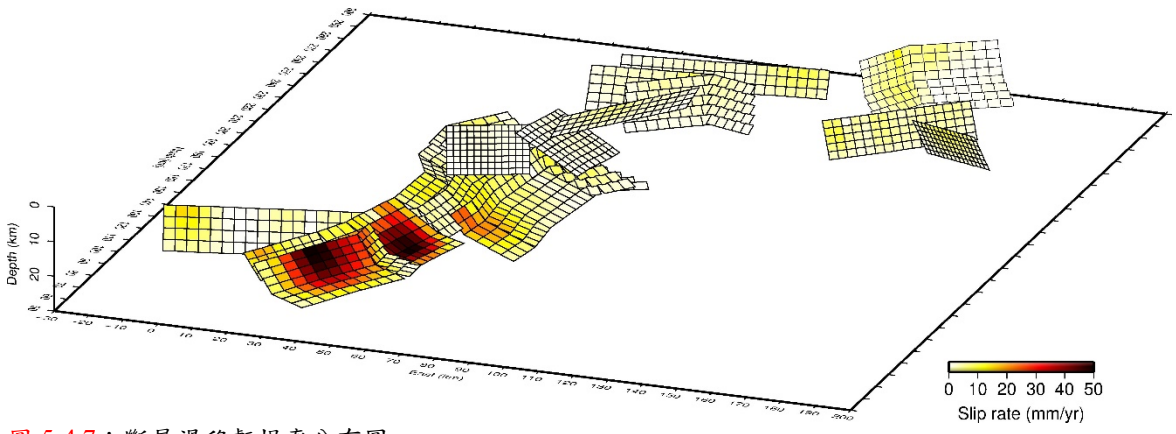


圖 5-4.7：斷層滑移虧損率分布圖。

5-5 北部地區之斷層滑移速率

表 5-5.1 為斷層模型(BLOKES、DEFNODE、Baseline Inversion)所使用斷層參數得到的擬合結果。

我們可以藉由地表 GPS 正演之水平速度場來探討模型所模擬之斷層滑移是否合理；下圖 5-5.1 為地表速度場模擬成果；圖中可見模擬結果之紅色箭頭整體而言相對原始速率量值要小，明顯可見量值與方向差最多的部分在宜蘭南部的 RYUK 塊體，相較原向量值更偏西北方，其次為 HSSH 塊體，推測應與測站數相對少且在塊體中分佈不均有關；西半部的正演模擬量較為符合，北部區域於台北、新北部分可見原始量值小，模擬量值亦小，但方向上較原始值有更偏西北部的趨勢。模擬之速度場相較原始速度場之 RMS 值為 5.352，與前期計畫成果之 RMS 皆大於 10 相比，成果可視為相對模擬較佳。

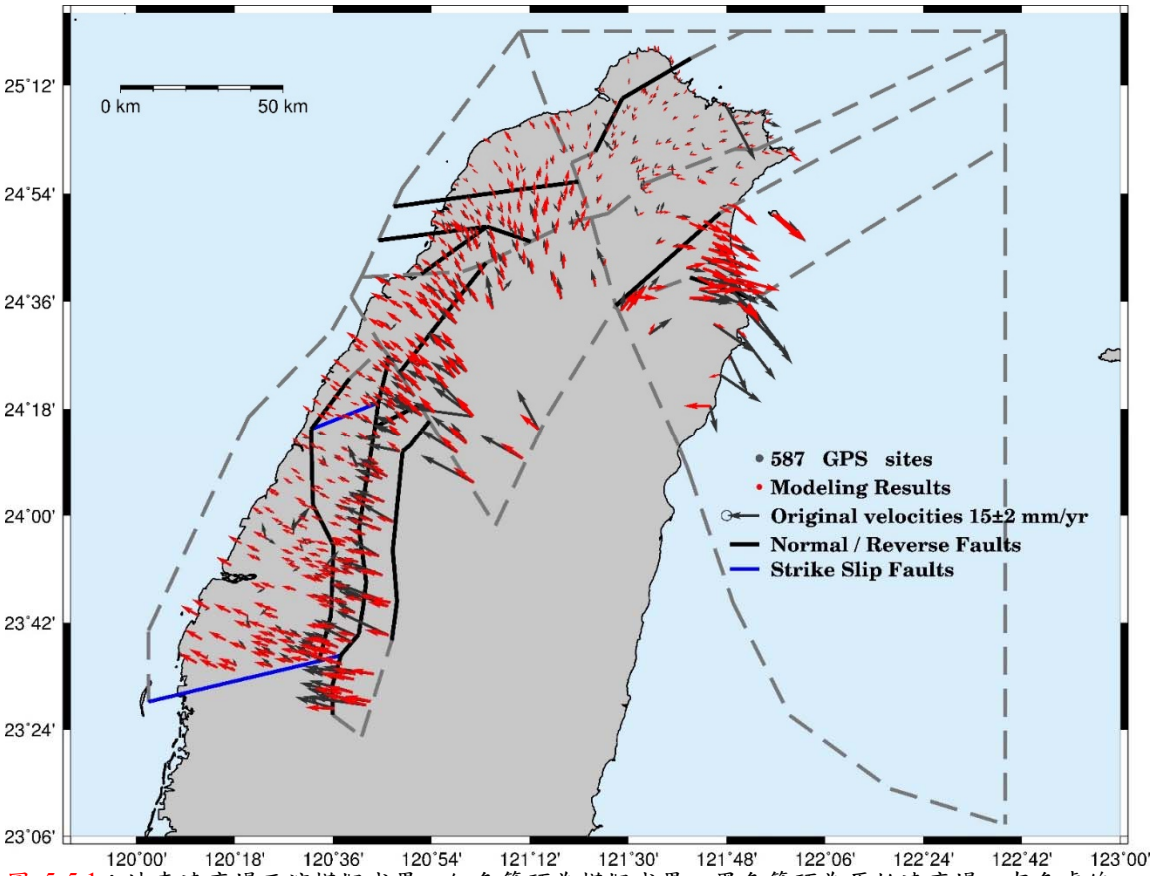


圖 5-5.1：地表速度場正演模擬成果。紅色箭頭為模擬成果，黑色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，黑色、藍色實線為斷層線位置。

斷層模擬成果中，北部斷層可見宜蘭斷層(南)變動最大，主要為左移的貢獻量，而新竹斷層變動最小，無論走向滑移或傾向滑移的變動量皆趨近於 0 mm/yr (圖 5-2.4)。各段層整體滑移速率值貢獻量於走向滑移或傾向滑移分量上，

分佈可謂平均，唯宜蘭斷層(南)之兩者級距較大，達 5.4 mm/y，其位於本次塊體最東測，且地面整體觀測值最大處，推測為使其變動量最大的原因。然其餘段層之走向滑速率量值皆未超過 4.0 mm/yr，傾向滑速率量值皆未超過 3.3 mm/yr。對應於預先給定地質滑移速率之約制，有約制滑移速率項之模擬成果於北部段層皆略大於或相當於約制值，差值未超過 0.1 mm/yr。

今年北部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果於工作會議時討論出各模型結果之權重，並依據討論所得之權重計算出加權平均滑移虧損速率(表 5-5.1)。計算結果顯示，山腳斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.9 mm/yr，湖口斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.8 mm/yr，新竹斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.1 mm/yr，新城斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.3 mm/yr，三義斷層之加權平均滑移虧損速率為 5.9 mm/yr，屯子腳斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.7 mm/yr，獅潭斷層之加權平均滑移虧損速率為 5.2 mm/yr，宜蘭北部構造之加權平均滑移虧損速率為 7.4 mm/yr，宜蘭南部構造之加權平均滑移虧損速率為 6.1 mm/yr。

同樣本次成果中，中部斷層滑移量以九芎坑斷層總滑移速率最小，車籠埔斷層總滑移速率最大，主要滑移速率累積於車籠捕斷層至觸口斷層沿線(圖 5-2.4)。除無地質滑移速率約制之大尖山斷層與觸口斷層，餘之五條斷層中，整體模擬成果皆較約制滑移量為小，可見顯著約制效果，而若觀察單段，其中未達約束效果之段落主要落於大茅埔-雙冬斷層，約制量為逆斷層傾滑量 2.0 ± 1.3 mm/yr(表 5-2.1)，然成果中大茅埔-雙冬斷層之傾滑分量自北段起由逆斷層漸變轉為正斷層，可能與其東側無觀測值之影響相關，然其變化型態與車籠埔斷層至觸口斷層沿線相仿。

表 5-5.1：斷層模型(BLOKES、DEFNODE、Baseline Inversion)所使用斷層參數得到的擬合結果。

			BLOCK Model	DEFNODE Model	Baseline Inversion Model	加權平均滑移虧損速率 (mm/yr)
	斷層名稱		總變動量 (mm/yr)	平均值滑移虧損率 (mm/yr)	斷層滑移速率平均值 (mm/yr)	
北部	山腳斷層	上界	2.5	3.6	7.6	4.0
		平均	2.3 ± 0.1 (4/10)	0.8 ± 1.4 (4/10)	3.4 ± 2.1 (2/10)	1.9
		下界	2.1	0.0	0.0	0.8
	湖口斷層	上界	4.4	3.8	3.7	3.9
		平均	4.2 ± 0.1 (2/10)	0.6 ± 1.6 (4/10)	1.9 ± 0.9 (4/10)	1.8
		下界	4.0	0.0	0.1	0.8
	新竹斷層	上界	1.2	4.6	2.5	2.8
		平均	0.8 ± 0.2 (1/3)	1.0 ± 1.8 (1/3)	1.5 ± 0.5 (1/3)	1.1
		下界	0.4	0.0	0.5	0.3
	新城斷層	上界	2.8	4.3	4.0	3.7
		平均	2.2 ± 0.3 (1/3)	0.3 ± 2.0 (1/3)	1.4 ± 1.3 (1/3)	1.3
		下界	1.6	0.0	0.0	0.5
	三義斷層	上界	2.4	15.4	14.4	12.4
		平均	2.2 ± 0.1 (2/10)	5.8 ± 4.8 (4/10)	7.8 ± 3.3 (4/10)	5.9
		下界	2.0	0.0	1.2	0.9
	屯子腳斷層	上界	1.4	8.1	5.5	5.0
		平均	1.2 ± 0.1 (1/3)	1.1 ± 3.5 (1/3)	2.9 ± 1.3 (1/3)	1.7
		下界	1.0	0.0	0.3	0.4
	獅潭斷層	上界	3.3	19.7	14.6	11.1
		平均	3.1 ± 0.1 (4/10)	4.9 ± 7.4 (2/10)	9.8 ± 2.4 (4/10)	5.2
		下界	2.9	0.0	5.0	3.2
	宜蘭北部構造	上界	3.6	25.9	21.3	19.6
		平均	3.4 ± 0.1 (2/10)	7.9 ± 9.0 (4/10)	9.0 ± 6.1 (4/10)	7.4
		下界	3.2	0.0	0.0	0.6
	宜蘭南部構造	上界	12.4	10.9	16.2	13.3
		平均	12.2 ± 0.1 (2/10)	2.5 ± 4.2 (4/10)	6.6 ± 4.8 (4/10)	6.1
		下界	12.0	0.0	0.0	2.4

中部	大甲－彰化斷層	北段	4.0	2.7	2.9	
		南段			0.7	
	車籠埔斷層		7.0	2.6	2.4	
	大茅埔－雙冬斷層		3.2	0.7	5.6	
	梅山斷層		5.0	3.9	3.2	
	九芎坑斷層		2.5	3.5	4.5	
	大尖山斷層		5.7	5.2	6.9	
	觸口斷層		3.6	7.2	30.4	
	木屐寮-六甲斷層			1.9	15.8	

*紅色號括號內數值為今年北部地區斷層滑移虧損率計算之權重值。

第六章、台灣西南部 GPS 單頻資料計算成果

本年度完成西南部 15 個單頻 GPS 點位資料解算，點位分布如圖 6-1.1，以 Bernese 5.2 解算時約制於連續站 GS73(新光國小)之速度值，資料收集時間為 2017 年 5 月 15 日至 2018 年 9 月 3 日，各單頻測站及周圍雙頻測站在此一時期之解算成果之時間序列如圖 6-1.2。

為統計計算之資料品質，針對時間序列進行觀測值與擬合值之不符值(misfit)分析，此 misfit 值之標準差可反映解算成果在時間序列上之離散程度，各點 misfit 標準差統計如圖 6-1.3。

根據此結果我們將 0601~0615 測站約制於 GS73(新光國小測站)進行解算並求解相對於澎湖測站 S01R 之速度場，由於雙頻約制站 GS73 於 2017 年 10 月間曾中斷資料，於復站後由坐標-時間序列可見站體坐標產生位移，因此在處理單頻資料時於此時間點修正此跳階情形，以求得正確之位移速度場，各單頻測站及周圍雙頻測站在此一時期之解算速度如圖 6-1.4。

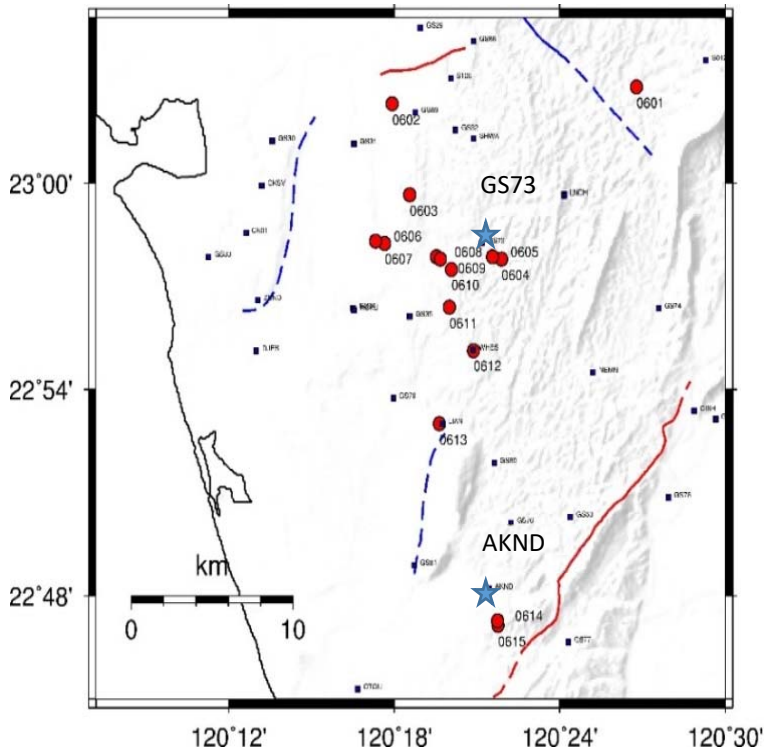


圖 6-1.1：西南部單頻 GPS 站點位分布。

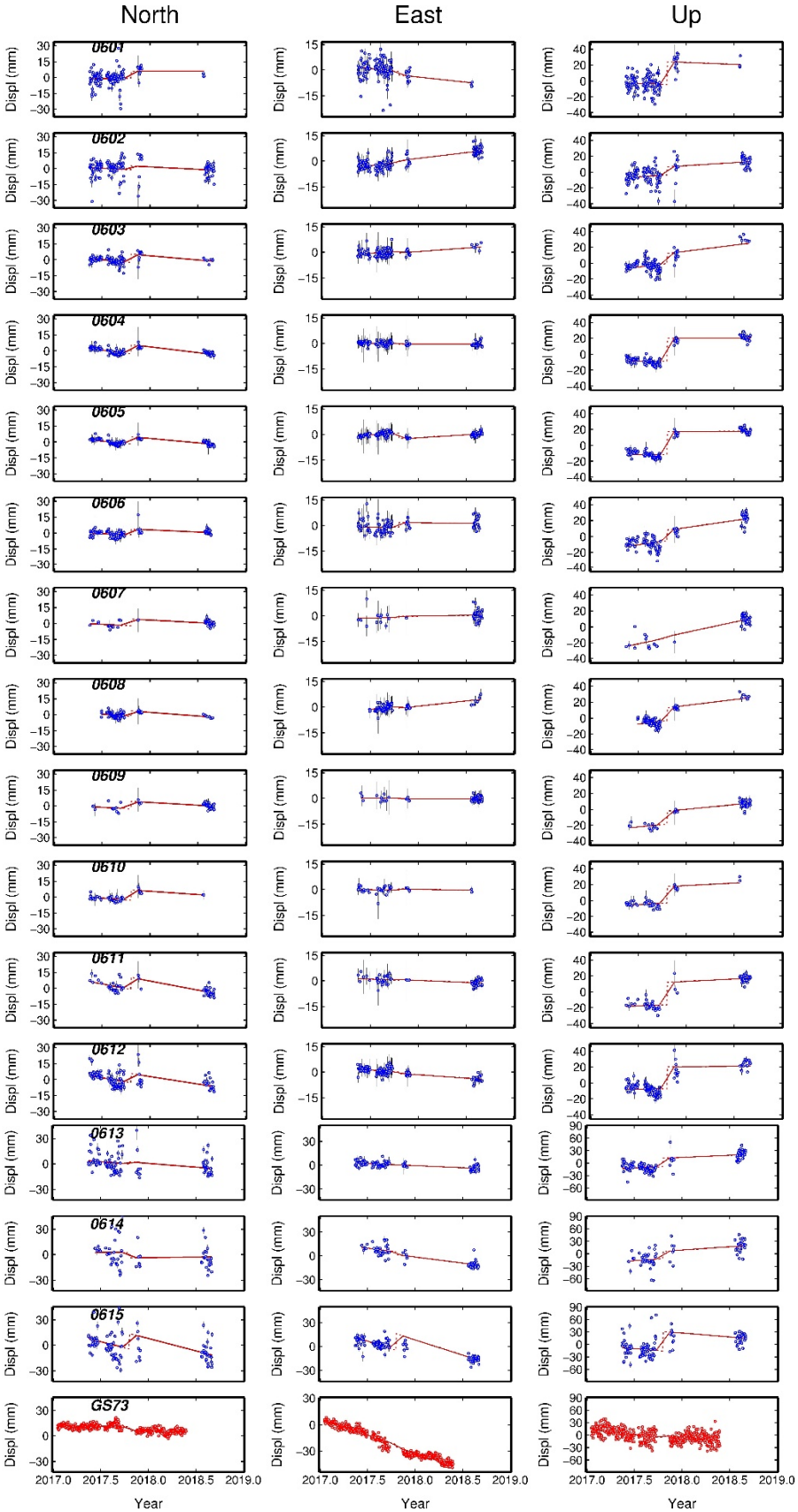


圖 6-1.2：西南部單頻 GPS 站解算成果時間序列，藍色圓圈為單頻站相對連續戰 GS73 之時間序列分布，紅色圓圈為雙頻站 GS73 相對澎湖白沙連序站 S01R 之時間序列分布。

