計畫編號：B113010

經濟部地質調查及礦業管理中心

113年度委託專業服務計畫執行期末報告書

（定稿）

「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形第二階段(2/3)」

(第二年度)

全 程 計 畫：自112 年 3 月至 114 年 12 月止

本年度計畫：自113 年 3 月至 113 年 12 月止

委託機關：經濟部地質調查及礦業管理中心

執行單位：國立東華大學

計畫主持人：顏君毅

中 華 民 國 113 年 12 月

目錄

目錄 I
圖目錄 V
表目錄 XVIII
摘要 XXIII
Abstract XXV

第一章、緒論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2 計畫目的 5
1-3 110-112 年度計畫成果概述 7
1-4 計畫工作方法概述 18
1-4-1 合成孔徑雷達差分干涉 (Interferometry 18
Synthetic Aperture Radar, InSAR) 18
1-4-2 多時序雷達差分干涉技術 (Multi-Temporal InSAR) 19
1-4-3 解算垂直變形速率 22
1-4-4 資料比對 23
1-4-5 斷層幾何與滑移量模擬 24
1-4-6 計畫成果效益及其應用 24
1-5 本年度計畫概述 25
1-5-1 本年度研究區域背景簡介 25
1-5-1-1 大甲斷層 25
1-5-1-2 鐵砧山斷層 29
1-5-1-3 彰化斷層 30
1-5-1-4 車籠埔斷層 34
1-5-1-5 大茅埔 - 雙冬斷層 45
1-5-1-6 初鄉斷層 52

1-5-2 本年度工作項目 56
1-5-2-1 本年度計畫期中交付工作項目 56
1-5-2-2 本年度計畫期末交付工作項目 56

第二章、計畫執行方法及進行步驟 59
2-1 雷達差分干涉 59
2-1-1 永久散射體雷達差分干涉技術(PSI)的基本概念 61
2-1-2 StaMPS 技術的 PS 點位選取概念 63
2-1-3 技術上需克服之困難 67
2-2 GNSS、水準測量與雷達差分干涉資料對比 67
2-2-1 工作內容概述 67
2-2-2 資料對比之執行方法及進行步驟 69
2-3 二維剖面模擬 71
2-3-1 方法與執行步驟 71
2-3-2 跨斷層之速度剖面分析 75
2-4 垂直速度場解析 75

第三章、中部地區雷達影像分析 79
3-1 資料處理與製圖 80
3-1-1 StaMPS 參數測試與律定 80
3-1-2 製圖底圖與 PSI 資料分佈 81
3-2 2014-2018 年雷達影像成果 84
3-3 2018-2021 年雷達影像成果 87
3-4 2022-2023 年雷達影像成果 90
3-5 垂直速度場解析 93
3-6 跨斷層的速度場剖面分析 100
3-6-1 A 剖面 105
3-6-2 B 剖面 108
3-6-3 C 剖面 111

3-6-4 D 剖面.....114
3-6-5 E 剖面.....117
3-6-6 F 剖面.....120
3-6-7 G 剖面.....123
3-6-8 H 剖面.....126

第四章、中部地區雷達資料與其他大地測量觀測資料的比對 129
4-1 GNSS 連續站與 PSI 資料比對.....129
4-1-1 2014~2018 年.....134
4-1-2 2018~2021 年.....140
4-1-3 2022~2023 年.....145
4-2 GNSS 連續站及移動站與 PSI 資料比對.....151
4-2-1 2014~2018 年.....154
4-2-2 2018~2021 年.....158
4-2-3 2022~2023 年.....163
4-3 水準測量資料與雷達資料比對成果.....169
4-3-1 大安至東勢測線.....171
4-3-3 北斗至水里測線.....177
4-3-4 龍井至太平測線.....180
4-3-5 五光至黃竹測線.....183
4-3-6 跨車籠埔斷層短測線.....185
4-4 重點區域時間序列分析.....194

第五章、二維剖面模擬 205
5-1 方法與執行步驟.....205
5-2 剖面 P1 模擬結果.....210
5-3 剖面 P2 模擬結果.....219
5-4 剖面 P4 模擬結果.....229
5-5 剖面 P5 模擬結果.....234

第六章、討論 239
6-1 雷達結果與各項大地測量資料比較 241
6-1-1 雷達差分干涉資料與 GNSS 比對.....241
6-1-2 20220918 地震影響 260
6-1-3 GNSS 時間序列.....265
6-1-4 雷達差分干涉資料與水準測線的比對 267
6-2 雷達影像成果 274
6-2-1 中臺灣地區垂直速度場 274
6-2-2 淺山區剖面.....279
6-3 中部地表變形之地質意義探討.....284
6-3-1 區域構造的速度變化 284
6-3-2 岩性邊界的地表變形 286
6-4 斷層錯位模擬 298

第七章、結論 299

Chapter 7 : Conclusions 301

參考文獻 305

期中委員審查意見 321

期末委員審查意見 327

(附錄請參閱電子檔)

附錄 A、三維向量於衛星視角方向的影響

附錄 B、GNSS 與 PSI 時間序列比對

附錄 C、各時期 P1~P5 成果

圖目錄

圖 1-1：目標區域。1 3
圖 1-2：研究區域中的道路與斷層分佈情形。 4
圖 1-3：工作團隊與主要工作項目。 5
圖 1-4：110 年至 112 年 PSI 與 GNSS 雷達視衛星方向速率圖。 8
圖 1-5：110 年至 112 年 PSI 與 GNSS 連續站速度場對比。 9
圖 1-6：2018-2020 年車瓜林斷層附近地表變形狀況。 10
圖 1-7：2018-2020 年車瓜林斷層附近地表變形剖面。 11
圖 1-8：2018-2020 年小崗山斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。 12
圖 1-9：2018-2020 年小崗山斷層附近剖面萃取之地表變形速率。 13
圖 1-10：2018-2021 年後甲里斷層附近地表變形狀況。 14
圖 1-11：2018-2021 年後甲里斷層附近地表變形剖面。 15
圖 1-12：2018-2021 年山腳斷層附近地表變形狀況。 16
圖 1-13：2018-2021 年山腳斷層附近剖面圖。 17
圖 1-14：雷達差分干涉影像對的相位變化與地表變形之間的示意關係圖（Wright, 2002）。 19
圖 1-15：冰島 Eyjafjallajökull 火山周圍的 PSI 時間序列地表變形量（Hooper, 2008）。 22
圖 1-16：大甲斷層、鐵砧山斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。 28
圖 1-17：彰化斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。 33
圖 1-18：車籠埔斷層條帶地質圖，豐原以東部分（林啟文等，2008）。 36
圖 1-19：車籠埔斷層條帶地質圖，豐原至烏溪部分（林啟文等，2008）。 37
圖 1-20：車籠埔斷層條帶地質圖，烏溪以南部分（林啟文等，2008）。 38
圖 1-21：車籠埔斷層古地震事件與發震模式（Chen et al., 2007）。 43
圖 1-22：大茅埔 - 雙冬斷層條帶地質圖，大茅埔斷層部分（林啟文等，2008）。 ..49

圖 1-23：大茅埔 - 雙冬斷層條帶地質圖，雙冬斷層烏溪以北部分（林啟文等，2008）。.....50
圖 1-24：大茅埔 - 雙冬斷層條帶地質圖，雙冬斷層烏溪以南部分（林啟文等，2008）。.....51
圖 1-25：初鄉斷層條帶地質圖 1/2（林啟文等，2021）。.....54
圖 1-26：初鄉斷層條帶地質圖 2/2（林啟文等，2021）。.....55
圖 2-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。.....60
圖 2-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。.....62
圖 2-4：雷達影像處理流程第一階段 - 雷達差分干涉處理流程圖。.....65
圖 2-5：雷達影像處理流程第二階段 - PSI 處理流程圖。.....66
圖 2-6：SENTINEL-1 東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。.....68
圖 2-7：SENTINEL-1 (asc：2015/10~2019/9; des：2015/4~2019/9) 雷達影像與 GNSS 測站龍崎 (LNCH) 時間序列比較圖。.....69
圖 2-8：GipsyX 軟體處理流程。.....71
圖 2-9：(a) 斷層幾何參數，(b) 由圖 (a) 提供的斷層幾何參數與滑動量，經過彈性半無限空間錯動理論計算的地表變形（Okada, 1985）。.....73
圖 2-10：藉由在空間上連續的地表變形資訊，採用彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992），推估斷層參數（Kuo et al., 2019）。.....74
圖 2-11：工作流程圖。.....75
圖 3-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與本次研究區域分佈圖。.....81
圖 3-2：2018-2021 年彰化地區升軌道方向 PSI 速度場套疊國土數值地形模型 (DTM) 成果。.....82
圖 3-3：2018-2021 年彰化地區升軌道方向 PSI 速度場套疊 SPOT 衛星影像成果。.....83
圖 3-4：2014-2018 升軌道影像 LOS 平均速度場。.....85
圖 3-5：2014-2018 降軌道影像 LOS 平均速度場。.....86
圖 3-6：2018-2021 升軌道影像 LOS 平均速度場。.....88
圖 3-7：2018-2021 降軌道影像 LOS 平均速度場。.....89
圖 3-8：2022-2023 年升軌道影像 LOS 平均速度場。.....91
圖 3-9：2022-2023 年降軌道影像 LOS 平均速度場。.....92

圖 3-10：2018 年至 2021 中臺灣地區升軌方向 PSI 與內插結果。.....95
圖 3-11：2018 年至 2021 年中臺灣地區降軌方向 PSI 與內插結果。.....96
圖 3-12：上圖左為 2018-2021 GNSS 東西向速度內插圖，內插使用距離反比加權法的線性模式。.....97
圖 3-13：上圖左為 2018-2021 GNSS 垂直向速度內插圖，內插使用距離反比加權法的線性模式。.....98
圖 3-14：2018-2021 年 GNSS 時間序列。.....99
圖 3-15：2014-2018 升軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。.....101
圖 3-16：2014-2018 降軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。.....101
圖 3-17：2018-2021 升軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。.....102
圖 3-18：2018-2021 降軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。.....102
圖 3-19：2022-2023 升軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。.....103
圖 3-20：2022-2023 降軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。.....103
圖 3-21：2018-2021 年 PSI 解析的垂直向平均速度場與剖面位置圖。.....104
圖 3-22：2018-2021 年 PSI 解析的東西向平均速度場與剖面位置圖。.....104
圖 3-23：各時期 A 剖面成果。.....106
圖 3-24：2018-2021 年 A 剖面東西向與垂直向成果。.....107
圖 3-25：各時期 B 剖面成果。.....109
圖 3-26：2018-2021 年 B 剖面東西向與垂直向成果。.....110
圖 3-27：各時期 C 剖面成果。.....112
圖 3-28：2018-2021 年 C 剖面東西向與垂直向成果。.....113
圖 3-29：各時期 D 剖面成果。.....115
圖 3-30：2018-2021 年 D 剖面東西向與垂直向成果。.....116
圖 3-31：各時期 E 剖面成果。.....118
圖 3-32：2018-2021 年 E 剖面東西向與垂直向成果。.....119
圖 3-33：各時期 F 剖面成果。.....121
圖 3-34：2018-2021 年 F 剖面東西向與垂直向成果。.....122
圖 3-35：各時期 G 剖面成果。.....124

圖 3-36：2018-2021 年 G 剖面東西向與垂直向成果。.....125
圖 3-37：各時期 H 剖面成果。.....127
圖 3-38：2018-2021 年 H 剖面東西向與垂直向成果。.....128
圖 4-1：GNSS 測站位置分佈圖。.....132
圖 4-2：GNSS 連續站時間序列。.....133
圖 4-3：2014-2018 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....136
圖 4-4：2014-2018 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....137
圖 4-5：2014-2018 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....138
圖 4-6：2014-2018 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....139
圖 4-7：2018-2021 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....141
圖 4-8：2018-2021 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....142
圖 4-9：2018-2021 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....143
圖 4-10：2018-2021 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....144
圖 4-11：2022-2023 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....147
圖 4-12：2022-2023 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....148
圖 4-13：2022-2023 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....149
圖 4-14：2022-2023 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....150
圖 4-15：GNSS 移動站與連續站位置分佈圖。.....153
圖 4-16：2014-2018 年 Ascending 平均速度場與所有 GNSS 移動站速度場。..155
圖 4-17：2014-2018 升軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。.....156
圖 4-18：2014-2018 年 Descending 平均速度場與所有 GNSS 速度場。.....157
圖 4-19：2014-2018 降軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。.....158
圖 4-20：2018-2021 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。.....160
圖 4-21：2018-2021 升軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。.....161
圖 4-22：2018-2021 年 Descending 平均速度場與所有 GNSS 速度場。.....162
圖 4-23：2018-2021 降軌道雷達資料與 2018-2018 所有 GNSS 比對。.....163
圖 4-24：2022-2023 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。.....165
圖 4-25：2022-2023 年升軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。.....166

圖 4-26：2022-2023 年 Descending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛移動。菱形為 GNSS 連續站三維向量投影至視衛星方向，圓形為 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。....167
圖 4-27：2022-2023 年降軌道雷達資料與移動站的比對。.....168
圖 4-28：水準測線分布。.....170
圖 4-29：水準測線 - 大安至東勢測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....172
圖 4-30：水準測線 - 大安至東勢測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。....173
圖 4-31：水準測線 - 王功至草屯至埔里測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....175
圖 4-32：水準測線 - 王功至草屯至埔里測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。.....176
圖 4-33：水準測線 - 北斗至水里測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....178
圖 4-34：水準測線 - 北斗至水里測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。....179
圖 4-35：水準測線 - 龍井至太平測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....181
圖 4-36：水準測線 - 龍井至太平測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。....182
圖 4-37：水準測線 - 五光至黃竹測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....183
圖 4-38：水準測線 - 五光至黃竹測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。....184
圖 4-39：水準測線 - 曾厝至霧峰測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。....186
圖 4-40：水準測線 - 曾厝至霧峰測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。....187
圖 4-41：水準測線 - 北勢至峰谷測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....188
圖 4-42：水準測線 - 北勢至峰谷測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。....189
圖 4-43：水準測線 - 烏溪南岸測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....190
圖 4-44：水準測線 - 烏溪南岸測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。.....191
圖 4-45：水準測線 - 中興新村測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。.....192
圖 4-46：水準測線 - 中興新村測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。.....193
圖 4-47：重點區域 GNSS 連續站分布圖。.....195
圖 4-48：2018-2021 年 GS39 與 LSB0 時間序列。.....197
圖 4-49：2018-2021 年 GS39 與 S016 時間序列。.....198
圖 4-50：2018-2021 年 CAOT 與 KZN1 時間序列。.....199

圖 4-51：2018-2021 年 CAOT 與 GS83 時間序列。.....201
圖 4-52：2018-2021 年 CAOT 與 FUQE 時間序列。.....202
圖 4-53：2018-2021 年 GS83 與 FUQE 時間序列。.....203
圖 4-54：2018-2021 年 YUNL 與 GS84 時間序列。.....204
圖 5-1：斷層錯位模型模擬結果示意圖組。.....206
圖 5-2：2018~2021 年 PSI 解析的垂直向平均速度場、GNSS 連續站與剖面位置圖。.....207
圖 5-3：2018~2021 年升軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。上圖為 P1 剖面位置，下圖為 P2~P5 剖面位置。.....208
圖 5-4：四條剖面 (P1、P2、P4 與 P5) 雷達影像上升及下降軌道視衛星方向速率剖面資料。.....209
圖 5-5：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬與實際觀測值之誤差 (RMSE)，以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....210
圖 5-6：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬與實際觀測值之誤差 (RMSE)，以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....211
圖 5-7：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬與實際觀測值之誤差 (RMSE)，以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....211
圖 5-8:針對新社線性構造於 2014~2018 時段之模擬與實際觀測值之誤差(RMSE)，以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....212
圖 5-9：針對新社線性構造於 2018~2021 段之模擬與實際觀測值之誤差 (RMSE)，以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....212
圖 5-10:針對新社線性構造於 2022~2023 段之模擬與實際觀測值之誤差(RMSE)，以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....213
圖 5-11：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....213

圖 5-12：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....214

圖 5-13：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....214

圖 5-14：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....215

圖 5-15：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....215

圖 5-16：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....216

圖 5-17：針對新社線性構造於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....216

圖 5-18：針對新社線性構造於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....217

圖 5-19：針對新社線性構造於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....217

圖 5-20：針對新社線性構造於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....218

圖 5-21：針對新社線性構造於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....218

圖 5-22：針對新社線性構造於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....219

圖 5-23：針對車籠埔斷層於 2014~2018 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....220

圖 5-24：針對車籠埔斷層於 2018~2021 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....220

圖 5-25：針對車籠埔斷層於 2022~2023 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....221

圖 5-26：針對隘寮構造於 2014~2018 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....221

圖 5-27：針對隘寮構造於 2018~2021 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....222

圖 5-28：針對隘寮構造於 2022~2023 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....222

圖 5-29：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....223

圖 5-30：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....223

圖 5-31：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....224

圖 5-32：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....224

圖 5-33：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....225

圖 5-34：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....225

圖 5-35：針對隘寮構造於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....226

圖 5-36：針對隘寮構造於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....226

圖 5-37：針對隘寮構造於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....227

圖 5-38：針對隘寮構造於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....227

圖 5-39：針對隘寮構造於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....228

圖 5-40：針對隘寮構造於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....228

圖 5-41：：針對車籠埔斷層於 2014~2018 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....229

圖 5-42：針對車籠埔斷層於 2018~2021 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....230

圖 5-43：針對車籠埔斷層於 2022~2023 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....230

圖 5-44：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....231

圖 5-45：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....231

圖 5-46：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....232

圖 5-47：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....232

圖 5-48：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....233

圖 5-49：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....233

圖 5-50：針對車籠埔斷層於 2014~2018 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....234

圖 5-51：針對車籠埔斷層於 2018~2021 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....235

圖 5-52：針對車籠埔斷層於 2022~2023 段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示 10%、30%、50%、70% 與 90%。.....235

圖 5-53：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....236

圖 5-54：針對車籠埔斷層於 2014~2018 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....236

圖 5-55：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....237

圖 5-56：針對車籠埔斷層於 2018~2021 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....237

圖 5-57：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....238

圖 5-58：針對車籠埔斷層於 2022~2023 時段之模擬，RMSE 最小的 10% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY 軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。.....238

圖 6-1：2018-2021 年 PSI 解析的垂直向平均速度場與 GNSS 連續站分布圖。240

圖 6-2：2014-2018 年 GNSS 測站 TACH 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....243

圖 6-3：2014-2018 年 GNSS 測站 LSB0 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....244

圖 6-4：2014-2018 年 GNSS 測站 GS27 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....245

圖 6-5：2014-2018 年 GNSS 測站 JSAN 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....246

圖 6-6：2014-2018 年 GNSS 測站 DNAN 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....247

圖 6-7：2018-2021 年 GNSS 測站 GS68 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....248

圖 6-8：2018-2021 年 GNSS 測站 W021 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....249

圖 6-9：2018-2021 年 GNSS 測站 GS26 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....250

圖 6-10：2018-2021 年 GNSS 測站 TKJS 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....251

圖 6-11：2018-2021 年 GNSS 測站 DNAN 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....252

圖 6-12：2022-2023 年 GNSS 測站 GS38 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....253

圖 6-13：2022-2023 年 GNSS 測站 GS82 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....254
圖 6-14：2022-2023 年 GNSS 測站 YUNL 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....255
圖 6-15：2022-2023 年 GNSS 測站 GS26 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....256
圖 6-16：2022-2023 年 GNSS 測站 W021 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....257
圖 6-17：2022-2023 年 GNSS 測站 DNAN 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....258
圖 6-18：2022-2023 年 GNSS 測站 JSAN 三分量 GNSS 時間序列與 PSI 時間序列。.....259
圖 6-19：2022-2023 年 GNSS 測站三分量 GNSS 時間序列與。.....261
圖 6-20：2022-2023 年 GNSS 測站 JSAN 三分量時間序列。.....262
圖 6-21：2022-2023 年 GNSS 測站 STES 三分量時間序列。.....263
圖 6-22：2022-2023 年 GNSS 測站 GS36 三分量時間序列。.....264
圖 6-23：GNSS 測站三分量時間序列。.....266
圖 6-24：GNSS 測站三分量時間序列。.....266
圖 6-25：GNSS 測站三分量時間序列。.....267
圖 6-26：水準測線與 PSI 垂直速度場比對圖，暖色系代表抬升，冷色系代表下陷，垂直向格點大小為 500 公尺。.....269
圖 6-27：2018-2021 水準測線 - 大安至東勢測線與 PSI 資料比對。.....270
圖 6-28：2018-2021 水準測線 - 龍井至太平測線與 PSI 資料比對。.....271
圖 6-29：2018-2021 水準測線 - 五光至黃竹測線與 PSI 資料比對。.....272
圖 6-30：2018-2021 水準測線 - 王功至草屯至埔里測線與 PSI 資料比對。.....273
圖 6-31：PSI 與 GNSS 東西向速度比對圖。.....275
圖 6-32：PSI 與 GNSS 垂直向速度比對圖。.....276
圖 6-33：2018-2021 年 P1 剖面東西向與垂直向成果。.....277
圖 6-34：2018-2021 年 PSI 解析的垂直向平均速度場與 P1 剖面位置圖。.....278
圖 6-35：2018-2021 升軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。.....280

圖 6-36：2018-2021 降軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。.....281
圖 6-37：2018-2021 年 PSI 解析的垂直向平均速度場與 P1 - P5 剖面位置圖 (PSI 格點大小 500 公尺)。 282
圖 6-38：2018-2021 年 PSI 解析的東西向平均速度場與 P1 剖面位置圖 (PSI 格點大小 500 公尺)。 283
圖 6-39：2018-2021 中部地區平均速度場變化及鄰近構造。 288
圖 6-40：新社河階的速度變化剖面 (P1)(觀測期間為 2018 至 2021 年)。.....289
圖 6-41：草屯隘寮地區的速度變化剖面 (P2) (觀測期間為 2018 至 2021 年)。290
圖 6-42：中寮地區的速度變化剖面 (P3) (觀測期間為 2018 至 2021 年)。.....291
圖 6-43：濁水溪的速度變化剖面 (P4) (觀測期間為 2018 至 2021 年)。.....292
圖 6-44：初鄉地區的速度變化剖面 (P5) (觀測期間為 2018 至 2021 年)。.....293
圖 6-45：新社斷層的構造模型。.....294
圖 6-46：隘寮斷層的構造模型。.....294
圖 6-47：濁水溪下游的路線地質圖。(改繪自林啟文等，2019)。 295
圖 6-48：車龍埔斷層與大尖山斷層間的構造演化示意圖 (林啟文等，2000)。.295
圖 6-49：中部地區地表變形調查結果。.....296
圖 6-50：中部淺山區的岩性地質圖 (比例尺 1:250,000)。.....297

表目錄

表 1-1：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。.....21
表 2-1：Sentinel-1 衛星影像資訊。.....60
表 3-1：Sentinel-1 衛星影像使用幅數。2018-2021 時段之影像數最多，也使影像解算品質最佳。.....79
表 4-1：各時期 GNSS 測站數量。.....131
表 4-2：各時期 PSI 與 GNSS 比對成果。.....131
表 4-3：2014-2018 年 PSI 與 GNSS 比對成果。.....135
表 4-4：2018-2021 年 PSI 與 GNSS 比對成果。.....140
表 4-5：2022-2023 年 PSI 與 GNSS 比對成果。.....146
表 4-6：各時期 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。.....152
表 4-7：：2014-2018 年 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。.....154
表 4-8：：2018-2021 年 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。.....159
表 4-9：：2022-2023 年 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。.....164

表 A：本年度預期進度甘梯圖 (Gantt Chart)。

Table A： The Gantt Chart of expected progress this year.

計畫名稱：應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形第二階段(2/3)													
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
2014-2018 視衛星方向地殼變動分析													
2018-2021 視衛星方向地殼變動分析													
2022-2023 視衛星方向地殼變動分析													
期中簡報會議													
2014-2018 跨斷層垂直速度剖面分析													
2018-2021 跨斷層垂直速度剖面分析													
2022-2023 跨斷層垂直速度剖面分析													
跨斷層時間序列分析													
重要觀測位置時間序列分析													
二維剖面模擬													
期末簡報會議與成果報告撰寫													
預定進度（累積數）	8	20	30	40	50	60	70	80	90	100			

說明：

(1).工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期，期中報告與期末報告必須明列於本表中。

(2).預定進度百分比一欄係為配合追蹤考核作業所需，累計百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。

(3).計畫進度控制若有分項協同計畫請分別列出整體計畫執行與各分項計畫執行之甘梯圖（表一）與預期進度查核點（表二）。

表 B：預期進度查核點 (Check Point)。

Table B： Check point of expected prgress.

序號	查核點 (交付項目)	預定達成日期	完成狀態
1	工作計畫書繳交、契約書簽訂	3 月 18 日	工作計畫書修正與契約書簽訂
3	期中報告繳交	7 月 24 日	已繳交
4	期中審查會議	8 月 7 日	以完成
5	期末報告繳交	11 月 29 日	已繳交
6	期末審查會議	12 月 6 日	已完成
7	驗收	12 月 31 日	未完成

表 C：期中交付之各項工作項目。

Table C：Various work items delivered at the middle of the period.

工作項目	章節
1. 2014-2018 視衛星方向地殼變動分析。	3-2
2. 2018-2021 視衛星方向地殼變動分析。	3-3
3. 2022-2023 視衛星方向地殼變動分析。	3-4
4. 2014-2018 跨斷層垂直速度剖面分析。	3-6
5. 2018-2021 跨斷層垂直速度剖面分析。	3-6
6. 2022-2023 跨斷層垂直速度剖面分析。	3-6
6. 跨斷層時間序列分析。	4-4, 6-1
7. 重要觀測位置時間序列。	4-4, 6-1
8. 二維剖面模擬。	第五章

摘要

本計畫利用雷達差分干涉方法在 113 年度調查中部地區的地表變形，特別針對斷層沿線的地表變形進行觀測，其中包含了大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔 - 雙冬斷層、初鄉斷層等六條斷層，以及中部科學園區、臺中都會區等重點區域。

本報告將原始雷達分段、組合、配對、解算、解相位、解算速度，產生出三個時間段的升軌與降軌資料，完成資料處理。這三個時間段分別為 2014~2018, 2018~2021, 以及 2022~2023 等三個時段。第一個時段的升降軌影像各有六十幅以上、第二時段升降軌各有兩百幅以上，第三個時間段升降軌影像則有多達六十幅影像。

我們也利用觀察範圍內同一時間段的連續 GNSS 站，取其周遭之永久散射點與雷達解算之速率比對，以檢驗我們對解算之雷達差分干涉資料之信心程度。一如過往成果顯示，影像數量越多通常誤差就會降低，因此第二時間段之誤差最小，另外兩個時間段誤差較大。此外，本計畫亦加入與移動式 GNSS 資料以及水準測線的比對。雷達資料與水準測線在大趨勢上大致類似，但是由於雷達資料含有東西向位移的資訊，而水準測線資料為純垂直資訊，因此不適合直接比對。我們使用了本計畫解算的垂直資料與水準資料比對，在大部分的比對狀況顯示測量到的變形趨勢類似，而雷達資料多了細節。移動式 GNSS 站的比對則與雷達資料的相關性弱 (以 2018-2021 升軌雷達資料比對為例：R^2 為 0.62)，不僅如此，移動式 GNSS 資料的趨勢與連續站的趨勢也相當不同。我們初步認為這是移動站取樣時間與頻率與連續站、雷達資料不匹配造成的迴歸差異或是測量基準不一的差異。

目前本區觀測中，最明顯地表變形以地層下陷的訊號最明顯。在活動構造上，本區被彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔 - 雙冬斷層分為四個主要區域，這四個區域在平均速度上有些許差異，彰化斷層至大茅埔 - 雙冬斷層約有 10 mm/yr 的變化量，彰化斷層在觀察期間沒有明顯的變形行為，而車籠埔斷層本身雖然沒有明顯錯動，但是其以東的區塊卻有顯著的變形，本期解算資訊尚看到大茅埔 - 雙冬、

初鄉附近的速度差異，野外的查核也發現雷達解算的速度差異區域附近確實可以找到一些地表破裂、建物破壞痕跡。

關鍵詞：雷達差分干涉、活動斷層、地表變形、臺中、彰化。

Abstract

This study utilized the Persistent Scatterer SAR Interferometry (PSI) method to investigate surface deformation in central Taiwan. The primary targets included the Tachia Fault, Tiechanshan Fault, Changhua Fault, Chelungpu Fault, Tamaopu-Shuangtung Fault, Chuxiang Fault, as well as the Central Taiwan Science Park and Taichung metropolitan area.

Radar interferometry data were processed to obtain radar line-of-sight velocities. Data from ascending and descending tracks were generated for three periods: 2014-2018, 2018-2021, and 2022-2023. The first period included over sixty images, the second period had more than 200 images, and the third period comprised up to sixty images for both ascending and descending tracks.

To ensure data quality for each period, velocities were compared with continuous GNSS station data and adjacent PS velocities. As previously reported, using more radar images generally reduces errors. Consequently, the second period exhibited the highest quality, with an R^2 value close to 1 and a slope close to 1 when comparing GNSS and PS velocities. The 2018-2021 ascending and descending datasets were also used to calculate vertical and east-west velocities in the study area.

Our results indicate that the most significant surface deformation feature in the observed area is ground subsidence due to groundwater withdrawals. From an active tectonic perspective, the area can be divided into four sectors by three north-south trending major faults: the Changhua Fault, Chelungpu Fault, and Tamaopu-Shuantung Fault. The Changhua Fault was not active in terms of velocity during the observation period. Although the Chelungpu Fault did not show offset itself, a narrow north-south strip to the east of the fault exhibited active uplift at a rate

of several millimeters per year. The Damapu-Shuantung Fault also showed signs of movement during the observation period. Fieldwork in the study area confirmed that sites with velocity differences observed in the plots also showed physical evidence, such as damaged dikes, tiles near houses, and concrete walls along roadsides.

KEYWORDS：Radar interferometry, active fault, surface deformation, Taichung, Changhua.

第一章、緒論

1-1 計畫整體概述

經濟部管轄了全國工商業發展、產業鏈佈局，以及全國能源產銷貿易、水資源、電力資源調度等基礎工作。經濟相關的基礎建設大至工業區、發電廠、水庫、變電所，小至水管、電塔、電線等的設施都受到臺灣獨特、快速的地表變形影響，而這些地表變形，絕大部分因素都受到臺灣獨特的地質與構造的影響。

構造活動會造成地表變形，而地表變形則會直接、間接造成公共設施損毀與威脅社會安全，較慢速的地表變形如國道三號高速公路的原田寮隧道北口附近持續的潛移造成路面與隧道破壞，持續影響該路段的交通運輸。由地震造成的快速變化則例如 1999 年集集地震在臺灣西部造成百公里等級的地表破裂、水電基礎設施嚴重損毀、經濟停滯多時。 而在近期則有 2022 年 9 月發生的池上與關山的地震，在超過六十公里長的區域造成多條平行的破裂，形成了總長超過八十公里的破裂，也造成玉里大橋毀損，高寮大橋、崙天大橋、長富大橋斷裂、鐵路毀損等設施損壞，也造成了地形劇烈的變化。地表變形也可能造成其他公共設施，例如醫院、學校、政府機關，市中心都會區的水、電、天然氣管線，甚至科學園區的精密生產線等，都有可能受到地表變形非常大的影響而造成各種不同的損害與損失。

這些地震或是較慢速的變形主要是因為臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊之間，而這兩個板塊在臺灣附近以每年大約八公分的速度聚合，也導致臺灣斷層密集、地震頻繁、地表變形劇烈。因為如此，經濟部地質調查及礦業管理中心已經在過去多年執行了斷層活動性觀測研究之計畫，包含在 106~109 年度執行第四階段計畫，利用全球衛星定位系統、精密水準測量、以及雷達等方法得到目標區域之地表變形、斷層位置、活動性等資料。

為了解其他區域的地表變形，延續 110 年至 111 年第一階段計畫，規劃 3 年期程（112 年至 114 年），利用雷達差分干涉技術針對目標區做地表變形的觀測與分析（圖 1-1）。在 112 年度針對北部地區的七條斷層（包含山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、

三義斷層、屯子腳斷層等區域）與新竹科學園區、臺北都會區等重點區域做觀測，在 113 年度（本年度，圖 1-2）針對中部地區的六條斷層（包含大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔 - 雙冬斷層、初鄉斷層等區域）與中部科學園區、臺中都會區等重點區域做觀測，以及 114 年度針對東部地區的八條斷層（包含米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層等區域）與板塊交界地震頻繁之建物、人口密集區等保全對象做觀測，並且對觀測結果進行分析。

自 112 年至 114 年分別對北部地區、中部地區、以及東部地區的活動斷層與地表變形做觀察與研究。在計畫中預計使用雷達差分干涉方法調查位觀測地區內的活動斷層，並且在處理完雷達資料後，利用經濟部地質調查及礦業管理中心本身之 GNSS 以及水準資料來檢測。在檢核完資料後，再利用這些資料沿著斷層垂直方向的剖面推估斷層之幾何與滑移速率。針對計畫的工作我們可以大致分成四個部分（圖 1-3），由東華大學負責雷達資料規劃產生以及整體計畫統合，由中研院地科所負責與測量資料比對，由中正大學負責斷層幾何與滑移量推估、中央大學團隊在構造解析與現地比較。團隊在過去兩年已經建立良好的橫向溝通、分工，並且可以適當整合成果。

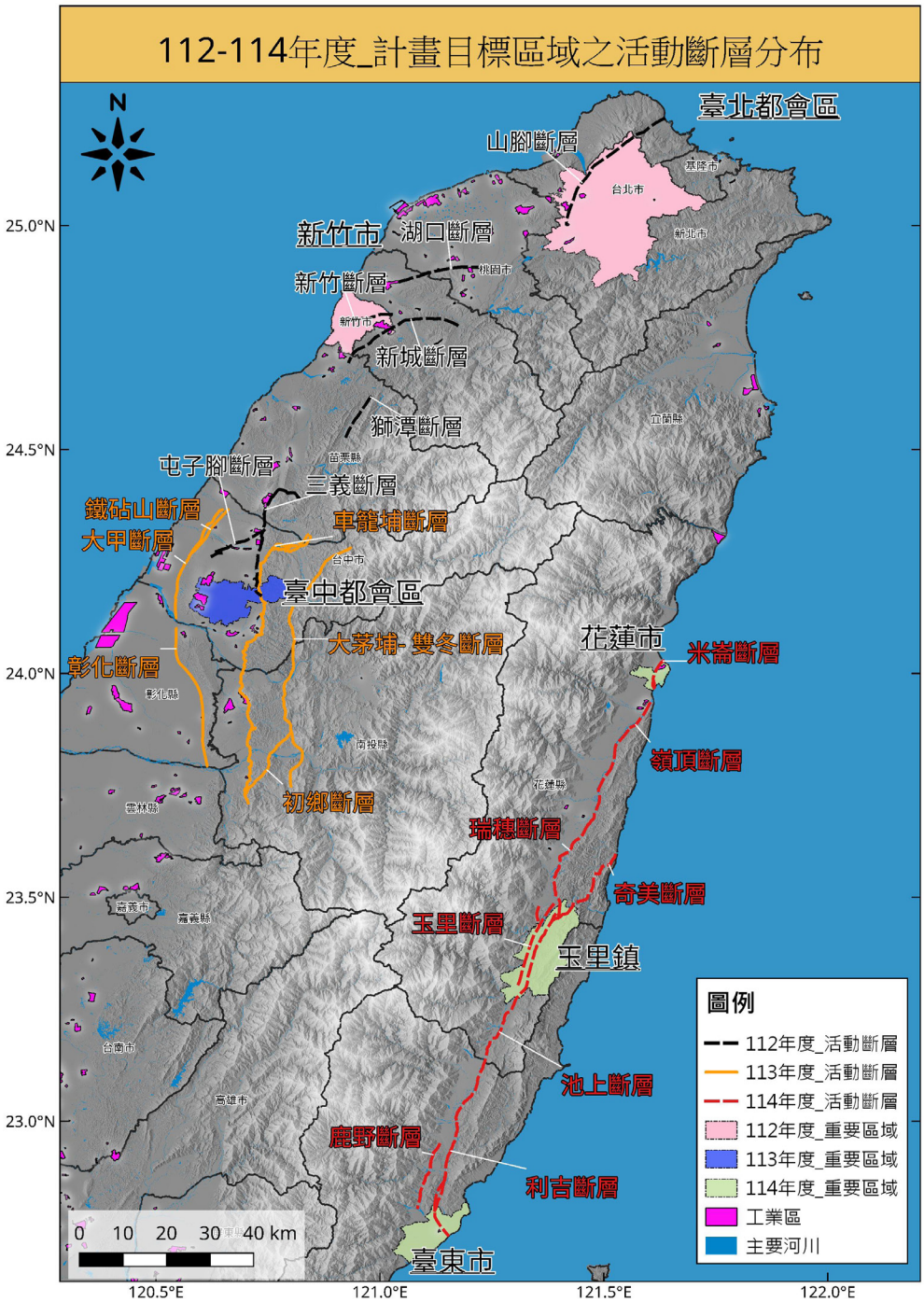


圖 1-1：目標區域。112 年度預計針對北部地區黑色標示之斷層以及粉紅與紫色區塊標示之重要區域做觀測與分析；113 年度針對中部地區橘色標示之斷層以及紫色與藍色區塊標示之重要區域做觀測與分析；114 年度針對東部地區紅色標示之斷層以及紫色與綠色區塊標示重要區域做觀測與分析。

Figure 1-1：Target area. 2023 targets in northern Taiwan, where faults are labeled in black. Other important areas were labeled in pink and purple. 2024 targets the central Taiwan, and faults are labeled in orange. Purple and blue areas are the important areas for observation. 2025 targets the eastern Taiwan, and faults are labeled in red. Purple and green areas are the important areas for observation.

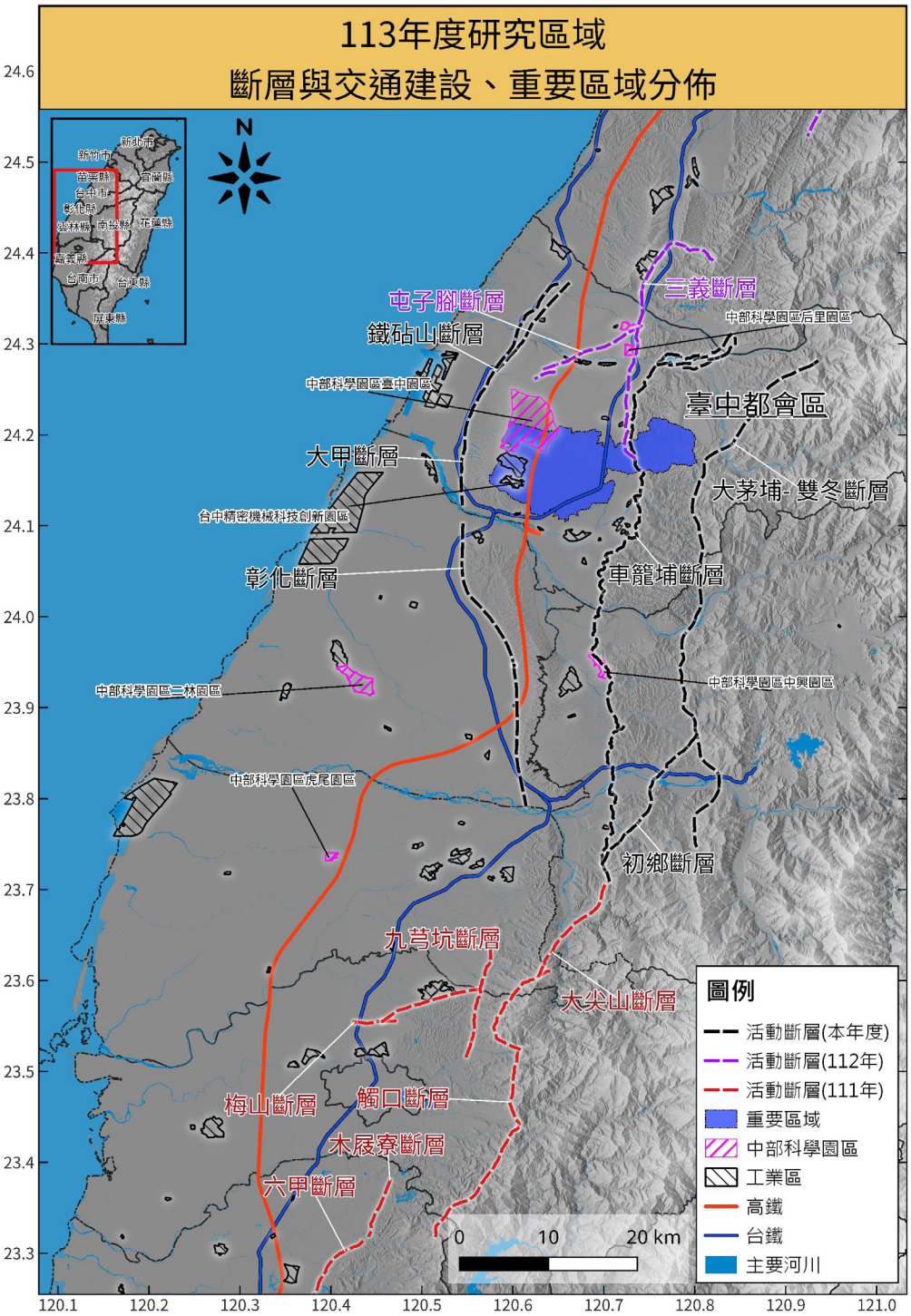


圖 1-2：研究區域中的道路與斷層分佈情形。黑色、紫色及紅色虛線段為活動斷層分佈位置（如圖 1-1）。橘色線段為臺灣高速鐵路的行經路線。藍色線段為臺灣鐵路的行經路線。藍色區塊為臺中都會區。紫色線段區塊為中部科學園區。黑色線段區塊為工業區。

Figure 1-2：Roads and faults in the study area. Black, purple, and red dash lines depict the active faults, orange line is high speed railways, blue lines are railroads. Blue areas are the target important areas. Purple areas are Central Taiwan Science Parks. Black areas are industrial districts.

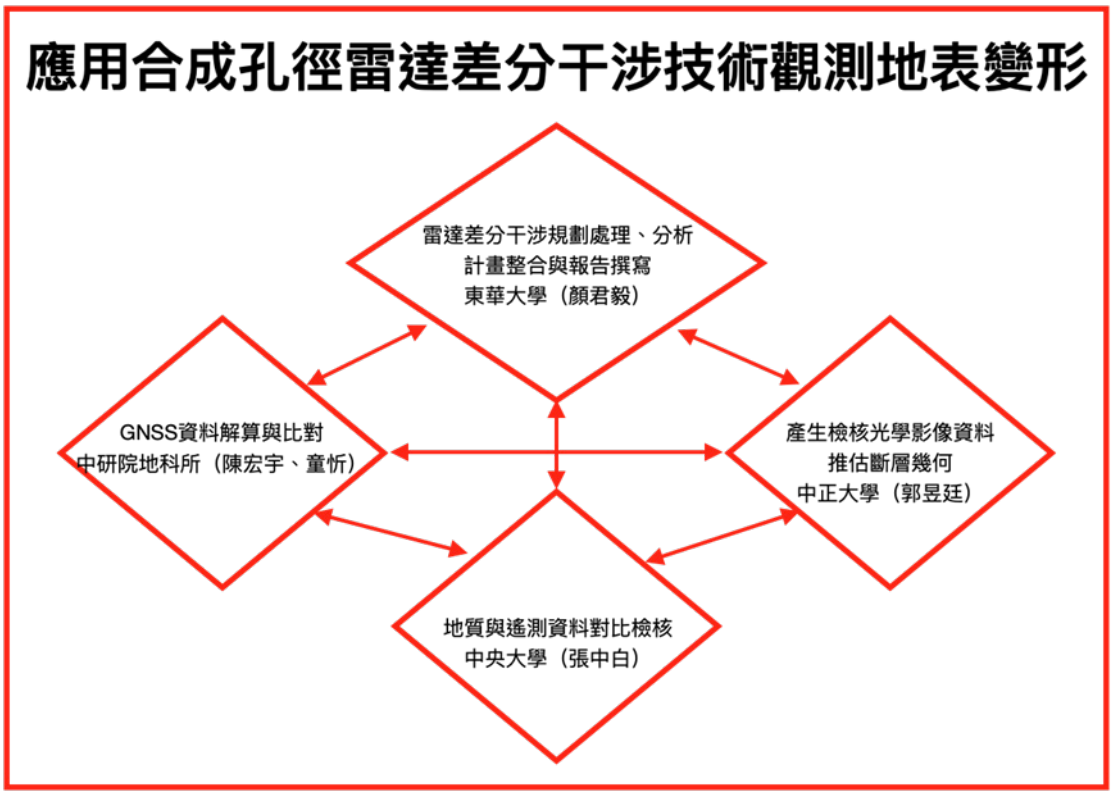


圖 1-3：工作團隊與主要工作項目。

Figure 1-3： Team members and main topics of focus.

1-2 計畫目的

經濟部地質調查及礦業管理中心於民國 106–109 年「斷層觀測性研究第四階段 – 地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」計畫中，除了分析臺灣全島近十年來的精密水準測線、高精度的 GNSS 連續及移動站資料，也開始引進 PSI 雷達衛星影像技術，完成分析全臺近 500 站的 GNSS 連續全球定位系統測站、767 站的 GNSS 移動站施測、29 條精密水準測線，以及應用 PSI 技術分析 2015–2020 年總共 1040 幅升軌及 867 幅降軌的臺灣東部地區干涉衛星影像，獲得大面積的地表變形速度場與地殼變形的時空分布，並建置臺灣東部地區 8 條活動斷層之斷層模型，計算出各斷層的加權平均滑移虧損速率。

因此，為延續經濟部地質調查及礦業管理中心上一期的「斷層觀測性研究第四階段 – 地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」計畫中最新之研究成果，並搭配新版臺灣活動斷層分布圖中新增的活動斷層，於 110–111 年度執行「應用合成孔徑雷達差分干

涉技術觀測地表變形第一階段」計畫。本期計畫將延續 110 年至 111 年第一階段計畫，進行為期三年度（112 年至 114 年）的「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形第二階段」計畫，運用合成孔徑雷達差分干涉技術，由測地學資料成果配合現地之地質調查，進行目標地區之地表變形與活動斷層觀測，並期望能配合其他經濟部地質調查及礦業管理中心已產出之地表變形觀測資料參數，進一步解析觀測區不同時期斷層滑移速率的變化及連續的地表變形情形。

本期計畫規劃 3 年期程，分別在 112 年度針對北部地區的七條斷層（包含山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、屯子腳斷層等區域）與新竹科學園區、臺北都會區等重點區域做觀測，在 113 年度針對中部地區的六條斷層（包含大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔 - 雙冬斷層、初鄉斷層等區域）與中部科學園區、臺中都會區等重點區域做觀測，以及 114 年度針對東部地區的八條斷層（包含米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層等區域）與板塊交界地震頻繁之建物、人口密集區等重點區域做觀測，並且對觀測結果進行分析。（圖 1-1）。

由雷達影像分析結果，配合經濟部地質調查及礦業管理中心之 GNSS 移動站、GNSS 連續站及精密水準測量結果，可求得研究區域之地表連續變形資訊，本計畫期望能由此達成以下目的：

1. 由地表連續變形之量級與運動方向，建置活動斷層模型，並據以推估斷層幾何與滑移量，作為未來強化臺灣活動斷層潛勢圖的重要參考依據。
2. 針對研究區域的範圍，嘗試建立三維地表速度場的時空變化。
3. 綜上所述，本計畫產出之圖資，將以衛星影像干涉分析結果圖示區域內地表連續變形資訊；其次，繪製目標區域跨活動斷層之速度剖面圖（目標區內北、中、南區各一條），並利用斷層反演模型推估及標示斷層滑移速率；此外，本計畫納入大地測量觀測之時間序列資料，與觀測期間之衛星影像干涉成果進行比較。

1-3 110-112 年度計畫成果概述

110-112 年度我們分別進行高屏地區、嘉南地區及北臺灣地區的雷達差分干涉處理（圖 1-4），與 GNSS 資料比對皆有品質很好的成果（圖 1-5）。對於監測跨斷層地表變形速度也有良好的成果，110 年度平均速度長成果顯示 2018-2020 年車瓜林斷層周遭速度變化大（圖 1-6），跨斷層的速度剖面顯示錯移量可達 10mm/yr（圖 1-7），小崗山斷層兩側顯示約有 5~7mm/yr 的速度差異（圖 1-8 與圖 1-9），並且提供相關資訊佐證小崗山斷層位置，供經濟部地質調查及礦業管理中心劃設小崗山斷層的地質敏感區參考使用。111 年度平均速度場成果顯示 2018~2021 年後甲里斷層（圖 1-10）其周遭的速度有明顯變化，跨斷層的速度剖面顯示斷層兩側有一落差，約為 5~10mm/yr（圖 2-11）。112 年度平均速度場成果顯示 2018-2021 年山腳斷層在臺北盆地周遭有明顯速度變化（圖 1-12），跨斷層的速度剖面顯示斷層兩側約有 7~12mm/yr 的速度落差（圖 1-13）。

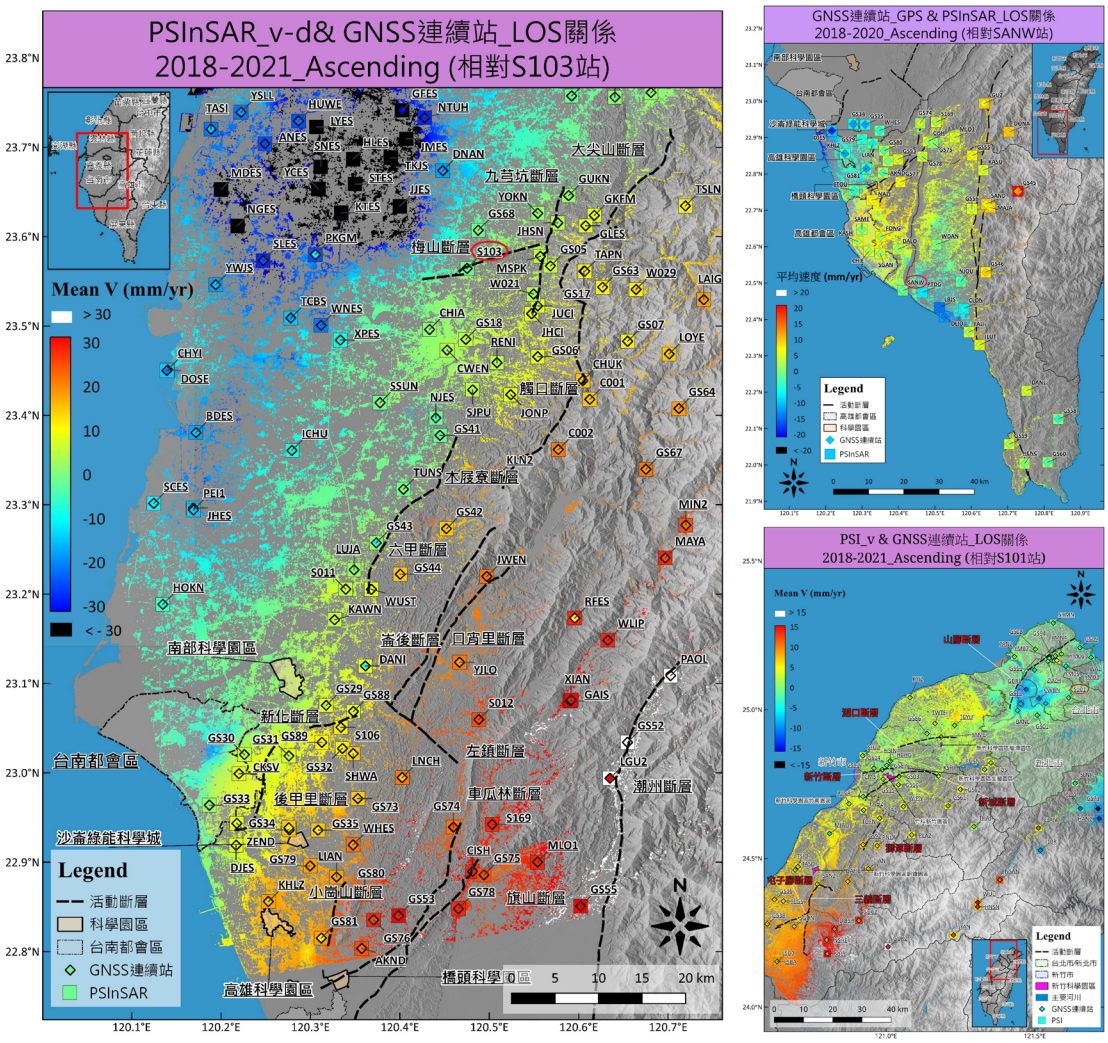


圖 1-4：110 年至 112 年 PSI 與 GNSS 雷達視衛星方向速率圖。(A) 2018-2021 年嘉義臺南地區升軌道方向成果。 (B) 2018-2020 年高雄屏東地區升軌道方向成果。 (C) 2018-2021 年北臺灣地區升軌道方向成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 1-4：Ascending results in Chiayi-Tainan area from 2018 to 2021. (B) Ascending results in Kaohsiung-Pingtung area from 2018 to 2020. (C) Ascending results in Northern Taiwan area from 2018 to 2021. Warm colors indicate movement towards the satellite, while cool colors indicate movement away from the satellite. Diamond symbols represent three-dimensional vector projections from continuous GNSS stations towards the line-of-sight direction of the satellite.

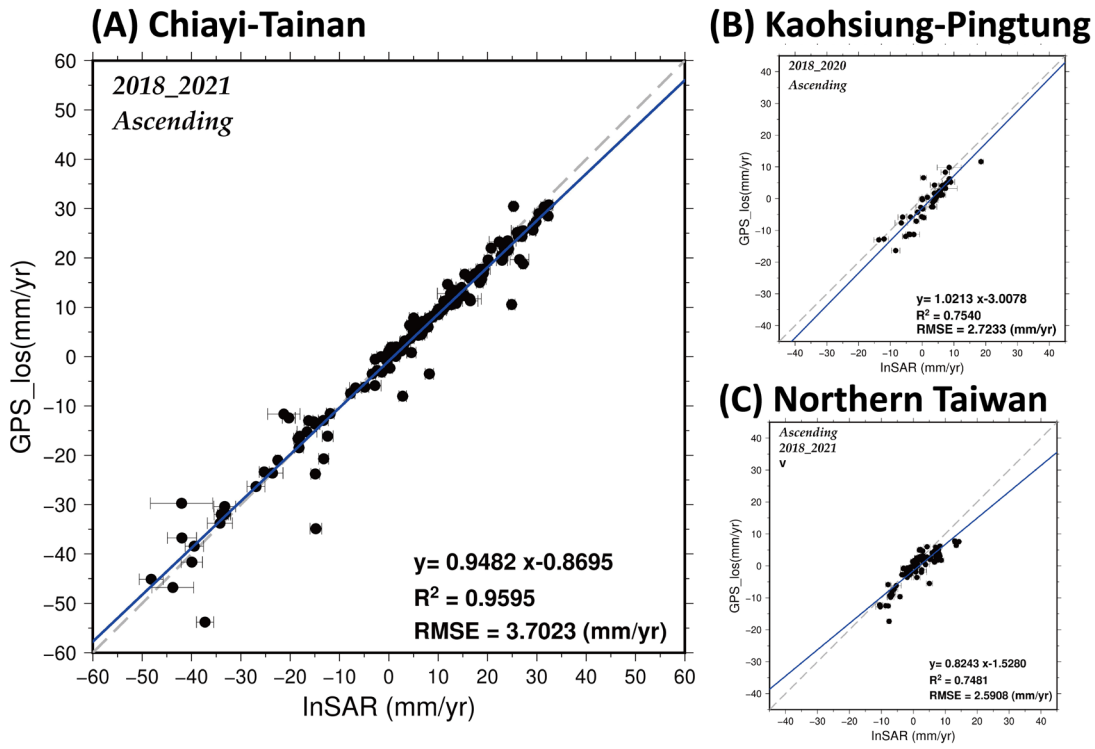


圖 1-5：110 年至 112 年 PSI 與 GNSS 連續站速度場對比。(A) 2018-2021 年嘉義臺南地區升軌道方向成果。(B) 2018-2020 年高雄屏東地區升軌道方向成果。(C) 2018-2021 年北臺灣地區升軌道方向成果。X 軸為 PSI 平均速度值與其標準差，Y 軸為 GNSS 投影至 LOS 方向速度值，於 2018-2021(2020) 時期 PSI 與 GNSS 觀測相似。

Figure 1-5：PSI and GNSS Continuous Station Velocity Field Comparison from 2021 to 2023. (A) Ascending results in Chiayi-Tainan area from 2018 to 2021. (B) Ascending results in Kaohsiung-Pingtung area from 2018 to 2020. (C) Ascending results in Northern Taiwan area from 2018 to 2021. X-axis shows PSI average velocity and its standard deviation, Y-axis shows GNSS velocity projected to the line-of-sight direction. PSI and GNSS observations are similar during the 2018-2021 (2020) period.

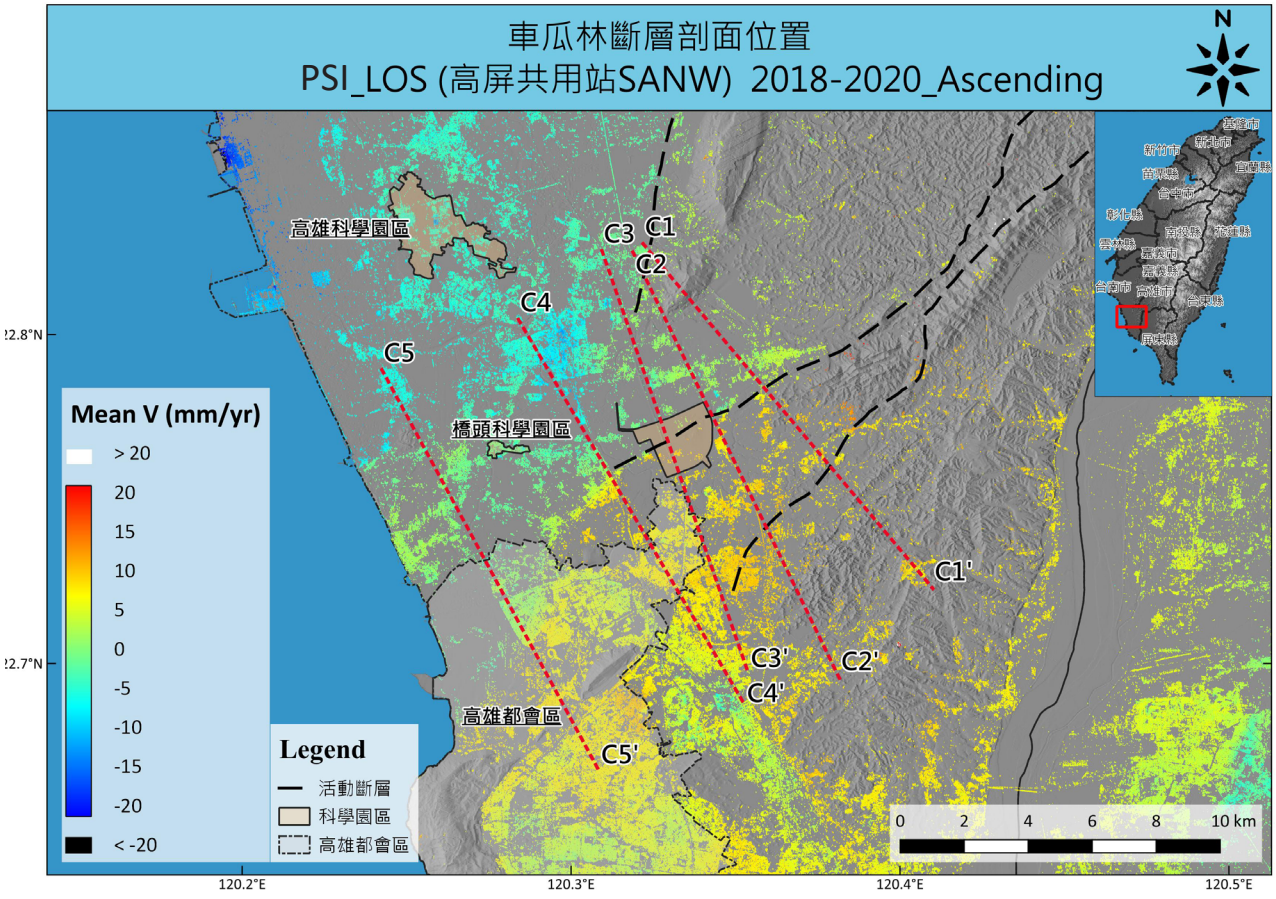


圖 1-6：2018-2020 年車瓜林斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

Figure 1-6：Surface Deformation Near the CheKuaLin Fault from 2018 to 2020. Warm colors indicate movement towards the satellite, while cool colors indicate movement away from the satellite. Black dashed line indicates traces of active faults and red dashed lines indicate profile positions.

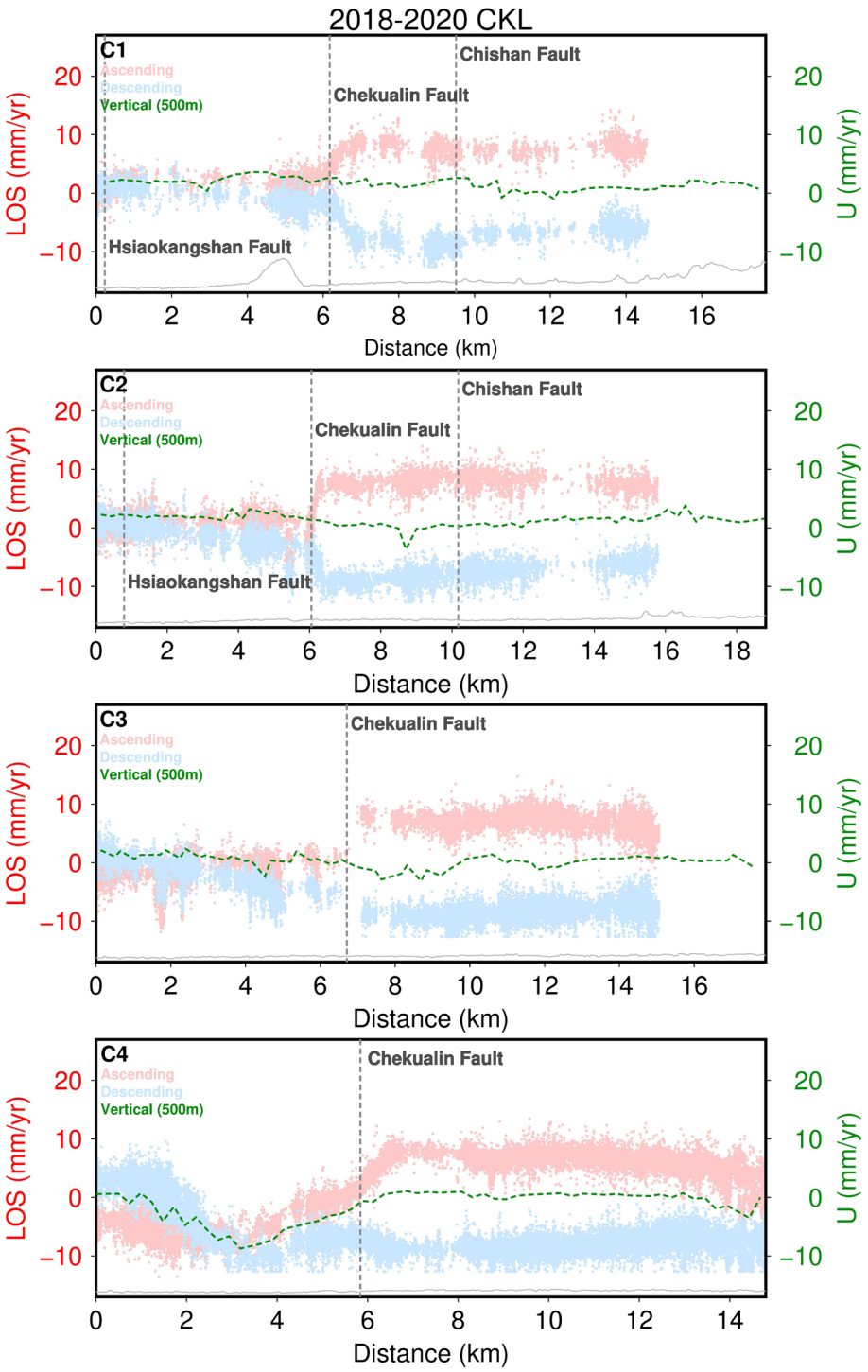


圖 1-7：2018-2020 年車瓜林斷層附近地表變形剖面。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 1-7：Cross-sections Show Surface Deformation Near the CheKuaLin Fault from 2018 to 2020. Red dots represent ascending PSI velocities, blue dots represent descending PSI velocities, green line represents vertical velocities, gray dashed lines indicate fault positions, and solid gray line represents topography.

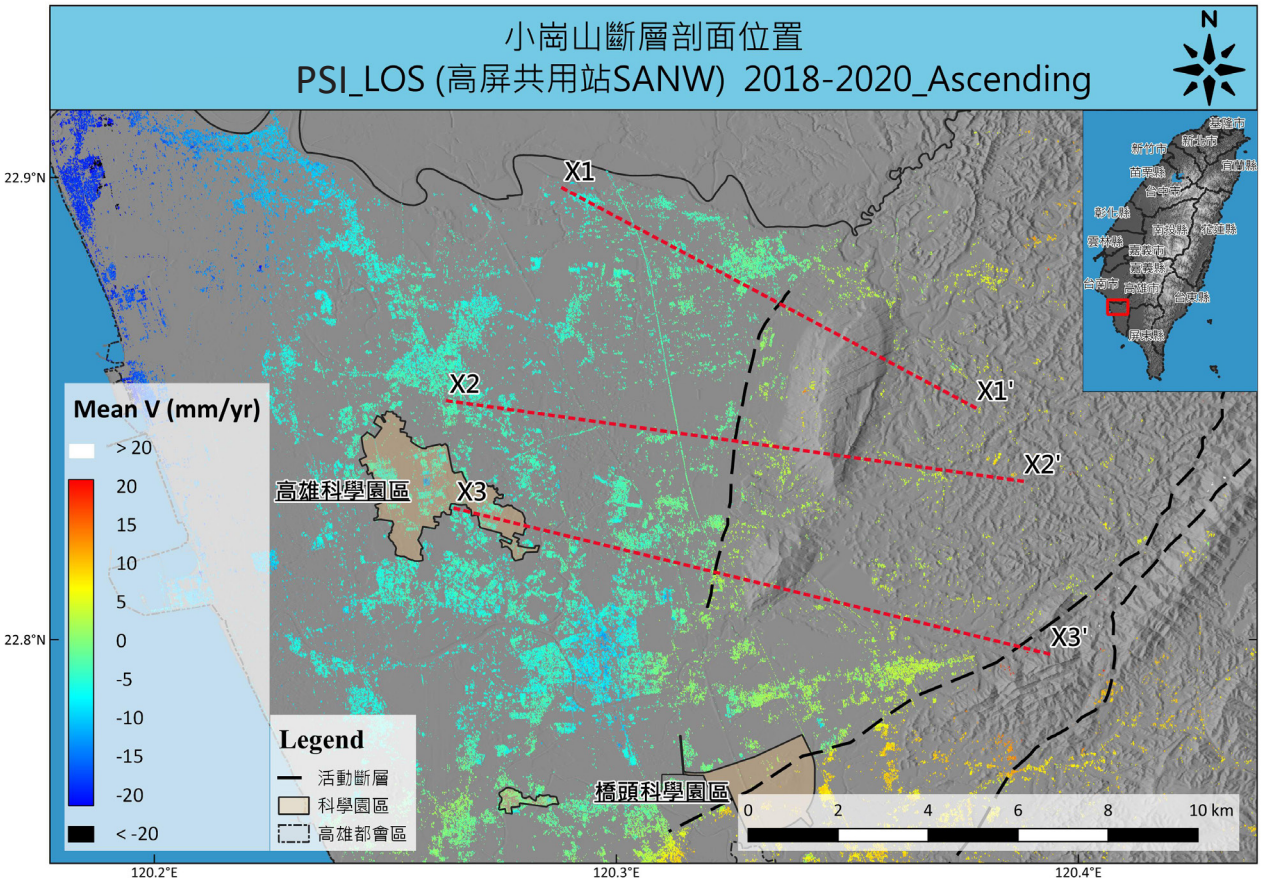


圖 1-8：2018-2020 年小崗山斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

Figure 1-8：Surface Deformation Near the HsiaoKangShan Fault from 2018 to 2020. Warm colors indicate movement towards the satellite, while cool colors indicate movement away from the satellite. Black dashed line indicates active fault positions, red dashed lines indicate profile positions.

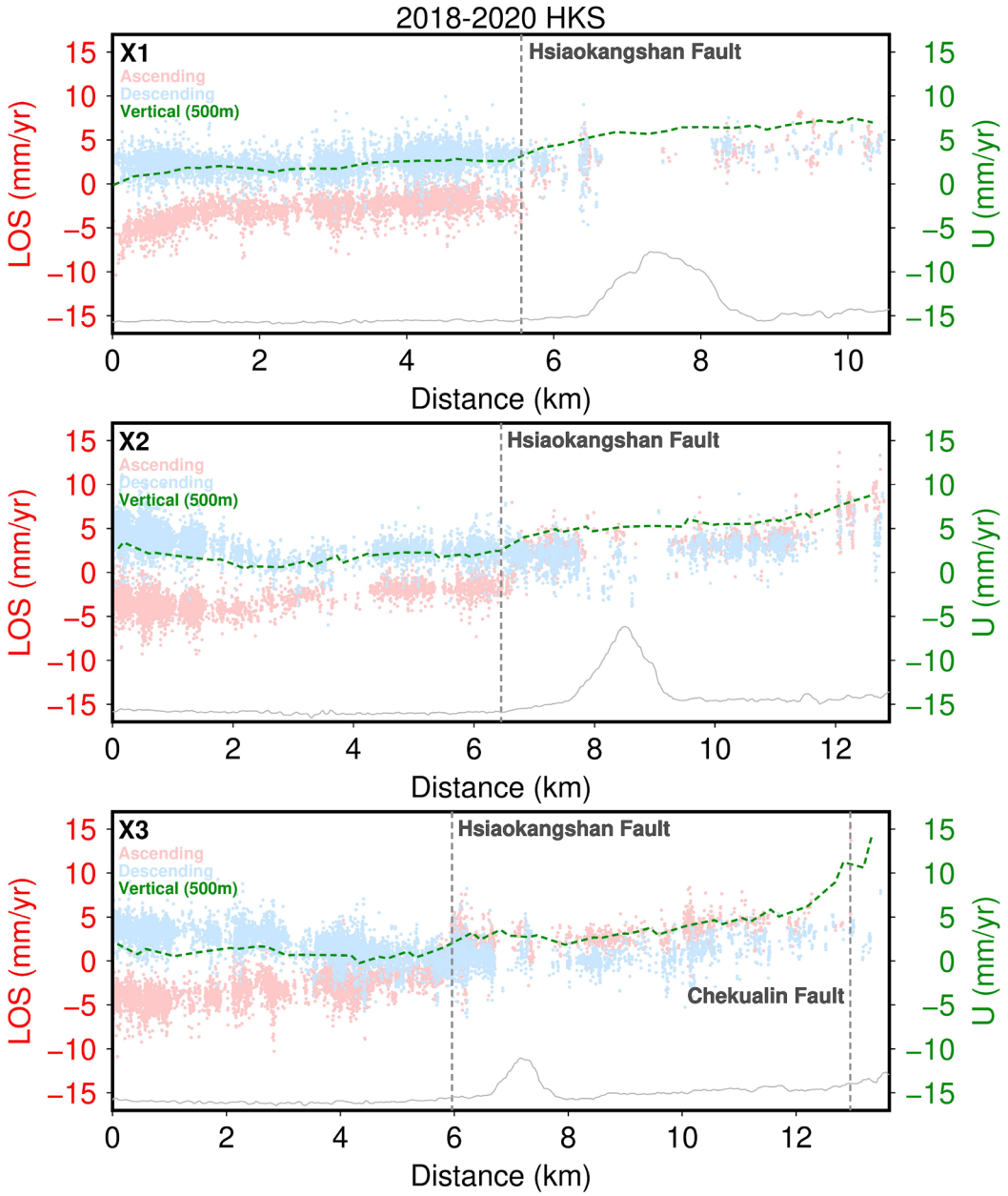


圖 1-9：2018-2020 年小崗山斷層附近剖面萃取之地表變形速率。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 1-9：Cross-sections Show Surface Deformation Near the HsiaoKangShan Fault from 2018 to 2020. Red dots represent ascending PSI velocities, blue dots represent descending PSI velocities, green line represents vertical velocities, gray dashed lines indicate fault positions, and solid gray line represents topography.

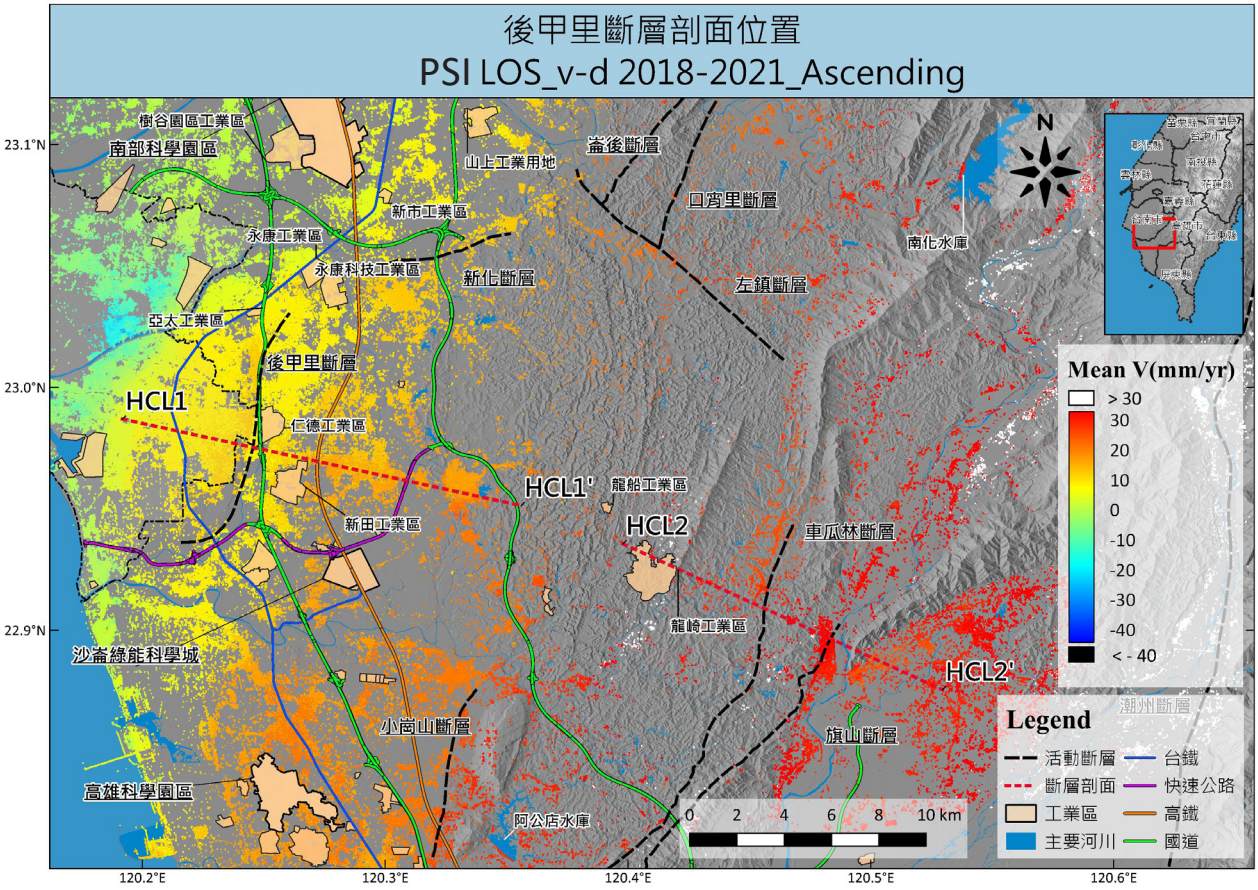


圖 1-10：2018-2021 年後甲里斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

Figure 1-10：Surface Deformation Near the Houchiali Fault from 2018 to 2021. Warm colors indicate movement towards the satellite, while cool colors indicate movement away from the satellite. Black dashed lines indicate active faults, red dashed lines indicate profile positions.

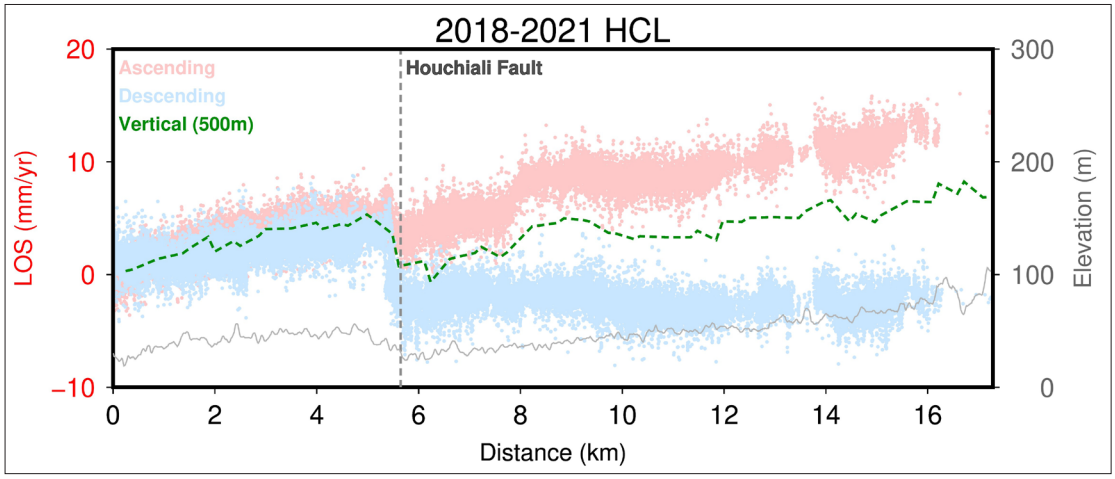


圖 1-11：2018-2021 年後甲里斷層附近地表變形剖面。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 1-11：Cross-sections Show Surface Deformation Near the Houchiali Fault from 2018 to 2021. Red dots represent ascending PSI velocities, blue dots represent descending PSI velocities, green line represents vertical velocities, gray dashed lines indicate faults, and solid gray line represents topography.

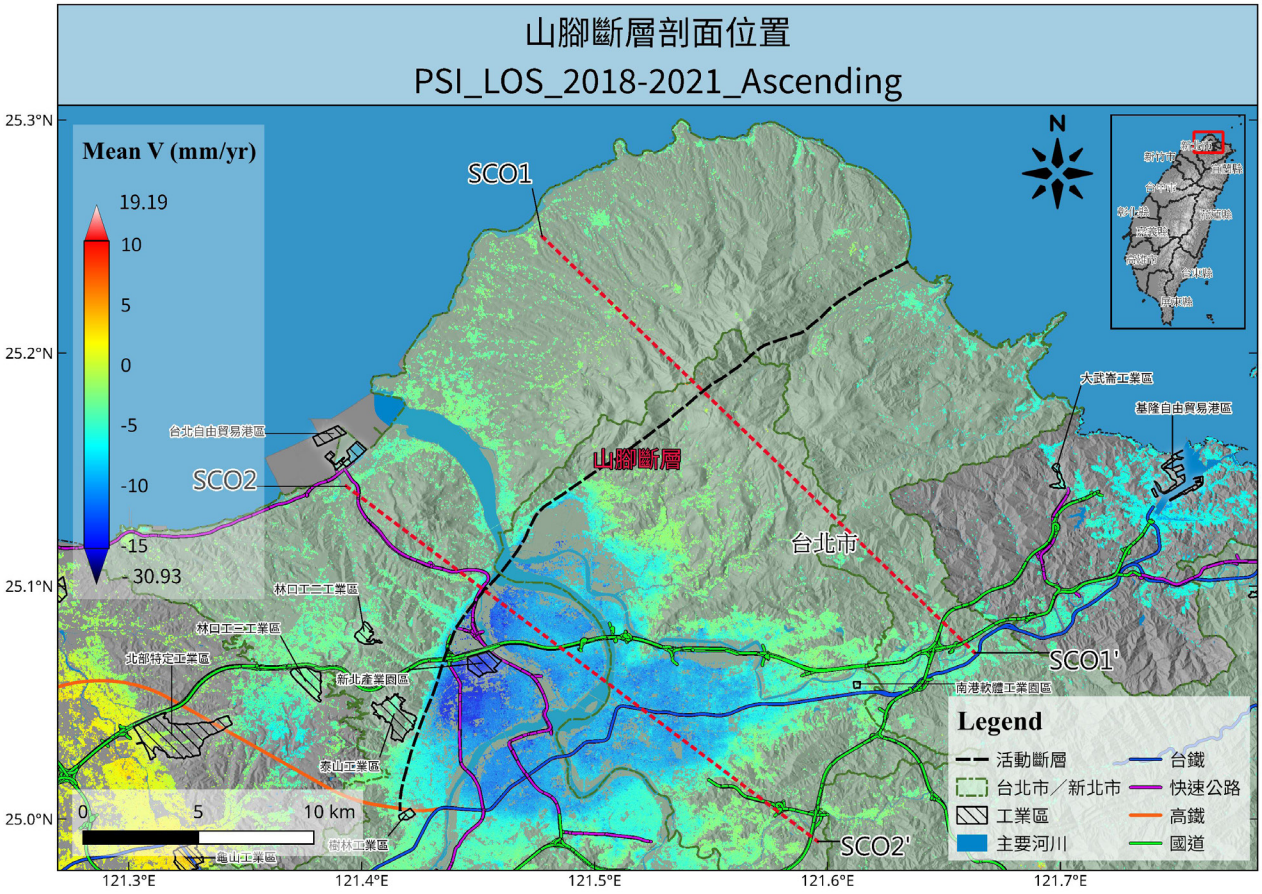


圖 1-12：2018-2021 年山腳斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

Figure 1-12：Surface Deformation Near the Shanchiao Fault from 2018 to 2021. Warm colors indicate movement towards the satellite, while cool colors indicate movement away from the satellite. Black dashed line indicates the fault and red dashed lines indicate profile positions.

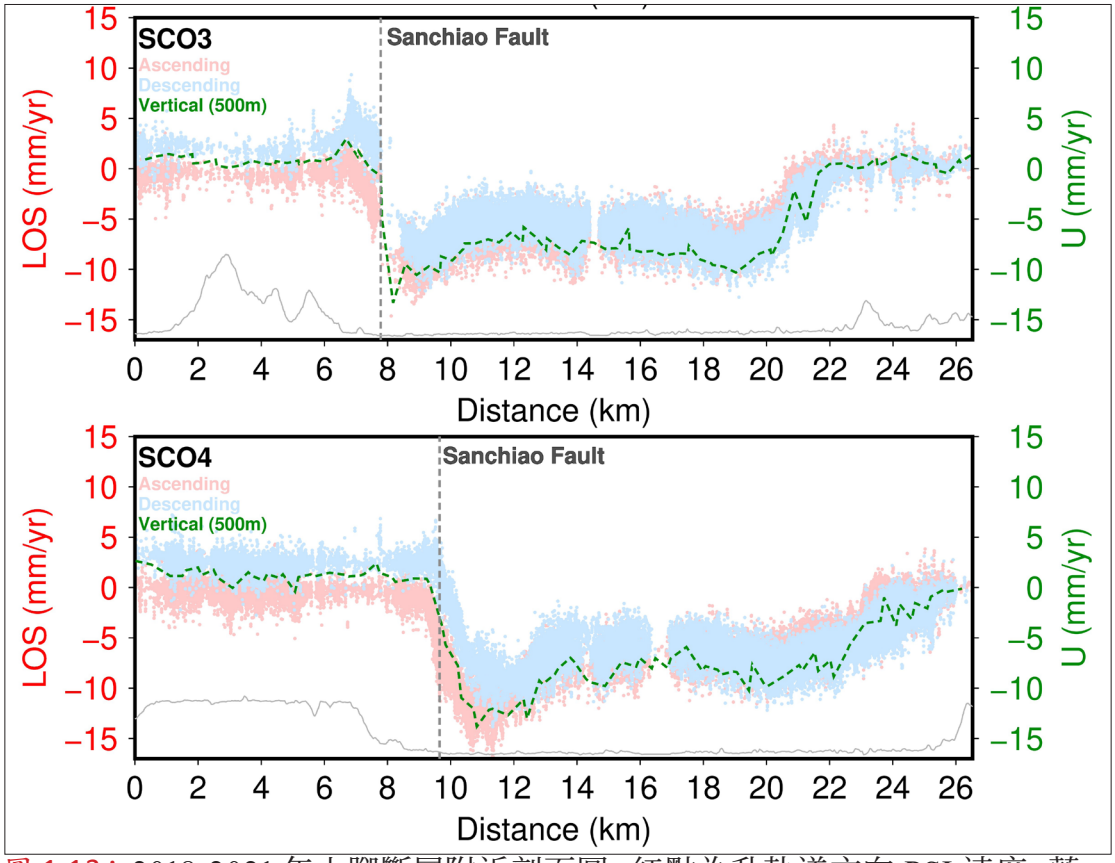


圖 1-13：2018-2021 年山腳斷層附近剖面圖。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 1-13：Cross-sections Show Surface Deformation Near the Shanchiao Fault from 2018 to 2021. Red dots represent ascending PSI velocities, blue dots represent descending PSI velocities, green line represents vertical velocities, gray dashed line indicates the fault, and solid gray line represents topography.

1-4 計畫工作方法概述

1-4-1 合成孔徑雷達差分干涉 (Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR)

合成孔徑雷達差分干涉技術的原理是將雷達系統搭載於衛星上且不斷發射脈衝，而天線會接收地表目標物的回波，當衛星依軌道重複運行時，即可於不同的時間點獲取到同一地區的 SAR 影像。將同區域不同時間的兩幅影像進行差分干涉，可獲得此區域在這兩個拍攝時間點之間，因地表與衛星間距離變化所造成的雷達波相位差（$\varphi_{x,i}$），再經由相位解算則可得到此時段內的地表變化量（圖 1-14）。真實的雷達波相位差可用以下方程式表示（Wright, 2002）：

$$\varphi_{x,i} = \varphi_{def,x,i} + \varphi_{\alpha,x,i} + \varphi_{orb,x,i} + \varphi_{\varepsilon,x,i} + n_{x,i} \quad \text{（公式 1）}$$

其中 $\varphi_{def,x,i}$ 是真實地表變形、$\varphi_{\alpha,x,i}$ 是大氣效應、$\varphi_{orb,x,i}$ 是軌道誤差、$\varphi_{\varepsilon,x,i}$ 是 DEM 誤差、$n_{x,i}$ 是熱雜訊和影像套合誤差。當兩張雷達影像受到上述的誤差影響之後，兩張影像的同調性會降低，其計算出來的相位資訊之可性度也會較低。因此，傳統 InSAR 技術雖發展已久，但使用雷達差分干涉技術時，仍受許多因素影響無法突破限制，例如：地表植被較密、變形速率較緩慢等，致使干涉結果產生雜訊及誤差無法成像或形成干涉環。為了突破這樣的限制，近 20 年來的合成孔徑雷達差分干涉技術已逐漸發展為時序性分析的雷達差分干涉技術，以求取時間上穩定的雷達反射回波訊號，進而針對具有這樣特性的像素之相位資訊進行解算，從而萃取出時間序列的地表位移量。這一類時序分析概念的技術，通稱為多時序雷達差分干涉技術。

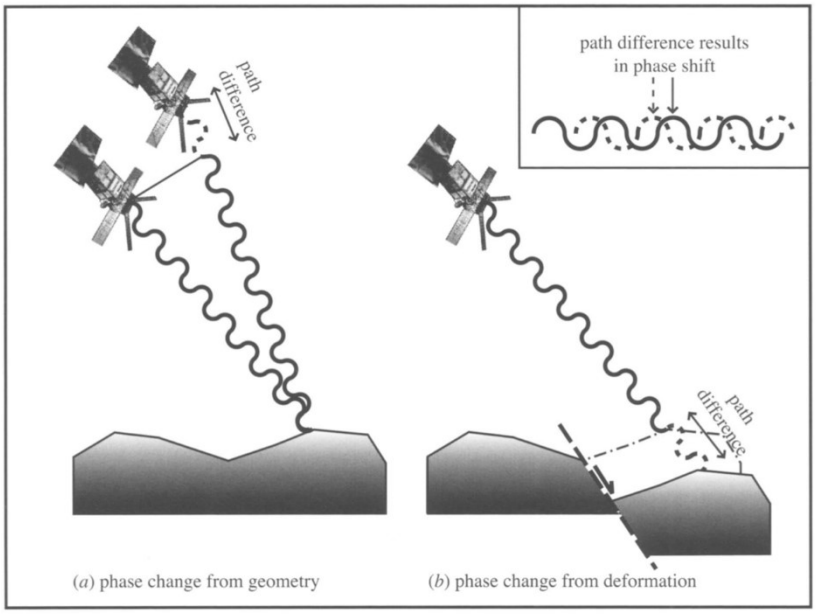


圖 1-14：雷達差分干涉影像對的相位變化與地表變形之間的示意關係圖（Wright, 2002）。

Figure 1-14：Figure shows how InSAR images detect phase changes resulting from surface deformation.（Wright, 2002）

1-4-2 多時序雷達差分干涉技術（Multi-Temporal InSAR）

多時序雷達差分干涉技術裡透過不同的主副影像配置、初始門檻值的挑選設定、變形模型的假設、以及相位回復的方式等，發展出各式的演算法，表 1-1 顯示較為知名的演算方法。這些各式演算法中，Crosetto 等人（2016）認為最具代表性的四種演算技術（表 1-1 灰階底色所示）為永久散射體差分干涉（Permanent Scatterer InSAR, PSInSAR™）技術（Ferretti et al., 2000, 2001）、短基線雷達差分干涉技術（Small Baseline Subset, SBAS）技術（Berardino et al., 2002）、史丹佛永久散射體（Stanford Method for Persistent Scatterers, StaMPS）技術（Hooper et al., 2004；Hooper et al., 2007；Hooper, 2008）、以及 SqueeSAR™ 技術（Ferretti et al., 2011）。

其中永久散射體差分干涉（Permanent Scatterer InSAR, PSInSAR™）技術和史丹佛永久散射體（Stanford Method for Persistent Scatterers, StaMPS）技術是目前最廣為使用的演算法。

這兩種演算法在尋找永久散射體（Persistent Scatterers, PS）的概念上非常相近，主要就是透過多幅干涉圖中選取具有較高訊噪比（Signal Noise Ratio, SNR）的像素，這類像素就被定義為永久散射體，再透過相位回復（unwrapping）的處理，就可以有效獲得永久散射體的地表位移資訊，於實例中顯示原本無明顯干涉條紋的區域，藉由此方法可成功獲得地表相位變化，這樣概念的分析技術雖可通稱為『永久散射體差分干涉技術』，但礙於 Permanent Scatterer InSAR 寫法已有版權登記，因此本計畫將統稱為 Persistent Scatterers Interferometry（PSI）。

這兩種 PSI 技術在概念上非常相近，但是在處理的邏輯與過程卻大相逕庭，Ferretti 所提出的 PSInSAR™ 在分析處理的過程中，必須加入當地線性的平均地表變形場，以求得非線性的地表變化量。然而 Hooper 所提出的 StaMPS 技術，則透過空間相關性的分析與概率模型的相位回復方式，在不須加入線性平均速度場的狀態下，就能在非線性或不規則的地表變形區域裡，如火山、斷層、地層下陷等，獲得時間序列的地表位移量（圖 1-15）。

為了有效監測臺灣的地表變形特性，以及本計畫的重要區域都位在都市人口密集地區，因此本計畫將使用 StaMPS 的 PSInSAR 分析技術，藉此在研究區中選取穩定的雷達散射體，萃取其中的雷達訊號，解算該像素之地表位移量，獲得傳統差分干涉技術無法觀察的緩慢地表變形區域之活動情形。

表 1-1：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。

Table 1-1：List of potential multi-temporal InSAR algorithms.

演算法	主影像配置	初始像素挑選方式	變形模型	相位回復方式
PSI™[1]	單幅主影像	振幅離散數值	線性模型	一維（時序圖） 二維（測量平差）
SBAS[2]	多幅主影像	空間相關係數	空間相關變形 線性模型	二維（MCF） 一維（SVD）
IPTA[3]	單幅主影像	振幅離散數值	線性模型	一維＋二維 （分群、分級網絡建構）
StaMPS[4]	單 / 多幅主影像	振幅離散數值	空間相關模型 線性模型	一維（時序圖） 二維（概率模型）
PSP[5]	單幅主影像	振幅離散數值	線性模型	一維（時序圖） 二維（鄰近點逐步擴展）
SqueeSAR™[6]	單幅主影像	振幅離散數值 統計分類	線性模型	一維（時序圖） 二維（測量平差）
TCP[7]	多幅主影像	振幅離散數值 空間相關係數	線性模型 非線性模型	一維（假設相位回復最小平方） 二維（測量平差）
QPS[8]	多幅主影像	振幅離散數值	線性模型	一維（時序圖） 二維（測量平差）

1. PSI™（Permanent Scatterer InSAR, Ferretti et al., 2000, 2001）;

2. SBAS（Small Baseline Subset, Berardino et al., 2002）;

3. IPTA（Interferometric Point Target Analysis, Werner et al., 2003）;

4. StaMPS（Stanford Method for Persistent Scatterers, Hooper et al., 2004, 2007; Hooper, 2008）;

5. PSP（Persistent Scatterer Pairs, Costantini et al., 2008, 2012）;

6. SqueeSAR™（Ferretti et al., 2011）;

7. TPC（Zhang et al., 2011）

8. QPS（Quasi Persistent Scatterers,）（Perissin and Wang, 2012）。

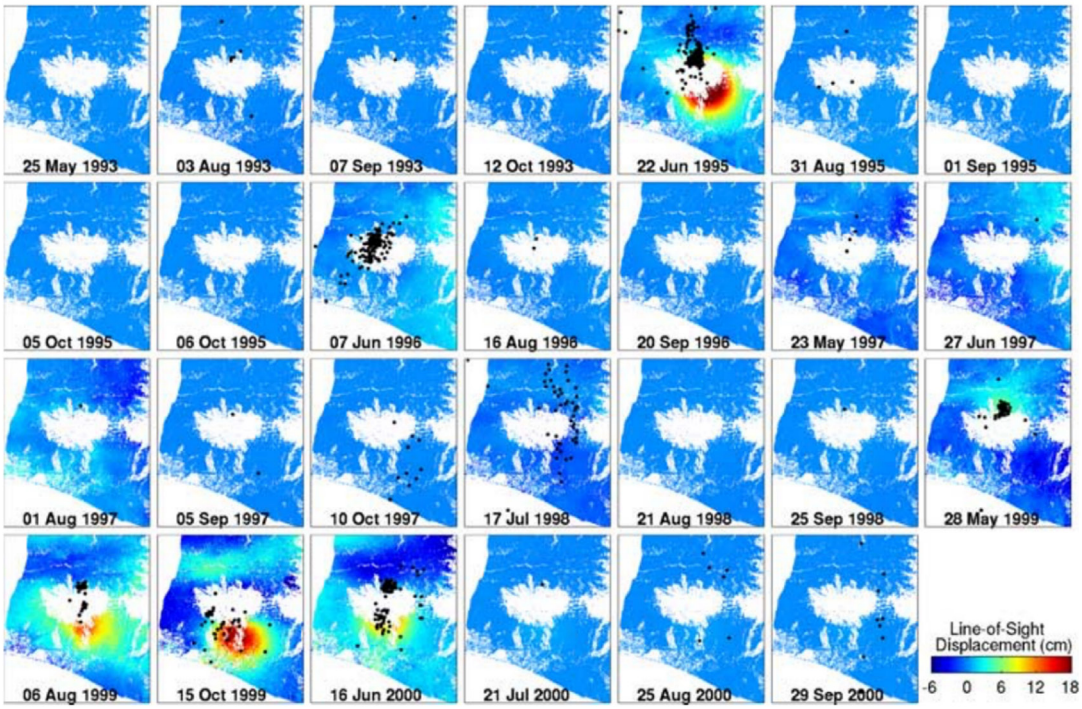


圖 1-15：冰島 Eyjafjallajökull 火山周圍的 PSI 時間序列地表變形量（Hooper, 2008）。

Figure 1-15：Figure shows time series of PSI-extracted surface deformation around Eyjafjallajökull Volcano, Iceland.

1-4-3 解算垂直變形速率

本期計畫中在資料品質允許狀況下，我們會利用同一時期之升軌與降軌資料推估該時期的垂直方向以及東西方向之速度場，並且將這些資料與 GNSS 比對。使用同一衛星兩個方向軌道的資料，僅能解析兩個方向的速度場，理論上這樣的計算，因為忽略南北向速度會帶入一些誤差到最後結果，我們以實際的 GNSS 南北向速度場應用公式進行分析，當南北向量值在觀測區域中差異介於 -10~10 mm/yr 之間對於解算的東西向及垂直向量值的影響小於 2 mm/yr，而台灣西部觀測區域的南北向量差值最大差不多就在每年一兩公分。然而垂直速度場以及東西向的速度場還是比雷達斜距方向的速度場更容易呈現與理解。因此在犧牲一些準確度、解析度的狀況下，我們會在其中一個時段嘗試解算垂直變形速率。各區域詳細南北向量值影響描述於垂直速度場解析章節。

1-4-4 資料比對

本計畫預計採用 GNSS 連續觀測站資料解算分析處理地礦中心設置及與其它單位交換之 GNSS 連續觀測站資料（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場。預計將 PSI 的成果分別與 GNSS 觀測資料和精密水準測量結果相互比對。在 PSI 成果和 GNSS 資料比對的工作上，我們會先選取適當 GNSS 測站進行資料整理和速度值計算，並與雷達影像時間序列值比對。主要內容分為以下三個部分：第一部分是將 GNSS 的速度場資料投影至衛星視角方向的速度值，並套疊至同一飛行軌道的 PSI 速度場上，將兩者進行視覺化比對。第二部分是將兩個軌道方向的 PSI 速度場成果解算出東西和垂直方向的速度場，並將 GNSS 的東西和垂直方向的速度值套疊至相對應的 PSI 解算成果上，進行視覺化之比對。第三部分是將 GNSS 的時間序列資料投影至衛星視角方向，並與 PSI 獲得之時間序列進行比對，用以評估 PSI 結果的準確性，最後再萃取重要區域與重要點位對其地表變形之時間序列做分析。

本團隊在 PSI 與 GNSS 及水準結果比對上，無論是視衛星方向上的速度場比對、轉換至東西方向與高程方向上的比對或是單站時間序列比對…等，都有相當豐富的經驗，對於各種測量資料的優勢與劣勢也相當清楚。此外，隨著 PSI 技術的進步與普遍應用，不同資料之間比對的方法也有相當大的改進，本團隊也會挑選最適用研究區域之比對方式來確定 PSI 結果的可信度。

本年度研究之中部地區約有近 90 個各單位的連續 GNSS 觀測站，分布從沿海地區至山區，涵蓋的範圍相當大。因此主要以此 GNSS 測站作為控制參考點，先檢核雷達差分干涉資料。如果資料品質良好，則可以直接使用；資料品質如果與期待有差距，則盡量找出誤差來源。最後再藉以利用 PSI 獲得之大面積地表變形觀測對於目標斷層及重要區域做較完整的分析研究。除了連續 GNSS 觀測站以外，搭配地礦中心提供之跨斷層精密水測線也將能增加對於 PSI 結果精度之控制，期望利用現有資料就能發揮最大的效用。

根據 PSI 與 GNSS 比對結果，可以發現 PSI 處理過程中潛在的誤差需要在處理過程中去除。例如在 110 年的結果中，成功發現處理過程中明顯的相位回復解算錯誤 (unwrapping error)，嘗試調整處理參數以及選擇影像處理範圍，減低相位回復解算錯誤。在 111 年結果也發現影像的時間密度高也可以減少 unwrapping error。

1-4-5 斷層幾何與滑移量模擬

地表變形是協助我們了解構造活動性的重要參考資訊，利用 PSI 與 GNSS 對比後的資料在指定斷層的垂直方向取出速度剖面可以釐清斷層活動之特性。PSI 因影像拍攝時間間隔的縮短，也能提供更密集的時序資訊，大幅度地提高地表變形在空間資訊上的解析。這些高解析時空資料，可利用簡易的二維彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985； Okada, 1992）推估斷層幾何參數，並探討斷層滑移或累積速度分佈（Hsu et al., 2003； Kuo et al., 2019），進而評估斷層的潛勢。

簡化地表變形和斷層滑動關係為 Δui=Green Function*Δuj+σ，其中 Δui 為地表變形，Δuj 為斷層滑移，σ 為誤差，而 Green Function 來自彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985；Okada, 1992），其中包含了斷層的幾何參數，如斷層平面位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）等，斷層平面位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層面下緣的深度。一組斷層幾何參數，即可提供每個位置上的地表變形資訊，透過地質構造模型、各點觀測資料與模型結果比較，將可獲得較符合之斷層幾何參數及其滑移量。每種斷層幾何參數在地表上的連續變化是不一樣的，透過遙測的觀測投影資料與模型結果進行擬合，將可獲得最匹配之斷層幾何參數，包含了斷層頂部、深部、角度及滑移量。因連續性的地表觀測點位數目多於要解析的參數個數，所以透過這樣的計算方式，不論是從斷層幾何與滑動來估算地表變形，或是從地表變形來回算斷層幾何與滑動，都是可行的。

1-4-6 計畫成果效益及其應用

i. 利用衛星雷達影像解算中部地區高空間解析度的地表變形資料

ii. 評估雷達差分干涉資料與 GNSS 以及水準測量資料之差異與關聯性

iii. 預計利用雷達遙測為主要工具對中部地區的地表變形做觀測與分析

iv. 利用地表變形資料估算監測範圍內之目標斷層之幾何以及滑移量

v. 利用以上資訊對重要區域可能受到之影響分析

1-5 本年度計畫概述

1-5-1 本年度研究區域背景簡介

本年度（113 年度）針對中部地區的六條斷層（包含大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔 - 雙冬斷層、初鄉斷層）與臺中都會區等重要區域進行研究（圖 1-2）。中部地區主要地質區包含西部麓山帶的第三紀碎屑沉積岩區，以及由土、砂和礫石為主的濱海平原地區沖積層。以下就調查範圍內的六條斷層由西而東分別簡述其地質及構造背景。

1-5-1-1 大甲斷層

大甲斷層，由苗栗縣通霄附近經大甲、甲南、清水、沙鹿至臺中縣大肚，長約 30 公里，呈北北東走向，為逆移斷層 (圖 1-16；林朝棨，1957)。斷層南段由甲南至大肚，長約 22 公里，又稱清水斷層（張徽正等，1998；林啟文等，2000b）。大甲斷層有明顯的線狀崖，根據野外調查及鑽探岩芯的岩層比對結果，顯示地表淺處大甲斷層的垂直移距約 50~70 公尺，斷層截切更新世晚期的地層，前緣並截穿地表，但斷層跡可能被崩積層或沖積層覆蓋，推測於全新世活動過，暫列為第一類活動斷層。

大甲斷層鄰近的地形包括后里臺地、大肚臺地與清水沖積平原；后里臺地位於大安溪與大甲溪之間，為一長方形的臺地。大肚臺地則由大甲溪向南延伸至烏溪，長約 20 公里，寬約 7 公里，為西翼陡東翼緩的不對稱的褶皺構造，海拔高度在 300 公尺以下；清水沖積平原

則位於大肚臺地的西側。根據地形資料顯示，大甲斷層北段的構造特徵明顯，北從大安溪南岸往南延伸至沙鹿，沿大肚臺地北段的西緣發育明顯線形崖特徵，且線形崖截切不同時期的階地面，證實大甲斷層為活動斷層（林朝棨，1957；Ku, 1963；楊貴三，1986； 沈淑敏等，2005；Chen et al., 2007）。大甲斷層南段，在沙鹿 - 龍井至大肚間的斷層線形特徵稍不明顯，僅有斷斷續續的構造線形 (張國禎等，2014)。根據大甲斷層上盤的大肚臺地的階地分析結果，大致可將大肚臺地的階地分為 10 階，其中 6 階 (H2-4，M1-3) 呈現撓曲或傾動的地形面，階面朝向大肚背斜兩翼傾斜，顯示為大肚臺地隆起後侵蝕與堆積產生的階地。另外低位河階 L5 呈現向上游傾動的反向階面，明顯受到大甲斷層活動之影響 (陳文山等，2008)。

大甲斷層和鐵砧山斷層臨近出露的地層包括頭嵙山層、紅土臺地堆積層、階地堆積物與沖積層。頭嵙山層香山相砂岩，以厚層砂岩及砂頁岩為主，主要分布於鐵砧山斷層以東的大甲溪南岸；頭嵙山層火炎山相礫岩以礫岩為主，偶夾透鏡狀砂岩，分布於鐵砧山、后里臺地西緣、大肚臺地西緣及北緣。紅土臺地堆積層主要由礫石、砂及泥組成，頂部有紅土化，分布於后里臺地與大肚臺地。階地堆積層由未膠結的礫岩所組成，分布於后里臺地西北側，沖積層則以礫石及砂為主。大甲斷層則是由頭嵙山層向西逆衝至沖積層之上 (Hsu and Chang, 1979)。 透過大安溪旁的大甲斷層上下盤的鑽井資料顯示，斷層在北段已截切淺層堆積層發育至地表，推測斷層角度約為 40~50 度，並根據鑽井採樣地定年資料，推測大甲斷層的垂直滑移速率約為 1.7~5.5 mm/yr(陳文山等，2006，2008)。

跟據淺層震測顯示，推測大甲斷層可能被新期沖積層覆蓋，並未截切地表 (許又立，2001)。透過大安溪南岸的地電阻測線 (06P-TCA-TC01)，顯示大甲斷層面向東傾斜 45 度，且約在 500 公尺深處轉為水平方向的層間滑動，上盤地層形成斷層彎曲褶皺 (fault-bend fold) (董倫道等，2006)。

透過 1996~1999 年間跨大甲斷層北段和鐵砧山斷層的 GNSS 測量資料顯示，平行斷層走向的分量為 -1.3 mm/yr，呈右移形式；垂直斷層走向地分量為 3.7 mm/yr，呈壓縮形式；高程方向的下陷量為 5.7 mm/yr；單獨跨過大甲斷層南段的速度場變化量，分別為平行斷

層走向的 0.9 mm/yr，呈左移形式；垂直斷層走向的分量為 0.5 mm/yr，呈壓縮形式；高程方向的沉陷量為 10.2 mm/yr，依速度結果研判大甲斷層和鐵砧山斷層在 1996~1999 年間為鎖定的狀態 (饒瑞鈞等，2006)。在 2000~2006 年間的 GNSS 測量資料顯示，跨過大甲斷層北段和鐵砧山斷層的速度場變化量，在平行斷層走向的分量為 3.1 mm/yr，呈左移形式；垂直斷層走向的分量為 3.7 mm/yr，呈伸張形式；高程方向抬升量為 5.2 mm/yr；單獨跨過大甲斷層南段的速度變化量，為平行斷層走向分量為 -0.8 mm/yr，呈右移形式；垂直斷層走向的分量為 0.5 mm/yr，呈壓縮形式；在高程方向地抬升量為 3.2 mm/yr；由速度場分析結果顯示，大甲斷層北側和鐵砧山斷層在 2000~2006 年間為具有左移分量的逆移運動，但大甲斷層南段則是呈現鎖定的狀態 (饒瑞鈞等，2006)。在 2007~2013 年間的速度場變化，跨大甲斷層及鐵砧山斷層在水平分量和垂直分量亦無明顯速度差異 (石晶瑩等，2019)。

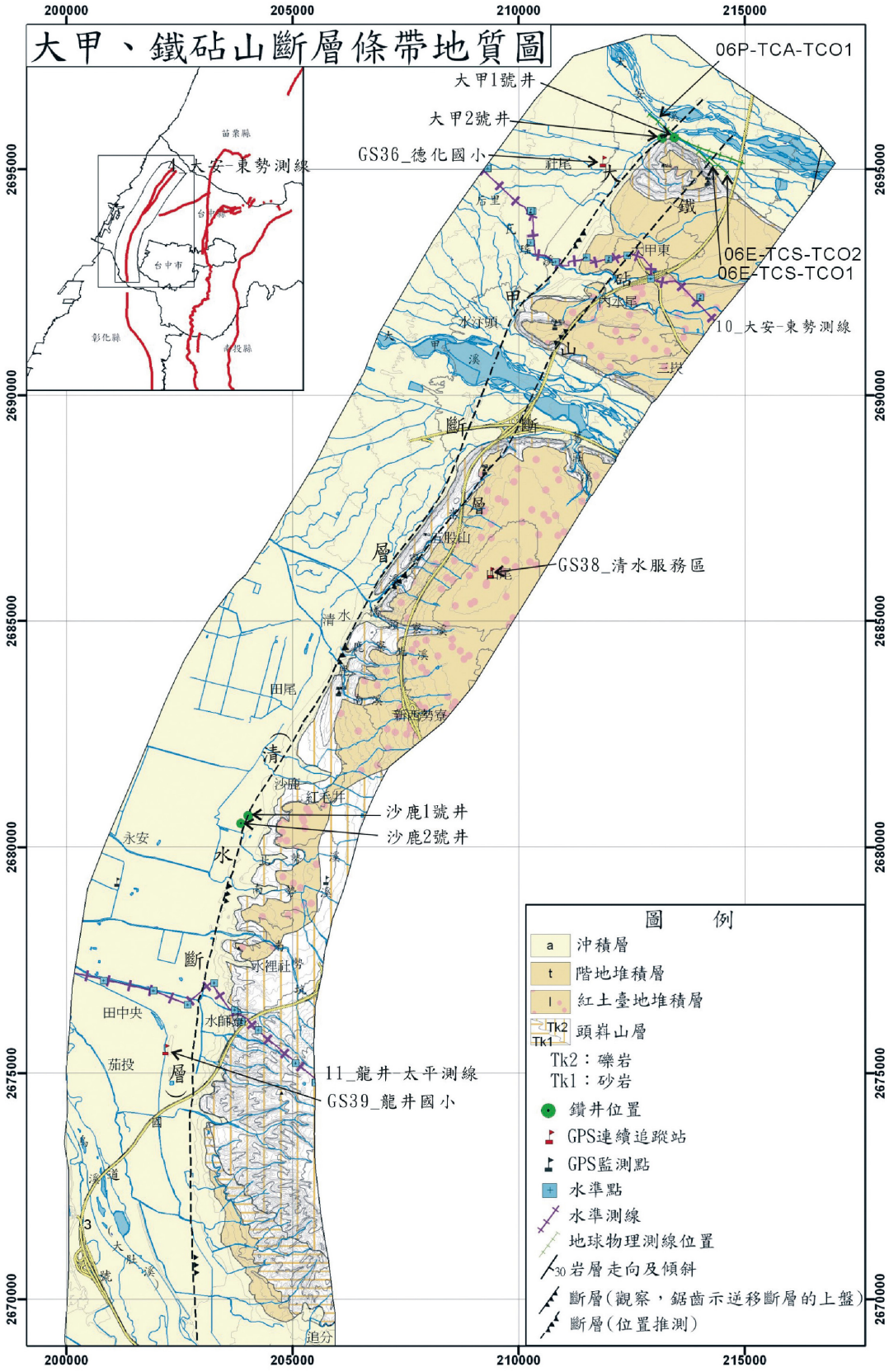


圖 1-16：大甲斷層、鐵砧山斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。

Figure 1-16：Strip Map of the Tachia Fault and Tiechanshan Fault.

1-5-1-2 鐵砧山斷層

鐵砧山斷層位於臺中縣大甲鎮鐵砧山北緣向南延伸至沙鹿後併入大甲斷層，長約 13 公里，呈北北東走向，為逆移斷層 (圖 1-16；林朝棨，1957)。因其位於大甲斷層東側，又稱大甲東斷層，推測可能是大甲斷層向西逆衝在上盤所形成的，由於截切更新世晚期地層，推測可能在全新世活動過，暫列第一類活動斷層。

在地形特徵上，后里臺地西緣，大甲東、內水尾一線以西的地勢較東側高，鐵砧山斷層在大甲溪以北呈反斜崖，截切后里臺地的階地群，往南過了大甲溪後，鐵砧山斷層進入大肚臺地的西北端，並有明顯的侵蝕溝特徵並造成直線狀的特徵，為斷層線谷 (林朝棨，1957; 沈淑敏等，2005)。由航照判釋，可觀察鐵砧山斷層北段除了切過大坪頂臺地，還截切過尾山面、二崁面、，內水尾西面、內水尾面、頂店東面、山腳面、外水尾東面與大甲東面等階面，並延伸至后里臺地西側 (Ku, 1963；沈淑敏等，2005)。根據其斷層崖與背斜軸的累積變位量判斷其為活動斷層 (石再添等，1983，1984；楊貴三，1986；Chen et al., 2007)。根據高解析度的 LiDAR 資料顯示，鐵砧山斷層在鐵砧山及后里臺的西緣，以及大甲溪南側，向東南方傾斜的斷層線崖特徵明顯，且連續性佳，並於大甲斷層間，形成一系列的褶皺構造，推測與兩條斷層的活動作用有關，進而造成壓力脊等相關構造 (張國禎等，2014)。

鐵砧山斷層北段臨近地層包含紅土臺地堆積層和階地堆積層，南段則為頭嵙山層和紅土臺地堆積層。根據前人調查，認為鐵砧山斷層截切紅土臺地堆積層及階地堆積物 (張憲卿，1994)，西側為上盤，頂面紅土層的最大變位量為 20 公尺 (Sun,1965)；在鐵砧山斷層南段，則有右移斷層的運動特徵 (江崇榮，1984)。李元希和石瑞銓 (2008) 至大甲溪進行野外調查，有觀察到向西傾斜 20-30 度的逆移斷層，推斷為鐵砧山斷層，斷層下盤 (東側) 的紅土化礫石層較厚，而上盤 (西側) 的礫石層厚度較薄，上盤礫石層受斷層作用形成拖曳褶皺，其認為鐵砧山斷層為一條向東逆移的背衝斷層。

在淺層震測地球物理探勘中，並未觀察到岩層錯動的證據 (王乾盈和郭炫佑，2003)。由地電阻資料 (06E-TCS-TC01 研判鐵砧山斷

層 (大甲東斷層) 的斷層面約向西傾斜 30 度，在后里臺地淺部的移距約 20 公尺 (林啟文等，2008)。

根據 1996~1999 年間跨大甲斷層北段和鐵砧山斷層的 GNSS 速度場變化，顯示平行斷層走向的分量為 -1.3 mm/yr，呈右移形式；垂直斷層走向地分量為 3.7 mm/yr，呈壓縮形式；高程方向的下陷量為 5.7 mm/yr，根據 2000-2006 年間跨大甲斷層北段和鐵砧山斷層的 GNSS 速度場變化顯示，在平行斷層走向的分量為 3.1 mm/yr，呈左移形式；垂直斷層走向的分量為 3.7 mm/yr，呈伸張形式；高程方向抬升量為 5.2 mm/yr；說明在 1996~2006 年間，大甲斷層北段和鐵砧山斷層都是呈現鎖住狀態。根據近期的精密水準測量結果顯示，在橫跨大甲、鐵砧山、屯子腳及三義斷層的測線中，約有 10 mm 的高程變化 (饒瑞鈞等，2006)，利用地電測勘顯示鐵砧山斷層為向西傾斜約 30 度的逆斷層，淺部地層約有 20 公尺的錯移 (Cheng, 1990)。

1-5-1-3 彰化斷層

彰化斷層位於八卦臺地西緣，由彰化縣和美鎮向南延伸至田中附近（圖 1-17；林朝棨，1957；中國石油公司，1982；石再添與楊貴三，1985；張徽正等，1998），呈北北西轉南北走向，為逆移斷層，向北可能連接大甲斷層，向南可能連接桐樹湖斷層，長約 36 公里。根據鑽探資料與岩層對比結果，推論斷層可能截切晚更新世的地層；由於彰化斷層淺部受沖積層掩覆，仍待進一步調查，暫列第一類活動斷層。

彰化斷層位於八卦臺地西緣，八卦臺地呈西坡陡峭，東坡平緩，並呈南北寬而中央窄的不對稱啞鈴形。根據彰化斷層的地形特徵可分為三段，顯示不同的活動特性（石再添與楊貴三，1985），斷層北段為彰化 - 花壇一帶，其構造地形特徵並不明顯，僅有在大厝寮附近可觀察到很短的線形崖，崖高 20~50 公尺；待人坑沖積扇上有斷層小崖，顯示斷層的活動累積性。中段的部分（花壇 - 員林）仍屬盲斷層，斷層活動的地形特徵並不明顯（陳勉銘等，2007）。在員林 - 田中區域為彰化斷層南段，大部分的地形崖特徵不明顯，僅有在社頭 - 田中一段約 5 公里長的範圍內，在臺地邊緣有約數十個三角崖切面特徵，且頂部殘留紅土化礫石，崖切面向西傾斜約 40 度（沈淑

敏等，2005；張國禎等，2014）。彰化斷層上盤的八卦臺地與北側的大肚臺地相似，為東緩西陡的臺地地形面；經地形判釋可將八卦臺地上的階地細分成 11 階，階地大致由南向北逐漸變低，階面向東傾斜且坡度緩，沒有撓曲變形。利用地形計測指標（ex. 河流縱剖面、水系密度、水系頻率、高度計量及河川等級）分析八卦臺地的新期構造，推論八卦臺地的抬升變形用是由北往南逐漸擴展（Delcaillau et al., 1998）。

彰化斷層鄰近出露的地層包括頭嵙山層、紅土臺地堆積層、礫石層與沖積層。頭嵙山層下部以厚層砂岩與砂頁岩互層為主；砂岩富含漂木和炭質物，偶夾厚層泥岩；頭嵙山層上部以厚層礫岩為主，局部夾透鏡狀礫石質砂岩。紅土臺地堆積層主要為礫石及砂，且頂部具紅土化現象。礫石層則屬階地堆積，可能為崩積層，主要位於八卦臺地西坡前緣與沖積平原交界處。臨近構造除了彰化斷層外，尚包含上盤的八卦山背斜，八卦山背斜為西陡東緩的不對稱的背斜，背斜西翼岩層傾角約 5~20 度，東翼約 5~10 度；北段的背斜軸呈北北西走向，南段則逐漸轉為南北走向。根據斷層兩側的岩芯對比及定年資料，估算彰化斷層的垂直滑移速率約為 4.3~10.3 mm/yr（陳文山等，2008），並斷層截切 2~3.8 萬年前的地層，推論彰化斷層在 2 萬年前曾有活動（陳華玟等，2007）。

彰化斷層前端雖未出露地表，但斷層上盤的八卦山背斜持續發育，根據震測剖面顯示，八卦山背斜下方有低角度的彰化斷層，斷層面向東傾斜 18~45 度，斷層截切淺部地上新 - 更新世地層（Chen, 1971），透過錯位模型反向分析，將褶皺變形岩層與地形面的幾何關係，推八卦山背斜為活動的斷層擴展褶皺（fault-propagation folding），斷層尖端尚未截穿地表（Suppe, 1986）。在彰化斷層北方測線剖面中，東側岩層向西傾斜，但角度向西漸減，剖面西側岩層略呈水平，中間有向東傾斜的不連續帶，寬度約 7 公尺，並可延伸至淺層地表，但未截切頂部岩層（石瑞銓等，2000）。彰化斷層在彰化以南一帶並未出露到地表，但在近地表處岩層中有小形變形帶或破裂帶存在。在員林東側的地電阻測線（02E-CHA-YL-2），顯示在 20 公尺深處，約有地電阻層的不連續面，傾角 70~85 度向東傾斜（林啟文等，2008）。

根據前人的定年資料，可以推估彰化斷層的長期活動速率。透過光螢光定年法（OSL）測量八卦臺地北端岩層及南端階地的年代，並利用地層的傾角、階地傾動面與斷層尖端褶皺模型（fault-tip folding model）推估斷層縮短量，推得八卦臺地的變形發生於 62.2 ± 9.6ka，斷層縮短量為 16.3 ± 4.1 mm/yr（Simoes et al.,2007）。若透過斷層彎曲褶皺（fault-bend fold）的理論估算斷層的縮短量，並利用宇宙射線定年法及土壤發育指標測得八卦臺地上階地的年代，可以推估斷層在 PK1-4 階形成後（約 400~200ky），縮短速率約維持在 4 mm/yr。在 PK5（約 105ky）及 PK6（約 28ky）形成後，斷層縮短速率分別增加至 6.5 mm/yr 和 22.8 mm/yr（Siame et al., 2012）。另外，根據八卦臺地竹山段的階地碳十四定年資料，可由最高階的年代約 31ky，距離河床高約 150~190 公尺，估算彰化斷層南段的垂直抬升速率為 6.18 ± 0.1 mm/yr，斷層滑移速率為 21 ± 5.8 mm/yr（Ota et al., 2002）。

根據 1996~1999 年間跨彰化斷層的 GNSS 速度場變化顯示，平行斷層走向的分量約為 -2.1 mm/yr，呈右移形式；垂直斷層走向的分量為 3.7 mm/yr，呈壓縮形式；在高程方向抬升速率為 8.4 mm/yr。根據 2000~2006 年間跨彰化斷層的速度場變化資料顯示，平行斷層走向的分量為 1.2 mm/yr，呈左移形式；垂直斷層走向的分量為 4.2 mm/yr，呈壓縮形式；高程方向的抬升速率為 3.2 mm/yr；由速度場分析結果研判彰化斷層在 1996~2006 年間，皆為鎖定狀態（饒瑞鈞等，2006）。另外，透過彰化斷層在 2004~2006 年間的精密水準測量結果顯示，在埔心至員林間 5 公里的距離內（C082~C084），有近 40 mm 的垂直變化量，顯示彰化斷層兩側有較顯著地變動；在北斗至水里測線中，通過彰化斷層的垂直變化練在 10 mm 以內，改變並不顯著（饒瑞鈞等，2006）。

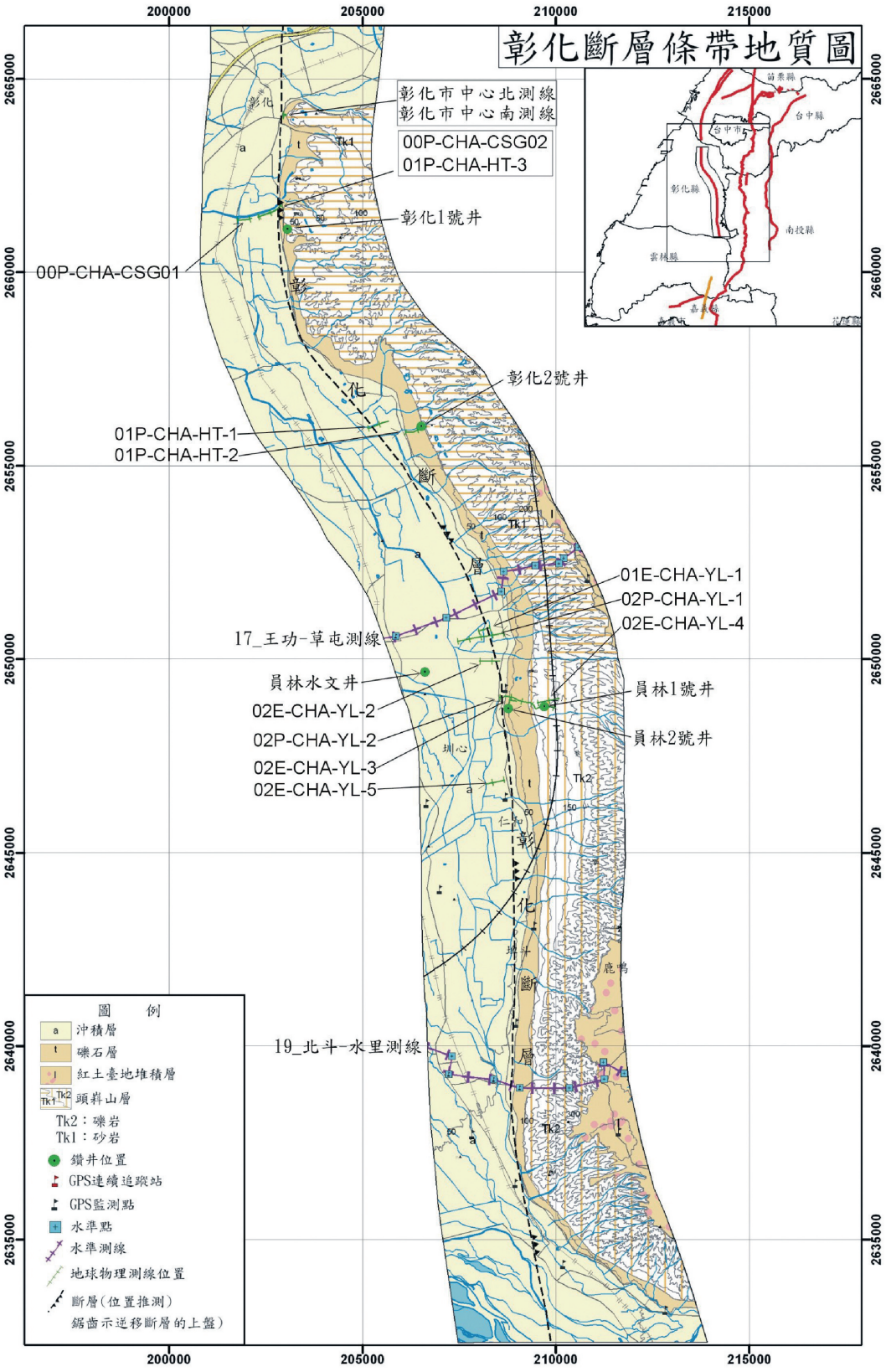


圖 1-17：彰化斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。

Figure 1-17：Strip Map of the Changhua Fault.

1-5-1-4 車籠埔斷層

車籠埔斷層為一逆移斷層，以烏溪為界可分為南北 2 部分（圖 1-18、圖 1-19 及圖 1-20）：北段約呈南北走向，由臺中縣豐原市北陽里向南延伸至霧峰鄉，長約 38 公里，在 1999 年集集地震時，石岡以東至苗栗縣卓蘭鎮也形成地表破裂與地面隆起，長約 16 公里（經濟部中央地質調查所，1999；李元希等，2000）。車籠埔斷層南段約呈南北走向，由南投縣草屯向南延伸至竹山鎮嶺腳附近，長約 38 公里（林啟文等，2000）。在豐原以北，斷層可能連接三義斷層；竹山以南，斷層連接鹿寮斷層與大尖山斷層（林啟文等，2000）。

車籠埔斷層最早被認為向北連接三義斷層，向南連接大尖山斷層；上述 3 條斷層的下盤均出露頭嵙山層，但三義斷層上盤出露東坑層（或南莊層），車籠埔斷層上盤出露錦水頁岩或卓蘭層，而大尖山斷層上盤則出露桂竹林層。由鑽井資料顯示，車籠埔斷層北段下方有另一條斷層，可以觀察到桂竹林層逆衝於頭嵙山層之上，該斷層雖未出露地表，但延伸至地表的位置約位於三義斷層的斷層跡，兩者的接觸約在豐原附近。至於車籠埔斷層南段則連接鹿寮斷層，並與大尖山斷層的特性有所不同，雖然後者在集集地震時也有活動。

1999 年集集地震時所形成的地表破裂，大部分都展現寬廣的斷層帶，並且有許多由主斷層分支而出的斷層崖、單斜崖與撓曲崖等，反應出車籠埔斷層上盤眾多分支斷層的地表特徵。地震斷層主要出現在山麓前緣，也就是山麓與平原的交界處，大多位於錦水頁岩的底部；山麓區內，則多位於車籠埔斷層上盤的錦水頁岩層中或是卓蘭層的底部。由車籠埔斷層的古地震研究結果，包括西元 1999 年的集集地震，過去 3000 年以來共有 7 次地震事件造成地表破裂，最後 6 次地震之間的發生時距最小約 200 年，最長約 700 年；最早的 2 次古地震的時距相距約 1200 年，可能還有許多次的古地震事件未被發現。車籠埔斷層的長期滑移速率為每年 6.94 mm，發震模式屬於時間可預測的再發性模式，車籠埔斷層目前列為第一類活動斷層。

本區由大安溪向南延伸至濁水溪支流清水溪，呈現兩個差異明顯的地形：車籠埔斷層東側由北而南分別為豐原山地、南投山地與竹山丘陵，斷層西側則為臺中盆地與斗六丘陵。太田陽子等（Ota et al.,

2001）將車籠埔斷層南段草屯地區的車籠埔斷層和隘寮斷層，分別稱為主要斷層（main fault）和副屬斷層（subsidiary fault），兩者與草屯河階群階面的崖高有一定比例關係。沈淑敏等（2005）由航照判釋集集地震前後地形特徵的變化，辨識出許多斷層崖、線性崖、反斜崖等構造線。

本區出露地層包括桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層、頭嵙山層、紅土臺地堆積層、階地堆積層與沖積層。車籠埔斷層在集集地震時的地表破裂位置，由地形與岩性的關係可歸納以下幾類：第一類是位在山麓前緣以西，地表破裂位於沖積層和階地堆積層，第二類是位於山麓與平原的交界處的山麓前緣，地表破裂大多位於錦水頁岩底部；第三類位於山麓區內，地表破裂位於車籠埔斷層上盤的錦水頁岩中或與卓蘭層的交界。何信昌與陳勉銘（2000）在測製臺中圖幅時，在某地區發現橫移斷層的露頭，在大坑地區者為左移性質，竹子坑地區則屬右移性質。由露頭所見，此橫移斷層均切過地表相當年輕的階地堆積層或現代沖積層。

集集地震時造成的地表破裂及變形帶所在位置大多位丘陵區的前緣（西緣），而中國石油公司臺探總處（1986）所繪的車籠埔斷層跡大多位於丘陵區西側的沖積平原，若依照中國石油公司潘玉生（Pan, 1967）與張錫齡（Chang, 1971）的定義，車籠埔斷層上盤出露桂竹林層，下盤出露頭嵙山層，此次地震斷層的位置大多出露錦水頁岩或卓蘭層（經濟部中央地質調查所，1999），局部地區可見地震斷層兩側出露相同地層，顯見車籠埔斷層與集集地震斷層除了位置不同外，層位落差也不同。依據鑽井結果（例如 Tanaka et al., 2002），地震斷層下盤仍有一主要斷層，該斷層上盤出露桂竹林層，下盤出露頭嵙山層，因此地震斷層與中國石油公司的車籠埔斷層定義不相同，斷層位置與所錯移層位當然也不相同；後者可能是在豐原市北陽里附近向北延伸，並可能連接三義斷層此外，某些地震斷層造成的崖兩側均出露錦水頁岩，由這資料顯示地震斷層是位於車籠埔斷層的上盤；換言之，作為主斷層的車籠埔斷層的最前緣（西緣）不一定出露地表，在此次地震中也無明顯的破裂與變形現象。地表所見的斷層崖、單斜崖與撓曲崖等僅是由主斷層分叉而出的分支斷層反應在地表的特徵。因此，地震斷層代表地表因地震所形成的地表破裂變形，與其主斷層（地質斷層）的位置不一定相同。

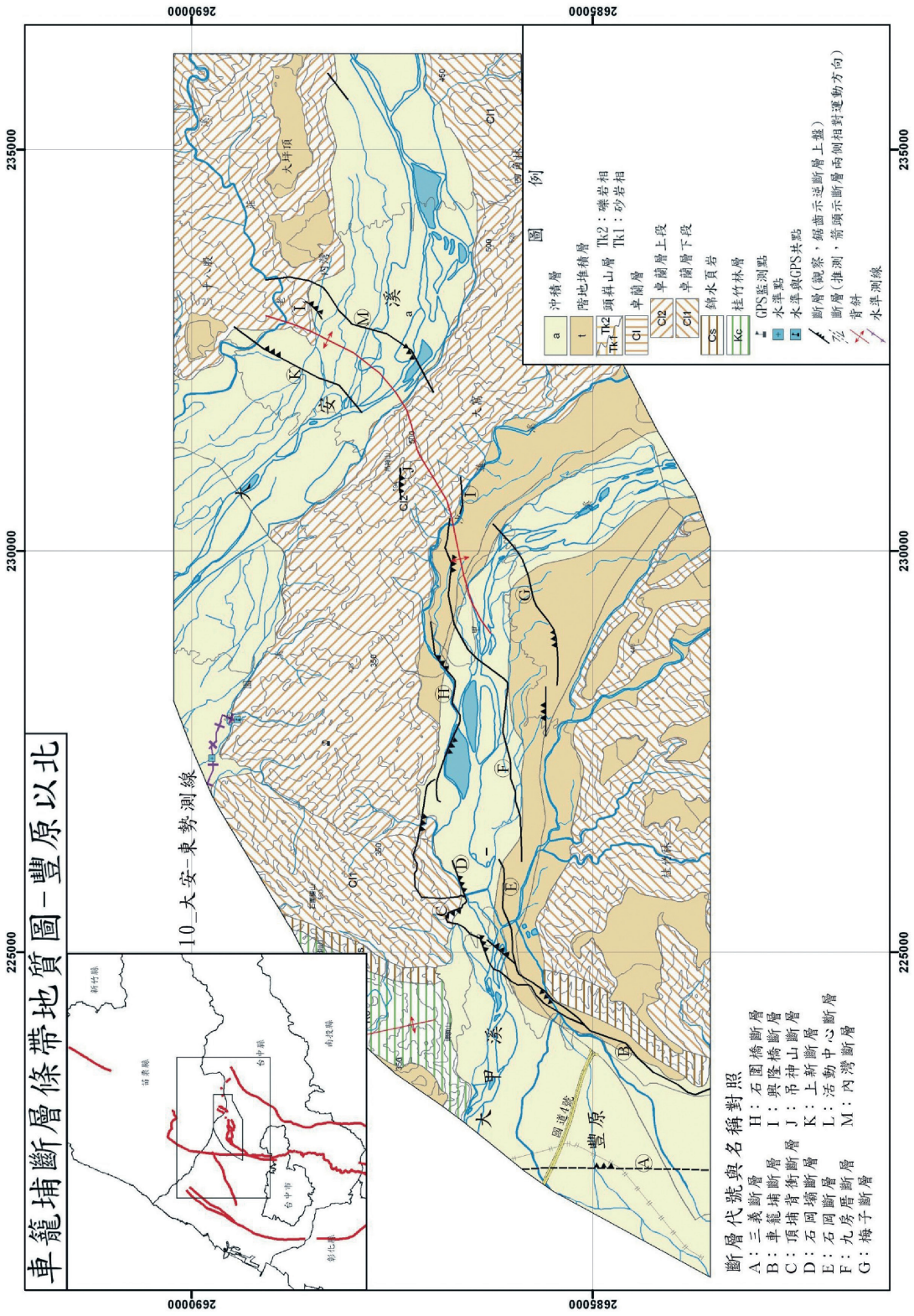


圖 1-18：車籠埔斷層條帶地質圖，豐原以東部分（林啟文等，2008）。

Figure 1-18：Strip Map of the Chelungpu Fault, and the part east of Fengyuan.

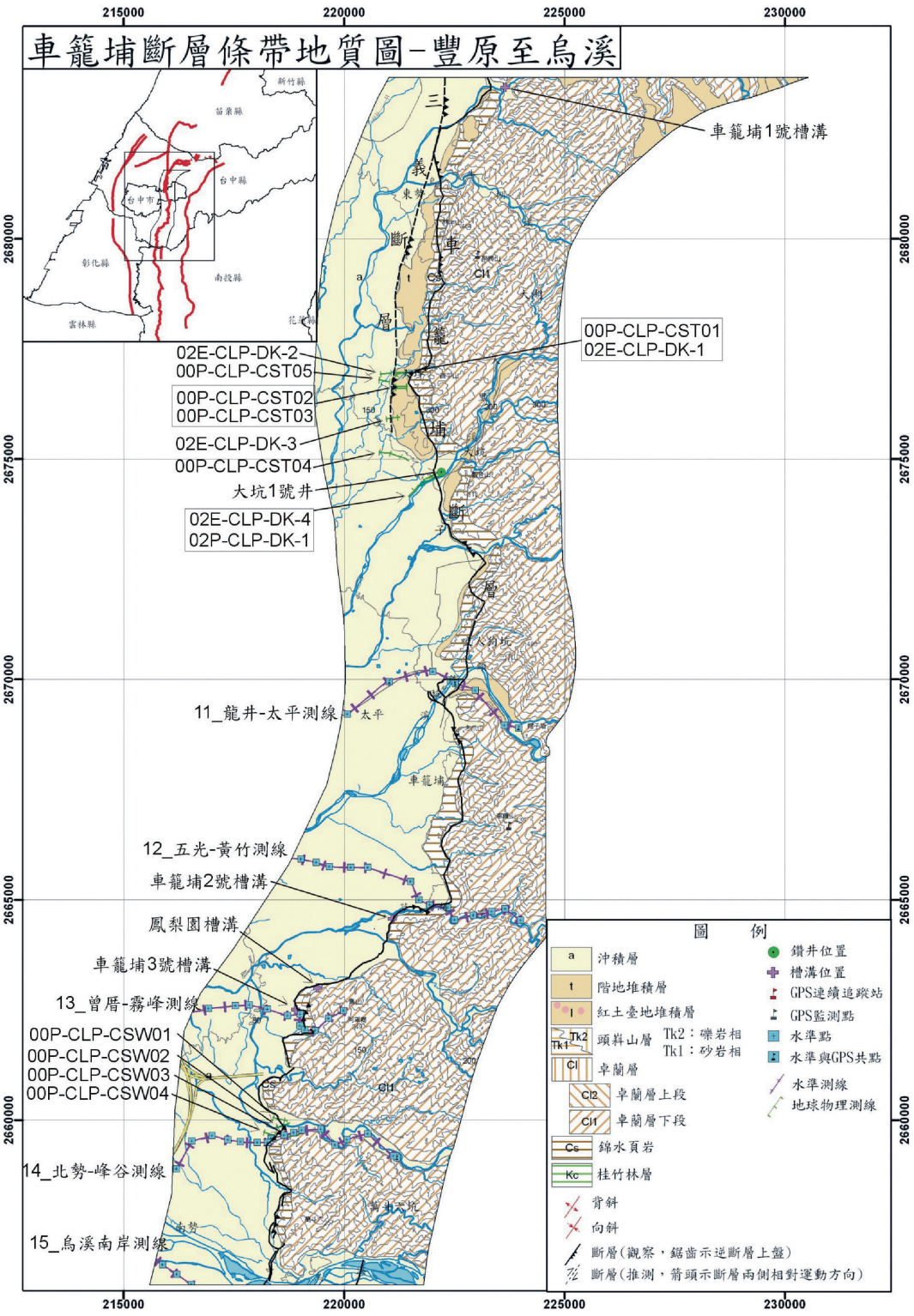


圖 1-19：車籠埔斷層條帶地質圖，豐原至烏溪部分（林啟文等，2008）。

Figure 1-19：Strip Map of the Chelungpu Fault, from Fengyuan to the Wu River.

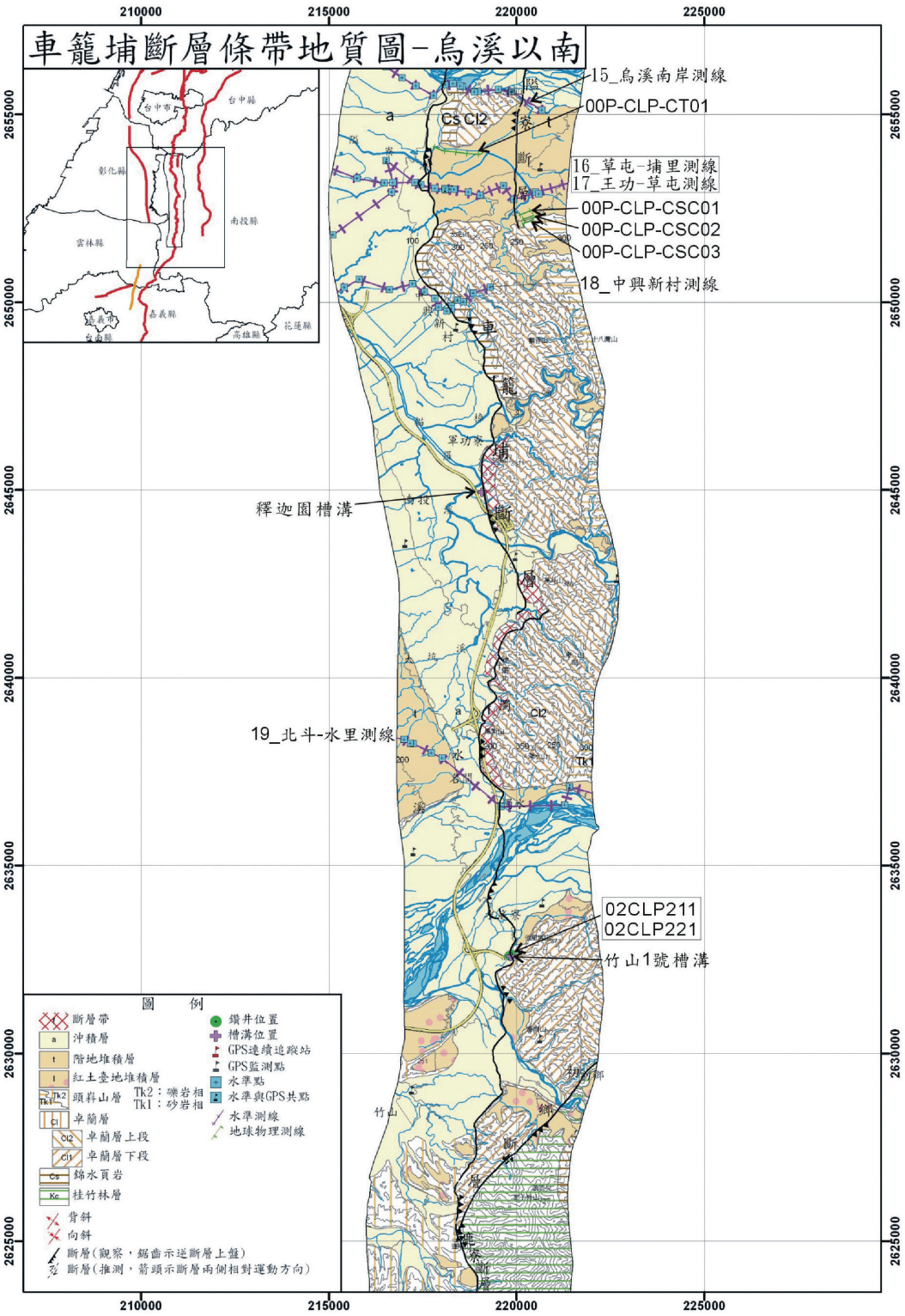


圖 1-20：車籠埔斷層條帶地質圖，烏溪以南部分（林啟文等，2008）。

Figure 1-20：Strip Map of the Chelungpu Fault, and the part south of Wu River.

