經濟部

計畫編號：109-5226904000-05-01

# 經濟部中央地質調查所

# 109年度委辦計畫執行

# 第四階段總報告書(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」

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本年度計畫：自109年02月至109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、國立臺灣大學

中 華 民 國 109 年 11 月

計畫編號：109-5226904000-05-01

# 經濟部中央地質調查所

# 109年度委辦計畫執行

# 第四階段總報告書(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」

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本年度計畫：自109年02月至109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、國立臺灣大學

中 華 民 國 109 年 11 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

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、國立臺灣大學

中　華　民　國　109　年　11　月

# 目錄

目錄 .....
表目錄 .....VI
圖目錄 ..... VII
摘要 ..... XVII
Abstract.....XIX

第一章、緒　論 .....1

1-1 計畫整體概述 .....1

1-2 研究目的 .....2

第二章、大地測量資料分析 .....8

2-1 GPS 連續站解算成果分析.....8
2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略 .....8
2-1-2 GPS 資料品質檢測 .....10
2-1-3 GPS 連續站時間序列分析 .....13

2-2 GPS 移動站坐標解算精度分析.....18
2-2-1 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析 .....18
2-2-2 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 及 GPSIY 解算成果比較 .....21

2-3 精密水準測量成果.....23
2-3-1 臺北地區精密水準測線.....27
2-3-1-1 石門至萬里測線.....27
2-3-1-2 士林至三芝測線.....29
2-3-1-3 淡水至士林測線.....31
2-3-1-4 五股至台北測線.....33
2-3-2 桃竹苗地區精密水準測線.....35
2-3-2-1 新屋至童話世界測線.....35
2-3-2-2 新竹至五峰測線.....37
2-3-2-3 新竹至峨嵋測線.....41
2-3-2-4 苗栗至南庄測線.....43
2-3-3 中部地區精密水準測線.....45
2-3-3-1 大安至東勢測線.....45
2-3-3-2 龍井至太平測線.....48
2-3-3-3 王功至草屯至埔里測線.....50
2-3-3-4 北斗至水里測線.....52
2-3-3-5 五光至黃竹測線.....54
2-3-4 嘉南地區精密水準測線.....56
2-3-4-1 金湖至瑞峰測線.....56
2-3-4-2 北門至楠西測線.....58
2-3-4-3 善化至關廟測線.....60
2-3-4-4 安平至龍崎測線.....62

2-3-4-4 玉井至新化測線.....64
2-3-5 高屏地區精密水準測線.....66
2-3-5-1 路竹至茂林測線.....66
2-3-5-2 岡山至安坡測線.....68
2-3-5-3 佳冬至七佳測線.....70
2-3-6 恆春地區精密水準測線.....72
2-3-6-1 恆春西臺地至佳樂水測線.....72
2-3-6-2 南樹林至鵝鑾鼻測線.....74
2-3-7 東部地區精密水準解算.....77
2-3-7-1 嶺頂至龍澗測線.....77
2-3-8-2 光復至豐濱測線.....79
2-3-8-3 紅葉至靜浦測線.....81
2-3-8-4 東成至富岡測線.....83
2-3-9 宜蘭地區精密水準解算.....85
2-3-9-1 梗枋至東澳測線.....85
2-4 臺灣各分區之 GPS 移動站觀測成果分析.....87
2-4-1 臺北地區 GPS 觀測網.....87
2-4-2 桃竹苗地區 GPS 觀測網.....90
2-4-3 中部地區 GPS 觀測網.....92
2-4-4 嘉南地區 GPS 觀測網.....94
2-4-5 高屏地區 GPS 觀測網.....97
2-4-6 恆春地區 GPS 觀測網.....100
2-4-7 東部地區 GPS 觀測網.....104
2-4-8 宜蘭地區 GPS 觀測網.....107
2-5 全臺地表速度場.....109
第三章、雷達影像分析.....114
3-1 中部地區.....115
3-1-1 PS-InSAR 成果資料分析.....115
3-1-1-1 ERS1/2（1996/1-1999/7）.....115
3-1-1-2 ENVISAT（2007/6-2008/6）.....117
3-1-1-3 ALOS（2006/12-2011/2）.....119
3-1-1-4 Sentinel-1A（2015/3-2016/2）.....121
3-1-2 PS-InSAR 技術時間序列分析.....123
3-1-2-1 彰化斷層（C1、C3）、車籠埔斷層（C2、C3）、大茅埔-雙冬斷層（C2、C3）.....124
3-1-2-2 梅山斷層（C4）.....127
3-1-2-3 九芎坑斷層（C5）、大尖山斷層（C5）.....128
3-2 北部地區.....129
3-2-1 PS-InSAR 成果資料分析.....129
3-2-1-1 ERS1/2（1996/1~1999/7）.....129
3-2-1-2 ENVISAT（2004/3~2008/6）.....131
3-2-1-3 ALOS（2007/1~2011/3）.....132

3-2-1-4 Sentinel-1（2015/4~2018/8）.....133
3-2-2 PS-InSAR 技術時間序列分析.....135
3-2-2-1 湖口斷層.....135
3-2-2-2 新竹斷層.....136
3-2-2-3 新城斷層.....137
3-2-2-4 屯子腳斷層.....138
3-3 南部地區.....139
3-3-1 PS-InSAR 成果資料分析.....139
3-3-1-1 ERS1/2（1995/4~1999/9）.....139
3-3-1-2 ENVISAT（2004/6~2008/9）.....141
3-3-1-3 ALOS（2007/1~2011/3）.....143
3-3-1-4 Sentinel-1（2015/04~2019/9）.....145
3-3-2 PS-InSAR 技術時間序列分析.....151
3-3-2-1 六甲斷層.....153
3-3-2-2 新化斷層.....154
3-3-2-3 後甲里斷層.....155
3-3-2-4 旗山斷層.....156
3-4 東部地區.....157
3-4-1 PS-InSAR 成果資料分析.....157
3-4-1-1 ERS1/2（1995/6~1999/9）.....157
3-4-1-2 ENVISAT（2006/3~2009/6）.....159
3-4-1-3 ALOS（2007/1~2010/12）.....161
3-4-1-4 Sentinel-1A &-1B（2015/4~2020/10）.....163
3-4-2 PS-InSAR 技術時間序列分析.....176
3-4-2-1 嶺頂斷層.....181
3-4-2-2 瑞穗斷層.....182
3-4-2-3 玉里斷層與池上斷層.....183
3-4-2-4 鹿野斷層.....185
第四章、斷層模型建置.....186
4-1 斷層幾何參數設定.....186
4-1-1 山腳斷層.....188
4-1-2 湖口斷層.....190
4-1-3 新竹斷層及新城斷層.....193
4-1-4 獅潭斷層.....196
4-1-5 三義斷層.....198
4-1-6 大甲–彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔–雙冬斷層.....201
4-1-7 屯子腳斷層.....205
4-1-8 九芎坑斷層及大尖山斷層.....208
4-1-9 梅山斷層.....210
4-1-10 木屐寮-六甲斷層.....212
4-1-11 觸口斷層.....214
4-1-12 新化斷層.....216

4-1-13 後甲里斷層 ..... 218
4-1-14 左鎮斷層 ..... 220
4-1-15 小崗山斷層 ..... 222
4-1-16 旗山斷層 ..... 226
4-1-17 潮州斷層 ..... 230
4-1-18 恆春斷層 ..... 235
4-1-19 米崙斷層 ..... 240
4-1-20 嶺頂-瑞穗斷層 ..... 245
4-1-21 奇美斷層 ..... 250
4-1-22 玉里-池上斷層 ..... 253
4-1-23 鹿野斷層-利吉斷層 ..... 257
4-1-24 宜蘭北部構造及宜蘭南部構造 ..... 262
4-2 BLOCKS 斷層模型 ..... 263
4-2-1 斷層模型原理與使用參數 ..... 263
4-2-2 斷層模擬結果 ..... 265
4-3 DEFNODE 斷層模型 ..... 275
4-3-1 斷層模型原理與使用參數 ..... 275
4-3-2 活動斷層長期滑移速率及虧損率 ..... 279
4-4 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model） ..... 290
4-4-1 斷層模型原理與使用參數 ..... 290
4-4-2 斷層模擬結果 ..... 293
4-5 臺灣之斷層滑移速率 ..... 300
第五章、106 年度-109 年度陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果 ..... 306
5-1 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震簡介 ..... 308
5-1-1 花蓮近海地震震源區地質簡介 ..... 310
5-1-2 花蓮近海地震同震地表位移場 ..... 313
5-1-2-1 GPS 連續站同震位移場 ..... 313
5-1-2-2 GPS 移動站同震觀測資料分析 ..... 317
5-1-2-3 精密水準同震觀測資料分析 ..... 326
5-1-2-4 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場 ..... 329
5-1-2-5 Sentinel-1 及 ALOS-2 雷達衛星之同震位移場 ..... 330
5-1-3 花蓮近海地震震源模型 ..... 332
5-1-3-1 斷層錯位模型 ..... 332
5-1-3-2 斷層模型結果 ..... 336
5-2 2019 年 4 月 18 日花蓮近海地震簡介 ..... 340
5-2-1 2019.04.18 花蓮地震震源區地質簡介 ..... 342
5-2-2 2019.04.18 花蓮近海地震同震地表位移場 ..... 343
5-2-2-1 GPS 連續站同震位移場 ..... 343
5-2-2-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場 ..... 345
5-2-3 2019.04.18 花蓮近海地震震源模型 ..... 346
5-2-3-1 斷層錯位模型 ..... 346
5-2-3-2 斷層模型結果 ..... 347

5-2-4 2019.04.18 地震事件討論與結論.....350
5-3 2020 年 5 月 3 日臺灣東部近海地震簡介.....351

第六章、結論與建議.....357
Chapter 6: Conclusions and Suggestions.....360

參考文獻.....363

（附錄請參閱光碟）
[附錄 1] 第四階段_CGPS 時間序列
[附錄 2] 第四階段_CGPS 速度表
[附錄 3] 第四階段_GPS 移動站時間序列
[附錄 4] 第四階段_GPS 移動站速度表
[附錄 5] 第四階段_精密水準時間序列
[附錄 6] 第四階段_精密水準速度表
[附錄 7] 第四階段_成果報告內圖片「300dpi 以上清晰圖檔（電子檔）」

# 表目錄

表 A：全程計畫預期進度甘梯圖（Gantt Chart）.....XVI
表 1-2.1：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 3-1.1：雷達影像其衛星、波段及時間區間.....114
表 4-1.1：台灣活動斷層之幾何參數。.....187
表 4-1.2：新化斷層傾角及深度資料與文獻列表（胡植慶等，2016）。.....217
表 4-1.3：旗山斷層幾何資料及文獻列表。.....229
表 4-1.4：潮州斷層幾何資料及文獻列表。.....233
表 4-1.5：米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數.....244
表 4-1.6：嶺頂斷層幾何形貌相關文獻.....249
表 4-1.7：瑞穗斷層幾何形貌相關文獻.....249
表 4-1.8：奇美斷層幾何形貌相關文獻.....252
表 4-2.1：GPS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。.....270
表 4-3.1：圖 4-3.1 中所示活動斷層之幾何參數。.....278
表 4-3.2：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓。.....285
表 4-3.3：斷層之地質滑移速率約束值及平均滑移速率。.....289
表 4-4.1：斷層平均滑移速率。.....295
表 4-5.1：本計畫模型加權平均斷層滑移虧損率。.....302
表 5-1.1：2017 年 1 月至 2020 年 11 月規模大於 6 級之地震事件。.....306
表 5-1.2：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之 GPS 移動站同震位移值。.....324
表 5-1.3：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之精密水準測線同震位移值。.....328

# 圖目錄

圖 1-2.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。 ....4
圖 1-2.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。 ....5
圖 1-2.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。 ....6
圖 1-2.4：Sentinel-1A 衛星影像於臺灣之升軌、降軌軌道涵蓋圖。 ....7
圖 2-1.1：連續 GPS 測站 GS30 與 GS63 利用 GAMIT（藍色）與 GipsyX（紅色）解算之時間序列。 ....9
圖 2-1.2：MESN 測站資料接收度低於 80%。 ....10
圖 2-1.3：GS27 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。 ....11
圖 2-1.4：利用 GIPSY-OASIS（藍點）與 GipsyX（紅點）解算之連續 GPS 測站 S01R 時間序列。 ....11
圖 2-1.5：利用重新轉檔前（紅點）與重新轉檔後（綠點：GIPSY-OASIS、藍點：GIPSYX）解算之連續 GPS 測站 CTOU 時間序列。 ....12
圖 2-1.6：不同運動機制之 GPS 測站時間序列。 ....15
圖 2-1.7：整合歷史資料至 2020 年 9 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙站之水平年速度場。 ....16
圖 2-1.8：整合歷史資料至 2020 年 9 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙 S01R 測站之垂直年速度場。 ....17
圖 2-2.1：臺灣地殼變形監測網。 ....20
圖 2-2.2：移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果。 ....22
圖 2-2.3：兩種軟體解算的速度估值的差值（Gamit 結果減去 Bernese 結果）直方圖。 ....22
圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。 ....24
圖 2-3.2：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖。 ....26
圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較。 ....27
圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較。 ....27
圖 2-3.5：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 ....28
圖 2-3.6：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較。 ....29
圖 2-3.7：士林至三芝測線水準高程變化圖。 ....30
圖 2-3.8：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較。 ....31
圖 2-3.9：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之時間序列比較。 ....31
圖 2-3.10：淡水至士林測線水準高程變化圖。 ....32
圖 2-3.11：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較。 ....33
圖 2-3.12：五股至台北測線水準高程變化圖。 ....34
圖 2-3.13：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。 ....35
圖 2-3.14：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 ....36
圖 2-3.15：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較....38
圖 2-3.16：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較....38
圖 2-3.17：新竹至五峰測線之部份時間序列。 ....38
圖 2-3.18：新竹至五峰測線水準高程變化圖。 ....39
圖 2-3.19：水準點位 G416 時間序列及現地情形。 ....40

圖 2-3.20：水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較。 .....41
圖 2-3.21：新竹至峨眉測線水準高程變化圖。。 .....42
圖 2-3.22：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較。 .....43
圖 2-3.23：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。 .....44
圖 2-3.24：水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較。 .....46
圖 2-3.25：水準點位 G901 與連續站 TEGS 之時間序列比較。 .....46
圖 2-3.26：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 .....47
圖 2-3.27：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較。 .....48
圖 2-3.28：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 .....49
圖 2-3.29：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較。 .....50
圖 2-3.30：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。 .....51
圖 2-3.31：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較。 .....52
圖 2-3.32：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。 .....53
圖 2-3.33：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較。 .....54
圖 2-3.34：五光至黃竹水準高程變化圖。 .....55
圖 2-3.35：水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較。 .....56
圖 2-3.36：水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較。 .....56
圖 2-3.37：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。 .....57
圖 2-3.38：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較。 .....58
圖 2-3.39：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。 .....59
圖 2-4.40：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較。 .....60
圖 2-4.41：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 .....61
圖 2-3.42：水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較。 .....62
圖 2-3.43：安平至龍崎測線水準高程變化圖。 .....63
圖 2-3.44：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之時間序列比較。 .....64
圖 2-3.45：台 20_新化至玉井測線路線圖。 .....65
圖 2-3.46：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較。 .....66
圖 2-3.47：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。 .....67
圖 2-3.48：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較。 .....68
圖 2-3.49：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。 .....69
圖 2-3.50：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較。 .....70
圖 2-3.51：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。。 .....71
圖 2-3.52：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較。 .....72
圖 2-3.53：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。 .....73
圖 2-3.54：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較。 .....75
圖 2-3.55：水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較。 .....75
圖 2-3.56：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。 .....76
圖 2-3.57：水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較。 .....77
圖 2-3.58：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。 .....78
圖 2-3.59：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較。 .....79
圖 2-3.60：光復至豐濱水準高程變化圖。 .....80
圖 2-3.61：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較。 .....81
圖 2-3.62：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 .....82
圖 2-3.63：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較。 .....83

圖 2-3.64：東成至富岡測線水準高程變化圖。 .....84
圖 2-3.65：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比較。 .....85
圖 2-3.66：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。。 .....86
圖 2-4.1：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場。 .....88
圖 2-4.2：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場。 .....89
圖 2-4.3：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。..90
圖 2-4.4：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2020 年垂直方向速度場。 .....91
圖 2-4.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....93
圖 2-4.6：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。 .....93
圖 2-4.7：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....95
圖 2-4.8：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 .....96
圖 2-4.9：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....98
圖 2-4.10：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 .....99
圖 2-4.11：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。..101
圖 2-4.12：G643 測站之時間序列。 .....102
圖 2-4.13：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002-2020 年之 GPS 垂直方向速度場。 .....103
圖 2-4.14：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。..105
圖 2-4.15：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 .....106
圖 2-4.16：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 .....107
圖 2-4.17：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。 .....108
圖 2-5.1：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。 .....111
圖 2-5.2：2002 年至 2020 全臺垂直速度場。 .....113
圖 3-1.1：ERS（1996/1-1999/7）衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 .....116
圖 3-1.2：ENVISAT（2007/6-2008/6）衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 .....118
圖 3-1.3：ALOS（2006/12-2011/2）衛星軌道 446，像幅編號 460 & 470，視衛星方向上年平均變動量。 .....120
圖 3-1.4：Sentinel-1A 降軌影像（2015/3-2016/2）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 .....122
圖 3-1.5：中部地區使用之 PS-InSAR 時間序列點位圖。 .....123
圖 3-1.6：C1 剖面 PS-InSAR 時間序列.....124
圖 3-1.7：C2 剖面 PS-InSAR 時間序列.....125
圖 3-1.8：C3 剖面 PS-InSAR 時間序列.....126
圖 3-1.9：C4 剖面 PS-InSAR 時間序列.....127
圖 3-1.10：C5 剖面 PS-InSAR 時間序列.....128
圖 3-2.1：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。 .....130
圖 3-2.2：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。 .....131
圖 3-2.3：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。 .....132
圖 3-2.4：Sentinel-1 升軌影像（2015/4~2018/8）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 .....133
圖 3-2.5：Sentinel-1 降軌影像（2015/4~2018/8）視衛星方向上年平均變動量。 .....134
圖 3-2.6：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。 .....135
圖 3-2.7：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。 .....135
圖 3-2.8：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。 .....136
圖 3-2.9：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。 .....136
圖 3-2.10：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。 .....137
圖 3-2.11：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。 .....137
圖 3-2.12：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。 .....138
圖 3-3.1：ERS（1995/4~1999/9）衛星軌道（Track）232，像幅編號（Frame）3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量。 .....140
圖 3-3.2：ENVISAT（2004/6~2008/9）衛星軌道 232，像幅編號 3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量。 .....142
圖 3-3.3：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 447，像幅編號 430、440 及 450 及衛星軌道 446，像幅編號 430 及 440 視衛星方向上年平均變動量。 .....144
圖 3-3.4：Sentinel-1 升軌影像（2015/10~2019/9）視衛星方向上年平均變動量。 .....146
圖 3-3.5：Sentinel-1 降軌影像（2015/4~2019/9）視衛星方向上年平均變動量。 .....147
圖 3-3.6：Sentinel-1 東西方向年平均變動量（單位：mm/yr）。 .....149
圖 3-3.7：Sentinel-1 垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。 .....150
圖 3-3.8：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站新化（S106）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。 .....151
圖 3-3.9：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。 .....152
圖 3-3.10：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 GS42 相對於 GS43 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 .....153
圖 3-3.11：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 S106 相對於 GS29 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 .....154
圖 3-3.12：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 GS31 相對於 GS30 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列 .....155

圖 3-3.13：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 LIKN 相對於 AKND 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 .....156
圖 3-4.1：ERS（1995/6~1999/9）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123、3141 視衛星方向上年平均變動量。 .....158
圖 3-4.2：ENVISAT（2006/3~2009/6）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123、3141 視衛星方向上年平均變動量。 .....160
圖 3-4.3：ALOS（2007/1~2010/12）衛星軌道 444，像幅編號 460 及 470 及衛星軌道 445，像幅編號 440 及 450 視衛星方向上年平均變動量。 .....162
圖 3-4.4：Sentinel-1 衛星選取區域涵蓋圖。 .....164
圖 3-4.5：Sentinel-1 升軌衛星影像 20191231-20200312 及降軌影像 20191115-20200126 干涉圖。 .....165
圖 3-4.6：Sentinel-1 干涉影像涵蓋區域綠色圓圈代表可以作為後續時間序列分析的資料。 .....166
圖 3-4.7：Sentinel-1 短時間基線在中央山脈區域有異常的干涉條紋產生。.....166
圖 3-4.8：Sentinel-1 升軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量。 .....169
圖 3-4.9：Sentinel-1 降軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量。 .....170
圖 3-4.10：Sentinel-1 升軌影像（左圖）及降軌影像（右圖）的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。 .....171
圖 3-4.11：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。 .....171
圖 3-4.11（續）：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。 .....172
圖 3-4.12：Sentinel-1 東西方向年平均變動量.....174
圖 3-4.13：Sentinel-1 垂直方向年平均變動量。 .....175
圖 3-4.14：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 .....177
圖 3-4.14（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 .....178
圖 3-4.14（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 .....179
圖 3-4.14（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 .....180
圖 3-4.15：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 SHUL 相對於 SLIN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 .....181
圖 3-4.16：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JSUI 相對於 JPEI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列.....182
圖 3-4.17：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JPIN 相對於 JULI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 .....183
圖 3-4.18：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 TAPO 相對於 SHAN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 .....184
圖 3-4.19：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 LONT 相對於 S105 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。.....185
圖 4-1.1：台北盆地北半部岩盤之縱深剖面。 .....188
圖 4-1.2：台灣北部之海域震測剖面。 .....189
圖 4-1.3：台灣北部之三維地形圖及構造平衡剖面。 .....189
圖 4-1.4：湖口背斜至觀音鑽井的構造剖面（湯振輝，1963）。 .....190
圖 4-1.5：湖口斷層地質剖面圖。 .....191
圖 4-1.6：橫跨湖口–楊梅背斜的地質剖面。 .....192

圖 4-1.7：橫跨湖口–楊梅背斜的地質構造剖面。 .....192
圖 4-1.8：新竹青草湖和寶山背斜的構造剖面。。 .....193
圖 4-1.9：新竹地區之地質構造與地震活動分布剖面圖。 .....194
圖 4-1.10：新竹地區的地震定位結果。 .....194
圖 4-1.11：中油油氣探勘調查於新竹地區的震測剖面。 .....195
圖 4-1.12：新竹–苗栗地區北部的構造剖面。 .....195
圖 4-1.13：橫跨新竹地區之地質平衡剖面。 .....195
圖 4-1.14：獅潭斷層之有限元素模型。 .....196
圖 4-1.15：台灣西北部的地質平衡剖面。 .....197
圖 4-1.16：1935 年新竹–台中地震之餘震紀錄及 1973 年至 2003 年地震目錄。 .....197
圖 4-1.17：三義–卓蘭地區微震震央分布情況。紅線為三義斷層之位置。 .....199
圖 4-1.18：三義斷層系統沿線相關震測線位置圖及震測剖。 .....199
圖 4-1.19：三義斷層及車籠埔斷層北側之地質平衡剖面。 .....200
圖 4-1.20：以集集地震之震間與同震位移所推求的中部構造模型。。 .....203
圖 4-1.21：以集集地震主震及地表破裂所推求的斷層模型。 .....203
圖 4-1.22：中部震測剖面及其構造解釋。 .....203
圖 4-1.23：以集集地震序列資料及斷層面解所推得之中部斷層幾何。 .....204
圖 4-1.24：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。 .....204
圖 4-1.25：跨越屯子腳斷層之震測線位置圖及震測剖面。 .....206
圖 4-1.26：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。 .....207
圖 4-1.27：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質構造剖面。 .....208
圖 4-1.28：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質平衡剖面。 .....209
圖 4-1.29：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。 209
圖 4-1.30：橫跨雲林嘉義一帶之地質平衡剖面。 .....210
圖 4-1.31：以震測剖面及地震資料推估之中部斷層構造。 .....211
圖 4-1.32：台南地區構造剖面及地震深度剖面。 .....213
圖 4-1.33：木屐寮-六甲斷層幾何面破裂模式。 .....213
圖 4-1.34：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質平衡剖面。 .....214
圖 4-1.35：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質構造剖。 .....215
圖 4-1.36：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質構造剖面。 .....215
圖 4-1.37：新化斷層淺層震測資料。 .....216
圖 4-1.38：1900~2015 年新化斷層地震分布及深度分布剖面。 .....217
圖 4-1.39：新化斷層幾何面破裂模式。 .....217
圖 4-1.40：(a) 台南地區區域地質圖，(b) 反射震測 D5 剖面。 .....218
圖 4-1.41：跨台南台地地質剖面圖。(a) 台南地區鑽井位置及剖面圖位置，(b) 跨後甲里斷層 129 地質剖面。 .....219
圖 4-1.42：後甲里斷層幾何面破裂模式。 .....219
圖 4-1.43：地調所新化地質圖幅及地質剖面。 .....220
圖 4-1.44：左鎮斷層淺層震測資。 .....221
圖 4-1.45：1900~2015 年左鎮斷層地震分布及深度分布剖面。 .....221
圖 4-1.46：左鎮斷層幾何面破裂模式。 .....221
圖 4-1.47：上圖：小崗山斷層條帶地質圖。 .....223

圖 4-1.48：小崗山斷層鑽井資料。 .....224
圖 4-1.49：地調所旗山地質圖幅及 CC’、DD’地質剖面圖。 .....225
圖 4-1.50：本計畫小崗山斷層幾何面破裂模式。 .....225
圖 4-1.51：臺灣西南部地區 Line 27 及 Line 28 平衡剖面。 .....226
圖 4-1. 52：西南部地區地質剖面圖 .....227
圖 4-1. 53：B-B’構造地質剖面。 .....227
圖 4-1.54：西南部地區平衡剖面圖。 .....228
圖 4-1. 55：西南部地區速度構造剖面圖。 .....228
圖 4-1.56：潮州斷層及西側分支斷層構造分布圖。。 .....231
圖 4-1.57：潮州地區震測剖面及地下構造解釋。 .....231
圖 4-1.58：BB’構造地質剖面。 .....232
圖 4-1.59：西南部地區平衡剖面圖。 .....232
圖 4-1.60：臺灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。上圖為 T4A 速度構造剖面分布圖；下圖為 T4A 速度構造及重定位地震剖面。 .....233
圖 4-1.61：(a) 地震、震源機制解及剖面線分布圖 (b) 剖面 7 及剖面 9 之地震深度分布及震源機制，CF 為潮州斷層 (c) 剖面 7、剖面 8 及剖面 9 之地震深度分布及地層速度構造剖面圖。 .....234
圖 4-1.62：台灣南部跨過恆春半島-蘭嶼之地體構造剖面。 .....236
圖 4-1.63：台灣南部跨恆春半島 A-A’震測剖面圖。 .....237
圖 4-1.64：台灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。 .....238
圖 4-1.65：南部斷層幾何形貌設定。上圖為臺灣南部活動斷層分布圖。 .....239
圖 4-1.66：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位深度剖面。 .....241
圖 4-1.67：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位南北向 GG’及 HH’深度剖面。 .....242
圖 4-1.68：花蓮地區 2012 年至 2017 年地震重定位深度剖面。 .....243
圖 4-1.69：本計畫米崙斷層幾何設定。 .....244
圖 4-1.70：嶺頂斷層地電阻影像剖面圖。 .....246
圖 4-1.71：花東縱谷斷層分段與幾何。 .....247
圖 4-1.72：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面。 .....247
圖 4-1.73：左圖為臺灣地體架構及地震站分布。 .....248
圖 4-1.74：2009 年 12 月 19 日 $M_L$ 4.7 地震序列。 .....248
圖 4-1.75：豐濱附近奇美斷層露頭。 .....250
圖 4-1.76：秀姑巒溪奇美村東南方奇美斷層露頭。 .....251
圖 4-1.77：泰林地區地電阻影像剖面結果圖。 .....251
圖 4-1.78：本計畫瑞穗斷層及奇美斷層幾何。 .....252
圖 4-1.79：(a) 池上斷層及附近之地震分布 b) 1998-2001 地震深度分布剖面 (c) 1995 年 M5.4 地震序列深度分布剖面 .....254
圖 4-1.80：(a) 2003 年成功地震餘震分布及斷層面解 (b) A-B 剖面餘震深度分。 .....254
圖 4-1.81：上圖為臺灣地體架構及地震站分布，下圖為跨越縱谷斷層南段 S03 速度構造剖面。 .....255
圖 4-1.82：位於舞鶴台地之東西向構造剖面。 .....256
圖 4-1.83.：卑南山礫岩構造演化圖。 .....258
圖 4-1.84：鹿野斷層與利吉斷層之地下構造模型。 .....258

圖 4-1.85：工作區域之地下構造剖面。 .....259
圖 4-1.86：(a) 鹿野 07P-LYHF-LT-1 測線位置圖，(b) 淺層震測剖面圖。 ....259
圖 4-1.87：左圖為臺灣地體架構及地震站分布， .....260
圖 4-1.88：(a) 2006 臺東地震系列重新定位及震源機制解，(b) 臺東地震剖面。 .....260
圖 4-1.89：鹿野-利吉斷層系統幾何形貌。 .....261
圖 4-1.90：宜蘭北部構造及宜蘭南部構造的三維幾何示意圖。 .....262
圖 4-2.1：斷層模擬初始值。 .....264
圖 4-2.2：2020 年臺灣 31 條斷層傾向滑移速率模擬成果。 .....271
圖 4-2.3：2020 年臺灣 31 條斷層走向滑移速率模擬成果。 .....272
圖 4-2.4：2020 年臺灣 31 條斷層模擬成果之滑移速率。 .....273
圖 4-2.5：臺灣 31 條斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果。 .....274
圖 4-3.1：(a) 本研究所使用的臺灣三維塊體模型及活動斷層分布。 .....277
圖 4-3.2：利用 GPS 連續站（藍色箭頭）及 GPS 移動站（紅色箭頭）資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站）。 .....282
圖 4-3.3：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置及誤差範圍..283
圖 4-3.4：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。(b) 以圖 a 中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。 ...284
圖 4-3.5：(a) 推求的斷層長期滑移速率（b） 各斷層面的鎖定係數分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率 .....286
圖 4-3.6：比較 GPS 觀測速度場（圖 a）以及本研究所得之最佳塊體模型所預估的地表運動（圖 b）。 圖 c 表示模型預估的殘差值.....287
圖 4-3.7：各塊體內之內部形變應變大小 .....288
圖 4-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖 .....292
圖 4-4.2：臺灣地區相對於測站 S01R 之水平速度場 .....296
圖 4-4.3：使用 2002-2019 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。 .....297
圖 4-4.4：使用 2002-2019 年水平速度場之全臺斷層滑移虧損率分布圖。.....298
圖 4-4.5：使用 2002-2019 年水平速度場之全臺斷層滑移虧損率分布圖。.....299
圖 4-5.1：本計畫 3 種模型之加權平均斷層滑移虧損率，對應表 4-5.1。.....305
圖 5-1.1：2017 年 1 月至 2020 年 11 月主要地震事件。 .....307
圖 5-1.2：中央氣象局 20180206 地震事件報告。 .....308
圖 5-1.3：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。 .....309
圖 5-1.4：臺灣東部地區地質圖。 .....310
圖 5-1.5：1951 年花蓮台東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖。 .....312
圖 5-1.6：測站 HUAL 與 PEPU 動態解算時間序列。 .....314
圖 5-1.7：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。 .....314
圖 5-1.8：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， .....315
圖 5-1.9：測站 HUAP 與 NSAN 每日解時間序列。 .....316
圖 5-1.10：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列.....319
圖 5-1.11：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列。 .....320
圖 5-1.12：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之同震位移場解算成果比較。 .....321

圖 5-1.13：2018 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。 .....321
圖 5-1.14：GPS 移動站 E549 現場環境圖。 .....322
圖 5-1.15：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 解算之同震位移場。 ....323
圖 5-1.16：花 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 之同震位移場。 .....325
圖 5-1.17：花蓮地區嶺頂-龍澗精密水準測線之坐標時間序列。 .....327
圖 5-1.18：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。 .....329
圖 5-1.19：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。。 .....331
圖 5-1.20：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型擬合結果。 .....334
圖 5-1.21：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型 DInSAR 擬合結果。 .....335
圖 5-1.22：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。 ....336
圖 5-1.23：花蓮近海地震多滑移量斷層模型擬合結果。 .....337
圖 5-1.24：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 升軌擬合結果。 .....338
圖 5-1.25：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 降軌擬合結果。 .....339
圖 5-2.1：中央氣象局 20190418 地震事件報告 .....340
圖 5-2.2：中央氣象局 20190418 花蓮地震事件。 .....341
圖 5-2.3：測站 TUNM 與 PEPU 每日解時間序列。 .....343
圖 5-2.4：花蓮秀林鄉地震 GPS 同震位移。 .....344
圖 5-2.5：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。 .....345
圖 5-2.6：2018 年與 2019 年花蓮地震餘震分。 .....348
圖 5-2.7：2019 年花蓮地震斷層模型擬合結果。 .....349
圖 5-3.1：中央氣象局 20200503 地震事件報告。 .....352
圖 5-3.2：20200503 地震事件之震源機制解與地震波反演之擬合結果。 .....353
圖 5-3.3：縱谷斷層分段圖。 .....354
圖 5-3.4：池上斷層區域之地震構造。 .....355
圖 5-3.5：本次地震（黑色星號）與池上斷層歷史地震之地理關係。 .....356

表 A：全程計畫預期進度甘梯圖（Gantt Chart）

Table A：Gantt Chart of expected progress.

| 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 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 工作項目 ＼ 月次 | | 第 1 年度（106 年度） | 第 2 年度（107 年度） | 第 3 年度（108 年度） | 第 4 年度（109 年度） |
| 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 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） | | | | | |
| 水準測量資料分析（由成大工作團隊負責） | | | | | |
| GPS 移動站資料檢核及分析（由成大工作團隊負責） | | | | | |
| 斷層之斷層幾何參數（由成大工作團隊負責） | 中部地區 | | | | |
| | 北部地區 | | | | |
| | 南部地區 | | | | |
| | 東部地區 | | | | |
| 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） | | 25% | 50% | 75% | 100% |

# 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。在 GPS 連續站資料處理方面，本計畫解算全臺約 500 站連續全球定位系統測站，資料累積至 2020 年 9 月的時序分析，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙站之年速度場。此外，資料累積至 2020 年 9 月底為止，GPS 移動站部分共完成 767 站的施測，精密水準則完成共計 29 條測之施測。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。本計畫彙整了 ERS-1/2、ENVISAT、ALOS 以及 Sentinel-1 等合成孔徑雷達影像進行 InSAR 在時間序列上的分析，作為大範圍地表變形的一種觀測方式。北部區域的台北盆地變形量較小，主要的下陷區域位於泰山、五股區域，而桃園工業區與台中市西區與南區有較局部的下陷。中部地區在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。南部地區兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。台南台地則觀測到最大抬升變形。此區主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。此外，跨過龍船斷層以及鳳山轉換帶也有明顯的速度不連續。東部地區的 ALOS 分析結果顯示北段向東跨過嶺頂斷層與池上斷層兩側有明顯速度梯度差異，且有明顯的分界。向南則顯示出跨過鹿野斷層也有速度梯度差異。Sentinel-1 分析結果呈現米崙斷層附近有明顯向北東與抬升的運動分量。另外在此區活動斷層中，主要在跨過池上斷層、鹿野斷層兩側都可以看到明顯的速度不連續性。在斷層模型建置方面，本研究針對臺灣地區地調所公告之活動斷層作為塊體邊界斷層，以 BLOCKS、DEFNODE 與 Baseline Inversion Model 等三個模型計算各斷層的加權平均滑移虧損速率，山腳斷層為 1.0 mm/yr、湖口斷層為 1.1 mm/yr、新竹斷層為 1.0 mm/yr、新城斷層為 1.6 mm/yr、獅潭斷層為 2.7 mm/yr、三義斷層為 4.2 mm/yr、大甲－彰化斷層（北段）為 2.4 mm/yr、大甲－彰化斷層（南段）為 3.9 mm/yr、屯子腳斷層為 1.1 mm/yr、車龍埔斷層為 5.3 mm/yr、大茅埔－雙冬斷層為 1.3 mm/yr、九芎坑斷層為 6.3 mm/yr、梅山斷層為 5.2 mm/yr、大尖山斷層為 4.9 mm/yr、木屐寮-六甲斷層為 4.2 mm/yr、

觸口斷層為 6.8 mm/yr、新化斷層為 18.9 mm/yr、後甲里斷層為 5.9 mm/yr、左鎮斷層為 3.7 mm/yr、小崗山斷層為 5.4 mm/yr、旗山斷層為 5.5 mm/yr、潮州斷層為 3.2 mm/yr、恆春斷層為 10.1 mm/yr、米崙斷層為 7.2 mm/yr、嶺頂斷層為 8.6 mm/yr、瑞穗斷層為 12.1 mm/yr、奇美斷層為 12.6 mm/yr、玉里斷層為 15.1 mm/yr、池上斷層為 10.4 mm/yr、鹿野斷層為 4.5 mm/yr、利吉斷層為 6.8 mm/yr。為了合理地解釋臺灣東北部之速度梯度變化，本計畫也將宜蘭北部及南部構造納入分析，宜蘭北部構造為 4.6 mm/yr、宜蘭南部構造為 3.2 mm/yr。

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. We also invert the surface velocities to estimate the short-term fault slip rate, slip rate deficit and optimized fault geometry parameters by adopting the fault models. By the September of 2020, the daily solutions and time series from 500 continuous GPS stations were calculated to get the interseimic velocity field with respect to S01R by removing the coseismic deformation, post-seismic deformation, periodic motion and unusual data. By the September of 2020, 767 surveyed-mode GPS stations and 29 leveling routes were re-surveyed. As a result, the velocity field shows a similar trend with the previous one. In this project, SAR images such as ERS-1/2, ENVISAT, ALOS and Sentinel-1 are integrated for InSAR time-series analysis as a method of observation of large-scale surface deformation. The Taipei Basin in the northern Taiwan region has a relatively small amount of deformation. The main subsidence areas are located in the Taishan and Wugu areas, while the Taoyuan Industrial Zone and the western and southern districts of Taichung City have more partial subsidence. The central area has obvious subsidence in the Changhua coastal area south of Bagua Mountain and the Yunlin area south of Zhuoshui river. The two main subsidence areas in the southern Taiwan region are the Jianan area along the coast and the Pingtung area to the south. The Tainan platform observed the largest uplift deformation. In this area, obvious velocity discontinuities can be seen mainly across the Houjiali fault and on both sides of the Qishan fault. In addition, there are obvious speed discontinuities across the Longchuan Fault and Fengshan Transition Zone. The results of ALOS analysis in the eastern region show that the northern section crosses the Lingding fault eastward and there is a clear difference in velocity gradient between the two sides of the Chishang fault, and there is a clear boundary. To the south shows that there is also a difference in velocity gradient across the Luye Fault. The results of Sentinel-1 analysis show that there is a significant northeast and uplift movement component near the Milun fault. In addition, in the active faults in this area, obvious velocity discontinuities can be seen mainly on both sides of the Chishang fault and Luyeh fault. For the fault model constructions, Taiwan active faults were selected as the target faults. The results show that the weighted average slip deficit rate of Sanchiao fault is 1.0 mm/yr、Hukou fault is 1.1 mm/yr、Hsinchu fault is 1.0 mm/yr、Hsincheng

fault is 1.6 mm/yr、Shihtan fault is 2.7 mm/yr、Sanyi fault is 4.2 mm/yr、Tachia-Changhua（North） fault is 2.4 mm/yr、Tachia-Changhua（South）fault is 3.9 mm/yr、Tuntzuchiaoi fault is 1.1 mm/yr、Chelungpu fault is 5.3 mm/yr、Tamaopu-Shuangtung fault is 1.3 mm/yr、Chiuchiungkeng fault is 6.3 mm/yr、Meishan fault is 5.2 mm/yr、Tachienshan fault is 4.9 mm/yr、Muchiliao-Liuchia fault is 4.2 mm/yr、Chukou fault is 6.8 mm/yr、Hsinhua fault is 18.9 mm/yr、Houchiali fault is 5.9 mm/yr、Tsochen fault is 3.7 mm/yr、Hsiaokangshan fault is 5.4 mm/yr、Chishan fault is 5.5 mm/yr、Chaochou fault is 3.2 mm/yr、Hengchun fault is 10.1 mm/yr、Milun fault is 7.2 mm/yr、Lingding fault is 8.6 mm/yr、Ruey fault is 12.1 mm/yr、Chimei fault is 12.6 mm/yr、Yuli fault is 15.1 mm/yr、Chihshang fault is 10.4 mm/yr、Luyeh fault is 4.5 mm/yr and Lichi fault is 6.8 mm/yr. In order to reasonably explain the speed gradient changes in northeastern Taiwan, this project also includes the northern and southern Yilan structures into the analysis. The northern Yilan structure is 4.6 mm/yr, the southern Yilan structure is 3.2 mm/yr.

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

# 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，以及斷層鎖定所引起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民國 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。於民國 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。在民國 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」與民國 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 1-2.1）、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 1-2.1），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 1-2.2 與圖 1-2.4），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，在民國 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、池上斷層和小崗山斷層）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。在民國 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，並結合民國 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，在一週內完成連續 GPS 同震位移場之解算工作。

表 1-2.1：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。

Table 1-2.1: Continuous GPS stations set up by the Central Geological Survey.

| 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 | GS50 | 蔡宅 | 2009/03/25 |
| GS02 | 新竹高工(2015.08.17 廢站) | 2004/10/21 | GS51 | 杉林國小 | 2009/12/18 |
| GS03 | 工研院 | 2004/10/19 | GS52 | 新發國小(2020.9 廢站) | 2009/12/18 |
| GS04 | 大埔美農場(2009.11.11 廢站) | 2004.10.16 | GS53 | 星星兒的家 | 2009/12/19 |
| GS05 | 半天寮淨水廠 | 2004/10/21 | GS54 | 大洲國中(2013.7.12 廢站) | 2009/12/15 |
| GS06 | 民和國中 | 2004/10/21 | GS55 | 舊寮國小 | 2009/12/11 |
| GS07 | 培英國小 | 2004/10/21 | GS56 | 瑪家國中 | 2009/12/14 |
| GS08 | 興華國小(2020.03.26 廢站) | 2005/08/15 | GS57 | 石門國小(2016.12.27 廢站) | 2009/12/15 |
| GS09 | 大鵬國小 | 2005/08/16 | GS58 | 高士國小 | 2009/12/14 |
| GS10 | 竹圍國中 | 2005/09/06 | GS59 | 車城國小射寮分校 | 2009/12/17 |
| GS11 | 北投國小 | 2005/08/15 | GS60 | 永港國小 | 2009/12/18 |
| GS12 | 樂善國小(2018.3.8 廢站) | 2005/09/06 | GS61 | 梅花國小 | 2010/10/06 |
| GS13 | 國光國小 | 2005/08/16 | GS62 | 新樂國小 | 2010/09/20 |
| GS14 | 西門國小 | 2005/09/13 | GS63 | 太興國小 | 2010/09/24 |
| GS15 | 雙溪國小 | 2005/09/13 | GS64 | 里佳國小 | 2010/09/28 |
| GS16 | 寶山水庫 | 2005/09/13 | GS65 | 茶山國小(2011.7.28 廢站) | 2010/10/14 |
| GS17 | 太平國小 | 2005/09/14 | GS66 | 達邦 | 2010/09/28 |
| GS18 | 嘉義農業試所 | 2005/09/14 | GS67 | 新美國小 | 2010/09/28 |
| GS19 | 保長國小(2012.5.25 廢站) | 2006/07/12 | GS68 | 三和國小 | 2010/12/17 |
| GS20 | 龜山島 | 2006/08/04 | GS69 | 樹林垃圾掩埋場 | 2011/09/22 |
| GS21 | 大嘉國小 | 2006/06/10 | GS70 | 玉田國小 | 2011/09/23 |
| GS22 | 快官交流道 | 2006/06/10 | GS71 | 大隱國小 | 2011/09/22 |
| GS23 | 五光國小 | 2006/05/30 | GS72 | 利澤國中 | 2011/09/22 |
| GS24 | 文祥國小 | 2006/05/30 | GS73 | 新光國小 | 2012/11/03 |
| GS25 | 寶山國小 | 2006/05/31 | GS74 | 內門國小 | 2012/11/03 |
| GS26 | 名崗國小 | 2006/05/31 | GS75 | 旗美高中 | 2012/11/01 |
| GS27 | 彰化農場 | 2006/05/31 | GS76 | 新興國小 | 2012/11/03 |
| GS28 | 中崙加壓站 | 2006/06/17 | GS77 | 深水國小 | 2012/11/15 |
| GS29 | 潭頂自來水廠 | 2006/06/16 | GS78 | 溪洲國小 | 2013/10/21 |
| GS30 | 大橋國小 | 2006/06/25 | GS79 | 中路國小 | 2013/10/21 |
| GS31 | 西勢國小 | 2006/06/17 | GS80 | 田寮國中 | 2013/10/21 |
| GS32 | 虎頭埤風景區 | 2006/06/23 | GS81 | 嘉興國中 | 2013/10/21 |
| GS33 | 永華國小 | 2006/06/22 | GS82 | 卓蘭實中 | 2014/11 |
| GS34 | 成大航太試驗場 | 2006/06/24 | GS83 | 土城國小 | 2014/11 |
| GS35 | 南沙崙農場 | 2006/06/24 | GS84 | 水里國中 | 2014/11 |
| GS36 | 德化國小 | 2006/10/21 | GS85 | 水泉國小龍泉分校 | 2014/11 |
| GS37 | 泰安服務區 | 2006/10/25 | GS86 | 水美國小 | 2015/09/15 |
| GS38 | 清水服務區 | 2006/10/21 | GS87 | 水源國小 | 2015/09/08 |
| GS39 | 龍井國小 | 2006/10/21 | GS88 | 那拔國小 | 2015/09/14 |
| GS40 | 龍峰國小(2016.11.7 廢站) | 2006/10/21 | GS89 | 新化國中 | 2015/09/14 |
| GS41 | 竹門國小 | 2007/11/23 | GS90 | 新埔工作站(2019.07.01 廢站) | 2016/09/02 |
| GS42 | 東原國中 | 2007/11/23 | GS91 | 香山高中 | 2016/09/02 |
| GS43 | 果毅國小 | 2007/11/27 | GS92 | 獅潭國中 | 2016/09/05 |
| GS44 | 六甲國小湖東分校 | 2007/11/30 | GS93 | 七星山 | 2017/01/01 |
| GS45 | 霧台鄉公所 | 2009/01/05 | GS94 | 中湖 | 2017/12/20 |
| GS46 | 來義國小 | 2009/01/06 | GS95 | 八煙 | 2017/12/20 |
| GS47 | 台電南展館(2013.7.25 廢站) | 2009/01/05 | GS96 | 二溪國小 | 2020/02/07 |
| GS48 | 警光山莊 | 2009/04/01 | GS97 | 玉井國小 | 2020/02/07 |
| GS49 | 馬赫坡民宿 | 2009/04/01 | | | |

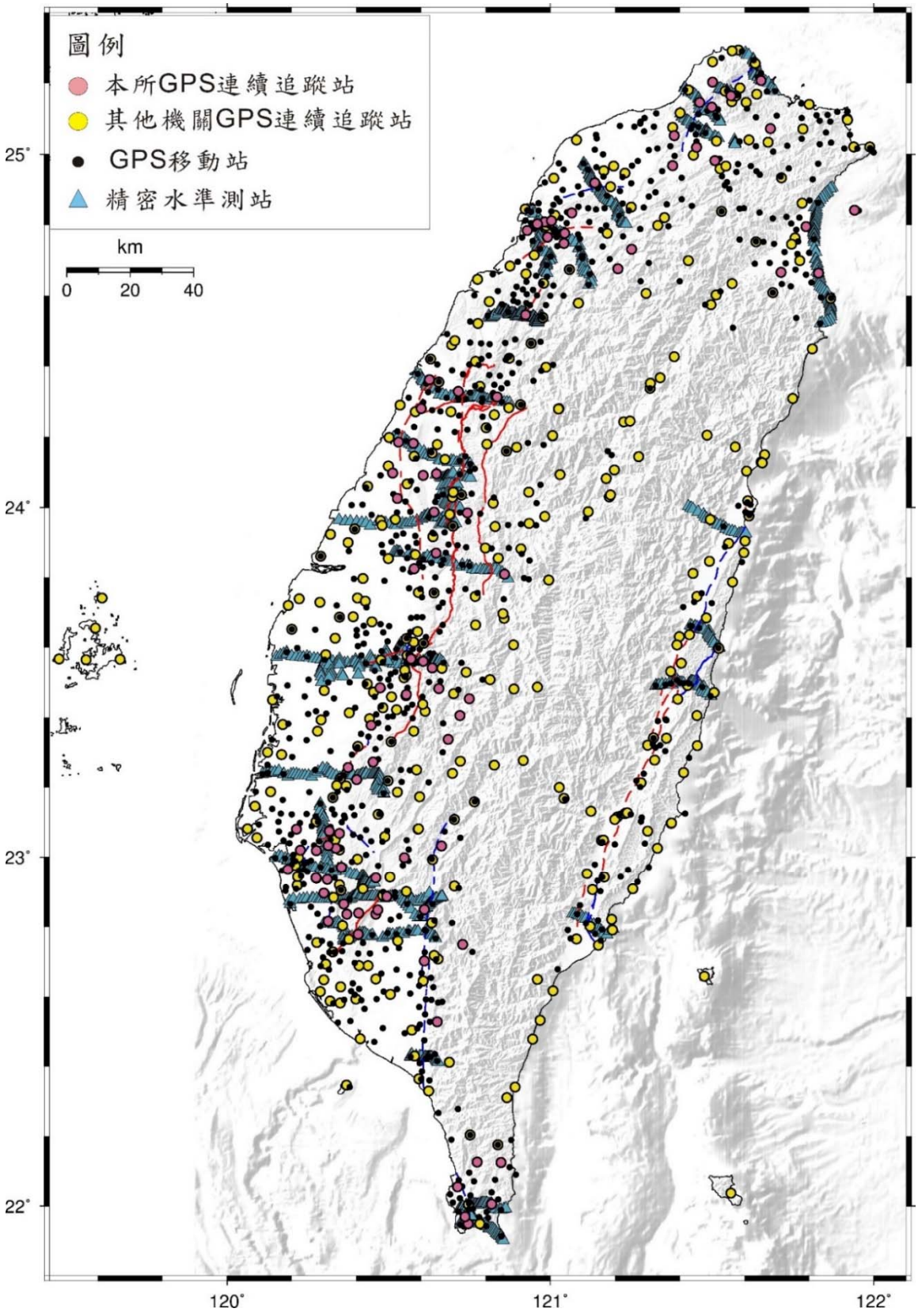



圖 1-2.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。包含 86 站 GPS 連續站、773 站 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。

Figure 1-2.1: CGS geodetic network for active fault monitoring, including 86 continuous GPS stations, 773 campaign-mode GPS stations and 42 pricise leveling routes.

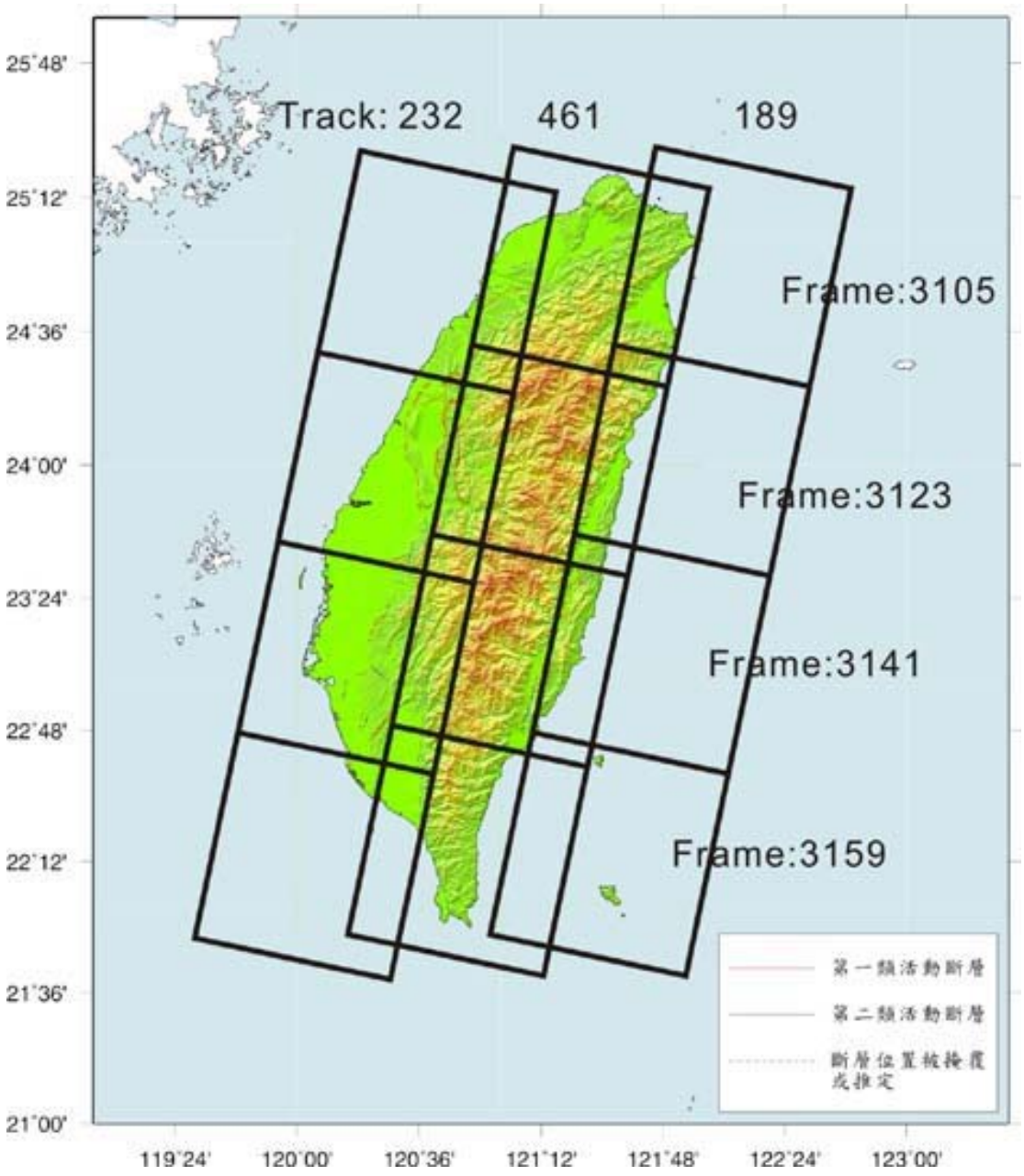



圖 1-2.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

Figure 1-2.2: Frames and tracks of ascending and descending orbits of ERS-1/2 (C-band) and EnviSAT (C-band) satellite images. Area of SAR image is about 110 km × 110 km per frame.

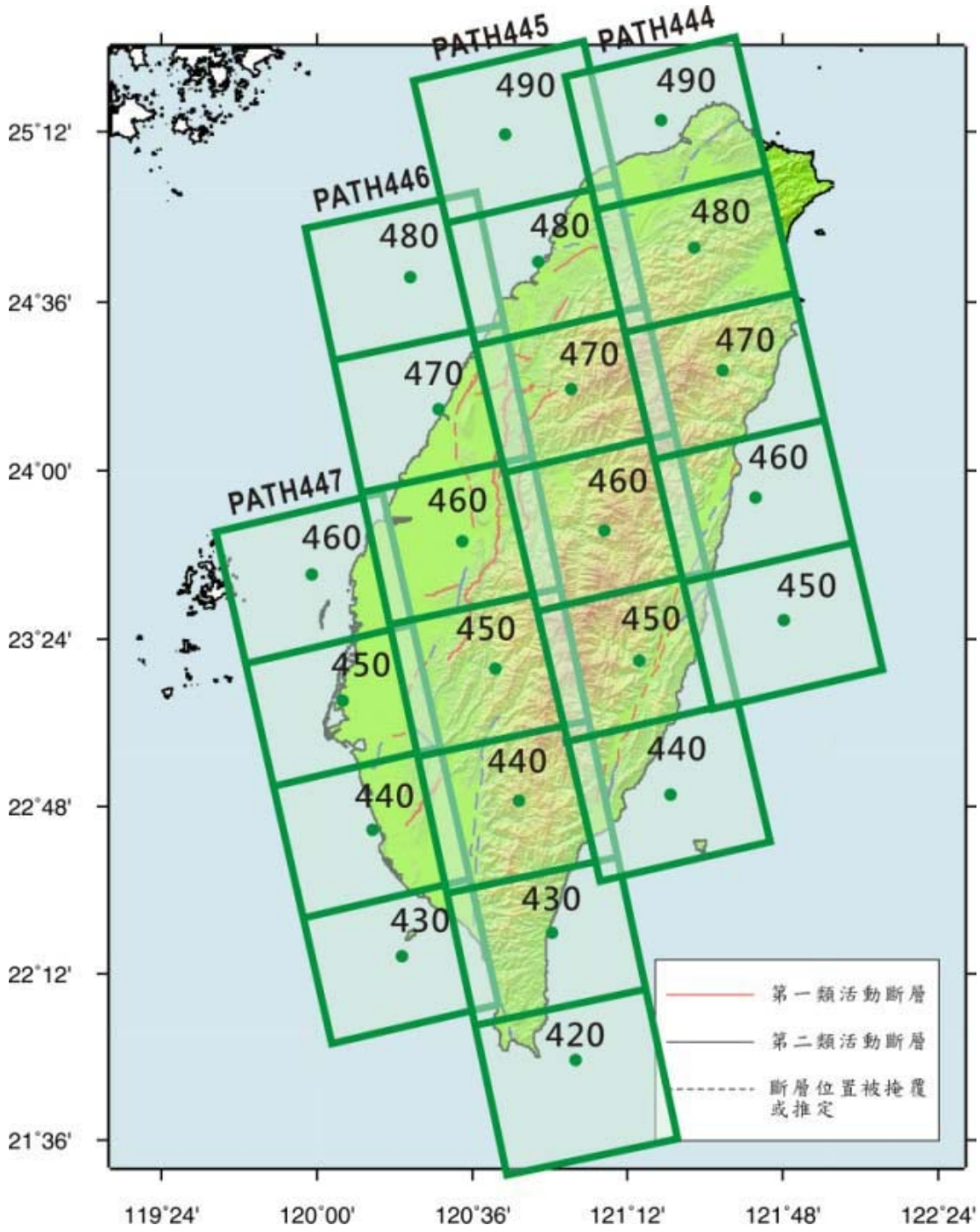



圖 1-2.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-2.3: Ascending tracks of ALOS satellite images.

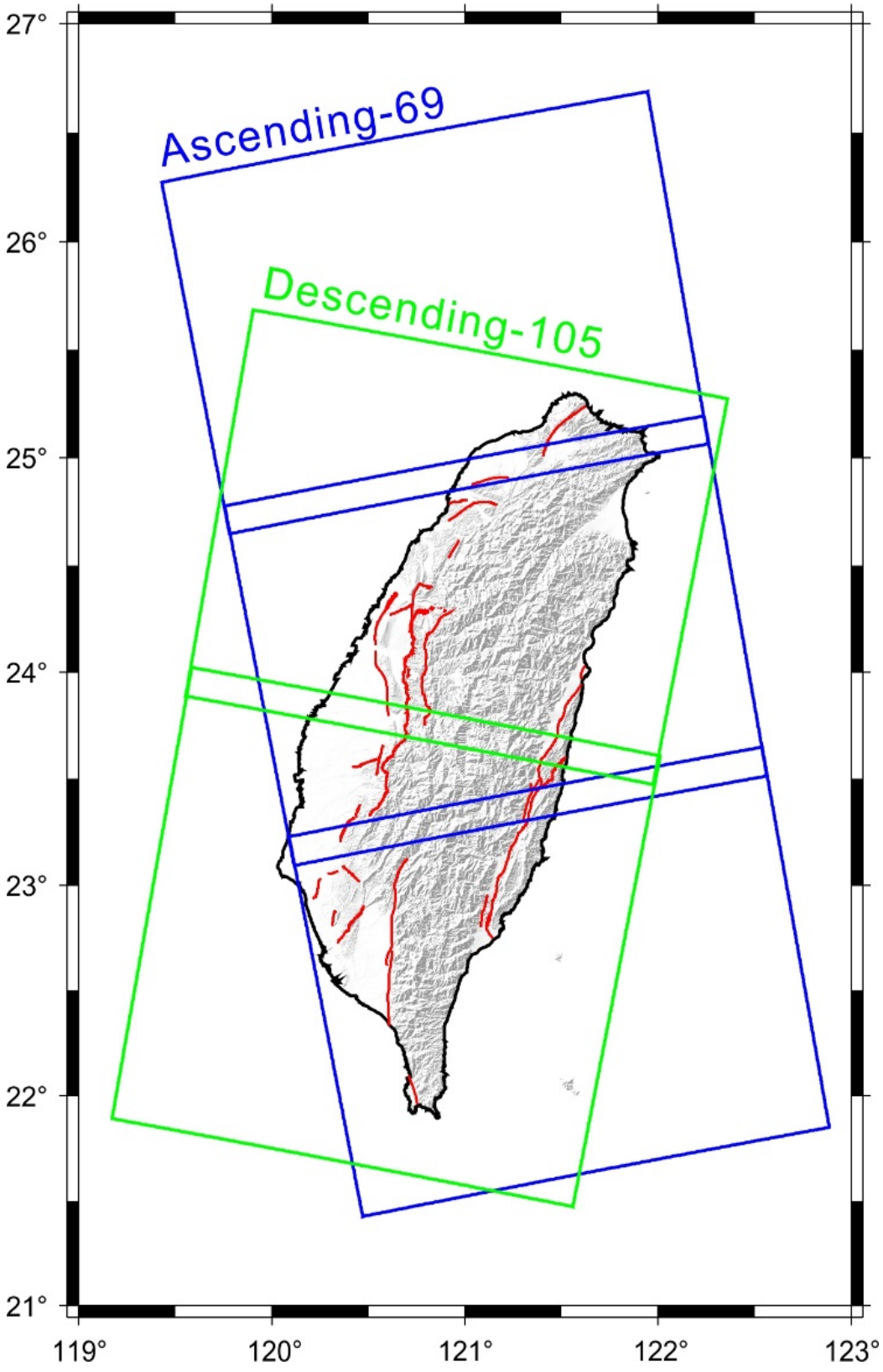



圖 1-2.4：Sentinel-1A 衛星影像於臺灣之升軌、降軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-2.4: Ascending and descending tracks of Sentinel-1A satellite images.

# 第二章、大地測量資料分析

## 2-1 GPS 連續站解算成果分析

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、國土測繪中心及經濟部水利署等單位，約 500 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 GipsyX 解算軟體計算求解精密之測站坐標。GipsyX 是一種精密單點定位之技術，其優點相較 GipsyX 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 GipsyX 軟體解算之結果大致相同，顯示使用 GipsyX 解算結果之可靠度。

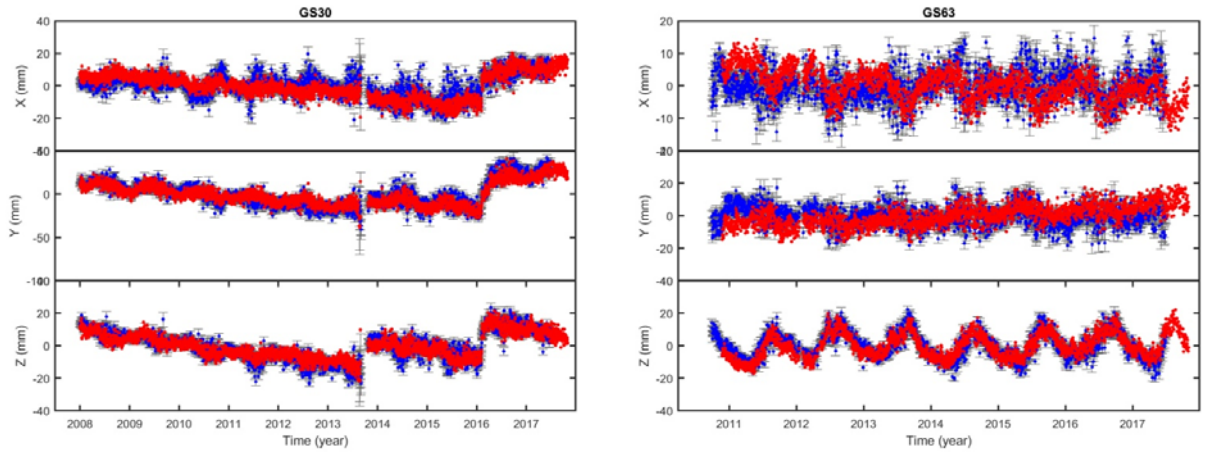



圖 2-1.1：連續 GPS 測站 GS30 與 GS63 利用 GAMIT（藍色）與 GipsyX（紅色）解算之時間序列。

Figure2-1.1: Time series data of continuous GPS station S01R processed by GAMIT (blue) and GipsyX (red).

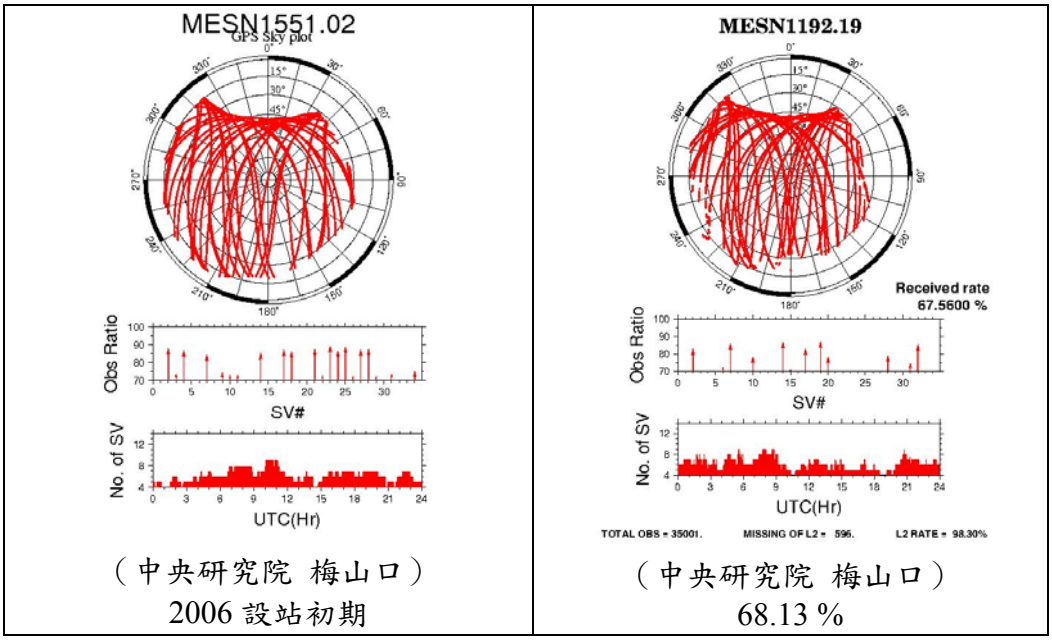
GipsyX 數據處理流程主要分為數據預處理、軌道計算和參數解算三個階段，最終從相位或偽距觀測數據中計算得出測站坐標及精度估計。而這裡的數據處理採取了以下步驟：

（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 2019 年 04 月 29 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。目前針對此站，已架設新點置換。




（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%。
Figure2-1.2: The data receiving of MESN station is < 80%。

此外，由圖 2-1.3 地調所測站 GS27 之時間序列可明顯看出 2014 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。

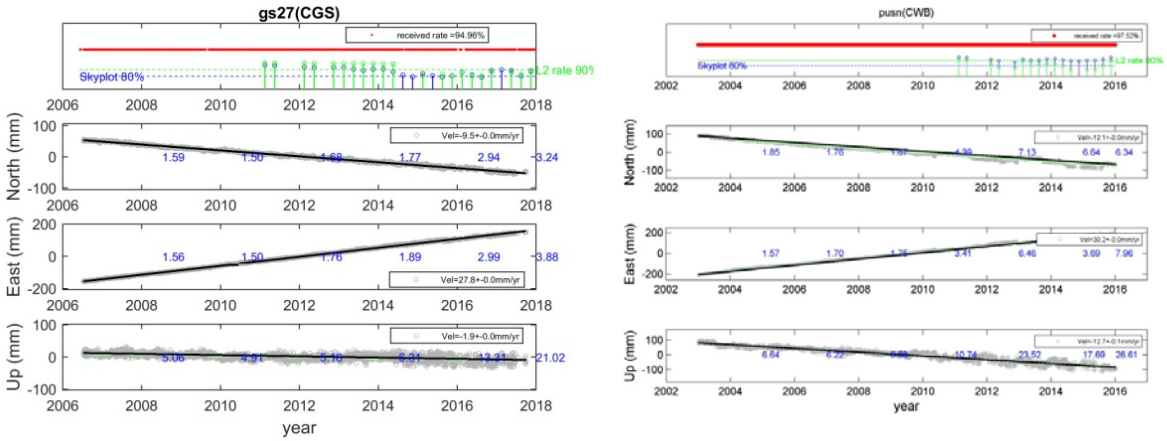



圖 2-1.3：GS27 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。
Figure2-1.3: The time series data of GS27 and PUSN stations were affected by the cover and unusual instrument operation.

以往報告所使用的解算軟體 GIPSY-OASIS 於 2018 年中即不再提供 ITRF2008 坐標框架之軌道參數，因此本年度改使用新版本 GipsyX 以目前最新的 ITRF2014 為坐標框架進行全台連續 GPS 測站坐標重新解算。圖 2-1.4 為 S01R 測站利用 GIPSY-OASIS（藍點）與 GipsyX（紅點）於 2017 至 2019 年解算之時間序列。可看出利用新舊軟體解算之結果大致相同，顯示使用 GipsyX 解算結果之可靠度。此外，舊軟體解算結果於 2018 年 4 月左右因軌道改變而形成的跳動，也可成功的移除。

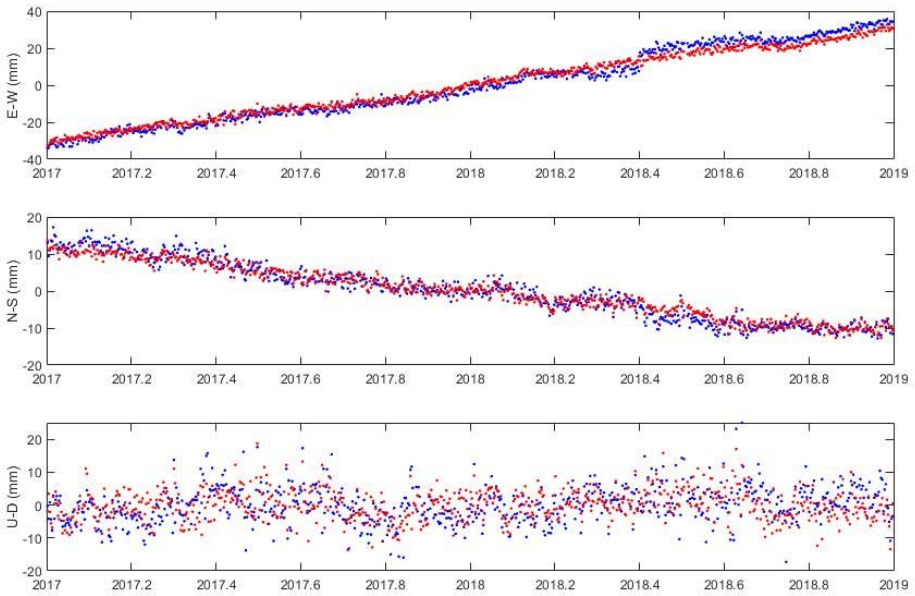



圖 2-1.4：利用 GIPSY-OASIS（藍點）與 GipsyX（紅點）解算之連續 GPS 測站 S01R 時間序列。
Figure2-1.4: Time series data of continuous GPS station S01R processed by GIPSY-OASIS (blue) and GipsyX (red).

另外，解算過程中也發現早期（約 2002-2015 年），氣象局測站資料大多使用 Trimble 5700 型號之記錄器，其記錄器對於時間紀錄上有嚴重的漂移現象，導致解算結果相當離散。為修正此問題，需重新針對原始資料轉檔再做計算。圖 2-1.5 即為以 CTOU 測站為例展示利用重新轉檔前（紅點）RINEX 檔案與重新轉檔後（綠點：GIPSY-OASIS、藍點：GIPSYX）RINEX 檔案之每日坐標解算結果。

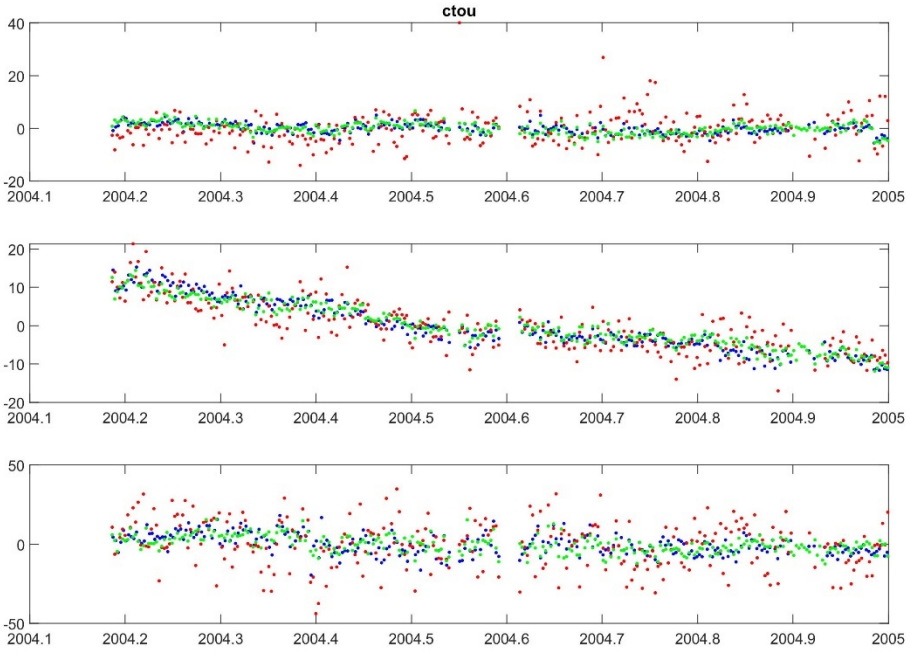



圖 2-1.5：利用重新轉檔前（紅點）與重新轉檔後（綠點：GIPSY-OASIS、藍點：GIPSYX）解算之連續 GPS 測站 CTOU 時間序列。

Figure2-1.5: Time series data of continuous GPS station CTOU processed by original RINEX file (red) and reconvert RINEX file (green: GIPSY-OASIS, blue: GIPSYX).

## 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，反應地表與地下構造的運動情形，可提供地殼變形的訊息。分析 1993 年至 2020 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 2-1.6 為以地調所 GS40、GS15、GS51 及 GS63 測站分別展示代表具有穩定速度的測站、因地震或是天線更換跳階位移或震後呈指數衰減的測站，以及受季節性變化影響明顯之測站。

圖 2-1.7 及圖 2-1.8 為彙整歷史資料至 2020 年 9 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，此結果與過去結果約略相同。

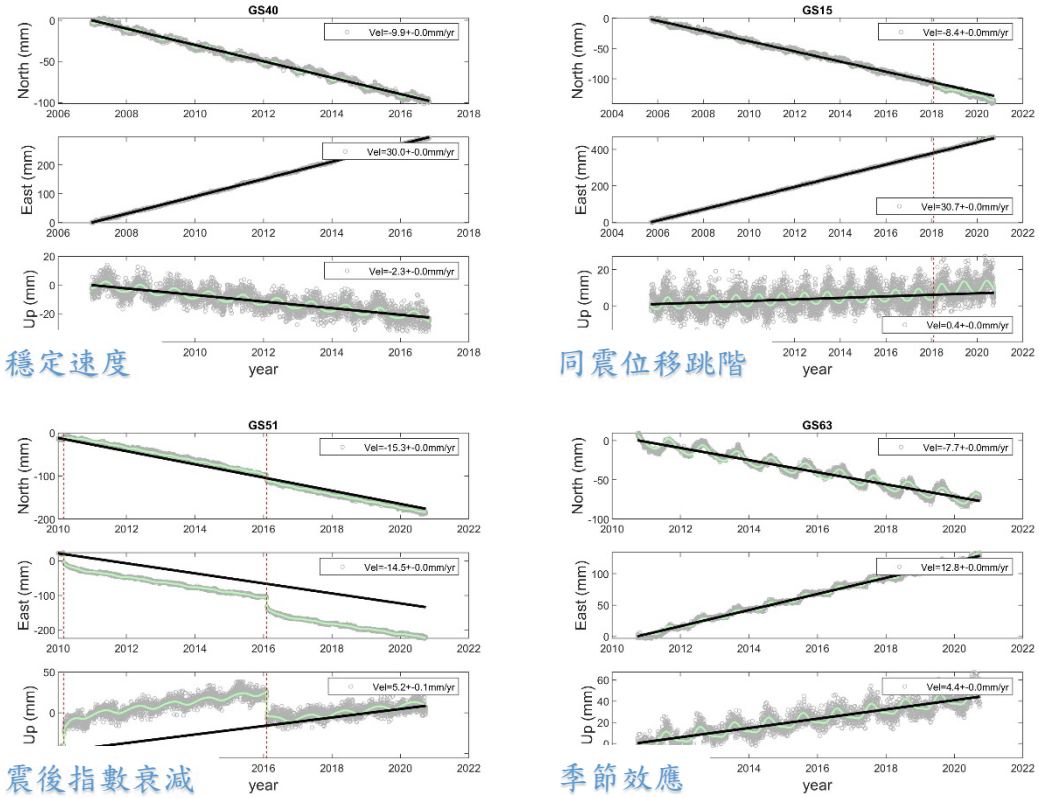



圖 2-1.6：不同運動機制之 GPS 測站時間序列。

Figure 2-1.6: Stable velocity, coseismic offset, post-seismic exponential decay and seasonal effect in GPS time series.

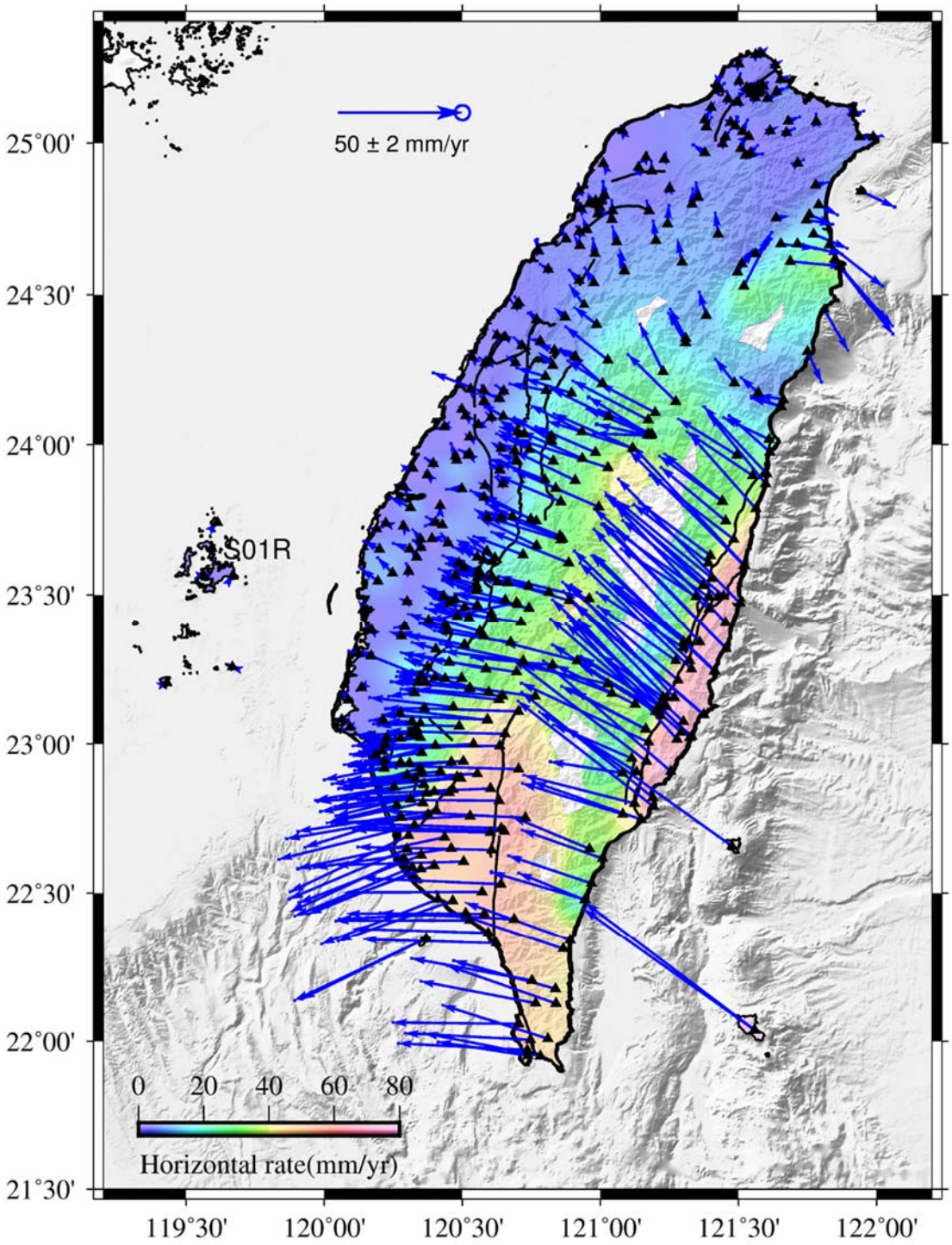



圖 2-1.7：整合歷史資料至 2020 年 9 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙站之水平年速度場。

Figure 2-1.7: Horizontal velocity field with respect to to S01R from 500 continuous GPS stations calculated by removing coseismic deformation, post-seismic deformation, periodic motion, and unusual data by September of 2020.

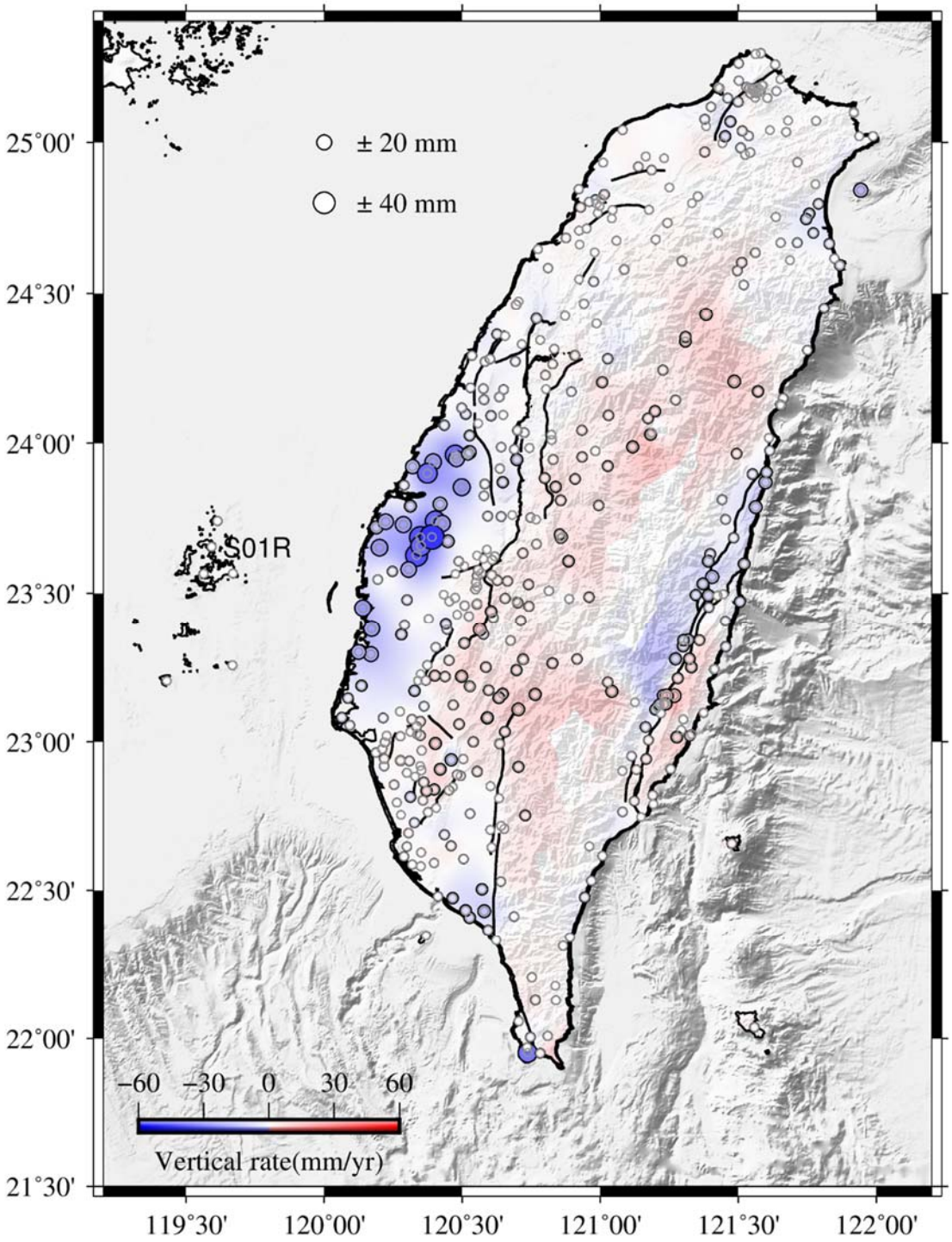



圖 2-1.8：整合歷史資料至 2020 年 9 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙 S01R 測站之垂直年速度場。圓圈代表速度場誤差值的大小。

Figure 2-1.8: Vertical velocity field with respect to S01R from 500 continuous GPS stations calculated with removing coseismic deformation, post-seismic deformation, periodic motion and unusual data. Circle indicates the size of error of the velocity field.

## 2-2 GPS 移動站坐標解算精度分析

### 2-2-1 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析

本計畫 GPS 移動站資料解算採用廣義約制台灣 5 個連續站於 ITRF[2014]坐標框架下之坐標，此 5 個連續站分別為陽明山站（YMSM）、鳳林站（FLNM）、北港站（PKGM）、墾丁站（KDNM）、澎湖站（S01R）、金門站（KMNM）。為了確保此 5 個連續站坐標時間序列之可靠度與穩定性，同時將此 5 個台灣連續站資料與 IGS（International GPS Service）國際連續站資料進行聯合解算，求解此 5 個台灣連續站於 ITRF[2014]框架之坐標時間序列。IGS 國際連續站分別為中國北京站（BJFS）、澳洲科科島站（COCO）、南韓大田站（DAEJ）、澳洲達爾文市站（DARW）、美國關島站（GUAM）、中國拉薩站（LHAZ）、菲律賓馬尼拉站（PIMO）、台灣新竹站（TNML）及日本筑波站（TSKB）。我們利用 IGS 公告各連續站於 ITRF[2014]坐標框架下之坐標及速度，以線性關係式推出各個連續站於任一觀測時刻之坐標，並約制此國際連續站之坐標，求解台灣 5 個連續站於 ITRF[2014]坐標框架之時間序列，確認此 5 個台灣連續站坐標時間序列之可靠度與穩定性，並求出各測站之線性速度，即可以任一觀測時刻之作標，作為移動站解算時之約制條件。

在 GPS 移動站資料解算流程部分，本計畫採用 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 International Earth Rotation Service 的 Bulletin B 公佈值，修正 UTC 與 UT1 之差值，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。

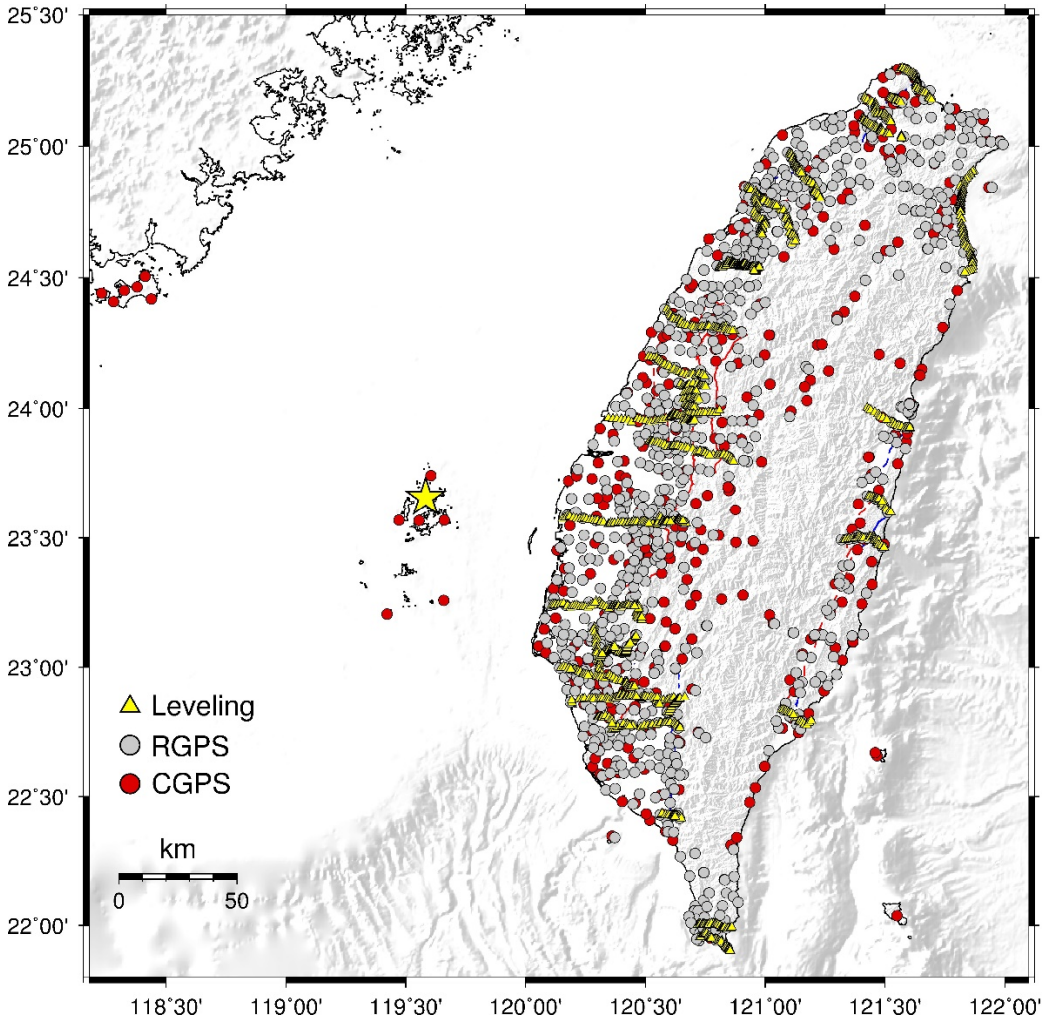



圖 2-2.1：臺灣地殼變形監測網。灰色圓圈為 GPS 移動站，紅色圓圈為 GPS 連續站，黃色三角形為精密水準點位，黃色星號為澎湖 S01R 連續站。紅色實線與藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層分布位置。左下圖黃色星號為本計畫使用之 IGS 連續站。

Figure 2-2.1: Taiwan crustal deformation monitoring network. Grey circles are campaign-mode GPS stations; Red circles are continuous GPS stations; Yellow triangles are precise leveling benchmarks; The yellow star is S01R continuous GPS station. Red solid lines and blue dashed lines represent the active faults reposrted by the CGS. The yellow stars in the bottom left figure are the IGS stations used in this project.

## 2-2-2 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 及 GPSIY 解算成果比較

我們分別採用兩套軟體：Bernese 與 GAMIT/GLOBK 處理全臺灣的 GPS 移動站資料，並且估算坐標的速度，所涵蓋的年份為 2002－2019 年。

我們採用廣義約制（generalized constraint）方式使用 GAMIT/GLOBK 軟體，以計算各站的每日解。廣義約制的方式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。在接下來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國際 IGS 連續站，因此每日的資料中的粗差（outliers）可以容易被偵測且排除（Herring et al. 2015）。本案採用臺灣附近的國際 IGS 站，按照站名字母順序為：中國北京（BJFS）、澳洲科科島（COCO）、南韓大田（DAEJ）、澳洲達爾文市（DARW）、美國關島（GUAM）、中國拉薩（LHAZ）、菲律賓馬尼拉（PIMO）、臺灣新竹（TNML）、臺灣桃園（TWTF）等。計算的框架為 International Terrestrial Reference Frame 2014，簡稱 ITRF14（Altamimi et al. 2016）。在採用 IGS 站進行坐標速度的計算上，不同的約制方式並對最後坐標速度估值的影響量很小，沒有顯著的差異（鄭凱謙等，2019），不過為了比較上能有較高的一致性，我們在 Bernese 軟體上也選擇採用相同的約制方式進行每日解的計算。

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，剔除不合理的移動站，例如：時間涵蓋長度有明顯差異者，共 664 個移動站進行比較與統計。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 0.90，相關性稍低於水平方向。且在垂直速度上 Gamit 解有稍微高估的情況。移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果比較如圖 2-2.2。速度估值的差異（Gamit 結果減去 Bernese 結果）在南北、東西、垂直三分量上平均分別為+1.28、+0.49、+2.29 mm/year，差值的直方圖與直方圖的常態分佈曲線如圖 2-2.3。結果顯示兩種解算軟體的水平速度估值差值小於 2 mm/year，垂直方向差異稍大，達 2.29 mm/year。且三分量的速度估值的差異都為正，代表 Gamit 結果稍微高於 Bernese 結果。造成此速度差值的原因之一是殘餘的系統誤差，因位大部份軟體在解算 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。

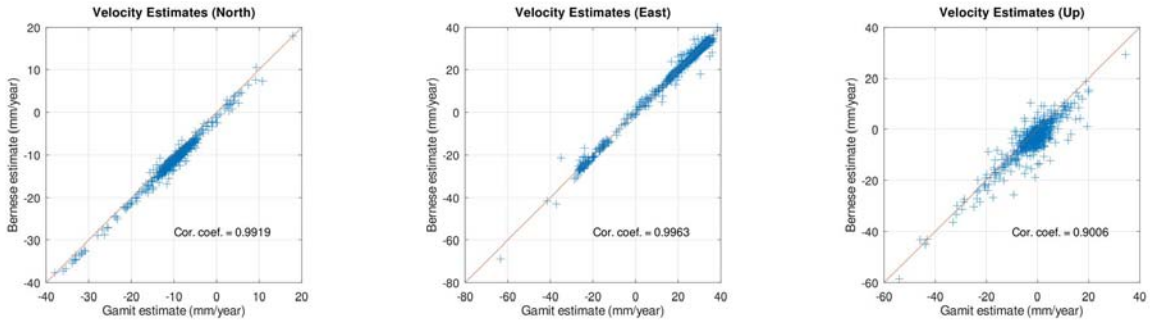



圖 2-2.2：移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果。
Figure 2-2.2: Velocity estimates of the survey GPS sites in the north, east and up components.

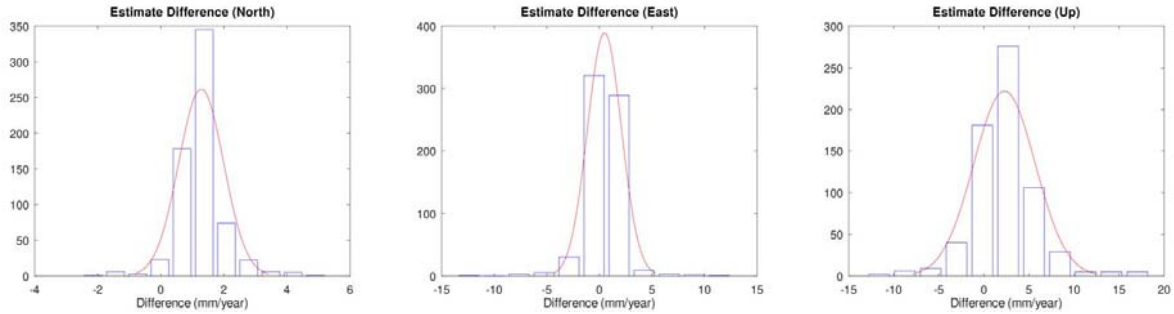



圖 2-2.3：兩種軟體解算的速度估值的差值（Gamit 結果減去 Bernese 結果）直方圖，紅色曲線為直方圖的常態分佈曲線迴歸解果。差值在南北、東西、垂直三分量上平均分別+1.28、+0.49、+2.29 mm/year。
Figure 2-2.3: Histograms for the velocity estimate difference (Gamit solution minus Bernese solution) in the north, east and up components. The average diference are +1.28, +0.49, +2.29 mm/year in the north, east and up components.

## 2-3 精密水準測量成果

水準測量是獲得高精度相對高程的測量方法。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。

2020 年 9 月底前所獲得共計 944 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 932 個測段 (圖 2-3.1a)，佔所有測段比例之 98.7 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 96.4 % (910 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 99.2 % (936 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 905 個測段達測段達 95.9 % (圖 2-3.1b) 顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

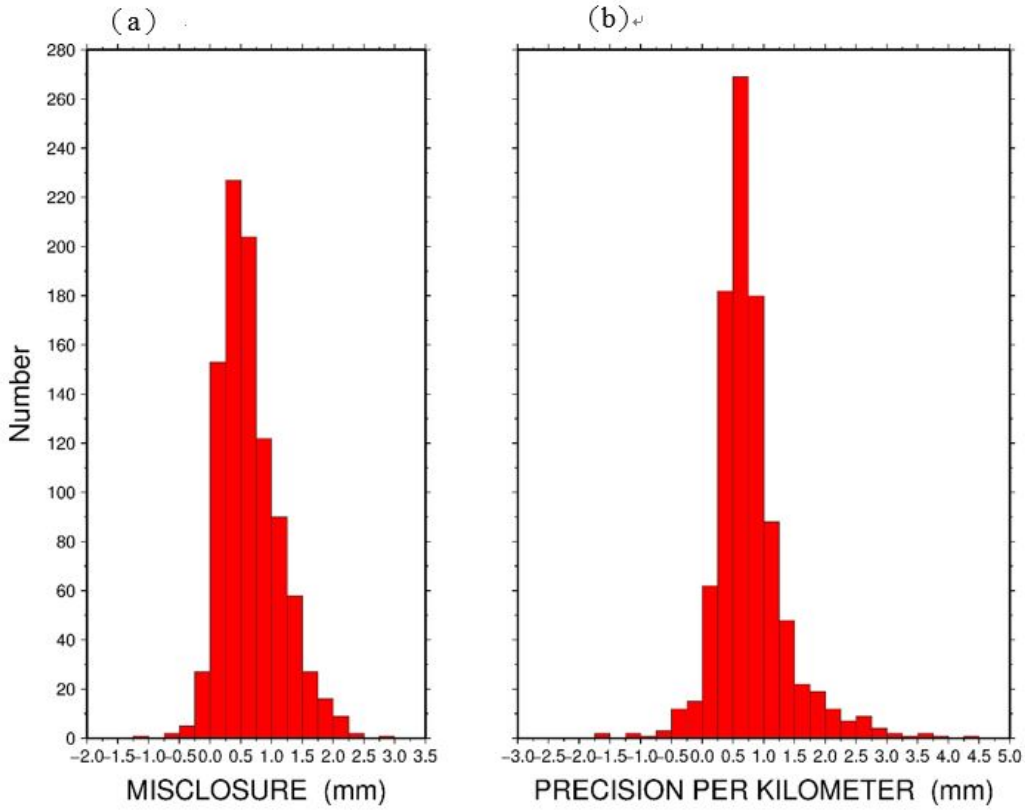



圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a) 為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.25 ~ 0.5 mm 上。(b) 為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

Figure 2-3.1: Diagram of pricise leveling data. Red column is the amount of 0.25 mm statistics value. (a) The error of closure, maximum is around 0.25~0.5 mm. (b) Observation accuracy of every kilometer, maximum is around 0.5~0.75 mm.

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 2-3.2），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。

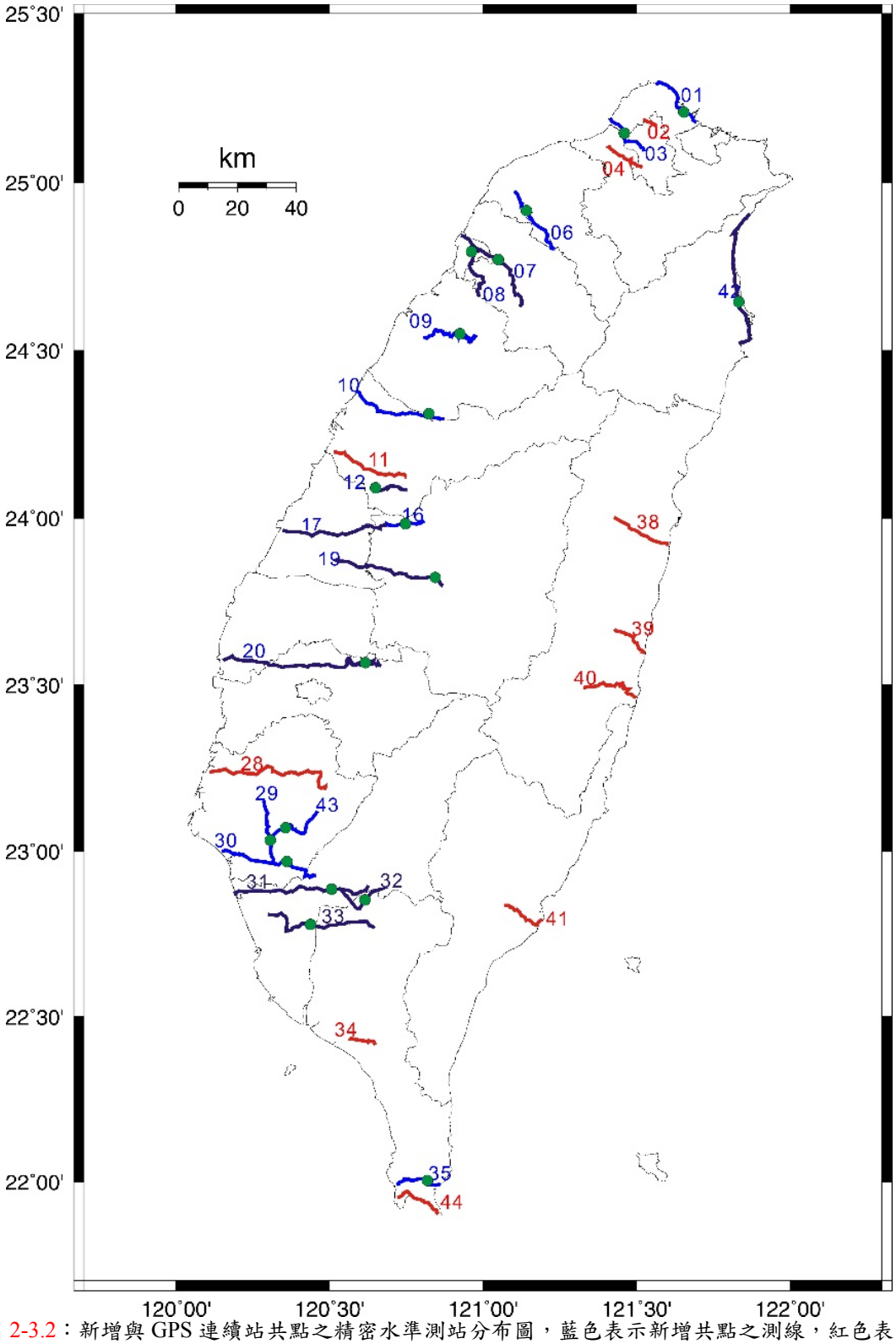



圖 2-3.2：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖，藍色表示新增共點之測線，紅色表示尚未新增之測線，綠色點位表示共點點位位置。

Figure 2-3.2: New overlapping location of GPS and pricise leveling. Blue lines are the new overlapping lines, red lines are those have not yet added, the green dots are the overlapping location of GPS and pricise leveling.

# 2-3-1 臺北地區精密水準測線

## 2-3-1-1 石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 20 公里，2004 至 2020 年間共進行 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-0.6 mm/yr 與-1.6 mm/yr），作為約制點來校正 2027 和 0807 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.3 及圖 2-3.4）。

根據圖 2-3.5，本測線垂直速度均落在 -3.0 至 0 mm/yr 之間，而跨斷層點位之垂直速度變化< 1.0 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。

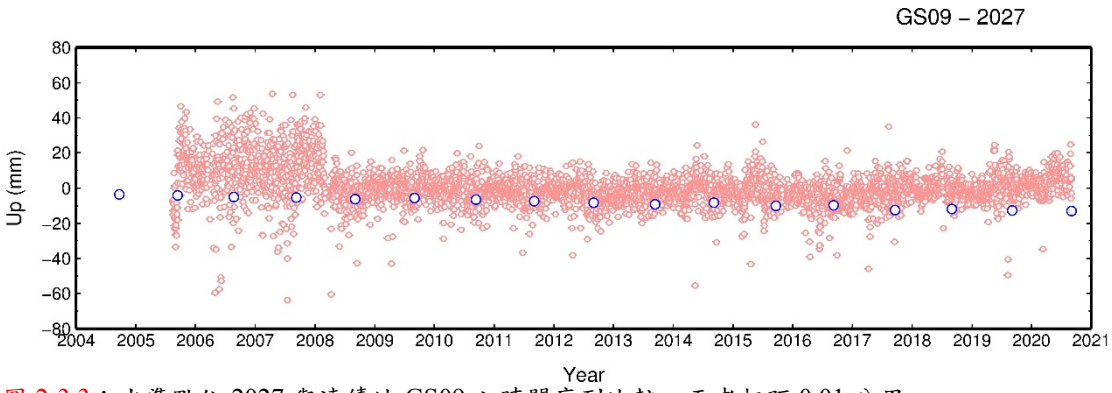



圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

Figure 2-3.3: Time series comparison between leveling bench mark 2027 and continuous GPS station GS09. The distance between two stations are 0.01 km.

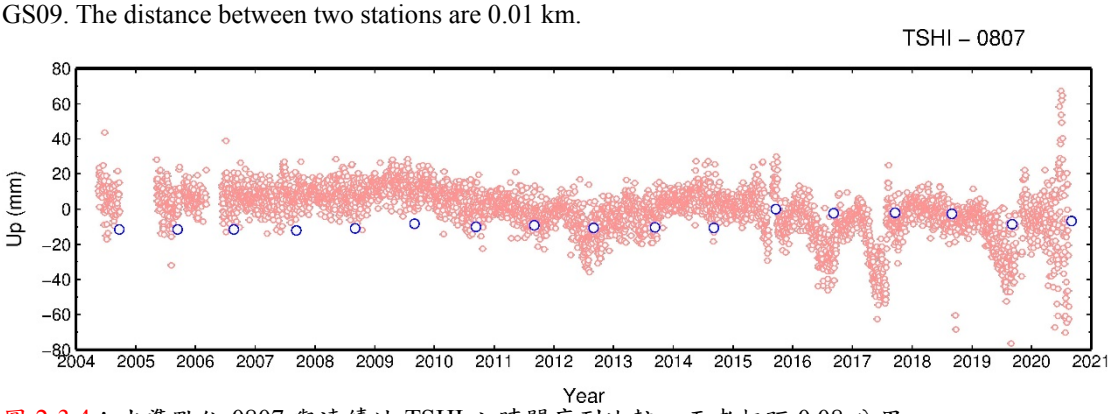



圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較，兩者相距 0.08 公里。

Figure 2-3.4: Time series comparison between leveling bench mark 0807 and continuous GPS station TSHI. The distance between two stations are 0.08 km.

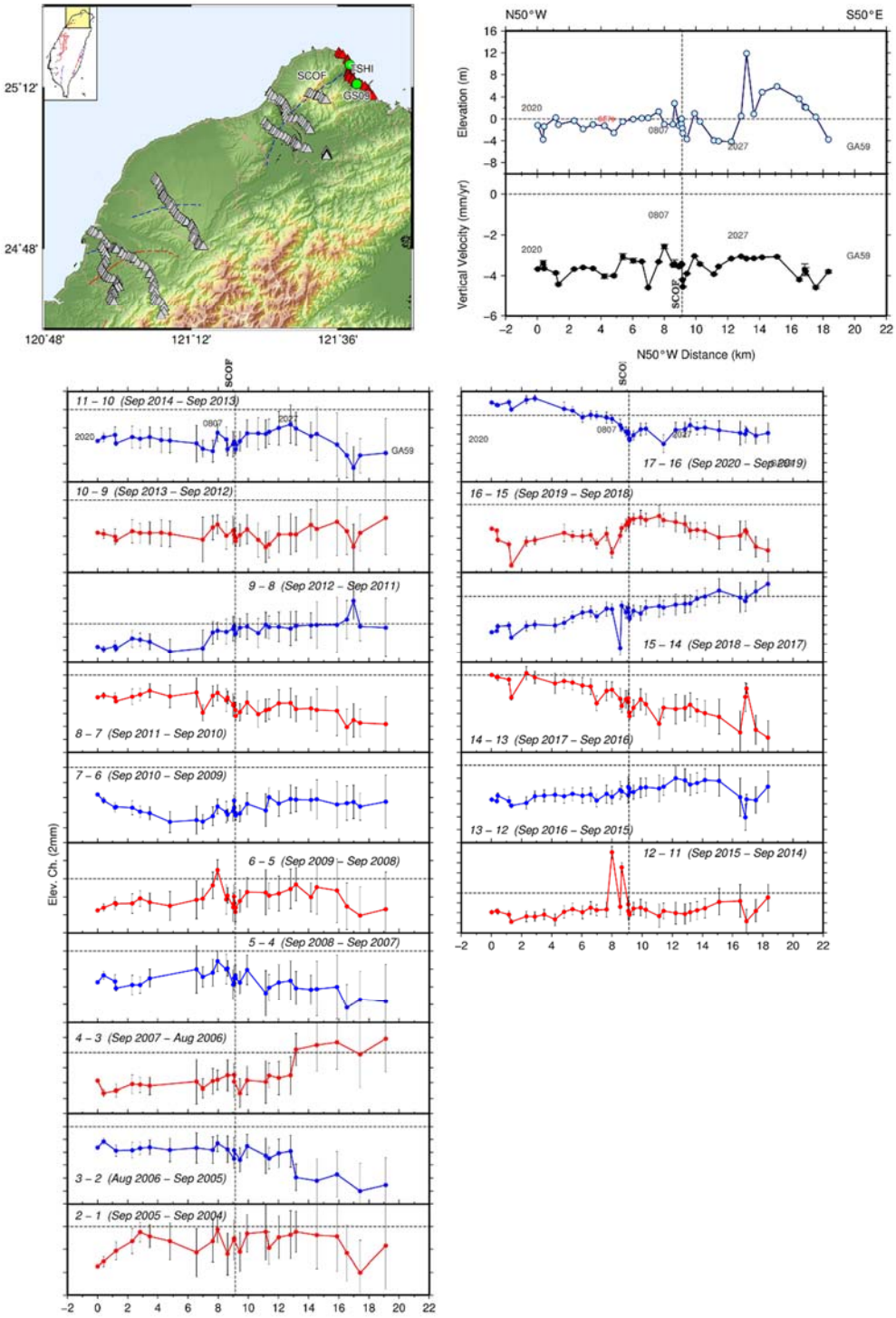



圖 2-3.5：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.5: Elevation change of the Shihmen-Wanli leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

## 2-3-1-2 士林至三芝測線

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 2020 年間共進行 17 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 2-3.6）。

根據圖 2-3.7，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 -4.0 至 0.0 mm/yr 之間。跨斷層之垂直速度非常不明顯（約 0 至 1 公里之測段），僅有約 0.3 mm/yr 的變化量，在 2 到 5 公里之測段稍有變化。據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能略為顯著，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資料來佐證。

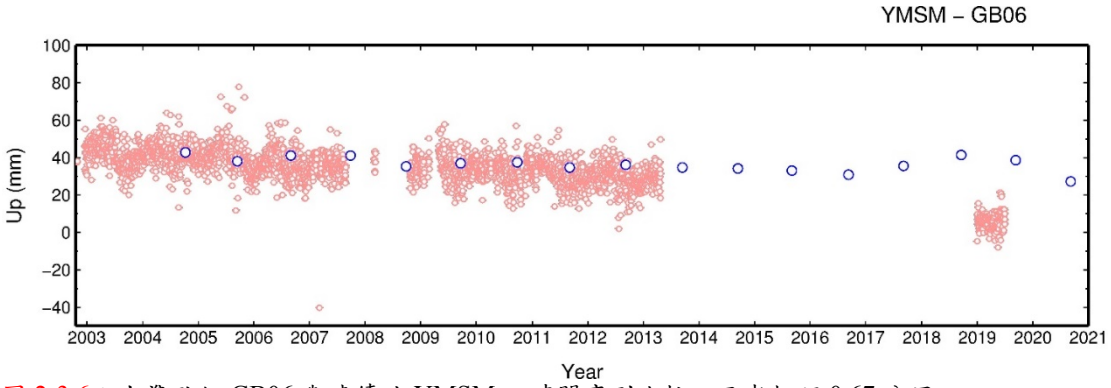



圖 2-3.6：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較，兩者相距 0.67 公里。

Figure 2-3.6: Time series comparison between leveling bench mark GB06 and continuous GPS station YMSM. The distance between two stations are 0.67 km.

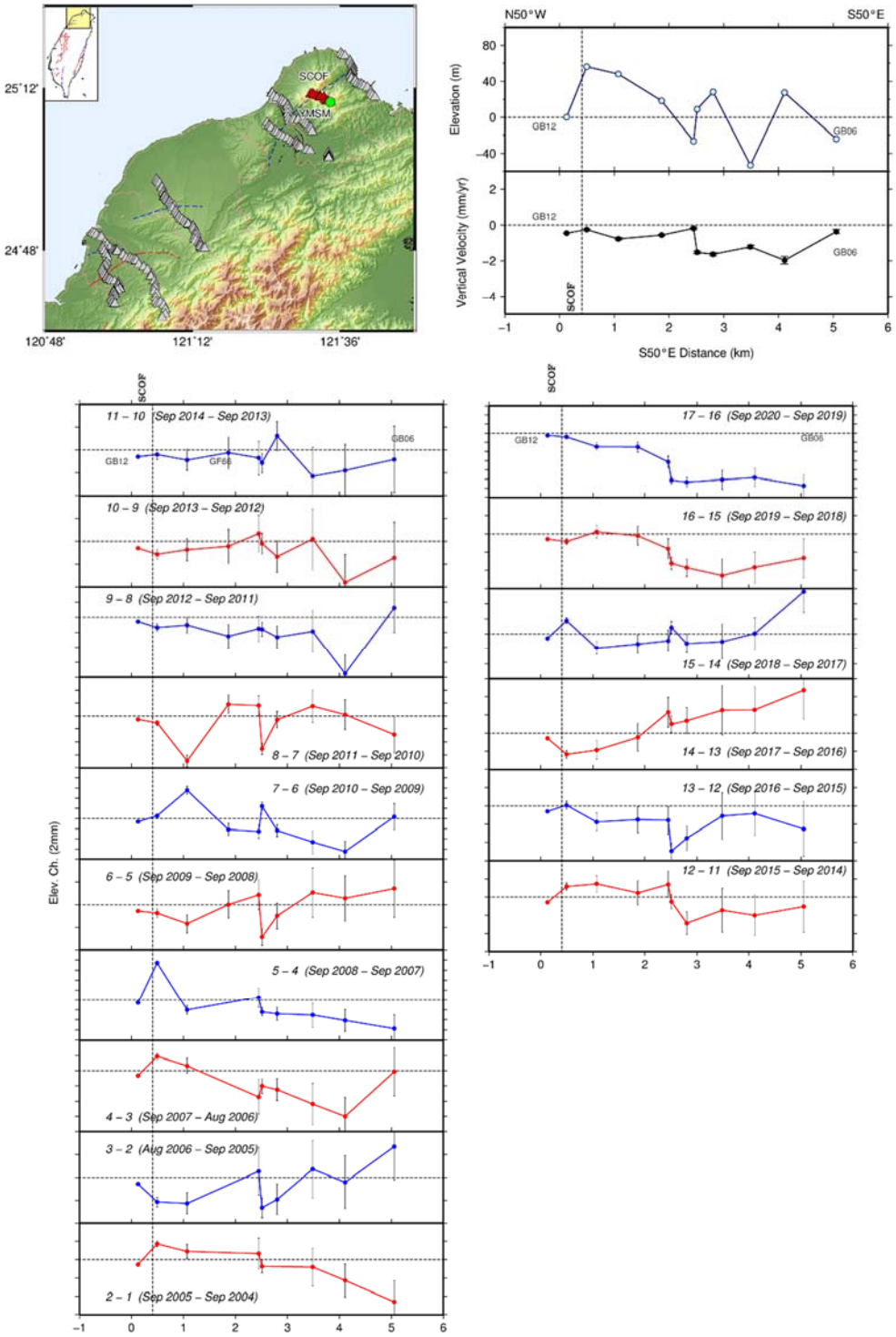



圖 2-3.7：士林至三芝測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.7: Elevation change of the Shilin-Sanzhi leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 2 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

## 2-3-1-3 淡水至士林測線

淡水至士林測線橫跨山腳斷層，測線長約 16 公里，在 2004 至 2020 年間進行共 17 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 及 TANS 之垂直速率（-7.1 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 2-3.8 及圖 2-3.9）。

根據圖 2-3.10，此測線之垂直速度在跨斷層有 10.0 mm/yr 的沉降變化量，最大值達 16.3 mm/yr；在斷層東側的垂直速率呈現逐漸增加的趨勢。觀察 2004~2006 及 2007~2014 之歷年高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由 30.0 mm 至 10.0 mm，顯示跨山腳斷層之沉陷有逐年減少的趨勢。

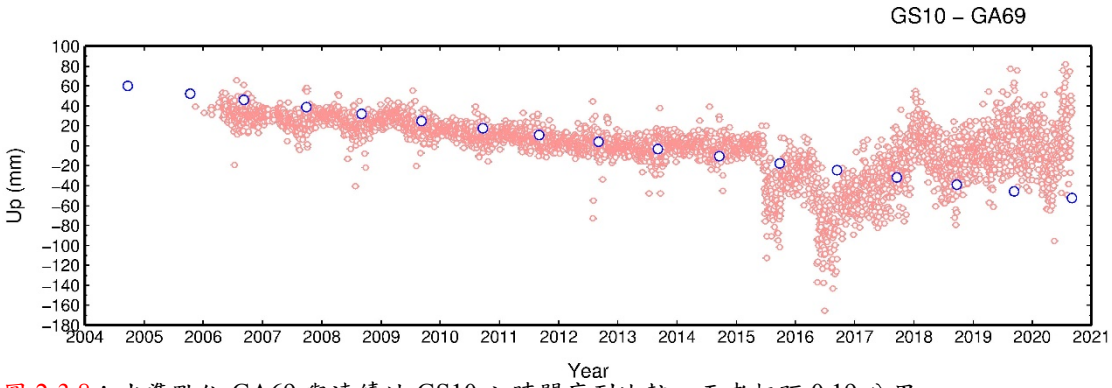



圖 2-3.8：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較，兩者相距 0.19 公里。
Figure 2-3.8: Time series comparison between leveling bench mark GA69 and continuous GPS station GS10. The distance between two stations are 0.19 km.

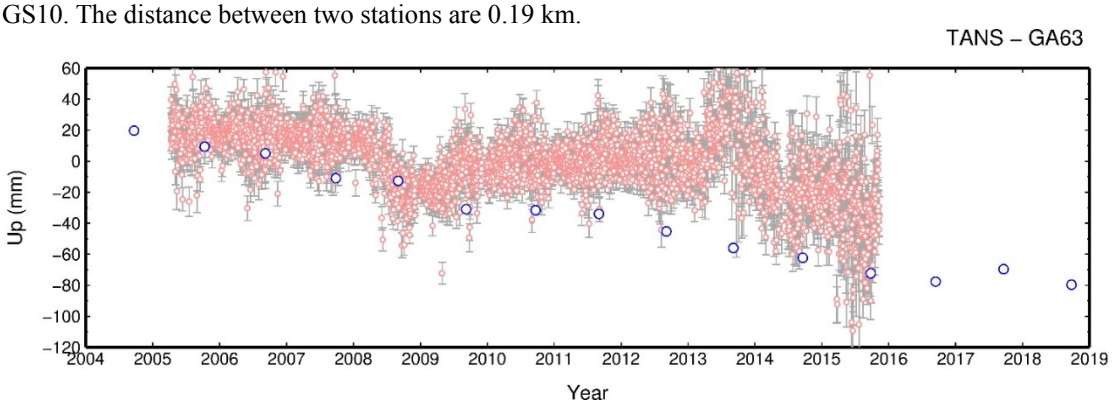



圖 2-3.9：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之時間序列比較，兩者相距 0.65 公里。
Figure 2-3.9: Time series comparison between leveling bench mark GA63and continuous GPS station TANS. The distance between two stations are 0.65 km.

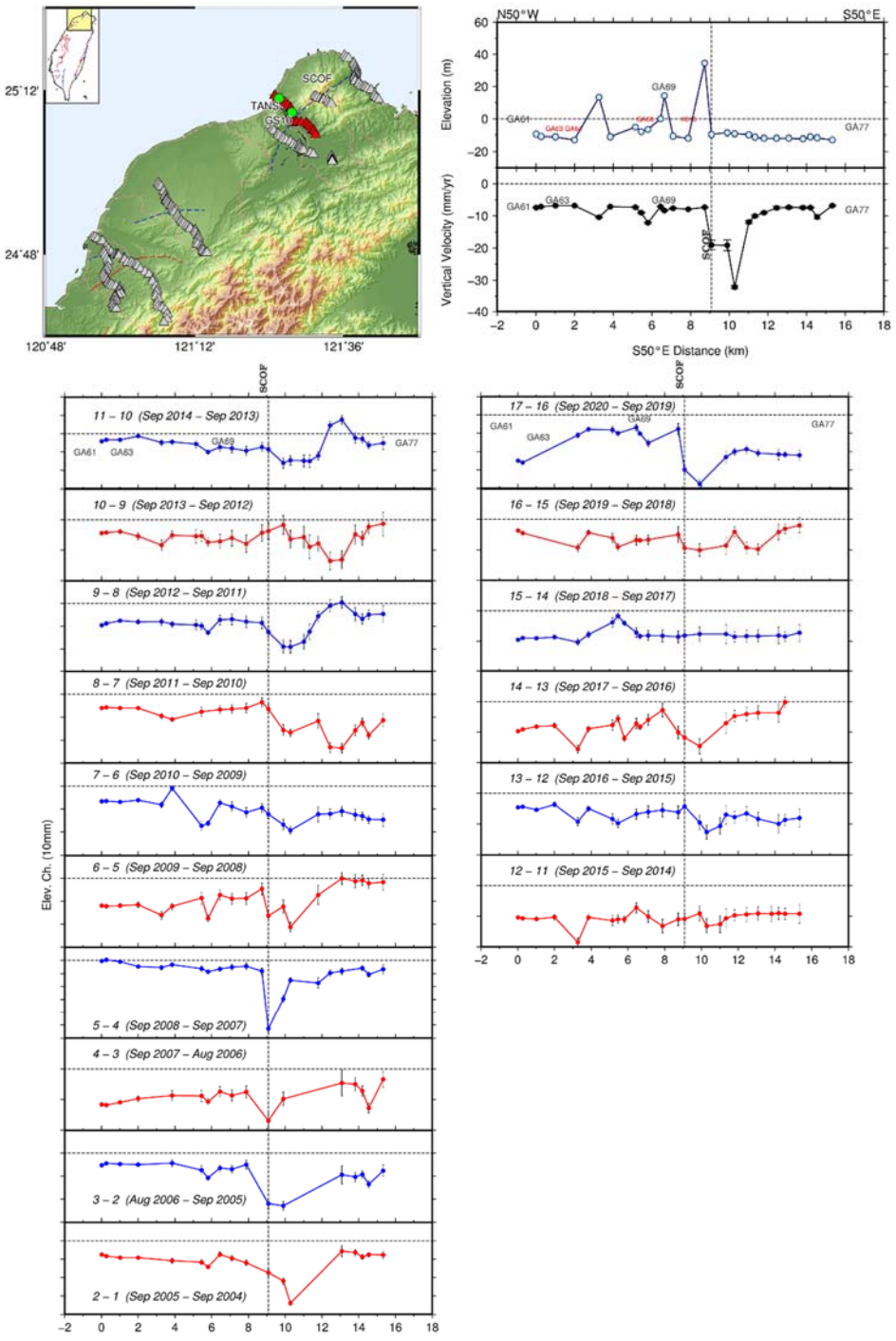



圖 2-3.10：淡水至士林測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，下欄中每個刻度代表 10mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.10: Elevation change of the Tamsui-Shihlin leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

## 2-3-1-4 五股至台北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 14 公里。此水準測線於 2004 至 2020 年間共進行 17 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 2-3.11）。

根據圖 2-3.12，此測線之垂直速度在跨斷層約有 6 mm/yr 的沉降變化量，在疏洪親水公園一帶為本測線沉陷較大的區域，最大垂直速度達-7.1 mm/yr，此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。另從歷年高程變化來看，2008 年至 2013 年在山腳斷層東側有週期性的抬升及沉降現象，2014 年起至今變化則較不明顯。

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

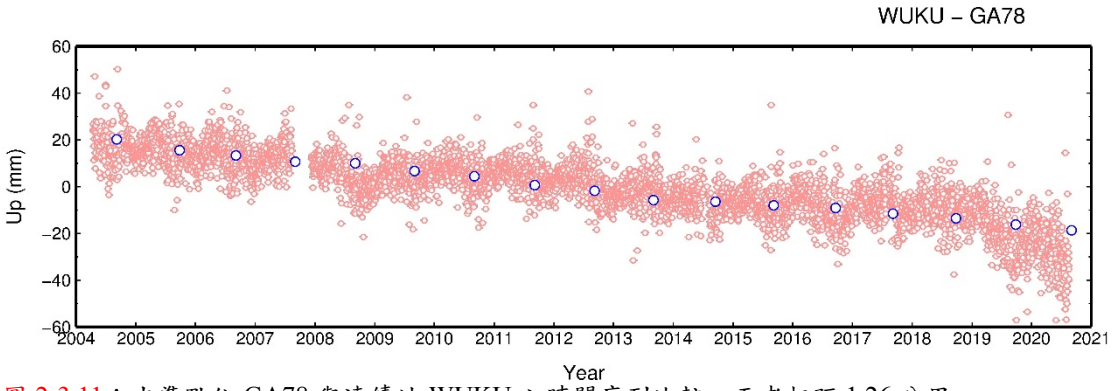



圖 2-3.11：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較，兩者相距 1.26 公里。
Figure 2-3.11: Time series comparison between leveling bench mark GA78 and continuous GPS station WUKU. The distance between two stations are 1.26 km.

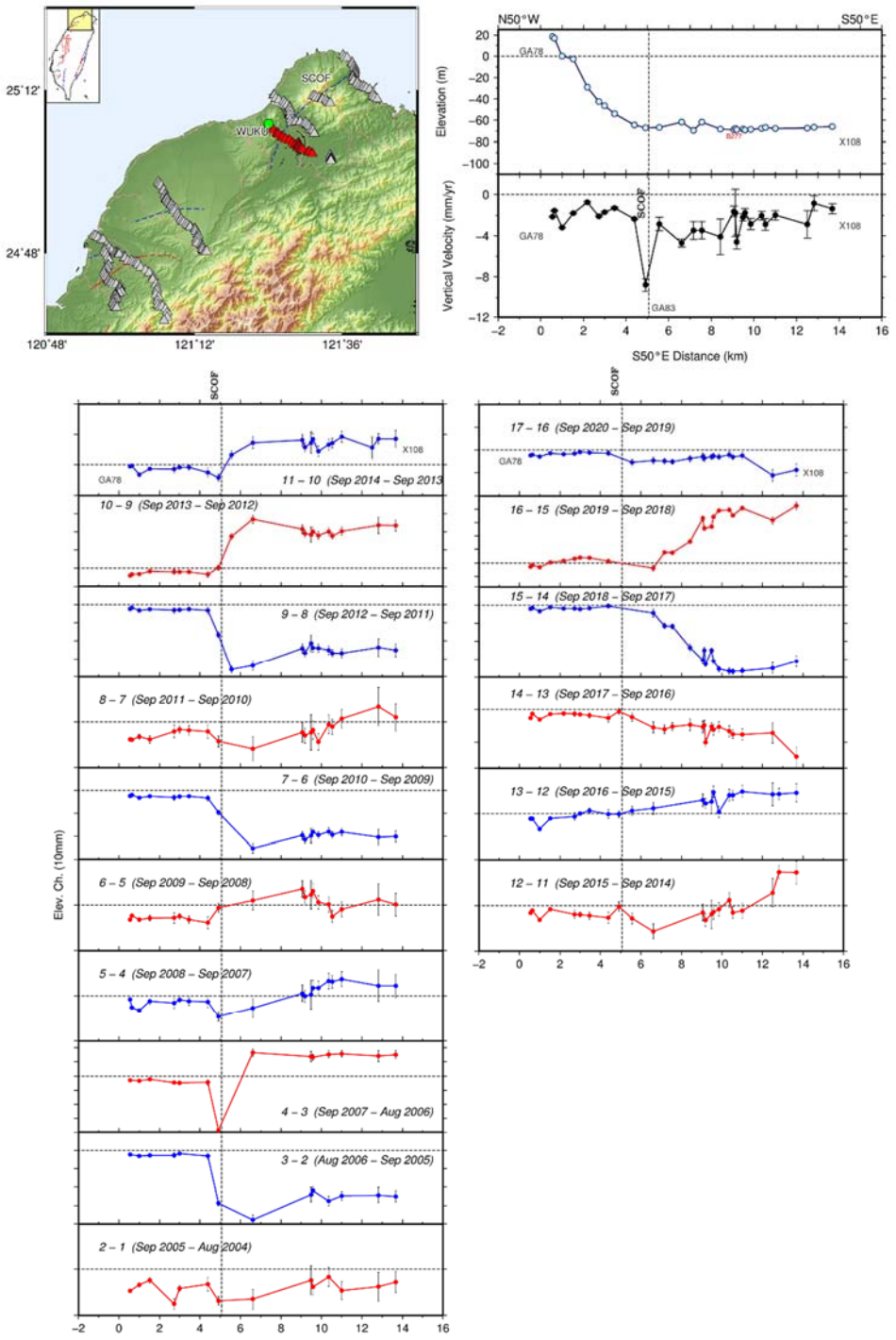



圖 2-3.12：五股至台北測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.12: Elevation change of the Wugu-Taipei leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

## 2-3-2 桃竹苗地區精密水準測線

### 2-3-2-1 新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層，測線長約 24 公里，並於 2004 至 2020 年間共進行 16 次的施測。該測線以 GPS 連續站 YAME 之垂直速率（1.3 mm/yr），作為約制點來校正 GB40 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.13）。

根據圖 2-3.14，此測線之垂直速度在跨越湖口斷層由南往北的抬升速度以約 3 mm/yr 的速率增加。

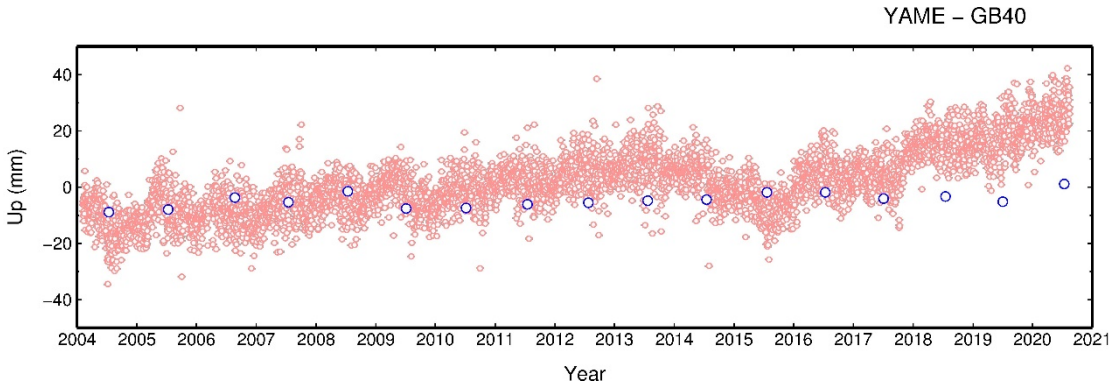



圖 2-3.13：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。兩者相距 3.3 公里。
Figure 2-3.13: Time series comparison between leveling benchmark GB40 and continuous GPS station YAME. The distance between two stations are 3.3 km.

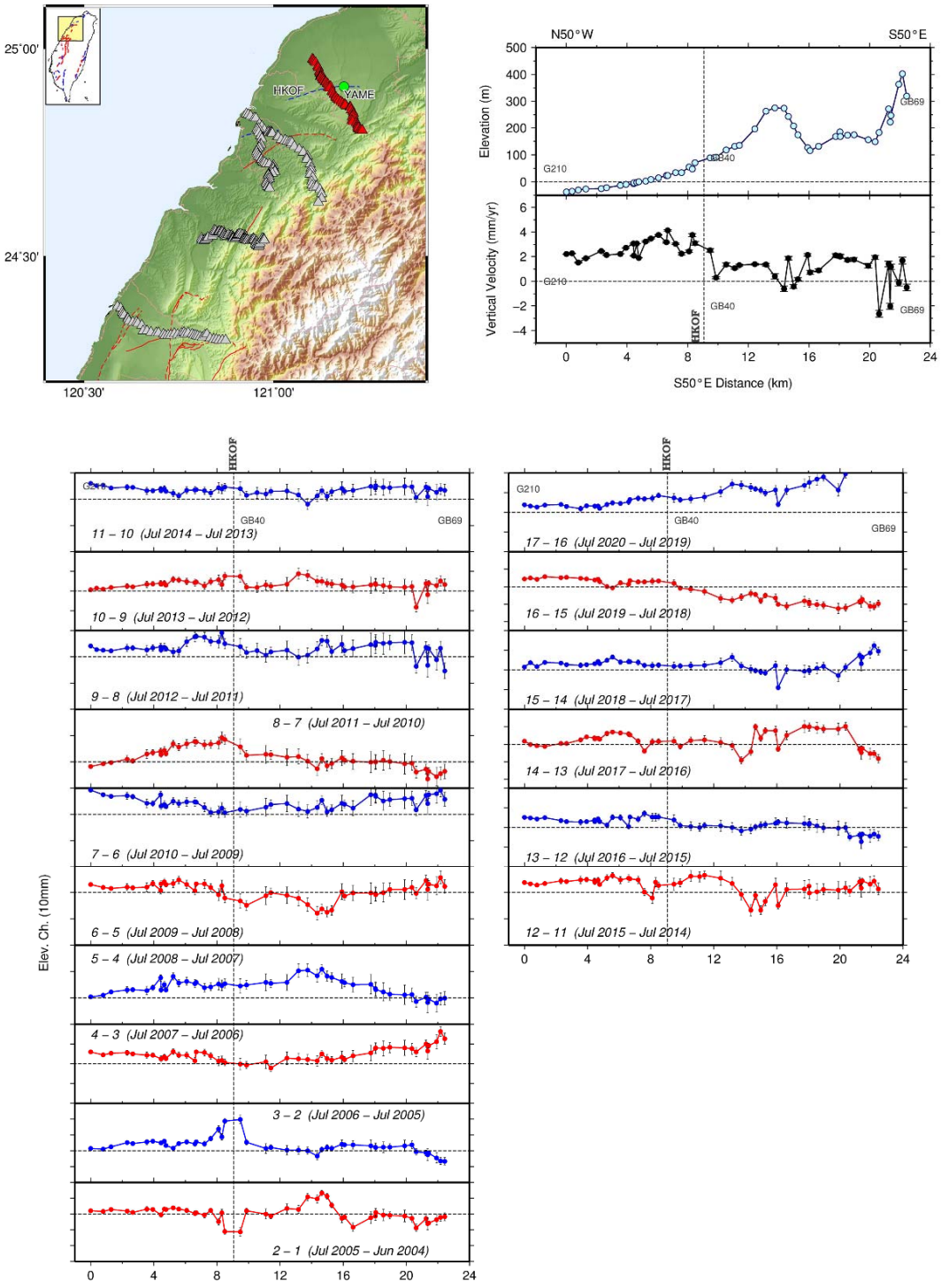



圖 2-3.14：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層。

Figure 2-3.14: Elevation change of the Xinwu-Guanxi leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKOF is the Hukou fault.