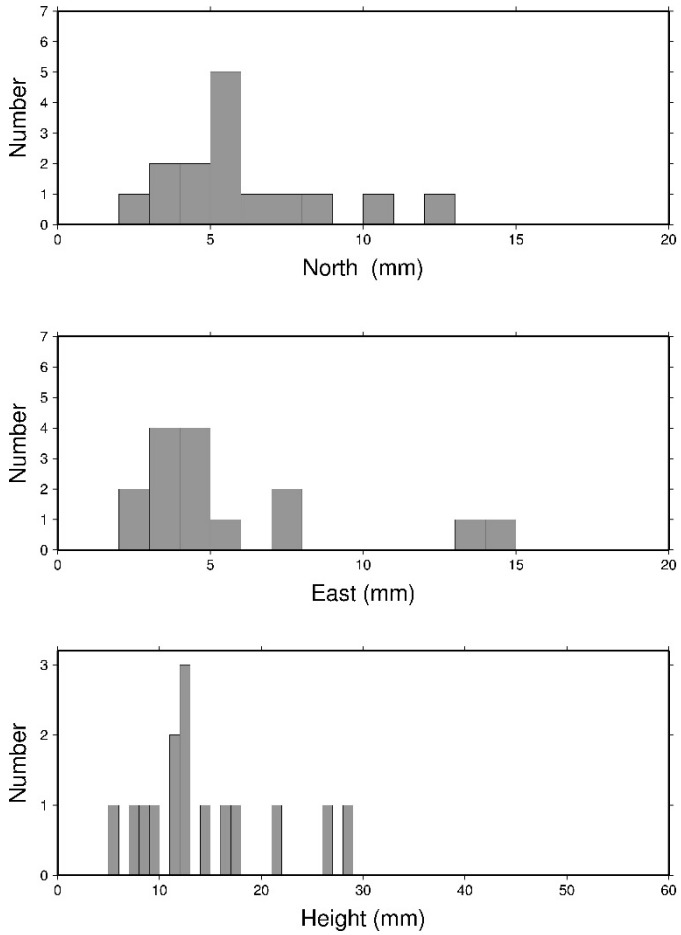


圖 6-1.3：西南部單頻 GPS 站觀測值與擬合值之殘差標準差結果。

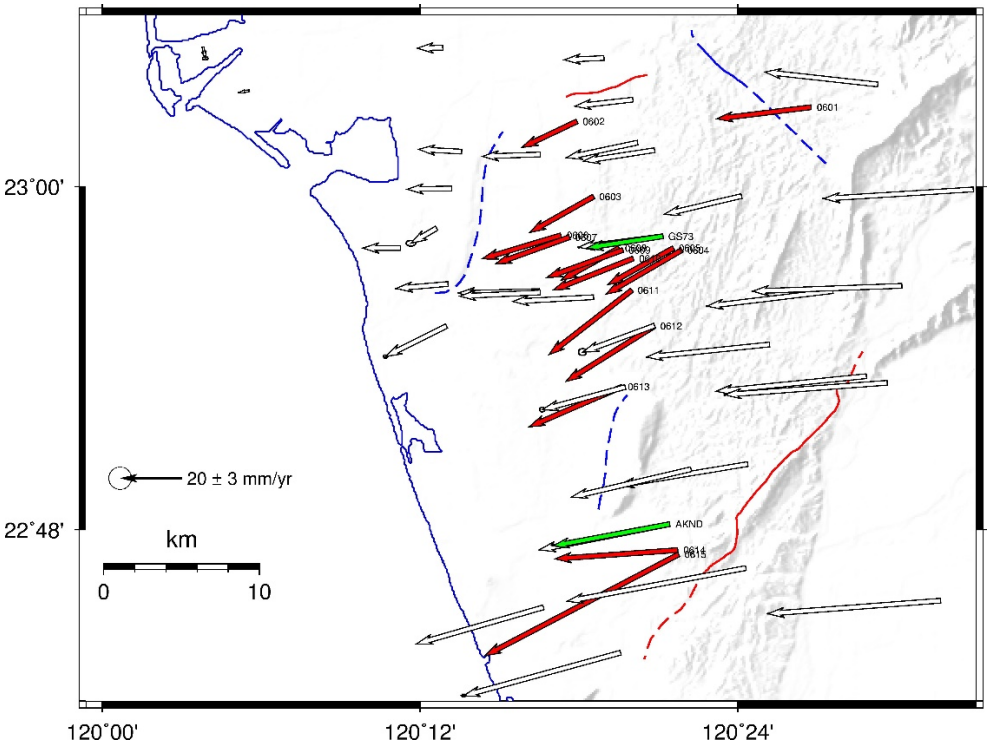


圖 6-1.4：西南部單頻 GPS 站解算相對澎湖測站 S01R 水平速度場分布圖，紅色箭頭為單頻站解算速度場，綠色箭頭為約制雙頻站解算速度場，白色箭頭為雙頻站解算速度場。

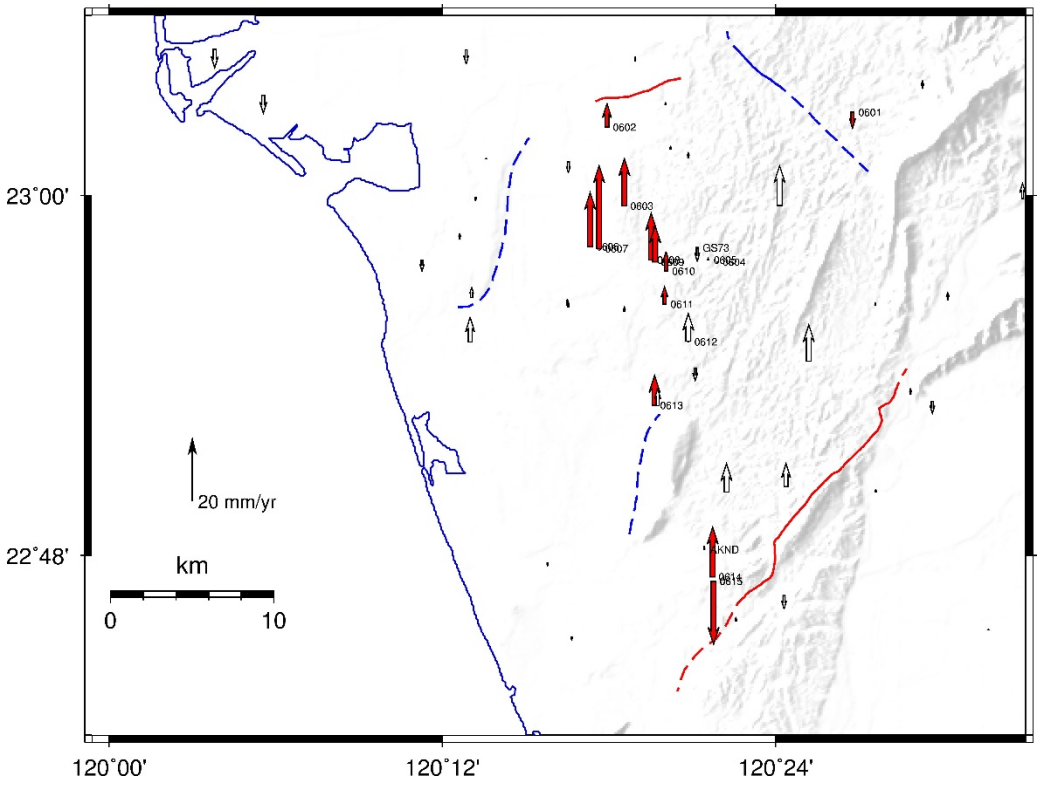


圖 6-1.5：西南部單頻 GPS 站解算相對澎湖測站 S01R 垂直速度場分布圖，紅色箭頭為單頻站解算速度場，綠色箭頭為約制雙頻站解算速度場，白色箭頭為雙頻站解算速度場。

第七章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果

7-1 花蓮近海地震簡介

因為歐亞板塊及菲律賓海板塊不斷相互斜向擠壓的作用（Ho, 1986; Teng, 1990, 1996），使台灣經歷多次的大規模災害性地震（Bonilla, 1975, 1977; Cheng and Yeh, 1989），其中最顯著的例子即是 1999 年發生在台灣中部的集集地震（Chen et al., 2001）。台灣東部的花東縱谷為菲律賓海板塊碰撞上歐亞板塊的縫合帶，縱谷斷層則是花東縱谷中的主要構造（Angelier et al., 1997; Shyu et al., 2005），因此縱谷斷層也發生多次的大規模地震，其中最重要的事件是 1951 年的花蓮-台東地震序列（Hsu, 1962; Bonilla, 1975; Cheng et al., 1996）。1951 年的地震事件發生在台灣地震活動最高的地區，指出縫合帶上的縱谷斷層有非常高的地震潛能（Yen et al., 2008）。

台灣東部花蓮近海於 2018 年 2 月 6 日發生了規模 6.0（M_L 6.0；M_w 6.2）的地震（圖 7-1.1），震央位於海岸附近（24.132°N, 121.659°E），震源深度約 10 km，同時沿著米崙斷層產生一系列的地表破裂。在主震發生的前後，震源地區就開始發生一系列的群震，先為 2018 年 2 月 3 日發生規模 4.6 的地震，接著在 2 月 4 日距離 2 月 6 日主震僅幾公里處發生規模 5.8 的地震，最後在 2 月 7 日於花蓮東北方發生規模 5.7 的地震。中央氣象局即時震度資訊顯示，幾乎全島都能感受到這次地震所引起的震動，最大 7 級震度則分佈在花蓮。由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 7-1.2），本次地震的主要斷層面可能有兩種型態，一為北北東–南南西走向向西傾之斷層面；一為近乎東–西走向向南傾之斷層面。然而，根據野外調查與初步的大地測量表明，本次規模 6.4 的地震在縱谷斷層最北段的米崙斷層產生地表破裂，造成約幾十公分的位移量，一些傾斜或倒塌的建築物也集中在米崙斷層的地表破裂處。在過去的地質研究中，米崙斷層被認為是東北–西南走向向東傾之斷層面（例如：Shyu et al., 2007）。

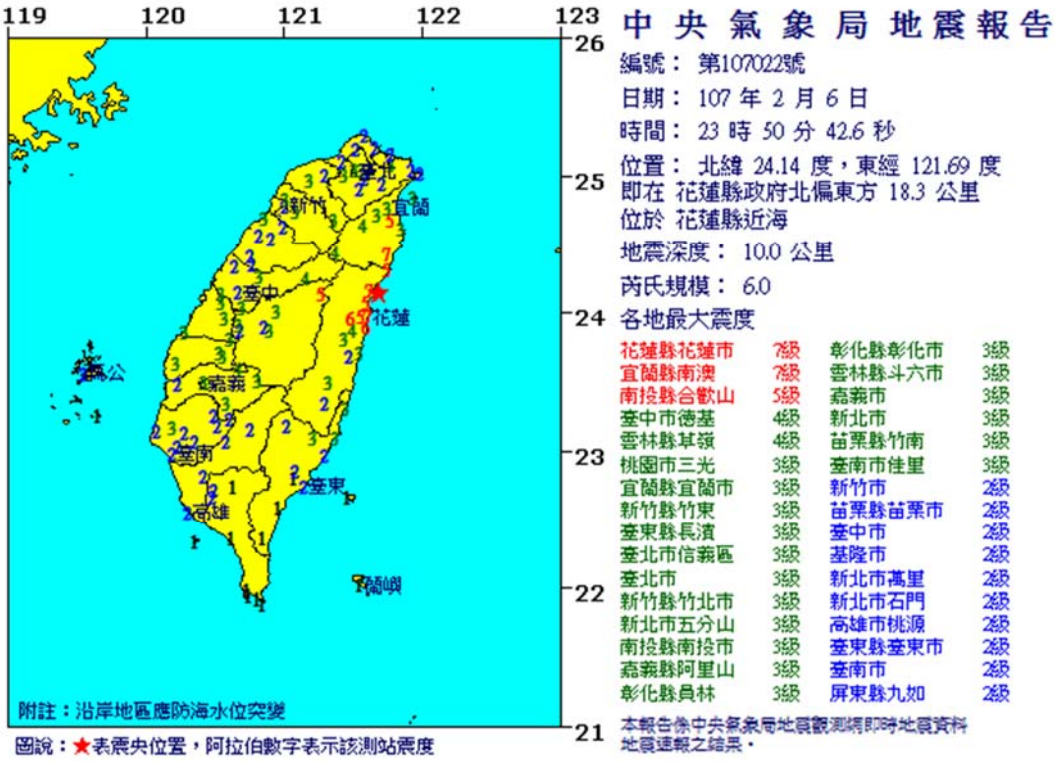


圖 7-1.1：中央氣象局 20180206 地震事件報告（https://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm）。

在過去的概念上，地震被認為是沿單一斷層發生的，然而過去越來越多的地震研究表示，單一地震事件的發生，不能只考慮單一斷層的影響；單一地震事件也可能導致多條斷層的破裂，同時引發慢地震（slow slip event）的發生（Hamling and Wallace, 2015; Wallace et al., 2017; Hamling et al., 2018），例如 2016 年紐西蘭規模 7.8 的凱庫拉地震，不僅沿著多條斷層產生非常複雜的地表破裂，同時隱沒帶上也被誘發出慢地震事件（Hamling and Wallace, 2015; Wallace et al., 2017; Hamling et al., 2018）。由於在本次 2018 年花蓮近海地震事件中，地震震源機制解和野外調查結果顯示的可能斷層面並不一致，本次地震是否如同 2016 年紐西蘭規模 7.8 凱庫拉地震一樣，並非由單一斷層錯動所誘發？

本報告首先整合 GPS 觀測結果、精密水準測量資料與 DInSAR 的計算成果，解析本次 2018 年花蓮近海地震造成之地表變形型態。最後再嘗試結合地質、地震等資訊，建立斷層模型來反演大地測量成果，釐清本次地震可能的發生機制。

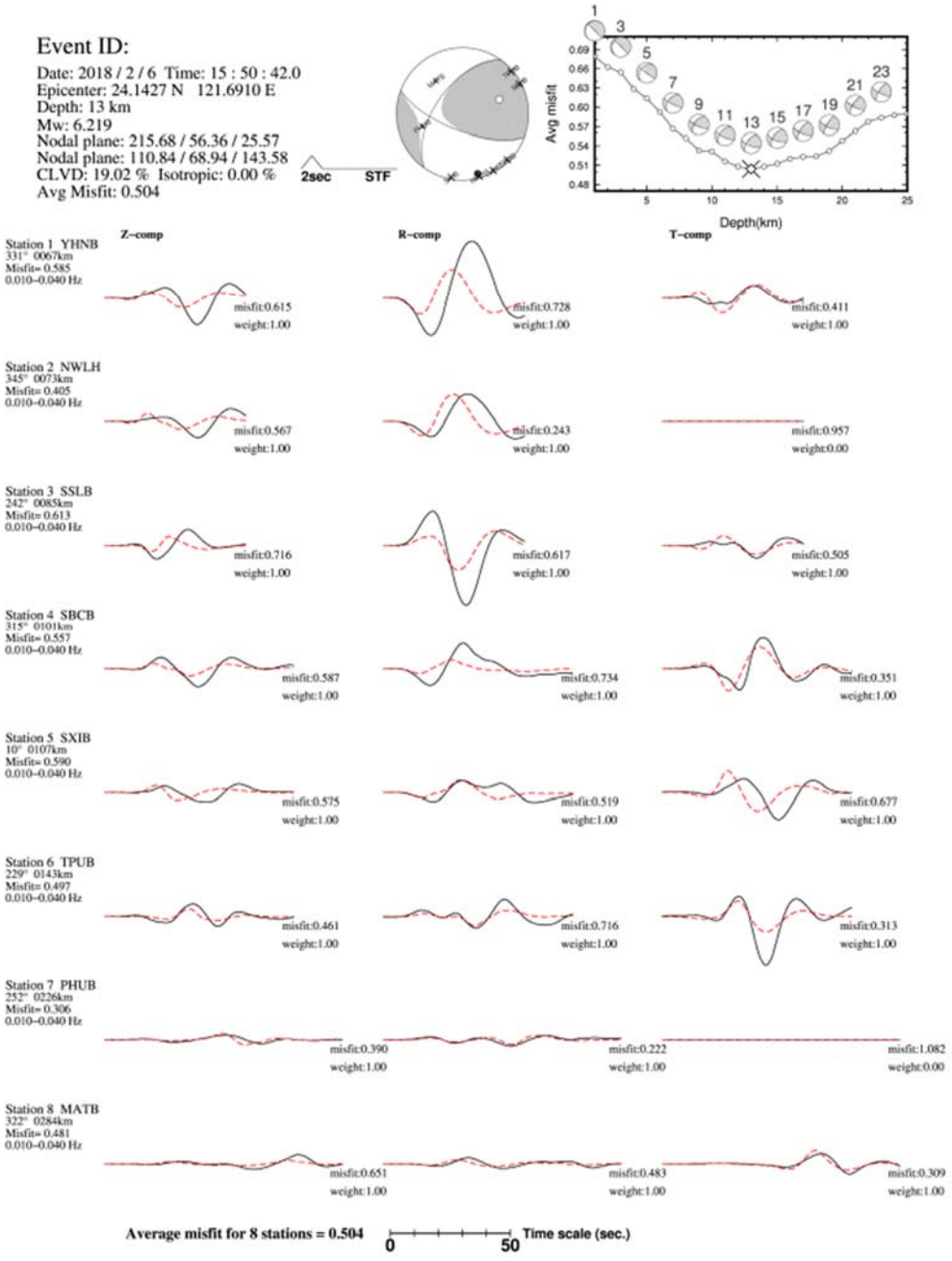


圖 7-1.2：中央氣象局 20180206 花蓮近海地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果（https://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm）。

7-1-1 花蓮近海地震震源區地質簡介

花東縱谷位於中央央山脈與海岸山脈兩大地質區之間（圖 7-1.3）。海岸山脈位於縱谷的東部，其特徵是由中新世到上新世早期的高度變形的弧前盆地和火山弧岩石物質所組成（Chang et al., 2001）。位於縱谷西部的中央山脈，主要由中生代到第三紀的低變質度板岩或片岩（Ho, 1988）。花東縱谷則由晚第四紀河流沉積物組成，這些沉積物源於鄰近的海岸山脈和中央山脈。