車籠埔斷層北段，約在豐原北陽里附近向北與三義斷層連接。在 1999 年集集地震時，北陽里以東有許多地表破裂與地面隆起（經濟部中央地質調查所，1999），李元希等（2000）將這些地表破裂或地面隆起各命名為區域性的斷層，陳文山等（2000）則統稱這些地表破裂為后里斷層。車籠埔斷層北段在豐原北陽里以南至烏溪之間，大致呈北北東至南北走向，斷層大致沿著桂竹林層與錦水頁岩的界面，或在錦水頁岩中，由斷層擦痕顯示以逆滑至逆斜滑為主。本段車籠埔斷層鄰近地震斷層有數條舊的斷層帶；廍子坑溪，地震斷層西側有一主斷層，錦水頁岩逆衝至階地堆積層之上，但集集地震時並未活動。陳文山等（2000）將石岡至草湖溪的集集地震地表破裂稱為石岡斷層。

車籠埔斷層南段在烏溪至濁水溪之間，大致呈南北走向，斷層大致在錦水頁岩或錦水頁岩與卓蘭層的界面附近滑動，由斷層擦痕顯示以逆滑至逆斜滑為主在濁水溪以南，斷層約呈北北東走向，至竹山後轉為北北西走向，一直延伸至抄封、嶺腳一帶與鹿寮斷層連接，主要斷層帶位於錦水頁岩與卓蘭層的界面，以逆滑至逆斜滑為主。本段車籠埔斷層鄰近地震斷層有數條舊的斷層帶，斷層帶度可達 500 公尺（Lin et al., 2002）；南投中興別莊、大埤、龍興大橋、龍南 1 號橋等露頭皆可觀察到斷層帶及斷層泥的出露。

田中等（Tanaka et al., 2002）於集集地震後在豐原地區鑽了 1 口深井，由岩芯紀錄發現有 2 個主要斷層帶，帶寬分別 3 公尺與 10 公尺，在集集地震時均有活動，位於下方的斷層帶是主要斷層，而位於上方的則是分支斷層。王乾盈等（Wang et al., 2002）配合該井的震測結果，顯示除了該 2 個斷層帶之外，其地下深部另有一斷層帶，可能才是車籠埔斷層的前緣。由上述資料顯示，誘發集集地震的主斷層帶之下，還有一個斷層帶，這個界面相當於桂竹林層逆衝至頭嵙山層的斷層帶；這一條斷層向北延伸是否連接三義斷層目前仍無法確認； Lin et al.（2002）認為地表所觀察到的地震斷層大多是次生斷層，車籠埔斷層的最前緣斷層在集集地震時並不一定有活動。

地礦中心於大坑地區的大坑 1 號井位在臺中市北屯區中臺技術學院旁的大里溪河床上，井深 3.0~130.65 公尺的為錦水頁岩有高度剪切現象，以層間滑動為主，但偶有與主斷層傾角（約 35~40 度）

相近或是呈高角度的剪切帶，大坑 1 號井與地震斷層地表軌跡間直線距離約 194 公尺，由此回推主斷層傾角約 34 度。大坑 1 號井下部 170 公尺間岩性主要為沖積層礫石，由岩性、產狀及組成等研判井下礫石來源可能為頭嵙山層。另外，在竹山鎮水底寮地區的竹山 1 號井，井深 407 公尺，井中共有 5 處剪切變形帶（CFI~CF5），由中部地區錦水頁岩與卓蘭層的層序與厚度（楊志成，1997）作比對，錦水頁岩可能有地層重覆的現象，CF5 是車籠埔斷層的主要斷層泥帶，而 CFI~CF4 可能是主斷層上盤的分支斷層。若將竹山 1 號井的斷層帶連接至集集地震地表破裂處，計算斷層傾角約 40 度。

行政院國家科學委員會在臺中市大坑地區進行車籠埔斷層深井鑽探（簡稱 TCDP），其中 A 孔深度 2003 公尺，自深度 431 公尺開始取樣（Song et al., 2007a）。岩芯中所屬地層分別為深度 500~1027 公尺為卓蘭層 1027~1268 公尺為錦水頁岩，1268~1712 公尺為桂竹林層，1721~2003 公尺為卓蘭層（Hung et al., 2007；Sone et al., 2007；Song et al., 2007b；Wu et al., 2007；Yeh et al., 2007）。岩芯中發現 10 個斷層帶，其中深度 1111 公尺的斷層帶可能是誘發集集地震的滑動帶（slip zone），而深度 1712 公尺的斷層帶研判是三義（Hung et al., 2007；Song et al., 2007；Yeh et al., 2007），桂竹林層逆衝至卓蘭層之上。

潘玉生（Pan，1967）由重力資料，推測車籠埔斷層為三義斷層向南延伸至后里以南的部分，斷層為低角度逆移斷層。黃金來（1968）根據震測資料認為斷層為向東傾斜約 50 度的逆移斷層，是由桂竹林層逆衝至頭嵙山層之上。張錫齡（Chang, 1971）綜合震測、重力及地面調查等資料，推論車籠埔斷層的斷面向東傾斜 40 度，為桂竹林層向西逆衝至頭嵙山層。王乾盈等（2000）則由淺層反射震測結果配合地表地質與中油公司的深部震測剖面，研判集集地震斷層是沿著錦水頁岩底部逆衝而上。

根據地礦中心在車籠埔斷層北段潭子地區數條淺層震測測線剖面（OOP-CLP-CST03 及 OOP-CLP-CST05，石瑞銓等，2000），由反射信號可看出測線東側岩層向東傾斜，而西側的地層有向西引曳而彎曲的現象，且不同高度皆出現向西引曳現象，暗示此處存在 2 條斷層；西側斷層的地表延伸處，位於平原上，而東側斷層約位在階地

崖邊；剖面再向東即為地震斷層露頭，位於卓蘭層內；這 3 處的斷層位置極可能為同一斷層帶在不同時期的活動所造成；西側 2 條斷層可能是更早期的地震斷層。臺中大坑淺層震測測線（02P-CLP-DK-1，石瑞銓等，2002）位於臺中市北屯區中臺技術學院前河流北岸，重合剖面也顯示出類似的結果，指示在集集地震的地表斷層帶以外，可能尚有其他斷層的存在。

霧峰地區淺層震測，共有 4 條測線（石瑞銓等，2002）：霧峰震測測線（測線 OOP-CLP-CSWOI）的同中點重合剖面中，地下淺部岩層受到極大的擾動，經比對地表出現的隆起與破裂處，兩者並不一致。震測結果顯示，集集地震地表破裂造成地下淺部岩層的擾動，此外剖面中亦有發現其他的破裂存在。在車籠埔斷層南段有 6 條淺層反射震測測線，草屯登輝路震測測線（OOP-CLP-CTOI，石瑞銓等，2002）剖面的地下構造影像極一致，顯示反射信號受到極大的擾動，地層受到抬升並且擾動。至於草屯鎮隘寮地區共有 3 條震測測線（石瑞銓等，2002），本測區 3 剖面地下構造影像皆顯示岩層錯移現象明顯且不連續帶較寬，然而挖溝資料顯示淺部並無明顯的斷層，可能僅是褶皺作用造成地表破裂。

集集地震發生於 1999 年 9 月 21 日，芮氏規模 7.3，震央位於日月潭西方 12.5 公里，震源深度 8 公里，地表破裂除了車籠埔斷層長度 76 公里，另外斷層北端在豐原市北陽里以東產生新的破裂，長度約 16 公里（經濟部中央地質調查所，1999）；大尖山斷層的地表破裂長度約 11 公里（林啟文等，2000）1999 年地震時，車籠埔斷層北段有多處地點可以看到斷層沿著錦水頁岩產生滑動所造成的斷層崖，其餘地點因為人工建築、稻田與沖積層覆蓋，所見到地表變形大多以撓曲崖、地表破裂與隆起抬升等為主，在石岡以東地區，則大多以錦水頁岩的層間滑動為主，在石岡至卓蘭之間形成一個寬緩的背斜構造（李元希等，2000；陳文山等，2000）。車籠埔斷層南段，除了在名間鄉斷層滑動面多位於錦水頁岩與卓蘭層的交界附近以外（林啟文等，2003），地表變形大多以撓曲崖為主，以及地表破裂與隆起抬升等，很少有斷層崖出現。綜合來說，地表變形所造成的地形崖有由北向南逐漸降低的趨勢，於九二一地震地質調查報告（經濟部中央地質調查所，1999）中有詳細報導。

1999 年集集地震後，陳文山等（2002，2003，2004，2005，2006；Chen et al., 2001a，2001b；2003，2004，2006，2007）於車籠埔斷層沿線進行許多槽溝開挖工作：車籠埔 1 號槽溝又稱為豐原中正公園槽溝（陳文山等，2002）；車籠埔 2 號槽溝又稱為大里文山農場槽溝；霧峰鳳梨園槽溝（Chen et al., 2004）；霧峰鳳梨園 B 槽溝剖面；車籠埔 3 號槽溝又稱為霧峰仙公廟槽溝（Chen et al., 2003）；仙宮廟槽溝；南投釋迦園槽溝（Chen et al., 2003）；竹山 1 號槽又稱為南投竹山槽溝（Chen et al., 2007）。陳文山等（2006；Chen et al., 2007）整合車籠埔斷層的十數個槽的調查結果（Chen et al., 2001a，cb；2003，2004），以及其他研究者的成果（Ota et al., 2001；2007），過去 3,000 年以來車籠埔斷層形成地表破裂的地震次數共有 7 次，發生時間如下，西元 1999 年、距今 365±65 年前、距今 735±55 年前、距今 905±15 年前、距今 1,540±160 年前、距今 1,805±95 前與距今 3,000±160 年前。最後 6 次古地震之間的發生時距最小約 200 年，最長約 700 年；最老兩次古地震的時距相距約 1,200 年，似乎較之後的地震時距長，原因可能是之間應尚有多次的古地震事件未被發現。

經由多個槽資料分析，獲得的長期滑移速率為 6.94 mm/yr，其同震的累積變形量（Y）與地震時距（X）的迴歸線性方程式為 Y=0.00694X-0.29，迴歸線性方程式的相關係數為 0.98（R^2=0.98）。因此，車籠埔斷層的發震模式屬於時間可預測的再發性模式（圖 1-21，time-predictable recurrence model），也就是當應力累積達到特定臨界值時，地震就可能會發生（Shimaki and Nakata，1960）。若以長期的滑移速率來推估車籠埔斷層下次可能的地震時間，約西元 2340±95 年（陳文山等，2006；Chen et al., 2007）。

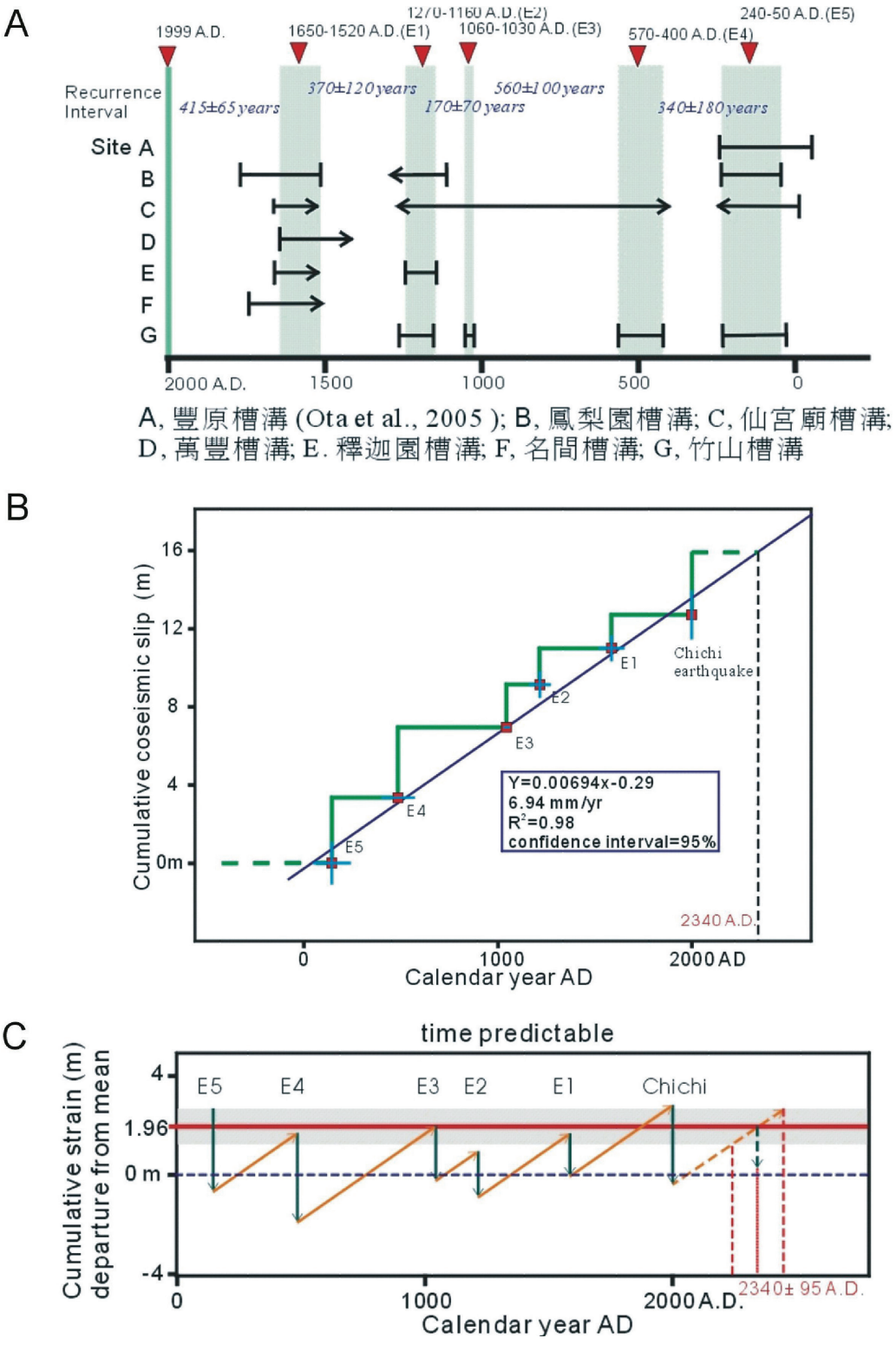


圖 1-21：車籠埔斷層古地震事件與發震模式（Chen et al., 2007）。A：各槽溝紀錄的古地震事件。B：車籠埔斷層同震累積變形量（Y）與地震時距（X）的迴歸線性方程式。C：車籠埔斷層下次可能的地震時間。

Figure 1-21：Paleoseismic Events and Seismic Patterns of the Chelungpu Fault (Chen et al., 2007). (A) Paleoseismic events recorded in various trenches. (B) Regression equation of cumulative deformation (Y) and time interval (X) for Chelungpu Fault earthquakes. (C) Predicted time of next likely earthquake for the Chelungpu Fault.

饒瑞鈞等（2006）以 GNSS 分析跨車籠埔斷層北段的跨斷層速度場變化，1996~1999 年間，在涵蓋大甲斷層、車籠埔斷層北段、大茅埔 雙冬斷層北段的剖面中，垂直斷層走向的速度由 17.5 mm/yr，向西減少至 7.7 mm/yr 平行斷層走向的速度由 2.0 mm/yr，向西增加至 3.7 mm/yr；其中，跨過車籠埔斷層北段的速度場變化，平行斷層走向的分亘為 1.1 mm/yr，呈左移形式，垂直斷層走向的分亘為 0.4 mm/yr，呈壓縮形式；高程方向抬升速率為 0.5 mm/yr，顯示車籠埔斷層北段在 1996~1999 年間為鎖定狀態。2000~2006 年間，在涵蓋大甲斷層、車籠埔斷層北段、大茅埔 - 雙冬斷層北段的剖面中，垂直斷層走向的速度由 12.1 mm/yr，向西減少至 2.5 mm/yr；平行斷層走向的速度由 11.4 mm/yr，向西減少至 -3.2 mm/yr；其中，跨過車籠埔斷層北段的速度場變化，平行斷層走向的分量為 7.6 mm/yr，呈左移形式，垂直斷層走向的分量為 6.9 mm/yr，呈壓縮形式；高程方向抬升速度為 1.2 mm/yr 由速度分析結果顯示，車籠埔斷層北段在 2000~2006 年間為具左移分量的逆移作用。

車籠埔斷層南段的跨斷層速度場分析結果（饒瑞鈞等，2006）：1996~1999 年間，在涵蓋彰化斷層、車籠埔斷層南段與大茅埔 雙冬斷層的剖面中，垂直斷層走向的速度由 13.4 mm/yr，向西減少至 4.4 mm/yr；平行斷層走向的速度由 10.3 mm/yr 向西減少至 6.5 mm/yr，其中，跨過車籠埔斷層南段的速度場變化量，平行斷層走向的分量為 4.0 mm/yr，呈左移形式；垂直斷層走向的分量為 3.5 mm/yr，呈壓縮形式；高程方向抬升速率為 19.1 mm/yr；由速度分析結果顯示，車籠埔斷層南段在 1996~1999 年間為鎖定狀態。2000~2006 年間，涵蓋彰化斷層、車籠埔斷層南段、大茅埔 - 雙冬斷層南段的剖面中，垂直斷層走向的速度量由 16.7 mm/yr，向西減少至 -3.0 mm/yr；平行斷層走向的速度量由 5.2 厘 / 年，向西減少至 2.6 mm/yr；其中，跨過車籠埔斷層南段的速度場變化量，平行斷層走向的分量為 8.2 mm/yr，呈左移形式；垂直斷層走向的分量 9.1 厘 / 年，呈壓縮形式；高程方向抬升速率為 9.1 mm/yr；由速度分析結果顯示，車籠埔斷層南段在 2000~2006 年間為具左移分量的逆移形式。

饒瑞鈞等（2006）在車籠埔斷層南端進行跨斷層速度場分析，結果顯示 1996-1999 年間，在涵蓋車籠埔斷層南段、大茅埔 - 雙冬

斷層南段的剖面中，垂直斷層走向的速度由 16.3 mm/yr，向西減少至 3.8 mm/yr，平行斷層走向的速度由 10.9 mm/yr，向西減少至 1.3 mm/yr。其中，跨過車籠埔斷層南段的速度場變化，平行斷層走向分量為 6.1 mm/yr，為左移形式，垂直斷層走向的分量為 8.9 mm/yr，為壓縮形式，高程方向抬升速率為 1.0 mm/yr；因此根據速度分析結果顯示，車籠埔斷層南段於 1996~1999 年間為具有左移分量的逆移形式。在 2000~2006 年間，涵蓋車籠埔斷層南段、大茅埔 - 雙冬斷層南段的剖面中，垂直斷層走向的速度由 35.1 mm/yr，向西減少至 -0.8 mm/yr；平行斷層走向的速度由 13.7 mm/yr，向西減少至 -0.9 mm/yr 其中，跨過車籠埔斷層南段的速度場變化，平行斷層走向的分量為 8.6 mm/yr，呈左移形式；垂直斷層走向的分量為 9.7 mm/yr，呈壓縮形式，高程方向抬升速度為 10.1 mm/yr；根據速度分析結果顯示，車籠埔斷層南段於 2000~2006 年間為具左移分量的逆移形式。

饒瑞鈞等（2006）的精密水準測量結果，王功至草屯測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔 - 雙冬斷層，2002~2006 年共 4 次施測，測線通過車籠埔斷層的高程差變化量在 10 mm 以內，變化並不顯著。而北斗至水里測線，由第 1 次與第 2 次結果，在名間地區水平約 3 公里間距內，通過車籠埔斷層有一近 30 mm 的高程差變化，顯示車籠埔斷層在此地區有較高的活動性。

1-5-1-5 大茅埔 - 雙冬斷層

大茅埔 - 雙冬斷層為一逆移斷層，以大甲溪為界可分為 2 段：北段稱為大茅埔斷層（何春蓀，1959），呈東北走向，由臺中縣和平鄉烏石坑，向西南延伸至東勢鎮慶東里（大茅埔），長約 14 公里；南段稱為雙冬斷層（大江二郎，1938），約呈南北走向，由大甲溪南岸新社鄉向南延伸至南投縣鹿谷鄉，長約 55 公里（圖 1-22、圖 1-23 及圖 1-24）。大茅埔 - 雙冬斷層截切頭嵙山層礫岩，其形成時代應在更新世中晚期以後。在 1999 年集集地震時，大茅埔 - 雙冬斷層有地表破裂現象，但並未有明顯的大量位移，多為沿斷層跡有噴沙或噴泥現象；斷層上盤在集集地震時有明顯的抬升現象，顯示斷層仍有再活動趨勢。由地殼變形監測結果看來，大茅埔 - 雙冬斷層在 1999 年集集地震前上下盤即有位移速度差，在集集地震時，上下盤亦有明顯的水平速度差，

且在地震 6 年後地殼仍處在調適變形狀態，然而精密水準測量結果顯示斷層兩側高程差變化並不顯著。大茅埔 - 雙冬斷層目前列為第一類活動斷層。

本區主要地形包括位於斷層西側的東勢丘陵與豐原山地，以及斷層東側的西部衝上斷層山地（林朝棨，1957）。從本區的數位地形模型看來，大茅埔 - 雙冬斷層跡並未有明顯的線形，但斷層跡兩側地形卻有顯著差異·斷層東側主要嶺線呈東北走向，西側呈東西走向，斷層大致通過地勢由陡至平緩處。在東勢鎮中坑地區，大茅埔斷層上盤出露南莊層，岩層為東北走向、向南呈中度傾斜；下盤出露卓蘭層，岩層為東西走向、向南緩傾斜，在地勢上造成明顯落差。在東勢南方的大茅埔地區，斷層上盤的桂竹林層與下盤的頭嵙山層也造成明顯的鞍部特徵。

大甲溪以南，雙冬斷層沿線也有明顯的地勢差異，斷層東側的山脈延伸長且寬廣，稜線約呈直線狀，主要嶺線呈南北走向，西側為南北走向的豬背脊地形，在礫岩分布區形成鋸齒狀山峰地形。在太平市樹頭寮地區，斷層上盤出露桂竹林層，下盤出露頭嵙山層，因斷層作用形成鞍部地形。在南投縣中寮的哮貓地區，斷層上盤出露的十四股層與下盤出露的頭嵙山層，因岩性差異造成地勢差異。本區出露的地層包括碧靈頁岩、十四股層、炭寮地頁岩、石門村層、猴洞坑層、福隆園層、南莊層、桂竹林層、卓蘭層、頭嵙山層、階地堆積層與沖積層碧靈頁岩，以黑色頁岩為主，間夾薄層灰色砂岩與頁岩之互層，頁岩中常夾有結核及化石。

邱華燈（Chiu, 1962）在雙冬西南方 2 公里的河床報導露頭，可見到中新世南港層向西逆衝至頭嵙山層礫岩之上，斷層面位態為 N50° E/55° E。羅偉等人（1999）經由野外觀察，推論雙冬斷層可能是高角度向東傾的逆移斷層，但傾角在淺部逐漸變緩，斷層兩側層位落差可超過 1，500 公尺。黃鑑水等人（2000）在雙冬西南方的露頭觀察到斷層破碎帶寬度約 50 公尺；在中寮溪及平林溪與粗坑溪交會處，斷層上盤為十四股層，下盤為頭嵙山層礫岩，且在平林溪斷層帶寬約 20 公尺，在粗坑溪斷層破碎帶厚度超過 20 公尺，斷面向東傾斜 40 度，斷層帶為河階礫石層所覆蓋。黃鑑水與陳勉銘（2000）在烏溪以南地區曾報導 3 個雙冬斷層的露頭，斷層帶的寬度約 20~50 公尺，斷

層面向東傾斜 35~45 度，斷層的最大層位落差超過 3,000 公尺；由於烏溪以南其他橫向或縱向斷層均為雙冬斷層所截切，因此雙冬斷層應為此區一條持續維持活動的重要斷層。邱華燈（Chiu，1975）由中油公司在粗坑背的粗坑 1 號井資料觀察雙冬斷層至下盤的頭嵙山層，估算斷層的傾角為 45 度。

根據野外調查結果，斷層跡沿線有數個凹陷狀地形特徵，應為岩層因抗蝕能力較兩側差，在斷層通過處形成斷層線鞍部（fault line saddle）的結果（林啟文等，2008）；這些斷層線鞍部兩側山頭的岩性截然不同，斷層跡西側為礫岩，東側則以砂岩為主。由新社南方南華莊地區橄欖樹休閒農莊旁 2 處露頭的調查結果，雙冬斷層通過雙連潭附近、新社階地南端，在南華莊地區為近南北走向。在草屯鎮雙冬南方的馬鄰坑地區，有一雙冬斷層的露頭，斷層上盤出露深坑砂岩（相當南港層），下盤為頭嵙山層礫岩夾砂岩，斷層帶介於兩層泥岩之間，斷層帶中有受剪動的獨立砂岩岩塊，斷層帶下方為厚 10 公尺的黑灰色斷層泥帶，且斷層泥帶直接與頭嵙山層礫岩接觸，礫岩中的礫石有剪裂現象，整個斷層帶厚度超過 50 公尺。在此露頭的西方約 200 公尺處，尚有一小型的逆移斷層，可能是雙冬斷層下盤所發育的分支斷層。

1999 年集集地震，黃鑑水等（2000）的調查結果，雙冬斷層在集集地震時並未有明顯的大量位移，但沿斷層跡有噴沙或噴泥，形成沙火山或泥火山；在中寮平林溪的斷層跡位置，河床沉積層呈階梯式落差斷裂，累計上盤錯距超過 30 公分，隆起沙脊斷裂與噴沙排列與斷層走向一致；集集往水里的快速道路在斷層跡附近有密集的隆起現象；雙冬南方的馬鄰坑一帶，雙冬斷層下盤的頭嵙山層中有兩處逆移斷層再活動的跡象，移距為 10~20 公分，皆有左移分量，斷層露頭處有大量崩塌現象。

侯進雄（2007）的 GNSS 分析結果，大茅埔 - 雙冬斷層在 1999 年集集地震之前（1996~1999 年），斷層下盤的水平位移向西北西或西北方，速率約 10~17 mm/yr，斷層上盤的水平位移也向西北西或西北方，速率約 15-28 mm/yr。在震後時期（2000-2005 年），斷層下盤的水平位移向西北西方，速率由約 20~60 mm/yr，逐漸降至 17~45 mm/yr；斷層上盤的水平位移向西北西方，速率由約 20~60 mm/yr，

逐漸降至 8~34 mm/yr，顯示在大地震之後 6 年，地殼仍處在調適變形狀態。

饒瑞鈞等（2006）自 2002~2006 年間共施測 4 次的精密水準測量顯示，橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔 - 雙冬斷層的王功至草屯測線以及北斗至水里測線，在通過大茅埔 - 雙冬斷層地區時，高程差變化量皆在 10mm 以內，改變並不顯著。其中北斗至水里測線在第 2 次與第 3 次結果發現車籠埔斷層上盤（涵蓋大茅埔 - 雙冬斷層）約 14 公里距離內，有約 25 mm 的高程變化量，顯示車籠埔斷層於集集地震過後約 5 年仍然有持續活動，但和大茅埔 - 雙冬斷層的關係則有待確認。

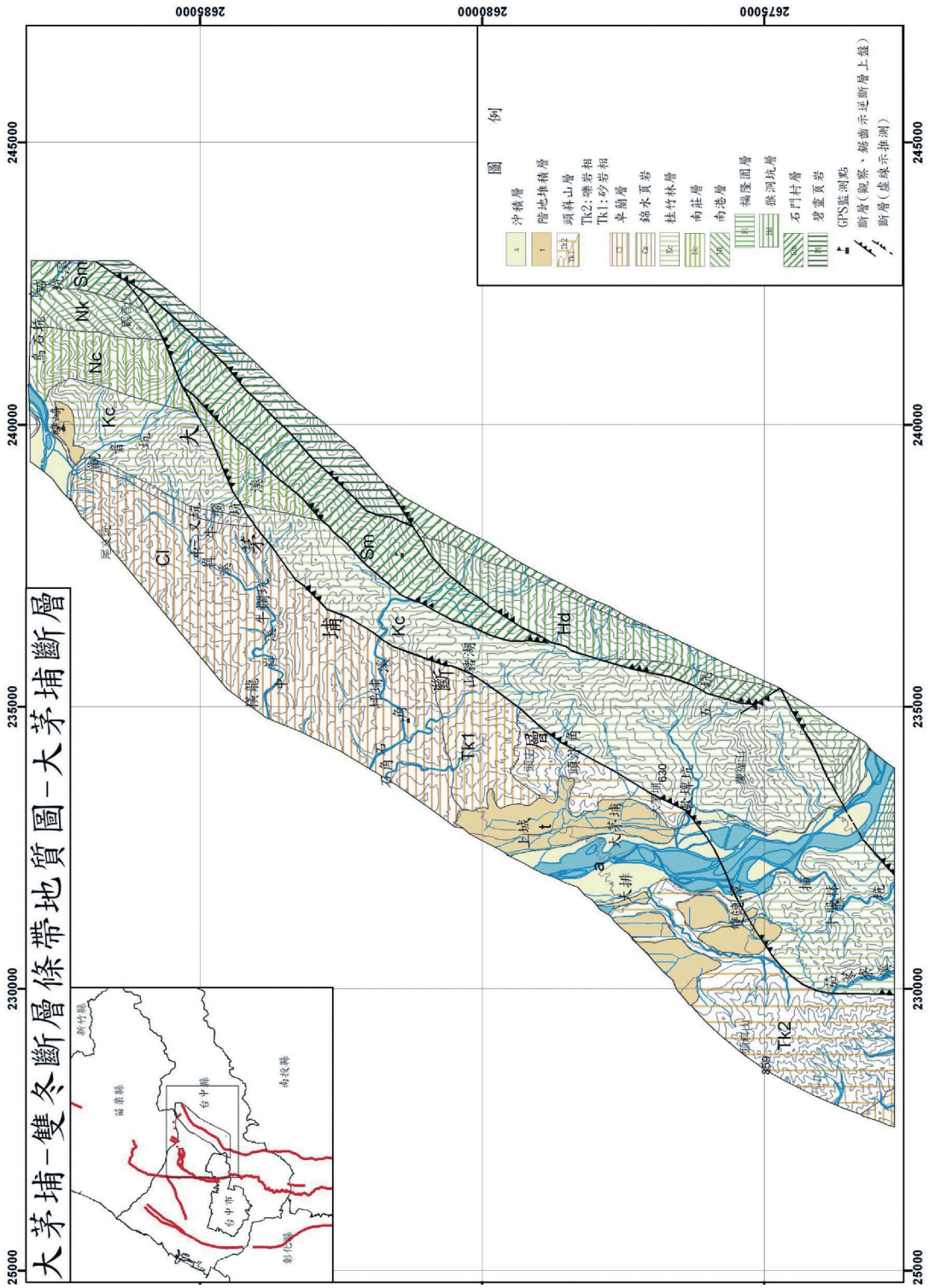


圖 1-22：大茅埔 - 雙冬斷層條帶地質圖，大茅埔斷層部分（林啟文等，2008）。

Figure 1-22：Geological Map of the Tamaopu-Shuangtung Fault, the section of the Tamaopu Fault.

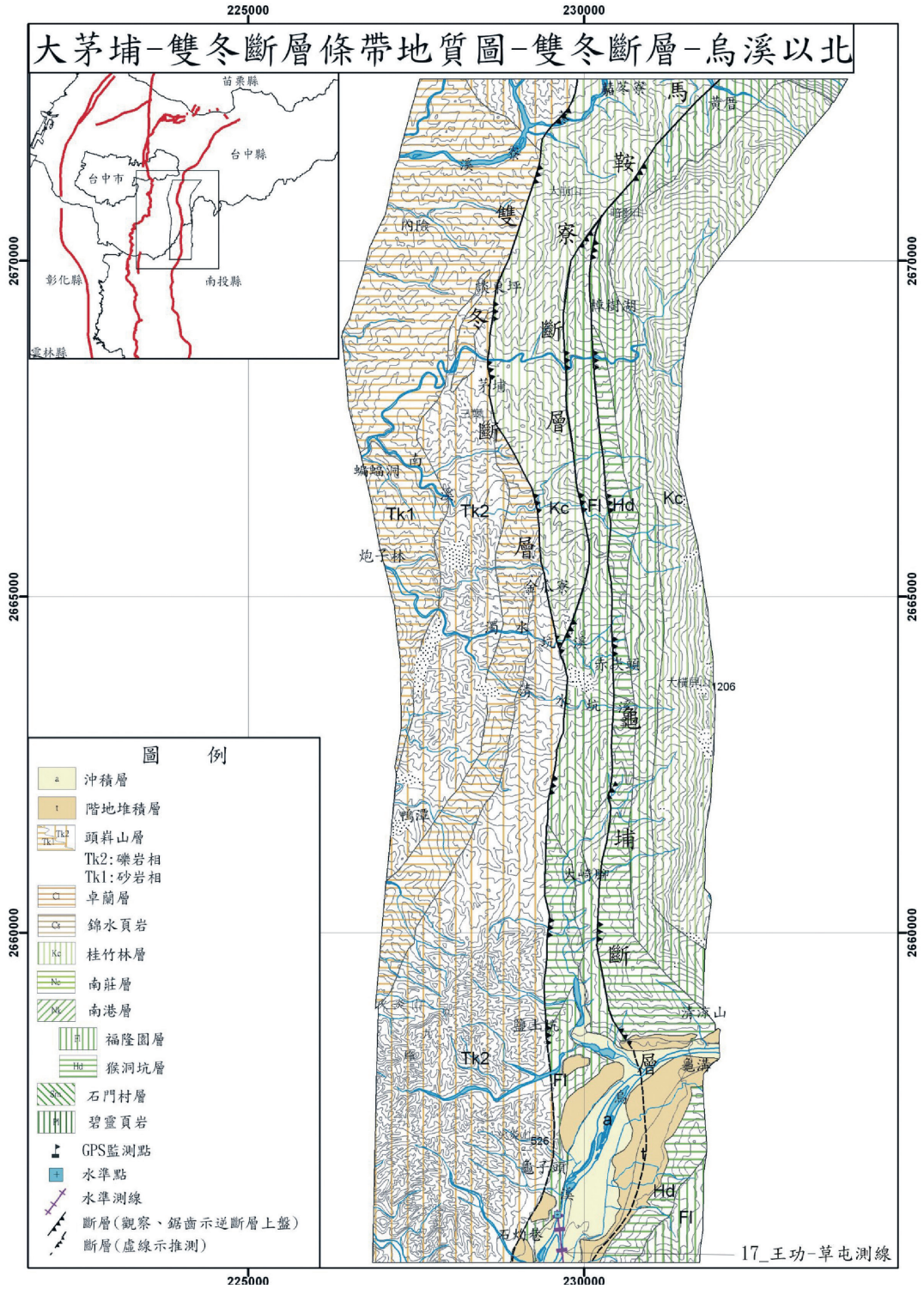


圖 1-23：大茅埔 - 雙冬斷層條帶地質圖，雙冬斷層烏溪以北部分（林啟文等，2008）。

Figure 1-23：Geological Map of the Tamaopu-Shuangtung Fault, the northern part of the Shuangtung Fault and Wu River.

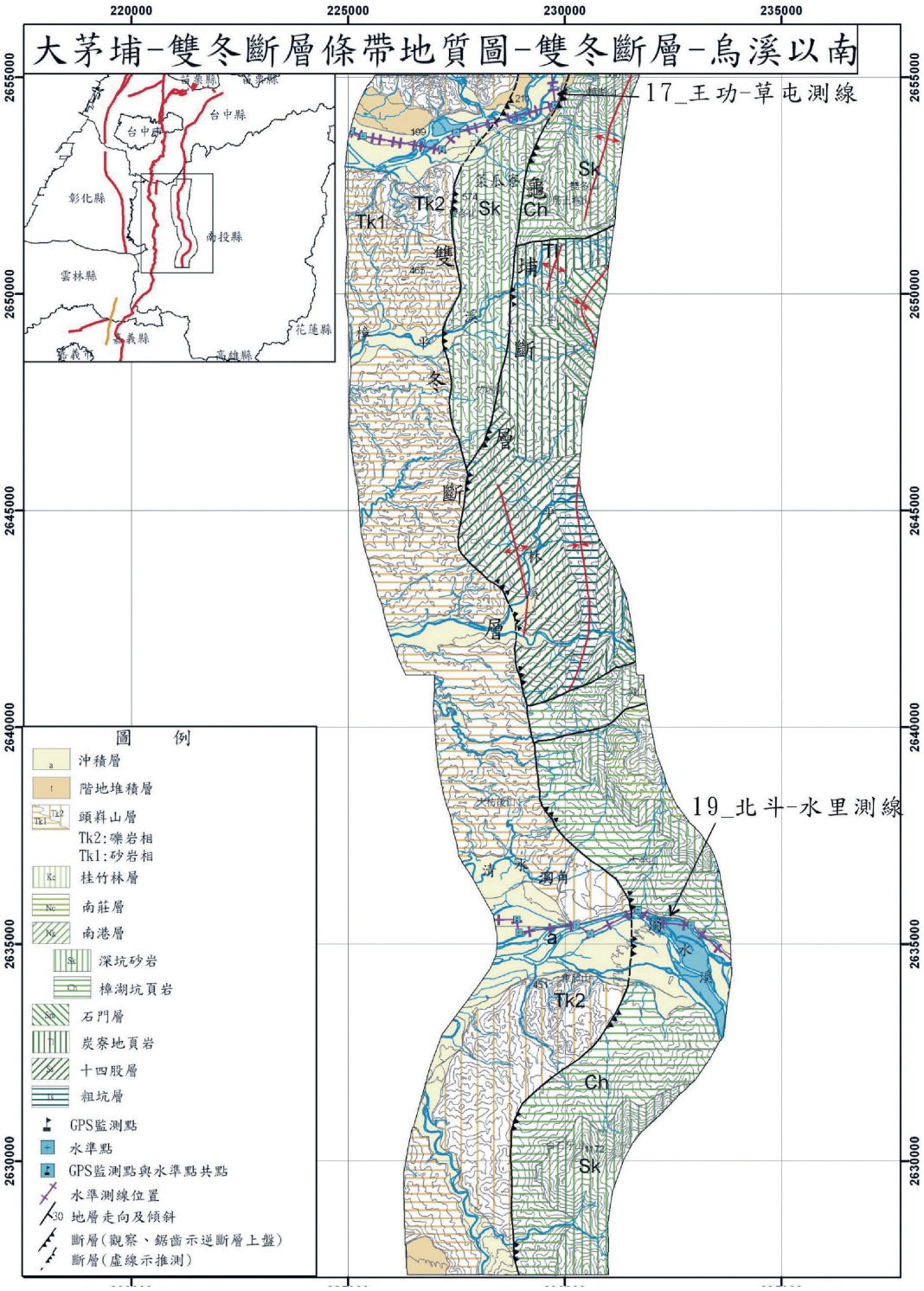


圖 1-24：大茅埔 - 雙冬斷層條帶地質圖，雙冬斷層烏溪以南部分（林啟文等，2008）。

Figure 1-24：Geological Map of the Tamaopu-Shuangtung Fault, the southern part of the Shuangtung Fault and Wu River.

1-5-1-6 初鄉斷層

初鄉斷層為東北走向的逆滑斷層（劉桓吉與李錦發，2000；林啓文等，2019），斷層跡長約 19.8 公里，由南投縣中寮鄉廣興向南延伸經濁水溪、東埔蚋溪至竹山南方，往南在竹山附近併入車籠埔斷層，廣興以北之斷層為推測，尚無法確認其是否與雙冬斷層連結（圖 1-25 及圖 1-26）。Chen et al.（2003）曾報導斷層截切更新世（約 13585 yr）階地堆積物，配合其他野外調查，顯示初鄉斷層為近期曾經活動的斷層，因此目前列為第二類活動斷層。

就地形而言，在濁水溪北岸，斷層兩側主要為低矮丘陵，地形特徵並未有明顯差異。濁水溪至初鄉底，斷層兩側均為山地，呈現南北走向的線形崖，東側海拔較西側高 200 公尺以上，位置約為斷層跡的延伸。東埔蚋溪南北兩側的階地，有受到斷層錯移而傾動現象，線形崖可追蹤約 800 公尺。初鄉斷層在東埔蚋溪以南併入車籠埔斷層，此處線形崖呈現東高西低的地勢，兩側高程差超過 300 公尺。

初鄉斷層沿線出露的地質型態可分為兩段：濁水溪以北，斷層上盤出露卓蘭層與頭嵙山層；除了在濁水溪河床出露的頂溪州背斜之外，由岩性與層態，集集西北方可能存在背斜構造；斷層下盤則出露呈同斜構造卓蘭層與頭嵙山層。東埔蚋溪以南，斷層上盤出露桂竹林層、錦水頁岩與卓蘭層，呈同斜構造；斷層下盤出露卓蘭層，有許多小型褶皺構造。往最南段，初鄉斷層在柿子林西北方併入車籠埔斷層，斷層上盤出露桂竹林層，低傾角向東傾斜，下盤出露頭嵙山層礫岩。

濁水溪以北，初鄉斷層少有良好出露點，僅能由岩性與岩層位態來推論斷層可能通過的位置。在名竹大橋以東，斷層沿河床有良好的出露：車籠埔斷層位於名竹大橋東方約 600 公尺處，錦水頁岩逆衝於礫石層之上，斷層核心為深黑色高度剪裂斷層泥，由南北岸延伸對照，主斷層位態為走向 N5° E，傾角 47° E。斷層下盤岩層受擾動變形的寬度僅 2-3 公尺寬；斷層上盤岩層變形甚劇，寬度 100-200 公尺寬，南北兩岸皆有波長數公尺褶皺及錯動量數公尺的斷層；緊鄰主斷層 10-15 公尺範圍內變形劇烈，泥岩內有剪碎的豆莢狀砂岩，也有平行主斷層的剪切面。

集集攔河堰西側約 1 公里處，初鄉斷層上盤出露向東北傾沒的頂溪州背斜，軸部偶有小型斷層；背斜西翼岩層由近軸部的東北走向、傾角約 30-60 度，向西側逐漸轉為約東西走向，近乎垂直，岩層也相對破碎，有許多錯距數公尺的斷層。東埔蚋溪初鄉橋東側河床，初鄉斷層上盤桂竹林層逆衝於卓蘭層與階地堆積層之上（林啓文等，2008）。東埔蚋溪以南，並未發現斷層露頭，但斷層兩側地形有明顯差異，應源自於桂竹林層與卓蘭層或頭嵙山層的岩性差異。

由斷層上下盤垂直抬升量、斷層傾角、以及錯移的地形面或沉積物，來估算初鄉斷層的長期滑移速率，有以下結果：Chen et al.（2003）採集東埔蚋溪河階地沉積物碳標本，定年結果為 13585 ± 265 cal BP，這是目前為止初鄉斷層錯移最年輕沉積物的年代。Simoes et al.（2007）針對東埔蚋溪進行階地調查，根據截切階地的底岩高差 28±11 公尺來計算，若斷層面與層面平行約傾角 56 度，則斷層滑移量為 34 ± 13m，平均滑移速率為 2.5 ± 1.1 mm/yr。黃文正等（2019）採用相同的斷層傾角與階地沉積物年代，但改以相同階地表面作為上下盤的高度差，由此估算斷層垂直抬升量 85 ± 7m，斷層滑移量為 102±9m，長期滑移速率則約為 7.5 mm/yr。因此，考慮垂直斷距高度差的誤差範圍，初鄉斷層的長期滑移速率約為 2.5-7.5 mm/yr。

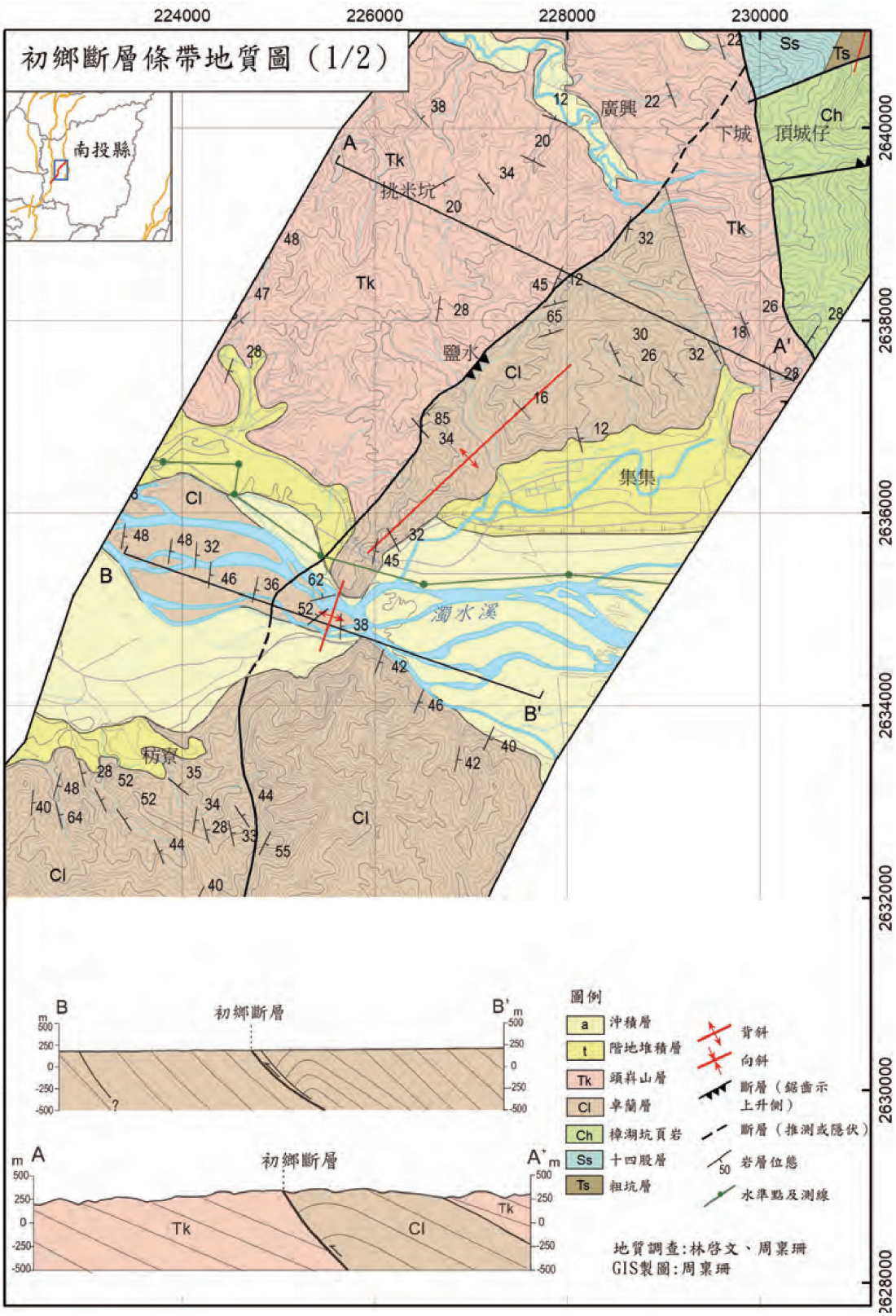


圖 1-25：初鄉斷層條帶地質圖 1/2（林啟文等，2021），原圖比例尺為 1：25,000。

Figure 1-25：Strip Map of the Chuhsiang Fault (1/2), original scale 1：25,000.

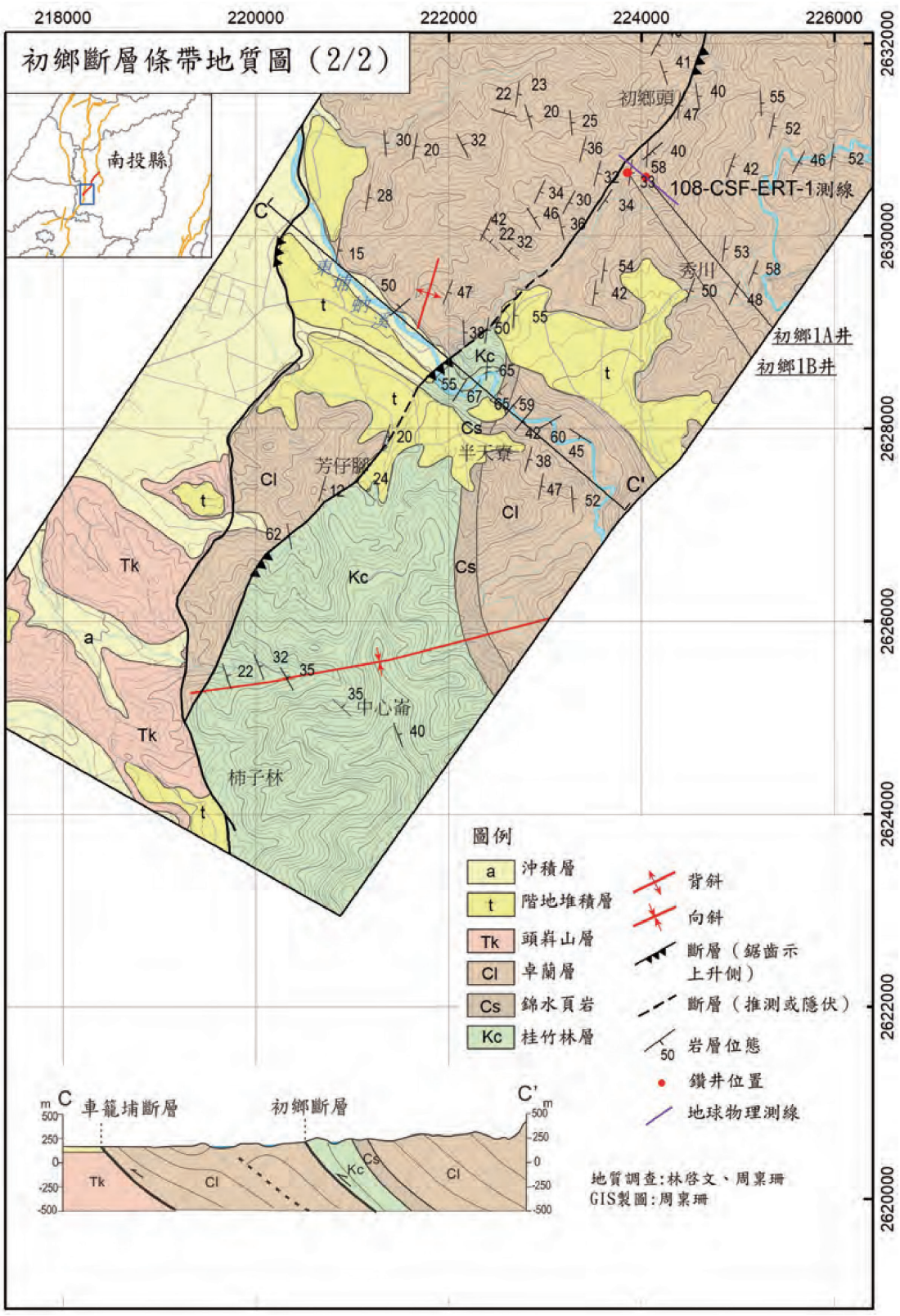


圖 1-26：初鄉斷層條帶地質圖 2/2（林啟文等，2021），原圖比例尺為 1：25,000。

Figure 1-26：Strip Map of the Chuhsiang Fault (2/2), original scale 1：25,000.

1-5-2 本年度工作項目

I. 本年度（113 年度）針對中部地區的六條斷層（包含包含大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔 - 雙冬斷層、初鄉斷層等區域）與中部科學園區、臺中都會區等重要區域進行研究（圖 1-2）。

II. 我們預計利用雷達差分干涉方法觀察地表變形，其中包含 2014-2018 年度、2018-2021 年度以及 2022-2023 年度三個時段的雷達差分干涉處理結果。這些結果會與約 150 個 GNSS 連續站做對比以及檢測。另外會針對移動站及水準測量做對比。

III. 經過對比後，於觀測區域中會在北、中、南區至少各產生一條剖面，呈現雷達解算後的地表變形速率，也會選三條截切斷層之剖面萃取速度資訊後，利用斷層反演模型推估斷層滑移速率。

IV. 另外針對觀測區域的 GNSS 連續站的時間序列做分析與比對，並在至少十個重要區域做地表變形時間序列分析與呈現。

1-5-2-1 本年度計畫期中交付工作項目

1. 研究區域中三個時間段（2014-2018, 2018-2021, 2022-2023）的升降軌視衛星方向平均速率。
2. 垂直斷層方向剖面之視衛星方向平均速率變化。
3. 初步三個時間段（2014-2018, 2018-2021, 2022-2023）的升降軌視衛星方向平均速率與 GNSS 連續站轉換視衛星方向平均速率之比對。

1-5-2-2 本年度計畫期末交付工作項目

1. 研究區域中三個時間段雷達視衛星方向速率（2014-2018, 2018-2021, 2022-2023）。
2. 雷達速度場與大地測量資料 (GNSS 連續站及移動站、水準測量) 比對。
3. 針對斷層兩側之雷達速度場變化量大者，進行垂直斷層之剖面雷達速度場分析。

4. 三條利用雷達資料擬合之斷層滑移量模擬與分析。
5. 重要觀測位置之地表變形時間序列分析。

第二章、計畫執行方法及進行步驟

2-1 雷達差分干涉

早期處理 PSI 的過程中，必須注意 SAR 感測器的狀態、可使用的影像圖幅數量、以及衛星軌道的基線長 (Baseline) 差異，然而隨著歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 於 2014 年開始發射了 Sentinel-1 衛星之後，上述問題已逐漸消弭。Sentinel-1 衛星持續性的重複拍攝能力 (再訪週期為 12 天)，以及穩定的軌道控制技術 (理論上每幅影像對的基線長可控制在正負 50 公尺之內)，再加上 2016 年 ESA 又發射另一顆相同的 Sentinel-1B 衛星，使得應用 SAR 衛星影像進行高時空解析度的地表變形監測之想法付諸實行。

除了上述衛星本身的限制外，研究區域內的永久散射體之質量與密度、地表變形的活動特性、參考點與各 PS 點位之間的距離、以及參考點本身的品質都是需要被考量的。臺灣中部地區有多條的活動斷層，並且以往有明顯的抽取地下水導致地層下陷（彰化雲林地區），因此地表變形訊號是綜合各項可能造成變形的因素而成。臺中市人口數僅次於新北市，近年發展許多重要的公共設施與建設，因此任何的地表變形都會影響民眾，其中活動斷層對此的影響又特別明顯。

因此透過 PSI 技術針對臺灣中部的活動斷層與構造線形進行全面性的監測，將有利於我們藉由地表變形的資訊，進一步了解研究區域的構造活動特性。

綜合上述考量，本計畫使用 Sentinel-1 衛星作為主要之分析影像，其影像可覆蓋整個研究區域 (如圖 2-1)，飛行軌道包含升軌和降軌，可獲得不同拍攝角度之成果，再搭配重複拍攝頻率為 6~12 天，是非常適合用來監測本計畫的研究區域，更多的影像相關資訊，請詳見表 2-1。在中部地區，2016 年美濃地震與 2018 年花蓮臺東大地震可能影響不大，然而由於 2022 年 Sentinel-1 資料品質不穩定、接收頻率不固定，所以處理影像時預計將 2022~2023 年的獨立出來，而前期則分為早期拍攝頻率 12 天的 2014~2018 時期，以及中期拍攝頻率 6 天的 2018~2021 時期。我們會將影像處理分成三個階段：(I)2014~2018

的地表位移、(II)2018~2021 的地表位移、(III)2022~2023 地表位移，探討不同階段的地表變動量。

表 2-1：Sentinel-1 衛星影像資訊。

table 2-1：Background information of Sentinel-1 images in this project.

影像時間段	飛行軌道	拍攝模式	再訪頻率	處理划幅	影像數量
時間段 (I) 2014-2018	升軌 Path：69	TOPS	12 天	Subswath： 1+2 (F1+F2)	88
	降軌 Path：105	TOPS	12 天	Subswath： 2+3 (F2+F3)	63
時間段 (II) 2018-2021	升軌 Path：69	TOPS	6-12 天	Subswath： 1+2 (F1+F2)	221
	降軌 Path： 105	TOPS	6-12 天	Subswath： 2+3 (F2+F3)	231
時間段 (III) 2022-2023	升軌 Path：69	TOPS	12 天	Subswath： 1+2 (F1+F2	61
	降軌 Path：105	TOPS	12 天	Subswath： 2+3 (F2+F3)	49

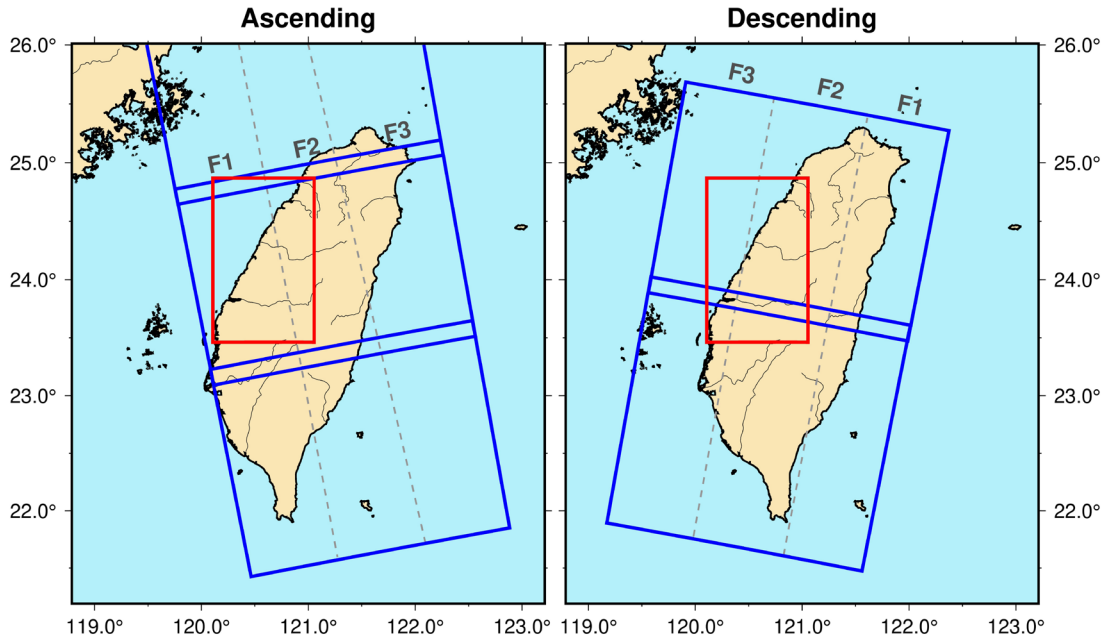


圖 2-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。

Figure 2-1 ： Orbits information of Sentinel-1 in the study area.

2-1-1 永久散射體雷達差分干涉技術 (PSI) 的基本概念

永久散射體雷達差分干涉技術為應用穩定的永久散射體反射回波，進而得到地表變形資訊。因此永久散射體需具備穩定的雷達波散射特性，常為表面不容易改變且對雷達波的散射不隨時間而改變的建築物、裸露岩石、道路等物體，這類點位所獲得的訊號可信度超過水域、山區及植被茂盛等其他區域，可提供訊噪比極高的訊號。永久散射體在雷達影像資訊上的特性可以分別從振幅資訊和相位資訊說明 (Osmanoglu et al., 2016)。從振幅資訊的角度來看 (圖 2-2)，假設強振幅的散射體 (Strong Scatterer, Ss) 和弱振幅的散射體 (Weak Scatterer, Sw) 遭受到一致的雜訊 (Noise, N) 干擾，Ss 的訊號在接收時會變成受到干擾的強振幅散射體反射訊號 (Strong Reflection, Rs)，而 Sw 的訊號在接收時會變成受到干擾的弱振幅散射體反射訊號 (Weak Reflection, Rw)。可見 Rw 訊號徑度改變較 Rs 大，表示雜訊干擾對於強振幅散射體 (Rs) 的影響比例較小，找出強振幅散射體 (Rs) 的訊號，有助於取得可信度較高的雷達振幅資訊。

另外，從相位資訊的角度來看 (圖 2-3)，當像素 (pixel) 中有一個強反射體，如：建物、大石頭，主導整個回波訊號的品質與資訊時，該像素的相位資訊在時間序列上會呈相當穩定的狀況。反之，如果一個像素內並沒有強的反射體主導反射訊號，則時間序列的相位資訊就容易呈現隨機變動的狀況，如：植被茂密區域。所以如何挑選出可以信賴的永久散射體，就是 PSI 這個演算法裡最重要的核心技術 (Hooper et al., 2012)。

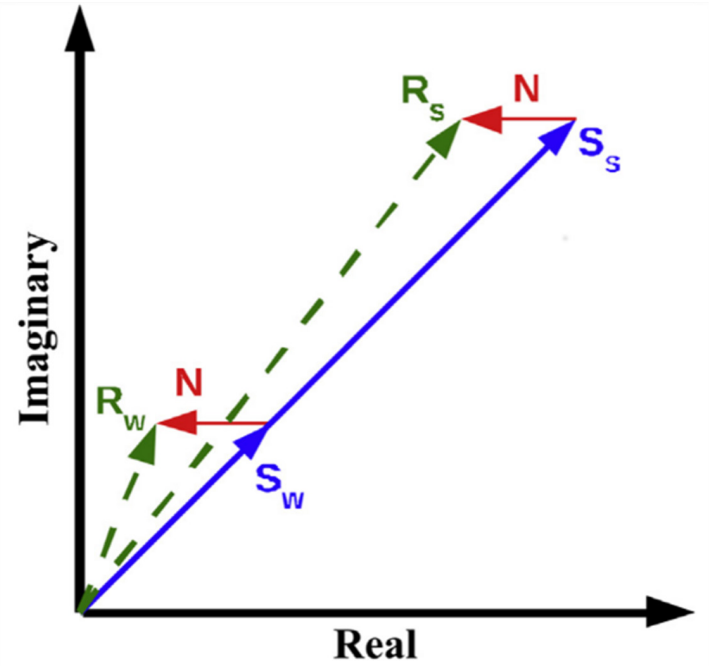


圖 2-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。(Osmanoglu et al., 2016)

Figure 2-2 ：Scatterer can generates various scatter and noise with different amplitudes. (Osmanoglu et al., 2016)

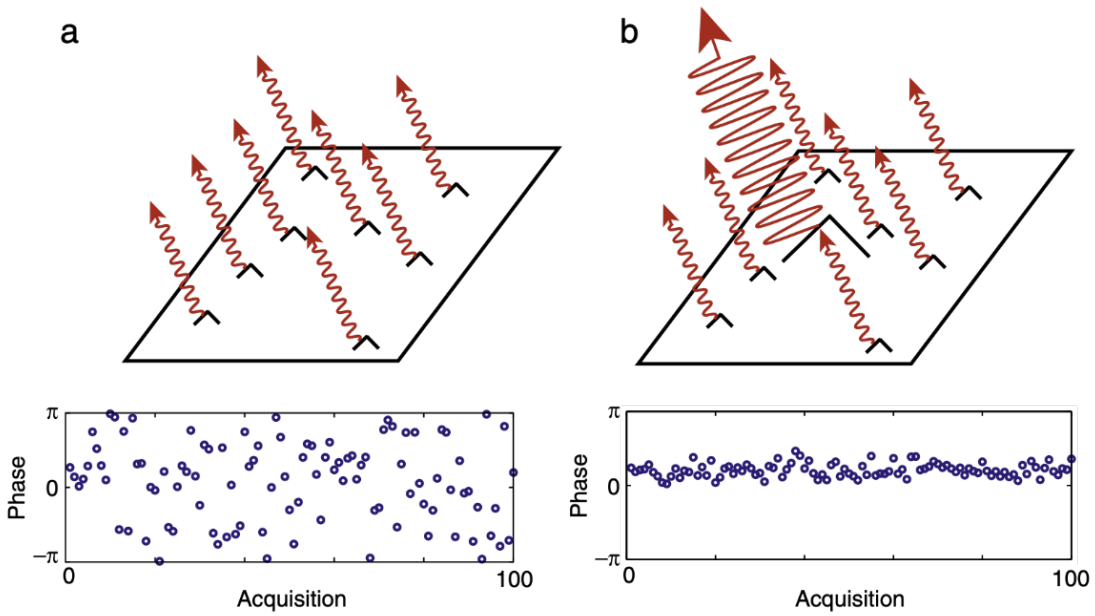


圖 2-3：永久散射體對相位的影響示意圖。(a) 一般散射體所反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(b) 一個像素之中有一個好的永久散射體時，反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(Hooper et al., 2012)

Figure 2-3：Illustration of phase in persistent scatterer. (a) time series of normal scatterer reflects radar phase; (b) a good reflector in a pixel will alter the reflect signals.

2-1-2 StaMPS 技術的 PS 點位選取概念

由於 PS 點是挑選於影像之中相位較穩定的點位，而相位的穩定性又與雷達波的回波強度及影像同調性有著正相關的關係，因此透過處理強度影像及同調性影像的資訊，可分別挑選出 PS 候選點 (PS candidate，PSC)，並且將這些候選點進行點位交集的分析，最後再透過時間序列的相位穩定度分析，篩選出真正的 PS 點位 (Hooper et al., 2004)。

在強度影像和同調性影像的分析中，利用 Ferretti 於 2001 年提出的方程式，挑選合適的 PSC：

$$D_A = \frac{\sigma}{\mu_A} \tag{2-1}$$

其中 D_A 在處理強度影像時，可為影像中像素之強度分佈指標 (Amplitude Dispersion Value)，當在處理同調性影像時，則為同調性分佈指標 (Coherence Dispersion Value)，同理，為各像素在時間序列上強度或同調性的標準差，μ_A 為各像素在所有影像中的平均強度或平均同調性。藉由強度和同調性分佈指數交集所獲得的點位就是 PSC。

假設在一定範圍內的 PSC 點位夠多時，其空間分佈情況是一個隨機分佈的狀態，這時平均範圍內 PSC 的雷達波相位差 ($\Phi_{x,i}$) 後，地形效應的誤差值便可在平均之後接近於零並忽略不計，再加上短距離內地表變化、大氣效應以及軌道效應的變化量極小，且於強度及同調性皆穩定的情況下，雜訊的干擾也很微弱，因此 PSC 單點相位差和平均相位差之間的差異，幾乎等於 DEM 誤差。藉由 DEM 的誤差與衛星的空間垂直基線長成一線性關係，因此可以估算出每個 PSC 的 DEM 誤差 ($\Phi_{\varepsilon,x,i}$)。當 PSC 的相位差 ($\Phi_{x,i}$) 減去平均的相位差 ($\Phi_{x,i}$) 和 DEM 誤差 ($\Phi_{\varepsilon,x,i}$) 之後，PSC 在空間上的相位誤差可假設已經去除，從而需要探討 PSC 相位在時間序列上的穩定度。因此，根據 Hooper 等人 (2004) 所提出的公式，我們將能尋求在時間序列上穩定的 PSC 相位：

$$\gamma_x = (1/N)\sum_{i=1}^{N} exp\sqrt{-1}(\phi_{x,i} - \bar{\phi_{x,i}} - \hat{\phi_{x,i}}) \tag{2-2}$$

其中 γ_χ 為第 χ 像素的相位於時間序列上的穩定程度，N 為干涉圖的數量。此後，我們便可訂定一門檻植，只要 PSC 的值小於，即可定義此 PSC 為真正的 PS 點。最後計算所挑選出來的 PS 點位之位移資訊，就可有效測量出地表在衛星視角 (line-of-sight, LOS) 方向的變形速率，並且可以時間序列的方式展現空間上的變異。

由於在城市環境下擁有大量的 PS 點位分佈，因此 PSInSAR 技術是非常適宜在都市地區進行時間序列的分析 (Soergel, 2010)。相較於其他 PSInSAR 技術，StaMPS 的演算法提出了一個嶄新的 PS 點位挑選方法，能更有效的挑選出在強度資訊上被判定是低強度反射訊號，但在相位時序上卻是持續穩定的散射體，如此可以萃取出空間上更多的 PS 點位資訊。此外，StaMPS 最重要的一個優勢在於不需要預先給定一個地表變形速度場，就可求出線性或非線性的地表位移資訊，讓此演算技術可應用的研究區域不受限制。同時，StaMPS 後續的分析流程中，也可進一步的使用 SBAS 技術分析，並且將 PSInSAR 和 SBAS 之成果整合 (Hooper, 2008)，另外，當面臨大氣干擾的問題時，可以直接加裝 TRAIN (2015) 演算技術在 StaMPS 之中，藉由大氣模式所產生之資料修正大氣效應。

本計畫的雷達影像處理流程主要分為兩個階段，第一階段是雷達差分干涉處理；第二階段是 StaMPS 技術解算 PSI 成果。在第一階段採用由 Sandwell 等人（Sandwell et al .,2011）開發的 GMTSAR 軟體進行雷達影像差分干涉處理，GMTSAR 處理時以指令進行處理流程，步驟較其他軟體簡潔且省時，主要執行步驟為 Sentinel-1 影像的前處裡部分包含應用軌道資訊於主影像與子影像並進行影像對位。雷達差分干涉的處理部分包含應用同調性影像進行差分干涉、去除地形造成的相位差以及濾波去雜訊。最後將成果輸出為 StaMPS 軟體格式，圖 2-4 顯示第一階段的流程圖 (團隊自行產出)。

第二個階段將使用由 Hooper 等人 (2004, 2007, 2008) 所開發的 StaMPS 軟體，進行 PSI 的分析與解算。StaMPS 的處理流程大致可分為三個部分如團隊自行產出流程圖 (圖 2-5)。第一部分為 PS 點位的挑選，詳情如前面所述。第二部分為相位解算，將搭配 SNAPHU 軟體進行三維空間 (2D 平面加上時間) 的時間序列相位

回復。第三部分為誤差估算，透過 DEM 推估 DEM 誤差，藉由高通濾波和低通濾波推估大氣效應和軌道效應。最後所計算出的結果即為真實地表變動的位移資訊。

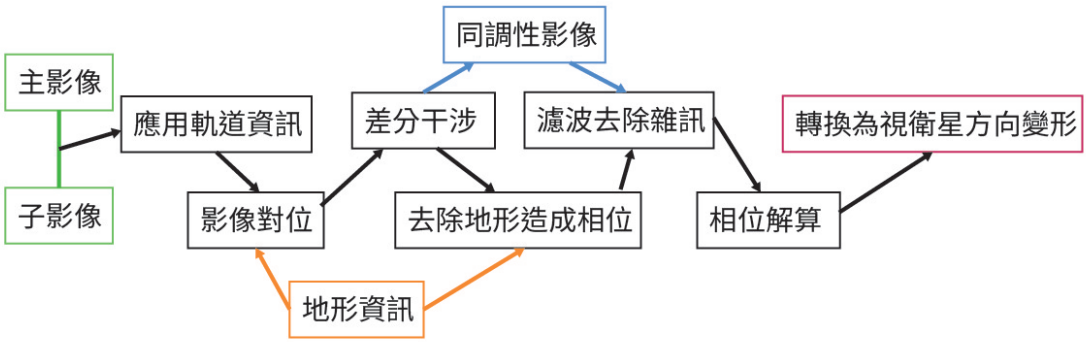


圖 2-4：雷達影像處理流程第一階段 - 雷達差分干涉處理流程圖。本階段主要工作為使用 GMTSAR 軟體處理 Sentinel-1 影像的差分干涉，並且將其輸出為 StaMPS 軟體所能使用的檔案格式。(團隊自行產出)

Figure 2-4：First stage of radar processing - flow chart of radar interferometry. In this stage, we use GMTSAR for radar interferometry, and export it to StaMPS format.

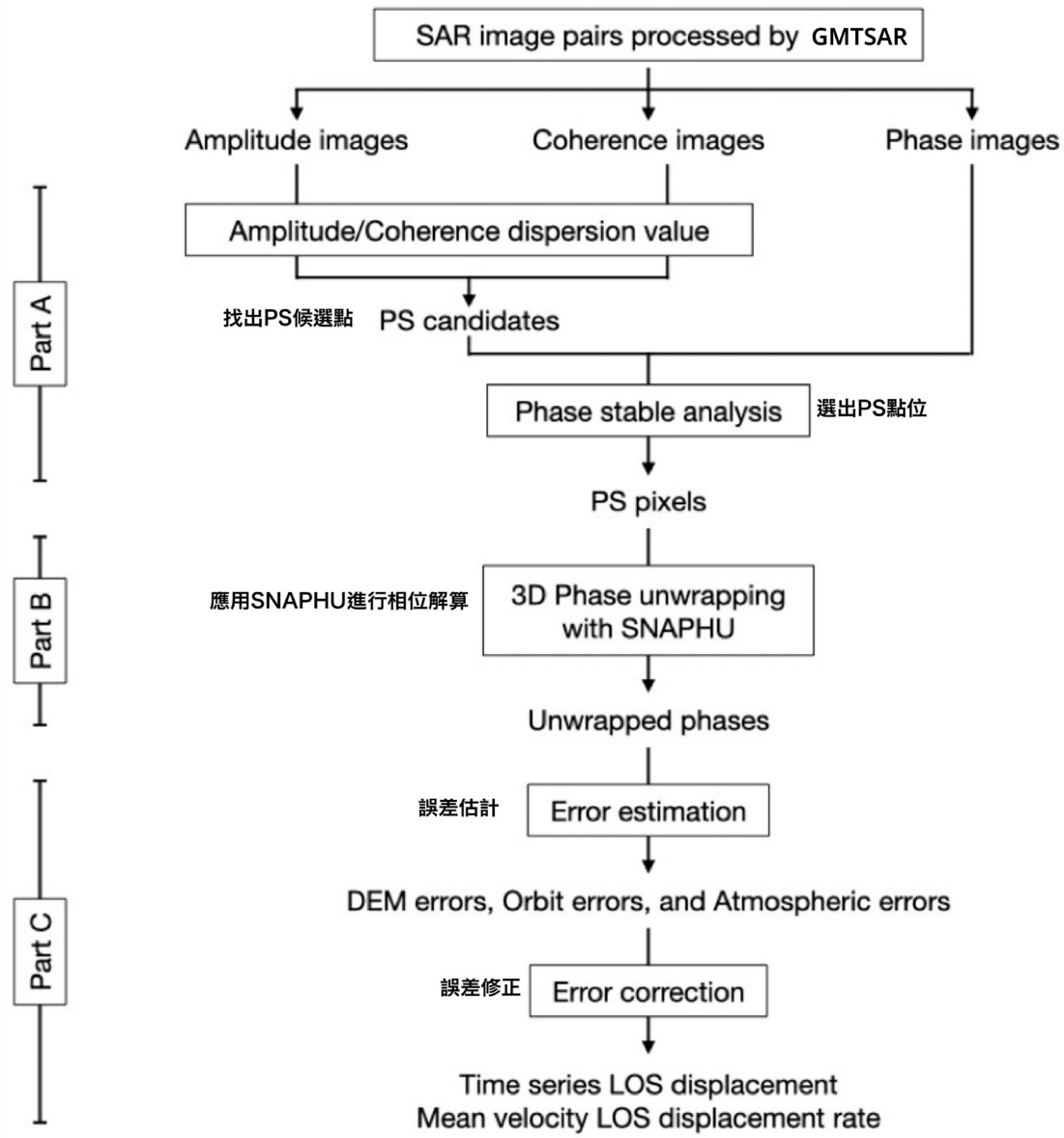


圖 2-5：雷達影像處理流程第二階段- PSI 處理流程圖。本階段主要工作為使用 StaMPS 演算法求得研究區域內地表變形的 PSI 時間序列與平均速度場之成果。(團隊自行產出)

Figure 2-5：Second stage of radar image processing. PSI workflow. This stage is to calculate the average velocity in the study region.

2-1-3 技術上需克服之困難

i. 雖然 PSInSAR 技術可以有效萃取出永久散射體的位移資訊，但是在植被過於茂密地區或是因為影像對所跨越的時間段落過長時，會導致空間上的永久散射體分佈較為稀疏，因而導致演算法的計算誤差。

ii. 當 PSI 結果呈現長週期的變形傾斜或變形梯度時，若有需求會利用 GNSS 資料進行空間上的修正，並透過距離反比加權法內插的方法推估出平面的修正值，消去空間上長週期的誤差趨勢。

2-2 GNSS、水準測量與雷達差分干涉資料對比

2-2-1 工作內容概述

預計選擇部分 GNSS 連續觀測站資料解算分析：處理地礦中心設置及與其它單位交換之 GNSS 連續觀測站資料（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場。

然後將雷達差分干涉資料與 GNSS 觀測資料、精密水準結果比對 (包含全時段與重要觀測時間)，方法包含：

a. 將 GNSS 的速度場資料計算至視衛星方向的速度值，並套疊至雷達同一座標系統進行視覺化比對。

b. 將 InSAR 速度場資料利用幾何座標轉換為東西方向上速度值及高程向速度值，並套疊至與 GNSS 同一座標系統進行視覺化比對 (圖 2-6)。

c. 將 GNSS 的時間序列資料計算至視衛星方向的速度值，與雷達影像獲得之時間序列進行比對，以評估雷達影像結果的準確性 (圖 2-7)。

d. 將地礦中心提供之精密水準資料 (視實際提供資料而定)，進行資料整理、速度值計算，並與連續 GNSS 及雷達影像速度值比對。

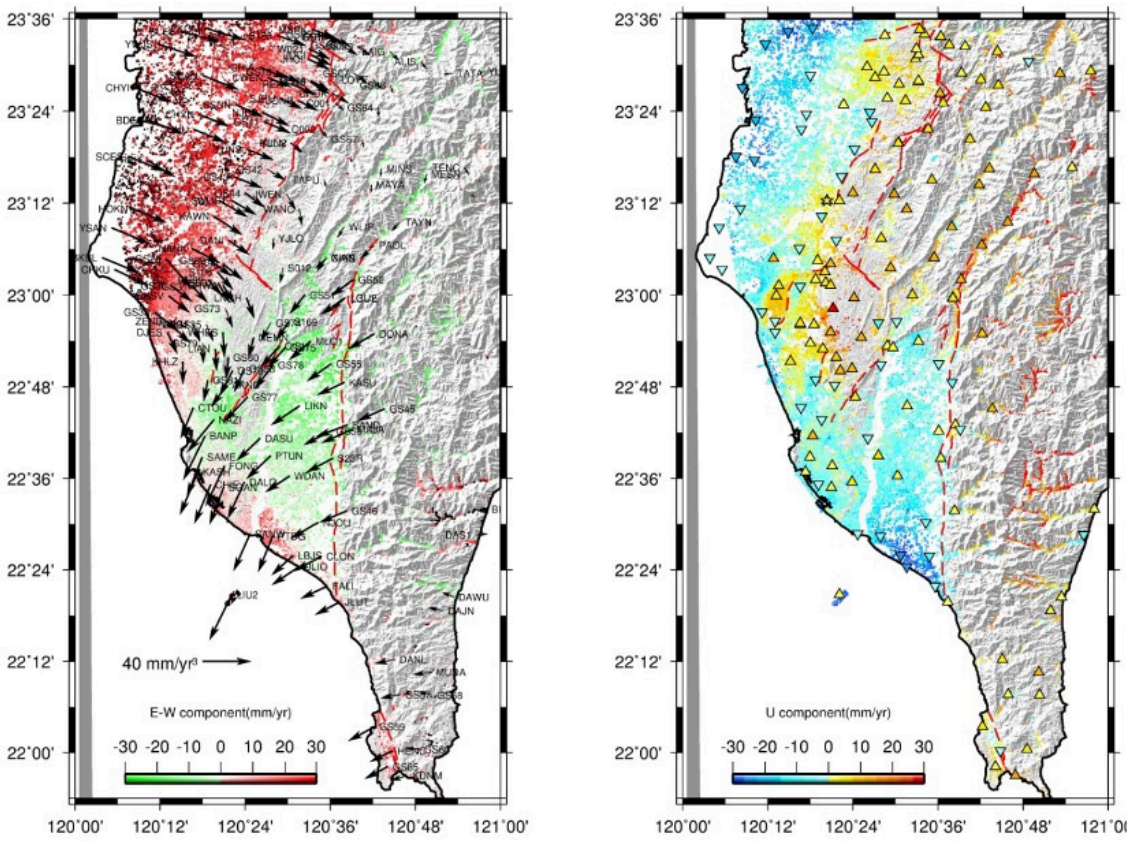


圖 2-6：SENTINEL-1 東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續 GNSS 測站水平方向移動速率。圓圈為連續 GNSS 測站垂直方向移動速率。

Figure 2-6：East-west and vertical annual velocity derived from Sentinel-1. Warm color depicts eastward or upward motion, and cold color depicts the westward and downward motion. Arrow indicates GNSS horizontal velocity, circles are vertical velocity from GNSS.

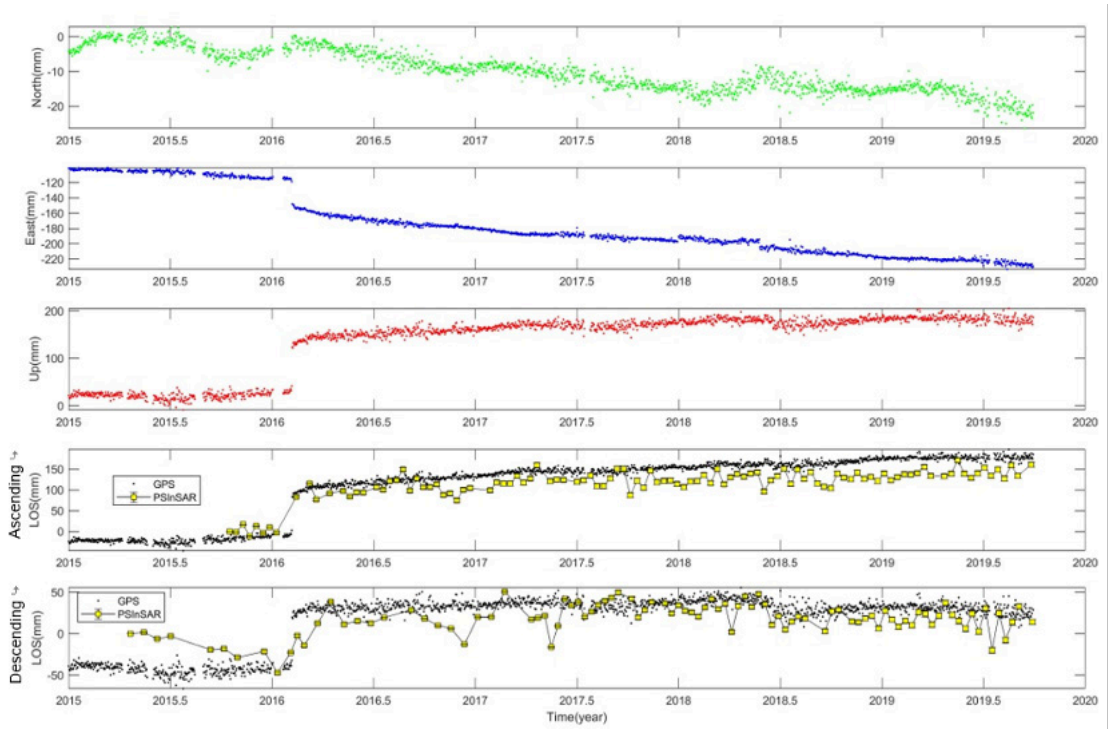


圖 2-7：SENTINEL-1 (asc： 2015/10~2019/9; des： 2015/4~2019/9) 雷達影像與 GNSS 測站龍崎 (LNCH) 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GNSS 三方向時間序列；黑色為 GNSS 投影至視衛星方向。黃色方型為雷達影像時間序列。

Figure 2-7：East-west and vertical annual velocity derived from Sentinel-1. Warm color depicts eastward or upward motion, and cold color depicts the westward and downward motion. Arrow indicates GNSS horizontal velocity, circles are vertical velocity from GNSS.

2-2-2 資料對比之執行方法及進行步驟

本研究利用美國 NASA 噴射推進研究室（JPL）所開發之 GipsyX 解算軟體計算求解精密之測站座標 (圖 2-8)。GipsyX 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，解算成果略優於利用相對定位的 GAMIT 或 BERNESE 解算軟體。本研究計

畫經由不同時間對相同測站監測及計算取得地表三維坐標變化，而獲得地表變形資料，尤其臺灣因板塊擠壓，而產生之不同地區變形量之差異，可提供斷層活動、孕震過程與震源力學的重要資訊。

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

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。

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

對於 GNSS 時間序列資料之分析，我們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，其時間序列模式可以用下式表示 (Nikolaidis, 2002)：

$$y(t_i) = a + bt_i + c\cos(2\pi t_i) + d\sin(2\pi t_i) + e\cos(4\pi t_i) + f\sin(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_{eq}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot \exp^{-(t_i - T_{eq})/\tau_j} + v_i \quad (2\text{-}3)$$

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。利用時間序列分析，能更了解地表與地下構造的運動情形，並提供有關更多地殼變形的訊息。

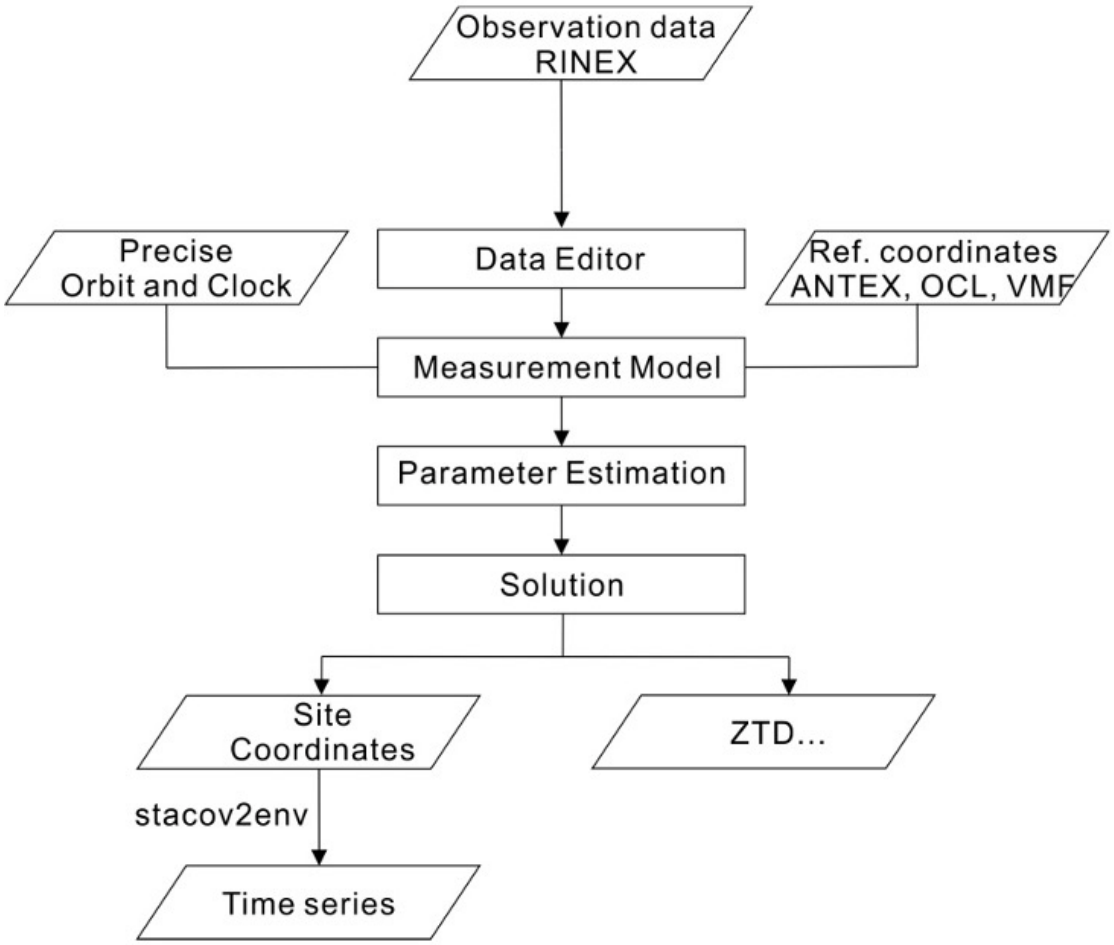


圖 2-8：GipsyX 軟體處理流程。

Figure 2-8：GipsyX processes.

2-3 二維剖面模擬

2-3-1 方法與執行步驟

本計畫採用斷層錯位模型是根據彈性半無限空間錯動理論（Okada, 1985; Okada, 1992）。斷層錯動的影響發生於地表面以下的岩體中，若將斷層兩側的岩石視為完整的岩體，岩石受斷層錯動導致的變形會近似於線性的彈性關係，而整個變形場的空間即可稱為彈性半無限空間。當斷層錯動時，則可視為彈性半無限空間中某個面產生位移量，而探討錯動面及其錯動向量與彈性半無限空間中位移場之關係的模擬稱之為彈性半無限空間錯位模型。假設在無限延伸的彈性半空間，由於剪切和拉伸斷裂引起的表面變形的解析解。該模型被廣泛用於模擬由局部擾動產生的地面變形，例如構造斷層

（地震）或火山堤（岩漿侵入）。給定矩形斷層的幾何形狀和滑移，它可以計算自由表面的變形（圖 2-9）。

簡化地表變形和斷層滑動關係為Δui=Green Function*Δuj+σ，其中Δui為地表變形，Δuj為斷層滑移，σ為誤差，而 Green Function 來自彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992; 圖 2-10），其中包含了斷層的幾何參數，如斷層平面位置 (km)、深度 (km)、長度 (km)、寬度 (km)、走向 (°)、傾角 (°) 等，斷層平面位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層斷層面下緣的深度。一組斷層幾何參數，即可提供每個位置上的地表變形資訊，透過地質構造模型、各點觀測資料與模型結果比較，將可獲得較符合之斷層幾何參數及其滑移量。每種斷層幾何參數在地表上的連續變化是不一樣的，透過遙測的觀測投影資料與模型結果進行擬合，將可獲得最匹配之斷層幾何參數，包含了斷層頂部、深部、角度及滑移量。因連續性的地表觀測點位數目多於要解析的參數個數，所以透過這樣的計算方式，不論是從斷層幾何與滑動來估算地表變形，或是從地表變形來回算斷層幾何與滑動，都是可行的。

本計畫處理多年期雷達影像觀測資料，由上升、下降軌道之視衛星地表變形年速度場與時間序列，針對特定斷層，依據斷層活動分時段，分別對同震與間震期間資料，進行垂直斷層走向投影，以模擬出二維位移或速度剖面。利用這些在空間中連續的二維資料，並透過網格搜索，求取最佳淺層斷層參數（斷層傾角，滑動速度，滑動的上下限等）。另一方面，並同步參考其他資料（野外地質調查、地物探勘、地震觀測等），建立更完整的斷層幾何參數，藉此精進在此斷層幾何上的滑移或累積速度分佈，進而探討應力累積與評估斷層潛勢。

斷層模型將有助於最大地震動速度、加速度的估算（圖 2-11），透過完整的斷層幾何參數，配合震源參數及速度構造，採用地震波模擬（Zhu, 2011），可計算出近斷層之最大地震動速度、加速度，這有助於提醒可能遭遇到的晃動強度，而對周遭馬路、鐵路、高鐵、建築物、廠房等，更能提供所需的抗震強度分析，以避免受到更嚴重的損壞。

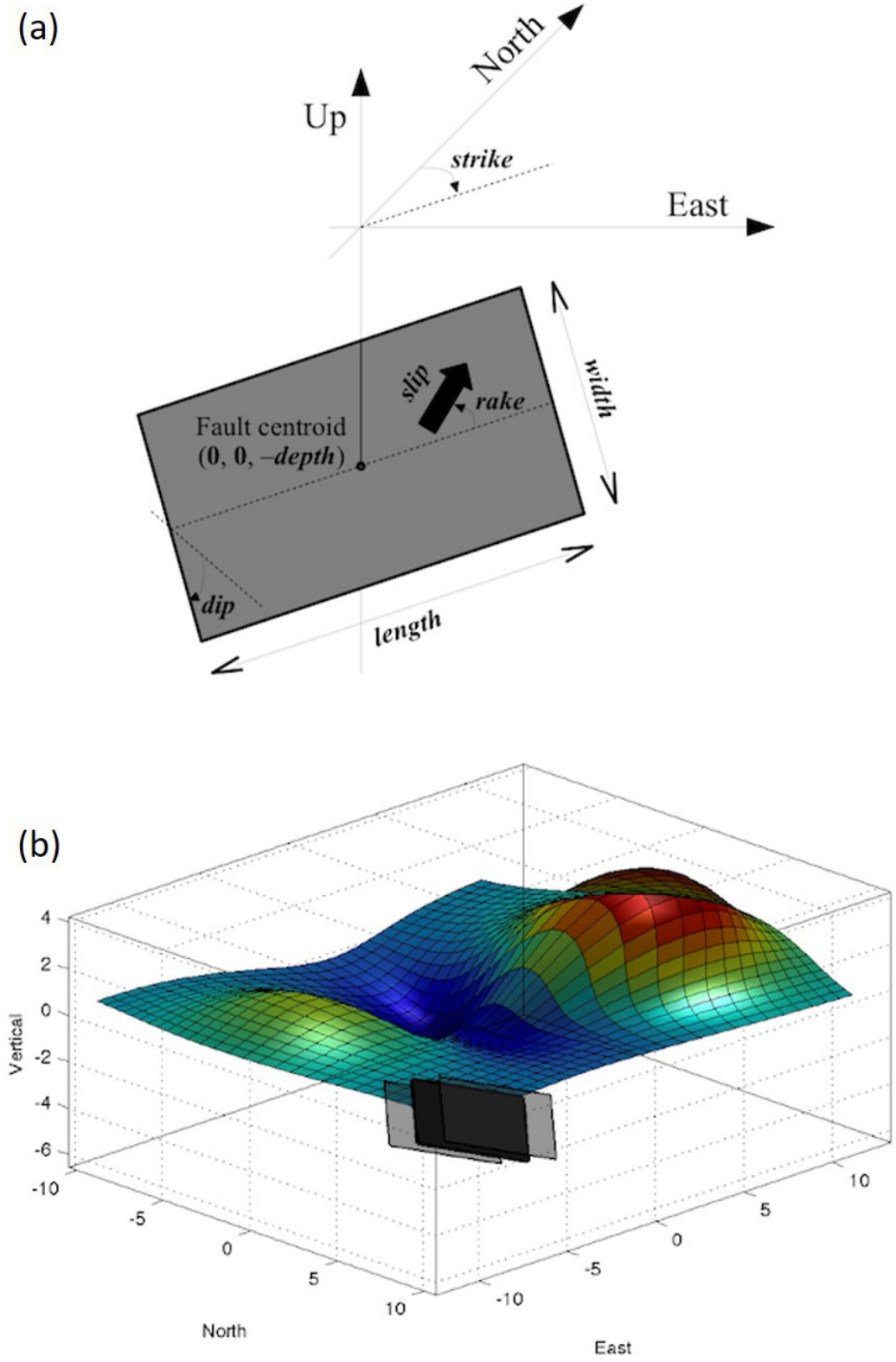


圖 2-9：(a) 斷層幾何參數，(b) 由圖 (a) 提供的斷層幾何參數與滑動量，經過彈性半無限空間錯動理論計算的地表變形（Okada, 1985）。

Figure 2-9：(a) Fault parameters; (b) parameters from (a) can be fed into Okada model.

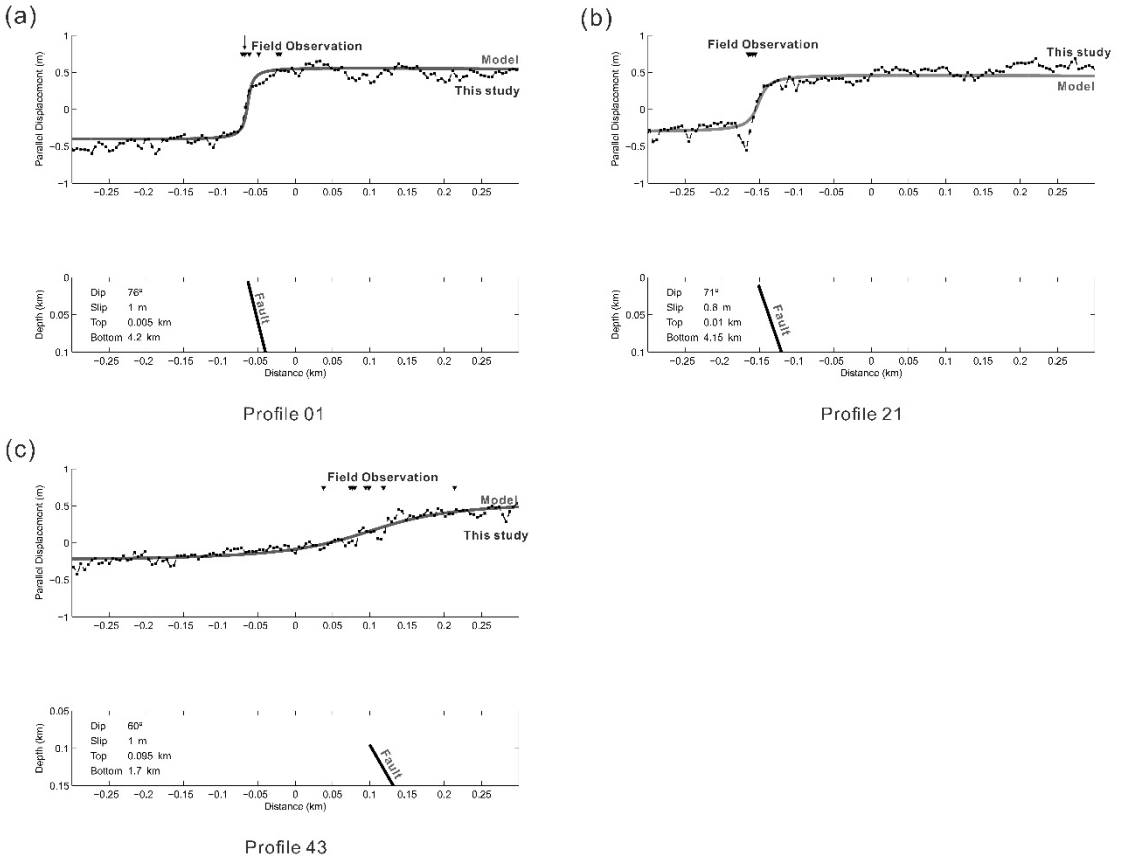


圖 2-10：藉由在空間上連續的地表變形資訊，採用彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992），推估斷層參數（Kuo et al., 2019）。

Figure 2-10：Using continuous deformation information in Okada model to calculate fault geometry.

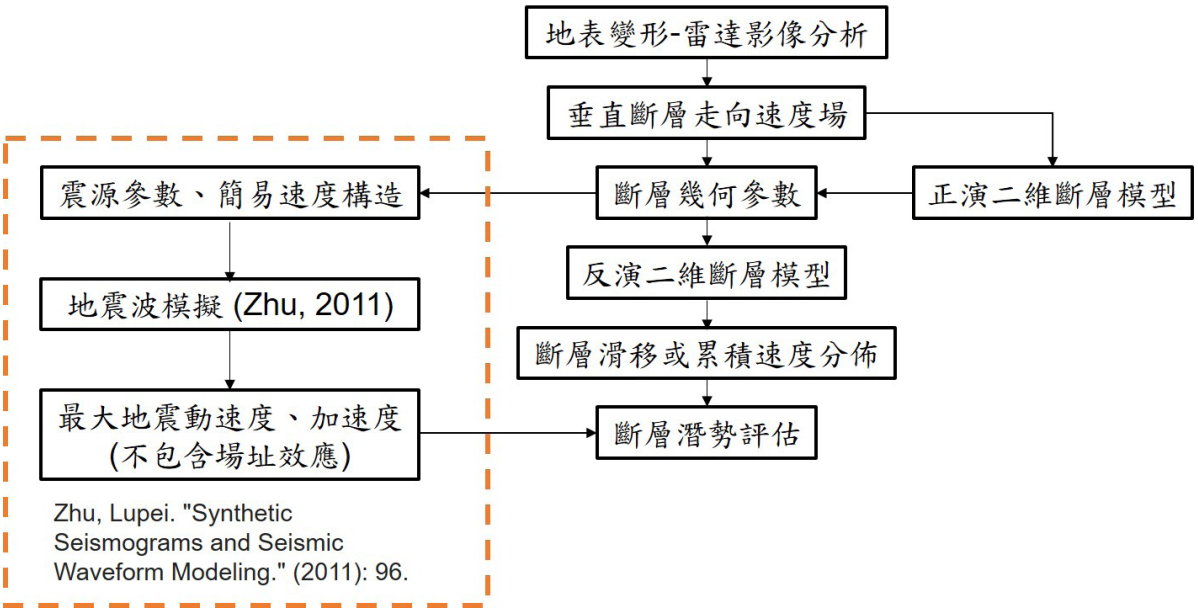


圖 2-11：工作流程圖。由雷達影像分析所獲得之速度場，透過簡易模型探討斷層滑移或累積分佈，進而評估斷層潛勢。而完整的斷層幾何參數也可與震源參數、簡易速度構造進行地震波模擬，以求得最大地震動速度與加速度。

Figure 2-11：Flow chart. Velocity from radar interferometry can be used to calculate model fault geometry and slip rate. Full fault geometry can be used to calculate earthquake source and other parameters.

2-3-2 跨斷層之速度剖面分析

透過本計畫內應用合成孔徑雷達差分干涉技術所獲得之地表變形，針對中部觀察區域內之重點斷層，選擇三條垂直於重點斷層走向之剖面，其長度涵蓋斷層兩側，將變形速率投影於剖面上，分別進行模擬，將其地表變形、模擬地表、斷層幾何與推估之斷層滑動或累積呈現出來。

2-4 垂直速度場解析

要以單分量的衛星斜距方向（LOS）觀測值解析垂直與水平方向分量，至少需要兩組不同觀測方向的資料才能達成。我們先將區域中資料相對於參考站 LNJS 後格點化及內插，讓升軌與降軌資料位置一致。為了避免格點化結果過於平滑，我們選取格點大小為 500 公尺，希望構造活動的地表變形資訊不至於失真。

接著我們對每一個格點利用三分量合成衛星斜距方向理論公式（式 2-4），再以最小平方法擬合求得該格點的水平與垂直向速度。

$$d_{LOS} = \begin{bmatrix} -sin\theta cos\alpha & sin\theta sin\alpha & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} \quad (2\text{-}4)$$

α 為正北與衛星軌跡方向之方位角（heading），θ 為衛星斜距方向和與地表垂直法線之夾角（incidence angle）。

由於我們只有兩個方向的觀測值，由公式 2-4 可知南北分量在衛星斜距方向的貢獻量小，因此計算時選擇忽略不不計，可將 2-4 式改寫為：

$$d_{LOS} = \begin{bmatrix} -sin\theta cos\alpha & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_U \end{bmatrix} \quad (2\text{-}5)$$

應用 2-5 式，每個格點的計算公式為：

$$\begin{bmatrix} -sin\theta_{SA} cos\alpha_{SA} & cos\theta_{SA} \\ -sin\theta_{SD} cos\alpha_{SD} & cos\theta_{SD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{SA} \\ d_{SD} \end{bmatrix} \quad (2\text{-}6)$$

θ_{SA}、α_{SA} 分別為 Sentinel-1 升軌道（Ascending）衛星斜距方向和與地表垂直法線之夾角（incidence angle）及正北與衛星軌跡方向之方位角（heading）。

θ_{SD}、α_{SD} 分別為 Sentinel-1 降軌道（Descending）衛星斜距方向和與地表垂直法線之夾角（incidence angle）及正北與衛星軌跡方向之方位角（heading）。

V_E、V_U 分別為東西向速度與垂直向速度。

d_{SA}、d_{SD} 分別為 Sentinel-1 升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的 PSI 觀測值。

將 5.3 式改寫為：

$$\begin{bmatrix} GSA_E & GSA_U \\ GSD_E & GSD_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vE} \\ m_{vU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{SA} \\ d_{SD} \end{bmatrix} \quad (2\text{-}7)$$

GSA_E、GSA_U 分別為 Sentinel-1 與升軌道（Ascending）相關東西向速度與垂直向速度值合成至衛星斜距方向（LOS）的單位向量。

GSD_E、GSD_U 分別為 Sentinel-1 與降軌道（Descending）相關東西向速度與垂直向速度值合成至衛星斜距方向（LOS）的單位向量。

m_{vE}、m_{vU} 分別為東西向速度場模型與垂直向速度場模型。

d_{SA}、d_{SD} 分別為 Sentinel-1 升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的 PSI 觀測值。

應用

$$Gm = d \tag{2-8}$$

即可求得每個格點的水平與垂直向速度。

$$m = G\backslash d \tag{2-9}$$

第三章、中部地區雷達影像分析

本計畫選取 Sentinel-1A 衛星 SAR 影像作為資料分析對象，其軌道重複週期為 6~12 天，使用的影像時間自 2014 年 10 月至 2023 年 12 月，分為升軌（Ascending）及降軌（Descending）兩部分，Sentinel-1 衛星自 2014 年 10 月後始有拍攝臺灣區域，發射初期衛星尚有需要調整，此時期影像頻率及拍攝範圍較不穩定，最高為 12 天一幅，至 2018 年 02 月 06 日花蓮地震發生後，始有 Sentinel-1B 影像加入觀測，此時期觀測頻率為 6 天，至 2021 年 12 月 Sentinel-1B 故障，2022 年 ESA 嘗試對 Sentinel-1 衛星系統進行參數或軌道等修正，但仍舊無法順利回傳 Sentinel-1B 衛星影像，衛星拍攝日期受到影響，降軌道方向長達 3 個月無觀測資料，此後僅剩 Sentinel-1A 衛星影像。因此我們依據影像頻率及品質將觀測時間區分為 (1) 2014 年 10 月 ~2018 年 02 月 06 日 (2)2018 年 02 月 07 日 ~2021 年 12 月 (3) 2021 年 12 月 ~2023 年 12 月。影像經初步處理後，將不符合範圍以及成像不佳的影像踢除，最終各時期影像使用幅數如表 3-1 所示。

表 3-1：Sentinel-1 衛星影像使用幅數。2018-2021 時段之影像數最多，也使影像解算品質最佳。

Table 3-1：Numbers of Sentinel-1A satellite images used in this project. The period from 2018 to 2021 has the highest number of images, resulting in the best image resolution quality.

	2014-2018	2018-2021	2022-2023
升軌（Ascending）	74 幅	215 幅	60 幅
降軌（Descending）	58 幅	228 幅	49 幅

3-1 資料處理與製圖

3-1-1 StaMPS 參數測試與律定

研究調查區域的設定通常是根據議題近似或是鄰近區域等條件而設置，然而雷達影像拍攝區域則不見得與研究區域相符，很多時候需要拼接影像、甚至做一些取捨。 本年度調查區域在升降軌皆需要接合影像，才能夠完整涵蓋調查區域（圖 3-1）。升軌影像發射後初期需三張影像才能涵蓋完整的臺灣，於 2014 年 10 月至 2015 年 10 月，需要上下兩圖幅才能涵蓋本年度調查區域；降軌道影像亦需要南北兩圖幅才能完整涵蓋本年度調查區域，而有些日期並非南北兩幅皆有拍攝，因此影像數量與上一年度略有不同。 在處理過程會先釐清是否有資料、接合是否有問題、測試接合後是否涵蓋研究區域…等等。 這些接合與測試都增加了處理的複雜度。實際執行時我們先選定調查區域內南北兩個點，將原始資料依照所選範圍合併，本年度升軌需要接合南北圖幅後，再同一圖幅內不同 subswath（F1、F2 與 F3）。

本年度調查區域於升軌道與降軌道皆須合併 subswath，升軌道為 F1 與 F2，降軌道為 F2 與 F3，過程須先以 GMTSAR 處理後全部圖幅合併後再裁切，最後使用 StaMPS 進行 PSI 流程，最後再選取參考點將兩 subswath 資料合併。

StaMPS 軟體的兩項參數：雷達強度散佈率預設門檻值和 Weed Standard Deviation (WSD) 數值，我們依據以往高屏與嘉南地區經驗，選擇雷達強度散佈率門檻值為 0.75、和 Weed Standard Deviation (WSD) 為 1 進行處理。為了比較各時段的變化，我們將 PSI 成果相對於林內國中測站位置。

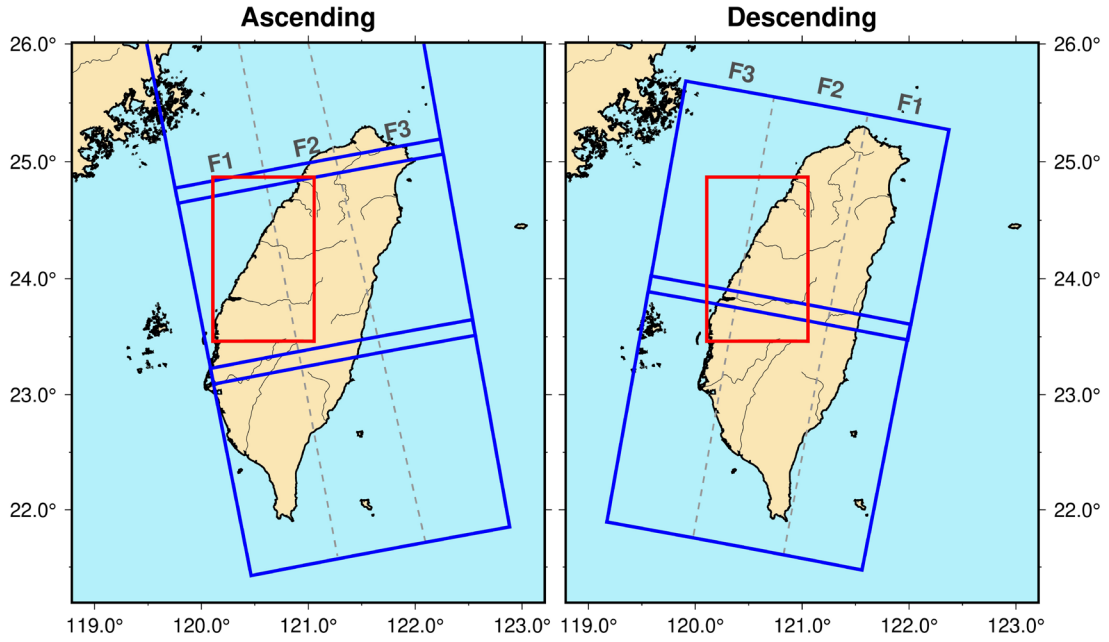


圖 3-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與本次研究區域分佈圖。

Figure 3-1：Orbits information of Sentinel-1 in the study area.

3-1-2 製圖底圖與 PSI 資料分佈

使用 GIS 軟體製圖時，我們發現在彰化沿海地區的底圖及標示的縣市界與 PSI 資料分佈有差異（圖 3-2），資料處理時使用的是日本宇宙航空研究開發機構（JAXA）的「15 公尺網格數值地形模型（DEM）」，為實際陸地與海岸線分佈的數值地形模型，製圖使用的則是內政部地政司的「2022 年版全臺灣及部分離島 20 公尺網格數值地形模型 DTM 資料」，為國土範圍的數值地形模型，除了實際的陸地與海岸線範圍，也包含了近岸海域以及沙洲，因此套疊後在沿海地區產生差異，並非資料處理或圖資錯誤。

將 PSI 成果套疊至國立中央大學太空及遙測研究中心（CSRSR）提供的 SPOT 衛星影像，圖 3-3A 可以看到在彰化地區的近岸海域有拍攝到部分海底地形與沙洲分佈，這些區域沒有 PS 點位分佈，陸地有許多線形分佈的資訊，我們將沿海地區的彰濱工業區（圖 3-3B）、彰化永興海埔新生地（圖 3-3C）以及麥寮工業區（圖 3-3D）放大檢視，可以看到 PS 的點位沿著堤防或道路分佈，在魚塭或是海域等水體區域則無 PS 點分佈，顯示 PSI 技術在沿海地區可以獲得穩定的永久散射體並獲得地表變形資訊。

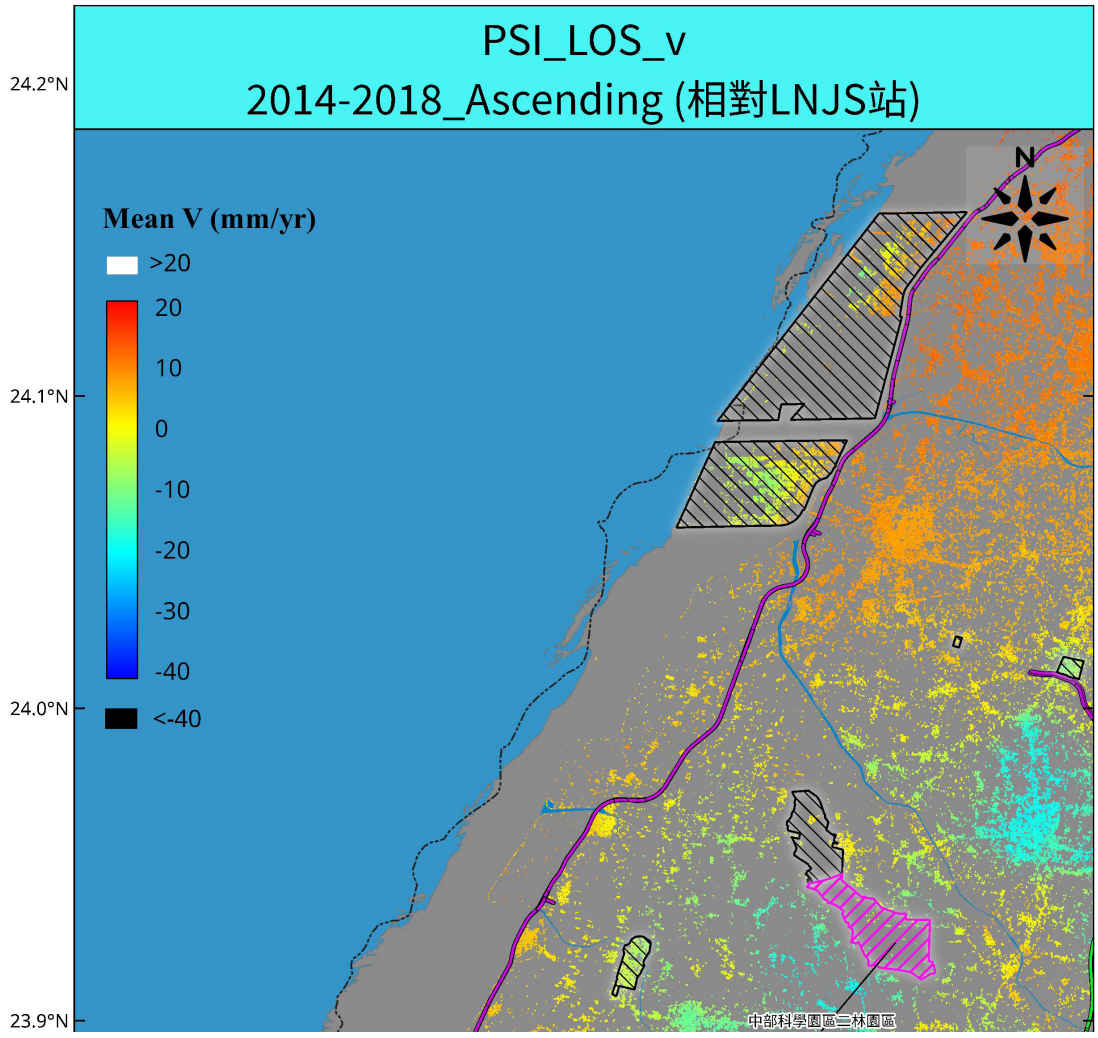


圖 3-2：2018-2021 年彰化地區升軌道方向 PSI 速度場套疊國土數值地形模型 (DTM) 成果。由於製圖與資料處理使用的地形數值模型定義不同，PS 點位分佈與地形底圖邊界及縣市界（黑色虛線）不相符。

Figure 3-2：PSI velocity field in ascending track direction in the Changhua area from 2018 to 2021 overlaid with the National Digital Terrain Model (DTM) results. Due to the differences in the terrain models used for mapping and data processing, the distribution of PS points does not match the boundaries of the terrain base map and county borders (indicated by black dashed lines).

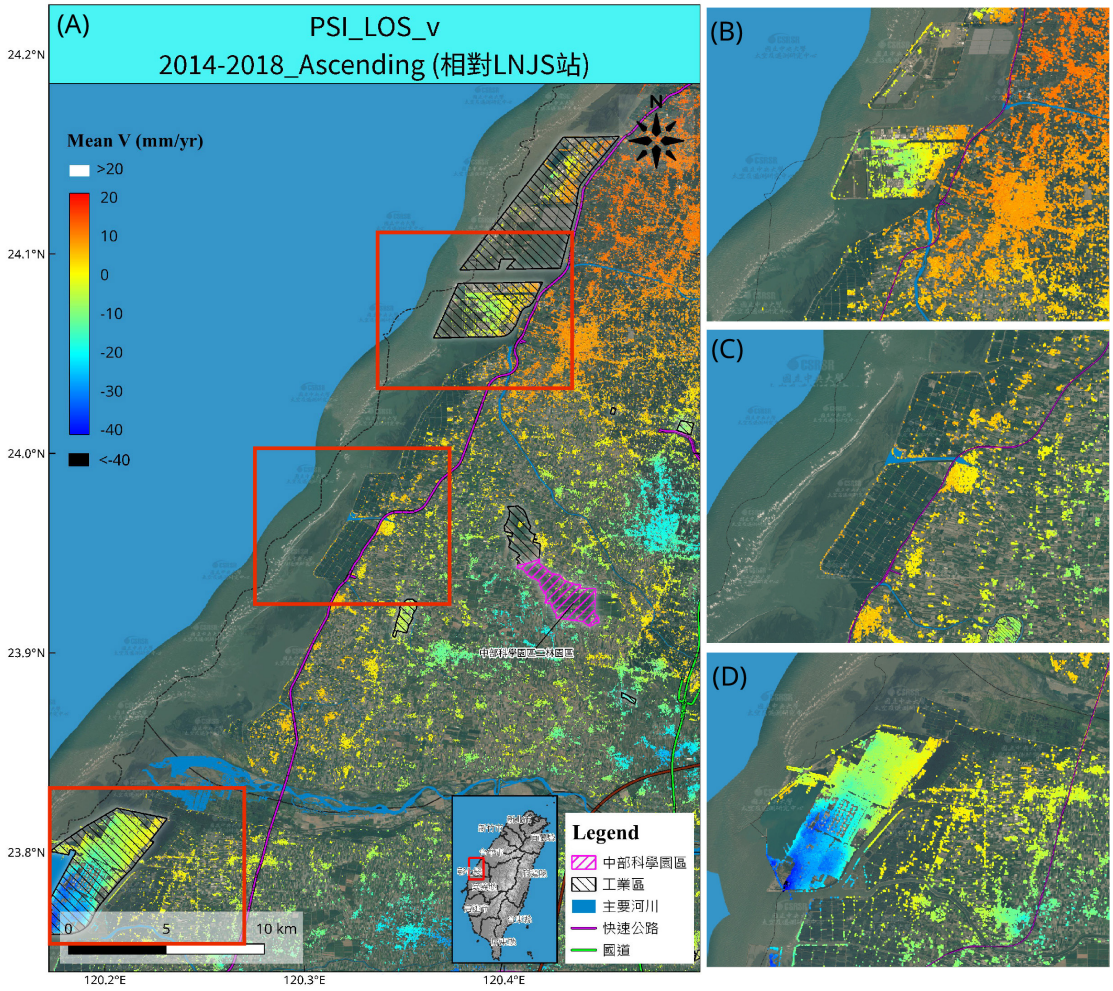


圖 3-3：2018-2021 年彰化地區升軌道方向 PSI 速度場套疊 SPOT 衛星影像成果。(A) 彰化沿海地區 PSI 成果，(B) 彰濱工業區 PSI 成果，(C) 彰化永興海埔新生地 PSI 成果，(D) 麥寮工業區 PSI 成果。

Figure 3-3：PSI velocity field in the ascending track direction in the Changhua area from 2018 to 2021 overlaid with SPOT satellite imagery results. (A) PSI results for the coastal area of Changhua, (B) PSI results for the Changhua Coastal Industrial Park, (C) PSI results for the Yongxing Reclaimed Land in Changhua, and (D) PSI results for the Mailiao Industrial Park.

3-2 2014-2018 年雷達影像成果

從 2014 年 10 月 22 日開始至 2018 年 02 月 03 日之間，選取 74 幅 Sentinel-1A 升軌道（Ascending）影像，並以 2016 年 08 月 12 日為主影像，此外，選取 58 幅 Sentinel-1A 降軌道（Descending）影像，並以 2016 年 08 月 14 日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過 GMTSAR 軟體處理完成，再經由 StaMPS 軟體搭配先前律定的參數，進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得 2014 年至 2018 年研究區域內的衛星視角（LOS）位移速度場。

升軌道的 LOS 速度場結果如圖 3-4 所示。相對於林內國中 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 20~-40 mm/yr，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區彰化臺中至苗栗一帶以及埔里盆地周遭，主要冷色系分佈於雲林及彰化地區的地層下陷區，最大可達 -50 mm/yr。研究區域內的車籠埔斷層兩側有些微的 LOS 速度差，其餘斷層兩側速度場差異不明顯。

降軌道的 LOS 速度場結果如圖 3-5 所示。相對於林內國中 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 -20mm/yr 到 10 mm/yr 之間，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在彰化臺中及苗栗一帶，主要冷色系分佈於雲林及彰化地區的地層下陷區，最大約為 -50 mm/yr，埔里盆地則是呈現冷色系（遠離衛星移動）。研究區域內的斷層兩側無明顯的 LOS 速度差異。

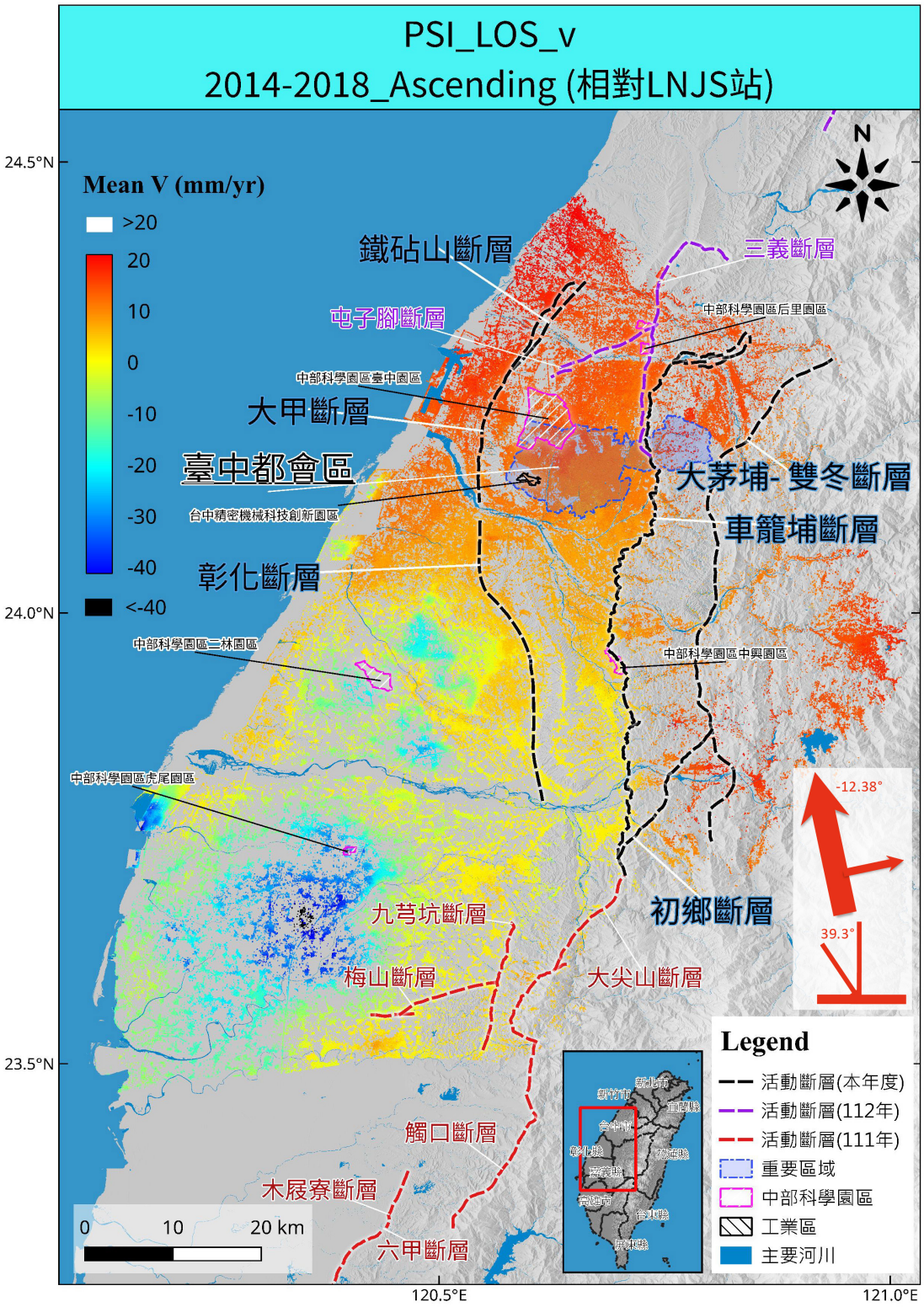


圖 3-4：2014-2018 升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-4：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites. The arrows indicate satellite flight direction and incident angle.

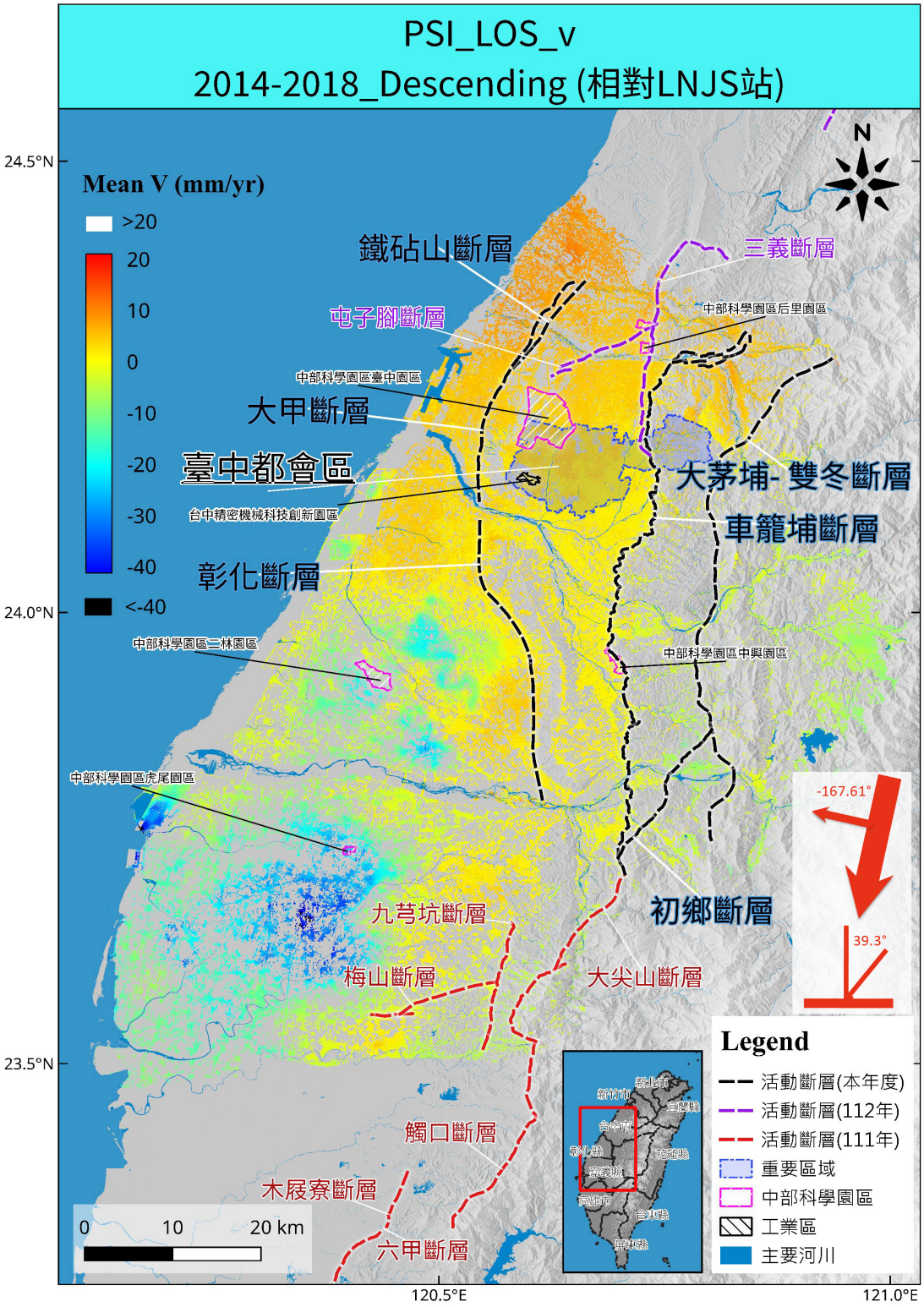


圖 3-5：2014-2018 降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-5：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites. The arrows indicate satellite flight direction and incident angle.

3-3 2018-2021 年雷達影像成果

自 2018 年 02 月 09 日開始至 2021 年 12 月 20 日之間，選取 215 幅 Sentinel-1A 與 Sentinel-1B 升軌道（Ascending）影像，並以 2018 年 08 月 14 為主影像，此外，選取 228 幅 Sentinel-1A 與 Sentinel-1B 降軌道（Descending）影像，並以 2018 年 08 月 16 日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過 GMTSAR 軟體處理完成，再經由 StaMPS 軟體搭配先前律定的參數，進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得 2018 年至 2021 年研究區域內 LOS 位移速度場。

升軌道的 LOS 速度場結果如圖 3-6 所示。相對於林內國中 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 -35~15mm/yr 之間，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短；呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈山區與埔里盆地附近，主要呈現冷色系的地區分佈在彰化及雲林的地層下陷區，最大可達 -50 mm/yr。本時期在車籠埔斷層兩側約有 3~5mm/yr 的 LOS 速度落差，梅山斷層兩側約有 5~7 mm/yr 的 LOS 速度差異，其餘斷層兩側的速度場差異則較不明顯。

降軌道的 LOS 速度場結果如圖 3-6 所示。相對於林內國中 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 -35mm/yr 到 15 mm/yr 之間，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在臺中至苗栗地區，主要呈現冷色系的地區分佈在彰化及雲林的地層下陷區，最大可達 -40 mm/yr，埔里盆地則顯示為冷色系（遠離衛星移動）。研究區域內的斷層兩側無明顯的 LOS 速度差異。

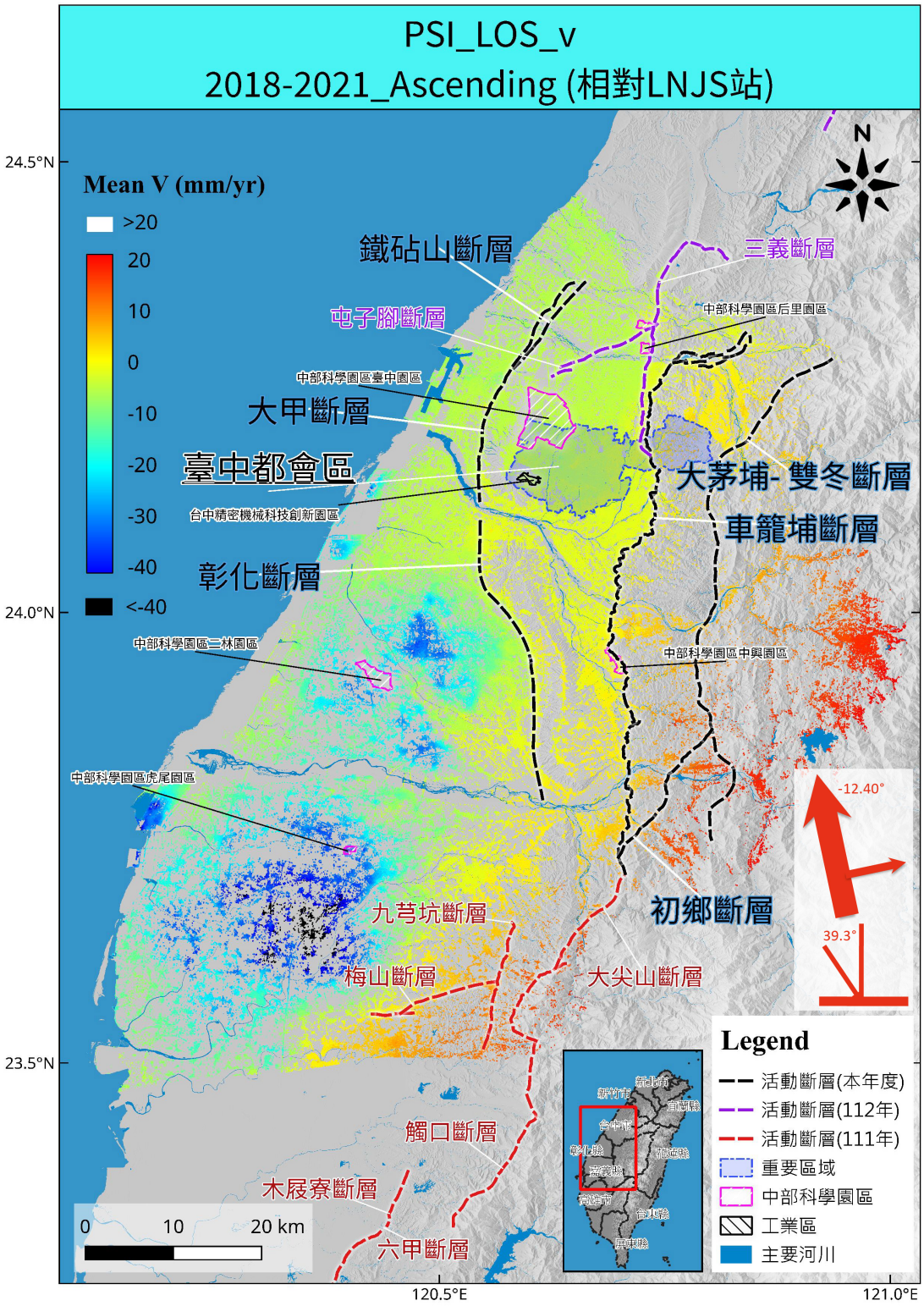


圖 3-6：2018-2021 升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-6：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites. The arrows indicate satellite flight direction and incident angle.

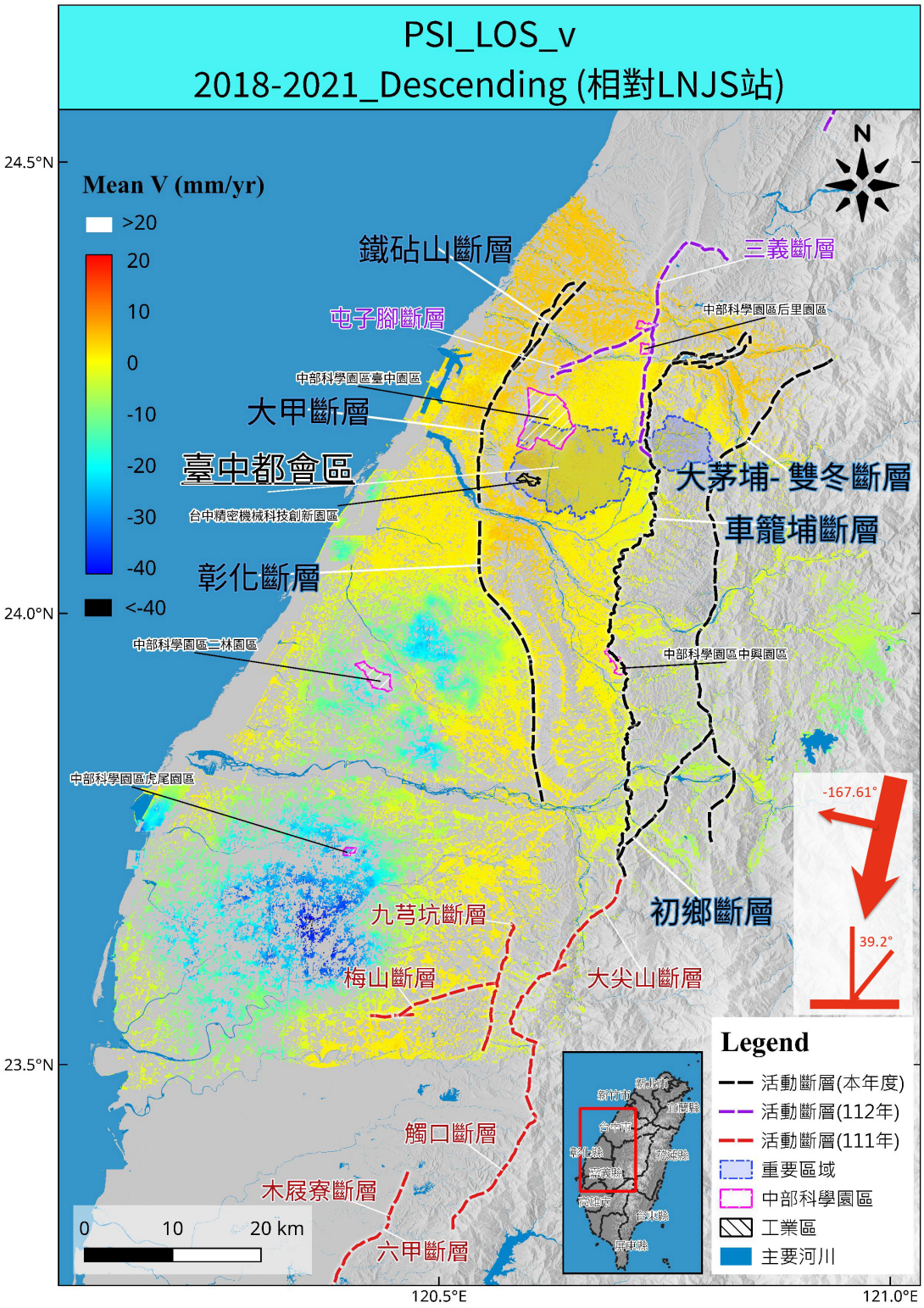


圖 3-7：2018-2021 降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-7：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites. The arrows indicate satellite flight direction and incident angle.

3-4 2022-2023 年雷達影像成果

由於 Sentinel-1B 衛星自 2021 年 12 月底開始無法接收資料，於 2022 年確認衛星電力問題致使無法傳輸資料，2022 年僅有拍攝頻率 12 天一次的 Sentinel-1A 衛星影像，且降軌道影像於 2022 年 3~6 月沒有影像，2022 年僅有 16 幅影像，上一年度僅用 2022 年影像，因為觀測時間跨距短且影像數量少，顯示單一年度的 PSI 品質不穩定。因此本年度我們使用 2021 年 12 月至 2023 年 12 月的 Sentinel 影像，嘗試增加觀測時間跨距與影像數量，期望獲得較穩定的資料品質。

從 2022 年 1 月至 2022 年 12 月之間，選取 60 幅 Sentinel-1 升軌道（Ascending）影像，並以 2022 年 08 月 17 日為主影像，此外，選取 49 幅 Sentinel-1A 降軌道（Descending）影像，並以 2022 年 12 月 29 日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過 GMTSAR 軟體處理完成，再經由 StaMPS 軟體搭配先前律定的參數，進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得 2022 年至 2023 年研究區域內 LOS 位移速度場。

升軌道的 LOS 速度場結果如圖 3-8 所示。相對於林內國中 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 -35~15mm/yr 之間，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在山區及埔里盆地一帶，主要冷色系的地區分佈在彰化及雲林的地層下陷區，最大可達 -60mm/yr。車籠埔斷層與梅山斷層兩側有些許 LOS 速度差，其餘斷層兩側無顯著的速度差異。

降軌道的 LOS 速度場結果如圖 3-9 所示。相對於林內國中 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 -35mm/yr 到 15 mm/yr 之間，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在山區及埔里盆地一帶，主要呈現冷色系的地區分佈在彰化及雲林的地層下陷區，最大可達 -60mm/yr。研究區域內的斷層兩側無明顯 LOS 速度差異。

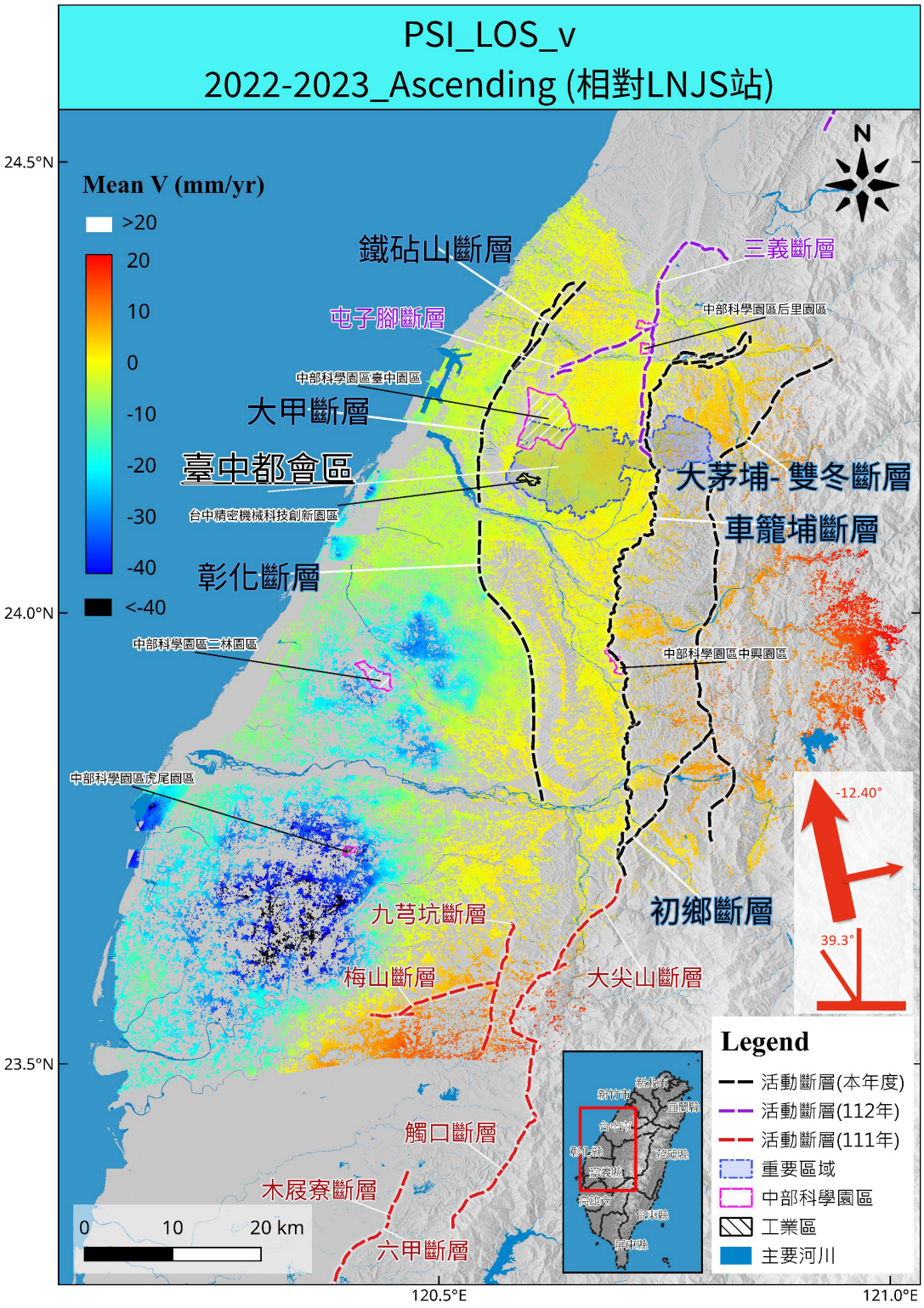


圖 3-8：2022-2023 年升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 3-8：Average LOS velocity fields between 2022-2023 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

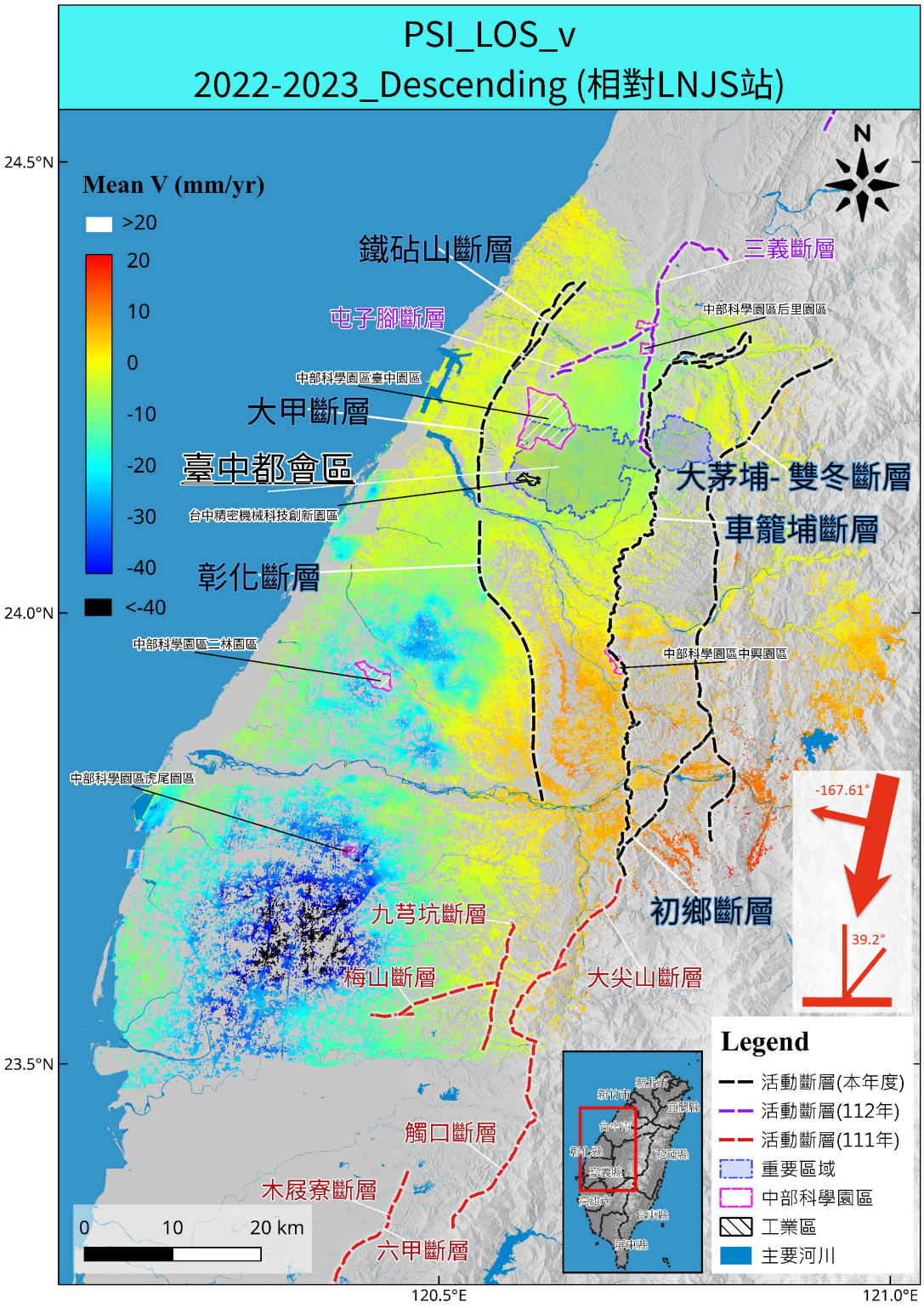


圖 3-9：2022-2023 年降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 3-9：Average LOS velocity fields between 2022 and 2023 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

3-5 垂直速度場解析

由於雷達與雷達衛星是以相對測距來量測物體移動之距離，所以在雷達遙測時通常都會以「在雷達視衛星方向、斜距方向的縮短、伸長」等方式來描述地表變形。如果能適當配合觀察地區的相關地質資訊以及其他大地測量資訊，便可以將雷達的資訊視為該區域的地表變形方式，從而進行更深入的討論。這樣的方式雖然最符合雷達資料的基本特性，但容易與大部分使用者在視覺上的理解方式產生誤解。 如果擁有多個軌道方向的雷達影像資訊時，依照軌道差異程度與軌道組合，可以利用數學方法將不同軌道雷達斜距方向的資訊轉換成二維（垂直、東西）或三維（垂直、東西、南北）的地表變形資訊。這樣的轉換方式雖然可能在過程中導入一些誤差，但是可以產出比較直觀性的地表變形資訊，在視覺上也比較容易與其他資料進行比較。

在過去經驗及先前章節所見，2018 年至 2021 年衛星影像數量最多，拍攝頻率穩定且衛星基線控制佳，本時期的 PSI 成果品質最佳最穩定，因此我們選擇這個時段解析東西向及垂直向速度場。我們先將區域中資料相對於參考站 LNJS 後格點化及內插，讓升軌與降軌資料位置一致。為了避免格點化結果過於平滑，我們選取格點大小為 500 公尺，希望構造活動造成的地表變形資訊不至於因內插失真（圖 3-10 與圖 3-11）。

本研究使用參數升軌道：α= -12.38˚、θ= 33.82˚；降軌道：α= -167.62˚、θ= 39.29˚(方位角為負表示由北方逆時針旋轉)。

由於我們僅有一個衛星升軌道與降軌道的觀測資料，無法解析三分量速度場，而由理論公式得每 10mm/yr 的南北向觀測值，於升降軌道 LOS 方向的貢獻量小於 1.5mm/yr（附錄 A），所佔比例並不如東西向與垂直向高，本年度彰化雲林區域的 GNSS 資料顯示南北向速度場分佈介於 -6~11mm/yr 間，投影至升軌道與降軌道方向 LOS 速度值大約為 -1~2mm/yr，以此 LOS 速度解析水平與垂直速度場，東西向速度場為 -0.5~0.5mm/yr，垂直向速度場為 -1~2mm/yr，屬誤差範圍內，因此認為本年度區域不計南北向速度對東西向與垂直向速度場解析影響不大。

解算後得到垂直以及東西向的速度場。垂直速度大概在 -50~20 mm/yr 附近。東西向的速度場則是落在 -40~35mm/yr 附近。與同時期的 GNSS 連續站的垂直、東西向的速度比對，垂直向斜率為 1.08，R^2 為 0.96，RMSE 為 3.06mm/yr。東西向斜率接近 0.82，R^2 則是為 0.91，而且 RMSE 低到 1.82mm/yr（圖 3-12 及圖 3-13）。

從解算出的東西向速度場顯示，臺灣中部地區沿海地區以向東速度為主，約為 5~15mm/yr，至西部祿山帶逐漸轉為向西移動，向西速度最大可達 -20mm/yr，在車籠埔斷層東側有明顯的速度變化，約有 10mm/yr 速度落差。垂直向速度場顯示彰化雲林地區各有一下陷區，下陷速率最大可達 -50mm/yr，西部麓山帶以抬升為主，最大抬升速率約為 10mm/yr，初鄉斷層與車籠埔斷層交界處約有 3~5mm/yr 的速度落差，其餘活動斷層並無明顯落差。其中 GS22 與 HOPN 兩站在垂直與水平向的速度場比對結果皆有明顯差異，檢視測站資訊與時間序列顯示 GS22 於 2018 年後有四次更換儀器紀錄，且 2020 年後的資料品質較差，HOPN 則是觀測質料品質不佳，2020 年後無觀測資料，因而影響 GNSS 速度場擬合，造成比對數值差異大（圖 3-14）。

利用 PSI 解析的東西向速度（md_E）與 GNSS 觀測值（E）比對斜率超過 0.8，且誤差（RMSE）小於 2mm/yr，R^2 超過 0.9，顯示解析出來的東西向速度場與此區域 GNSS 連續站得到的東西向速度趨勢相當一致。而解析的垂直向（md_U）與 GNSS 觀測值（U）比對斜率接近 1，RMSE 接近 3mm/yr，超過 0.96，顯示解析出來的垂直向速度場與此區域 GNSS 連續站得到的垂直向速度趨勢一致且數值相似。

此方法可以補足 GNSS 資料空間分佈不足進而取得大面積的水平與垂直速度場，但由於點位限制需要進行格點化，因此在過度內插的地區，如山區、湖泊等，可能必須進行適度遮罩，以改善過度解釋內插資料的情形。

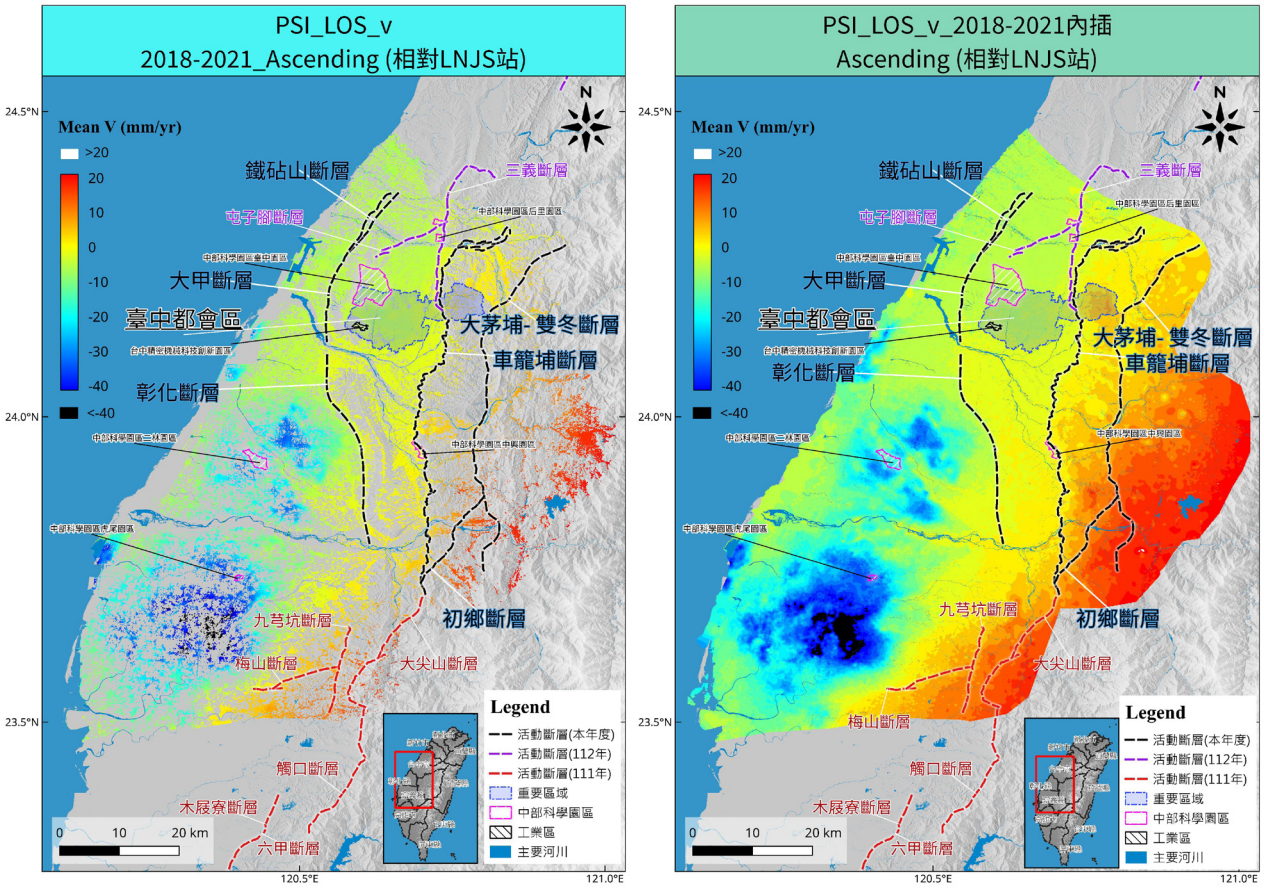


圖 3-10：2018 年至 2021 中臺灣地區升軌方向 PSI 與內插結果。左圖為 PSI 成果，右圖為以 500 公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 3-10：(Left) PSI results in ascending track between 2018 and 2021 in central Taiwan. (Right) PSI results Interpolated with a 500-m grid resolution. Warm colors represent movements toward the satellite and cold colors represent movements away from the satellite.

