經濟部

計畫編號：106-5226904000-07-01

經濟部中央地質調查所
106年度委辦計畫執行期末報告書

「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（1/4）」
（第1年度）

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止

本年度計畫：自106年02月至106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

中 華 民 國 106 年 11月

計畫編號：106-5226904000-07-01

經濟部中央地質調查所

106 年度委辦計畫執行期末報告書

「斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層反演評估（1/4）」

（第1年度）

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

中 華 民 國 106 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（1/4）

（第1年度）

計畫主持人：景國恩

協同主持人：胡植慶

研　究　員：陳宏宇、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

中　華　民　國　106　年　11　月

目錄

目錄 ...I
表目錄 ...V
圖目錄 ...VI
摘要 ...XIX
Abstract ...XX

第一章、緒　論 ...1
1-1 計畫整體概述 ...1
1-2 研究目的 ...2
1-3 本年度工作概述 ...6
1-4 前一期工作成果 ...8
1-4-1 GPS 觀測及精密水準測量 ...8
1-4-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS） ...12
1-4-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR） ...13
1-4-3-1 北部地區及中部地區 ...14
1-4-3-2 南部地區 ...15
1-4-3-3 東部地區 ...16

第二章、大地測量資料分析 ...18
2-1 GPS 連續站解算成果分析 ...18
2-1-1 GPS 連續站計算使用軟體與方法策略 ...18
2-1-2 GPS 資料品質檢測 ...19
2-1-3 GPS 連續站時間序列分析 ...20
2-2 2017 GPS 移動站測量外業督導與檢核 ...24
2-2-1 GPS 速度場計算方法 ...24
2-2-2 GAMIT 移動站速度場計算 ...27
2-2-3 GPS 坐標計算穩定度分析 ...31
2-2-4 坐標殘差分析 ...31
2-2-5 均方根誤差分析 ...32
2-2-6 臺北地區 GPS 觀測成果分析 ...33
2-2-7 恆春地區 GPS 觀測成果分析 ...36
2-2-8 桃竹苗地區 GPS 歷年觀測成果分析 ...39
2-2-9 嘉南地區 GPS 觀測成果分析 ...40
2-2-10 高屏地區 GPS 觀測成果分析 ...42
2-2-11 中部地區 GPS 歷年觀測成果分析 ...43
2-2-12 東部地區 GPS 歷年觀測成果分析 ...48
2-2-13 宜蘭地區 GPS 歷年觀測成果分析 ...49

2-3 精密水準測量精度分析 51
2-3-1 精密水準測量精度分析 51
2-3-2 水準垂直速度場之推求 52
2-3-3 台 2_石門至萬里測線 53
2-3-4 士林至三芝測線 57
2-3-5 淡水至士林測線 60
2-3-6 五股至臺北測線 63
2-3-7 縣 115_新屋至童話世界測線 66
2-3-8 縣 122_新竹至五峰測線 69
2-3-9 縣 117_新竹至峨眉測線 73
2-3-10 苗栗至南庄測線 76
2-3-11 縣 132_大安至東勢測線 79
2-3-12 縣 136_龍井至太平測線 82
2-3-13 跨車籠埔斷層之短測線 85
2-3-14 縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線 88
2-3-15 縣 150-台 16_北斗至水里測線 92
2-3-16 縣 164_金湖至瑞峰測線 95
2-3-17 縣 174_北門至楠西測線 99
2-3-18 台 19 甲_善化至關廟測線 102
2-3-19 縣 182_安平至龍崎測線 106
2-3-20 台 28_路竹至茂林測線 109
2-3-21 台 22_岡山至安坡測線 112
2-3-22 佳冬至七佳測線 115
2-3-23 恆春半島地區測線 118
2-3-24 台 20_新化至玉井測線 125
2-3-25 嶺頂至瀧澗測線 126
2-3-26 光復至豐濱測線 129
2-3-27 紅葉至靜浦測線 132
2-3-28 東成至富岡測線 135
2-3-29 梗枋-東澳測線 138
2-4 全台速度場 142
2-4-1 全台速度場 142
2-4-2 臺灣活動斷層潛勢圖 147
2-5 西南部單頻 GPS 之解算成果 154
2-6 陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果報告 157

第三章、中部地區雷達影像分析 158
3-1 中部地區 PS-InSAR 成果資料分析 159
3-1-1 ERS1/2 159
3-1-2 ENVISAT 160
3-1-3 ALOS 161

3-1-4 SENTINEL-1A 162
3-2 GPS 連續站周圍 PS 點之時間序列(期中階段測試結果) 164
3-3 中部地區斷層剖面分析 166
3-3-1 彰化斷層（C1、C3）、車籠埔斷層（C2、C3）、大茅埔-雙冬斷層（C2、C3） 167
3-3-1-1 地表變形觀測 167
3-3-1-2 構造解釋 167
3-3-2 梅山斷層（C4） 174
3-3-2-1 地表變形觀測 174
3-3-2-2 構造解釋 174
3-3-3 九芎坑斷層（C5）、大尖山斷層（C5） 177
3-3-3-1 地表變形觀測 177
3-3-3-2 構造解釋 177

第四章、中部地區地表速度場分析 180
4-1 GPS 連續站、移動站及 PSInSAR 測量資料整合與分析 180
4-2 中部地區應變速率之空間分布 185
4-2-1 應變計算方法 185
4-2-2 應變計算結果 186
4-2-3 應變計算結論 190

第五章、斷層模型建置 191
5-1 BLOCKS 斷層模型 193
5-1-1 斷層模型原理 193
5-1-2 斷層模擬使用參數 193
5-1-3 斷層模擬結果 194
5-2 DEFNODE 斷層模型 204
5-2-1 斷層模型原理 204
5-2-2 斷層模擬結果 206
5-3 基線應變反演模型(Baseline Inversion Model) 214
5-3-1 斷層模型原理 214
5-3-2 斷層模擬結果 216
5-4 最佳斷層幾何參數評估 222

第六章、結論 224
參考文獻 226
委員審查意見 228
期中委員審查意見 228
期末委員審查意見 232

（附錄請參閱光碟）

［附錄 2-1］106 年期末_CGPS 時間序列

［附錄 2-2］106 年期末_CGPS 速度表

［附錄 2-2.1］106 年期末_GPS 移動站時間序列

［附錄 2-2.2］106 年期末_GPS 移動站速度表

［附錄 2-3.1］106 年期末_精密水準時間序列

［附錄 2-3.2］106 年期末_精密水準速度表

［附錄 2-5］106 年期期末_單頻 GPS 時間序列

表目錄

表 A：預期進度甘梯圖（Gantt Chart）：計畫進度控制及檢討之依據。 XIII
表 B：預期進度查核點（Check Point）：計畫進度控制及檢討之依據。 XIV
表 C：期末須交付之各項工作項目。 XVI
表 1-1.1：中央地質調查所建置的GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。 3
表 2-5.1：西南部單頻 GPS 站解算資料統計表。 155
表 5-1.1：8 條斷層之斷層模型參數。 191
表 5-1.2：BLOCK model 所採用之三組模型參數。 194
表 5-1.3：BLOCK 三組模型模擬成果。 199
表 5-2.1：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。 213
表 5-2.2：斷層之地質滑移速率約束值（Shyu et al., 2016）及平均滑移速率估算值。 213
表 5-3.1：三義斷層、屯子腳斷層、木屐寮-六甲斷層斷層參數。 216
表 5-3.2：三組模型之斷層滑移速率平均值（mm/yr）。 221

圖目錄

圖 1-1.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。 4
圖 1-1.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。 5
圖 1-1.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。 5
圖 1-4.1：2002–2016 年臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之水平速度場。 10
圖 1-4.2：2002–2016 年臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。 11
圖 1-4.3：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖。 12
圖 1-4.4：整合歷史資料至 2016 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場。 13
圖 1-4.5：北部地區及中部地區之衛星影像視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 14
圖 1-4.6：南部地區之衛星影像視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 16
圖 1-4.7：東部地區之雷達影像視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 17
圖 2-1.1：MESN 測站資料接收度低於 80%。 19
圖 2-1.2：SANI 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。 19
圖 2-1.3：全臺連續 GPS 測站近三年資料精度分析。 20
圖 2-1.4：整合地調所連續 GPS 測站 GS01 歷史資料至 2017 年 04 月之時間序列。 21
圖 2-1.5：整合歷史資料至 2017 年 10 月，修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常之年速度場。 22
圖 2-1.6：整合歷史資料至 2017 年 10 月，修正同震位移、週期性變化及測站異常之年速度場。 23
圖 2-2.1：未受地震影響之 GPS 點位時間序列。 25
圖 2-2.2：受地震影響且震後之地表位移速率並無發生改變之 GPS 點位時間序列。 25
圖 2-2.3：受地震影響且震後之地表位移速率亦發生改變之 GPS 點位時間序列。 26
圖 2-2.4：受地震影響並記錄到震後非線性地表位移之 GPS 點位時間序列。 26
圖 2-2.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2016 年 GPS 水平方向速度場。 28
圖 2-2.6：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2016 年 GPS 垂直方向速度場。 29
圖 2-2.7：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2016 年 GPS 水平方向速度殘差分布。 ...29
圖 2-2.8：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2007 年 GPS 垂直方向速度殘差分布。 ...30
圖 2-2.9：2002~2016 年中部地區 GPS 移動站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 ...30
圖 2-2.10：中部地區 GPS 移動站 GAMIT 及 Bernese 解算速度差異及其速度誤差之關係圖。 31
圖 2-2.11：2002-2016 年及 2017 年 GPS 點位坐標殘差分布圖。 32
圖 2-2.12：2002–2016 年及 2017 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 32
圖 2-2.13：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 33
圖 2-2.14：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2017 年之垂直方向速度場。 34
圖 2-2.16：臺北地區 GPS 移動站 GA69 及連續站 GS10 周圍環境圖。 34
圖 2-2.17：臺北地區 GPS 移動站連續站 GS10 周圍環境圖。 35
圖 2-2.18：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（恆春西台地-佳樂水）時間序列分析圖。 36
圖 2-2.19：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 37
圖 2-2.20：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2017 年之 GPS 垂直方向速度場。 38
圖 2-2.21：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 39
圖 2-2.22：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場。 39

圖 2-2.23：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（安平–龍崎）時間序列分析圖。 40
圖 2-2.24：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....41
圖 2-2.25：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 41
圖 2-2.26：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....42
圖 2-2.27：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 43
圖 2-2.28：2002~2017 年中部地區 GPS 連續測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 44
圖 2-2.29：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....44
圖 2-2.30：左圖為 GPS 連續站 FUNY、PINT 與 YUNL 之坐標時間序列 45
圖 2-2.31：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（王功-草屯-埔里）時間序列分析圖。 45
圖 2-2.32：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....46
圖 2-2.33：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。.....47
圖 2-2.34：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（紅葉-靜浦）時間序列分析圖。 48
圖 2-2.35：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....49
圖 2-2.36：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。.....49
圖 2-2.37：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....50
圖 2-2.38：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）2004~2017 年之 GPS 垂直方向速度場。 50
圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。 51
圖 2-3.2：臺北地區之水準垂直速度場。 53
圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。 53
圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較。.....54
圖 2-3.5：石門至萬里測線之時間序列。 55
圖 2-3.6：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 56
圖 2-3.7：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較。.....57
圖 2-3.8：士林至三芝測線之時間序列。 58
圖 2-3.9：士林至三芝測線水準高程變化圖。 59
圖 2-3.10：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。.....60
圖 2-3.11：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之間序列比較。.....60
圖 2-3.12：淡水至士林測線之時間序列。 61
圖 2-3.13：淡水至士林測線水準高程變化圖。 62
圖 2-3.14：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。 63
圖 2-3.15：五股至臺北測線之時間序列。 64
圖 2-3.16：五股至臺北測線水準高程變化圖。 65
圖 2-3.17：桃竹地區之水準垂直速度場。 66
圖 2-3.18：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較。 66
圖 2-3.19：新屋至童話世界測線之間序列.....67
圖 2-3.20：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 68
圖 2-3.21：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較。 70
圖 2-3.22：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較。.....70

圖 2-3.23：水準點位 T001 與連續站 GS02 之時間序列比較。.....70
圖 2-3.24：新竹至五峰測線之時間序列.....71
圖 2-3.25：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。.....72
圖 2-3.26：水準點位 G416 現地情形。.....72
圖 2-3.27：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較。.....73
圖 2-3.28：新竹至峨眉測線之時間序列。.....74
圖 2-3.29：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。.....75
圖 2-3.30：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較。.....76
圖 2-3.31：苗栗地區之水準垂直速度場。STNF 為獅潭斷層。.....76
圖 2-3.32：苗栗至南庄測線之時間序列。.....77
圖 2-3.33：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。.....78
圖 2-3.34：台中地區之水準垂直速度。.....79
圖 2-3.35：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較。.....80
圖 2-3.36：大安至東勢測線之時間序列。.....80
圖 2-3.37：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。.....81
圖 2-3.38：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較。.....82
圖 2-3.39：水準點位 G929 與連續站 GS40 之時間序列比較。.....82
圖 2-3.40：龍井至太平測線之時間序列。.....83
圖 2-3.41：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。.....84
圖 2-3.42：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較。.....85
圖 2-3.43：五光至黃竹測線之時間序列。.....86
圖 2-3.44：五光至黃竹水準高程變化圖。.....87
圖 2-3.45：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震前）。.....88
圖 2-3.46：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震後至今）。.....89
圖 2-3.47：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較。.....89
圖 2-3.48：王功至草屯測線及草屯至埔里測線之時間序列。.....90
圖 2-3.49：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。.....91
圖 2-3.50：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較。.....92
圖 2-3.51：北斗至水里測線之時間序列。.....93
圖 2-3.52：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。.....94
圖 2-3.53：嘉義地區之水準垂直速度場。.....95
圖 2-3.54：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。.....95
圖 2-3.55：水準點位 G742 與連續站 S103 之間序列比較。.....96
圖 2-3.56：金湖至瑞峰測線之時間序列。.....97
圖 2-3.57：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。.....98
圖 2-3.58：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震前）。.....99
圖 2-3.59：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震後至今）。.....99
圖 2-3.60：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較。.....100
圖 2-3.61：北門至楠西測線之時間序列。.....100
圖 2-3.62：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。.....101
圖 2-3.63：南部地區之水準垂直速度場（2010 甲仙地震前）。.....102
圖 2-3.64：南部地區之水準垂直速度場（2010 甲仙地震後至今）。.....103

圖 2-3.65：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較。 103
圖 2-3.66：善化至關廟測線之時間序列。 104
圖 2-3.67：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 105
圖 2-3.68：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較。 106
圖 2-3.69：安平至龍崎測線之時間序列。 107
圖 2-3.70：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。 108
圖 2-3.71：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較 109
圖 2-3.72：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較。 109
圖 2-3.73：路竹至茂林測線之時間序列。 110
圖 2-3.74：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。 111
圖 2-3.75：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較。 112
圖 2-3.76：岡山至安坡測線之時間序列。 113
圖 2-3.77：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。 114
圖 2-3.78：佳冬-七佳之水準垂直速度場。 115
圖 2-3.79：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。 115
圖 2-3.80：佳冬至七佳測線之時間序列。 116
圖 2-3.81：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。 117
圖 2-3.82：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年 12 月 26 日恆春地震前）。 119
圖 2-3.83：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年 12 月 26 日恆春地震後至 2010 年 4 月 2 日速度發生變化）。 119
圖 2-3.84：恆春半島之水準垂直速度場（2010 年 4 月 2 日後至 2015 年 1 月 4 日速度發生變化）。 120
圖 2-3.85：恆春半島之水準垂直速度場（2015 年 1 月 4 日速度發生變化至今）。 120
圖 2-3.86：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較。 121
圖 2-3.87：恆春西台地至佳樂水測線之時間序列。 121
圖 2-3.88：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較。 122
圖 2-3.89：南樹林至鵝鑾鼻測線之時間序列。 122
圖 2-3.90：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。 123
圖 2-3.91：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。 124
圖 2-3.92：台 20_新化至玉井測線路線圖。紅色三角形為水準路線圖。 125
圖 2-3.93：花東地區之垂直速度場。 126
圖 2-3.94：水準點位 G971 與連續站 YENL 之時間序列比較。 127
圖 2-3.95：嶺頂至瀧澗之時間序。 127
圖 2-3.96：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。 128
圖 2-3.97：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較 129
圖 2-3.98：光復至豐濱測線之時間序列。 130
圖 2-3.99：光復至豐濱水準高程變化圖。 131
圖 2-3.100：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較 132
圖 2-3.101：紅葉至靜浦測線之時間序列。 133
圖 2-3.102：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 134
圖 2-3.103：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較。 135
圖 2-3.104：東成至富岡測線之時間序列。 136

圖 2-3.105：東成至富岡測線水準高程變化圖。.....137
圖 2-3.106：宜蘭地區之水準垂直速度場。.....139
圖 2-3.107：水準點位 GG83 與連續站 SUAO 之時間序列比較。.....139
圖 2-3.108：梗枋至東澳測線之時間序列。.....140
圖 2-3.109：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。.....141
圖 2-3.110：水準點位 9053 現地狀況。.....141
圖 2-4.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。.....144
圖 2-4.2：2002 年至 2017 全臺垂直速度場。.....146
圖 2-4.3：應變場圖。.....148
圖 2-4.4：水平速度場圖。.....148
圖 2-4.5：垂直速度場圖。.....149
圖 2-4.6：剪應變圖。.....149
圖 2-4.7：旋轉率圖。.....150
圖 2-4.8：第一版臺灣應變速率場與活動斷層潛勢圖。.....151
圖 2-4.9：第二版臺灣應變速率場與活動斷層潛勢圖。.....152
圖 2-4.10：第三版臺灣應變速率場與活動斷層潛勢圖。.....153
圖 2-5.1：西南部單頻 GPS 站點位分布。.....154
圖 2-5.2：西南部單頻 GPS 站解算成果時間序列。.....155
圖 2-5.3：西南部單頻 GPS 站觀測值與擬合值之殘差標準差結果。.....156
圖 2-5.4：西南部單頻 GPS 站 misfit 標準差與距約制站(WHES)距離之關係圖。.....156
圖 2-5.5：西南部單頻 GPS 站解算相對澎湖測站 S01R 速度場分布圖。.....156
圖 2-6.1：臺灣地區 2017 年規模大於 4.0 之地震事件分布圖。.....157
圖 3.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。.....159
圖 3-1.1：ERS 衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量。.....160
圖 3-1.2：ENVISAT 衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量。.....161
圖 3-1.3：ALOS（衛星軌道 446 像幅編號 460 & 470）與 GPS 視衛星方向速率比對。.....162
圖 3-1.4：Sentinel-1A 視衛星方向速率。.....163
圖 3-2.1：ERS（1996/1～1999/7）時期、ENVISAT（2007/6～2008/6）時期及 ALOS（2006/12～2011/2）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。.....164
圖 3-2.2：ENVISAT（2007/6～2008/6）時期及 ALOS（2006/12～2011/2）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。.....165
圖 3-3.1：中部地區使用之剖面線位置圖。.....166
圖 3-3.2：C1~C3 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。.....168
圖 3-3.3：C1 及 C2 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。.....168
圖 3-3.4：C1~C2 剖面速度場圖。.....169
圖 3-3.5：C1 剖面時間序列。.....170
圖 3-3.6：C2 剖面時間序列。.....170
圖 3-3.7：C3 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。.....172
圖 3-3.8：C3 剖面時間序列。.....172
圖 3-3.9：C3 剖面速度場圖。.....173
圖 3-3.10：C4 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。.....174
圖 3-3.11：C4~C6 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量。.....175

圖 3-3.12：C4 剖面速度場圖。.....176
圖 3-3.13：C4 剖面時間序列。.....176
圖 3-3.14：C5 之水平速度場。.....177
圖 3-3.15：C5 剖面速度場圖。.....178
圖 3-3.16：C5 剖面時間序列.....179
圖 4-1.1：觀測點與網格三頂點示意圖。.....184
圖 4-1.2：臺灣中部區域內差結果。.....184
圖 4-2.1：中部地區應變場圖。.....187
圖 4-2.2：中部地區剪應變場圖。.....188
圖 4-2.3：中部地區之旋轉率分佈圖。.....189
圖 5-1.1：模型建置中所使用之構造剖面位置。.....191
圖 5-1.2：模型建置中所使用之構造剖面位置。.....192
圖 5-1.3：第一組參數斷層模擬面走向滑移速率。.....196
圖 5-1.4：第一組參數斷層模擬面傾向滑移速率。.....196
圖 5-1.5：第一組參數斷層模擬面總滑移速率。。.....196
圖 5-1.6：第二組參數斷層模擬面走向滑移速率。.....197
圖 5-1.7：第二組參數斷層模擬面傾向滑移速率。.....197
圖 5-1.8：第二組參數斷層模擬面總滑移速率。.....197
圖 5-1.9：第三組參數斷層模擬面走向滑移速率。.....198
圖 5-1.10：第三組參數斷層模擬面傾向滑移速率。.....198
圖 5-1.11：第三組參數斷層模擬面總滑移速率。.....198
圖 5-1.12：第一組參數 GPS 水平速度反演量。.....201
圖 5-1.13：第二組參數 GPS 水平速度反演量。.....202
圖 5-1.14：第三組參數 GPS 水平速度反演量。.....203
圖 5-2.1：(a)本研究所使用的臺灣中部三維塊體模型及活動斷層分布。.....205
圖 5-2.2：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置及誤差範圍。.....208
圖 5-2.3：(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。.....209
圖 5-2.4：(a) 推求的斷層長期滑移速率。.....210
圖 5-2.5：(a) GPS 觀測速度場 (b) 最佳塊體模型所預估的地表運動 (c) 模型預估的殘差值。
.....211
圖 5-2.6：各塊體內之內部形變應變大小。.....212
圖 5-3.1：斷層僅受到滑移虧損率對地表影響之速率。.....217
圖 5-3.2：模型一，滑移虧損率，基線模型反演成果。.....218
圖 5-3.3：模型二，滑移虧損率，基線模型反演成果。.....219
圖 5-3.4：模型三，滑移虧損率，基線模型反演成果。.....220
圖 5-3.5：斷層模型 1 所使用 misfit 值。.....221
圖 5-3.6：斷層模型 2 所使用 misfit 值。.....221
圖 5-3.7：斷層模型 3 所使用 misfit 值。.....221
圖 5-4.1：模型 1 的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。.....222
圖 5-4.2：模型 2 的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。.....223
圖 5-4.3：模型 3 的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。.....223

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

計畫名稱：斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（1/4）													
月 次 工 作 項 目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	備註
第一季查核點													
第二季查核點													
期中報告													
第三季查核點													
期末報告													
第四季查核點													
GPS 移動站及單頻站資料檢核及分析（由成大工作團隊負責）													
GPS 及水準測量規劃、督導（由成大工作團隊負責）													
中部地區斷層之斷層幾何參數（由成大工作團隊負責）													
GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算（由臺大工作團隊負責）													
PSInSAR 衛星影像分析（由臺大工作團隊負責）													
整合並綜合分析觀測資料（由成大工作團隊負責）													
預定進度（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

表 B：預期進度查核點（Check Point）：計畫進度控制及檢討之依據。

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第一季查核點） 1. 修正後之契約書與工作計畫書 2. 第一期款請款收據 3. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核12-1 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 11-1 月 c. 彙整以往 PS-InSAR 成果資料	三月三十一日	契約書與工作計畫書修正，第一期請款（金額）。
2	（第二季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻站及水準資料查核2-4 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 2-4 月 c. 處理連續 GPS 站周圍 PS 點之時間序列	六月三十日	第二季工作進度報告與繳交文件
3	（期中報告） 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 期中報告簡報資料 4. 會計報表 5. 第二期款請款收據	七月三十一日	期中報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況、第二期請款（金額）
4	（第三季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻及水準資料查核5-7 月 b. GPS 連續站計算及時序分析至5-7 月 c. 處理PSInSAR 時間序列分析	九月三十日	第三季工作進度報告與繳交文件
5	（期末報告） 1. 工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻站及水準資料8-9 月查核及分析 b. GPS 連續站計算及時序分析 8-9 月 c. 彙整中部地區活動斷層及潛在活動構造之斷層幾何參數各活動斷層的滑移虧損率 d. 綜合分析觀測資料 2. 期末報告書面資料初稿	十一月三十日	期末報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況

6	（第四季查核點，驗收） 1. 正式研究成果報告書30 份 2. 正式研究成果報告書電子檔10 份 3. 會計報表 4. 尾款請款收據	十二月三十一日	清點所有交付項目與教育訓練等契約承諾、尾款請款（金額）

查核點共計六個請標示於甘梯圖上（包括以季為單位之工作進度報告表、期中簡報及期末簡報）。

本欄內文字僅為範例，可依據個案狀況酌予修正內容。

表 C：期末須交付之各項工作項目。

	工作項目	章節
測量外業督導與檢核	1. 測量外業督導部份，GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段，共計 42 測段。以上數據以 2017 年度測量公司承辦之業務範圍為準。	2-2
	2. 測量外業檢核部份，抽樣 GPS 移動站分區測量數量 10%(小數點以下四捨五入)進行檢和測量，並針對 GPS 移動站測量成果與抽測結果進行基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。	2-2 2-3 2-4 2-5
連續 GPS 觀測站資料解算分析	1. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料(視實際交換所得資料而定)，進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場，並提供週期性變化結果(以超過兩年以上之資料做分析)。	2-1
移動式 GPS、精密水準測量及單頻 GPS 觀測網成果解算分析	1. 2017 年 GPS 移動站與精密水準測量成果解算誤差及成果分析。	2-2
	2. 完成全台 GPS 移動站與精密水準資料之時序分析，提供全台不同時期之加密水平與垂直速度場及應變速率場，並提供解算成果列表及成果圖。	2-3 2-4
	3. 解算西南部地區單頻 GPS 觀測網之成果與精度，並評估其取代 GPS 移動站之可行性。	2-5
中部地區雷達影像分析	1. 利用分析之 PS-InSAR 成果資料，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。並配合規劃區域，利用 PS-InSAR 技術時間序列分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊(規劃區域與委託機關溝通協調後決定)。	3-1 3-2 3-3
中部地區地表速度場分析與斷層參數求解	1. 整合 GPS 連續站、移動站及精密水準測量資料，求得區域性不同時期之三維變形資訊。	4-1 4-2 5-1 5-2 5-3 5-4
	2. 完成中部地區應變速度場之推求	
	3. 建立至少三個斷層模型來提供活動斷層及潛在的活動構造之短期斷層滑移速率、滑移虧損率及最佳斷層幾何參數等資訊。	
	4. 分析活動斷層地質敏感區之活動特性，提供中央地質調查所規劃建設。	
陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果報告	1. 利用單點定位技術（PPP）發展連續 GPS 近即時觀測，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一周內完成連續 GPS 速度場之解算工作（包含地調所提供之 GPS 連續觀測站高頻資料），並配合地調所測量外業等資料（GPS 移動站及精密水準測量），在完成所有觀測工作 3 週內提出分析成果報告。	2-6
製作第一版之臺灣地表變形圖(圖上同時標示相關重要構造)，並進行 1 次會議討論來修正呈現方式。		2-4-2

提供成果報告書內圖片「300dpi 以上清晰圖檔(電子檔)」以及計畫參與人員運用計畫執行成果所發表之相關著作電子檔。	
成果報告書 30 份、光碟片 10 份。	

摘要

本計畫分析臺灣全島近十數年來的 GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準測線及 PS-InSAR 資料，提供全臺地表速度場，接著透過斷層模型之建立，推估斷層短期滑移速率、滑移虧損率及最佳斷層幾何參數等資訊，期能提供斷層活動潛勢之分析工作，並提供活動斷層地質敏感區分析之參考。今年度計畫主要執行重點地區為臺灣中部地區之活動斷層及潛在活動構造。在 GPS 連續站資料處理方面，本計畫計算歷史資料累積至 2017 年 10 月全臺連續全球定位系統測站共 500 站，除分析線性速率外，還加入分析週期性與震後衰減之效應。分析速度場之後結果與過去只使用線性迴歸結果約略相同。此外，利用三年內的精度分析則可有效篩選出未來大地震發生後可用於動態解算之連續 GPS 測站。本計畫目前已完成 29 條精密水準主、副測線之計算分析與 700 個 GPS 移動站之資料計算。在 GPS 移動站的資料解算方面，本計畫比較由 GAMIT 及 Bernese 解算之中部地區速度場結果及各測站之坐標時間序列，指出兩者解算結果大致相符。速度誤差越小的測站，則兩種軟體解算出來的速度差異量就越小，此結果也可協助我們在未來瞭解各測站之環境品質。本計畫更發現臺灣地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此本計畫分為九個時間段來分別解算臺灣不同時期之地表速度場。PSInSAR 主要工作除彙整臺灣中部地區成果，另加入了 Sentinel-1A 於 2015 年至 2016 年初之全臺速度場。時間序列方面，挑選中部地區連續 GPS 測站 SANI 及 FUNY 與 PSInSAR 三個時期之時間序列比較，並針對中部地區斷層以 C 波段的 ERS 衛星及 ENVISAT 衛星進行時序分析。配合彙整中部地區斷層剖面分析可得到斷層空間與時間上的變化，此方法後續可再加以改進運用在其他區域斷層分析。在斷層模型建置方面，本期研究主要以 BLOCK、DEFNODE 與基線應變模型三個不同的斷層模型，評估中臺灣七條活動斷層之斷層滑移速率或滑移虧損速率。比較三個不同斷層模型在三組不同斷層幾何參數的不符值差異，同時參考地質與地球物理資料所判斷之最佳權重，本計畫提供後續最佳之斷層幾何參數。此外，三個不同斷層模型所提供之斷層滑移虧損速率顯示，大甲－彰化斷層（~4.6 mm/yr）在 DEFNODE 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率；車籠埔斷層（~10.3 mm/yr）在 BLOCKS 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率；大茅埔－雙冬斷層（5.5±2.3 mm/yr）、梅山斷層（5.8±2.7 mm/yr）、九芎坑斷層（6.8±2.4 mm/yr）、大尖山斷層（7.9±2.4 mm/yr）與觸口斷層（5.9±1.7 mm/yr）在三個斷層模型間的推估量差異並不特別顯著。上述之滑移虧損速率將提供後續地震潛勢評估所需之斷層參數。

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 slip rate deficit and optimized fault geometry parameters by adopting the fault models. The surface velocity field and the derived fault parameters will help to assess the probability analysis of major faults and to delineate the geologically sensitive areas of active faults. The main target area in this year is central Taiwan. In this project, we first calculate the daily solution and time series of 500 continuous GPS stations in Taiwan from December of 2016 to October of 2017. We use Nikolaidis's model to remove coseismic, post- seismic and periodic motion. The present velocity field shows a similar trend with previous long-term estimation. The precision analysis of three-year data susggests the countinuous GPS stations which could be adopted for coordinate kinematic calculation after the major earthquake. We also finish data processing from 29 leveling routes and 700 surveyed-mode GPS stations. For the surveyed-mode GPS calculation, the resultant coordinate cmparison of GAMIT and Bernese softwares indicates the surface velocity field is reliable in this project. We finally estimate nine velocity fields in Taiwan based on coordinate time series analysis of continuous GPS observations and leveling measurements. For the PS-InSAR works in Central Taiwan. we present velocity map produced from Sentinel-1A images in March of 2015 to Feburary of 2016. Besides, we chose the continuously GPS stations SANI and FUNY for PSInSAR time series comparison. For the fault model constructions, 7 active faults are selected as the target faults in central Taiwan. The BLOCK, DEFNODE and baseline inversion models are used in this project to evaluate the fault slip rate deficit distribution on the faults and suggest the optimized fault geometry parameters. The slip rate deficits on the Tachia-Changhua (~4.6 mm/yr), Chelungpu (~10.3 mm/yr), Tamaopu-Shuangtung (5.5±2.3 mm/yr), Meishan (5.8±2.7 mm/yr), Chiuchiungkeng (6.8±2.4 mm/yr), Tachienshan fault (7.9±2.4 mm/yr) and Chukou faults (5.9±1.7 mm/yr) are comparable in these three models. The slip rate deficits will also be provided to assess the probability analysis of major faults.

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，以及斷層鎖定所引致的地震災損可能更為嚴重。故對於活動斷層的加強調查與持續性觀測，以及瞭解活動斷層的運動特性與危害度分析就顯得非常急迫與重要。

經濟部中央地質調查所於 91－95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，逐年在臺灣陸上活動斷層帶設置全球定位系統（Global Positioning System，簡稱 GPS）監測網與精密水準測線。於 96－99 年「地震地質與地變動潛勢分析」計畫中，除了逐步累積 GPS 與精密水準之觀測成果，並開始嘗試各種斷層模型建置之測試，試圖藉由斷層模型來擷取地表變形資訊所顯示之斷層運動特性。在 98－101 年「斷層活動性觀測研究第二階段－斷層監測與潛勢分析研究」與 102－105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫中，已完成 86 站 GPS 連續站（表 1-1.1）、773 站 GPS 移動站及 42 條精密水準路線（含 29 條長測線及 13 條短測線）之設置（圖 1-1.1），並藉由高精度的 GPS 與水準觀測數據分析，瞭解各斷層於間震、同震以及震後的變形型態變化，進一步計算出間震期的斷層滑移速率與同震及震後的斷層面滑移特性。另外，PS-InSAR 衛星影像分析技術也在這一時期之計畫工作中被引進（圖 1-1.2 與圖 1-1.3），可針對大範圍的地表地形變化進行觀測，快速地獲得大區域面狀之地殼變形資訊。因此經由過去近十年之大地測量監測資料，我們觀測到包含東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部等數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域。

另一方面，在 98－101 年之「斷層活動性觀測研究第二階段－斷層監測與潛勢分析研究」計畫中，特別針對臺灣 8 條活動斷層（瑞穗斷層、車籠埔斷層、山腳斷層、新城斷層、六甲斷層、木屐寮斷層、池上斷層和小岡山斷層）嘗試進行斷層活動度及地震潛能分析，逐步研究詳細的斷層參數並評估其地震發生機率。在 102－105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫中，透過蒐集與分析地調所及國內既有之 33 條活動斷層資料，並參考日本地震研究推進本計畫及美國加州之經驗方法，將各孕震構造之活動特性予以統計數量化，以製作臺灣地區第一版之斷層活動潛勢圖。然而在此工作中，並未很好的將大地測量監測資料引用至此斷層活動潛勢分析工作中。因此，在本階

段之工作中，將試圖找到合適之方法將大地測量監測資料引用至斷層活動潛勢分析的工作中。

1-2 研究目的

本階段「斷層活動性觀測研究第四階段－地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」計畫的研究目的，（1）將著重在活動斷層模型的建置工作上，利用近十數年來的地表變形觀測結果，同時針對活動斷層及潛在的活動構造，採用三種以上的斷層模型進行參數反演，推估斷層短期滑移速率或滑移虧損率等資訊，並結合 102－105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫與後續計畫中所提出的斷層幾何參數進行評估，找出最佳的斷層幾何參數組合結果，其相關結果也將納入斷層潛勢分析計畫整體評估，作為製作臺灣活動斷層潛勢圖的重要參考依據。此外，（2）由於過去礙於大地測量資料蒐集時間長度之不足，特別是 GPS 移動站資料，難以對垂直速度場有足夠的解析能力，然而在蒐集近十數年的大地測量監測資料後，本階段計畫除持續分析中央地質調查所活動斷層觀測網之資料外，還將進一步解析這些數量龐大的大地測量監測資料，嘗試建立臺灣地區三維地表速度場之時空變化，並檢核其精度。（3）本階段計畫另嘗試利用單點定位技術（PPP）發展連續 GPS 近即時資料解算技術，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一周內完成連續 GPS 同震位移場之解算工作。

表 1-1.1：中央地質調查所建置的GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。

測站代碼	測站名稱	接收起始時間	測站代碼	測站名稱	接收起始時間
GS01	地調所	2002/06/17	GS48	警光山莊	2009/04/01
GS02	新竹高工(2015.08.17 廢站)	2004/10/21	GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01
GS03	工研院	2004/10/19	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS04	大埔美農場 (2009.11.11 廢站)	2004.10.16	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS52	新發國小	2009/12/18
GS06	民和國中	2004/10/21	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS07	培英國小	2004/10/21	GS54	大洲國中(2013.7.12 廢站)	2009/12/15
GS08	興華國小	2005/08/15	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS57	石門國小(2016.12.27 廢站)	2009/12/15
GS11	北投國小	2005/08/15	GS58	高士國小	2009/12/14
GS12	樂善國小	2005/09/06	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS13	國光國小	2005/08/16	GS60	永港國小	2009/12/18
GS14	西門國小	2005/09/13	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS63	太興國小	2010/09/24
GS17	太平國小	2005/09/14	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS65	茶山國小(2011.7.28 廢站)	2010/10/14
GS19	保長國小(2012.5.25 廢站)	2006/07/12	GS66	達邦	2010/09/28
GS20	龜山島	2006/08/04	GS67	新美國小	2010/09/28
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS68	三和國小	2010/12/17
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS23	五光國小	2006/05/30	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS73	新光國小	2012/11/02
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS74	內門國小	2012/11/02
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS76	新興國小	2012/11/02
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS77	深水國小	2012/11/14
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS78	溪洲國小	2013/10/22
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS79	中路國小	2013/10/16
GS33	永華國小	2006/06/22	GS80	田寮國中	2013/10/16
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS81	嘉興國中	2013/10/16
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS82	卓蘭實驗高中	2014/12/16
GS36	德化國小	2006/10/21	GS83	土城國小	2014/12/22
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS84	水里國中	2014/12/17
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2015/01/08
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS86	水美國小	2015/09/15
GS40	龍峰國小(2016.11.7 廢站)	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS42	東原國中	2007/11/23	GS89	新化國中	2015/09/14
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS90	新埔工作站	2016/09/02
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS91	香山高中	2016/09/02
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS46	來義國小	2009/01/06	GS93	七星山	2017/01/01
GS47	台電南展館 (2013.7.25 廢站)	2009/01/05			

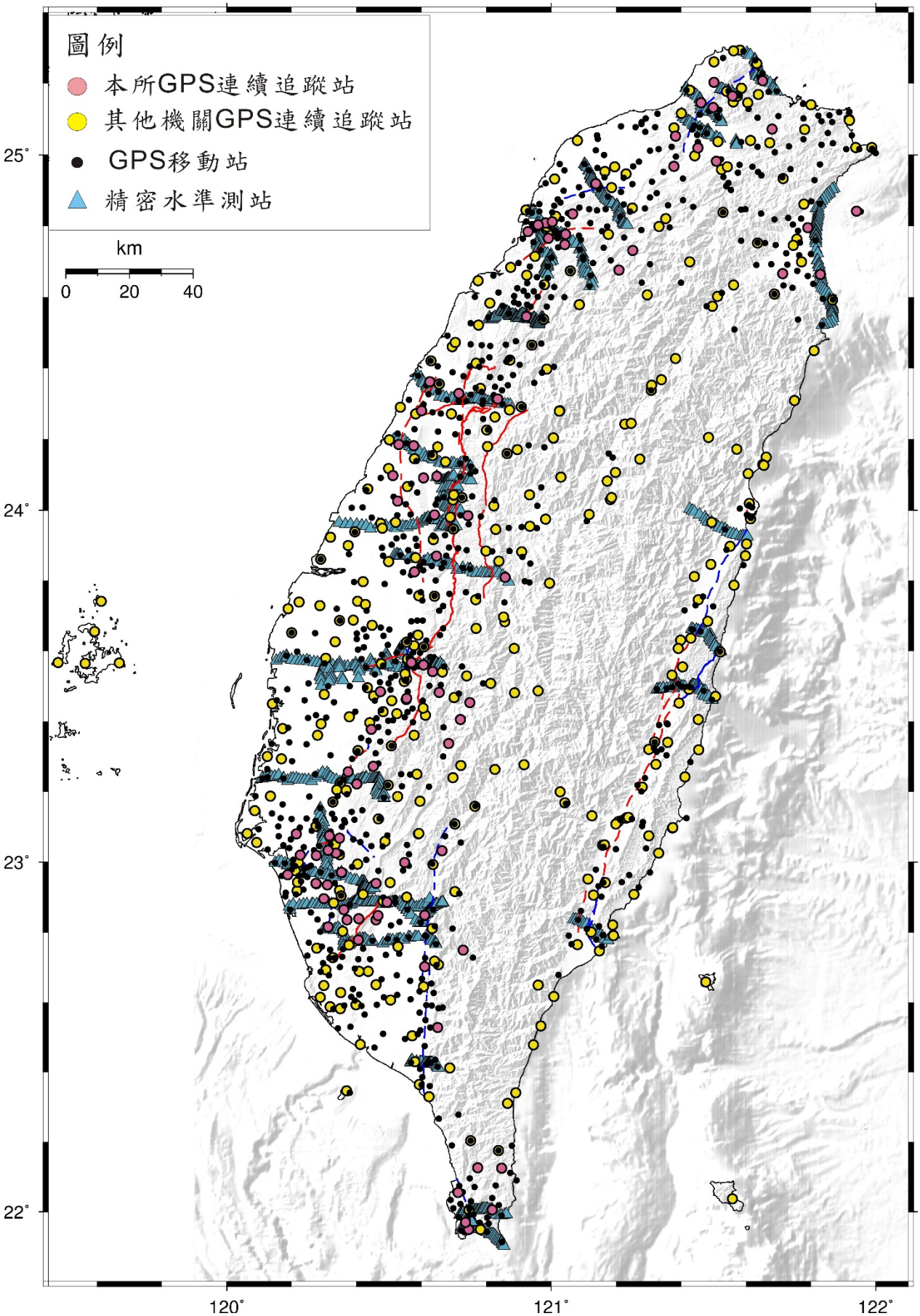


圖 1-1.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。包含 83 站 GPS 連續站、773 站 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。

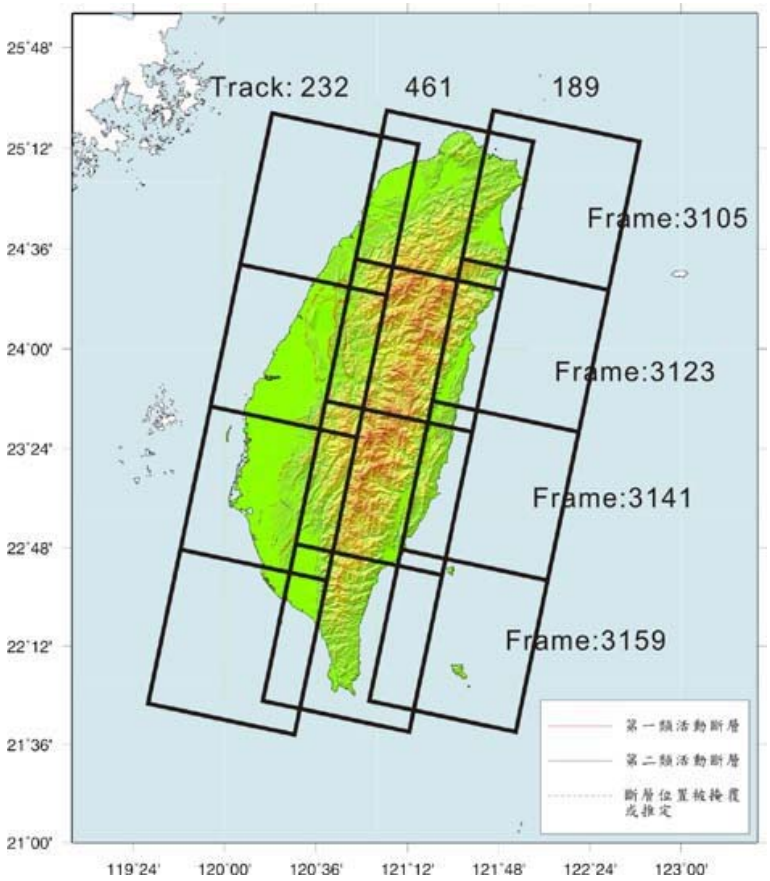


圖 1-1.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

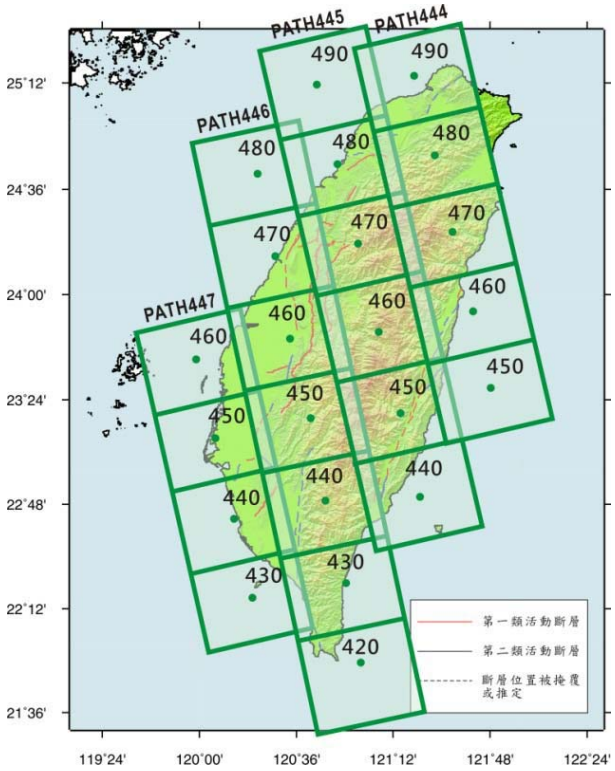


圖 1-1.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。

1-3 本年度工作概述

(1) 測量外業督導與檢核

a. 在測量外業督導部分，將全臺灣 GPS 移動站分布分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段。以上數據以各年度測量公司承辦之業務範圍為準。

b. 在測量外業檢核部分，抽樣 GPS 移動站分區測量數量 10%（小數點以下四捨五入）進行檢核測量，並針對 GPS 移動站測量成果與抽測結果進行基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。

(2) 連續 GPS 觀測站資料解算分析

處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場，並提供週期性變化結果（以超過兩年以上之資料做分析）。

(3) 移動式 GPS 及精密水準測量成果解算分析

完成全台 GPS 移動站與精密水準資料之時序分析，由連續 GPS 坐標時間序列判斷地震同震變形、震後變形及其他擾動所造成地表變形之時間，確認各時期之 GPS 移動站速度場及水準測量是否受相同影響，提供全台不同時期之加密水平與垂直速度場。

(4) 中部地區雷達影像分析

提供「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」計畫內中部地區 PS-InSAR 成果資料，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。並配合規劃區域，利用 PS-InSAR 技術時間序列分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊。

(5) 中部地區地表速度場分析與斷層參數求解

a. 整合 GPS 連續站、移動站及精密水準測量資料，求得區域性不同時期之三維變形資訊。

b. 利用速度場推求中部地區應變速率之空間分布情形。

c. 利用至少三種不同的斷層模型，使用斷層潛勢分析計畫提供之斷層幾何，反演短期斷層滑移速率或滑移虧損率及最佳斷層幾何參數等資訊，並進行整合分析，提供相關斷層參數供斷層潛勢分析工作所需。

d. 分析活動斷層地質敏感區之活動特性，提供中央地質調查所劃設建議。

(6) 連續 GPS 近即時資料解算技術

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（包含中央地質調查所提供之 GPS 連續觀測站高頻資料）。此外，成功大學工作團隊會配合中央地質調查所測量外業等資料

（GPS 移動站及精密水準測量），在完成所有觀測工作 3 週內提出分析成果報告。

(7) 臺灣西南部地區單頻 GPS 觀測網成果分析

解算西南部地區單頻 GPS 觀測網之成果與精度，並評估其取代 GPS 移動站之可行性，計畫第二年（107 年）可視第一年（106 年）效益擇不同地區辦理。

1-4 前一期工作成果

本計畫為 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」之延續計畫，上一階段之計畫工作成果說明如下。

1-4-1 GPS 觀測及精密水準測量

在過去的計畫工作中，將臺灣地區 2002－2016 年所測量之 GPS 移動站與連續站觀測資料作時序分析，藉由各站的坐標時間序列分析，可知各點之位移變化情形並求得各地區速度場分布。以臺北地區、宜蘭地區、桃竹苗地區、中部地區、嘉南地區、高屏地區、恆春地區及花東地區等 8 個測網，解算 773 座移動站之水平方向速度場（圖 1-4.1）。

由解算結果可知，桃竹苗地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。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。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，跨過潮州斷層及恆春斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr，恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41－62 mm/yr。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北北西。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。

精密水準部分（圖 1-4.2），大臺北地區之四條精密水準，皆為穩定沉陷，垂直速度大約落在-10 mm/yr 內。桃園地區之精密水準，除跨湖口斷層附近點位有些微的抬升速度（約 0 至 1 mm/yr），其餘點位之垂直速度約在-2 至 0 mm/yr。新竹地區之兩條精密水準在跨斷層速度並無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。苗栗地區之精密水準在跨斷層變化也不顯著，速度皆約在-5 mm/yr 上下。台中地區之兩條精密水準在跨斷層也無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。彰化、南投地區之精密水準在沿海一帶有相當大的沉陷量，最大沉陷速度達到-40 mm/yr，而進入南投山區最大有約 10 mm/yr 的抬升速度。雲林、嘉義地區之精密水準，在沿海一帶的垂直速度約為-20 至-15 mm/yr，而進入山區則約有 3 mm/yr 的抬升速度。台南地區之北門－楠西測線，也是呈現沿海沉陷、山區抬升的現象，平均垂直速度分別為-10 mm/yr 與 7 mm/yr；善化－關廟測線除少數點位沉陷，其餘大多落在 0－4 mm/yr 之間；安平－龍崎測線在龍船斷層附近約有 20 mm/yr 的速度變化。而高雄地區的路竹－茂林測線同樣也在龍船斷層鄰近地區有 15 mm/yr 的抬升速度；岡山－安坡測線在小岡山斷層西側約有-10 mm/yr，東側則約在-3 至 0 mm/yr。屏東地區之佳冬－七佳測線，在觸口斷層以西約有-20 mm/yr 的沉陷速度，東側則無顯著變化。恆春半島地區的時間段為 2010 至 2016 年，在恆春斷層以東有些微的抬升現象，速率 3 mm/yr。

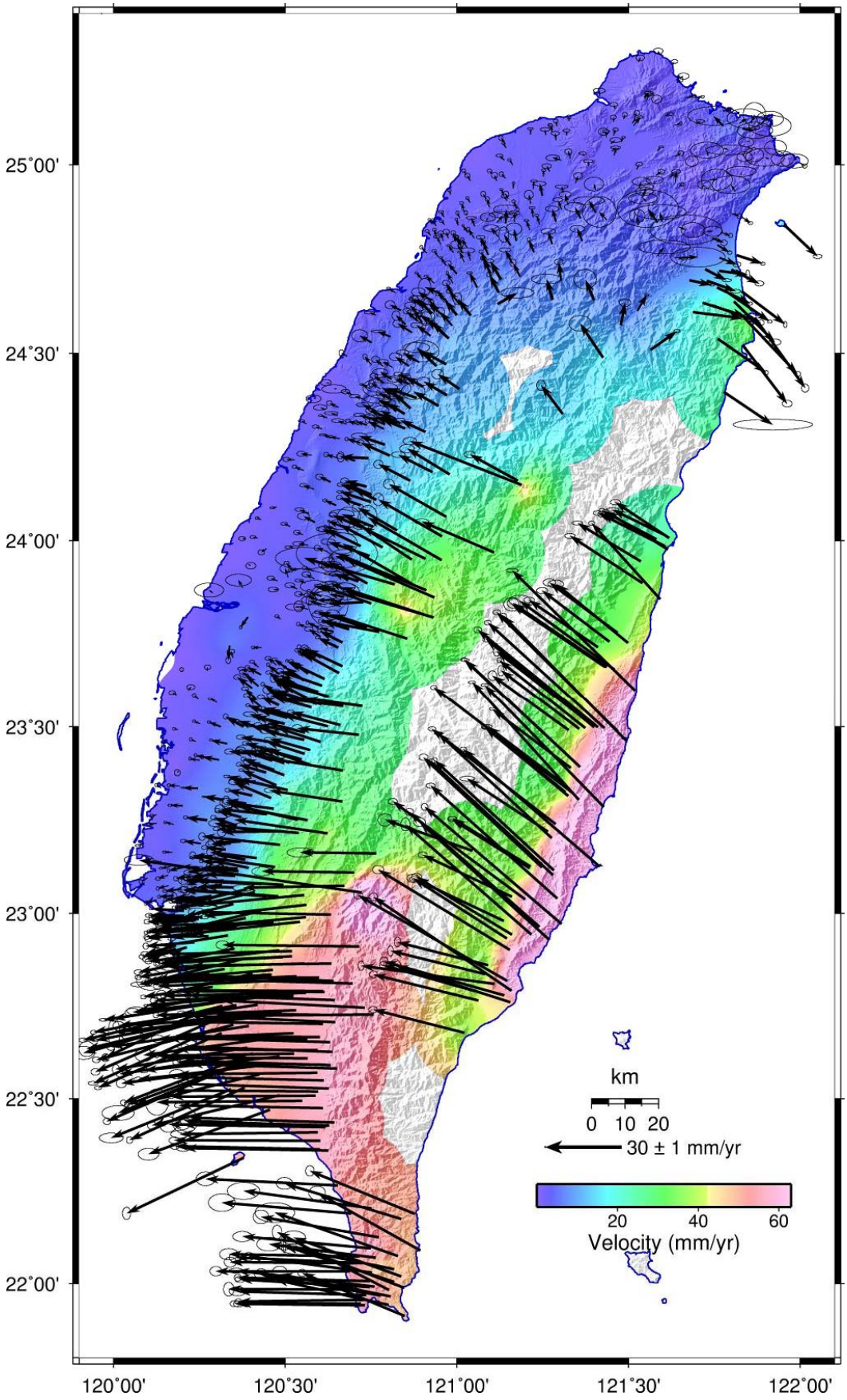


圖 1-4.1：2002－2016 年臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之水平速度場。

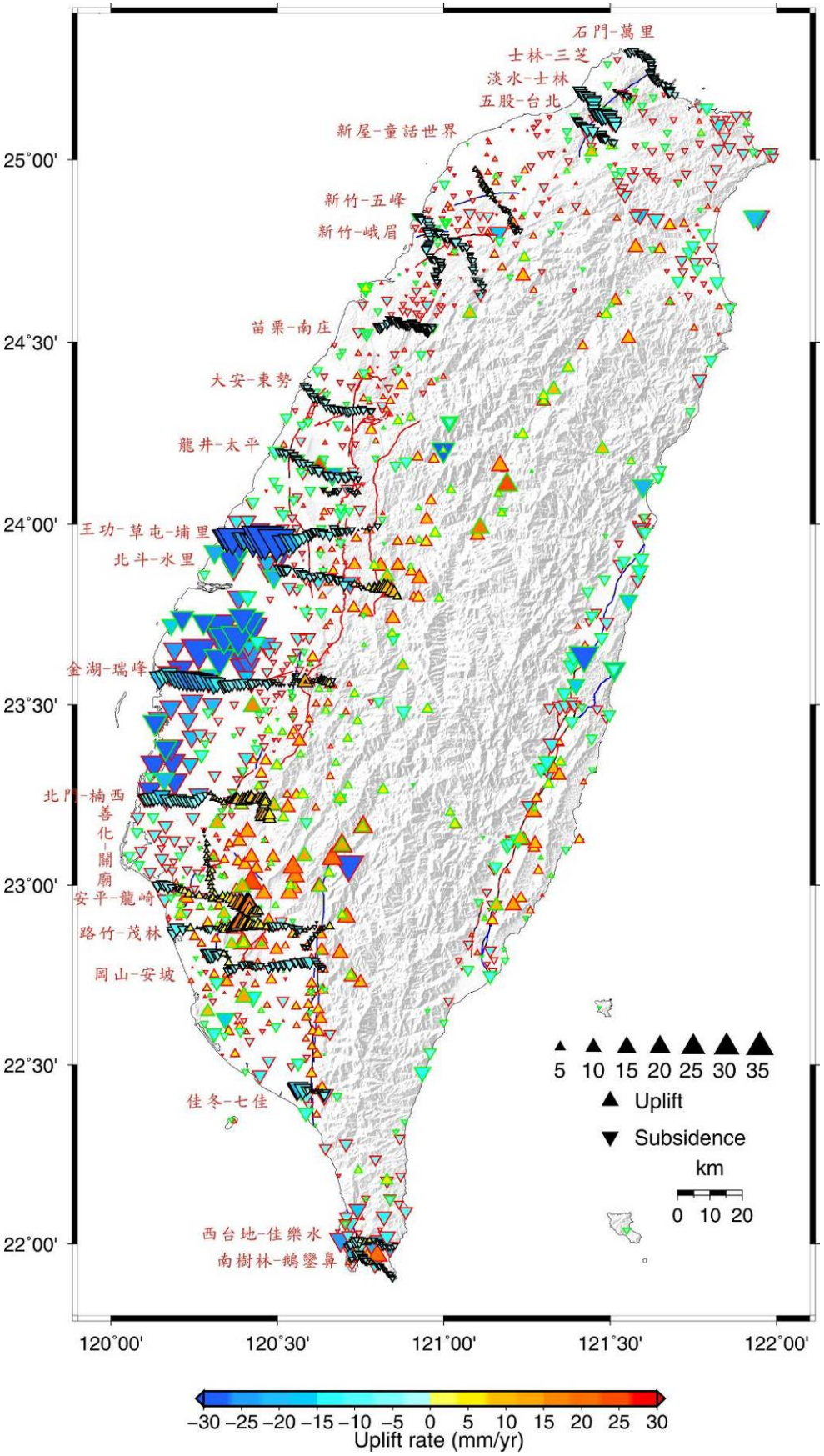


圖 1-4.2：2002－2016 年臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示水準、綠色邊框表示連續站、紅色邊框表示移動站。

1-4-2 全球衛星定位系統連續觀測站（CGPS）

GPS 連續站統計自 2015 年 12 月至 2016 年 11 月的連續 GPS 資料月報，利用點位透空圖分析資料接收品質，統計出所有交換測站資料接收度分布圖，明顯看出大部份接收度較低的測站都位於靠近中央山脈區域，建議應定期清除測站周圍環境，以避免測站遮蔽過度嚴重導致資料品質隨時間變差（圖 1-4.3）。

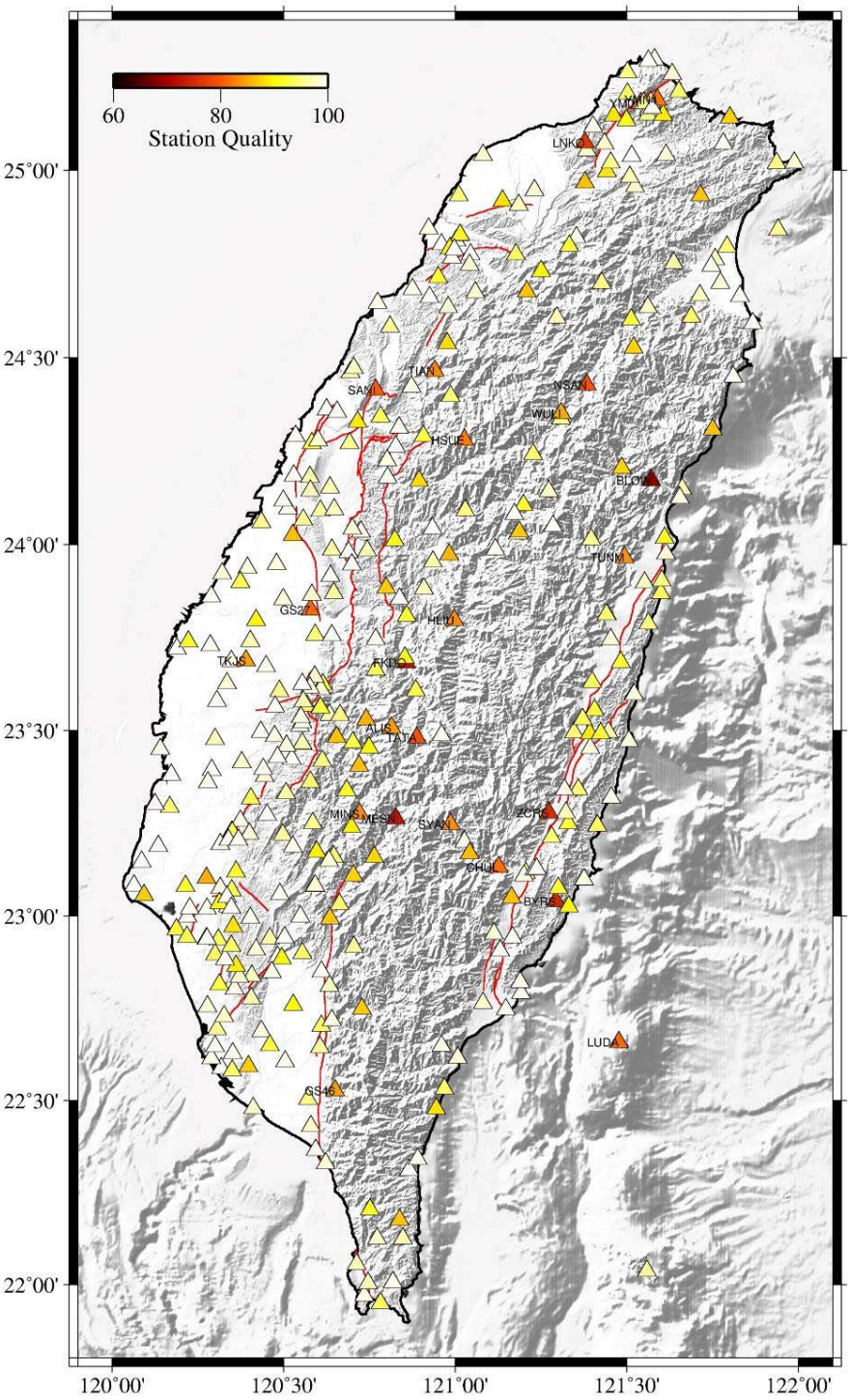


圖 1-4.3：GPS 連續觀測站接收度品質分布圖（顏色越深表示測站遮蔽越嚴重）。

分析由經濟部中央地質調查所所提供之全台連續全球定位系統（Continuous Global Positioning System，CGPS）連續測站，其包括中央地質調查所、中央氣象局、中央研究院、內政部、國土測繪中心、中正大學等單位。結果顯示水平速度場相對澎湖白沙，中南部測站多為東南往西北移動，台南以南地區多呈現東北往西南移動；另外北部地區則是由南往北移動，在宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為，此結果與過去長期解算結果約略相同（圖 1-4.4）。

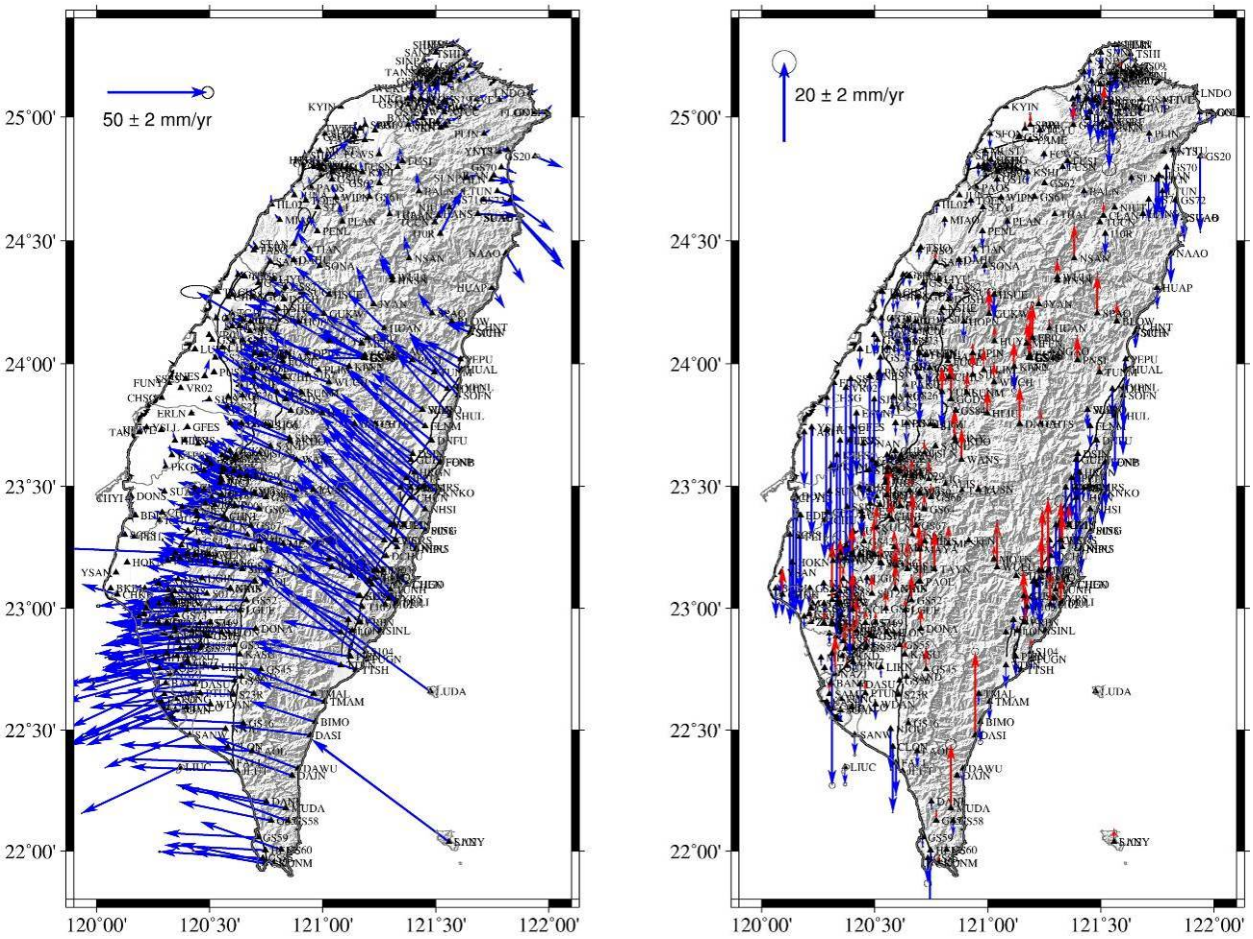


圖 1-4.4：整合歷史資料至 2016 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

1-4-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR）

上一階段計畫彙整臺灣地區由 ERS（European Remote Sensing Satellite）-1/2、ENVISAT（Environmental Satellite）以及 ALOS（Advanced Land Observing Satellite）等衛星所拍攝的 SAR 影像，利用 Stamps 軟體（Hooper et al., 2012）計算得到 PS-InSAR 成果來分析活動構造的活動情形。

1-4-3-1 北部地區及中部地區

ERS 衛星影像分析結果顯示，可以得到在這段期間（1996-1999），臺北盆地主要以向視衛星方向抬升的運動為主，最大抬升速率為位於士林、北投地區的 8 mm/yr。而桃園工業區則有最大下陷速率，約為 20 mm/yr（圖 1-4.5 左上）。整體而言，濁水溪以北，八卦山南段以西地區有明顯下陷，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，說明此資料的可信度高，並且可提供早期更全面性的地表變形速率（圖 1-4.5 左下）。ENVISAT 衛星影像分析結果顯示，在這段期間（2007-2008），臺北盆地主要以往視衛星方向下陷的運動為主，最大下陷速率為位於泰山、五股地區的 9 mm/yr，而盆地西側則為平均 3-4 mm/yr 的下陷速率（圖 1-4.5 中上）。濁水溪以北的溪湖、二林，以南的褒忠、土庫地區為明顯下陷地區，下陷率大約 40-50 mm/yr 左右。此外，在台中市南區也可觀察到大約 20-30 mm/yr 的下陷速率（圖 1-4.5 中下）。ALOS 衛星影像分析結果則顯示，在這段期間（2007-2011），臺北盆地主要以往視衛星方向輕微抬升或不動的運動為主（圖 1-4.5 右上）。濁水溪以北的溪湖、二林，以南的虎尾地區為明顯下陷地區，下陷率大約 45 mm/yr 左右（圖 1-4.5 右下）。

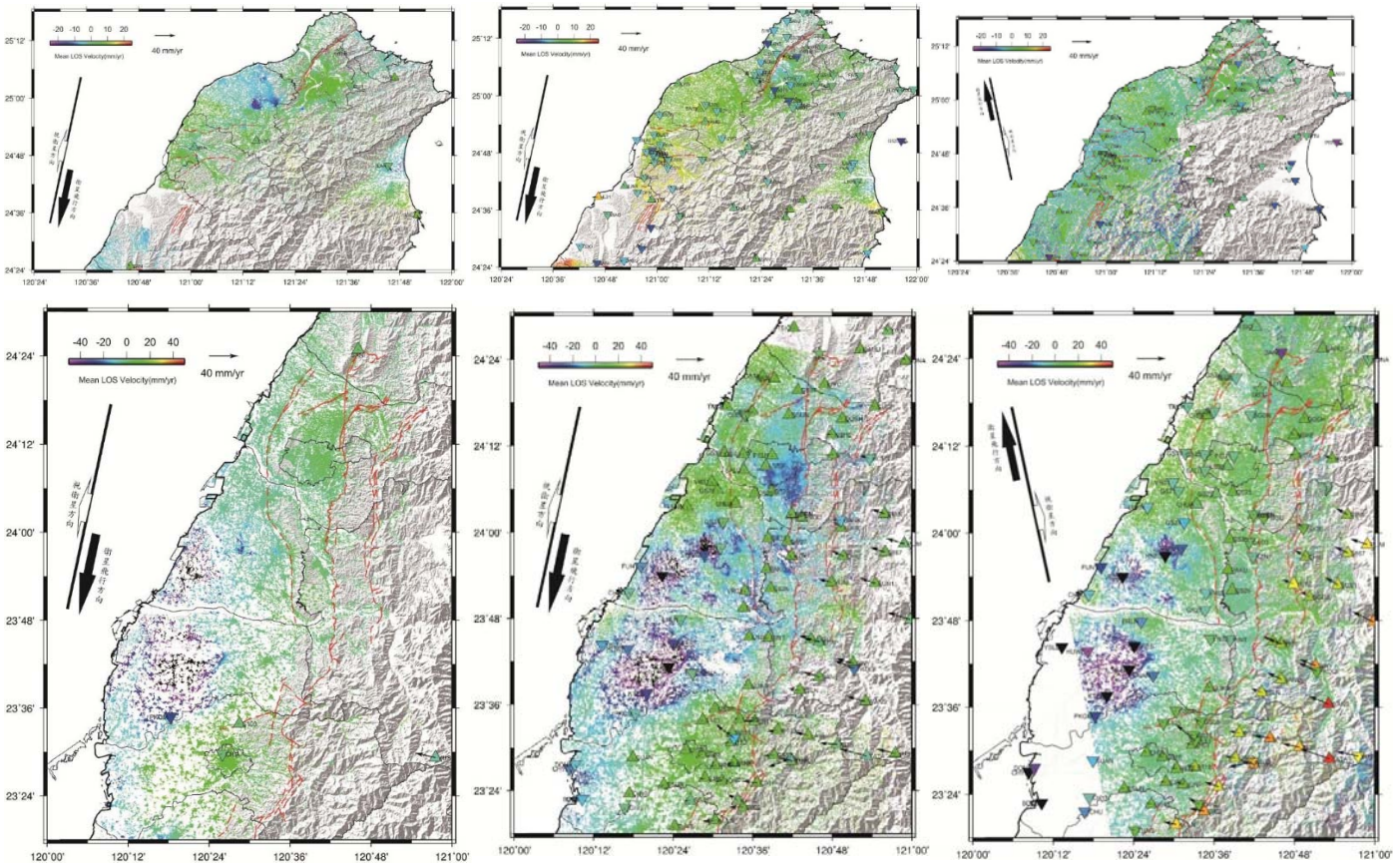


圖 1-4.5：北部地區及中部地區之衛星影像視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。北部地區參考點為連續 GPS 測站 YMSM，中部地區參考點為連續 GPS 測站 SANI，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。左圖為 ERS 衛星，中圖為 ENVISAT 衛星，右圖為 ALOS 衛星。

1-4-3-2 南部地區

ERS 衛星影像分析結果顯示，可以得到在這段期間（1995～1999），兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。以連續 GPS 測站 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。台南台地則擁有最大抬升量，速率約將近 20 mm/yr（S011 本身相對澎湖白沙擁有 10~15 mm/yr 的抬升量，因此台南台地真實抬升量應為 5～10 mm/yr。）此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。此外，跨過龍船斷層以及鳳山轉換帶也有明顯的速度不連續，速度梯度可達將近 20mm/yr，需持續關注（圖 1-4.6 左）。ENVISAT 衛星影像分析結果顯示，在這段期間（2004～2008），西南地區變形行為與 ERS 結果相似。以 S011 為不動點而言，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 1-4.6 中）。ALOS 衛星影像分析結果則顯示，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（2007～2010），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 1-4.6 右）。

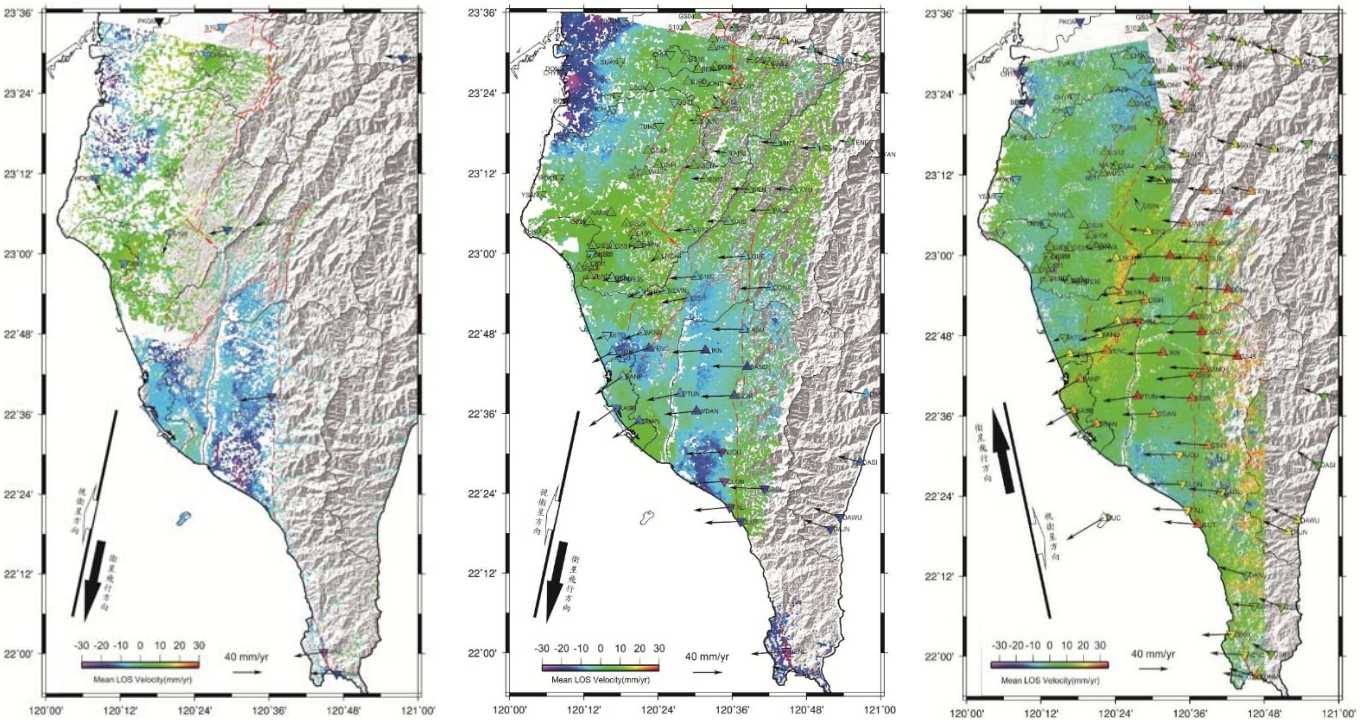


圖 1-4.6：南部地區之衛星影像視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。左圖為 ERS 衛星，中圖為 ENVISAT 衛星，右圖為 ALOS 衛星。

1-4-3-3 東部地區

ERS 衛星影像分析結果顯示，在這段期間（1995~1999），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 1-4.7 左）。ENVISAT 衛星影像分析結果顯示，在這段期間（2006~2009），跨過幾條主要斷層都沒有明顯的速度梯度差異。整體來說，只有北側向東跨過嶺頂斷層有些微的轉變為視衛星方向遠離與在卑南臺地向東跨過利吉斷層有較明顯視衛星方向拉近的速度梯度差異，約為 5 mm/yr。反而在跨過池上斷層並無明顯的速度梯度差異，可能為影像數目不夠導致干涉結果不好而造成（圖 1-4.7 中）。ALOS 衛星影像分析結果則顯示，在這段期間（2007~2010），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約 20–35 mm/yr 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 1-4.7 右）。

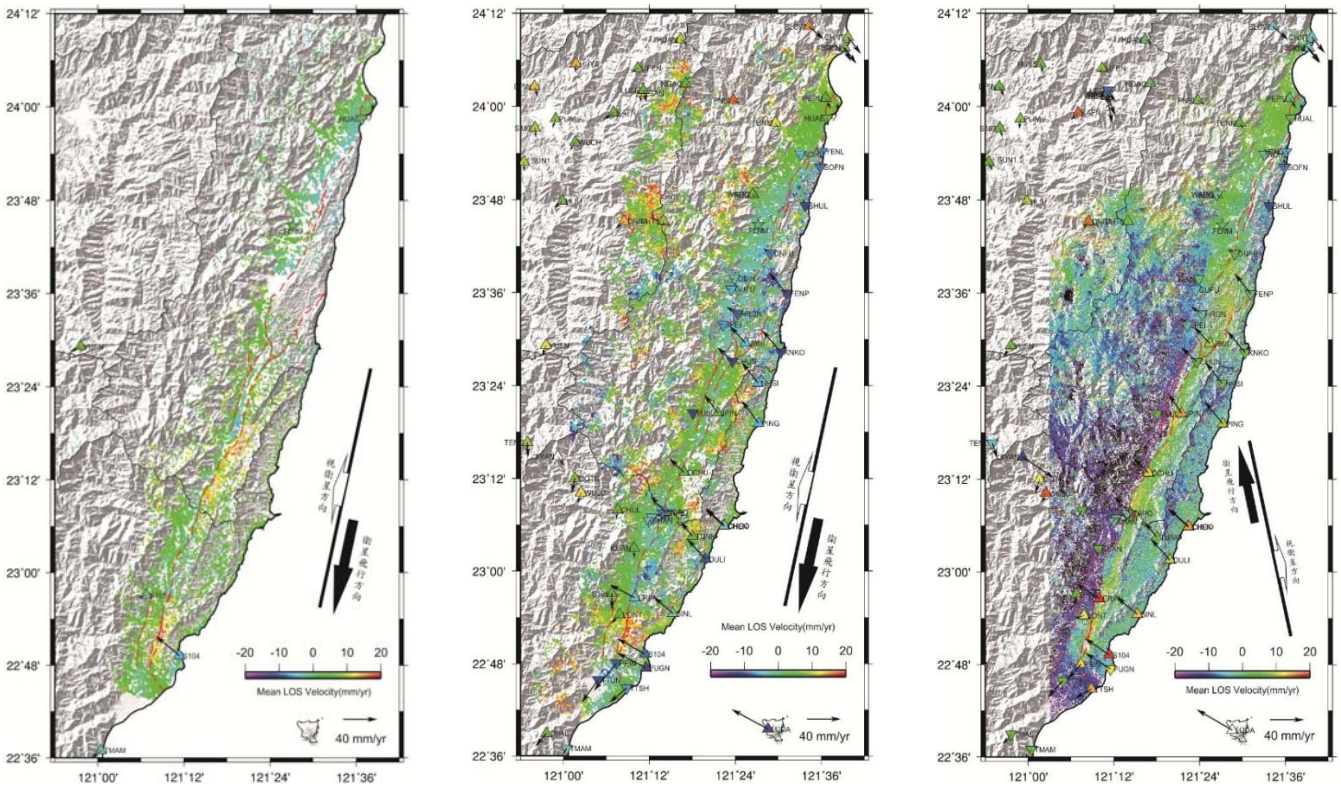


圖 1-4.7：東部地區之雷達影像視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近，冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。控制點為連續 GPS 站 FLNM，三角形為同時期 GPS 連續站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升，尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。左圖為 ERS 衛星，中圖為 ENVISAT 衛星，右圖為 ALOS 衛星。

第二章、大地測量資料分析

2-1 GPS 連續站解算成果分析

本次報告所使用之 GPS 連續站資料係由經濟部中央地質調查所所提供，連續站所屬機構包括中央地質調查所、中央研究院、中央氣象局、內政部、國土測繪中心、中正大學等單位，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 GIPSY-OASIS 解算軟體計算求解精密之測站坐標。GIPSY 是一種精密單點定位之技術，其優點相較 GAMIT/GLOBK 是不需要分小網方式解算，解算速度快約數十倍，且各站的解算結果有獨立性，不會受到資料較差的測站干擾。其最突出的特點為利用非差分精密單點定位（Precise Point Positioning，PPP）方式處理數據，在參數上採用 JPL 的 Gerald Bierman 改進的卡曼濾波算法，該算法不但計算快速，而且數據穩定、精確。而其缺點在於不能像雙差方法消除共同誤差源的部份，在使用參數處理誤差方面較為麻煩。不過可使用 Ambizap 利用雙差方法的優點，消除共同誤差改善精度，解算成果略優於 GAMIT 或 BERNESE。

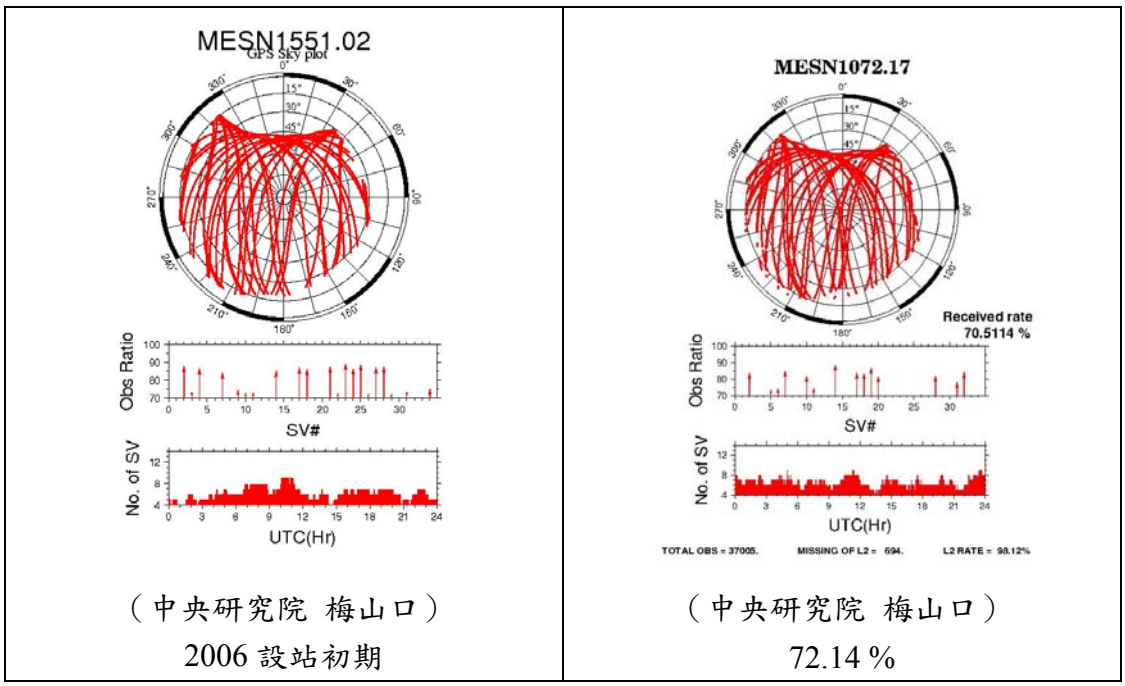
GIPSY 數據處理流程主要分為數據預處理、軌道計算和參數解算三個階段，最終從相位或偽距觀測數據中計算得出測站坐標及精度估計。而這裡的數據處理採取了以下步驟：

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

（2）採用精密單點定位方法對本地網各觀測日的所有站點進行單獨處理，獲得各點的單日坐標解，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

本報告統計自 2016 年 11 月至 2017 年 10 月的連續 GPS 資料。以圖 2-1.1 中央研究院連續 GPS 測站 MESN 為例，由 2017 年 04 月點位透空圖可見得此測站東方有建築物的遮罩，而西南方則有疑似因植被遮罩而產生的資料接收不連續，相較設站初期可明顯看出衛星軌跡的不連續。



（中央研究院 梅山口）
2006 設站初期

（中央研究院 梅山口）
72.14 %

圖 2-1.1：MESN 測站資料接收度低於 80%。

此外，由圖 2-1.2 中央氣象局測站 SANI 之時間序列可明顯看出 2010 年開始因為遮蔽增加導致坐標解算產生較大之跳動進而影響速度計算，以及 PUSN 測站 2014 年後 L2 接收率下降同樣導致坐標解算產生較大之跳動影響速度計算。因此目前認為測站環境與儀器運作正常為兩個影響時間序列分析的重要因子。

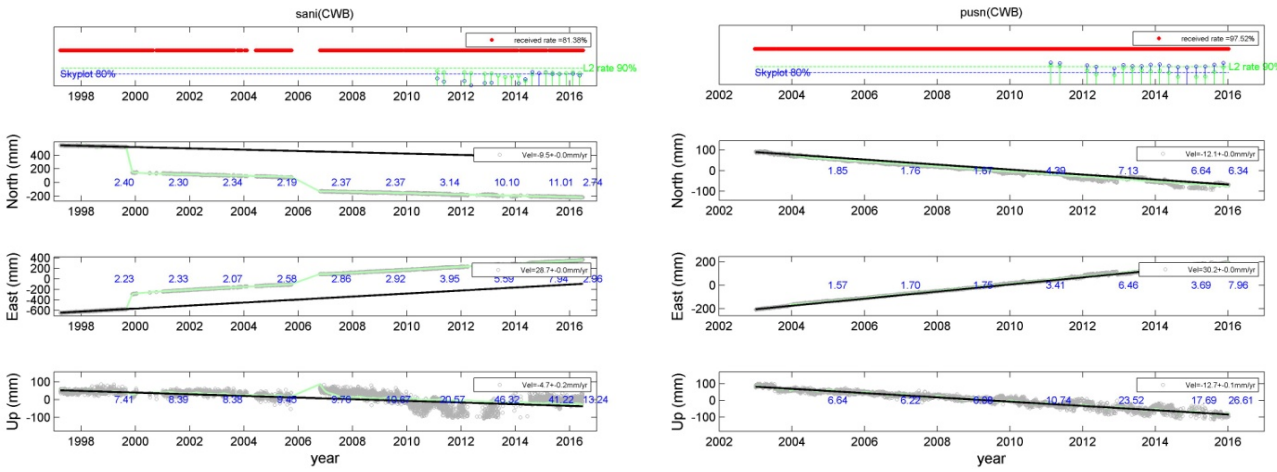


圖 2-1.2：SANI 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。

圖 2-1.3 為統計近三年全臺連續 GPS 測站之精度分析。水平方向上精度大多為 2-3 公厘，高程方向上大多為 7-8 公厘，利用此分析方式可為後續大地震事件動態分析提供測站選擇的基本條件。

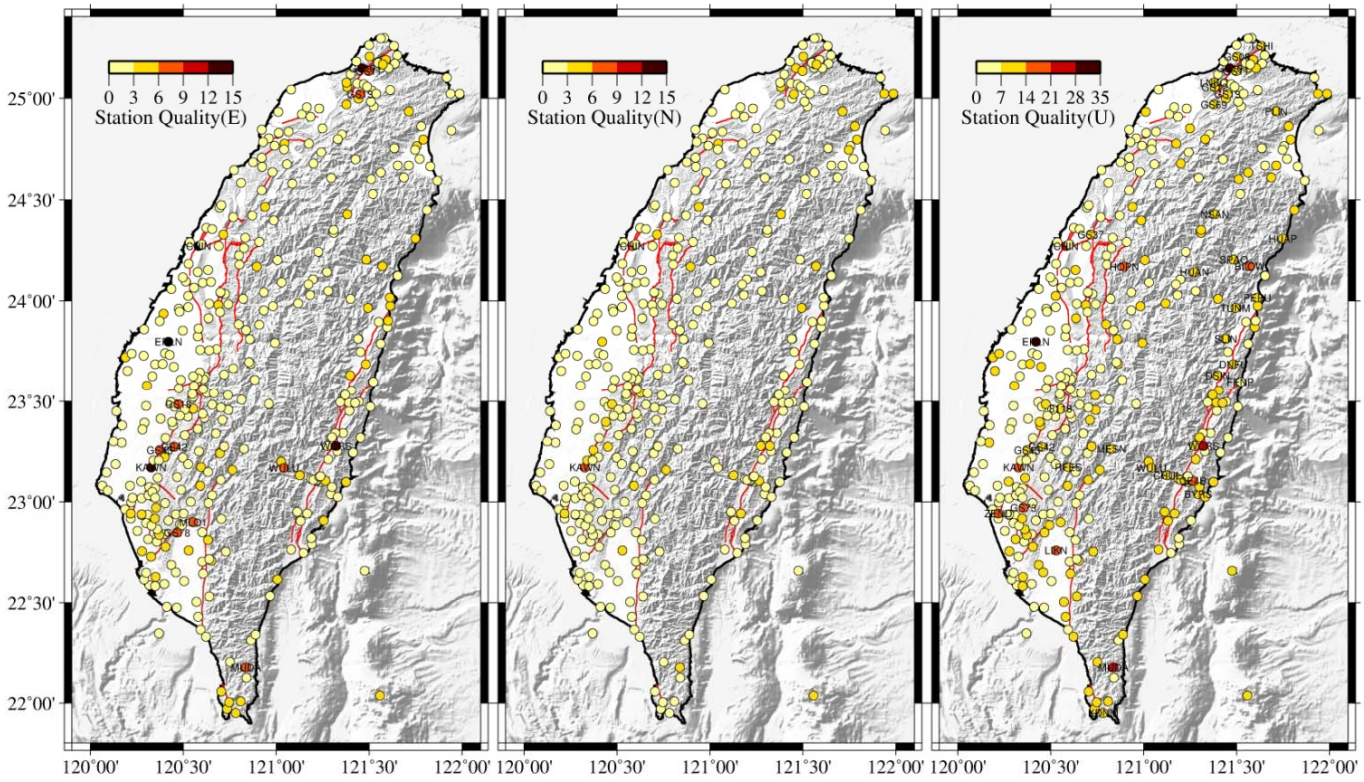


圖 2-1.3：全臺連續 GPS 測站近三年資料精度分析。

2-1-3 GPS 連續站時間序列分析

時間序列（time series）和速度場（velocity field）是 GPS 資料處理的主要成果，而其表現是地表與地下構造的運動情形，可以提供有關更多地殼形變的訊息。本年度報告分析 2016 年 11 月至 2017 年 10 月的資料，並結合各測站從設站以來長時間資料解算的結果，就測站移動速度場或地震跳階影響加以探討。為了對觀測資料做有效的時間序列分析，我們首先需要對所有的 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。對於 GPS 時間序列資料之分析，本年度我們加入考慮長時間的地殼變動、週期性之變化、以及地震引發的同震與震後活動。諸歸於此類的時間序列模式可以用下式表示（Nikolaidis., 2002）：

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

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

圖 2-1.4 為地調所連續 GPS 測站 GS01 時間序列，時間段為 2002 年至 2017 年 04 月。與上一階段之結果相比（圖 2-1.4 左），本年度除考慮地震造成的同震與人為天線更換外，加入了上述提到的周期性變化與震後變形指數衰減的現象（圖 2-1.4 右）。由兩張圖比較看來，雖然測站年速度在三個分量上變化差異不顯著，約為 1-2 mm/yr。但為求後續斷層模型計算更為精準，連續 GPS 計算都加入周期性以及震後變化修正。

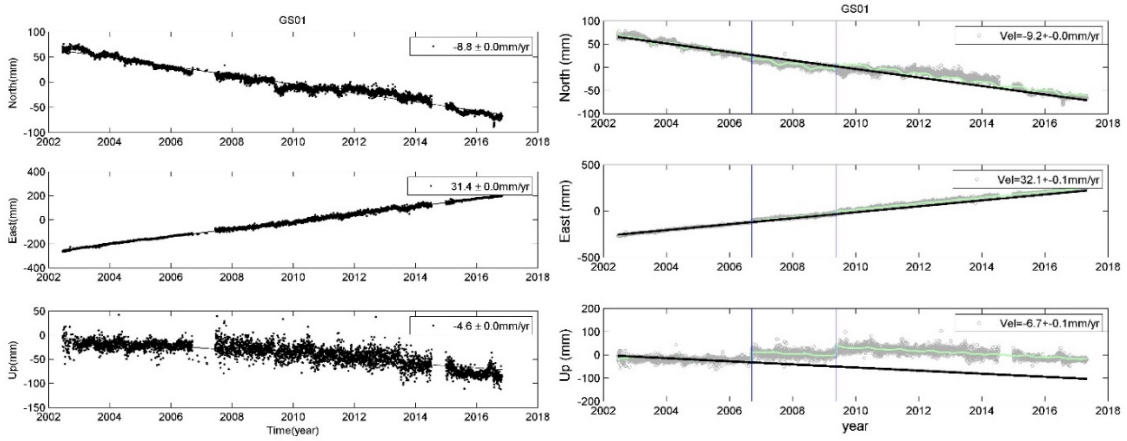


圖 2-1.4：整合地調所連續 GPS 測站 GS01 歷史資料至 2017 年 04 月之時間序列。左圖為修正同震位移及測站異常之時間序列，右圖為再加入測站週期性變化與大地震後震後變形指數衰減現象之時間序列。

圖 2-1.5 及圖 2-1.6 為彙整歷史資料至 2017 年 10 月年速度場之結果。由解算結果顯示水平速度場相對澎湖白沙站，中南部測站多為東南東往西北西移動，臺南以南地區多呈現東北往西南移動；另外北部地區則是由南往北移動，在宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為。縱谷斷層東側與西南部地區為水平速度較大的區域；垂直速度場方向上則以西部彰雲地區以及東部縱谷斷層西側為主要下陷區域，中央山脈則呈現以抬升為主的變形行為，此結果與過去只使用線性迴歸結果約略相同。

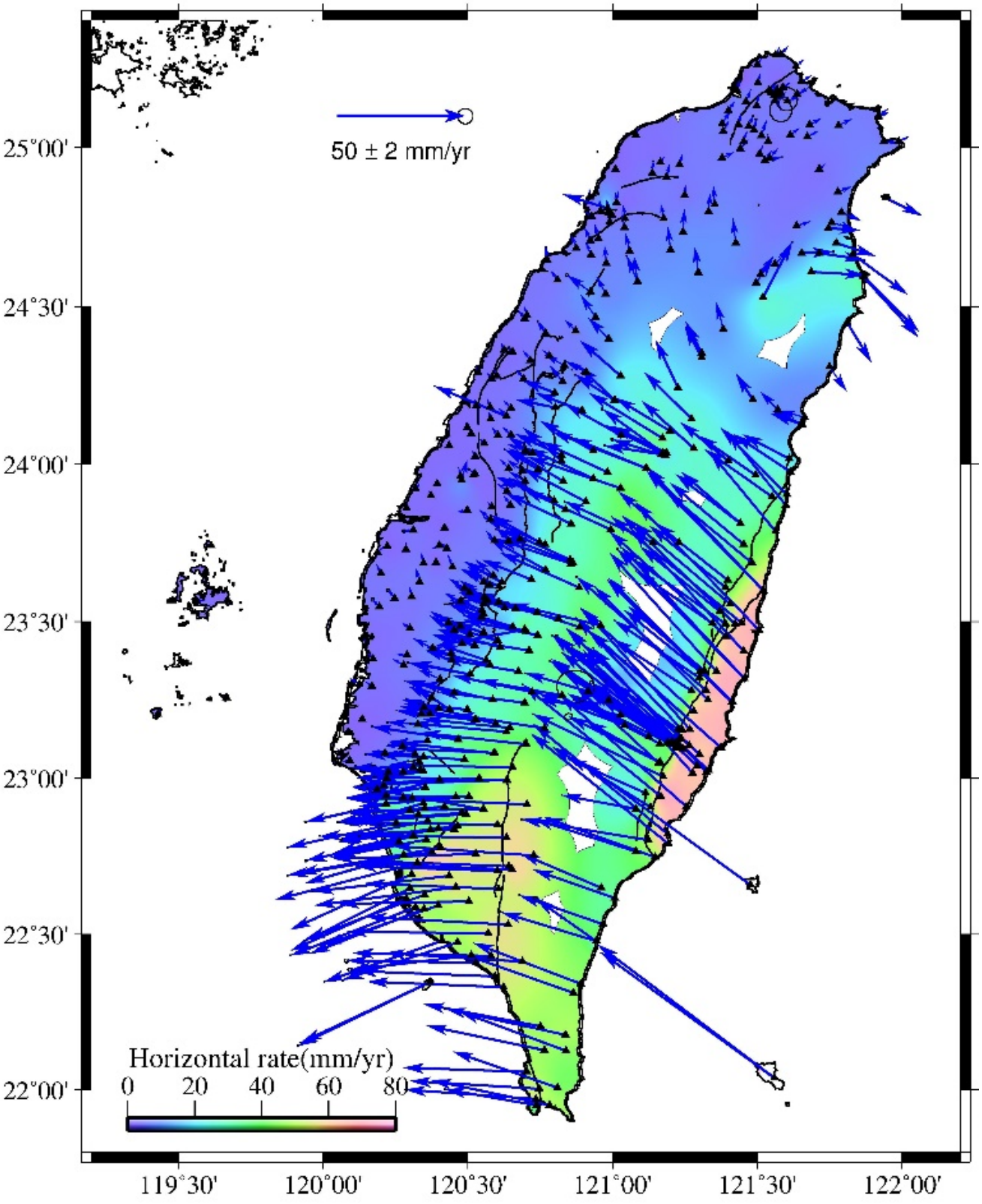


圖 2-1.5：整合歷史資料至 2017 年 10 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）（水平方向速度場）。

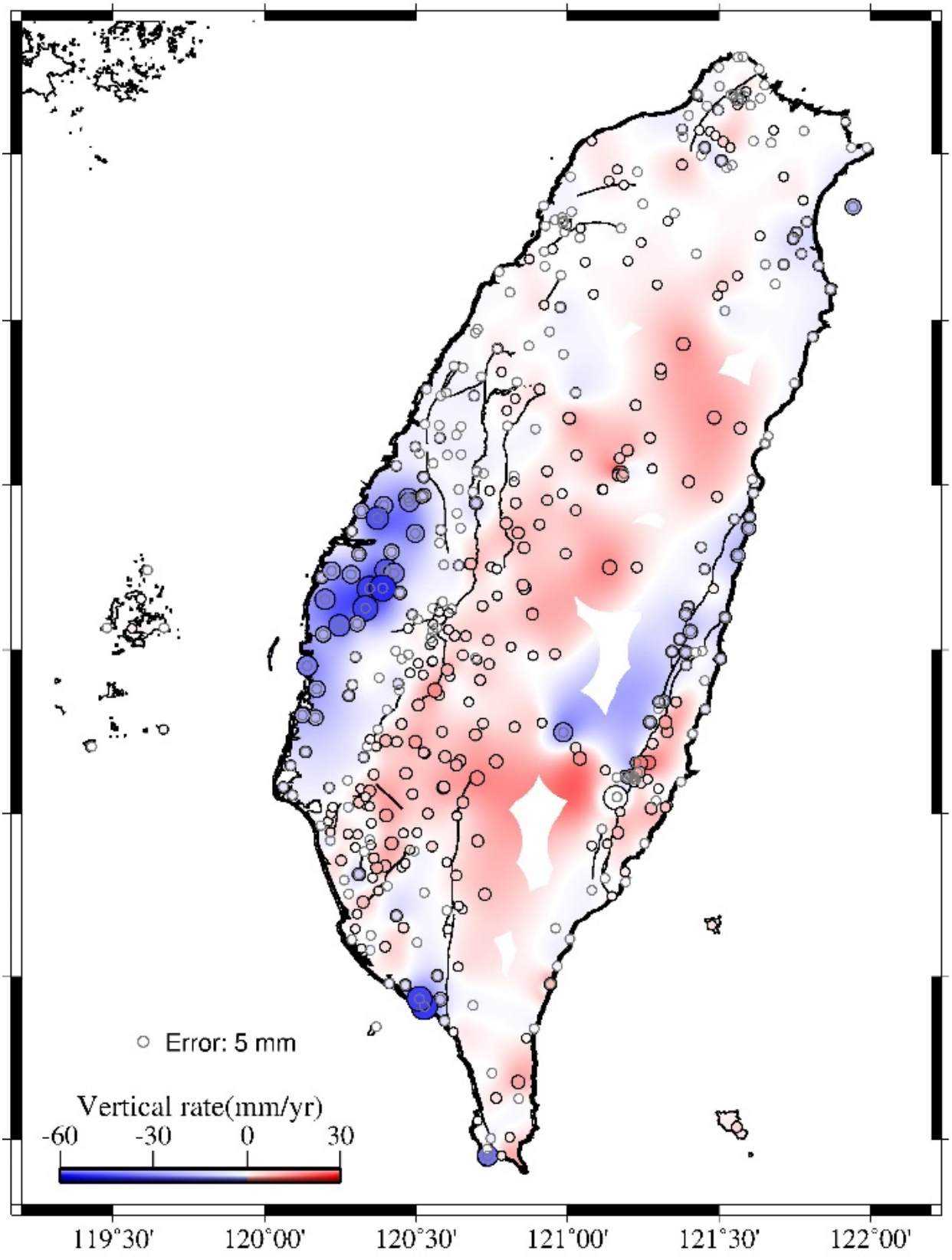


圖 2-1.6：整合歷史資料至 2017 年 10 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常之年速度場（相對 S01R 澎湖白沙）（垂直方向速度場）。圓圈代表速度場誤差值的大小。

2-2 2017 GPS 移動站測量外業督導與檢核

在 GPS 資料處理方面，本計畫主要以移動站之觀測資料為主，再配合部分連續站的觀測資料，進行臺灣地區斷層活動造成之地表變形監測。本研究 GPS 觀測資料之解算與網形平差，是採用 Bernese 5.2（Dach et al., 2007）解算軟體進行解算。

2-2-1 GPS 速度場計算方法

為了探討臺灣地區斷層活動及地殼變形行為，我們利用歷年每日 GPS 觀測坐標的成果，進行各個測站速度之評估。在考慮地震對地表位移所造成的影響，我們根據時間序列的型態，分別利用下述 4 個方程式，針對第 n 個測站的第 i 個坐標分量之時間序列進行擬合。

1. 首先是針對 GPS 觀測期間並無地震造成明顯地表位移的測站（圖 2-2.1），我們利用式 2-2.1 擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + v \qquad （式 2\text{-}2.1）$$

其中 a 為截距，b 為測站速率，v 為殘差值，t_i 為坐標時間序列中第 t_i 的時刻。

2. 於觀測資料蒐集期間內，雖然有地震造成明顯之同震位移，但是若震後的地表位移速率並無明顯改變的連續站（圖 2-2.2），可以採用式 2-2.2 擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_j) + v \qquad （式 2\text{-}2.2）$$

其中 c_j 為地震造成之同震位移，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。

3. 若連續站於觀測期間內，不但有因為地震造成的明顯同震位移，且震後的地表位移速率亦發生改變（圖 2-2.3），可採用式 2-2.3 進行擬合。

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{n_c} c_j H(t_i - T_j) + \sum_{j=1}^{n_d} d_j H(t_i - T_j)t_i + v \qquad （式 2\text{-}2.3）$$

其中 d_j 為地震震後地表位移之改變速率，n_d 為有產生地震震後地表速率改變量之總地震事件數。

4. 於連續站觀測期間內，不但有因為地震造成了明顯的同震位移，震後的地表位移速率亦發生改變，同時也觀測記錄到非線性的震後變形（圖 2-2.4），則可以採用式 2-2.4 擬合。

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

$$+ \sum_{j=1}^{n_e} e_j \log(t_i - T_j) H(t_i - T_j) + v \qquad \text{（式 2-2.4）}$$

其中 e_j 為非線性的震後變形。

於本計畫中，我們考慮各測站受到地震事件影響的程度，利用最小二乘法，將上述式 2-2.1 至式 2-2.4 應用到各個測站的各個坐標分量，評估各測站相對於大陸邊緣測站（S01R）之速度場。此外，在速度場誤差評估方面，經由最小二乘法所獲得各速度值之誤差量主要是反映全頻等幅雜波（white noise）。然而，當我們考慮各速度值的誤差時，我們還必須同時考慮時間序列中和時間相關（time-correlated 或 colored）的誤差，即布朗運動（Brownian motion 或 random walk noise），所造成的影響。根據 GPS 連續站長期觀測資料所獲得的經驗值（Langbein and Johnson., 1997），我們知道布朗運動（σ_R）在各個速度分量上的值分別為 0.9、1.0 和 3.0 mm/yr$^{1/2}$。因此，在估算速度場誤差時，我們同時考慮布朗運動（σ_R）和最小二乘法所獲得各速度值之全頻等幅雜波（σ_W）的貢獻量，以（$\sigma_R + \sigma_W$）$^{1/2}$ 計算速度場誤差。根據經驗值（Langbein and Johnson., 1997），水平方向之布朗運動值為 1.0 mm/yr$^{1/2}$，垂直方向之布朗運動值則為 3.0 mm/yr$^{1/2}$。