## 2-3-2-2 新竹至五峰測線

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），此測線於 2002 至 2020 年間共進行 16 次的施測。本測線分別以 GPS 連續站 TNML、GS03 之垂直速率（-0.5 mm/yr 、-1.1 mm/yr），作為約制點來校正 HCCA、T004 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率之垂直速率（圖 2-3.15~16）。

根據圖 2-3.18，此測線跨新竹斷層之垂直速度並無顯著變化，變化量皆<2.0 mm/yr，但在跨新城斷層有約 4.0 mm/yr 的垂直速度變化量（約-2.0～2.0 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（圖 2-3.17）。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 2-3.19）。

另外，根據此測線 G429、T004、T003 三個點位之時間序列顯示（圖 2-3.18），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，需要注意此區域是否有地滑現象。

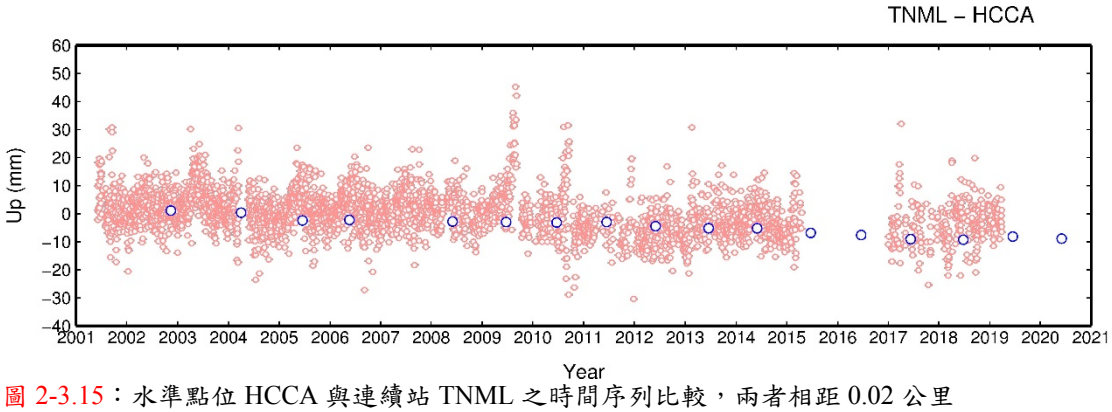



圖 2-3.15：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里

Figure 2-3.15: Time series comparison between leveling benchmark HCCA and continuous GPS station TNML. The distance between two stations are 0.02 km.

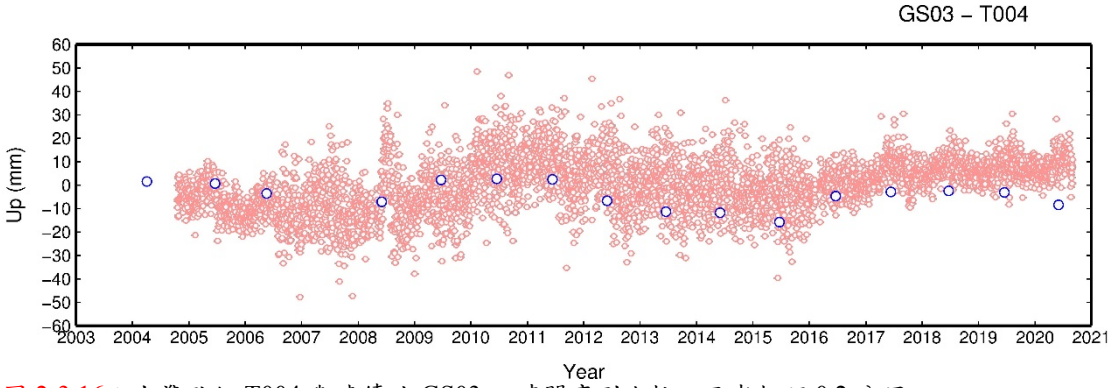



圖 2-3.16：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里

Figure 2-3.16: Time series comparison between leveling benchmark T004 and continuous GPS station GS03. The distance between two stations are 0.2 km.

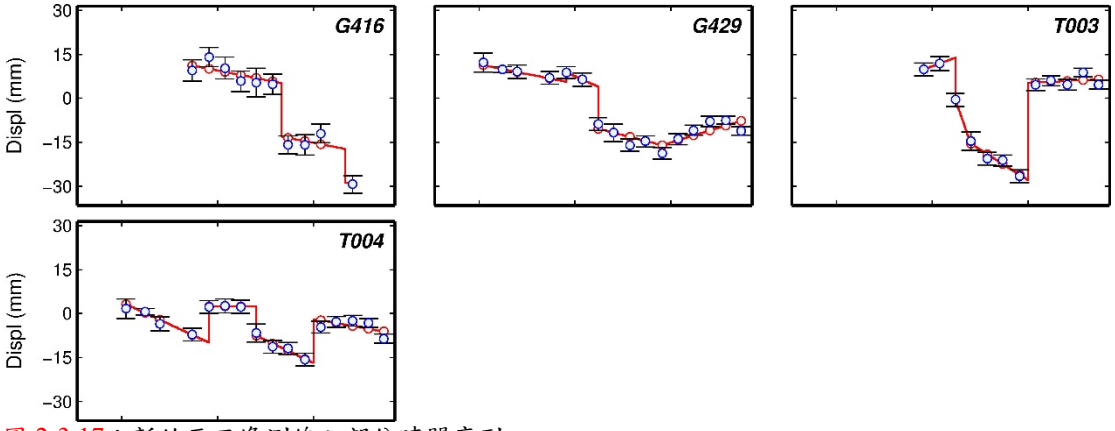



圖 2-3.17：新竹至五峰測線之部份時間序列。

Figure 2-3.17: Part of leveling time series of the Hsinchu-Wufeng leveling route.

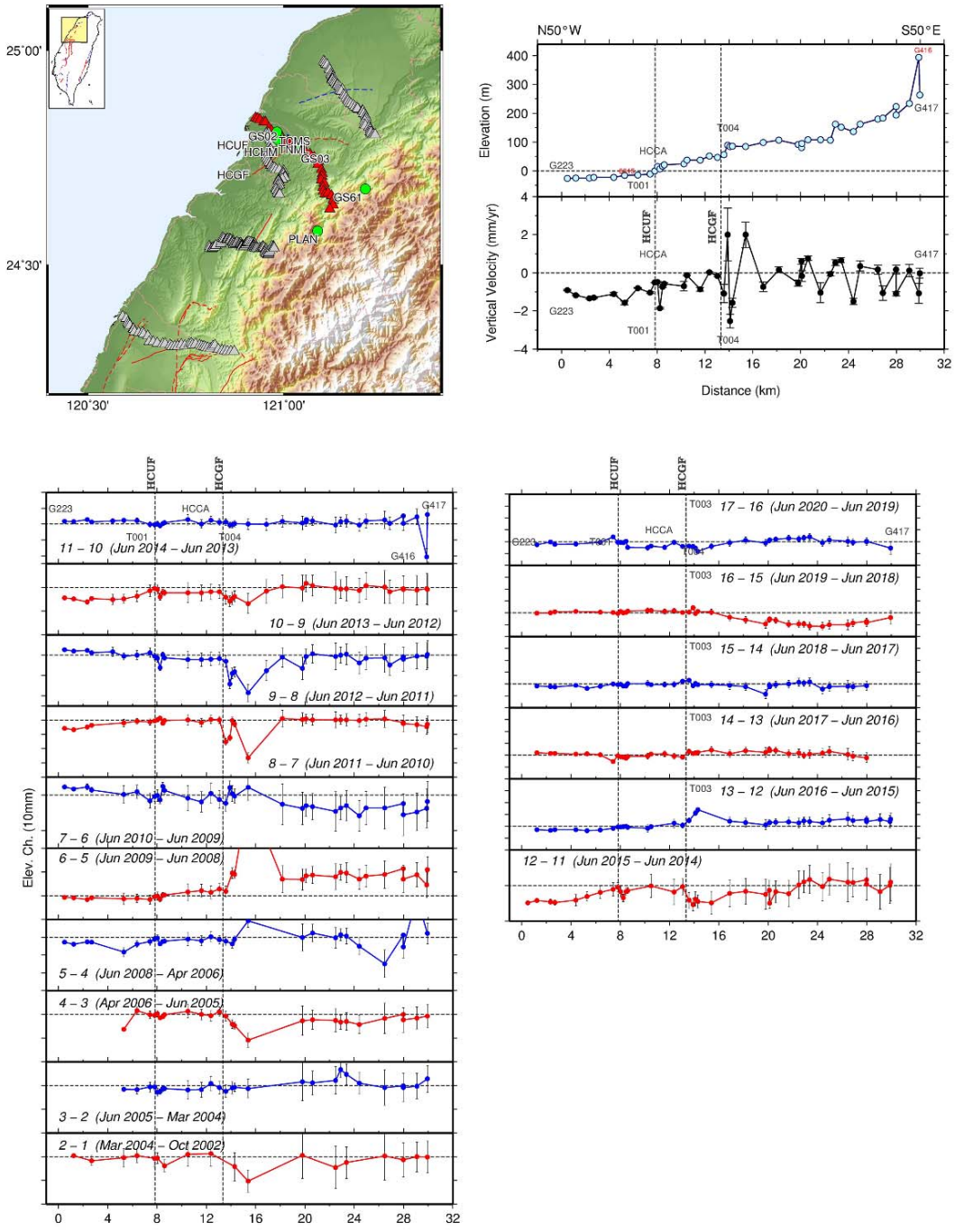



圖 2-3.18：新竹至五峰測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.18: Elevation change of the Hsinchu-Wufeng leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.



圖 2-3.19：水準點位 G416 時間序列及現地情形。
Figure 2-3.19: Time series of bench mark G416 and its present situation.

## 2-3-2-3 新竹至峨嵋測線

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 2020 年間共進行 14 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS14 之垂直速率（-4.0 mm/yr），作為約制點 GB71 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.20）。

根據圖 2-3.21，此測線的垂直速度由東南往西北逐漸由約 1.0 mm/yr 的沉陷速度增加至約 3.0 至 4.0 mm/yr 的沉陷速度。然而，跨越新竹斷層和新城斷層皆未有顯著的速率變化，變化量皆< 1.0 mm/yr。

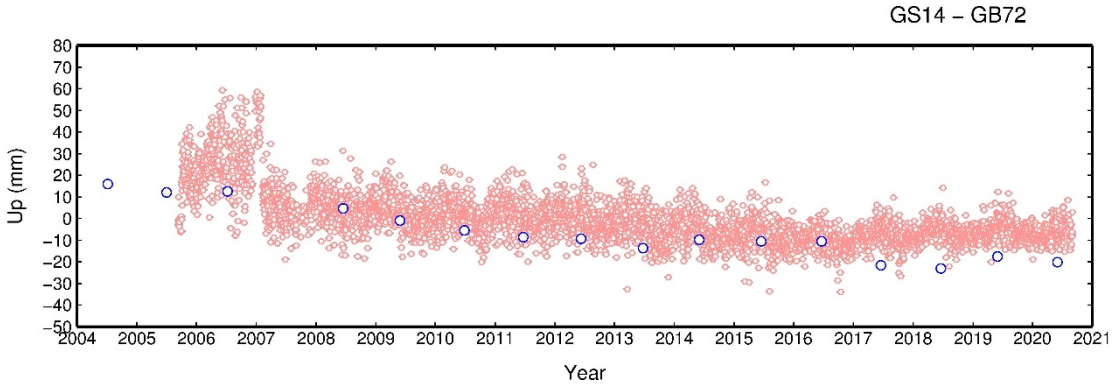



圖 2-3.20：水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。
Figure 2-3.20: Time series comparison between leveling benchmark GB71 and continuous GPS station GS14. The distance between two stations are 0.1 km.

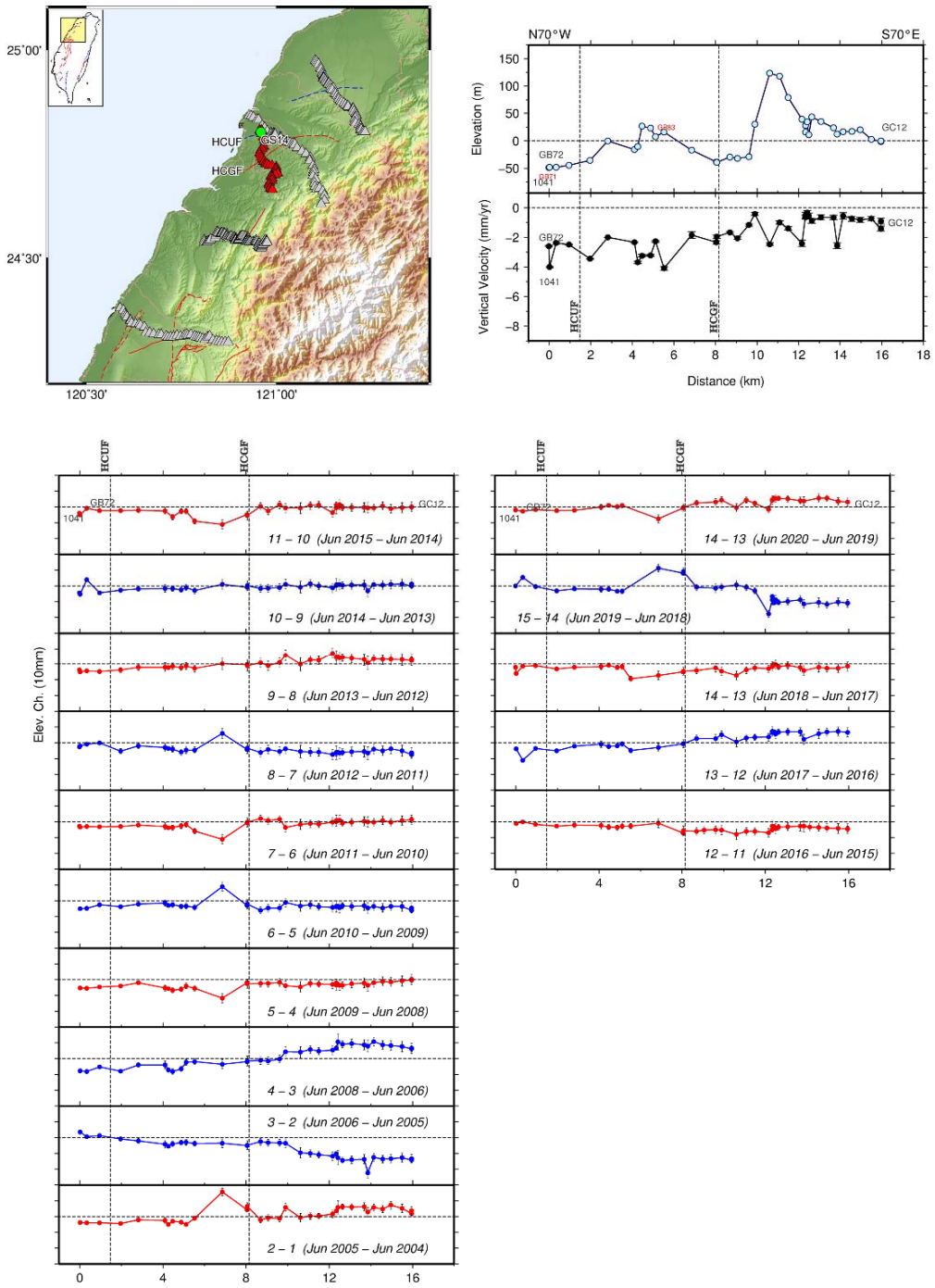



圖 2-3.21：新竹至峨眉測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.21: Elevation change of the Hsinchu-Emei leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

## 2-3-2-4 苗栗至南庄測線

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 2020 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 GD97 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.22）。

根據圖 2-3.23，整條測線的水準沉陷速率大多在 2.0～4.0 mm/yr 之間，少數最大沉陷速率可達 7.0 mm/yr。跨獅潭斷層區域之速率變化並不顯著（變化量< 1.0 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。從歷年高程變化來看，在 2005~2009 年、2010~2016 年及 2017~2020 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。

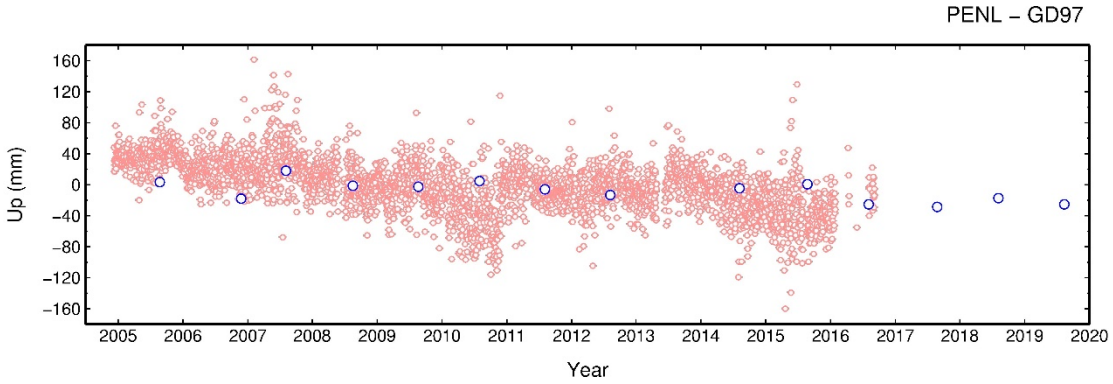



圖 2-3.22：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 2-3.22: Time series comparison between leveling benchmark GD97 and continuous GPS station PENL. The distance between two stations are 0.02 km.

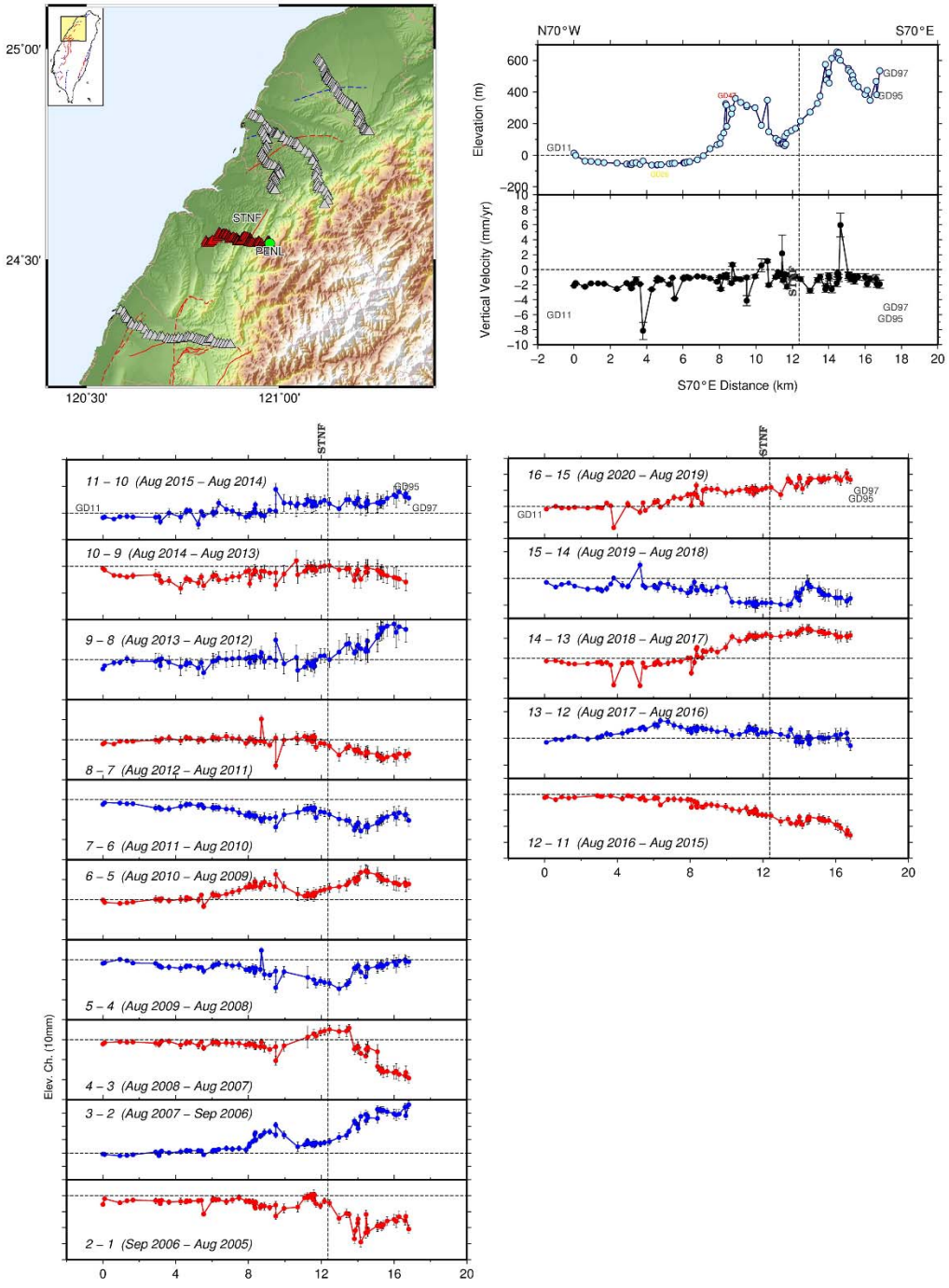



圖 2-3.23：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每欄刻度均代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 2-3.23: Elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. STNF is the Shihtan fault.

## 2-3-3 中部地區精密水準測線

### 2-3-3-1 大安至東勢測線

中部地區完成的精密水準測線分別為大安-東勢、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 2020 年止共計有 16 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，因此使用連續站 GS82 與 TEGS 之垂直速率（-1.4 mm/yr、-1.8 mm/yr）作為約制點，來校正 B283 與 G901 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.24 及圖 2-3.25）。

大安-東勢測線各水準點之垂直速度多在-5.0 mm/yr 至-2.0 mm/yr 間（圖 2-3.26），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）持續呈現下陷（約-3.0 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）逐漸由-4.0 mm/yr 增加至測線末端的-2.0 mm/yr 至 1.0 mm/yr 間，反映三義斷層的上盤相對其下盤正持續抬升。

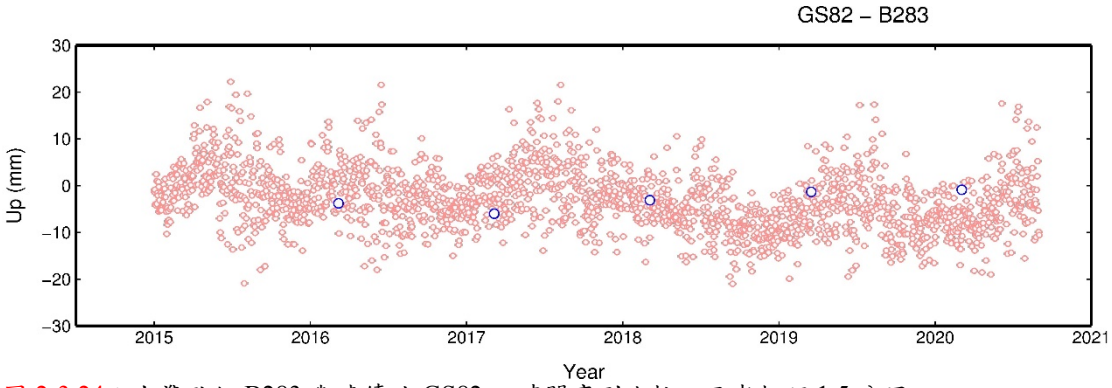



圖 2-3.24：水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。

Figure 2-3.24: Time series comparison between leveling bench mark B283 and continuous GPS station GS82. The distance between two stations are 1.5 km.

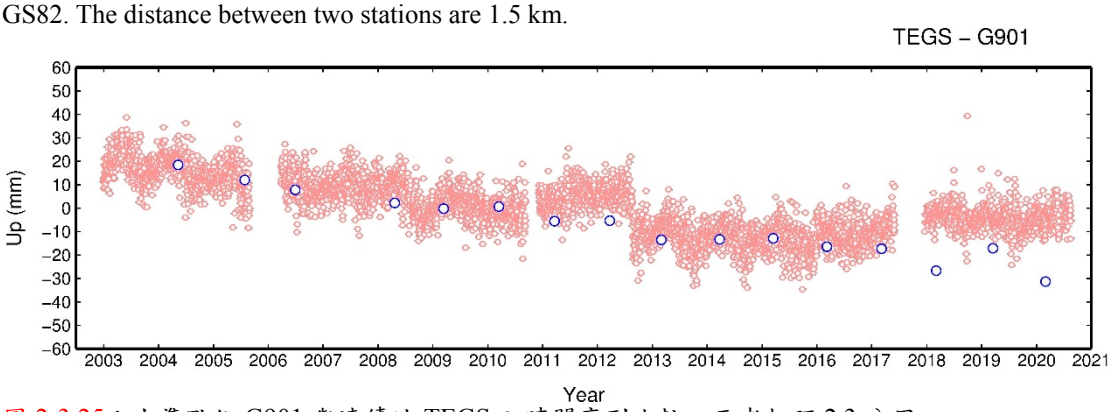



圖 2-3.25：水準點位 G901 與連續站 TEGS 之時間序列比較，兩者相距 2.3 公里。

Figure 2-3.25: Time series comparison between leveling bench mark G901 and continuous GPS station TEGS. The distance between two stations are 2.3 km.

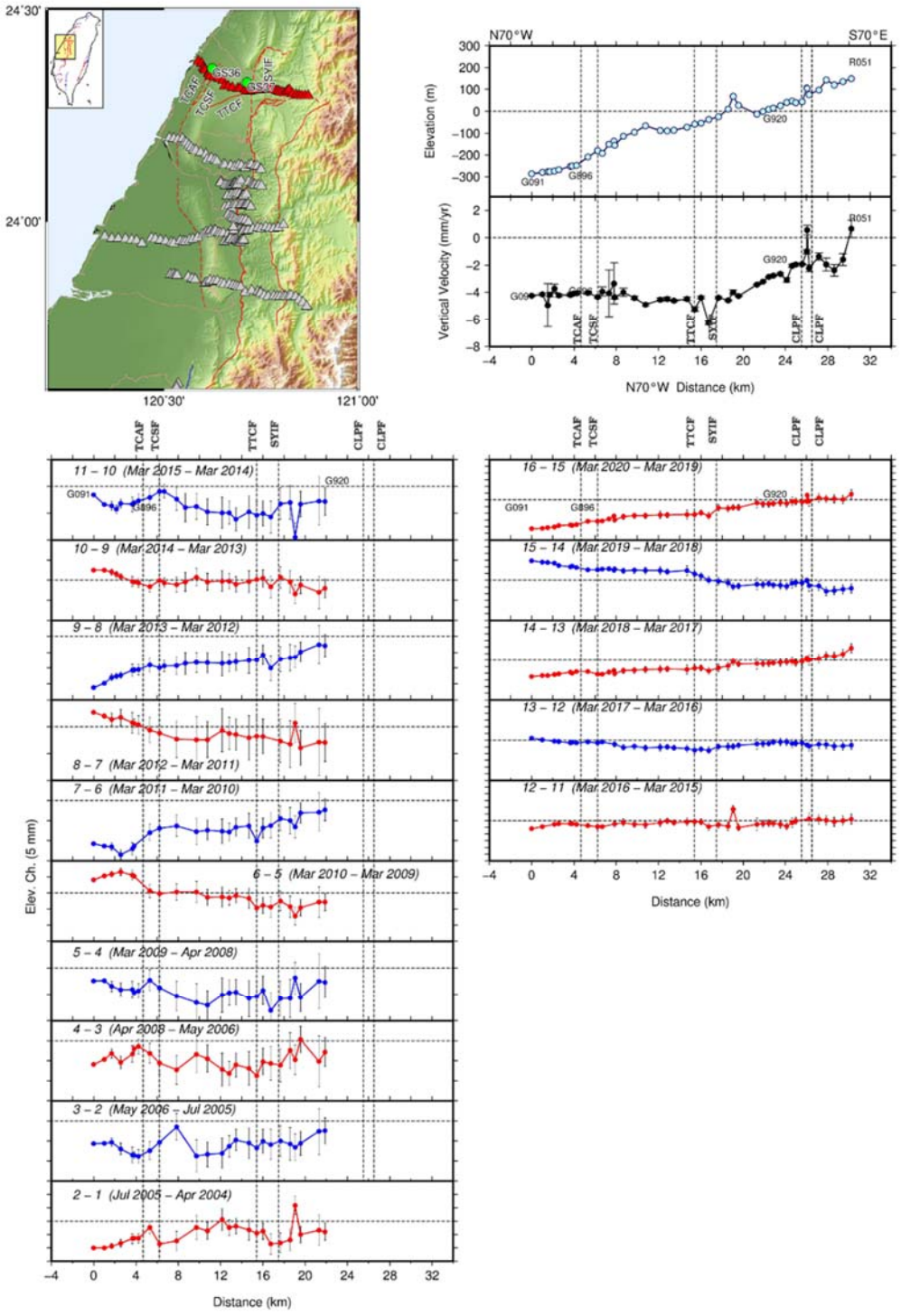



圖 2-3.26：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、CLPF 車籠埔斷層。

Figure 2-3.26: Elevation change of the Da'an-Dongshi leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, SYIF is Sanyi fault, and CLPF is Chelungpu fault.

## 2-3-3-2 龍井至太平測線

龍井至太平測線橫跨車籠埔斷層，測線長約 25 公里(投影至剖面的長度)，於 2004 至 2020 年間，共進行 16 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 垂直速率（-18 mm/yr)，作為約制點 G937 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.27)，而地震前後速度變化不明顯，以約 1.8 mm/yr 沉降速度運動。

根據圖 2-3.28，此測線 2013 年 6 月前之垂直速度在兩個斷層間之垂直速率大多落在 0.0 ~ 3.0 mm/yr 之間，而 2013 年 6 月後之垂直速度的垂直速度並無太多變化，亦無顯著抬升變化；在 2004 年至 2020 年間在跨車籠埔斷層區域之垂直速度有約 3.0 mm/yr 的速度變化量，可說明此斷層可能在 1999 年集集地震後有持續性的抬升現象。

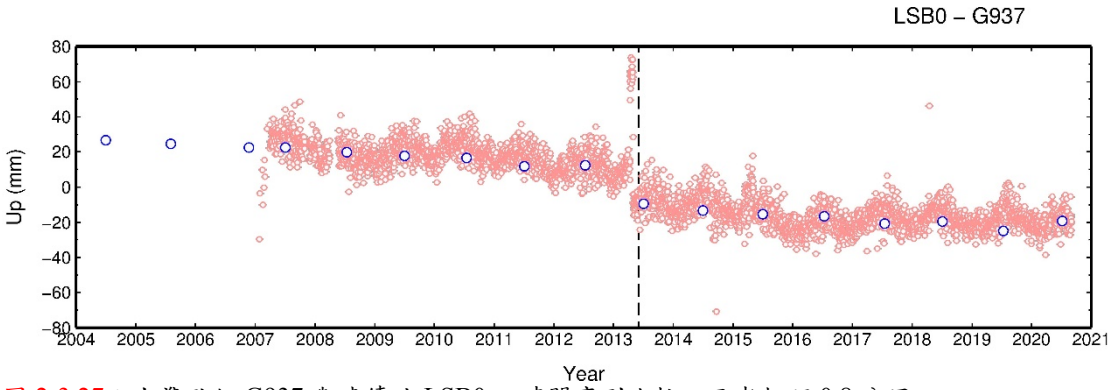



圖 2-3.27：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

Figure 2-3.27: Time series comparison between leveling bench mark G937 and continuous GPS station LSB0. The distance between two stations are 0.8 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

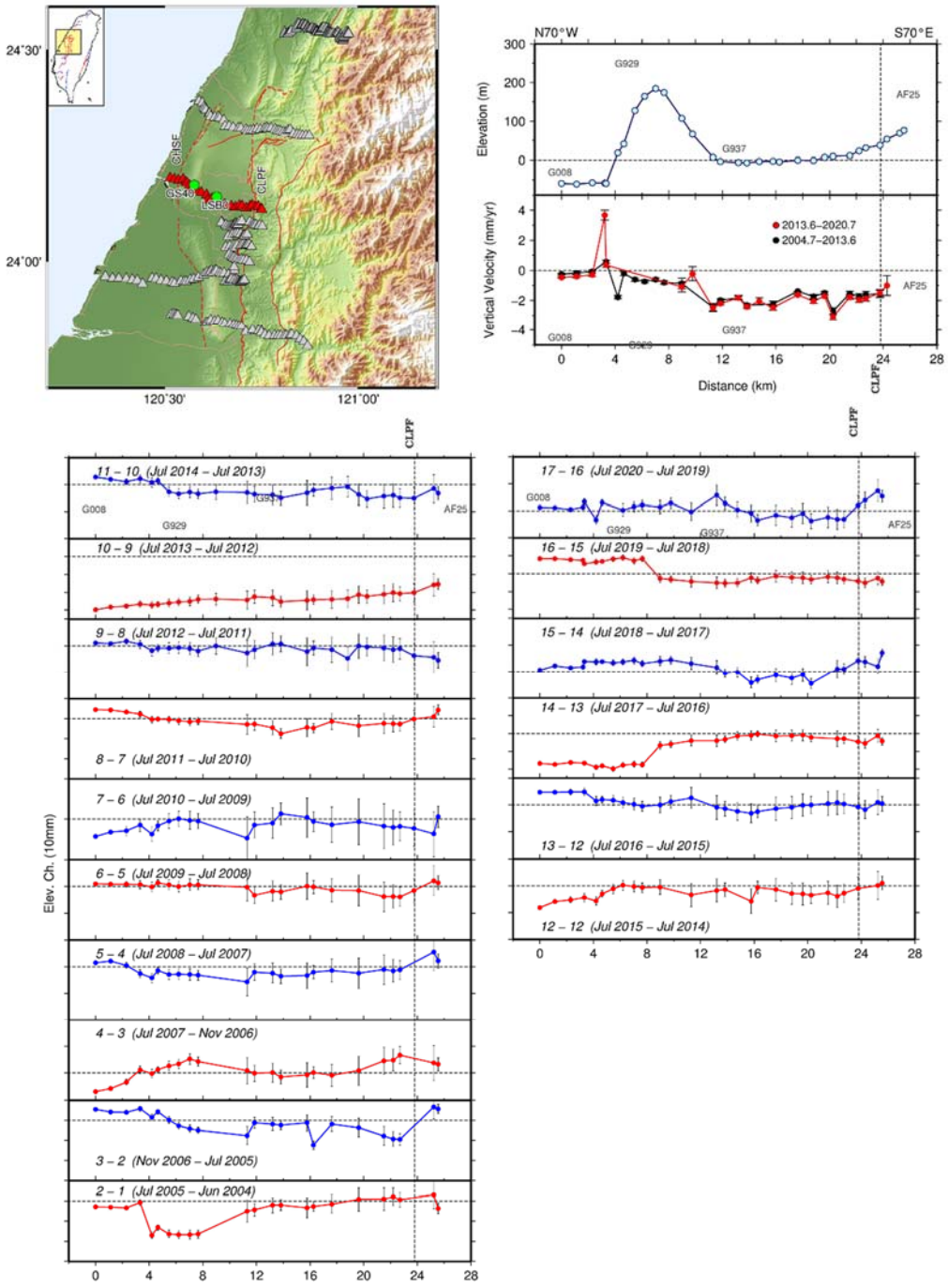



圖 2-3.28：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。
Figure 2-3.28: Elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPE is Chelungpu fault.

## 2-3-3-3 王功至草屯至埔里測線

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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以GPS 連續站 CAOT 之 2013 年地震前垂直速率（-2.7 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-0.3 mm/yr），作為約制點來校正 T075 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.29）。

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。

根據圖 2-3.30，彰化斷層以西（王功至員東國小）可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速率最大可達約 55.0 mm/yr，但高程地形卻沒有太大的變化；彰化斷層以東跨車籠埔斷層至大茅埔－雙冬斷層一帶（八卦山山脈至雙冬國小），平均垂直速度均約在-10.0 ~ 0.0 mm/yr 之間，雖然八卦山背斜一帶地形較高，但垂直速度未有明顯變化。相較於彰化斷層西側，東側之垂直速度變化並不顯著。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，彰化斷層以東之垂直速度變化相對而言較不顯著。

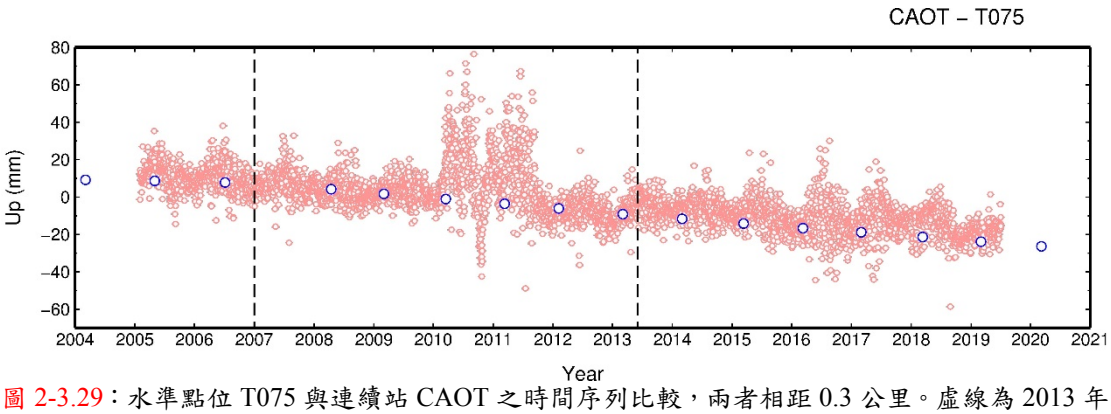



圖 2-3.29：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.29: Time series comparison between leveling bench mark T075 and continuous GPS station CAOT. The distance between two stations are 0.3 km. The left dashed line is the 2007 velocity change event and the right is June 2nd 2013 Nantou earthquake.

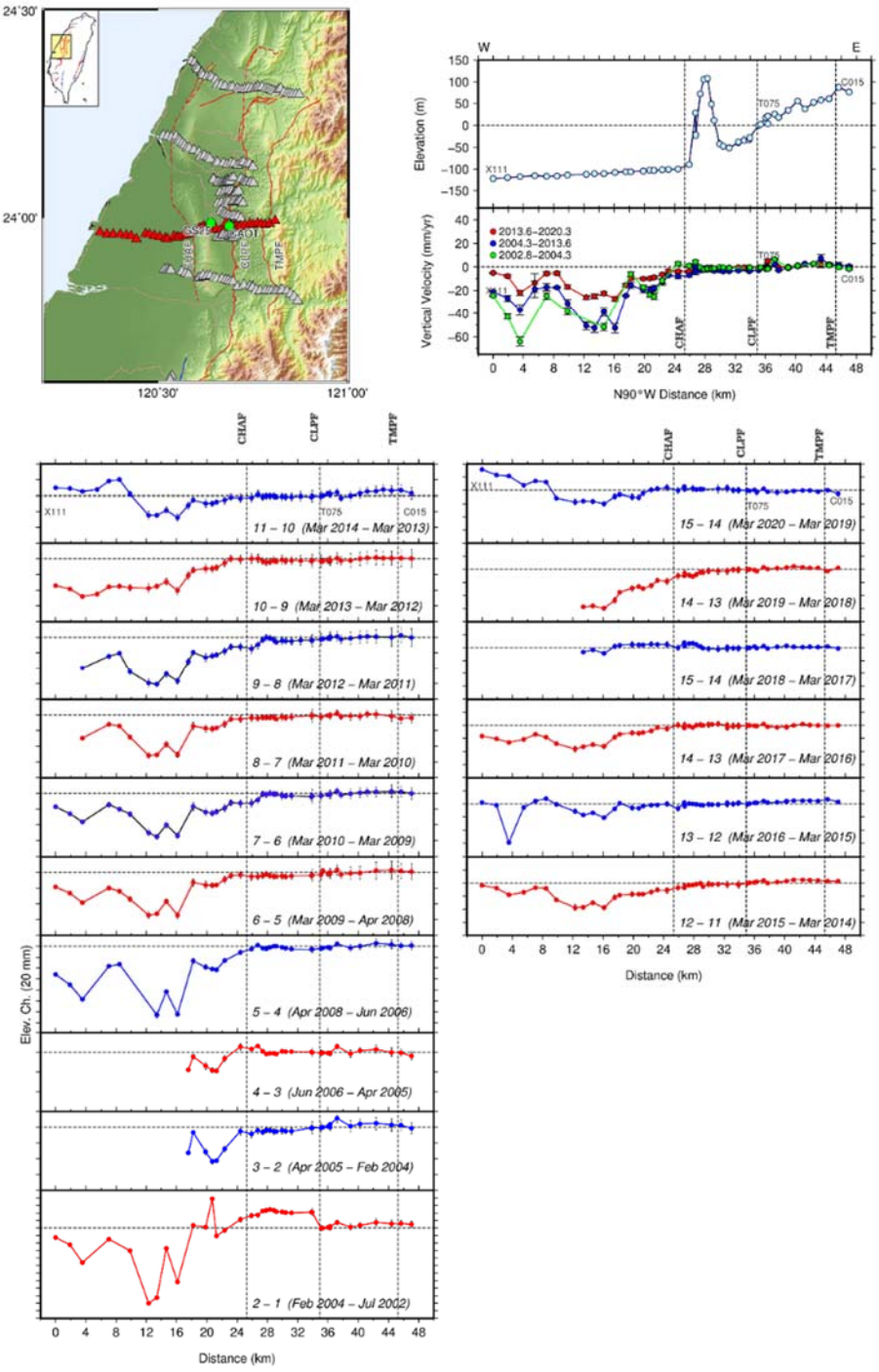



圖 2-3.30：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2004 年之垂直速度、藍色為 2004 - 2013 年南投地震震後垂直速度、紅色為 2013 年至今之垂直速度。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2-3.30: Elevation change of the Wanggong-Caotun and Caotun-Puli. leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity of 2002-2004, blue is the vertical velocity before the Nantou earthquake, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

## 2-3-3-4 北斗至水里測線

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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS26 之 2013 年地震前垂直速率（-0.9 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-4.3 mm/yr），作為約制點來校正 MX83 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.31），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 2-3.32，2007 年前之垂直速度大致呈現抬升現象，除彰化斷層以西沉降運動約 10 mm/yr，越往東之抬升速度逐步上升至約 12 mm/yr，2007 年至 2013 年間彰化斷層以西之垂直速度雖沉陷（最大值約-6.0 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。2013 年後之垂直運動在通過彰化斷層後亦逐步抬升，且最大值約為 12 mm/yr，較往年數值更為增加。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。

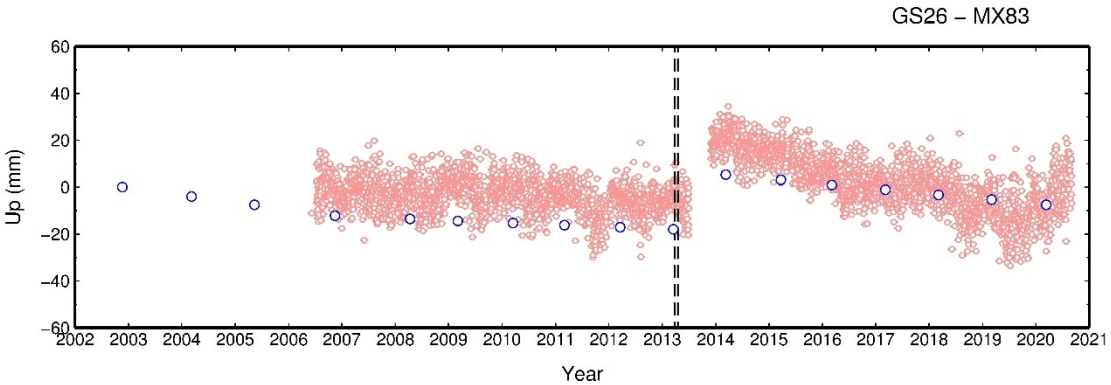



圖 2-3.31：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.31: Time series comparison between leveling bench mark MX83 and continuous GPS station GS26. The distance between two stations are 1.5 km. Dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

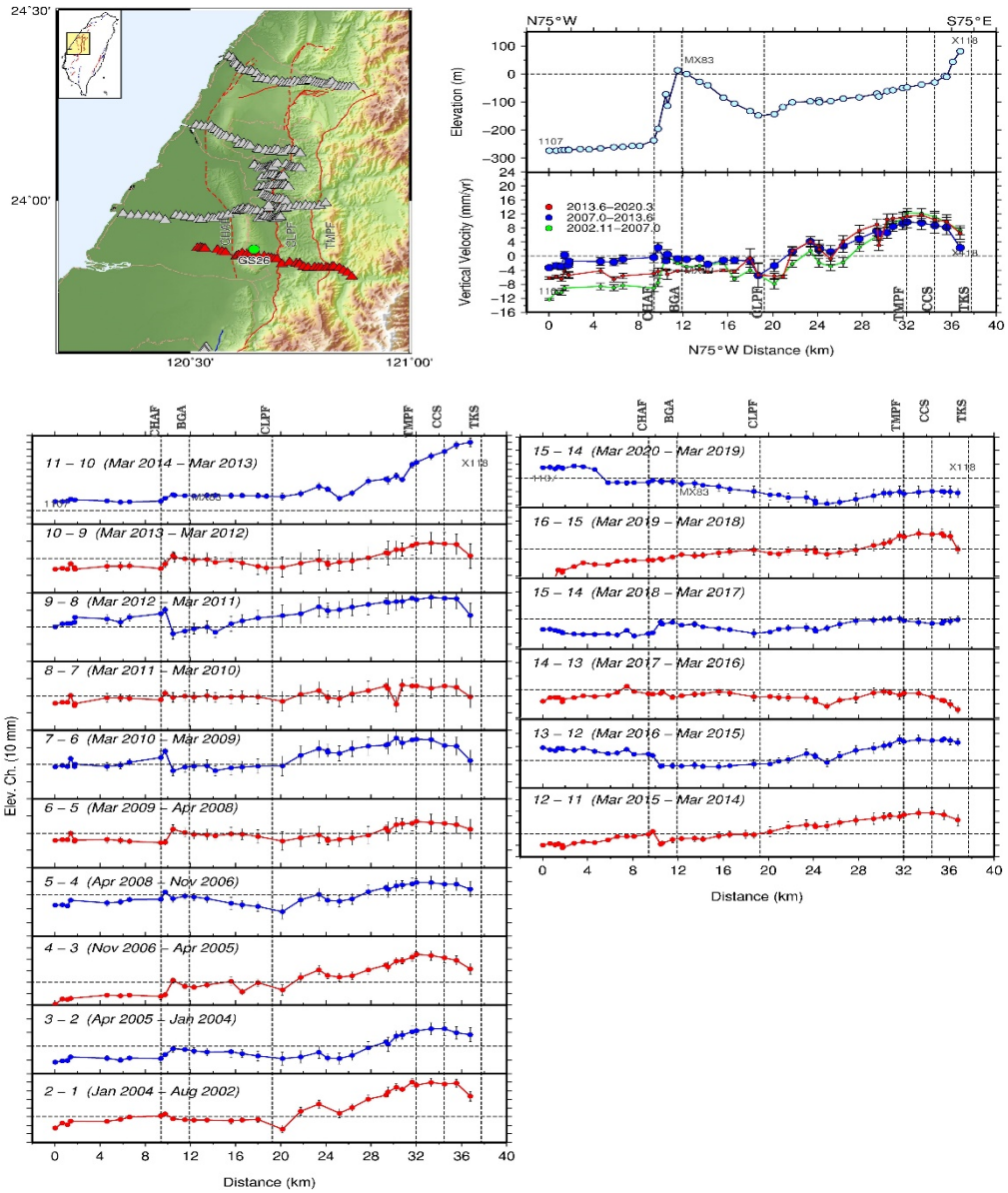



圖 2-3.32：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2007 年之垂直速度、藍色為 2007 - 2013 年南投地震震前垂直速度、紅色為 2013 年南投地震後至今之垂直速度。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2-3.32: Elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity of 2002-2007, blue is the vertical velocity before the Nantou earthquake, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

## 2-3-3-5 五光至黃竹測線

五光-黃竹測線橫跨車籠埔斷層，總長約 11 公里（投影至剖面的長度），自 2006 至 2020 年止共計施測 15 次。本測線以 GPS 連續站 GS23 之 2013 年地震前垂直速率（-4.7 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-5.6 mm/yr），作為約制點來校正 AF15 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.33）。

根據圖 2-3.34 之垂直速度及歷年高程變化來看，此測線 2013 年 6 月前與後的垂直速度並無太多變化亦無顯著抬升變化，近幾年並無明顯之變化呈現相對穩定的狀態。

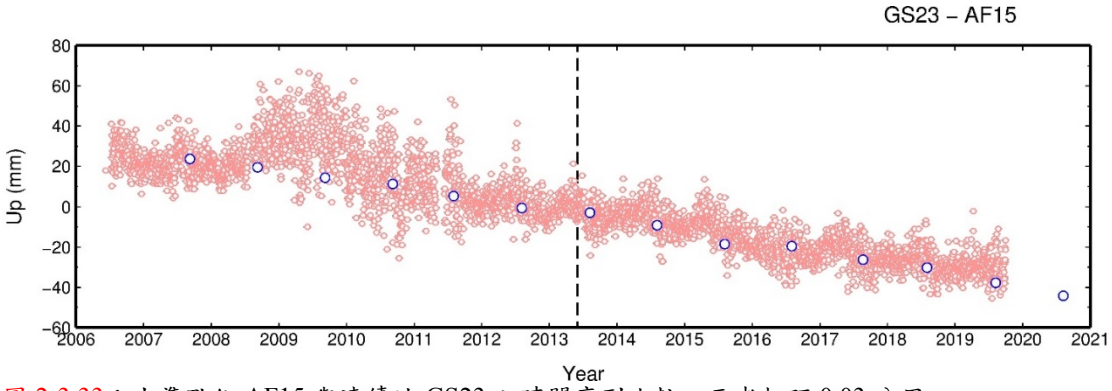



圖 2-3.33：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。

Figure 2-3.33: Time series comparison between leveling bench mark AF15 and continuous GPS station GS23. The distance between two stations are 0.03 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

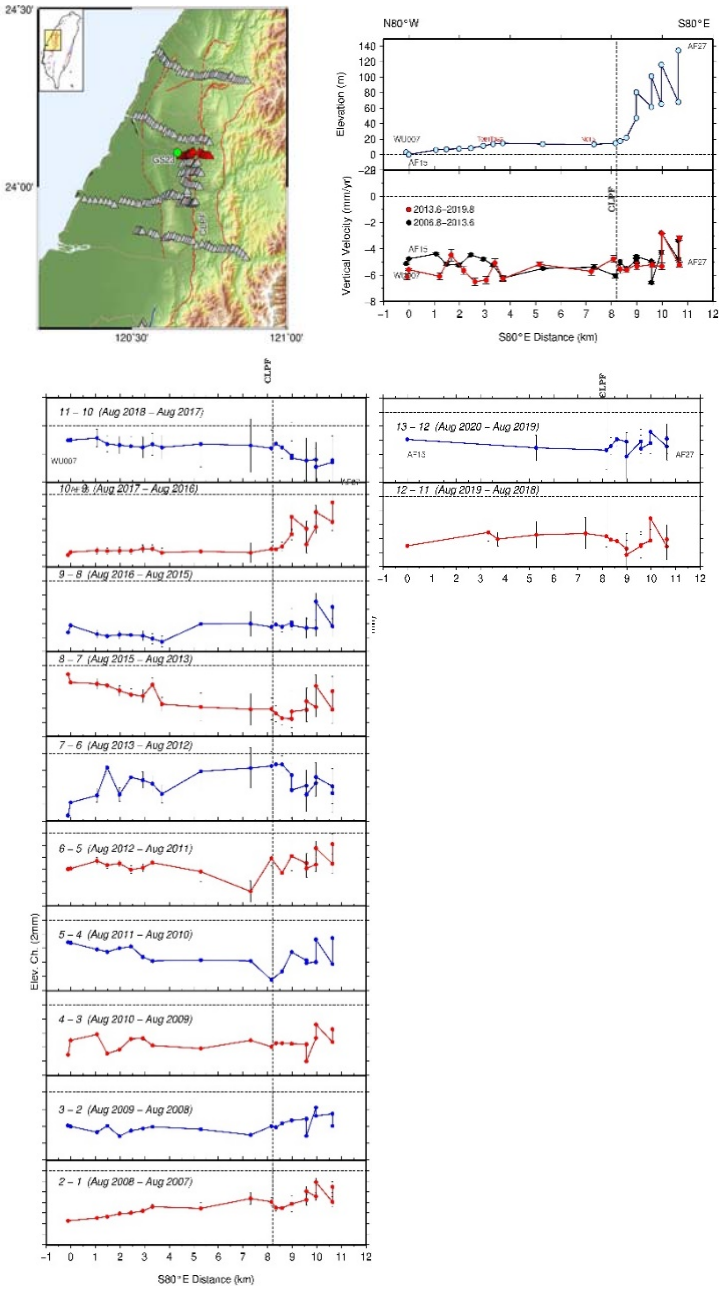



圖 2-3.34：五光至黃竹水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2006 - 2013 年之垂直速度、紅色為 2013 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2-3.34: Elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity of 2006-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 2 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

# 2-3-4 嘉南地區精密水準測線

## 2-3-4-1 金湖至瑞峰測線

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 2020 年間共進行 18 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS17 及 S103 之垂直速率（2.3 mm/yr 及-0.1 mm/yr），作為約制點來校正 G776 及 G742 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.35 及圖 2-3.36）。

根據圖 2-3.37，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-2.0 至 0.0 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<2.0 mm/yr），但至測線末段之整體趨勢為逐步抬升（約從 0.0 到 4.0 mm/yr）。

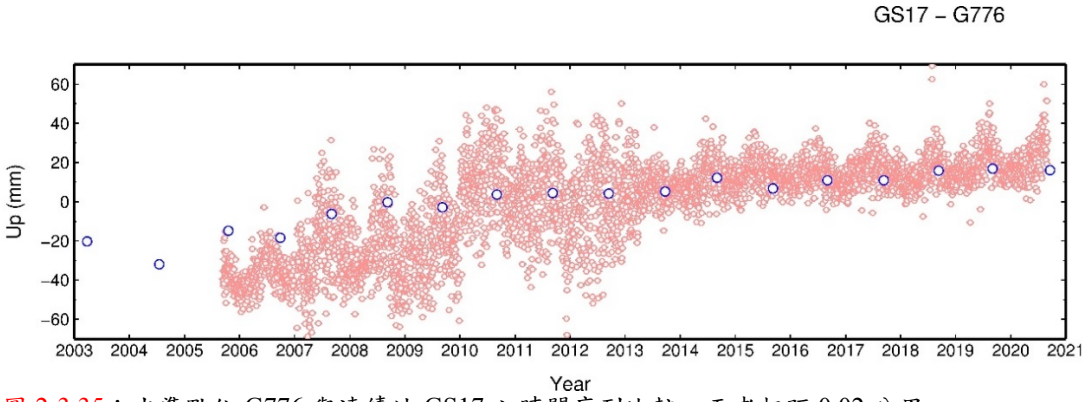



圖 2-3.35：水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 2-3.35: Time series comparison between leveling bench mark G776 and continuous GPS station GS17. The distance between two stations are 0.02 km.

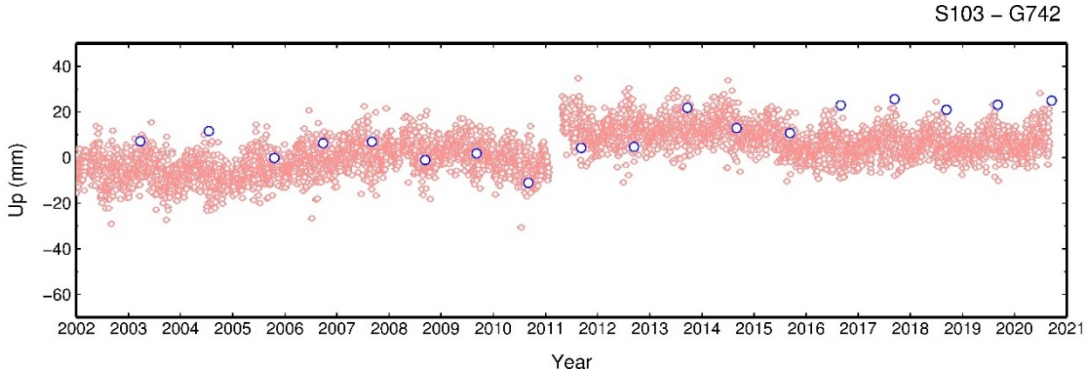



圖 2-3.36：水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較，兩者相距 0.78 公里。
Figure 2-3.36: Time series comparison between leveling bench mark G742 and continuous GPS station S103. The distance between two stations are 0.78 km.

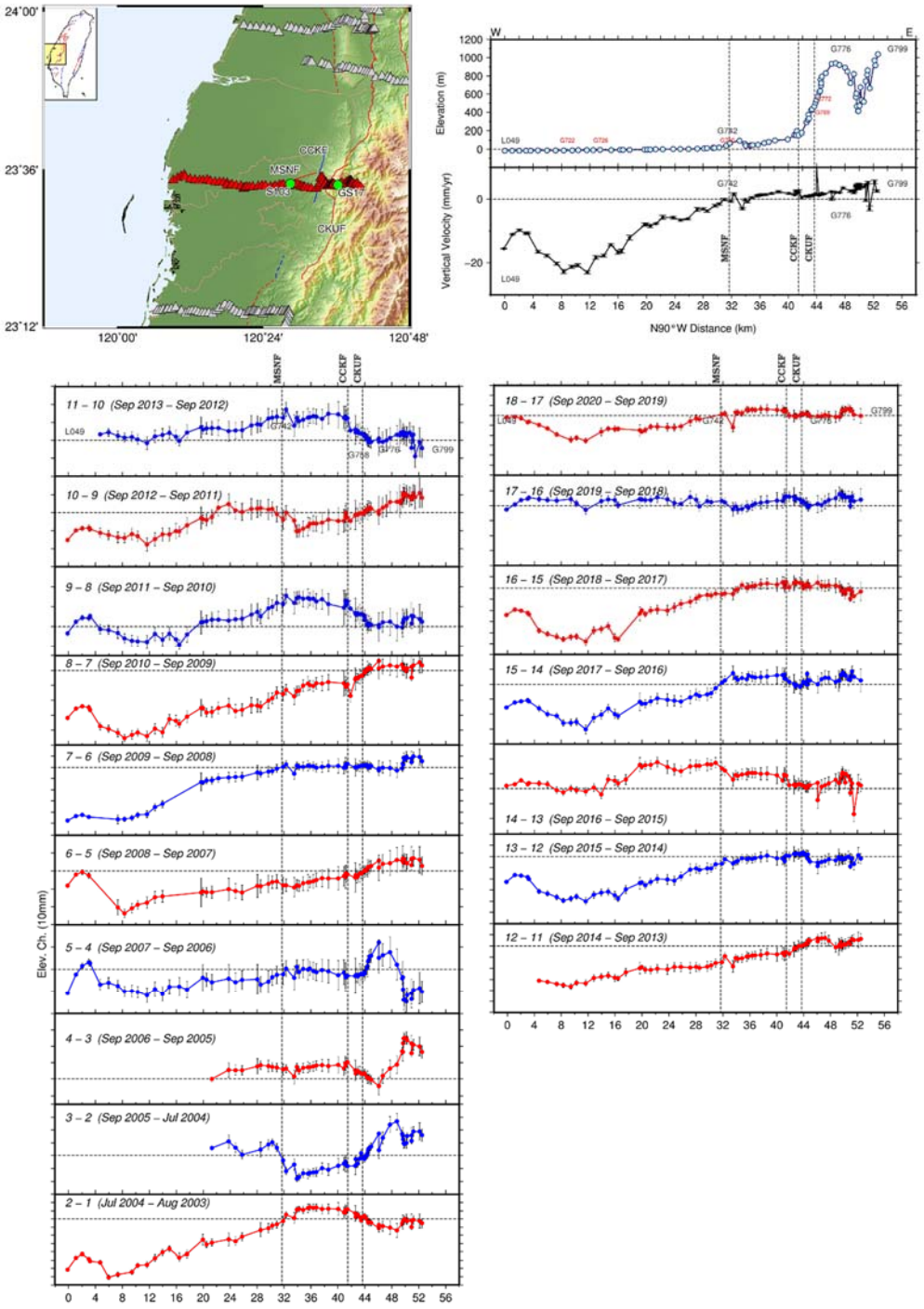



圖 2-3.37：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2-3.37: Elevation change of the Jinhu-Ruifeng leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

## 2-3-4-2 北門至楠西測線

嘉南地區完成的精密水準測線為北門-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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS44 之垂直速率（6.4 mm/yr)，作為約制點來校正 I088 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.38)。而本測線測量點位經查證後已確認測量樁點柚子坑（G824）已滅失，無法繼續觀測。

根據圖 2-3.39，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2003 年 10 月至 2010 年 3 月甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 年 3 月至 2020 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。

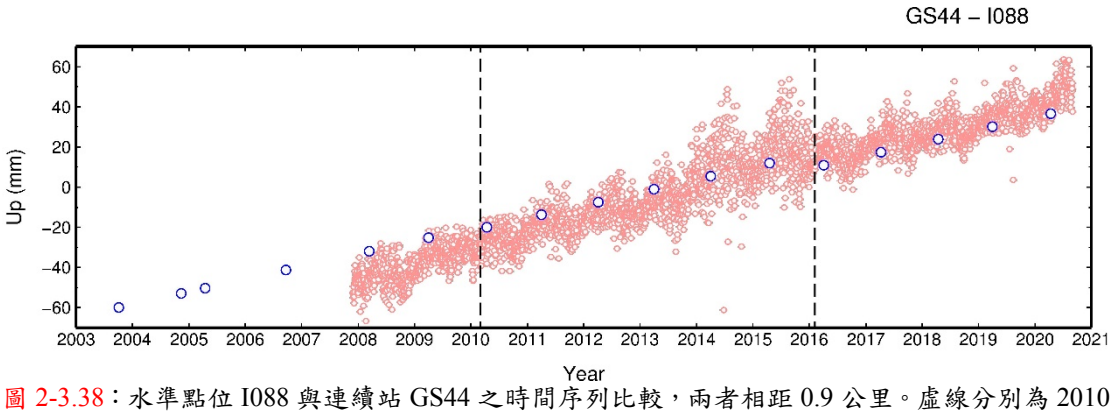



圖 2-3.38：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-3.38: Time series comparison between leveling bench mark I088 and continuous GPS station GS44. The distance between two stations are 0.9 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

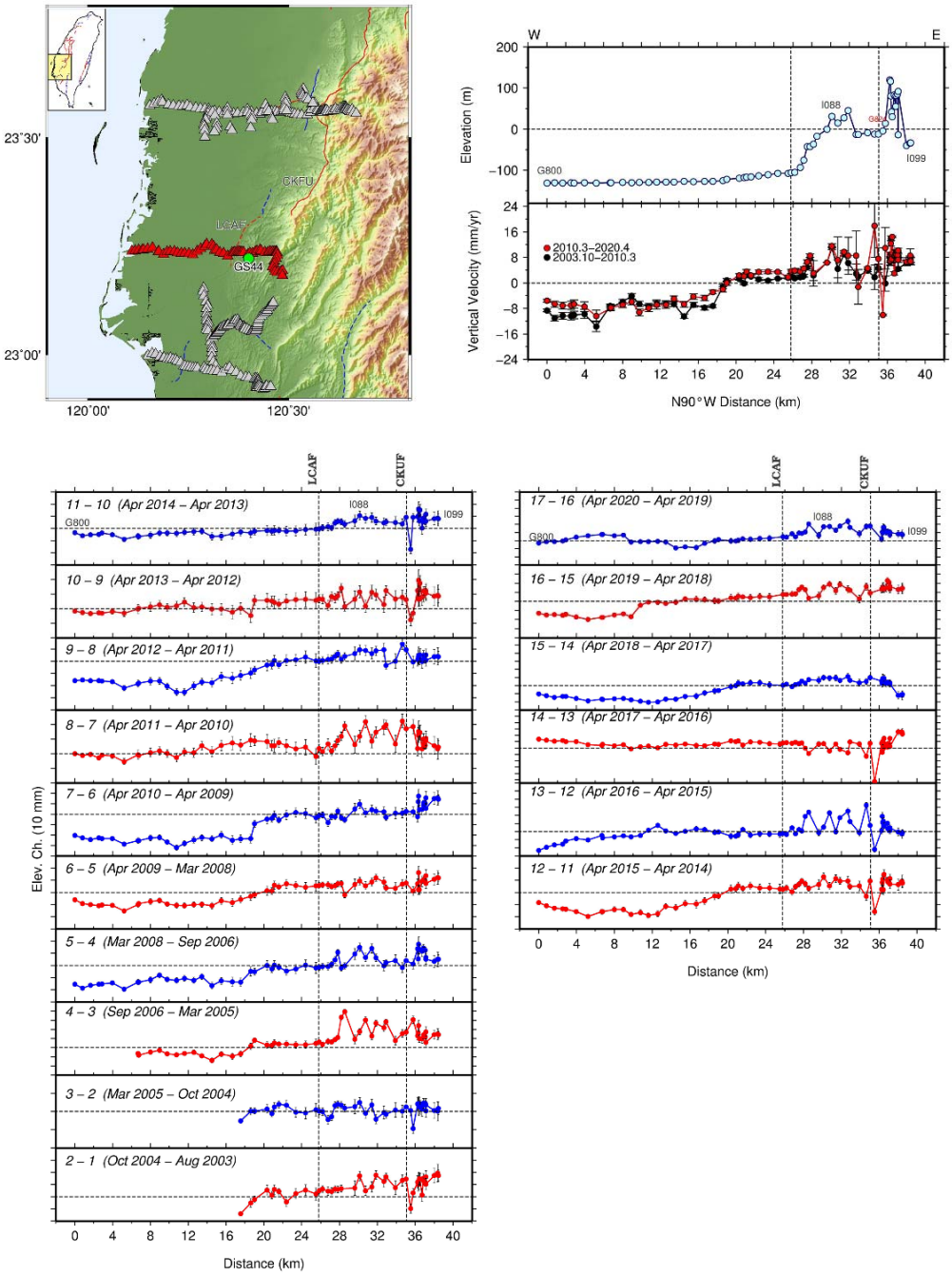



圖 2-3.39：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2-3.39: Elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LCAF is Liuchia fault, and CKUF is Chukou fault.

## 2-3-4-3 善化至關廟測線

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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（0.9 mm/yr），作為約制點來校正 G377 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.40），由於 G374 自去年遺失今後將以相近的 G377 作為取代。

根據圖 2-4.41，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2002 年 11 月至 2010 年 3 月甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月之垂直速度、藍色為 2016 年 3 月至 2020 年 10 月之垂直速度。 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～-3.0 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-7.0～39.0 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 39.0 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。

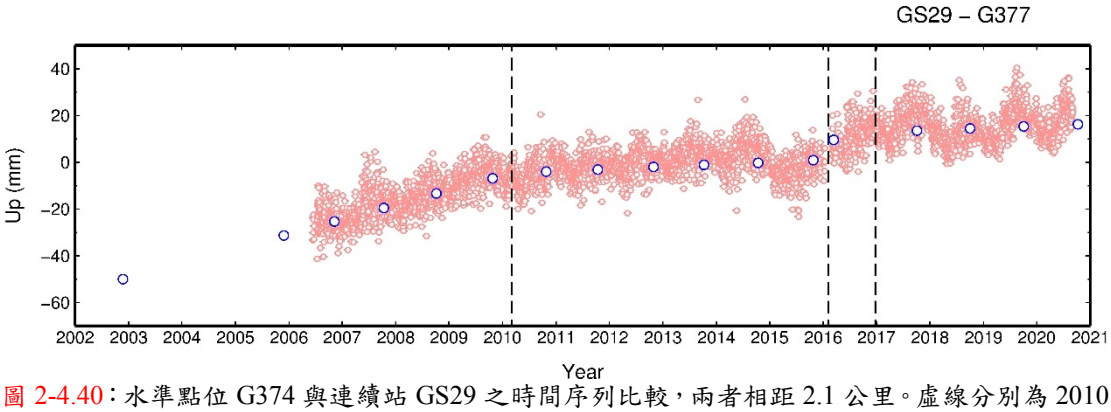



圖 2-4.40：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-4.40: Time series comparison between leveling bench mark G377 and continuous GPS station GS29. The distance between the two is 2.1 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

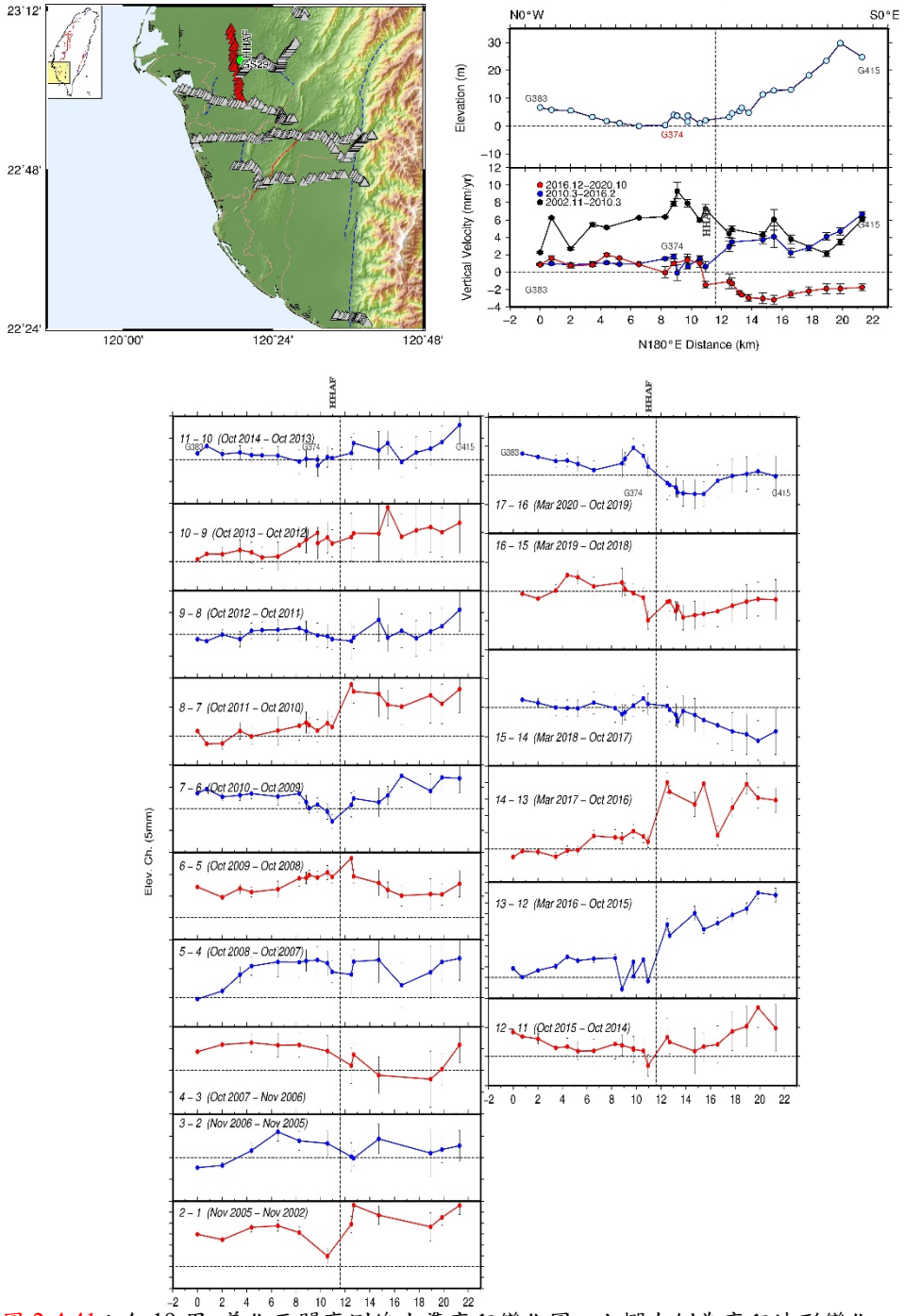



圖 2-4.41：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

Figure 2-3.41: Elevation change of the Shanhua-Guanmiao leveling route. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , blue is the vertical velocity before the Meinong earthquake of 2010-2016, red is the vertical velocity from 2016 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault.

## 2-3-4-4 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨後甲里斷層，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 2006 年至 2020 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS73 之垂直速率（1.1 mm/yr），作為約制點來校正 G358 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.42），2016 年美濃地震前垂直抬升速率約為 2.5 mm/yr，而 2017 年美濃地震後抬升速率上升至約 5.7 mm/yr。

根據圖 2-3.43，黑色為 2001 年 7 月至 2003 年 12 月之垂直速度，在跨越後甲里斷層前後皆為沉降約 5.0 ~ 10.0 mm/yr，越靠近龍船斷層時逐步抬升但跨越該斷層後出現沉降現象：綠色為 2003 年 12 月至 2010 年 5 月之垂直速度，跨越後甲里斷層前為沉降約 5.0 ~ 10.0 mm/yr，但跨越後甲里斷層後有明顯沉降速度減緩情況，直至靠近龍船斷層前才逐步變成抬升現象；藍色為 2010 年 5 月至 2016 年 2 月之垂直速度，在後甲里斷層以西呈現 5.0 ~ 15.0 mm/yr 的沉降運動，通過後甲里斷層後亦呈現約 10.0 mm/yr 沉降速度，往東逐漸抬升直至通過龍船斷層後才變為沉降運動；紅色為 2016 年 12 月至 2020 年 5 月之垂直速度，後甲里斷層以西呈現 0.0 ~ 5.0 mm/yr 沉降現象，而往東通過斷層後呈現抬升現象，以 0 ~ 20.0 mm/yr 的數值越往東遞增。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在關廟至龍船斷層附近有產生同震抬升的型態。

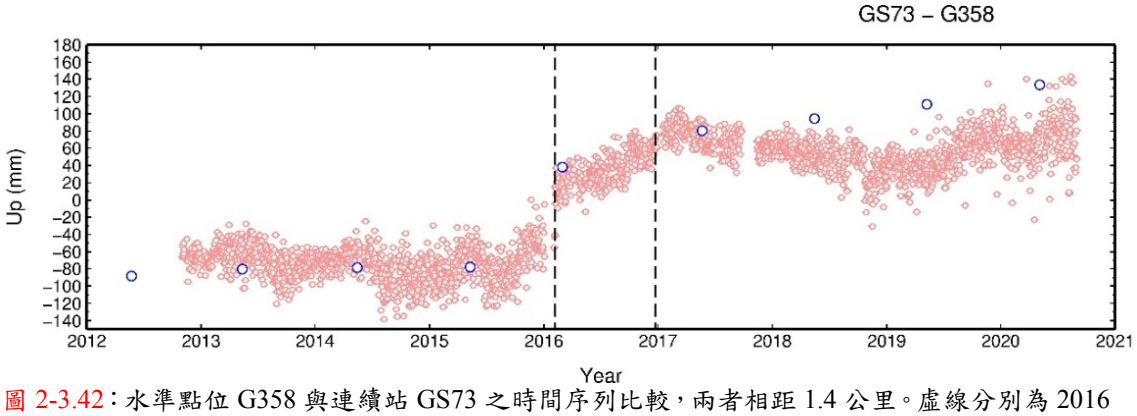



圖 2-3.42：水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2016 年 2 月 6 日美濃地震及 2017 年 2 月 11 日美濃地震。

Figure 2-3.42: Time series comparison between leveling bench mark G358 and continuous GPS station GS73. The distance between two stations are 1.4 km. The left dashed line is the February 6th 2016 Meinong earthquake, the right is the February 11th 2017 Meinong earthquake.

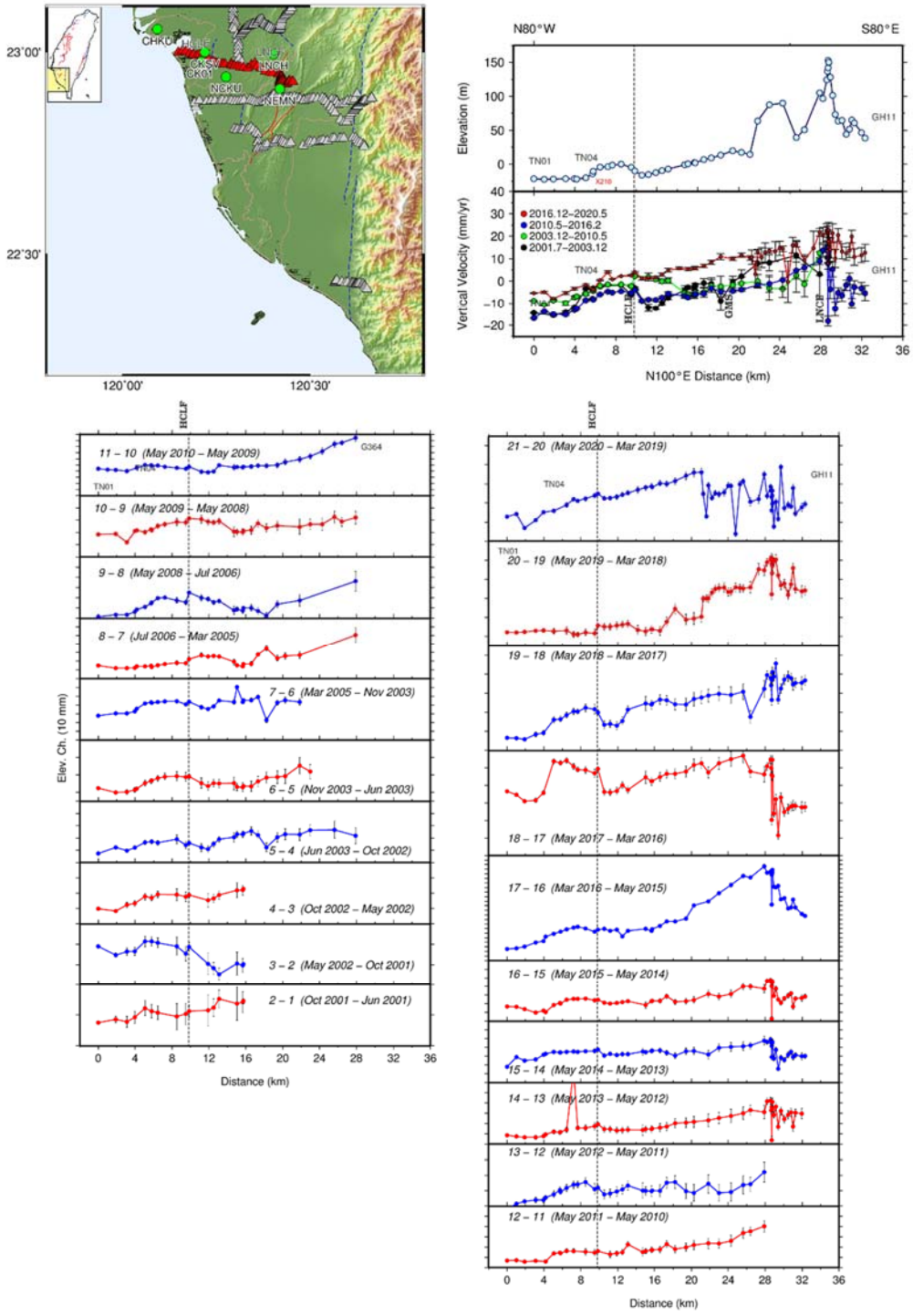



圖 2-3.43：安平至龍崎測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層。

Figure 2-3.43: Elevation change of the Anping-Longci leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCLF is the Houchiali fault.

## 2-3-4-4 玉井至新化測線

玉井至新化精密水準測線橫跨左鎮斷層，測線長約 25 公里，從 2001 年至 2020 年共計有 21 次施測。本測線以 GPS 連續站 CK01 之垂直速率（3.4 mm/yr），作為約制點來校正 TN04 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.44）。

根據圖 2-3.45，新化斷層兩側有明顯垂直速度的變化，西側以約 3 mm/yr 沉降速率運動，跨越斷層後逐步增加至約 3 mm/yr 的抬升速率。而橫跨左鎮斷層兩側並無明顯垂直運動方向的不同，但抬升速度逐步增加至約 5 mm/yr。此外本測線的 J006（新化高中）與善化至關廟測線共點，所以台 20_新化至玉井測線、善化至關廟與安平至龍崎測線可以組成更好的垂直速度場監測網。

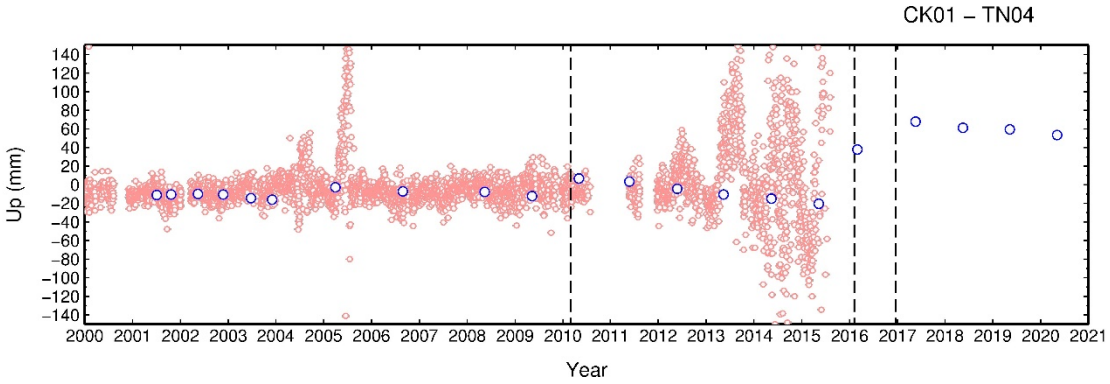



圖 2-3.44：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震、2016 年 2 月 6 日美濃地震及 2017 年 2 月 11 日美濃地震。

Figure 2-3.44: Time series comparison between leveling bench mark TN04 and continuous GPS station CK01. The distance between two stations are 1.4 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the right two are the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake and the Feburary 11th 2017 Meinong earthquake.

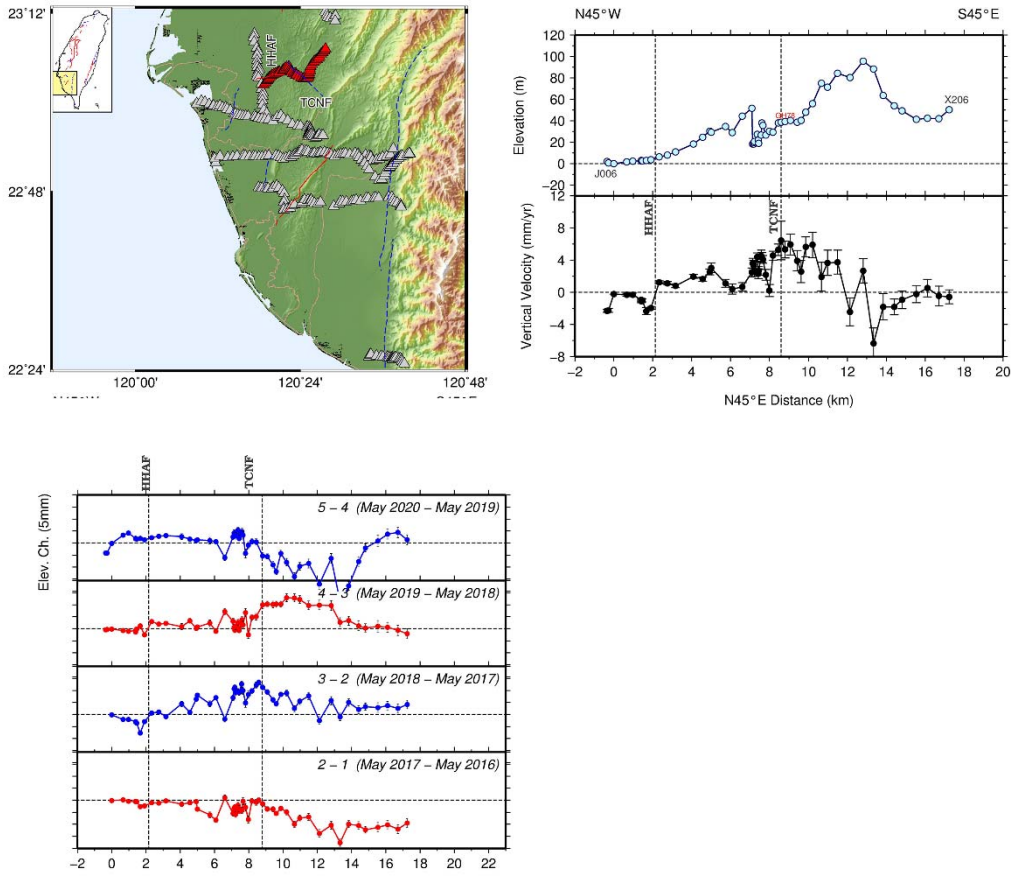



圖 2-3.45：台 20_新化至玉井測線路線圖。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 2-3.45: Elevation change of the Yujing-Xinhua leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault, and TCNF is Tsochen fault.

## 2-3-5 高屏地區精密水準測線

## 2-3-5-1 路竹至茂林測線

高屏地區完成的精密水準測線為路竹-茂林測線，其橫跨小岡山、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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS55 之垂直速率（0.1 mm/yr），作為約制點來校正 R016 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.46）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點情人廣場（GG33）及濫墾山地告示牌（G665）已滅失，無法繼續觀測。

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。圖 2-3.47 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中藍色為 2002 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 12 月至 2020 年 2 月，主線於小岡山斷層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。

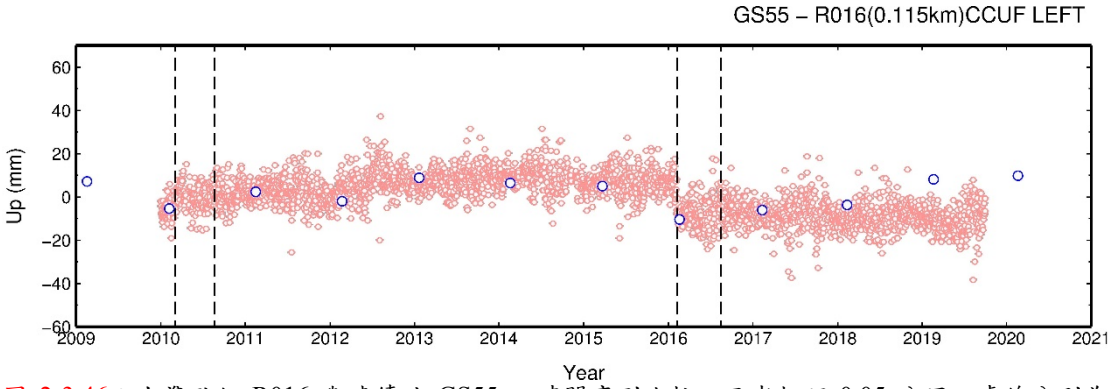



圖 2-3.46：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.46: Time series comparison between leveling bench mark R016 and continuous GPS station GS55. The distance between two stations are 0.05 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

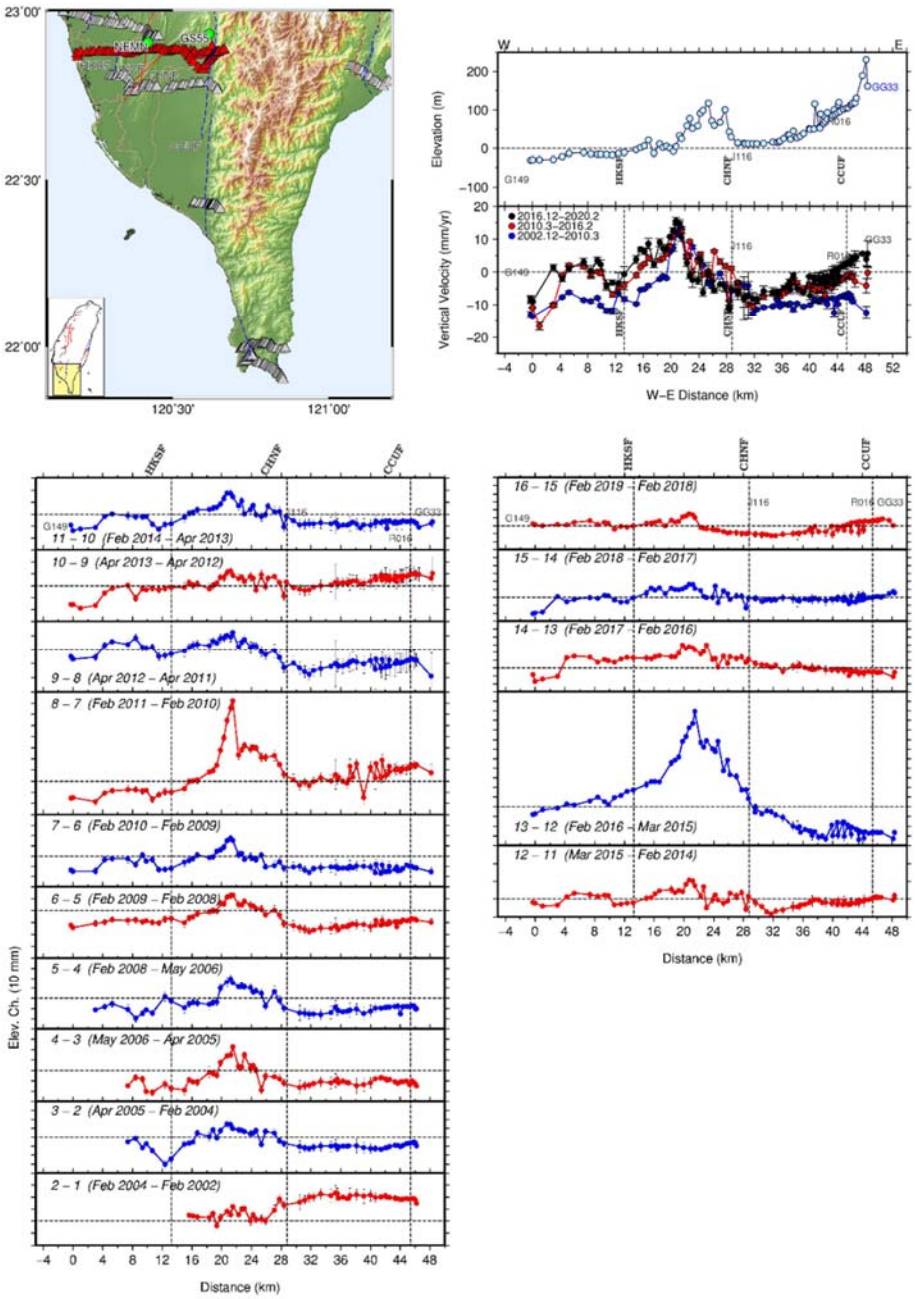



圖 2-3.47：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，藍色為 2002 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度，黑色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.47: Elevation change of the Luzhu-Maolin leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Blue is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake, red is the vertical velocity before the Meinong earthquake, black is the vertical velocity from 2016 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

## 2-3-5-2 岡山至安坡測線

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 2020 年共計 15 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 2-3.48）。

根據圖 2-3.49，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，垂直速度在跨越小崗山斷層至 旗山斷層之間有明顯的垂直運動改變的現象，約由 12.5 mm/yr 沉降運動改變成約 3.2 mm/yr 抬升運動；而旗山斷層至潮州斷層之間，沉降速度呈現緩降的趨勢，大致由 1.8 mm/yr 增加至 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。

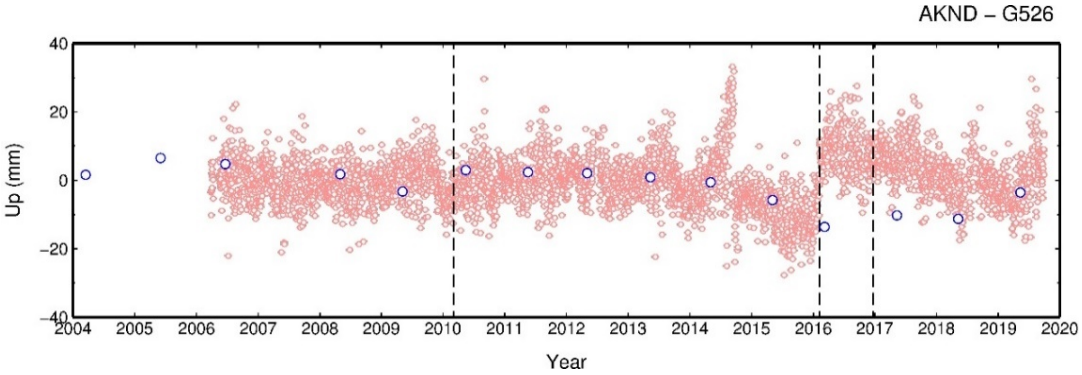



圖 2-3.48：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-3.48: Time series comparison between leveling bench mark G526 and continuous GPS station AKND. The distance between two stations are 0.8 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

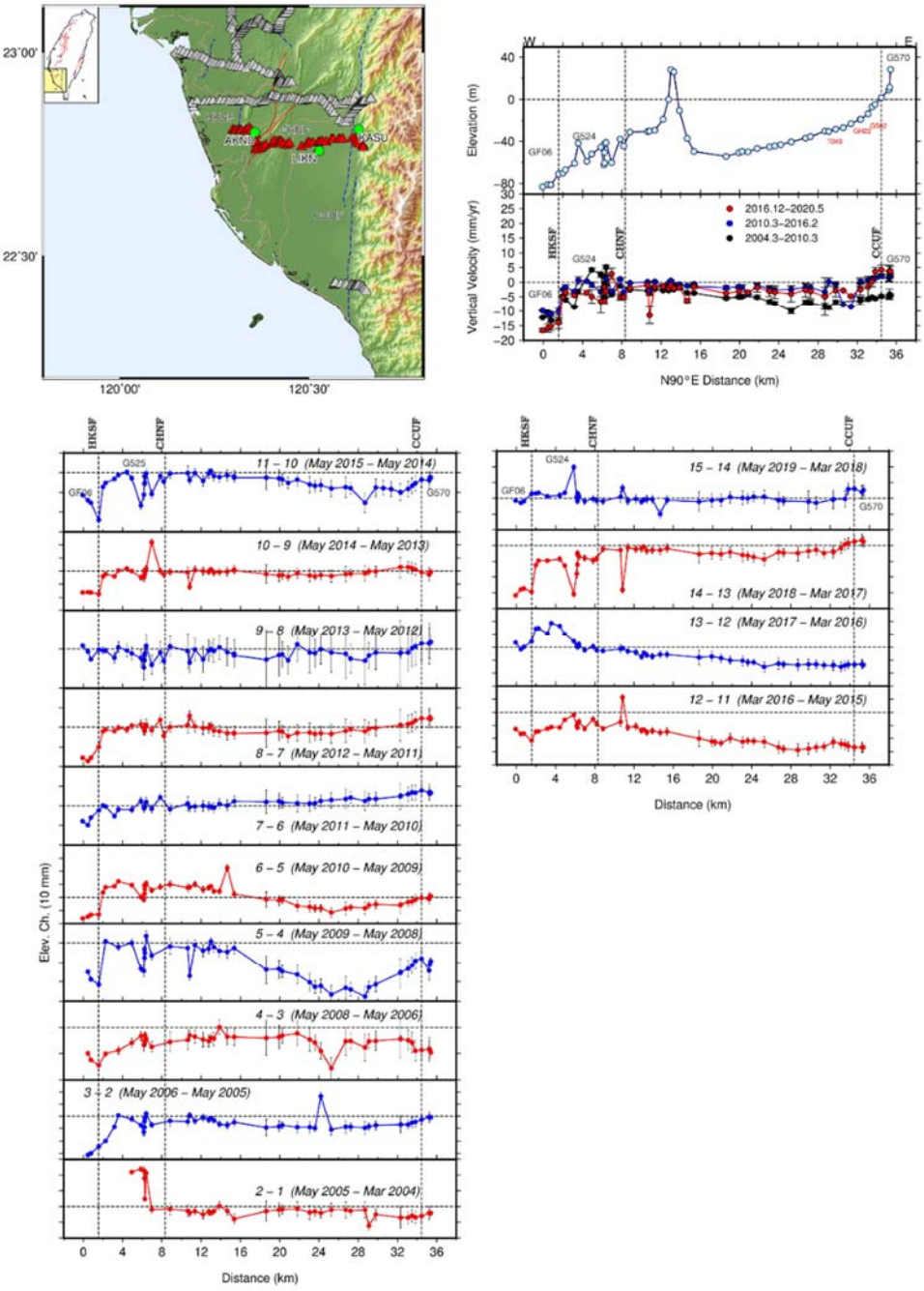



圖 2-3.49：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，所示黑色為 2004 - 2010 年甲仙地震震間垂直速度、藍色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度、紅色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.49: Elevation change of the Kangshan-Anpo leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity during Jiaxian earthquake of 2004-2010, blue is the vertical velocity between the Jiaxian earthquake and Meinong of 2010-2016 , red is the vertical velocity from 2016 until now. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

## 2-3-5-3 佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里，於 2005 至 2020 年間共進行了 16 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 2-3.50）。

根據圖 2-3.51，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-20.0 mm/yr；而斷層東側 2 公里內之變化較小，垂直速度落在 -0.2 至 1.0 mm/yr 之間。

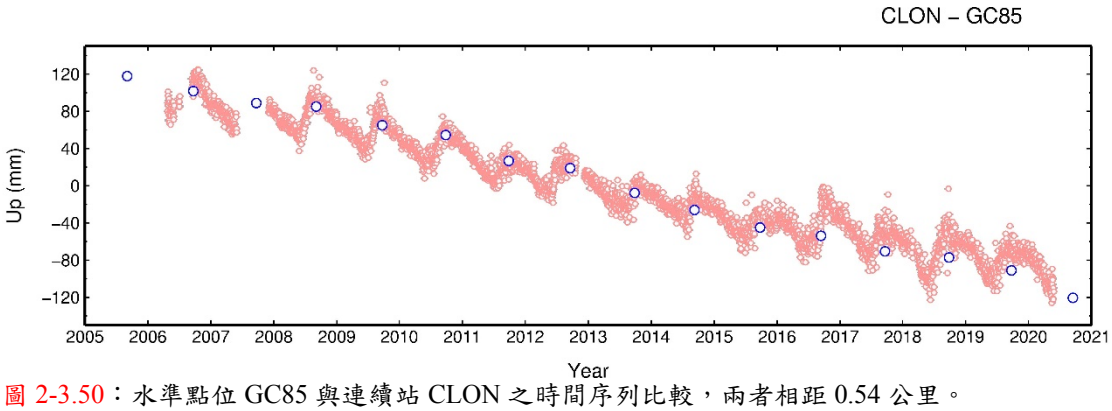



圖 2-3.50：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較，兩者相距 0.54 公里。

Figure 2-3.50: Time series comparison between leveling bench mark GC85 and continuous GPS station CLON. The distance between two stations are 0.54 km.

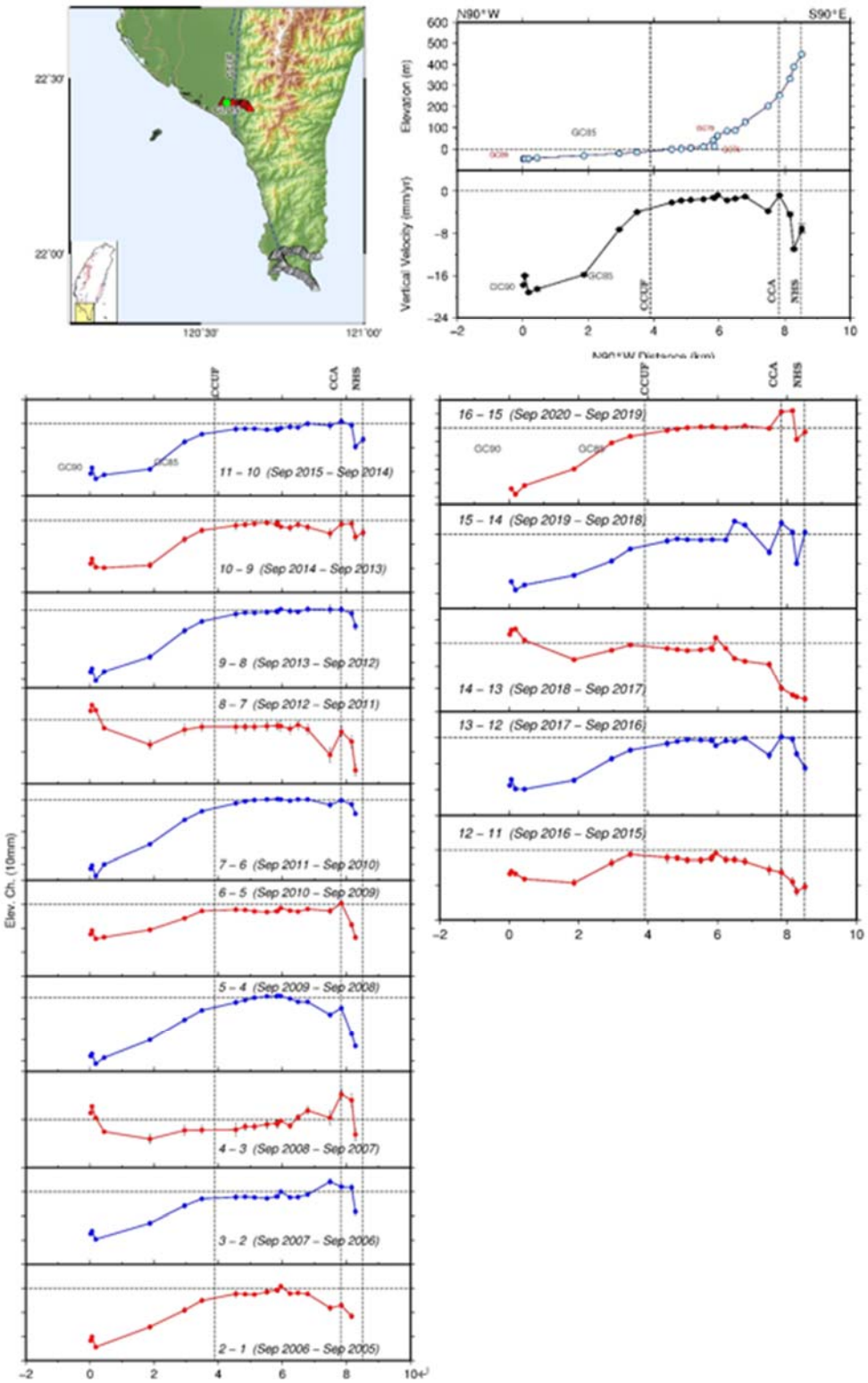



圖 2-3.51：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.51: Elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CCUF is Chaochou fault.

# 2-3-6 恆春地區精密水準測線

## 2-3-6-1 恆春西臺地至佳樂水測線

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（-2.3 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（-7.0 mm/yr）及 2010 年至今之垂直速率（-1.3 mm/yr），作為約制點來校正 G670 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.52）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點進誠橋（G674）已滅失，無法繼續觀測。

由圖 2-3.53 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2002 年 3 月至 2006 年 12 月、藍色為 2006 年 12 月至 2009 年 10 月、紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月、綠色為 2015 年 8 月至 2020 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，最大同震沉降量達 63.1 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。

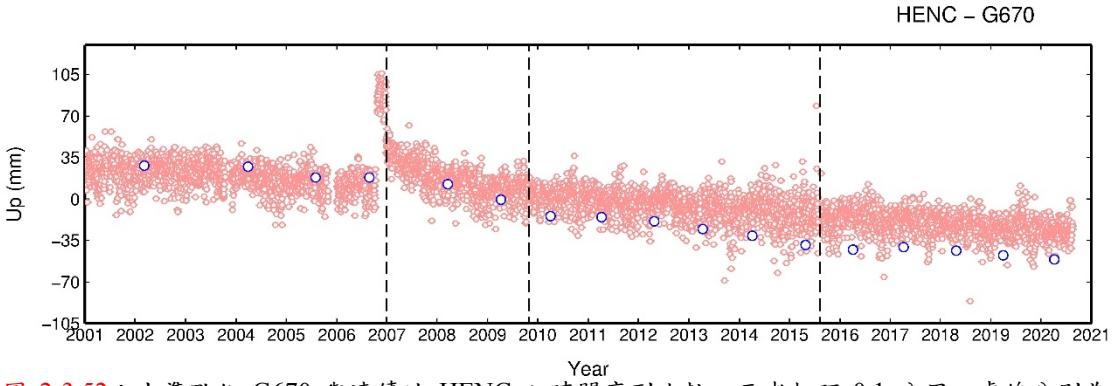



圖 2-3.52：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年 4 月 2 日速度發生變化及 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.52: Time series comparison between leveling bench mark G670 and continuous GPS station HENC. The distance between two stations are 0.1 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle one is the April 2nd 2010 velocity change event and the right one is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

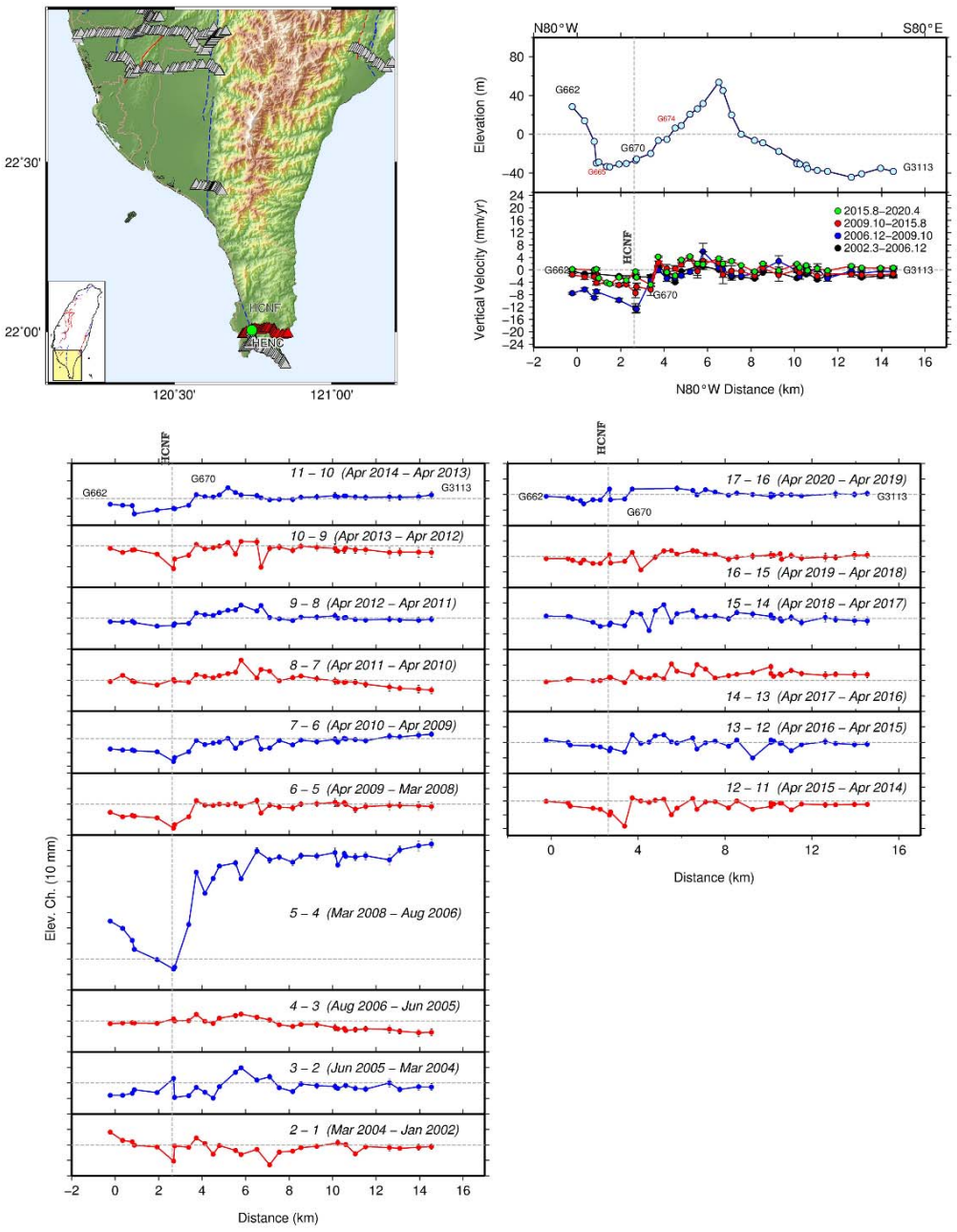



圖 2-3.53：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2009 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月、綠色為 2015 年 8 月至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.53: Elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2009 , red is the vertical velocity of 2009-2015,green is the vertical velocity from 2015 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

## 2-3-6-2 南樹林至鵝鑾鼻測線

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（-0.4 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（1.7 mm/yr）與 GS85 之 2010 年至今之垂直速率（0.3 mm/yr），作為約制點來校正 Q014 與 G656 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.54、圖 2-3.55）。

由圖 2-3.56 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2002 年 3 月至 2006 年 12 月，大致呈現沉降速度約 5 mm/yr；藍色為 2006 年 12 月至 2009 年 10 月，跨斷層兩側出現明顯垂直運動的不同，斷層西側逐漸抬升至約 6 mm/yr；紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月，跨斷層西側的抬升速度減緩至 1 mm/yr；綠色為 2015 年 8 月至 2020 年 4 月，跨斷層兩側亦出現明顯垂直運動的不同，斷層西側抬升速度至約 3 mm/yr。

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。南樹林至鵝鑾鼻測線，最大同震沉降量達 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。

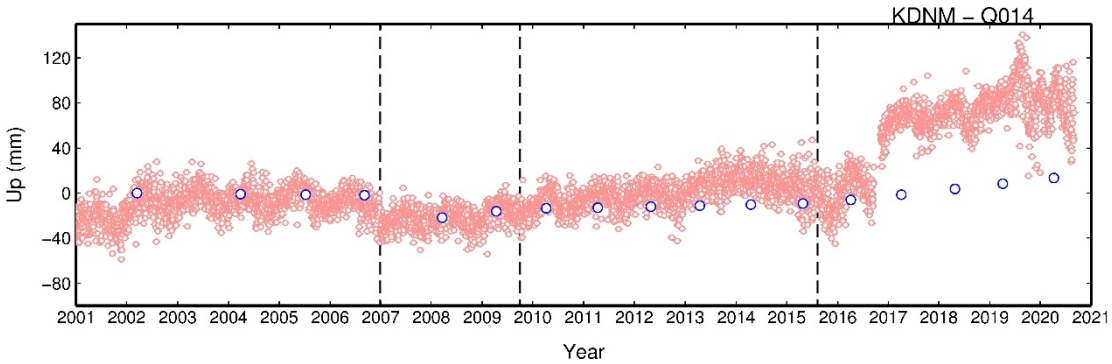



圖 2-3.54：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年 4 月 2 日速度發生變化及 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.54: Time series comparison between leveling bench mark Q014 and continuous GPS station KDNM. The distance between two stations are 0.2 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle one is the April 2nd 2010 velocity change event and the right one is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

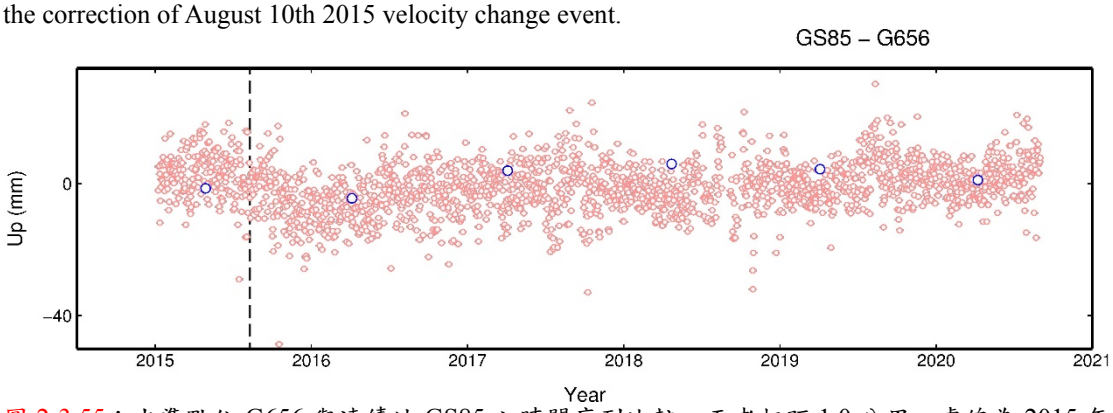



圖 2-3.55：水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較，兩者相距 1.0 公里。虛線為 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.55: Time series comparison between leveling bench mark G656 and continuous GPS station GS85. The distance between two stations are 0.1 km. The dashed line is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

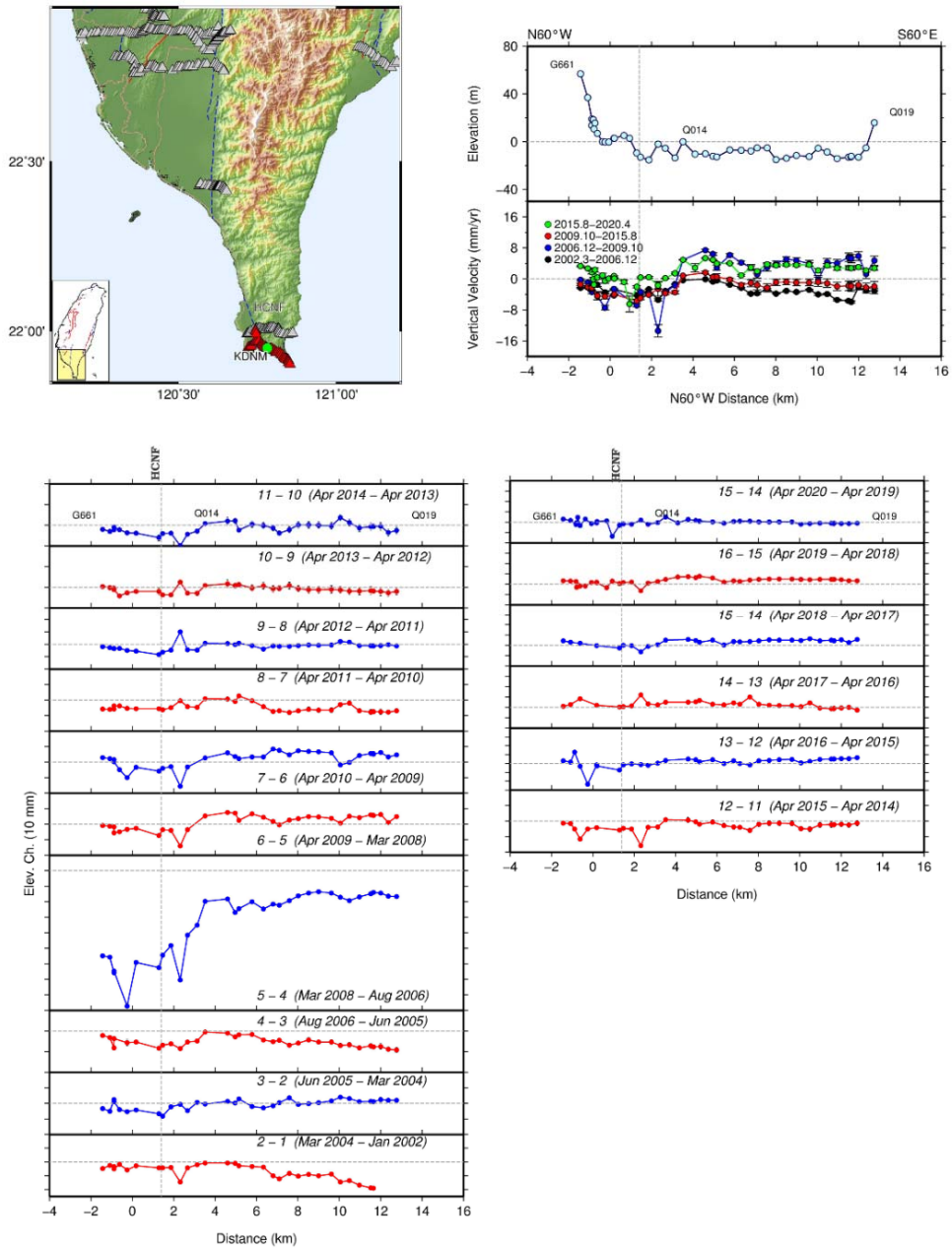



圖 2-3.56：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2009 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月、綠色為 2015 年 8 月至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.56: Elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2009 , red is the vertical velocity of 2009-2015,green is the vertical velocity from 2015 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

## 2-3-7 東部地區精密水準解算

東部地區完成的精密水準測線分別為嶺頂至龍澗、光復至豐濱、紅葉至靜浦和東成至富岡測線。

## 2-3-7-1 嶺頂至龍澗測線

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 20 公里，從 2004 年至 2020 年共計有 18 次施測，其中 2018 年因為花蓮地震，故在該年 2、10 月進行施測。本測線以 GPS 連續站 TUNM 之 2009 年地震前垂直速率（-9.4 mm/yr）、2009 年震後至 2018 年垂直速率（-9.2 mm/yr）及 2018 年至今之垂直速率（-1.3 mm/yr），作為約制點來校正 G979 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.57）。由於道路坍方故自 2016 年後僅有 N670 以東之垂直速度資料。

根據圖 2-3.58，2018 年以後此測線在嶺頂斷層西側之垂直速度約由 20.8 mm/yr 降至-10.3 mm/yr，以靠山區之測站較以往增加最大差約 13.9 mm/yr 之抬升速率，而嶺頂斷層東側與以往相似皆呈沉陷之趨勢約-10.1mm/yr。

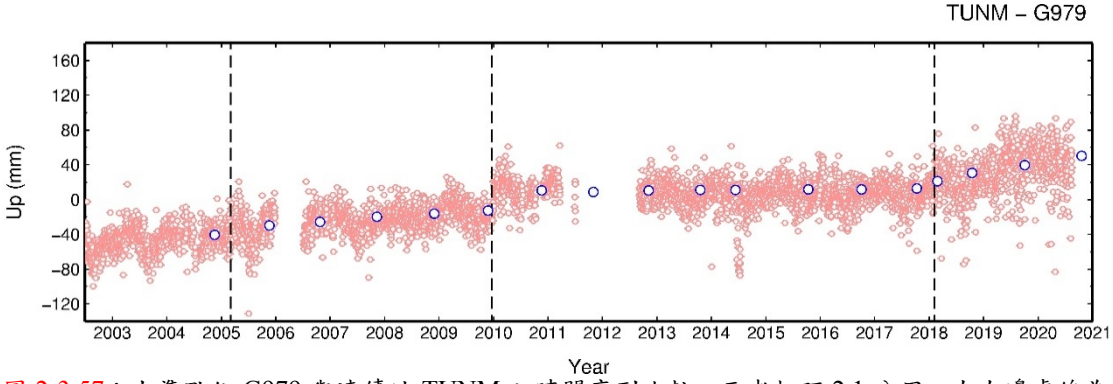



圖 2-3.57：水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。左左邊虛線為 2005 年 3 月 6 日蘇澳地震；中間虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.57: Time series comparison between leveling bench mark G979 and continuous GPS station TUNM. The distance between two stations are 2.1 km. The left dashed line is the March 6th 2005 Suao earthquake, the middle one is the December 19th 2009 Hualien earthquake and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

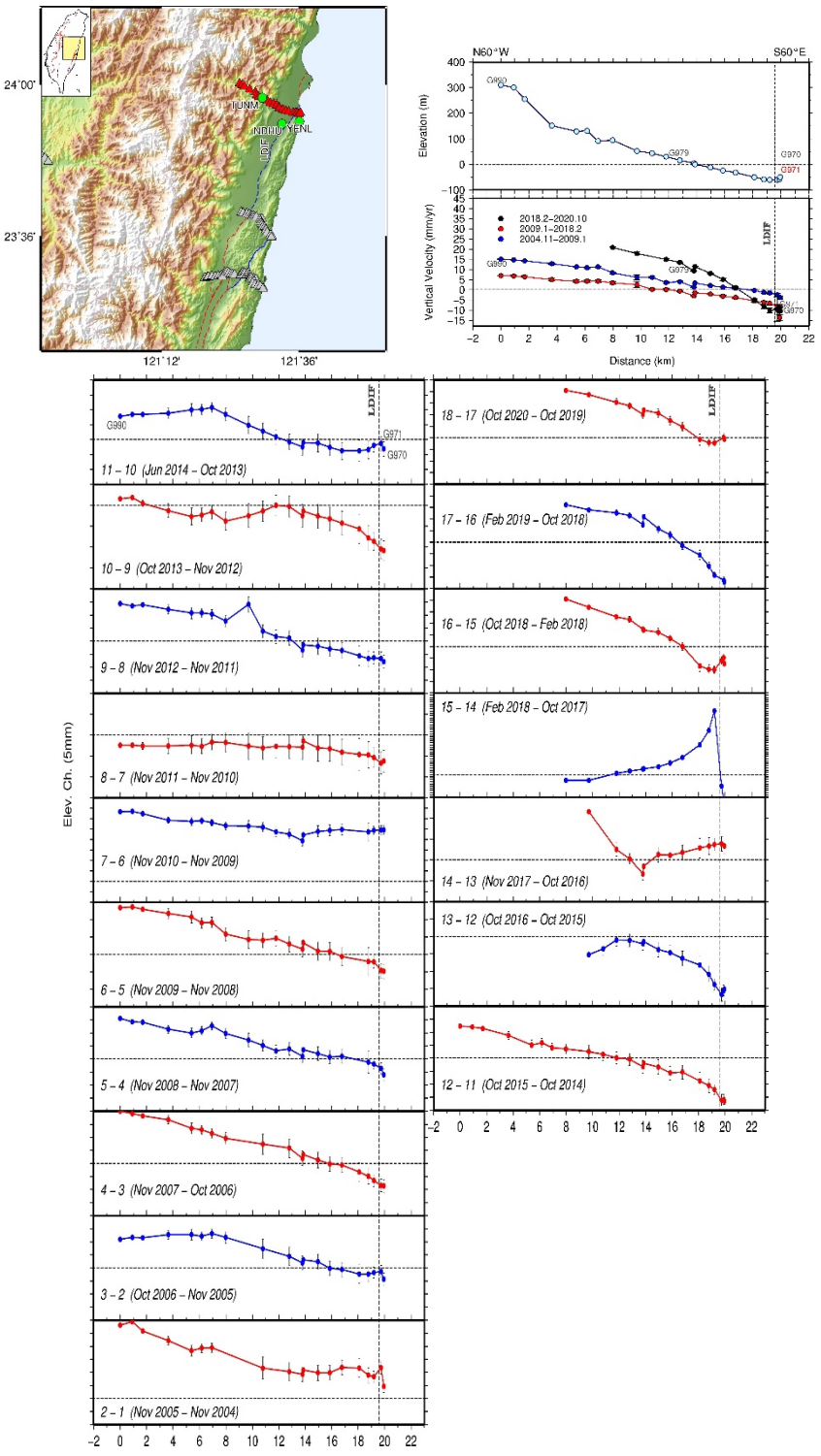



圖 2-3.58：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地直購造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 2-3.58: Elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Blue is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, red is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2018 , black is the vertical velocity from 2018 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LDIF is Lingding fault.

## 2-3-8-2 光復至豐濱測線

光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層，測線長約 12 公里，從 2004 年至 2020 年共計有 18 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 2009 年地震前垂直速率（-14.9 mm/yr）、2009 年震後至 2013 年垂直速率（-7.6 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-11.3 mm/yr），作為約制點來校正 G991 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.59)。

根據圖 2-3.60，此測線在奇美斷層以西之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在奇美斷層東側則不一致。在瑞穗斷層西側之垂直速度在 2018 年花蓮地震後之速率約落在-20.9 mm/yr 至-12.8 mm/yr，跨斷層後則逐漸抬升至 0.1 mm/yr。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-12.3 mm/yr 緩升至-11.3 mm/yr。

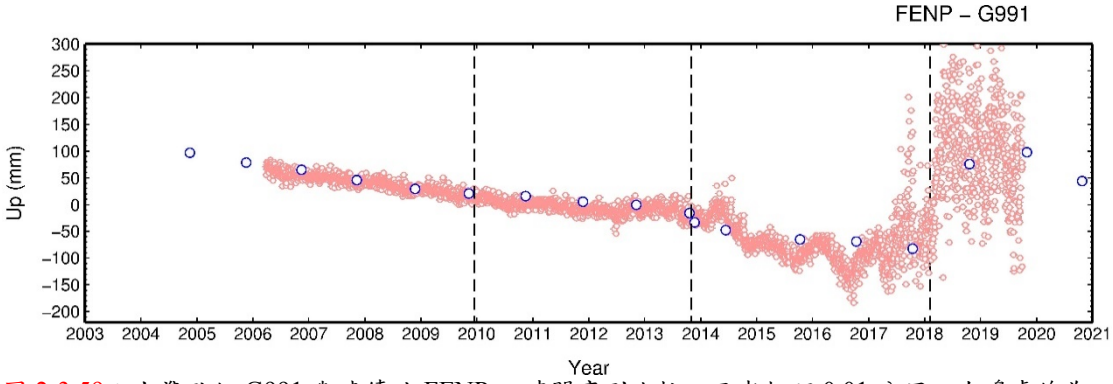



圖 2-3.59：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.59: Time series comparison between leveling bench mark G991 and continuous GPS station FENP. The distance between the two is 1.0 Km, the left one is the December 19th 2009 Hualien earthquake, the middle one is the October 31th 2013 Ruisui earthquake and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

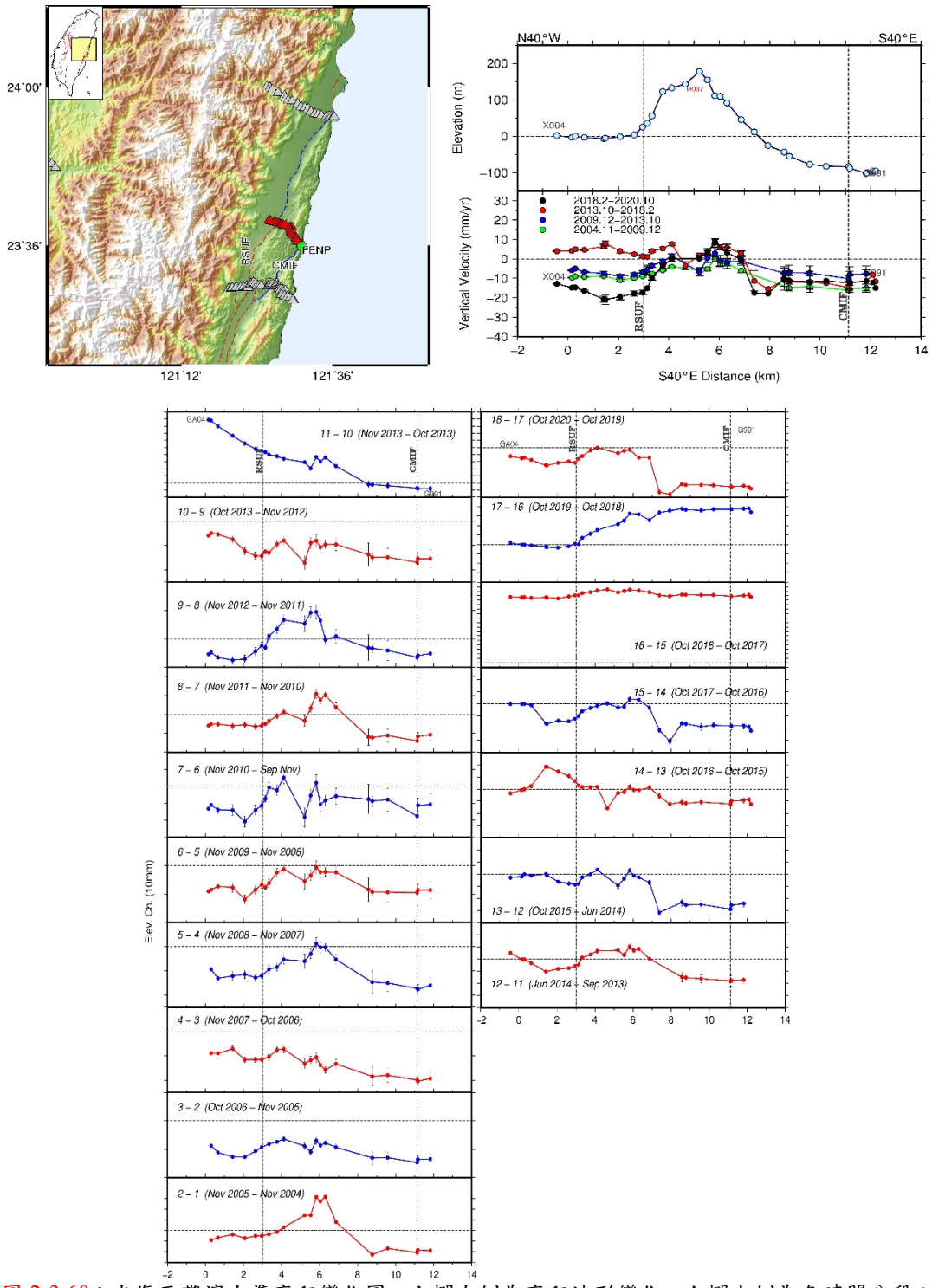



圖 2-3.60：光復至豐濱水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.60: Elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, blue is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity after the 2013 Ruisui earthquake of 2013-2018, black is the vertical velocity from 2018 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. RSUF is Rueyshui fault, CMIF is Chimei fault.

## 2-3-8-3 紅葉至靜浦測線

紅葉至靜浦測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層，測線長約 18 公里，2004 年至 2020 年間進行共 18 次的施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（0.6 mm/yr），作為控制點來校正 GA22 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.61）。

根據圖 2-3.62，此測線在玉里斷層左側之垂直速度約由-4.4 mm/yr 降至-8 mm/yr，在玉里斷層東側至奇美斷層西側，速度變化約由-9.5 mm/yr 緩升至 1.9 mm/yr，可說明此測線跨過的三條斷層仍有地質活動。

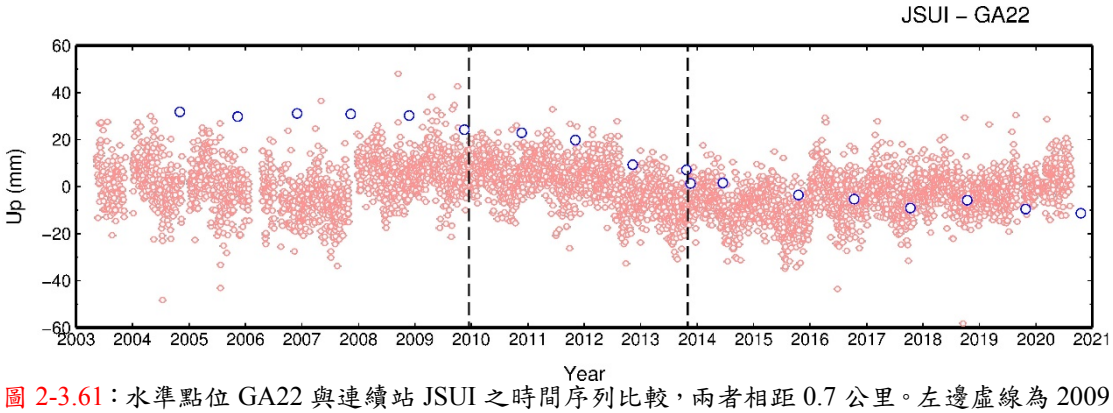



圖 2-3.61：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 3 月 6 日蘇澳地震；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

Figure 2-3.61: Time series comparison between leveling bench mark GA22 and continuous GPS station JSUI. The distance between the two is 1.0 Km. The left dashed line is the March 6th 2009 Suao earthquake and the right one is the October 31st 2013 Ruisui earthquake.

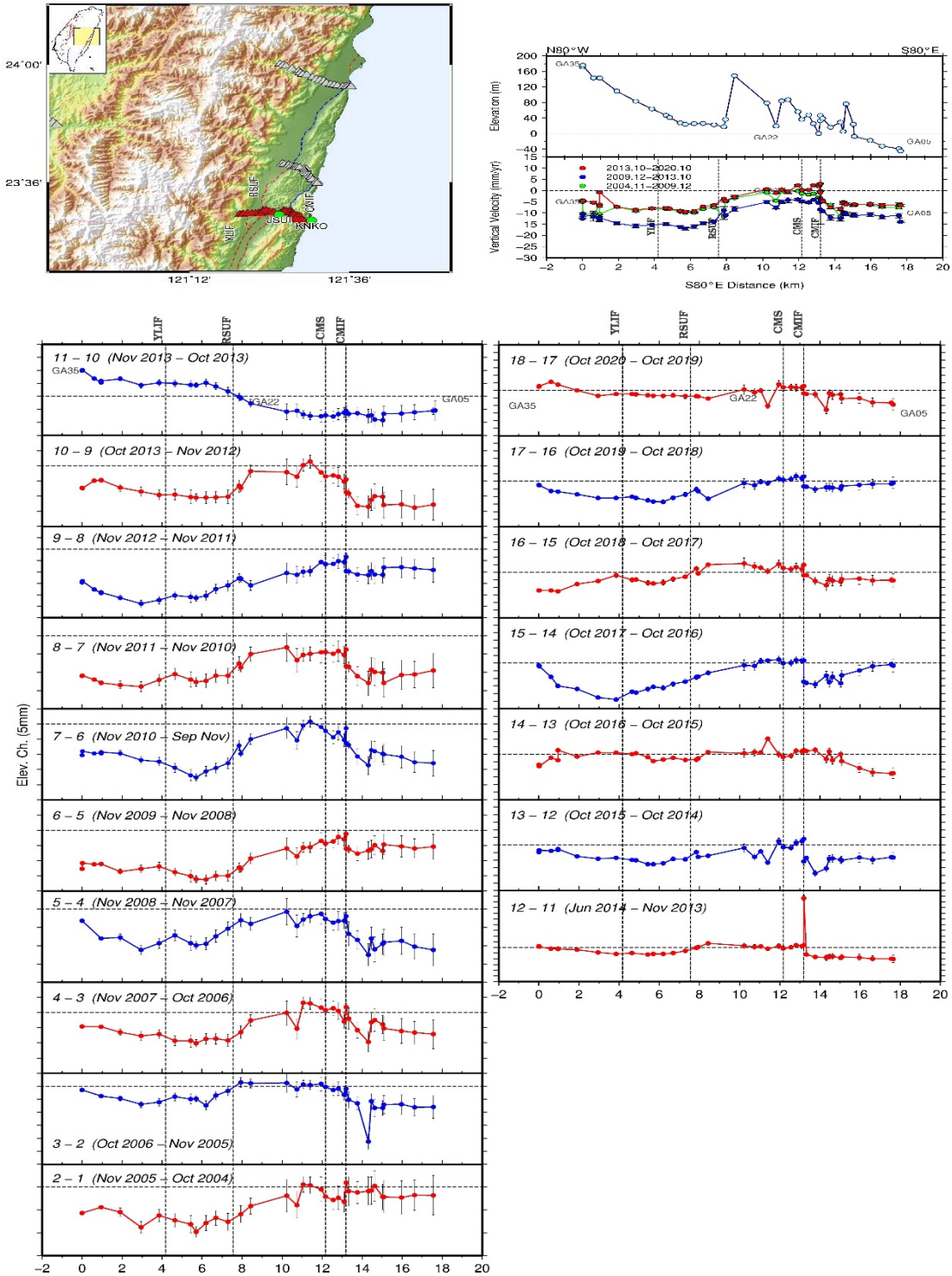



圖 2-3.62：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.62: Elevation change of the Hongye-Jingpu leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, blue is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, CMS is Chimei syncline, CMIF is Chimei fault.