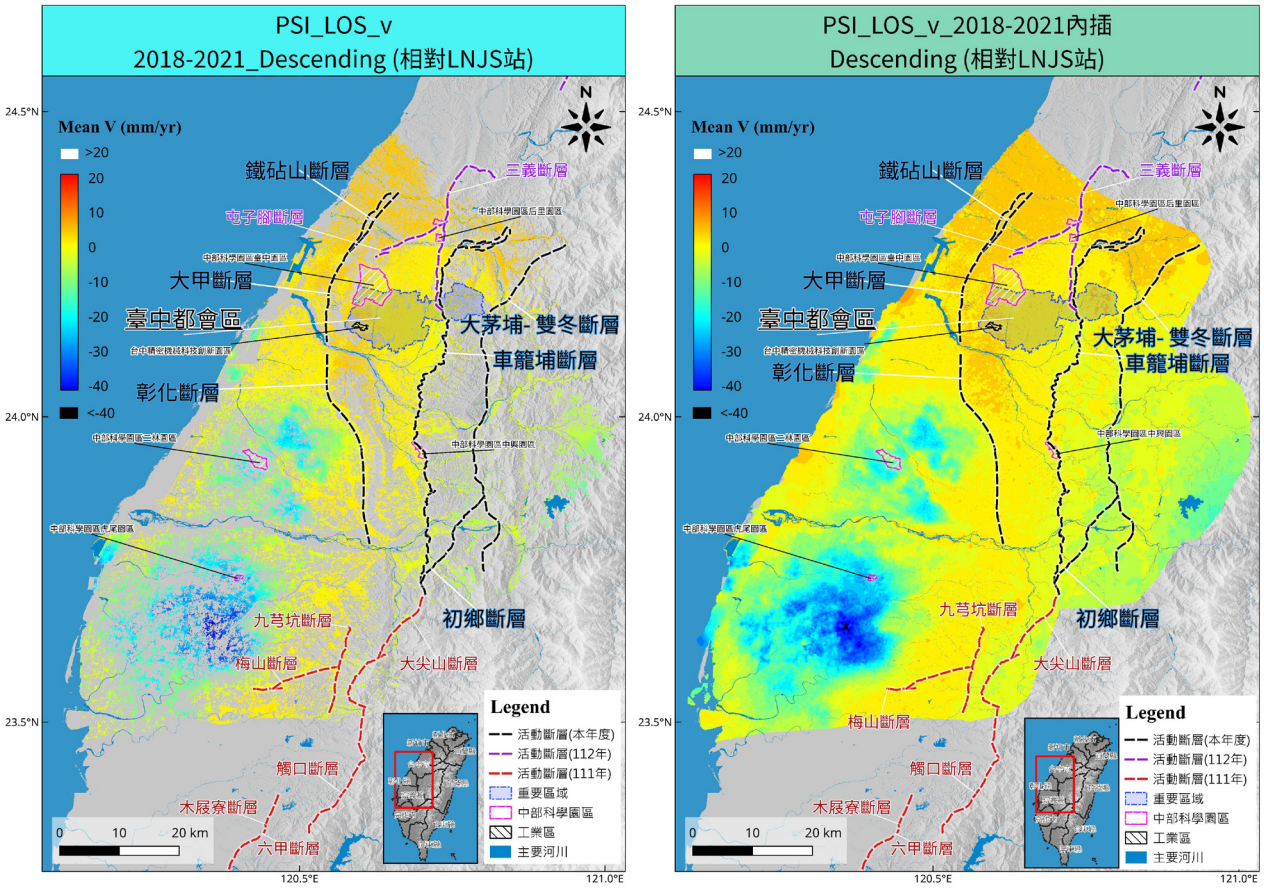


圖 3-11：2018 年至 2021 年中臺灣地區降軌方向 PSI 與內插結果。左圖為 PSI 成果，右圖為以 500 公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 3-11：(Left) PSI results in Descending track between 2018 and 2021 in central Taiwan. (Right) PSI results Interpolated with a 500-m grid resolution. Warm colors represent movements toward the satellite and cold colors represent movements away from the satellite.

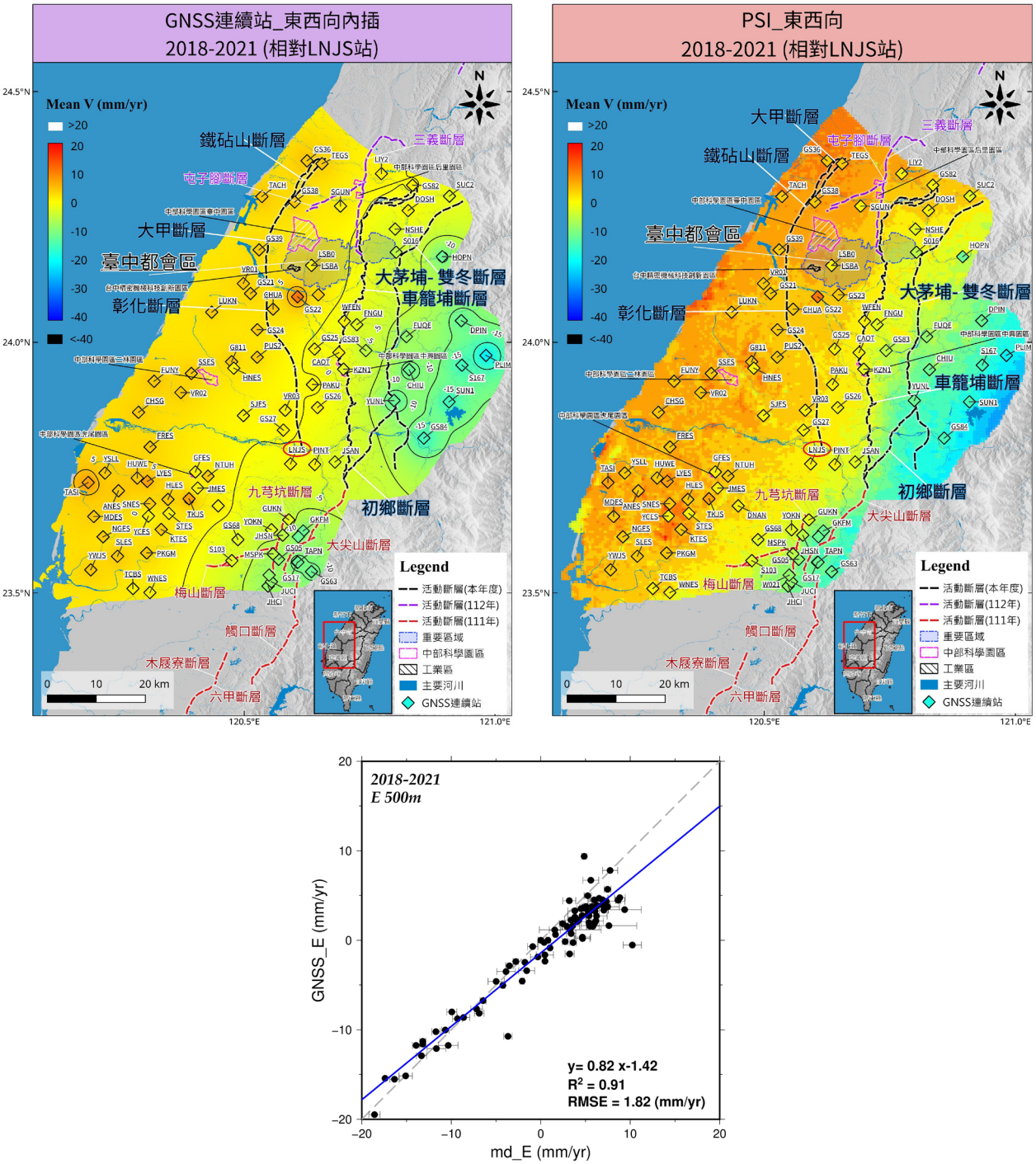


圖 3-12：上圖左為 2018-2021 GNSS 東西向速度內插圖，內插使用距離反比加權法的線性模式。上圖右為 2018 年至 2021 年東西向速度解析結果。下圖為 GNSS 比對圖。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS，菱形及其填色為 GNSS 連續站東西向速度。暖色代表向東，冷色表示向西。

Figure 3-12：(Upper Left) East-West Interpolated Velocity field from GNSS between 2018 and 2021. Velocity is interpolated with the Inverse Distance Weighting liner model. (Upper Right) East-West Velocity field resolved from Radar data between 2018 and 2021 in this area. (Lower) Comparison between PSI and GNSS results. Reference point is the continuous GNSS station LNJS. Colored diamonds represent the vertical velocity of the continuous stations. Warm colors represent eastward and cold colors represent westward.

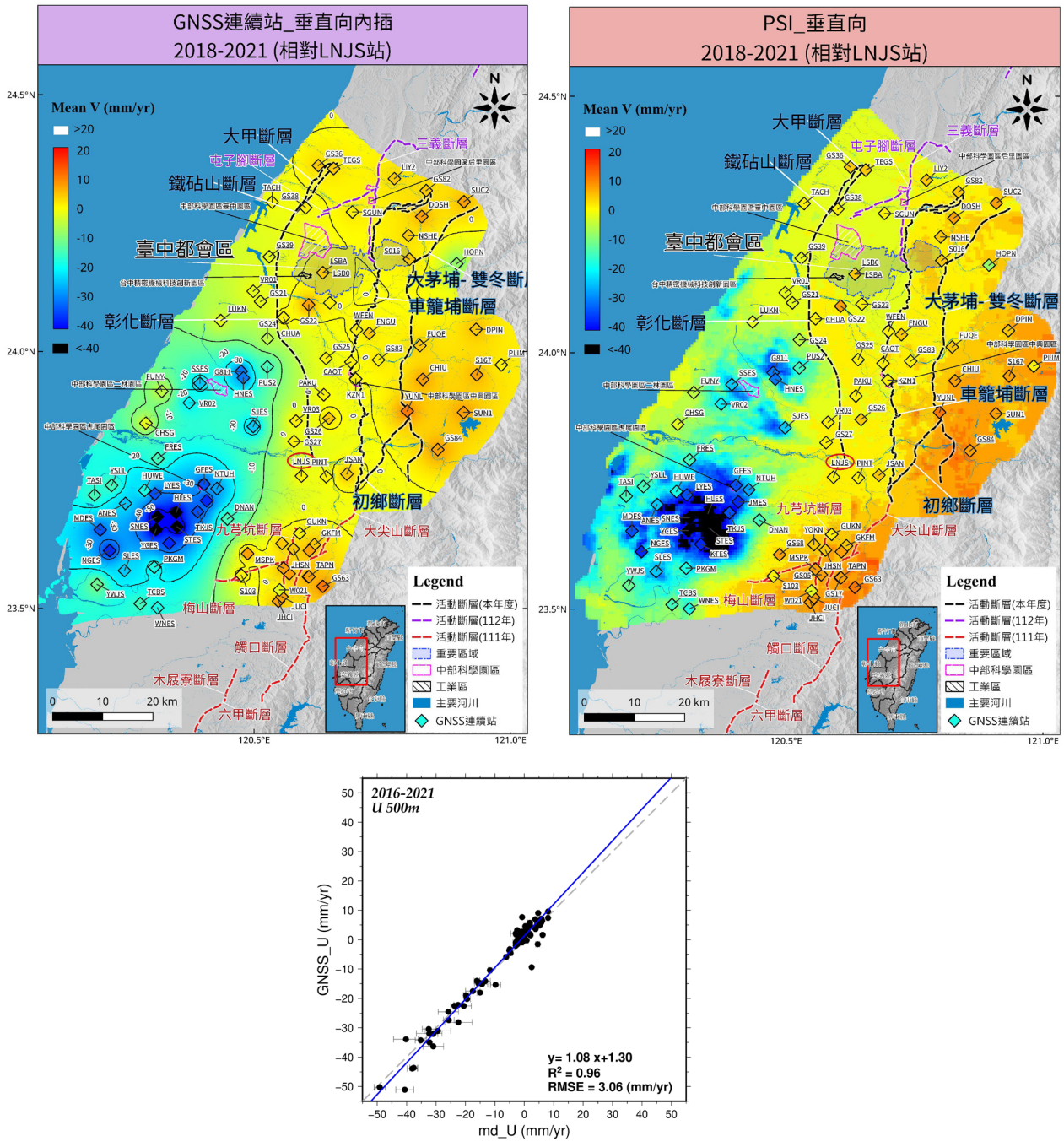


圖 3-13：上圖左為 2018-2021 GNSS 垂直向速度內插圖，內插使用距離反比加權法的線性模式。上圖右上圖為 2018 年至 2021 年垂直向速度解析結果。由於 GNSS 內插的原因，圖面上看起來與雷達資料有一些差異。下圖為 GNSS 比對圖。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS，菱形及其填色為 GNSS 連續站垂直速度。暖色代表抬升，冷色表示下陷。

Figure 3-13：(Upper Left) East-West Interpolated Velocity field from GNSS between 2018 and 2021. Velocity is interpolated with the Inverse Distance Weighting liner model. (Upper Right) Vertical velocity field resolved from Radar data between 2018 and 2021 in this area. (Lower) Comparison between PSI and GNSS results. Reference point is the continuous GNSS station LNJS. Colored diamonds represent the vertical velocity of the continuous stations. Warm colors represent eastward and cold colors represent westward.

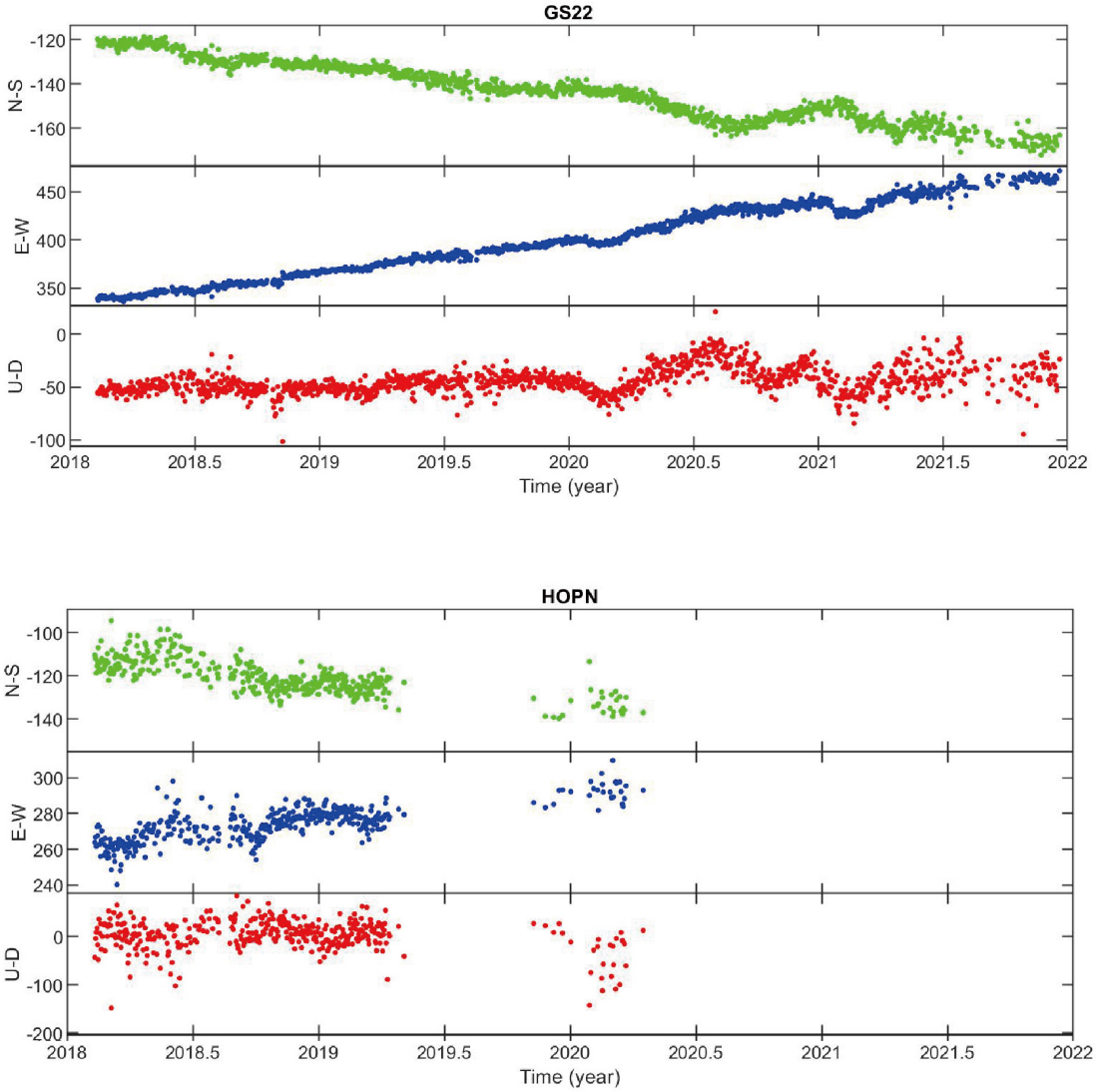


圖 3-14：2018-2021 年 GNSS 時間序列。上圖為 GS22 測站，下圖為 HOPN 測站，GS22 測站 2021 年後垂直向觀測品質較爲不佳，HOPN 測站資料缺失，影響擬合速度，比對結果不佳。

Figure 3-14：2018-2021 GNSS time series. The upper chart shows data from the GS22 station, and the lower chart shows data from the HOPN station. After 2021, the vertical observations at the GS22 station have lower quality, and there are data gaps at the HOPN station, which affect the velocity fitting and result in poor comparison.

3-6 跨斷層的速度場剖面分析

本研究為了深入探討鐵砧山斷層、大甲斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔 - 雙冬斷層、初鄉斷層等區域的活動特性，我們會以 LOS 速度場以及 PSI 解析的垂直與東西向速度場，擷取跨斷層的剖面進行分析，由於中部的斷層距離近，區域難以劃分，因此我們與地礦中心討論後設置六條東西向的長剖面，盡可能地跨過每一條斷層進行分析，由北到南分別為 A 剖面、B 剖面、C 剖面、D 剖面、E 剖面以及 F 剖面，另外設置兩條跨過臺中盆地的南北向長剖面，由東向西為 G 剖面與 H 剖面，每條剖面選取兩側 500 公尺內的 PS 點位，將其投影至剖面走向之上，並沿著剖面距離進行一維空間的濾波，獲得連續的剖面 LOS 位移資訊。

各時期的剖面位置與 PSI 速度場成果如圖 3-15~ 圖 3-22，各剖面細節敘述於以下各子節。

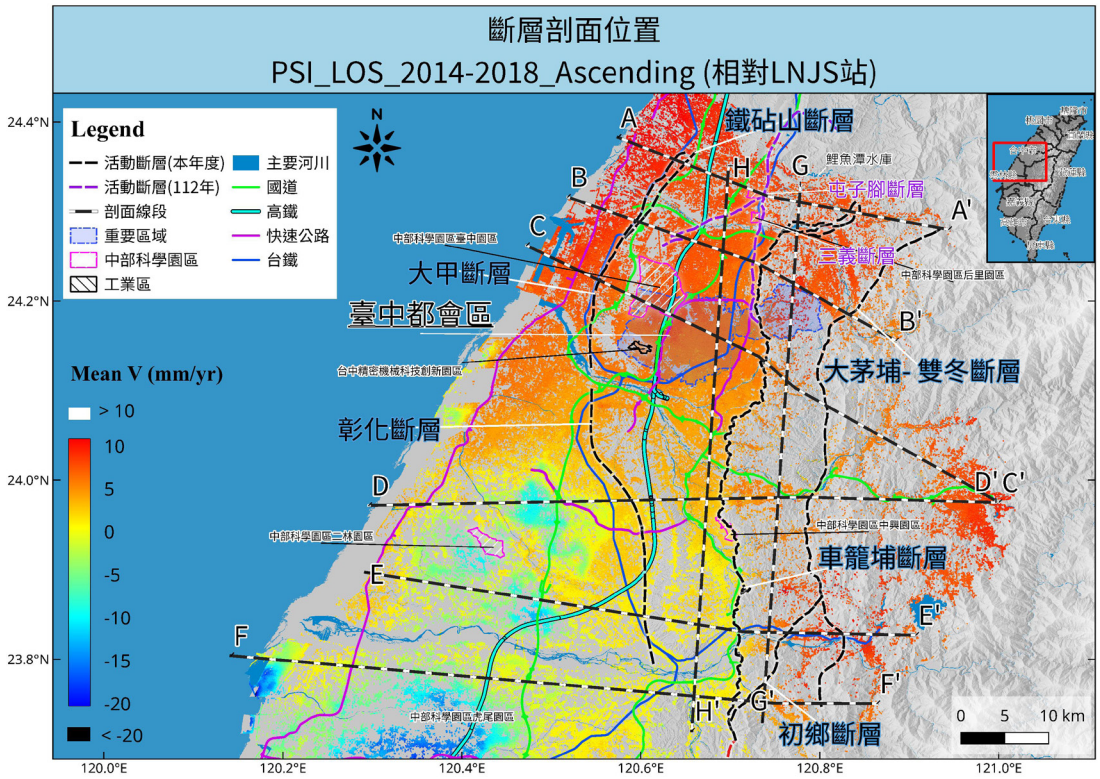


圖 3-15：2014-2018 升軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-15：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the Faults.

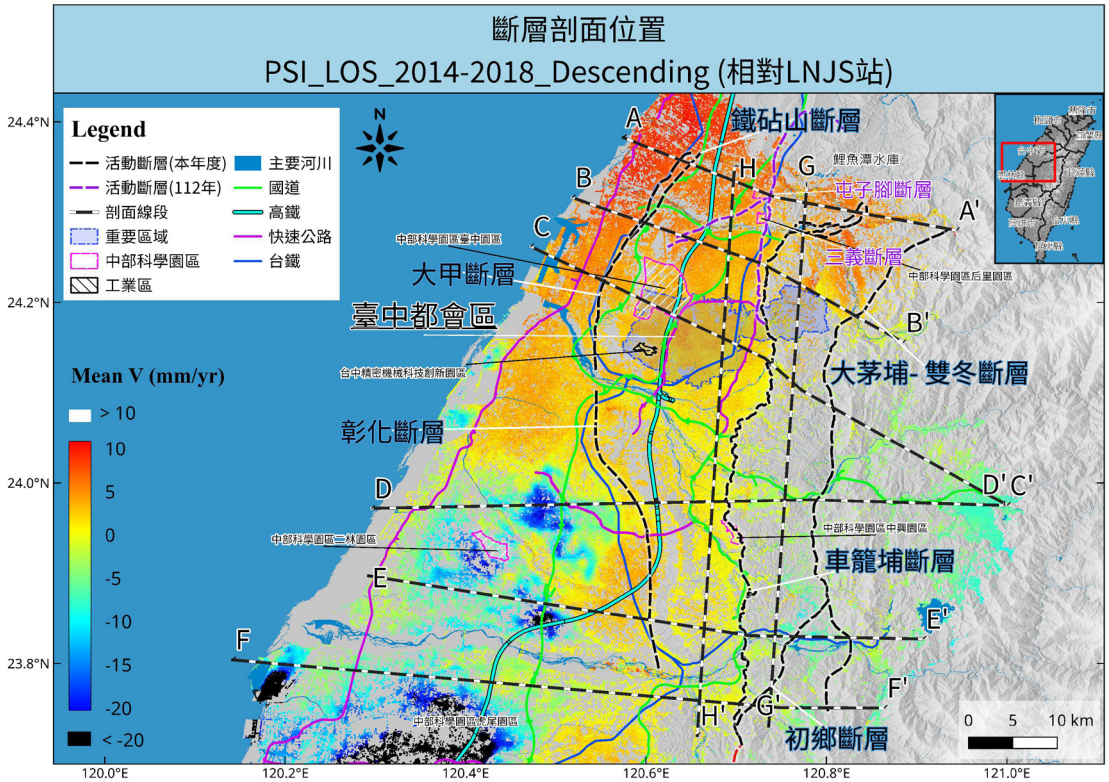


圖 3-16：2014-2018 降軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-16：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the Faults.

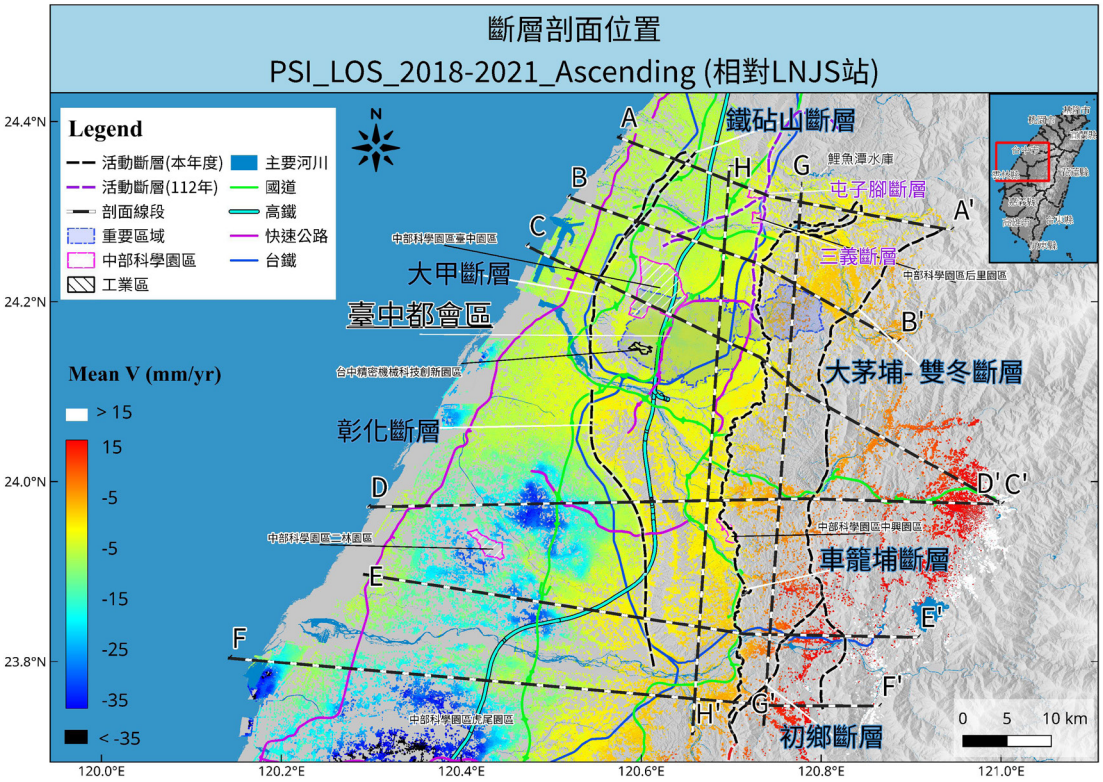


圖 3-17：2018-2021 升軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-17：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Faults.

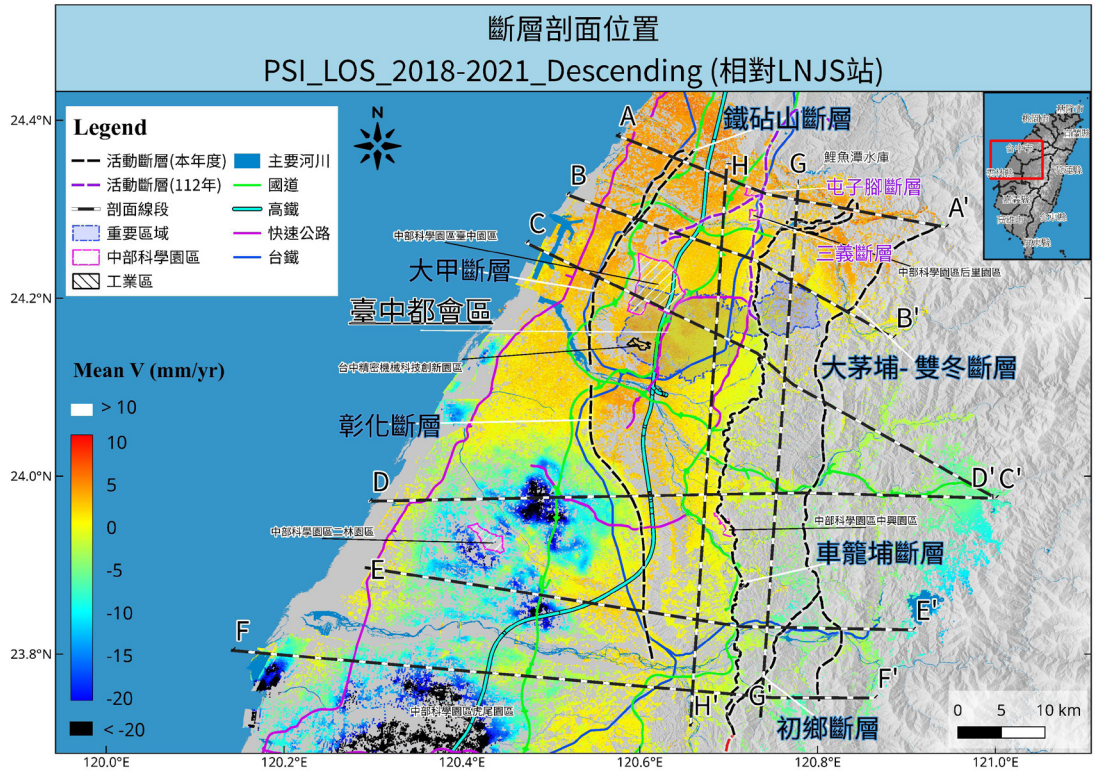


圖 3-18：2018-2021 降軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-18：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Faults.

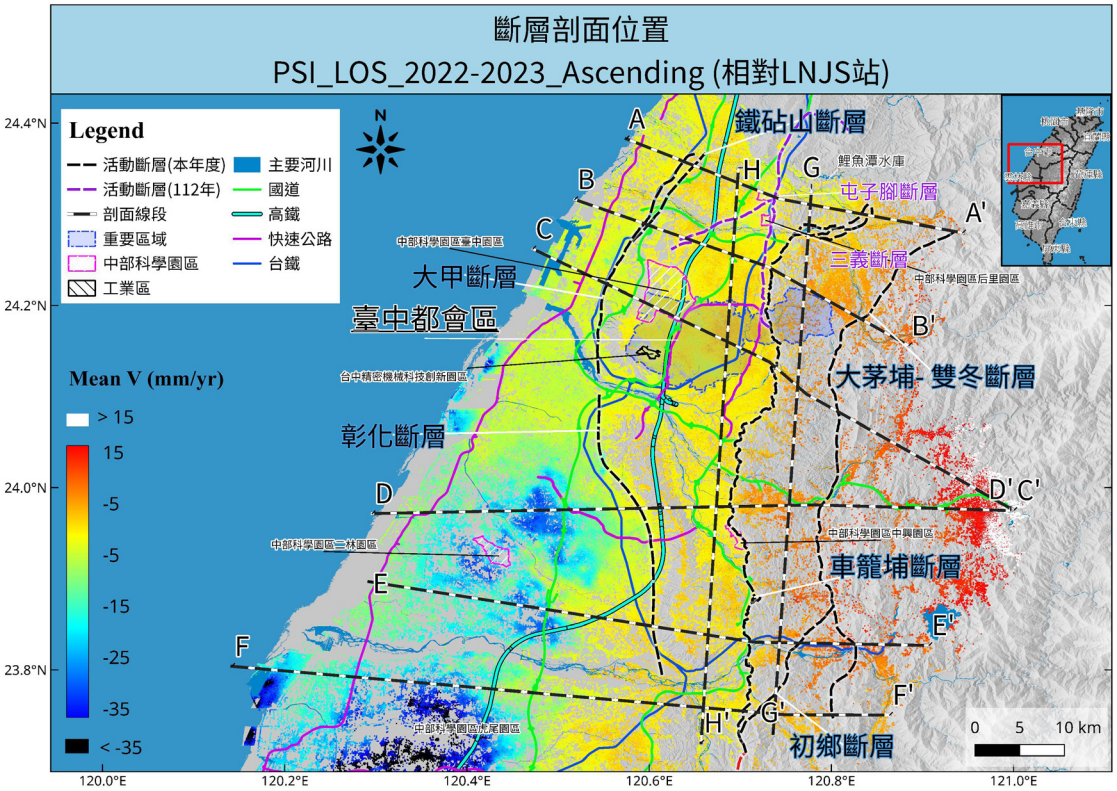


圖 3-19：2022-2023 升軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-19：Average LOS velocity fields between 2022 and 2023 processed with images of ascending orbits and profiles across the Faults.

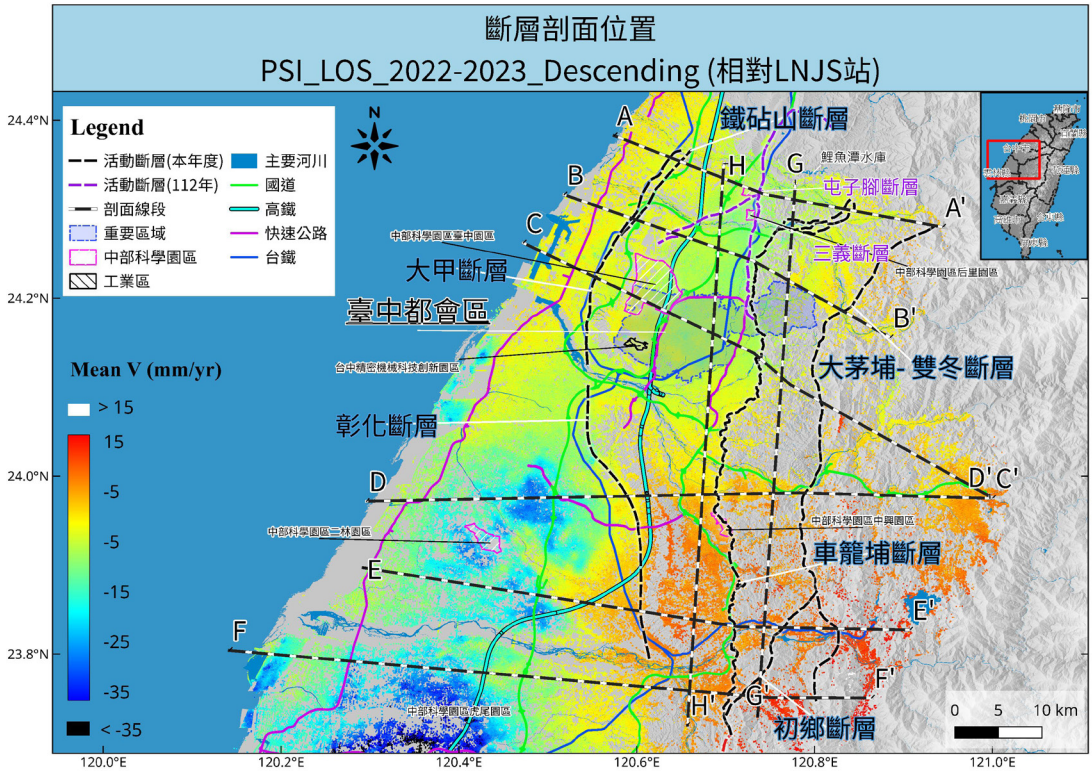


圖 3-20：2022-2023 降軌道方向 LOS 平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-20：Average LOS velocity fields between 2022 and 2023 processed with images of descending orbits and profiles across the Faults.

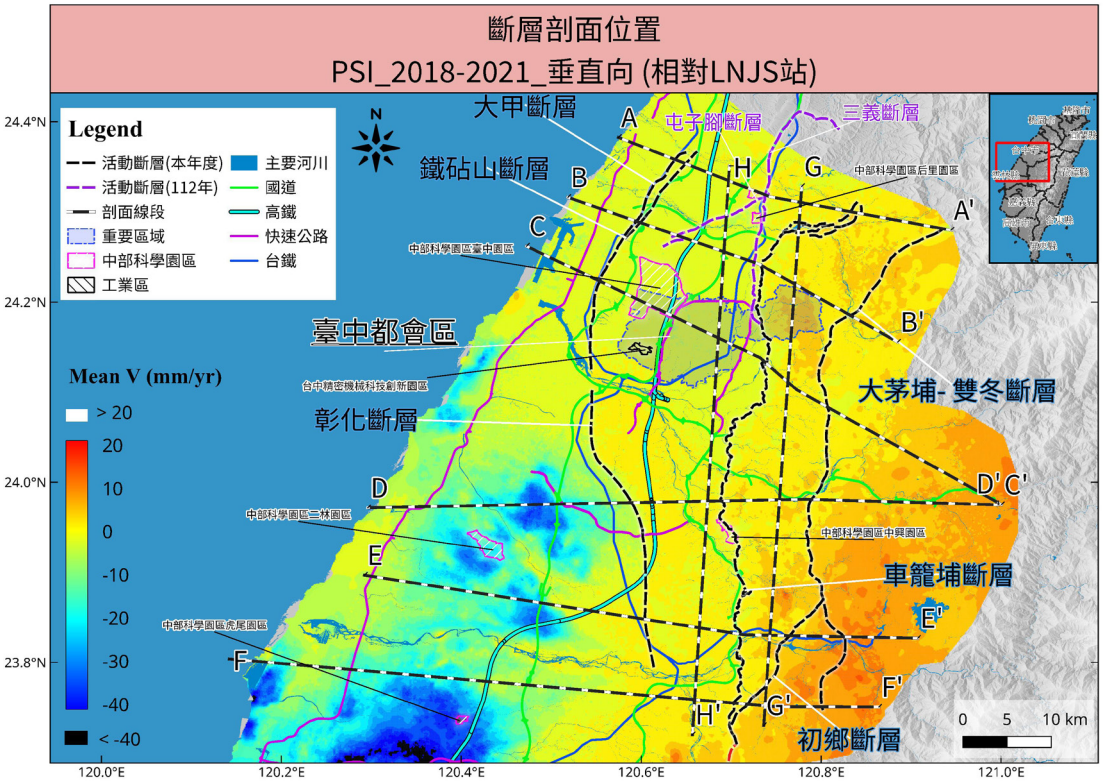


圖 3-21：2018-2021 年 PSI 解析的垂直向平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-21：Vertical average velocity fields between 2018 and 2021 processed with PSI data and profiles across the Faults.

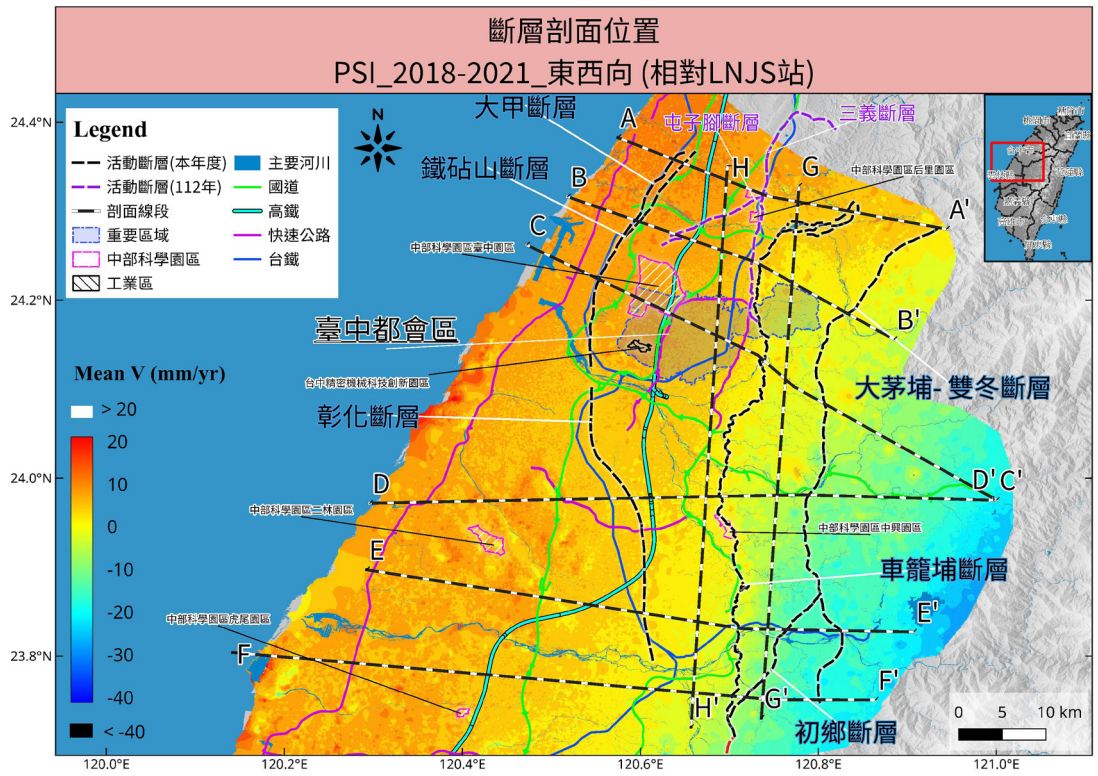


圖 3-22：2018-2021 年 PSI 解析的東西向平均速度場與剖面位置圖。

Figure 3-22：East-west average velocity fields between 2018 and 2021 processed with PSI data and profiles across the Faults.

3-6-1 A 剖面

A 剖面通過六條斷層，分別是大甲斷層（TCA）、鐵砧山斷層（TCS）、屯子腳斷層（TTC）、三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 A 剖面在各斷層兩側沒有明顯的 LOS 速度落差（圖 3-15~ 圖 3-22），2014 年至 2018 年升降軌道成果顯示剖面西側 LOS 速度大於剖面東側，2018 年至 2021 年降軌道方向無明顯變化，升軌道方向呈現剖面西側 LOS 速度小於剖面東側，2022 年至 2023 年升降軌道成果呈現剖面西側 LOS 速度小於剖面東側，2018 至 2021 年的東西向速度呈現剖面東側以向東速度小於西側，垂直向速度場呈現剖面東側抬升速度大於西側。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-23 所示，大甲斷層至鐵砧山斷層之間在 2014 至 2018 年約有 1~2 mm/yr 的 LOS 速度變化，2022 至 2023 年升軌道方向約有 2~3 mm/yr 的 LOS 速度變化，但在其他時期沒有明顯落差。三義斷層與屯子腳斷層位置十分接近，兩斷層兩側除了在 2018 年至 2021 年升軌道方向沒有觀測到明顯變化，其餘時期方向約有 2~4 mm/yr 的 LOS 速度變化。車籠埔斷層東側至分枝間各時期皆有觀測到速度變化，2022 年至 2023 年升軌道方向最大約 4 mm/yr 速度落差，其餘時期速度變化較小約在 1~2 mm/yr 之間。車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層東側進入山區，植被較多 PS 點較少，平均線僅能提供參考，各時期 A 剖面升降軌觀測到的 LOS 速度變化趨勢很接近。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-24 所示，A 剖面西側以向東速度為主，至剖面東側逐漸減少，在各斷層兩側並無明顯速度變化。垂直向則是剖面西側為下陷，至剖面東側逐漸轉為抬升。大茅埔 - 雙冬斷層兩側有垂直速度變化，但此處植被茂密，PS 點數少，是否為真實下陷訊號需要其他資料或野外調查佐證。

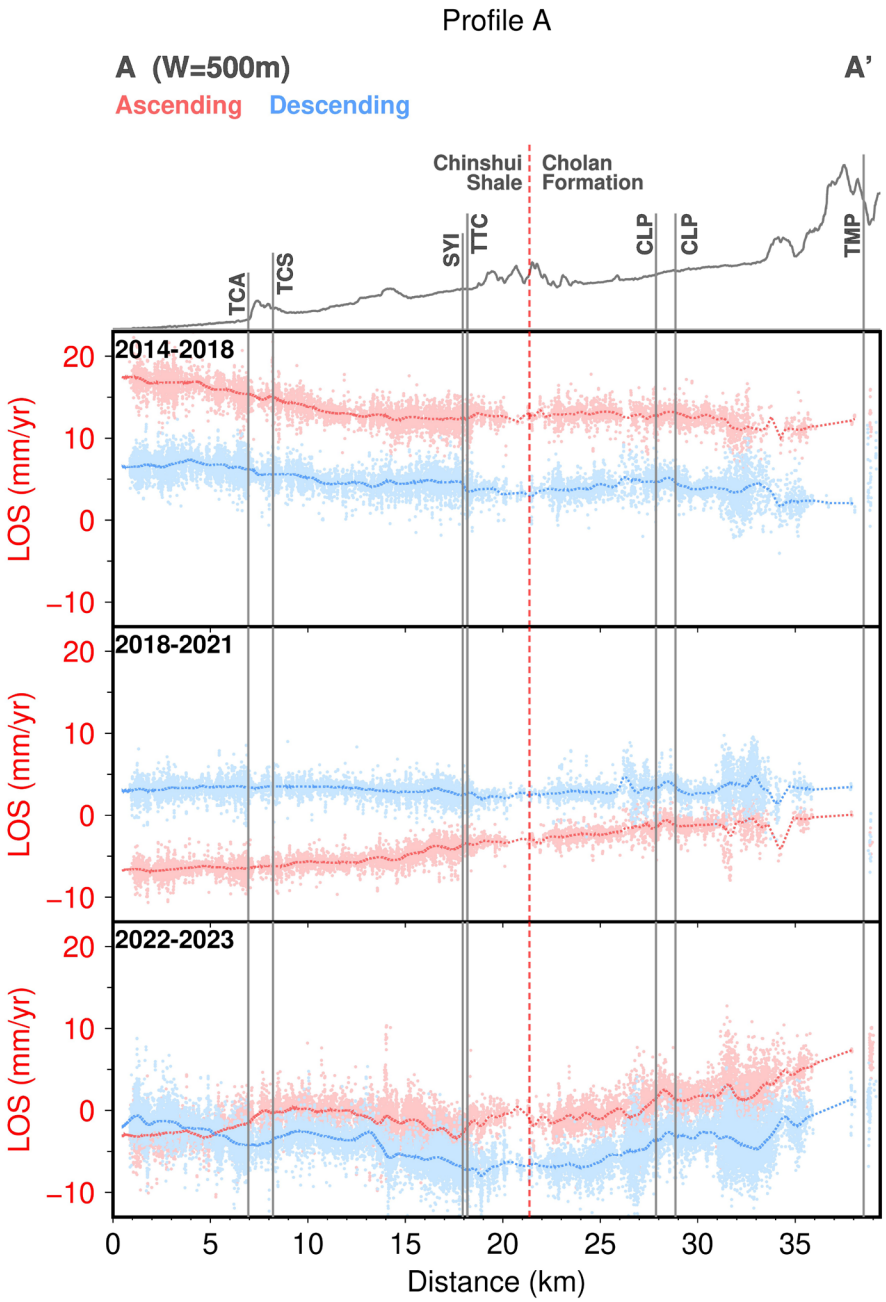


圖 3-23：各時期 A 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置分別為大甲斷層（TCA）、鐵砧山斷層（TCS）、屯子腳斷層（TTC）、三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-23：Result of profile A in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines are the fault location for Tachia Fault (TCA), Tiechanshan Fault (TCS), Tuntzuchiao Fault (TTC), Sanyi Fault (SYI), Chelungpu Fault (CLP) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

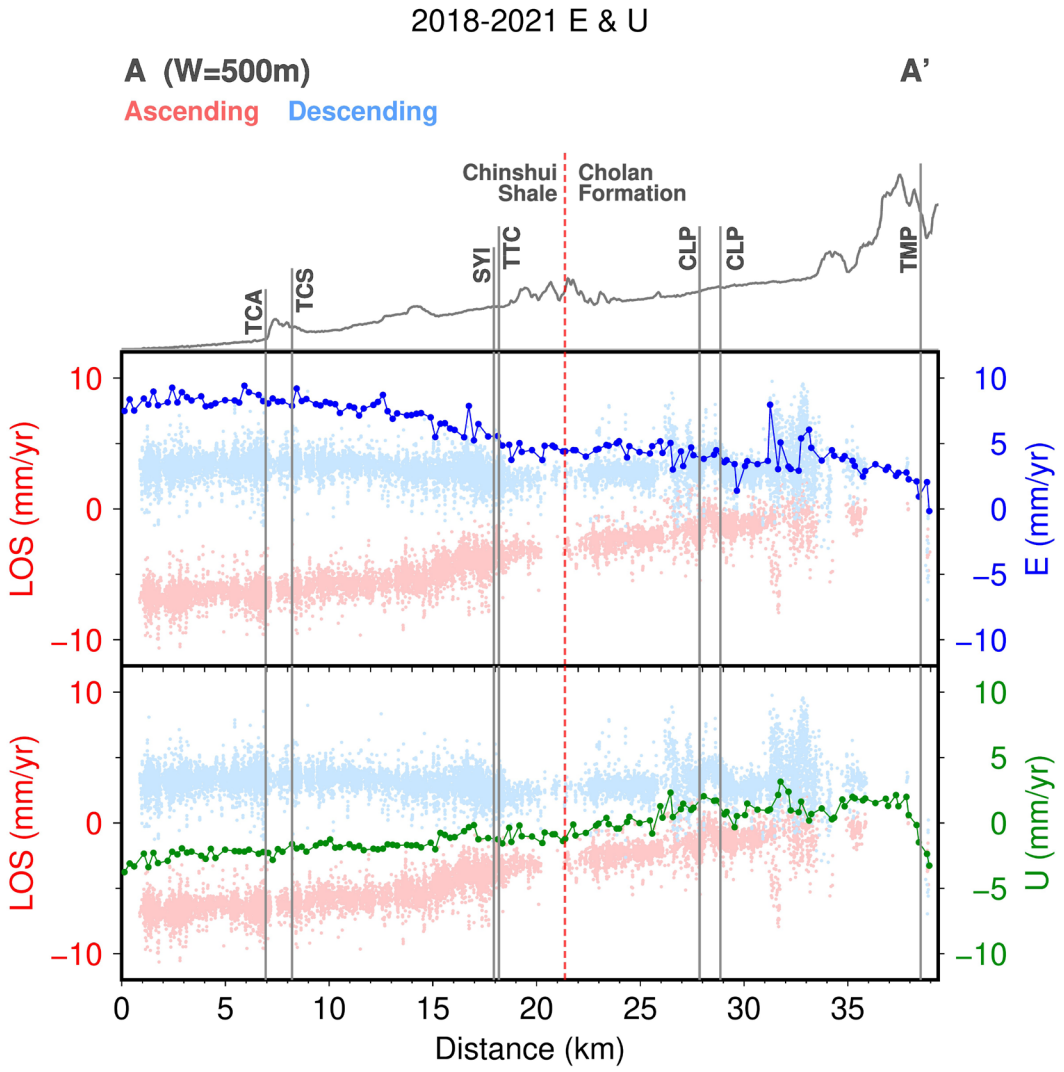


圖 3-24：2018-2021 年 A 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為大甲斷層（TCA）、鐵砧山斷層（TCS）、屯子腳斷層（TTC）、三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-24：Results of profile A from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines are the fault location for Tachia Fault (TCA), Tiechanshan Fault (TCS), Tuntzuchiao Fault (TTC), Sanyi Fault (SYI), Chelungpu Fault (CLP) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

3-6-2 B 剖面

B 剖面通過六條活動斷層，分別是大甲斷層（TCA）、鐵砧山斷層（TCS）、屯子腳斷層（TTC）、三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 B 剖面在各斷層兩側沒有明顯的 LOS 速度落差，2014 年至 2018 年降軌道方向在車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層之間約有 3~5 mm/yr 速度變化，升軌道方向則無明顯變化，其餘時期在車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層之間約有 2~3 mm/yr 速度變化。2018 至 2021 年的東西向速度呈現剖面東側以向東速度為主，垂直向速度場呈現剖面西側抬升速度大於東側，車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層之間約有 3~5 mm/yr 速度變化（圖 3-15~ 圖 3-22）。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-25 所示，三個時期的升降軌道在車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層之間皆有觀測到速度變化，檢閱文獻將新社線型的位置標在剖面上，發現與速度變為位置一致，LOS 速度落差最大約為 4 mm/yr，2018 年至 2021 年升軌道方向的變化量最小約為 2 mm/yr。大甲斷層（TCA）、鐵砧山斷層（TCS）、屯子腳斷層（TTC）、三義斷層（SYI）等則無明顯 LOS 速度落差。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-26 所示，剖面西側以向東速度為主，至剖面東側逐漸減少，在各斷層兩側並無明顯速度變化。垂直向則是剖面西側為下陷，至車籠埔斷層逐漸轉為抬升。新社線型有 2~3 mm/yr 的東西向速度差以及大約 4 mm/yr 的垂直向速度差。東西向速度與垂直向速度在錦水頁岩與卓蘭層交界速度變化梯度變大，至卓蘭層與頭嵙山層交界趨緩。

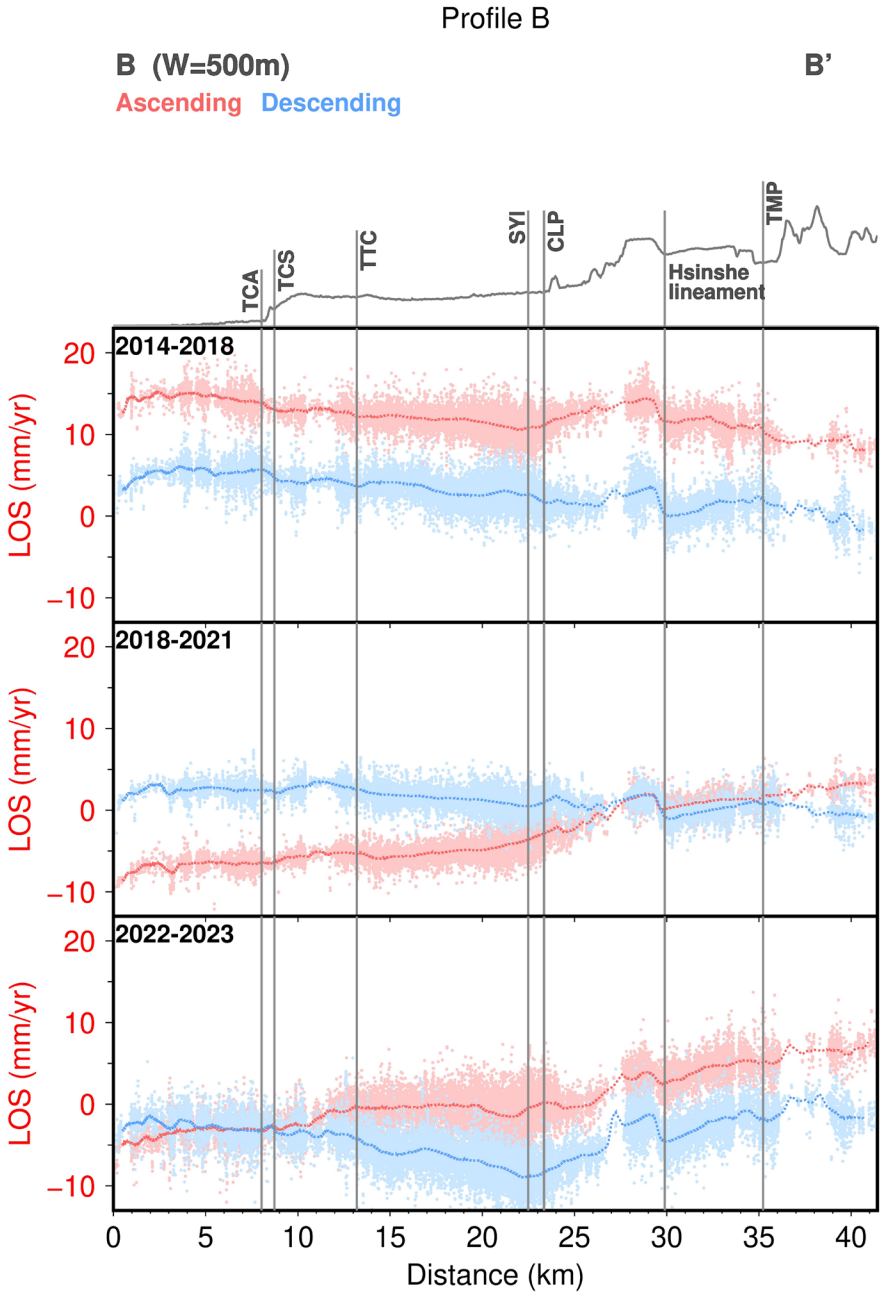


圖 3-25：各時期 B 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置分別為大甲斷層（TCA）、鐵砧山斷層（TCS）、屯子腳斷層（TTC）、三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）、新社線型以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-25：Result of profile B in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines are the fault location for Tachia Fault (TCA), Tiechanshan Fault (TCS), Tuntzuchiao Fault (TTC), Sanyi Fault (SYI), Chelungpu Fault (CLP), Hsinshe lineament and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

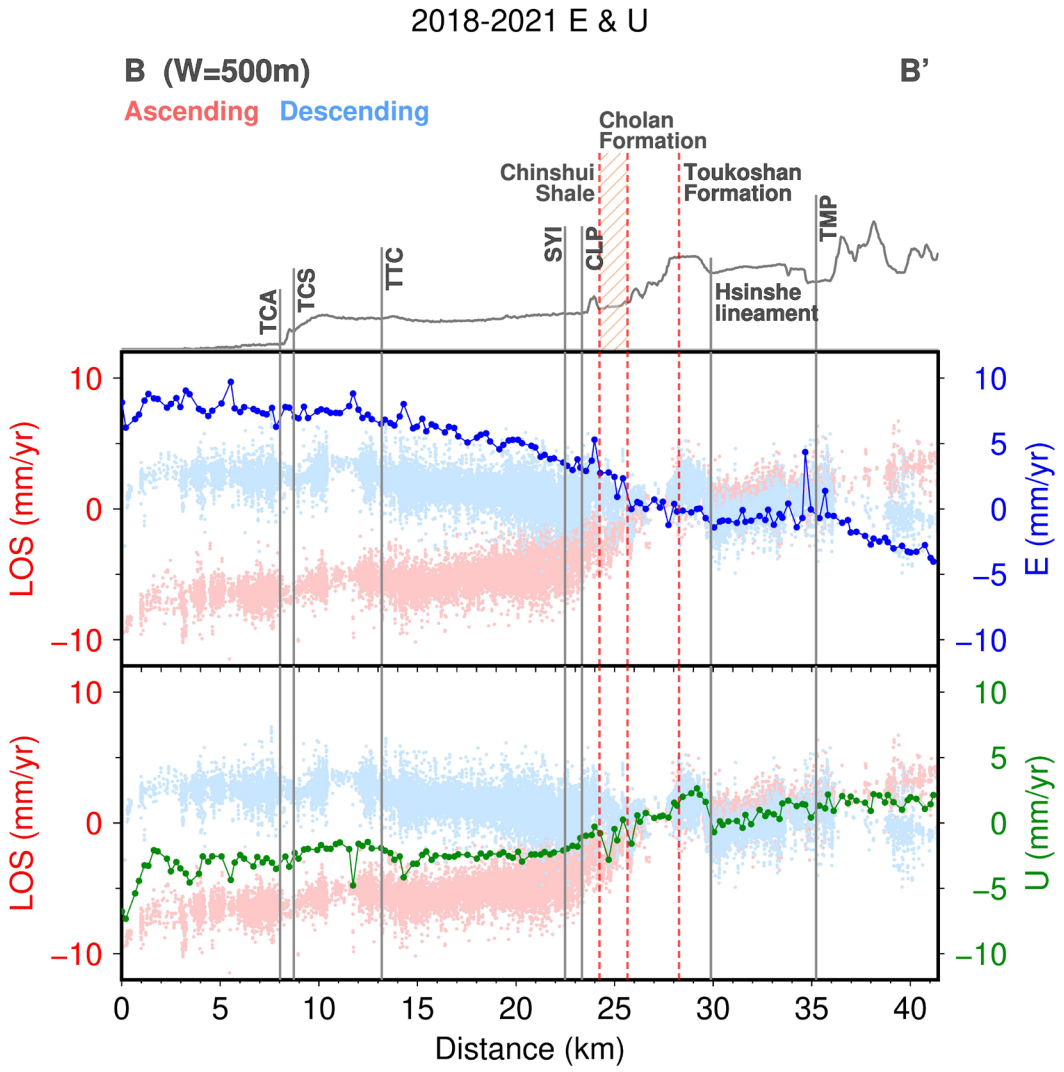


圖 3-26：2018-2021 年 B 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為大甲斷層（TCA）、鐵砧山斷層（TCS）、屯子腳斷層（TTC）、三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）、新社線型以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-26：Results of profile B from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines are the fault location for Tachia Fault (TCA), Tiechanshan Fault (TCS), Tuntzuchiao Fault (TTC), Sanyi Fault (SYI), Chelungpu Fault (CLP), Hsinshe lineament and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

3-6-3 C 剖面

C 剖面通過三條斷層，分別是大甲斷層（TCA）、車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 C 剖面在各斷層兩側沒有明顯的 LOS 速度落差（圖 3-15~ 圖 3-22），升軌道方向 LOS 速度場顯示，2014 年至 2018 年剖面沿線無明顯速度變化，其餘時期剖面西側 LOS 速度小於剖面東側。降軌道方向 LOS 速度場顯示 2014 年至 2018 年與 2018 年至 2021 年剖面西側 LOS 速度大於剖面東側，2022 年至 2023 年反之。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-27 所示，2018 年至 2021 年與 2022 年至 2023 年升降軌道在大甲斷層處有 LOS 速度落差，由 3~4 mm/yr 降至 1~2 mm/yr，2014 年至 2018 年則無明顯 LOS 速度差異。剖面在 35 公里左右有 1~2 mm/yr 的 LOS 速度差，該處恰好位於卓蘭層與頭嵙山層交界，可能為岩性變化造成速度差異。大茅埔 - 雙冬斷層因植被較多 PS 點較少，無法有效獲得地表變形資訊。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-28 所示，C 剖面西側以向東速度為主，通過車籠埔斷層後逐漸轉為向西，大甲斷層約有 2 mm/yr 的東西向速度變化，其餘斷層則無明顯東西向速度變化。垂直向則是剖面西側為下陷，通過車籠埔斷層後逐漸轉為抬升，大甲斷層約有 3 mm/yr 的垂直向速度變化，卓蘭層內岩性邊界與頭嵙山層交界有速度變化，需要近一步佐證。

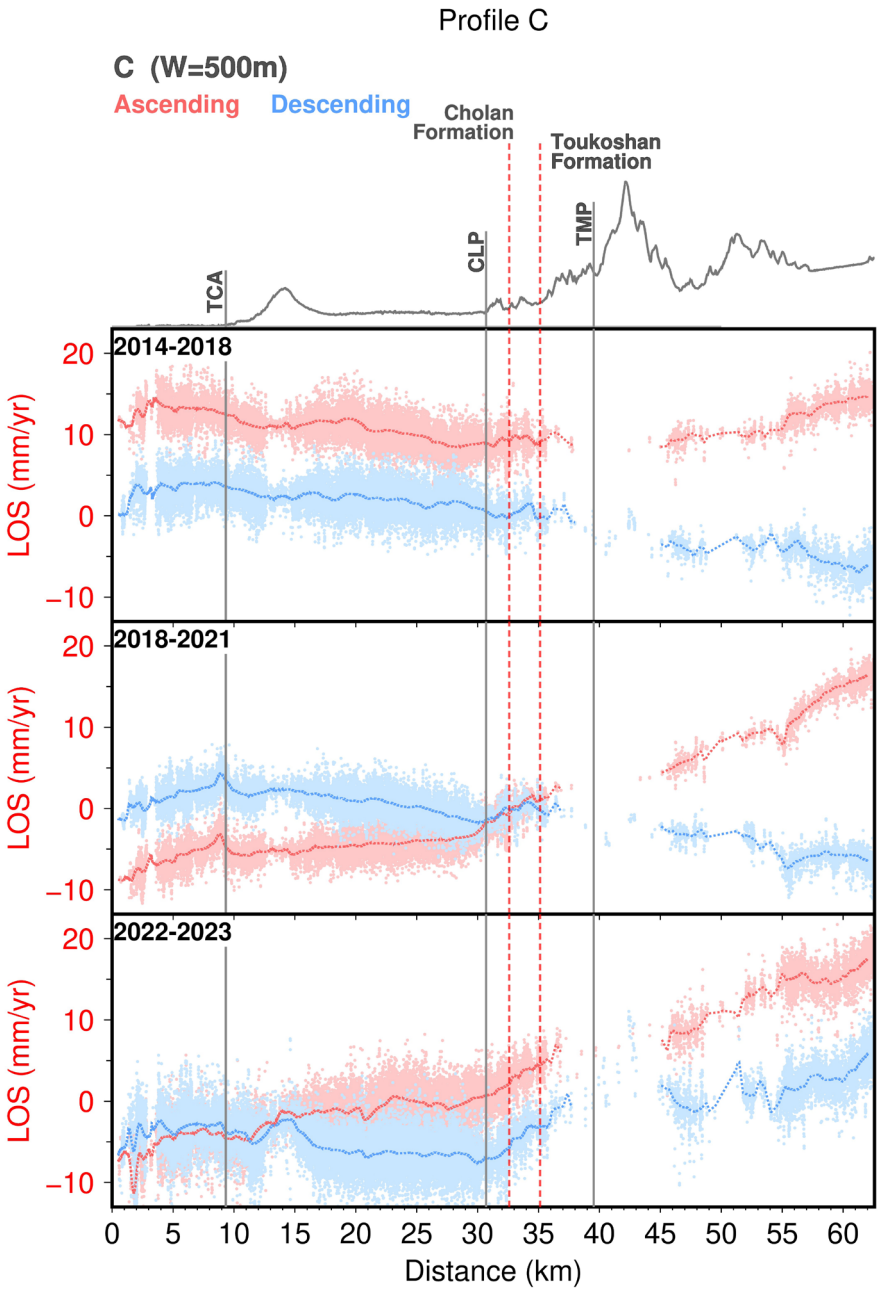


圖 3-27：各時期 C 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置分別為大甲斷層（TCA）、車籠埔斷層（TLP）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-27：Result of profile C in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines are the fault location for Tachia Fault (TCA), Chelungpu Fault (CLP) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

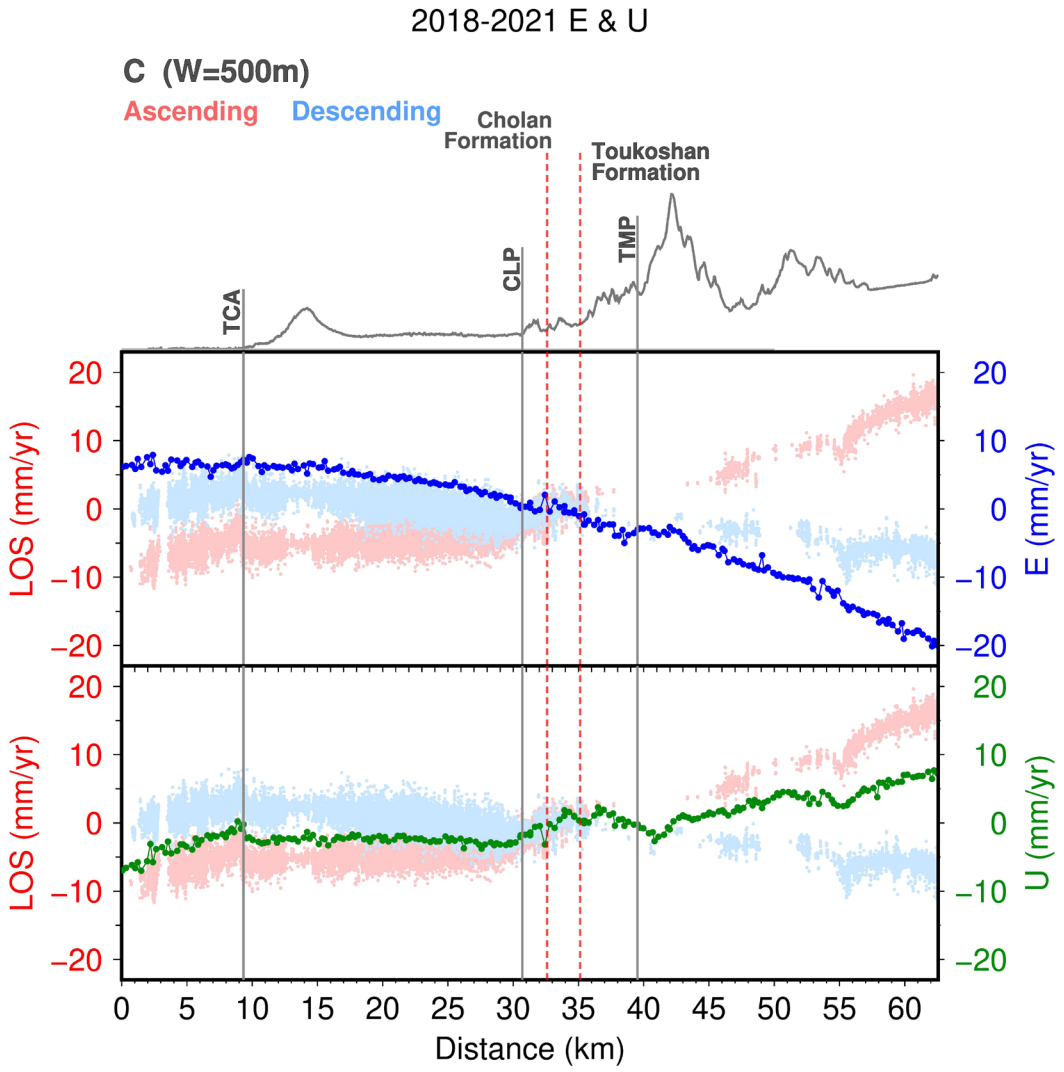


圖 3-28：2018-2021 年 C 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為大甲斷層（TCA）、車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-28：Results of profile C from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines are the fault location for Tachia Fault (TCA), Chelungpu Fault (CLP) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

3-6-4 D 剖面

D 剖面通過四條斷層，分別是彰化斷層（CHA）、車籠埔斷層（CLP）、隘寮斷層（AIL）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 D 剖面 2018 年至 2023 年兩時期升軌道方向在車籠埔斷層附近約有 2~4 mm/yr 速度變化，其餘斷層無明顯變化（圖 3-15~ 圖 3-22）。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-29 所示，車籠埔斷層東側 LOS 速度增加，至隘寮斷層處有明顯 LOS 速度變化，升軌道方向約有 4 mm/yr 速度差異，降軌道方向約有 3~7 mm/yr 速度差異，2014 年至 2018 年最大，此後遞減。彰化地區的地層下陷情形，升軌道方向以 2018 年至 2021 年最大，可達 -33 mm/yr，降軌道方向以 2022 年至 2023 年最大，可達 -25 mm/yr。各時期 D 剖面升降軌觀測到的 LOS 速度變化趨勢很接近。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-30 所示，D 剖面西側以向東速度為主，通過車籠埔斷層後逐漸轉為向西，且速度變化梯度大於剖面西側，在各斷層兩側並無明顯速度變化。垂直向則是剖面西側為地層下陷區域，通過車籠埔斷層後逐漸轉為抬升。隘寮斷層垂直速度變化較東西向速度變化明顯，約有 4 mm/yr。

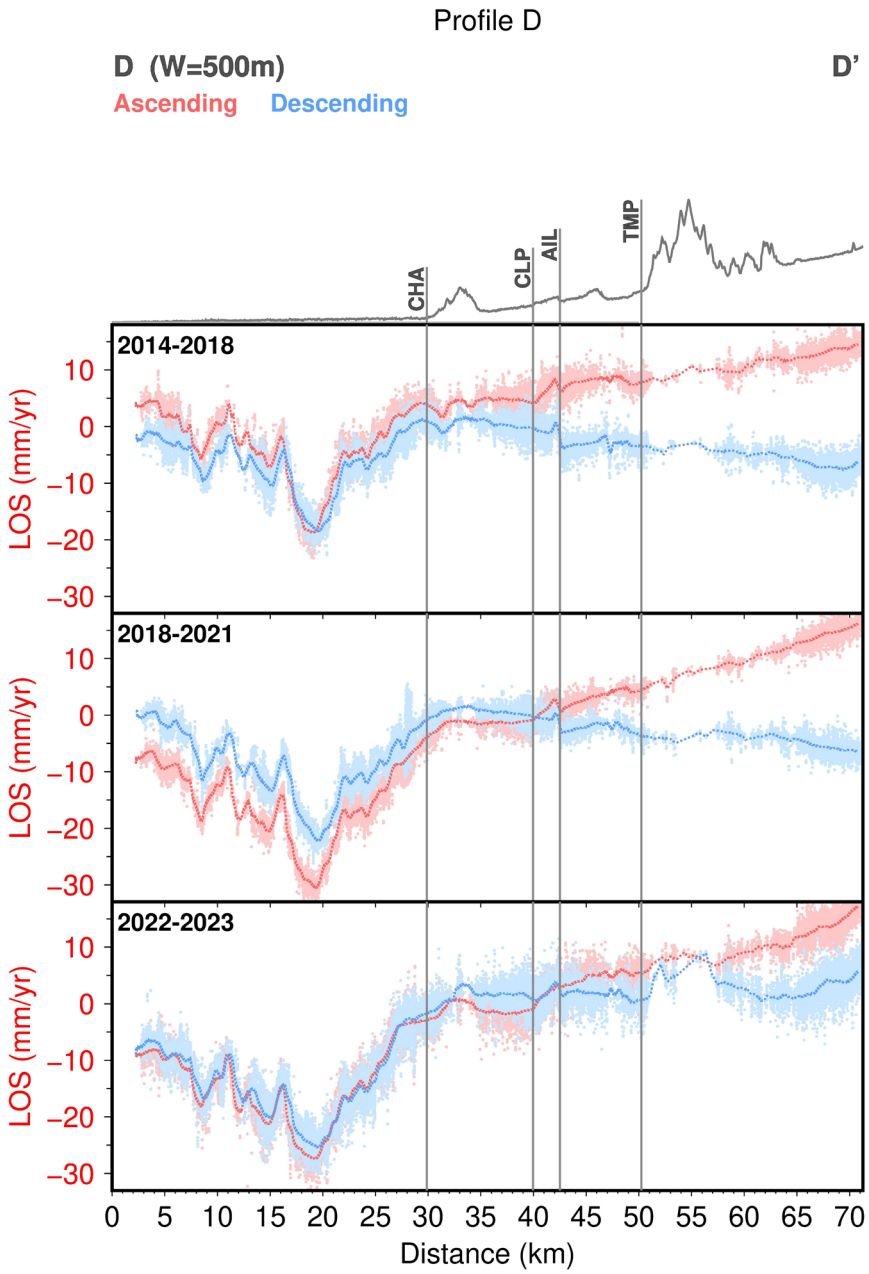


圖 3-29：各時期 D 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置分別為彰化斷層（CHA）、車籠埔斷層（CLP）、隘寮斷層（AIL）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-29：Result of profile D in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines are the fault location for Changhua Fault (CHA), Chelungpu Fault (CLP), Ailiao Fault (AIL) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

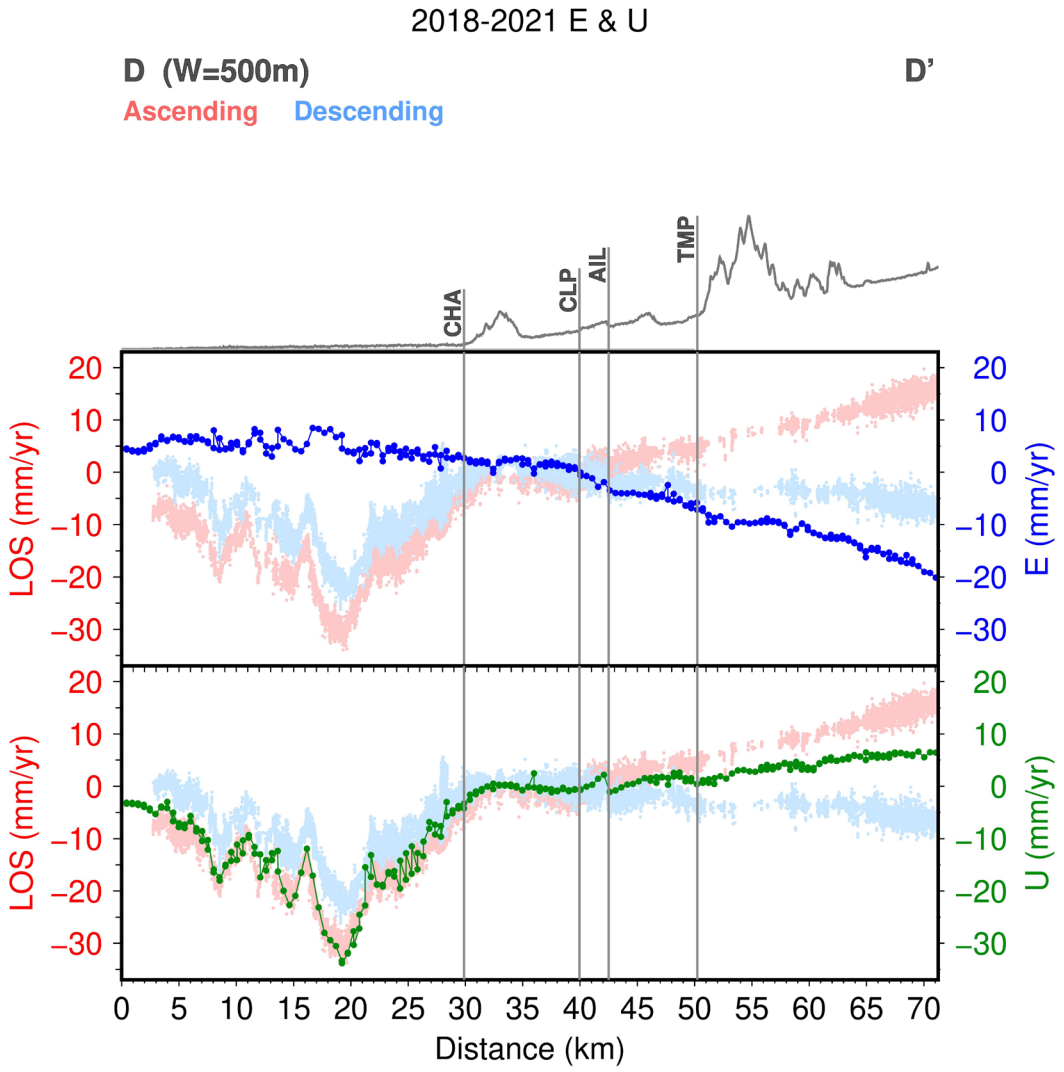


圖 3-30：2018-2021 年 D 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為彰化斷層（CHA）、車籠埔斷層（CLP）、隘寮斷層（AIL）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-30：Results of profile A from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines are the fault location for Changhua Fault (CHA), Chelungpu Fault (CLP), Ailiao Fault (AIL) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

3-6-5 E 剖面

E 剖面通過四條斷層，分別是彰化斷層（CHA）、車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 E 剖面在各斷層無明顯速度差異（圖 3-15~ 圖 3-22），在升軌道方向呈現剖面東側 LOS 速度大於剖面西側，降軌道方向前兩時期呈現剖面東側 LOS 速度小於剖面西側，2022 年至 2023 年反之。2018 至 2021 年的東西向速度呈現剖面東側以向西速度為主，垂直向速度場呈現剖面西側抬升速度小於東側。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-31 所示，彰化地區的地層下陷情形，升軌道方向以 2018 年至 2021 年最大，可達 -28 mm/yr，降軌道方向以 2022 年至 2023 年最大，可達 -23 mm/yr。在剖面 45 公里處有一明顯速度變化， 2014 年至 2018 年升軌道方向最大約為 7 mm/yr，其餘時期與軌道方向約為 3~5 mm/yr，該處為卓蘭層與頭嵙山層交界，推測岩性變化為此處 LOS 速度差異的原因。2014 年至 2021 年兩個時期顯示車籠埔斷層以東觀測數值相反，與水平向變化量有關。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-32 所示，E 剖面西側以向東速度為主，通過車籠埔斷層後逐漸轉為向西速度，在各斷層兩側並無明顯速度變化。垂直向則是剖面西側為下陷，通過車籠埔斷層後逐漸轉為抬升。剖面在 45 公里的卓蘭層與頭嵙山層交界處東西向與垂直向速度皆有變化，東西向變化大於垂直向變化。

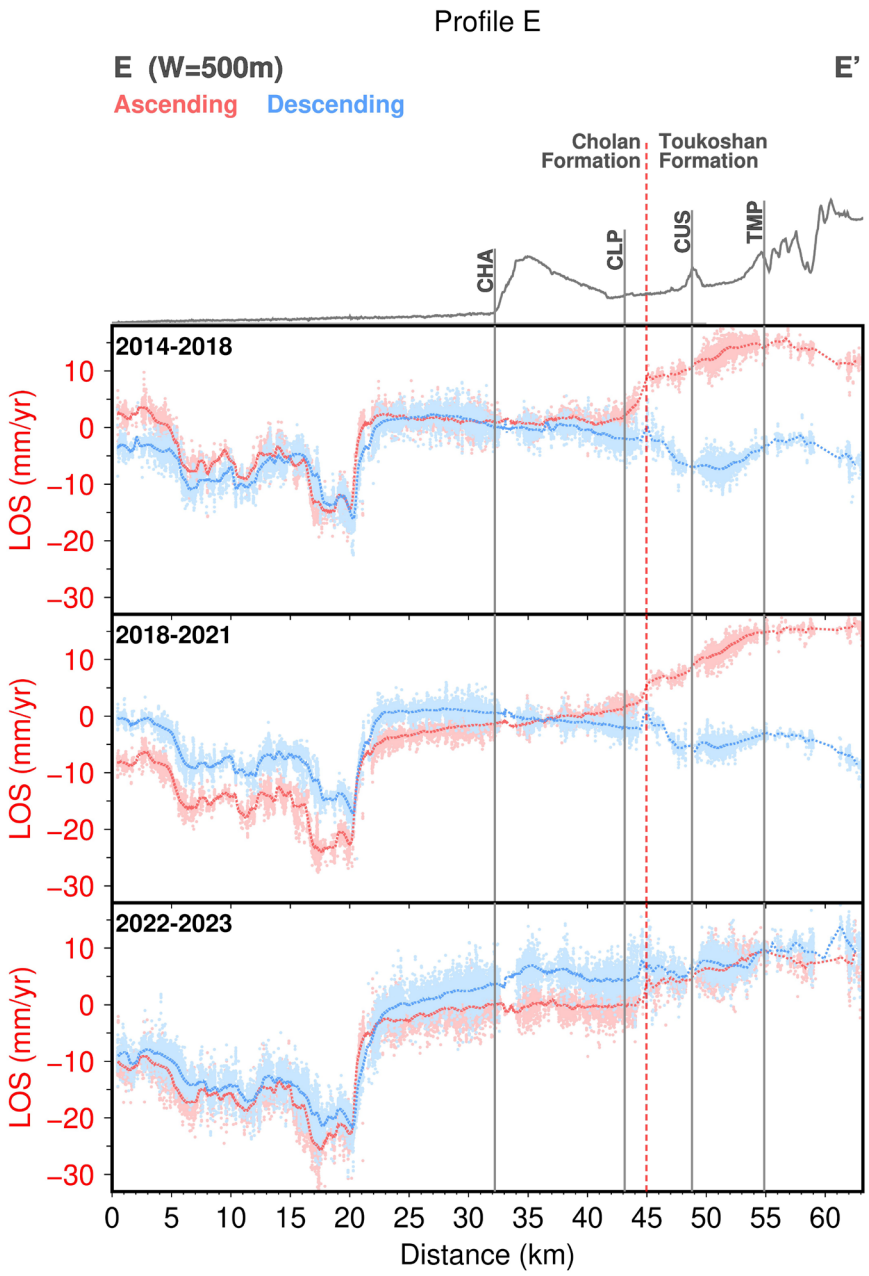


圖 3-31：各時期 E 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置分別為彰化斷層（CHA）、車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-31：Result of profile E in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines are the fault location for Changhua Fault (CHA), Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

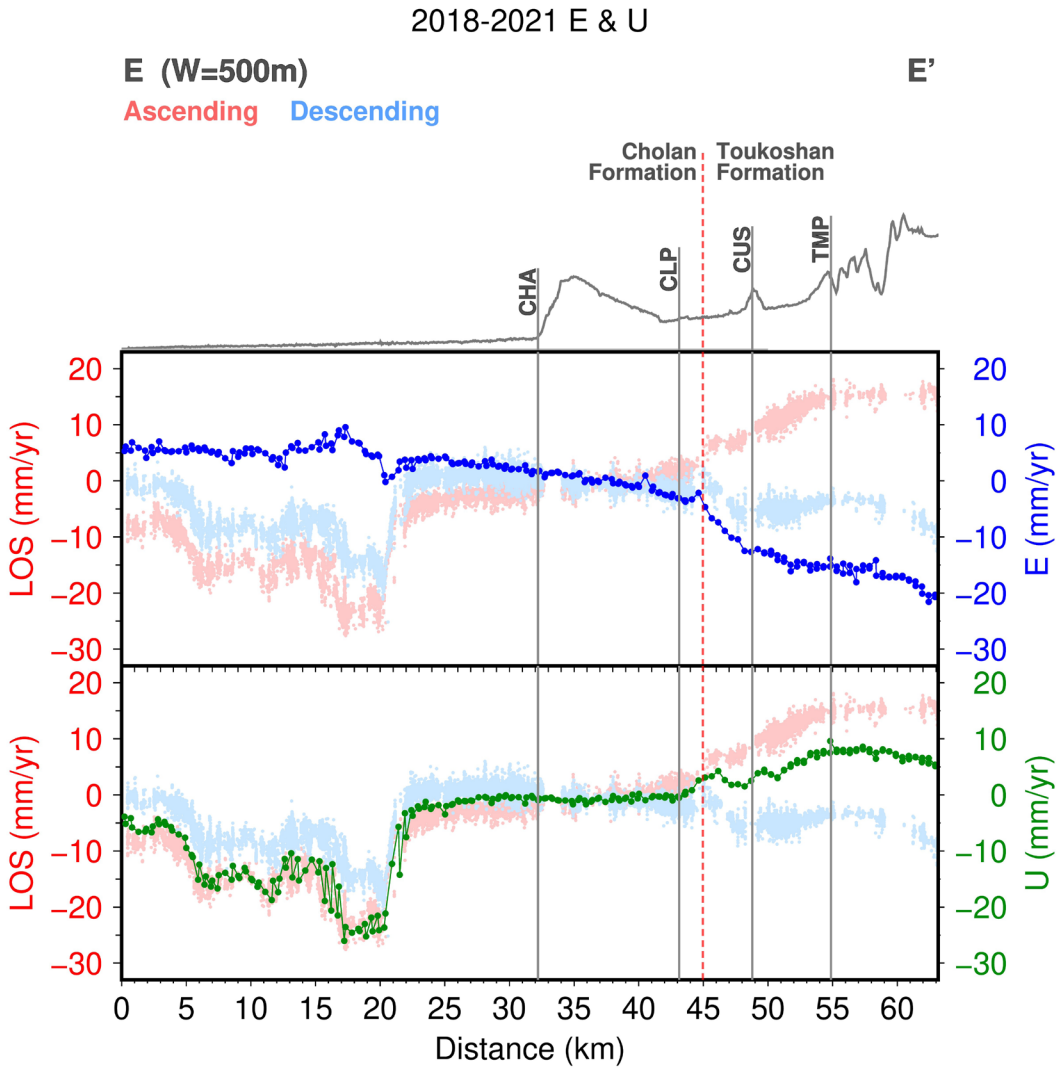


圖 3-32：2018-2021 年 E 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為彰化斷層（CHA）、車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-32：Results of profile E from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines are the fault location for Changhua Fault (CHA), Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

3-6-6 F 剖面

F 剖面通過三條斷層，分別是車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 F 剖面在各斷層無明顯速度差異（圖 3-15~ 圖 3-22），在升軌道方向呈現剖面東側 LOS 速度大於剖面西側，在初鄉斷層附近約有 2~3 mm/yr 的 LOS 速度變化，降軌道方向前兩時期呈現剖面東側 LOS 速度小於剖面西側，2022 年至 2023 年反之。2018 至 2021 年的東西向速度呈現剖面東側以向西速度為主，垂直向速度場呈現剖面西側抬升速度小於東側，在初鄉斷層附近有速度變化約為 3 mm/yr。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-33 所示，F 剖面在斷層兩側無明顯的 LOS 速度落差，2014 年至 2021 年兩時期的升軌道方向成果以及 2022 年至 2023 年升降軌道成果，顯示剖面通過初鄉斷層後 LOS 速度增加，前兩個時期的速度變化梯度大於 2022 年至 2023 年，在剖面約 64 公里處有一 3~5 mm/yr 的 LOS 速度落差，降軌道方向差異大於升軌道方向，該處應為鹿谷向斜。2014 年至 2021 年兩個時期顯示車籠埔斷層以東觀測數值相反，與水平向變化有關。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-34 所示，F 剖面西側以向東速度為主，通過車籠埔斷層後逐漸轉為向西速度，在各斷層兩側並無明顯速度變化。垂直向則是剖面西側為下陷，通過車籠埔斷層後逐漸轉為抬升。垂直向速度剖面在 64 公里處的鹿谷向斜約有 5 mm/yr 的速度落差，東西向垂直剖面則無明顯落差，垂直向與東西向速度剖面皆顯示在車籠埔斷層至鹿谷向斜之間速度變化梯度較大。

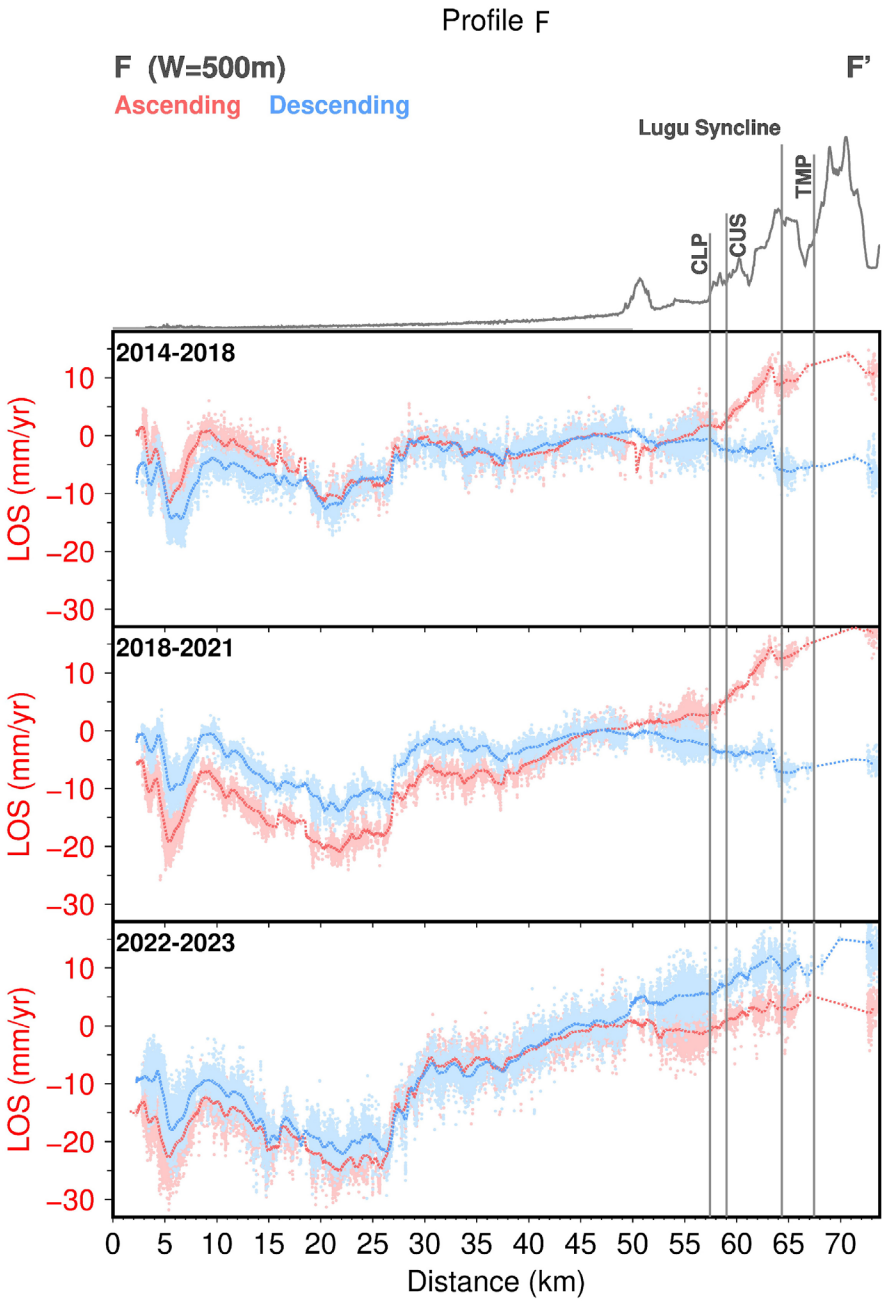


圖 3-33：各時期 F 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）、鹿谷向斜以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-33：Result of profile F in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS), Lugu Syncline and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

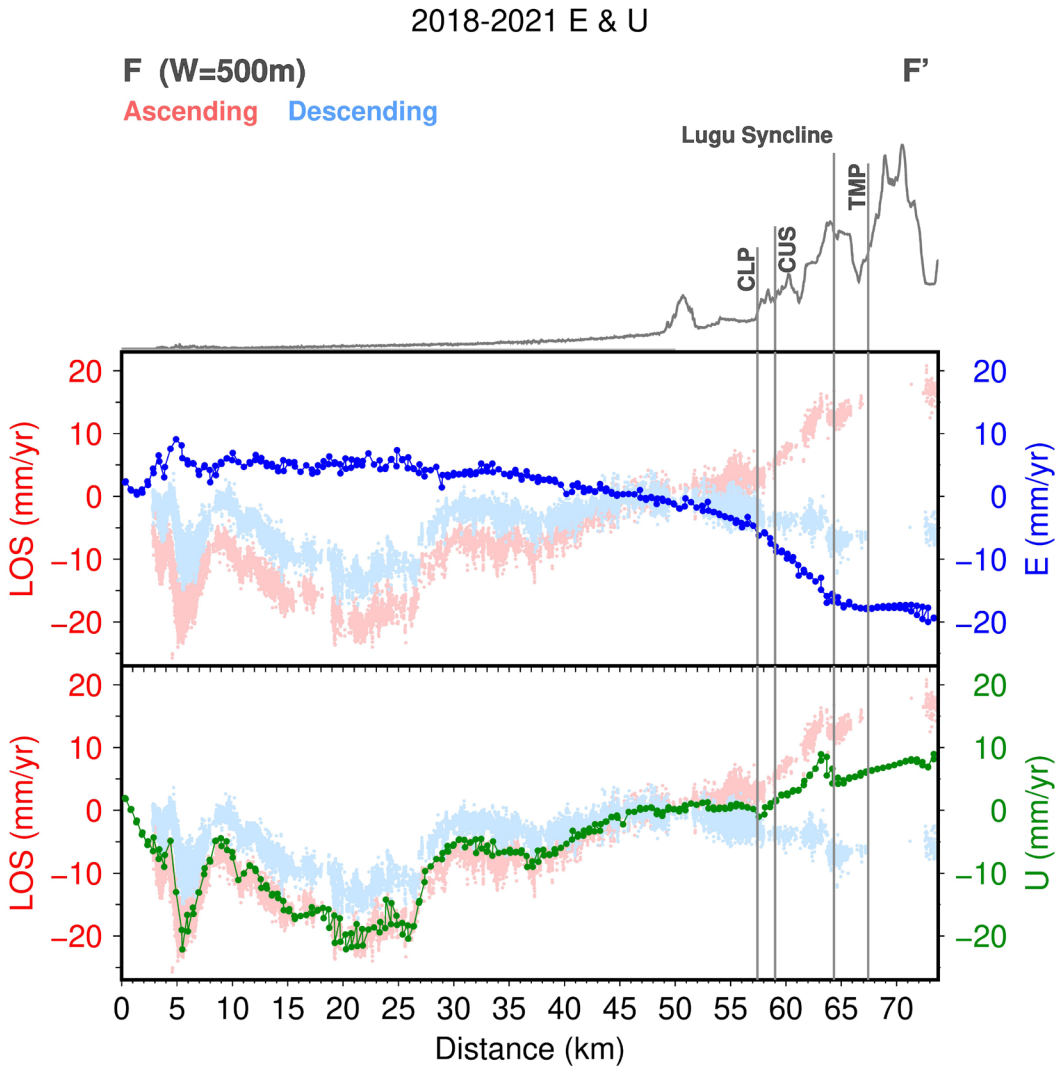


圖 3-34：2018-2021 年 F 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）、鹿谷向斜以及大茅埔 - 雙冬斷層（TMP）。

Figure 3-34：Results of profile F from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS), Lugu Syncline and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

3-6-7 G 剖面

G 剖面為車籠埔斷層東側通過臺中都會區的北 - 南走向剖面，通過二條斷層，由北至南分別為車籠埔斷層（CLP）及其分支以及初鄉斷層（CUS），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 G 剖面在各斷層兩側無明顯速度落差（圖 3-15~ 圖 3-22），2014 年至 2018 年升軌道方向剖面無明顯速度變化，2018 年至 2021 年升軌道方向及 2022 年至 2023 年升降軌道方向呈現北部 LOS 速度小於南部，2014 年至 2018 年及 2018 年至 2021 年降軌道方向則呈現北部 LOS 速度大於南部，2018 至 2021 年的東西向速度呈現北部以向東速度為主，往南逐漸轉換為向西，垂直向速度場呈現北部抬升速度小於南部，在新社附近山區有一抬升速度高區約為 3~5 mm/yr，初鄉斷層附近有約 1~3 mm/yr 的速度變化。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-35 所示，斷層兩側無明顯速 LOS 速度落差，61 公里處初鄉斷層速度與 55~58 公里處速度不連續，但是缺乏斷層北側的 PSI 資料，無法確認速度變化量。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-36 所示，G 剖面在北段以向東速度為主，逐漸轉為向西，在越過大肚溪以南半段主要都是向西的速度。在平面圖中（圖 3-12）可看出車籠埔斷層兩側相對速度在北段與南段有足夠明顯的不同。 在各斷層兩側並無明顯速度變化。垂直向在 15~20、45~55 公里處有較高數值，這部分為車籠埔斷層以東的變形帶，在後面章節會討論。

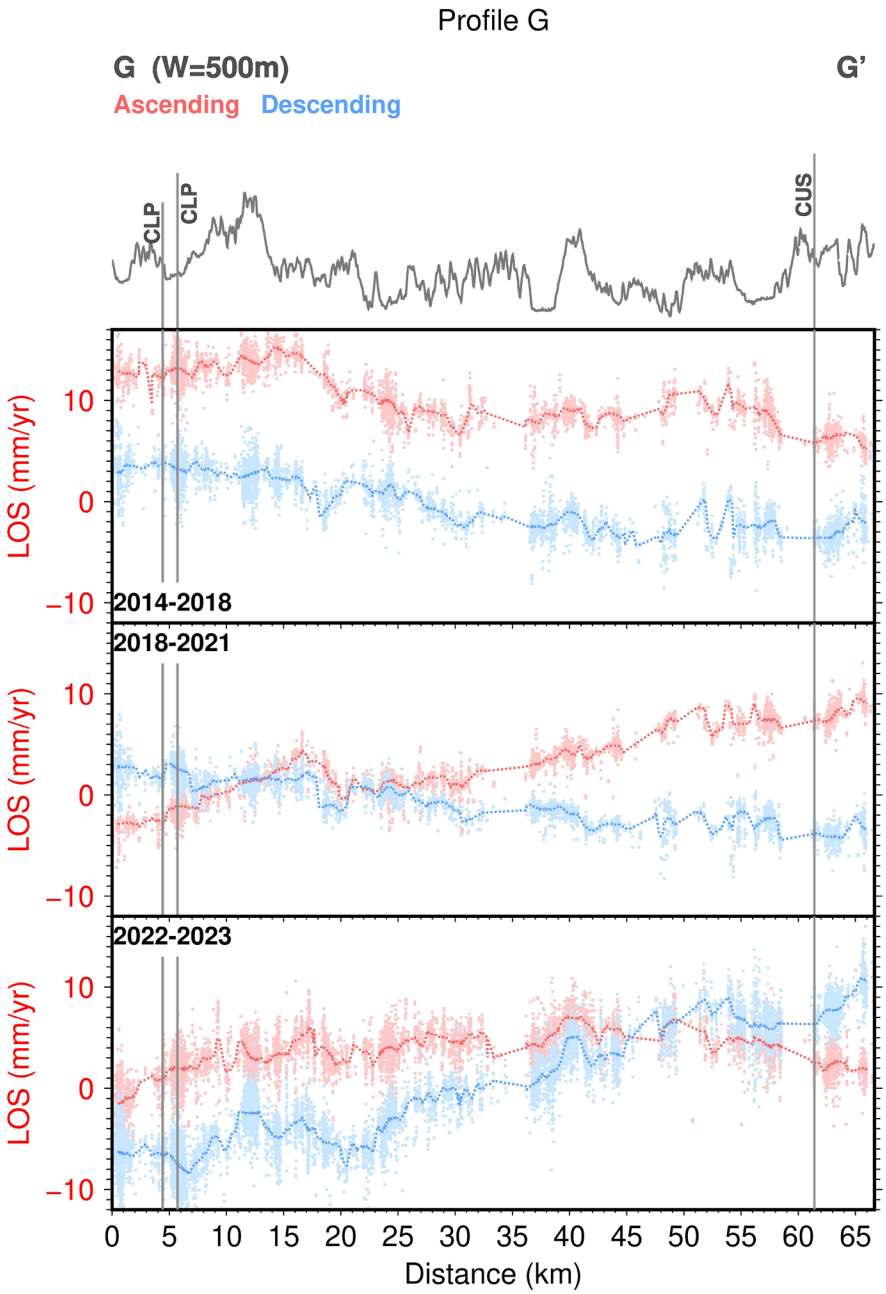


圖 3-35：各時期 G 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）及初鄉斷層（CUS）。

Figure 3-35：Result of profile G in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP) and Chuhsiang Fault (CUS).

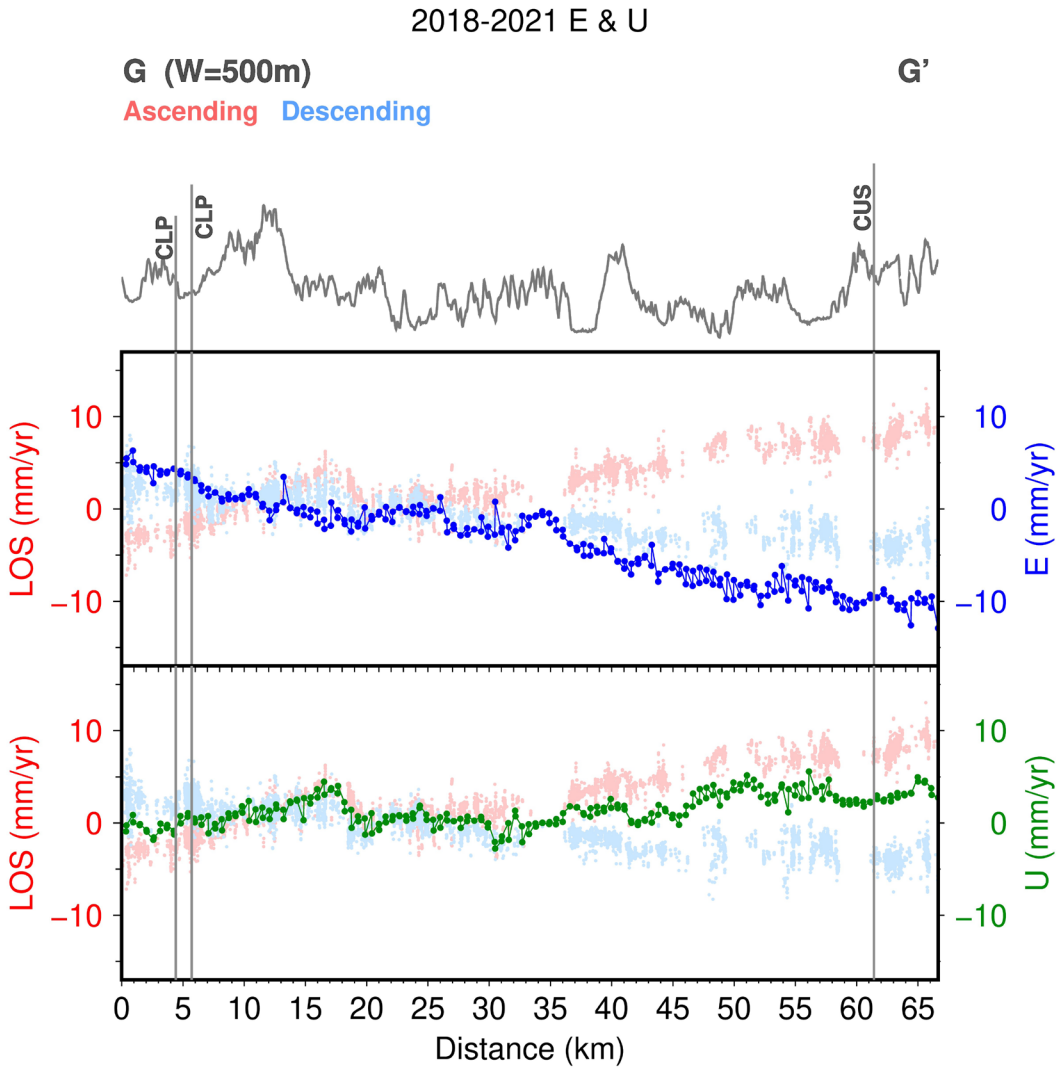


圖 3-36：2018-2021 年 G 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）及初鄉斷層（CUS）。

Figure 3-36：Results of profile G from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP) and Chuhsiang Fault (CUS).

3-6-8 H 剖面

H 剖面為車籠埔斷層西側通過臺中都會區的北 - 南走向剖面，通過屯子腳斷層（TTC），各時期的 LOS 速度場與剖面分佈圖以及 2018 至 2021 年東西向與垂直向剖面分布圖顯示 F 剖面在各斷層兩側無明顯速度落差（圖 3-15~ 圖 3-22），2014 年至 2018 年升降軌道方向及 2018 年至 2021 年降軌道方向呈現北部 LOS 速度大於南部，2018 年至 2021 年升軌道方向及 2022 年至 2023 年降軌道方向呈現北部 LOS 速度小於南部，2022 年至 2023 年升軌道方向則無明顯差異，2018 至 2021 年的東西向速度呈現北部以向東速度為主，往南逐漸轉換為向西，垂直向速度場無明顯差異。

三時期的 LOS 速度剖面成果如圖 3-37 所示，斷層兩側無明顯速 LOS 速度落差，2014 年至 2018 年北部 LOS 速度大於南部，2018 年至 2021 年升降軌道方向及 2022 年至 2023 年升軌道方向剖面南北變化梯度小，2022 年至 2023 年降軌道方向呈現北部 LOS 速度小於南部。

2018 年至 2021 年東西向及垂直向剖面成果如圖 3-38 所示，H 剖面北部以向東速度為主，逐漸轉為向西，在各斷層兩側並無明顯速度變化。垂直向則是無明顯差異。

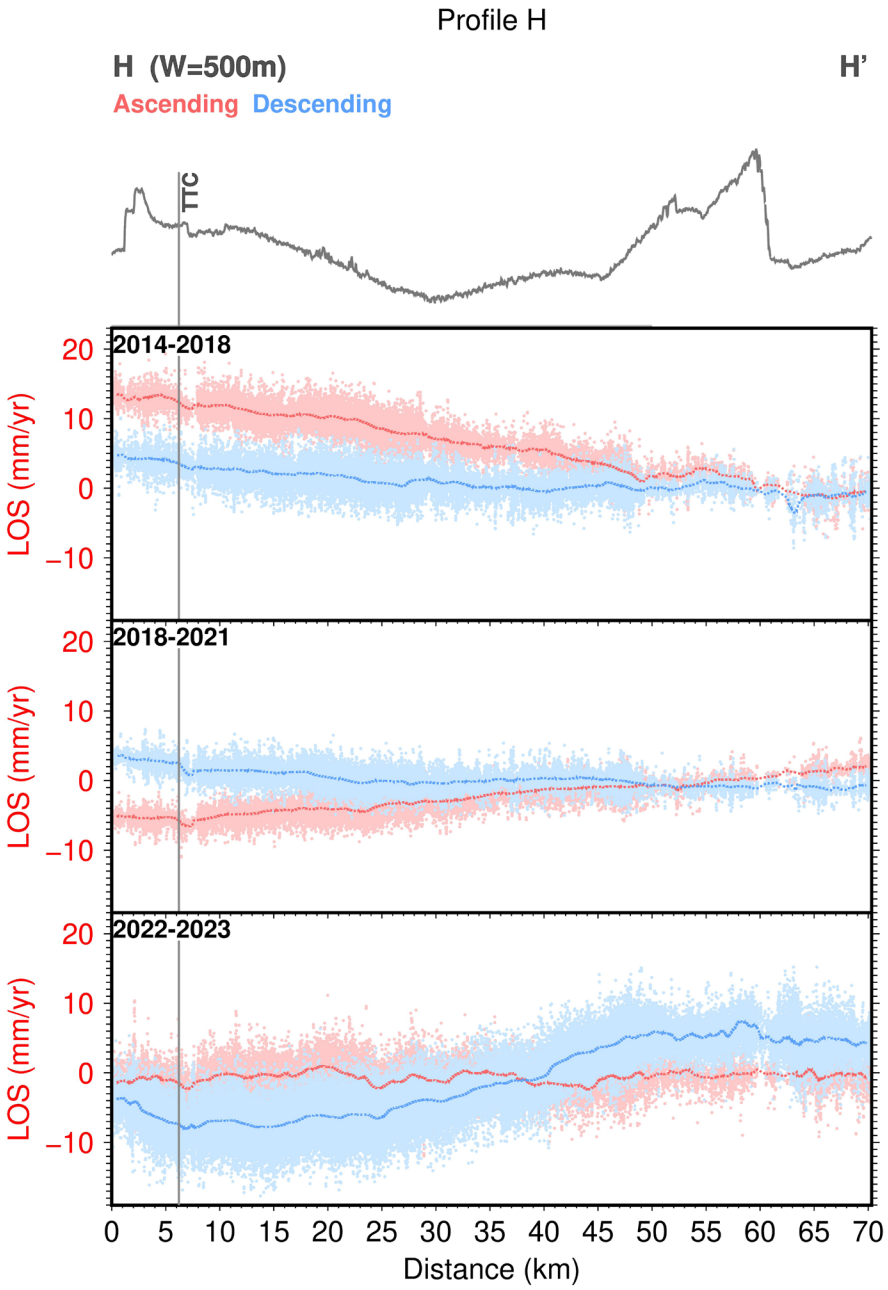


圖 3-37：各時期 H 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色虛線為斷層位置為屯子腳斷層（TTC）。

Figure 3-37：Result of profile H in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray dashed lines is the fault location for Tuntzuchiao Fault (TTC).

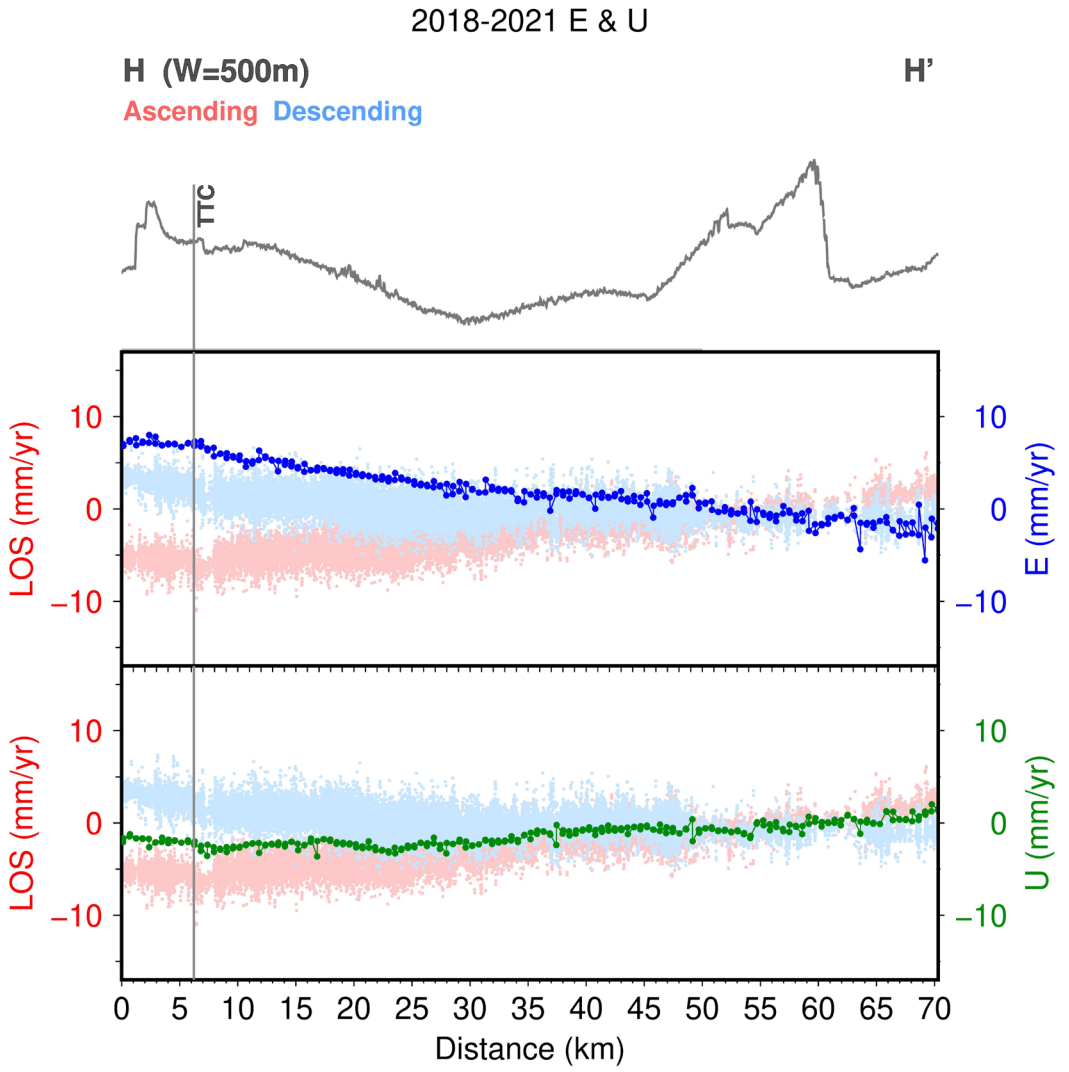


圖 3-38：2018-2021 年 H 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置為屯子腳斷層（TTC）。

Figure 3-38：Results of profile H from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom：topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray dashed lines is the fault location for Tuntzuchiao Fault (TTC).

第四章、中部地區雷達資料與其他大地測量觀測資料的比對

在這個章節中，我們呈現了雷達差分干涉資料與 GNSS 資料的比對成果。藉由不同來源的資料對比，我們可以將資料的相同與差異之處找出，並且進而對其異同探討，除了可以針對資料品質做探討之外，也可能可以對調查區域的特性有更多的了解。

本計畫選取 Sentinel-1A 與 Sentinel-1B 衛星 SAR 影像作為資料分析對象，由於 Sentinel-1B 衛星自 2018 年 2 月後固定拍攝臺灣，至 2021 年底無法接收訊號，2014-2018 年與 2022-2023 年兩時段的衛星軌道重複週期為 12 天，2018-2021 年加入 Sentinel-1B 影像頻率為 6 天，使用的影像時間自 2014 年 10 月至 2023 年 12 月，影像使用幅數如表 3-1 所示。

我們分別解算了三個時段在調查範圍內的 GNSS 資料並且先將這些計算資料轉換成雷達斜距方向的速度，再以 GNSS 測站座標為中心，搜尋周圍 500 公尺以內的 PS 點，取速度場平均值作為 PSI 於 GNSS 測站的觀測值，而標準差代表資料的離散程度。我們將結果相對於同一測站，並且畫在同一張圖上做比對，以散佈圖計算一維線性迴歸，以決定係數（R^2）檢視 PSI 與 GNSS 資料之直線關係的強度，以根均方誤差 (RMSE) 檢視預測值和觀測值之間的平均差異，評估迴歸模型的準確度。

4-1 GNSS 連續站與 PSI 資料比對

我們分別解算了 2014~2018、2018~2021、2022~2023 三個時段在調查範圍內的 GNSS 資料並且先將這些計算資料轉換成雷達斜距方向的速度，再以 GNSS 測站座標為中心，搜尋周圍 500 公尺以內的 PS 點，取速度場平均值作為 PSI 於 GNSS 測站的觀測值，而標準差代表資料的離散程度。我們將 PSI 與 GNSS 成果相對於同一測站，以散佈圖計算一維線性迴歸，以決定係數（R^2）檢視 PSI 與 GNSS 資料之直線關係的強度，以根均方誤差 (RMSE) 檢視預測值和觀測值之間的平均差異，評估迴歸模型的準確度。各時期 GNSS 數量

如表 4-1，各時期比對成果如表 4-2，測站位置如圖 4-1。2014~2018 年與 2018~2021 年我們選取林內國中 (LNJS) 為參考站，但此站在 2022~2023 年 GNSS 速度場過大，檢視林內國中 (LNJS) 與鄰近的坪頂成功國小 (PINT) 的時間序列後（圖 4-2），發現 2022 年 09 月 18 日池上地震後林內國中 (LNJS) 測站因儀器老舊無法持續提供觀測資料，至 2023 年 5 月更換天線後才繼續接收資料，資料中斷時間過長，評估後我們以坪頂成功國小 (PINT) 作為 2022~2023 年的參考站。

考量原參考點 LNJS(林內國中)2022/9/24~2023/5/15 資料空缺，且後期資料 (2023/5/15 之後) 與前期 (2022/9/24 之前) 在高程方向上有約 10 公分的差異，推測為天線位置移動造成。由於並沒有經該單位確認是否有更換紀錄，因此 2022~2023 期間的影像改以鄰近約 2.3 公里處、長期時間序列相似且穩定的 PINT(成功國小) 為參考點。

整體而言，第一個時段 2014~2018 年受限於前期 Sentinel-1A 在 2014 年 4 月時發射，待軌道穩定、十月才開始在臺灣拍攝，而 Sentinel-1B 在此時期並未拍攝臺灣地區，因此此時段的時間影像間隔與頻率相對 2018~2021 時期不穩定，這可能是造成此段時間與 GNSS 連續站對比而言相似度低的原因之一。2018~2021 隨著衛星狀態穩定，觀測時間長，影像張數多 GNSS 連續站與 PSI 比對相似度越來越高，2018~2021 年計算出的迴歸線斜率接近 1。而 2022~2023 年，雖然 Sentinel-1B 故障，僅有 Sentinel-1A 衛星一年的觀測資料，且降軌道方向於 3~6 月期間無觀測資料，影像數量甚至略低於 2014~2018 年，但衛星運行與軌道相較於發射初期穩定，且影像數量與時間跨距足夠使雷達的 LOS 速度場收斂，與 GNSS 觀測資料比對成果顯示本時期資料有一定可信度。各時期比對成果詳述於以下各子節。

表 4-1：各時期 GNSS 測站數量。

Table 4-1：Numbers of GNSS stations in each period.

	2014-2018	2018-2021	2022-2023
升軌 (Ascending)	80	82	77
降軌 (Descending)	78	81	76

表 4-2：各時期 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-2：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through every period.

	Track	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
2014-2018	Ascending	0.80	0.68	6.82
	Descending	0.84	0.89	2.52
2018-2021	Ascending	0.97	0.97	2.69
	Descending	1.07	0.91	3.18
2022-2023	Ascending	0.78	0.88	4.75
	Descending	0.87	0.88	4.44

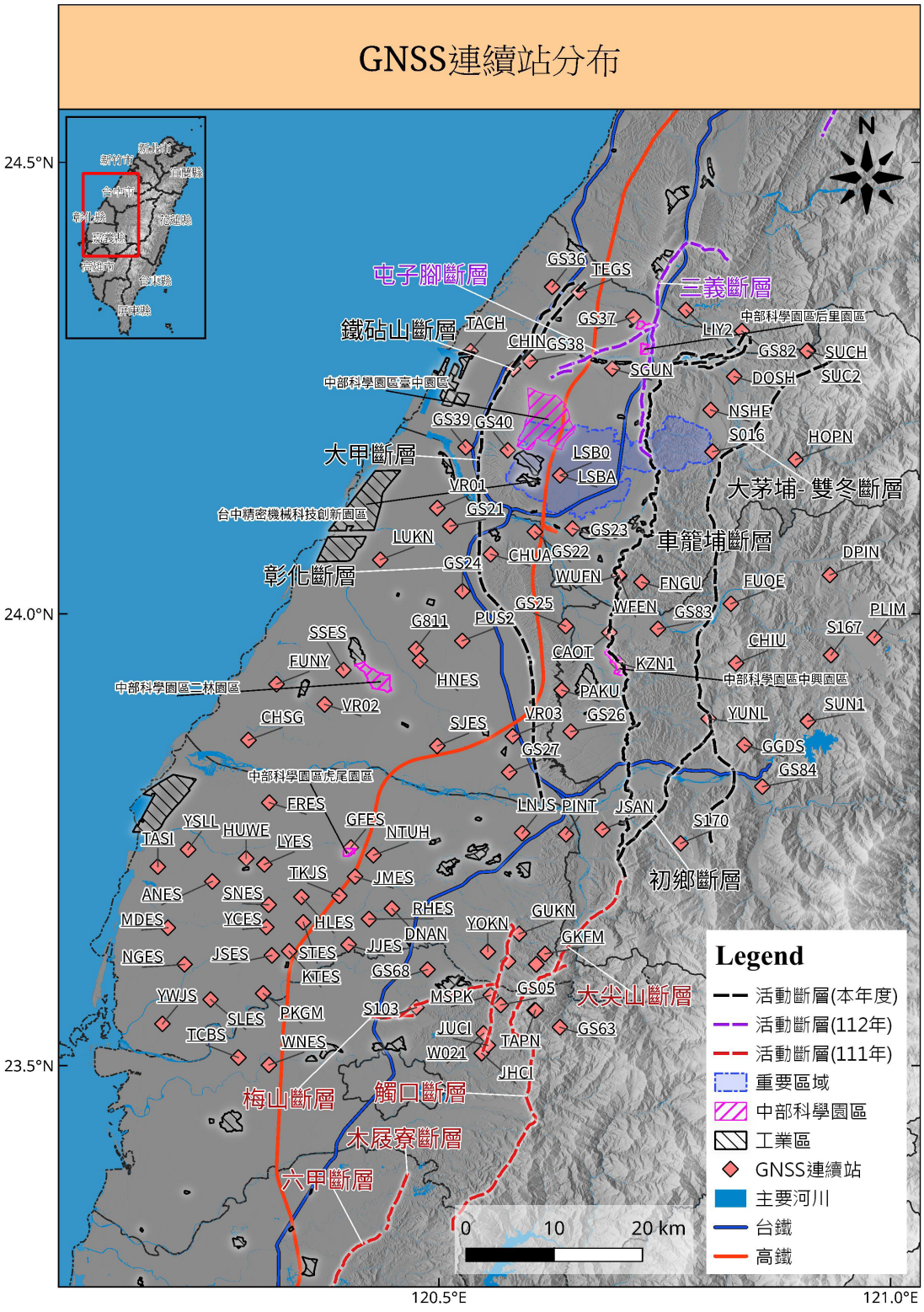


圖 4-1：GNSS 測站位置分佈圖。

Figure 4-1：The map for the GNSS stations.

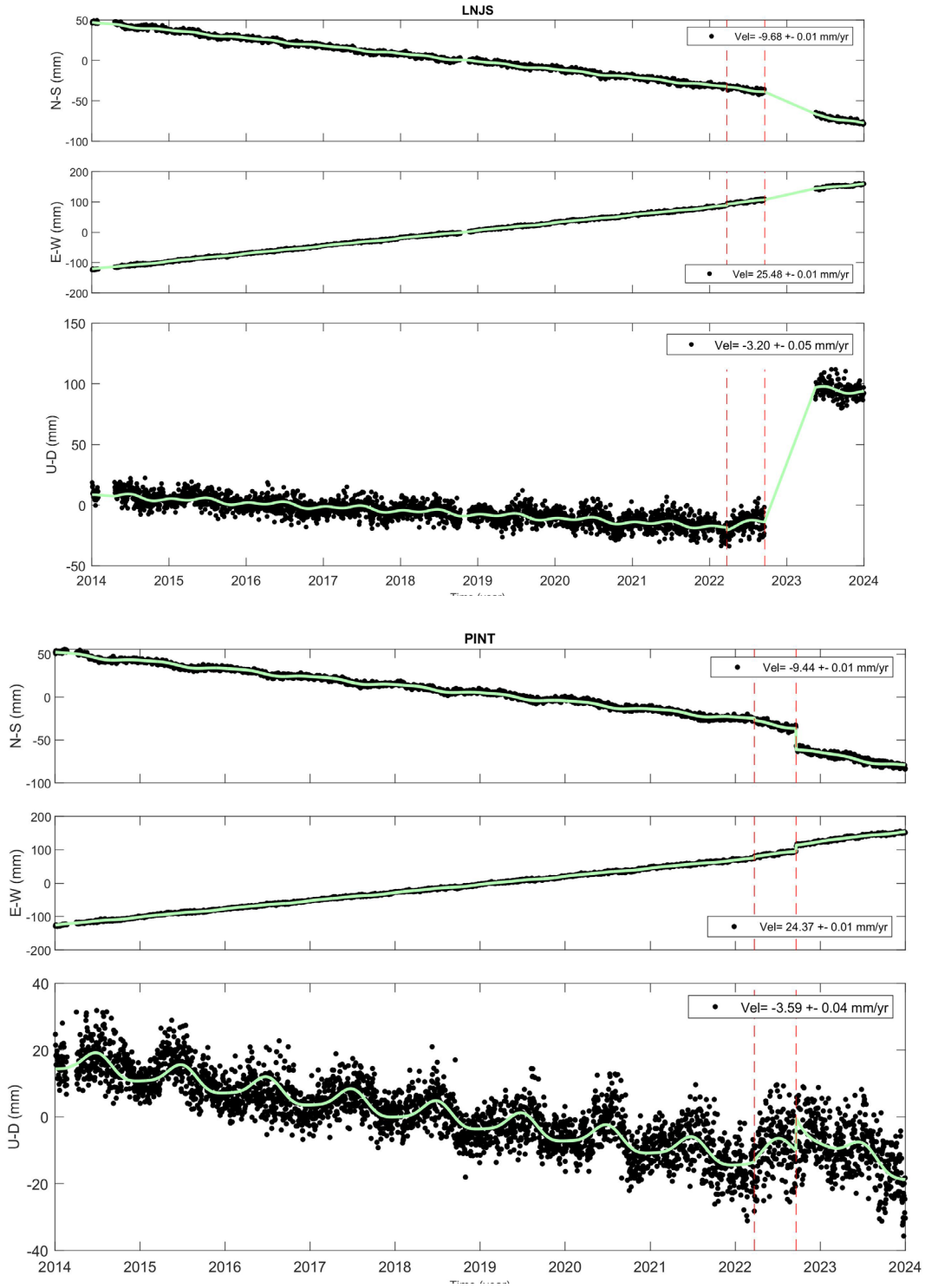


圖 4-2：GNSS 連續站時間序列。上圖為林內國中 (LNJS)，下圖為坪頂成功國小 (PINT)，自上而下為南北向、東西向以及垂直向時間序列， 黑點為觀測值，紅色虛線分別為 2022 年 03 月 23 日與 2022 年 09 月 18 日的地震。

Figure 4-2：Time series of the GNSS stations. (Upper) LNJS station. (Lower) PINT station. From top to bottom is N-S, E-W and U-D component, Black dots are GNSS observation and red dashed lines indicate the earthquake events of 20220323 and 20220918, respectively.

4-1-1 2014~2018 年

圖 4-3, 4-5 為 2014-2018 年研究區域升軌道與降軌道的永久散射體雷達差分干涉成果。圖 4-4, 4-6 分別為研究區域 GNSS 測站速度與測站周圍 500 公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表 4-3 則是 2014~2018 年升降軌道 PSI 與 GNSS 資料比對結果。從表 4-3 的結果可以看到升軌道與降軌道方向 PSI 與 GNSS 的斜率都超過 0.8，升軌道方向的 R^2 與 RMSE 不盡理想，降軌道方向的 R^2 為 0.89，RMSE 接近 2.5 mm/yr。

圖 4-3 顯示升軌 PSI 與 GNSS 觀測相對於林內國中 (LNJS) 的地表變形趨勢相似，在下陷區與山區兩者觀測值相近，在彰化以北 PSI 觀測值明顯大於 GNSS 觀測值，而梅山斷層至大尖山斷層一帶則是 GNSS 觀測值大於 PSI 觀測值。顯示斜率為 1 的灰色虛線附近有許多測站，但受到彰化以北測站與梅山斷層至大尖山斷層一帶測站影響，使得 2014~2018 年升軌道方向的 R^2 與 RMSE 不盡理想。

圖 4-5 顯示相對於林內國中（LNJS）降軌 PSI 與 GNSS 觀測的地表變形趨勢接近，僅有零星測站顯示兩者觀測值差異較明顯，大部分測站兩者觀測值相近。圖 4-6 顯示大多數測站分佈於斜率為 1 的灰色虛線附近，僅有零星測站有偏差，但並沒有很大的落差。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料可能受前期衛星不穩定影響，於升軌道方向資料品質尚可，降軌道方向資料品質佳。

表 4-3：2014-2018 年 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-4：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2014-2018.

	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
Ascending	0.80	0.68	6.82
Descending	0.84	0.89	2.52

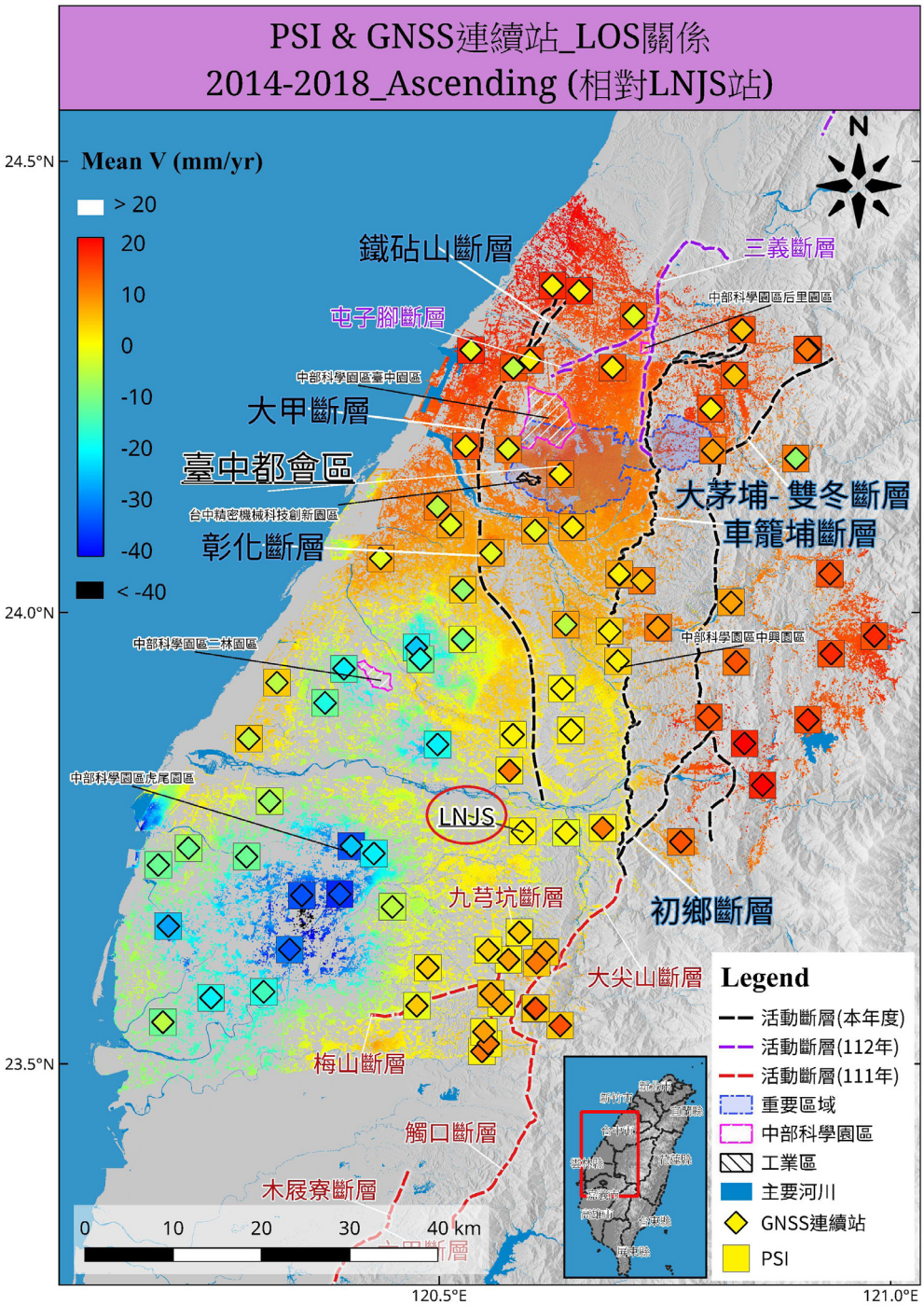


圖 4-3：2014-2018 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-3：Mean velocity field in ascending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station LNJS. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

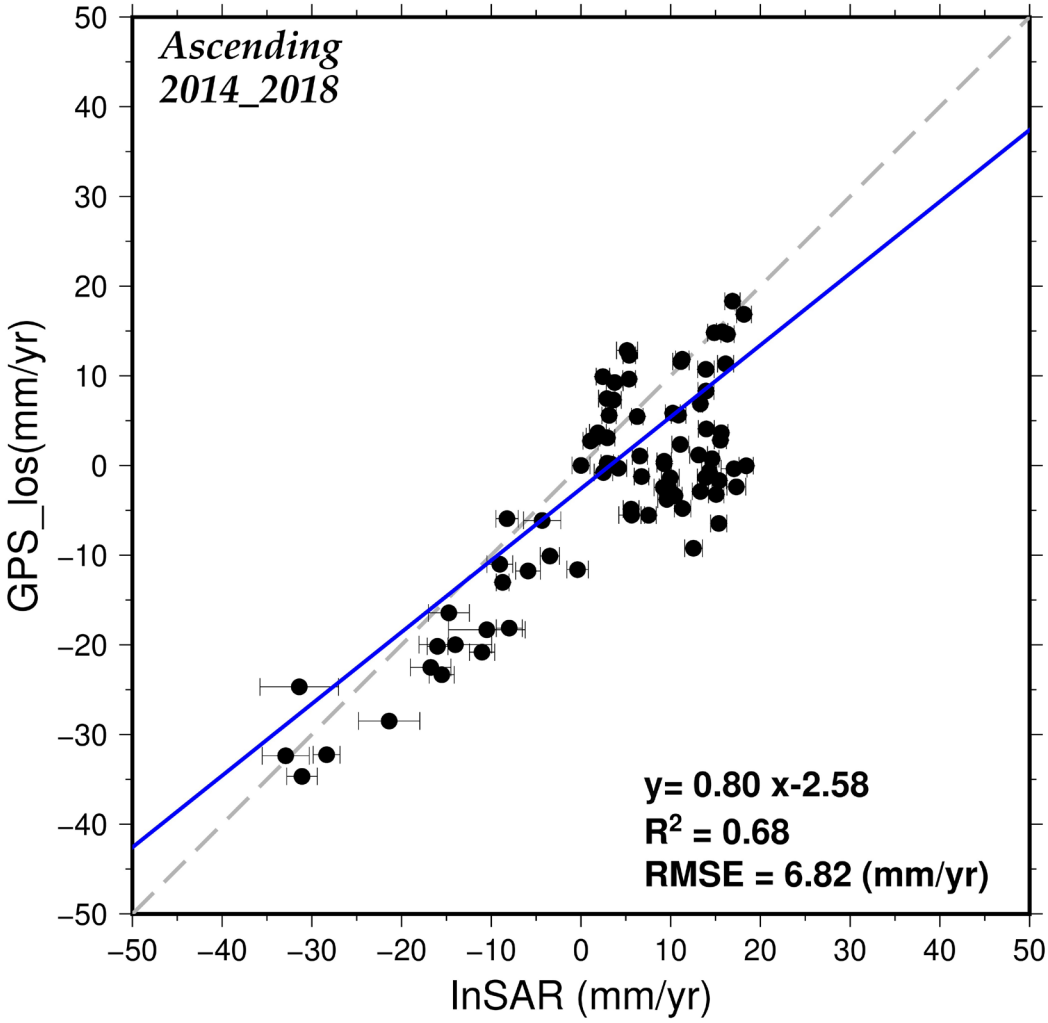


圖 4-4：2014-2018 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS。雖然 R^2 及 RMSE 與理想有相當的差異，然而雷達資料與 GNSS 呈現線性相關，所以雷達的趨勢與 GNSS 一致，而數量不同。

Figure 4-4：2014-2018 ascending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station LNJS was used as the reference station. Although the R^2 and RMSE are far from ideal, the correlation between PSI and GNSS data is linear with limited dispersion from the fitted line.

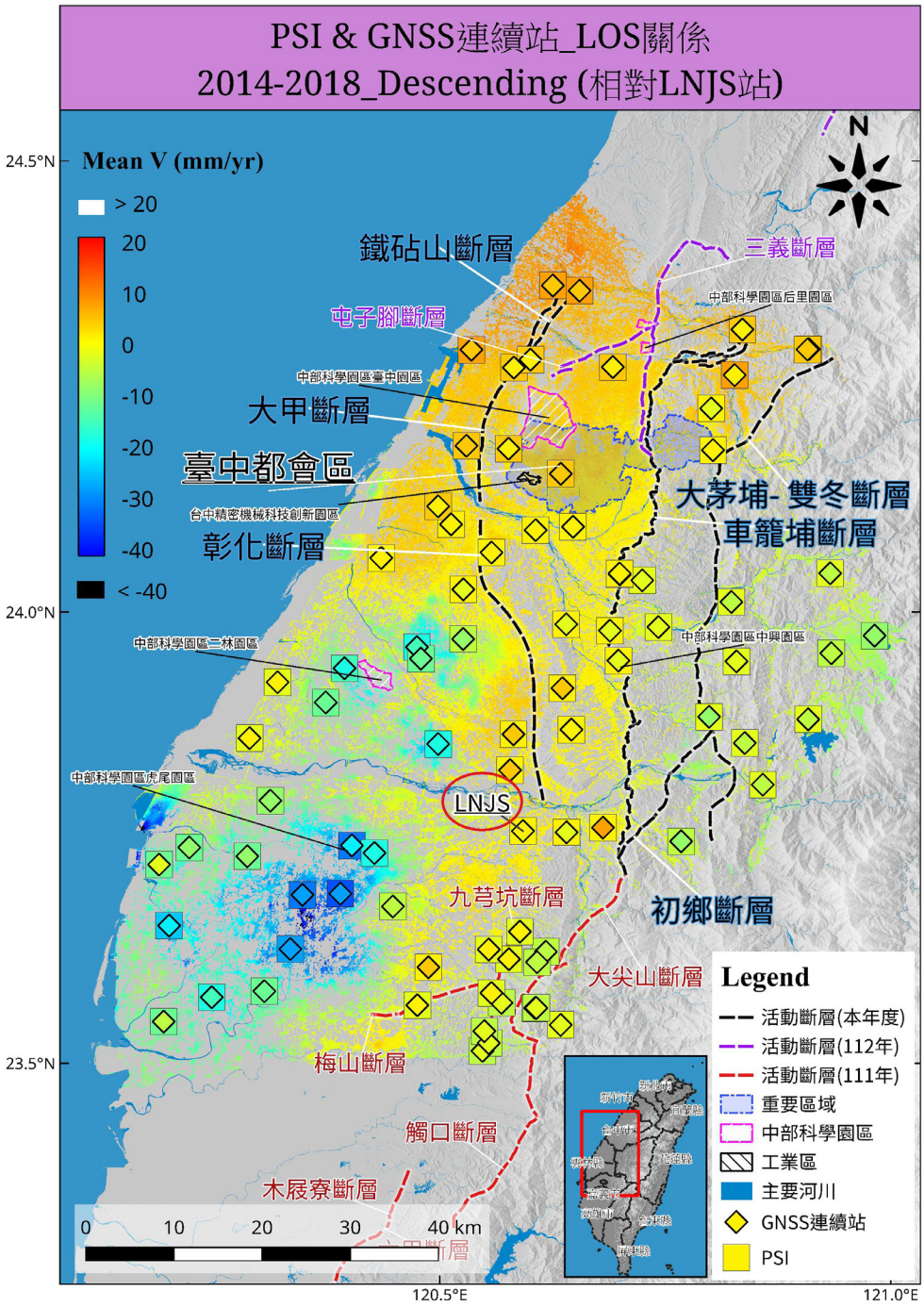


圖 4-5：2014-2018 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-5：Mean velocity in dscending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station LNJS. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

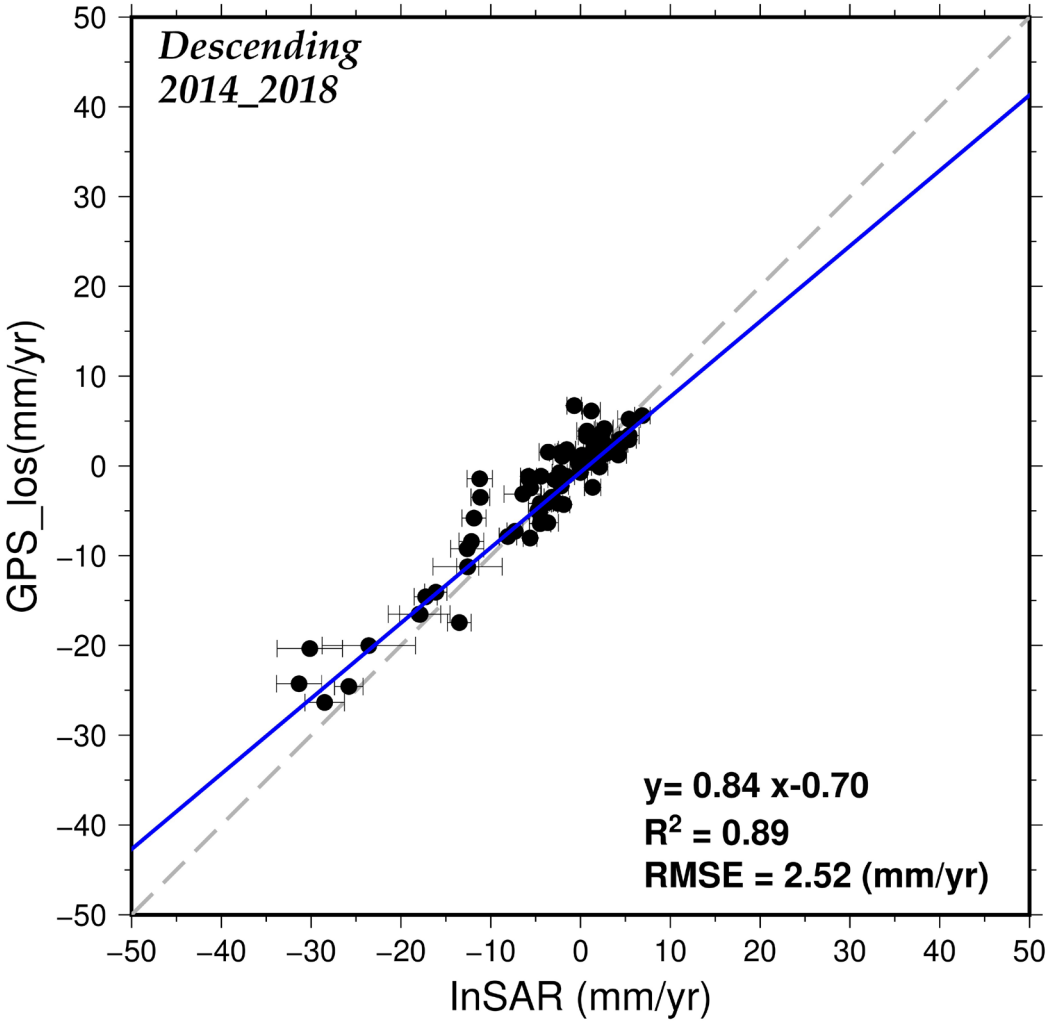


圖 4-6：2014-2018 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS。

Figure 4-6：2014-2018 descending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station S101 was used as the reference station.

4-1-2 2018~2021 年

圖 4-7, 4-9 為 2018~2021 年研究區域升降軌道的永久散射體雷達差分干涉成果。圖 4-8, 4-10 分別為研究區域 GNSS 測站速度與測站周圍 500 公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表 4-4 則是 2018~2021 年升降軌道的 PSI 與 GNSS 資料比對結果。結果顯示升降軌道的斜率都接近 1，R^2 是三時期中最佳，RMSE 於升軌道方向為三時期中最佳，降軌道方向略高於 2014~2018 時期，本時期雷達資料與此區域 GNSS 連續站得到的速度趨勢一致。

圖 4-7 與圖 4-8 顯示升軌道方向 PSI 與 GNSS 觀測值相對於林內國中 (LNJS) 除了零星山區測站有明顯差異，其餘測站幾乎分佈於斜率為 1 的灰色虛線附近。圖 4-9 與圖 4-10 顯示降軌道方向除了零星測站有明顯差異，其餘測站分佈比升軌道方向更貼近斜率為 1 的灰色虛線，因此 R^2 略低於升軌道成果，但 RMSE 優於升軌道成果。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料在山區也有比對符合的測站，除了有部分離散點之外，大部分都與 GNSS 觀測相當符合。本時段結果品質極佳。

表 4-4：2018-2021 年 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-4：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2018-2021.