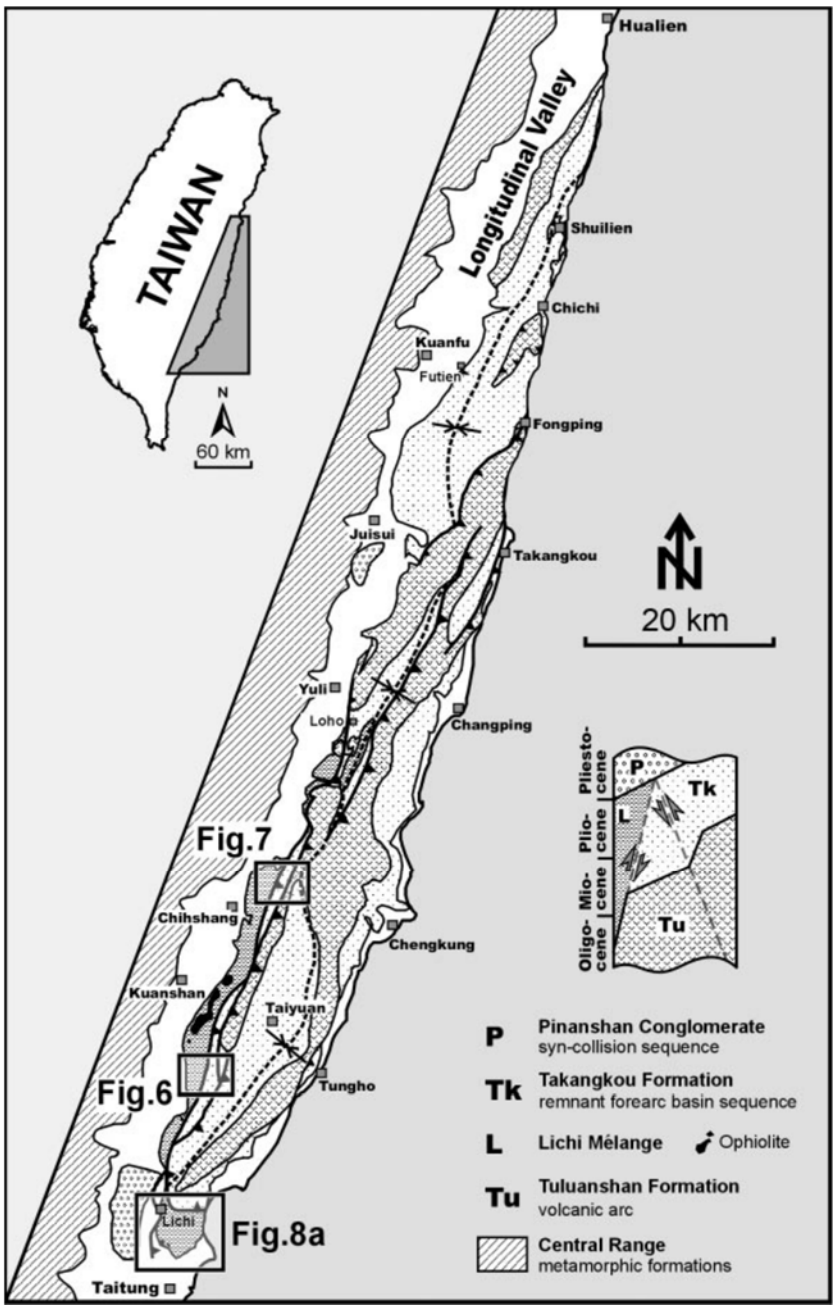


圖 7-1.3：臺灣東部地區地質圖（Chang et al., 2001）。

縱谷中最顯著和活躍的構造即是北北東–南南西走向且向東傾的縱谷斷層。縱谷斷層特點是，南段以逆衝斷層分量為主，但在北段則為左移之走向滑移斷層分量為主（例如：Chemenda et al., 1997; Kao and Jian, 2001; Kim et al., 2006）。在地貌上，這個斷層沿線多在河谷中存在明顯的地表隆起或傾斜的河流階地，或以斷層崖，小背斜，山體滑坡等形式表現出來。最近的大地測量成果指出，縱谷正以每年約 40 mm/yr 的速度相互聚合（Yu et al., 1997）。縱谷斷層南段之池上斷層表現出地表潛移的行為，池上地區之速度剖面顯示斷層以約 20-30 mm/yr 的速率在潛移（Angelier et al., 1997; Lee et al., 2001），然而縱谷斷層北段近地表跨斷層僅有較小的速度差異（Yu and Kuo, 2001），而深部仍有較高的斷層滑移速率（Hsu et al., 2003; Johnson et al., 2005; Rau et al., 2007）。

在地震活動方面，縱谷斷層一向被認為是非常活躍的，且有發生過災難性地震的紀錄，導致縱谷斷層地表破裂的發育。1951 年的花蓮台東地震序列（圖 7-1.4）是發生在縱谷斷層上最著名的地震事件，該事件在花東縱谷造成嚴重的生命財產災損（Gutenberg and Richter, 1954; Lee et al., 1978; Abe, 1981; Hsu, 1985; Cheng et al., 1996）。該地震序列在花蓮東部外海地區先後發生 3 次規模 7 的地震，導致縱谷斷層最北端的米崙斷層與嶺頂斷層產生地表破裂；兩次規模大於 6 的地震事件，導致縱谷斷層中的池上斷層及玉里斷層發生地表破裂（Hsu, 1962; Yu, 1997; Shyu et al., 2007）。除了 1951 年花蓮台東地震序列外，花東縱谷也發生其他重要的地震事件，如 2003 年 12 月 10 日規模 6.5 的成功地震導致池上斷層破裂，其為 1999 年集集地震以來，臺灣陸上規模最大的地震；2013 年規模 6.4 的瑞穗地震，則是縱谷北段第一個主要逆衝型地震，根據主餘震序列及大地測量成果指出，北段縱谷斷層下盤為隆起。縱谷斷層南段的斷層滑移速率較穩定，且有重複地震（repeating earthquake）的發生（Chen et al., 2007）；縱谷斷層北段自 1951 年花蓮台東地震序列後，至本次 2018 年花蓮近海地震發生期間則沒有發生過大地震。

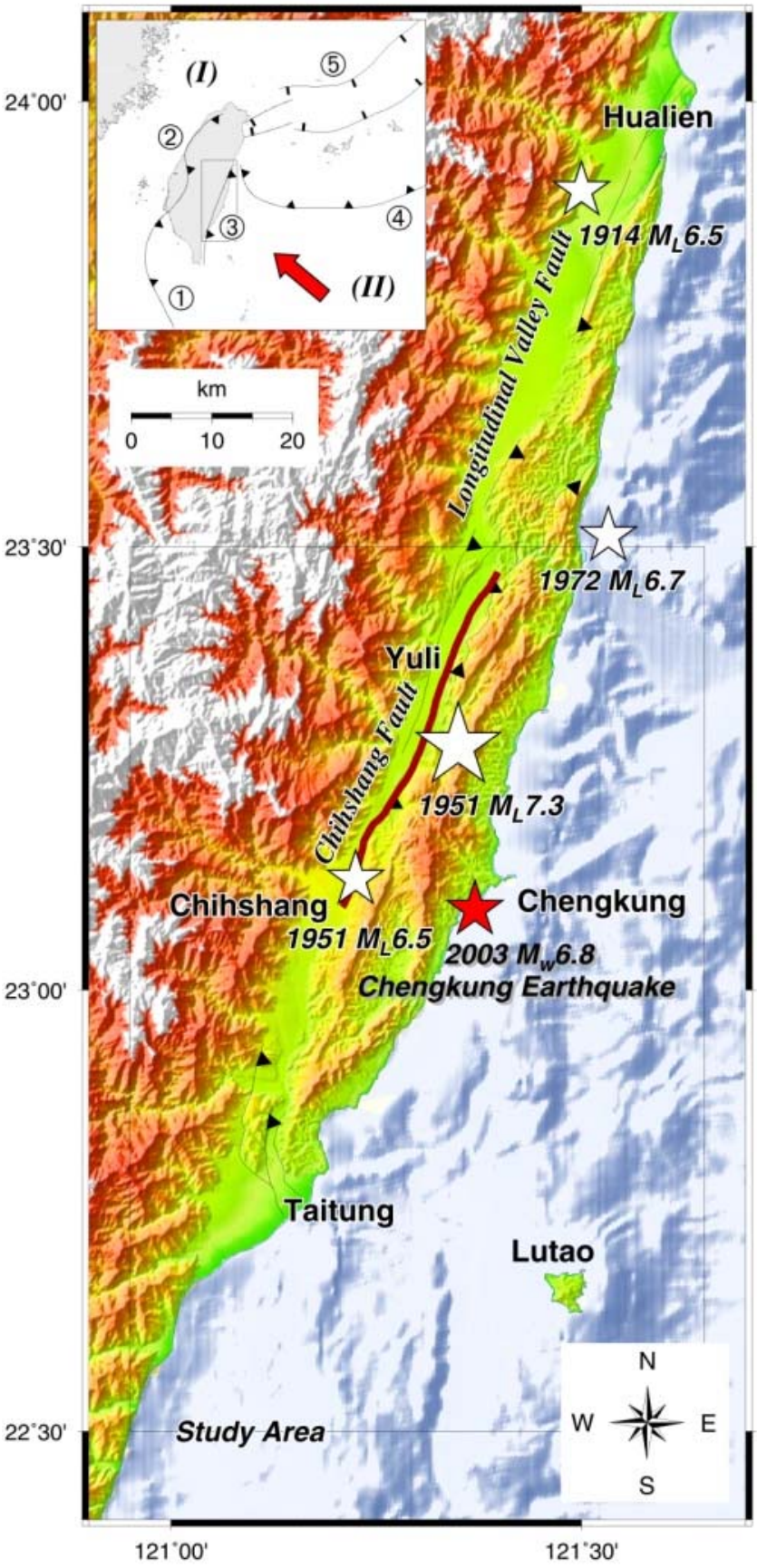


圖 7-1.4：1951 年花蓮台東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖（Ching et al., 2007）。

7-2 花蓮近海地震同震地表位移場

中央地質調查所於 2018 年 2 月 6 日花蓮近海發生之規模 6.0 地震後，首先與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GPS 連續站資料，進行地表同震位移場之解算。爾後，中央地質調查所又分別於 2 月 8 日於近震央區進行 9 個 GPS 移動站之觀測，再於 2 月 26 日於壽豐及光復地區進行另外 7 個 GPS 移動站之觀測，總計於震源區域共計進行 16 個 GPS 移動站之觀測。中央地質調查所同時還於 2 月 27 日至 2 月 28 日利用兩個工作天的時間完成嶺頂-龍澗精密水準測線之量測。最後還蒐集雷達衛星影像進行同震地表位移場解算。

7-2-1 GPS 連續站同震位移場

本研究團隊於地震發生後，藉由中央地質調查所與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集之全臺 GPS 連續站資料，進行震央附近同震位移之解算，此位移場為利用震前三十分鐘與震後三十分鐘的平均定位坐標相減所得（圖 7-2.1）。由結果可知（圖 7-2.2），GPS 連續站所測得的最大同震位移，並非在震央附近，而是在位於花蓮市的花蓮站（圖 7-2.1(左) HUAL，東經 121.6135 度，北緯 23.9754 度），位於米崙斷層的上盤側，與倒塌的統帥大飯店相距不到三百公尺。同震抬升為 100.4 mm，同震位移水平分量向東為 141.4 mm；同震位移水平分量向北為 431.2 mm。而位於此測站西北方的北埔測站（圖 7-2.1(右) PEPU，東經 121.6103 度，北緯 24.0179 度），位於米崙斷層的下盤側，其同震抬升為 36.0 mm，同震位移水平分量向西為 52.7 mm，同震位移水平分量向南為 332.0 mm，顯示出米崙斷層主要以左移斷層為主，兼具逆衝分量的斷層運動。而南邊位於嶺頂斷層北段的上盤側的鹽寮站（YENL），其同震下陷 19.7 mm，同震位移水平分量向西為 14.2 mm；向北為 202.1 mm。位於嶺頂斷層北段的下盤側的東華大學（NDHU）站，卻呈現垂抬升 63.6 mm 的同震變形，其同震位移水平分量向西為 82.9 mm；向南 37.0 mm。跨嶺頂斷層北段兩側的同震變形，與嶺頂斷層的斜逆移運動形態不吻合，可能在嶺頂斷層的下盤存在一不知名的斷層系統，被花蓮外海 M_w 6.2 地震所誘發。

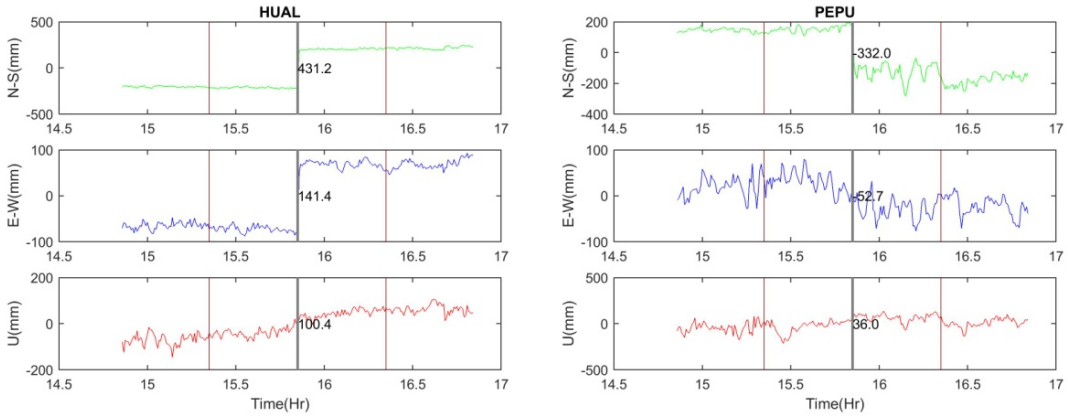


圖 7-2.1：測站 HUAL 與 PEPU 動態解算時間序列。圖中灰線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震發震時間，紅線為地震前後三十分鐘。數字為後三十分鐘平均減前三十分鐘平均之同震位移。

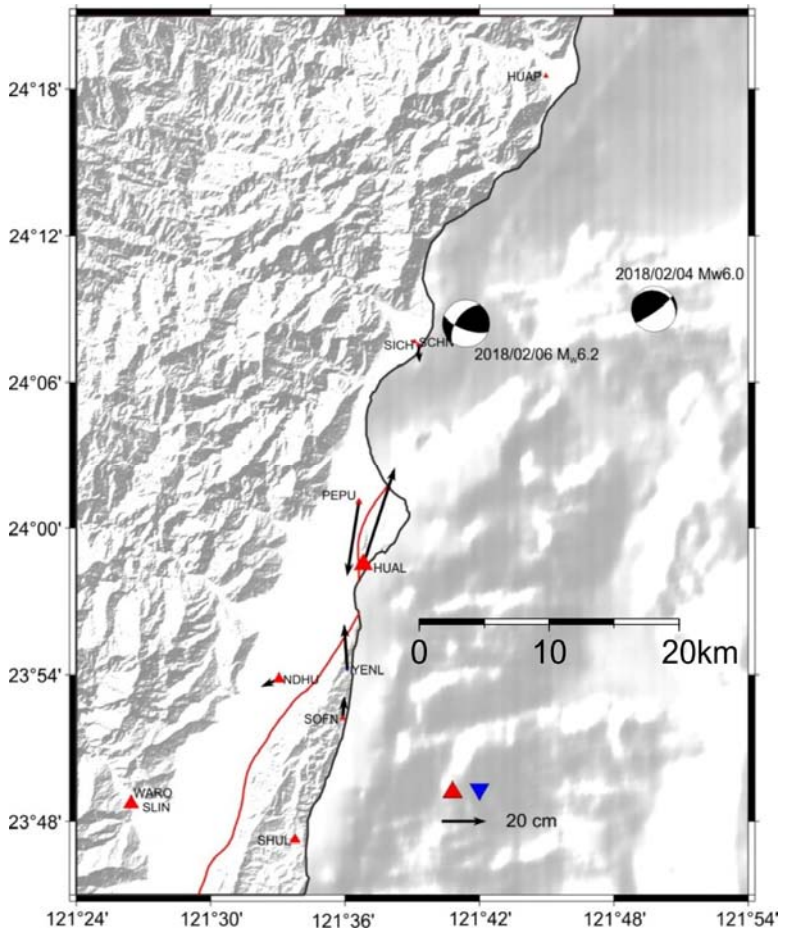


圖 7-2.2：花蓮地震 GPS 同震位移，地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。紅色三角形代表抬升，藍色三角形代表下陷。

為求得較穩定之全臺灣同震位移，圖 7-2.3 為利用地震後 5 天每日解之平均定位坐標，減掉前 5 天平均定位坐標所得到的花蓮地震同震變形場。圖中只有水平方向上位移超過 49 mm 或高程向位移超過 10 mm 才顯示站名。由圖中可明顯看出花蓮地震主要影響範圍集中於花蓮地區，最北至秀林鄉和平最南至壽豐鄉。每日解測得的最大同震位移位，同樣是在位於花蓮市的花蓮站，擁有同震抬升 59.2 mm，水平分量向東同震位移為 167.7 mm；向北同震位移為 432.0 mm。北埔站則擁有同震抬升 51.2 mm，水平分量向東同震位移為 53.9 mm、向北同震位移為 286.1 mm。而南邊位於嶺頂斷層上盤側的鹽寮站（YENL）擁有同震下陷量 34.4mm，下盤側的東華大學（NDHU）則呈現抬升 32.6mm 的同震變形。

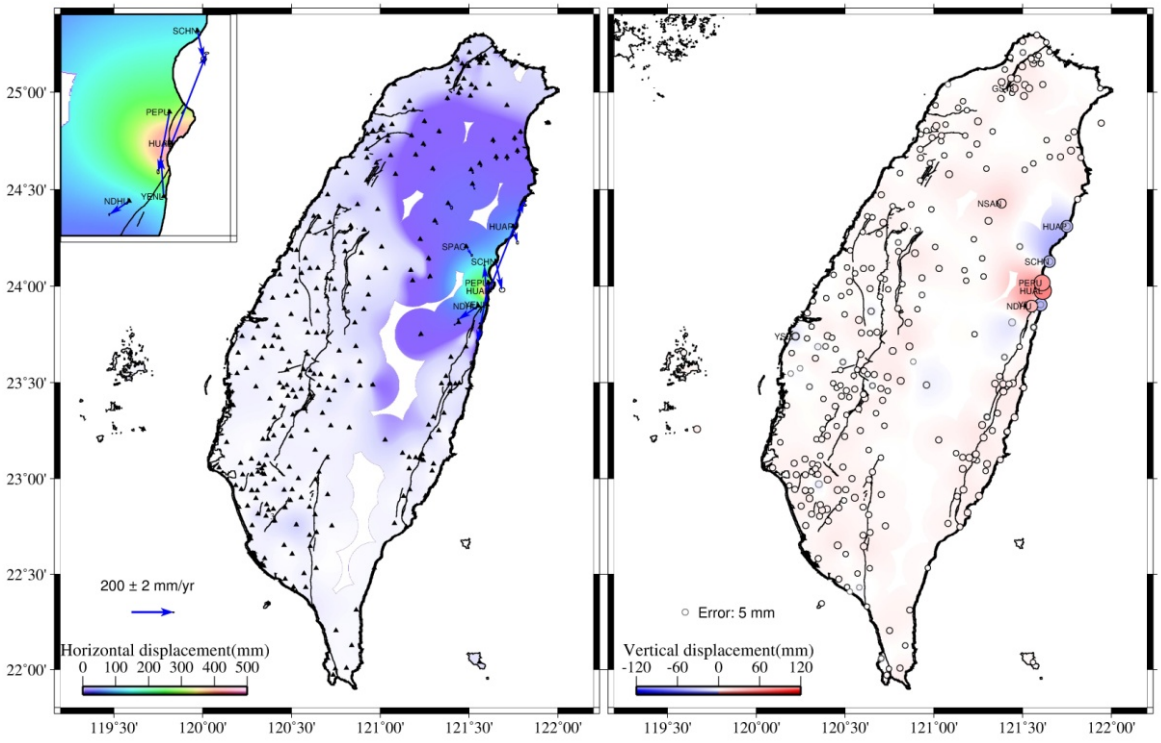


圖 7-2.3：花蓮地震 GPS 每日解（後五天平均坐標減前五天平均坐標）同震位移，站名顯示為水平方向上位移超過 49 mm 或高程向位移超過 10 mm。

值得注意的是位於震央北邊的和平站（HUAP，東經 121.7494 度，北緯 24.3090 度）於此結果中呈現同震下陷 31.1 mm，向東同震位移為 20.0 mm、向南同震位移為 77.6 mm，與動態快速解差異甚大。而南山站（NSAN，東經 121.3828 度，北緯 24.4282 度）也呈現 17.7 mm 的同震位移抬升。對比圖 7-2.4 的和平站與南山站的時間序列可發現，此兩站應該主要還有受到 2 月 4 日規模 5.8 的地震影響，使每日解呈現之同震位移並無法單獨解析此次花蓮地震同震位移。