## 2-3-8-4 東成至富岡測線

東成至富岡測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層，測線長約 14 公里，2009 年至 2020 年間共進行 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 之垂直速率（2.2 mm/yr），作為控制點來校正 A086 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.63)。

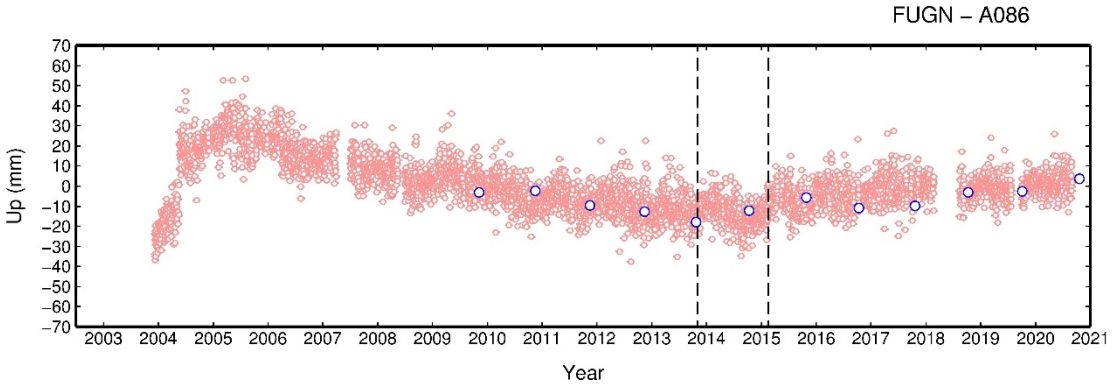



圖 2-3.63：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2015 年 2 月 14 日台東外海地震。

Figure 2-3.63: Time series comparison between leveling bench mark A086 and continuous GPS station FUGN. The distance between the two is 1.0 Km. The left dashed line is the October 31st 2013 Ruisui earthquake and the right one is the Feburary 14th 2015 Taitung offshore earthquake.

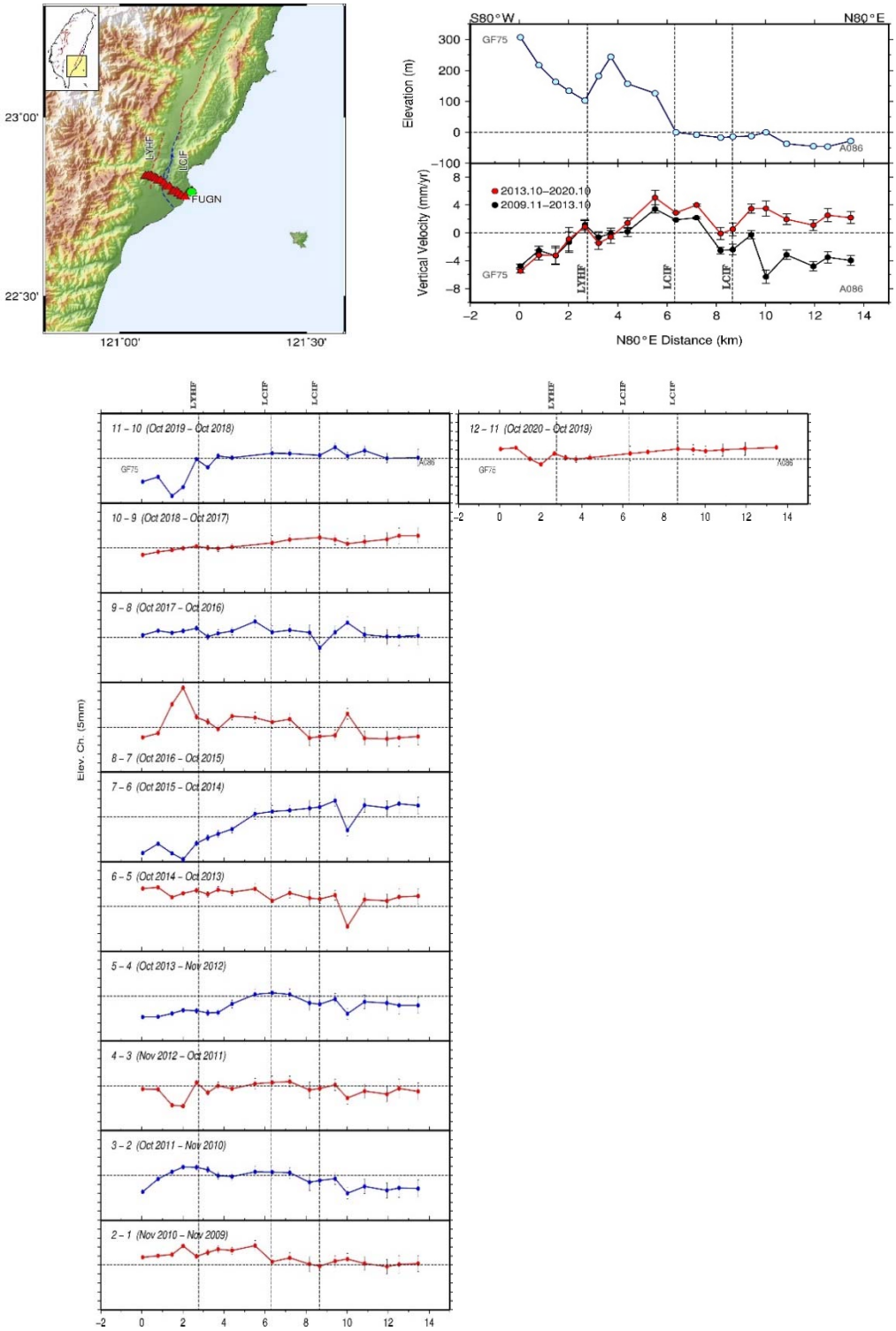



圖 2-3.64：東成至富岡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層

Figure 2-3.64: Elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the 2013 Ruisui earthquake earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LYHF is Luyeh fault, LCIF is Lichi fault.

## 2-3-9 宜蘭地區精密水準解算

宜蘭地區完成的精密水準測線分別為梗枋至東澳測線。

## 2-3-9-1 梗枋至東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長約 44 公里，2011 年至 2020 年間共進行 10 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS72 之 2018 年地震前垂直速率（-7.9 mm/yr）與 2018 年至今垂直速率（-7.1 mm/yr），作為控制點來校正 GG78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.65）。

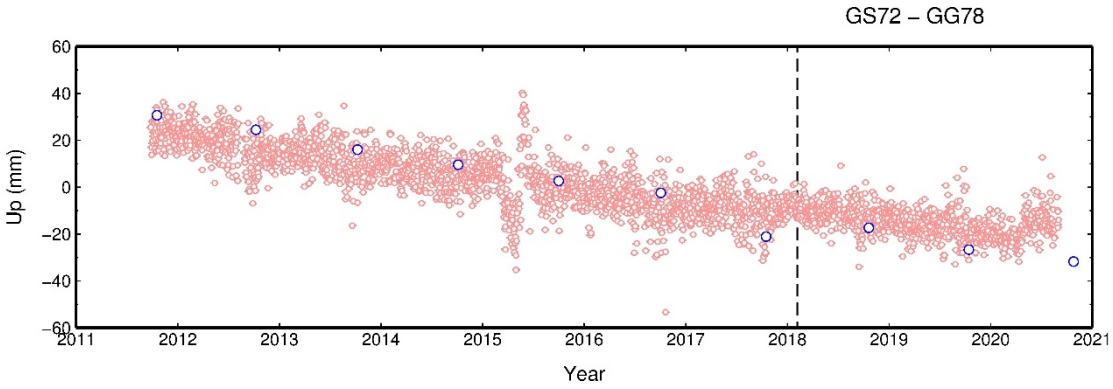



圖 2-3.65：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比較，兩者相距 1.1 公里。虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.65: Time series comparison between leveling bench mark G971 and continuous GPS station YENL. The distance between the two is 1.1 Km. The dashed line is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

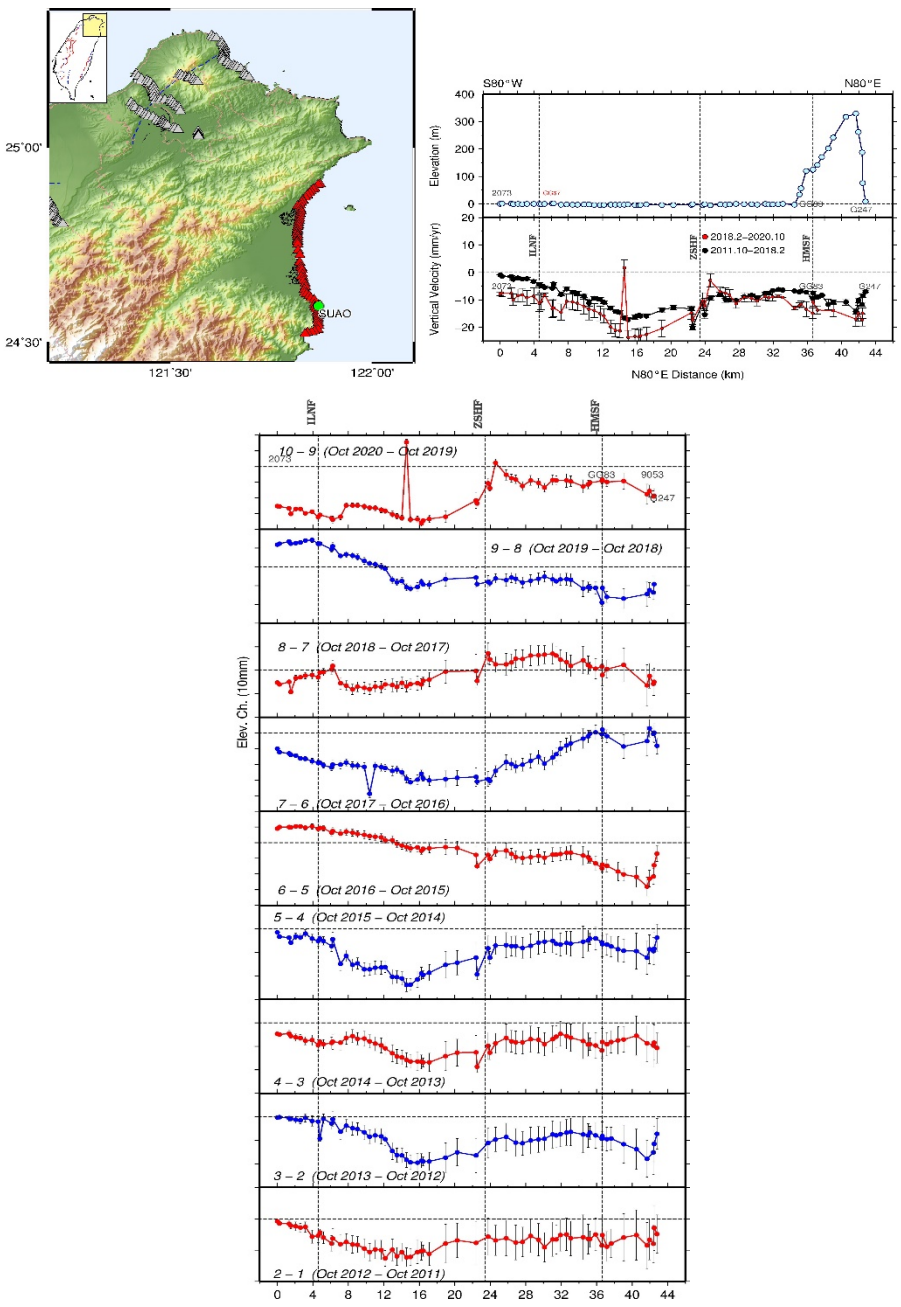



圖 2-3.66：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水-梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。

Figure 2-3.66: Elevation change of the Gengfang-Dongao leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the 2013 Ruisui earthquake earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. ILNF is Yilan fault, ZSHF is Zhuoshui-Lishan fault, HMSF is Hsiaomaoshan fault.

## 2-4 臺灣各分區之 GPS 移動站觀測成果分析

### 2-4-1 臺北地區 GPS 觀測網

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 73 點位施測。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。

臺北地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.1 所示，黑色箭號表示 GPS 移動站之速度場，相對於 S01R 測站，本區 2002－2020 年相對移動大致朝東北向運動為主，由南向北略呈順時針旋轉，相對速度量值集中在 2.5～3.5 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-4.2 所示，由結果可知新北地區大致呈現無明顯垂直運動，局部以 5.0 mm/yr 速度抬升，而台北地區則顯示沉降特徵，速度大約落在 10.0 mm/yr 內。

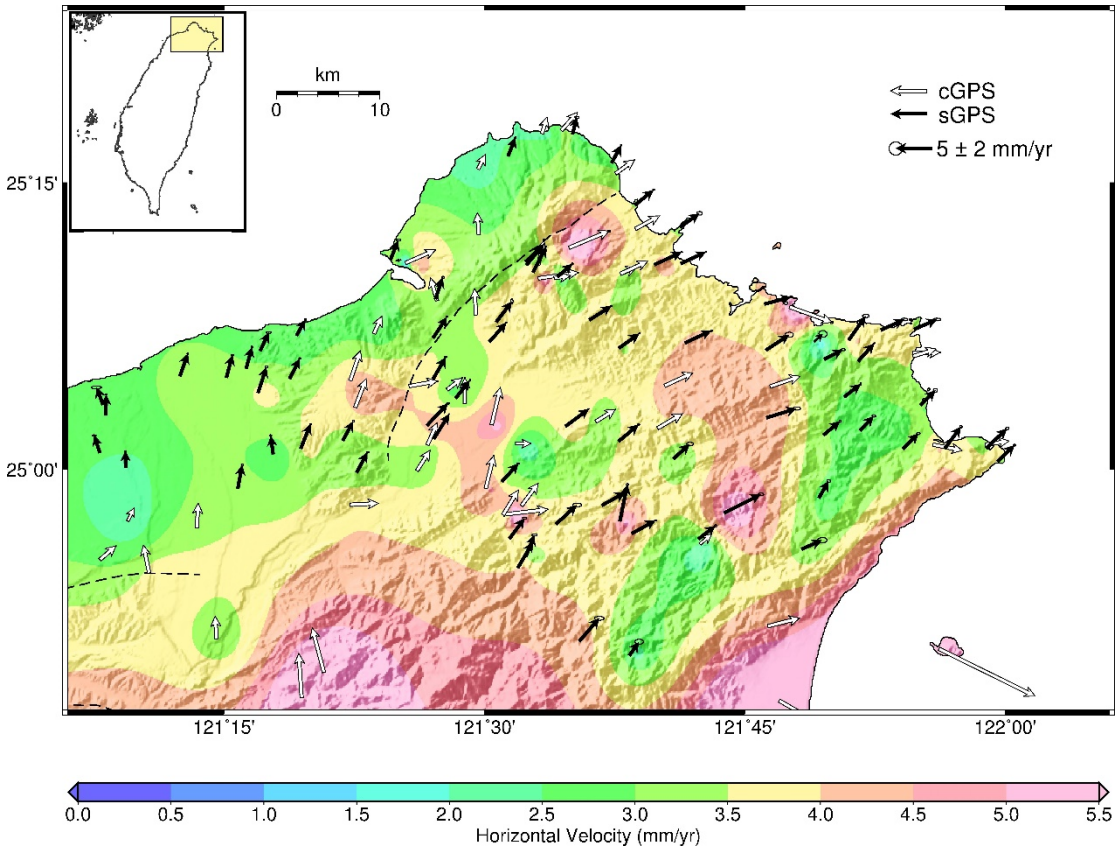



圖 2-4.1：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場，彩色色階為 2002-2020 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 2002-2020 年 GPS 移動站速度場，白色箭號為 2002-2020 年 GPS 連續站速度場。

Figure 2-4.1: Taipei area GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002-2020. The black arrows are campaign-mode GPS velocity field and the white arrows are continuous GPS velocity field from 2002- 2020.

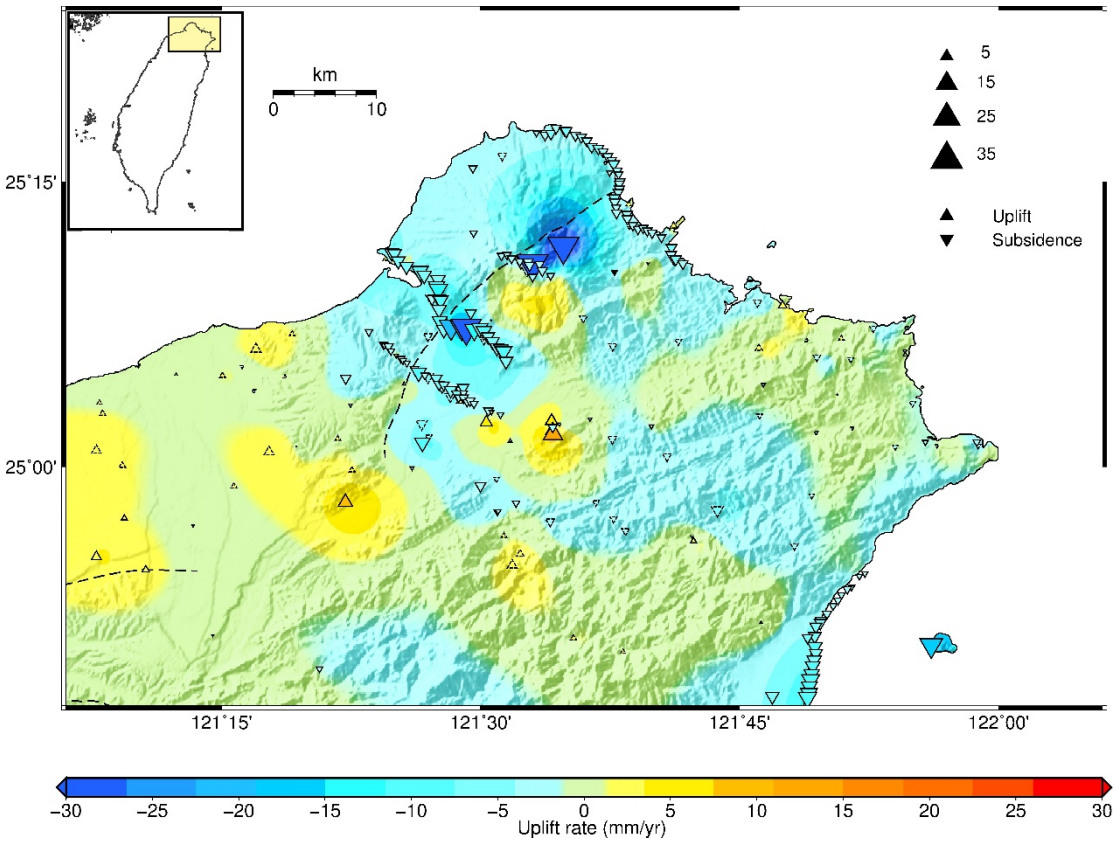



圖 2-4.2：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。GPS 站觀測時間為 2002-2020 年，精密水準站觀測時間為 2002-2020 年。

圖 2-4.2: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Taipei area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame. The duration of continuous GPS observation is from 2002-2020; while pricise leveling is from 2002-2020.

## 2-4-2 桃竹苗地區 GPS 觀測網

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，截至十月底為止完成 GPS 移動站 94 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，桃竹苗地區動站與連續站坐標時間序列型態皆相符。

桃竹苗地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.3 所示，相對於 S01R 測站，可知本區 2002－2020 年間朝西北向運動為主，速度場量值大致上約為 3.6～5.5 mm/yr（圖 2-4.3）。

垂直速度場如圖 2-4.4 所示，由結果可知本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 10.0 mm/yr 內。

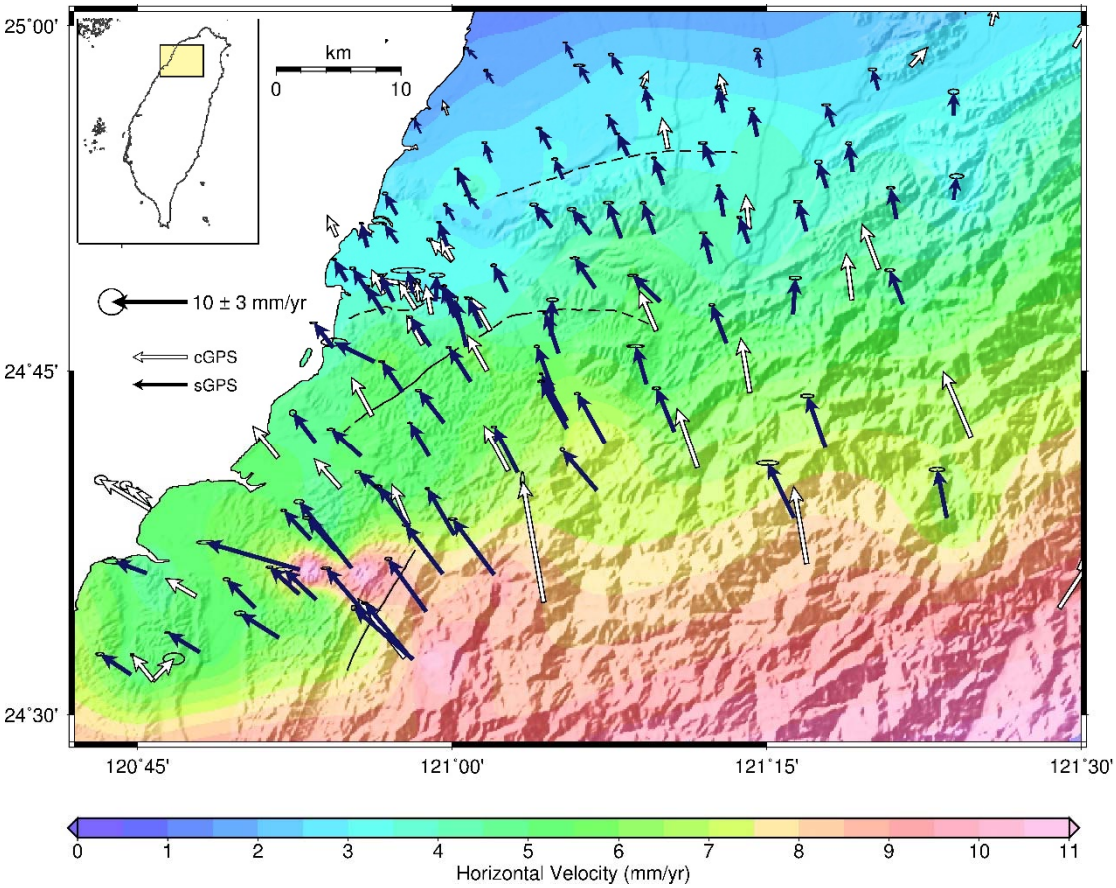



圖 2-4.3：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2020 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.3: Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002~2020

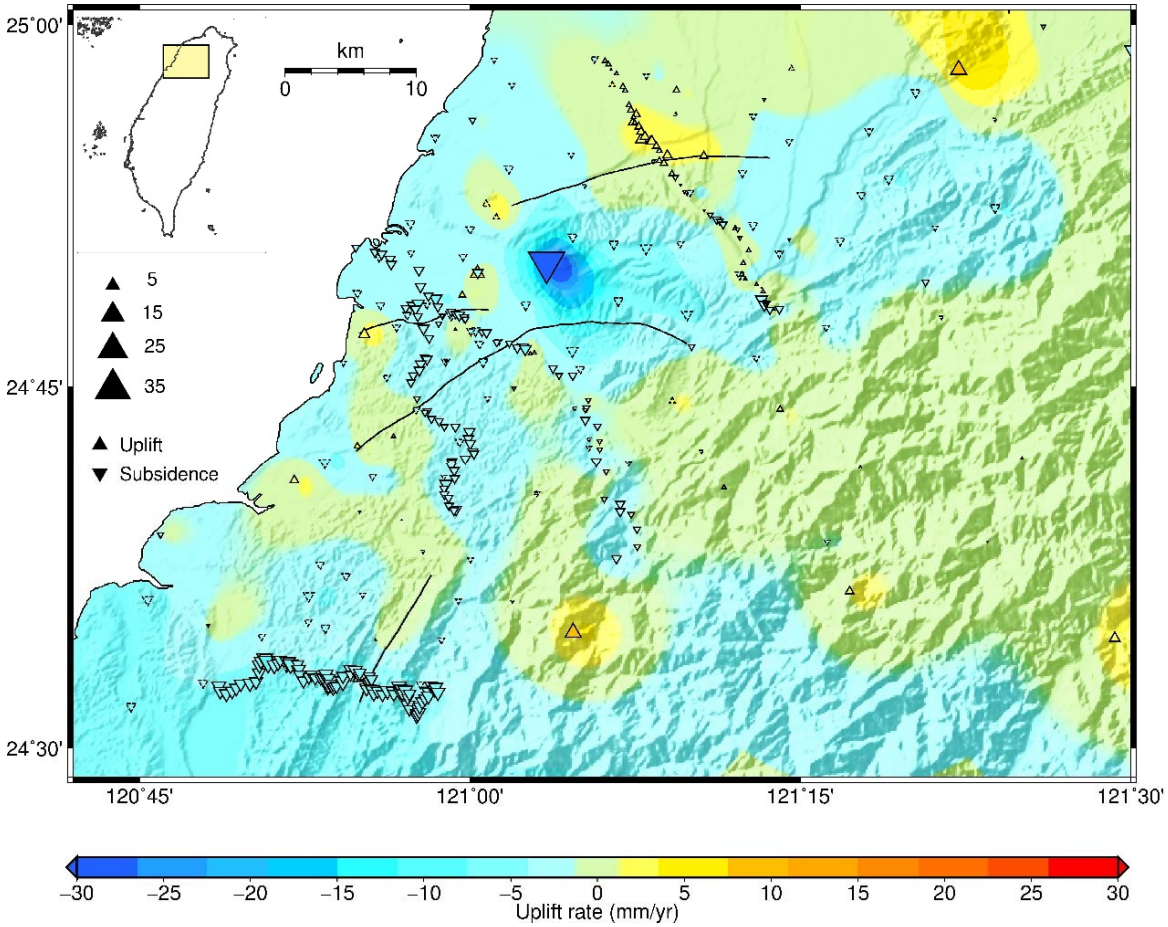



圖 2-4.4：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2020 年垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.4: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

## 2-4-3 中部地區 GPS 觀測網

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 153 點，以及 9 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，中部地區移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

檢視中部地區 GPS 移動站坐標時間序列，2013 年 6 月 ML 6.5 之南投地震，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 2002－2020 年分為 2002－2013 年以及 2013－2020 年兩個時間段，分別估算速度場。

中部地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.5 所示，由結果可知本區速度大致朝西北向運動，2004-2013 年速度約為 3.8 ~ 10.9 mm/yr，2013-2020 年速度約為 3.4 ~ 10.7 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-4.6，台中地區跨斷層之垂直速度並無明顯變化。彰化、雲林地區在沿海一帶有相當大的沉陷量，沉降速度值約為最大 35.0 mm/yr，進入南投山區則呈抬升，最大速度值達到約 10.0 mm/yr。

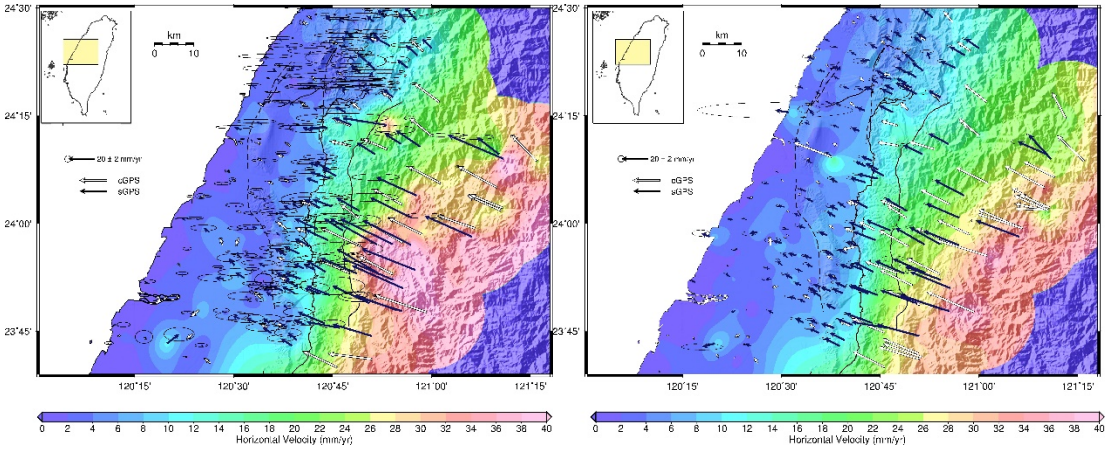



圖 2-4.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，上圖表示 2004-2013 年速度場，下圖表示震後 2013-2020 年速度場。

Figure 2-4.5: Central Taiwan areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The left figure is the velocity field from 2004-2013; while the right one is from 2013-2020.

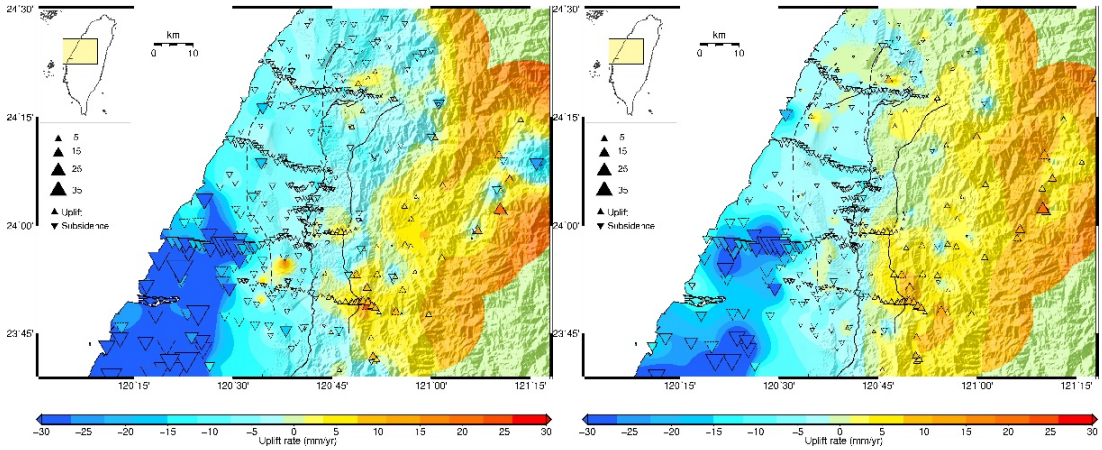



圖 2-4.6：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。左表示 2002-2013 年速度場，右表示 2013-2020 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.6: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Central Taiwan. The left figure is the velocity field from 2004-2013; while the right one is from 2013-2020. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

## 2-4-4 嘉南地區 GPS 觀測網

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 167 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，嘉南地區移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

嘉南地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.7 和圖 2-4.8，相對於 S01R 測站，嘉南地區的水平運動方向呈順時針旋轉，而越往嘉南平原其水平速度量值則越小。雲林沿海一帶沉降速度最大達到 30.0 mm/yr，推測與超抽地下水導致地層下陷有關，而嘉義地區在沿海一帶的垂直沉降速度也達到 15.0 至 20.0 mm/yr，進入嘉南地區的山區則有約 3.0 mm/yr 的抬升速度。台南地區之沿海亦呈現約 10.0 mm/yr 之平均沉陷速率，山區則有約 7.0 mm/yr 的平均抬升速率。善化-關廟地區之垂直速度約在 0.0 至 4.0 mm/yr 之間，在龍船斷層附近則約有 20.0 mm/yr 的抬升速度。

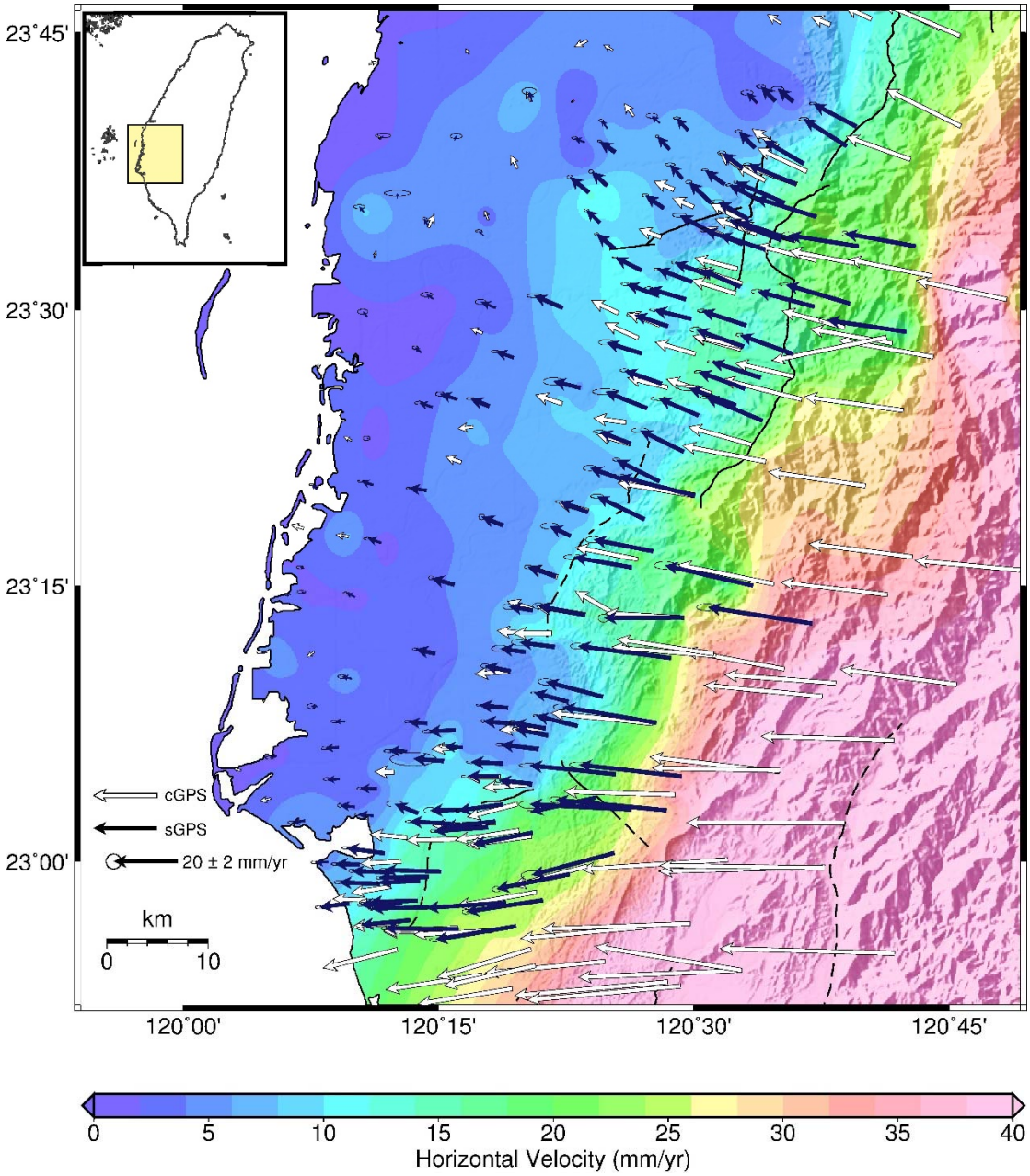



圖 2-4.7：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002-2020 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.7: Chiayi, Tainan areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002-2020.

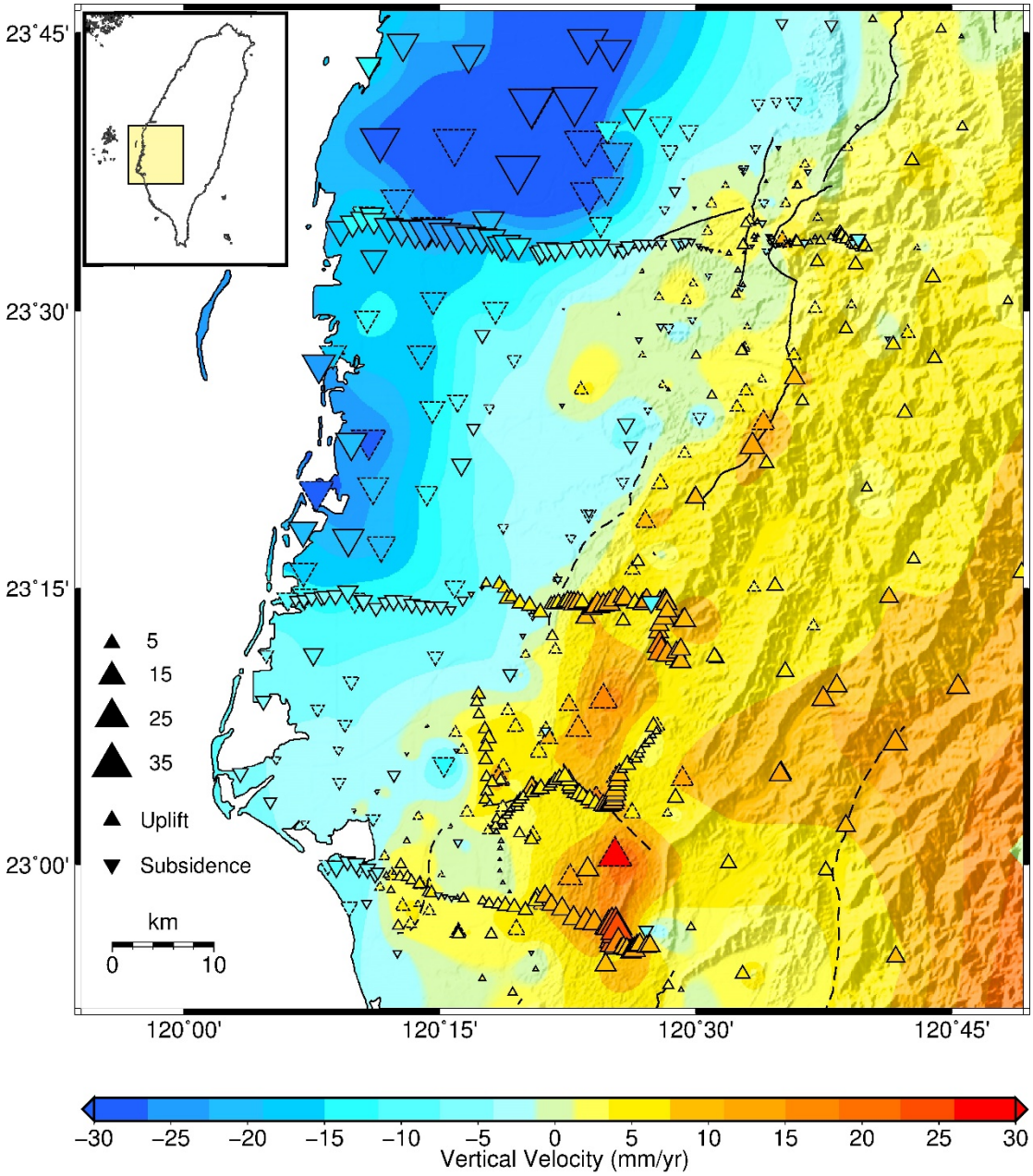



圖 2-4.8：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，圖表示 2002-2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.8: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Chiayi, Tainan areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

## 2-4-5 高屏地區 GPS 觀測網

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 103 點，以及 2 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。

高屏地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.9 和圖 2-4.10，因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震，本研究將速度場區分為 2002－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2020 年三個時間段分別估算速度場。高雄地區的車瓜林斷層周遭有 15.0 mm/yr 的抬升速度，小崗山斷層西側有約 10.0 mm/yr 的沉降速率，東側之沉降速率則降至 0.0 至 3.0 mm/yr。

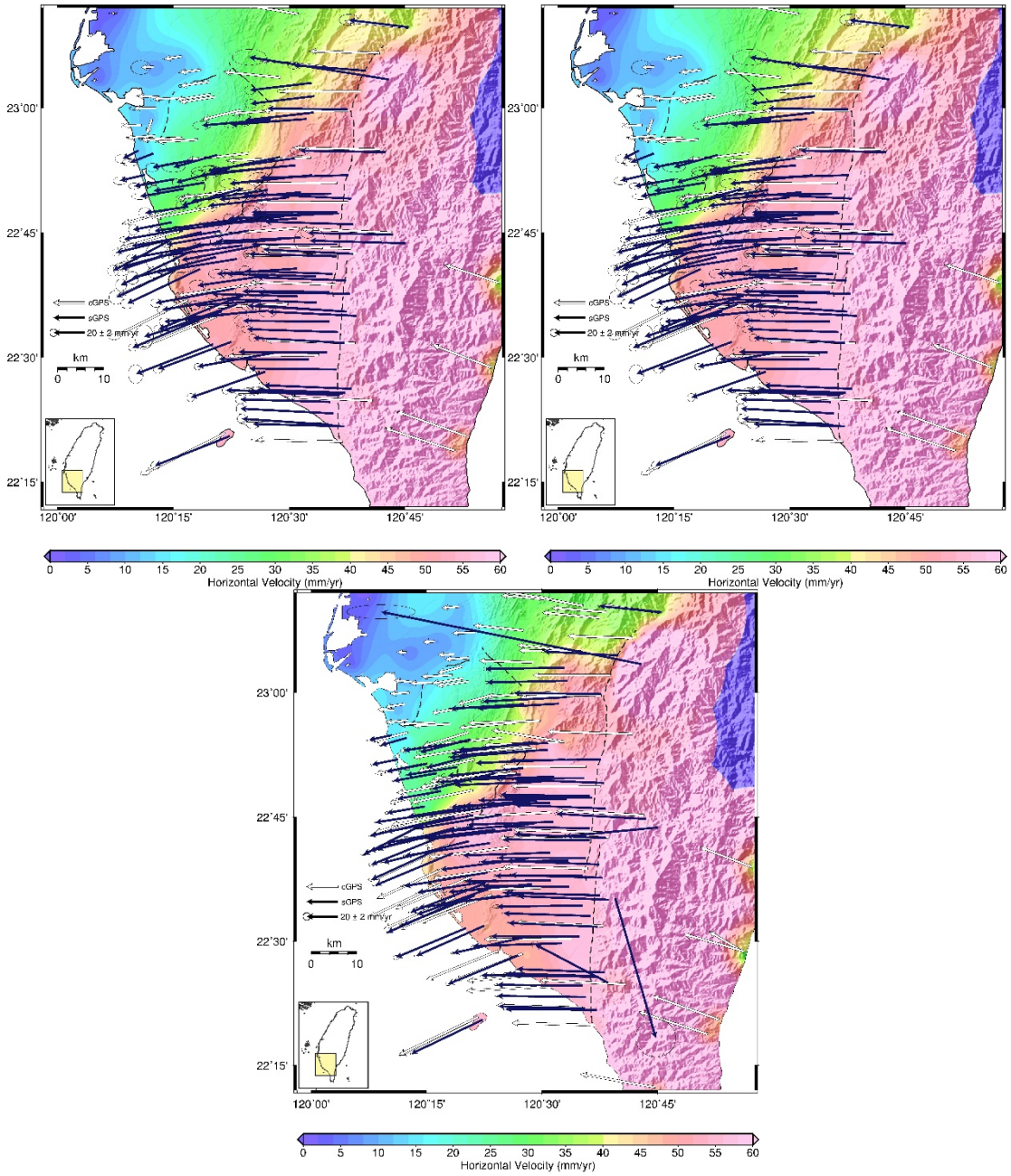



圖 2-4.9：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2020 年速度場。

Figure 2-4.9: Kaohsiung and Pingtung areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The left figure is the velocity field from 2002-2010; while the right one is from 2010-2016; The down figure is the velocity field from 2016-2020.

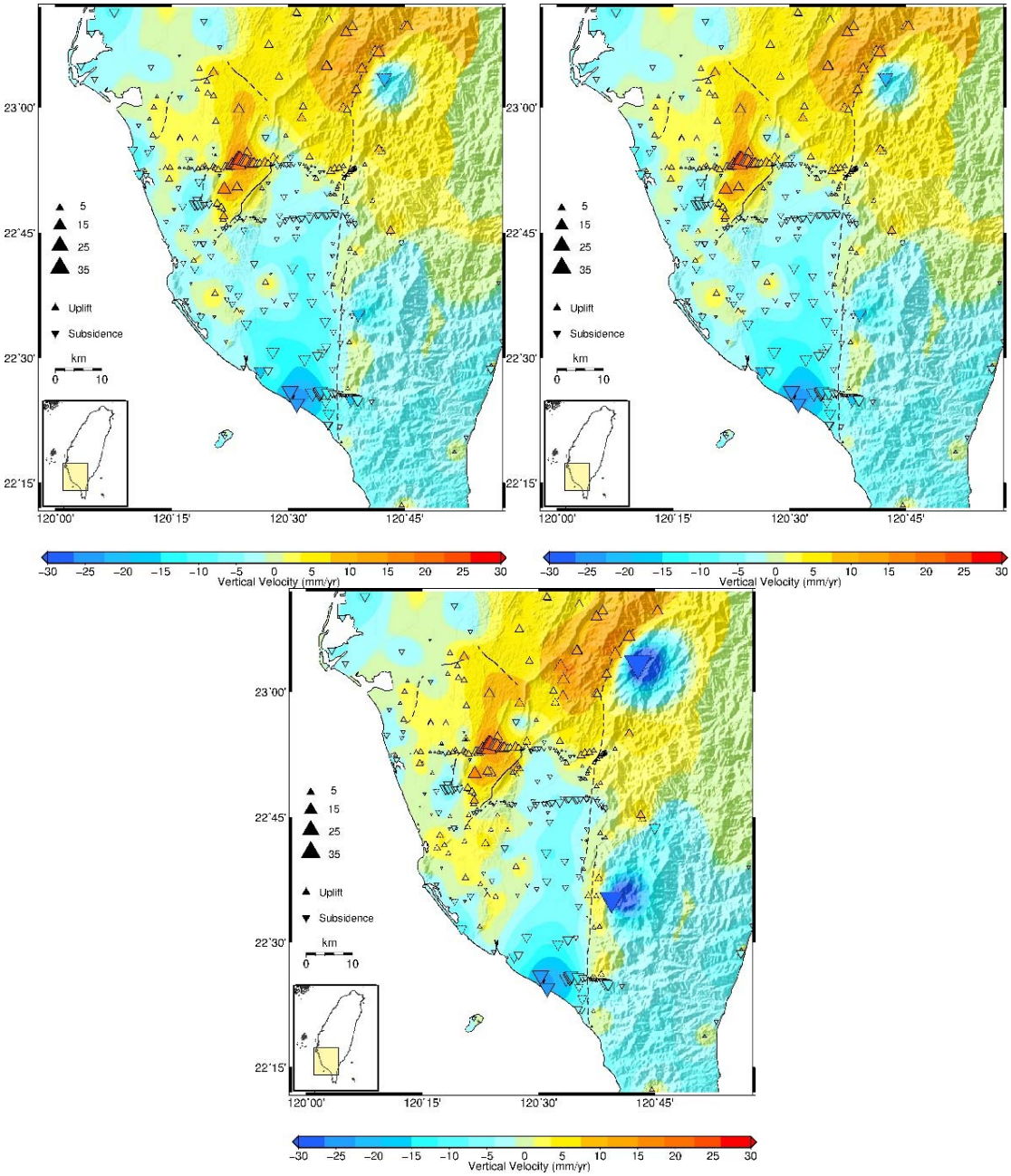



圖 2-4.10：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.10: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (Left figure) and 2010-2016 (Right figure) and 2016-2020 (Down figure) in Kaohsiung and Pingtung areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

## 2-4-6 恆春地區 GPS 觀測網

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 37 點，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，恆春地區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。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。

恆春地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.11，相對於 S01R 測站，屏東外海地震前 2002－2006 年速度場，速度量值 50.5 ~ 55.6 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年中的速度場，速度量值 48.6~54.3 mm/yr， 2011 年中至 2016 年之速度場，速度量值 46.7~50.9 mm/yr，2017 年之後之速度場，速度量值 45.0～50.0 mm/yr。大部份 GPS 移動站呈現向西運動，但在鵝鑾鼻地區及牡丹鄉西部附近之六個測站時間序列在 2017 年始有明顯跳動情況，從其中一個測站 G643 的時間序列如圖 2-4.12 進行分析，推測此現象是因為儀器誤差亦或是局部運動方向不同所導致，但仍須更長期的監測來得到結論。

恆春地區各觀測點位之垂直速度場如圖 2-4.13，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 2.4 mm/yr，2011 年至今的平均速率約為-0.4 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-10.9 mm/yr，2011 年至今的平均速率約為-0.7 mm/yr，此現象或許可說明在 2006 年震後至 2020 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象。

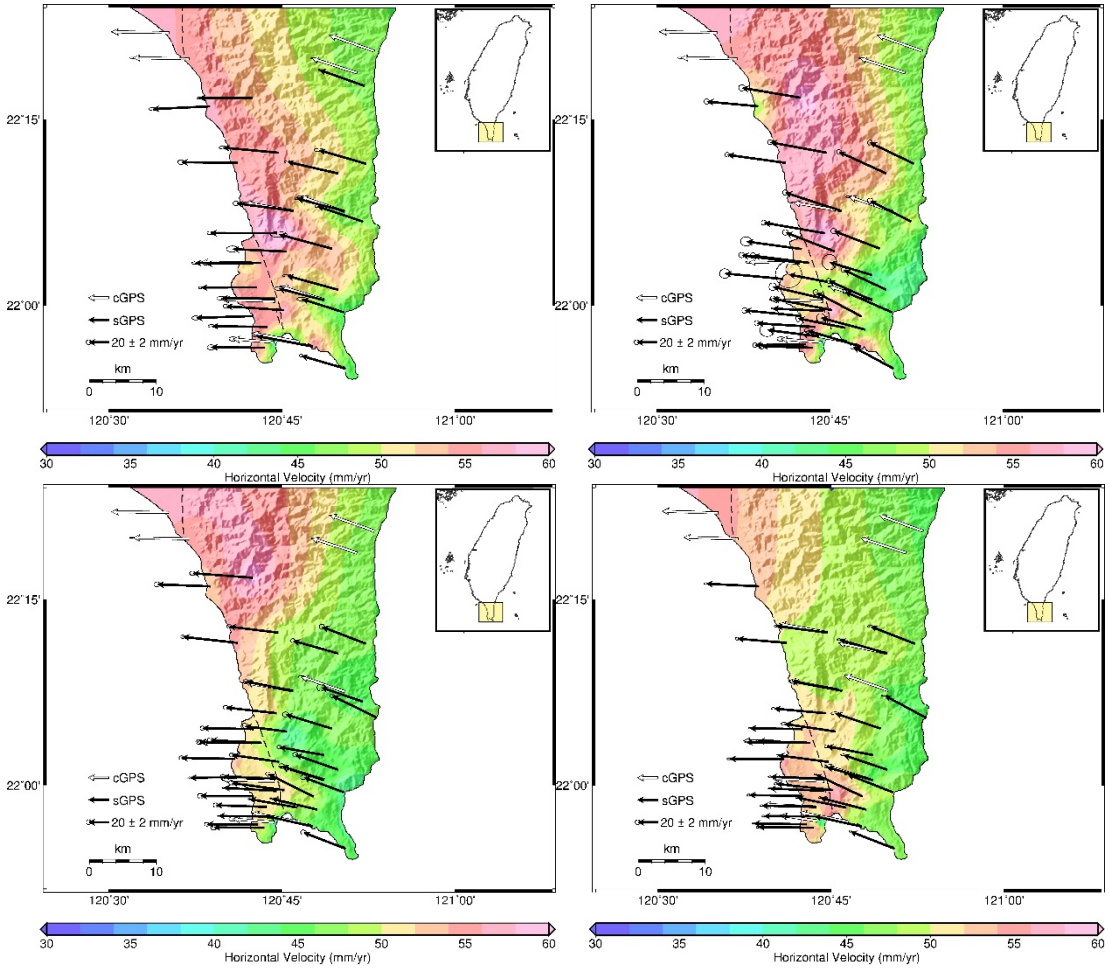



圖 2-4.11：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002-2006 年速度場，右上表示震後 2006-2010 年速度場，左下表示震後 2011-2016 年速度場，右下為 2017-2020 年速度場。

Figure 2-4.11: Hengchun GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top left figure is the velocity field from 2002~2006 before the Pingtung offshore earthquake; the top right one is from 2006-2010 after the earthquake; the bottom left is from 2010-2015; the bottom right is from 2015-2020.

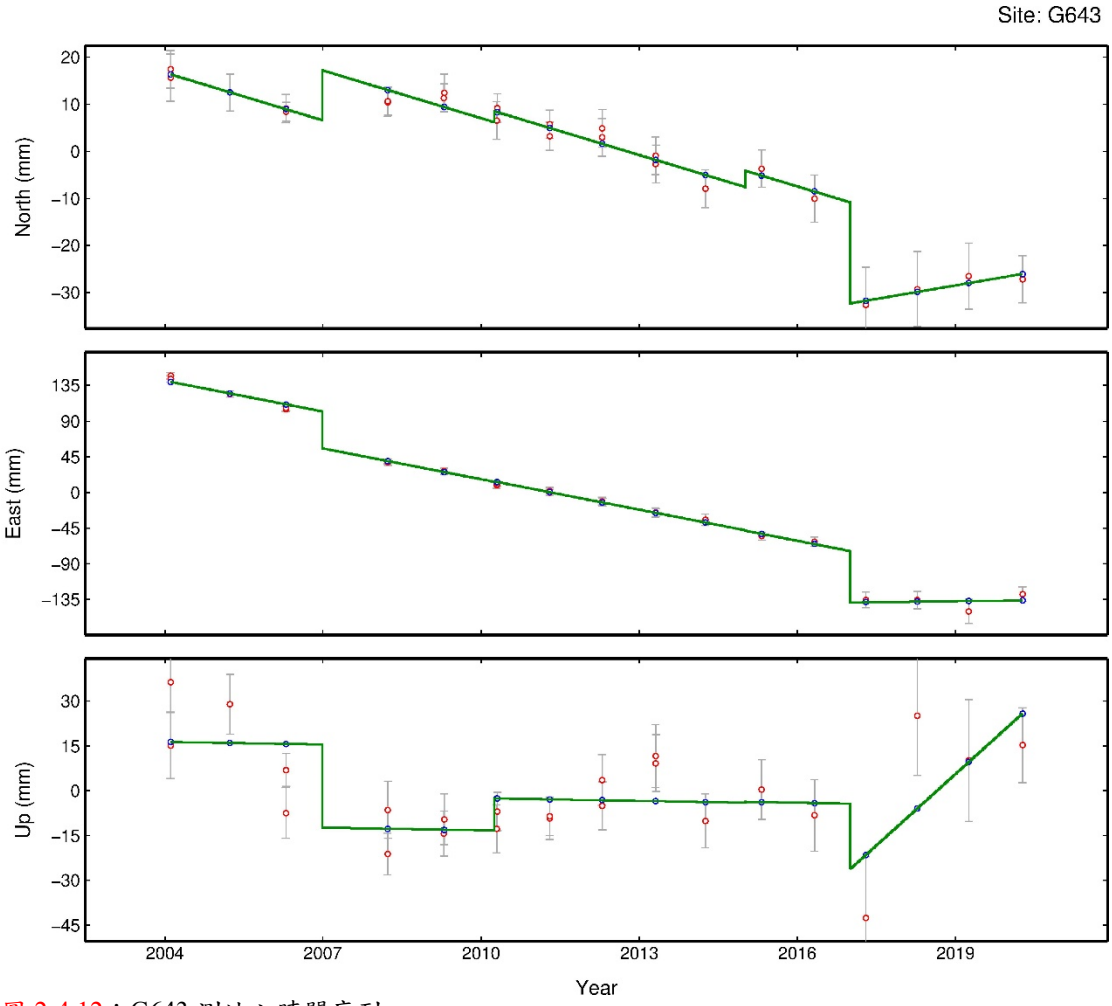



圖 2-4.12：G643 測站之時間序列。

Figure 2-4.12: Time series of GPS campaign station G643.

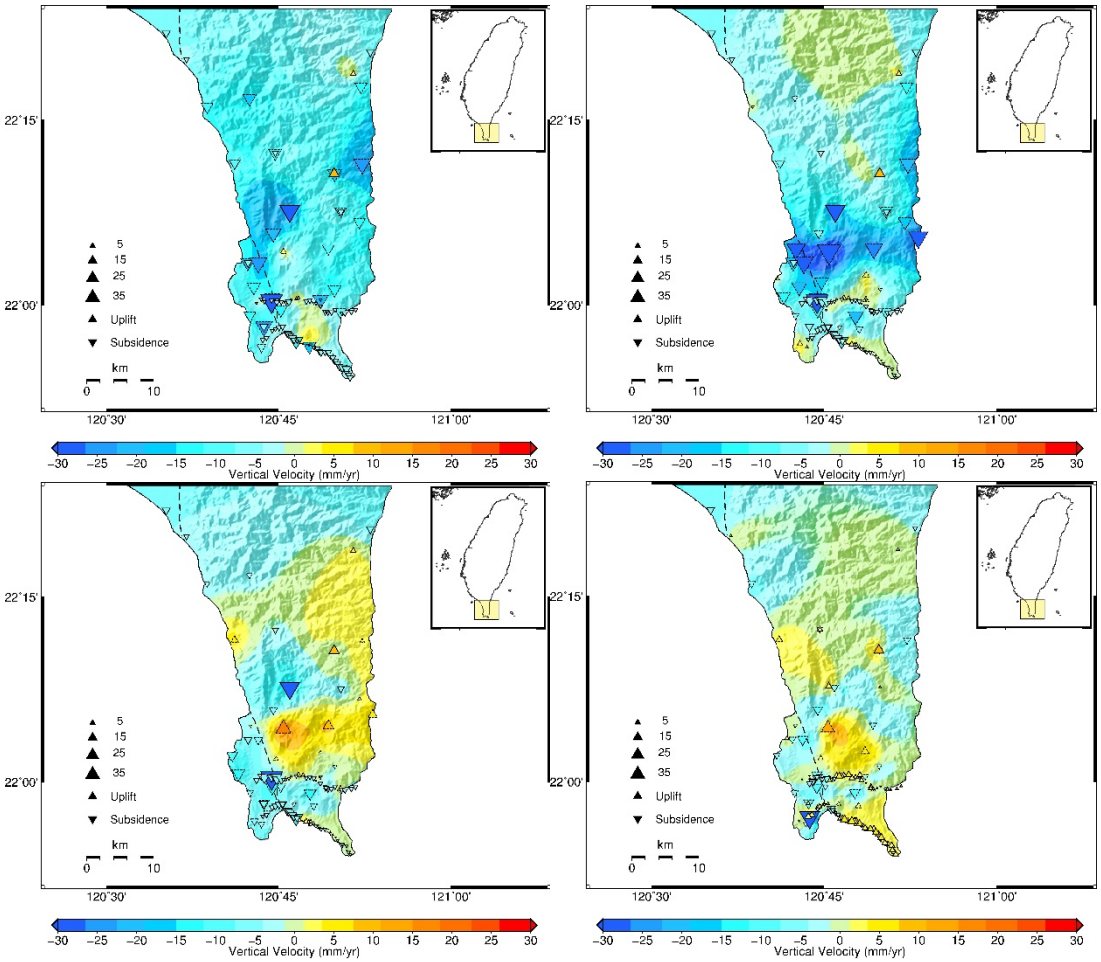



圖 2-4.13：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002-2020 年之 GPS 垂直方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002-2006 年速度場，右上表示震後 2006-2010 年速度場，左下表示震後 2011-2016 年速度場，右下為 2017-2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.13: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2020 in Hengchun area. The top left figure is the velocity field from 2002-2006 before the Pingtung offshore earthquake; the top right one is from 2006-2010 after the earthquake; the bottom left is from 2011~2016; the bottom right is from 2017-2020. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

## 2-4-7 東部地區 GPS 觀測網

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 102 點以及 4 條精密水準測線，花東地區移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

花東地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.14 和圖 2-4.15，花東地區的水平速度相對於 S01R 測站，大致呈現往西北 50 ~ 80 mm/yr 速度運動，在池上斷層東西側也有約 10 mm/yr 的水速度落差。從垂直方向的速度場可觀察到跨池上斷層的兩側有不同的運動方向，東側約有 10mm/yr 的抬升速度，而西側約有 10 mm/yr 的沉降速度。

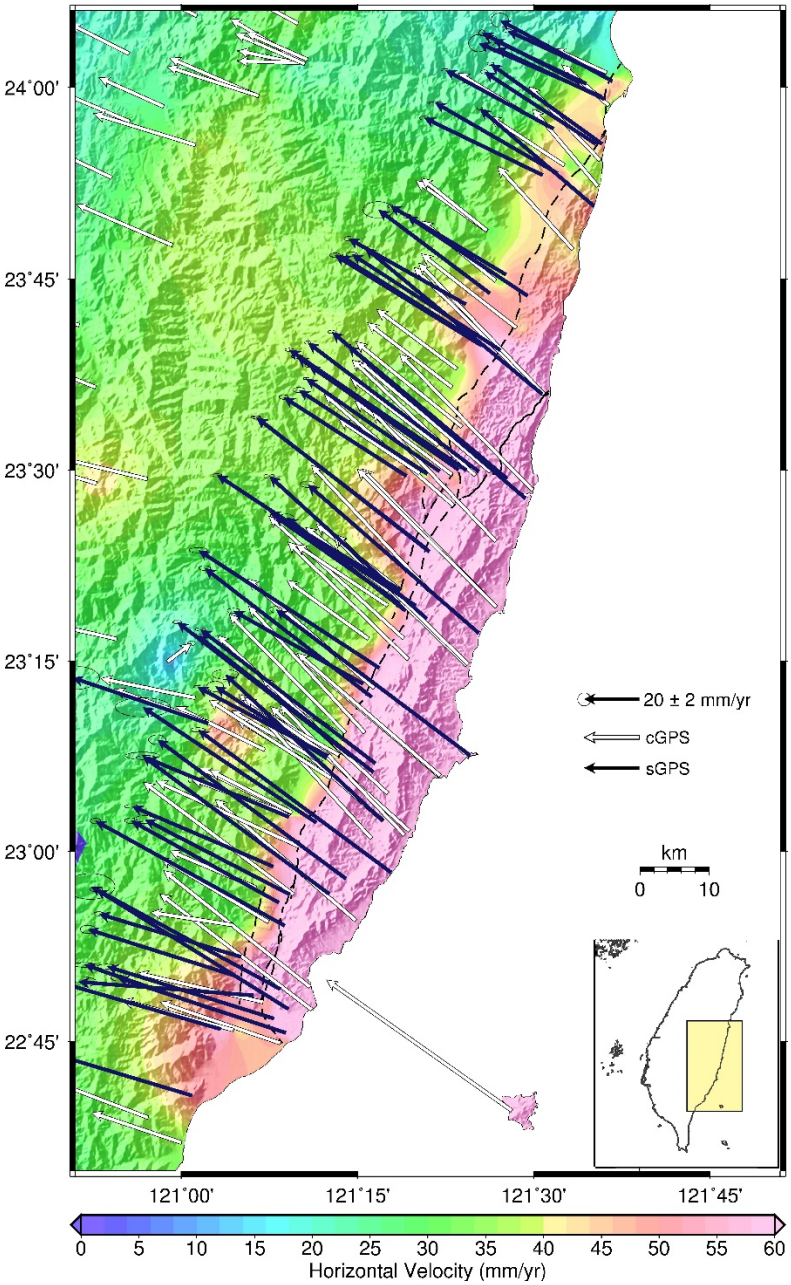



圖 2-4.14：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2020 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.14: Eastern areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002~2020

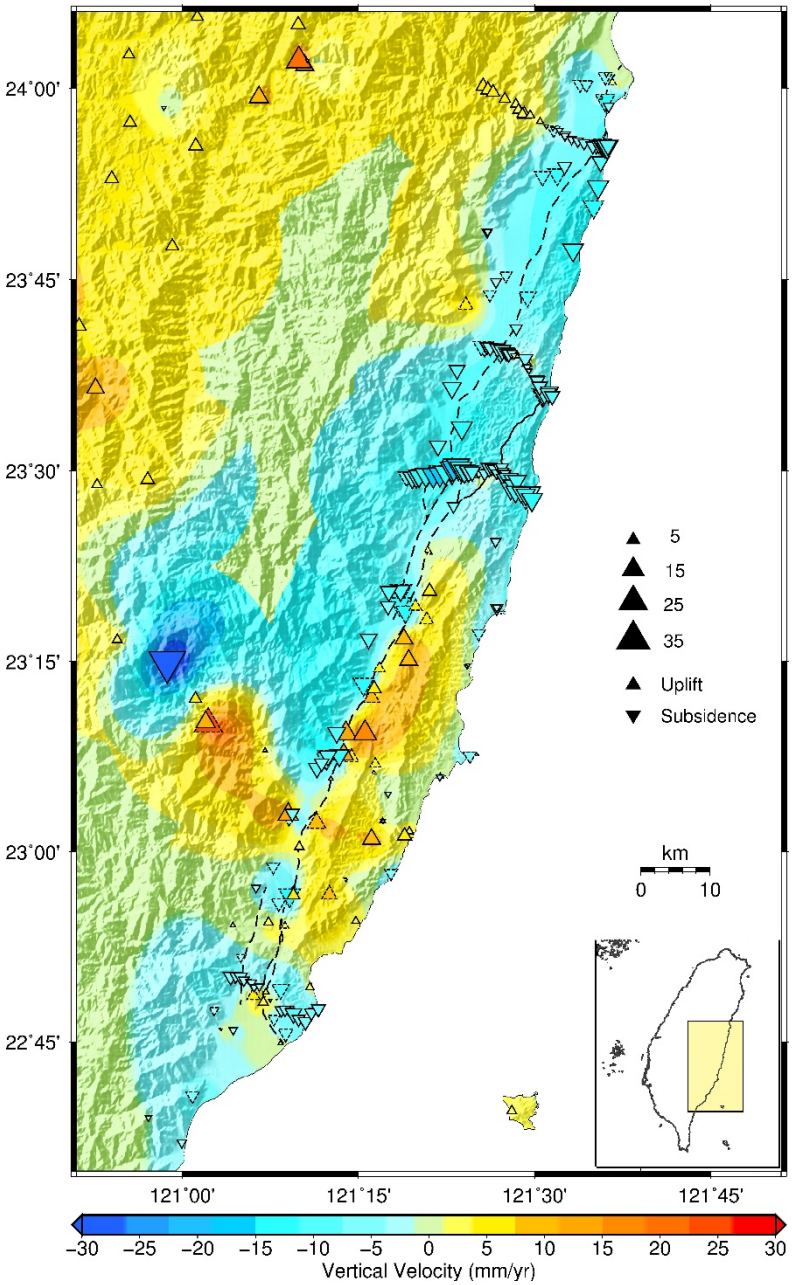



圖 2-4.15：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，圖表示 2002~2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.15: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Eastern areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

## 2-4-8 宜蘭地區 GPS 觀測網

本節針對今年已完成測量之宜蘭地區觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 28 點以及 1 條精密水準測線，宜蘭地區移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

宜蘭地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.16，2004 至 2020 年速度量值 4.5 ~ 33.5 mm/yr 。

垂直速度場如圖 2-4.17，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 0.5 ~ 26.8 mm/yr。

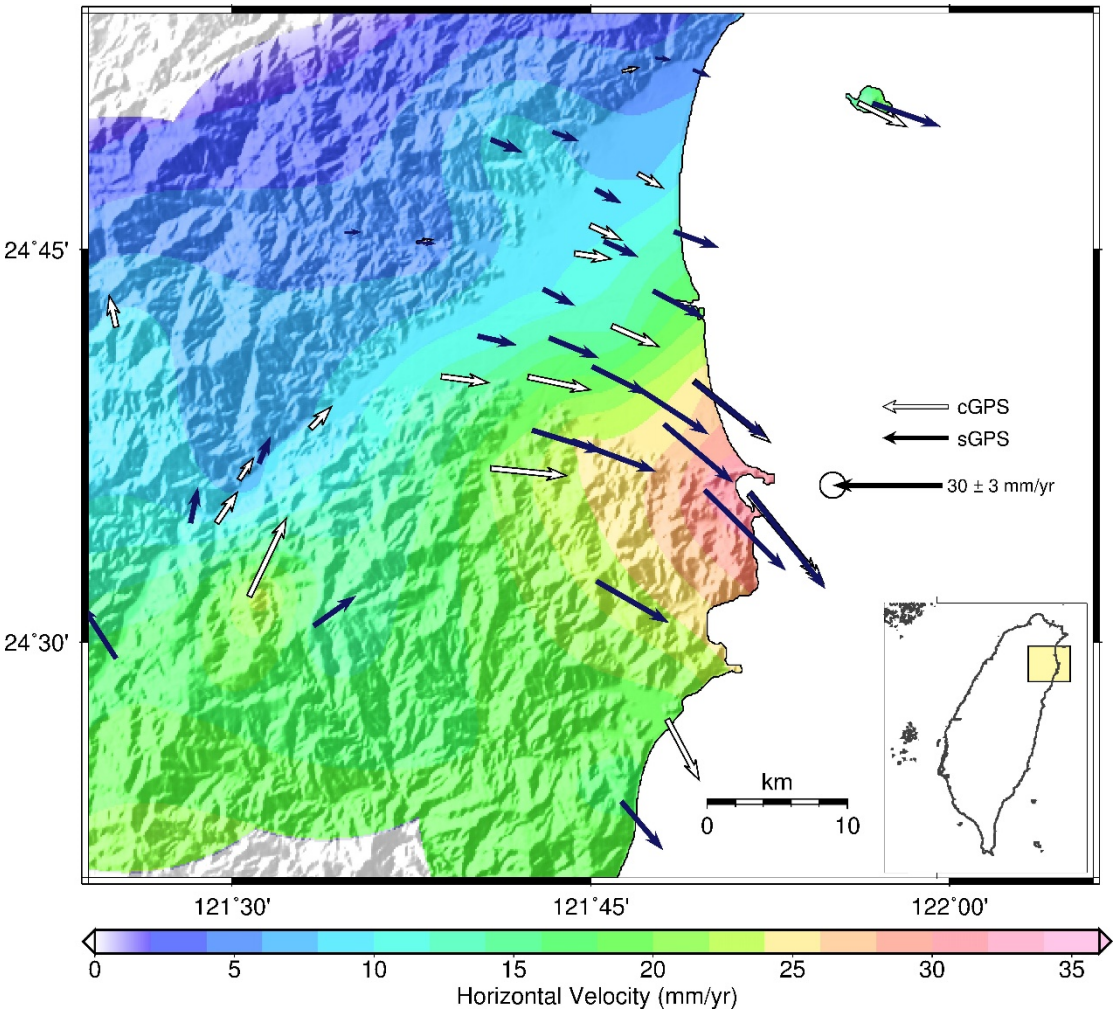



圖 2-4.16：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。
Figure 2-4.16: Yilan areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station.

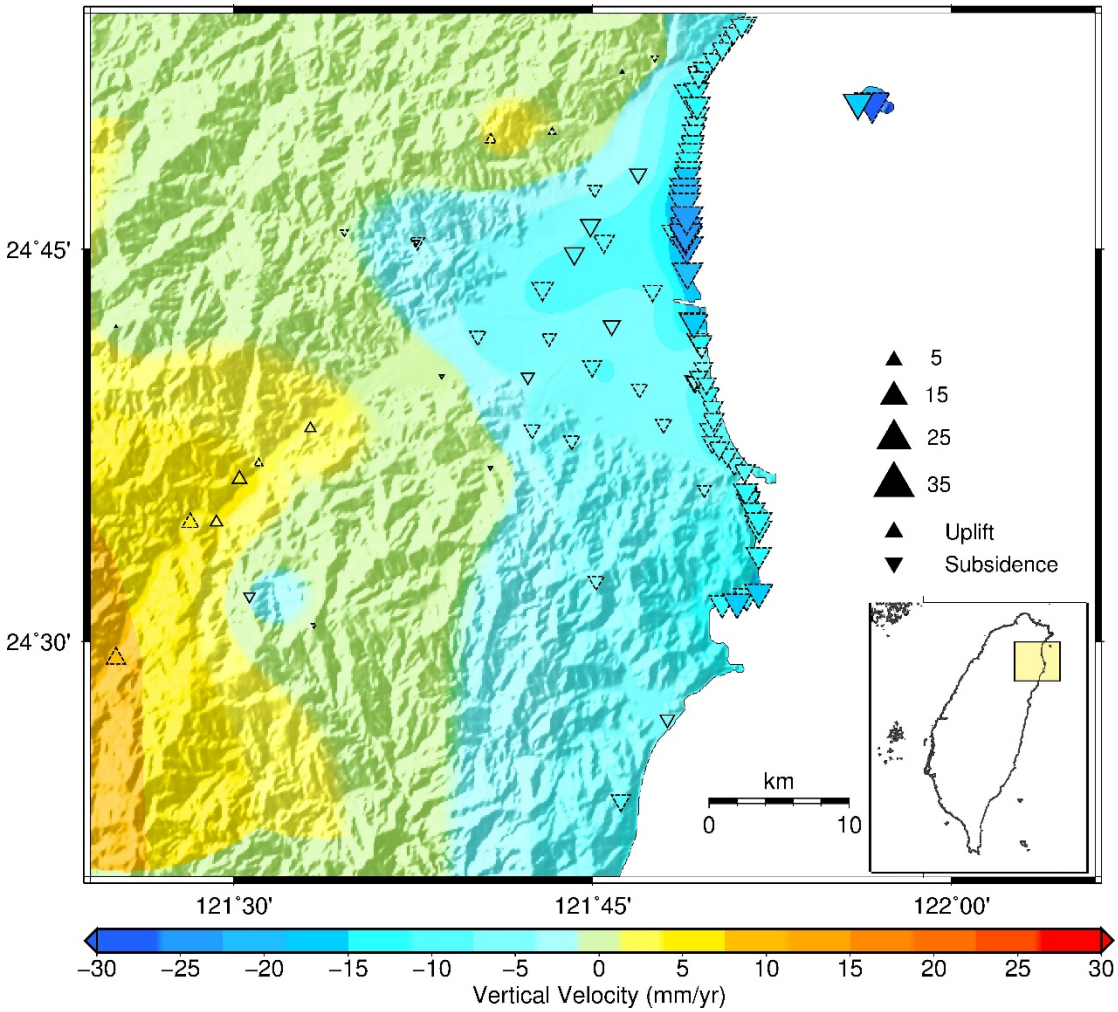



圖 2-4.17：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.17: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Yilan areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

## 2-5 全臺地表速度場

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，分為七個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-5.1 及圖 2-5.2。

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，整體區域的速度值約為 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。

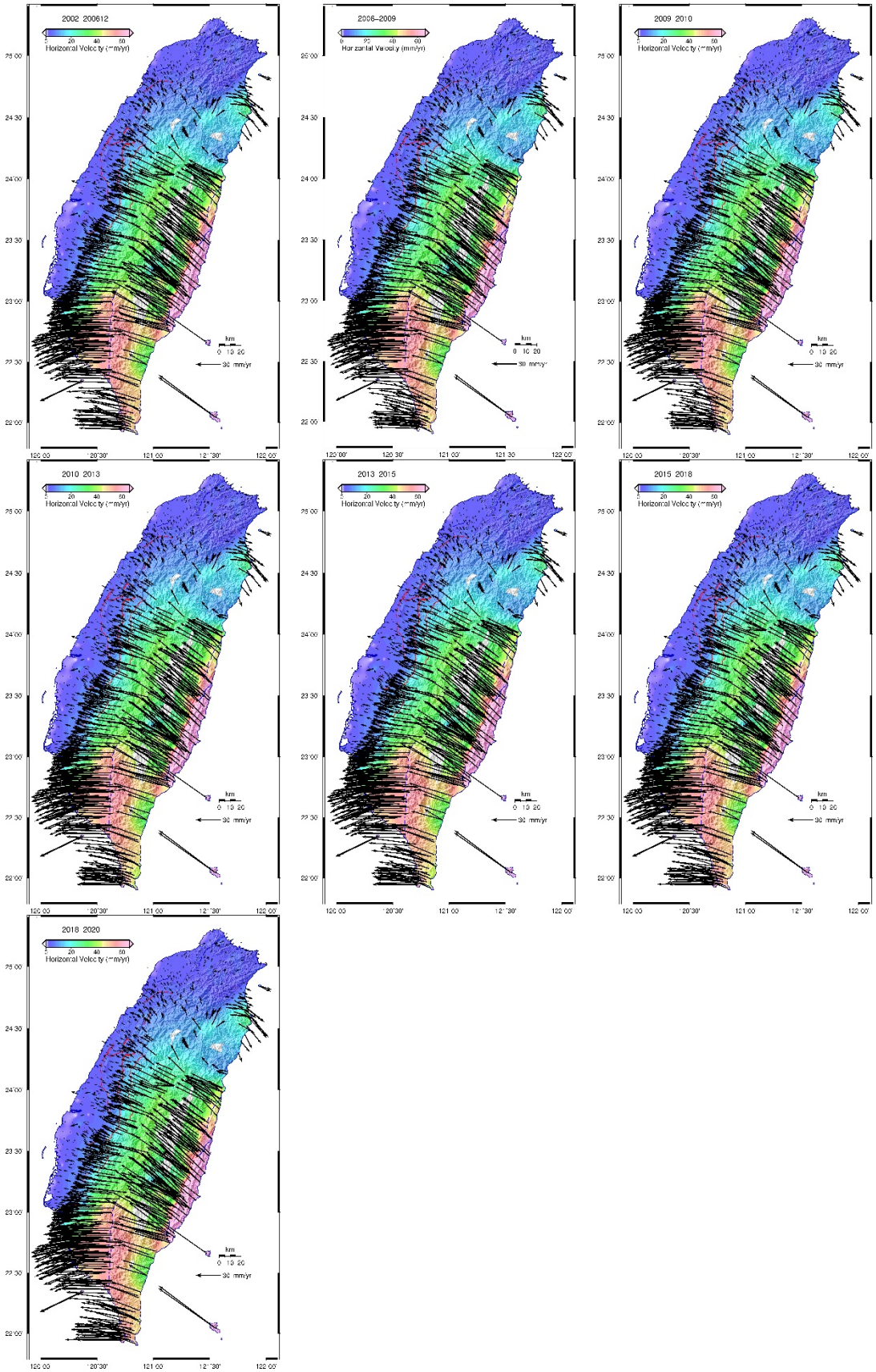



圖 2-5.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。

Figure 2-5.1: Taiwan horizontal velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station.

根據圖 2-5.2，大臺北地區皆為穩定沉陷，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。新竹地區垂直速度約-5 至 0 mm/yr。苗栗地區速度皆約在-5 mm/yr 上下。台中地區之垂直速度約-5 至 0 mm/yr。彰化、南投地區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，而高雄地區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，在小崗山斷層西側約有-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來協助解析。屏東地區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 2015 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。花蓮地區之垂直速度，由西向東一路遞減，約由 5 mm/yr 降至-10 mm/yr，但在跨瑞穗斷層後由約由-10 mm/yr 升至-1 mm/yr。台東地區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）。

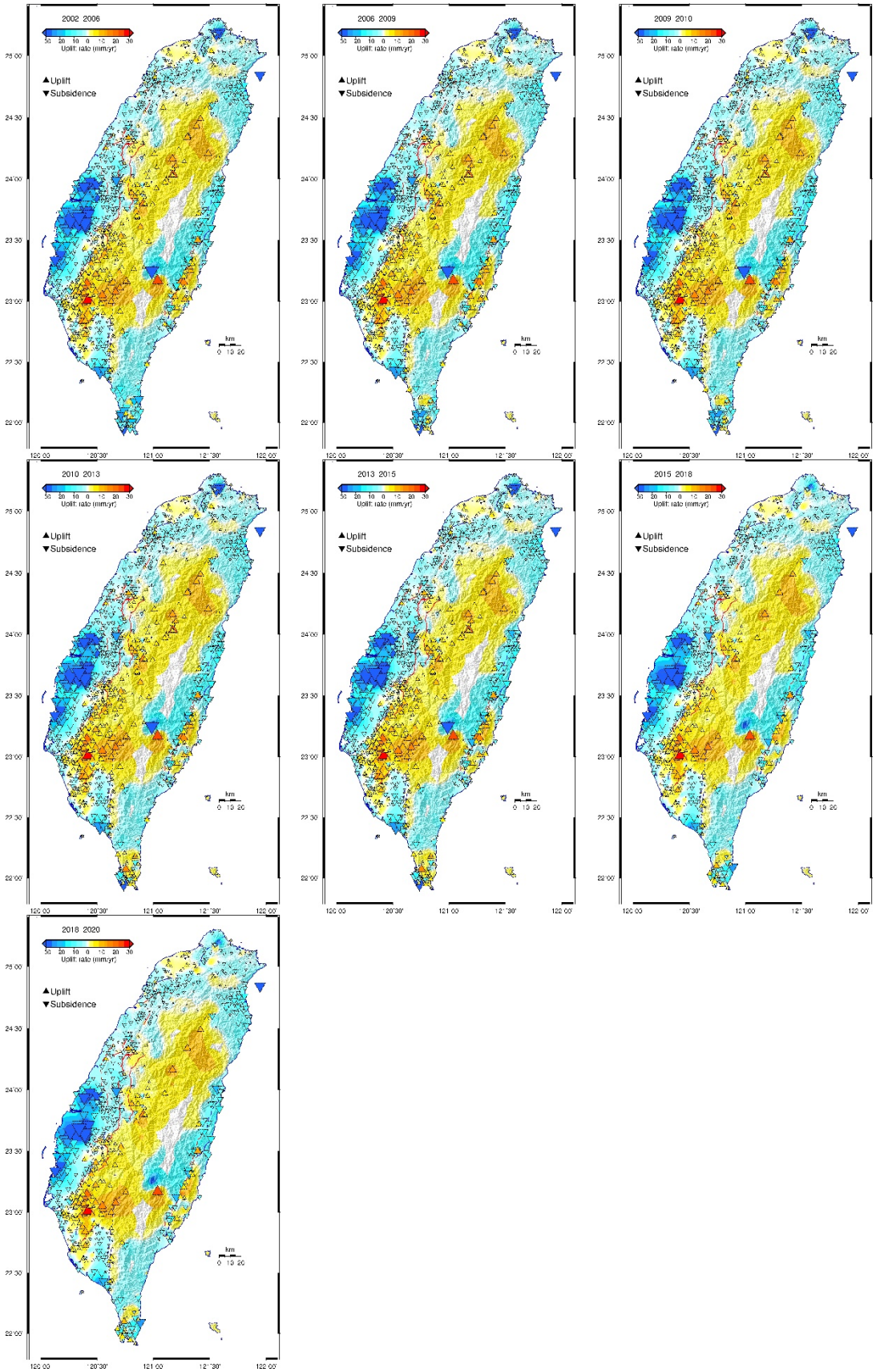



圖 2-5.2：2002 年至 2020 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降。

Figure 2-5.2: Vertical velocities relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taiwan from 2002 to 2020.

# 第三章、雷達影像分析

本計畫彙整臺灣地區，由 ERS-1/2（European Remote Sensing Satellite）、ENVISAT（Environmental Satellite）、ALOS（Advanced Land Observing Satellite）以及 Sentinel-1 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-1 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 ERS-1/2、ENVISAT 及 ALOS 三種衛星所拍攝的 SAR 影像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，並用利用 StaMPS 軟體進行 PS-InSAR 流程解算。而 Sentinel-1 衛星 SAR 影像因為有良好的軌道控制，為了減少雜訊的干擾，則使用時間基線小基線方法作為影像配對方式，使所有影像間時間間隔包括 12、24、36、48、72、96、192、288、384 天，將影像製作出干涉條紋圖，以獲得最佳干涉結果，再利用與 GPS 相同方式，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其衛星、波段及時間區間請詳見表 3-1.1：

表 3-1.1：雷達影像其衛星、波段及時間區間
Table 3-1.1: Satellites, bands and time of radar Images.

| | 波段 | 中部地區 | 北部地區 | 南部地區 | 東部地區 |
|---|---|---|---|---|---|
| ERS-1/2 | C | 1996/1~1999/7 | 1996/1~1999/7 | 1995/4~1999/9 | 1995/06~1999/09 |
| ENVISAT | C | 2007/6~2008/6 | 2004/3~2008/6 | 2004/6~2008/9 | 2006/03~2009/06 |
| ALOS | L | 2006/12~2011/2 | 2007/1~2011/3 | 2007/1~2011/3 | 2007/01~2010/12 |
| Sentinel-1A | C | 2015/3~2016/2 | 2015/4~2018/8 | 2015/4~2019/9 | 2015/04~2020/10 |
| Sentinel-1B | C | | | | 2018/02~2020/10 |

# 3-1 中部地區

## 3-1-1 PS-InSAR 成果資料分析

### 3-1-1-1 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，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。

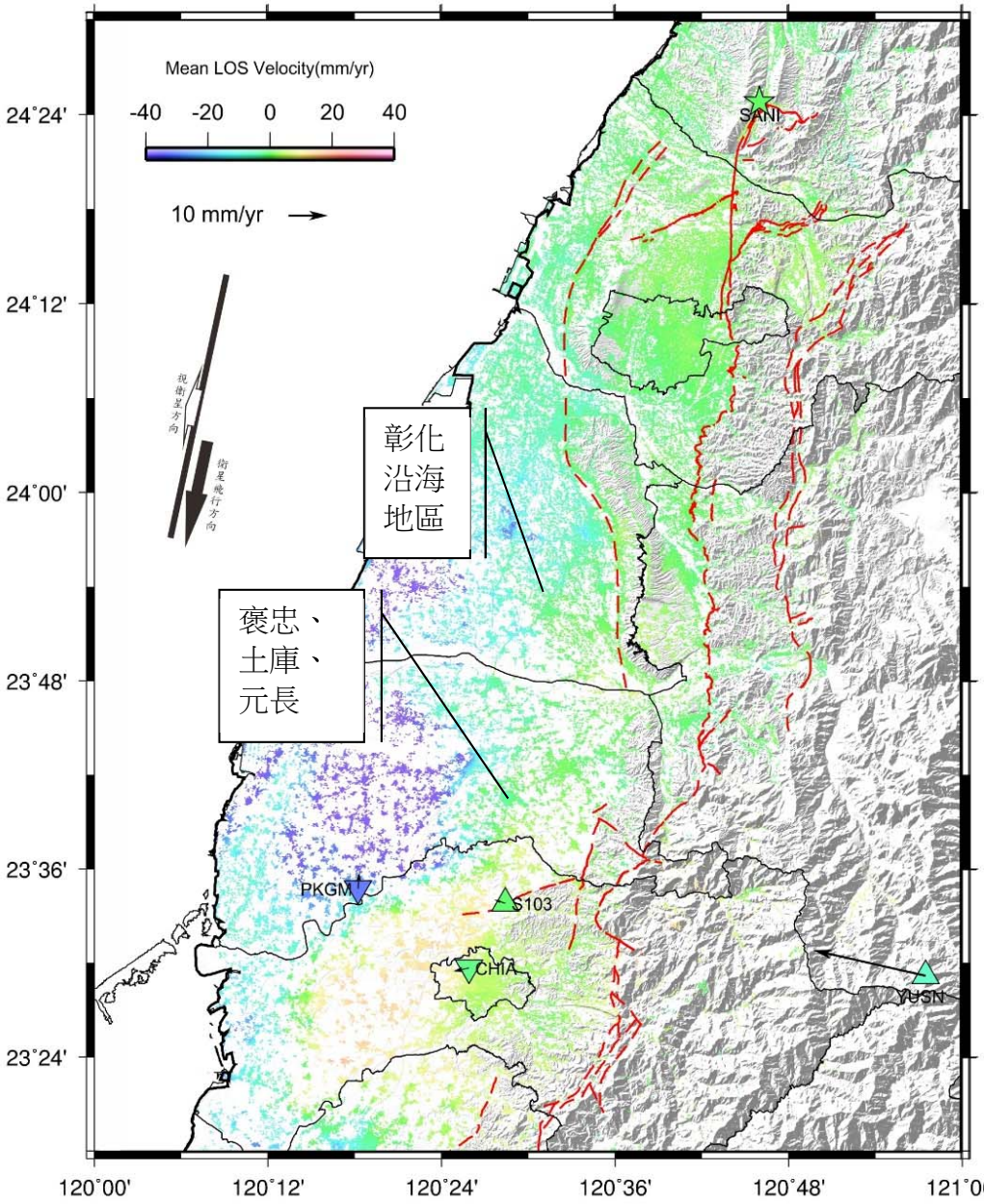



圖 3-1.1：ERS（1996/1-1999/7）衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 SANI，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.1: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ERS (1996/1-1999/7) (Track=232, Frames=3123). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station SANI. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-1-1-2 ENVISAT（2007/6-2008/6）

圖 3-1.2 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。

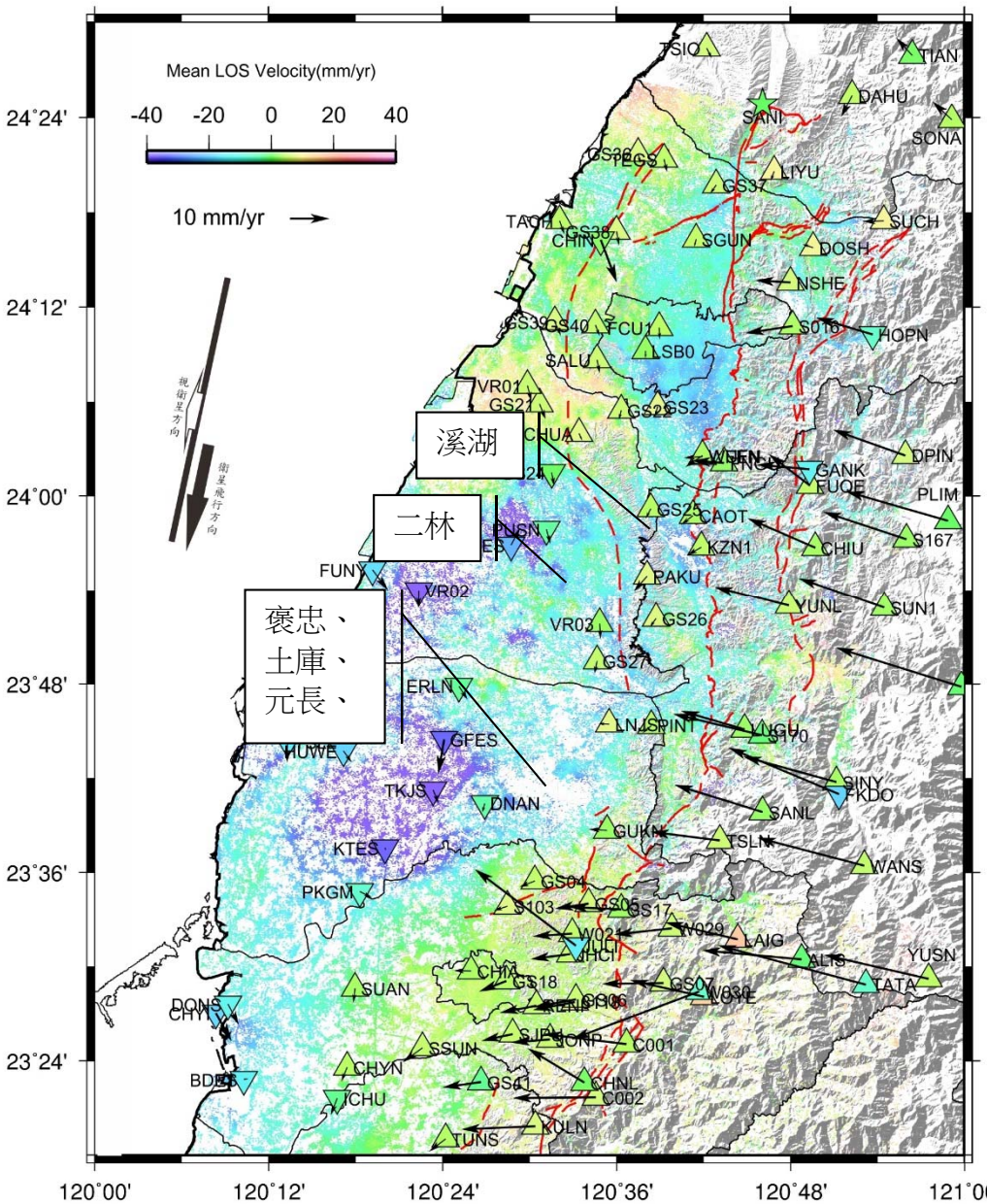



圖 3-1.2：ENVISAT（2007/6-2008/6）衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 SANI，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.2: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT (2007/6-2008/6) (Track=232, Frames=3123). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station SANI. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-1-1-3 ALOS（2006/12-2011/2）

圖 3-1.3 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。

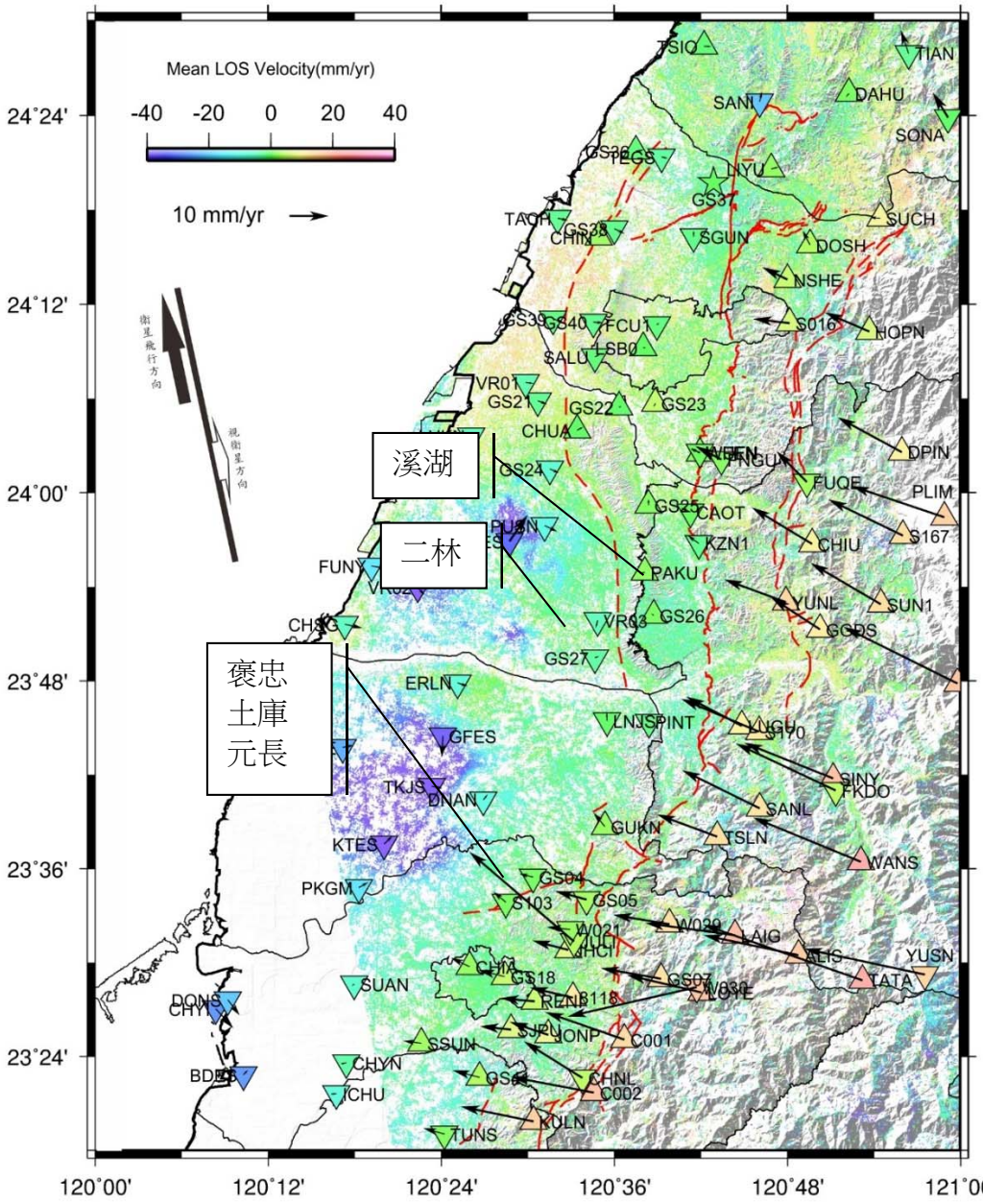



圖 3-1.3：ALOS（2006/12-2011/2）衛星軌道 446，像幅編號 460 & 470，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 GS37，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.3: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ALOS (2006/12-2011/2) (Track=446, Frames=460&470). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station GS37. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-1-1-4 Sentinel-1A（2015/3-2016/2）

圖 3-1.4 即為 Sentinel-1A 衛星影像在此期間（2015/3-2016/2）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。目前 Sentinel-1A 影像資料已經累積有三年左右，預計下年度將能呈現較長時間段之速率分析，以了解現今構造活動趨勢。

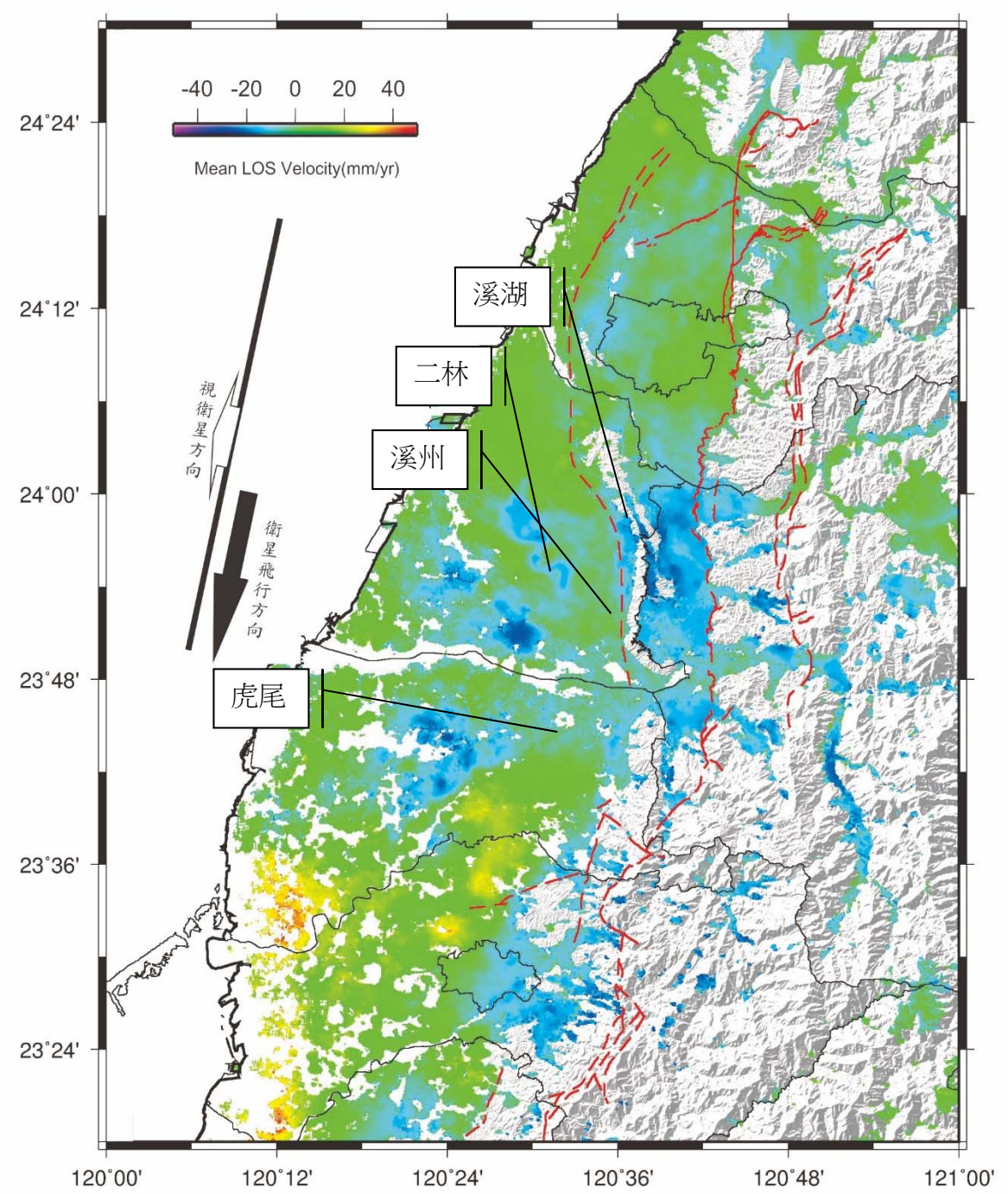



圖 3-1.4：Sentinel-1A 降軌影像（2015/3-2016/2）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。

Figure 3-1.4: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1A descending images (2015/3-2016/2). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and eastward motion while elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence and westward mtion.

## 3-1-2 PS-InSAR 技術時間序列分析

圖 3-1.5 為使用第三階段計畫總結報告書蒐集各學者所繪製之地質剖面位置做為參考，針對中部地區斷層選點位進行 PS-InSAR 技術時間序列分析。

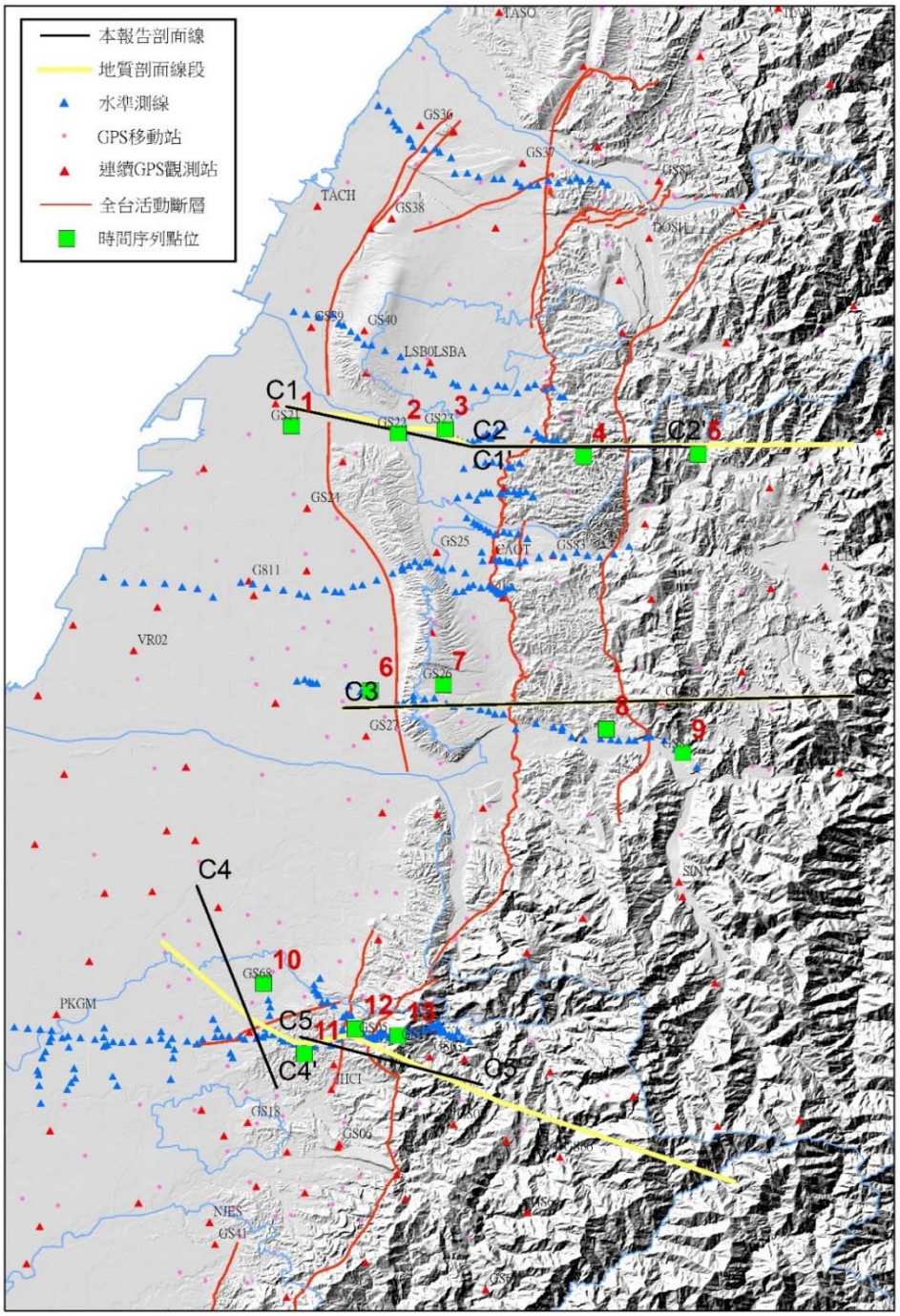



圖 3-1.5：中部地區使用之 PS-InSAR 時間序列點位圖。
Figure 3-1.5: PS-InSAR time series points used in central Taiwan.

## 3-1-2-1 彰化斷層（C1、C3）、車籠埔斷層（C2、C3）、大茅埔-雙冬斷層（C2、C3）

C1 剖面跨越彰化斷層，根據圖 3-1.6 衛星影像時間序列分析來看，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。

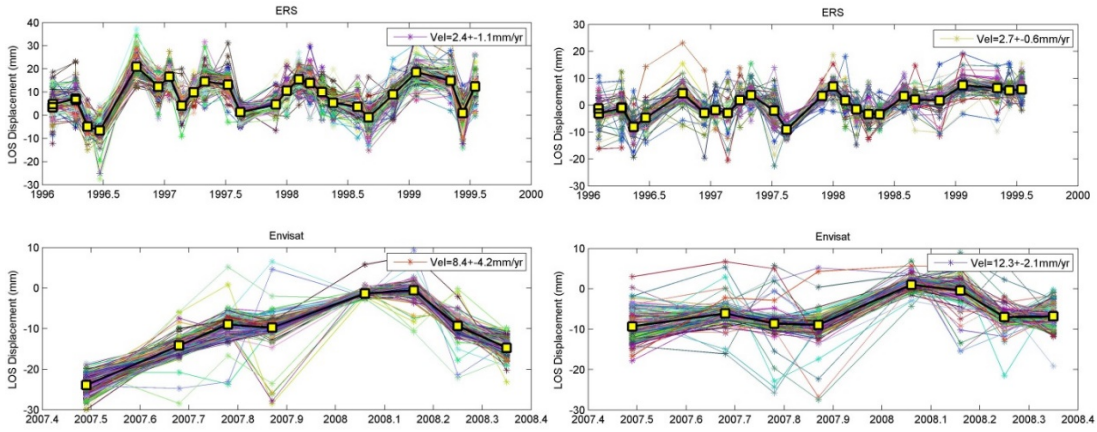



圖 3-1.6：C1 剖面 PS-InSAR 時間序列，（左）彰化斷層西側；（右）彰化斷層東側。（位置如圖 3-1.5 綠色方框 1~2）

Figure 3-1.6: PS-InSAR time series of profile C1, (left) west side of Changhua fault; (right) east side of Changhua fault. (The locations are shown in Figure 3-1.5 with green boxes 1~2)

C2 剖面跨越車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，圖 3-1.7 ENVISAT 時間序列速率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。

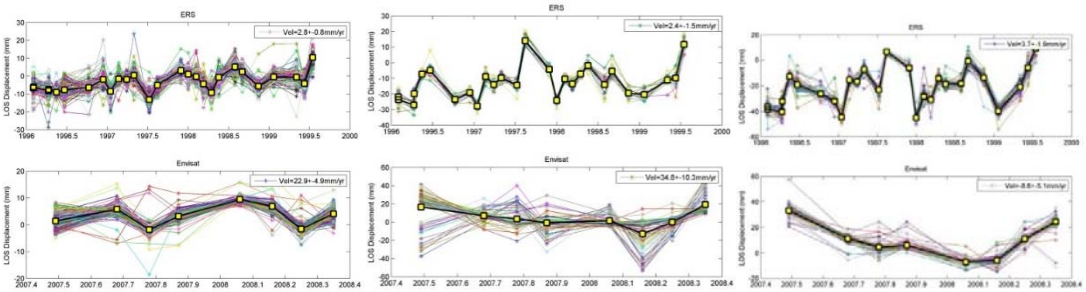


圖 3-1.7：C2 剖面 PS-InSAR 時間序列，（左）車籠埔斷層西側；（中）車籠埔斷層東側與大茅埔-雙冬斷層西側；（右）大茅埔-雙冬斷層東側。（位置如圖 3-1.5 綠色方框 3~5）

Figure 3-1.7: PS-InSAR time series of profile C2, (left) west side of Chelungpu fault; (middle) east side of Chelungpu fault and west side of Tamaopu-Shuangtung fault; (right) east side of Tamaopu-Shuangtung fault. (The locations are shown in Figure 3-1.5 with the green boxes 3~5)

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 3-1.8 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。

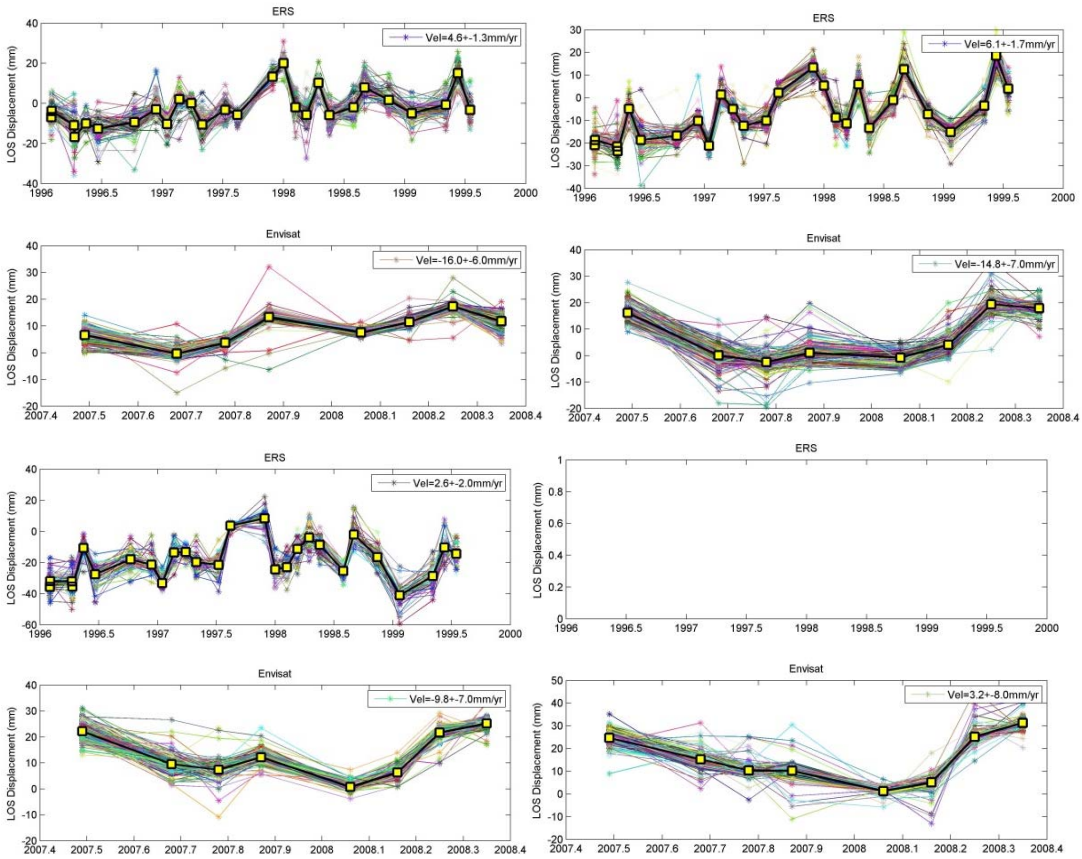



圖 3-1.8：C3 剖面 PS-InSAR 時間序列，（左上）彰化斷層西側；（右上）彰化斷層東側與南段車籠埔斷層西側；（左下）南段車籠埔斷層東側與大茅埔-雙冬斷層西側；（右下）大茅埔-雙冬斷層東側。（位置如圖 3-1.5 綠色方框 6~9）

Figure 3-1.8: PS-InSAR time series of profile C3, (top left) west side of Changhua fault; (top right) east side of Changhua fault and west side of Chelongpu fault in south profile; (bottom left) east side of Chelungpu fault in south profile and west side of Tamaopu-Shuangtung fault; (lower right) east side of Tamaopu-Shuangtung fault. (The locations are shown in Figure 3-1.5 with the green boxes 6~9)

## 3-1-2-2 梅山斷層（C4）

C4 剖面跨越梅山斷層，根據圖 3-1.9 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。

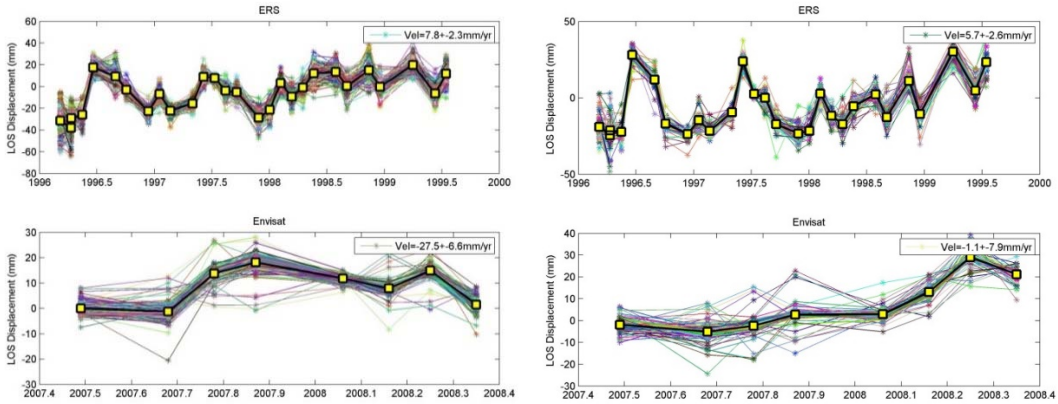



圖 3-1.9：C4 剖面 PS-InSAR 時間序列，（左）梅山斷層北側；（右）梅山斷層南側與九芎坑斷層西側。（位置如圖 3-1.5 綠色方框 10~11）

Figure 3-1.9: PS-InSAR time series of profile C4, (left) north side of Meishan fault; (right) south side of Meishan fault and west side of Chiuchiungkeng fault. (The locations are shown in Figure 3-1.5 with the green boxes 10~11)

## 3-1-2-3 九芎坑斷層（C5）、大尖山斷層（C5）

C5 剖面跨越九芎坑斷層及大尖山斷層，根據圖 3-1.10，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。

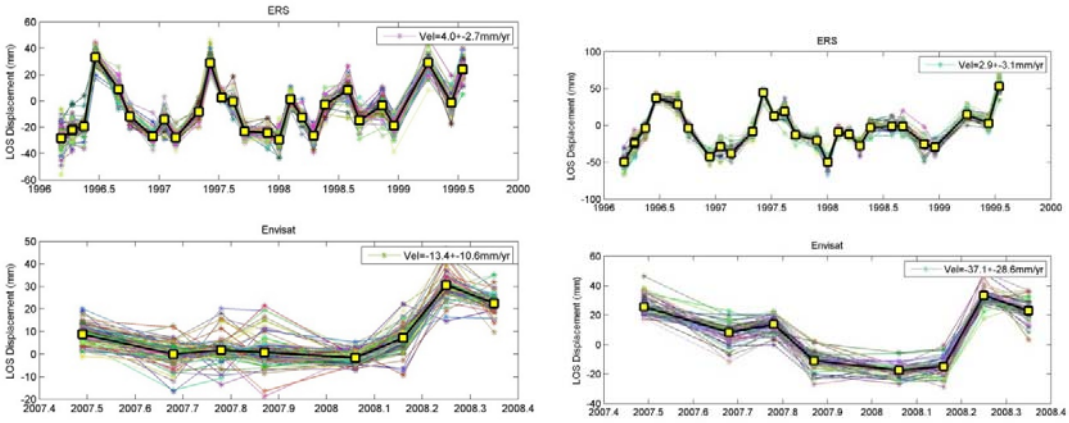



圖 3-1.10：C5 剖面 PS-InSAR 時間序列，（左）九芎坑斷層東側與大尖山斷層西側；（右）大尖山斷層東側。（位置如圖 3-1.5 綠色方框 12~13）

Figure 3-1.10: PS-InSAR time series of profile C5, (left) east side of Chiuchiungkeng fault and west side of Tachienshan fault; (right) east side of Tachienshan fault. (The locations are shown in Figure 3-1.5 with the green boxes 12~13)

# 3-2 北部地區

## 3-2-1 PS-InSAR 成果資料分析

### 3-2-1-1 ERS1/2（1996/1~1999/7）

圖 3-2.1 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。

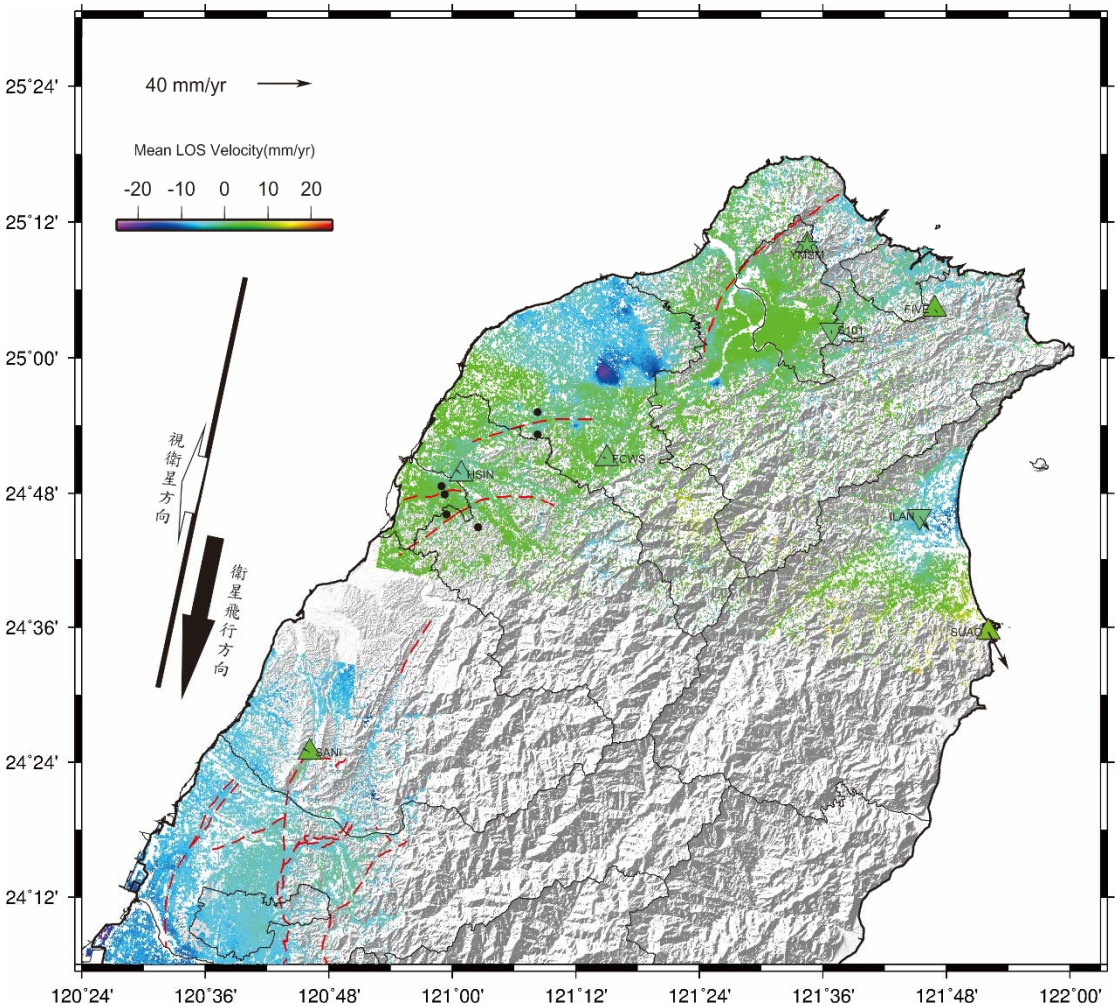



圖 3-2.1：ERS（1996/1~1999/7）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-2.1: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ERS (1996/1~1999/7) (Track=461, Frame=3105). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-2-1-2 ENVISAT（2004/3~2008/6）

圖 3-2.2 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。

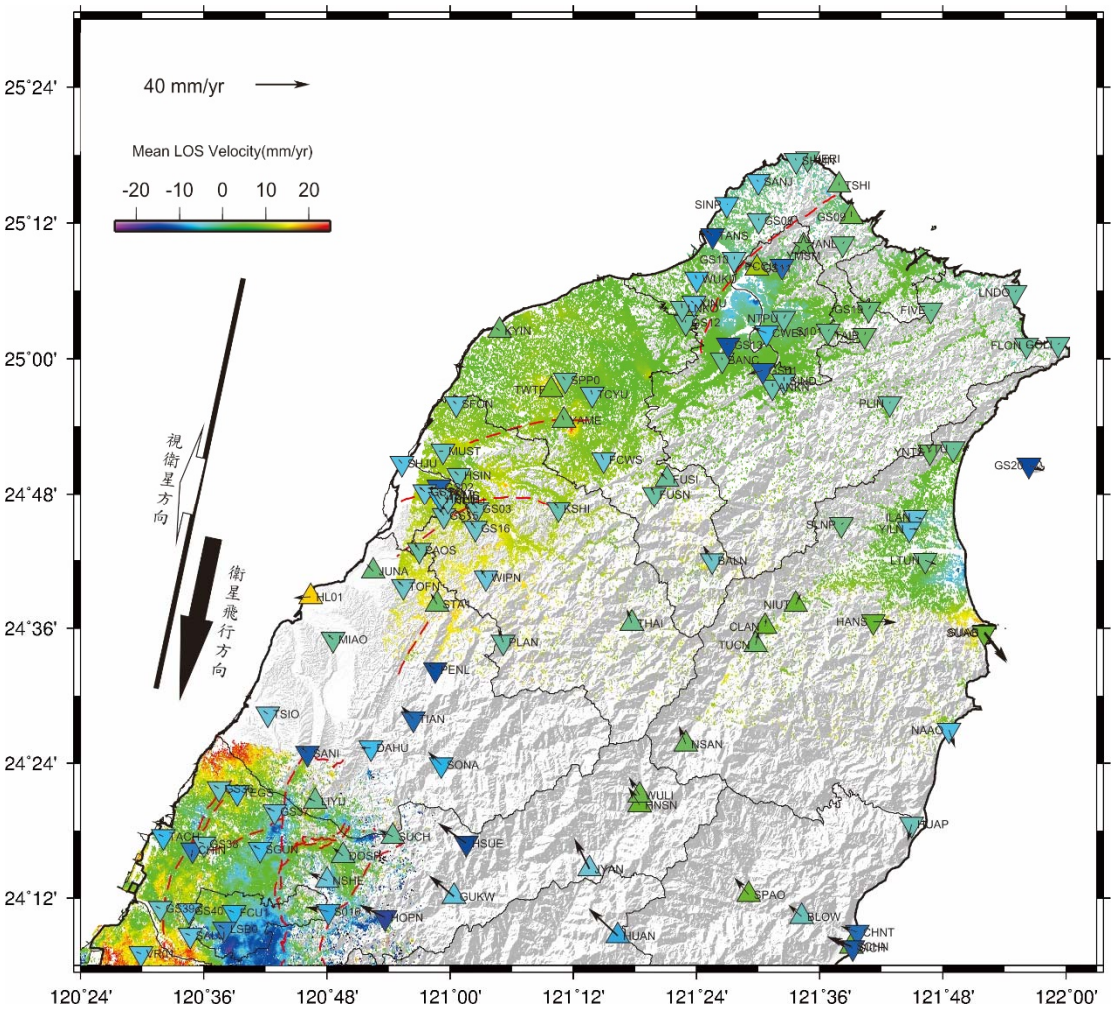



圖 3-2.2：ENVISAT（2004/3~2008/6）衛星軌道 461，像幅編號 3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-2.2: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT (2004/3~2008/6) (Track=461, Frames=3105). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-2-1-3 ALOS（2007/1~2011/3）

圖 3-2.3 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。

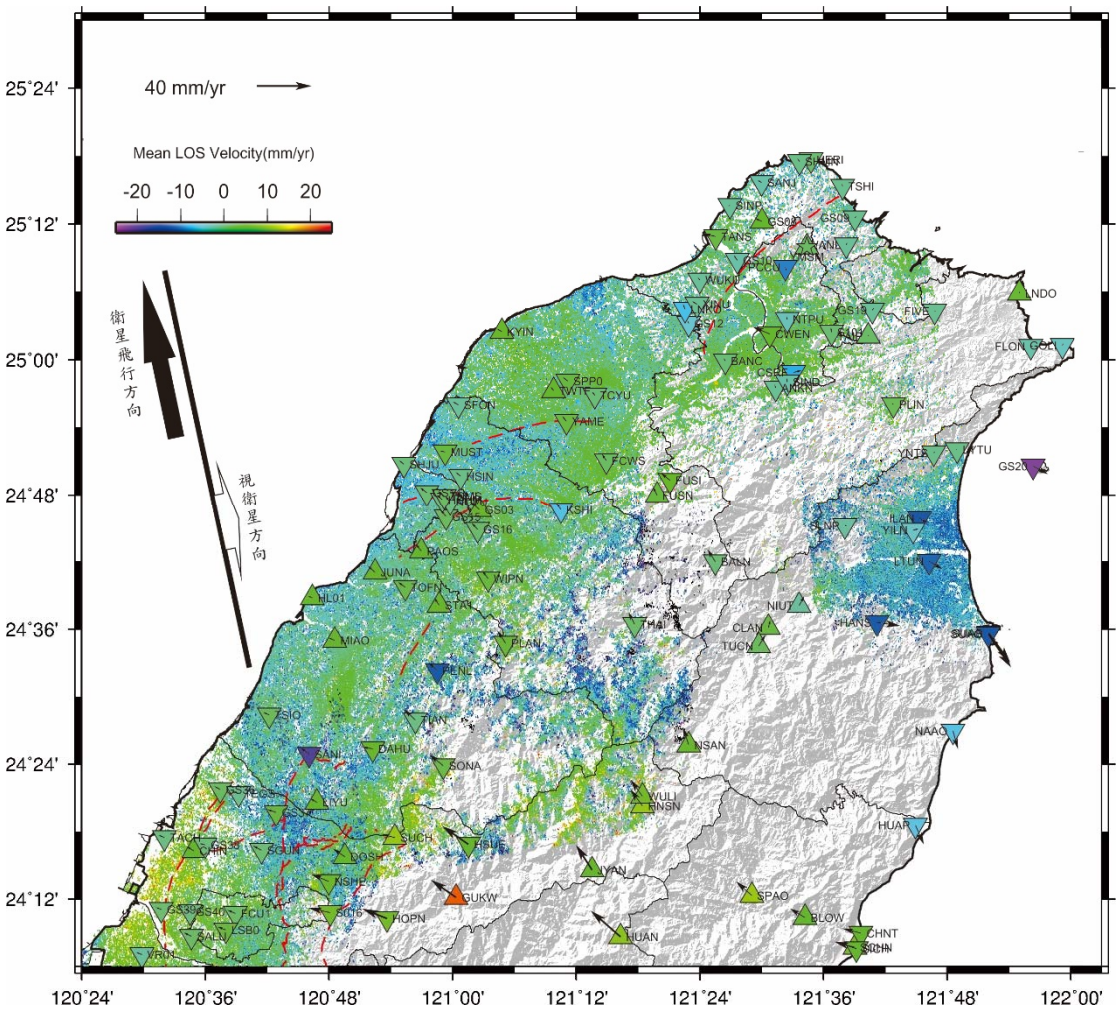



圖 3-2.3：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 444、445 及 446，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-2.3: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ALOS (2007/1~2011/3) (Track=444,445&446). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

# 3-2-1-4 Sentinel-1（2015/4~2018/8）

圖 3-2.4 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。

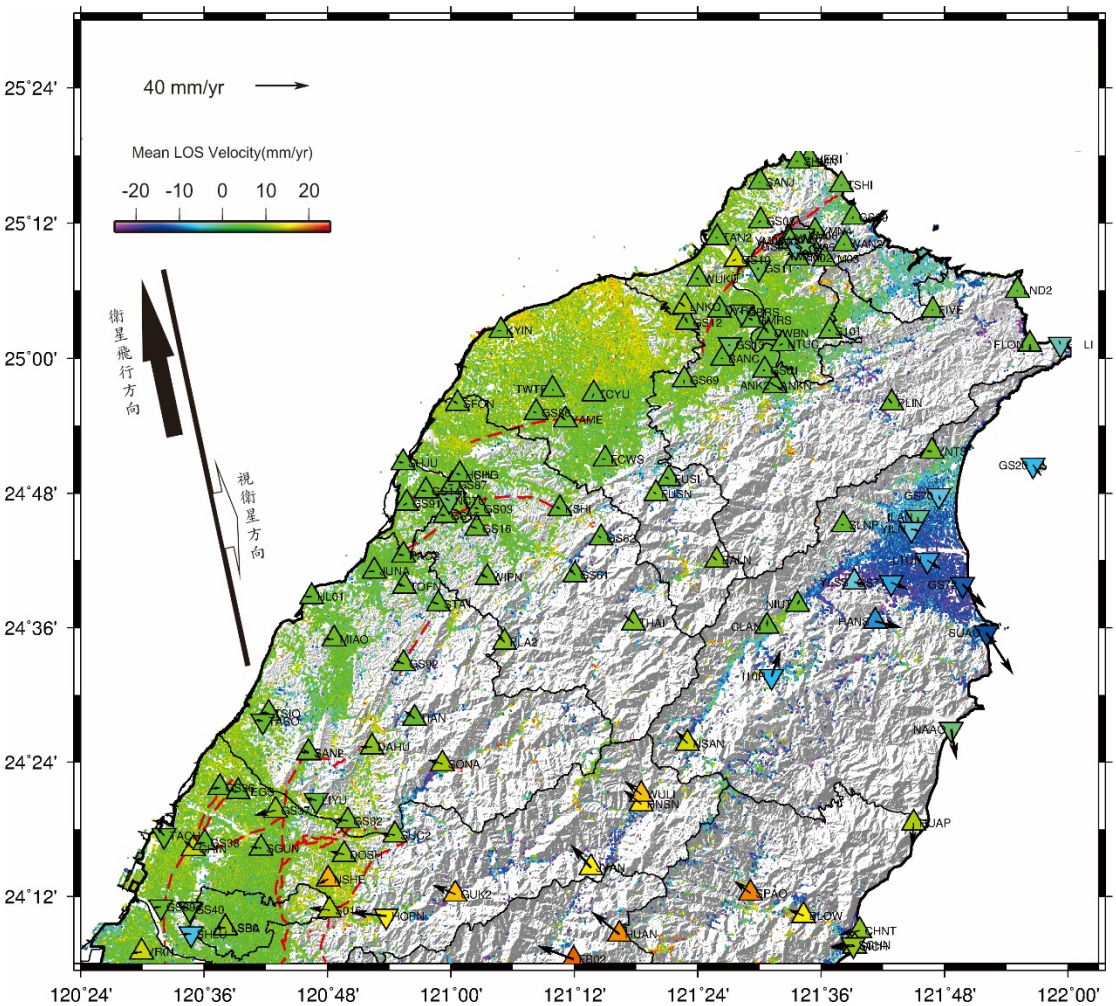



圖 3-2.4：Sentinel-1 升軌影像（2015/4~2018/8）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-2.4: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 ascending images (2015/4~2018/8). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

圖 3-2.5 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。

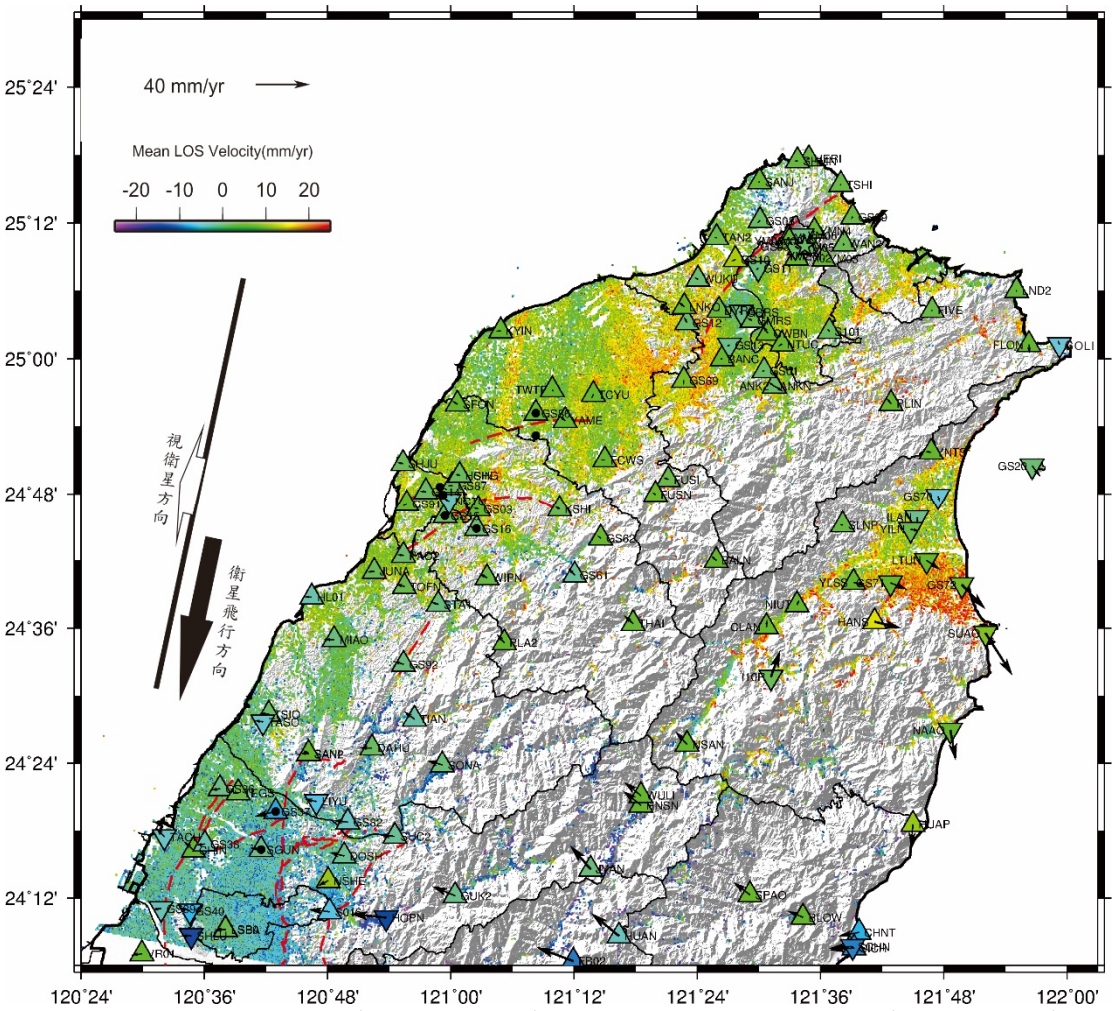



圖 3-2.5：Sentinel-1 降軌影像（2015/4~2018/8）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-2.5: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 descending images (2015/4~2018/8). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and eastward motion while elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence and westward mtion. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-2-2 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 3-2.1 及圖 3-2.5 之黑色圓點。

## 3-2-2-1 湖口斷層

根據圖 3-2.6 及圖 3-2.7 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。

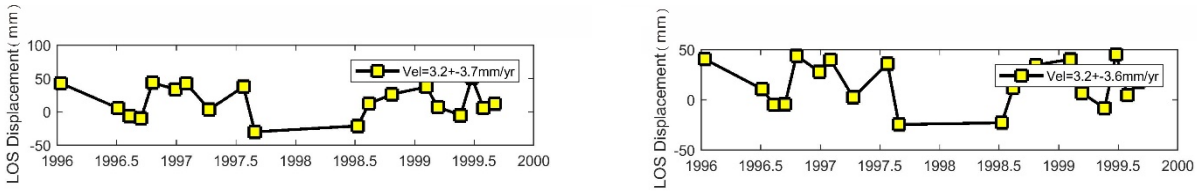



圖 3-2.6：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）湖口斷層西側；（右）湖口斷層東側。

Figure 3-2.6: PSInSAR time series during the period of ERS (1996/1~1999/7), (left) west side of Hukou fault; (right) east side of Hukou fault.