	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
Ascending	0.97	0.97	2.69
Descending	1.07	0.91	3.18

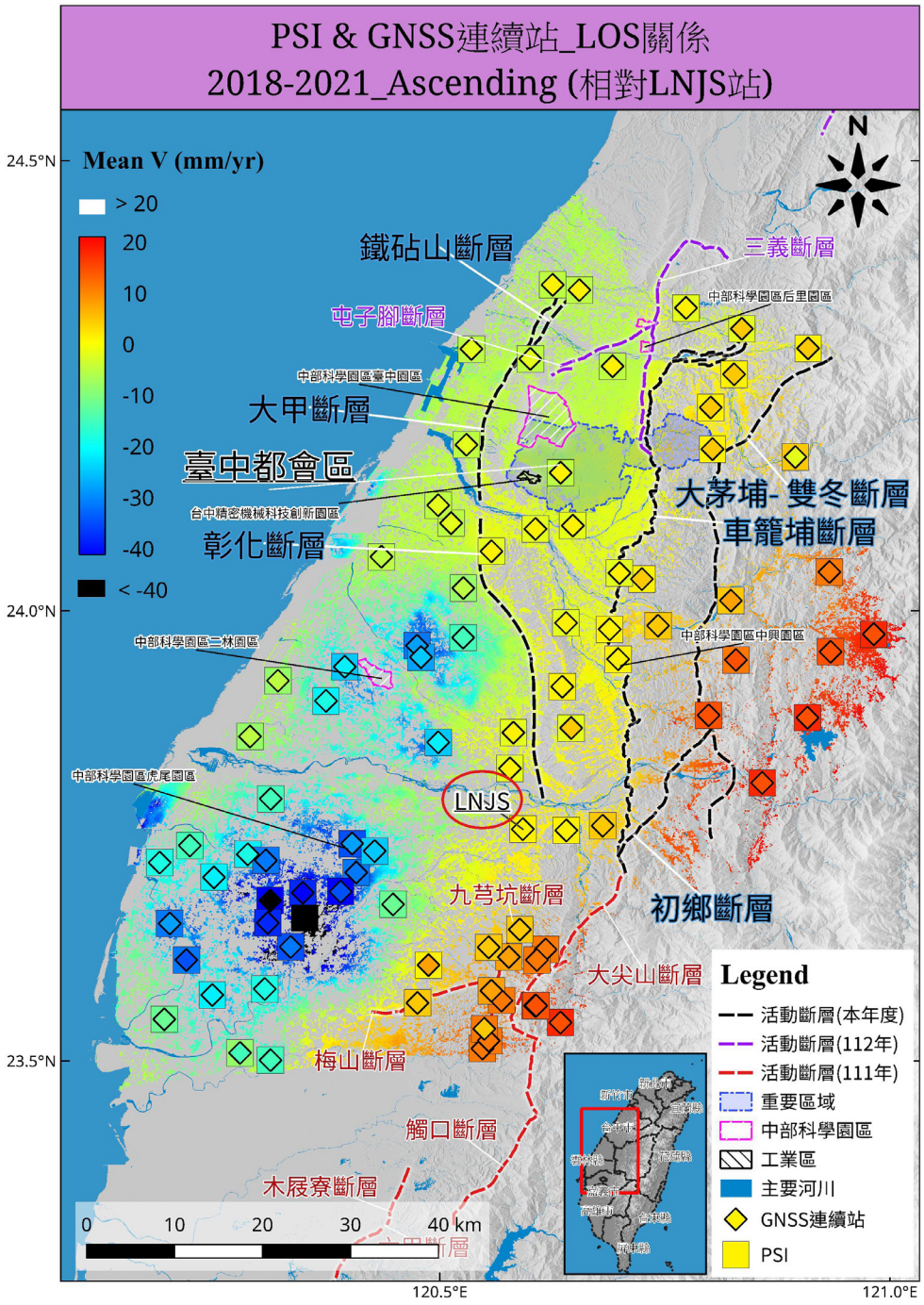


圖 4-7：2018-2021 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-7：Mean velocity field in ascending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station LNJS. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

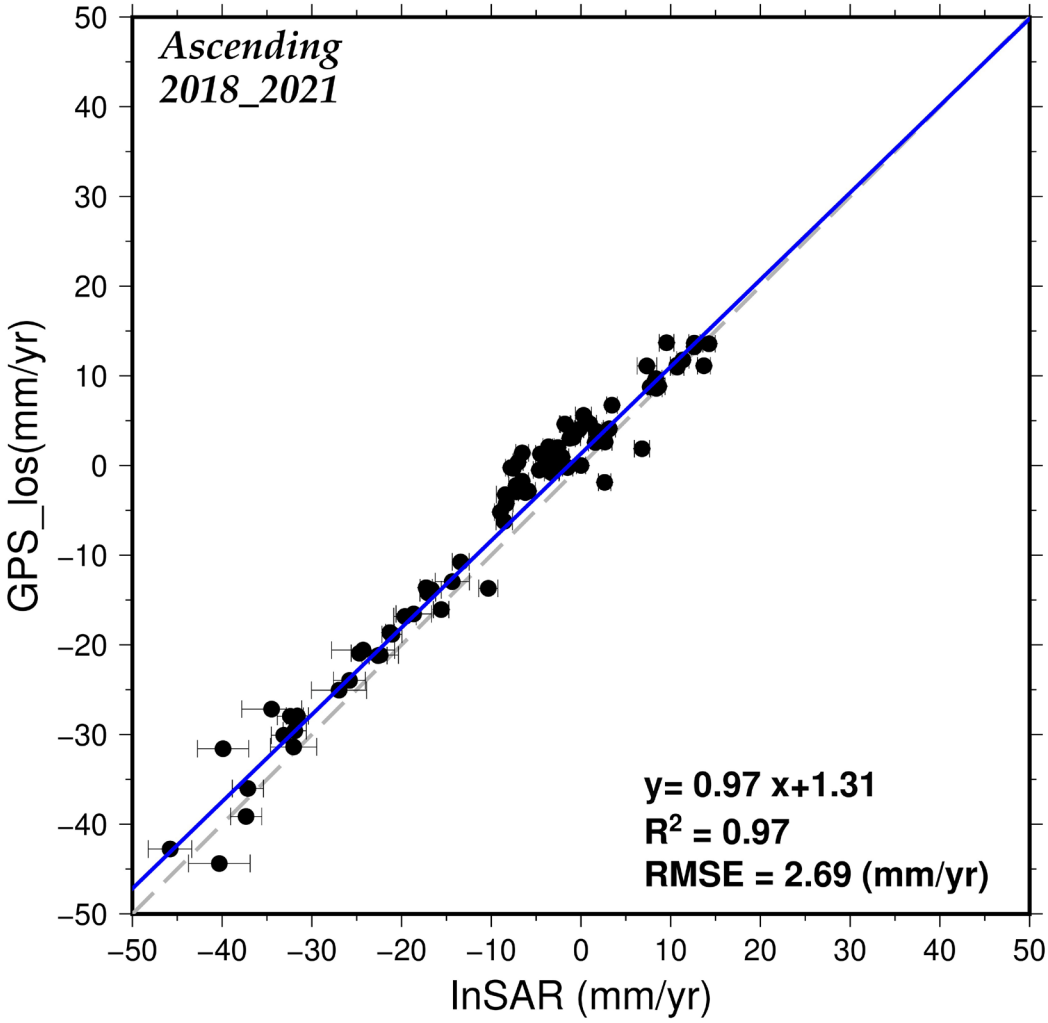


圖 4-8：2018-2021 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS。

Figure 4-8：2018-2021 ascending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station LNJS was used as the reference station.

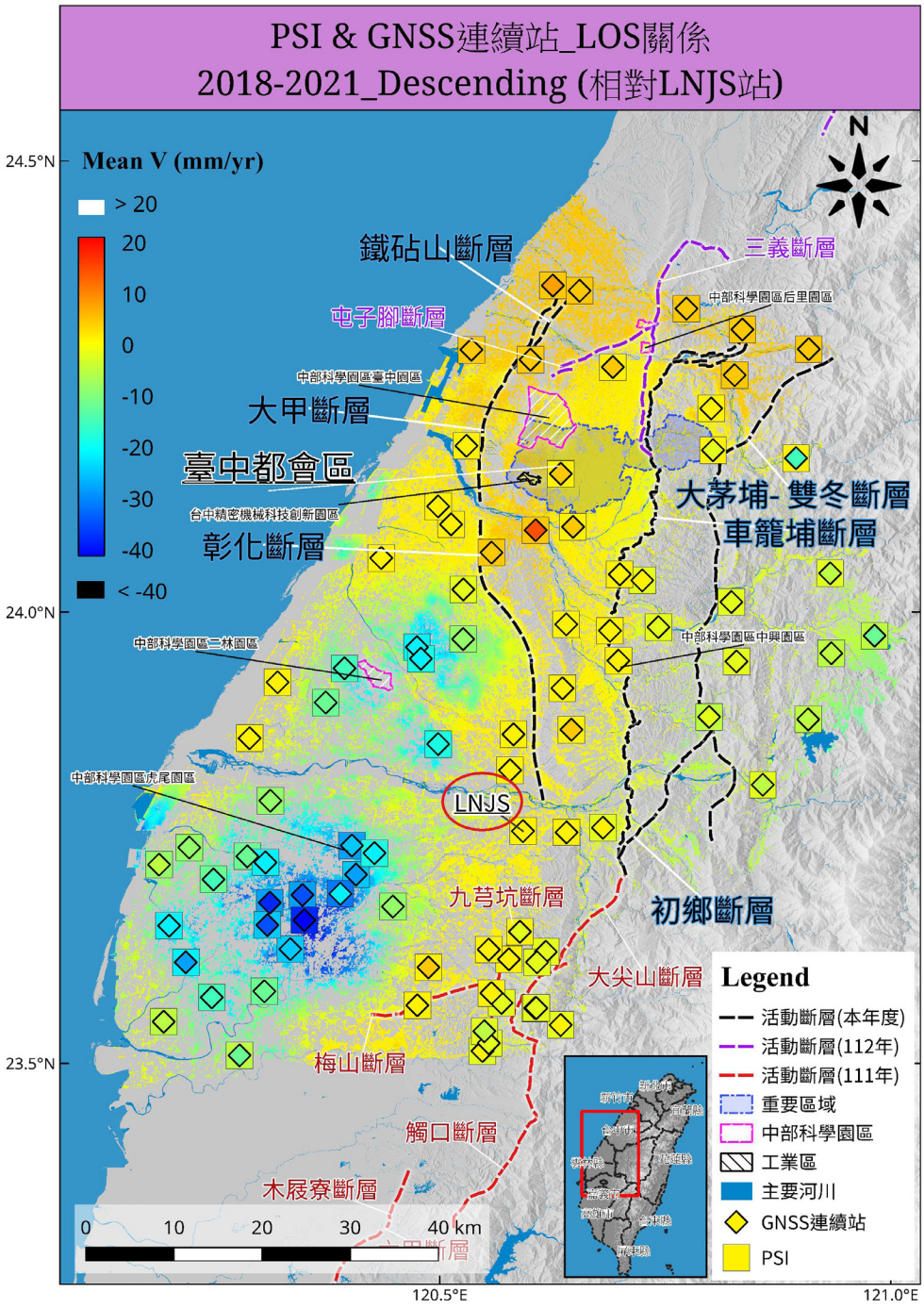


圖 4-9：2018-2021 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-9：Mean velocity field in descending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station LNJS. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

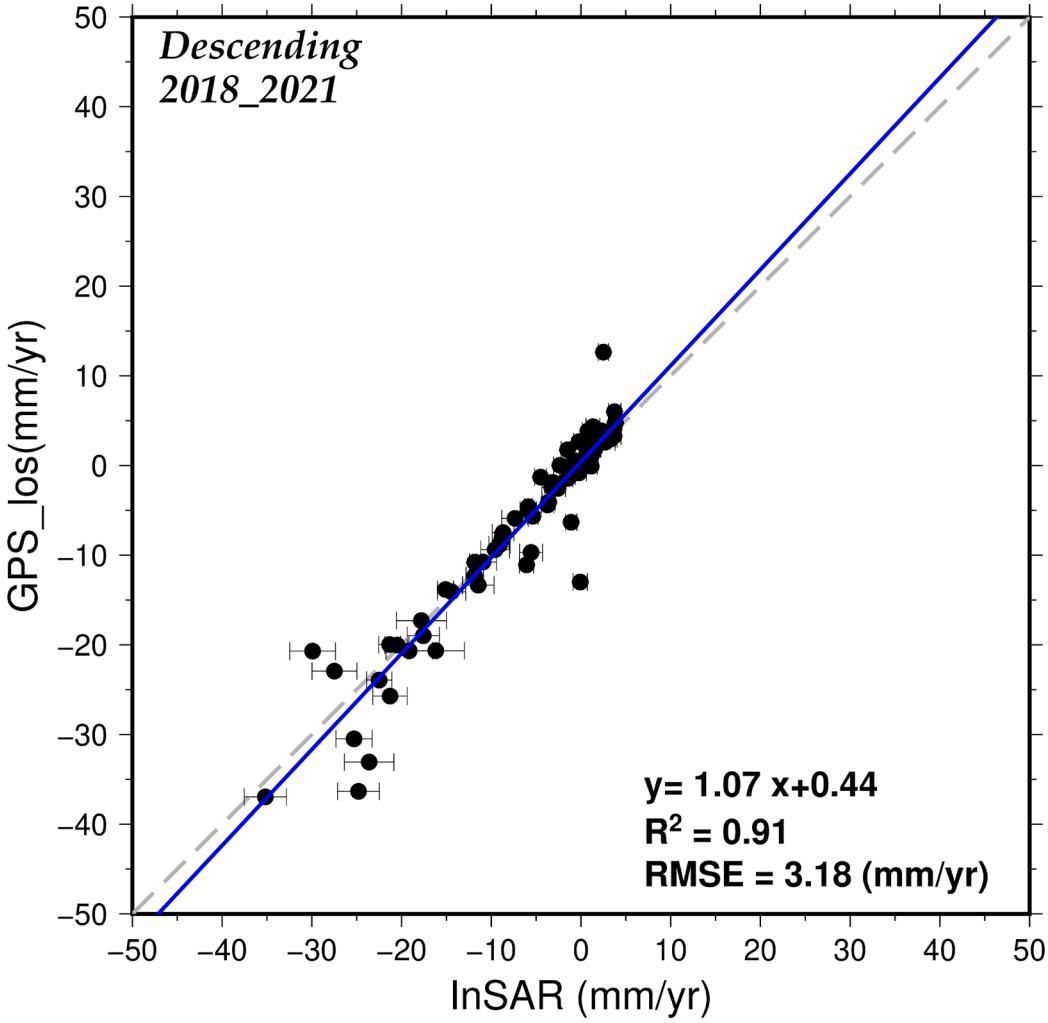


圖 4-10：2018-2021 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 LNJS。

Figure 4-10：2018-2021 descending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station LNJS was used as the reference station.

4-1-3 2022~2023 年

圖 4-11, 4-13 為 2022~2023 年研究區域升降軌道的永久散射體雷達差分干涉成果。圖 4-12, 4-14 分別為研究區域的 GNSS 測站速度與測站周圍 500 公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表 4-5 則是 2022~2023 年升降軌道的 PSI 與 GNSS 資料比對結果。升軌與降軌的 RMSE 都偏高（大於 7 mm/yr），移除離群測站後雖然斜率無變化，但是 R^2 與 RMSE 皆有改善，升軌道斜率接近 0.8，降軌道斜率接近 0.9，本時期雷達資料與此區域 GNSS 連續站得到的速度趨勢一致。

圖 4-11 與圖 4-12 顯示升軌道與降軌道的 PSI 與 GNSS 資料相對於坪頂成功國小 (PINT)，除了下陷區與山區測站兩者觀測值相近，其餘測站 GNSS 觀測值較 PSI 觀測值大，但變形趨勢一致。圖 4-12 與圖 4-14 顯示大部分測站落在迴歸線附近，移除離群點後升軌道的 R^2 提升至 0.88，RMSE 為 4.75 mm/yr，降軌道的 R^2 提升至 0.88，RMSE 為 4.44 mm/yr。

以整體資料狀況看來，雖然兩者觀測值有所差異，由資料分佈圖說明兩者資料呈線性分佈，變形趨勢一致。資料有一定可信度。

表 4-5：2022-2023 年 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-5：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2022-2023.

	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
Ascending	0.78	0.71	8.52
移除 LNJS 站	0.78	0.88	4.75
Descending	0.87	0.72	8.41
移除 LNJS 站	0.87	0.88	4.44

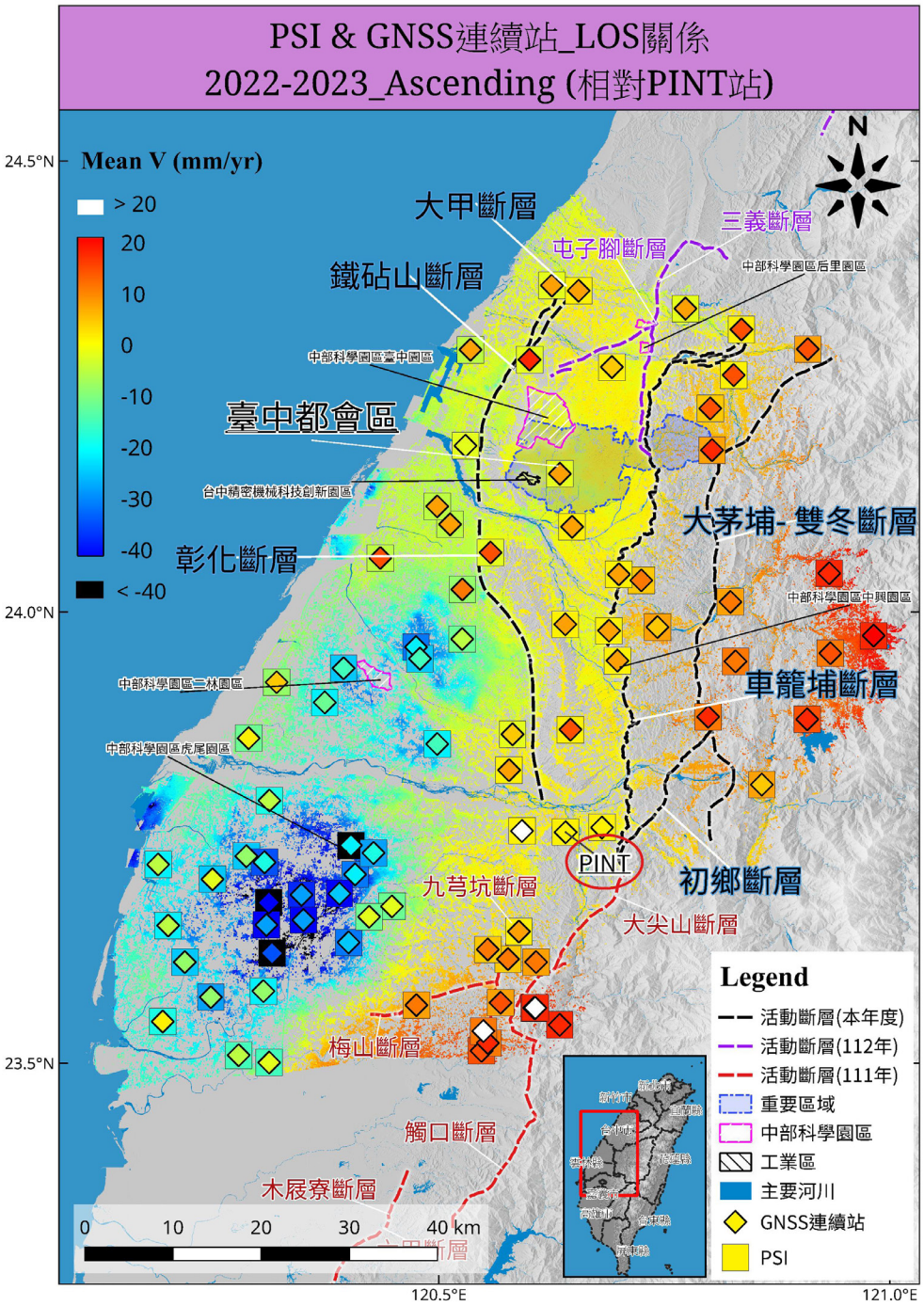


圖 4-11：2022-2023 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 PINT，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-11：Mean velocity field in ascending track between 2022-2023. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station PINT. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

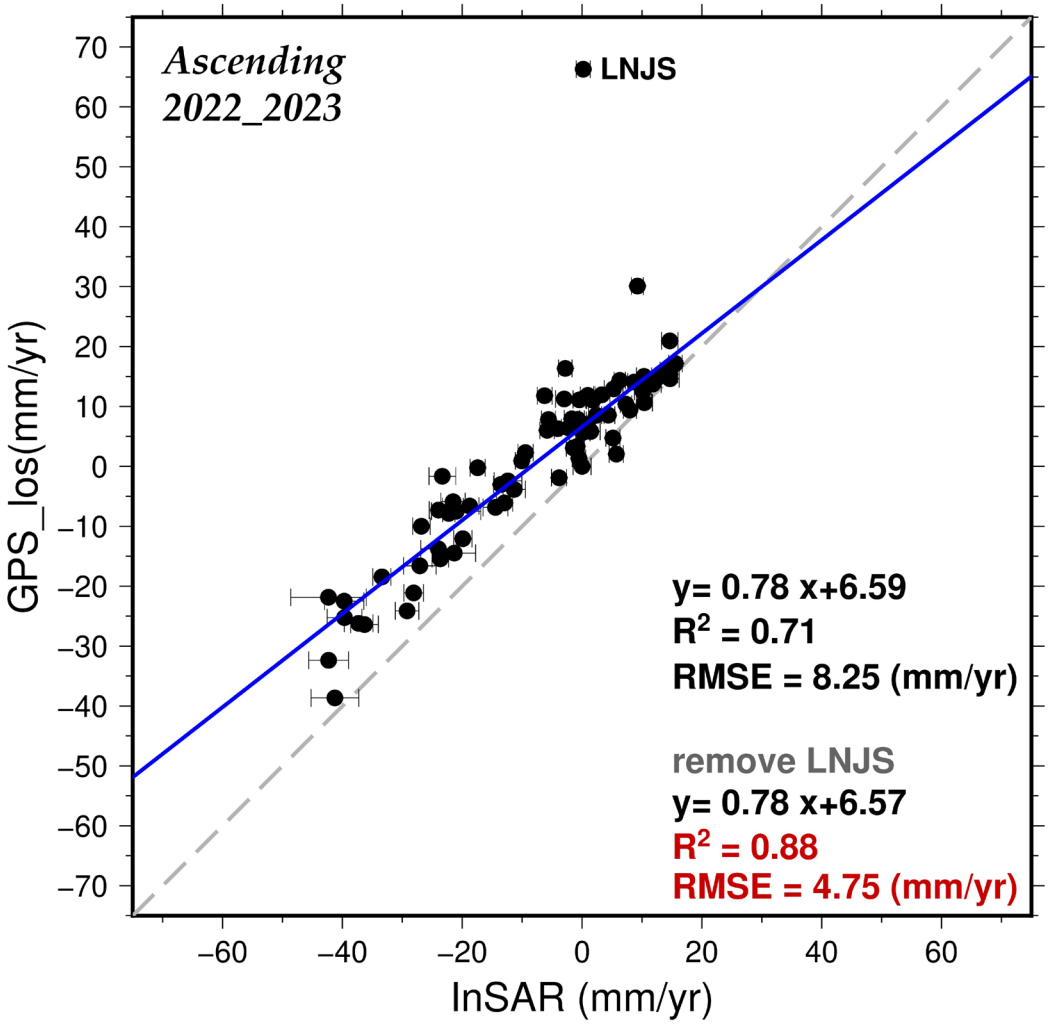


圖 4-12：2022-2023 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 PINT。

Figure 4-12：2022-2023 ascending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station PINT was used as the reference station.

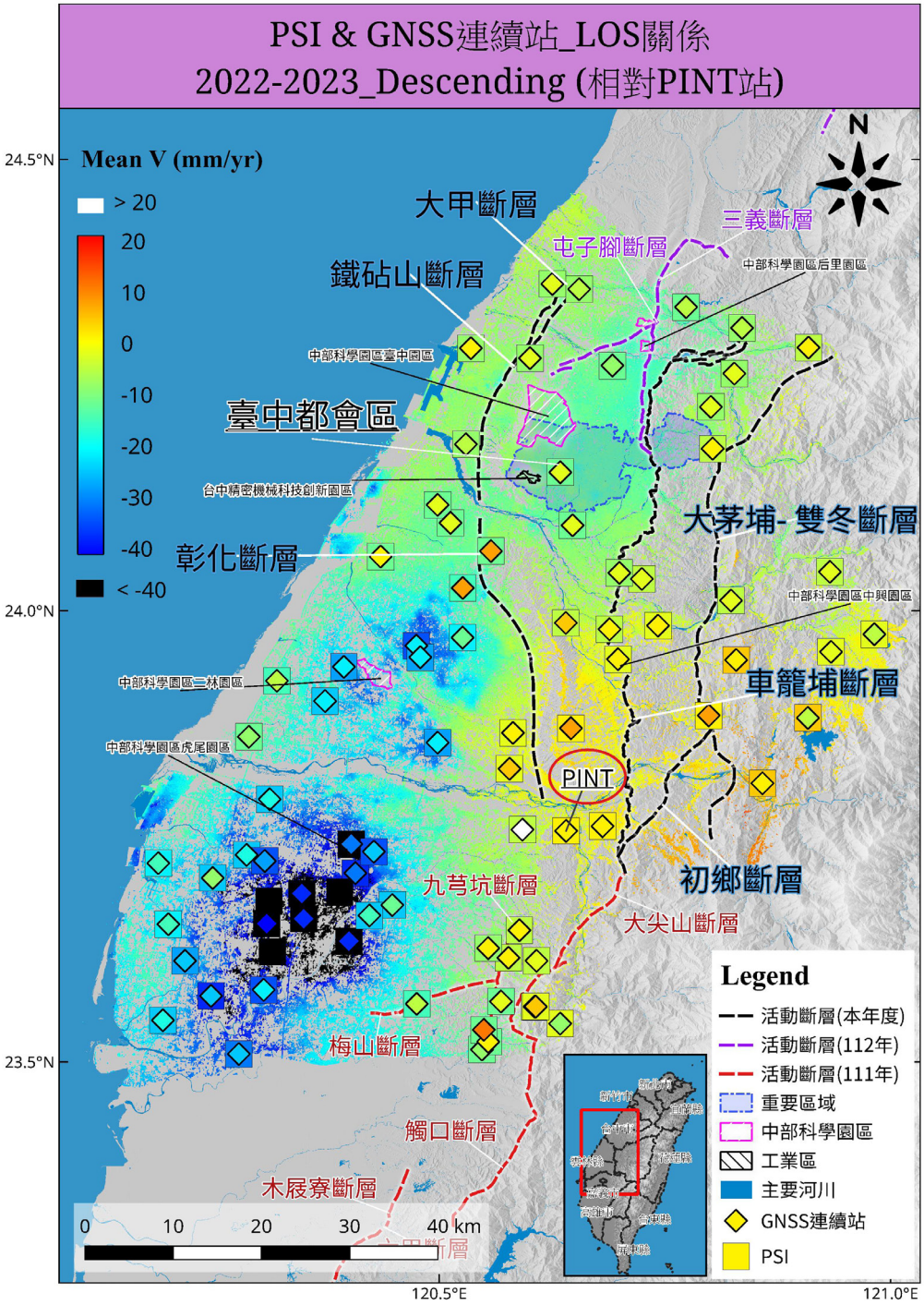


圖 4-13：2022-2023 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 PINT，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-13：Mean velocity field in descending track between 2022-2023. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station PINT. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

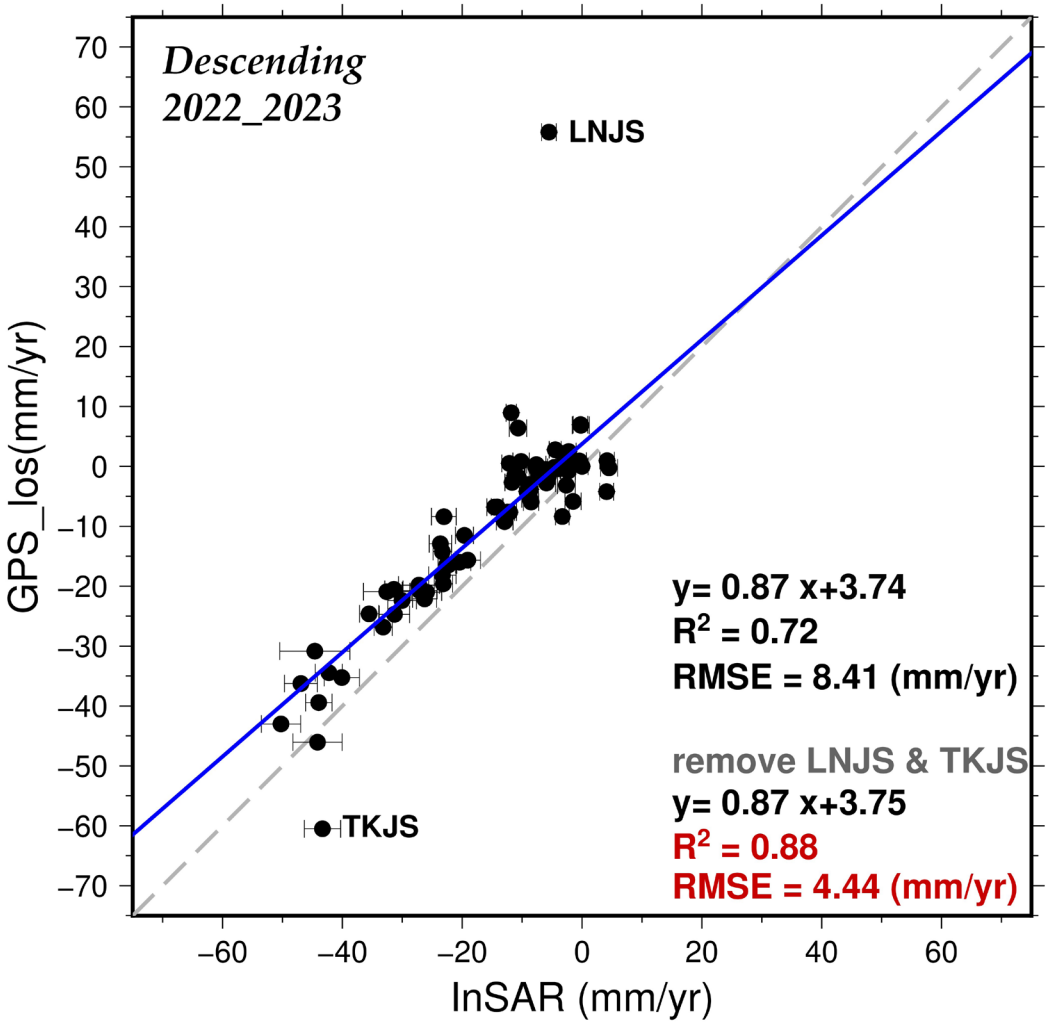


圖 4-14：2022-2023 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 PINT。

Figure 4-14:2022-2023 descending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station PINT was used as the reference station.

4-2 GNSS 連續站及移動站與 PSI 資料比對

本章節我們使用由地礦中心的重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估 - 第二階段（2/3）計畫提供的移動站及中央研究院的連續站時間序列資料，以下簡稱 cGNSS 測站。針對 GNSS 移動觀測站，我們盡量挑選 PSI 同時段的觀測資料，同樣將調查範圍內的 GNSS 移動觀測站計算得到的三方向速度值轉換為在雷達斜距方向上的速度，並搜尋測站周圍 500 公尺的 PS 點，取其平均作為 GNSS 移動觀測站的 PSI 觀測值，GNSS 移動站位置如圖 4-15。將所有的 GNSS 資料與雷達資料畫在同一張圖上比對，並以散佈圖計算一維線性迴歸，以決定係數（Coefficient of determination，R^2）檢視 PSI 與 GNSS 資料之直線關係的強度，以均方根誤差 (Root Mean Square Error；RMSE) 檢視預測值和觀測值之間的平均差異，評估迴歸模型的準確度。

表 4-6 為各時期 PSI 與 GNSS 比對的成果，2014 年至 2018 年雖然 R^2 與 RMSE 的數值不佳，但可以看到 PSI 與 GNSS 在整體區域的變形趨勢相似，在彰化雲林及埔里地區兩者資料相似度高，2018 年至 2021 年 R^2 與 RMSE 為三時期最佳，且迴歸線斜率接近 1，兩者資料呈線性分布，2022 年至 2023 年雖然迴歸線斜率接近 1，但 R^2 與 RMSE 為三時期最差，本時期由於觀測時間跨距短，影像數量較少，且多數移動站僅有 2 筆觀測資料計算平均速度，誤差較大，使得比對結果不佳。以下各節針對各時期資料說明。

表 4-6：各時期 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。

Table 4-6：Comparisons of velocity fields between PSI and the campaign and continues GNSS results through every period.

	Track	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
2014-2018	Ascending	0.73	0.22	14.72
	Descending	0.67	0.17	10.68
2018-2021	Ascending	1.06	0.62	9.21
	Descending	1.31	0.51	9.47
2022-2023	Ascending	0.99	0.14	28.47
	Descending	1.06	0.17	26.73

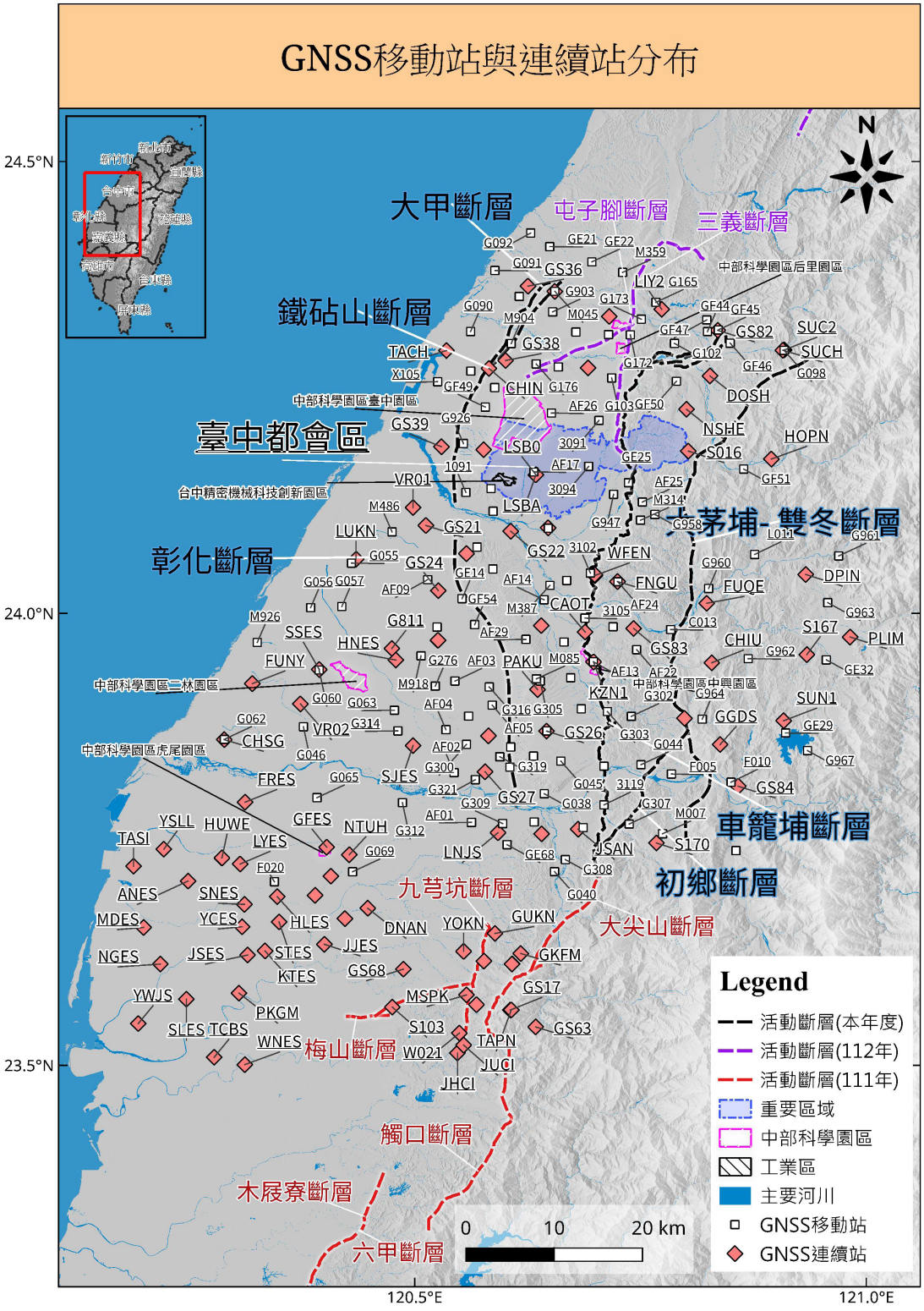


圖 4-15：GNSS 移動站與連續站位置分佈圖。

Figure 4-15：The map for the campaign and continues GNSS stations.

4-2-1 2014~2018 年

圖 4-16, 4-18 分別為 2014~2018 年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與 GNSS 連續站及移動站結果作比較。圖 4-17, 4-19 則是分別為研究區域 GNSS 測站速度與測站周圍 500 公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。表 4-7 則是 2014~2018 年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與 GNSS 資料比對結果。

升軌道成果顯示臺中地區 PSI 與 GNSS 數值差異較大，大部分測站投影至 LOS 方向速度為 -10~20 mm/yr 之間，多數測站的 PSI 觀測值大於 GNSS 觀測值，部分相鄰的 GNSS 移動站觀測數值差異較大的情形（例如 G092 與 GE21），也有鄰近的連續站與移動站觀測數值差異大的情形（例如 TACH 與 G090），下陷區與埔里及山區大多數的 PSI 與 GNSS 觀測值接近（圖 4-16）。降軌道方向亦有類似情形，臺中地區測站 PSI 與 GNSS 觀測值差異較升軌道差異小，其餘地區 PSI 與 GNSS 觀測值接近（圖 4-18）。

圖 4-17 顯示 GNSS 投影至升軌方向的 LOS 速度大約介於 -40~60 mm/yr 間，PSI 觀測值大約介於 -40~20 mm/yr 間，圖 4-19 顯示 GNSS 投影至降軌方向的 LOS 速度大約介於 -45~60 mm/yr 間，PSI 觀測值大約介於 -35~10 mm/yr 間，受到臺中地區資料影響雖然升降軌道斜率都有超過 0.6，但是 R^2 不佳，RMSE 也超過 10mm/yr。

表 4-7：：2014-2018 年 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。

Table 4-7 ：Comparisons of velocity fields between PSI and the campaign and continues GNSS results through 2014-2018.

	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
Ascending	0.73	0.22	14.72
Descending	0.67	0.17	10.68

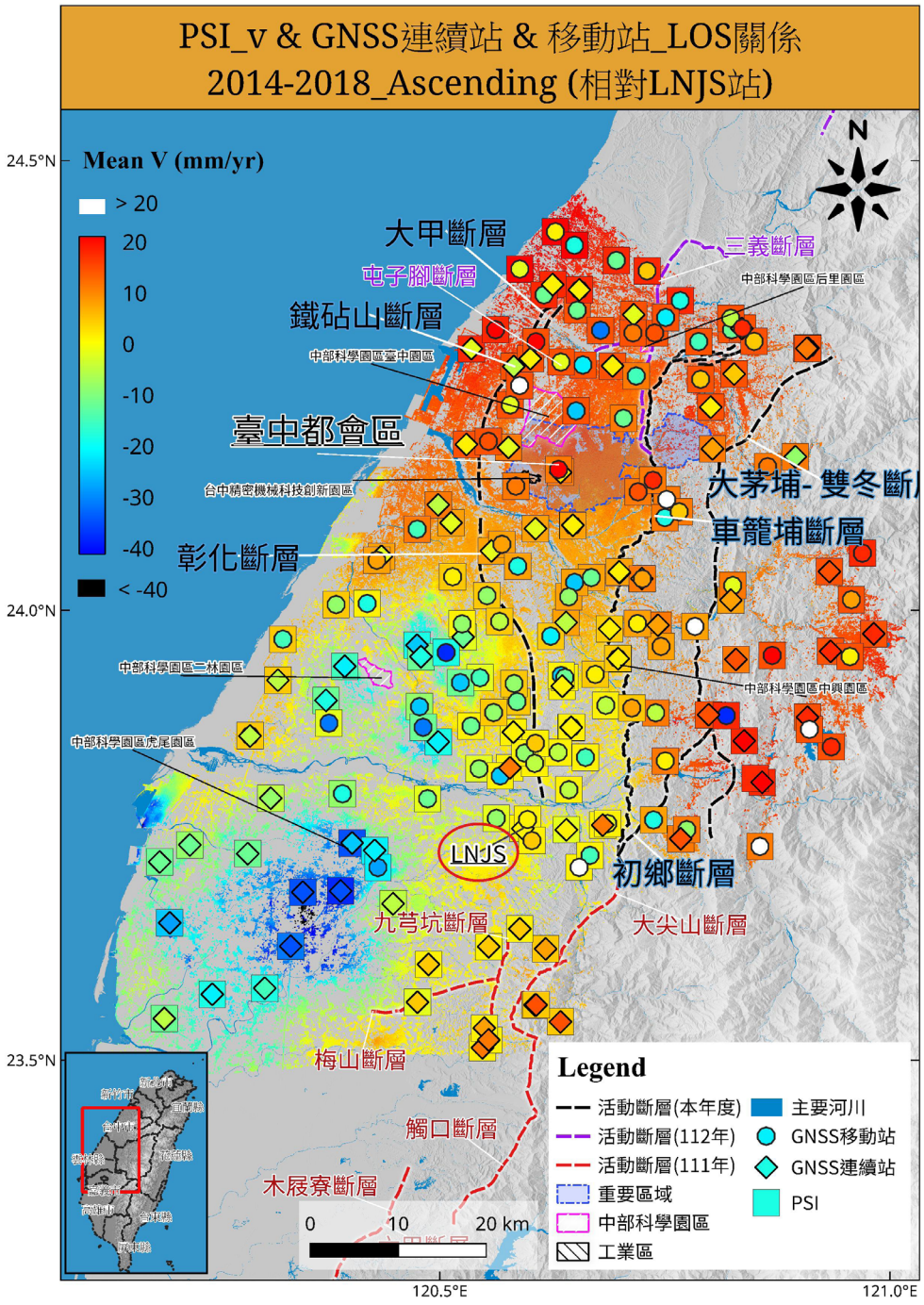


圖 4-16：2014-2018 年 Ascending 平均速度場與所有 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為 GNSS 連續站三維向量投影至視衛星方向，圓形為 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-16：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds and circle represent 3-directions velocity projected to LOS direction of continuous GNSS station and campaign GNSS station.

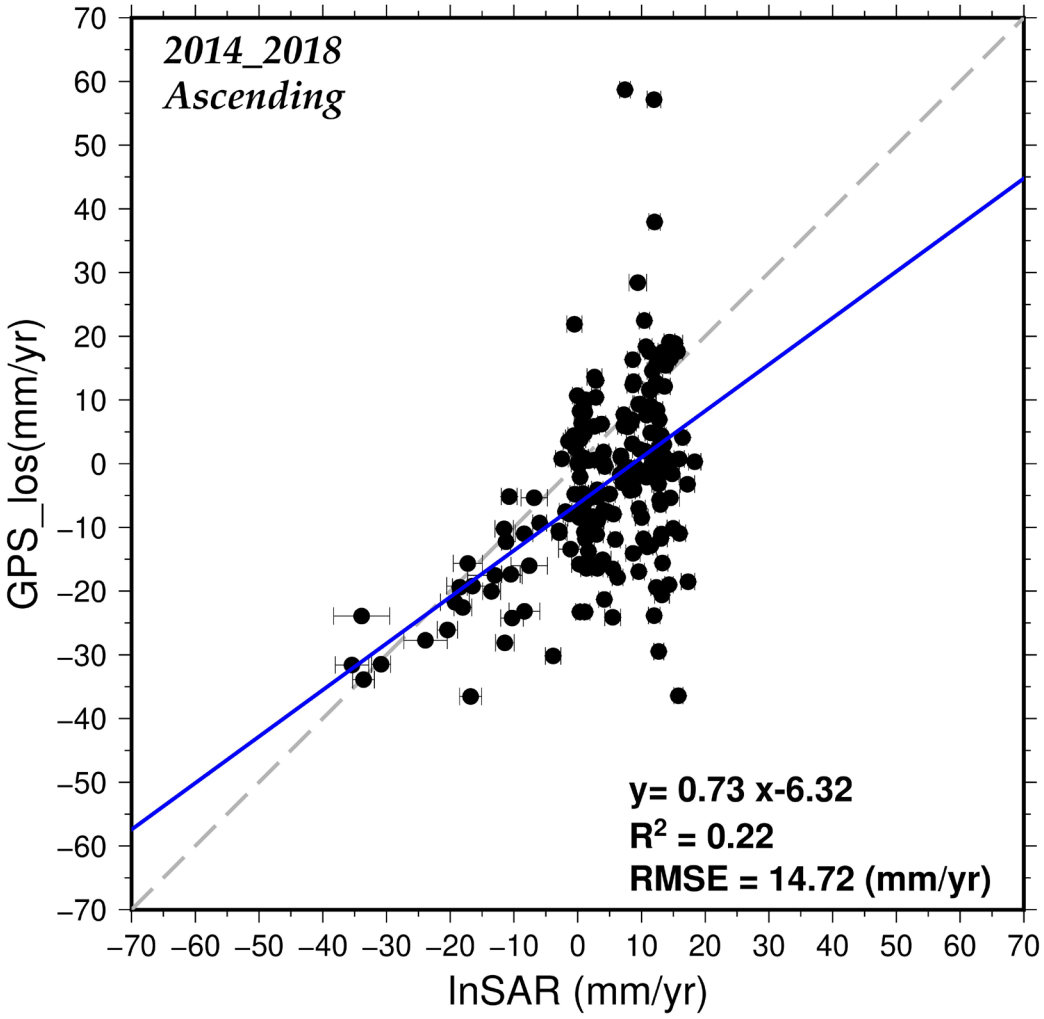


圖 4-17：2014-2018 升軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。

Figure 4-17：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2014-2018.

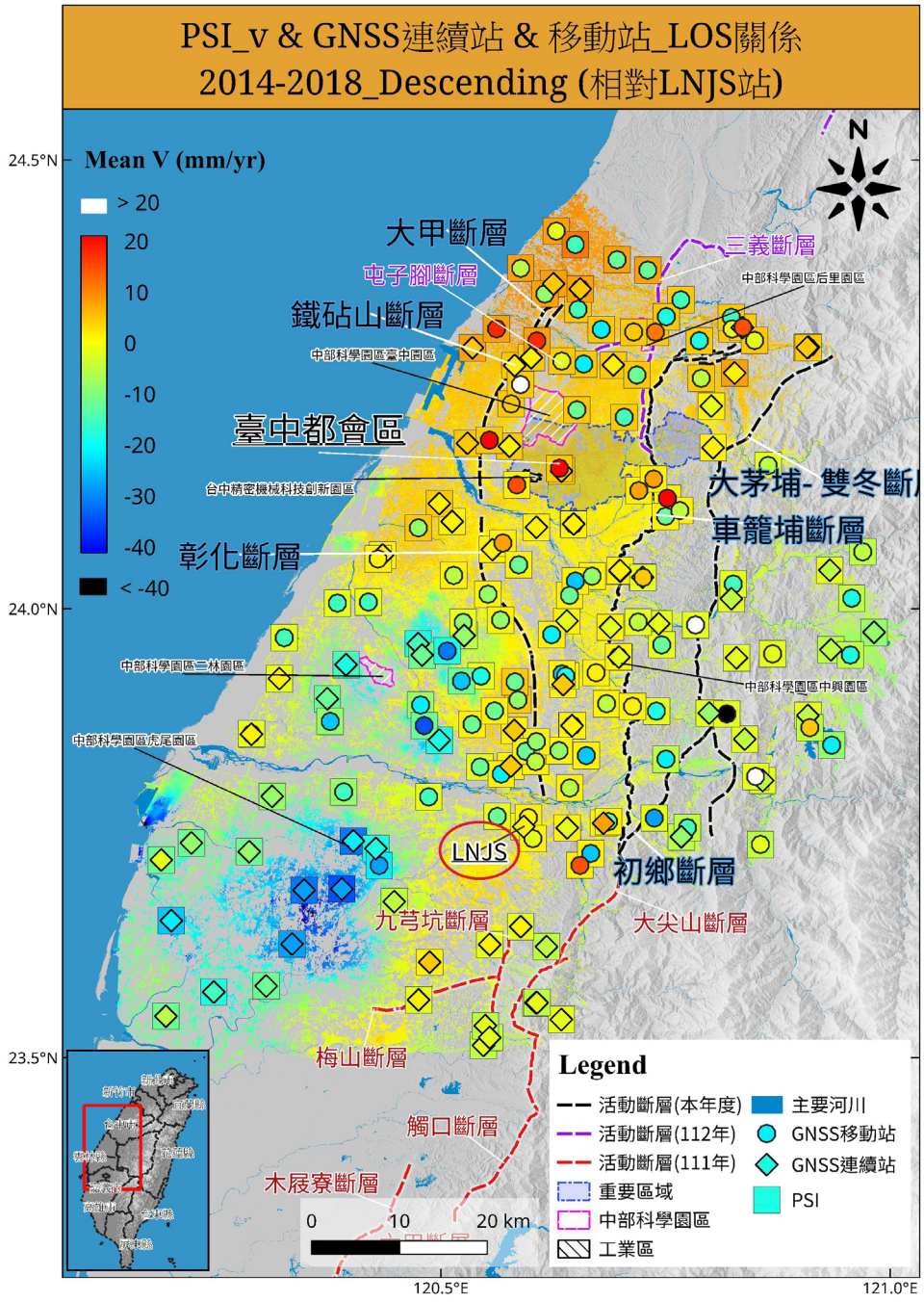


圖 4-18：2014-2018 年 Descending 平均速度場與所有 GNSS 速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為 GNSS 連續站三維向量投影至視衛星方向，圓形為 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-18：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds and circle represent 3-directions velocity projected to LOS direction of continuous GNSS station and campaign GNSS station.

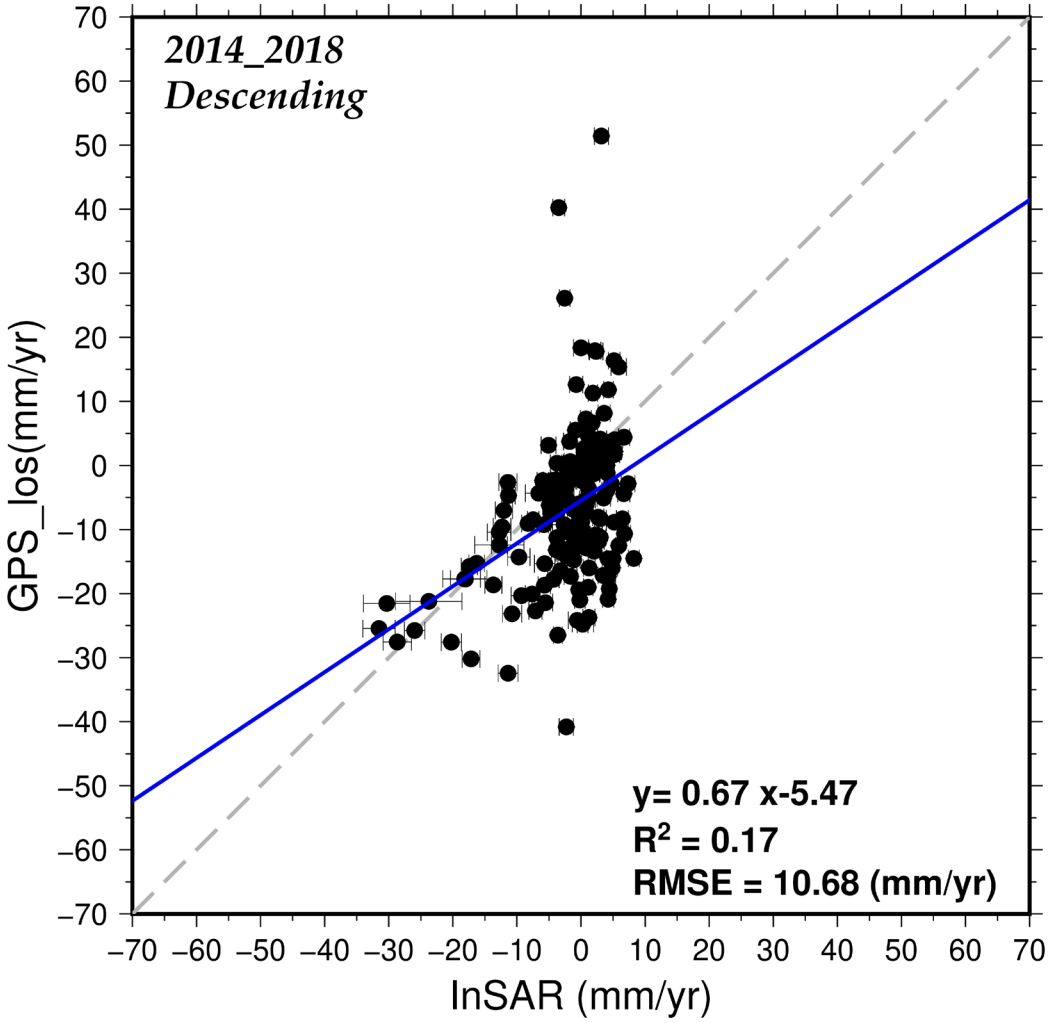


圖 4-19：2014-2018 降軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。

Figure 4-19：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2014-2018.

4-2-2 2018~2021 年

圖 4-20, 4-22 分別為 2018~2021 年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與 GNSS 連續站及移動站結果比較。圖 4-21, 4-23 則是分別為研究區域所有 GNSS 測站速度與測站周圍 500 公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表 4-8 則是 2018~2021 年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與所有 GNSS 資料比對結果。升軌道

（Ascending）的斜率接近 1，R^2 約 0.62，RMSE 約 9 mm/yr，降軌道資料斜率接近 1，R^2 為 0.51，RMSE 小於 9.5 mm/yr。

升軌道成果顯示相對於 LNJS 測站，臺中地區 GNSS 移動站觀測數值比 PSI 與 GNSS 連續站觀測值大，彰化雲林下陷區及埔里山區觀測值較接近（圖 4-20），降軌道成果亦有相同現象（圖 4-22）。

圖 4-21 顯示 GNSS 投影至升軌方向的 LOS 速度大約介於 -45~50 mm/yr 間，PSI 觀測值大約介於 -45~20 mm/yr 間，圖 4-22 顯示 GNSS 投影至降軌方向的 LOS 速度大約介於 -65~30 mm/yr 間，PSI 觀測值大約介於 -35~5 mm/yr 間。升降軌道成果皆顯示，GNSS 移動站觀測值分布較 PSI 大許多，但在分布圖顯示多數測站分布於斜率為 1 的灰色虛線附近，表示本時期的 GNSS 移動站與 PSI 資料趨勢接近，存在線性關係。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的升降軌道雷達資料相對 GNSS 資料收斂，因而整體 R^2 與 RMSE 較前期佳，R^2 也比過去計畫好，趨勢可提供參考。

表 4-8：：2018-2021 年 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。

Table 4-8：Comparisons of velocity fields between PSI and the campaign and continues GNSS results through 2018-2021.

	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
Ascending	1.06	0.62	9.21
Descending	1.31	0.51	9.47

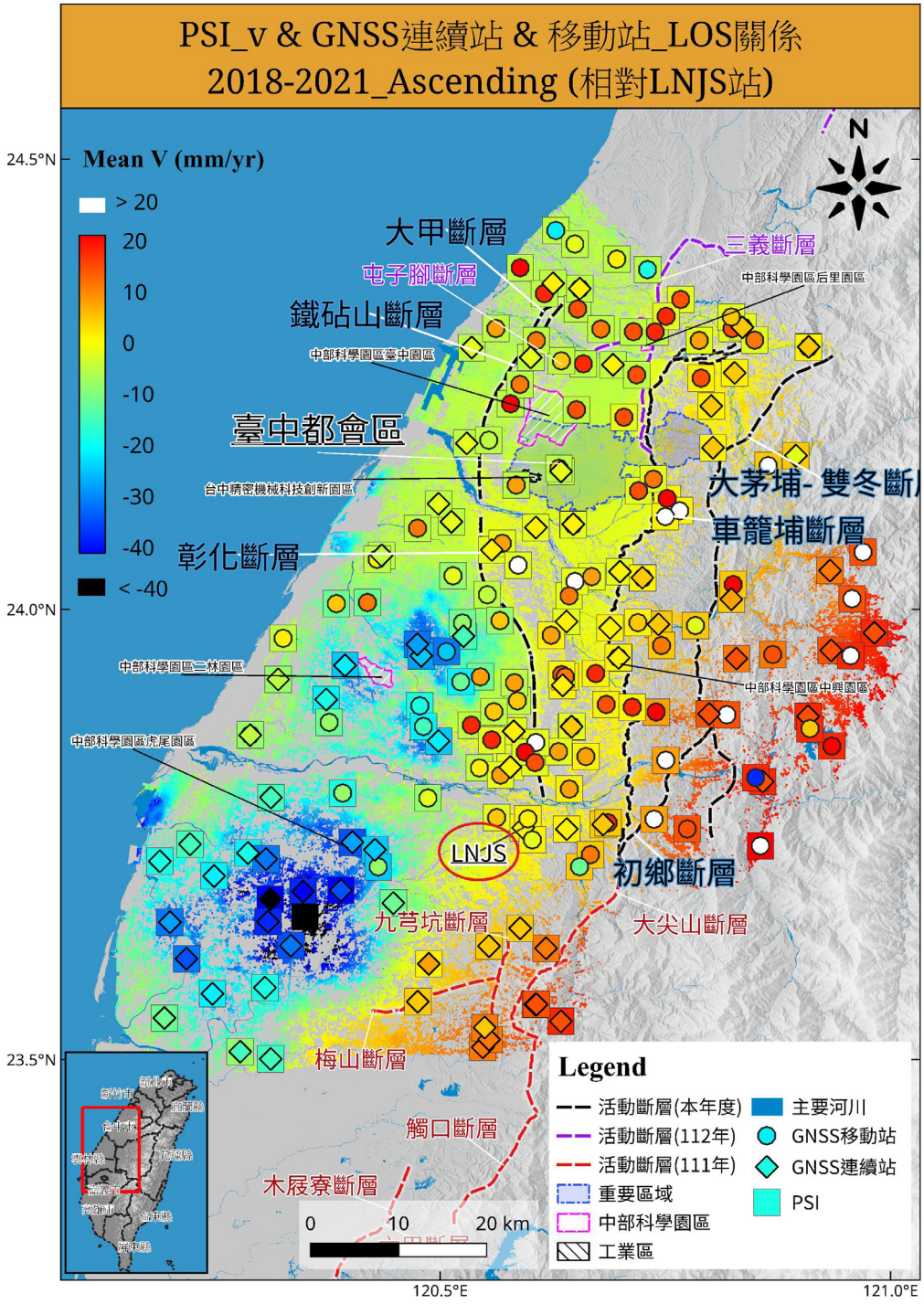


圖 4-20：2018-2021 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為 GNSS 連續站三維向量投影至視衛星方向，圓形為 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-20：Velocity field in ascending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds and circle represent 3-directions velocity projected to LOS direction of continuous GNSS station and campaign GNSS station.

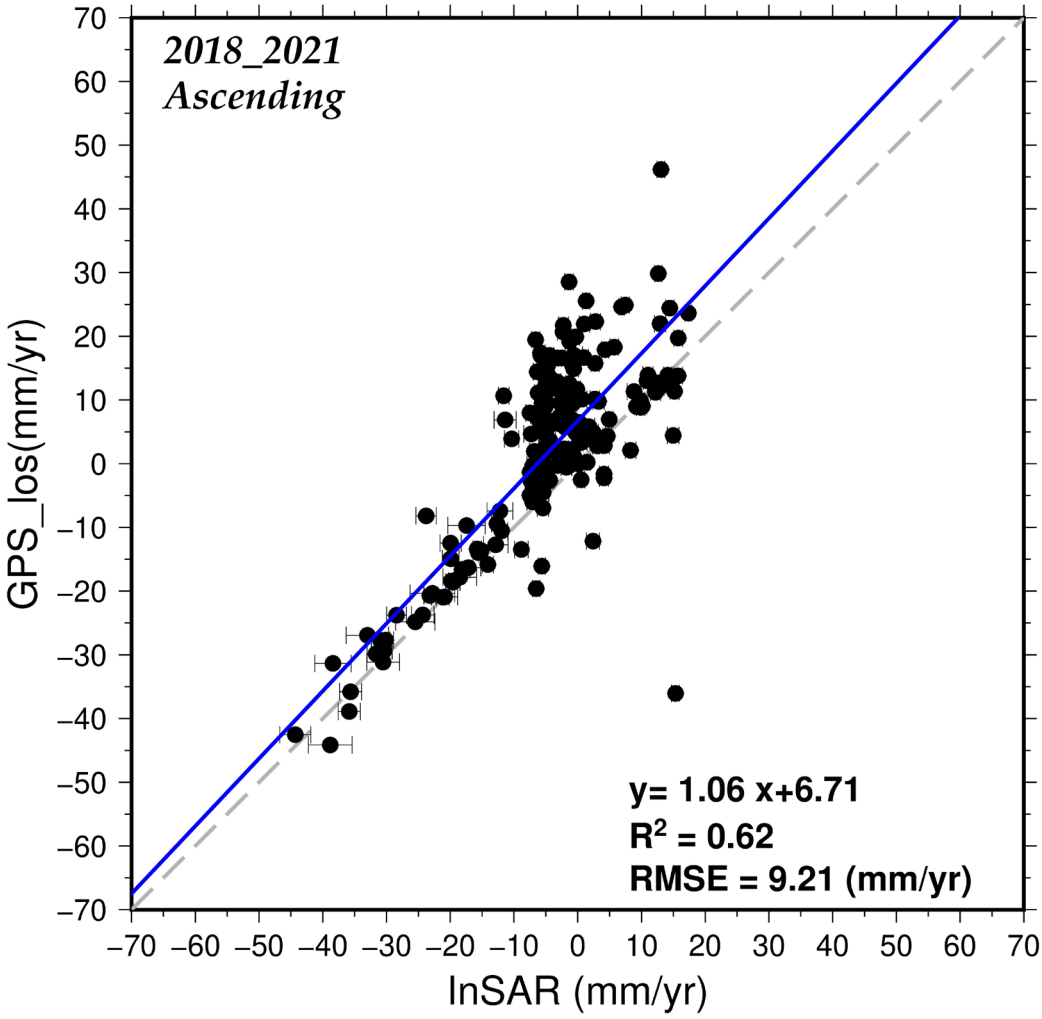


圖 4-21：2018-2021 升軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。

Figure 4-21：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2018-2021.

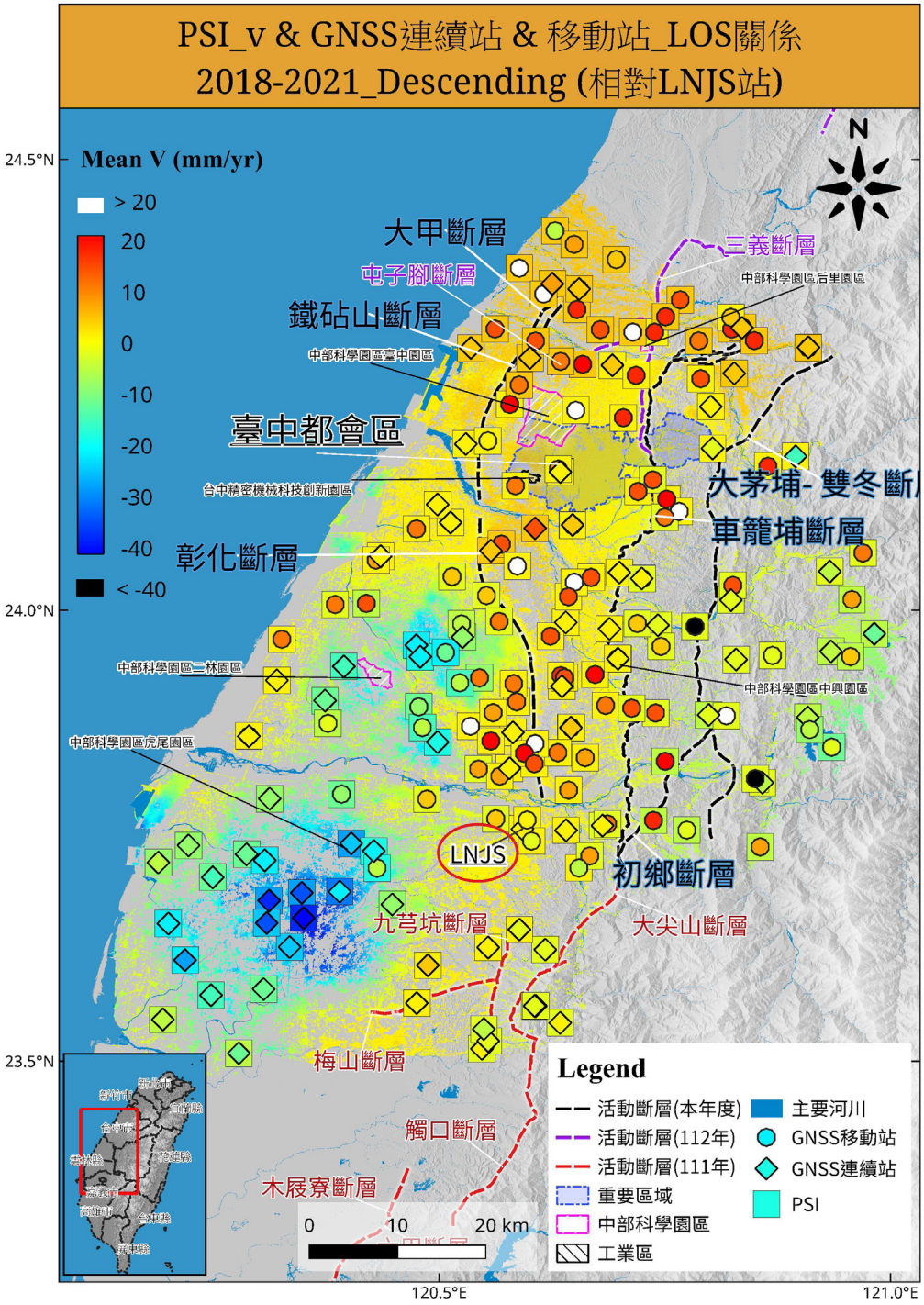


圖 4-22：2018-2021 年 Descending 平均速度場與所有 GNSS 速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為 GNSS 連續站三維向量投影至視衛星方向，圓形為 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-22：Velocity field in descending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds and circle represent 3-directions velocity projected to LOS direction of continuous GNSS station and campaign GNSS station.

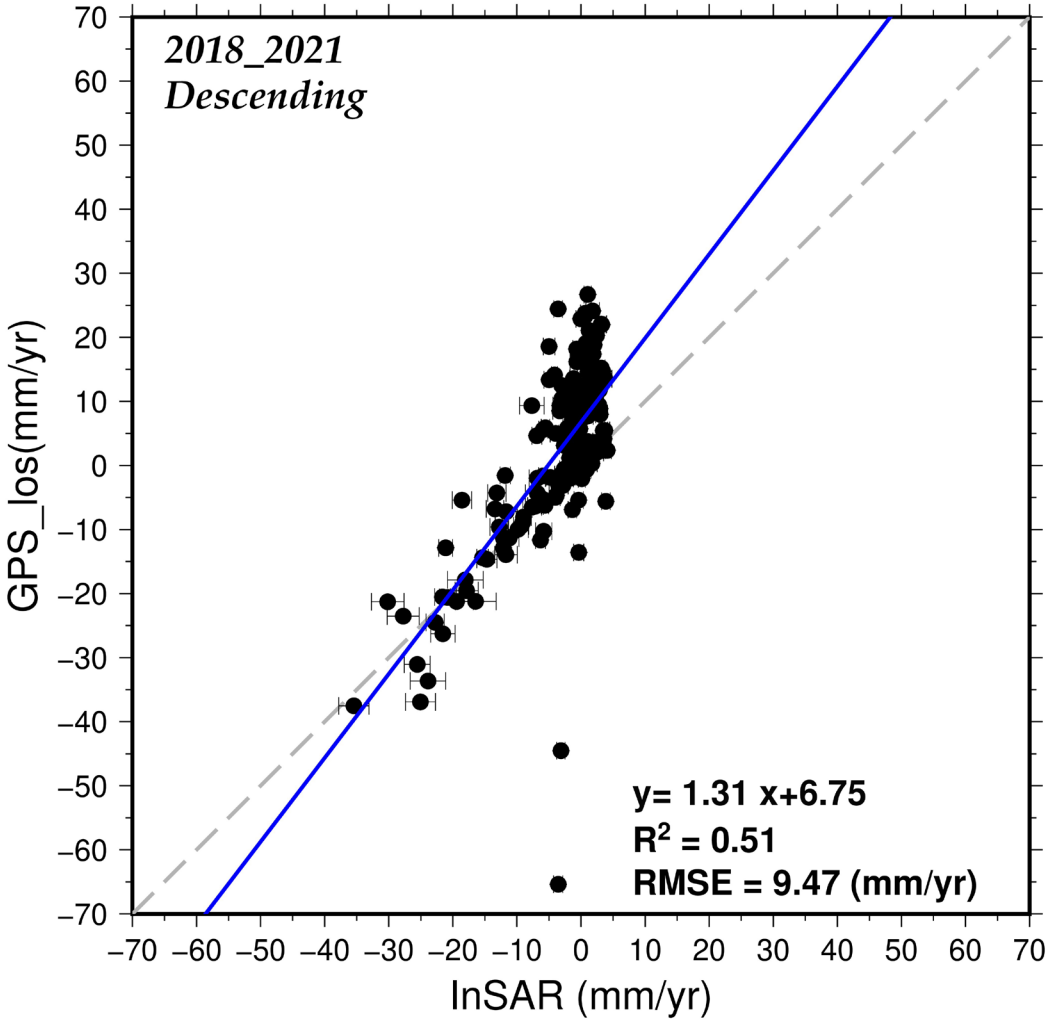


圖 4-23：2018-2021 降軌道雷達資料與 2018-2018 所有 GNSS 比對。

Figure 4-23：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2018-2021.

4-2-3 2022~2023 年

圖 4-24, 4-26 分別為 2022 年至 2023 年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與 GNSS 連續站及移動站結果作比較。圖 4-25, 4-27 則是分別為研究區域所有 GNSS 測站速度與測站周圍 500 公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表 4-9 則是 2022 年至 2023 年的升軌道與降軌道速度場與所有 GNSS 資料比對結果。結果顯示本時期的 PSI 與 GNSS 的 R^2 與 RMSE 都比前兩個時期低，兩者資料相似度低。

升降軌道成果皆顯示有多數移動站數值大於 20 mm/yr，相較於 PSI 與 GNSS 連續站觀測值大，比對狀況不佳（圖 4-24 及圖 4-26）。

圖 4-25 顯示 GNSS 投影至升軌方向的 LOS 速度大約介於 -65~70 mm/yr 間，PSI 觀測值大約介於 -50~20 mm/yr 間，圖 4-26 顯示 GNSS 投影至降軌方向的 LOS 速度大約介於 -50~60 mm/yr 間，PSI 觀測值大約介於 -50~15mm/yr 間。升降軌道成果皆顯示資料離散，雖然可得到斜率接近 1 的迴歸式，但 R^2 與 RMSE 為三時段最差，因為本時期僅有一年觀測資料，在 PSI 方面因觀測時間跨距短、影像數量少，使得 PSI 資料品質不佳，而移動站為一年進行一次觀測，本時期僅由 2 點決定該站平均速度，誤差較大，GNSS 移動站品質較不穩定，為本時期比對成果不佳的原因。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料受限於影線數目，資料品質不佳，PSI 與 GNSS 移動站對比而言相似度較低，僅能參考趨勢。

表 4-9：：2022-2023 年 PSI 與 GNSS 移動站與連續站比對成果。

Table 4-9 ：Comparisons of velocity fields between PSI and the campaign and continues GNSS results through 2022-2023.

	slope	R^2	RMSE (mm/yr)
Ascending	0.99	0.14	28.47
Descending	1.06	0.17	26.73

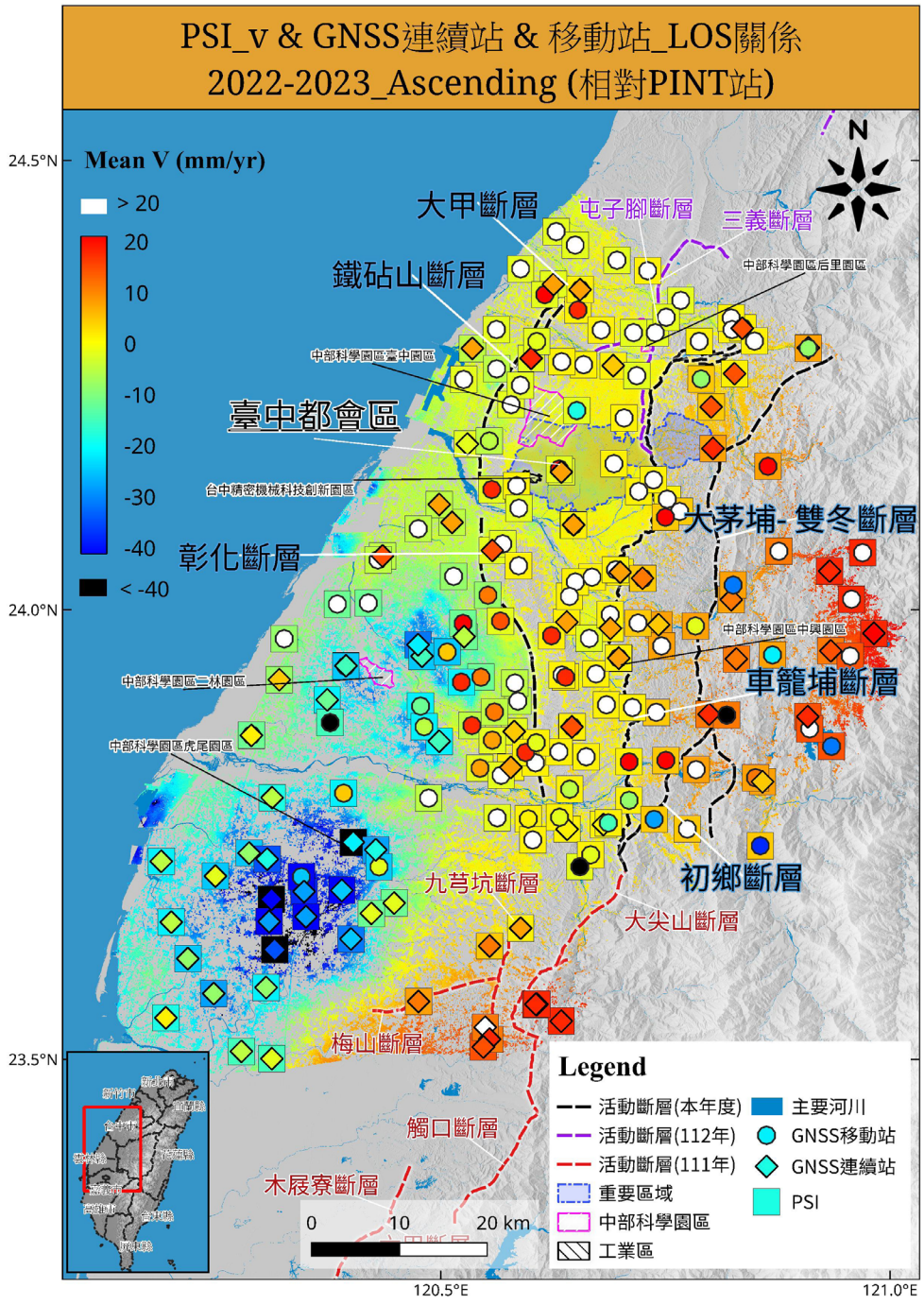


圖 4-24：2022-2023 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為 GNSS 連續站三維向量投影至視衛星方向，圓形為 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-24：Velocity field in ascending track between 2022 and 2023. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds and circle represent 3-directions velocity projected to LOS direction of continuous GNSS station and campaign GNSS station.

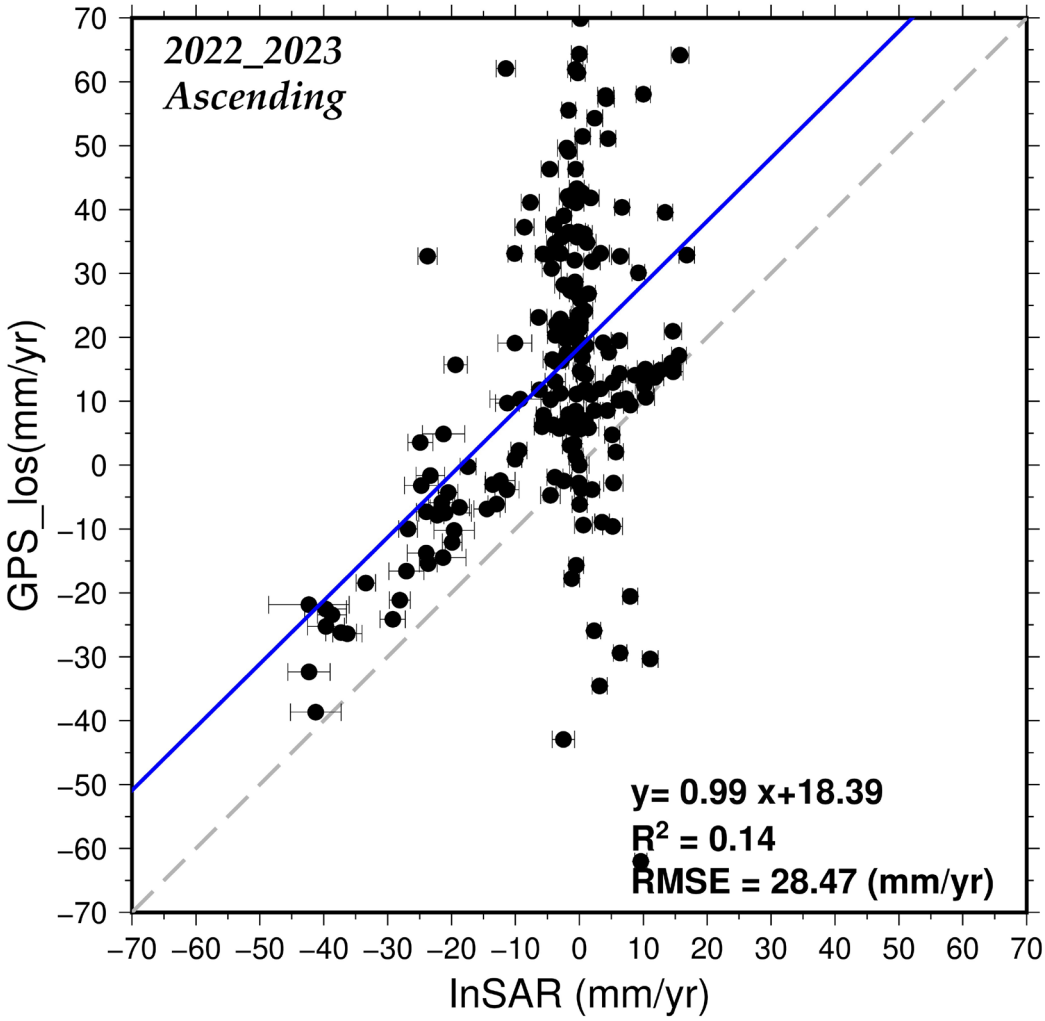


圖 4-25：2022-2023 年升軌道雷達資料與所有 GNSS 比對。

Figure 4-25：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2022-2023.

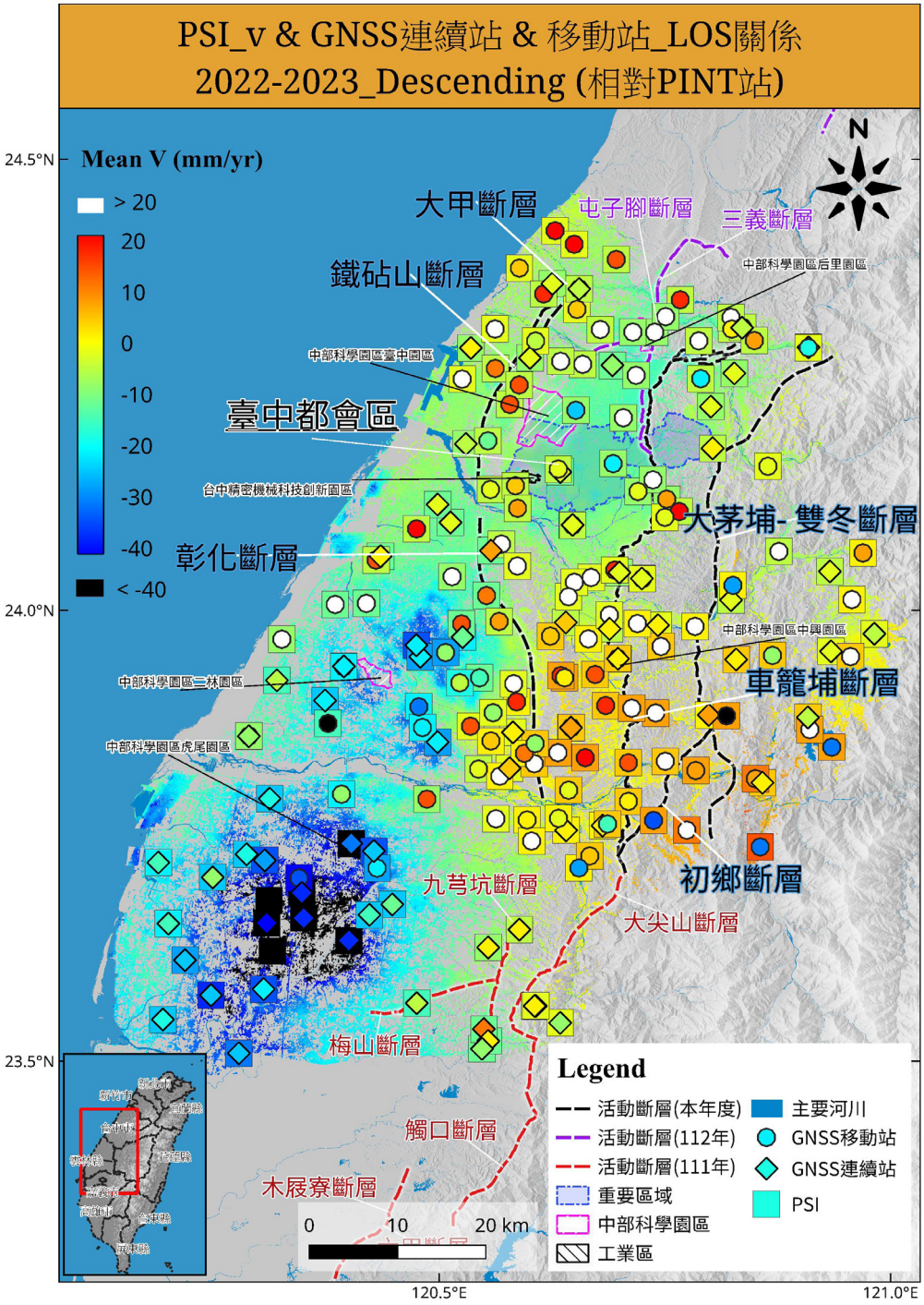


圖 4-26：2022-2023 年 Descending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛移動。菱形為 GNSS 連續站三維向量投影至視衛星方向，圓形為 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-26：Velocity field in descending track between 2022 and 2023. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds and circle represent 3-directions velocity projected to LOS direction of continuous GNSS station and campaign GNSS station.

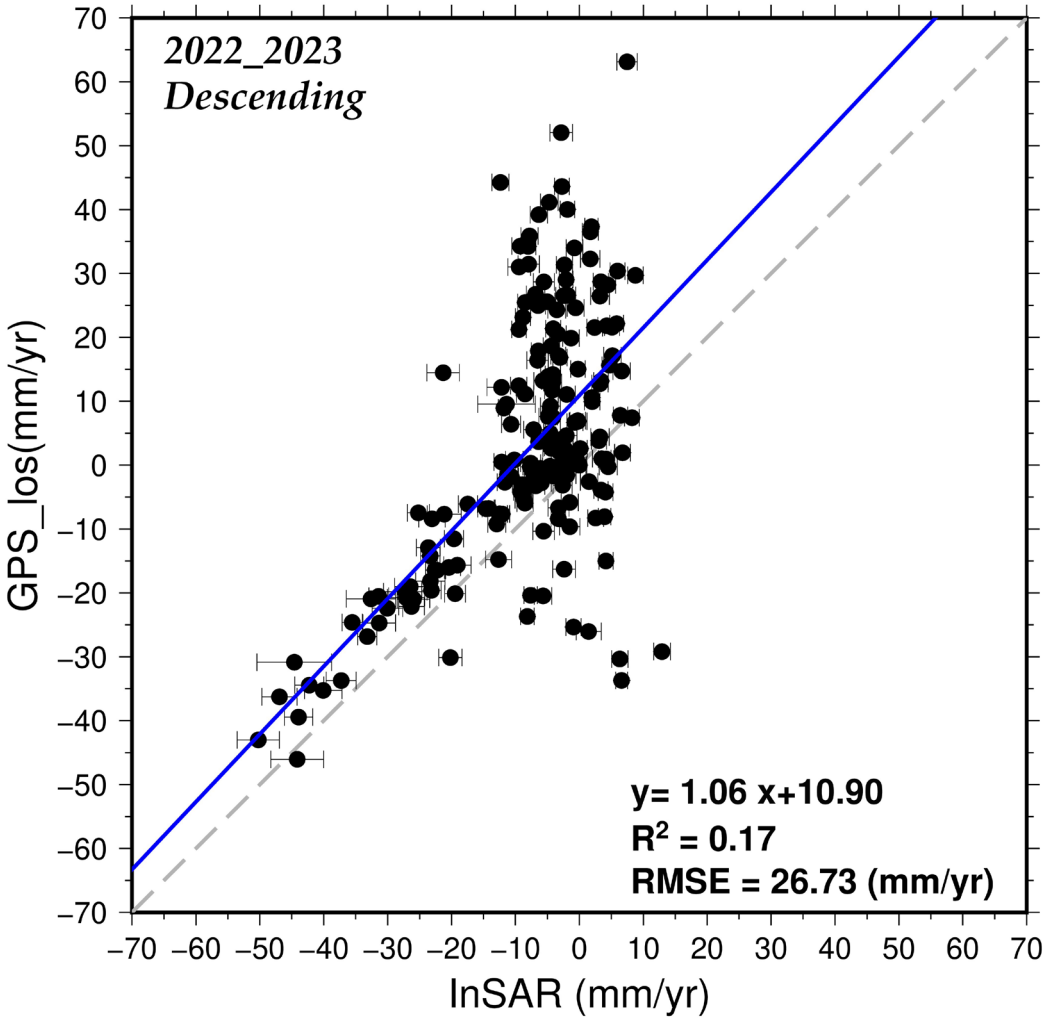


圖 4-27：2022-2023 年降軌道雷達資料與移動站的比對。

Figure 4-27：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2022-2023.

4-3 水準測量資料與雷達資料比對成果

調查區域中有九條長期觀察之水準測線，分別是大安至東勢測線、王功至草屯至埔里測線、北斗至水里測線、龍井至太平測線、五光至黃竹測線，以及跨車籠埔斷層的四條短測線（曾厝至霧峰測線、北勢至峰谷測線、烏溪南岸測線及中興新村測線）（圖 4-28）。我們運用這些水準測量資料來與雷達資料對比，藉此比較整體趨勢以及細節部分的差異。精密水準測量資料由地礦中心的重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估 - 第二階段（2/3）計畫提供。

在比對方法上，我們以水準測線頭尾連結拉一條剖線，沿著剖線萃取雷達資訊，並且將剖線兩側的水準測站資訊投影到剖線上來比對。 由於水準測線與雷達資料的基準不同，我們透過鄰近的 GNSS 測站先將水準資料與雷達資料做校正，將其拉至同一個參考點比對。

由於此方法使用頭尾的直線做投影基準線，所以在經過投影的處理後會有部分水準站與雷達資訊不共點的狀況，因此某一些數字的差異會因為這些地面上的幾何差異造成。

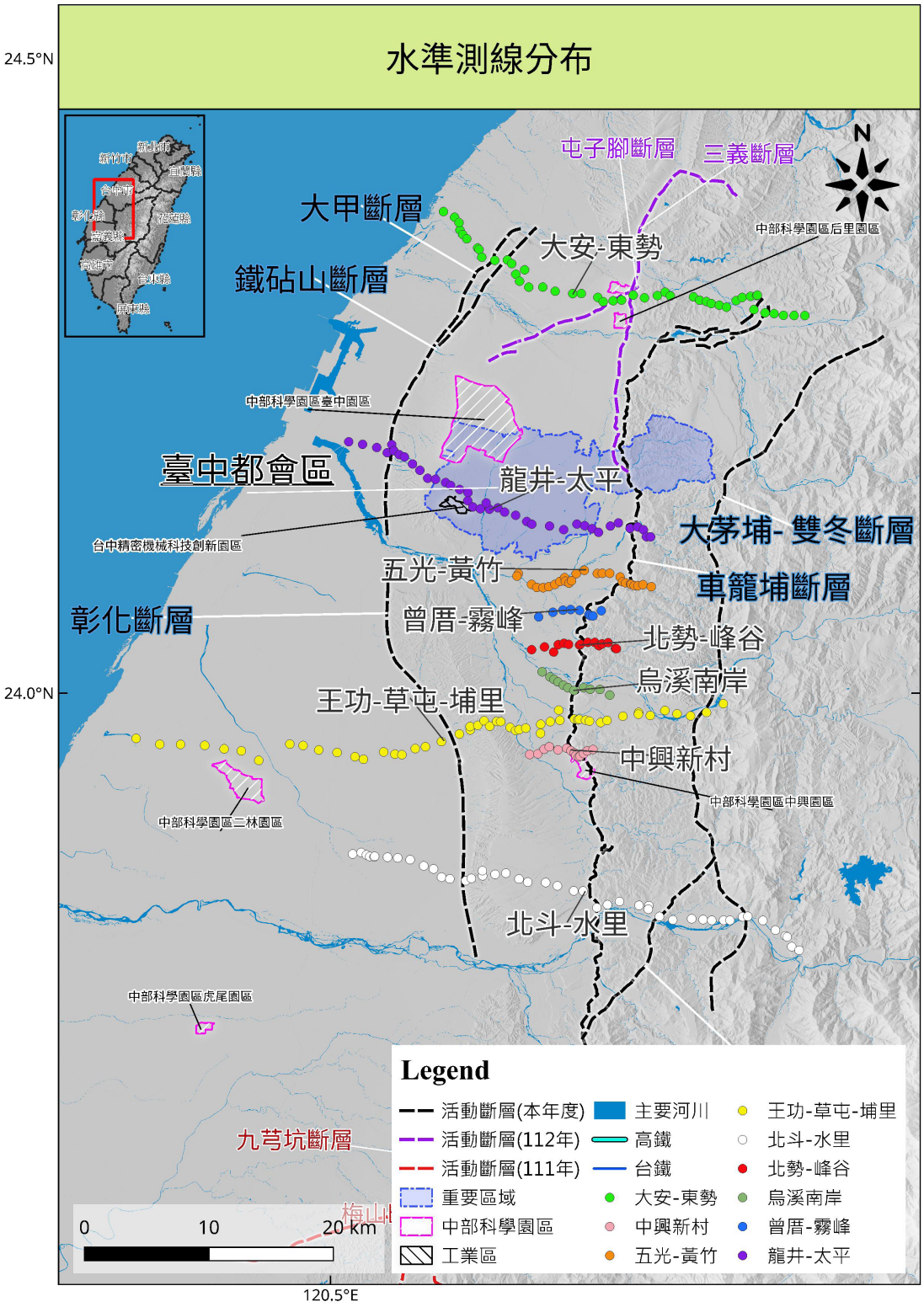


圖 4-28：水準測線分布。

Figure 4-28：Locations of leveling profiles.

4-3-1 大安至東勢測線

大安至東勢測線，其橫跨橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層與三義斷層，路線長約 31 公里（投影至剖面的長度），以 GNSS 連續站 GS82 做為參考點 (藍色三角形) 來校正水準點位 B283 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點 GS82 校正後，2014~2018 及 2018~2021 兩個時期的兩個方向 (ascending 及 descending) 雷達影像結果與水準測量結果一致，整體速度變化不大，整體視衛星方向速率位於 5mm/yr 以內，跨越三條斷層速度無明顯變化。2022~2023 期間因水準資料測量次數過少建議持續監測再比對 (圖 4-29、4-30)。

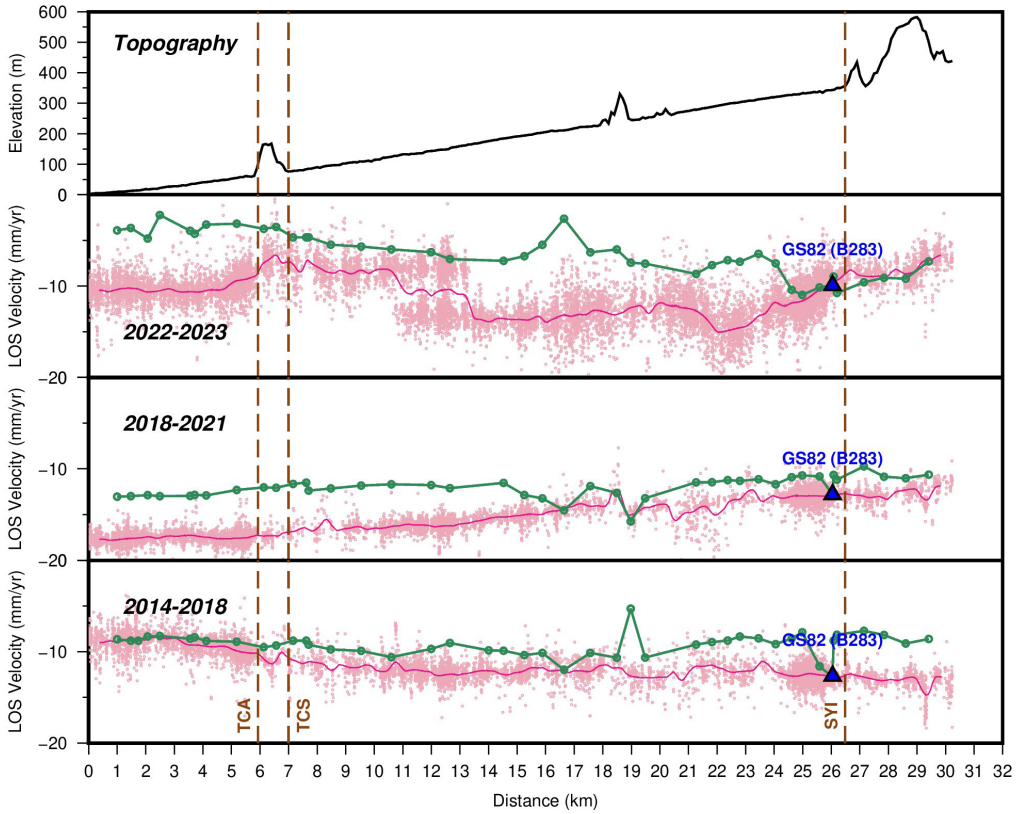


圖 4-29：水準測線 - 大安至東勢測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 GS82(B283)。TCA 為大甲斷層；TCS 為鐵砧山斷層；SYI 為三義斷層。

Figure 4-29：Comparison of PSInSAR and Da' an-Dongshi leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS82(B283). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TCA is Tachia fault, TCS is Tiehchanshan fault, and SYIF is Sanyi fault.

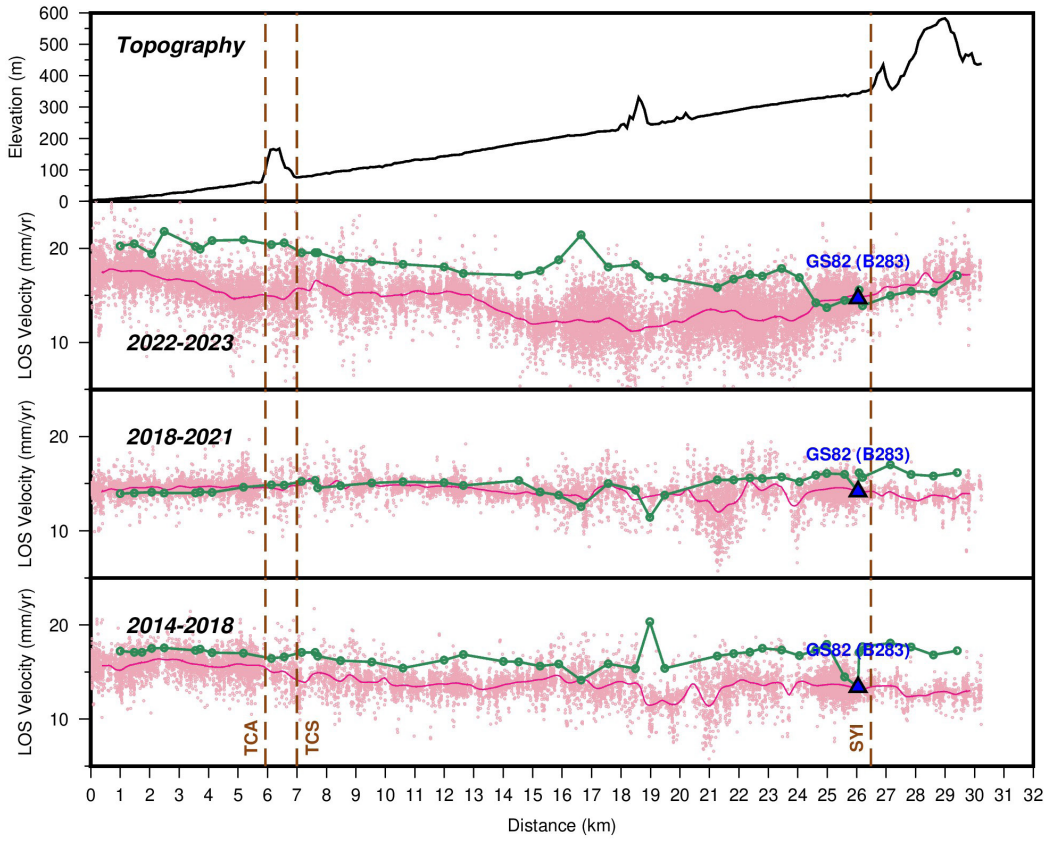


圖 4-30：水準測線 - 大安至東勢測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 GS82(B283)。TCA 為大甲斷層；TCS 為鐵砧山斷層；SYI 為三義斷層。

Figure 4-30：Comparison of PSInSAR and Da' an-Dongshi leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS82(B283). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TCA is Tachia fault, TCS is Tiehchanshan fault, and SYIF is Sanyi fault.

4-3-2 王功至草屯至埔里測線

王功 - 草屯 - 埔里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔 - 雙冬斷層，測線長約 47 公里 (投影至剖面的長度），以 GNSS 連續站 CAOT 做為參考點 (藍色三角形) 來校正水準點位 T075 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點 CAOT 校正後，三個時期的兩個方向 (ascending 及 descending) 雷達影像結果與水準測量結果一致，彰化斷層以西呈現明顯的視衛星方向遠離，應為王功至員東國小地層下陷造成。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，彰化斷層以東之視衛星方向速度變化相對而言較不顯著 (圖 4-31、4-32)。

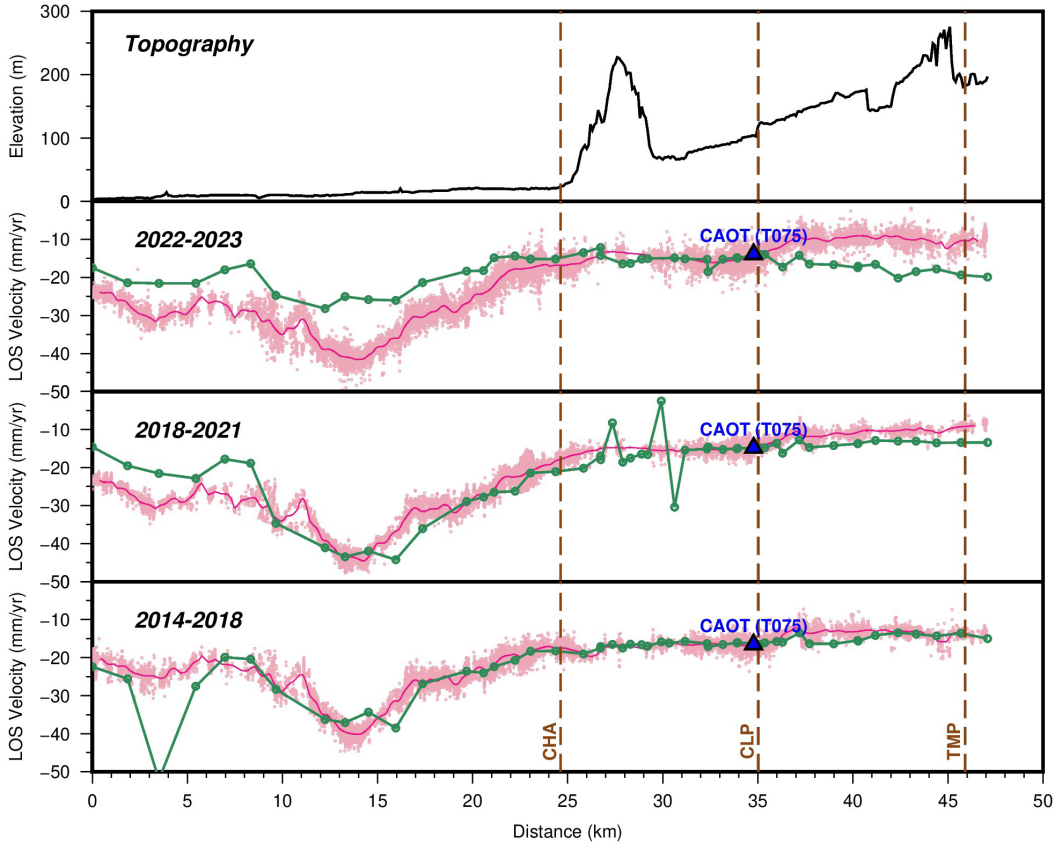


圖 4-31：水準測線 - 王功至草屯至埔里測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 CAOT(T075)。CHA 為彰化斷層、CLP 為車籠埔斷層、TMP 為大茅埔 - 雙冬斷層。

Figure 4-31：Comparison of PSInSAR and Wangong-Caotun-Puli leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station CAOT(T075). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CHA is Changhua fault, CLP is Chelungpu fault, and TMP is Tamaopu-Shuangtung fault.

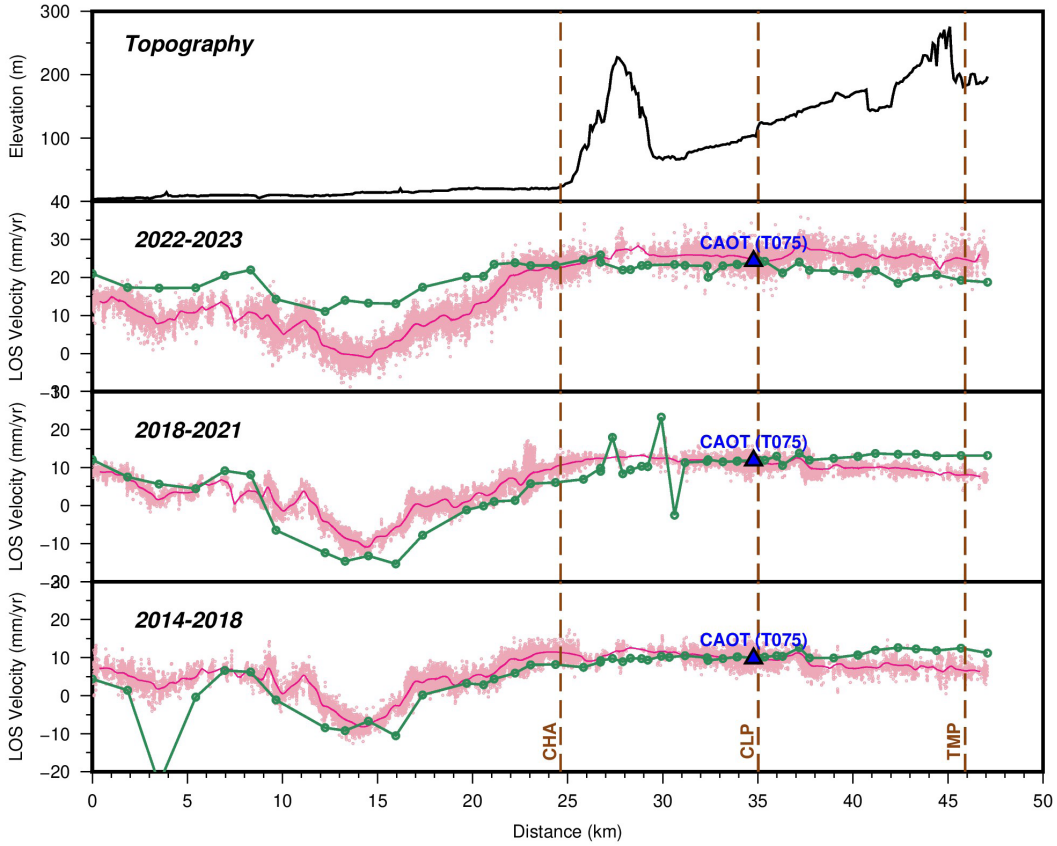


圖 4-32：水準測線 - 王功至草屯至埔里測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 CAOT(T075)。CHA 為彰化斷層、CLP 為車籠埔斷層、TMP 為大茅埔 - 雙冬斷層。

Figure 4-32：Comparison of PSInSAR and Wangong-Caotun-Puli leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station CAOT(T075). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CHA is Changhua fault, CLP is Chelungpu fault, and TMP is Tamaopu-Shuangtung fault.

4-3-3 北斗至水里測線

北斗 - 水里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔 - 雙冬斷層，長約 37 公里 (投影至剖面的長度)，以 GNSS 連續站 GS26 做為參考點 (藍色三角形) 來校正水準點位 MX83 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。根據圖 3-6、升軌資料在向東跨越車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層間有明顯視衛星方向接近行為，其中又以 2014~2018 期間最為明顯，最大可達 12 mm/yr。而在降軌影像則無明顯變化，代表除了水準資料可觀察到的抬升行為外，該區域也有一定程度的水平位移 (圖 4-33、4-34)。

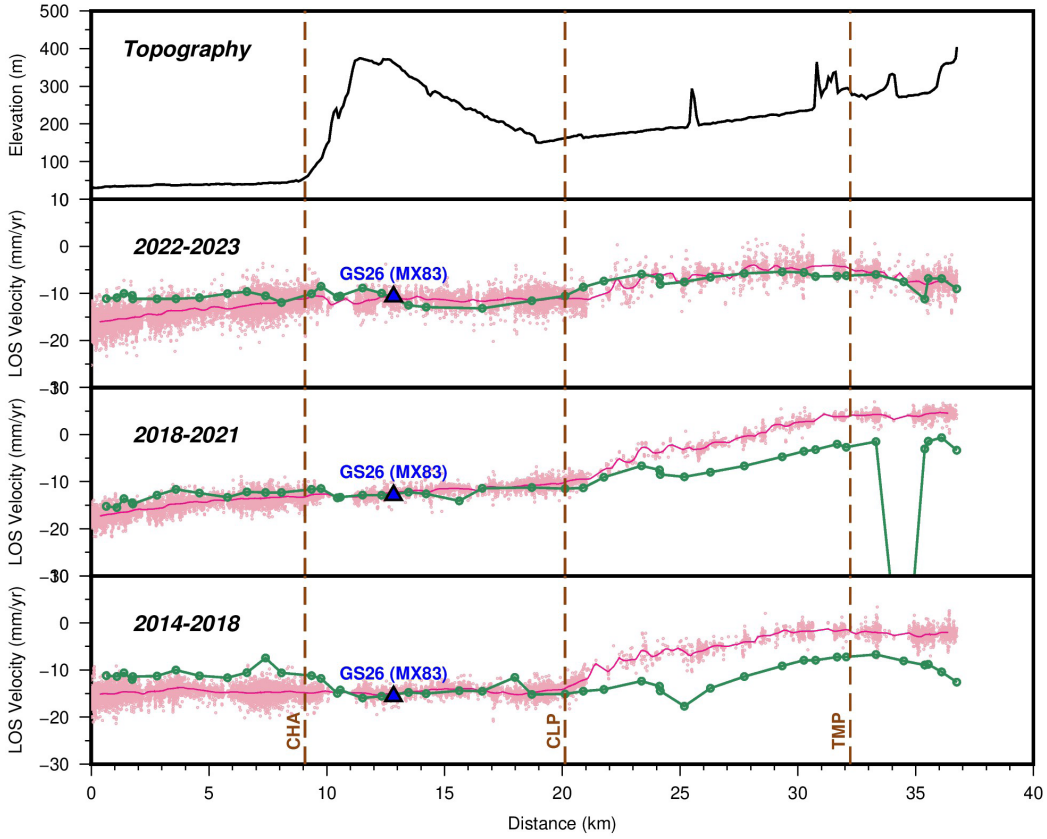


圖 4-33：水準測線 - 北斗至水里測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 GS26(MX83)。CHA 為彰化斷層、CLP 為車籠埔斷層、TMP 為大茅埔 - 雙冬斷層。

Figure 4-33：Comparison of PSInSAR and Beidou-Shuili leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS26(MX83). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CHA is Changhua fault, CLP is Chelungpu fault, and TMP is Tamaopu-Shuangtung fault.

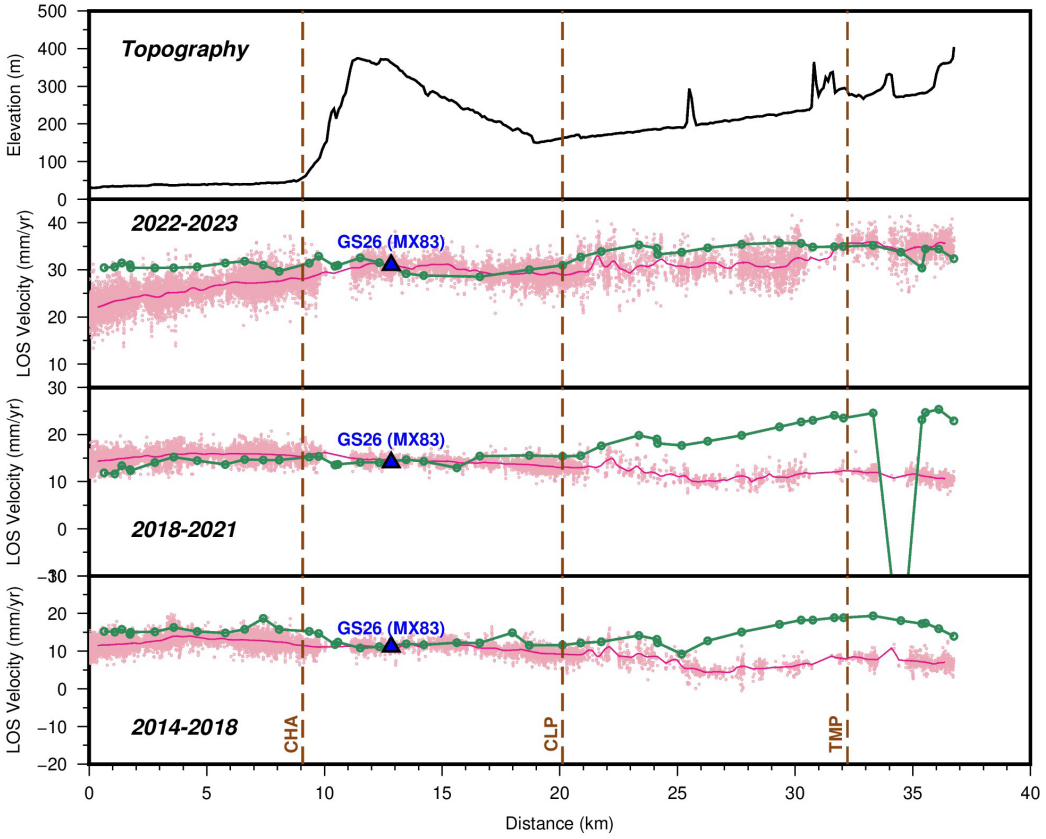


圖 4-34：水準測線 - 北斗至水里測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 GS26(MX83)。CHA 為彰化斷層、CLP 為車籠埔斷層、TMP 為大茅埔 - 雙冬斷層。

Figure 4-34：Comparison of PSInSAR and Beidou-Shuili leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS26(MX83). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CHA is Changhua fault, CLP is Chelungpu fault, and TMP is Tamaopu-Shuangtung fault.

4-3-4 龍井至太平測線

龍井至太平測線橫跨車籠埔斷層以及彰化斷層，長約 26 公里 (投影至剖面的長度），以 GNSS 連續站 LSB0 做為參考點 (藍色三角形) 來校正水準點位 G937 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。整體而言，以參考點 LSB0 校正後，三個時期的兩個方向 (ascending 及 descending) 雷達影像結果整體速度變化不大，整體視衛星方向速率位於 10 mm/yr 以內。其中，2022~2023 時期跨越大甲斷層有一下陷行為，約 5 mm/yr。跨越車籠埔斷層速度則無明顯變化 (圖 4-35、4-36)。

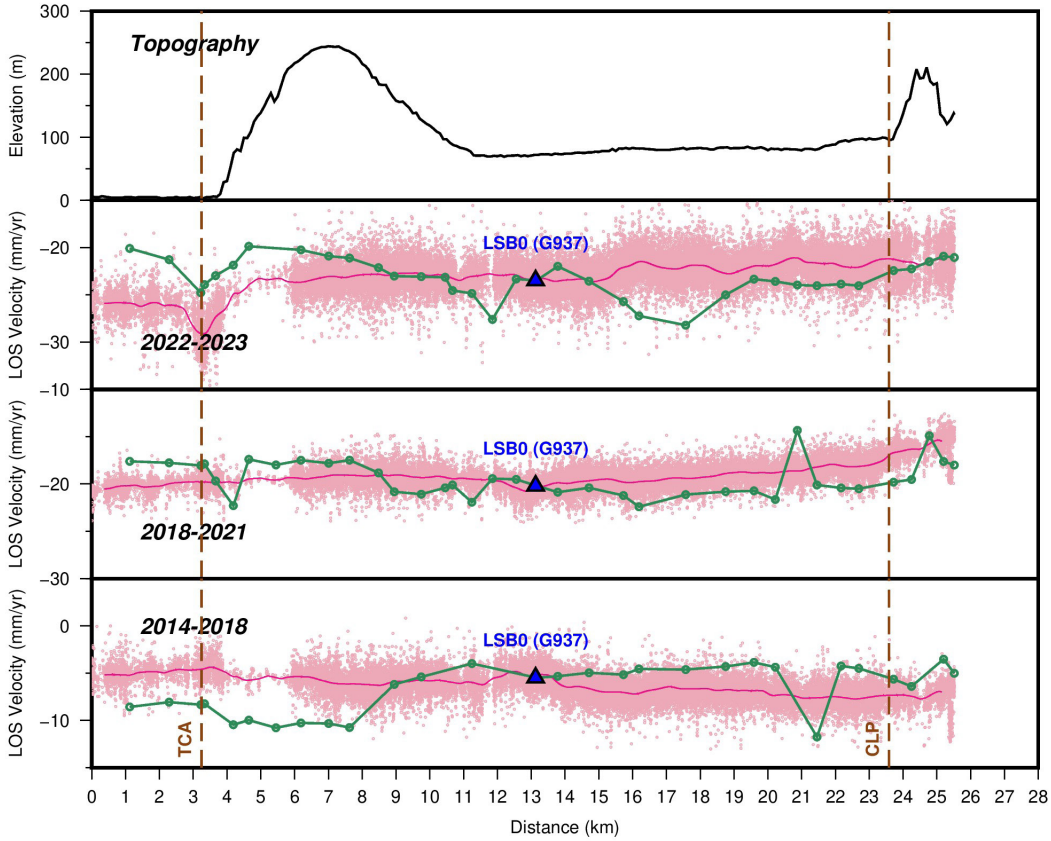


圖 4-35：水準測線 - 龍井至太平測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 CWBN(X018)。TCA 為大甲斷層、CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-35：Comparison of PSInSAR and Longjing-Taiping leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station LSB0(G937). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TCA is Tachia fault, CLP is Chelungpu fault.

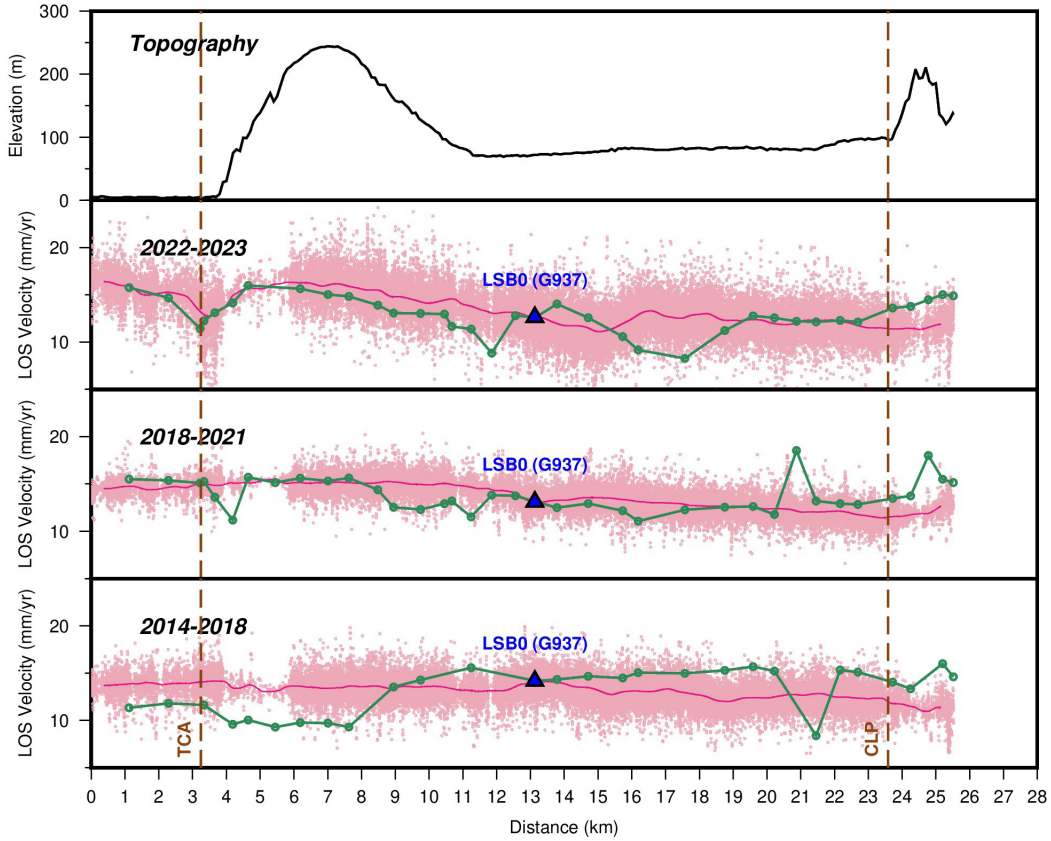


圖 4-36：水準測線 - 龍井至太平測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 CWBN(X018)。TCA 為大甲斷層、CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-36：Comparison of PSInSAR and Longjing-Taiping leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station LSB0(G937). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TCA is Tachia fault, CLP is Chelungpu fault.

4-3-5 五光至黃竹測線

五光 - 黃竹測線橫跨車籠埔斷層，路線長約 11 公里（投影至剖面的長度），以 GNSS 連續站 GS23 做為參考點 (藍色三角形) 來校正水準點位 AF15 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點 AF15 校正後，三個時期的兩個方向 (ascending 及 descending) 雷達影像結果整體速度變化不大，整體視衛星方向速度差異約為 2~3 mm/yr 以內 (圖 4-37、4-38)。

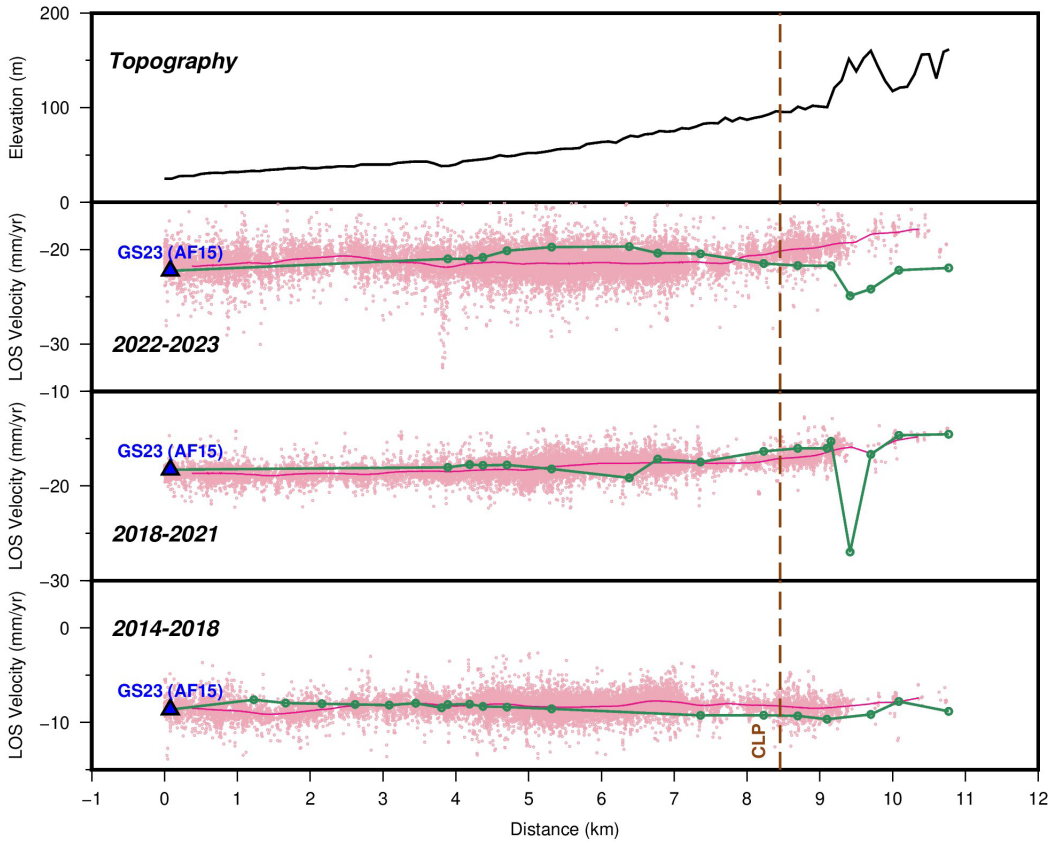


圖 4-37：水準測線 - 五光至黃竹測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 GS23(AF15)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-37：Comparison of PSInSAR and Wuguang-Huangzhu leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS23(AF15). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

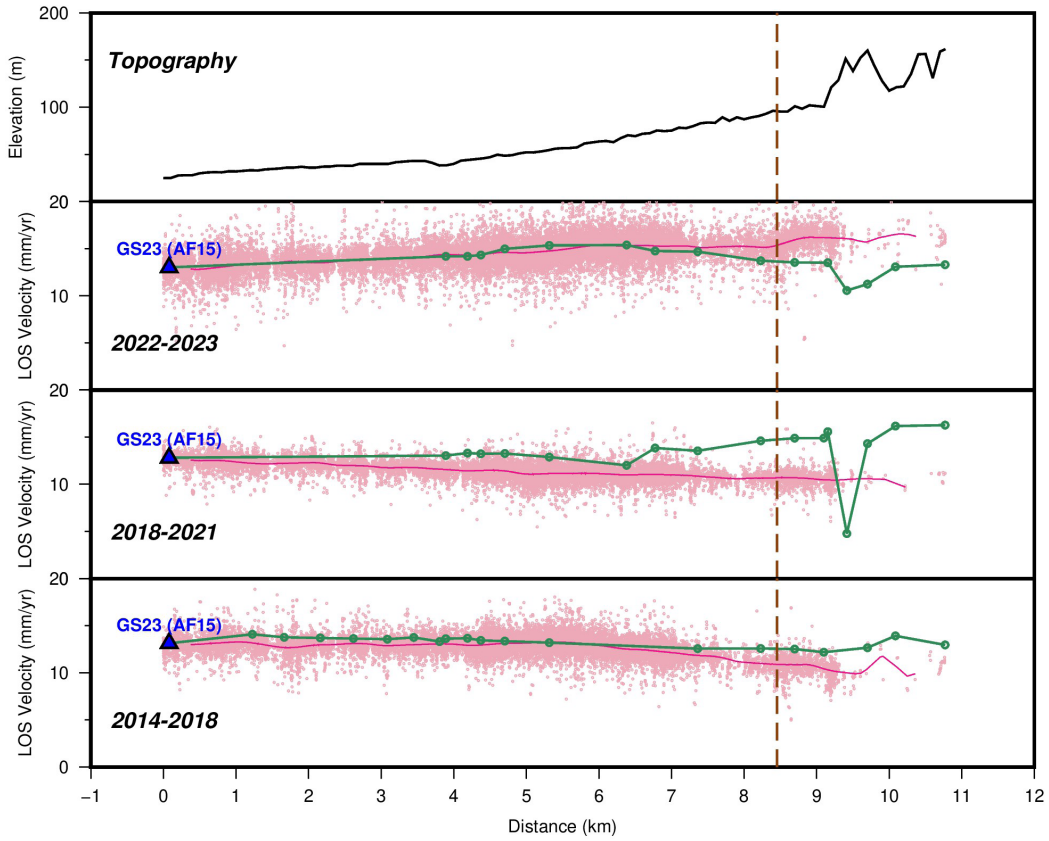


圖 4-38：水準測線 - 五光至黃竹測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 GS23(AF15)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-38：Comparison of PSInSAR and Wuguang-Huangzhu leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS23(AF15). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

4-3-6 跨車籠埔斷層短測線

除了前 5 節的五條水準測線為每年定期量測外，車籠埔斷層沿線另有 4 條橫跨斷層之水準測線，路線長約 5~7 公里（投影至剖面的長度）。由北至南分別為曾厝至霧峰測線、北勢至峰谷測線、烏溪南岸測線及中興新村測線。由於此四條測線為每四年測量一次，從 2014 年到 2023 年共只有 2013、2015、2019 及 2023 四次測量，本章節以水準整體平均速率進行雷達影像的對比。

4 條短測線分別以 GNSS 連續站 WUFN、WFEN、CAOT、KZN1 做為參考點 (藍色三角形) 來校正水準點位 T074、GE89、T005、B238 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點校正後，三個時期的兩個方向 (ascending 及 descending) 雷達影像結果整體速度變化不大，跨越車籠埔斷層無明顯速度差異，整體視衛星方向速度差異約為 2~3mm/yr 以內 (圖 4-39~4-46)。

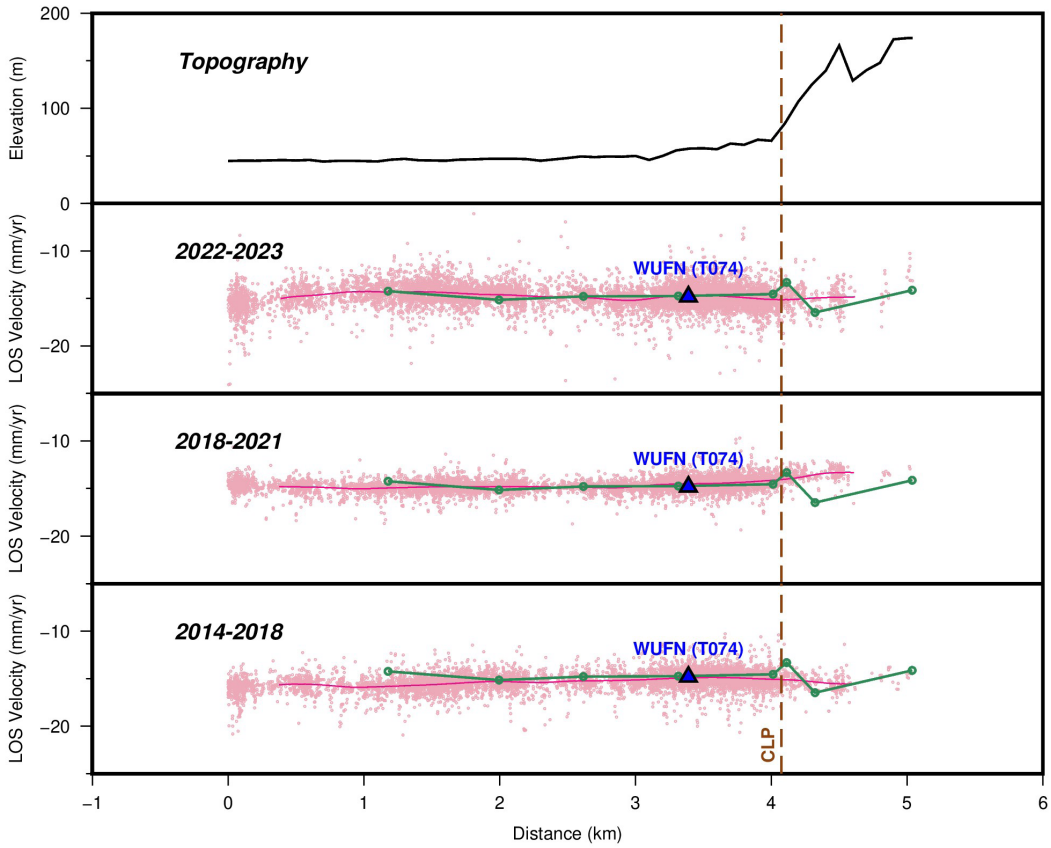


圖 4-39：水準測線 - 曾厝至霧峰測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 WUFN(T074)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-39：Comparison of PSInSAR and Zengcuo-Wufeng leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station WUFN(T074). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

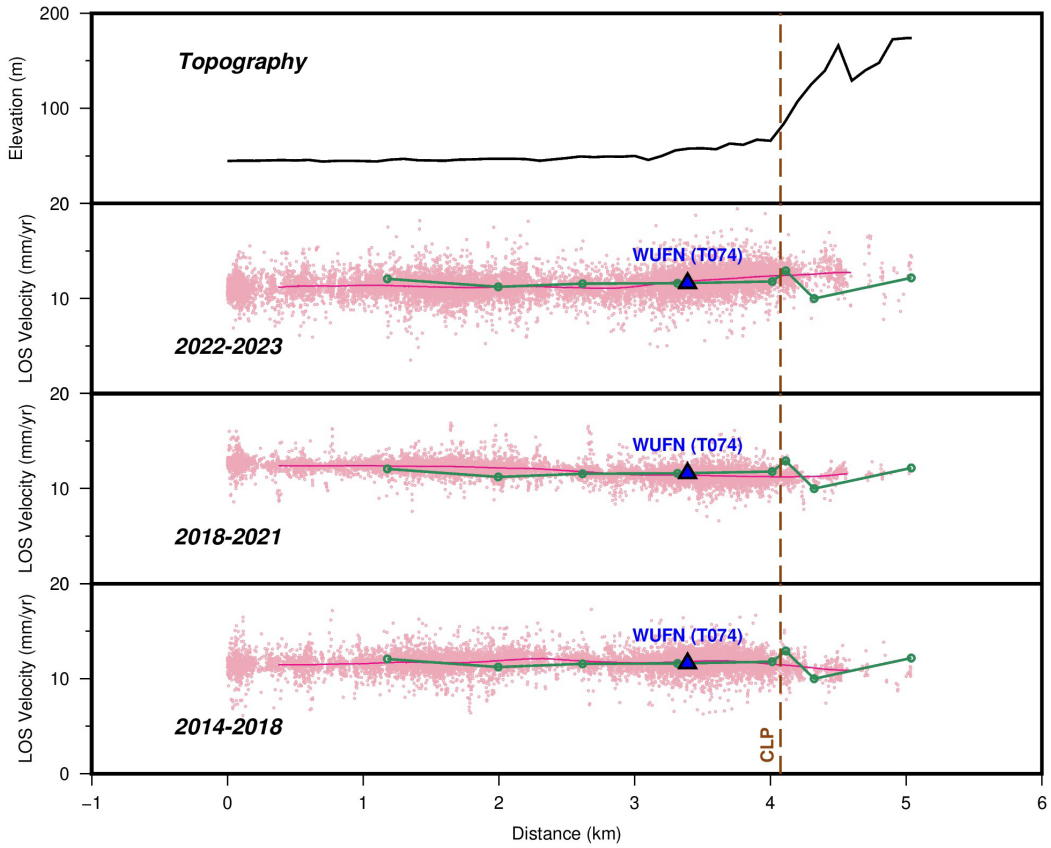


圖 4-40：水準測線 - 曾厝至霧峰測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 WUFN(T074)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-40：Comparison of PSInSAR and Zengcuo-Wufeng leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station WUFN(T074). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

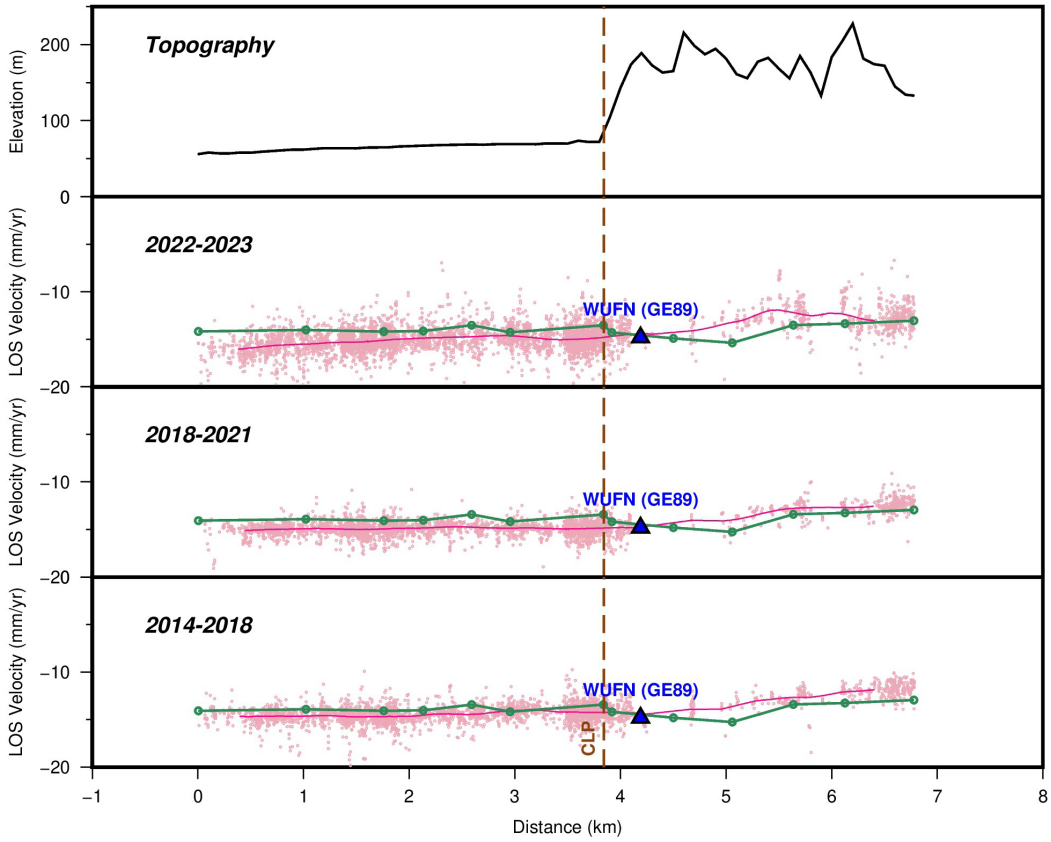


圖 4-41：水準測線 - 北勢至峰谷測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 WFEN(GE89)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-41：Comparison of PSInSAR and Beishi-Fenggu leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station WEFN(GE89). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

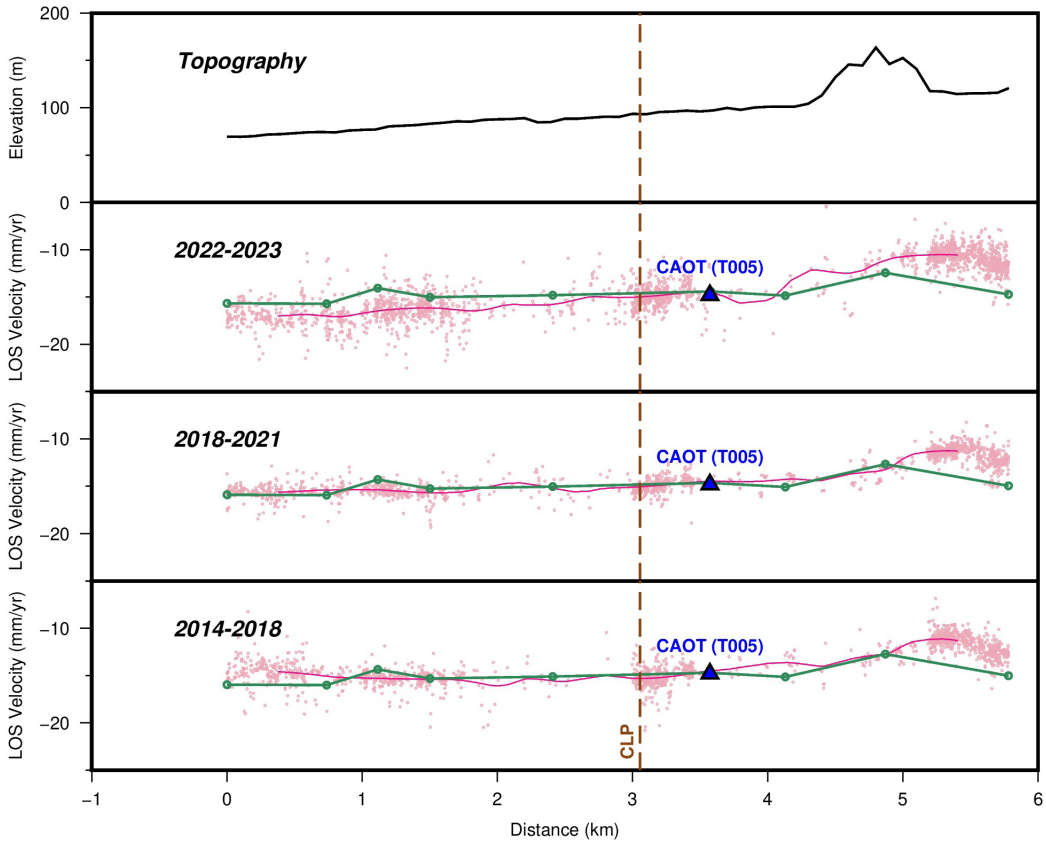


圖 4-42：水準測線 - 北勢至峰谷測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 WFEN(GE89)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-42：Comparison of PSInSAR and Beishi-Fenggu leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station WFEN(GE89). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

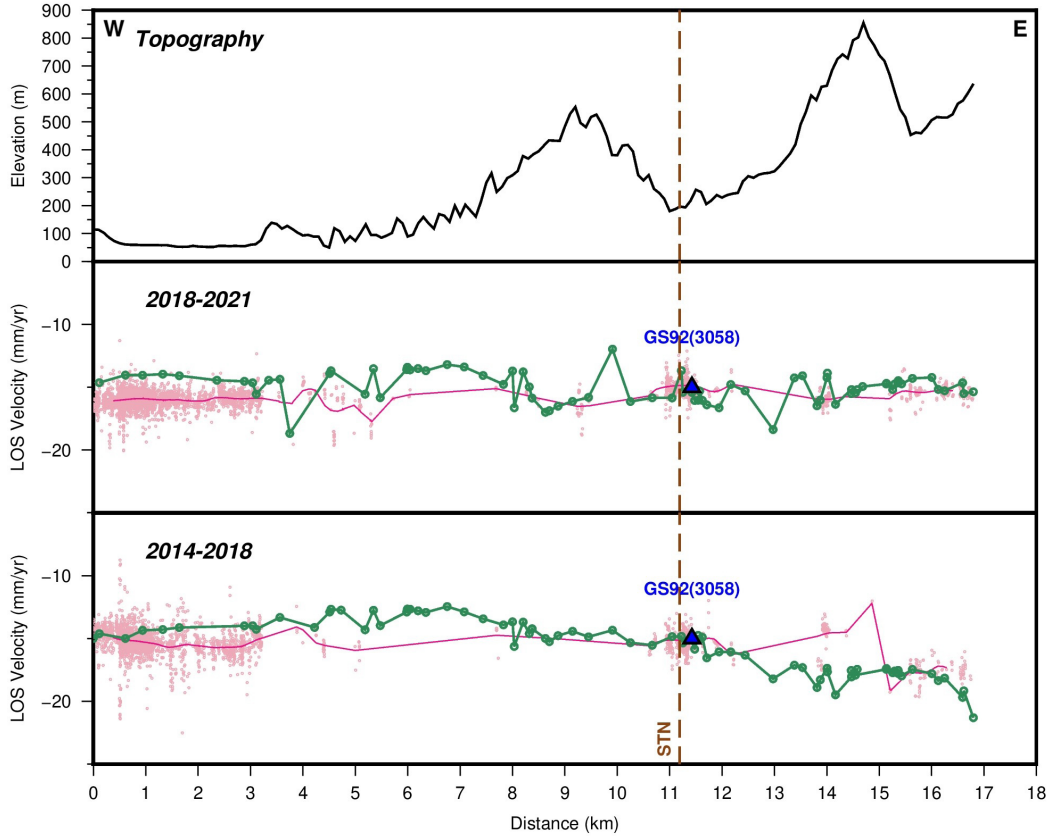


圖 4-43：水準測線 - 烏溪南岸測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 CAOT(T005)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-43：Comparison of PSInSAR and South Bank of Wuxi leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station CAOT(T005). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

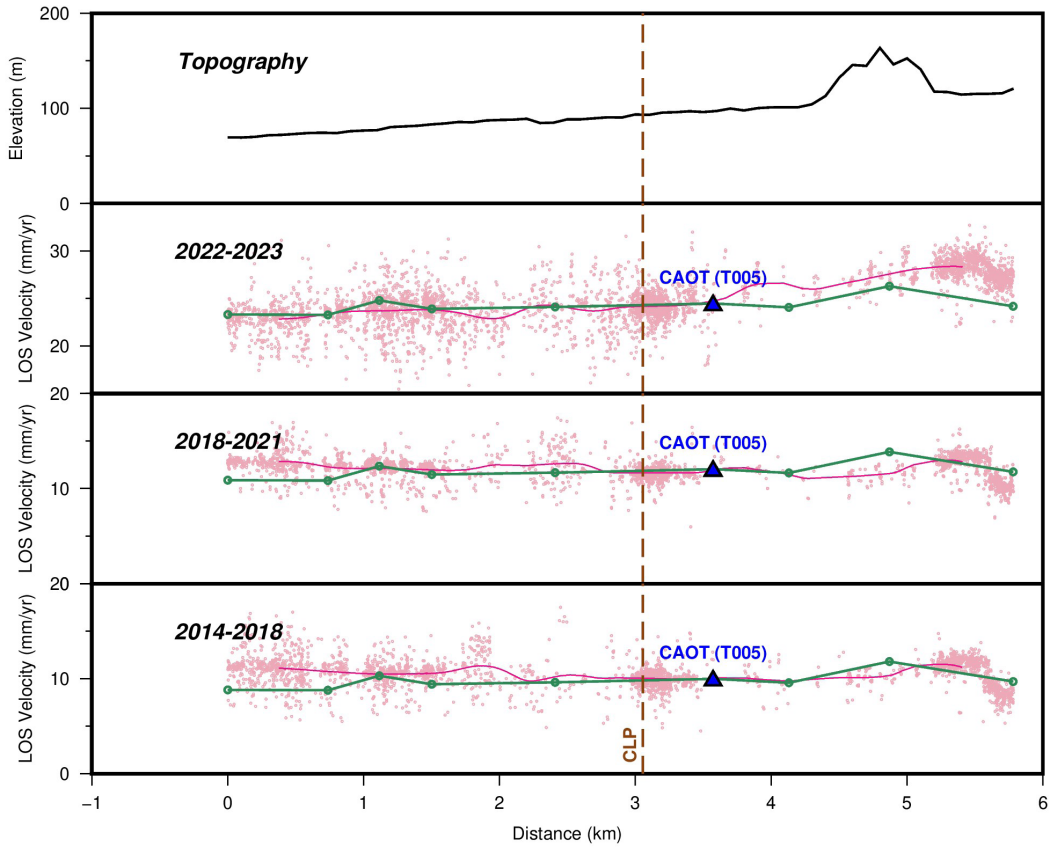


圖 4-44：水準測線 - 烏溪南岸測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 CAOT(T005)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-44：Comparison of PSInSAR and South Bank of Wuxi leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station CAOT(T005). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

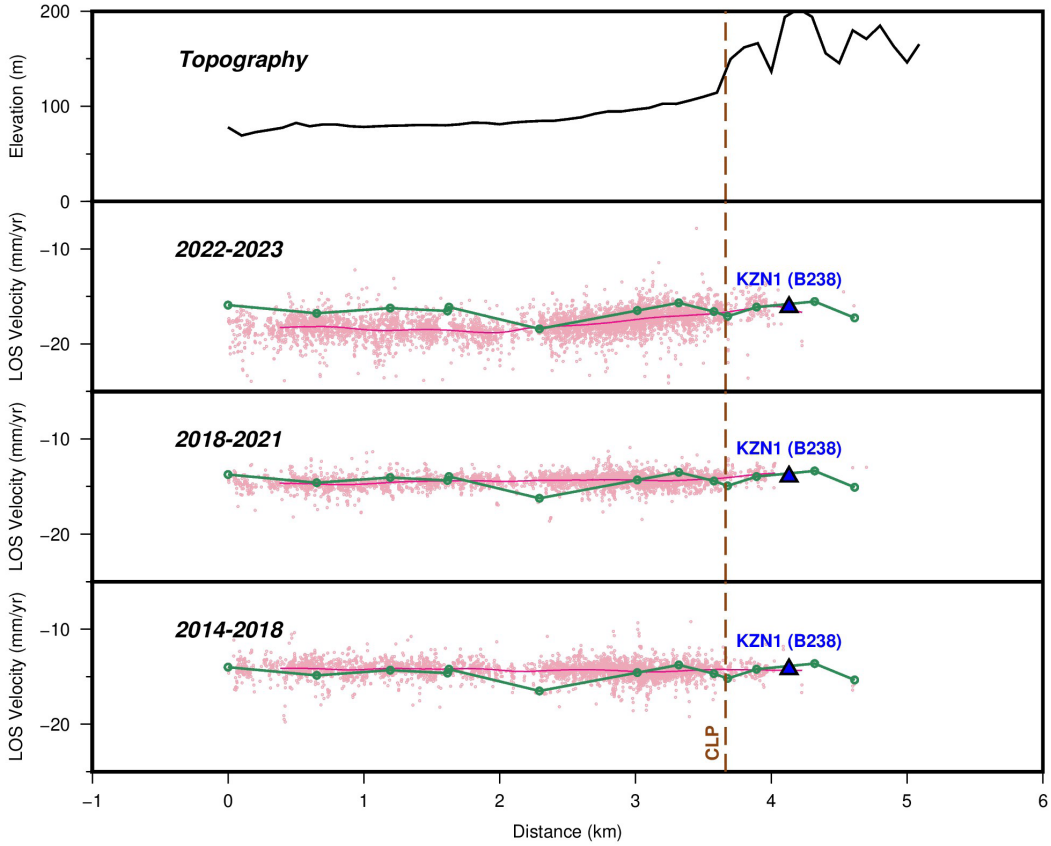


圖 4-45：水準測線 - 中興新村測線與 PSInSAR 資料比對 (Ascending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 KZN1(B238)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-45：Comparison of PSInSAR and Zhongxing New Village leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station KZN1(B238). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

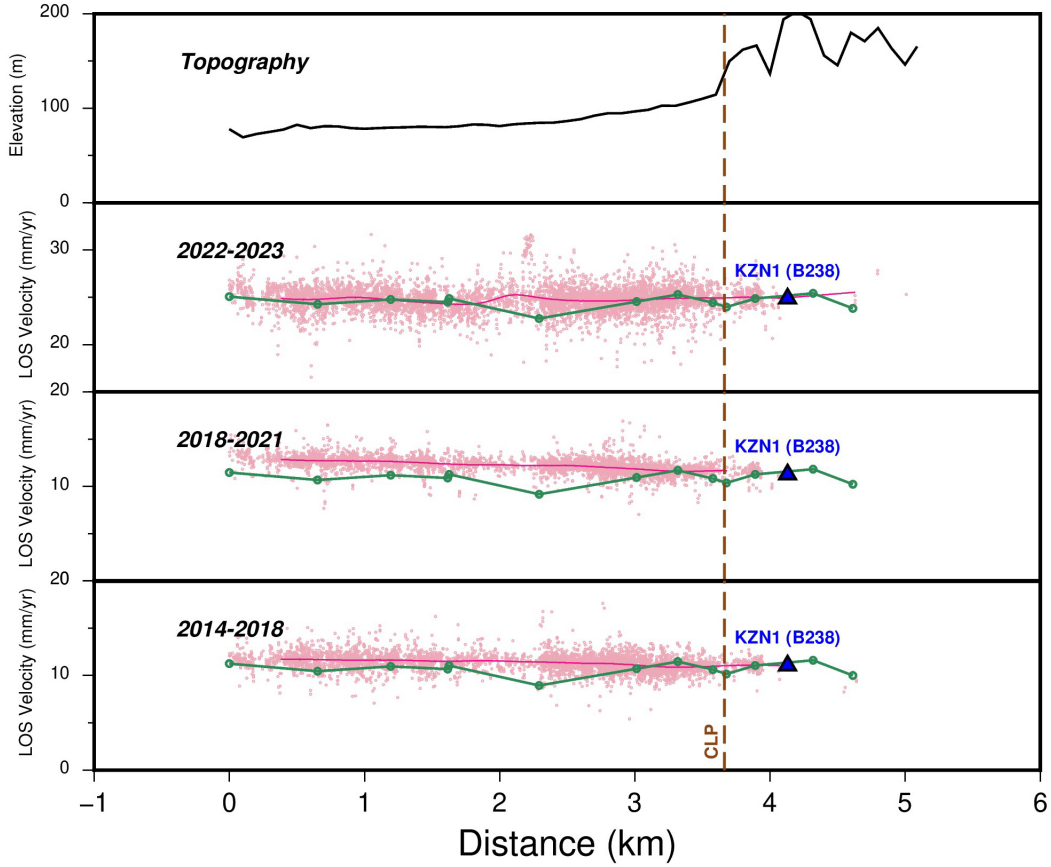


圖 4-46：水準測線 - 中興新村測線與 PSInSAR 資料比對 (Descending)。由上至下為地形高程、2022-2023 時間段比對、2018-2021 時間段比對及 2014-2018 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 KZN1(B238)。CLP 為車籠埔斷層。

Figure 4-46：Comparison of PSInSAR and Zhongxing New Village leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2022-2023 period, 2018-2021 period and 2014-2018 period, green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station KZN1(B238). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

4-4 重點區域時間序列分析

本年度計畫區域重點區域中設有GNSS連續站的有臺中都會區（LSB0、S016）、中部科學園區中興園區（KZN1），另外在車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層之間選取 CAOT、GS83、FUQE、GS84 探討此區域的地表變形（圖 4-47）。

我們取一鄰近目標區域的 GNSS 連續站為參考站，將 2018 年至 2021 年的 GNSS 三分量時間序列相對於主影像日期，與 PSI 一致，再以目標站的三分量時間序列分別扣除參考站的時間序列，最後再分別投影至升軌道與降軌道方向與 PSI 時間序列比對。PSI 的時間序列則是擷取目標站及參考站座標範圍內 100 至 500 公尺內的 PS 點，至少需有 10 個 PS 點，取平均值作為該站點的 PSI 時間序列，最後將目標站時間序列扣除參考站時間序列。

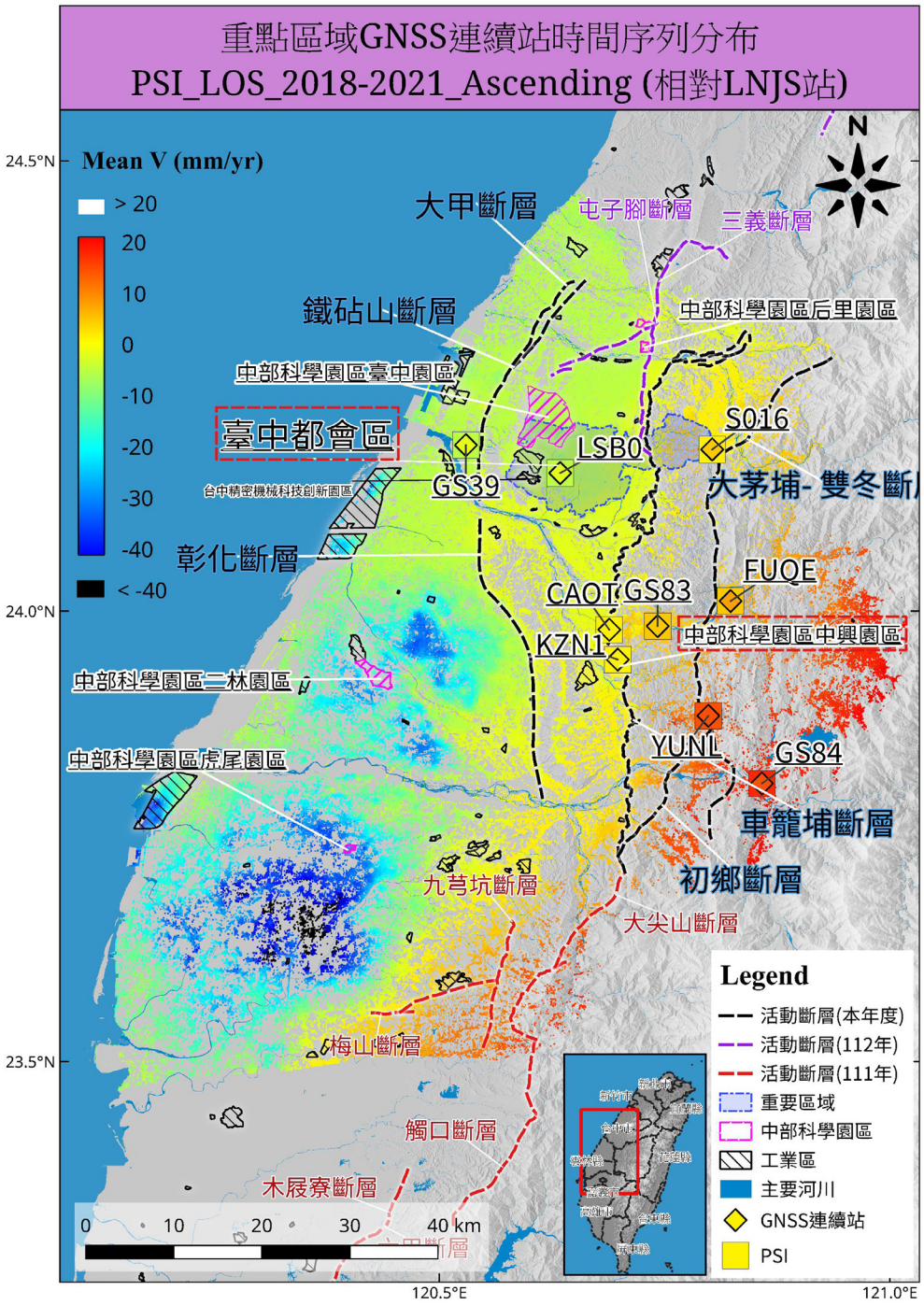


圖 4-47：重點區域 GNSS 連續站分布圖。

Figure 4-47： The map for the GNSS stations of the important area.