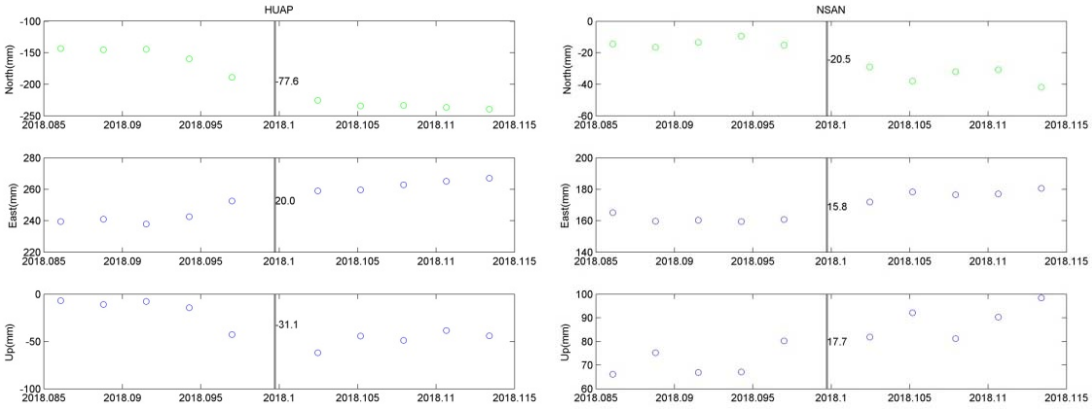


圖 7-2.4：測站 HUAP 與 NSAN 每日解時間序列。圖中灰線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震發震日期，數字為後五日平均減前五日平均之同震位移。

7-2-2 GPS 移動站同震觀測資料分析

中央地質調查所在 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震發生後，分別於 2 月 8 日於近震央區進行 9 個 GPS 移動站之觀測，再於 2 月 26 日於壽豐及光復地區進行另外 7 個 GPS 移動站之觀測，總計於震源區域共計進行 16 個 GPS 移動站之觀測。由於 GPS 移動站的觀測為每年一次，因此在 GPS 移動站同震位移場的計算中，為了消除震間速度場造成的誤差，本計畫也同時納入 2014－2018 年的觀測資料一起進行解算，其中 2016 年因為沒有金門站資料，所以在本次同震位移場的計算中被排除。

在 GPS 移動站的解算中，為了確認測站坐標計算的可靠性，本計畫分別採用 Bernese 及 GAMIT 兩套軟體進行 GPS 移動站坐標解算。在 GAMIT 的解算中，本團隊利用 GAMIT/GLOBK 軟體處理移動站資料，使用廣義約制（generalized constraint）方式組合這些每日解。廣義約制是採用一組具有可靠先驗坐標與速度場的連續站當約制站，利用其先驗誤差決定權值，在將誤差最小化的計算中，允許每日網形在疊加過程中有小幅度的平移、旋轉與尺度調整。因為選做約制站大多為穩固的 IGS 連續站，因此每日資料中的粗差（outliers）可以容易被偵測且排除（Herring et al., 2015）。本計畫因位置侷限在全球的一個小區域，網形的旋轉與尺度調整效果並不顯著，因此我們僅考慮平移，忽略旋轉與尺度調整。我們選定了臺灣周圍的穩固 IGS 連續站，因為與本島相比，金門地處較穩固的歐亞板塊內部，所以我們也把台灣內政部的連續站金門（KMNM）包括在其中，處理了地調所 2014 – 2018 年在花蓮共 16 個移動站坐標並計算同

震位移量。

在 Bernese 的 GPS 移動站坐標解算中，本團隊採用過去幾個階段計畫之標準作業程序進行資料解算。由於本次測量屬於小區域測量，為了增加坐標解算成功率，本團隊加入了鄰近 GPS 連續站鳳林站（FLNM），令其與各測站組成小區域的基線網，再透過鳳林站和金門 GPS 連續站（KMNM）組成基線，並最小約制金門站之坐標，求得各 GPS 移動站之坐標值。解算資料同樣為 2014－2018 年之觀測資料。

在地表同震位移場的估算中，本團隊利用 2014 – 2018 年每日 GPS 觀測坐標成果，在考慮速度場對各個測站地表同震位移場的影響下，採用下述方程式進行坐標時間序列的擬合，獲得本次 2018 年花蓮近海地震之同震位移量（圖 7-2.5、7-2.6）。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_j) + v$$

其中 y 為坐標，t_i 為測量時間，c_j 為地震造成之同震位移量，n_c 為有產生同震位移量之總地震事件數，T_j 為地震事件發生之時間，H 為階層函數，v 為殘差值。

由圖 7-2.7 同震成果比較圖及圖 7-2.8 同震殘差圖可知，Bernese 和 GAMIT 兩個軟體解算獲得之同震位移場相當接近。兩者位移場比較的殘差值在水平分量上較小，垂直分量上較大，分別為 E 分量約 2.2 ~ 19.4 mm，N 分量約 1.3 ~ 16.4 mm，U 分量約 5.2～49.1 mm。兩個解算軟體所得最大位移差異量出現在測站 E459（圖 7-2.9），該測站之位移量在 E 分量及 U 分量差異較大，殘差值分別為 103.2 mm 及 93.2 mm，檢視該站之坐標解算成果，兩個軟體皆顯示其坐標 RMS Error 偏大。換言之，由於測站 E459 之資料品質不佳，所以導致解算成果可信度降低。

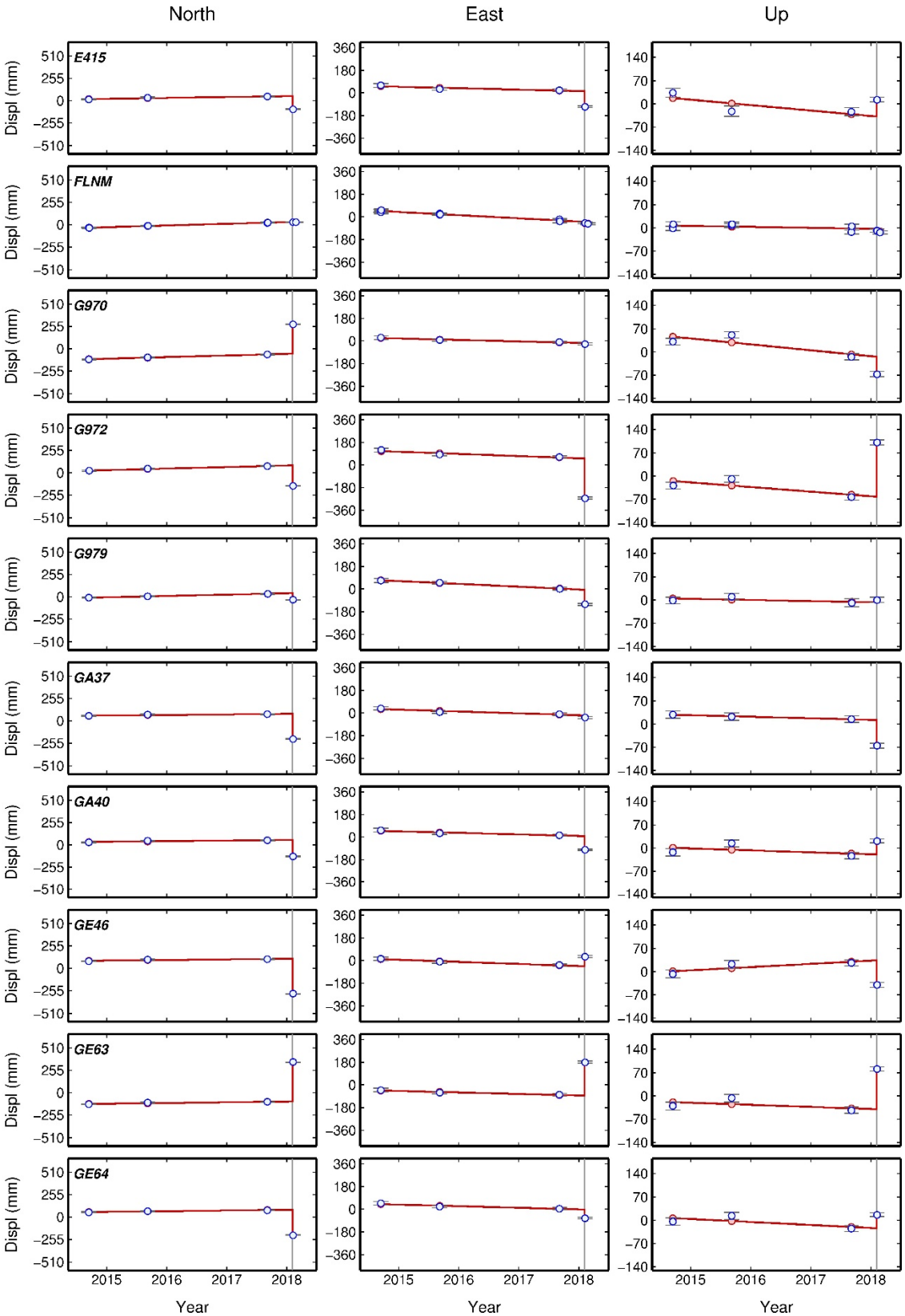


圖 7-2.5：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列。藍色圓圈為各方向上相對平均值之坐標分量，紅線為坐標時間序列擬合線，灰色垂直線為 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震發生時間，各欄左上文字為 GPS 移動站點號。

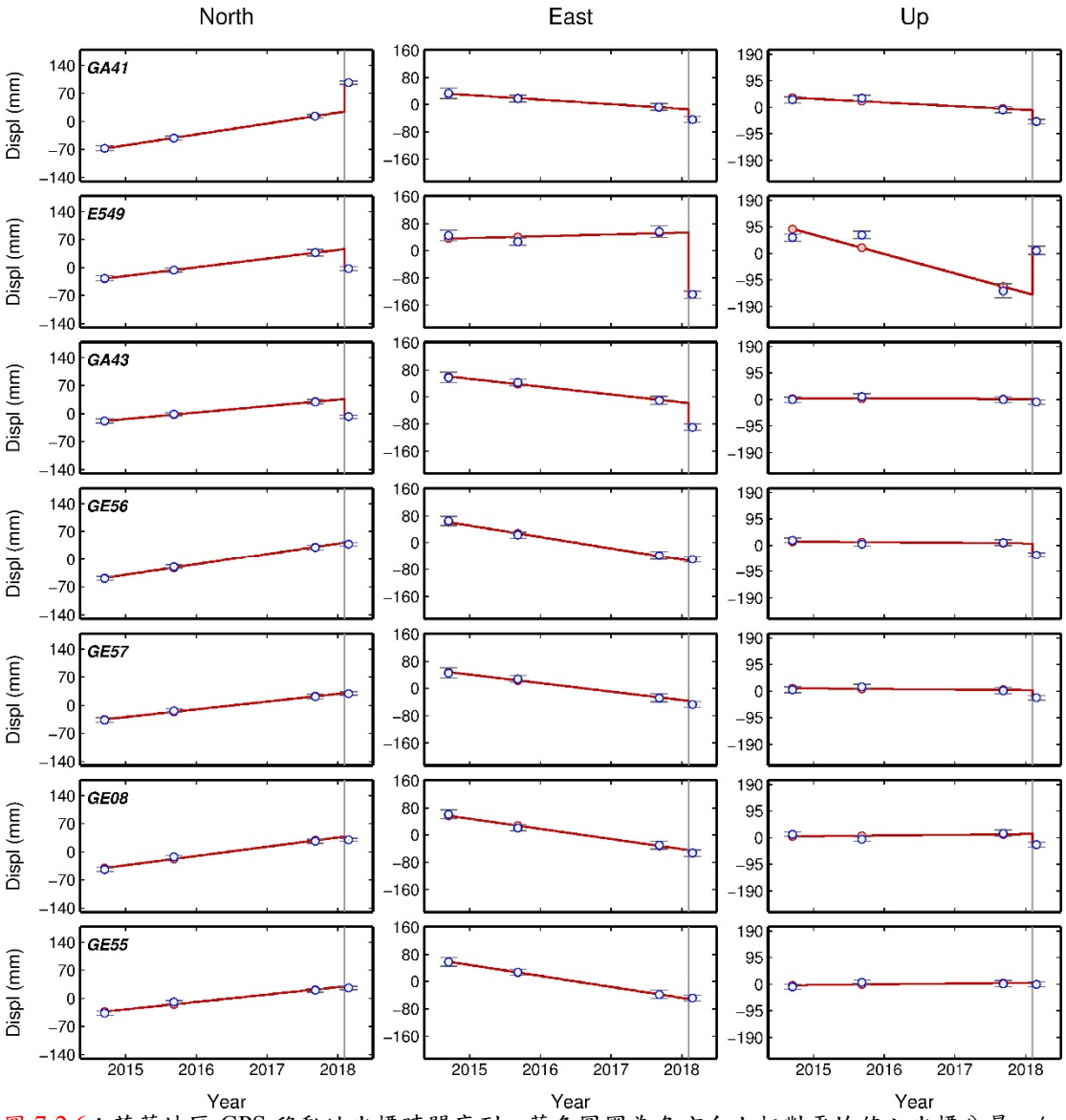


圖 7-2.6：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列。藍色圓圈為各方向上相對平均值之坐標分量，紅線為坐標時間序列擬合線，灰色垂直線為 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震發生時間，各欄左上文字為 GPS 移動站點號。

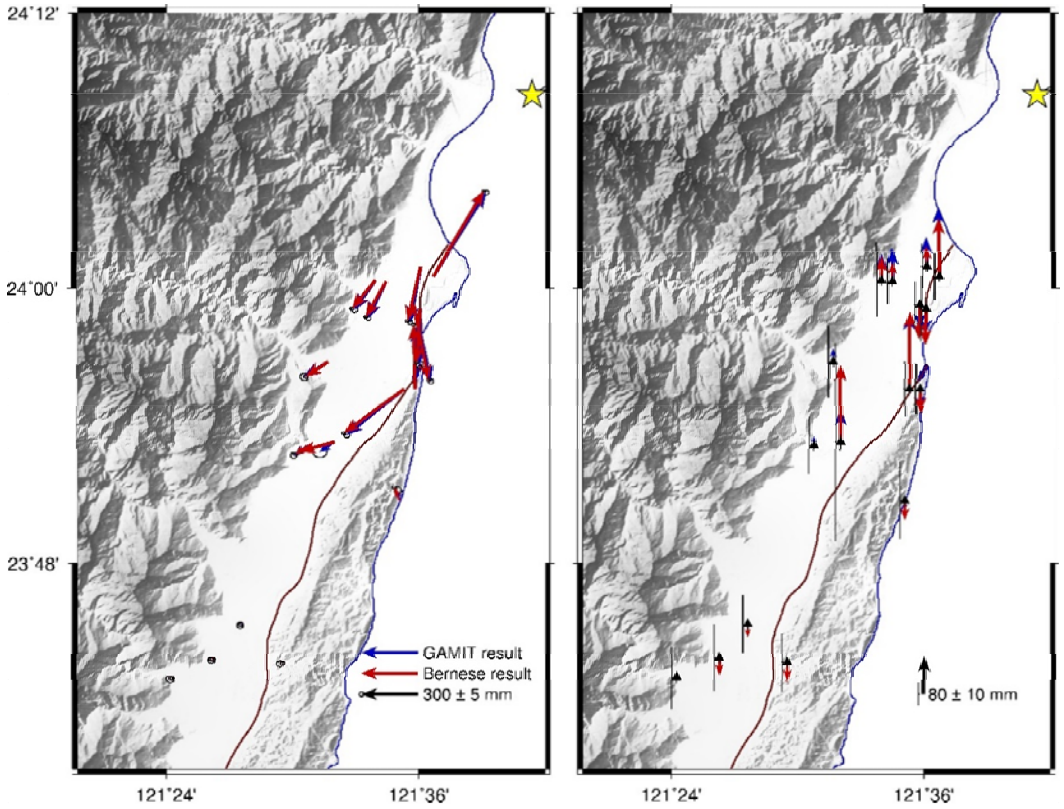


圖 7-2.7：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之同震位移場解算成果比較。

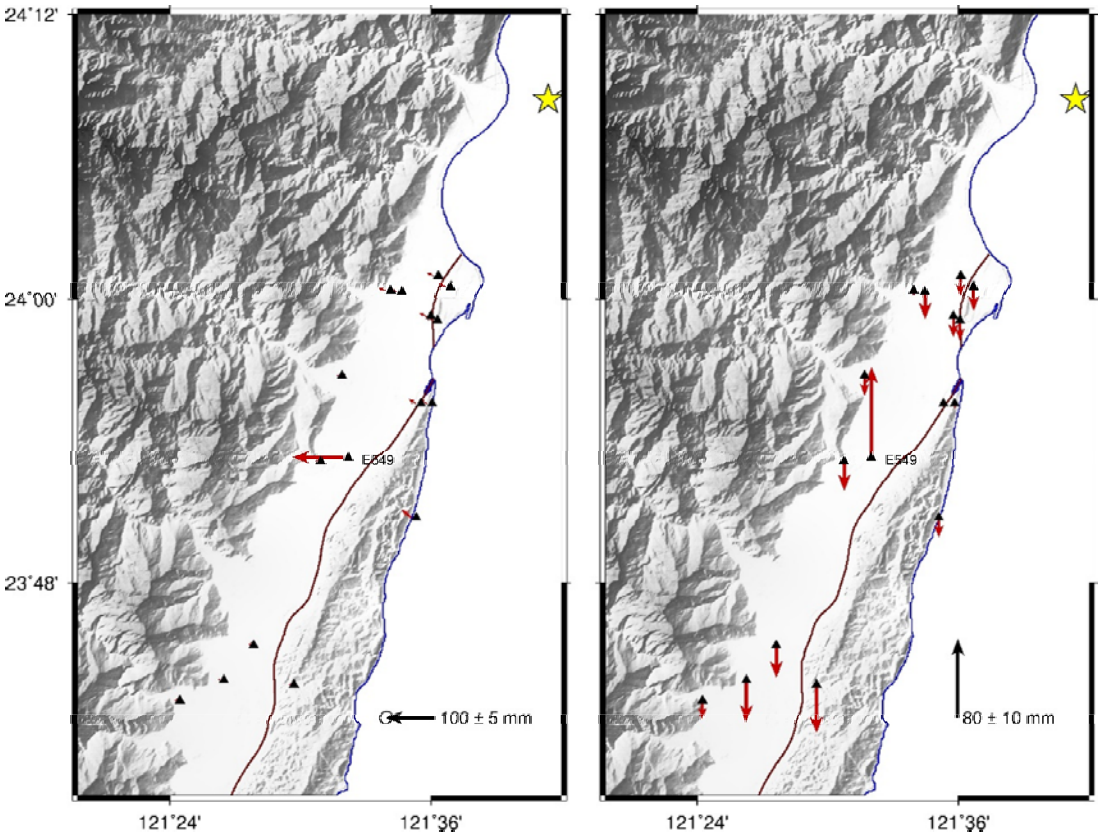


圖 7-2.8：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之 GAMIT 及 Bernese 同震位移場解算成果殘差比較。



圖 7-2.9：GPS 移動站 E549 現場環境圖。

最後得到 Bernese 與 GAMIT 兩個軟體獲得之同震位移場解算成果的結果指出（圖 7-2.10-圖 7-2.11；表 7-2.1），米崙斷層東側上盤之點位同震位移場多呈北至東北向，斷層西測之點位大多呈西南向，反映米崙斷層為左移的形態；花蓮大橋西側的 G972 及東側的 G970 測站，其同震水平位移方向由西南向轉為北向，整體水平同震位移量約 6.6 ~ 519.8 mm，同樣也反映嶺頂斷層為左移的運動形態；震源區之最大水平同震位移量發生在 GE63 測站，南北向達到 440 mm，東西向為 278 mm。