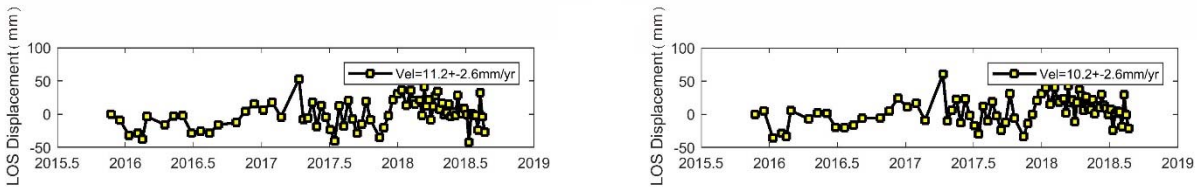



圖 3-2.7：Sentinel-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）湖口斷層西側；（右）湖口斷層東側。

Figure 3-2.7: PSInSAR time series during the period of Sentinel-1 (2015/4~2018/8), (left) west side of Hukou fault; (right) east side of Hukou fault.

## 3-2-2-2 新竹斷層

根據圖 3-2.8 及圖 3-2.9 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。

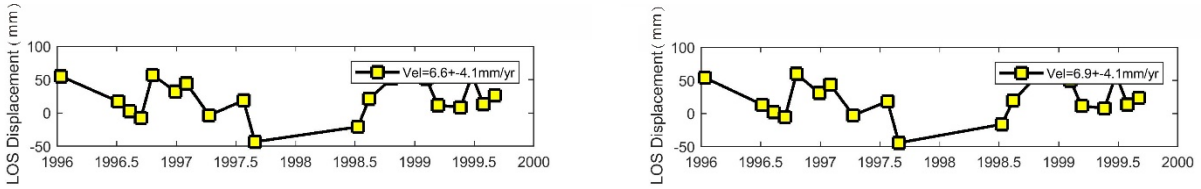



圖 3-2.8：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新竹斷層西側；（右）新竹斷層東側。

Figure 3-2.8: PSInSAR time series during the period of ERS (1996/1~1999/7), (left) west side of Hsinchu fault; (right) east side of Hsinchu fault.

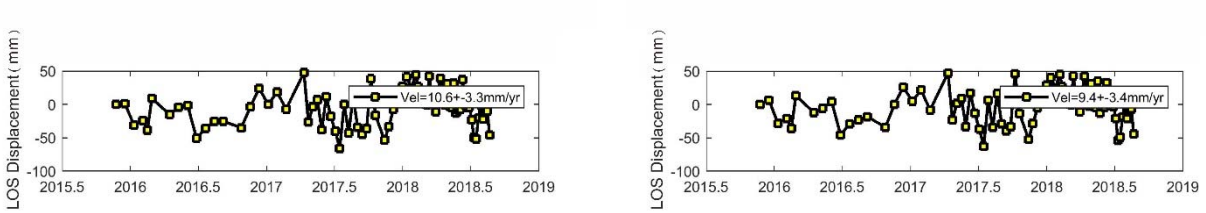



圖 3-2.9：Sentinel-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新竹斷層西側；（右）新竹斷層東側。

Figure 3-2.9: PSInSAR time series during the period of Sentinel-1 (2015/4~2018/8), (left) west side of Hsinchu fault; (right) east side of Hsinchu fault.

## 3-2-2-3 新城斷層

根據圖 3-2.10 及圖 3-2.11 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。

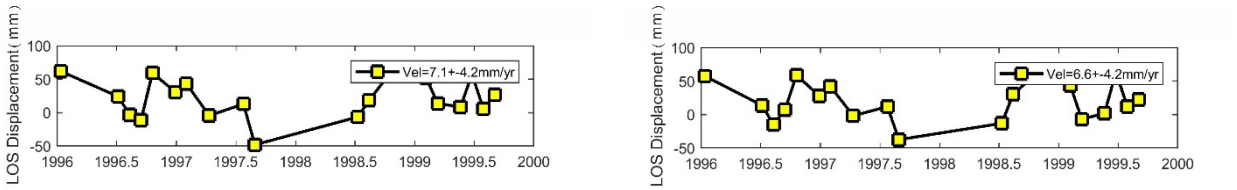



圖 3-2.10：ERS（1996/1~1999/7）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新城斷層西側；（右）新城斷層東側。

Figure 3-2.10: PSInSAR time series during the period of ERS (1996/1~1999/7), (left) west side of Hsincheng fault; (right) east side of Hsincheng fault.

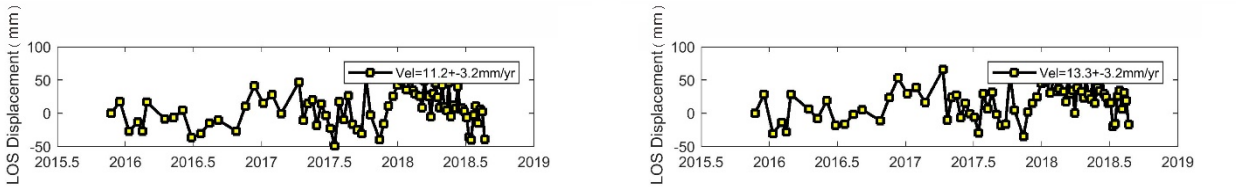



圖 3-2.11：Sentinel-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）新城斷層西側；（右）新城斷層東側。

Figure 3-2.11: PSInSAR time series during the period of Sentinel-1 (2015/4~2018/8), (left) west side of Hsincheng fault; (right) east side of Hsincheng fault.

## 3-2-2-4 屯子腳斷層

根據圖 3-2.12 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。

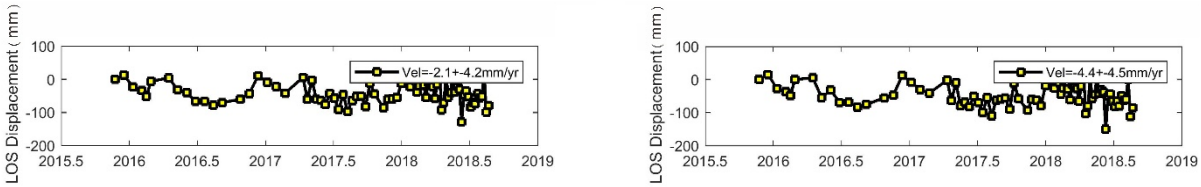



圖 3-2.12：Sentinel-1（2015/4~2018/8）時期之 PSInSAR 時間序列，（左）屯子腳斷層西側；（右）屯子腳斷層東側。

Figure 3-2.12: PSInSAR time series during the period of Sentinel-1 (2015/4~2018/8), (left) west side of the Tuntzuchiao fault; (right) east side of Tuntzuchiao fault.

# 3-3 南部地區

## 3-3-1 PS-InSAR 成果資料分析

### 3-3-1-1 ERS1/2（1995/4~1999/9）

圖 3-3.1 即為 ERS 影像在此期間（1995/4~1999/9）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。並且將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。分析永久散射點的結果，可以得到在這段期間（1995/4~1999/9），兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。以連續 GPS 測站 S011 為不動點而言，此兩處沿海地區最大視衛星方向下陷量可達到近 30 mm/yr。台南台地則觀測到最大抬升量，速率約將近 20 mm/yr。此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。此外，跨過龍船斷層以及鳳山轉換帶也有明顯的速度不連續，速度梯度可達將近 20 mm/yr，需持續關注。

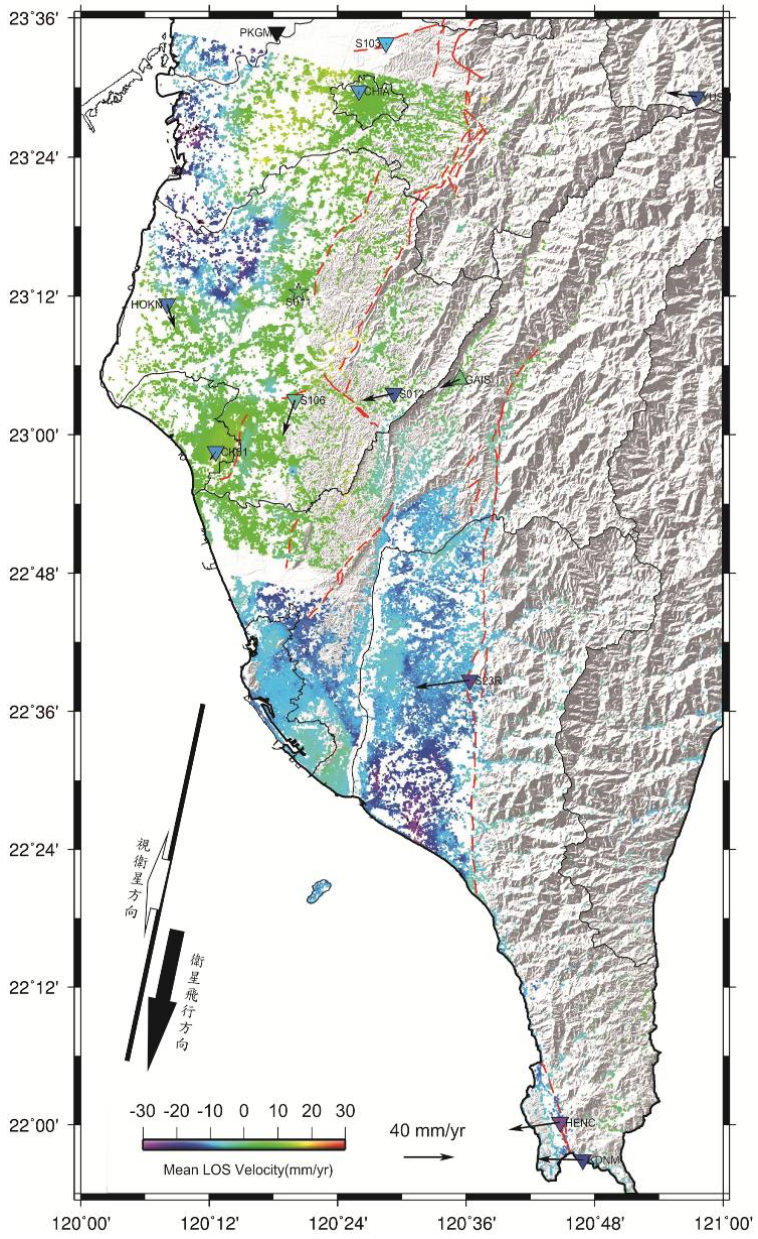



圖 3-3.1：ERS（1995/4~1999/9）衛星軌道（Track）232，像幅編號（Frame）3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-3.1: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ERS (1995/4~1999/9) (Track=232, Frames=3141&3159; Track=461, Frame=3159). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-3-1-2 ENVISAT（2004/6~2008/9）

圖 3-3.2 為 ENVISAT 影像在此期間（2004/6~2008/9）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻合，顯示此結果的可靠信相當高。從圖 3-3.2 可見，在這段期間（2004/6~2008/9），西南地區變形行為與 ERS 結果相似。以 S011 為參考點而言，嘉南沿海地區最大視衛星方向下陷量約為 30 mm/yr。新化斷層以北以及台南台地及大灣低地南側則擁有最大抬升量，最大速率約為 10 mm/yr。其中跨過六甲斷層、木屐寮斷層及龍船斷層都能看到有變形速率不一的情形。反之，跨過後甲里斷層兩側之變形不連續則較為不明顯。

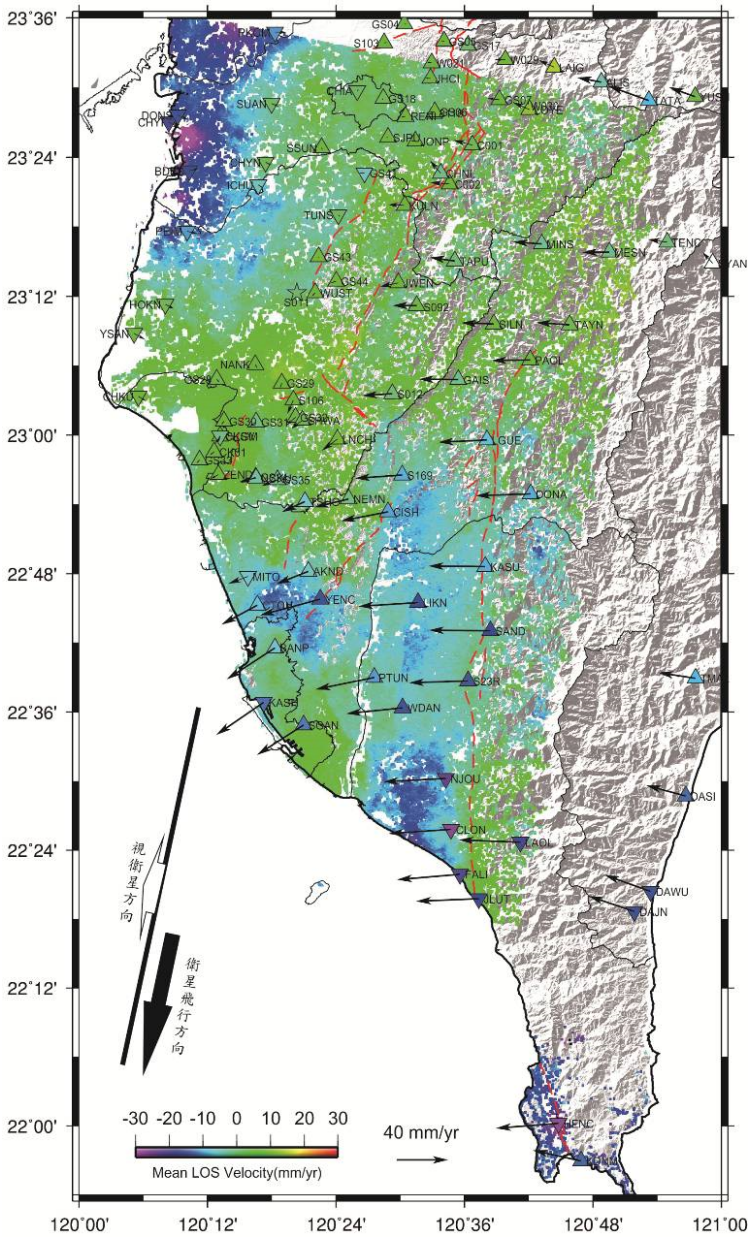



圖 3-3.2：ENVISAT（2004/6~2008/9）衛星軌道 232，像幅編號 3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-3.2: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT (2004/6~2008/9) (Track=232, Frames=3141&3159; Track=461, Frame=3159). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-3-1-3 ALOS（2007/1~2011/3）

圖 3-3.3 即為 ALOS 衛星影像在此期間（2007/1~2011/03）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，可發現南邊的 PSInSAR 速度都比連續 GPS 測站速度小，造成此原因應該為此影像有包含一南北方向的長波長效應，未來也可針對此校正方式研究出更好的方法，以避免此問題。以 S011 為不動點而言，其最大視衛星方向抬升量約為位於龍船斷層西側的 30 mm/yr。在這段期間（2007/1~2011/3），西南變形行為顯示九條斷層跨斷層兩側都有明顯程度不一的速度變化，其中又以旗山斷層最為明顯。另外，跨過龍船斷層以及右昌斷層也顯示出明顯的速度不連續。

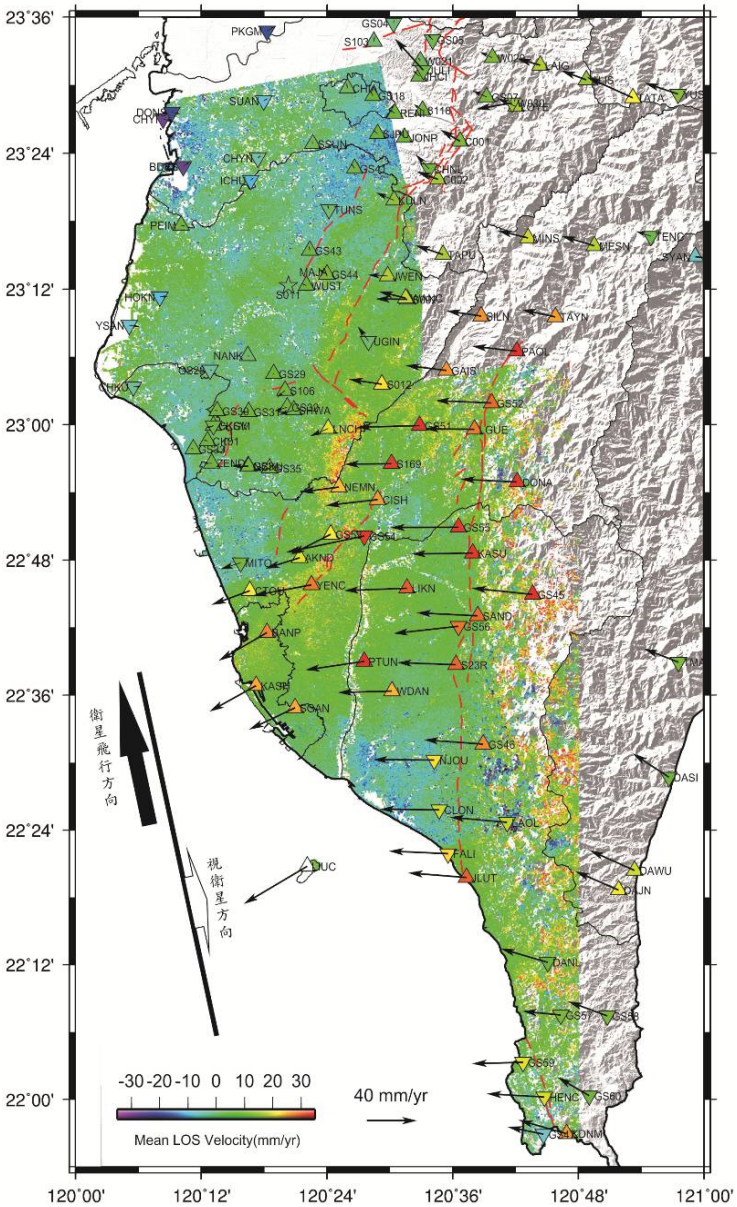



圖 3-3.3：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 447，像幅編號 430、440 及 450 及衛星軌道 446，像幅編號 430 及 440 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-3.3: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ALOS (2007/1~2011/3) (Track=447, Frames=430, 440&450; Track=446, Frames=430&440). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-3-1-4 Sentinel-1（2015/04~2019/9）

圖 3-3.4 及圖 3-3.5 即為 Sentine-1 衛星影像在此期間（2015/04~2019/09）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。並且將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。分析永久散射點的結果，可以得到在這段期間，兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。以連續 GPS 測站 S011 為參考點而言，此兩處沿海地區最大視衛星方向下陷量可達到近 30 mm/yr。台南台地則最大抬升量，速率約將近 20 mm/yr。此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。另外，跨過鳳山轉換帶也有明顯速度不連續。

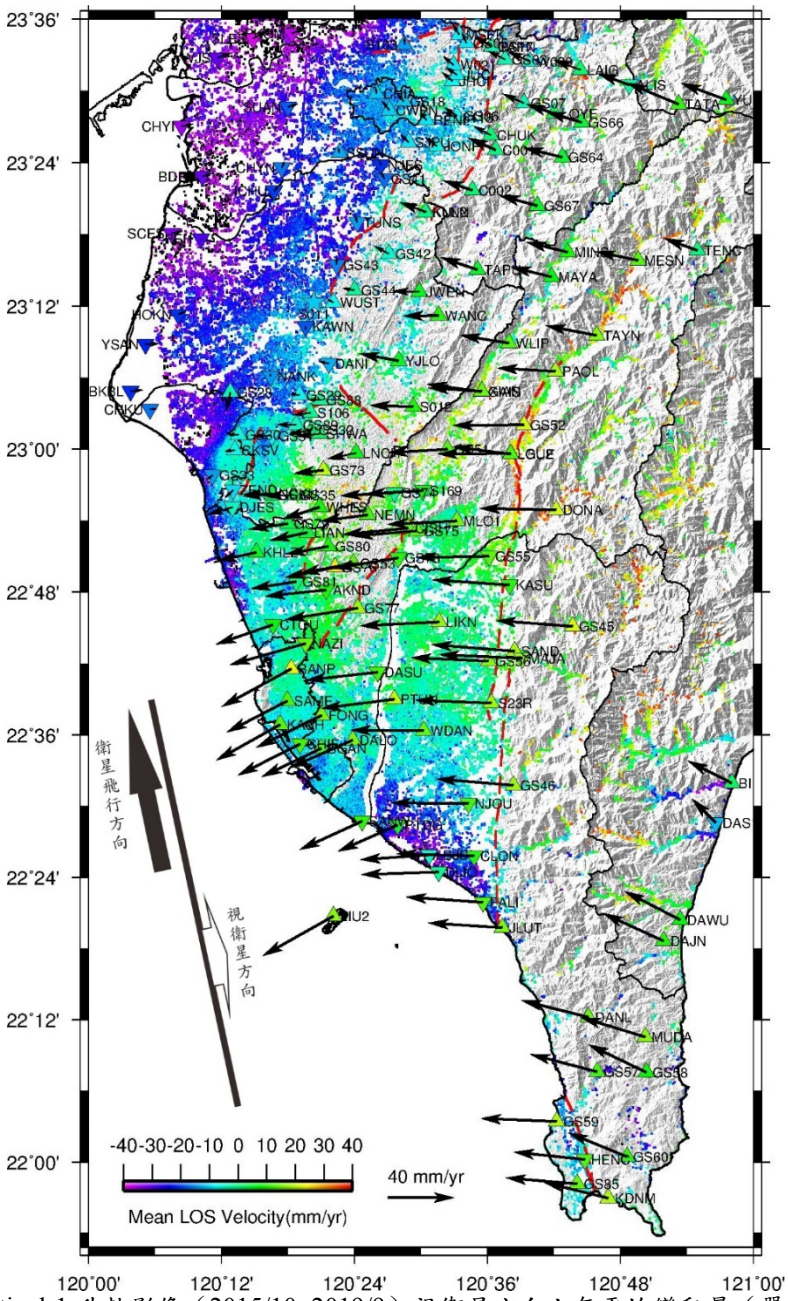



圖 3-3.4：Sentinel-1 升軌影像（2015/10~2019/9）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-3.4: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 ascending images (2015/10~2019/9). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

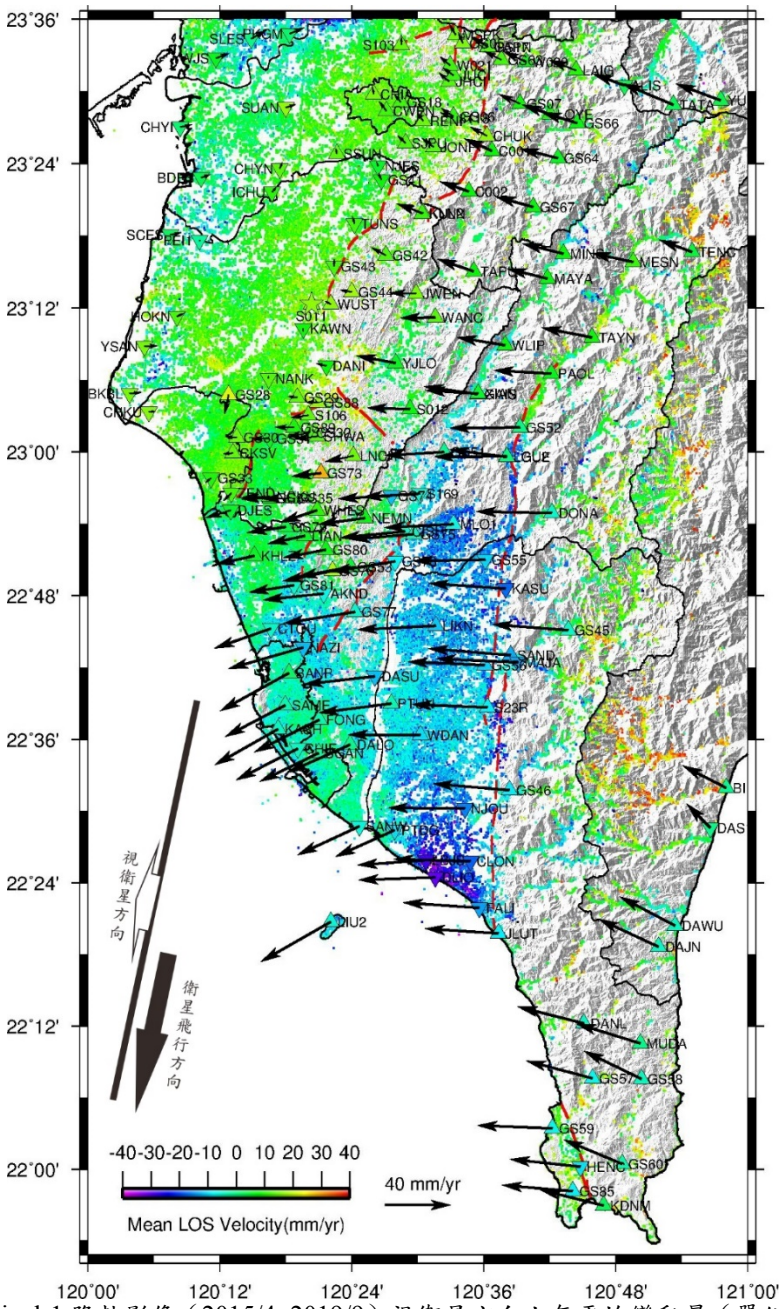



圖 3-3.5：Sentinel-1 降軌影像（2015/4~2019/9）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-3.5: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 descending images (2015/4~2019/9). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is S011, continuous GPS station. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

Sentinel-1 衛星對於同一區域會有升軌與降軌影像，也因此可以獲得兩個方向的速度場，因此可以計算獲得垂直方向與東西方向上的地表變形速度場（Tung, et al., 2019）。

$$E = \frac{LOS_{dsc}\cdot\cos(\theta_{asc}) - LOS_{asc}\cdot\cos(\theta_{des})}{\cos(\alpha_{dsc})\cdot\sin(\alpha_{dsc})\cos(\theta_{asc}) + \cos(\alpha_{asc})\cdot\sin(\alpha_{asc})\cos(\theta_{dsc})}$$

$$U = \frac{LOS_{asc} + E\times\cos(\alpha_{asc})\sin(\theta_{asc})}{\cos(\theta_{asc})}$$

$LOS_{asc}$ ： 升軌視衛星方向變形量
$LOS_{dsc}$ ： 降軌視衛星方向變形量
$\theta_{asc}$ ： 升軌衛星觀測入射角度
$\theta_{dsc}$ ： 降軌衛星觀測入射角度
$\alpha_{asc}$ ： 升軌衛星軌道飛行方向角度(與正北之夾角)
$\alpha_{dsc}$ ： 降軌衛星軌道飛行方向角度

接著，我們結合升軌與降軌影像以獲得東西方向（圖 3-3.6）與垂直方向（圖 3-3.7）上的地表變形。由結果可以得到在這段期間，嘉義的東石鄉、雲林的內陸以及屏東的林邊與佳冬為主要的下陷區域，其下陷量可達到近 30 mm/yr。主要的抬升則位於台南台地，抬升速率約為 15 mm/yr，而龍崎地區則擁有最大的抬升速率，約 25 mm/yr。此外，嘉義市則是呈現不動或輕微抬升的運動行為。其結果與 GPS 相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。並且，經過這樣的運動方向轉換，可以發現此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層、旗山斷層、小崗山斷層以及六甲斷層與木屐寮斷層兩側都可以看到明顯的速度不連續性。

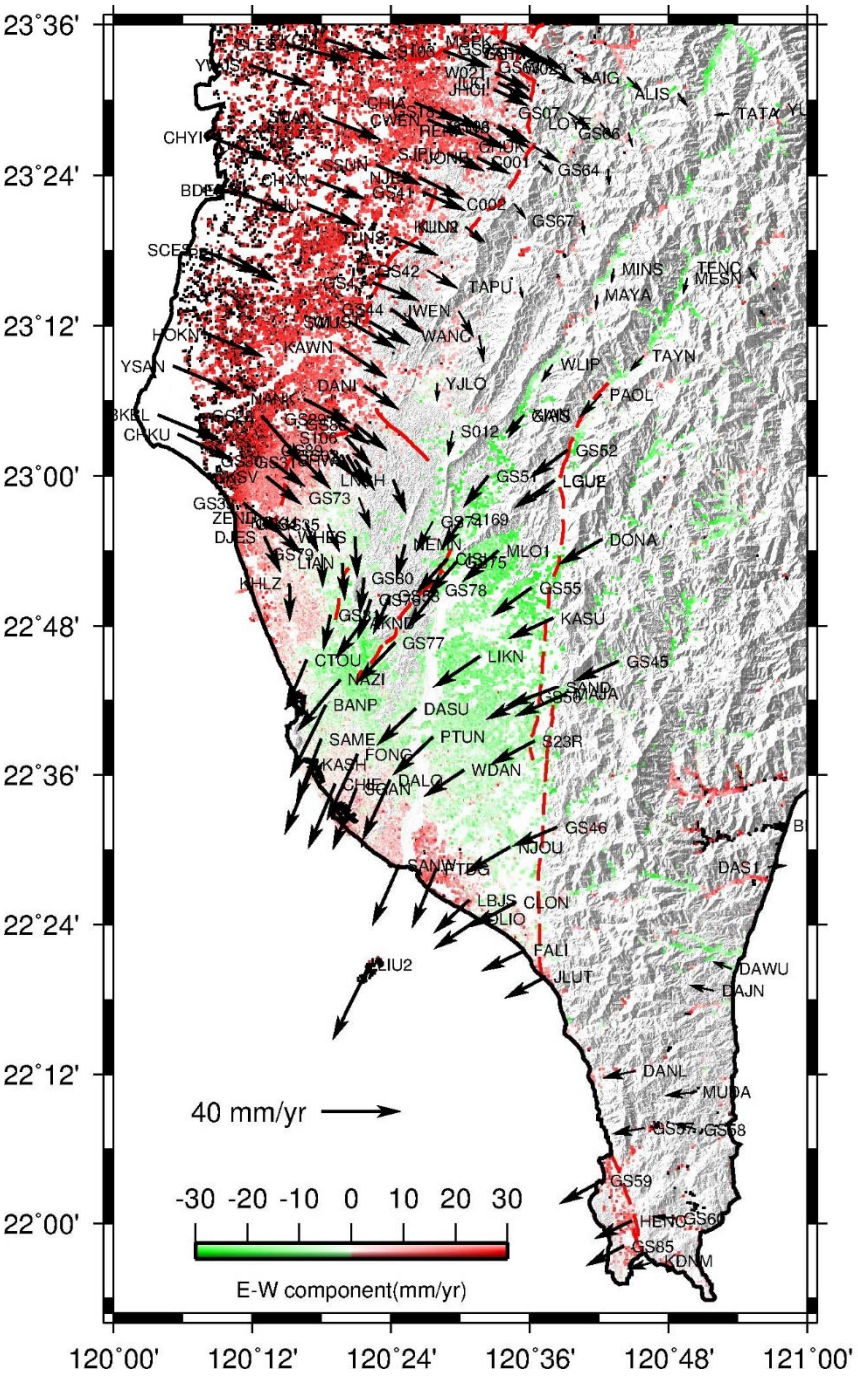



圖 3-3.6：Sentinel-1 東西方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東；冷色系代表地表變形向西。箭頭為連續 GPS 測站水平方向移動速率。

Figure 3-3.6: 2.5-dimension velocity field (E-W direction) converted from ascending and descending interferograms (warm color represents eastward; cold color represents westward). The symbol arrows present the GPS horizontal velocity.

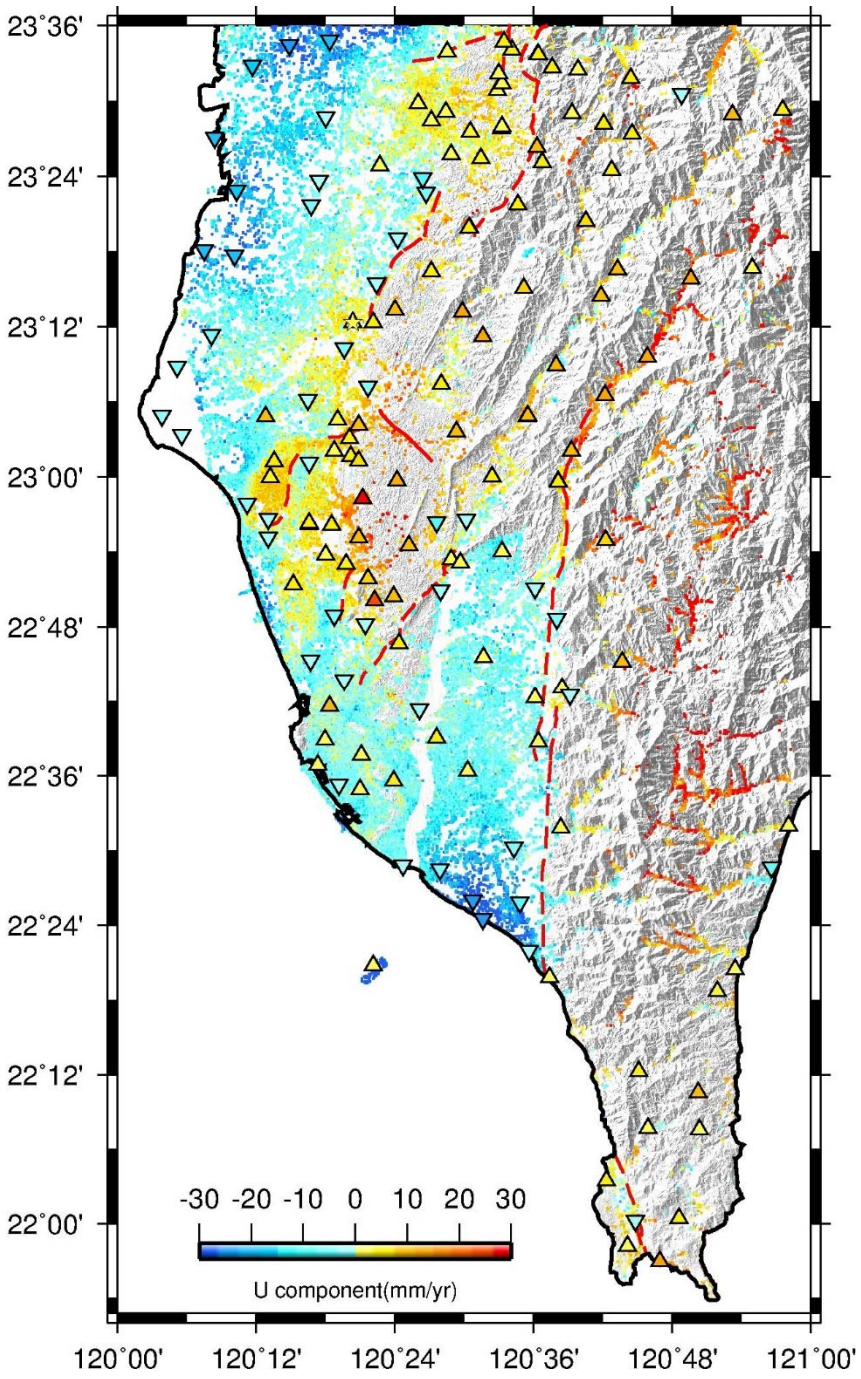



圖 3-3.7：Sentinel-1 垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系三角形代表地表變形抬升；冷色系倒三角形代表地表變形下降。三角形為連續 GPS 測站垂直方向移動速率。

Figure 3-3.7: 2.5 dimension velocity field (vertical direction) converted from ascending and descending interferograms (warm color triangle represents uplift; cold color inverse triangle represents subsidence). Triangles and inverse triangles represent the vertical velocity field.

## 3-3-2 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 Sentinel-1 影像（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9），針對南部地區斷層進行 PS-InSAR 技術時間序列分析。為了確立 Sentinel-1 影像的可信度，首先挑選南部地區中央研究院位於新化之連續 GPS 測站（S106），以中央研究院位於角秀山之 S011 測站為參考點進行測試比較。圖 3-3.8 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 Sentinel-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有很好的關聯性。另外，選擇美濃地震中位移最大的中央研究院位於龍崎之連續 GPS 測站（LNCH），同樣以 S011 為參考站測試地震的效應。由圖 3-3.9 同樣可得到 Sentinel-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有很好的關聯性。

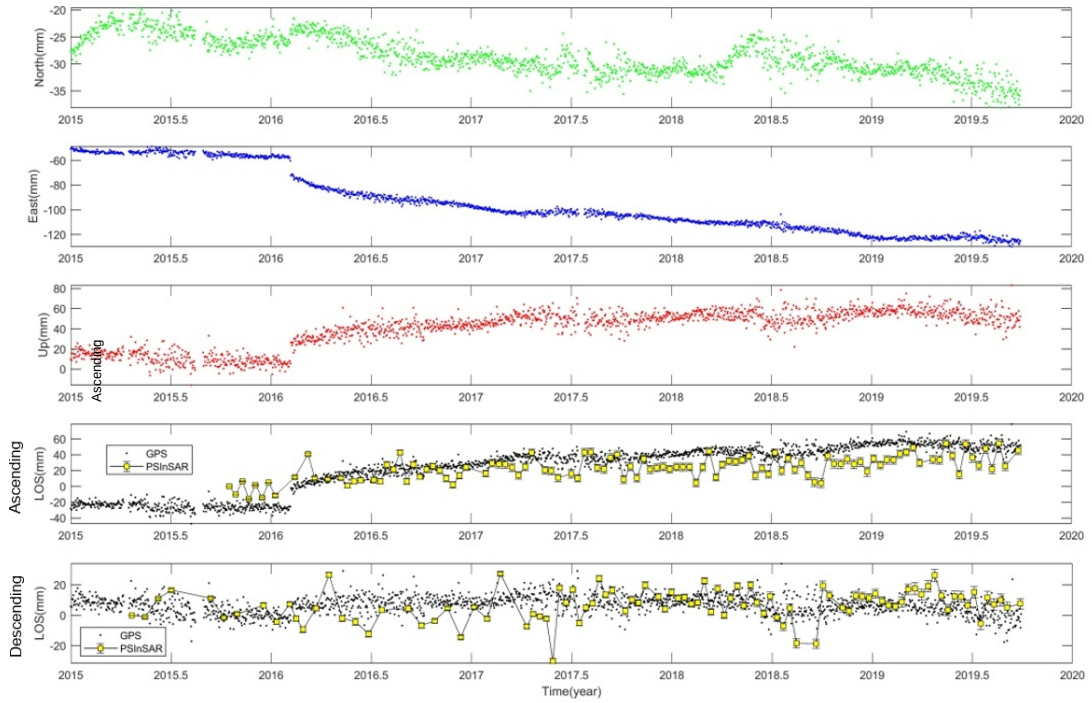



圖 3-3.8：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站新化（S106）時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.8: The comparison between PSInSAR and time series of GPS station S106 during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

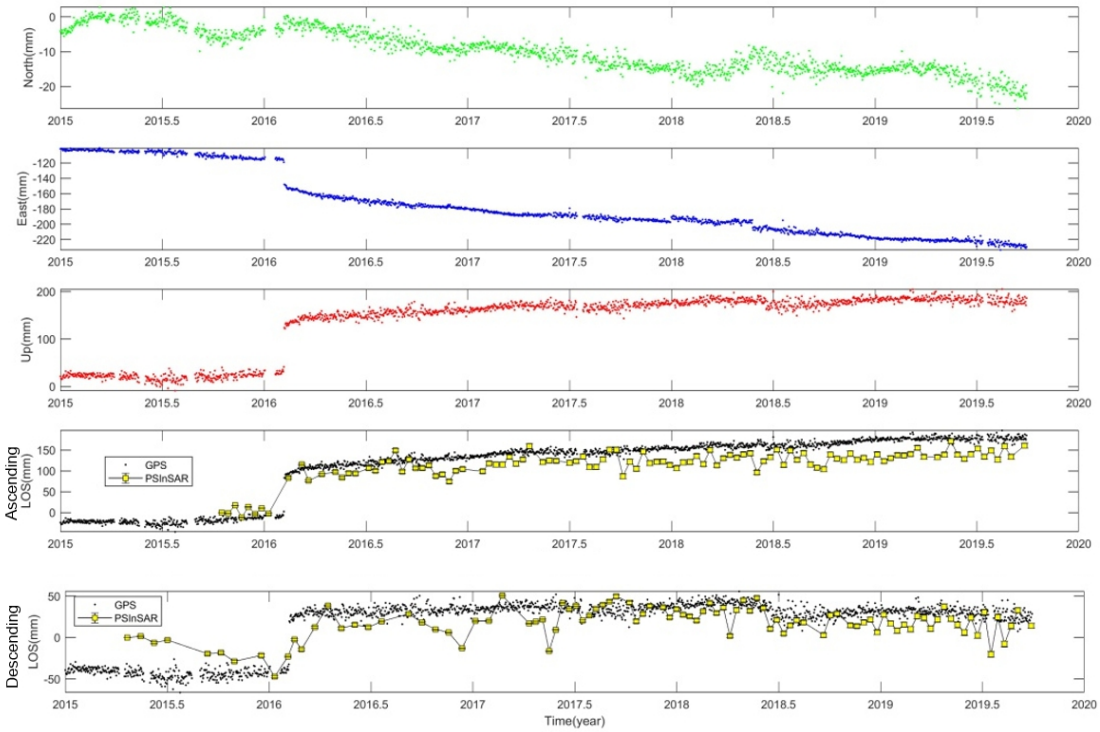



圖 3-3.9：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure3-3.9: The comparison between PSInSAR and time series of GPS station LNCH during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

接著由北至南選擇南部地區五條斷層東西兩側（上下盤）各一連續 GPS 測站及附近的永久散射點位進行分析。

## 3-3-2-1 六甲斷層

根據圖 3-3.10 GPS 及衛星時間序列結果顯示，Sentinel-1 衛星時期（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）上盤 GS42 相對下盤 GS43 速度差異不明顯，顯示此斷層淺部近期並未有活動的現象。

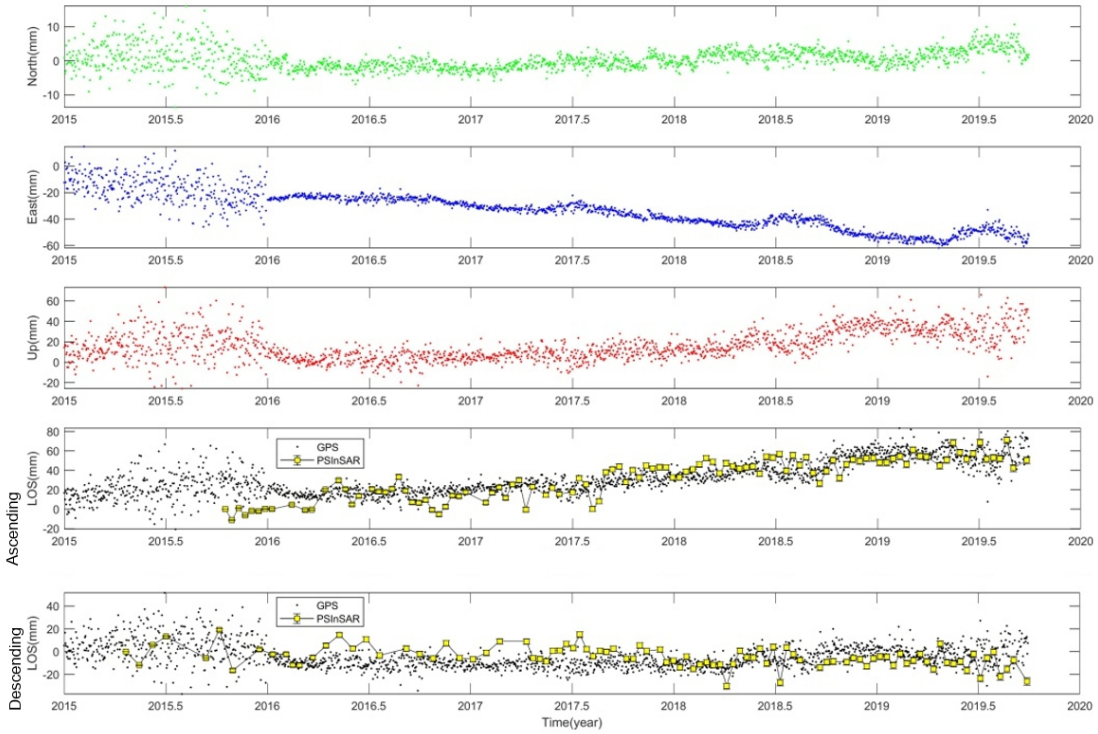



圖 3-3.10：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 GS42 相對於 GS43 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.10: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station GS42 relative to GPS station GS43 during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

## 3-3-2-2 新化斷層

根據圖 3-3.11 GPS 及衛星時間序列結果顯示，新化斷層南側 GPS 測站 S106 相對於北側 GS29 於美濃地震時呈現變形大小不同的行為，此現象可於升軌影像觀察到，並且與 GPS 的時間序列相當一致。但除了美濃地震以外，長期來說，此兩測站之間並無明顯的速度差異。另外，由 GPS 及衛星影像都可以觀察到相當明顯的季節性年周期震盪。

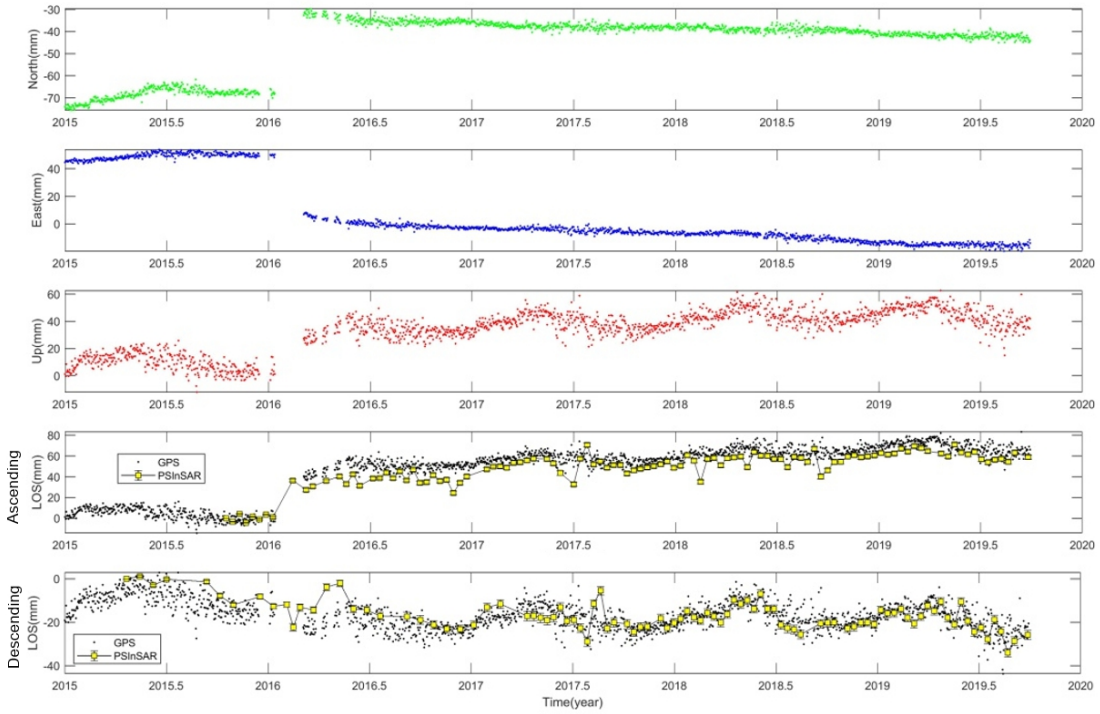



圖 3-3.11：Sentinel-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 S106 相對於 GS29 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure3-3.11: The comparison between PSInSAR and time series at GPS station S106 relative to GPS station GS29 during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

## 3-3-2-3 後甲里斷層

根據圖 3-3.12 GPS 及衛星時間序列結果顯示，後甲里斷層東側 GPS 測站 GS31 相對於西側 GS30 於美濃地震時呈現變形大小不同的行為，但此現象經過坐標投影到視衛星方向上卻較不明顯，但其測站之間的相對速度似乎在美濃地震後有了很大的改變，GPS 及 InSAR 結果都顯示台南台地於美濃地震震後抬升速度變快。

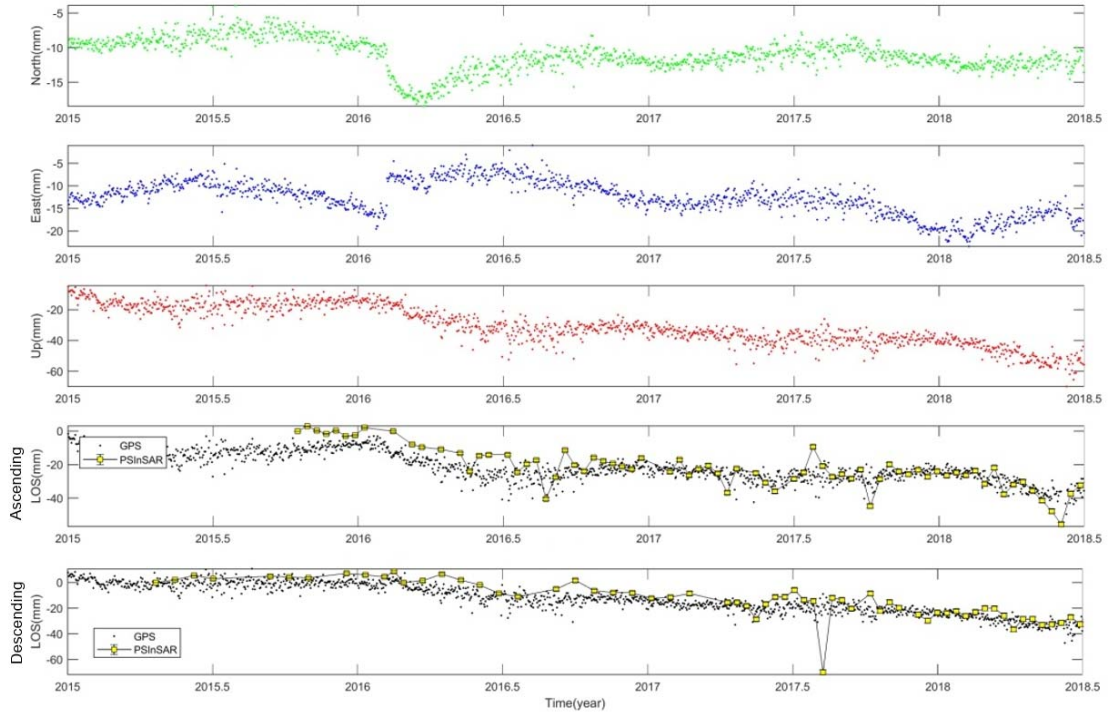



圖 3-3.12：Sentinel-1 ( asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9 ) 時期 GPS 測站 GS31 相對於 GS30 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure3-3.12: The comparison between PSInSAR and time series at GPS station GS31 relative to GPS station GS30 during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

## 3-3-2-4 旗山斷層

根據圖 3-3.13 GPS 及衛星時間序列結果顯示，旗山斷層東側 GPS 測站 LIKN 相對於西側 AKND 於美濃地震時呈現些微變形大小不同的行為，但此現象經過坐標投影到降軌影像視衛星方向上卻較不明顯，只有在升軌影像上可以觀察到約 2-3 公分的同震變形。長期來說，此兩測站之間並無明顯的速度差異。

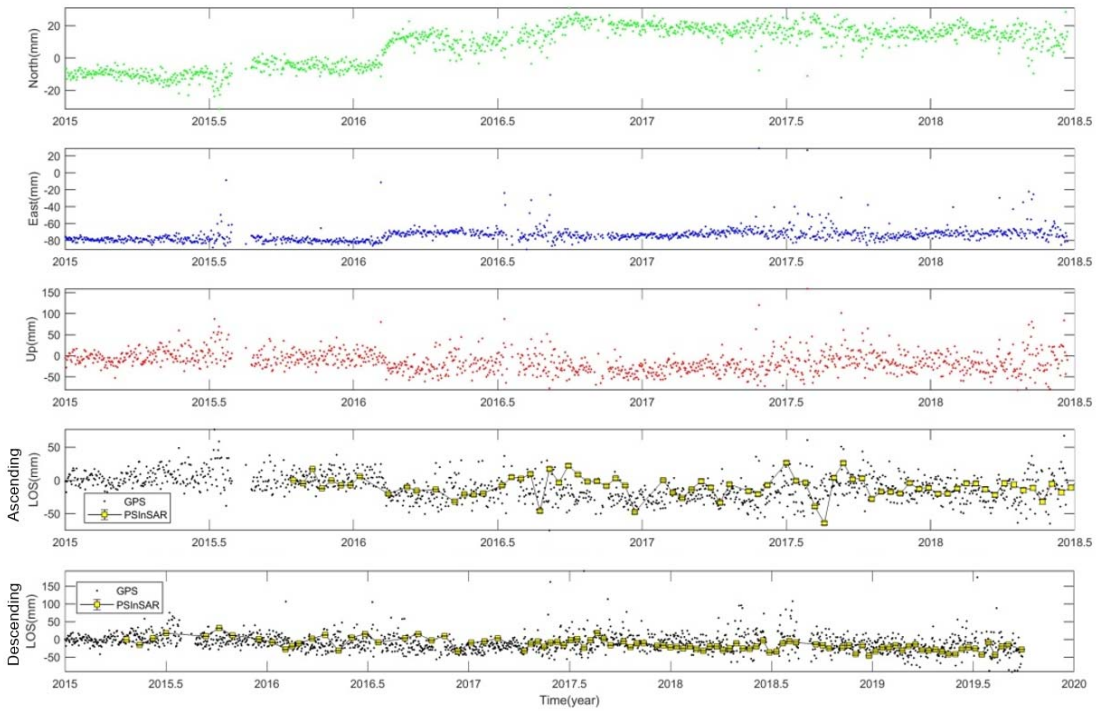



圖 3-3.13：Sentinel-1( asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9 )時期 GPS 測站 LIKN 相對於 AKND 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.13: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station LIKN relative to GPS station AKND during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

# 3-4 東部地區

## 3-4-1 PS-InSAR 成果資料分析

### 3-4-1-1 ERS1/2（1995/6~1999/9）

圖 3-4.1 即為 ERS 衛星影像在此期間（1995/6~1999/9）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。結果顯示北段花蓮地區由西向東呈現視衛星方向速度由接近 0 慢慢轉為負值，但跨過斷層並無明顯的速度梯度差異。而中段則明顯看出玉里斷層與池上斷層間有明顯的視衛星方向遠離及跨過更南側的池上斷層向東也有相當明顯的速度梯度差異，轉換為視衛星方向拉近。往南到利吉斷層與鹿野斷層速度梯度差異雖變小，跨過利吉斷層還是可見速度梯度差異，與池上斷層類似，約有將近 10 mm/yr。

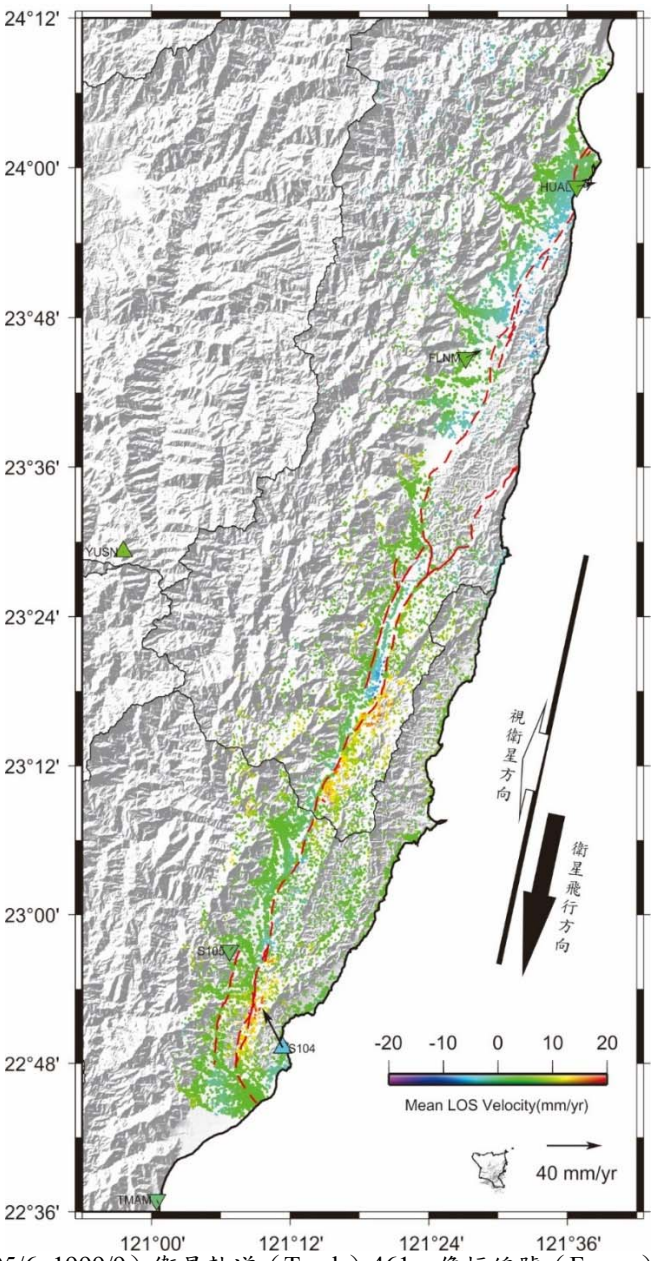



圖 3-4.1：ERS（1995/6~1999/9）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123、3141 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-4.1: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ERS (1995/6~1999/9) (Track=461, Frames=3123&3141). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-4-1-2 ENVISAT（2006/3~2009/6）

圖 3-4.2 即為 ENVISAT 衛星影像在此期間（2006/3~2009/6）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。結果顯示跨過幾條主要斷層都沒有明顯的速度梯度差異。整體來說，只有北側向東跨過嶺頂斷層有些微的轉變為視衛星方向遠離與在卑南臺地向東跨過利吉斷層有較明顯視衛星方向拉近的速度梯度差異，約為 5 mm/yr。反而在跨過池上斷層並無明顯的速度梯度差異，可能因為總影像數目只有 9 張，略顯不夠導致干涉結果不好而造成。

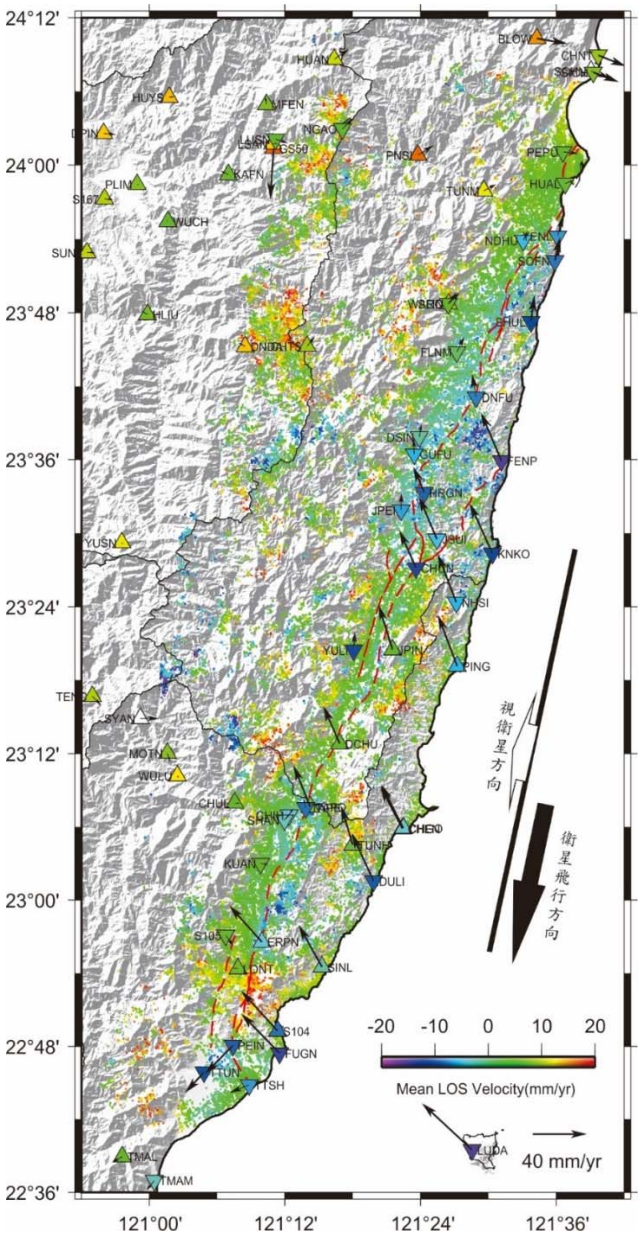



圖 3-4.2：ENVISAT（2006/3~2009/6）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123、3141 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-4.2: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT (2006/3~2009/6) (Track=461, Frames=3123&3141). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-4-1-3 ALOS（2007/1~2010/12）

圖 3-4.3 即為 ALOS 衛星影像在此期間（2007/1~2010/12）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。結果顯示北段向東跨過嶺頂斷層呈現為視衛星方向遠離，速度梯度差異約為 10 mm/yr。而跨過池上斷層則有每年約 20~35 毫米的速度梯度差異，且有明顯的分界，能有效的萃取出池上斷層在地表上的位置。向南則顯示出向東跨過鹿野斷層也有速度梯度差異，約為 10 mm/yr。相較於 C 波段的衛星影像，L 波段的 ALOS 干涉結果較適合用來監測臺灣東部的活動斷層。

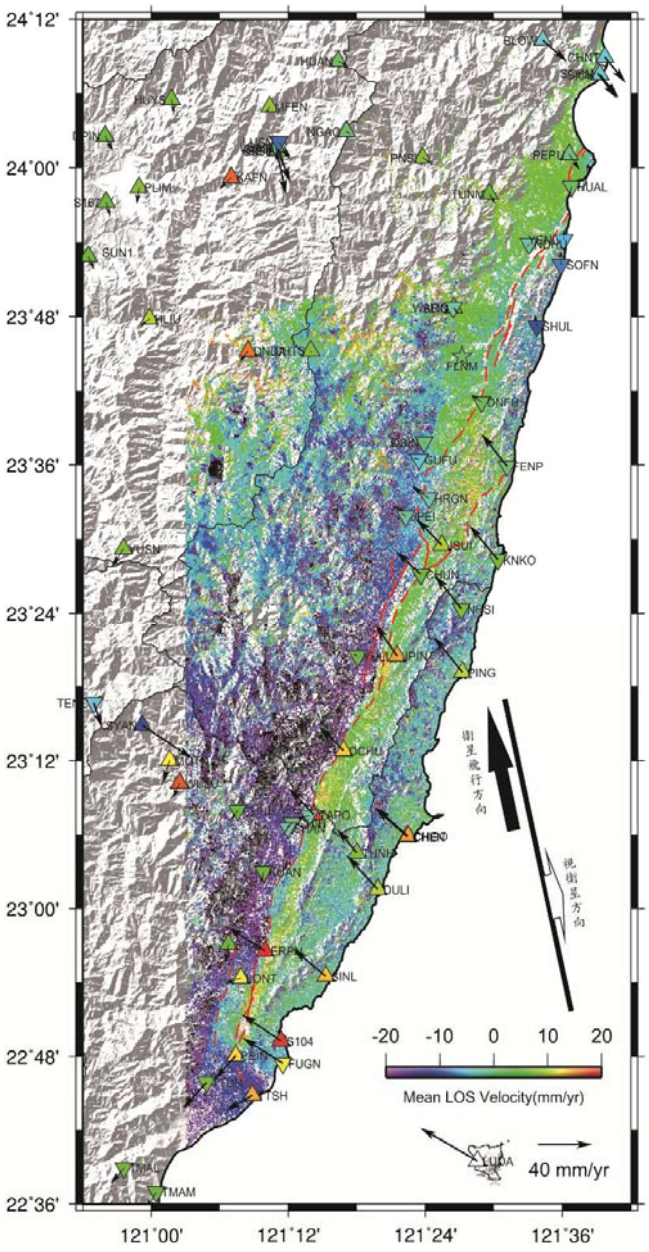



圖 3-4.3：ALOS（2007/1~2010/12）衛星軌道 444，像幅編號 460 及 470 及衛星軌道 445，像幅編號 440 及 450 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-4.3: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ALOS (2007/1~2010/12) (Track=444, Frames=460&470; Track=445, Frames=440&450). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

## 3-4-1-4 Sentinel-1A &-1B（2015/4~2020/10）

本計畫選取 Sentinel-1 衛星 SAR 影像區域如圖 3-4.4 所示。分為降軌（Descending）及升軌（Ascending）兩部分。分析影像時間從 2015 年 5 月至 2020 年 10 月，使用時間基線小基線方法作為影像配對方式，使所有影像間時間間隔包括 12、24、36、48、72、96、192、288、384 天，將影像製作出干涉條紋圖，以獲得最佳干涉結果。升軌的部分，共有 132 幅合併後影像作為干涉，完成的干涉影像共 1040 幅；降軌的部分，目前共有 128 幅合併後影像作為干涉，完成的干涉影像共 867 幅。

本計畫目前的研究使用到較長時間基線，與過去只有使用 40 天內的短時間基線有所差異。干涉影像對時間較短的情況下，構造變形所產生的相位變化有較多的機會比其他訊號造成的干擾來的小，例如水氣、土壤含水量的改變與電離層等。如果要利用 SAR 作為長期構造活動監測之工具，必須仰賴良好的干涉資料，每一對干涉資料包括這兩張影像（主影像與副影像）之間的變形所造成的相位改變，也包括其他訊號造成的相位改變。如果並非地質在短時間內造成的地表變形，較短時間基線的情況下干涉對，其中構造變動所造成的相位變化有機會比水氣、土壤含水量或者軌道誤差等等的干擾所造成的相位變化還要小，結果可能會導致干涉後計算相位回復時的錯誤，並最終影響長期構造變形時間序列監測的誤差。

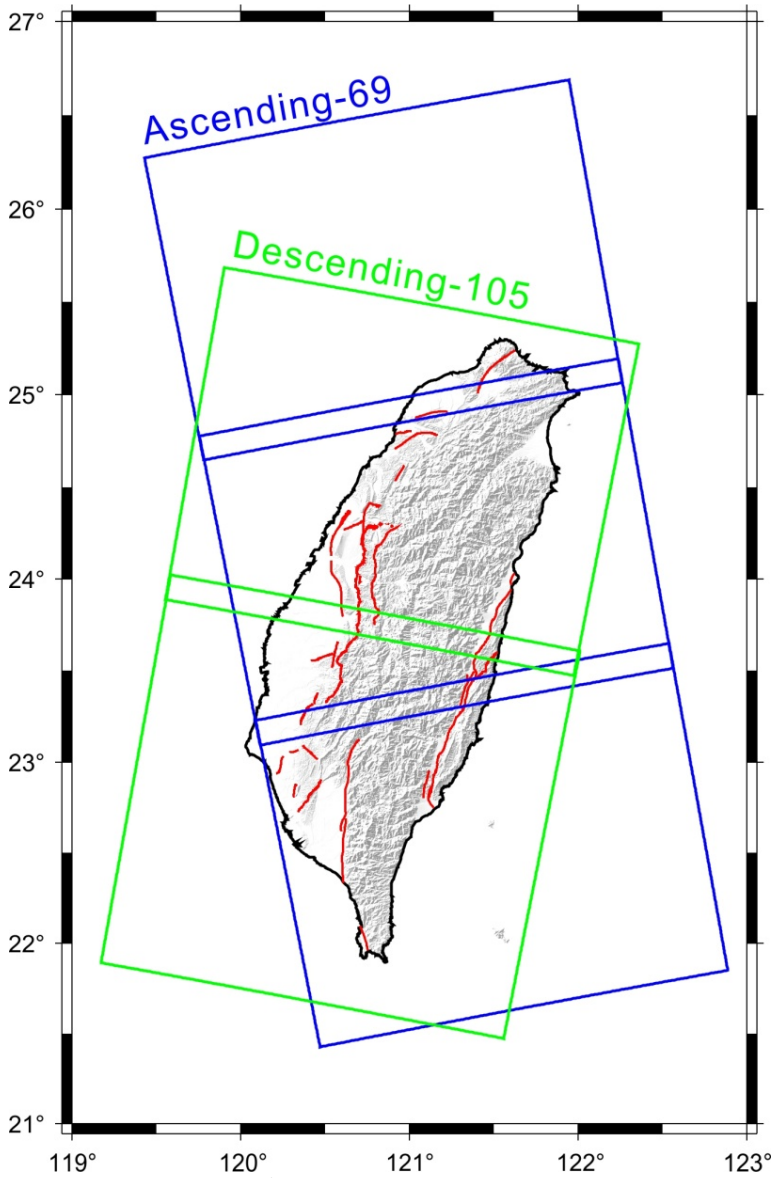



圖 3-4.4：Sentinel-1 衛星選取區域涵蓋圖。

Figure 3-4.4: Sentinel-1 AOI in this project that contains 3 ascending images in orbit number 69 and 2 descending images in orbit number 105.

圖 3-4.5 為以 Sentinel-1 升軌衛星影像 20191231-20200312 及降軌影像 20191115-20200126 兩張干涉圖為例。顯示由於 Sentinel-1 衛星影像垂直基線都相當短，除中央山脈多為高山植被所覆，C 波段影像波長較短無法穿透而形成良好的干涉訊號外，大致上都能產生大範圍的干涉條紋。由圖可見影像中干涉條紋大多產生於縱谷區域的城市、裸露河川地，中央山脈山區大部分只能在溪谷中有干涉條紋。

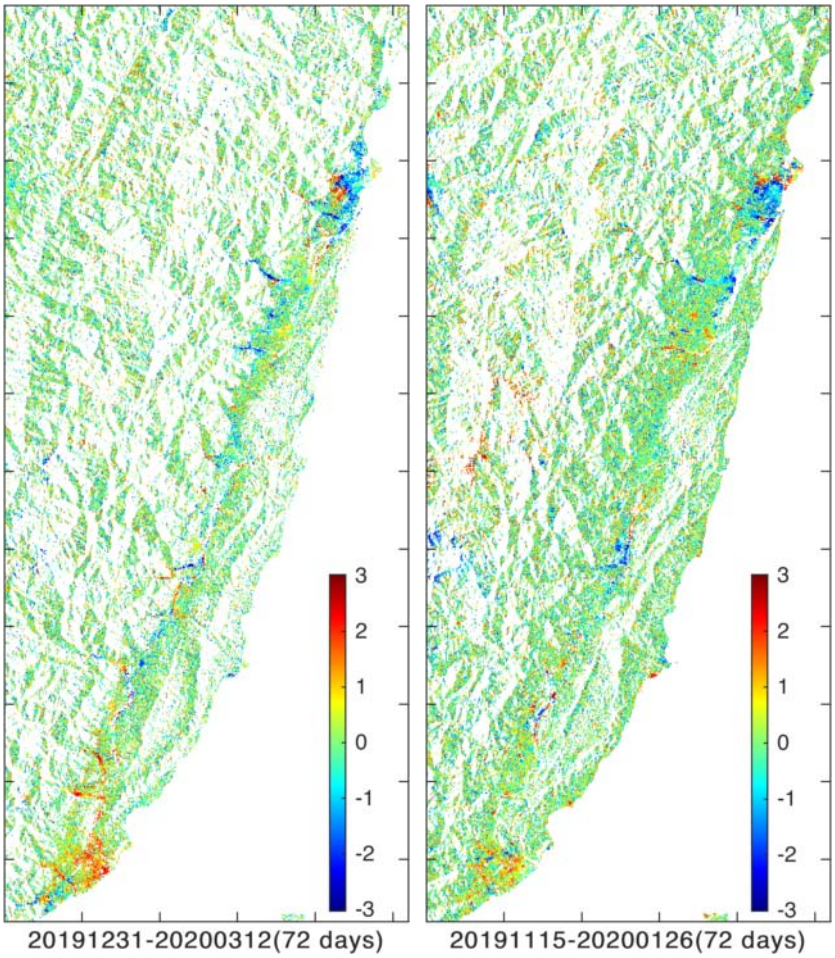



圖 3-4.5：Sentinel-1 升軌衛星影像 20191231-20200312 及降軌影像 20191115-20200126 干涉圖。
Figure 3-4.5: Sentinel-1 ascending interferogram of 20191231-20200312 and descending interferogram of 20191115-20200126.

圖 3-4.6 Sentinel-1 早期與現在在台灣區域所拍攝的範圍會略有差異，在進行干涉處理時，並非每個干涉對都能完整涵蓋研究區域，必須要經過挑選移除不完整的干涉對。而圖 3-4.7 為 20170127-20170208 與 20200124-20200205 干涉圖，時間基線是 12 天，由圖可見影像中於中央山脈區域有異常的干涉條紋呈現，然而這些區域屬於植被明顯，SAR 訊號的相位屬於比較不連續的區域。這些相位資訊可能是由於短時間基線干涉所導致的水氣、土壤含水量的改變與大氣中水氣之干擾。

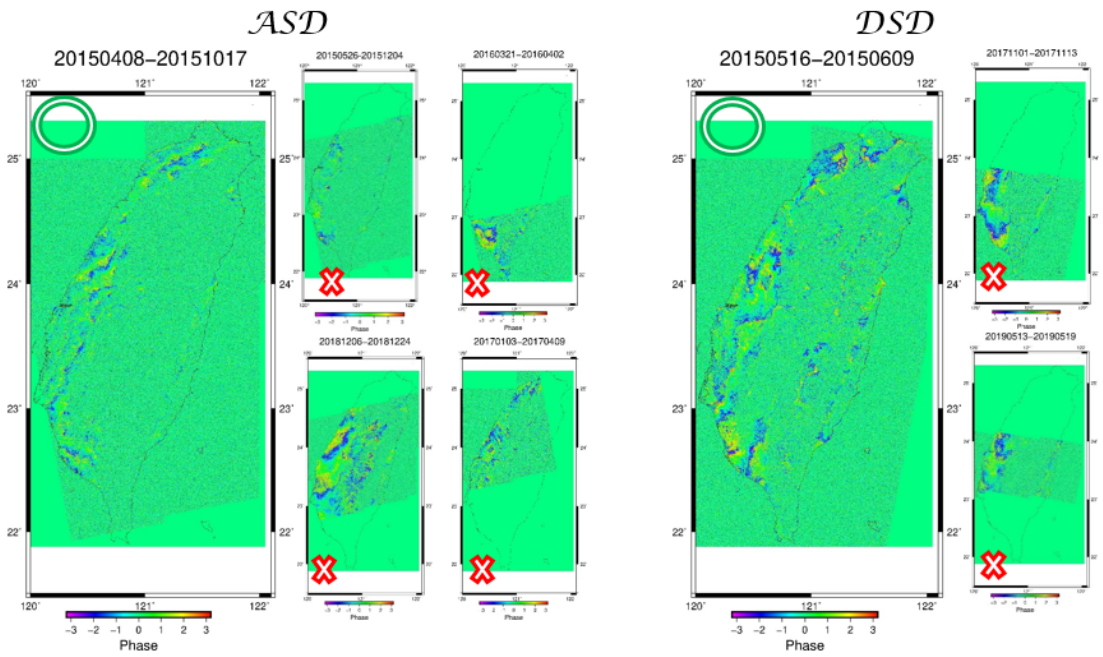



圖 3-4.6：Sentinel-1 干涉影像涵蓋區域綠色圓圈代表可以作為後續時間序列分析的資料，而紅色叉叉的干涉必須要移除。

Figure 3-4.6: Sentinel-1 interferograms covered in AOI of this project. We use the inteferograms marked with green circles and exclude those with red crosses.

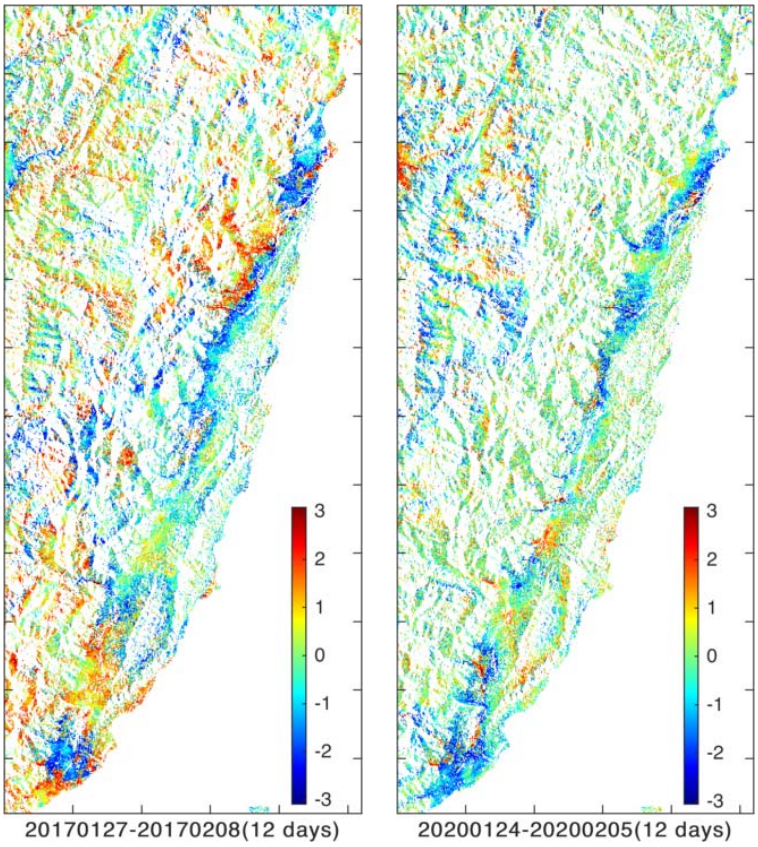



圖 3-4.7：Sentinel-1 短時間基線在中央山脈區域有異常的干涉條紋產生。

Figure 3-4.7: Abnormal fringe observed in short-term temporal baseline in Central Range area.

圖 3-4.8 及圖 3-4.9 即為 Sentine-1 衛星影像在此期間（2015/04~2020/10）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，對所有 PS 點做校正。並且將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值進行比較。升軌的比對結果的相關性比降軌比對結果小（圖 3-4.10），可能是由於東部區域的速度場有較多平行於升軌衛星飛行方向的分量（圖 3-4.8），平行衛星飛行方向的變形在相位變化上並不明顯，導致 InSAR 在偵測接近平行衛星飛行方向的變形並不敏感。

對於升軌衛星是由西往東觀測，台灣東部縱谷區域大部分斷層上盤北偏西的速度場在視衛星方向的變化是縮短的，數值上為正值。而對於降軌衛星是由東往西觀測，北偏西的速度場在視衛星方向遠離，數值顯示為負值。

圖 3-4.11 剖面 A 向東跨過米崙斷層，升軌的 LOS 速度約在-15 mm/yr 至 5 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在 10 mm/yr 至 20 mm/yr 之間變化。整體 LOS 速度不論升軌或降軌都是由西向東遞減，速度梯度有明顯變化，明顯的分界能有效的萃取出米崙斷層在地表上的位置。跨過米崙斷層之後，升軌的速度變得更小，而降軌的速度變得更大。在升軌與降軌的變化方向相反的主要原因，可能是由於實際地表變形速度是發生在水平方向（向東）而非垂直，會在升軌的視衛星方向伸長（負變化），在降軌的視衛星方向縮短（正變化）。綜合升軌與降軌的速度場剖面資料顯示，在跨過米崙斷層後地表有明顯水平速度分量（約向東）增加。

剖面 B 向東跨過嶺頂斷層，升軌與降軌的 LOS 速度約在-4 mm/yr 至 4 mm/yr 之間變化。整體 LOS 速度不論升軌或降軌都是由西向東遞減，速度梯度有明顯變化，明顯的梯度分界能有效的萃取出嶺頂斷層在地表上的位置，斷層西側的速度較為一致，約-3 mm/yr。特別的是此剖面區域不論升軌或降軌的速度變化都相當一致，這有可能是由於該區域的水平速度相當小，主要貢獻在 LOS 的速度是來自於垂直的速度分量。這一推論也可從該區域都有相當小的 GPS 水平速度場（圖 3-4.8 或圖 3-4.9）得到佐證。

剖面 C 向東跨過瑞穗斷層與奇美斷層，升軌的 LOS 速度約在-1 mm/yr 至 6 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在-2 mm/yr 至-9 mm/yr 之間變化。主要明顯速度梯度變化的地方發生在瑞穗斷層，跨過瑞穗斷層之後，升軌的速度變得更大，而降軌的速度變得更小。與剖面 A 的解釋一樣，是由於主要地表變形速度

是發生在水平方向（向西）的壓縮，會在升軌的視衛星方向縮短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。綜合升軌與降軌的速度場剖面資料顯示，在跨過瑞穗斷層後地表有明顯水平速度分量（約向西）增加。但跨越奇美斷層時並沒有發現明顯的速度梯度變化。

剖面 D 向東跨過玉里斷層與池上斷層，升軌與降軌的 LOS 速度約在-6 mm/yr 至 2 mm/yr 之間變化。原來速度場由西向東遞減，在跨過玉里斷層後向東增加，然後在池上斷層附近達到最大，過了池上斷層約 0.5 公里之後，升軌與降軌的速度變得較為反向不一致。整體來說，池上斷層以西的 LOS 速度場，除了受到水平運動的貢獻外，主要受到垂直地表變化控制，因此在升軌與降軌的速度變化接近一致，而池上斷層以東的 LOS 速度場主要受到接近北偏西的水平運動影響，會在升軌的視衛星方向縮短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。

剖面 E 向東跨過池上斷層南段，升軌的 LOS 速度約在-7 mm/yr 至 4 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在-5 mm/yr 至 4 mm/yr 之間變化。直到池上斷層之前，整體 LOS 速度不論升軌或降軌都是由西向東遞減，接近池上斷層時，升軌的 LOS 速度場在 1 公里內上升了約 7 mm/yr，降軌的 LOS 速度場在 1 公里內上升了約 4 mm/yr。過了池上斷層約 1 公里之後，升軌與降軌的 LOS 速度場有些微反向的趨勢，推測可能主要受到接近北偏西的水平運動影響 ，會在升軌的視衛星方向縮短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。

剖面 F 向東跨過鹿野斷層與利吉斷層，升軌的 LOS 速度約在-4 mm/yr 至 9 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在 0 mm/yr 至 7 mm/yr 之間變化。從升軌與降軌 LOS 速度幾乎反向的表現，說明該區域的變形主要以水平變形為主，從 GPS 速度場可以看出該區域具有北偏西的構造活動，在升軌的視衛星方向縮短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。一直到靠近鹿野斷層前約 1 公里，升軌的 LOS 速度就開始明顯上升，直到跨鹿野斷層後約 0.5 公里，LOS 速度上升了約 8 mm/yr，但此現象在降軌的 LOS 速度變化較不明顯。目前推測可能是由於向西旋轉的速度改變，導致變化的速度在升軌 LOS 貢獻的比例較多，而在降軌的 LOS 的貢獻較少而造成。另外速度場的變化並非以斷層為分界，可能也指示了主要活動來自於斷層較深處，斷層淺部是鎖定的。升軌與降軌的 LOS 速度場在跨過鹿野斷層後基本上是反向的，在升軌的 LOS 速度呈現向東增加，在降軌呈現遞減。在跨過利吉斷層後升軌與降軌的 LOS 速度場又反過來，在升軌

的 LOS 速度呈現向東遞減，在降軌呈現增加。升降軌反向的 LOS 速度場說明在鹿野斷層東側的構造活動有水平方向的速度改變，並且受到利吉斷層淺部活動的影響，速度場的變化大約發生在利吉斷層的位置。

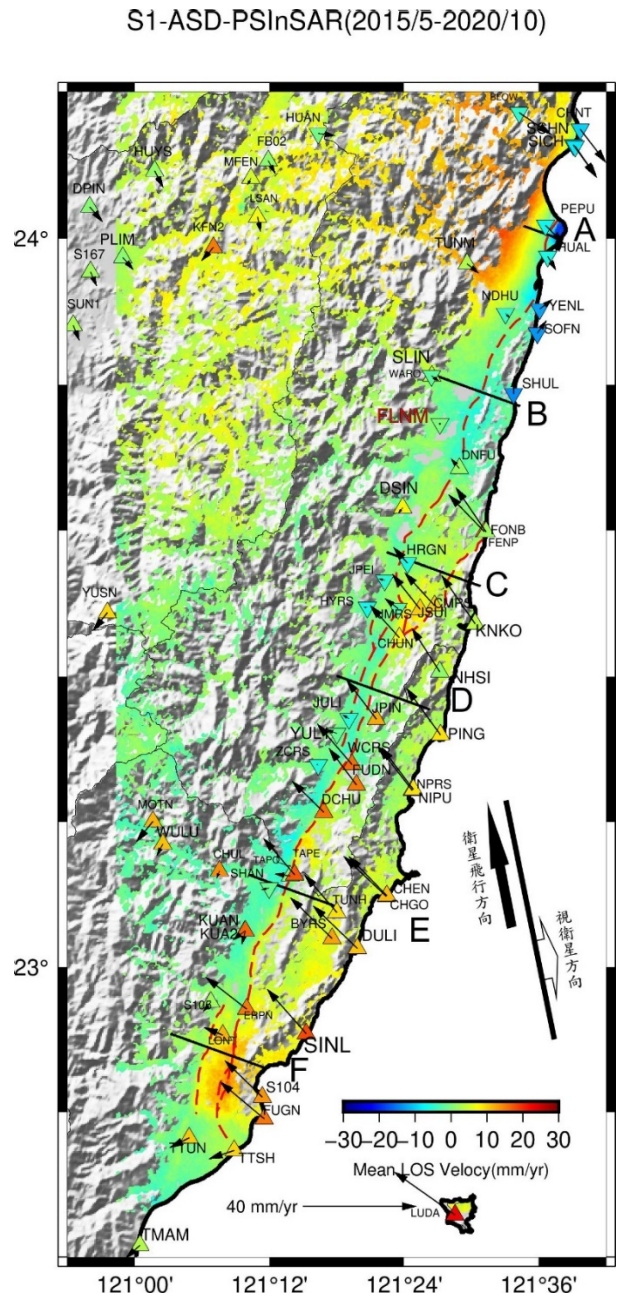



圖 3-4.8：Sentinel-1 升軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-4.8: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 ascending images (2015/04~2020/10). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

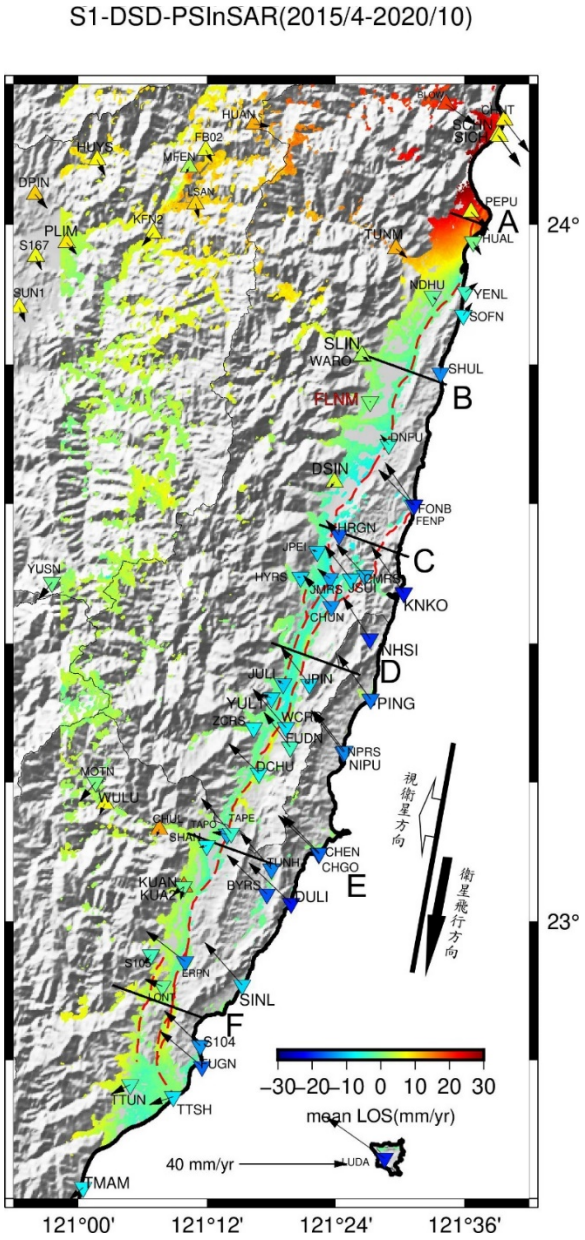



圖 3-4.9：Sentinel-1 降軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-4.9: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 descending images (2015/04~2020/10). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and eastward motion while elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence and westward mtion. Reference point is continuous GPS station FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

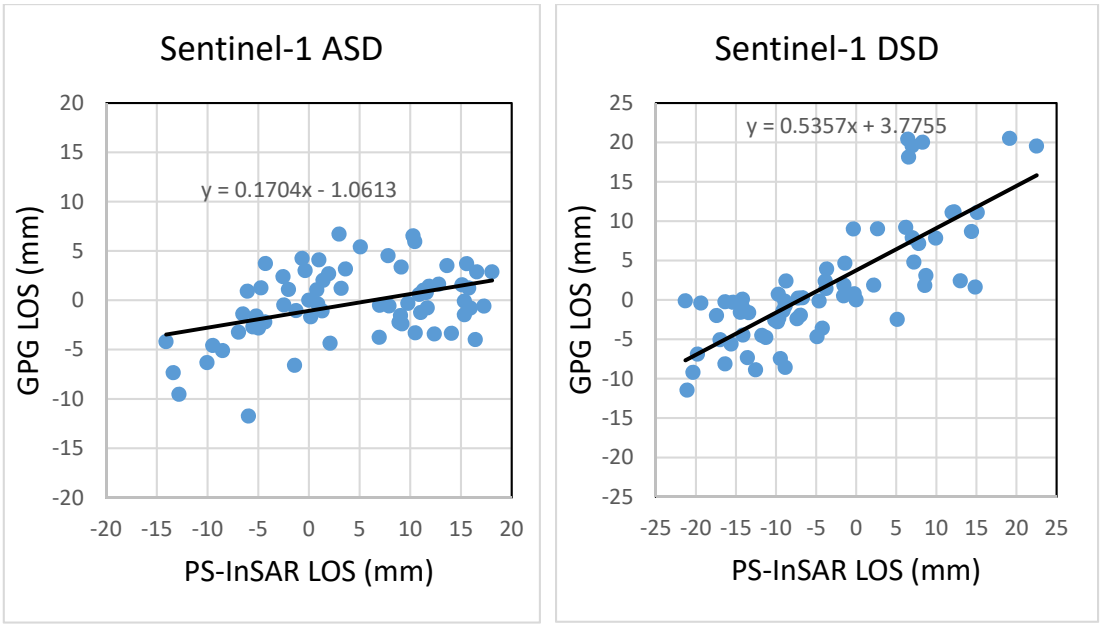



圖 3-4.10：Sentinel-1 升軌影像（左圖）及降軌影像（右圖）的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。

Figure 3-4.10: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of Sentinel-1 images and continuous GPS stations.

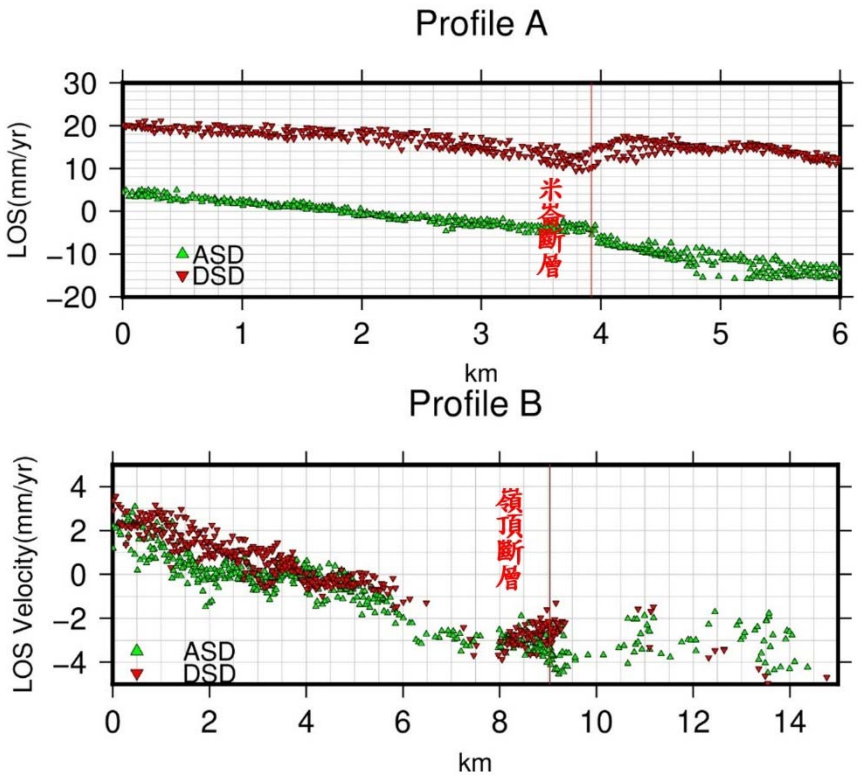



圖 3-4.11：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。剖面位置如圖 3-1.8 或圖 3-1.9。綠色三角形為升軌 LOS 速度場剖面，紅色三角形為降軌 LOS 速度場剖面。

Figure 3-4.11: Mean LOS velocity profile from PSs of assending and descending orbits. Locations of profiles are shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9. Green triangles represent LOS velocity in ascending oribit while red triangle represent LOS velocity in descending orbit.

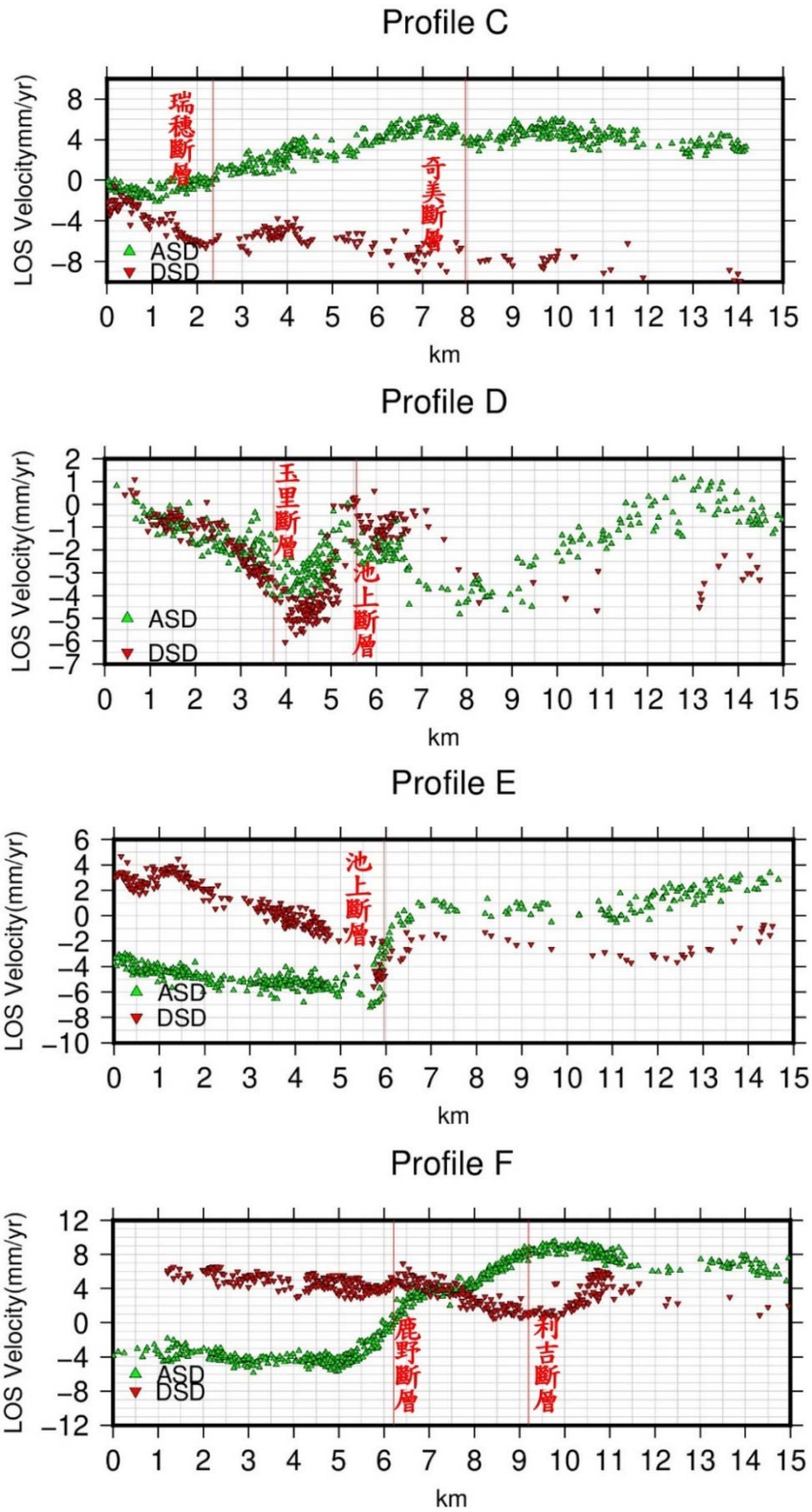



圖 3-4.11（續）：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。剖面位置如圖 3-1.8 或圖 3-1.9。綠色三角形為升軌 LOS 速度場剖面，紅色三角形為降軌 LOS 速度場剖面。

Figure 3-4.11 (Cont.): Mean LOS velocity profile from PSs of assending and descending orbits. Locations of profiles are shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9. Green triangles represent LOS velocity in ascending oribit while red triangle represent LOS velocity in descending orbit.

SAR 所分析的變化一般都是指視衛星方向的變化，但 Sentinel-1 衛星對於同一區域會有升軌與降軌影像，也因此可以獲得兩個方向的速度場，因此可以計算獲得垂直方向與東西方向上的地表變形速度場（Tung, et al., 2019）。

$$E = \frac{LOS_{dsc}\cdot\cos(\theta_{asc}) - LOS_{asc}\cdot\cos(\theta_{des})}{\cos(\alpha_{dsc})\cdot\sin(\alpha_{dsc})\cos(\theta_{asc}) + \cos(\alpha_{asc})\cdot\sin(\alpha_{asc})\cos(\theta_{dsc})}$$

$$U = \frac{LOS_{asc} + E\times\cos(\alpha_{asc})\sin(\theta_{asc})}{\cos(\theta_{asc})}$$

$LOS_{asc}$ ： 升軌視衛星方向變形量
$LOS_{dsc}$ ： 降軌視衛星方向變形量
$\theta_{asc}$ ： 升軌衛星觀測入射角度
$\theta_{dsc}$ ： 降軌衛星觀測入射角度
$\alpha_{asc}$ ： 升軌衛星軌道飛行方向角度(與正北之夾角)
$\alpha_{dsc}$ ： 降軌衛星軌道飛行方向角度

接著，我們結合升軌與降軌影像以獲得東西方向（圖 3-4.12）與垂直方向（圖 3-4.13）上的地表變形。由結果可以得到在這段期間：（1）縱谷大致呈現向西的構造活動速度分量。（2）縱谷北端從嶺頂斷層北端以北有明顯向東的構造活動分量。（3）縱谷南端鹿野斷層兩側的速度場不同，上盤（東側）向西，而下盤（西側）向東。（4）縱谷北側米崙斷層西側至中央山脈區有明顯抬升的變形趨勢，而且越往西側變形速度場越大，可以達到 20 mm/yr，此結果與 GPS 的速度場相符。（5）池上斷層兩側有明顯垂直速度場差異，但差異量約 14 mm/yr。（6）InSAR 所顯示的水平與垂直速度場有一致的趨勢，但量值都較 GPS 小。

對於縱谷北側木瓜溪以北，或米崙斷層西側至中央山脈區域，抬升變形速率不論是 InSAR 或 GPS 都顯示有越來越大的現象，比對 Ching et al. (2011a)研究中更北側一點，沿著立霧溪從東往西向中央山脈的水準測量結果，也有相同的抬升變形速率變化變大的現象。這個情況可能與臺灣造山系統的板塊隱沒特性有關，歐亞板塊大約在臺灣東部向東隱沒，而菲律賓海板塊在台灣東部以斜碰撞的方式撞上歐亞板塊，並且在臺灣東北區域向北隱沒，然而隱沒於地涵的歐亞板塊有可能隨著越往臺灣東北測產生脫落（Teng et al., 2000）或者裂縫（Lallemand et al., 2013）而變短，結果會導致受板塊帶動的地涵物質累積在這個區域造成較大的抬升力。Lin and Kuo（2016）藉由各種板塊隱沒的模型結果也顯示在花蓮以西的中央山脈區域會有較大於中央山脈中南段的垂直變形速率。

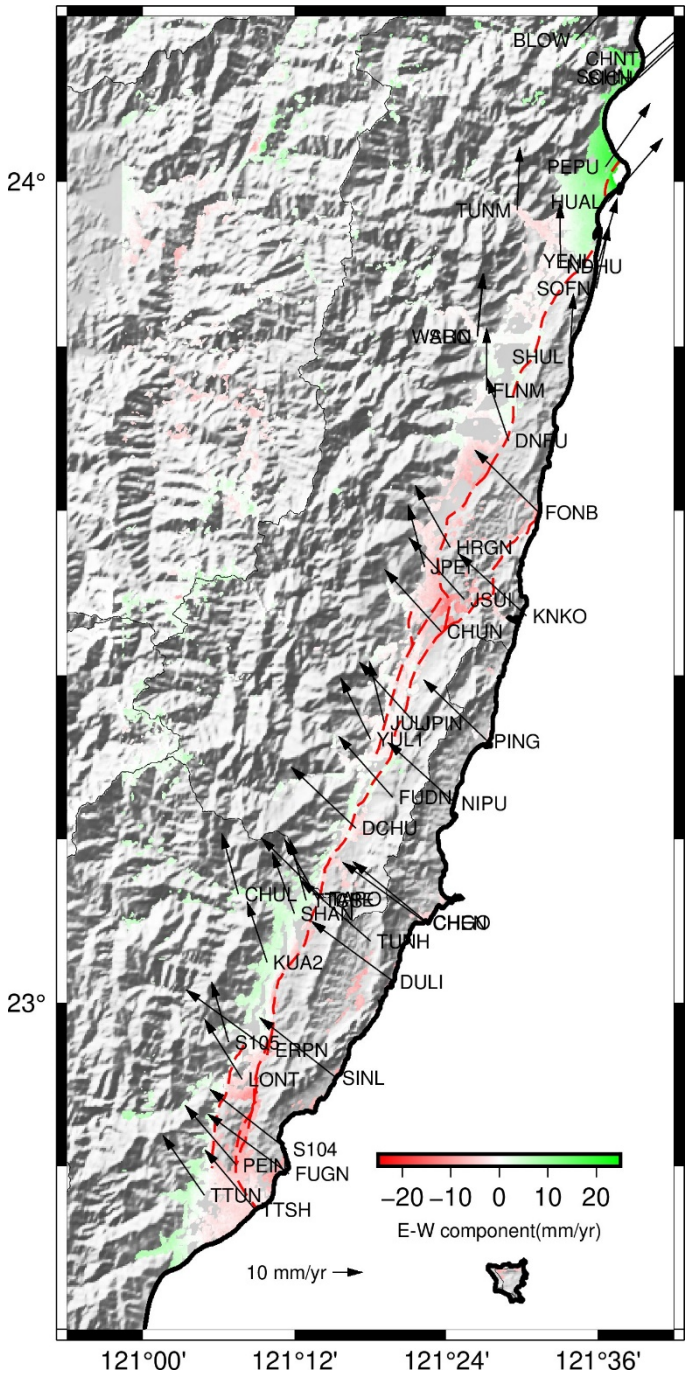



圖 3-4.12：Sentinel-1 東西方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東；冷色系代表地表變形向西。箭頭為連續 GPS 測站水平方向移動速率。

Figure 3-4.12: 2.5-dimension velocity field (E-W direction) converted from ascending and descending interferograms (warm color represents eastward; cold color represents westward). The symbol arrows present the GPS horizontal velocity.

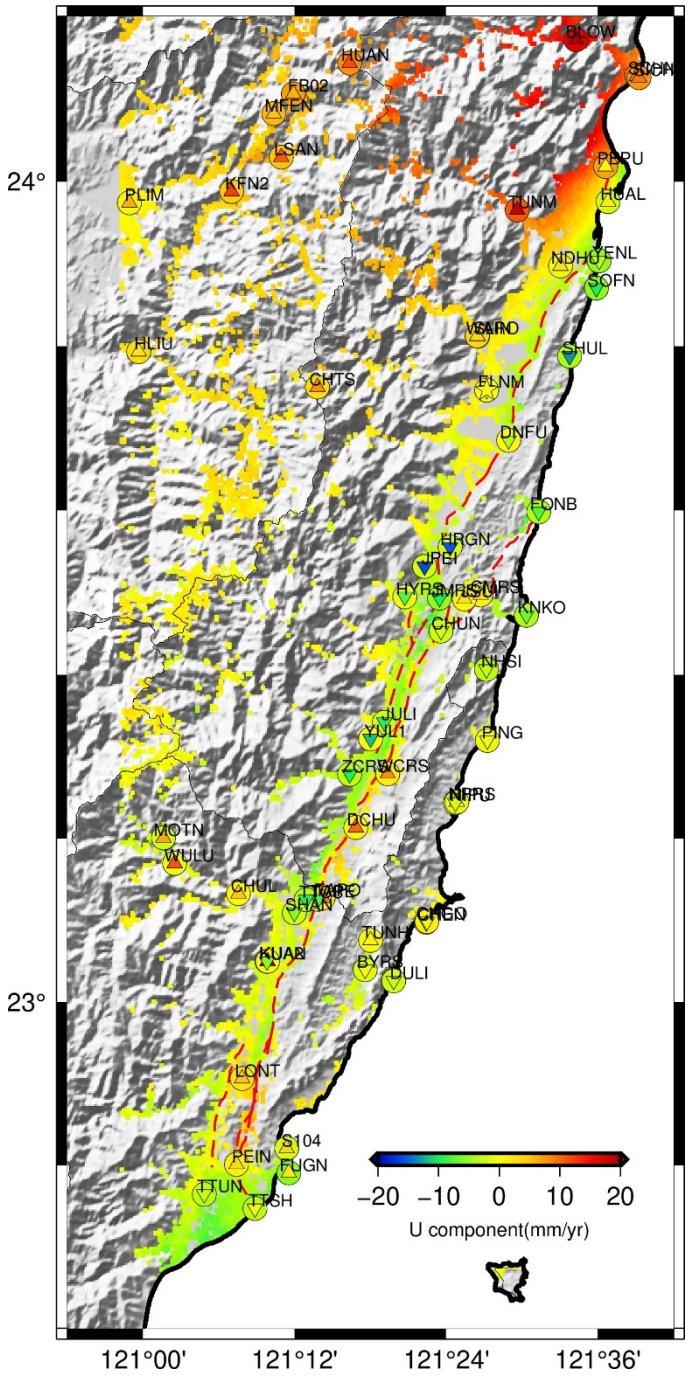



圖 3-4.13：Sentinel-1 垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系三角形代表地表變形抬升；冷色系倒三角形代表地表變形下降。三角形為連續 GPS 測站垂直方向移動速率。

Figure 3-4.13: 2.5 dimension velocity field (vertical direction) converted from ascending and descending interferograms (warm color triangle represents uplift; cold color inverse triangle represents subsidence). Triangles and inverse triangles represent the vertical velocity field.

## 3-4-2 PS-InSAR 技術時間序列分析

針對 Sentinel-1 衛星進行連續 GPS 測站周圍 PS 點之時間序列進行比對，包括做為參考點的 FLNM 測站、米崙斷層附近的 PEPU、瑞穗斷層與奇美斷層之間的 JSUI 與鹿野斷層與奇美斷層之間的 LONT，共四個測站。FLNM 之 GPS 資料與周圍 PS 點時間序列的參考點相對於 ITFR14，其餘測站皆以花蓮縣鳳林的 FLNM 測站做為參考點進行測試比較。由於 PS-InSAR 獲得之時間序列為對視衛星方向（LOS）上的變化，圖 3-4.14 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 Sentinel-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有良好的關聯性，趨勢大致符合，米崙斷層附近的 PEPU 站也明顯地顯示了同震及震後的變形行為。

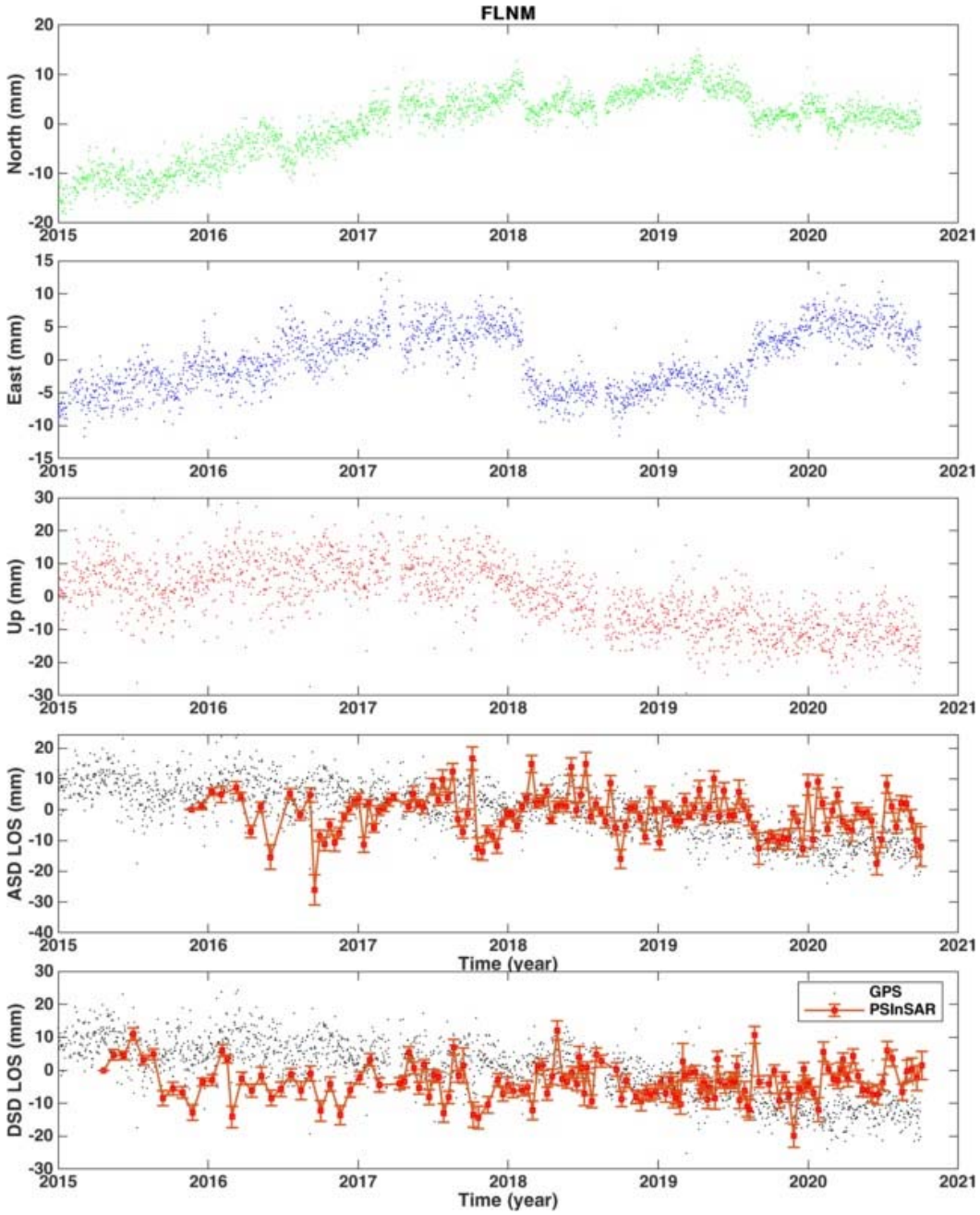



圖 3-4.14：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-4.8 或圖 3-4.9。

Figure 3-4.14: Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

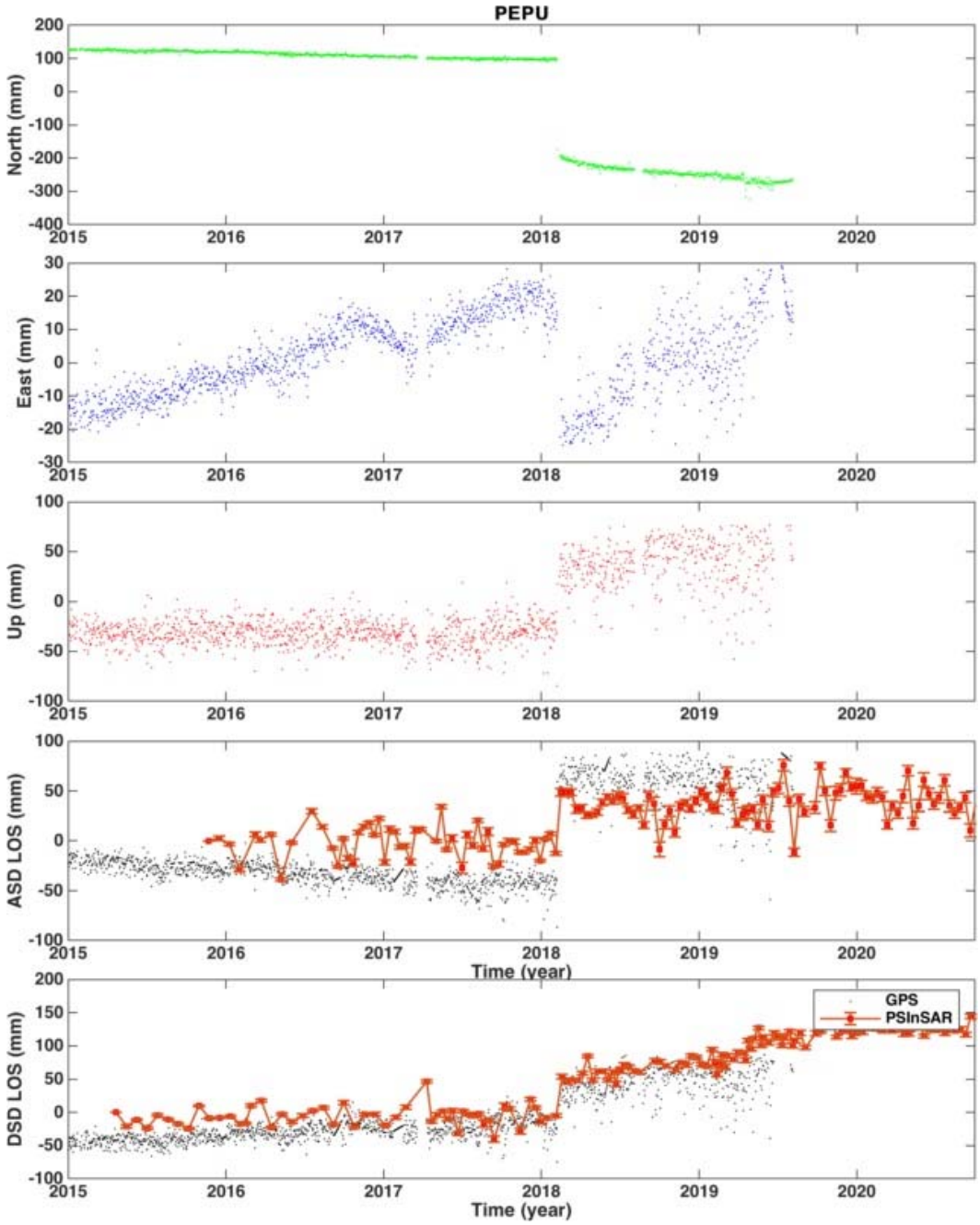



圖 3-4.14（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-4.8 或圖 3-4.9。

Figure 3-4.14 (Cont.) C Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

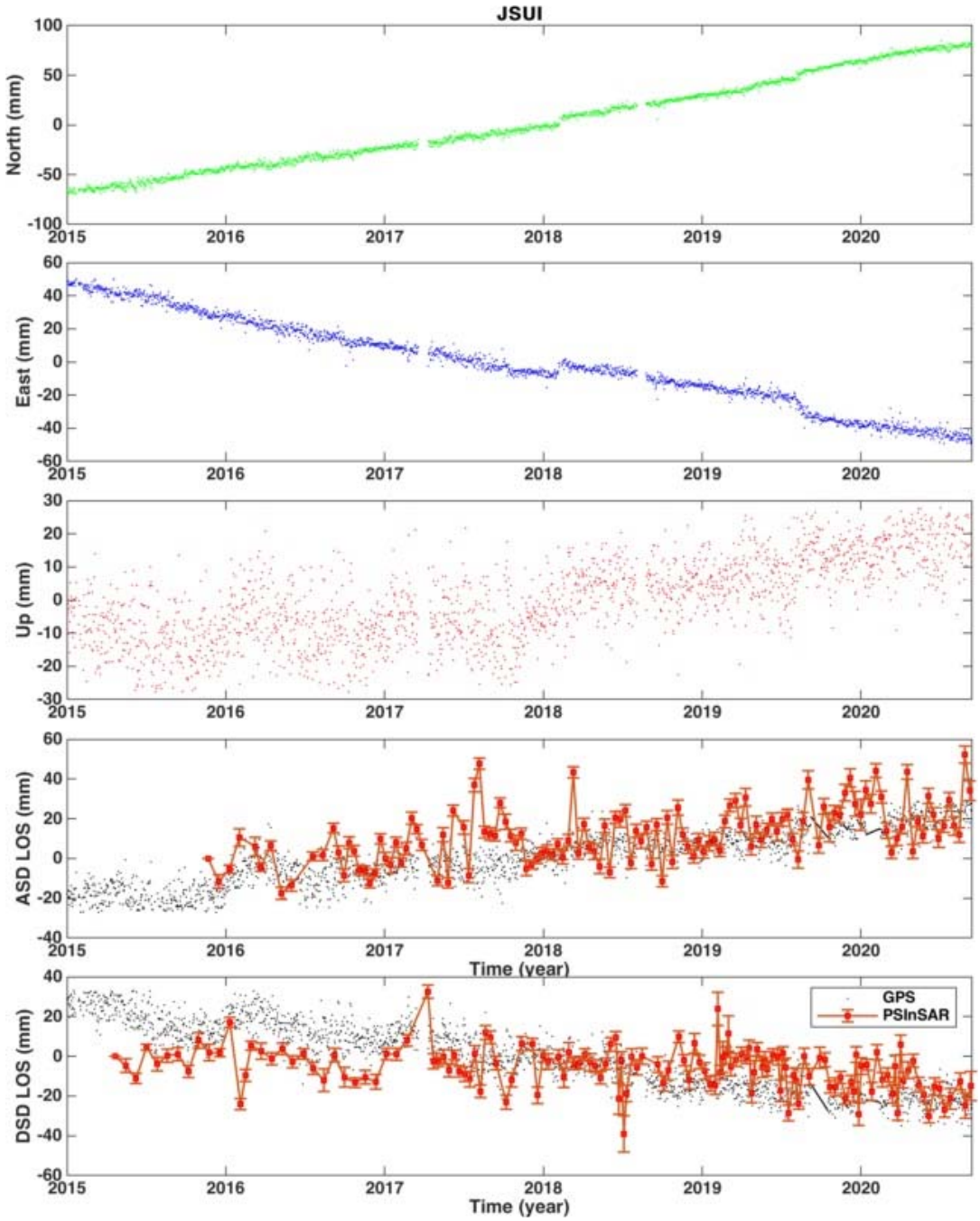



圖 3-4.14（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-4.8 或圖 3-4.9。

Figure 3-4.14 (Cont.) C Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

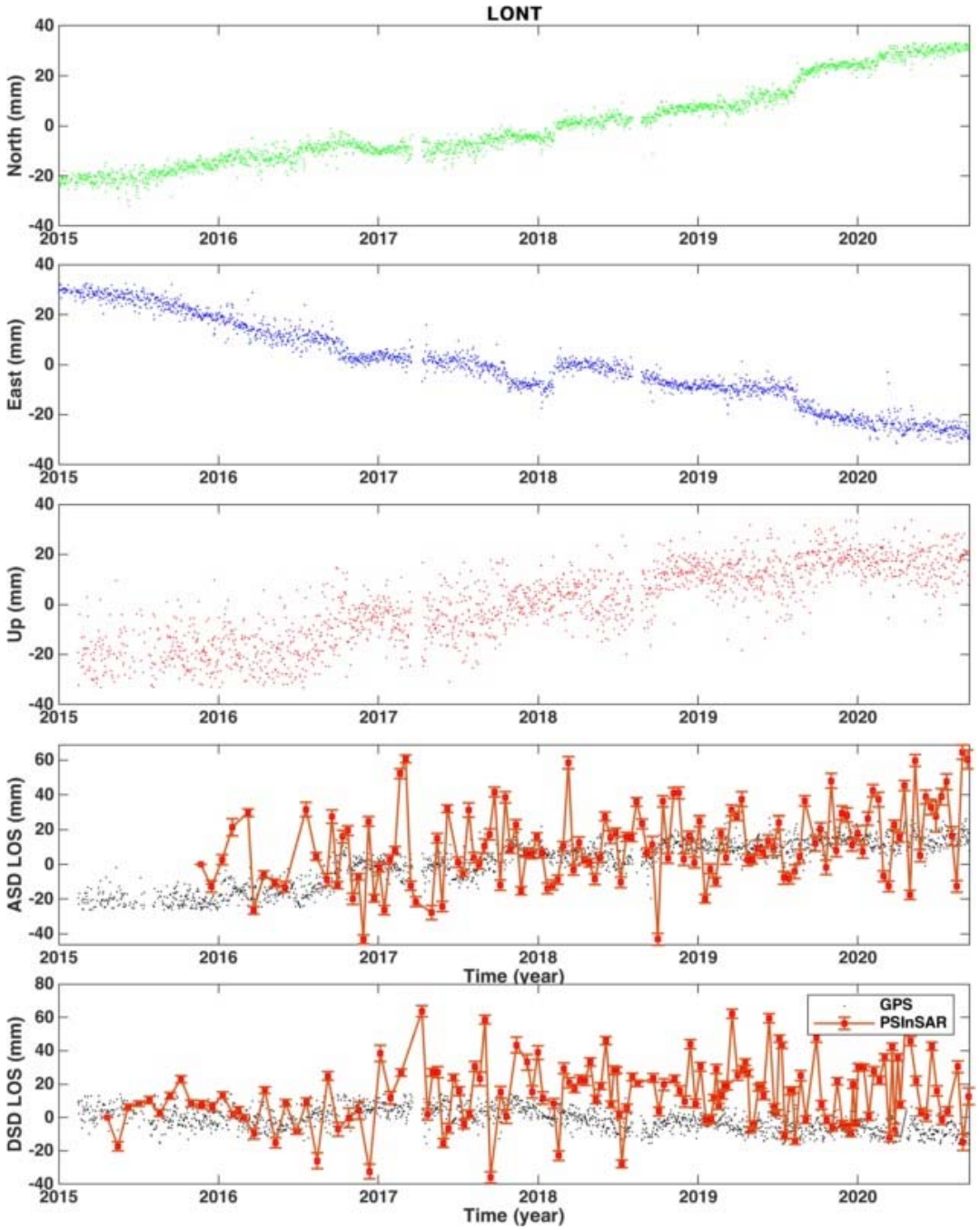



圖 3-4.14（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-4.8 或圖 3-4.9。

Figure 3-4.14 (Cont.) C Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

## 3-4-2-1 嶺頂斷層

根據圖 3-4.15 GPS 及衛星時間序列結果顯示，Sentinel-1 衛星時期（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）斷層東側的 SHUL 相對斷層西側 SLIN 在 2018 年花蓮地震有水平向較明顯的同震地表變形，但偏南北向的地表變形在 InSAR 偵測較不敏感，此點可由 GPS 轉 LOS 與 InSAR LOS 的時間序列看出來。

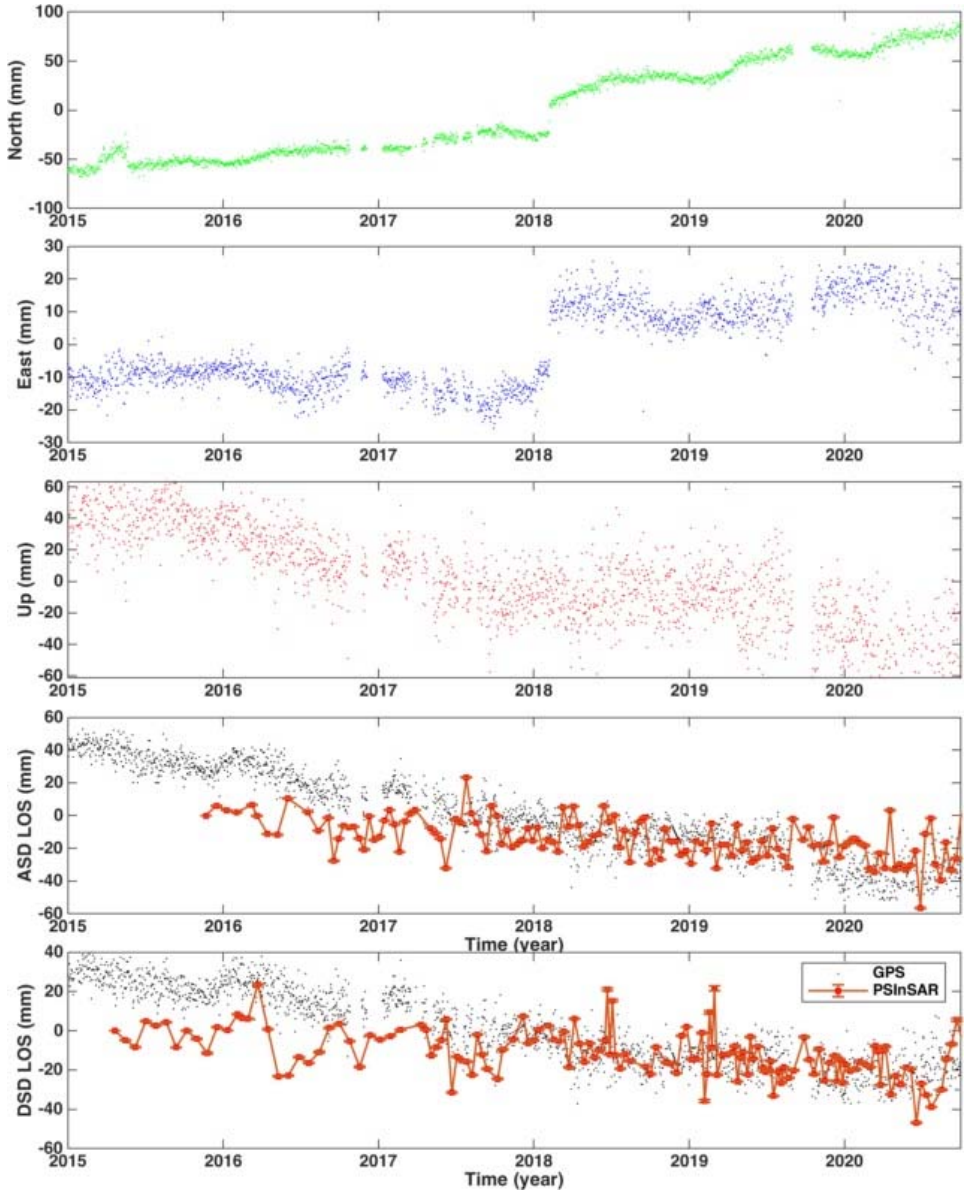



圖 3-4.15：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 SHUL 相對於 SLIN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-4.15: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station SHUL relative to GPS station SLIN during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

## 3-4-2-2 瑞穗斷層

圖 3-4.16 GPS 及衛星時間序列結果顯示，Sentinel-1 衛星時期（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）斷層東側的 JSUI 相對斷層西側 JPEI 在 2018 年花蓮地震有水平向較明顯的同震地表變形，但偏南北向的地表變形在 InSAR 偵測較不敏感，此點可由 GPS 轉 LOS 與 InSAR LOS 的時間序列看出來。

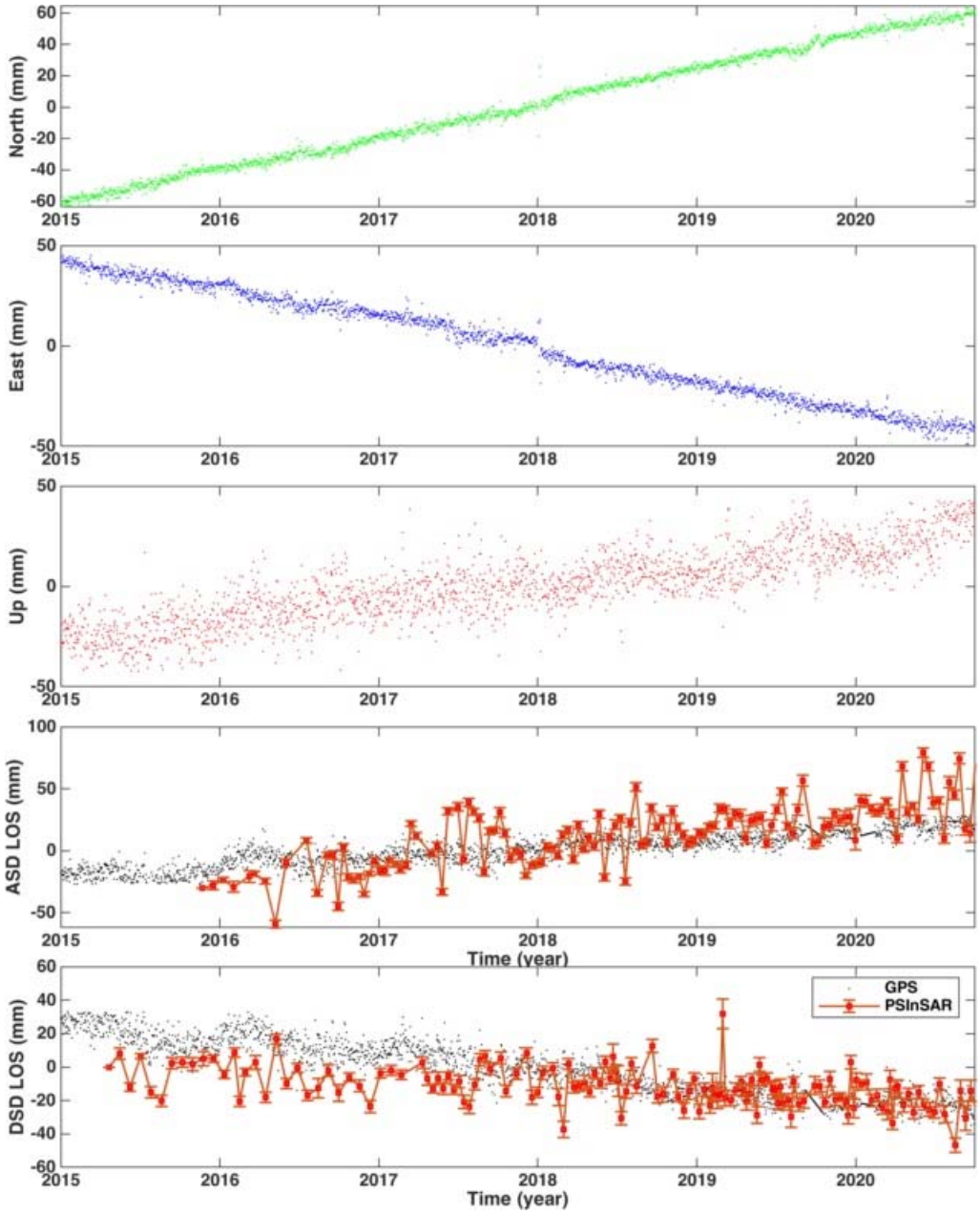



圖 3-4.16：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JSUI 相對於 JPEI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-4.16: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station JPEI relative to GPS station HYRS during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

## 3-4-2-3 玉里斷層與池上斷層

根據圖 3-4.17 GPS 及衛星時間序列結果顯示，池上斷層北段東側 JPIN 相對於玉里斷層西側 GPS 測站 JULI 於長期平均向西北方位移，PS-InSAR 的時間序列與 GPS 的時間序列相當一致。

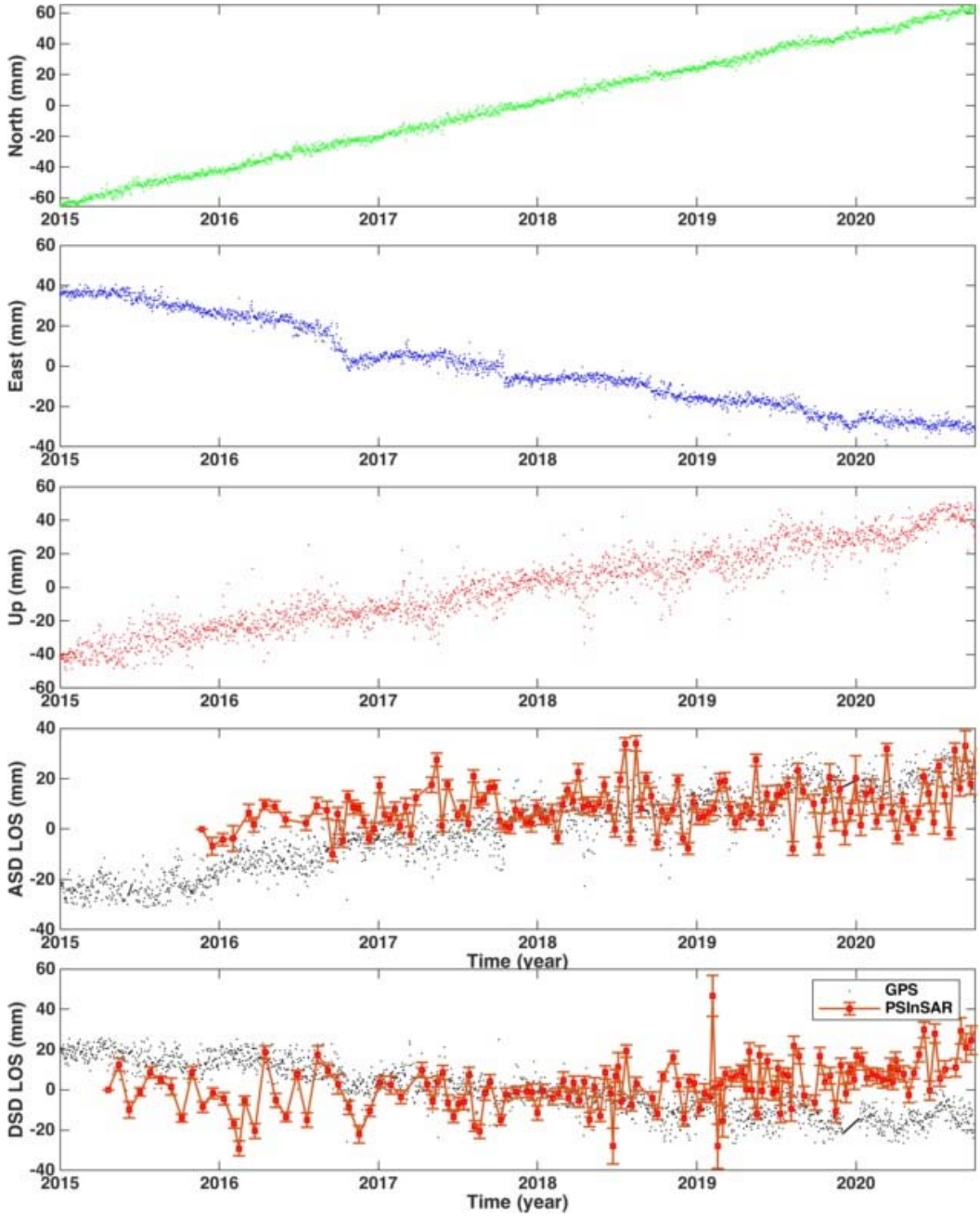



圖 3-4.17：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JPIN 相對於 JULI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-4.17: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station JPIN relative to GPS station JULI during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

圖 3-4.18 GPS 及衛星時間序列結果顯示，池上斷層東側 GPS 測站 TAPO 相對於池上斷層西側 SHAN 長期平均向西北方位移，有明顯週期性抬升，PS-InSAR 的時間序列與 GPS 的時間序列相當一致。

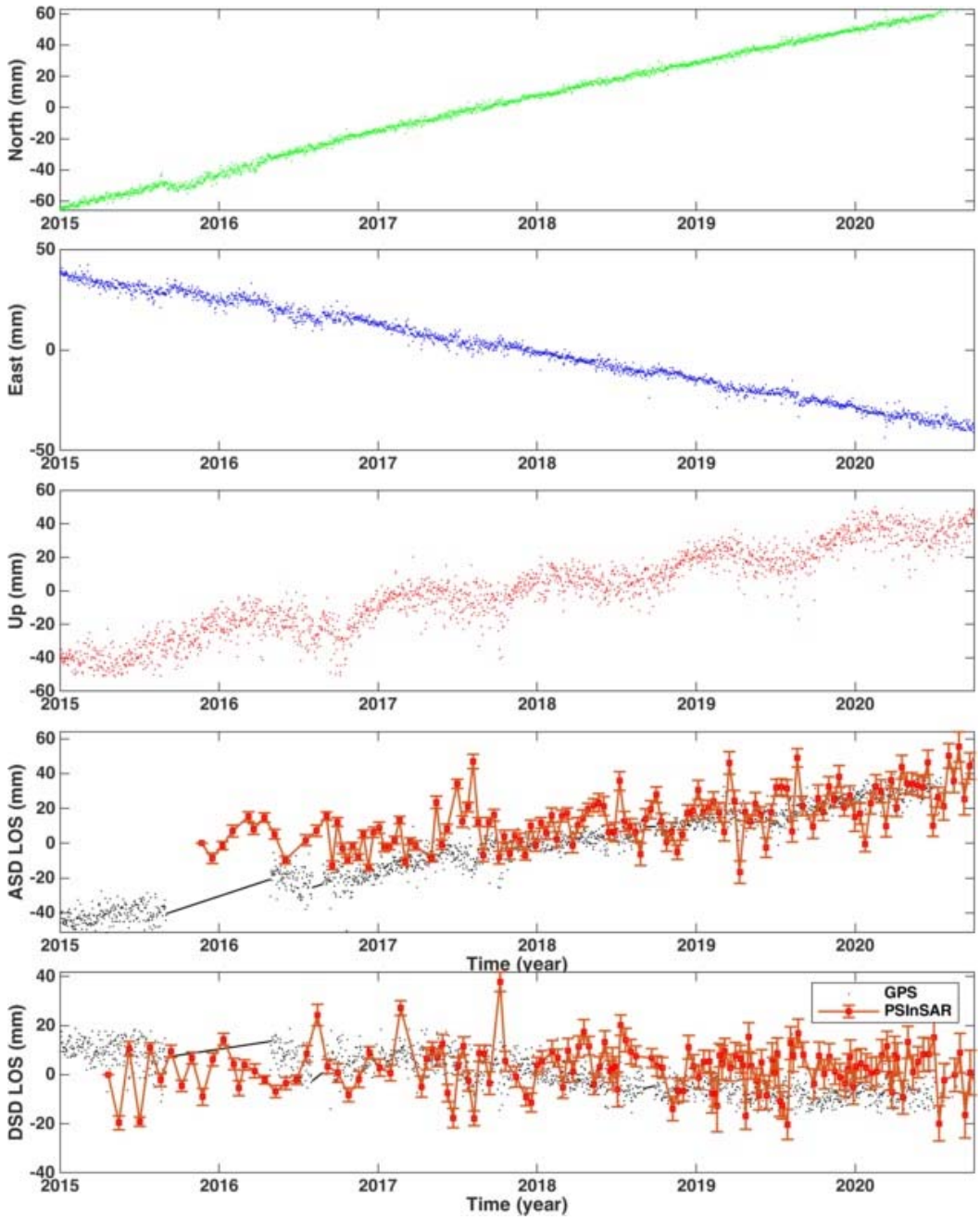



圖 3-4.18：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 TAPO 相對於 SHAN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-4.18: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station TAPO relative to GPS station SHAN during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

## 3-4-2-4 鹿野斷層

圖 3-4.19 GPS 及衛星時間序列結果顯示，鹿野斷層東側 GPS 測站 LONT 相對於斷層西側 S105 長期平均向西北方位移，有些微週期性抬升訊號，PS-InSAR 的時間序列與 GPS 的時間序列相當一致，降軌的 PS-InSAR 可以看出在 2018 年花蓮地震後到年中有一段變形趨勢變化，之後又回到原來的趨勢。

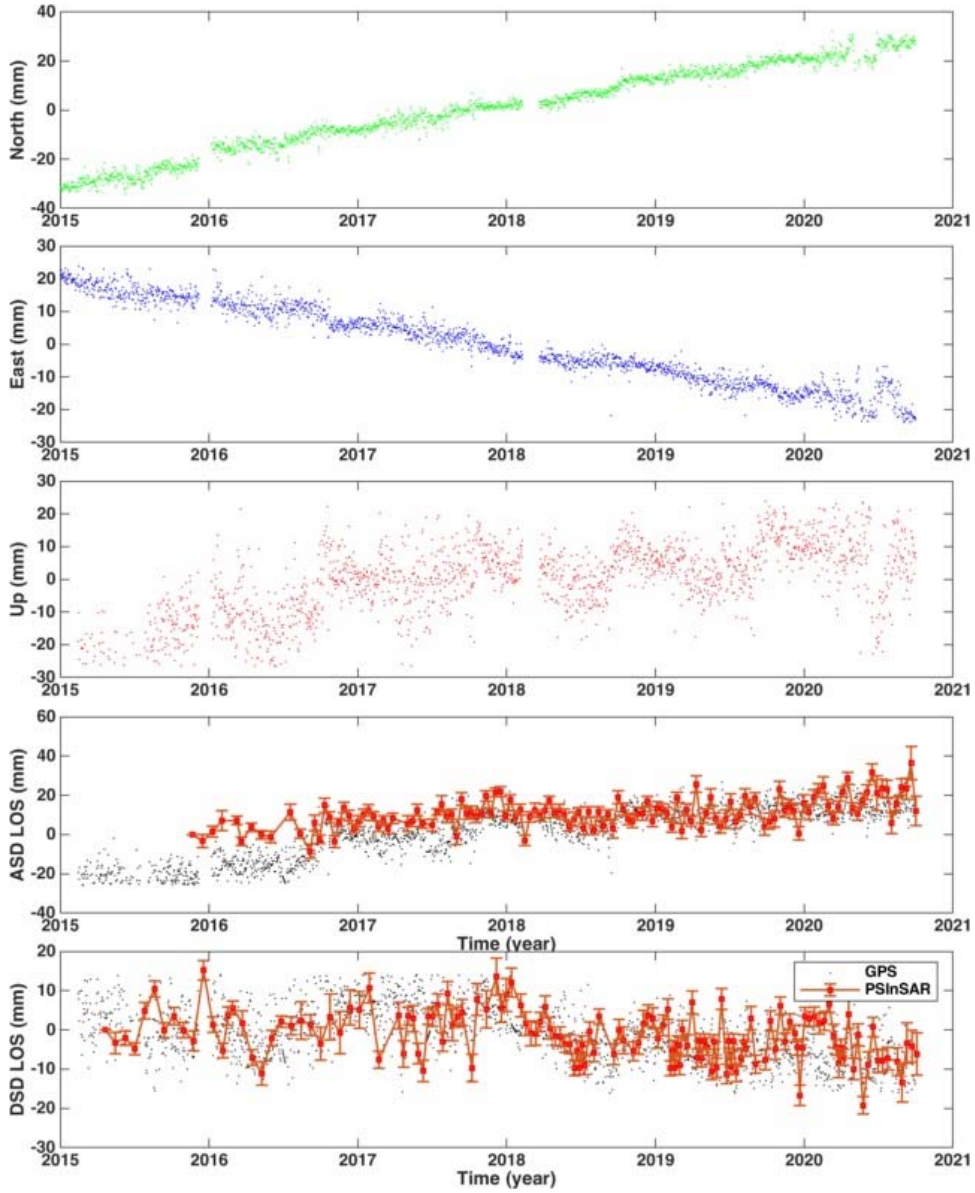



圖 3-4.19：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 LONT 相對於 S105 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-4.19: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station LONT relative to GPS station S105 during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

# 第四章、斷層模型建置

## 4-1 斷層幾何參數設定

本階段之計畫進行地調所活動斷層之模型建置，各斷層分別為：山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、大甲－彰化斷層、屯子腳斷層、車龍埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮-六甲斷層、觸口斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層、米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層與利吉斷層。為了合理地解釋臺灣東北部之速度梯度變化，本計畫也將宜蘭北部及南部構造納入分析。

本計畫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活動構造，採用斷層模型進行參數反演，推估斷層短期滑移速率及滑移虧損率等資訊。在斷層幾何參數的估算中，為了與中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫成果進行整合，本章節之斷層幾何參數採用中興工程顧問社彙整之各斷層參數（表 4-1.1），推算最佳模型之擬合解，提供後續斷層潛勢分析使用。簡要之斷層幾何參數描述內容如下。

表 4-1.1：台灣活動斷層之幾何參數。

Table 4-1.1: Geometry parameters of active faults in Taiwan.

| | 斷層名稱 | | 傾角（degree） | 斷層底部深度（km） |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 山腳斷層 | | 70.0 | 0.0－9.0 |
| 2 | 湖口斷層 | | 60.0 | 0.0－7.0 |
| 3 | 新竹斷層 | | 50.0 | 0.0－10.0 |
| 4 | 新城斷層 | | 40.0 | 0.0－10.0 |
| 5 | 獅潭斷層 | | 50.0 | 0.0－8.0 |
| 6 | 三義斷層 | | 25.0 | 0.0－9.0 |
| 7 | 大甲－彰化斷層 | 北段 | 25.0 | 0.0－6.0 |
| | | 南段 | 25.0 | 0.0－7.5 |
| 8 | 屯子腳斷層 | | 75.0 | 0.0－13.0 |
| 9 | 車龍埔斷層 | | 35.0 | 0.0－8.0 |
| 10 | 大茅埔－雙冬斷層 | | 50.0 | 0.0－5.0 |
| 11 | 九芎坑斷層 | | 25.0 | 0.0－7.0 |
| 12 | 梅山斷層 | | 80.0 | 0.0－12.5 |
| 13 | 大尖山斷層 | | 32.5 | 0.0－6.5 |
| 14 | 木屐寮-六甲斷層 | | 45.0 | 0.0－6.0 |
| 15 | 觸口斷層 | | 45.0 | 0.0－7.0 |
| 16 | 新化斷層 | | 80.0 | 0.0－12.5 |
| 17 | 後甲里斷層 | | 40.0 | 0.0－4.0 |
| 18 | 左鎮斷層 | | 70.0 | 0.0－10.0 |
| 19 | 小崗山斷層 | | 45.0 | 0.0－10.0 |
| 20 | 旗山斷層 | | 60.0 | 0.0－13.0 |
| 21 | 潮州斷層 | | 60.0 | 0.0－17.5 |
| 22 | 恆春斷層 | | 75.0 | 0.0－20.0 |
| 23 | 米崙斷層 | | 65.0 E | 0.0－10.0 |
| 24 | 嶺頂斷層 | | 65.0 E | 0.0－27.5 |
| 25 | 瑞穗斷層 | | 65.0 E | 0.0－27.5 |
| 26 | 奇美斷層 | | 80.0 E | 0.0－25.0 |
| 27 | 玉里斷層 | | 51.0 E | 0.0－10.0 |
| 28 | 池上斷層 | | 60.0 E<br>25.0 E | 0.0－20.0<br>20.0－25.0 |
| 29 | 鹿野斷層 | | 30.0 E | 0.0-5.0 |
| | | | 下接利吉斷層 | |
| 30 | 利吉斷層 | | 55.0 E<br>40.0 E | 0.0－22.0<br>22.0－27.5 |
| 31 | 宜蘭北部及南部構造 | 北部 | 60.0 | 0.0－9.4 |
| | | 南部 | 60.0 | 0.0－11.3 |

## 4-1-1 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)根據基盤深度模型推估的結果,認為山腳斷層深部銜接至基底滑脫面,其斷層幾何為深度 0.0 - 6.0 公里,傾角 75 度;深度 6.0 - 15.0 公里傾角則為 25 度(圖 4-1.1)。

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 0.0 - 9.0 公里時傾角為 70 度,深度在 9.0 -15.0 公里時傾角則為 35 度(圖 4-1.2)。

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 4-1.3)。

與本計畫合作之單位中興工程顧問社在專家會議中決議,匙狀幾何具有較大的可能性,且三個模型在淺部皆為高傾角,在故本計畫選用第二組斷層幾何為山腳斷層的幾何模式。此外,由於地震多發生在斷坡上,所以本計畫在估算斷層潛勢時,首先考慮斷層深度在 0.0 - 9.0 公里時傾角為 70 度的部分。

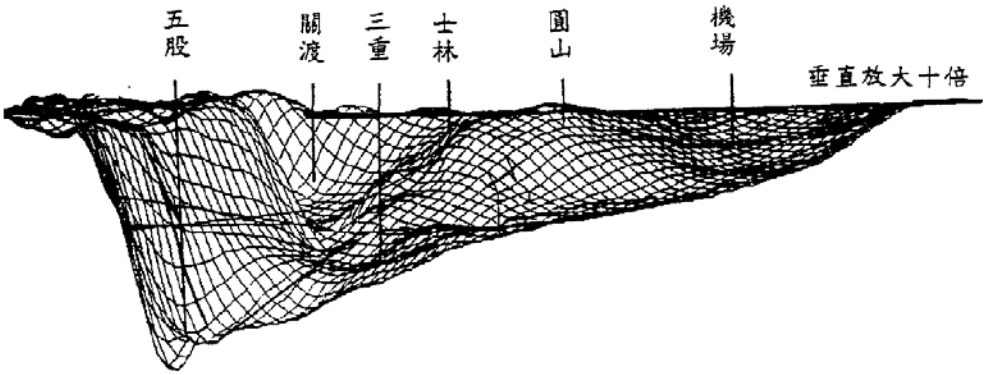



圖 4-1.1:台北盆地北半部岩盤之縱深剖面(王乾盈與孫志財,1999)。
Figure 4-1.1: Depth section of the rock pan in the northern half of the Taipei Basin.