臺中都會區選擇以西側的 GS39 為參考站，將都會區中西邊的 LSB0 測站與東邊鄰近山區的 S016 測站分別相對於 GS39 測站，成果如圖 4-48、圖 4-49，可以看到三站的原始時間序列（圖 4-48~4-49 A、B）趨勢與數值很接近，LSB0 相對 GS39 在東西向有明顯的週期性變化（圖 4-48C），S016 相對 GS39 在東西向除了有週期性變化，相較 LSB0 斜率呈現負值（向西）（圖 4-49C），投影至升軌道與降軌道的時間序列（圖 4-48~4-49D 藍點）與 PSI 時間序列（圖 4-48~4-49D 綠點）顯示沒有明顯的 LOS 速度變化，兩站相對 GS39 的變化趨勢相似，都有類似週期性的變化，S016 測站的 PSI 降軌道方向時間序列有較明顯的週期性變化，但由於靠近山區，PSI 時間序列數值分佈較廣，無法看出 GNSS 時間序列變化，因此將 GNSS 時間序列另用分佈較小的座標軸呈現後可見週期性變化，惟尺度較 PSI 觀測小。

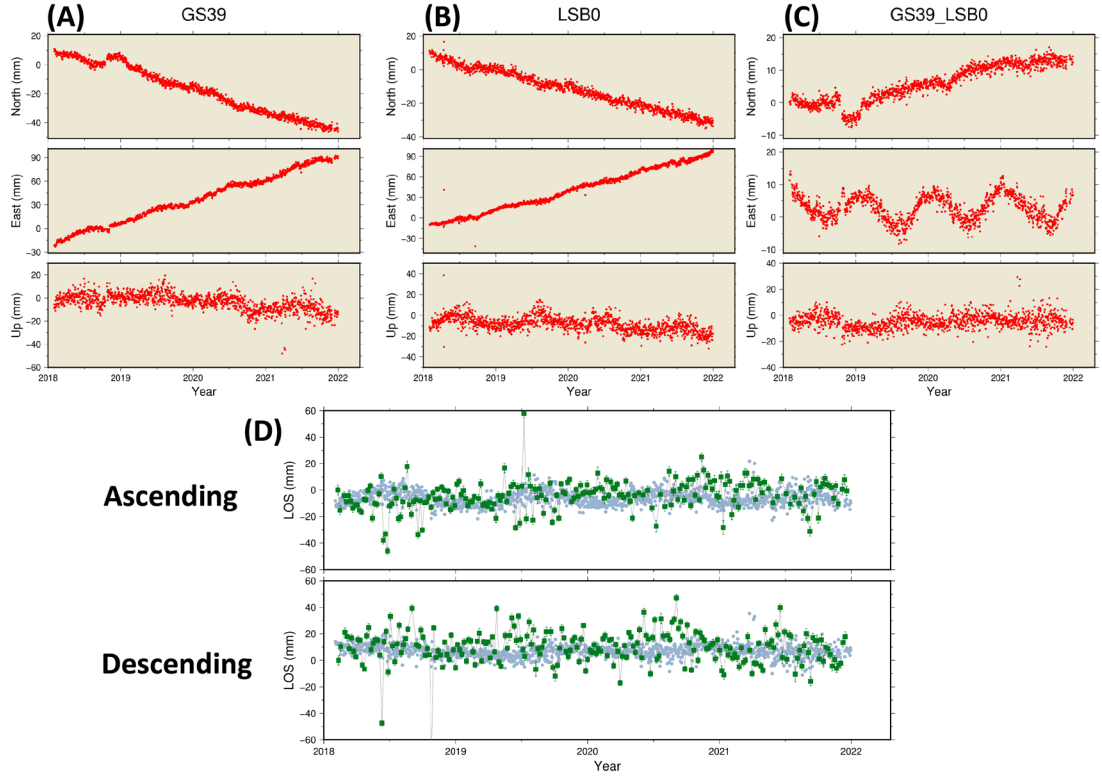


圖 4-48：2018-2021年GS39與LSB0時間序列。(A)GS39三分量時間序列，(B)LSB0三分量時間序列，(C)LSB0相對GS39三分量序列，由上而下分別為南北向、東西向以及垂直向時間序列。(D)LSB0相對GS39的LOS方向時間序列，上圖為升軌道方向，下圖為降軌道方向，藍點為GNSS時間序列投影至LOS方向，綠點為PSI時間序列。

Figure 4-48： Time Series of GS39 and LSB0 from 2018 to 2021.(A) GS39 three-component time series, (B) LSB0 three-component time series, (C) LSB0 relative to GS39 three-component time series, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom, (D) LSB0 relative to GS39 Line-of-Sight (LOS) direction time series, with the upper plot showing the ascending orbit direction and the lower plot showing the descending orbit direction. Blue points represent the projection of the GNSS time series onto the LOS direction, while green points represent the PSI time series.

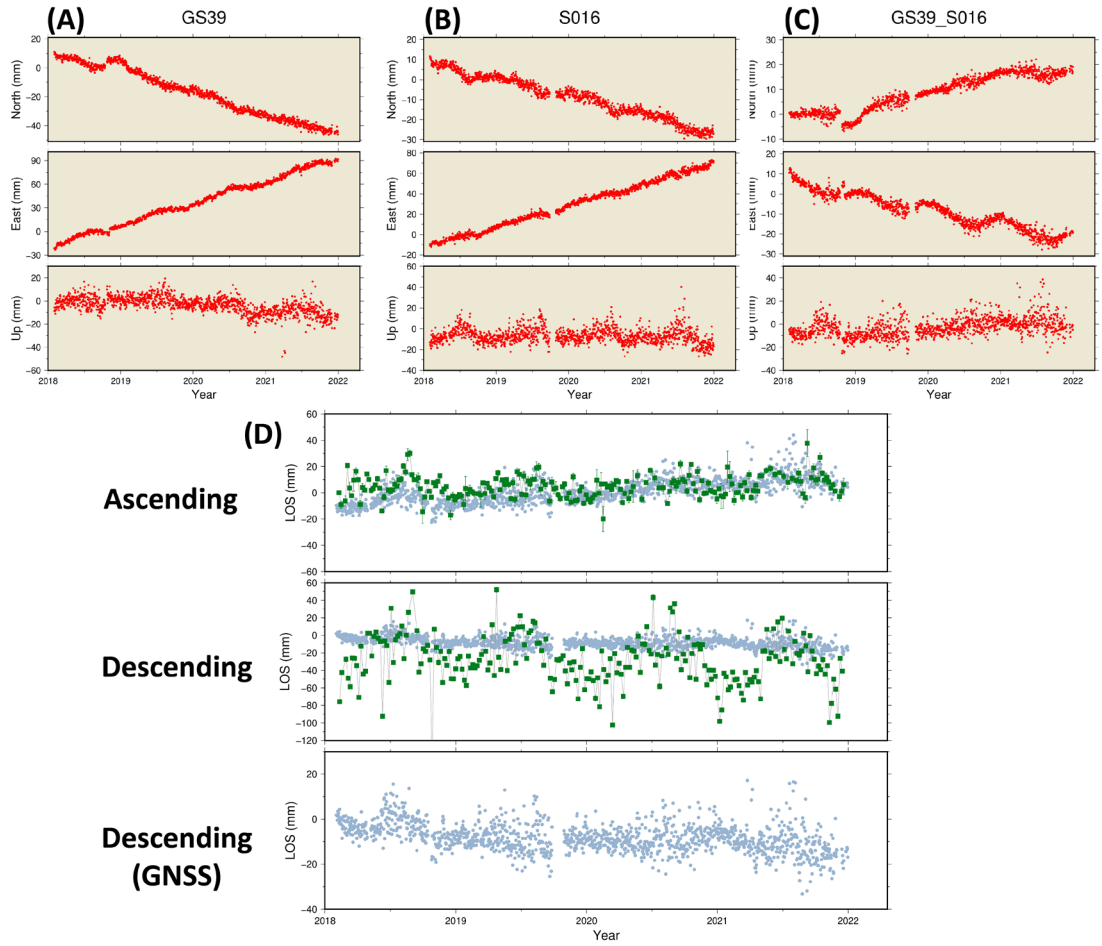


圖 4-49：2018-2021 年 GS39 與 S016 時間序列。(A)GS39 三分量時間序列，(B) S016 三分量時間序列，(C) S016 相對 GS39 三分量序列，由上而下分別為南北向、東西向以及垂直向時間序列。(D) S016 相對 GS39 的 LOS 方向時間序列，上圖為升軌道方向，下圖為降軌道方向，藍點為 GNSS 時間序列投影至 LOS 方向，綠點為 PSI 時間序列。

Figure 4-49： Time Series of GS39 and S016 from 2018 to 2021.(A) GS39 three-component time series, (B) S016 three-component time series, (C) S016 relative to GS39 three-component time series, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom, (D) S016 relative to GS39 Line-of-Sight (LOS) direction time series, with the upper plot showing the ascending orbit direction and the lower plot showing the descending orbit direction. Blue points represent the projection of the GNSS time series onto the LOS direction, while green points represent the PSI time series.

中部科學園區中興園區選取西北方的 CAOT 為參考站，將 KZN1 測站相對於參考站，成果顯示 CAOT 南北向變化量略大於 KZN1，東西向與垂直向變化趨勢與數值相似，垂直向有週期性變化（圖 4-50A、B），KZN1 相對於北邊的時間序列顯示在東西向與垂直向有週期性變化，三分量的時間序列變化量不明顯（圖 4-50C），投影至升軌道與降軌道的時間序列顯示沒有明顯的變化量，PSI 的時間序列變化與趨勢與 GNSS 類似（圖 4-50D）。

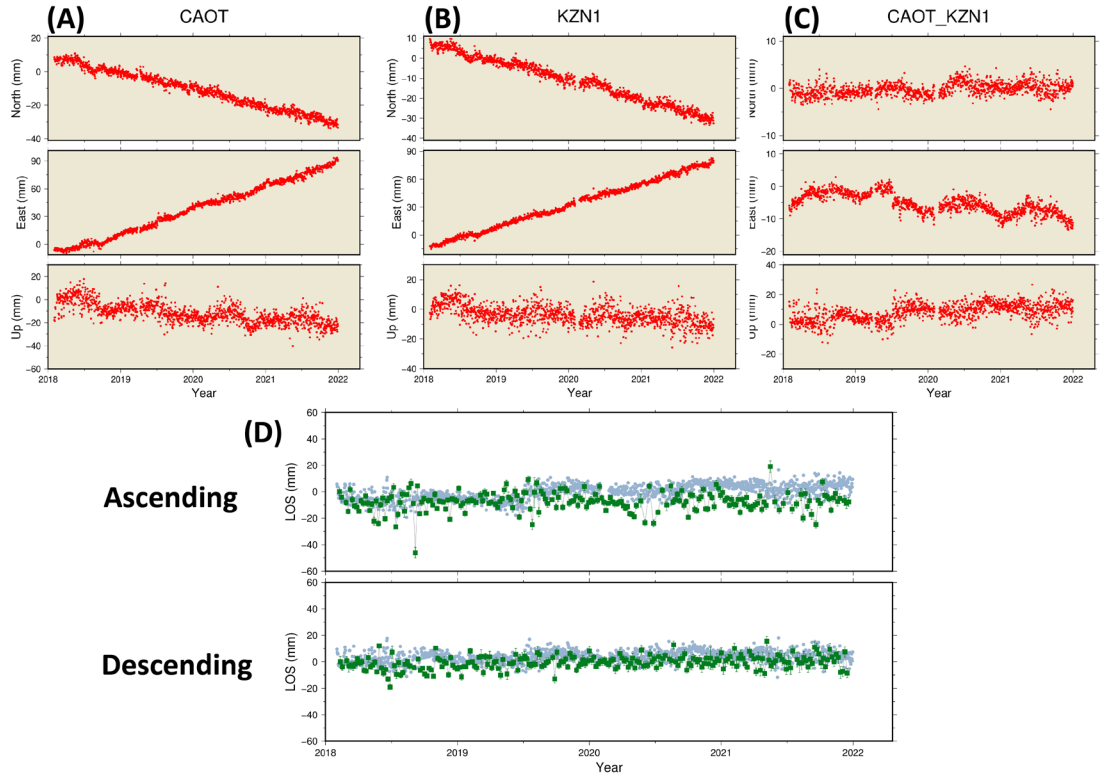


圖 4-50：2018-2021 年 CAOT 與 KZN1 時間序列。（A）CAOT 三分量時間序列，（B）KZN1 三分量時間序列，（C）KZN1 相對 CAOT 三分量序列，由上而下分別為南北向、東西向以及垂直向時間序列。（D）KZN1 相對 CAOT 的 LOS 方向時間序列，上圖為升軌道方向，下圖為降軌道方向，藍點為 GNSS 時間序列投影至 LOS 方向，綠點為 PSI 時間序列。

Figure 4-50： Time Series of CAOT and KZN1 from 2018 to 2021.(A) CAOT three-component time series, (B) KZN1 three-component time series, (C) KZN1 relative to CAOT three-component time series, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom, (D) KZN1 relative to CAOT Line-of-Sight (LOS) direction time series, with the upper plot showing the ascending orbit direction and the lower plot showing the descending orbit direction. Blue points represent the projection of the GNSS time series onto the LOS direction, while green points represent the PSI time series.

車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層之間，我們首先選擇 CAOT 為參考站，GS83 及 FUQE 為目標，比較車籠埔斷層兩側至大茅埔 - 雙冬斷層的變化，另外以 GS83 為參考站，FUQE 為目標，比較大茅埔 - 雙冬斷層兩側的變化。CAOT 與 GS83 的三分量時間序列顯示，兩站南北向與垂直向的變化相似，垂直向有週期性變化，CAOT 的東西向變化量大於 GS83（圖 4-51A、B），車籠埔東側相對西側南北向位移隨時間增加（向北），東西向隨時間減少（向西），垂直向有週期性變化，整體變化量較水平向不明顯（圖 4-51C），投影至升軌道與降軌道方向時間序列顯示與 PSI 時間序列變化趨勢一致，升軌道方向位移量持續增加，降軌道方向位移變化量不明顯（圖 4-51D）。

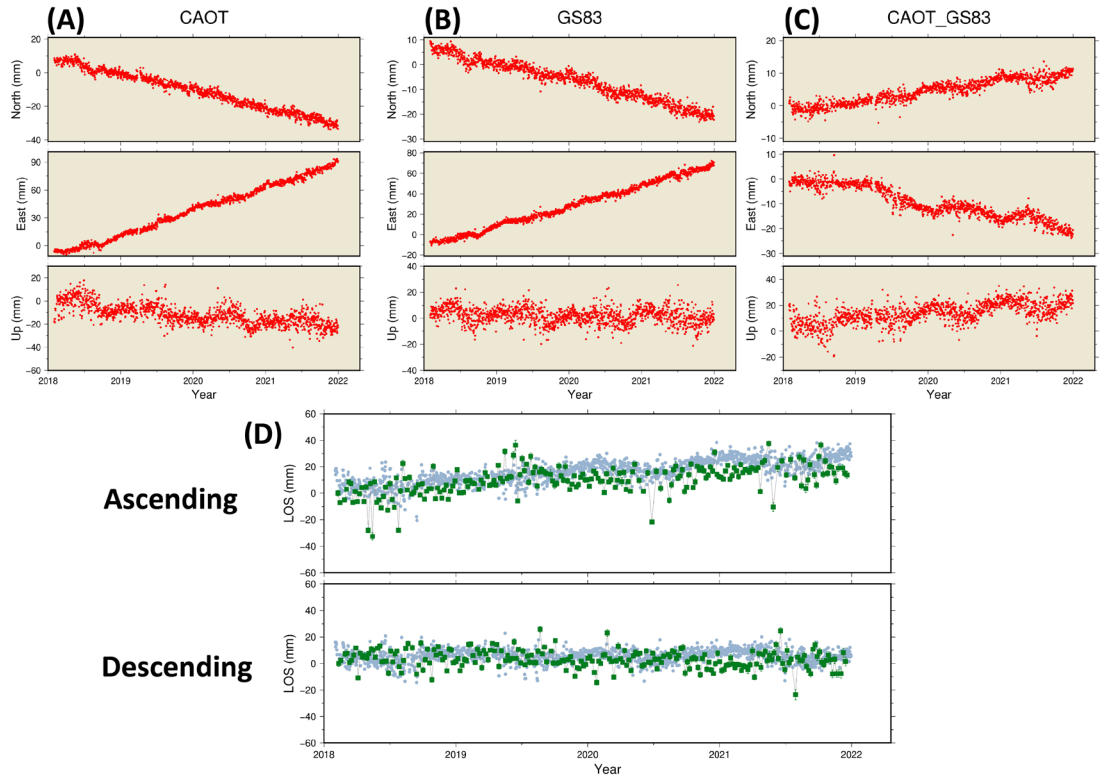


圖 4-51：2018-2021 年 CAOT 與 GS83 時間序列。（A）CAOT 三分量時間序列，（B）GS83 三分量時間序列，（C）GS83 相對 CAOT 三分量序列，由上而下分別為南北向、東西向以及垂直向時間序列。（D）GS83 相對 CAOT 的 LOS 方向時間序列，上圖為升軌道方向，下圖為降軌道方向，藍點為 GNSS 時間序列投影至 LOS 方向，綠點為 PSI 時間序列。

Figure 4-51： Time Series of CAOT and GS83 from 2018 to 2021.(A) CAOT three-component time series, (B) GS83 three-component time series, (C) GS83 relative to CAOT three-component time series, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom, (D) GS83 relative to CAOT Line-of-Sight (LOS) direction time series, with the upper plot showing the ascending orbit direction and the lower plot showing the descending orbit direction. Blue points represent the projection of the GNSS time series onto the LOS direction, while green points represent the PSI time series.

CAOT 與 FUQE 的三分量時間序列顯示，CAOT 南北向與東西向的變化量都較 FUQE 測站大，垂直向則相似(圖 4-52A、B)，大茅埔-雙冬斷層東側（FUQE）相對車籠埔西側（CAOT）南北向位移隨時間增加（向北），東西向隨時間減少（向西），垂直向略微增加，整體變化量較水平向不明顯（圖 4-52C），因 FUQE 靠近山區，PSI 時間序列較為散亂，但與 GNSS 投影至升軌道與降軌道方向時間序列變化趨勢一致，升軌道方向位移量持續增加，降軌道方向位移變化量不明顯（圖 4-52D）。

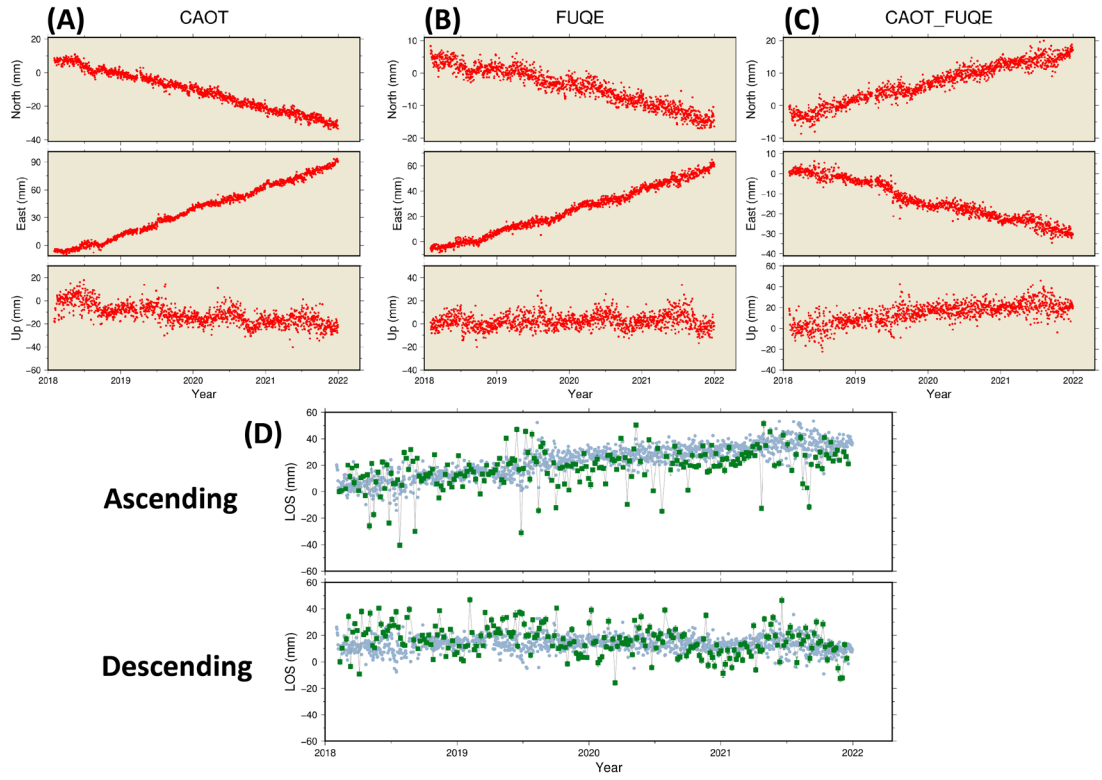


圖 4-52：2018-2021 年 CAOT 與 FUQE 時間序列。（A）CAOT 三分量時間序列，（B）FUQE 三分量時間序列，（C）FUQE 相對 CAOT 三分量序列，由上而下分別為南北向、東西向以及垂直向時間序列。（D）FUQE 相對 CAOT 的 LOS 方向時間序列，上圖為升軌道方向，下圖為降軌道方向，藍點為 GNSS 時間序列投影至 LOS 方向，綠點為 PSI 時間序列。

Figure 4-52： Time Series of CAOT and FUQE from 2018 to 2021.(A) CAOT three-component time series, (B) FUQE three-component time series, (C) FUQE relative to CAOT three-component time series, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom, (D) FUQE relative to CAOT Line-of-Sight (LOS) direction time series, with the upper plot showing the ascending orbit direction and the lower plot showing the descending orbit direction. Blue points represent the projection of the GNSS time series onto the LOS direction, while green points represent the PSI time series.

GS83 與 FUQE 的三分量時間序列顯示，兩站南北向與垂直向的變化相似，垂直向有週期性變化，GS83 的東西向變化較 FUQE 測站大，（圖 4-53A、B），大茅埔 - 雙冬斷層東側（FUQE）相對西側（GS83）南北向位移隨時間增加（向北），東西向隨時間減少（向西），垂直向有週期性變化，整體變化量較水平向不明顯（圖 4-53C），因 FUQE 靠近山區，PSI 時間序列較為散亂，但與 GNSS 投影至升軌道與降軌道方向時間序列變化趨勢一致，位移變化量不明顯（圖 4-53D）。

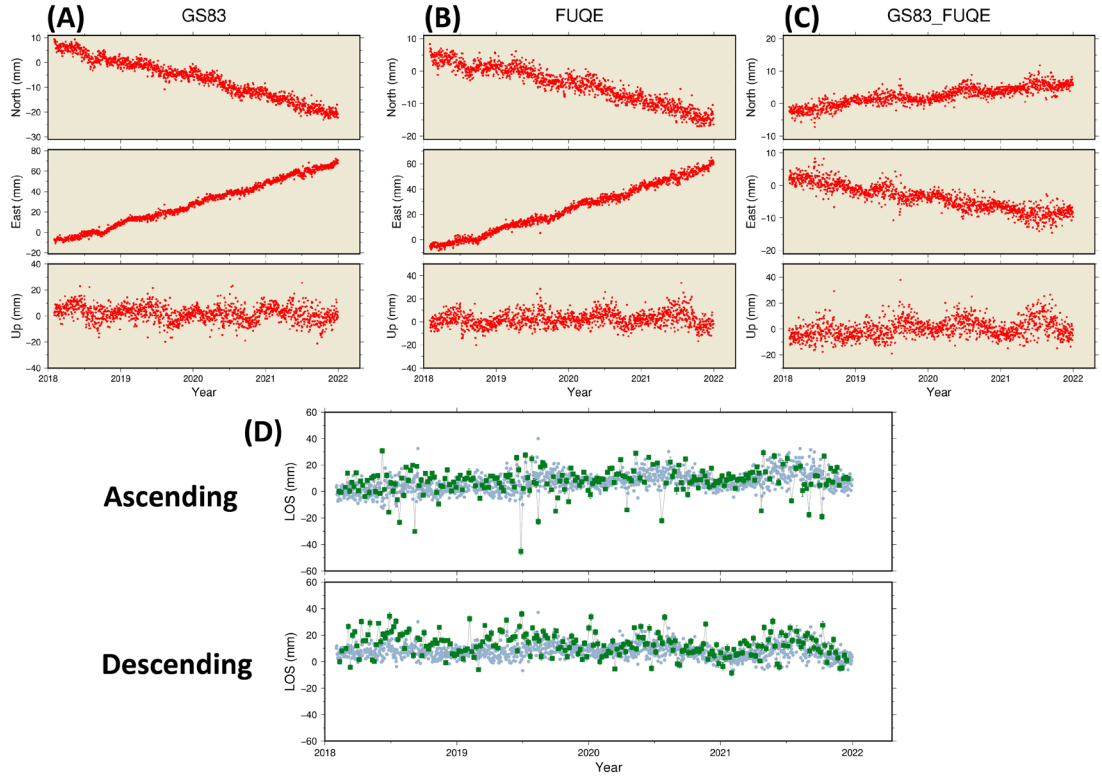


圖 4-53：2018-2021 年 GS83 與 FUQE 時間序列。（A）GS83 三分量時間序列，（B）FUQE 三分量時間序列，（C）FUQE 相對 GS83 三分量序列，由上而下分別為南北向、東西向以及垂直向時間序列。（D）FUQE 相對 GS83 的 LOS 方向時間序列，上圖為升軌道方向，下圖為降軌道方向，藍點為 GNSS 時間序列投影至 LOS 方向，綠點為 PSI 時間序列。

Figure 4-53： Time Series of GS83 and FUQE from 2018 to 2021.(A) GS83 three-component time series, (B) FUQE three-component time series, (C) FUQE relative to GS83 three-component time series, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom, (D) FUQE relative to GS83 Line-of-Sight (LOS) direction time series, with the upper plot showing the ascending orbit direction and the lower plot showing the descending orbit direction. Blue points represent the projection of the GNSS time series onto the LOS direction, while green points represent the PSI time series.

大茅埔 - 雙冬斷層南段，我們選取 YUNL 測站為參考站，將 GS84 相對於參考站，三分量時間序列顯示，兩站南北向與垂直向的變化相似，垂直向有週期性變化，YUNL 的東西向變化較 GS84 測站大，（圖 4-54A、B），大茅埔 - 雙冬斷層東南側（GS84）相對西北側（YUNL）南北向與垂直向位移不明顯，東西向隨時間減少（向西），垂直向有週期性變化（圖 4-54C），PSI 時間序列較為散亂，但與 GNSS 投影至升軌道與降軌道方向時間序列變化趨勢一致，位移變化量不明顯（圖 4-54D）。

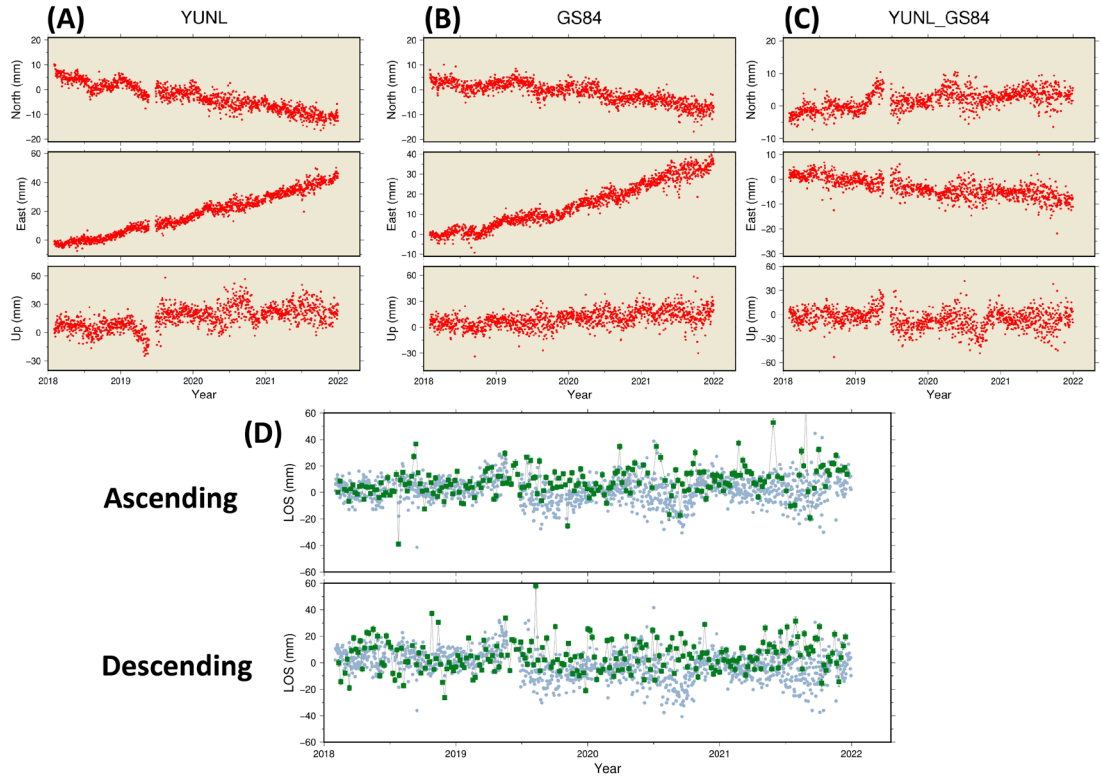


圖 4-54：2018-2021 年 YUNL 與 GS84 時間序列。（A）YUNL 三分量時間序列，（B）GS84 三分量時間序列，（C）GS84 相對 YUNL 三分量序列，由上而下分別為南北向、東西向以及垂直向時間序列。（D）GS84 相對 YUNL 的 LOS 方向時間序列，上圖為升軌道方向，下圖為降軌道方向，藍點為 GNSS 時間序列投影至 LOS 方向，綠點為 PSI 時間序列。

Figure 4-54： Time Series of YUNL and GS84 from 2018 to 2021.(A) YUNL three-component time series, (B) GS84 three-component time series, (C) GS84 relative to YUNL three-component time series, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom, (D) GS84 relative to YUNL Line-of-Sight (LOS) direction time series, with the upper plot showing the ascending orbit direction and the lower plot showing the descending orbit direction. Blue points represent the projection of the GNSS time series onto the LOS direction, while green points represent the PSI time series.

第五章、二維剖面模擬

5-1 方法與執行步驟

透過前面介紹的斷層錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992，圖5-1），與本計畫所計算2014~2018、2018~2021與2022~2023之雷達影像上升與下降軌道剖面資料進行擬合。由於第三章的長剖面不適合用於斷層錯位模型，因此我們在車籠埔斷層周遭取五條短剖面（P1~P5），因P3剖面速度改變明顯的地方特殊，對其描述於第六章，在此章節僅針對四條剖面(P1、P2、P4、P5，圖5-2~5-4)，利用不同斷層幾何與滑動量所產生東西、南北與垂直方向之地表變形，轉投影至LOS方向後，與計畫內所獲得之速度場剖面進行匹配，選擇均方根誤差(Root Mean Square Error；RMSE)作爲篩選機制，並參考各參數的分佈來討論利用單一維度資料、剖面模擬方式可以怎麼幫助我們了解模擬的斷層系統。

所設定參數有四項，包含斷層幾何相關之斷層傾角(Dip)、斷層的頂部(Fault Top)、底部(Fault Bottom)深度，與沿著傾角滑動(Dip Slip)的量值；搜尋範圍分別為斷層頂部(Fault Top)0~5000公尺，格點為500公尺；斷層底部(Fault Bottom) 則由斷層頂部(Fault Top)~10000公尺，格點為500公尺；斷層傾角(Dip)5~85度，格點為5度；傾向滑移(Dip Slip) -0.02~0.02公尺，格點為0.002公尺，一組模擬搜尋筆數共計59840。

RMSE的值越小，表示整體模擬值越靠近觀測值，再利用統計數量分布來表達這些參數是否集中或分散，因此透過RMSE由小到大排序，將每個參數在RMSE前1%與10%的值，進行數量百分比計算，另外也將每兩種參數進行數量百分比計算，以便顯示個別參數與兩兩參數對中，在哪些參數組合有較多的百分比，進而討論該斷層幾何與滑動特性。

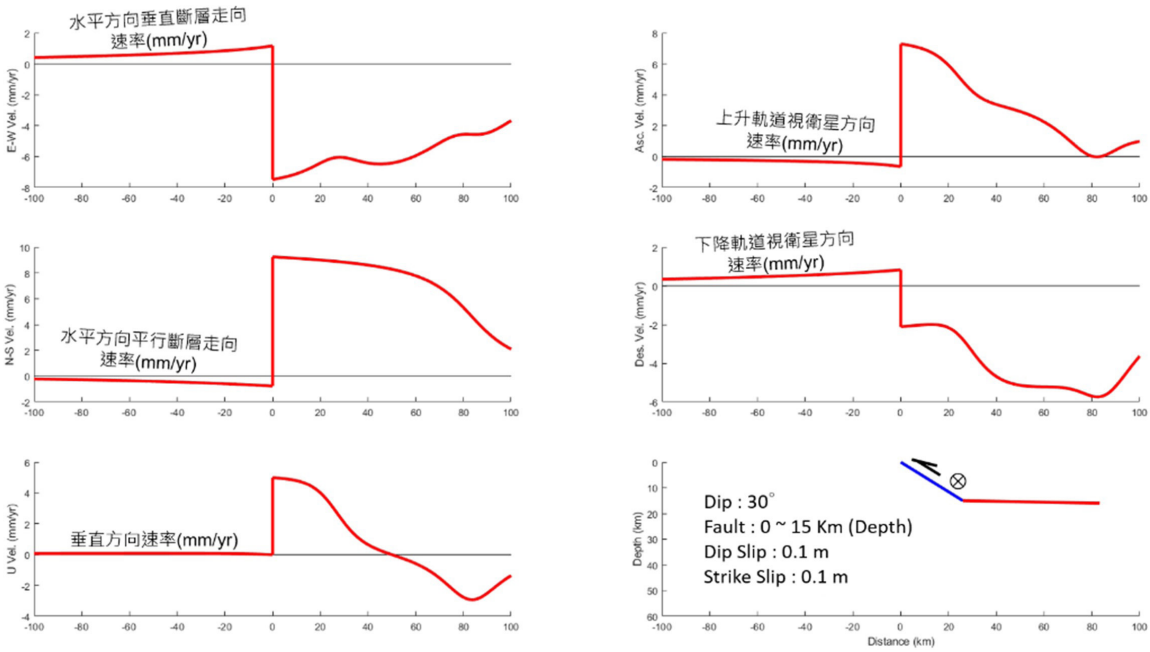


圖5-1：斷層錯位模型模擬結果示意圖組，假設斷層幾何與滑動量，透過斷層錯位模型推估地表變形行為，左邊由上到下分別為水平方向垂直斷層走向速率、水平方向平行斷層走向速率、垂直方向速率，右邊由上到下分別為上升軌道視衛星方向速率、下降軌道視衛星方向速率與斷層幾何、運動方向及參數。

Figure 5-1：To estimate surface deformation under fault dislocation model with versatile fault geometry and fault slip. Left column: (upper) velocity perpendicular to the strike (E~W direction), (middle) velocity along the strike (N~S direction), (lower) vertical velocity. Right column: (upper) LOS velocity of ascending orbit, (middle) LOS velocity of descending orbit, (lower) fault geometry.

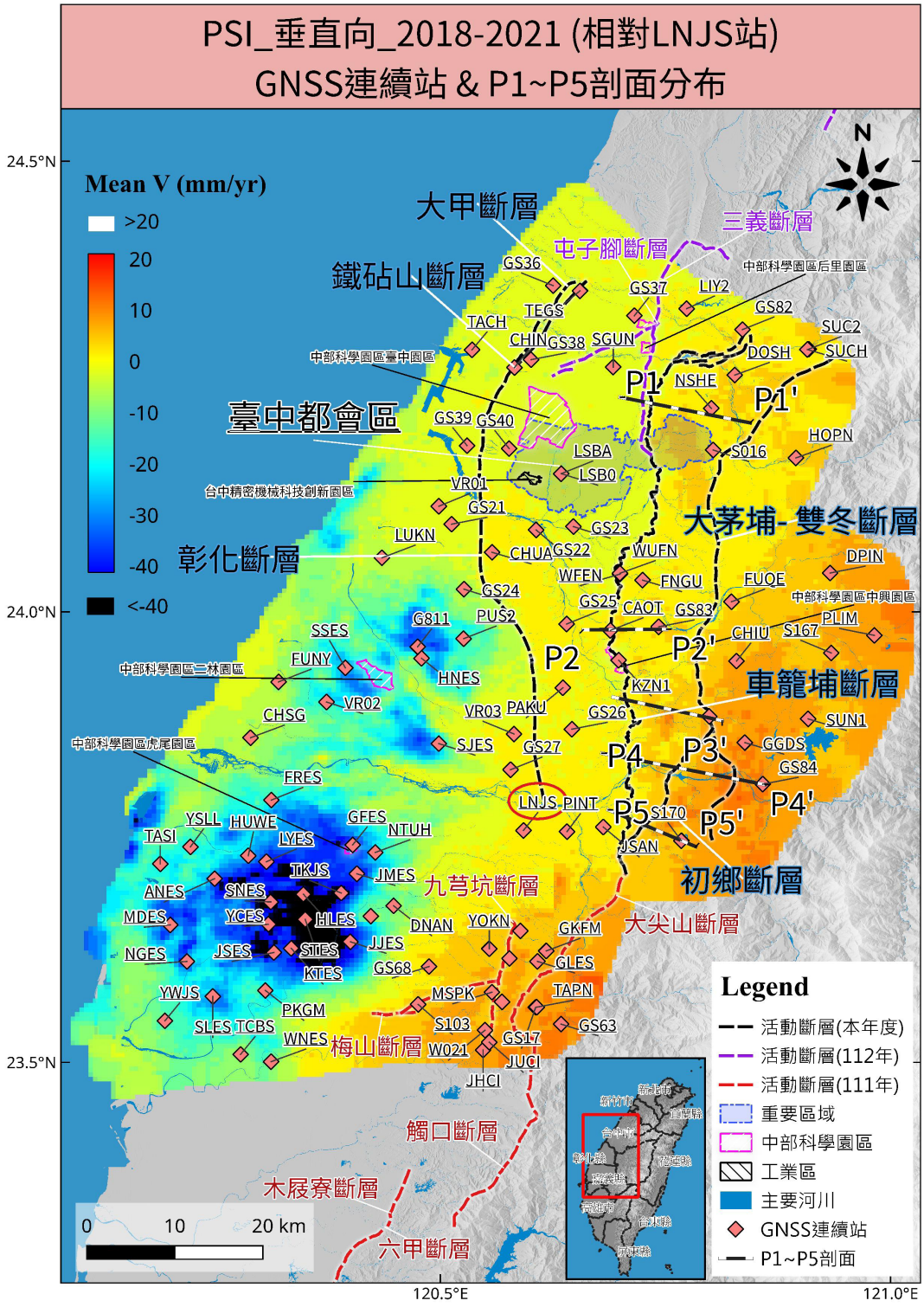


圖5-2：2018~2021年PSI解析的垂直向平均速度場、GNSS連續站與剖面位置圖。

Figure 5-2：Vertical average velocity fields between 2018 and 2021 processed with PSI data and the map for the continues GNSS stations and profiles across the Faults.

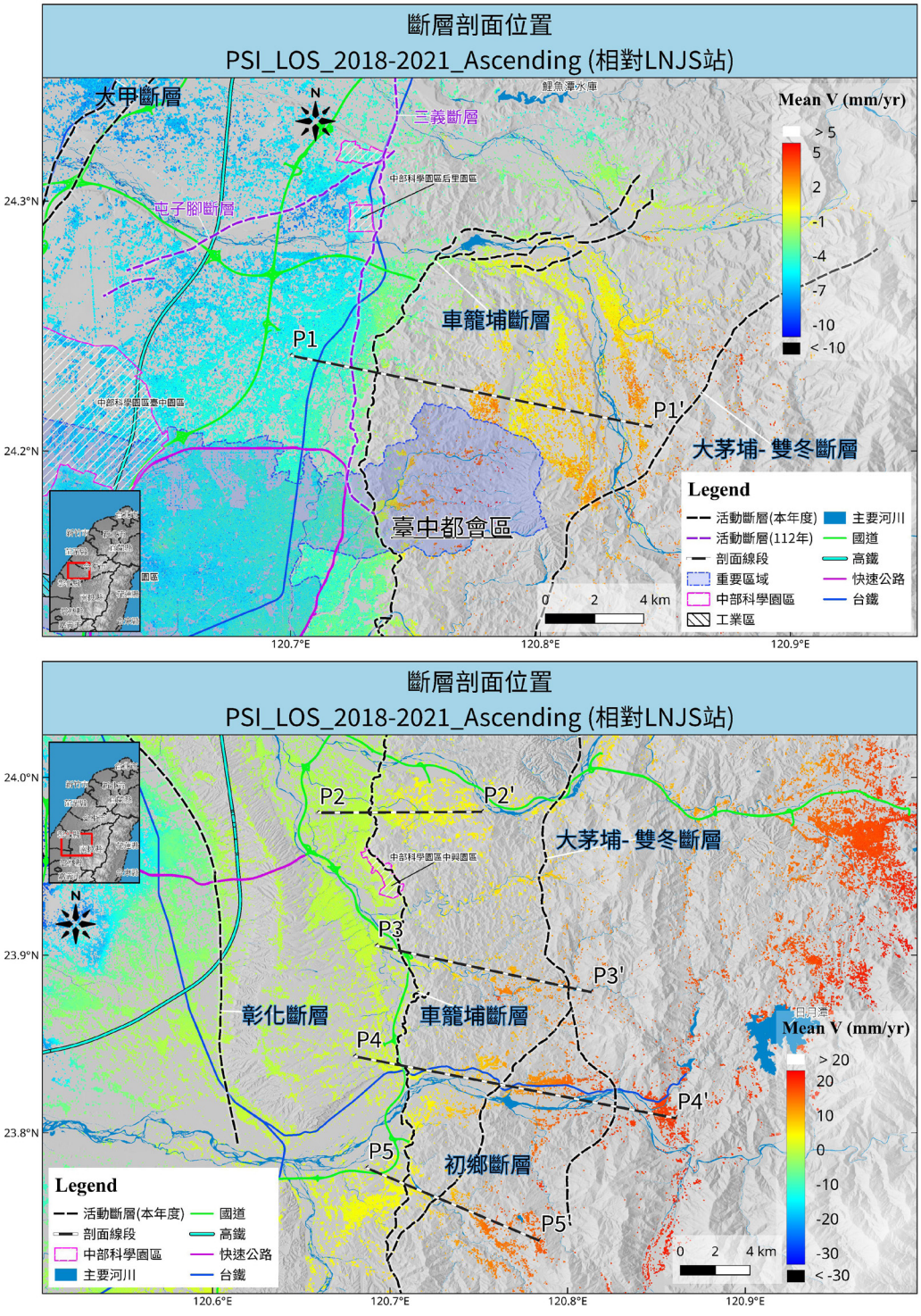


圖5-3：2018~2021年升軌道方向LOS平均速度場與剖面位置圖。上圖為P1剖面位置，下圖為P2~P5剖面位置。

Figure 5-3 ：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Faults. The upper image shows the location of profile P1, and the lower image shows the locations of profiles P2 to P5.

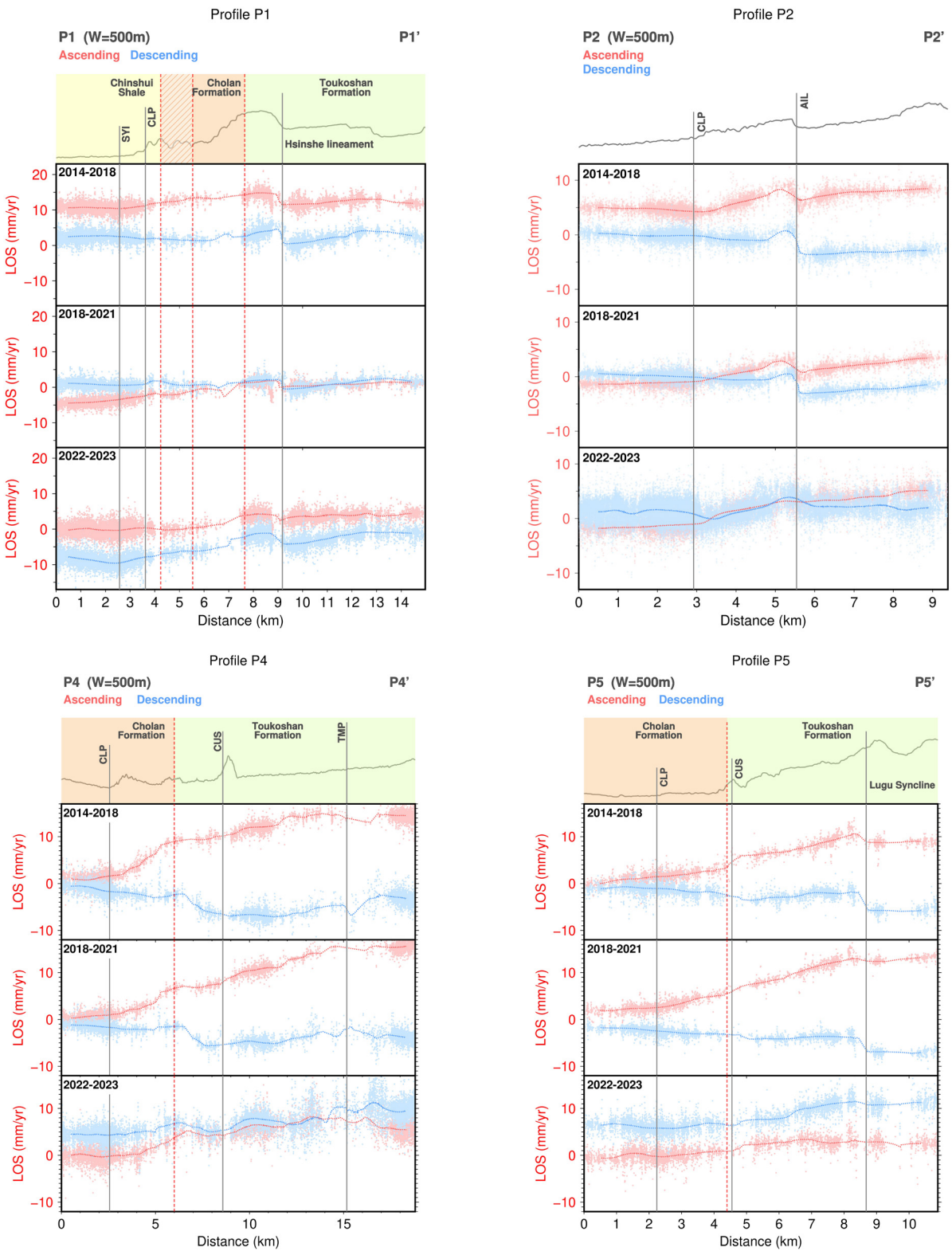


圖5-4：四條剖面(P1、P2、P4與P5)雷達影像上升及下降軌道視衛星方向速率剖面資料。

Figure 5-4：Velocity profiles extracted from InSAR results (ascending and descending orbits) of four profiles (P1, P2, P4, and P5).

5-2 剖面P1模擬結果

剖面P1單獨對車籠埔斷層(CLP)與新社線性構造(Hsinshe lineament)進行三個時段模擬，透過RMSE的結果(圖5-5~5-10)，選擇RMSE在總數前1%與10%來呈現六組模擬，分別於傾角、傾滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計百分比圖(圖5-11~5-22)。

透過簡易模擬地表變形剖面P1，結果表現車籠埔斷層(CLP)東傾10°~30°，像西逆衝滑動年速率較大(>10mm/yr)，斷層面滑動頂部深度淺，斷層面滑動寬度大，而2022~2023模擬顯示滑動區塊改變，平均滑動傾角有所變化；而新社線性構造(Hsinshe lineament) 則為向西傾20°~40°較大向東逆衝滑動年速率(>10mm/yr)，斷層面滑動頂部深度淺，斷層面滑動寬度小，2018~2021模擬顯示滑動區塊改變，透過比較顯示，新社線性構造淺層角度較陡。

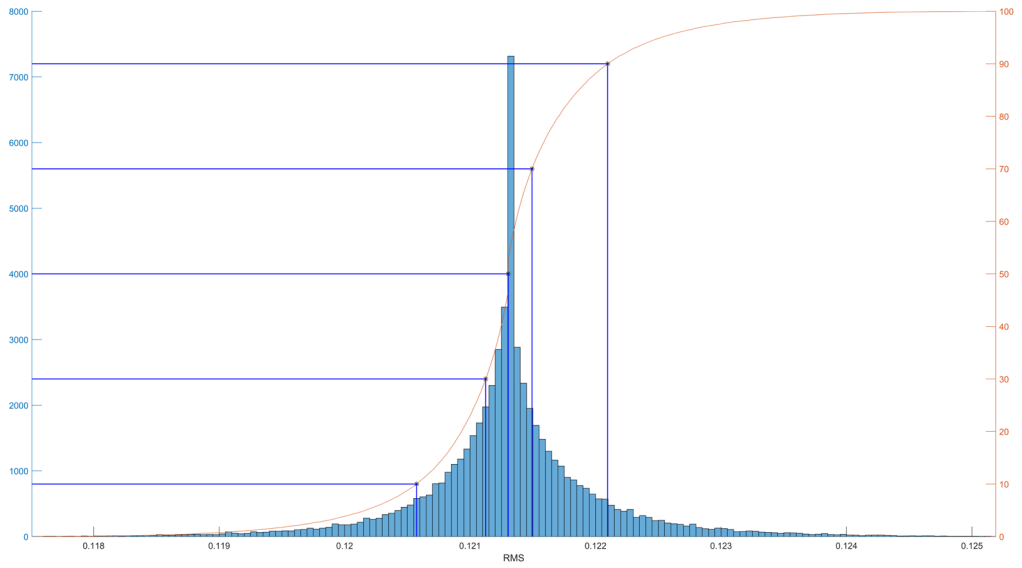


圖5-5：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-5：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2014~2018. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

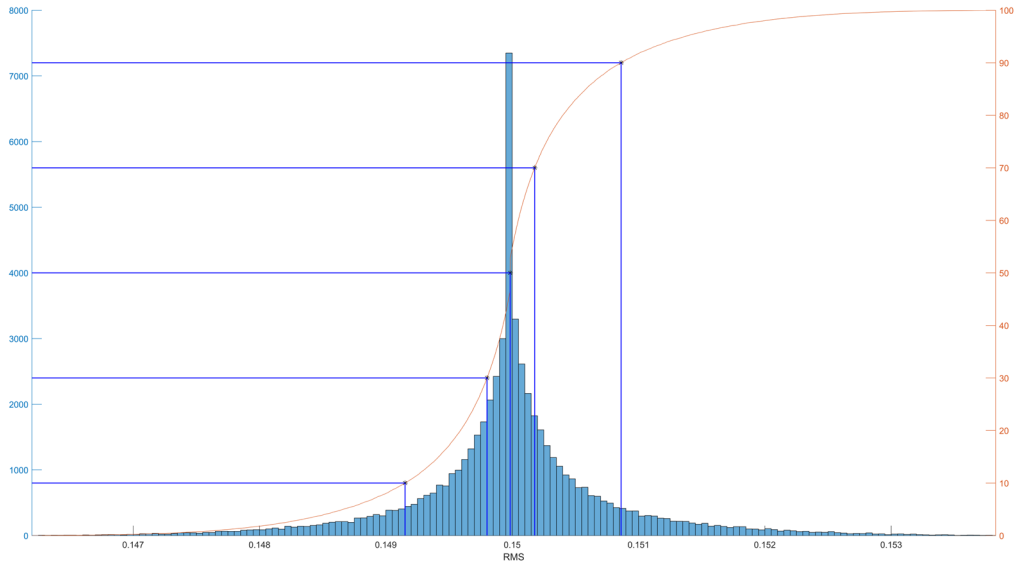


圖5-6：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-6： Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2018~2021. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

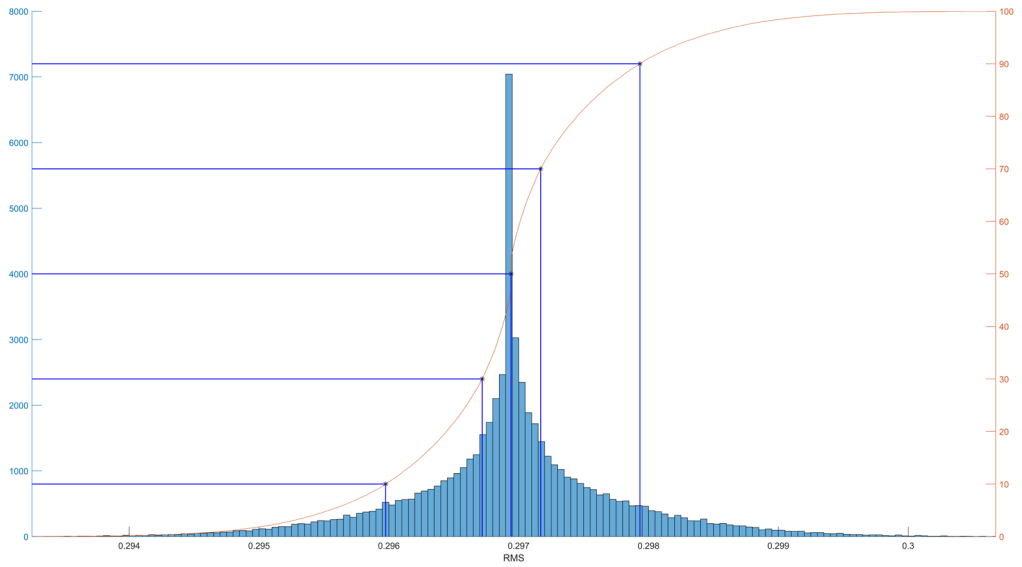


圖5-7：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-7：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2022~2023. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

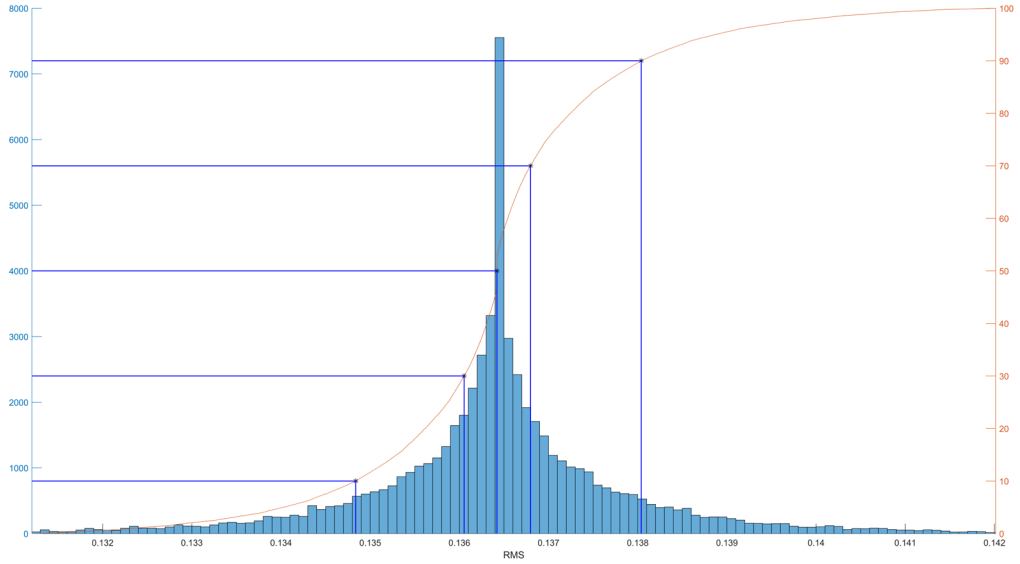


圖5-8：針對新社線性構造於2014~2018時段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-8：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in Hsinshe lineament model during 2014~2018. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

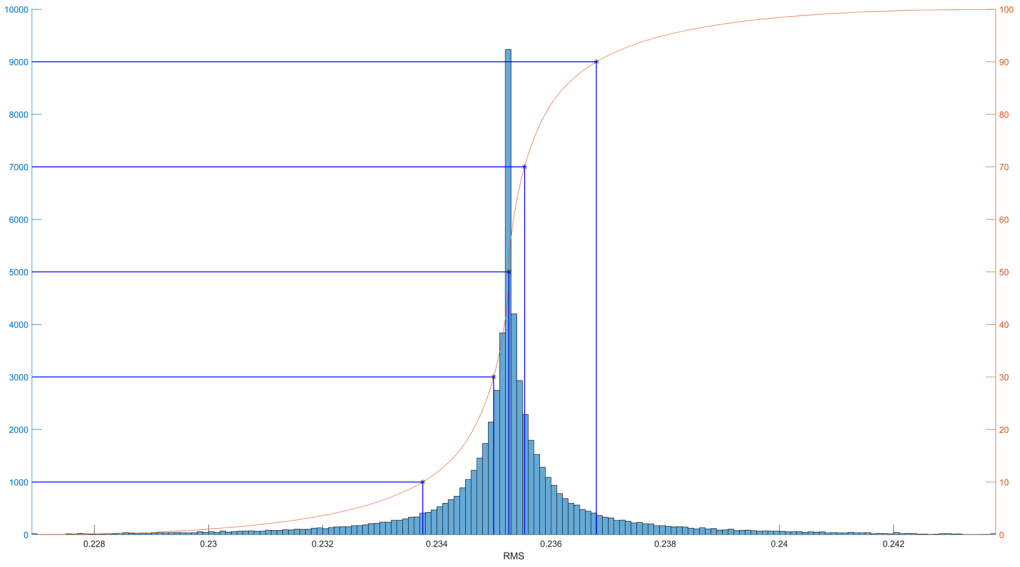


圖5-9：針對新社線性構造於2018~2021段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-9：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in Hsinshe lineament model during 2018~2021. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

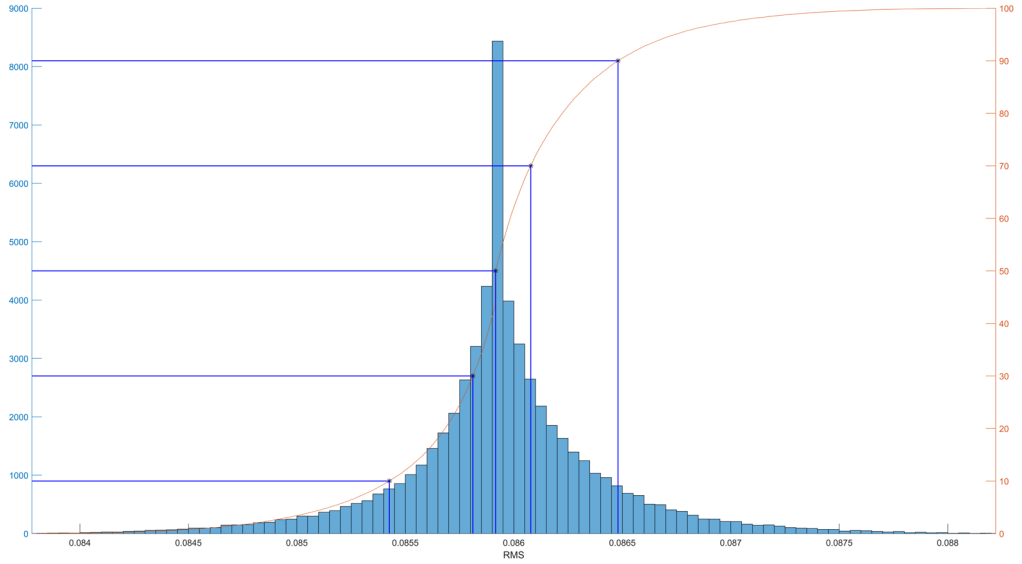


圖5-10：針對新社線性構造於2022~2023段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-10：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in Hsinshe lineament model during 2022~2023. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

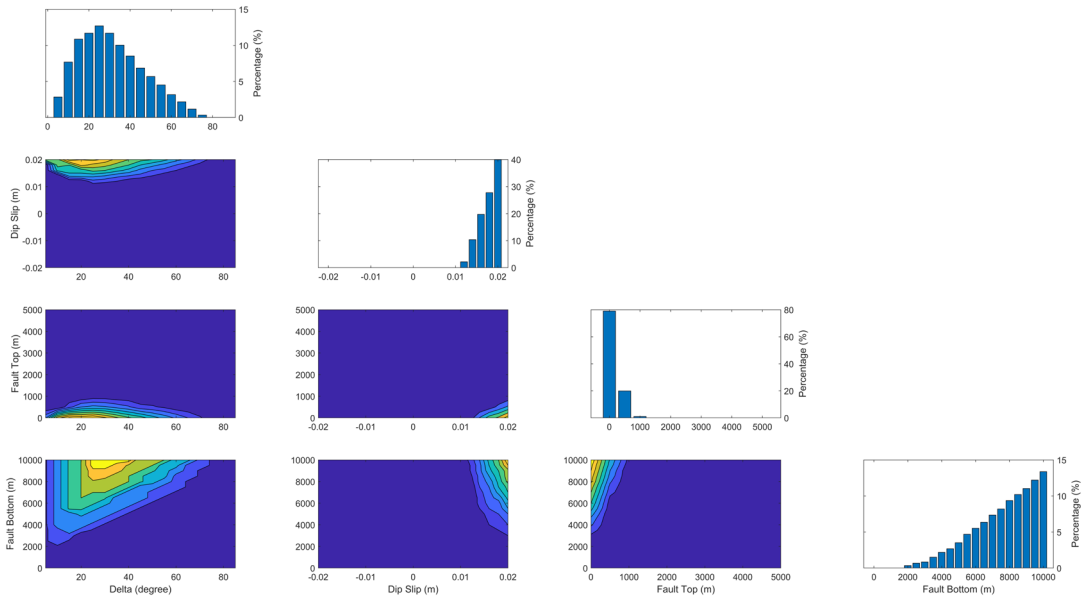


圖5-11：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的1% 結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-11：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2014~2018.

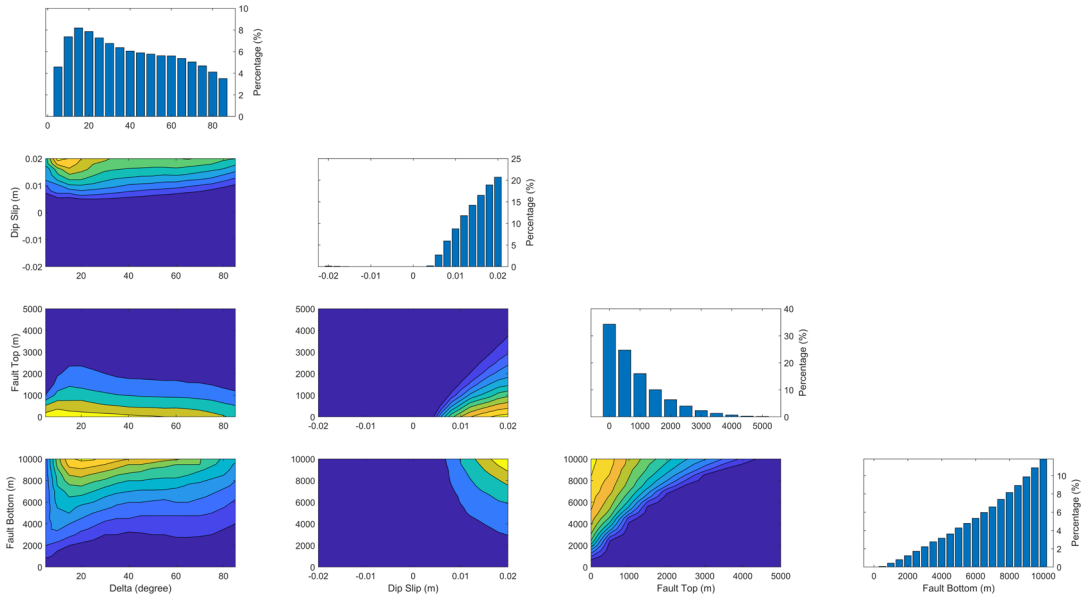


圖5-12：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-12：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2014~2018.

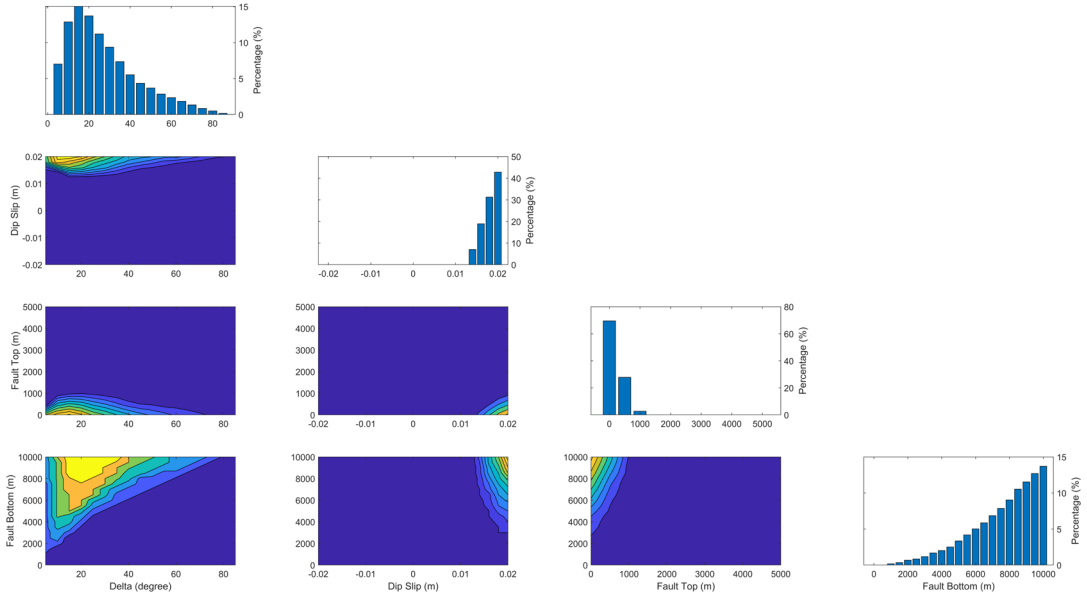


圖5-13：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-13：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2018~2021.

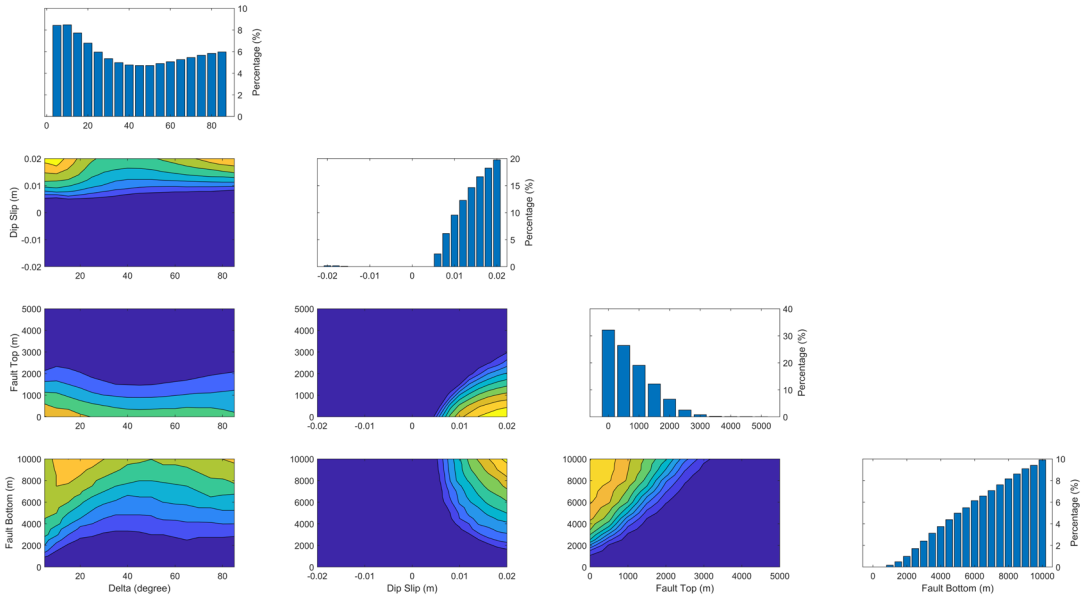


圖5-14：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-14：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2018~2021.

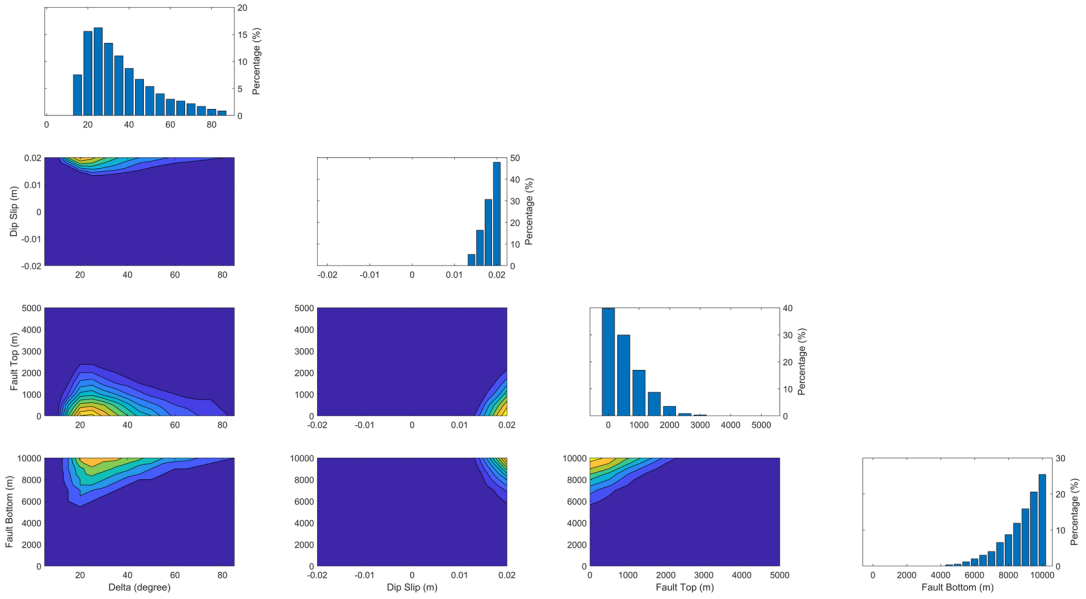


圖5-15：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-15：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2022~2023.

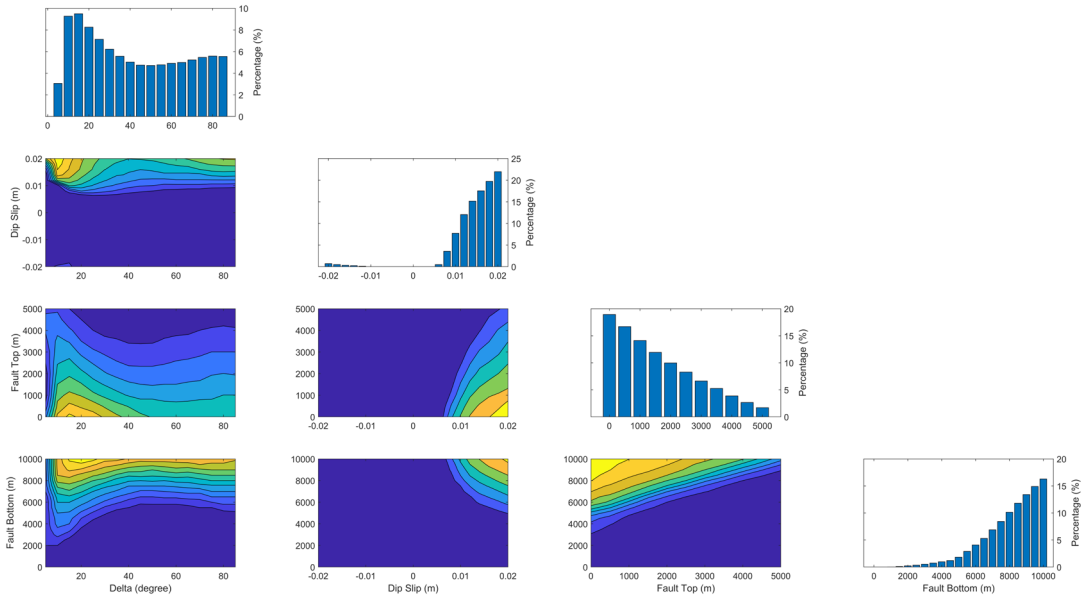


圖5-16：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-16：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2022~2023.

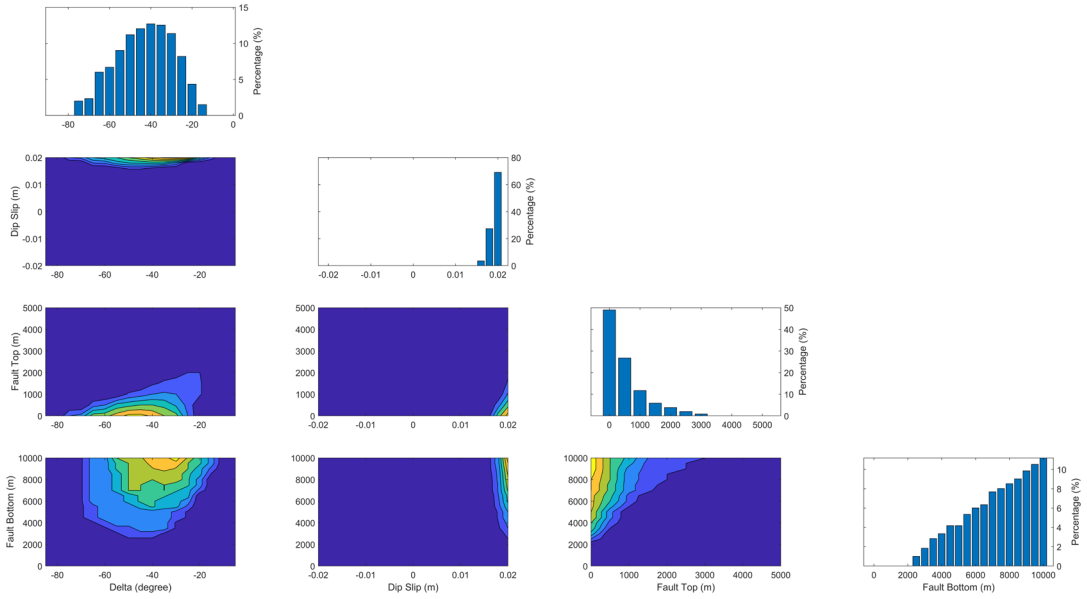


圖5-17：針對新社線性構造於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-17：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in Hsinshe lineament model during 2014~2018.

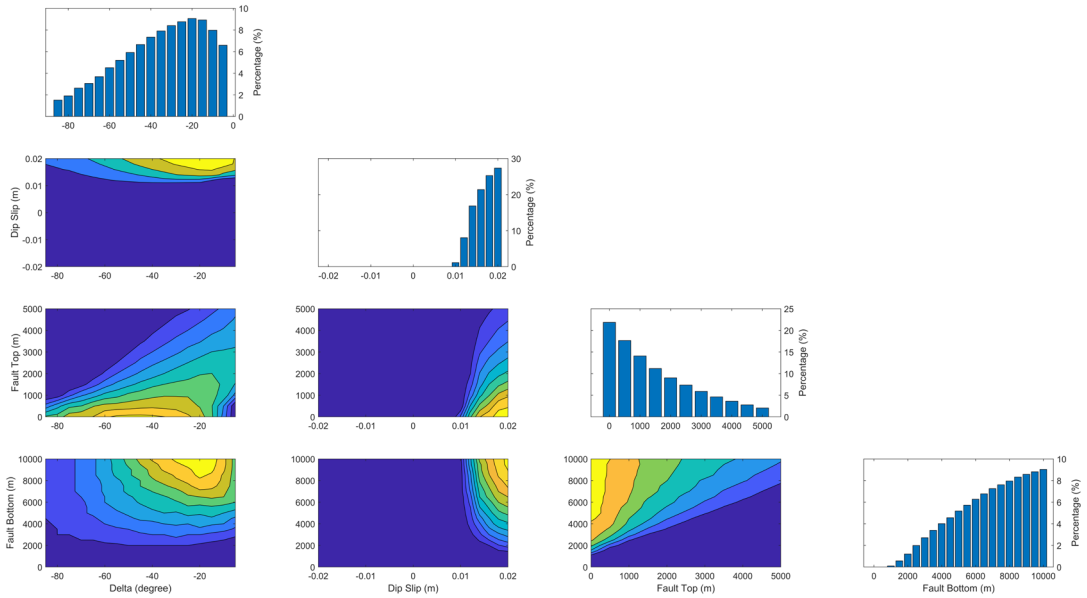


圖5-18：針對新社線性構造於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-18：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in Hsinshe lineament model during 2014~2018.

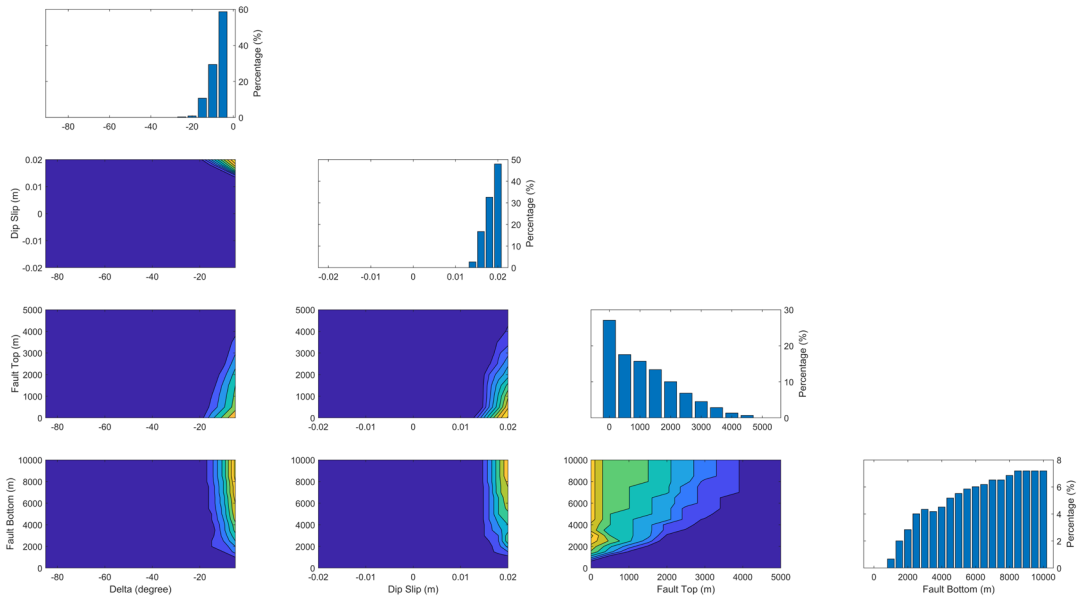


圖5-19：針對新社線性構造於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-19：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in Hsinshe lineament model during 2018~2021.

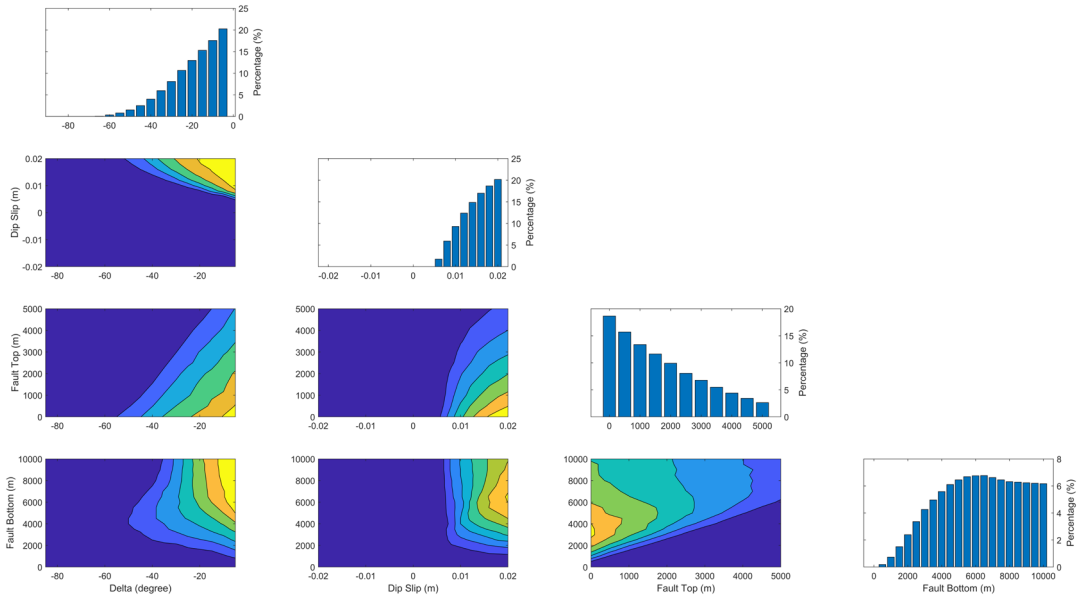


圖5-20：針對新社線性構造於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-20：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in Hsinshe lineament model during 2018~2021.

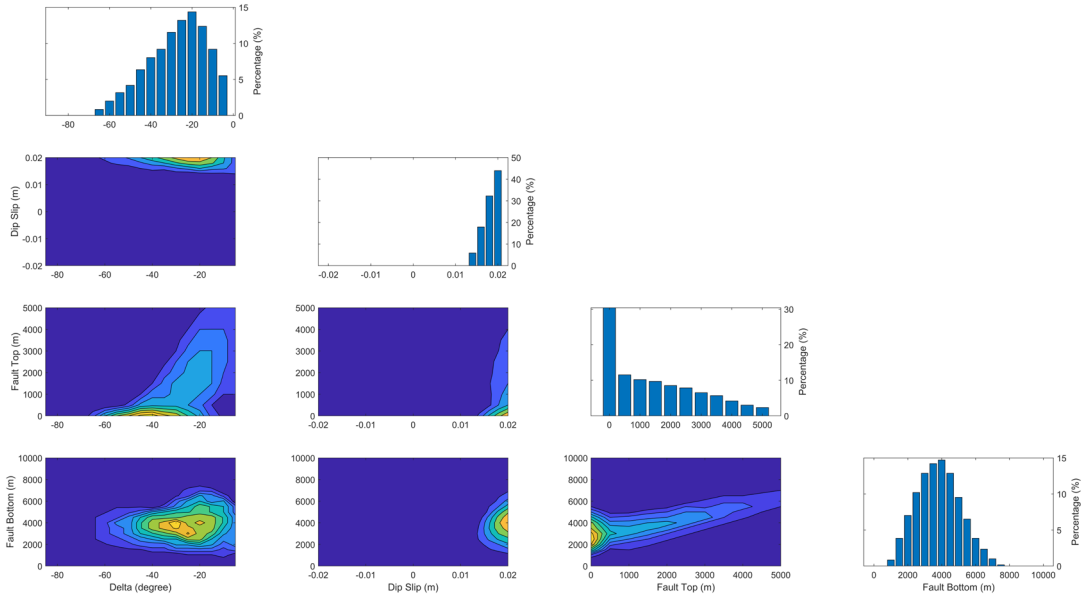


圖5-21：針對新社線性構造於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-21：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in Hsinshe lineament model during 2022~2023.

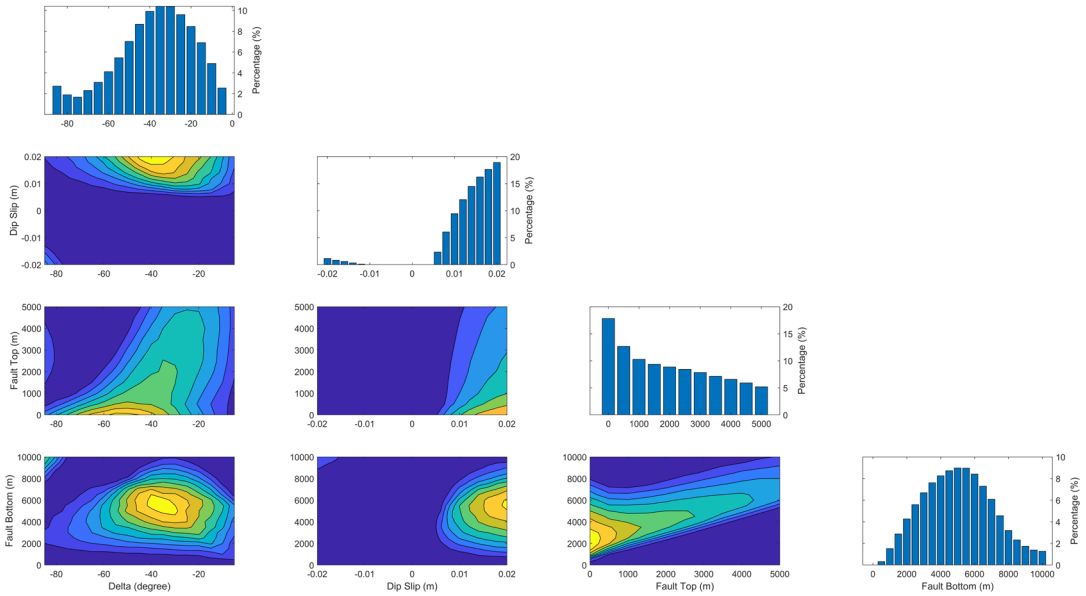


圖5-22：針對新社線性構造於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-22：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in Hsinshe lineament model during 2022~2023.

5-3 剖面P2模擬結果

剖面P2單獨對車籠埔斷層(CLP)與隘寮構造(AIL)進行三個時段模擬，透過RMSE的結果(圖5-23~5-28)，選擇RMSE在總數中最小的1%與10%來呈現六組模擬，分別於傾角、傾滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計百分比圖(圖5-29~5-40)。

透過簡易模擬地表變形剖面P2，結果表現車籠埔斷層(CLP) 低角度東傾(<20°)，小向西逆衝滑動年速率(+4~6mm/yr)，斷層面滑動頂部深度淺，斷層面滑動寬度大；而隘寮構造(AIL)則為低角度西傾(<20°) (*若高角度西傾，則得到的為伸張滑動量值，故推測不適合)，較大向東逆衝滑動年速率(~+10mm/yr)，斷層面滑動頂部深度淺，斷層面滑動寬度小。

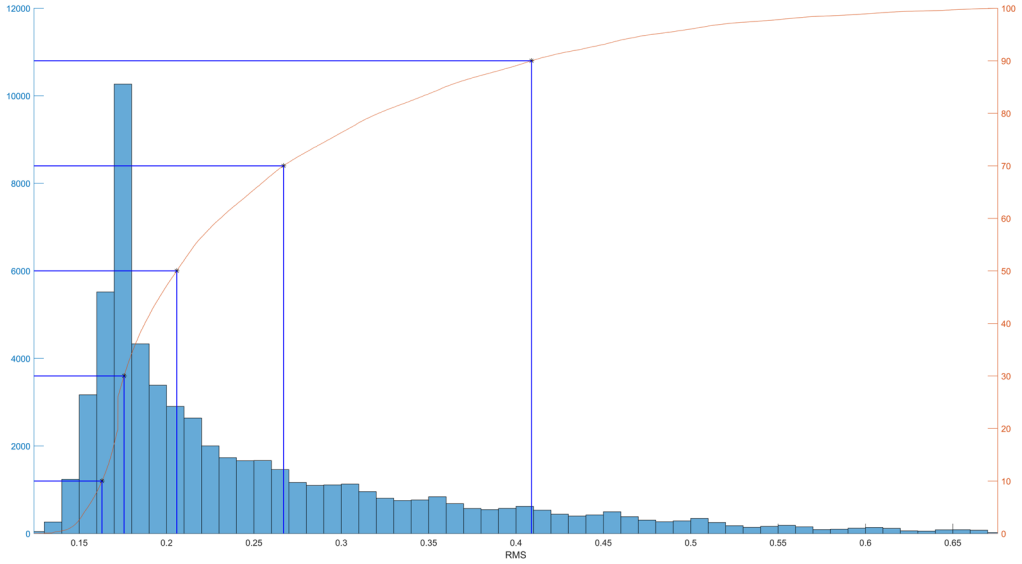


圖5-23：針對車籠埔斷層於2014~2018段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-23：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2014~2018. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

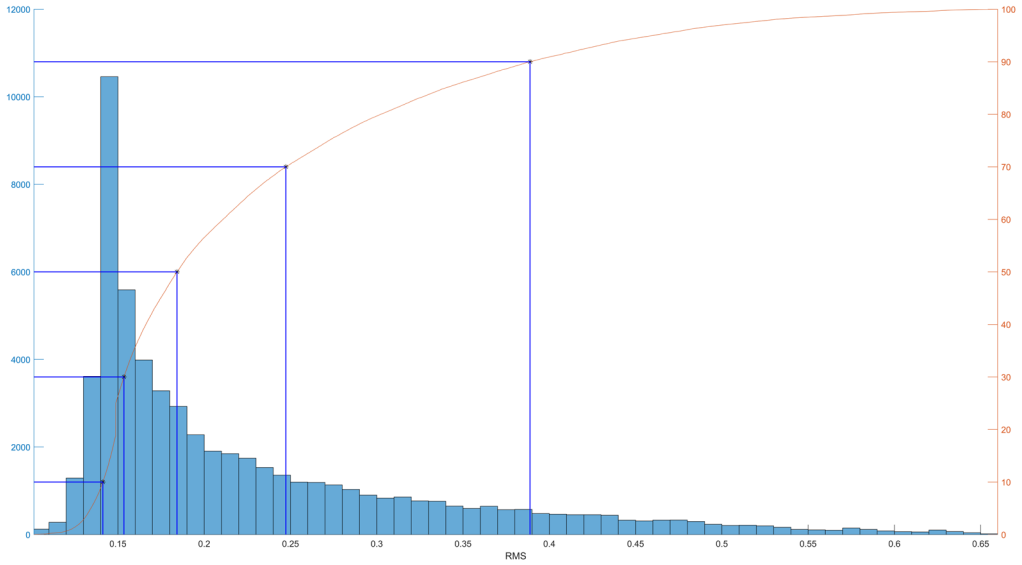


圖5-24：針對車籠埔斷層於2018~2021段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-24：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2018~2021. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

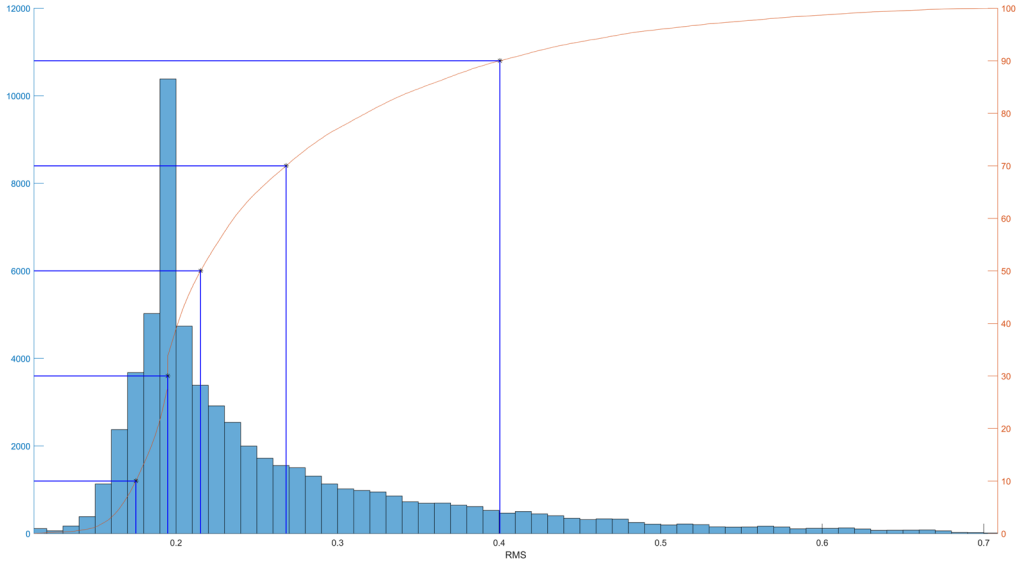


圖5-25：針對車籠埔斷層於2022~2023段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-25：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2022~2023. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

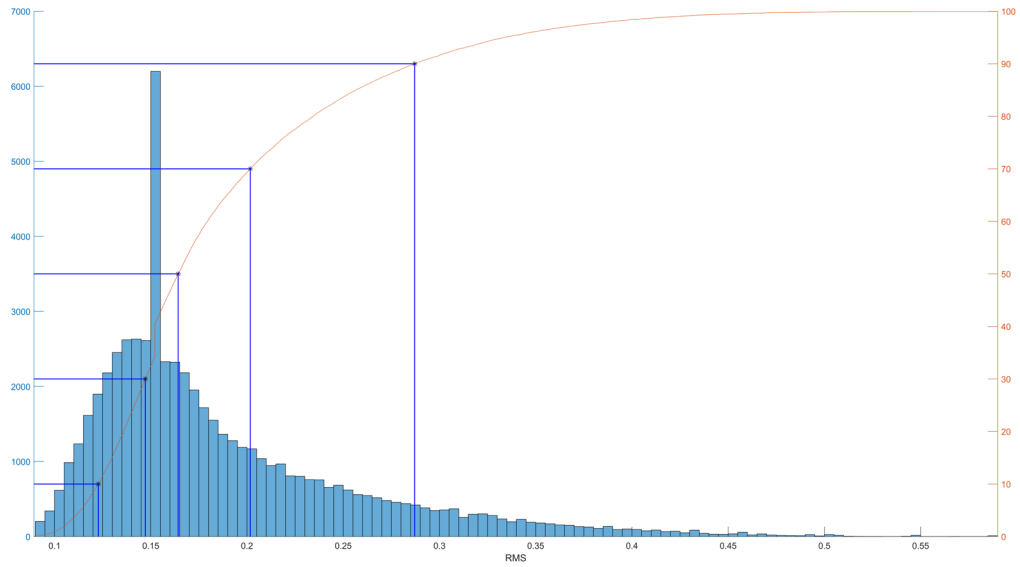


圖5-26：針對隘寮構造於2014~2018段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-26：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in AIL model during 2014~2018. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

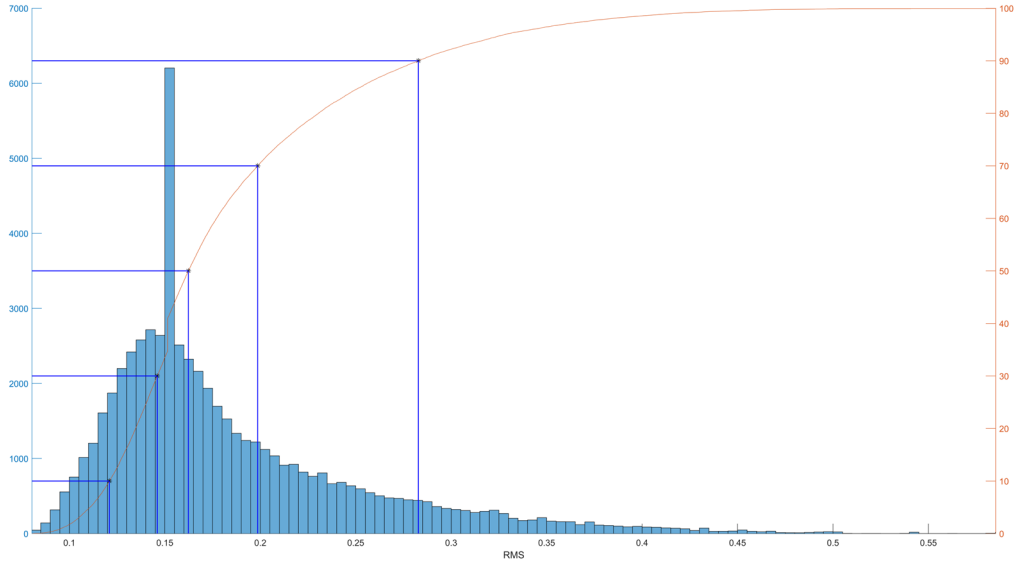


圖5-27：針對隘寮構造於2018~2021段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-27：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in AIL model during 2018~2021. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

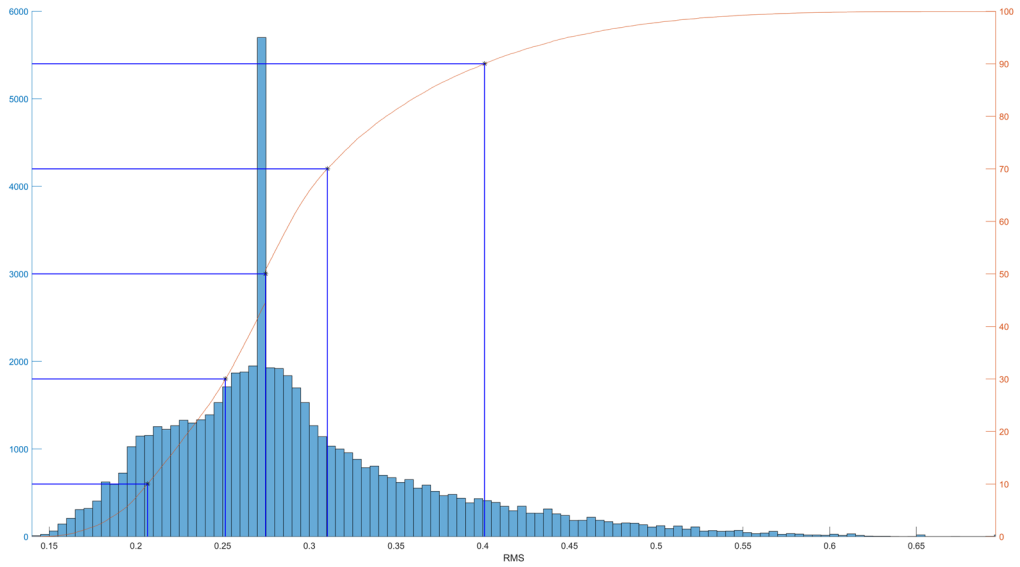


圖5-28：針對隘寮構造於2022~2023段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-28：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in AIL model during 2022~2023. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

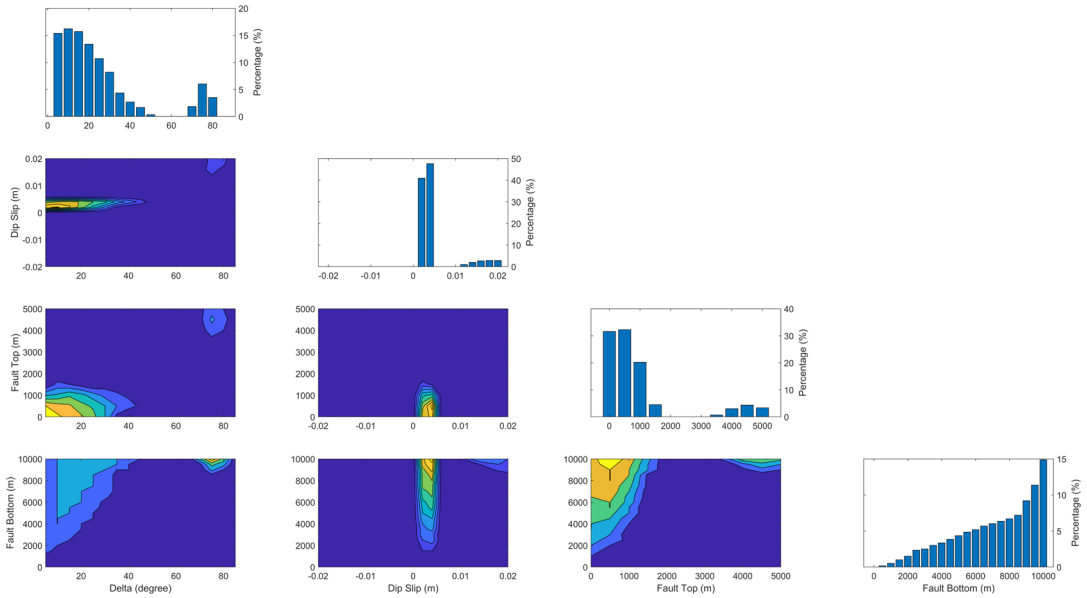


圖5-29：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-29：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2014~2018.

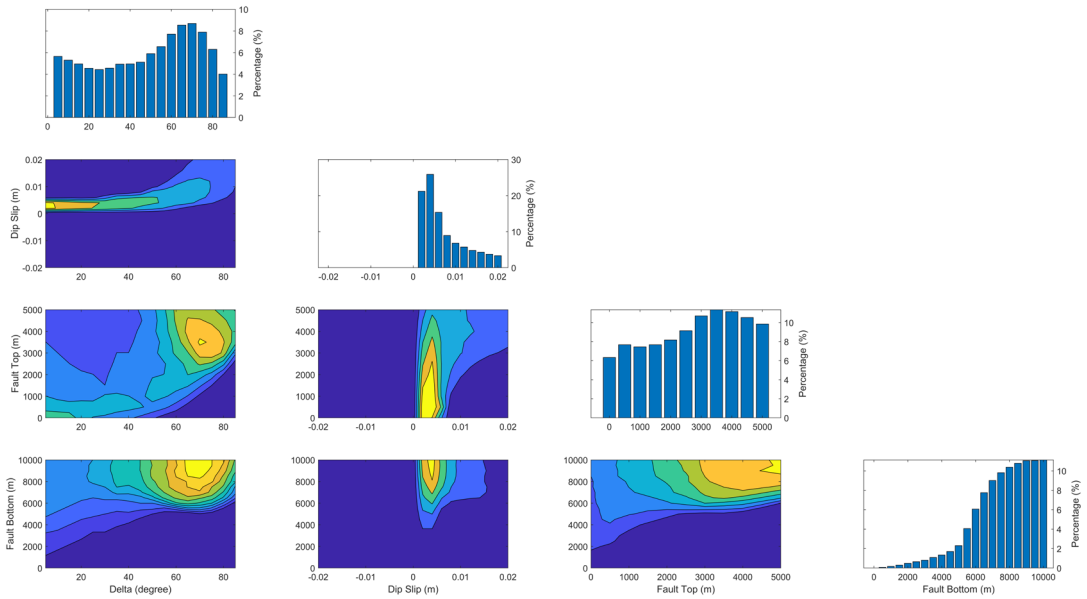


圖5-30：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-30：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2014~2018.

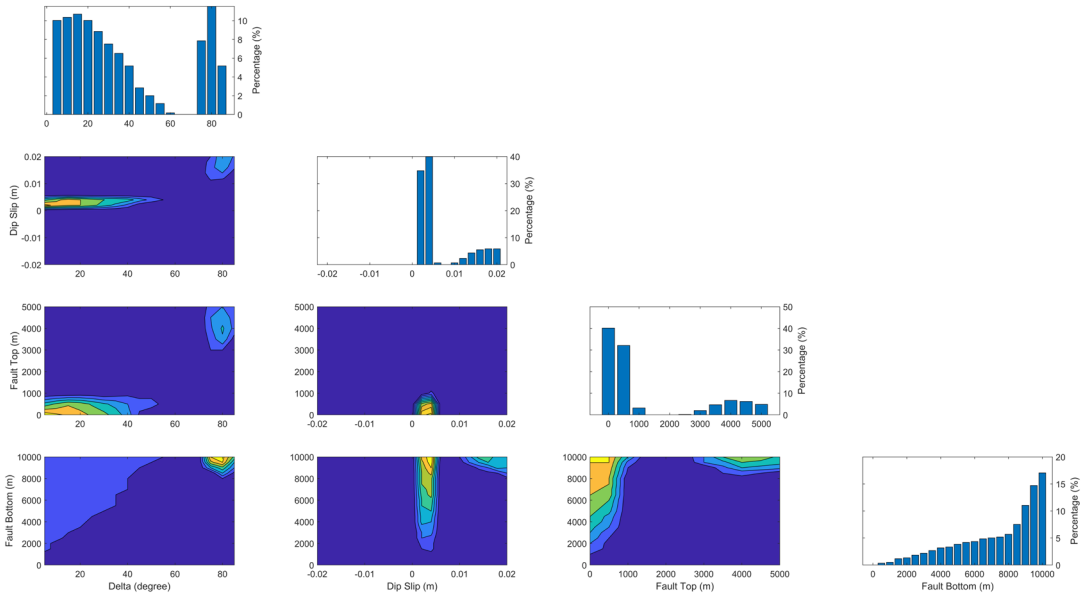


圖5-31：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-31：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2018~2021.

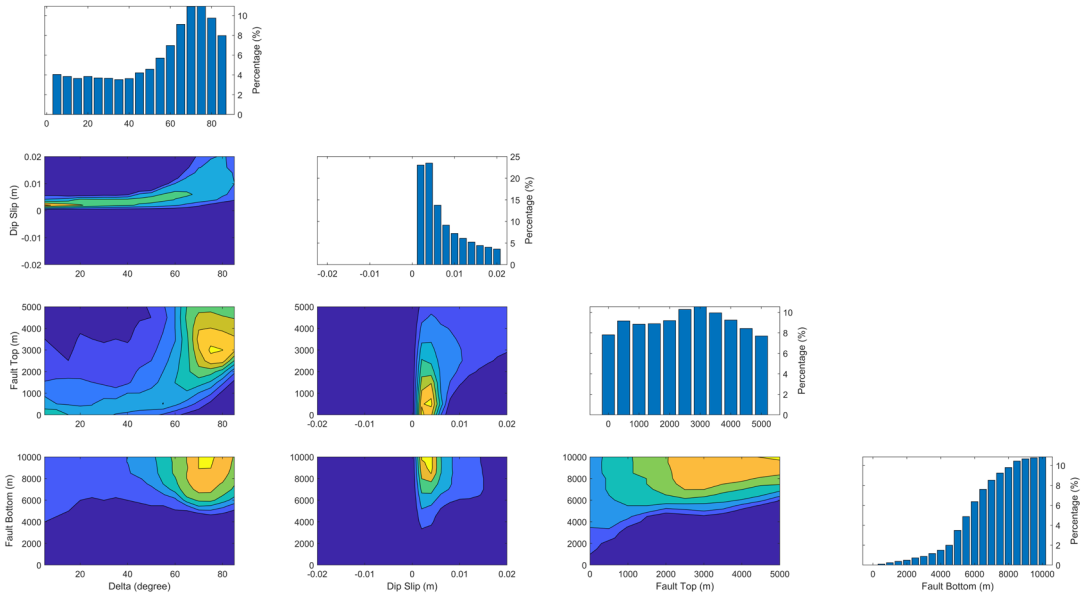


圖5-32：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-32：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2018~2021.

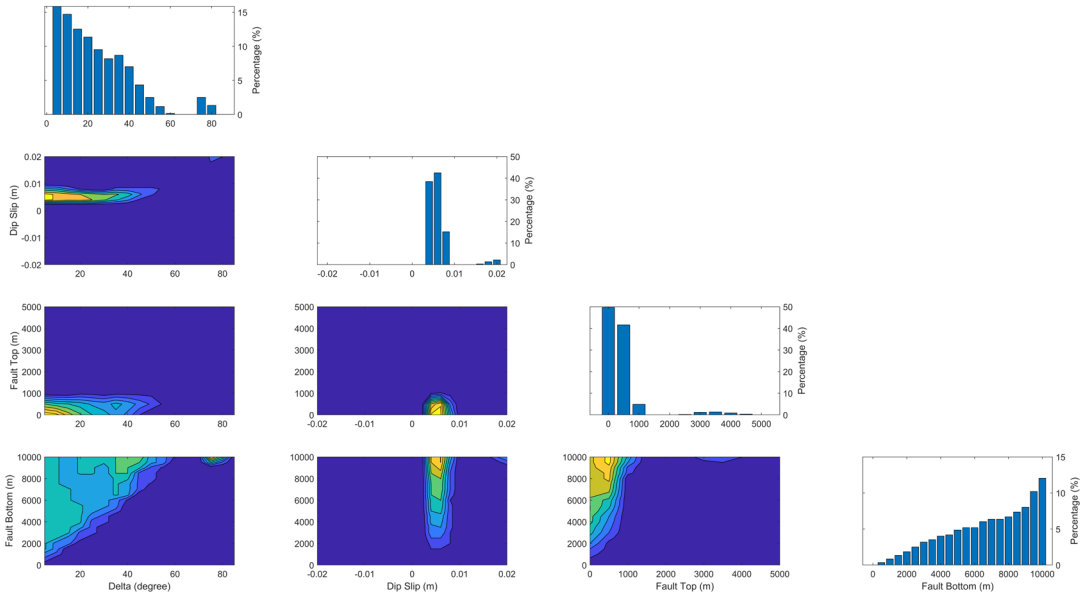


圖5-33：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-33：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2022~2023.

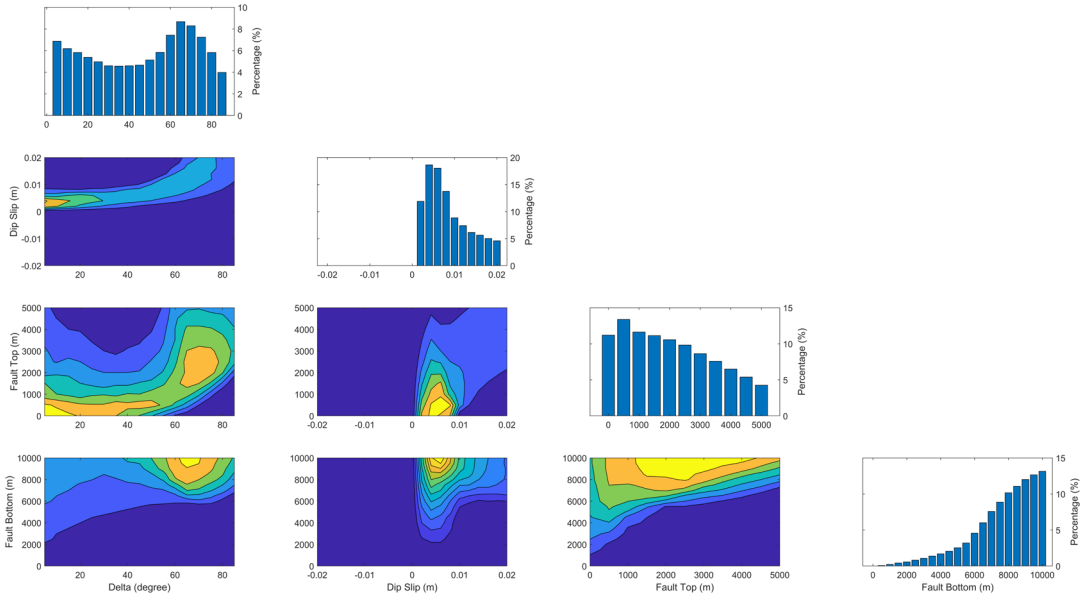


圖5-34：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-34：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2022~2023.

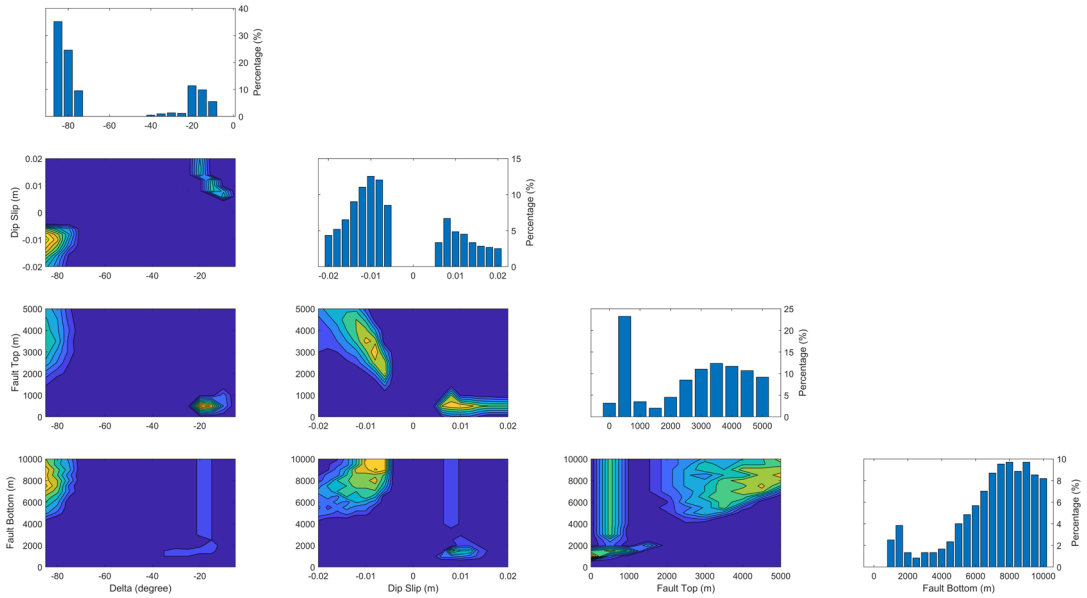


圖5-35：針對隘寮構造於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-35：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in AIL model during 2014~2018.

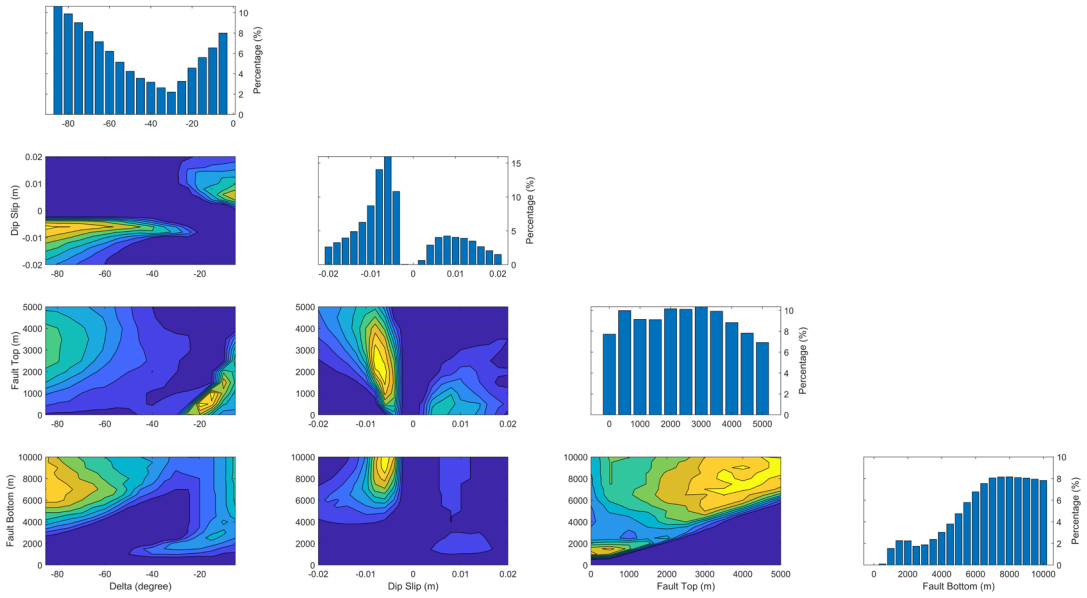


圖5-36：針對隘寮構造於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-36：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in AIL model during 2014~2018.

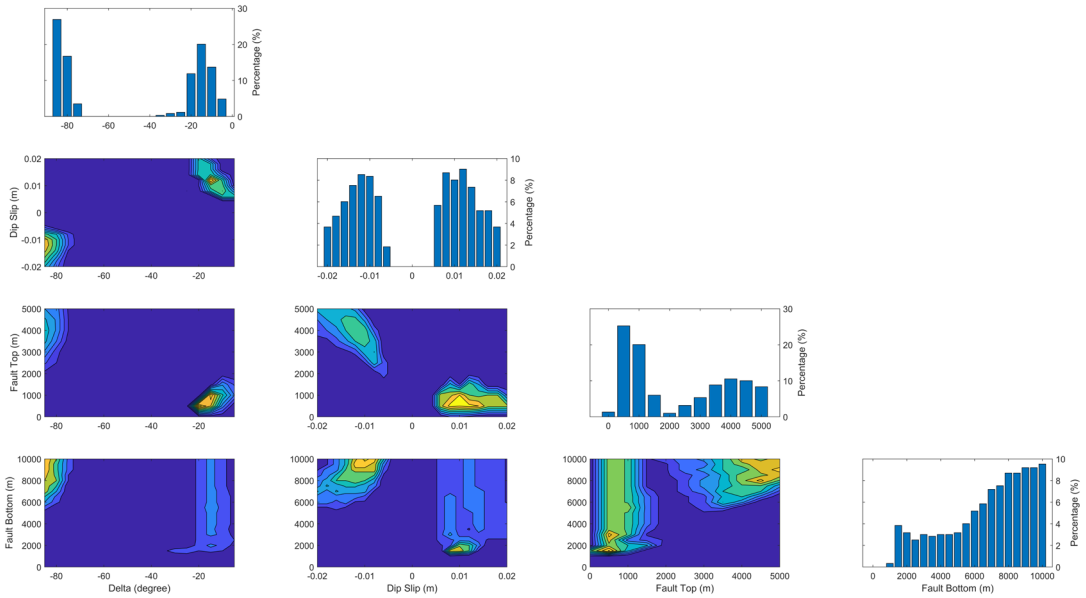


圖5-37：針對隘寮構造於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-37：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in AIL model during 2018~2021.

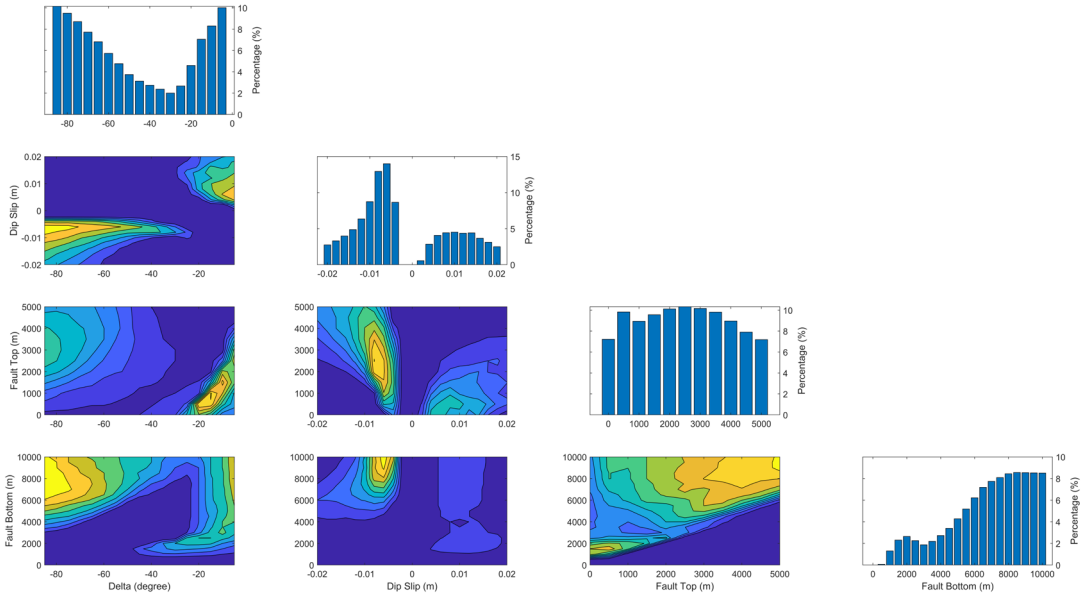


圖5-38：針對隘寮構造於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-38：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in AIL model during 2018~2021.

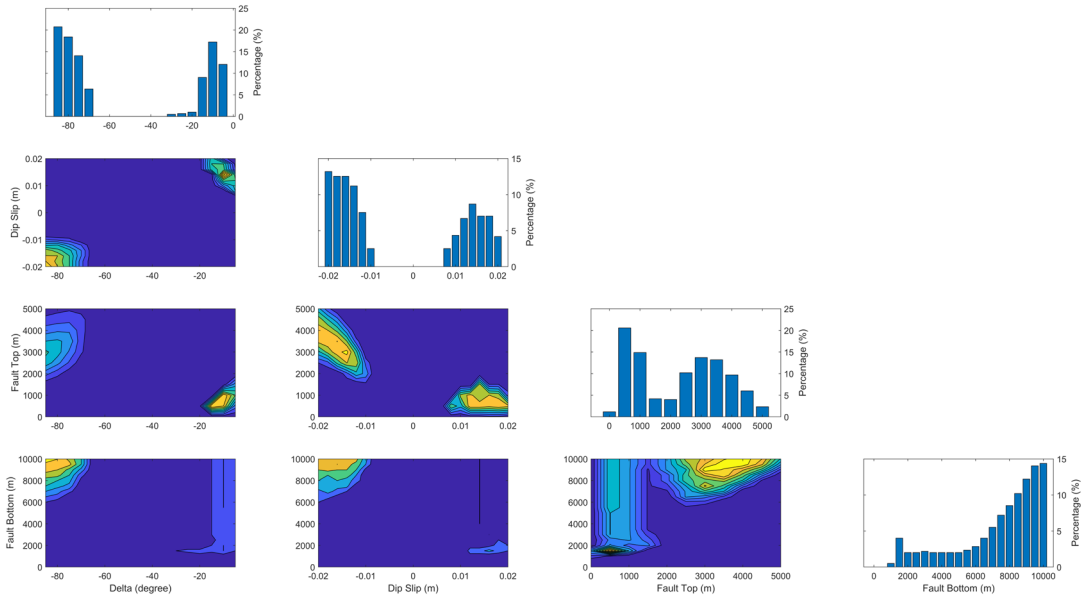


圖5-39：針對隘寮構造於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-39：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in AIL model during 2022~2023.

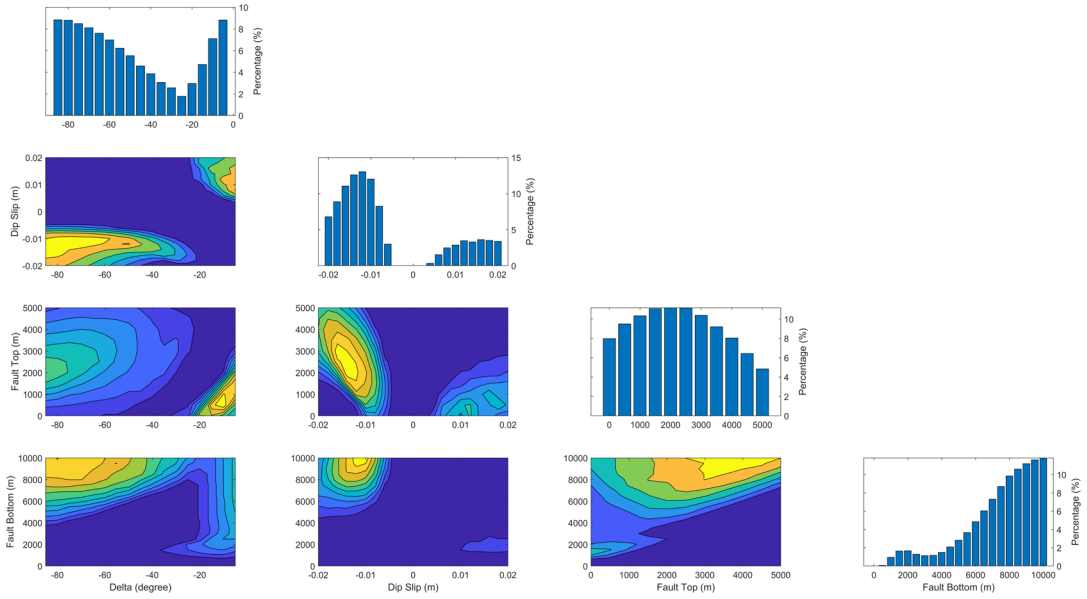


圖5-40：針對隘寮構造於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-40：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in AIL model during 2022~2023.

5-4 剖面P4模擬結果

剖面P4對車籠埔斷層(CLP)進行三個時段模擬，透過RMSE的結果(圖5-41~5-43)，選擇RMSE在總數前1%與10%來呈現六組模擬，分別於傾角、傾滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計百分比圖(圖5-44~5-49)。

透過簡易模擬地表變形剖面P4，結果表現車籠埔斷層(CLP)低角度東傾(<20°)，較大向西逆衝滑動年速率(>10mm/yr)，斷層面滑動頂部深度較深，斷層面滑動寬度大。

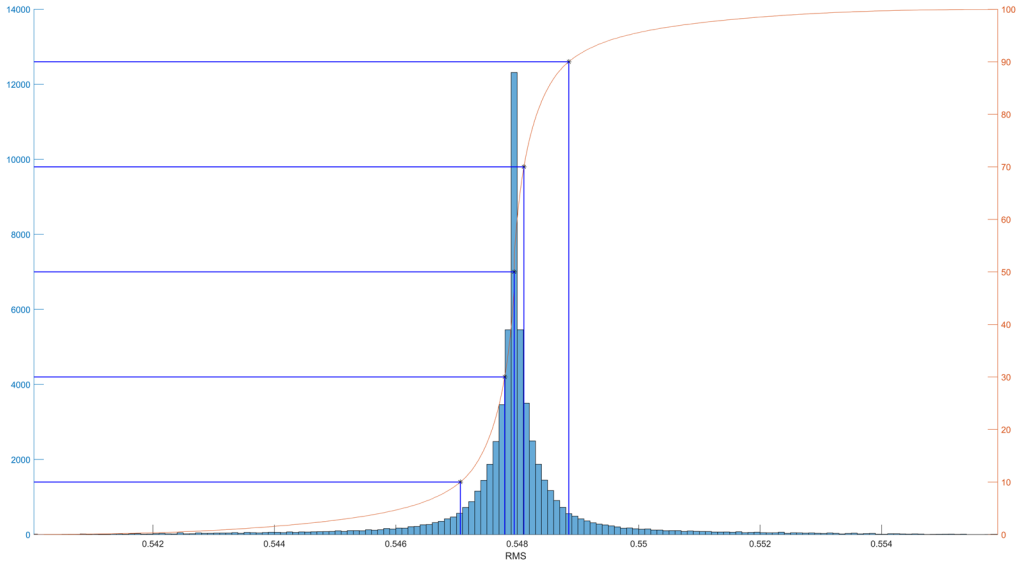


圖5-41：針對車籠埔斷層於2014~2018段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-41：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2014~2018. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

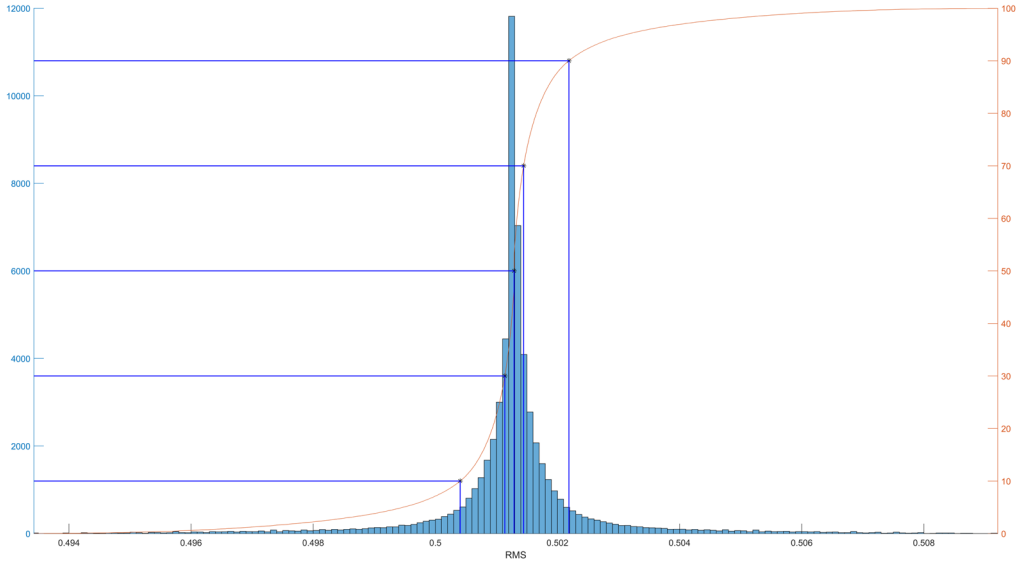


圖5-42：針對車籠埔斷層於2018~2021段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-42：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2018~2021. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

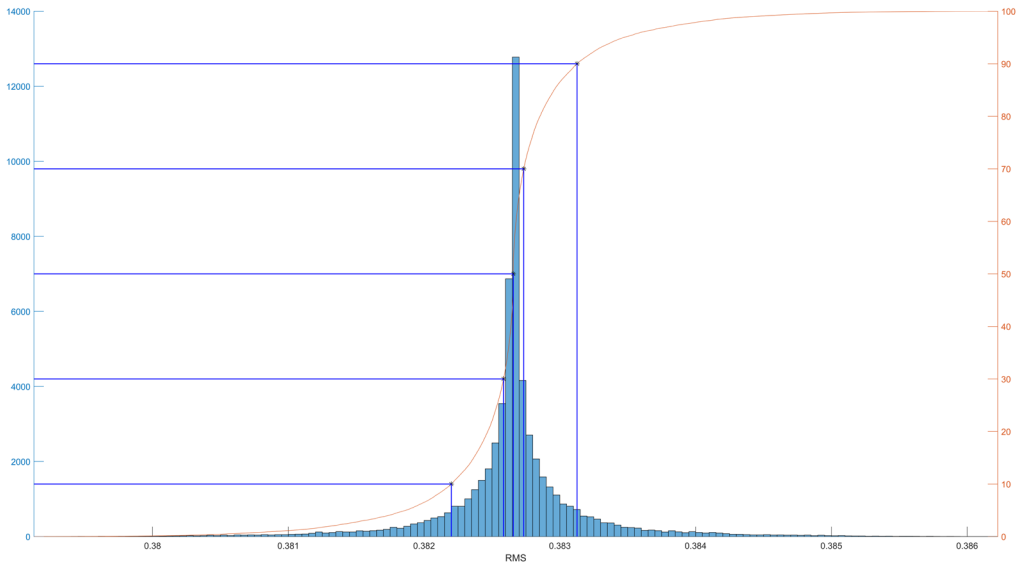


圖5-43：針對車籠埔斷層於2022~2023段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-43：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2022~2023. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

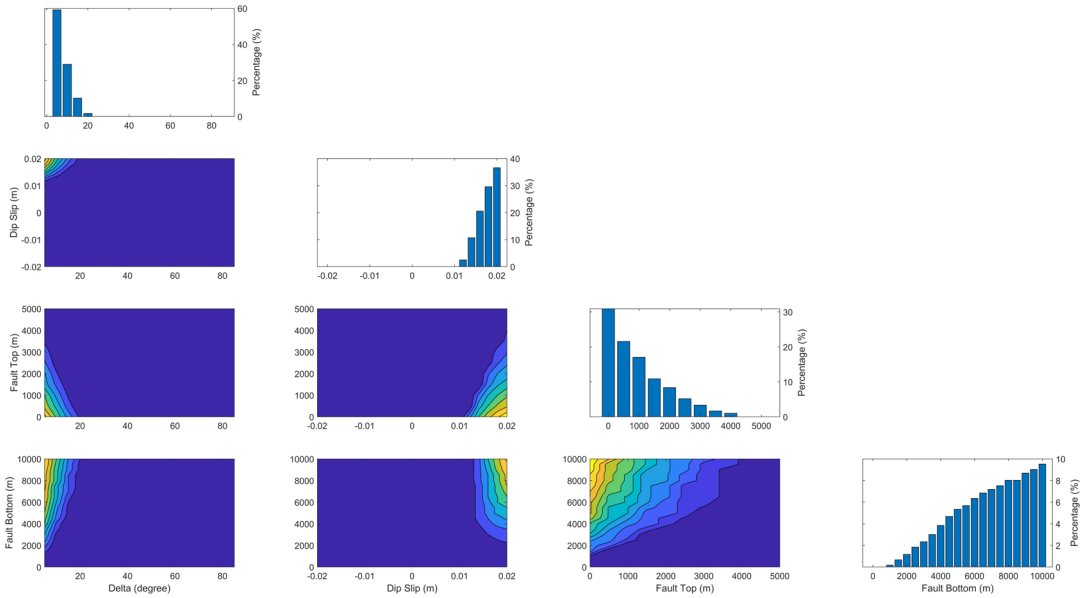


圖5-44：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-44：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2014~2018.

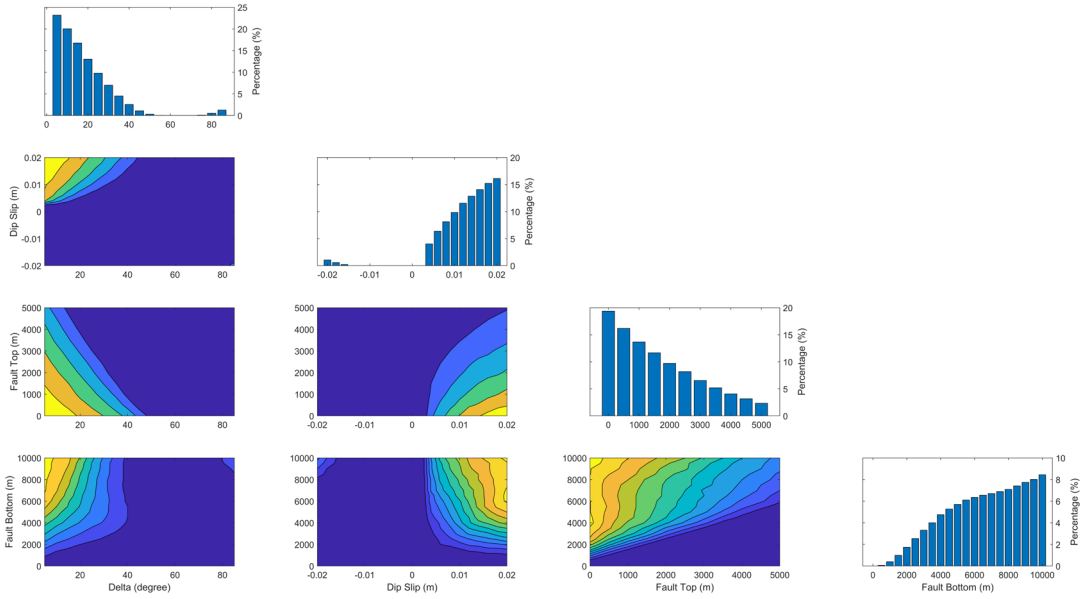


圖5-45：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-45：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2014~2018.

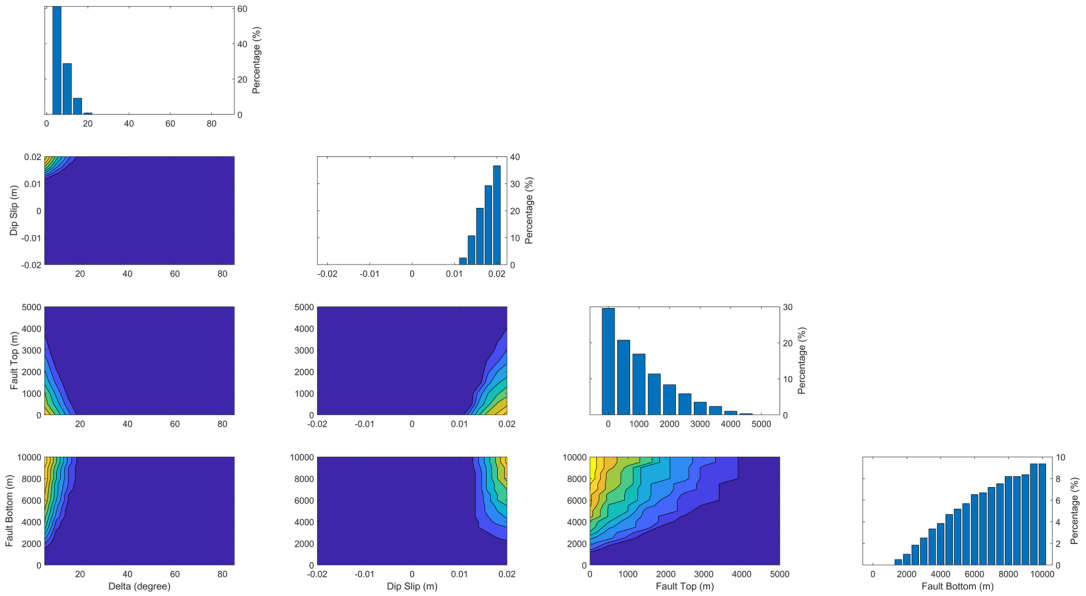


圖5-46：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-46：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2018~2021.

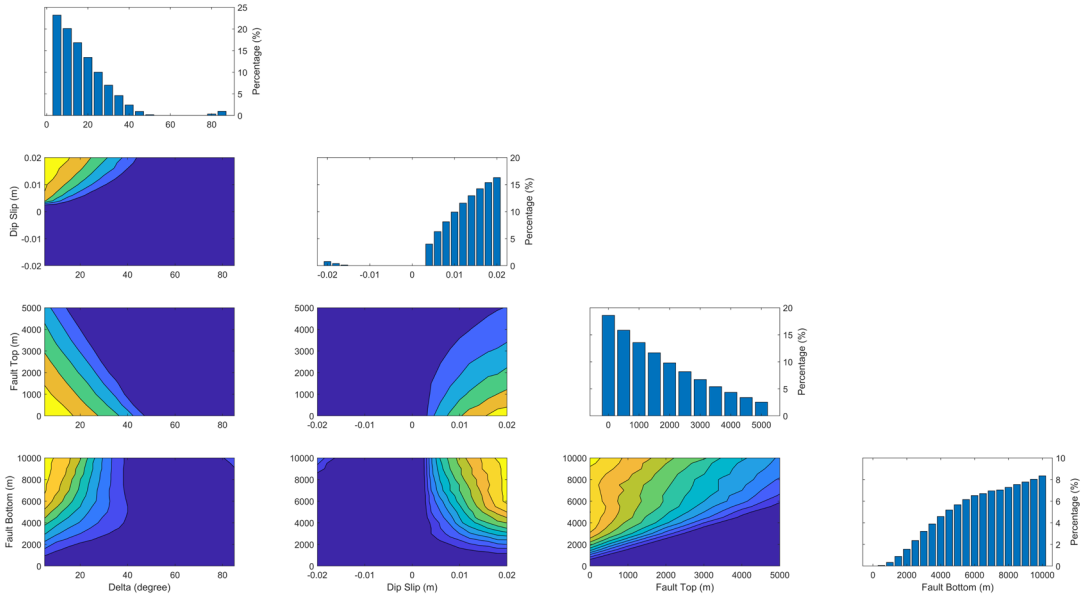


圖5-47：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-47：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2018~2021.

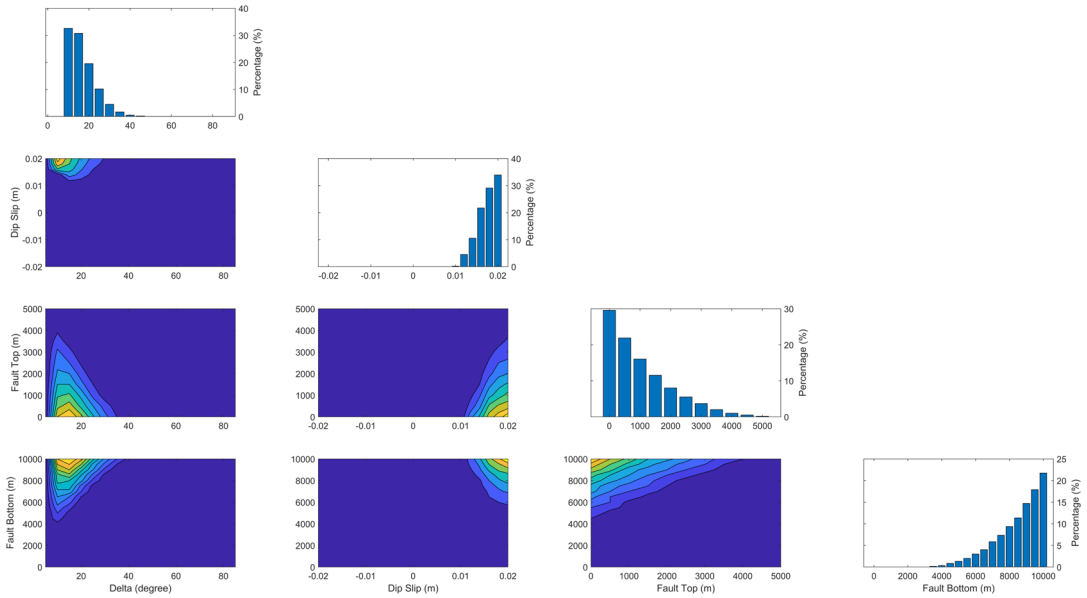


圖5-48：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-48：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2022~2023.