垂直位移場則指出（圖 7-2.10-圖 7-2.11；表 7-2.1），在北埔地區於米崙斷層兩側皆呈現抬升，美崙山南側則為沉陷，往南斷層東側嶺頂地區呈下陷，斷層西側志學地區則為抬升，壽豐以南位移量並不顯著，整體垂直同震位移量約 -77.6 ~ 163.6 mm。其中位於花蓮大橋西側的 G972 及東側的 G970 測站，在垂直分量上由顯著抬升轉為沉陷，變化十分顯著。無論是 GPS 移動站之水平同震位移場或是垂直同震位移場，其整體分布趨勢符合 GPS 連續站之解算結果。

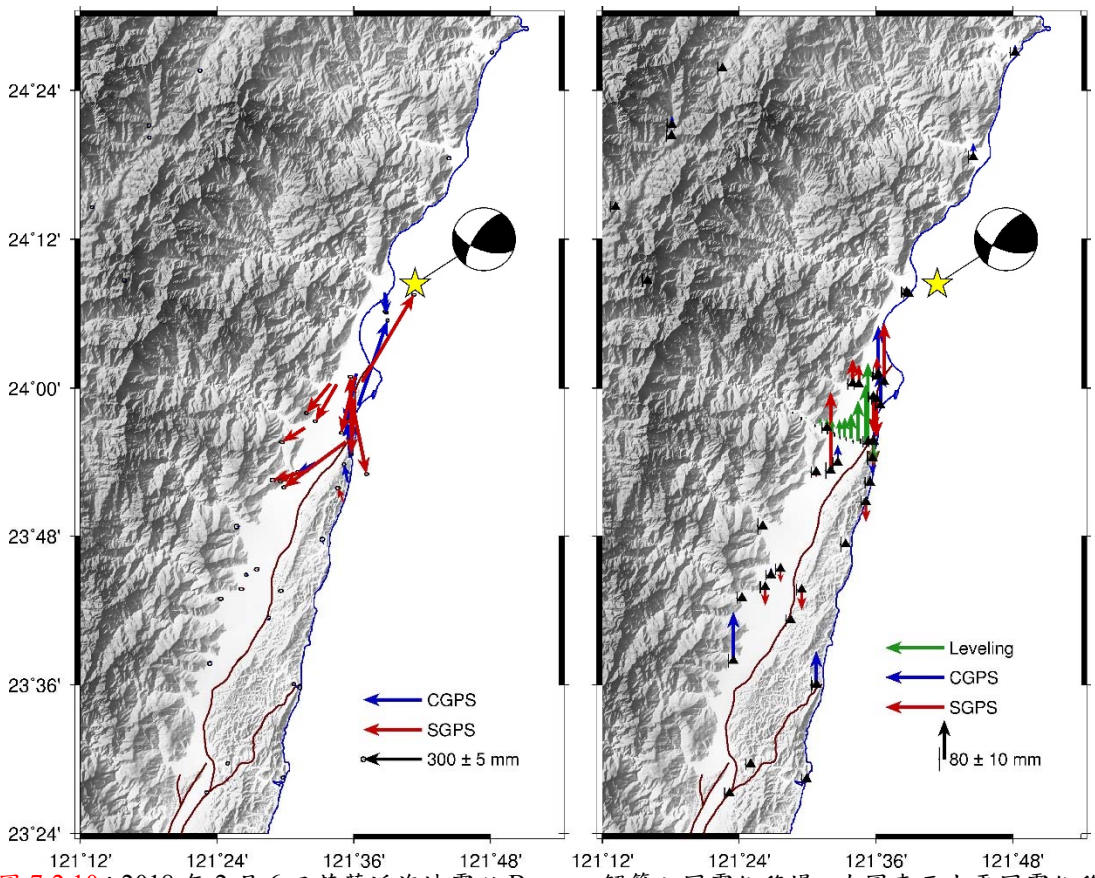


圖 7-2.10：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 解算之同震位移場，左圖表示水平同震位移場，右圖表示垂直同震位移場。

表 7-2.1：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之 GPS 移動站同震位移值。

點號	經度	緯度	de	dn	du	Sde	Sdn	Sdu	Date
E415	121.5730	24.0045	-124.212	-150.427	50.862	4.348	2.871	4.685	2/8
G970	121.6040	23.9254	-7.184	337.189	-52.039	4.472	3.034	2.365	2/8
G972	121.5955	23.9252	-315.831	-232.335	163.631	4.458	3.029	4.490	2/8
G979	121.5353	23.9450	-115.770	-76.414	7.397	5.067	3.215	4.431	2/8
GA37	121.6081	23.9836	-18.402	-285.036	-77.634	4.457	3.034	4.743	2/8
GA40	121.5817	24.0036	-108.626	-188.582	40.752	4.344	2.865	4.449	2/8
GE46	121.6032	23.9867	77.494	-398.087	-73.921	4.457	2.864	4.274	2/8
GE63	121.6188	24.0069	265.269	447.061	120.906	4.344	2.865	4.386	2/8
GE64	121.6089	24.0144	-70.315	-288.147	40.494	4.344	2.865	4.213	2/8
GA41	121.5921	23.8442	-30.088	70.572	-40.639	4.762	3.269	4.205	2/26
E549	121.5406	23.8867	-182.966	-49.528	162.218	5.759	3.912	4.862	2/26
GA43	121.5197	23.8843	-69.520	-45.291	-11.350	5.000	3.250	6.839	2/26
GE56	121.4984	23.7267	6.396	-5.635	-41.635	4.989	3.432	4.613	2/26
GE57	121.4676	23.7544	-8.692	-1.906	-26.952	4.996	3.442	4.719	2/26
GE08	121.4448	23.7300	-7.121	-9.298	-37.491	4.982	3.251	4.724	2/26
GE55	121.4110	23.7157	4.251	-5.038	-6.137	4.982	3.251	4.831	2/26

註：de、dn、du 分別代表 E、N、U 分量之同震位移值，單位為 mm；sde、sdn、sdu 分別代表 E、N、U 分量之誤差，單位為 mm；Date 為 2018 年花蓮近海地震發生後之觀測時間。

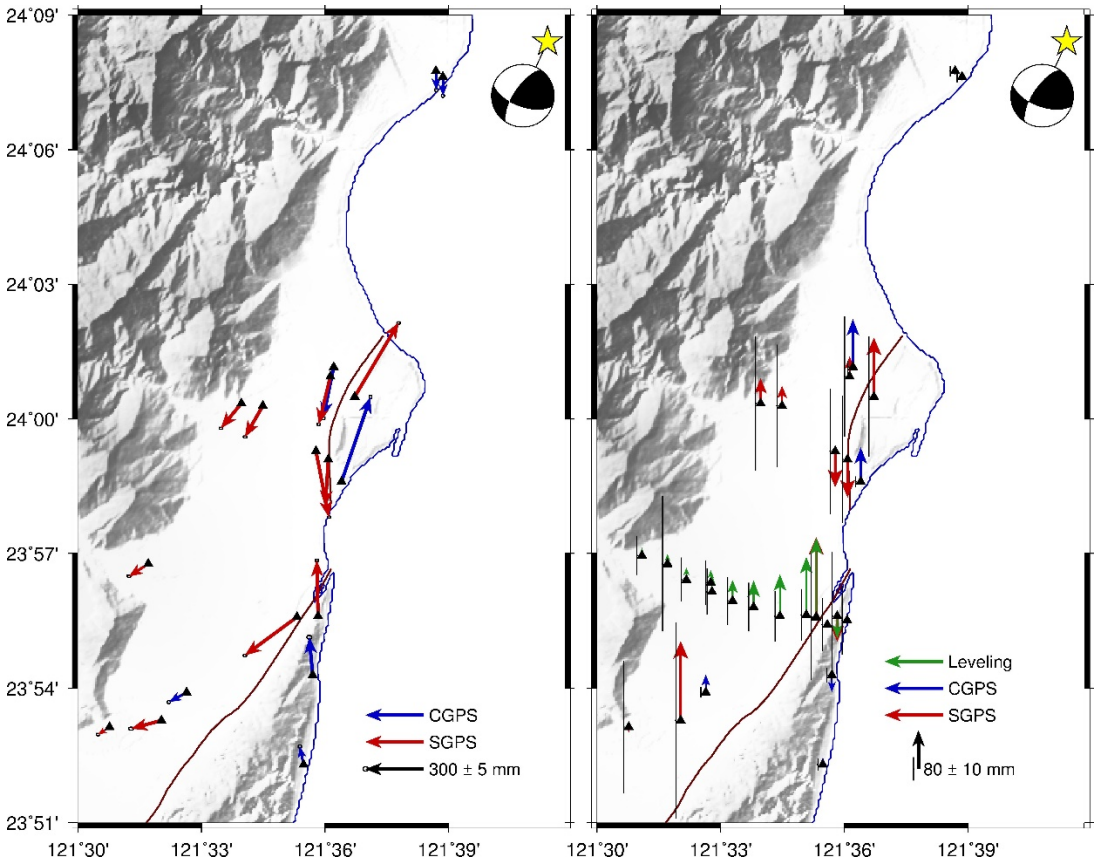


圖 7-2.11： 花 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 之同震位移場（花蓮市地區放大圖）。左圖表示水平同震位移場，右圖表示垂直同震位移場。

7-2-3 精密水準同震觀測資料分析

中央地質調查所於 2018 年 2 月 6 日花蓮近海發生之規模 6.0 地震後，於 2 月 27 日至 2 月 28 日完成嶺頂-龍澗精密水準測線之量測。在地表同震位移場的估算中，本團隊利用 2004 – 2018 年嶺頂-龍澗之精密水準測線坐標成果，在考慮速度場對各個測站地表同震位移場的影響下，採用下述方程式進行坐標時間序列的擬合，獲得本次 2018 年花蓮近海地震之同震垂直位移量（圖 7-2.12）。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_j) + v$$

其中 y 為坐標，t_i 為測量時間，c_j 為地震造成之同震位移量，n_c 為有產生同震位移量之總地震事件數，T_j 為地震事件發生之時間，H 為階層函數，v 為殘差值。

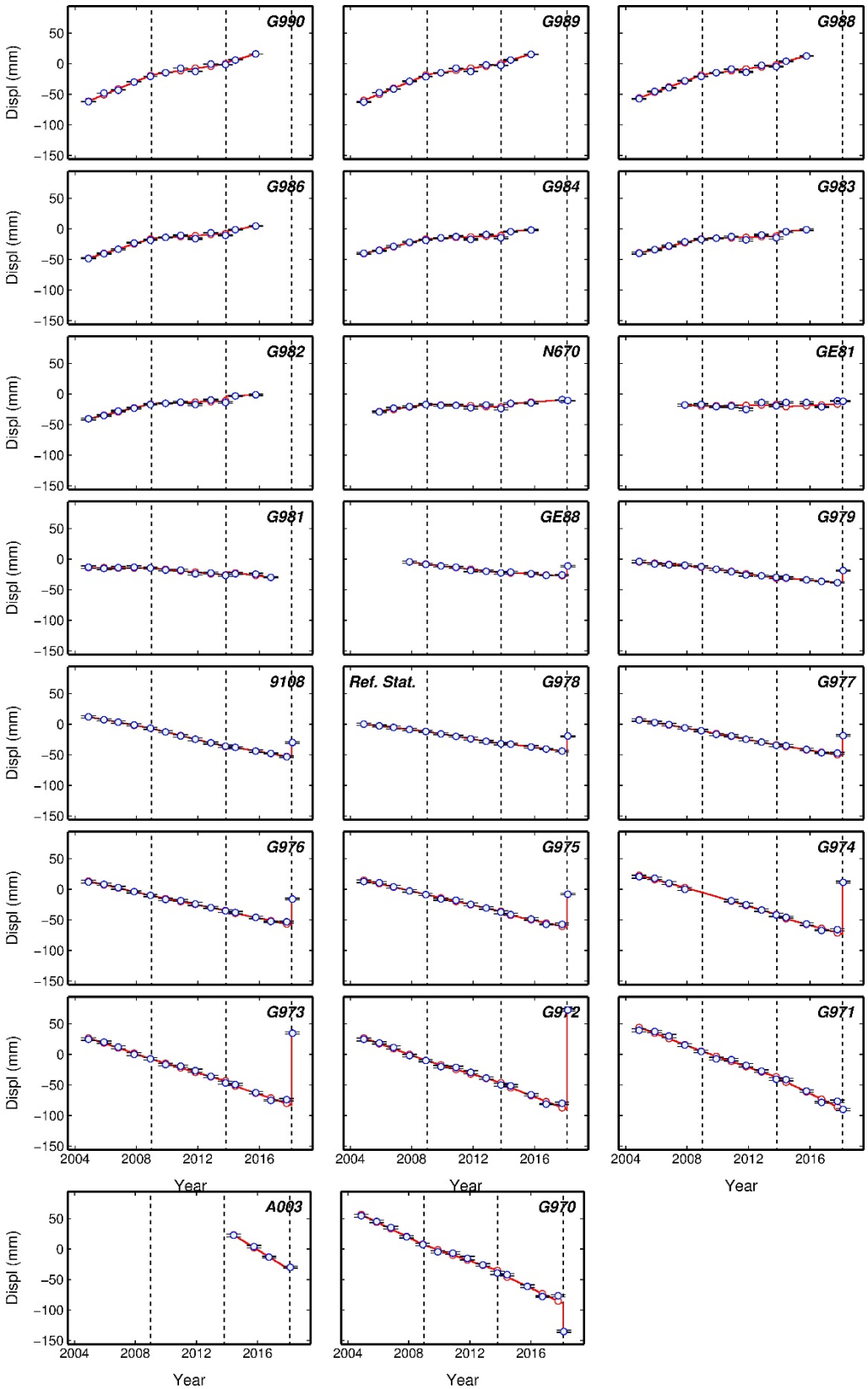


圖 7-2.12：花蓮地區嶺頂-龍澗精密水準測線之坐標時間序列。藍色圓圈為相對平均值之坐標分量，紅線為坐標時間序列擬合線，垂直虛線為各地震之發生時間，最右邊之虛線則為 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震發生時間，各小圖右上之文字為水準點點號。

由於精密水準的坐標值為相對高程值，若要估算各水準點位之實際垂直位移場，需要透過與鄰近 GPS 垂直位移場之比較約制，才能獲得與 GPS 相同參考點（KMNM）之垂直位移場。在本測線中共計有 G972（花蓮大橋西岸）及 G970（東海岸風景區北口）兩點與 GPS 移動站共點，因此本團隊選擇約制 G972 之 GPS 垂直同震位移量，來評估嶺頂-龍澗精密水準測線之垂直同震位移場。

精密水準測量結果顯示（圖 7-2.10-圖 7-2.11；表 7-2.2），相對於 KMNM 測站，嶺頂斷層西側之同震垂直位移場呈現抬升，同震量由西約 3.94 mm 向東逐漸增加至約 163.6 mm，一跨越花蓮大橋至嶺頂斷層東側，則立即轉為沉陷，沉陷值約 0.02～45.51 mm。

表 7-2.2：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之精密水準測線同震位移值。

點號	經度	緯度	du	Sdu
N670	121.4921	23.9656	-2.080	0.491
GE81	121.5051	23.9580	3.941	1.156
GE88	121.5249	23.9483	16.254	1.369
G979	121.5353	23.9450	20.737	1.442
9108	121.5430	23.9393	24.541	1.547
G978	121.5528	23.9382	25.646	1.562
G977	121.5533	23.9348	32.685	1.617
G976	121.5616	23.9314	42.329	1.663
G975	121.5702	23.9292	54.595	1.701
G974	121.5808	23.9258	85.294	1.751
G973	121.5915	23.9262	118.346	1.809
G972	121.5955	23.9252	163.631	1.826
G971	121.5999	23.9226	0.021	1.844
A003	121.6029	23.9243	5.031	2.401
G970	121.6040	23.9254	-45.513	1.861

註：Du 為同震垂直位移量，單位為 mm；sdu 代表同震垂直量之誤差，單位為 mm。

7-2-4 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場

2018 年花蓮地震發生後，歐洲太空總署 ESA（European Space Agency）所屬衛星 Sentinel-1B 於 2 月 9 日飛越台灣上空，拍攝了震後第一幅升軌軌道（ascending orbit）雷達影像。隨後 2 月 11 日又拍攝震後第一幅降軌軌道（descending orbit）的雷達影像。此外本研究團隊執行日本宇宙航空研究開發機構（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）ALOS-2 的 RA-6 計畫，緊急向 JAXA 要求拍攝震央區 ALOS-2 雷達影像，於 2 月 10 日與 2 月 11 日同樣飛越台灣上空，拍攝了震後的雷達影像。本研究團隊隨即使用差分合成孔徑雷達干涉技術（D-InSAR），將上述影像與震前之影像進行運算，得到視衛星方向同震地表視衛變形圖。圖 7-2.13 即為 Sentinel-1 衛星升軌干涉圖，由圖可明顯看出主要的變形區域（條紋密度較高）位於米崙斷層南側與嶺頂斷層北段的下盤側。由於雷達影像為側視拍攝之緣故，經過相位回復後，所得到之變化量為地表於兩張影像拍攝時間內之相對衛星的斜距變形。以此影像為例，變形量的值代表花蓮地震同震時，位於米崙斷層南段的西側地區地表位移分量為抬升或向東為主。而跨過木瓜溪向南位於嶺頂斷層北段的西側地區地表位移分量則為下陷或向西為主。

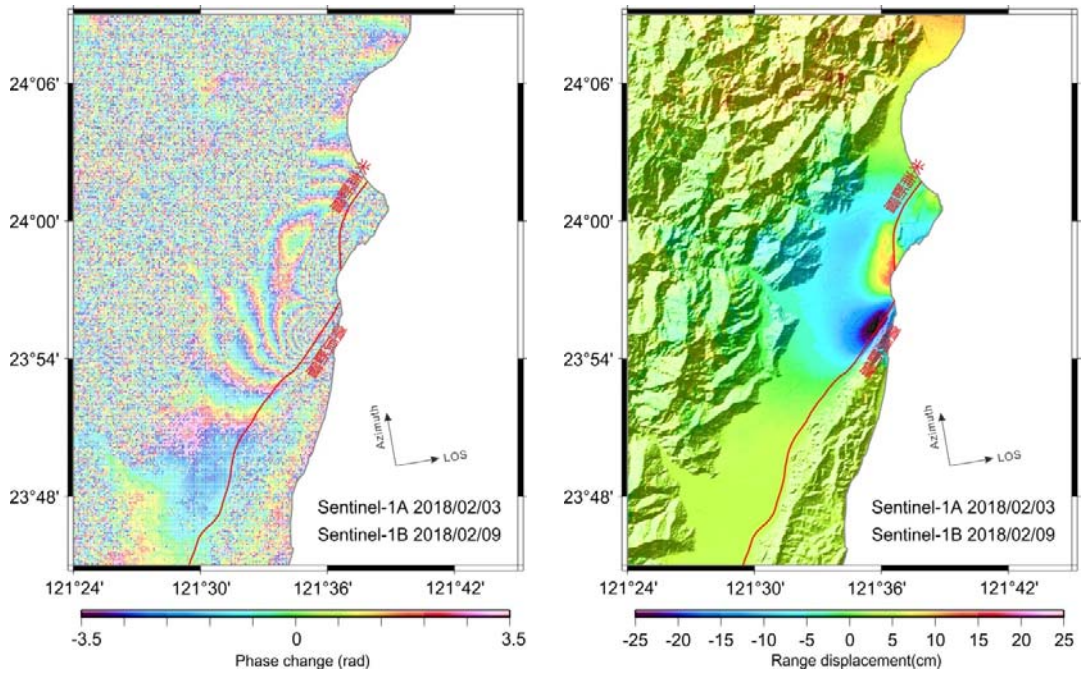


圖 7-2.13：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。

7-2-4-1 Sentinel-1 及 ALOS-2 雷達衛星之同震位移場

由於根據 GPS 同震位移結果可以明顯看出此次地震同震位移較大的地方並不是震央所在之處，而是位於南邊的米崙斷層兩側及嶺頂斷層北段，因此衛星影像處理上主要以此區域為主（圖 7-2.14）。由於雷達衛星對於沿軌道飛行方向（近南北向）之變動量較不敏感。若忽略沿沿軌道飛行方向的變動，將升軌和降軌兩種衛星影像的不同視線方向，由視衛星方向上的變形轉換至東西向與高程方向的同震變形。在主要變形區域之中，兩種衛星影像計算之成果均顯示最大的抬升量位於花蓮市東北方靠近七星潭的位置；由 Sentinel-1 影像也可得到另一個主要抬升區域為嶺頂斷層北段下盤側。而主要下陷區域則是位於米崙斷層南段。並且跨越米崙斷層或嶺頂斷層北段東西兩側均有明顯之位移不連續，因此，從同震地表視衛星方向變形觀點，本研究團隊推測此次地震發生之時，米崙斷層與嶺頂斷層均有產生錯動，且分屬不同的斷層系統。另外嶺頂斷層北段的下盤側也可能存在一未知斷層被誘發，造成下盤側的抬升變形和西南向的同震位移。