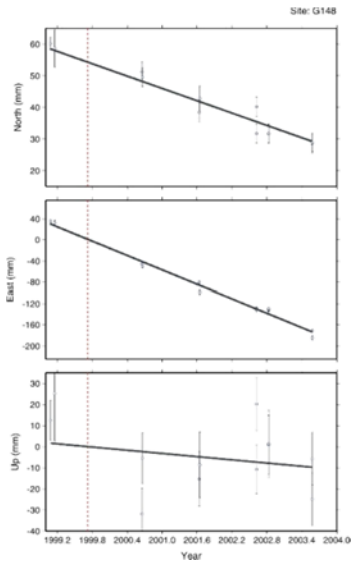


圖 2-2.1：未受地震影響之 GPS 點位時間序列。

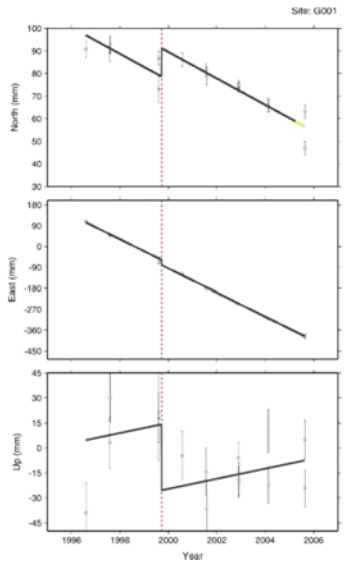


圖 2-2.2：受地震影響且震後之地表位移速率並無發生改變之 GPS 點位時間序列。

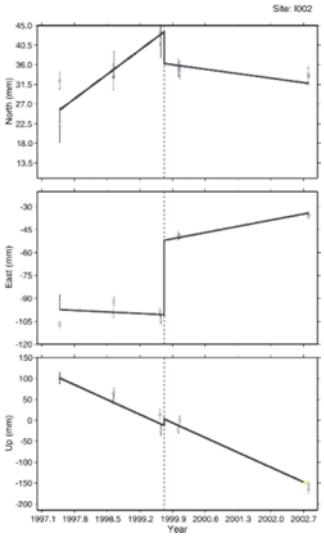


圖 2-2.3：受地震影響且震後之地表位移速率亦發生改變之 GPS 點位時間序列。

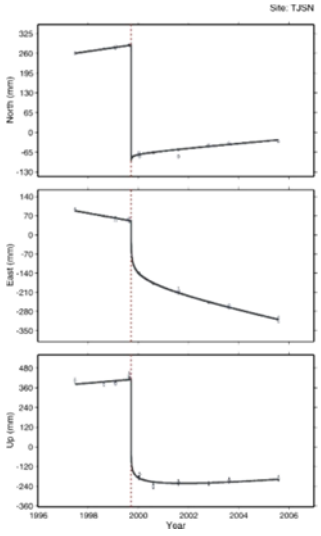


圖 2-2.4：受地震影響並記錄到震後非線性地表位移之 GPS 點位時間序列。

2-2-2 GAMIT 移動站速度場計算

由於過往歷年計畫的 GPS 坐標解算軟體皆採用 Bernese，為了瞭解 GPS 坐標解算成果的穩定性與可靠度，在本年度的計畫中，加入 GAMIT 軟體來獨立解算 GPS 資料，並與 Bernese 的解算成果交互驗證。在 GAMIT 軟體的解算過程中，參考框架的選定為國際大地參考框架（International Terrestrial Reference Frame）2014 年結果，簡稱 ITRF14（Altamimi et al., 2016），選用的臺灣附近國際 IGS 連續站作為約制站，包括：中國北京（BJFS）、澳洲科科島（COCO）、南韓大田廣域市（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）、日本筑波市（TSKB）等 IGS 連續站。其中，為了因應 2011 年日本 311 地震的震後影響，TSKB 站資料僅使用到 2010 年底。

從本計畫所提供的臺灣本地連續站中，我們選定了內政部地政司衛星測量中心建置的北港（PKGM）、鳳林（FLNM）、墾丁（KDNM）、金門（KMNM）、陽明山（YMSM）等，以及中央研究院地球科學研究所的澎湖白沙（S01R），共 7 站。澎湖白沙位於比較穩固的歐亞板塊位置，遠離板塊聚合帶，傳統上被選做臺灣地殼變形研究的參考點（Ching et al., 2007；Tsai et al., 2012；Yu et al., 2003；Yu et al., 1997）。為了與其他研究能有相同的比較基礎，我們也選定澎湖白沙作為相對速度場圖的參考點。其他選定的站因為建置時間久、穩定性高，後續求取時間序列的條件比較理想。此外這些站大略均勻分布於臺灣本島，也有利於後續 GPS 移動站的定位需要。

我們利用 GAMIT/GLOBK 軟體處理每日解，採用廣義約制（generalized constraint）方式組合每日解。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，因此每日的資料中的粗差（outliers）可以容易被偵測且排除（Herring et al., 2015）。本案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。

選定了國際 IGS 與臺灣的連續站後，我們處理了 2002 到 2016 年臺灣中部的移動站（survey GPS，sGPS）資料，地區包括了臺中市、彰化縣、南投縣、雲林縣、嘉義縣等共約 300 個移動站資料。處理流程如下：

1. 採用 stochastic 約制方式，約制國際 IGS 站與臺灣連續站，求解移動站的每日解。
2. 利用 Globk 程式，將每日解組合成每月份 h 檔(為 GAMIT 文件格式，含所有解算參數的估值與完整的變方協變方矩陣)。
3. 利用 Globk 程式組合 2002 到 2016 年所有的各月份 h 檔，並初算時間序列與速度場。

4. 利用 tsview 程式進行偵錯與粗差(outlier)剔除，時間序列中任何單一點的絕對值大於 3 倍中誤差者會被剔除。

5. 修正時間序列上不合理的跳動，這些跳動主要因為天線位置的改變，例如：地震的同震位移或天線或天線罩的更動等。

重覆步驟 2 - 5，計算最後的各移動站時間序列與絕對速度場，並且以澎湖白沙 S01R 為基準，計算相對速度場。

比較由 GAMIT 及 Bernese 解算之中部地區速度場結果（圖 2-2.5 及圖 2-2.6）及各測站之坐標時間序列（圖 2-2.9），指出兩軟體解算速度殘差分布（圖 2-2.7 及圖 2-2.8）可知，E 方向殘差標準差為 2.45 mm/yr，N 方向殘差標準差為 2.25 mm/yr，垂直方向殘差標準差為 8.61 mm/yr。造成殘差標準差略大的原因，可能和苗栗山區及部分點位因為兩軟體解算成果數量不同造成之較大差異所影響。除了這些這些地區，由圖 2-2.5 及圖 2-2.6 指出其他地區之 GPS 速度場的解算成果是穩定的。同時，本計畫為了進一步瞭解兩種軟體解算速度間的差異原因，我們針對兩者間的速度差異及其速度誤差進行比較（圖 2-2.10），結果指出兩者約呈正相關，速度誤差越小則速度差異量越小，此結果也可協助我們在未來瞭解各測站之環境品質。

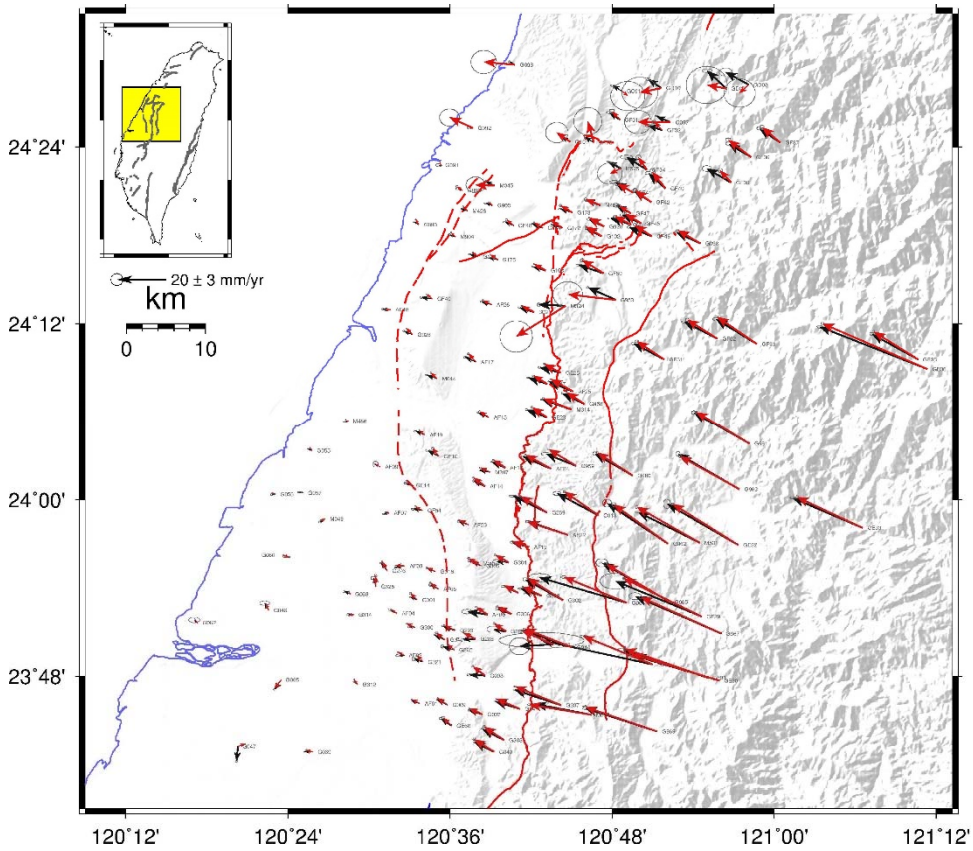


圖 2-2.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2016 年 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示 GAMIT 解算速度場，黑色箭頭表示 Bernese 解算速度場。

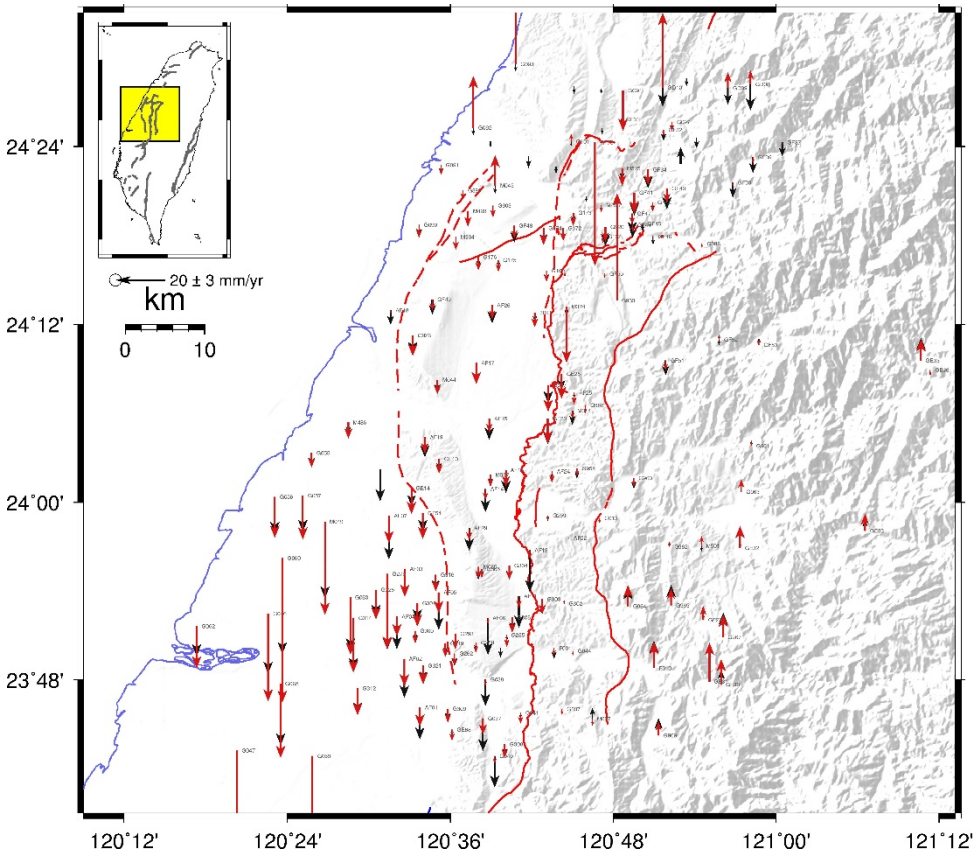


圖 2-2.6：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2016 年 GPS 垂直方向速度場，紅色箭頭表示 GAMIT 解算速度場，黑色箭頭表示 Bernese 解算速度場。

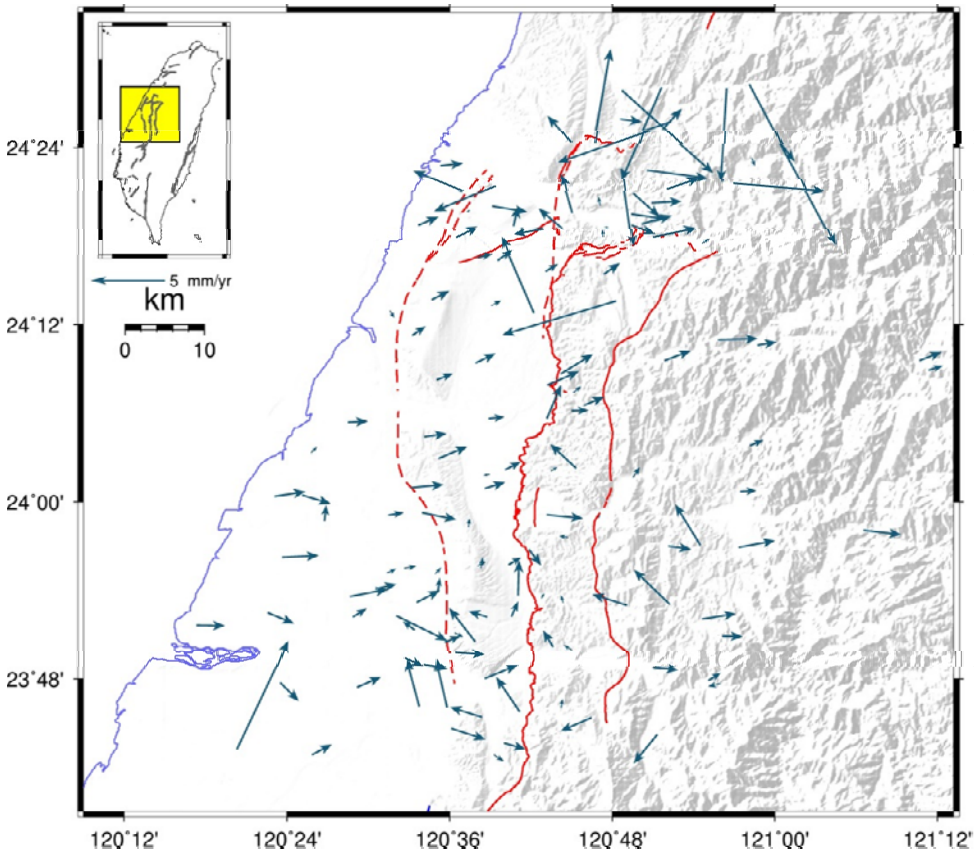


圖 2-2.7：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2016 年 GPS 水平方向速度殘差分布。

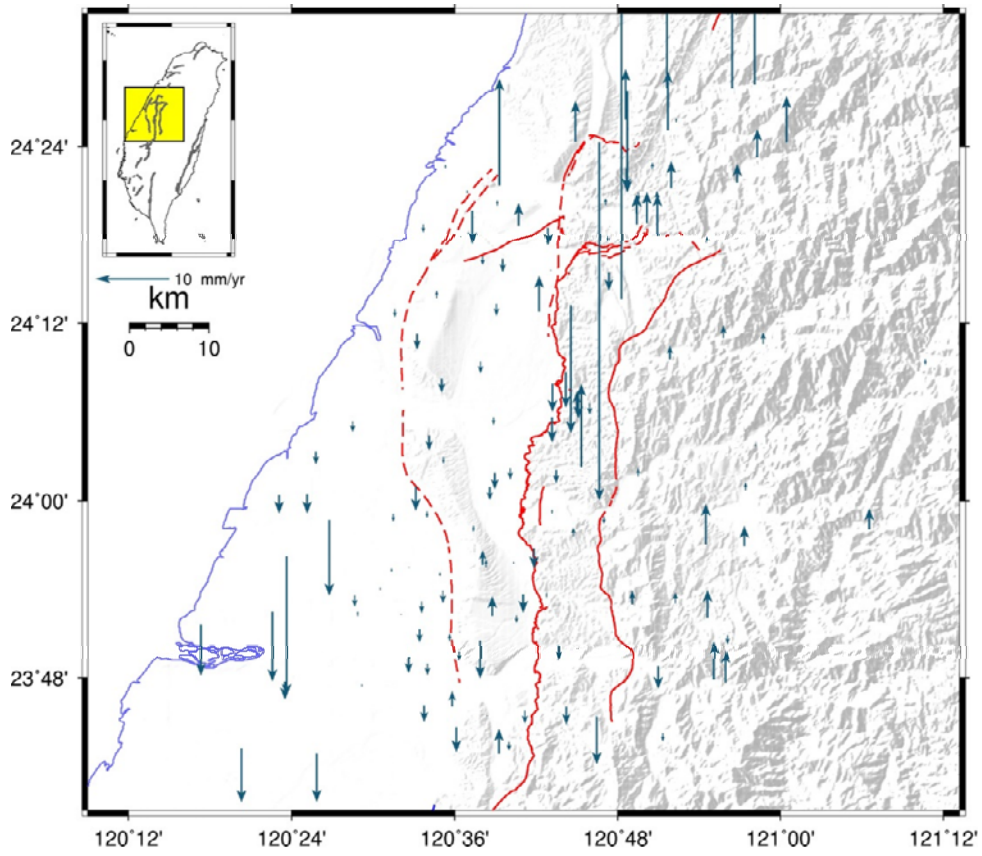


圖 2-2.8：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 2002~2007 年 GPS 垂直方向速度殘差分布。

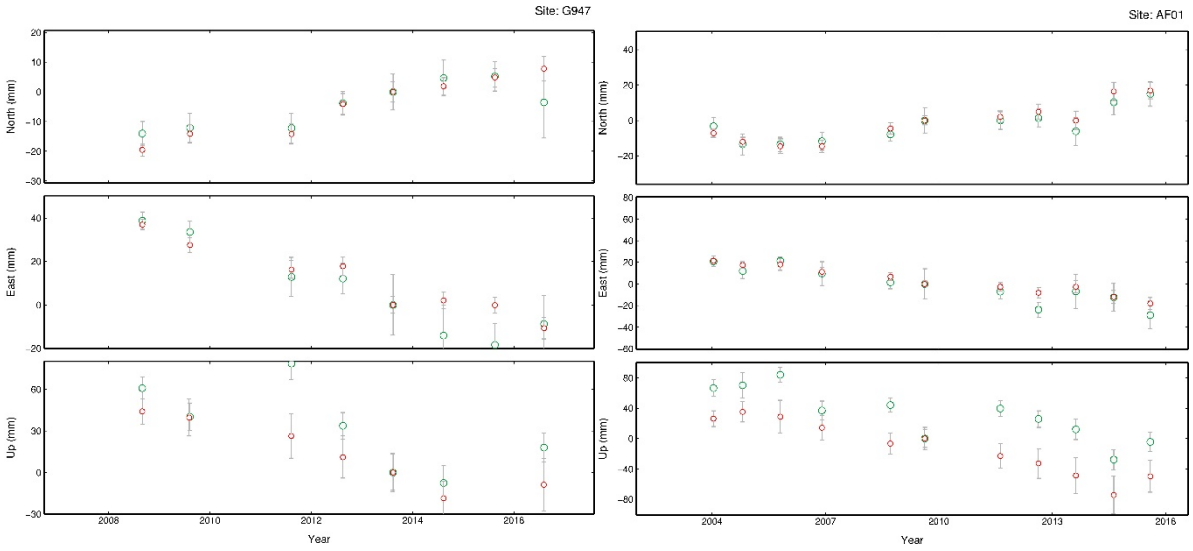


圖 2-2.9：2002~2016 年中部地區 GPS 移動站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖，紅色點位表示 GAMIT 解算結果，綠色點位表示 Bernese 解算結果。

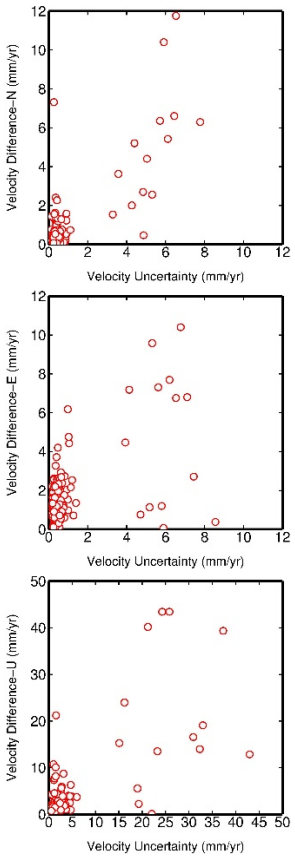


圖 2-2.10：中部地區 GPS 移動站 GAMIT 及 Bernese 解算速度差異及其速度誤差之關係圖。

2-2-3 GPS 坐標計算穩定度分析

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

2-2-4 坐標殘差分析

由圖 2-2.11 可知 2002-2016 年及 2017 年 GPS 觀測資料之坐標殘差分布情形。2002-2016 年資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.2 ± 4.1 mm（2 倍標準差）、E 方向為-0.2 ± 5.0 mm 及 H 方向為-0.2 ± 15.7 mm。在 2017 年的資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.3 ± 2.9 mm、E 方向為−0.4 ± 4.8 mm 及 H 方向為 0.2 ± 14.6 mm。

2-2-5 均方根誤差分析

均方根誤差分析為針對測站每次解算時，所產生的均方根誤差量（RMS error）做其統計。本計畫採用水平及垂直兩分量來分析。由統計結果（圖 2-2.12）可看出 2002-2016 年水平方向之均方根誤差平均值為 9.3 mm，在垂直方向的平均值為 21.7 mm，及 2017 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.6 mm，垂直方向的平均值為 22.5 mm。

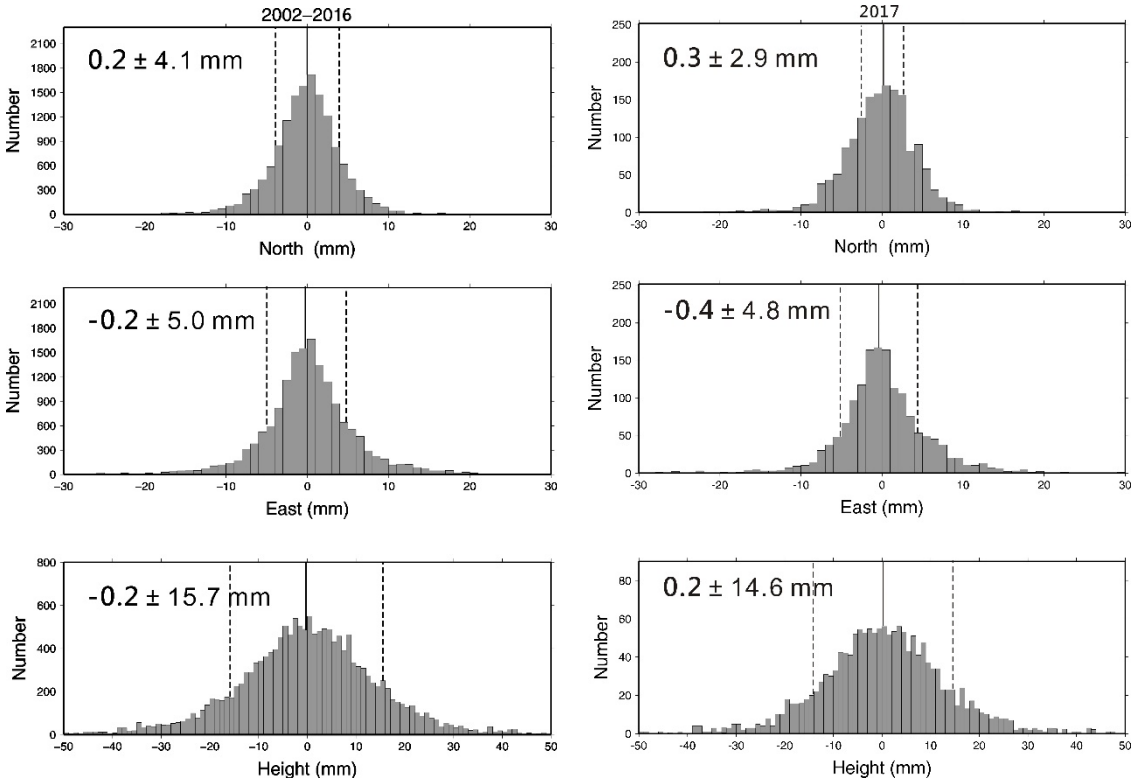


圖 2-2.11：2002-2016 年及 2017 年 GPS 點位坐標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95%信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

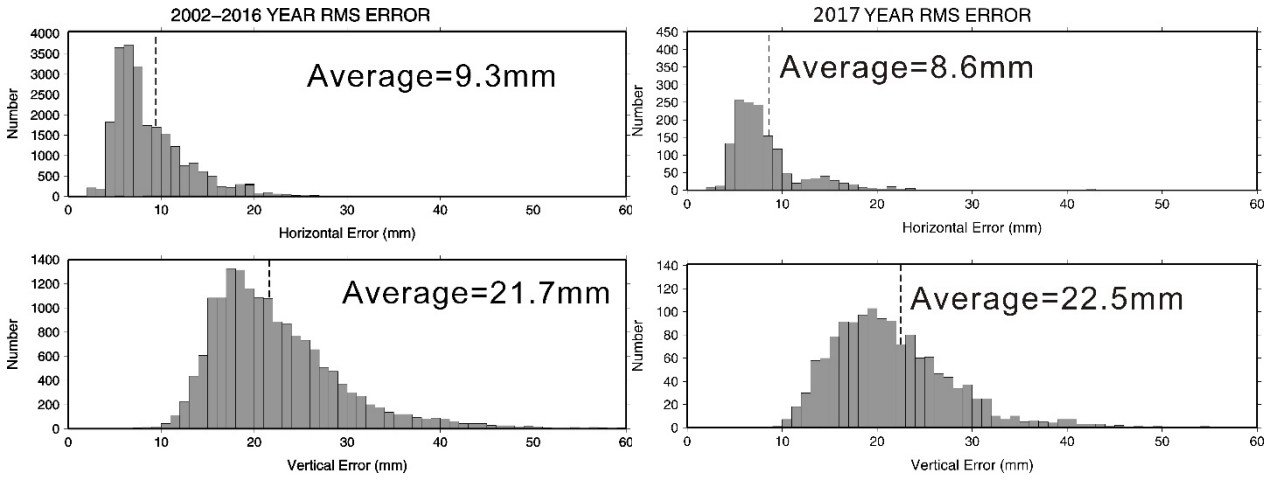


圖 2-2.12：2002–2016 年及 2017 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

2-2-6 臺北地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之臺北地區觀測資料進行分析，臺北地區各觀測點位之速度值如圖 2-2.13 黑色箭頭為 2002 年至 2017 年之水平速度場，速度量值 1.7～6.0 mm/yr，其垂直速度場（圖 2-2.14）指出北部地區主要為下陷，下陷量為 0.1～10.7 mm/yr。此外，比較山腳斷層兩側之水平速度場指出，斷層東側平行斷層走向分量約為朝北北東 2.0～3.0 mm/yr；斷層西側平行斷層走向分量約為朝北北東 1.0～2.0 mm/yr，故指出該斷層具有左移分量。然而，除了臺北盆地有較明顯的沉陷量，其他跨越山腳斷層之垂直速度場並沒有太顯著的變化。

另外，GPS 點位 GA69（竹圍國小）及 GPS 連續站 GS10（竹圍國中）僅相距約 250 m，由時間序列比對可發現兩點垂直速度有顯著差異，GA69 垂直速度值約-3.1 mm/yr，連續站 GS10 則為−8.1 mm/yr，經現場勘查兩點皆位於大屯山山腳（圖 2-2.15），然而由於 GS10 位於土堤圍牆上方，可能因為土坡的場址不穩定，造成 GS10 垂直沉陷速度較大，建議遷移此站至穩固之場址。

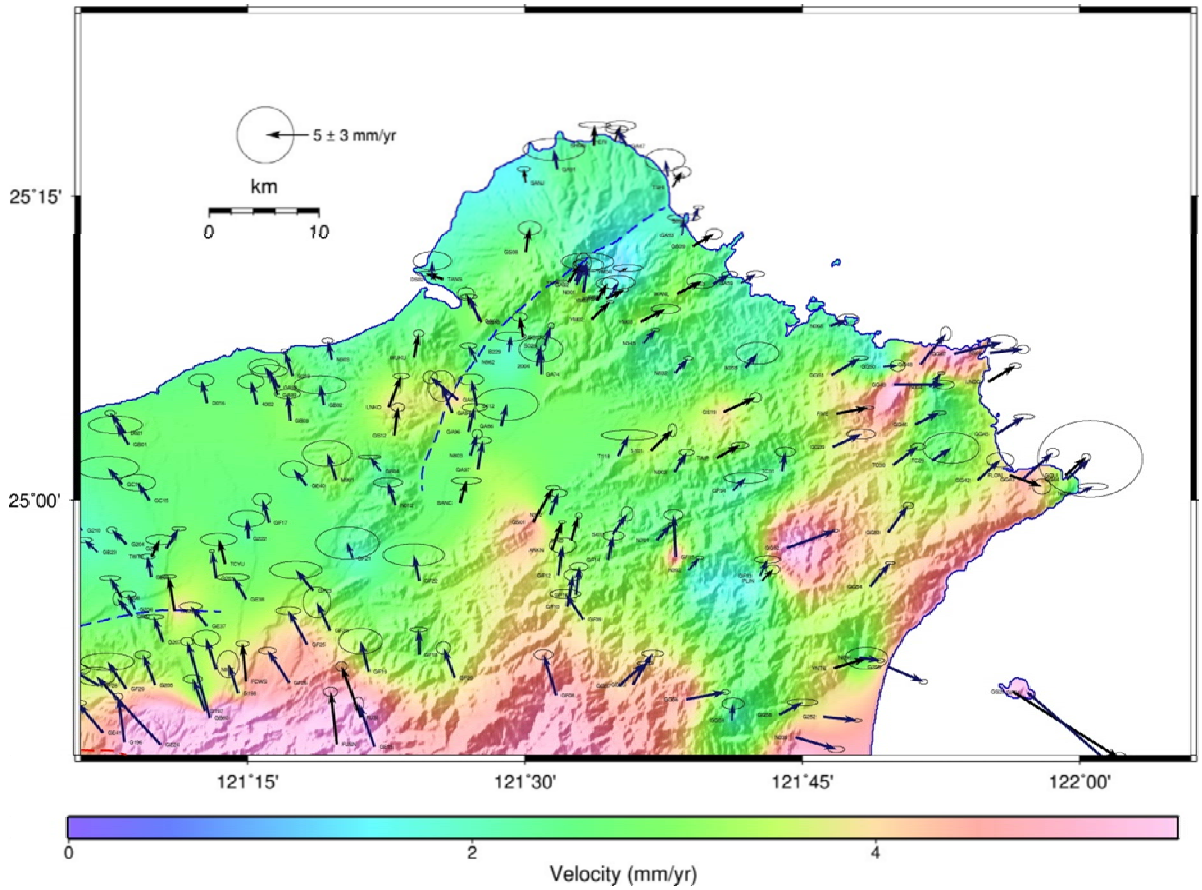


圖 2-2.13：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2017 年資料所解算之速度場分布色階圖。

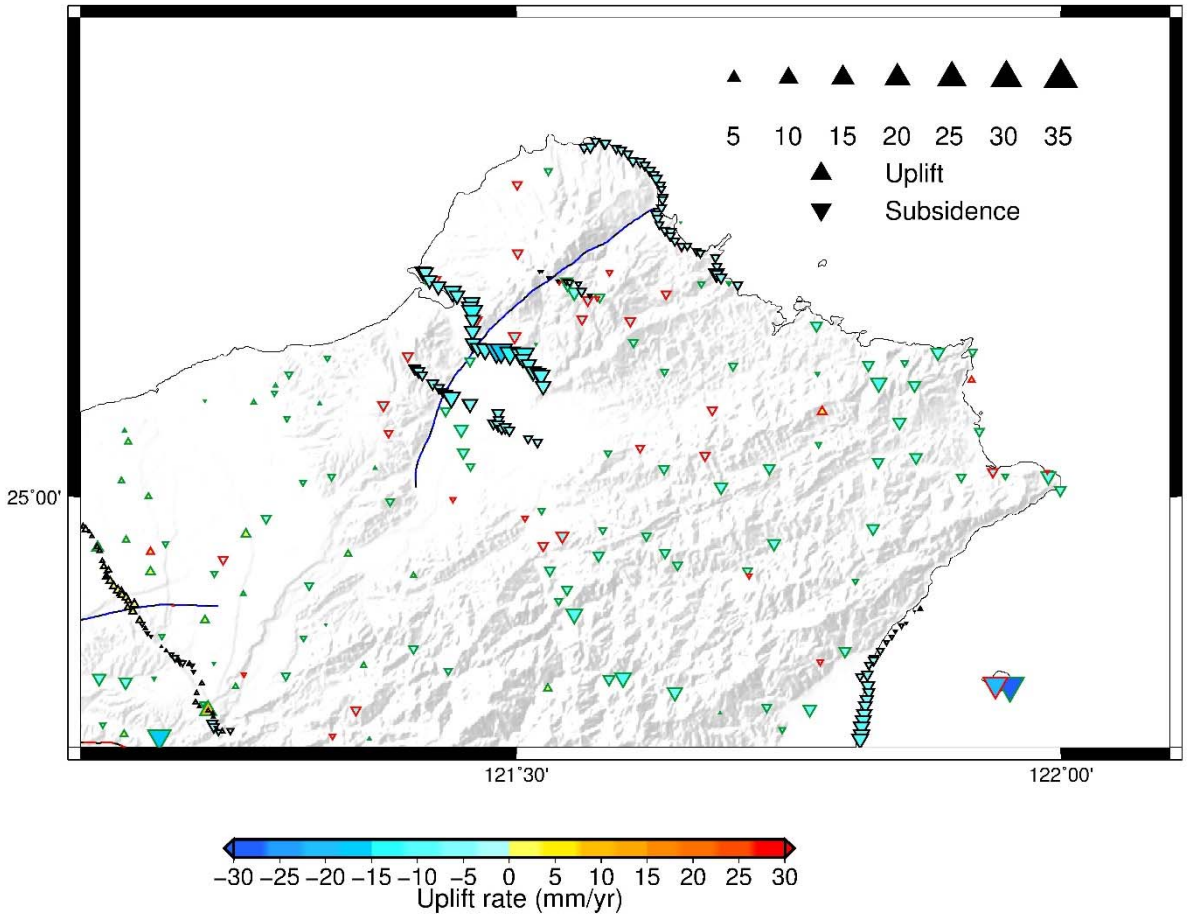


圖 2-2.14：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2017 年之垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

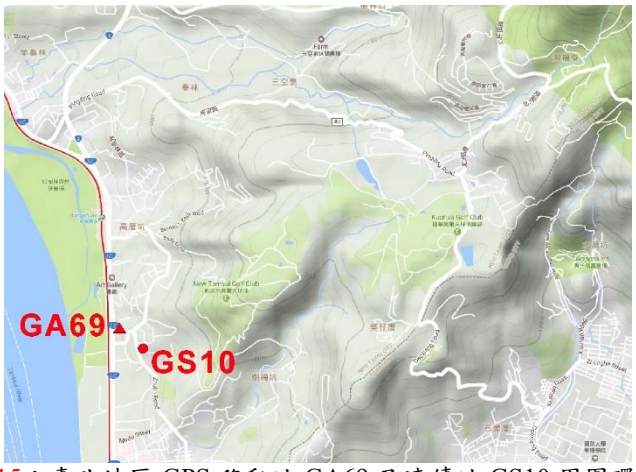


圖 2-2.15：臺北地區 GPS 移動站 GA69 及連續站 GS10 周圍環境圖。



圖 2-2.16：臺北地區 GPS 連續站 GS10 周圍環境圖。

2-2-7 恆春地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之恆春地區觀測資料進行分析，經由精密水準坐標時間序列分析結果可知（圖 2-2.17），此區速度場在 2006 年屏東西南外海 M_L 7.0 地震前後有明顯的速率變化，在 2010 年中及 2015 年初又發生兩次顯著之速率改變，故本章節將恆春地區 2002 至 2017 年速度場分為四個時間段討論。

恆春地區各觀測點位之水平速度場指出（圖 2-2.18），屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，速度量值 41.3～59.5 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年中的速度場，速度量值 34.5～73.2 mm/yr， 2010 年中至 2015 年之速度場，速度量值 36.1～56.5 mm/yr，2015 年之後之速度場，速度量值 29.1 ~ 53.7 mm/yr。

恆春地區之垂直速度場指出（圖 2-2.19），第一時間段中恆春斷層兩側皆呈現 5.0 ~ 11.9 mm/yr 之下陷量，第二時間段斷層東側呈現 0.1 ~4.5 mm/yr 之抬升量，而西側呈現 3.2~ 8.0 mm/yr 之下陷量，第三時間段斷層兩側大致呈現下陷，值約 0.1 ~ 4.8 mm/yr，第四時間段斷層兩側大致呈現下陷，值約 1.2 ~ 7.8 mm/yr，唯第四段之觀測次數僅 2 次尚需更多觀測資料進行精確分析。

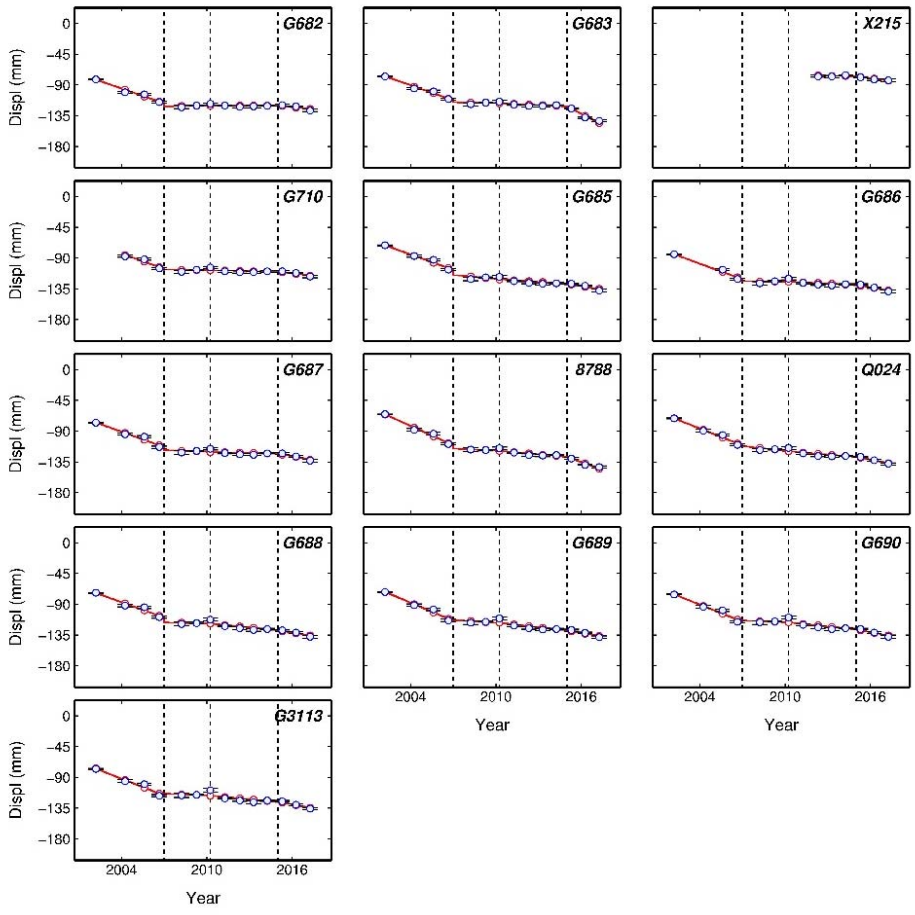


圖 2-2.17：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（恆春西台地-佳樂水）時間序列分析圖，虛線之時間分隔點為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年 4 月 1 日及 2015 年 1 月 1 日。

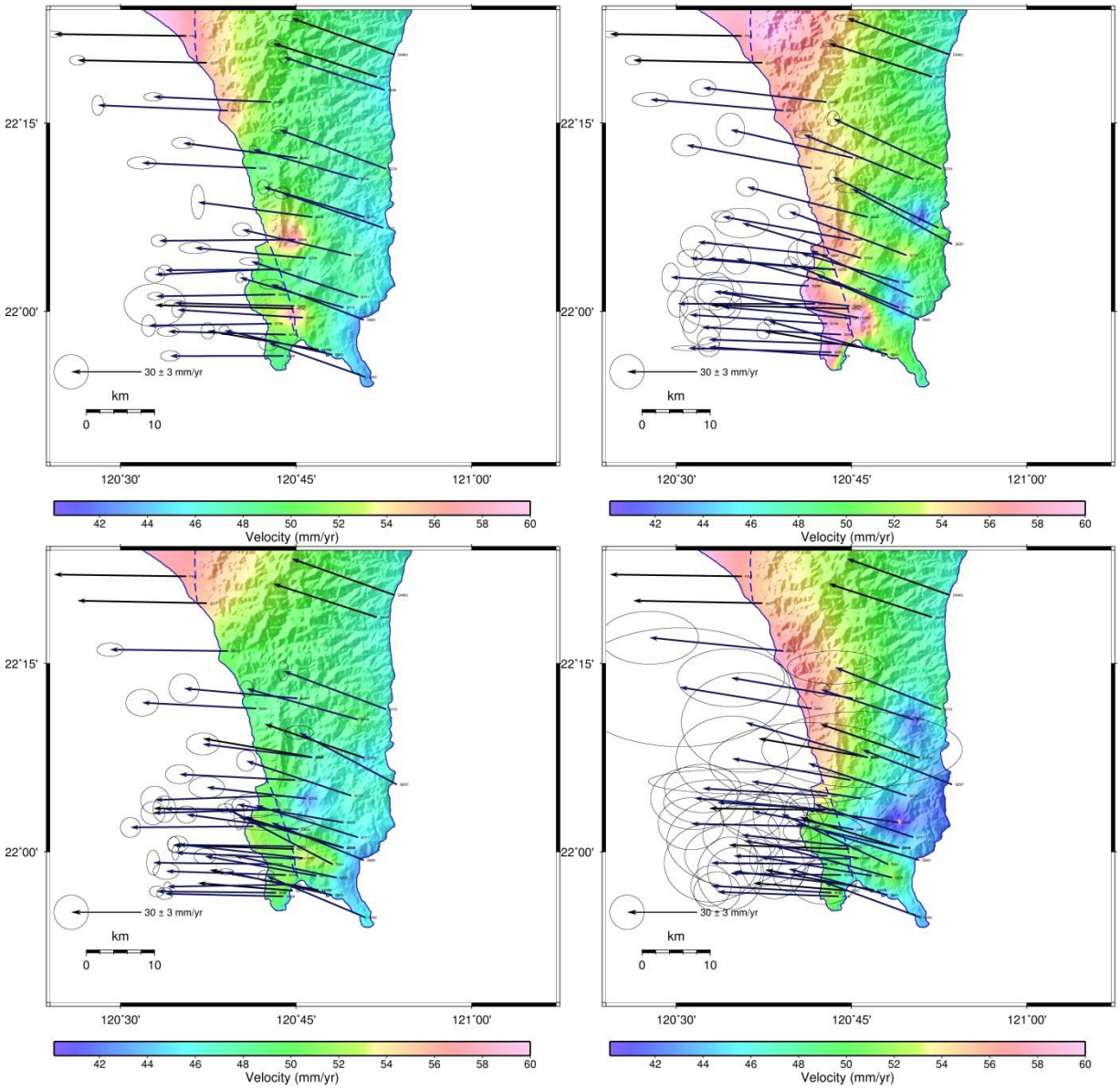


圖 2-2.18：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，右上表示震後 2006~2010 年速度場，左下表示震後 2010~2015 年速度場，右下為 2015~2017 年速度場。

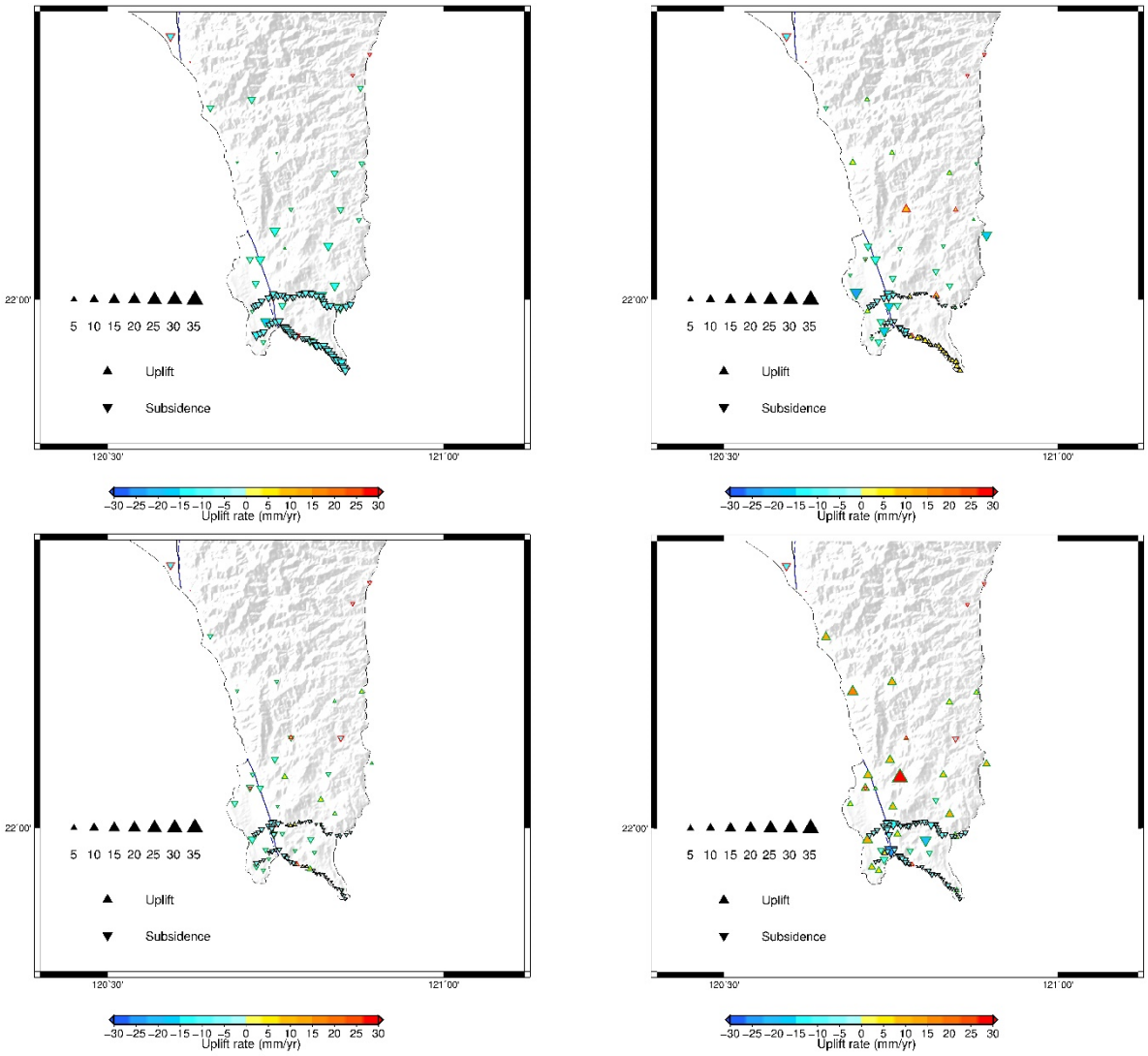


圖 2-2.19：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2017 年之 GPS 垂直方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，右上表示震後 2006~2010 年速度場，左下表示震後 2010~2015 年速度場，右下為 2015~2017 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-2-8 桃竹苗地區 GPS 歷年觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之桃竹苗地區觀測資料進行分析，桃竹苗地區 2002 年至 2017 年各觀測點位之水平速度場為 2.5 ~ 22.6 mm/yr（圖 2-2.20）。

由圖 2-2.21 可知桃竹苗地區垂直速度場在新城斷層以北與湖口斷層以南之間大致呈現 2.0 ~ 3.5 mm/yr 之下陷量，湖口斷層以北則轉為約 0.1 ~ 1.9 mm/yr 之抬升量。新城斷層以南在垂直方向位移速度值約 0.1 ~ 1.4 mm/yr，獅潭斷層東西兩側則皆為下陷，沉陷量約為 4.0 ~ 5.2 mm/yr。

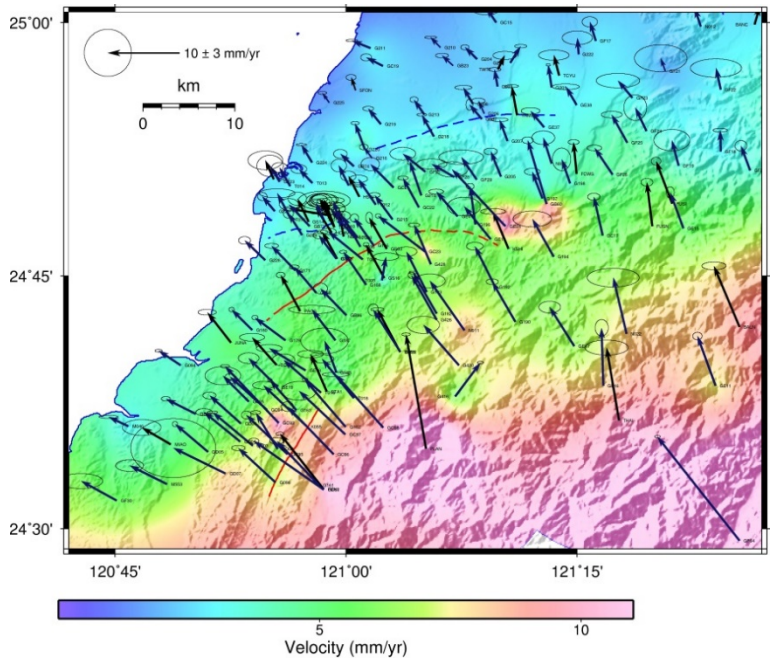


圖 2-2.20：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2016 年資料所解算之速度場分布色階圖。

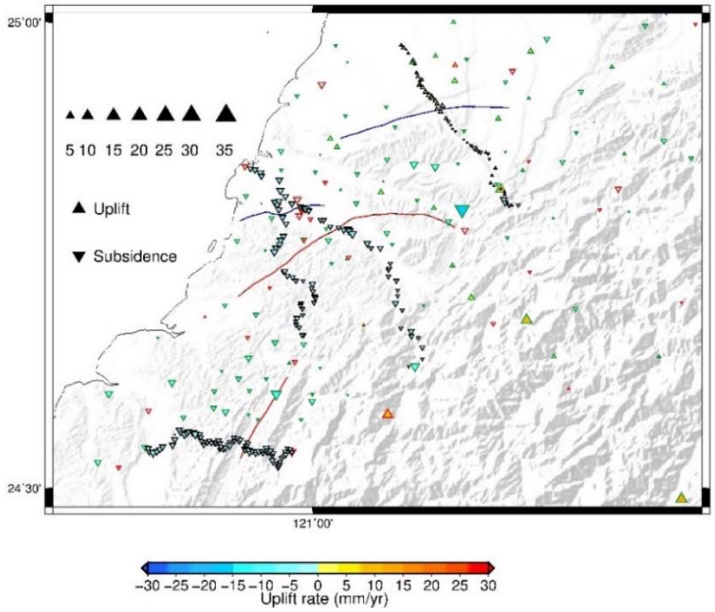


圖 2-2.21：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2016 年之 GPS 垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-2-9 嘉南地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之嘉南地區觀測資料進行分析，由精密水準時間序列分析結果可知（圖 2-2.22），安平-龍崎及路竹茂林測線東段在 2010 年甲仙地震後發生速度變化，因此將本區及高屏地區之 GPS 資料以 2010 年 3 月為分界，分別求取兩段之速度場，由圖 2-2.23 可知 2002 至 2010 年速度量值 0.4 ~ 37.1 mm/yr，2010 至 2017 年速度量值 3.6 ~ 42.1 mm/yr。此外，雖然 2016 年美濃地震後同樣也造成嘉南地區的速度場改變，但是因為資料累積不足，所以本計畫目前並沒有另外進行 2016 年美濃地震後的速度場評估。

由圖 2-2.24 可知垂直速度場在嘉義、雲林及臺南北部沿海的地層下陷區呈現明顯沉陷，沉陷量為 30.0 ~ 55.4 mm/yr，在進入以大尖山-觸口-木屐寮-六甲斷層系統為界之麓山帶，垂直速度場則轉為抬升，整體值約 9.7 ~ 15.2 mm/yr。

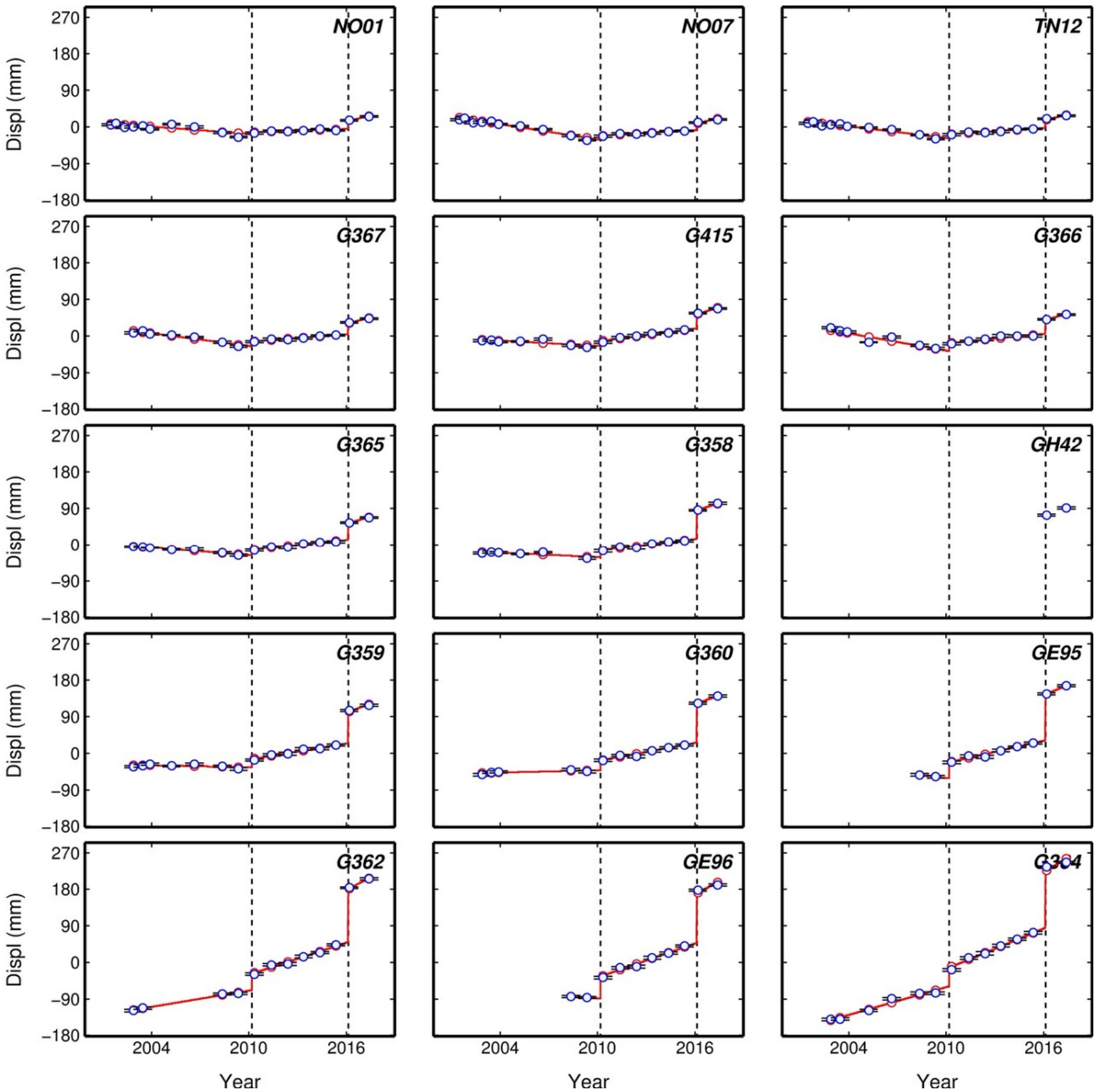


圖 2-2.22：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（安平-龍崎）時間序列分析圖，虛線之時間分隔點為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

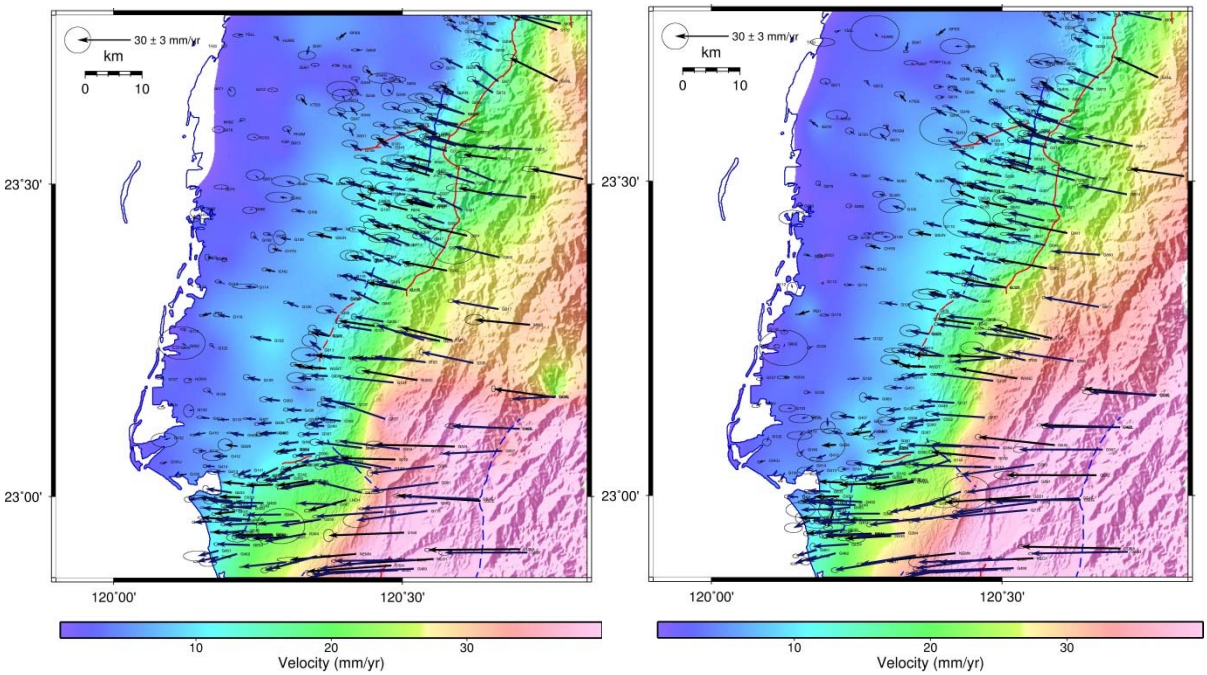


圖 2-2.23：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2017 年速度場。

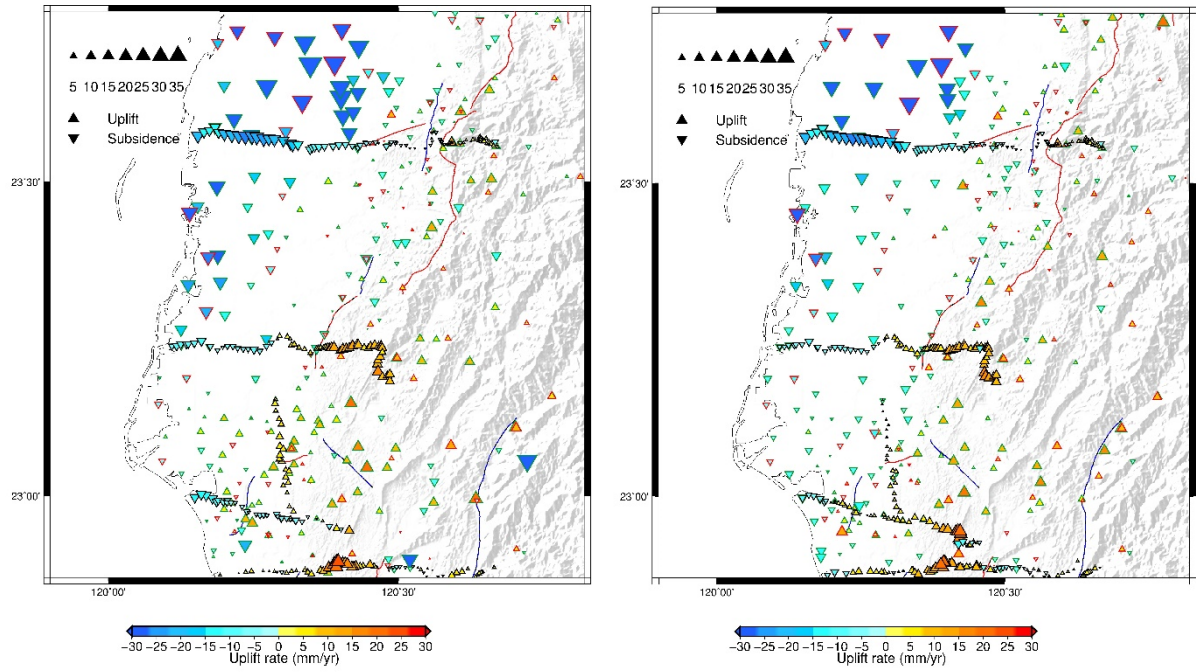


圖 2-2.24：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2017 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-2-10 高屏地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之高屏地區觀測資料進行分析，各觀測點位之速度值如圖 2-2.25 示，由結果可知 2002 至 2010 年速度量值 12.9 ~ 64.5 mm/yr，2010 至 2017 年速度量值 13.6 ~ 61.2 mm/yr。

由高屏地區垂直速度場結果（圖 2-2.26）可知，在小岡山斷層以及旗山斷層之間呈現約 8.3 ~ 22.8 mm/yr 之抬升量，其餘地區大致呈下陷，顯著下陷區在永安及枋寮一帶，約 14.8 ~ 20.0 mm/yr。

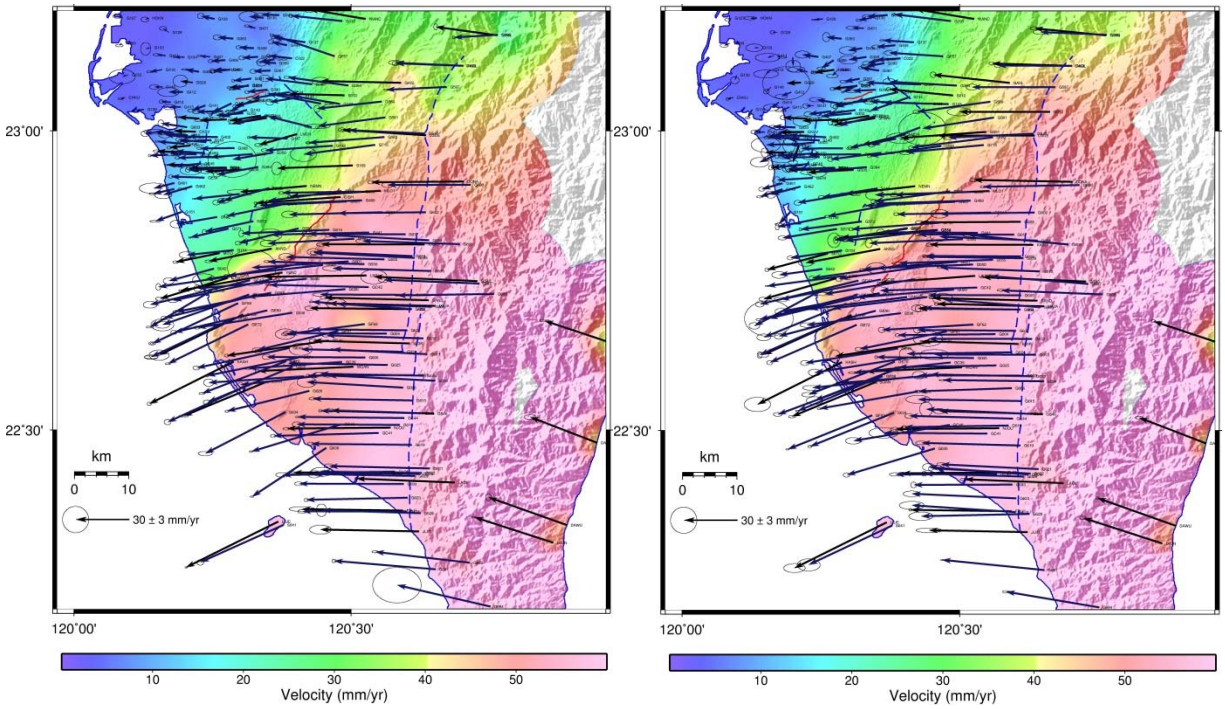


圖 2-2.25：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2017 年速度場。

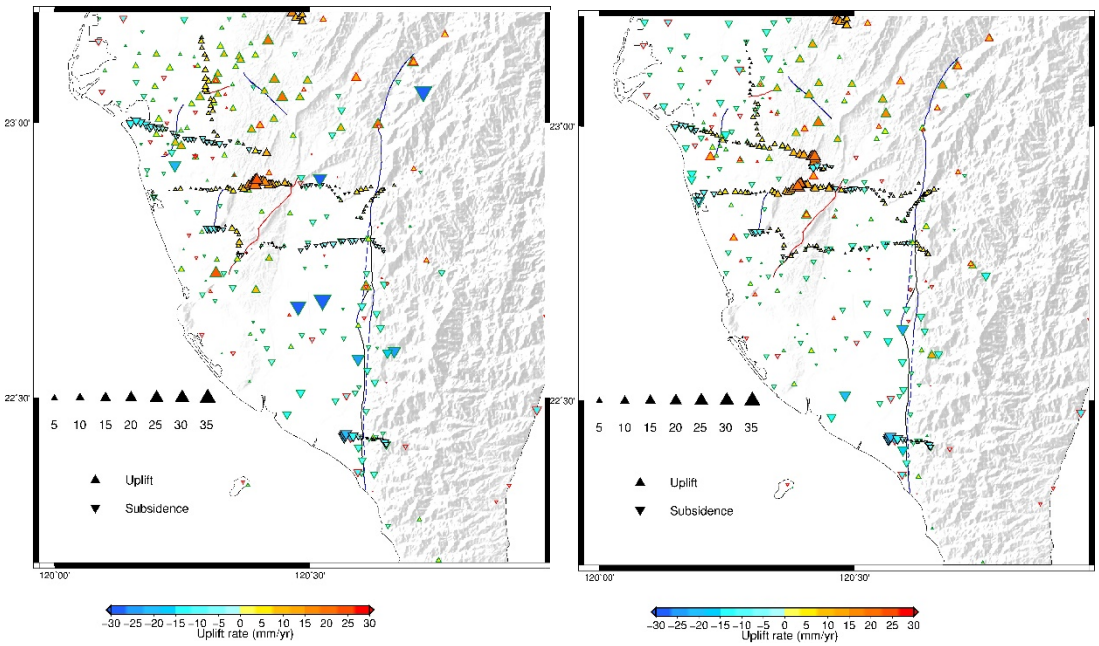


圖 2-2.26：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2017 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站。

2-2-11 中部地區 GPS 歷年觀測成果分析

檢視中部地區移動站歷年時間序列，可發現部分點位出現速度轉折的現象（如圖 2-2.27），經過統計以及比對該地區連續站時間序列，可發現轉折點分布如圖 2-2.28，此外由連續站及精密水準時間序列結果（圖 2-2.29 及圖 2-2.30），亦可發現此速度轉折之現象，考慮到 2013 年 6 月 M_L 6.5 之南投地震之影響，我們將此區域時間段分為 2002-2007 年、2007-2013 年以及 2013-2017 年三個時間段，由結果可知三段時期之速度場分布如圖 2-2.31 及圖 2-2.32，2002-2007 年速度約為 2.5 ~ 9.6 mm/yr，2007-2013 年速度約為 4.9 ~ 12.0 mm/yr，2013-2017 年速度約為 4.9～12.0 mm/yr，垂直方向由西向東跨車籠埔、大茅埔斷層後呈現抬升，第一段速度值約為 12.7 ~ 16.5 mm/yr，第二段速度值約為 7.5 ~ 9.1mm/yr，第三段速度值約為 5.8～6.5 mm/yr，沿海地區為顯著下陷區，第一段速度值約為 38.9～107.5 mm/yr，第二段速度值約為 28.5～51.9mm/yr，第三段速度值約為 3.8～28.3 mm/yr。

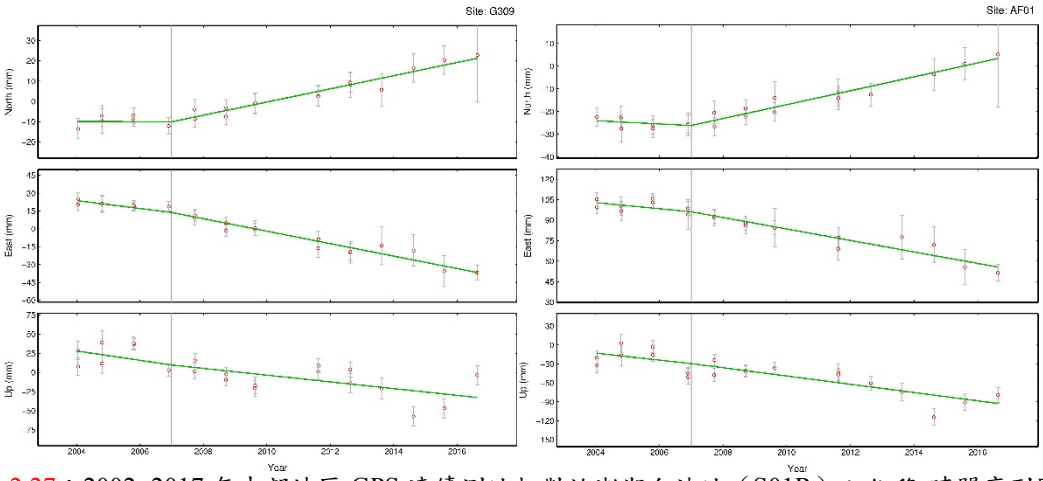


圖 2-2.27：2002~2017 年中部地區 GPS 連續測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。

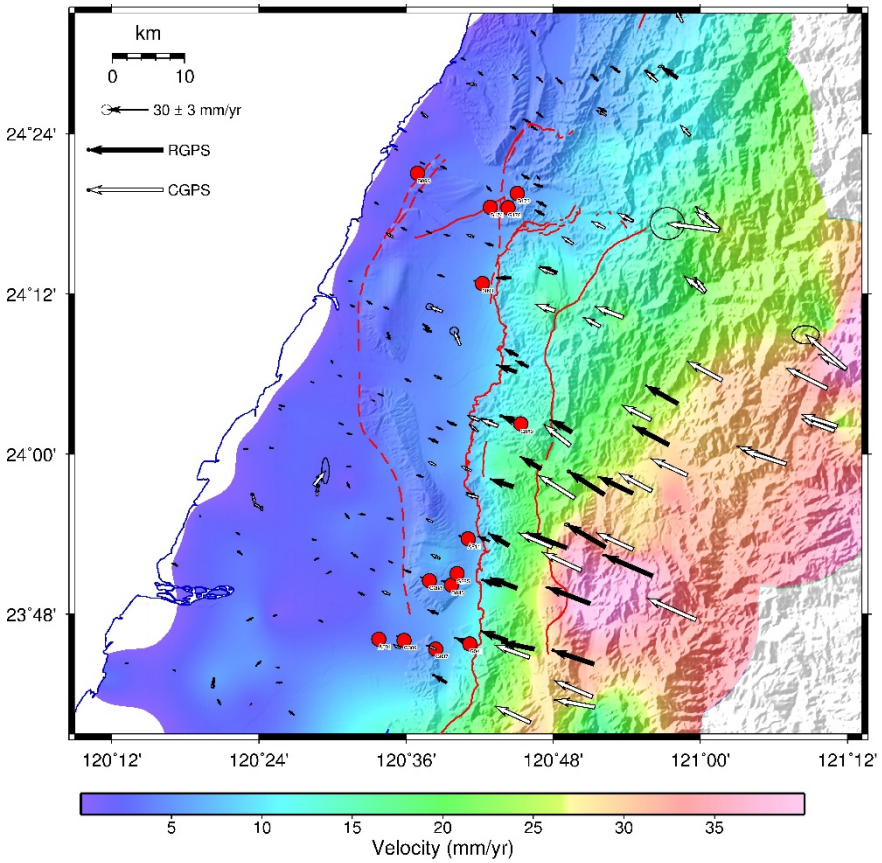


圖 2-2.28：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色圓圈代表發生速度轉折之移動站點位。

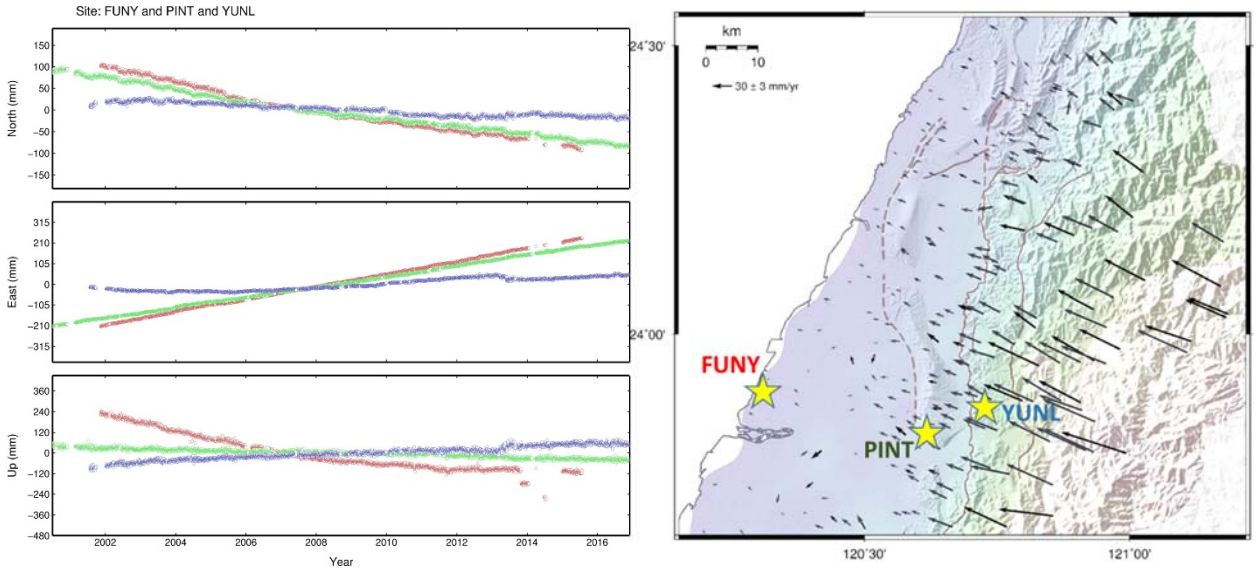


圖 2-2.29：左圖為 GPS 連續站 FUNY、PINT 與 YUNL 之坐標時間序列。右圖星號指出此三個測站的位置。

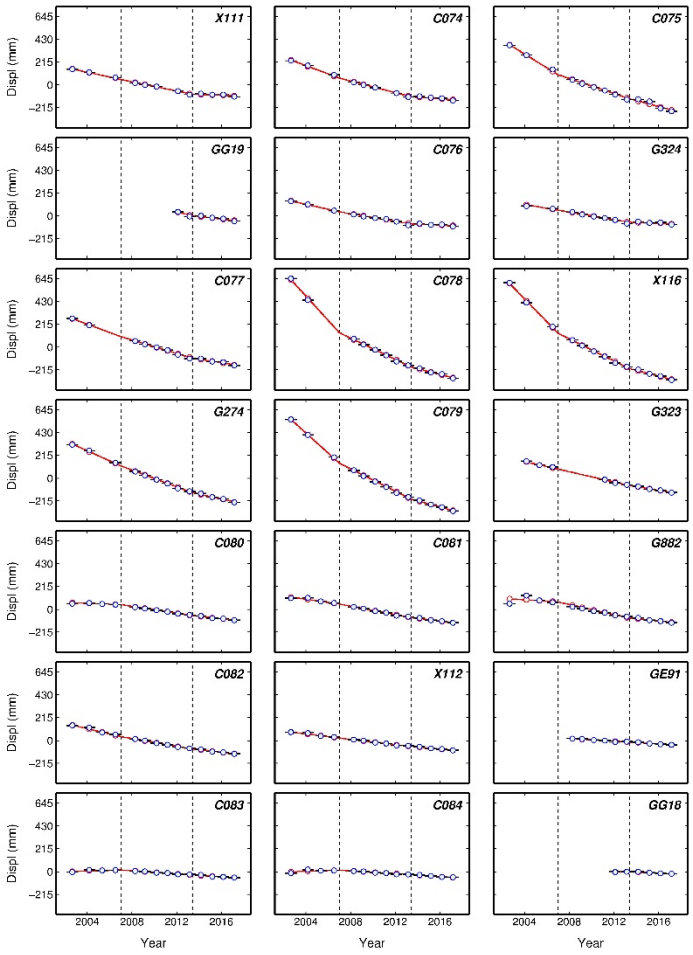


圖 2-2.30：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（王功-草屯-埔里）時間序列分析圖，虛線之時間分隔點為 2007 年 1 月 1 日及 2013 年 6 月 2 日南投地震。

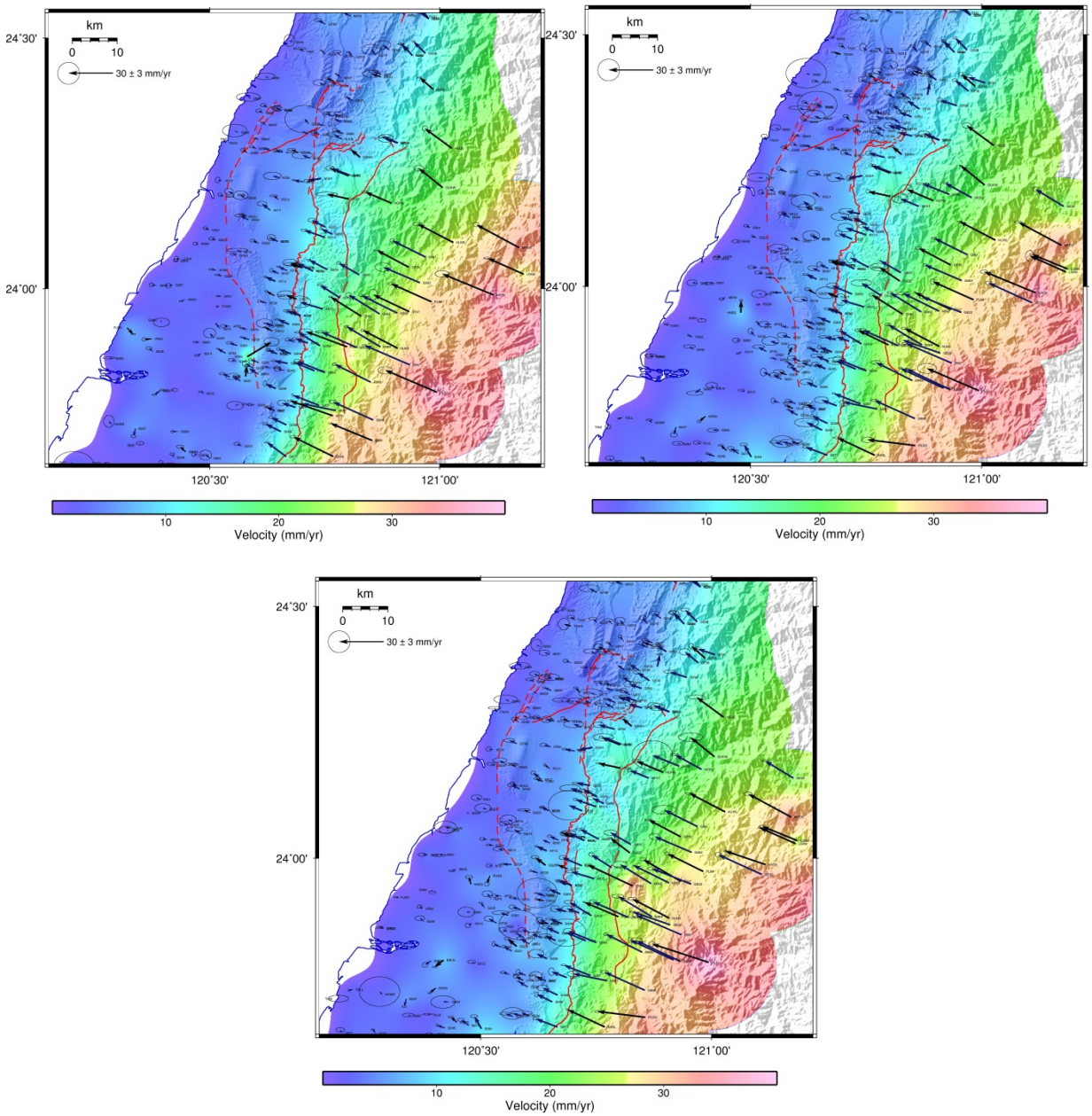


圖 2-2.31：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上表示 2002~2007 年速度場，右上表示震後 2007~2013 年速度場，下圖表示 2013~2017 年速度場。

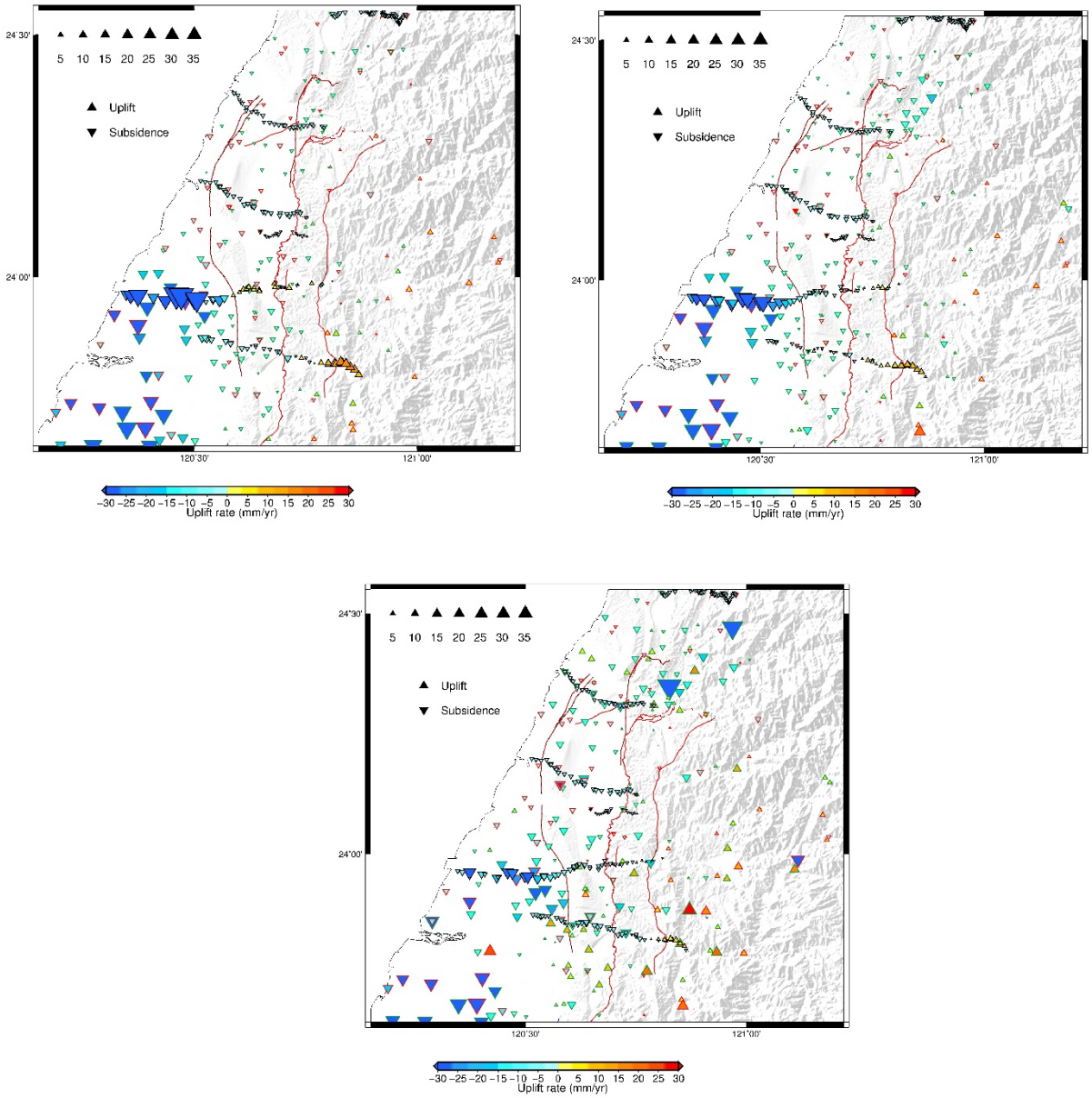


圖 2-2.32：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，左上表示 2002~2007 年速度場，右上表示震後 2007~2013 年速度場，下圖表示 2013~2017 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-2-12 東部地區 GPS 歷年觀測成果分析

由精密水準時間序列分析結果可知，紅葉-靜浦（圖 2-2.33）、嶺頂-瀧澗及光復-豐濱測線在 2009 年以及 2013 年瑞穗地震後發生速度變化，因此將本區之 GPS 資料以 2009 年 1 月及 2013 年 10 月為分界，分別求取三段之速度場，由圖 2-2.34 可知 2002 至 2009 年速度量值 21.4～70.2 mm/yr，2009 至 2013 年速度量值 13.2～52.3 mm/yr，2013 至 2017 年速度量值 9.6～63.2 mm/yr。

由圖 2-2.35 可知東部地區，除海岸山脈南段沉陷較不顯著外，垂直速度場大致呈現下陷，整體值約 0.6～30.2 mm/yr，其中光復-豐濱測線在 2013 年瑞穗地震後沉陷速度變大，值約 13.9～34.8 mm/yr。

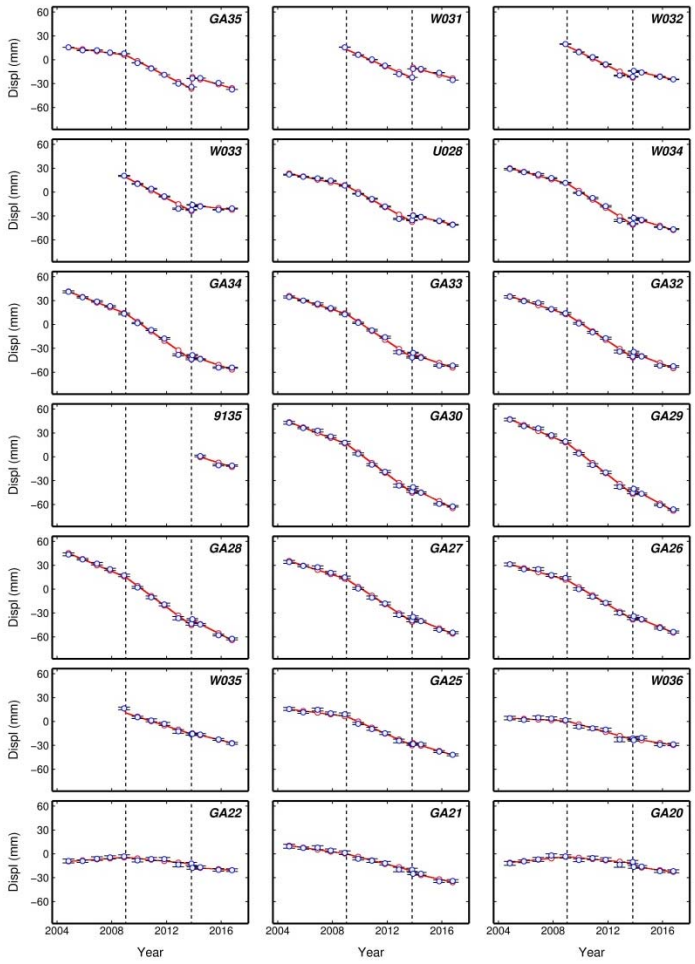


圖 2-2.33：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之精密水準測線（紅葉-靜浦）時間序列分析圖，虛線之時間分隔點為 2009 年 1 月 1 日及 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

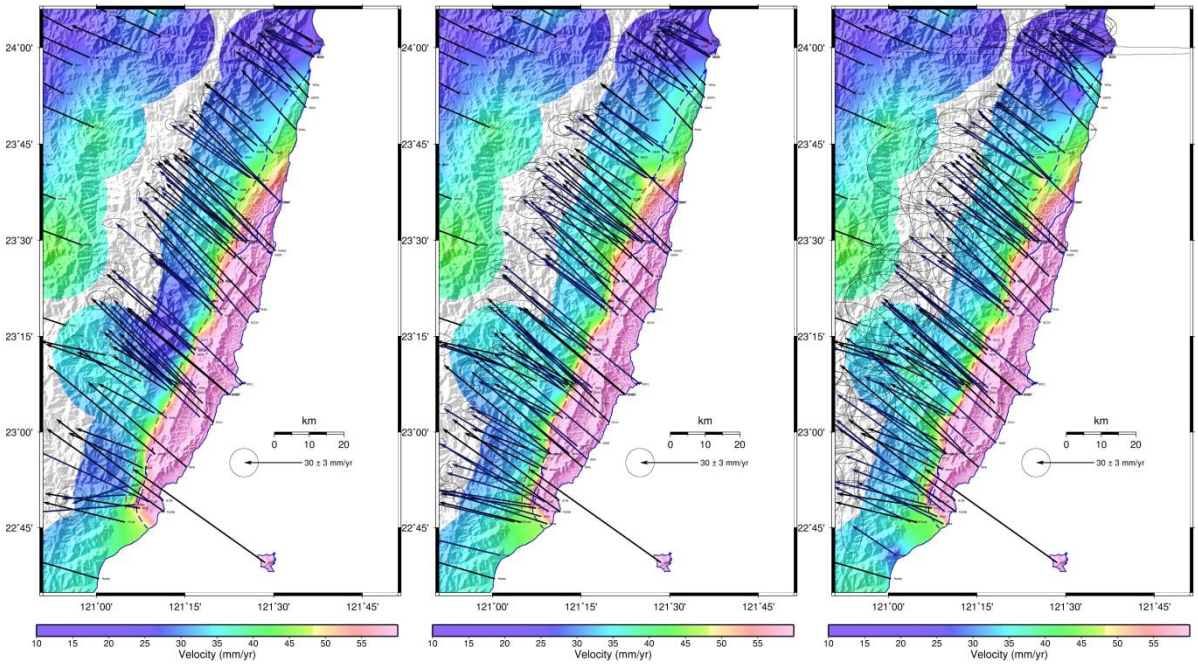


圖 2-2.34：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2003~2009 年速度場，中間表示震後 2009~2013 年速度場，右圖表示 2013~2017 年速度場。

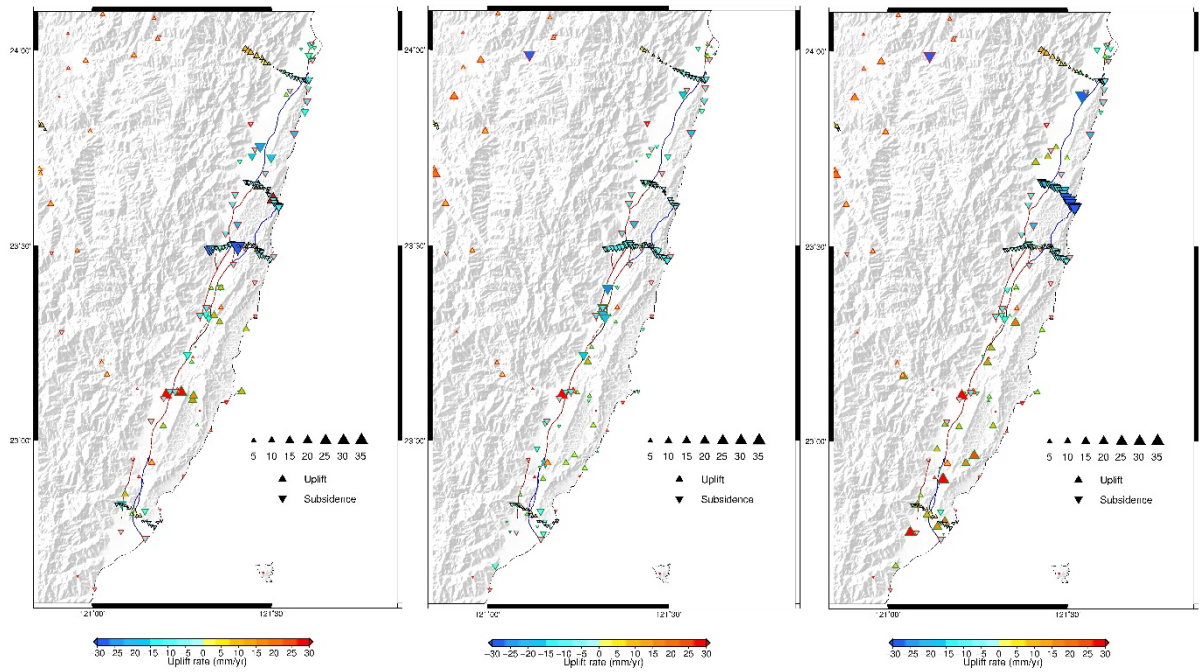


圖 2-2.35：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，左圖表示 2003~2009 年速度場，中間表示 2009~2013 年速度場，右圖表示 2013~2017 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-2-13 宜蘭地區 GPS 歷年觀測成果分析

宜蘭地區 GPS 分析資料觀測時間自 2004 至 2017 年，各觀測點位之速度值如圖 2-2.36 及圖 2-2.37 所示，水平速度量值 1.9 ~ 36.2 mm/yr，垂直方向大致為沉陷，其沉陷量由北至南先增加後再減少，往南至南澳亦呈現沉陷，整體值約 0.1 ~ 25.8 mm/yr。

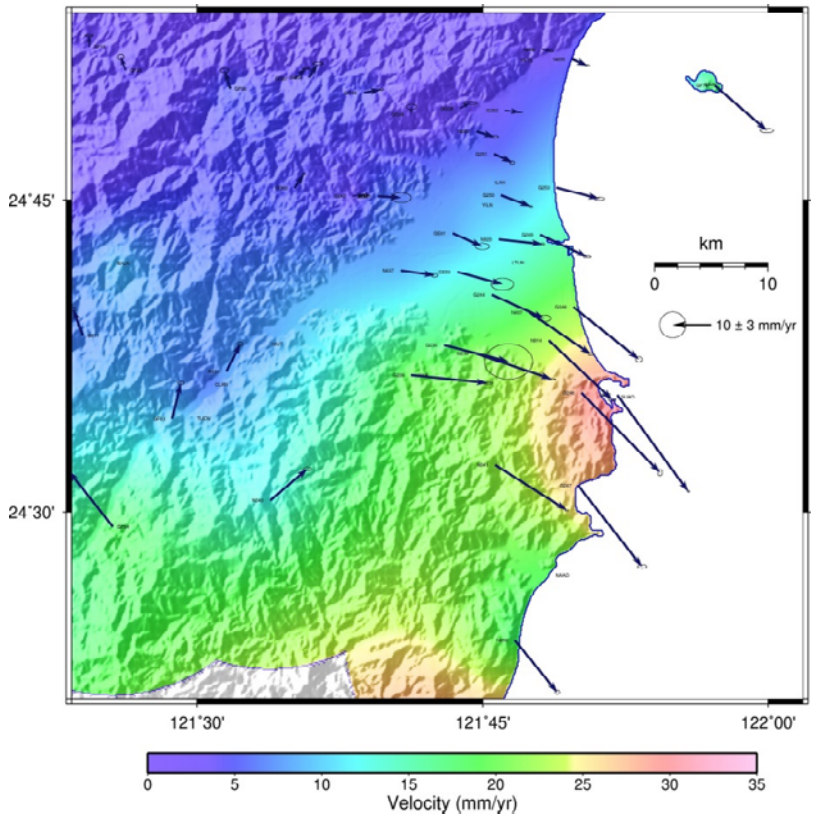


圖 2-2.36：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2004~2017 年資料所解算之速度場分布色階圖。

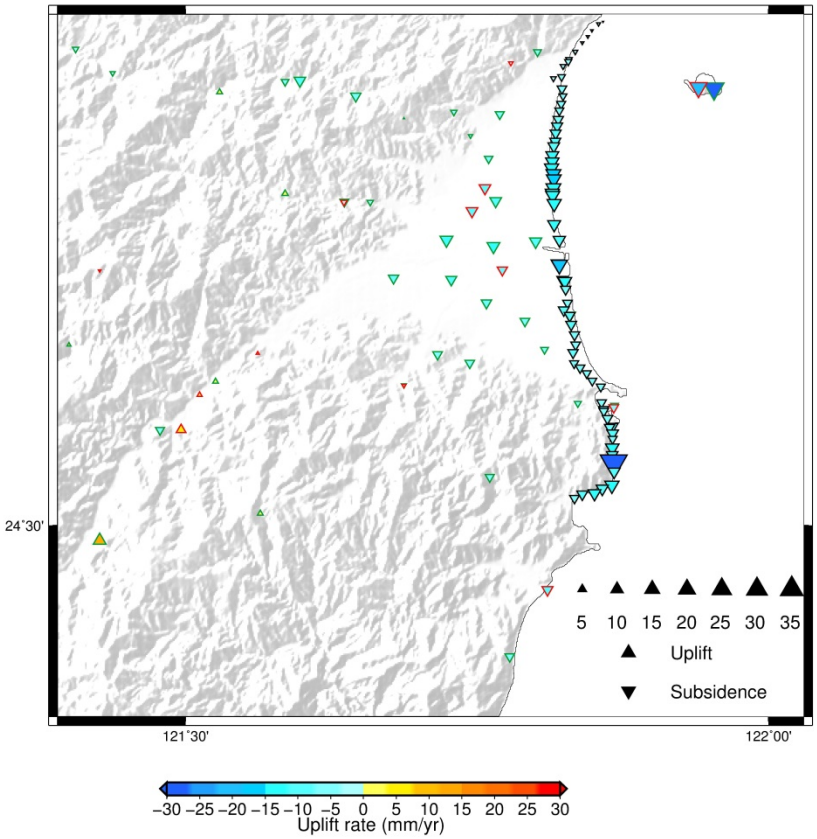


圖 2-2.37：宜蘭地區相對於澎湖白沙站（S01R）2004~2017 年之 GPS 垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-3 精密水準測量精度分析

2-3-1 精密水準測量精度分析

截至 2017 年所獲得之精密水準測量資料包含「台 2_石門至萬里測線」、「士林至三芝測線」、「淡水至士林測線」、「五股至臺北測線」、「縣 115_新屋至童話世界測線」、「縣 122_新竹至五峰測線」、「縣 117_新竹至峨眉測線」、「苗栗至南庄測線」、「縣 132_大安至東勢測線」、「縣 136_龍井至太平測線」、「縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線」、「縣 150-台 16_北斗至水里測線」、「縣 164_金湖至瑞峰測線」、「縣 174_北門至楠西測線」、「縣 182_安平至龍崎測線」、「台 28_路竹至茂林主、副線」、「台 22_岡山至安坡測線」、「佳冬至七佳測線」、「恆春西台地至佳樂水測線」、「台 26_南樹林至鵝鑾鼻」、「台 19 甲_善化至關廟」、「台 20_新化至玉井測線」、「嶺頂至瀧澗測線」、「光復至豐濱測線」、「紅葉至靜浦測線」、「東成至富岡測線」和「梗枋至東澳測線」共 29 條主、副測線，以及跨車籠埔斷層之「五光至黃竹測線」。

2017 年 11 月底前所獲得共計 577 個測段，其往返閉合差均合乎內政部九十年度編印之「一等水準測量作業規範」。其中，測段往返閉合差絕對值小於 2.0 mm 以下者，有 568 個測段（圖 2-3.1a），佔所有測段比例之 98.4 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 97.7 %（564 個測段）；測段往返閉合差精度小於 $2.0\sqrt{k}$ 者，則佔所有測段比例為 99.7 %（575 個測段）。考慮與測段距離的關係後（Bomford, 1985），每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 1071 個測段達測段達 98.4 %（圖 2-3.1b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

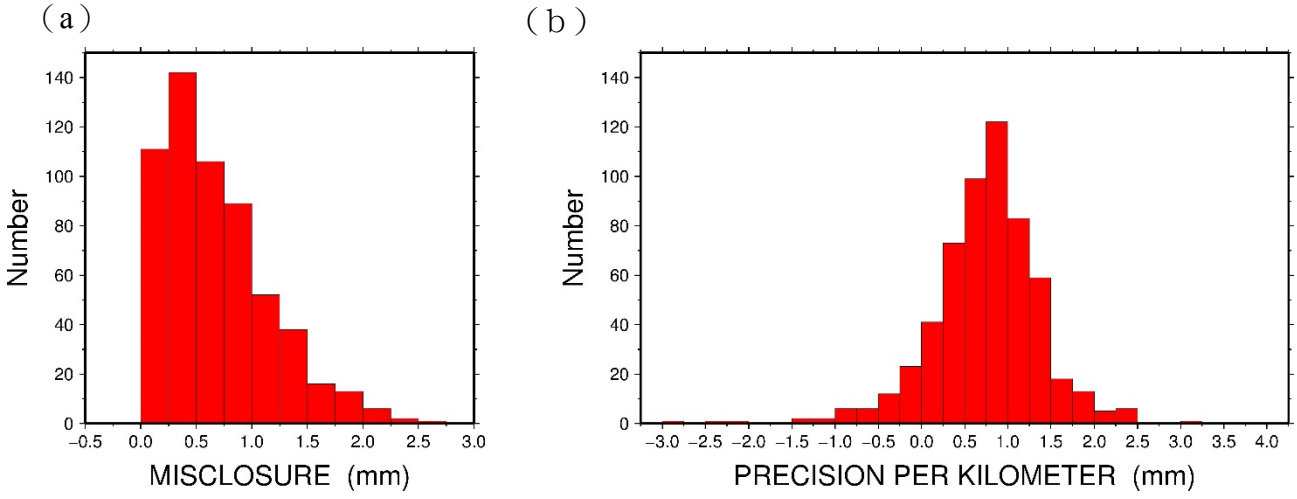


圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。（a）為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.25 ~ 0.5 mm 上。（b）為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.75 ~ 1.0 mm 上。

2-3-2 水準垂直速度場之推求

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

實際處理資料時，首先選定測線中作為參考點的測站，該參考點須為長期穩定之樁位，如果選用的測站點變動很大，會因誤差傳播造成其他測線成果呈現出不合理的跳動，因此測試選用參考點時，會依照時間序列整體穩定度進行挑選。

接著在測線上選定距離 GPS 連續站最接近的水準點作為約制點，透過將約制站的速度（斜率）調整成與 GPS 連續站相同，將整條水準測線之垂直速度轉換到相對於 S01R（澎湖白沙）之垂直速度。

最後藉由檢視時間序列，進行同震修正、外部誤差所造成的離群跳動，以得到相對於測站 S01R 的垂直速度場。

2-3-3 台 2_石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 20 公里，2004 至 2017 年間共進行 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-2.08 mm/yr 與-2.08 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 2-3.6，本測線垂直速度均落在 -6 至-1 mm/yr 之間，而跨斷層點位之垂直速度變化< 1 mm/yr，此結果說明近幾年山腳斷層在該區域並未有明顯之活動跡象。另在地形高程變化部分，在橫跨斷層區域約有 3~ 5 m 的跨斷層地形高度的變化量，可能是因山腳斷層及其分支斷層長期活動所導致。