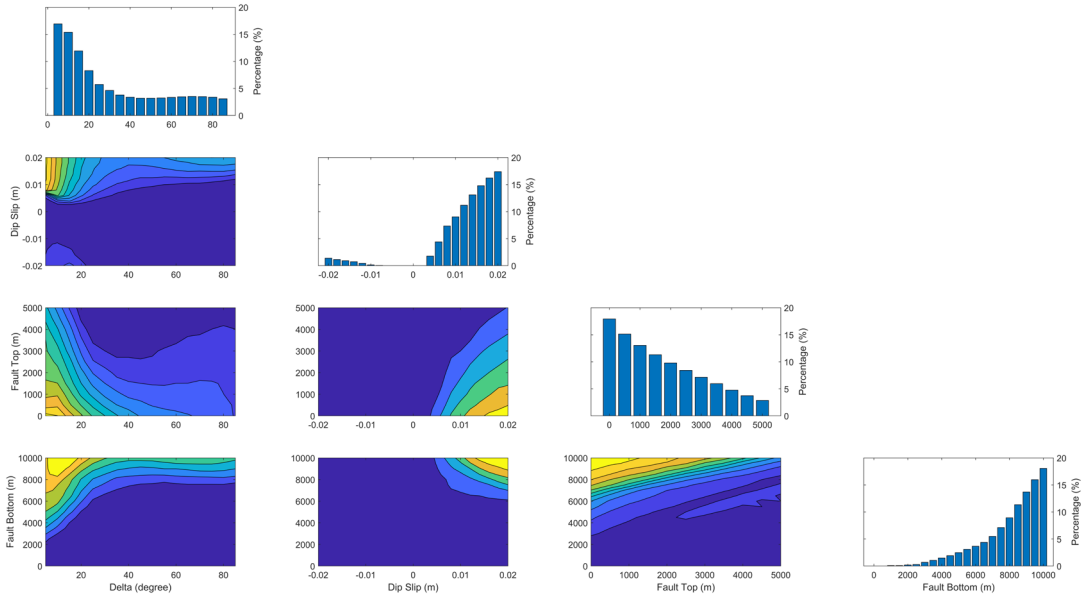


圖5-49：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-49：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2022~2023.

5-5 剖面P5模擬結果

剖面P5對車籠埔斷層(CLP)進行三個時段模擬，透過RMSE的結果(圖5-50~5-52)，選擇RMSE在總數前1%與10%來呈現六組模擬，分別於傾角、傾滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計百分比圖(圖5-53~5-58)。

透過簡易模擬地表變形剖面P5，結果表現車籠埔斷層(CLP) 低角度東傾(<20°)，較大向西逆衝滑動年速率(>10mm/yr)，斷層面滑動頂部深度較深，斷層面滑動寬度大，而2022~2023模擬顯示滑動區塊改變，平均滑動傾角有所變化。

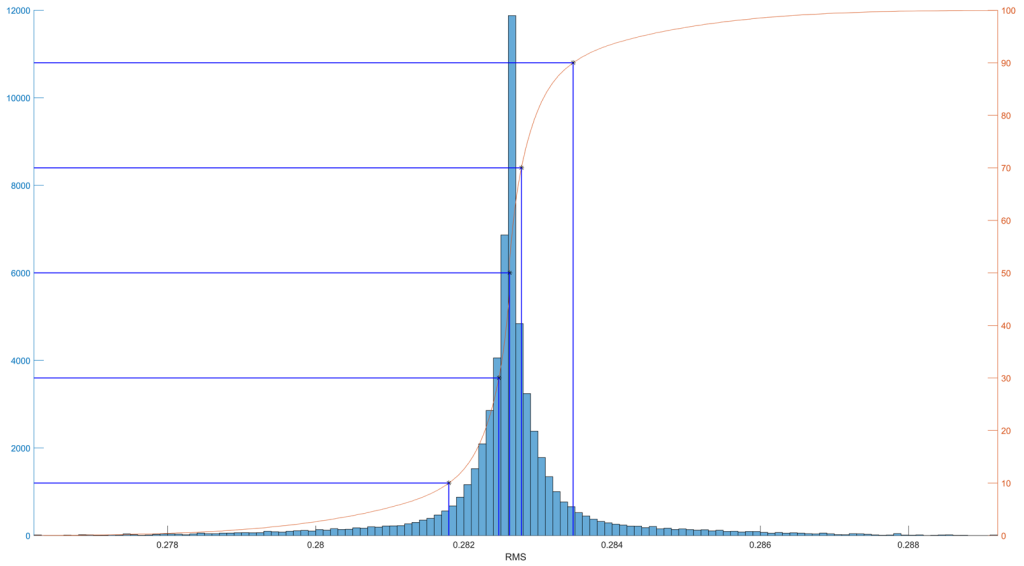


圖5-50：針對車籠埔斷層於2014~2018段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-50：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2014~2018. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

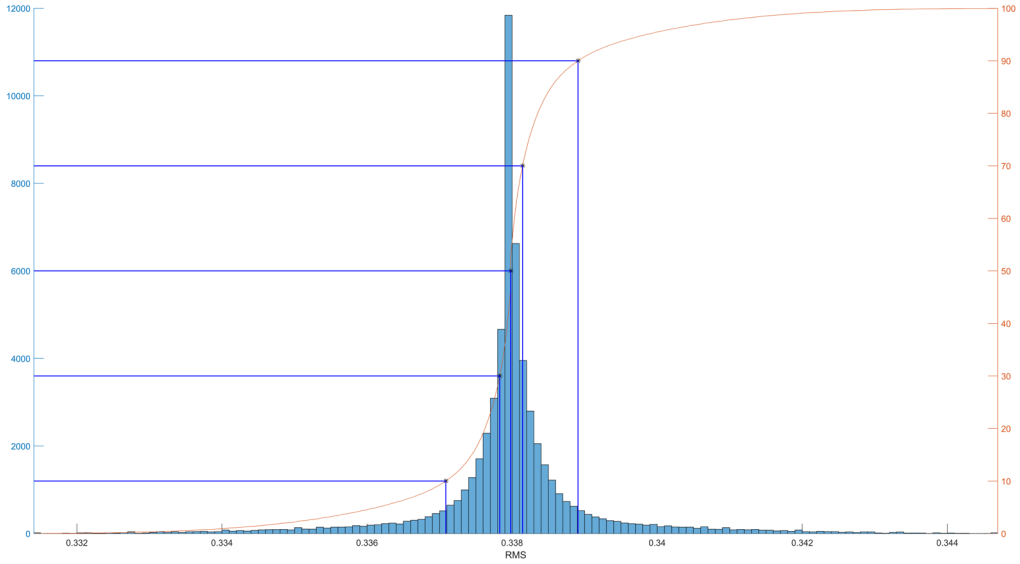


圖5-51：針對車籠埔斷層於2018~2021段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-51：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2018~2021. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

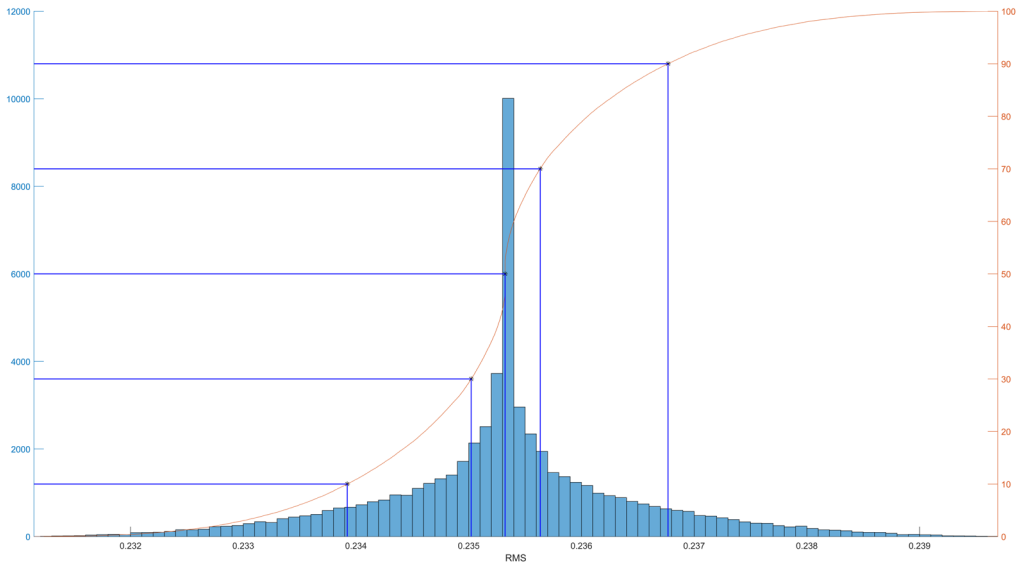


圖5-52：針對車籠埔斷層於2022~2023段之模擬與實際觀測值之誤差（RMSE），以個數及累積百分比分布圖，藍色框線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-52：Distribution of RMSE (calculating from difference between observations and models), number and cumulative percentage in CLP model during 2022~2023. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

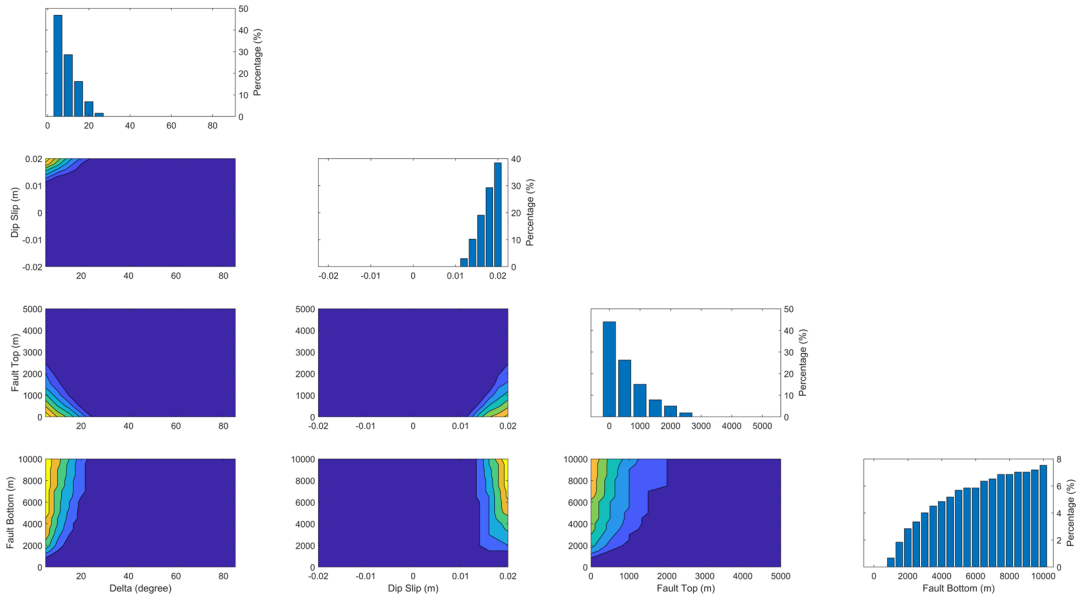


圖5-53：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-53：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2014~2018.

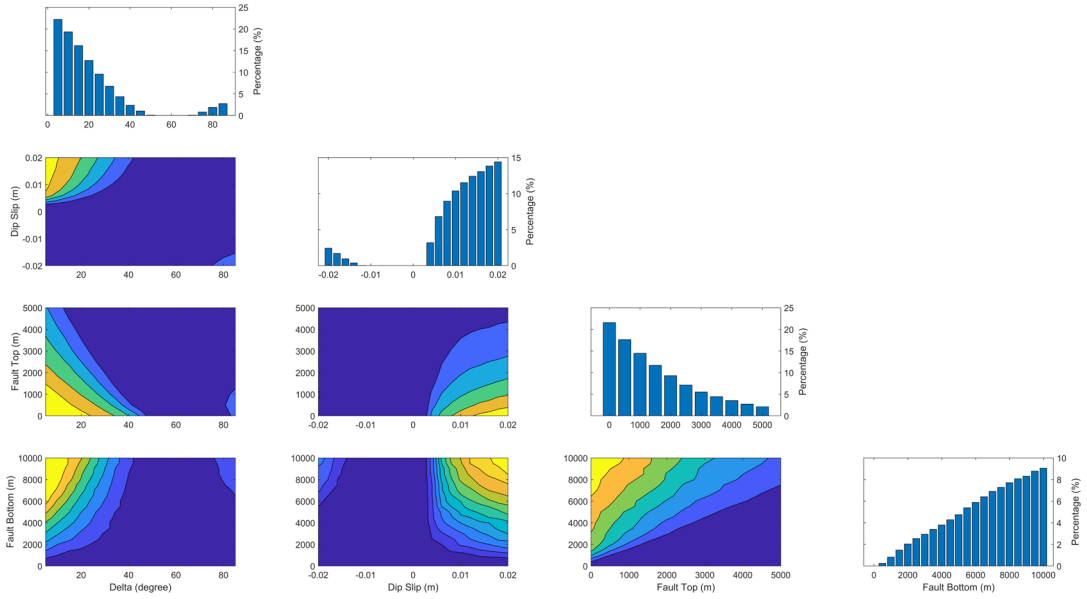


圖5-54：針對車籠埔斷層於2014~2018時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-54：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2014~2018.

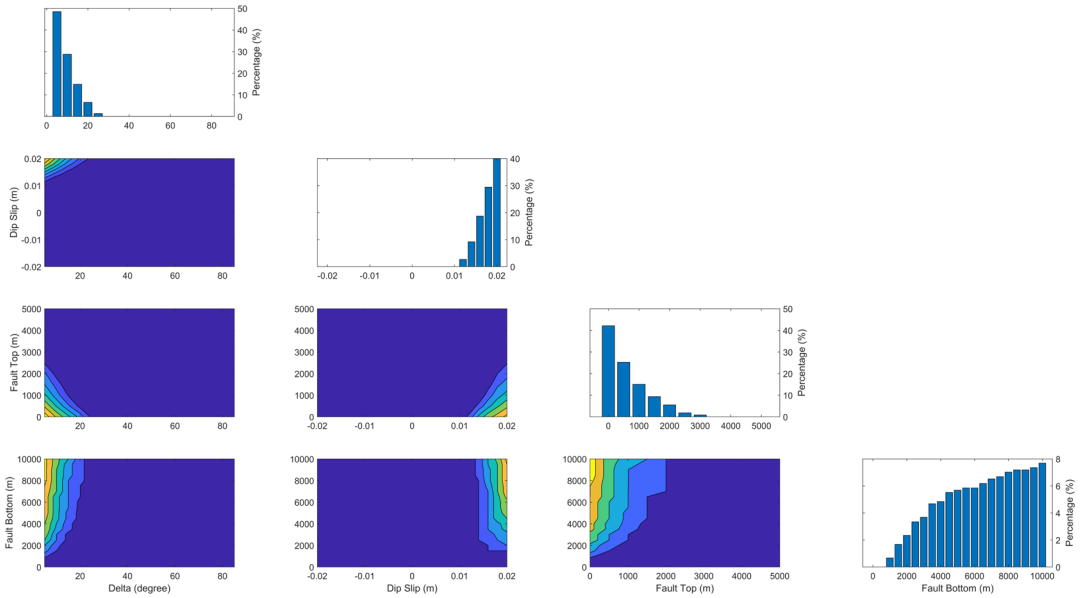


圖5-55：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-55：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2018~2021.

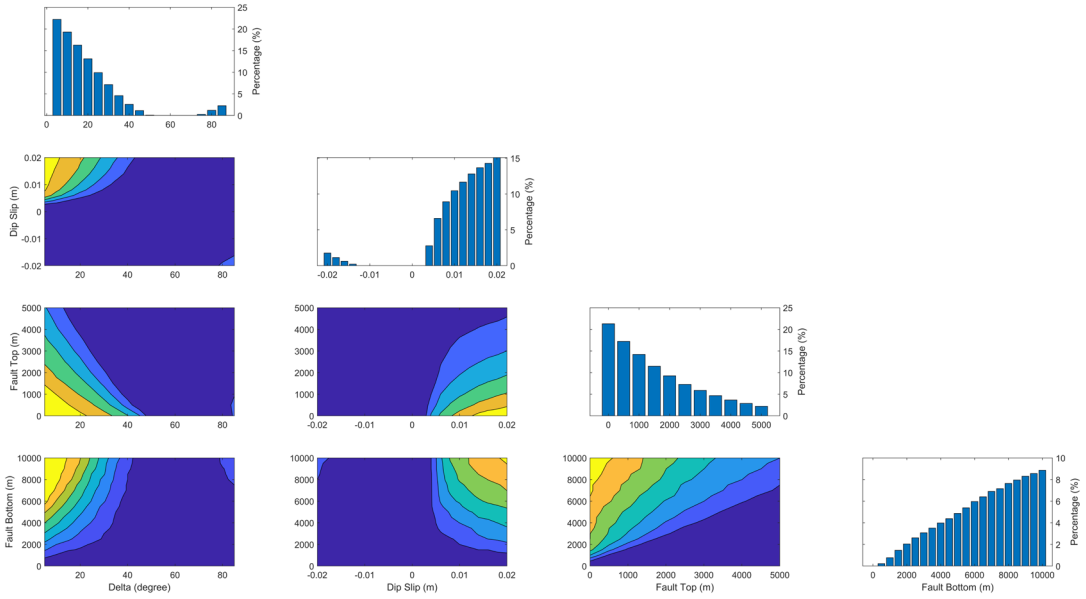


圖5-56：針對車籠埔斷層於2018~2021時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-56：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2018~2021.

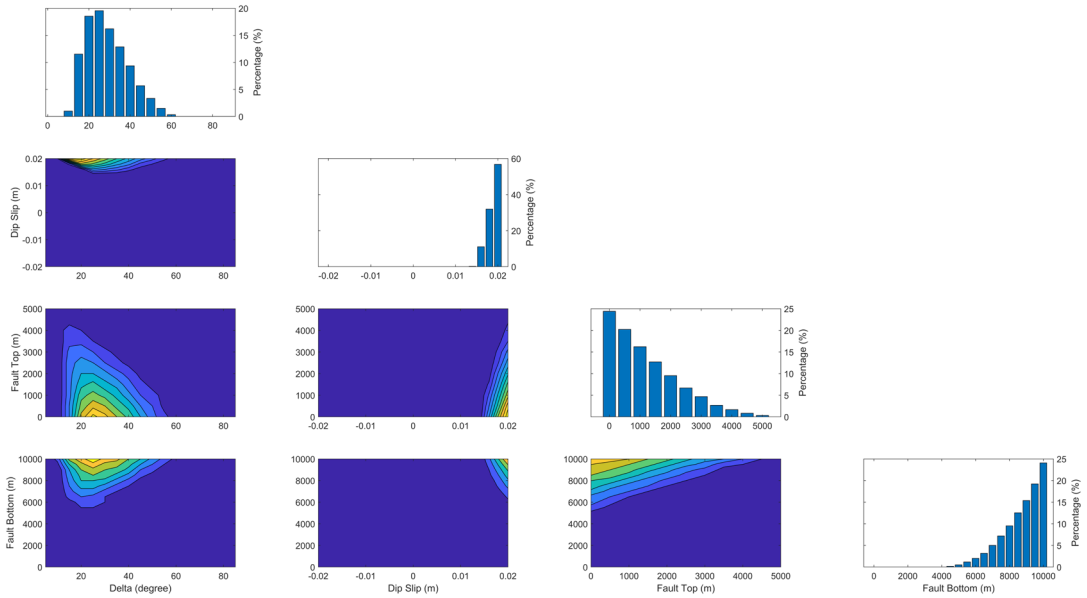


圖5-57：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的1%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-57：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 1% RMSE in CLP model during 2022~2023.

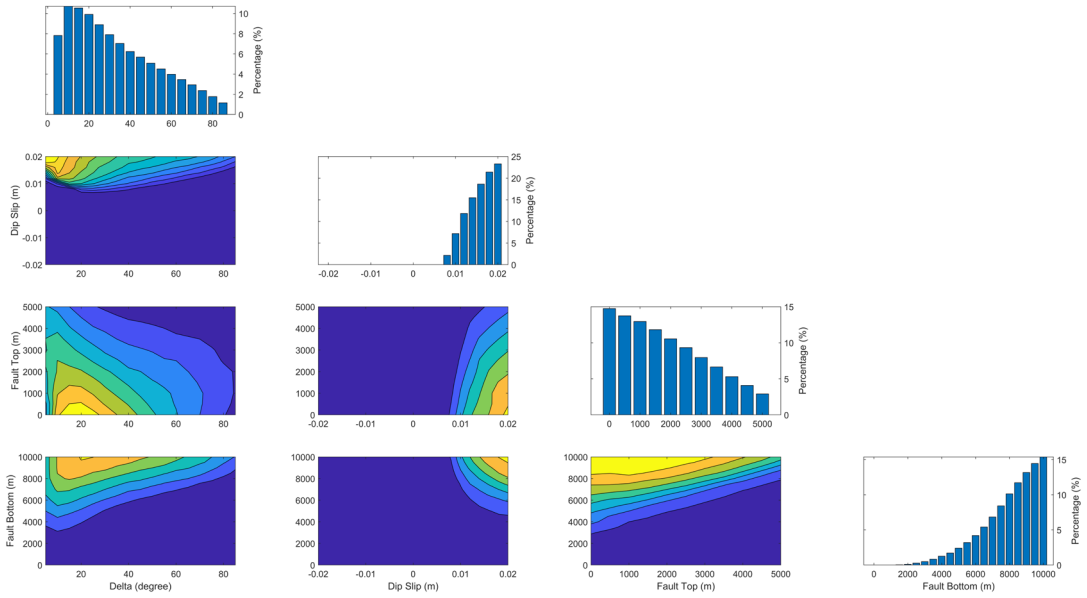


圖5-58：針對車籠埔斷層於2022~2023時段之模擬，RMSE最小的10%結果中，所有參數的個數百分比分布圖，XY軸依序為傾角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-58：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with the lowest 10% RMSE in CLP model during 2022~2023.

第六章、討論

本年度計畫利用雷達衛星影像解算臺灣中部的地表變形，解算結果與同時段的連續GNSS測站資料比對，以檢核雷達資料的精準度。在比對的同時，我們也將雷達資料的參考座標從衛星影像之間的相對差值，平移成與GNSS資料相同的相同座標系統。這些資料也與同時期的campaign GNSS以及leveling資料比對。

觀察檢核後的資料後，我們也針對部分區域到野外現地比對，確認雷達解算出之地表變形與現實中的地形、構造、甚至結構物破壞能有連結，並且對部分變形現象提出初步解釋。縱觀整體資料後，選取了多條剖面呈現於期末報告，並且選擇部分剖面反推斷層幾何與滑移量。對於部分的問題在本章節做討論。

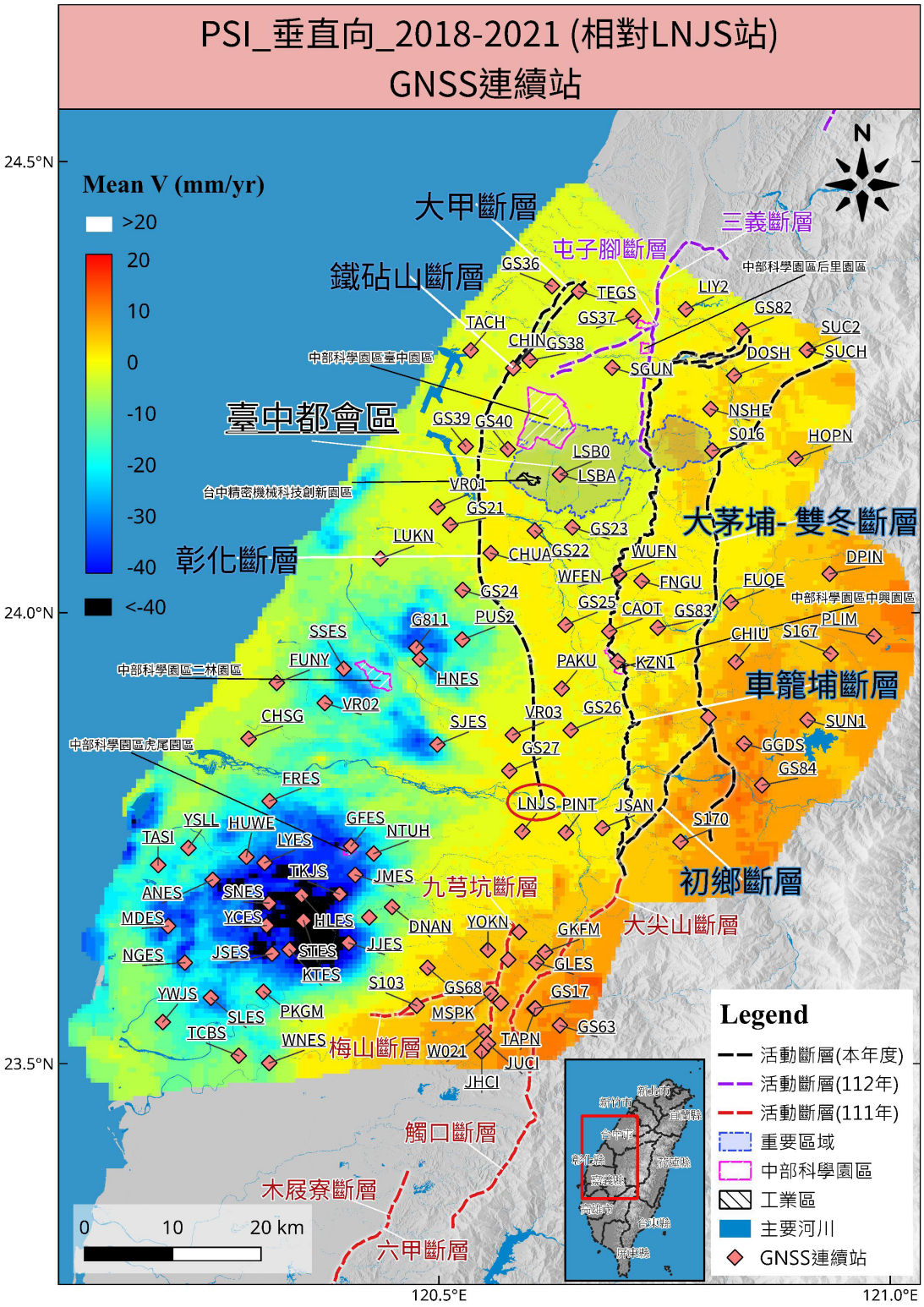


圖6-1：2018-2021年PSI解析的垂直向平均速度場與GNSS連續站分布圖。

Figure 6-1：Vertical average velocity fields between 2018 and 2021 processed with PSI data and the map for the continues GNSS stations.

6-1 雷達結果與各項大地測量資料比較

6-1-1 雷達差分干涉資料與GNSS比對

我們檢視了各時期GNSS與PSI的時間序列，本章節我們挑選各時期幾個速度場比對差異大的測站以及比對成果良好的測站討論，其餘測站成果提供於附錄。

由第四章4-1節比較可以看出三個時間段中，2014~2018與2022~2023雷達結果與連續GNSS比對較差，而2018~2022比對較好。其中2014年至2018年升軌道方向於臺中地區比對成果差異大，降軌道方向比對成果較相似，此區域我們挑選TACH（圖6-2）以及臺中都會區內的LSB0（圖6-3）兩測站代表，濁水溪北側的GS27（圖6-4）於升軌道比對不佳，降軌道比對相似。觀察這幾個時間序列，可以看出這幾站的雷達資料大趨勢雖然與連續GNSS站的資料大致符合，然而雷達資料離散程度相當大。這樣離散的資料在過往經驗看來通常是雷達影像不足、或是受到拍攝時大氣延遲的影響，或是兩者皆具。JSAN（圖6-5）於升降軌道比對成果皆不佳，本站由於GNSS站資料時間較短，迴歸起始與終點不同，DNAN（圖6-6）則是升降軌道成果比對良好。

2018年至2021年速度場比對成果佳，但仍有些許離群點，梅山斷層北側的GS68（圖6-7）在升降軌道速度場比對皆有較大的差異，南邊的W021（圖6-8）則是在升軌方向比對差異較大，降軌道比對差異略小，但鄰近的測站無此現象，而且W021之GNSS資料相當特別（圖6-8），前期平穩，後期震盪幅度到達200mm，似乎與當地構造狀況不甚符合，可能需要檢視GNSS原始資料了解狀況。彰化地區的GS26（圖6-9）及雲林地區的TKJS（圖6-10）在降軌道方向的資料在2021下半年度離散程度較高，這樣的現象再升軌資料中似乎也有跡象但是並不明顯。DNAN（圖6-11）則是升降軌道成果比對良好。

2022年至2023年速度場比對成果差異較大，除了雷達影像觀測時間跨距短、影像數量少，本時期Sentinel-1B衛星除役，Sentinel-1A衛星基線控制也沒有前段時期好，這些都影響PSI解算品質，而僅使用兩年GNSS時間序列擬合的GNSS速度場，也容易收到資料收

斂程度的影響，都是造成本時期比對成果不如前期的原因。結果顯示升軌道方向在臺中地區比對的成果差異比較大，我們挑選鐵砧山斷層與車籠埔斷層附近差異明顯的GS38（圖6-12）及GS82（圖6-13）為代表，這兩站的雷達資料雖然離散程度相對於2018~2021資料較高，然而主要差異是在時間短造成少數離群資料影響迴歸數值。大茅埔-雙冬斷層南段附近的YUNL（圖6-14）在升軌道方向比對良好，降軌道方向比對不佳，其中一部分原因是雷達降軌資料有部分時段沒有拍攝，造成資料間隔較長，另外該站的GNSS資料在後段也有缺失。這樣的資料缺失對雷達與GNSS各自的迴歸都有相當大的影響，也影響了相互之間的比對。GS26（圖6-15）與W021（圖6-16）則是升降軌道比對差異皆大，DNAN（圖6-17）則是升降軌道成果比對良好。

雖然GNSS移動站的測量補足了連續站空間密度上不足的狀況，然而過去數年執行計畫中可以看到移動站的趨勢與雷達資料有相當的差異，其實也與GNSS連續站有相當的差異。初步推測這些比對不佳的原因可能是這三種測量的時間上採樣頻率不同，而比對的量值是速度，移動站因為測量頻率的關係忽略了許多地方存在的季節性或是其他較高頻率的變動，這些變動在其他兩種測量資料中會記錄並且進到迴歸中，造成比對上的差異。

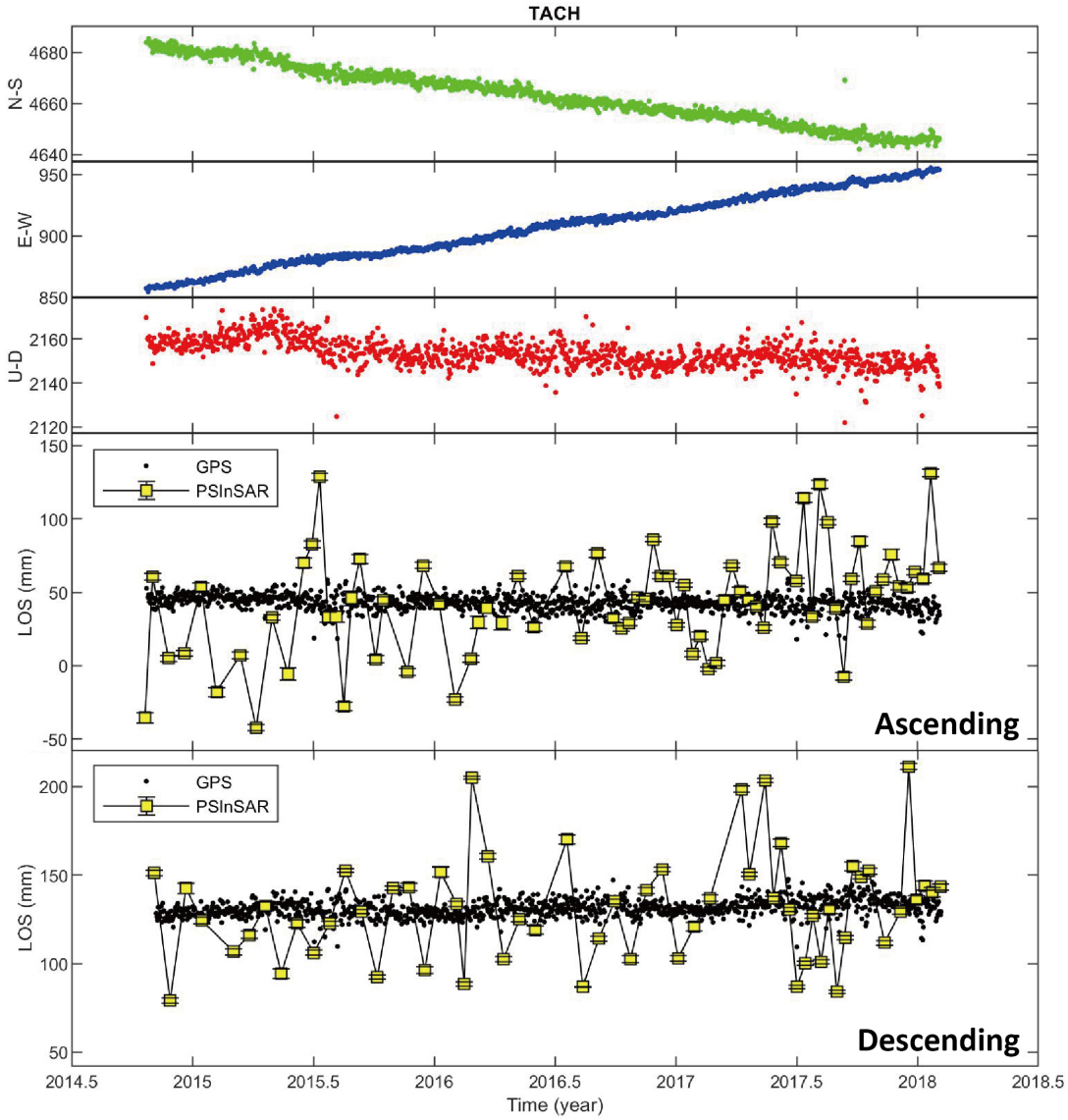


圖6-2：2014-2018年GNSS測站TACH三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-2：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station TACH between 2014 to 2018. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

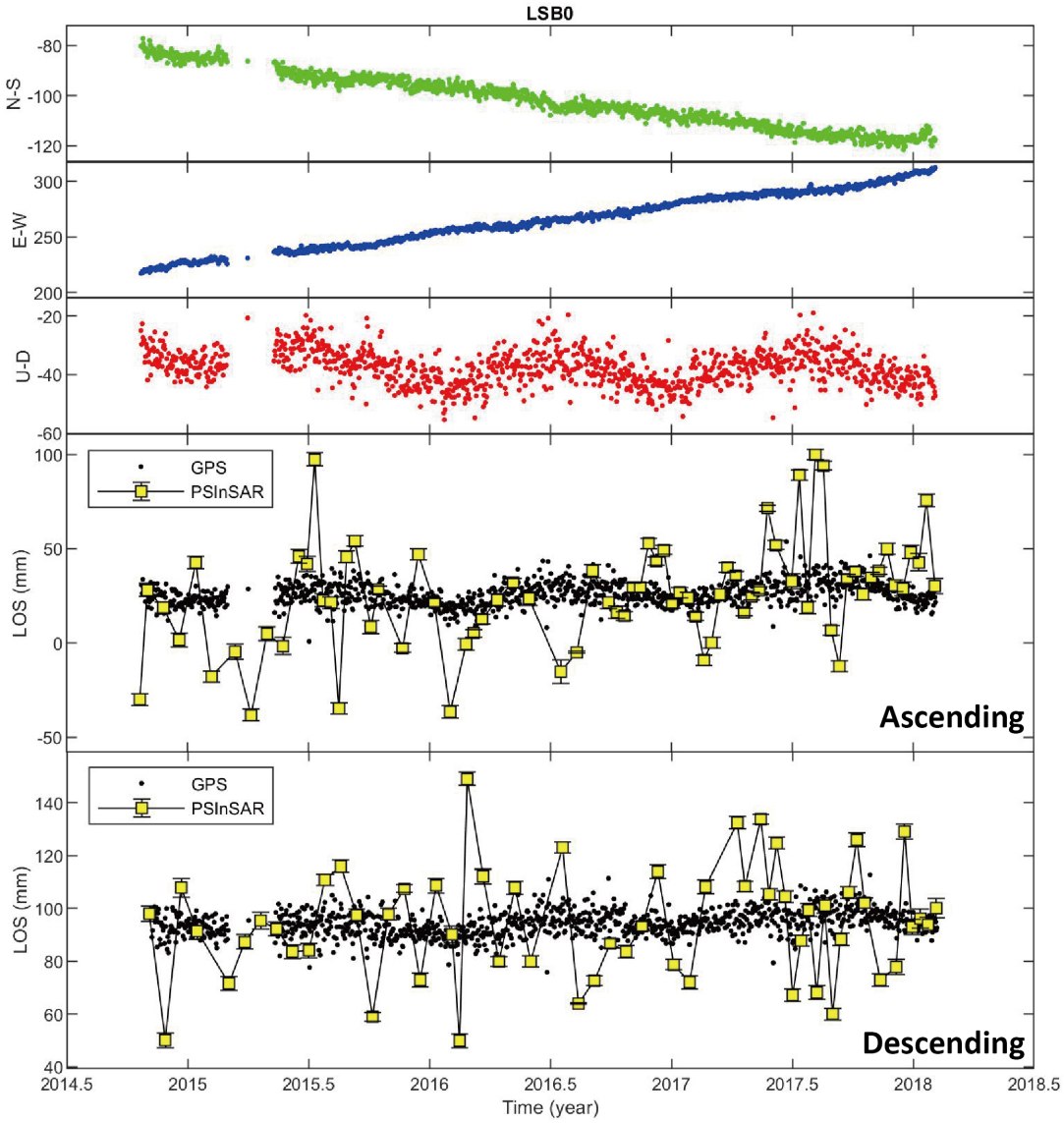


圖6-3：2014-2018年GNSS測站LSB0三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-3：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station LSB0 between 2014 to 2018. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

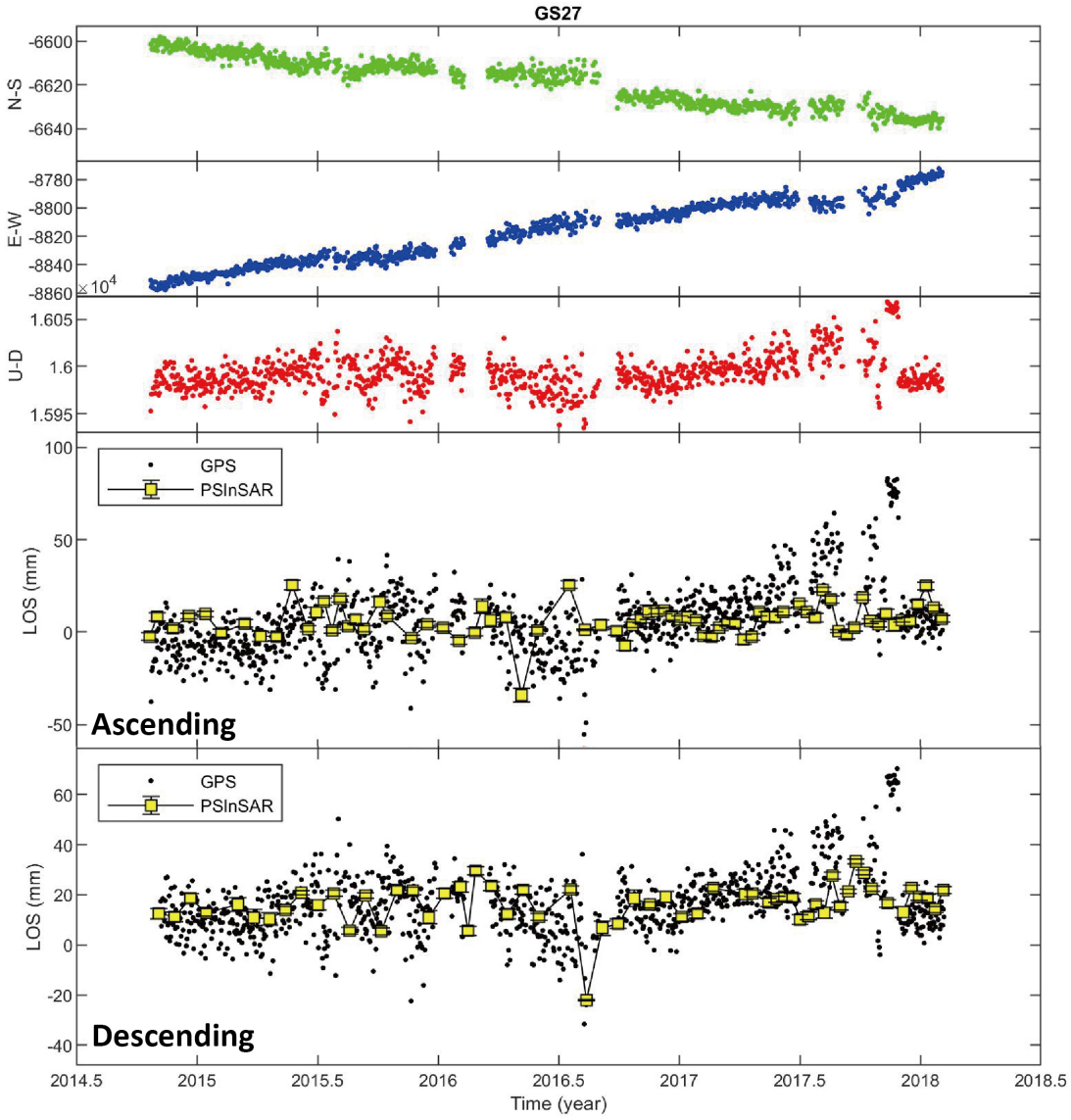


圖6-4：2014-2018年GNSS測站GS27三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-4：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station GS27 between 2014 to 2018. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

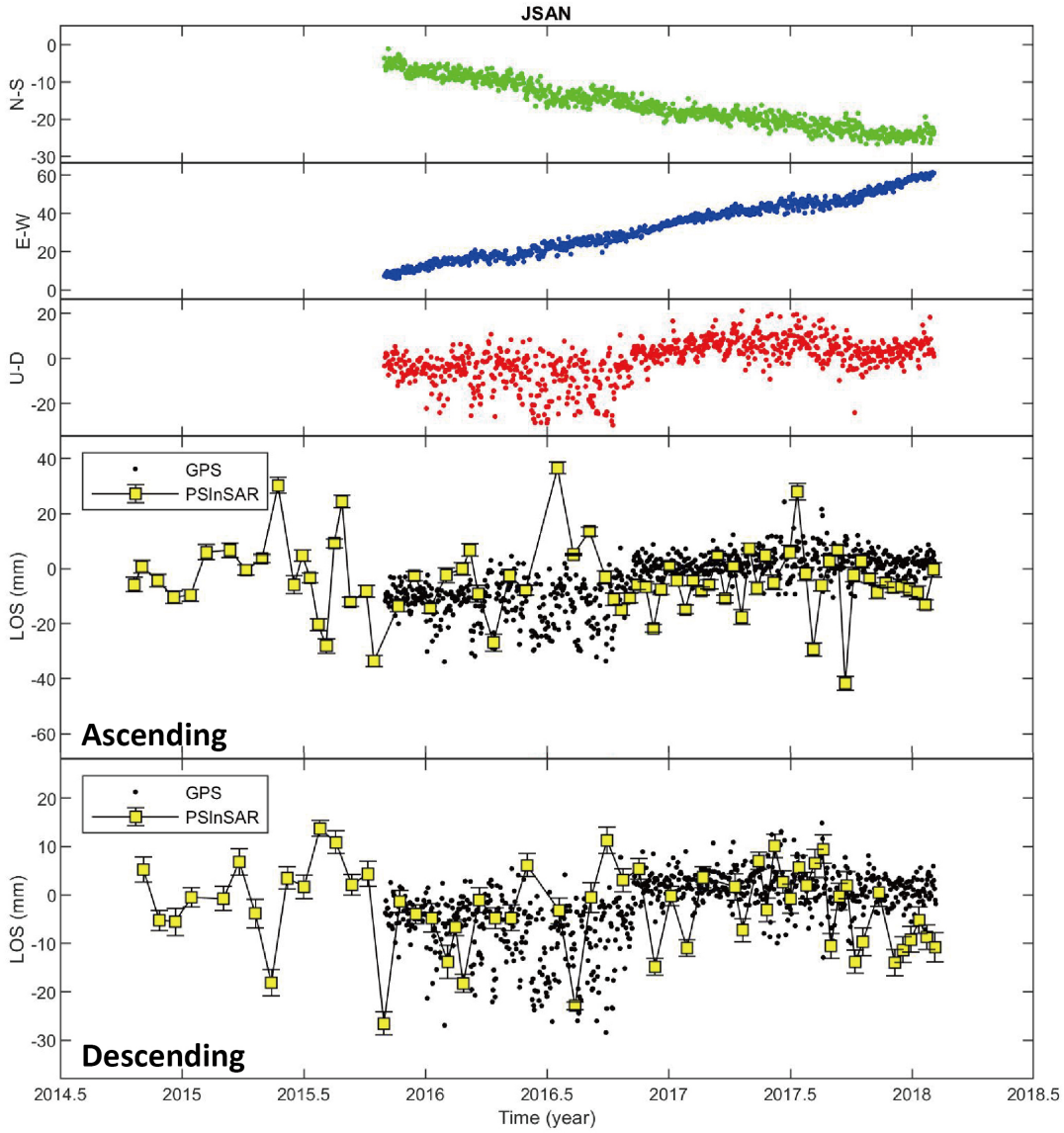


圖6-5：2014-2018年GNSS測站JSAN三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-5：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station JSAN between 2014 to 2018. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

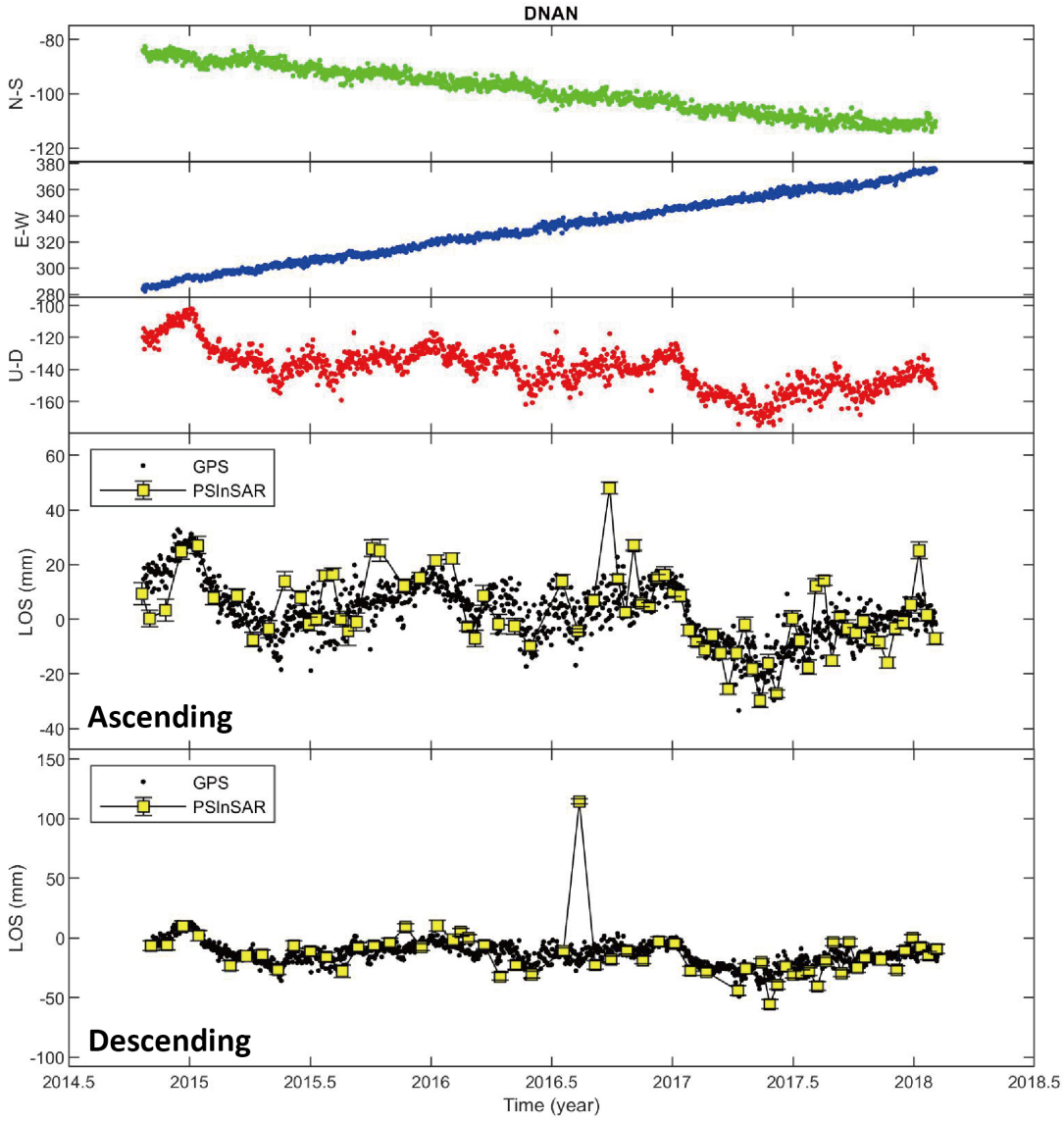


圖6-6：2014-2018年GNSS測站DNAN三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-6：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station DNAN between 2014 to 2018. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

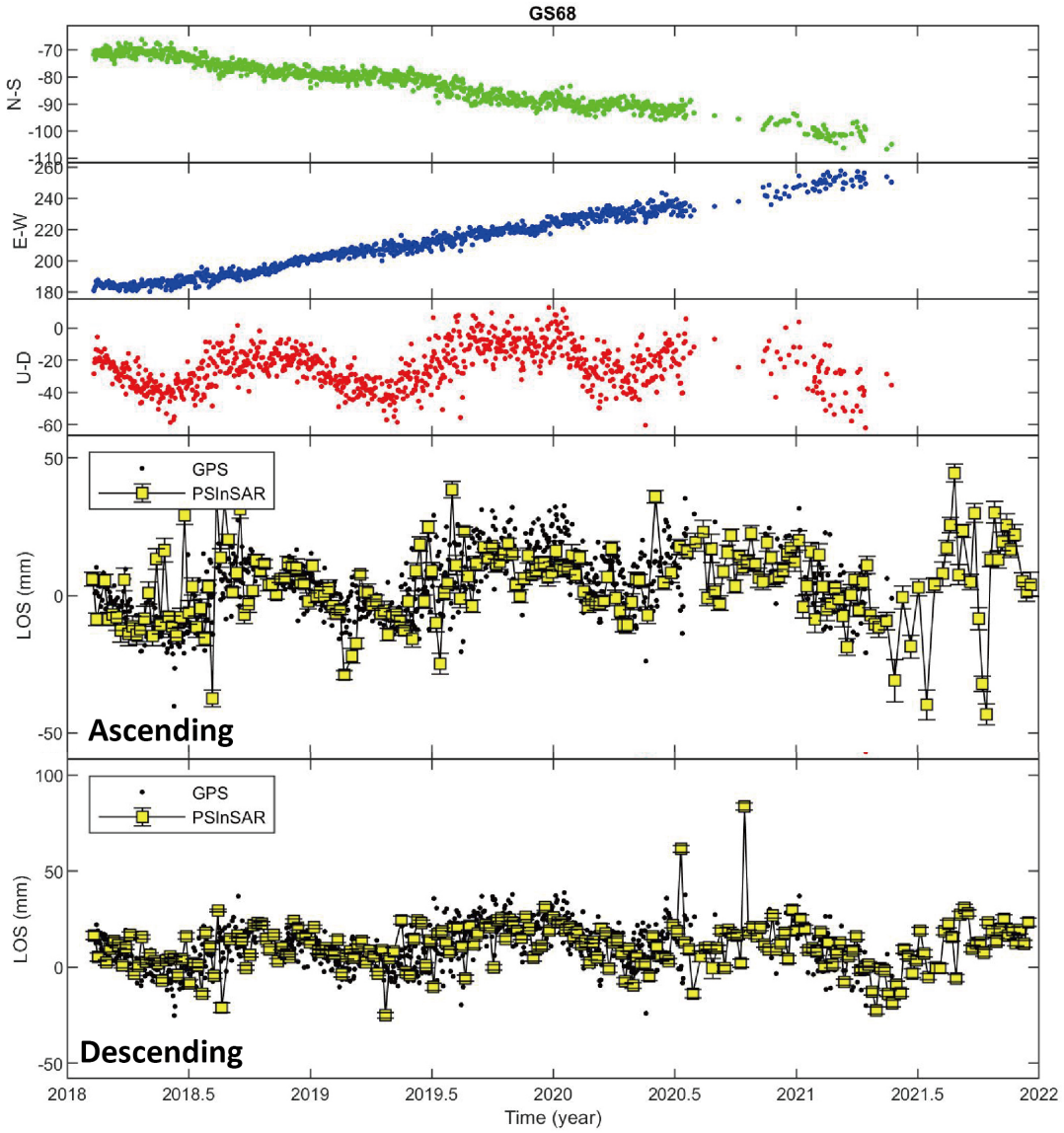


圖6-7：2018-2021年GNSS測站GS68三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-7：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station GS68 between 2018 to 2021. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

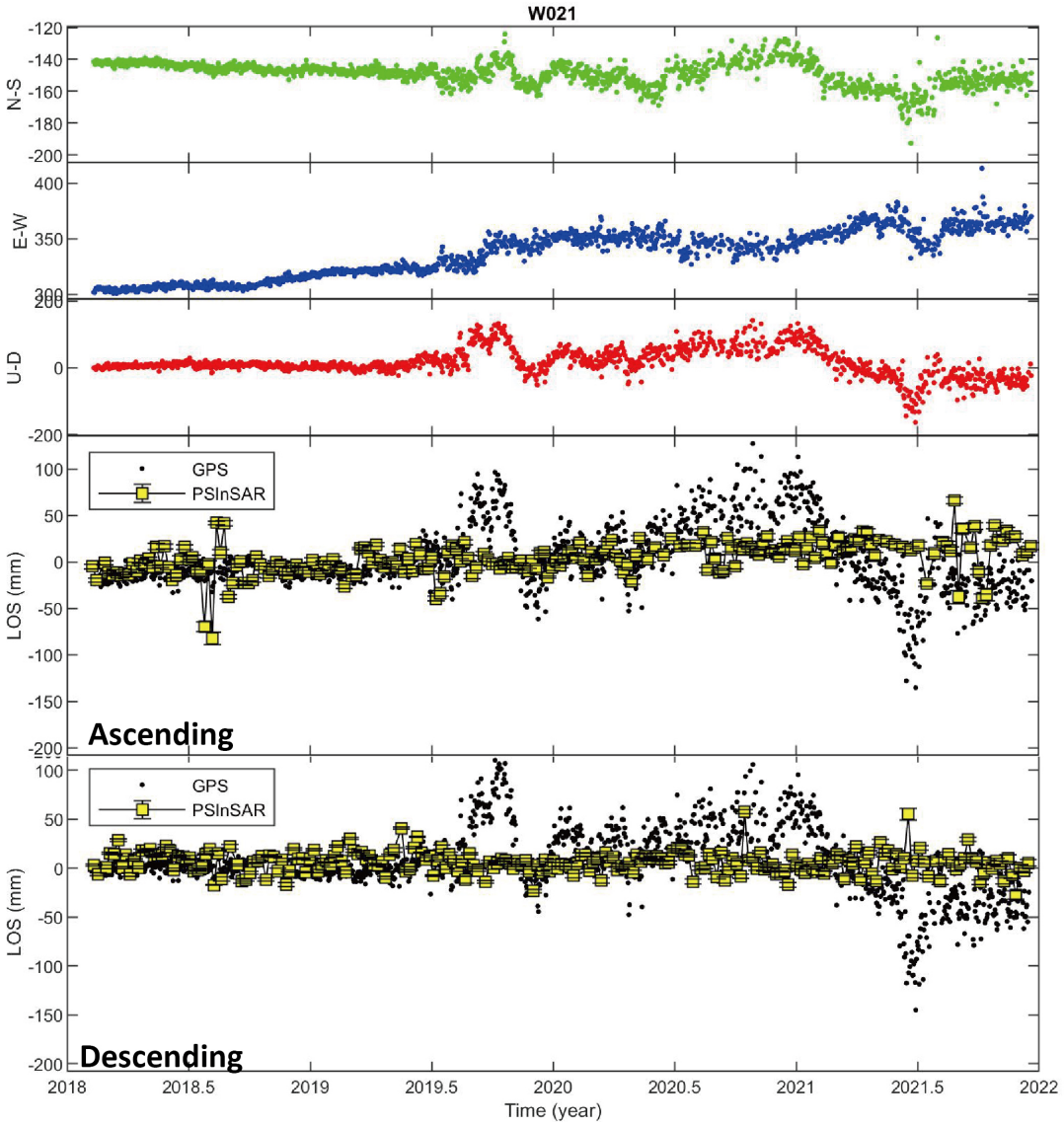


圖6-8：2018-2021年GNSS測站W021三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-8：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station W021 between 2018 to 2021. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

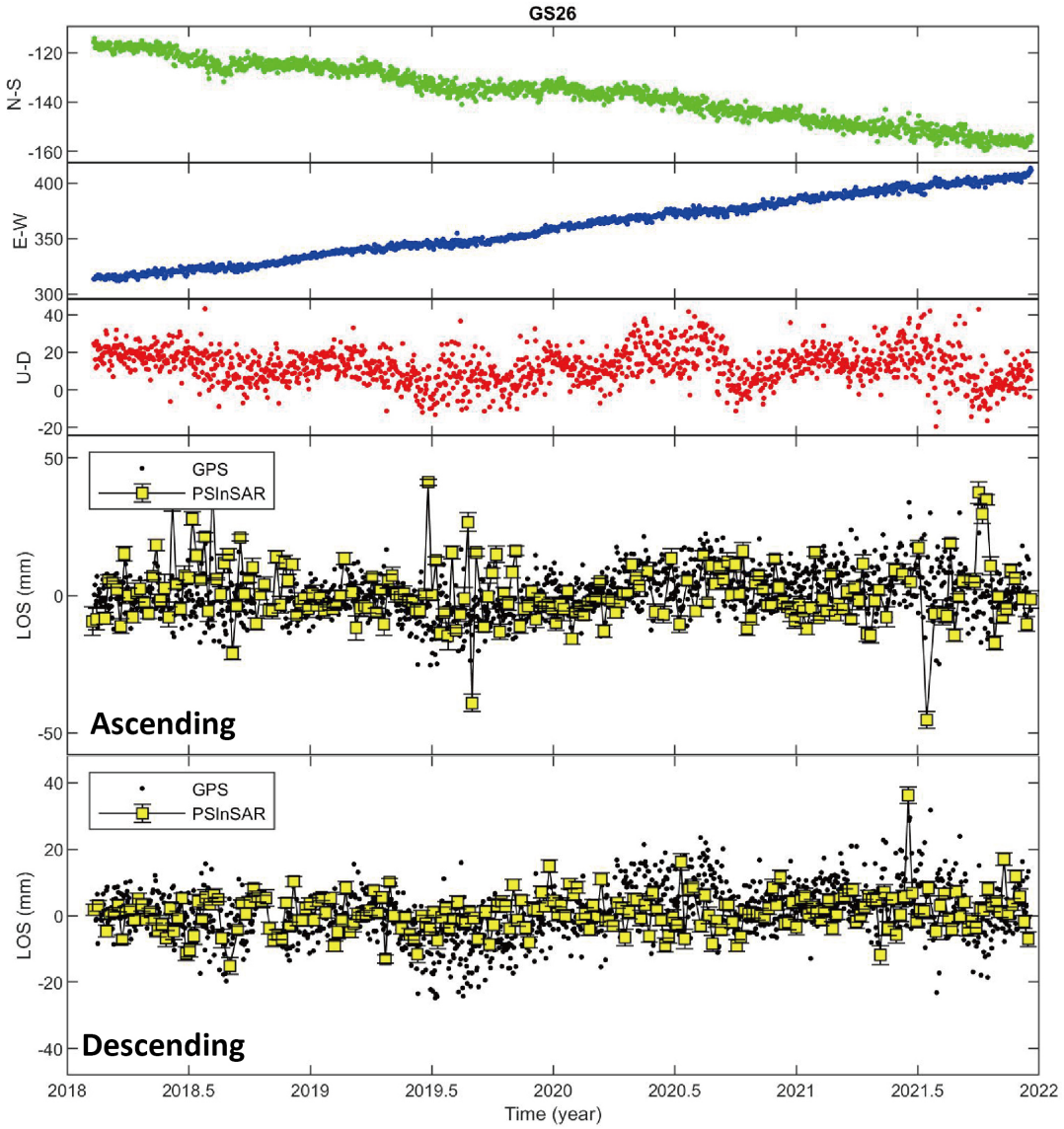


圖6-9：2018-2021年GNSS測站GS26三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-9：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station GS26 between 2018 to 2021. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

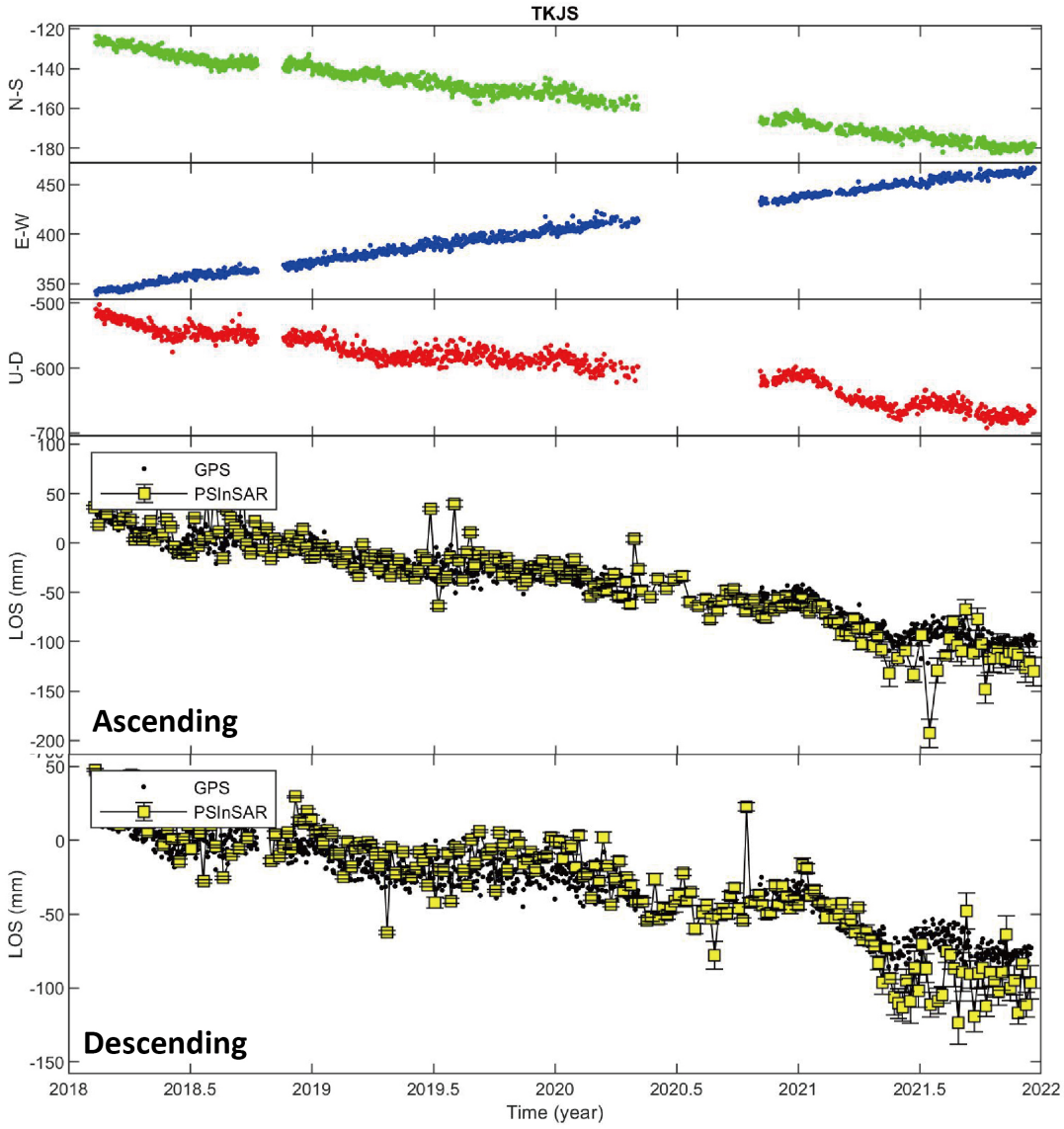


圖6-10：2018-2021年GNSS測站TKJS三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-10：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station TKJS between 2018 to 2021. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

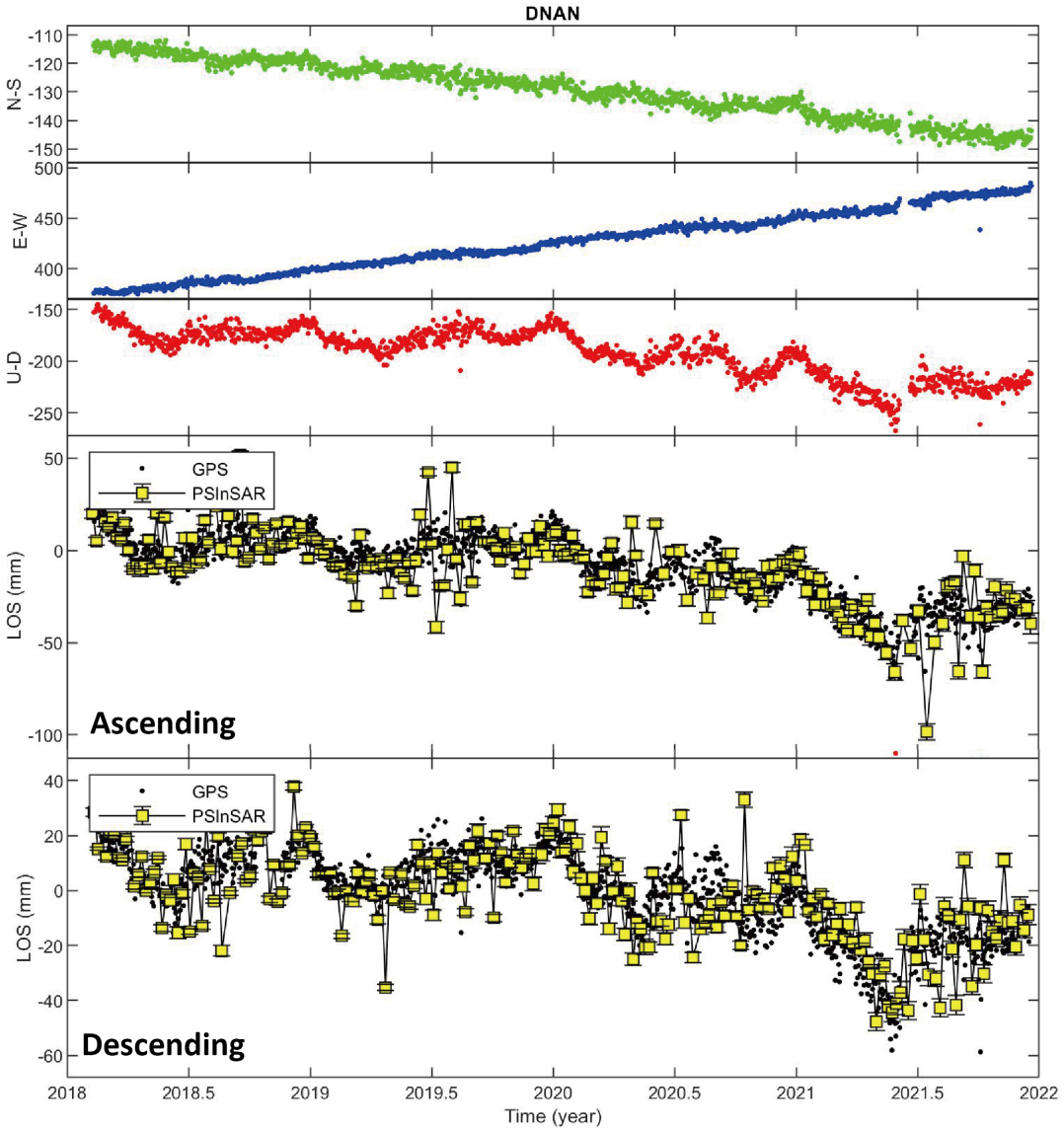


圖6-11：2018-2021年GNSS測站DNAN三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-11：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station DNAN between 2018 to 2021. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

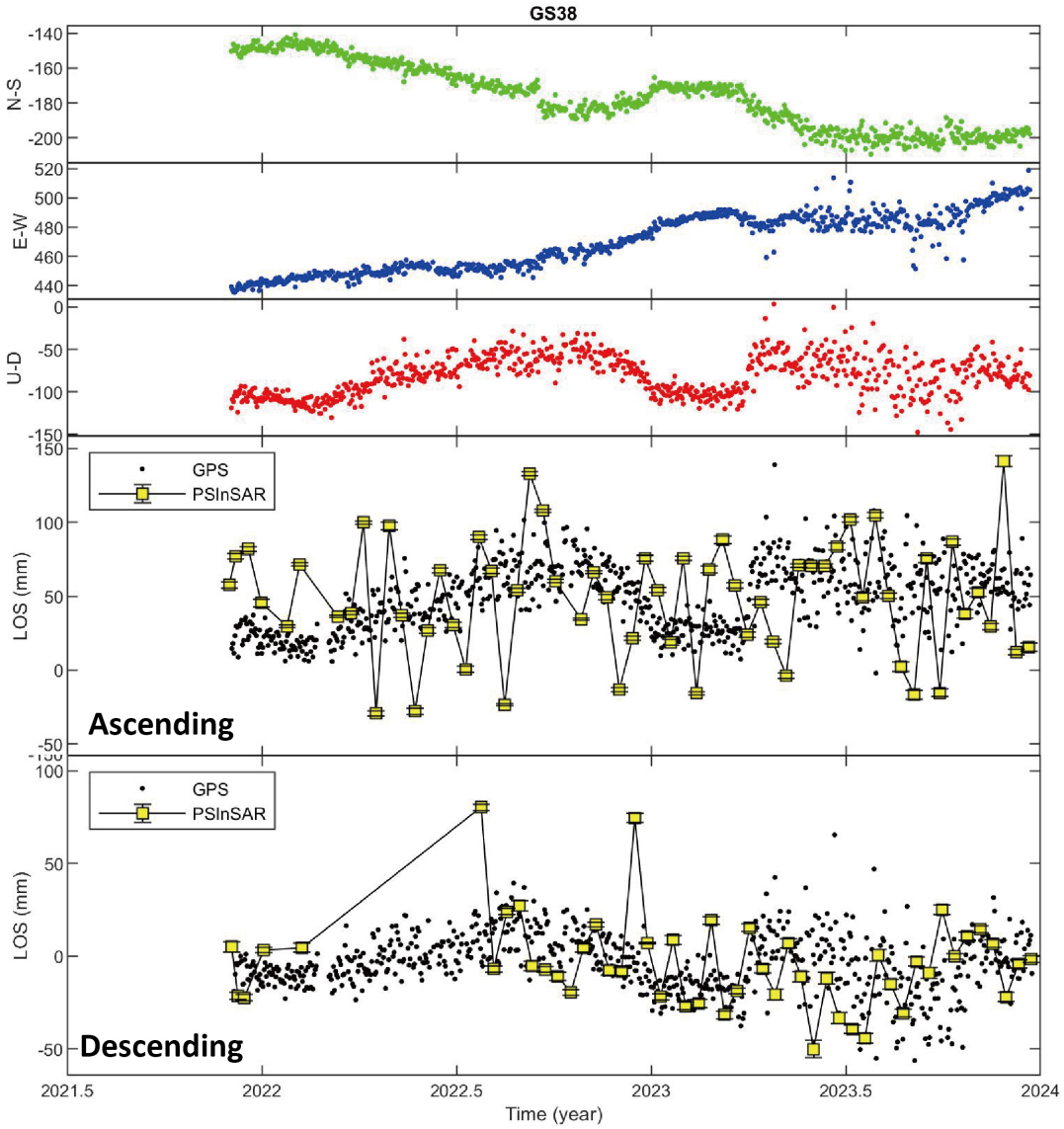


圖6-12：2022-2023年GNSS測站GS38三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-12：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station GS38 between 2022 to 2023. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

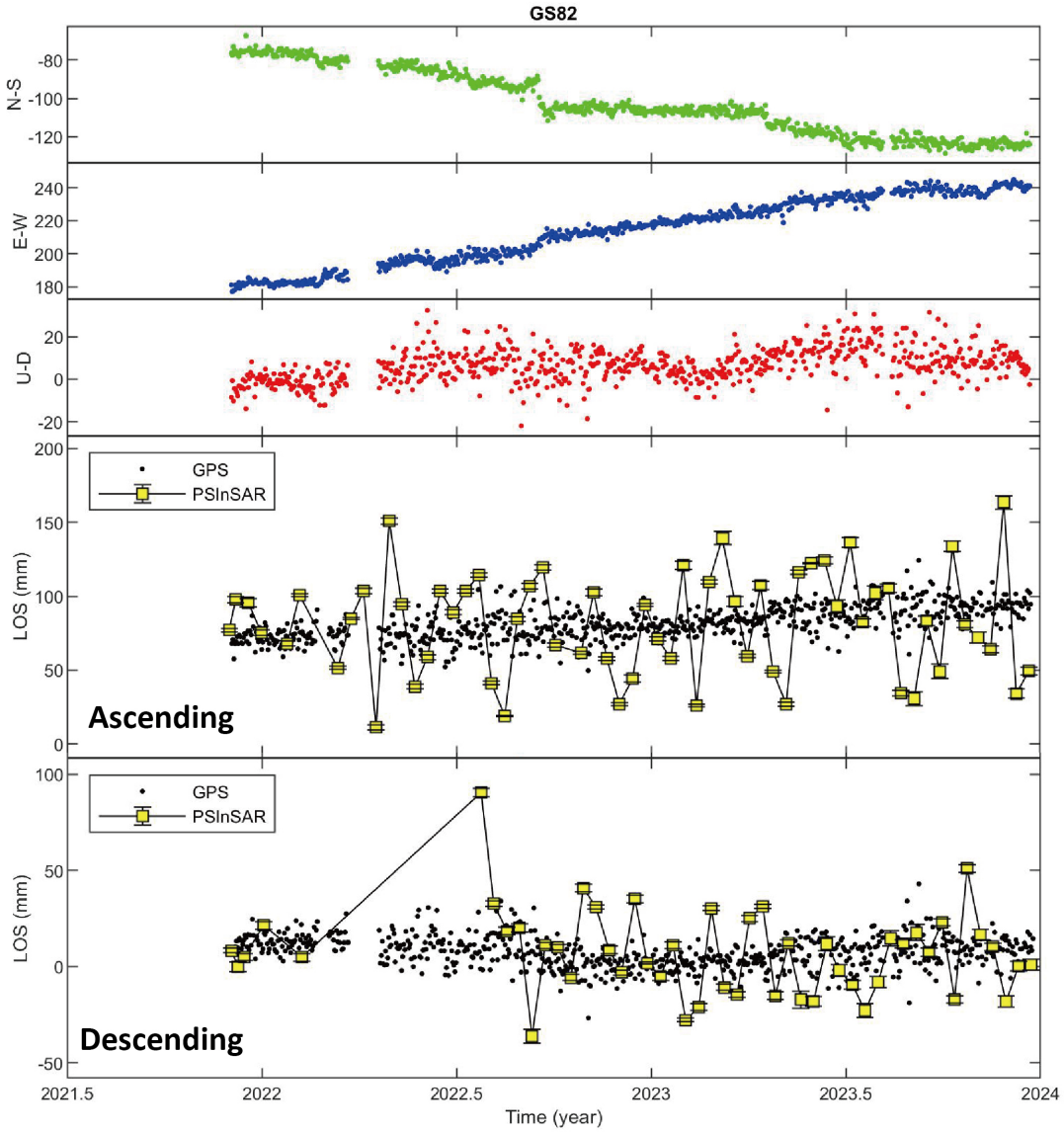


圖6-13：2022-2023年GNSS測站GS82三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-13：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station GS82 between 2022 to 2023. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

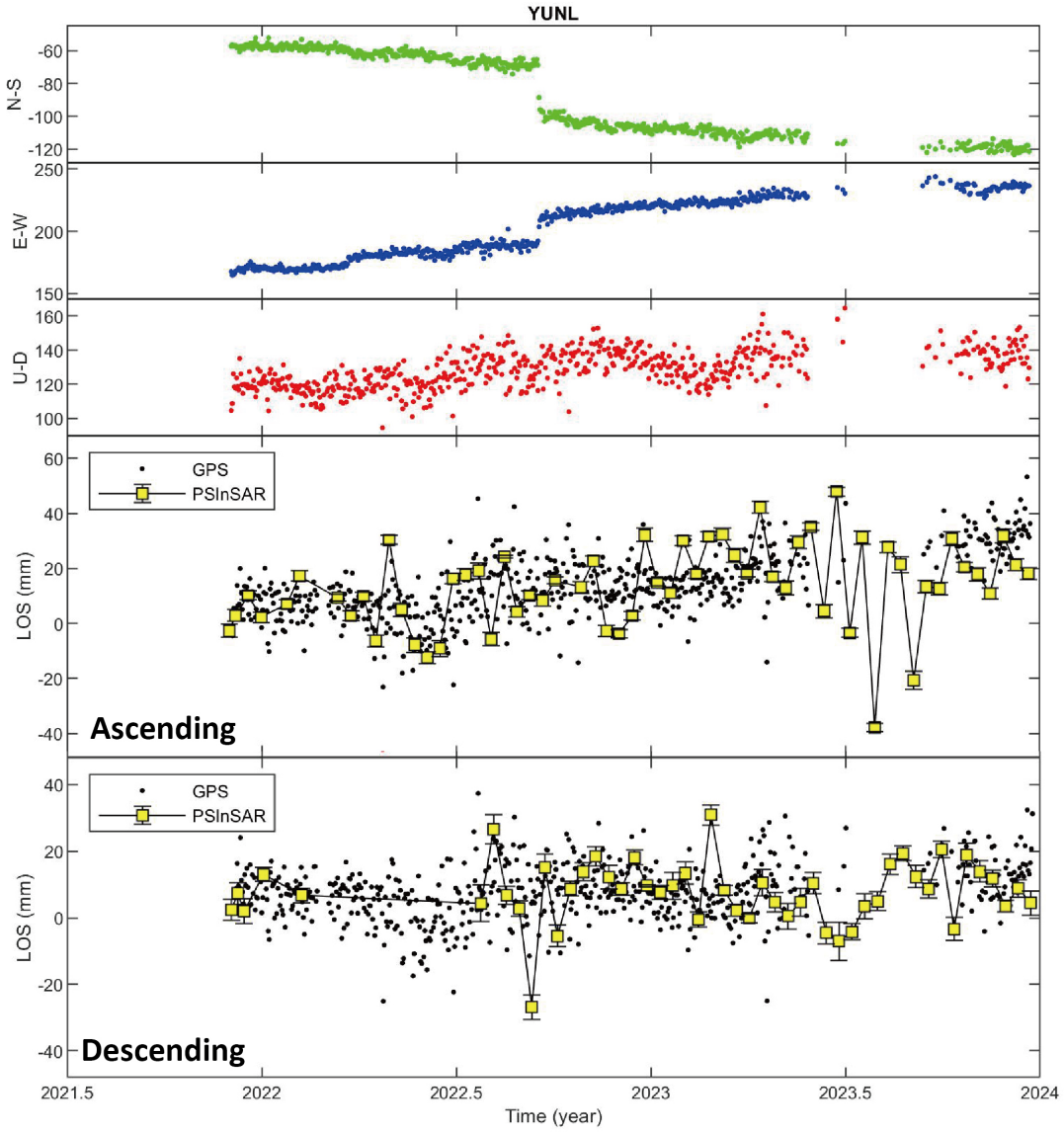


圖6-14：2022-2023年GNSS測站YUNL三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-14：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station YUNL between 2022 to 2023. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

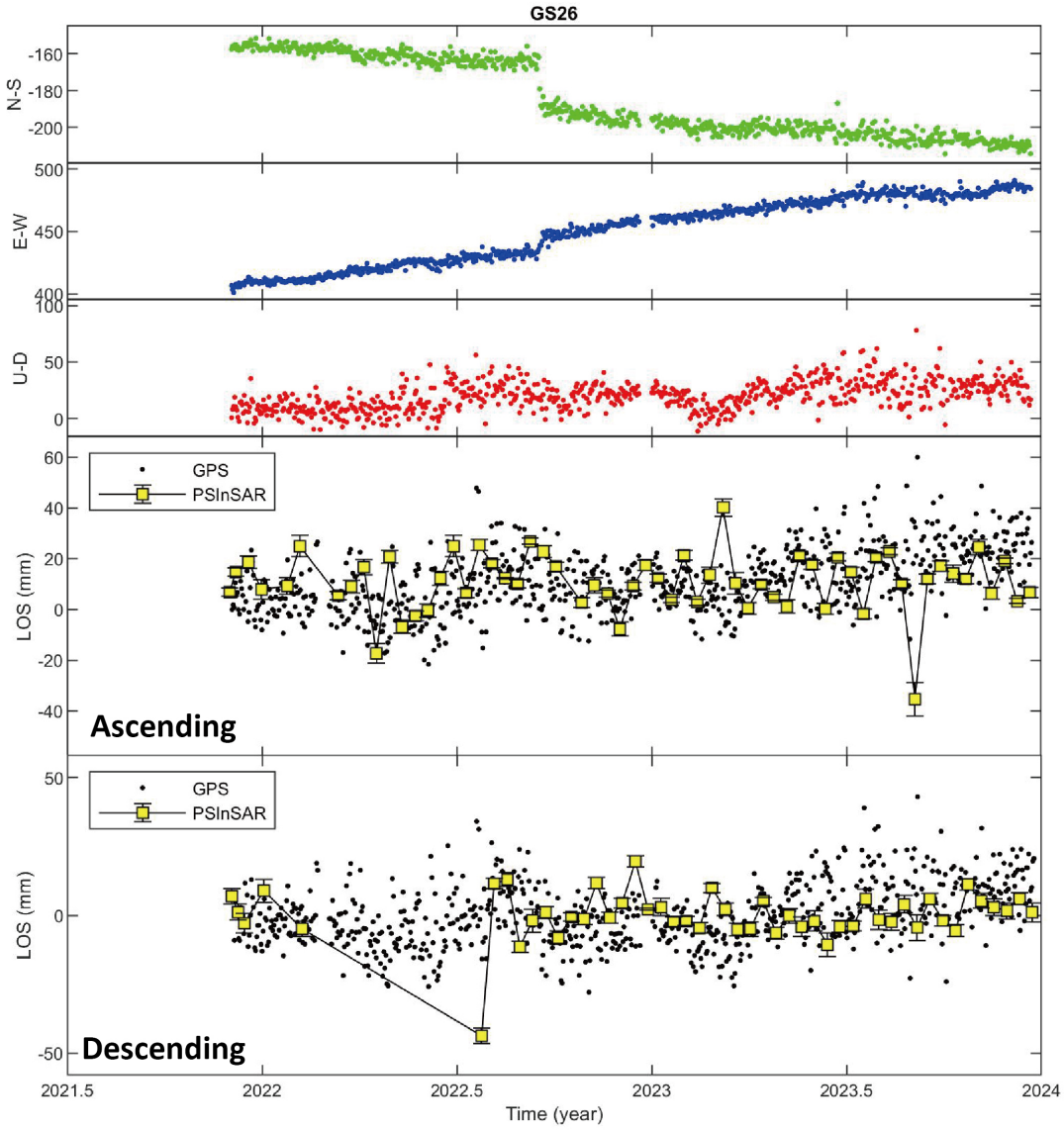


圖6-15：2022-2023年GNSS測站GS26三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-15：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station GS26 between 2022 to 2023. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

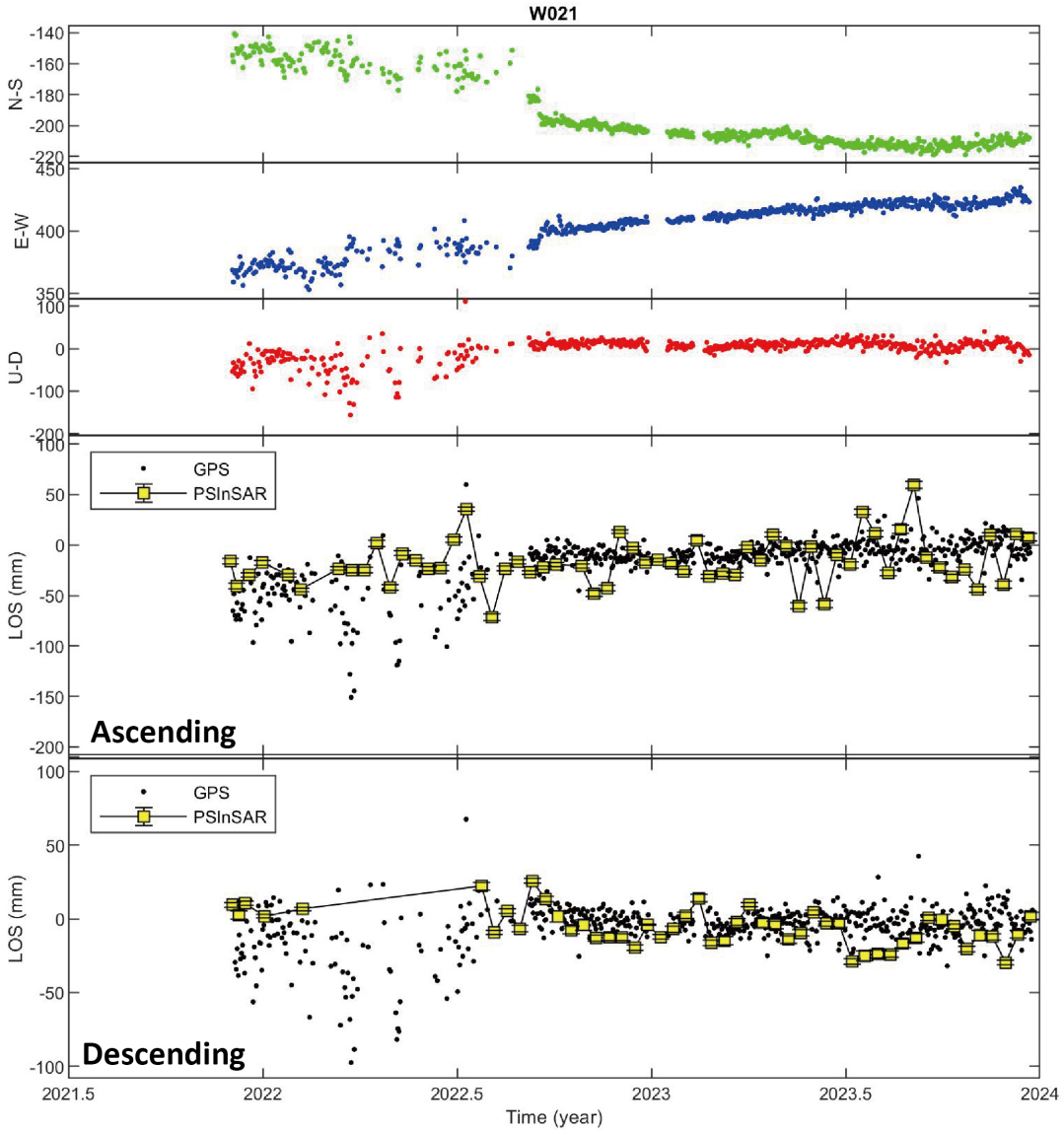


圖6-16：2022-2023年GNSS測站W021三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-16：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station W021 between 2022 to 2023. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

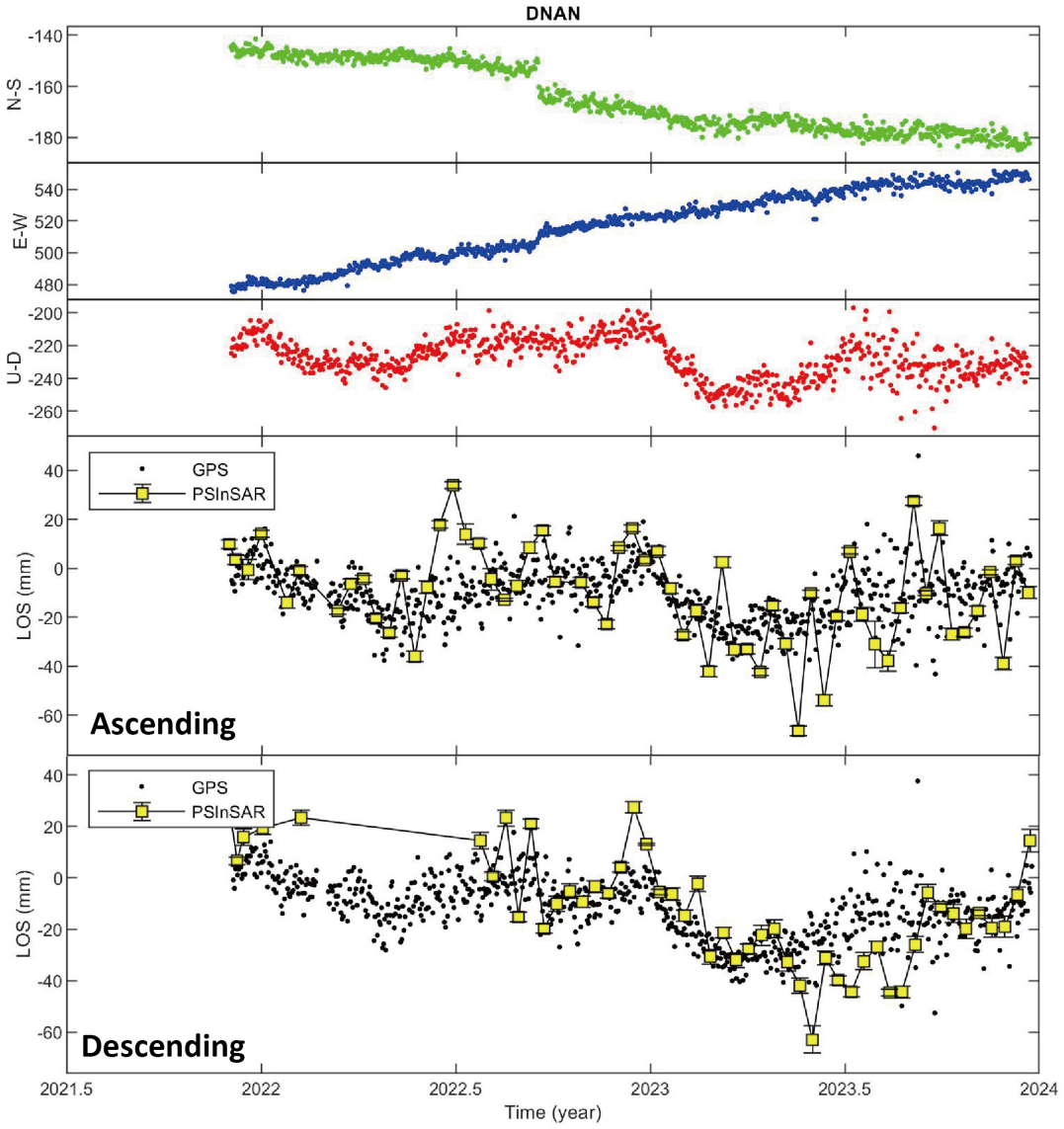


圖6-17：2022-2023年GNSS測站DNAN三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-17：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station DNAN between 2022 to 2023. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

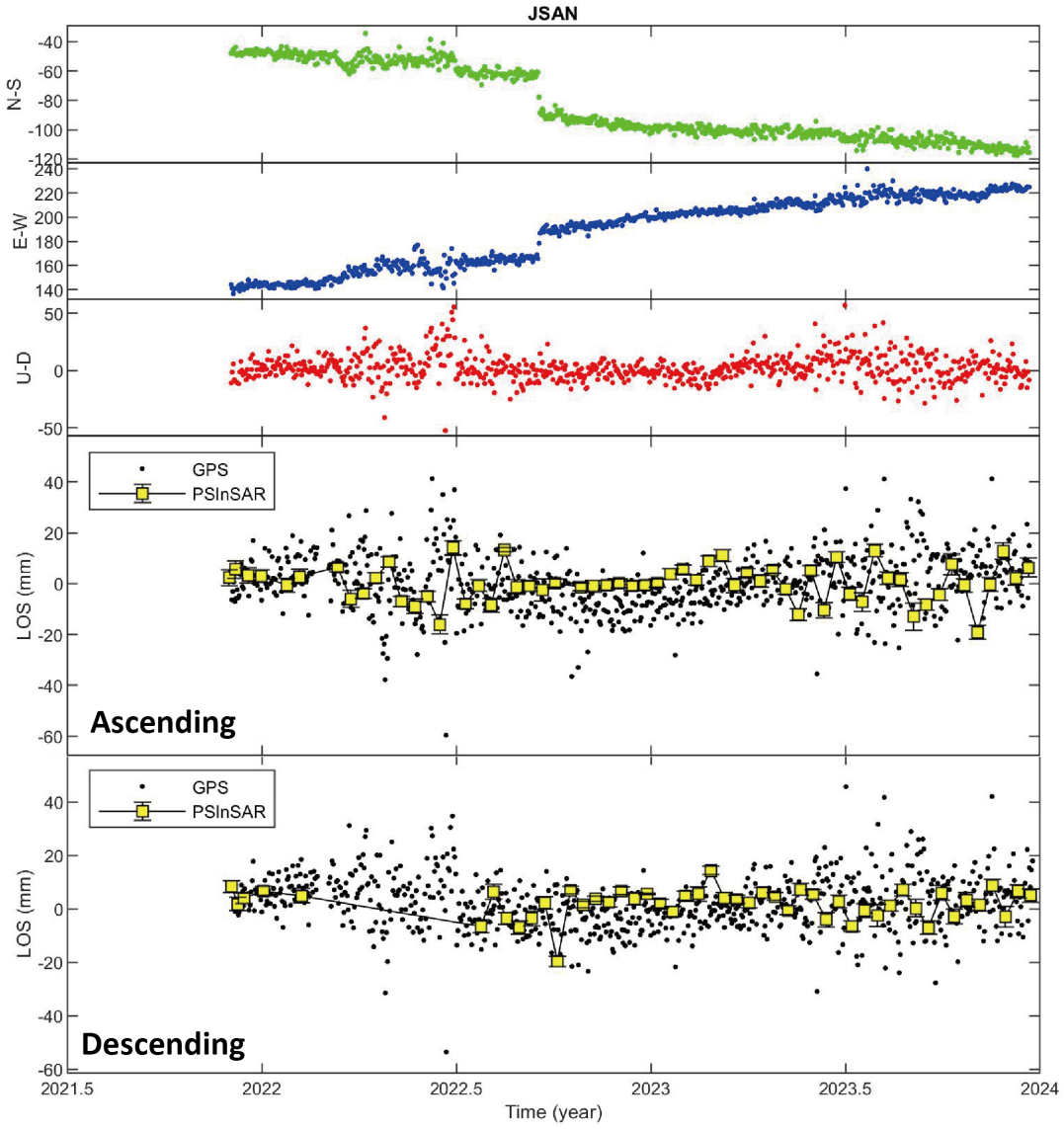


圖6-18：2022-2023年GNSS測站JSAN三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至升軌道與降軌道方向LOS（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。

Figure 6-18：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station JSAN between 2022 to 2023. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position in the ascending and descending orbital directions (LOS, black dots) and PSI time series (yellow squares).

6-1-2 20220918地震影響

2022年09月18日的臺東關山地震對GNSS測站有同震位移，多數測站在東西向及南北向不連續（offset）的情形比垂直向明顯，計算時間序列及擬合速度場時，我們並未對同震位移進行修正，綜合三方向而投影至LOS方向的時間序列時同震錯移不如預期明顯。

PSI同樣觀察LOS方向的距離變化，對於垂直方向的較東西向敏感，南北向的變化對LOS距離變化非常小，因此受到此次同震的影響不如GNSS東西、南北方向明顯，升軌道方向有變化的站有GS38（圖6-12）、GS82（圖6-13）、DNAN（圖6-17），降軌道方向有變化的站有GS82（圖6-13）、YUNL（圖6-14）、W021（圖6-16）、DNAN（圖6-17），鄰近參考站PINT東邊的JSAN（圖6-18）則是降軌道有變化。

2022年至2023年所有GNSS測站與參考站PINT的直線距離介於4.2~67.5公里之間，我們挑選最近的的JSAN測站（4.2公里）、距離居中的STES測站（31.6公里）以及最遠的GS36測站（67.5公里），檢視這三站與參考站的原始三分量時間序列（International Terrestrial Reference Frame, ITRF框架），發現在垂直向幾乎沒有同震變形，東西向與南北向的同震變形隨著距離逐漸減少（圖6-19），將所有的測站相對於參考站後，會發現鄰近的JSAN測站同震位移幾乎被修正（圖6-20），而隨距離增加顯示GNSS時間序列在東西向與南北向有不連續（offset）的情形（圖6-21~圖6-22）。

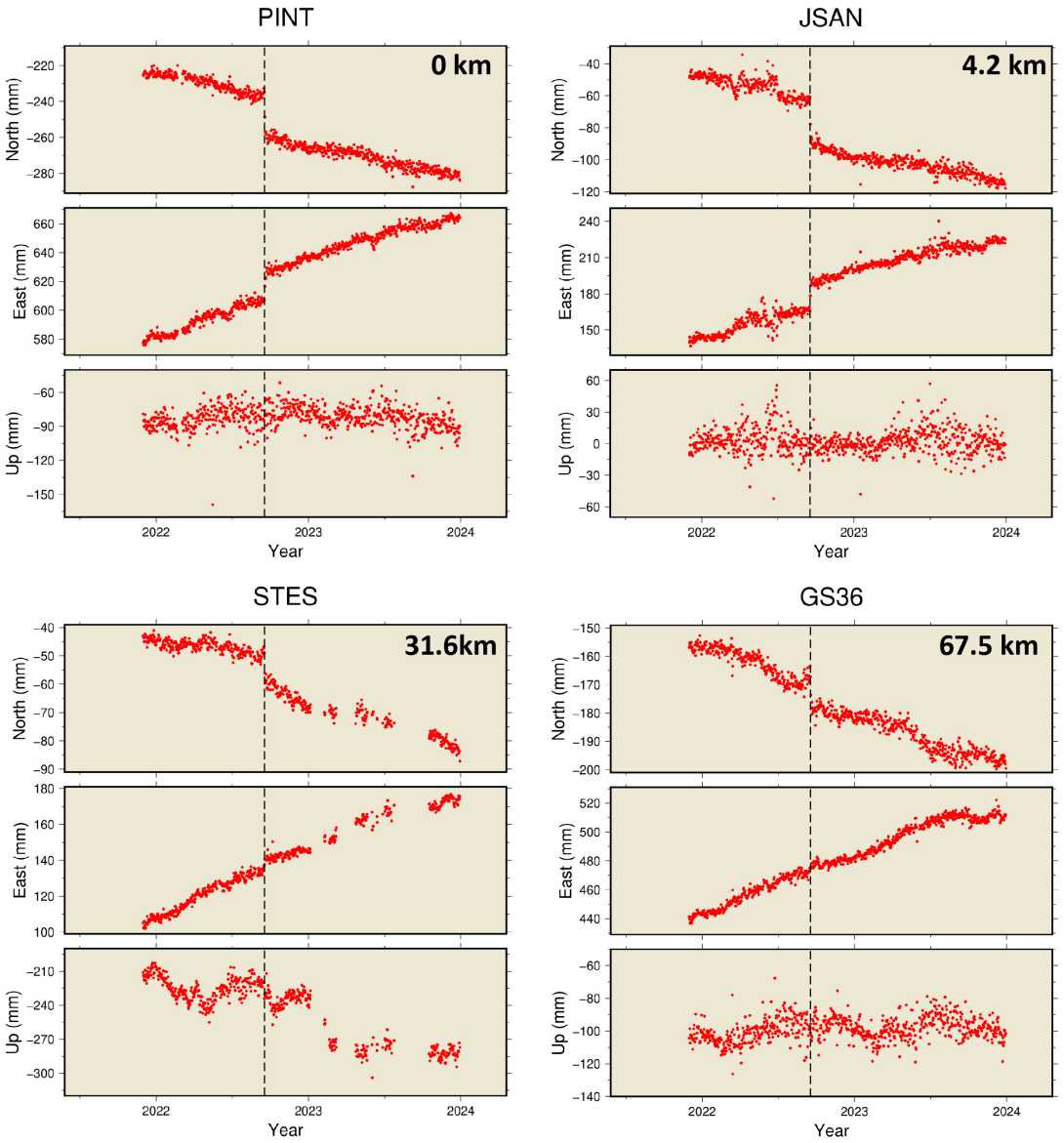


圖6-19：2022-2023 年 GNSS 測站三分量 GNSS 時間序列與。左上為PINT測站，右上為JSAN測站，左下為STES測站，右下為GS36測站。公里數為各測站與PINT測站直線距離。自上而下為 GNSS 南-北向、東-西向及垂直向時間序列。

Figure 6-19：The 2022-2023 GNSS station three-component GNSS time series. The top left is the PINT station, the top right is the JSAN station, the bottom left is the STES station, and the bottom right is the GS36 station. The distances are the straight-line distances between each station and the PINT station. From top to bottom, the time series are the GNSS North-South, East-West, and Vertical components.

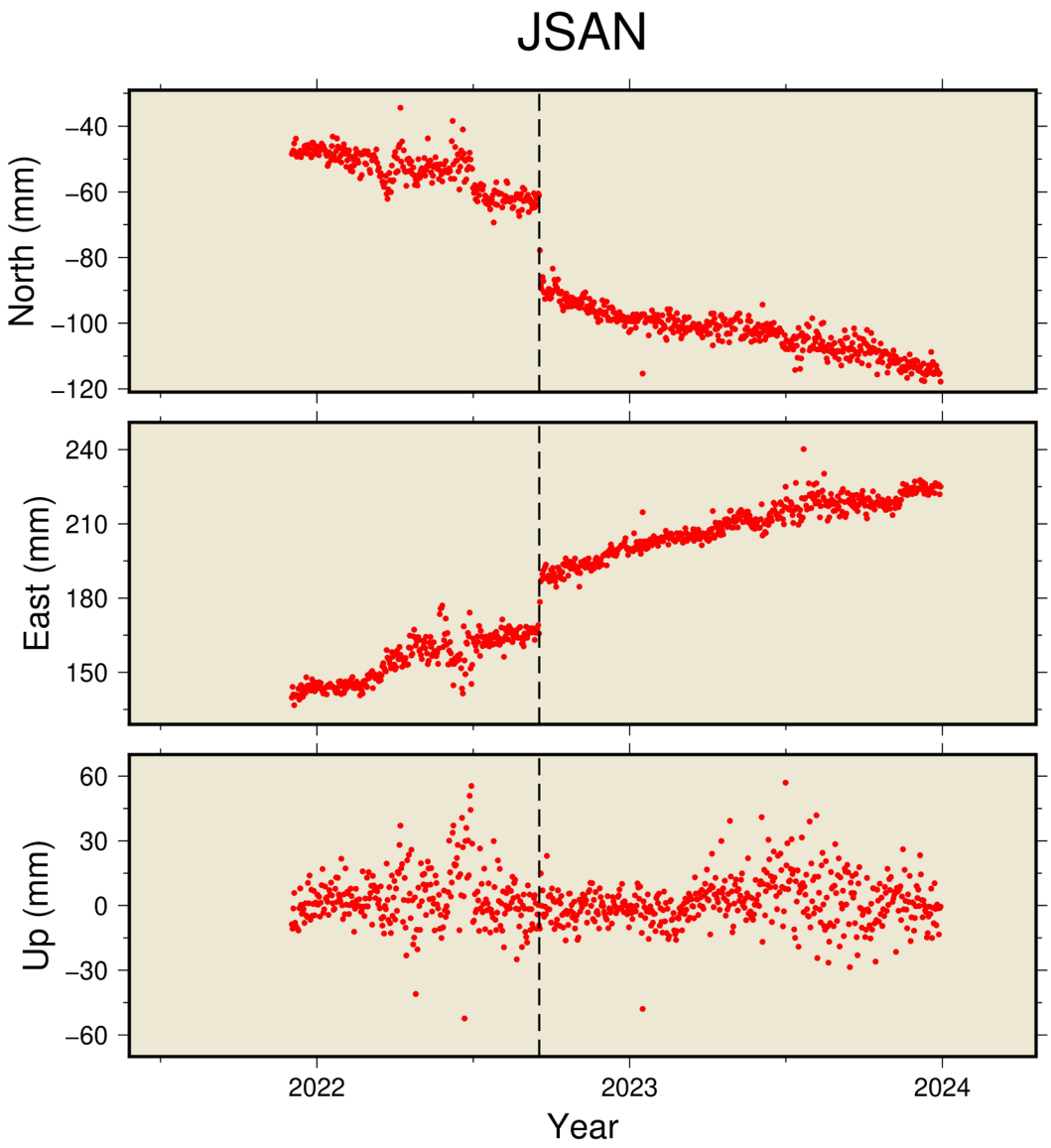


圖6-20：2022-2023年GNSS測站JSAN三分量時間序列。左圖為ITRF框架時間序列，右圖為相對PINT測站的時間序列，自上而下為 GNSS 南-北向、東-西向及垂直向時間序列。

Figure 6-20：The 2022-2023 GNSS station JSAN three-component GNSS time series. The left figure shows the time series in the ITRF frame, while the right figure shows the time series relative to the PINT station. From top to bottom, the time series are the GNSS North-South, East-West, and Vertical components.

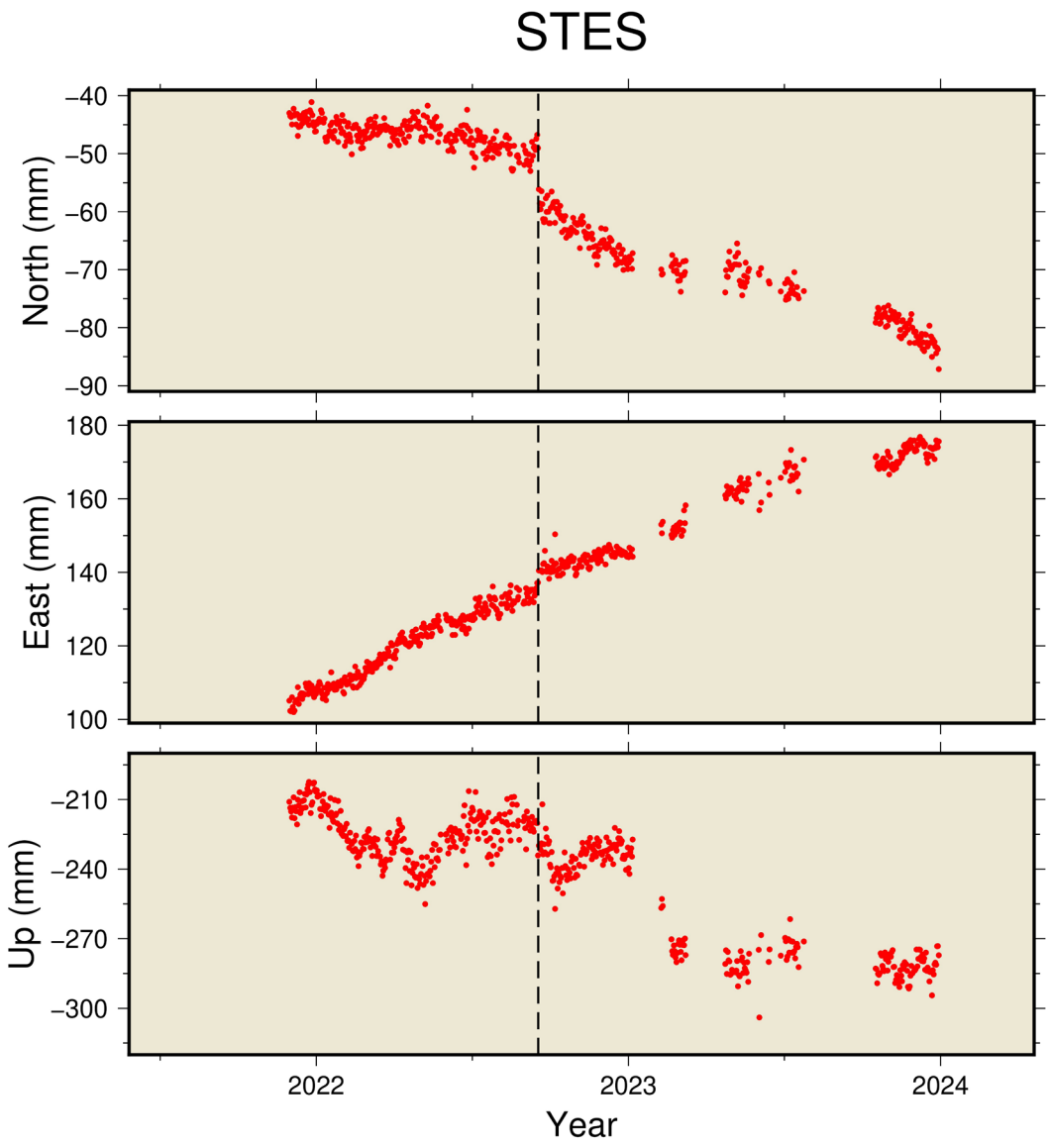


圖6-21：2022-2023年GNSS測站STES三分量時間序列。左圖為ITRF框架時間序列，右圖為相對PINT測站的時間序列，自上而下為 GNSS 南-北向、東-西向及垂直向時間序列。

Figure 6-21：The 2022-2023 GNSS station STES three-component GNSS time series. The left figure shows the time series in the ITRF frame, while the right figure shows the time series relative to the PINT station. From top to bottom, the time series are the GNSS North-South, East-West, and Vertical components.

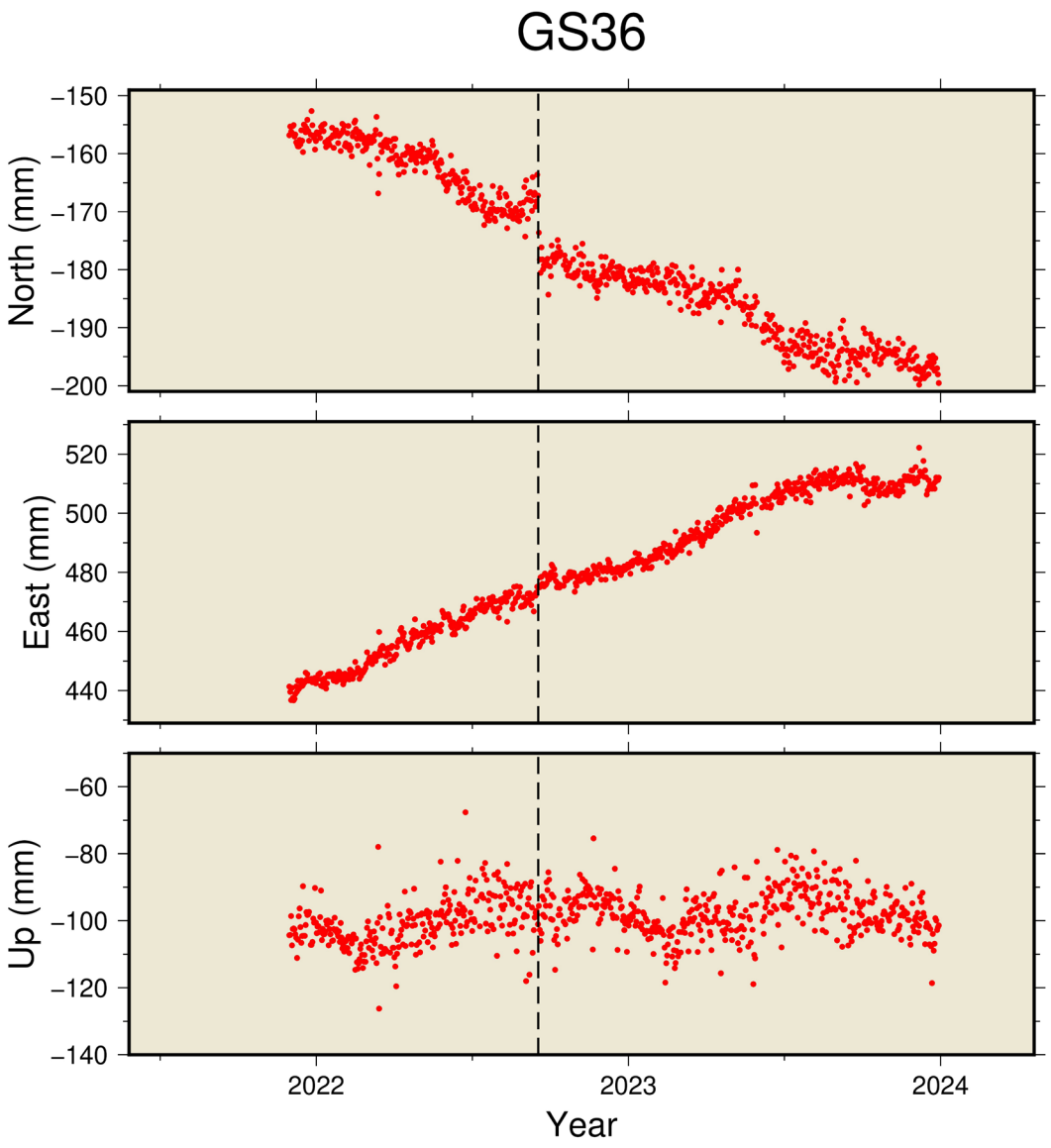


圖6-22：2022-2023年GNSS測站GS36三分量時間序列。左圖為ITRF框架時間序列，右圖為相對PINT測站的時間序列，自上而下為 GNSS 南-北向、東-西向及垂直向時間序列。

Figure 6-22：The 2022-2023 GNSS station GS36 three-component GNSS time series. The left figure shows the time series in the ITRF frame, while the right figure shows the time series relative to the PINT station. From top to bottom, the time series are the GNSS North-South, East-West, and Vertical components.

6-1-3 GNSS時間序列

在今年計畫觀測區域北端選取三個站位，選取與GNSS站位同樣位置的雷達資料與GNSS資料做兩站之間相對變化比較。在北端選取了GS39, LSB0,以及S016等三個站做比較。臺中都會區的時間序列比對中，在升降軌道的成果顯示GS39~LSB0的相對距離呈現季節性的變化（數值與成果圖受到outlier影響有壓縮），雷達資料與GNSS投影資料趨勢大致類似，但是數量有差異，可能是雷達取樣都是在1公里平方範圍內的所有數據平均（並且標示標準差）導致的差異。GS39~S016相對變化也呈現一些季節性，但是與GS39/LSB0相對比較，升軌有數值變大、降軌有數值變小的趨勢，顯現出S016具季節性往西移動的狀況（圖4-48~49D）。GS39/LSB0對顯示雖然彰化斷層兩側地表的變形速率沒有明顯差異，但是卻有季節性的接近與遠離，可能造成季節性速度差異。比較LSB0與S016相對GS39的時間序列，東邊的S016往西的分量比LSB0大，顯示車籠埔斷層東西兩側呈現壓縮。S016比LSB0受到的季節擾動小，推測靠近山區的地表季節性變化（乾濕季、地下水）的影響比較小。南北向趨勢一樣，量值也幾乎相同，表示2018年至2021年南北的走向滑移影響不大。相對GS39，LSB0在濕季時的地表變形是以向西和抬生的運動為主，在乾季的時候，地表變形是以向東和沈降為主（圖6-22）。

研究區域中段選取了CAOT, GS83, 與FUQE 分別位在車籠埔斷層以西、車籠埔斷層與大茅埔雙冬斷層中間、以及大茅埔雙冬斷層以東。CAOT~GS83（圖4-52）相對於CAOT顯示車籠埔斷層以東的地塊相對於以西地塊的運動，綜合解果顯示兩側持續有速度差異，這樣的結果在東西向速度場與垂直速度場都可以看到（圖3-12, 3-13），與CAOT~FUQE（圖4-53）顯示車籠埔斷層西側相對車籠埔斷層東側以及大茅埔-雙冬斷層東側的變形（圖6-23），東側的FUQE向北及向西以及向上的分量皆大於西側的GS83，顯示車籠埔斷層東西兩側呈現壓縮，東側山區抬升速率較快，同樣的在東西向、垂直向的速度場可以觀察到此現象（圖3-12, 3-13）。

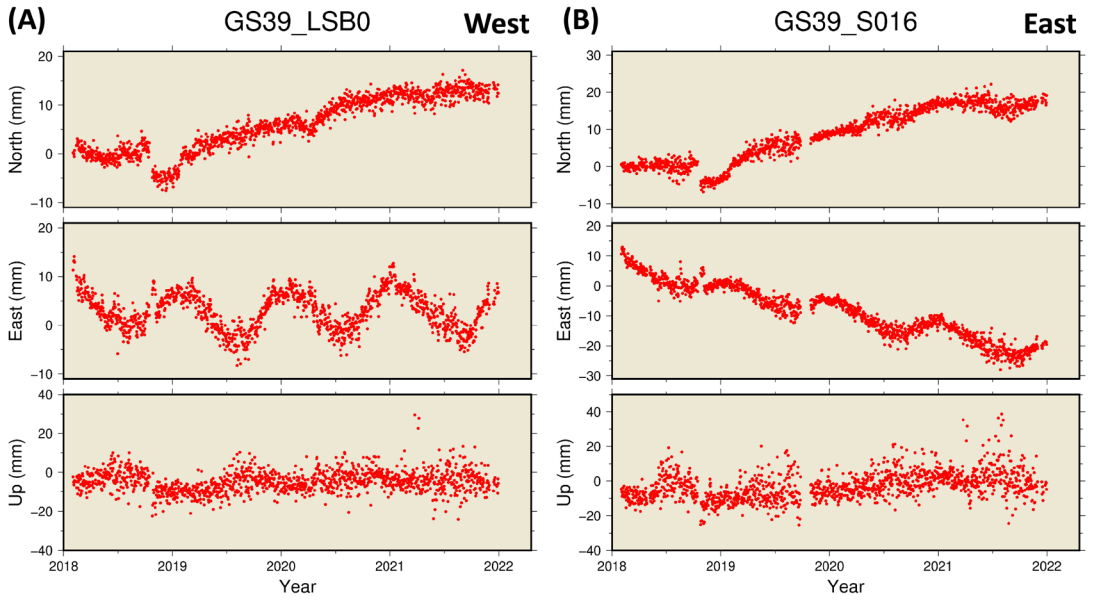


圖6-23：GNSS測站三分量時間序列。（A）LSB0相對GS39，（B）S016相對GS39，由上至下分別為南北向、東西向與垂直向時間序列。

Figure 6-23：GNSS Station Three-Component Time Series. (A) LSB0 relative to GS39, (B) S016 relative to GS39, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom.

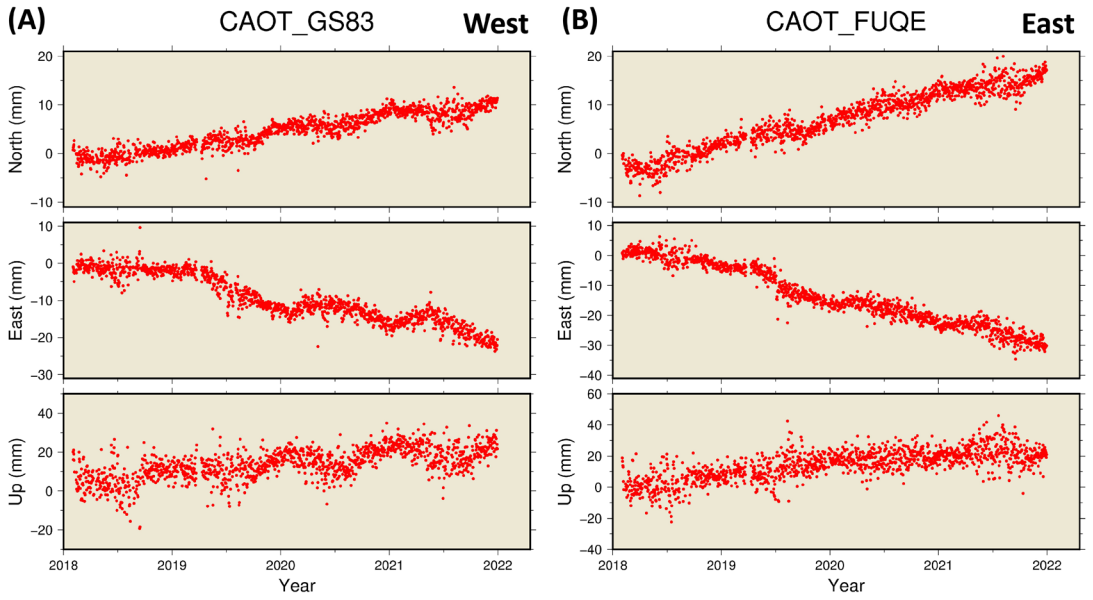


圖6-24：GNSS測站三分量時間序列。（A）GS83相對CAOT，（B）FUQE相對CAOT，由上至下分別為南北向、東西向與垂直向時間序列。

Figure 6-24：GNSS Station Three-Component Time Series. (A) GS83 relative to CAOT, (B) FUQE relative to CAOT, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom.

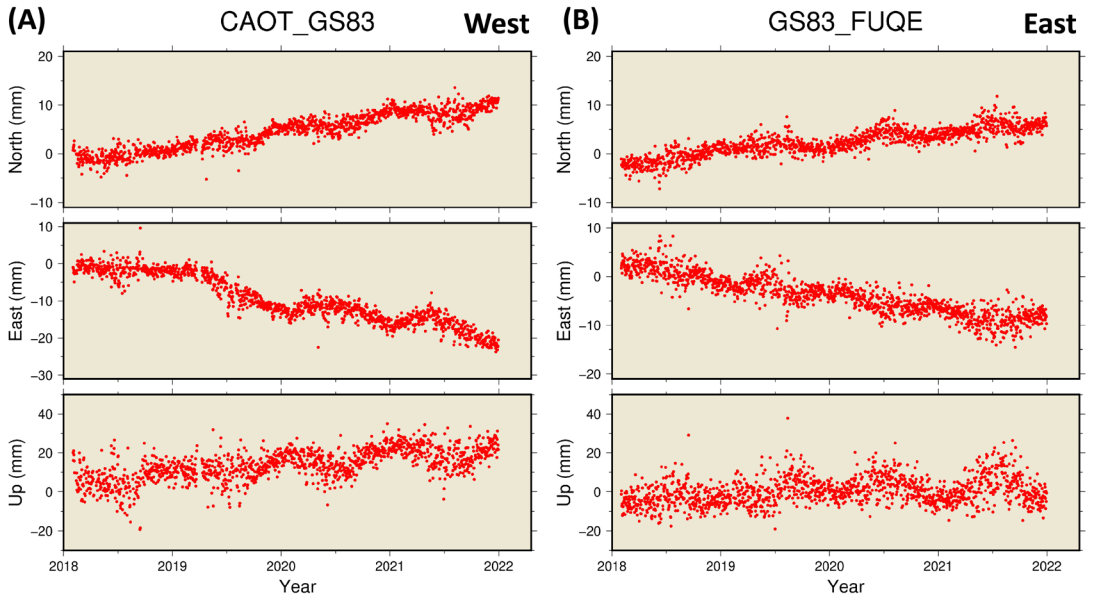


圖6-25：GNSS測站三分量時間序列。（A）GS83相對CAOT，（B）FUQE相對GS83，由上至下分別為南北向、東西向與垂直向時間序列。

Figure 6-25：GNSS Station Three-Component Time Series. (A) GS83 relative to CAOT, (B) FUQE relative to GS83, showing North-South, East-West, and Vertical time series from top to bottom.

6-1-4 雷達差分干涉資料與水準測線的比對

針對四條長距離的水準測線大安至東勢測線、龍井至太平測線、五光至黃竹測線及王功至草屯至埔里測線（圖6-26），以2018~2021年的升軌道成果、降軌道成果以及垂直向成果與水準測量成果進行討論。由於升軌、降軌資料與水準資料的垂直變動有觀測角度與方向上的差異，在比較升降軌資料時，先將水準資料以雷達觀測入射角修正，但是由於升降軌資料會包含東西向變化的資訊，所以升降軌資料與水準測量的專注量測垂直方向變化本質上會有差異。而解算得到垂直資料則可直接與水準資料直接比對，在討論時主要也會討論垂直方向的異同。

大安-東勢測線中，整條測線的速度變化在垂直方向都在 5mm/yr以內，水準測量與雷達垂直解算資料都呈現相當平直、沒有特別變化的剖面（圖6-27）。龍井-太平測線跨越了八卦-大肚山並且向東經過臺中都會區後，跨過車籠埔斷層（圖6-28），然而整段的變化也在5mm/yr　以下，在臺中都會區東側似乎有稍微地往下趨勢，但是數量極少。跨過車籠埔斷層以東的區域有些微抬昇的趨勢，這樣的

狀況在兩種資料上都有顯現。全段水準與雷達資料基本上也都相當符合。五光-黃竹測線（圖6-29），在第6到第7公里中間看到一個向東抬升的趨勢，而在第9、10公里間有一點位數值大幅度下降再跳回，然而雷達資料中並沒有這樣的趨勢出現。這條測線沿線中，雷達資料顯示平均速度差異不大，往東跨過車籠埔斷層之後有微幅向上抬昇的現象。在約45km長的王功-草屯-埔里長測線中（圖6-30），水準資料與雷達垂直資料趨勢相當吻合，包含約7公里處之小抬升、約15公里之溪湖下陷區，到跨過彰化斷層後八卦山東側大致持平的趨勢皆相當吻合。然而在細節上有部分差異。在王功與溪湖中間，測線約5~12公里間，水準資料呈現一個向上凸起的抬升，而雷達資料中卻有三個抬升的波出現。雷達資料也沒有看到25~30公里附近水準資料的震盪，反而是在八卦山區域有微幅的相對抬升。在36~37公里處的小抬升量可同時於水準與雷達資料上觀察到。

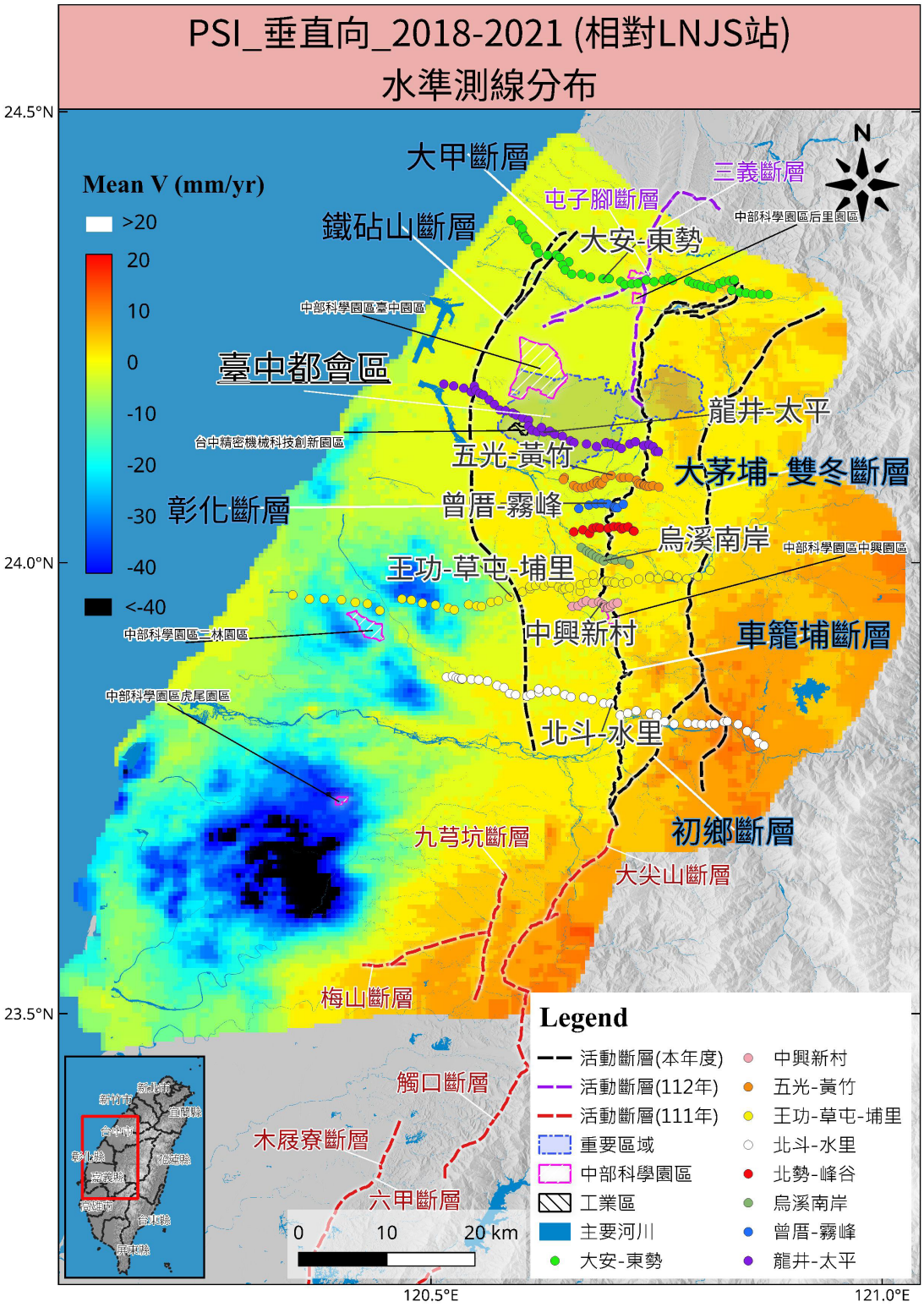


圖6-26：水準測線與PSI垂直速度場比對圖，暖色系代表抬升，冷色系代表下陷，垂直向格點大小為500公尺。

Figure 6-26：Comparison of Levelling Profiles and PSI Vertical Velocity Field. Warm colors represent uplift, while cool colors represent subsidence. The vertical grid spacing is 500 meters.

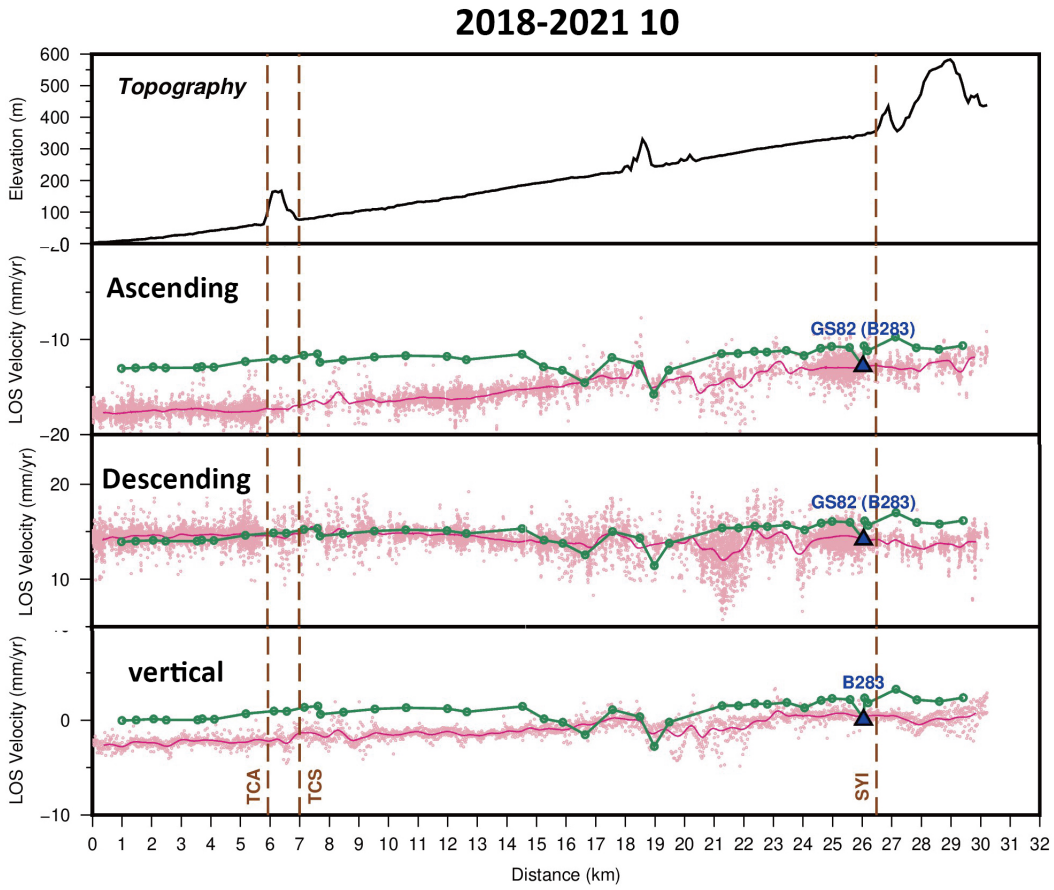


圖6-27：2018-2021水準測線-大安至東勢測線與PSI資料比對。由上至下為地形高程、Ascending方向比對、Descending方向比對及垂直向速度比對，垂直向格點大小為100公尺，成果尚需驗證。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS82(B283)。TCA為大甲斷層；TCS為鐵砧山斷層；SYI為三義斷層。

Figure 6-27：Comparison of PSI and Da' an-Dongshi leveling route in 2018-2021 period. From the top to bottom are topography, Ascending track, Descending tracd and vertical velocity, the vertical grid size is 100 meters, and the results still need to be verified. Green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS82(B283). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TCA is Tachia fault, TCS is Tiehchanshan fault, and SYIF is Sanyi fault.

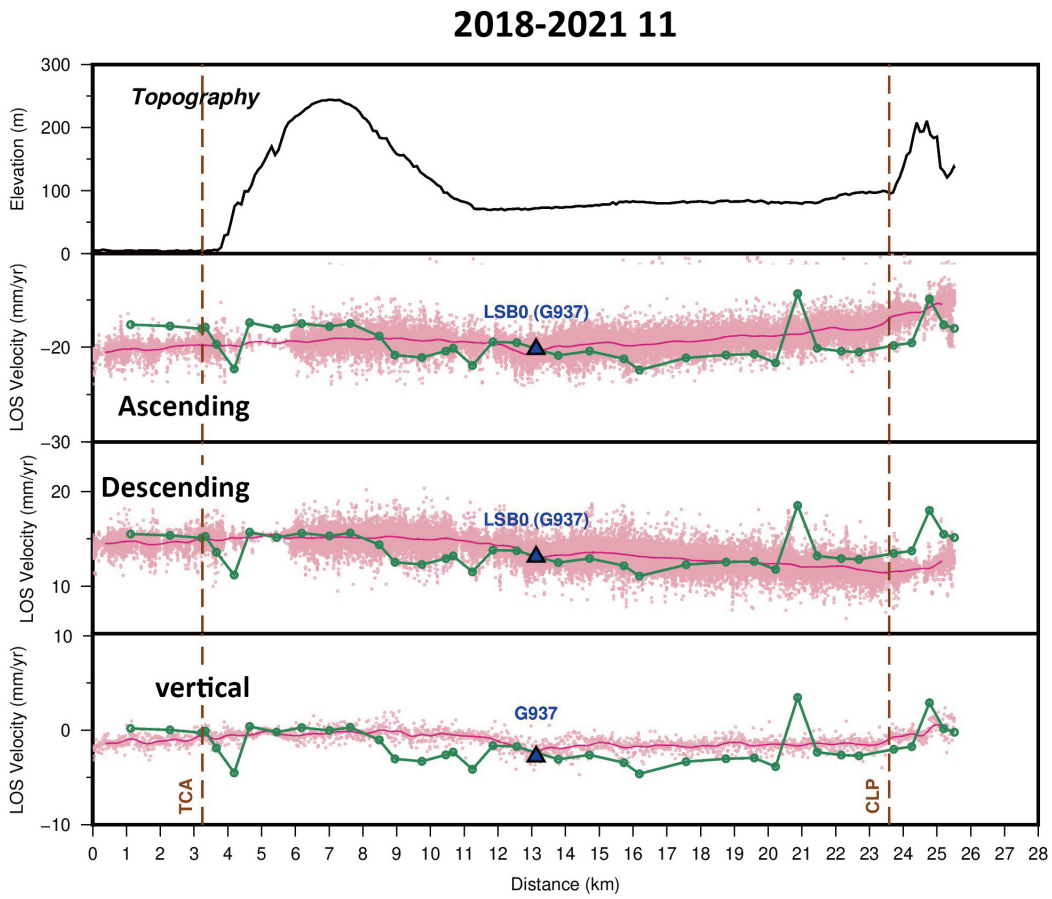


圖6-28：2018-2021水準測線-龍井至太平測線與PSI資料比對。由上至下為地形高程、Ascending方向比對、Descending方向比對及垂直向速度比對，垂直向格點大小為100公尺，成果尚需驗證。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點CWBN(X018)。TCA為大甲斷層、CLP為車籠埔斷層。

Figure 6-28：Comparison of PSInSAR and Longjing-Taiping leveling route in 2018-2021 period. From the top to bottom are topography, ascending track, descending track and vertical velocity, the vertical grid size is 100 meters, and the results still need to be verified. Green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station LSB0(G937). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TCA is Tachia fault, CLP is Chelungpu fault.

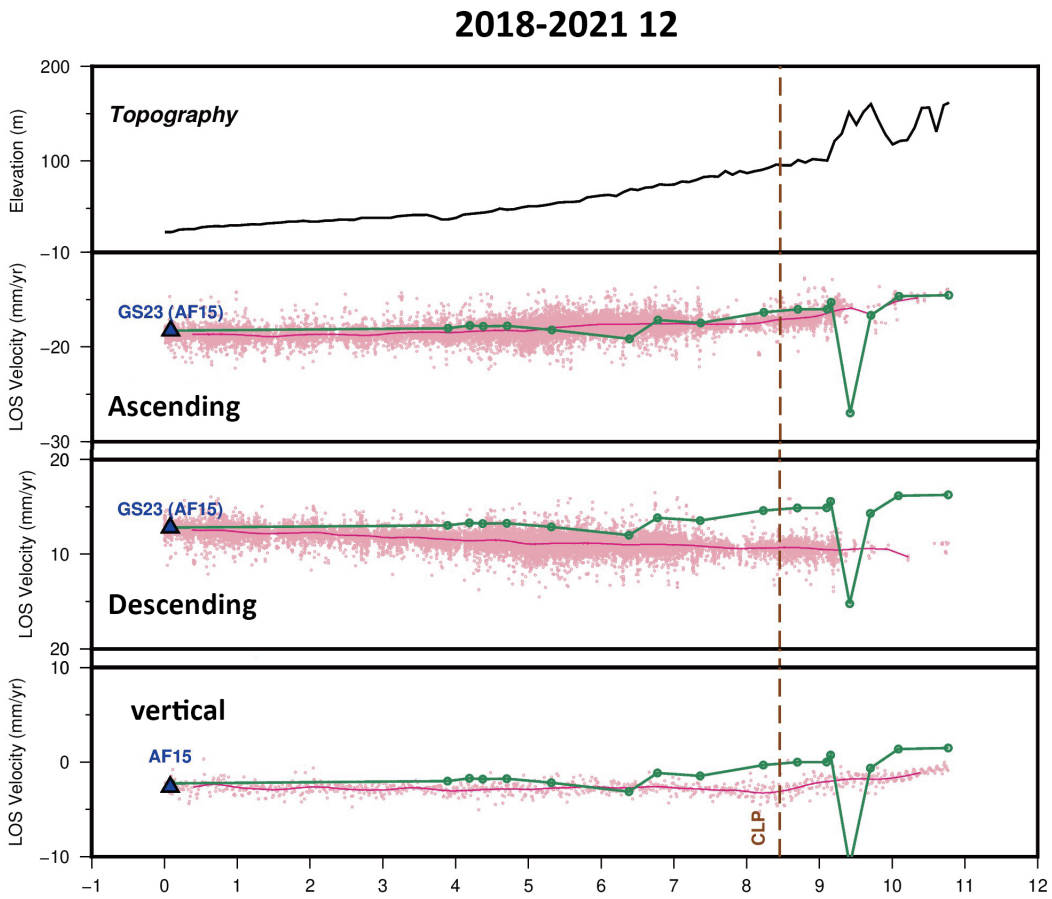


圖6-29：2018-2021水準測線-五光至黃竹測線與PSI資料比對。由上至下為地形高程、Ascending方向比對、Descending方向比對及垂直向速度比對，垂直向格點大小為100公尺，成果尚需驗證。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS23(AF15)。CLP為車籠埔斷層。

Figure 6-29：Comparison of PSI and Wuguang-Huangzhu leveling route in 2018-2021 period. From the top to bottom are topography, ascending track, descending track and vertical velocity, the vertical grid size is 100 meters, and the results still need to be verified. Green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSIvelocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS23(AF15). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CLP is Chelungpu fault.

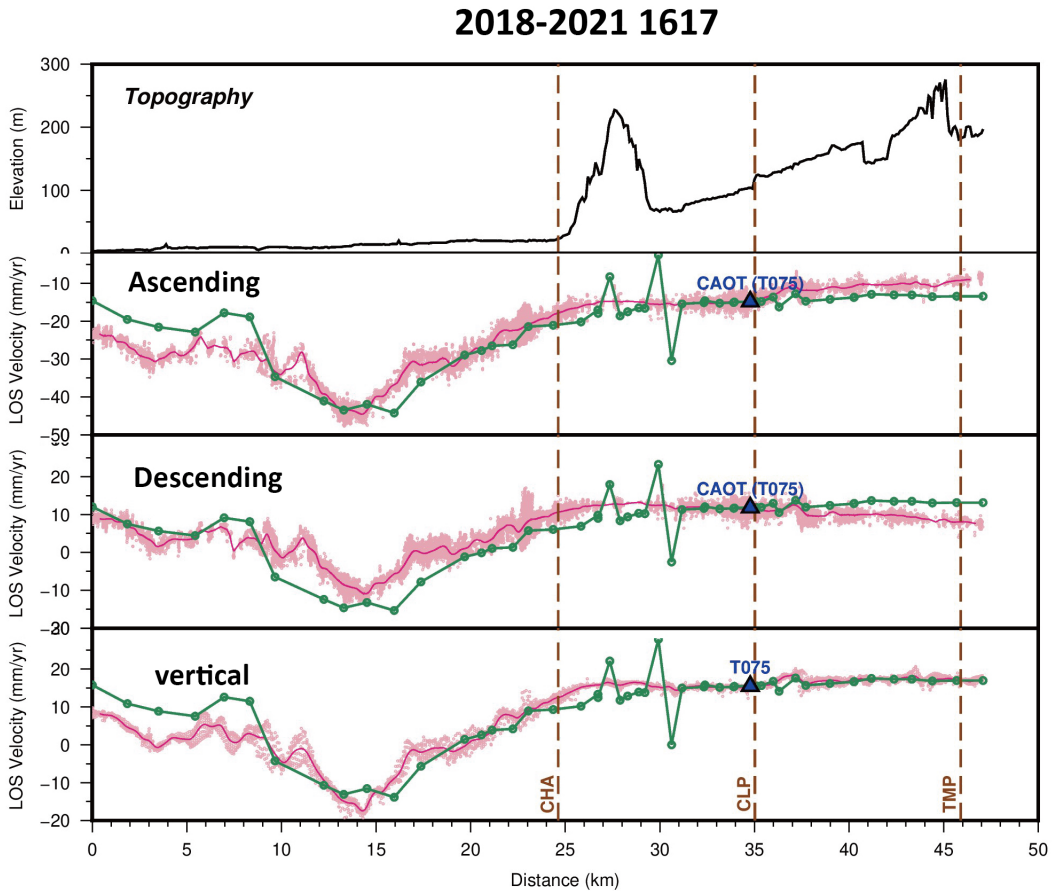


圖6-30：2018-2021水準測線-王功至草屯至埔里測線與PSI資料比對。由上至下為地形高程、Ascending方向比對、Descending方向比對及垂直向速度比對，垂直向格點大小為100公尺，成果尚需驗證。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點CAOT(T075)。CHA為彰化斷層、CLP為車籠埔斷層、TMP為大茅埔 - 雙冬斷層。

Figure 6-30：Comparison of PSInSAR and Wangong-Caotun-Puli leveling route in 2018-2021 period. From the top to bottom are topography, ascending track, descending track and vertical velocity, the vertical grid size is 100 meters, and the results still need to be verified. Green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station CAOT(T075). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CHA is Changhua fault, CLP is Chelungpu fault, and TMP is Tamaopu-Shuangtung fault.

6-2 雷達影像成果

6-2-1 中臺灣地區垂直速度場

由於雷達衛星觀測資料有升軌、降軌兩個方向，因此可以將觀察結果轉換成垂直與東西向的成果。在過去經驗及先前章節（第三章、第四章）所見，2018年至2021年衛星影像數量最多，拍攝頻率穩定且衛星基線控制佳，本時期的PSI成果品質最佳最穩定，因此我們取用了2018-2021時段的資料解析東西向及垂直向速度場。在這個計算時需要將資料格點化，在過去數年的計劃都是採取500公尺的格點。今年測試使用較細的格點（100公尺格點）。

在比對結果上，500公尺跟100公尺在變形趨勢差異不大，與GNSS比對散布圖成果中，不管是東西向或垂直向的R^2與RMSE數值也很接近(圖6-31~6-33)。因此大趨勢上這個解析度並沒有問題。然而如圖6-34的500公尺與100公尺格點的PSI解析之垂直向平均速度場成果圖上，可以看到紅圈標示的範圍100公尺的圖會有不同於500公尺格點所顯示的顏色，也許這樣的解析度呈現很多的「細節」，然而我們目前沒有更好的資料可以去判斷這些細節的真實性，這些「細節」到底是內插造成的假象、還是部分接近真實資料，可能未來還需要設計不同方式來驗證。以圖6-33的P1剖面為例，寬度500公尺的剖面中，100公尺格點可能會有過度解釋無法突顯構造活動的情形。實際上我們尚未找到一個合理查核內插假象的方法，因此100公尺解析度的解算結果僅供參考，並在每張呈現結果加註。

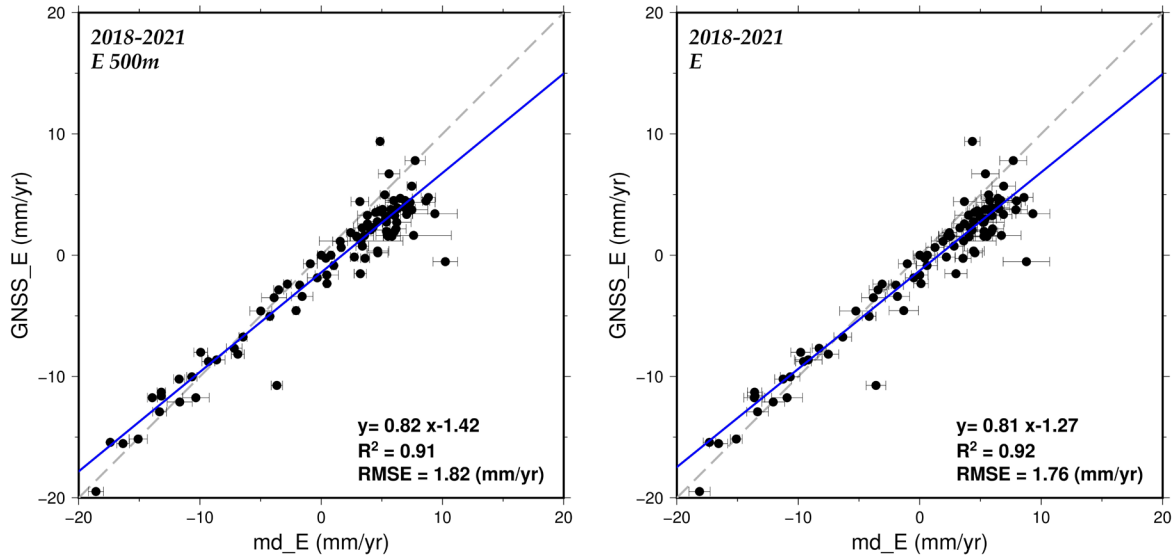


圖6-31：PSI與GNSS東西向速度比對圖。左圖為PSI格點大小500公尺成果，右圖為PSI格點大小100公尺成果，參考點為連續GNSS測站LNJS，X軸為PSI東西向速度，Y軸為GNSS東西向速度，向東為正，向西為負。

Figure 6-31：Comparison of PSI and GNSS east-west velocity. The left panel shows the results with a PSI grid size of 500 meters, while the right panel shows the results with a PSI grid size of 100 meters. The reference point is the continuous GNSS station LNJS. The X-axis represents the PSI east-west velocity, and the Y-axis represents the GNSS east-west velocity. Positive values indicate eastward motion, while negative values indicate westward motion.