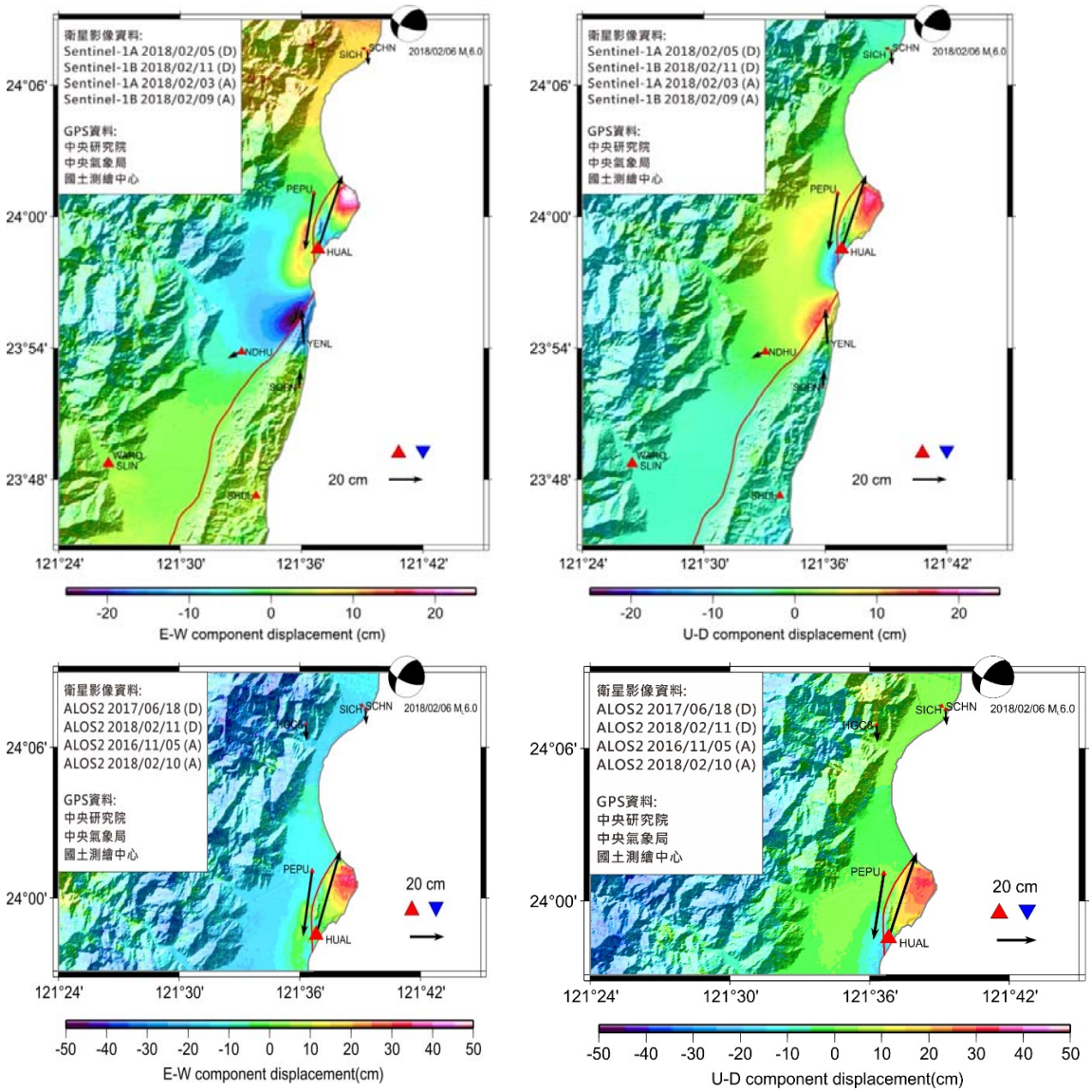


圖 7-2.14：Sentinel-1 與 ALOS-2 東西方向與垂直方向花蓮地震同震地表變形場。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續 GPS 測站同震變形水平方向位移。三角形為連續 GPS 測站同震變形垂直方向位移。地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。

7-3 花蓮近海地震震源模型

由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 7-1.2），本次地震的主要斷層面可能有兩種型態，一為北北東–南南西走向向西傾之斷層面；一為近乎東–西走向向南傾之斷層面。然而，根據野外調查與初步的大地測量表明，本次規模 6.4 的地震在縱谷斷層最北段的米崙斷層產生地表破裂，造成約幾十公分的位移量，一些傾斜或倒塌的建築物也集中在米崙斷層的地表破裂處。在過去的地質研究中，米崙斷層被認為是東北–西南走向向東傾之斷層面（例如：Shyu et al., 2007）。為了解析這個問題，本團隊利用斷層錯位模型（Okada, 1985, 1992），建立初步的斷層模型來嘗試提供一個可能的震源模型。

7-3-1 斷層錯位模型

本計畫的斷層錯位模型是採用根據彈性錯動理論（Okada, 1985, 1992）所建立之斷層錯位模型，其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量。假設地球為表面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間(half space)，介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體(Poisson solid)，即彈性模量(λ)等於剪切模量(μ)之彈性體。沿著斷層元素(fault patch/fault element)的斷層滑移量 Δu_j（ξ_1, ξ_2, ξ_3）會使均質均向的彈性體表面產生位移場 Δu_i（x_1, x_2, x_3），其關係如下式所列。其中，δ_{jk}為克羅內克函數；v_k為正交於地表元素$d\sum$之餘弦函數方向；F 為施力點之力量大小。

$$u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)\right] v_k d\sum$$

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括：斷層平面位置(km)、深度(km)、長度(km)、寬度(km)、走向(°)、傾角(°)。其中，斷層平面位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層斷層面下緣的深度。斷層滑移量(fault slip)包含三個方向的分量[S_1, S_2, S_3]，分別以左移(left-lateral strike slip)、逆衝(reverse dip slip)及伸張(tensile slip)為正方向。在進行對雙偶合震源之斷層活動分析時，一般只會考慮走向滑移量(S_1, strike slip)與傾向滑移量(S_2, dip slip)；在進行火山之岩漿沿岩脈運動分析時，才會採用伸張滑移量(S_3)。斷層滑移角(rake)指示斷層上盤相對於下盤之運動方向，其和斷層滑移量之關係為 tan(rake) = S_2 / S_1。地表位移量(displacement)

同樣也包含三個方向的分量[U_1, U_2, U_3]，分別以東(East)、北(North)與上(Up)為正方向。水平位移量(horizontal displacement)則為 sqrt(U_1^2+U_2^2)。

由震源機制解與主餘震的空間分布指出（圖 7-3.1），本次地震主要的孕震構造極有可能是北北東–南南西走向且向西傾之斷層面；另一方面，GPS 同震位移場（圖 7-2.11）、精密水準同震垂直位移場（圖 7-2.11）與雷達衛星影像（圖 7-2.14）分析結果皆指出，此次地震同震位移較大的地方並不是震央所在之處，而是位於南邊的米崙斷層兩側及嶺頂斷層北段，另外嶺頂斷層北段的下盤側也可能存在一未知向西傾的斷層被誘發，造成下盤側的抬升變形和西南向的同震位移。然而，主要的地表位移量也確實是沿著米崙斷層及嶺頂斷層北段在分布，顯示近地表也有向東傾斜之斷層在這次地震中被誘發。為了獲得更可信之斷層幾何形貌，本團隊以中央氣象局震源機制解提供的斷層幾何參數(走向 215.68°、傾角 56.36°)、主餘震分布與米崙斷層及嶺頂斷層的斷層線位置為初始值，利用單一滑移量斷層模型，以蒙地卡羅法反演 GPS 同震位移場與 DInSAR 同震位移場，搜尋最佳的斷層參數，包含有斷層位置、斷層長度、斷層寬度、斷層傾角、斷層深度與斷層滑移量。隨後在固定這些斷層幾何參數，將斷層面劃分成數十個小斷層面，反演斷層滑移分布。

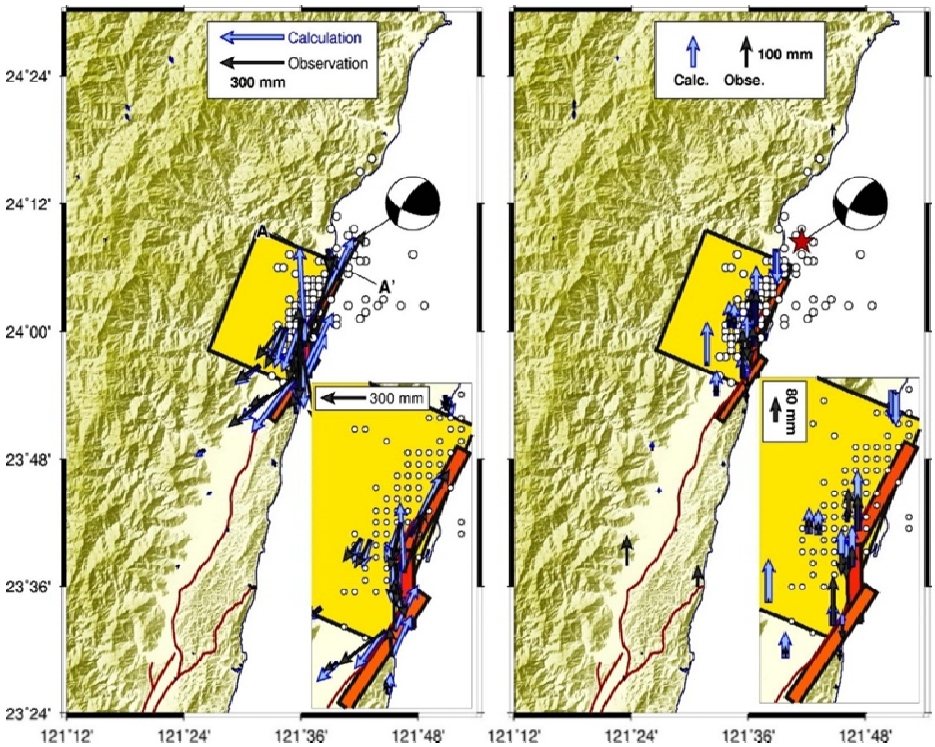


圖 7-3.1：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型擬合結果。左圖為 GPS 水平位移場擬合結果；右圖為 GPS 垂直位移場擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，舉行顏色反映滑移量的大小；紅色星號為主震震央位置；白色圓圈為餘震分布。

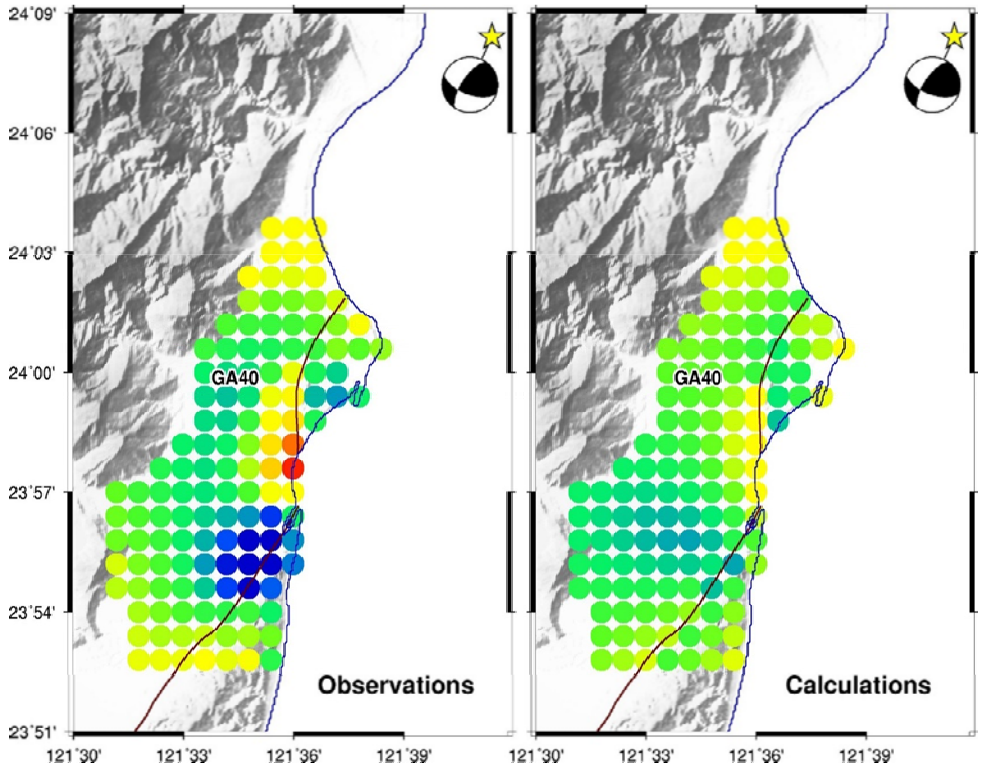


圖 7-3.2：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型 DInSAR 擬合結果。左圖為 DInSAR 同震位移場觀測值；右圖為 DInSAR 同震位移場計算值。

7-3-2 斷層模型結果

本計畫首先利用單一滑移量斷層模型，以蒙地卡羅法反演 GPS 同震位移場與 DInSAR 同震位移場（圖 7-3.2），搜尋最佳的斷層參數，包含有斷層位置、斷層長度、斷層寬度、斷層傾角、斷層深度與斷層滑移量。其模型最佳解（圖 7-3.1）指出，造成這次地震的孕震系統確實包含兩個可能的斷層面，一個為深部向西傾斜，傾角約 67°的左移盲斷層，此斷層面可能延伸至約 20 km 深，並在淺部被米崙斷層截切；另一個則為淺部向東傾斜的米崙斷層，傾角約 52°的左移斷層，斷層破裂深度約至 7 km 深。此發震系統的斷層幾何，可以與主震位置及主震餘震序列進行相當好的比對（圖 7-3.3）。

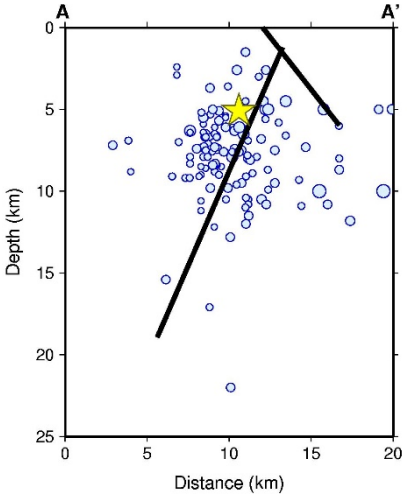


圖 7-3.3：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型與主震餘震序列比較結果。剖面位置標註於圖 3.1。黑色線為斷層投影位置，黃色星號為主震震源位置，藍色圓圈為餘震分布。

接著，在固定這些斷層幾何參數後，將斷層面劃分成數十個小斷層面（圖 7-3.4），同時反演 GPS 同震位移場、Sentinel-1 升軌（圖 7-3.5）與降軌（圖 7-3.6）之同震位移場，估算各斷層之斷層滑移分布。其最佳模型（圖 7-3.4）指出，深部向西傾斜之盲斷層與淺部向東傾斜之米崙斷層皆為近乎純左移之走向滑移斷層。深部向西傾斜盲斷層之滑移量主要分布在 200 mm ~ 800 mm，集中在深度約 2 – 15 km 的位置，介於主震震央位置與壽豐之間。淺部向東傾斜米崙斷層之滑移量主要分布在 200 mm ~ 600 mm，集中在深度約 5 km 以上的位置。深部向西傾斜盲斷層之測地矩（M_0）為 7.35×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 6.54；淺部向東傾斜米崙斷層之測地矩為 9.41×10^{24} dyne-cm，相當於 M_w 5.95。

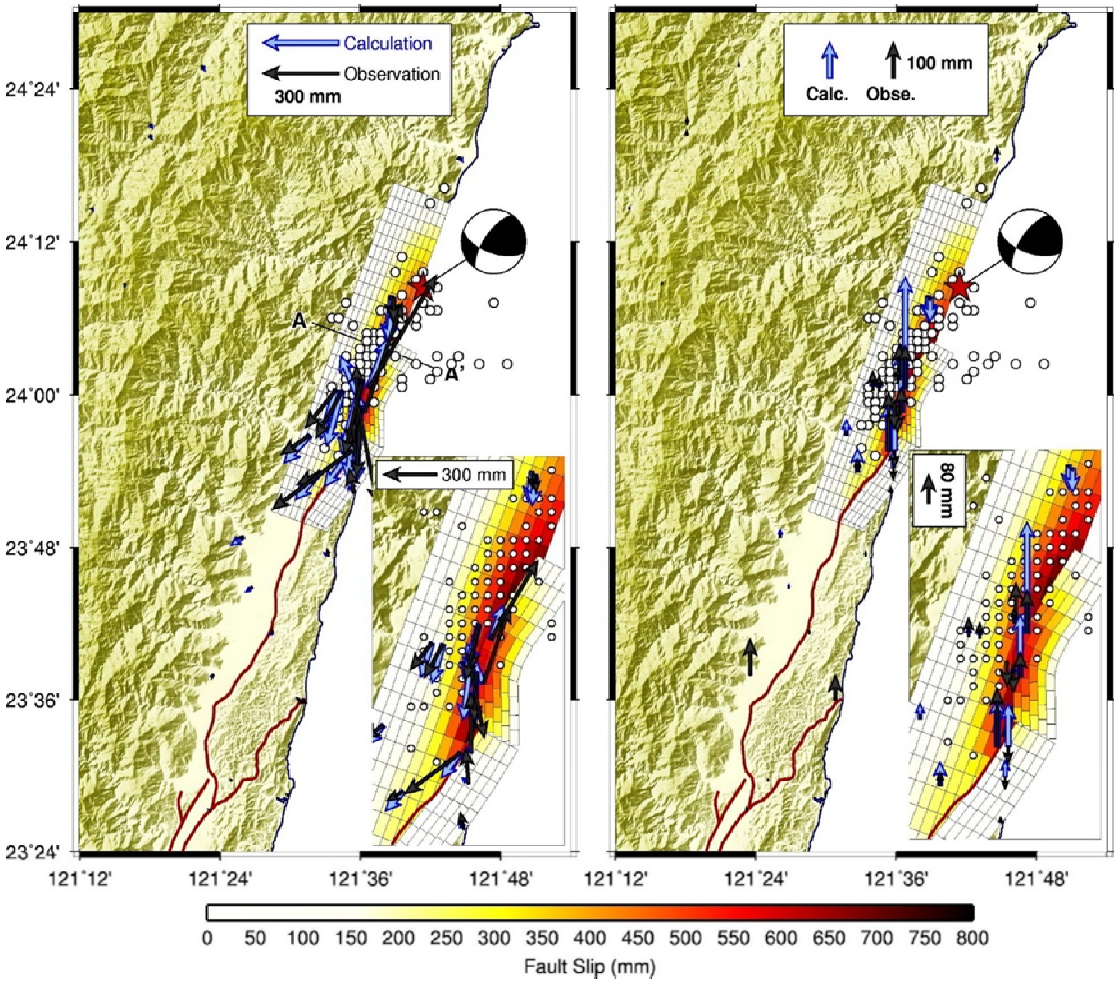


圖 7-3.4：花蓮近海地震多滑移量斷層模型擬合結果。左圖為 GPS 水平位移場擬合結果；右圖為 GPS 垂直位移場擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，舉行顏色反映滑移量的大小；紅色星號為主震震央位置；白色圓圈為餘震分布。