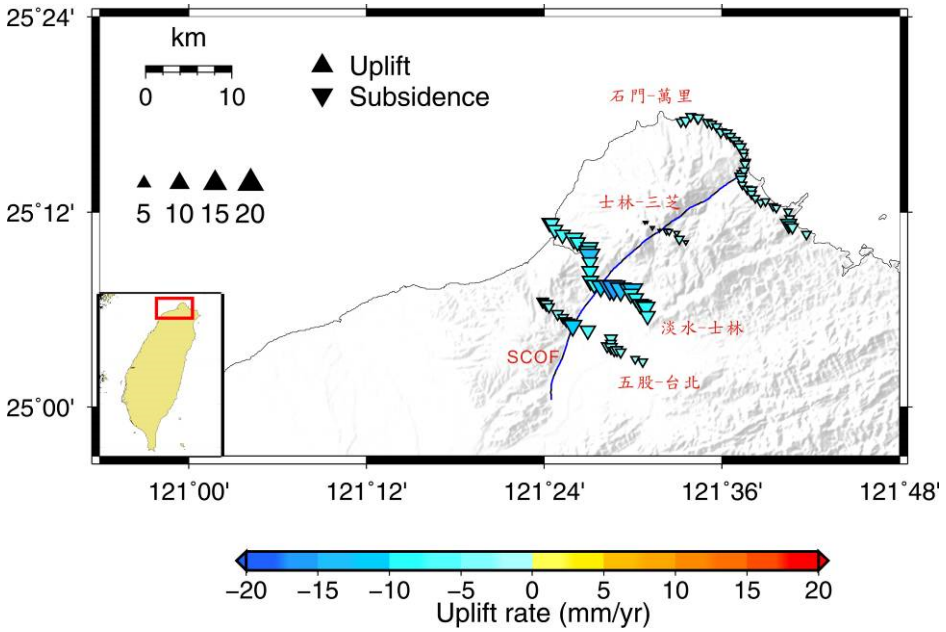


圖 2-3.2：臺北地區之水準垂直速度場。SCOF 為山腳斷層

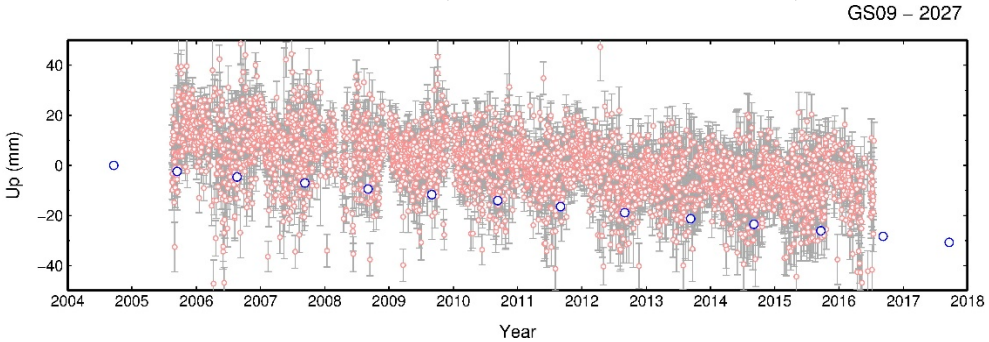


圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

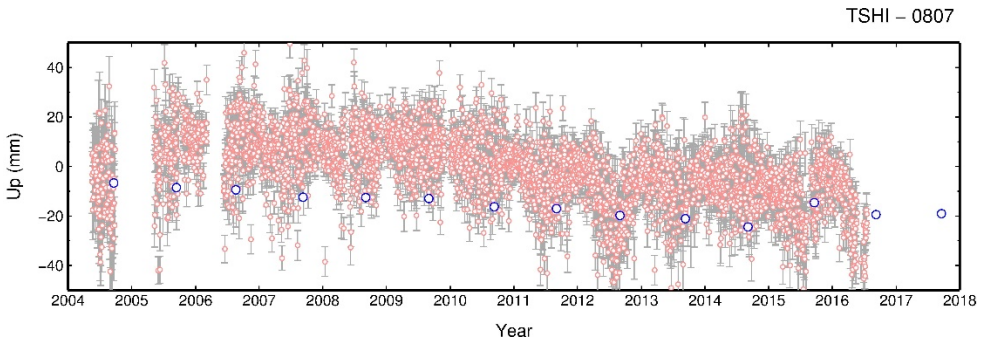


圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較，兩者相距 0.08 公里。

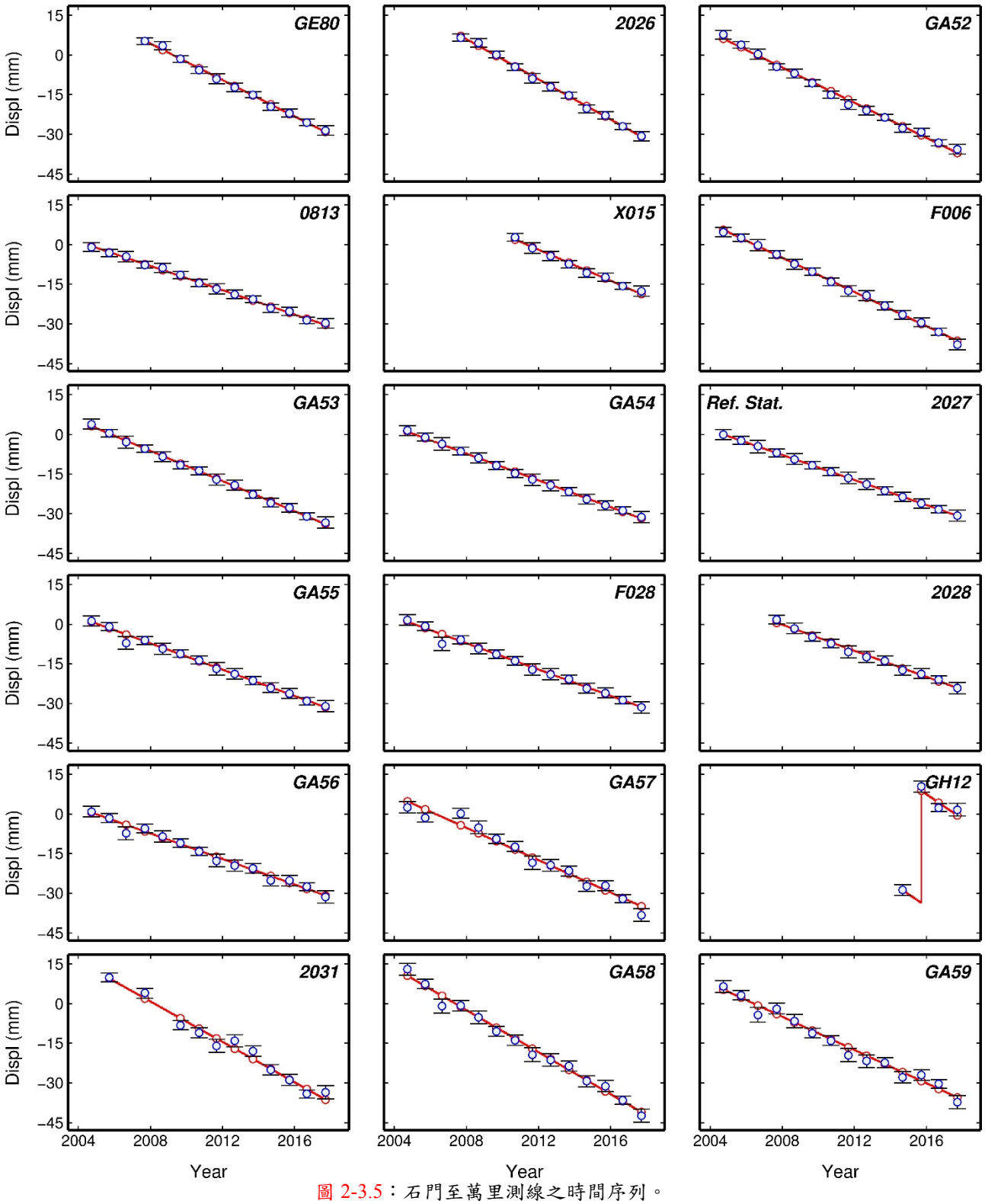


圖 2-3.5：石門至萬里測線之時間序列。

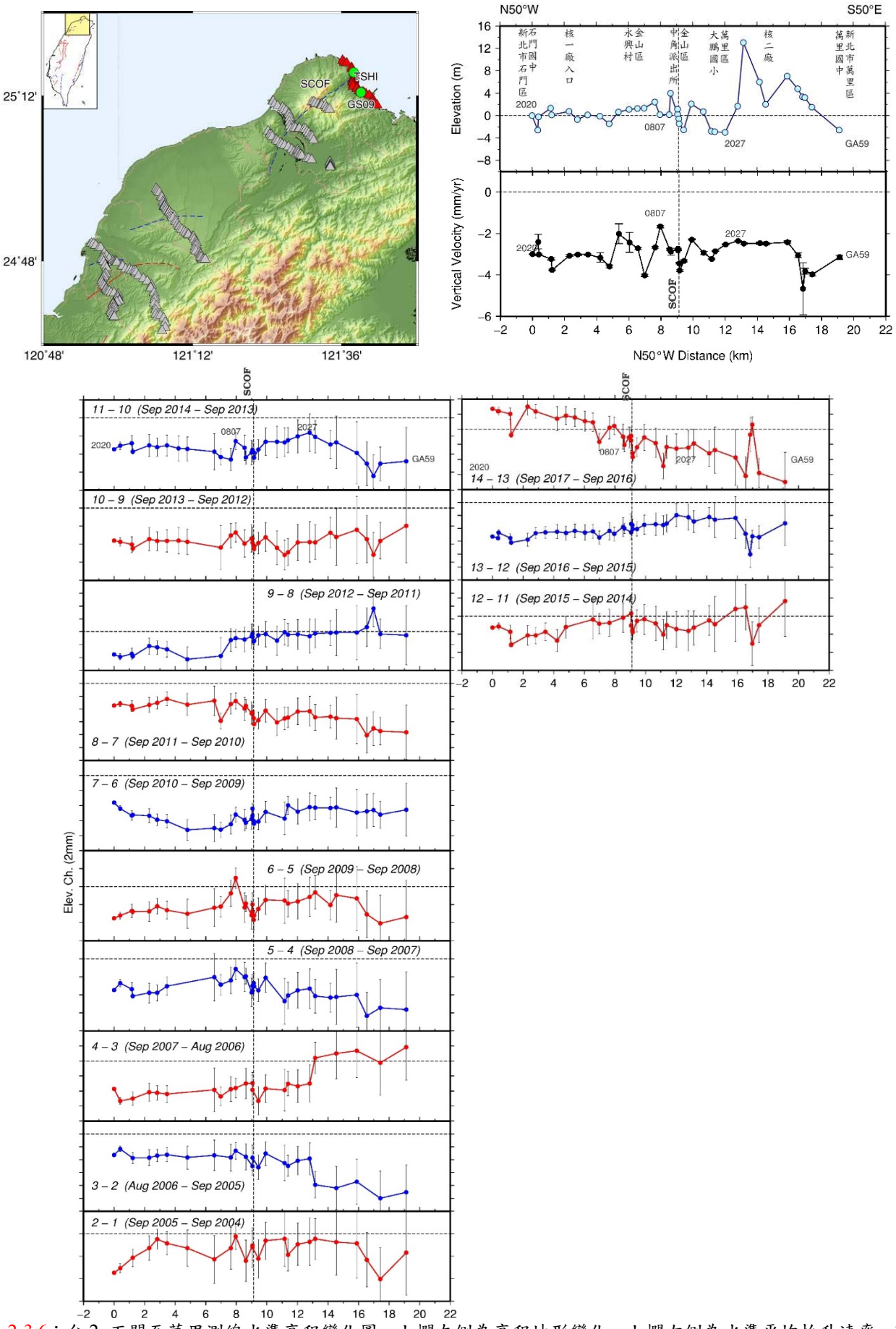


圖 2-3.6：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-4 士林至三芝測線

本測線跨越山腳斷層，測線長約 5 公里。該測線 2004 至 2017 年間共進行 14 次測量。本測線以 GPS 連續站 YMSM 之垂直速率（-0.59 mm/yr），作為約制點來校正 GB06 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.7）。

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

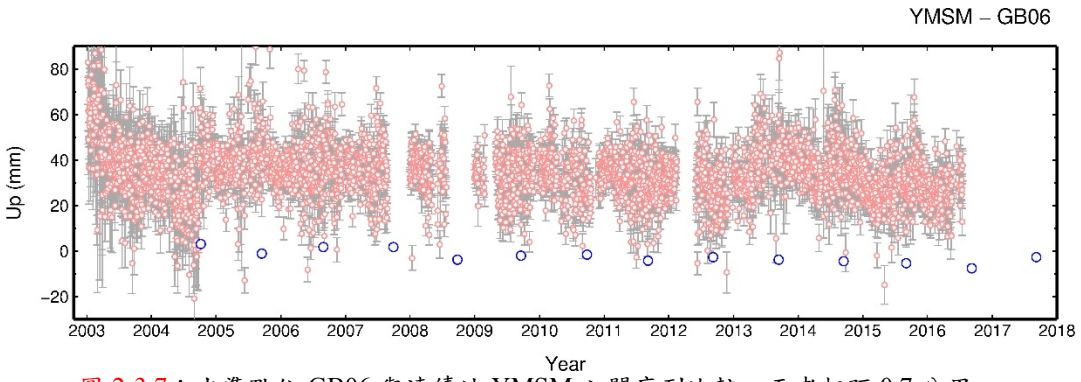


圖 2-3.7：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較，兩者相距 0.7 公里。

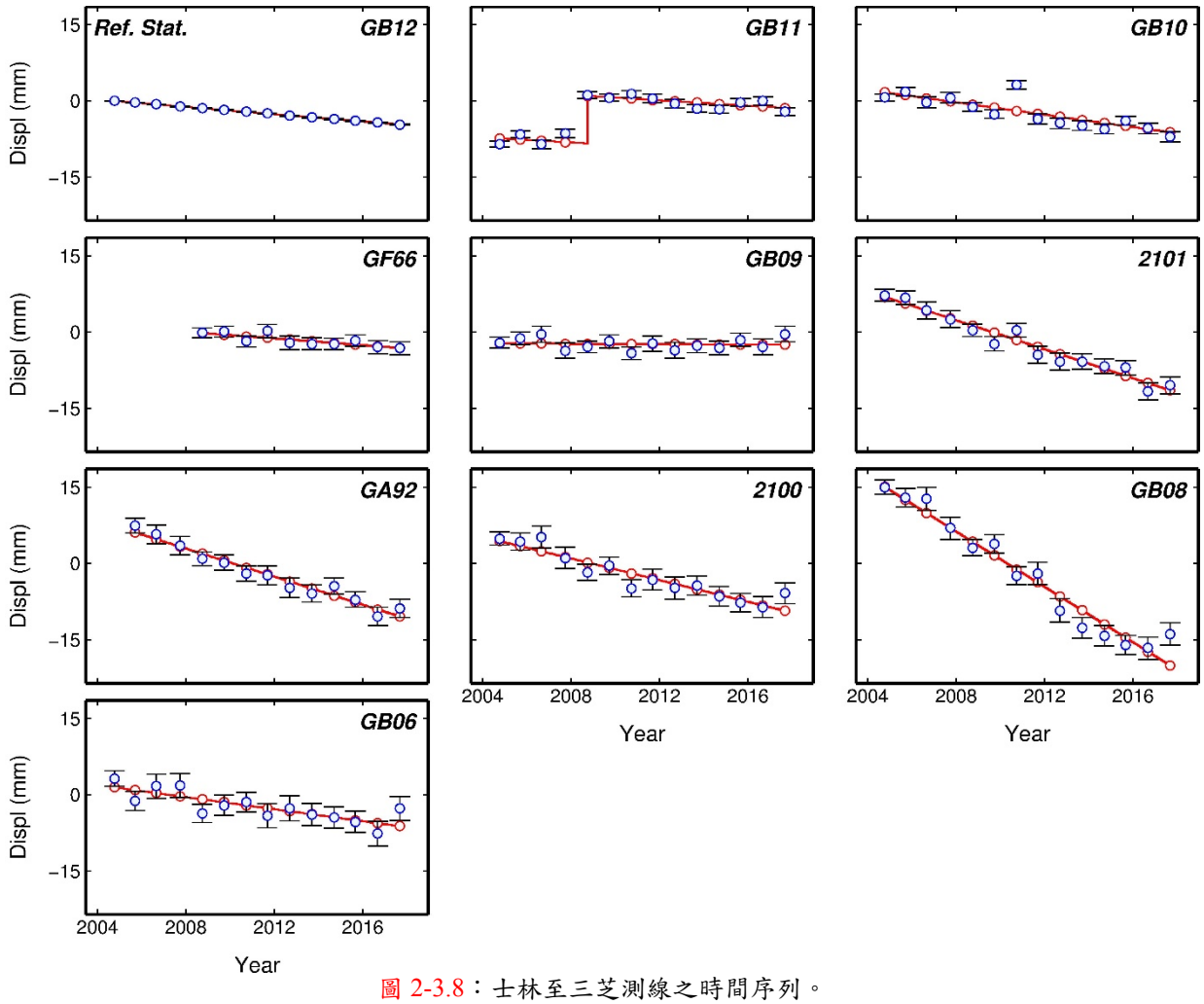


圖 2-3.8：士林至三芝測線之時間序列。

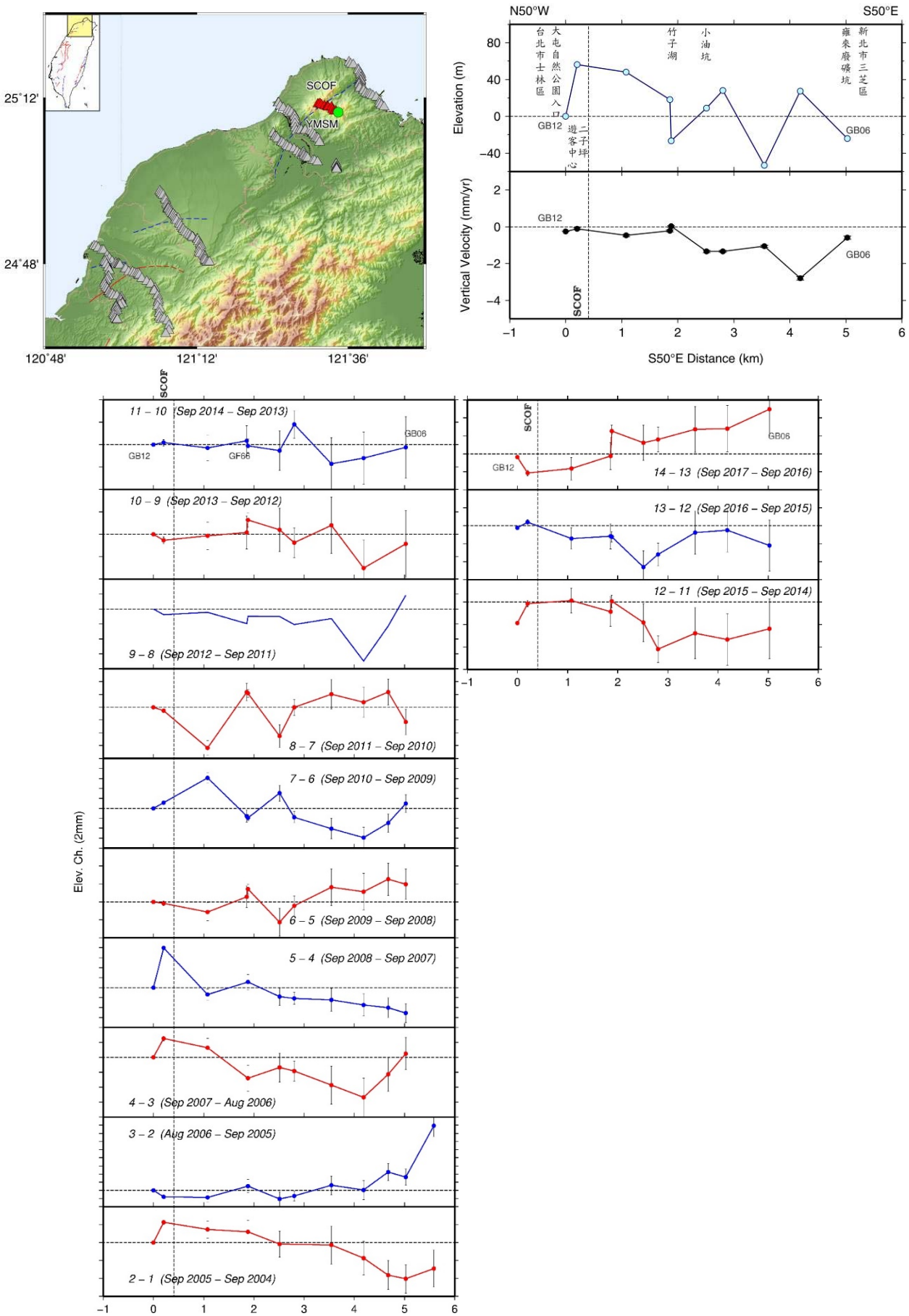


圖 2-3.9：士林至三芝測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-5 淡水至士林測線

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

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

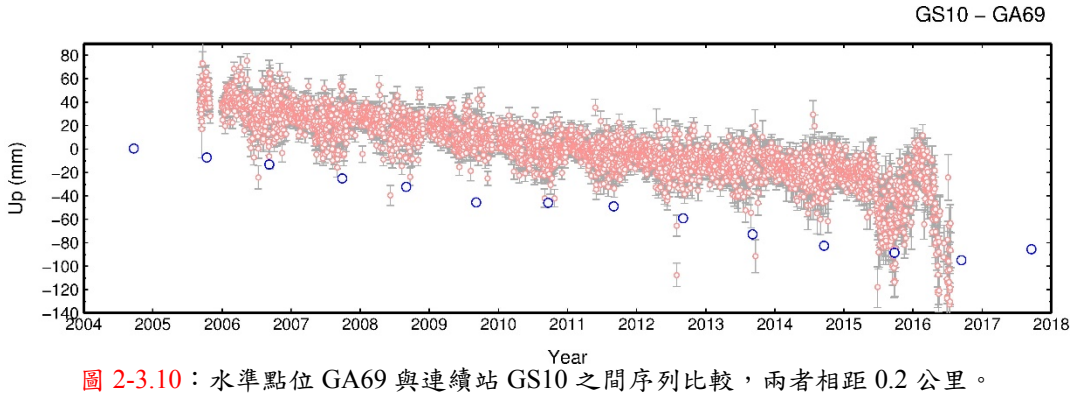


圖 2-3.10：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較，兩者相距 0.2 公里。

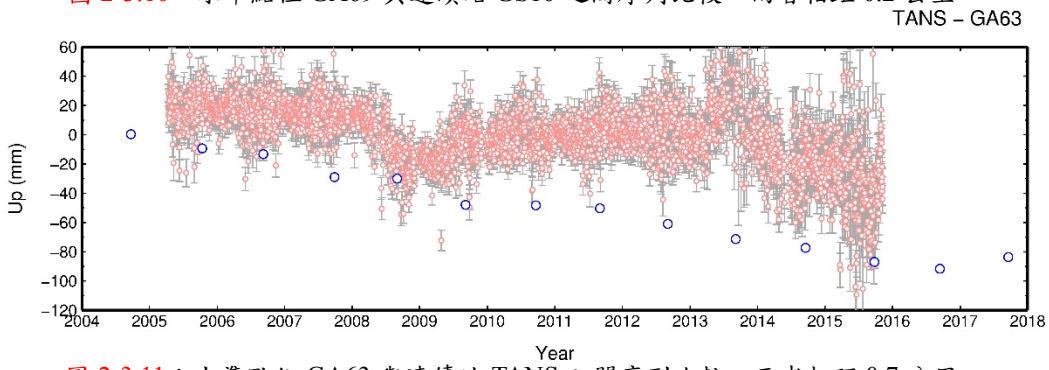


圖 2-3.11：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之間序列比較，兩者相距 0.7 公里。

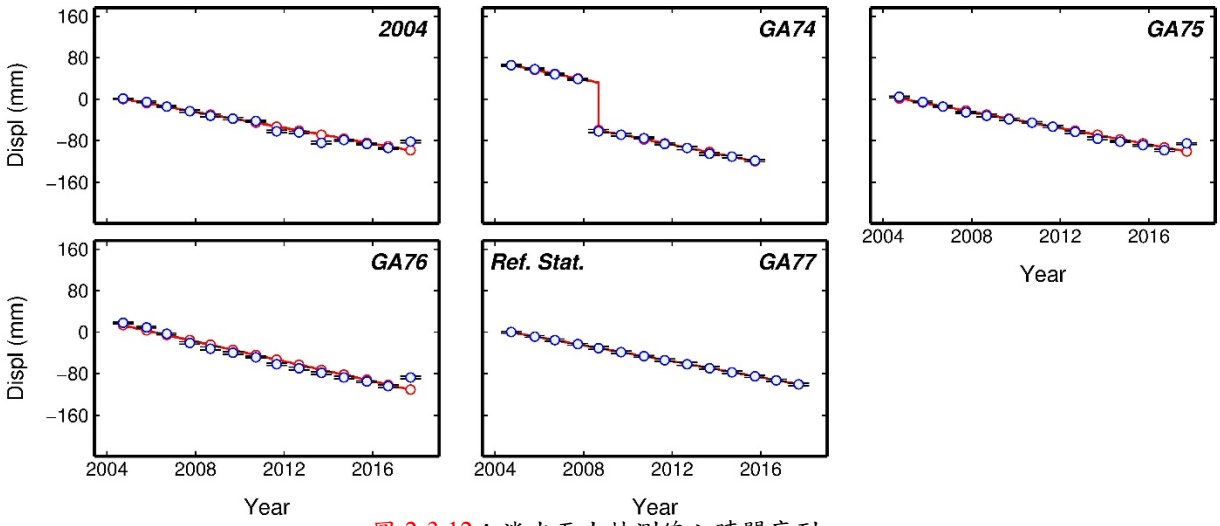


圖 2-3.12：淡水至士林測線之時間序列。

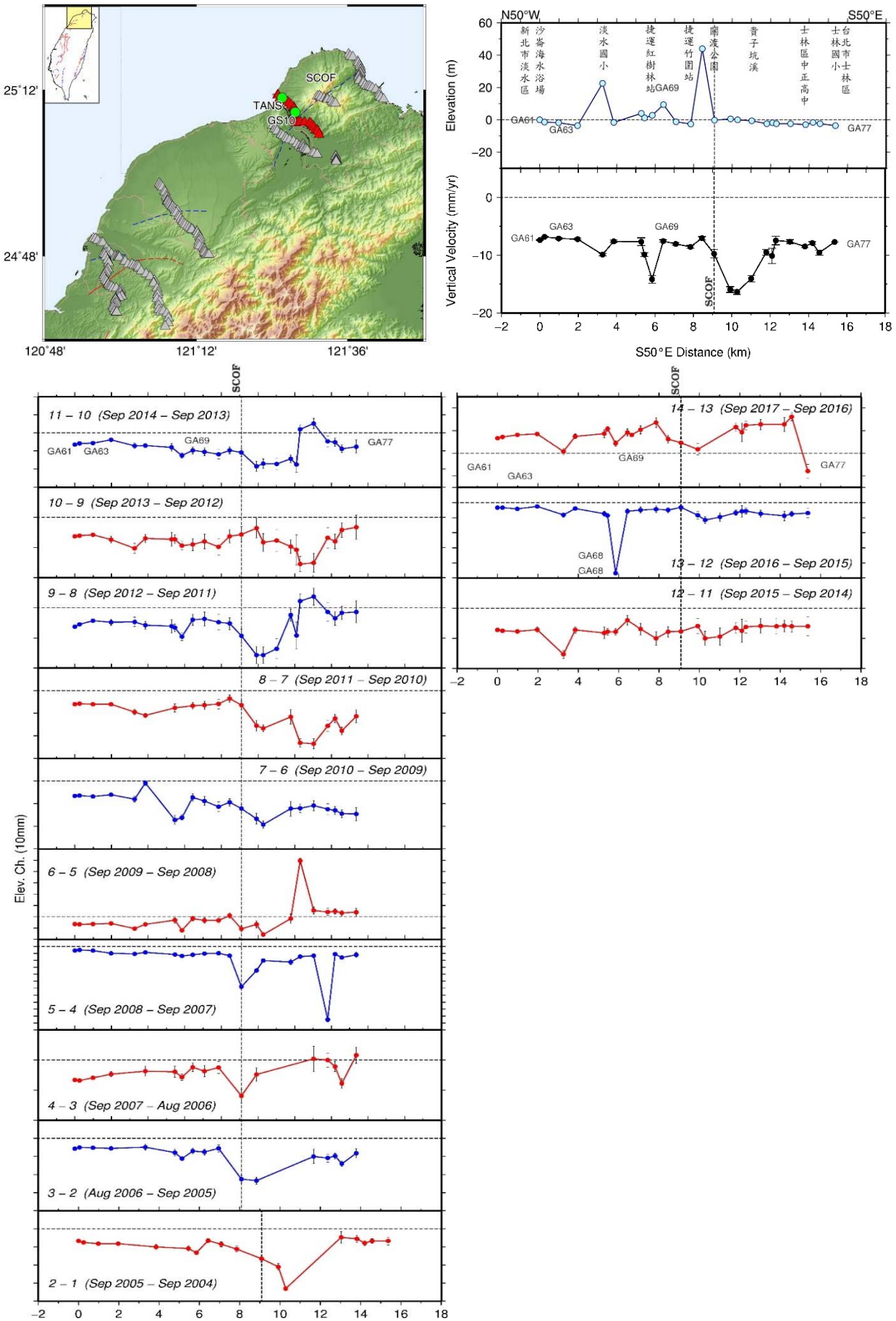


圖 2-3.13：淡水至士林測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-6 五股至臺北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 14 公里。此水準測線於 2004 至 2017 年間共進行 14 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率（-3.91 mm/yr），作為約制點來校正 GA78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.14）。

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

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

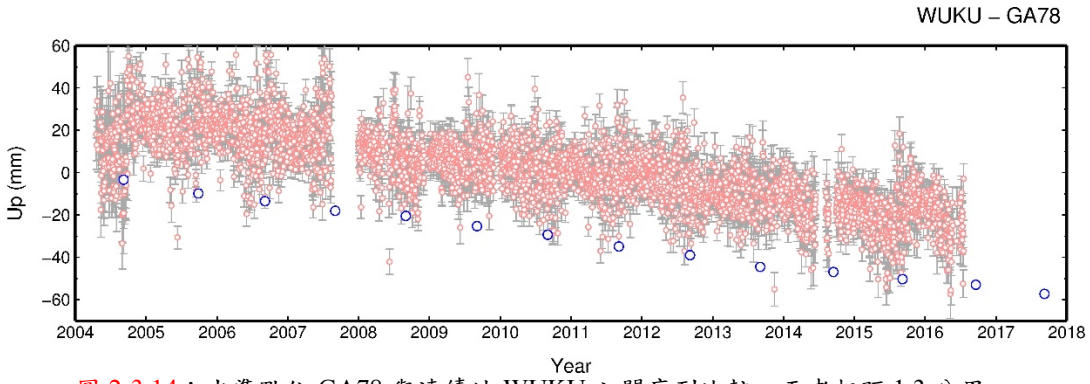


圖 2-3.14：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較，兩者相距 1.3 公里。

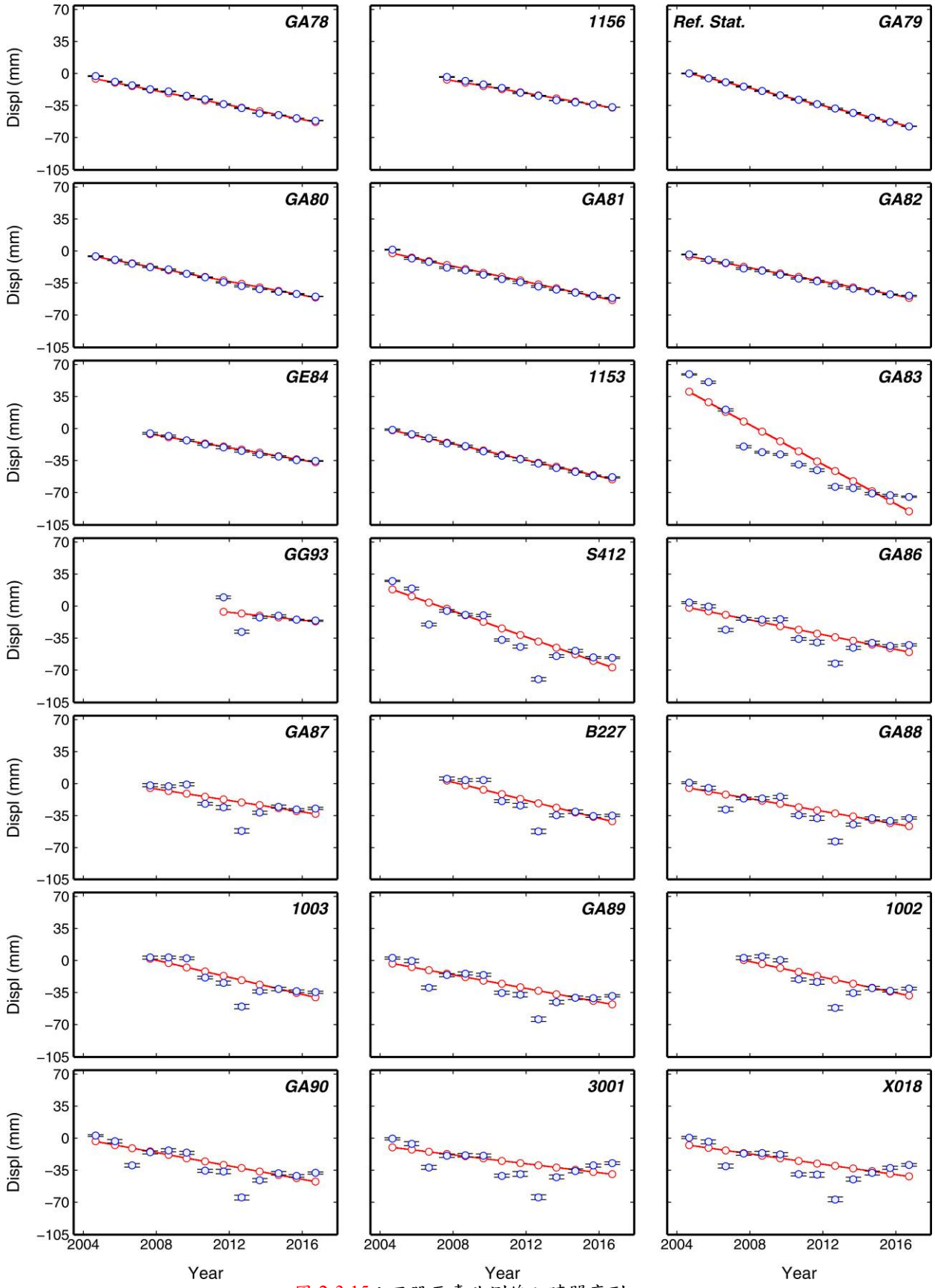


圖 2-3.15：五股至臺北測線之時間序列。

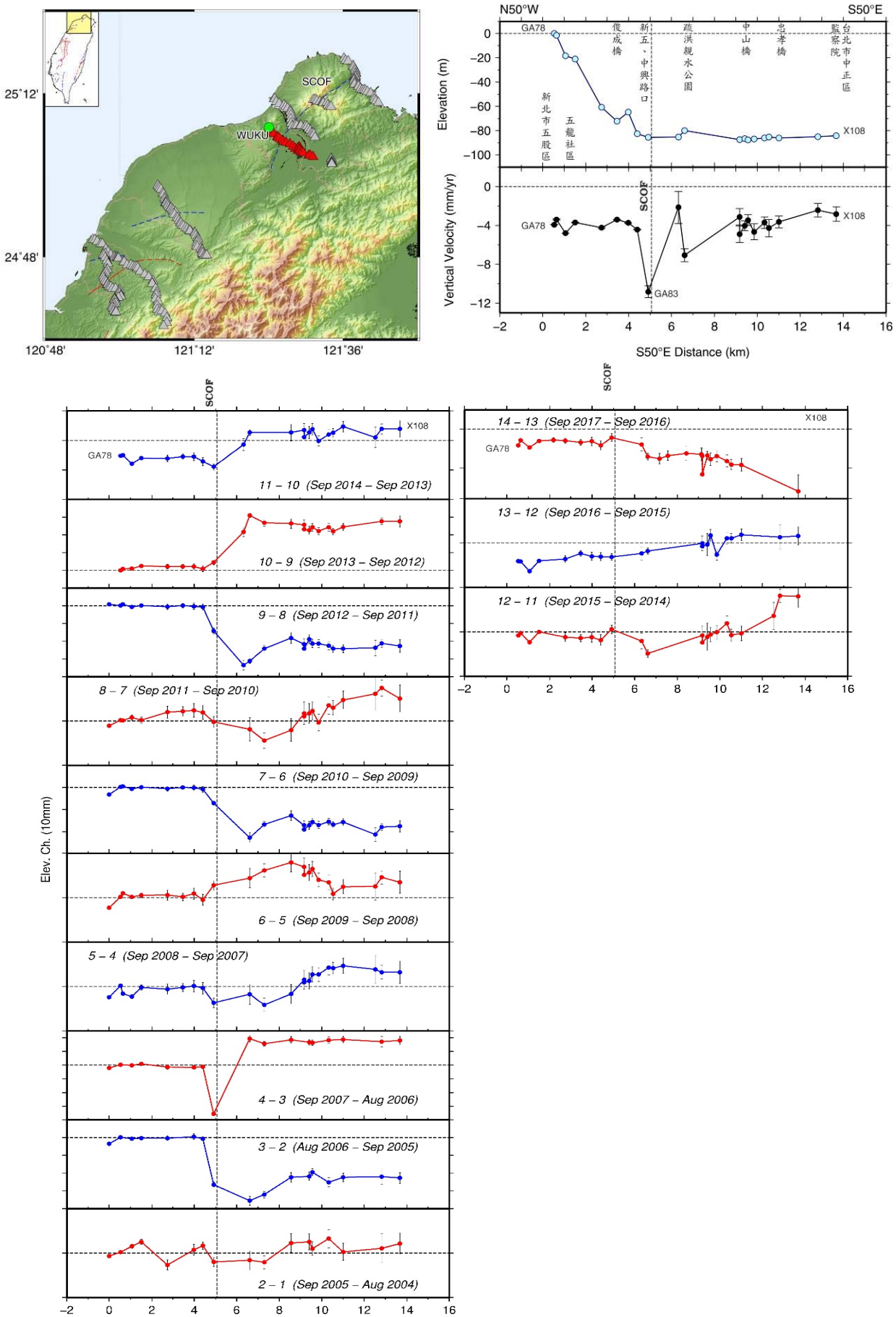


圖 2-3.16：五股至臺北測線水準高程變化圖。上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-3-7 縣 115_新屋至童話世界測線

本測線主要橫跨湖口斷層，測線長約 24 公里(投影至剖面的長度)，分別於 2004 至 2017 年間進行 14 次的施測作業。本測線以 GPS 連續站 YAME 之垂直速率（-1.12 mm/yr），作為約制點來校正 GB40 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.18）。

根據圖 2-3.20，此測線之垂直速度跨湖口斷層由北約 1-2 mm/yr 之抬升速率至斷層南側約 0 mm/yr，有約 2 mm/yr 的變化量。

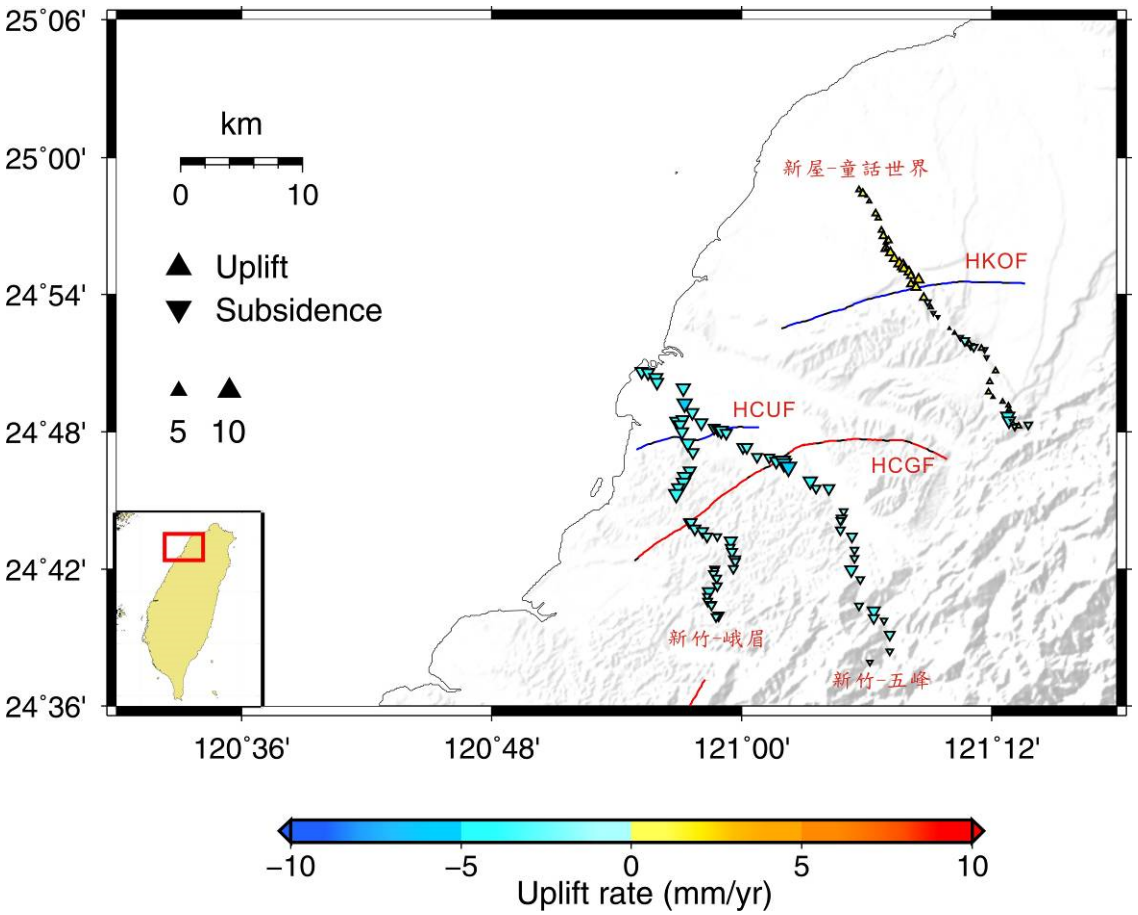


圖 2-3.17：桃竹地區之水準垂直速度場。HKOF 為湖口斷層、HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

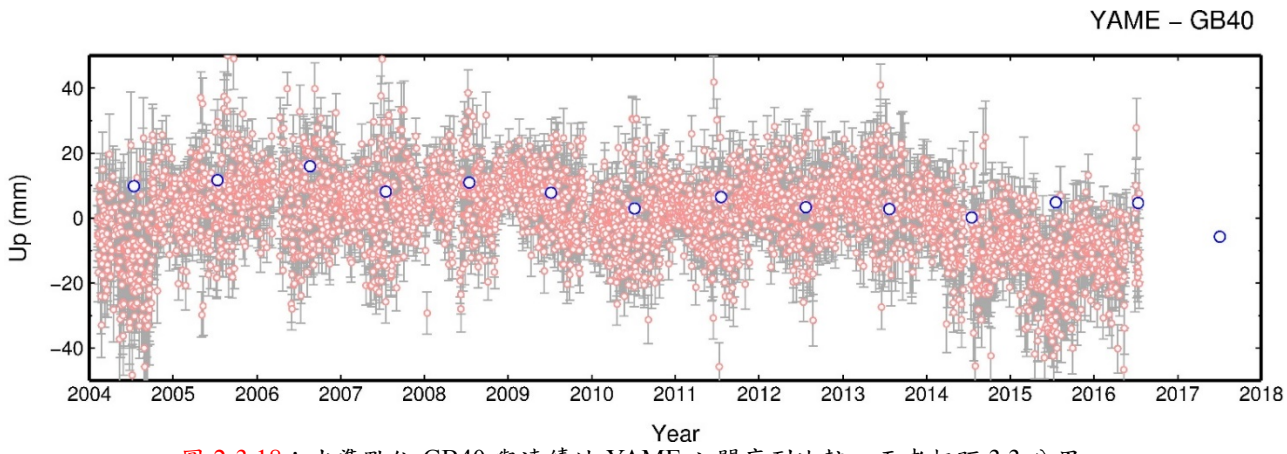


圖 2-3.18：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較，兩者相距 3.3 公里。

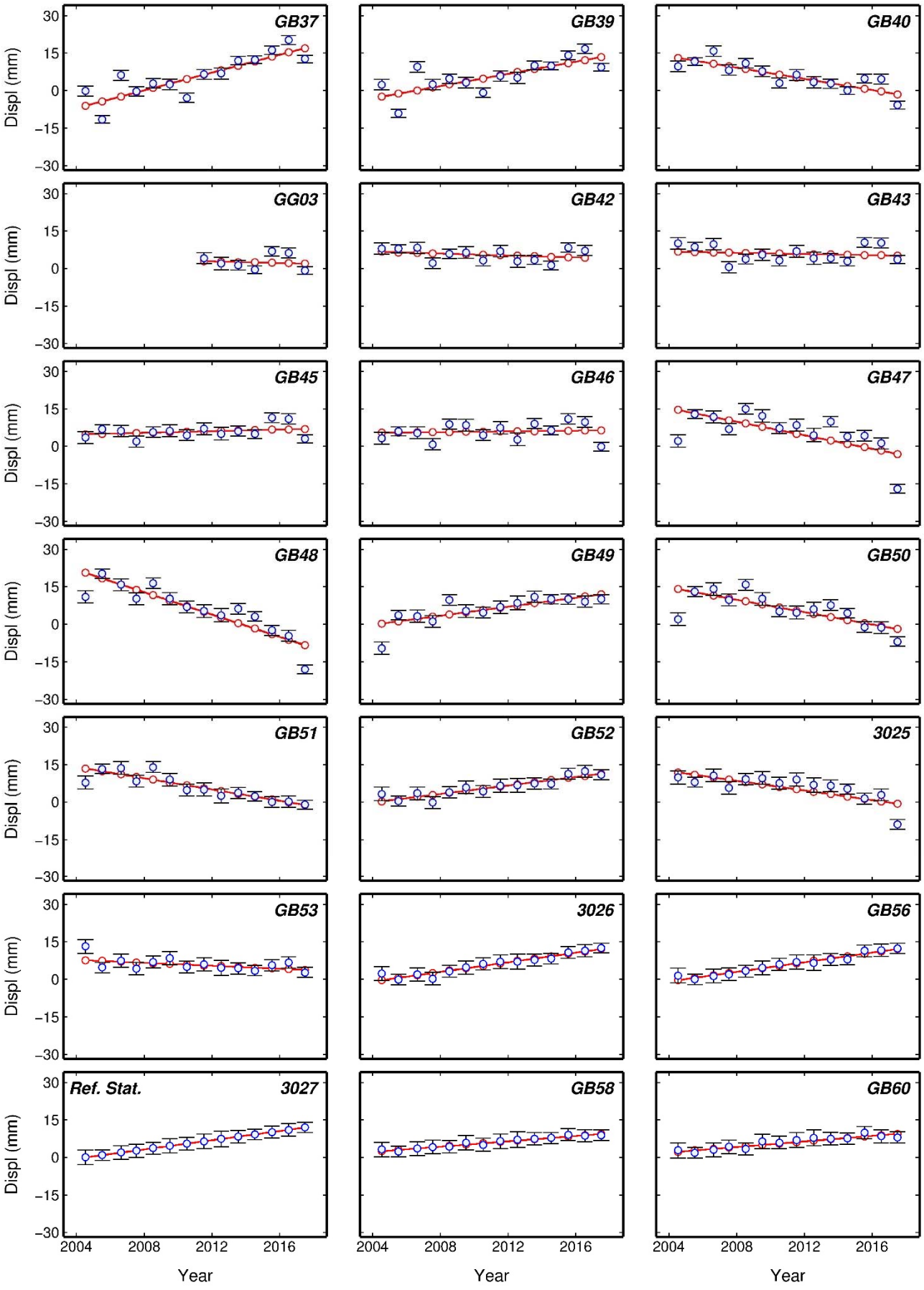


圖 2-3.19：新屋至童話世界測線之間序列

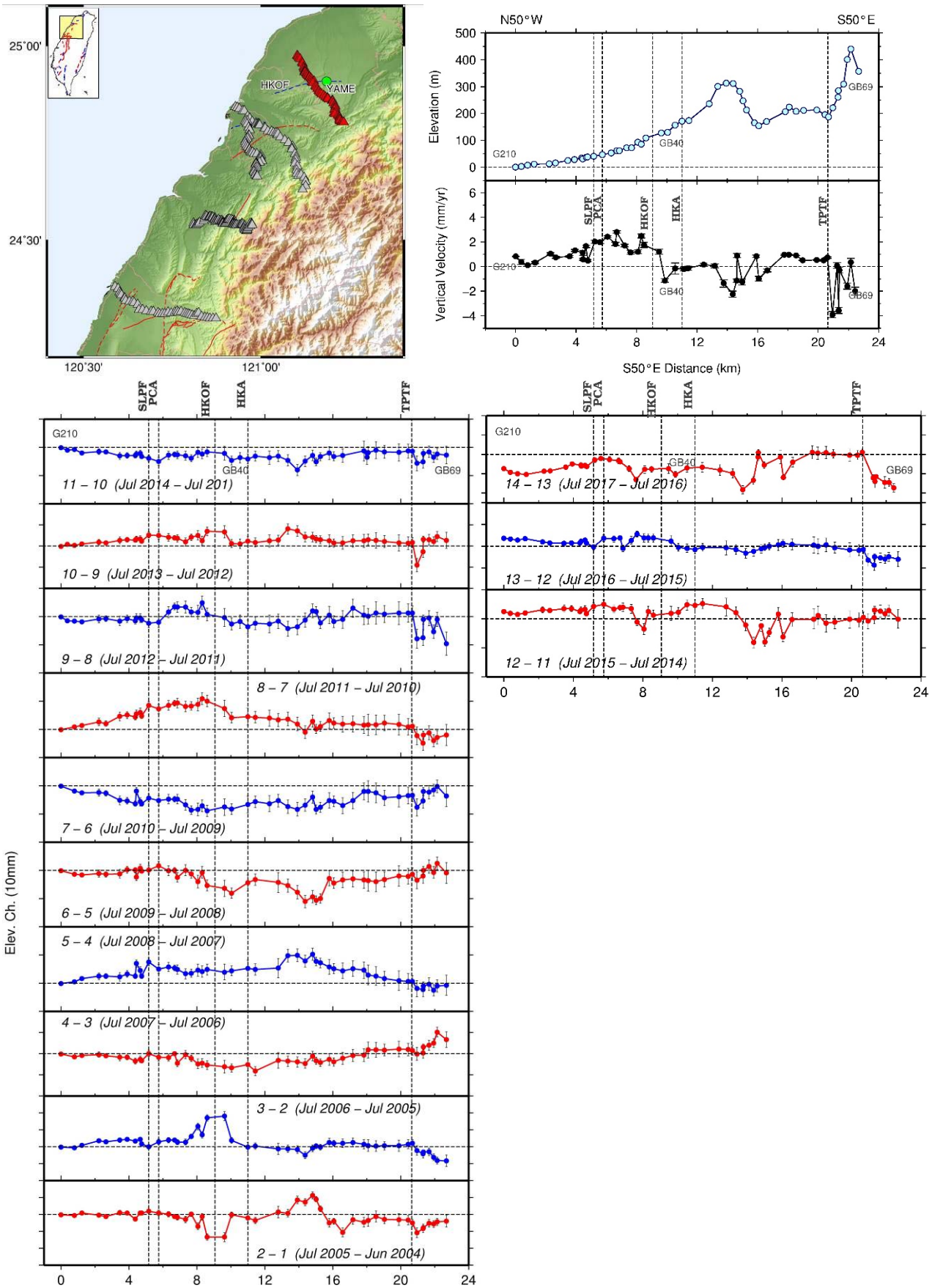


圖 2-3.20：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SLPF 為雙連坡斷層、PCA 為平鎮背斜、HKOF 為湖口斷層、HKA 湖口背斜、TPTF 為大平地斷層。

2-3-8 縣 122_新竹至五峰測線

本測線橫跨新竹斷層及新城斷層，測線長約 31 公里(投影至剖面的長度)。2002 年至 2017 年間，共進行 14 次的施測。本測線分別以連續 GPS 站 TNML、GS03、GS02 之垂直速率（-2.04 mm/yr 、-2.61 mm/yr、-4.71 mm/yr），作為約制點來校正 HCCA、T004、T001 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率之垂直速率（圖 2-3.21~23）。

根據圖 2-3.25，此測線跨新竹斷層之垂直速度並無顯著變化，變化量皆<2 mm/yr，但在跨新城斷層有約 4 mm/yr 的變化量（約-4.0 至 0.0 mm/yr）。從歷年高程變化來看，水準點位 G416（五峰國小）近 2013 至 2014 年間年下陷約 2.1 cm，而此點 GPS 之觀測資料也與鄰近地區之速度型態不一致。經實地勘查後發現，點位本身並無損壞，由於該校位於山坡地，因此這段時間的變位是否和該地區的邊坡運動有關，需要進一步分析與討論。不過長期來看，此點建議仍然可以繼續觀測，但在資料使用上須要特別注意。（圖 2-3.26）

另外，根據此測線 G429、T004、T003、6020 四個點位之時間序列顯示（圖 2-3.24），在工研院竹東院區附近，其時間序列變化明顯與鄰近點位不同，根據實地勘驗結果，需要注意此區域是否有地滑現象。

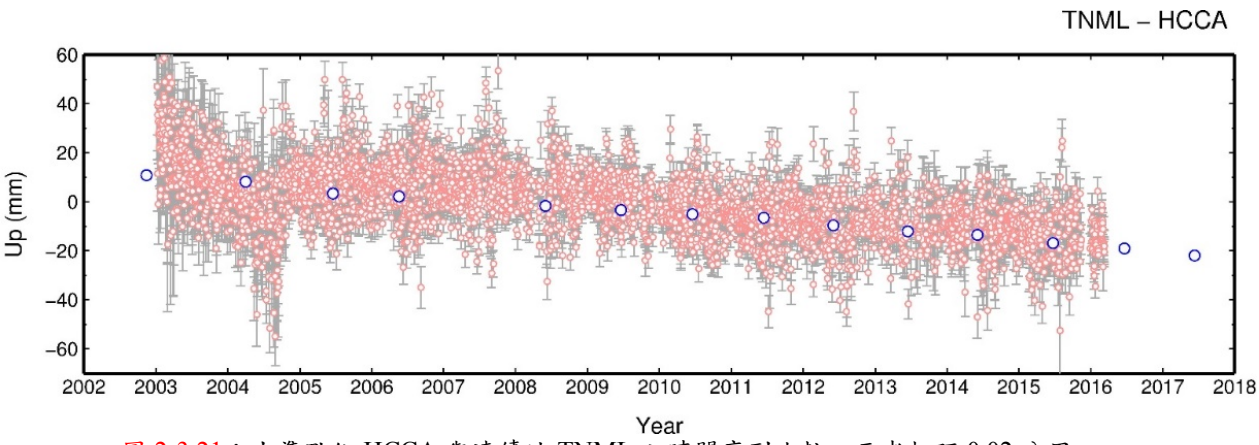


圖 2-3.21：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

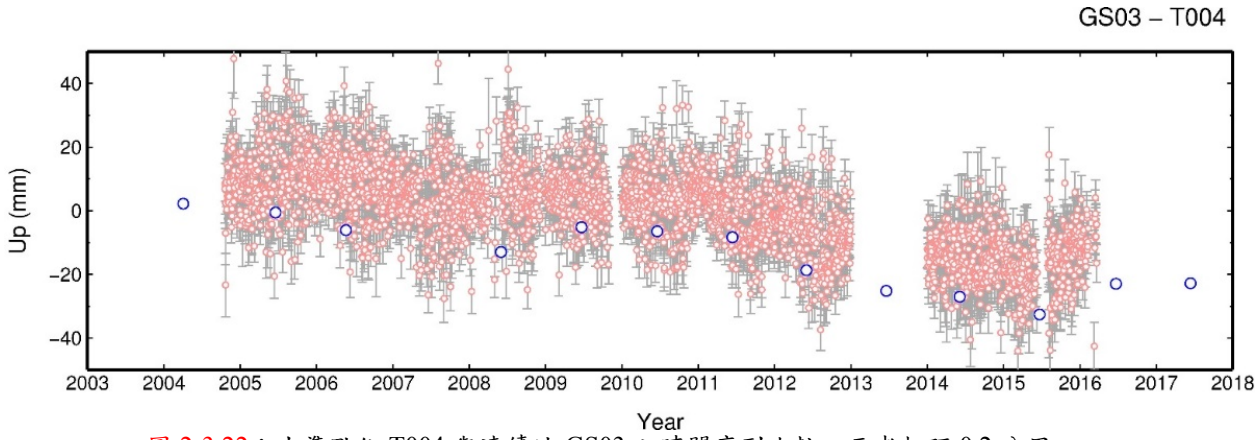


圖 2-3.22：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。

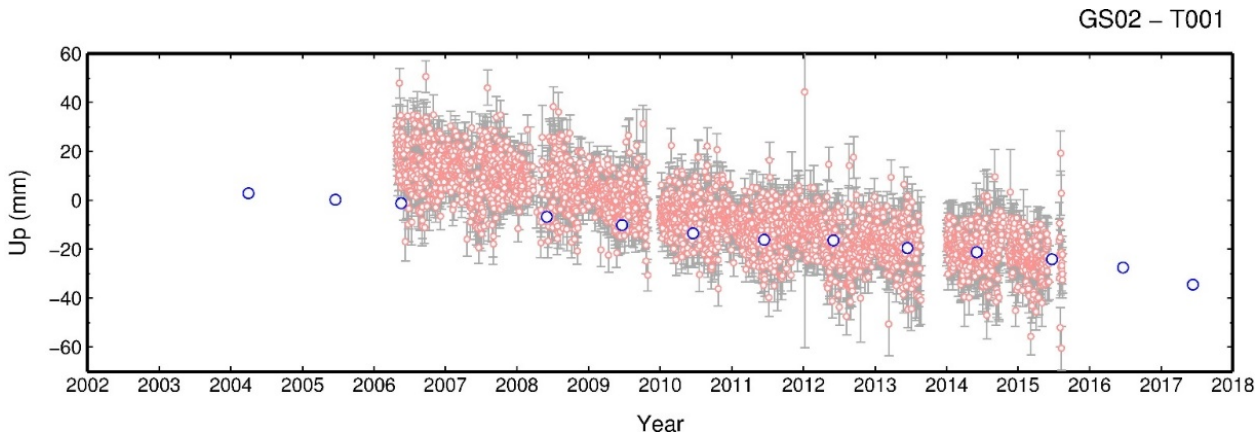


圖 2-3.23：水準點位 T001 與連續站 GS02 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

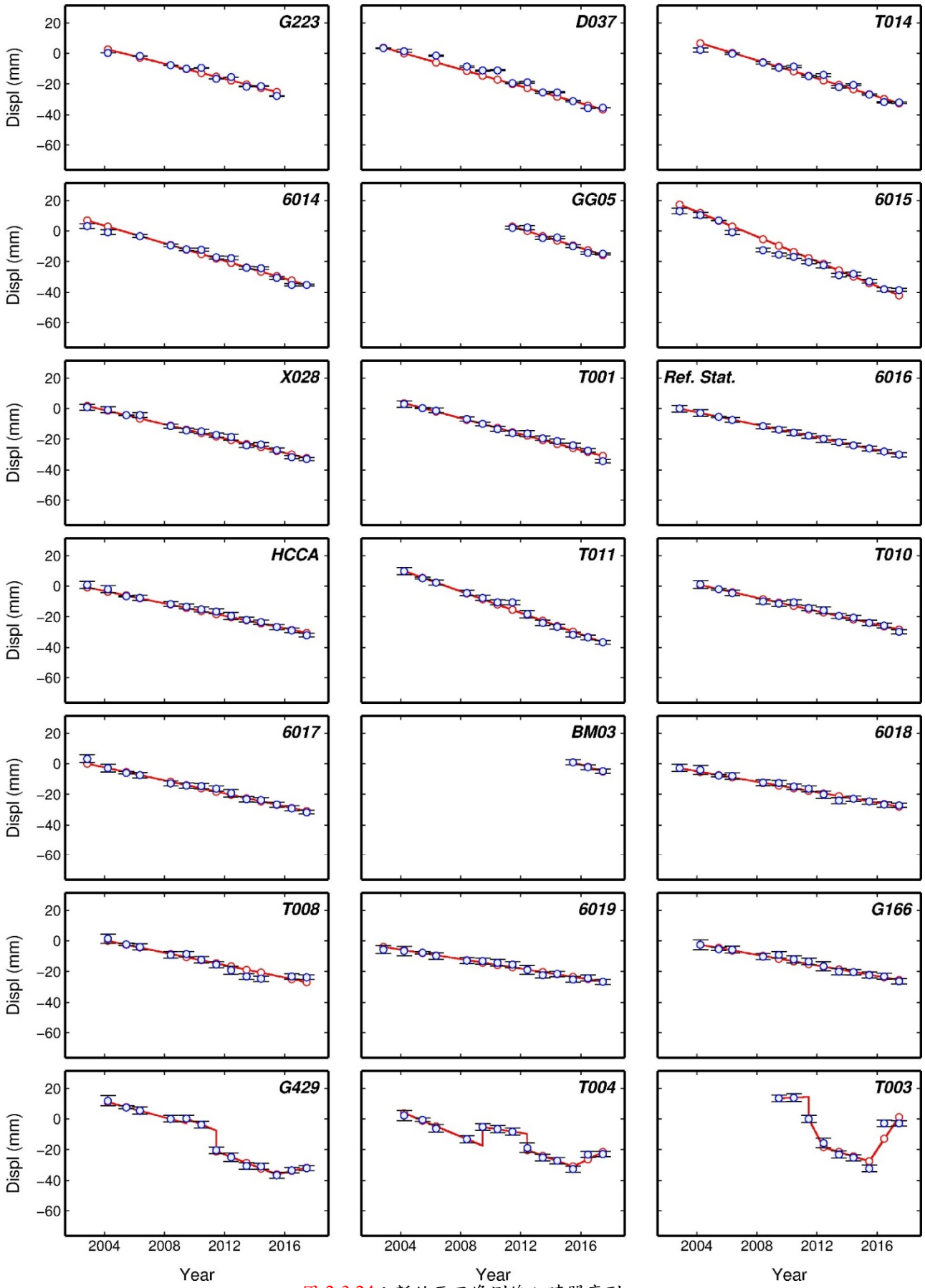


圖 2-3.24：新竹至五峰測線之時間序列

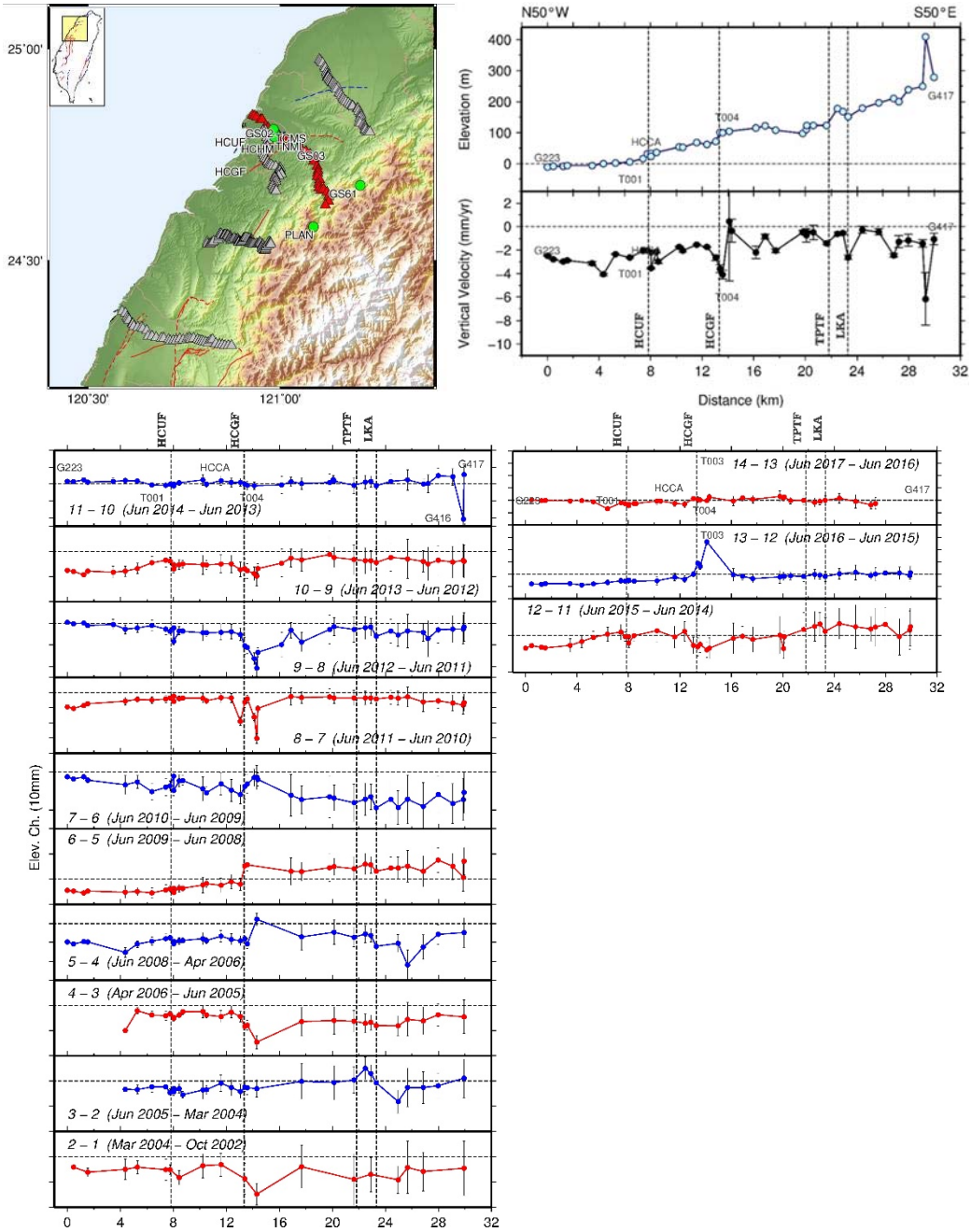


圖 2-3.25：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層、TPTF 為大平地斷層、LKA 為鹿廚坑背斜。



圖 2-3.26：水準點位 G416 現地情形。

2-3-9 縣 117_新竹至峨眉測線

本測線橫跨新竹斷層及新城斷層，測線長 16 公里(投影至剖面的長度)。此測線於 2004 至 2017 年間進行共 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS14 之垂直速率（-3.27 mm/yr），作為約制點 GB72 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.27）。

根據圖 2-3.29，此測線的垂直速度在跨新竹斷層和新城斷層皆未有顯著的變化，變化量皆< 1 mm/yr。另 2005~2006 年間之高程變化與其他時段（2004~2005、2006~2010）不同，疑與 2006 年 7 月凱米颱風（KAEMI）之降雨有關（颱風警報期間：7/23~7/26；水準測量期間：7/10~8/01）。

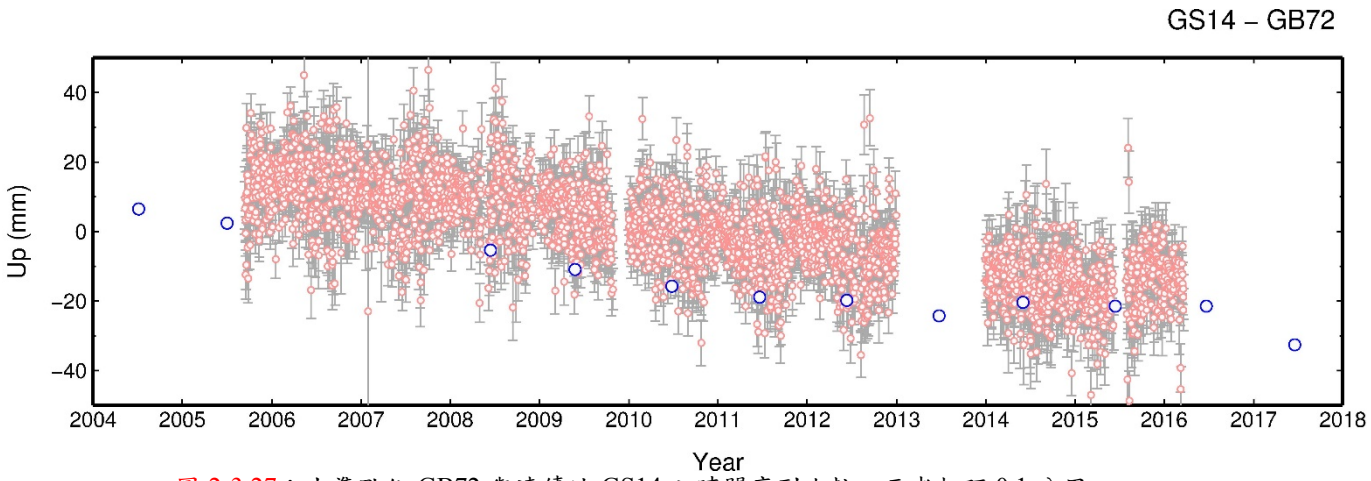


圖 2-3.27：水準點位 GB72 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。

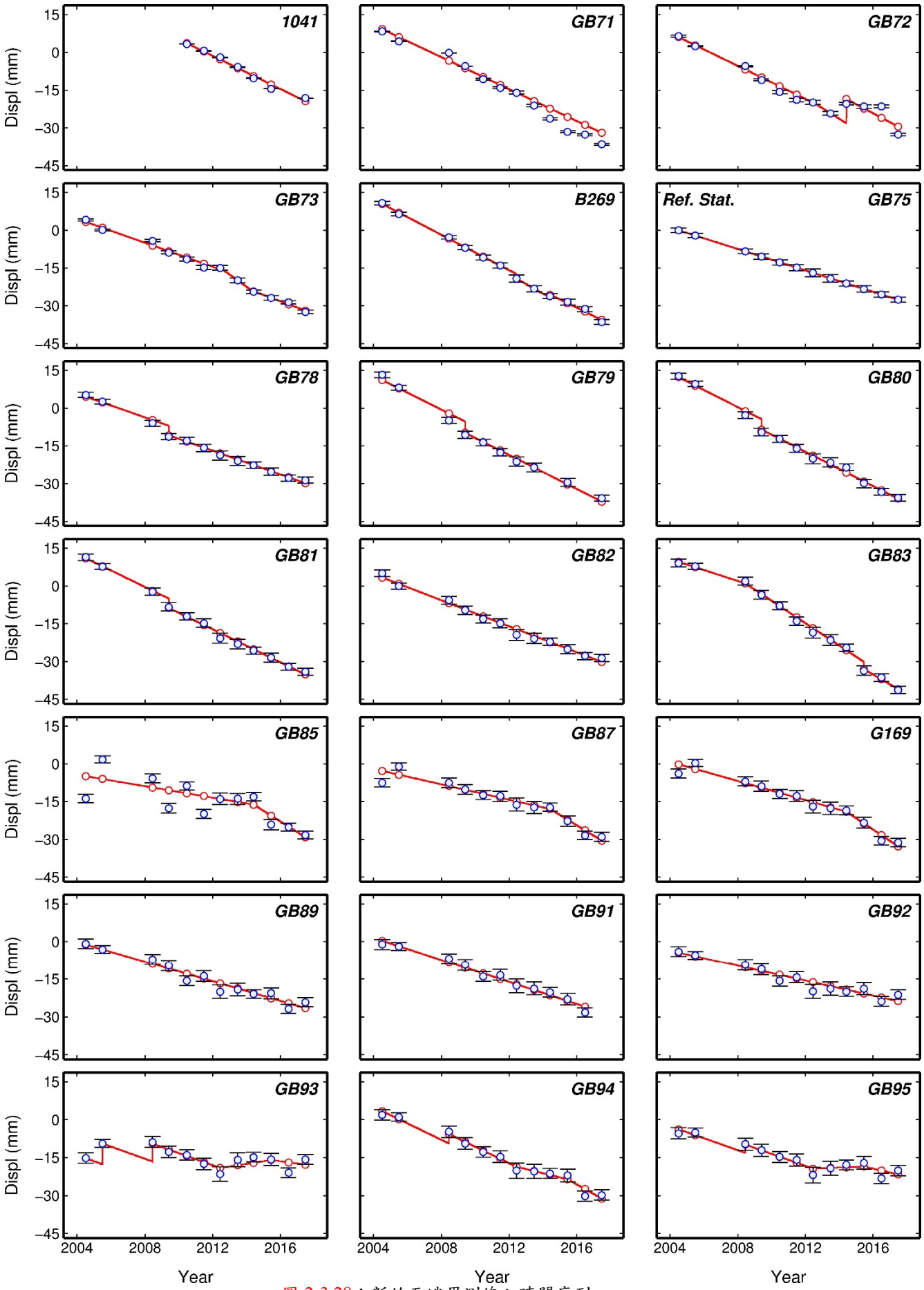


圖 2-3.28：新竹至峨眉測線之時間序列。

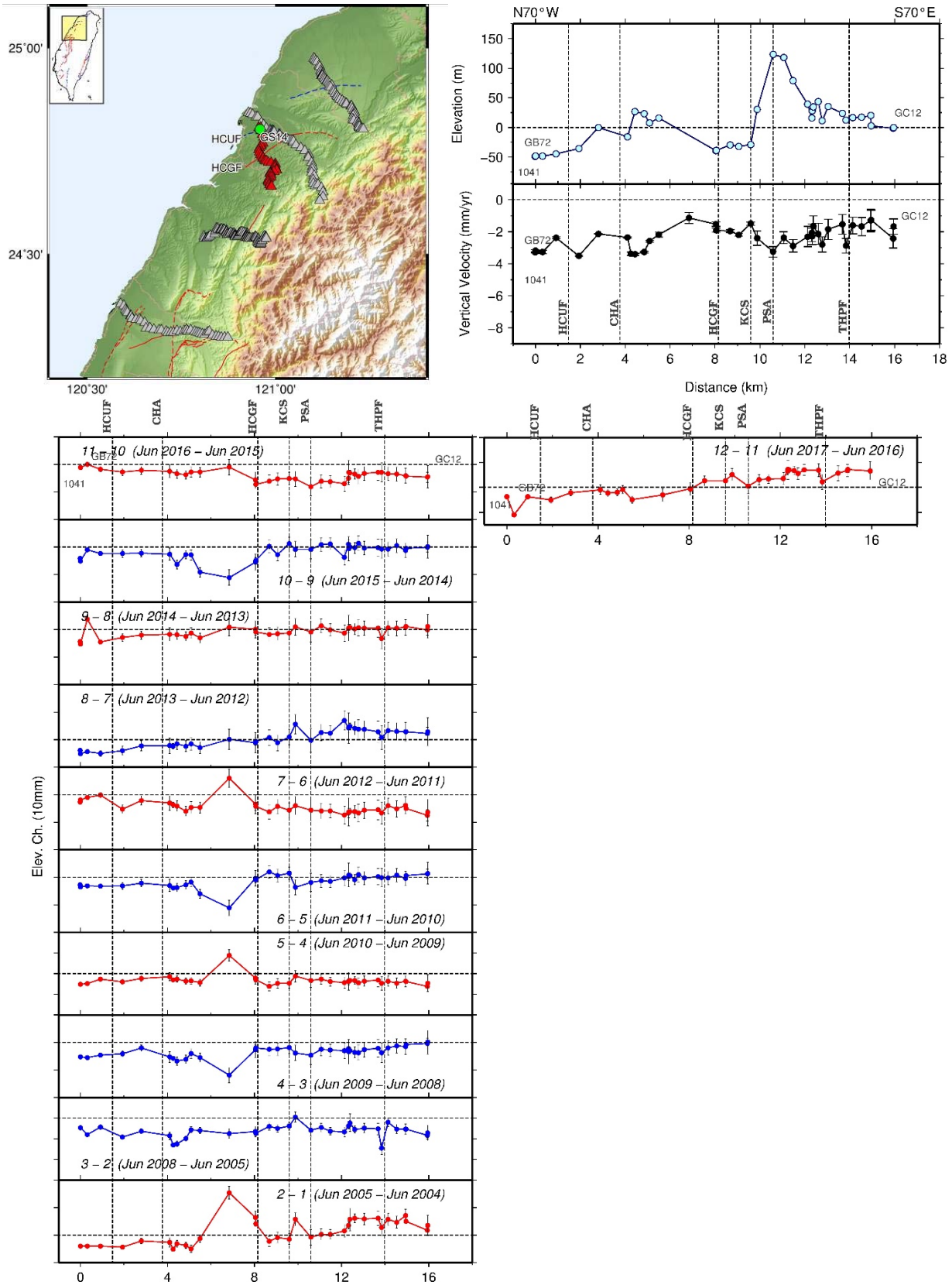


圖 2-3.29：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、CHA 為青草湖背斜、HCGF 為新城斷層、KCS 為柑子崎向斜、PSA 為寶山背斜、THPF 為斗煥坪斷層。

2-3-10 苗栗至南庄測線

本測線橫跨獅潭斷層，測線長約 17 公里，此測線於 2005 至 2017 年間共進行 13 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 之垂直速率（-5.47 mm/yr），作為約制點 GD95 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.30）。

根據圖 2-3.33，整條測線的水準垂直速度大多在-4 至-7 mm/yr 之間，跨獅潭斷層之區域之變化並不顯著（變化量< 1 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。從歷年高程變化來看，在 2005~2009 年及 2010~2016 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。

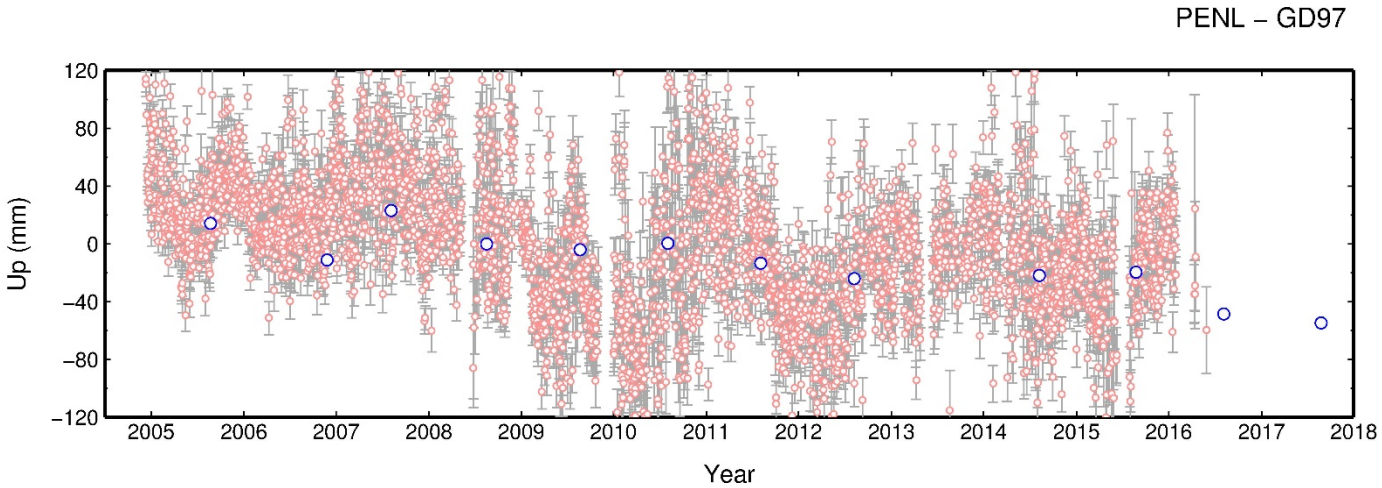


圖 2-3.30：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

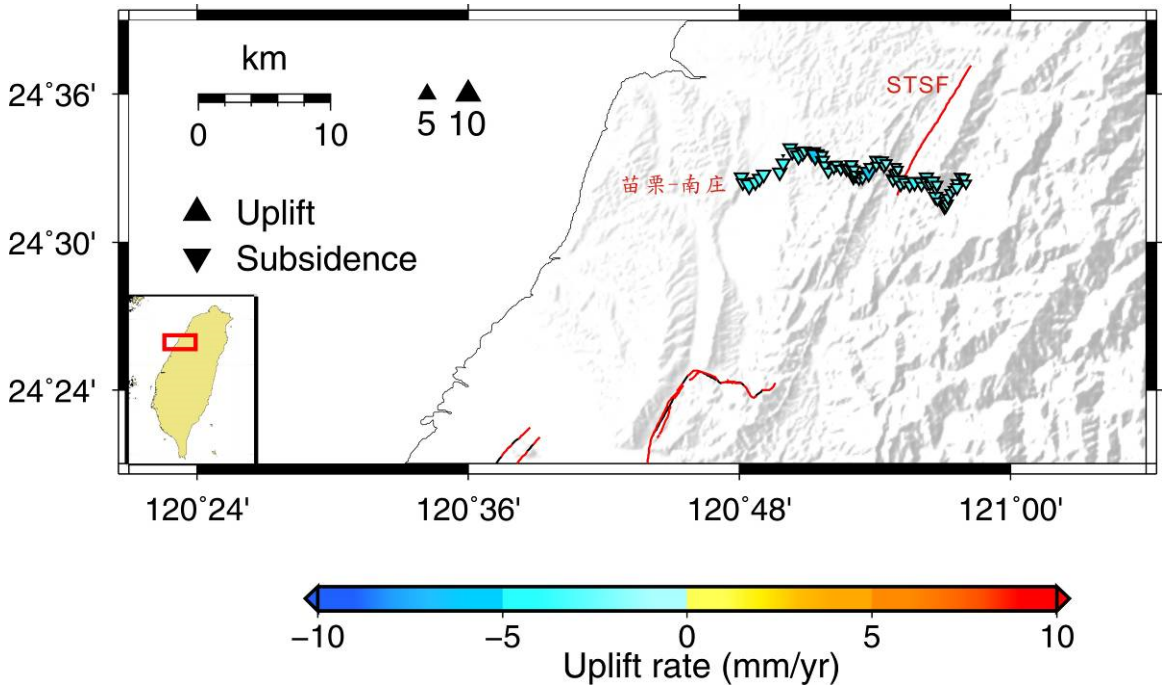


圖 2-3.31：苗栗地區之水準垂直速度場。STNF 為獅潭斷層。

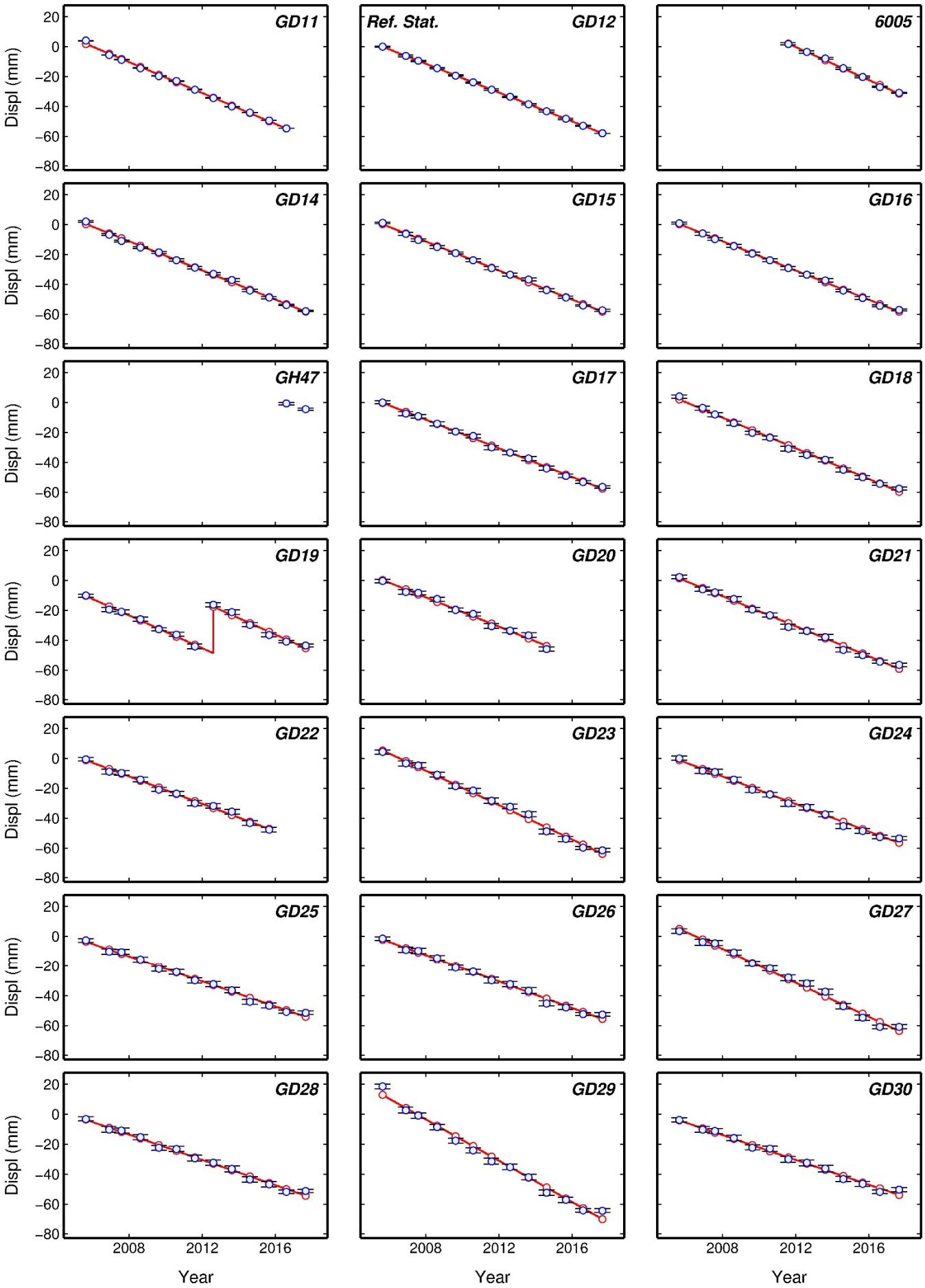


圖 2-3.32：苗栗至南庄測線之時間序列。

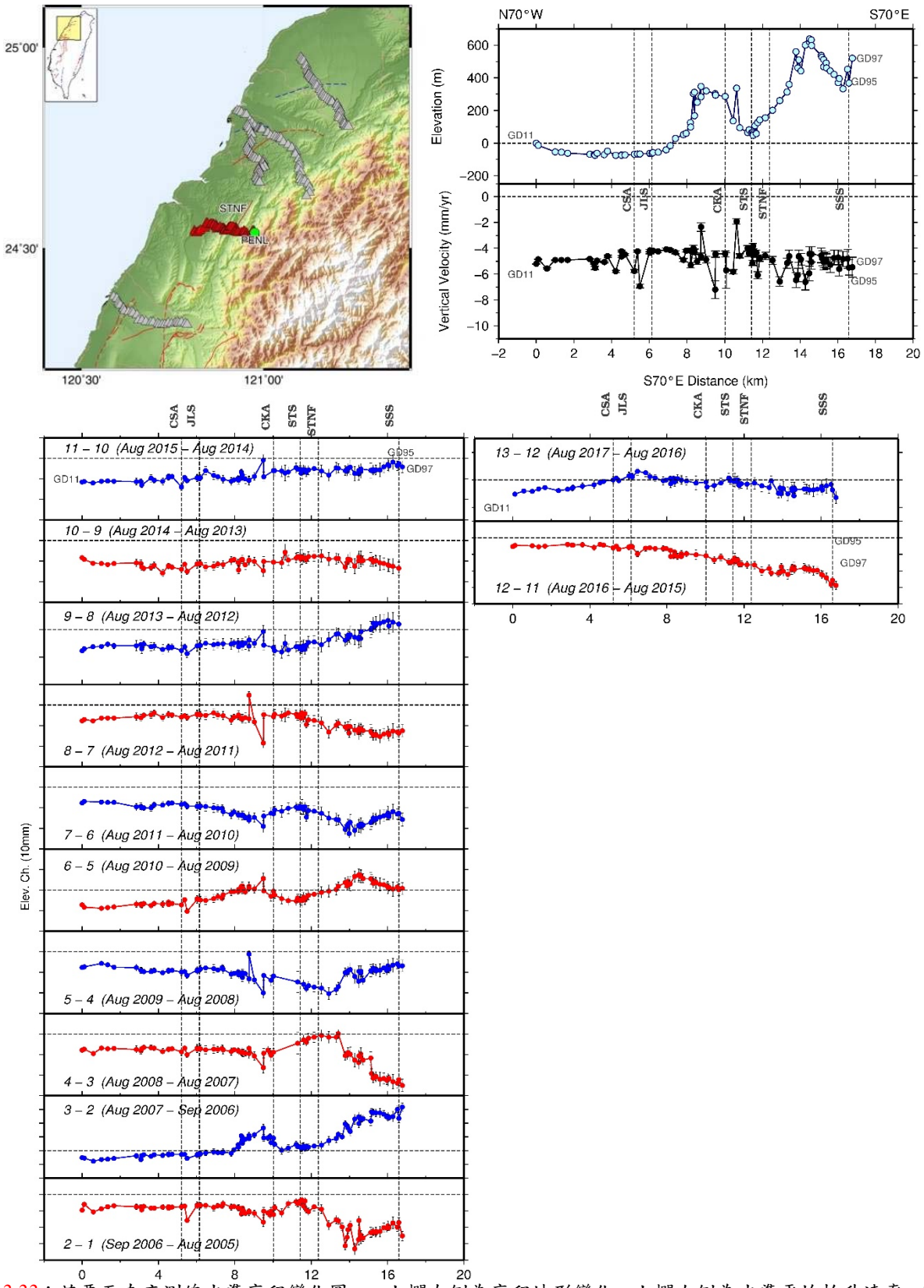


圖 2-3.33：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每欄刻度均代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CSA 為錦水背斜、JLS 為仁隆向斜、CKA 為出磺坑背斜、STS 為獅潭向斜、STNF 為獅潭斷層 、SSS 為神社向斜。

2-3-11 縣 132_大安至東勢測線

本測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 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 2017 年止共計有 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS36 之垂直速率(-3.34 mm/yr)，作為約制點來校正 G896 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.35）。

根據圖 2-3.37，就垂直速度而言，各水準點之垂直速度多在-5.0 mm/yr 至-2.0 mm/yr 間，而 G920 以東之水準點因測量次數過少建議持續監測。且自鐵砧山至屯子腳斷層間（東陽國小至內埔國小）的下陷速率呈現增加的趨勢（約-2.2～-4.6 mm/yr），但高程地形卻是逐漸抬升。在通過三義斷層後的垂直速度（貓仔坑至明正國小）逐漸抬升至測線末端，顯示屯子腳斷層北側有略微下陷的現象，而三義斷層的上盤相對其下盤正持續抬升。此外，海墘國小至大甲運動場間之歷年高程變化於 2004 至 2016 年呈現規律之起伏，說明該段區域有年週期的變化。

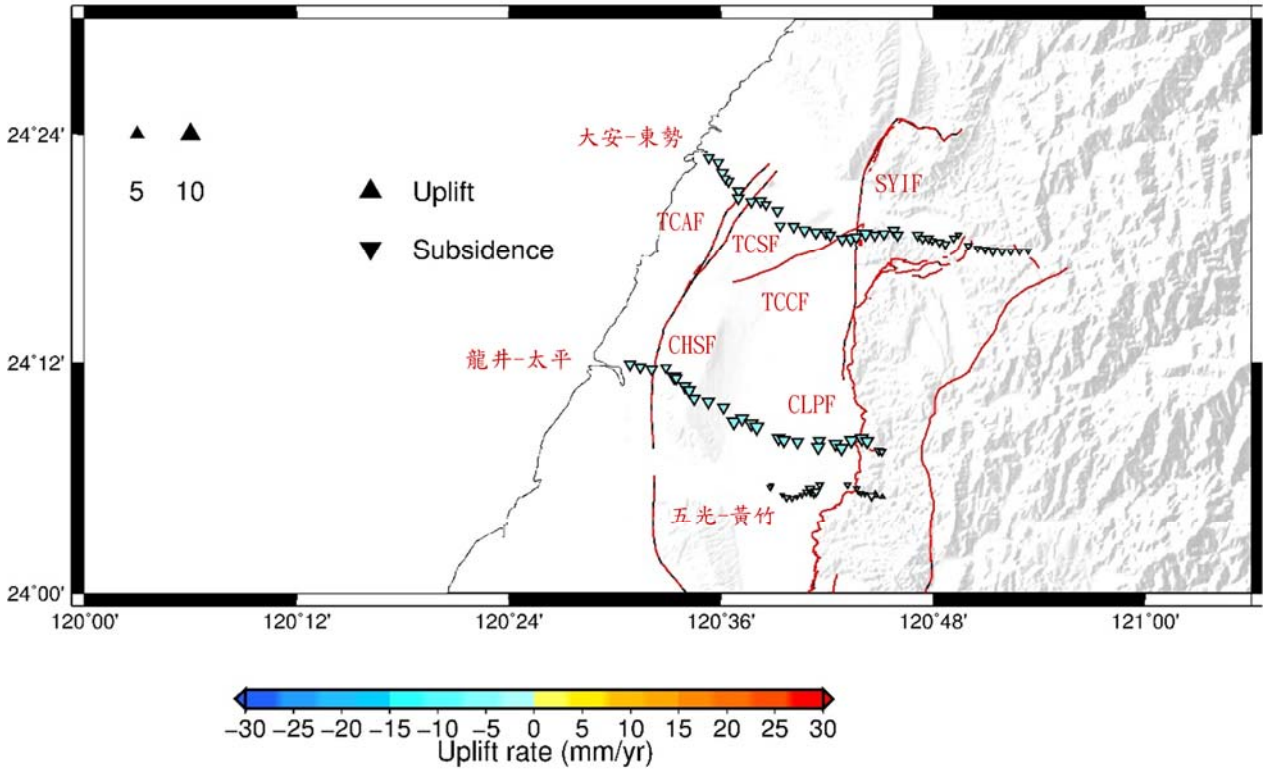


圖 2-3.34：台中地區之水準垂直速度。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

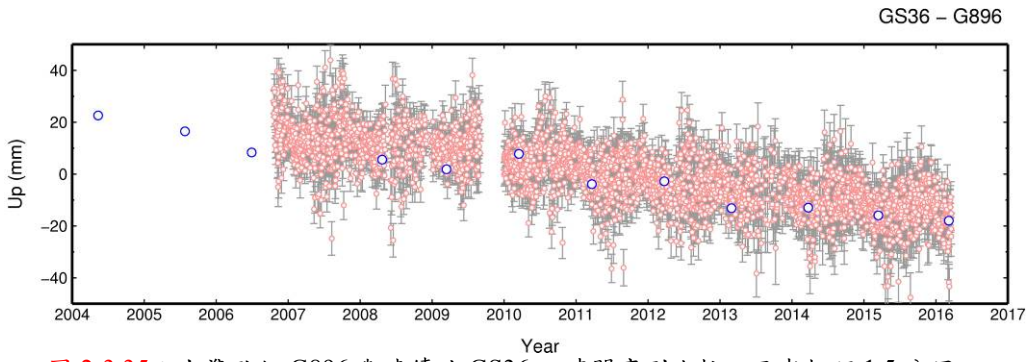


圖 2-3.35：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。

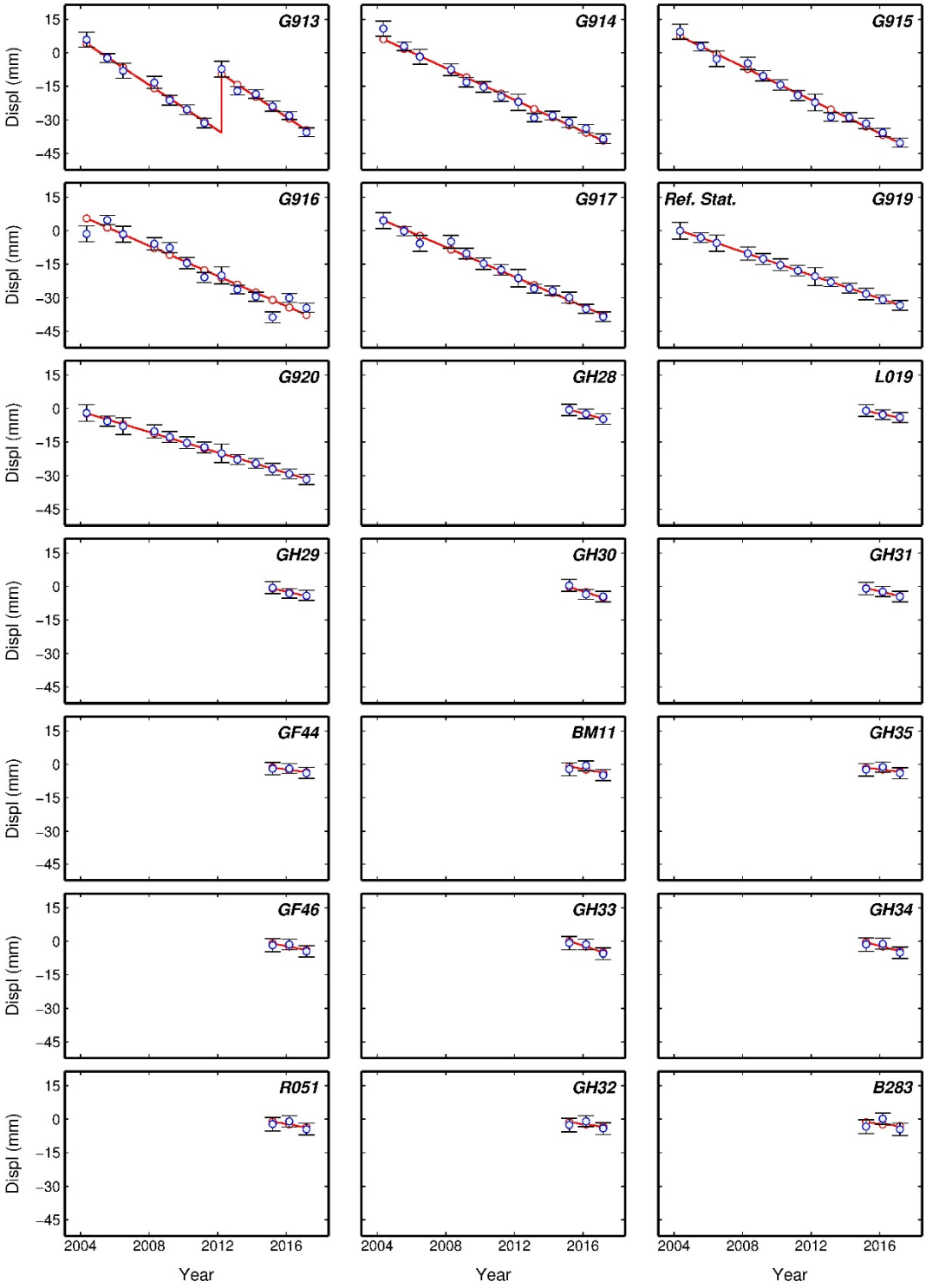


圖 2-3.36：大安至東勢測線之時間序列。

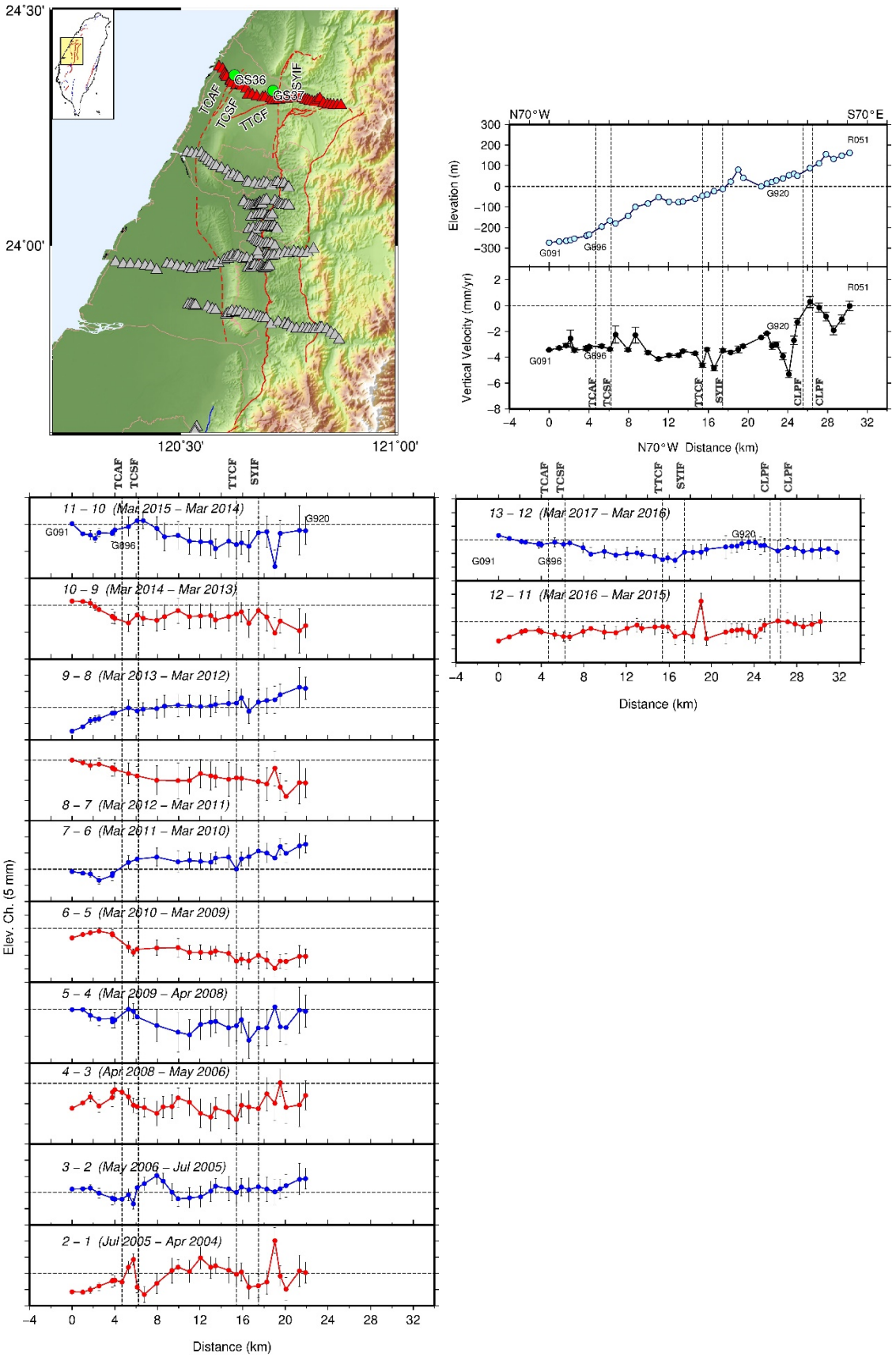


圖 2-3.37：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層 CLPF 車籠埔斷層。

2-3-12 縣 136_龍井至太平測線

本測線橫跨清水斷層和車籠埔斷層，測線長約 25 公里(投影至剖面的長度)，於 2004 至 2017 年間，共進行 14 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 和 GS40 之垂直速率（-4.73 mm/yr 和-4.22 mm/yr），作為約制點 G937 及 G929 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.38 及圖 2-3.39）。

根據圖 2-3.41，此測線之垂直速度在兩個斷層間之垂直速率大多落在-6 到-4 mm/yr 之間，無顯著變化；在清水斷層兩側則呈現不同的趨勢，左側為逐步抬升（由-3.8 mm/yr 到-2.9 mm/yr），右側至大肚山背斜則為下降（最大達-5.9 mm/yr），兩側最大變化量達 3.0 mm/yr；在跨車籠埔斷層區域之垂直速度也有 3.0 mm/yr 的變化，均可說明此兩斷層可能在 1999 年集集地震後有持續性的抬升現象。

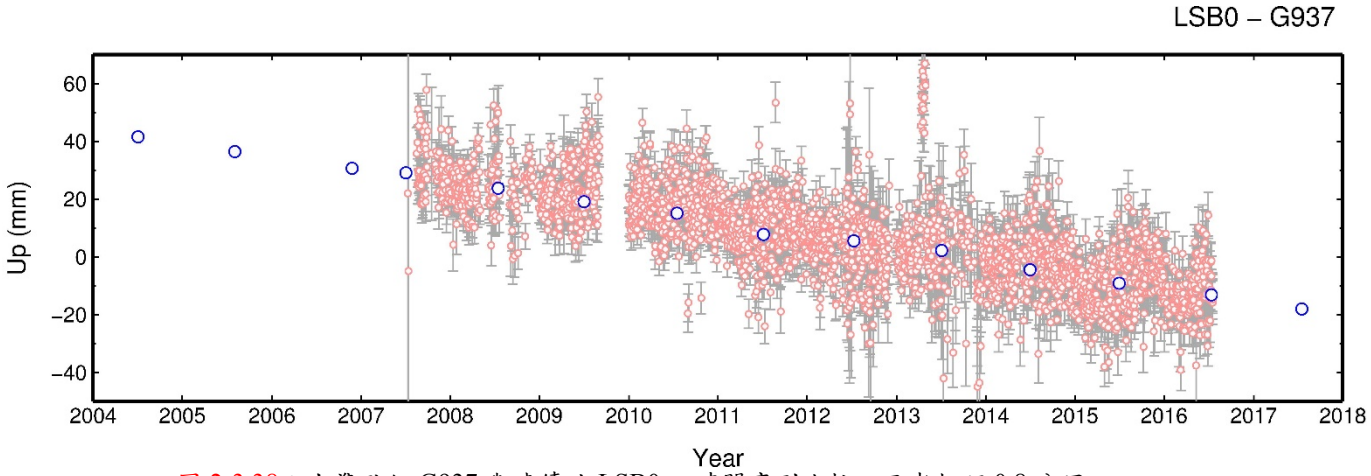


圖 2-3.38：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

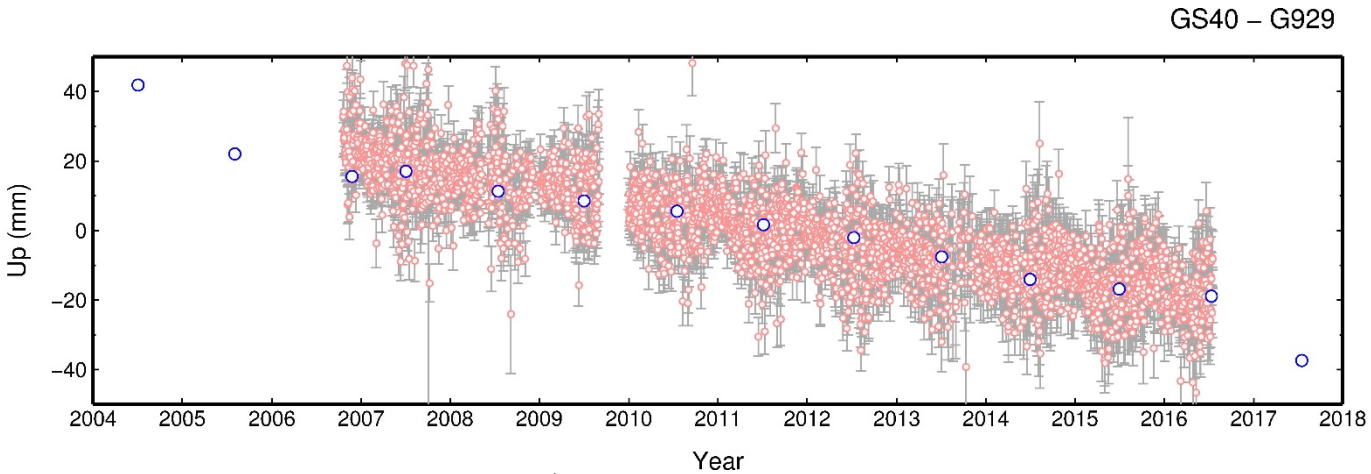


圖 2-3.39：水準點位 G929 與連續站 GS40 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