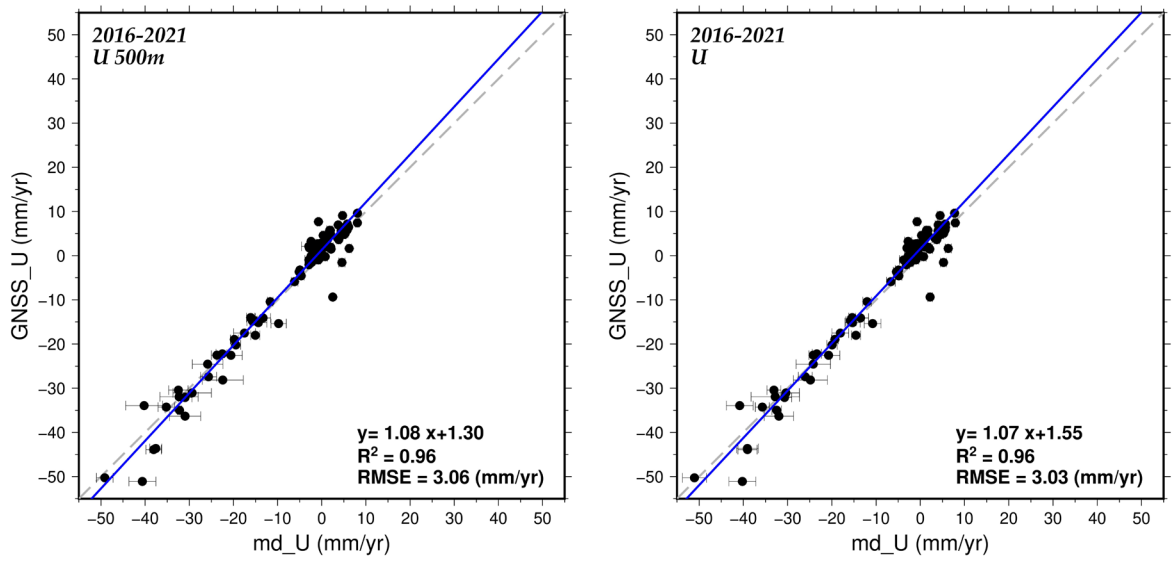


圖6-32：PSI與GNSS垂直向速度比對圖。左圖為PSI格點大小500公尺成果，右圖為PSI格點大小100公尺成果，參考點為連續GNSS測站LNJS，X軸為PSI垂直向速度，Y軸為GNSS垂直向速度，抬升為正，下陷為負。

Figure 6-32：Comparison of PSI and GNSS vertical velocity. The left panel shows the results with a PSI grid size of 500 meters, while the right panel shows the results with a PSI grid size of 100 meters. The reference point is the continuous GNSS station LNJS. The X-axis represents the PSI vertical velocity, and the Y-axis represents the GNSS vertical velocity. Positive values indicate uplift, while negative values indicate subsidence.

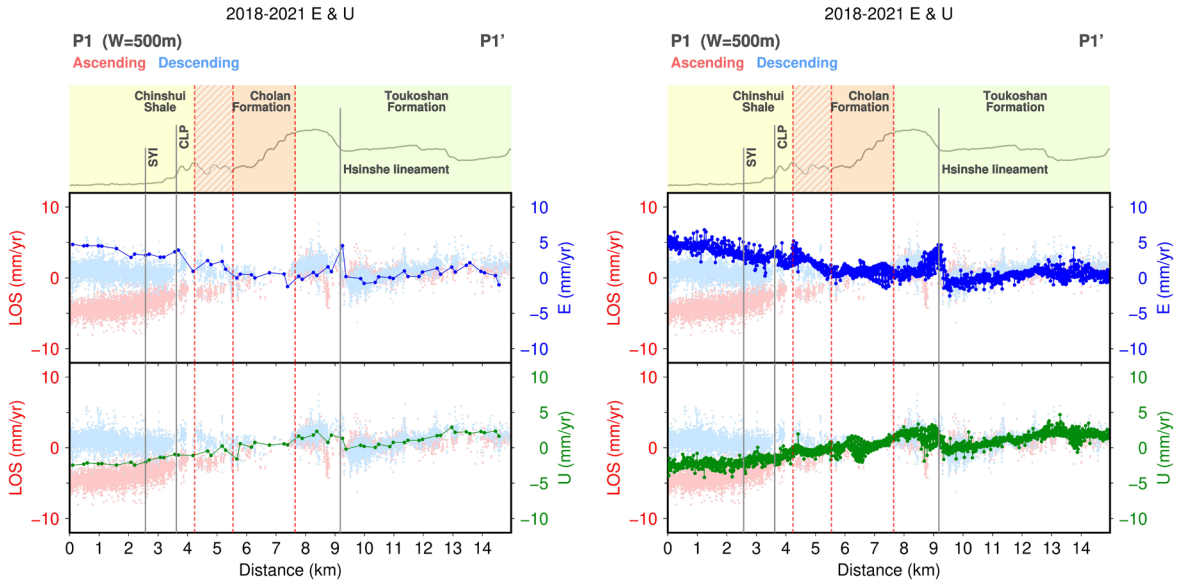


圖6-33：2018-2021年P1剖面東西向與垂直向成果。左圖為PSI格點大小500公尺成果，右圖為PSI格點大小100公尺成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為PSI升軌道方向LOS速度，水藍點為降軌道方向LOS速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色虛線為斷層位置分別為三義斷層（SYI）及車籠埔斷層（CLP）。

Figure 6-33：East-west and vertical velocity results along Profile P1 from 2018 to 2021. The left panel shows the results with a PSI grid size of 500 meters, while the right panel shows the results with a PSI grid size of 100 meters. From top to bottom, the figure displays the topography, east-west velocity profile, and vertical velocity profile. Red points represent the PSI LOS velocity in the ascending orbital direction, while blue points represent the LOS velocity in the descending orbital direction. Blue points and blue line segments indicate the east-west velocity, green points and green line segments represent the vertical velocity. The gray dashed lines denote fault locations, which include the Sanyi Fault (SYI) and Chelungpu Fault (CLP).

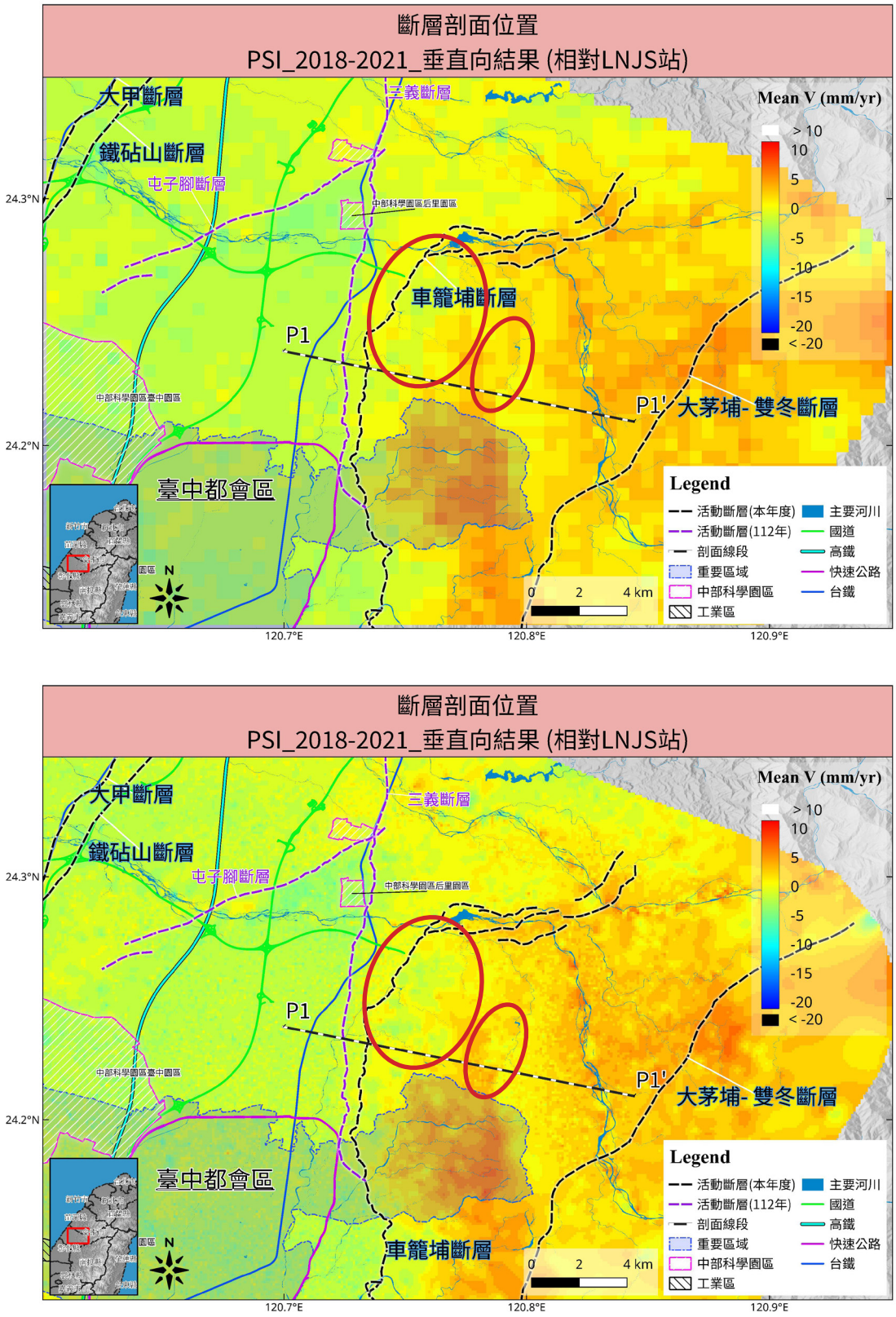


圖6-34：2018-2021年PSI解析的垂直向平均速度場與P1剖面位置圖。上圖為PSI格點大小500公尺成果，下圖為PSI格點大小100公尺成果。

Figure 6-34：Vertical average velocity fields between 2018 and 2021 processed with PSI data and P1 profiles across the Faults. The upper panel shows the results with a PSI grid size of 500 meters, while the lower panel shows the results with a PSI grid size of 100 meters.

6-2-2 淺山區剖面

從第三章永久散射體雷達差分干涉結果圖中(圖3-4~圖3-9)，由於在整個中部的速度場分析範圍中，包含了濁水溪沖積平原的彰化及雲林地層下陷區域，與靠近山區的車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷及初鄉斷層分布的區域，為了在圖上顯示範圍中的所有PSI之速度結果，因此使用了數值涵蓋範圍較廣的色條(-40~20 mm/yr)來顯示PSI的速度，導致了在小區域的範圍上，顏色變化的解析度過低不便於觀察出速度場變化的地方，尤其是車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷及初鄉斷層分布在山區周遭受植披的影響，PSI的資料點相較於平原區較少，在圖上觀察速度場變化較不易，並且，在3-6的跨斷層的速度場剖面分析的結果圖中(圖3-15~圖3-20)，由於選取的A至H剖面較長，一樣會使用較廣的色條來製圖，使圖上顏色的變化不夠明顯。為此，我們在小範圍尤其是斷層周遭的PSI結果顯示上，針對該個小區域調整了PSI的速度場使用之色條數值範圍，讓顏色變化的解析度提高，因而觀察到了車籠埔斷層周遭似乎有一些PSI速度場的變化量，於是我們針對此區域額外畫設了P1~P5的短剖面進行探討，各時期的剖面位置與PSI速度場成果如圖6-35~圖6-38。

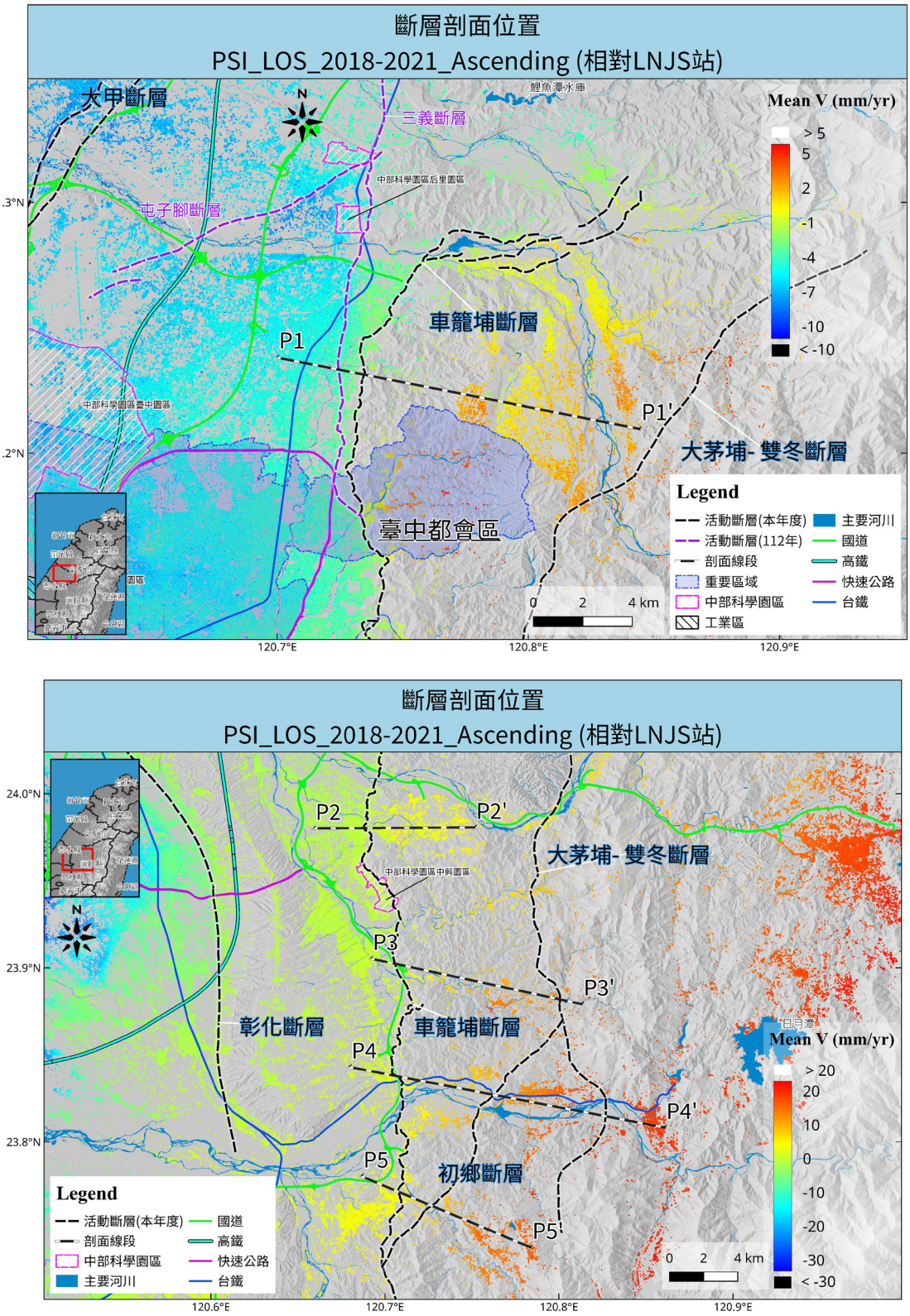


圖6-35：2018-2021 升軌道方向LOS平均速度場與P1-P5剖面位置圖。上圖為P1剖面，下圖為P2至P5剖面。

Figure 6-35：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

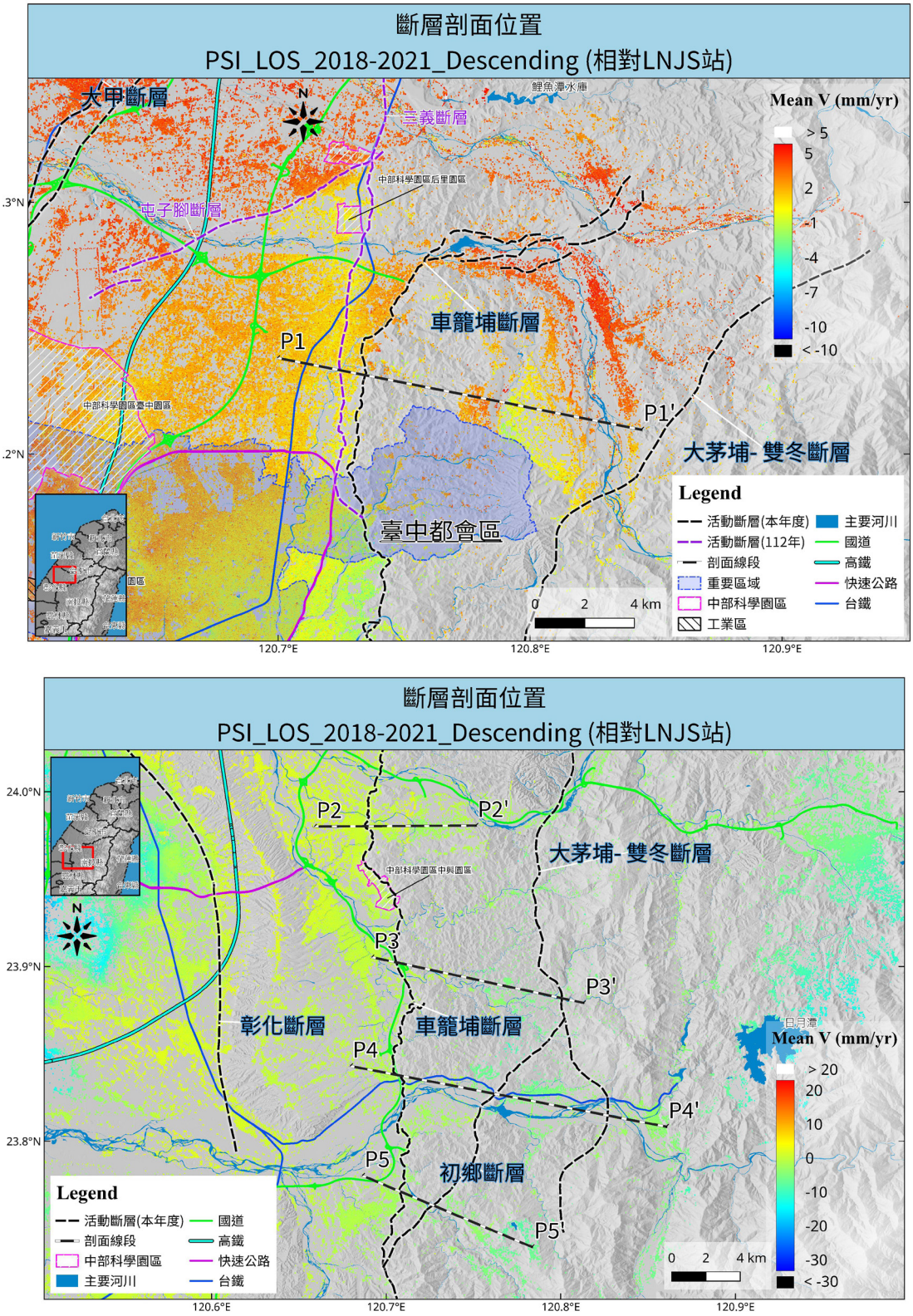


圖6-36：2018-2021 降軌道方向LOS平均速度場與P1-P5剖面位置圖。上圖為P1剖面，下圖為P2至P5剖面。

Figure 6-36：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

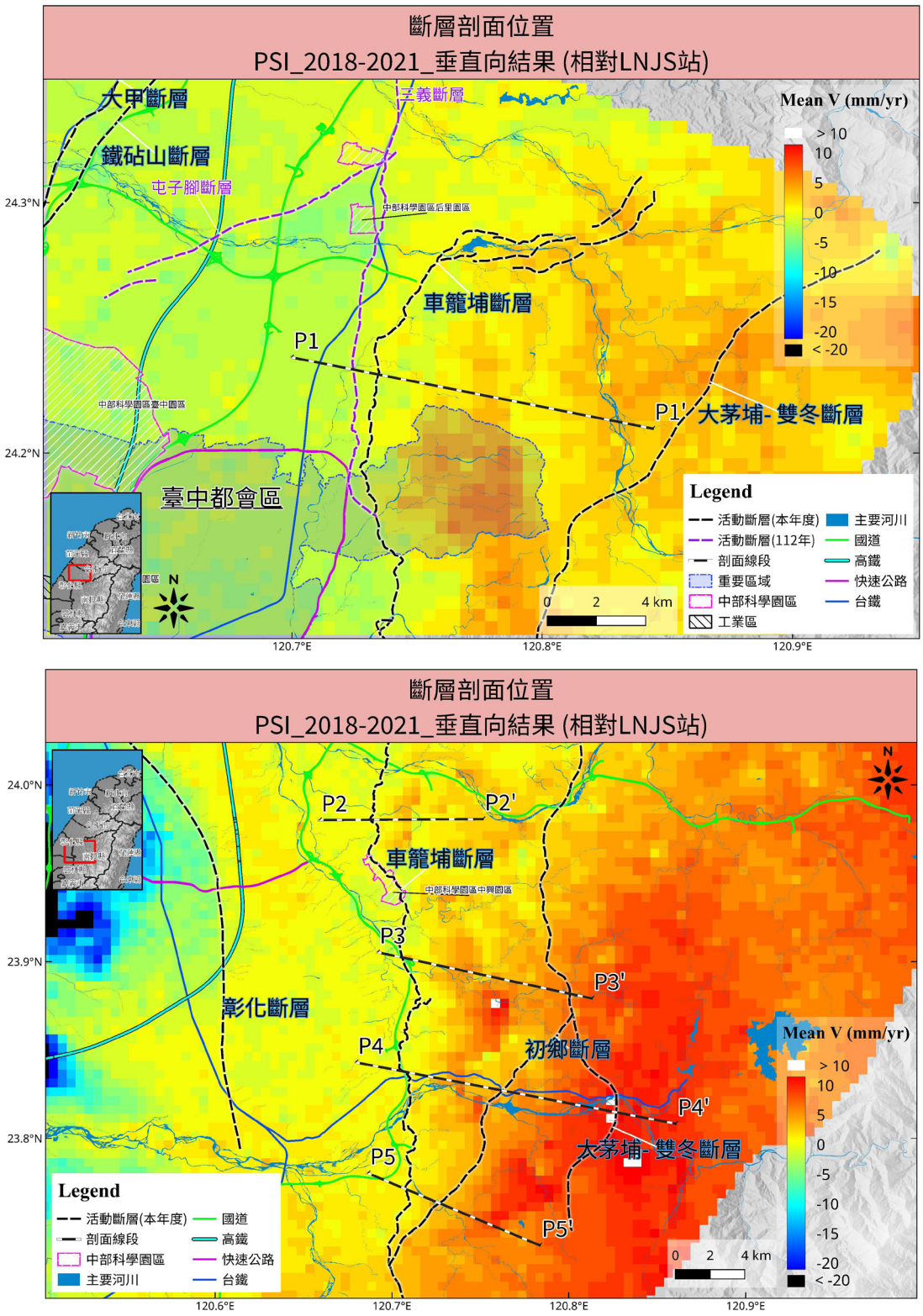


圖6-37：2018-2021年PSI解析的垂直向平均速度場與P1 - P5剖面位置圖(PSI格點大小500公尺)。上圖為P1剖面，下圖為P2至P5剖面。

Figure 6-37：Vertical average velocity fields between 2018 and 2021 processed with PSI data and P1 profiles across the Faults (PSI grid size of 500 meters). The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

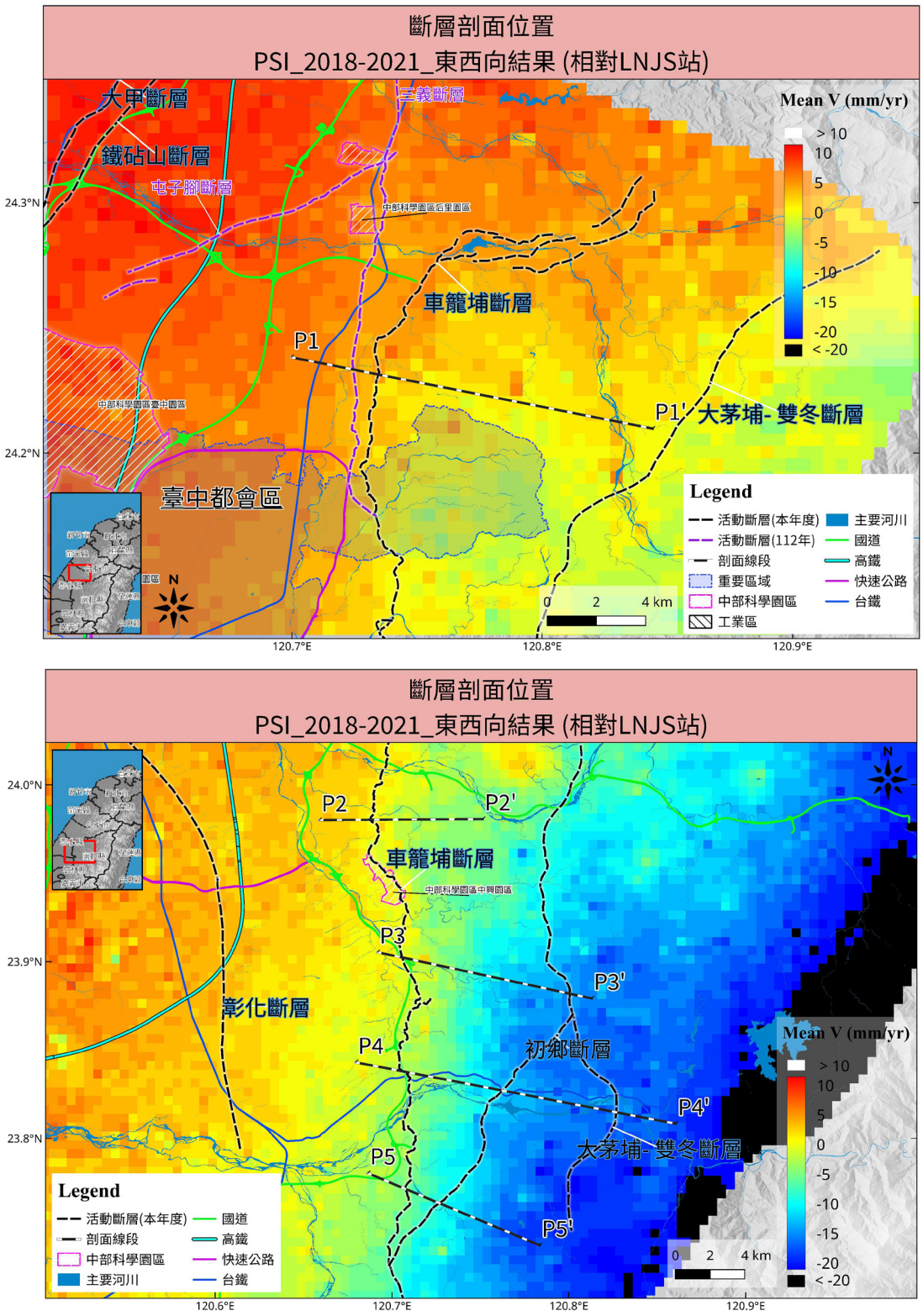


圖6-38：2018-2021年PSI解析的東西向平均速度場與P1剖面位置圖（PSI格點大小500公尺)。上圖為P1剖面，下圖為P2至P5剖面。

Figure 6-38：East-west average velocity fields between 2018 and 2021 processed with PSI data and P1 profiles across the Faults (PSI grid size of 500 meters). The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

6-3 中部地表變形之地質意義探討

根據永久散射體雷達差分干涉結果(圖3-4~圖3-14)和斷層的速度場剖面分析(圖3-15~圖3-38)，臺灣中部地區地表變形速率變動範圍一般未超過10mm/yr (未包含地層下陷速率)，其中部分地區的變形可能與地下地質有關。本計畫分析淺山區的PSI速度場變化(觀測時間：2018-2021；圖6-39)，從北到南製作五條剖面(P1至P5；圖6-40至圖6-44)，並將LOS速度變化轉換為水平與垂直方向的速度變化，以進一步觀察地表構造活動特徵。在觀測期間，雖沿主要活動斷層的變形不顯著，但在車籠埔斷層的上盤區域發現了若干速度變化區。本報告將結合地質資料和前人研究，探討這些速度變化的地質意義。此外，為驗證差分干涉結果的準確性，針對速度變化區域進行現場查核(圖6-39)，以檢視變形狀況。

6-3-1 區域構造的速度變化

本計畫結果顯示，沿921地震的同震斷層-車籠埔斷層上的速度變化雖不明顯，但是在其上盤區域有明顯的速度變化(圖6-39)，可能與地下構造的活動相關，包括新社階地群(剖面P1，圖6-40)、隘寮地區(剖面P2，圖6-41)、中寮地區(剖面P3，圖6-42)、濁水溪河床(剖面P4，圖6-43)，以及初鄉地區(剖面P5，圖6-44)。下文將分析這些區域的地表活動特徵及構造背景。

新社階地群位於車籠埔斷層最北端的大甲溪南岸，根據地勢及前人研究，新社階地群大致可分為5層階地(圖6-45)。其中一處顯著的160公尺高差線形崖被稱為新社線形。因為在地表及淺層地區不到斷層證據(葛滿龍，2006)，過去研究認為此地形特徵是由車籠埔斷層的斷層彎曲褶皺構造(fault-bend folding)所致(Tsai and Sung, 2003; Lai et al., 2006; Yue et al., 2011; Le Béon et al., 2014)，但因此處崖坡相當陡直，亦有學者認為係斷層活動所致(沈淑敏等，2005)。根據本計畫的PSI觀測結果(剖面P1，圖6-40)，在新社線形的崖坡上方可觀察到階面有明顯的向東水平運動及向上抬升的現象。此運動並非典型的斷層彎曲褶皺所能造成，加上斷層錯位模型分析(第五章)，推測新社線形下方可能存在淺層較陡、深部逐漸變緩的逆斷層(傾角約20~40度)。此區域的地表變形可能受到車籠埔斷層前緣(淺

層)鎖住,在持續接受造山帶向西擠壓作用,觸發背衝斷層發育並造成T1b階地有顯著的抬升活動(圖6-45)。

位於烏溪南岸的草屯階地上,隘寮地區呈現西高東低的撓曲崖,形成明顯的隘寮線形,高差約25公尺。1999年集集地震期間,草屯階地出現顯著的地表變形,除車籠埔斷層的水平縮短外,隘寮線形的縮短量達6.1±0.6公尺(Kuo et al., 2013),並可在崖底觀察到地表破裂特徵(Ota et al., 2004, 2007)。對於隘寮線形學者一般有兩種解釋:因未在震測資料中觀察到明顯的地層錯動跡象,部分學者認為隘寮線形為車籠埔斷層的斷層彎曲褶皺構造(Chen et al., 2007; Kuo et al., 2013);另有學者認為隘寮線形為獨立的背衝斷層構造(林啟文等,2003;Ota et al., 2007),且根據比較不同階地的陡坡高度,推測隘寮線形可能隨著車籠埔斷層同時活動(Ota et al., 2007)。根據本計畫的PSInSAR觀測結果(P2,圖6-41),隘寮線形上盤(西側)有明顯的垂直運動及向東位移,加上斷層錯位模型結果顯示隘寮線形為低角度向西傾斜的逆斷層,其底部與車籠埔斷層相連。此區域的地表變形是由於車籠埔斷層的前緣(淺部)鎖住,在造山帶持續的推擠的狀態下,造成「隘寮斷層」活動,進而顯現其上盤的地表變形(圖6-46)。

在中寮地區的速度剖面(P3,圖6-42)中,除了可以觀察到在錦水頁岩和卓蘭層邊界有速度的變化外,在初鄉斷層上盤(東側)出現顯著的速度變化,該現象與地形變化相對應。根據圖6-39,速度變化現象可沿南北延伸。此區域並未存在顯著的岩性邊界或已知構造,推測該現象可能與深部斷層幾何變化有關,值得後續進一步研究。

在濁水溪下游地區,根據林啟文等人(2019)的地質調查結果,在車籠埔斷層上盤發現一系列東傾的逆斷層系統(A~E斷層,圖6-47),走向呈東北至東北東方向,伴隨褶皺變形。PSI的速度剖面結果(P4,圖6-43)顯示車籠埔斷層至初鄉斷層間的速度變化較大,其中兩處與B、C斷層位置吻合。觀測結果指出,兩斷層之間的地表變形較為複雜,受前緣斷層鎖住狀況的影響,該區域上盤內部的斷層會持續潛移以釋放來自東側造山帶的壓應力。

在初鄉地區的速度剖面中(P5，圖6-44)，可以在鄰近鹿谷向斜軸部觀察到約3mm/yr的速度變化。前人研究指出，車籠埔斷層在應力持續擠壓狀態下形成次級斷層-初鄉斷層(林啟文等，2000)。該斷層早期以左移運動為主，並分隔車籠埔斷層和大尖山斷層；隨著左移分量減少，初鄉斷層南側的大尖山斷層持續抬升，並促使出露的桂竹林層在壓力下發育出鹿寮斷層。初鄉斷層上盤的岩層受此兩條斷層活動影響而逐漸形成向斜構造(圖6-48)，根據近期地表觀測，該向斜構造為活動向斜。

除了上述區域外，本計畫的地表調查結果也發現在雙冬斷層和初鄉斷層一帶(調查位置詳見圖6-39)，地表有因斷層活動而擠壓破裂之狀況。位於雙冬斷層通過的雙冬社區活動中心(調查點1，圖6-49a)，地板磁磚因長期受擠壓作用而突起破裂，當地居民也證實這種現象已持續多年。另外，在初鄉斷層截切的縣道151(中正路)(調查點2，圖6-49b, c, d)處，新建於1999年後的擋土牆出現了明顯的破裂與錯移現象，而道路另一側的邊坡防護水泥也有對應的破裂，裂縫走向約為210度，進一步證實此區的雙冬斷層和初鄉斷層仍持續活動。

6-3-2 岩性邊界的地表變形

在車籠埔斷層上盤區域，PSI數據顯示部分地表變形呈不連續特徵。將變形區疊加至岩性地質圖上(比例尺1:25,000；圖6-39、圖6-50)，並在速度剖面上標註岩性分界線(圖6-40至圖6-44)，可發現上述不連續現象多位於岩性或地層邊界，如錦水頁岩-卓蘭層(上盤約300公尺至1公里)、卓蘭層-頭嵙山礫岩(上盤約3~4公里)，以及卓蘭層內的砂頁偶夾泥岩和砂岩間夾泥岩的邊界(上盤約2公里)。本團隊至霧峰921地震博物館南側的堤防調查(調查點3，圖6-49e, f)，此區域為錦水頁岩-卓蘭層交界處，可觀察到路和堤防皆有破裂的情形，走向約120，且有擠壓抬升的現象，進一步證實岩性差異可能促使層間滑移，岩性邊界線因此取代地震斷層，成為間震期地表變形的主要發生地。

觀察本計畫產生之垂直速度場從觀測區北段到中南段，可以看到在車籠埔斷層東側有一區南北狹長的抬升區，這一區在北端有

新社線型附近的抬升區，中段有隘寮線型的抬升區，再往南則有中寮地區的抬升區，這些抬升區，在套用地礦中心的地質圖後，全部落於卓蘭層的東側之頭嵙山層中。這一現象顯示雖然中部地區幾條大斷層兩側沒有明顯的錯動，但是背景的大地構造環境造成的東西向壓縮卻有部分以推擠膠結不佳的頭嵙山層抬升來表現。而在雷達資料解算的東西向資訊中顯示，車籠埔斷層兩側大約以新社、草屯為界，可以分成三段。新社以北，斷層兩側區塊沒有明顯的東西向速度差，新社以南草屯以北則是有小幅的東西向速度差，在草屯以南車籠埔斷層東側有一狹窄的過渡區，就再進到東西向速度差異較大的區塊。至少在中、南兩個區段，這樣的差異跟卓蘭層的寬度有相當的正相關。

本研究驗證了PSI技術在地表變形監測中的高可信度與精確性，並顯示出PSI的速度變化與實際地質活動狀況緊密相關。PSI能夠有效監測地表變形，為臺灣複雜的構造環境提供可靠數據。臺灣地質結構極其複雜，除了已知的活動斷層外，其他未知地質構造或潛在因素，如岩性邊界，也可能是地表變形容易集中處。本研究觀測到雙冬斷層和初鄉斷層近期仍具活動性，儘管其活動度低於車籠埔斷層。因此相關研究工作需持續進行，並在高活動區域展開更深入的地質調查，以便精確掌握完整資訊，為未來防災減災工作提供科學依據。

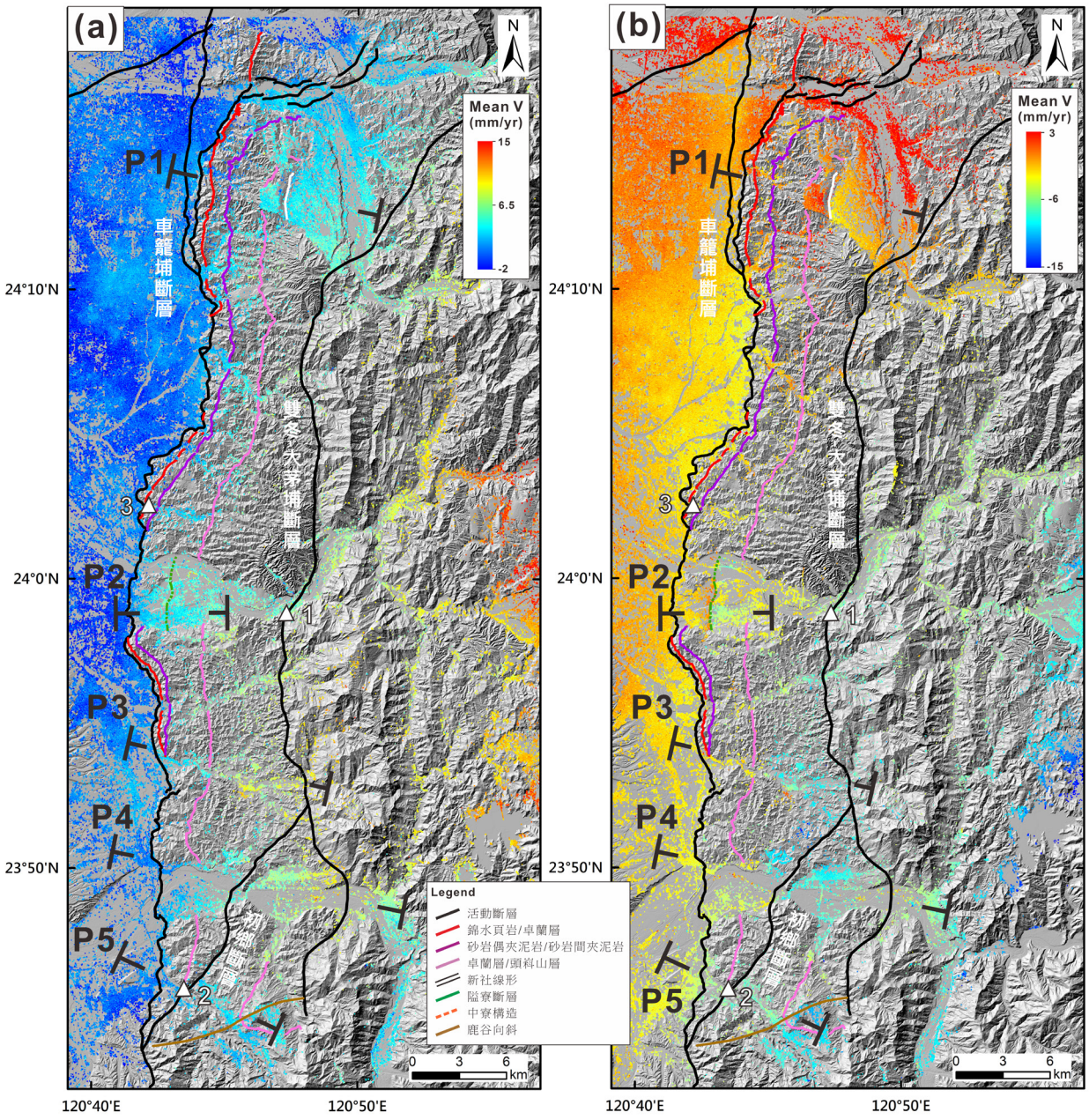


圖6-39：2018-2021中部地區平均速度場變化及鄰近構造。(a)升軌衛星影像結果，(b)降軌衛星影像結果。白色三角形為調查點位，黑色線段為活動斷層，白色線段為新社線形(沈淑敏等，2006)，綠色線段為隘寮斷層(林啟文等，2003; 沈淑敏等，2006)，其他顏色線段為地礦中心出版的兩萬五分之一岩性組合圖中的岩性邊界、地層邊界及背斜資料(后里、東勢、臺中市、新社、霧峰、國姓、南投、中寮、竹山、集集、瑞竹、溪頭圖幅)。

Figure 6-39：Average velocity field variation and nearby structures in the central Taiwan region from 2018 to 2021. (a) Ascending satellite imagery results, (b) Descending satellite imagery results. White triangles indicate survey locations, black lines represent active faults, white lines denote the Xinshe lineament (Shen et al., 2006), green lines show the Ailiao Fault (Lin et al., 2003; Shen et al., 2006), and other colored lines represent lithologic boundaries, formation boundaries, and anticline data from the 1:25,000 Lithological Unit Assemblage Map published by the Central Geological Survey, MOEA (Houli, Dongshih, Taichung City, Xinshe, Wufong, Guosing, Nantou, Jhongliao, Jhushan, Jiji, Rueijhu, Sitou maps).

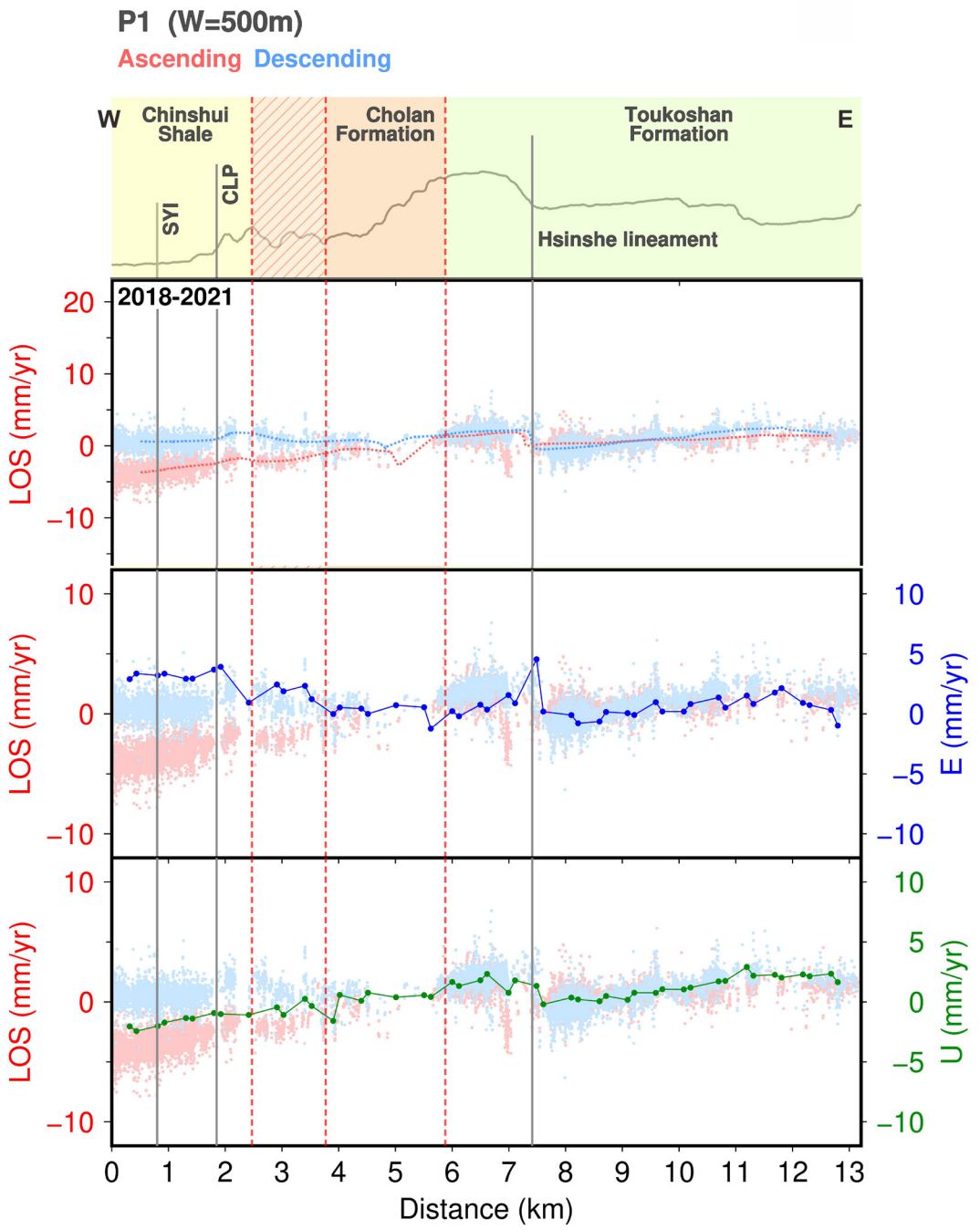


圖6-40：新社河階的速度變化剖面(P1)(觀測期間為2018至2021年)。

Figure 6-40：Velocity profile (P1) of Xinshe terraces (Observation period: 2018 to 2021).

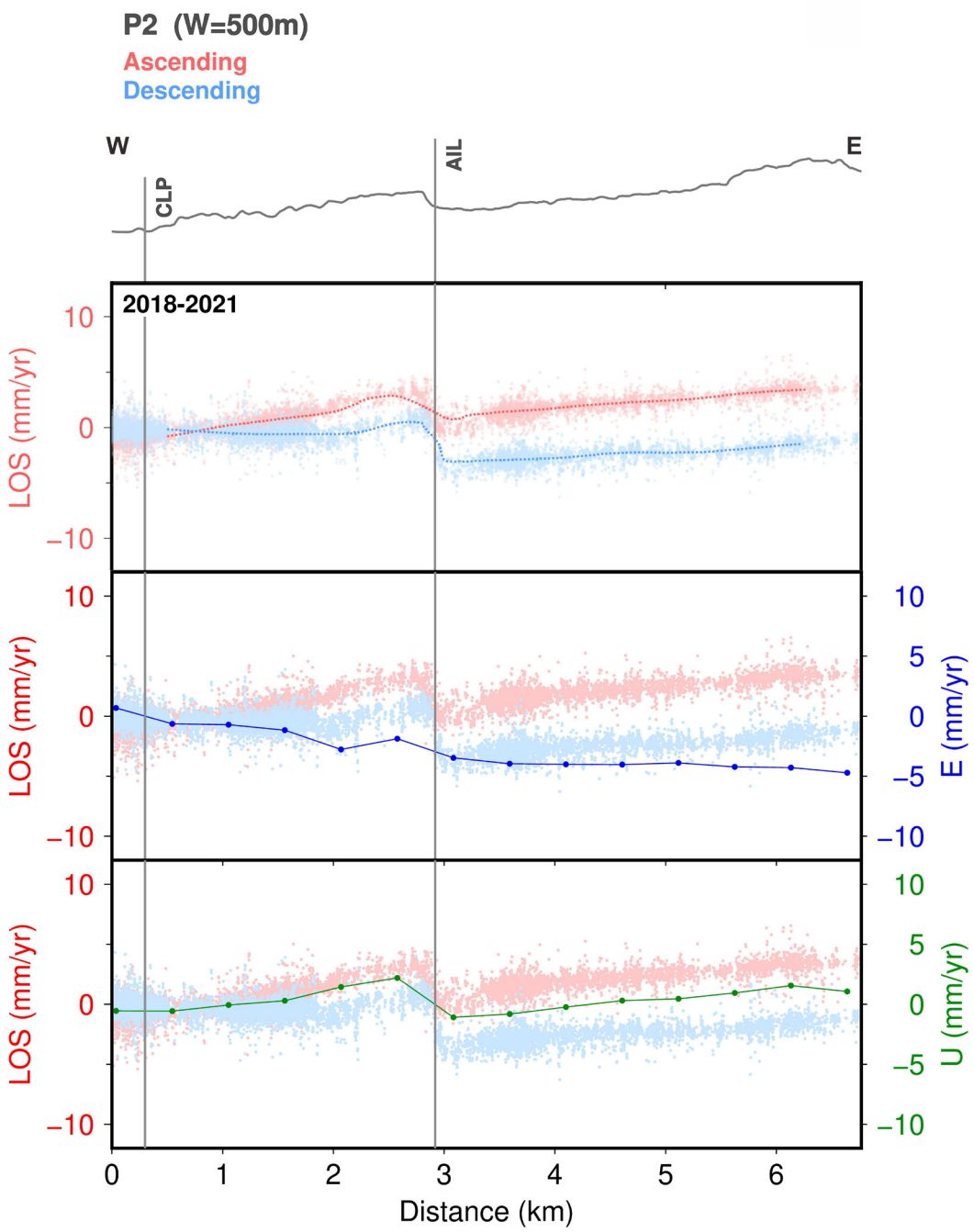


圖6-41：草屯隘寮地區的速度變化剖面(P2) (觀測期間為2018至2021年)。

Figure 6-41：Velocity profile (P2) of the Caotun-Ailiao area (Observation period: 2018 to 2021).

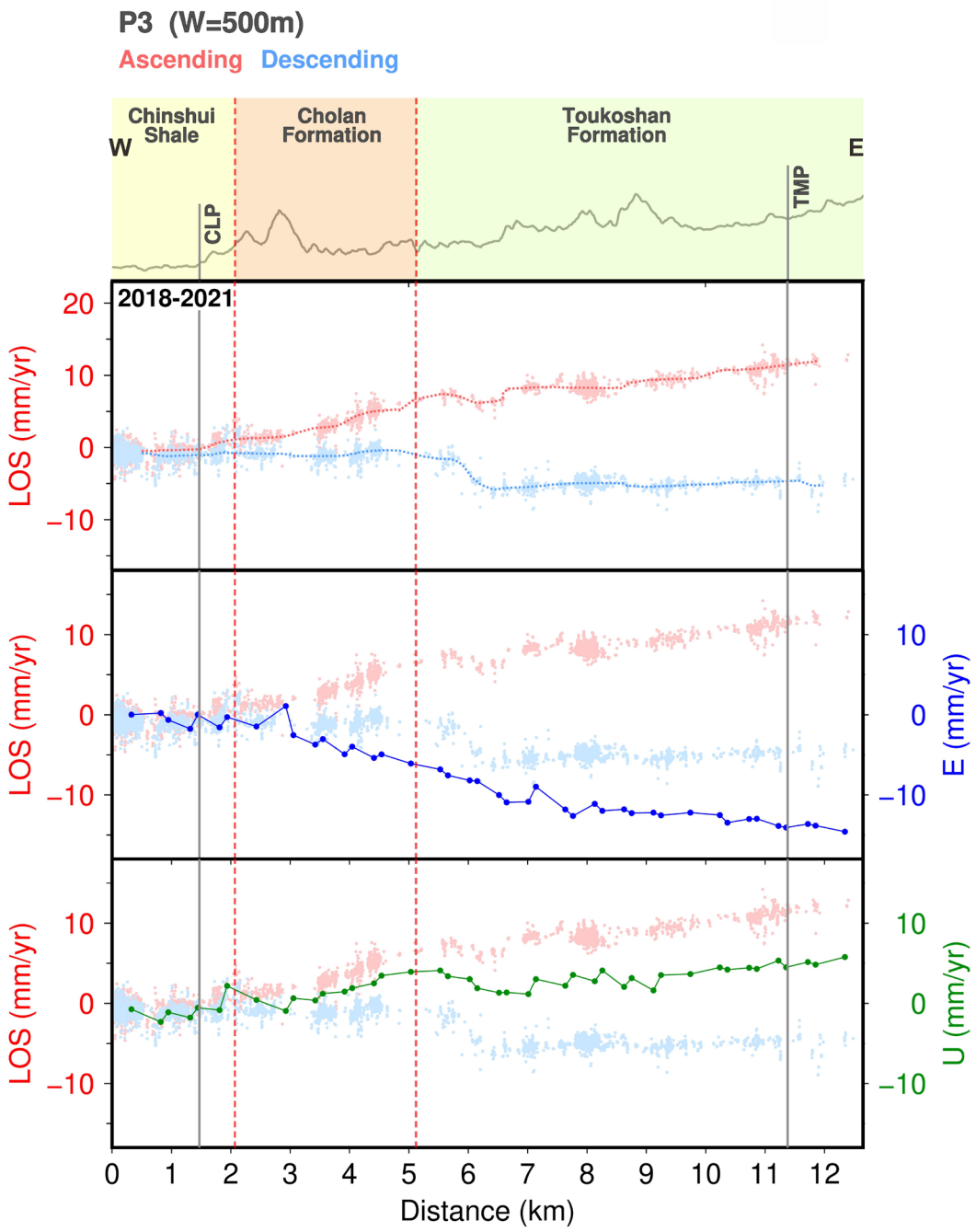


圖6-42：中寮地區的速度變化剖面(P3) (觀測期間為2018至2021年)。

Figure 6-42：Velocity profile (P3) of the Zhongliao area (Observation period: 2018 to 2021).

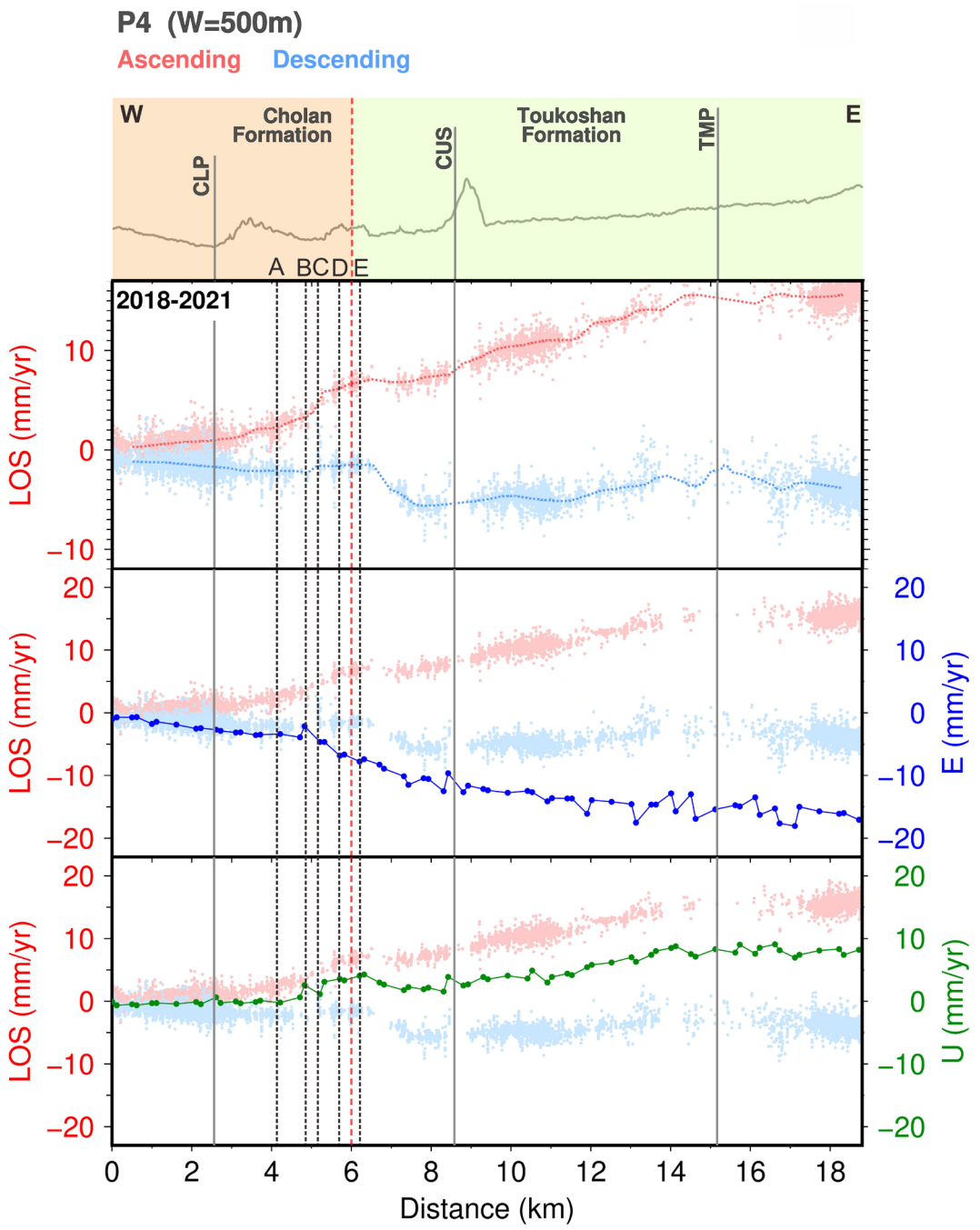


圖6-43：濁水溪的速度變化剖面(P4) (觀測期間為2018至2021年)。

Figure 6-43：Velocity profile (P4) of the downstream region of the Jhuoshuei River (Observation period: 2018 to 2021).

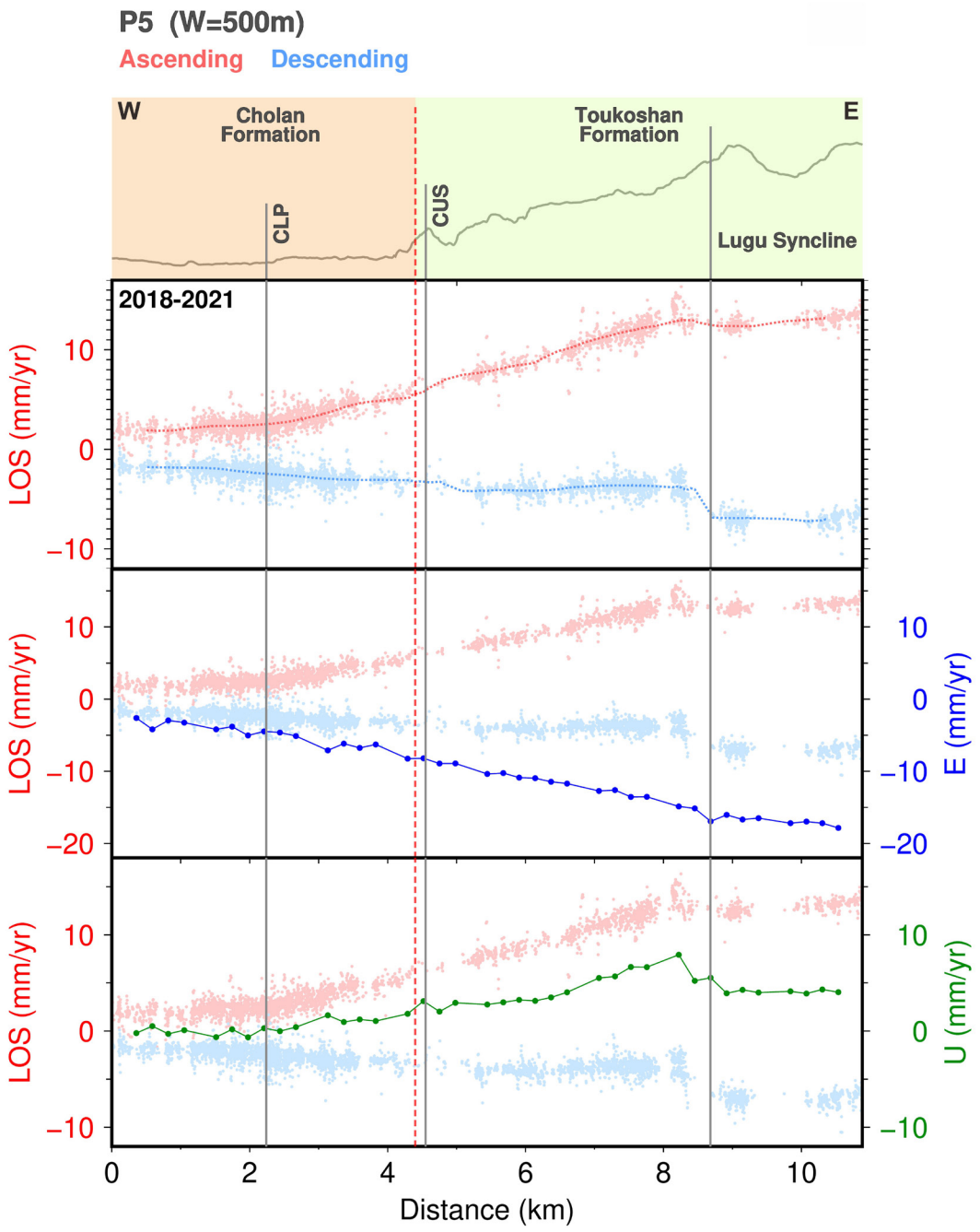


圖6-44：初鄉地區的速度變化剖面(P5) (觀測期間為2018至2021年)。

Figure 6-44：Velocity profile (P5) of the Chuxhsiang area (Observation period: 2018 to 2021).

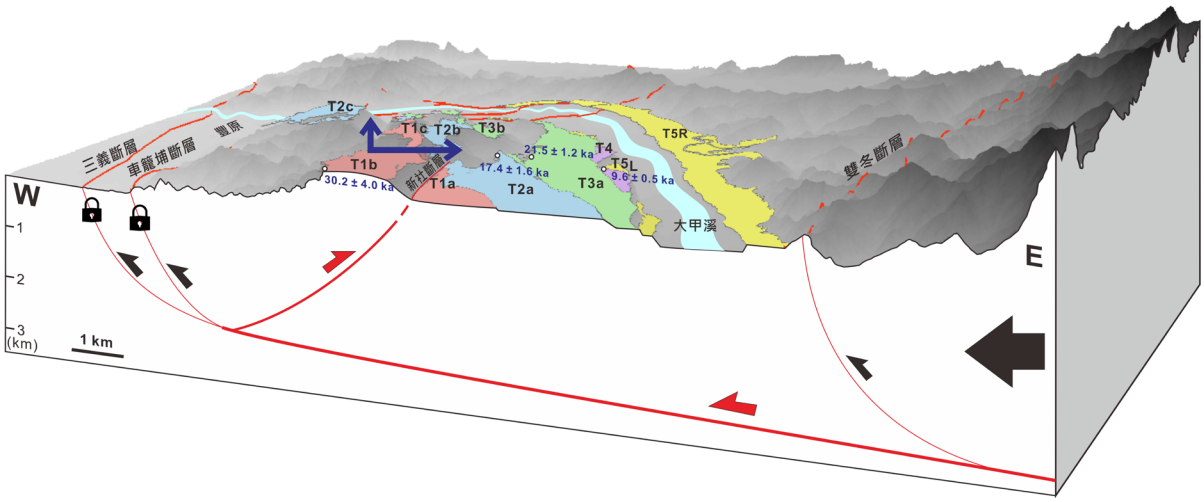


圖6-45：新社斷層的構造模型。

Figure 6-45：Structural model of the Xinshe Fault.

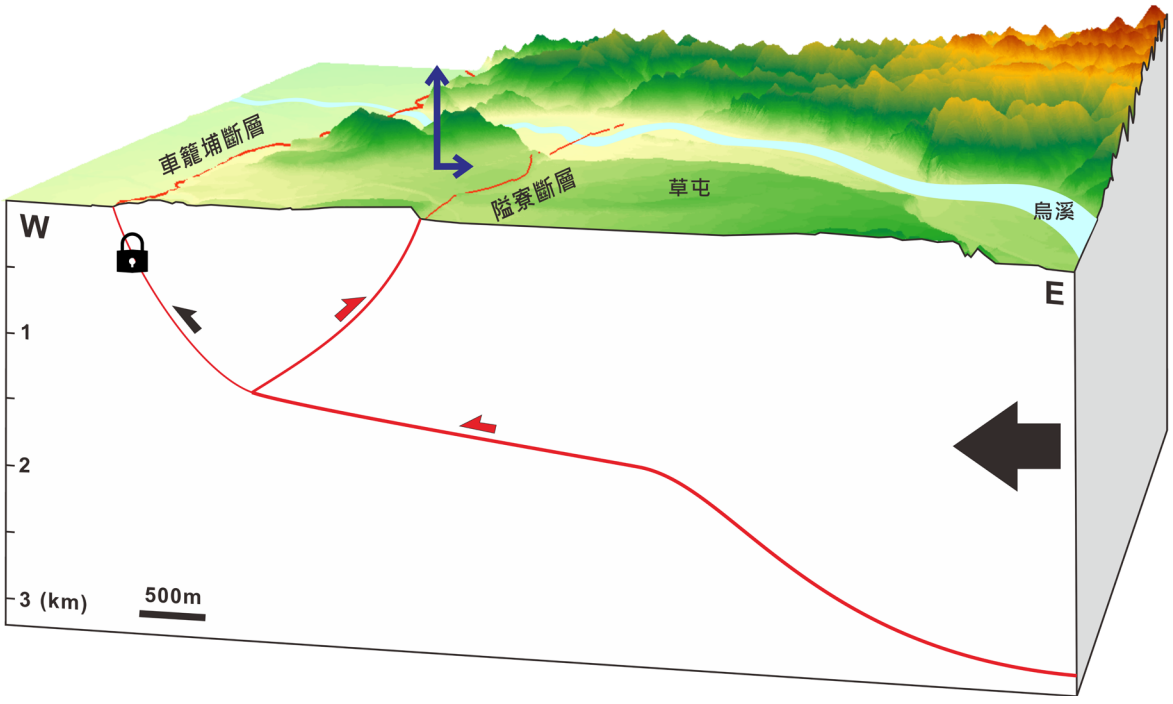


圖6-46：隘寮斷層的構造模型。

Figure 6-46：Structural model of the Ailiao Fault.

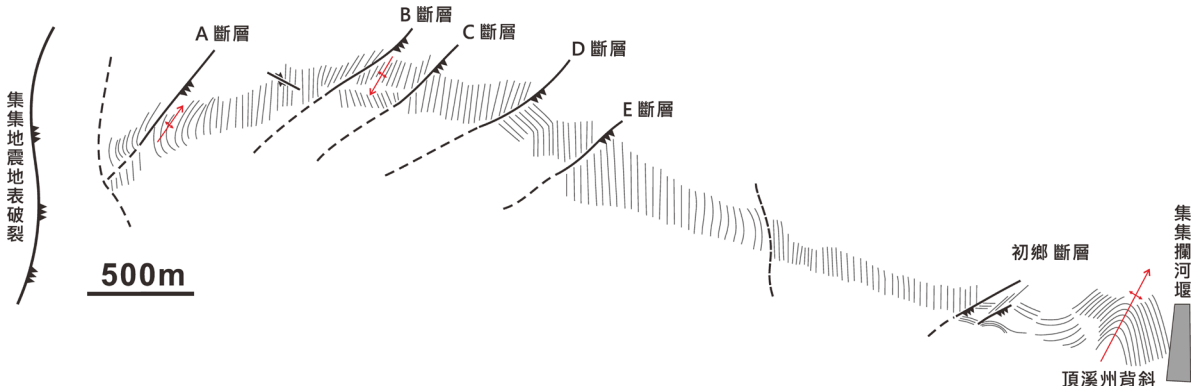


圖6-47：濁水溪下游的路線地質圖。(改繪自林啟文等，2019)。

Figure 6-47：Geological map along the route in the downstream region of the Jhuoshuei River. (Adapted from Lin Qi-Wen et al., 2019)

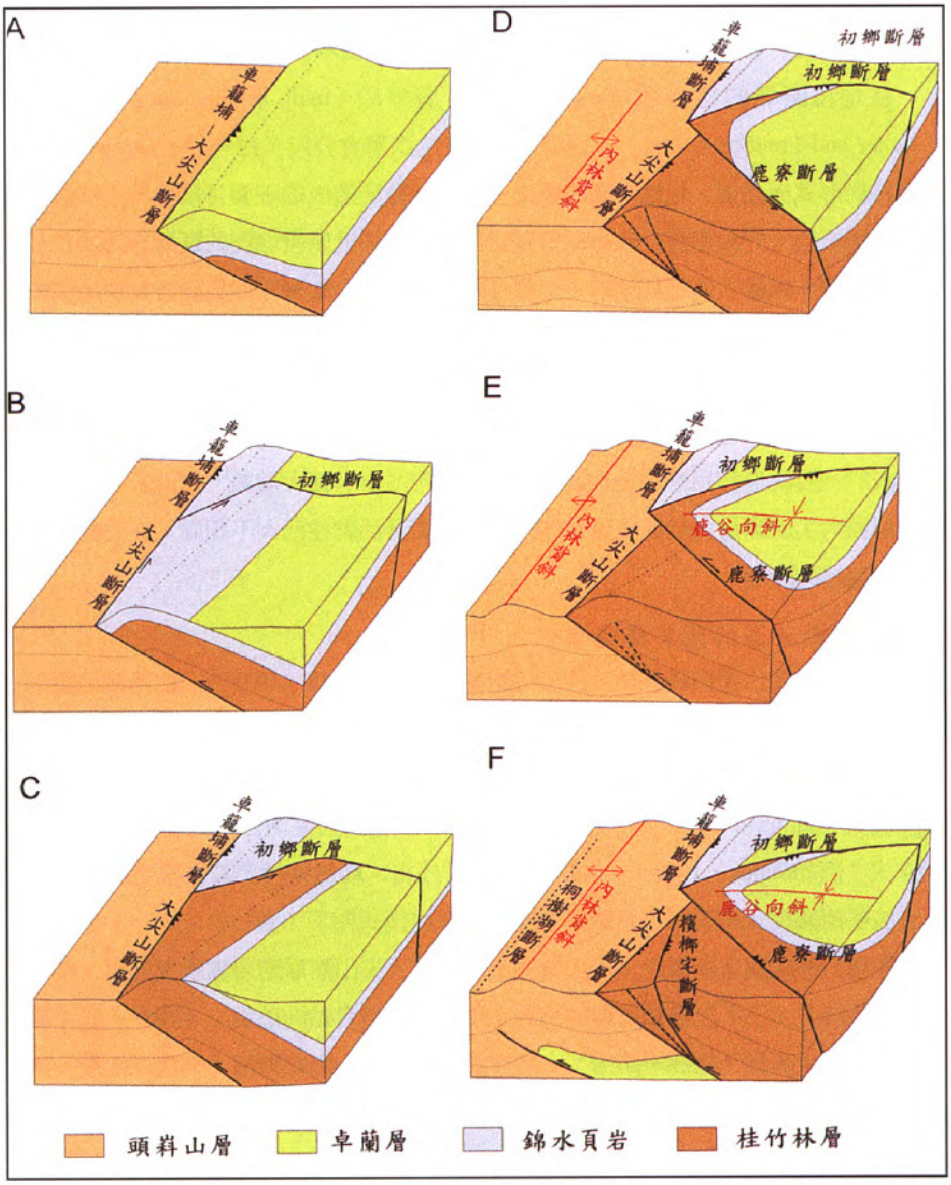


圖6-48：車籠埔斷層與大尖山斷層間的構造演化示意圖(林啟文等，2000)。

Figure 6-48：Diagram of tectonic evolution between the Chelungpu Fault and the Tachienshan Fault (Lin et al., 2000).

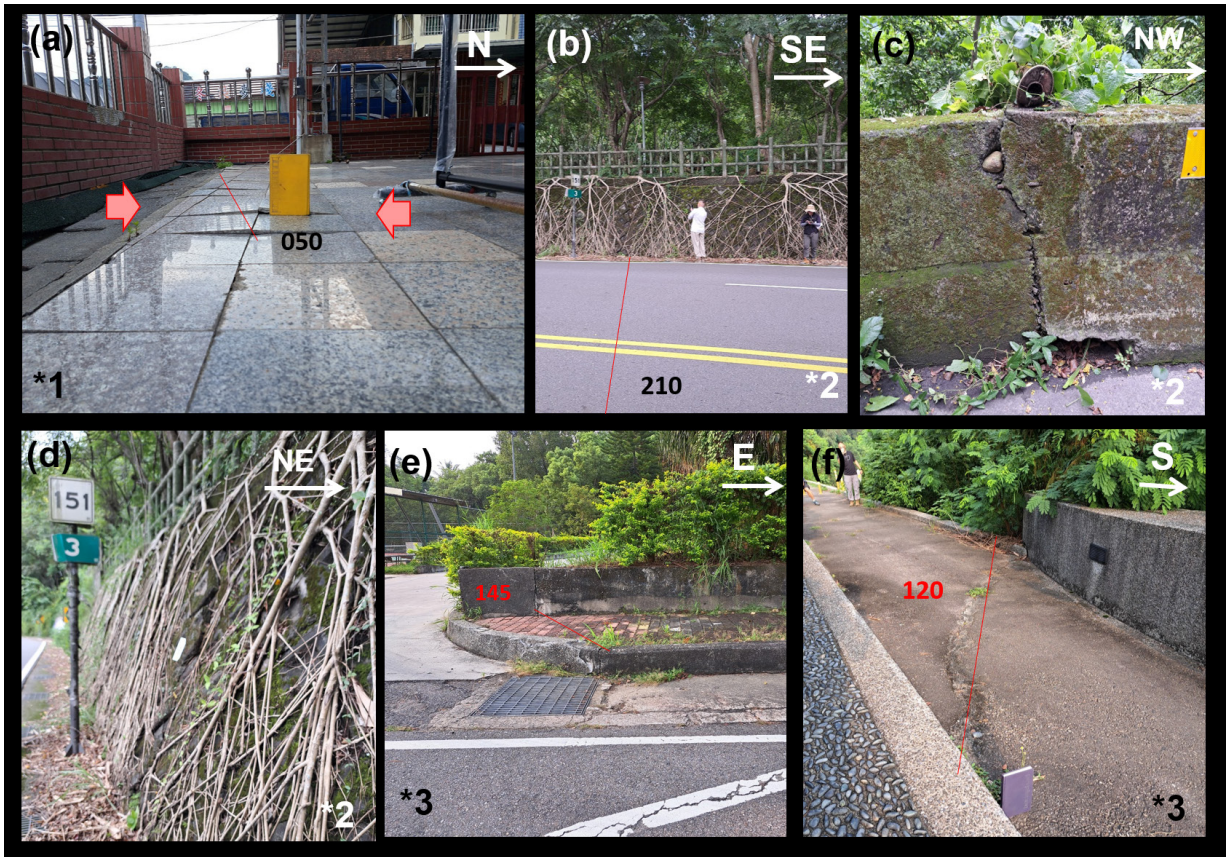


圖6-49：中部地區地表變形調查結果。(a) 調查點 1，草屯雙冬社區活動中心的磁磚擠壓破裂現象。(d) 調查點 2，初鄉 151 縣道(中正路)旁的擋土牆破裂情況，其破裂走向約為 210 度。 (c) 調查點 2，151 縣道(中正路)在道路另一側亦可觀察到對應的破裂。(d)該擋土牆自 1999 年建置完成後，在受到斷層活動影響而有錯動跡象，且 (e) 調查點 3，921 地震博物館南側道路破裂情況。(f) 調查點 3，921 地震博物館南側河堤破裂情況。

Figure 6-49：Surface deformation survey results in the central Taiwan region. (a) Survey Point 1, tile compression and cracking at the Shuangdong Community Activity Center in Caotun. (b) Survey Point 2, cracking in the retaining wall beside County Road 151 (Zhongzheng Road) in Chuxiang, with a fracture direction of approximately 210 degrees. (c) Corresponding cracks were observed on the opposite side of County Road 151 (Zhongzheng Road). (d) The retaining wall, completed in 1999, shows signs of fault movement. (e) Survey Point 3, cracking on the south road of the 921 Earthquake Museum. (f) Survey Point 3, cracking in the riverbank near the south side of the 921 Earthquake Museum.

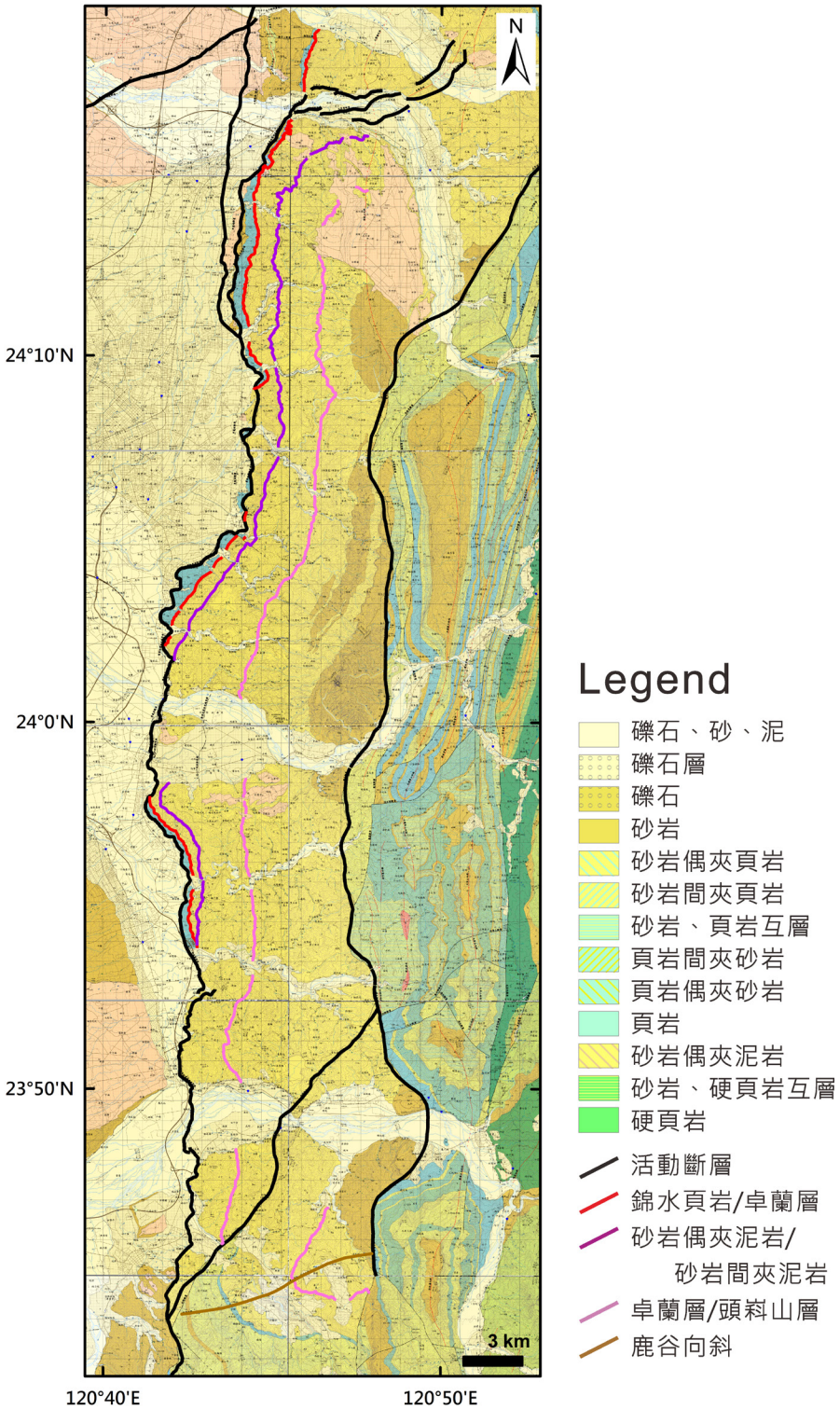


圖6-50：中部淺山區的岩性地質圖(比例尺1:250,000)。資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心岩性地質圖(后里、東勢、臺中市、新社、霧峰、國姓、南投、中寮、竹山、集集、瑞竹、溪頭圖幅)。

Figure 6-50：Lithological Unit Assemblage Map of the shallow mountainous areas in the central Taiwan region (Scale 1:250,000). Data source: Lithological Unit Assemblage Map published by the Central Geological Survey, MOEA (Houli, Dongshih, Taichung City, Xinshe, Wufong, Guosing, Nantou, Jhongliao, Jhushan, Jiji, Rueijhu, Sitou maps).

6-4 斷層錯位模擬

針對車籠埔斷層及其周遭區域，本研究配合速度場剖面成果，由北至南選擇了其中四條剖面(P1、P2、P4、及P5，如圖6-39所示)，考慮不同情境之斷層幾何與滑動量，將其可能產生之東西、南北與垂直方向的地表變形投影至LOS方向後，與2014~2018、2018~2021與2022~2023三個時間段之雷達影像上升與下降軌道所產生之速度場剖面進行匹配。

由速度場變化與斷層錯位情境的擬合，我們可以對目標區域之構造型態進行更進一步的討論。針對所選取的剖面區域，本研究在斷層錯位模擬的結果顯示：

1. 車籠埔斷層滑動面向東傾，平均角度小於20度，斷層面滑動頂部深度北淺南深，整體滑動面寬度大，速率較大(>10 mm/yr)。
2. 新社線形滑動面向西傾，較車籠埔斷層陡，平均角度大於20度，斷層面滑動頂部較淺，整體滑動面寬度小，速率較大(>10 mm/yr)。
3. 隘寮段層滑動面向西傾，傾面略緩約與車籠埔斷層相當，平均角度小於20度，斷層面滑動頂部較淺，整體滑動面寬度小，速率較小(<=10 mm/yr)。

配合區域背景地質架構，斷層幾何的分布型態可與前人研究進行驗證。由北往南來說，擬合之車籠埔斷層滑動面頂部在北段相對較淺而南段較深，此一斷層分段的特性在集集地震同震地表變形行為以及本計畫所監測之間震速度場皆可得到呼應。由西往東來說，車籠埔斷層作為變形前緣之一的活動斷層，其滑動面在間震期間呈現鎖定狀態，然而車籠埔斷層以東之新社線形與隘寮斷層，仍持續在地表上呈現出顯著的形變，這可能是這些構造為了調適累積的應力在幾何上以背衝斷層型態往東逆衝的結果。本研究擬合之斷層錯位結果顯示，前緣斷層(如車籠埔斷層)與背衝構造(如新社線形與隘寮斷層)對於地表變形量各有貢獻，建議未來應針對這些背衝構造進行持續監測，以提升我們對區域應力場在同震與間震週期裡隨時間演化的理解。

第七章、結論

本年度計畫針對中部地區，使用了2014~2023年間的雷達衛星影像來解算觀測區域之地表變形，並對此區域內之重要區域、活動斷層附近之地表變形狀況敘述，並且針對部分區域進一步觀測、調查、或模擬。

由於雷達衛星影像本質，我們將觀測期間分成三個時段，分別為2014~2018, 2018~2021, 以及2022~2023等三個時間區段。本計畫分別完成這三個時段中升、降軌地表變形之解算，分別使用了74/58, 215/228, 60/49個影像時間，降軌影像又接合南北兩張總共四個圖幅區塊、升軌影像使用兩個圖幅區塊來綜合解算觀測區域之地表變形。這些解算也與同時期之cGNSS站位資料對比，藉由cGNSS資料來檢核雷達衛星解算之地表變形與速率。

與各時段同時期大約80個cGNSS測站比對後，資料品質以2018-2021期間的資料品質最高，斜率都接近1，R^2也都大於0.9甚至到達0.97，而RMSE 則接近或是小於3 mm/yr。而另外兩個時段GNSS與PS速度比較的斜率多在0.8附近，R^2大多超過0.85（除了2014-2018升軌資料），而RMSE則介於2.5到6.82之間。由過去數年的執行計畫結果與今年結果都顯示影像數量與時間密度是控制資料品質的關鍵因素。因此2018~2021時段資料品質最高，本計畫也利用該時段資料換算獲得垂直與東西向速率。

由解算得到之地表變形發現在最粗的尺度可以彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷層將今年計畫觀測區域分為由西向東四個區塊，分別大致呈現該區塊之地表變形特性。在彰化斷層以西的區塊，以地層下陷為主，跨彰化斷層並沒有明顯的錯動。彰化斷層以東至車籠埔斷層中間，部分地區在八卦山區塊有微幅相對抬升（D剖面）。

車籠埔斷層以東到大茅埔-雙冬斷層中間的區塊中，跨車籠埔斷層處幾乎沒有錯動，然而這一區塊內部有不少的變形行為。除了光復國中以東數百公尺河堤有數處剪切外，包含新社線型、隘寮線型、中寮等南北沿線都有小幅但是足夠顯著的錯動。透過地表變形資料、地形觀察、文獻回顧，我們認為新社與隘寮以類似背衝斷層的

方式形成地表變形。另外透過二維模擬，我們認為這個區段車籠埔斷層大概是20°向東傾斜的面，而新社、隘寮等背衝構造則是20~40度不等、向西傾斜。本計畫調查結果顯示有一些變形不在斷層沿線，而是在地層與地層交界附近，在不同剖面中可看到部分錦水、卓蘭、頭嵙山層的交界有較明顯的變形，顯示除了斷層滑動面以外，岩層材料差異也是吸收構造應力的方式。由本計畫產生之垂直速度場觀察，車籠埔斷層以東有一南北狹長的抬升區，這個抬升區大部分坐落於頭嵙山層內，顯示非同震時期膠結較差的地層受到水平應力擠壓可能部分以垂直抬升方式對應變形。同樣觀察本計畫解算之東西向速度場可觀察到，車籠埔斷層東側由新社與草屯可以區分成三個區塊，新社以北的區塊在斷層兩側沒有東西向的相對運動。新社到草屯這一區塊則有大約5mm/yr的東西向速度差。草屯以南的車籠埔斷層東側除了一南北向非常狹窄的過渡帶之外，斷層兩側則有1~2cm/yr的東西向速度差，而前述的「過渡帶」在套疊地礦中心的地質圖後，大部分都是落在卓蘭層中，而速度差大的則是頭嵙山層。

在野外查核時我們於草屯雙冬社區活動中心見到地面與磁磚破壞，當地居民也談到該處持續破壞的現象，這與雷達解算資料中顯示大茅埔-雙冬以東的區塊有相對抬升的現象一致，另外我們在初鄉151縣道也觀察到破壞現象，顯示初鄉斷層持續潛移的活動性，與雷達資料符合。

Chapter 7 : Conclusions

This year's project focuses on central Taiwan, utilizing radar satellite images from 2014 to 2023 to resolve surface deformation in the observation area. Our results describe the surface deformation conditions in key areas within this region, particularly near active faults, and include further observation, investigation, or simulation for selected areas.

Due to the inherent characteristics of radar satellite imagery, tectonic settings, and general deformation patterns in Taiwan, the observation period was divided into three distinct intervals: 2014~2018, 2018~2021, and 2022~2023. This project successfully resolved surface deformation for both ascending and descending tracks during these three periods. The resolution was achieved using 74/58, 215/228, and 60/49 images, respectively. In the descending track, we combined four frames from the northern and southern acquisitions into the observation data. In the ascending track, we utilized two frames to comprehensively resolve surface deformation within the observation area. Furthermore, these results were compared with cGNSS station data from the corresponding periods to validate the surface deformation and rates derived from radar satellite calculations based on cGNSS data.

After comparing approximately 80 cGNSS stations during the same periods, the data quality was highest for the 2018~2021 period. The slopes were close to 1, the R^2 values were all greater than 0.9, even reaching 0.97, and the RMSE was close to or less than 3 mm/yr. For the other two periods, the slopes of the GNSS and PS velocity comparisons were slightly larger mostly around 0.8, with R^2 values mostly exceeding 0.85 (except for the 2014~2018 ascending track data), and RMSE ranged between 2.5 and 6.82. Results from past years' projects and this year's results both indicate that the number of images and time density are key factors in controlling data quality. Therefore, the data quality was highest

for the 2018~2021 period, and this project also used data from this period to calculate vertical and east-west velocities.

The surface deformation results from our calculations reveal that, in the first order, the Changhua Fault, Chelungpu Fault, and Tamaopu-Shuangdong Fault divide the observation area of this year' s project into four blocks from west to east, each roughly exhibiting the surface deformation characteristics of that block. In the block west of the Changhua Fault, subsidence is predominant, with no significant displacement across the Changhua Fault. Between the Changhua Fault and the Chelungpu Fault, some areas in the Pagua Mountain block show slight relative uplift (Profile D).

In the block between the Chelungpu Fault and the Tamaopu-Shuangdong Fault, there is almost no displacement across the Chelungpu Fault. However, there are numerous deformation activities within this block. Besides several shear zones on the dike a few hundred meters east of Guangfu Junior High School, there are minor but significant displacements along the north-south lines of Xinshe, Ailiao, and Zhongliao areas. Through surface deformation data, topographic observations, and literature review, we believe that the deformations in Xinshe and Ailiao are formed in a manner similar to back-thrust faults.

Additionally, through two-dimensional modeling, we believe that the Chelungpu Fault in this section dips approximately 20° eastward, while the back-thrust structures in Xinshe and Ailiao dip westward at angles ranging from 20° to 40°. The results of this project indicate that some deformations are not along the major fault lines but near the interfaces between different strata. In various profiles, significant deformations can be observed at the boundaries of the Jinshui, Zhuolan, and Toukoshan formations, indicating that, in addition to fault slip surfaces, differences in rock material also play a role in absorbing structural stress.

Observations from the vertical velocity field generated by this project reveal a north-south elongated uplift zone east of the Chelungpu Fault. This uplift zone is mostly situated within the Toukoshan Formation, indicating that during interseismic periods, the poorly cemented strata may respond to horizontal stress through vertical uplift. Similarly, observations of the east-west velocity field resolved by this project show that the eastern side of the Chelungpu Fault can be divided into three blocks from Xinshe to Caotun. The block north of Xinshe shows no relative east-west movement on either side of the fault. The block from Xinshe to Caotun exhibits an east-west velocity difference of approximately 5 mm/yr. South of Caotun, aside from a very narrow north-south transition zone, there is an east-west velocity difference of 1~2 cm/yr on either side of the fault. When overlaid with the geological map from the Central Geological Survey, most of the "transition zone" falls within the Zhuolan Formation, while the areas with larger velocity differences are in the Toukoshan Formation.

During field verification, we observed ground and tile damage at the Shuangdong Community Activity Center in Shuangdong village. Local residents also reported ongoing damage at this location, which is consistent with the radar data indicating relative uplift in the block east of Tamaopu-Shuangdong. Furthermore, we observed damage along County Road 151 in Chuxiang, suggesting the continuous creeping activity of the Chuxiang Fault, which aligns with the radar data.

參考文獻

大江二郎（1938）臺中州國姓油田調查報告臺灣總督府殖產局出版，第 804 號。

中國石油公司，中國石油公司臺探總處（1974）苗栗地質圖（1:100,000）。

中國石油公司，中國石油公司臺探總處（1982）臺中地質圖（1:100,000）。

中國石油公司臺探總處（1986）嘉義地質圖，比例尺十萬分之一。中國石油公司出版。

王乾盈、郭炫佑（2003）以反射震測法偵測鐵砧山斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第 14 號，第 77-87 頁。

石再添、楊貴三（1985）八卦臺地的活動斷層與地形面。國立臺灣師範大學地理學研究報告，第 11 期，第 173-186 頁。

石再添、鄧國雄、楊貴三（1984）大肚臺地的活動斷層與地形面，中國地理學會會刊，12 號，9-21 頁。

石晶瑩、景國恩、張午龍、莊昀叡、陳建良（2019）利用 GNSS 與精密水準資料解析臺灣中部地區之斷層滑移虧損速率。經濟部中央地質調查所彙刊，第 32 號，第 45-63 頁。

石瑞銓、王維豪、李元希（2011）斷層帶地下構造調查研究（總報告）。經濟部中央地質調查所報告，共 183 頁。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山（2002）地震地質與活動斷層資料建置：淺層地球物理探勘（1/5）。經濟部中央地質調查所研究報告，共 166 頁。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山（2004）地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 地球物理探勘計畫（3/5）。經濟部中央地質調查所報告 93-8 號，共 218 頁。

石瑞銓、陳平護、顏宏元、林正宏（2000）臺灣中部與臺東地區活動斷層地球物理探勘。經濟部中央地質調查所研究報告，共126頁。

石瑞銓、謝榮木、林育徹（2003）彰化斷層淺層反射震測調查。經濟部中央地質調查所特刊，第14號，第89-93頁。

何信昌、陳勉銘（2000）臺中圖幅及說明書，，五萬分之一臺灣地質圖第24號。經濟部中央地質調查所。

何春蓀（1959）臺灣中部臺中與南投間之逆衝斷層構造臺灣省地質調查所彙刊，第11號，13-20頁。

李元希、石瑞銓（2008）地震地質與地變動潛勢分析-斷層帶地下構造調查研究（1/4）。經濟部中央地質調查所研究報告，第96-12號，共128頁。

李元希、吳維毓、石同生、盧詩丁、謝孟龍、張徽正（2000）九二一集集地震地表變形特徵-埤豐橋以東。經濟部中央地質調查所特刊，第12號，，19-40頁。

沈淑敏、張瑞津、楊貴三（2005）地震地質調查及活動斷層資料庫建置-活動構造地形及資料庫建置分析（1/2）。經濟部中央地質調查所研究報告，第94-6號，共80頁。

沈淑敏、張瑞津、楊貴三、古念偉、蘇惠貞（2006）活動構造地形判釋及資料建置分析（總報告）。經濟部中央地質調查所報告，共105頁。

林啓文、周稟珊、張育仁（2019）臺灣中部濁水溪地區卓蘭層的構造特性及其意義。經濟部中央地質調查所特刊，第34號，第1-23頁。

林啓文、劉彥求、周稟珊、林燕慧（2021）臺灣活動斷層調查的近期發展。經濟部中央地質調查所彙刊，第三十四號，第1-40頁

林啟文、石同生、石瑞銓（2003）臺灣中部南投地區的車籠埔斷層帶特性研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 16 號，53-72 頁。

林啟文、吳維毓、林燕慧、陳致言（2001）活動斷層 - 清水斷層調查。活動斷層調查報告，經濟部中央地質調查所全球資訊網。

林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正（2000）臺灣活動斷層概論，五十萬分之一 : 臺灣活動斷層分布圖說明書，第二版。經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，共 122 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村 （2008）臺灣中部的活動斷層二萬五千分之一活動斷層條帶地質圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 21 號，共 148 頁。

林啟文、盧詩丁、陳文山（2012）臺灣活動斷層分布圖 2012 年版說明書。經濟部中央地質調查所刊，第 26 號，1-30 頁。

林啟文、盧詩丁、黃文正、石同生、張徽正（2000） 臺灣中部濁水溪以南地區的集集地震斷層與構造分析。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 89-112 頁。

林朝棨（1957）臺灣地形，臺灣省通志稿，第一卷，第一冊。臺灣文獻委員會，424 頁。

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

侯進雄（2007）臺灣活動斷層構造相關地殼變形監測研究。國立臺灣大學地球科學研究所博士論文 , 共 209 頁。

張國楨、徐澔德、詹瑜璋、陳柔妃、葉恩肇、賴光胤（2011）近斷層高精度地形資料之判釋與分析（1/4）。經濟部中央地質調查所報告第 100-10 號，300 頁。

張國楨、徐澔德、詹瑜璋、陳柔妃、葉恩肇、賴光胤（2014）近斷層高精度地形資料之判釋與分析（總報告）。經濟部中央地質調查所報告，共 329 頁。

張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁（1998）臺灣活動斷層概論 - 五十萬分之一臺灣地區活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所，103 頁。

許文立（2001）彰化斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理所碩士論文，共 101 頁。

陳文山、李錫堤、陳于高、張瑞津、沈淑敏、楊貴三（2003）地震地與活動斷層資料庫建置 - 槽開挖與古地震研究（2/5）。經濟部中央地質調查所研究計畫報告。

陳文山、李錫堤、陳于高、張瑞津、沈淑敏、楊貴三、齊士崢（2002）地震地與活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究（1/5）。經濟部中央地質調查所研究計畫報告。

陳文山、陳于高、張瑞津、沈淑敏、楊貴三（2004）地震地質與活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究（3/5）。經濟部中央地質調查所研究計畫報告。

陳文山、陳于高、張瑞津、沈淑敏、楊貴三（2005）地震地質與活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究（4/5）。經濟部中央地質調查所研究計畫報告。

陳文山、陳于高、楊小青（2014）斷層活動特性分析與評估（總報告）。經濟部中央地質調查所報告，共 189 頁。

陳文山、陳于高、楊志成、顏一勤、楊小青（2006）地震地質與活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究（5/5）。經濟部中央地質調查所研究計畫報告與總報告。

陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰（2000）九二一集集大地震的地震斷層特性與構造意義。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號 ,，139-154 頁。

陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青（2008）地震地質與地變動潛勢分析計畫 - 斷層長期滑移速率與再現週期研究（1/4）。經濟部中央地質調查所報告第 96-10 號，共 86 頁。

陳文山、游能悌、楊小青（2010）斷層長期滑移速率與再現周期研究（總報告）。經濟部中央地質調查所報告，共 141 頁。

陳勉銘、陳華玟、朱傚祖、謝凱旋（2008）從鑽探岩心探討彰化斷層的特性。經濟部中央地質調查所特刊，第 20 號，第 33-47 頁。

陳華玟、陳勉銘、邵屏華、張碩芳、謝凱旋（2007）彰化斷層與八卦丘陵的演化。地質環境與資源研討會論文集，第 63-70 頁。

黃文正、陳建志、波玫琳、顏一勤（2019）活動斷層特性精細調查（1/4）。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告 B10834 號，共 104 頁。

黃金來（1968）臺中車籠埔區震測解釋報告中國石油公司未發表報告。

黃鑑水、陳勉銘（2000）臺灣中部地區之雙冬斷層。經濟部中央地質調查所特刊 , 第 12 號，171-182。

楊貴三 （1986） 臺灣活斷層的地形學研究 - 特論活斷層與地形面的關係。私立中國文化大學地學研究所博士論文，178 頁。

楊貴三、沈淑敏（2010）。臺灣全志，卷二，土地誌，地形篇。南投市：臺灣文獻館。

經濟部中央地質調查所（1999）九二一地震地質調查報告，共 315 頁

董倫道、李奕亨、陳文山（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫 - 地球物理探勘計畫（5/5）。經濟部中央地質調查所研究報告，第 95-09 號，共 187 頁。

董倫道、陳文山、李奕亨（2007）地震地質調查及活動斷層資料庫建置:淺層地球物理探勘（總報告）。經濟部中央地質調查所報告，共 221 頁。

葛滿龍 (2006) 新社地區盒階地形與地下構造關係之研究。國立臺灣師範大學地理學系，碩士論文。

劉彥求、林啟文、林燕慧、陳柏村（2008）活動斷層 - 大甲斷層調查。活動斷層調查報告，經濟部中央地質調查所全球資訊網。

劉桓吉、李錦發（1998）雲林圖幅及說明書 , 五萬分之一臺灣地質圖第 38 號。經濟部中央地質調查所出版 , 共 47 頁。

鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三、許民陽（1984）臺灣西部與南部活斷層的地形學研究。師大地理研究所地理研究報告，第 10 期，49-94 頁。

蕭瑞文（2002）清水斷層之淺部構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 104 頁。

羅偉、吳樂群、陳華玟（1999）國姓圖幅與說明書 , 五萬分之一臺灣地質圖第 25 號經濟部中央地質調查所 , 共 71 頁。

饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫 - 活動斷層監測系統計畫（5/5）。經濟部中央地質調查所報告第 95-10 號 , 共 147 頁。

饒瑞鈞、余致義、胡植慶、洪日豪、詹瑜璋、李建成（2002）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫 - 活動斷層監測系統計畫（1/5）。經濟部中央地質調查所研究報告 , 共 124。

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 40(11), 2375-2383.

California Department of Conservation（2015）The Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act.

Chang, S.L.（1971） Subsurface geologic study ofthe Taichung basin: Petrol. Geol. Taiwan, no.8, 21-45.

Chen, J.S.（1971） A comparative study of the refraction and reflection seismic data obtained on the Changhua Plain to the Peikang Self, Petrol. Geol. Taiwan, No. 15, P. 199-217.

Chen, W.S., Chen, Y.G. and Cheng, H.C.（2001a） Paleoseismic study of the Chelungpu fault in the Mingjian area: Western Pacific Earth Sciences, Vol. 1, no.3, 351-358.

Chen, W.S., Chen, Y.G., Chang, H.C., Lee, Y.H. and Lee, C.C.（2001b） Paleoseismic study of the Chelungpu fault in the Wanfung area: Western Pacific Earth Sciences, Vol. 1, no.4, 43-72.

Chen, W.S., Lee, K.J., Lee, L.S., Ponti, D.J. Prentice, C., Chen, Y.G., Chang, H.C. and Lee, Y.H.（2004） Slip rate and recurrence interval of the Chelungpu fault during the past 1900 years: Quaternary International, 115-116, 167-176.

Chen, W.S., Lee, K.J., Lee, L.S., Streig, Ashley R., Chang, H.C. and Lin, C.W.（2007） Paleoseismic evidence for coseismic growth-fold in the Chichi earthquake and early earthquakes, central Taiwan: J. Asian Earth Sci., doi: 10.1016/j-jseaes 2006.07.027.

Chen, W.S., Y.G. Chen, Shih, R.C., Liu, T.K., Huang, N.W., Lin, C.C., Sung, S.H. and Lee, K.J.（2003） A modern analog of the out-of-sequence thrust system in relation with the Chi-Chi earthquake ruptures in the Western Foothills, central Taiwan: J. Asian Earth Sci., Vol.21, 473-480.

Chen, W.S., Yang, C.C., Yen, Y.C., Lee, L.S., Lee, K.J., Yang, H.C., Chang, H.C., Ota Y., Lin, C.W., Lin, W.H., Shih, T.S. and Lu, S.T.（2006） Late Holocene Paleoseismicity of the Southern Part of the Chelungpu Fault in Central Taiwan: Evidence from the Chushan excavation site: Bull. Seism. Soc. Am., Vol.97, no.1B, 1-13.

Chen, Y.-G., Chen, Y.-W., Chen, W.-S., Zhang, J.-F., Zhao, H., Zhou, L.-P., and Li, S.-H.（2003） Preliminary results of long-term slip rates of 1999 earthquake fault by luminescence and radiocarbon dating: Quaternary Science Reviews, v. 22, no. 10, p. 1213-1221.

Chen, Y.G., Hung, J.H., Lai, K.Y., Lin, Y.N., Wilcox, T., Mueller, K.（2007） River Terrace Development in Response to Folding above Active Wedge Thrusts in Houli, central Taiwan. J. Asian Ear. Sci., doi: 10.1016/j.jseaes.2006.07.023.

Chen, Y. G., Lai, K. Y., Lee, Y. H., Suppe, J., Chen, W. S., Lin, Y. N. N., Wang, Y., Hung, J. H.& Kuo, Y. T. (2007). Coseismic fold scarps and their kinematic behavior in the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B3).

Cheng, P. H.（1990）Electrostratigraphic Study of the Quaternary Formations in Houli Tableland. Proceedings of The Geological Society of China, 33(2), 127-142.

Costantini, M., Falco, S., Malvarosa, F. and Minati, F. (2008) A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. In IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Vol. 2, pp. II-449). IEEE.

Costantini, M., Malvarosa, F., Minati, F. and Vecchioli, F. (2012) Multi-scale and block decomposition methods for finite difference integration and phase unwrapping of very large datasets in high resolution SAR interferometry. In 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 5574-5577). IEEE.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, M. and Crippa, B., (2016) Persistent scatterer interferometry:

A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78-89.

Delcaillau, B., Deffontaines, B., Floissac, L., Angelier, J., Deramond, J., Souquet, P., Chu, H.T. and Lee, J.F.（1998） Morphotectonic evidence from lateral propagation of an active frontal fold; Pakuashan anticline, foothills of Taiwan: Geomorphology, Vol.24, 263-290.

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

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

Ferretti, A., Tamburini, A., Novali, F., Fumagalli, A., Falorni, G. and Rucci, A. (2011) Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring. Energy Procedia, 4, 3465-3471.

Foumelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., ... and Wong, C. (2018) ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 1364-1367). IEEE.

Hooper, A. (2008) A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. Geophysical Research Letters, 35(16).

Hooper, A., D. Bekaert, K. Spaans, M. Arıkan,(2012), Recent advances in SAR interferometry time series analysis for

measuring crustal deformation, Tectonophysics, 514–517, 1-13.

Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H. (2007) Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos. J. Geophys. Res., 112, B07407, doi:10.1029/2006JB004763

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. Letter, 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737

Hsu, T.L. and Chang, H.C.（1979）Quaternary faults in Taiwan: Mem. Geol. Soc. China, no.3, 155-165.

Hsu, Y.J., Simons, M., Yu, S.B., Kuo, L.C., Chen, H.Y., 2003. A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. Earth and Planetary Science Letters 211, 287-294.

Hung, J.H., Wu, Y.H., Yeh, E.C., Wu, J.C and TCDP Scientific Party（2007） Subsurface structure, physical properties and fault zone characteristics in the scientific drilling holes of Taiwan Chelungpu-Fault Drilling Project: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, no.2, 271-293.

Ku, C.C.（1963） Photogeologic study of terraces in north-western Taiwan. Proc. Geol. Soc. China, no.6, 51-60.

Kuo, Y. T., Ayoub, F., Leprince, S., Chen, Y. G., Avouac, J. P., Shyu, J. B. H., ... & Kuo, Y. J. (2014). Coseismic thrusting and folding in the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi earthquake: A high-resolution approach by aerial photos taken from Tsaotun,

central Taiwan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(1), 645-660.

Kuo, Y.T., Wang, Y., Hollingsworth, J., Huang, S.Y., Chuang, R.Y., Lu, C.H., Hsu, Y.C., Tung, H., Yen, J.Y., Chang, C.P., 2019. Shallow Fault Rupture of the Milun Fault in the 2018 M-w 6.4 Hualien Earthquake: A High-Resolution Approach from Optical Correlation of Pleiades Satellite Imagery. Seismol Res Lett 90, 97-107.

Lai, K. Y., Chen, Y. G., Hung, J. H., Suppe, J., Yue, L. F., & Chen, Y. W. (2006). Surface deformation related to kink-folding above an active fault: Evidence from geomorphic features and co-seismic slips. Quaternary International, 147(1), 44-54.

Le Béon, M., Suppe, J., Jaiswal, M. K., Chen, Y. G., & Ustaszewski, M. E. (2014). Deciphering cumulative fault slip vectors from fold scarps: Relationships between long-term and coseismic deformations in central Western Taiwan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(7), 5943-5978.

Lin, C.W., Shih, R.C., Lin, Y.H. and Chen, W.S. （2002） Structural Characteristics of the Chelungpu Fault Zone in the Taichung Area, Central Taiwan: Western Pacific Earth Sciences, Vol. 2, no.4, 411-426.

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. Bulletin of the seismological society of America 75, 1135-1154.

Okada, Y., 1992. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. Bulletin of the Seismological Society of America 82, 1018-1040.

Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. and Cabral-Cano, E (2016) Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 90-102.

Ota, Y. , Huang, C.Y. , Yuan, Peter B. , Sugiyama, Y. , Lee, Y. , Watanabe, M. , Sawa, H. Yanagida, M., Sasake, S. and Tanifuchi, K.（2001） Trenchmg study at the Tsaotun site in the central part Ofthe Chelungpu Fault, Taiwan: Western Pacific Earth Sciences, Vol. l, 110.4, 487-498.

Ota, Y., Shishikura, M., Ichikawa, K., Watanabe, M., Yanagida, M., Tanaka, T., Sawa, H., Yamaguchi, M., Lee, Y.H., Lu, S.T., Shih, T.S. and Amagasa, S.（2007） Low-angle reverse faulting during two earthquakes on the northern part of the Chelungpu fault, deduced from the Fengyuan trench, central Taiwan: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, no.1, 55-66.

Ota, Y., Shyu, J. B. H., Chen, Y.-G., and Hsieh, M.-L.（2002） Deformation and age of fluvial terraces south of the Choushui river, central Taiwan, and their tectonic implications. Western Pacific Earth Sciences, 2, No.3, pp.251-260.

Ota, Y., Watanabe, M., Suzuki, Y., & Sawa, H. (2004). Geomorphological identification of pre-existing active Chelungpu Fault in central Taiwan, especially its relation to the location of the surface rupture by the 1999 Chichi earthquake. Quaternary International, 115, 155-166.

Ota, Y., Watanabe, M., Suzuki, Y., Yanagida, M., Miyawaki, A., & Sawa, H. (2007). Style of the surface deformation by the

1999 Chichi earthquake at the central segment of Chelungpu fault, Taiwan, with special reference to the presence of the main and subsidiary faults and their progressive deformation in the Tsauton area. Journal of Asian Earth Sciences, 31(3), 214-225.

Pan, Y. S.（1967）Interpretation and seismic coordination Of the Bouguer gravity anomalies over west-central Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no. 5 , 99-115.

Perissin, D., Wang, Z. and Lin, H. (2012) Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 73, 58-67.

Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. and Wessel, P. (2011), Open radar interferometry software for mapping surface deformation, Eos Trans. AGU, 92(28), doi:10.1029/2011EO280002.

Shimaki, K. and Nakata, T.（1960）Time-predictable recurrence model for large earthquakes: Geophys. Res. Letters, 7, 279-282.

Siame L. L., Chen, R.-F., Derrieux, F., Lee, J.-C., Chang, K.-J.,Bourlès, D. L. Braucher, R., Léanni, L., Kang, C.-C., Chang. C.-P., Chu, H.-T.（2012）Pleistocene alluvial deposits dating along frontal thrust of Changhua Fault in western Taiwan: The cosmic ray exposure point of view. J. Asian Earth Sci., 51, pp.1-20.

Simoes, M., Avouac, J. P., Chen, Y.-G., Singhvi, A. K., Wang, C.-Y., Jaiswal, M., Chan, Y.-C., and Bernard, S.（2007）Kinematic analysis of the Pakuashan fault tip fold, west central Taiwan: Shortening rate and age of folding inception. J. Geophys. Res., 112, B03S14, doi:10.1029/2005JB004198.

Simoes, M., Avouac, J.P. and Chen, Y.G.（2007） Sliprates onthe Chelungpuand Chushlangthmst faults inferred from a deformed Strath tenace along the Dungpura nver, west central Taiwan. J. Geophys. Res. 112,B03S10.

Soergel, U. (Ed.) (2010) Radar Remote Sensing of Urban Areas, vol. 15. Springer Science & Business Media.

Sone, H., Yeh, E.C., Nakaya, T., Hung, J.H., Ma, K.F., Wang, C.Y., Song, S.R. and Shimamoto, T.（2007） Mesoscopic structural observations of cores from the Chelungpu Fault System, Taiwan Chelungpu-Fault Drilling Project Hole-A, Taiwan: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, no.2, 359-377.

Song, S.R., Kuo, L.W., Yeh, E.C., Wang, C.Y., Hung, J.H. and Ma, K.F.（2007b） Characteristics of lithology, fault-related rocks and fault zone structures in TCDP Hole-A: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, no.2, 243-269.

Song, S.R., Wang, C.Y., Hung, J.H. and Ma, K.F.（2007a） Preface to the special issue on Taiwan Chelungpu-Fault Drilling Project（TCDP）: site characteristics and on-site measurements: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, no.2, I-V.

Sun, S.C.（1965）Geology and petroleum potentialities of the Chingshui-Yuanlin area, Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.4, 161-173.

Suppe, J., Namson, J.（1979）Fault-bend origin of frontal folds of the western Taiwan fold-and-thrust belt. Petrol. Geo. Taiwan, 16, 1-18.

Tanaka, H., Wang, C.H., Chen, W.M., Sakiguchi, A., Ujiie, K., Ito, H. and Ando, M.（2002） Initial science report of shallow drilling penetrating into the Chelungpu fault zone, Taiwan: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 13, no.3, 227-251.

Tang, C.H.（1969）Photogeologic interpretation of the Miaoli area, Taiwan, with special reference to its geologic structures: Proc. Geol. Soc. China, no.12, 11-19.

Tsai, H., & Sung, Q. C. (2003). Geomorphic evidence for an active pop-up zone associated with the Chelungpu fault in central Taiwan. Geomorphology, 56(1-2), 31-47.

Wang, C.Y., Kuo, S.Y., Shyu W.L., and Hsiao, J.W.（2003）Investigating Near-surface Structures under the Changhua Fault, West-central Taiwan by the Reflection Seismic Method.

Wang, C.Y., Tanaka, H., Chou, J., Chen, C.C. and Hong, J.H.（2002）Shallow reflection seismics aiding geological drilling into the Chelungpu fault after the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 13, no.2, 153-170.

Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T. and Wiesmann, A. (2003) Interferometric point target analysis for deformation mapping. In IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477) (Vol. 7, pp. 4362-4364). IEEE.

Wright, T. J. (2002). Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 360, 2873-2888.

Wu, J.C., Huang, S.T., Wang, M.H., Tasi, C.C., Mei, W.W., Hung, J.H., Lee, T.Y., Yang, K.M. and Lee, K.F.（2007）Core Slabbing and nannofossil analysis on the Chelungpu fault zone, Taichung, Taiwan: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, No.2, 327-357.

Yeh, E.C., Sone, H., Nakay, T., Ian, K.H., Son, S.R., Hung, J.H., Lin, W., Hirono, T., Wang, C.Y. and Ma, K.F.（2007） Core discription and characteristics of fault zones from Hole-A of the Chelungpu-Fault Drilling Project: Terr. Atmos. Ocean. Sci., Vol. 18, no.2, 327-357.

Yue, L.F., Suppe, J., Hung, J.H.（2005） Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan（Mw = 7.6）. J. Struct. Geol., 27, 2058-2083.

Zhang Lei, Ding Xiaoli, Lu Zhong., 2011. Modeling PSInSAR Time Series without Phase Unwrapping. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,49(1): 547-556.

Zhu, L., 2011. Synthetic Seismograms and Seismic Waveform Modeling.

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
(一) 報告書內容相關建議	
1. 第59頁，請說明2022年Sentinel-1資料品質不穩定原因為何？若機關欲針對該年臺東地震進行分析有無建議之方法？	Sentinel-1原先有A、B兩顆同時服役，然而1B受到太空天氣影響，故障，因此剩下1A拍攝。然而1A的軌道控制精準度降低，所以資料品質較前期稍有下降。 理論上這類品質下降都可以使用較長觀測時間、較多影像解決。然而台灣，特別是花東地區在這幾年有幾個大地震，使雷達影像一起解算有實際困難性。然而雷達差分干涉有基本的精度，我們的處理方式可以將環境限制下最大精度萃取出來。
2. 第64頁提到StaMPS可加裝TRAIN進行大氣改正，是否於本案中有使用？建議加入供機關評估其必要性。	TRAIN大氣修正原理分為兩類，第一類為應用地形資訊修正，第二類為應用全球氣象觀測資料進行修正。由於臺灣的地表變形與地形息息相關，不適宜應用第一類修正，全球的氣象觀測站於臺灣可應用於修正的測站僅有一站，使得全臺灣應用同一修正值，亦無法有效進行大氣修正。因此本案無使用TRAIN進行大氣修正，亦不建議使用於觀測臺灣地表變形。

3. 第67頁，請說明GNSS資料經克利金內差的方法調整後之斷層邊緣是否仍可信?	67頁談到修正可能存在的「長週期」誤差。這樣的誤差有幾種可能減少、降低的方式，克利金內插是多種手段之一。Interpolation之後的邊緣只能參考，克利金也不是修正誤差中的重點。
4. 第76頁，請說明格點化以500米間距進行是否過於模糊而不符機關需求？	我們理解500公尺間距不算精細，但是我們也需要考量內插會過度表現資料。因此我們先以保守方式表現這類資料。未來我們會依照內插的結果並評估使用多少間隔最為適當。
5. 第77頁，請說明南、北分量忽略是否會造成斷層活動判釋的限制？升、降軌影像拍攝日期不同是否會造成解算上的問題？	南北分量說明已列入期末報告內容，我們以升降軌道的平均速度場解析垂直與水平向速度場，因此拍攝日期並不影響。
6. 有關雷達影像處理流程（第80、84、87、90頁），是使用GMTSAR或SNAP？若使用不同軟體，建議可簡單比較供未來機關使用參考。	本計劃主要使用GMTSAR做前半段處理、StaMPS做後半段處理。我們會修正報告內容以符合現今處理狀況。
7. 第81頁，請說明InSAR使用JAXA的DEM是否有特別的原因?	在現代雷達影像、這一類的雷達處理過程中，DEM　的精準程度不若以往重要，誤差也大部分可以在處理過程中消除。　使用 JAXA的DEM是過往不同處理中的使用習慣。

8. 第115-116頁，Ascending與Descending平均速度場的對比，請說明Ascending明顯較差的原因為何。	Ascending 與 Descending 的誤差有差異的狀況通常出現在影像數目較少的時間段。 我們在許多處理資料中觀察到這樣的現象。這部分真正的原因還不完全清楚，目前大多認為這與拍攝時間、大氣狀況有關係。
9. 第123頁，2022-2023的成果提及LNJS & PINT受到2022/9/18池上地震的影響，建議說明為何這兩站東邊的站沒有受到影響？理論上GNSS和InSAR都應該記錄到同樣的地表位移，不論是何原因造成，InSAR的LOS velocity是否有修正地震的影響？	感謝委員專業提問。我們在期中報告中沒有講清楚，事實上LNJS的問題是地震附近有資料缺失，造成該站資料偏差。因此需要找另外的站對比。我們在期末報告第四章、第六章會針對這部分有解釋。
10. 請確認圖2-11與預定完成事項是否符合？	感謝委員建議，該項作業會在期末報告的結果中呈現。
11. 圖3-14~3-20不同時期 LOS 的範圍建議統一，比較能理解各時段差異的原因。	感謝委員建議，我們已於期末報告中改善。
12. 請說明為何只有2014-2018升軌與降軌（圖4-4和4-6）的R^2值差異比其他兩時期大很多？	感謝委員提問，此提問與第八題幾乎一樣，已在該處回覆。

13. 當InSAR velocity and GNSS velocity有比較大的差異時（除了outliers之外），建議團隊可以探討造成這些差異的原因（例如TKJS 測站）明顯和其他資料有差異（圖4-14）的原因為何？	感謝委員建議，我們已在期末報告中討論章節進行討論。
14. 跨斷層的訊號分析建議採用station pair，比較跨過斷層的測站對的基線變化，會比只看單一測站時間序列變化更佳。	感謝委員建議，我們在比對時會選擇適當站位呈現。
15. 請說明車籠埔斷層以西地區北段垂直速度逐年明顯下降的意涵。通過該區之剖面上的大甲斷層缺乏斷層上盤速度大於下盤的現象，亦請說明之。	期中報告時，我們只有時間呈現資料，這部分的討論會在期末報告中增加、呈現。
16. 建議團隊建立在臺中盆地南北方向的速度剖面，可觀察地表在此方向的連續變形情形。	感謝委員建議，我們已於期末報告中改善。
17. 建議與另案（重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估-第二階段）的 GNSS 成果應進行交叉比對。	本案過去分年的計劃確實都有與另案的測量成果進行比對。
18. 建議計畫目標及後續應用可再聚焦並強調業務對接。	感謝委員建議，我們會嘗試在期末報告的緒論、以及結論中加強這方面的論述。

19. 請說明時序分段主因為何？	感謝委員建議，已於報告書中修正。主因是考慮影像品質與觀測頻率，2014-2018.02僅有S1A衛星觀測，2018.02-2021.12有S1A與S1B兩衛星，2022-2023年S1B衛星故障且衛星基線控制較差。
20. 請說明參考站更換是否有橋接問題？	不會。LNJS這一站出現資料欠缺，導致短時間內的速度場偏差，這樣的狀況不會影響整個GNSS框架，以及相關結果。
(二) 報告書內容相關建議（若再度撰寫於期末報告書）	
1. 建議修正內文用字以及符號（GPS or GNSS、mm/yr or 公厘/年、~or –等...）。	感謝委員建議，我們已於期末報告中改善。
2. 建議統一零位移之色碼以及補充圖表中各數字之單位。	感謝委員建議，我們已於期末報告中改善。

3. 建議Abstract內更換「proposal」等用字。	感謝委員，我們會更改成 project，也會再注意其中用詞。
4. 第9頁的圖1-5（B）請補上RMSE，第109頁請補充 RMSE 的單位。	感謝委員建議，我們已於期末報告中改善。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
(一) 報告書內容相關建議	
1. 本期報告之易讀性較上期明顯改善，且撰寫完整豐富，執行團隊之研究成果值得肯定。	感謝委員肯定。
2. 摘要提到「雷達成果與水準資料變化趨勢類似，但與移動式GNSS站的相關性弱」，以及「四個斷層區域在平均速度上有些許差異」，此些描述建議提供量化資訊。	感謝委員建議，已於摘要中修正。
3. G-G’剖面上有多個垂直速度明顯變化之處，請討論其可能的含意。	感謝委員建議，此剖面之速度變化已經在期末報告章節中討論。
4. 1-4-3解算垂直變形速率一章提到「利用同一時期之升軌與降軌資料推估該時期的垂直方向以及東西方向之速度場，並且將這些資料與GNSS比對。理論上這樣的計算會帶入一些誤差到最後結果」，建議補充說明提及的誤差。	感謝委員建議，已在本章節加入誤差概述，於3-5垂直速度場解析有詳細數值描述。

5. 第23頁提及「PSI 處理過程中潛在的誤差需要在處理過程中去除」，後面提到是unwrapping error，請說明是如何去除的?	感謝委員提問，我們調整參數或是分割區域處理降低unwrapping error。
6. 第59頁提及「早期拍攝頻率12天的2014~2018時期，以及中期拍攝頻率6天的2018~2021時期。我們會將影像處理分成三個階段：(I)2014~2018」，是否其實可以一起執行?因為摘要提到，根據團隊的經驗，影像數量越多則誤差可降低，且第20頁也提到，StaMPS 技術可獲得非線性之地表位移量時間序列。	感謝委員提問，由於衛星初期及2022年後的基線等不穩定，避免資料污染不建議一起執行，但可獲得時間序列，並已經於期末報告書中展示。
7. 第60頁，呈上點，建議在表2-1中描述三個時間段之影像張數（與表3-1、4-1合併，重複資訊）。	感謝委員建議，我們已在報告中修正，並移除重複資訊。
8. 建議提供資料來源，如圖2-5之PSI處理流程圖（看起來有改過），以及表1-1多時序雷達差分干涉技術演算法比較。	感謝委員建議，圖2-5流程圖為團隊自行產出，其餘文獻檢查後列於參考文獻中。
9. 本計畫的雷達影像處理流程分兩階段，有關第一階段採用GMTSAR，建議提供清楚明確的GMTSAR處理步驟。圖2-4只能呈現一般雷達差分干涉處理流程，並請說明GMTSAR獨特之處在哪?	感謝委員提問，GMTSAR處理流程與一般雷達差分干涉處理流程步驟原理一樣，以指令進行步驟，過程簡易，且為開源免費軟體。

10. 建議補充參考資料(例如Sandwell et al., 2011)。GMTSAR也可以處理第二階段工作(分析與解算)，團隊未來可以考慮用StaMPS和GMTSAR來進行，最後比較兩種結果並附海報做參考。	感謝委員建議，已在參考資料中補充文獻。StaMPS與GMTSAR處理第二階段工作會再評估可行性。
11. 表2-1，可考慮增加一列，把升軌和降軌的圖幅數量增加在三個不同時期中。2-1大標題與內文的內容不太符合，建議修改。	感謝委員建議，我們已在報告中修正。
12. 4-3水準測量資料與雷達資料比對成果，除了展示很多剖面成果，建議定量評估二者差異的程度，以及差異量在空間的分布。	感謝委員建議，我們會於下年度計畫中嘗試處理。
13. 4-4重點區域時間序列分析一章，請加強說明PSI跟GNSS成果量級差異頗大之原因。	感謝委員提問，我們檢視該章節後，並未發現該圖資料在相同框架下有PSI與GNSS成果量級差異頗大之處。
14. 解算三維變形似乎是利用平均速度，是否可以時間序列解算出三維形變之時間序列?	感謝委員提問，處理與檢核工作量不適於計畫時間框架。
15. 中部地區PSI跟GNSS比對的成果似乎比臺灣其他地方還要差，而且Ascending & Descending不同時期的觀測和GNSS資料對比，各有好壞，需要思考原因為何?目前看來當地殼運動速度小於20mm/yr，二者的差異甚大。	感謝委員提問，我們在討論的部分是針對成果較差的少數測站來做討論，整體看來中部地區比對不比其他地方差。

16. 圖6-26，建議把水準的成果用色階表示和PSI垂直速度場對比。	感謝委員建議，我們會再改進製圖。
17. 6-1-1章節討論部分PSI時間序列解算不佳之可能成因，建議提供後續可能的改善方法與精進作為。	感謝委員建議，本計劃解算之結果，特別是2018~2021的結果，與GNSS連續佔比對非常良好，大部分的時間序列也相當一致。我們在第六章抓出極少數比對不佳的資料與測站比對，在2018~2021這一時間段，比對不佳的測站有不少是因為cGNSS測站資料品質不佳，造成速度迴歸出現問題。 因此未來我們會對GNSS測站資料做更進一步檢視，再做比對。
18. 第276頁，請說明為何只取2018-2021時段?	感謝委員提問，2018年至2021年衛星影像數量最多，拍攝頻率穩定且衛星基線控制佳，本時期的PSI成果品質最佳最穩定，因此我們選擇這個時段解析東西向及垂直向速度場。這些說明已加入報告中。
19. 第301頁，cGNSS是否有完整名稱？	感謝委員提問，cGNSS完整名稱為：全球衛星導航系統連續觀測站。
20. 第107頁，提到所得結果須有野外佐證，是否會於此計畫進行驗證?	感謝委員提問，我們已於報告書中6-3-2章節提到野外實地調查的結果與討論。

(二) 報告書內容相關建議（若再度撰寫於期末報告書）	
1. 整體報告展示了很多圖但缺乏統整一目了然的成果。	感謝委員建議，計畫成果會統整於提交之成果圖上。
2. PXXIII：關鍵字應為“活動斷層”	感謝委員建議，已於期末報告中修正。
3. P67：GNTSAR應為GMTSAR	感謝委員建議，已於期末報告中修正。
4. P142：表4-5及其他類似表格需補充單位	感謝委員建議，已於期末報告中修正。
5. 在P67的內文，請整段移到P64在描述第二階段前。	感謝委員建議，已於期末報告中修正。
6. P23「本年度研究之中部地區約有近90個各單位的連續GNSS觀測站，分布從沿海地區至宜蘭平原」，是否有誤？	感謝委員建議，已於期末報告中修正。

附錄A、三維向量於衛星視角方向的影響

差分干涉技術成果為衛星視角方向（LOS）觀測，所以衛星並非只有觀測垂直向的地表變形，水平分量也會被衛星觀測到。為了解三維地表變形資訊如何影響衛星視方向觀測值，我們假設南北向（N）、東西向（E）及垂直向（U）各有 +10 mm的地表變形量，且向北、向東及抬升為正，將Sentinel-1衛星的飛行方向與觀測視角角度代入理論公式(1)，將三分量投影至LOS方向，並繪製示意圖（圖A-1）。

$$d_{LOS} = [-sin\theta cos\alpha \;\; sin\theta sin\alpha \;\; cos\theta] \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} \quad (1)$$

可以看到在南北向與垂直向，無論是升軌道（Ascending）或是降軌道（Descending），+10 mm/yr （向北或抬升）的地表變形投影至LOS方向皆會造成正貢獻量（靠近衛星移動），東西向對於升軌道（Ascending）是負貢獻量（遠離衛星移動），於降軌道（Descending）則是正貢獻量（靠近衛星移動）。南北向的貢獻量約為觀測值的11% - 13%，東西向貢獻量為觀測值的53% - 61%，垂直向貢獻量則為觀測值的77% - 83%，可見Sentinel-1衛星LOS方向觀測雖然以垂直向影響最大，但東西向地表變形亦不可忽略。

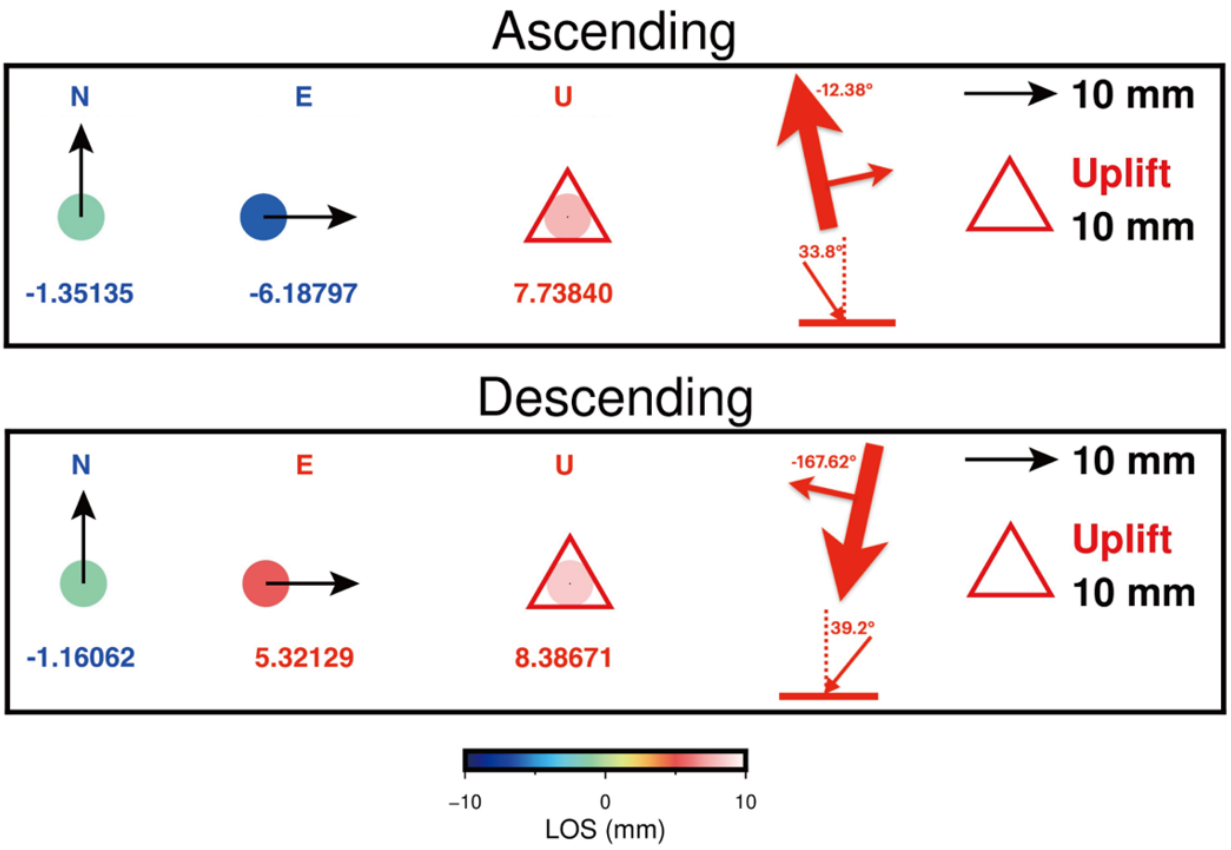
由於東西向在升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）是相反的貢獻量，在水平運動明顯的地區，可能會發生上升軌道（Ascending）的觀測值與下降軌道（Descending）的觀測值不同的情形。

以示意圖為例：

向北10 mm、向東 10 mm及抬升10 mm的地區，在升軌道方向的LOS觀測值約為 0.2 mm，但在降軌道方向的LOS觀測約值則為12.55 mm，造成升軌道LOS觀測值遠小於降軌道LOS觀測值的情形；

倘若向西 15 mm 及抬升10 mm的地區，在升軌道的LOS觀測值約為17 mm，但在降軌方向的LOS觀測值約為 0.4 mm，造成升軌道LOS觀測值大於降軌道LOS觀測值的情形。

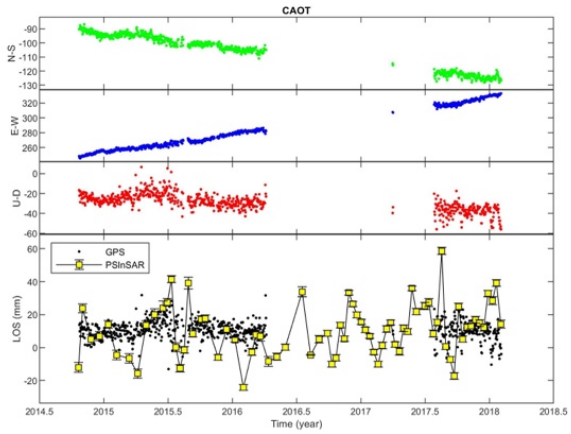
因此當升軌道與降軌道方向觀測值不同時，必須小心檢視是否為水平向地表變形所造成。

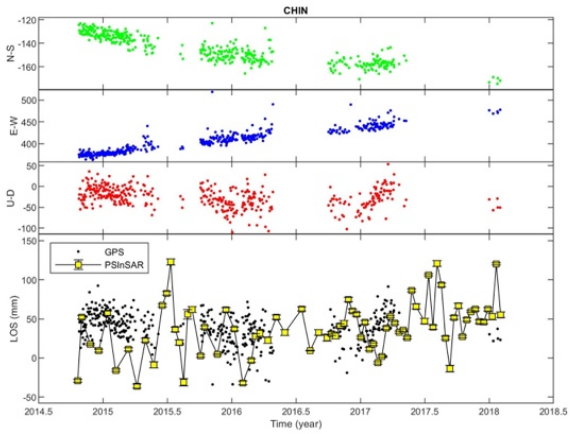


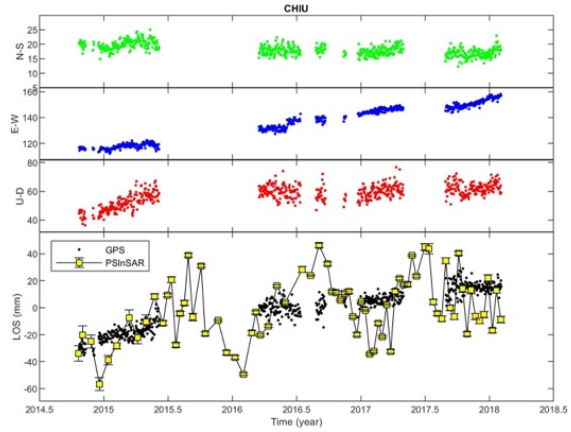
圖A-1: 三維向量投影至衛星視角方向（LOS）貢獻量示意圖。上圖為升軌道（Ascending）方向，下圖為降軌道（Descending）方向。N為南北向，E為東西向，U為垂直向，圓形及其填色為各分量投影至LOS方向量值，紅色箭頭代表衛星飛行方向及視角。