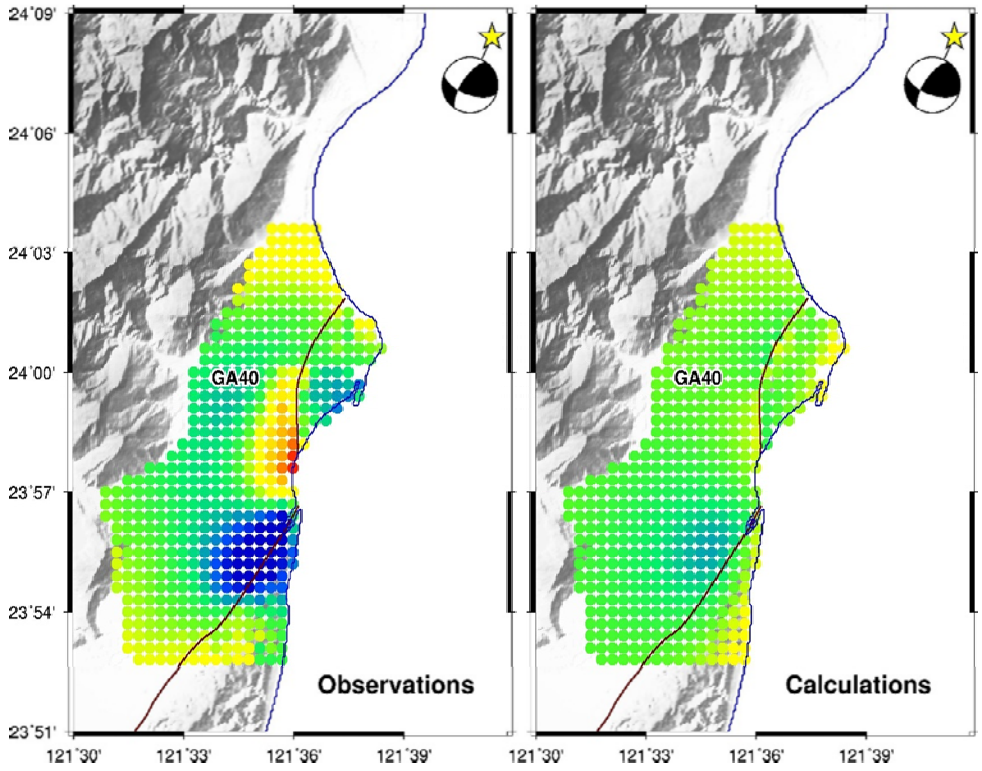


圖 7-3.5：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 升軌擬合結果。左圖為 DInSAR 同震位移場觀測值；右圖為 DInSAR 同震位移場計算值。

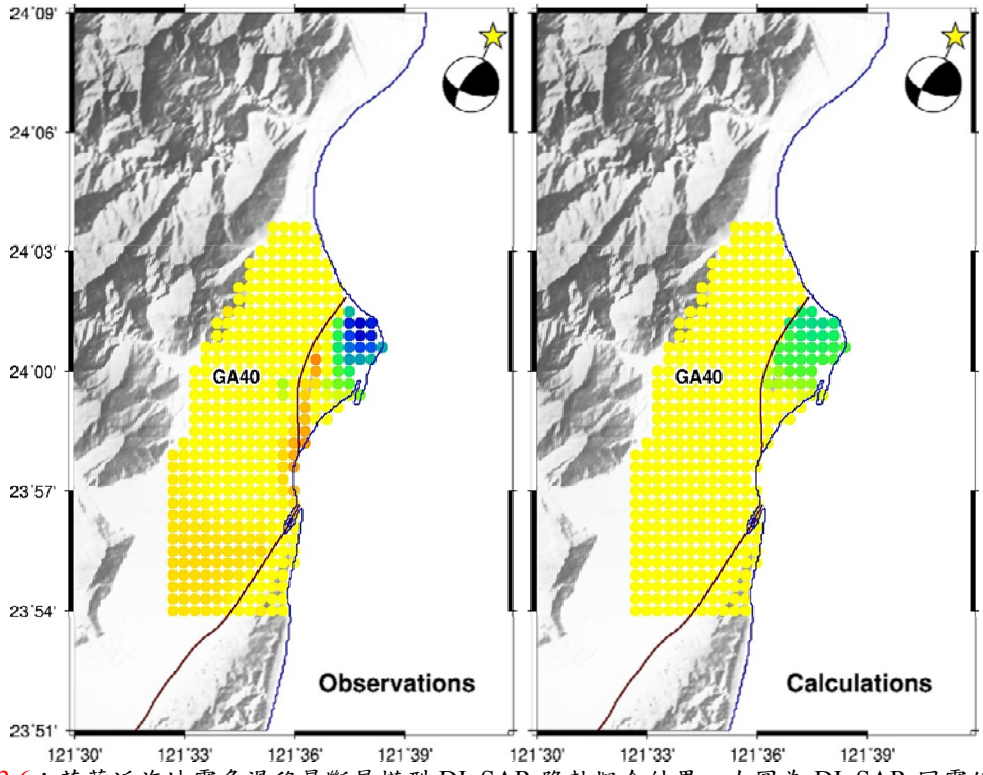


圖 7-3.6：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 降軌擬合結果。左圖為 DInSAR 同震位移場觀測值；右圖為 DInSAR 同震位移場計算值。

第八章、結論

本期計畫的主要工作重點在於（1）採用 GMAIT 與 Bernese 軟體分別解算 GPS 移動站資料，用以評估 GPS 移動站速度場之穩定性；（2）嘗試評估 GPS 移動站垂直速度場；（3）求解臺灣不同時期之地表速度場；（4）加入 Sentinel-1A 衛星影像獲得之地表速度場；（5）嘗試結合 PSInSAR 速度場與 GPS 速度場來獲得更高解析度之的表三維速度場；（6）利用斷層模型反演地表速度場來推估斷層滑移虧損速率。

在 GPS 連續站資料處理方面，計算歷史資料累積至 2018 年 9 月全臺連續全球定位系統測站近 500 站，並加入週期性效應與震後變形衰減因子分析。移除部分測站因為架設時間過短（< 1 年），以及有同震及震後變形效應後，相對於澎湖白沙站，全臺速度場呈現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。縱谷斷層東側與西南部地區為水平速度較大的區域；垂直速度場以西部彰雲地區以及東部縱谷斷層西側為主要下陷區域，中央山脈呈現以抬升為主的變形行為。

本計畫 GPS 移動站部分共完成 739 站的施測，精密水準則完成共計 29 條測線之施測。比較採用 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 在北部地區的 GPS 移動站解算成果，顯示兩者之水平速度場相關係數達 0.99 以上，垂直速度場相關係為 0.84。移動站速度南北、東西、垂直三分量的估值差異平均分別為-0.37、0.87、-0.14 mm/yr，差異量皆 <1 mm/yr，故本計畫 GPS 移動站之解算成果是可靠的。本計畫同時也求解 2018 年 2 月 6 日規模 6.0 花蓮近海地震之地表同震位移場，指出米崙斷層與嶺頂斷層有發生錯動。接著本計畫完成西南部 2017 年 5 月 15 日至 2018 年 9 月 3 日間 15 個單頻 GPS 點位資料解算，結果指出各單頻測站之速度場與周圍雙頻測站在此一時期之速度場相當一致。

本年度分析處理 Sentinel-1A 衛星影從 2015 年 4 月至 2018 年 8 月之干涉影像對，由升軌及降軌結果顯示，北部地區主要構造活動較不明顯。大致上運動速率都介於-10 到 10 mm/yr，並且跨斷層都沒有明顯的速度不連續，斷層活動性相對較低。

本計畫利用 GPS 三分量觀測資料和三維塊體模型 BLOCKS、DEFNODE 與

基線應變模型，針對臺灣北部及中部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析。模型中將此區共分為 23 個塊體，並將地調所公佈的活斷層（宜蘭北部及南部構造除外）當作各塊體的邊界。利用三維塊體模型，我們同時解算符合 GPS 觀測速度的各塊體最佳剛體旋轉速率及邊界斷層上的最佳滑移速率及滑移虧損率（slip deficit rate）。本計畫接著以 BLOCKS 程式、DEFNODE 程式與基線應變模型計算各斷層的加權平均滑移虧損速率，結果顯示山腳斷層為 1.9 mm/yr，湖口斷層為 1.8 mm/yr，新竹斷層為 1.1 mm/yr，新城斷層為 1.3 mm/yr，三義斷層為 5.9 mm/yr，屯子腳斷層為 1.7 mm/yr，獅潭斷層為 5.2 mm/yr，宜蘭北部構造為 7.4 mm/yr，宜蘭南部構造為 6.1 mm/yr。目前本研究僅引入 GPS 三分量觀測資料，以垂直向速度場擬合較不理想，可能與非斷層活動(如：地層下陷、地下水位變化…等)的雜訊有關，未來將嘗試以二維斷層模型輔助分析斷層垂直向地表運動，並將其他測地資料套入模型，以期模擬出更接近真實的斷層滑移行為。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。

參考文獻

林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）臺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。

許榮欣、高書屏（1996）臺灣地區一等水準網測量殘留之系統誤差之研究。行政院國家科學委員專題研究計畫成果報告，共 82 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。

黃旭燦、楊耿明、吳榮章（2004）臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（V）。經濟部中央地質調查所報告，計畫編號 5226902000-02-93-02。

劉啟清（1986） 水準測量的系統誤差，第五屆測量學術及應用研討會論文集。國科會工程研究中心及成功大學，F1-F25。

王淳璟（2015）結合衛星雷達與 GPS 觀測資料分析北台灣地表變形。國立中央大學地球科學學系碩士論文，共 118 頁。

王乾盈及孫志財 (1999) 臺北盆地震測地層解釋。經濟部中央地質調查所特刊，第十一號，第 273 至 292 頁。

朱傲祖、梁勝雄、李建成、陳建良 (2012) 湖口斷層新釋：上盤活動背衝斷層之新發現及露頭構造分析。經濟部中央地質調查所特刊，第二十六號，第 31 至 51 頁。

邱華燈 (1962) 台中縣大安背斜震波測勘之結果與解釋。中國地質學會專刊，第 1 號，第 187-188 頁。

吳逸民及張建興 (2007) 苗栗台中都會區地震災害潛勢分析—子計畫：苗栗台中都會區地震震源潛勢分析(II)。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，21 頁。

李奕亨 (2009) 以中尺度反射震測法研究屯子腳斷層活動機制及構造的意義。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 113 頁。

陳冠宇 (2014) 台灣北部由造山帶至弧後張裂之陸域及海域構造研究。國立中央大學地球科學系博士論文，共 199 頁。

黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏 (2004) 斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)-台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。經濟部中央地質調查所報告 93-13 號。

黃宣維 (2012) 以三維構造幾何形貌和大地測量分析台灣西北部新竹地區之新期構造活動。國立臺灣大學理學院地質科學系碩士論文，共 132 頁。

黃姝琳 (2009) 台灣南部嘉義地區麓山帶構造型態轉換之研究。國立臺灣大學理學院地質科學系碩士論文，共 101 頁。

蒲新杰 (2010) 藉由高密度地震網之監測資料探討新竹地區地殼構造的特性。國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 159 頁。

楊耿明、洪日豪、吳榮章、黃旭燦、丁信修、徐祥宏 (2001) 斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究 (1/5)-西南地區(觸口斷層)。經濟部中央地質調查所，第 20 至 33 頁。

羅聖宗、林殿順 (2007) 十萬分之一海洋地質圖幅編制測試計畫期末報告。經濟部中央地質調查所委辦計畫。

林銘軒 (2012) 台北盆地水文地質架構及地層下陷之探討。國立台灣大學理學院地質科學系暨研究所碩士論文，共 116 頁。

范凱婷 (2010) 台北盆地及周圍山區之現今地表變形研究。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 102 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)期末報告，中央地質調查所報告第 99-10 號。經濟部中央地質調查所，共 400 頁。

Altamimi, Z., Collilieux, X., and Metivier, L. （2011） ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame. J. Geod., doi:10.1007/s00190-011-0444-4.

Altamimi, Z., Paul Rebischung, Laurent Mtivier, and Xavier Collilieux. 2016. “ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions.” Journal of Geophysical Research: Solid Earth 121（8）: 6109–31. doi:10.1002/2016JB013098.

Angelier, J., Chang, T.-Y., Hu, J.-C., Chang, C.-P., Siame, L., Lee, J.-C., Deffontaines, B., Chu, H.-T.,

Lu, C.-Y. （2009） Does extrusion occur at both tips of the Taiwan collision belt? Insights from active deformation studies in the Ilan Plain and Pingtung Plain regions. Tectonophysics, 466, 356-376, doi:10.1016/j.tecto.2007.11.015.

Blewitt, G. （2015） GPS and Space-Based Geodetic Methods. In Treatise on Geophysics, edited by Gerald Schubert, 2nd Edition, 3:307–38. Oxford: Elsevier.

Chiu, H.-T. (1971) Folds in the northern half of western Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, 8, 7-19.

Champenois, J.（2011）Caractérisation des déformations tectoniques inter-sismiques de l'île de Taiwan par interférométrie radar. PhD Thesis, University Paris Est, France.

Crosetto, M., Castillo, M., and Arbiol, R. （2003） Urban subsidence monitoring using radar interferometry: Algorithms and validation. Photogramm. Eng. Remote Sens., 69, 775-783.

Ching, K.-E., Rau R.-J., Lee J.-C., Hu J.-C. （2007） Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995–2005. Earth Planet. Sci. Lett., 262, 601–619, doi:10.1016/j.epsl.2007.08.017.

Ching, K.-E., R.-J. Rau, K. M. Johnson, J.-C. Hu, and J.-C. Lee （2011） Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, J. Geophys. Res., 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.

Ching, K.-E., R.-J. Rau, J.-C. Hu, and J.-C. Lee 2007. “Contemporary Deformation of Tectonic Escape in SW Taiwan from GPS Observations, 1995-2005.” Earth and Planetary Science Letters 262 （3–4）: 601–19. doi:10.1016/j.epsl.2007.08.017.

Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M.K., and Miyazaki, S. （2002） Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series, J. Geophys. Res., 107, 2075, doi:10.1029/2001JB000573.

Desbrun, M., M. Meyer, P. Schroder, and A. H. Barr （1999）, Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow, in Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH ’99, 317–324, ACM Press/Addison-Wesley, New York, doi:10.1145/311535.311576.

Dominguez, S., J.-P. Avouac, and R. Michel (2003) Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan, J. Geophys. Res., 108(B2), 2083, doi:10.1029/2001JB000951.

Ferretti, A., Prati, C., and Rocca F. （2000） Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 38（5）, 2202-2212.

Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. （2001） Permanent scatterers in SARinterferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39（1）, 8 –20.

Herring, T.A., King, R.W., Clusky, and S.C.M. （2010） GAMIT/GLOBK Reference Manual. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachussetts Institute of Technology.

Hooper, A., and Zebker H. A. （2007） Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. J. Opt. Soc. Am. A, 24（9）, 2737-2747.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B. （2004） A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. Geophys. Res. Lett., 31（23）, doi: 10.1029/2004gl021737.

Hooper, A., Segall P., and H. Zebker （2007）, Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos, J. Geophys. Res., 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763.

Hooper A., Bekaert D., Spaans K., and Arikan M. （2012） Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, Tectonophysics, 514-517, pp.1-13. doi:10.1016/j.tecto.2011.10.013

Hugentobler, U., Schaer, S., and Fridez, P. eds. （2005） Bernese GPS software version 5.0. Astronomical Institute, University of Berne, 388 pp.

Herring, T. A., R. W. King, M. A Floyd, and S. C. McClusky. 2015. GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT, Release 10.6. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm.

Hou, C.-S., Hu, J.-C., Chen, Y.-G., Chen, C.-L., Cheng, L.-W., Tang, C.-L., Huang, S.-H., Lo, C.-H.（2009）The crustal deformation of the Ilan Plain acted as a westernmost extension of the Okinawa Trough. Tectonophysics, 466, 344-355, doi:10.1016/j.tecto.2007.11.022.

Hsieh, C.-S., Shih, T.-Y., Hu, J.-C., Tung, H., Huang, M.-H., Angelier, J. （2011） Using differential

SAR interferometry to map land subsidence: A case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. Nat. Hazards, 58, 1311-1332.
Hu, J.-C., Yu, S.-B., Angelier, J., Chu H.-T. （2001） Active deformation of Taiwan from GPS measurements and numerical simulations. J. Geophys. Res., 106, 2265-2280.
Hu, J.-C., Yu, S.-B., Chu, H.-T., Angelier, J. （2002）Transition tectonics of northern Taiwan induced by convergence and trench retreat, in Byrne, T.B., and Liu, C.-S., eds., Geology and Geophysics of an Arc-Continent collision, Taiwan. Geol. Soc. Am. Special Papers 358, 149-162.
Hu, J.-C., Chu, H.-T. Hou, C.-S., Chen, R.-F., Lai, T.-H., Nien P.-F. （2006） The contribution to tectonic subsidence by groundwater abstraction in the Pingtung area, southwestern Taiwan as determined by GPS measurements. Quatern. Int., 147, 62-69.
Hu, J.-C., Hou, C.-S., Shen, L.-C., Chan, Y.-C., Chen, R.-F., Huang, C., Rau, R.-J., K.H., Chen, Lin, C.-W., Huang, M.-H., Nien, P.-F. （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., 35, 287-302, doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.020.
Huang, M.-H., Tung H., Fielding, E., Huang, H.-H., Liang, C., Huang, C. Hu, J.-C. （2016）. Multiple fault slip triggered above the 2016 Mw 6.4 MeiNong earthquake in Taiwan. Geophys. Res. Lett., 43, doi: 10.1002/2016GL069351.
Huang, B. S. and Y. T. Yeh (1992) Source geometry and slip distribution of the April 21, 1935 Hsinchu-Taichung, Taiwan earthquake, Tectonophysics, 210, 77-90.
Hung, J. H. and D. V. Wiltschko (1993) Structure and kinematics of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, 28, 59-96.
Hung, J. H., D. V. Wiltschko, H. C. Lin, J. B. Hickman, P. Fang, and Y. Bock (1999) Structure and motion of the southwestern Taiwan fold and thrust belt, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 10, 543-568.
Jackson, D.D., Lee, W.B., and Liu, C.C. （1981） Height Dependent Errors in Southern California Leveling, Earthquake Prediction: An International Review. AGU, 457-492.
Johnson, K. M., P. Segall, and S.-B. Yu （2005）, A viscoelastic earthquake cycle model for Taiwan, J. Geophys. Res., 110, B10404, doi:10.1029/2004JB003516.
Kao, H., and W. P. Chen (2000) The Chi-Chi earthquake sequence: Active, out-of-sequence thrust faulting in Taiwan, Science, 288(5475), 2346-2349.
Kampes, B. M. （2005） Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry, Ph. D. thesis, Delft Univ. of Technol., Delft, Netherlands.
Langbein, J., and Johnson, H. （1997） Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. J.Geophys. Res., 102, 59-604.
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 Creepmeter Monitoring, 1998-2001. Journal of Geophysical Research, 108, B11, 2528, doi:10.10129/2003JB002394. （SCI）
Lyons, S., and Sandwell D. （2003） Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking, J. Geophys. Res., 108, 2047, doi:10.1029/2002JB001831.
Lin K.-C., J.-C. Hu, K.-E. Ching, J. Angelier, R.-J. Rau, S.-B. Yu, M.-H. Huang（2010） GPS crustal deformation, strain rate, and seismic activity after the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 115, B07404, doi:10.1009/2009JB006417.
Lee, Y.-H. and Y.-X. Shih (2011) Coseismic displacement, bilateral rupture, and structural characteristics at the southern end of the 1999 Chi-Chi earthquake rupture, central Taiwan, J. Geophys. Res., 116, B07402, doi:10.1029/2010JB007760.
Lin, C. H., Y. H. Yeh, and S. W. Roecker (1989) Seismic velocity structures in the Sanyi-Fengyuan area, central Taiwan, Proceedings of the Geological Society of China, Vol. 32, No. 1, 101-120.
Lin, Y. N. (2005) Surface deformation and seismogenic structure model of the 1935 Hsinchu-Taichung Earthquake (MGR = 7.1), in Miaoli, northwestern Taiwan, Master Thesis National Taiwan University, 77pp.
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.