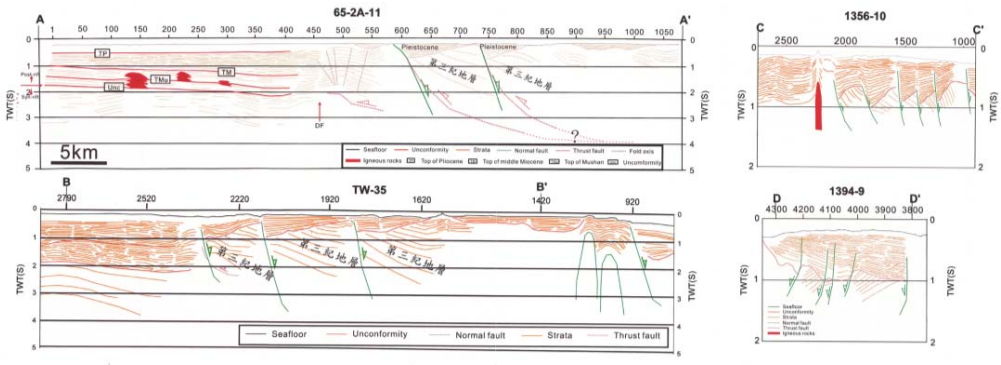



圖 4-1.2：台灣北部之海域震測剖面（羅聖宗等，2007）。

Figure 4-1.2: Seismic profile in the sea area of northern Taiwan.

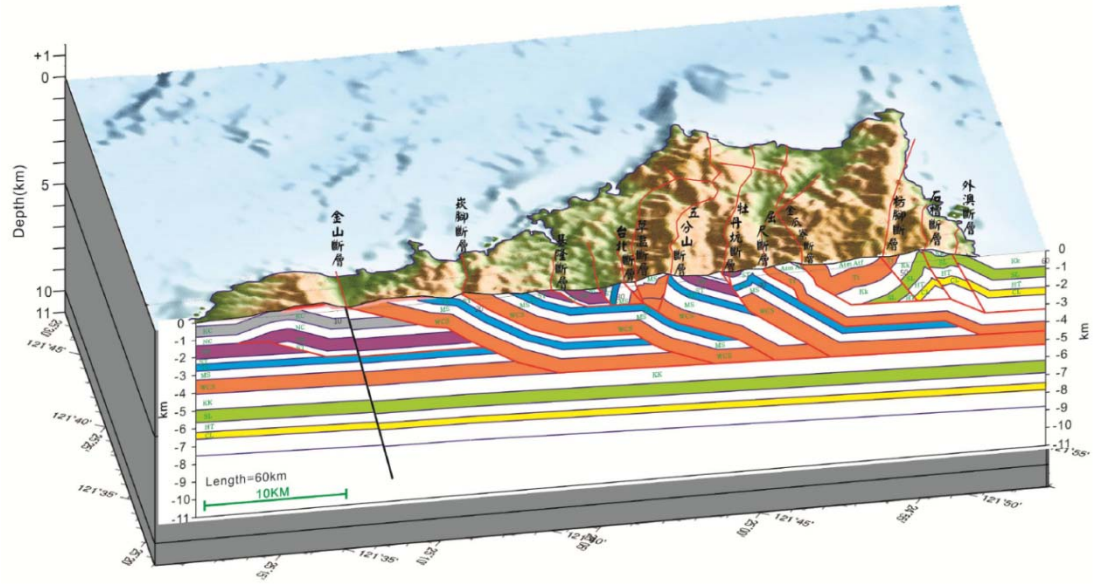



圖 4-1.3：台灣北部之三維地形圖及構造平衡剖面（陳冠宇，2014）。

Figure 4-1.3: Three-dimensional topographic map and structural balance section of northern Taiwan.

## 4-1-2 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 4-1.4）。

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（Busk，1939）重新繪製湖口斷層地質剖面，得斷層傾角範圍約在 40 - 50 度之間（圖 4-1.5）。

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）以斷層彎曲褶皺模型(fault-bend fold)計算得深部滑移系統之傾角為 28 - 29 度，與鑽井資料獲得之斷層傾角 25 - 38 度一致（圖 4-1.6）；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 - 7.5 公里處（圖 4-1.7）。

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，屬於滑脫面的一部分，故選擇 0.0 - 7.0 公里、傾角為 60 度為湖口斷層的斷層幾何。

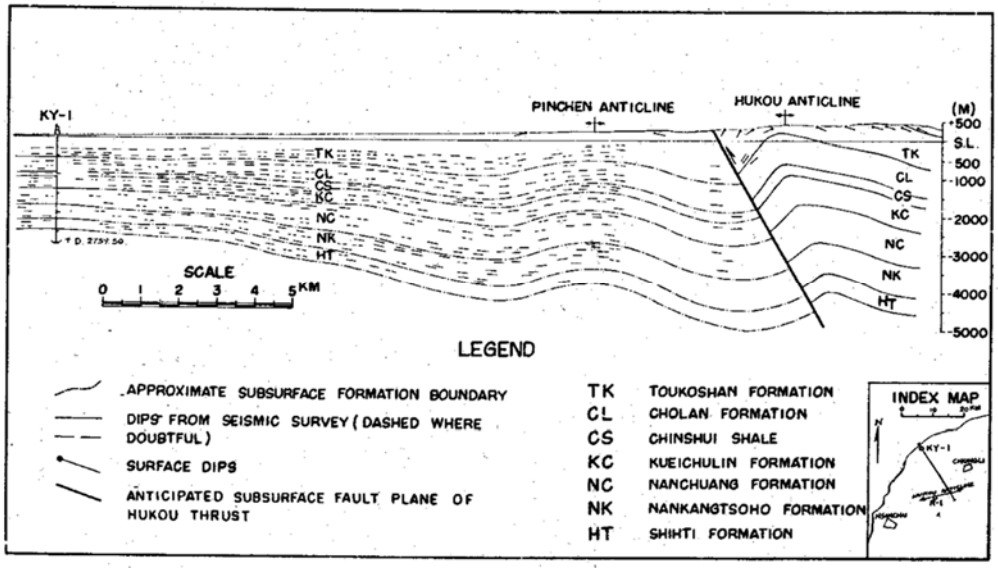



圖 4-1.4：湖口背斜至觀音鑽井的構造剖面（湯振輝，1963）。
Figure 4-1.4: Structural section from Hukou anticline to Guanyin drilling.

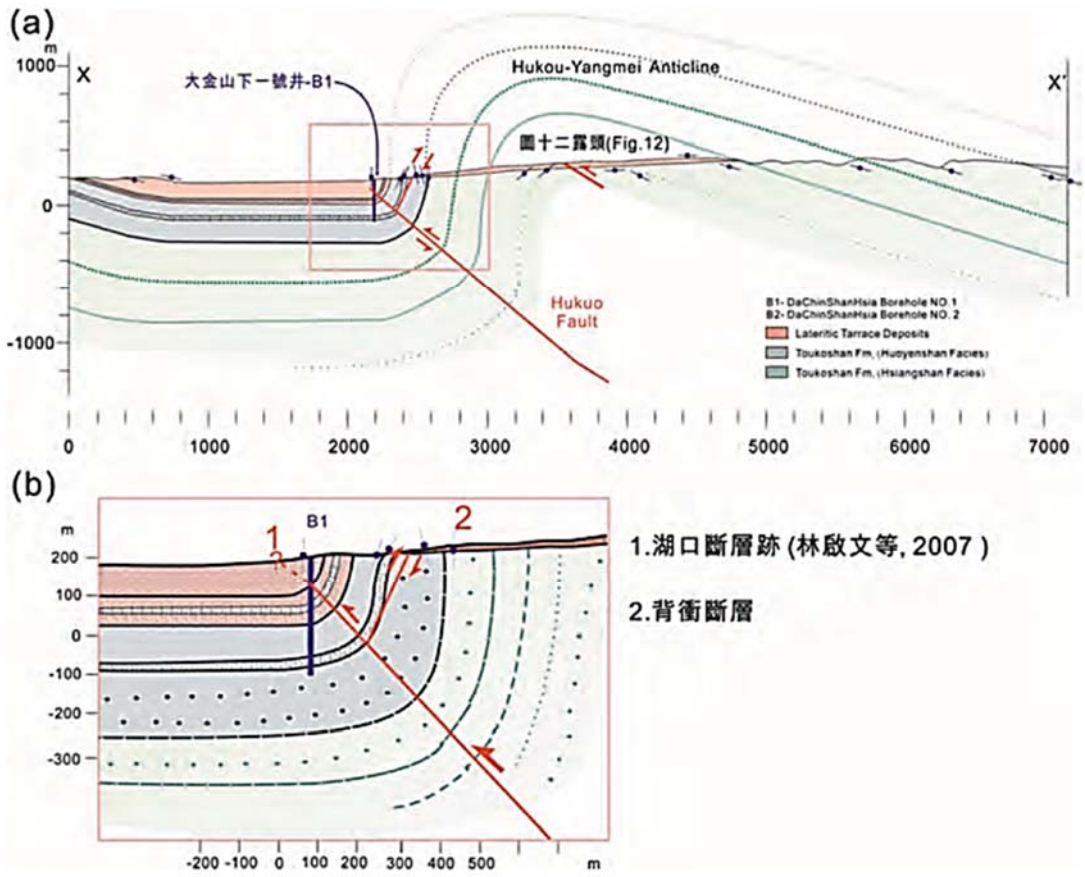



圖 4-1.5：湖口斷層地質剖面圖。(a) 大範圍區域剖面，包含湖口斷層上盤之明顯背斜構造。(b) 近斷層及淺部近地表之斷層相關變形構造剖面（朱傚祖等，2012）。

Figure 4-1.5: Geological section of the Hukou fault. (A) A large area section, including the obvious anticline structure of the hanging wall of the Hukou fault. (B) Near-fault and shallow near-surface fault-related deformation structure sections.

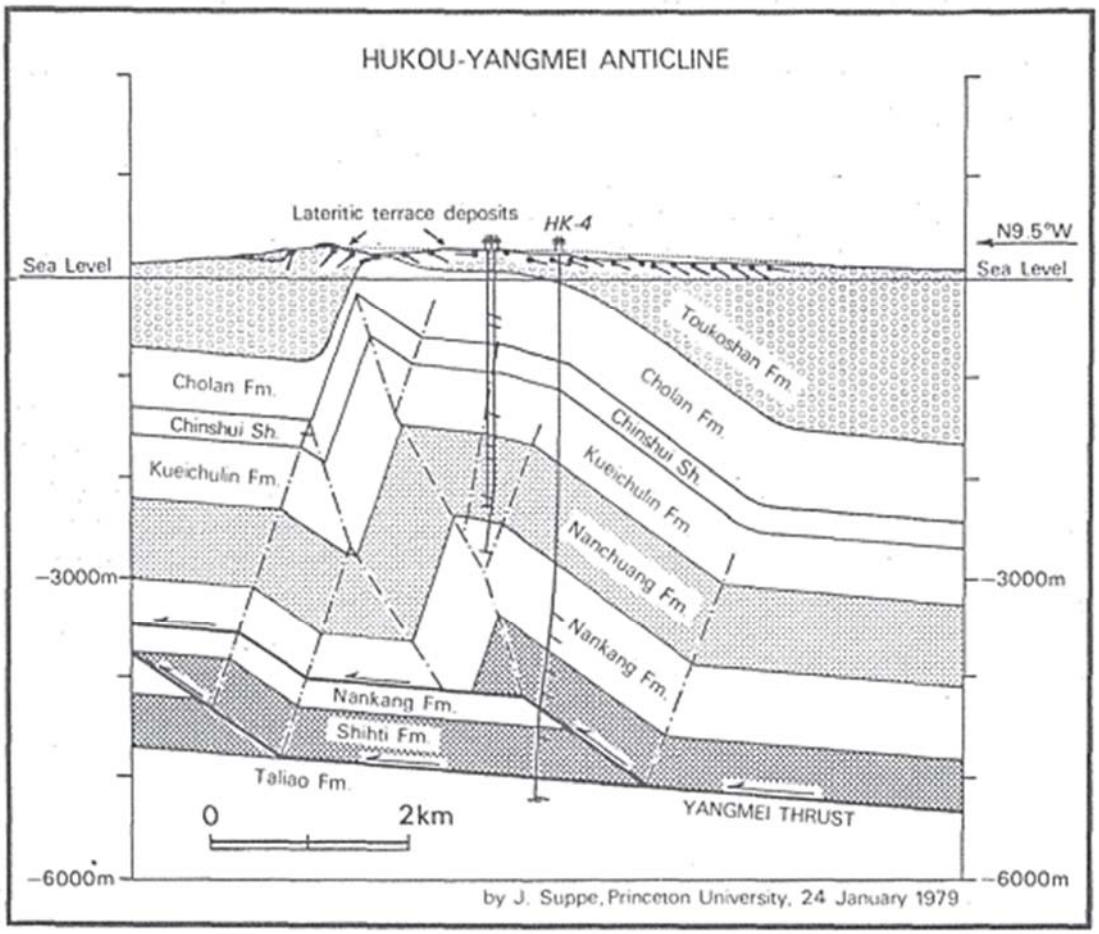



圖 4-1.6：橫跨湖口–楊梅背斜的地質剖面（Suppe and Namson, 1979）。
Figure 4-1.6: Geological section across Hukou-Yangmei anticline.

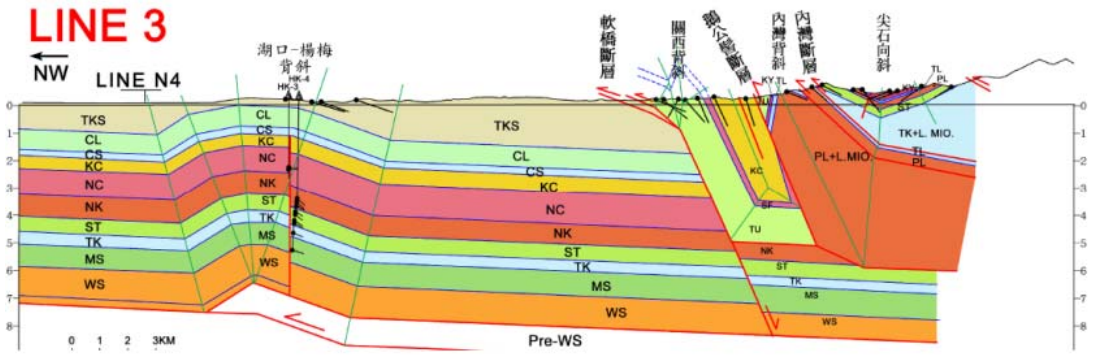



圖 4-1.7：橫跨湖口–楊梅背斜的地質構造剖面（黃旭燦等，2004）。
Figure 4-1.7: Geological structure section across Hukou-Yangmei anticline.

## 4-1-3 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 4-1.8）。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位於 10 公里（圖 4-1.9），與 Chiu（1971）之幾何模型及蒲新杰（2010）地震重新定位後的結果相同（圖 4-1.10）。

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 - 50 度（圖 4-1.11）。

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 - 10 公里時傾角則約 7.5 度，而新城斷層之深度則為 10 公里，傾角約 20 度（圖 4-1.12 及圖 4-1.13）。

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，此構造可能屬於滑脫面的一部分。故經專家會議決議，選擇新竹斷層為深度 10 公里，傾角 50 度，新城斷層深度為 10 公里，傾角 40 度之斷層參數。

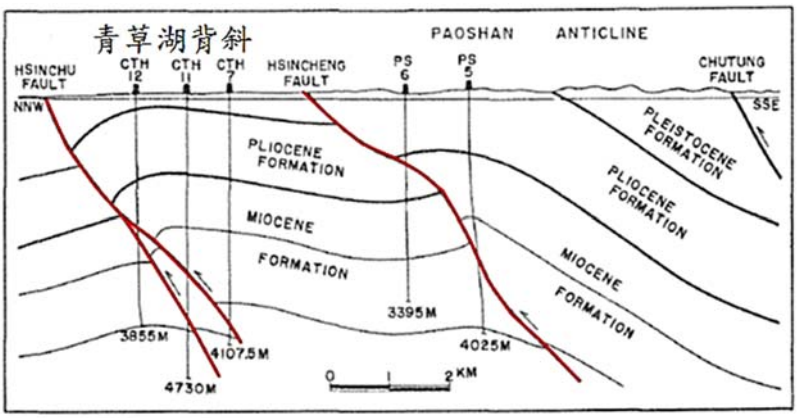



圖 4-1.8：新竹青草湖和寶山背斜的構造剖面。左側紅線為新竹斷層，右側為新城斷層（Chiu, 1971）。

Figure 4-1.8: Structural sections of Qingcaohu and Baoshan anticlines in Hsinchu. The red line on the left is the Hsinchu Fault, and the right is the Hsincheng Fault.

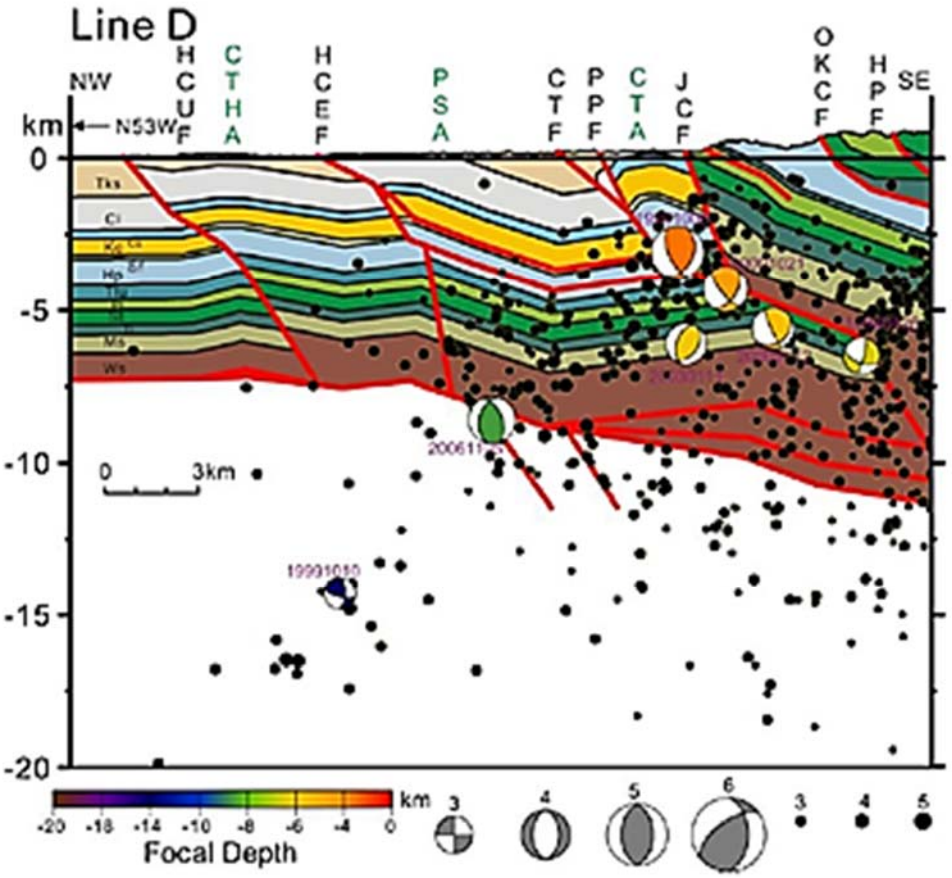



圖 4-1.9：新竹地區之地質構造與地震活動分布剖面圖。HCUF 代表新竹斷層，HCEF 則是新城斷層（黃宣維，2012）。

Figure 4-1.9: Geological structure and seismic activity distribution profile in Hsinchu area. HCUF stands for Hsinchu Fault and HCEF stands for Xincheng Fault.

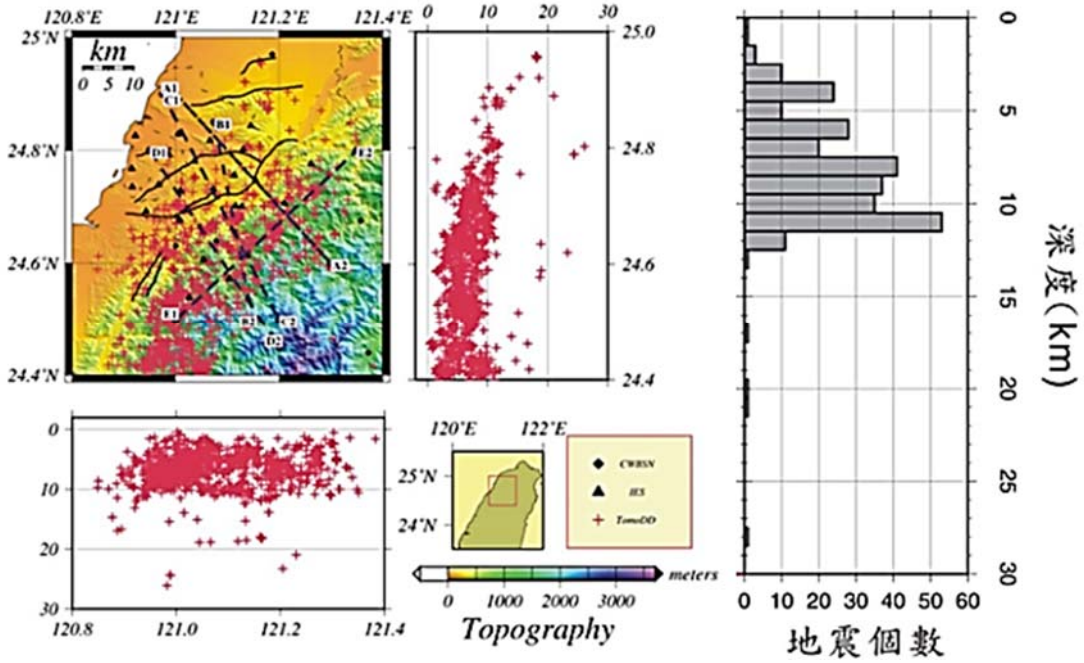



圖 4-1.10：新竹地區的地震定位結果（蒲新杰，2010）。

Figure 4-1.10: Earthquake location results in Hsinchu area.

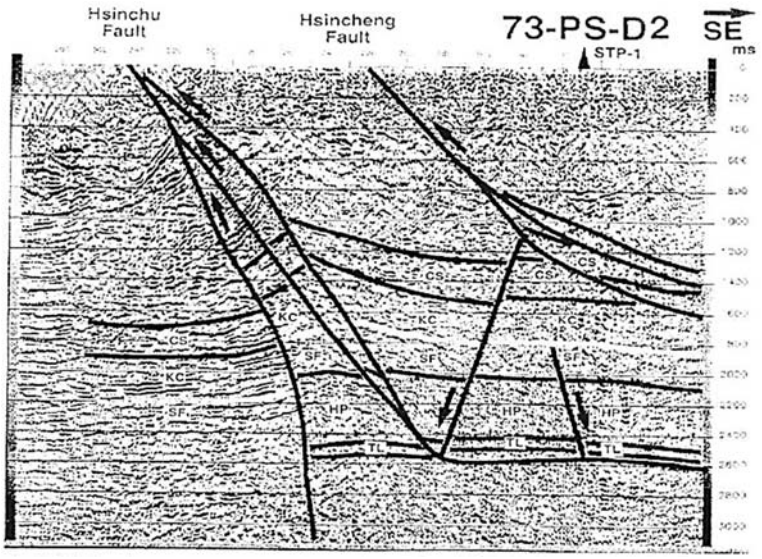



圖 4-1.11：中油油氣探勘調查於新竹地區的震測剖面。左側地表破裂為新竹斷層，右側地表破裂則是新城斷層（Yang et al., 1996）。

Figure 4-1.11: CNPC's oil and gas exploration survey was conducted on the seismic profile in the Hsinchu area. The surface rupture on the left is the Hsinchu Fault, and the surface rupture on the right is the Hsincheng Fault.

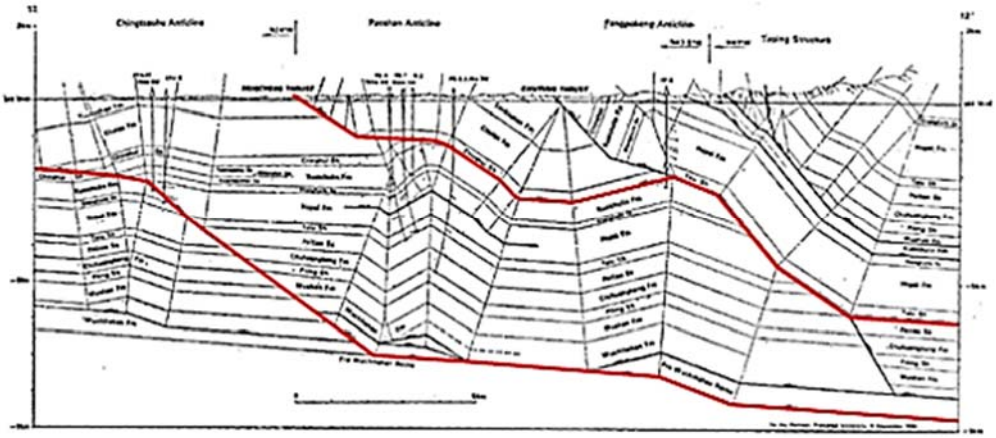


圖 4-1.12：新竹–苗栗地區北部的構造剖面。左側紅線為新竹斷層，右側紅線為新城斷層（Namson, 1984）。

Figure 4-1.12: Structural section of the northern part of Hsinchu-Miaoli area The red line on the left is the Hsinchu fault, and the red line on the right is the Hsincheng fault.

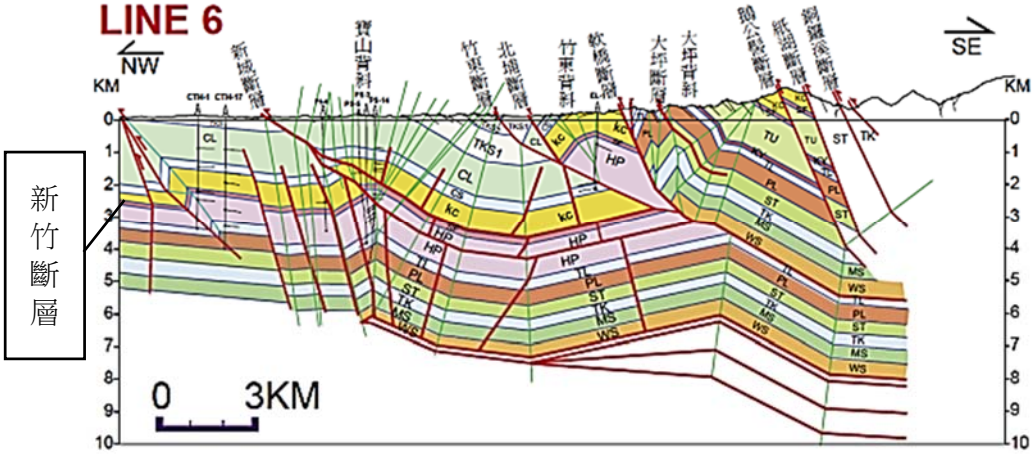



圖 4-1.13：橫跨新竹地區之地質平衡剖面（黃旭燦等，2004）。

Figure 4-1.13: Geological balance section across the Hsinchu area.

## 4-1-4 獅潭斷層

Huang and Yeh（1992）使用有限元素模型及大地測量資料，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 4-1.14）。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 4-1.15 及圖 4-1.16）。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。

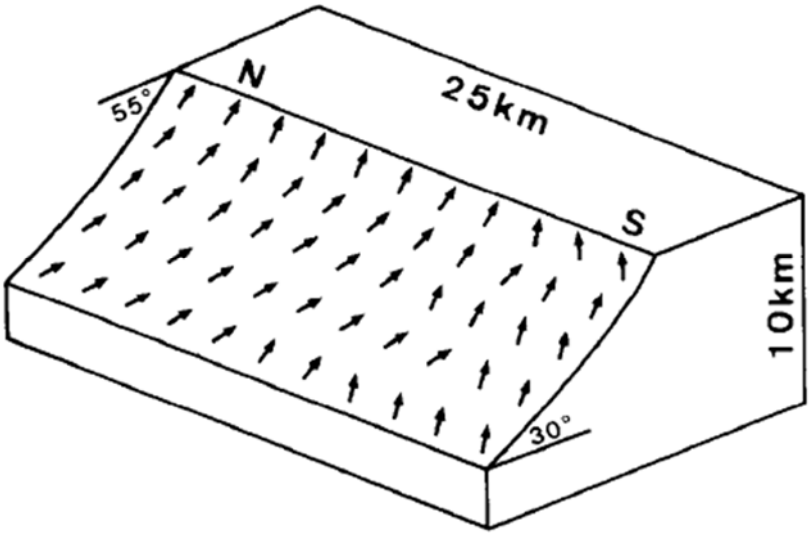



圖 4-1.14：獅潭斷層之有限元素模型（Huang and Yeh, 1992）。
Figure 4-1.14: Finite Element Model of Shihtan Fault.

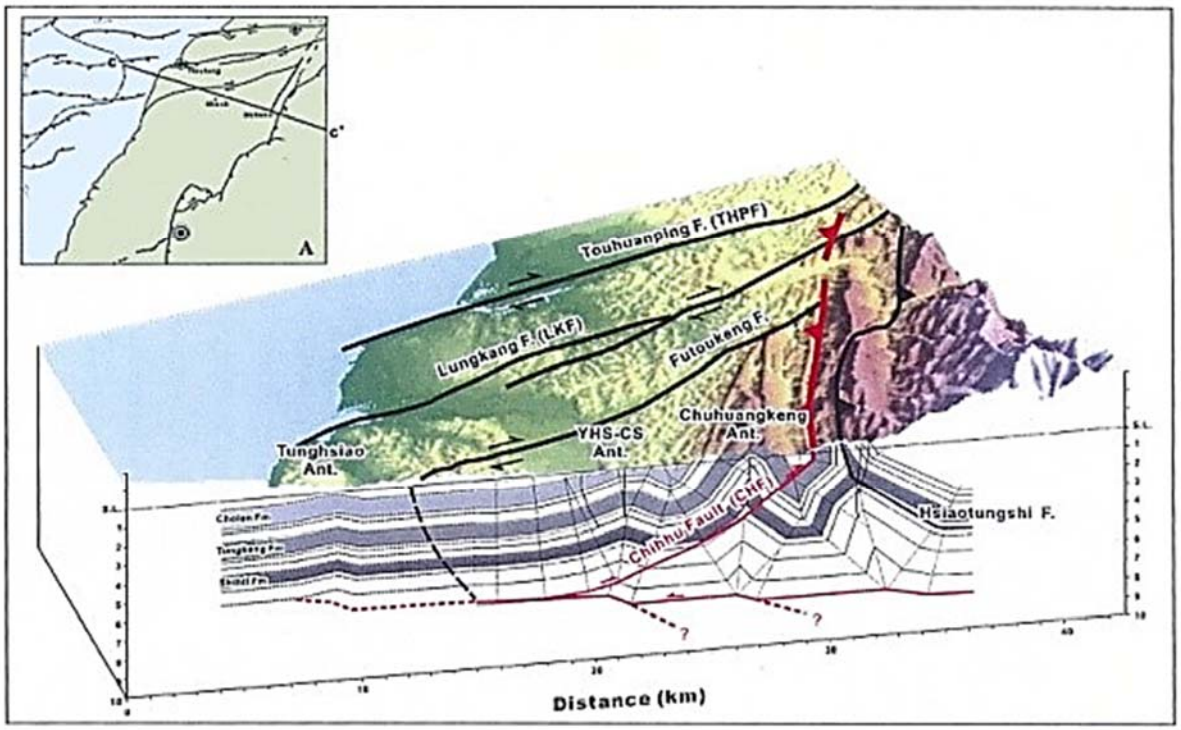



圖 4-1.15：台灣西北部的地質平衡剖面（Lin, 2005）。
Figure 4-1.15: Geological balance section of northwestern Taiwan.

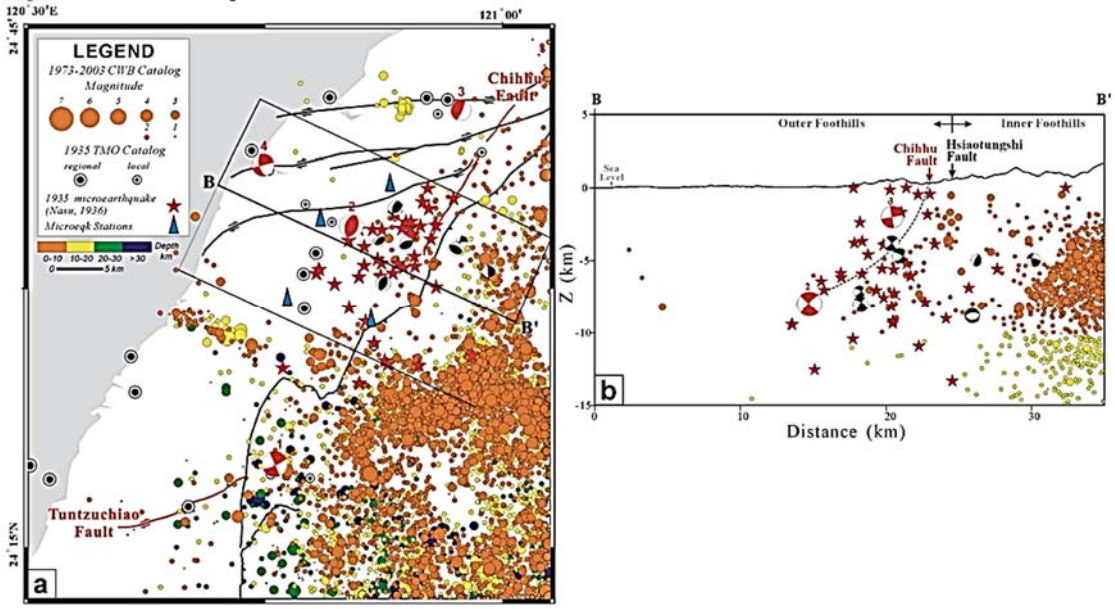



圖 4-1.16：1935 年新竹–台中地震之餘震紀錄及 1973 年至 2003 年地震目錄（Lin, 2005）。
Figure 4-1.16: Records of aftershocks of the Hsinchu-Taichung earthquake in 1935 and catalogues of earthquakes from 1973 to 2003.

## 4-1-5 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）由中油鑽井及反射震測資料推求平衡剖面所得到的 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 4-1.17）。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 4-1.18）。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 4-1.19）。

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。

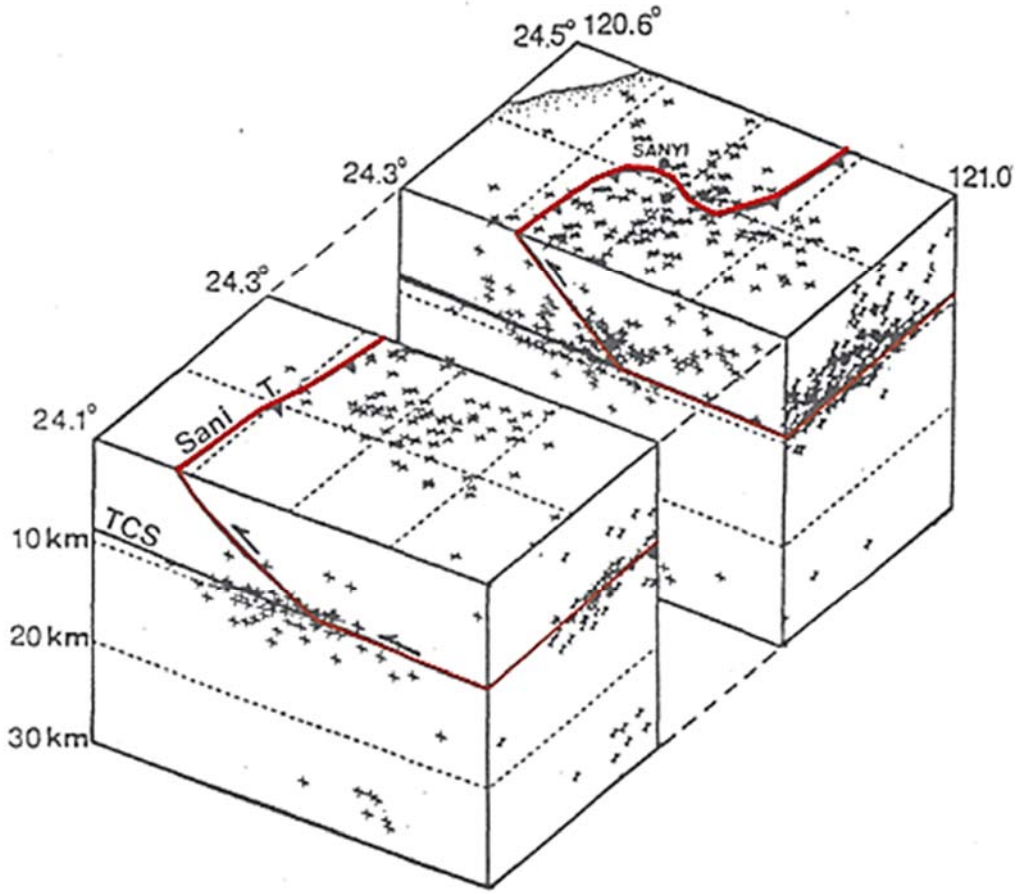



圖 4-1.17：三義–卓蘭地區微震震央分布情況。紅線為三義斷層之位置（Lin et al., 1989）。
Figure 4-1.17: The distribution of the epicenters of microseisms in the Sanyi-Zuolan area. The red line is the location of the Sanyi Fault.

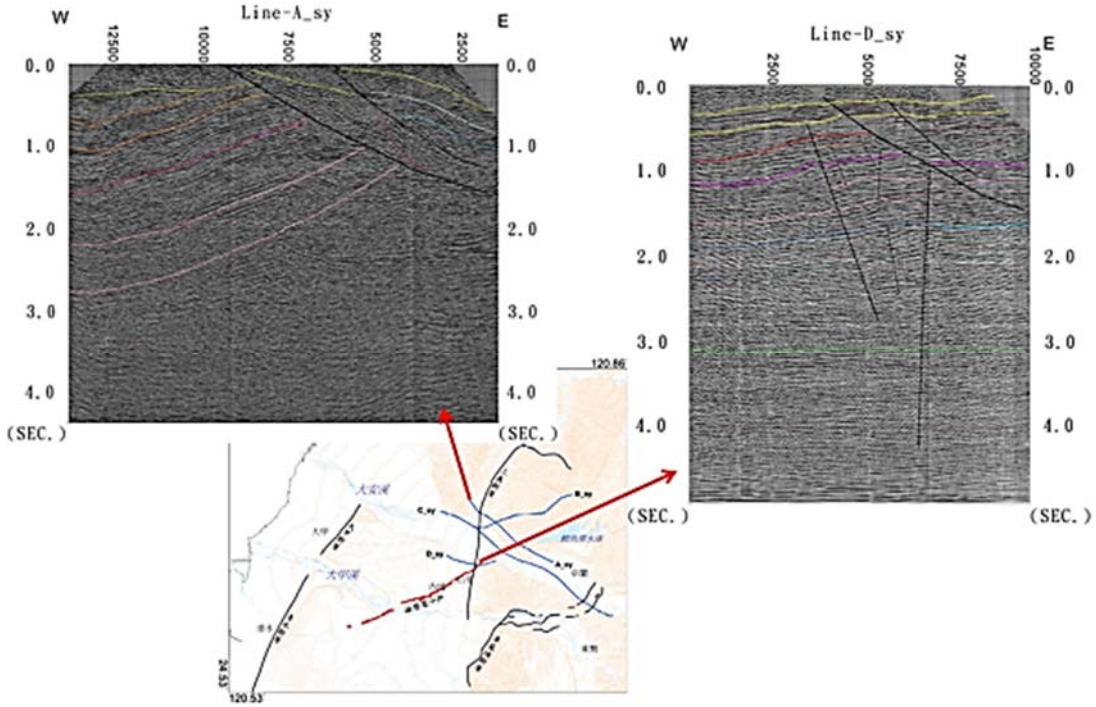



圖 4-1.18：三義斷層系統沿線相關震測線位置圖及震測剖面（李奕亨，2009）。
Figure 4-1.18: Location map and seismic profile of related seismic survey lines along the Sanyi fault

system.

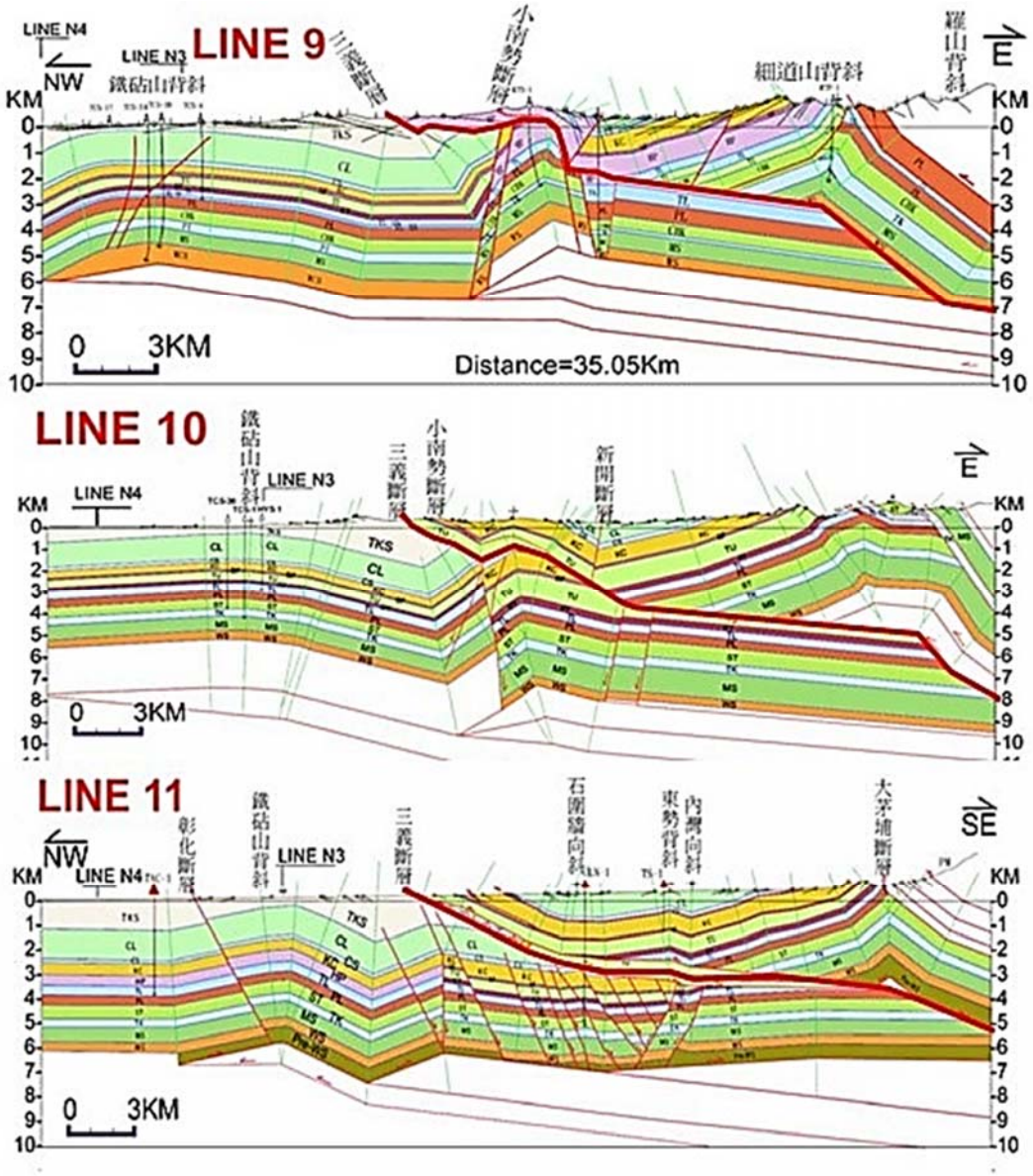



圖 4-1.19：三義斷層及車籠埔斷層北側之地質平衡剖面（黃旭燦等，2004）。
Figure 4-1.19: Geological balance section on the north side of the Sanyi fault and Chelungpu fault.

## 4-1-6 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 衛星影像推求的地表同震位移場，以地溫資料作約制，利用斷層錯位模型推估集集地震的同震模型，得大甲–彰化斷層北段於深度 5.0 公里內傾角約為 22.5 度，深度 5.0 至 8.5 公里傾角則約為 8.0 度，南段則於深度 7.0 公里內傾角為 22.5 度，深度 7.0 至 8.5 公里內傾角則約為 8.0 度；車籠埔斷層深度 8.5 公里內傾角約為 25.0 度，深度 8.5 至 12.0 公里傾角則約為 8.0 度；而大茅埔–雙冬斷層深度 5.0 公里內傾角約為 45.0 度，深度 5.0 至 12.0 公里傾角則約為 15.0 度（圖 4-1.20）。Yue et al.（2005）與 Lee and Shih（2011）所發表的斷層模型及震測剖面則推估大甲–彰化斷層北段深度 6.0 公里內傾角約為 25.0 度，深度 6.0 至 8.0 公里之傾角約為 6.5 度，南段深度 7.5 公里內傾角約 25.0 度，深度 7.5 至 8.0 公里內傾角約 6.5 度；車籠埔斷層深度 8.0 公里內傾角約為 35.0 度，而深度 8.0 至 10.0 公里內傾角約 6.5 度；大茅埔–雙冬斷層深度 5.0 公里內傾角約為 50.0 度，而深度 5.0 至 10.0 公里內傾角約 18.0 度（圖 4-1.21 及圖 4-1.22）。Kao and Chen（2000）利用集集地震序列資料及斷層面解來推求中部地區之斷層幾何（圖 4-1.23），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 4-1.24），兩者結果可推得大甲–彰化斷層北段深度 2.0 至 6.5 公里之傾角為 35.0 度，深度 6.5 至 11.0 公里則為 10.0 度，南段深度 2.0 至 7.0 公里傾角為 35.0 度，深度 7.0 至 11.0 公里則為 10.0 度；車籠埔斷層深度 11.0 公里內之傾角為 40.0 度，深度 11.0 至 15.0 公里則為 10.0 度；而大茅埔–雙冬斷層深度 9.5 公里內之傾角為 40.0 度，深度 9.5 至 15.0 公里則為 20.0 度。綜合以上文獻結果，本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 5.0 公里內傾角為 22.5 度，深度 5.0 至 8.5 公里，傾角為 8.0 度，南段深度 7.0 公里內傾角為 22.5 度，深度 7.0 至 8.5 公里之傾角為 8.0 度；車籠埔斷層深度 8.5 公里內傾角為 25.0 度，深度 8.5 至 12.0 公里傾角則為 8.0 度；大茅埔–雙冬斷層深度 5.0 公里內傾角為 45.0 度，深度 5.0 至 12.0 公里內傾角為 15.0 度。
2. 大甲–彰化斷層北段深度 6.0 公里內傾角為 25.0 度，深度 6.0 至 8.0 公里，

傾角為 6.5 度，南段深度 7.5 公里內傾角為 25.0 度，深度 7.5 至 8.0 公里之傾角為 6.5 度；車籠埔斷層深度 8.0 公里內傾角為 35.0 度，深度 8.0 至 10.0 公里傾角則為 6.5 度；大茅埔–雙冬斷層深度 5.0 公里內傾角為 50.0 度，深度 5.0 至 10.0 公里內傾角為 18.0 度。

3. 大甲–彰化斷層北段深度 2 至 6.5 公里之傾角為 35.0 度，深度 6.5 至 11.0 公里，傾角為 10.0 度，南段深度 2.0 至 7.0 公里內傾角為 35.0 度，深度 7.0 至 11.0 公里之傾角為 10.0 度；車籠埔斷層深度 11.0 公里內傾角為 40.0 度，深度 11.0 至 15.0 公里傾角則為 10.0 度；大茅埔–雙冬斷層深度 9.5 公里內傾角為 40.0 度，深度 9.5 至 15.0 公里內傾角為 20.0 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的可能性，故本計畫選用第二組斷層幾何。此外，由於地震多發生在斷坡上，所以本計畫在估算斷層潛勢時，首先大甲–彰化斷層北段考慮斷層深度在 0.0 – 6.0 公里時傾角為 25.0 度的部分，南段考慮斷層深度在 0.0 – 7.5 公里時傾角為 25.0 度；車籠埔斷層考慮斷層深度在 0.0 – 8.0 公里時傾角為 35.0 度；大茅埔–雙冬斷層考慮斷層深度在 0.0 – 5.0 公里時傾角為 50.0 度。

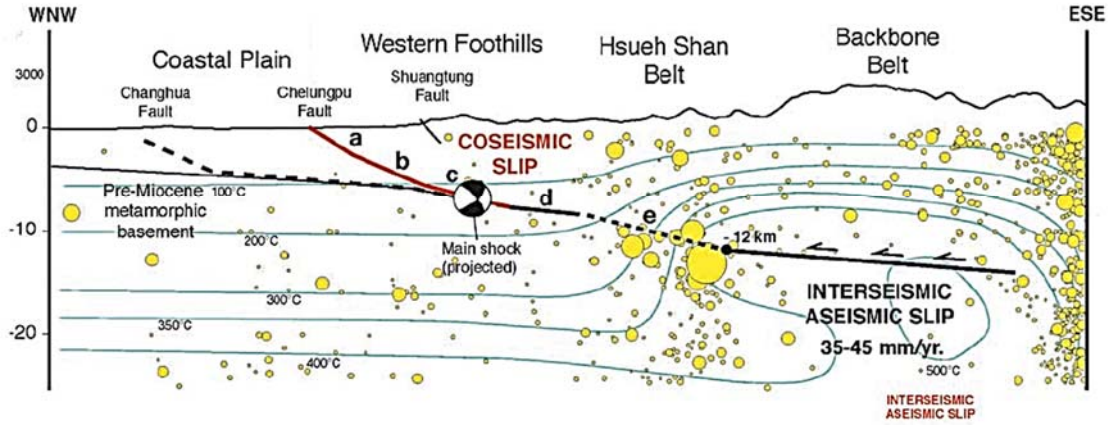



圖 4-1.20：以集集地震之震間與同震位移所推求的中部構造模型。圖中最左側的黑色虛線為大甲–彰化斷層，紅線為車籠埔斷層，往東之黑色實線為大茅埔–雙冬斷層（Dominguez et al., 2003）。

Figure 4-1.20: The central structure model derived from the interseismic and coseismic displacements of the Chi-Chi earthquake. The black dotted line on the far left of the figure is the Dajia-Changhua fault, the red line is the Chelungpu fault, and the black solid line to the east is the Tamaopu-Shuangtung fault.

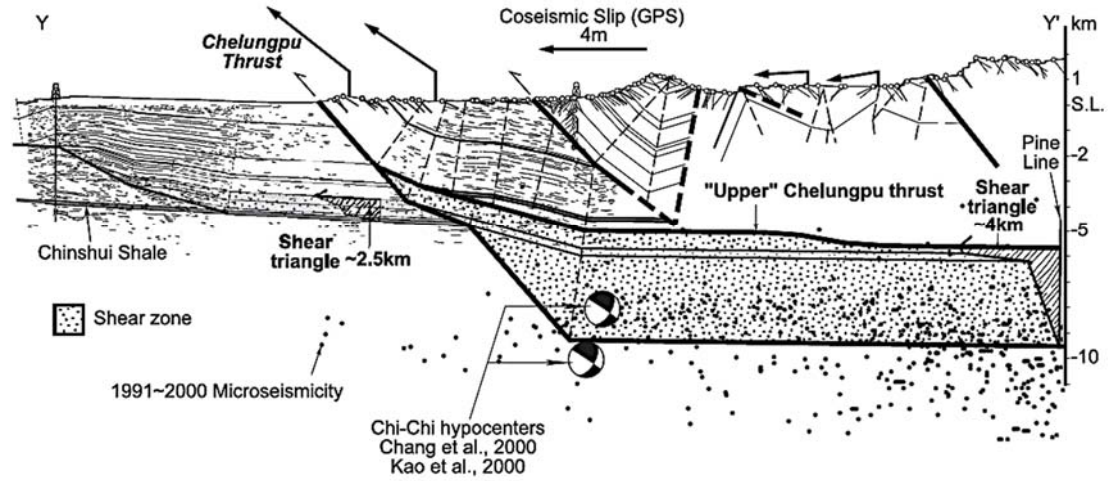



圖 4-1.21：以集集地震主震及地表破裂所推求的斷層模型（Yue et al., 2005）。

Figure 4-1.21: A fault model derived from the main shock and surface rupture of the Chi-Chi earthquake.

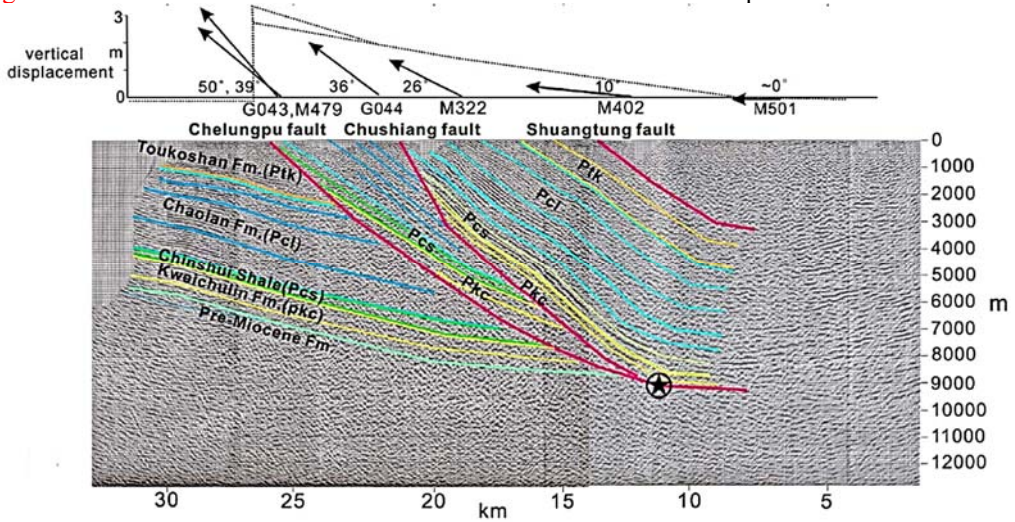



圖 4-1.22：中部震測剖面及其構造解釋。最左側之桃紅色線為車籠埔斷層，最右側之桃紅色線則是雙冬斷層（Lee and Shih, 2011）。

Figure 4-1.22: Seismic section of the central part and its structural interpretation. The pink line on the far left is the Chelungpu Fault, and the pink line on the far right is the Shuangtung Fault.

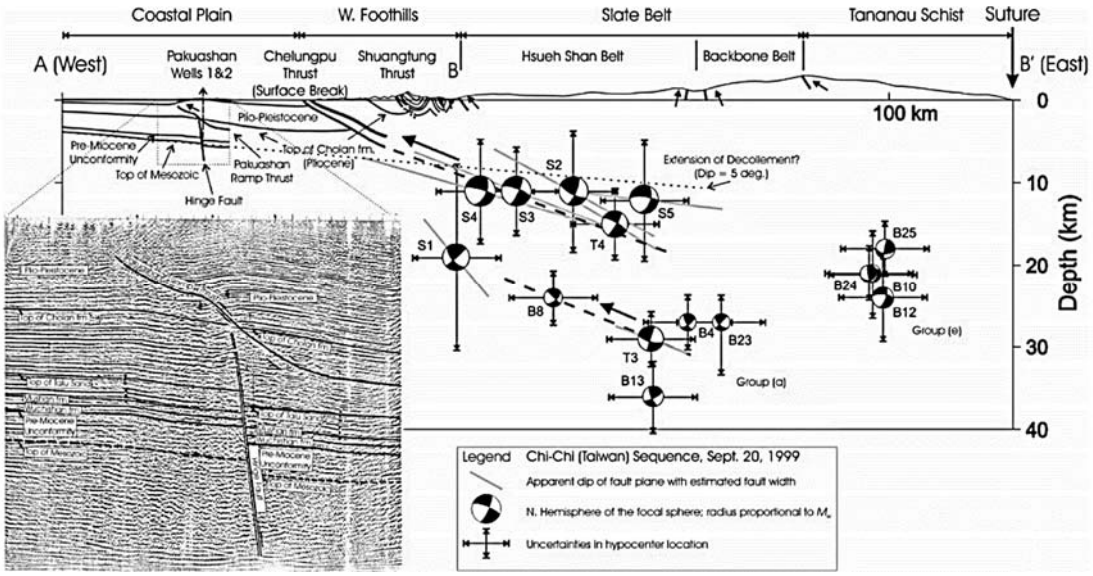



圖 4-1.23：以集集地震序列資料及斷層面解所推得之中部斷層幾何（Kao and Chen, 2000）。

Figure 4-1.23: Geometry of the central fault derived from the data of Ci-Ci earthquake sequence and the fault plane solution.

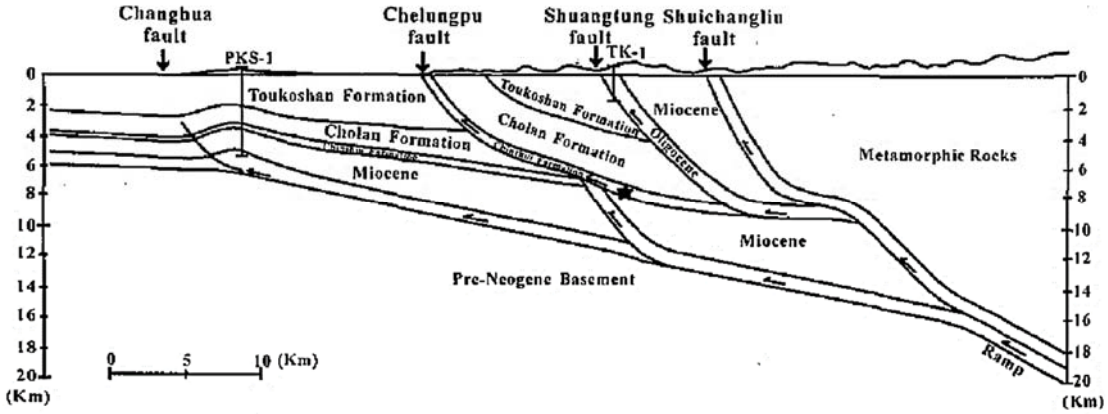



圖 4-1.24：以鑽井、重力、地震資料及薄皮構造模型所推得之中部構造幾何（Wang et al., 2000）。

Figure 4-1.24: The geometry of the central structure derived from drilling, gravity, seismic data and thin-skin structure models.

## 4-1-7 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 4-1.25）。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 4-1.26）。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，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。

依中興工程顧問社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，即為斷層深度在 0.0 - 13.0 公里時傾角為 75 度。

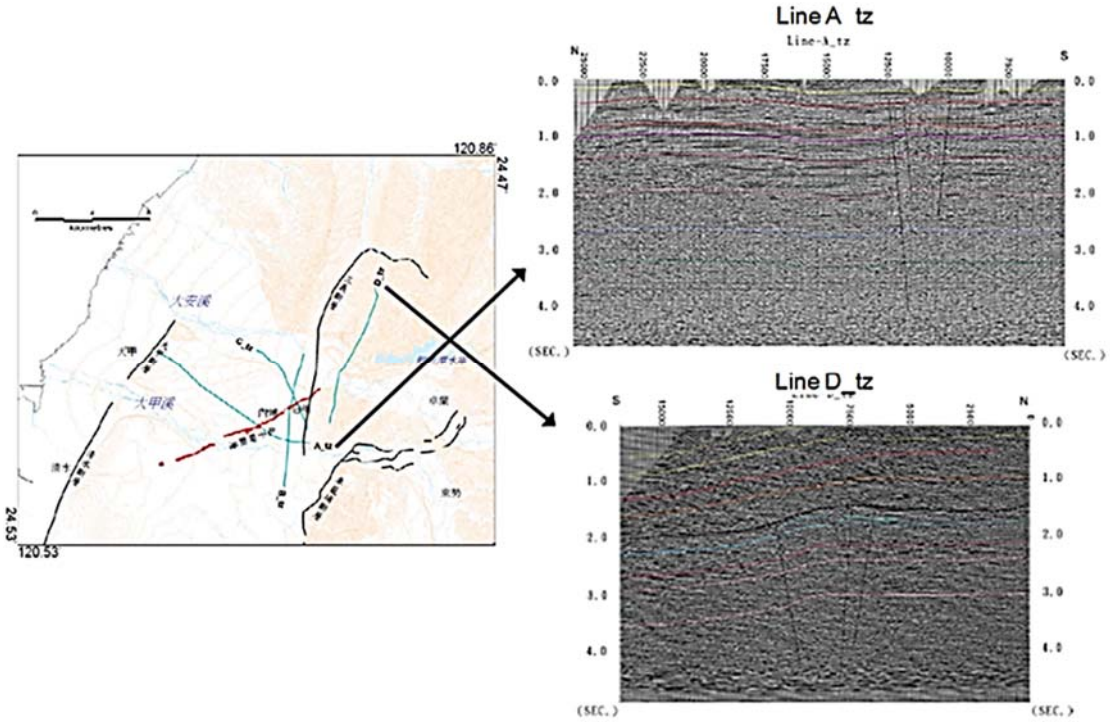



圖 4-1.25：跨越屯子腳斷層之震測線位置圖及震測剖面。由 LineA_tz 震測剖面可看出屯子腳斷層為開花狀構造，LineD_tz 震測剖面中的黑色線為三義斷層，屯子腳斷層在其下發育並改變其地層傾角（李奕亨，2009）。

Figure 4-1.25: Location map and seismic profile of the seismic survey line crossing the Tuntzuchiao fault. From the LineA_tz seismic profile, it can be seen that the Tuntzuchiao fault is a flowering structure. The black line in the LineD_tz seismic profile is the Sanyi fault. The Tuntzuchiao fault develops under it and changes its stratigraphic dip.

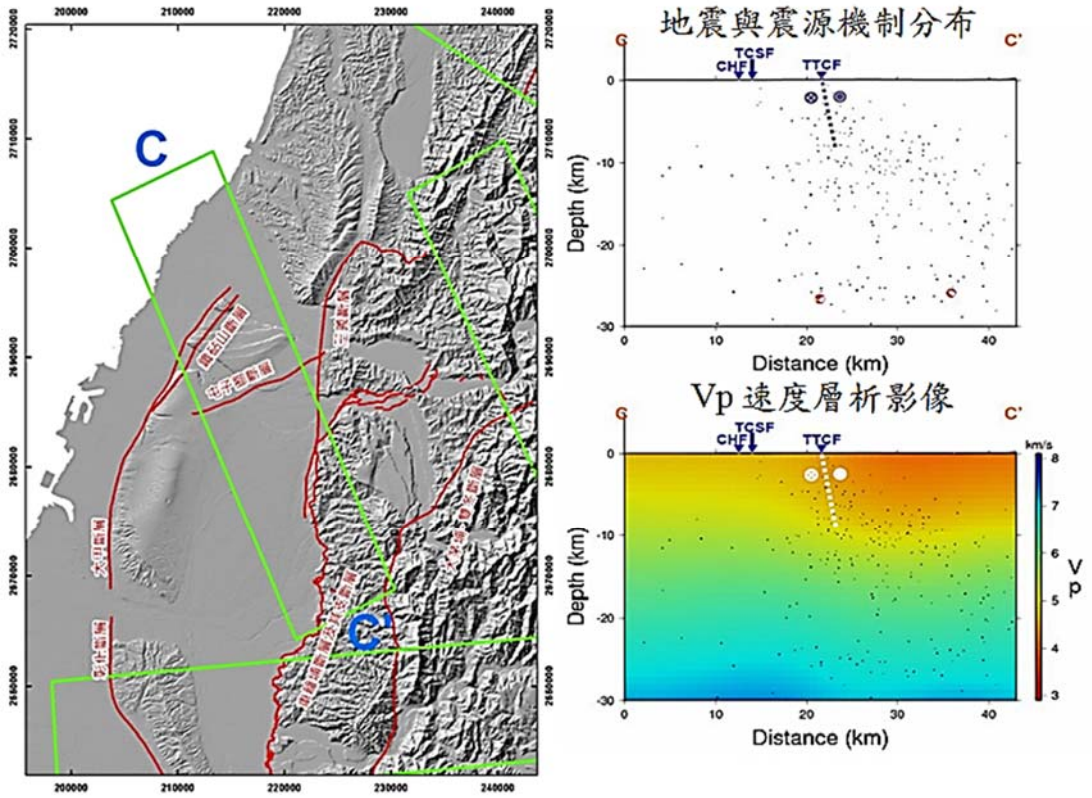



圖 4-1.26：苗栗–台中地區地震及震源機制之剖面分布及 Vp 速度層析影像。CHF 為彰化斷層，TCSF 為鐵砧山斷層，TTCF 為屯子腳斷層（吳逸民等，2007）。

Figure 4-1.26: Profile distribution and Vp velocity tomographic images of earthquakes and focal mechanisms in Miaoli-Taichung area. CHF is the Changhua fault, TCSF is the Tachienshan fault, and TTCF is the Tuntzuchiao fault.

## 4-1-8 九芎坑斷層及大尖山斷層

前人研究多利用地質平衡剖面來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 7.0 公里內之傾角為 25.0 度，深度 7.0 至 8.0 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 4-1.27）。後來的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 4.0 公里內傾角為 27.5 度，深度 4.0 至 6.0 公里則為 8.5 度（圖 4-1.28）；大尖山斷層之深度為 5.0 公里，傾角為 30.0 度。而黃姝琳（2009）則加入地震資料，推估九芎坑斷層於深度 8.0 公里內的傾角是 30.0 度，深度 8.0 至 10.0 公里則為 8.5 度；大尖山斷層之深度約 8.0 公里，斷層傾角則約為 35.0 度（圖 4-1.29）。

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 7.0 公里內之傾角為 25.0 度，深度 7.0 至 8.0 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 4.0 公里內傾角為 27.5 度，深度 4.0 至 6.0 公里之傾角則為 8.5 度；大尖山斷層深度為 5.0 公里，傾角為 30.0 度。
3. 九芎坑斷層深度 8 公里內的傾角是 30.0 度，深度 8.0 至 10.0 公里之傾角則為 8.5 度；大尖山斷層深度約 8.0 公里，斷層傾角則約為 35.0 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。此外，由於地震多發生在斷坡上，所以本計畫在估算斷層潛勢時，九芎坑斷層僅考慮斷層深度在 0.0 – 7.0 公里時傾角為 25.0 度的部分，大尖山斷層深度在 0.0 – 6.5 公里時傾角為 32.5 度。

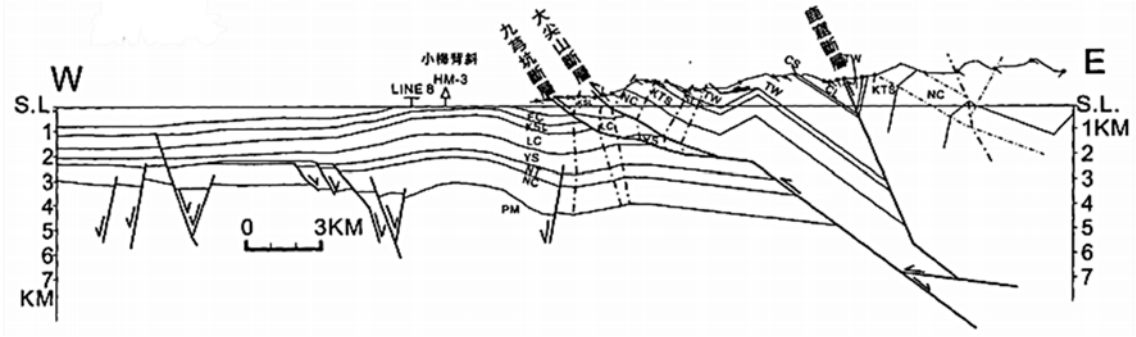



圖 4-1.27：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質構造剖面（楊耿明等，2001）。
Figure 4-1.27: Geological structural section across the Chiuchiungkeng fault and Tiehchanshan fault.

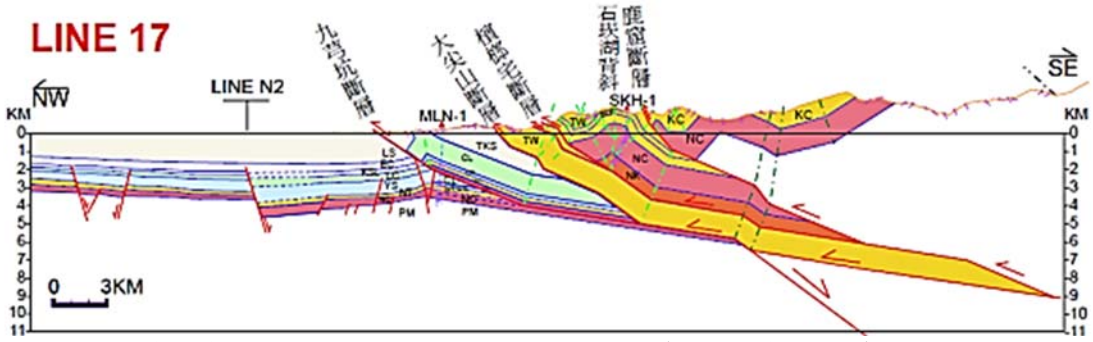



圖 4-1.28：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之地質平衡剖面（黃旭燦等，2004）。

Figure 4-1.28: Geological balance section across the Chiuchiungkeng fault and Tiehchanshan fault.

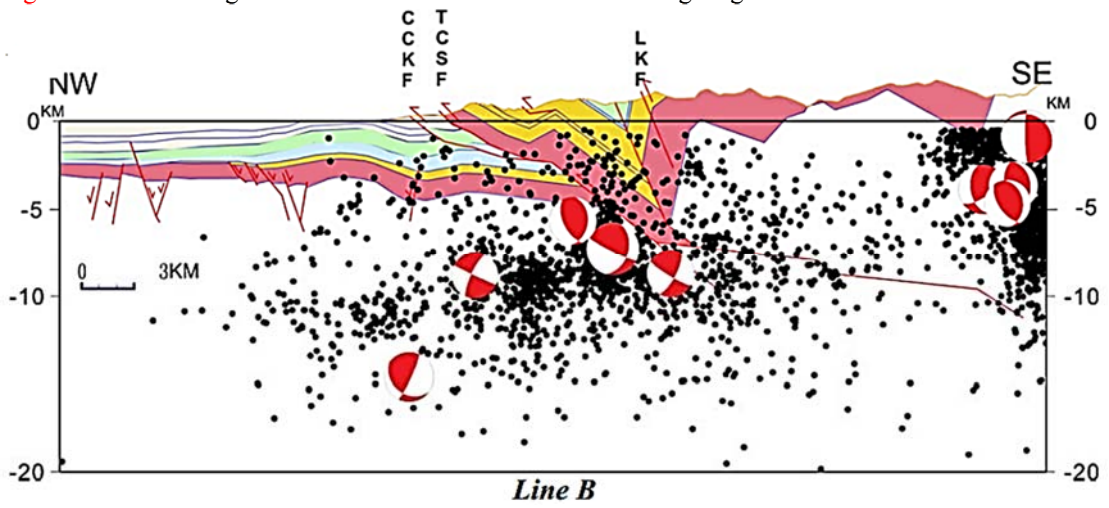



圖 4-1.29：橫跨九芎坑斷層及大尖山斷層之區域地質構造剖面與震源分布。CCKF 為九芎坑斷層，TCSF 為大尖山斷層，LKF 則是鹿窟斷層（黃姝琳，2009）。

Figure 4-1.29: The regional geological structure section and source distribution across the Chiuchiungkeng Fault and Tiehchanshan Fault. CCKF is the Chiuchiungkeng fault, TCSF is the Tiehchanshan fault, and LKF is the Luku fault.

## 4-1-9 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（圖 4-1.30）。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（圖 4-1.31）。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 10.0 公里，傾角 85.0 度；（2）深度 12.5 公里，傾角 80.0 度；（3）深度 15.0 公里，傾角 75.0 度。

在上述三組參數之邏輯樹分析結果中，由於三組參數差異不大，且第二組參數具有較大權重，故本計畫選用第二組斷層幾何。

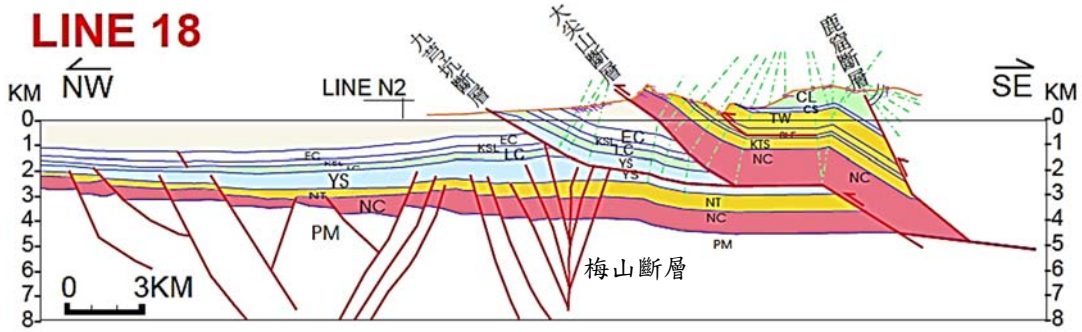



圖 4-1.30：橫跨雲林嘉義一帶之地質平衡剖面（黃旭燦等，2004）。
Figure 4-1.30: A geological balance section across the Chiayi area of Yunlin.

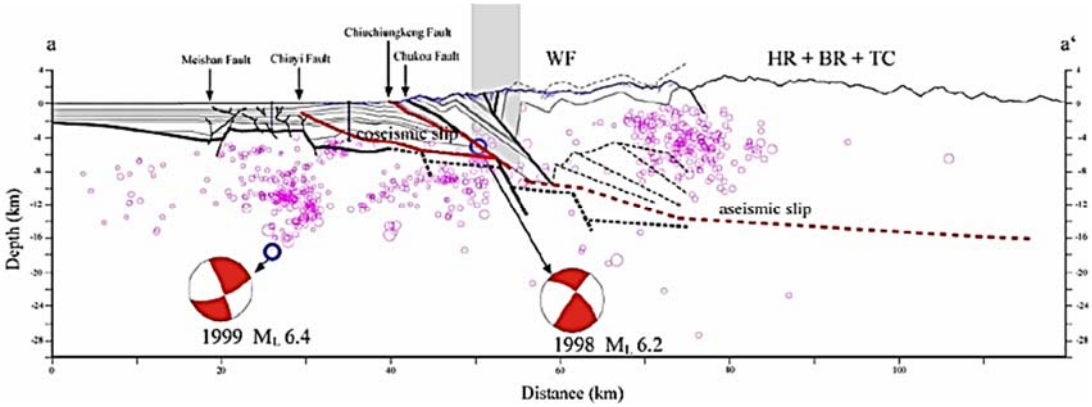



圖 4-1.31：以震測剖面及地震資料推估之中部斷層構造。圖中所指示之斷層由左至右依序為梅山斷層、嘉義斷層、九芎坑斷層及觸口斷層（Yang, 2007）。

Figure 4-1.31: Estimate the central fault structure with seismic profile and seismic data. The faults indicated in the figure from left to right are Meishan Fault, Chiayi Fault, Chiuchiungkeng Fault and Chukou Fault in order.

## 4-1-10 木屐寮-六甲斷層

根據楊志成等（2005）莿桐崎剖面及地調所台南藝術學院附近斷層露頭（林啟文等，2007）指出，木屐寮-六甲斷層有破裂到地表。

根據中油牛山背斜軸部之 NS-27 鑽井，在深度約 3,350 公尺處鑽遇一傾角約 43 度的斷面（Hu and Sheen, 1989），因此本計畫推測木屐寮-六甲斷層在深度 4 公里以內的傾角為 45 度。至於深部的幾何形貌，楊志成（2007）在台南地區的構造剖面中，參考中油鑽井、地表地層位態、震測剖面及地震分布描繪六甲斷層幾何面。根據楊志成（2007）剖面推估（圖 4-1.32），斷層在深度 6 公里就已經轉平。由於地震多發生在斷坡上，所以本計畫在估算斷層潛勢時，僅考慮木屐寮-六甲斷層斷層深度在 0.0 – 6.0 公里時傾角為 45 度的部分（圖 4-1.33）。

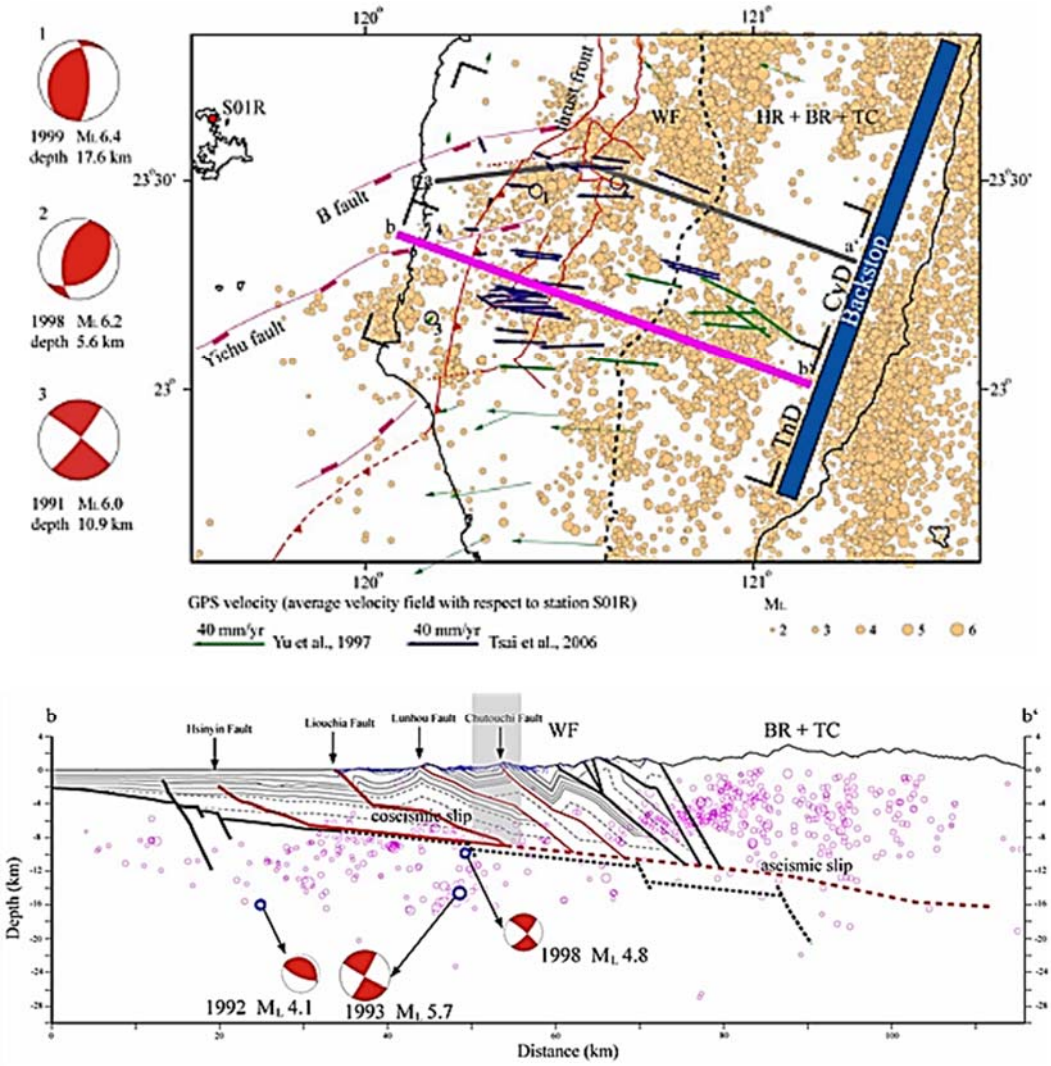



圖 4-1.32：台南地區構造剖面及地震深度剖面。上圖為剖面位置及地震分布平面圖，b-b'以粉紅色線段標記；下圖為 b-b'構造剖面及地震深度，粉紅色圓圈為 b-b'剖面 5 公里寬度範圍內規模大於 2 之地震事件（楊志成，2007）。

Figure 4-1.32: The cross section with the relocated earthquakes across the Tainan domain.

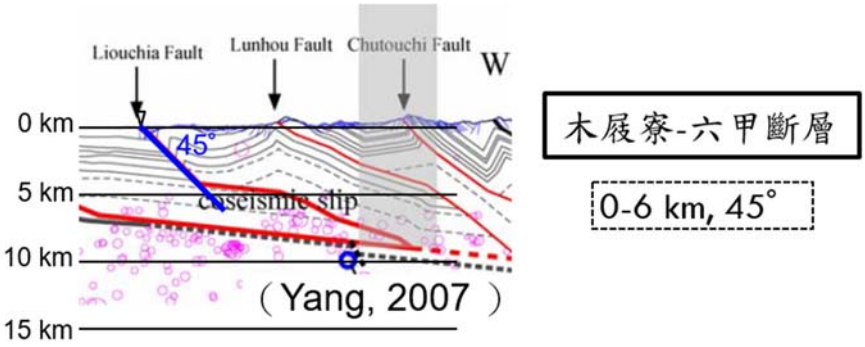



圖 4-1.33：木屐寮-六甲斷層幾何面破裂模式。

Figure 4-1.33: Fault geometry of Muchiliao–Liuchia fault.

## 4-1-11 觸口斷層

前人研究主要利用地質平衡剖面研究中部地區之斷層構造並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 4-1.34）。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 4-1.35）。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 4-1.36）。

上述三組幾何模式中，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，故本計畫選用第一組斷層幾何。此外，由於地震多發生在斷坡上，所以本計畫在估算斷層潛勢時，觸口斷層考慮斷層深度在 0.0 – 7.0 公里時傾角為 45 度的部分。

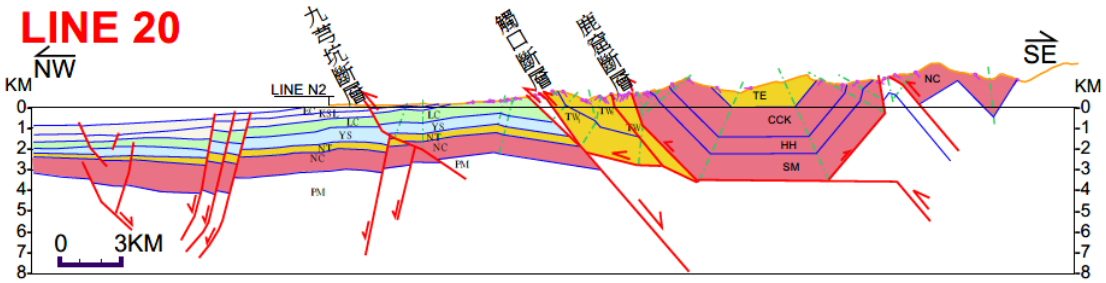



圖 4-1.34：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質平衡剖面（黃旭燦等，2004）。
Figure 4-1.34: Geological balance section across the Chiuchiungkeng fault and Chukou fault.

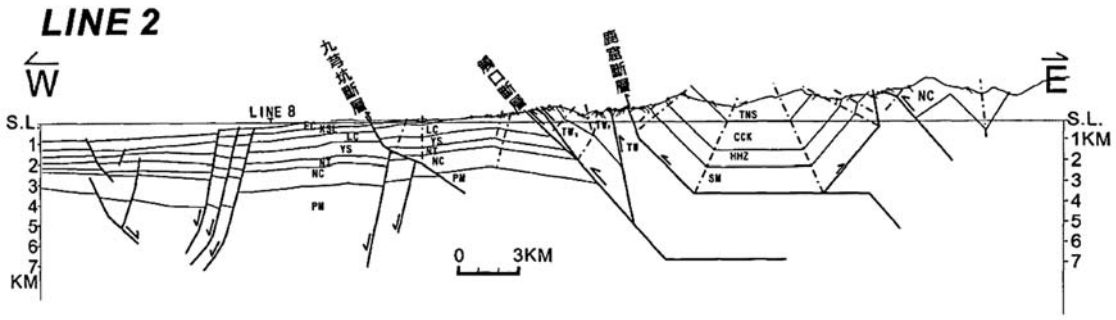



圖 4-1.35：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質構造剖面（楊耿明等，2001）。

Figure 4-1.35: Geological structure section across the Chiuchiungkeng fault and Chukou fault.

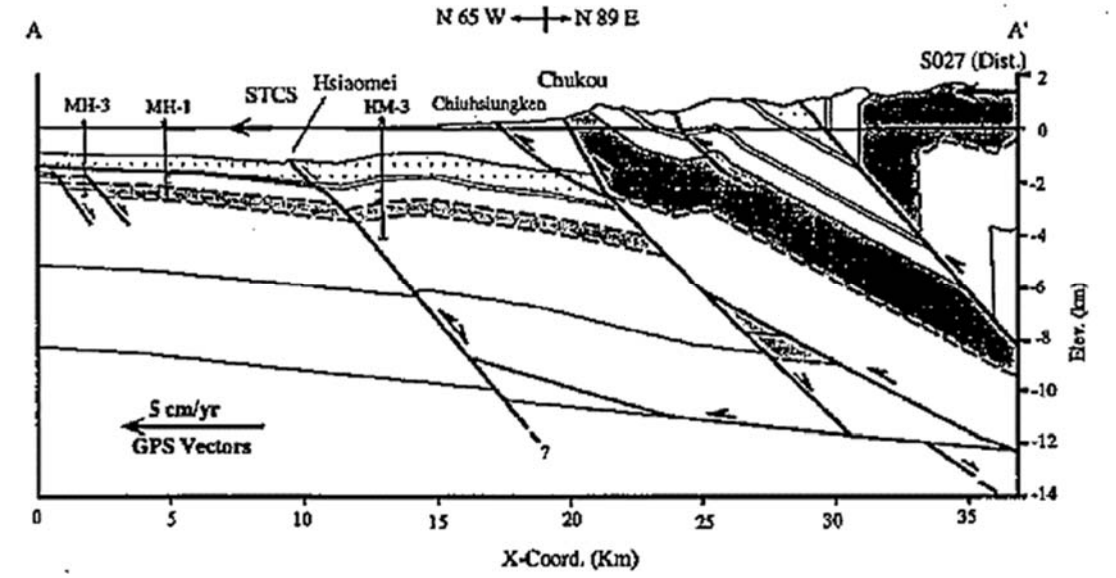



圖 4-1.36：橫跨九芎坑斷層與觸口斷層之地質構造剖面（Hung et al., 1999）。

Figure 4-1.36: Geological structure section across the Chiuchiungkeng fault and Chukou fault.

# 4-1-12 新化斷層

林啟文等（2007）根據淺層震測資料結果指出，新化斷層淺部為寬廣的剪切帶，剪切帶內岩層被高角度不連續面截切，呈開花狀構造（圖 4-1.37），因此新化斷層被推估為高角度走向滑移斷層。又根據 1900 - 2015 年地震深度分布剖面指出（圖 4-1.38），背景地震分布集中於 12 - 15 公里的深度附近。

根據上述文獻資料，本計畫將新化斷層之傾角依走向滑移常見之傾角 80 度進行設定，斷層深度則參考背景地震發震深度設定為 0.0 - 12.5 公里。新化斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 4-1.2 中。

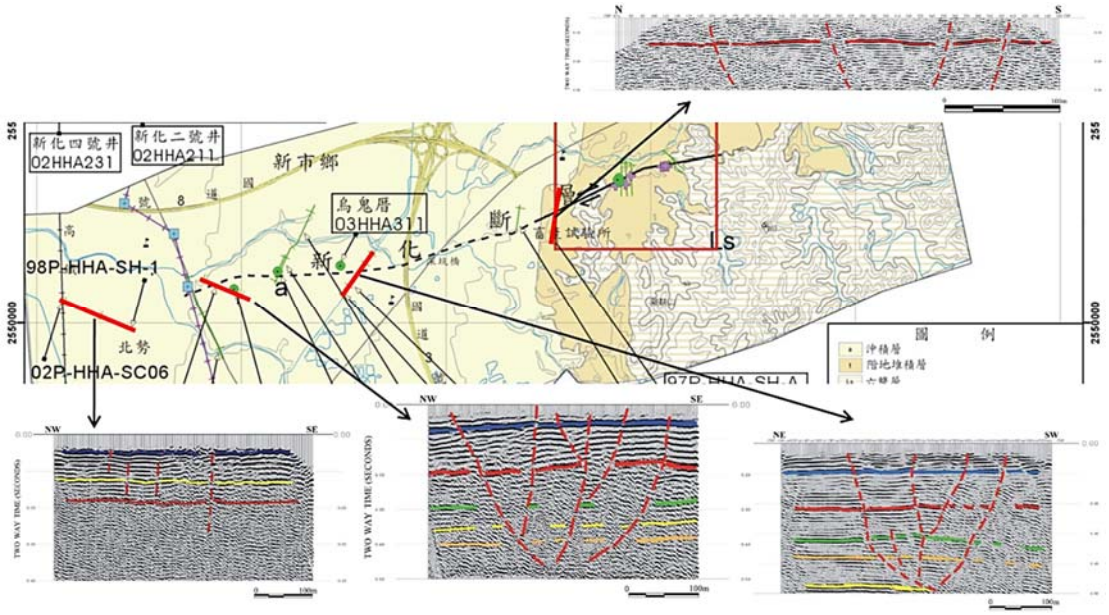



圖 4-1.37：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007）。
Figure 4-1.37: Shallow seismic reflection across the Hsinhua fault.

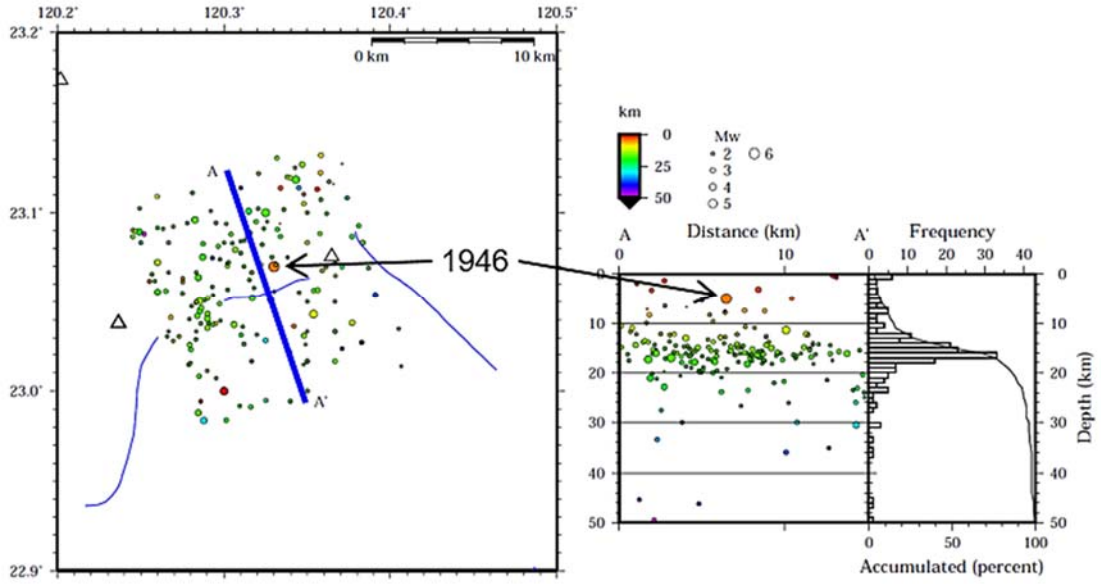



圖 4-1.38：1900~2015 年新化斷層地震分布及深度分布剖面。
Figuer 4-1.38: Background seismicity and depth distribution across the Hsinhua fault from 1900 to 2015.




圖 4-1.39：新化斷層幾何面破裂模式。
Figuer 4-1.39: Geometries of Hsinhua fault.

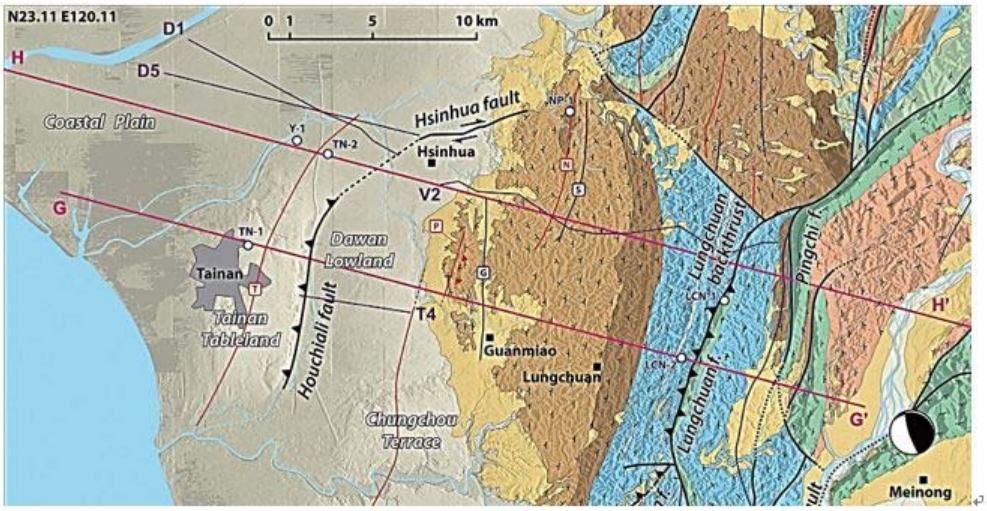
表 4-1.2：新化斷層傾角及深度資料與文獻列表（胡植慶等，2016）。
Table 4-1.2: Parameters and references of the dip angle and depth of the Hsinhua fault (胡植慶等，2016)

| 參考文獻 | 調查方法 | 傾角 | 深度 |
|---|---|---|---|
| 陳文山等，2011 | 排鑽 | 高角度 | |
| 石瑞銓等，1998，2002；黃勝群等，2004 | 淺層震測 | 開花狀構造 | 基底滑脫面至少 8 公里 |
| 黃旭燦等，2004 | 平衡剖面 | | 滑離面約3.5公里 |

# 4-1-13 後甲里斷層

Le Béon et al.（2019）的震測剖面及地質剖面顯示（圖 4-1.40、圖 4-1.41），後甲里斷層為臺南背斜西側的背衝斷層，且後甲里斷層面延伸至地表，斷層深度 4 公里，傾角 40 度。

因此，根據 Le Béon et al.（2019）震測剖面及地質剖面，本計畫設定後甲里斷層之斷層傾角為 40 度，斷層深度為 0.0 – 4.0 公里（圖 4-1.42）。



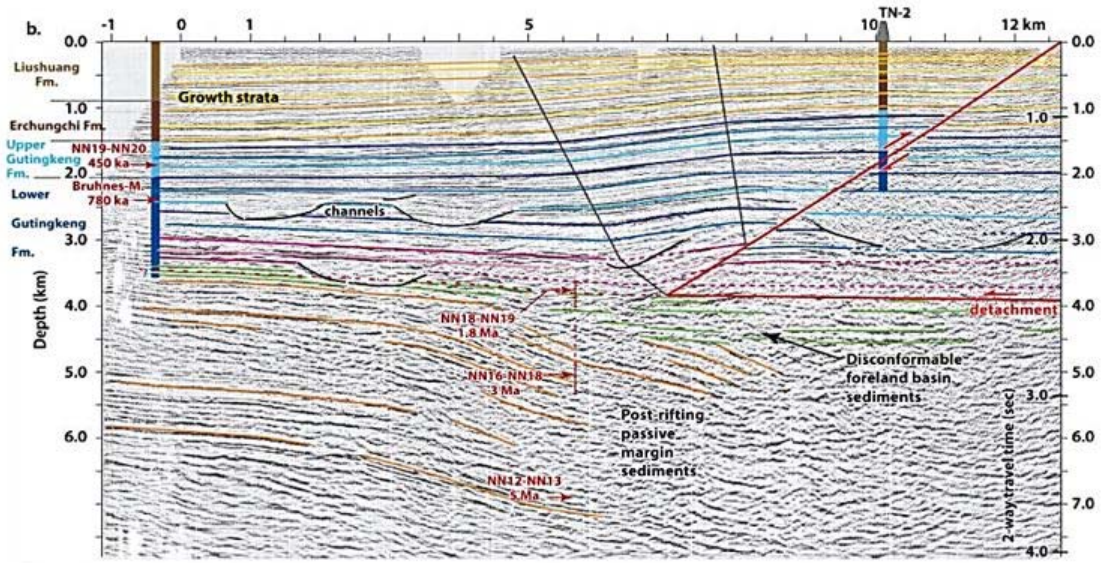




圖 4-1.40：(a) 台南地區區域地質圖，(b) 反射震測 D5 剖面（Le Béon et al., 2019）。
Figure 4-1.40: Tainan geologic map and seismic reflection profile D5 (Le Béon et al., 2019).

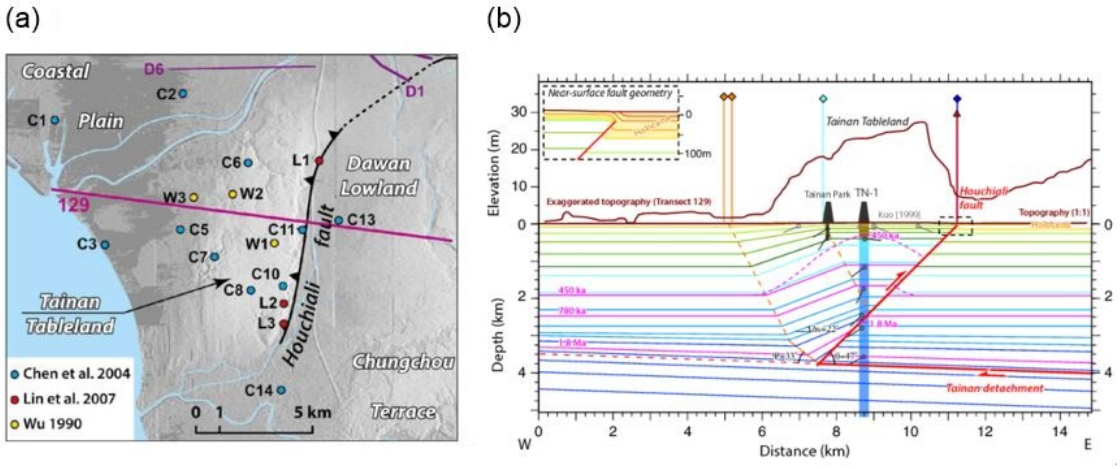



圖 4-1.41：跨台南台地地質剖面圖。(a) 台南地區鑽井位置及剖面圖位置，(b) 跨後甲里斷層 129 地質剖面（Le Béon et al., 2019）。

Figure 4-1.41: Geological model across the Tainan tableland, southwestern Taiwan (Le Béon et al., 2019).

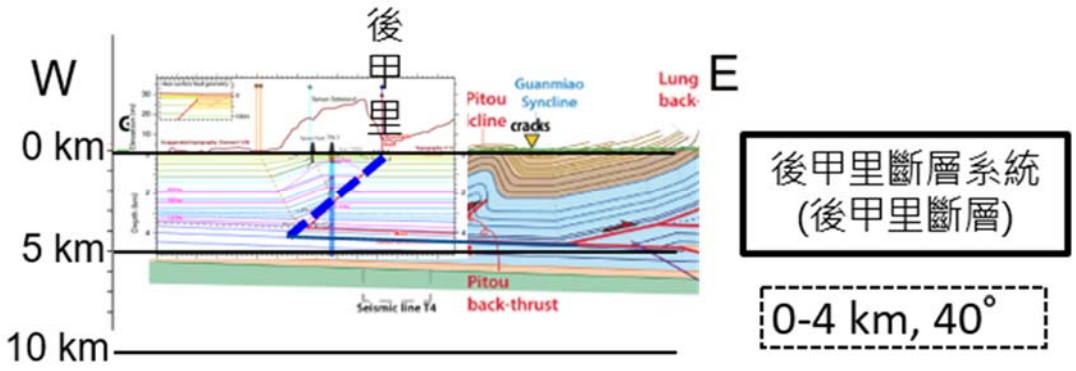



圖 4-1.42：後甲里斷層幾何面破裂模式。

Figuer 4-1.42: Geometry of the Houchiali fault.

# 4-1-14 左鎮斷層

在地調所五萬分之一地質圖幅中指出，左鎮斷層為一高角度左移斷層（圖 4-1.43）。陳延宗（2007）以反射震測法研究左鎮斷層，然而由於此區域岩層以泥岩及頁岩為主，震測反射訊號較不明顯，僅能由地層傾角變化與地表地形特徵推測左鎮斷層可能的位置（圖 4-1.44）。根據 1900-2015 年左鎮斷層上盤地震深度分布剖面（圖 4-1.45），地震分布集中於 8 - 14 km 的深度。由於無法由過去之研究成果得知左鎮斷層之幾何樣貌，而本斷層屬走向滑移斷層，因此設定左鎮斷層為高傾角 70 度之活動斷層。斷層深度則參考左鎮斷層南北兩側構造單元之滑脫面深度，設為 0.0 – 10.0 公里（圖 4-1.46）。

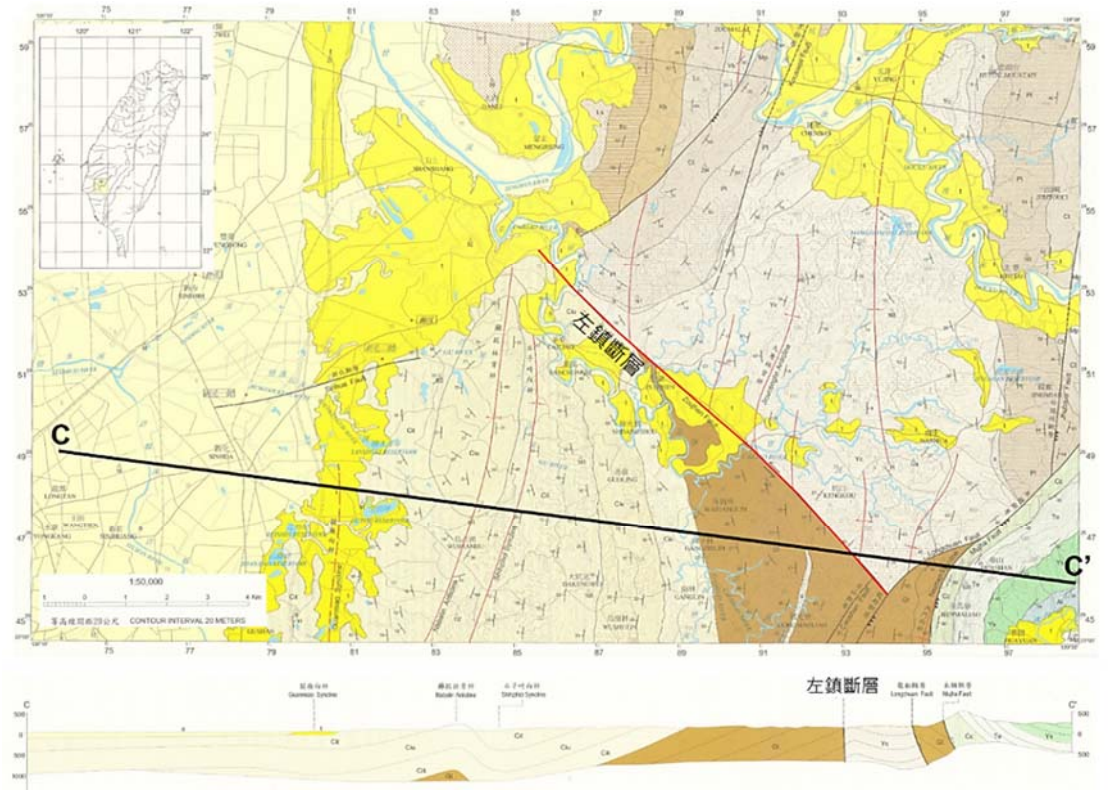



圖 4-1.43：地調所新化地質圖幅及地質剖面圖（修改自何信昌等，2005）。

Figuer 4-1.43: CGS geological map in Hsinhua area and the geological cross section modified from (何信昌等，2005).

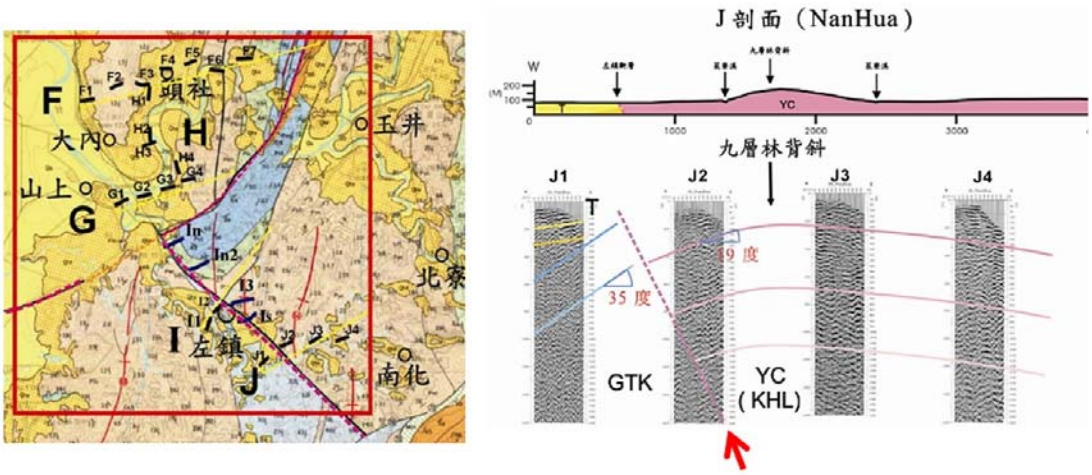



圖 4-1.44：左鎮斷層淺層震測資料（陳延宗，2007）。

Figuer 4-1.44: Shallow seismic reflection profile across the Tsochen fault (陳延宗，2007).

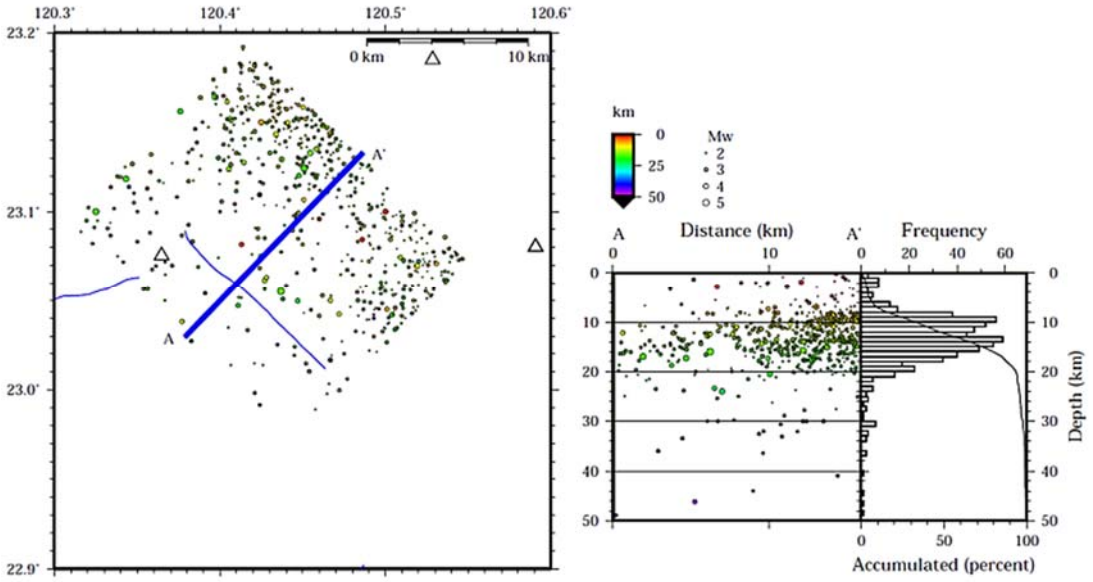



圖 4-1.45：1900~2015 年左鎮斷層地震分布及深度分布剖面。

Figuer 4-1.45: Background seismicity and distribution of focal depth in the Tsochen fault area from 1990 to 2015.

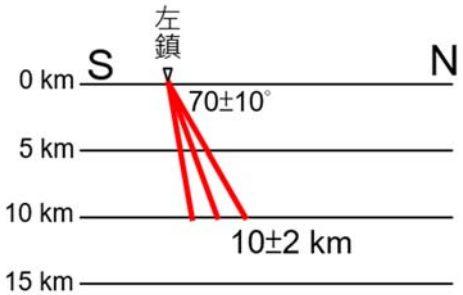



圖 4-1.46：左鎮斷層幾何面破裂模式。

Figuer 4-1.46: Geometry model of the Tsochen fault.

## 4-1-15 小崗山斷層

中央地質調查所在小崗山斷層沿線實施淺層震測（圖 4-1.47），於大崗山與小崗山之間的測線 08P-HKS-AL-1 可看到基盤向東逐漸升高，推測斷層向東傾斜約呈 45 度（林啟文等，2009；陳文山等，2010）。

此外，大、小崗山西側有四孔鑽井，由東至西分別為山腳下 1 號，小崗山 1 號，小崗山 2 號及 3 號。其中，山腳下 1 號、小崗山 1 號井雖都未鑽遇斷層帶，但兩口井的古亭坑層具有密集的剪切構造，剪切面與層面傾角大致平行，傾角向東傾斜約 50-70 度（陳文山等，2010）（圖 4-1.48）。

地調所五萬分之一地質圖幅中，小崗山斷層地表呈現撓區現象，但斷層尖端未出露地表，屬於盲斷層，圖 4-1.49 為旗山圖幅中跨過小崗山斷層的兩個地質剖面。

小崗山斷層之傾角及破裂深度，根據所蒐集到之震測剖面及地質資料綜合評估，本計畫採用的斷層傾角 45 度。考慮與旗山斷層之間的幾何關係，基底滑脫面止於旗山斷層，若僅考慮斷坡破裂，斷層深度 0.0- 10.0 公里（圖 4-1.50）。

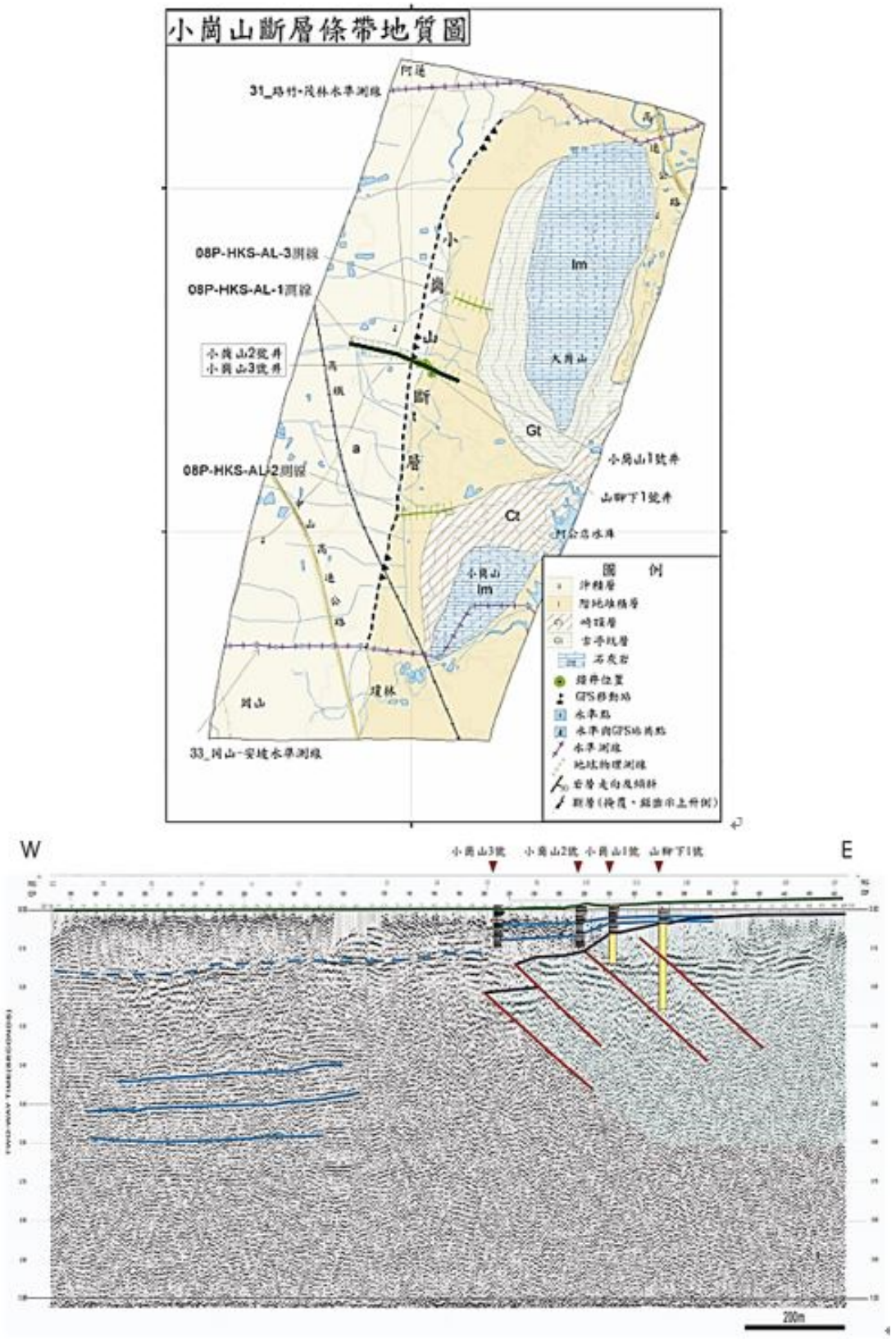



圖 4-1.47：上圖：小崗山斷層條帶地質圖。下圖：08P-HKS-AL-1 震測剖面（林啟文等，2009；陳文山等，2010）。

Figuer 4-1.47: (Up) Geological map of Hsiaokangshan fault. (Down) 08P-HKS-AL-1 seismic reflection.

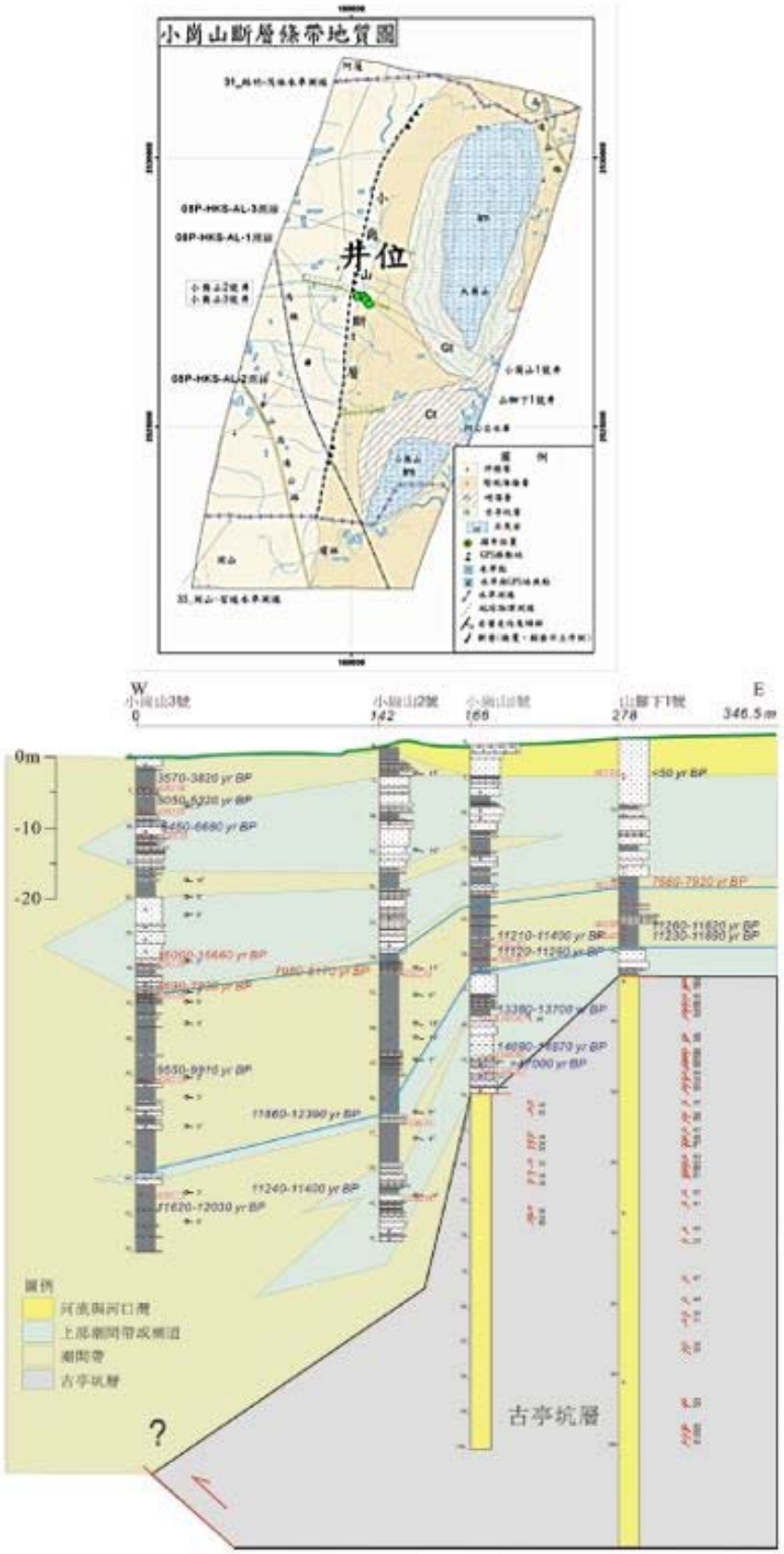



圖 4-1.48：小崗山斷層鑽井資料（陳文山等，2010）。
Figuer 4-1.48: Drilling data across the Hsiaokangshan fault.