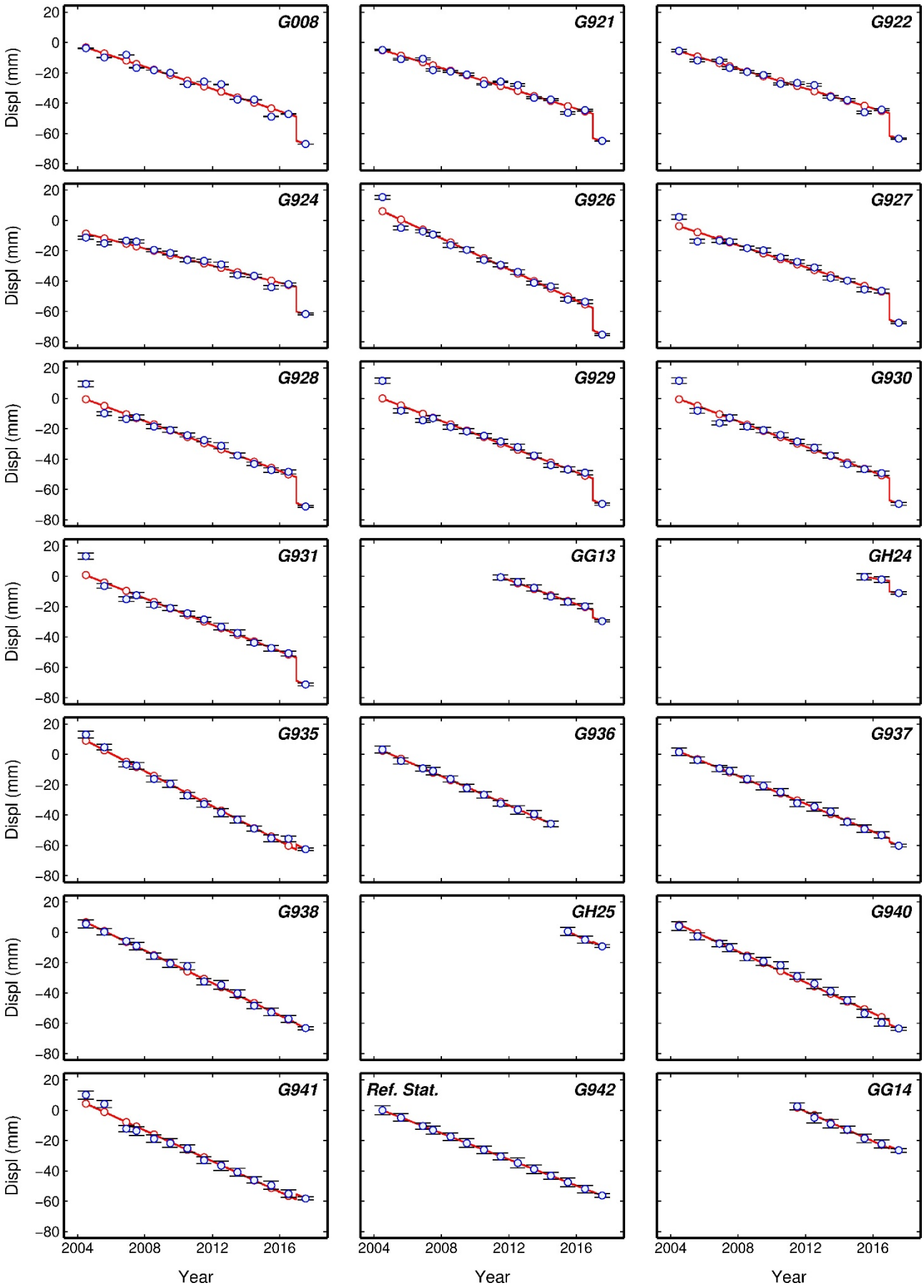


圖 2-3.40：龍井至太平測線之時間序列。

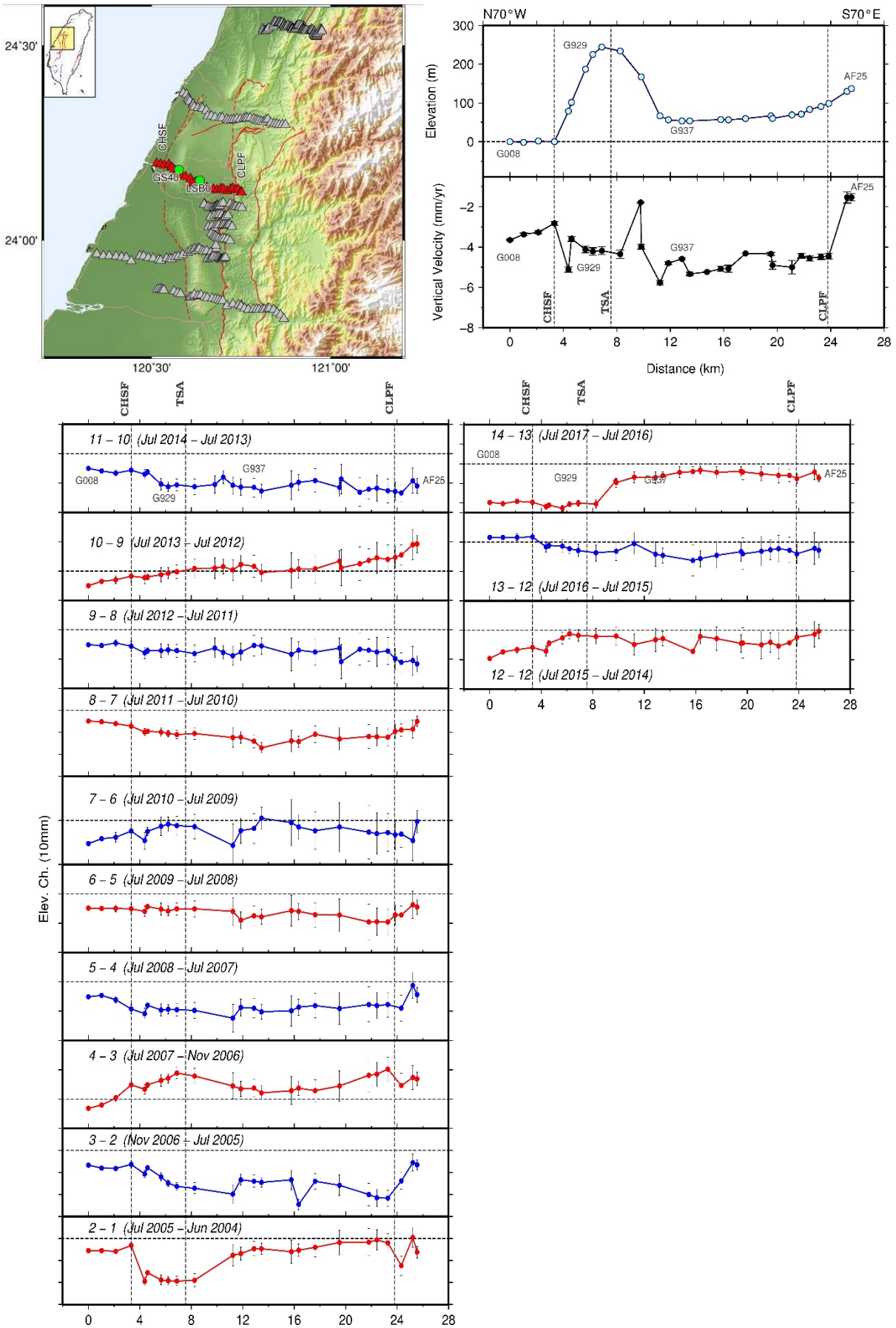


圖 2-3.41：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-13 跨車籠埔斷層之短測線

經濟部中央地質調查所從 2007 年起在車籠埔斷層沿線，設置了 5 條橫跨斷層之水準測線，由北至南分別為五光至黃竹、曾厝至霧峰、北勢至峰谷、烏溪南岸及中興新村。2016 年僅施測五光至黃竹，自 2007 至 2017 年止共計施測 10 次。根據圖 2-3.44 之垂直速度及歷年高程變化來看，跨車籠埔斷層之五條短測線，近幾年並無明顯之變化，呈現相對穩定的狀態。

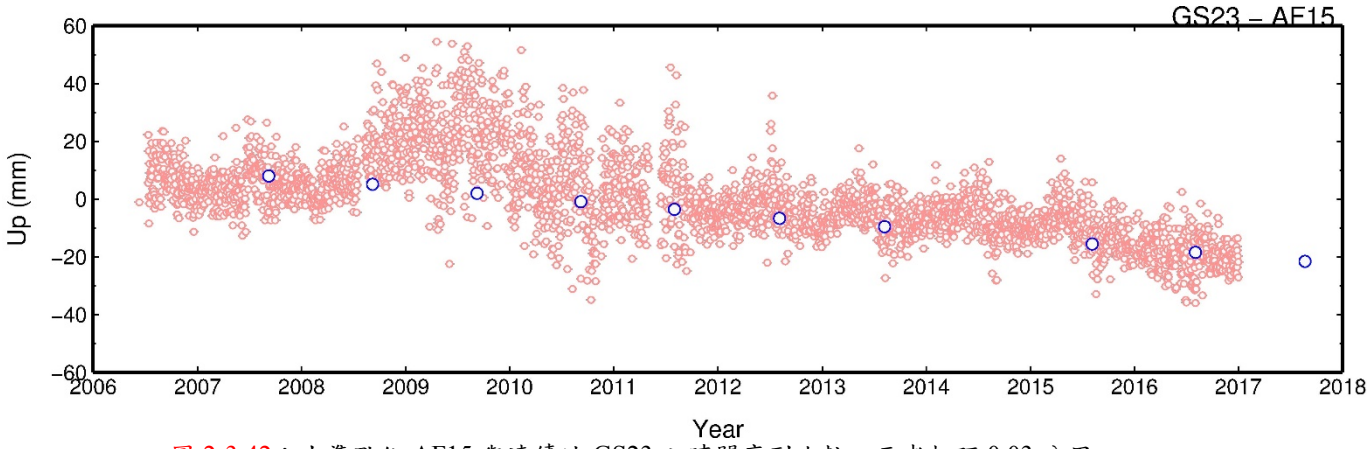


圖 2-3.42：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。

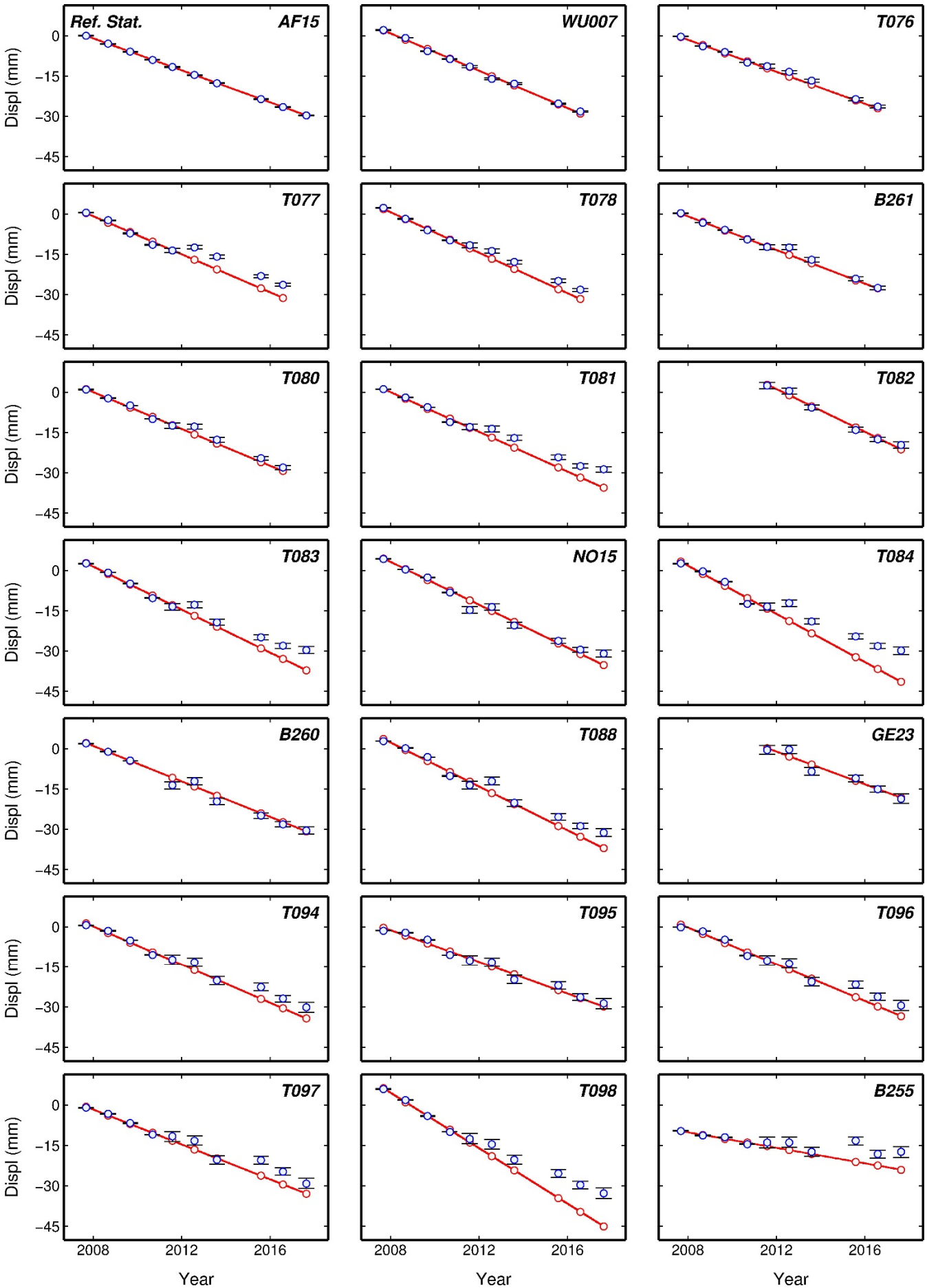


圖 2-3.43：五光至黃竹測線之時間序列。

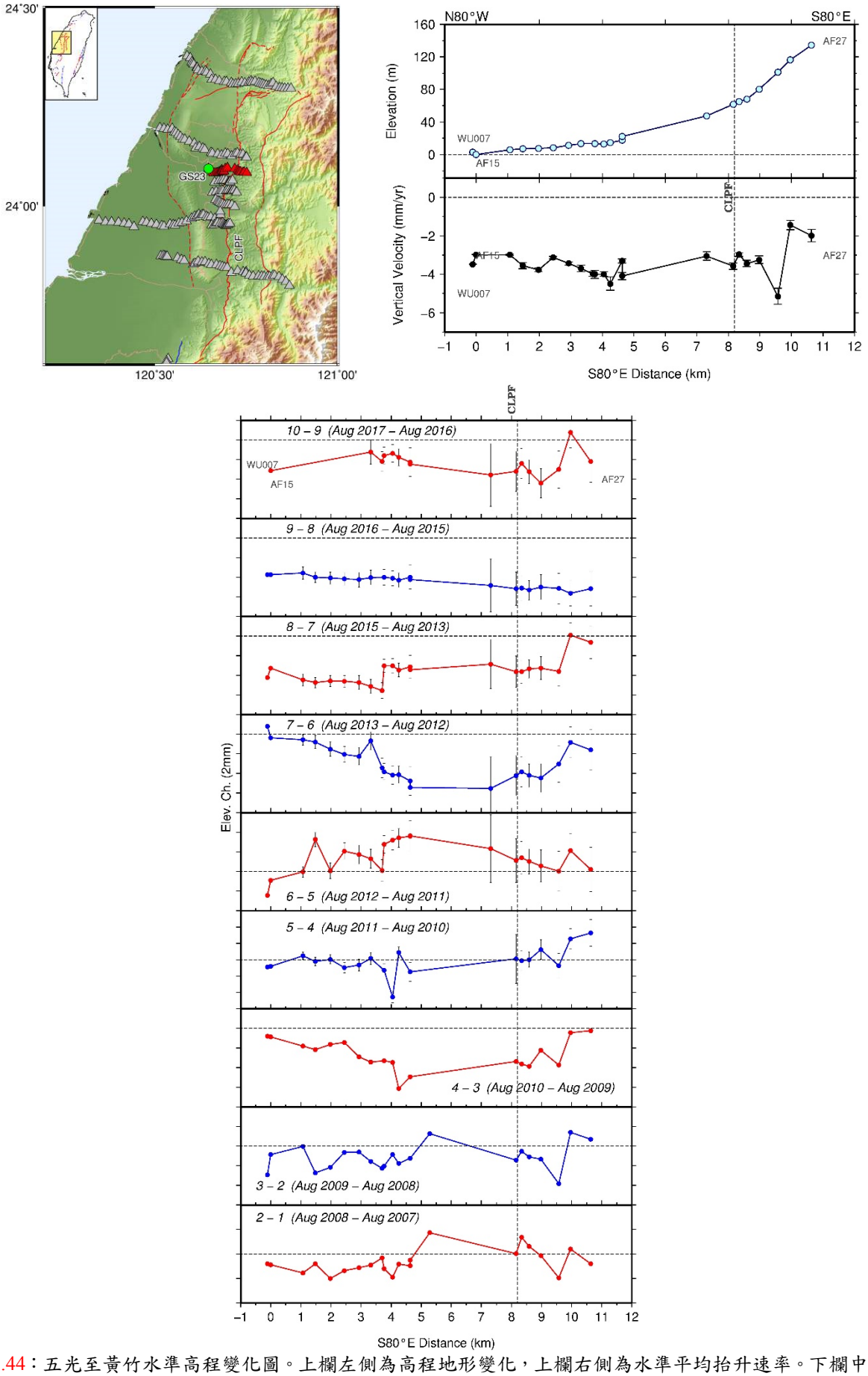


圖 2-3.44：五光至黃竹水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

2-3-14 縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，總長約 47 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2017 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 CAOT 之垂直速率（-4.91 mm/yr），作為約制點來校正 T075 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.47）。

由精密水準時間序列得知本測線以及相鄰的光復-豐濱、紅葉-靜浦在 2009 年以及 2013 年瑞穗地震後發生速度變化，因此以 2009 年 1 月及 2013 年 10 月為分界，分別求取三段之速度場。

根據圖 2-3.48，由精密水準時間序列得知本測線於 2007 年發生速度變化，因此以 2007 年 1 月 1 日為速度變化分界；南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模 6 以上的地震，但在 2013 年至 2014 年之歷年高程差方面未有明顯的變化；而在跨車籠埔斷層以東至測線末端的點位，其同震位移量在-4.5 mm 到 5.5 mm 之間，因此在估算垂直速度時需考慮南投地震同震位移之影響。

根據圖 2-3.49，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。

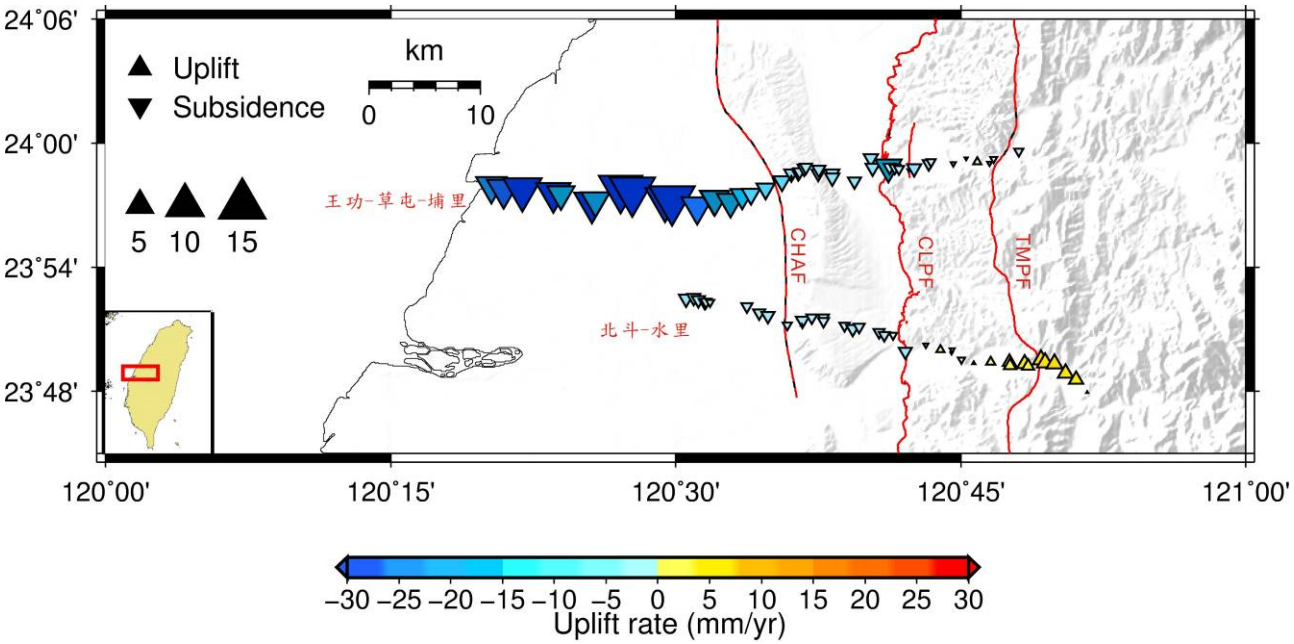


圖 2-3.45：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震前）。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

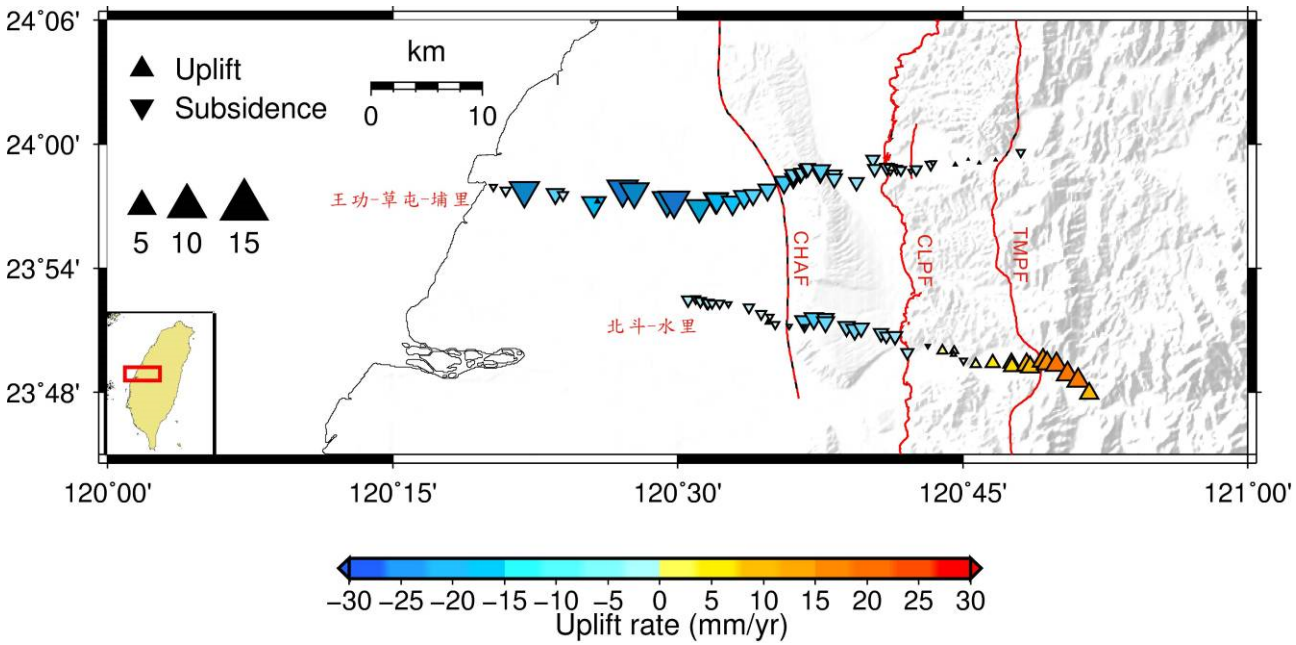


圖 2-3.46：彰投地區之水準垂直速度場（2013 年南投地震後至今）。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。

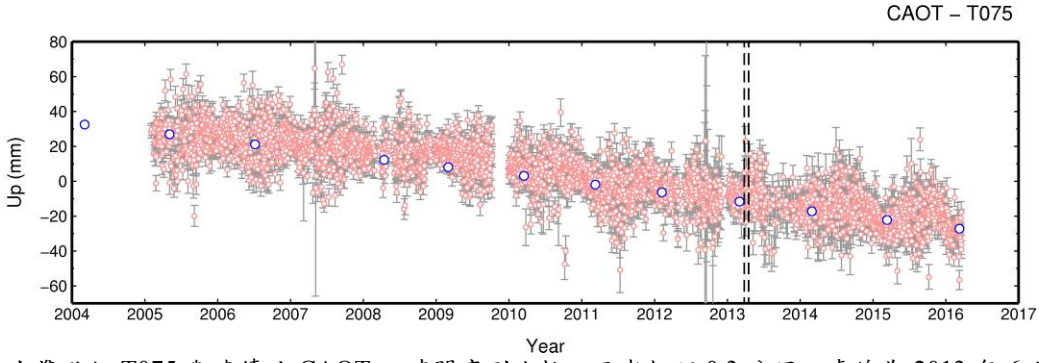


圖 2-3.47：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

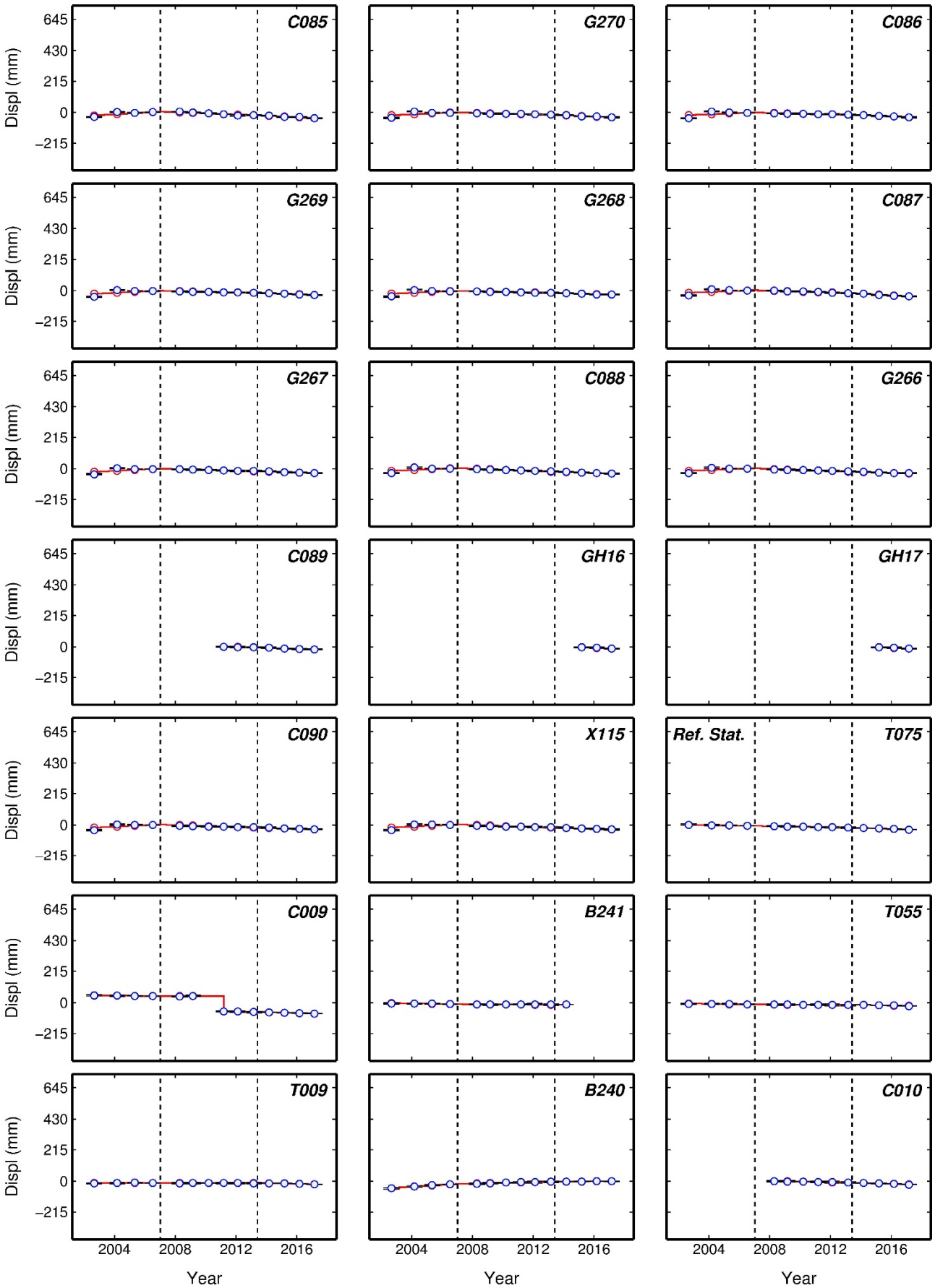


圖 2-3.48：王功至草屯測線及草屯至埔里測線之時間序列。虛線為 2007 年 1 月 1 日速度變化事件與 2013 年 6 月 2 日南投地震。

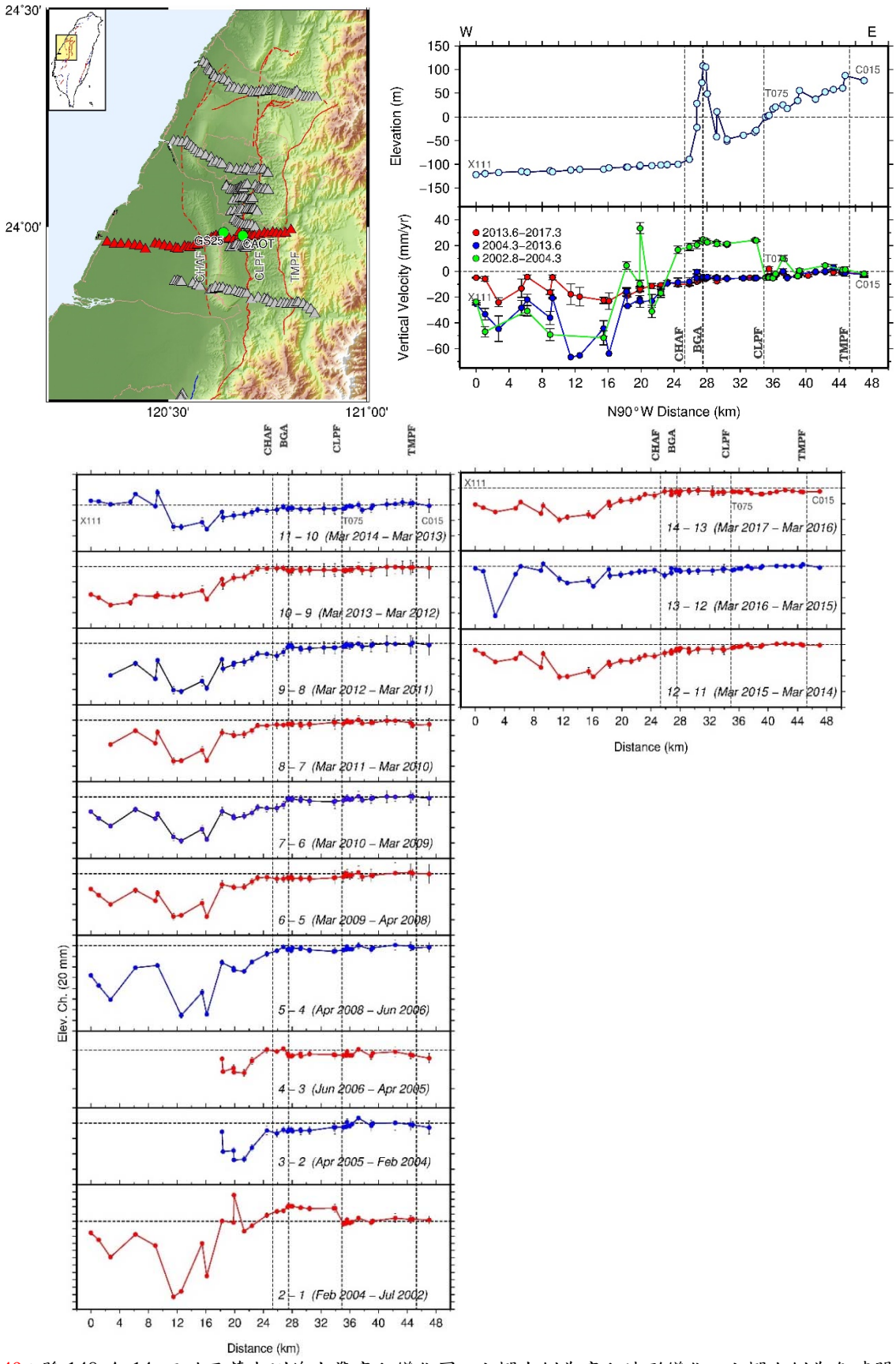


圖 2-3.49：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2004 年之垂直速度、藍色為 2004 - 2013 年南投地震震後垂直速度、紅色為 2013 年至今之垂直速度。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 為八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

2-3-15 縣 150-台 16_北斗至水里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 38 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2017 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS26 之垂直速率（-3.36 mm/yr），作為約制點來校正 MX83 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.50）。

此外，南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模 6 以上的地震，造成此測線各點位有 64.0 mm 到 138.0 mm 的同震位移量，2013 年至 2014 年之歷年高程差在大茅埔－雙冬斷層上盤也有顯著的抬升，最大值達 85.0 mm。因此速度之估算是藉由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 2-3.52 來看，彰化斷層以西之垂直速度雖為沉陷（最大值約-8.0 mm/yr），但不似王功至埔里測線可見明顯的地層下陷現象（最大值約-80.0 mm/yr）。而彰化斷層以東至赤水派出所一帶，高程地形有顯著抬升，但垂直速度變化不大。通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的區段（名間國小至水里隧道），高程地形與垂直速度抬升的狀況更為明顯（約由-7.0～10.0 mm/yr），然而通過大茅埔－雙冬斷層後之地區，其抬升速率由 10.0 mm/yr 下降至 3.5 mm/yr，此結果可能暗示斷層滑移量於集集地震過後約 10 年仍然集中於車籠埔斷層以東之滑脫面。

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

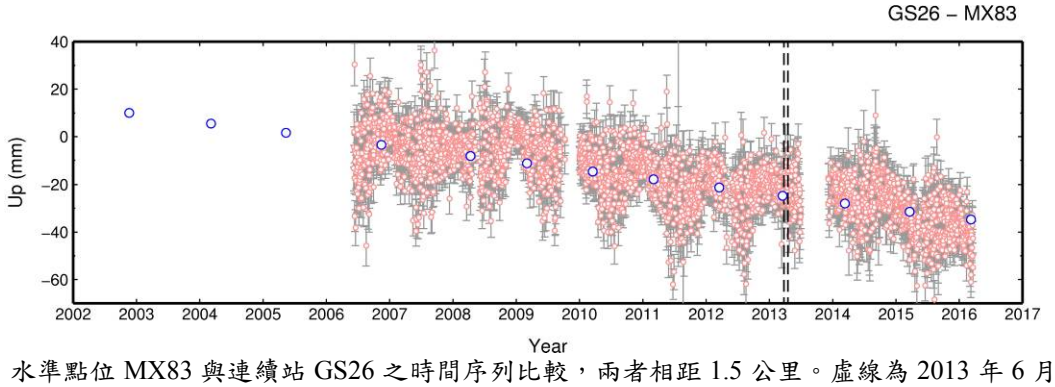


圖 2-3.50：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

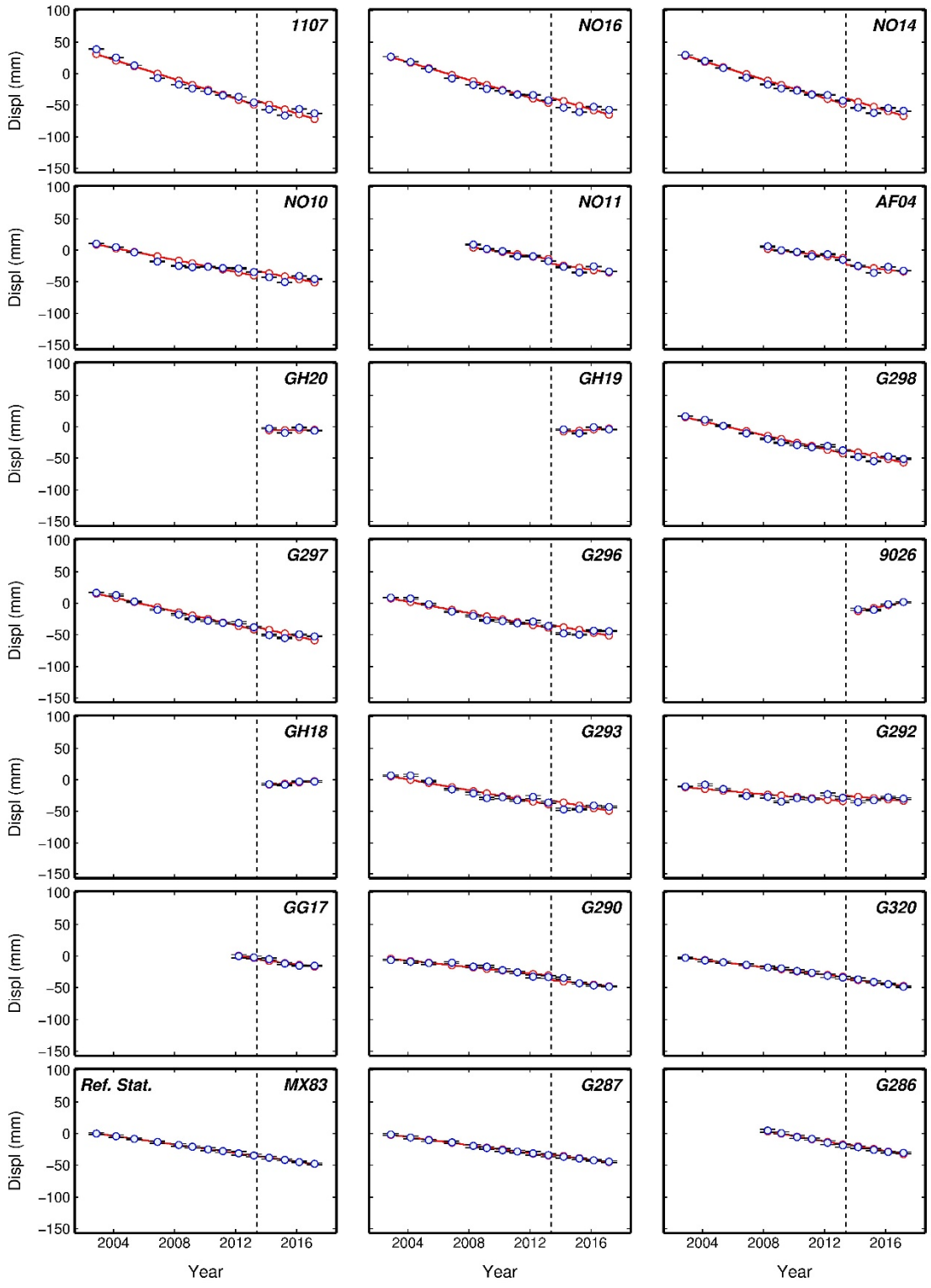


圖 2-3.51：北斗至水里測線之時間序列。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

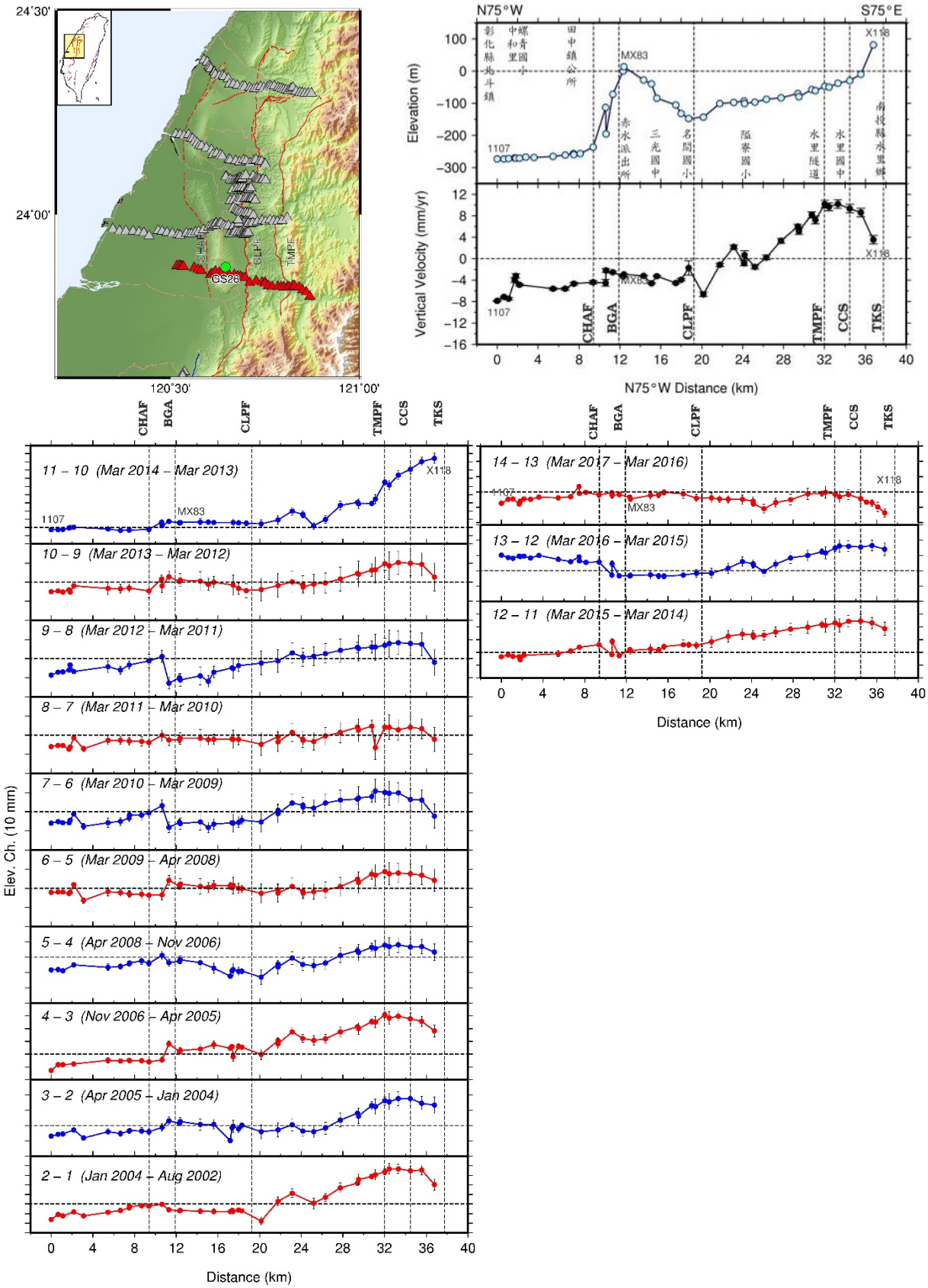


圖 2-3.52：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層、CCS 集集大山向斜、TKS 為頂崁向斜。

2-3-16 縣 164_金湖至瑞峰測線

本測線橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層，總長約 54 公里， 2003 年至 2017 年間共進行 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS17、TAPN 及 S103 之垂直速率（1.31 mm/yr、0.58 mm/yr 及-0.11 mm/yr），作為約制點來校正 G776、G758 和 G742 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.54 及圖 2-3.55）。

根據圖 2-3.57，梅山斷層以西之垂直速度變化較大，最大達-26 mm/yr，以東到九芎坑斷層則大多介在-2 至 0 mm/yr 之間；在跨九芎坑斷層與觸口斷層之區域（約 40~46 公里處），垂直速率雖然未有顯著變化（變化量<2 mm/yr），但至測線末段之整體趨勢為逐步抬升（約從 0 到 4 mm/yr）。在地形高程部分，梅山斷層以西為平原地區，因此較無變化，而在九芎坑斷層以東則有顯著的地形起伏，或許可說明九芎坑斷層與觸口斷層仍有活動的跡象。

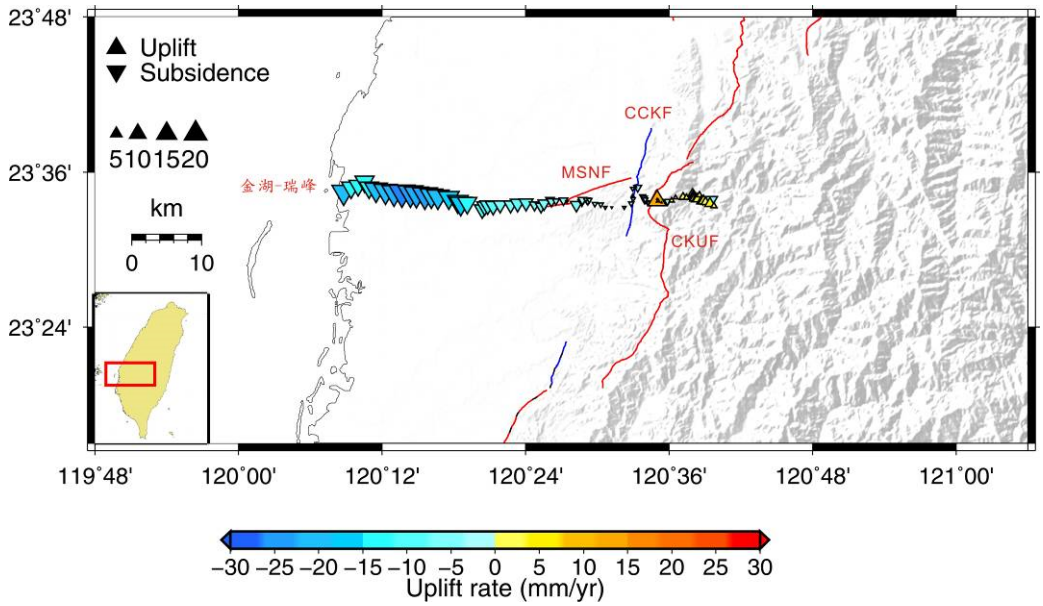


圖 2-3.53：嘉義地區之水準垂直速度場。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

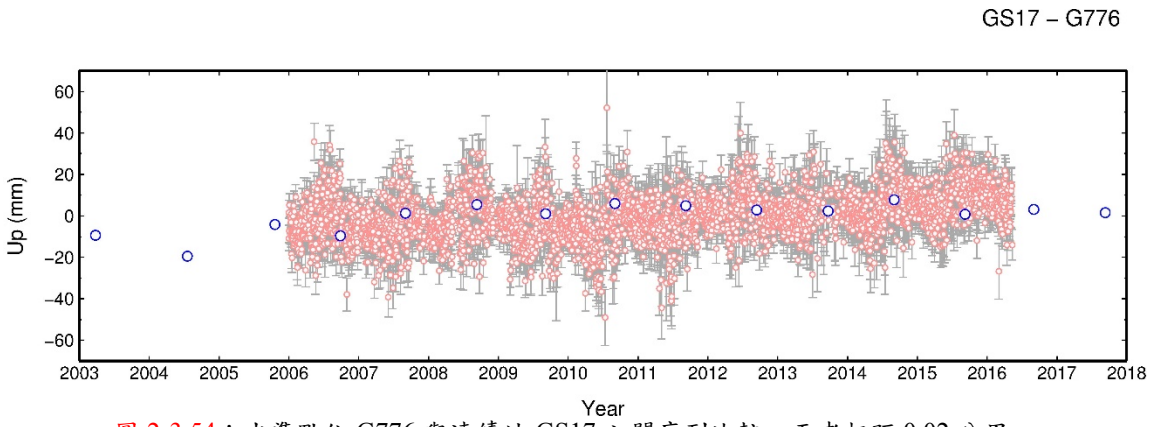


圖 2-3.54：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

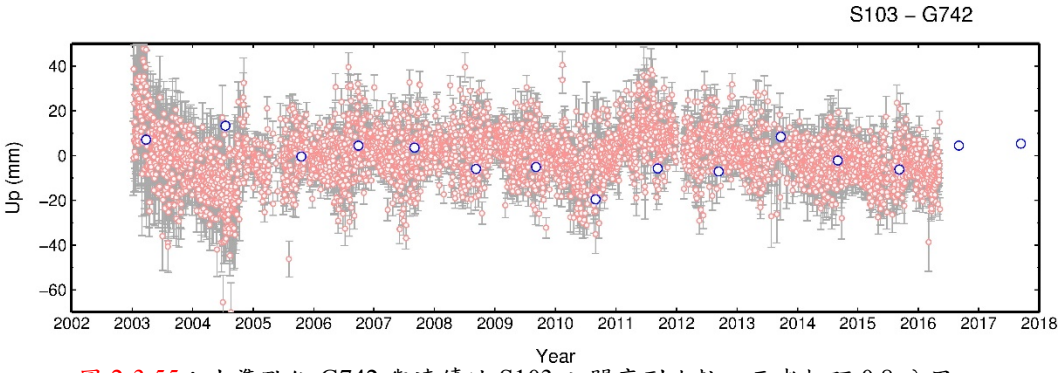


圖 2-3.55：水準點位 G742 與連續站 S103 之間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

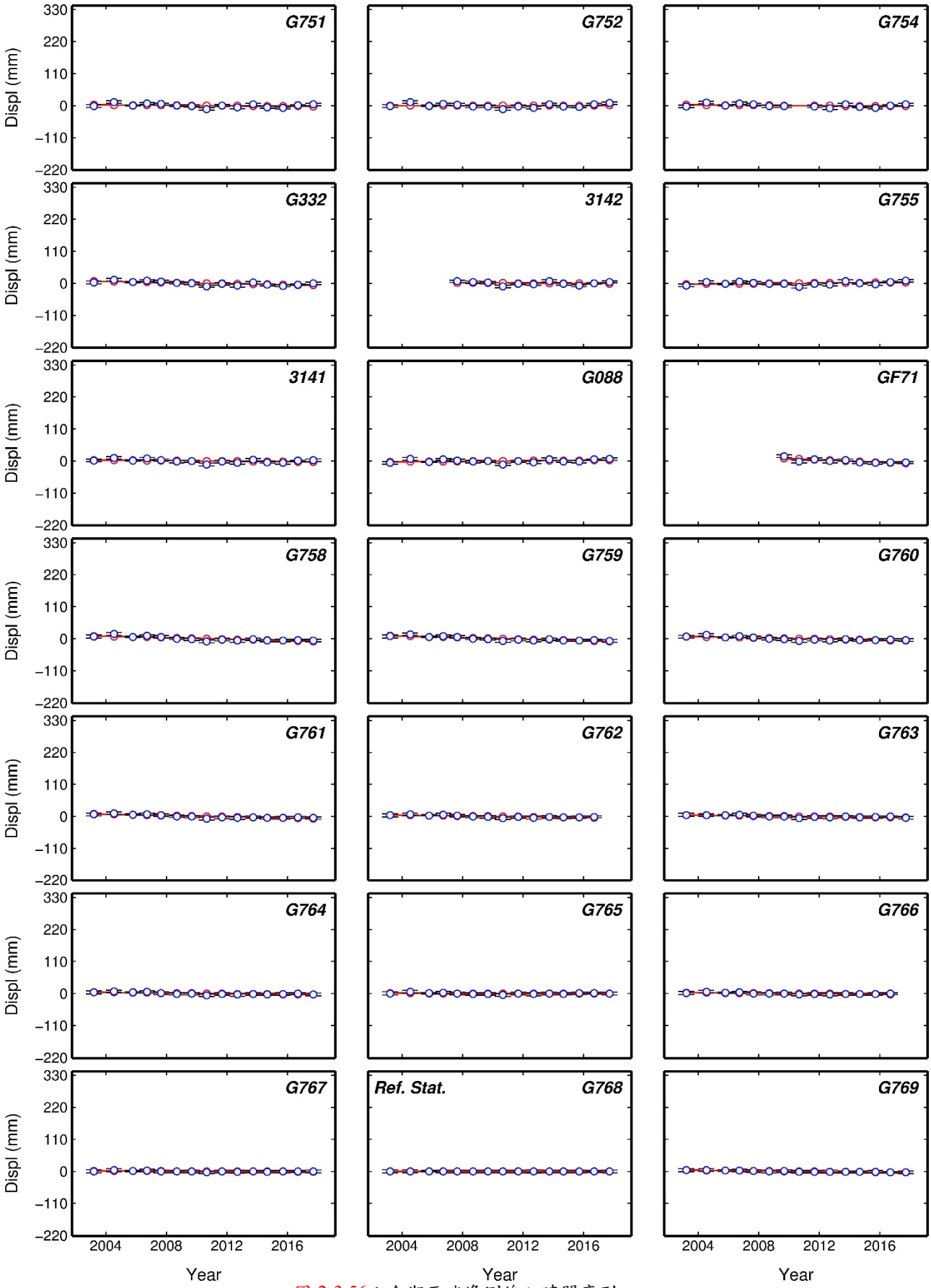


圖 2-3.56：金湖至瑞峰測線之時間序列。

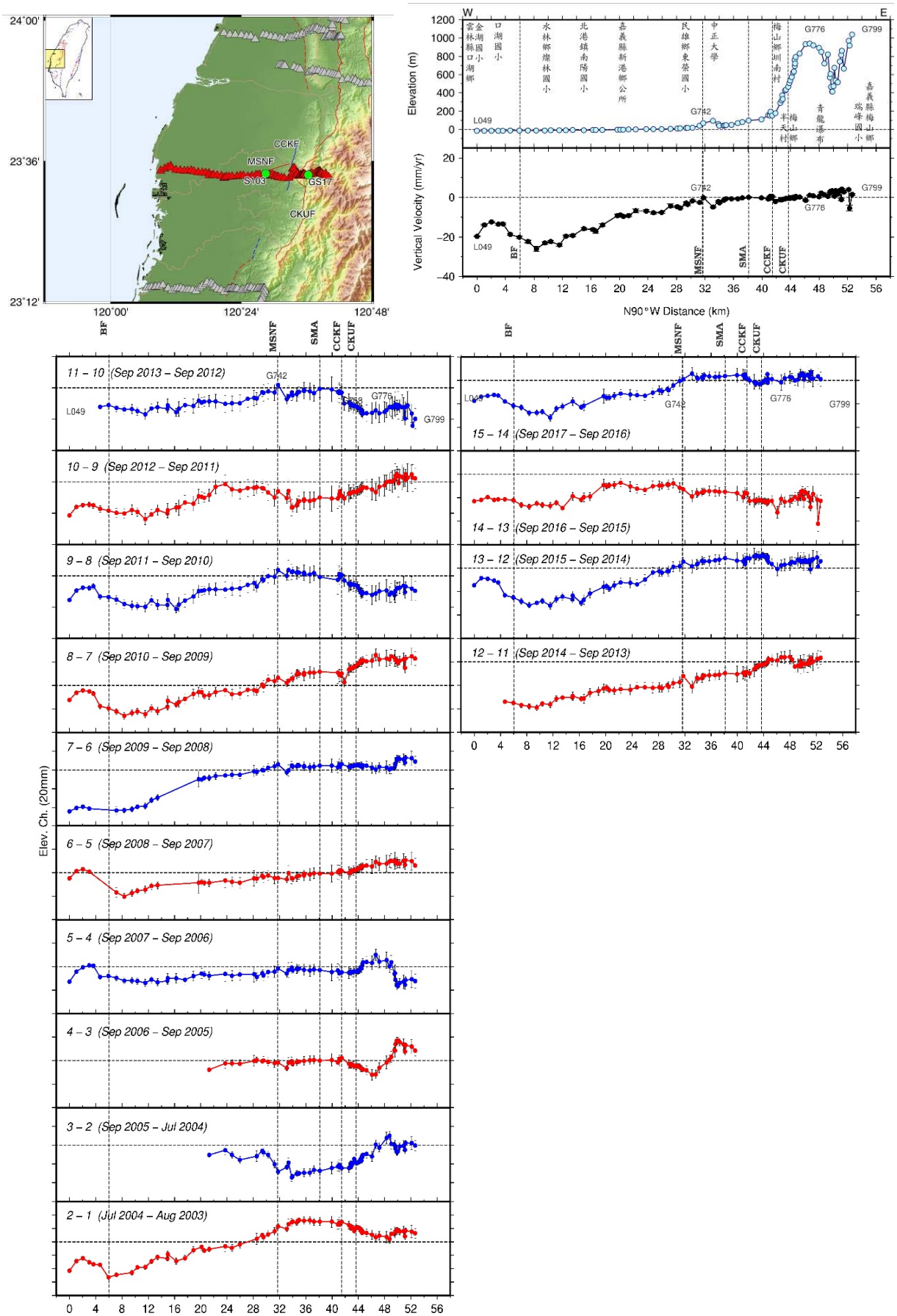


圖 2-3.57：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。BF 為 B 斷層、MSNF 為梅山斷層、SMA 為小梅背斜、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

2-3-17 縣 174_北門至楠西測線

本測線橫跨六甲斷層與觸口斷層，測線長約 40 公里(投影至剖面的長度)，從 2003 年至 2017 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS44 之垂直速率（5.94 mm/yr)，作為約制點來校正 I088 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.60)。

根據圖 2-3.62，六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。

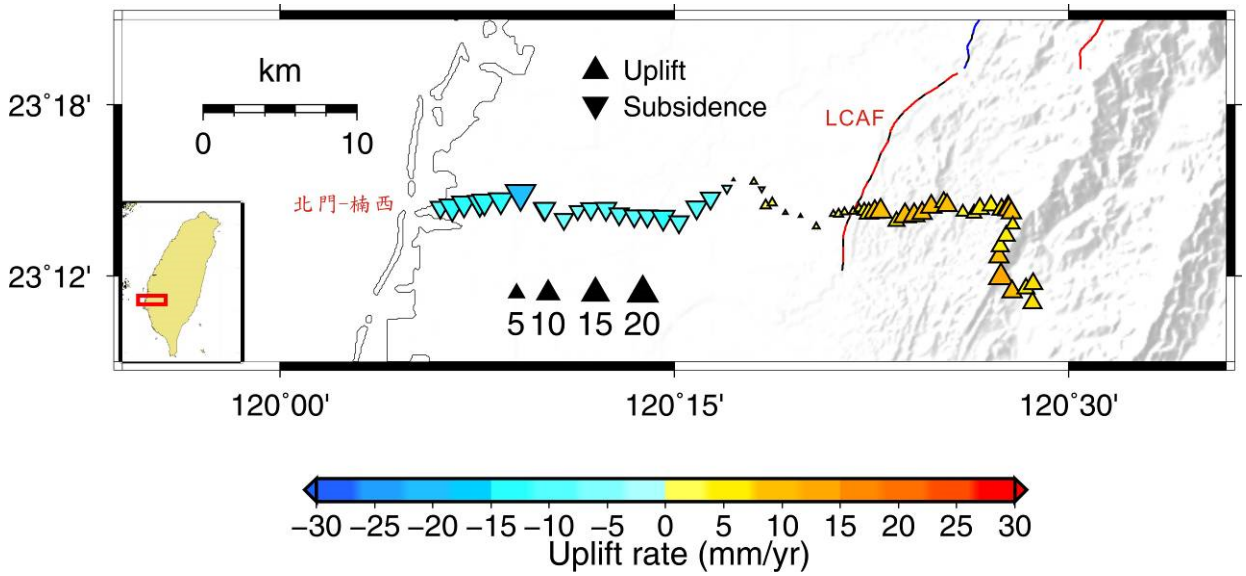


圖 2-3.58：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震前)。LCAF 為六甲斷層。

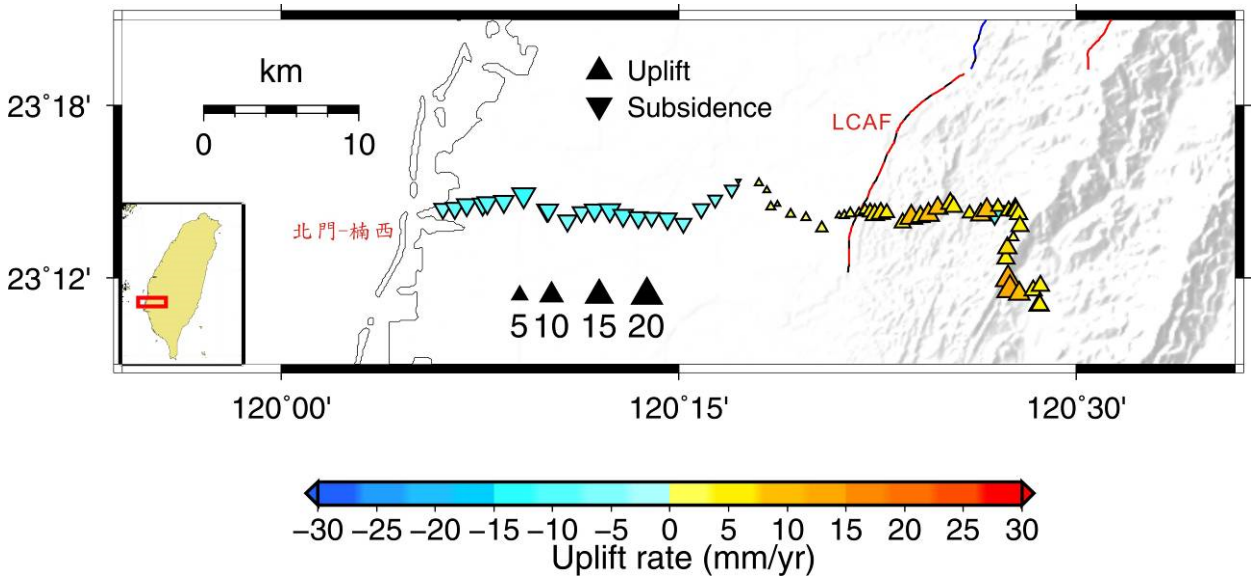


圖 2-3.59：北門至楠西測線之垂直速度場（2010 年甲仙地震後至今)。LCAF 為六甲斷層。

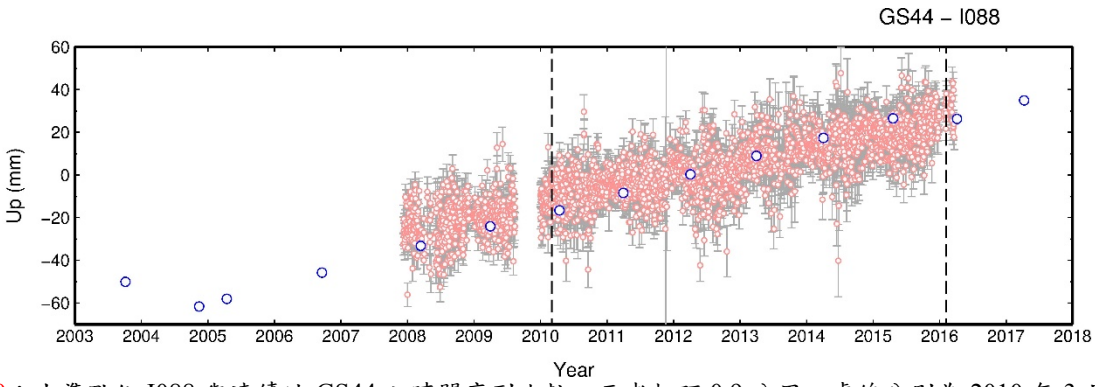


圖 2-3.60：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

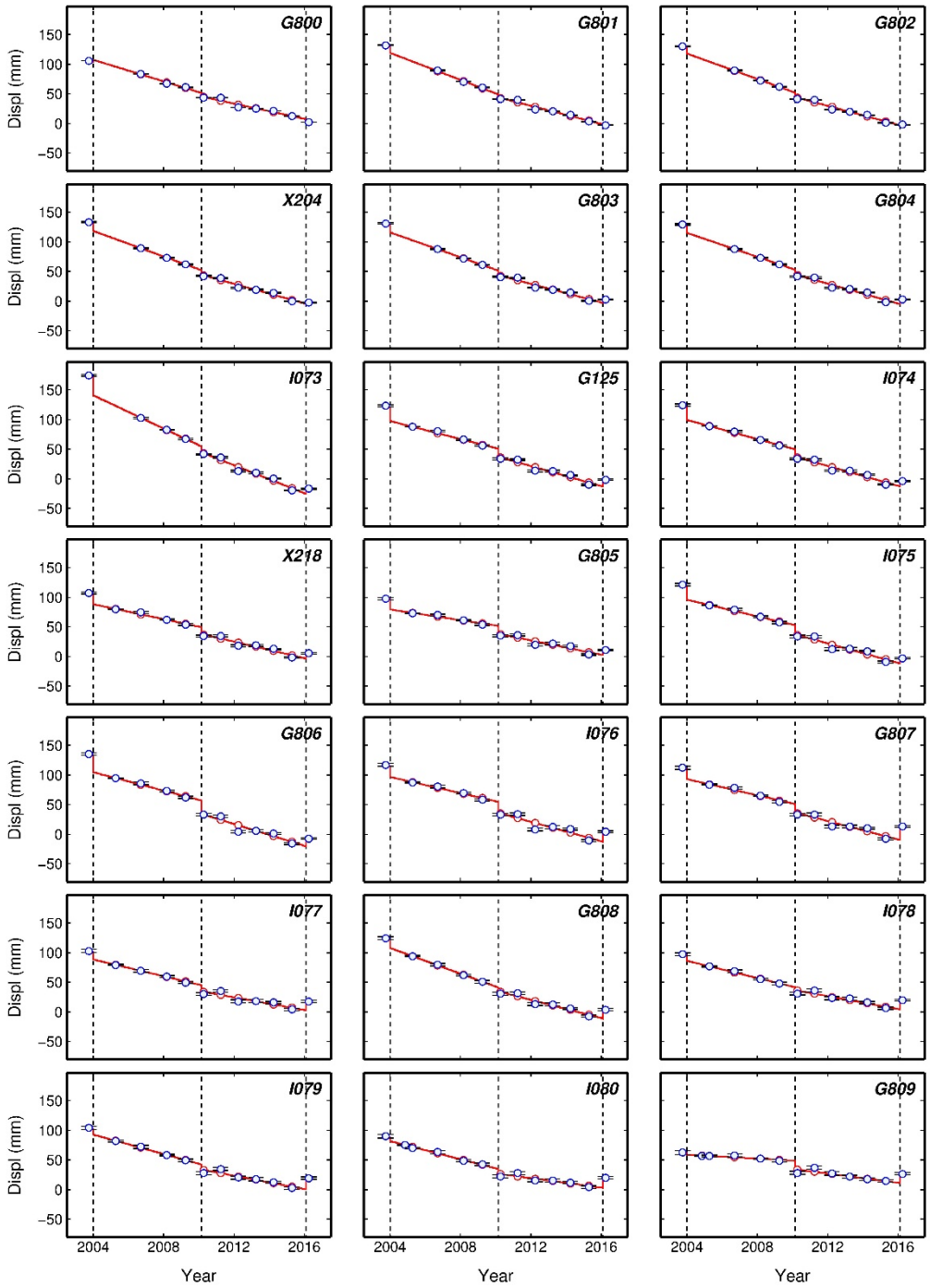


圖 2-3.61：北門至楠西測線之時間序列。虛線分別為 2004 年修正數值事件、2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 6 月 2 日美濃地震。

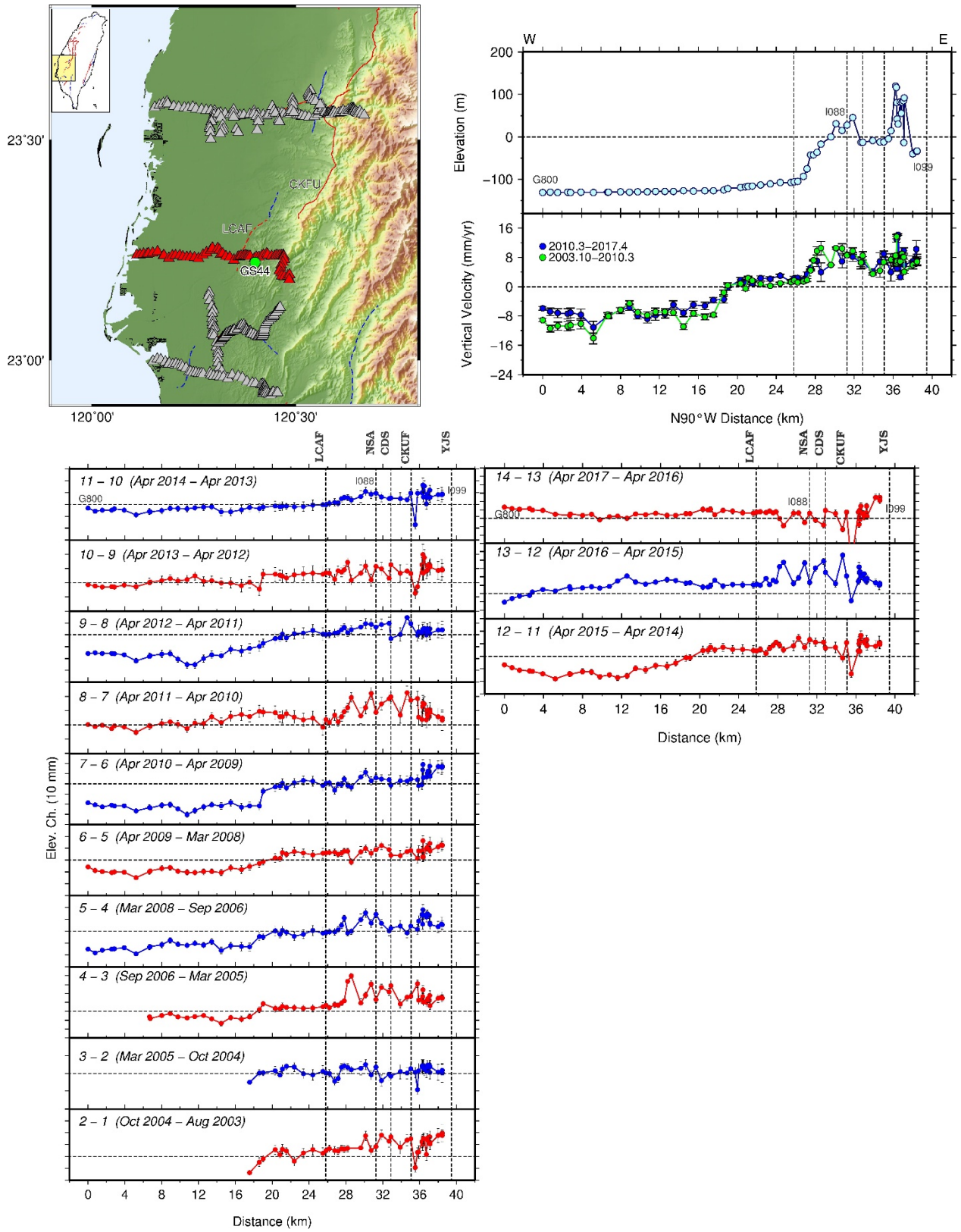


圖 2-3.62：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、藍色為 2010 至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、NSA 為牛山背斜、CDS 為前大埔向斜、CKUF 為觸口斷層、YJS 為玉井向斜。

2-3-18 台 19 甲_善化至關廟測線

本測線由北往南走橫跨新化斷層，測線長約 22 公里，從 2003 年至 2017 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（1.17 mm/yr），作為約制點來校正 G374 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.65）。

根據圖 2-3.67， 此測線北段（新化斷層以北）之垂直速度約落在 0.0 mm/yr 到 2.0 mm/yr 之間，南段（新化斷層以南）垂直速度則約落在 1.0～4.5 mm/yr 之間，地形高程在跨越斷層後也有約 25.0 m 之抬升現象（新化高中至關廟區）。

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

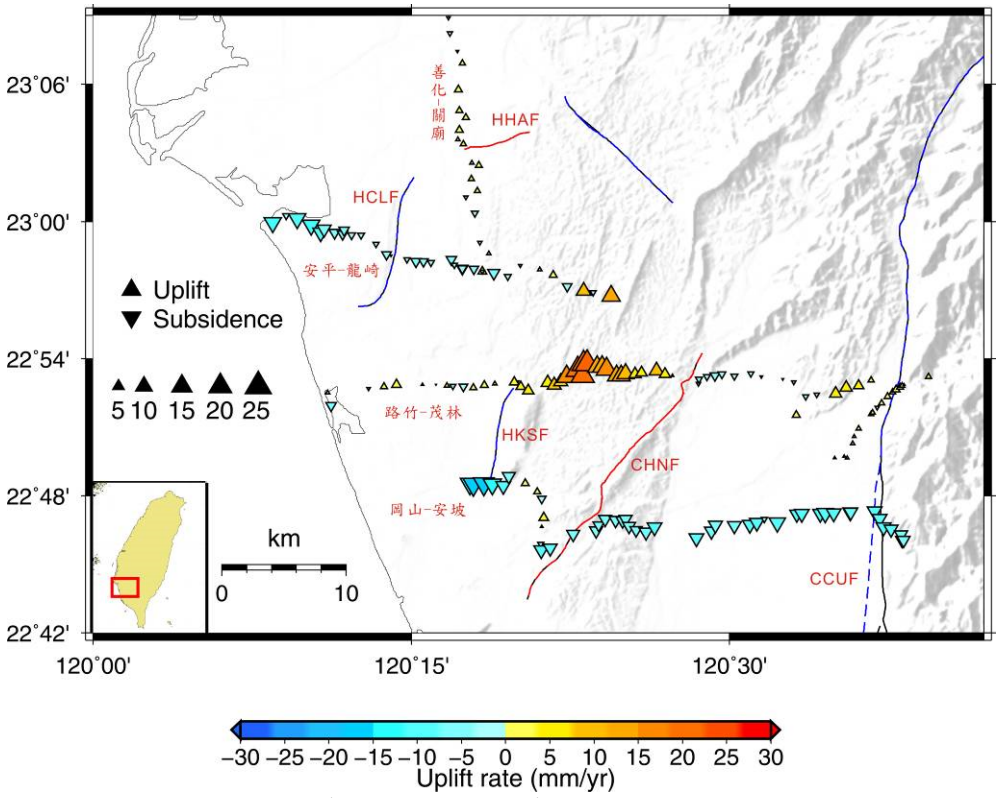


圖 2-3.63：南部地區之水準垂直速度場（2010 甲仙地震前）。HHAF 為新化斷層、HCLF 為後甲里斷層、HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為觸口斷層。

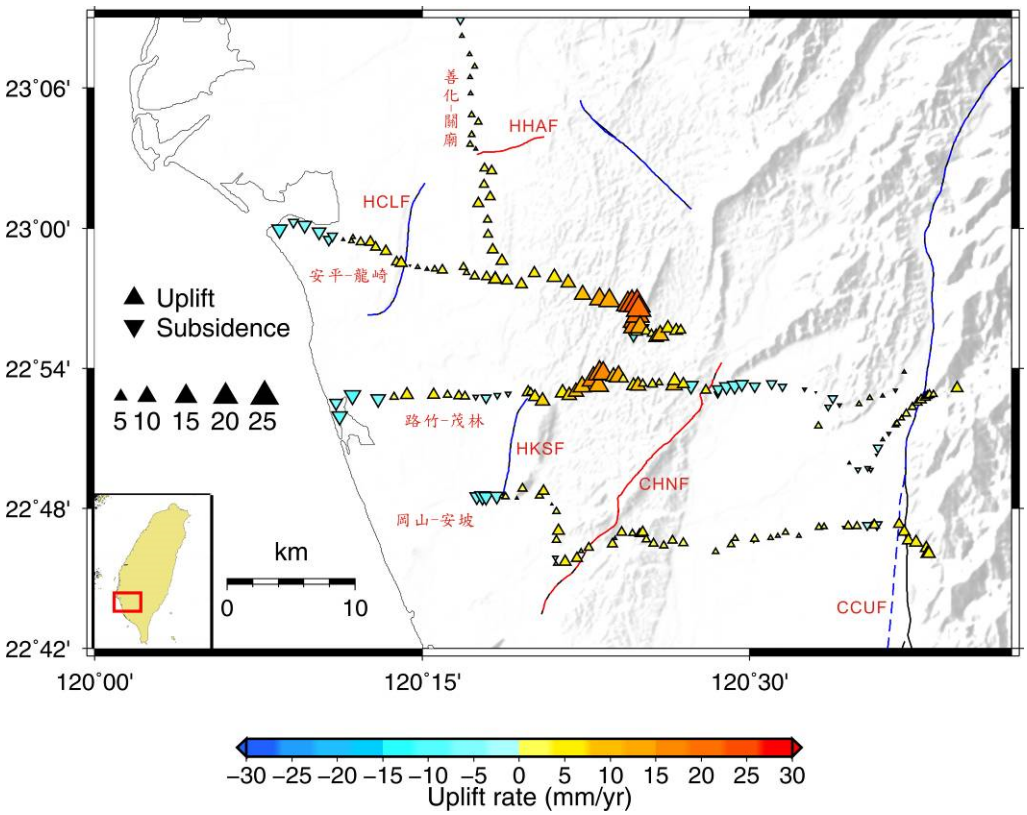


圖 2-3.64：南部地區之水準垂直速度場（2010 甲仙地震後至今）。HHAF 為新化斷層、HCLF 為後甲里斷層、HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為觸口斷層。

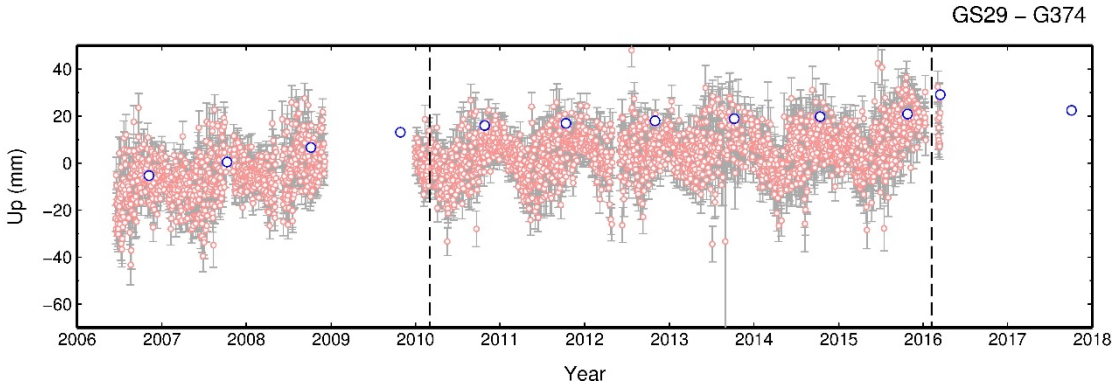


圖 2-3.65：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

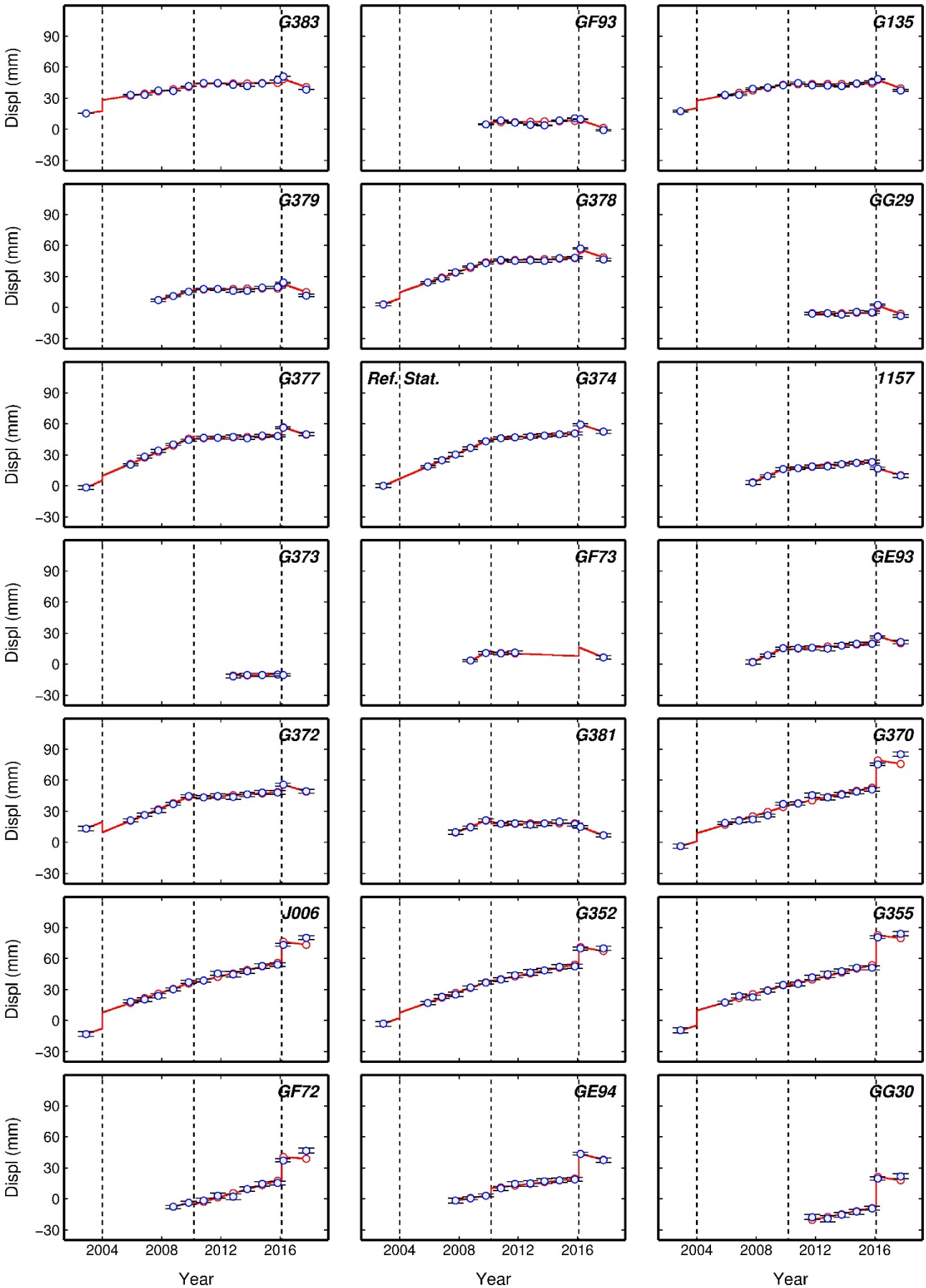


圖 2-3.66：善化至關廟測線之時間序列。虛線分別為 2004 年數值修正事件、2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

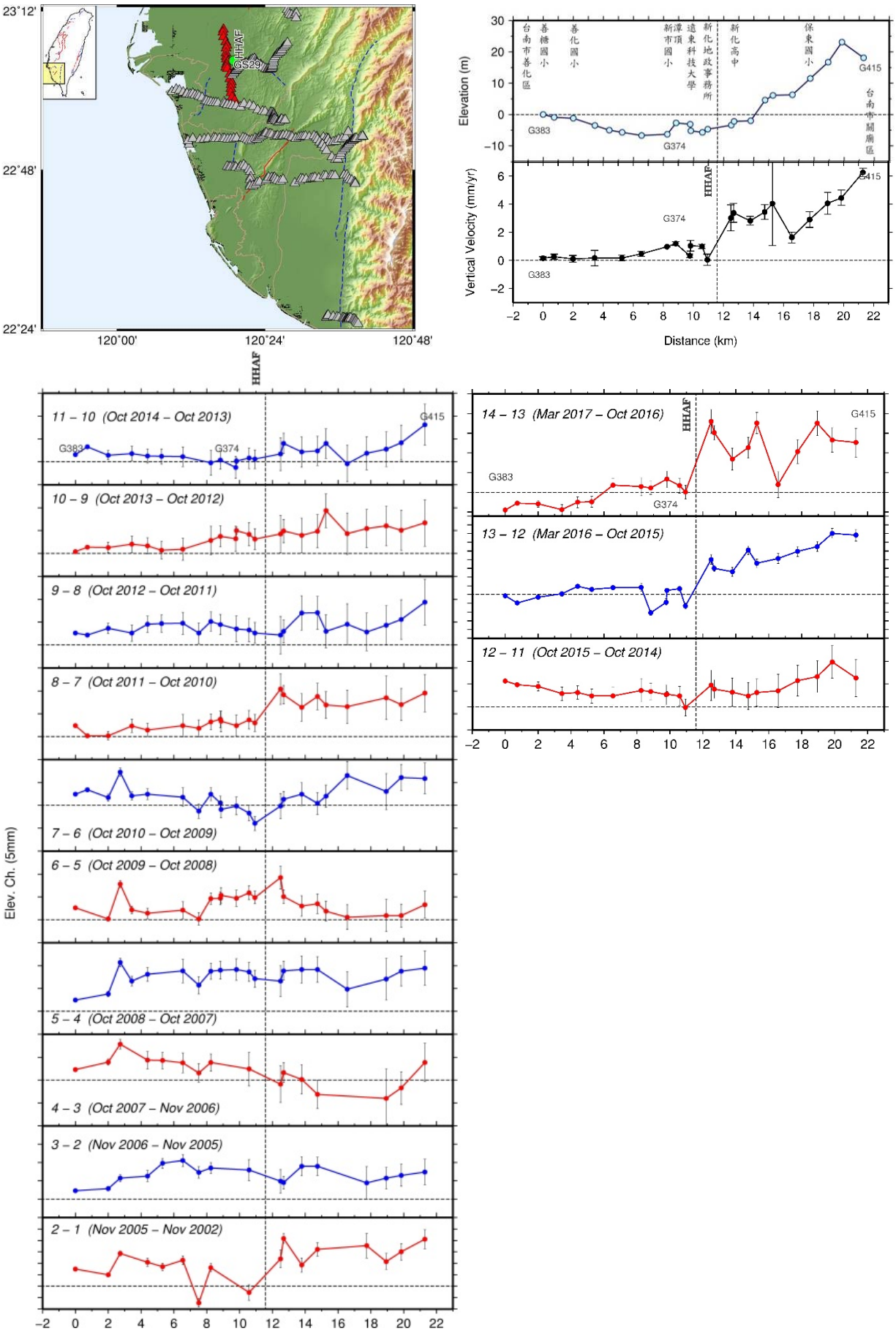


圖 2-3.67：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

2-3-19 縣 182_安平至龍崎測線

本測線橫跨臺南台地、後甲里斷層與龍船斷層，從臺南安平區至龍崎區，2013 年起延伸至高雄市內門區，全長約 33 公里，從 2001 年至 2017 年共計有 18 次施測。本測線以 GPS 連續站 CKSV 之垂直速率（2.97 mm/yr），作為約制點來校正 TN04 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.68）。

根據圖 2-3.70，不論由地形剖面、高程歷年變化及垂直速率圖上均可明顯見到臺南台地之存在（中西區至仁德區一帶），且台地之東緣有往東延伸之趨勢。測線最西側（安平區至中西區）有約-7.0 至 0.0 mm/yr 之沉陷速率；而臺南台地的西緣（中西區）至台地的東緣（虎尾寮、仁德區）由水準高程變化可發現該區域有穩定的之地表抬升速率趨勢（約 0.4 ~ 5.3 mm/yr），但整體的地表垂直變化量並不明顯。在虎尾寮地區跨後甲里斷層至仁德區，垂直速度在跨斷層有顯著的變化，約由 5.0 mm/yr 降至-1.0 mm/yr。

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

2016 年 2 月芮氏規模 6.6 的美濃地震，造成此水準測線點位有-35.0 ~ 115.0 mm 之同震位移量。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在關廟向斜至龍船斷層附近有產生同震變形。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。

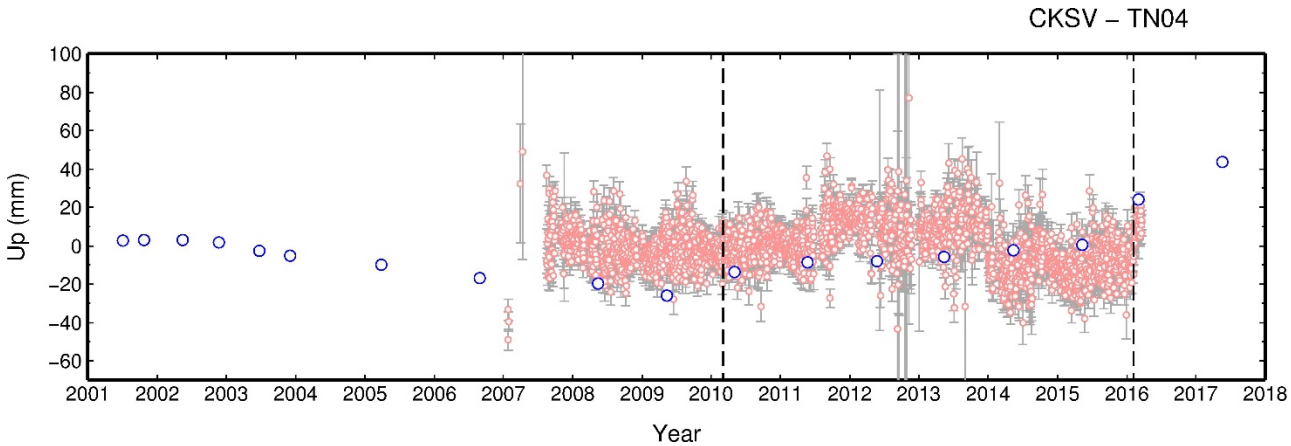


圖 2-3.68：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

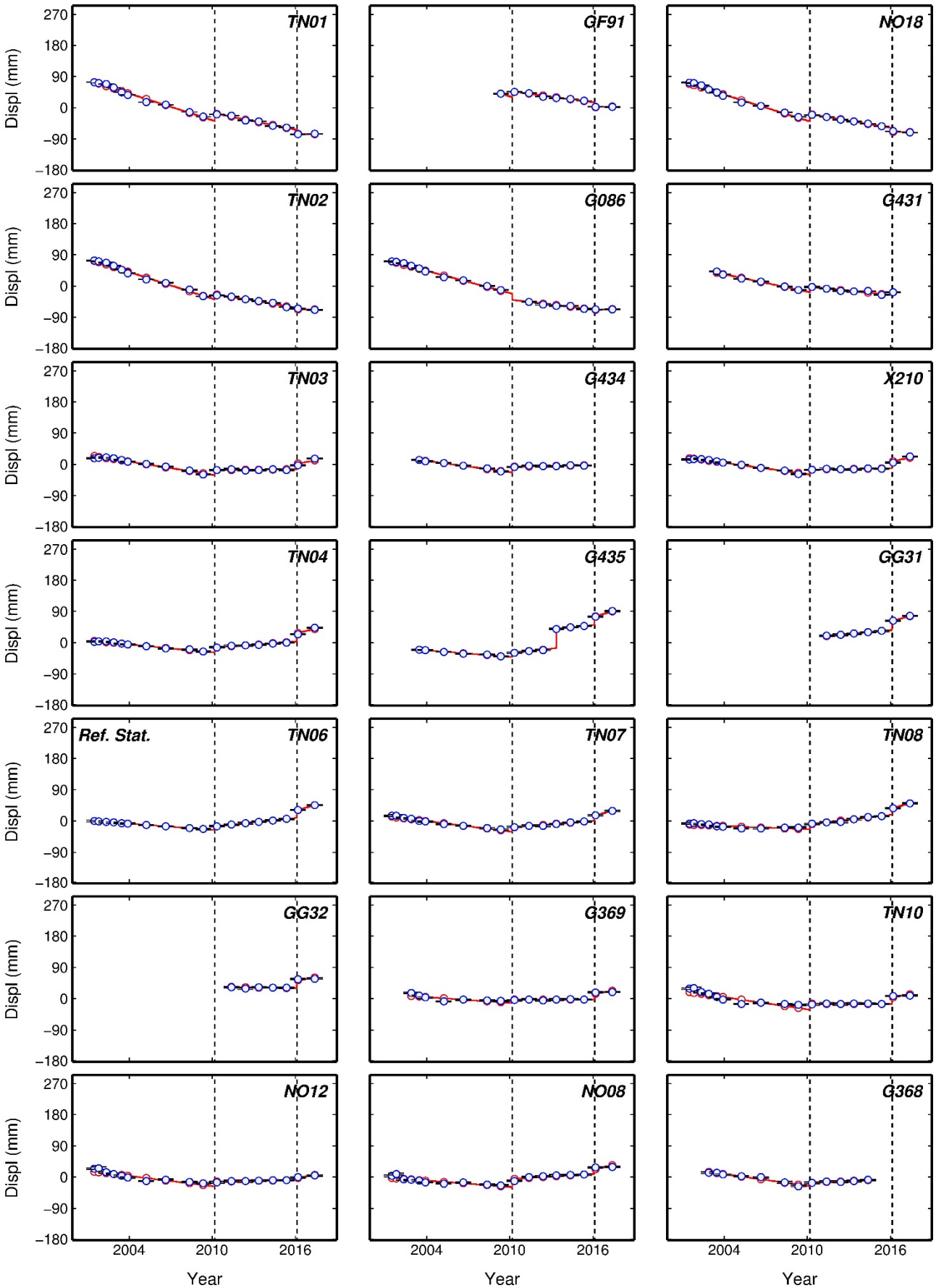


圖 2-3.69：安平至龍崎測線之時間序列。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

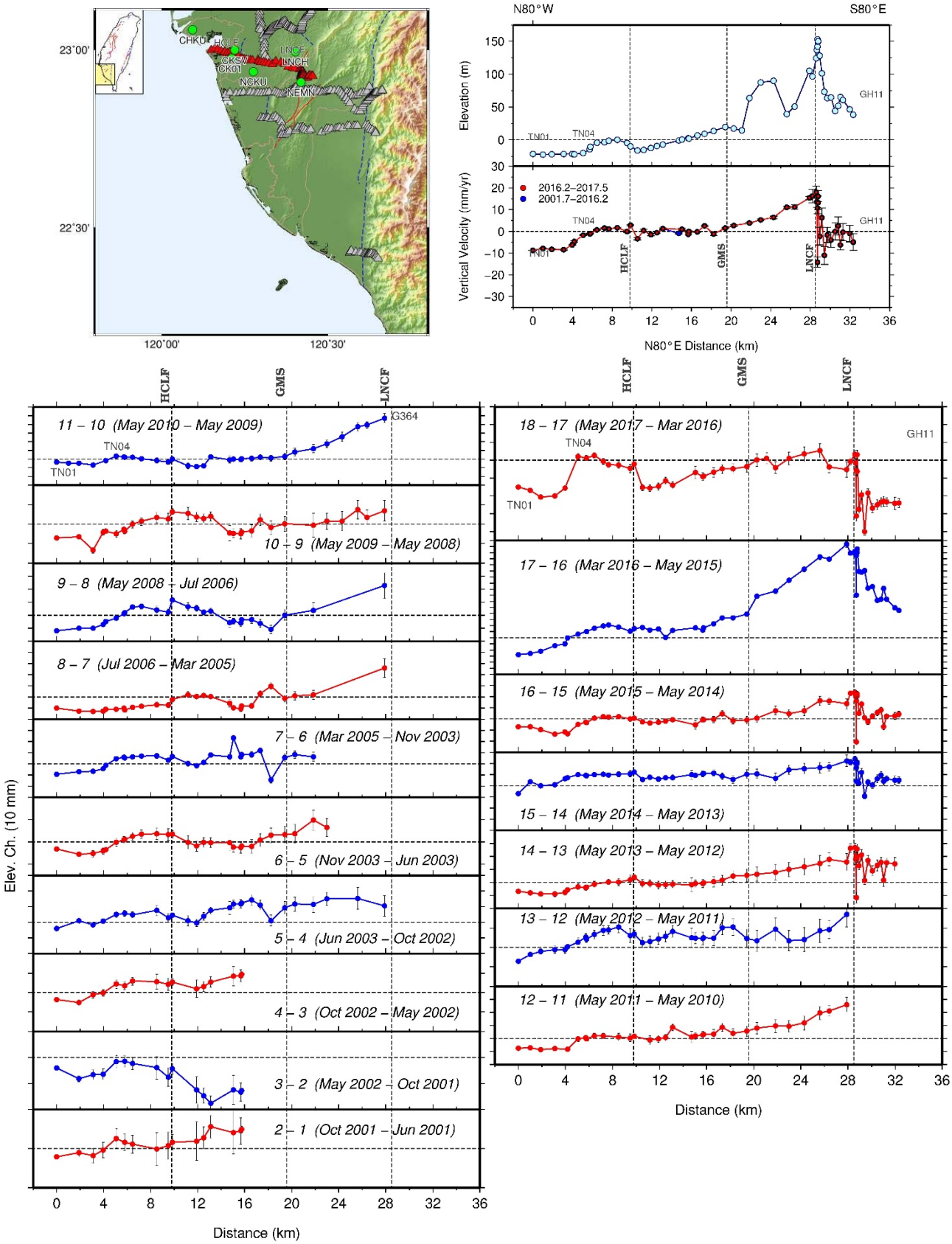


圖 2-3.70：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，藍色為 2001 - 2016 年美濃地震震間垂直速度，紅色為 2016 年至今之垂直速度，由於目前震後僅有 2 次觀測資料，暫設定無震後效應。下欄中各線條為高程變化曲線。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、GMS 為關廟向斜、LCF 為龍船斷層。

2-3-20 台 28_路竹至茂林測線

本測線橫跨小岡山、龍船、旗山及潮州斷層，路線長約 50 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2017 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS55 和 CISH 之垂直速率（0.08 及 0.75 mm/yr），作為約制點來校正 R016 與 J116 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.71 及圖 2-3.72）。

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

台 28_路竹至茂林測線於中壇附近分成北（縣 184 主線）與南（台 27 副線）兩條水準測線。由圖 2-3.74 顯示，主線於小岡山斷層與龍船斷層之間的垂直速率持續增加（約 0.0～20.0 mm/yr），與地形剖面比較，此區域（月世界一帶）垂直速率增加之處與地形高程變化並不吻合，目前對於此結果的解釋仍然沒有定論，可能與小岡山斷層的運動、活動背斜的活躍或是泥貫入體的發育有關。

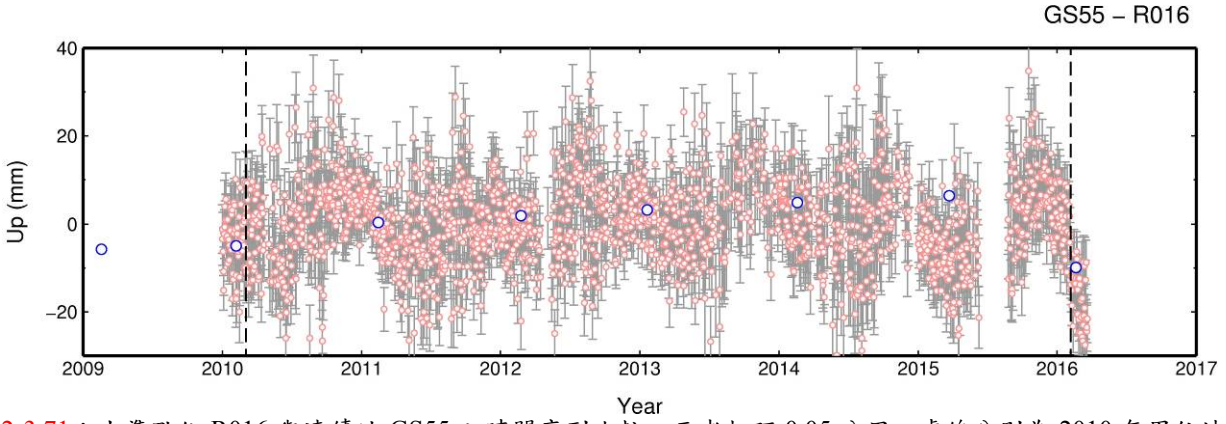


圖 2-3.71：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震。

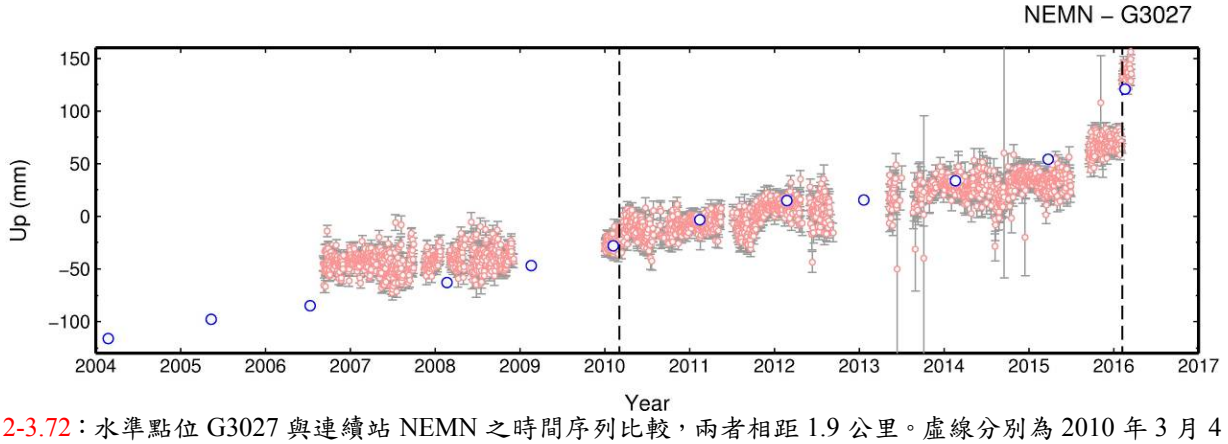


圖 2-3.72：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較，兩者相距 1.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

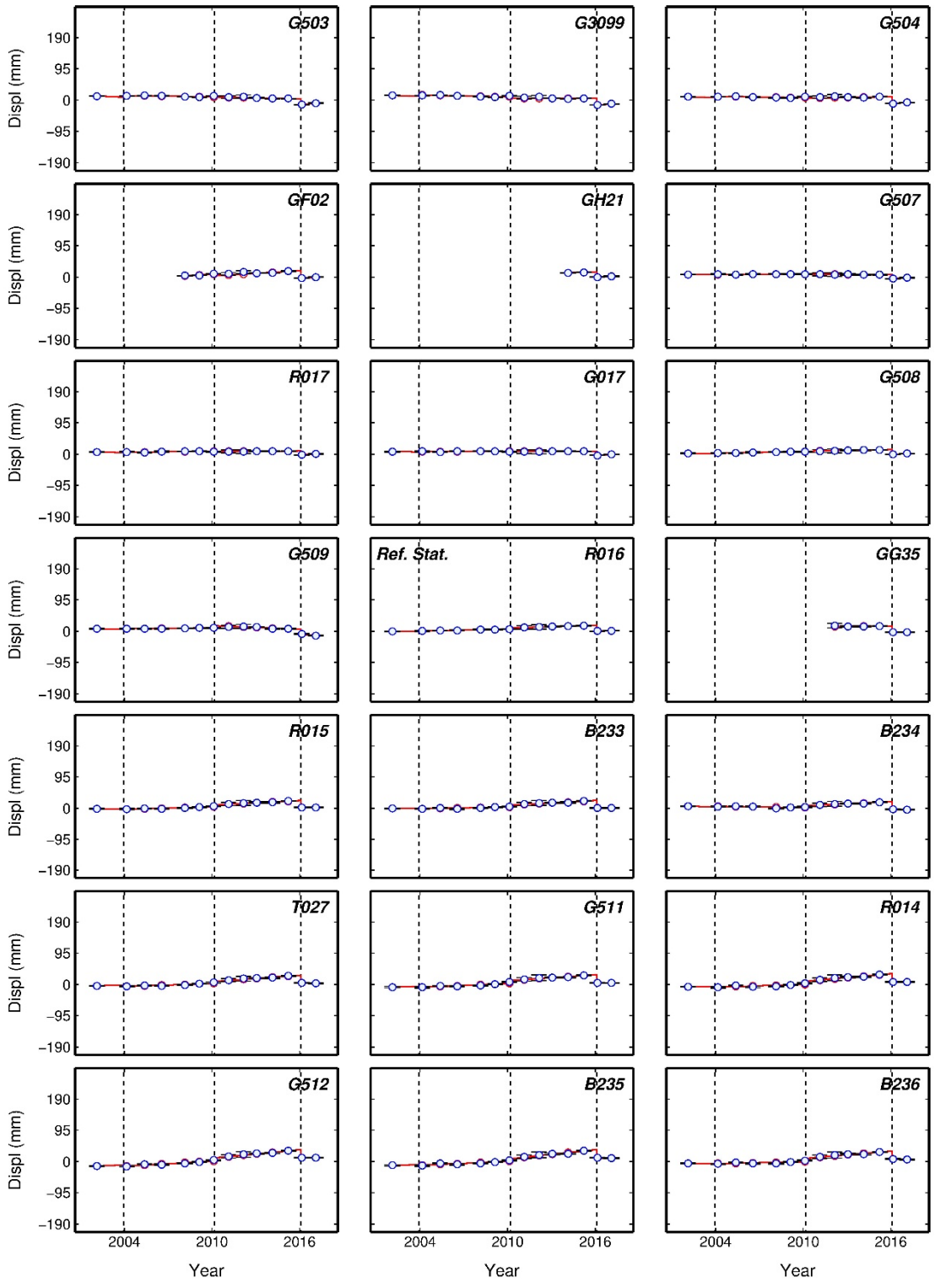


圖 2-3.73：路竹至茂林測線之時間序列。虛線分別為 2003 年 12 月 10 日成功地震、2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

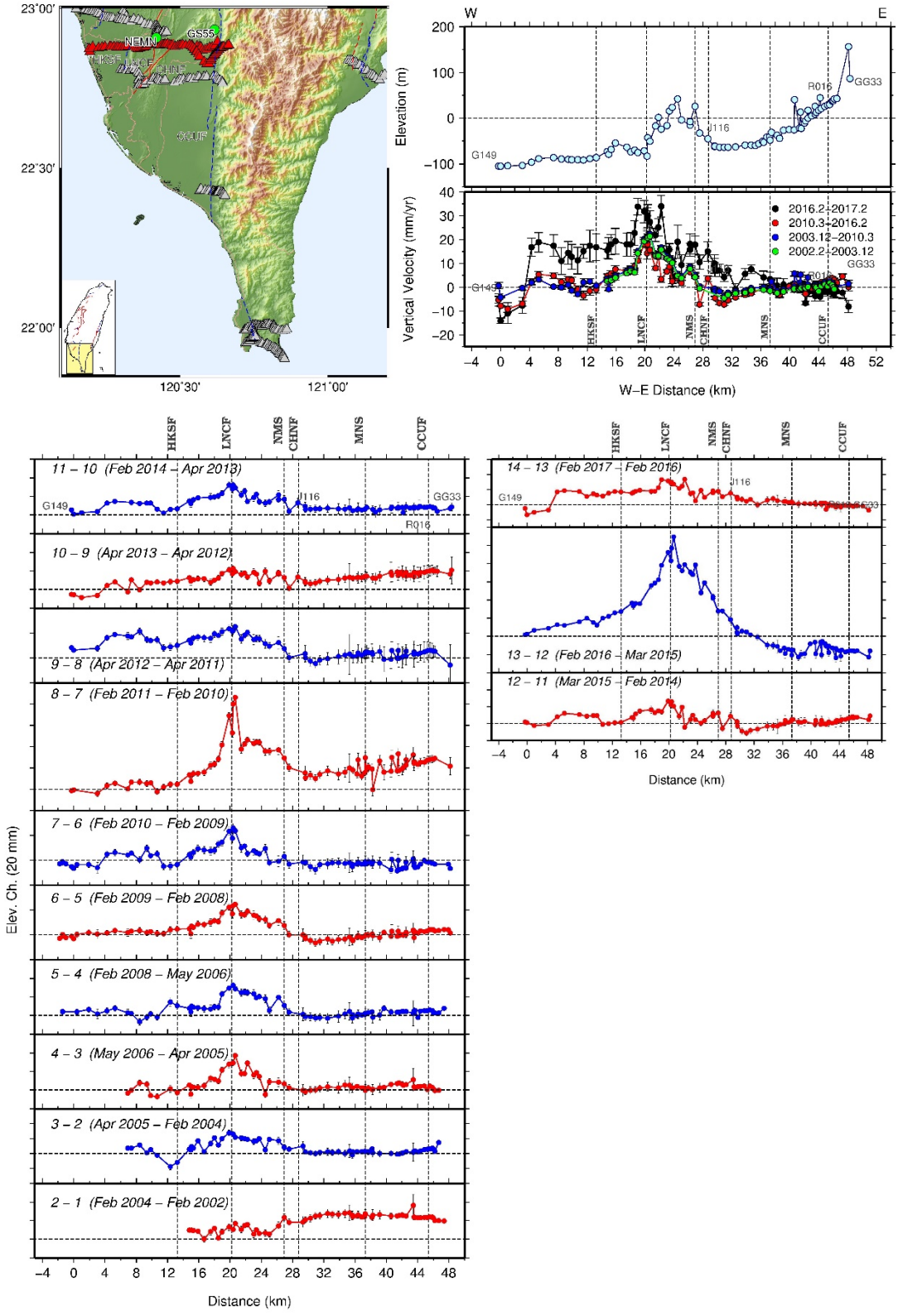


圖 2-3.74：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2003 年成功地震震前垂直速度、藍色為 2003 - 2010 年成功地震與甲仙地震震間垂直速度、紅色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度，黑色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、LNCF 為龍船斷層、NMS 為內門向斜、CHNF 為旗山斷層、MNS 為美濃向斜、CCUF 為潮州斷層。