Murase, M., C. H. Lin, F. Kimata, H. Mori and H. C. Pu. (2014), Volcano-hydrothermal activity detected by precise levelling surveys at the Tatun volcano group in Northern Taiwan during 2006–2013. Journal of Volcanology and Geothermal Research., 286, 30-40.

Namson, J. (1984) Structure of the Western Foothills belt, Miaoli-Hsinchu area, Taiwan:(III) Northern part, Petroleum Geology of Taiwan, 20, 35-52.

Nikolaidis, R. （2002）. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. dissertation, Univ. of Calif., San Diego, La Jolla.

Okada, Y. （1985） Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seismolog. Soc. Am., 75: 1135±1154

Okada, Y. （1992） Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, 82（2）, 1018-1040.

Prescott, W.H., Savage, J.C., and Kinoshita, W.T. （1979） Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978. J. Geophys. Res., 84, 5423-5435.

Rau, R.-J., Ching, K.-E., Hu, J.-C., Lee, J.-C. （2008） Crustal deformation and block kinematics in transition from collision to subduction: GPS measurements in northern Taiwan, 1995-2005, J. Geophys. Res., 113, B09404, doi:10.1029/2007JB005414.

Su, Z., Hu, J.-C., Wang, E., Li, Y., Yang, Y., Wang, P.-L. （2017） Monitoring interseismic activity on the Ilan Plain （NE Taiwan） using Small Baseline PS-InSAR, GPS and leveling measurements: Partitioning from arc-continent collision and back-arc extension. Geophys. J. Int., 212（1）, 264-283, doi: 10.1093/gji/ggx394.

Saastamoinen, I.I. （1973） Contribution to the theory of atmospheric refraction. Bull. Geodesique, 107, 13-34.

Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T. （2000） Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan.PAGEOPH, 157, 2303-2322.

Segall, P., and Davis, J.L. （1997） GPS applications for geodynamics and earthquake studies. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 25, 301-336.

Shen, Z.K., Jackson, D.D., and Ge, B.X. （1996） Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. J. Geophys. Res., 101, 27957-27980.

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）.

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, Vol. 27, No. 3, 311-323, doi: 10.3319/TAO.2015.11.27.02.

Su, C. C. (2011) The last interglacial depositional environment and tectonic characteristics of the Ilan Plain, northeastern Taiwan. Master Thesis, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 129pp.(in Chinese)

Suppe, J. (1980) Imbricated structure of western foothills belt, south-central Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, 17. 1-16.

Suppe, J. and J. Namson (1979) Fault-bend origin of frontal folds of the Western Taiwan fold-and-thrust belt, Petroleum Geology of Taiwan, No. 16, 1-18.

Tang, C. H. (1963) Geology and oil potentialities of the Hukou Anticline, Hsinchu, Mr. H. H. Ling's 70th Birthday Jubilee Volume, Petroleum Geology of Taiwan, No. 2, 241-252

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.

Tsai, Min-Chien, Shui-Beih Yu, Ya-Ju Hsu, Horng-Yue Chen, and How-Wei Chen. 2012. "Interseismic Crustal Deformation of Frontal Thrust Fault System in the Chiayi–Tainan Area, Taiwan." Tectonophysics 554–557: 169–84. doi:10.1016/j.tecto.2012.05.014.

Tung, H., Hu, J.-C. （2012）. Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of central Taiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. Tectonophysics, 578, 126-135, Doi:10.1016/j.tecto.2012.08.009.

Tung, H., Chen, H-Y, Hu, J-C, Chen, H., Yang, K-H (2016). Transient Deformation induced by Groundwater Change in Taipei Metropolitan Area revealed by High Resolution X-band SAR

Interferometry, Tectonophysics, 692(B), 265-277,
Ward, S.N. （1994） A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 1293-1309.
Werner, C., Wegmuller U., Strozzi T., and Wiesmann A. （2003） Interferometric point target analysis for deformation mapping, Int.Geos. Remote Sens. Symp.2003, 7,4362-4364
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, F. T., Liang, W.-T., Lee J.-C., Benz, H., Villasenor, A. (2009) A model for the termination of the Ryukyu subduction zone against Taiwan: A junction of collision, subduction/separation, and subduction boundaries. J. Geophys. Res., 114, B07404, doi:10.1029/2008JB005950.
Ward, S. N. （1998） On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135（3）, 1011-1018.
Wang, H., and T. J. Wright. （2012）, Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet, Geophys. Res. Lett., 39, L07303, doi:10.1029/2012GL051222.
Wang, C. Y., C. H. Chang, and H. Y. Yen (2000) An interpretation of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan based on the thin-skinned thrust model, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 11(3), 609-630.
Walters, R. J., B. Parsons, and T. J. Wright. （2014）, Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of Eastern Anatolia, J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 5215-5234. doi:10.1002/2013JB010909.
Walters, R. J., B. Parsons and T. J. Wright（2014） Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of Eastern Anatolia, J. Geophys. Res. Soild Earth, 119, 5215-5234,doi:10.1029/2012GL051222.
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., Y.J. Hsu, L.C. Kuo, H.Y. Chen, and C.C. Liu. 2003. GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. J. Geophys. Res., 108, 2520, doi:10.1029/2003JB002396.
Yang, K.-M., S.-T. Huang, J.-C. Wu, H.-H. Ting, W.-W. Mei, M. Lee, H.-H. Hsu, and C.-J. Lee (2007) 3D geometry of the Chelungpu thrust system in Central Taiwan: Its implications for active tectonics, Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, No. 2, 143-181.
Yang, K. M., J. C. Wu, J. S. Wickham, H. H. Ting, J. B. Wang, and W. R. Chi (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structural mode and evolution in foothills belt, northwestern Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, 30, 111-150.
Yue, L. F., J. Suppe, and J. H. Hung (2005) Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw= 7.6), Journal of Structural Geology, 27(11), 2058-2083.
Zebker, H. A., and Villasenor, J. （1992） Decorrelation in interferometric radar echoes : IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 30, 5, 950-959.

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
（一）地表變形觀測資料處理分析	
1. 圖 1-4.4 表示水準資料的三角形，是否用相同的大小，只用顏色代表垂直速度。	已調整三角形比例，並於垂直速度場增繪量值色階以利閱讀。
2. 第 2-2 章節，當比較GPS 和水準測量的垂直時序資料時，是把相同時間觀測的點的結果拉在一起，還是平移整個時間序列資料。	是採平移整個時間序列資料，該比較是觀察兩者速度趨勢是否一致。
3. 精密水準測量分析部分缺少各測線每兩年間的高程變化圖，建議期末報告書能加以補充。	感謝委員建議，已補充說明。
4. P.73-75 圖 2-5.2 至圖 3-1.3 建議使用本所活動斷層圖資。	感謝委員建議，已修正。
5. PS-InSAR 不同衛星影像間的差異與關聯? 不同時期衛星影像的差異有多少?誤差有多少請說明。	由於衛星發射與接收多為不重疊或時間短暫，因此本團隊盡可能利用所有能使用之衛星影像作分析。後續則利用連續 GPS 測站速率作為真值以判斷衛星影像結果之可信度，如圖（圖 3-1.2、圖 3-1.7、圖 3-1.9、圖 3-1.11、圖 3-1.13），結果顯示，北部地區的衛星影像結果以 ERS 與 Sentinel-1 的資料可信度相當高。
（二）斷層模型反演評估	
1. 第 5-1 章節，將不同斷層模型(BLOKES、DEFNODE、Baseline Inversion)所使用的斷層參數及得到的擬合結果列於同一表格中，若列於不同表格難以進行比較。	感謝委員建議，已列於同一表格中。
2. P.126 如何利用應變速率的推求移除非斷層鎖定造成的地表速度梯度。	是的，只有當斷層為鎖定時，才能用應變速率推求斷層虧損速率。然而，若整條斷層均為潛移，也沒有推求滑移虧損速率的必要。另外，若斷層是淺部潛移且深部鎖定，則會移除跨斷層線的基線，避免造成估算錯誤。

期中審查意見	處理情形
3. BLOCES 斷層模型預測的垂直速度場與大地測量實測得到的結果差異甚大。	垂直速度的擬合度受到斷層幾何的影響非常大。目前本計畫是根據既有地質研究成果來設定斷層幾何，並沒有進一步用二維模型來測試其他斷層幾何的可能性。這方面相關的工作需要到下一個階段的工作才有可能進行。
4. 三個模型的差異很大，為什麼?	這個差異已再次進行檢查並重新計算過。結果顯示，若模型成果的差異大，往往是因為該地區的測站密度不足或分布不均勻，也說明該斷層推求之滑移虧損速率可信度不高。
5. 此區域斷層形貌複雜，期末報告應針對目標斷層幾何參數（傾角、深度等）依據加以說明，例如新城斷層及三義斷層傾角及深度須再審核。	本計畫已經針對此區域之斷層形貌進行說明，然而更進一步的審核，則需要在下一個階段的工作才有可能進行。
6. 斷層在各區段傾角不一樣，每個地區所引用的文獻要說明，例如p.103 表5-1 斷層模型之幾何參數，內文中僅說明團隊會議依文獻討論而得，但未說明所引用之文獻。	感謝委員建議，已補充於期末報告5-1 章節中完整說明。
（三）全文應修正事項	
1. 圖說文字有的靠左對齊、有的置中、有的靠右，請統一格式(p. 115,122)。	感謝委員建議，已修正。
2. 速度的估算如果採用mm/yr，有些段落取到小數點後第2 位，有些段落速率僅取到整數，請求取至小數點後一位（例如：p. 39, 41, 44, 52,128）。	感謝委員建議，已修正。
3. 表 5-1.1 滑移速率取小數點後 1 位(表 5-3.1 等其他表格亦同)。	感謝委員建議，已修正。
4. 參考點的位置請標明（p. 74, 75）。	感謝委員建議，已修正。
5. 第 5-3-2 章節，內文中並未提及圖 5-3.1 及圖 5-3.3 的說明，請補充。	感謝委員建議，已修正。
6. GPS 移動站及精密水準測量點點位偏移，請修正。	感謝委員建議，已修正。
7. 部分已更新之資料尚未完全更新於報告書中（例：圖2-4.8 圖說說明以將資料更新至2018 年，但圖尚未更新）。	感謝委員建議，已修正。

期中審查意見	處理情形
（四）內容勘誤	
1. P.VIII 計畫名稱有誤，請修正。	感謝委員建議，已修正。
2. 圖 1-4.3 請加入誤差橢圓。	感謝委員建議，已修正。
3. 圖 2-5.2 缺少比例尺。	感謝委員建議，已修正。
4. P.59 圖2-5.2 圖例抬升及下陷缺少比例尺。	感謝委員建議，已修正。
5. P.68 圖 2-5.11 圖例應各自表述，避免混用。	感謝委員建議，已將圖修正至 7-2.10 及 7-2.11。
6. P.89 圖 4-2.1 及圖 4-2.2 圖說，「中部」應為「北部」。	感謝委員建議，已修正。
7. P.91 變「型」分析應為變「形」分析。	感謝委員建議，已修正。
8. P.105 各斷層所使用參數如「表 5-2」，應為「表 5-1.1」。	感謝委員建議，已修正。
9. P.128-129 屯子「角」斷層應為屯子「腳」斷層。	感謝委員建議，已修正。
10. P.126 彈性錯動理論所引用的公式 5-3.1，出處應為 Okada, 1958。	感謝委員建議，已修正。
11. P.177 圖說編號有誤請修正。	感謝委員建議，已修正。
（五）其他建議事項	
1. 期末報告應考慮比較地表速度的分析和斷層模型所得有關斷層各特性的結果討論，並且與地質資料所得之斷層活動行為與模型進行比較。	感謝委員建議，本計畫工作團隊非常同意委員的建議，也認為是這個計畫應該要進行的工作。只是本工作團隊今年的工作重心放在釐清不同斷層模型造成的差異原因所在與如何提供最終成果，同時也不斷的在討論如何整合不同的觀測資料，所以相關建議工作會陸續放到後續的計畫工作內容中。
2. 斷層模擬部分，斷層的設定與本所公布活動斷層略有差異，某些不在設定內的斷層滑移速率將無法獲得，建議提出解決方式。此外，使用斷層模擬出的斷層滑移速率與前期計畫所求得的差異，建議予以分析說明。	感謝委員建議，在模型建置的過程中，斷層幾何的設定一定會有些微調整來符合模型基本的假設、實際地表觀測成果與合理的解析度。至於和前期的成果差異，主要是採用更多條的斷層建置。
3. 第 2-5 章節內容尚缺PS-InSAR 結果，建議期末報告書能補充。	感謝委員建議，已補充。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一）地表變形觀測資料處理分析	
1. P.236單頻時間序列在2017年底速度上有跳階情形，建議後續應分析原因。	由於雙頻約制站 GS73 於 2017 年 10 月間曾中斷資料，於復站後由坐標-時間序列可見站體坐標產生位移，因此在處理單頻資料時於此時間點修正此跳階情形，以求得正確之位移速度場，但是後續會在有更多觀測數據後進行原因分析。
2. 比較GPS連續站及移動站之時間序列時，是否只是把相對S01R之結果畫出來，沒有找一共同觀測的時間點進行校準，似乎有些區域的測站時間序列相差較大。	在進行 GPS 連續站與移動站的比較時，是將所有成果一起繪製比較，檢驗兩者的趨勢是否一致。由於是速度場的比對檢核，所以並沒有指挑選共同的觀測時間，而是使用所有能獲得的資料。另外，由於幾乎所有的比對測站都不是共站的形式，而測站對的選擇依據僅是兩站之間的距離，所以如果兩站間恰好有構造或其他滑動面通過，就可能造成較大的測站時間序列差異。這部分需要後續的查證，感謝委員的提醒。
3. P.66 2007年中部速度場出現變異的原因為何？	除了 1999 年集集地震的震後變形是其中一個原因外，目前並不清楚是否還有其他原因可以貢獻到這個速度變化中，這需要更進一步的研究與討論。
4. P.151~153 ERS/SENTINEL-1 不同時期之比較，速度差異是因為InSAR技術之提升，還是表示地殼應變之差異。	不同時期之比較，速度差異可能原因為使用衛星不同，不同衛星視角有差異，波長也不盡相同，因此對於目標物的反射訊號接收反應不同。此外，由於與 GPS 等其他大地測量資料對比結果良好，因此也可能確實反應地表變形在不同時期確實有不同的速率。
（二）斷層模型反演評估	

期末審查意見	處理情形
1. P.183 圖5-1.2之剖面深度只到5-6公里,若選用該模式應說明9-15公里斷層傾角估算的依據。	主要是依據羅聖宗等人(2007)人之研究，以及中興顧問社之專家會議討論，建議所得之斷層幾何。
2. P.186 5-1-3節，提及選用Chiu(1971)和黃宣維(2012)，文中所提的新竹及新城斷層深度10公里之傾角建議改引用黃宣維(2012)。	感謝委員建議，已修正。
3. 建議後續將各斷層所採用的深度之定義宜說明清楚。	感謝委員建議，已補上說明。
4. P.200、201 所引用楊耿明等(2001)及黃姝琳(2009)，以及楊耿明等(2001)及黃旭燦(2004)之剖面為同一剖面，對斷層形貌之說明一致。	感謝委員建議，已修正說明。
5. P.234 表5-5.1,請說明不同斷層模型之權重如何決定。	目前各模型所得到的斷層滑移虧損結果是於工作會議時討論出各模型結果之權重。未來會持續與USGS討論它們處理不同模型結果之權重經驗。
（三）報告書內容及其他建議事項	
1. P.48、P.63、P.123 比例尺色階設定太寬，導致無法呈現該圖細節，應配合圖框範圍內資料進行調整，請全文逐一搜尋改進。	感謝委員建議，已修正。
2. P.237 單頻速度場應納入該區同時間所有雙頻站速度進行比較，以瞭解二種觀測方法於結果上的差異。	感謝委員建議，已納入。
3. [附錄1:CGPS 時間序列]未解算至最新日期，各N,E,H 方向速度與[附錄2: CGPS 速度表]所列數值不一致，請查明是否為參考點不同的問題並予以修正。	感謝委員建議,附錄 1 已更新。由於本研究為利用 PPP 單點解算以獲取各站最多的觀測量，因此在時間序列方面為測站在 ITRF2008 座標框架下之位置。而速度場則是為了要能更為凸顯臺灣地區細微的速度變化，而將所有測站速度相對於位於澎湖白沙的 SO1R 測站做速度的差分。因此所列數值與時間序列顯示之數值才會有所差異。
4. 183 5-1-1 節，首度提及邏輯樹進行分析，宜先說明該分析方法之依據。	已於此節補加邏輯樹方法的簡要說明及依據。
5. 速度的估算如果採用mm/yr,有些段落取到小數點後第2 位，請求取至	感謝委員建議，已修正。

期末審查意見	處理情形
小數點後一位。	
6. 大地測量點位(GPS 連續站、GPS 移動站及水準測線點位)偏移，應確認點位與斷層之間的關係。	感謝委員建議，遵照辦理。
7. 第 2-4 節，部分水準測線缺乏分析的描述，水準測線的內文須更新。	感謝委員建議，已修正。
8. 第 2-4 節，若速率分為多個時間區段進行估算，內文中描述應說明清楚為哪一時段的速率變化。	感謝委員建議，已修正。
9. P.254、255 圖7-2.10 及圖7-2.11 應說明為Bernesec 或GARMIT 之解算成果。	感謝委員建議，已修正。
10. P.21 GPS 連續站資料提供機構請再增加「經濟部水利署」。	感謝委員建議，已修正。
11. P.149 所列「期中」是否為誤植，抑或進度確實尚未整理至期末應有進度？請再查明修正。	感謝委員建議，為誤植，已刪除。
12. P.227、235 Misfit 翻譯不同，分別為不符值及擬合值，請統一。	感謝委員建議，已修正。