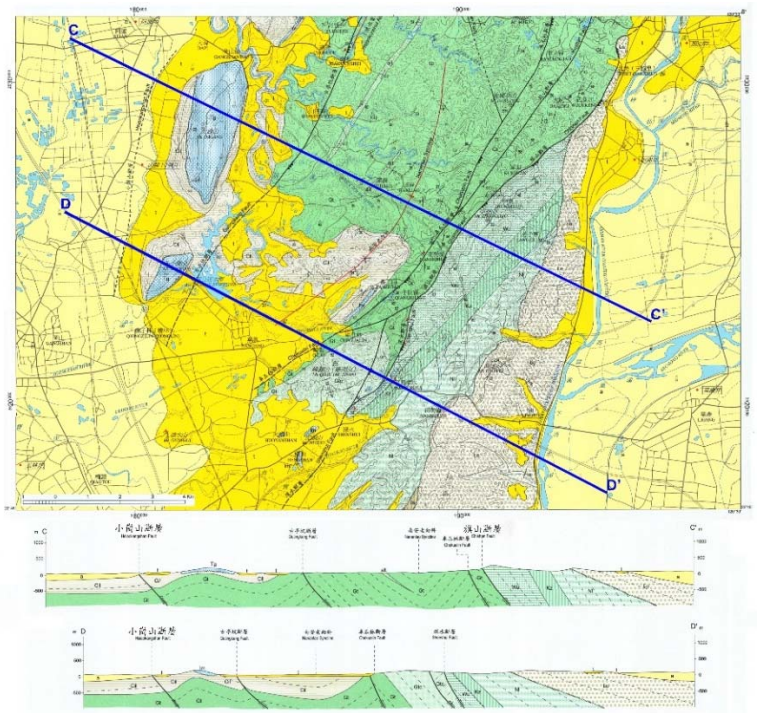



圖 4-1.49：地調所旗山地質圖幅及 CC’、DD’地質剖面圖（修改自林啟文，2013）。

Figuer 4-1.49: CGS geological map in Chishan area and the CC’ and DD’ geological cross sections modified from (Lin, 2013).

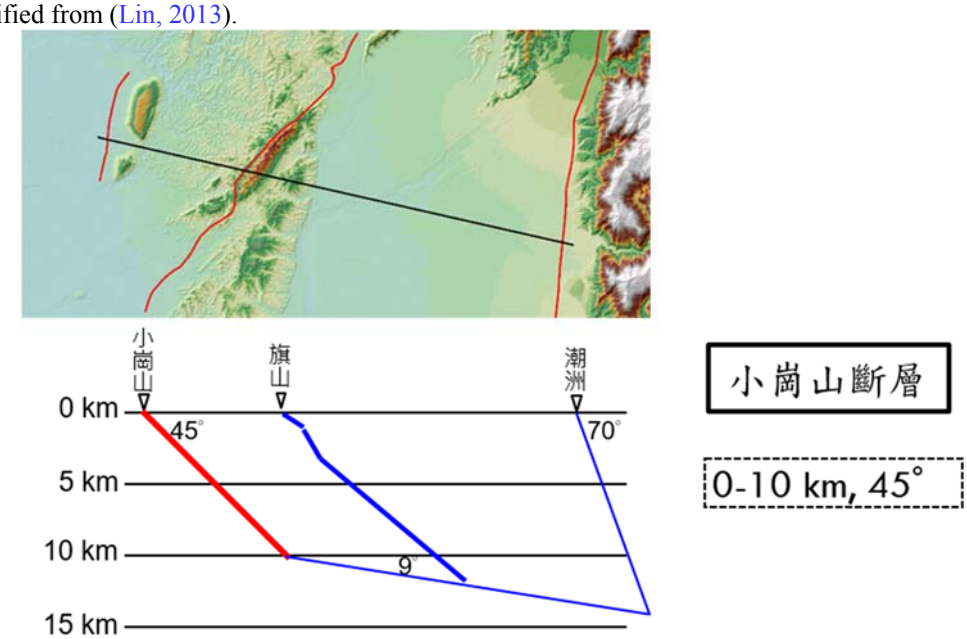



圖 4-1.50：本計畫小崗山斷層幾何面破裂模式。

Figuer 4-1.50: Fault geometry model of the Hsiaokangshan fault.

# 4-1-16 旗山斷層

根據黃旭燦等（2004）繪製的兩條地質平衡剖面（圖 4-1.51），指出旗山斷層位於龍船斷層東側，傾角約 50 度。而根據洪日豪（2006）所做出的地質平衡剖面，旗山斷層於深度 0.0－6.0 公里，傾角約 67.5 度；深度 6.0－13.5 公里，傾角約 35 度（圖 4-1.52）。Wiltschko et al.（2010）構造地質剖面則顯示，旗山斷層於深度 0.0 – 3.5 公里，傾角約 55 度；深度 3.5 – 12.5 公里，傾角約 28 度（圖 4-1.53）。陳文山等（2011、2012）平衡剖面（圖 4-1.54）顯示旗山斷層（內英斷層）深度約 12 公里，斷層傾角在 0.0－3.0 公里為 55 度；3.0－11.5 公里為 40 度。陳文山（2016）整合速度構造剖面及地震深度分布（圖 4-1.55），地震深度一般比平衡剖面之滑脫面深。

旗山斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 4-1.3。綜合野外露頭調查、淺層震測、平衡剖面、GPS 資料反演等前人文獻資料，旗山斷層傾角約 50 – 70 度。滑脫面深度約 10 公里，以此作為下界；地震深度分布主要集中於 16 公里以上，以此作為上界，中間值取 13 公里深。所以本計畫採用的旗山斷層斷層幾何即是斷層傾角為 60 度，斷層深度為 0.0－13.0 公里。

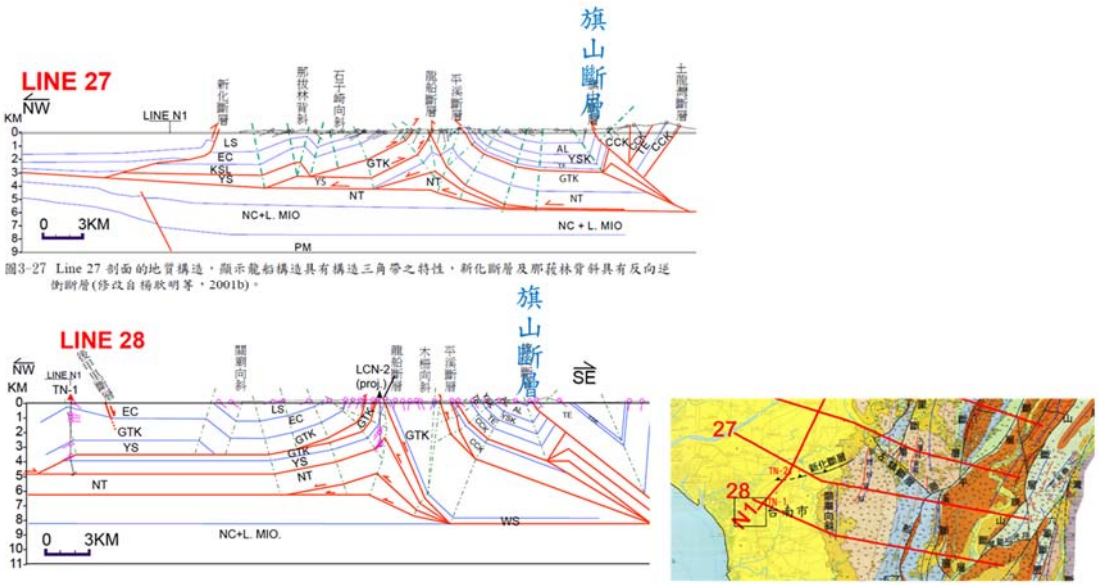



圖 4-1.51：臺灣西南部地區 Line 27 及 Line 28 平衡剖面（黃旭燦等，2004）。
Figure 4-1. 51: Geological balanced cross-section of Line 27 and Line 28 in SW Taiwan.

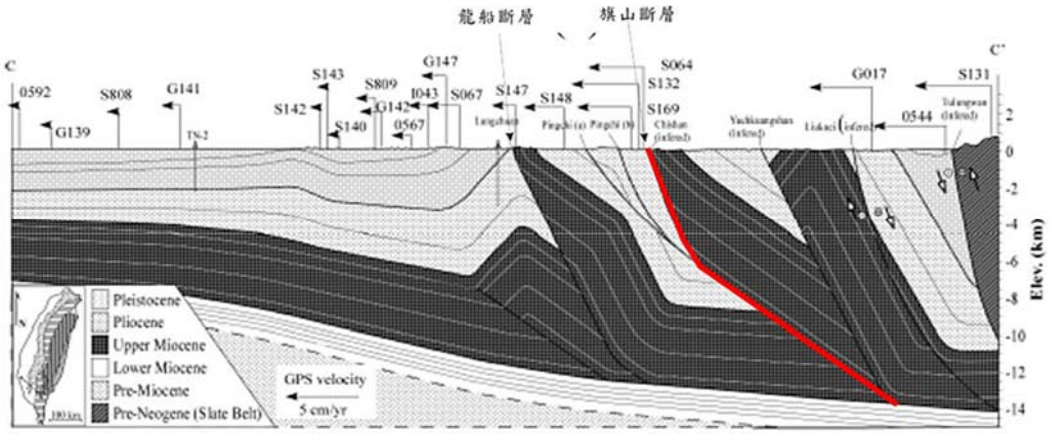



圖 4-1. 52：西南部地區地質剖面圖（洪日豪，2006）。

Figure 4-1. 52: Geological cross-section in SW Taiwan.

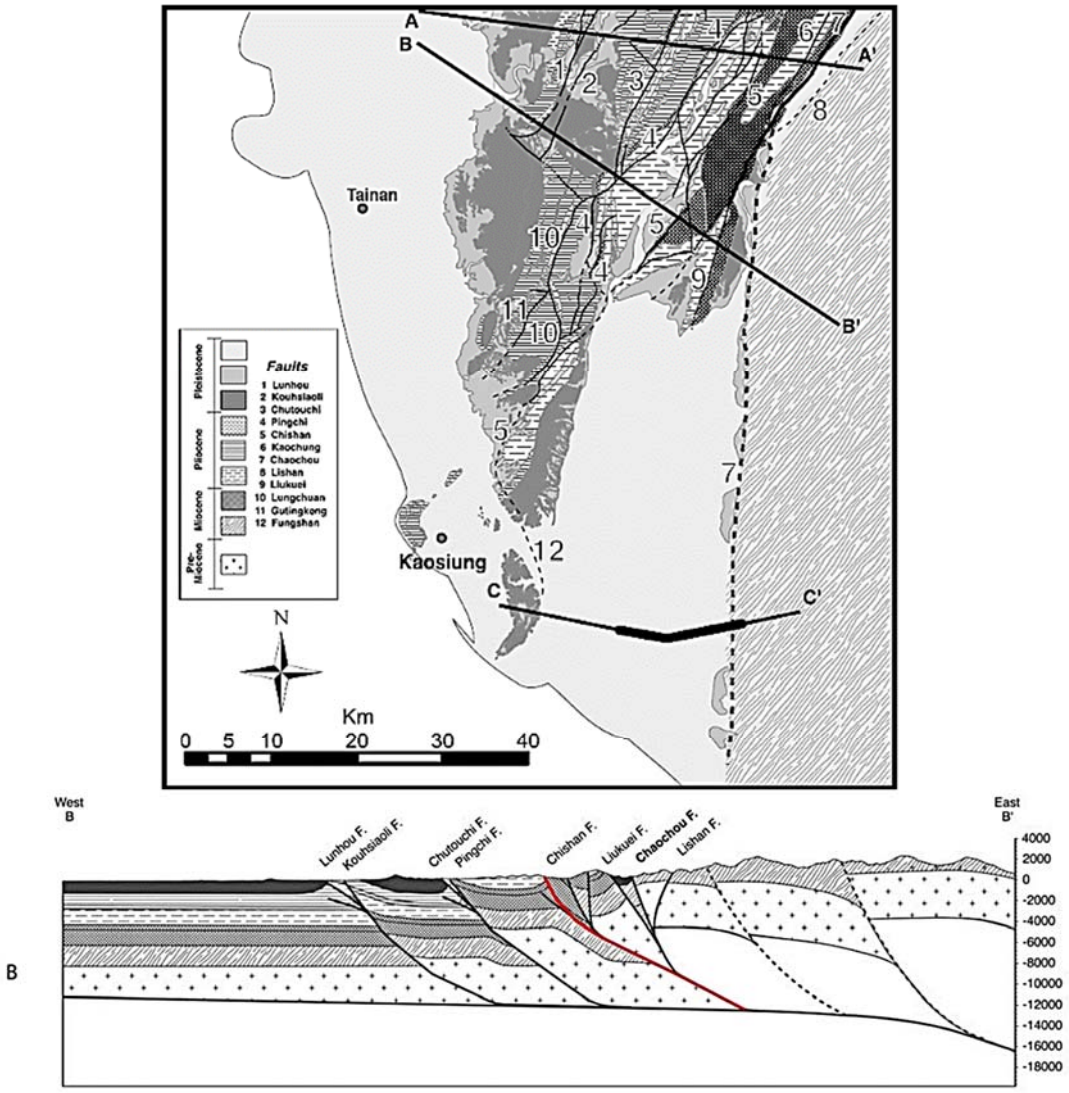



圖 4-1. 53：B-B’構造地質剖面（Wiltschko et al., 2010）。

Figure 4-1. 53: B-B’ structural cross-section.

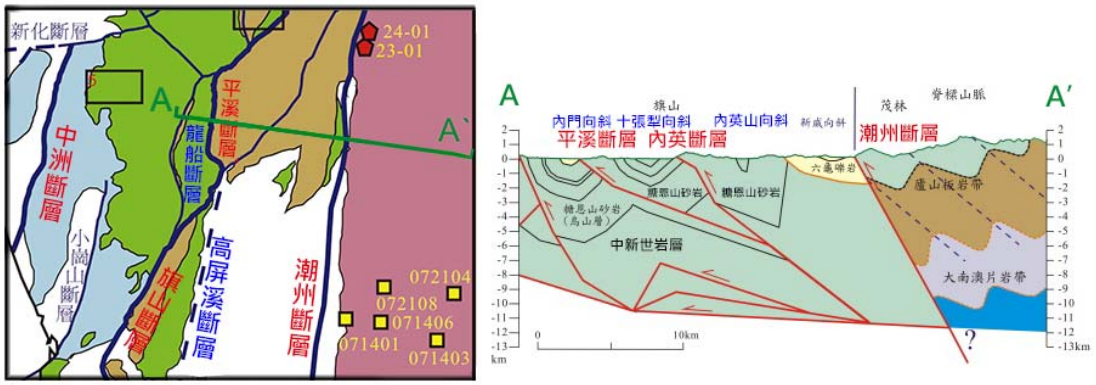



圖 4-1.54：西南部地區平衡剖面圖（陳文山等，2011）。

Figure 4-1. 54: Geological balanced cross-section in SW Taiwan.

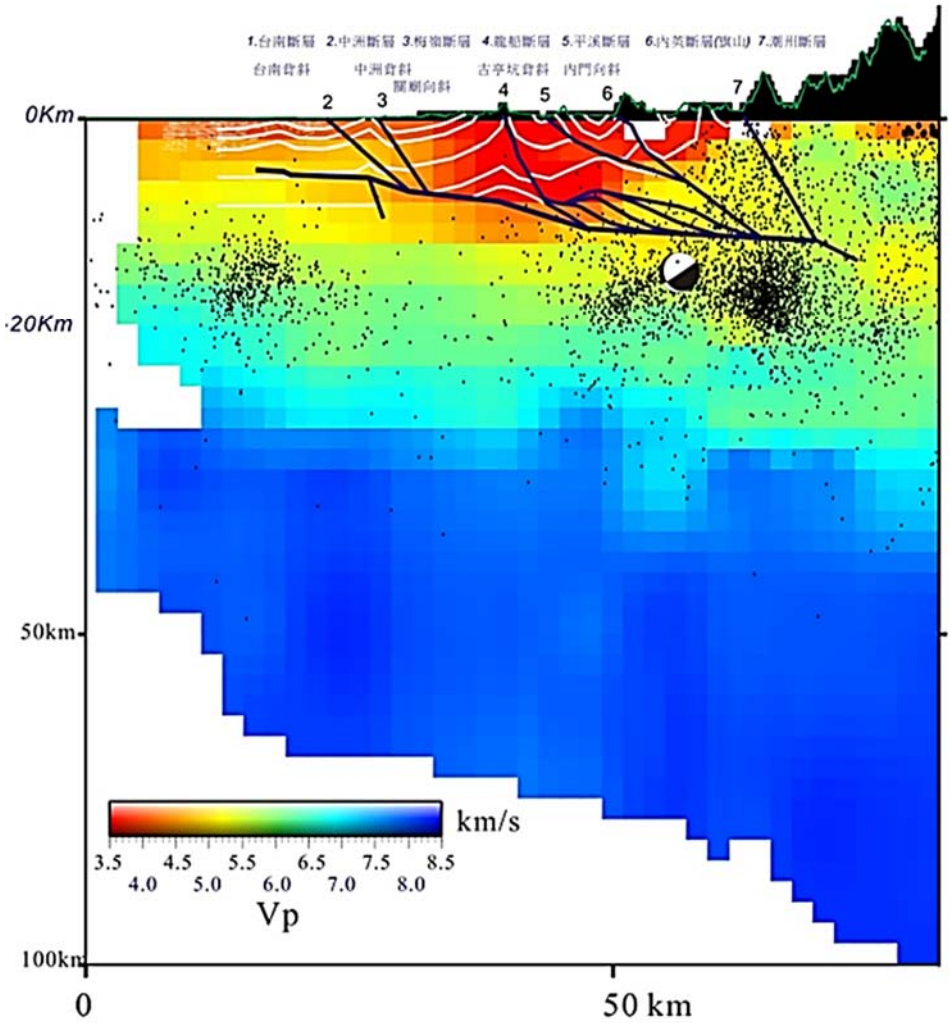



圖 4-1. 55：西南部地區速度構造剖面圖（陳文山，2016）。

Figure 4-1. 55: Velocity structure cross-section of SW Taiwan.

表 4-1.3：旗山斷層幾何資料及文獻列表。

Table 4-1.3: Chishan fault geometry and its references.

| 參考文獻 | 調查方法 | 傾角 | 深度 |
|---|---|---|---|
| 陳柏村（2005） | 野外露頭觀察 | 約 60 度向東 | - |
| 黃旭燦（2004） | 平衡剖面 | 50° | |
| 洪日豪（2006） | 構造地質剖面 | 深度 0.0 - 6.0 km，67.5°<br>深度 6.0 - 13.5 km，35° | 13.5 km |
| Wiltschko et al. (2010) | 構造地質剖面 | 深度 0.0 - 3.5 km，55°<br>深度 3.5 - 12.5 km，28° | 12.5 km |
| 陳文山等（2011） | 構造地質剖面 | 深度 0.0 - 3.0 km，55°<br>深度 3.0 - 11.5 km，40° | 11.5 km |
| 陳文山（2016） | 速度構造剖面及地震深度分布 | - | 16 km |

## 4-1-17 潮州斷層

Hsieh（1970）由重力異常資料指出屏東平原東緣的重力梯度甚陡，由屏東平原的重力異常低值區陡升至中央山脈的高值區，推測有一向東傾斜 75 度至 80 度的高角度逆斷層。Chiang（1971）則由震測及鑽井資料指出（圖 4-1.56），潮州東南方約 7 公里處的潮州背斜西翼為萬隆逆斷層所切斷，斷層面向東傾斜 50 度（圖 4-1.57）。Wiltschko et al.（2010）的構造地質剖面則顯示，潮州斷層於深度 0 – 9 公里，傾角約 65 度；深度 9 – 13 公里，傾角約 30 度（圖 4-1.58）。陳文山等（2011、2012）平衡剖面（圖 4-1.59）顯示潮州斷層深度約 14 公里，斷層傾角為 62 度。

McIntosh et al.（2013）描繪臺灣南部跨越屏東平原之地震活動分布及速度構造剖面（圖 4-1.60），顯示潮州斷層下方的深部地震應是隱沒板塊造成的地震。為了了解潮州斷層孕震深度，蒐集 Wu et al.（2014）的地震及速度構造剖面（圖 4-1.61），從地震深度剖面中推估潮州斷層孕震深度約在 15 – 20 公里。

潮州斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 4-1.4 中。潮州斷層之傾角，根據所蒐集到之震測剖面及地震深度分布等資料，潮州斷層可能為屏東平原處之盲斷層，傾角 50 度，也有可能是位於中央山脈與屏東平原之高角度斷層。中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫認為傾角可設定 50 – 70 度。潮州斷層之破裂深度，根據地震深度分布及速度構造剖面，應在 15 – 20 公里。因此，參考上述文獻資料，本計畫採用潮州斷層之斷層幾何組合進行斷層滑移虧損速率的推求，即為斷層傾角 60 度，斷層深度 0.0 – 17.5 公里。

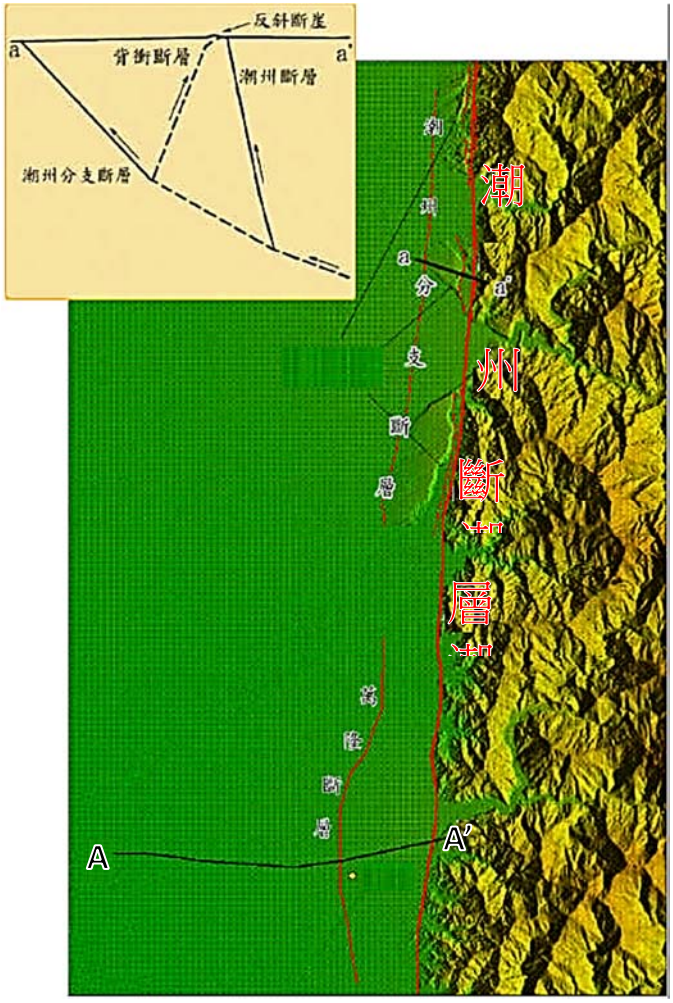



圖 4-1.56：潮州斷層及西側分支斷層構造分布圖。AA'線段為震測剖面位置，黃點為 CC-1 井位。左上角方框為分支斷層、反斜斷崖及潮州斷層之構造示意圖（改自廖何松，2003）。

Figure 4-1.56: Structural map of the Chaochou fault and its western branches. Line AA' is the location of seismic reflection; yellow dot is the drilling well CC-1. The inset presents the profile of branched fault, back-thrust, and the Chaochou fault.

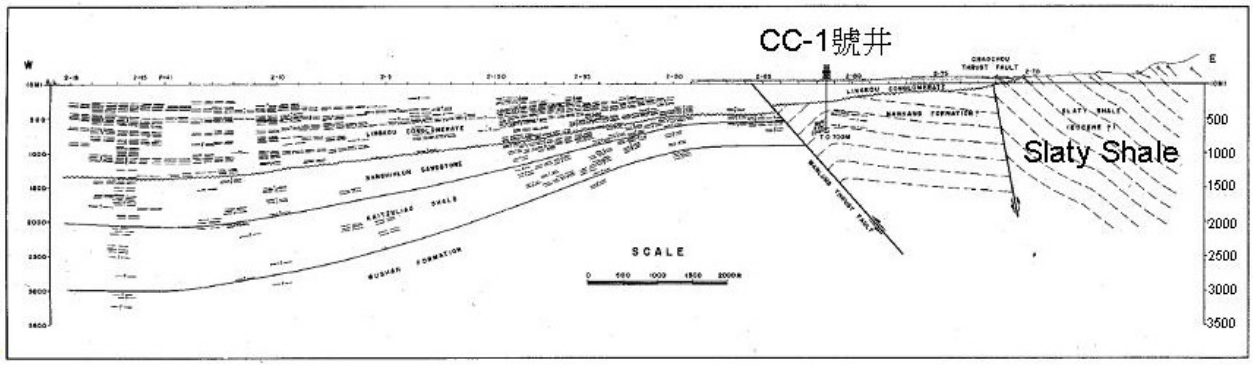



圖 4-1.57：潮州地區震測剖面及地下構造解釋，剖面線位置位於圖 4-1.56AA'線段（修改自 Chiang，1971）。

Figure 4-1.57: Seismic reflection of Chaochou fault. Line AA' in Figure 4-1.56 is the cross-section line

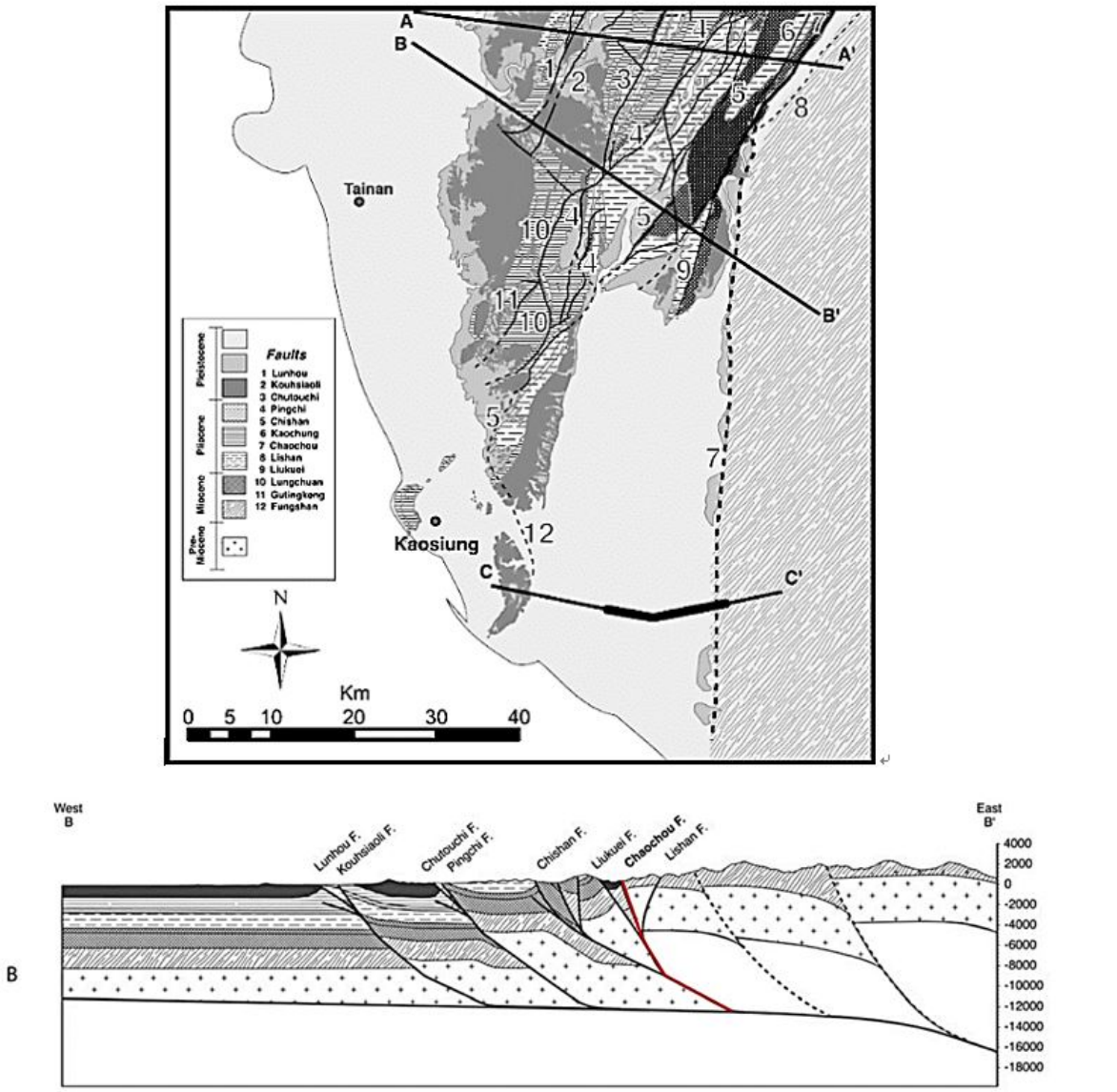



圖 4-1.58：BB’構造地質剖面（Wiltschko et al., 2010）。

Figure 4-1.58: Structure geological cross-section BB’.

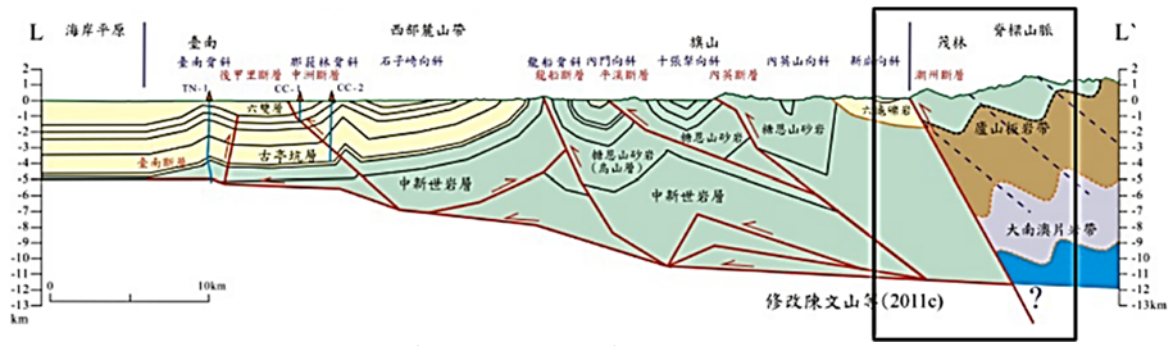



圖 4-1.59：西南部地區平衡剖面圖（陳文山等，2011）。

Figure 4-1.59: SW Taiwan balanced geological cross-section.

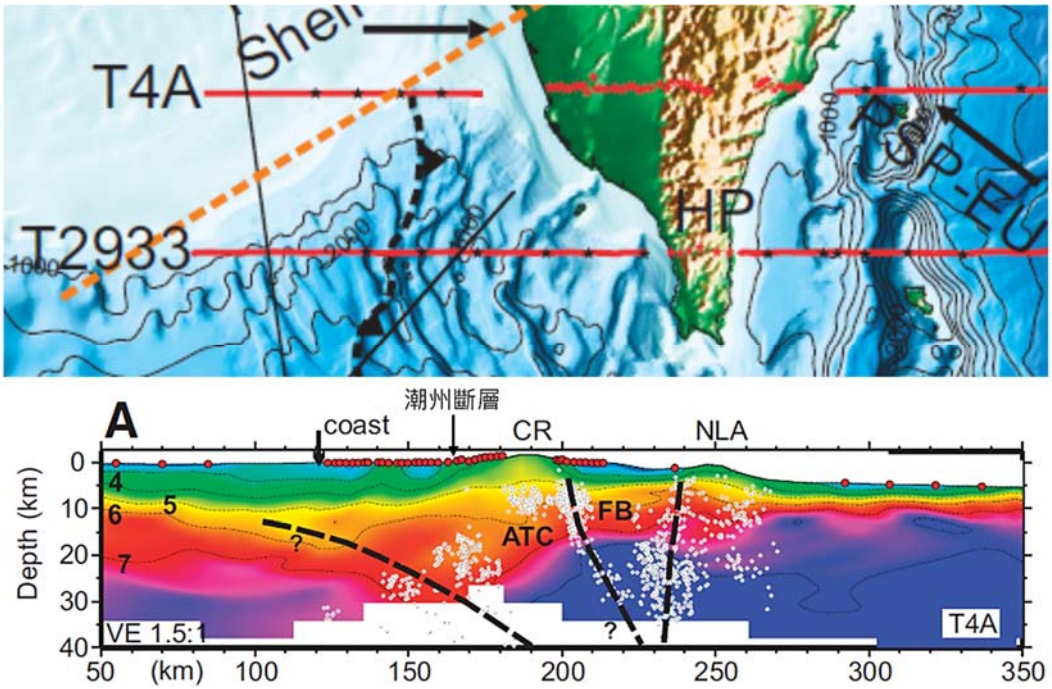



圖 4-1.60：臺灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。上圖為 T4A 速度構造剖面分布圖；下圖為 T4A 速度構造及重定位地震剖面（McIntosh et al., 2013）。

Figure 4-1.60: Velocity structure and earthquake relocation in southern Taiwan. Upper figure is location of T4A velocity profile; while the lower one is T4A velocity profile and earthquake relocation (McIntosh et al., 2013).

表 4-1.4：潮州斷層幾何資料及文獻列表。

Table 4-1.4: Chaochou fault geometry and its references.

| 參考文獻 | 調查方法 | 傾角 | 深度 |
|---|---|---|---|
| 謝世雄（Hsieh, 1970） | 重力資料 | 東傾 75 - 80° | - |
| Chiang（1971） | 震測與鑽井剖面 | 50° | - |
| Wiltschko et al.（2010） | 構造地質剖面 | 深度 0 - 9 km，65°<br>深度 9 - 13 km，30° | 13 km |
| 陳文山等（2011） | 構造地質剖面 | 深度 0 - 14 km，62° | 14 km |
| Wu et al.（2014） | P 波速度構造剖面 | | 孕震帶約<br>15 – 20 km |

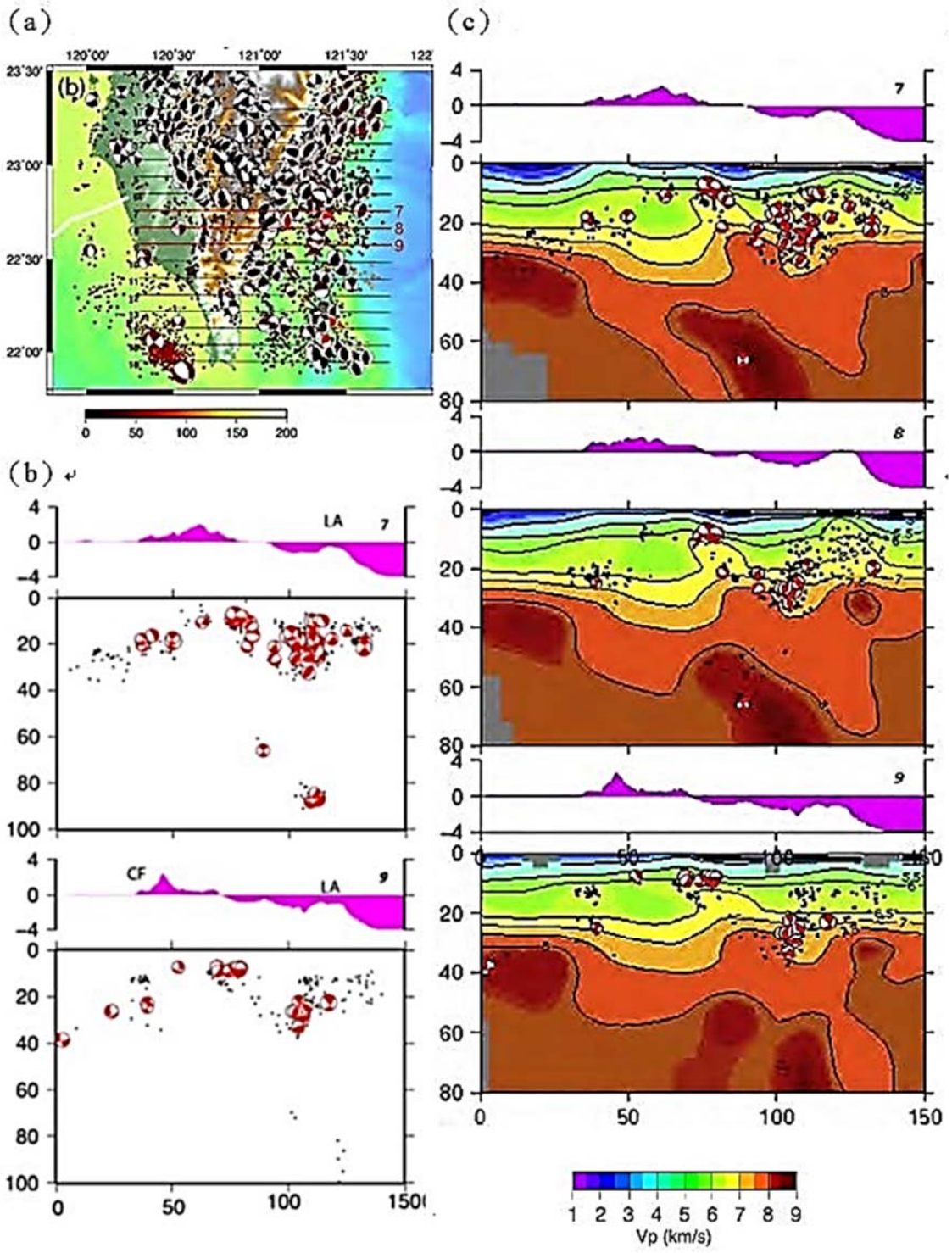



圖 4-1.61：(a) 地震、震源機制解及剖面線分布圖 (b) 剖面 7 及剖面 9 之地震深度分布及震源機制，CF 為潮州斷層 (c) 剖面 7、剖面 8 及剖面 9 之地震深度分布及地層速度構造剖面圖 (Wu et al., 2014)。

Figure 4-1.61: (a) Earthquake, focal mechanism and locations of cross-sections. (b) Focal depth and focal mechanism of profile 7 and profile 9, CF: Chaochou fault. (c) Focal depth, focal mechanism and crustal velocity structure of profile 7, profile 8 and profile 9 (Wu et al., 2014).

## 4-1-18 恆春斷層

根據跨恆春半島地體構造剖面（圖 4-1.62），恆春半島是位於隱沒帶板塊之間的增積岩體，由一系列向西的逆衝斷層構成，其中恆春斷層為中新統與更新統的分界（陳文山等，2005）。

根據 Lin et al.（2009）之震測剖面圖（圖 4-1.63）指出，增積岩體上發育的逆斷層向下止於隱沒板塊頂部，而位於恆春半島的恆春斷層應是一高角度斷層。在地調所前階段計畫中，所蒐集之陸域鑽井資料及海域震測剖面（中興公司，2012）也得到恆春斷層傾角為約 60 到 70 度的高角度斷層。McIntosh et al.（2013）描繪臺灣南部恆春半島之地震活動分布及速度構造剖面（圖 4-1.64），顯示恆春半島之地震深度約在 15 公里，然而根據其描繪隱沒板塊上部（圖 4-1.65 黑色虛線）深度，於恆春半島處則可達到 25 公里。基於上述證據，本計畫認為恆春斷層幾何可考慮地震深度分布，也需考慮與隱沒帶板塊幾何的關係，故進行斷層滑移虧損速率推求的最適斷層幾何，即是斷層深度 0.0 – 20.0 km，傾角 75 度。

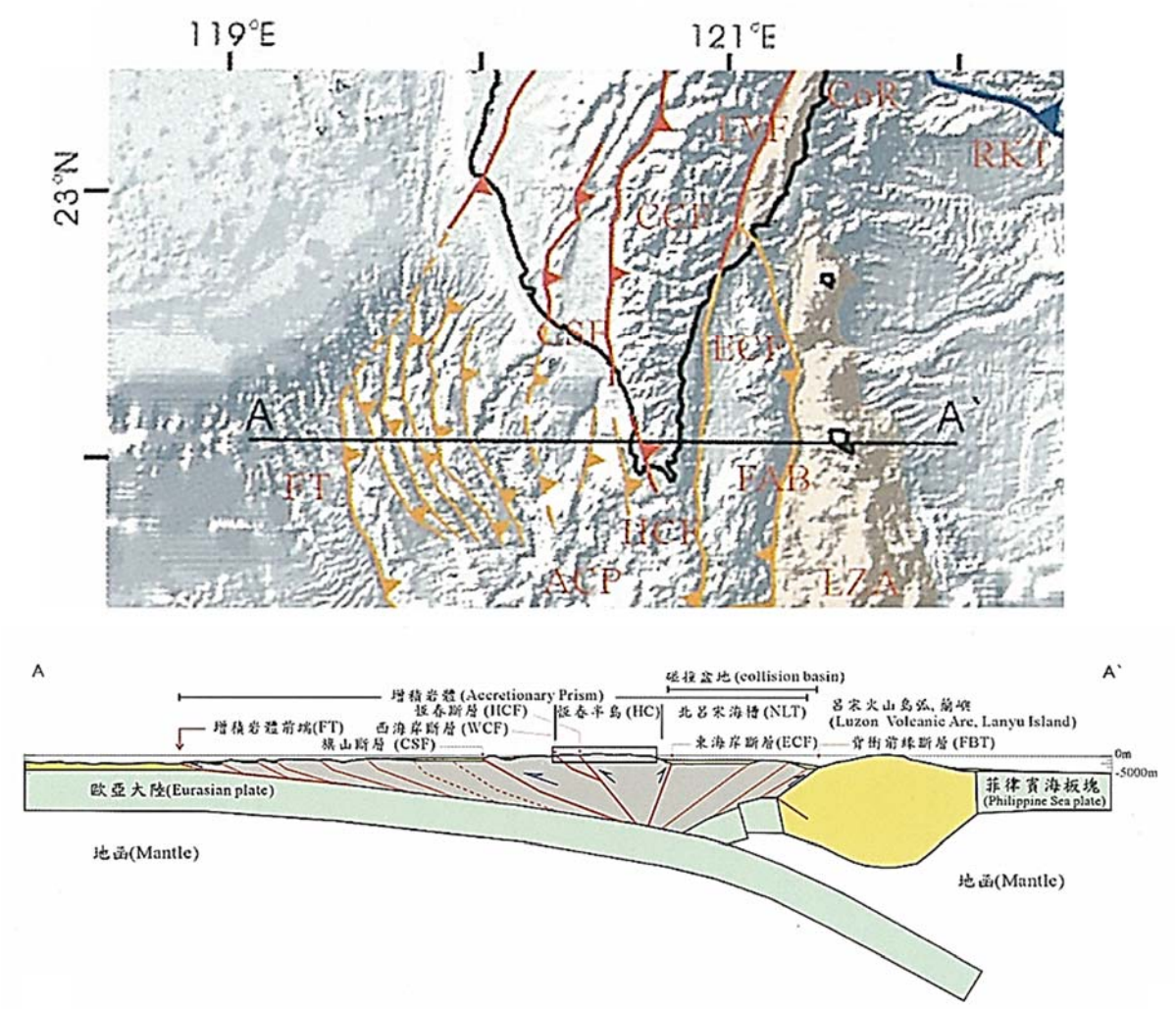



圖 4-1.62：台灣南部跨過恆春半島-蘭嶼之地體構造剖面。上圖為海陸域地形及構造分布圖，其中 ACP 為增積岩體，HCF 為恆春斷層。下圖為 A-A’ 地體構造剖面（陳文山等，2005）。

Figure 4-1.62: Schematic geological cross-section across the Hengchun Peninsula-Lanyu Island (陳文山等，2005).

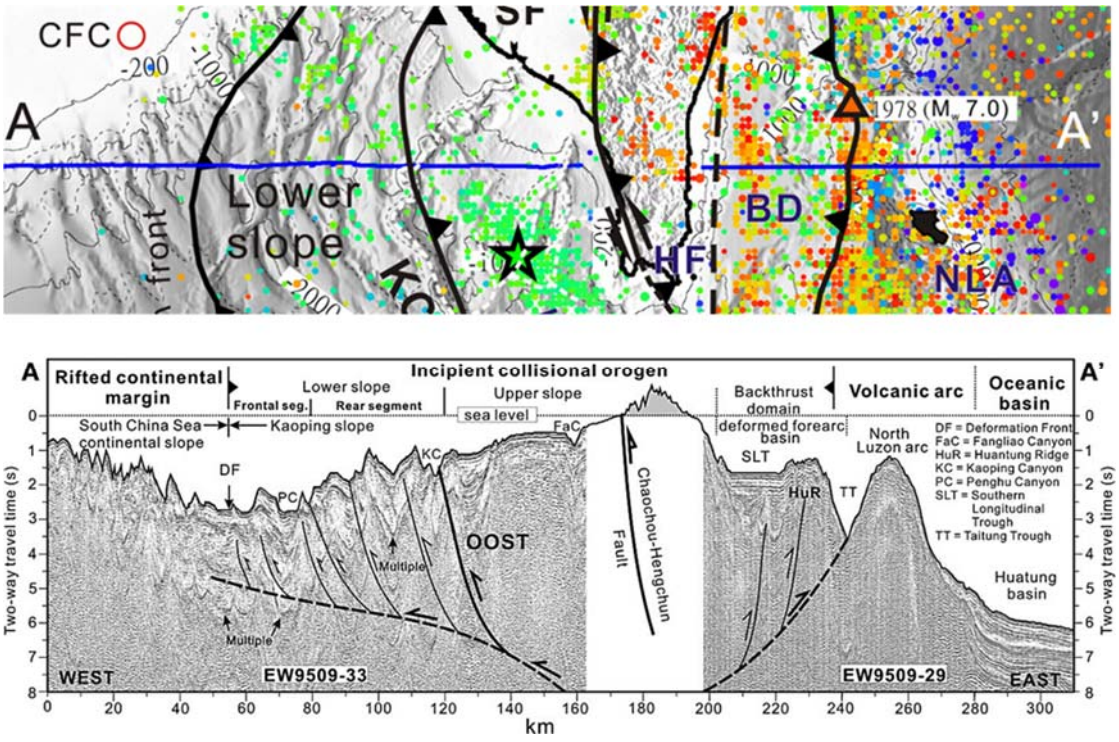



圖 4-1.63：台灣南部跨恆春半島 A-A'震測剖面圖（Lin et al., 2009）。

Figure 4-1.63: Seismic cross section across the Hengchun Peninsula (Lin et al., 2009).

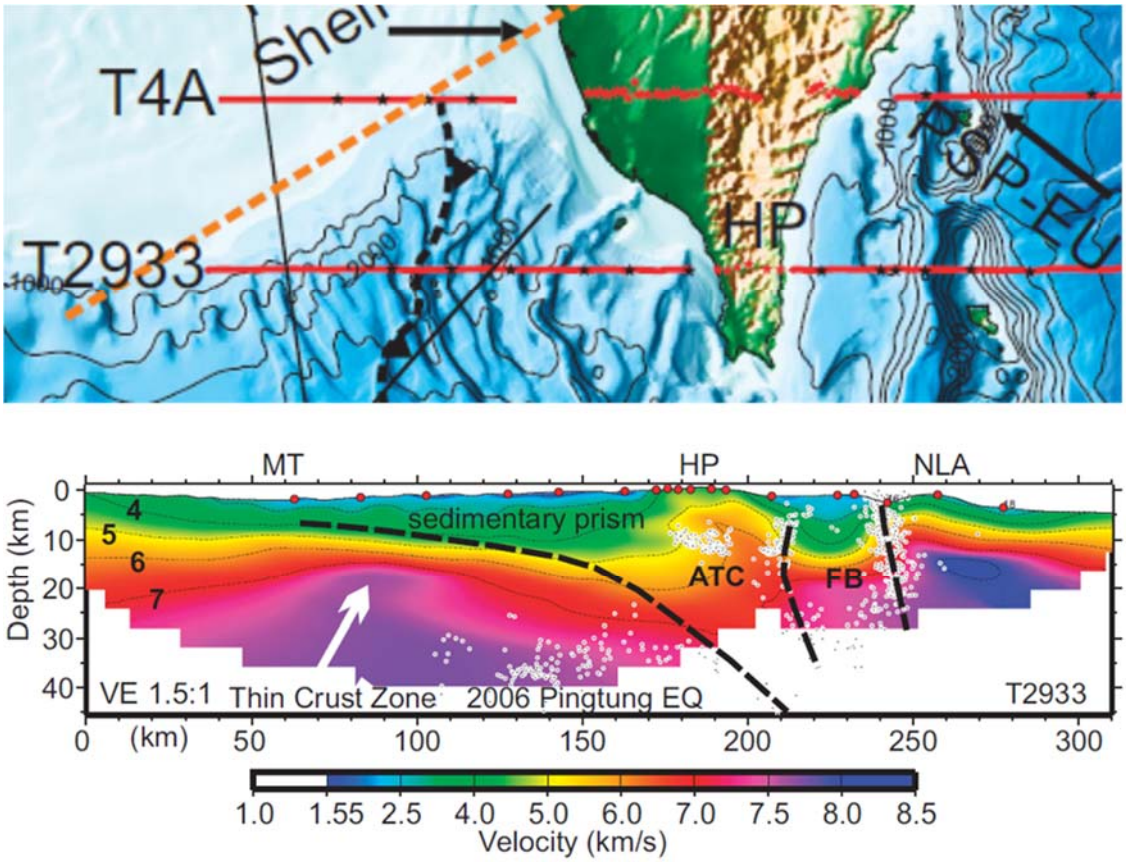



圖 4-1.64：台灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。上圖為 T2933 速度構造剖面分布圖；下圖為 T2933 速度構造及重定位地震剖面（McIntosh et al., 2013）。

Figure 4-1.64: T2933 tomographic models with relocated seismicity across southern Taiwan (McIntosh et al., 2013).

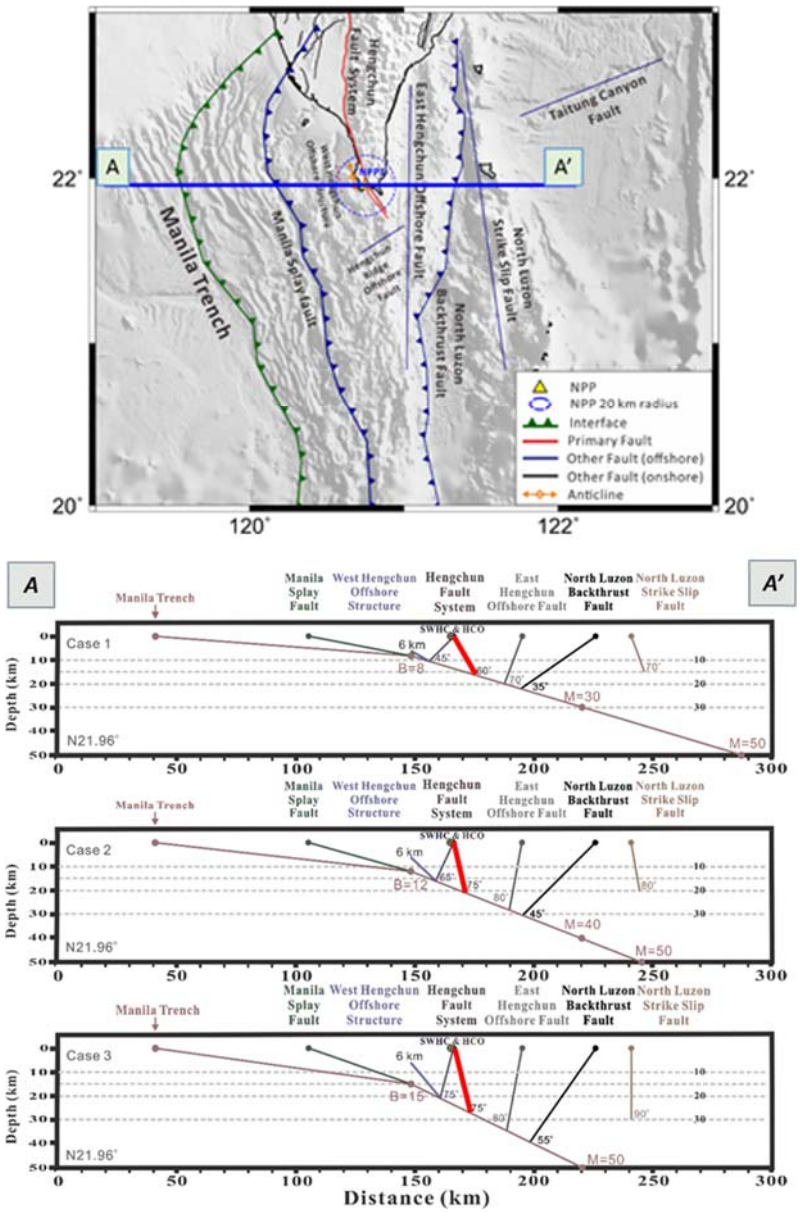



圖 4-1.65：南部斷層幾何形貌設定。上圖為臺灣南部活動斷層分布圖，下圖為臺灣南部活動斷層 AA’ 剖面之幾何形貌，其中 HCO 即恆春斷層。

Figure 4-1.65: Fault geometry setting of the fault system in southern Taiwan.

## 4-1-19 米崙斷層

陳俊甫(2013)於台灣東部針對 1991-2010 年的地震進行重定位(圖 4-1.66a)。米崙斷層位於美崙台地處，美崙台地下方有編號 1 及編號 3 兩個地震群（圖 4-1.66b）。陳俊甫（2013）認為深部編號 3 地震群可能為海岸山脈深處與中央山脈，抑或是縱谷沈積物，碰撞所引發的地震活動，與美崙台地下方深 10 公里的地震群在深度上以及機制上有明顯的差異，故兩者為不同系統的地震活動。Shyu et al.（2016）進一步繪製美崙台地附近之地震分布來解析美崙台地上部地震群的分布情形（圖 4-1.67）。

2018 年 2 月花蓮地震後，Wen et al.（2019）蒐集米崙斷層附近 2012-2017 地震進行重定位（圖 4-1.68a），其中 C-C'剖面（圖 4-1.68b）正好跨過米崙斷層。結果指出米崙斷層下方 10 公里處有明顯的地震群，而深度 20~30 公里的地震群與米崙斷層關聯性似乎不高。

米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 4-1.5。米崙斷層之傾角，根據震測剖面推斷為高角度斷層，然而從地震深度分布剖面中，從幾個地震群中要定出斷層面仍有不確定性，本計畫從 Wen et al.（2019）剖面中得到最符合地震深度分布趨勢線的傾角 65E 度作為斷層面中值（圖 4-1.69）。深度上，對於上部地震群而言，前階段計畫的深度 30 公里顯然太深，因此本計畫修改米崙斷層破裂深度為 10 公里。

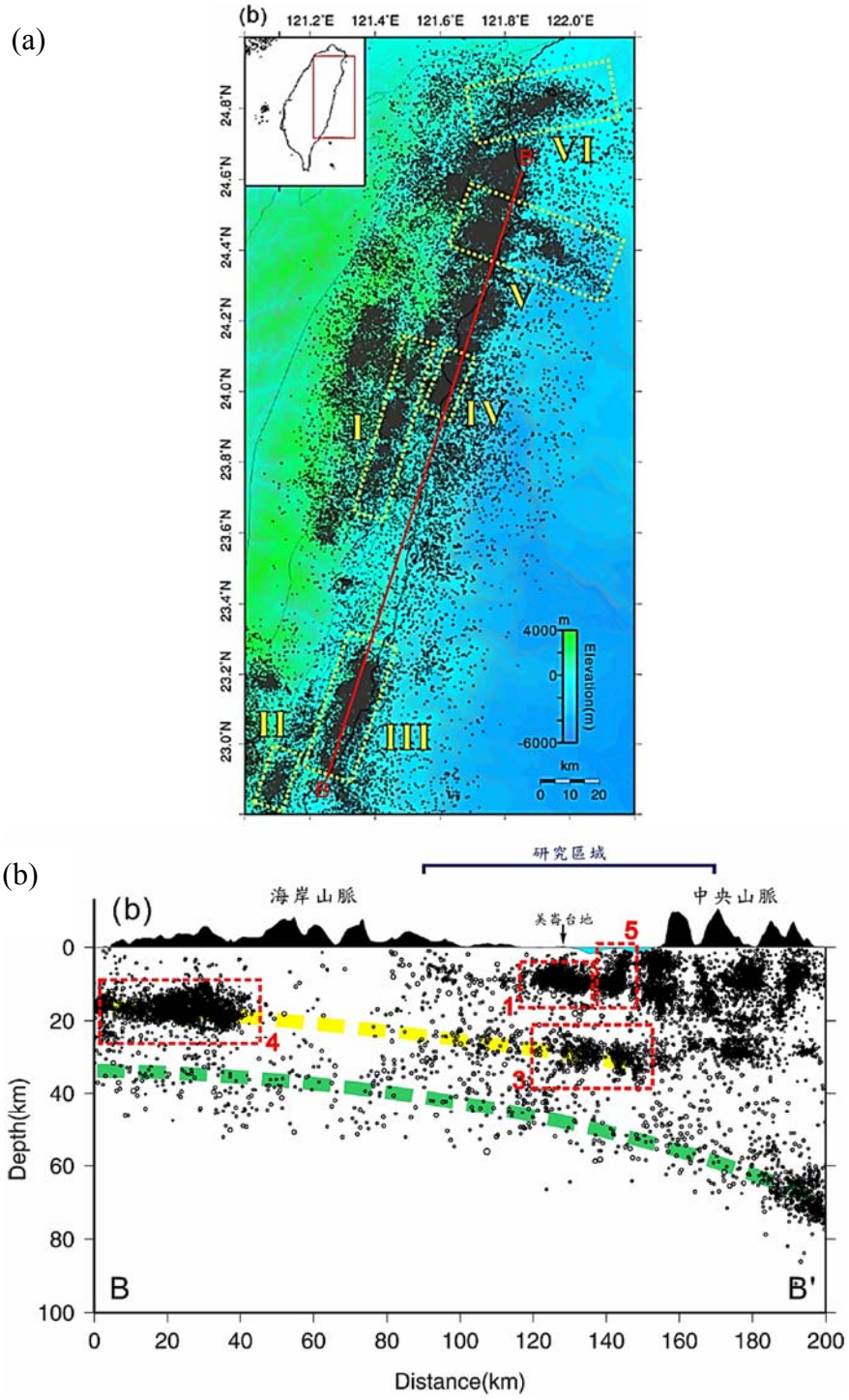



圖 4-1.66：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位深度剖面。(a) 利用 3DCOR 重定位之震央分布；(b) 定位後剖面 B 地震的震源深度分布，綠色虛線為班尼奧夫帶地震帶的位置，黃色虛線為縱谷斷層的地震活動帶（陳俊甫，2013）。

Figure 4-1.66: Relocated earthquake profile during 1991-2010 in eastern Taiwan. (a) The distribution of relocated earthquakes using 3DCOR. (b) The earthquake distribution along the section BB'. The green dotted line is the location of Benioff zone. The yellow dotted line is the seismic zone of the Longitudinal Valley fault (陳俊甫，2013).

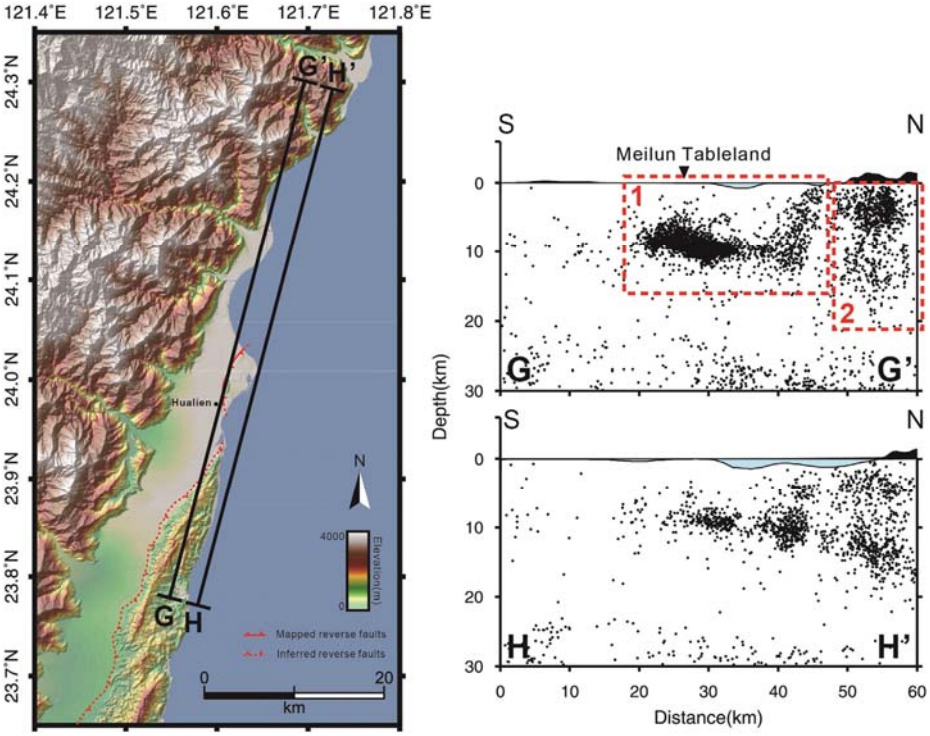



圖 4-1.67：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位南北向 GG'及 HH'深度剖面（Shyu et al., 2016）。
Figure 4-1.67: Distribution of relocated earthquakes along the GG' and HH' profiles in eastern Taiwan from 1991 to 2010 (Shyu et al., 2016).

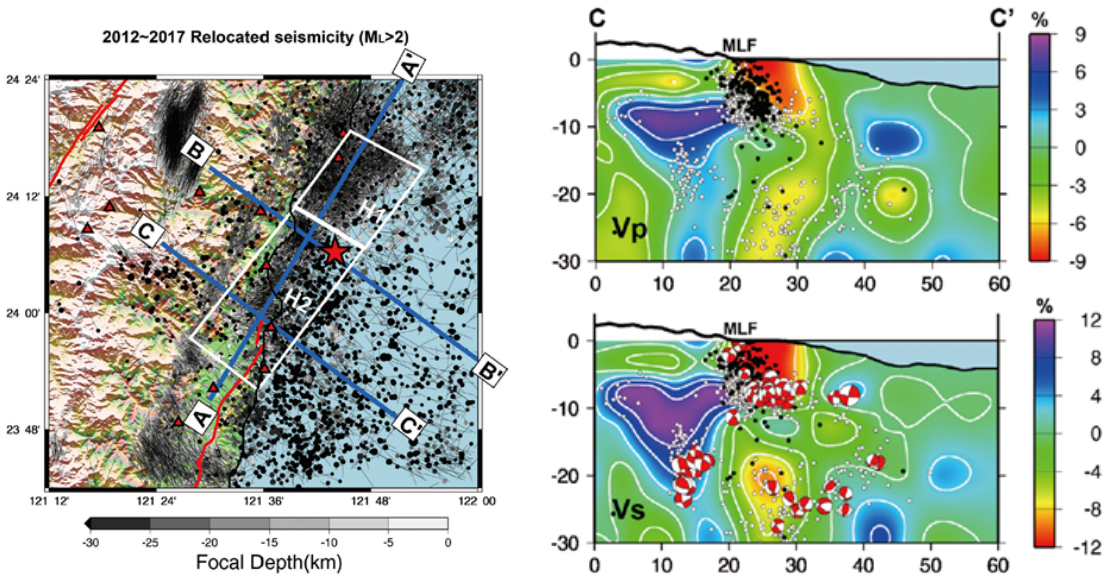



圖 4-1.68：花蓮地區 2012 年至 2017 年地震重定位深度剖面。左圖為重定位之震央分布圖，右圖為 C-C'剖面地震的震源深度分布及 Vp、Vs 速度構造剖面，白點為西元 2012-2017 年 $M_L$ > 2 的地震，黑點為 2018 年 2 月花蓮地震（Wen et al., 2019）。

Figure 4-1.68: Relocated earthquakes between 2012 and 2017 in Hualien area. Left figure is relocated earthquake distribution. Right figure is earthquake distribution and the Vp and Vs velocity models along the CC' section. The white point is the $M_L$ > 2 earthquake in 2012-2017, and the black point is the Hualien earthquake in February 2018 (Wen et al., 2019).

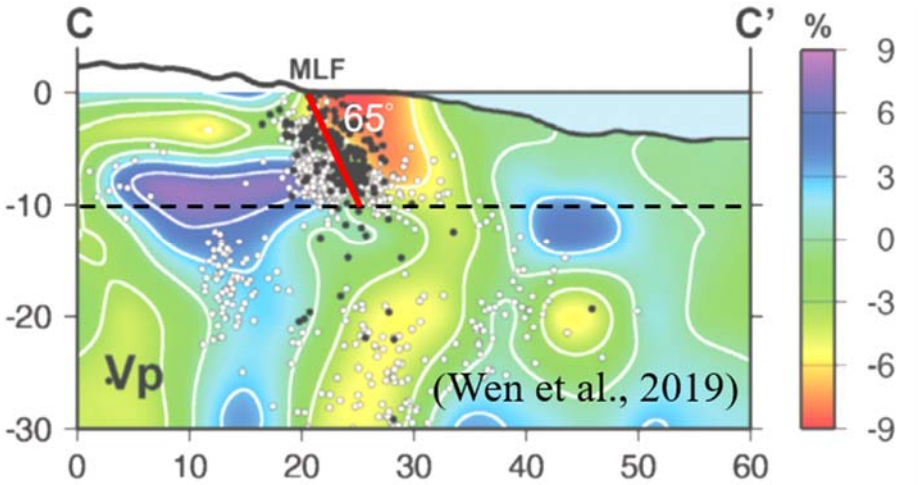



圖 4-1.69：本計畫米崙斷層幾何設定。

Figure 4-1.69: The geometry of Milun fault system.

表 4-1.5：米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數

Table 4-1.5: Various survey methods and fault parameters of the Milun fault geometry

| 參考文獻 | 方法 | 傾角 | 深度 |
|---|---|---|---|
| 朱傚祖與游明聖，1996 | 淺層震測剖面 | 淺部為高角度斷層 | |
| Kuochen et al., 2004 | 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震 | NA | 在 10 公里深度有一地震密集區 |
| 陳俊甫，2013；Shyu et al., 2016 | 1991-2010 3DCOR 重定位地震 | NA | 地震群 1：10 公里 |
| | | | 地震群 3：20-30 公里（研判非米崙斷層地震） |
| Wen et al. 2019 | 2012-2017 重定位地震、速度構造剖面 | NA | 在 10 公里深度有一地震密集區 |

## 4-1-20 嶺頂-瑞穗斷層

石瑞銓等（2004）跨嶺頂斷層的地電阻測線顯示，嶺頂斷層上盤處存在低電阻率帶，研判是斷層破碎帶（圖 4-1.70），呈高角度分布。根據李建成（2004）花東縱谷斷層模型及分段，鳳林光復段即嶺頂斷層及瑞穗斷層位置（圖 4-1.71），屬於高角度匙狀幾何。圖 4-1.72 為臺灣東部地區利用 hypoDD 重定位之 1991-2002 地震分布（Kuo-Chen et al., 2004），其中 D 剖面即位於瑞穗斷層所在位置。假設圖 4-1.72（b）中斷層面（紅色虛線）符合地震分布，瑞穗斷層在深度 0-25 公里傾角為 75 度，25-40 公里傾角為 45 度。此外，Kuo-Chen et al.（2012）建立跨全臺灣之速度構造剖面，其中跨越縱谷斷層北段 C03 速度構造剖面如圖 4-1.73 右上圖所示，從 C03 速度構造剖面不易觀察斷層面的延伸。然而跨越縱谷斷層中段 C02 速度構造剖面，如圖 4-1.73 右下圖所示，可觀察到位於縱谷斷層地震群深度達到 30 公里，假設斷層面符合地震分布，則斷層傾角約為 65 度。最後，根據 Shyu et al.（2016）2009/12/19 $M_L$ 4.7 地震序列，地震主要位於 20~40 公里深度，大部分為逆斷層機制（圖 4-1.74），此地震序列的趨勢線呈現 65E 的傾角。

嶺頂斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 4-1.6。嶺頂斷層之傾角，根據地電阻剖面推斷為高角度斷層，然而從地震深度分布剖面中，要定出斷層面仍有不確定性，本計畫從地震深度分布剖面中得到最符合地震深度分布趨勢線的傾角 65 E 作為斷層面傾角。深度上，本計畫認為岩石在深度超過 30 公里已屬於塑性帶，不易產生脆性破裂，因此選用斷層深度為 27.5 公里。

瑞穗斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 4-1.7。本計畫認為嶺頂斷層與瑞穗斷層屬於李建成等（2004）提出的縱谷斷層鳳林光復段，考慮嶺頂斷層與瑞穗斷層系統破裂的可能性，瑞穗斷層幾何參數則同於嶺頂斷層：傾角 65 E。深度上，本計畫認為岩石在深度超過 30 公里已屬於塑性帶，不易產生脆性破裂，因此選用斷層深度為 27.5 公里。

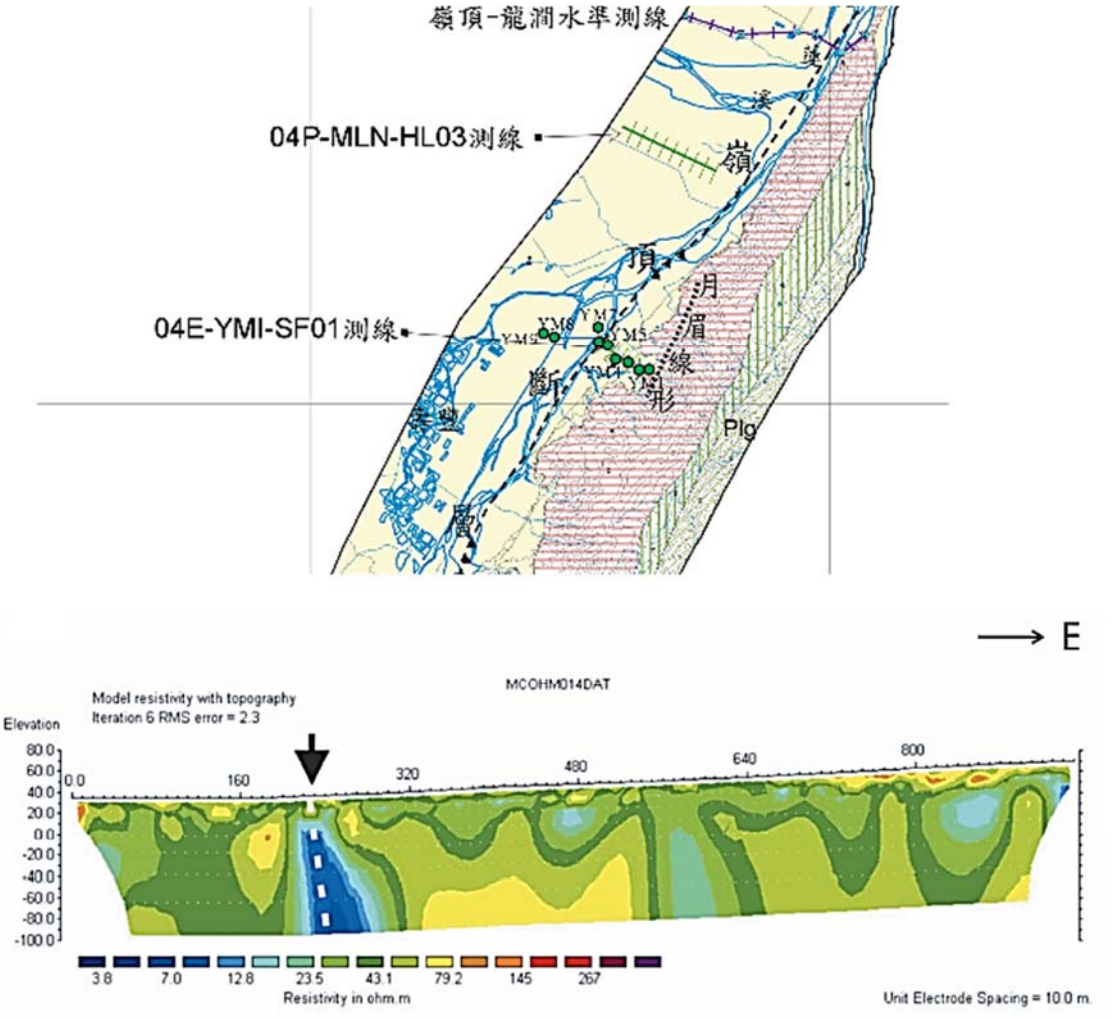



圖 4-1.70：嶺頂斷層地電阻影像剖面圖，剖面位置位於上圖之 04E-YMI-SF01 測線（石瑞銓等，2004）。

Figure 4-1.70: Resistivity profile of the Lingding fault. The profile location is located at the 04E-YMI-SF01 in the above figure.

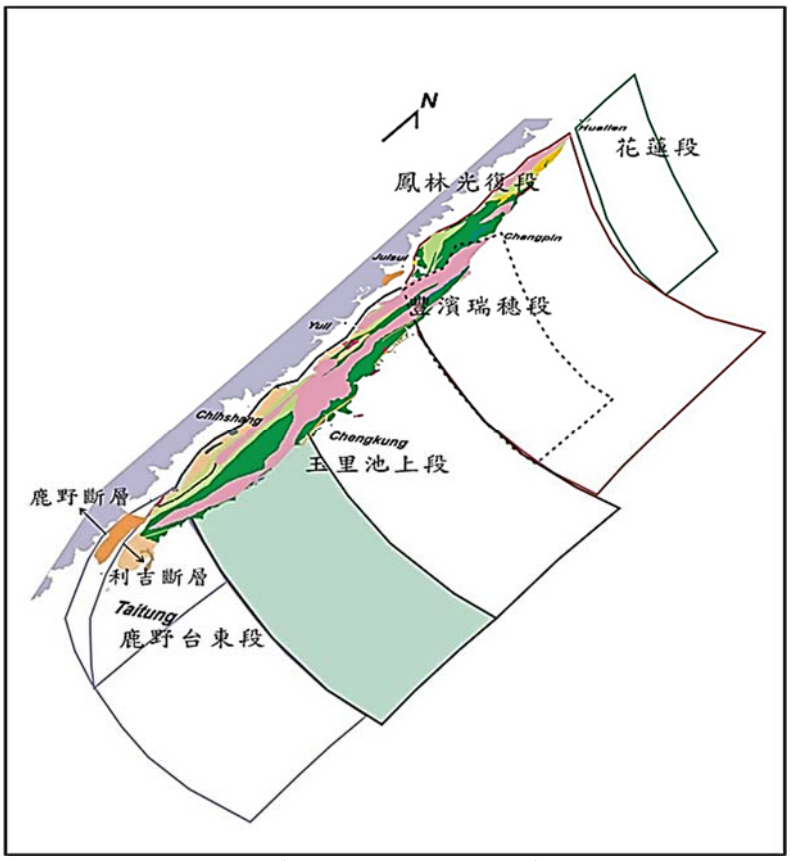



圖 4-1.71：花東縱谷斷層分段與幾何（引自李建成等，2004）。

Figure 4-1.71: Geometry and segmentation of the Longitudinal Valley fault (Lee et al., 2004).

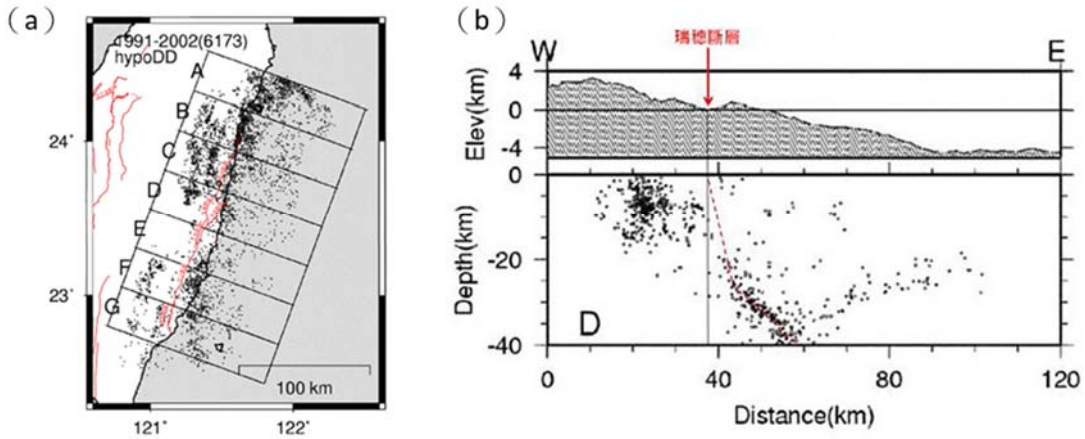



圖 4-1.72：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面，其中 D 剖面即瑞穗斷層通過之處，剖面於 25~35 公里深處有明顯之地震富集（修改自 Kuochen et al., 2004）。

Figure 4-1.72: Relocated earthquakes in eastern Taiwan. Rueysui fault passes the D profile. Earthquakes mainly occur at a depth of 25 to 35 km.

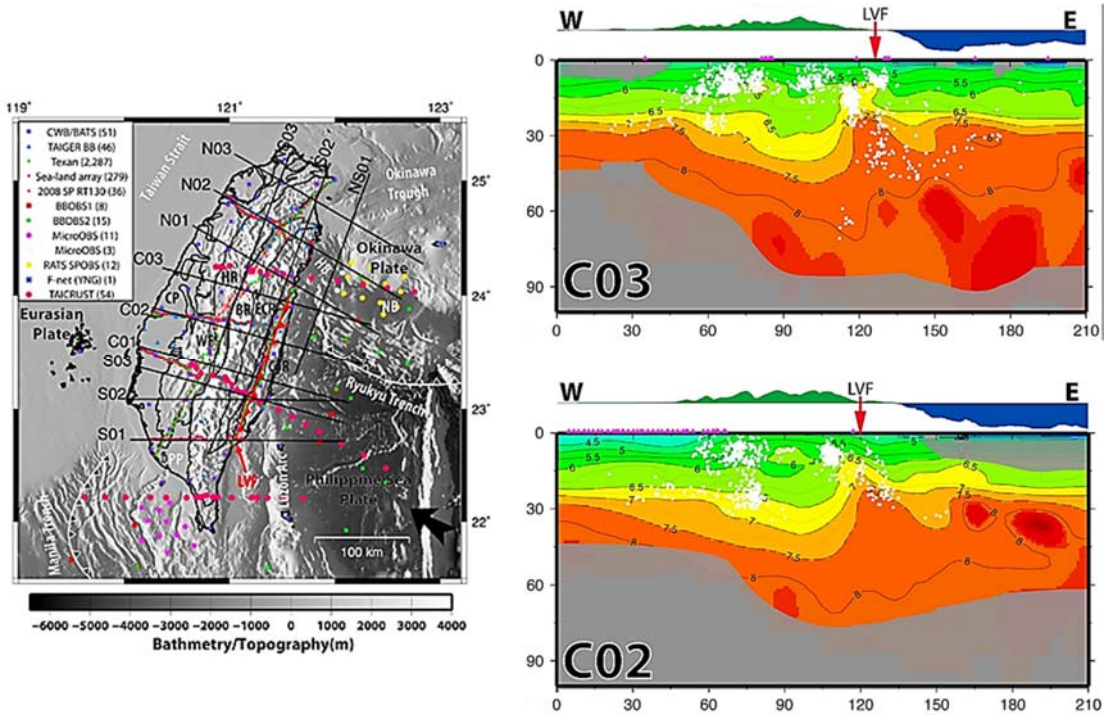



圖 4-1.73：左圖為臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，右圖上為跨越縱谷斷層北段 C03 速度構造剖面，右圖下為跨越縱谷斷層中段 C02 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012）。

Figure 4-1.73: Taiwan tectonics and the distribution of seismic stations. The solid black lines show the locations of velocity cross section. (Up) The northern section of the Longitudinal Valley fault locates at the C03 velocity cross section. (Down) The middle section of Longitudinal Valley fault locates at the C02 velocity cross section across (modified from Kuochen et al., 2012).

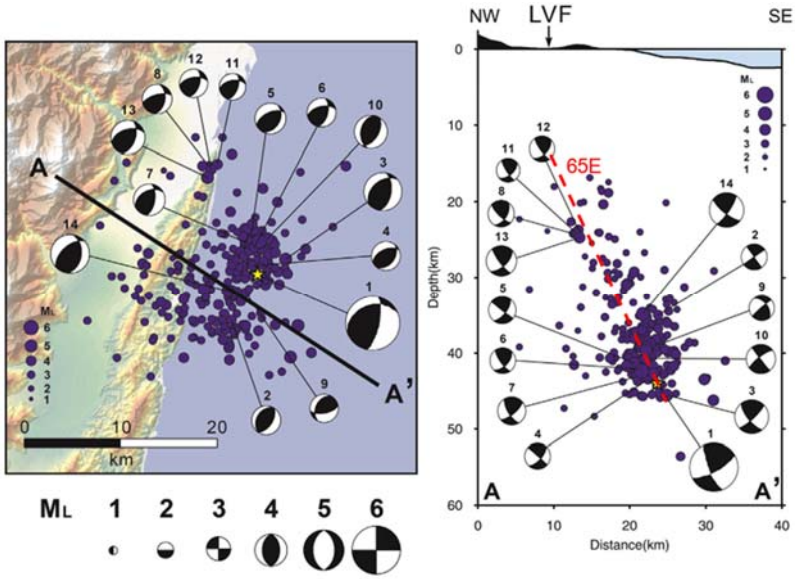



圖 4-1.74：2009 年 12 月 19 日 $M_L$ 4.7 地震序列（Shyu et al., 2016）。

Figure 4-1.74: $M_L$ 4.7 earthquake sequence on December 19, 2009.

表 4-1.6：嶺頂斷層幾何形貌相關文獻

Table 4-1.6: References for the geometry of Lingding fault.

| 文獻 | 方法 | 傾角 | 深度（km） |
|---|---|---|---|
| 石瑞銓等，2004 | 地電阻剖面 | 高角度 | - |
| Kuochen et al., 2012 | C02 速度構造剖面及地震分布 | 65E | 30 公里左右 |
| Shyu et al., 2016 | 2009/12/19 ML4.7 地震序列 | 65E | 20-40 |

表 4-1.7：瑞穗斷層幾何形貌相關文獻

Table 4-1.7: References for the geometry of Rueysui fault.

| 文獻 | 方法 | 傾角 | 深度（km） |
|---|---|---|---|
| Kuochen et al., 2004 | 1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估 | 0-25 公里，75 度<br>25-40 公里，45 度 | 可達 40 公里 |
| Kuochen et al., 2012 | C02 速度構造剖面及地震分布 | 65 度 | 30 公里左右 |

# 4-1-21 奇美斷層

Chen et al.（1991）於豐濱附近發現一奇美斷層露頭（圖 4-1.75），斷層截切全新世河階，斷層位態為 N40E/80˚E，斷層帶寬約 1 公尺。此外，林啟文等（2009）也指出，在奇美村附近的秀姑巒溪有 3 個奇美斷層的露頭，都鑾山層的火成岩逆衝至八里灣層砂頁岩互層之上，斷層面位態為 N70-80°E/70°S，斷層帶中斷面擦痕的滑移角（rake）分別為 80°與 16°，為逆衝兼具左移分量。秀姑巒溪奇美村東南方奇美斷層露頭則顯示黑色剪裂泥岩與剪裂砂岩層（圖 4-1.76）。

董倫道等（2005）利用大地電磁波進行探勘，在春日以南泰林地區三條剖面線的地電阻影像整合剖面判讀結果，奇美斷層為高角度逆衝斷層（圖 4-1.77）。

奇美斷層幾何形貌相關文獻彙整於表 4-1.8 中。奇美斷層傾角，主要參考野外露頭、地球物理推估，以高傾角 80 度作為斷層面中值。奇美斷層的深度，從目前的地震深度分布中，並無法解析奇美斷層的破裂深度，本計畫考慮奇美斷層與瑞穗斷層之空間關係，假設奇美斷層為瑞穗斷層的分支斷層，則奇美斷層以 80 度傾角向下延伸時，約在 25 公里處與瑞穗斷層相接（圖 4-1.78）。

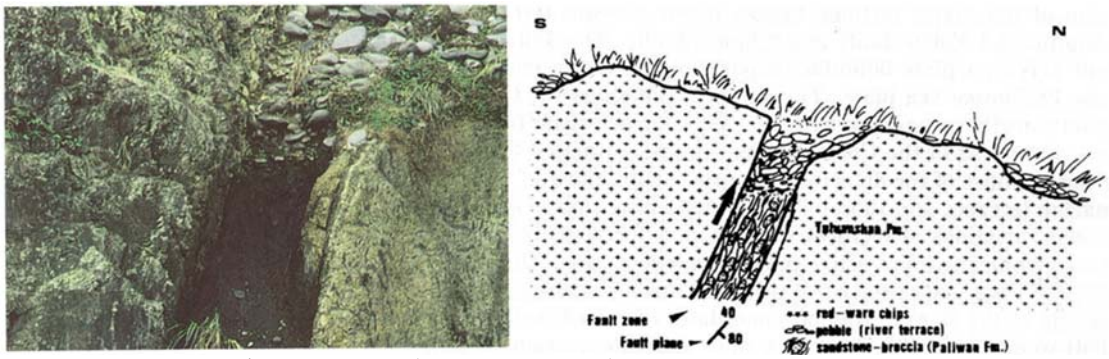



圖 4-1.75：豐濱附近奇美斷層露頭（Chen et al., 1991）。
Figure 4-1.75: The outcrop of Chimei fault near Fengpin (Chen et al., 1991).



圖 4-1.76：秀姑巒溪奇美村東南方奇美斷層露頭（林啟文等，2009）。
Figure 4-1.76: The outcrop of Chimei fault at Hsiukuluan river, southeast of the Chimei village (林啟文等，2009).

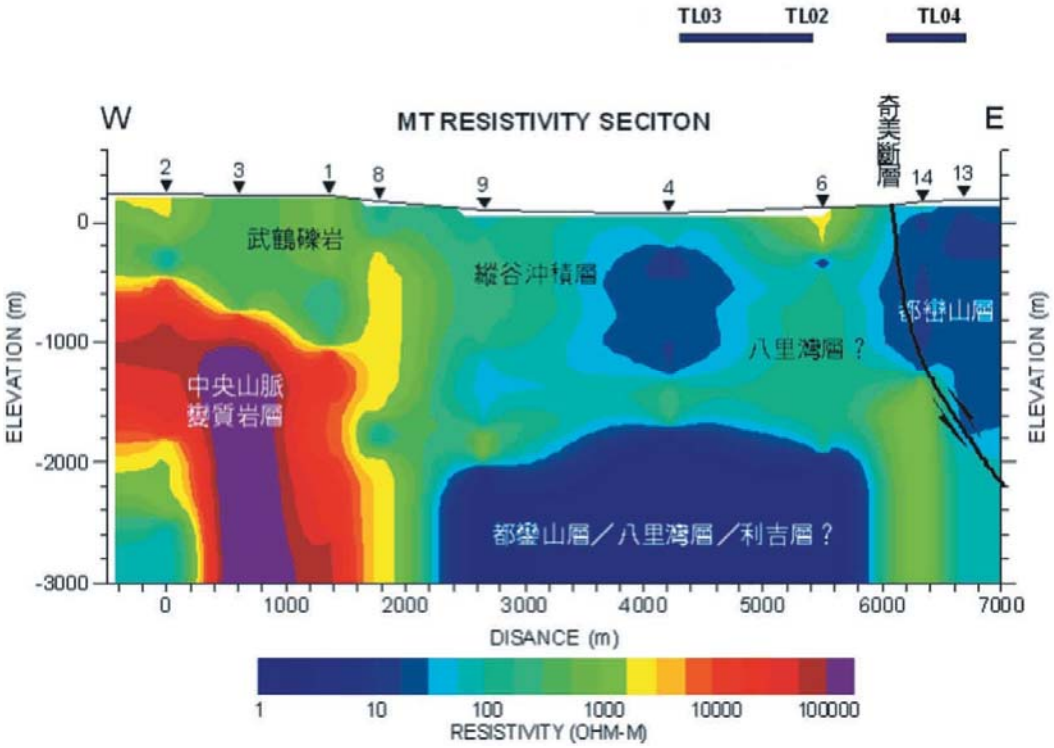



圖 4-1.77：泰林地區地電阻影像剖面結果圖（董倫道等，2005）。
Figure 4-1.77: MT resistivity section in Tailin area (董倫道等，2005).

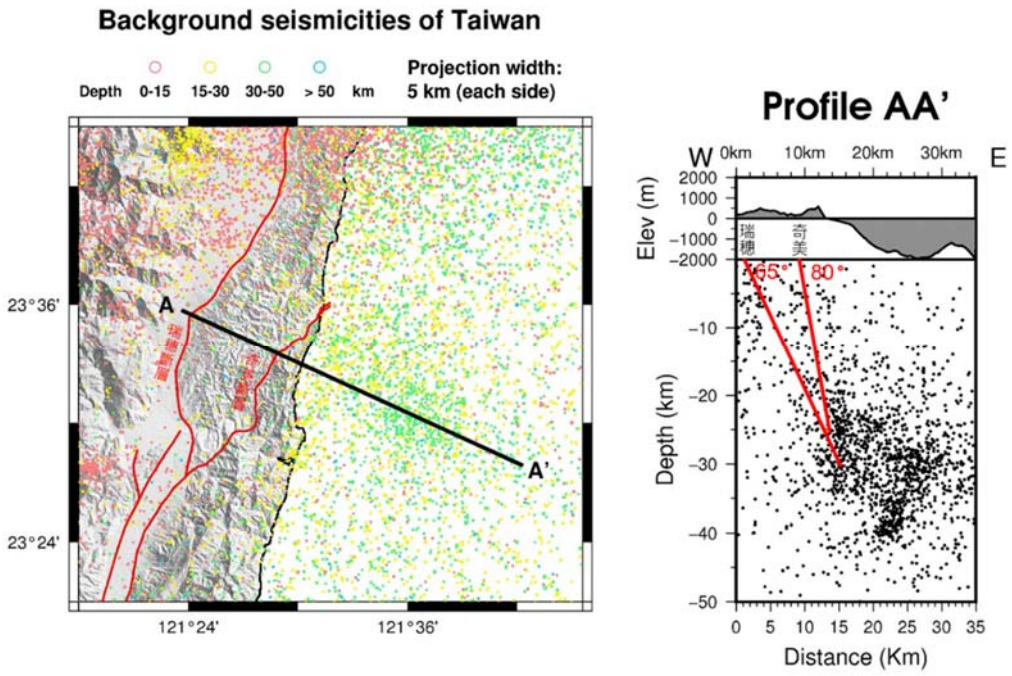



圖 4-1.78：本計畫瑞穗斷層及奇美斷層幾何。圓點為中央氣象局 1900-2015 地震。
Figure 4-1.78: Fault geometry of the Rueyshui fault and the Chimei fault.

表 4-1.8：奇美斷層幾何形貌相關文獻
Table 4-1.8: References for the geometry of Chimei fault.

| 文獻 | 方法 | 傾角（度） | 深度（km） |
|---|---|---|---|
| Chen et al., 1991 | 豐濱附近奇美斷層露頭 | 80 | -- |
| 賴文基，1995 | 秀姑巒溪河谷現地調查 | 75 | -- |
| 羅偉與楊昭男，2004 | 秀姑巒溪奇美斷層的露頭 | 70 | -- |
| 董倫道等，2005 | 地電阻剖面 | 高角度 | -- |

## 4-1-22 玉里-池上斷層

Lee et al.（2003）蒐集池上斷層附近 1998-2001 及 1995 年規模 5.4 地震序列之地震記錄（圖 4-1.79），認為地震應是沿著池上斷層之斷層面分布，得到斷層面在 0-10 公里深度傾角約 60-65 度，10-20 公里深度傾角變為 45 度，20-25 公里深度時傾角變為 10 度。Cheng et al.（2009）重定位 2003 年 $M_w$ 6.8 成功地震之餘震結果，可作為池上斷層幾何形貌之參考，由縱谷東邊的餘震序列分佈可以看出有一明顯的地震帶沿著傾角向東的斷層面分佈（圖 4-1.80）。整體而言，在深度 0-20 公里斷層面傾角約 60 度，20-27 公里斷層面傾角約 25 度。另外，根據 Kuo-Chen et al.（2012）速度構造剖面及地震震源分布，推估池上斷層傾角 60 度，深度約 27 公里左右（圖 4-1.81）。

池上斷層之傾角及破裂深度，主要參考 P 波速度構造剖面、地震震源分布、2003 年成功地震餘震分布等資料，本計畫認為傾角可採用雙傾角方式呈現。依據地震震源分布，池上斷層在深度 0-20 公里的傾角約 60 度，深度 20-25 公里約 25 度。

玉里斷層之傾角及破裂深度，Shyu et al.（2007）利用 GPS 量測資料與現地調查進行地形分析，建構位於舞鶴台地縱谷地區之東西向構造剖面，依據該模型剖面圖，玉里斷層發育於縱谷中之沖積層，深度可能超過 5 公里，但並未確定，如圖 4-1.82 所示。本計畫則假設玉里斷層為池上斷層的分支，於一定深度與池上斷層相接，深度 0-10 公里 51 度，下接池上斷層。

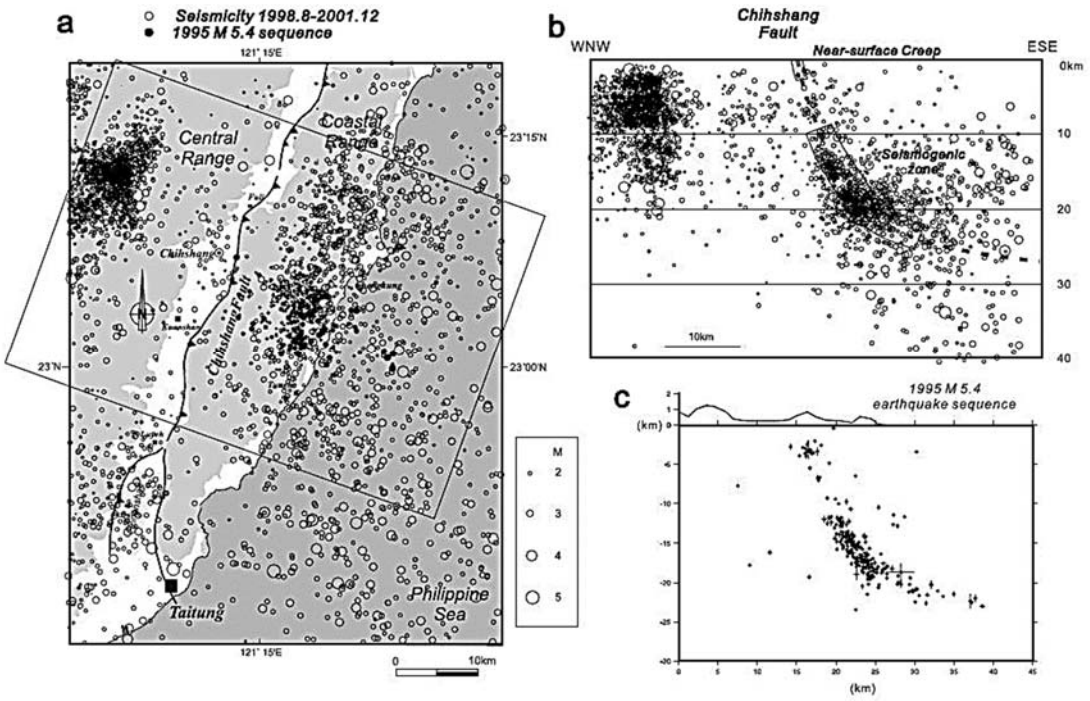



圖 4-1.79：(a)池上斷層及附近之地震分布，空心圓圈為 1998-2001 之地震，黑色實心圓圈為 1995 年 M5.4 地震序列（b）1998-2001 地震深度分布剖面（c）1995 年 M5.4 地震序列深度分布剖面，圖中的十字代表定位誤差（摘自 Lee et al., 2003）。

Figure 4-1.79: (a) Seismicity in the Chihshang fault area. Opened circles are the earthquakes during 1998-2001. Black solid circles are the 1995 M5.4 earthquake sequence. (b) Profile of background seismicity from 1998 to 2001. (c) The earthquake profile of the M5.4 earthquake sequence in 1995. The cross in the figure represents the uncertainty of relocation (after Lee et al., 2003).

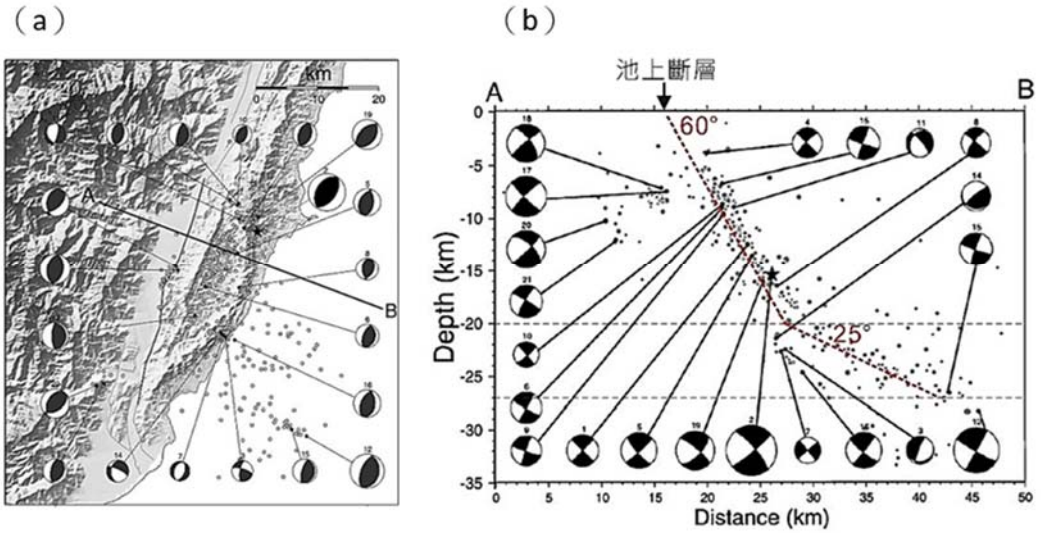



圖 4-1.80：（a）2003 年成功地震餘震分布及斷層面解（b）A-B 剖面餘震深度分布（Cheng et al., 2009）。

Figure 4-1.80: (a) Aftershock distribution of the 2003 Chengkung earthquake and their focal mechanism solutions. (b) A-B profile aftershock distribution (Cheng et al., 2009).

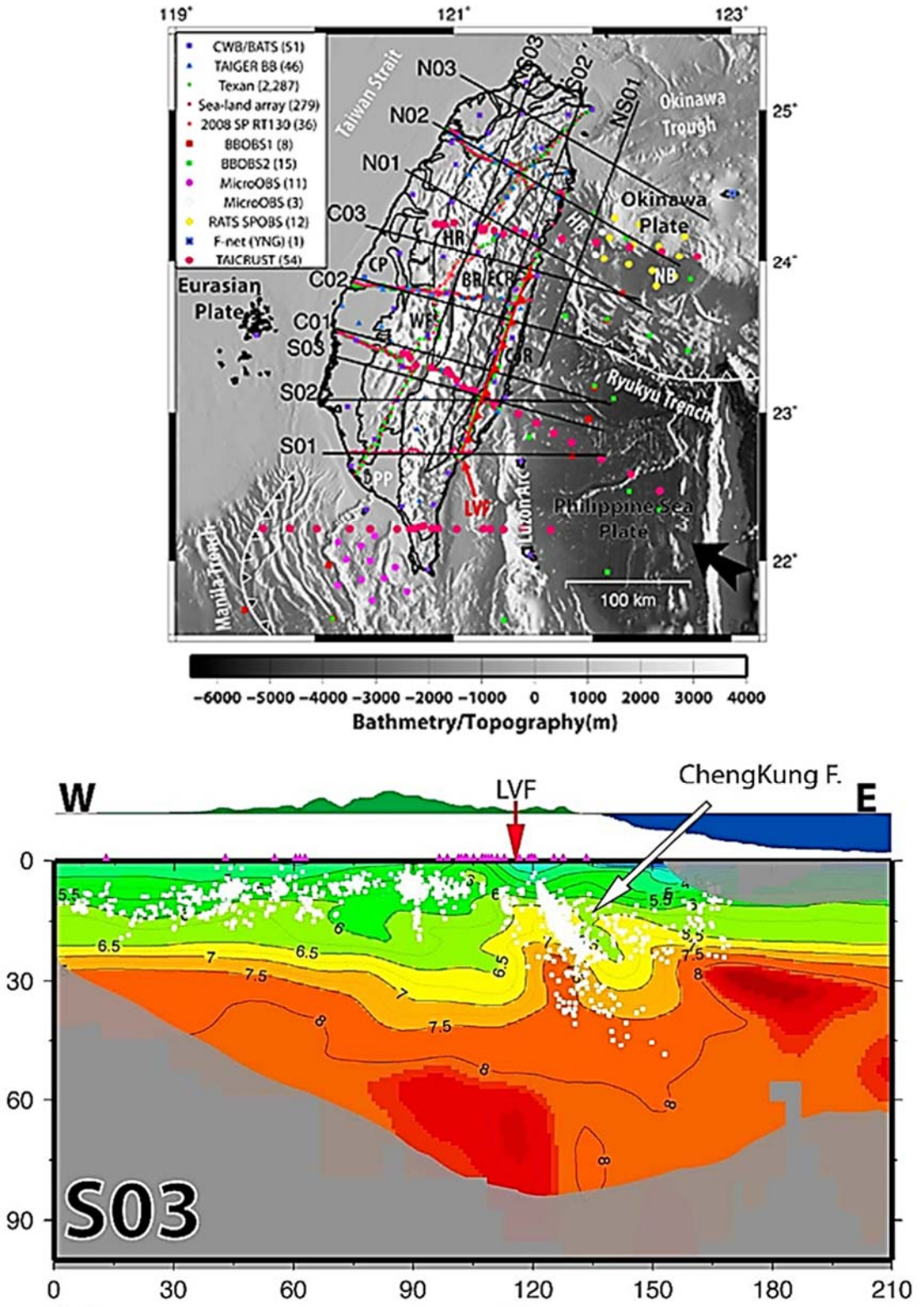



圖 4-1.81：上圖為臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，下圖為跨越縱谷斷層南段 S03 速度構造剖面（Kuo-Chen et al., 2012）。

Figure 4-1.81: (Up) Taiwan tectonics and the distribution of seismic stations. The solid black lines are the distribution of velocity profiles. (Down) The southern section of the Longitudinal Valley fault passes the S03 profile (Kuo-Chen et al., 2012).

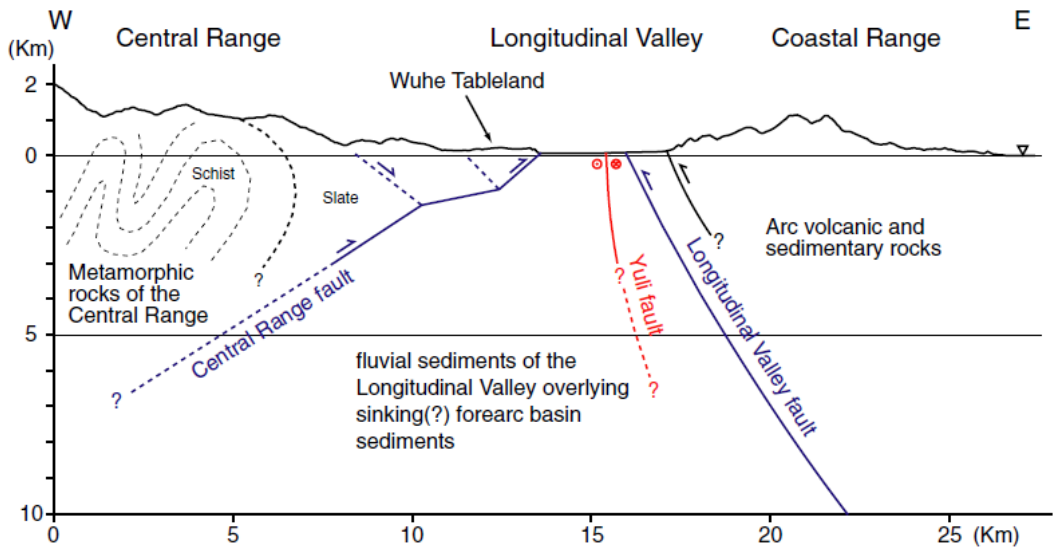



圖 4-1.82：位於舞鶴台地之東西向構造剖面，玉里斷層發育於縱谷中之沖積層，底部未知（Shyu et al., 2007）。

Figure 4-1.82: The east-west structural section on the Wuhe platform, the Yuli fault developed in the alluvial layer of the Longitudinal Valley, and its bottom is unknown (Shyu et al., 2007).

# 4-1-23 鹿野斷層-利吉斷層

Lee et al.（1998）根據大地測量資料推估之卑南山地區的構造演化模型（圖 4-1.83）：(a）卑南山礫岩於漸新世中期沉積於縱谷斷層（利吉斷層）下盤，(b）後由於逆衝作用使卑南山礫岩摺曲，(c）縱谷斷層逆衝作用於此處傳遞至卑南山礫岩西側並形成鹿野斷層，縱谷斷層（利吉斷層）則變為左移為主的斷層。由此演化模型可知鹿野斷層應為縱谷斷層於淺處分岔出來的低傾角分支逆斷層。

紀權宥（2007）認為利吉斷層及鹿野斷層為潛移作用為主的活動斷層（圖 4-1.84），故以階地抬升速率代表長期地殼垂直變化速率，GPS 水平變化速率代表長期地殼水平速率，估算利吉斷層面傾角約為 53 度，而鹿野斷層則為利吉斷層的分支斷層，傾角 17 度。然而，姜彥麟（2007）利用跨斷層 2006 年 4 月 1 號的臺東地震同震時期，地表的水平壓縮量和垂直抬升量，估算近地表利吉斷層傾角約 70 度，鹿野斷層傾角約 35~40 度（圖 4-1.85）。又王蘭榛等（2010），利用改良淺層震測影像探討鹿野斷層之構造，在龍田階地西側，跨越鹿野斷層位置設置一條測線（07P-LYHF-LT-1）（圖 4-1.86），經剖面量測鹿野斷層傾角約為 45 度。

此外，根據 Kuochen et al.（2012）速度構造剖面及地震震源分布，推估利吉斷層傾角約 55 度，深度約 30 公里（圖 4-1.87）。Wu et al.（2006）則利用 CWBSN 和 TSMIP 於 2006 年 4 月間在臺東地區所記錄的 1265 筆地震事件，包含 2006 年 4 月 1 日臺東地震，進行重新定位並描繪中央山脈斷層、鹿野斷層、利吉斷層三者的斷層面（圖 4-1.88），且認為鹿野斷層為利吉斷層的分支斷層。

本計畫判定鹿野斷層為利吉斷層的分支斷層。因目前針對鹿野斷層幾何的研究僅從地表變形量反推或是僅地下 1 公里深度以內，經諮詢相關專家，幾何模型可設定為深度 0-5 公里傾角 30 度，而後銜接至利吉斷層。利吉斷層在深度 0-22 公里的傾角約 55 度，深度 22-27.5 公里約 40 度（圖 4-1.89）。

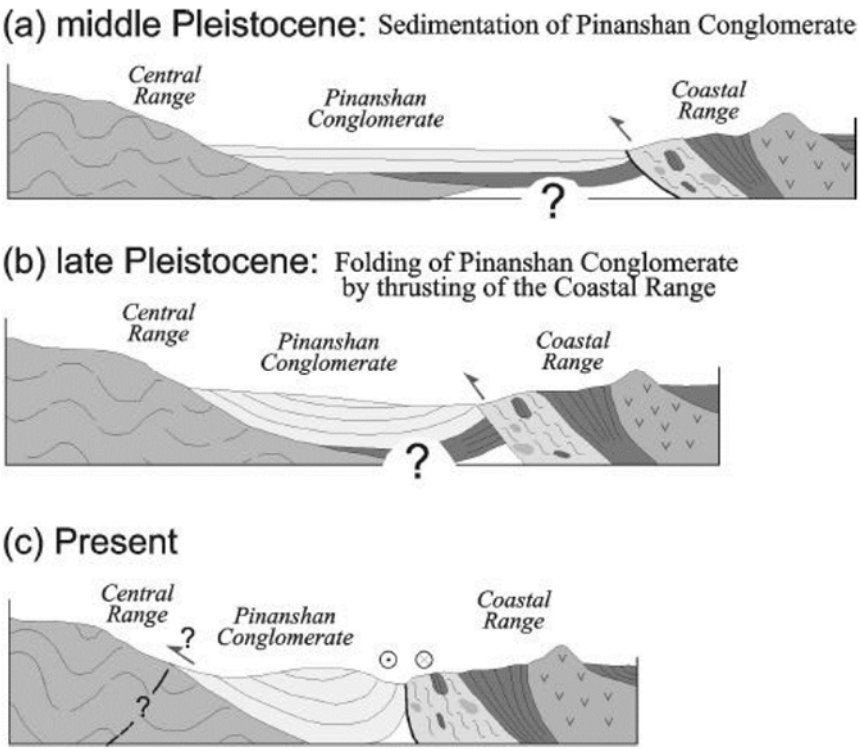



圖 4-1.83.：卑南山礫岩構造演化圖（Lee et al., 1998）。
Figure 4-1.83: Tectonic evolution of Pinanshan Conglomerate.

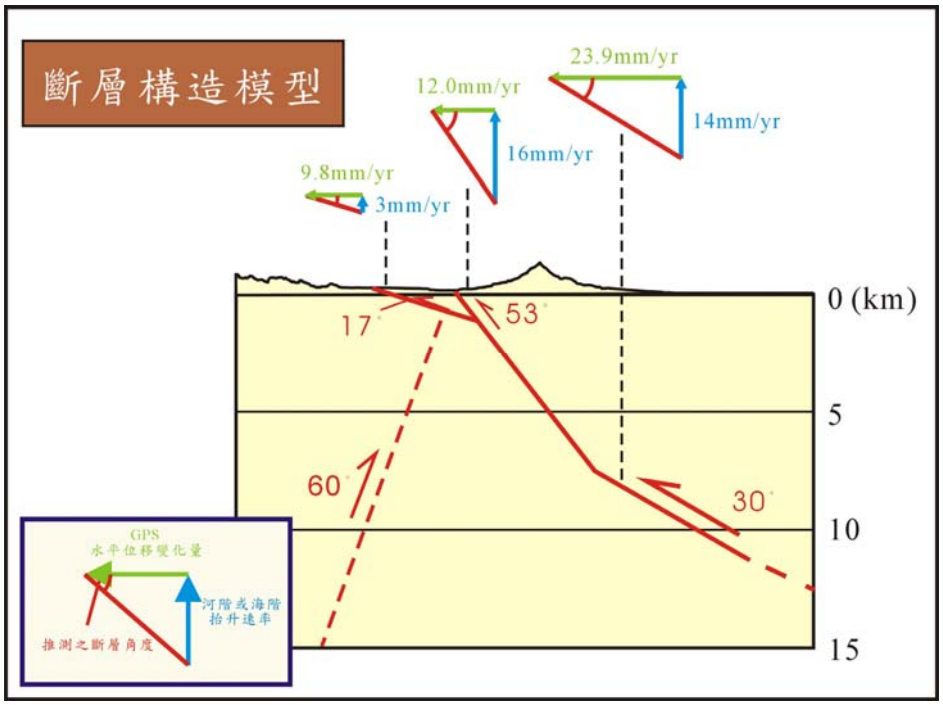



圖 4-1.84：鹿野斷層與利吉斷層之地下構造模型（紀權宥，2007）。
Figure 4-1.84: Structural model of Luyeh fault and Lichi fault (紀權宥，2007).

| 跨地震時期 | 抬升量<br>（mm） | 水平壓縮量<br>（mm） | 近地表傾角<br>（°） |
|---|---|---|---|
| 利吉斷層 | 15.5 | 5 | 70 |
| 鹿野斷層 | 10～11 | 13 | 35～40 |

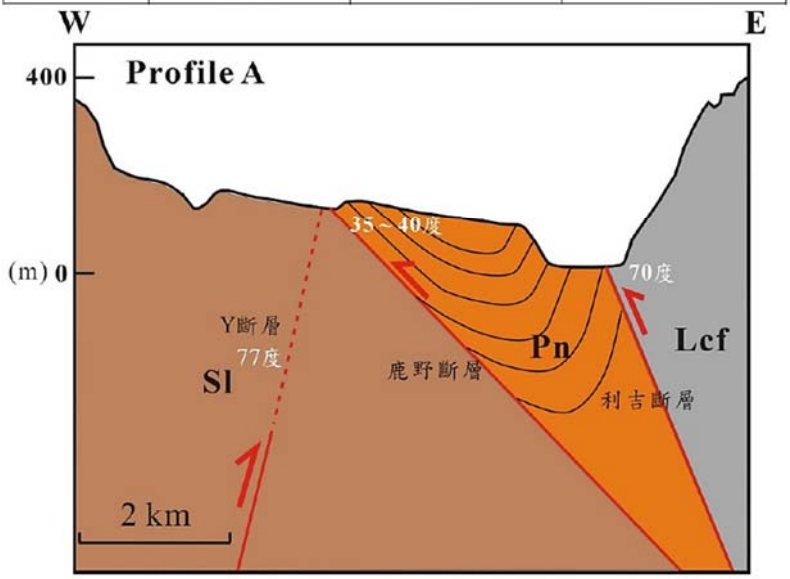
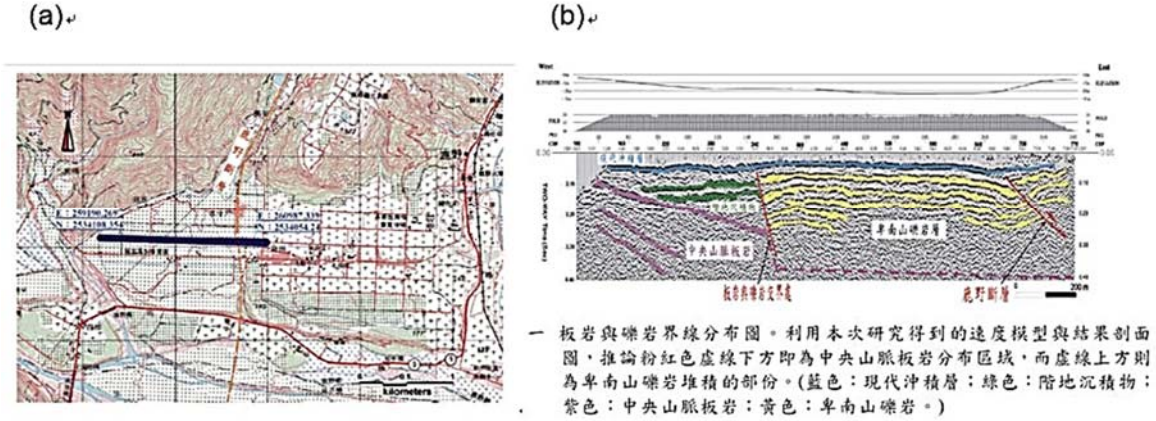



圖 4-1.85：工作區域之地下構造剖面。Lcf：利吉層；Pn：卑南山礫岩；Sl：中央山脈板岩層（姜彥麟，2007）。

Figure 4-1.85: Structural model of the study area (姜彥麟，2007).




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

圖 4-1.86：（a）鹿野 07P-LYHF-LT-1 測線位置圖，（b）淺層震測剖面圖（王蘭榛，2010）。

Figure 4-1.86: (a) Location of seismic reflection line (07P-LYHF-LT-1) in Luyeh, (b) Interpretation of shallow seismic reflection profile.

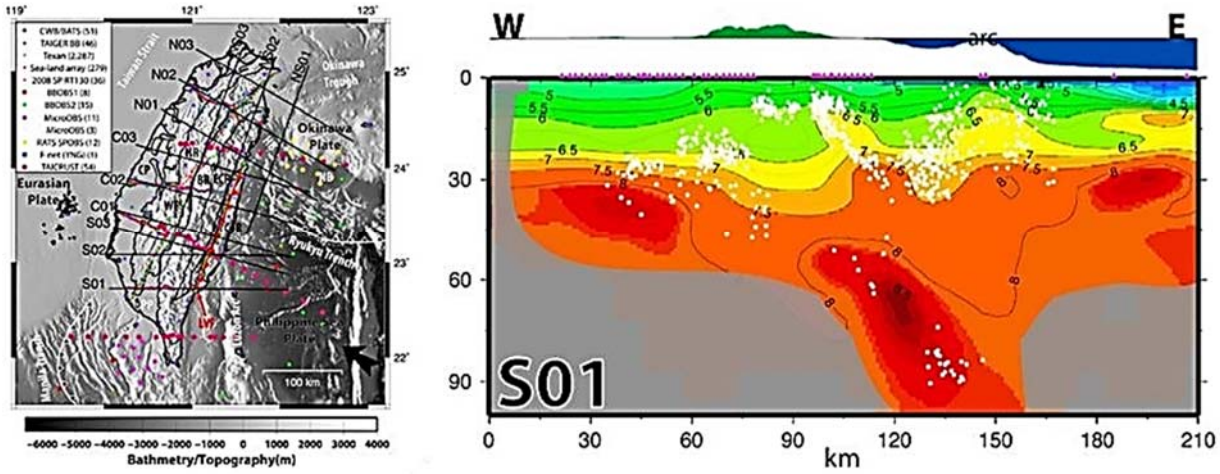



圖 4-1.87：左圖為臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，右圖為縱谷斷層最南段 S01 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012）。

Figure 4-1.87: Taiwan seismotectonics and the distribution of seismic stations. The solid black line shows the distribution of velocity structure profiles. The picture on the right is the S01 velocity structure section of the southernmost section of the longitudinal valley fault (modified from Kuochen et al., 2012).

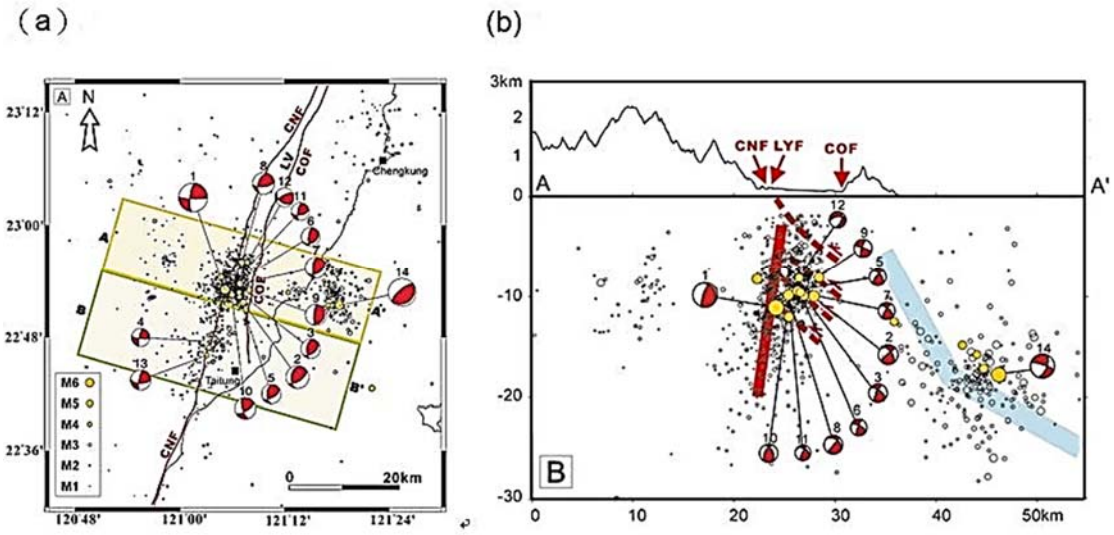



圖 4-1.88：(a) 2006 臺東地震系列重新定位及震源機制解，(b) 臺東地震剖面圖，圖中左側粗紅線為中央山脈斷層，上部紅色虛線為鹿野斷層位置，右側淡藍色多邊形為利吉斷層位置（Wu et al., 2006）。

Figure 4-1.88: (a) Relocation and focal mechanism solutions of the 2006 Taitung earthquake sequence. (b) Earthquake profile. Thick red line on the left is the Central Range fault, the upper red dotted line is the Luyeh fault, and the right light blue polygon is the Lichi fault (Wu et al., 2006).

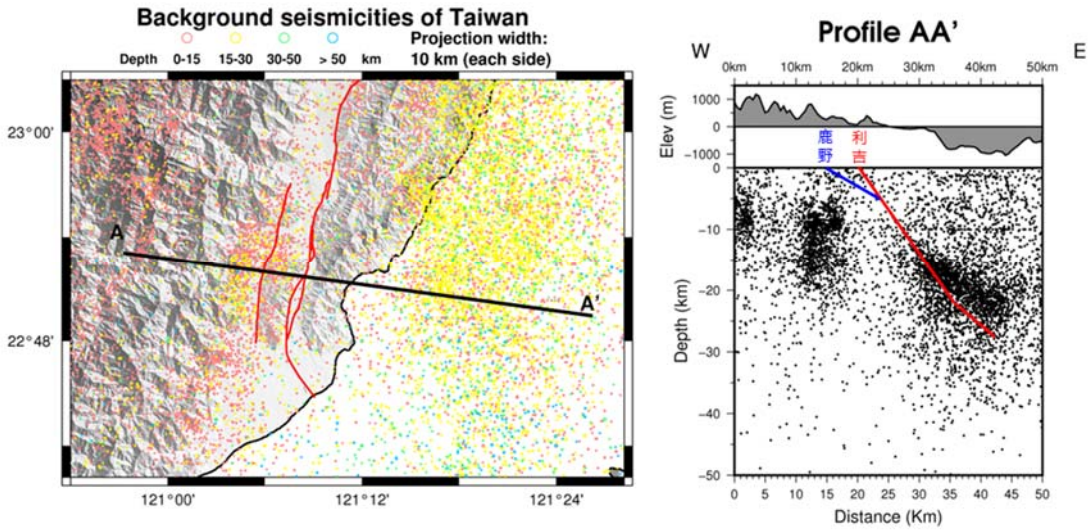



圖 4-1.89：鹿野-利吉斷層系統幾何形貌。
Figure 4-1.89: Luyeh - Lichi fault system geometry.

# 4-1-24 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 4-1.90)。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。

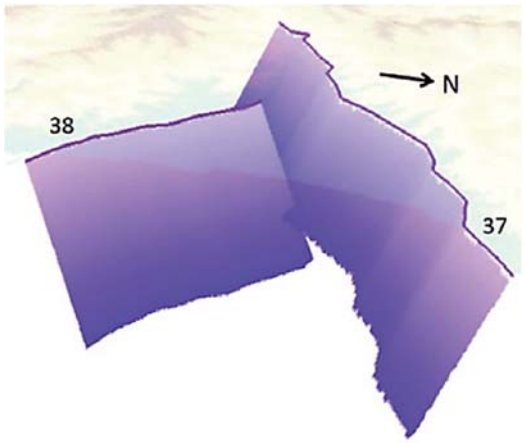



圖 4-1.90：宜蘭北部構造及宜蘭南部構造的三維幾何示意圖（Shyu et al., 2016）。
Figure 4-1.90: Three-dimensional geometric schematic diagrams of the northern Yilan structure and the southern Yilan structure.

# 4-2 BLOCKS 斷層模型

## 4-2-1 斷層模型原理與使用參數

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。

BLOCKS 斷層滑移速率模擬，在本計畫第四年度已陸續完成次臺灣中部、北部、西南部與東部等地區，今年統合臺灣過去模擬之四個區域共三十二條斷層：山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、大甲－彰化斷層、屯子腳斷層、車龍埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮-六甲、觸口斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層、米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層、玉里斷層、宜蘭（北）構造、宜蘭（南）構造等。各斷層所使用參數如傾角與深度由團隊會議與所內同期相關計畫之專家會議共同研討而得，而各斷層初始滑移速率作為滑移速率初始約制，則參考徐浩德教授（Shyu et al., 2016）發表之地值速率與中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫所調查之地質滑移速率，初步依等腰三角形之基礎幾何分配至傾向滑移速率與走向滑移速率。

本次全臺共三十二條斷層構造共由三十二個塊體描述，待模擬之斷層構造皆位於塊體交界。所有塊體外圍同樣設一點（座標：112.924，31.867），使外圍標訂為相對不動之塊體。其中同根據徐浩德教授（Shyu et al., 2016）發表，將本次三十二條斷層分類主要運動模式。其中屯子腳斷層、梅山斷層、新化斷層、旗山斷層、米崙斷層等五條斷層是以走向滑移為主要運動模式，圖中以藍色線段標示（圖 4-2.1）；另二十七條斷層並未全與該文獻歸納之斷層相符，然考量臺灣整體運動主要受板塊碰撞擠壓影響為主，故將之歸類於以傾向滑移為主的斷層活動型態，圖中以紅色線段標示（圖 4-2.1）。

地表長期變動速率使用 GPS 速度場表示，使用成功大學團隊所提供共 1161 站連續站與移動站速度場(圖 4-2.1)，測站速度擬合時間段多為 2016 至 2019 年，分布範圍以臺灣本島為主與鄰近陸地之零星測站。

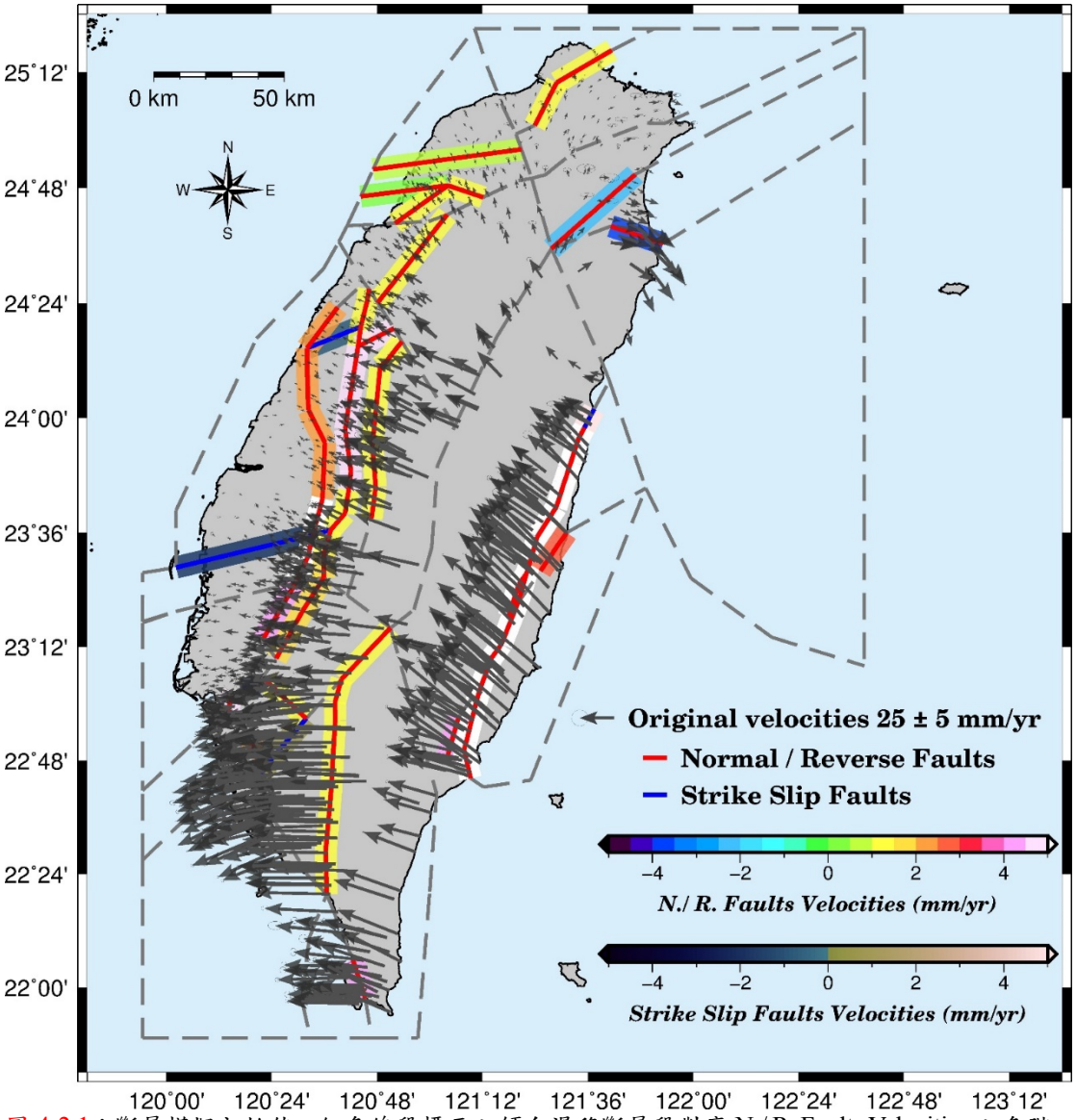



圖 4-2.1：斷層模擬初始值。紅色線段標示之傾向滑移斷層段對應 N./ R. Faults Velocities 之色階。藍色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階。灰色箭頭速度場為台灣鄰近 1161 站成大隊所提供之 GPS 測站速度場。

Figure 4-2.1: The input values of the BLOCK model with the 1161 GPS velocity field (the deep gray arrows) computed by National Cheng Kung University. The blue lines indicate strike-slip faults and red lines indicate normal/reverse faults and the corresponding color bars down to the figure.