2-3-21 台 22_岡山至安坡測線

本測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層，測線長約 36 公里，從 2004 年至 2017 年共計 13 次施測。本測線以 GPS 連續站 AKND 之垂直速率（2.49 mm/yr），作為約制點來校正 G526 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.75）。

根據圖 2-3.77，垂直速度在跨越小崗山斷層至旗山斷層之間有明顯的抬升現象，約由-12.5 mm/yr 抬升至 3.2 mm/yr；而旗山斷層至潮州斷層之間，速度呈現緩降的趨勢，大致由-1.8 mm/yr 緩降至-7.5 mm/yr；在橫跨潮州斷層區域，垂直速率並未有明顯之變化量（約在-1.0 mm/yr 左右），或許可說明潮州斷層在本區域中並未有明顯之活動發生。

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

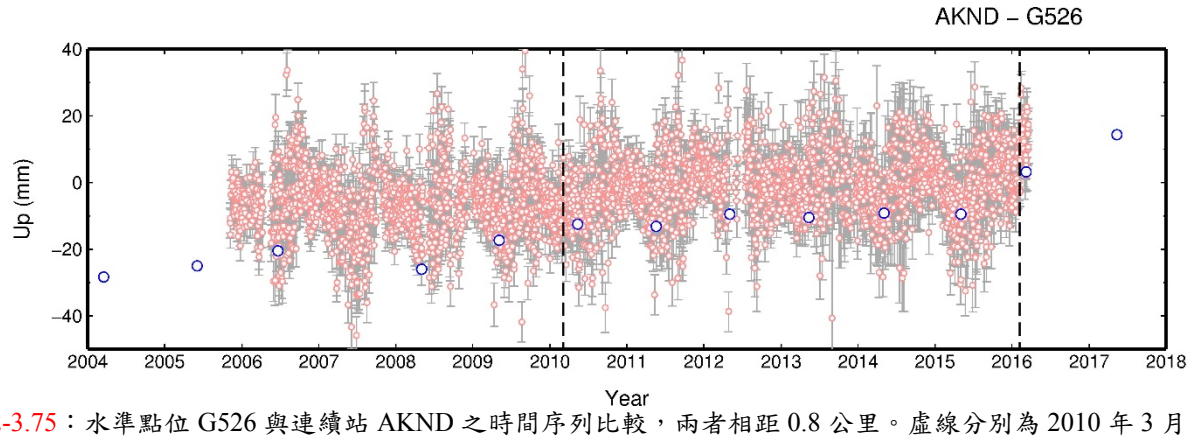


圖 2-3.75：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

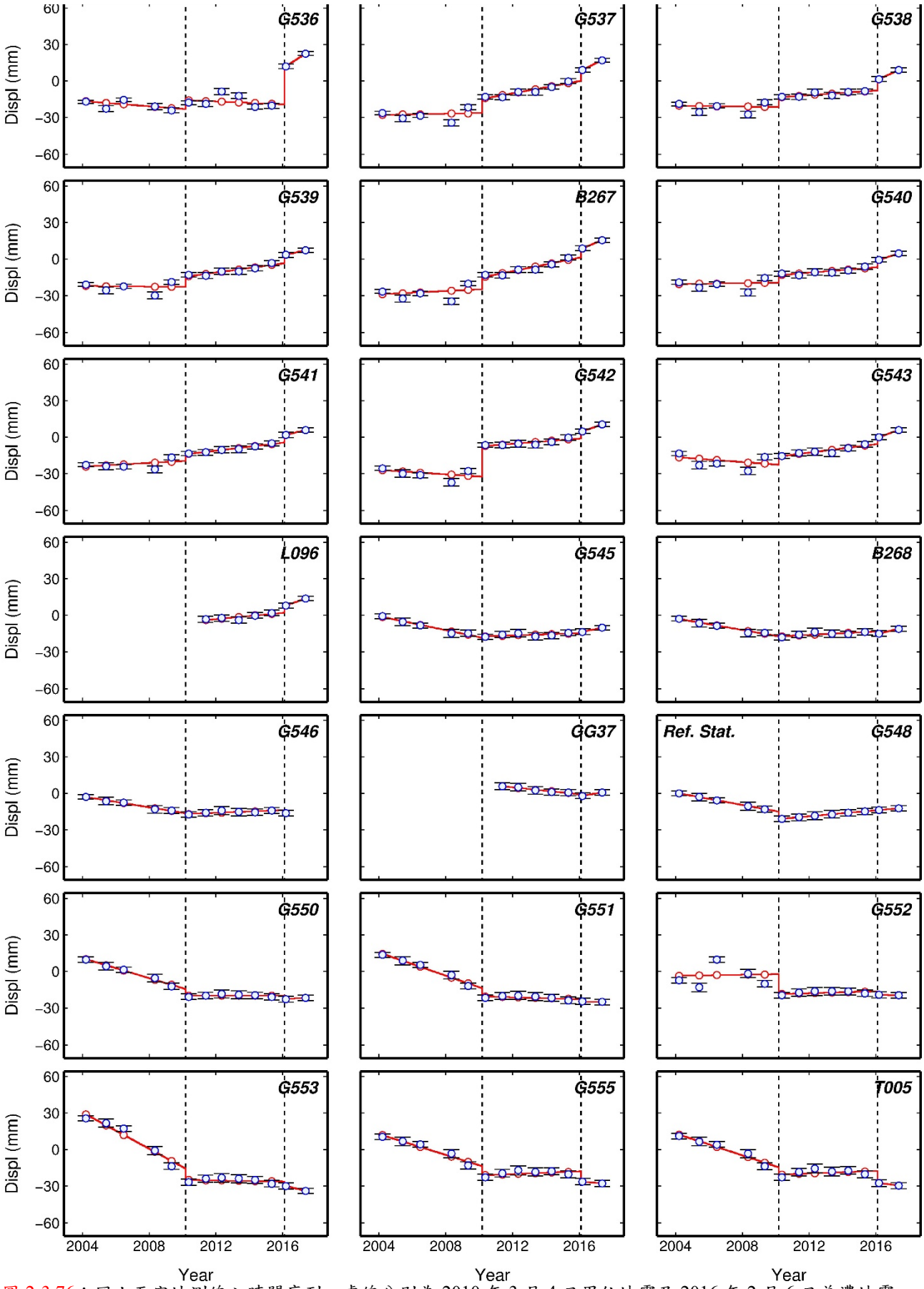


圖 2-3.76：岡山至安坡測線之時間序列。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

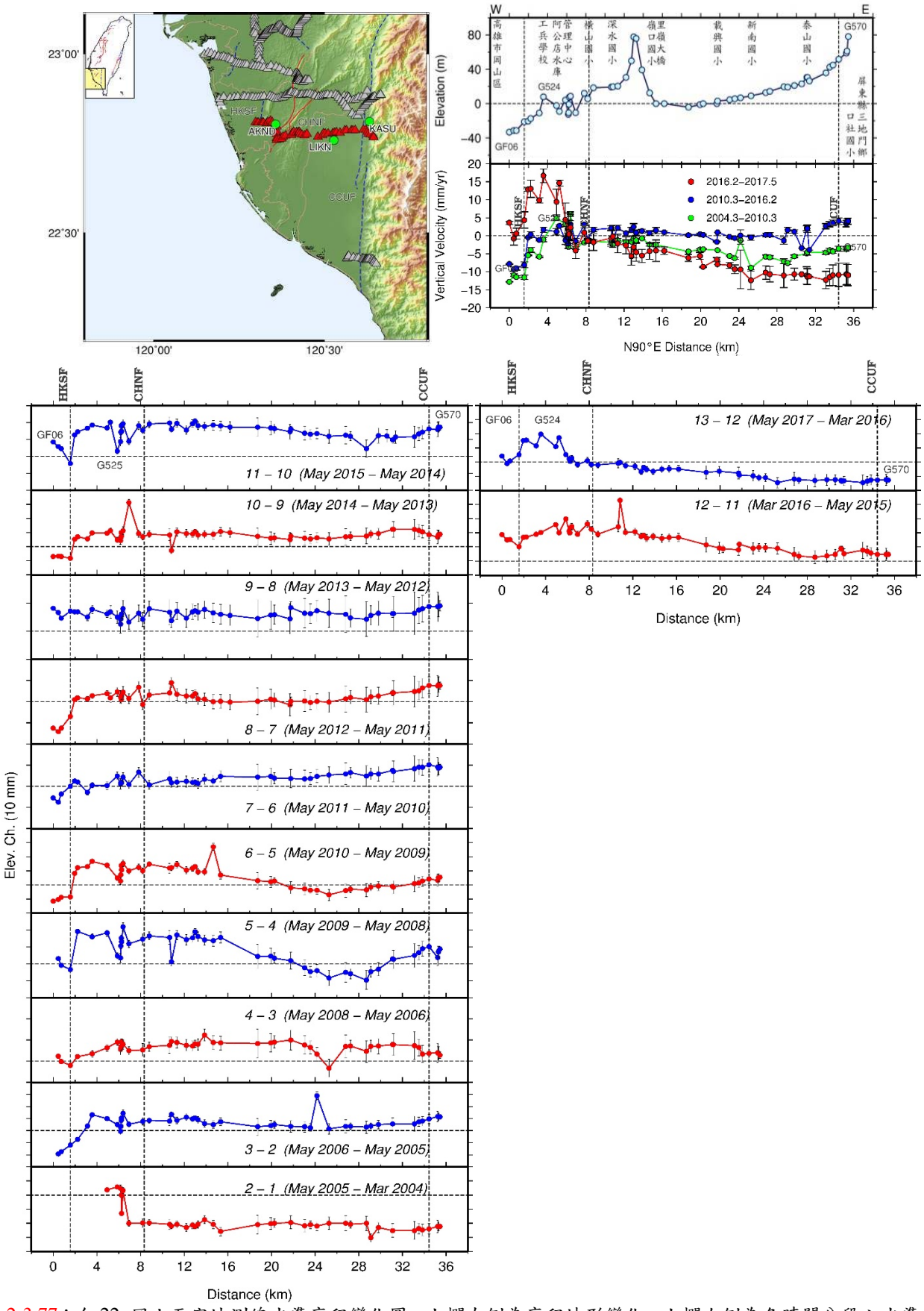


圖 2-3.77：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，所示綠色為 2004 - 2010 年甲仙地震震間垂直速度、藍色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度、紅色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

2-3-22 佳冬至七佳測線

本測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里，於 2005 至 2017 年間共進行了 13 次的施測，主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。本測線以 GPS 連續站 CLON 之垂直速率（-14.84 mm/yr），作為約制點來校正 GC85 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.79）。

根據圖 2-3.81，該測線於 2007~2008 年間之高程變化與其他時段（2005~2007 年、2008~2010 年）不同，疑與 2008 年 8 月如麗颱風（NURI）之降雨有關（警報期間：8/19~8/21；水準測量期間：9/04~9/09）。潮州斷層西側之垂直速度變化較明顯，最大值達-20 mm/yr；斷層東側 2 公里內之變化較小，垂直速度落在 -0.2 至 1 mm/yr 之間，說明潮州斷層近期仍有活動跡象。

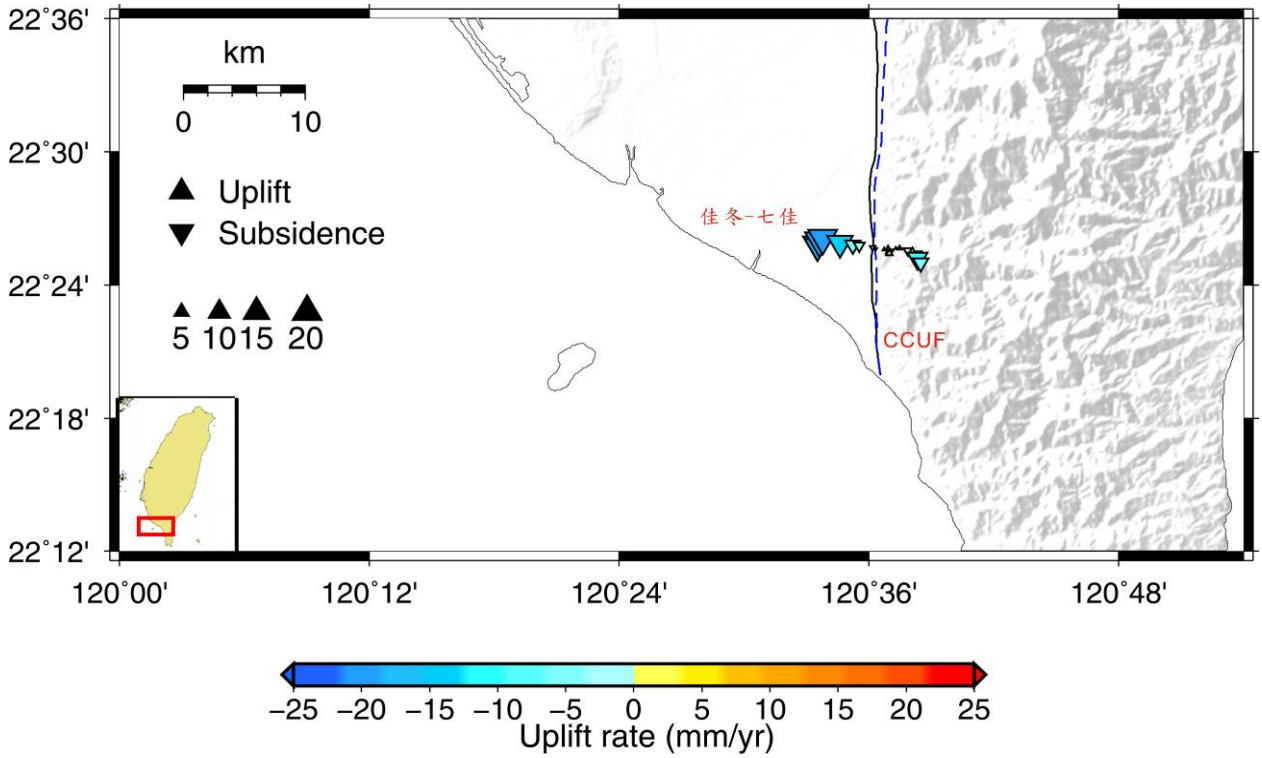


圖 2-3.78：佳冬-七佳之水準垂直速度場。CCUF 為潮州斷層。

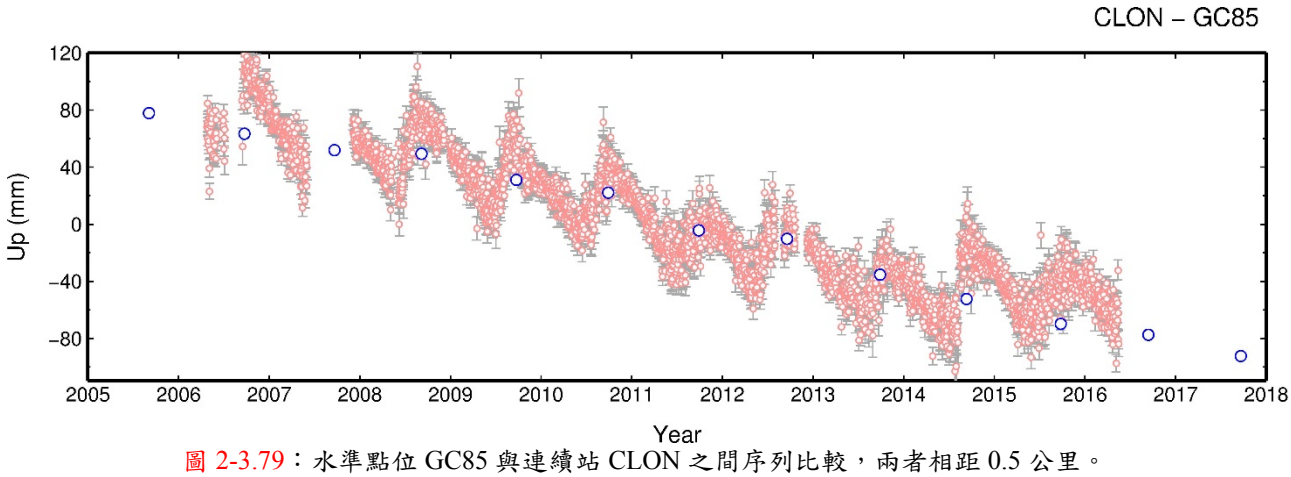


圖 2-3.79：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較，兩者相距 0.5 公里。

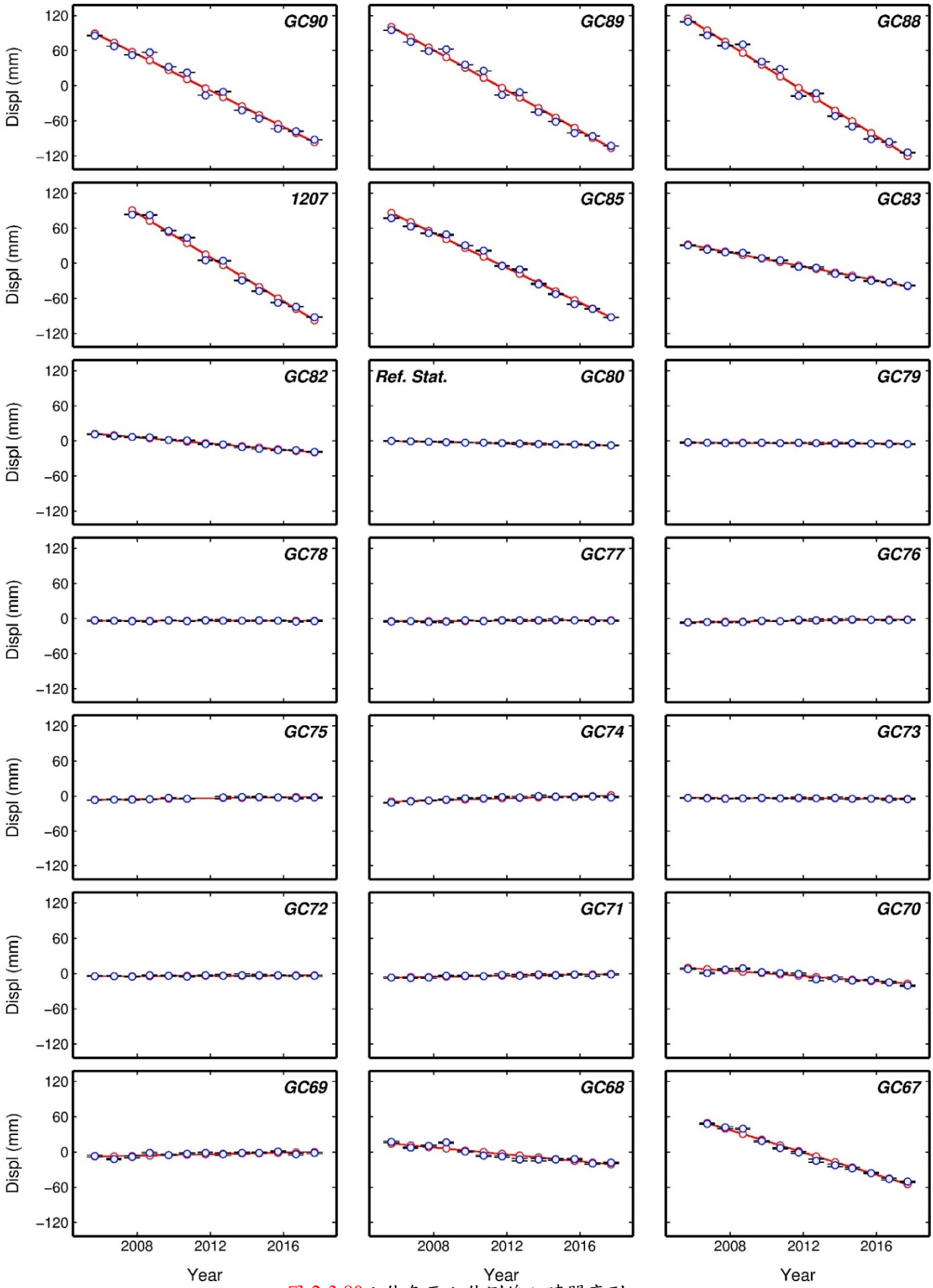


圖 2-3.80：佳冬至七佳測線之時間序列。

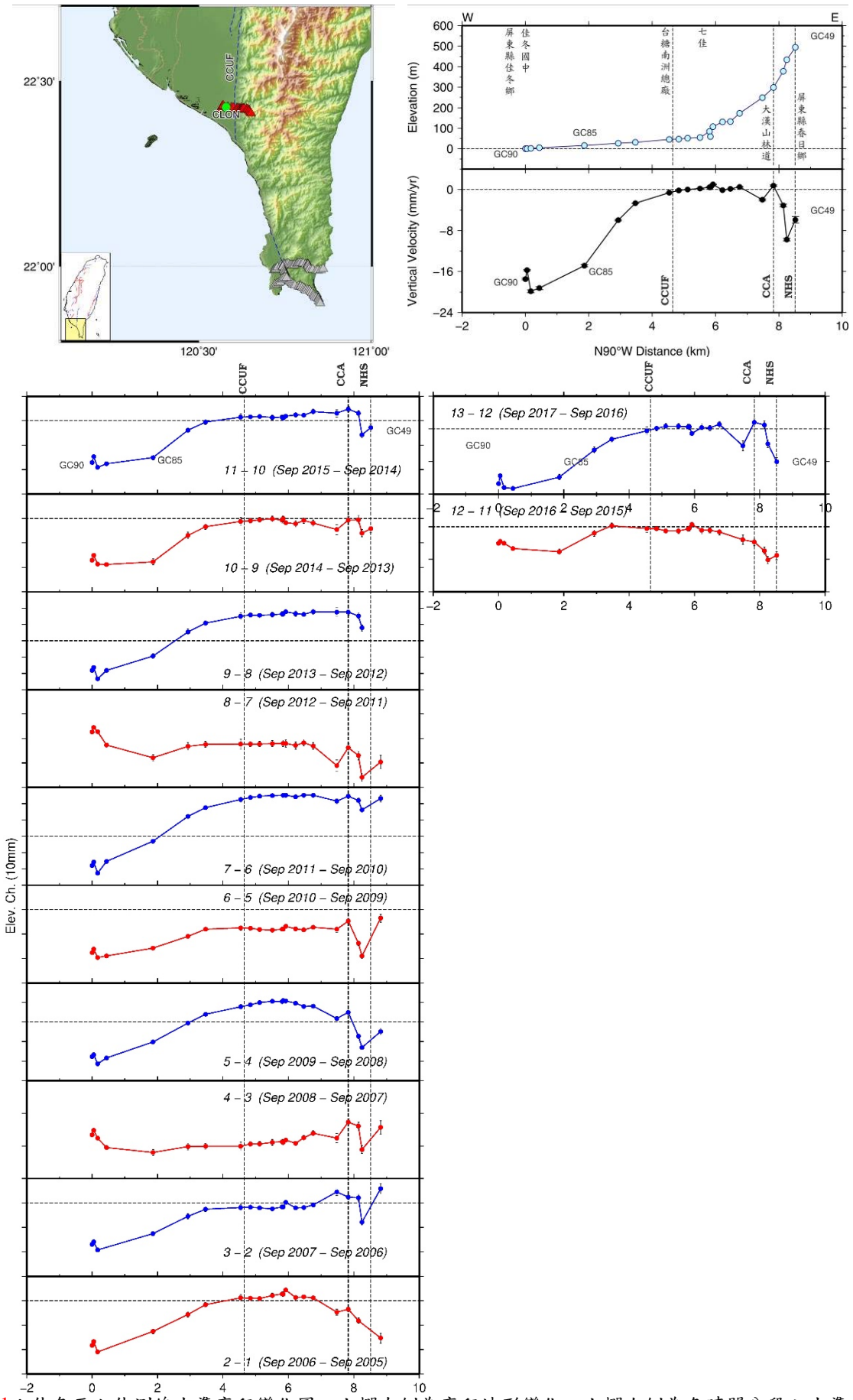


圖 2-3.81：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層、CCA 為七佳背斜、NHS 為南和向斜。

2-3-23 恆春半島地區測線

恆春半島地區共規劃有 2 條橫跨恆春斷層的精密水準測線，分別是北邊的恆春西台地至佳樂水測線（投影至剖面的長度約 15 公里）以及南邊的台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線（投影至剖面的長度約 13 公里）。至 2017 年止，各有 14 次的測量資料。

恆春西台地至佳樂水測線以 GPS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-4.21 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（-11.99 mm/yr）及 2010 年至今之垂直速率（-5.65 mm/yr），作為約制點來校正 G670 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.86 及圖 2-3.87）。

台 26_南樹林至鵝鑾鼻則以 GPS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（-4.31 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（4.47 mm/yr）與 2010 年至今之垂直速率（1.04 mm/yr），作為約制點來校正 Q014 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.88 及圖 2-3.89）。

根據圖 2-3.90 與圖 2-3.91，在歷年高程變化的部分，恆春半島的兩條水準測線在 2006 年以前均無明顯變化，說明 2006 年以前恆春斷層並無顯著之活動性。但在 2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化。恆春西台地至佳樂水測線之點位，最大同震量達-63.1 mm；南樹林至鵝鑾鼻測線，最大同震量達-76.1 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

在垂直速率部分，以斷層東邊約兩公里為分界，兩條測線在震後均呈現不同的運動型態（紅色及藍色部分），西側為沉陷、東側為抬升。其中較南邊的南樹林至鵝鑾鼻測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為 3.7 mm/yr（藍色部分），2010 年至今的平均速率約為-0.9 mm/yr（紅色部分）；較北邊的恆春西台地至佳樂水測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為-1.9 mm/yr（藍色部分），2010 年至今的平均速率約為-0.5 mm/yr（紅色部分），此現象或許可說明在 2006 年震後至 2017 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象。

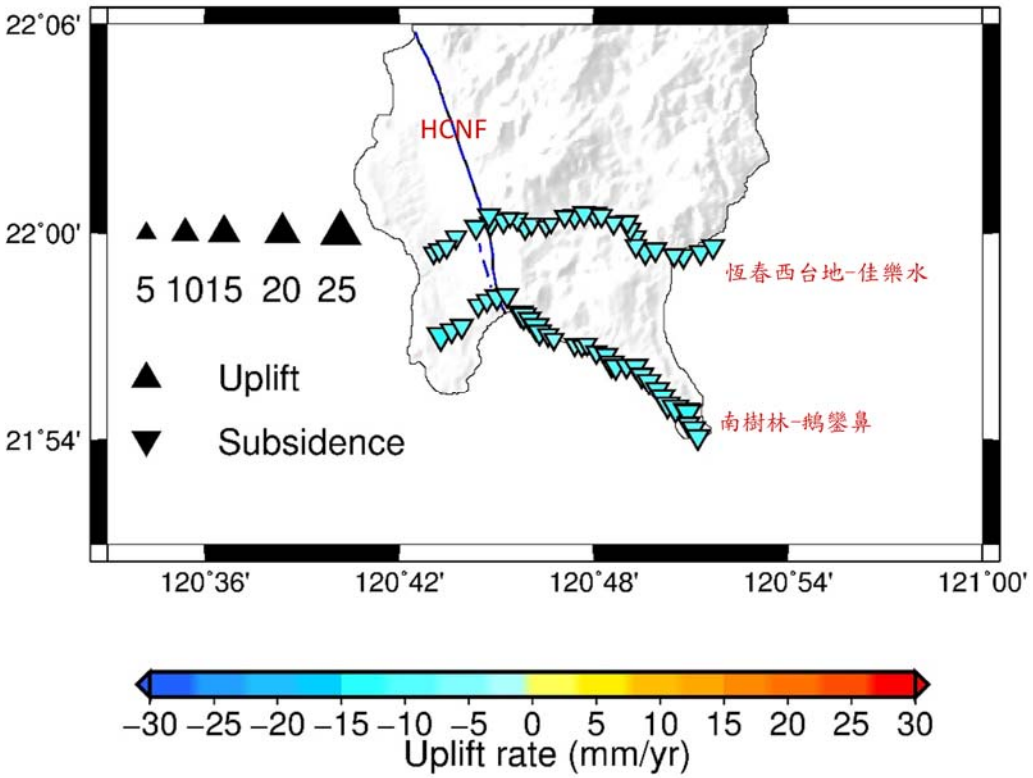


圖 2-3.82：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年 12 月 26 日恆春地震前）。HCNF 為恆春斷層。

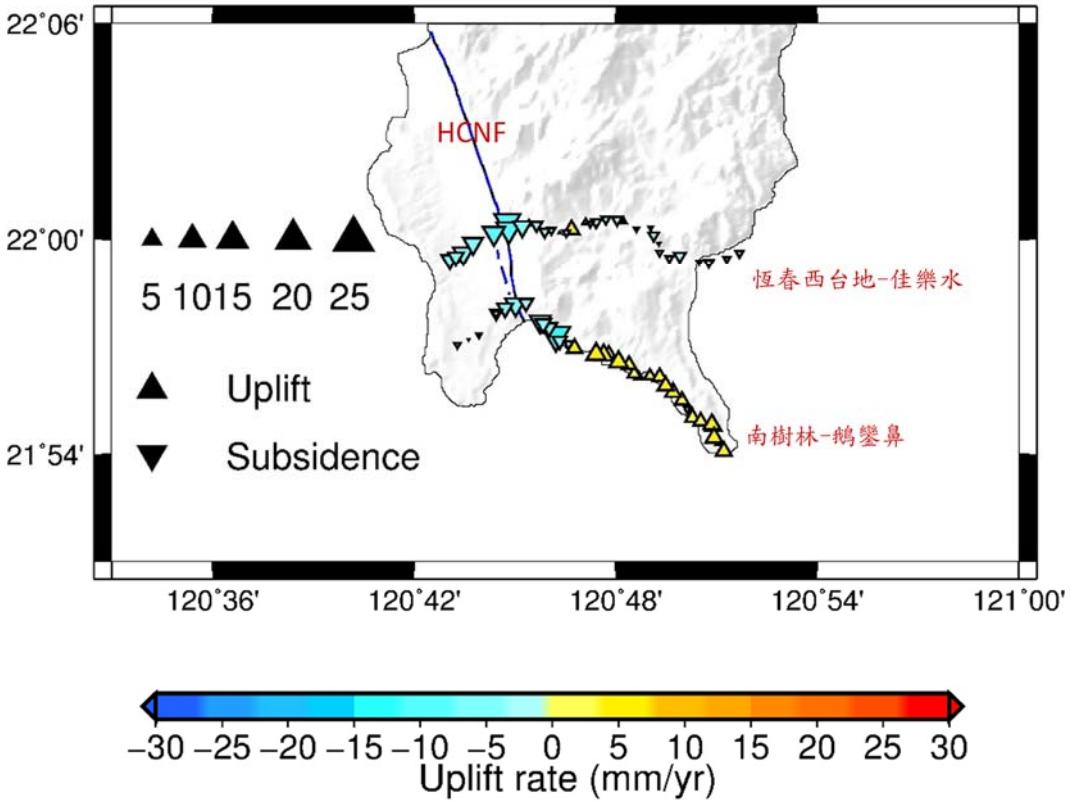


圖 2-3.83：恆春半島之水準垂直速度場（2006 年 12 月 26 日恆春地震後至 2010 年 4 月 2 日速度發生變化）。HCNF 為恆春斷層。

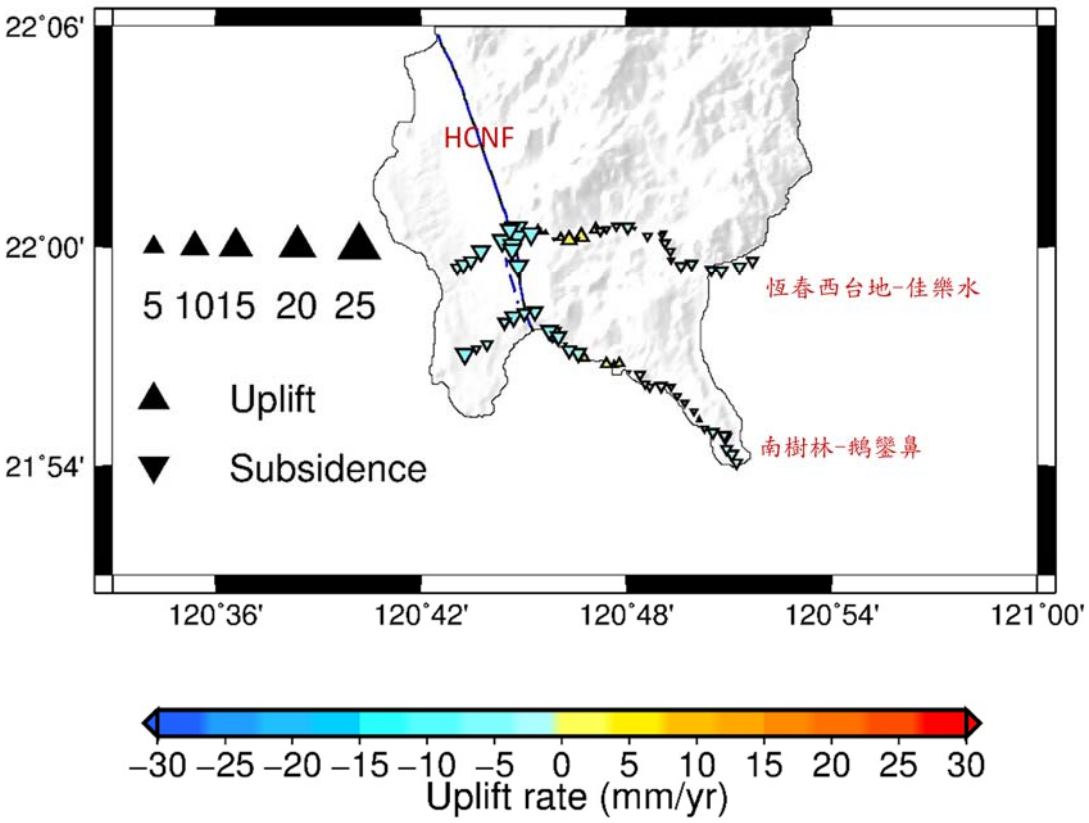


圖 2-3.84：恆春半島之水準垂直速度場（2010 年 4 月 2 日後至 2015 年 1 月 4 日速度發生變化）。HCNF 為恆春斷層。

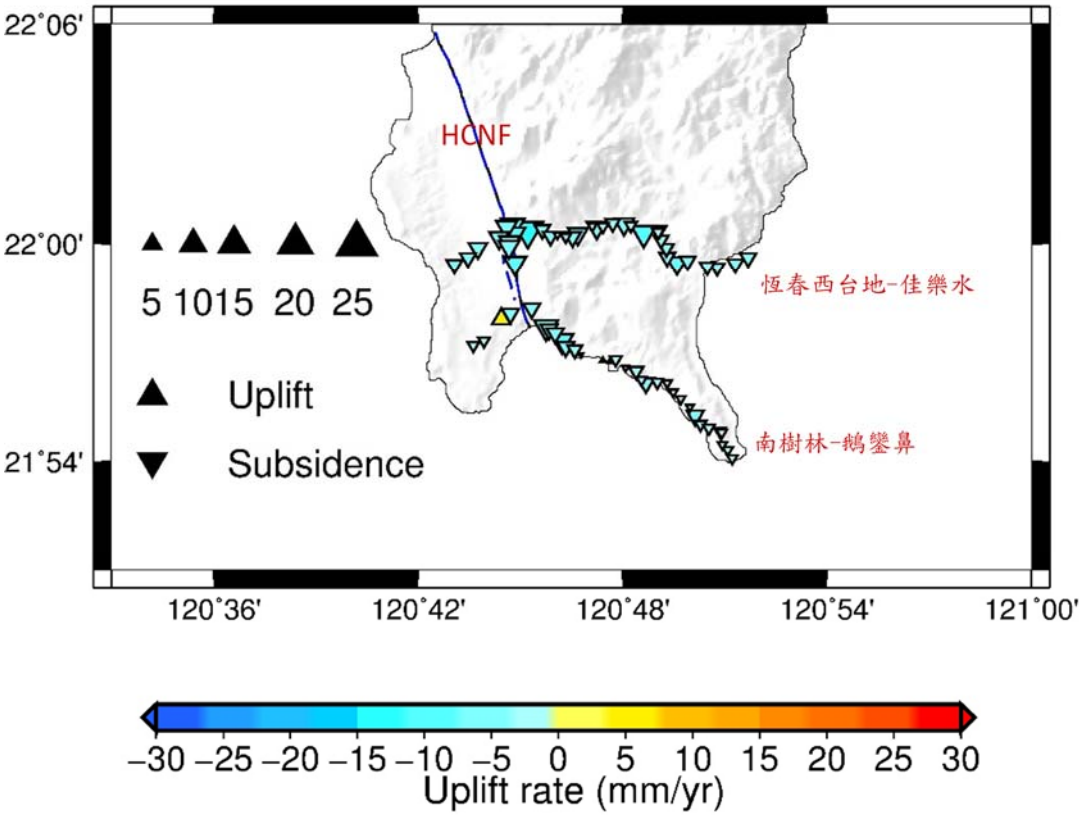


圖 2-3.85：恆春半島之水準垂直速度場（2015 年 1 月 4 日速度發生變化至今）。HCNF 為恆春斷層。

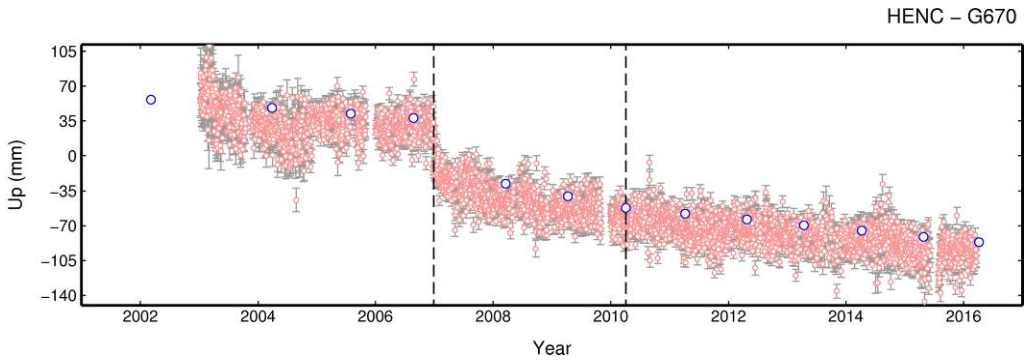


圖 2-3.86：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

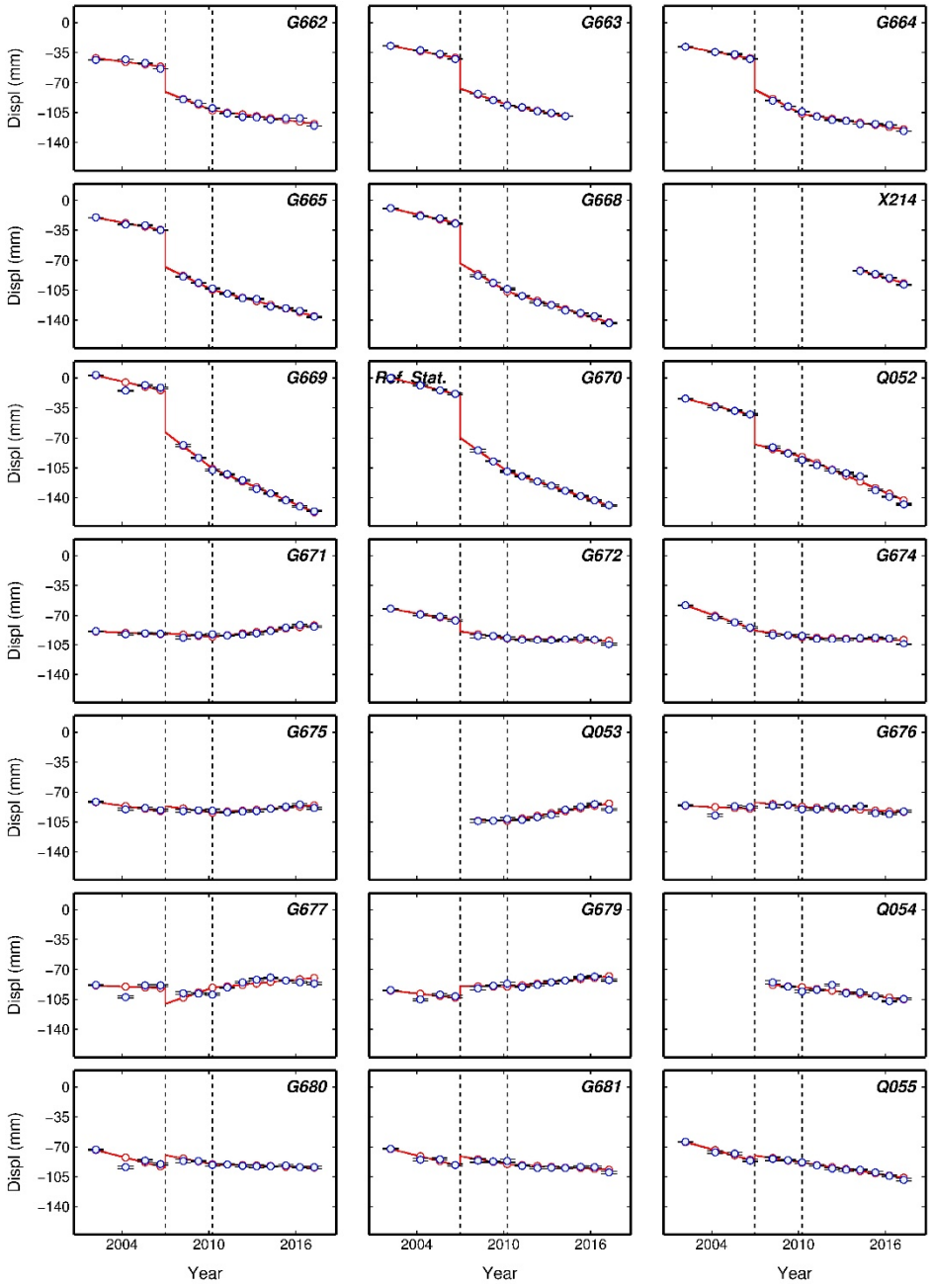


圖 2-3.87：恆春西台地至佳樂水測線之時間序列。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

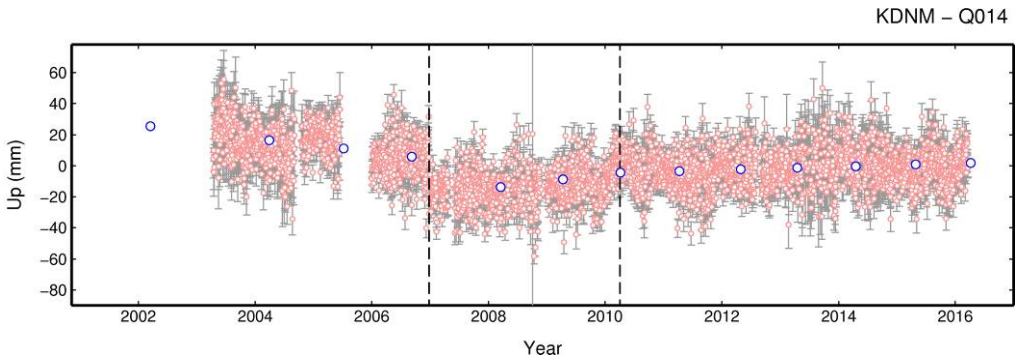


圖 2-3.88：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。虛虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

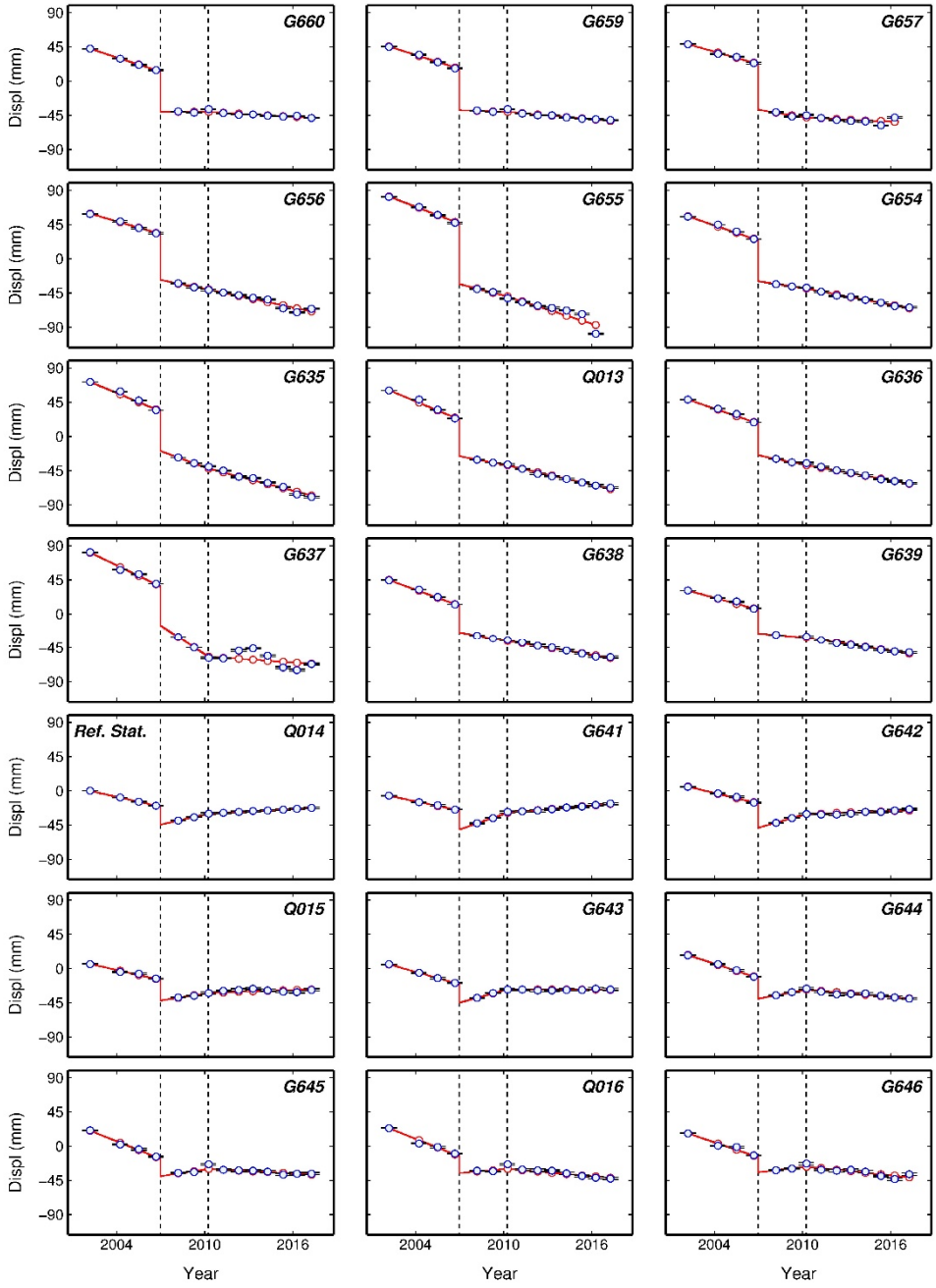


圖 2-3.89：南樹林至鵝鑾鼻測線之時間序列。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2010 年 4 月 2 日速度發生變化。

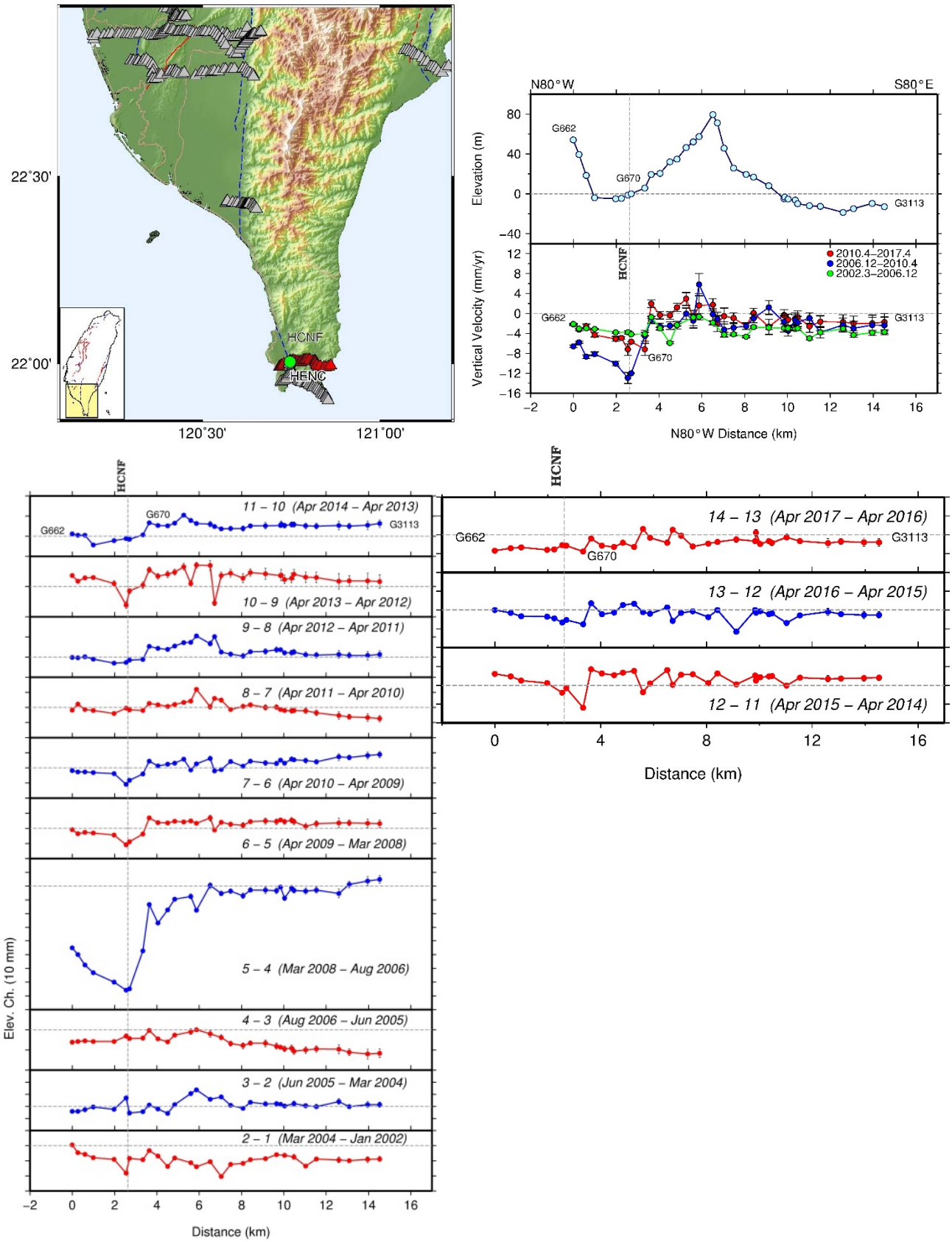


圖 2-3.90：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

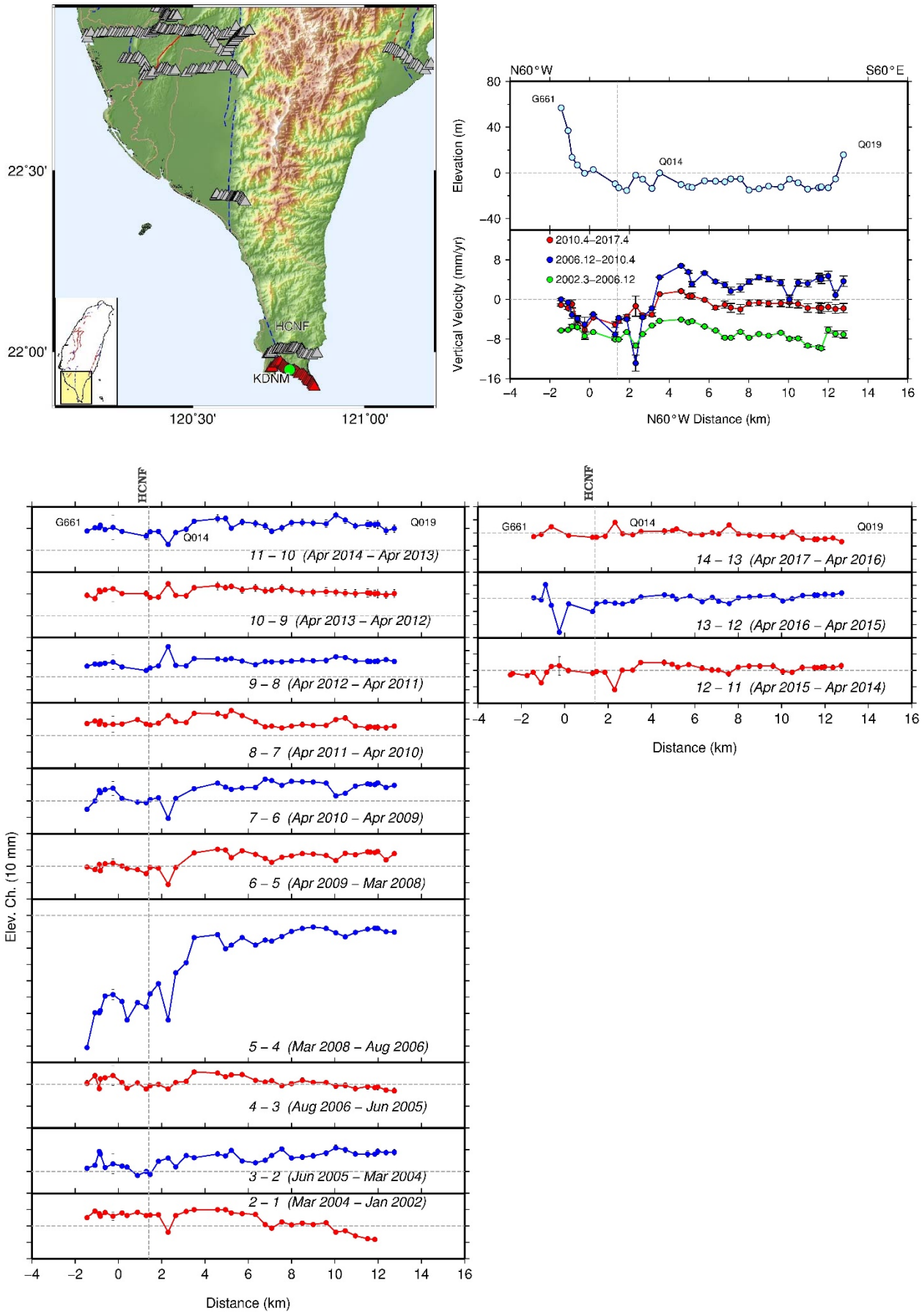


圖 2-3.91：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2010 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2010 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HNCF 為恆春斷層。

2-3-24 台 20_新化至玉井測線

經濟部中央地質調查所於 2016 年 5 月新增橫跨新化斷層與左鎮斷層之台 20_新化至玉井精密水準測線，路線長約 25 公里，包括 55 個點位（圖 2-3.92）。此測線的 J006（新化高中）與善化至關廟測線共點，所以台 20_新化至玉井測線、善化至關廟與安平至龍崎測線可以組成更好的垂直速度場監測網。

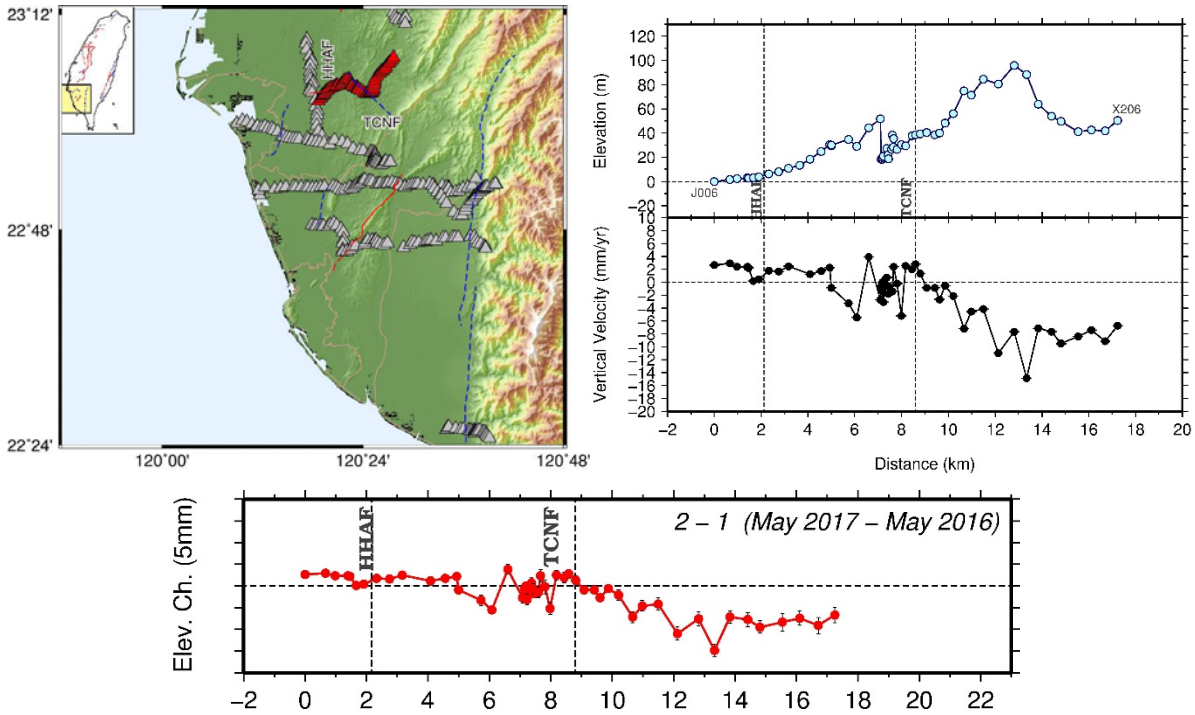


圖 2-3.92：台 20_新化至玉井測線路線圖。紅色三角形為水準路線圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

2-3-25 嶺頂至瀧澗測線

本測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 20 公里，從 2004 年至 2017 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 YENL 之垂直速率（-10.59 mm/yr），作為約制點來校正 G971 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3.94）

根據圖 2-3.95，由精密水準時間序列得知本測線以及相鄰的光復-豐濱、紅葉-靜浦在 2009 年以及 2013 年瑞穗地震後發生速度變化，因此以 2009 年 1 月及 2013 年 10 月為分界，分別求取三段之速度場。

根據圖 2-3.96，此測線在斷層西側之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在斷層東側則不一致。跨斷層之垂直速度為沉降趨勢，速度約由-9.5 mm/yr 降至-10.5 mm/yr，地表高程則約有 2 m 的抬升量。

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

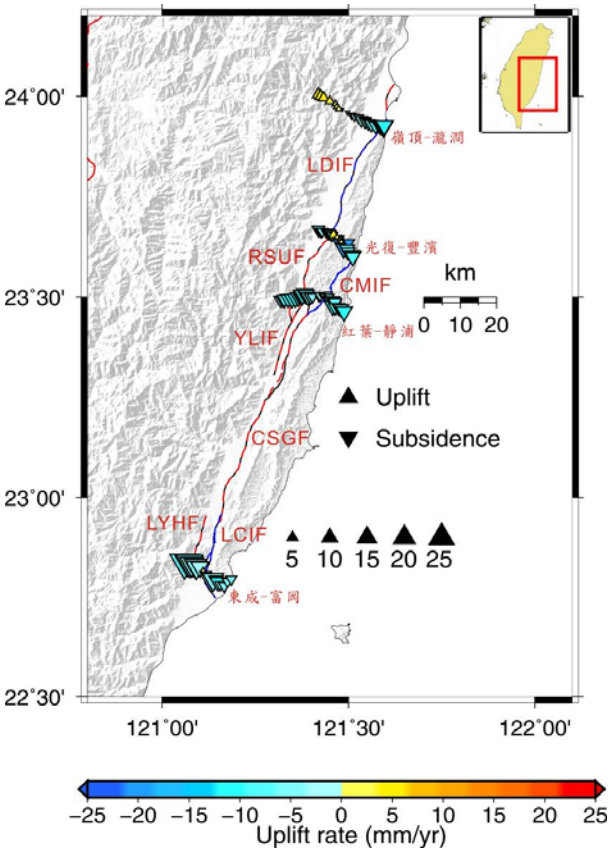


圖 2-3.93：花東地區之垂直速度場。LDIF 為嶺頂斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層、YLIF 為玉里斷層、CSGF 為池上斷層、LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

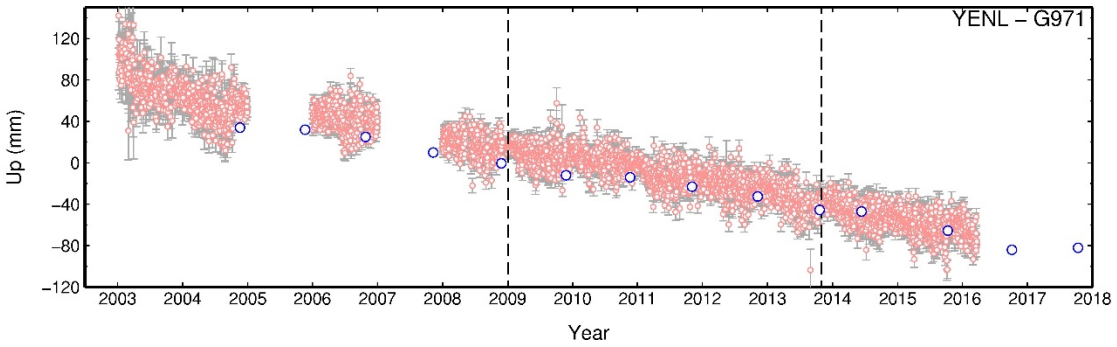


圖 2-3.94：水準點位 G971 與連續站 YENL 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

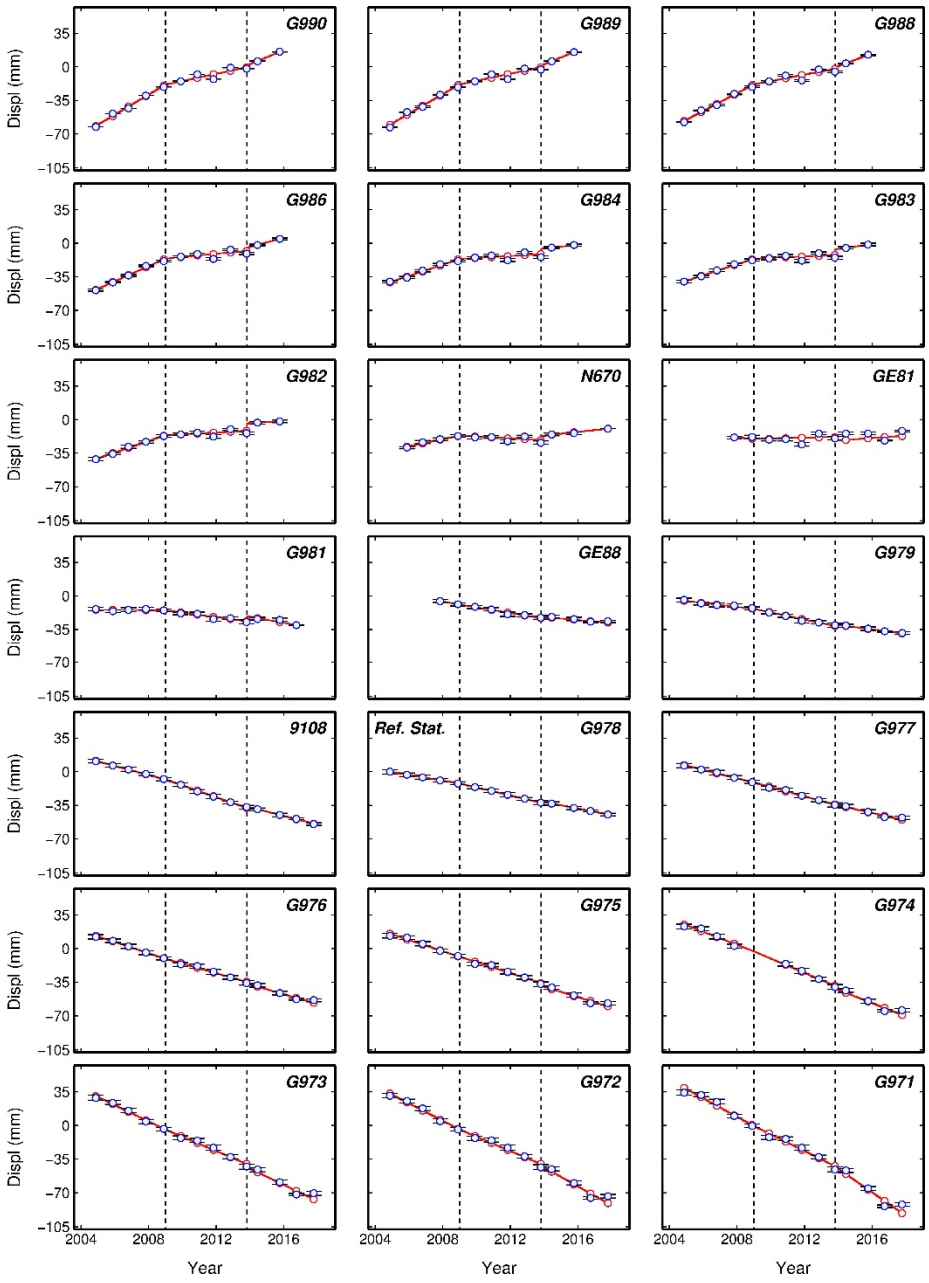


圖 2-3.95：嶺頂至瀧澗之時間序。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

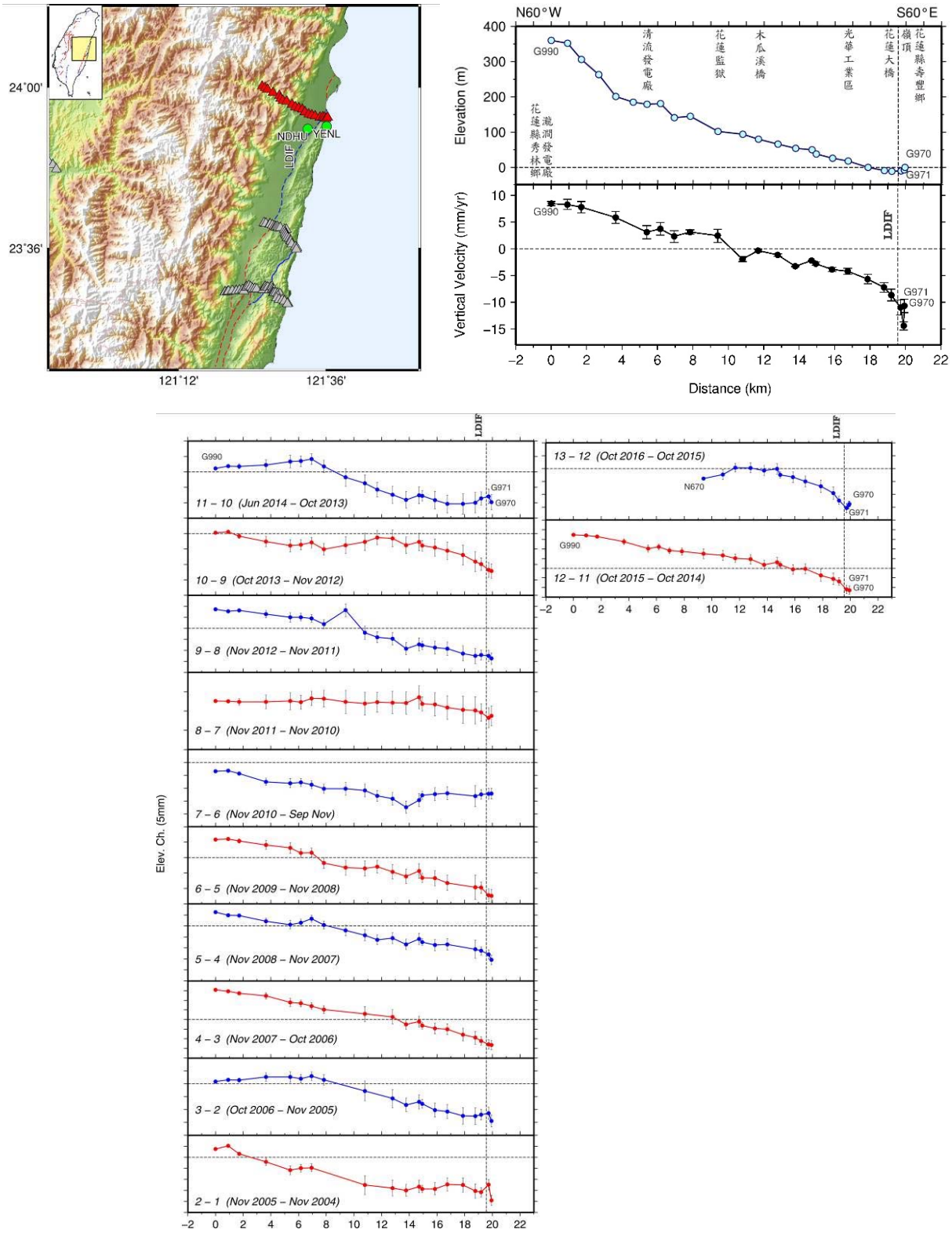


圖 2-3.96：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地直購造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

2-3-26 光復至豐濱測線

本測線橫跨瑞穗及奇美斷層，測線長約 12 公里，從 2004 年至 2017 年共計有 15 次施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 FENP 之垂直速率（-9.03 mm/yr），作為約制點來校正 G991 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3.97）

根據圖 2-3.99，此測線在奇美斷層以西之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在奇美斷層東側則不一致。在跨奇美斷層後之地表高程約有 4.5 m 的沉陷量，而垂直速度則從-10.7 mm/yr 緩升至 -9.6 mm/yr。另在瑞穗斷層西側之垂直速度約落在-6.5 mm/yr 至-3.8 mm/yr，跨斷層後則逐漸抬升至 3.8 mm/yr。另外，根據歷年高程變化（Sep 2013 - Oct 2013）可知，2013 年 10 月 31 日瑞穗地震在奇美斷層西側造成顯著抬升，同震位移量達 100 mm，抬升量較南邊的紅葉-靜浦測線大（20 mm）。

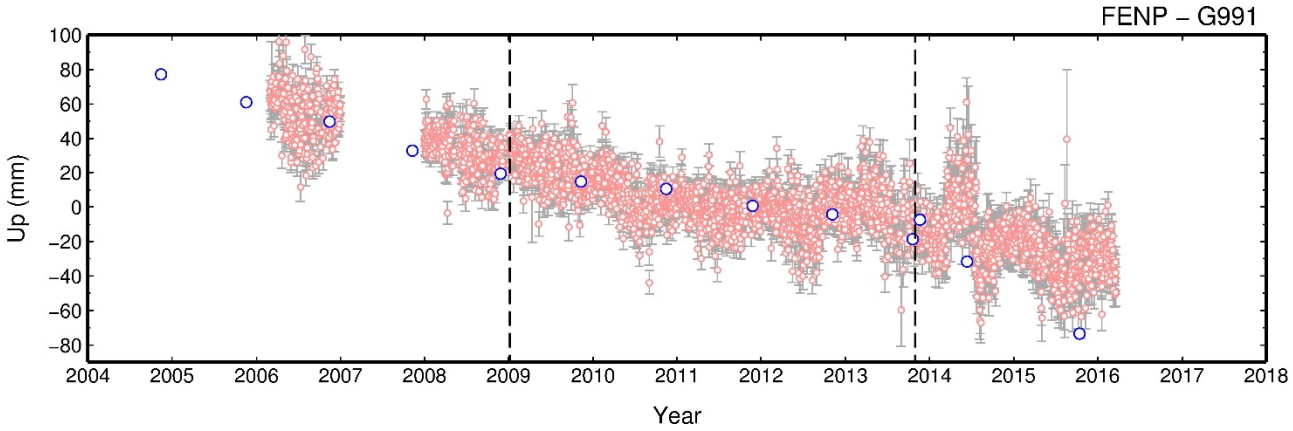


圖 2-3.97：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

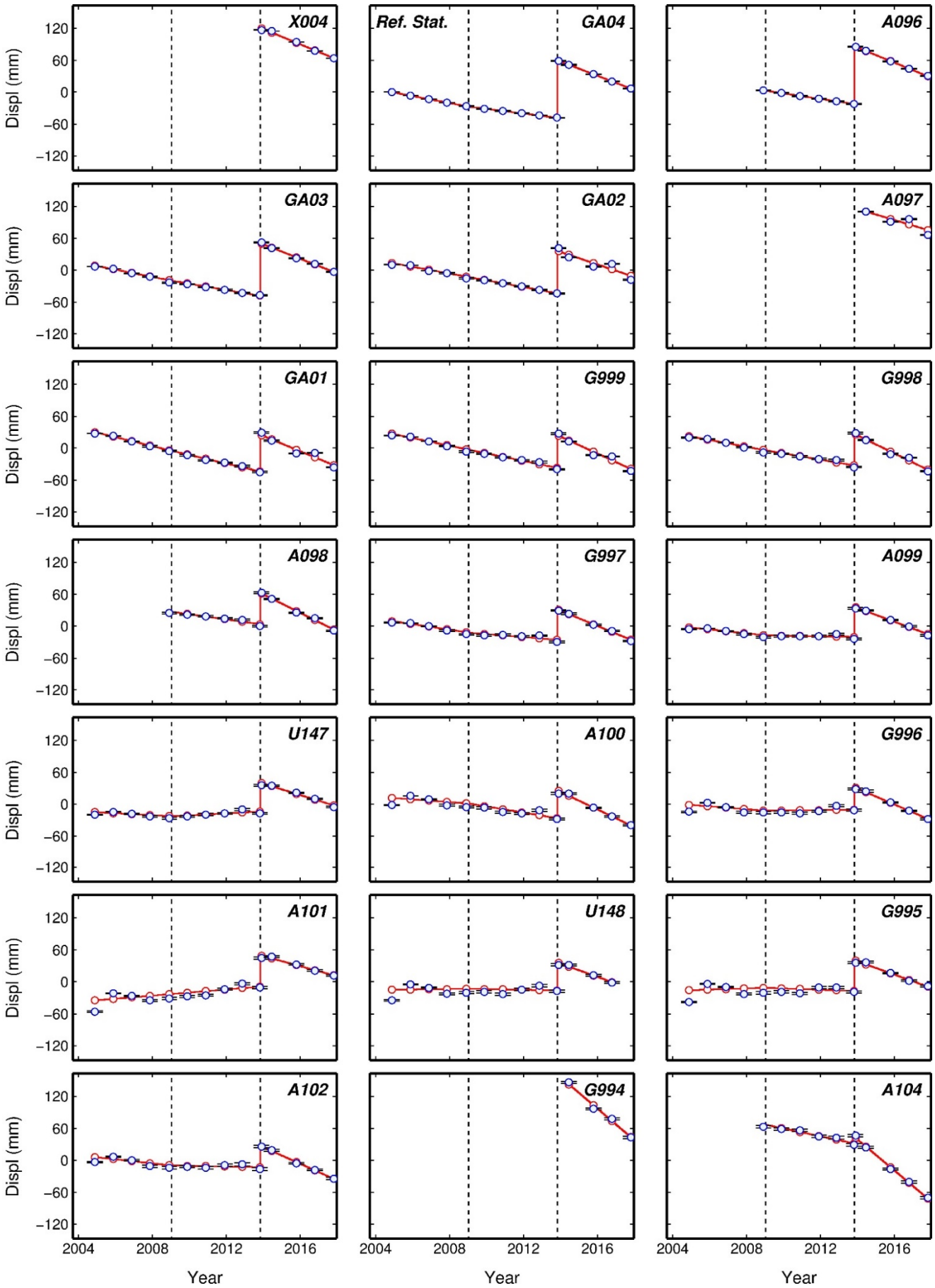


圖 2-3.98：光復至豐濱測線之時間序列。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

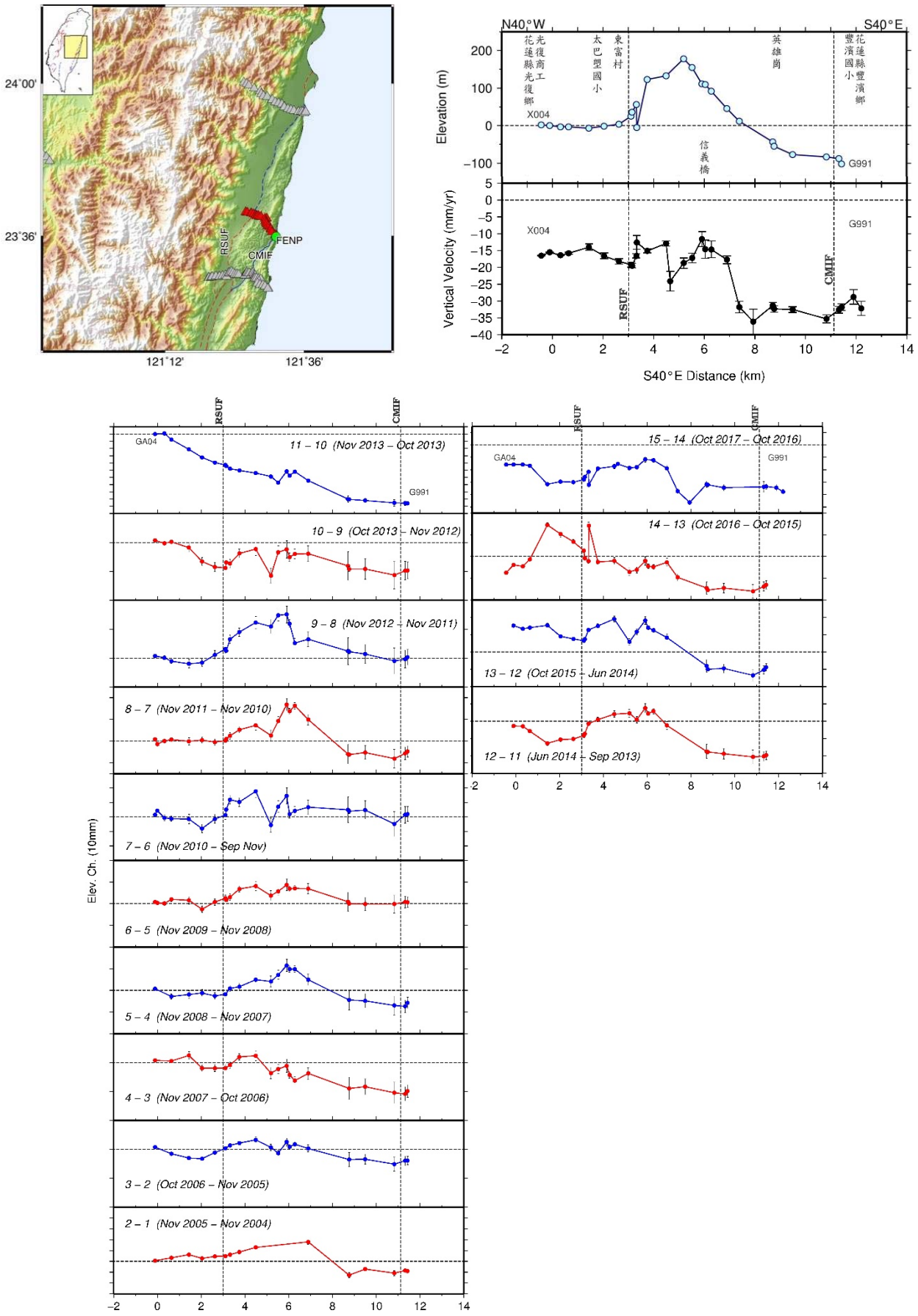


圖 2-3.99：光復至豐濱水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

2-3-27 紅葉至靜浦測線

本測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層，測線長約 18 公里，2004 年至 2017 年間進行共 15 次的施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（-2.01 mm/yr），作為控制點來校正 GA22 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3.100）

根據圖 2-3.102，此測線在玉里斷層左側之垂直速度約由-6 mm/yr 降至-11 mm/yr，在玉里斷層東側至奇美斷層西側，速度變化約由-12 mm/yr 緩升至-1 mm/yr，可說明此測線跨過的三條斷層仍有地質活動。另外，根據歷年高程變化（Nov 2013 - Oct 2013）可知，2013 年 10 月 31 日之瑞穗地震在奇美斷層西側造成顯著抬升，同震位移量達 20 mm，抬升量較北邊光復-豐濱測線小（100 mm）。

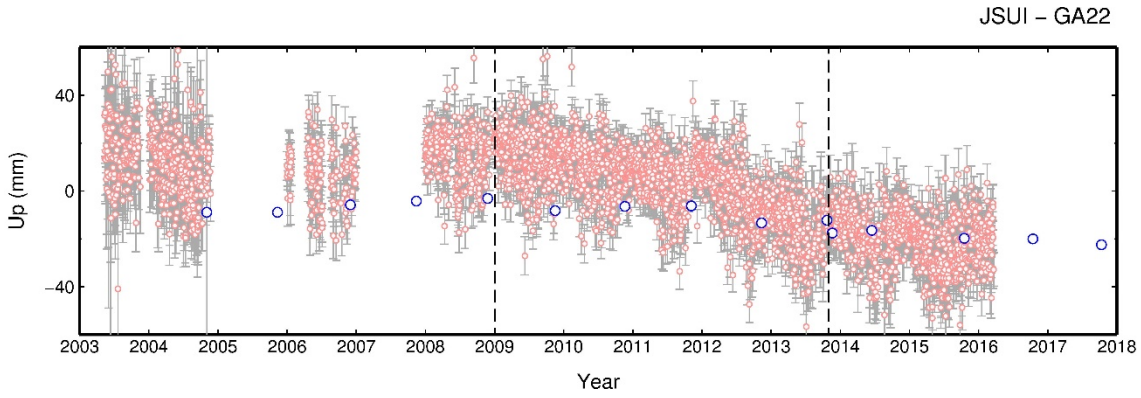


圖 2-3.100：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

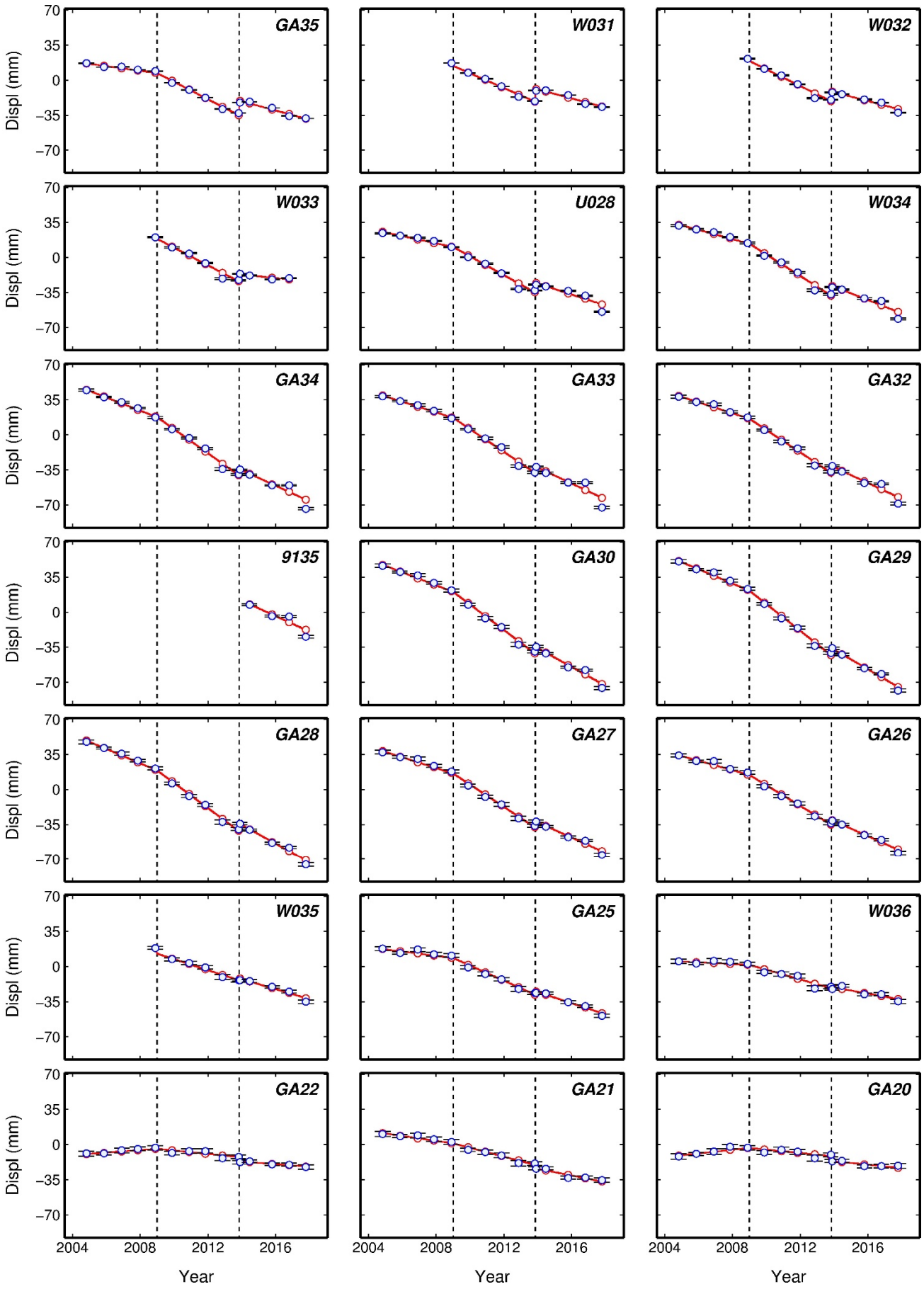


圖 2-3.101：紅葉至靜浦測線之時間序列。左邊虛線為 2009 年 1 月 4 日速度變化分界；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

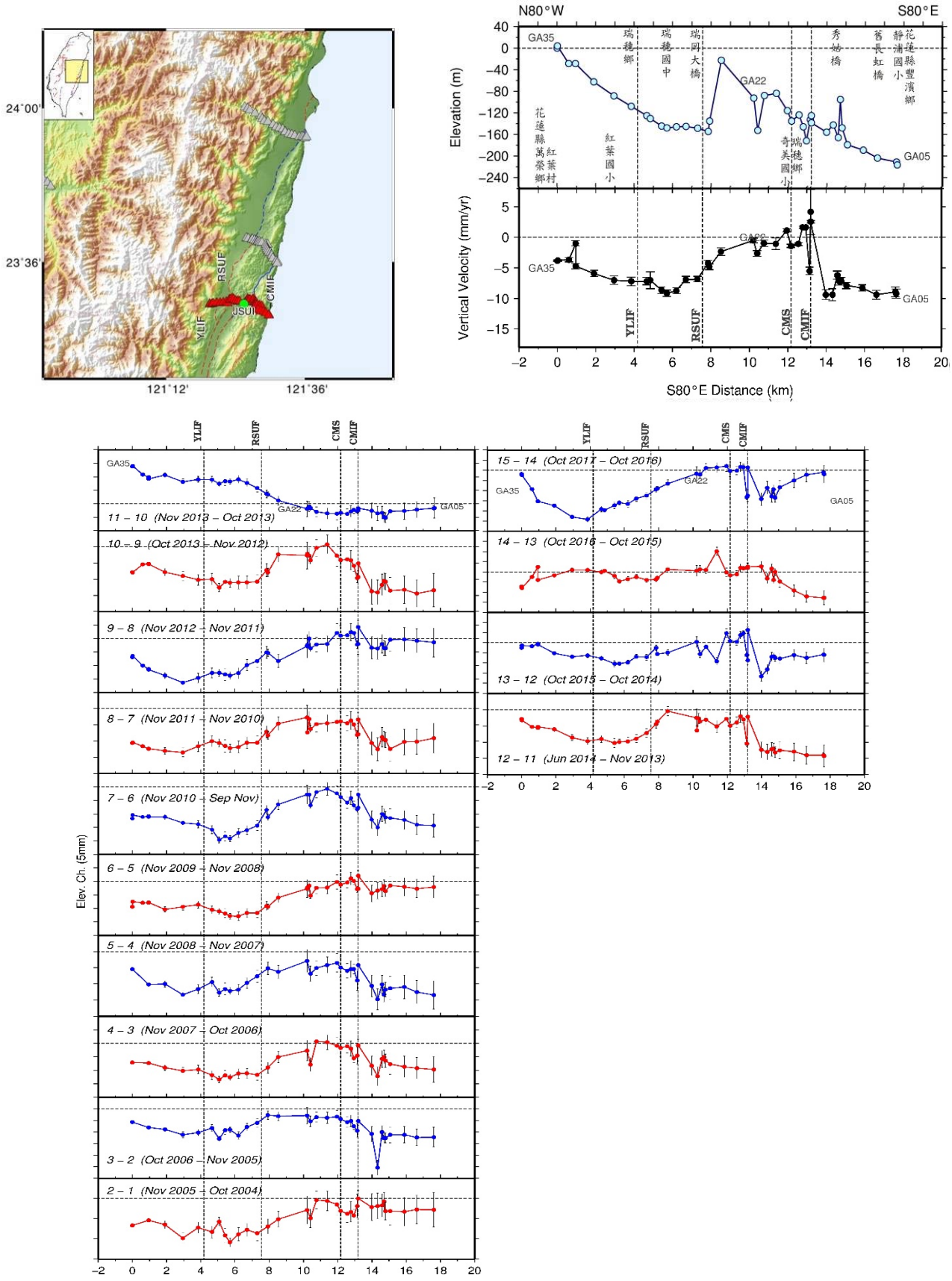


圖 2-3.102：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

2-3-28 東成至富岡測線

本測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層，測線長約 14 公里，2009 年至 2017 年間共進行 9 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 之垂直速率（-4.86 mm/yr），作為控制點來校正 A086 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3.103）

根據圖 2-3.105，此測線之垂直速度在利吉斷層兩側有不同的形態，西側從東成跨過鹿野斷層到岩灣國小一帶，垂直速度約由-8 mm/yr 上升至 0.3 mm/yr；東側（岩灣國小至富岡）則約由 0 mm/yr 下降至-4.8 mm/yr。；此外，從歷年高程變化來看，2014 年至 2015 年間，鹿野斷層以東有顯著的抬升，最大變化量達 25 mm；2015 年至 2016 年間，在鹿野斷層以西約 2 公里處則約有 20mm 的變化量，或許可說明鹿野斷層近期仍有活動。

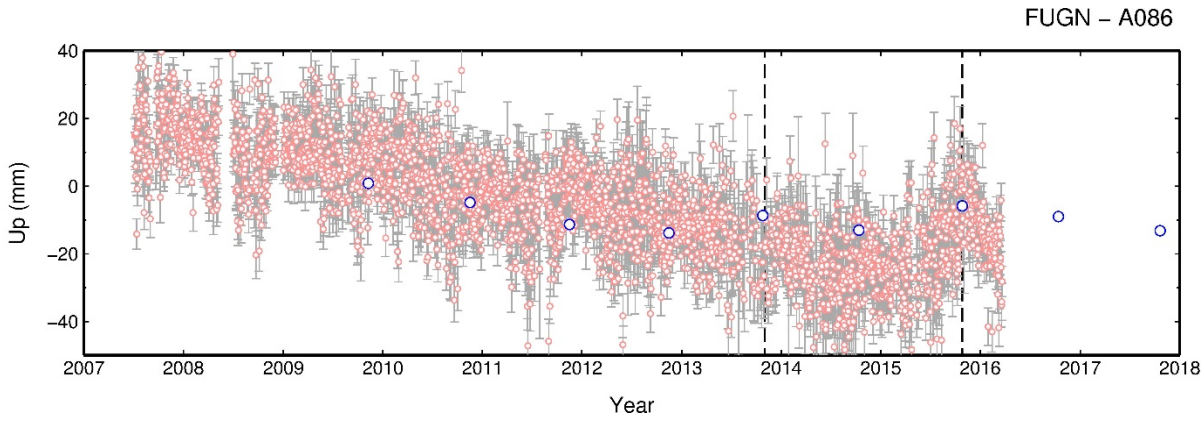


圖 2-3.103：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為一速度變化分界。

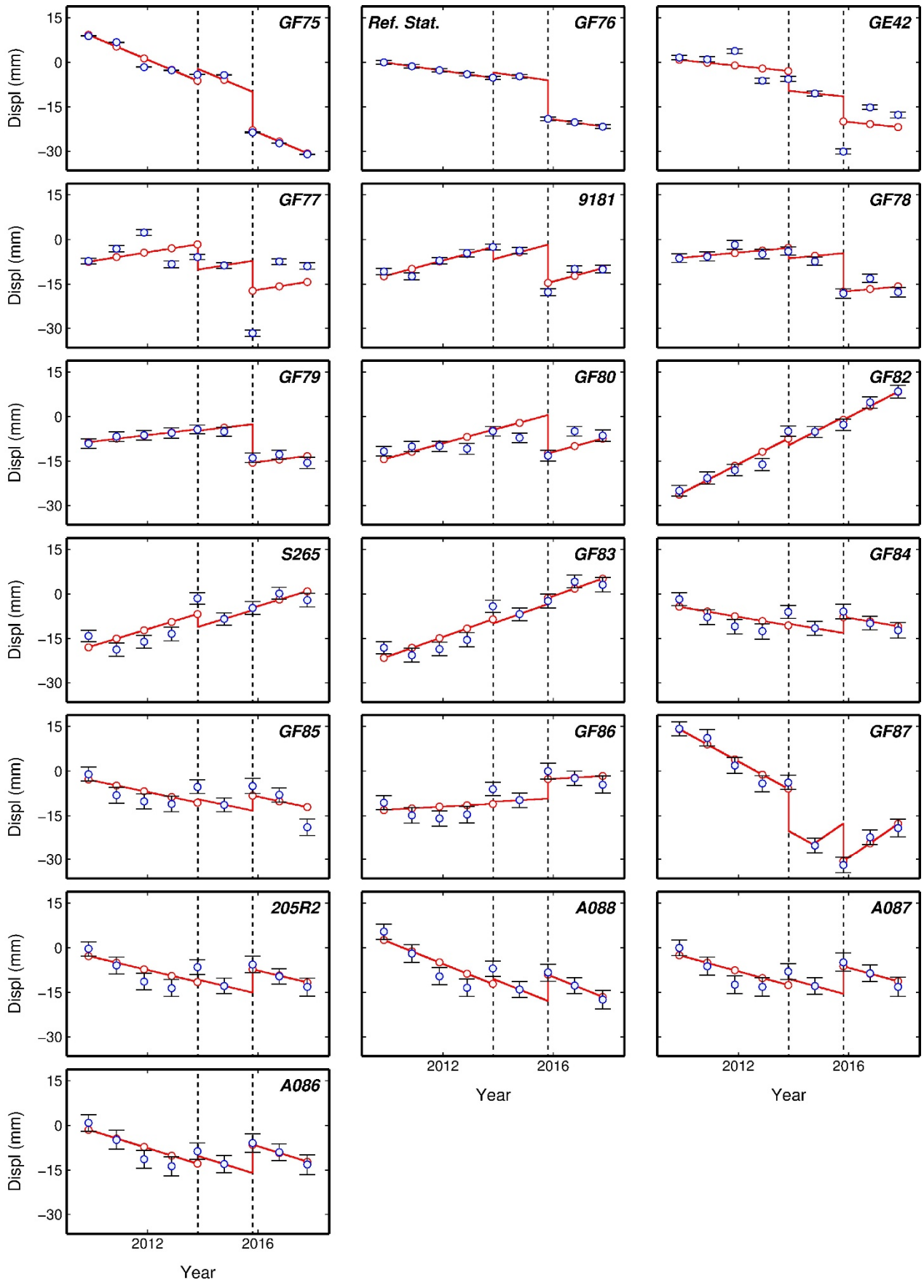


圖 2-3.104：東成至富岡測線之時間序列。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為一速度變化分界。

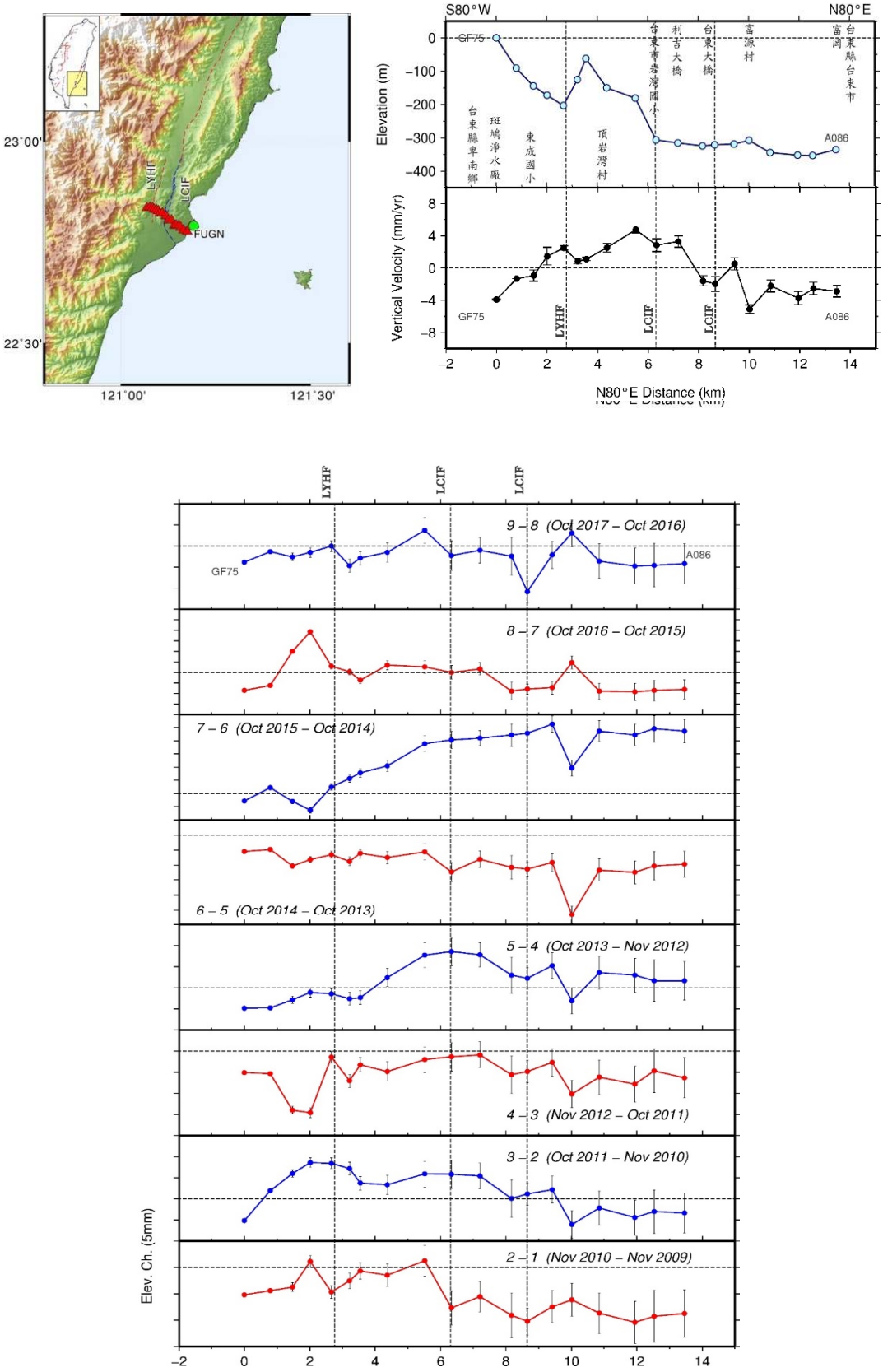


圖 2-3.105：東成至富岡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

2-3-29 梗枋-東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長約 44 公里，2011 年至 2017 年間共進行 7 次施測。本測線以 GPS 連續站 SUAO 之垂直速率（-6.87 mm/yr），作為控制點來校正 GG83 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。（圖 2-3.107）

根據圖 2-3.109，該測線由宜蘭縣頭城鎮沿台 2 線至蘇澳鎮再轉接台 9 線至南澳鄉東澳村。在梗枋至蘭陽隧道前皆為蘭陽平原地區，故地表高程起伏較小，但自頭城鄉烏石港至五結鄉傳藝中心一帶，垂直速度約從 0 mm/yr 降至-15 mm/yr，，歷年高程（Oct 2015 – Oct 2014）也有 20 mm/yr 的變化量，顯示該區有地層下陷之情形。通過蘭陽隧道至東澳嶺一帶為丘陵及山地地形，因此地表高程有明顯的起伏。測線終點東澳一帶為三角洲，因此過東澳嶺一帶地形呈現下降的趨勢，垂直速度約在-5 mm/yr 至-13 mm/yr 之間。

水準點位 9053（永平橋）位於蘇花公路 116 公里處，近幾年有 3~7 公分的下陷。（圖 2-3.110）經現地勘查發現，該處有坍方情況發生，建議停止測量此點並另尋地基較穩固之處重新埋設此點，避免測量人員危險，另在運用資料時排除該點數據。

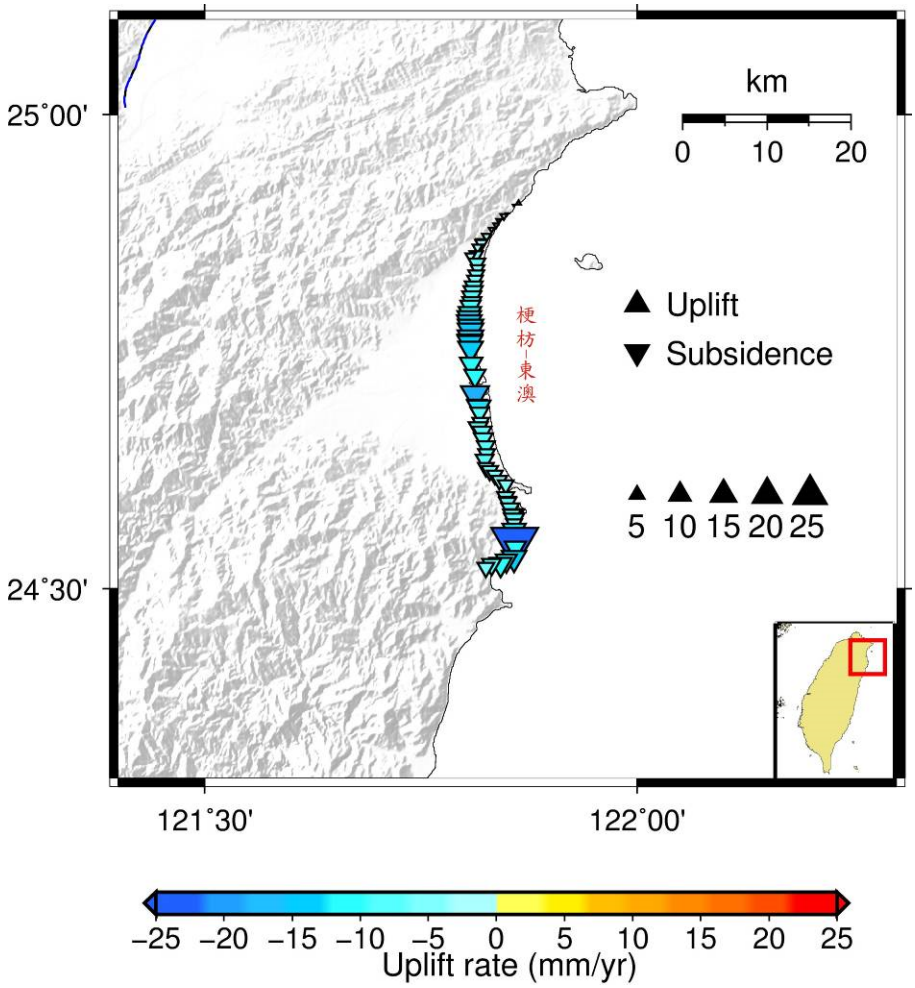


圖 2-3.106：宜蘭地區之水準垂直速度場。

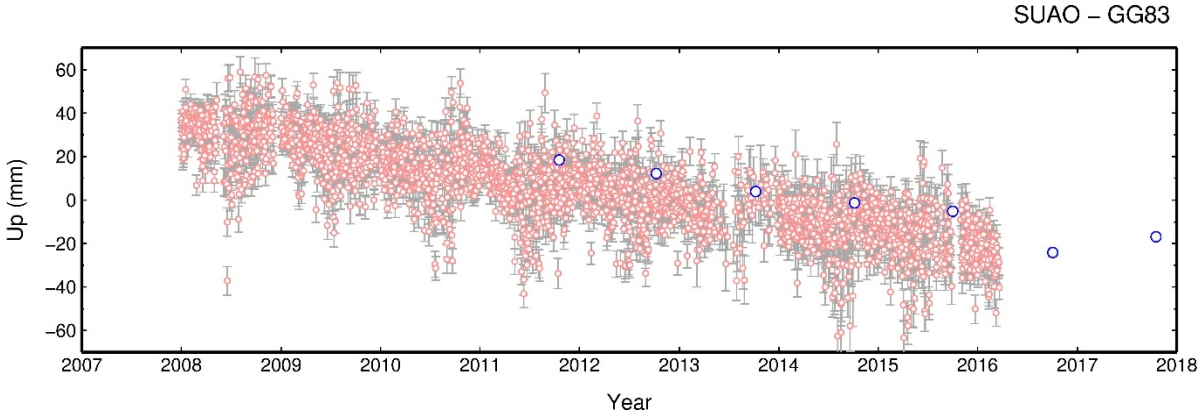


圖 2-3.107：水準點位 GG83 與連續站 SUAO 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