## 4-2-2 斷層模擬結果

本次模擬結果，臺灣自北沿西部往南與東部由北往南共有三十條主要斷層與宜蘭兩構造，期中屯子腳斷層、梅山斷層、新化斷層、旗山斷層、米崙斷層等五條斷層是以走向滑移為主的活動斷層，其餘預測為傾向滑移斷層。經 BLOCKS 模擬成果，斷層由各分段平均滑移速率成果如表 4-2.1。走向滑移速率中，正值顯示為左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表示為逆斷層，負值表正斷層。

台灣西側北部的五條斷層：山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層中，山腳斷層鎖定深度為 9.0 km 東傾 70.0°，成果於傾向滑移分量呈現逆衝量值約-1.4 mm/yr，走向滑移分量表現左移量值約 1.3 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為左移帶伸張分量。故山腳斷層總滑動量值為 1.88±0.15 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。湖口斷層鎖定深度為 7.0 km 東傾 20.0°，模擬成果走向滑移分量值相當於傾向滑移分量，量值分別為 0.8 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為右移斷層帶逆衝分量，整體斷層總滑移速率為 1.1 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。新竹斷層鎖定深度為 10.0 km 東傾 50.0°，模擬成果傾向滑移分量值略大於走向滑移分量，量值分別為 0.5 mm/yr 與 0.4 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為逆斷層帶左移分量，整體斷層總滑移速率為 0.6 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。新城斷層鎖定深度為 10.0 km 東傾 40.0°，模擬成果於傾向滑移分量量值為 1.6 mm/yr，而走向滑移分量於約為 1.2 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3）。各段落皆顯示為帶逆衝分量右移斷層，總滑動量值為 2.03±0.45 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。獅潭斷層鎖定深度為 8.0 km 東傾 50.0°，成果傾向滑移分量值略大於走向滑移分量，量值分別為 1.5 mm/yr 與 1.1 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為逆衝斷層帶左移分量，整體斷層總滑移速率為 1.9 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。整體而言與約制速率相近，表現上除山腳斷層外，各斷層逆衝分量較走向滑移分量越接近中部越為明顯，有一往南逆衝表現漸增趨勢。

台灣西側中部的十條斷層：三義斷層、大甲-彰化斷層、屯子腳斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮-六甲、觸口斷層。最北的三義斷層鎖定深度為 9.0 km 東傾 25.0°，成果逆衝分量方面於自北往南漸減（圖 4-2.2）。而走向滑移分量皆為左移狀態，於最南段略為明顯為

1.3 mm/yr 之（圖 4-2.3）。斷層整體而言為逆衝斷層帶左移分量，總滑動量值為 3.9±2.6 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。大甲-彰化斷層鎖定深度為 6.0 km 東傾 25.0°，成果於傾向滑移分量上各小段皆為正值呈現逆衝分量，整體傾向滑移量值約為 2.7±1.0 mm/yr（圖 4-2.2、表 4-2.1）；而走向滑移速率則皆為正值左移分量，整體走向滑移量值約為 3.1±0.8 mm/yr（圖 4-2.3、表 4-2.1），整體斷層總滑移速率為 4.3±0.3 mm/yr（表 4-2.1、圖 4-2.4）。屯子腳斷層鎖定深度為 7.5km 東傾 25.0°，斷層走向為東北-西南，成果傾向滑移分量值大於走向滑移分量，量值分別為 0.6 mm/yr 與-0.3 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示包含正斷層與右移分量，整體斷層總滑移速率為 0.7 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。車籠埔斷層鎖定深度為 13.0 km 東傾 75.0°，成果於傾向滑移分量上皆為正值，約為 4.9±0.7 mm/yr 呈現逆衝分量 （圖 4-2.2、表 4-2.1）；而走向滑移速率表現為左移量值 4.8±0.5mm/yr（圖 4-2.3、表 4-2.1），整體斷層總滑移速率為 6.9±0.2 mm/yr（表 4-2.1、圖 4-2.4）。大茅埔-雙冬斷層鎖定深度為 8.0 km 東傾 35.0°，成果於傾向滑移分量上均呈現為逆衝運動，平均量值約為 1.5±0.5 mm/yr（圖 4-2.2、表 4-2.1）；而走向滑移速率則是左移狀態，整體走向滑移量值約為 1.3±0.3 mm/yr（圖 4-2.3），整體斷層總滑移速率為 2.1±0.3 mm/yr（表 4-2.1、圖 4-2.4）。九芎坑斷層鎖定深度為 5.0 km 東傾 50.0°，模擬成果傾向滑移分量方面皆為逆衝運動，量值介於 3.3 至 4.7 mm/yr，由北往南遞增（圖 4-2.2）。而走向滑移分量於主要為左移運動，而北端則呈現負值之右移分量（圖 4-2.3）。斷層整體而言為逆衝斷層帶左移分量，總滑動量值為 4.1±1.0 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。梅山斷層鎖定深度為 7.0 km 東傾 25.0°，近東西走向，為走向滑移運動為主之斷層，模擬成果走向滑移分量值與傾向滑移分量相當，量值為 1.8 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為右移斷層帶逆衝分量，整體斷層總滑移速率為 2.6 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1），於地質速率約制項上與初始約制值十分相近。大尖山斷層鎖定深度為 12.5 km 東傾 80.0°，各段成果傾向滑移分量方面皆為逆衝運動，量值約為 6.2±1.5 mm/yr（圖 4-2.2）。而走向滑移分量於呈現南北有較明顯左移分量整體量值 3.3±1.8 mm/yr，而最南端則為左移分量 0.1 mm/yr（圖 4-2.3）。斷層整體而言為逆衝斷層帶左移分量，總滑動量值為 7.3±0.7 mm/yr （圖 4-2.4、表 4-2.1）。木屐寮-六甲斷層鎖定深度為 6.5 km 東傾 32.5°，成果傾向滑移分量值略大於走向滑移分量，量值分別為 4.4 mm/yr 與 4.3 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為正斷層帶左移分量，整體斷層總滑移速

率為 6.2 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1），於地質速率約制項上相對較初始約制值大。觸口斷層鎖定深度為 6.0 km 東傾 45.0°，成果於傾向滑移分量方面呈逆衝運動（圖 4-2.2），逆衝分量平均為 2.0±1.8 mm/yr。而走向滑移分量呈現左移分量 2.4±1.1 mm/yr（圖 4-2.3），斷層整體而言為逆衝斷層帶左移分量，總滑動量值為 3.3±1.3 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。整體而言中西部的斷層運動皆以逆衝為主，其中有以車籠埔斷層速率累積最為明顯。

台灣西南部的七條斷層：新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層；新化斷層鎖定深度為 7.0 km 東傾 45.0°，成果傾向滑移分量值大於走向滑移分量，量值平均分別為 42.5±1.6 mm/yr 與-0.3±0.7 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為逆衝斷層帶右移分量，整體斷層總滑移速率為 42.5±1.6 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1），相較於地質速率約制初始約制值落差較大。後甲里斷層鎖定深度為 12.5 km 東傾 80.0°，傾向滑移模擬量值平均為 4.8±1.3 mm/yr（圖 4-2.2），而走向滑移分量約為 4.6±1.0 mm/yr，斷層整體而言為逆衝斷層帶左移分量，總滑動量值為 6.8±0.5 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。左鎮斷層鎖定深度為 4.0km 東傾 40.0°為溪北-東南走向；成果傾向滑移分量方面皆為逆衝運動，量值約為 1.3±0.1 mm/yr（圖 4-2.2），而走向滑移分量則兩段均為左移 0.7 mm/yr（圖 4-2.3）。斷層整體而言為逆衝左移斷層，總滑動量值為 1.5±0.1 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。小崗山斷層鎖定深度為 10.0 km 東傾 70.0°，成果傾向逆衝滑移分量大於左移走向滑移分量值，量值分別為 3.1 mm/yr 與 1.4 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），整體斷層總滑移速率為 3.4 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。旗山斷層鎖定深度為 10.0 km 東傾 45.0°，呈東北-西南走向；成果傾向滑移分量值略大於走向滑移分量，量值皆約為 0.8 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為逆衝斷層帶左移分量，整體斷層總滑移速率為 1.1±0.1 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1），於地質速率約制項上與初始約制值十分相近。潮州斷層鎖定深度為 17.5 km 東傾 60.0°，成果於傾向滑移分量上各段均呈現為逆衝運動，平均量值約為 1.3±0.2 mm/yr（圖 4-2.2、表 4-2.1），而走向滑移速率則為左移狀態，整體走向滑移量值與傾向滑移量值近似（圖 4-2.3、表 4-2.1），整體斷層總滑移速率約為 1.9±0.2 mm/yr（表 4-2.1、圖 4-2.4）。恆春斷層鎖定深度為 20.0 km 東傾 75.0°，成果傾向逆衝滑移分量略大於左移走向滑移分量值，量值分別為 4.4 mm/yr 與 4.3 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），整體斷層總滑移速率為 6.2 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1），模擬量於地

質速率約制項上與初始約制值相符。整體西南部斷層而言，仍是以逆衝帶左移分量為主，而新化斷層則有明顯較大量級的逆衝量且略帶右移分量。

台灣東部的八條斷層與宜蘭兩構造為：米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層、玉里斷層、宜蘭（北）構造與宜蘭（南）構造。米崙斷層鎖定深度為 10.0 km 東傾 65.0°，模擬成果傾向滑移分量上北段量值與走向滑移速率皆為 7.2 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），故米崙斷層整體總滑移速率為 10.2 mm/yr（表 4-2.1、圖 4-2.4）。嶺頂斷層傾角設定與米崙斷層同為東傾 65.0°深度則為 27.5 km，其成果，傾向滑移分量上最南段有較大的 10.6 mm/yr，其餘段落表現較為平均（圖 4-2.2）；而走向滑移速率表現則更為平均，約為 7.6 mm/yr，最小的為最南一小段之 6.7 mm/yr（圖 4-2.3），故嶺頂斷層總滑動量，南北段大於中段（圖 4-2.4），整體總滑移速率為 9.8±1.0 mm/yr（表 4-2.1）。瑞穗斷層傾角設定為東傾 65.0°深度 27.5 km，成果於傾向滑移分量上近南北段量值較大，量值平均為 7.6±0.5mm/yr（圖 4-2.2）；而走向滑移速率量值平均為 7.7±2.0mm/yr（圖 4-2.3），整體而言瑞穗斷層總滑動量值，最大值位在北段 13.0 mm/yr，整體總滑移速率為 10.9±1.2 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。奇美斷層，鎖定深度為 25.0 km 東傾 80.0°，成果於傾向滑移分量上，最大量值為最南段之 10.0 mm/yr，最小為北段之 7.5 mm/yr（圖 4-2.2），而走向滑移速率則表現平均，量值均為 1.3 mm/yr（圖 4-2.3），故總滑動量值，最大值為 10.1 mm/yr（圖 4-2.4），故整體總滑移速率為 9.0±1.0 mm/yr（表 4-2.1）。池上斷層，是本次模擬中最長的斷層，其東傾 60.0°鎖定深度為 20.0km，成果於傾向滑移分量運動型態上，主要為中、南段略高於北段，最小值為 3.3 mm/yr，最大值為 18.8 mm/yr（圖 4-2.2）；而走向滑移速率運動型態同樣是中、南段略高於北段，最小值為 3.2 mm/yr，最大值為 9.6 mm/yr（圖 4-2.3），池上斷層總滑動量值，最大值在中段為 20.1 mm/yr，最小值在最中段近北部之 4.6 mm/yr（圖 4-2.4），整體斷層總滑移速率為 12.0±5.3 mm/yr（表 4-2.1）。鹿野斷層，本次模擬鹿野斷層幾何設定為東傾 30.0°鎖定深度為 5.0 km，平均成果於傾向滑移分量和走向滑移速率皆為 4.5±0.1 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），故整體斷層總滑移速率為 6.4±0.0 mm/yr（表 4-2.1）。利吉斷層鎖定深度為 22.0 km 東傾 55.0°，成果於北段呈現逆衝帶左移分量，而南段則反之為左移帶逆衝分量，以整條斷層整體而言，傾向滑移分量為 4.9±2.4 mm/yr (圖 4-2.2)，走向滑移速率為 6.3±0.8 mm/yr（圖 4-2.3），整體斷層總滑移速率為 8.3±0.9 mm/yr

（表 4-2.1）。玉里斷層鎖定深度為 10.0 km 東傾 51.0°，成果整體而言，各段左移量值大於逆衝滑移分量，左移量值平均為 4.8±0.3 mm/yr（圖 4-2.3），傾向滑移速率平均為 2.9±1.1 mm/yr（圖 4-2.2），整體斷層總滑移速率為 5.7±0.7 mm/yr（表 4-2.1）。宜蘭（北）構造鎖定深度為 9.4 km 東傾 60.0°，成果傾向擴張分量大於右移走向滑移分量值，量值分別為-2.5 mm/yr 與-1.7 mm/yr （圖 4-2.2、圖 4-2.3），顯示為右移正斷層，整體斷層總滑移速率為 3.2 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1）。宜蘭（南）構造鎖定深度為 11.3 km 東傾 60.0°，成果傾向擴張分量大於右移走向滑移分量值，量值分別為-3.9 mm/yr 與-3.8 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），同為右移正斷層，整體斷層總滑移速率為 5.5 mm/yr（圖 4-2.4、表 4-2.1），模擬量於地質速率約制項上與初始約制值相符，然未約制值之傾向滑移項則明顯較大。東部各斷層與構造整體而言與約制速率相近，其中玉里斷層有明顯較小與池上斷層略大的模擬成果。

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 4-2.5 為本次全臺共 30 條斷層與 2 構造涵蓋範圍，地表速度場模擬成果。旋轉量自東部斷層沿線以東與宜蘭（南）構造以南之模擬結果，紅色箭頭整體而言相對原始速率量值較小，有逆時針旋轉的偏量；新城斷層以北至宜蘭（北）構造以北鄰近區域則反之，有較大量值的正演速度，亦有相對更大的順時針旋轉量偏量。整體而言，落差最大的速度測站坐落於中部山群鄰近區域，該區域未連為塊體，與本次未定義斷層地區相符。整體模擬之速度場相較原始速度場之 RMS 值為 13.122。

故以量值趨勢而言，整體量值可見相較於原始量測值較小，顯示模擬的成果較為保守；而位移場移動方向與實際量測值相符，亦代表目前斷層的設置與幾何提供了合理的推估基礎。然而如同他期模擬結果，速度場若位於塊體內部，於斷層線之上，相對都有較同於原始量測值之模擬成果，可見多數提供了斷層參數條件者，使模擬成果更符合實際移動狀態。

本次全臺斷層模擬成果中，模擬成果多與約制值相近，僅新化斷層之傾向滑移項有顯較大的值，同時由模擬成果圖亦可見台灣西部斷層交錯層疊，斷層間距要 BLOCKS 在國外他處應用有較為短窄的幾何關係，很可能影響模擬成果。綜觀由成果亦顯見初始地質約制速率對模擬成果有明顯影響，而塊體、斷層幾何同有明顯的影響，如於塊體較外圍或未定義斷層之邊界有較差的模擬成果。

表 4-2.1：GPS 速度場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。

Table 4-2.1: The result values of each fault model with GPS velocity field. The positive strike-slip rates indicates left-lateral moving and the negative values indicates right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

| 參數項目 / 斷層名稱 | 2020 BLOCKS 台灣東部斷層模擬成果 | | |
|---|---|---|---|
| | 平均走滑速率（s.s. mm/yr） | 平均傾向滑移速率（d.s. mm/yr） | 總滑移速率（mm/yr） |
| 山腳斷層 | 1.4±0.2 | 1.3±0.0 | 1.9±0.2 |
| 湖口斷層 | 0.8±0.0 | 0.8±0.0 | 1.1±0.0 |
| 新竹斷層 | 0.4±0.0 | 0.5±0.0 | 0.6±0.0 |
| 新城斷層 | 1.2±0.9 | 1.6±0.1 | 2.0±0.5 |
| 獅潭斷層 | 1.1±0.0 | 1.5±0.0 | 1.9±0.0 |
| 三義斷層 | 1.2±0.1 | 3.5±3.0 | 3.9±2.6 |
| 大甲－彰化斷層 | 3.1±0.8 | 2.7±1.0 | 4.3±0.3 |
| 屯子腳斷層 | -0.3±0.0 | 0.6±0.0 | 0.7±0.0 |
| 車籠埔斷層 | 4.8±0.5 | 4.9±0.7 | 6.9±0.2 |
| 大茅埔－雙冬斷層 | 1.3±0.3 | 1.5±0.5 | 2.1±0.3 |
| 九芎坑斷層 | 0.9±1.2 | 3.9±0.7 | 4.1±1.0 |
| 梅山斷層 | -1.8±0.0 | 1.8±0.0 | 2.6±0.0 |
| 大尖山斷層 | 3.3±1.8 | 6.2±1.5 | 7.2±0.7 |
| 木屐寮-六甲 | 4.3±0.0 | 4.4±0.0 | 6.2±0.0 |
| 觸口斷層 | 2.4±1.1 | 2.0±1.7 | 3.3±1.3 |
| 新化斷層 | -0.3±0.6 | 42.5±1.6 | 42.5±1.6 |
| 後甲里斷層 | 4.6±1.0 | 4.8±1.7 | 6.8±0.5 |
| 左鎮斷層 | 0.7±0.0 | 1.3±0.1 | 1.5±0.1 |
| 小崗山斷層 | 1.4±0.0 | 3.1±0.0 | 3.4±0.0 |
| 旗山斷層 | 0.8±0.1 | 0.8±0.0 | 1.1±0.1 |
| 潮州斷層 | 1.3±0.2 | 1.3±0.2 | 1.9±0.2 |
| 恆春斷層 | 4.3±0.0 | 4.4±0.0 | 6.2±0.0 |
| 米崙斷層 | 7.2±0.0 | 7.2±0.0 | 10.2±0.0 |
| 嶺頂斷層 | 7.5±0.3 | 6.2±1.7 | 9.8±1.0 |
| 瑞穗斷層 | 7.6±0.5 | 7.7±2.0 | 10.9±1.2 |
| 奇美斷層 | 1.3±0.0 | 8.9±1.0 | 9.0±1.0 |
| 玉里斷層 | 4.8±0.3 | 2.9±1.1 | 5.7±0.7 |
| 池上斷層 | 6.4±2.4 | 10.0±4.9 | 12.0±5.3 |
| 鹿野斷層 | 4.5±0.1 | 4.5±0.1 | 6.4±0.0 |
| 利吉斷層 | 6.3±0.8 | 4.9±2.4 | 8.3±0.9 |
| 宜蘭(北) | -1.7±0.0 | -2.5±0.0 | 3.0±0.0 |
| 宜蘭(南) | -3.8±0.0 | -3.9±0.0 | 5.5±0.0 |

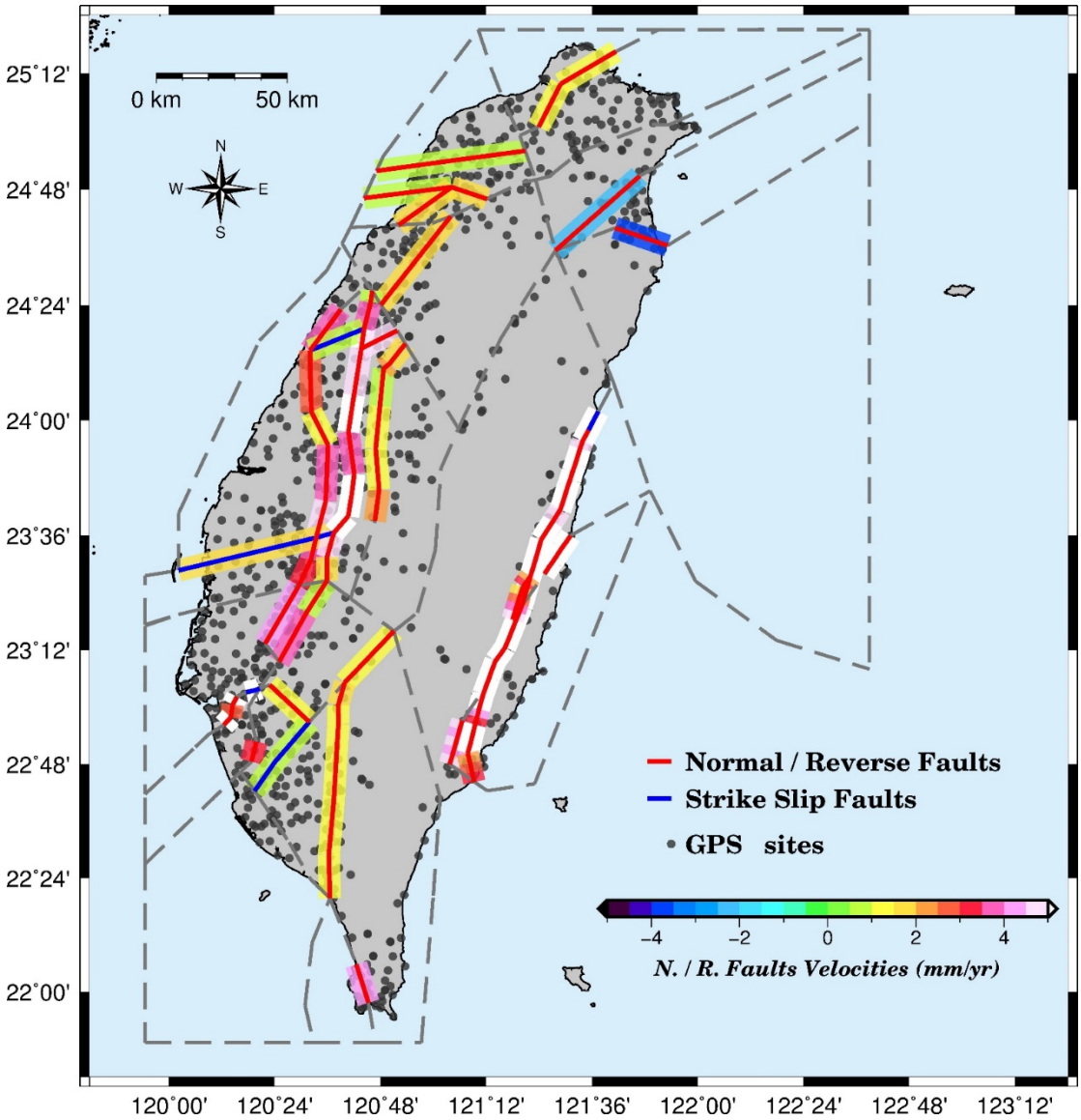



圖 4-2.2：2020 年臺灣 31 條斷層傾向滑移速率模擬成果。

Figure 4-2.2: The dip-slip rates of each segment modeled with 2020 GPS velocity field.

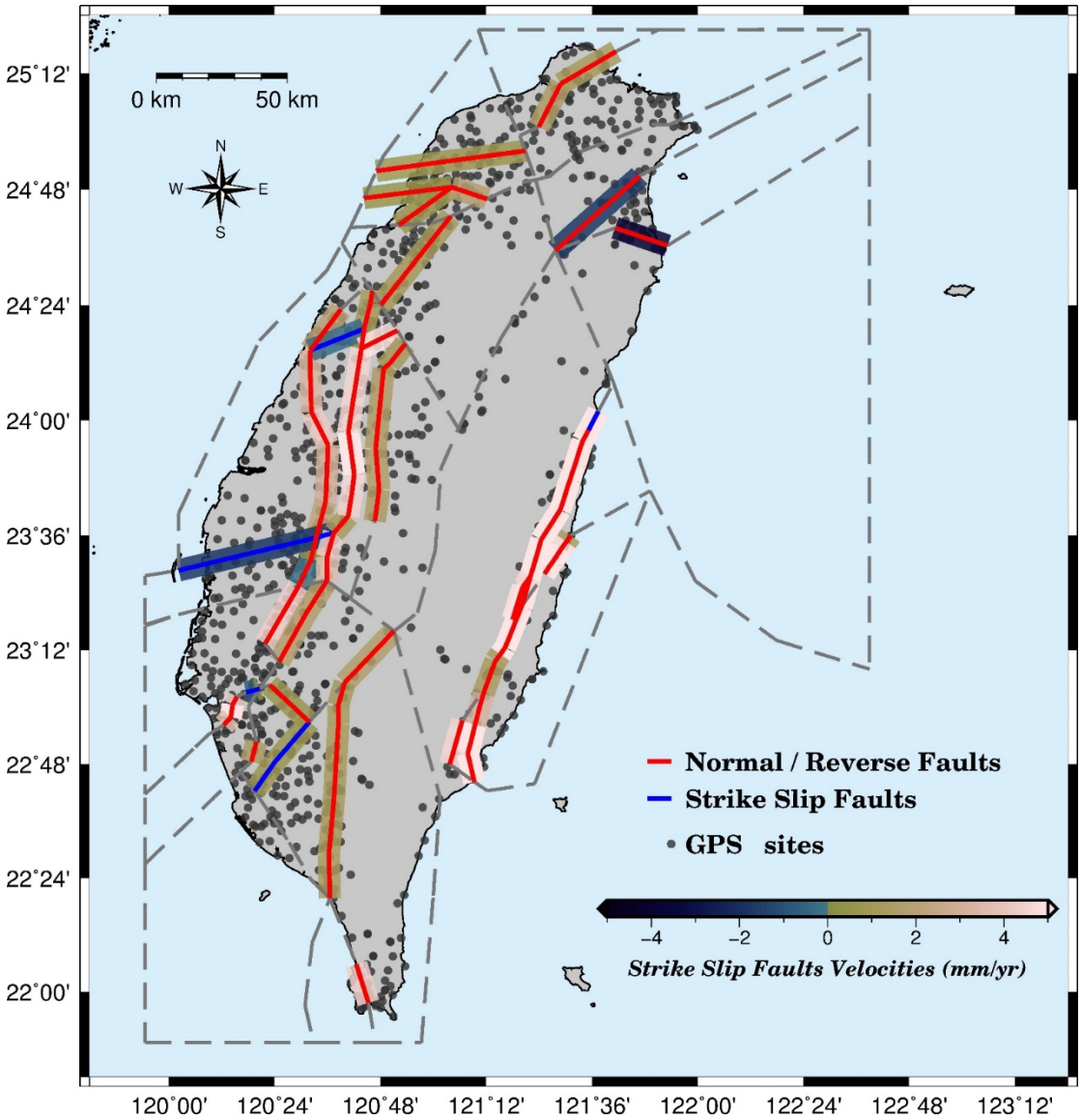



圖 4-2.3：2020 年臺灣 31 條斷層走向滑移速率模擬成果。

Figure 4-2.3: The strike-slip rates of each segment modeled with 2020 GPS velocity field.

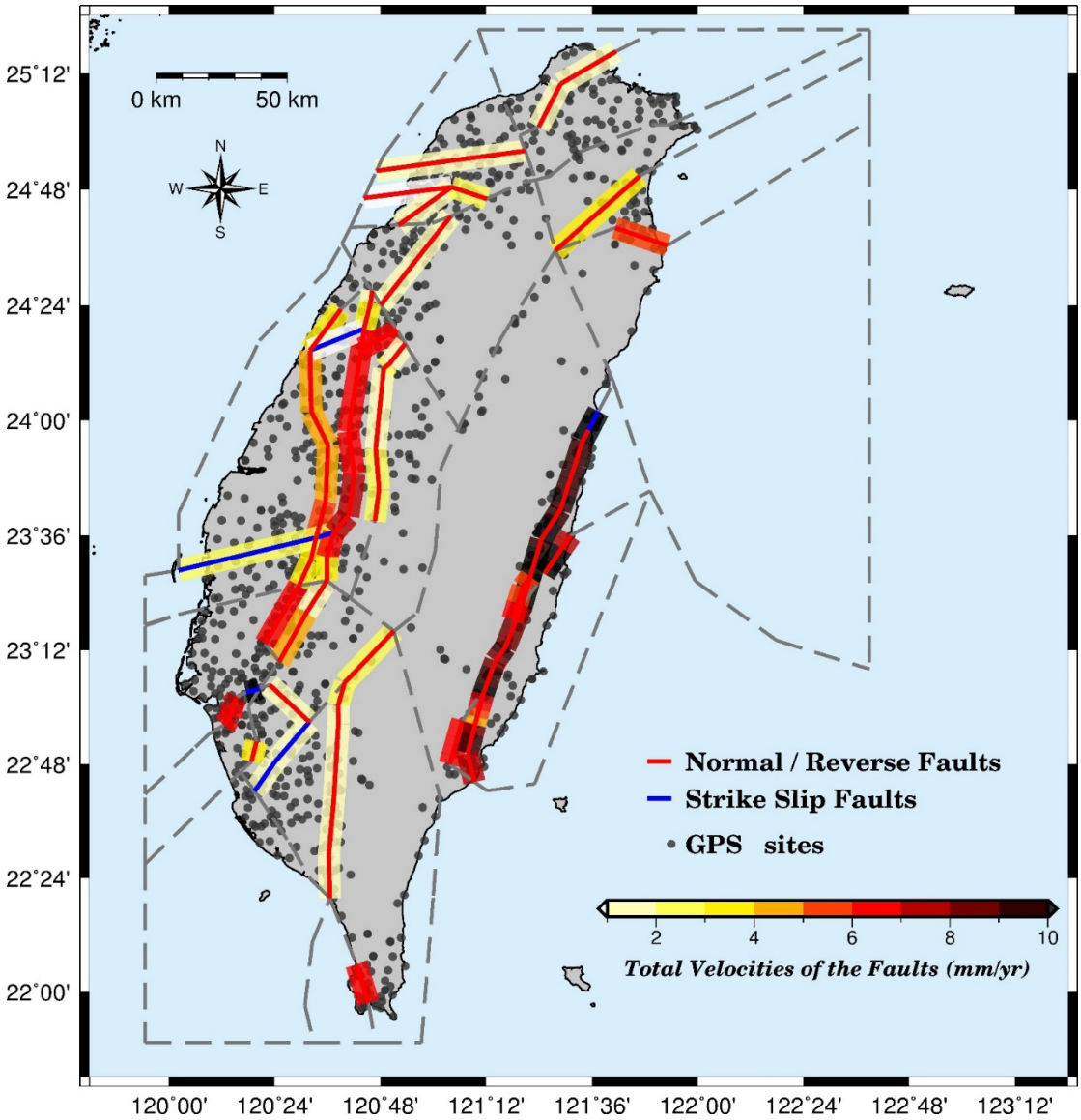



圖 4-2.4：2020 年臺灣 31 條斷層模擬成果之滑移速率。

Figure 4-2.4: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with 2020 GPS velocity field.

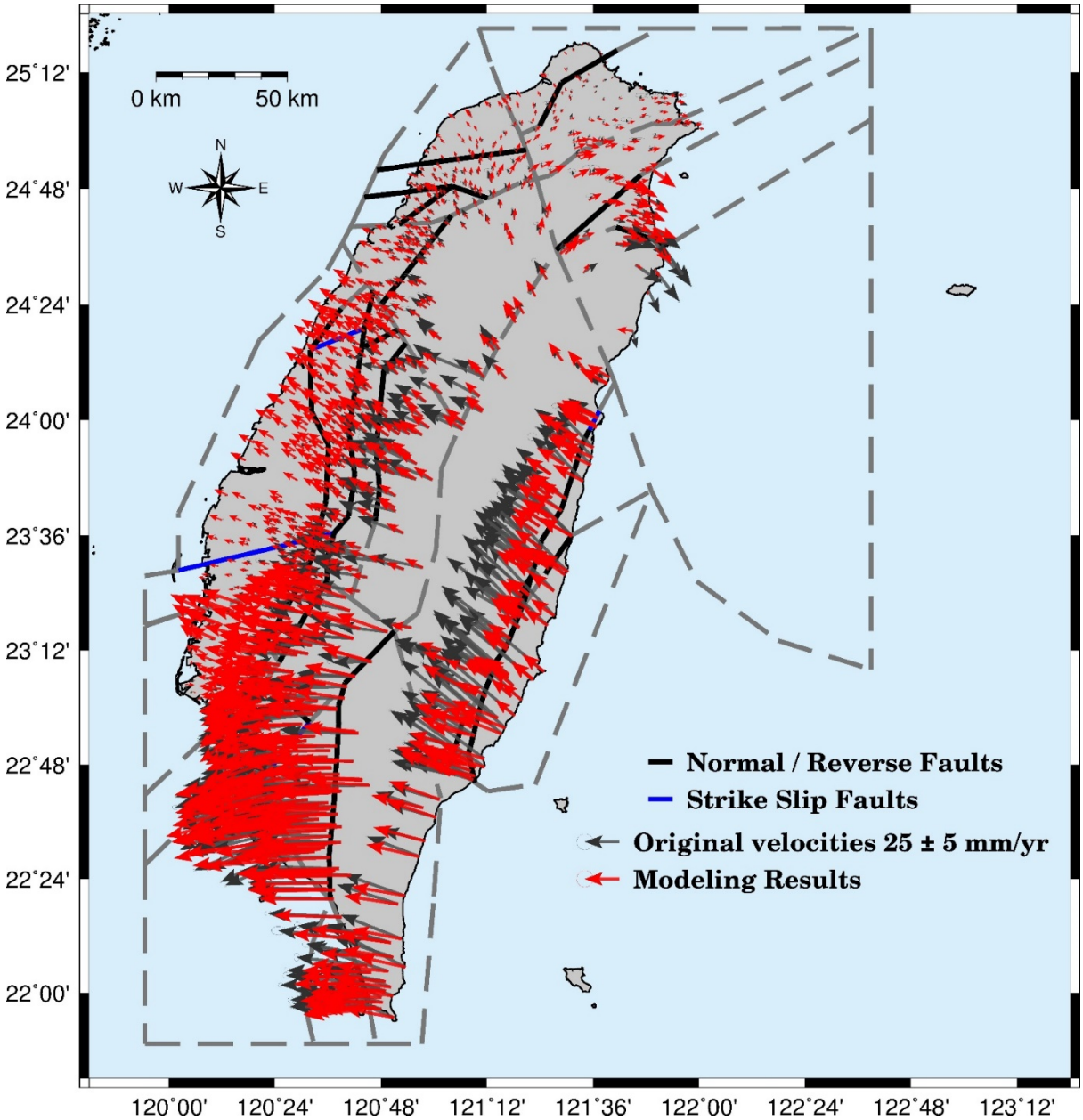



圖 4-2.5：臺灣 31 條斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果，標準差值為 12.4。紅色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，黑色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 4-2.5: The results of GPS velocity field modeled with 114 GPS sites velocity field which the standard deviation is 12.4. The red arrows are the modeled results, the deep gray arrows are the original velocities and the blue, red and dash lines are the faults and block boundaries which follows the icon chart within the picture.

# 4-3 DEFNODE 斷層模型

## 4-3-1 斷層模型原理與使用參數

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

本研究藉由 Rob McCaffrey 提出的三維塊體模型 DEFNODE（McCaffrey, 2005）來進行斷層現今滑移率及虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每個斷層都位於兩個轉動塊體（block）的邊界上。Ching et al.（2011）曾將臺灣地區幾個重要的斷層視為塊體邊界，再利用塊體模型來探討臺灣現今的地殼運動情形。本研究針對地質調查所於 2012 年公佈的臺灣活斷層位置，並參考本計畫之斷層參數資料（表 4-3.1），建構了本研究區域的塊體邊界模型（圖 4-3.1）。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，除了另外加入 HSS1、HECH 塊體外，並修改 LUCU、WCPS、EKSH、SCEN、NCOR、LVFD、PHSP 等塊體幾何，分別對應後甲里斷層、木屐寮-六甲斷層、觸口斷層、恆春斷層、米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、玉里斷層、池上斷層、利吉斷層及鹿野斷層，以符合其塊體邊界（圖 4-3.1），因木屐寮斷層及六甲斷層地理位置相當接近，且我們收集到兩條斷層的深度、傾角等斷層參數相當接近，為了模型簡化，因此在本模型中將木屐寮斷層及六甲斷層視為同一條斷層構造。在模型中，除了地調所公佈的活斷層外，另外加入了 Ching et al.（2011）所提出的梅嶺斷層，以呈現更完整的地表活動。其中梅嶺斷層雖然不是地調所所公佈的活斷層，但此構造可能對台南台地的孕震潛勢有一定程度的影響，因此加入塊體模型的邊界。

本研究使用 EURA 做為參考塊體（圖 4-3.1），並假設參考塊體是不旋轉的，因此其餘塊體上的水平速度皆是相對於 EURA 的運動。DEFNODE 再以此計算各塊體的剛體轉動速度場及斷層面(塊體邊界)上各節點的滑移速率以及虧損率。除此之外，由於斷層潛勢評估需要知道表 4-3.1 上所列各斷層段的長期滑移速率、間震期滑移速率及滑移虧損率、因此我們將塊體模型所得之各斷層節點上的值取平均，可以得到各個速率的平均值及標準差。由此可知，若沿斷層面的滑移速率

分布較不平均 ，則所得的速率標準差也會相對較大。

由圖 4-3.1 可看出，各塊體的邊界幾乎都和地表的斷層線一致，而有些延伸的斷層邊界主要是為了符合塊體在幾何上的連續性以供數值模型所需。圖中邊界上的圓圈代表節點，塊體模型即是用來估算斷層面在各節點上的滑移速率值。

為了求取各斷層面上的震間滑移速率及滑移虧損率，必須先得到斷層的地下幾何形貌。本研究經由整理臺灣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 4-3.1）。注意除了如圖 4-3.1 中所示的地表節點外（深度為 0 km），沿著斷層傾角也分別在一半斷層深度及斷層底部各設一個節點。本文下一節中斷層面上的滑移量分佈皆是由這些節點上的值進行內插所得。

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

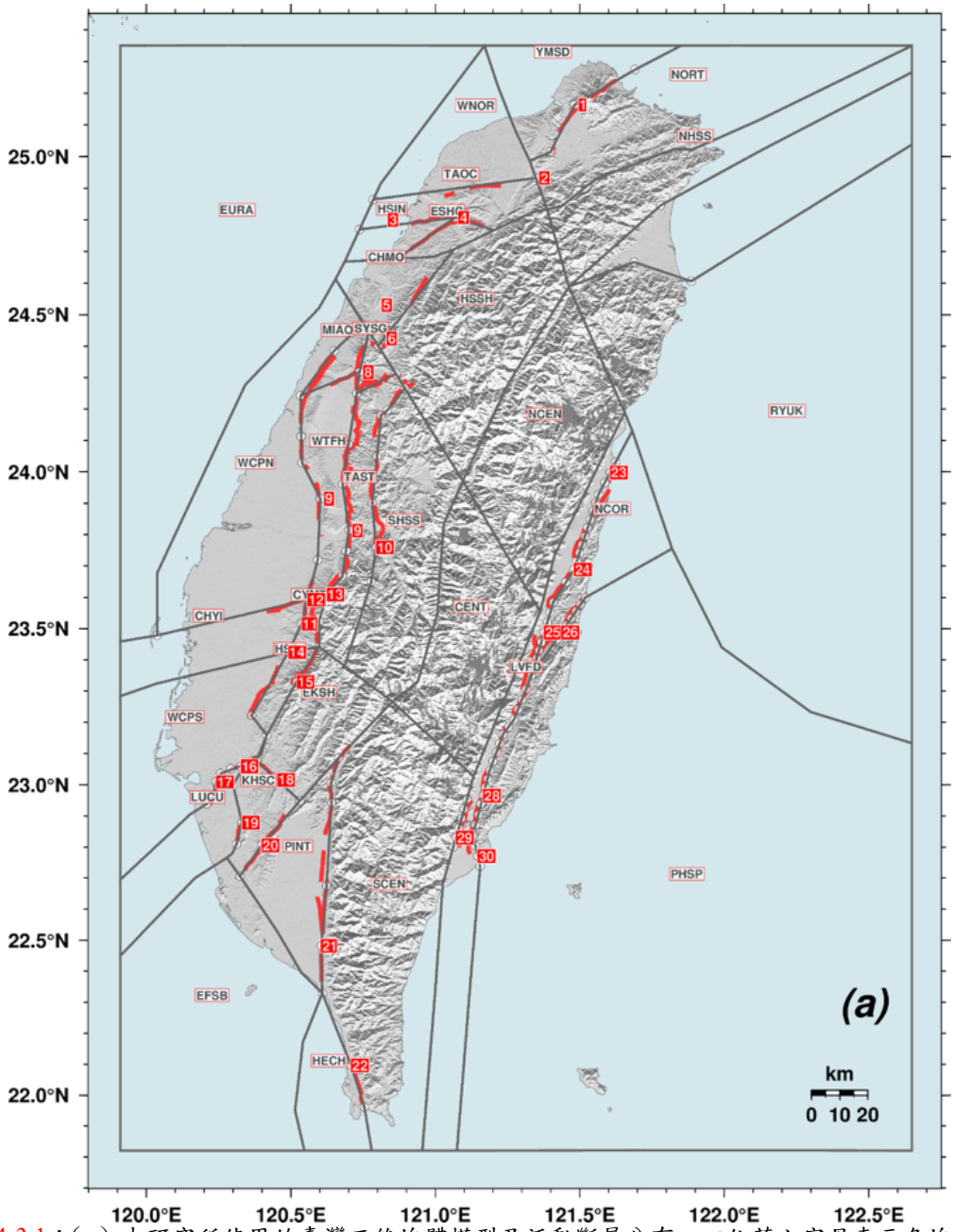



圖 4-3.1：(a) 本研究所使用的臺灣三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公佈之活斷層，紅色虛線表示推測或隱伏斷層，紫色實線表示非地調所公佈之活斷層。數字代表之斷層分別為： 1. 山腳斷層； 2. 湖口斷層； 3. 新竹斷層； 4. 新城斷層； 5. 獅潭斷層； 6. 三義斷層；7. 大甲-彰化斷層； 8. 屯子腳斷層；9. 車籠埔斷層 10.大茅埔－雙冬斷層； 11. 九芎坑斷層； 12. 梅山斷層；13. 大尖山斷層；14. 木屐寮－六甲斷層； 15. 觸口斷層； 16. 新化斷層；17. 後甲里斷層； 18. 左鎮斷層； 19. 小崗山斷層； 20. 旗山斷層； 21. 潮州斷層； 22. 恆春斷層；23. 米崙斷層； 24. 嶺頂斷層； 25. 瑞穗斷層;26. 奇美斷層； 27. 玉里斷層;28. 池上斷層；29. 鹿野斷層;30. 利吉斷層。

Figure 4-3.1: (a) The block model setup of this work. Black lines are block boundaries. Red lines are CGS active faults. Labeled numbers are: 1. Shanchiao fault; 2. Hukou fault; 3. Hsinchu fault; 4. Hsincheng Fault; 5. Shihtan Fault; 6. Sanyi fault; 7. Tachia-Changhua Fault; 8. Tuntzuchiao Fault; 9. Chelungpu Fault; 10. Tamaopu-Shuangtung Fault; 11. Chiuchiungkeng Fault; 12. Meishan Fault; 13. Tachienshan Fault; 14. Liuchia-Muchiliao Fault; 15. Chukou Fault; 16. Hsinhua Fault; 17. Houchiali Fault; 18. Zuozhen Fault; 19. Hsiaogangshan Fault; 20. Chishan Fault); 21. Chaochou Fault; 22. Hengchun Fault; 23. Milun fault; 24. Lingding fault; 25. Rueisui fault; 26. Chimei fault; 27. Yuli fault; 28. Chihshang fault; 29. Luyeh fault; 30. Lichi fault.

表 4-3.1：圖 4-3.1 中所示活動斷層之幾何參數。

Table 4-3.1: Subsurface geometry of active faults shown in Figure 4-3.1.

| | 斷層名稱 | | 傾角(degree) | 斷層底部深度(km) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 山腳斷層 | | 70.0 | 0.0－9.0 |
| 2 | 湖口斷層 | | 60.0 | 0.0－7.0 |
| 3 | 新竹斷層 | | 50.0 | 0.0－10.0 |
| 4 | 新城斷層 | | 40.0 | 0.0－10.0 |
| 5 | 獅潭斷層 | | 50.0 | 0.0－8.0 |
| 6 | 三義斷層 | | 25.0 | 0.0－9.0 |
| 7 | 大甲－彰化斷層 | 北段 | 25.0 | 0.0－6.0 |
| | | 南段 | 25.0 | 0.0－7.5 |
| 8 | 屯子腳斷層 | | 75.0 | 0.0－13.0 |
| 9 | 車龍埔斷層 | | 35.0 | 0.0－8.0 |
| 10 | 大茅埔－雙冬斷層 | | 50.0 | 0.0－5.0 |
| 11 | 九芎坑斷層 | | 25.0 | 0.0－7.0 |
| 12 | 梅山斷層 | | 80.0 | 0.0－12.5 |
| 13 | 大尖山斷層 | | 32.5 | 0.0－6.5 |
| 14 | 木屐寮-六甲斷層 | | 45.0 | 0.0－6.0 |
| 15 | 觸口斷層 | | 45.0 | 0.0－7.0 |
| 16 | 新化斷層 | | 80.0 | 0.0－12.5 |
| 17 | 後甲里斷層 | | 40.0 | 0.0－4.0 |
| 18 | 左鎮斷層 | | 70.0 | 0.0－10.0 |
| 19 | 小崗山斷層 | | 45.0 | 0.0－10.0 |
| 20 | 旗山斷層 | | 60.0 | 0.0－13.0 |
| 21 | 潮州斷層 | | 60.0 | 0.0－17.5 |
| 22 | 恆春斷層 | | 75.0 | 0.0－20.0 |
| 23 | 米崙斷層 | | 65.0 | 0.0－10.0 |
| 24 | 嶺頂斷層 | | 65.0 | 0.0－27.5 |
| 25 | 瑞穗斷層 | | 65.0 | 0.0－27.5 |
| 26 | 奇美斷層 | | 80.0 | 0.0－25.0 |
| 27 | 玉里斷層 | | 51.0 | 0.0－10.0 |
| 28 | 池上斷層 | | 60.0<br>25.0 | 0.0－20.0<br>20.0－25.0 |
| 29 | 鹿野斷層 | | 30.0 | 0.0-5.0 |
| | | | 下接利吉斷層 | |
| 30 | 利吉斷層 | | 55.0<br>40.0 | 0.0－22.0<br>22.0－27.5 |
| 31 | 宜蘭北部及南部構造 | 北部 | 60.0 | 0.0－9.4 |
| | | 南部 | 60.0 | 0.0－11.3 |

## 4-3-2 活動斷層長期滑移速率及虧損率

本研究所使用的地表運動資料為臺灣 GPS 觀測網在 2005-2020 所觀測的連續測站及移動站之平均水平速度場，包含了 442 個連續測站及 804 個 GPS 移動站資料（圖 4-3.2）。利用這些速度場及各斷層參數，即可估算出最符合 GPS 觀測資料的塊體旋轉率（圖 4-3.3 及圖 4-3.4a、b；表 4-3.2）。圖 4-3.2 中顯示大部份塊體之 Euler pole 皆位於臺灣周圍，由我們所推求的水平速度（圖 4-3.4b），可看出部份塊體旋轉速率較大（圖 4-3.4a）。圖 4-3.5a、c、d 分別顯示本區域的斷層長期滑移速率、滑移虧損率及間震期滑移速率等值。圖 4-3.6 則顯示本研究區域的三種水平速度場，分別是 GPS 觀測值（a）、塊體模型所預測的值（b），以及上述兩者的差別（殘差值, c）。由此圖可知，在大部分地區，觀測值和塊體模型預估的水平運動有很好的一致性，而預估較差的部分則落在西南部地區及瑞穗斷層至利吉斷層兩側的塊體，推測此現象可能是因為這兩處的塊體幾何較為複雜，且花東縱谷兩側臨中央山脈及太平洋，測站及資料的數目明顯較少，並有較多大規模地震發生於此，較易受到震後效應的影響，使塊體模型的預測結果不如預期。除此之外，為了評估各塊體可能存在的內部變形（internal deformation），我們利用 block modeling 來推算南部塊體的內部應變率（internal strain rate）。結果如圖 4-3.7，顯示臺灣的塊體主應變軸以東西向壓縮應變、南北向伸張應變為主。這個趨勢和一些前人直接由 GPS 觀測值求得的應變速率場相似，間接說明了 block modeling 的正確演算過程。

在此針對本計畫中各區域之活斷層探討，結果陳述如下。表 4-3.3 顯示全台活斷層上各節點的滑移速率的平均值，並可看出這些斷層之平均長期滑移速率及平均滑移虧損率，及其對應之計算標準差。其中斷層的長期平均滑移速率（geodetic long-term slip rate）的計算是由近十年測地資料（GPS, 水準等）所得的地表運動推估而得，和利用地質資料（槽溝開挖或河階等）所觀測的長期（數百~數千年）滑移速率（geologic long-term slip rate）存在有本質上的差異。若假設斷層的震間能量累積速率為常數，則 geodetic 和 geologic slip rates 應該相同。然而由於板塊構造及運動的複雜性，在地質時間的尺度下，斷層活動往往存在變異性，所以許多研究都曾指出這兩種斷層滑移速率的差別（e.g., Ward, 1998）。評估 geodetic long-term slip rate 的方法，除了和 geologic long-term slip rate 進行比

較外，也可以由地震活動度等資料來間接進行。

間震期滑移速率為長期滑移速率減去滑移虧損率，由於斷層深部設定成自由滑動，本研究將地表及斷層一半深度的滑移虧損率作平均。表 4-3.3 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約為 21 mm/yr 及 26 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約為 5~9 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，故平均滑移虧損率約 5 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 4-3.6a），這樣的速度變化使得在車籠埔斷層、大茅埔—雙冬斷層、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 10~21 mm/yr，以九芎坑及大尖山斷層較高。但因此二條斷層的斷層鎖定係數偏低，平均滑移虧損率僅 5~6 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。整體來看，北台灣的地表應變較弱，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。

在臺灣西南部，比較模型所估算的斷層測地長期滑移速率與地質長期滑移速率顯示兩種滑移速率差異較大的分別是左鎮斷層、旗山斷層以及恆春斷層。圖 4-3.6a 顯示在南部區域的速度場有明顯的逆時針旋轉，造成在左鎮斷層、旗山斷層與恆春斷層兩側的速度場方向有明顯改變，此現象可以視為左鎮斷層、旗山斷層與恆春斷層面上有較快速錯動的原因之一，然而會造成斷層兩側速度改變的除塊體的長期滑移外，也可能受潛移等其他變形影響，因而造成兩種滑移速率間較大的差異。此外因滑移虧損率為長期滑移速率乘以斷層鎖定係數，所以在長期滑移速率較快的斷層面上往往也會有較高的滑移虧損率，因此非常高的滑移虧損率，

可能是因長期滑移速率被高估的影響。

而臺灣東部的斷層均顯示相對較高之平均長期滑移速率（約介於 34~53 mm/yr），但除了池上斷層淺部之滑移虧損率較低（<4 mm/yr）以外，其餘斷層的平均滑移虧損率皆約為 8~20 mm/yr。由圖 4-3.5b 可看出池上斷層淺部於間震期之鎖定程度相對較低，與此斷層已知的震間潛移（interseismic creeping）行為吻合。而奇美斷層因為沒有地質速率約制，所以算出的測地長期速率與滑移虧損率皆為最高。此外，鹿野及利吉斷層週遭部分測站殘差值較大（圖 4-3.6c），推估可能受到 2006 台東卑南地震（$M_L$=6.0）的震後效應影響外，斷層東側測站（資料）數量過低（僅約 5 個 GPS 站）也會影響模型的估算。此外，花東縱谷中段玉里斷層附近也有部分測站殘差值較大（表 4-3.3），且玉里斷層的滑移速率估算值及誤差均偏高。此現象可能歸因於此斷層與其東邊邊緊鄰的瑞穗斷層相距過近，因此在模型中形成了一個狹小的塊體。由於其體積過小，因此空間上相對稀疏 GPS 資料無法提供穩定的模型參數解析。另外也有研究指出，玉里斷層在 10 km 以上有可能和瑞穗斷層相接，因此應該將這兩個斷層視為同一地體構造系統。鑒於以上原因，本研究中偏高的玉里斷層速率值仍須進一步的檢驗。

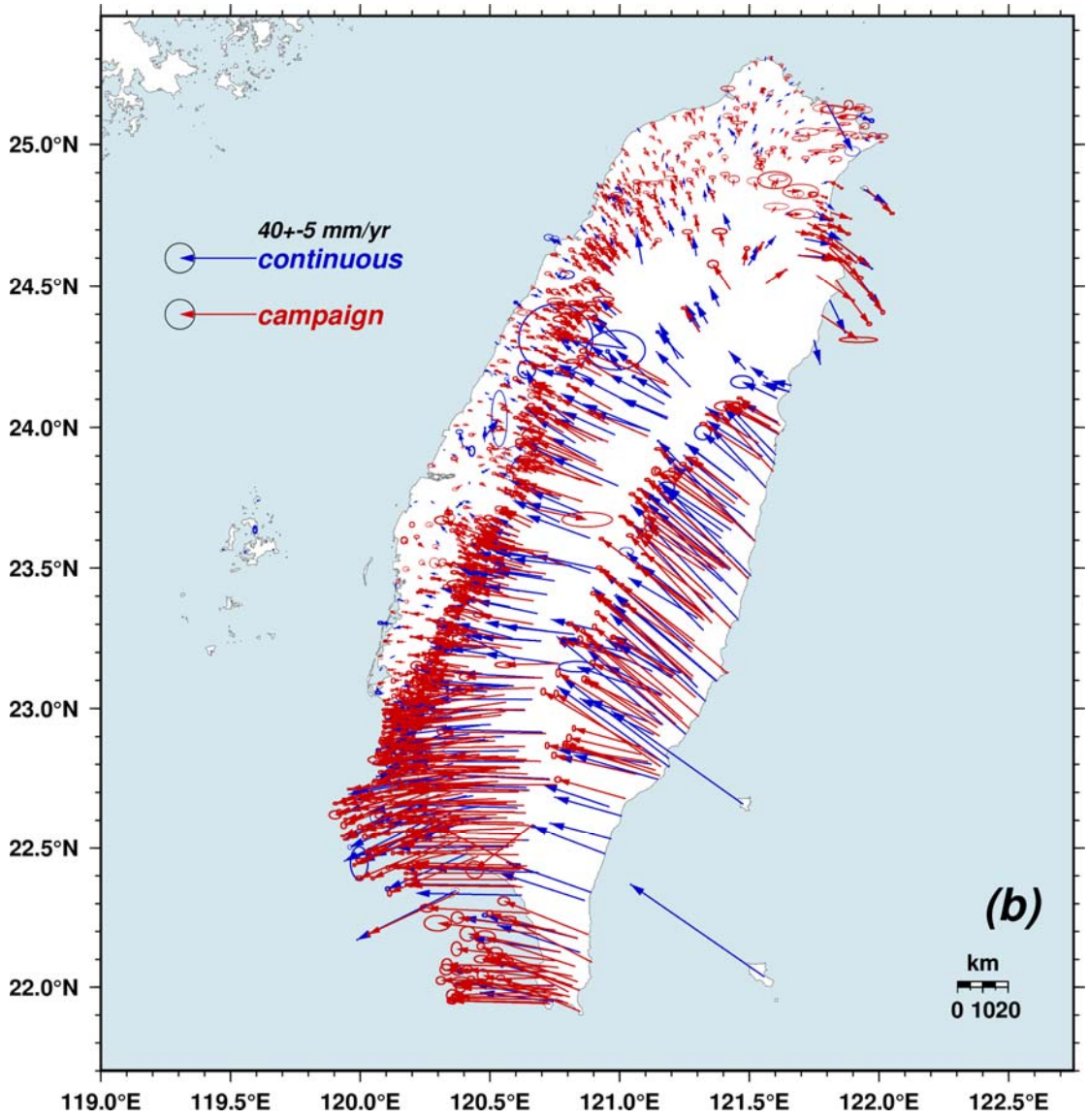



圖 4-3.2：利用 GPS 連續站（藍色箭頭）及 GPS 移動站（紅色箭頭）資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站）。

Figure 4-3.2: Continuous (blue arrows) and campaign (red arrows) GPS velocity field observed from 2005-2020, all referenced to S01R at Penghu

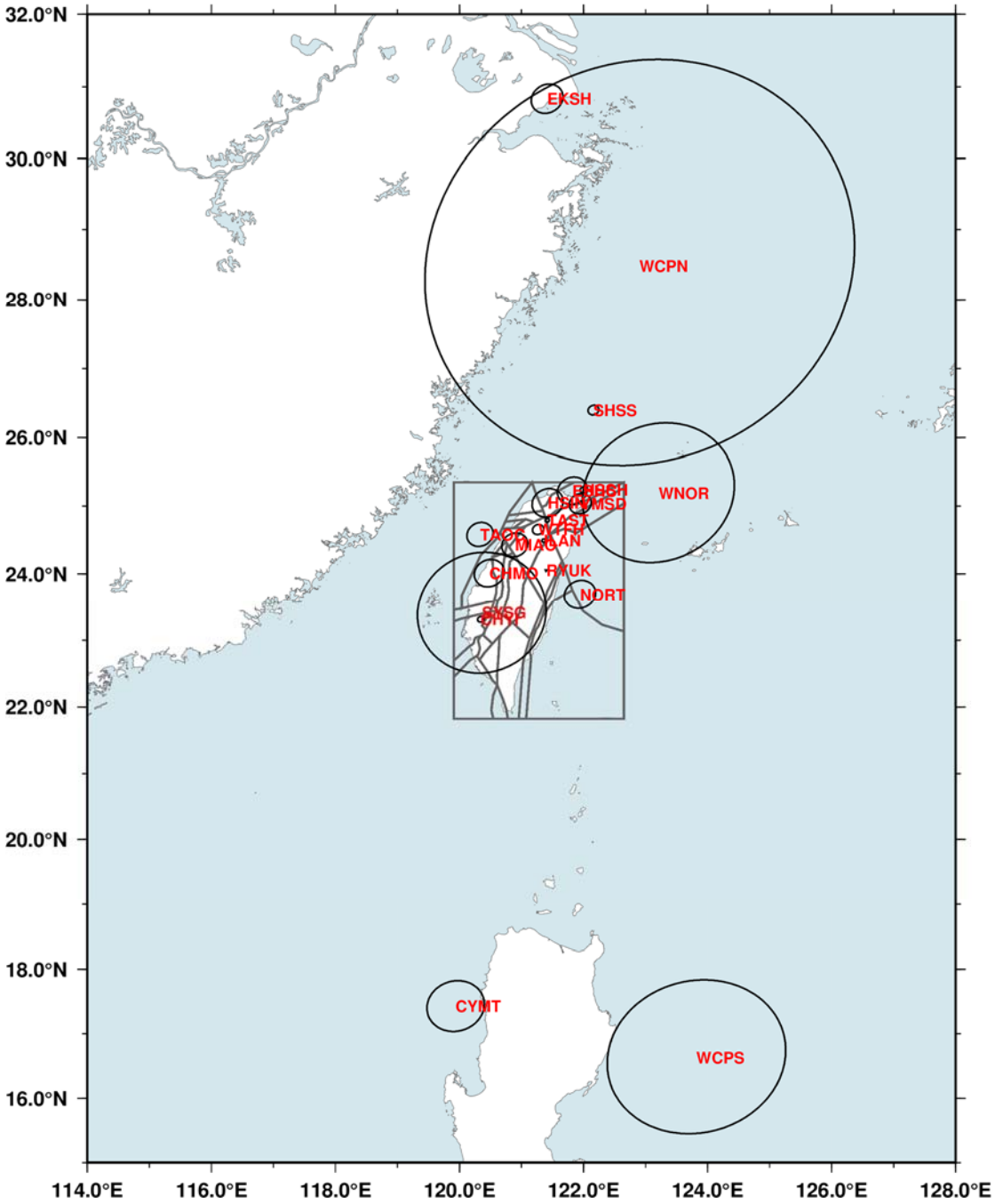



圖 4-3.3：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 2-8.1）。

Figure 4-3.3: The location of the rotation poles for each block were marked along with the 95% confidence error.

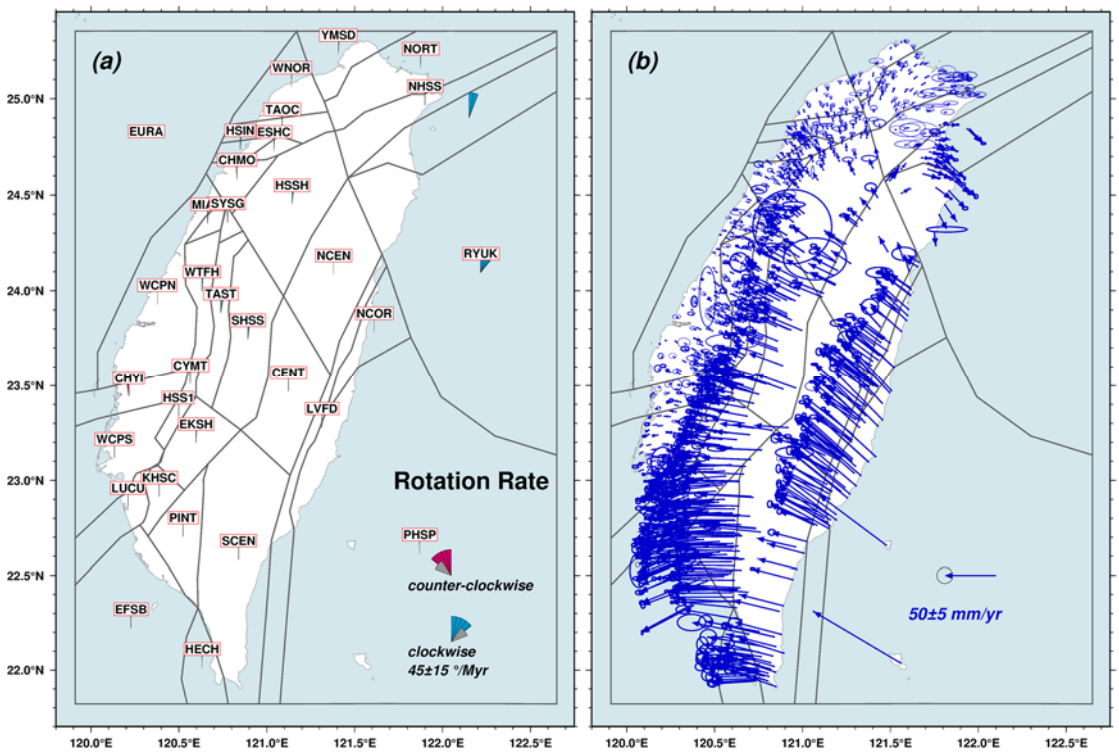



圖 4-3.4：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。 紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15°/My 的角速度。(b) 以圖 a 中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。

Figure 4-3.4: (a) The rotation rate of blocks. Blue for clockwise rotation, and red for counterclockwise rotation. (b) Predicted velocity field resulted from block rotation.

表 4-3.2：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓。

Table 4-3.2: Location of rotation pole, angular velocity, and their error ellipses of each block.

| 名稱 | 軸經度 | 軸緯度 | 角速度 (deg/my) | 角速度誤差 (deg/my) | 誤差橢圓長軸方位角(deg) | 誤差橢圓長軸長(deg) | 誤差橢圓短軸長(deg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CHYI | 120.345 | 23.327 | 8.88 | 0.13 | 66.32 | 1.09 | 0.94 |
| WCPS | 122.965 | 19.167 | 0.33 | 0.11 | 71.71 | 25.04 | 21.19 |
| EKSH | 121.182 | 29.027 | -3.52 | 0.16 | 61.30 | 3.55 | 3.03 |
| LUCU | 114.419 | 55.873 | -0.39 | 0.00 | 180.00 | 0.00 | 0.00 |
| KHSC | 110.634 | 45.847 | -0.63 | 0.00 | 180.00 | 0.00 | 0.00 |
| PINT | 125.425 | -32.558 | 0.64 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| EFSB | 120.986 | 20.935 | 12.41 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| SCEN | 100.557 | -52.445 | 0.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CYMT | 120.09 | 17.597 | 1.82 | 0.27 | 72.45 | 10.21 | 8.88 |
| HSS1 | 121.442 | 47.937 | -0.36 | 0.26 | 40.77 | 52.02 | 45.29 |
| HECH | 317.458 | 74.598 | -0.39 | 0.00 | 180.00 | 0.00 | 0.00 |
| WCPN | 114.572 | 14.92 | 0.02 | 0.08 | 72.03 | 101.03 | 98.04 |
| WTFH | 121.2 | 24.666 | -4.24 | 0.10 | 64.69 | 1.80 | 1.56 |
| MIAO | 120.933 | 24.388 | -4.77 | 0.28 | 63.75 | 4.18 | 3.66 |
| SHSS | 122.086 | 26.241 | -6.11 | 0.13 | 63.82 | 1.66 | 1.43 |
| CHMO | 120.607 | 24.114 | 2.82 | 0.20 | 63.21 | 5.19 | 4.54 |
| HSSH | 122.014 | 25.245 | -6.64 | 0.09 | 64.49 | 1.06 | 0.93 |
| TAST | 121.409 | 24.804 | -10.09 | 0.09 | 65.42 | 0.69 | 0.60 |
| SYSG | 123.363 | 11.768 | 0.13 | 0.72 | 81.58 | 104.35 | 103.45 |
| TAOC | 120.397 | 24.699 | 2.34 | 0.15 | 62.81 | 4.77 | 4.18 |
| WNOR | 121.962 | 25.078 | -1.05 | 0.18 | 62.99 | 12.60 | 11.02 |
| HSIN | 121.309 | 25.031 | -3.24 | 0.23 | 63.00 | 5.19 | 4.54 |
| ESHC | 121.817 | 25.205 | -3.67 | 0.23 | 62.95 | 4.57 | 3.98 |
| YMSD | 121.878 | 25.021 | -2.56 | 0.12 | 63.25 | 3.55 | 3.10 |
| NORT | 121.954 | 23.658 | -1.81 | 0.12 | 65.69 | 5.16 | 4.50 |
| NHSS | 122.484 | 19.415 | -0.27 | 0.14 | 70.77 | 36.42 | 32.21 |
| CENT | 84.019 | -58.143 | 0.33 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ILAN | 121.366 | 24.536 | -21.27 | 0.18 | 64.60 | 0.63 | 0.55 |
| RYUK | 121.384 | 24.04 | -39.43 | 0.16 | 65.93 | 0.31 | 0.27 |
| NCEN | 135.288 | 37.836 | -0.58 | 0.00 | 180.00 | 0.00 | 0.00 |
| LVFD | 129.59 | 34.297 | -1.02 | 0.00 | 180.00 | 0.00 | 0.00 |
| PHSP | 91.596 | -12.921 | 0.84 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| NCOR | 174.82 | 43.311 | -0.57 | 0.00 | 180.00 | 0.00 | 0.00 |

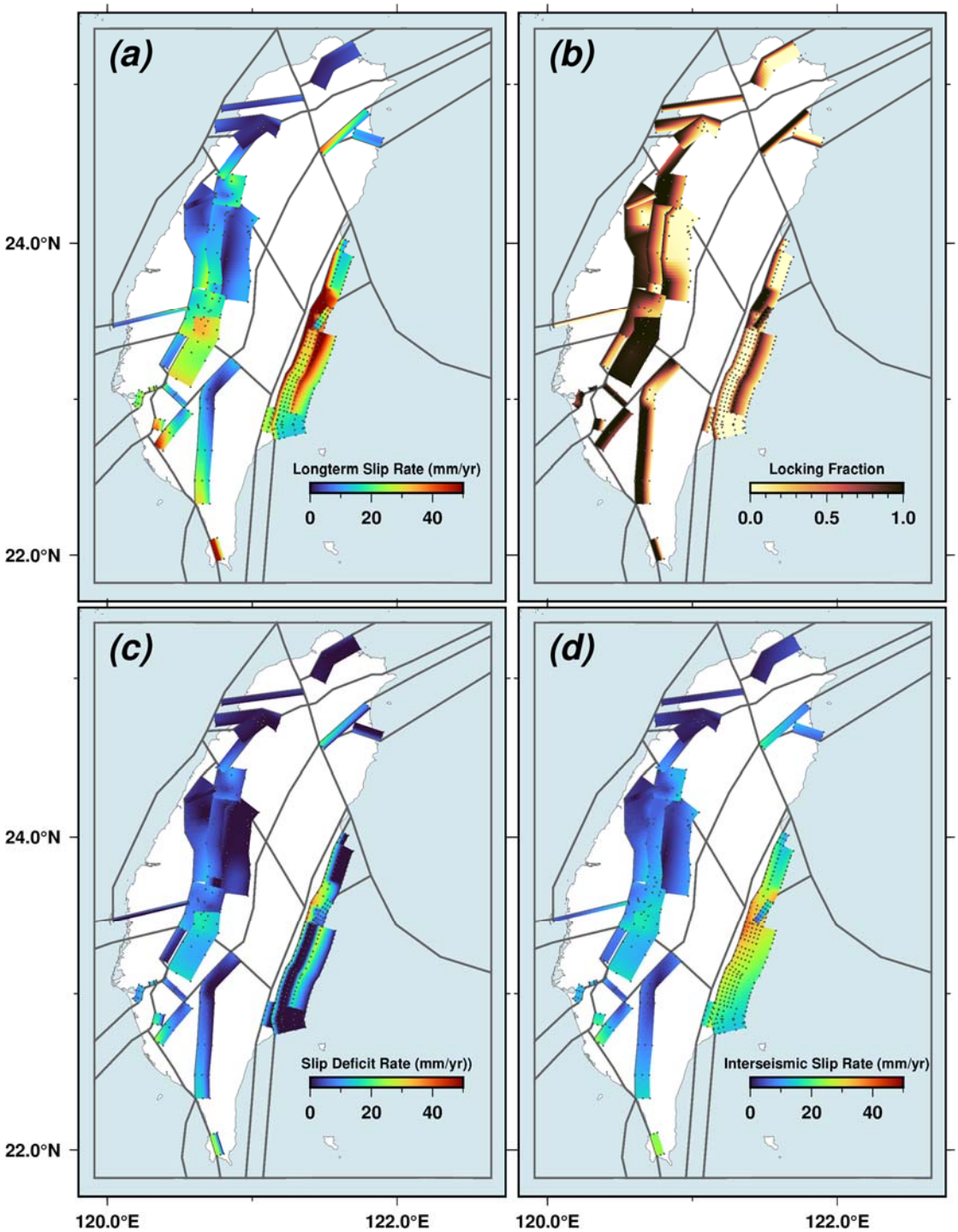



圖 4-3.5：(a) 推求的斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層的地表位置。橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b) 各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient) 分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的間震期滑移速率。

Figure 4-3.5: (a) Longterm slip rate. (b) Locking Fraction. (c) Slip deficit rate.

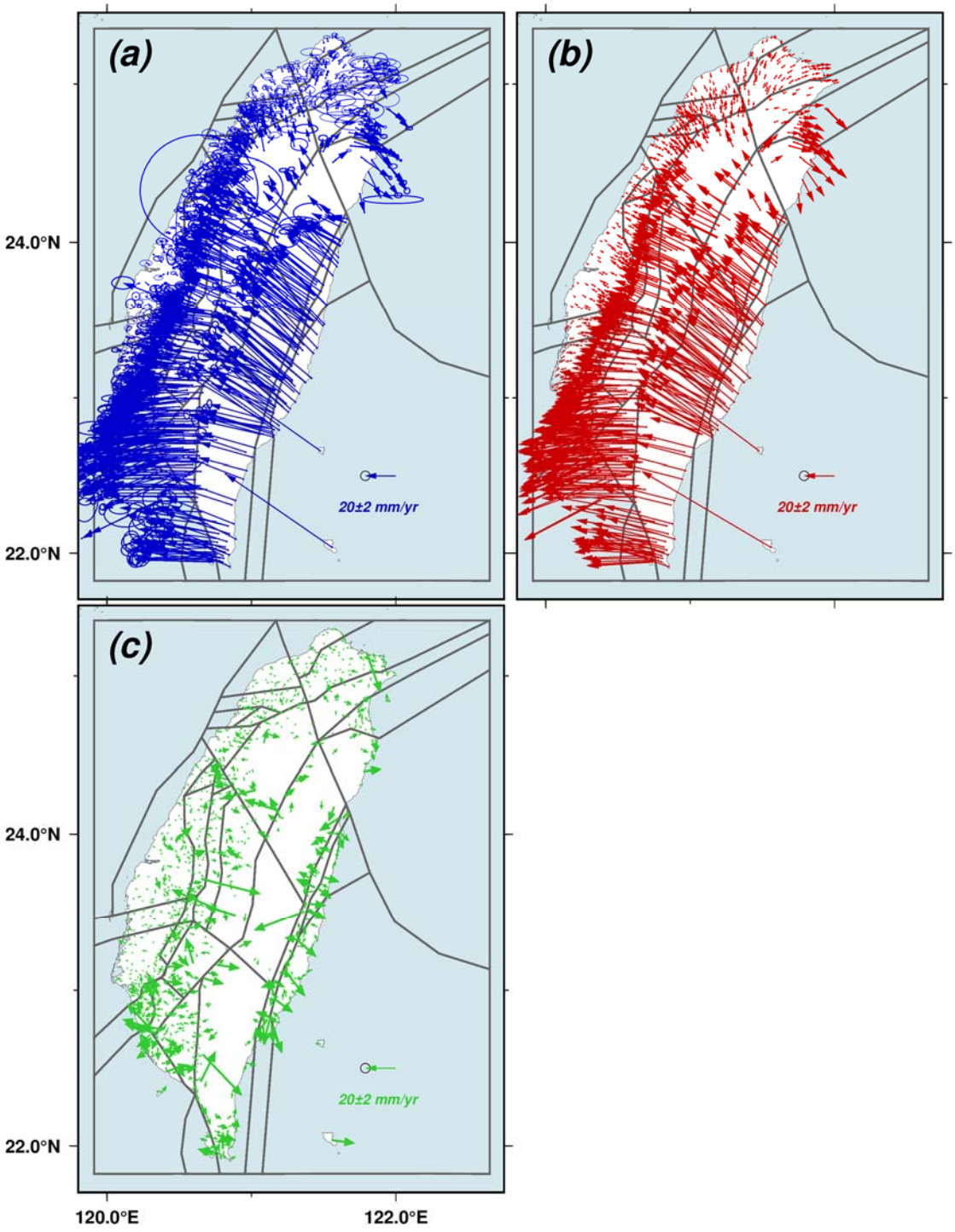



圖 4-3.6：比較 GPS 觀測速度場（圖 a）以及本研究所得之最佳塊體模型所預估的地表運動（圖 b）。 圖 c 表示模型預估的殘差值，其對應之 reduced χ2 為 152.489，黑線代表各斷層的地表位置。

Figure 4-3.6: Comparison of GPS observation and model prediction. (a) Observed GPS velocity field. (b) Block model predication. (c) Residual.

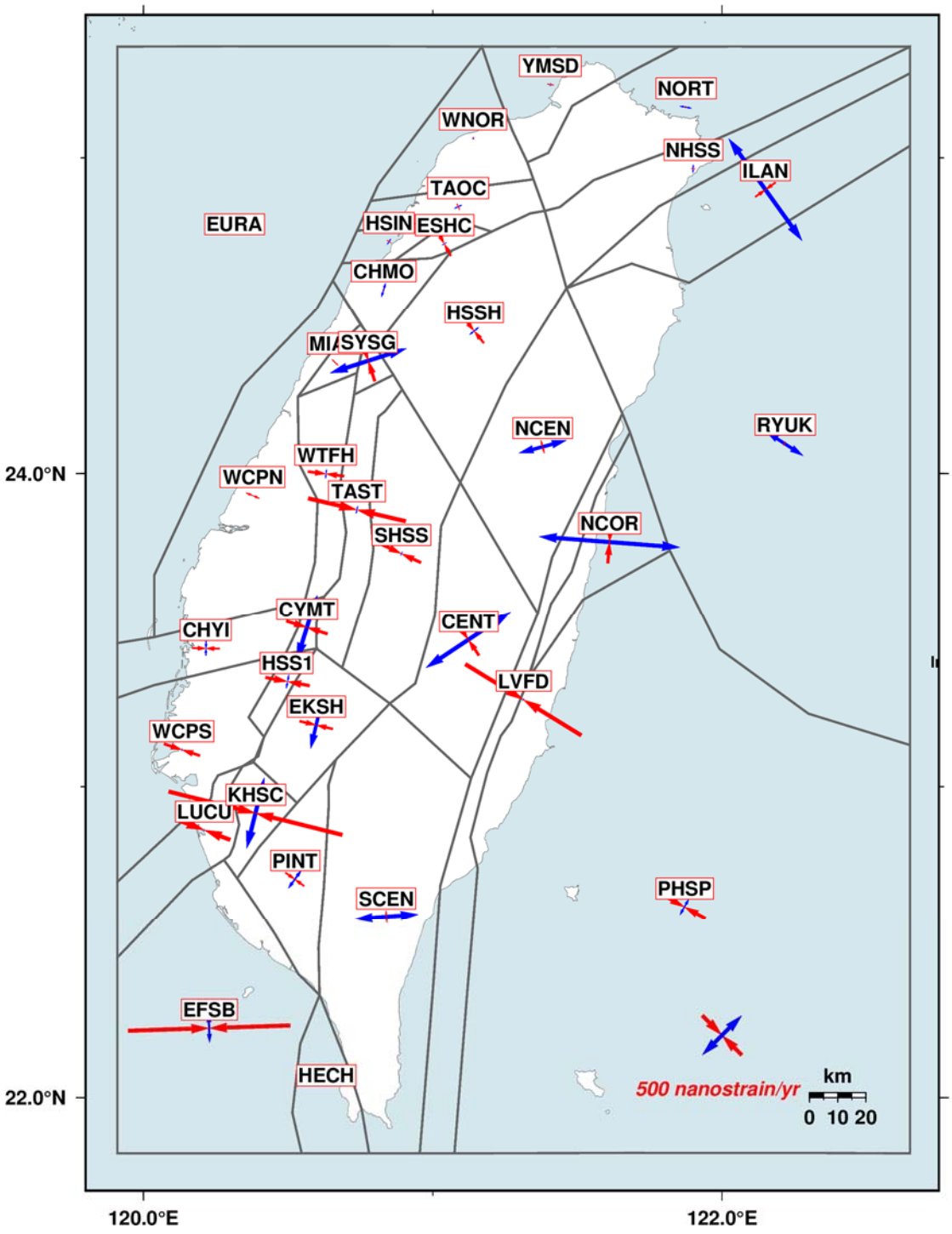



圖 4-3.7：各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

Figure 4-3.7: Internal strain of each block. Red and blue arrows represent maximum and minimum principle strain rate.

表 4-3.3：斷層之地質滑移速率約束值（Shyu et al, 2016）及平均滑移速率。

Table 4-3.3: The minimum, maximum value of geological fault slip rate and the longterm slip rate, deficit rate along with their standard error calculated by our model.

| 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 (mm/yr) | 平均滑移虧損率(mm/yr) | 標準差 (mm/yr) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 山腳 | | 1.1 | 2.6 | 2.9 | 2.3 | 0.6 | 1.2 |
| 湖口 | | 0.3 | 2.0 | 5.2 | 1.8 | 1.9 | 1.6 |
| 新竹 | | 0.2 | 1.1 | 3.7 | 2.4 | 1.3 | 1.6 |
| 新城 | | 0.6 | 3.0 | 2.7 | 2.8 | 0.9 | 1.6 |
| 獅潭 | | 0.6 | 3.1 | 12.6 | 8.3 | 5.6 | 4.4 |
| 三義 | | 0.6 | 3.1 | 15.0 | 6.0 | 5.7 | 3.3 |
| 大甲—彰化 | 北 | - | - | 8.2 | 5.2 | 1.3 | 1.6 |
| | 南 | - | - | 14.5 | 10.7 | 4.3 | 5.7 |
| 屯子腳 | | 0.3 | 1.7 | 5.0 | 1.7 | 1.4 | 1.6 |
| 車籠埔 | | 0.0 | 6.9 | 12.9 | 3.1 | 2.4 | 3.6 |
| 大茅埔—雙冬 | | 0.7 | 3.3 | 6.6 | 3.7 | 1.2 | 1.6 |
| 九芎坑 | | 2.4 | 12.0 | 22.5 | 5.2 | 7.2 | 4.3 |
| 梅山 | | 0.0 | 2.5 | 17.9 | 10.6 | 4.5 | 7.4 |
| 大尖山 | | - | - | 18.9 | 6.0 | 5.5 | 6.3 |
| 觸口 | | - | - | 29.8 | 4.3 | 14.8 | 2.3 |
| 木屐寮—六甲 | | 4.4 | 7.1 | 10.6 | 3.6 | 3.5 | 3.0 |
| 新化 | | 0.8 | 4.5 | 25.8 | 0.5 | 12.9 | 0.2 |
| 後甲里 | | 0.0 | 7.1 | 22.8 | 2.3 | 10.6 | 2.1 |
| 左鎮 | | - | - | 16.2 | 6.8 | 7.8 | 3.5 |
| 小崗山 | | 1.1 | 5.5 | 29.7 | 10.2 | 11.8 | 9.4 |
| 旗山 | | 0.7 | 1.5 | 28.6 | 13.7 | 13.4 | 7.1 |
| 潮州 | | 0.6 | 2.9 | 13.9 | 8.7 | 5.7 | 5.2 |
| 恆春 | | 5.7 | 6.4 | 39.8 | 12.8 | 16.0 | 12.4 |
| 米崙 | | 10.1 | 10.2 | 20.2 | 11.2 | 5.8 | 8.8 |
| 嶺頂 | | 5.6 | 17.1 | 32.8 | 15.8 | 10.4 | 12.7 |
| 瑞穗 | | 5.6 | 17.1 | 53.3 | 17.5 | 19.4 | 15.3 |
| 奇美 | | - | - | 23.1 | 9.1 | 10.7 | 4.4 |
| 玉里 | | 5.6 | 17.1 | 59.7 | 15.6 | 38.7 | 33.3 |
| 池上 | | 5.6 | 17.1 | 34.5 | 14.1 | 8.1 | 11.5 |
| 利吉 | | 5.6 | 17.1 | 20.9 | 10.0 | 3.9 | 8.1 |
| 鹿野 | | 6.2 | 6.5 | 29.6 | 9.6 | 4.6 | 6.7 |
| 宜蘭北部構造 | | 1.0 | 5.5 | 23.1 | 13.1 | 9.3 | 8.9 |
| 宜蘭南部構造 | | 4.9 | 6.1 | 11.4 | 3.3 | 2.3 | 3.7 |

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

## 4-4-1 斷層模型原理與使用參數

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，但是在基線應變模型中，則是直接利用斷層錯位模型反演地表速度梯度來推求斷層滑移虧損速率。斷層錯位模型是根據彈性錯動理論（Steketee，1958）所建立之斷層模型（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且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。沿著各斷層單元（fault patch/fault element）的斷層滑移量$\Delta u_j$（$\xi_1$，$\xi_2$，$\xi_3$）會使具有均向性的均質彈性體產生位移場$u_i$（$x_1$，$x_2$，$x_3$）（式 4-4.1）。

$$\boldsymbol{u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]\, v_k d\sum} \qquad \text{（式 4-4.1）}$$

其中，F 為施力點之作用力；$\delta_{jk}$為克羅內克函數（Kronecker delta），當 j＝k 時，$\delta_{jk}$＝1，否則為 0；$v_k$為正交於地表單元（surface element）$d\sum$之餘弦函數方向。$u_i$和$\Delta u_j$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 4-4.1，亦即每一個斷層面單元（patch/element）上的斷層滑移量，會在任一地表單元產生對應之地表位移量；而任一地表單元之位移量，會等於所有斷層單元上滑移量作用在該地表單元位移量的總和。

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，在此重新定義各個參數之使用符號。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 4-4.1）。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 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($U_1^2 + U_2^2$)。

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梯度變化，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）。

$$e = \Delta L / L_0 \qquad \text{（式 4-4.2）}$$

其中 e 為伸長率；$\Delta L$ 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 4-4.3 之最小值來求得斷層滑移虧損率之最佳解。

$$\boldsymbol{F(s)} = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (\mathrm{G}\boldsymbol{s} - \boldsymbol{d}) \right\|^2 \qquad \text{（式 4-4.3）}$$

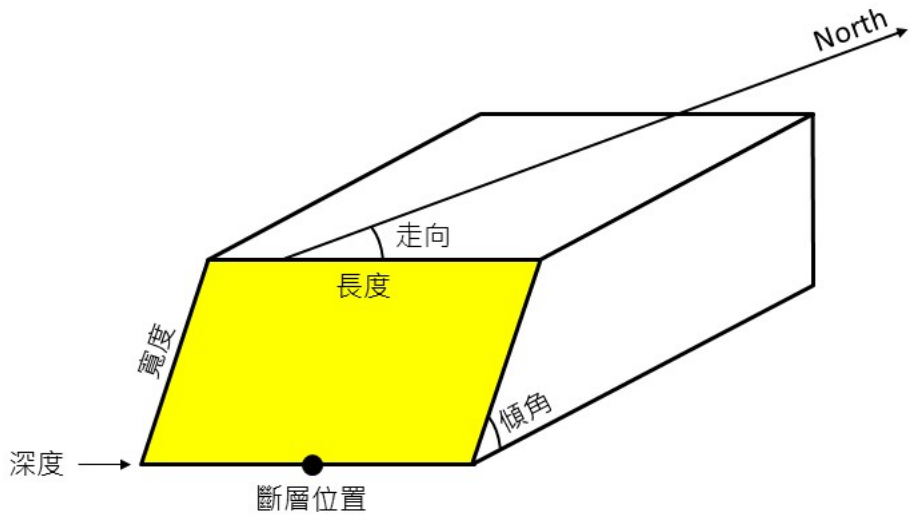



圖 4-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。黃色面為斷層面。斷層幾何參數包含：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。

Figure 4-4.1: Geometry parameters of fault dislocation model. Fault geometry parameters include fault location (km), depth (km), length (km), width (km), strike (°) and dip (°).

## 4-4-2 斷層模擬結果

本計畫主要針對臺灣既有之活動斷層進行模型建置來推求斷層滑移虧損速率。為了合理地解釋臺灣東北部之速度梯度變化，本計畫同時也將宜蘭北部及南部構造納入分析；而玉里斷層則參照審查委員之建議，自本模型中移除。本模型使用的資料為臺灣 GPS 觀測網所評估之 2002－2019 年水平速度場(圖 4-4.2)。本計畫利用基線應變模型反演水平速度梯度，避開傳統塊體模型難以估算塊體運動量的困難，直接計算可以用來評估地震潛勢之斷層滑移虧損率平均值（表 4-4.1）。

為了獲得最佳之平滑參數(smoothing parameter)，本計畫測試特定範圍的平滑參數值，根據取捨曲線（trade-off curve），當平滑參數為 -1.2 時，所得到斷層滑移虧損速率分布為最佳模型，模型結果顯示不符值為 243.4 mm/yr(圖 4-4.3)。

由全臺速度場及模型結果指出，位於北臺灣的斷層（山腳、湖口、新竹、新城、獅潭、三義斷層及宜蘭北部南部構造），區域水平速度量與跨斷層之速度變化皆不大（圖 4-4.2），因此各斷層面上的平均滑移虧損速率大約介於 0.0 ~ 3.0 mm/yr（圖 4-4.4、圖 4-4.5）。

臺灣中部區域（大甲-彰化、車龍埔、大茅埔-雙冬、九芎坑、梅山、大尖山及觸口斷層)之水平速度場在跨斷層有明顯的差異（圖 4-4.2），因此中部地區部分斷層有較大的滑移虧損速率，滑移虧損速率較高的斷層大致位於西部麓山帶與西部平原區的交界帶上（圖 4-4.4、圖 4-4.5），即車龍埔、九芎坑及梅山斷層，大約介於 6.7 ~ 8.5 mm/yr。

臺灣南部區域（木屐寮-六甲、新化、後甲里、左鎮、小崗山、旗山、潮州及恆春斷層），以木屐寮-六甲及恆春斷層具有較高的平均滑移虧損率（分別為 2.8 mm/yr 及 8.2mm/yr）(圖 4-4.4、圖 4-4.5)，木屐寮-六甲斷層兩側水平速度大小有由西向東遞增的水平速率變化，而恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向兩測速度場明顯方向變化（圖 4-4.2）。

臺灣東部區域（米崙、嶺頂、瑞穗、奇美、玉里、池上、鹿野及利吉斷層），以瑞穗、池上及利吉斷層具有較高的平均滑移虧損率，瑞穗斷層由東向西跨過兩側水平速度場明顯速度值從約 62 mm 降至約 30 mm（圖 4-4.2），瑞穗斷層之平均滑移虧損速率為 6.0 mm/yr。橫跨利吉斷層至鹿野斷層之水平速度場，由約 60

mm 減低至約 40 mm，且有 15 度的逆時針旋轉方向變化（圖 4-4.2），鹿野及利吉斷層之平均滑移虧損速率為 2.4 mm/yr 及 8.3 mm/yr。玉里斷層周遭測站分布較為稀疏，水平速度值約 30~35 mm，斷層滑移速率平均值為 0.8 mm/yr。此外，由於奇美斷層週遭測站分佈稀疏，使得奇美斷層的滑移虧損速率估算值有很大的不確定性（圖 4-4.4、圖 4-4.5）。

表 4-4.1：斷層平均滑移速率。

Table 4-4.1: Average slip deficit rates.

| 斷層名稱 | | 平均走滑速率（s.s. mm/yr） | 平均傾向滑移速率（d.s. mm/yr） | 斷層平均滑移虧損速率（mm/yr） | 標準差（mm/yr） |
|---|---|---|---|---|---|
| 山腳斷層 | | 0.6 | 0.2 | 0.6 | 0.4 |
| 湖口斷層 | | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.3 |
| 新竹斷層 | | 0.4 | 1.0 | 1.2 | 0.6 |
| 新城斷層 | | 0.6 | 1.6 | 2.0 | 0.9 |
| 獅潭斷層 | | 0.1 | 0.5 | 0.7 | 0.9 |
| 三義斷層 | | 2.7 | 1.0 | 3.0 | 1.0 |
| 大甲－彰化斷層 | 北段 | 0.2 | 1.3 | 1.7 | 0.8 |
| | 南段 | 2.5 | 1.4 | 3.0 | 1.4 |
| 屯子腳斷層 | | 0.1 | 0.5 | 1.2 | 0.9 |
| 車籠埔斷層 | | 3.3 | 5.0 | 6.7 | 2.0 |
| 大茅埔－雙冬斷層 | | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.3 |
| 九芎坑斷層 | | 1.1 | 7.4 | 7.6 | 6.3 |
| 梅山斷層 | | 6.9 | 4.7 | 8.5 | 6.6 |
| 大尖山斷層 | | 1.7 | 0.9 | 2.1 | 1.5 |
| 木屐寮－六甲斷層 | | 1.9 | 2.1 | 2.8 | 2.3 |
| 觸口斷層 | | 1.8 | 1.2 | 2.2 | 2.3 |
| 新化斷層 | | 0.8 | 0.5 | 1.3 | 0.8 |
| 後甲里斷層 | | 0.0 | 0.3 | 0.2 | 0.5 |
| 左鎮斷層 | | 0.3 | 1.3 | 1.7 | 2.0 |
| 小崗山斷層 | | 0.0 | 1.0 | 1.1 | 1.5 |
| 旗山斷層 | | 1.1 | 1.0 | 1.9 | 1.3 |
| 潮州斷層 | | 0.6 | 1.4 | 1.9 | 1.7 |
| 恆春斷層 | | 4.6 | 5.7 | 8.2 | 2.1 |
| 米崙斷層 | | 3.5 | 4.0 | 5.5 | 1.6 |
| 嶺頂斷層 | | 2.8 | 3.8 | 5.7 | 3.7 |
| 瑞穗斷層 | | 0.4 | 5.6 | 6.0 | 2.7 |
| 奇美斷層 | | 7.5 | 15.6 | 18.2 | 5.4 |
| 玉里斷層 | | 0.8 | 0.0 | 0.8 | 0.5 |
| 池上斷層 | | 10.1 | 2.4 | 11.0 | 9.7 |
| 鹿野斷層 | | 0.7 | 2.2 | 2.4 | 1.1 |
| 利吉斷層 | | 5.7 | 5.8 | 8.3 | 2.5 |
| 宜蘭北部及南部構造 | 北部 | 1.3 | 0.1 | 1.5 | 1.3 |
| | 南部 | 1.4 | 1.1 | 1.8 | 0.9 |

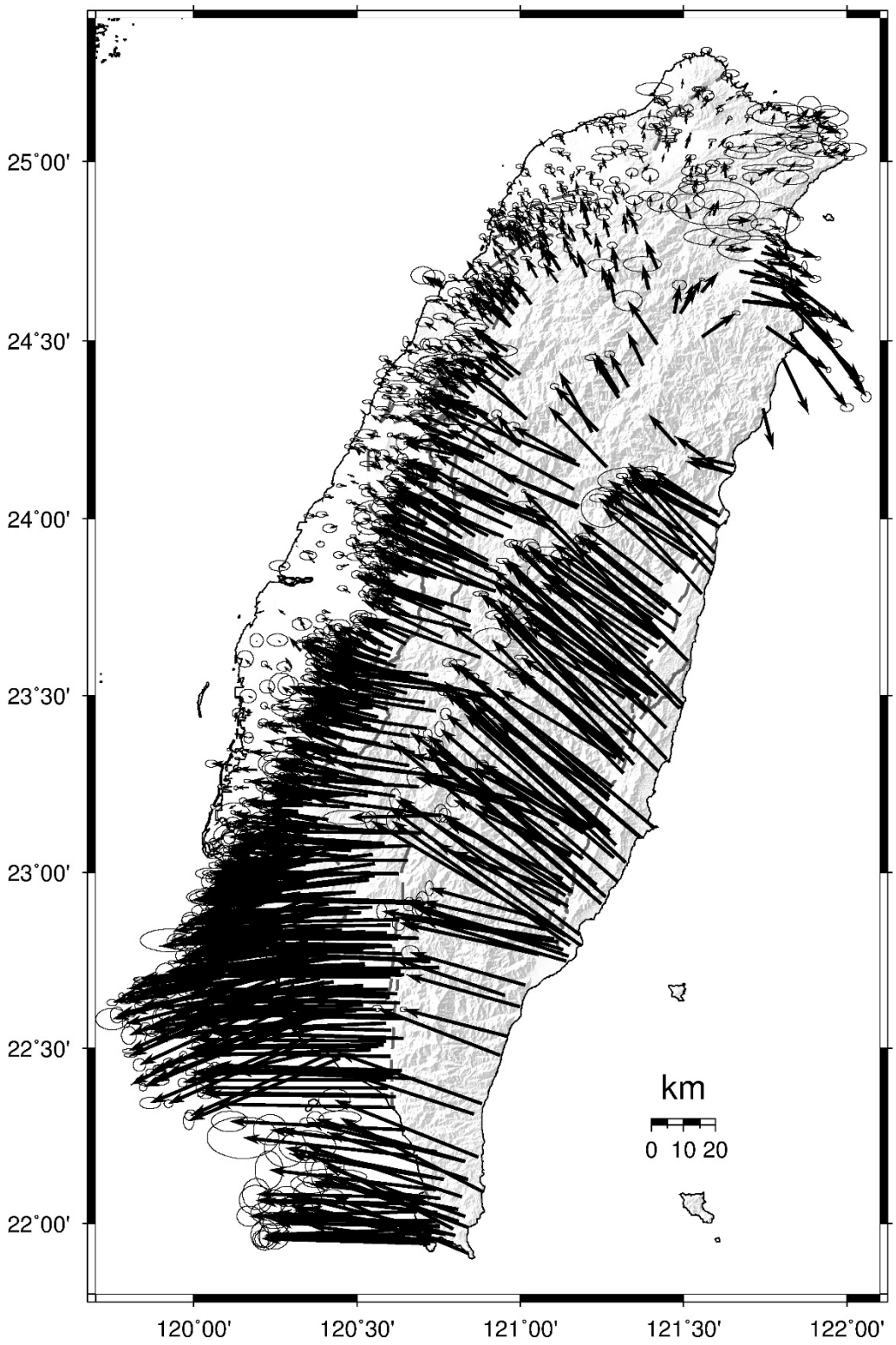



圖 4-4.2：臺灣地區相對於測站 S01R 之水平速度場。灰色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層。

Figure 4-4.2: Horizontal GPS velocity of Taiwan relative to S01R station. Gray dashed lines indicate the CGS active faults.

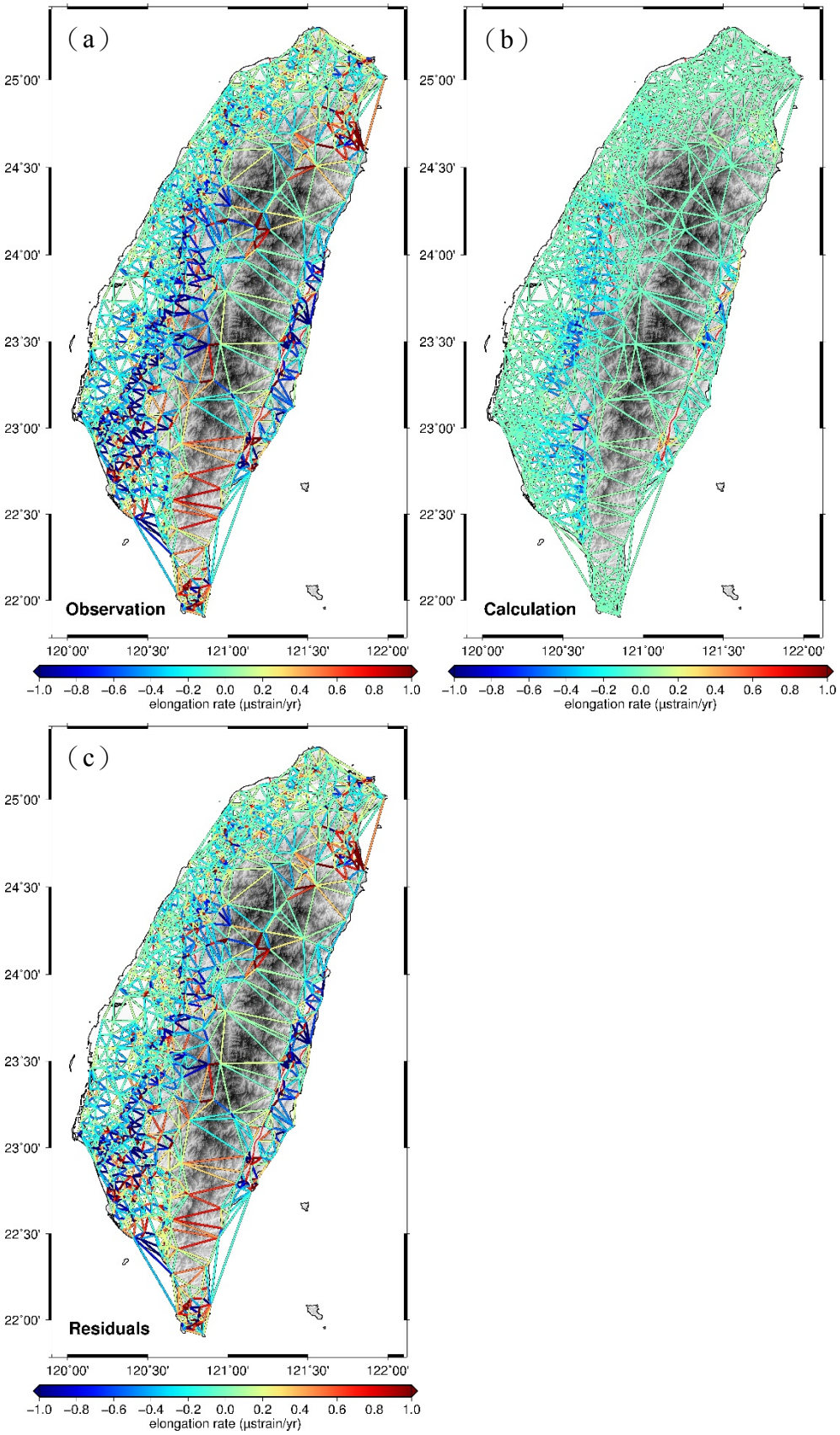



圖 4-4.3：使用 2002-2019 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 基線應變觀測值。(b) 基線應變計算值。(c) 基線應變殘差值。

Figure 4-4.3: Comparison of observations and calculations. (a) Observed elongation rates；(b) Calculated elongation rates；(c) Residuals.

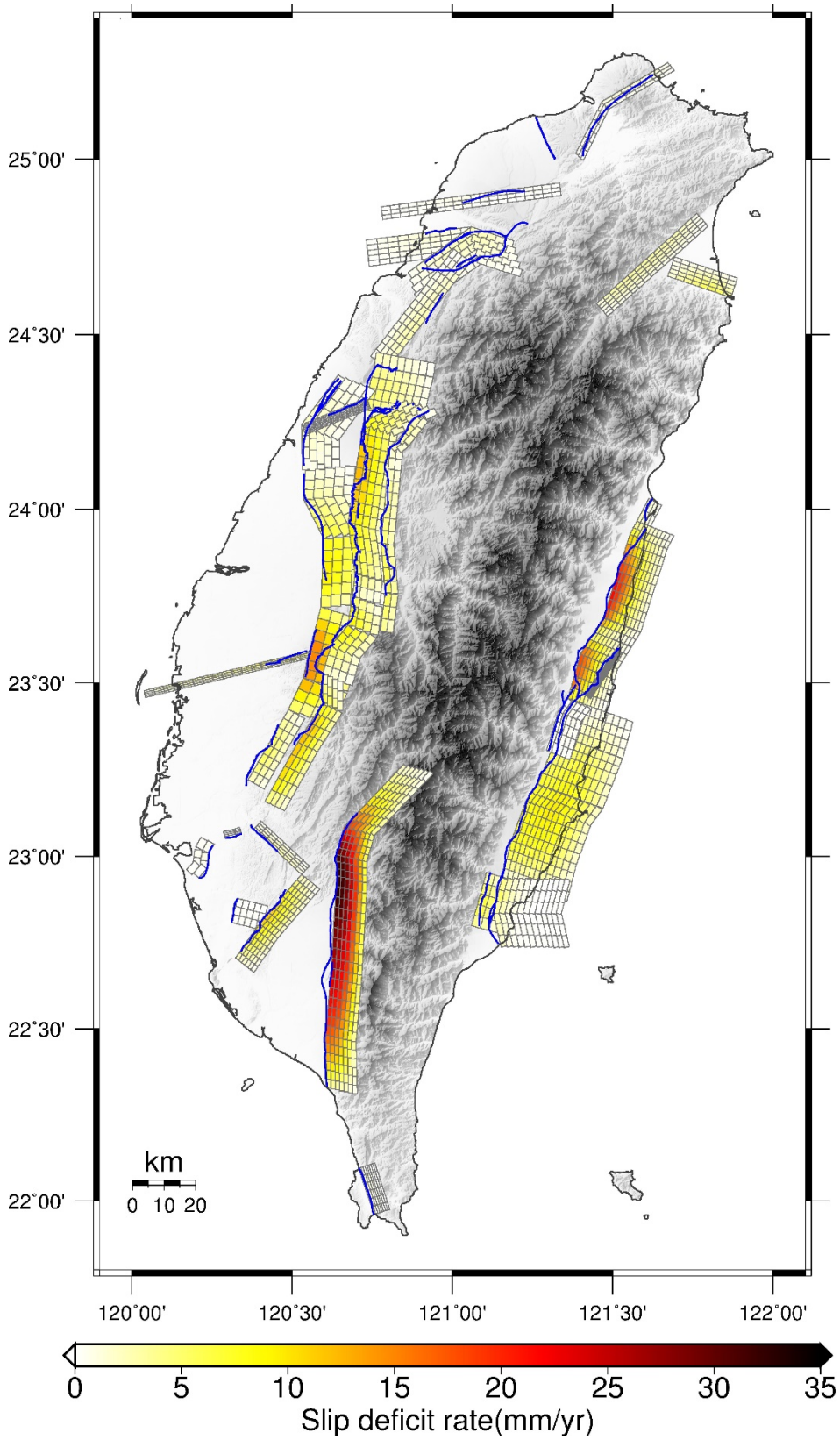



圖 4-4.4：使用 2002-2019 年水平速度場之全臺斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 4-4.4: Fault slip deficit rate distribution in Taiwan using 2002-2019 horizontal velocity field.

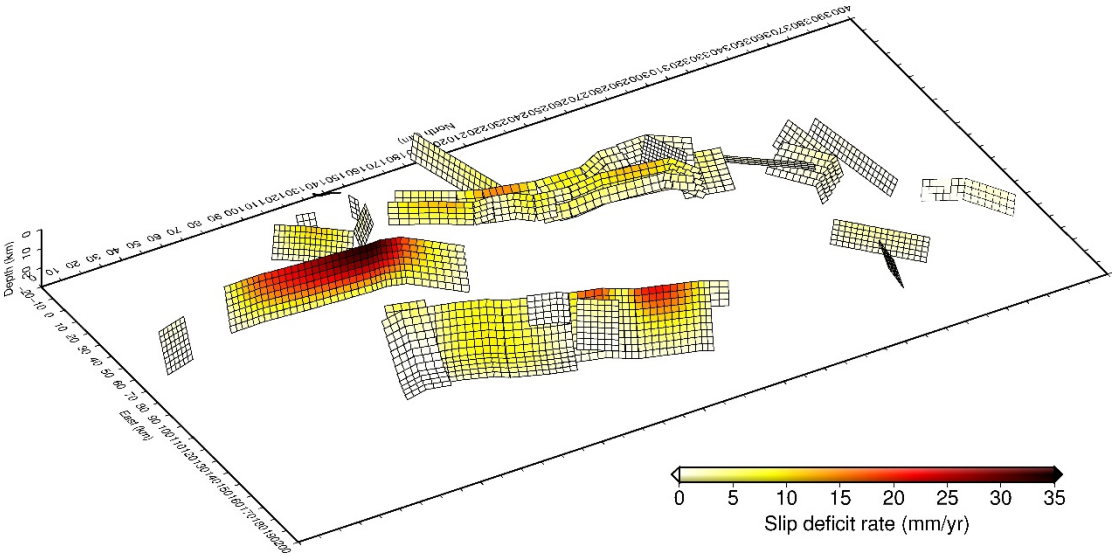



圖 4-4.5：使用 2002-2019 年水平速度場之全臺斷層滑移虧損率分布圖。
Figure 4-4.5: Fault slip deficit rate distribution of Taiwan using 2002-2019 horizontal velocity field.

# 4-5 臺灣之斷層滑移速率

本階段之計畫進行地調所活動斷層之模型建置，各斷層分別為：山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、大甲－彰化斷層、屯子腳斷層、車龍埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、木屐寮-六甲斷層、觸口斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層、米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層與利吉斷層。為了合理地解釋臺灣東北部之速度梯度變化，本計畫也將宜蘭北部及南部構造納入分析。接著以 BLOCKS 程式、DEFNODE 程式與基線應變模型計算各斷層的平均滑移虧損速率。

本計畫依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果（2002 年至 2019 年速度場），並依據三種模型結果之平均計算出加權平均滑移虧損速率（表 4-5.1、圖 4-5.1），上界為中值加 1 倍標準差，下界為中值減 1 倍標準差。計算結果顯示如下。

臺灣北部地區斷層（山腳、湖口、新竹、新城、獅潭、三義斷層及宜蘭北部南部構造），區域水平速度量與跨斷層之速度變化皆不大，由於目前在臺灣北部整體來看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，北台灣的地表應變較弱，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。然而相較於台灣其他地區斷層臺灣北部地區斷層有較低的加權平均滑移虧損速率。

臺灣中部地區斷層（大甲-彰化、車龍埔、大茅埔-雙冬、九芎坑、梅山、大尖山及觸口斷層)，大甲—彰化斷層因斷層兩側水平速度變化不大。從長期滑移速率來看，因速度場在西部麓山帶及西部平原間有明顯變化，這樣的速度變化使得在車籠埔斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層這些南北向斷層上有較大的加權平均滑移虧損速率。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。整體來看，中部麓山帶地區一系列南北向的斷層具有較大的滑移虧損。

臺灣南部地區斷層（木屐寮-六甲、新化、後甲里、左鎮、小崗山、旗山、潮州及恆春斷層），比較模型所估算的斷層測地長期滑移速率與地質長期滑移速率

顯示兩種滑移速率差異較大的分別是左鎮斷層、旗山斷層以及恆春斷層。南部區域的速度場有明顯的逆時針旋轉，造成在左鎮斷層、旗山斷層與恆春斷層兩側的速度場方向有明顯改變，此現象可以視為左鎮斷層、旗山斷層與恆春斷層面上有較快速錯動的原因之一，然而會造成斷層兩側速度改變的除塊體的長期滑移外，也可能受潛移等其他變形影響，因而造成兩種滑移速率間較大的差異。此外因滑移虧損率為長期滑移速率乘以斷層鎖定係數，所以在長期滑移速率較快的斷層面上往往也會有較高的滑移虧損率，因此非常高的滑移虧損率，可能是因長期滑移速率被高估的影響。

臺灣東部地區斷層（米崙、嶺頂、瑞穗、奇美、玉里、池上、鹿野及利吉斷層），均顯示相對較高之加權平均滑移虧損速率。而奇美斷層因為沒有地質速率約制，所以算出的測地長期速率與滑移虧損率皆為最高。此外，鹿野及利吉斷層週遭部分測站殘差值較大，推估可能受到 2006 台東卑南地震（ML=6.0）的震後效應影響外，斷層東側測站（資料）數量過低（僅約 5 個 GPS 站）也會影響模型的估算。此外，花東縱谷中段也有部分測站殘差值較大，我們認為除了該區域過於狹長的塊體幾何（LVFD）外，縱谷斷層兩側的測站密度過低也會影響模型的解析度。

表 4-5.1：本計畫模型加權平均斷層滑移虧損率。

Table 4-5.1: Weighted average slip deficit rate in this project.

| 斷層名稱 | | BLOCKS Model<br>總變動量<br>（mm/yr） | DEFNODE Model<br>平均值滑移虧損率<br>（mm/yr） | Baseline Inversion Model<br>斷層平均滑移速率<br>（mm/yr） | 加權平均滑移虧損速率<br>（mm/yr） |
|---|---|---|---|---|---|
| 山腳斷層 | 上界 | 2.1 | 1.8 | 1.0 | 1.6 |
| | 平均 | 1.9 ± 0.2 | 0.6 ± 1.2 | 0.6 ± 0.4 | **1.0** |
| | 下界 | 1.7 | 0.0 | 0.2 | 0.6 |
| 湖口斷層 | 上界 | 1.1 | 3.5 | 0.7 | 1.8 |
| | 平均 | 1.1 ± 0.0 | 1.9 ± 1.6 | 0.4 ± 0.3 | **1.1** |
| | 下界 | 1.1 | 0.3 | 0.1 | 0.5 |
| 新竹斷層 | 上界 | 0.6 | 2.9 | 1.8 | 1.8 |
| | 平均 | 0.6 ± 0.0 | 1.3 ± 1.6 | 1.2 ± 0.6 | **1.0** |
| | 下界 | 0.6 | 0.0 | 0.6 | 0.4 |
| 新城斷層 | 上界 | 4.8 | 2.5 | 2.9 | 3.4 |
| | 平均 | 2.0 ± 2.8 | 0.9 ± 1.6 | 2.0 ± 0.9 | **1.6** |
| | 下界 | 0.0 | 0.0 | 1.1 | 0.4 |
| 獅潭斷層 | 上界 | 1.9 | 10.0 | 1.6 | 4.5 |
| | 平均 | 1.9 ± 0.0 | 5.6 ± 4.4 | 0.7 ± 0.9 | **2.7** |
| | 下界 | 1.9 | 1.2 | 0.0 | 1.0 |
| 三義斷層 | 上界 | 6.5 | 9.0 | 4.0 | 6.5 |
| | 平均 | 3.9 ± 2.6 | 5.7 ± 3.3 | 3.0 ± 1.0 | **4.2** |
| | 下界 | 1.3 | 2.4 | 2.0 | 1.9 |
| 大甲－彰化斷層（北段） | 上界 | 4.6 | 2.9 | 2.5 | 3.3 |
| | 平均 | 4.3 ± 0.3 | 1.3 ± 1.6 | 1.7 ± 0.8 | **2.4** |
| | 下界 | 4.0 | 0.0 | 0.9 | 1.6 |
| 大甲－彰化斷層（南段） | 上界 | 4.6 | 10.0 | 4.4 | 6.3 |
| | 平均 | 4.3 ± 0.3 | 4.3 ± 5.7 | 3.0 ± 1.4 | **3.9** |
| | 下界 | 4.0 | 0.0 | 1.6 | 1.9 |
| 屯子腳斷層 | 上界 | 0.7 | 3.0 | 2.1 | 1.9 |
| | 平均 | 0.7 ± 0.0 | 1.4 ± 1.6 | 1.2 ± 0.9 | **1.1** |
| | 下界 | 0.7 | 0.0 | 0.3 | 0.3 |
| 車籠埔斷層 | 上界 | 7.1 | 6.0 | 8.7 | 7.3 |
| | 平均 | 6.9 ± 0.2 | 2.4 ± 3.6 | 6.7 ± 2.0 | **5.3** |
| | 下界 | 6.7 | 0.0 | 4.7 | 3.8 |
| 大茅埔－雙冬斷層 | 上界 | 2.4 | 2.8 | 0.8 | 2.0 |
| | 平均 | 2.1 ± 0.3 | 1.2 ± 1.6 | 0.5 ± 0.3 | **1.3** |
| | 下界 | 1.8 | 0.0 | 0.2 | 0.7 |
| 九芎坑斷層 | 上界 | 5.1 | 14.5 | 13.9 | 11.2 |
| | 平均 | 4.1 ± 1.0 | 7.2 ± 4.3 | 7.6 ± 6.3 | **6.3** |
| | 下界 | 3.1 | 2.9 | 1.3 | 2.4 |
| 梅山斷層 | 上界 | 2.6 | 11.9 | 15.1 | 9.9 |
| | 平均 | 2.6 ± 0.0 | 4.5 ± 7.4 | 8.5 ± 6.6 | **5.2** |
| | 下界 | 2.6 | 0.0 | 1.9 | 1.5 |

| 斷層名稱 | | BLOCKS Model<br>總變動量<br>（mm/yr） | DEFNODE Model<br>平均值滑移虧損率<br>（mm/yr） | Baseline Inversion Model<br>斷層平均滑移速率<br>（mm/yr） | 加權平均滑移虧損速率<br>（mm/yr） |
|---|---|---|---|---|---|
| 大尖山斷層 | 上界 | 7.9 | 11.8 | 3.6 | 7.8 |
| | 平均 | 7.2 ± 0.7 | 5.5 ± 6.3 | 2.1 ± 1.5 | **4.9** |
| | 下界 | 6.5 | 0.0 | 0.6 | 2.4 |
| 木屐寮－六甲斷層 | 上界 | 6.2 | 6.5 | 5.1 | 5.9 |
| | 平均 | 6.2 ± 0.0 | 3.5 ± 3.0 | 2.8 ± 2.3 | **4.2** |
| | 下界 | 6.2 | 0.5 | 0.5 | 2.4 |
| 觸口斷層 | 上界 | 4.6 | 17.1 | 4.5 | 8.7 |
| | 平均 | 3.3 ± 1.3 | 14.8 ± 2.3 | 2.2 ± 2.3 | **6.8** |
| | 下界 | 2.0 | 12.5 | 0.0 | 4.8 |
| 新化斷層 | 上界 | 44.1 | 13.1 | 2.1 | 19.8 |
| | 平均 | 42.5 ± 1.6 | 12.9 ± 0.2 | 1.3 ± 0.8 | **18.9** |
| | 下界 | 40.9 | 12.7 | 0.5 | 18.0 |
| 後甲里斷層 | 上界 | 7.3 | 12.7 | 0.7 | 6.9 |
| | 平均 | 6.8 ± 0.5 | 10.6 ± 2.1 | 0.2 ± 0.5 | **5.9** |
| | 下界 | 6.3 | 8.5 | 0.0 | 4.9 |
| 左鎮斷層 | 上界 | 1.6 | 11.3 | 3.7 | 5.5 |
| | 平均 | 1.5 ± 0.1 | 7.8 ± 3.5 | 1.7 ± 2.0 | **3.7** |
| | 下界 | 1.4 | 4.3 | 0.0 | 1.9 |
| 小崗山斷層 | 上界 | 3.4 | 21.2 | 2.6 | 9.1 |
| | 平均 | 3.4 ± 0.0 | 11.8 ± 9.4 | 1.1 ± 1.5 | **5.4** |
| | 下界 | 3.4 | 2.4 | 0.0 | 1.9 |
| 旗山斷層 | 上界 | 1.2 | 20.5 | 3.2 | 8.3 |
| | 平均 | 1.1 ± 0.1 | 13.4 ± 7.1 | 1.9 ± 1.3 | **5.5** |
| | 下界 | 1.0 | 6.3 | 0.6 | 2.6 |
| 潮州斷層 | 上界 | 2.1 | 10.9 | 3.6 | 5.5 |
| | 平均 | 1.9 ± 0.2 | 5.7 ± 5.2 | 1.9 ± 1.7 | **3.2** |
| | 下界 | 1.7 | 0.5 | 0.2 | 0.8 |
| 恆春斷層 | 上界 | 6.2 | 28.4 | 10.3 | 15.0 |
| | 平均 | 6.2 ± 0.0 | 16.0 ± 12.4 | 8.2 ± 2.1 | **10.1** |
| | 下界 | 6.2 | 3.6 | 6.1 | 5.3 |
| 米崙斷層 | 上界 | 10.2 | 14.6 | 7.1 | 10.6 |
| | 平均 | 10.2 ± 0.0 | 5.8 ± 8.8 | 5.5 ± 1.6 | **7.2** |
| | 下界 | 10.2 | 0.0 | 3.9 | 4.7 |
| 嶺頂斷層 | 上界 | 10.8 | 23.1 | 9.4 | 14.4 |
| | 平均 | 9.8 ± 1.0 | 10.4 ± 12.7 | 5.7 ± 3.7 | **8.6** |
| | 下界 | 8.8 | 0.0 | 2.0 | 3.6 |

| 斷層名稱 | | BLOCKS Model<br>總變動量<br>（mm/yr） | DEFNODE Model<br>平均值滑移虧損率<br>（mm/yr） | Baseline Inversion Model<br>斷層平均滑移速率<br>（mm/yr） | 加權平均滑移虧損速率<br>（mm/yr） |
|---|---|---|---|---|---|
| 瑞穗斷層 | 上界 | 12.1 | 34.7 | 8.7 | 18.5 |
| | 平均 | 10.9 ± 1.2 | 19.4 ± 15.3 | 6.0 ± 2.7 | **12.1** |
| | 下界 | 9.7 | 4.1 | 3.3 | 5.7 |
| 奇美斷層 | 上界 | 10.0 | 15.1 | 23.6 | 16.2 |
| | 平均 | 9.0 ± 1.0 | 10.7 ± 4.4 | 18.2 ± 5.4 | **12.6** |
| | 下界 | 8.0 | 6.3 | 12.8 | 9.0 |
| 玉里斷層 | 上界 | 6.4 | 72.0 | 1.3 | 26.6 |
| | 平均 | 5.7 ± 0.7 | 38.7 ± 33.3 | 0.8 ± 0.5 | **15.1** |
| | 下界 | 5.0 | 5.4 | 0.3 | 3.6 |
| 池上斷層 | 上界 | 17.3 | 19.6 | 20.7 | 19.2 |
| | 平均 | 12.0 ± 5.3 | 8.1 ± 11.5 | 11.0 ± 9.7 | **10.4** |
| | 下界 | 6.7 | 0.0 | 1.3 | 2.7 |
| 鹿野斷層 | 上界 | 6.4 | 11.3 | 3.5 | 7.1 |
| | 平均 | 6.4 ± 0.0 | 4.6 ± 6.7 | 2.4 ± 1.1 | **4.5** |
| | 下界 | 6.4 | 0.0 | 1.3 | 2.6 |
| 利吉斷層 | 上界 | 9.2 | 12.0 | 10.8 | 10.7 |
| | 平均 | 8.3 ± 0.9 | 3.9 ± 8.1 | 8.3 ± 2.5 | **6.8** |
| | 下界 | 7.4 | 0.0 | 5.8 | 4.4 |
| 宜蘭北部構造 | 上界 | 3.0 | 18.2 | 2.8 | 8.0 |
| | 平均 | 3.0 ± 0.0 | 9.3 ± 8.9 | 1.5 ± 1.3 | **4.6** |
| | 下界 | 3.0 | 0.4 | 0.2 | 1.2 |
| 宜蘭南部構造 | 上界 | 5.5 | 6.0 | 2.7 | 4.7 |
| | 平均 | 5.5 ± 0.0 | 2.3 ± 3.7 | 1.8 ± 0.9 | **3.2** |
| | 下界 | 5.5 | 0.0 | 0.9 | 2.1 |

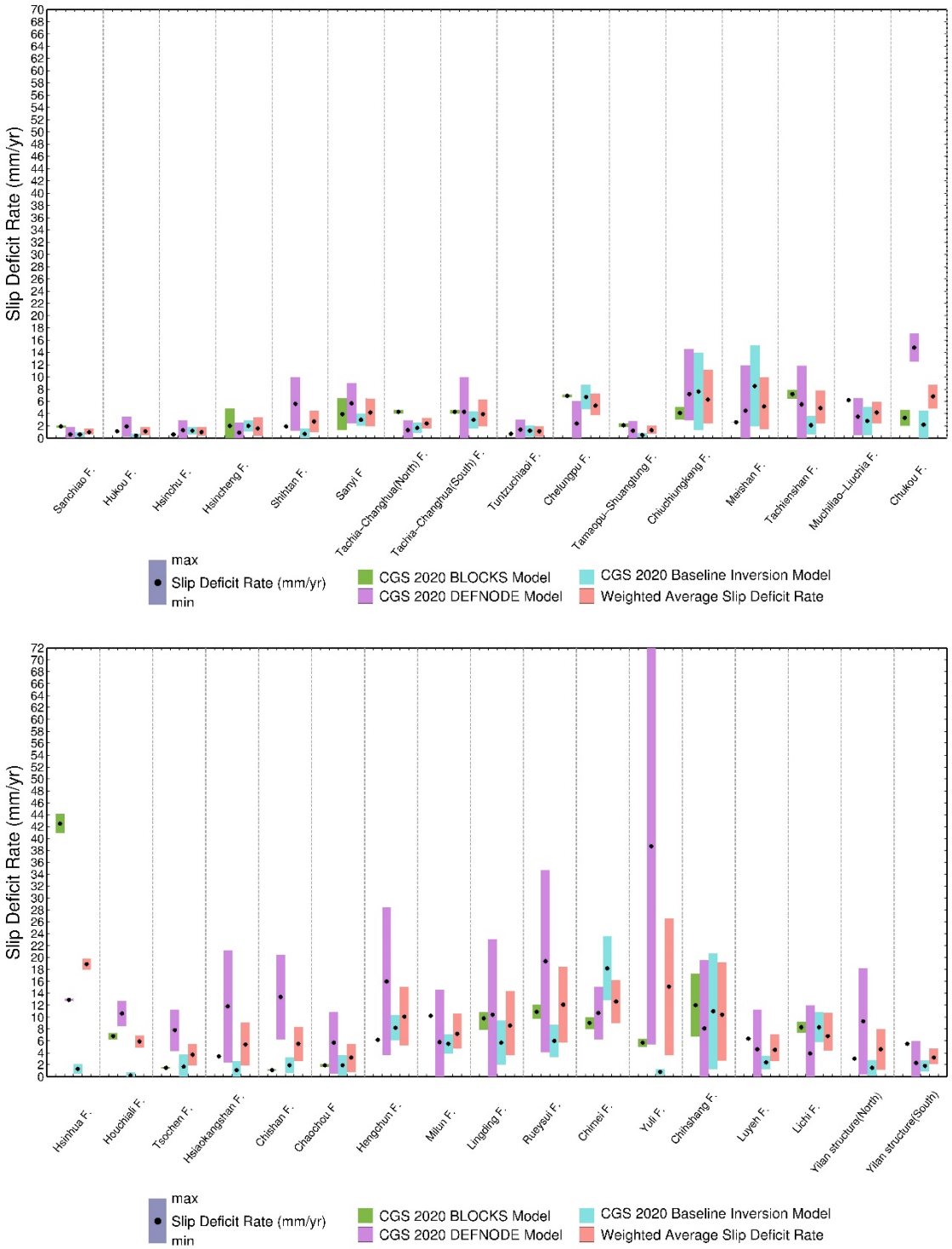



圖 4-5.1：本計畫 3 種模型之加權平均斷層滑移虧損率，對應表 4-5.1。

Figure 4-5.1: Weighted average slip deficit rate in this project.

# 第五章、106 年度-109 年度陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果

累計 2017 年 1 月至 2020 年 11 月臺灣地區共有 2 個發生陸地上規模大於 6 級的地震。另外由於 2020 年尚未陸地上規模大於 6 級的地震，所以本團隊提供 2020 年 5 月 3 日臺灣東部長濱鄉外海處芮氏規模 5.9，臺灣本島各地最大震度達 4 級之地震事件之分析成果，如表 5-1.1 詳列（圖 5-1.1）。

由表 5-1.1 可看出於 2017 至 2020 年間幾次地震都集中於臺灣東部地區，反映歐亞板塊及菲律賓海板塊不斷相互斜向擠壓的結果（Ho, 1986; Teng, 1990, 1996）。

表 5-1.1：2017 年 1 月至 2020 年 11 月規模大於 6 級之地震事件。
Table 5-1.1: From January 2017 to November 2020, earthquake events with a scale of greater than 6 magnitude.

| 臺灣時間 | 經度 | 緯度 | 規模 | 深度 | 震央位置 |
|---|---|---|---|---|---|
| 2018/02/06 23:50 | 121.69 | 24.14 | 6.0 | 10.0 公里 | 花蓮縣政府北偏東方 18.3 公里 |
| 2019/04/18 13:01 | 121.54 | 24.06 | 6.1 | 18.8 公里 | 花蓮縣政府西北方 10.6 公里 |
| 2020/05/03 11:24 | 121.61 | 23.23 | 5.9 | 40.4 公里 | 臺東縣政府東北方 70.7 公里 |

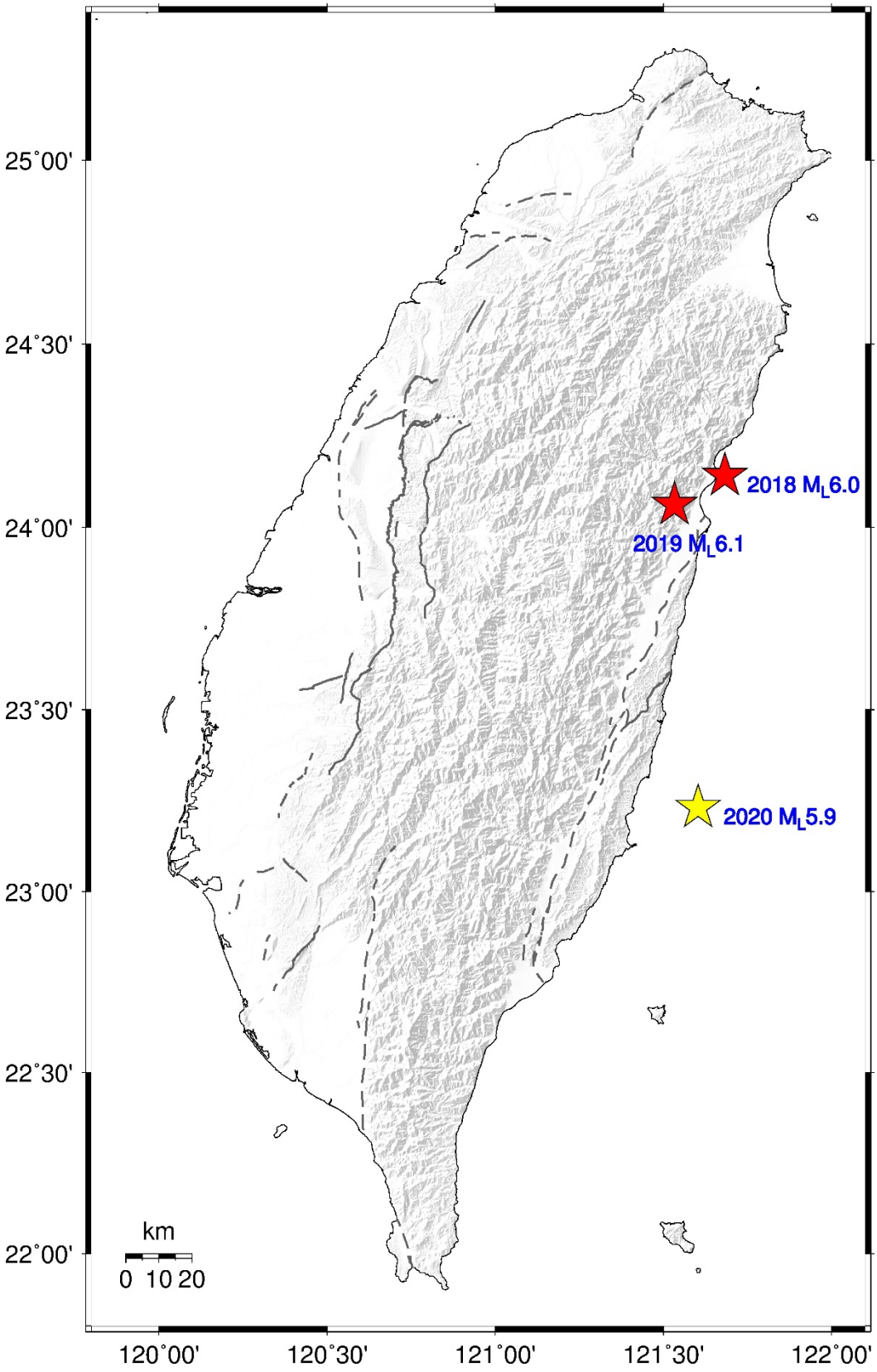



圖 5-1.1：2017 年 1 月至 2020 年 11 月主要地震事件。紅星號為規模大於 6 級之地震位置；黃色星號為規模小於 6 級之地震位置。

Figure 5-1.1: Distribution of major earthquakes from January 2017 to November 2020. Red stars are the locations of $M_L > 6$ earthquakes. Yellow star is the location of $M_L < 6$ earthquake.

# 5-1 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震簡介

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 5-1.2），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 5-1.3），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）。

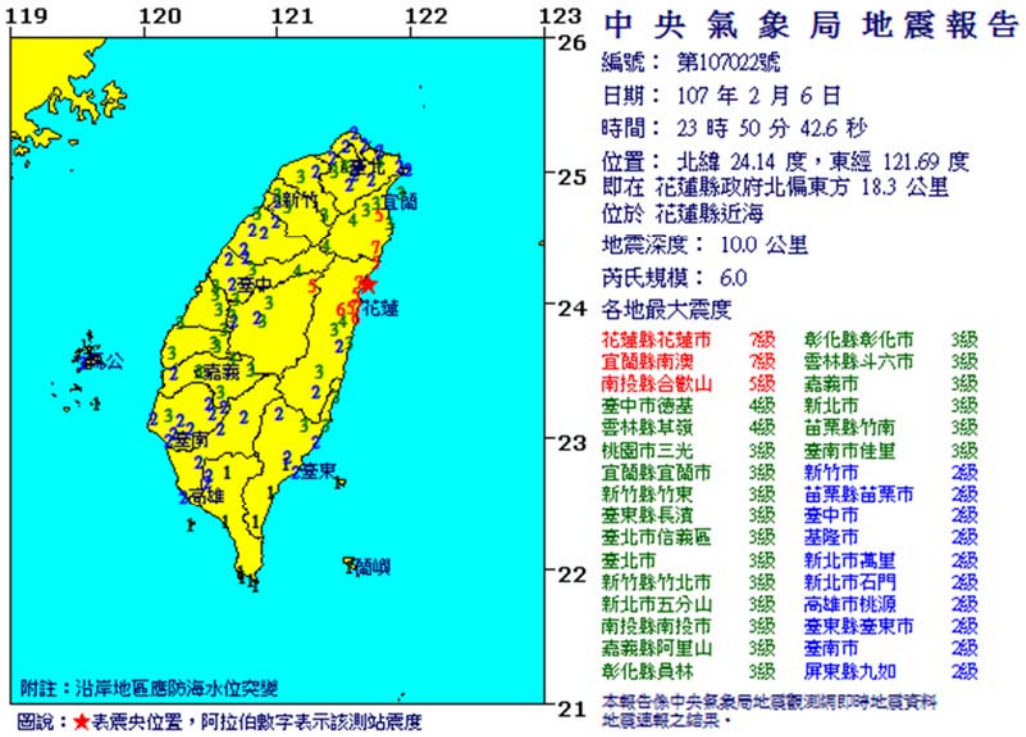



圖 5-1.2：中央氣象局 20180206 地震事件報告（https://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm）。
Figure 5-1.2: 6th Feb 2018 Earthquake event report from CWB.

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。

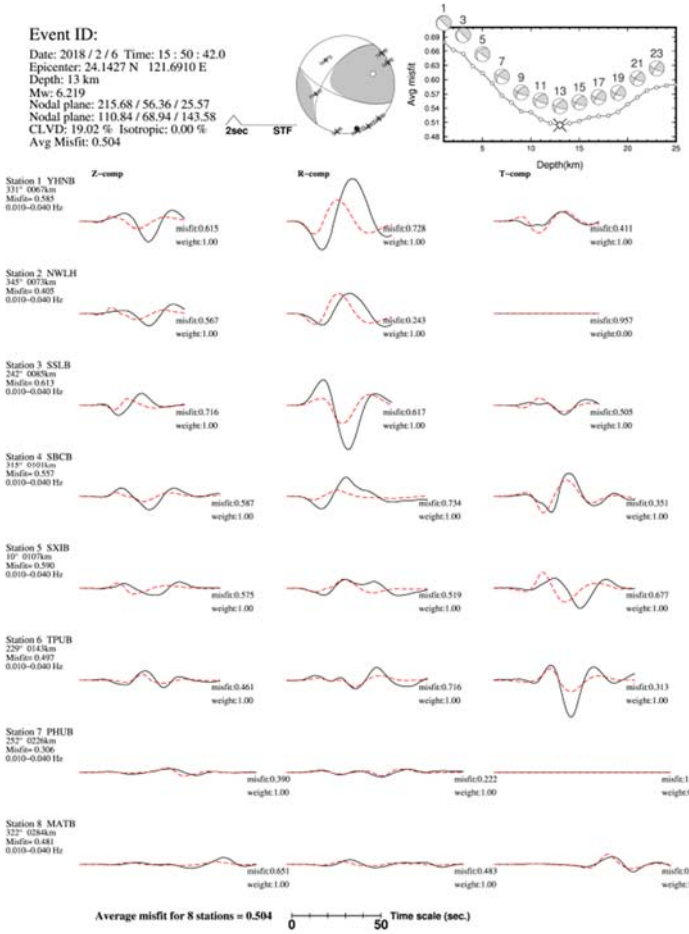



圖 5-1.3：中央氣象局 20180206 花蓮近海地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果（https://www.cwb.gov.tw/V7/earthquake/rtd_eq.htm）。
Figure 5-1.3: The focal mechanism and seismic wave inversion of 20180206 earthquake event.

## 5-1-1 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 5-1.4）。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。

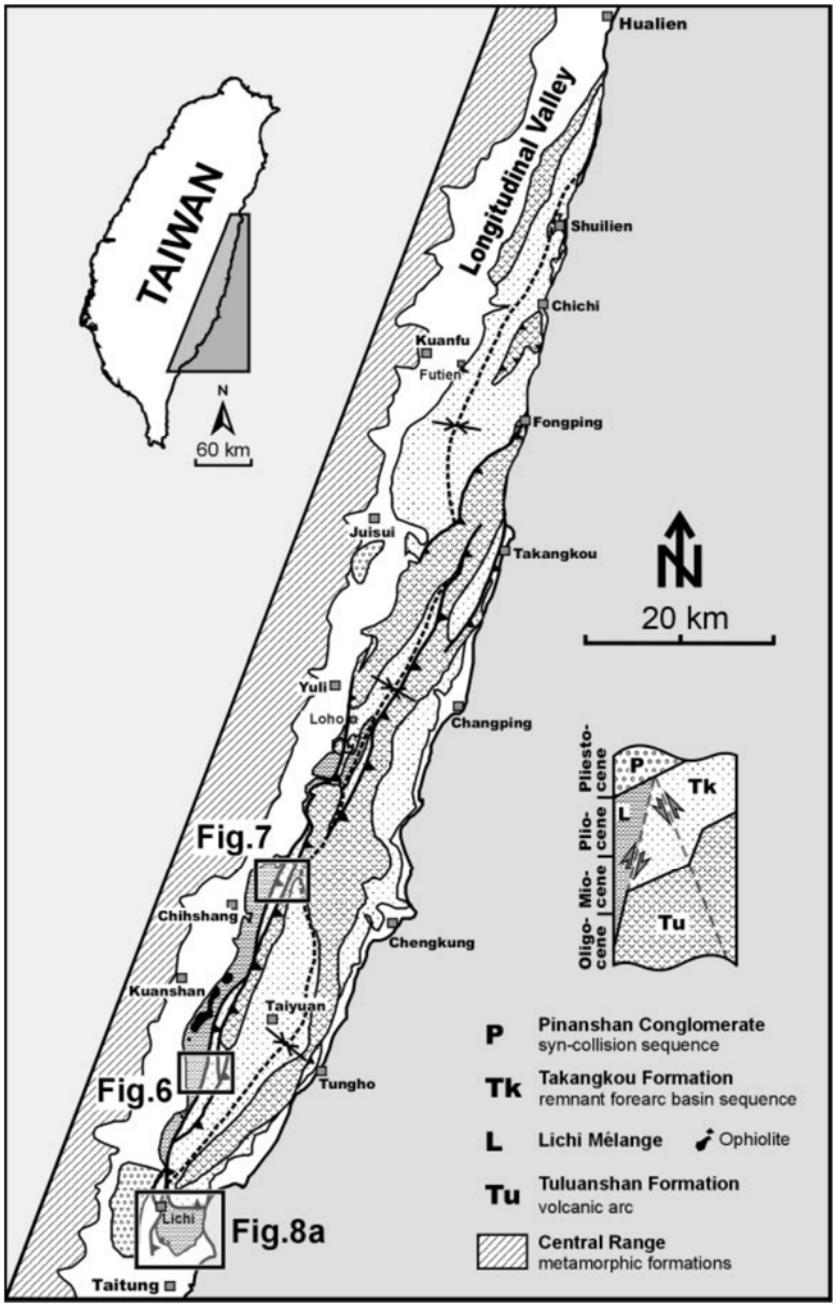



圖 5-1.4：臺灣東部地區地質圖（Chang et al., 2001）。
Figure 5-1.4: Geological map in eastern Taiwan (Chang et al., 2001).

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 5-1.5）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。

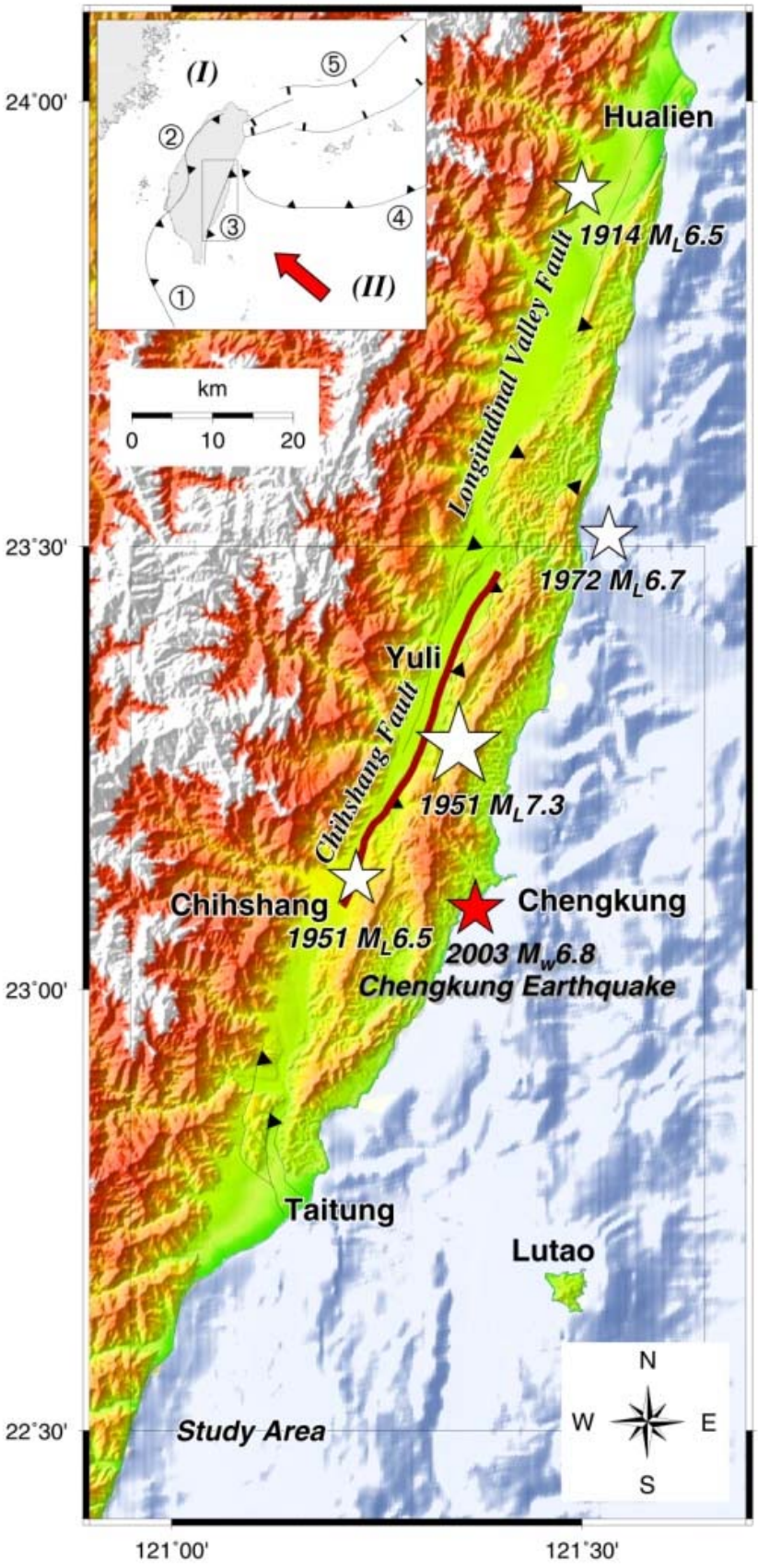



圖 5-1.5：1951 年花蓮台東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖（Ching et al., 2007）。
Figure 5-1.5: 1951 Hualine-Taitung earthquake sequence and 2003 Chengkung earthquake (Ching et al., 2007).

## 5-1-2 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。

### 5-1-2-1 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 5-1.6）。由結果可知（圖 5-1.7），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 5-1.6（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 5-1.6（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。

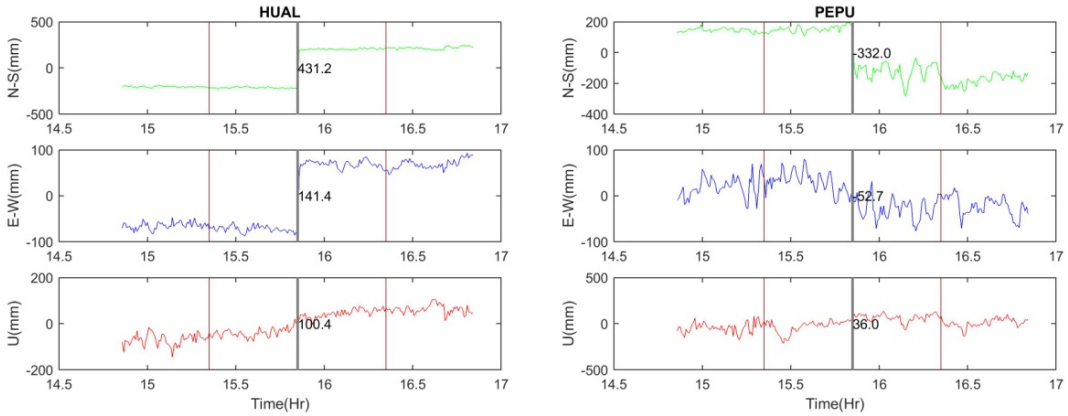



圖 5-1.6：測站 HUAL 與 PEPU 動態解算時間序列。圖中灰線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震發震時間，紅線為地震前後三十分鐘。數字為後三十分鐘平均減前三十分鐘平均之同震位移。

Figure 5-1.6: Kinematic solution time series of HUAL and PEPU stations. The gray line in the figure is the time of the Hualien earthquake on February 6, 2018, and the red line is 30 minutes before and after the earthquake. The figure is the average co-seismic displacement of the last 30 minutes minus the average of the first 30 minutes.

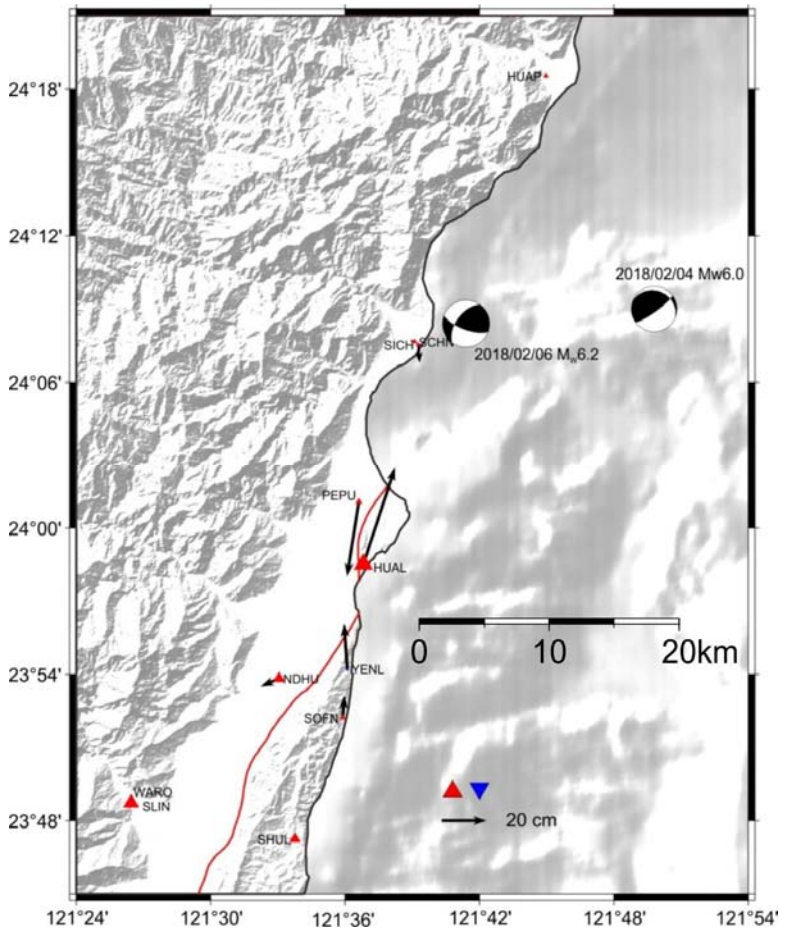



圖 5-1.7：花蓮地震 GPS 同震位移，地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。紅色三角形代表抬升，藍色三角形代表下陷。

Figure 5-1.7: GPS coseismic displacements of earthquake in Hualien county. Focal mechanism solution is from the CWB. Red triangles represent land uplift; blue triangles represent land subsidence.

為求得較穩定之全臺灣同震位移，圖 5-1.8 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 或垂直向位移超過 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 34.4 mm，下盤側的東華大學（NDHU）則呈現抬升 32.6 mm 的同震變形。

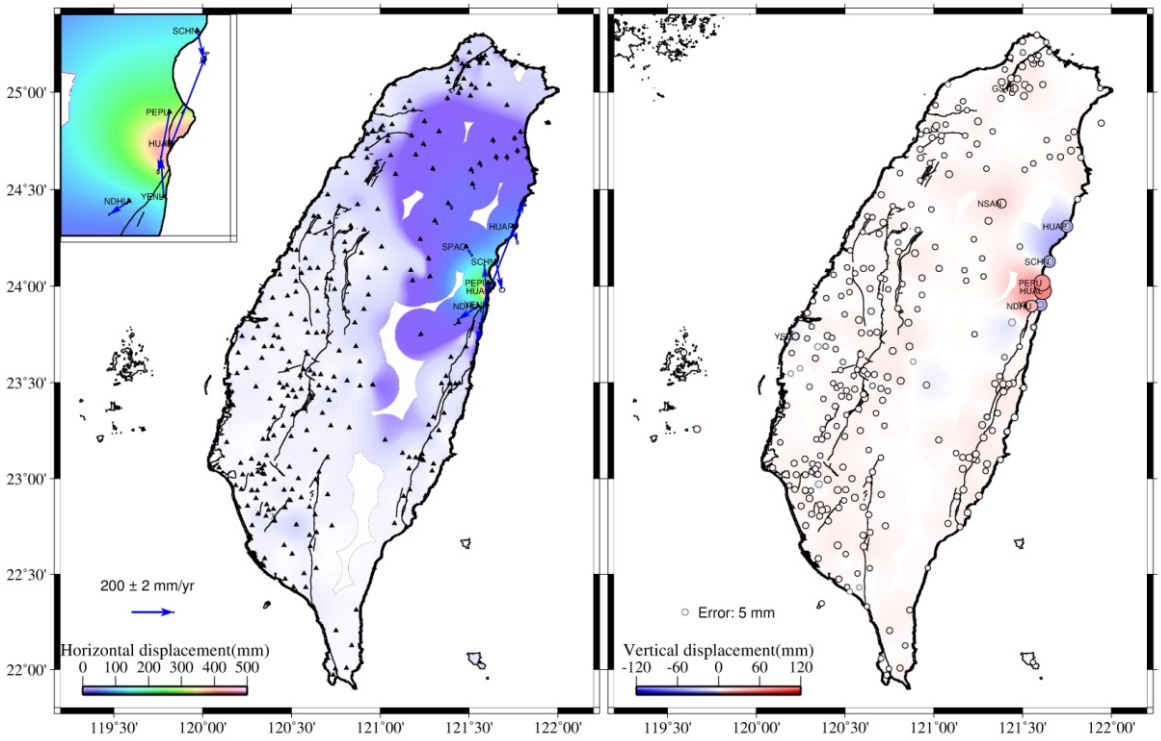



圖 5-1.8：花蓮地震 GPS 每日解（後五天平均坐標減前五天平均坐標）同震位移，站名顯示為水平方向上位移超過 49 mm 或高程向位移超過 10 mm。

Figure 5-1.8: The GPS stations coordinate time coseismic displacement of earthquake in Hualien county. Station names are shown when the horizontal displacement exceeds 49 mm or the vertical displacement exceeds 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 5-1.9 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。

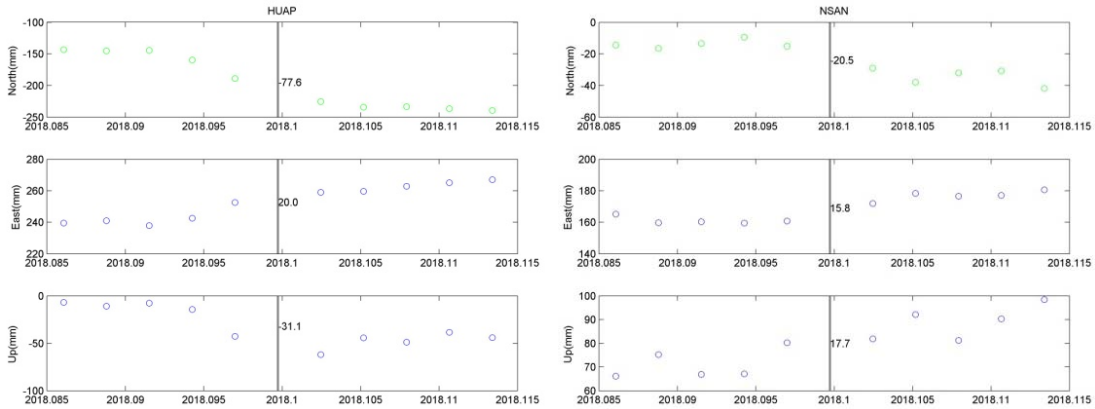



圖 5-1.9：測站 HUAP 與 NSAN 每日解時間序列。圖中灰線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震發震日期，數字為後五日平均減前五日平均之同震位移。

Figure 5-1.9: Coordinate time series of HUAP and NSAN stations. Gray lines represent the original time of event. The numbers represent coseismic displacements calculated by average coordinate differences between four-day after and five-day before the earthquake.

## 5-1-2-2 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 5-

1.10、5-1.11）。

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

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 5-1.12 同震成果比較圖及圖 5-1.13 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 5-1.14），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。

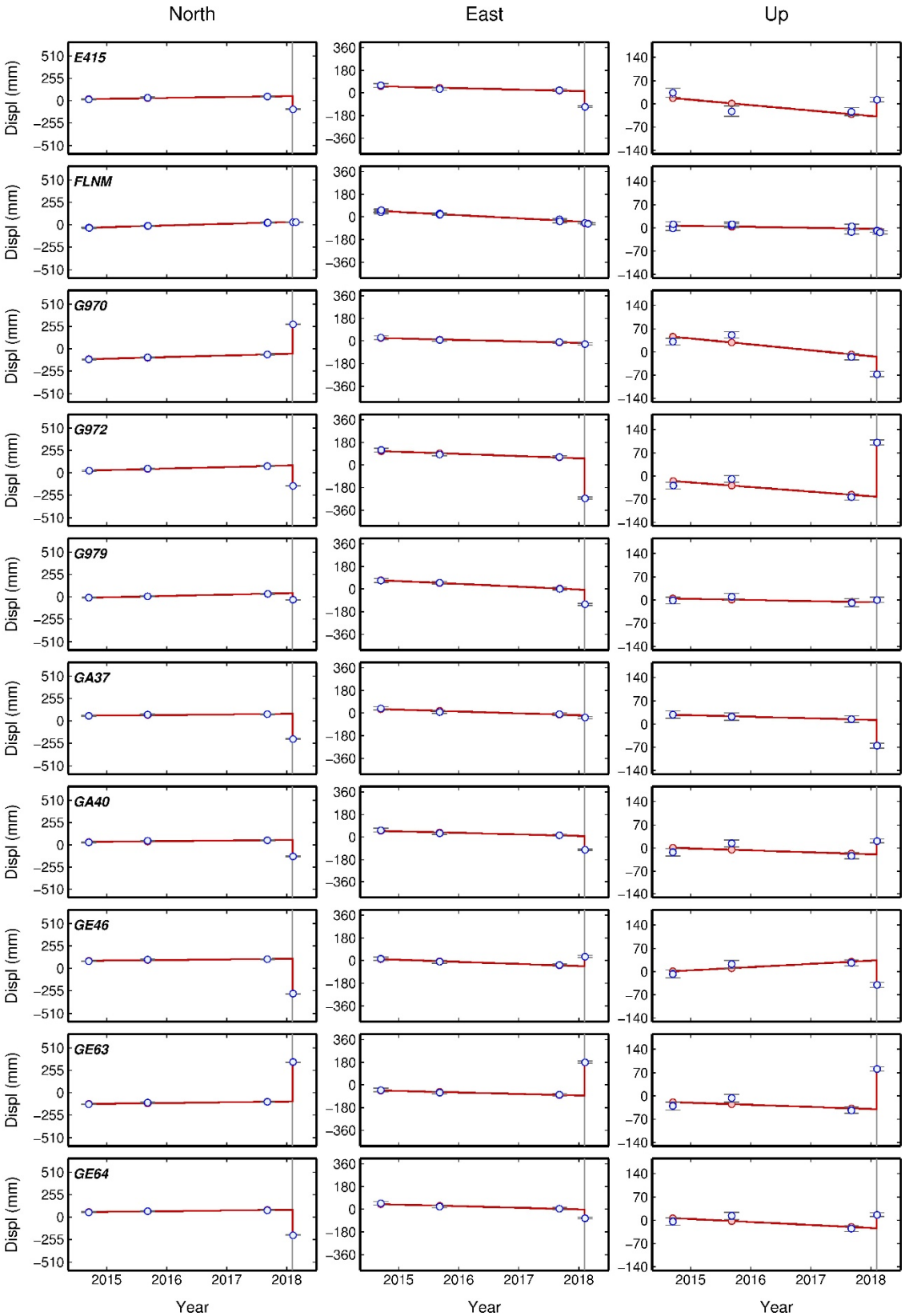



圖 5-1.10：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列。藍色圓圈為各方向上相對平均值之坐標分量，紅線為坐標時間序列擬合線，灰色垂直線為 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震發生時間，各欄左上文字為 GPS 移動站點號。

Figure 5-1.10: Coordinate time series of campaign-mode GPS stations in Hualien. The blue circle is the coordinate component relative to the average. Red lines are the coordinate time series fitting lines. Gray vertical line is the epoch of the Hualien offshore earthquake on February 6, 2018.

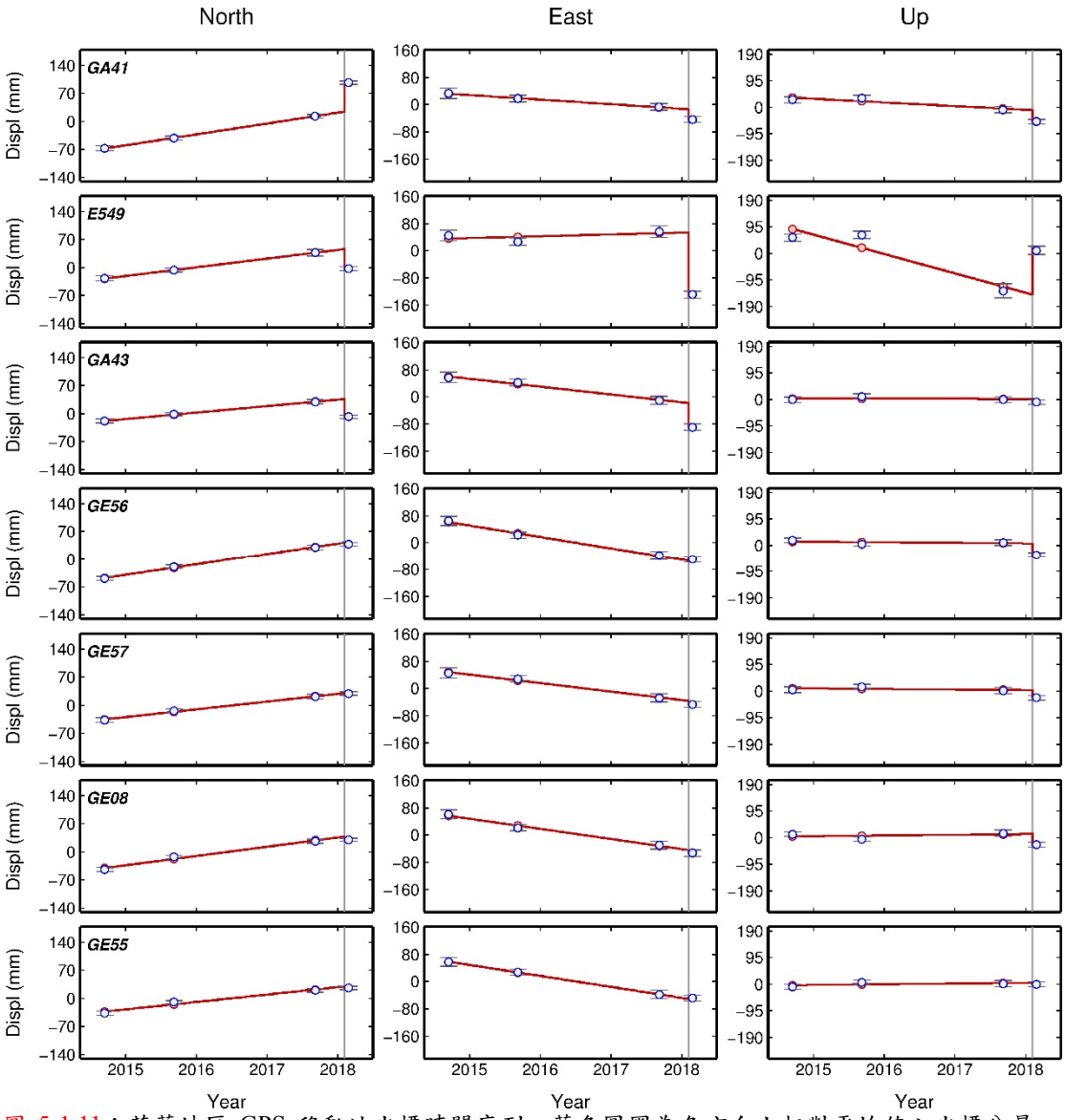



圖 5-1.11：花蓮地區 GPS 移動站坐標時間序列。藍色圓圈為各方向上相對平均值之坐標分量，紅線為坐標時間序列擬合線，灰色垂直線為 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震發生時間，各欄左上文字為 GPS 移動站點號。

Figure 5-1.11: Coordinate time series of campaign-mode GPS stations in Hualien. The blue circle is the coordinate component relative to the average. Red lines are the coordinate time series fitting lines. Gray vertical line is the epoch of the Hualien offshore earthquake on February 6, 2018.

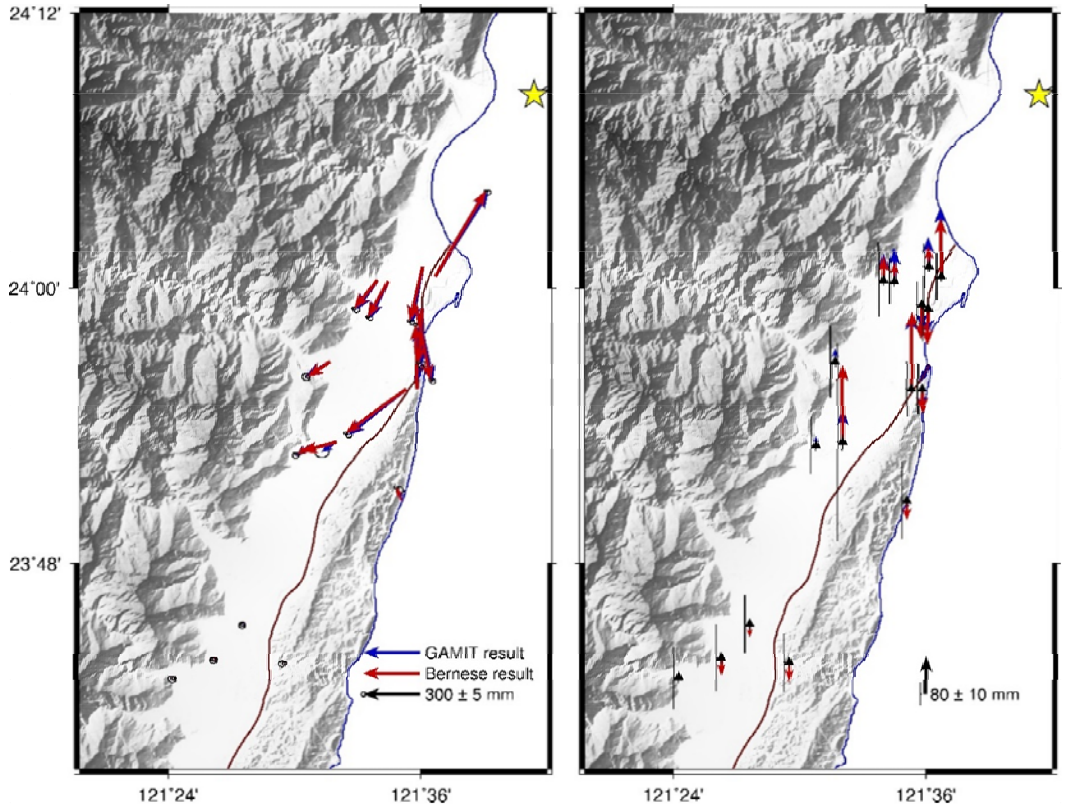



圖 5-1.12：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之同震位移場解算成果比較。
Figure 5-1.12: Coseismic displacement field of the Hualien offshore earthquake on February 6, 2018.

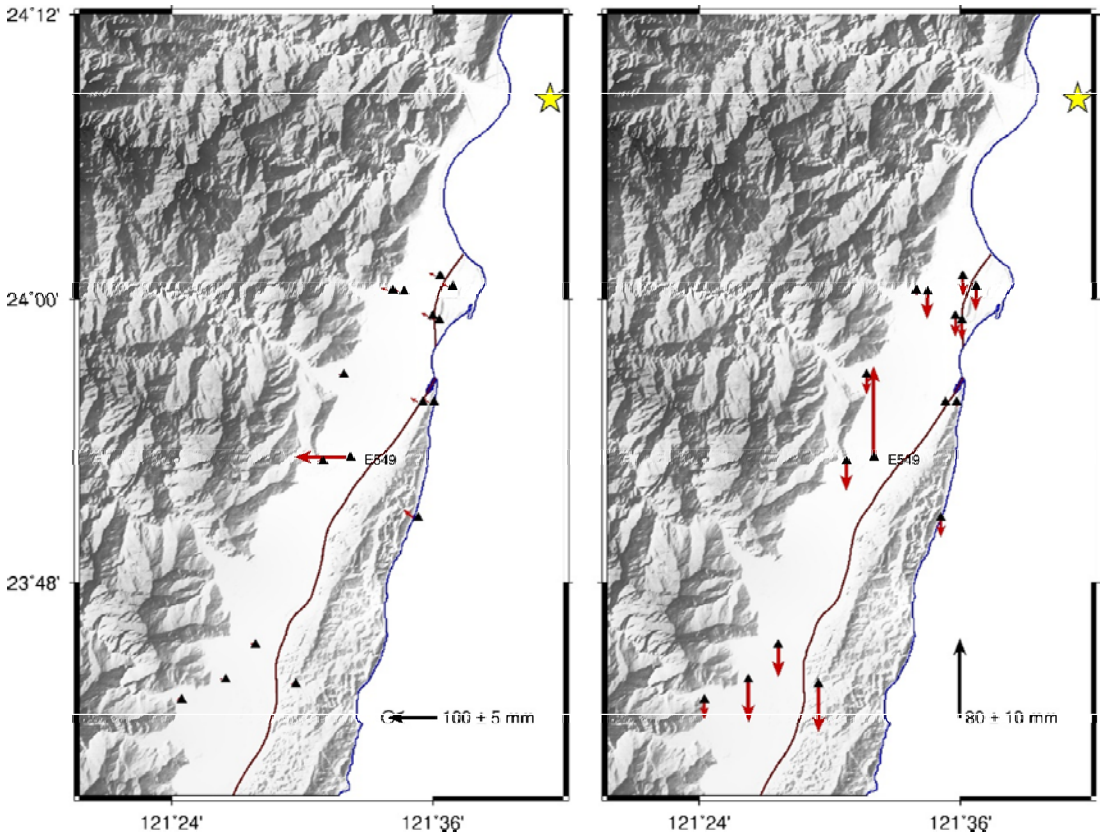



圖 5-1.13：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之 GAMIT 及 Bernese 同震位移場解算成果殘差比較。
Figure 5-1.13: Residual coseismic displacements between displacements from GAMIT and Bernese.



圖 5-1.14：GPS 移動站 E549 現場環境圖。
Figure 5-1.14: E549 GPS campaign-mode station site and its environment.

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 5-1.15-圖 5-1.16；表 5-1.2），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 5-1.15-圖 5-1.16；表 5-1.2），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。

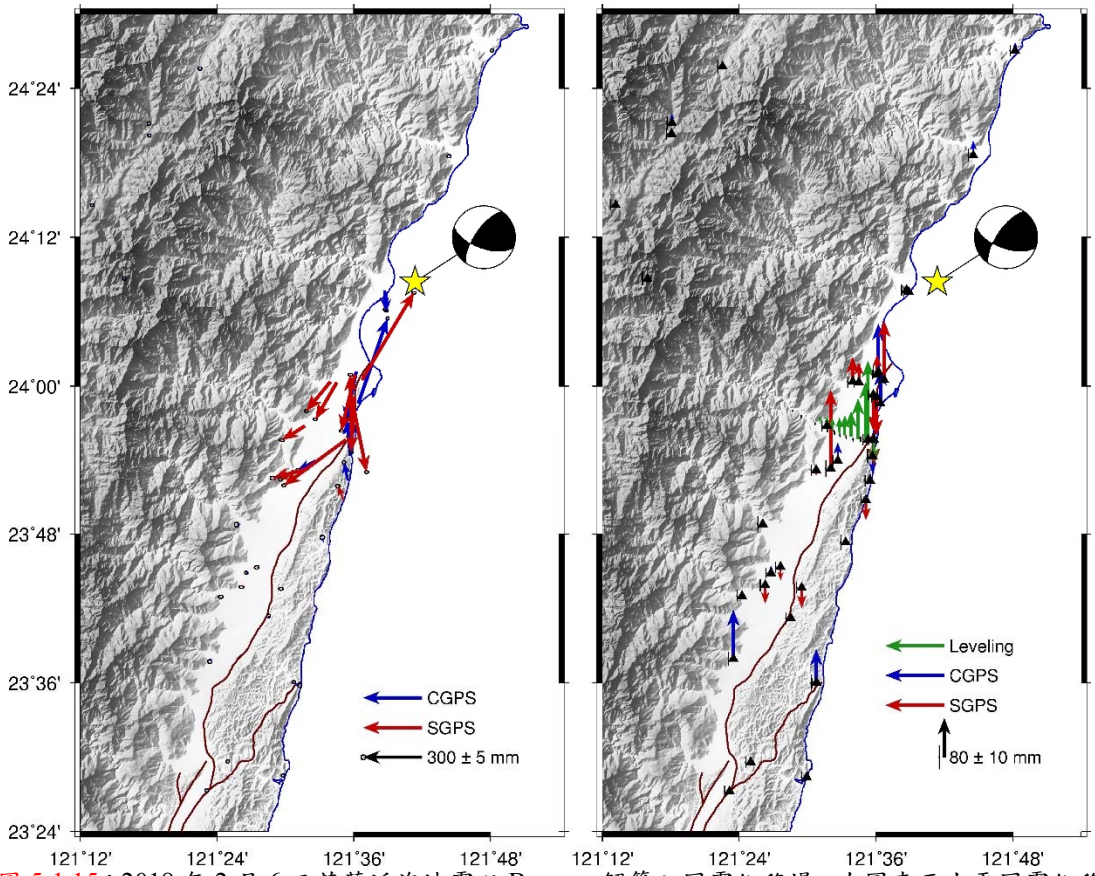



圖 5-1.15：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 解算之同震位移場，左圖表示水平同震位移場，右圖表示垂直同震位移場。

Figure 5-1.15: The coseismic displacement field calculated by Bernese of the 2018 Hualien offshore earthquake. Left figure shows the coseismic horizontal displacement field while right figure shows the coseismic vertical displacement field.

表 5-1.2：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之 GPS 移動站同震位移值。
Table 5-1.2: Coseismic displacements of the 2018 Hualien offshore earthquake from campaign-mode GPS stations.

| 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。

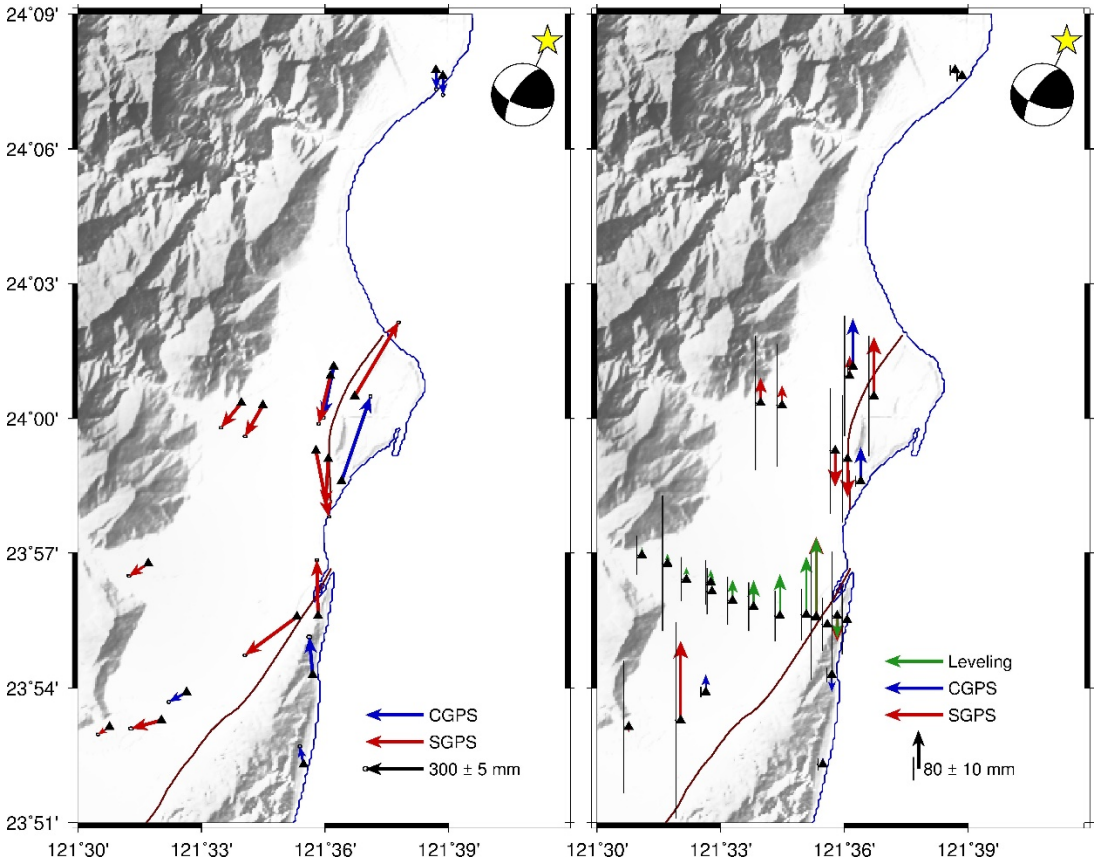



圖 5-1.16：花 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震以 Bernese 之同震位移場（花蓮市地區放大圖）。左圖表示水平同震位移場，右圖表示垂直同震位移場。

Figure 5-1.16: The coseismic displacement field of the 2018 Hualien offshore earthquake (enlarged map of Hualien City area). Left figure shows the coseismic horizontal displacement field. Right figure shows the coseismic vertical displacement field.

## 5-1-2-3 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 5-1.17）。

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

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。

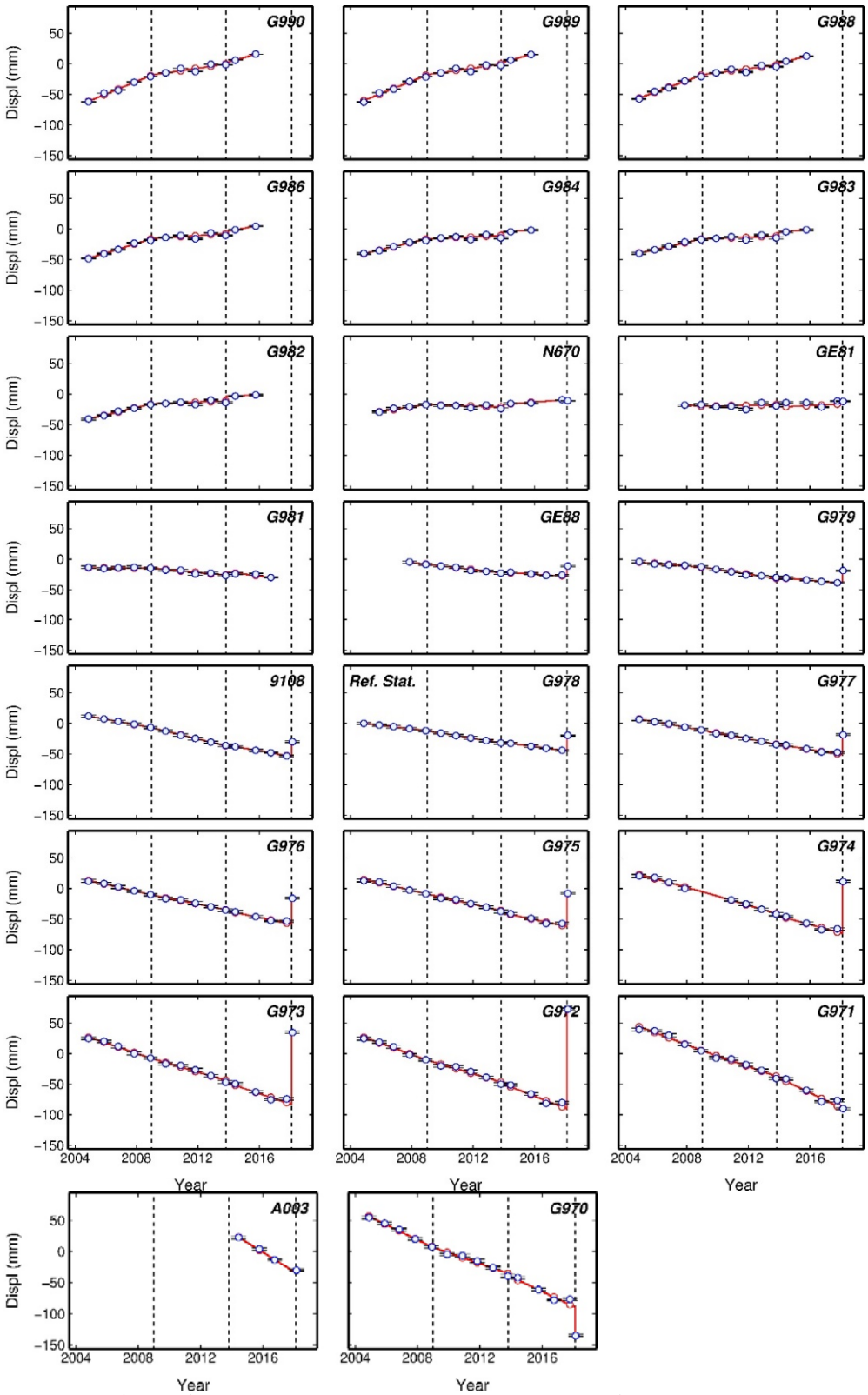



圖 5-1.17：花蓮地區嶺頂-龍澗精密水準測線之坐標時間序列。藍色圓圈為相對平均值之坐標分量，紅線為坐標時間序列擬合線，垂直虛線為各地震之發生時間，最右邊之虛線則為 2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震發生時間，各小圖右上之文字為水準點點號。

Figure 5-1.17: The coordinate time series of the Lingding-Longjian precision leveling line in Hualien area. The blue circle is the coordinate component relative to the average. Red line is the coordinate time series fitting line. Vertical dashed lines are the epoches of earthquakes.

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 5-1.15 圖 5-1.16；表 5-1.3），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 5-1.3：2018 年 2 月 6 日花蓮近海地震之精密水準測線同震位移值。
Table 5-1.3: Coseismic displacements of the 2018 Hualien offshore earthquake from precision leveling.

| 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。

## 5-1-2-4 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 5-1.18 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。

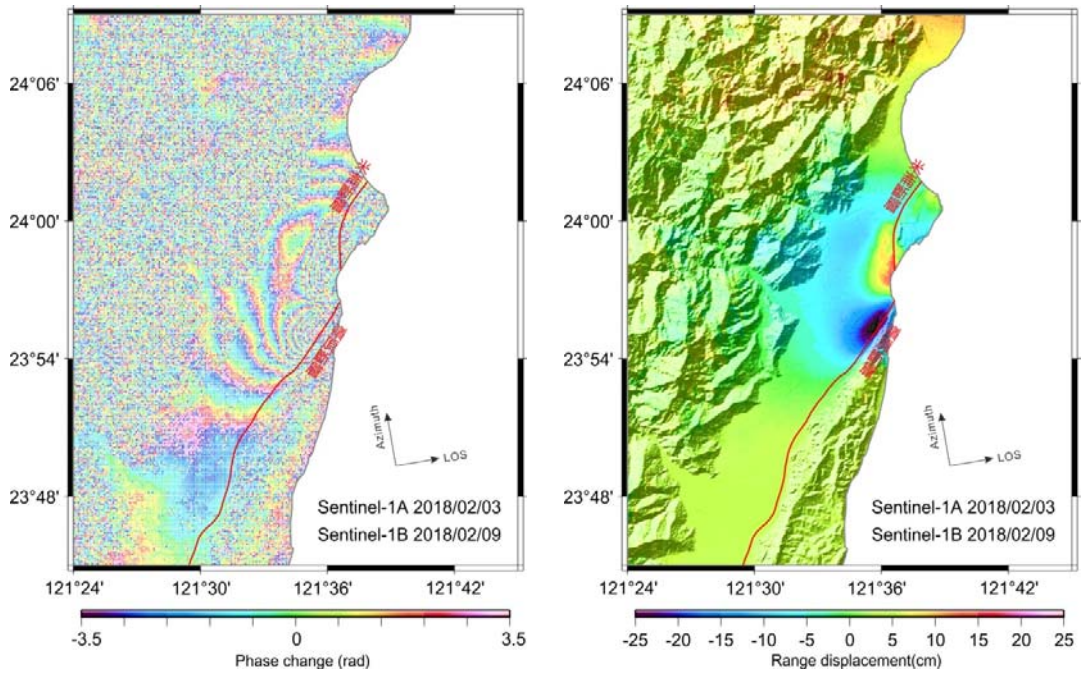



圖 5-1.18：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。

Figure 5-1.18: The coseismic LOS displacements from Sentinel-1of the Hualien offshore earthquake.

## 5-1-2-5 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 5-1.19）。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。

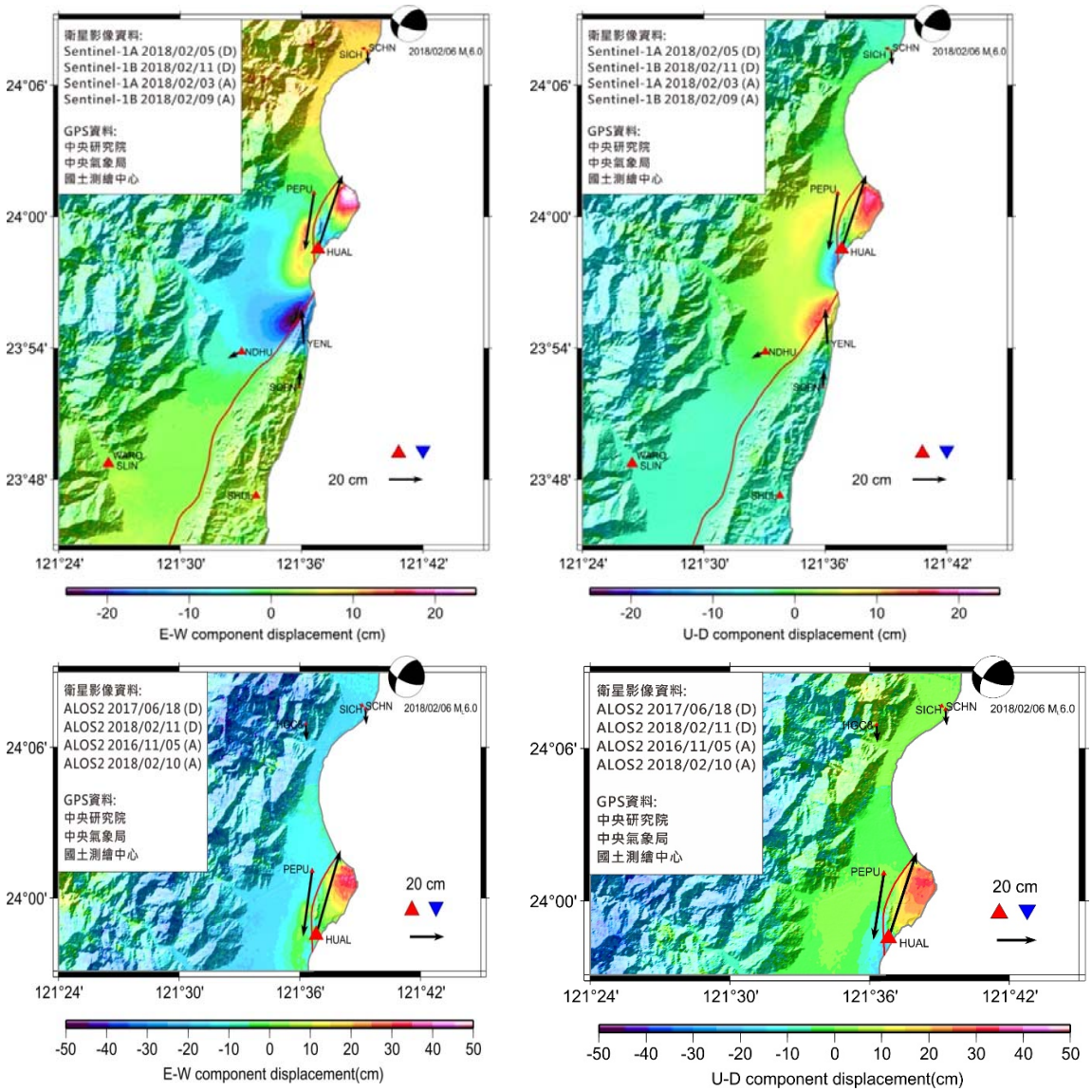



圖 5-1.19：Sentinel-1 與 ALOS-2 東西方向與垂直方向花蓮地震同震地表變形場。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續 GPS 測站同震變形水平方向位移。三角形為連續 GPS 測站同震變形垂直方向位移。地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。

Figure 5-1.19: Sentinel-1 and ALOS-2 coseismic displacement fields in east and vertical components of the Hualien offshore earthquake. The warm colors represent the eastward and uplift displacements; the cool colors represent the westward and subsidence displacements. The arrows are the GPS horizontal displacements. The triangles are the GPS vertical displacement. The focal mechanism solution comes from the Central Weather Bureau.

## 5-1-3 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 5-1.3），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。

## 5-1-3-1 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（$\lambda$）等於剪切模量（$\mu$）之彈性體。沿著斷層元素（fault patch/fault element）的斷層滑移量 $\Delta u_j$（$\xi_1$, $\xi_2$, $\xi_3$）會使均質均向的彈性體表面產生位移場 $\Delta u_i$（$x_1$, $x_2$, $x_3$），其關係如下式所列。其中，$\delta_{jk}$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。

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

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 5-1.20），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 5-1.16）、精密水準同震垂直位移場（圖 5-1.16）與雷達衛星影像（圖 5-1.19）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。

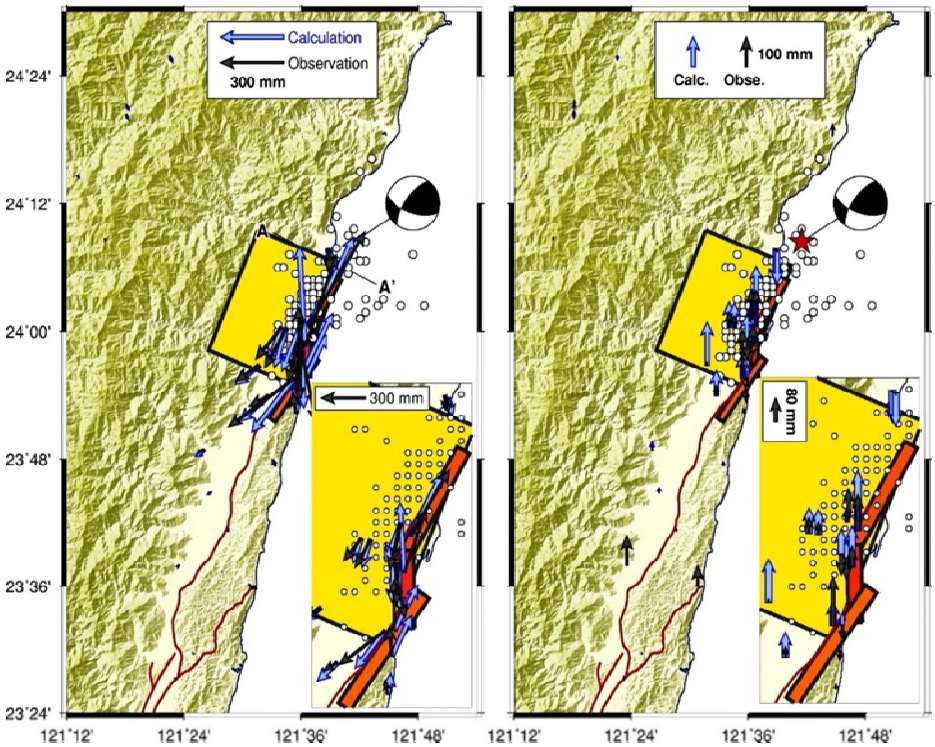



圖 5-1.20：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型擬合結果。左圖為 GPS 水平位移場擬合結果；右圖為 GPS 垂直位移場擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，舉行顏色反映滑移量的大小；紅色星號為主震震央位置；白色圓圈為餘震分布。

Figure 5-1.20: Uniform-slip fault model of Hualien earthquake. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slips. Red star is the epicenter of the main shock and the white circles are aftershocks.

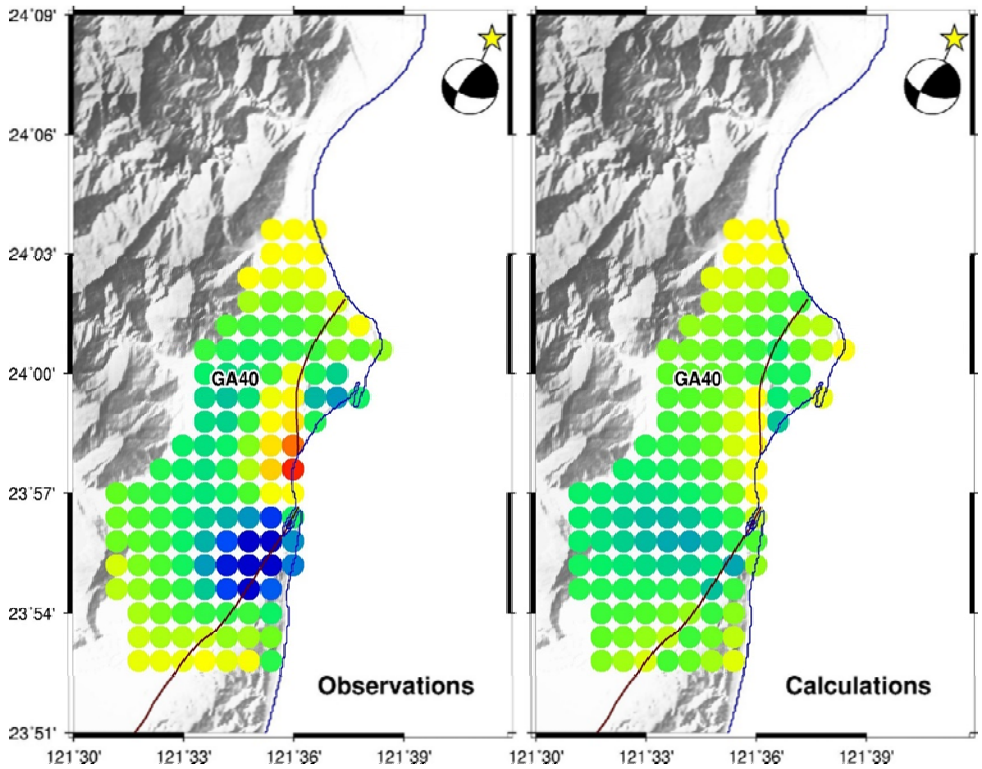



圖 5-1.21：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型 DInSAR 擬合結果。左圖為 DInSAR 同震位移場觀測值；右圖為 DInSAR 同震位移場計算值。

Figure 5-1.21: Comparison of observed and calculated DInSAR LOS displacements of the Hualien offshore earthquake using uniform-slip model. Left figure shows the observed coseismic displacement field; right figure shows the calculated coseismic displacement field.

## 5-1-3-2 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 5-1.21），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 5-1.20）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 度的左移盲斷層，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 度的左移斷層，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 5-1.22）。

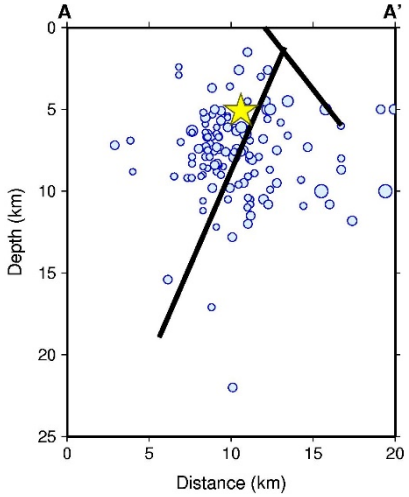



圖 5-1.22：花蓮近海地震單一滑移量斷層模型與主震餘震序列比較結果。剖面位置標註於圖 5-1.20。黑色線為斷層投影位置，黃色星號為主震震源位置，藍色圓圈為餘震分布。

Figure 5-1.22: Comparison of the evaluated fault planes of the Hualien offshore earthquake and the main shock and aftershock distribution. The position of the section is marked in Figure 5-1.20. The black line is the fault planes. The yellow star is the main shock. The blue circles are the distribution of aftershocks.

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 5-1.23），同時反演 GPS 同震位移場、Sentinel-1 升軌（圖 5-1.24）與降軌（圖 5-1.25）之同震位移場，估算各斷層之斷層滑移分布。其最佳模型（圖 5-1.23）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 $7.35 \times 10^{25}$ dyne-cm，相當於 $M_w$ 6.54；淺部向東傾斜米崙斷層之測地矩為 $9.41 \times 10^{24}$ dyne-cm，相當於 $M_w$ 5.95。

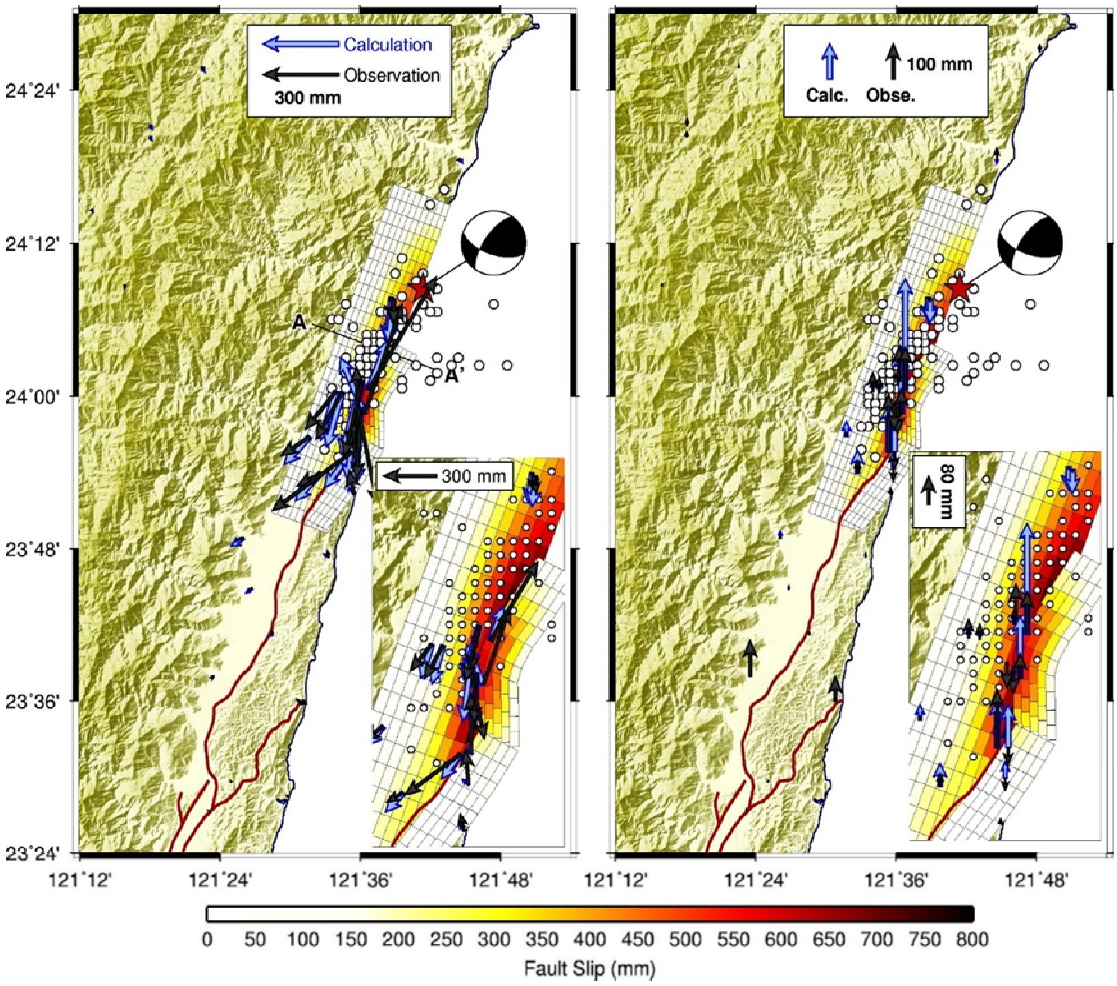



圖 5-1.23：花蓮近海地震多滑移量斷層模型擬合結果。左圖為 GPS 水平位移場擬合結果；右圖為 GPS 垂直位移場擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，舉行顏色反映滑移量的大小；紅色星號為主震震央位置；白色圓圈為餘震分布。

Figure5-1.23: Coseismic source model of Hualien earthquake. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slips. Red star is the epicenter of the main shock and the white circles are aftershocks.

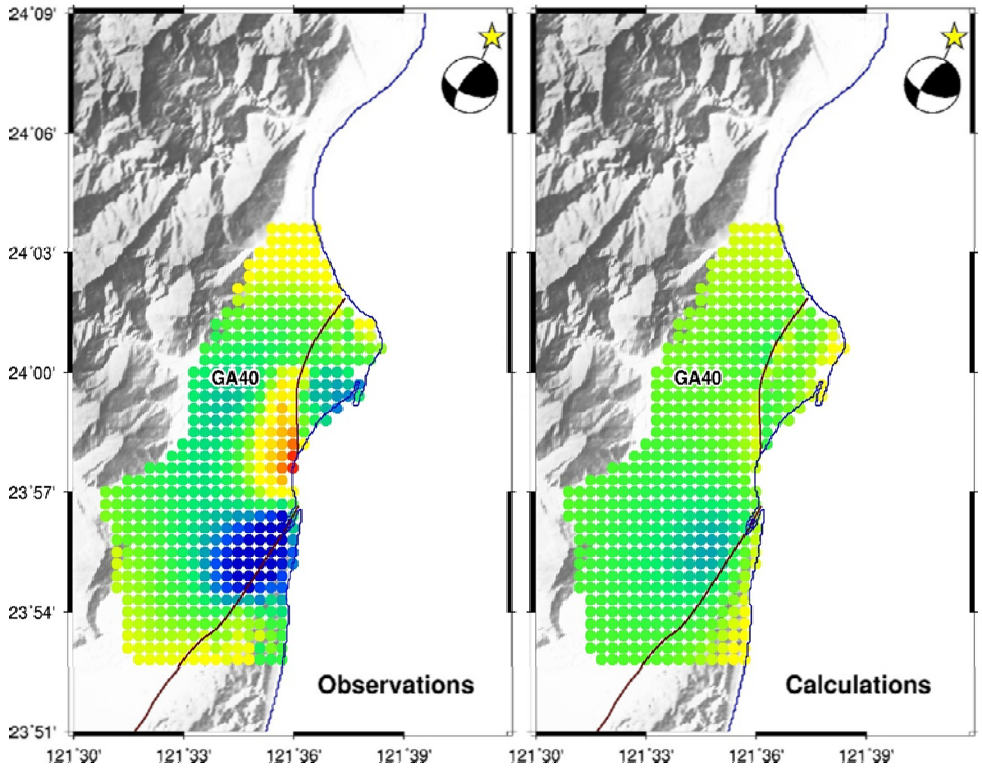



圖 5-1.24：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 升軌擬合結果。左圖為 DInSAR 同震位移場觀測值；右圖為 DInSAR 同震位移場計算值。

Figure 5-1.24: Comparison of observed and calculated ascending DInSAR LOS displacements of the Hualien offshore earthquake using distributed-slip fault model. Left figure shows the observed coseismic displacement field; right figure shows the calculated coseismic displacement field.

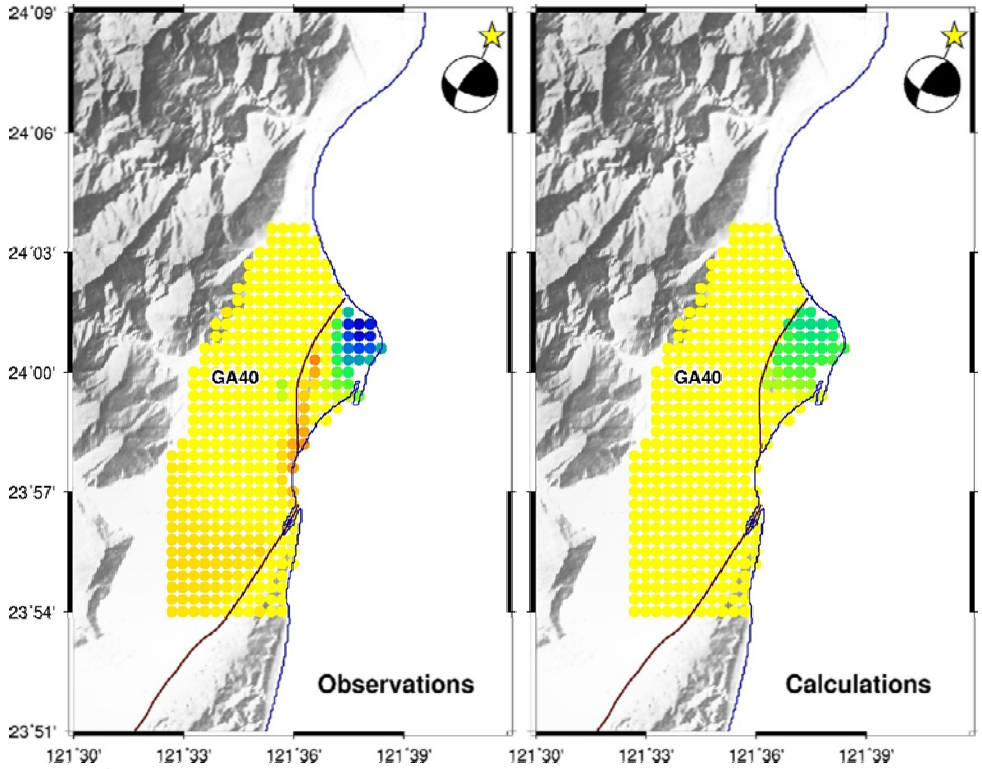



圖 5-1.25：花蓮近海地震多滑移量斷層模型 DInSAR 降軌擬合結果。左圖為 DInSAR 同震位移場觀測值；右圖為 DInSAR 同震位移場計算值。

Figure 5-1.25: Comparison of observed and calculated descending DInSAR LOS displacements of the Hualien offshore earthquake using distributed-slip fault model. Left figure shows the observed coseismic displacement field; right figure shows the calculated coseismic displacement field.

# 5-2 2019 年 4 月 18 日花蓮近海地震簡介

在 2018 年 2 月 6 日於臺灣東部花蓮近海於發生了規模 6.0（$M_L$ 6.0；$M_w$ 6.2）的地震後，在今年（2019 年）4 月 18 日於 2018 年花蓮地震震央以西的位置又發生另一個規模 6.1（$M_L$ 6.1；$M_w$ 6.2）的地震（圖 5-2.1），震央位於中央山脈一側（24.0543°N, 121.5592°E），震源深度約 20 km。此次地震雖然並無像去年之地震一樣產生地表破裂，然而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 5-2.2），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；一為東北–西南走向向東南傾之斷層面。然而，與 2018 年花蓮地震震源機制進行比對，本次規模 6.1 的地震應該是發生在北北東–南南西走向向西傾之斷層面。本報告首先整合 GPS 觀測結果與 DInSAR 的計算成果，解析本次 2019 年花蓮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。

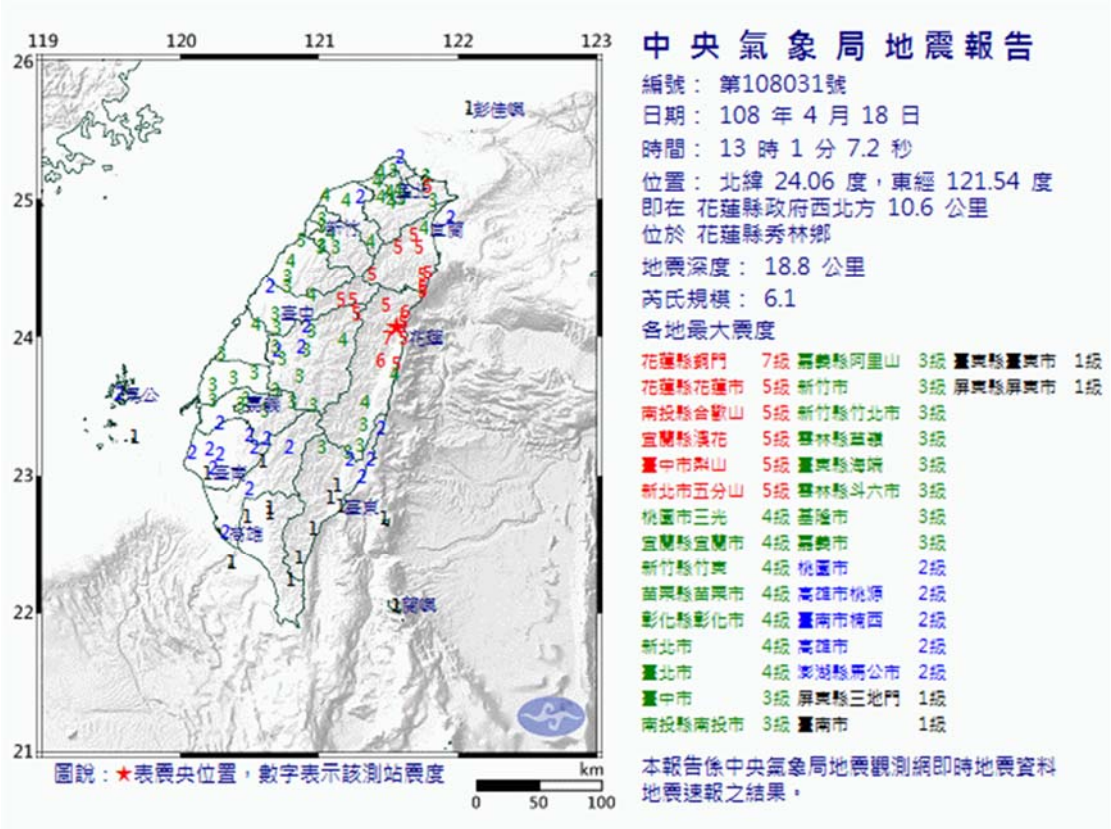



圖 5-2.1：中央氣象局 20190418 地震事件報告（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/imgs/2019041813010761031）。
Figure 5-2.1: 18th April 2019 Earthquake event report from CWB.

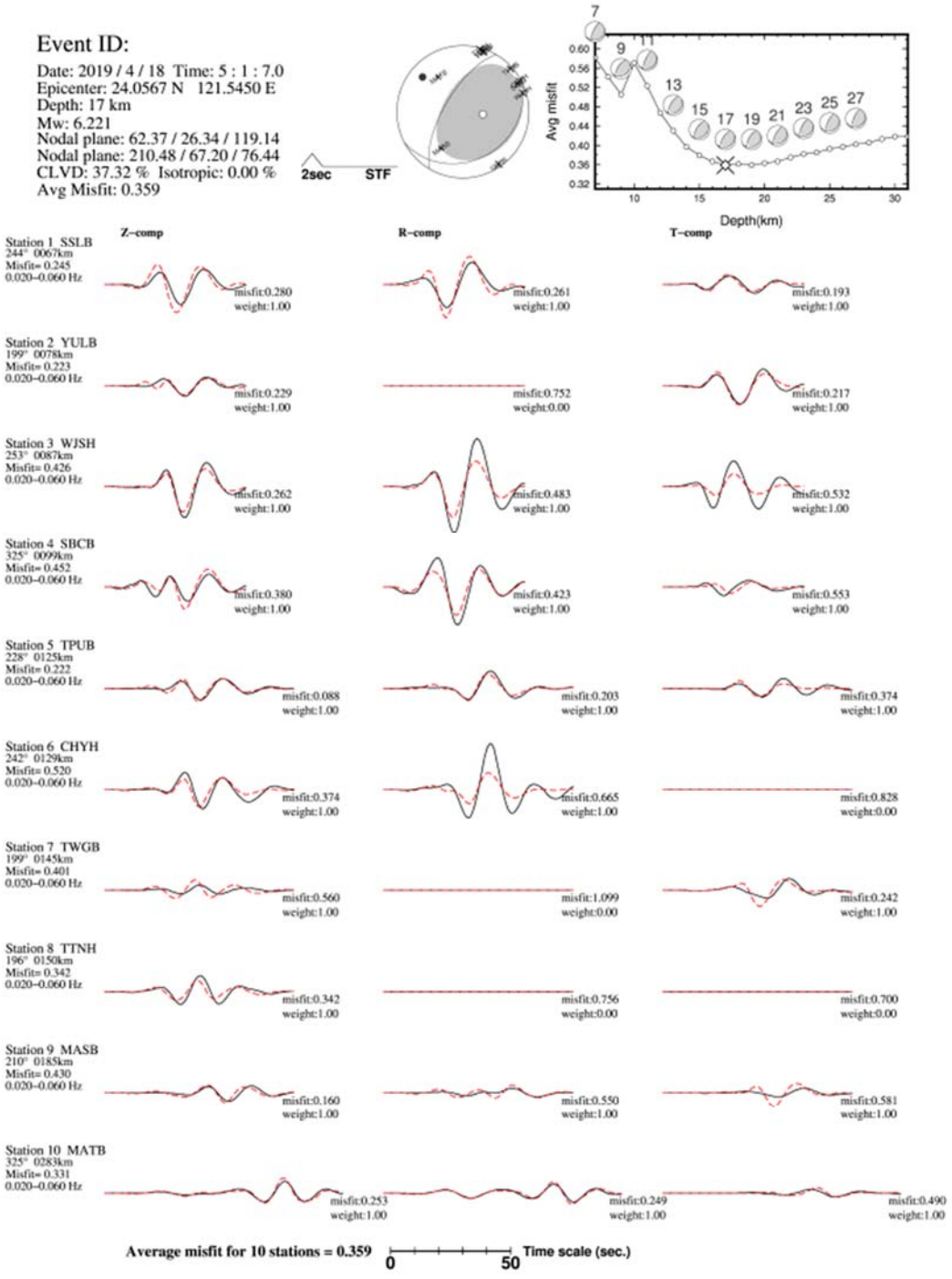



圖 5-2.2：中央氣象局 20190418 花蓮地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/cmt/20190418130107610 31）。

Figure 5-2.2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 2019 Hualien earthquake event

## 5-2-1 2019.04.18 花蓮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 5-1.4）。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。

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 5-1.5）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。

## 5-2-2 2019.04.18 花蓮近海地震同震地表位移場

中央地質調查所於 2019 年 4 月 18 日花蓮發生之規模 6.1 地震後，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。最後還蒐集雷達衛星影像進行同震地表位移場解算。

## 5-2-2-1 GPS 連續站同震位移場

本研究團隊於地震發生後，即利用布設於震央附近之全球衛星定位系統連續追蹤站進行同震位移之解算，此位移場為利用震前五天與震後四天的平均定位坐標相減所得（圖 5-2.3）。由結果可知（圖 5-2.4），GPS 連續追蹤站所測得的最大同震位移，為震央南邊屬於中央氣象局的銅門測站，(TUNM，東經 121.4936 度，北緯 23.9652 度)。同震抬升為 3.1 mm，同震位移水平分量向西為 3.8 m；同震位移水平分量向南為 17.1 mm。而位於震央東南邊的北埔測站（圖 5-2.3（右）PEPU，東經 121.6103 度，北緯 24.0179 度），其同震抬升為 16.1 mm，同震位移水平分量向西為 7.6 mm，同震位移水平分量向南為 12.9 mm。除此之外，周圍測站所記錄到的同震位移均不超過 10 mm，並且於地震後並無明顯的永久變形行為，連續 GPS 的同震位移場大致沿震央呈扇形分布，推測此次花蓮秀林鄉地震應位於較深的西傾斷層系統，且於發震時期並未觸發淺層的斷層活動。

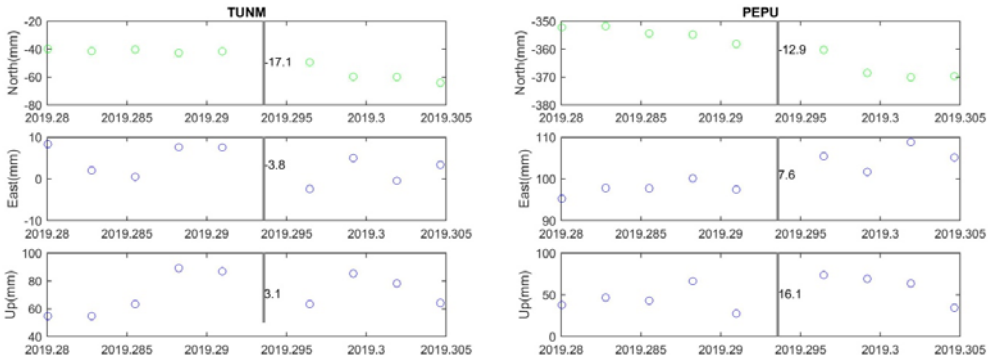



圖 5-2.3：測站 TUNM 與 PEPU 每日解時間序列。圖中灰線為 2019 年 4 月 18 日花蓮秀林鄉地震發震日期，數字為後四日平均減前五日平均之同震位移。

Figure 5-2.3: Coordinate time series of TUNM and PEPU stations. Gray lines represent the original time of event. The numbers represent coseismic displacements calculated by average coordinate differences between four-day after and five-day before the earthquake.

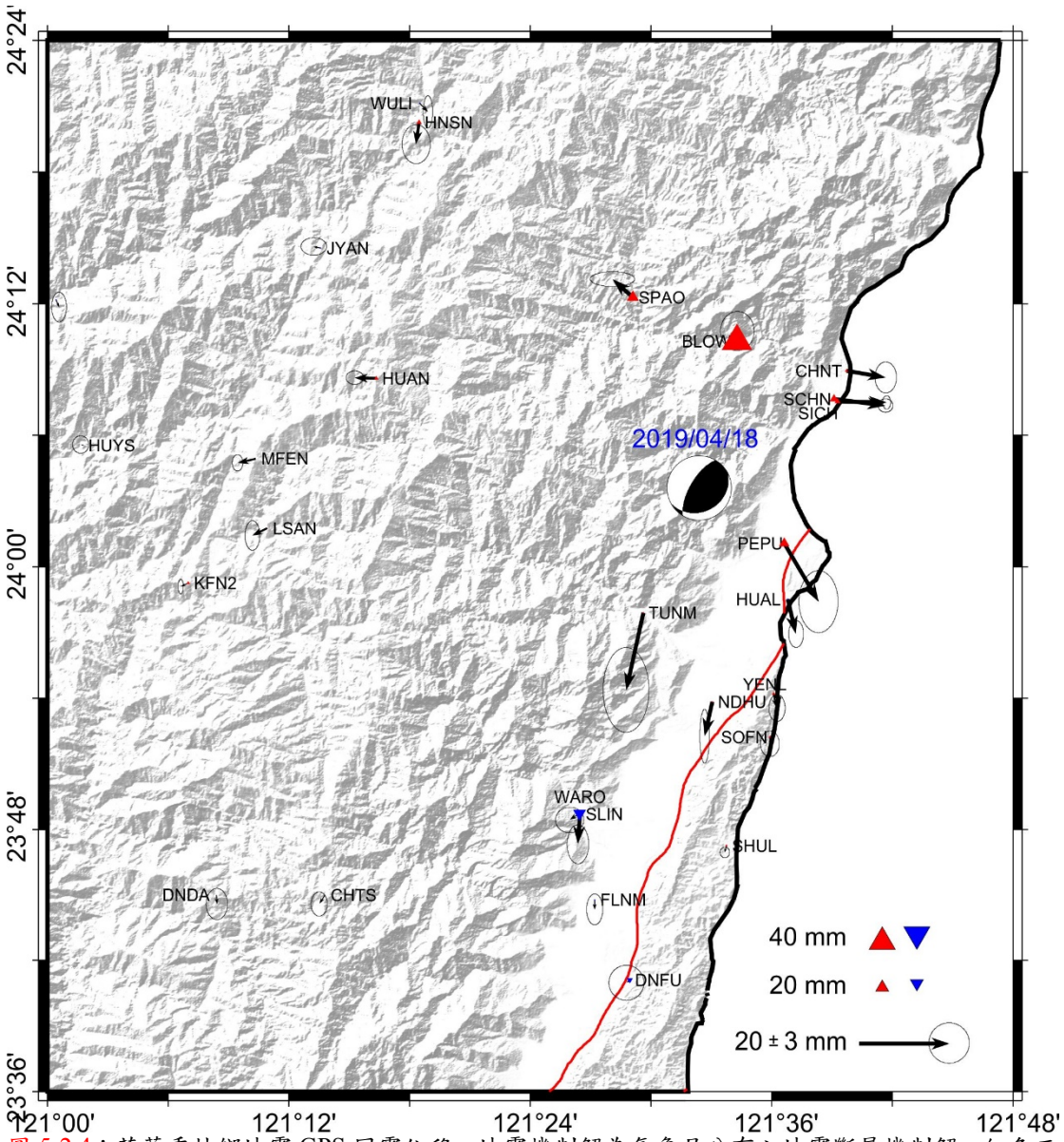



圖 5-2.4：花蓮秀林鄉地震 GPS 同震位移，地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。紅色三角形代表抬升，藍色三角形代表下陷。

Figure 5-2.4: GPS coseismic displacements of earthquake at Hsiulin township in Hualien county. Focal mechanism solution is from the CWB. Red triangles represent land uplift; blue triangles represent land subsidence.

## 5-2-2-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場

花蓮秀林鄉地震發生後，歐洲太空總署（European Space Agency；ESA）所屬衛星 Sentinel-1B 於 2019 年 4 月 19 日飛越臺灣上空，拍攝了震後第一幅降軌軌道（descending orbit）雷達影像，但其含蓋範圍太小，無法對整個花蓮地區分析同震行為。因此本團隊利用同年 4 月 23 日 Sentinel-1A 的升軌軌道（ascending orbit）雷達影像及 4 月 25 日 Sentinel-1A 的降軌軌道雷達影像與地震前影像進行同震變形分析。本研究團隊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 5-2.5 即為 Sentinel-1 衛星升軌及降軌干涉圖，由圖可明顯看出相較於 2018 年 2 月 6 日的花蓮地震而言，本次地震在升軌衛星上靠中央山脈側可觀察到梯度較緩的干涉條紋，由影像干涉條紋計算最大變形量沿視衛星方向約 3 cm，比 GPS 觀察的同震變形量級稍大，推測有些大氣的效應貢獻在視衛星的變形上。另外在米崙斷層跟嶺頂斷層兩側並無觀測到明顯的干涉條紋梯度變化或不連續的情況，因此此次地震並無誘發淺部的斷層活動。此同震變形量可能並非為真實地表變形，部分來自於大氣效應或其他誤差。根據合成孔徑雷達干涉技術結果顯示，其變形量與連續 GPS 測站一致，最大均只有數公分，表示此次花蓮秀林鄉地震應位於較深的斷層系統，且於發震時期並未觸發淺層的斷層活動。

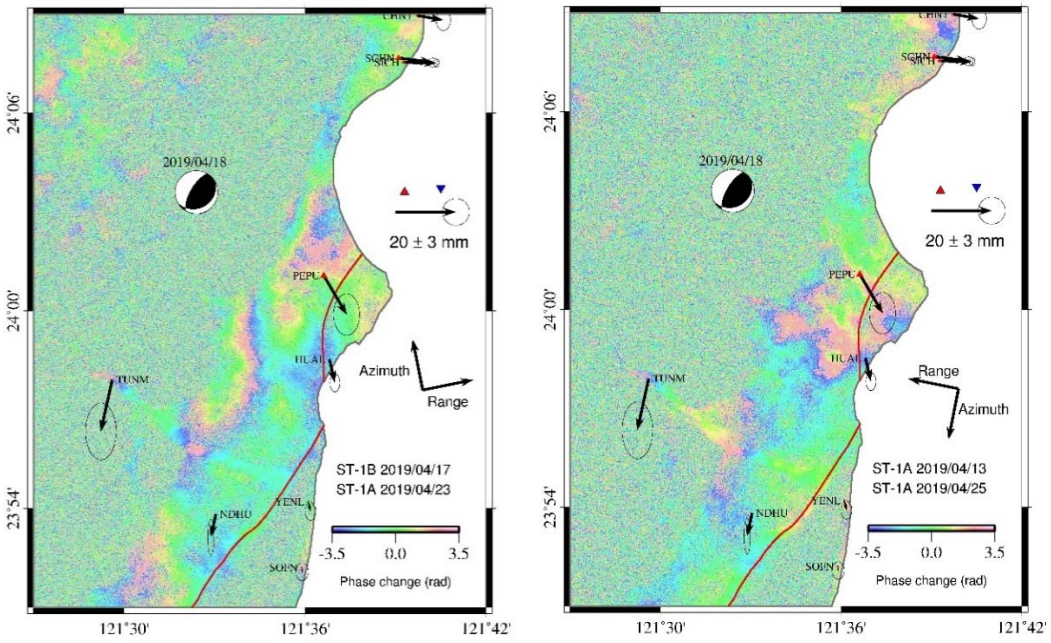



圖 5-2.5：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。

Figure 5-2.5: The coseismic surface deformation field of LOS direction from Sentinel-1satellite of Hualien earthquake.

## 5-2-3 2019.04.18 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 5-2.2），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；一為東北–西南走向向東南傾之斷層面。然而，根據 2018 年花蓮近海地震的震源機制解指出，本次規模 6.2 的地震可能是北北東–南南西走向向西傾之斷層面。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。

## 5-2-3-1 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（$\lambda$）等於剪切模量（$\mu$）之彈性體。沿著斷層元素（fault patch/fault element）的斷層滑移量 $\Delta u_j$（$\xi_1$, $\xi_2$, $\xi_3$）會使均質均向的彈性體表面產生位移場 $\Delta u_i$（$x_1$, $x_2$, $x_3$），其關係如下式所列。其中，$\delta_{jk}$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。

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

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）。

## 5-2-3-2 斷層模型結果

由震源機制解與主餘震的空間分布指出（圖 5-2.6），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，因此本團隊根據 2018 年花蓮近海地震之震源模型，擷取北北東–南南西走向且向西傾之斷層面，繼續往 25 公里處延伸來建立本次地震的斷層幾何。

接著，本計畫將斷層面劃分成數十個小斷層面（圖 5-2.7），以求取同震斷層滑移量。由於本次地震震源位置太深，DInSAR 與 GPS 垂直位移場的可信度不夠，因此本計畫僅反演 GPS 水平同震位移場來估算斷層滑移分布。其最佳模型（圖 5-2.7）指出，斷層之滑移量主要分布在 50 mm - 80 mm，集中在深度約 10 - 25 km 的位置。此地震之測地矩（$M_0$）為 $1.06 \times 10^{25}$ dyne-cm，相當於 $M_w$ 5.98。

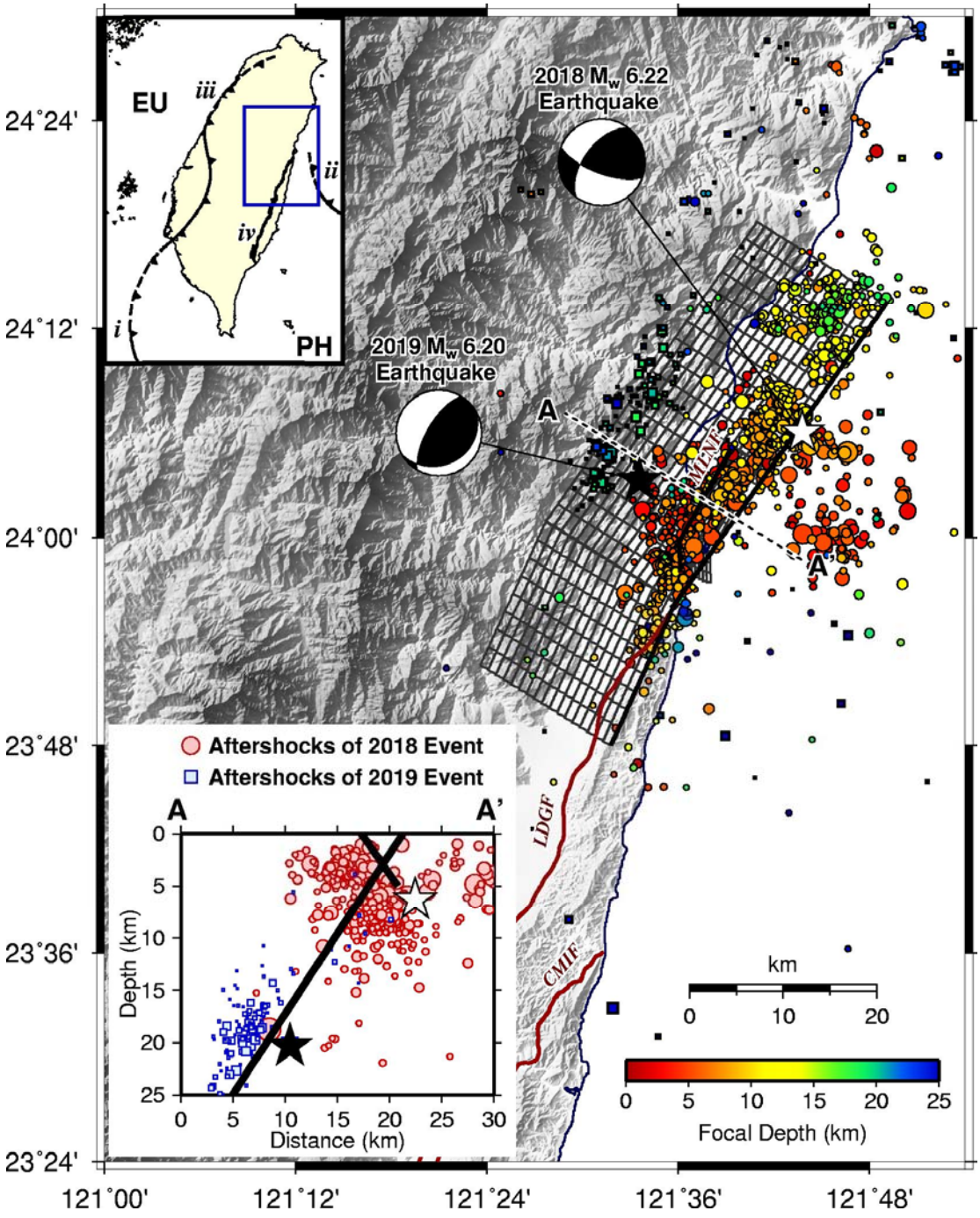



圖 5-2.6：2018 年與 2019 年花蓮地震餘震分布。圓圈為 2018 年花蓮地震餘震，方形為 2019 年花蓮地震餘震，顏色為地震深度。白色星號為 2018 年花蓮地震主震震央；黑色星號為 2019 年花蓮地震主震震央。灰色方框為本研究採用的最佳斷層模型在地表的投影位置；黑色粗線為斷層上緣在地表的投影位置。紅線為中央地質調查所公告之活動斷層，CMIF：奇美斷層；LDGF：嶺頂斷層；MLNF：米崙斷層。左上圖藍色方框標是研究區域。左下圖為 AA'剖面中兩個地震之主餘震分布，黑色粗線為最佳斷層模型之位置。

Figure 5-2.6: Aftershock distribution of 2018 and 2019 Hualien earthquakes. Circles are aftershocks of 2018 event while rectangles are aftershocks of 2019 event. White star is the epicenter of 2018 main shock and black one is the 2019 main shock. Grey rectangles are the location of the fault projected to the surface. Upper inset shows the location of working area. CMIF: Chimei fault; LDGF: Linding fault; MLNF: Milun fault. Lower inset is the profile of main shock and aftershock distribution. Black lines are locations of optimal modeled faults.

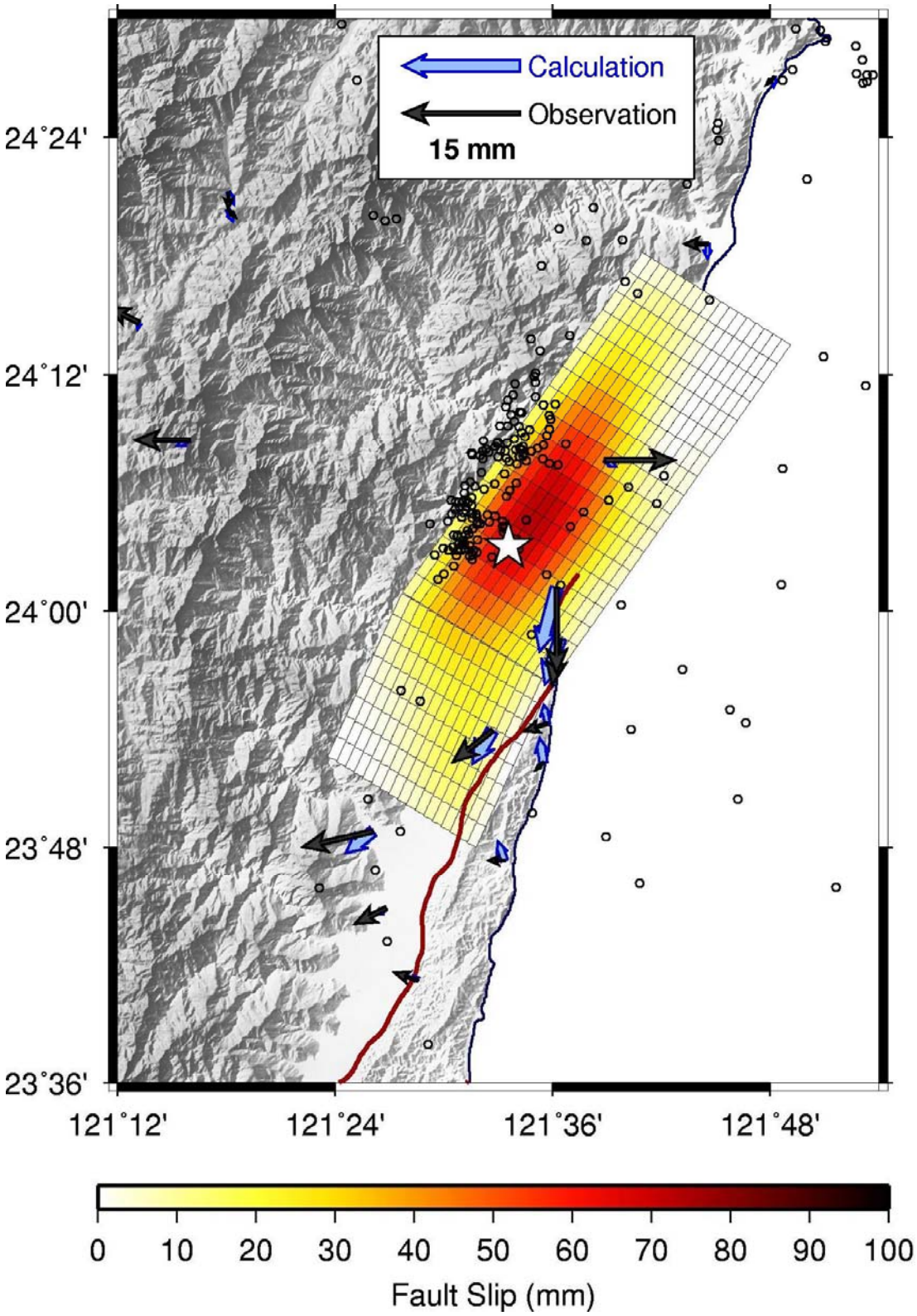



圖 5-2.7：2019 年花蓮地震斷層模型擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；白色星號為主震震央位置；圓圈為餘震分布。

Figure 5-2.7: Coseismic source model of 2019 Hualien earthquake. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip. White star is the epicenter of the main shock and the white circles are aftershocks.

## 5-2-4 2019.04.18 地震事件討論與結論

2019 年 4 月 18 日臺灣東部花蓮發生了 $M_L$ 6.1 的地震，震央位於中央山脈一側（24.0543°N, 121.5592°E），震源深度約 20 km。中央地質調查所於該地震發生後，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 連續站資料來進行地表同震位移場之解算。

由 GPS 連續站獲得之地表同震位移場指出，最大同震位移位於震央南邊的銅門測站，同震抬升為 3.1 mm，水平分量向西為 3.8 m；向南為 17.1 mm。而位於震央東南邊的北埔測站，其同震抬升為 16.1 mm，同震位移水平分量向西為 7.6 mm，同震位移水平分量向南為 12.9 mm。除此之外，周圍測站所記錄到的同震位移均不超過 10 mm，並且於地震後並無明顯的永久變形行為，連續 GPS 的同震位移場大致沿震央呈扇形分布。

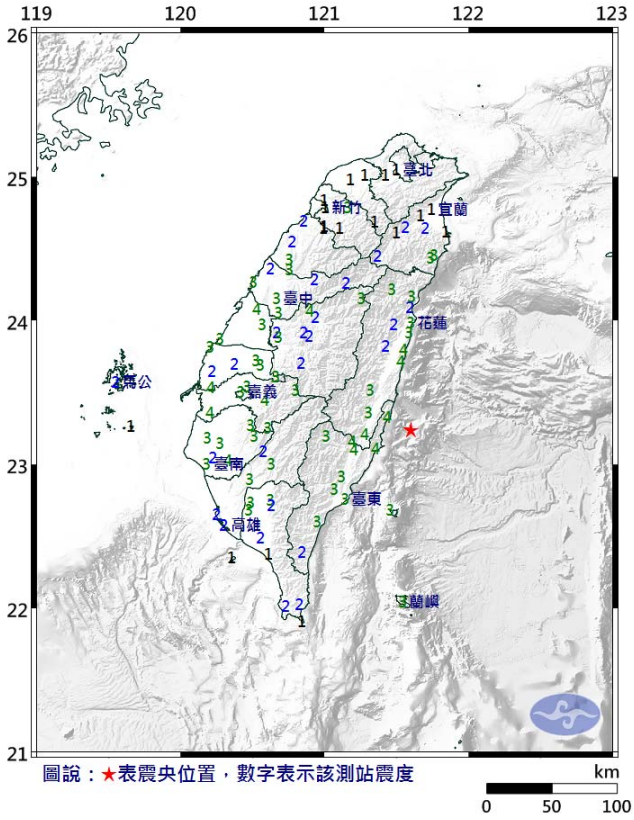
在衛星影像處理方面，本團隊主要採用（European Space Agency；ESA）所屬衛星 Sentinel-1A/B 的雷達影像，使用差分合成孔徑雷達干涉技術（D-InSAR），得到視衛星方向同震地表視衛變形圖。然而，此同震變形量可能並非為真實地表變形，部分來自於大氣效應或其他誤差。根據合成孔徑雷達干涉技術結果顯示，其變形量與連續 GPS 測站一致，最大均只有數公分，表示此次花蓮秀林鄉地震應位於較深的斷層系統，且於發震時期並未觸發淺層的斷層活動。

由震源機制解與主餘震的空間分布指出，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，因此本團隊根據 2018 年花蓮近海地震之震源模型，擷取北北東–南南西走向且向西傾之斷層面，繼續往 25 公里處延伸來建立本次地震的斷層幾何。本計畫僅反演 GPS 水平同震位移場來估算斷層滑移分布。其最佳模型指出，斷層之滑移量主要分布在 50 mm ~ 80 mm，集中在深度約 10 – 25 km 的位置。此地震之測地矩（$M_0$）為 $1.06 \times 10^{25}$ dyne-cm，相當於 $M_w$ 5.98。然而，雖然本次地震的規模和 2018 年花蓮近海地震的規模相當，但是由本次地震深度達 20 公里，因此此模型之可信度仍需要更進一步驗證。

# 5-3 2020 年 5 月 3 日臺灣東部近海地震簡介

在 2020 年 5 月 3 日於臺灣東部長濱鄉外海處（23.23°N, 121.61°E）發生了芮氏規模 5.9（$M_L$ 5.9；$M_W$ 5.0）震源深度為 40.4 km 的地震。臺灣本島最大震度達 4 級（圖 5-3.1）。孕育本地震可能的斷層面為東北-西南走向，朝東南或西北傾的逆斷層（圖 5-3.2）。

本次地震的活動推測和縱谷斷層可能有關係，但仍需後續研究釐清。縱谷斷層是一個傾角向東的逆衝斷層，地表出露之斷層跡大致沿著海岸山脈的西緣山腳下與花東縱谷交接觸，從花蓮到臺東可以區分成幾個不同的斷層區塊，各自有不同滑移錯位的行為模式。Chen et al.（2007）利用歷史地震和地形表現的構造不連續，配合大地測量資料提出了四個分段，由北至南分別為嶺頂斷層、瑞穗斷層、池上斷層和利吉斷層（圖 5-3.3）。此地震位於菲律賓海板塊和歐亞板塊碰撞邊界最底部，位於菲律賓海板塊地函的最上部，淺部對應到池上斷層，極可能和池上斷層在深部的活動相關（圖 5-3.4）。利用 1991-2005 全臺灣規模二以上的地震重新定位後（Wu et al., 2008），此區地震顯現向東傾沒的線性構造，這個線性構造延伸到地表，對應到池上斷層的最北段（圖 5-3.4）。池上斷層的錯動，可朔源至 1951 年的花蓮台東地震序列（Hsu, 1962; Yu, 1997; Shyu et al., 2007）（圖 5-3.5）。除了 1951 年花蓮台東地震序列外， 2003 年 12 月 10 日規模 6.5 的成功地震導致池上斷層破裂（圖 5-3.5）。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）。




## 中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第109025號

日期： 109 年 5 月 3 日

時間： 11 時 24 分 40.6 秒

位置： 北緯 23.23 度，東經 121.61 度

即在 臺東縣政府東北方 70.7 公里

位於 臺灣東部海域

地震深度： 40.4 公里

芮氏規模： 5.9

各地最大震度（採用109年新制10級震度分級）

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 臺東縣長濱 | 4級 | 宜蘭縣南澳 | 3級 | 臺北市 | 1級 |
| 花蓮縣富里 | 4級 | 臺中市 | 3級 | | |
| 嘉義縣番路 | 4級 | 臺南市 | 3級 | | |
| 南投縣國姓 | 4級 | 苗栗縣鯉魚潭 | 3級 | | |
| 臺南市新化 | 4級 | 新竹縣關西 | 3級 | | |
| 彰化縣彰化市 | 4級 | 南投縣南投市 | 2級 | | |
| 雲林縣水林 | 4級 | 高雄市 | 2級 | | |
| 臺東縣臺東市 | 3級 | 苗栗縣苗栗市 | 2級 | | |
| 花蓮縣花蓮市 | 3級 | 澎湖縣馬公市 | 2級 | | |
| 高雄市六龜 | 3級 | 桃園市三光 | 1級 | | |
| 屏東縣三地門 | 3級 | 宜蘭縣宜蘭市 | 1級 | | |
| 雲林縣斗六市 | 3級 | 新竹市 | 1級 | | |
| 嘉義市 | 3級 | 新竹縣竹北市 | 1級 | | |
| 臺中市霧峰 | 3級 | 新北市 | 1級 | | |
| 屏東縣屏東市 | 3級 | 桃園市 | 1級 | | |

本報告係中央氣象局地震觀測網即時地震資料地震速報之結果。

圖 5-3.1：中央氣象局 20200503 地震事件報告（http://www.cwb.gov.tw）。

Figure 5-3.1: 3th May 2020 Earthquake event report from CWB.

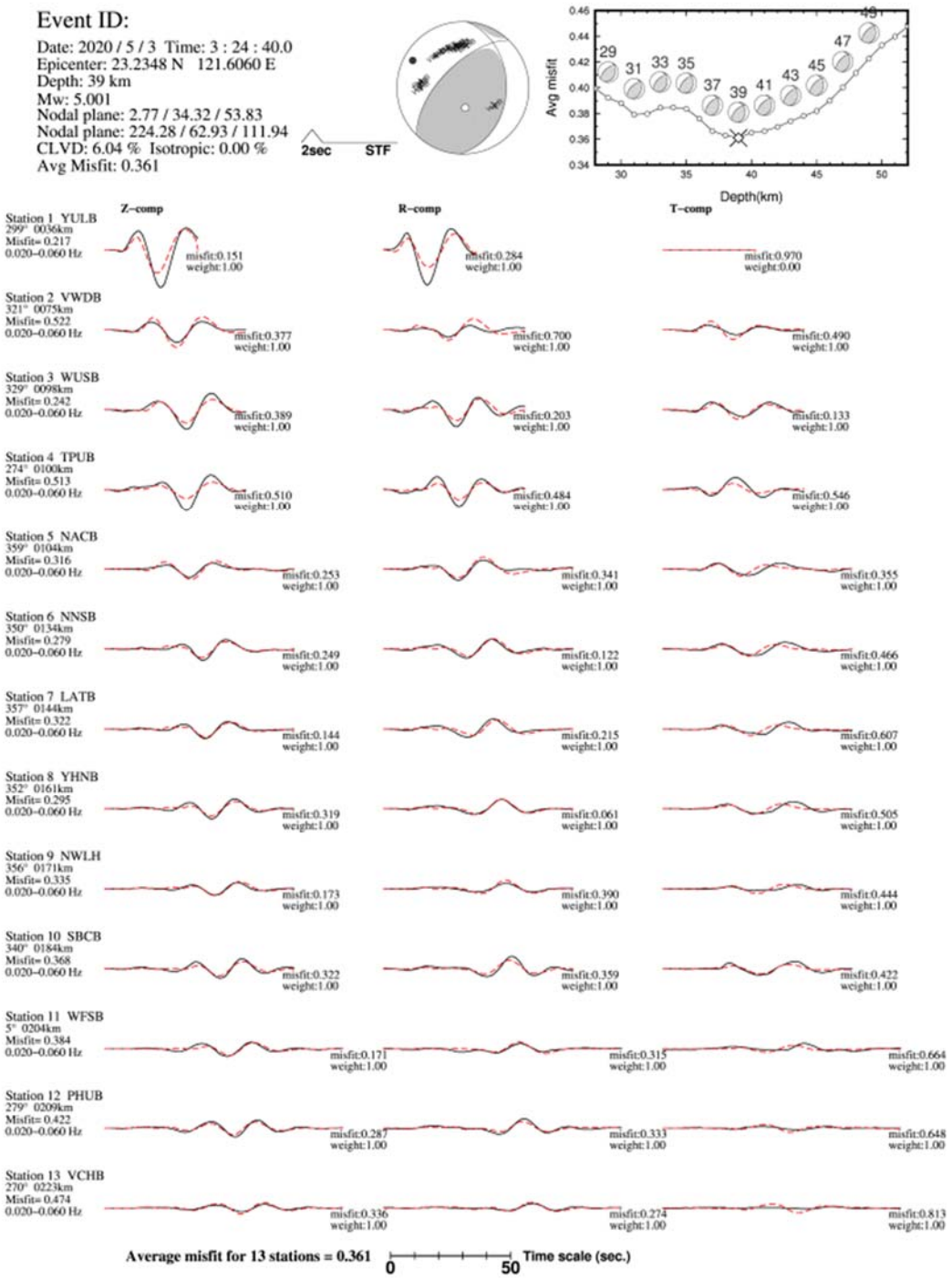



圖 5-3.2：20200503 地震事件之震源機制解與地震波反演之擬合結果（http://www.cwb.gov.tw）。
Figure 5-3.2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 20200503 earthquake event.

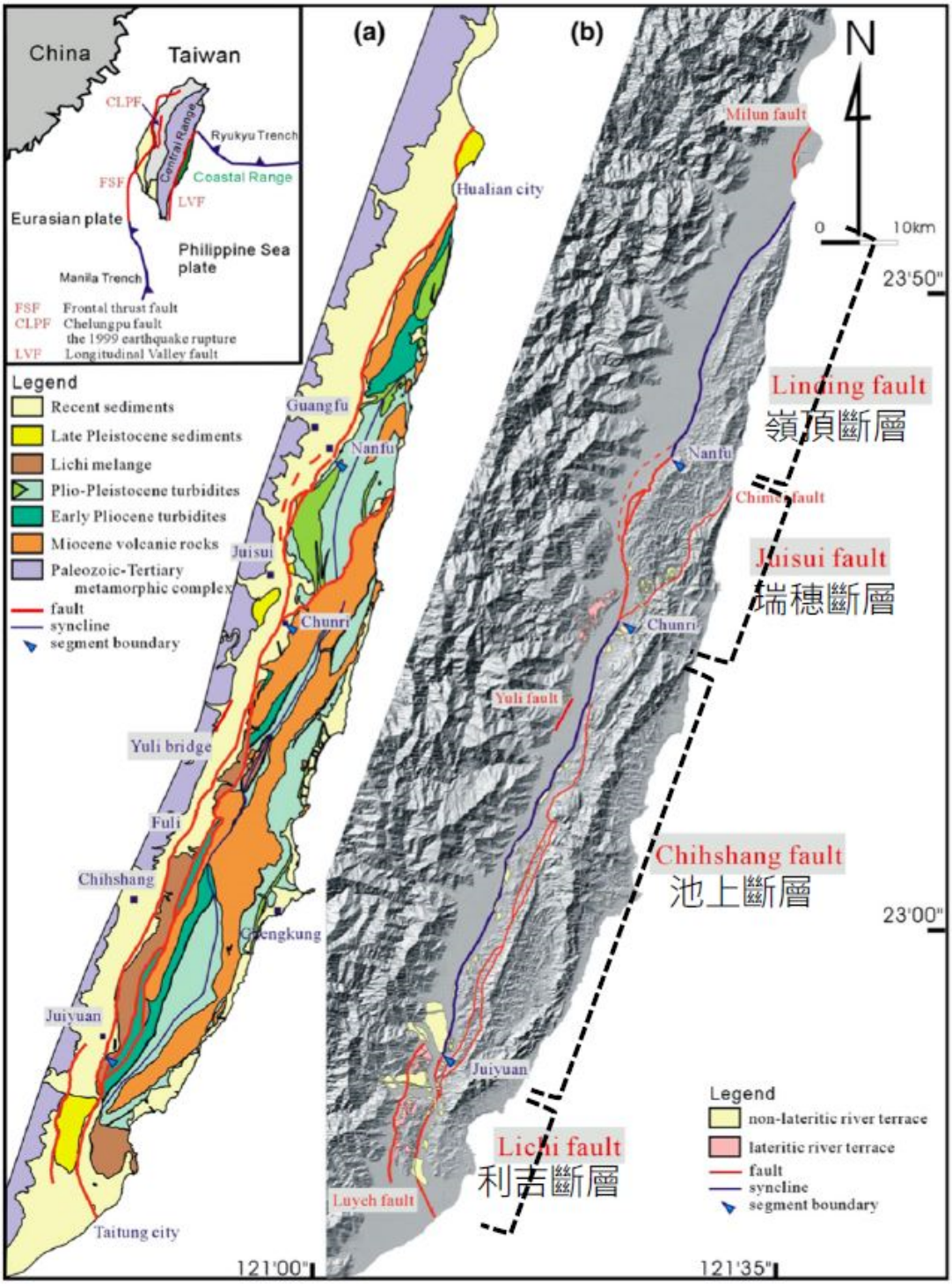



圖 5-3.3：縱谷斷層分段圖（Chen et al., 2007）。縱谷斷層由北至南分別為嶺頂斷層、瑞穗斷層、池上斷層和利吉斷層。

Figure 5-3.3: Segmentation of the Longitudinal Valley fault (Chen et al., 2007). The Longitudinal fault is divided into the Linding fault, Juisui fault, Chihshang fault, and tLichi fault.

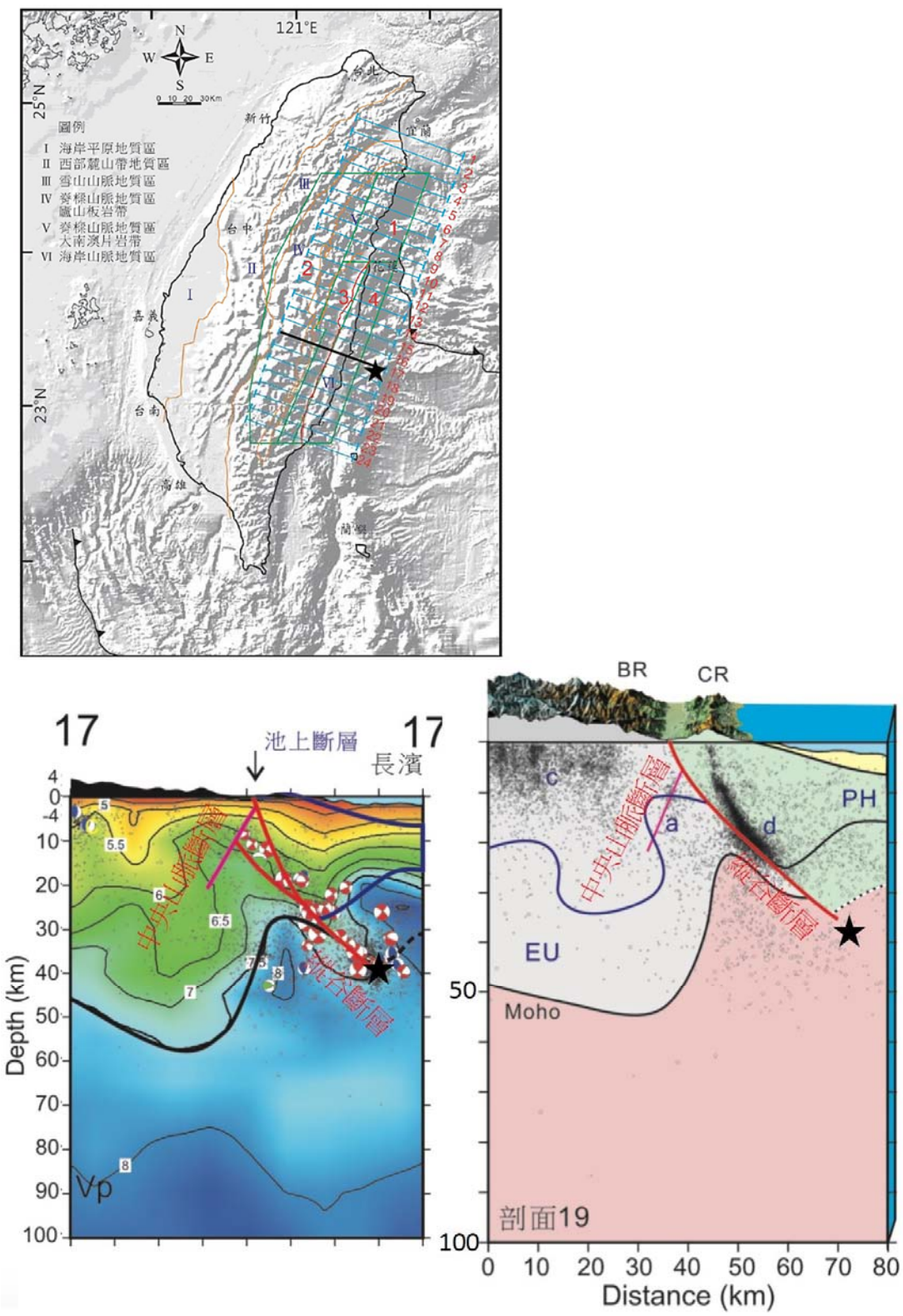



圖 5-3.4：池上斷層區域之地震構造（陳文山等，2018）。

Figure 5-3.4: Seismotectonics of the Chihshang fault area (陳文山等，2018).

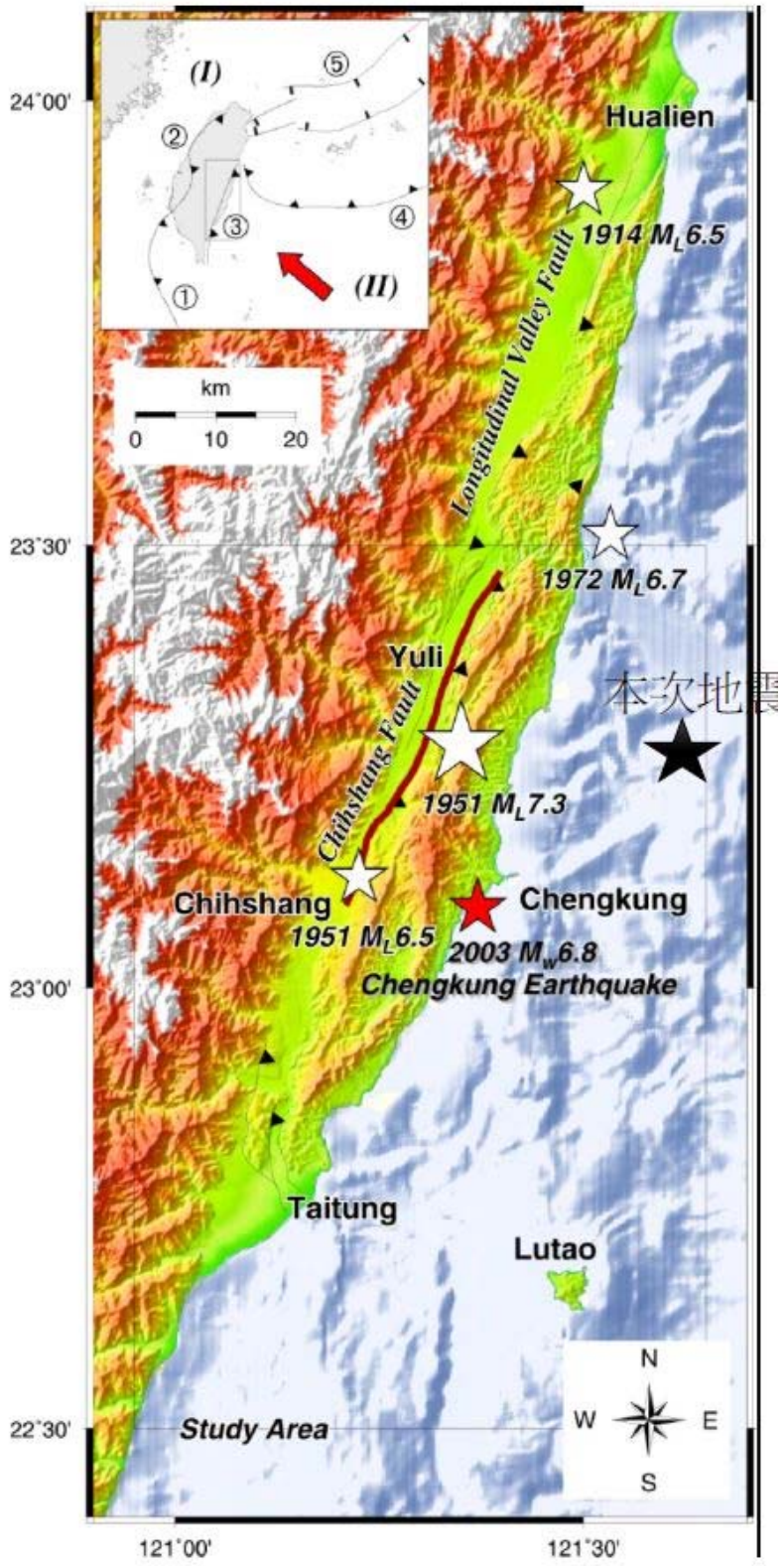



圖 5-3.5：本次地震（黑色星號）與池上斷層歷史地震之地理關係（Ching et al., 2007）。
Figure 5-3.5: Locations of this earthquake and other historical earthquakes related to the Chihshang fault (Ching et al., 2007).

# 第六章、結論與建議

本計畫的主要工作重點在於（1）求解臺灣不同時期之地表速度場；（2）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 2020 年 09 月全臺連續全球定位系統測站約 500 站，並加入週期性效應與震後變形衰減因子分析。在 GPS 移動站與精密水準資料處理方面，計算歷史資料累積至目前 2020 年 09 月全臺 GPS 移動站部分共完成 767 點的施測，精密水準則完成共計 29 條主線測線及 1 條水準副線測線之施測。此外，本計畫也分別採用兩套軟體比較採用 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 處理全台灣的 GPS 移動站資料分別解算的移動站每日解，所涵蓋的年份為 2002–2019 年，計算各移動站的水平、垂直速率估值，剔除不合理的移動站，例如：時間涵蓋長度有明顯差異者，共 664 個移動站進行比較與統計。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 0.90，相關性稍低於水平方向。且在垂直速度上 Gamit 解有稍微高估的情況。速度估值的差異在南北、東西、垂直三分量上平均分別為+1.28、+0.49、+2.29 mm/year，結果顯示兩種解算軟體的水平速度估值差值小於 2 mm/year，垂直方向差異稍大，達 2.29 mm/year。且三分量的速度估值的差異都為正，代表 Gamit 結果稍微高於 Bernese 結果。造成此速度差值的原因之一是殘餘的系統誤差，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，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。相對於澎湖白沙站的全臺速度場顯示，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。

本計畫彙整了 ERS-1/2、ENVISAT、ALOS 以及 Sentinel-1 等合成孔徑雷達影像進行 InSAR 在時間序列上的分析，作為大範圍地表變形的一種觀測方式。中部地區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，2015 年 3 月至 2016 年 2 月期間下陷率較小，大約 30

mm/yr 左右。北部地區臺北盆地的變形不明顯，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。而桃園工業區則有最大下陷速率，約為 20 mm/yr。另一明顯下陷區位於台中市西區與南區，速率可達 20 mm/yr。2007/1-2011/3 期間，臺北盆地主要以往視衛星方向輕微抬升或不動的運動為主；宜蘭地區則有較明顯的視衛星方向遠離，約為 10 mm/yr。南部地區兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。以連續 GPS 測站 S011 為不動點而言，此兩處沿海地區最大視衛星方向下陷量可達到近 30 mm/yr。台南台地則觀測到最大抬升量，速率約將近 20 mm/yr。此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。此外，跨過龍船斷層以及鳳山轉換帶也有明顯的速度不連續，速度梯度可達將近 20 mm/yr。東部地區 2007 年 1 月至 2010 年 12 月的 ALOS 分析結果顯示北段向東跨過嶺頂斷層呈現為視衛星方向遠離，速度梯度差異約為 10 mm/yr。而跨過池上斷層則有每年約 20~35 毫米的速度梯度差異，且有明顯的分界，能有效的萃取出池上斷層在地表上的位置。向南則顯示出向東跨過鹿野斷層也有速度梯度差異，約為 10 mm/yr。2015 年 10 月至 2020 年 10 月的 Sentinel-1 分析結果呈現米崙斷層附近有明顯向北東與抬升的運動分量。向東北的水平運動速率可達 20 mm/yr，抬升的速率 20 mm/yr。另外在此區活動斷層中，主要在跨過池上斷層、鹿野斷層兩側都可以看到明顯的速度不連續性。

本計畫利用 BLOCKS、DEFNODE 與 Baseline Inversion Model 反演水平速度場和垂直速度場，推求臺灣地區活動斷層之斷層滑移虧損率。依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果依據三種模型結果之平均計算出加權平均滑移虧損速率。計算結果顯示，山腳斷層為 1.0 mm/yr、湖口斷層為 1.1 mm/yr、新竹斷層為 1.0 mm/yr、新城斷層為 1.6 mm/yr、獅潭斷層為 2.7 mm/yr、三義斷層為 4.2 mm/yr、大甲－彰化斷層（北段）為 2.4 mm/yr、大甲－彰化斷層（南段）為 3.9 mm/yr、屯子腳斷層為 1.1 mm/yr、車龍埔斷層為 5.3 mm/yr、大茅埔－雙冬斷層為 1.3 mm/yr、九芎坑斷層為 6.3 mm/yr、梅山斷層為 5.2 mm/yr、大尖山斷層為 4.9 mm/yr、木屐寮-六甲斷層為 4.2 mm/yr、觸口斷層為 6.8 mm/yr、新化斷層為 18.9 mm/yr、後甲里斷層為 5.9 mm/yr、左鎮斷層為 3.7 mm/yr、小崗山斷層為 5.4 mm/yr、旗山斷層為 5.5 mm/yr、潮州斷層為 3.2 mm/yr、恆春斷層為 10.1 mm/yr、米崙斷層為 7.2 mm/yr、嶺頂斷層為 8.6 mm/yr、瑞穗斷層為 12.1 mm/yr、奇美斷層為 12.6

mm/yr、玉里斷層為 15.1 mm/yr、池上斷層為 10.4 mm/yr、鹿野斷層為 4.5 mm/yr、利吉斷層為 6.8 mm/yr。為了合理地解釋臺灣東北部之速度梯度變化，本計畫也將宜蘭北部及南部構造納入分析，宜蘭北部構造為 4.6 mm/yr、宜蘭南部構造為 3.2 mm/yr。

利用大地測量資料來進行地殼變形研究，主要是用來解析地質構造的運動行為，觀測資料越充足，則資料解析力就越佳。GPS 連續站因為可以連續接收衛星資料，因此可以獲得最佳的時間解析力；然而 GPS 連續站的空間分布不足，無法提供好的空間解析力，因此 GPS 移動站則是替代方案，以較差的時間解析力來換取較好的空間解析力；不過，GPS 在高程的偵測精度不足，所以需要精密水準來提供最佳的垂直運動約制；但是，不管是 GPS 還是精密水準，都會面臨空間解析力不佳的困境，所以 InSAR 是提供地表變形空間解析的最佳方案，但是由於 InSAR 僅提供視衛星方向之分量，而且非常容易受到地形起伏的影像而導致解纏錯誤，所以 InSAR 需要 GPS 和水準的成果來提供約制。換言之，InSAR 並不能取代精密水準或是任何一種監測手段，特別是在地形起伏較大的臺灣。

針對 GPS 移動站的存廢問題，首先必須認知到現有 GPS 連續站的密度，並不足以提供活動斷層活動性的解析力，因此這些 GPS 移動站位置本身是非常重要的。然而對於 GPS 移動站耗時耗費經費的問題，目前有兩種建議的處置方案。第一種方案是逐步採用低價位 GNSS 儀器來架設 GNSS 連續站，現有的低價位 GNSS 儀器不僅僅可以提供雙頻資料，由於可以接收四星資訊，所以坐標精度也大幅的提升，在透空度不佳的環境下，依舊可以提供不錯的觀測品質。第二種方案是在經費有限的狀況下，可以先設立半固定站。半固定站的好處在於（1）提供未來連續站設站的基礎，避免過去的測量資料無法合併使用；（2）由於基樁是固定的，所以可以大幅提升坐標的解算精度。

透過精密水準長期的觀測，本團隊也注意到很多水準測線觀測的高程變化在沒有地震的影響之下，每年的觀測結果差異甚大。由時間序列的趨勢來看，這些點位的長期運動速率是合理的，換言之，本團隊推測這些短期的變化是合理的，只是過去我們並沒有這樣高精度高重複度的高程成果可以觀察到。目前推測這些變化差異大的區域，除了和人為活動干擾有關外，也可能和當地的地質條件有關，具體可能的原因需要進一步去驗證。

# Chapter 6: Conclusions and Suggestions

The continuous GPS data from nearly 500 stations were processed till September 2020. The periodic effects and postseismic deformation were also condidered. Besides, geodetic data from 767 campaign-mode GPS stations and 29 precise leveling routes and 1 sub-leveling routes were also processed in this project. Surface velocity field relative to station S01R shows that the SW Taiwan stations were mostly moving from southeast to northwest. To the south of Tainan, stations were mostly moving from northeast to southwest. In the northern Taiwan, the movements are from the south to the north. In Yilan area, there is a rotation in the direction of the southeast. The east part of Longitudinal Fault and southwestern Taiwan have a large horizontal velocity. The west part of Longitudinal fault and Changhua, Yunlin areas are the main subsidence areas, and the characteristic of Central Range is uplifting.

In this project, SAR images such as ERS-1/2, ENVISAT, ALOS and Sentinel-1 are integrated for InSAR time-series analysis as a method of observation of large-scale surface deformation. Among the central Taiwan regions, the Changhua coastal area to the south of Bagua Mountain and the Yunlin area to the south of Zhuoshuixi have significant subsidence. The subsidence rate is about 40-50 mm/yr. The subsidence rate is relatively small from March 2015 to February 2016. In the northern Taiwan area, the deformation of the Taipei Basin is not obvious. The maximum subsidence rate is 9 mm/yr in the Taishan and Wugu areas, while the average subsidence rate on the west side of the basin is 3-4 mm/yr. The Taoyuan Industrial Zone has the largest subsidence rate, which is about 20 mm/yr. Another obvious subsidence area is located in the west and south districts of Taichung City, with a rate of up to 20 mm/yr. During the period from January 2007 to March 2011, the Taipei Basin was dominated by slight uplift or motionless movements depending on the direction of the satellite in the past; in the Yilan area, the direction of the satellite was significantly farther away, about 10 mm/yr. There are two main subsidence areas in southern Taiwan, located in the Jianan area along the coast and the Pingtung area in the south. Taking the continuous GPS station S011 as a fixed point, the maximum satellite-dependent subsidence in these two coastal areas can reach nearly 30 mm/yr. The Tainan platform observed the largest uplift at a rate of approximately 20 mm/yr. Among the nine active faults in this area, obvious velocity discontinuities can be seen mainly on both sides of the Houjiali fault and

Chishan fault. In addition, there are obvious discontinuities in velocity across the Longchuan Fault and Fengshan Transition Zone, with a velocity gradient of nearly 20 mm/yr. The results of the ALOS analysis in the eastern Taiwan region from January 2007 to December 2010 show that the northern section crosses the Lingding fault eastward as far away depending on the satellite direction, and the velocity gradient difference is about 10 mm/yr. Crossing the Chishang fault has an annual velocity gradient difference of about 20 to 35 mm, and there are obvious boundaries, which can effectively extract the location of the Chishang fault on the surface. To the south shows that there is also a velocity gradient difference across the Luye fault eastward, which is about 10 mm/yr. The Sentinel-1 analysis results from October 2015 to October 2020 show that there is a significant northeast and uplift movement component near the Milun fault. The rate of horizontal movement to the northeast can reach 20 mm/yr, and the rate of uplift is 20 mm/yr. In addition, among the active faults in this area, obvious velocity discontinuities can be seen mainly on both sides of the Chishang Fault and Luyeh Fault.

For the fault model constructions, Taiwan active faults were selected as the target faults . The results show that the weighted average slip deficit rate of Sanchiao fault is 1.0 mm/yr、Hukou fault is 1.1 mm/yr、Hsinchu fault is 1.0 mm/yr、Hsincheng fault is 1.6 mm/yr、Shihtan fault is 2.7 mm/yr、Sanyi fault is 4.2 mm/yr、Tachia-Changhua（North） fault is 2.4 mm/yr、Tachia-Changhua（South）fault is 3.9 mm/yr、Tuntzuchiaoi fault is 1.1 mm/yr、Chelungpu fault is 5.3 mm/yr、Tamaopu-Shuangtung fault is 1.3 mm/yr、Chiuchiungkeng fault is 6.3 mm/yr、Meishan fault is 5.2 mm/yr、Tachienshan fault is 4.9 mm/yr、Muchiliao-Liuchia fault is 4.2 mm/yr、Chukou fault is 6.8 mm/yr、Hsinhua fault is 18.9 mm/yr、Houchiali fault is 5.9 mm/yr、Tsochen fault is 3.7 mm/yr、Hsiaokangshan fault is 5.4 mm/yr、Chishan fault is 5.5 mm/yr、Chaochou fault is 3.2 mm/yr、Hengchun fault is 10.1 mm/yr、Milun fault is 7.2 mm/yr、Lingding fault is 8.6 mm/yr、Ruey fault is 12.1 mm/yr、Chimei fault is 12.6 mm/yr、Yuli fault is 15.1 mm/yr、Chihshang fault is 10.4 mm/yr、Luyeh fault is 4.5 mm/yr and Lichi fault is 6.8 mm/yr. In order to reasonably explain the speed gradient changes in northeastern Taiwan, this project also includes the northern and southern Yilan structures into the analysis. The northern Yilan structure is 4.6 mm/yr, the southern Yilan structure is 3.2 mm/yr.

The purpose to adopt the geodetic data for crustal deformation is to understand the activities of active structures. Continuous GPS station (cGPS) may collect the data continuously. Therefore, cGPS has the best temporal resolution. However, the spatial resolution of cGPS is poor, the campaign-mode GPS station (sGPS) is adopted to increase the spatial resolution using the low temporal resolusion data. But both cGPS and sGPS cannot provide good vertical deformation. The precise leveling is therefore used to obtain high precision vertical deformation. Even though, all of these techniques encounter the spatial resolusion problem. InSAR is then a good method to provide the best spatial resultion data but only in Line-of-Sight (LOS) component. In other words, GPS and leveling are still necessary to constrain the LOS deformation rate field from InSAR, especially in Taiwan.

The coverage of cGPS in Taiwan so far is still not enough to solve the activities of active faults. Therefore, the sites of sGPS are still very important for our monitoring. However, we propose two plans to improve the shortcomings of sGPS. First, the low-cost GPS instrument can be adopted to construct the cGPS at the sGPS site. The low-cost GPS instrument can receive the dual-frequency observations from four satellite systems. It therefore can provide a reliable coordinate even though the site is located at a poor skyview place. Second, a semi-fixed station could be used to replace the sGPS. The data from this site has better coordinate precision than sGPS site and it could be upgraded to continuous station in the future.

Based on the long-term leveling observation, we notice that the temporal elevation change is high without earthquakes at some leveling routes. However, from the leveling time series, the trends of those benchmarks are reasonable. In other words, these high variations may be reasonable. The reason to cause these high variations is still not clear.

# 參考文獻


李建成、朱傚祖、安朔葉、胡植慶（2004）台灣東部縱谷斷層的快速潛移特性及地質災害。2004年台灣活動斷層與地震災害研討會摘要，國立成功大學，11-18 頁。

紀權宥（2006）南段花東縱谷之新期構造研究-利吉斷層與鹿野斷層的活動特性。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文。共 84 頁。

姜彥麟（2007）花東縱谷斷層南段地表變形及斷層運動學分析。國立台灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共 131 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。

陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權宥、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生（2008）從古地震研究與 GPS 資料探討縱谷斷層的分段意義。經濟部中央地質調查所特刊，第二十號，第 165-191 頁。

陳文山、吳逸民、葉柏逸、賴奕修、柯明淳、柯孝勳、林義凱（2018）,臺灣東部碰撞帶孕震構造,經濟部中央地質調查所特刊,第三十三號，第 123-155 頁.

陳俊甫（2013）台灣東部縱谷北端區域的地震構造特性。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 112 頁。

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。

鄭凱謙、陳江鑫、朱郁婷、景國恩、陳建良，2019，臺灣中部 GPS 移動站時間序列速度場。

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.

Altamimi, Zuheir, Paul Rebischung, Laurent Métivier, 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., Chu, H.T., and Lee, J.C. 1997. Shear concentration in a collision zone: kinematics of the Chihshang Fault as revealed by outcrop-scale quantification of active faulting, Longitudinal Valley, eastern Taiwan. Tectonophysics 274, 117-143.

Bonilla, M.G. 1975. A review of recently active faults in Taiwan. Open file report 75-41, U.S. Geological Survey, Menlo park, 58pp.

Bomford, G. (1985) Geodesy, 4th Ed., Oxford University Press.

Blewitt, G. (2015) GPS and Space-Based Geodetic Methods. In Treatise on Geophysics, edited by Gerald Schubert, 2nd Edition, 3:307–38. Oxford: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-53802-4.00060-9.

Cheng, L.W., J.C. Lee, J.C. Hu, and H.Y. Chen (2009) Coseismic and postseismic slip distribution of the 2003 Mw=6.5 Chengkung Earthquake in eastern Taiwan: elastic modeling from inversion of GPS data. Tectonophysics, 466, 335-343.

Ching, K. E., Hsieh, M. L., Johnson, K. M., Chen, K. H., Rau, R. J., & Yang, M. (2011a). Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B8)

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., Rau, R. J., and Zeng, Y. (2007), Coseismic source model of the 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake, Taiwan, determined from GPS measurements, J. Geophys. Res., 112, B06422, doi:10.1029/2006JB004439.

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

Cheng, S.N., Yeh, Y.T., and Yu, M.S. 1996. The 1951 Taitung earthquake in Taiwan. Journal of the Geological Society of China 39, 267-285.

Chen, W. S., Yen, I. C., Fengler, K. P., Rubin, C. M., Yang, C. C., Yang, H. C., ... Lin, Y. H. (2007). Late Holocene paleoearthquake activity in the middle part of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan. Earth and Planetary Science Letters, 264(3–4), 420–437.

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

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.

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.

Hsu, T.L. 1962. Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Memoir of the Geological Society of China 1, 95-102

Huang, H.H., Wu, Y.M., Song, X.D., Chang, C.H., Lee, S.J., Chang, T.M., Hsieh, H.H. (2014) Joint Vp and Vs tomography of Taiwan: Implications for subduction-collision orogeny. Earth Planet. Sci. Lett. 392, 177-191https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.026.

Huang, M.-H., & Huang, H.-H. (2018). The complexity of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake in east Taiwan. Geophysical Research Letters, 45, 13,249–13,257.

Johnson, K. M. (2013), Slip rates and off-fault deformation in Southern California inferred from GPS data and models,J. Geophys. Res. Solid Earth, 118, 5643–5664, doi:10.1002/jgrb.50365.

KuoChen, H., Francis T. Wu, Steven W. Roecker (2012) Three-dimensional P velocity structures of the lithosphere beneath Taiwan from the analysis of TAIGER and related seismic data sets. JGR, 117, B06306.

Lallemand, S., Theunissen, T., Schnürle, P., Lee, C. S., Liu, C. S., & Font, Y. (2013). Indentation of the Philippine Sea plate by the Eurasia plate in Taiwan: Details from recent marine seismological experiments. Tectonophysics, 594, 60-79.

Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, F. S. Jeng, and R. J. Rau (2003) Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998–2001, J. Geophys. Res., 108(B11), 2528.

Lin, S. C., & Kuo, B. Y. (2016). Dynamics of the opposite - verging subduction zones in the Taiwan region: Insights from numerical models. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(3), 2174-2192.

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.

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

Meade, B.J. and J.P. Loveless (2009), Block modeling with multiple fault network geometries and a linear elastic coupling estimator in spherical coordinates, Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6).

Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 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, 1018-1040

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.
Shyu, J. B. H., Sieh, K., Avouac, J.P., Chen, W.S. (2006) Millennial slip rate of the Longitudinal Valley fault from river terraces: Implications for convergence across the active suture of eastern Taiwan. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 111, B08403.
Shyu, J. B. H., L. H. Chung, Y. G. Chen, J. C. Lee, K. Sieh (2007) Re-evaluation of the surface ruptures of the November 1951 earthquake series in eastern Taiwan, and its neotectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 31 (3). pp. 317-331.
Shyu, J. B. H., Chuang, Y. R., Chen, Y. L., Lee, Y. R. & Cheng, C. T. (2016), A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan, Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 27(3).
Steketee, J. A. (1958). On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, Can. J. Phys. 36, 192-205.
Teng, L. S., Lee, C. T., Tsai, Y. B., & Hsiao, L. Y. (2000). Slab breakoff as a mechanism for flipping of subduction polarity in Taiwan. Geology, 28(2), 155-158.
Tung, H., Chen, H. Y., Hsu, Y. J., Hu, J. C., Chang, Y. H., & Kuo, Y. T. (2019). Triggered slip on multifaults after the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake by continuous GPS and InSAR measurements. Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 30(3), 1-16.
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. Tectonophysics, 578, 126-135.
Wu, Yih-Min, Yue-Gau Chen, Chien-Hsin Chang, Ling-Ho Chung, Ta-Liang Teng, Francis T. Wu, and Chien-Fu Wu (2006) Seismogenic structure in a tectonic suture zone: With new constraints from 2006 Mw6.1 Taitung earthquake. Geophys. Res. Lett., Vol.33, L22305.
Wu, Y.M., Chang, C.H., Zhao, L., Teng, T.L., Nakamura, M., 2008. A comprehensive relocation of earthquakes in Taiwan from 1991 to 2005. Bull. Seismol. Soc. Am. 98, 1471–1481.
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.
Wen, S., Y.-Y. Wen, K.-E. Ching, Y.-L. Yeh, and Y.-H. Lee (2019) Tectonic implications on the 2018 Hualien Earthquake. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 30, 389-398, doi: 10.3319/ TAO.2019.01.28.01.
Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics 274, 41-59.
Yang, Y.-H., Hu, J.-C., Tung, H., Tsai, M.-C., Chen, Q., Xu, Q., Zhang, Y.-J., Zhao, J.-J., Liu, G.-X., Xiong, J.-N., Wang, J.-Y., Yu, B., Chiu, C.-Y., & Su, Z. (2018). Co-seismic and postseismic fault models of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake occurred in the junction of collision and subduction boundaries offshore eastern Taiwan. Remote Sensing, 10, 1372; doi:10.3390/rs10091372.
Yen, J.-Y., Lu, C.-H., Dorsey, R. J., Kuo-Chen, H., Chang, C.-P., Wang, C.-C., Chuang, R. Y., Kuo, Y.-T., Chiu, C.-Y., Chang, Y.-H., Bovenga, F., & Chang, W.-Y. (2018). Insights into Seismogenic Deformation during the 2018 Hualien, Taiwan, Earthquake Sequence from InSAR, GPS, and Modeling. Seismological Research Letters, 90, doi: 10.1785/0220180228.