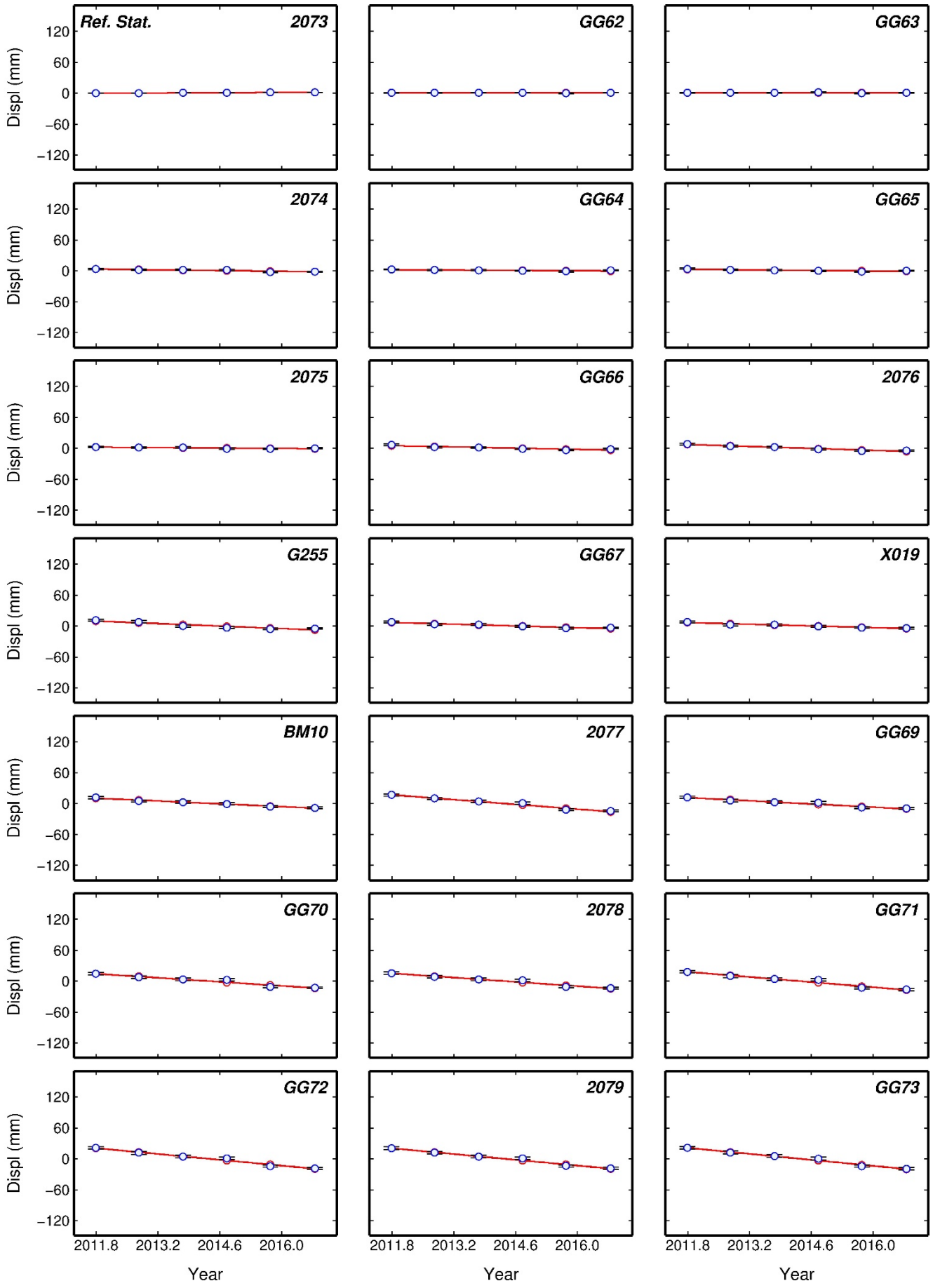


圖 2-3.108：梗枋至東澳測線之時間序列。

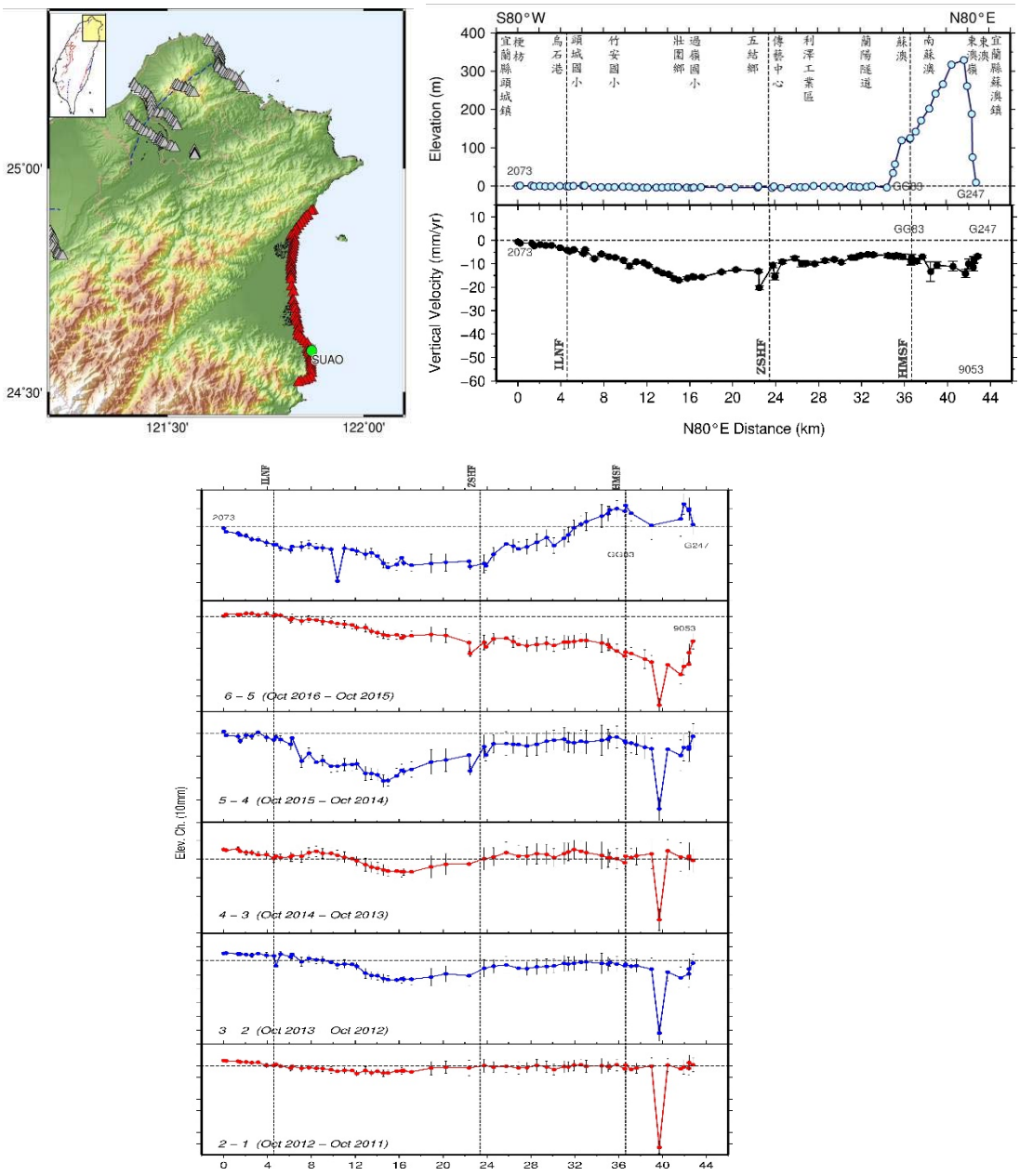


圖 2-3.109：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水-梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。



圖 2-3.110：水準點位 9053 現地狀況。

2-4 全臺速度場

2-4-1 全臺速度場

藉由檢視 GPS 連續站及精密水準測量之坐標時間序列可發現，地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此我們針對 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震等，以及發生速度場變化之轉折點，分別為 2007 年 1 月（中部地區）、2009 年 1 月（東部地區）、2010 年 4 月（恆春地區）、2015 年 1 月（恆春地區），分為九個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-4.1 及圖 2-4.2。

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，值約 60 mm/yr，恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41~62 mm。

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

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

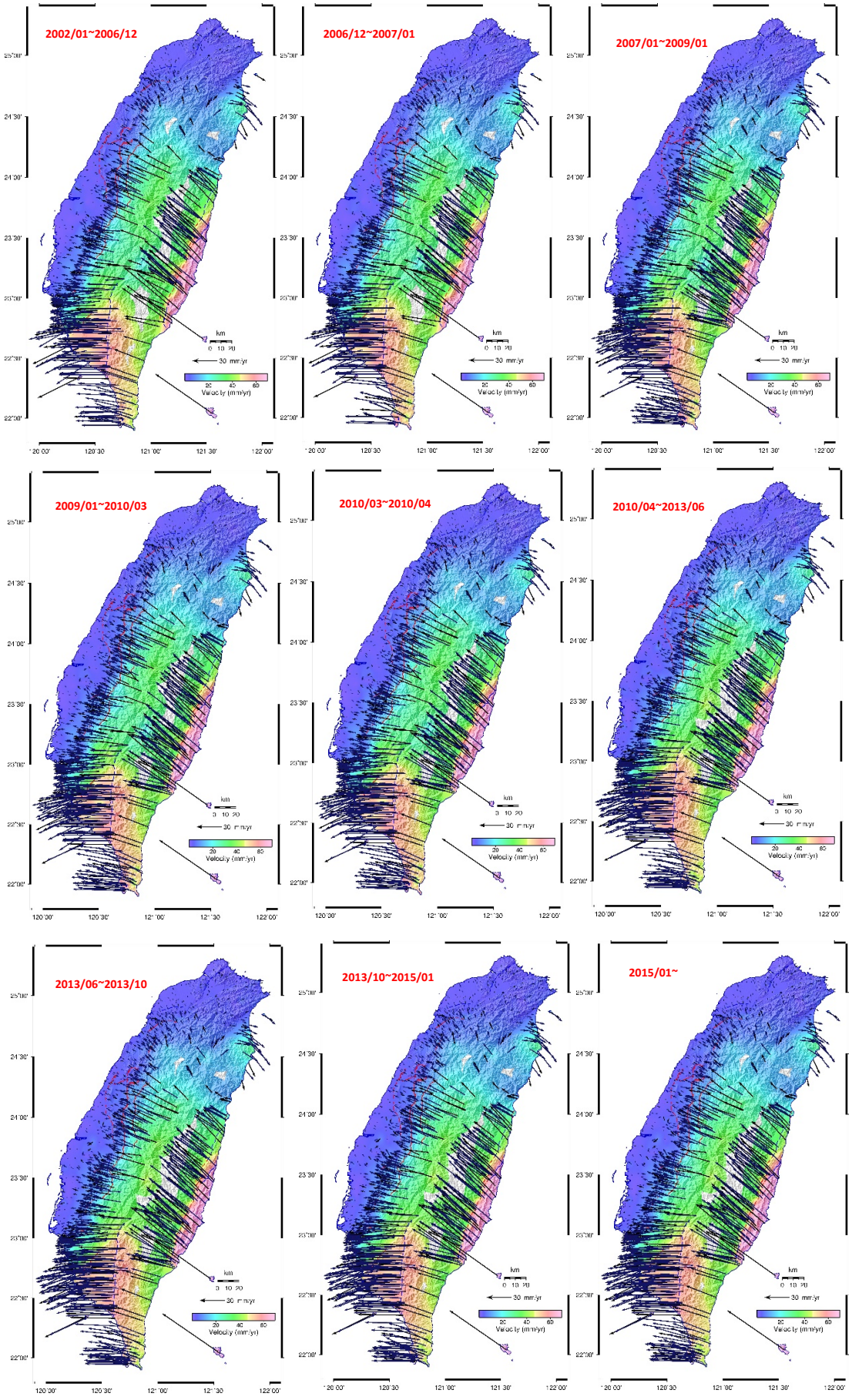


圖 2-4.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。

根據圖 2-4.2，大臺北地區之四條精密水準，皆為穩定沉陷，垂直速度大約落在-10 mm/yr 內。桃園地區之精密水準，除跨湖口斷層附近點位有些微的抬升速度(約 0 至 1 mm/yr)，其餘點位之垂直速度約在-2 至 0 mm/yr。新竹地區之兩條精密水準在跨斷層速度並無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。苗栗地區之精密水準在跨斷層變化也不顯著，速度皆約在-5 mm/yr 上下。台中地區之兩條精密水準在跨斷層也無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。彰化、南投地區之精密水準在沿海一帶有相當大的沉陷量，最大沉陷速度達到-40 mm/yr，而進入南投山區最大有約 10 mm/yr 的抬升速度。雲林、嘉義地區之精密水準，在沿海一帶的垂直速度約為-20 至-15 mm/yr，而進入山區則約有 3 mm/yr 的抬升速度。台南地區之北門-楠西測線，也是呈現沿海沉陷、山區抬升的現象，平均垂直速度分別為-10 mm/yr 與 7 mm/yr；善化-關廟測線除少數點位沉陷，其餘大多落在 0-4 mm/yr 之間；安平-龍崎測線在龍船斷層附近約有 20 mm/yr 的速度變化，而高雄地區的路竹–茂林測線同樣也在龍船斷層南接之車瓜林斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，岡山-安坡測線在小岡山斷層西側約有-10 mm/yr，東側則約在-3 至 0 mm/yr，由於此一系列地表垂直速度場之空間變化有可能是受到背衝斷層、活動褶皺或是泥貫入體的影響所造成，所以和龍船斷層或車瓜林斷層的具體關聯性，需要其他更多的地球物理觀測，如高精度之地震層析成像、地電、重力等，來協助解析。屏東地區之佳冬-七佳測線，在潮州斷層以西約有-20 mm/yr 的沉陷速度，東側則無顯著變化。恆春半島地區的時間段為 2010 至 2017 年，在恆春斷層以東有些微的抬升現象，速率約 3 mm/yr。宜蘭地區之梗枋-東澳測線在頭城鎮至五結鄉一帶，垂直速度最大達-18 mm/yr，進入蘇花公路(蘇澳至東澳段)，垂直速度則約在-10 mm/yr。花蓮地區之嶺頂-瀧澗測線之垂直速度，由西向東一路遞減，約由 5 mm/yr 降至-10 mm/yr；光復-豐濱測線僅在跨瑞穗斷層後在海岸山脈一帶約有 5 mm/yr 之抬升速度；紅葉-靜浦測線之垂直速度皆為負值，但在跨瑞穗斷層後由約由-10 mm/yr 升至-1 mm/yr。台東地區之東成-富岡測線之垂直速度在利吉斷層兩側有不同的運動型態，西側為抬升（約由-8 mm/yr 上升至 0.3 mm/yr），東側為沉降（0 mm/yr 下降至-4.8 mm/yr）。

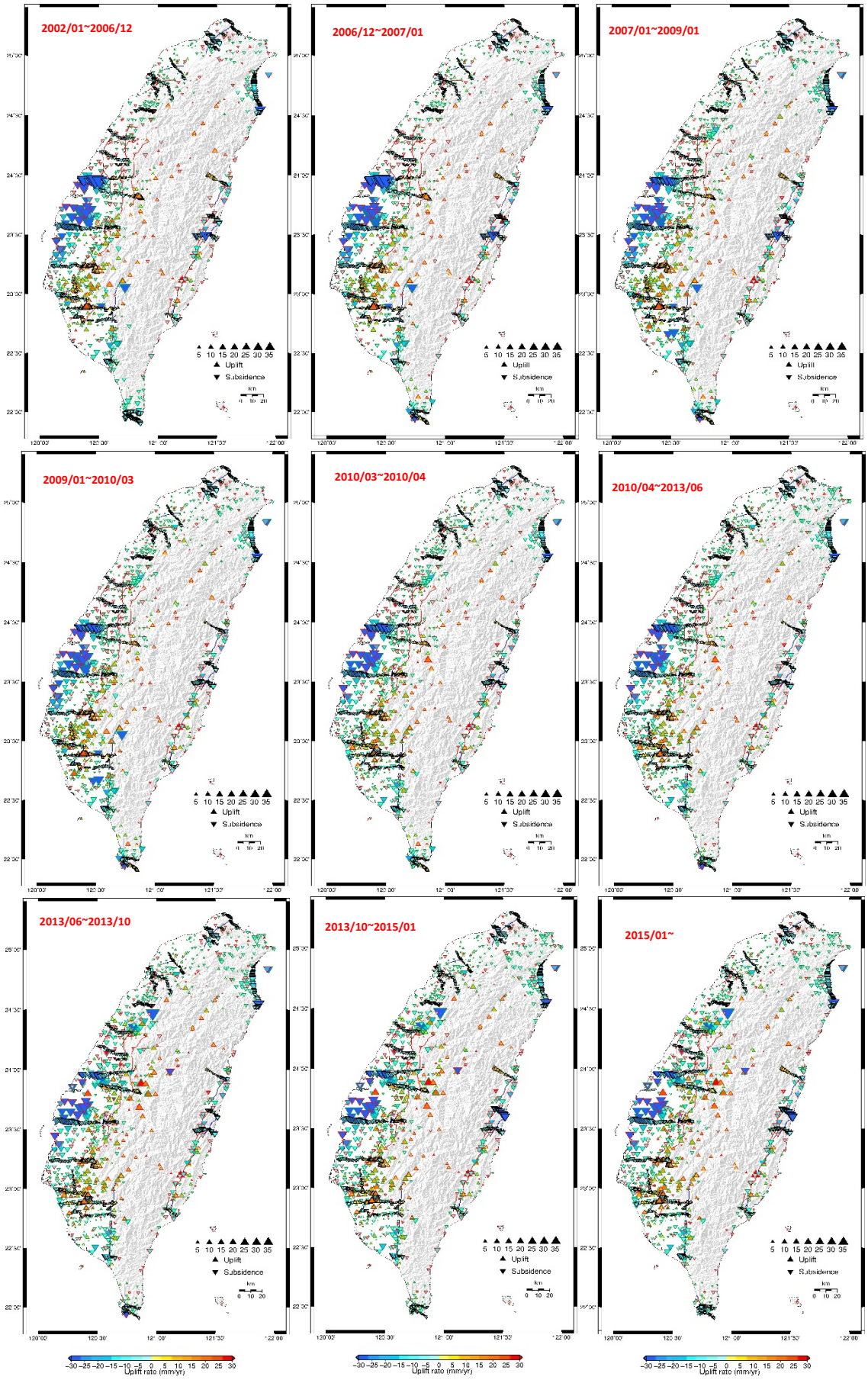


圖 2-4.2：2002 年至 2017 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

2-4-2 臺灣活動斷層潛勢圖

於 2017 年 10 月 05 日至中央地質調查所進行第 1 次會議，討論如何呈現製作第一版之臺灣地表變形圖(圖上同時標示相關重要構造) 。經討論後與中興社配合，成大團隊共需繪製 1 張 A1 大圖、4 張 A5 小圖。大圖為應變速率，小圖分別為垂直速度場、水平速度場、剪應變及旋轉率，並將成果圖檔提供給中興社整合繪製。

應變速率圖(圖 2-4.3)說明應變速率反映的是各測站間的水平速度梯度變化，不會因為速度參考點的選擇不同而有所差異。擠壓和伸張往往對應逆斷層與正斷層的活動。此外，利用應變速率的空間分布特性，可以協助判斷各區域應變累積行為及其地震危害度。而為了呈現臺灣造山帶的地表變形型態，在選擇速度場參考點位時，希望能選擇造山帶外圍但是又接近造山帶的點位，所以最終沿用余水倍先生的建議，採用位於澎湖 S01R 的測站當成臺灣地區速度場之參考點。圖檔格式，經緯度圖框需不留白吻合 A1 尺寸，經緯度座標繪製於圖框內，不考慮地質分區，並將海底及陸地地形加入，色階底圖以紅藍色系表現應變場，加入 GPS 連續站、移動站、水準點位，不同資料點位以不同圖案做區分，另需標示出資料相對站站號(S01R)。

小圖圖檔格式，不需繪製經緯度圖框、比例尺及臺灣外島，僅繪製臺灣本島及圖說。垂直速度場小圖，色階底圖以紅藍色系表現速度變化，箭頭符號呈現 GPS 垂直速度場及水準資料，另外嘗試加入 GPS 點位。水平速度場小圖，色階底圖以彩紅色系(seis)表現水平變化。

水平速度場圖(圖 2-4.4)說明由 GNSS 移動站與 GNSS 連續站的坐標變化量推求出臺灣地表相對 S01R 測站之水平運動量與方向。

垂直速度場圖(圖 2-4.5)說明由精密水準、GNSS 移動站與 GNSS 連續站的坐標變化量推求出臺灣地表相對 S01R 測站之垂直運動量與方向。

剪應變率圖(圖 2-4.6)說明根據水平速度場推求之剪應變率，主要可以反映走向滑移斷層之運動行為。

旋轉率圖(圖 2-4.7)說明根據水平速度場推求之旋轉率，主要可以反映臺灣不同區域之塊體旋轉行為。

與中興社多次信件往來討論更新 5 張圖之呈現內容，最後由中興社彙整，目前完成更新至第三版臺灣水平速度場及活動斷層潛勢圖(圖 2-4.10)。

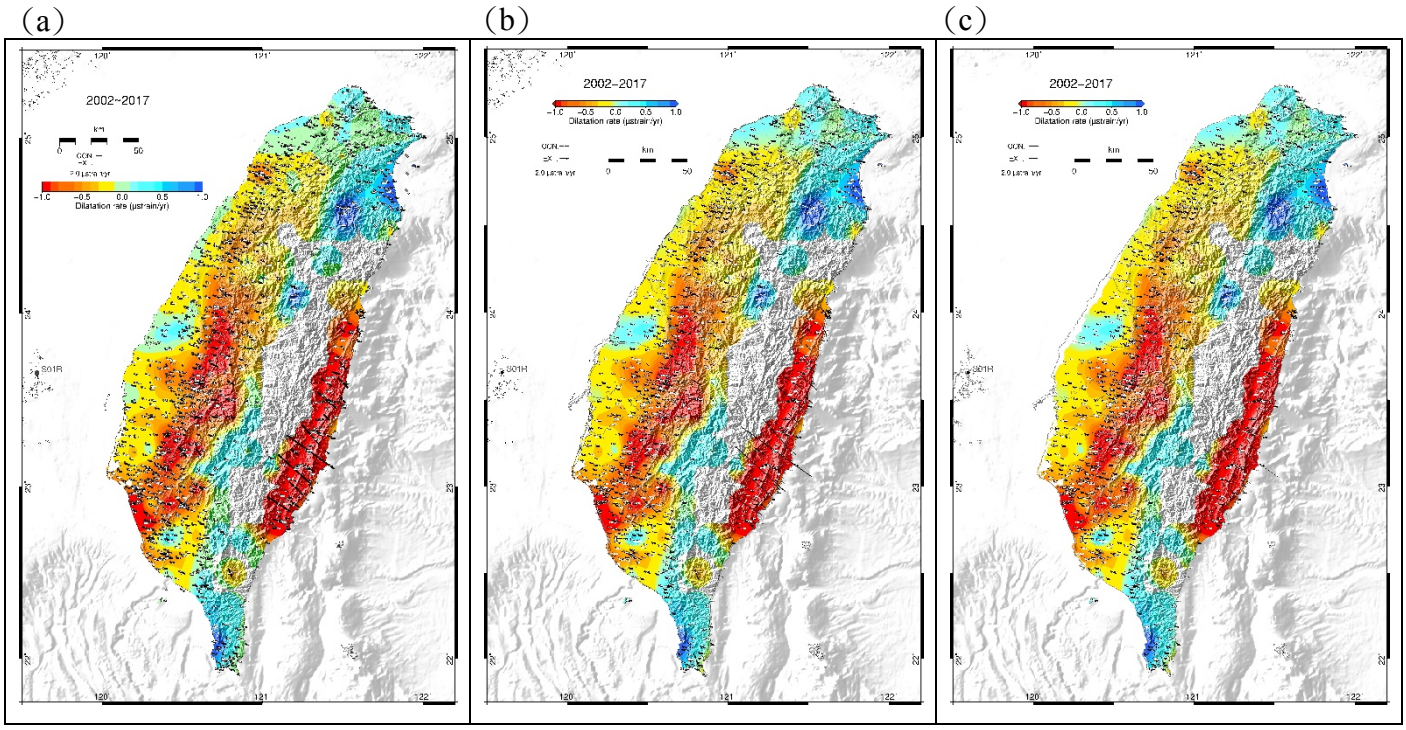


圖 2-4.3：應變場圖。(a)第一版應變場圖。(b)第二版應變場圖。調整 color bar 格式及粗細，修正外框以 0.5 度為一個單位，將 GPS 點位符號縮小以校園點黑色呈現，應變場改為更細的雙箭頭格式，移除海域部分的應變場，加上縣市邊界。(c)第三版應變場圖。修正底圖海岸現改為較新版之臺灣海岸線。

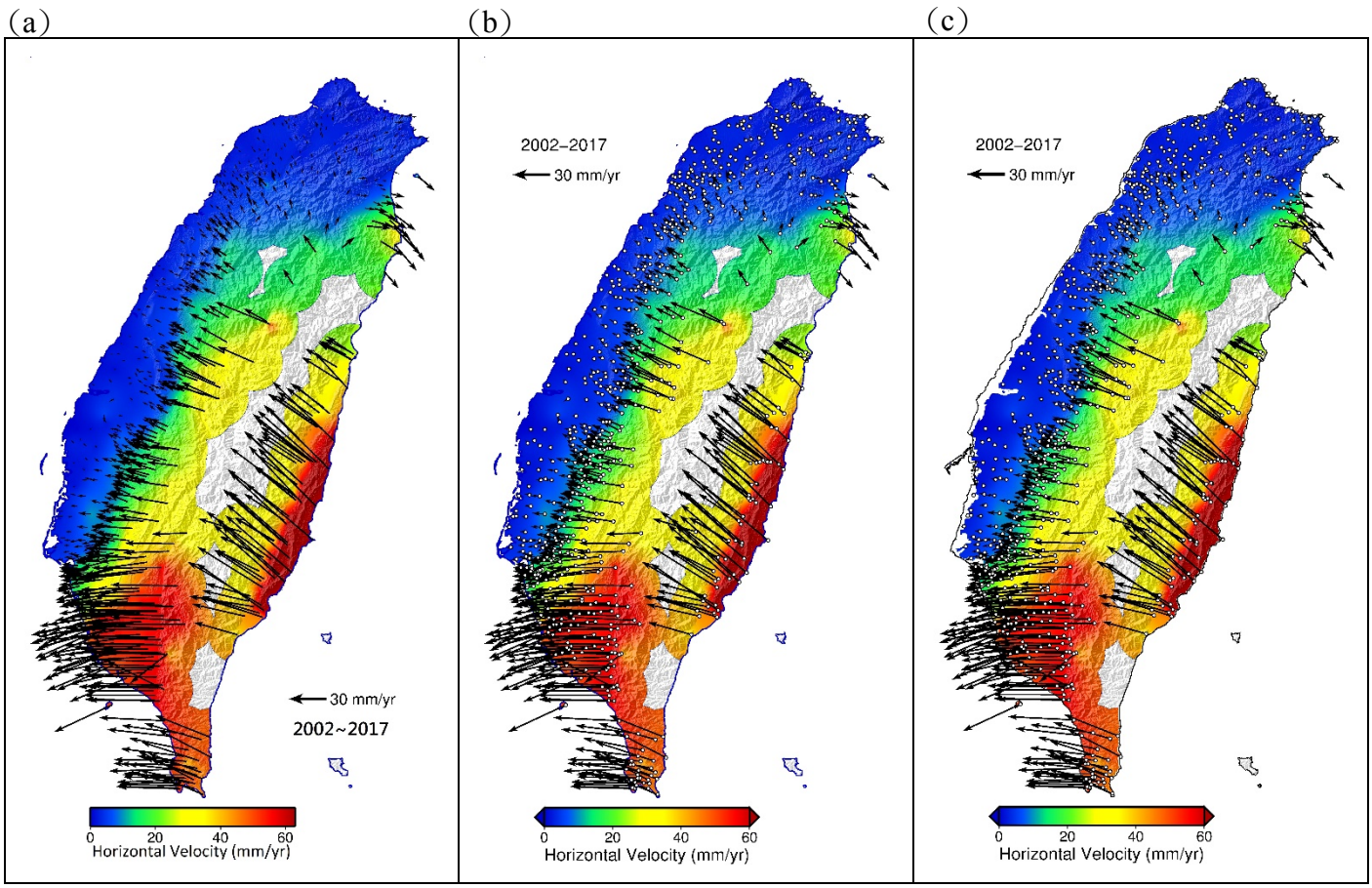


圖 2-4.4：水平速度場圖。(a)第一版水平速度場圖。(b)第二版水平速度場圖。調整 color bar 格式，增加 GPS 點為符號。(c)第三版水平速度場圖。修正底圖海岸現改為較新版之臺灣海岸線。

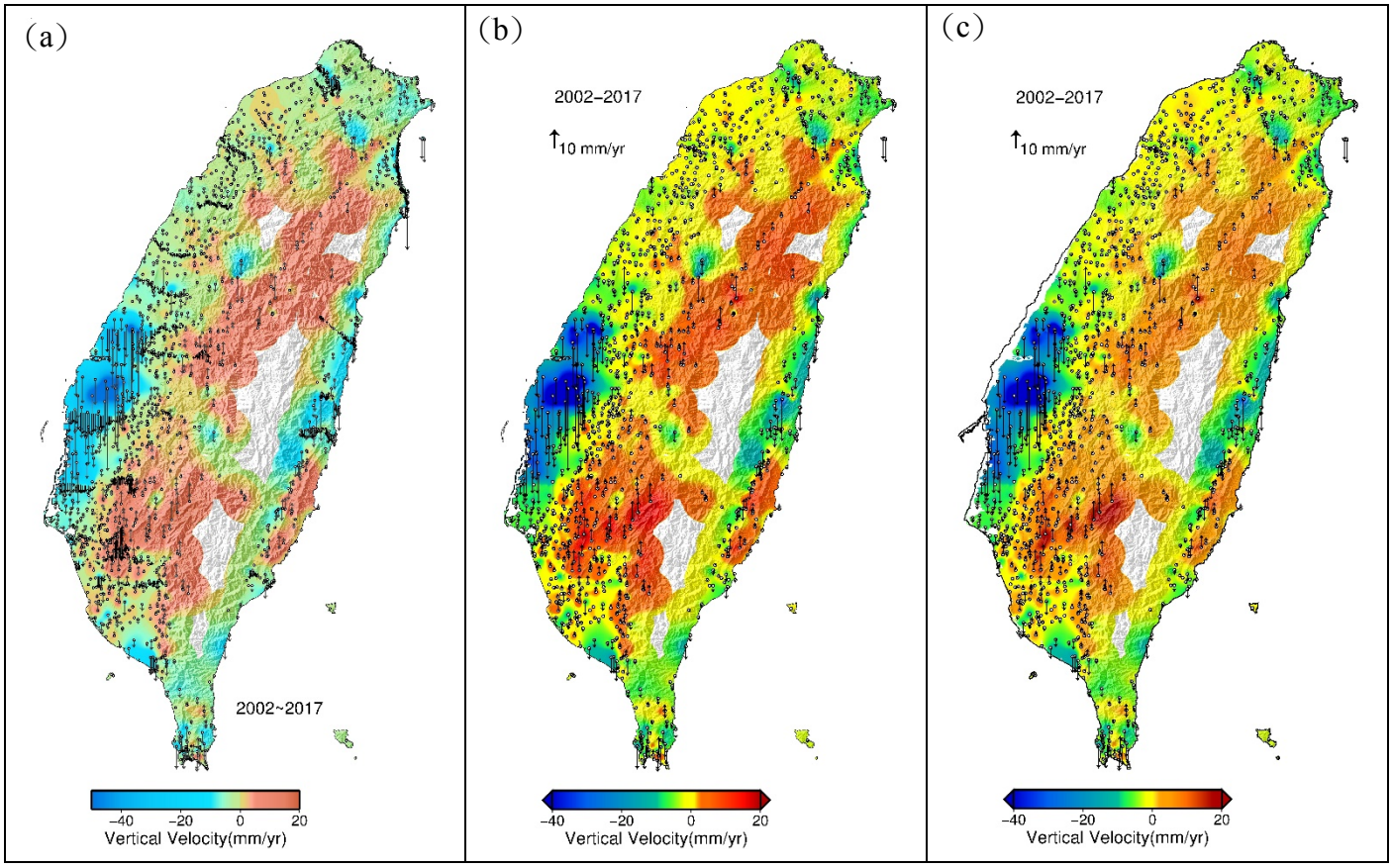


圖 2-4.5：垂直速度場圖。(a)第一版垂直速度場圖。(b)第二版垂直速度場圖。調整 color bar 格式，移除水準資料，修正底圖顏色，增加單位圖說。(c)第三版垂直速度場圖。修正底圖海岸現改為較新版之臺灣海岸線。

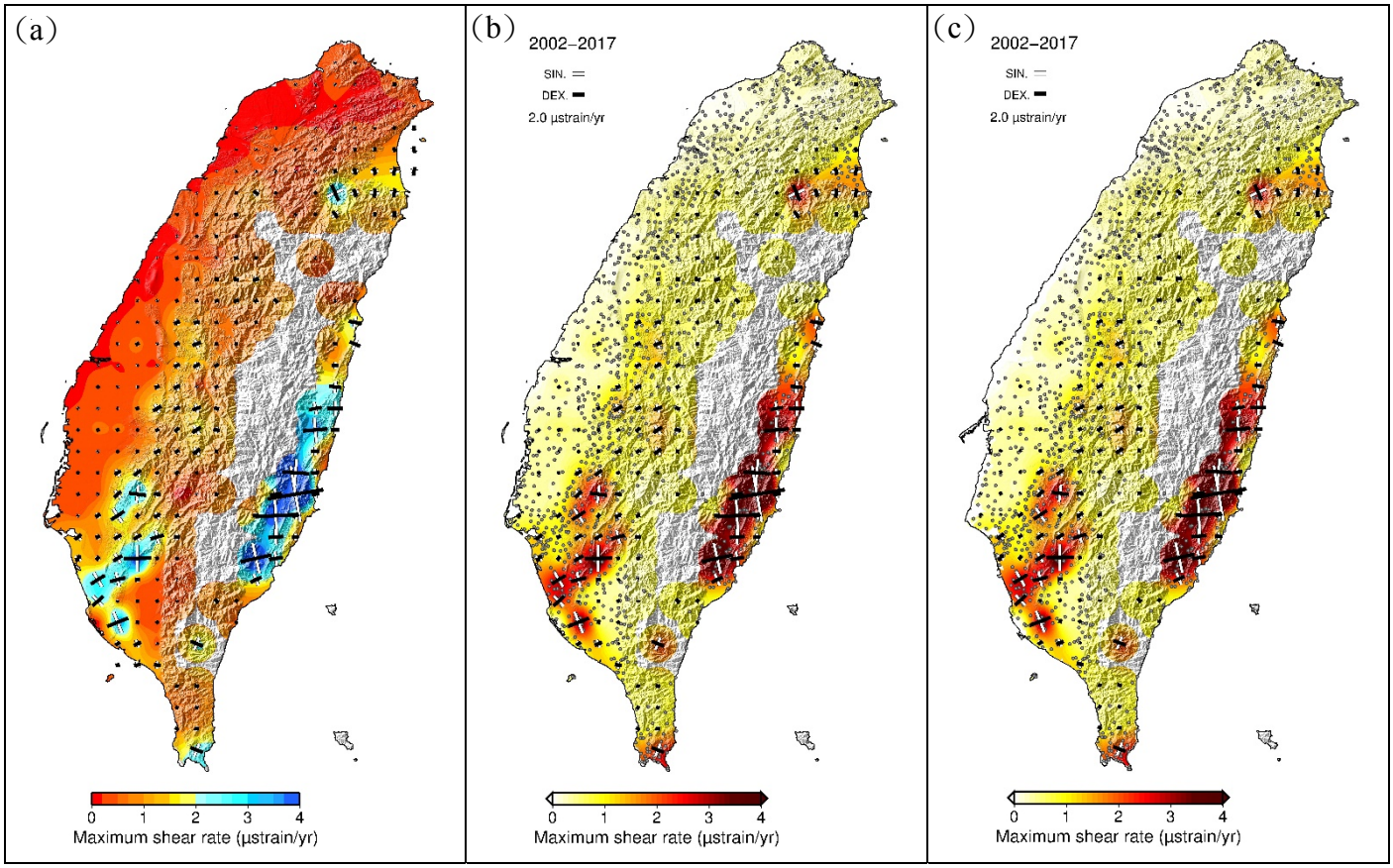


圖 2-4.6：剪應變圖。(a)第一版剪應變圖。(b)第二版剪應變圖。調整 color bar 格式，修正底圖顏色，增加 GPS 點為符號及單位圖說。(c)第三版剪應變圖。修正底圖海岸現改為較新版之臺灣海岸線。

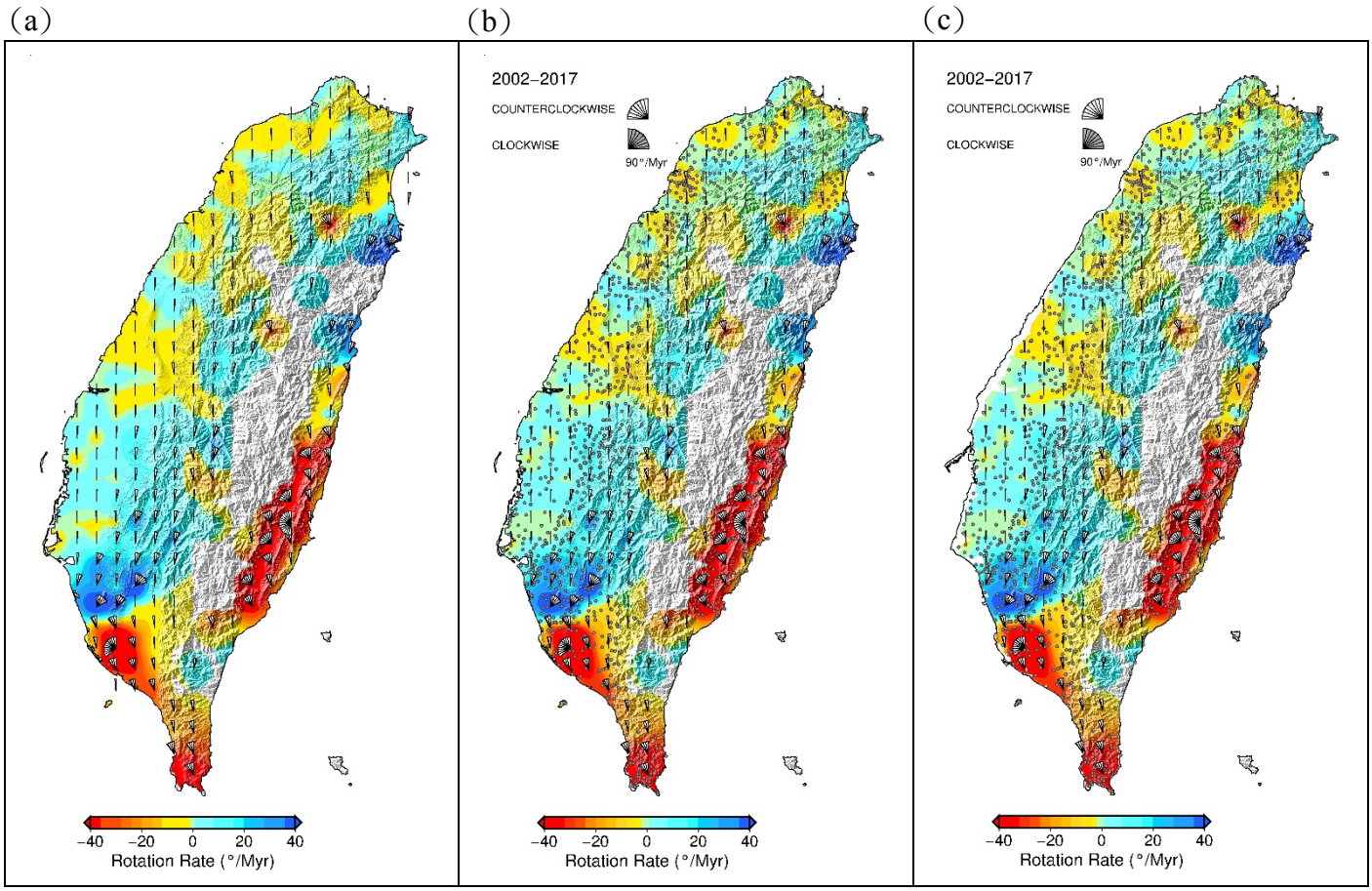
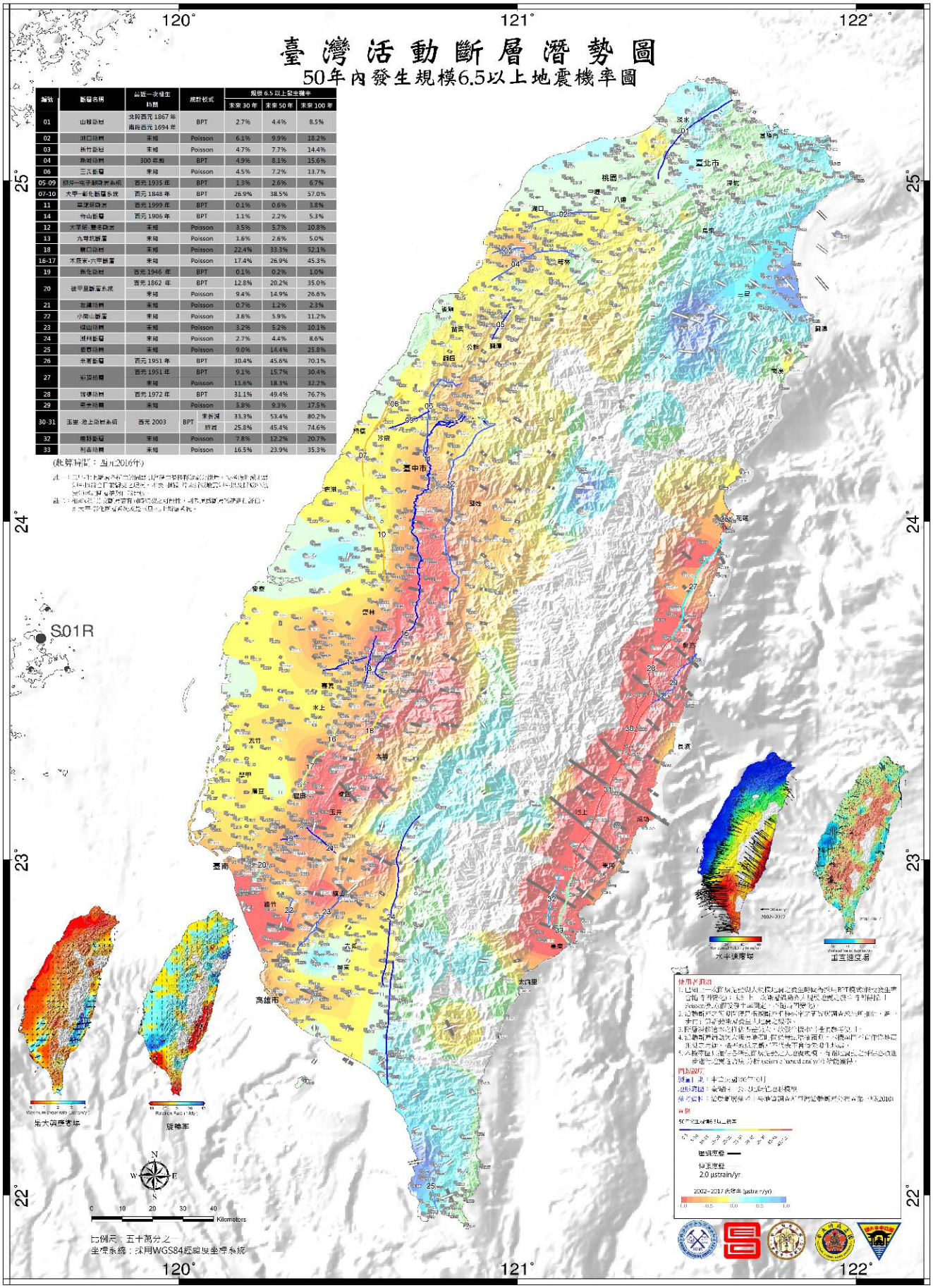


圖 2-4.7：旋轉率圖。(a)第一版旋轉率圖。(b)第二版旋轉率圖。增加 GPS 點為符號及單位圖說。(c)第三版旋轉率圖。修正底圖海岸現改為較新版之臺灣海岸線。



編號	斷層名稱	最近一次發生時間	統計模式	規模 6.5 以上發生機率		
				未來 30 年	未來 50 年	未來 100 年
01	山腳斷層	北段西元 1867 年 南段西元 1694 年	BPT	2.7%	4.4%	8.5%
02	湖口斷層	未知	Poisson	6.1%	9.9%	18.2%
03	新竹斷層	未知	Poisson	4.7%	7.7%	14.4%
04	新城斷層	300 年前	BPT	4.9%	8.1%	15.6%
06	三灣斷層	未知	Poisson	4.5%	7.2%	13.7%
05-09	屯原－電子園區斷層系統	西元 1935 年	BPT	1.3%	2.6%	6.7%
07-10	大甲－彰化斷層系統	西元 1848 年	BPT	26.9%	38.5%	57.0%
11	車埕斷層	西元 1999 年	BPT	0.1%	0.6%	3.8%
14	竹山斷層	西元 1906 年	BPT	1.1%	2.2%	5.3%
12	大茅埔－雙冬斷層	未知	Poisson	3.5%	5.7%	10.8%
13	九芎坑斷層	未知	Poisson	1.6%	2.6%	5.0%
18	觸口斷層	未知	Poisson	22.4%	33.3%	52.1%
16-17	木屐寮－六甲斷層	未知	Poisson	17.4%	26.9%	45.3%
19	新化斷層	西元 1946 年	BPT	0.1%	0.2%	1.0%
20	後甲里斷層系統	西元 1862 年	BPT	12.8%	20.2%	35.0%
		未知	Poisson	9.4%	14.9%	26.6%
21	左鎮斷層	未知	Poisson	0.7%	1.2%	2.3%
22	小崗山斷層	未知	Poisson	3.6%	5.9%	11.2%
23	楠山斷層	未知	Poisson	3.2%	5.2%	10.1%
24	潮州斷層	未知	Poisson	2.7%	4.4%	8.6%
25	恆春斷層	未知	Poisson	9.0%	14.4%	25.8%
26	米崙斷層	西元 1951 年	BPT	30.4%	45.6%	70.1%
27	新開斷層	西元 1951 年	BPT	9.1%	15.7%	30.4%
		未知	Poisson	11.6%	18.3%	32.2%
28	瑞穗斷層	西元 1972 年	BPT	31.1%	49.4%	76.7%
29	奇美斷層	未知	Poisson	5.8%	9.3%	17.5%
30-31	玉里－池上斷層系統	西元 2003	BPT	33.3%	53.4%	80.2%
			泊松	25.8%	45.4%	74.6%
32	鹿野斷層	未知	Poisson	7.8%	12.2%	20.7%
33	利吉斷層	未知	Poisson	16.5%	23.9%	35.3%

(截算時間：西元2016年)

圖 2-4.8：第一版臺灣應變速率場與活動斷層潛勢圖。

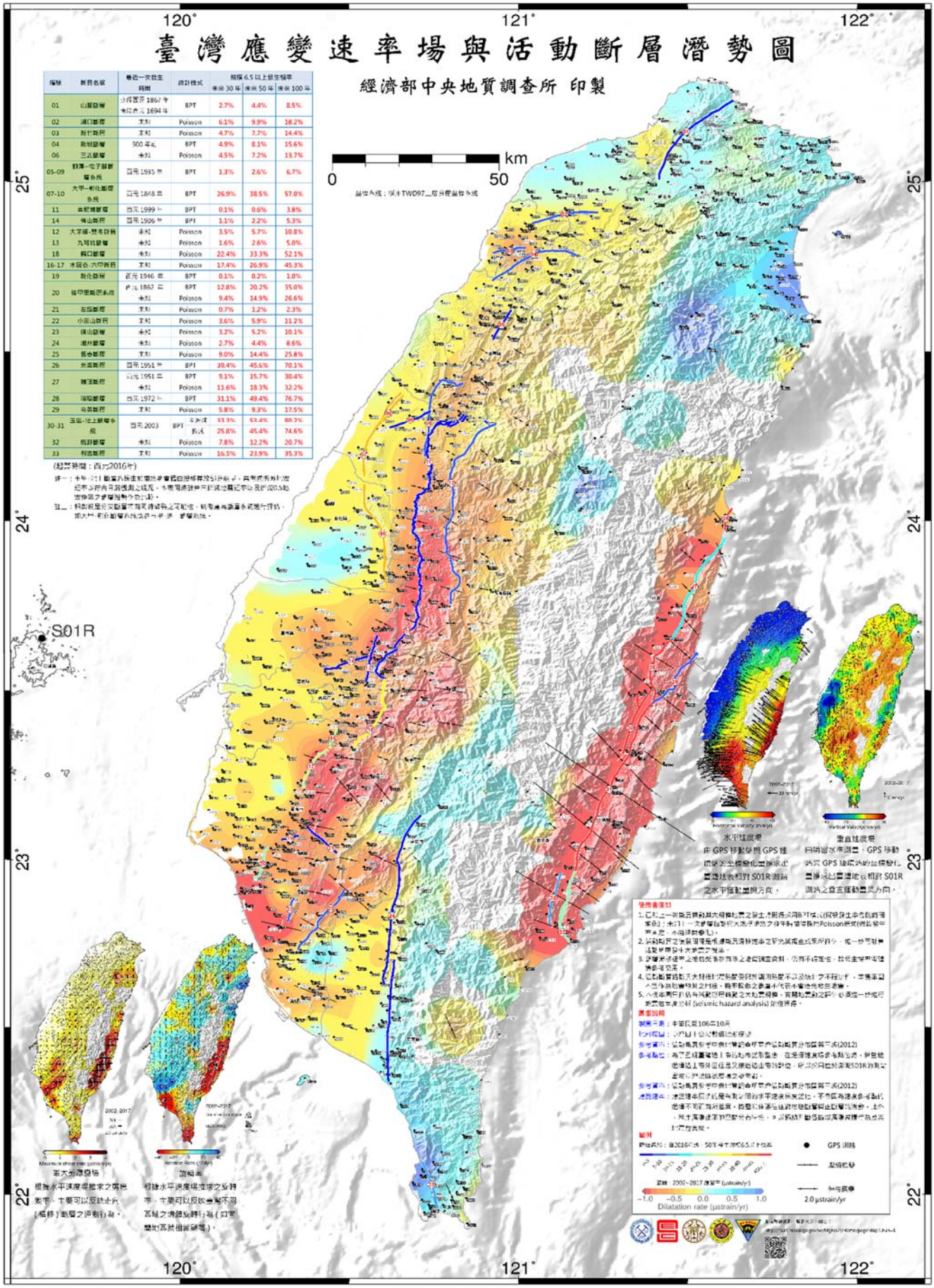


圖 2-4.9：第二版臺灣應變速率場與活動斷層潛勢圖。

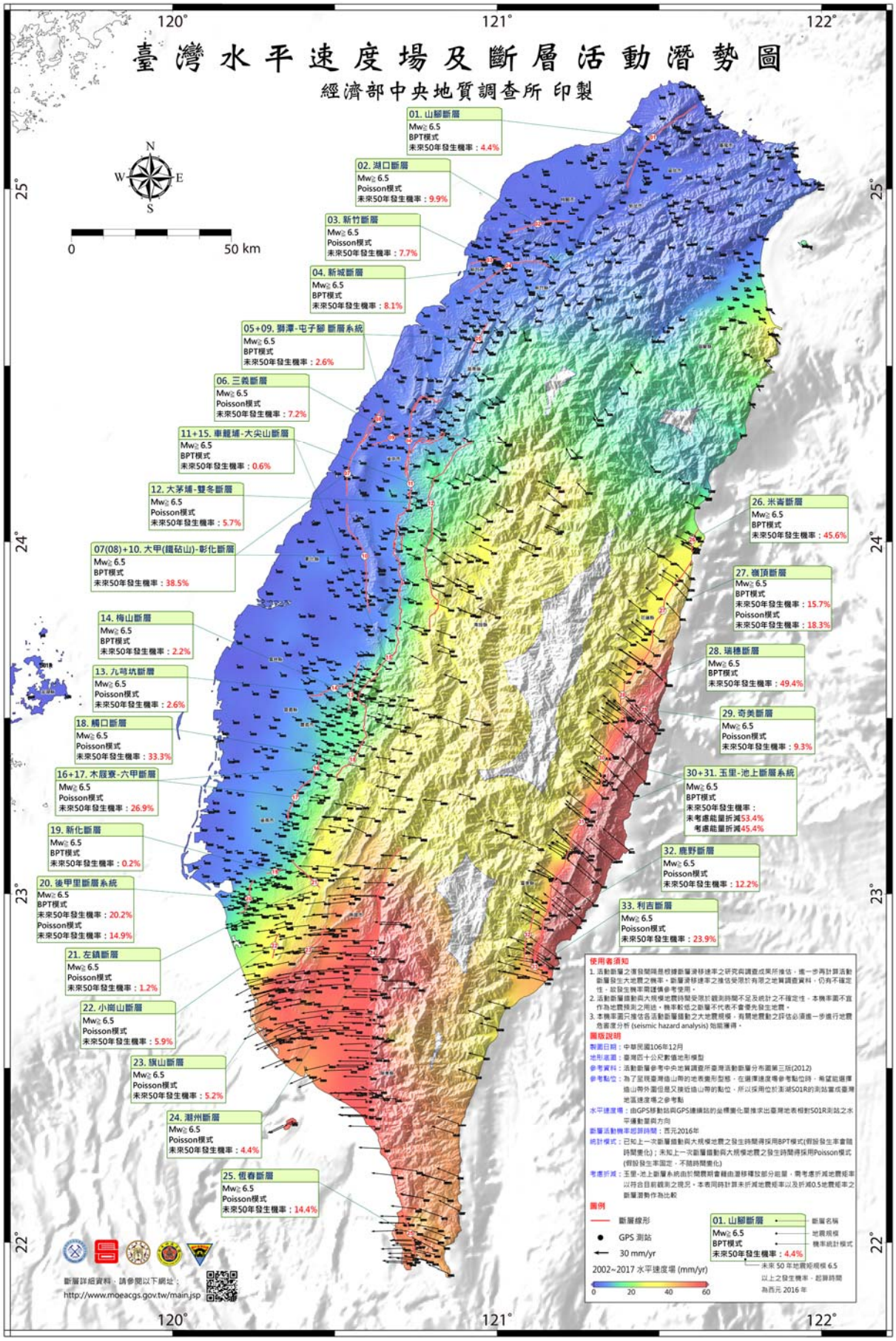


圖 2-4.10：第三版臺灣水平速度場及活動斷層潛勢圖。

2-5 西南部單頻 GPS 之解算成果

本年度完成西南部 15 各單頻 GPS 點位架設（圖 2-5.1），以 Bernese 5.2 解算時約制於連續站 WHES(文和國小)之速度值，資料收集時間為 5 月 15 日至 9 月 7 日（第 135-250 日）共計 126 天，實際可解算資料統計如表 2-5.1，各單頻測站及周圍雙頻測站在此一時期之解算成果之時間序列（圖 2-5.2）指出，在排除離散度之差異後，單頻測站之坐標時間序列隨時間之變化相當穩定。

為統計計算之資料品質，針對時間序列進行觀測值與擬合值(misfit)之殘差分析，此 misfit 值之標準差可反映解算成果在時間序列上之離散程度，各點 misfit 標準差統計如圖 2-5.3，由於單頻資料之解算結果受到與約制站(WHES)之距離影響，因此針對 misfit 標準差與距離的關係圖結果如圖 2-5.4。換言之，只要單頻 GPS 測站和鄰近的雙頻 GPS 測站在 10 km 範圍內，則可以獲得相當好的坐標解算品質，且距離約制站越近，時間序列離散度越低。

根據此結論本計畫將 0601~0613 測站約制於 GS73(新光國小測站)，0614 及 0615 兩測站約制於 AKND(阿公店測站)進行解算並求解相對於澎湖測站 S01R 之速度場，各單頻測站及周圍雙頻測站在此一時期之解算速度如圖 2-5.2。

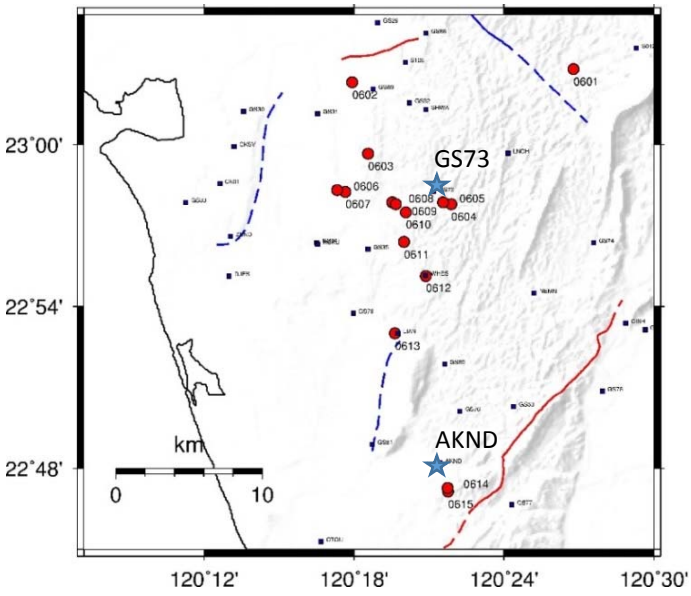


圖 2-5.1：西南部單頻 GPS 站點位分布。

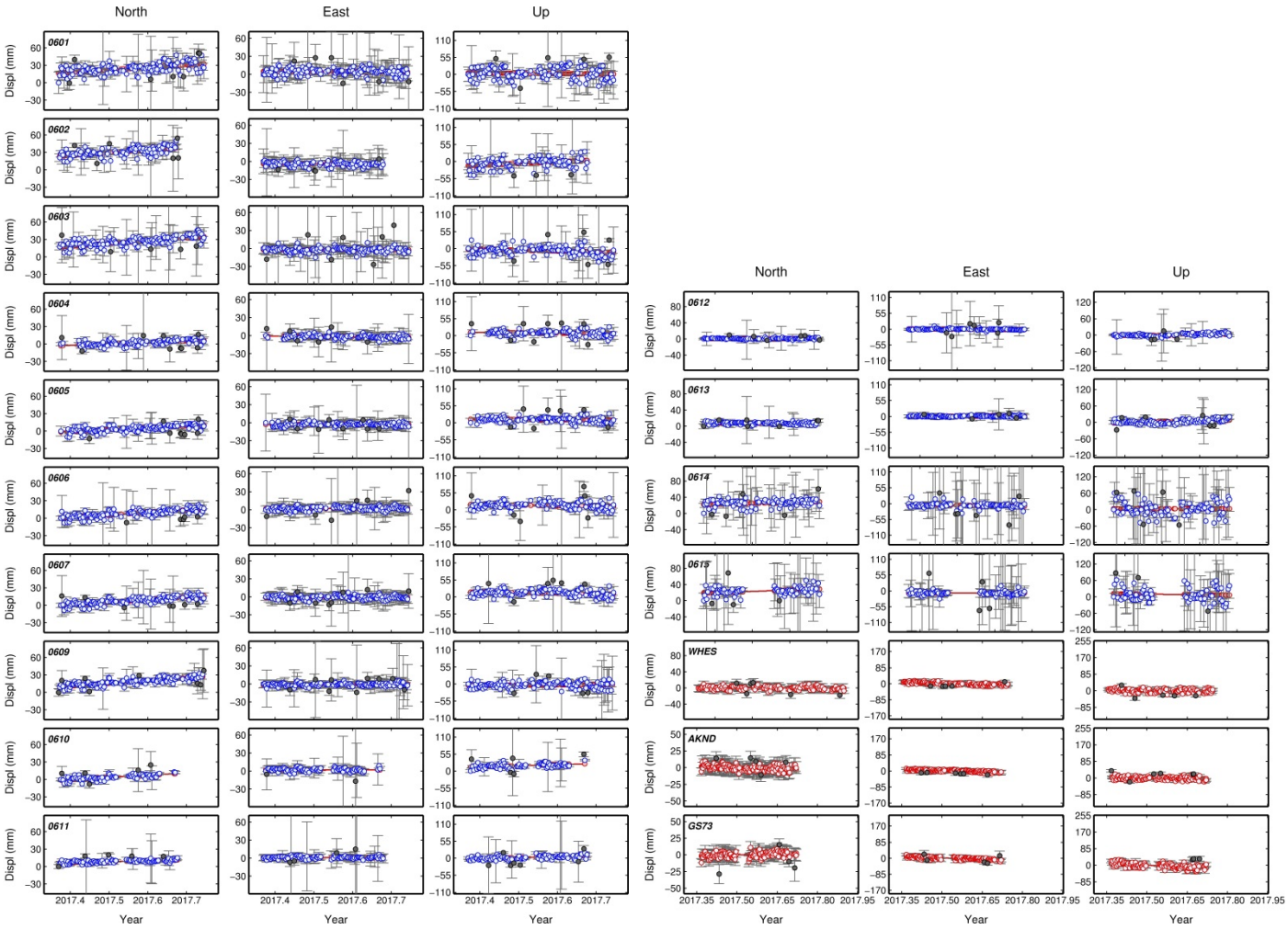


圖 2-5.2：西南部單頻 GPS 站解算成果時間序列，藍色圓圈為單頻站時間序列分布，紅色圓圈為雙頻站時間序列分布。

表 2-5.1：西南部單頻 GPS 站解算資料統計表。

站名	實際解算天數	大於 2 倍殘差 STD 點數	站名	實際解算天數	大於 2 倍殘差 STD 點數
0601	117	6	0609	120	9
0602	90	4	0610	76	2
0603	118	7	0611	89	4
0604	103	6	0612	95	6
0605	115	8	0613	96	5
0606	114	6	0614	86	6
0607	75	8	0615	75	4
0608	104	20			

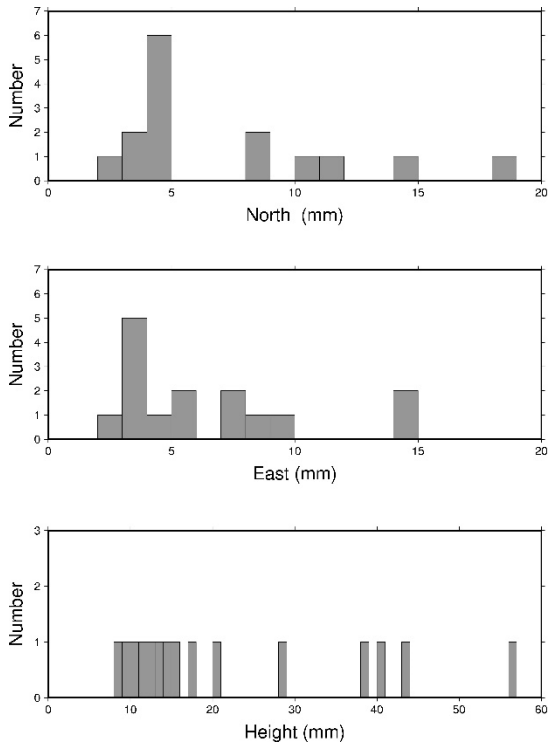


圖 2-5.3：西南部單頻 GPS 站觀測值與擬合值之殘差標準差結果。

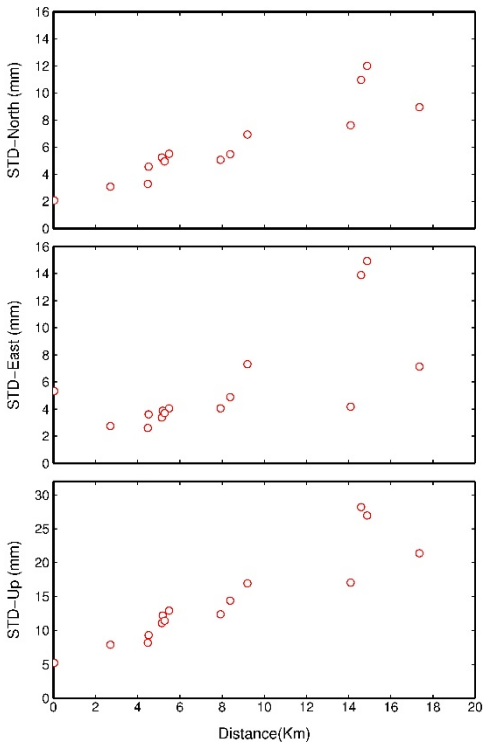


圖 2-5.4：西南部單頻 GPS 站 misfit 標準差與距約制站(WHES)距離之關係圖。

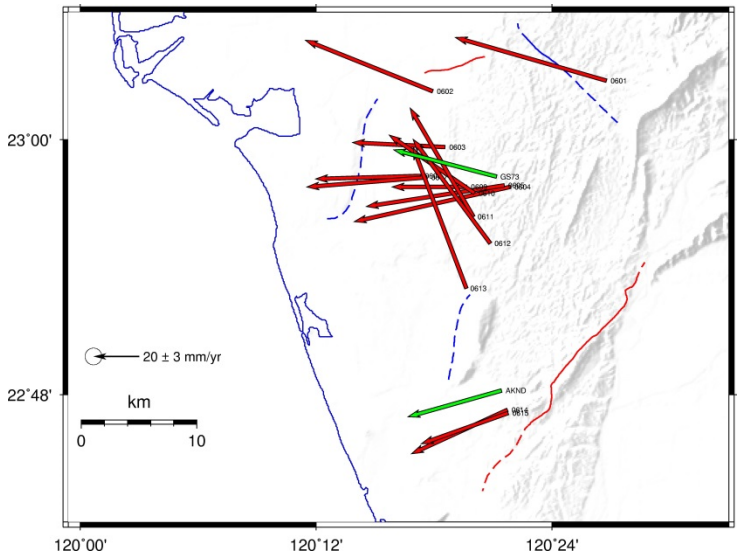


圖 2-5.5：西南部單頻 GPS 站解算相對澎湖測站 S01R 速度場分布圖，紅色箭頭為單頻站第 135-250 日解算速度場，綠色箭頭為雙頻站第 135-250 日解算速度場。

2-6 陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果報告

依據中央氣象局地震目錄，統計本年度地震規模大於 4.0 之地震分布情形如圖 2-6-1，其中規模大於 6 之地震為 2016 年 4 月 30 日發生之第 106020 號地震，地震規模 6.0 位於台東縣政府東南方 157.9 公里處，由於該事件並非發生於陸上且距離臺灣本島較遠，各測站無明顯位移訊號，因此並無進行該事件之同震位移場分析。

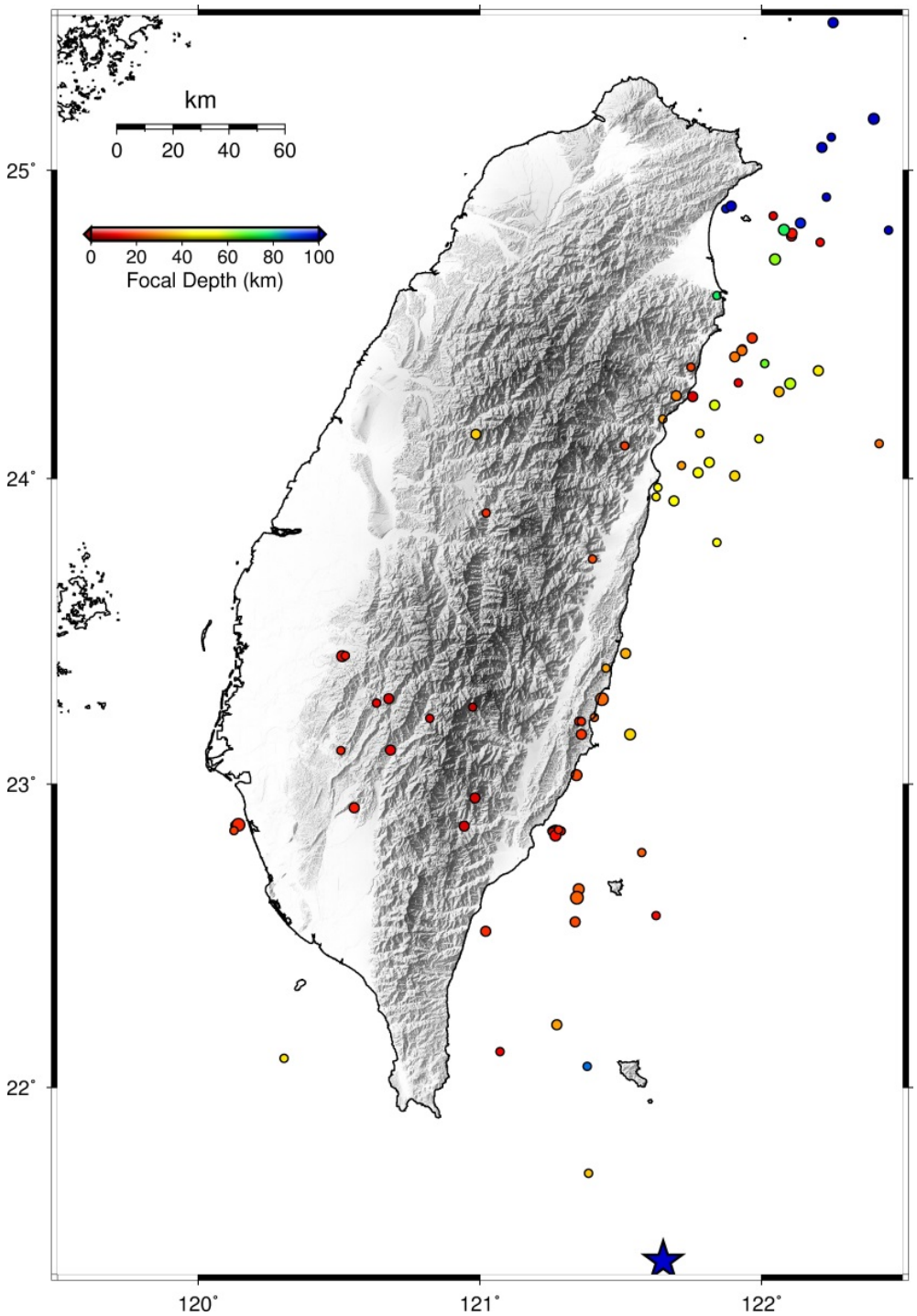


圖 2-6.1：臺灣地區 2016 年至 2017 年中規模大於 4.0 之地震事件分布圖，色階表示地震深度，星號表示規模大於 6.0 之地震事件。

第三章、中部地區雷達影像分析

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

歐洲太空總署（European Space Agency，ESA）於 1991 年 7 月發射 ERS-1 衛星，並於 1995 年發射同系列的 ERS-2 衛星，波長為 C 波段。ENVISAT 為 ERS-1/2 後續繼承任務的衛星，於 2002 年發射；Sentinel-1A 衛星於 2014 年發射，同樣為 C 波段。此外，ALOS 衛星於 2006 年 1 月 24 日發射，並於 2006 年 2 月 16 日拍攝第一幅影像，為日本地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地區域進行觀測的衛星，其為 L 波段。

本計畫針對所有衛星所拍攝的 SAR 影像都先利用影像對相關值，根據時間基線（Temporal Baseline)、空間垂直基線(Perpendicular Spatial Baseline)、都普勒中心頻率(Doppler Centroid Frequency)及熱雜訊（Thermal Noise）挑選出主影像（Master)。在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將影像製作出 N-1 張干涉條紋圖。完成所有影像對的干涉結果後，本計畫利用 StaMPS 軟體進行 PS-InSAR 流程解算，獲得永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。

本研究團隊目前使用於地殼變形監測之雷達影像分別有以下衛星、波段（圖 3.1）及所使用的時間區間：

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

（2） C 波段之 **ENVISAT** 衛星 SAR 影像時間：從 2007 年 6 月至 2008 年 6 月。

（3） L 波段之 **ALOS** 衛星 SAR 影像時間：從 2006 年 12 月至 2011 年 2 月。

（4） C 波段之 **SENTINEL-1A** 衛星 SAR 影像時間：從 2015 年 3 月至 2016 年 2 月。

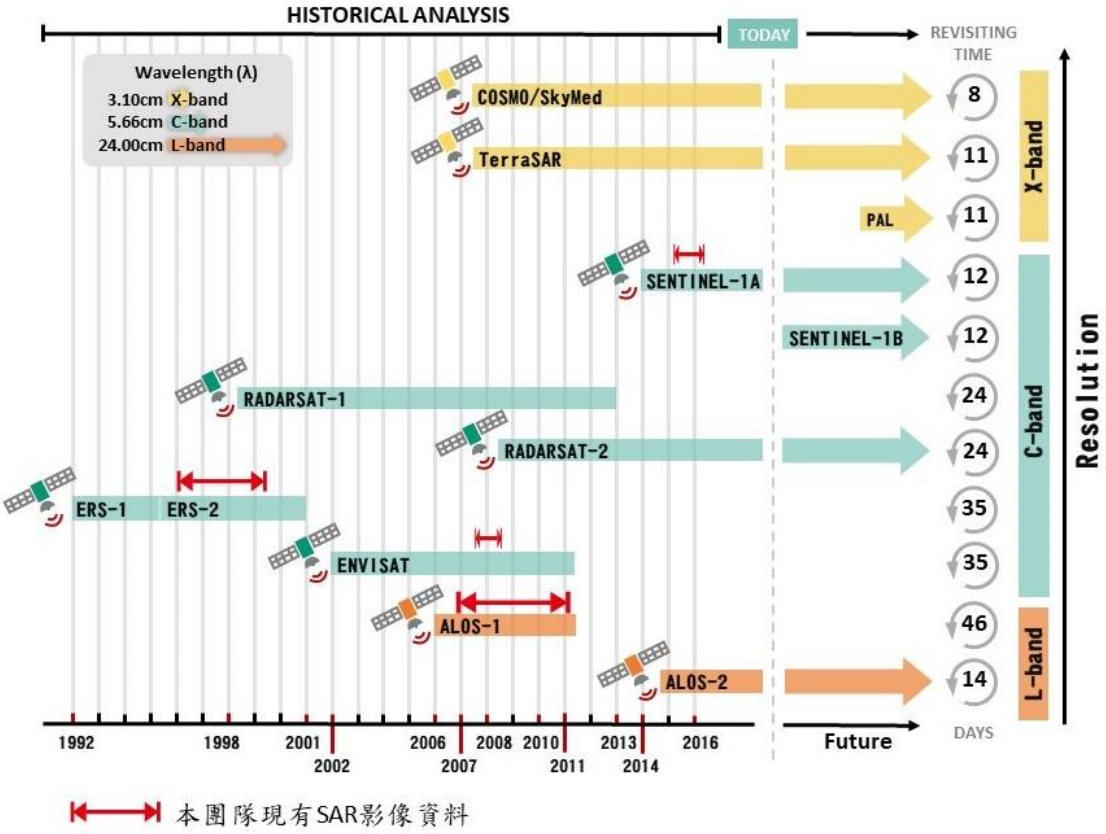


圖 3.1：本團隊現有 SAR 影像圖資示意圖。

3-1 中部地區 PS-InSAR 成果資料分析

3-1-1 ERS1/2

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。

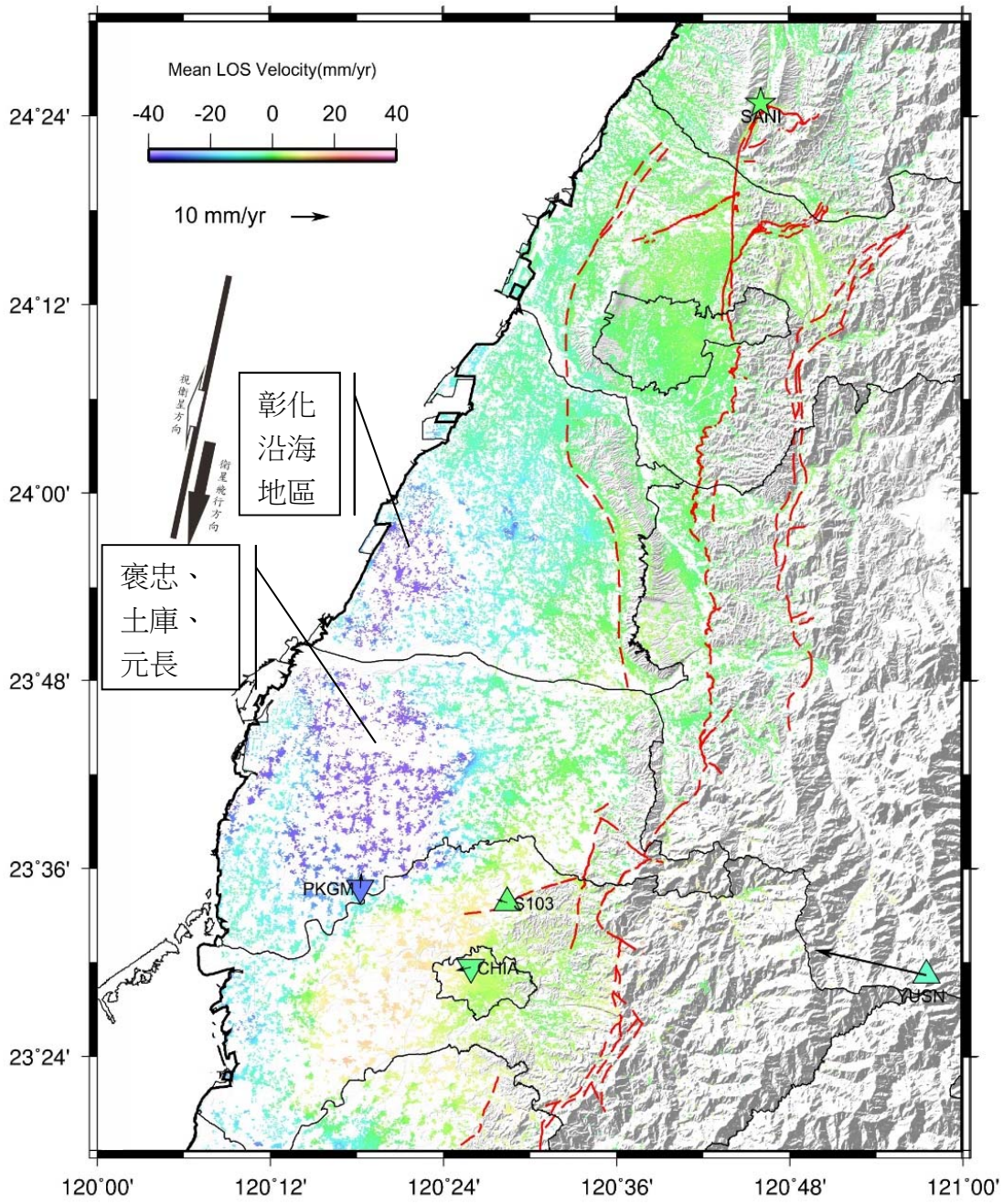


圖 3-1.1：ERS 衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 SANI，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

3-1-2 ENVISAT

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。

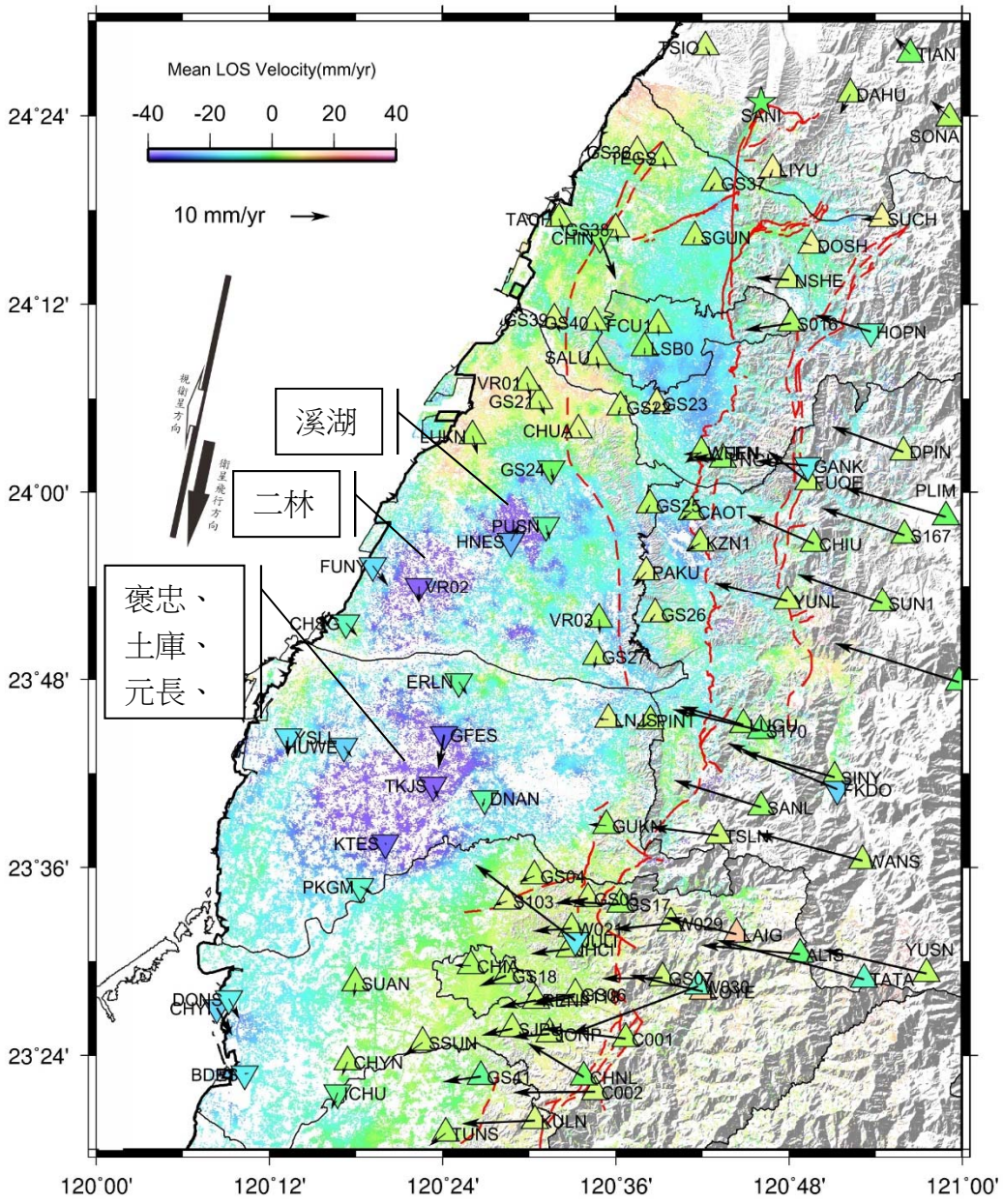


圖 3-1.2：ENVISAT 衛星軌道 232，像幅編號 3123 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 SANI，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

3-1-3 ALOS

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。

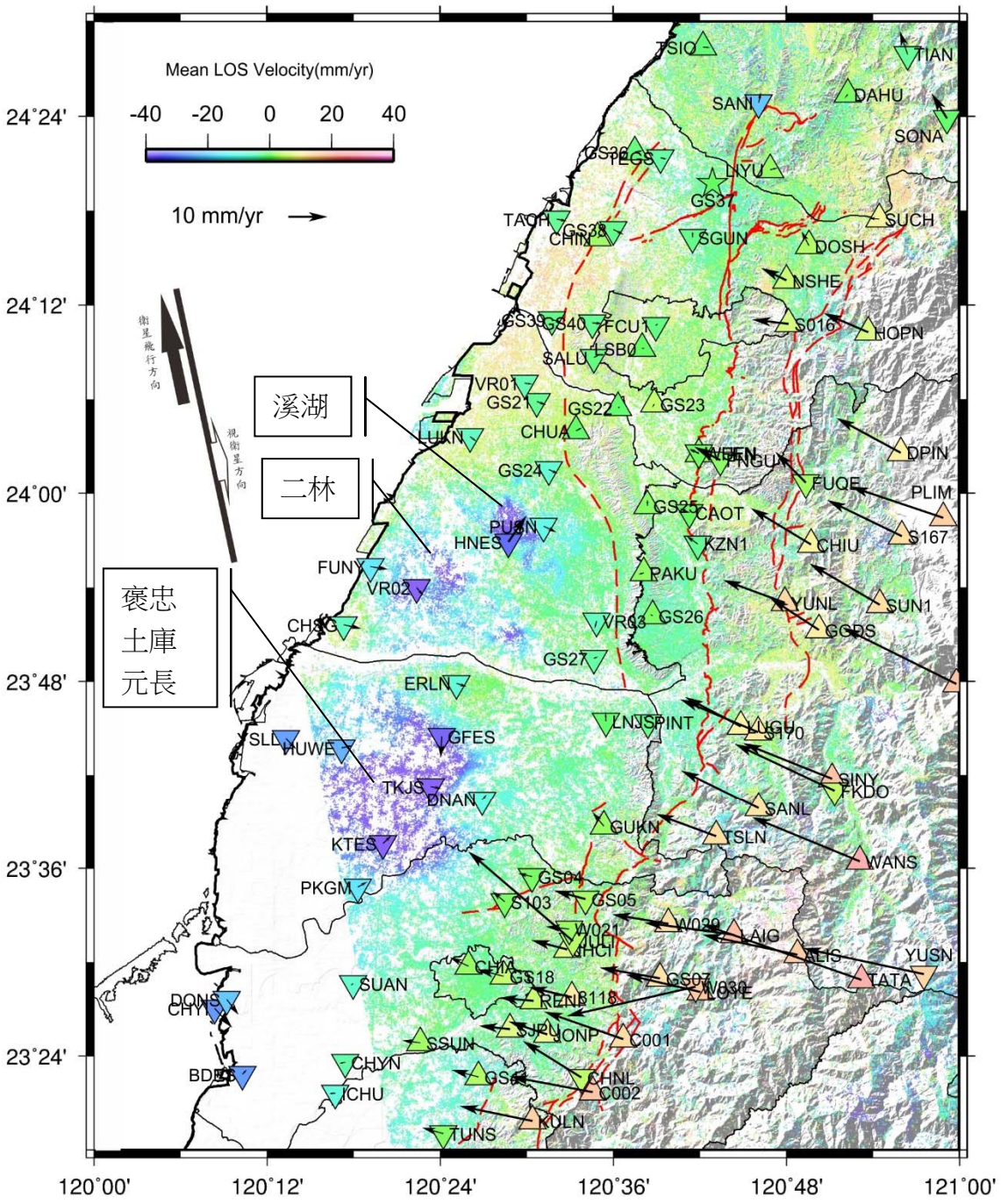


圖 3-1.3：ALOS（衛星軌道 446 像幅編號 460＆470）與 GPS 視衛星方向速率比對。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 GS37，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

3-1-4 SENTINEL-1A

圖 3-1.4 即為 Sentinel-1A 衛星影像在此期間（2015/03-2016/02）獲得的永久散射點在視衛星方

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

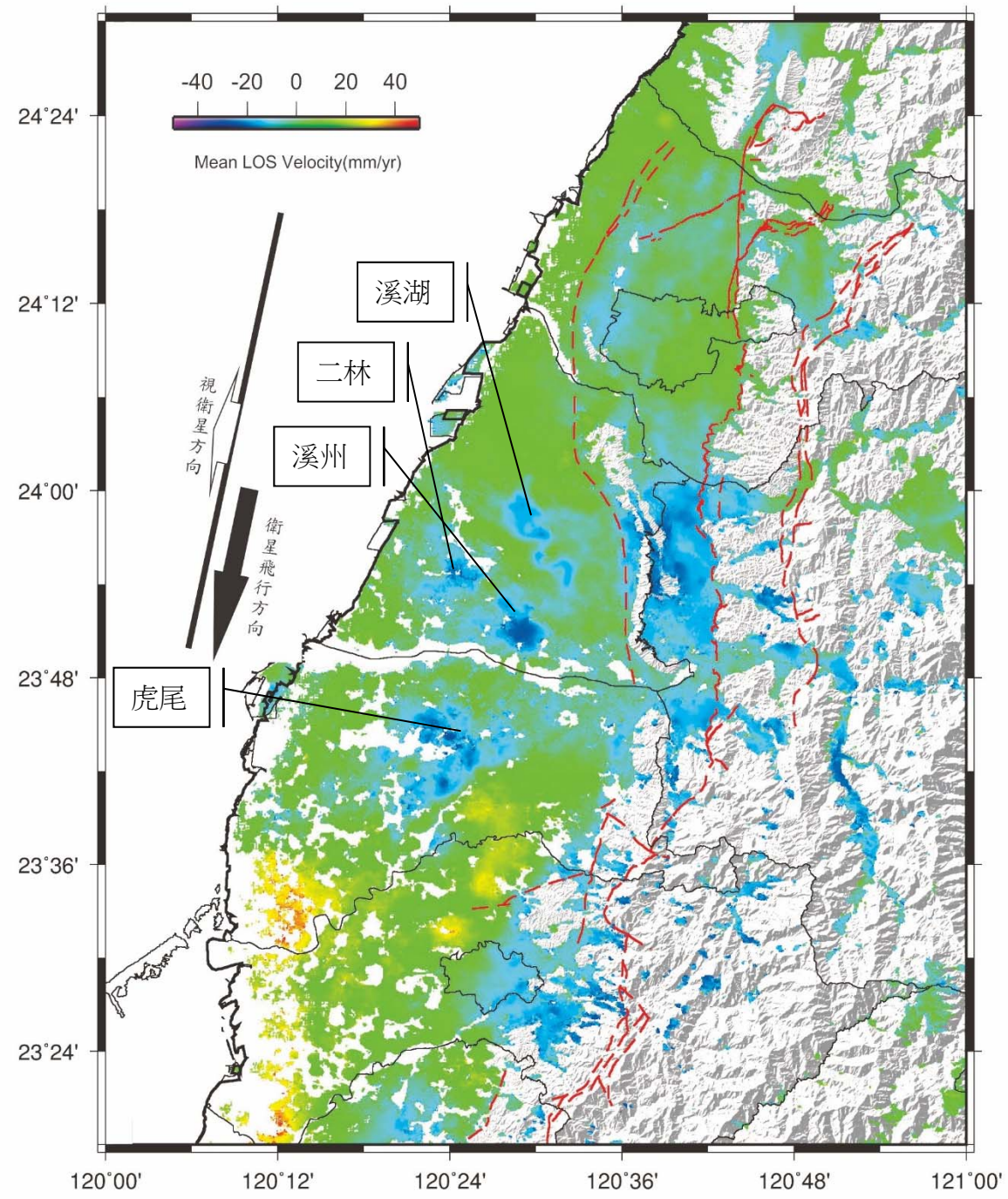


圖 3-1.4：Sentinel-1A 視衛星方向速率。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。

3-2 GPS 連續站周圍 PS 點之時間序列(期中階段測試結果)

由圖 3-2.1 右下連續 GPS 測站時間圖可看出中部地區大部分的連續 GPS 測站都架設於 1999 年 921 集集地震之後（綠色三角測站），因此大部分測站都無法與 ERS 衛星時期做比較。本期中報告首先挑選中部地區中央氣象局位於三義之連續 GPS 測站（SANI）進行測試比較。由於 PSInSAR 獲得之時間序列為對視衛星方向（LOS）上的變化，圖 3-2.1 為利用衛星與地面的幾何關係將 GPS 時間序列之 ENU 三個方向上的變化（藍色、綠色及紅色）轉換至 LOS 方向上（黑色），並截取與衛星拍攝同時期之比較。圖中顯示出 ERS 與 ENVISAT 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有很好的關聯性，然而 ALOS 衛星所得出之時間序列跳動較明顯，但整體趨勢還是能呈現出視衛星方向遠離的變形行為。

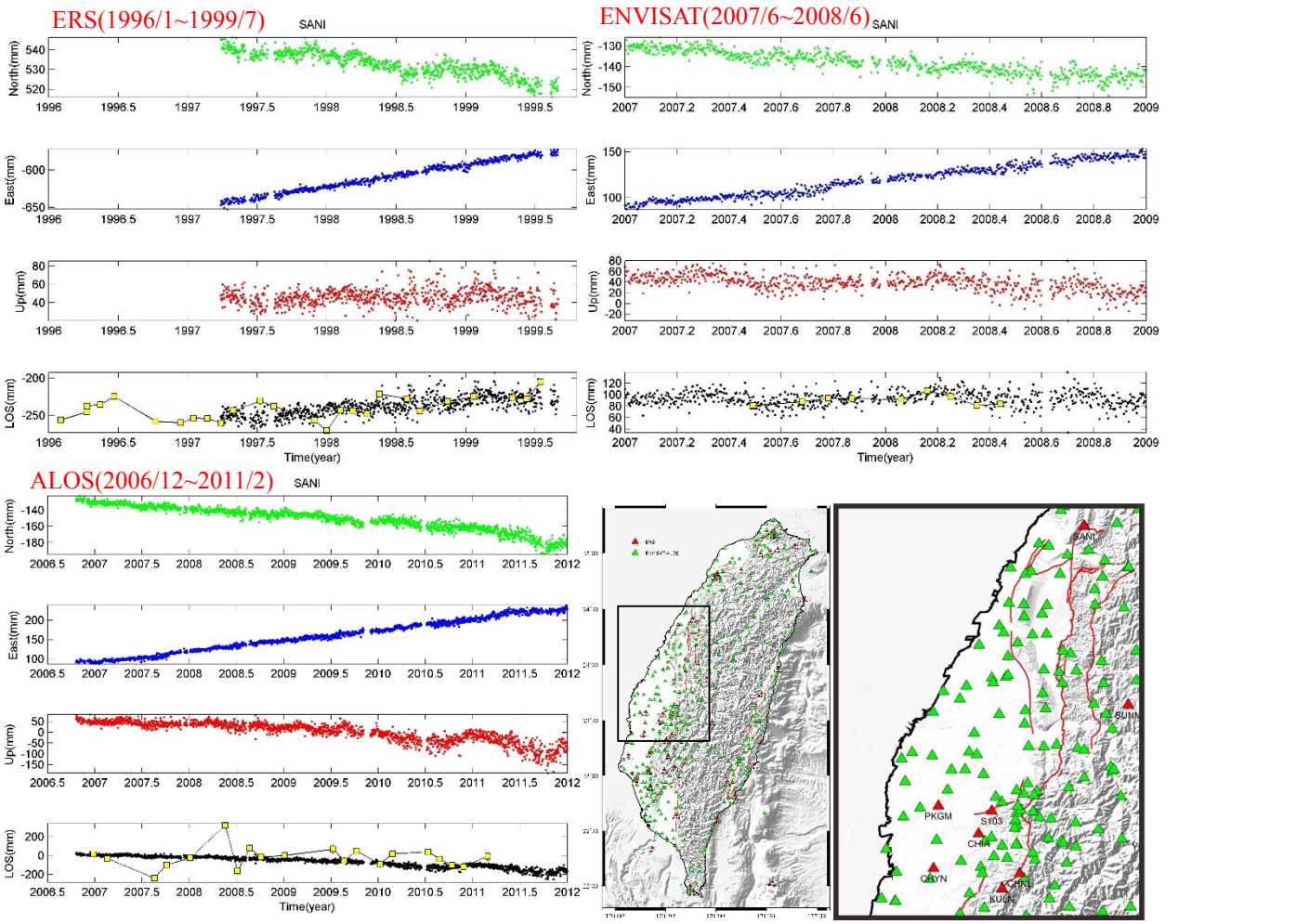


圖 3-2.1：ERS（1996/1～1999/7）時期、ENVISAT（2007/6～2008/6）時期及 ALOS（2006/12～2011/2）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。右下為 GPS 測站位置。

除連續 GPS 測站 SANI 外，我們同時也比較了中央氣象局位於彰化芳苑的 FUNY 測站，同樣顯示出 ENVISAT 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有較好的關聯性，而 ALOS 衛星所得出之時間序列一樣跳動較明顯。這樣的原因可能為 L 波段的 ALOS 衛星受到較大的大氣或是其他雜訊影響。因此在中部地區建議初步先以 C 波段的 ERS 衛星或是 ENVISAT 衛星進行後續斷層活動的時序分析。而針對 L 波段的 ALOS 衛星則需要更進一步的修正以利後續分析。

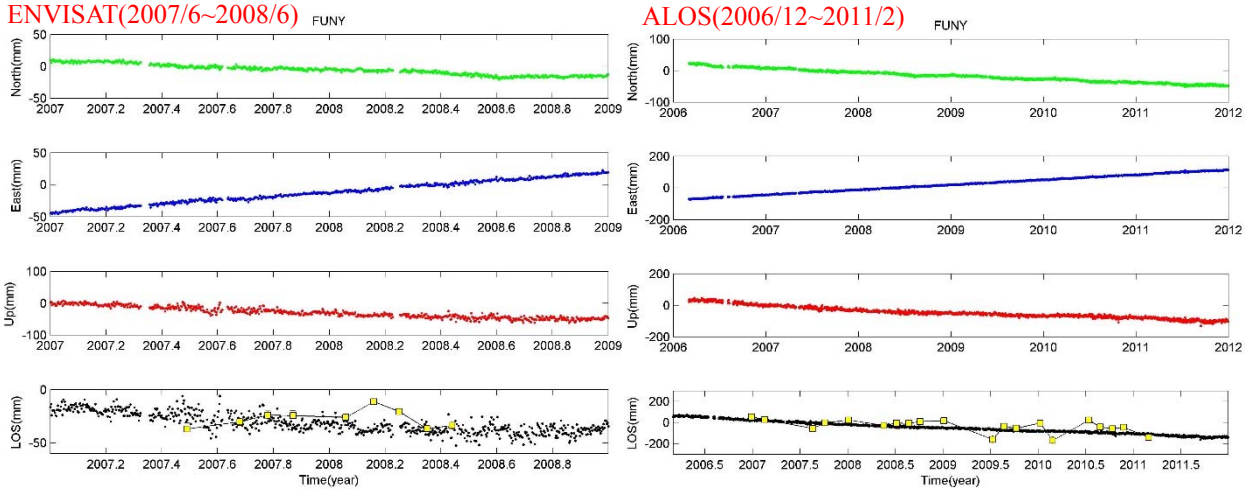


圖 3-2.2：ENVISAT（2007/6～2008/6）時期及 ALOS（2006/12～2011/2）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

3-3 中部地區斷層剖面分析

第三階段計畫總結報告書蒐集各學者所繪製之地質剖面，進而根據水準測線、GPS 移動站、連續 GPS 觀測站以及地調所公布之斷層位置，挑選出適合之地質剖面做為參考，並擷取線段做為斷層剖面分析使用，本階段第一年針對中部地區斷層進行時空速率變化探討（圖 3-3.1）。

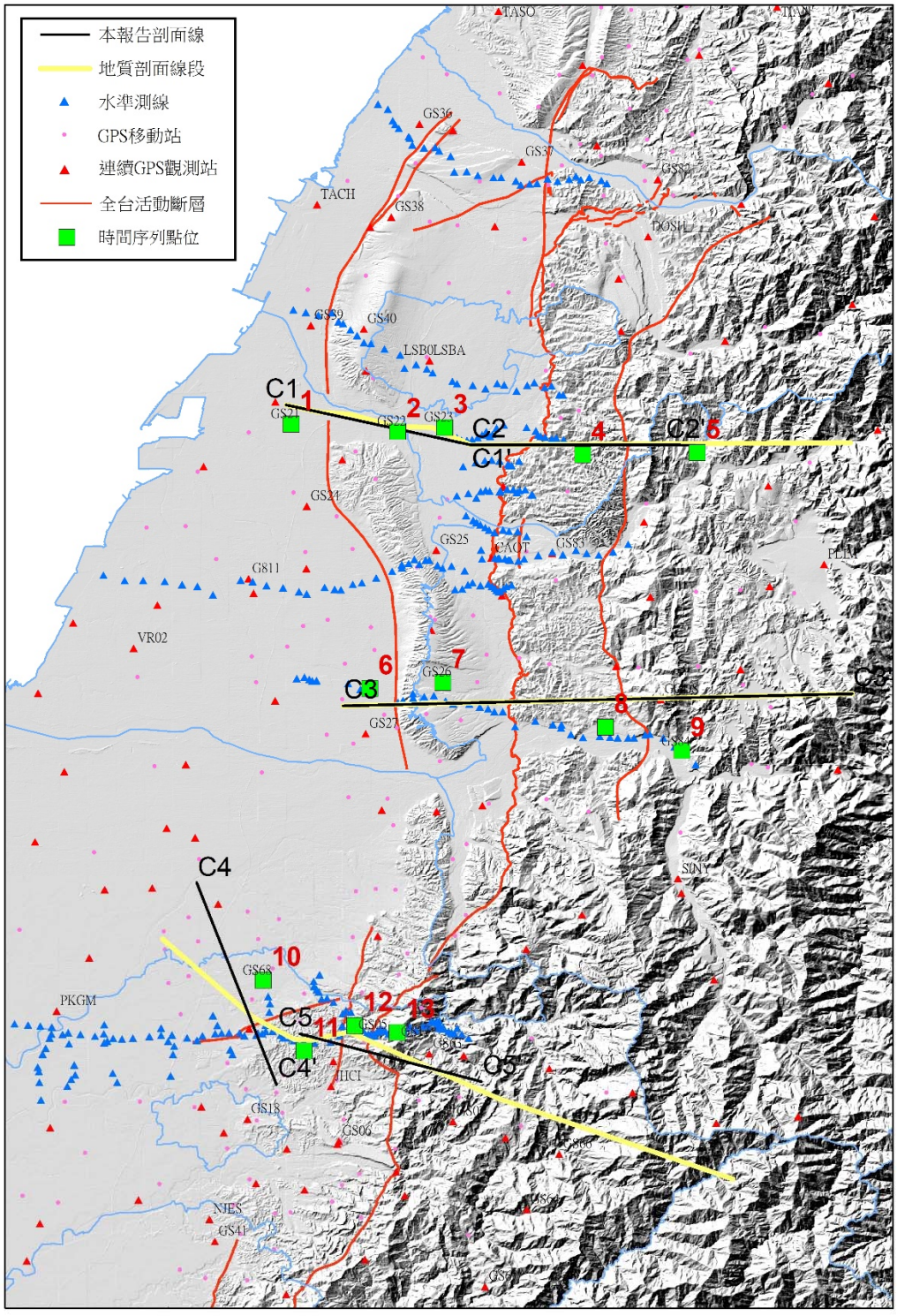


圖 3-3.1：中部地區使用之剖面線位置圖。

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

3-3-1-1 地表變形觀測

PS-InSAR 分析結果顯示從整體變形行為看來（圖 3-3.3 及圖 3-3.7），三種衛星影像在 C1 剖面跨過彰化斷層處均沒有明顯的速度梯度差異；另外在 C2 剖面跨過車籠埔斷層向東因進入山區，導致有效的永久散射點減少，因此也看不出明顯的速度梯度差異。在 C3 剖面方面，ERS 及 ENVISAT 衛星在向東跨過彰化斷層都有呈現輕微視衛星速度縮短，位置約符合八卦山背斜。而 ENVISAT 及 ALOS 衛星向東跨過車籠埔斷層也都有呈現視衛星速度梯度差異。圖 3-3.3 中 ENVISAT 衛星影像於彰化斷層與車籠埔斷層間，及圖 3-3.7 中於車籠埔斷層與大茅埔-雙冬斷層間有一明顯速度不連續，其應該為大氣效應或影像相位回復錯誤導致的差異，需進一步分析確認。

3-3-1-2 構造解釋

C1 剖面跨越彰化斷層，長度 17 公里、半寬 7 公里、剖面走向 103.4°。根據圖 3-3.4 及圖 3-3.5，由衛星影像時間序列分析來看，在 ERS 衛星時期及歷年 GPS 資料顯示，跨斷層速度變化並不顯著，而 ENVISAT 影像時期（921 地震後）則顯示有近 4 mm/yr 的速度差異。並且整體來說 921 地震後變形速度都增加。

C2 剖面跨越車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，長度 34 公里、半寬 7 公里、剖面走向 89.5°。根據圖 3-3.4，ENVISAT 及 ALOS 衛星資料結果都顯示在此剖面跨車籠埔斷層向東 2 公里處都呈現視衛星方向縮短的速度梯度差異，約 3~5 mm/yr，與水準結果相似。由圖 3-3.6 ENVISAT 時間序列速率則顯示上下盤速率最大將近 10 mm/yr。繼續向東跨過大茅埔-雙冬斷層則轉換為視衛星方向遠離的速度梯度差異，由 ENVISAT 時間序列速率顯示此遠離視衛星方向速率最大約為 40 mm/yr。此變形行為也與地形上的大橫屏向斜吻合，因此可能為構造活動行為所造成。由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，在跨車籠埔斷層垂直速度，由西至東有約 2 mm/yr 的抬升量，跨越大茅埔-雙冬斷層則無觀測資料。跨車籠埔斷層的水平速度在平行斷層分量上，約有 2 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量上則有約 3 mm/yr 的縮短量，跨大茅埔-雙冬斷層的水平速度在平行斷層分量上，約有 3 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量上則有約 3 mm/yr 的縮短量。

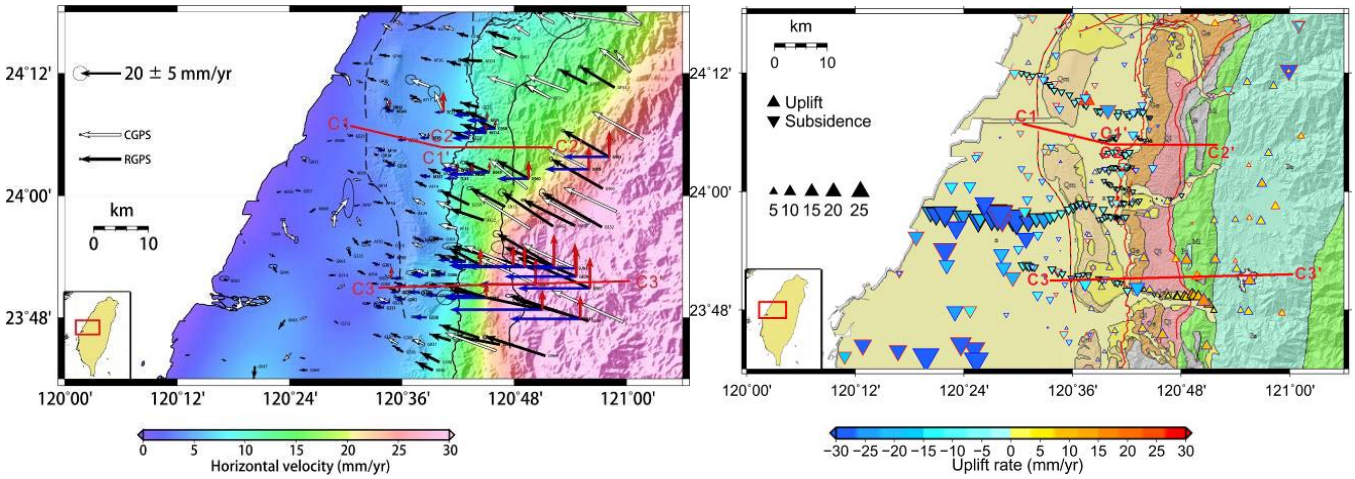


圖 3-3.2：C1~C3 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。

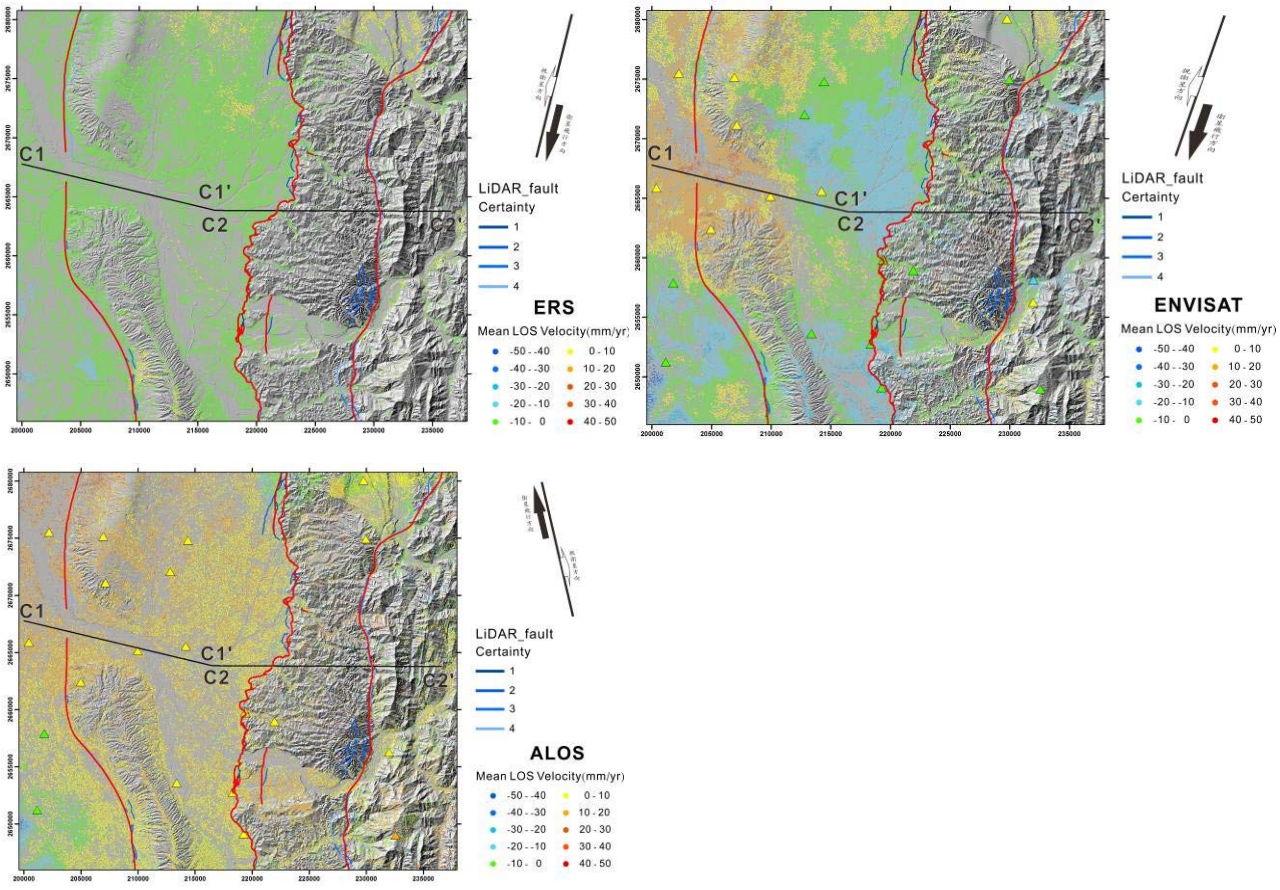


圖 3-3.3：C1 及 C2 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。LiDAR_線形 1：可完全指示構造之活動位置、特性等，於今日之地表位置或資料庫明確者；LiDAR_線形 2：就文獻中，尚無詳細之地表露頭證據、或無相關之資料者，亦或尚無精細之構造線形位置記錄，但在 LiDAR 地形資料上，其構造地形上有詳細而明確的地形特徵或證據指出地表線形確為構造活動所引致；LiDAR_線形 3：其線段之地形特性同地形線形 2 所描述者，但本線形經由野外查核中，可或因地形受人為開發而破壞、或其他因素影響，而未能直接於野外觀察到本線段之地表真實構造特徵者；LiDAR_線形 4：文獻中無詳細之地表露頭證據、或無相關之資料者，亦或尚無精細之構造線形位置記錄，但在 LiDAR 之地形資料上，其構造地形上之地形特徵證據推測本地表線形可能為構造活動所影響。（張國禎，2014）

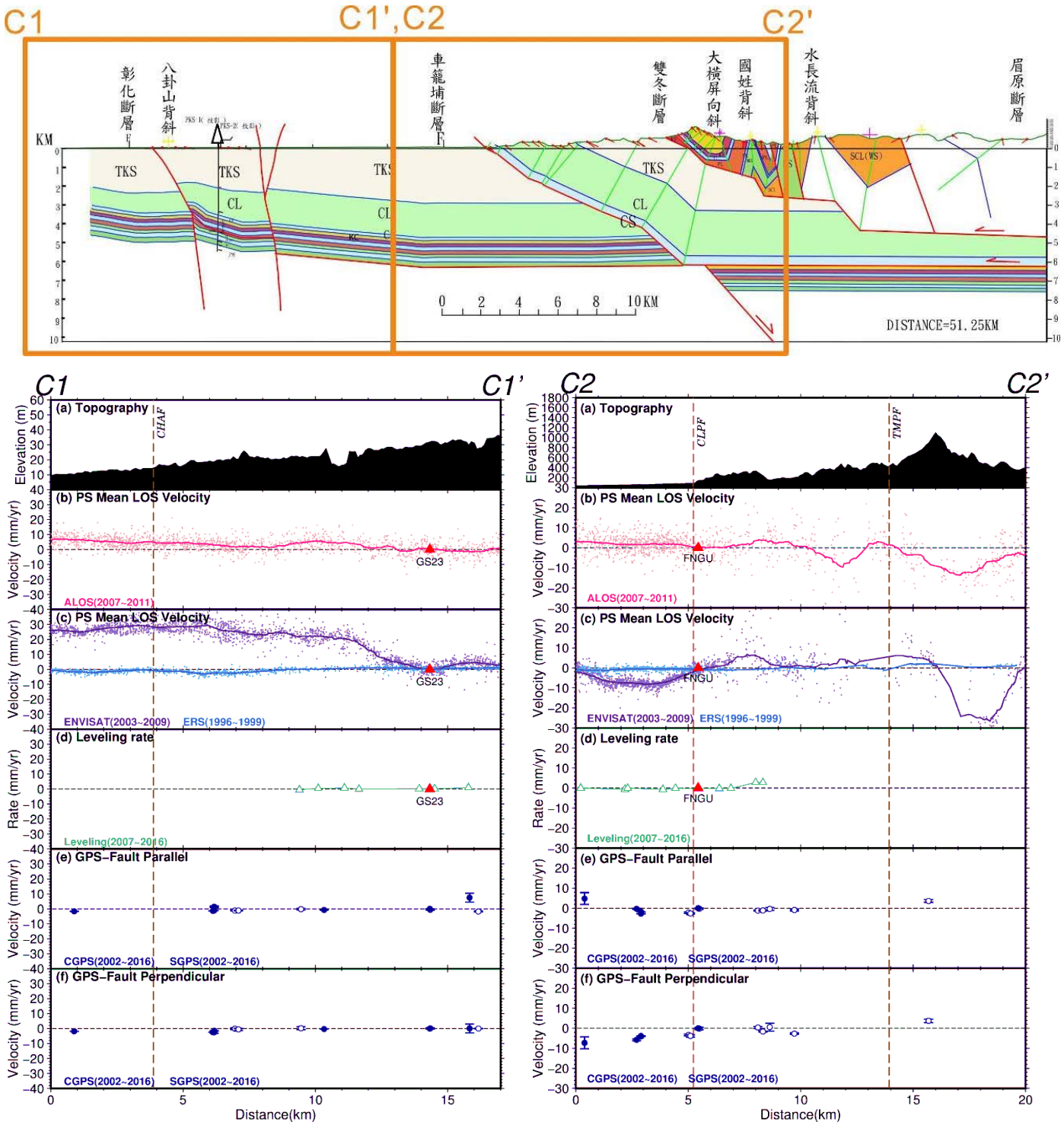


圖 3-3.4：C1~C2 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。地質剖面圖（黃旭燦等，2004）。

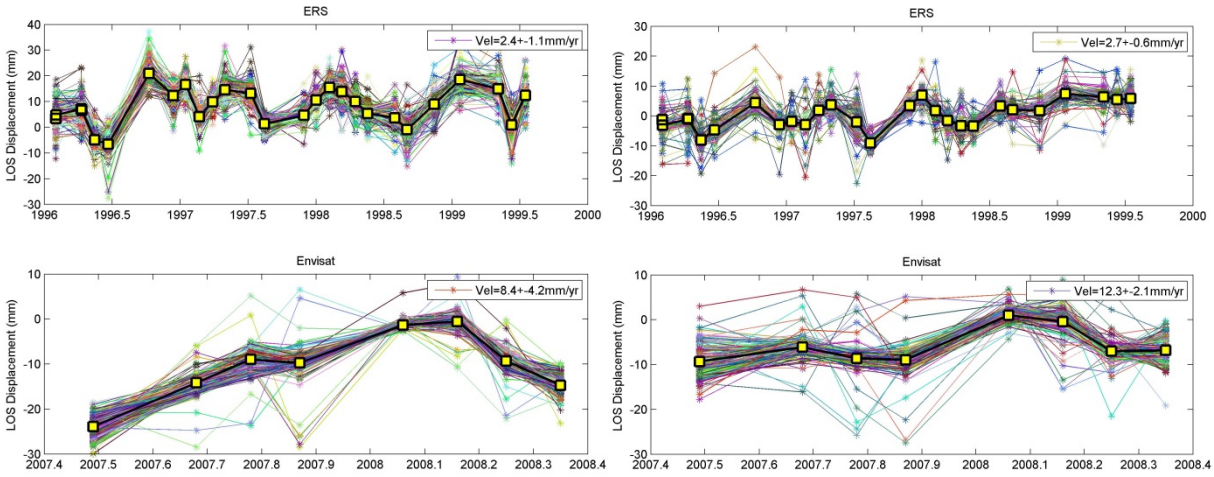


圖 3-3.5：C1 剖面時間序列，（左）彰化斷層西側；（右）彰化斷層東側。（位置如圖 3-3.1 綠色方框 1~2）

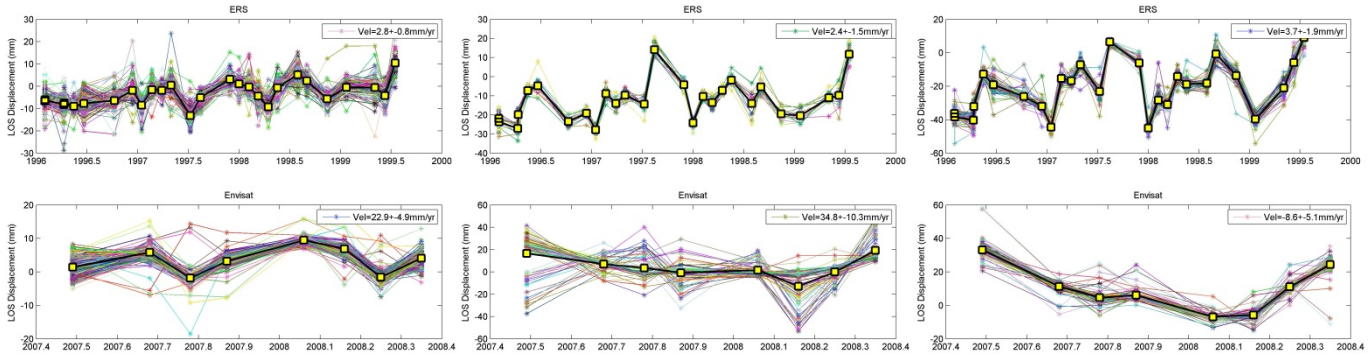


圖 3-3.6：C2 剖面時間序列，（左）車籠埔斷層西側；（中）車籠埔斷層東側與大茅埔-雙冬斷層西側；（右）大茅埔-雙冬斷層東側。（位置如圖 3-3.1 綠色方框 3~5）

C3 剖面跨越彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，長度 45.7 公里、半寬 7 公里、剖面走向 88.5°。根據圖 3-3.8 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。而根據圖 3-3.9，三種影像在 C3 剖面向東跨彰化斷層向東 1 公里處都呈現視衛星方向縮短的速度梯度差異，且繼續向東跨過車籠埔斷層也都呈現視衛星方向縮短的速度梯度差異，與水準結果相似。顯示此兩條斷層都為帶有逆衝分量的斷層。其中若比對其他衛星影像與水準、GPS 測量結果，ENVISAT 影像散度過大，可能原因為大氣影響嚴重，因此八卦山背斜地區應該為地形影響的大氣效應，而非真實變形大。由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，在跨彰化斷層垂直速度，由西至東有約 1-2 mm/yr 的抬升量，跨越大茅埔-雙冬斷層則無觀測資料。跨彰化斷層的水平速度在平行斷層分量上變化並不顯著，垂直斷層的分量上則有約 2 mm/yr 的縮短量，跨車籠埔斷層的水平速度在平行斷層分量上，約有 3 mm/yr 的左

移分量，垂直斷層的分量上則有約 4 mm/yr 的縮短量，跨大茅埔-雙冬斷層的水平速度在平行斷層分量上，約有 3 mm/yr 的左移分量，垂直斷層的分量上則有約 12 mm/yr 的縮短量。

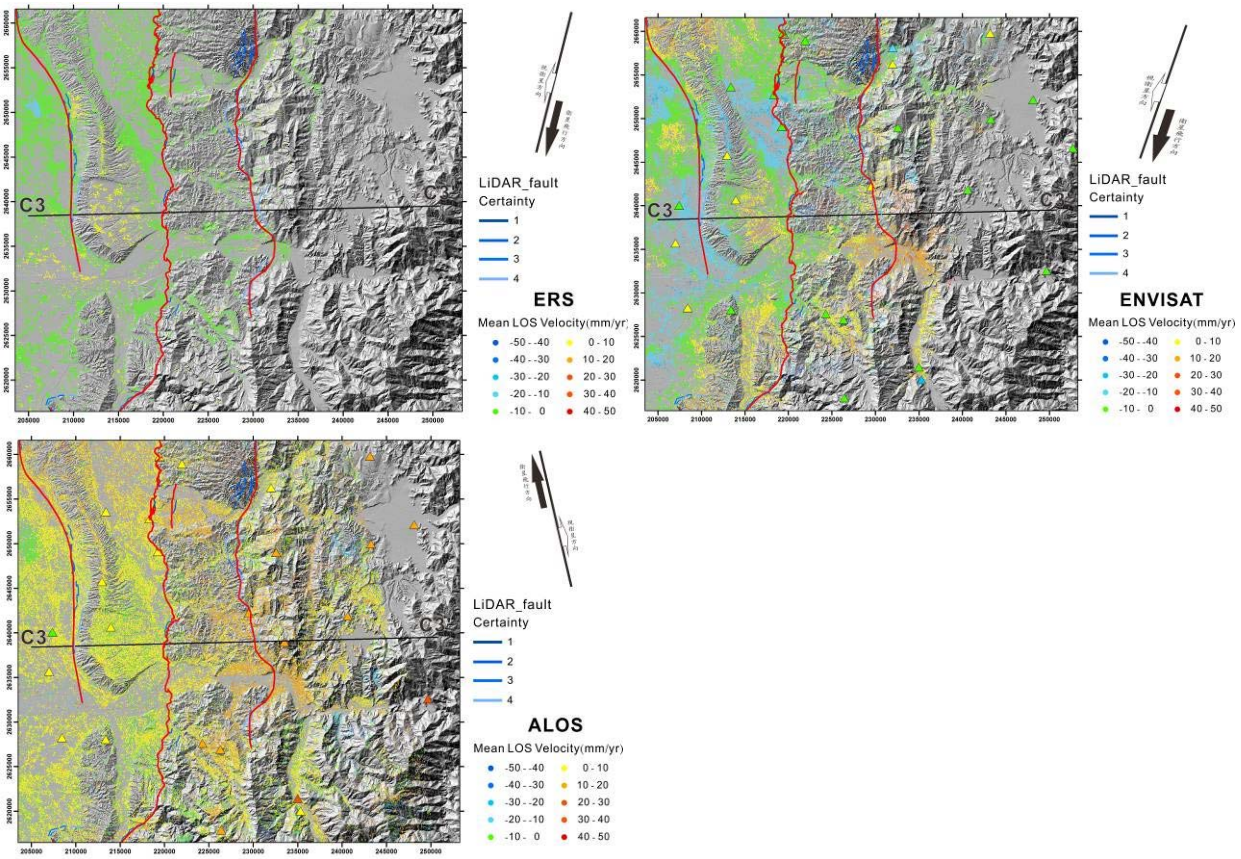


圖 3-3.7：C3 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。LiDAR 線形說明如圖 3-3.3 所示。

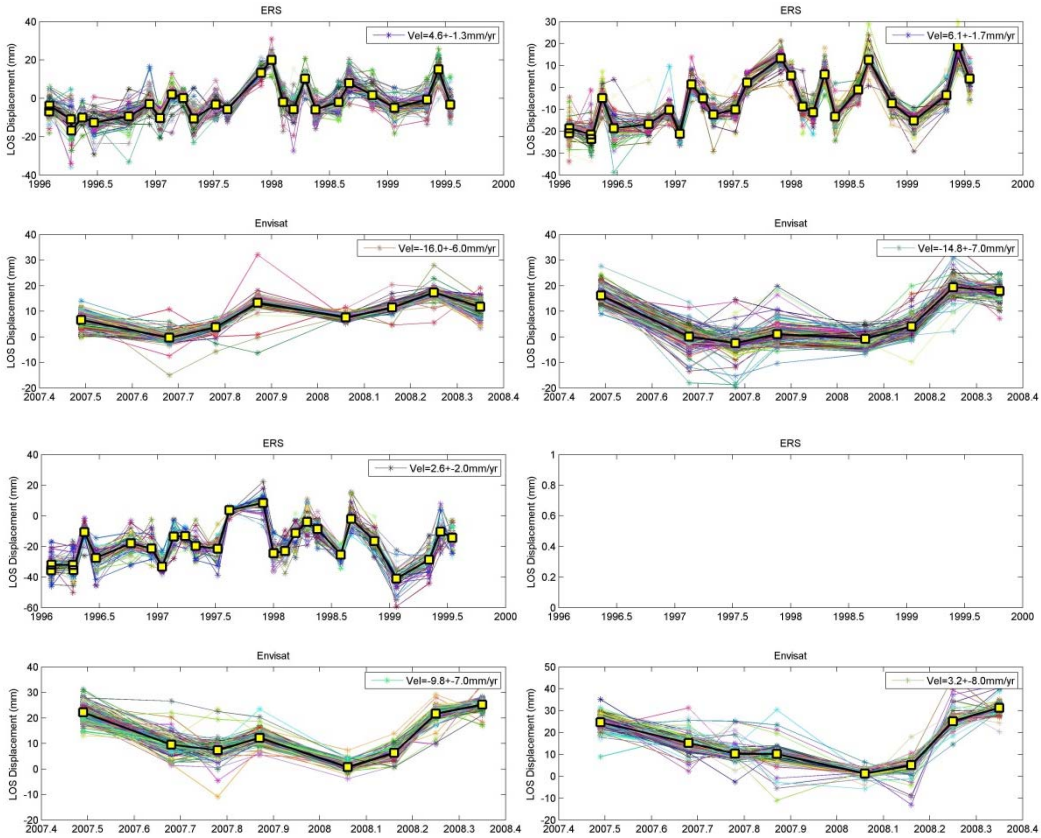


圖 3-3.8：C3 剖面時間序列，（左上）彰化斷層西側；（右上）彰化斷層東側與南段車籠埔斷層西側；（左下）南段車籠埔斷層東側與大茅埔-雙冬斷層西側；（右下）大茅埔-雙冬斷層東側。（位置如圖 3-3.1 綠色方框 6~9）

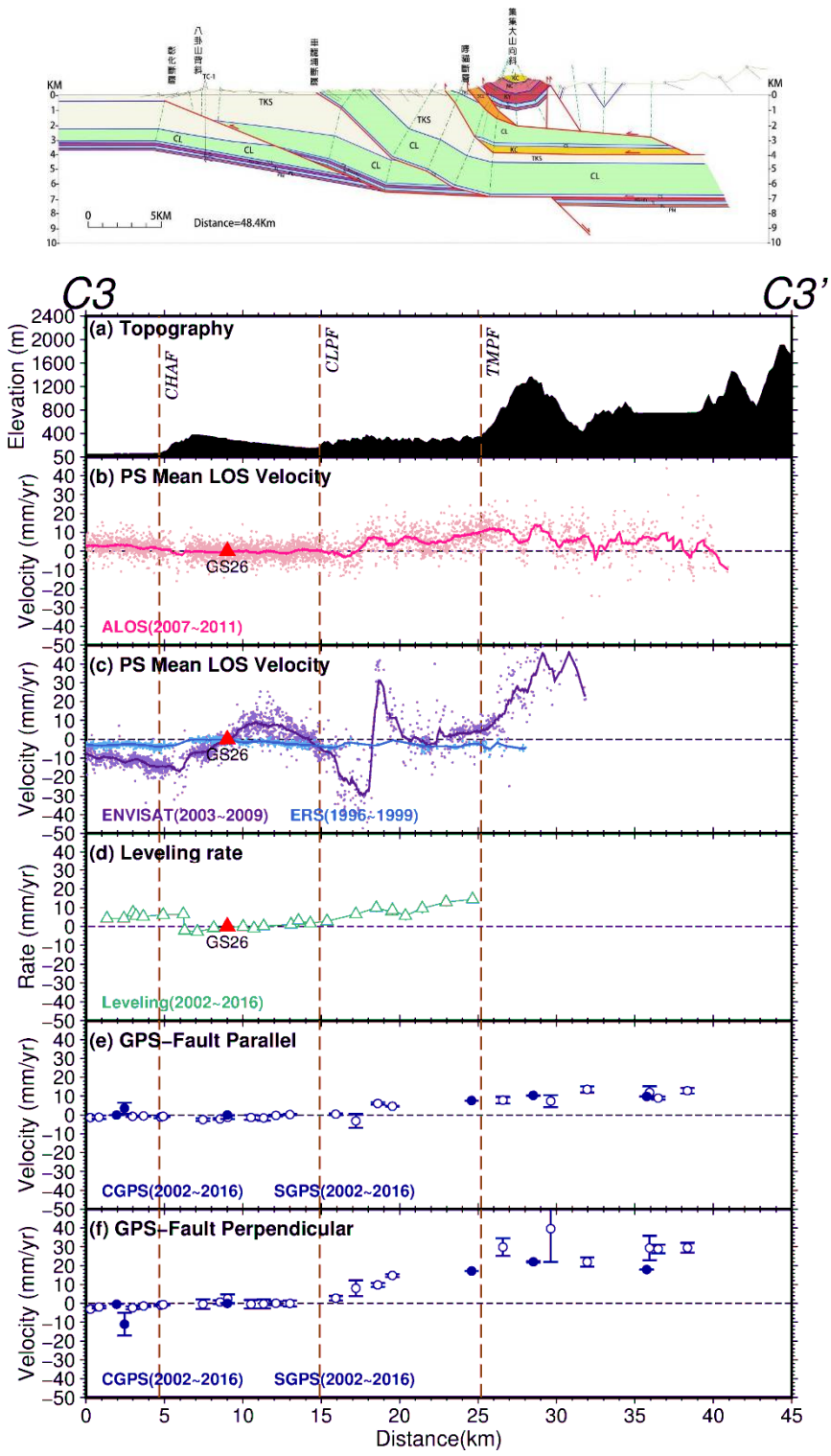


圖 3-3.9：C3 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔-雙冬斷層。地質剖面圖（黃旭燦等，2004）。

3-3-2 梅山斷層（C4）

3-3-2-1 地表變形觀測

三種衛星影像結果顯示（圖 3-3.11），在跨過梅山斷層處沒有明顯的速度梯度差異。主要視衛星方向上的速度梯度改變則呈現在斷層向北約 1 公里處。

3-3-2-2 構造解釋

C4 剖面跨越梅山斷層，長度 21 公里、半寬 5.2 公里、剖面走向 160°。根據圖 3-3.12，三種衛星影像都顯示出在梅山斷層北側 1 公里處有一視衛星方向速度增加，約為 2-3 mm/yr。根據圖 3-3.13 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。由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，在跨梅山斷層垂直速度，由西北至東南有約 3 mm/yr 的抬升量。跨梅山斷層的水平速度在平行斷層分量上，約有 4 mm/yr 的右移分量，垂直斷層的分量上則有約 3 mm/yr 的縮短量。

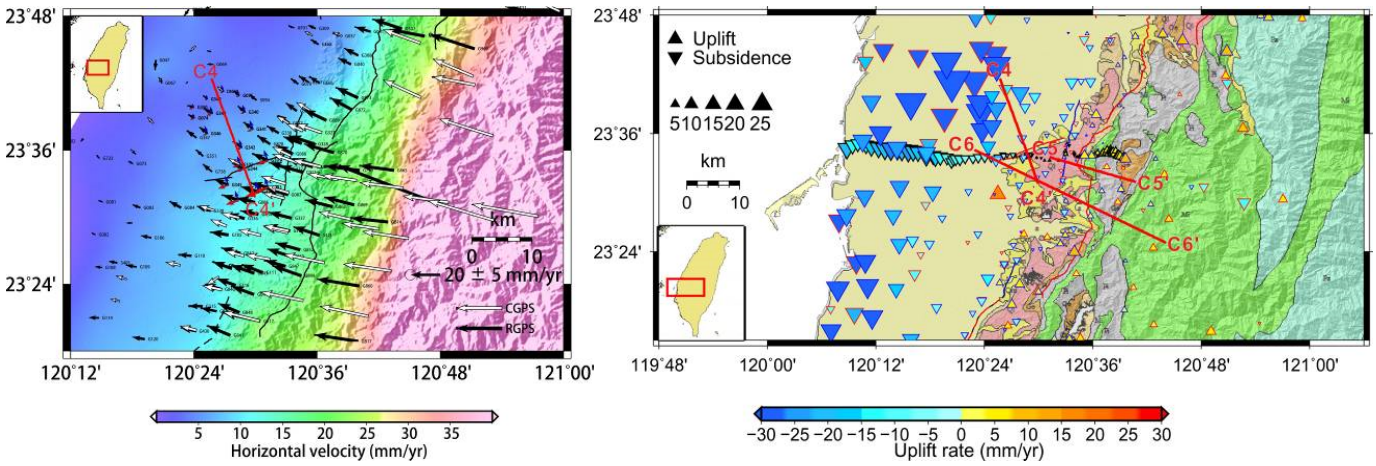


圖 3-3.10：C4 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。

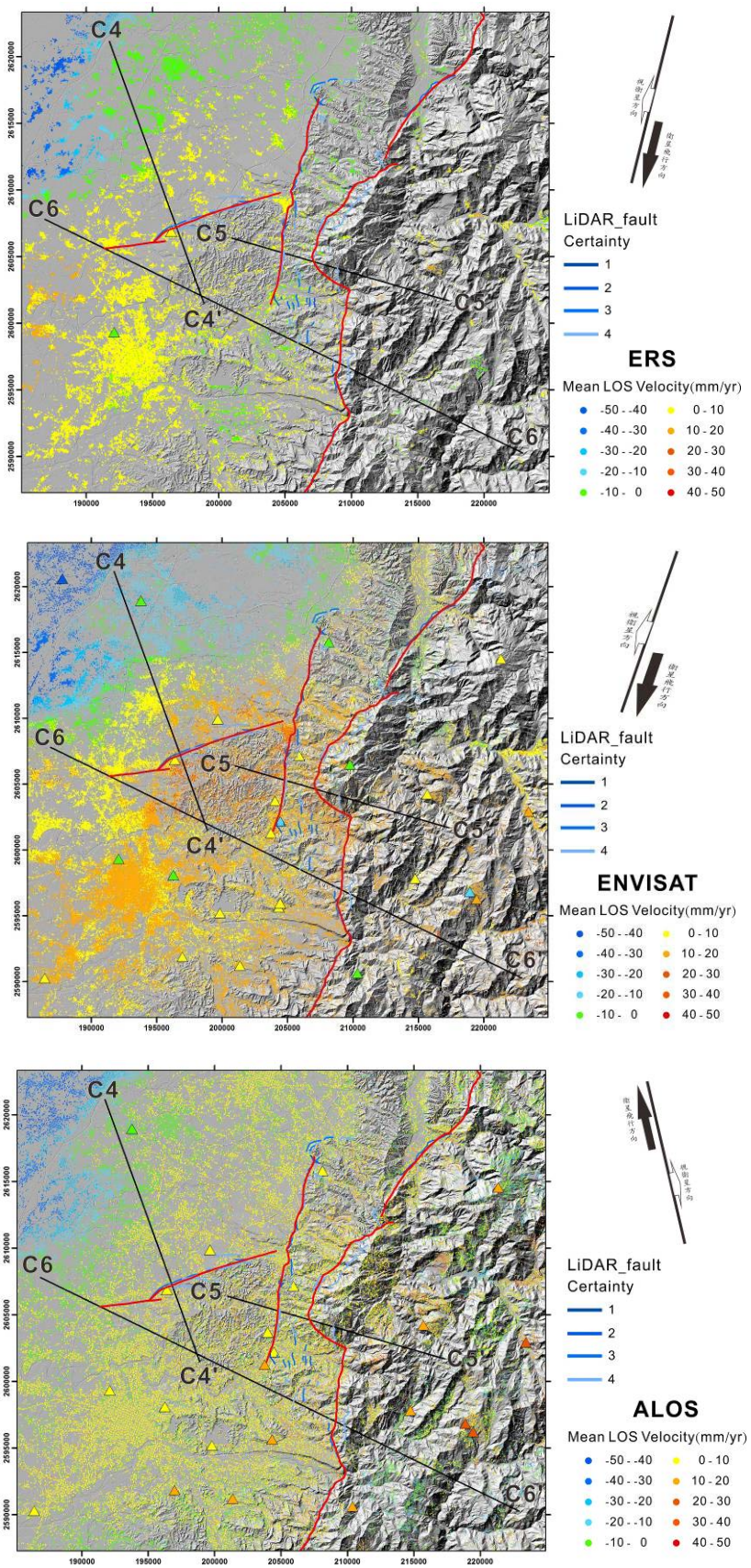


圖 3-3.11：C4~C6 剖面區域之 ERS、Envisat 及 ALOS 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。LiDAR 線形說明如圖 3-3.3 所示。

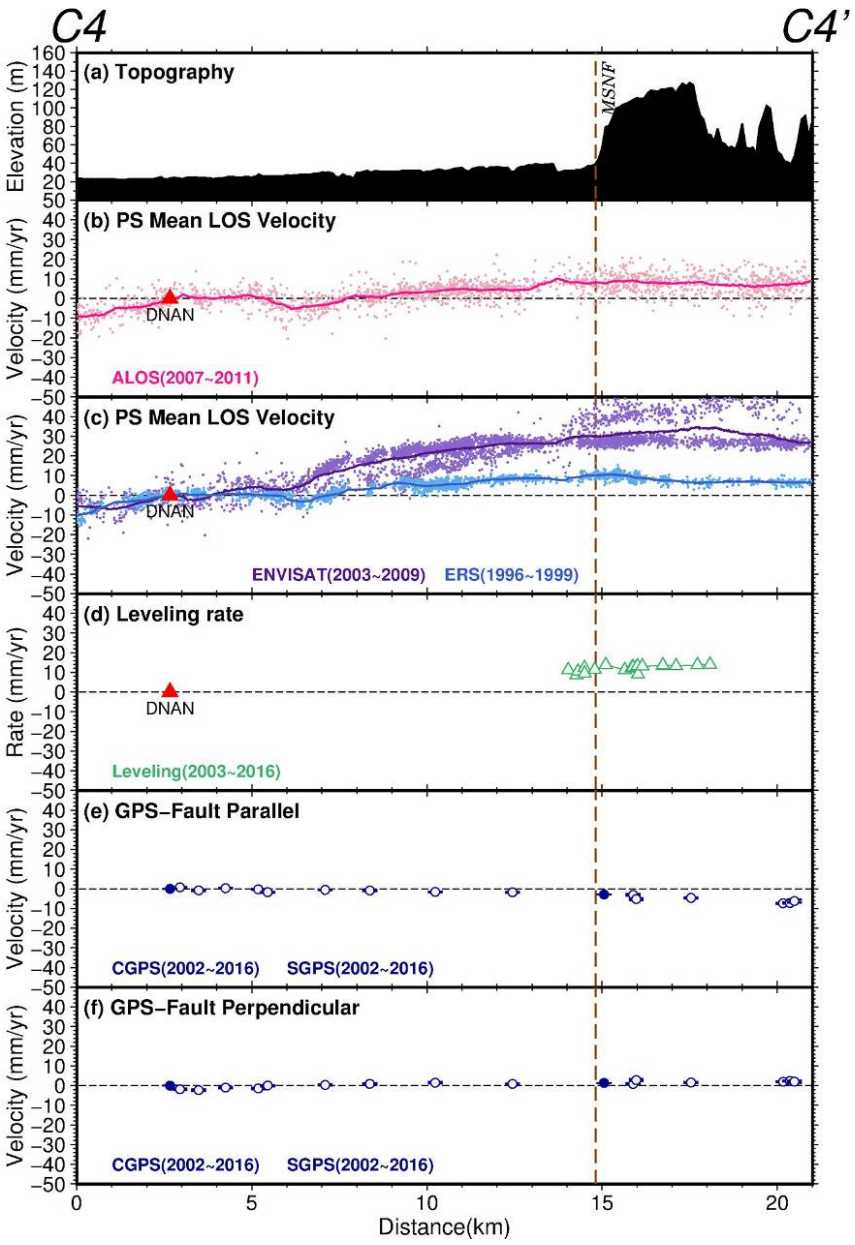


圖 3-3.12：C4 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。MSNF 為梅山斷層。

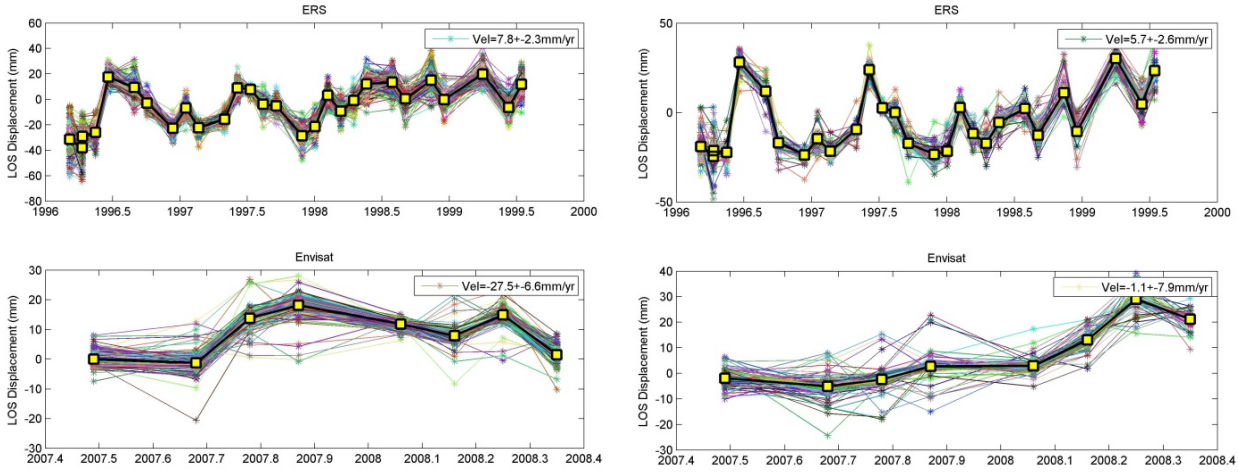


圖 3-3.13：C4 剖面時間序列，(左) 梅山斷層北側；(右) 梅山斷層南側與九芎坑斷層西側。(位置如圖 3-3.1 綠色方框 10~11)

3-3-3 九芎坑斷層（C5）、大尖山斷層（C5）

3-3-3-1 地表變形觀測

三種衛星影像結果顯示（圖 3-3.11），ERS 及 ENVISAT 衛星在向東跨過九芎坑斷層都有呈現輕微視衛星速度遠離，ALOS 衛星則沒有明顯速度差異。而再向東跨過大尖山斷層因進入山區，導致有效的永久散射點減少，因此看不出明顯的速度梯度差異。

3-3-3-2 構造解釋

C5 剖面跨越九芎坑斷層及大尖山斷層，長度 40 公里、半寬 3.2 公里、剖面走向 106°。根據圖 3-3.15，三種衛星影像結果都顯示向東跨過九芎坑斷層視衛星方向速度約有 3 mm/yr 的變化量，跨過大尖山斷層則只有 ALOS 衛星有視衛星方向 2-3 mm/yr 的速度變化量。而根據圖 3-3.16，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。由歷年 GPS 及精密水準資料顯示，在跨九芎坑斷層垂直速度約有 3 mm/yr 的變化量，在跨大尖山斷層的變化則不明顯。跨九芎坑斷層的水平速度在平行斷層分量上，並無顯著變化，垂直斷層的分量上則有約 7 mm/yr 的縮短量，跨大尖山斷層的水平速度在平行斷層分量上，無顯著變化，垂直斷層的分量上則有約 5 mm/yr 的縮短量。

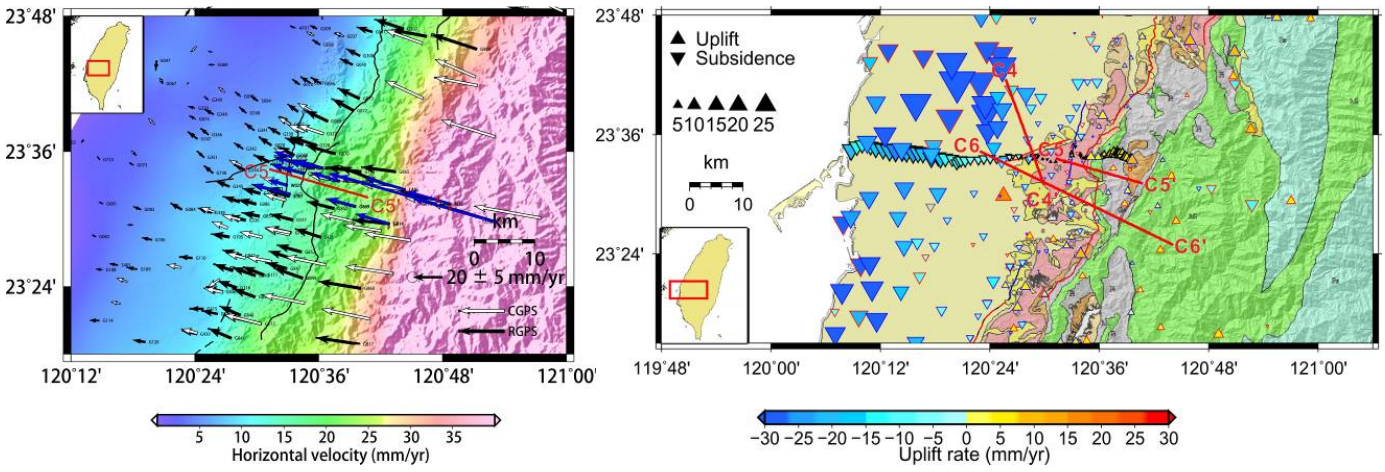


圖 3-3.14：C5 之水平速度場（左圖）、垂直速度場（右圖）及剖面位置圖。

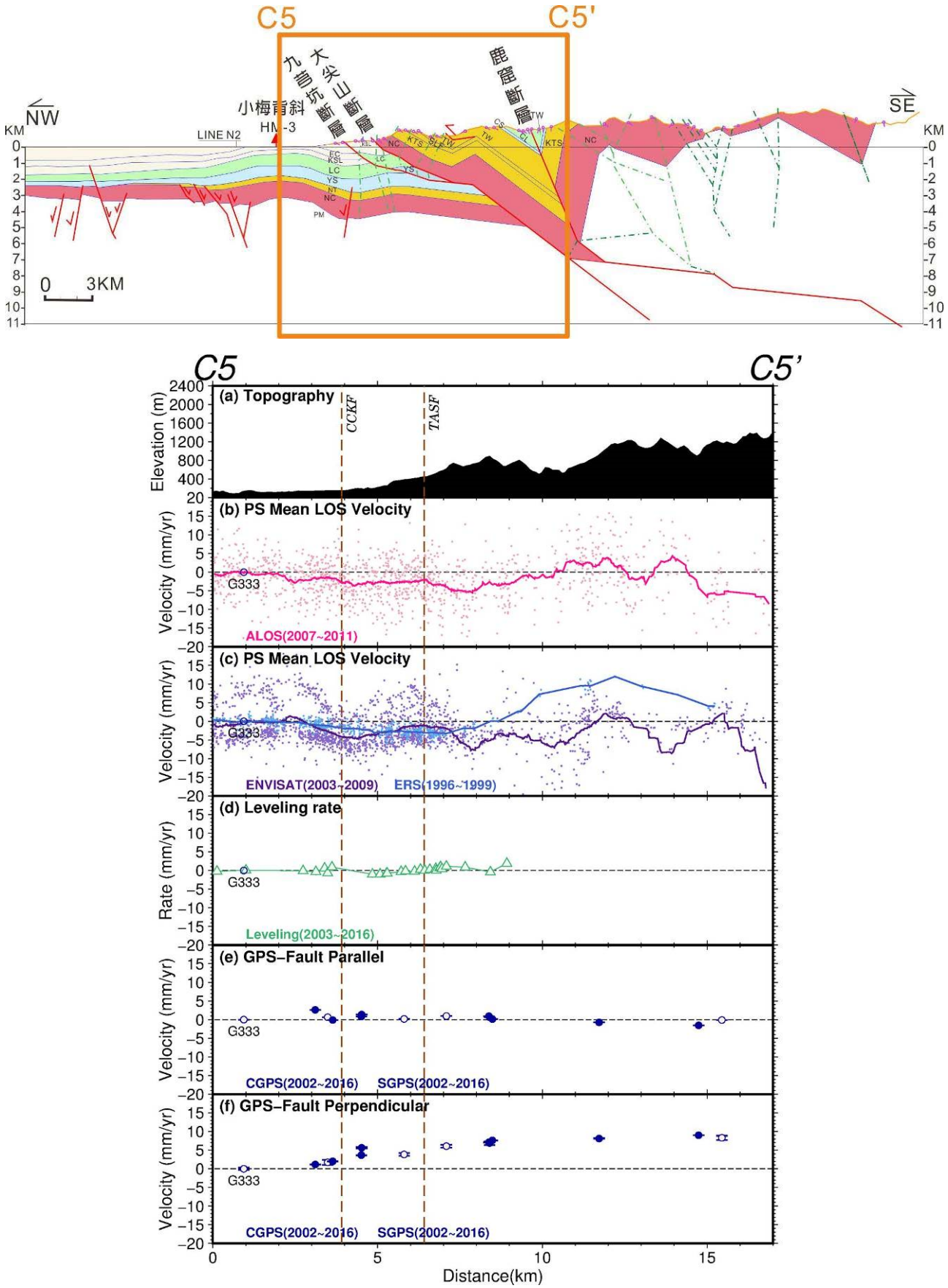


圖 3-3.15：C5 剖面速度場圖，(a)地形高程；(b)L 波段 ALOS 視衛星方向速度變化；(c)C 波段 ENVISAT 及 ERS 視衛星方向速度變化；(d)水準測量資料；(e)GPS 平行斷層方向之速度變化；(f)GPS 垂直斷層方向之速度變化。CCKF 為九芎坑斷層、TASF 為大尖山斷層。地質剖面圖（黃旭燦等，2004）。

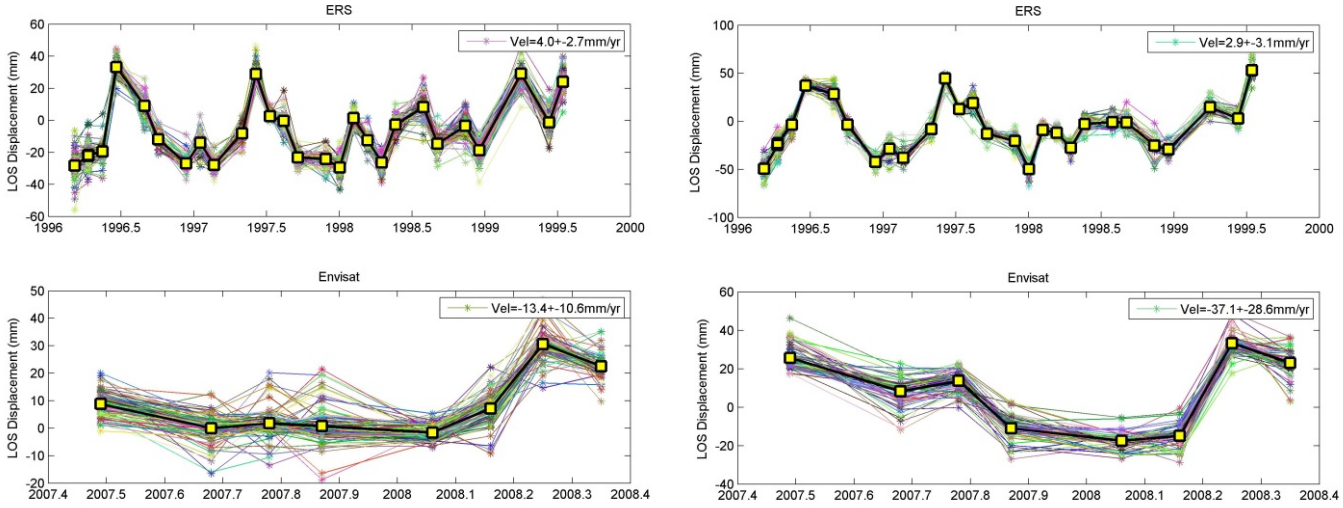


圖 3-3.16：C5 剖面時間序列，（左）九芎坑斷層東側與大尖山斷層西側；（右）大尖山斷層東側。（位置如圖 3-3.1 綠色方框 12~13）

第四章、中部地區地表速度場分析

4-1 GPS 連續站、移動站及 PSInSAR 測量資料整合與分析

由於觀測地表變形的方法眾多，且各方法基準框架皆不同，因此本計畫期以三角網格進行線性內插結合各種測地資料以獲取分布更廣泛、更加貼近真實之地表變形形貌。

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

$$N_m = a_m + b_m x + c_m y \qquad （式 4-1.1）$$

x,y 為網格內觀測點之坐標

a_m、b_m、c_m ：為節點 m 與另兩個節點相關的係數，假設三節點 1、2、3 的坐標分別為（x_1, y_1）、（x_2, x_2）、（x_3, x_3），如圖 4-1.1 所示，以節點 1 為例：

$$a_1 = (x_2 y_3 - x_3 y_3) / \Delta \qquad （式 4-4.2）$$
$$b_1 = (y_2 - y_3) / \Delta$$
$$c_1 = (x_2 - x_2) / \Delta$$
$$\Delta = x_1 (y_2 - y_3) + x_2 (y_3 - y_1) + x_3 (y_1 - y_2) \qquad （三角形面積）$$

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

$$U(x,y) = \sum_{m=1}^{3} N_m u_m \qquad （式 4-1.3）$$

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

可將式 4-1.3 式改寫為

$$U(x,y) = [N_1 \; N_2 \; N_3] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \qquad （式 4-1.4）$$

應用式 4-1.4 式，由 Wang et al.（2012）提出的計算公式為:

$$\begin{bmatrix} G_{sar} & G_{orb} & G_{atm} \\ G_{gps} & 0 & 0 \\ k^2\nabla^2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vel} \\ m_{orb} \\ m_{atm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{sar} \\ d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad （式 4-1.5）$$

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

G_{gps}為與 GPS 相關的格林函數，為觀測點與節點的 shape function N，G_{orb}、G_{atm} 為與 InSAR 觀測資料中軌道殘差以及大氣效應相關的格林函數。m_{vel}、m_{orb}、m_{atm}分別為節點三分量速度場模型、軌道殘差模型以及大氣效應模型。d_{sar}、d_{gps}分別為 InSAR 觀測值、GPS 觀測值。k^2控制節點速度平滑程度的參數。∇^2為拉普拉斯運算子（Laplacian smoothing operator, Desbrun et al., 1999）。

$$\mathrm{L}(u_i) = \frac{2}{\sum_{j\epsilon N_1(i)}|eij|}\sum_{j\epsilon N_1(i)}\frac{u_j u_i}{|e_{ij}|} \qquad （式 4-1.6）$$

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

在此我們假設經 StaMPS 計算後，大氣效應及軌道殘差已被成功扣除，因此將式 4-1.5 式改寫為：

$$\begin{bmatrix} G_{sar} \\ G_{gps} \\ k^2\nabla^2 \end{bmatrix}[m_{vel}] = \begin{bmatrix} d_{sar} \\ d_{gps} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad （式 4-1.7）$$

其中

$$G_{sar} = \begin{matrix} S_{11E} & S_{11N} & S_{11U} & S_{12E} & S_{12N} & S_{12U} & & & S_{1nE} & S_{1nN} & S_{1nU} \\ S_{21E} & S_{21N} & S_{21U} & S_{22E} & S_{22N} & S_{22U} & \dots & \dots & S_{2nE} & S_{2nN} & S_{2nU} \\ S_{31E} & S_{31N} & S_{31U} & S_{32E} & S_{32N} & S_{32U} & & & S_{3nE} & S_{3nN} & S_{3nU} \\ & & & \vdots & & & & & & \vdots & \\ S_{k1E} & S_{k1N} & S_{k1U} & S_{k2E} & S_{k2U} & S_{k2U} & \dots & \dots & S_{knE} & S_{knN} & S_{knU} \end{matrix} \qquad （式 4-1.8）$$

S_{kn*}為第 k 筆 LOS 觀測資料與第 n 個節點於*方向之 shape function 與合成至 LOS 方向的單位向量（P）乘積，而三分量速度場合成至 LOS 方向公式為：

$$LOS = [\cos\theta \quad -\sin\theta\cos\alpha \quad -\sin\theta\sin\alpha]\begin{bmatrix} V_U \\ V_E \\ V_N \end{bmatrix} \qquad （式 4-1.9）$$

其中 α 為與衛星軌跡方向之方位角，θ 為 LOS 方向和與地表垂直法線之夾角。由 4-1.9 式，合成單位向量P表示為:

$$\mathrm{P} = [\cos\theta \quad -\sin\theta\cos\alpha \quad -\sin\theta\sin\alpha] = [P_U \; P_E \; P_N] \qquad （式 4-1.10）$$

則

$$S_{kn*} = N_{kn*} * P_* \qquad （式 4-1.11）$$

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

$$G_{gps}=\begin{bmatrix} N_{11E} & 0 & 0 & N_{12E} & 0 & 0 & \cdots & \cdots & N_{1nE} & 0 & 0 \\ 0 & N_{11N} & 0 & 0 & N_{12N} & 0 & & & 0 & N_{1nN} & 0 \\ 0 & 0 & N_{11U} & 0 & 0 & N_{12U} & & & 0 & 0 & N_{1nU} \\ & & & \vdots & & & & & & \vdots & \\ N_{\mathrm{m}1E} & 0 & 0 & N_{m2E} & 0 & 0 & & & N_{mnE} & 0 & 0 \\ 0 & N_{m1N} & 0 & 0 & N_{m2N} & 0 & \cdots & \cdots & 0 & N_{mnN} & 0 \\ 0 & 0 & N_{m1U} & 0 & 0 & N_{m2U} & & & 0 & 0 & N_{mnU} \end{bmatrix} \quad (式\ 4\text{-}1.12)$$

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

$$m_{vel}=\begin{matrix} m_{1E} \\ m_{1N} \\ m_{1U} \\ m_{2E} \\ m_{2N} \\ m_{2U} \\ \vdots \\ \vdots \\ m_{nE} \\ m_{nN} \\ m_{nU} \end{matrix} \quad (式\ 4\text{-}1.13)$$

m_{vel}為各節點三分量速度場矩陣，m_{n*} 為第 n 個節點於*方向之速度，而觀測資料為：

$$d_{gps}=\begin{matrix} V_{1E} \\ V_{1N} \\ V_{1U} \\ V_{2E} \\ V_{2N} \\ V_{2U} \\ \vdots \\ \vdots \\ V_{nE} \\ V_{nN} \\ V_{nU} \end{matrix},\ d_{sar}=\begin{matrix} LOS_1 \\ LOS_2 \\ LOS_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ LOS_k \end{matrix} \quad (式\ 4\text{-}1.14)$$

m，k 分別為 GPS 及 InSAR 觀測資料數量。

k^2則以模型平滑程度與模型預測和觀測值擬合程度之間的 trade-off 曲線決定。

我們使用加權最小二乘法（weighted least-square）估算節點三分量速度場（m_{vel}），首先分別利用 PSInSAR 標準差與 GPS 資料誤差製造個對角權重矩陣（diagonal weighting matrix，式 4-1.15），並且把權重矩陣加入公式 4-1.7，便可求得符合觀測值的節點三分量速度場。

$$W_{sar}=\begin{bmatrix} 1/s_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/s_k \end{bmatrix},\ W_{gps}=\begin{bmatrix} 1/\sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/\sigma_m \end{bmatrix} \quad (式\ 4\text{-}1.15)$$

上式 s 與 σ 分別代表 PSInSAR 標準差與 GPS 資料誤差，分別有 k 及 m 筆資料，將公式式 4-1.15 代入公式式 4-1.7 中，便可得到下列公式：

$$\begin{bmatrix} W_{sar} & G_{sar} \\ W_{gps} & G_{gps} \\ k^2\nabla^2 & \end{bmatrix} [m_{vel}] = \begin{bmatrix} W_{sar} & d_{sar} \\ W_{gps} & d_{gps} \\ 0 & \end{bmatrix} \qquad (式\ 4\text{-}1.16)$$

上列公式可改寫成：

$$G_w m = d_w \qquad (式\ 4\text{-}1.17)$$

即可得到加權最小二乘之解：

$$\mathrm{m} = \left(G_w{}^T G_W\right)^{-1} G_w{}^T d_w \qquad (式\ 4\text{-}1.18)$$

在此我們採用 2006-2011 年的 ALOS 解算資料以及 2002-2017 年的連續站及移動站觀測資料(GPS 觀測結果經同震效應修正)，估算得到中部區域三分量速度場(圖 4-1.2)相對澎湖白沙站(S01R)的結果。中部地區水平速度場呈現向西北西向，而垂直速度在濁水溪出海口附近呈現明顯下陷，其餘地區高程方向變化則不顯著。

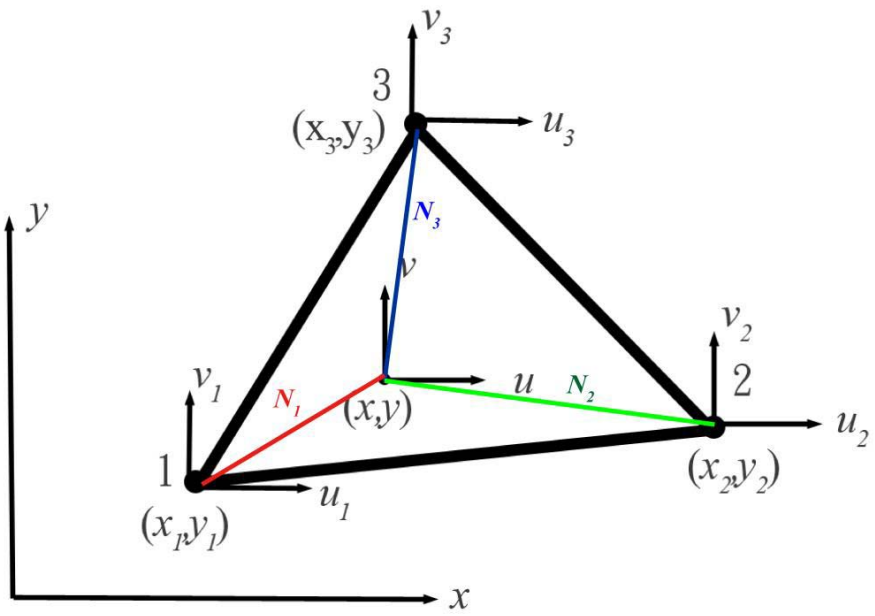


圖 4-1.1：觀測點與網格三頂點示意圖。

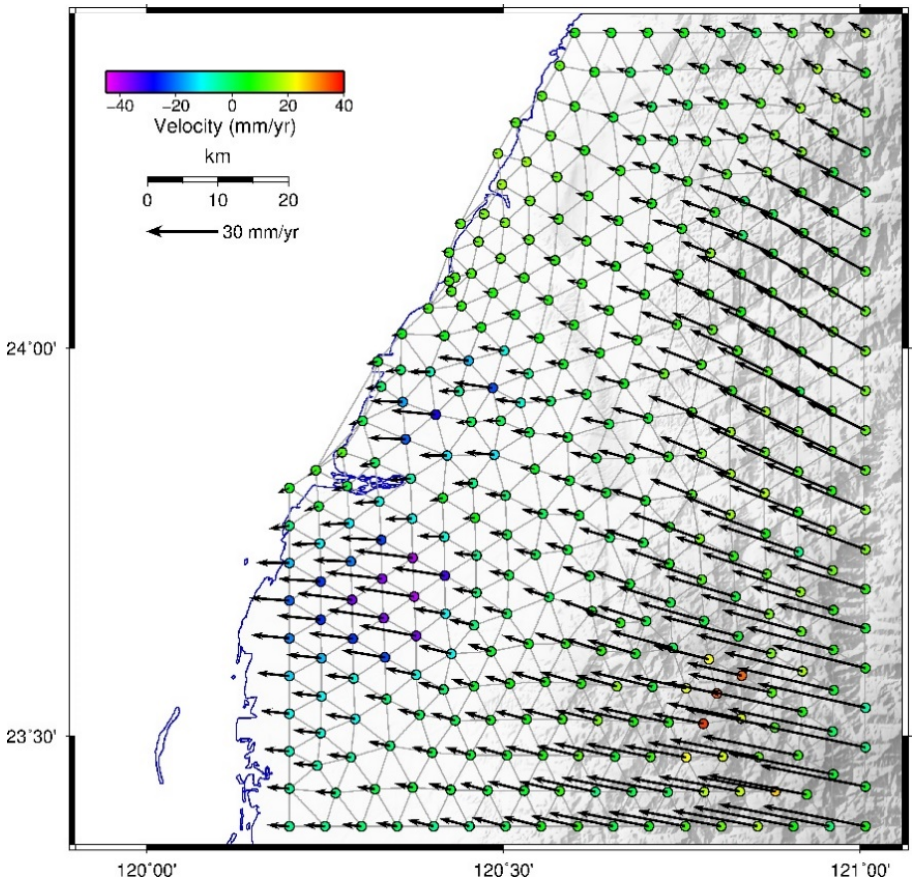


圖 4-1.2：臺灣中部區域內差結果，三維速度場估算結果與應變場內插水平速度場比較。圓點為節點之垂直速度場，暖色系表示抬升，冷色系則回下陷。此處僅展示以所有 GPS 及 PSInSAR 觀測資料進行速度場估算結果。

4-2 中部地區應變速率之空間分布

4-2-1 應變計算方法

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

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

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

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

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

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

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

傳統上，我們可以將此逆推問題視為以下形式：

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

G(m)是連結非線性模型參數向量 m、線性模型參數向量 s 與觀測資料向量 d 之核心矩陣，e 則為的觀

測與模型的誤差，其平均為零，斜方差距陣（covariance matrix）為 Σ 讓誤差呈常態分佈 e～N（0, Σ）。非觀測資料向量 d 之形式為$d = [d_1^T, d_2^T, \cdots, d_n^T]^T$，誤差向量的形式為$e = [e_1^T, e_2^T, \cdots, e_n^T]^T$。通常來說，網格點的總數大於有資料點的網格數，且整個系統合理假設為連續變化，因此有必要對線性模型 s 參數施以正則化（regularization） 以最小化平滑或阻尼運算式$\|Ds\|^2$。如此，最佳解就是將下列的目標公式最小化：

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

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

為了更客觀的估計平滑參數來推估更可靠的應變率分佈，我們可以採用貝式逆推方法，如此模型參數的後驗機率（posterior probability）為

$$p(e, \sigma^2, \alpha^2 | d) \propto (2\pi\sigma^2)^{-\frac{N}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} (2\pi\sigma^2)^{-\frac{M}{2}} \times$$

$$exp\left[-\frac{1}{2\alpha^2} (d - Ge)^T \Sigma^{-1} (d - Ge) - \frac{1}{2\alpha^2} (De)^T \left(De \right) \right]$$

如此未知的線性模型參數為每個格點中的應變率張量 e，未知的非線性模型參數為平滑參數 α^2 與資料權重 σ^2。我們可以使用 metropolis 演算法來找出非線性參數的分佈，並由此計算線性最小平方法而求得理想的模型參數數值分佈。D是一階的平滑運算式：

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

4-2-2 應變計算結果

由逆推計算中同時估計各網格的應變率矩陣之量值與平滑參數之數值。計算所得之應變率與主應變軸方向分佈如下列圖示所示；針對中部地區採平行正南北與平行正東西向之網格，約每五公里選取一網格點，使其選取隔點鄰近十公里之地表速度資料以達資料密度與平滑化之需求，計算應變、剪應變場與旋轉率如接續之附圖。

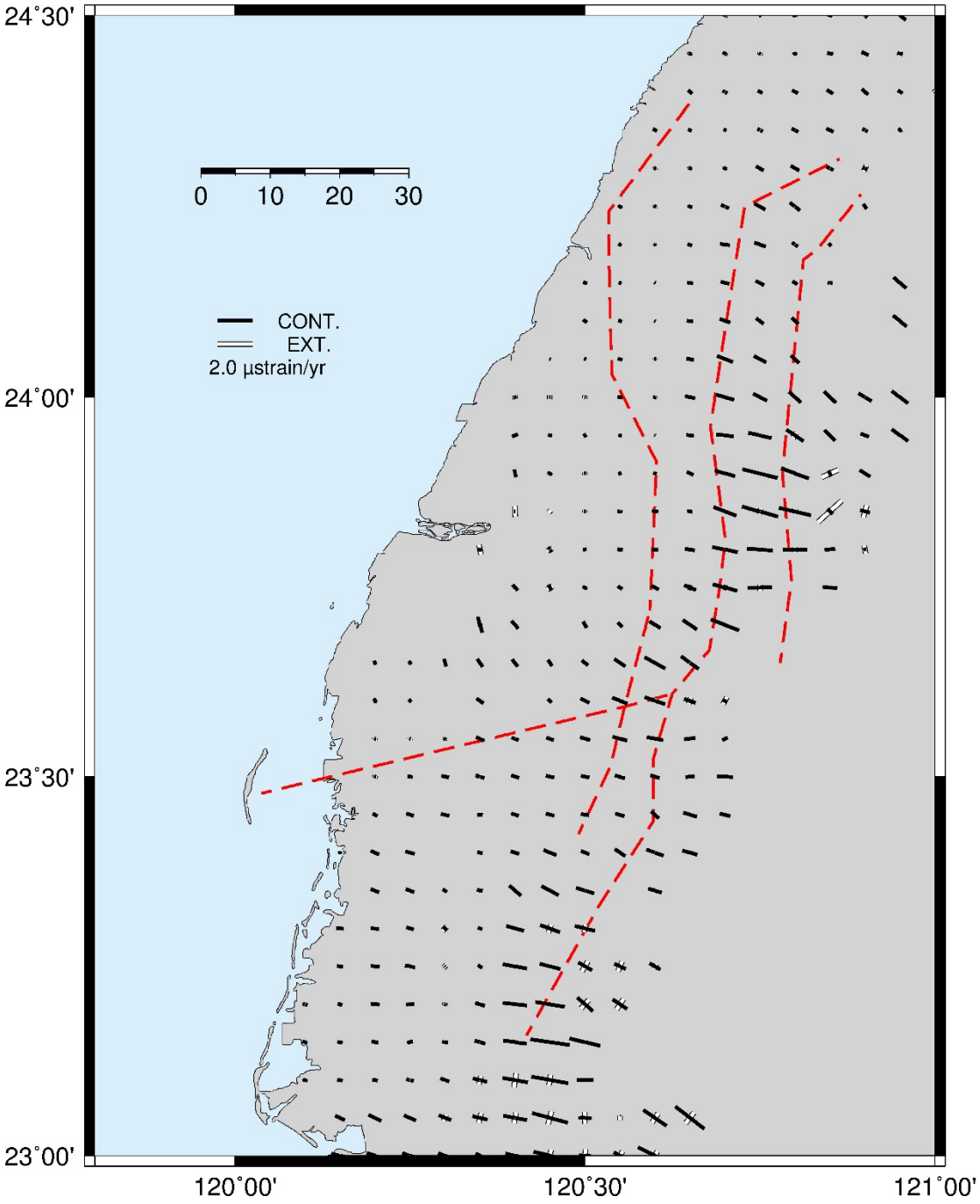


圖 4-2.1：中部地區應變場圖。

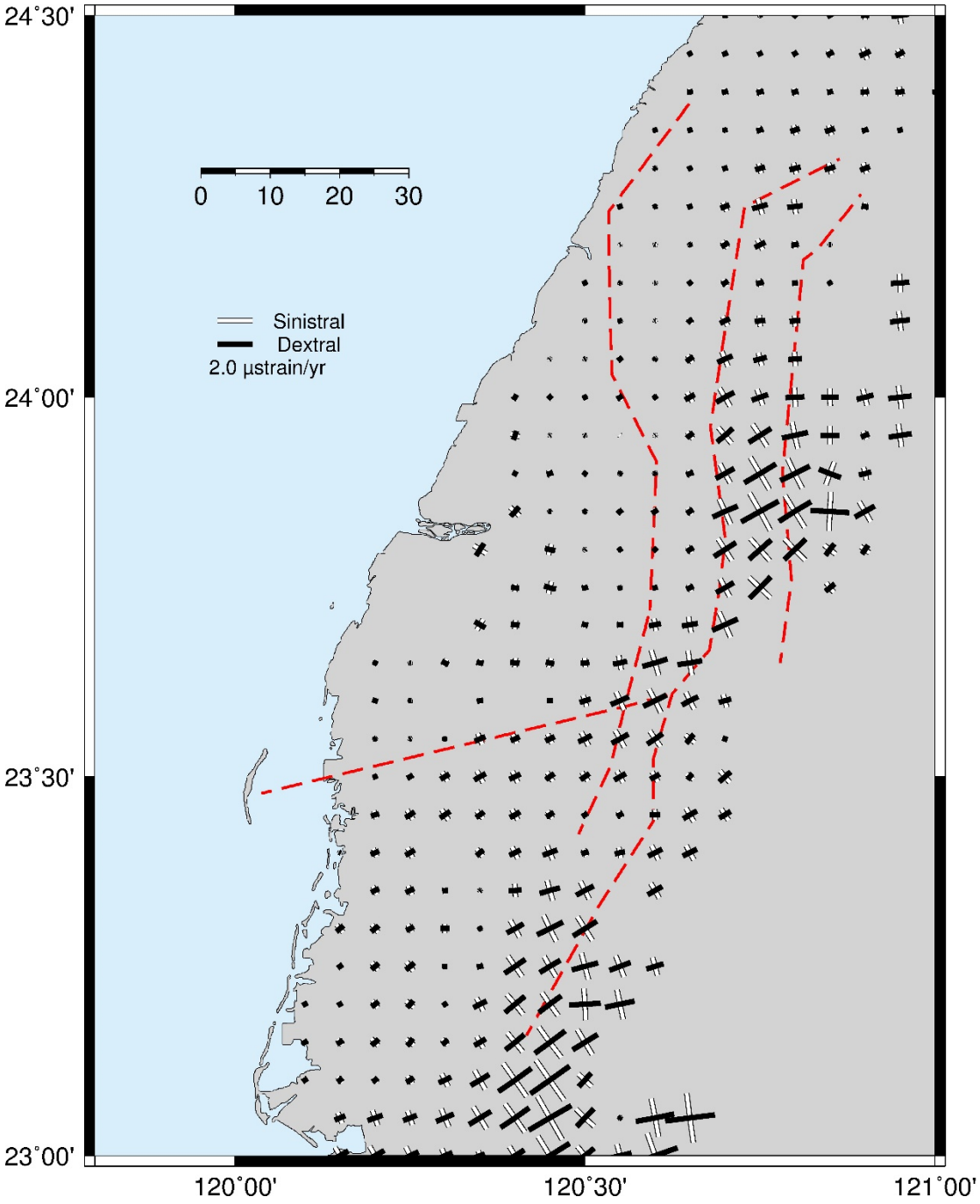


圖 4-2.2：中部地區剪應變場圖。

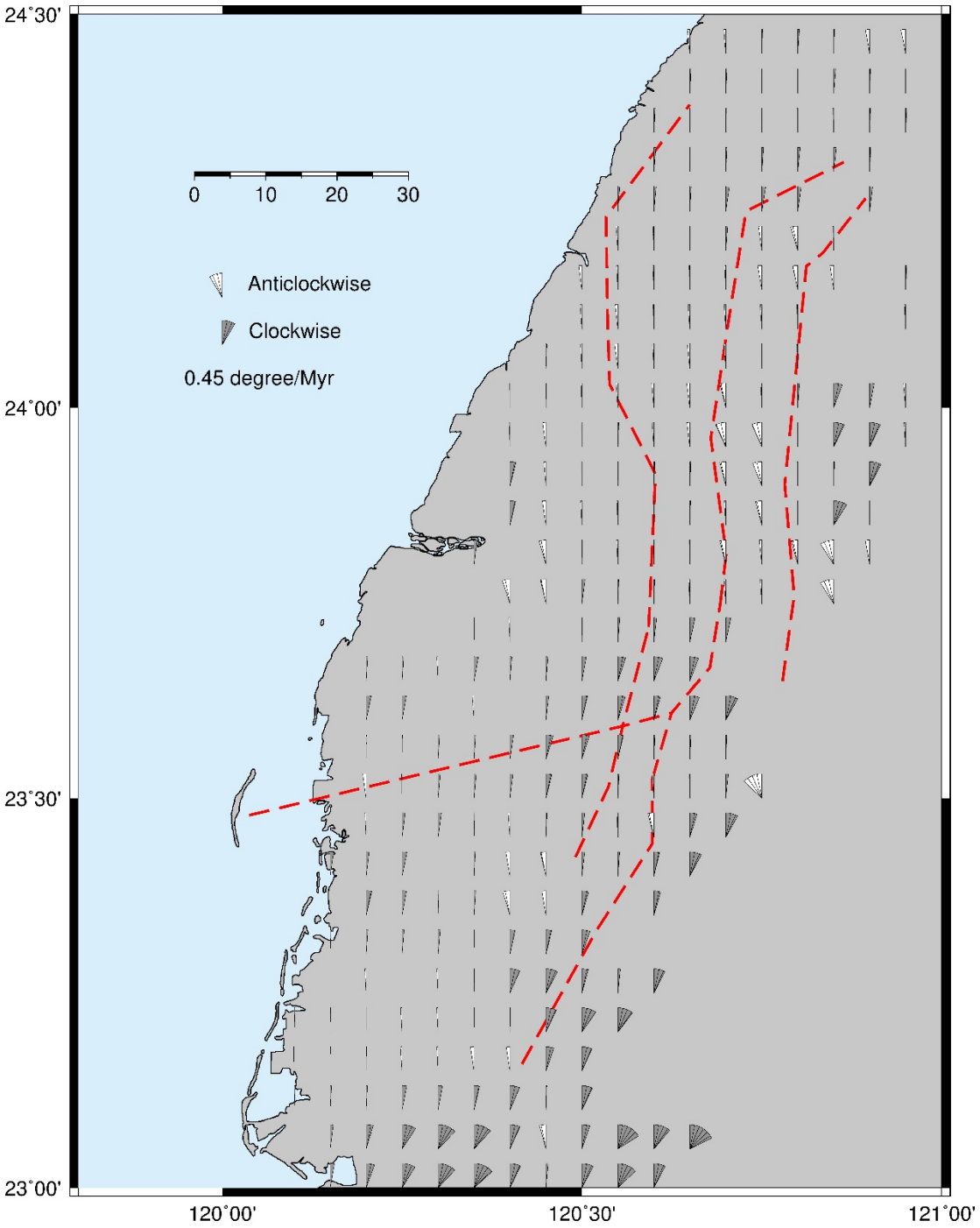


圖 4-2.3：中部地區之旋轉率分佈圖。

4-2-3 應變計算結論

以目前臺灣區域應變率分布結果來看，主要的壓縮發生在花東縱谷與西南部麓山帶前緣的區域。局部性的伸張發生在北臺灣、宜蘭地區與中央山脈東側。花東縱谷區域的壓縮應變軸方向與板塊運動方向相似，而臺灣西南部的壓縮應變軸方向則略為轉至向西。中臺灣地區，應變率以壓縮為主，方向與板塊運動方向相似，但量值較東臺灣小，且在西部麓山帶以西到平原區後，應變率之量值極小。針對本期計畫所探討之中部地區，可以看到變形主要發生在麓山帶前緣，壓縮量主要介於車籠埔斷層南段-大尖山斷層北段與大茅埔-雙冬斷層之間，垂直斷層走向，而伸張量約略在大茅埔-雙冬斷層以東與整體研究區域更南部，方向約略平行於斷層走向，從剪應變場圖可見右旋剪應變量在車籠埔斷層-大尖山斷層-觸口斷層以東與以南皆有一近規則之夾角，故該條斷層應提供了左移與逆衝之分量，而旋轉率分佈則可見與剪應變場有相同的變動趨勢。

第五章、斷層模型建置

本計畫針對中部地區七條斷層大甲－彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、梅山斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層及觸口斷層計算其斷層之滑移虧損率，使用了中興社所提供斷層參數，根據原始資料的特性與可靠度，提出調整斷層參數權重配置的建議，整合出三組模型斷層參數(表 5-1.1)進行測試，提供最佳的整合結果，並討論斷層滑移虧損率。模型建置中所使用之構造剖面於地圖中列出位置請參考圖 5-1.1 及圖 5-1.2。

表 5-1.1： 8 條斷層之斷層模型參數。

	斷層名稱		傾角(degree)	斷層底部深度(km)
1	大甲－彰化	北段	25.0	0.0－6.0
			6.5	6.0－8.0
		南段	25.0	0.0－7.5
			6.5	7.5－8.0
2	車籠埔		35.0	0.0－8.0
			6.5	8.0－10.0
3	大茅埔－雙冬		50.0	0.0－5.0
			18.0	5.0－10.0
4	梅山		80.0	12.5
5	九芎坑		25.0	0.0－7.0
			6.5	7.0－8.0
6	大尖山		32.5	0.0－6.5
7	觸口		45.0	0.0－7.0
			5.0	7.0－8.0
8	木屐寮－六甲		40.0	6.0

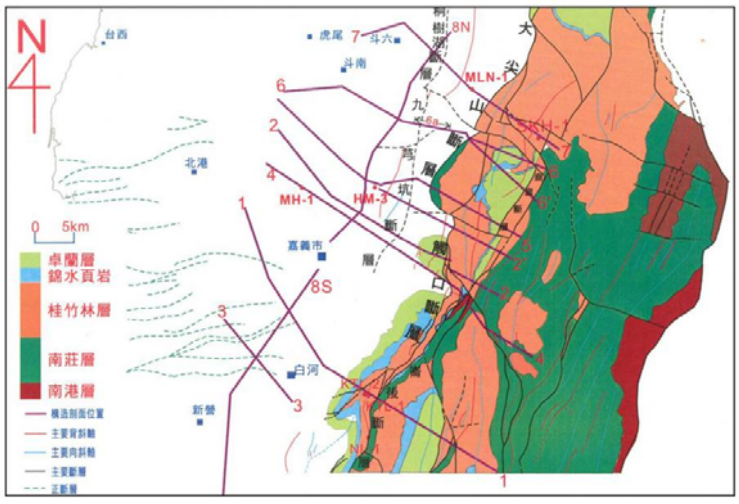


圖 5-1.1：模型建置中所使用之構造剖面位置(楊耿明，2004)。

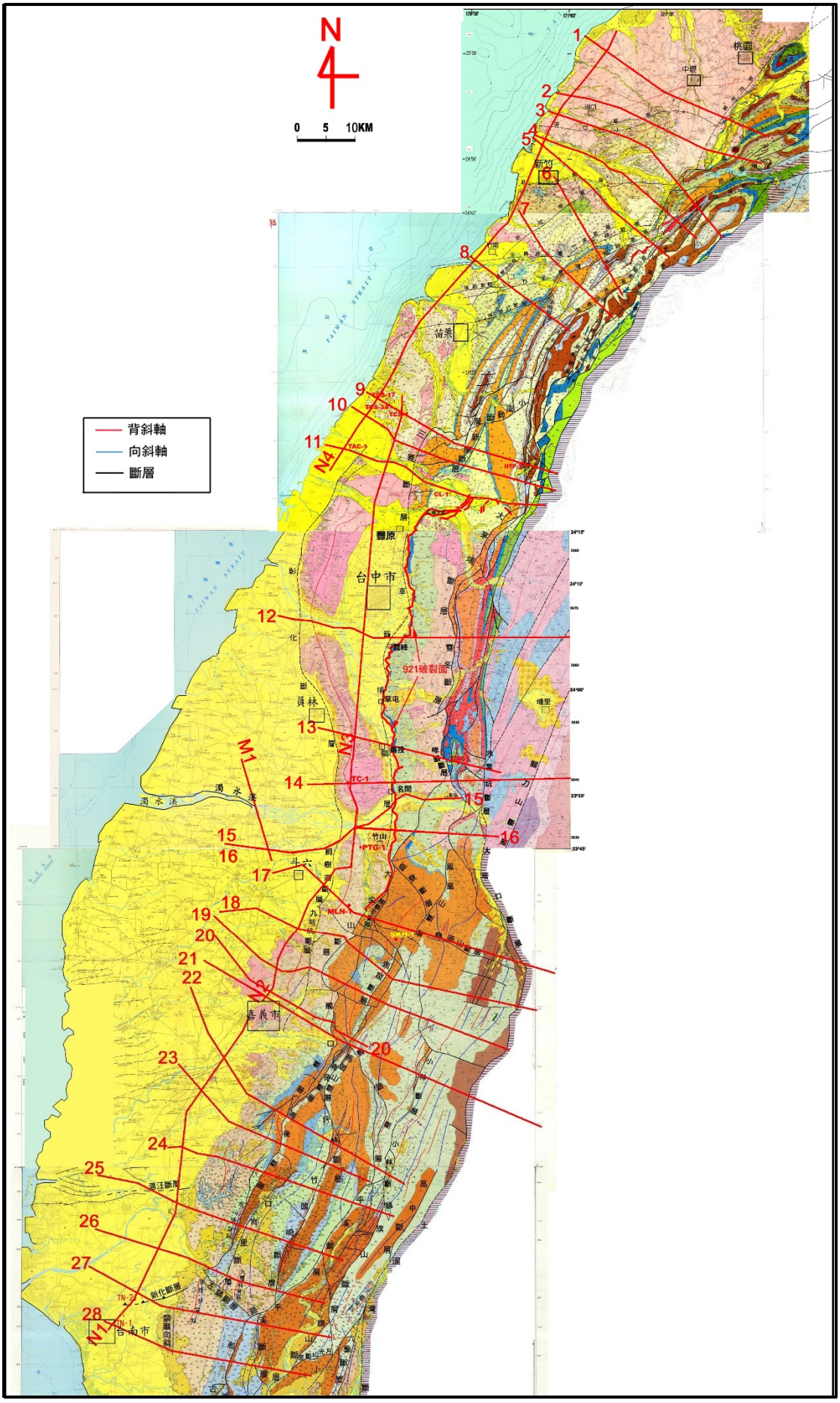


圖 5-1.2：模型建置中所使用之構造剖面位置(黃旭燦，2004)。

5-1 BLOCKS 斷層模型

5-1-1 斷層模型原理

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

5-1-2 斷層模擬使用參數

BLOCKS 為 matlab 語言所編寫之程式套件，其所需的觀測資料包含斷層幾何、塊體旋轉定位與地表 GPS 點位之水平速度觀測值。本團隊所使用之塊體模型地表投影位置參照中央大學張午龍老師所修改之 TAST、CYMT、HSS1、SYSG、MIAO、WCPN、CHYI、SHSS、EKSH、WCPS、WTFH 等 11 個塊體邊界，並以塊體交界描述斷層位置。又經團隊夥伴中興社所作之文獻回顧，與期中會議、專家意見等討論後，模型中各條斷層所使用的參數如表 5-1.2。BLOCK model 將塊體視為單層並排，故本團隊所使用之輸入檔取近地表傾角，斷層鎖定深度取定為最深之斷層深度，另僅第 2 組參數之大甲-彰化斷層之近地表埋藏深度為 2 km，其餘斷層段視為出露地表，埋藏深度皆為 0 km。此外，所採用之 GPS 水平速度場包含塊體內 160 個固定連續站與 298 個移動站。另經測試過後，得到 BLOCKS 在模擬運作中若有事先給定斷層滑移速率初始值，可以提供模型模擬值較好的收斂，故參考臺灣大學徐浩德老師於 2016 年所發表之地質法斷層滑移速率估計值（同團隊中大張老師所整理之版本）。

表 5-1.2：BLOCK model 所採用之三組模型參數。

斷層參數 / 斷層名稱		第(1)組		第(2)組		第(3)組		給定斷層模擬初始速率與標準差(Shyu et al., 2016)	
		傾角(degree)	斷層深度(km)	傾角(degree)	斷層深度(km)	傾角(degree)	斷層深度(km)	地質長期滑移速率最大值(mm/yr)	標準差
1	大甲－彰化	25	8	35	2-11	22.5	8.5	5.7	±8.3
2	車籠埔	35	10	40	15	25	12	6.9	±7.7
3	大茅埔－雙冬	50	10	40	15	45	12	3.3	±6.2
4	梅山斷層	80	12.5	80	12.5	80	12.5	2.5	±9.2
5	九芎坑	25	8	30	10	27.5	6	12.0	±11.7
6	大尖山	32.5	6.5	35	8	30	5	無，暫給為 0.0	±7.7
7	觸口	45	8	35	12	40	10	無，暫給為 0.0	±11.1

5-1-3 斷層模擬結果

斷層模擬成果如下圖 5-1.3 至圖 5-1.11 所展示。圖中，灰色虛線為塊體分界，模擬之斷層走向滑移速率與傾向滑移速率皆以色彩表示級距。從三組模型模擬成果中，從斷層面總滑移速率可以看出變動量最大的分段依次約為車籠埔斷層中段、梅山斷層與九芎坑斷層交接段、大茅埔-雙冬斷層南段、大甲-彰化斷層南段或觸口斷層南段，最後為大尖山斷層北段，速率值介於 14.3 mm/yr 至 6.9 mm/yr 之間。

第一組參數模擬成果中，從走向滑移（strike-slip)方向看，除梅山斷層與觸口斷層外，多數斷層皆以左移為主，各段斷層左移最大量為大茅埔-雙冬斷層中南段的 7.7 mm/yr，最大右移量則為觸口斷層北段的 3.4 mm/yr。而傾向滑移（dip-slip)中，正值代表了斷層逆衝的速率，總體而言，各段斷層逆衝速率介於 2.3 mm/yr 至 13.2 mm/yr 之間，大多逆衝數率皆在 10 mm/yr 內，而超過 10 mm/yr 逆衝值者，較明顯者為觸口斷層的中段與梅山斷層於九芎坑斷層和大尖山斷層之間的段落，分別為 13.2 mm/yr、11.9 mm/yr；另外，觸口斷層與九芎坑斷層的北段有些許正向滑移分量，滑移速率僅 0.8 mm/yr。

第二組參數模擬成果中，從走向滑移方向上看，大甲-彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷層、九芎坑斷層與大尖山斷層皆為左移斷層，同時梅山斷層於西段亦為帶左移分量的斷層段；而梅

山斷層與觸口斷層皆以右移為主，觸口斷層右移量值介於 0.9 mm/yr - 4.6 mm/yr 之間，梅山斷層於九芎坑斷層和大尖山斷層之間的段落具右移分量為 2.1 mm/yr。而傾向滑移方向中，除了觸口斷層北段略帶 4.9 mm/yr 正向滑移分量外，其餘斷層段皆俱逆衝分量，最大逆衝值為車籠埔斷層中段的 12.8 mm/yr，最小值為觸口斷層中段 0.6 mm/yr。

第三組參數模擬成果中，走向滑移方向方面，區域中斷層幾乎皆為左移斷層，而大甲-彰化斷層除北段略帶 0.1 mm/yr 的右移分量以外，亦是左移分量為主的斷層，量值約 4.2 mm/yr – 6.8 mm/yr 之間，另梅山斷層東側段亦有 3.0 mm/yr 的右移分量，而於九芎坑斷層和大尖山斷層之間的段落左移分量為 0.8 mm/yr，觸口斷層右移分量值介於 1.7 mm/yr - 4.6 mm/yr 之間；大茅埔-雙冬斷層南段有左移斷層最大量為 5.5 mm/yr，最小為 2.1 mm/yr，而九芎坑斷層左移量值介於 2.2 mm/yr - 4.6 mm/yr 之間，車籠埔斷層南段有左移斷層最大量為 6.3 mm/yr，最小為北段的 2.3 mm/yr，大尖山斷層左移量值介於 1.2 mm/yr - 4.8 mm/yr 之間。傾向滑移方面，整區斷層皆以逆斷層性質為主，逆衝分量最大的為車籠埔斷層，量值介於 1.4 mm/yr 至 12.9 mm/yr 之間，梅山斷層兩段逆衝分量分別為 4.7 mm/yr 與 11.2 mm/yr，大茅埔-雙冬斷層左移分量值介於 3.3 mm/yr 至 10.2 mm/yr 之間，九芎坑斷層左移量值介於 9.0 mm/yr 至 11.9 mm/yr 之間，大甲-彰化斷層左移分量值介於 2.7 mm/yr 至 8.3 mm/yr 之間，大尖山斷層則介於 3.0 mm/yr 與 5.8 mm/yr；另僅觸口斷層北段略帶正向滑移分量 2.6 mm/yr，顯示整體運動趨勢一致。

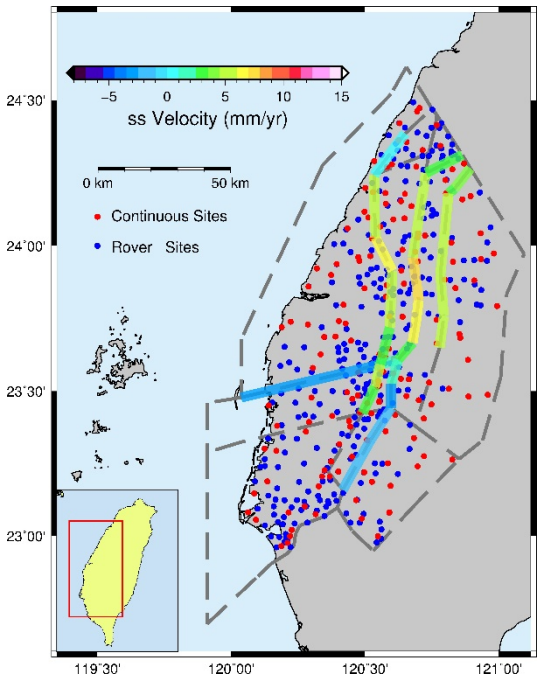


圖 5-1.3：第一組參數斷層模擬面走向滑移速率。

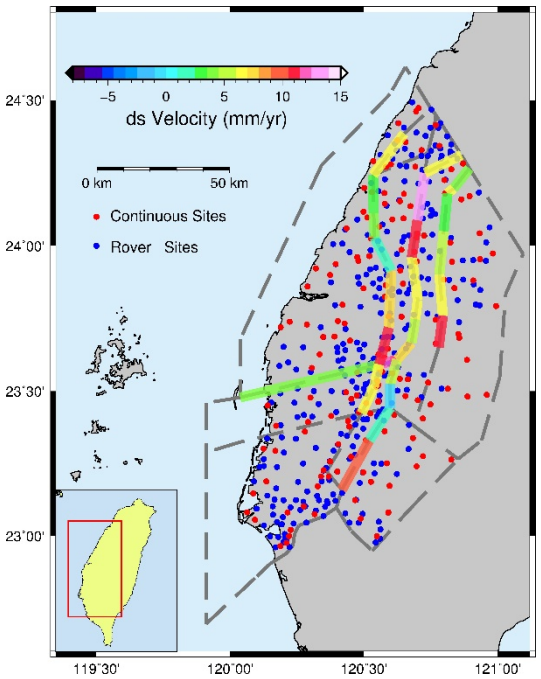


圖 5-1.4：第一組參數斷層模擬面傾向滑移速率。

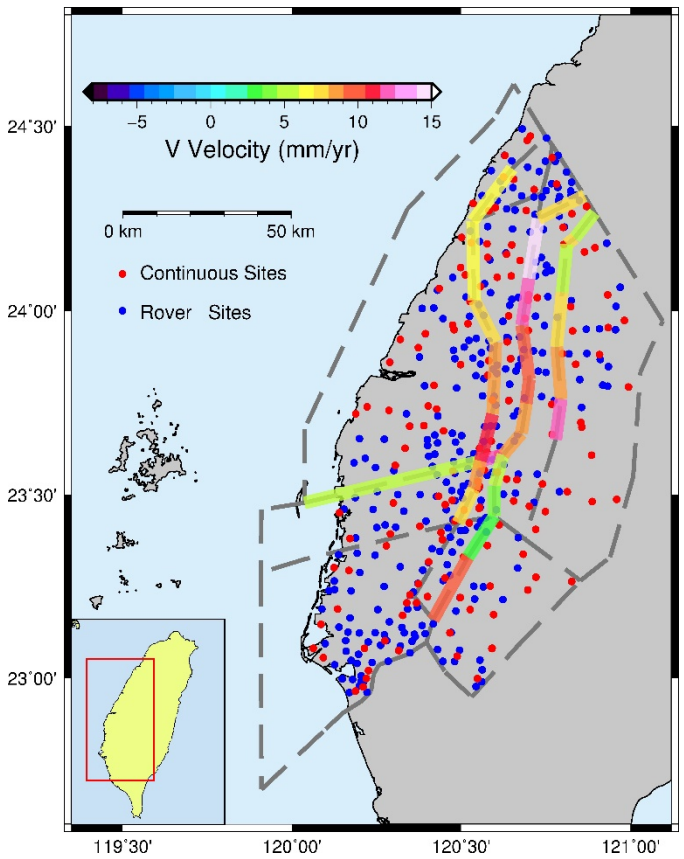


圖 5-1.5：第一組參數斷層模擬面總滑移速率。第一組斷層參數模擬結果，斷層總體滑移速率最大的為車籠埔斷層北段，總滑移量約為 14.3mm/yr，為圖中縱向斷層中間粉紅色至橘紅色段落；平均滑移速率最小的為觸口斷層中段約 3.3 mm/yr，圖中為縱向斷層中間中南段最淺的綠色處。

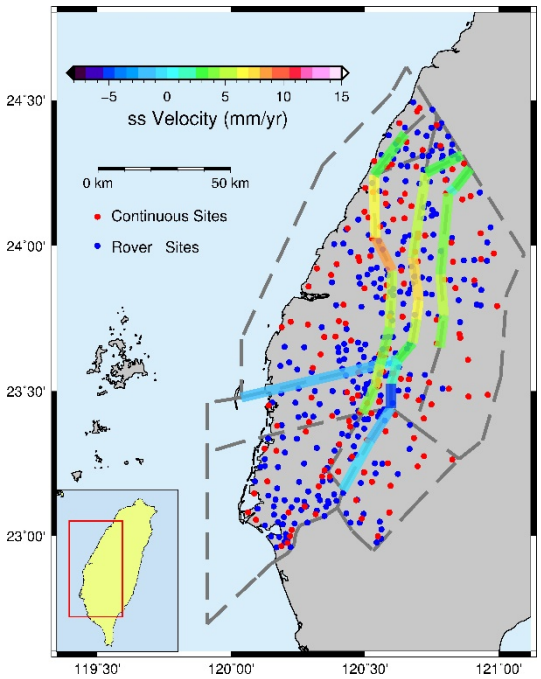


圖 5-1.6：第二組參數斷層模擬面走向滑移速率。

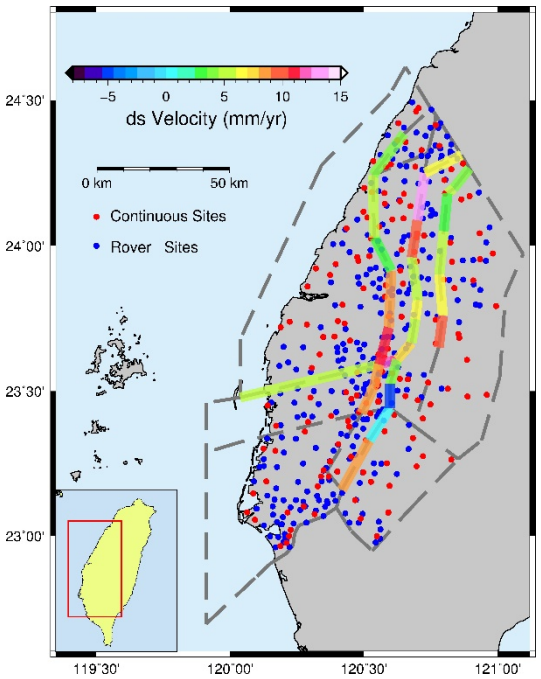


圖 5-1.7：第二組參數斷層模擬面傾向滑移速率。

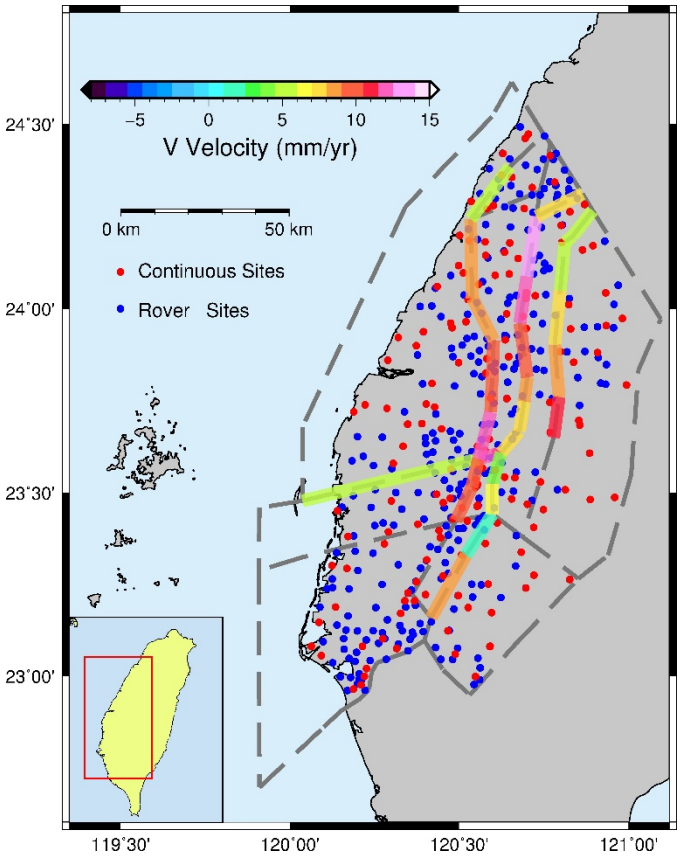


圖 5-1.8：第二組參數斷層模擬面總滑移速率。第二組斷層參數模擬結果，斷層總體滑移速率最大的為九芎坑斷層中段，總滑移量約為 13.9 mm/yr，圖中中間縱向斷層北段最淺粉紅色段落；總滑移速率最小的為觸口斷層 1.3 mm/yr，圖中為南北向斷層中約最南段的淺藍色段落。

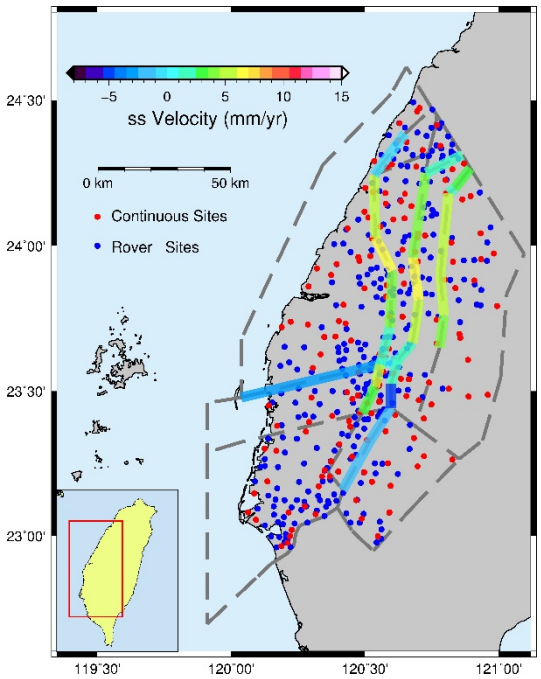


圖 5-1.9：第三組參數斷層模擬面走向滑移速率。

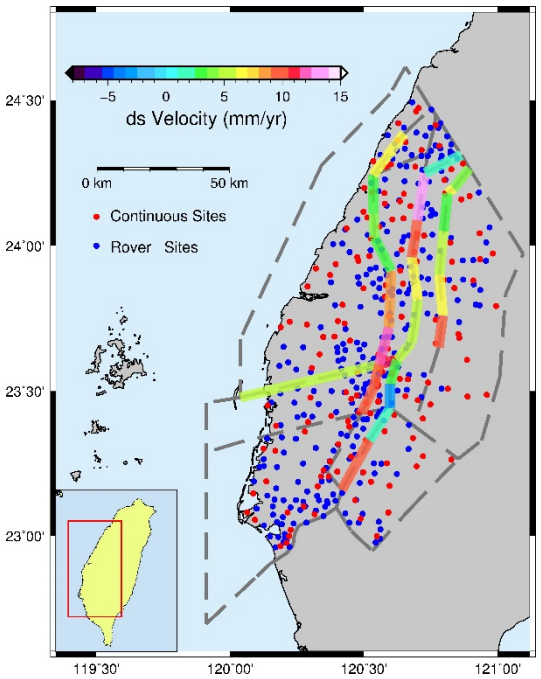


圖 5-1.10：第三組參數斷層模擬面傾向滑移速率。

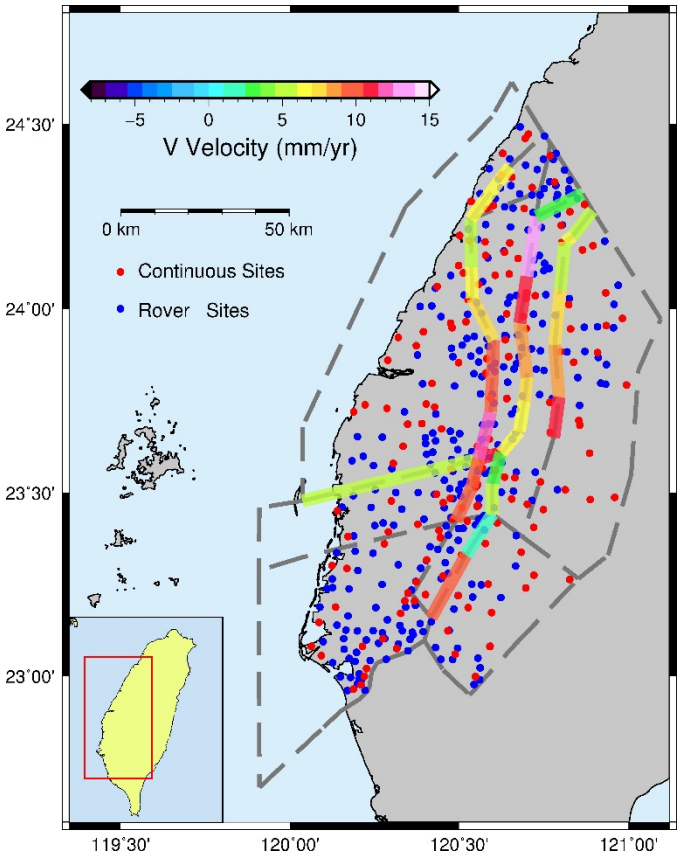


圖 5-1.11：第三組參數斷層模擬面總滑移速率。第三組斷層參數模擬結果，斷層總體滑移速率最大的為車籠埔斷層，總滑移量約為 13.5 mm/yr，圖中為中間總像斷層淺粉紅色顯示之段落；平均滑移速率最小的為觸口斷層的 2.3 mm/yr，圖中為同條斷層近南段的淺藍色。

表 5-1.3 為各斷層平均總滑移速率，從總滑移速率看，三組模型中變動量最大的斷層為九芎坑斷層與車籠埔斷層，模擬的滑移速率分別介於 9.0 mm/yr 至 10.6 mm/yr 之間與 8.8 mm/yr 至 10.6 mm/yr 之間，主要貢獻量皆來自於傾向滑移速率。總滑移速率最小的斷層為觸口斷層，模擬的滑移速率介於 5.5 mm/yr 至 5.6 mm/yr 之間，分段中主要的貢獻量皆來自最南段的傾向滑移速率。

表 5-1.3：BLOCK 三組模型模擬成果。

滑移速率 / 斷層名稱		第(1)組模擬成果			第(2)組模擬成果			第(3)組模擬成果		
		走向滑移速率	傾向滑移速率	總滑移速率	走向滑移速率	傾向滑移速率	總滑移速率	走向滑移速率	傾向滑移速率	總滑移速率
1	大甲－彰化	4.6	4.6	7.1	6.0	5.0	8.0	4.3	4.9	7.2
2	車籠埔	5.7	8.7	10.6	5.2	8.4	10.1	4.4	7.3	8.8
3	大茅埔－雙冬	4.5	6.1	7.8	3.7	5.8	7.0	4.0	6.0	7.4
4	梅山斷層	-0.8	8.2	8.7	-8.0	8.2	8.4	-1.1	8.0	8.4
5	九芎坑	3.5	8.2	9.0	4.4	9.1	10.2	3.2	10.0	10.6
6	大尖山	3.9	5.8	7.1	3.7	5.3	6.6	2.7	4.6	5.4
7	觸口	-2.7	3.6	5.5	-2.2	1.4	5.5	-2.8	2.6	5.7

可藉反演出的斷層幾何，正演出地表水平速度場。圖 5-1.12 至圖 5-1.14 為 GPS 水平速度場依三組斷層參數模擬結果所正演之水平速度場。其中可見一原始輸入之灰色速度向量明顯與其他速度量在量級與方向均有極大落差，此為連續站 LSBA，而解算中該站資料會被濾除，故下文中取均值亦移除不列計算，但反演時仍在該點給出模擬成果。原始連續站在 E 方向的平均速度為 12.93 mm/yr 往西，N 方向平均速度為 3.45 mm/yr，總平均速度量為 13.39 mm/yr；而移動站 E 方向的平均速度為往西 13.41 mm/yr，N 方向平均速度為 3.27 mm/yr，總平均速度量為 13.80 mm/yr。

其中，第一組參數在 GPS 連續站的模擬成果中，E 方向的平均速度差為 3.13 mm/yr，顯示整體模擬結果在往西分量上少於原始的向西速度分量，N 方向的平均速度差為-0.74 mm/yr，表示整體模擬結果向北速度的速度分量仍較原始值少，總平均速度量為 16.02 mm/yr。而移動站模擬成果中，E 方向的平均速度差為 3.26 mm/yr，顯示整體模擬結果在往西分量上少於原始的向西速度分量，N 方向的平均速度差為-1.04 mm/yr，總平均速度量為 10.39 mm/yr；表示整體模擬結果向北速度的速度分量

仍較原始值少，與連續站速度場模擬結果相似。

而第二組參數在 GPS 連續站的模擬成果中，E 方向的平均速度差為 3.22 mm/yr，顯示整體模擬結果在往西分量上少於原始的向西速度分量，N 方向的平均速度差為-0.79 mm/yr，表示整體模擬結果向北速度的速度分量仍較原始值少，總平均速度量為 10.14 mm/yr。而移動站模擬成果中，E 方向的平均速度差為 3.31 mm/yr，顯示整體模擬結果在往西分量上少於原始的向西速度分量，N 方向的平均速度差為-1.01 mm/yr，總平均速度量為 10.35 mm/yr；整體模擬結果向北速度的速度分量仍較原始值少，顯示速度場整體模擬成果趨勢相近，但較原始速度場值總平均為小。

第三組參數在 GPS 連續站的模擬成果中，E 方向的平均速度差為 3.10 mm/yr，顯示整體模擬結果在往西分量上少於原始的向西速度分量，N 方向的平均速度差為-0.72 mm/yr，表示整體模擬結果向北速度的速度分量仍較原始值少，而總平均速度量為 10.27 mm/yr。另在移動站模擬成果中，E 方向的平均速度差為 3.27 mm/yr，整體模擬結果在往西分量上少於原始的向西速度分量，N 方向的平均速度差為-0.95 mm/yr，總平均速度量為 10.40 mm/yr；表示整體模擬結果向北速度的速度分量仍較原始值少，整體速度場模擬成果相似，與第二組參數模擬成果相近，亦較原始速度場值總平均為小。

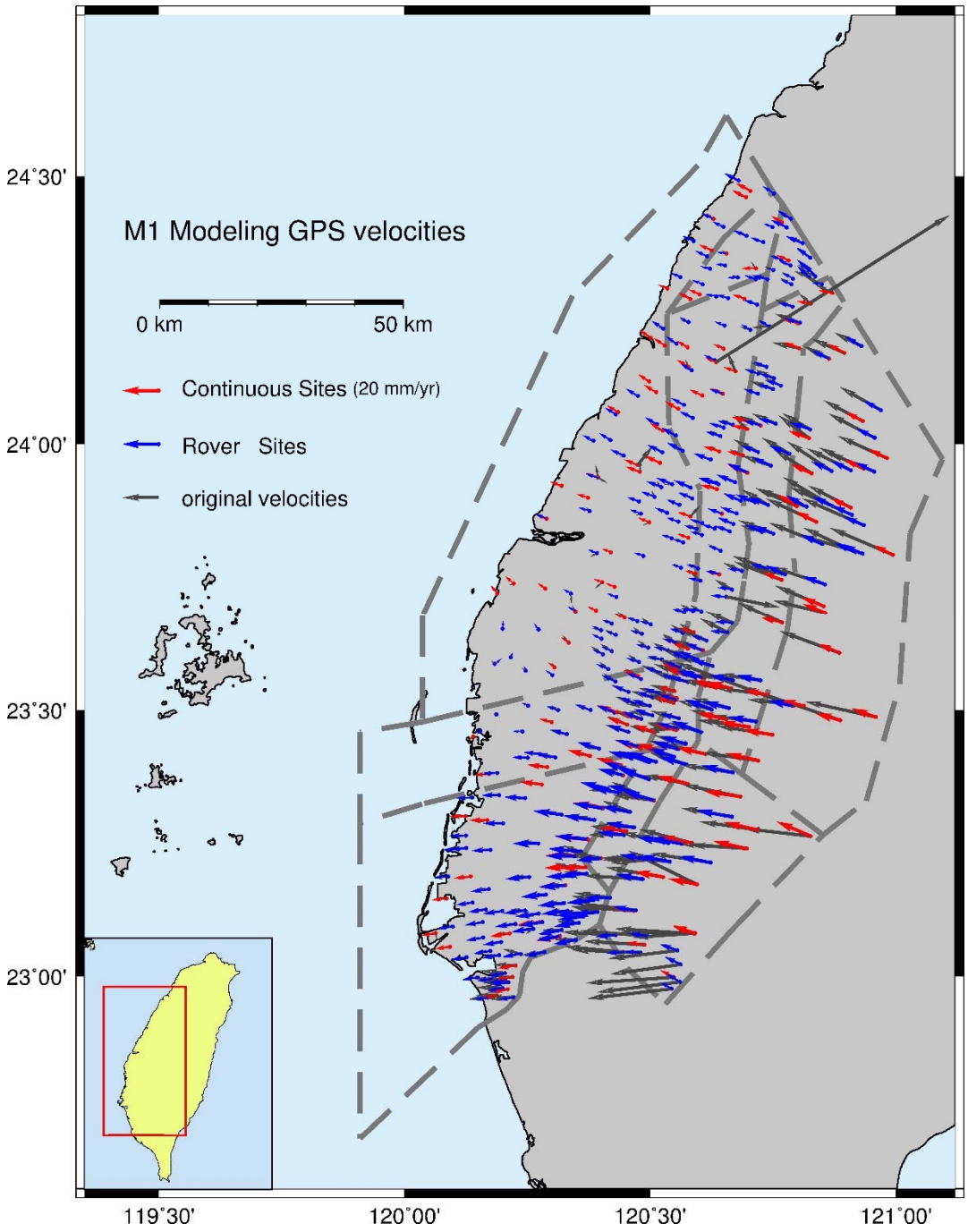


圖 5-1.12：第一組參數 GPS 水平速度反演量。圖中灰色虛線為模型塊體邊界，紅色藍色與灰色箭頭分別表示：GPS 連續站速度場、GPS 移動站速度場與分別之原始速度場，總平均量值分別為 16.02 mm/yr、10.39 mm/yr 與 13.39 mm/yr。

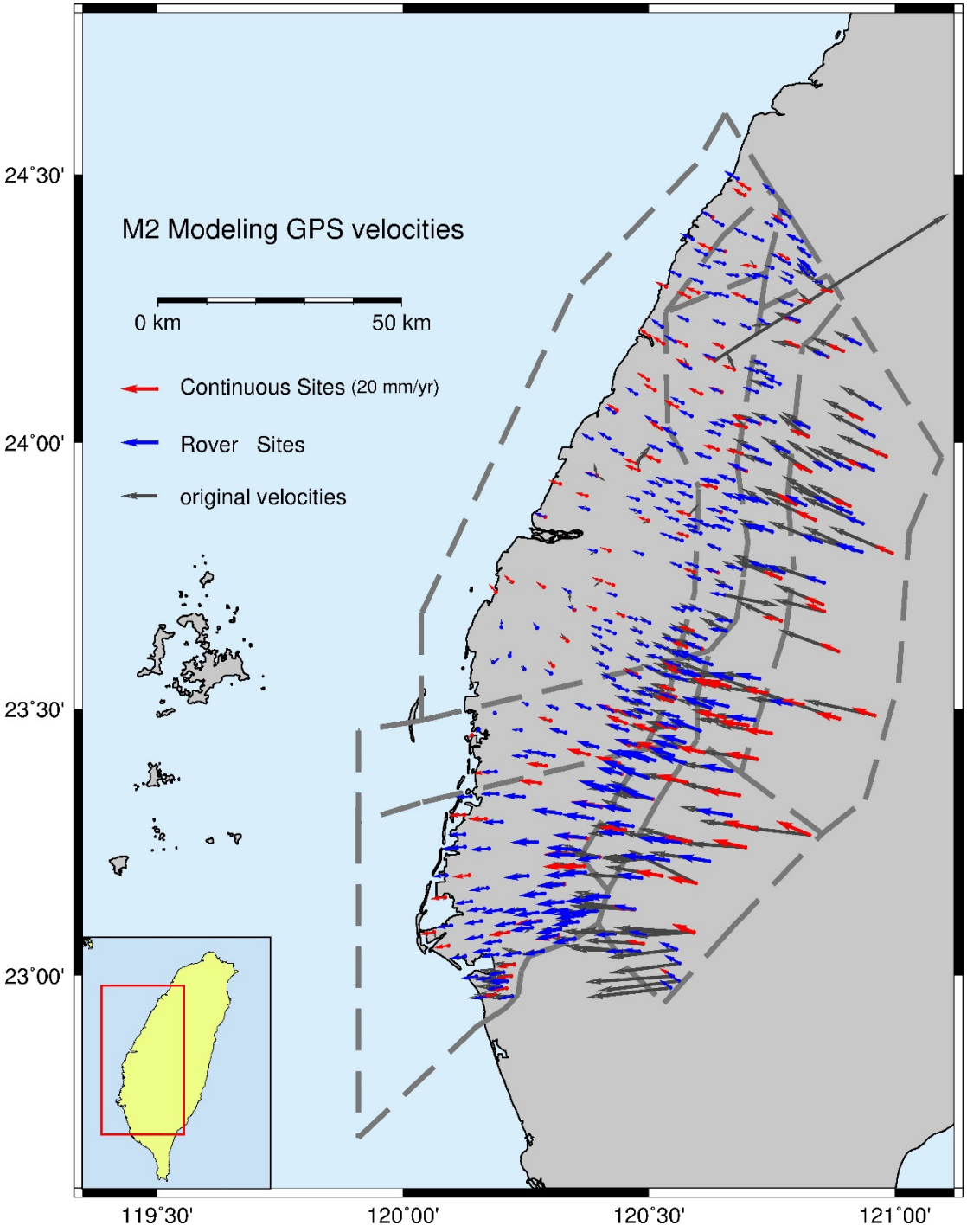


圖 5-1.13：第二組參數 GPS 水平速度反演量。圖中灰色虛線為模型塊體邊界，紅色藍色與灰色箭頭分別表示：GPS 連續站速度場、GPS 移動站速度場與分別之原始速度場，總平均量值分別為 10.14 mm/yr、10.35 mm/yr 與 13.39 mm/yr。

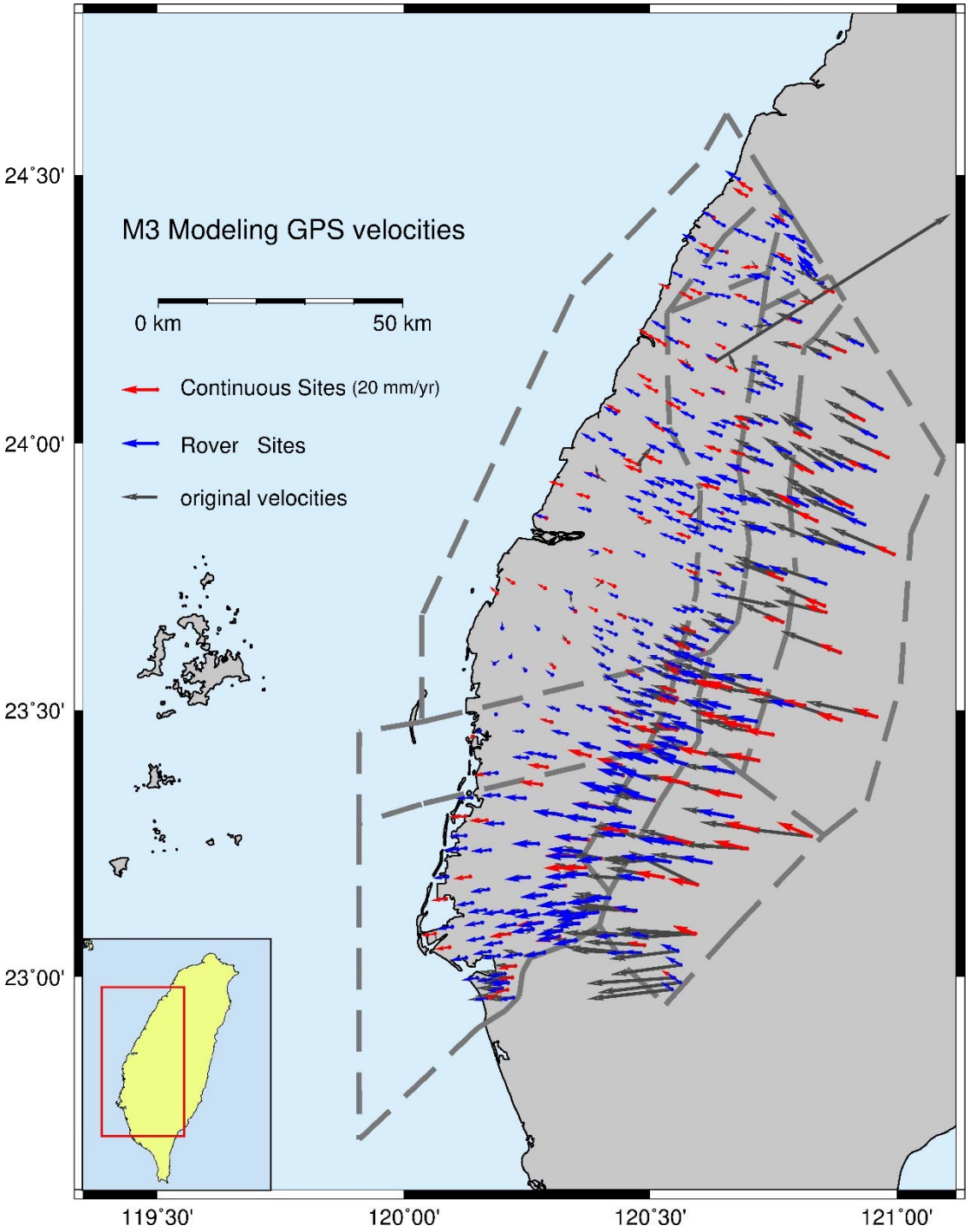


圖 5-1.14：第三組參數 GPS 水平速度反演量。圖中灰色虛線為模型塊體邊界，紅色藍色與灰色箭頭分別表示：GPS 連續站速度場、GPS 移動站速度場與分別之原始速度場，總平均量值分別為 10.27 mm/yr、10.40 mm/yr 與 13.39 mm/yr。

5-2 DEFNODE 斷層模型

5-2-1 斷層模型原理

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

本研究藉由 Rob McCaffrey 提出的三維塊體模型 DEFNODE（McCaffrey., 2005）來進行斷層現今滑移速率及滑移虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每條斷層都位於兩個轉動塊體（block）的邊界上。Ching et al.（2011）曾將臺灣地區幾條重要的斷層視為塊體邊界，再利用塊體模型來探討臺灣現今的地殼運動情形。本研究針對地質調查所於 2012 年公佈的臺灣活斷層位置，並參考本計畫之斷層參數資料（表 5-1.1），建構了本研究區域的塊體邊界模型（圖 5-2.1）。為了符合地調所公布的活動斷層分布資料，我們修正了 Ching et al.（2011）的模型，除了加入 TAST、CYMT、HSS1、SYSG 等塊體外，並修改 MIAO、WCPN、CHYI、SHSS、EKSH 等塊體幾何，分別對應大甲斷層、彰化斷層、大尖山斷層、大茅埔—雙冬斷層及觸口斷層南段，以符合其塊體邊界（圖 5-2.1），因大甲斷層及彰化斷層地理位置相當接近，且我們收集到兩條斷層的深度、傾角等斷層參數相當接近，為了模型簡化，因此在本研究中將大甲斷層及彰化斷層視為同一條斷層構造。在模型中，除了本研究計畫所針對的 7 條斷層外，另向南延伸加入了木屐寮—六甲斷層作為塊體邊界，以降低因模型邊界效應所造成的誤差，避免地殼變形量過度集中在區域南端的觸口斷層。

本研究使用 EURA 做為參考塊體（圖 5-2.1（a）），並假設參考塊體是不旋轉的，因此其餘塊體上的水平速度皆是相對於 EURA 的運動。DEFNODE 再以此計算各塊體的剛體轉動速度場及斷層面（塊體邊界）上各節點的滑移速率以及虧損率。除此之外，由於斷層潛勢評估需要知道表 5-1.1 上所列各斷層段的長期滑移速率及滑移虧損率、因此我們將塊體模型所得之各斷層節點上的值取平均，可以得到各個速率的平均值及標準差。由此可知，若沿斷層面的滑移速率分布較不平均 ，則所得的速率標準差也會相對較大。

由圖 5-2.1（a)可看出，各塊體的邊界幾乎都和地表的斷層線一致，而有些延伸的斷層邊界主要是為了符合塊體在幾何上的連續性以供數值模型所需。圖中邊界上的圓圈代表節點，塊體模型即是

用來估算斷層面在各節點上的滑移速率值。

為了求取各斷層面上的間震期滑移速率及滑移虧損率，必須先得到斷層的地下幾何形貌。本研究經由整理臺灣中部活動斷層的各種地質及地球物理文獻及證據，建立了本文研究範圍內的斷層幾何參數表（表 5-1.1）。注意除了如圖 5-2.1(a)中所示的地表節點外（深度為 0 km），沿著斷層傾角也分別在一半斷層深度及斷層底部各設一個節點。本文下一節中斷層面上的滑移量分佈皆是由這些節點上的值進行內插所得。

本次研究中在模型反演過程中加入塊體內部形變，此時各塊體將不再是剛性塊體，塊體內部的速度梯度可產生內部形變，較符合臺灣目前大地構造，並加入由地質研究方法推估的斷層滑移速率（表 5-2.2，Shyu et al., 2016)作為反演過程的約束值，以得到更佳的擬合結果。

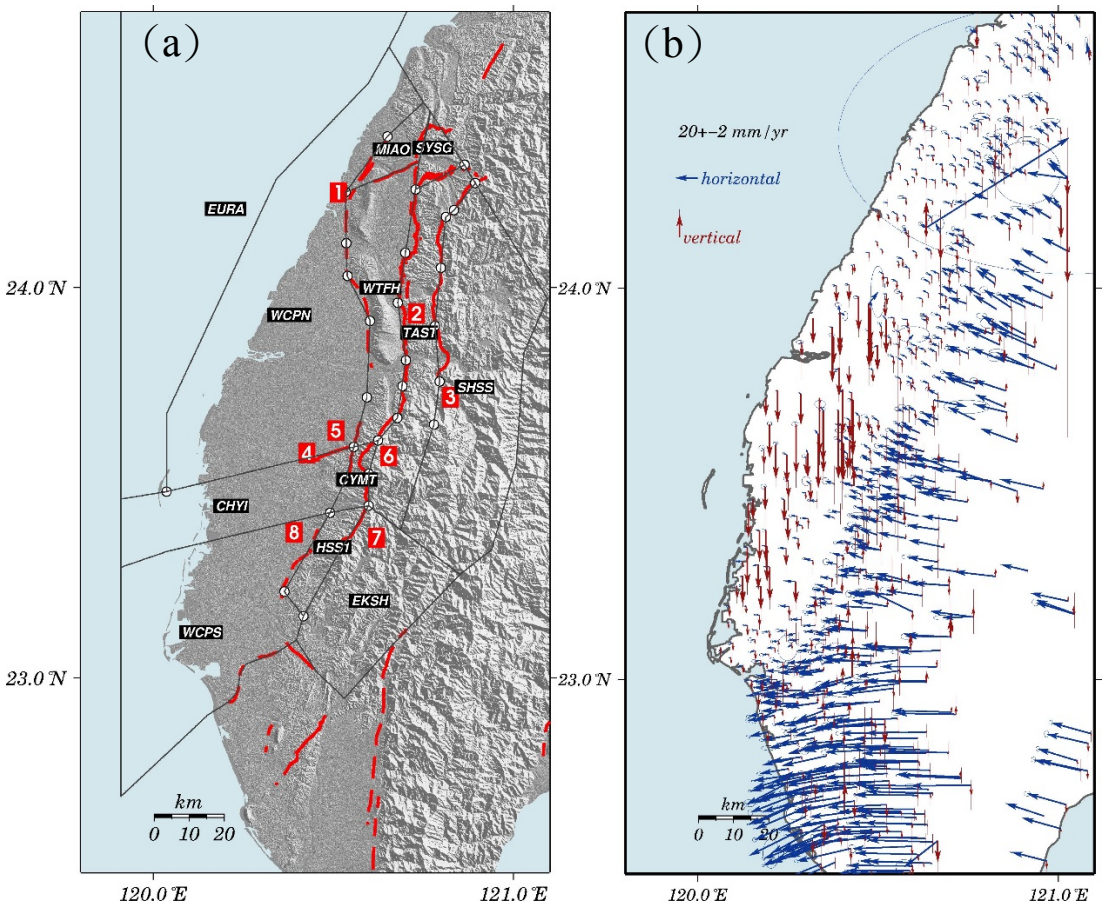


圖 5-2.1：(a)本研究所使用的臺灣中部三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公布之活動斷層，紅色虛線表示推測或隱伏斷層。紅色數字代表之斷層分別為：1. 大甲—彰化斷層；2. 車籠埔斷層；3. 大茅埔—雙冬斷層；4. 梅山斷層；5.九芎坑斷層；6. 大尖山斷層；7.觸口斷層；8. 木屐寮—六甲斷層。(b)GPS 資料所觀測到的平均水平速度場(藍色箭號)(相對於澎湖白沙站)及平均垂直速度場(紅色箭號)。

5-2-2 斷層模擬結果

本研究所使用的地表運動資料為臺灣 GPS 觀測網迄至 2016 年所觀測到的平均水平速度場及平均垂直速度場，包含了 456 筆測站資料(圖 5-2.1)。利用這些速度場及各斷層參數，即可估算出最符合 GPS 觀測資料的塊體旋轉率（圖 5-2.2 及圖 5-2.3a、b；表 5-2.1)，圖 5-2.2 中顯示各塊體之旋轉軸皆位於臺灣周圍，由我們所推求的水平速度(圖 5-2.3b)，可看出部份塊體旋轉速率較大(圖 5-2.3a)，圖 5-2.4a、b、c、d 分別顯示本區域的斷層長期滑移速率、斷層鎖定係數、滑移虧損率及間震期滑移速率等值。圖 5-2.5 則顯示本研究區域的三種水平速度場，分別是 GPS 觀測值(a)、塊體模型所預測的值(b)，以及上述兩者的差別(殘差值, c)。由此圖可知，在大部分地區，觀測值和塊體模型預估的水平運動有很好的一致性，而預估較差的水平部分則落在大茅埔—雙冬斷層及大尖山斷層東側的塊體，推測此現象可能是因為該區測站分布不平均，且東邊及南邊山區缺少測站，使本區塊體模型的預測結果不如預期；而位於車籠埔斷層西側的 G040 測站則是由於速度場趨勢和其他站明顯不同，以致於擬合不佳。垂直運動的擬合結果則明顯不如水平運動，此現象則與垂直速度場的誤差大於水平速度場有關。

除此之外，為了評估各塊體可能存在的內部變形(internal deformation)，我們利用 block modeling 來推算中部塊體的內部應變率(internal strain rate)。結果如圖 5-2.6，顯示臺灣中部的塊體主應變軸以東西向壓縮應變、南北向伸張應變為主，平均應變率約為 500 nanostrain/yr。這個結果和一些前人(Lin et al., 2010)直接由 GPS 觀測值求得的應變速率場相似，間接說明了 block modeling 的正確演算過程。

在此針對本階段 7 條臺灣中部的大甲—彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔—雙冬斷層、梅山斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層進行探討，結果陳述如下。

表 5-2.2 顯示此 7 條斷層上各節點的滑移速率的平均值，並可看出這些斷層之平均長期滑移速率及平均滑移虧損率，及其對應之計算標準差。其中斷層的長期平均滑移速率(geodetic long-term slip rate)的計算是由近十年測地資料(GPS, 水準等)所得的地表運動推估而得，和利用地質資料(槽溝開挖或河階等)所觀測的長期(數百~數千年)滑移速率(geologic long-term slip rate)存在有本質上的差異。若假設斷層的震間能量累積速率為常數，則 geodetic 和 geologic slip rates 應該相同。然而由於板塊構造及運動的複雜性，在地質時間的尺度下，斷層活動往往存在變異性，所以許多研究都曾指出這兩種斷層滑移速率的差別(e.g., Ward, 1998)。評估 geodetic long-term slip rate 的方法，除了和 geologic long-

term slip rate 進行比較外，也可以由地震活動度等資料來間接進行。

表 5-2.2 顯示大甲—彰化斷層北段因斷層兩側水平與垂直速度變化皆不大，因此斷層面上的長期滑移速率為 6.8 mm/yr，滑移虧損率也僅 1.2 mm/yr；然而跨南段的水平及垂直速度場梯度較大，長期滑移速率與滑移虧損率也較北段大，各為 10.0 mm/yr 與 4.9 mm/yr。從長期滑移速率來看（圖 5-2.4a），因水平及垂直速度場在西部麓山帶及西部平原間有明顯變化（圖 5-2.1），這樣的速度變化使得在九芎坑、大尖山、觸口斷層上有較大的長期滑移速率，最大值落在大尖山斷層，約 13.7 mm/yr，而大尖山斷層的斷層鎖定係數偏低，因此平均滑移虧損率為 6.0 mm/yr。其中垂直速度場可能記錄到非構造活動的垂直向地表運動(如：地層下陷)，可能對模型結果產生影響。由於目前在臺灣中部並沒有觀測到斷層潛移情況發生，因此本研究假設所有斷層近地表處皆為鎖定狀態，故斷層面上間震期滑移速率在地表附近幾乎都接近 0（圖 5-2.4d）。由於滑移虧損率為長期滑移速率減去間震期滑移速率，因此在這一系列斷層上都有較大的滑移虧損率，平均滑移虧損率最大的地區落在觸口斷層，約 7.8 mm/yr。本研究顯示在臺灣中部地區這一系列南北向的斷層有較大的滑移虧損。

模型結果顯示，本區域南部的大尖山斷層及觸口斷層具有較高的平均長期滑移速率，其中觸口斷層的平均滑移虧損率約 7.8 mm/yr，塊體模型的滑移虧損率主要由 GPS 所測之地表水平運動所推求，而本研究中加入了垂直速度場資料，可能因此影響塊體模型估算斷層傾角方向的滑移速率，未來工作將持續探討非構造活動造成的垂直速度場對塊體模型模擬結果的影響。

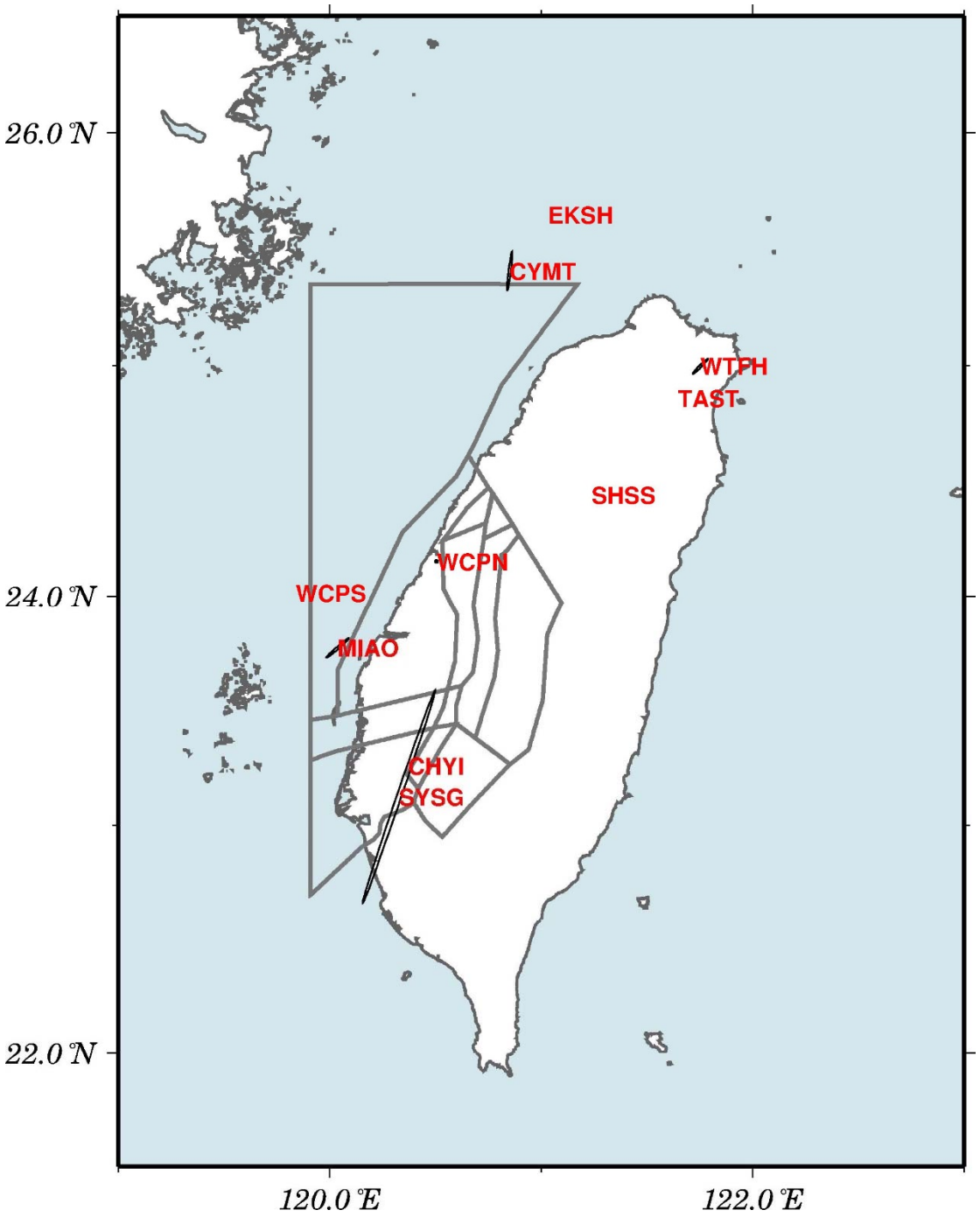


圖 5-2.2：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 5-2.1）。

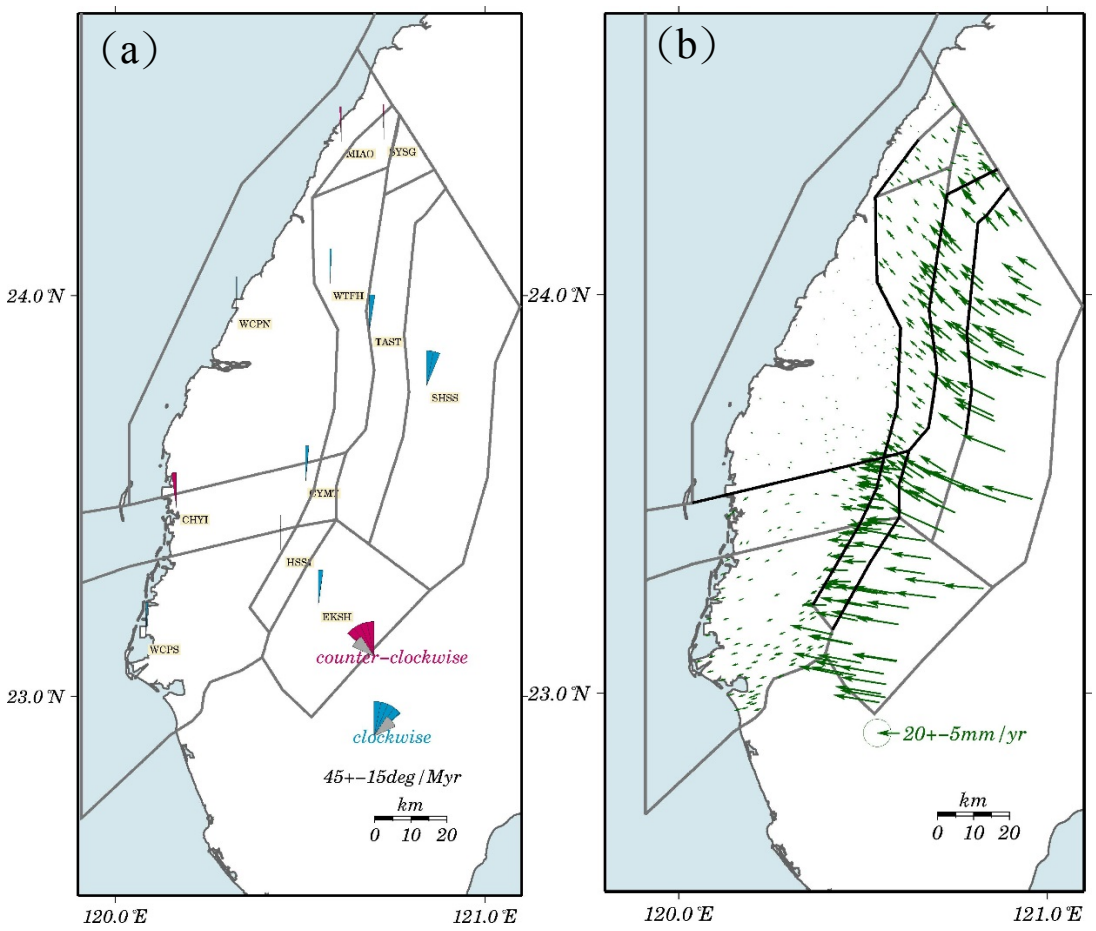


圖 5-2.3：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15°/My 的角速度。(b) 以圖 a 中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。

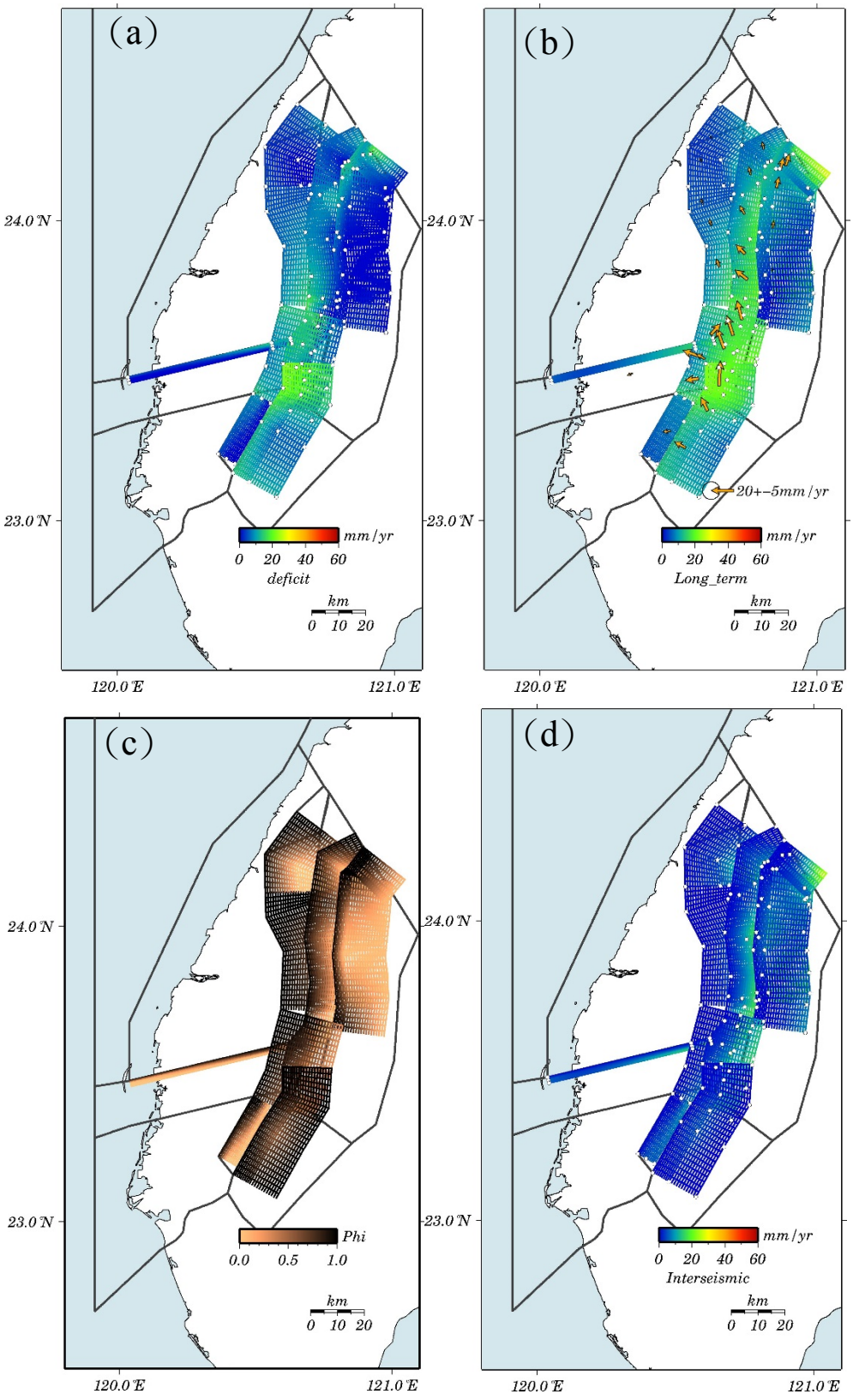


圖 5-2.4：(a) 推求的斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層的地表位置，橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向，暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的間震期滑移速率。

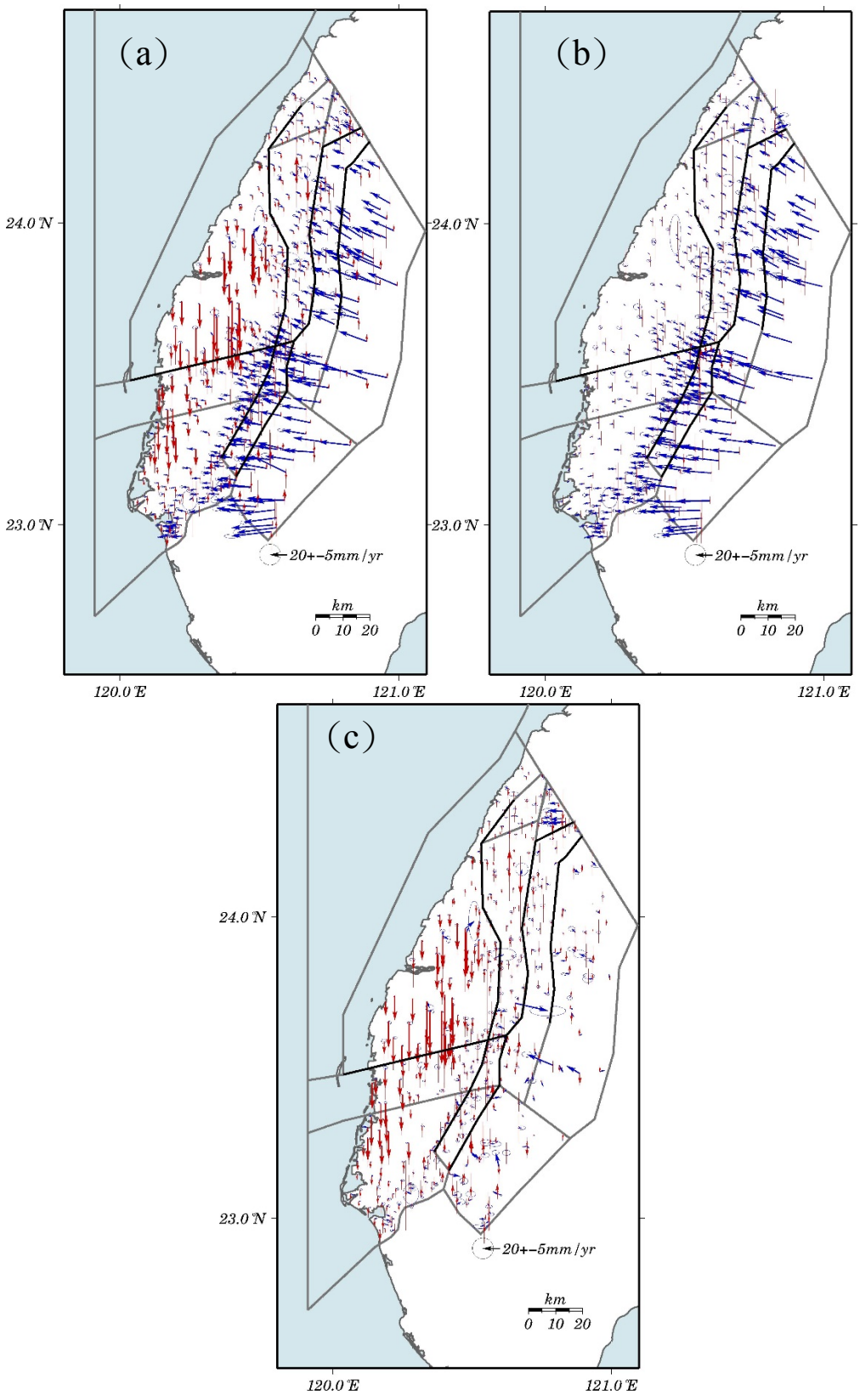


圖 5-2.5：(a) GPS 觀測速度場，藍色及紅色箭號各為水平及垂直速度場。(b) 最佳塊體模型所預估的地表運動，藍色及紅色箭號各為水平及垂直速度場。(c) 模型預估的殘差值，其對應之 reduced χ^2 為 909.273。藍色及紅色箭號各為水平及垂直速度場殘差值，黑線代表各斷層的地表位置。

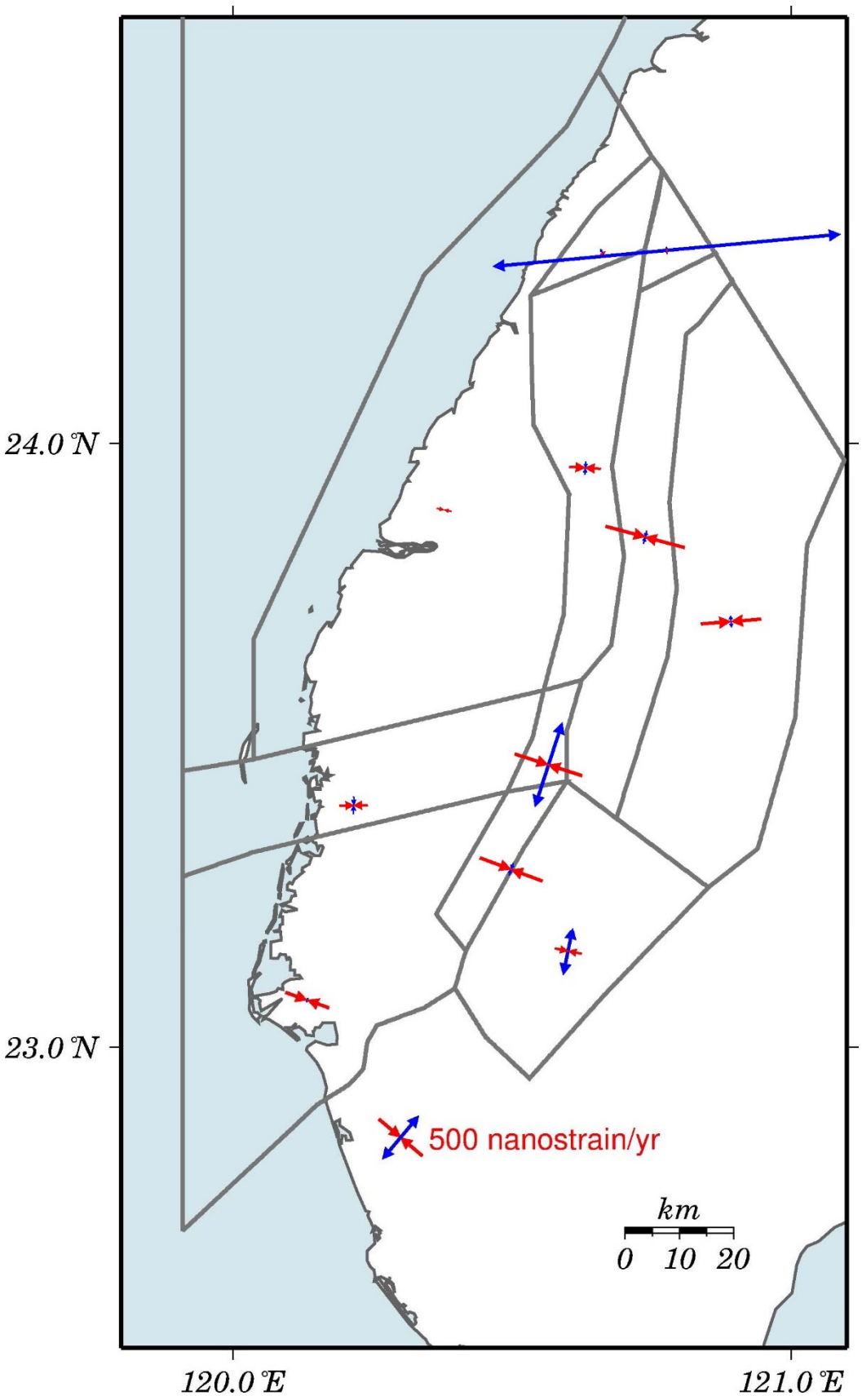


圖 5-2.6：各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

表 5-2.1：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。

名稱	經度	緯度	角速度（deg/my）	角速度誤差（deg/my）	誤差橢圓長軸長（deg）	誤差橢圓短軸長（deg）	誤差橢圓長軸方位角
EURA	180.00	-0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	90.00
CHYI	120.37	23.26	8.66	0.08	0.00	0.00	164.27
WCPS	119.84	24.01	-2.87	0.27	0.01	0.00	163.12
EKSH	121.03	25.65	-7.74	0.14	0.07	0.00	4.86
CYMT	120.85	25.41	-5.97	0.36	0.17	0.01	7.20
HSS1	119.89	-33.47	0.23	0.16	66.26	0.23	0.66
WCPN	120.50	24.15	-1.24	0.02	0.01	0.01	30.50
WTFH	121.75	24.99	-2.83	0.13	0.09	0.01	44.92
MIAO	120.04	23.77	3.25	0.36	0.13	0.01	49.07
SHSS	121.24	24.44	-23.80	0.12	0.01	0.00	15.47
TAST	121.64	24.86	-9.13	0.23	0.05	0.00	39.37
SYSG	120.33	23.12	1.95	1.05	0.98	0.02	18.70

表 5-2.2：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及平均滑移速率估算值。

斷層名稱	地質長期滑移速率最小值（mm/yr）	地質長期滑移速率最大值（mm/yr）	測地長期平均滑移速率（mm/yr）		標準差	平均滑移虧損率（mm/yr）	標準差
大甲－彰化	1.1	5.7	北段	6.8	±7.2	1.2	±3.1
			南段	10.0	±8.3	4.9	±5.1
車籠埔	0.0	6.9	9.0		±7.7	3.1	±5.0
大茅埔－雙冬	0.7	3.3	3.3		±6.2	3.2	±4.8
梅山	0.0	2.5	9.6		±9.2	3.5	±6.3
九芎坑	2.4	12.0	13.0		±11.7	4.3	±7.6
大尖山			13.7		±7.7	6.0	±8.1
觸口			11.9		±11.1	7.8	±9.9
木屐寮－六甲	4.4	7.1	5.9		±2.2	3.2	±3.7

5-3 基線應變反演模型(Baseline Inversion Model)

5-3-1 斷層模型原理

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

斷層錯位模型是基線應變模型的基礎，是根據彈性錯動理論（Okada., 1992）所建立，其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量，進而可藉由地表位移資料為制約條件，推估斷層滑移參數包括斷層位置、深度、長度、寬度、走向、傾角和三個方向的滑移量，再以此斷層參數處理出地表的位移場及斜距方向的變化量。假設地球為表面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間，介質特性為具有 0.25 蒲松比的 poisson solid（$\lambda = \mu$）。沿著斷層元素的錯動 $\Delta u_j\ (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 會使均質均向的彈性半無限空間表面 $\Delta u_i\ (x_1, x_2, x_3)$ 產生位移場，其關係式 5-2.1 中，δ_{jk} 為克羅內克函數；v_k 為正交於地表元素 $d\sum$ 之餘弦函數方向；F 為施力點之力量大小。

$$\boldsymbol{u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]\, v_k d\sum} \qquad （式 5-3.1）$$

地表位移向量 u 可經由下列 10 個參數計算得知，$p = [X, Y, d, \alpha, \delta, L, W, U_1, U_2, U_3]$。其中 X、Y 和 d 分別代表由斷層矩形左下角算起的 E、N 及 U 方向坐標位置，α 和 δ 為斷層走向和傾角，L 和 W 是斷層長度及寬度，而向量 $[U_1, U_2, U_3]$ 分別以左移、逆衝及伸張為正方向。對雙偶合震源而言，r 的定義如式 5-3.2 式：

$$\boldsymbol{\tan r = {U_2}/{U_1}} \qquad （式 5-3.2）$$

對逆斷層而言，$U_2 > 0$，$r > 0$；對正斷層而言，$U_2 < 0$，$r < 0$；對左移斷層而言，$U_1 > 0$，$|r| \leq 90°$；對右移斷層而言，$U_1 < 0$，$|r| \geq 90°$。選擇參數時，斷層位置、長度、寬度、走向和傾角皆以地表量測為準，且最初假設斷層錯動是在均勻均向性的介質中發生，因此λ和μ的數值相等；故所需計算的參數為沿著斷層平面上三個方向的分量。

在基線應變正演模型中，假設是「地表的應變率是來自於斷層鎖定所造成之彈性變形」，因此基

於彈性錯動理論可以估算斷層滑移虧損速率所造成各測站之速度場，進一步可以計算個測站間之基線應變率。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，而基線之伸張率（elongation rate）則為基線兩端測站之速度差投影至基線方向之向量除以基線長，其計算如式 5-3.3 式：

$$\boldsymbol{e = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}} \qquad （式 5-3.3）$$

其中 e 為應變率；l_i為受力瞬時長度；l_0為負荷前的原來長度；Δl為基線長度變化量。

就基線應變反演模型，本計畫給定斷層幾何參數，地表基線應變率與斷層滑移虧損率間之格林函數 G 由 Okada（1985）所提供之方程式求得，斷層滑移虧損速率矩陣為 s，地表基線應變率矩陣為 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 5-3.4 式之最小值來求得斷層滑移虧損率之最佳解。

$$\boldsymbol{F(s) = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (Gs - d) \right\|^2} \qquad （式 5-3.4）$$

5-3-2 斷層模擬結果

本計畫使用 GPS 臺灣中部地區 2007-2017 年連續站及移動站的水平速度場資料。水平速度場所蘊含的資訊含括了應變率及旋轉率，在本計畫中僅採用因主應變率造成之水平速度分量（圖 5-3.1），利用基線應變模型反演此水平速度分量，計算中部地區各斷層之滑移虧損率平均值(表 5-3.2)。

表 5-3.1：三義斷層、屯子腳斷層、木屐寮-六甲斷層斷層參數。

	斷層參數 / 斷層名稱	傾角（degree）	斷層底部深度（km）
1	三義斷層	15	0-9
2	屯子腳斷層	80	0-14.8
3	木屐寮—六甲斷層	30	0-10

本計畫於基線反演模型中，針對本階段 7 條臺灣中部地區的大甲－彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、梅山斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層及觸口斷層進行探討，計算其斷層之滑移虧損率，我們使用了三組不同的斷層參數(表 5-1.1)設定進行測試，並加入三義斷層、屯子腳斷層、木屐寮-六甲斷層斷層參數(表 5-3.1)，欲了解最佳之斷層參數為何，模型結果如以下描述。

模型一之結果如圖 5-3.2 所示，結果顯示大甲—彰化斷層北段因斷層兩側水平速度變化皆不大，因此斷層面上的滑移虧損率僅只有約 5 mm/yr，此區域的滑移虧損率主要集中在九芎坑斷層及觸口斷層；於九芎坑斷層的平均滑移量為 7 mm/yr，主要集中於南段深度 17 公里約有 40 mm/yr 之最大滑移虧損率。觸口斷層的平均滑移量為 4 mm/yr，則主要集中於斷層南段深度 25 公里處約有 40 mm/yr 的最大滑移虧損率於此處累積；而在大茅埔－雙冬斷層平均滑移量約為 6 mm/yr，主要集中於南段深度 22 公里處約有 35 mm/yr 之最大滑移虧損率於此處累積。

模型二之結果如圖 5-3.3 所示，此區域的滑移虧損率主要集中在九芎坑斷層及觸口斷層，於九芎坑斷層平均滑移量為 10 mm/yr，主要集中於南段深度 17 公里有約 40 mm/yr 之最大滑移虧損率，而在觸口斷層平均滑移量為 11 mm/yr，主要集中於南段深度 25 公里處約有 60 mm/yr 之最大滑移虧損率。而在大茅埔－雙冬斷層平均滑移量為 7 mm/yr，主要集中於西南西段深度 13 公里處約有 40 mm/yr 之最大滑移虧損率於此處累積，而在中段則在深度 25 公里約 25 mm/yr 滑移虧損率。

模型三之結果如圖 5-3.4 所示，此區域的滑移虧損率主要集中在九芎坑斷層及觸口斷層，於九芎坑斷層平均滑移量為 4 mm/yr，主要集中於南段深度 17 公里有約 40 mm/yr 之最大滑移虧損率，

而在觸口斷層平均滑移量為 7 mm/yr，主要集中於南段深度 25 公里處約有 55 mm/yr 之最大滑移虧損率。而在大茅埔－雙冬斷層平均滑移量為 6 mm/yr，主要集中於西南西段深度 13 公里處約有 40 mm/yr 之最大滑移虧損率於此處累積，而在中段則在深度 25 公里約 30 mm/yr 滑移虧損率。

三種模型成果皆顯示於大甲—彰化斷層(北段、南段)、車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷層北段因斷層水平速度變化皆不大，因此斷層面上的滑移虧損率值較小。於九芎坑斷層南段 13 至 20 公里深、觸口斷層南段 15 至 25 公里深及大茅埔－雙冬斷層西南西段 10 至 15 公里深，有該斷層面上較高之滑移虧損率累積。

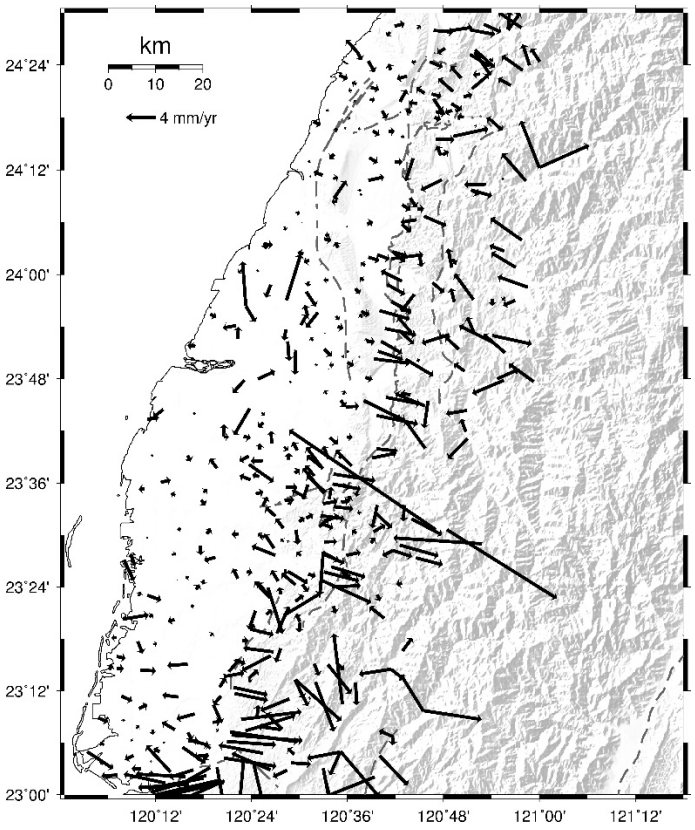


圖 5-3.1：觀測速率減掉受應變率及旋轉率所影響之速率計算值，得到斷層僅受到滑移虧損率對地表影響之速率。

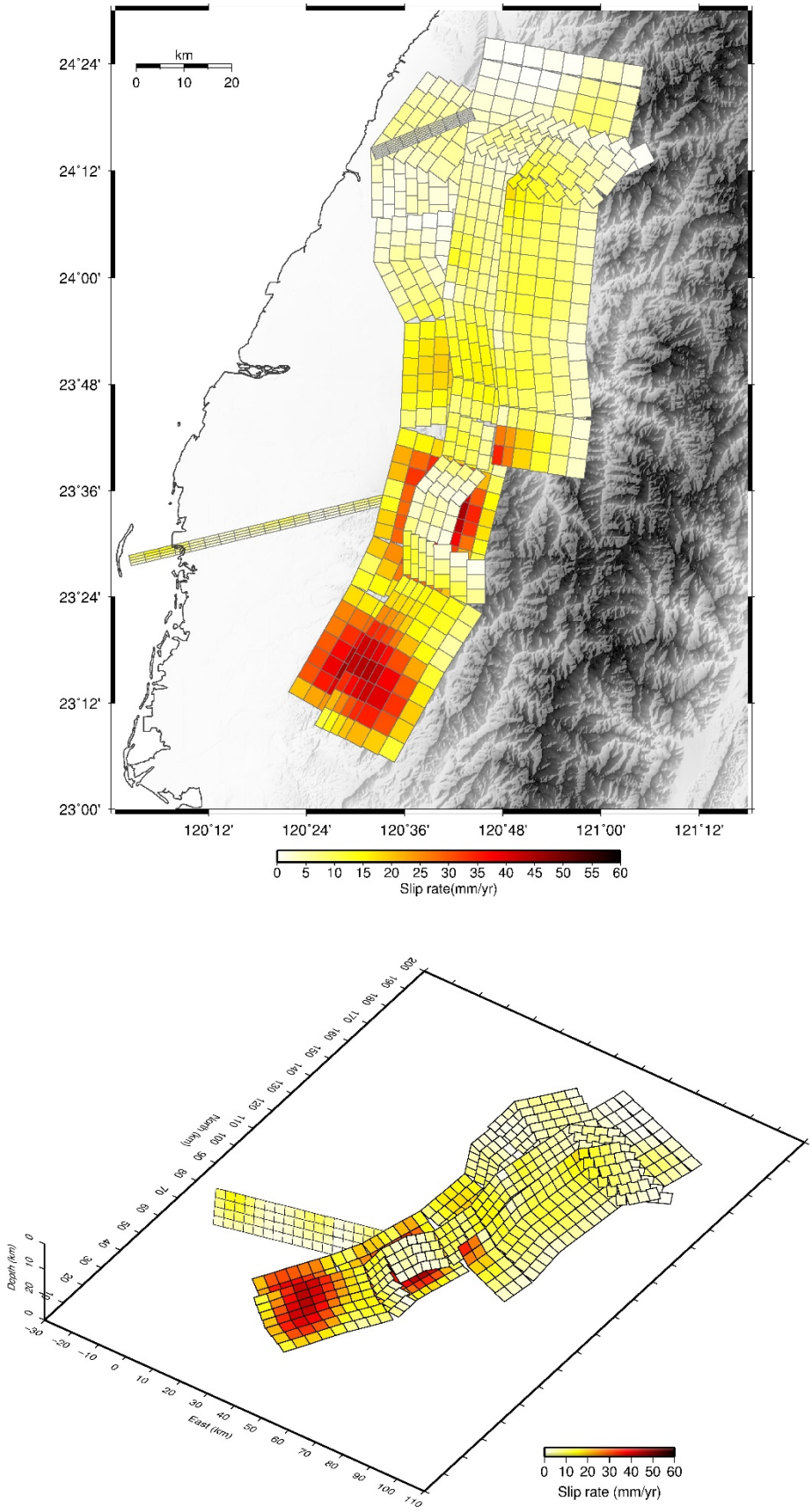
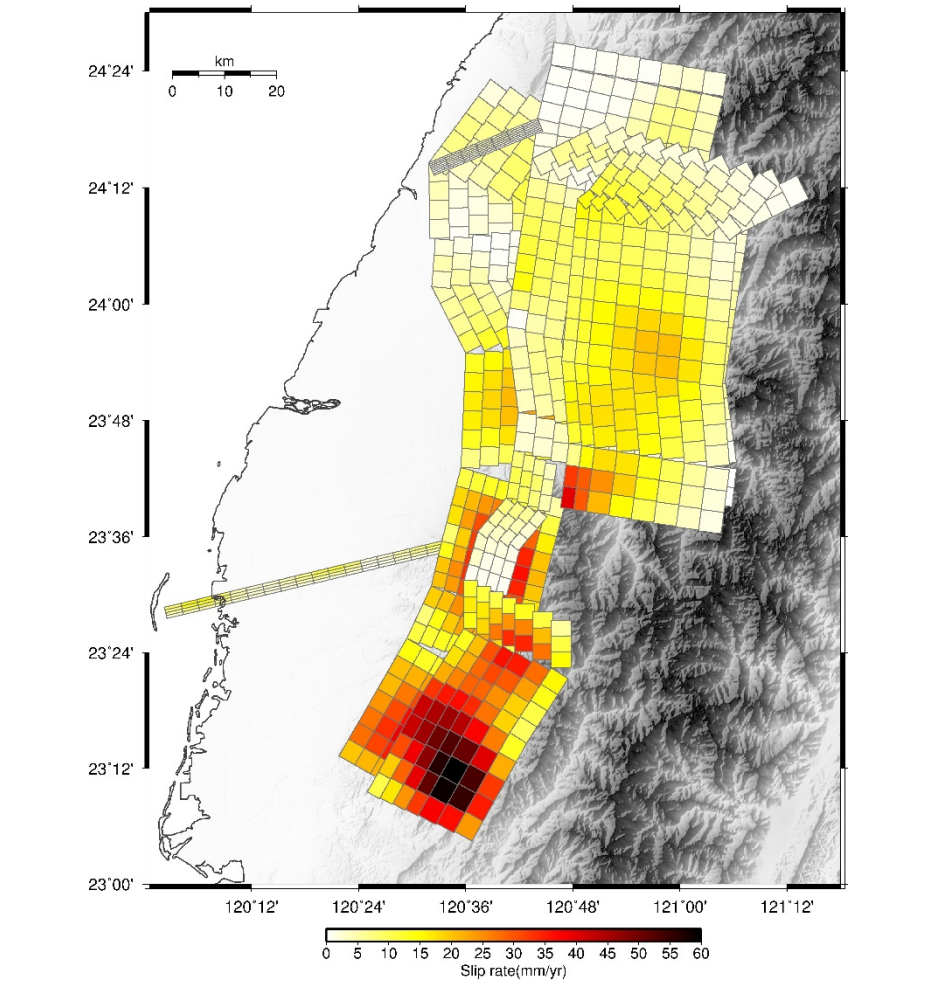


圖 5-3.2：模型一，滑移虧損率，基線模型反演成果。



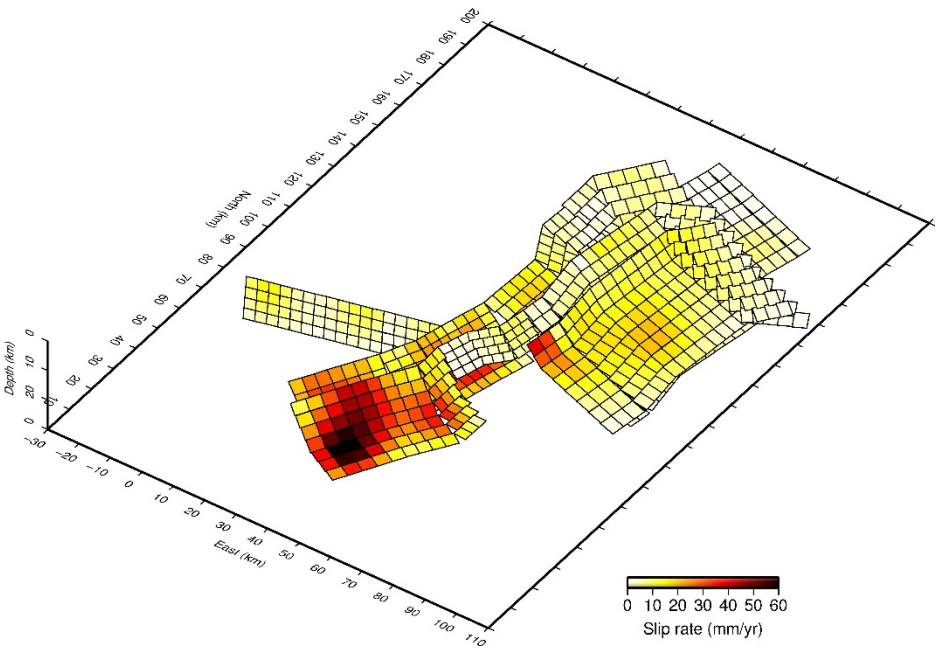


圖 5-3.3：模型二，滑移虧損率，基線模型反演成果。

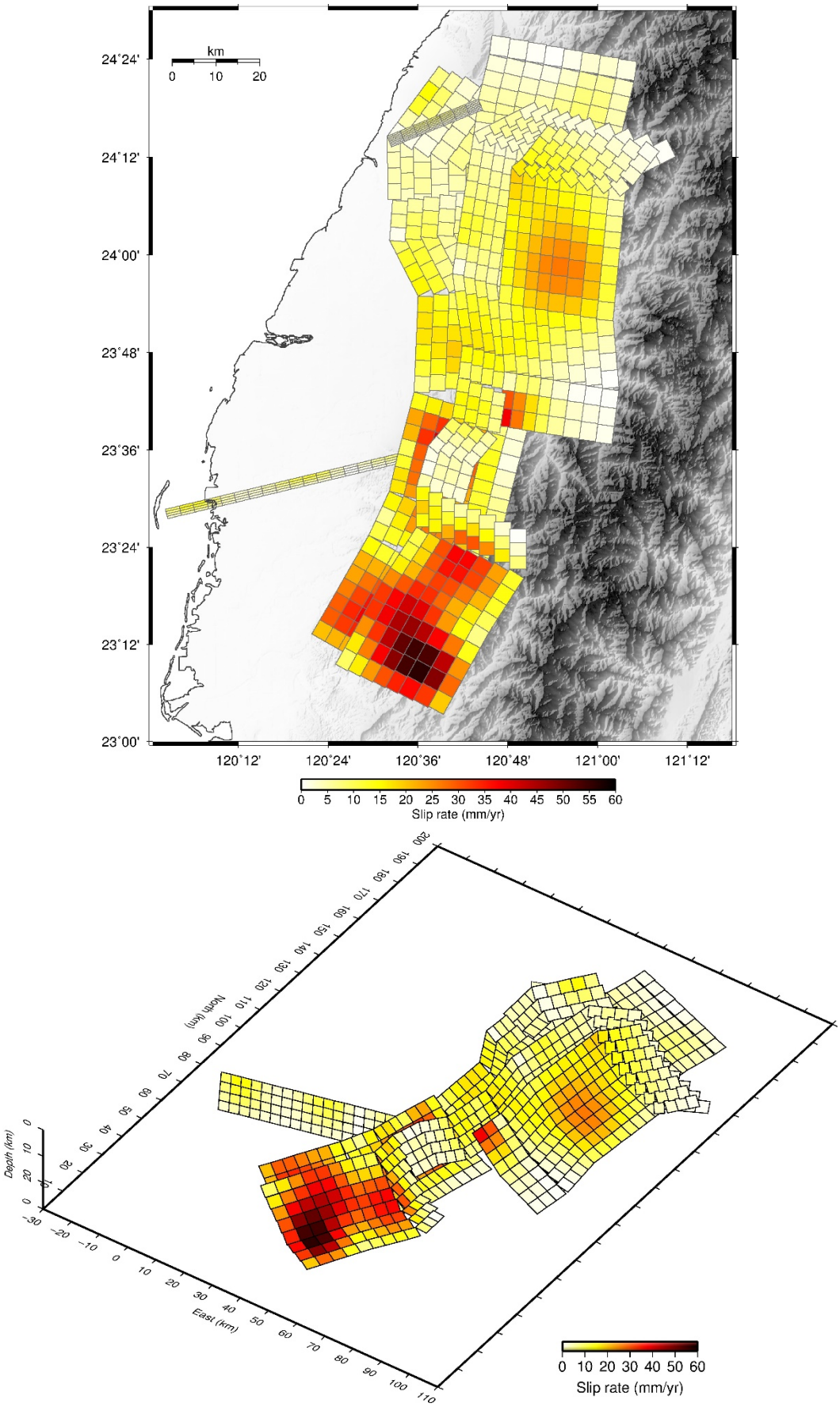


圖 5-3.4：模型三，滑移虧損率，基線模型反演成果。

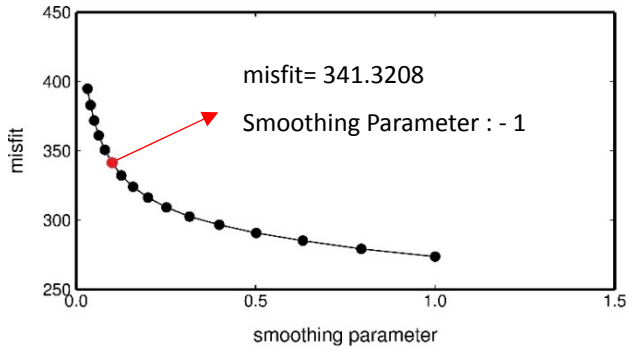


圖 5-3.5：斷層模型 1 所使用 misfit 值。

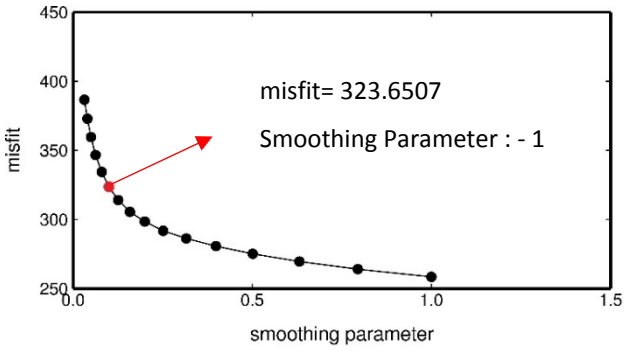


圖 5-3.6：斷層模型 2 所使用 misfit 值。

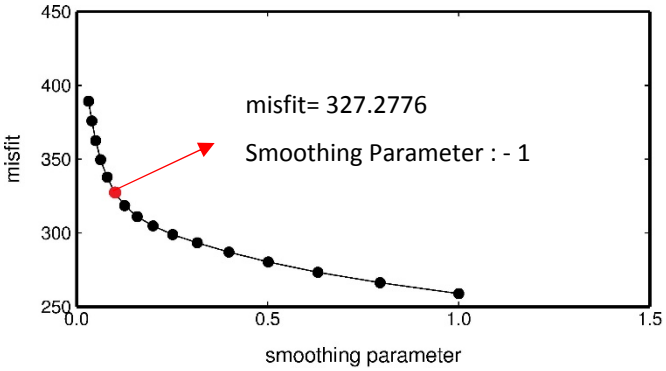


圖 5-3.7：斷層模型 3 所使用 misfit 值。

表 5-3.2：三組模型之斷層滑移速率平均值（mm/yr）。

		模型 1	模型 2	模型 3
大甲－彰化斷層	北段	4.29	5.59	8.55
	南段	7.97	5.95	9.34
車籠埔斷層		10	11.73	15.87
大茅埔－雙冬斷層		5.63	7.35	5.86
梅山		5.22	6.68	6.50
九芎坑		7.02	10.18	3.82
大尖山		10.48	7.19	10.76
觸口		4.46	10.51	7.33

5-4 最佳斷層幾何參數評估

本期研究主要以 BLOCK、DEFNODE 與基線應變模型三個不同的斷層模型，評估中臺灣七條活動斷層之斷層滑移速率或滑移虧損速率。比較三個不同斷層模型在三組不同斷層幾何參數的不符值差異指出，如果僅反演水平速度場來估算斷層滑移虧損速率，則無法顯著區分三組不同斷層幾何參數所造成的差異，因此本計畫同時參考地質與地球物理資料所判斷之最佳權重(參閱本期中興工程顧問社之地調所計劃報告)，最後本計畫建議以模型 1 當做最佳斷層幾何模型(已使用於 5-2 的計算與分析)。

此外，三個不同斷層模型所提供之斷層滑移虧損速率(如圖 5-4.1、5-4.2 及 5-4.3)顯示，三個不同斷層模型所提供之斷層滑移虧損速率顯示，大甲－彰化斷層（~4.6 mm/yr）在 DEFNODE 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率；車籠埔斷層（~10.3 mm/yr）在 BLOCKS 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率；大茅埔－雙冬斷層（5.5±2.3 mm/yr）、梅山斷層（5.8±2.7 mm/yr）、九芎坑斷層（6.8±2.4 mm/yr）、大尖山斷層（7.9±2.4 mm/yr）與觸口斷層（5.9±1.7 mm/yr）在三個斷層模型間的推估量差異並不特別顯著。

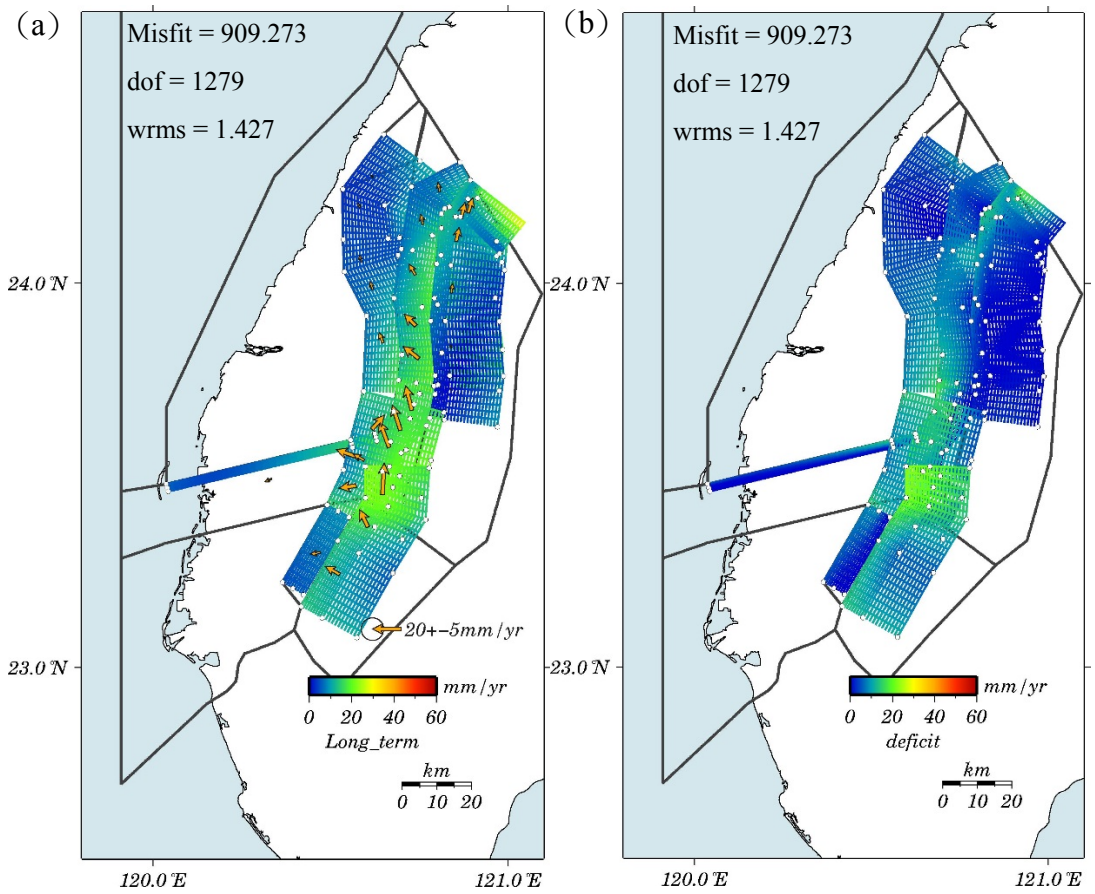


圖 5-4.1：模型 1 的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。圖上的黑體字為該模型之擬合參數結果。

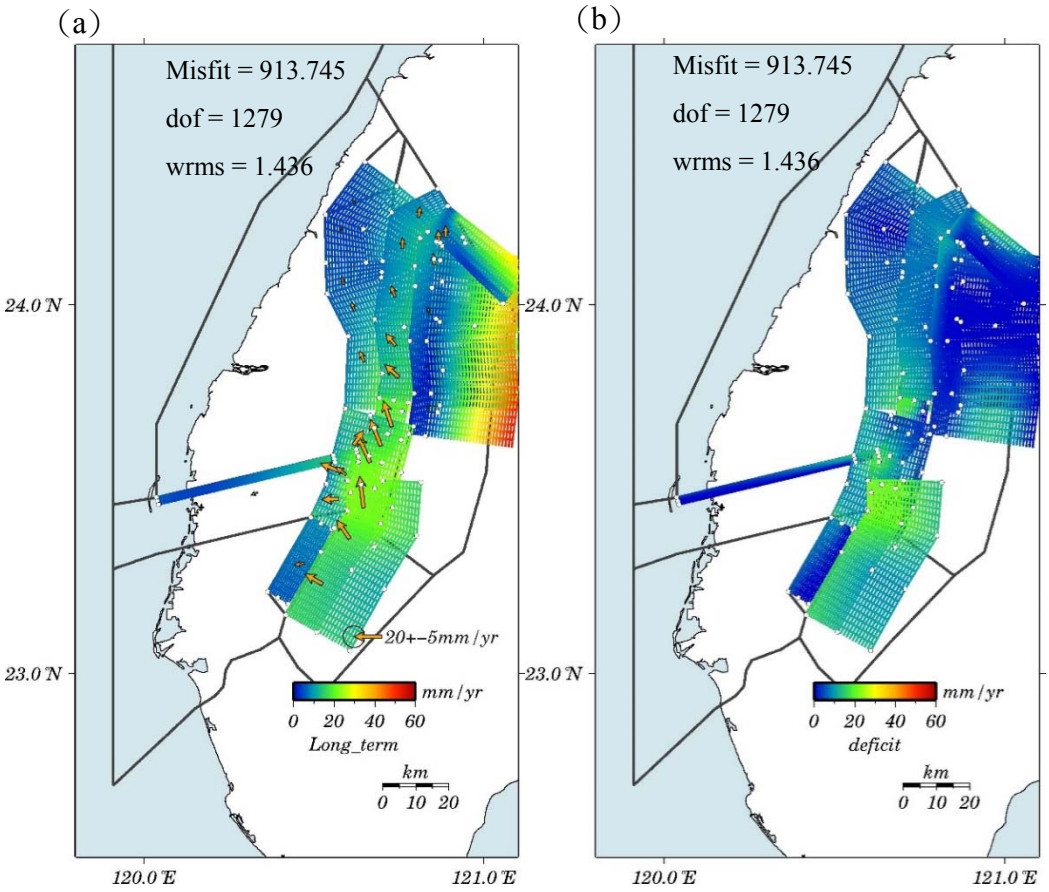


圖 5-4.2：模型 2 的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。圖上的黑體字為該模型之擬合參數結果。

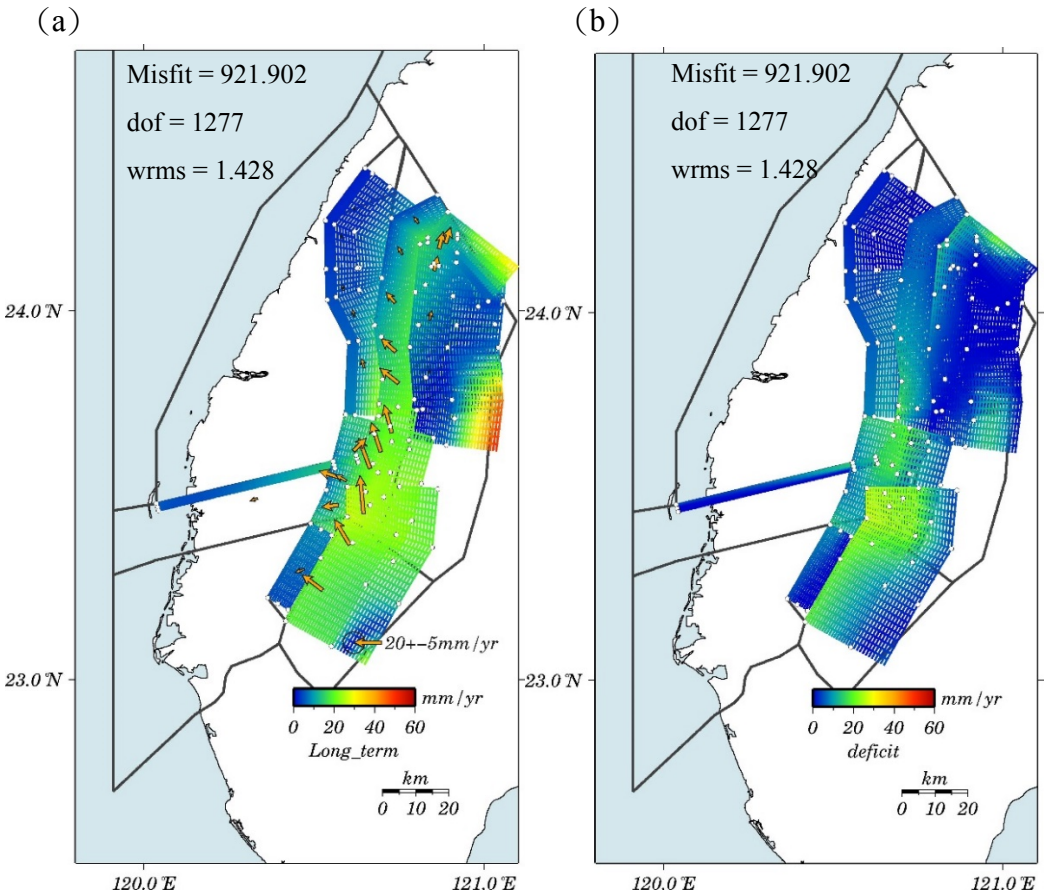


圖 5-4.3：模型 3 的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。圖上的黑體字為該模型之擬合參數結果。

第六章、結論

本期計畫的主要工作重點在於（1）採用 GMAIT 與 Bernese 軟體分別解算 GPS 移動站資料，用以評估 GPS 移動站速度場之穩定性；（2）嘗試評估 GPS 移動站垂直速度場；（3）求解臺灣不同時期之地表速度場；（4）測試 Sentinel-1A 衛星影像獲得之地表速度場；（5）嘗試結合 PSInSAR 速度場與 GPS 速度場來獲得更高解析度之的表三維速度場；（6）利用三個不同之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 2017 年 10 月全臺連續全球定位系統測站共 500 站，並加入週期性效應與震後變形衰減因子分析。移除部分測站因為架設時間過短（< 2 年），以及有同震及震後變形效應後，相對於澎湖白沙站，全臺速度場呈現中南部測站為東南東往西北西移動；宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為，臺南以南往南移動。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。利用三年內的精度分析則可有效篩選出未來大地震發生後可用於動態解算之連續 GPS 測站。

本計畫目前已完成 29 條精密水準主、副測線之計算分析與 700 個 GPS 移動站之資料計算。在 GPS 移動站的資料解算方面，由於過往歷年計畫的 GPS 坐標解算軟體皆採用 Bernese，為了瞭解 GPS 坐標解算成果的穩定性與可靠度，在本年度的計畫中，加入 GAMIT 軟體來獨立解算 GPS 資料，並與 Bernese 的解算成果交互驗證。比較由 GAMIT 及 Bernese 解算之中部地區速度場結果及各測站之坐標時間序列，指出兩者解算結果大致相符。亦即，本計畫 GPS 速度場的解算成果是穩定的。進一步的分析更指出，速度誤差越小的測站，兩種軟體解算出來的速度差異量就越小，此結果也可協助我們在未來瞭解各測站之環境品質。進一步，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，因此本計畫針對 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震等，以及發生速度場變化之轉折點，分別為 2007 年 1 月（中部地區）、2009 年 1 月（東部地區）、2010 年 4 月（恆春地區）、2015 年 1 月（恆春地區），分為九個時間段分別解算臺灣不同時期之地表速度場。

本年度初步測試 Sentinel-1A 衛星影像在 2015 至 2016 年初期間獲得的視衛星方向速度場大致與早期衛星影像相同。目前 Sentinel-1A 影像資料已經累積有三年左右，並且臺灣地區已於 2017 年

進入穩定接收期(12 天/張),預計未來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。由初步雷達干涉時間序列與連續 GPS 測站比對,得到 C 波段的 ERS 衛星與 ENVISAT 衛星資料之時間序列,較適用於中部地區分析。配合彙整中部地區斷層剖面分析可得到斷層空間與時間上的變化,此方法後續可再加以改進運用在其他區域斷層分析。

在斷層模型建置方面,本期研究主要以 BLOCK、DEFNODE 與基線應變模型三個不同的斷層模型,評估中臺灣七條活動斷層之斷層滑移速率或滑移虧損速率。比較三個不同斷層模型在三組不同斷層幾何參數的不符值差異指出,如果僅反演水平速度場來估算斷層滑移虧損速率,則無法顯著區分三組不同斷層幾何參數所造成的差異,因此本計畫同時參考地質與地球物理資料所判斷之最佳權重,最後本計畫建議以模型 1 當做最佳斷層幾何模型。此外,三個不同斷層模型所提供之斷層滑移虧損速率顯示,大甲–彰化斷層(~4.6 mm/yr)在 DEFNODE 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率;車籠埔斷層(~10.3 mm/yr)在 BLOCKS 與基線應變模型中獲得接近的斷層滑移虧損速率;大茅埔–雙冬斷層(5.5±2.3 mm/yr)、梅山斷層(5.8±2.7 mm/yr)、九芎坑斷層(6.8±2.4 mm/yr)、大尖山斷層(7.9±2.4 mm/yr)與觸口斷層(5.9±1.7 mm/yr)在三個斷層模型間的推估量差異並不特別顯著。

參考文獻

林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）臺灣東部與南部的活動斷層，二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第二十三號，共 178 頁。

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

張國禎（2012）重要活動斷層調查特性研究－近斷層高精度地形資料之判釋與分析（1/4）。經濟部中央地質調查所委辦計畫成果報告書，共 289 頁。

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

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

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

Altamimi, Zuheir, Paul Rebischung, Laurent M?tivier, 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.

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

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

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

Ching, Kuo En, Ruey Juin Rau, Jian Cheng Lee, and Jyr Ching Hu. 2007. "Contemporary Deformation of Tectonic Escape in SW Taiwan from GPS Observations, 1995-2005." Earth and Planetary Science Letters 262 （3–4）: 601–19. doi:10.1016/j.epsl.2007.08.017.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

Jackson, D.D., Lee, W.B., and Liu, C.C. （1981） Height Dependent Errors in Southern California Leveling, Earthquake Prediction: An International Review. AGU, 457-492.

Kampes, B. M. （2005） Displacement parameter estimation using permanent scatterer interferometry, Ph. D. thesis, Delft Univ. of Technol., Delft, Netherlands.

Langbein, J., and Johnson, H. （1997） Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. J.Geophys. Res., 102, 59-604.

Lee, J.C., Angelier, J., Chu, H.T., Hu, J.C., Jeng, F.S., and Rau, R.J. （2003） Active Fault Creep Variations at Chihshang, Taiwan, Revealed by Creepmeter Monitoring, 1998-2001. Journal of Geophysical Research, 108, B11, 2528, doi:10.10129/2003JB002394. （SCI）

Lyons, S., and Sandwell D. （2003） Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking, J. Geophys. Res., 108, 2047, doi:10.1029/2002JB001831.

Lin K.-C., J.-C. Hu, K.-E. Ching, J. Angelier, R.-J. Rau, S.-B. Yu, M.-H. Huang (2010) GPS crustal deformation, strain rate, and seismic activity after the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 115, B07404, doi:10.1009/2009JB006417.

McCaffrey, R. （2002） Crustal block rotations and plate coupling, in Plate Boundary Zones. Geodyn. Ser., vol. 30, edited by S. Stein and J. Freymueller, pp. 101– 122, AGU, Washington, D. C.

McCaffrey, R. （2005） Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data, J. Geophys. Res., 110, B07401, doi:10.1029/2004JB003307.

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

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

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

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

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

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

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

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

Shyu, J. B. H., Y. R. Chuang, Y. L. Chen, Y. R. Lee and C. T. Cheng （2016） A New On-Land Seismogenic Structure Source Database by the Taiwan Earthquake Model （TEM） Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences 27, 311-323, doi: 10.3319/TAO.2015.11.27.02（TEM）.

Tung, H., and Hu, J.-C. （2012） Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of centralTaiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. Tectonophys., 578, 126-135.

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

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

Ward, S.N. （1994） A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 1293-1309.

Werner, C., Wegmuller U., Strozzi T., and Wiesmann A. （2003） Interferometric point target analysis for deformation mapping, Int.Geos. Remote Sens. Symp.2003, 7,4362-4364

Wu, Y.-Y., Hu, J.-C., Lin, G.-P., Chang, C.-P., Tung, H., Lu, C.-H. （2013） Transient active deformation in Tainan Tableland using Persistent Scatterers SAR interferometry. Bull. Soc. Geol. France, in press.

Ward, S. N. （1998） On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135（3）, 1011-1018.

Wang, H., and T. J. Wright. (2012), Satellite geodetic imaging reveals internal deformation of western Tibet, Geophys. Res. Lett., 39, L07303, doi:10.1029/2012GL051222.

Walters, R. J., B. Parsons, and T. J. Wright. (2014), Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of Eastern Anatolia, J. Geophys. Res. Solid Earth, 119, 5215-5234. doi:10.1002/2013JB010909.

Yu, S.-B., H.-Y. Chen, and L.-C. Kuo. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics, 274:41–59.

Yu, S.B., Y.J. Hsu, L.C. Kuo, H.Y. Chen, and C.C. Liu. 2003. GPS measurement of postseismic deformation following the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. J. Geophys. Res., 108, 2520, doi:10.1029/2003JB002396.

Zebker, H. A., and Villasenor, J. （1992） Decorrelation in interferometric radar echoes : IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 30, 5, 950-959.

委員審查意見

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
（一）地表變形觀測資料處理分析	
1. 報告書第 9 頁提及「安平-龍崎測線及路竹-茂林測線在龍船斷層附近區域都有較明顯的抬升，或可說明龍船斷層仍有活動」，然沿這二條測線的抬升量其實分布在數公里寬廣範圍內而呈現一背斜形貌，跨越龍船斷層其實沒有明顯抬升量落差，請說明如何得知斷層仍有活動？若無法確認抬升量係龍船斷層活動所致，建議修正相關描述。	感謝委員建議，對於路竹-茂林測線的垂直速度場成果以其速度型態描述為主，淡化並納入不同的可能解釋。
2. 圖 2-1.4 之水平速度場，部分觀測站與鄰近站差異過大，建議查明原因，且不宜展繪於圖中。	感謝委員指正，已修正。
3. 圖 2-1.5 若為連續站之觀測成果，數量似乎偏少，圓形圖例有重疊，建議使用其他方式呈現。	感謝委員指正，已修正。
4. 第 48 頁提及中部地區 GPS 連續站序列在 2007 年初出現速度轉折，研判其合理的原因為何？	於 9/21 日招開之工作會議討論中，認為此依區域性之速度變化，可能之原因為集集地震震後效應及沿海地層下陷所造成，經過修正後採用 2007 年之後速度為此區域震間速度。
5. 報告書中有關水準測線之長度描述，建議加註說明為「投影至剖面的長度」。	感謝委員指正，已修正。
6. 第 53 頁，有關大安-東勢測線延長部份，請繪於圖上並加註說明於內文中。	感謝委員指正，已修正，另亦於內文補正測線總長數值。
7. 圖 2-3.10、2-3.13、2-3.18 及 2-3.22 之圖說，垂直虛線標示「活動斷層」之地表出露位置，但垂直虛線也標示向斜及背斜等構造，建議修改為「主要地質構造」。	感謝委員指正，已修正。
8. 第 63 頁，第 2 段，「在通過六甲斷層至觸口斷層之間有達 10.0mm/yr 以上的垂直抬升速度，此結果若非反應六甲斷層在此 10 年內均保持著活動性，即表示六甲斷層與觸口斷層間存在的北勢坑斷層為一活動構造。」請詳細說明此處地表變形抬升與斷層活動間之相關性，若無法確認地表抬升的原因，相關描述建議客觀而謹慎。	感謝委員建議，對於跨越六甲斷層至觸口斷層之間的垂直速度場成果，以修改為對其速度型態之客觀描述為主，淡化其可能的解釋。

期中審查意見	處理情形
9. 第 70 頁之抬升速率的比例尺在 0 處不合理，不可能在同一值有二個顏色出現(差異劇烈)，請修改。	感謝委員指正，已根據速度場的可信區間進行色階的調整。
10. 圖 2-4.2 及 2-4.6，水平速度場分布圖及垂直速度場分布圖建議不需套疊於臺灣地質圖上。未來可以參考使用時代地層圖(類似 2012 年活動斷層圖的底圖)。	感謝委員建議，已與地調所開會協調製作本年度活動斷層潛勢圖。
11. 第 82 頁提及「路竹-茂林測線在龍船斷層周遭有 15mm/yr 的抬升速度，或許可說明龍船斷層仍有活動」之說法似乎過於武斷，龍船斷層附近的抬升為整體區域的廣域抬升，並非在斷層附近有明顯抬升速率之落差，反而不像斷層的活動。	感謝委員建議，對於路竹-茂林測線的垂直速度場成果以其速度型態描述為主，淡化並納入不同的可能解釋。
12. 第 86 頁，單頻 GPS 的成果太單薄，請加入其他單位的觀測站進行整體分析，並分析其與現有成果(GPS 連續站及移動站)之差異。	感謝委員建議，已加入誤差、速度場解算分析等詳細結果。
13. 有關第三章中部地區雷達影像分析部分，在分析結果中提及許多地表變動情形的地名(溪湖、二林、褒忠、土庫等)，但在圖 3-1.1 至 3-1.3 都未標示，請在圖中標示重要地名以便於閱讀。	感謝委員指正，已修正。
14. 圖 4-2.1 至 4-2.6 係用來說明中部地區應變速率之空間分布，建議聚焦在中部地區做較詳細的呈現。	謝謝委員意見，已參考意見修改。
15. 圖 4-2.4 至 4-2.6，建議標示圖例及其數值之比例尺。	謝謝委員意見，已參考意見修改。
16. 建議團隊再次思考 PS-InSAR 在計畫中的角色，是否再加入新時期的影像一起分析，分析結果能否貢獻在模型反演，否則看起來像是獨立的章節。	謝謝委員意見，已加入 Sentinel-1A 影像進行分析，詳見 3-1-4 節。目前 PS-InSAR 的主要貢獻在於協助內插地表三維速度場，增加我們對於地表變形型態的解析能力。另外，由於本團隊目前使用的模型反演程式主要是反演水平速度場，目前本團隊在持續修改相關程式，嘗試將 PS-InSAR 的成果納入模型反演。
(二)斷層模型反演評估	
1. 圖 5-1.1 所使用的三維塊體模型分布，CHYI 與 WCPS 之邊界建議不用；WCPN 之邊界建議西移與其他塊體一致。	CHYI 與 WCPS 之邊界為過去計畫中為了探討義竹斷層之影響而設置，本期計畫中僅設為塊體邊界，並未設置斷層。 WCPN 以西與參考塊體 EURA 設有邊界，此為西部平原區與歐亞板塊之分界，因此有保留此邊界之必要性，感謝委員建議。

期中審查意見	處理情形
2. 計算斷層滑移虧損率所使用之斷層幾何參數設定，建議參考已發表之諸地下構造平衡剖面所顯示之模型。	斷層幾何參數皆有參考已發表的構造平衡剖面來設置，感謝委員建議。
（三）報告書內容及其他建議事項	
1. 報告書之編排不易閱讀，研究區域及成果出現之先後順序較無邏輯建議改善。	感謝委員指正，已修正。
2. 本年度之重點為「中部地區」，然於報告書中並無特別說明，建議補充說明。	感謝委員指正，已在速度場、PS-InSAR、應變、模型建置等章節針對中部地區加入分析結果。
3. Sentinel 1-B(衛星影像），目前並無接收臺灣地區，建議團隊可發信與 ESA 爭取。	特請法國學者 Erwan Pathier 與法方接洽得知，根據 ESA 的規劃不可能再增加臺灣的接收，Sentinel-1B 只提供歐洲區域的拍攝。
4. 報告書封面「委託專業服務計畫」請更正為「委辦計畫」，「第 106 年度」請更正為「第 1 年度」。	感謝委員指正，已修正。
5. 第 8 頁，章節 1-4-1，第 3 行，桃「苗」竹苗，請更正。倒數第 4 行，「由西北西轉為西北北」建議修正為「北北西」。	感謝委員指正，已修正。
6. 第 9 頁及第 82 頁，第 2 行，「獅潭斷層」應為「湖口斷層」。	感謝委員指正，已修正。
7. 第 13 頁，PS-InSAR 應完整描述前一期 4 年的結果，而非只有東部地區。	感謝委員指正，已修正。
8. 第 25 頁，第 4 段第 2 行，「圖 2-2.5、2-2.6」應為「表 2-2.1、2-2.2」。	感謝委員指正，已修正。
9. 第 26 頁，圖 2-2.5 之圖說，「臺灣連續站絕對水平速度場圖，相對於澎湖白沙。」既然為絕對水平速度場，則不會相對於澎湖，請修正。	感謝委員指正，已修正。
10. 第 29 頁及第 33 頁，圖 2-2.8 及圖 2-2.12 之圖說，原因尚待「待」察明，請更正。	感謝委員指正，已修正。
11. 第 44 頁，圖 2-2.27 之圖說，白色箭號為「20010」，請更正。	感謝委員指正，已修正。
12. 第 50 頁，圖 2-2.37 之圖說，「黑色方型為移動站點位」，應為「藍色方型為連續站點位」。	感謝委員指正，已修正。
13. 第 51 頁，第 2 段，九十年度編印「一等水準測量作業規範」，請更新為 2014 年。	感謝委員指正，已修正。
14. 第 55 頁，圖 2-3.5 之圖說，請加入「CLPF 車籠埔斷層」。	感謝委員指正，已修正。

期中審查意見	處理情形
15. 第 68 頁，圖 2-3.22 之右上圖，橫軸標題為「N90°W」，建議修改為「W-E」。	感謝委員指正，已修正。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一）地表變形觀測資料處理分析	
1. 不同軟體的解算結果（GAMIT 與 BERNESE）可能有系統誤差，需仔細分析（包含 GPS 連續站和 GPS 移動站），以免整合不同軟體結果時有偏差。	由速度殘差分析比較可發現，本次解算系統誤差並不顯著，在往後的資料處理也會加強注意是否產生系統性誤差。
2. P.21, 22，所繪之水平速度場及垂直速度場於點位密度不足的地區，請考慮內插距離對分析品質的影響，適當去除內插距離過遠的內、外插成果較為合理。	感謝委員建議，已修正。
3. P27, 28，GAMIT 與 Bernese 的解算速度場結果，大部分一致，但局部地區呈現較大差異（如苗栗山區、彰化丘陵與斗六丘陵一帶）；圖 2-2.7 顯示 G947、AF01 等 2 站利用 GAMIT 與 Bernese 的解算速度場結果，在垂直向的變化，數值差異也甚大（可達 40-50mm 以上），建議探討說明可能原因。	經檢查解算資料後可發現，差異較大點位，可能是因為軟體坐標解算設定差異所造成，使得兩軟體間求解天數不同所造成，天數吻合之點位速度殘差皆小於 3 mm/yr，因此在下一年度的坐標解算工作中，將會調整軟體設定，進一步比較資料之一致性。
4. P.31，GS10 竹圍國中因場址問題造成不穩定，執行團隊應提供類似改善的建議。	由於 GS10 位於土堤圍牆上方，可能因為土坡的場址不穩定，造成 GS10 垂直沉陷速度較大，建議遷移此站至穩固之場址。
5. P.31，「斷層兩側之水平速度指出，該斷層具有左移分量」，圖 2-2.11 如何看出此趨勢？請說明。	比較山腳斷層兩側之水平速度場指出，斷層東側平行斷層走向分量約為朝北北東 2.0 ~ 3.0 mm/yr；斷層西側平行斷層走向分量約為朝北北東 1.0 ~ 2.0 mm/yr，故指出該斷層具有左移分量
6. P.93，圖 2-4.1 利用短期資料計算 GPS 速度，誤差很大，宜小心，有些測站有明顯的遮蔽效應，速度會因為遮蔽效應隨時間的改變有明顯的變化。	在處理不同時期之 GPS 速度場計算時，會考慮空間系統性之變化以避免因單一測站環境所造成之影響。而主要造成速度場變化的因素目前顯示是因為中規模地震的效應。
7. P.97，解算成果受到約制站（WHWS 文和國小）之距離影響很大，是否考慮加入本區域所有雙頻 GPS 連續站一起約制求解，再比較此二種解算結果之差異。	由約制 WHES 之結果可得單頻解算結果受到與約制站之距離影響甚大，因此另外以 GS73 及 AKND 等雙頻站分區解算，以縮短基線距離，成果將於期末報告完稿呈現。
8. P.97, 98，圖 2-5.2 顯示單頻速度場方向似乎與雙頻、連續站差異頗大，原因為何？西南部單頻、雙頻結果之比較，因為比較時間太短，沒有實質意義，也許可以比坐標。	由於單頻資料觀測時間較短，所以其速度場並非直接反映板塊間之擠壓運動，而是反映地區性之週期性運動。故比較同時期之雙頻測站速度場，可以指出單雙頻測站呈現之地表變形型態類似。

期末審查意見	處理情形
9. P.15, 16，圖 1-4.6 及圖 1-4.7，ENVISAT 和 ALOS 的差異大，須仔細探討可能原因。	ENVISAT 影像與 ALOS 影像主要差異為波長不同、衛星觀測的幾何形貌不同以及觀測時間不同，導致顯現出來的變形行為不同。但透過幾何校正後，與同時期 GPS 測量到速率都很一致，代表資料都有可信度。例如，西南部地區有明顯的暫態變形行為，因此在不同時間上所得到的變形速率也有所差異。而東部地區則是受限於植被，導致只有長波長 L 波段 ALOS 衛星較能觀察到縱谷斷層鎮間的變形行為。
10. P.99, 100，現有 SAR 影像圖資，使用的最新資料只到 2016 年 2 月，建議分析至可接收衛星影像最新時段之資料。	由於 Sentinel 影像處理流程與早期影像大不相同。本年度主要著重在方法的建立，因此只使用了一年的資料。下年度開始將會納入最新影像分析。
11. P.113，圖 3-3.9 在 ENVISAT 可明顯看出八卦背斜呈現變形的形貌，但在 ALOS、ERS、水準測量卻不明顯，可能的原因為何？	以圖 3-3.9ENVISAT 剖面來看，比對其他衛星影像與水準、GPS 測量結果。此 ENVISAT 影像散度過大，可能原因為大氣影響嚴重。因此八卦山背斜地區應該為地形影響的大氣效應，而非真實變形。另補充於內文。
（二）斷層模型反演評估	
1. 第五章斷層模型建置中所使用之構造剖面應於地圖中列出位置。	已將斷層模型建置中所使用之構造剖面列於地圖中。
2. 第五章斷層模型建置中不同模型應盡量統一使用相同的斷層幾何參數。	感謝委員的建議，斷層模型建置中不同模型的斷層幾何參數是一致的。
3. P.137，表 5-1.2 之數值有許多和地質資料計算的結果差異很大，請說明原因。	經測試後，我們發現給定斷層初始滑移速率，可以提供模型斷層模型模擬值較好的收斂，故已提供新的三組模擬成果，並更新圖示與文字內容，並在 5-1-2 段增加文字說明，謝謝委員不吝指教。
4. P.155，所使用黃旭燦平衡剖面與洪日豪剖面上面造山帶前緣之主要斷層，為崙後斷層而非觸口斷層，請改用出現觸口斷層的剖面。	在潛勢評估中，本計畫有考慮崙後斷層與觸口斷層聯合破裂之事件，即考慮崙後斷層為觸口斷層南延之部分。
5. P.154, 155，楊耿明剖面與黃旭燦平衡剖面其實是同一計畫的剖面，但位置不同，亦即代表不同位置的斷層形貌，請釐清。	在 PSHA 及斷層模擬中，為了簡化斷層幾何形貌作為 PSHA 之輸入檔，通常只考慮斷層最多雙傾角之情形，斷層在不同位置幾何形貌之差異，則是用邏輯樹方式，考慮斷層不同之深度傾角，權重後再進行評估。
6. P.154, 155，從模擬結果得知，三種模型結果差異甚大，顯示反演結果受控於構造剖面初始設	在進行模型的滑移速率約制參數調整後，差異已並不甚大，更進一步的模型設定討論，會持

期末審查意見	處理情形
定影響很大，是否能嘗試降低此影響，加重地表變形的權重進行反演。	續測試更新。
（三）報告書內容及其他建議事項	
1. 許多圖的標示太小不清楚，或者圖的品質不佳，請改進。	感謝委員指正，已修正。
2. 速度場圖請加入誤差橢圓。	加入資料繪製誤差橢圓，感謝委員指正。
3. 圖說明文字大小、行距、及排版（邊界）建議全文統一，P.97 表名稱應在表格上方。	感謝委員指正，已修正。
4. 圖目錄只須寫標題，不需要說明。	感謝委員指正，已修正。
5. 請修正向量及走向的描述，例如：P.91「東北-西南走向」應為「東北走向」。	感謝委員指正，已修正。
6. 水準測線的點位，建議表示清楚。	感謝委員指正，已修正。
7. 時間序列圖虛線代表意義?若為地震時間，應說明詳細日期「000 年 00 月 00 日」。	感謝委員指正，已修正。
8. 文獻引用，英文文獻逗號應為半型，例如「Dach et al., 2007」。	感謝委員指正，已修正。
9. P.3，所列 GPS 連續觀測站資料表未更新至現況，例如 GS40 龍峰國小、GS57 石門國小均已廢站應予標註，GS93 七星山應予新增。	感謝委員指正，已修正。
10. P.4，圖 1-1.1 大地測量觀測網圖為招標文件內容，點位資料至今已有更新，建議研究團隊應以最新資料進行重繪，圖說亦須更改。	感謝委員指正，已修正。
11. P.8, 91，「速度值約為 10 至-40mm/yr」相關數值是否有誤，請確認。	感謝委員指正，已修正。
12. P.14，第 9 行，「從圖 2-6.9 中」應刪掉。	感謝委員指正，已修正。
13. P.15，第 3 行「台南台地則擁有最大抬升量，速率約將近 20mm/yr」，此數值超出過往已知的抬升速率頗多，建議確認相關數值。	由於其成果為 1995~1999 年資料以連續 GPS 測站 S011 為不動點，而 S011 本身相對澎湖白沙擁有 10~15 mm/yr 的抬升量，因此台南台地真實抬升量應修正為 5-10 mm/yr。另補充於內文。
14. P.16，內文應加上衛星影像時間。	感謝委員指正，已修正。
15. P.27，第三段「重覆步驟 2-5」，前述步驟應補上步驟編號	感謝委員指正，已修正。
16. P.27, 28, 37, 47，圖 2-2.5、圖 2-2.6、圖 2-2.8、圖 2-2.32、圖 2-2.33 圖說說明資料處理年份與內文不同，請修改。	感謝委員指正，已修正。
17. P.29, 30，應為「圖 2-2.9」及「圖 2-2.10」。	感謝委員指正，已修正。

期末審查意見	處理情形
18. P.32，圖 2-2.12 圖說，應為「綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站」。	感謝委員指正，已修正。
19. P.33，圖 2-2.14 站址周圍環境圖，請標明 GA69 及 GS10。	周圍環境照主要為連續站 GS10 照片，已修改圖片說明，感謝委員指正。
20. P.41，第 6 行「2013-2013 年」應為「2013-2017 年」。	感謝委員指正，已修正。
21. P.46，圖 2-2.31 圖說說明虛線時間分隔點為 2009 年 1 月，但圖中顯示虛線位置為 2008 年以前。	感謝委員指正，已修正。
22. P.65，「說明此兩斷層可能在 1999 年集集地震後有持續性的活動現象」，有抬升現象並無法證實斷層有持續性的活動，建議修正為「說明此兩斷層附近可能在 1999 年集集地震後有持續性的抬升現象」。	感謝委員指正，已修正。
23. P.69，圖 2-3.28 圖說「五光至竹測線」應為「五光至黃竹測線」。	感謝委員指正，已修正。
24. P.70，圖 2-3.29 右上圖誤植龍井-太平測線高程地形變化，請確認。	感謝委員指正，已修正。
25. P.73，圖 2-3.33 有兩條虛線，圖說僅說明一條。	感謝委員指正，已修正。
26. P.84，第四段第 5 行「測線支點位」應為「之」。	感謝委員指正，已修正。
27. P.96，圖 2-4.3 臺灣活動斷層潛勢圖不是最新版本，臺灣活動斷層潛勢圖內說明文字模糊，請修正，且內文中缺乏一段文字說明本圖之製作與代表意義、相關使用限制，資料容易遭誤解誤用，建議增加相關文字說明。臺灣的長寬比似乎不對。	感謝委員指正，已修正。
28. P.97，單頻 GPS 之解算建議加入各單頻站的解算時間序列與鄰近移動站或連續站的比較，否則僅置於光碟附錄無法充分展現單頻站的分析成果。	感謝委員指正，已在本文及光碟附錄中皆加入各單頻站的解算時間序列。
29. P.105, 106，圖 3-2.1 及圖 3-2.2 建議在圖中標示何為 ERS、ENVISAT 及 ALOS 的圖。	感謝委員建議，已修正。

期末審查意見	處理情形
30. P.129，應變計算結論有提及全臺灣應變分布，建議應放全臺灣應變分布圖。	感謝委員建議，已修正。此部份因期中報告審查委員建議將工作重點著重於中部地區，故在期末報告將研究區域改成中部地區。
31. P.130，第 1 行「大矛埔-雙冬斷層」應為「茅」。	感謝委員指正，已修正。
32. P.143，第 3 行「活斷層」應為「活動斷層」。	感謝委員指正，已修正。
33. P.144，表 5-2-1 第 4 欄「斷層底部深度」但許多斷層卻顯示從 0 至數公里，相關文字描述請再確認。	意義上應為「斷層鎖定深度」，因本階段斷層隨深度的傾角有變化，故未修改用詞，感謝委員指正。
34. P.145，第 2 行「南部塊體」應為「中部」；提及「前人」，應列文獻；應為「圖 5-2.4a」及「圖 5-2.4d」。	感謝委員指正，已修正。
35. P.146，圖 5-2.2 塊體邊界及臺灣邊界皆為黑線，建議各塊體 Euler pole 所在位置及誤差範圍使用其他方式呈現。	除了圖 5-2.2 之外，本研究也將各塊體 Euler pole 之經緯度及誤差範圍呈現於表 5-2.1，未來會更注意結果於圖中的呈現，感謝委員建議。
36. 今年的計畫成果豐碩，期待未來應就 GPS、水準測量和 PS-InSAR 的資料，做更具整合性的解釋。	感謝委員建議，將於未來之工作進行。
37. 規模 6 以上之地震事件章節補充	感謝委員指正，已修正。