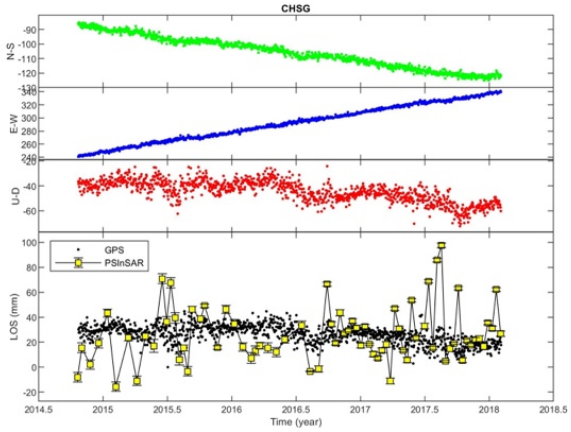
附錄 B GNSS 與 PSI 時間序列比對

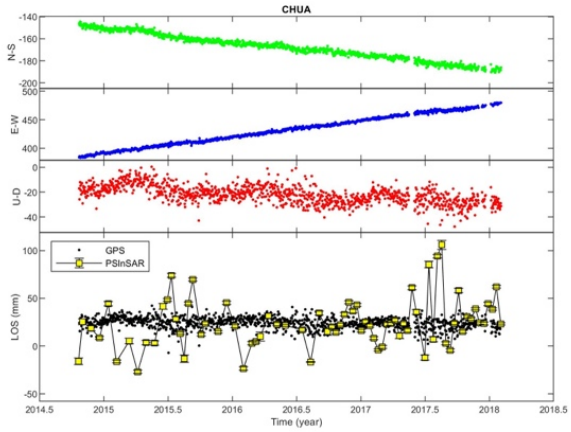
B-1 2014-2018 Ascending

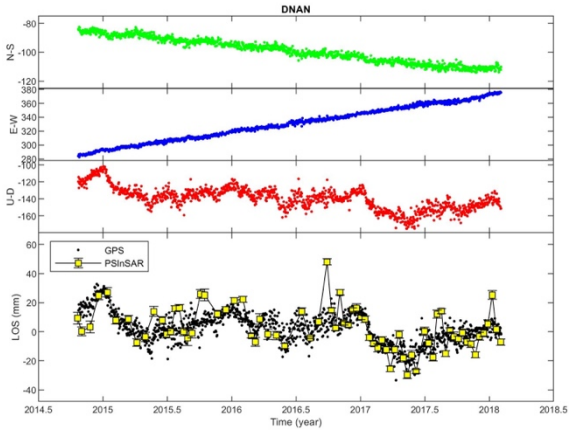


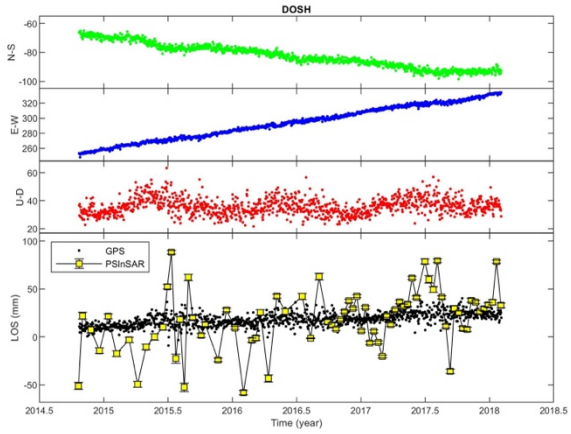


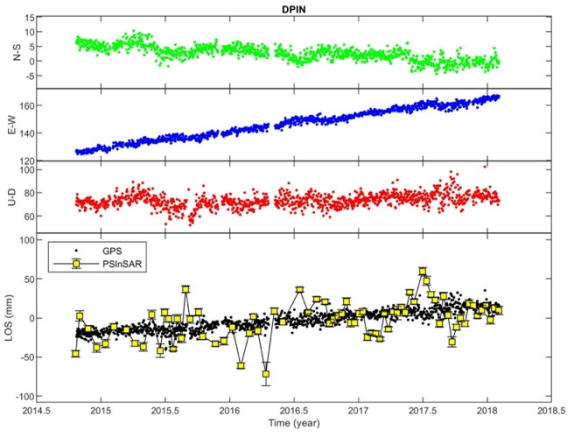


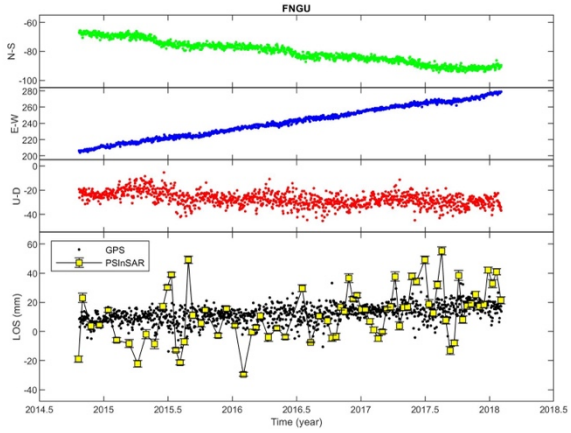


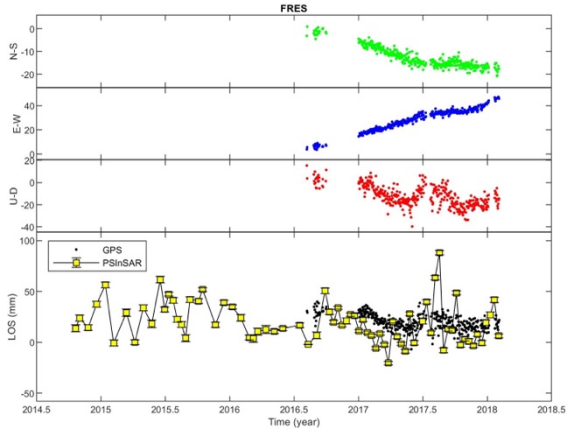


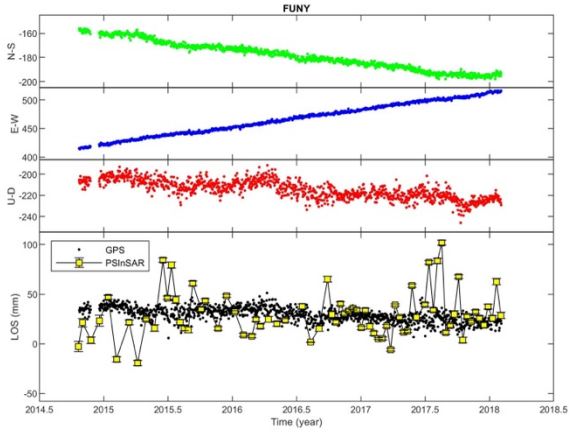


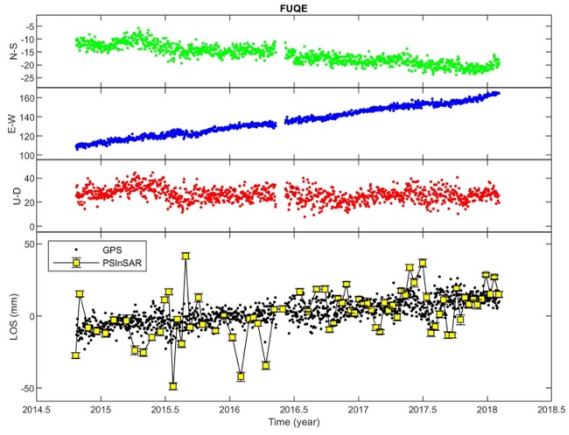

DOSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

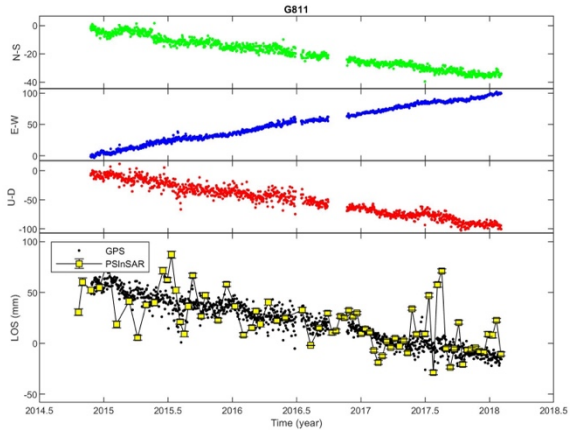

DPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

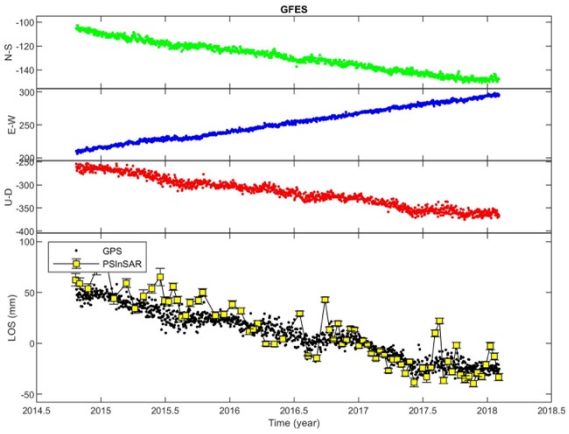

FNGU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

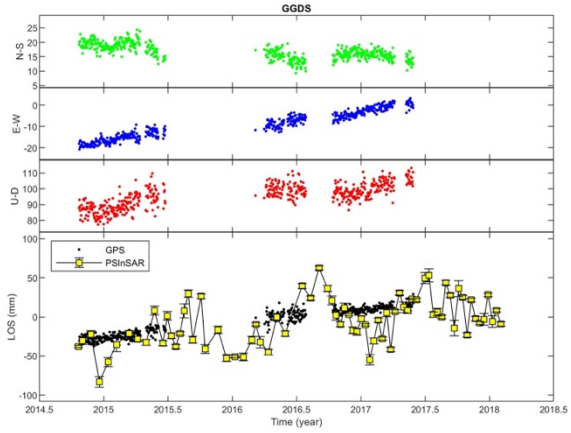

FRES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

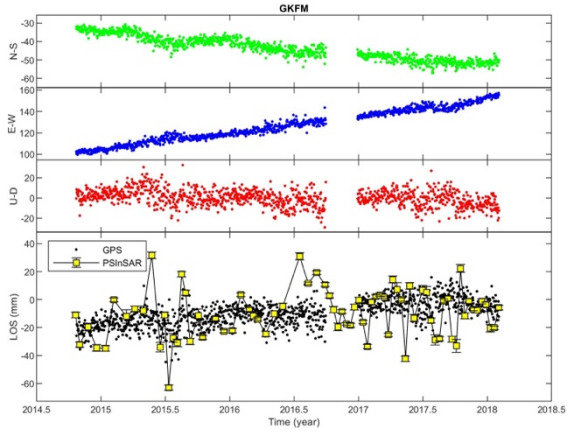

FUNY
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

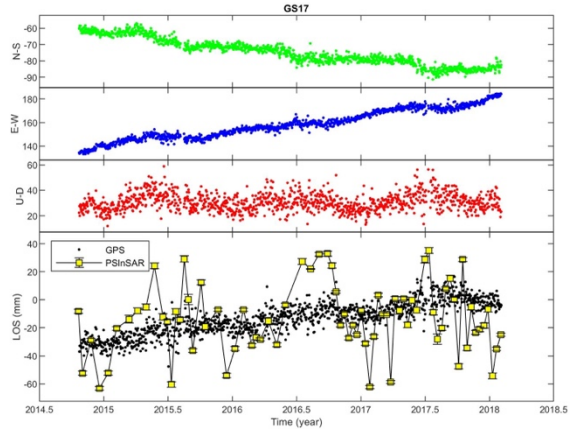

FUQE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

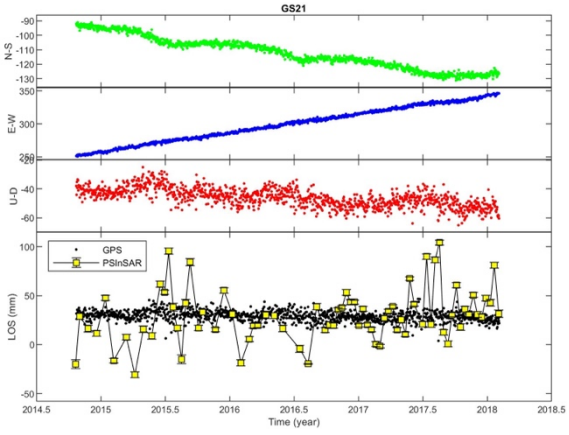

G811
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

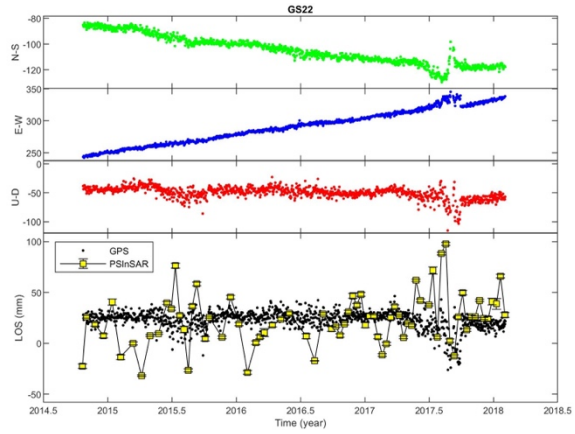

GFES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

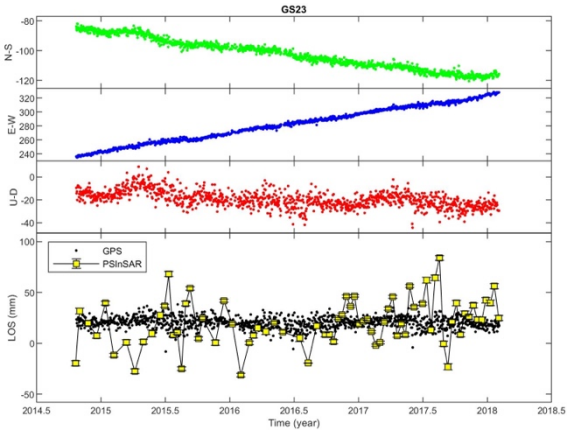

GGDS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

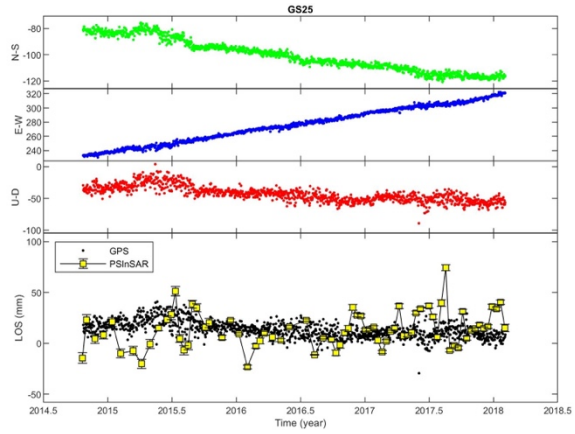

GKFM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

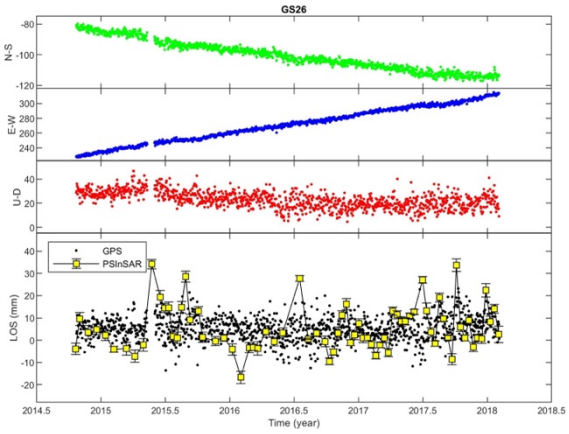

GS17
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

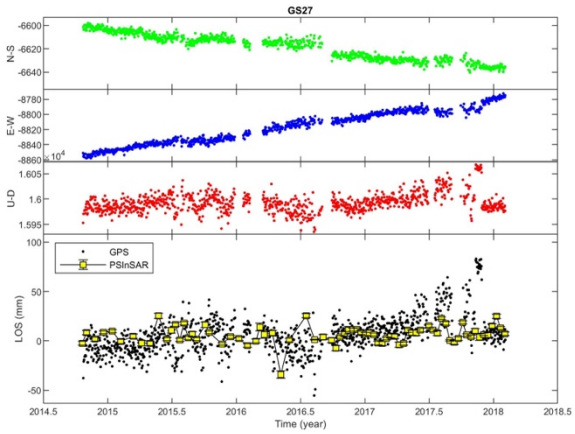

GS21
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

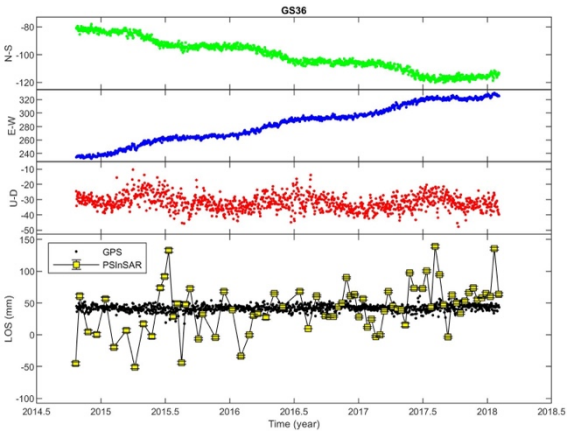

GS22
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

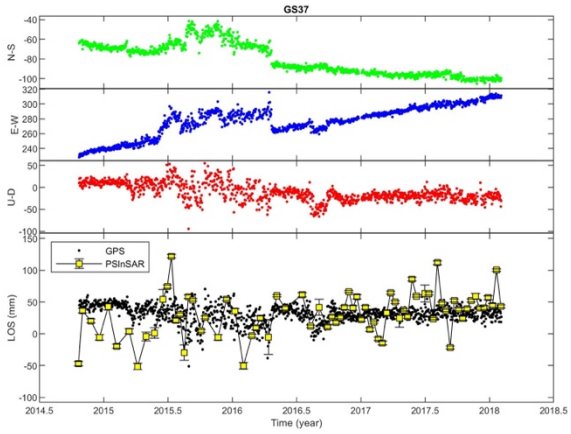

GS23
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

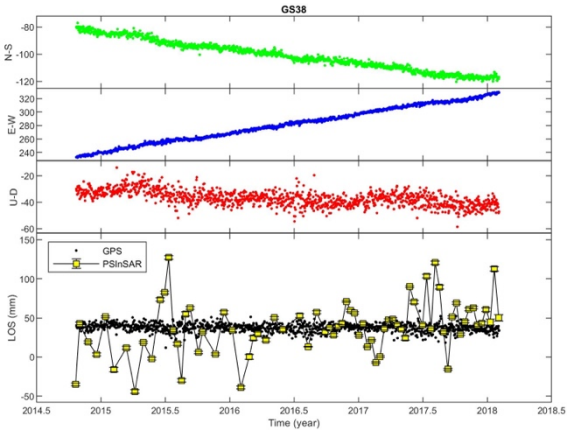

GS25
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

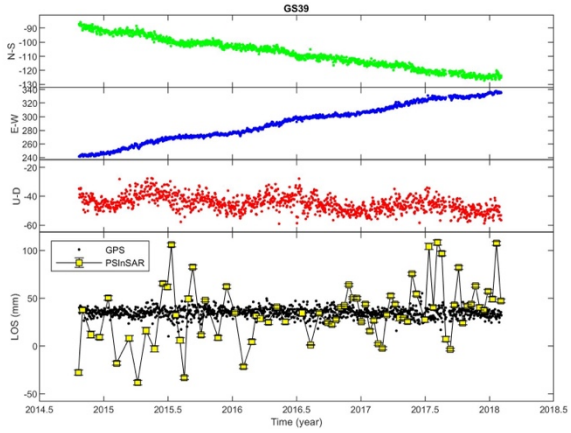

GS26
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

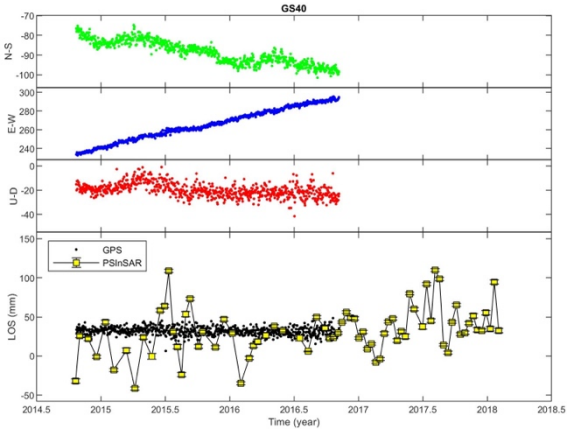

GS27
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

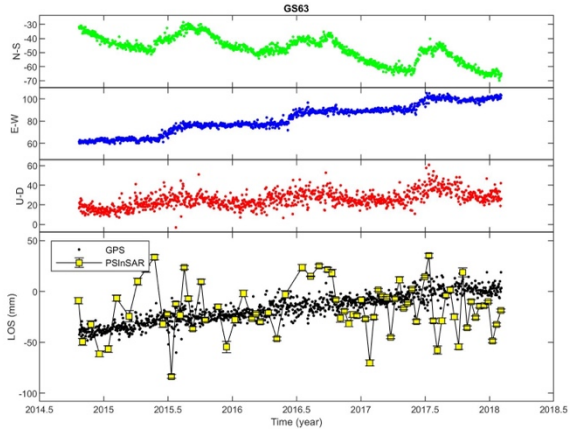

GS36
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

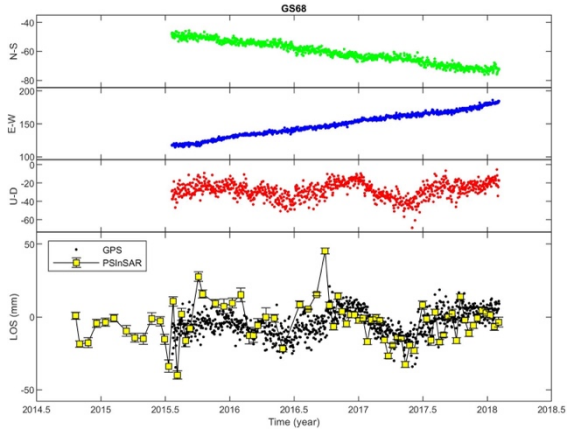

GS37
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

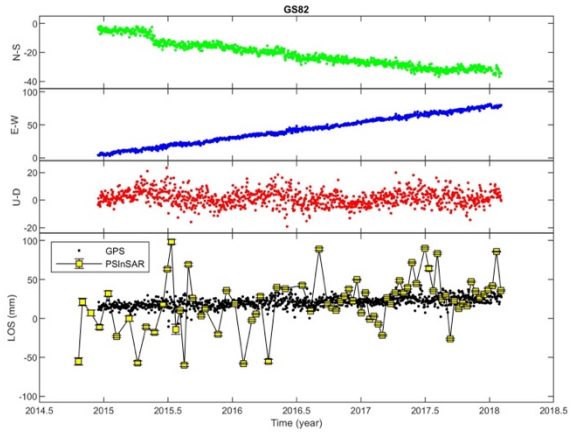

GS38
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

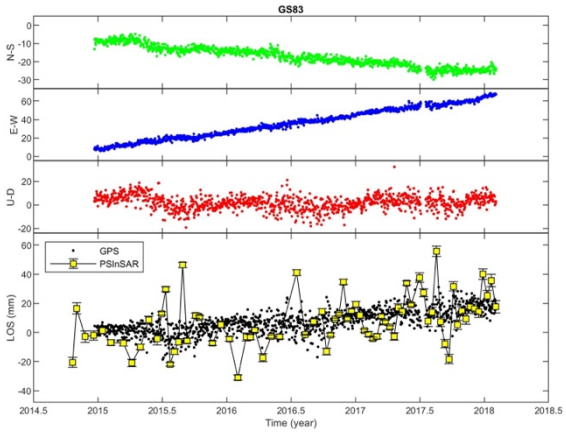

GS39
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

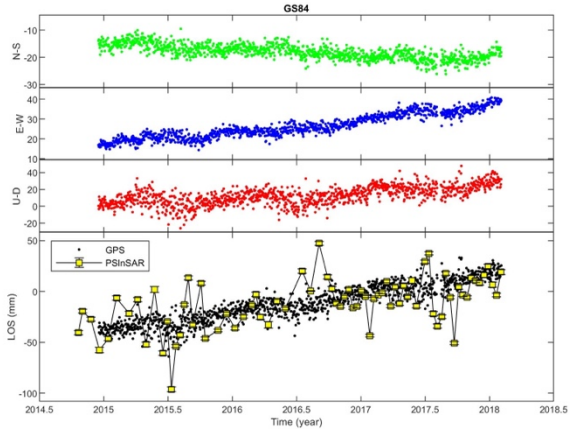

GS40
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

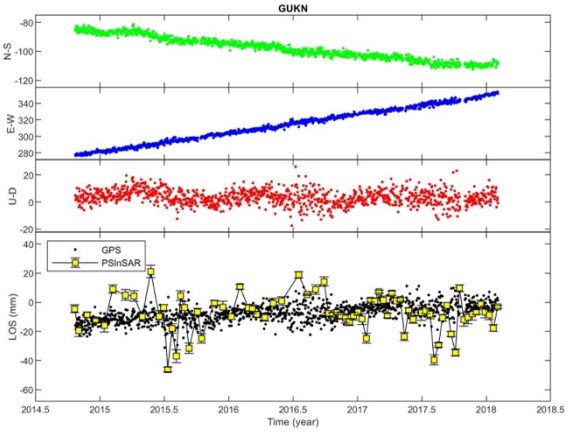

GS63
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

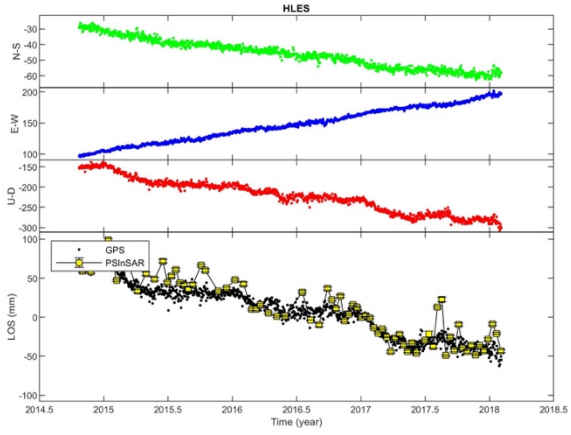

GS68
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

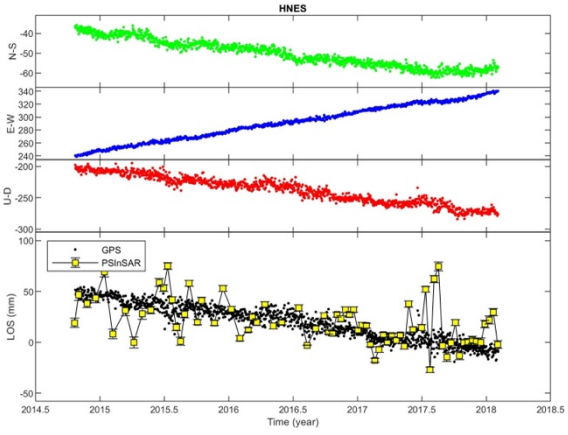

GS82
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

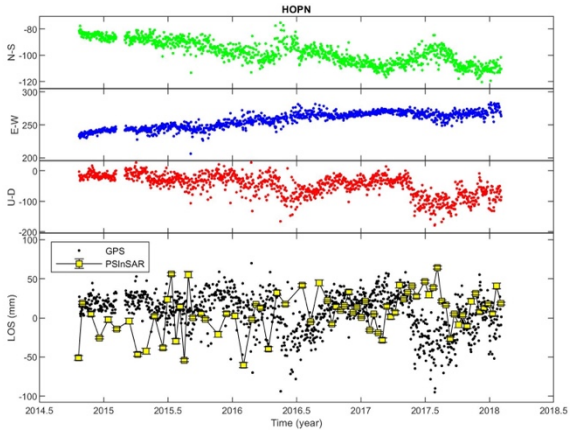

GS83
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

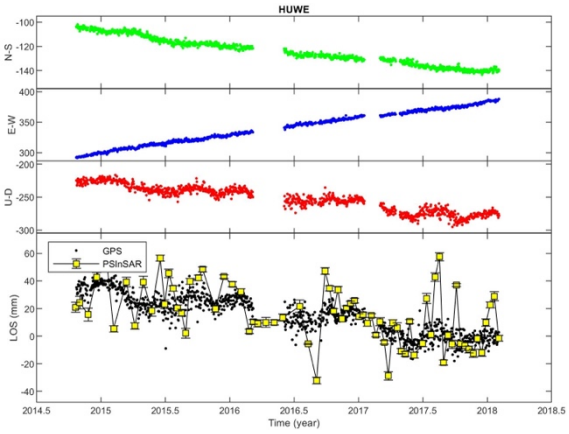

GS84
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

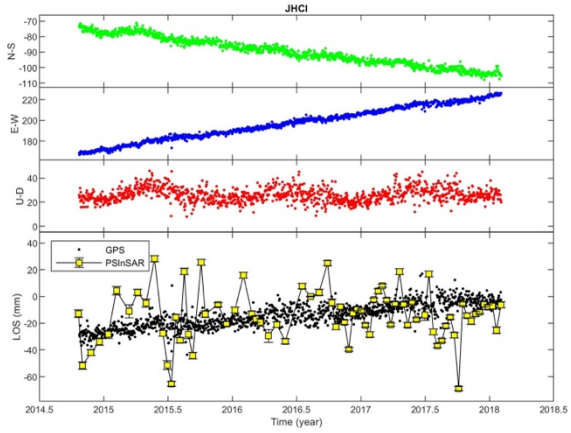

GUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

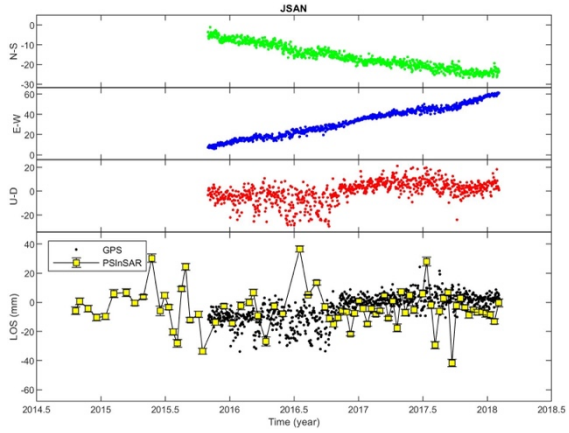

HLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

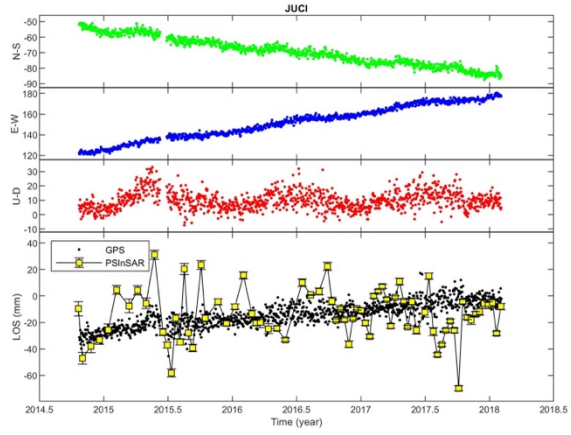

HNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

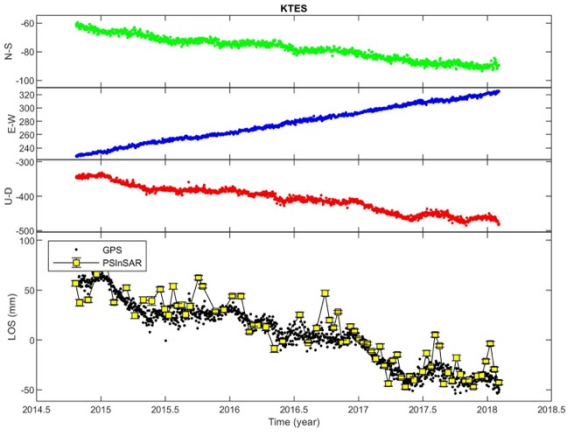

HOPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

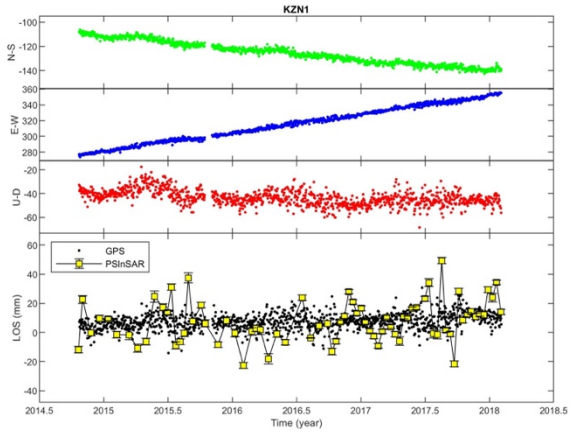

HUWE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

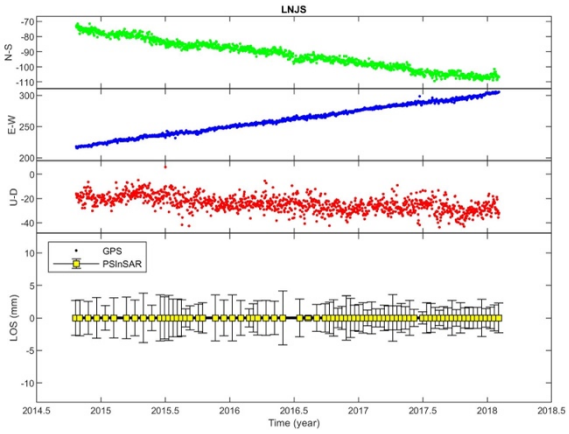

JHCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

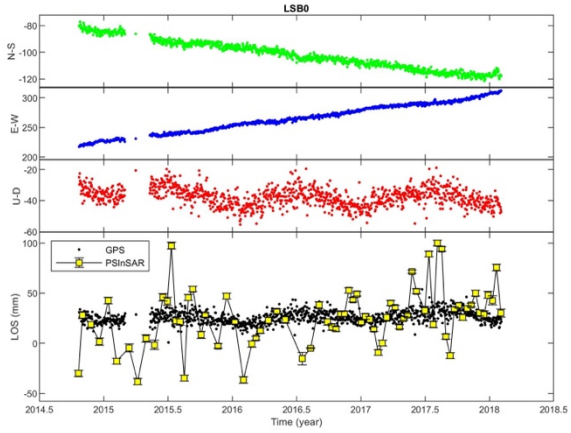

JSAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

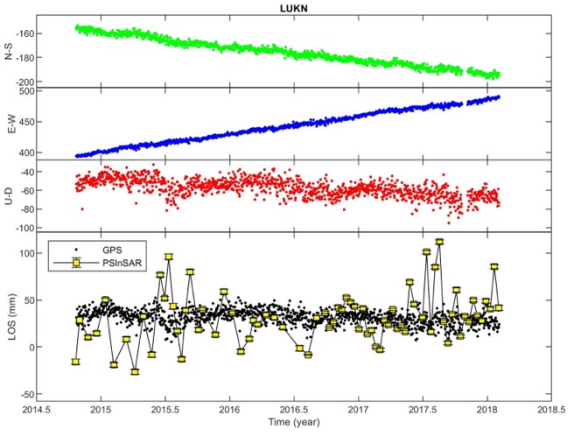

JUCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

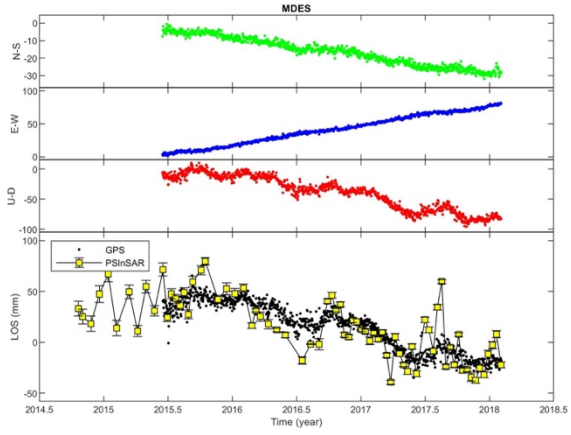

KTES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

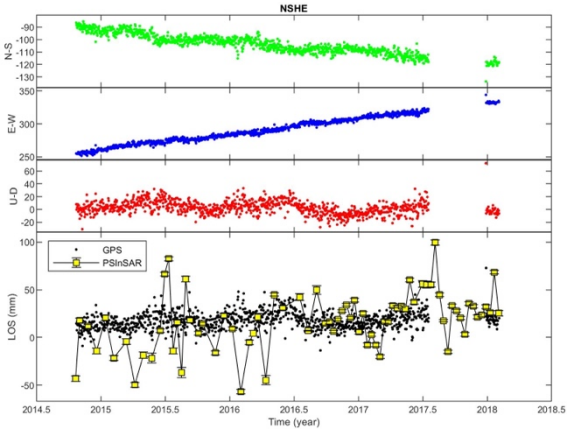

KZN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

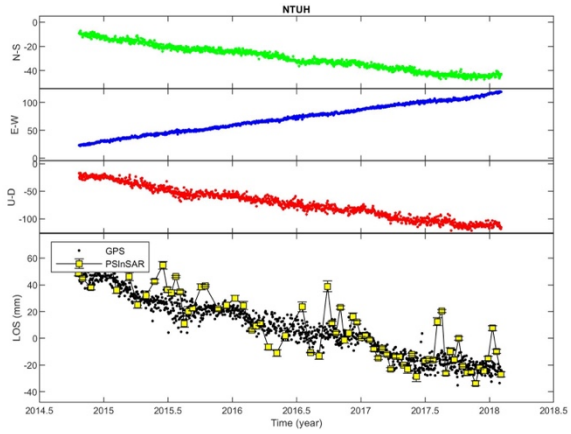

LNJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

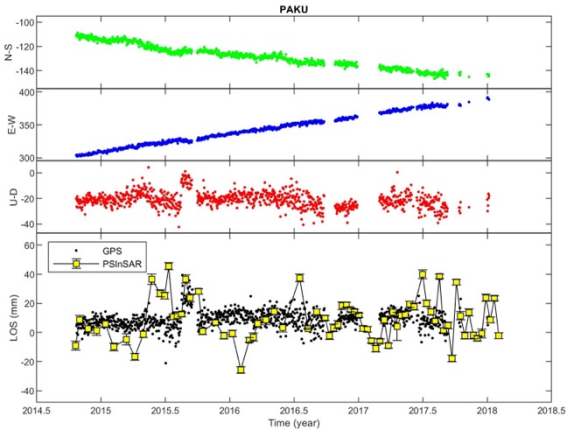

LSB0
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

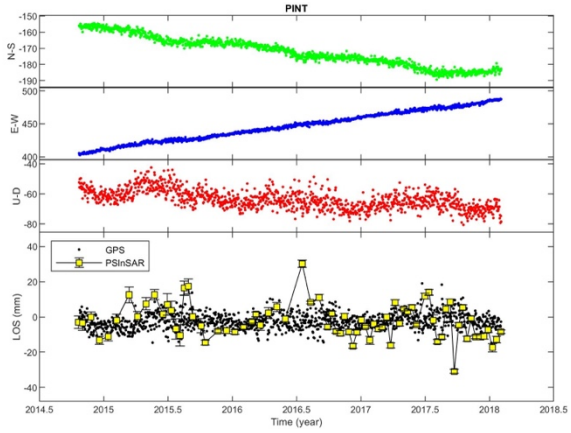

LUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

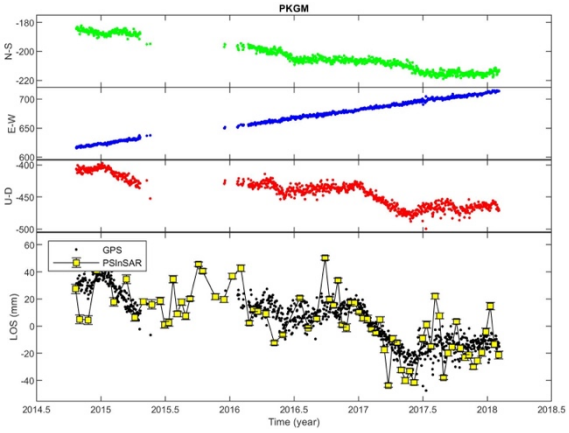

MDES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

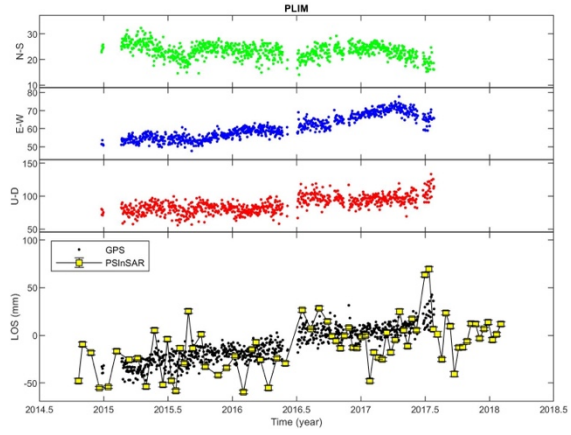

NSHE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

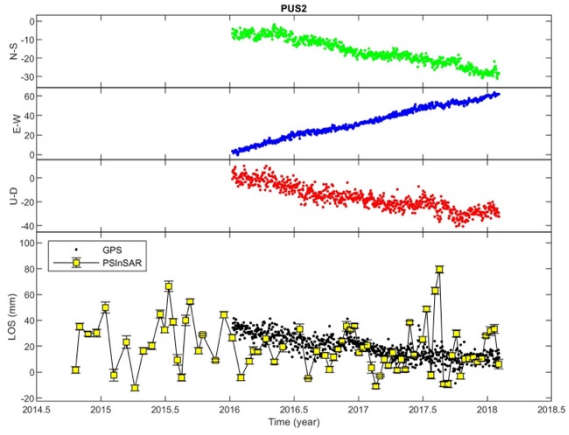

NTUH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

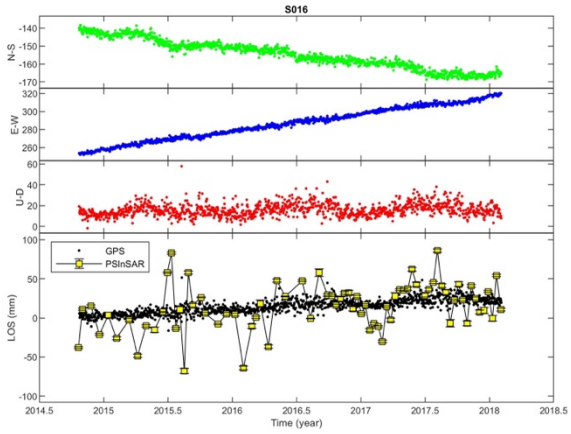

PAKU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

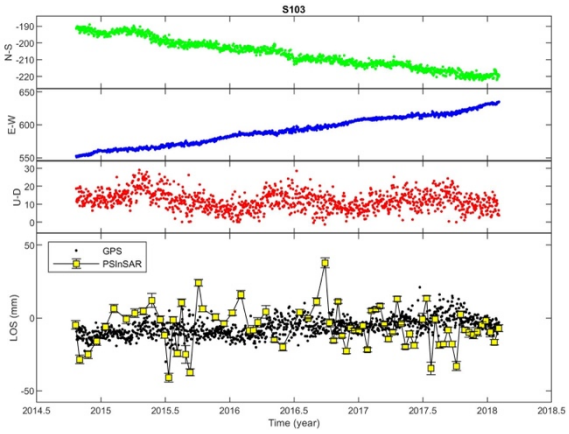

PINT
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

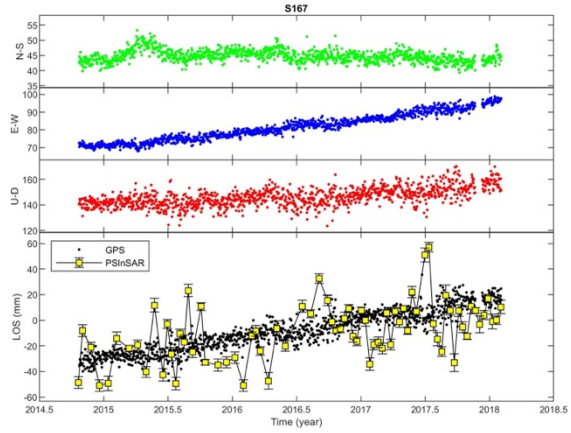

PKGM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

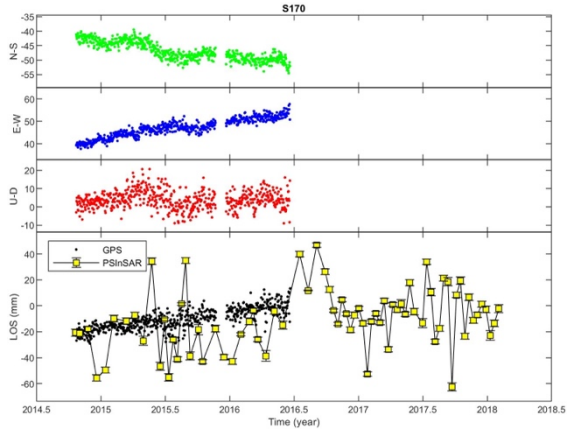

PLIM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

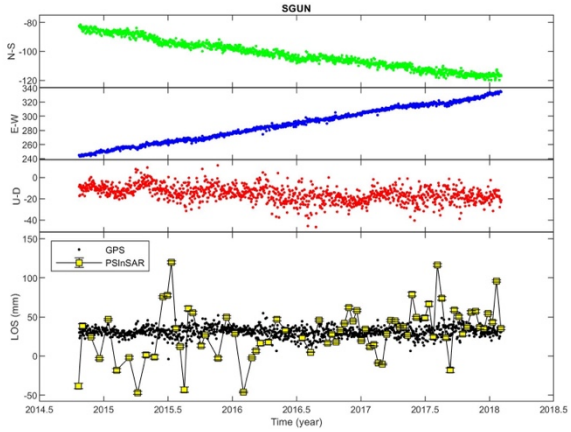

PUS2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

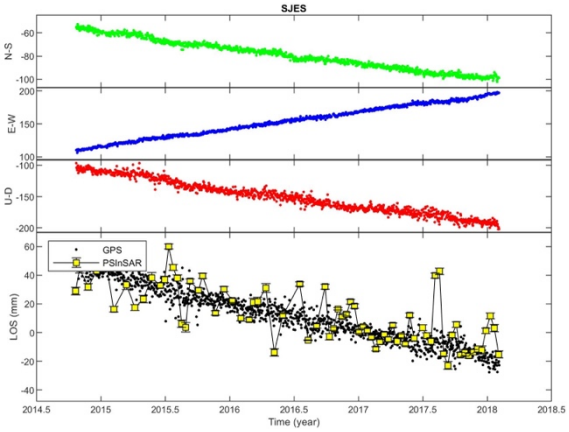

S016
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

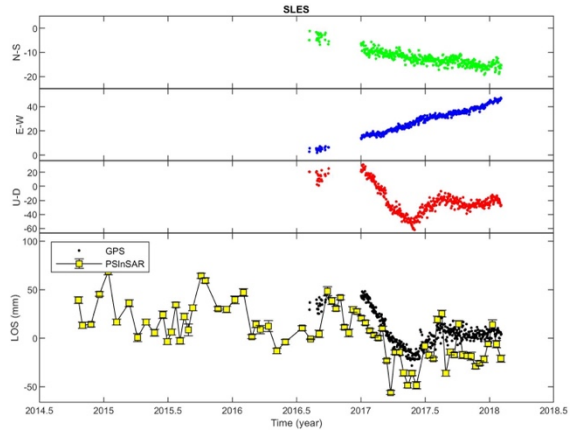

S103
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

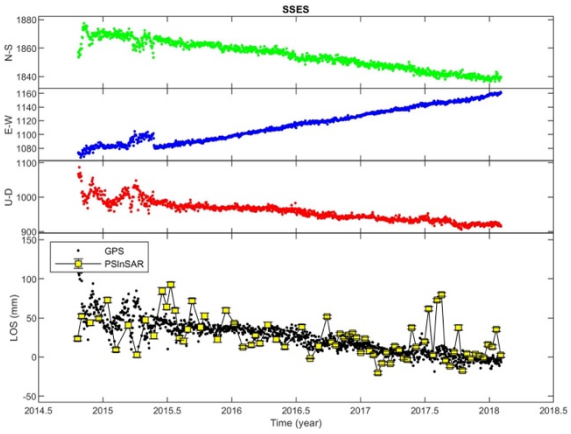

S167
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

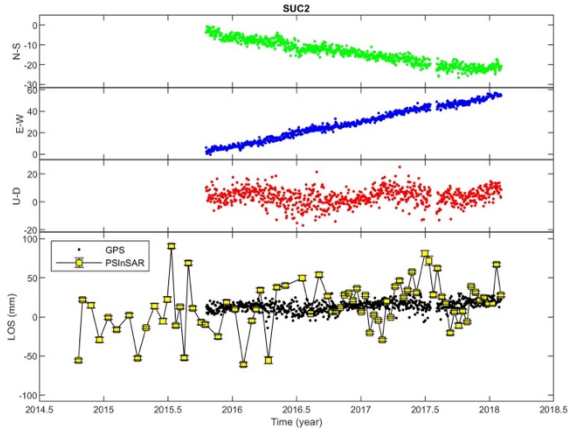

S170
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

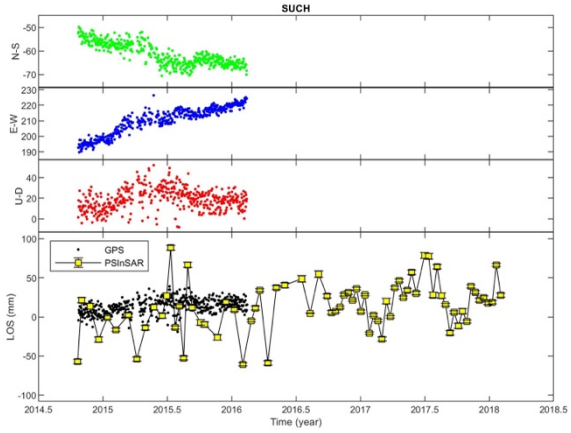

SGUN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

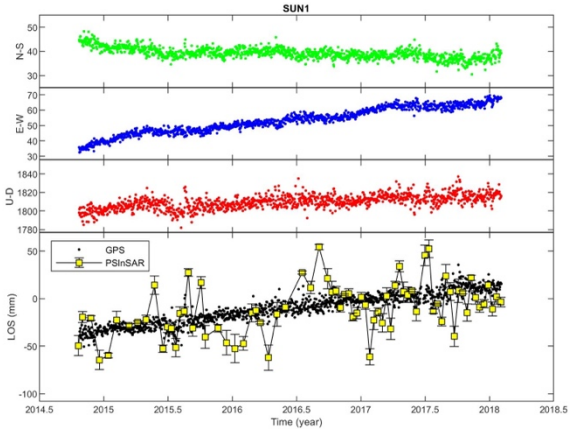

SJES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

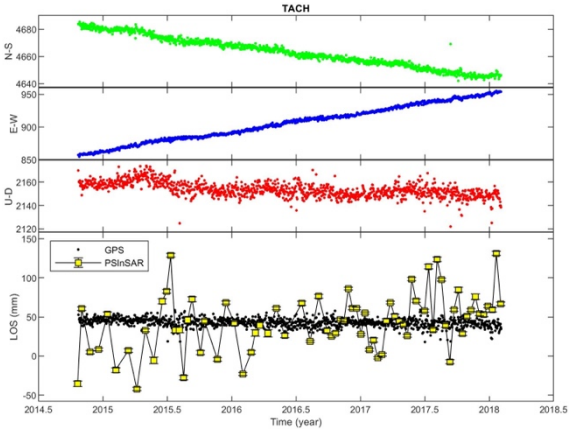

SLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

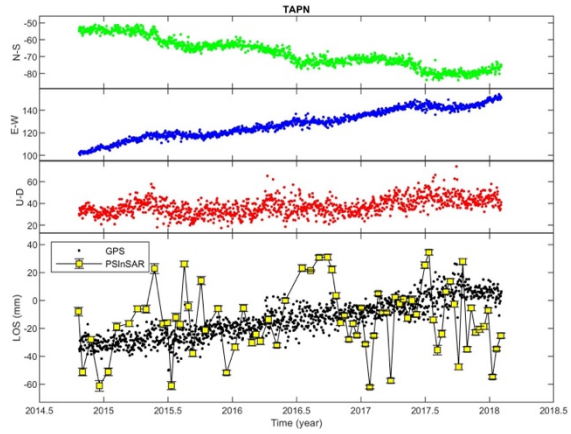

SSES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

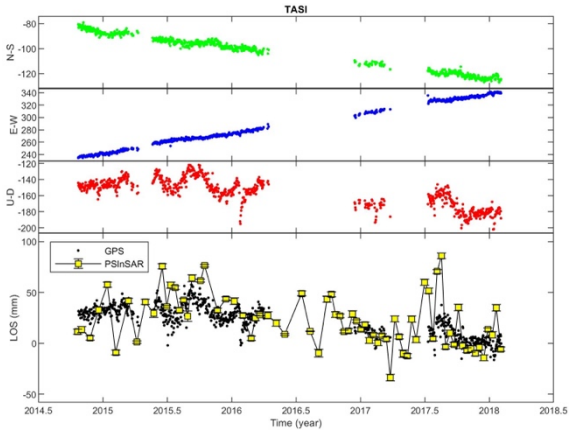

SUC2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

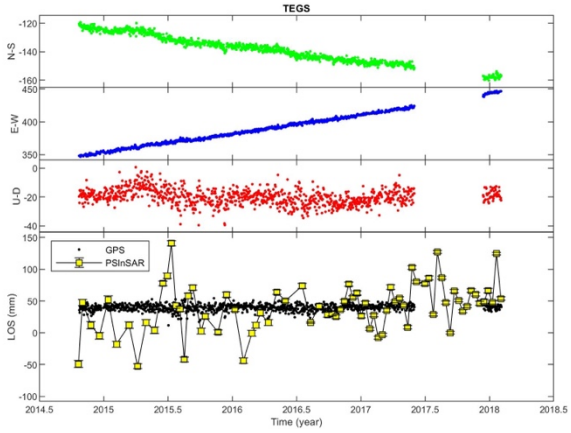

SUCH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

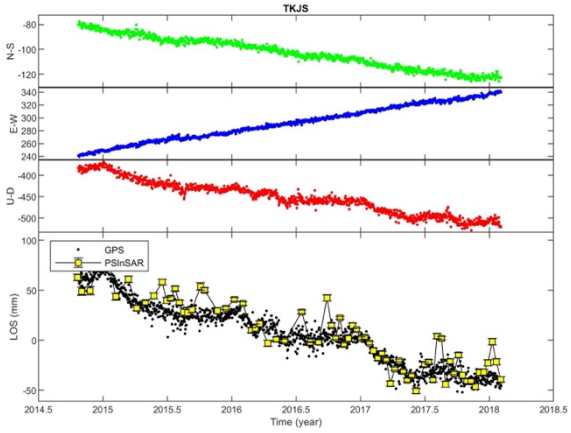

SUN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

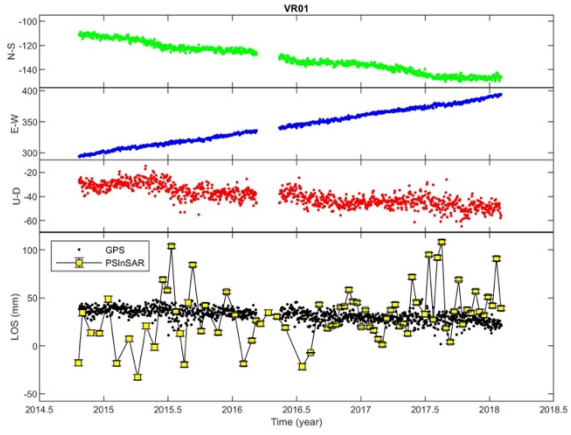

TACH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

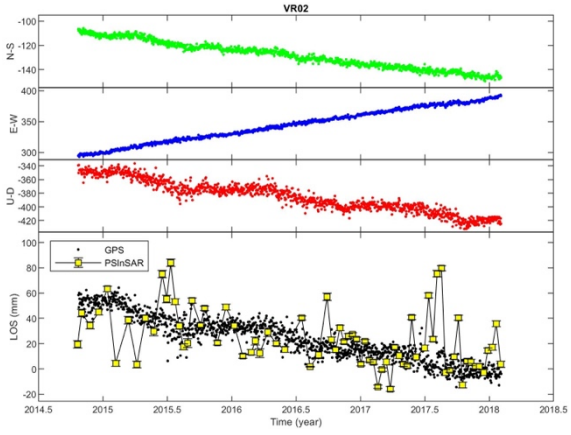

TAPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

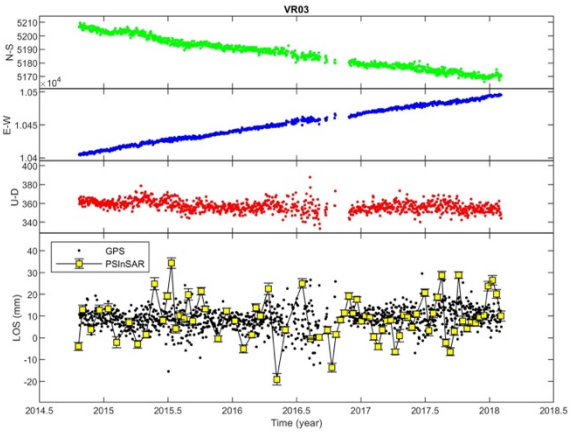

TASI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

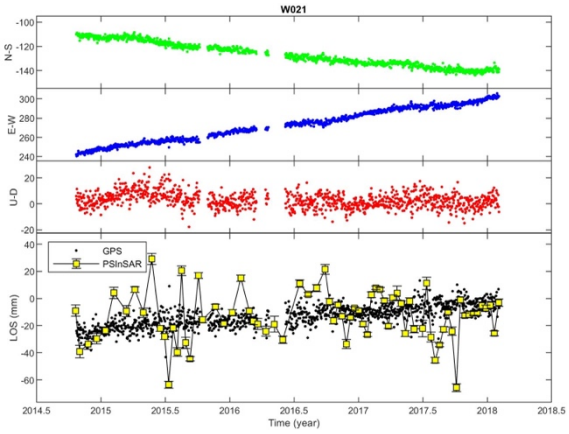

TEGS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

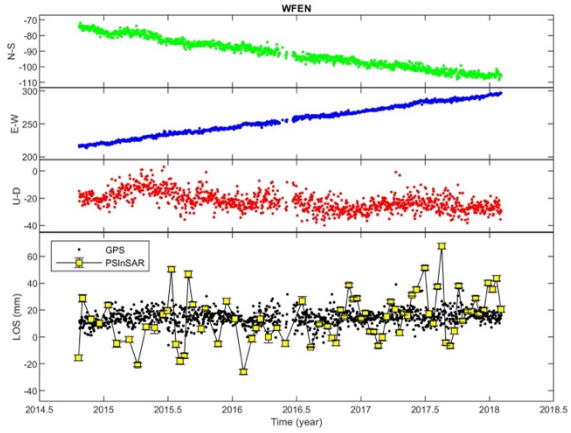

TKJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

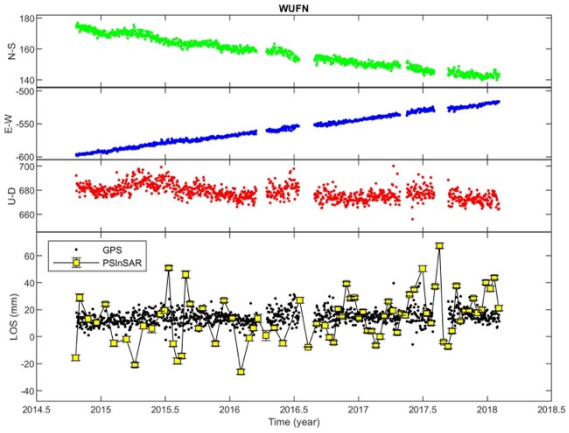

VR01
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

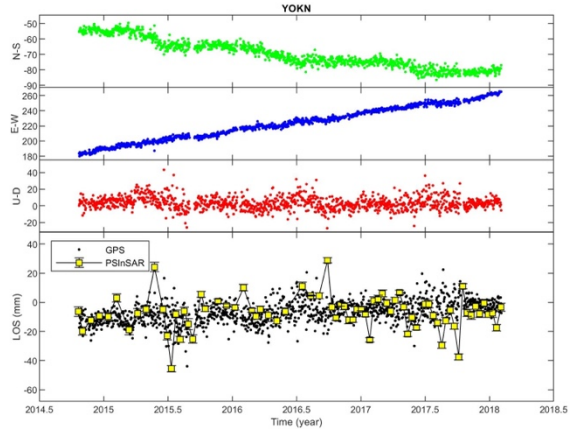

VR02
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

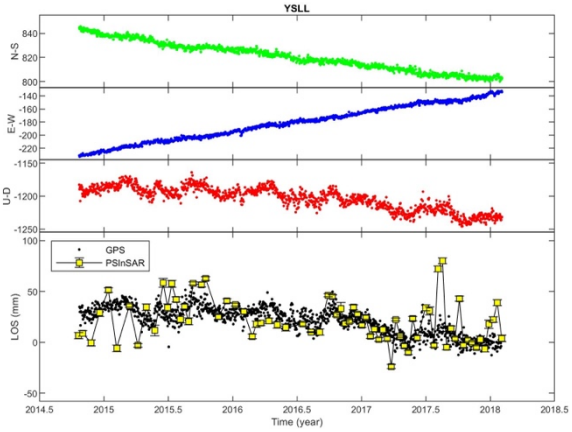

VR03
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


W021
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WFEN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WUFN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YOKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YSLL
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

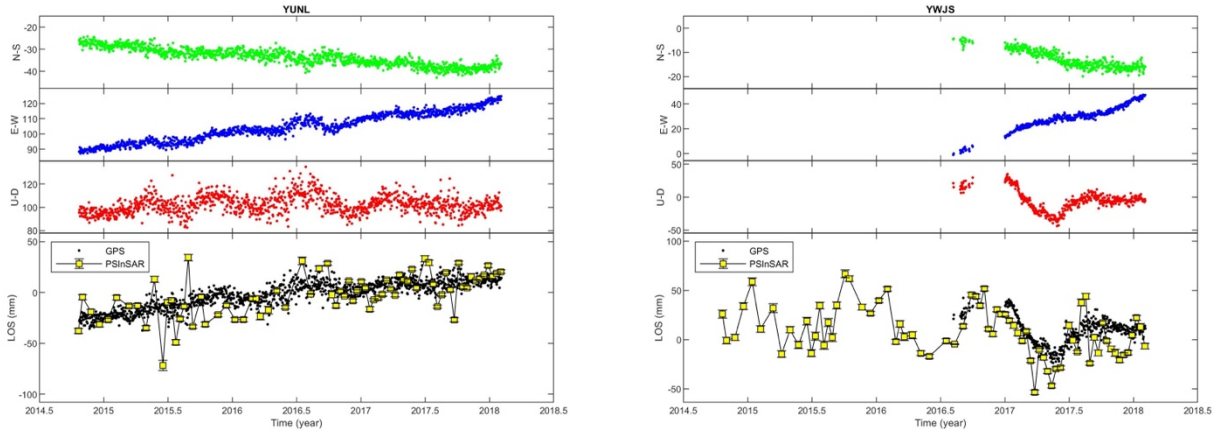
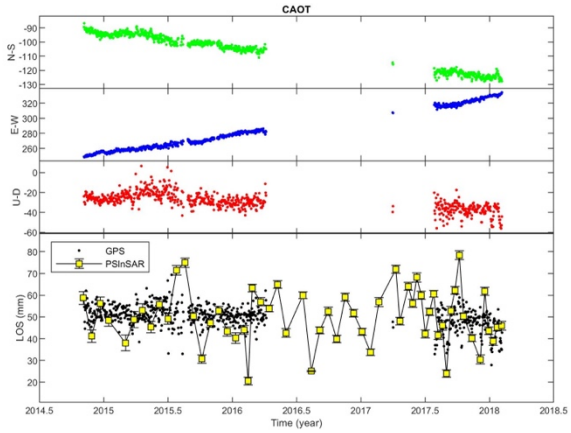
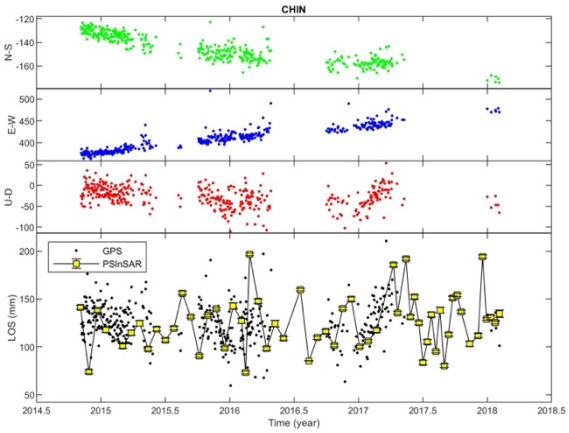


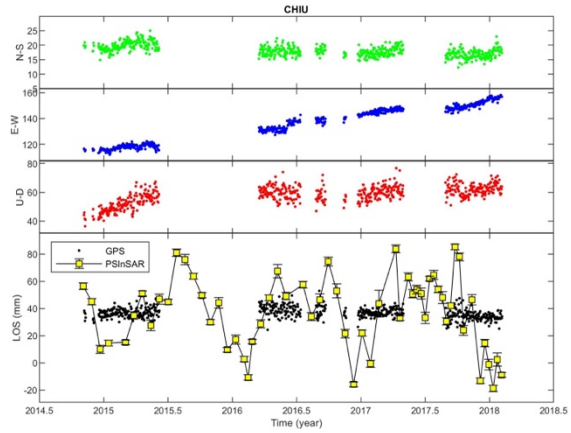
圖 B-1：2014-2018 升軌 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列。

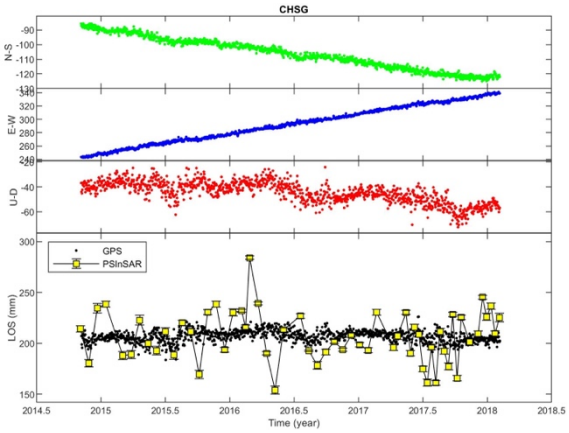
Figure B-1：Time series for GNSS 3-direction, projected GNSS 3-direction into LOS and PSI time series in ascending orbit between 2014 and 2018.

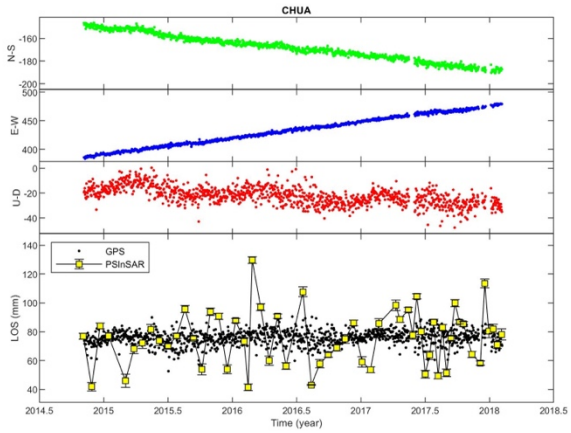
B-2 2014-2018 Descending

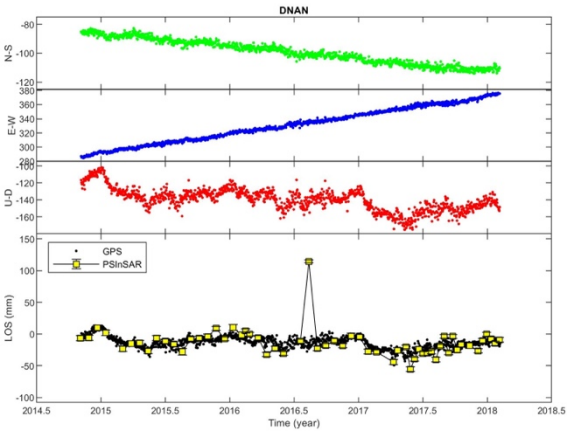


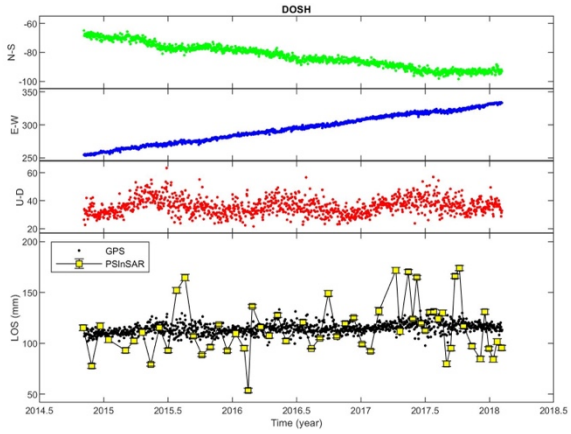


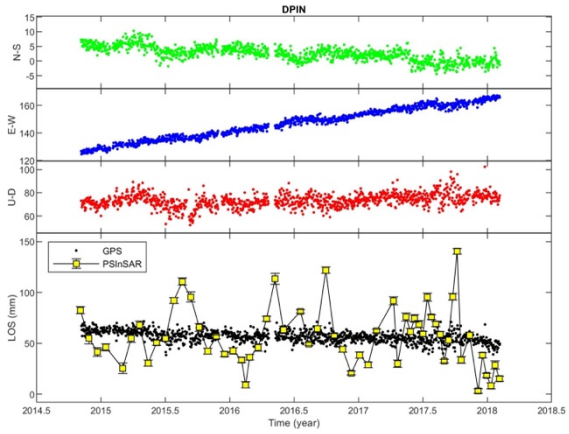


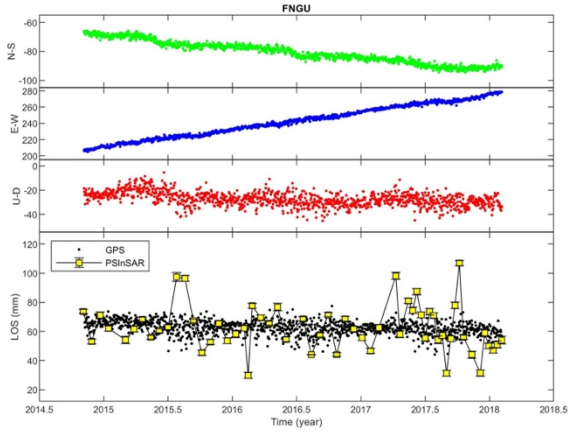


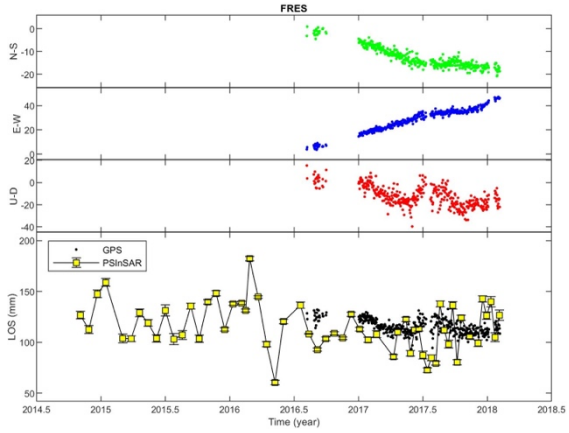


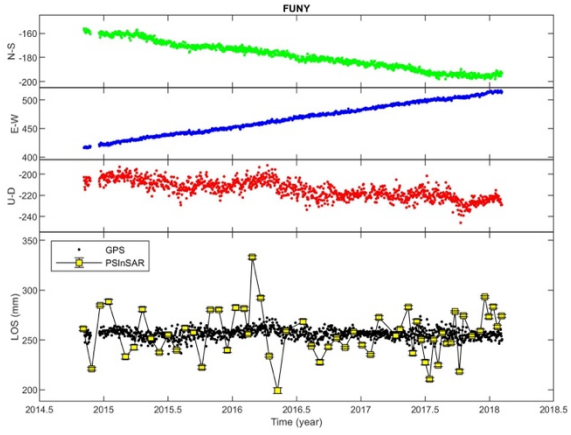


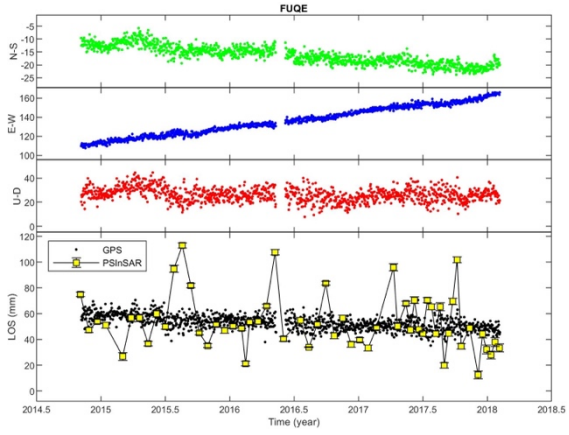

DOSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

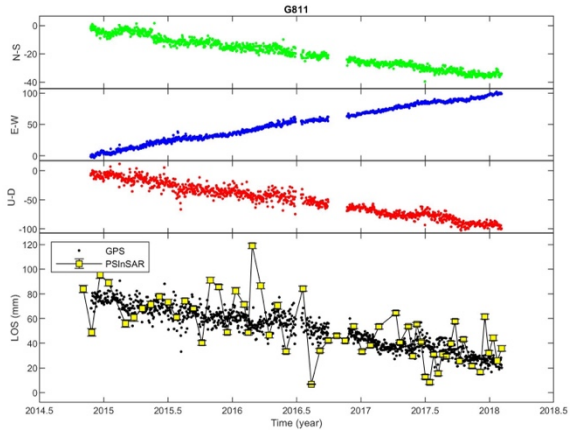

DPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

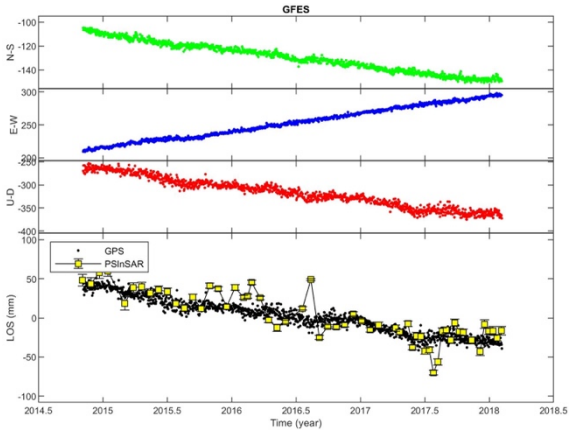

FNGU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

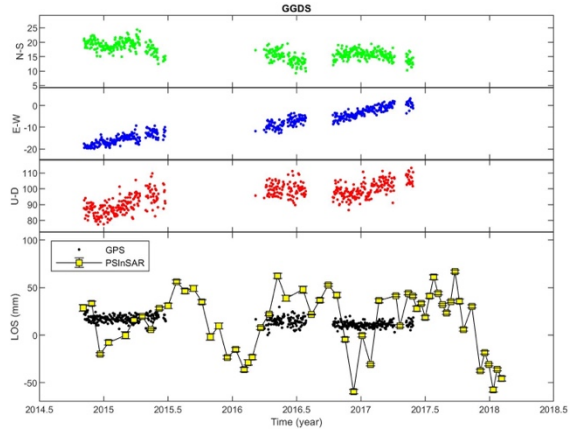

FRES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

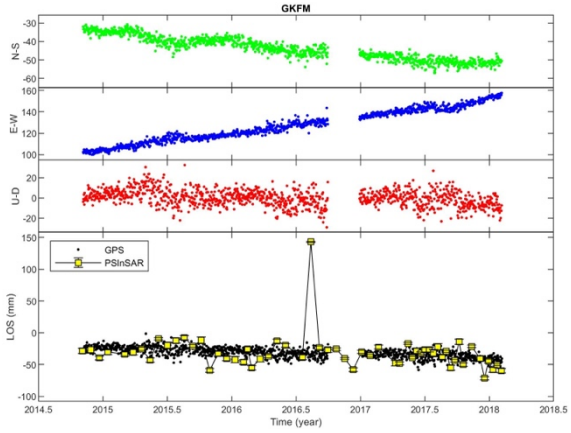

FUNY
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

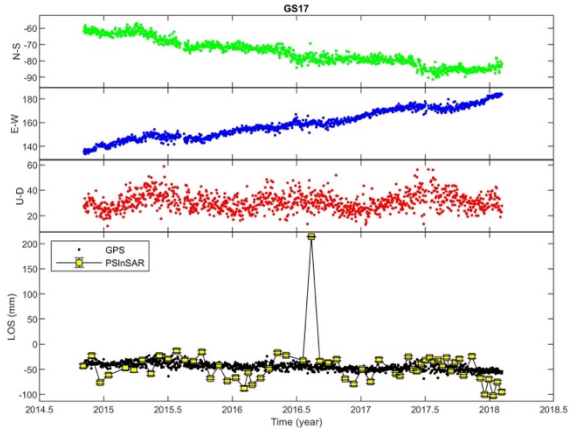

FUQE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

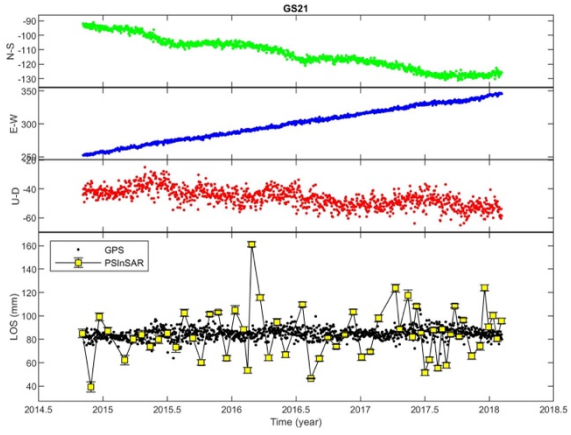

G811
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

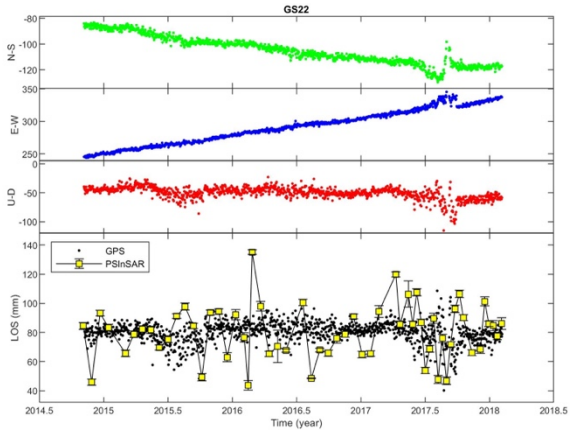

GFES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

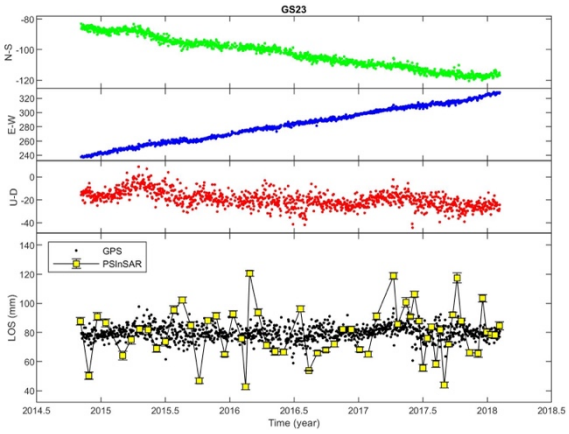

GGDS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

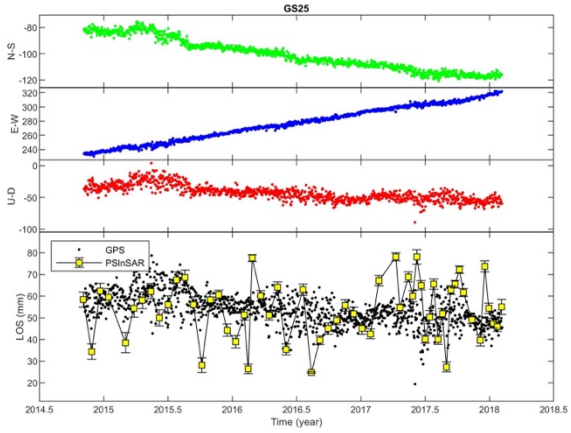

GKFM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

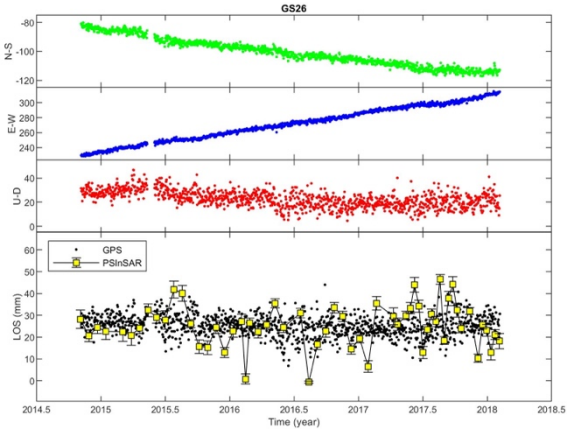

GS17
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

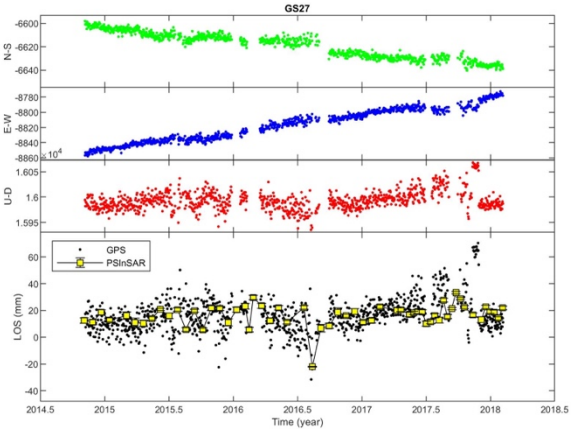

GS21
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

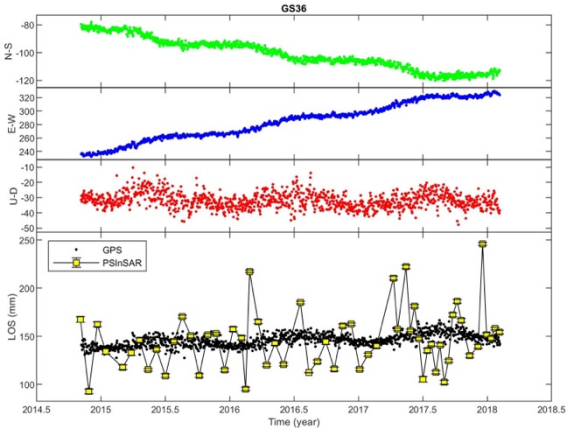

GS22
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

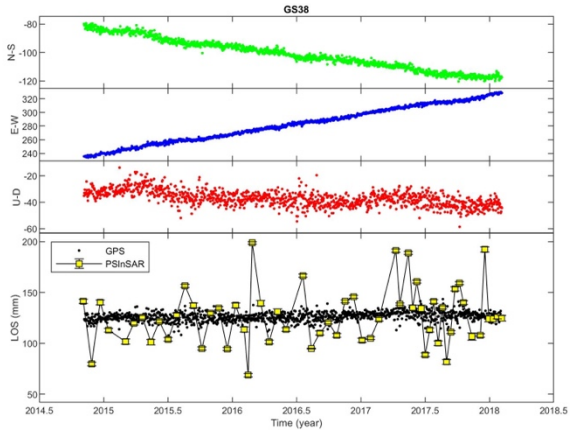

GS23
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

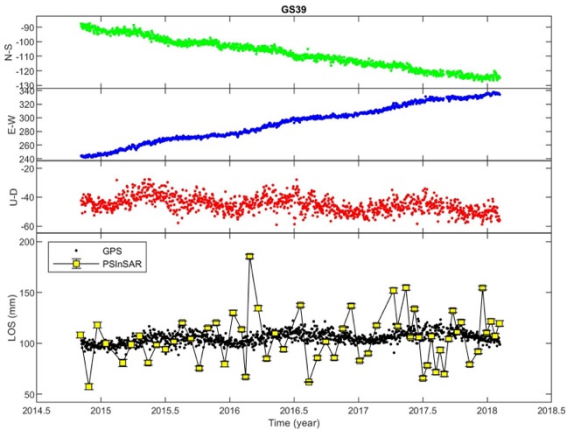

GS25
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

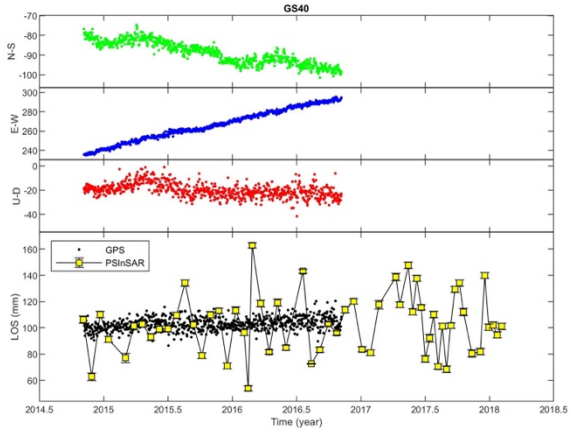

GS26
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

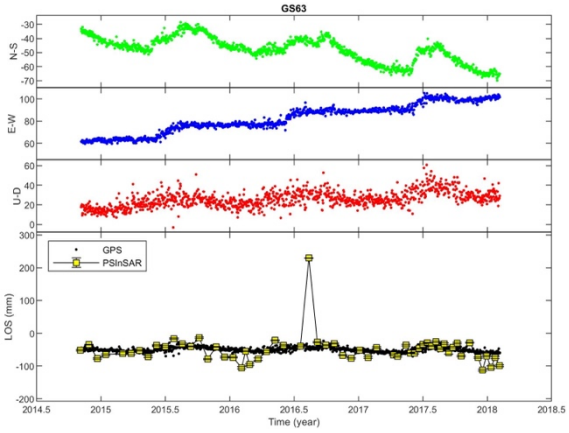

GS27
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

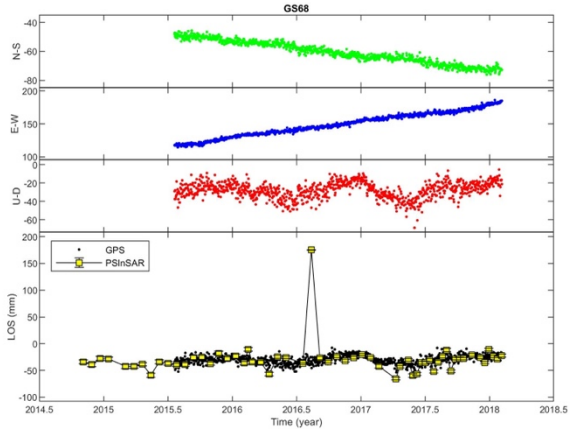

GS36
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

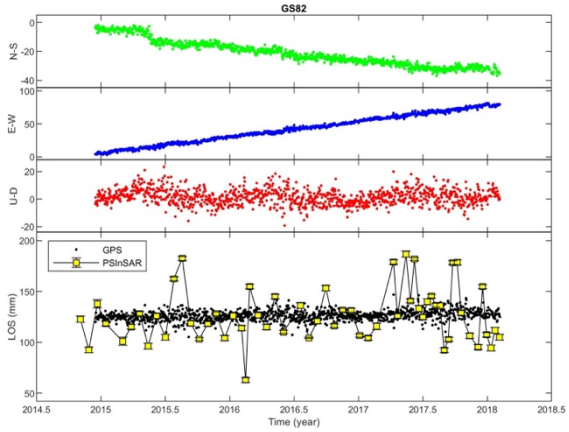

GS38
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

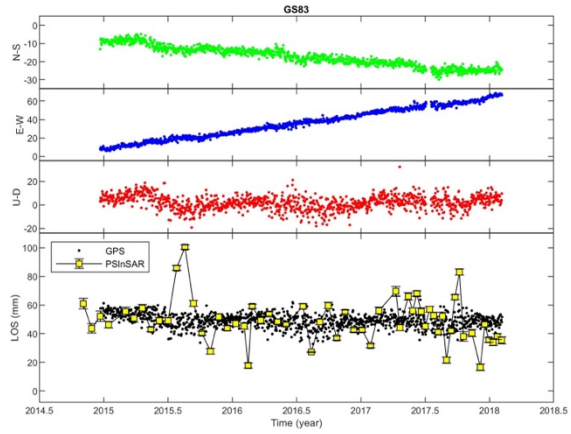

GS39
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

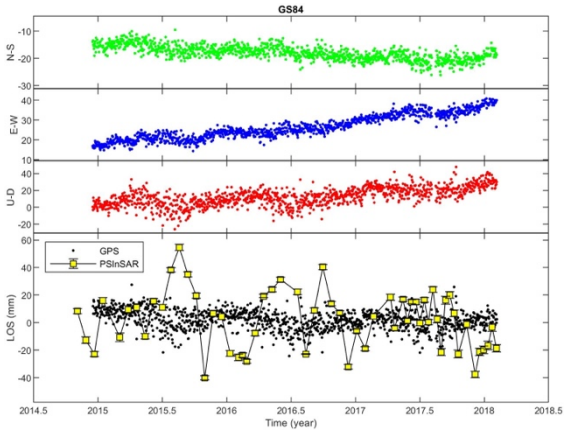

GS40
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

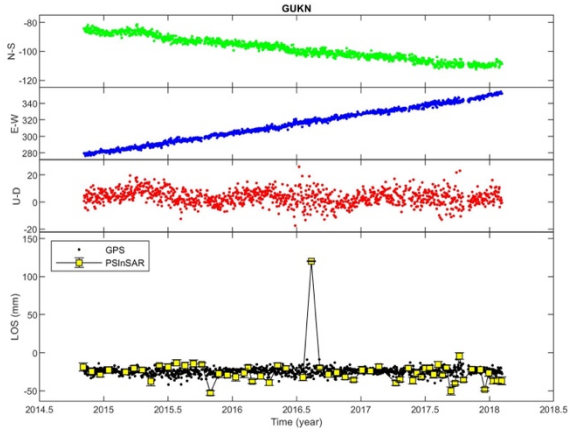

GS63
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

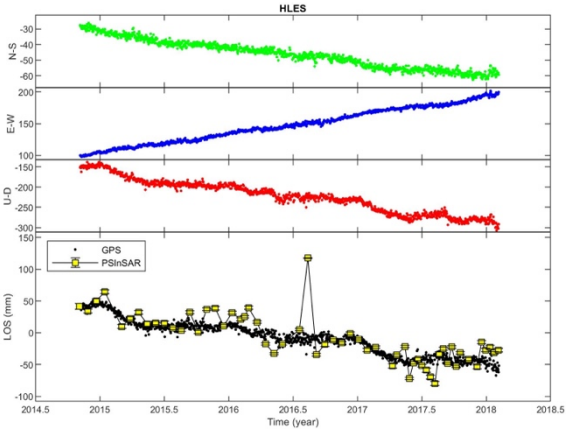

GS68
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

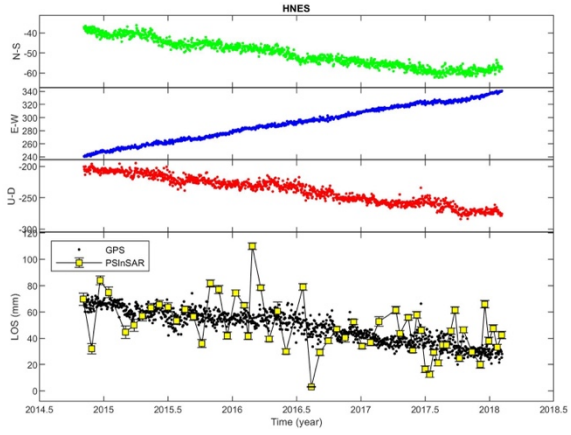

GS82
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

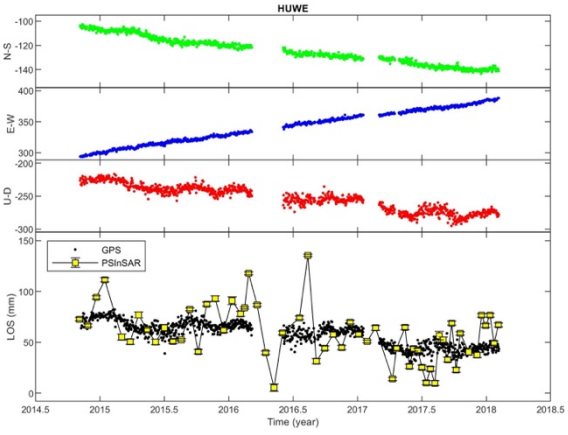

GS83
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

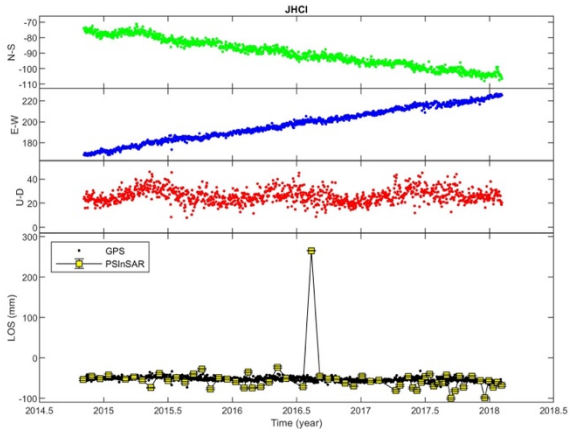

GS84
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

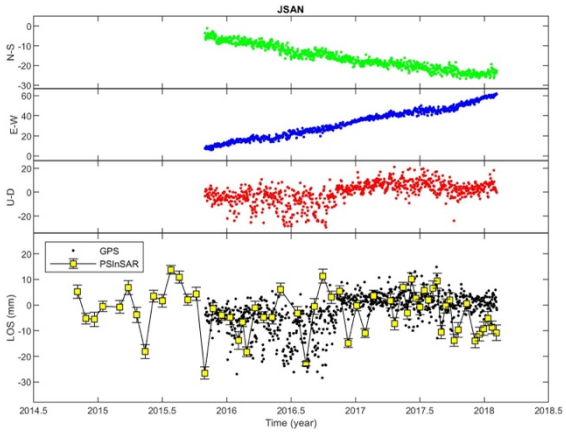

GUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

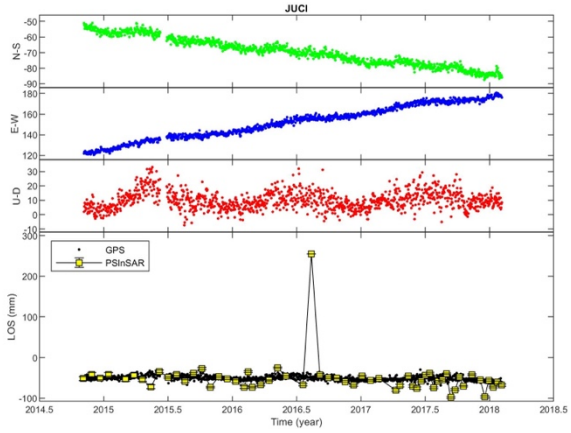

HLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

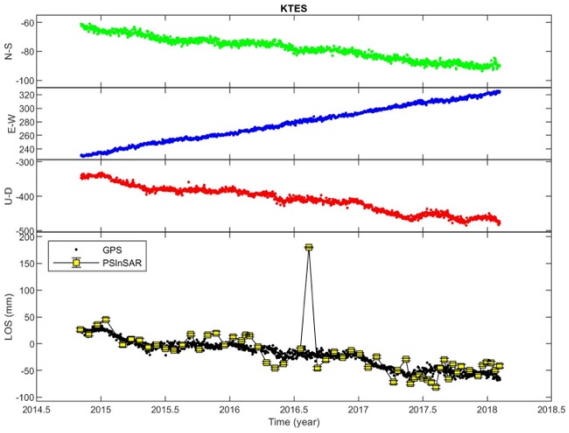

HNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

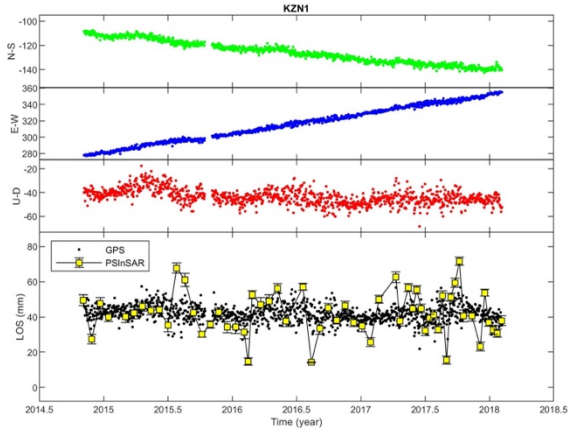

HUWE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

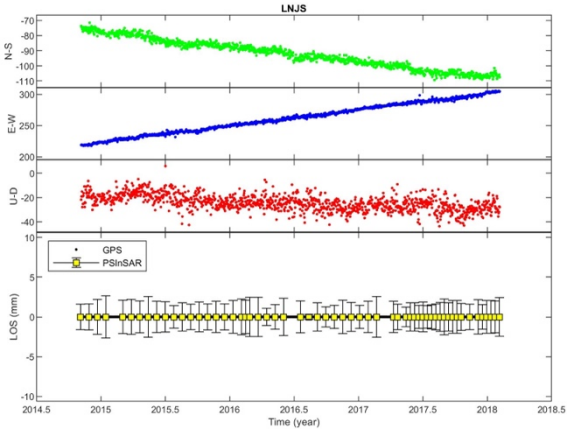

JHCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

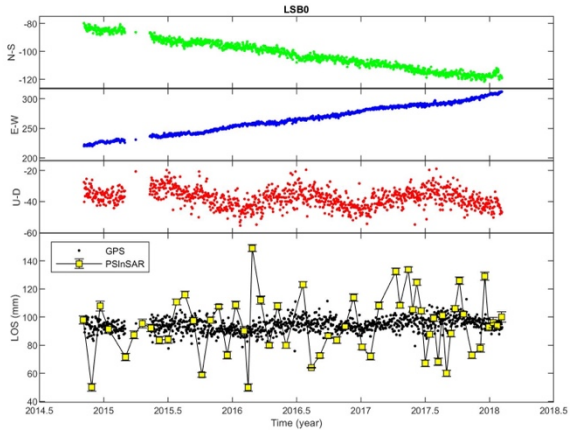

JSAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

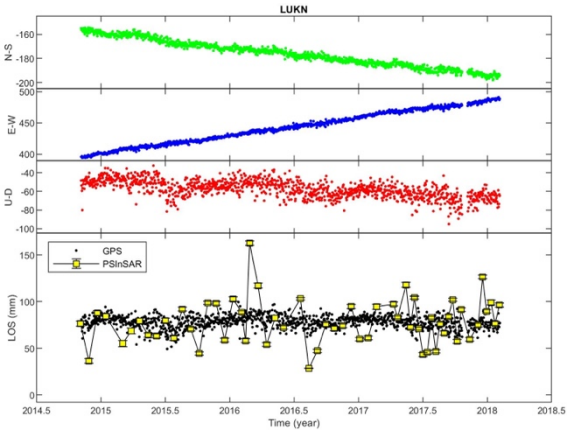

JUCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

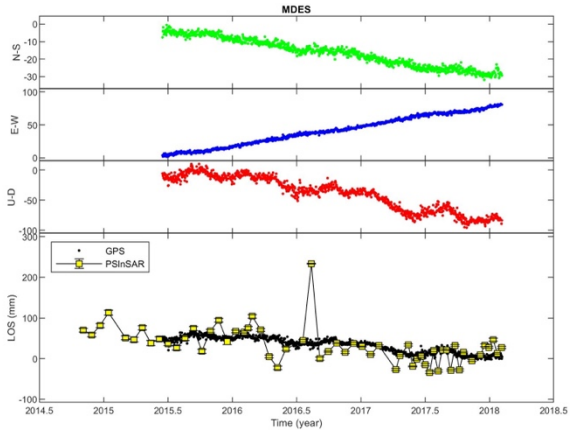

KTES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

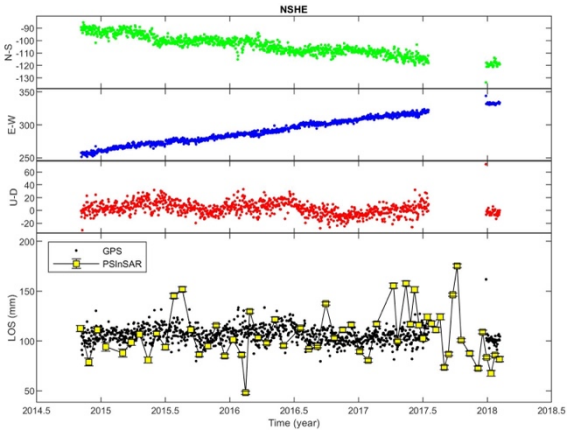

KZN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

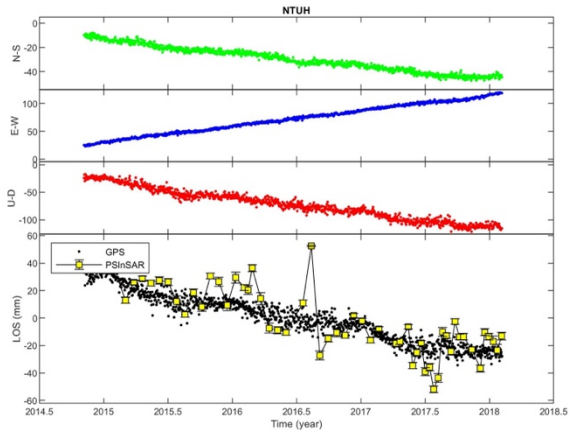

LNJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

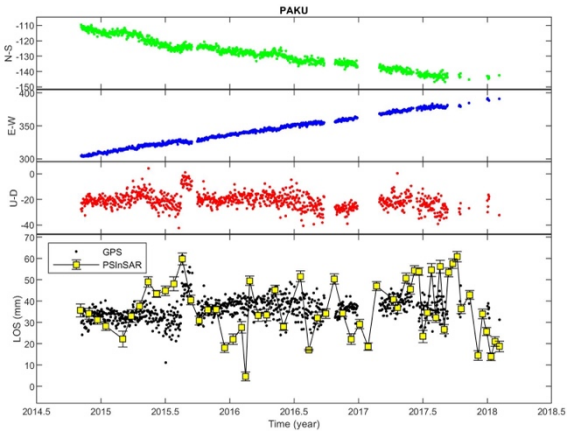

LSB0
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

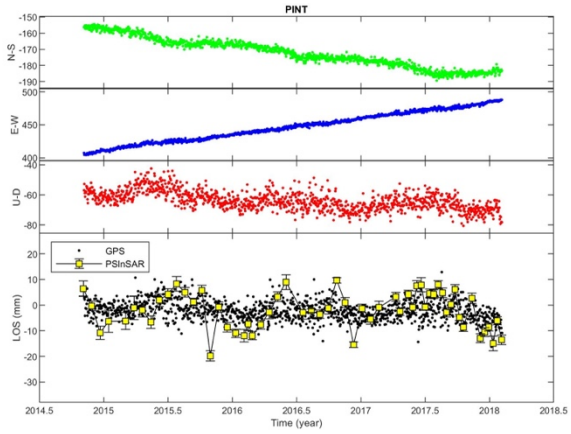

LUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

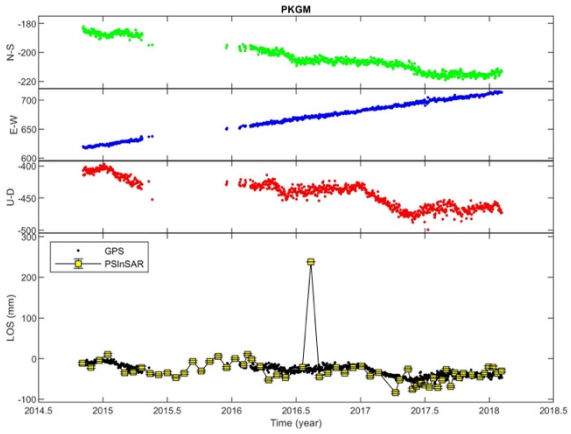

MDES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

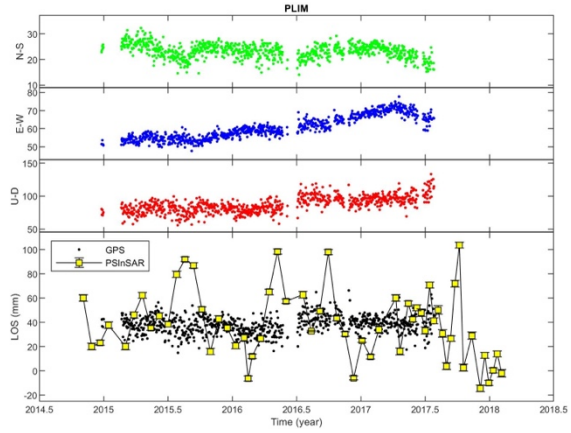

NSHE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

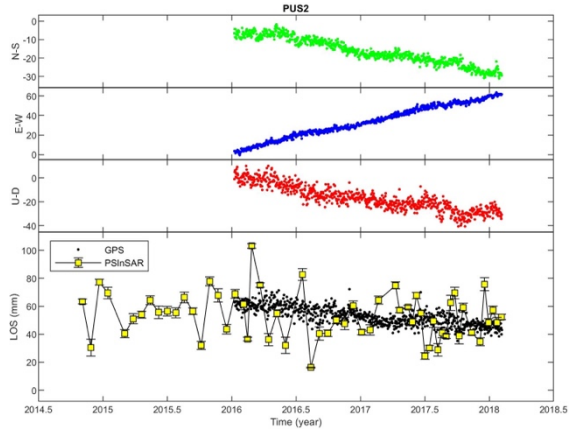

NTUH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

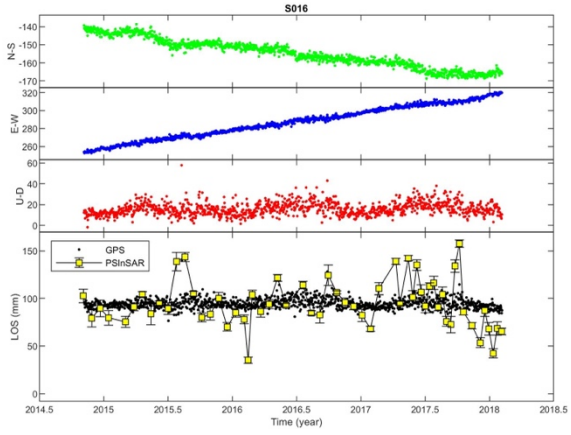

PAKU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

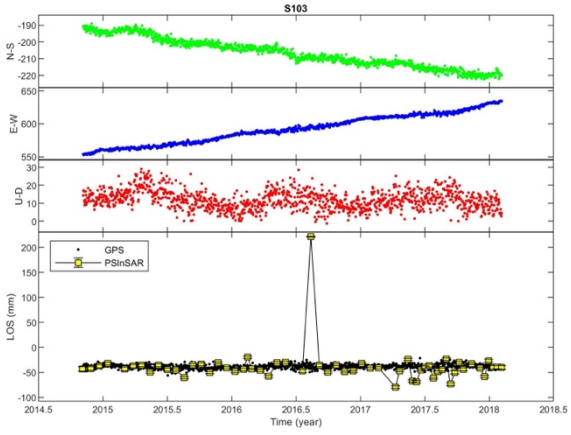

PINT
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

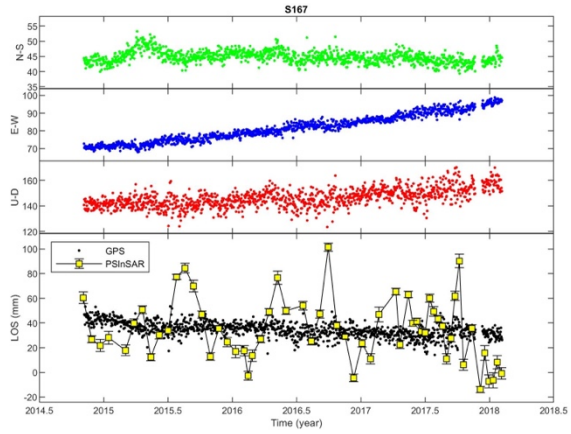

PKGM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

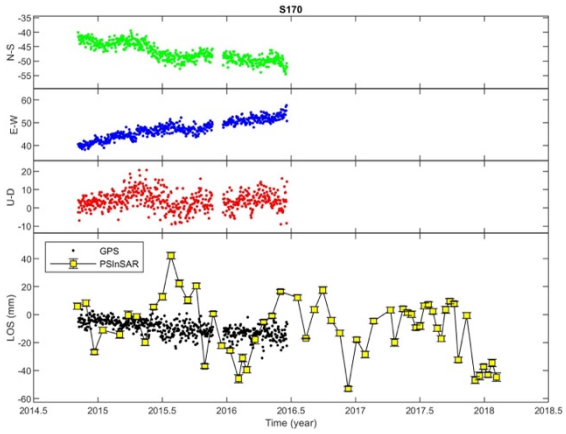

PLIM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

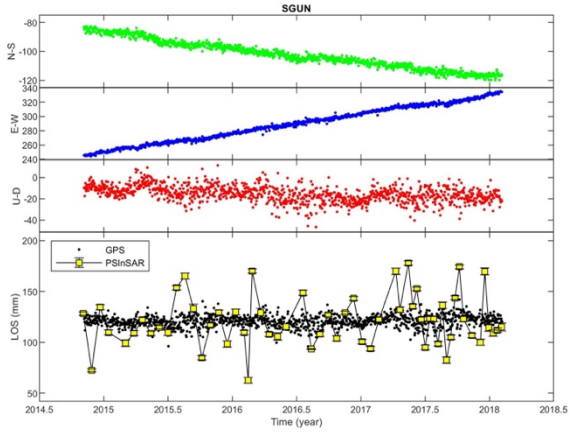

PUS2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

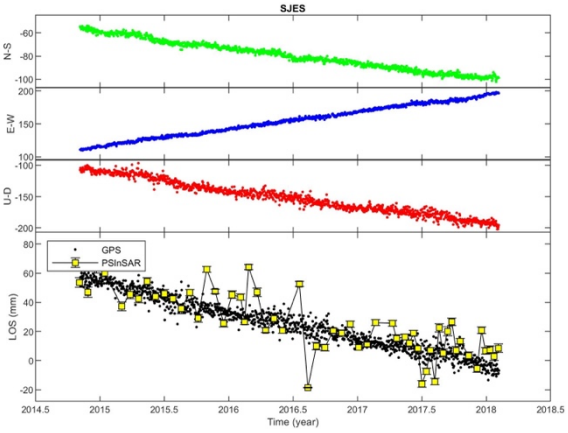

S016
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

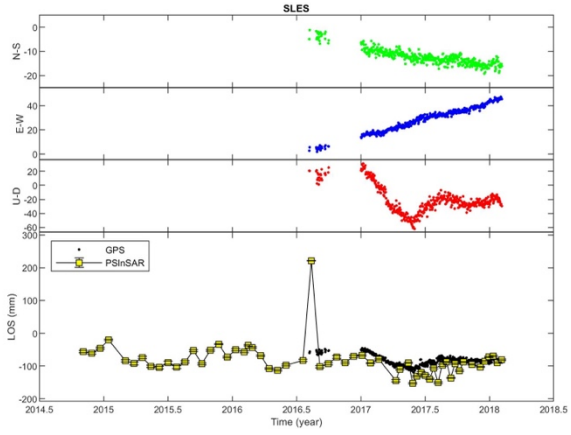

S103
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

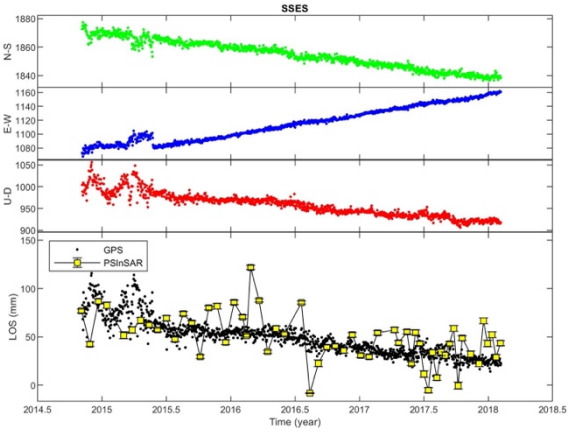

S167
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

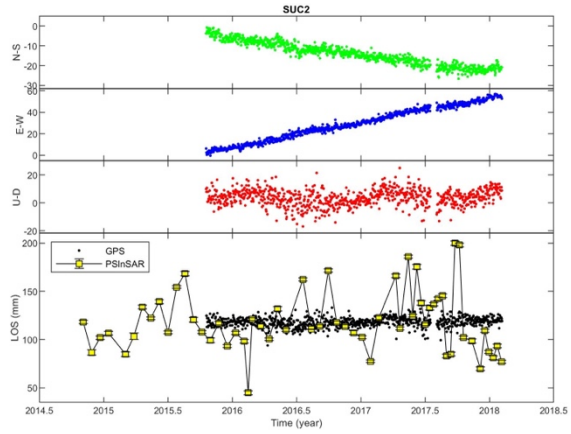

S170
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

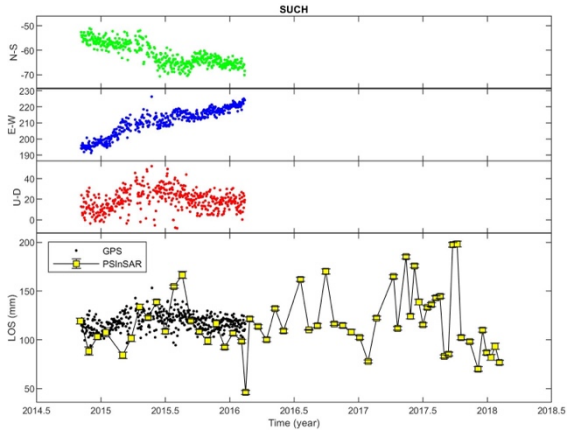

SGUN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

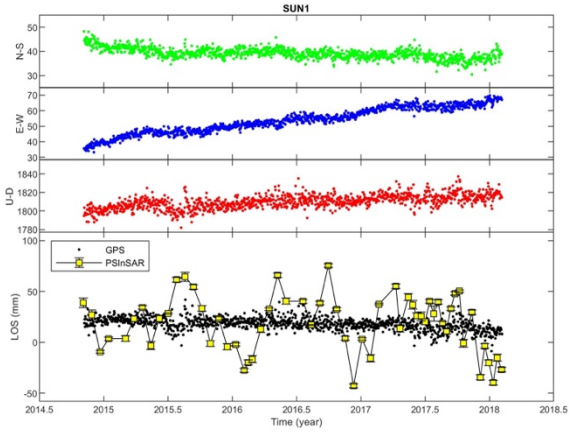

SJES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

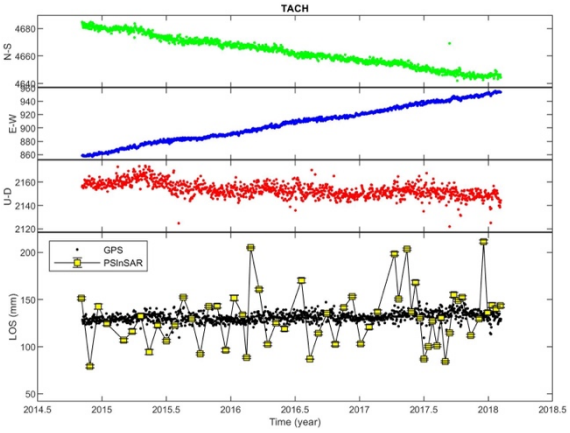

SLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

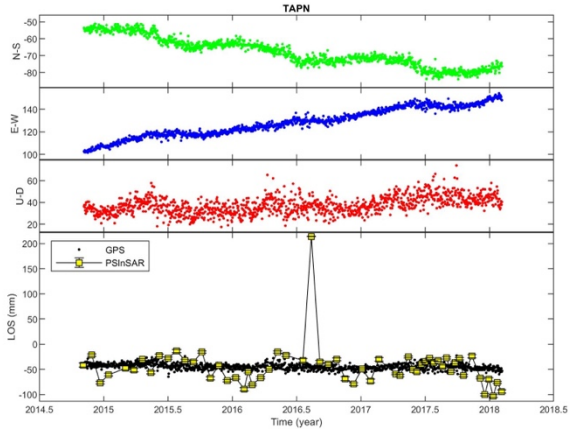

SSES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

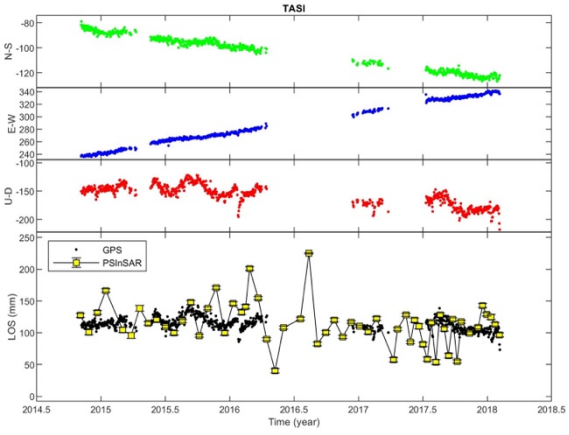

SUC2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

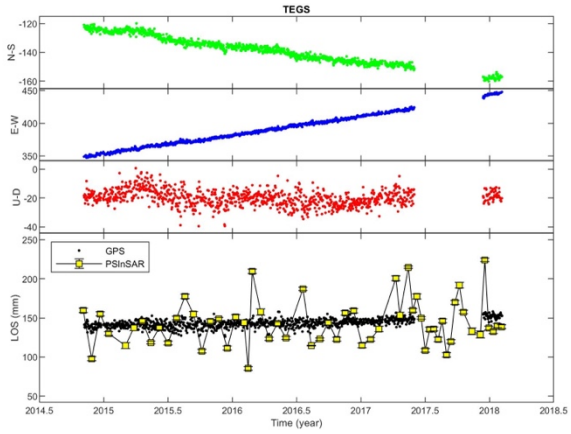

SUCH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

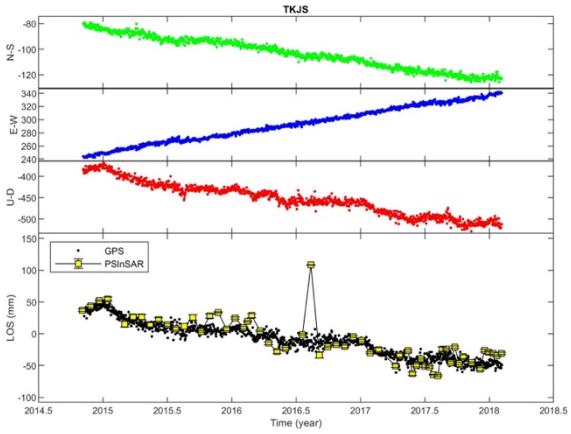

SUN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

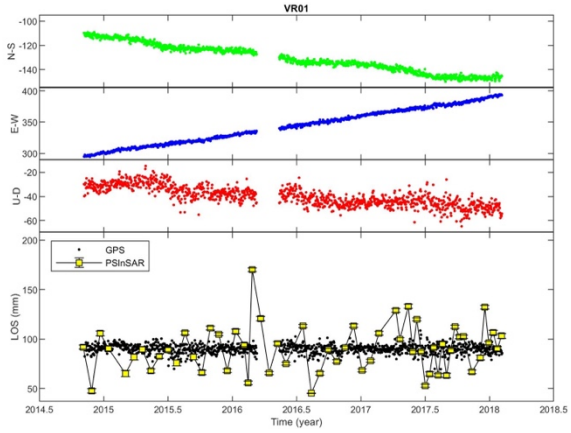

TACH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

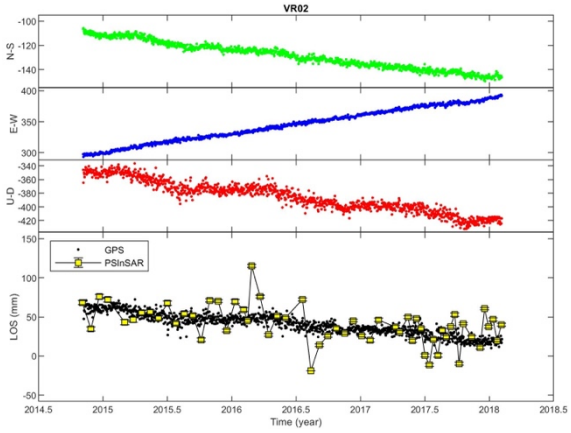

TAPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

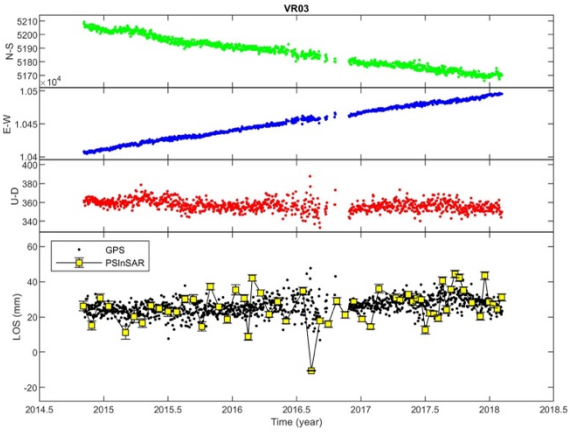

TASI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

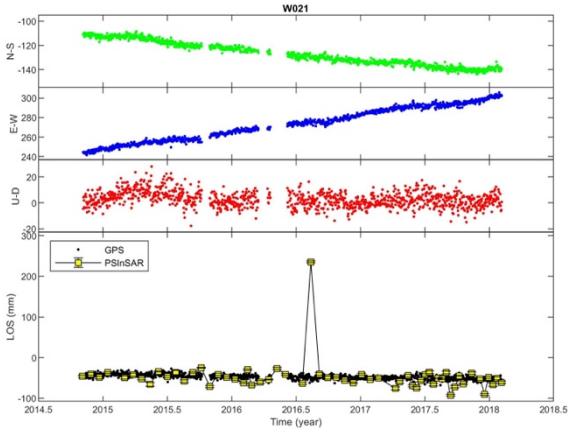

TEGS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


TKJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


VR01
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


VR02
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


VR03
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


W021
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

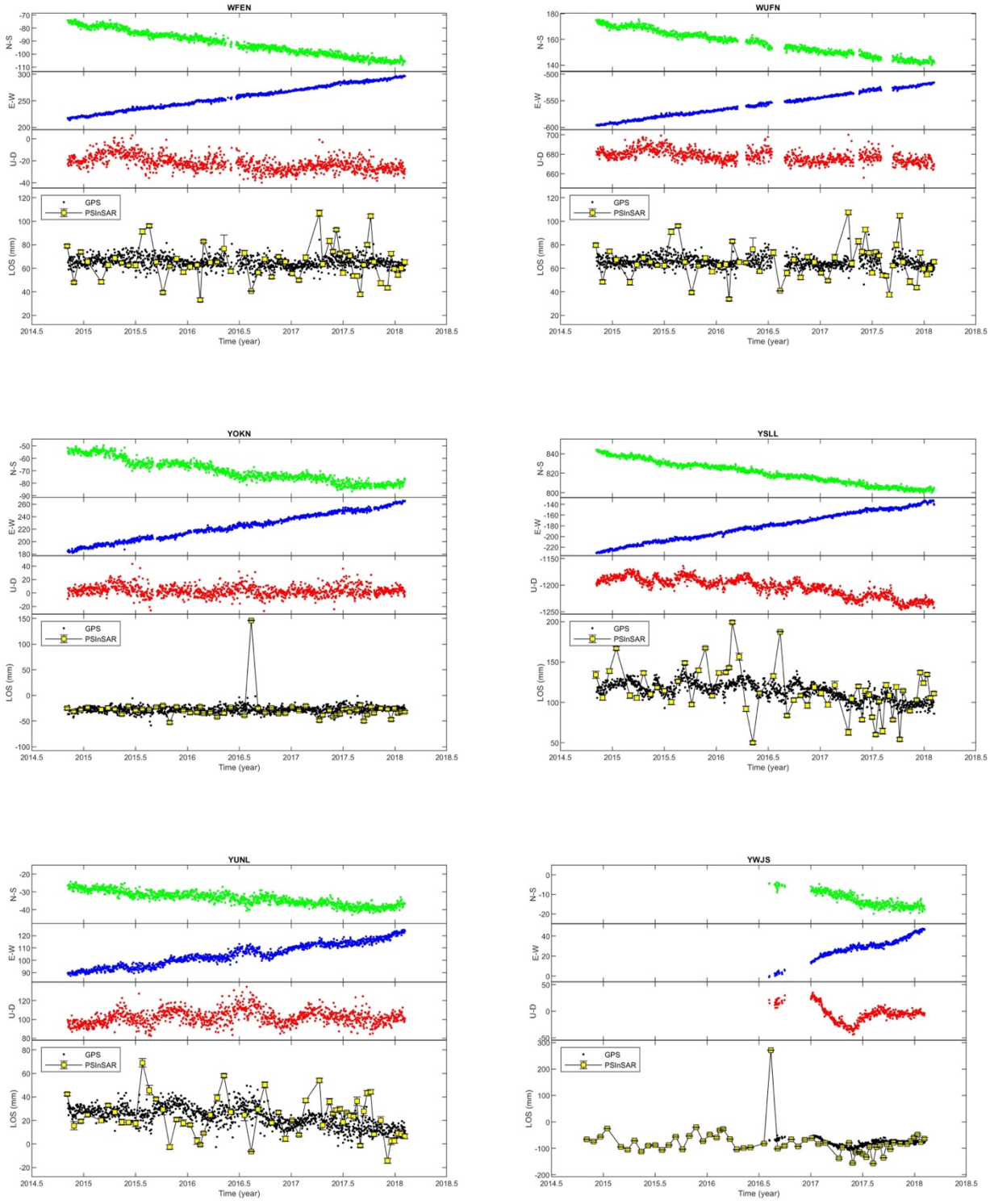
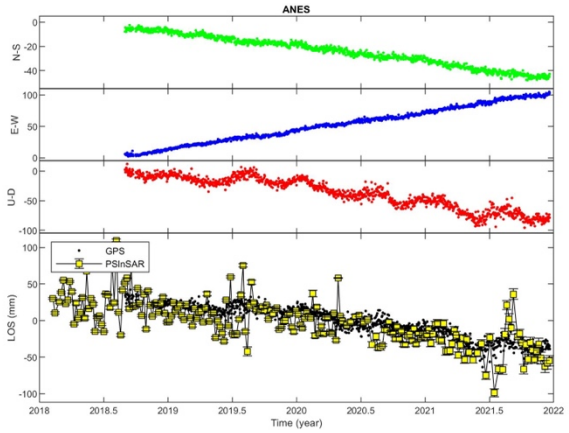
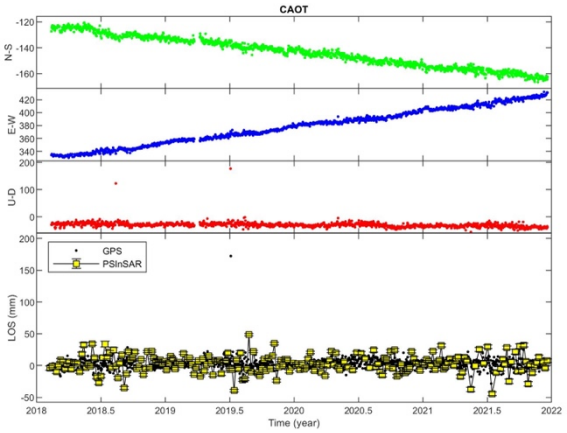


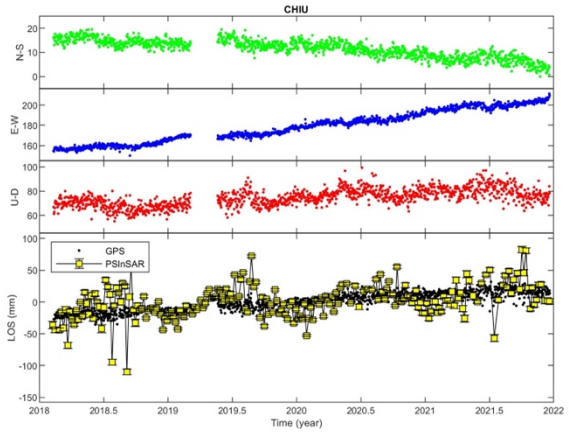
圖 B-2：2014-2018 降軌 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列。

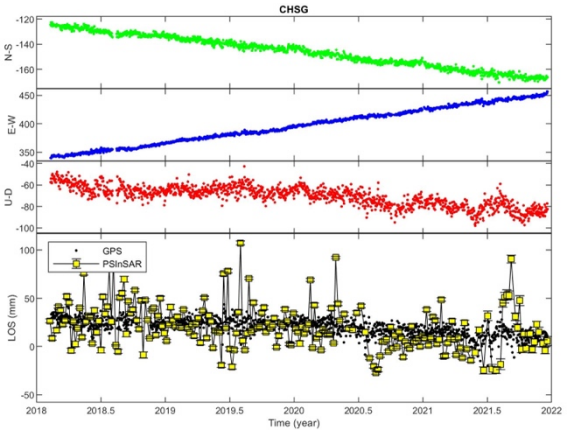
Figure B-2：Time series for GNSS 3-direction, projected GNSS 3-direction into LOS and PSI time series in descending orbit between 2014 and 2018.

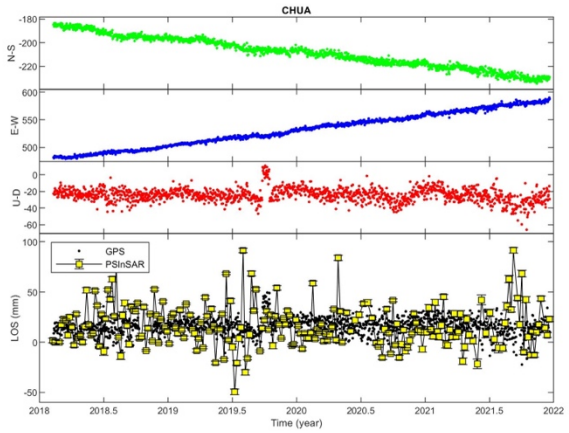
B-3 2018-2021 Ascending

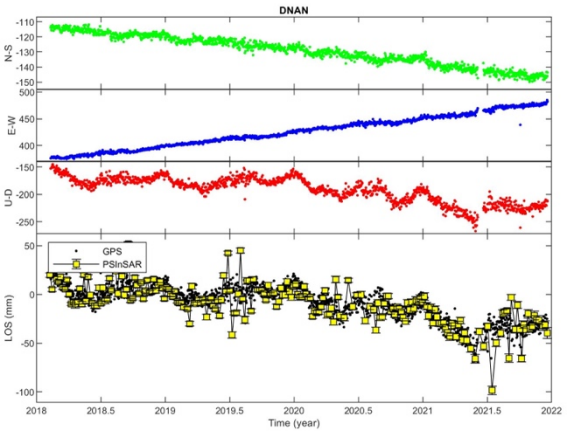


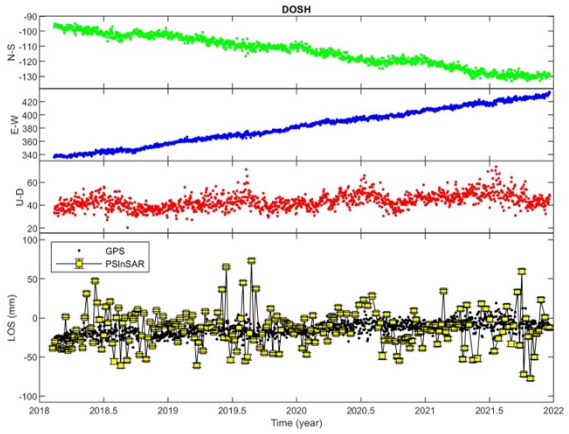


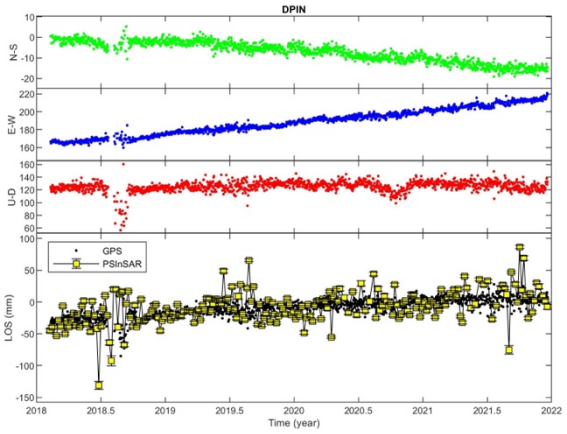


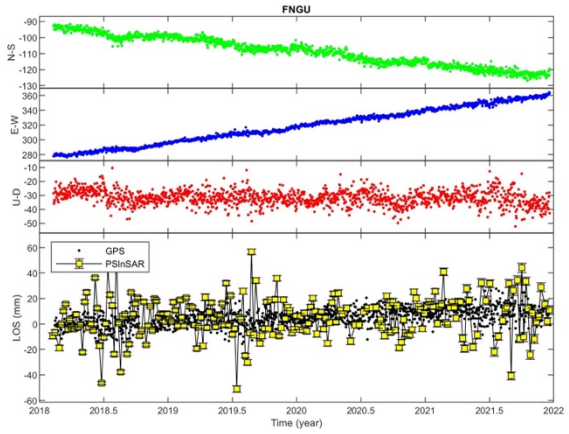


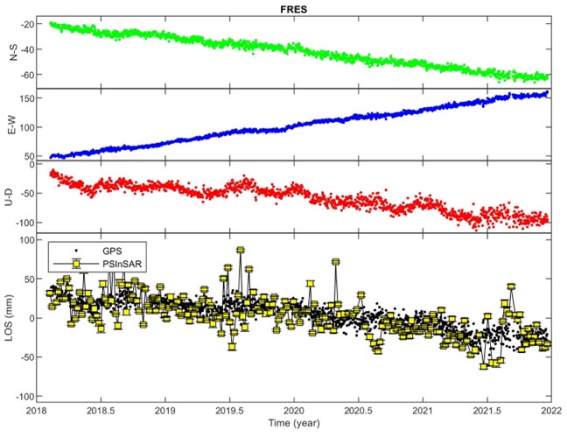


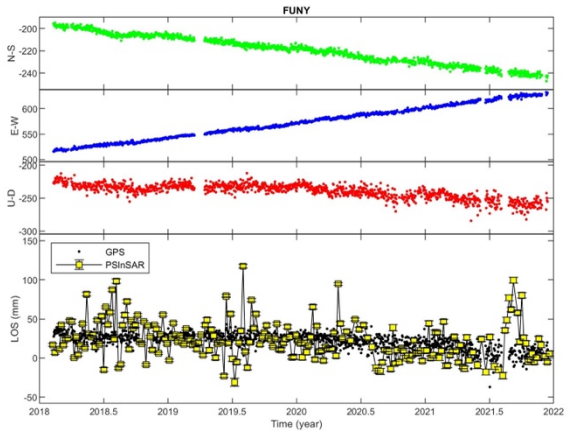


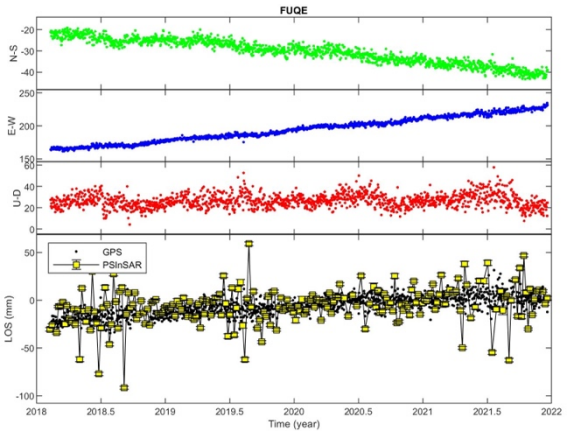

DOSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

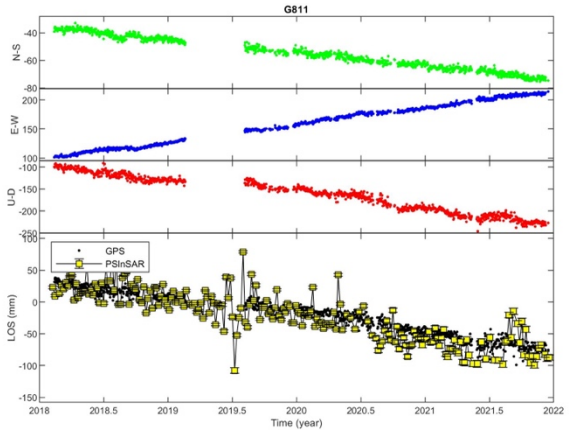

DPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

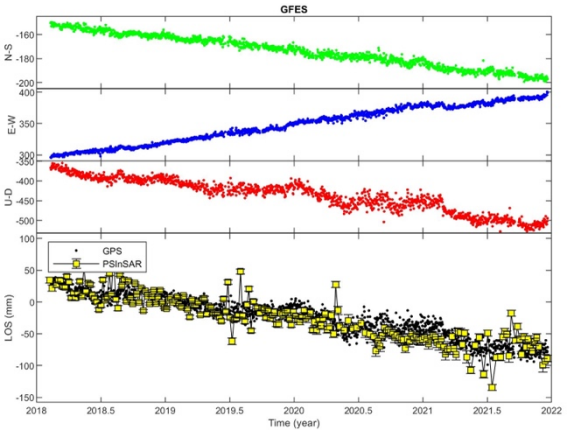

FNGU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

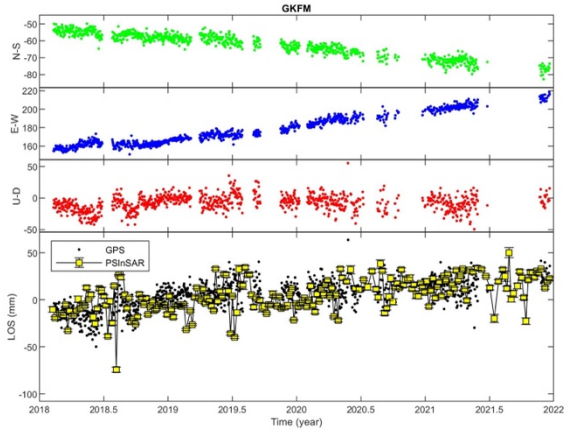

FRES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

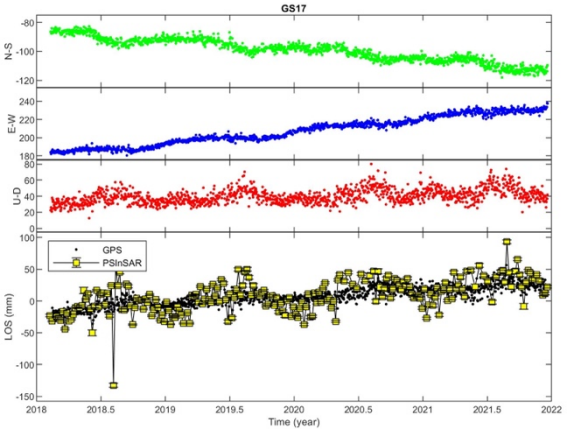

FUNY
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

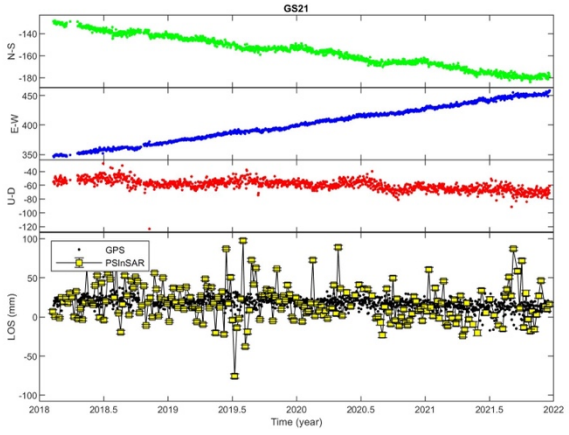

FUQE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

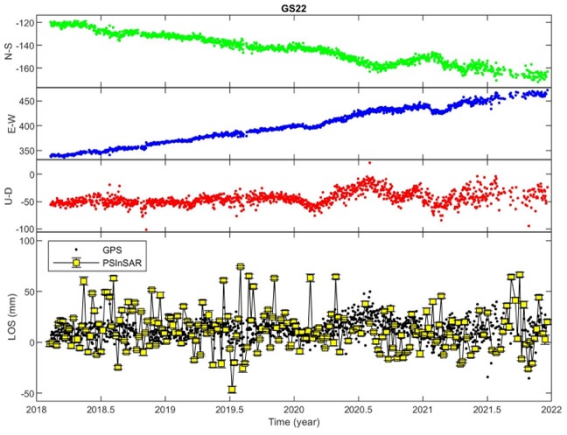

G811
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

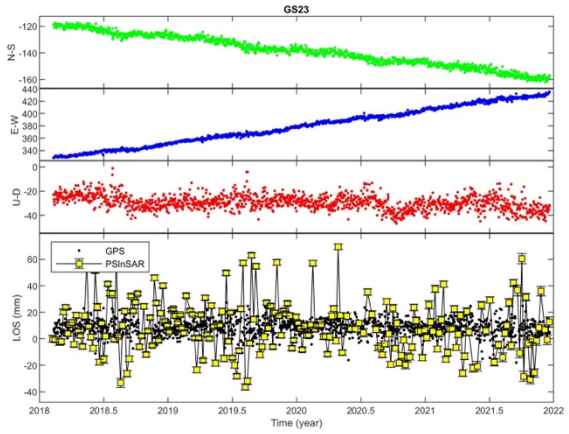

GFES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

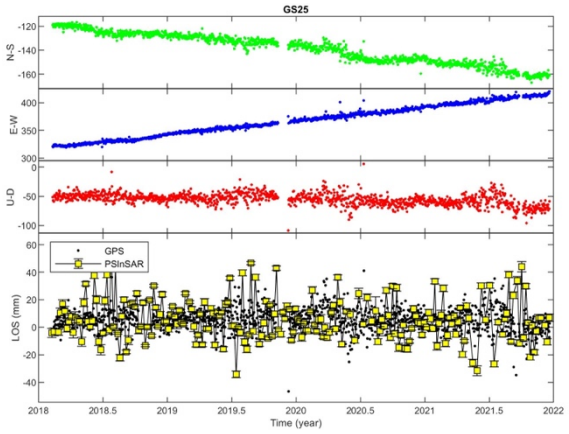

GKFM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

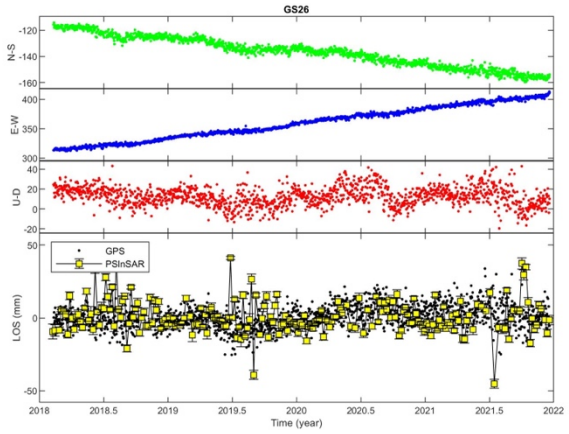

GS17
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

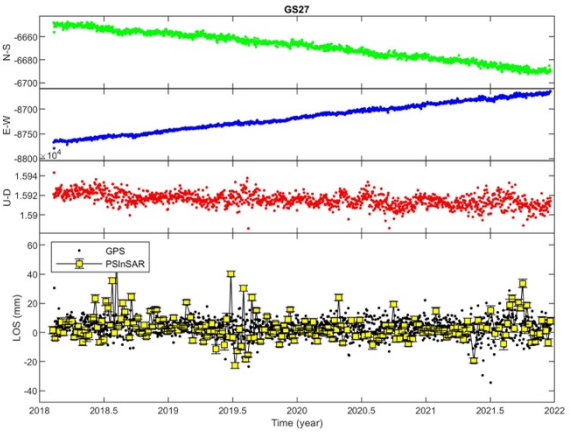

GS21
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

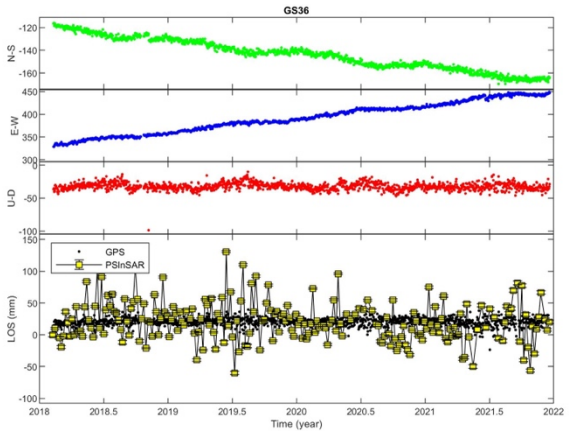

GS22
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

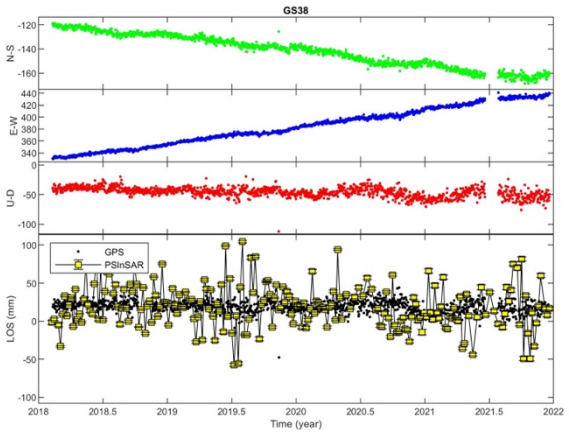

GS23
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

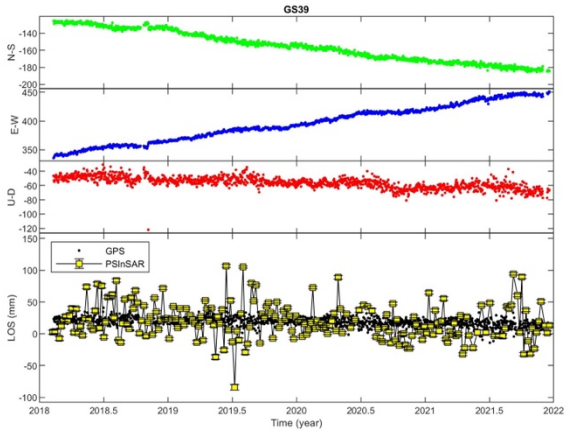

GS25
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

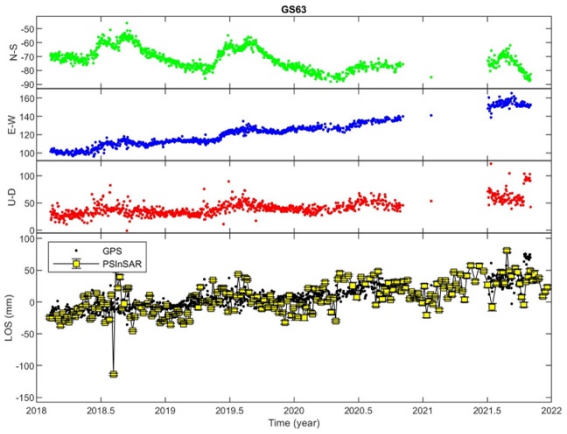

GS26
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

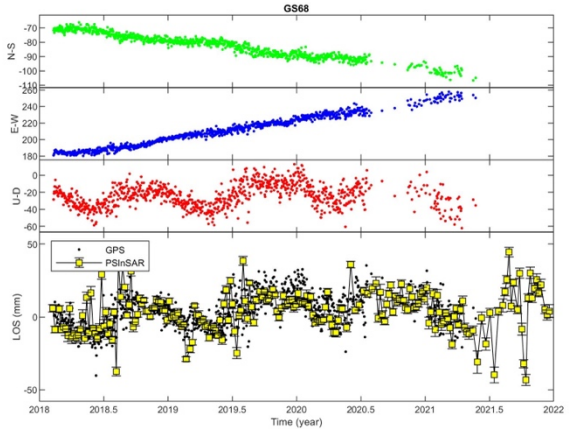

GS27
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

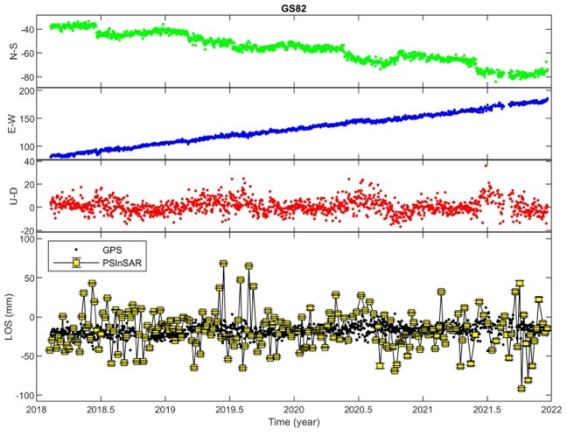

GS36
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

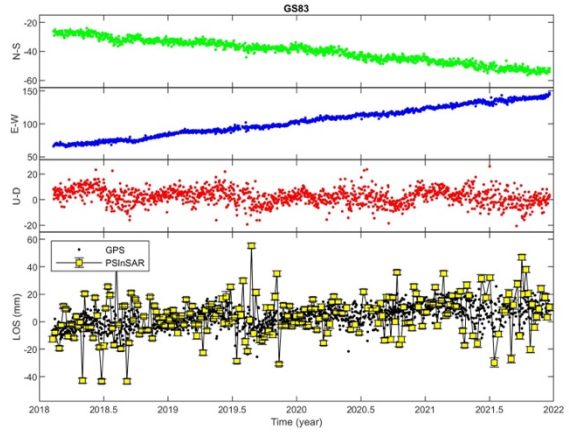

GS38
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

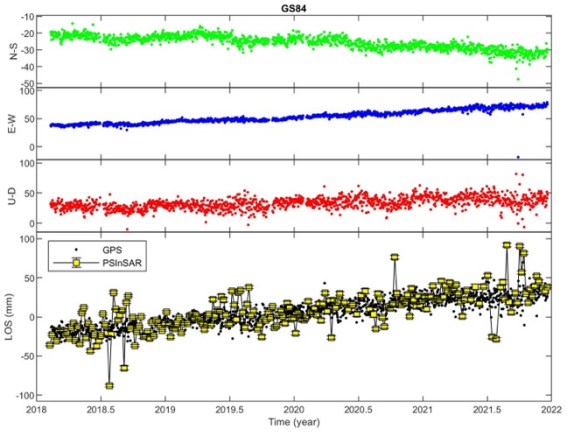

GS39
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

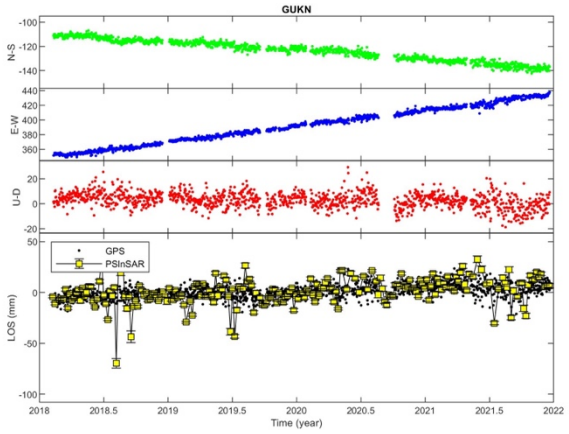

GS63
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

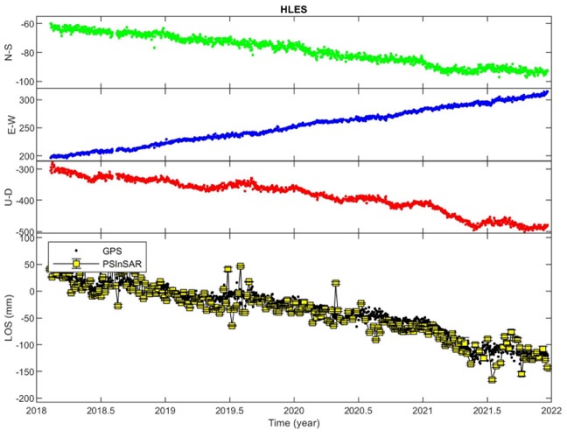

GS68
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

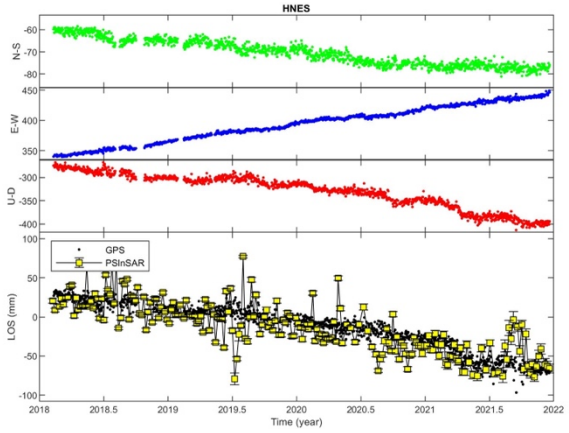

GS82
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

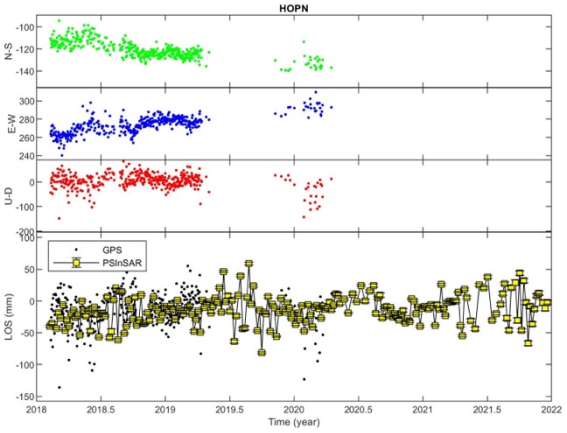

GS83
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

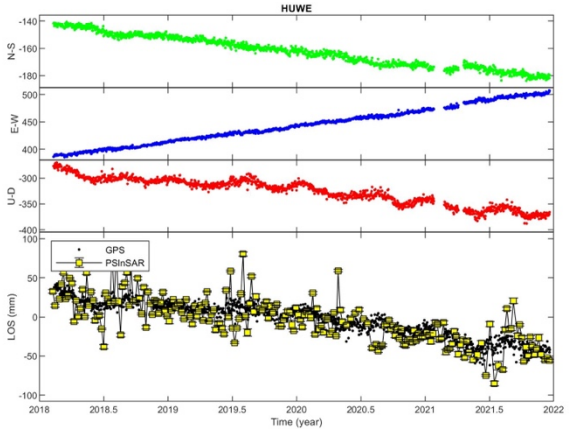

GS84
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

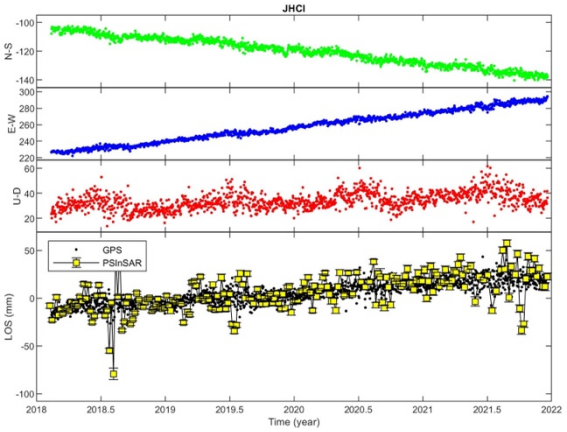

GUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

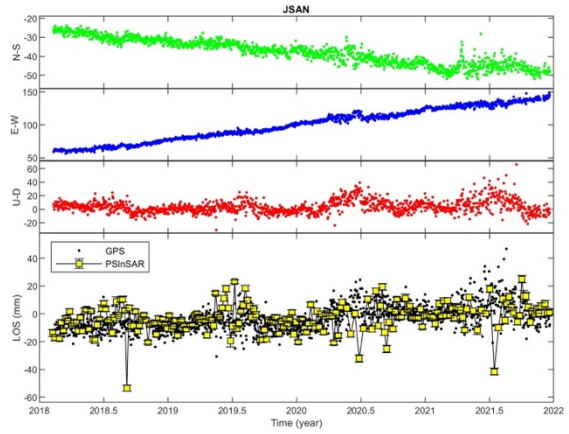

HLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

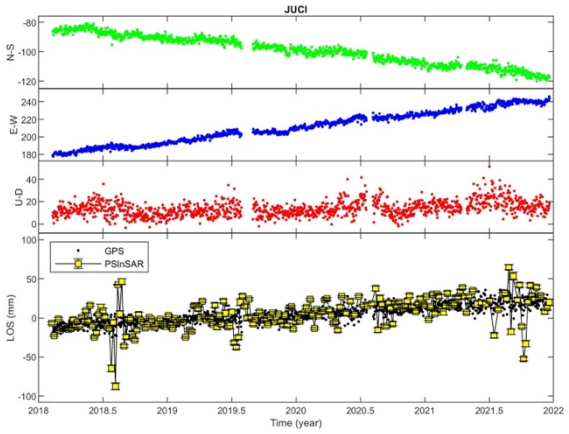

HNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

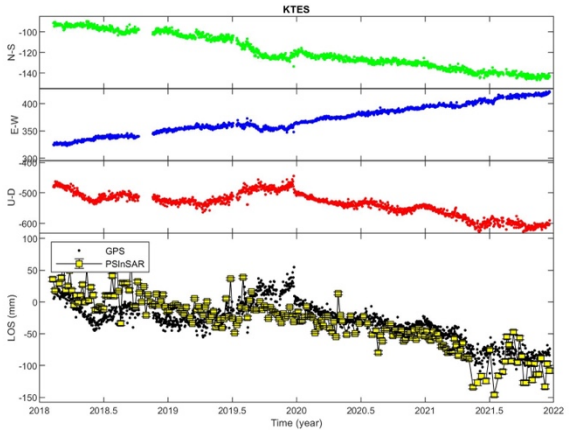

HOPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

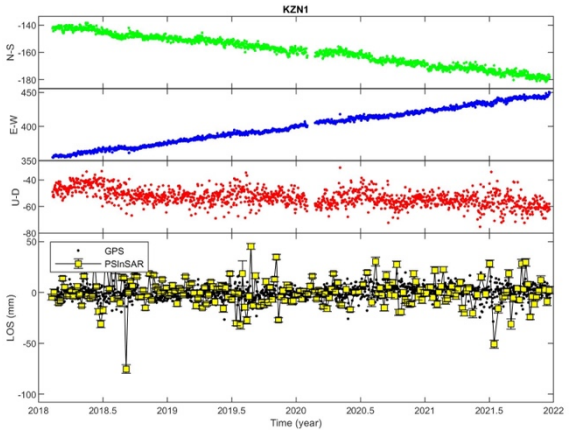

HUWE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

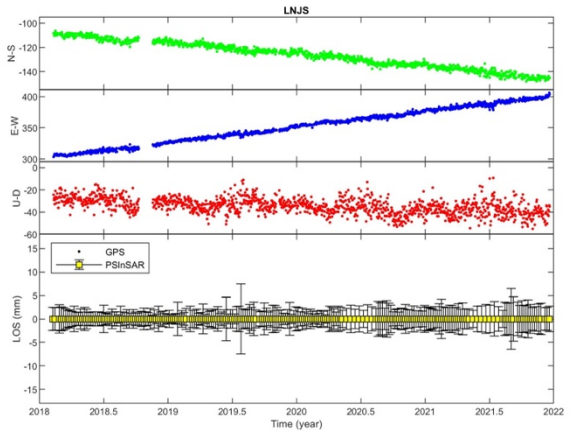

JHCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

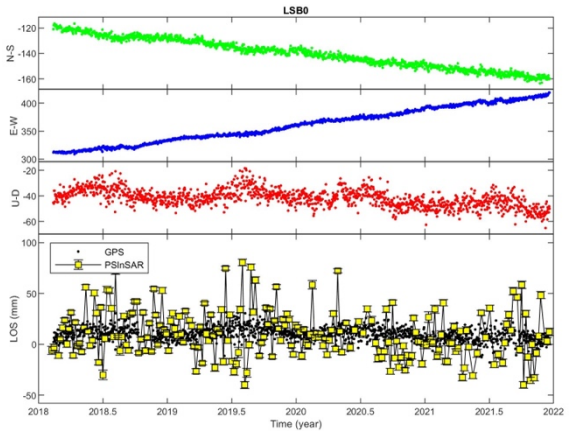

JSAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

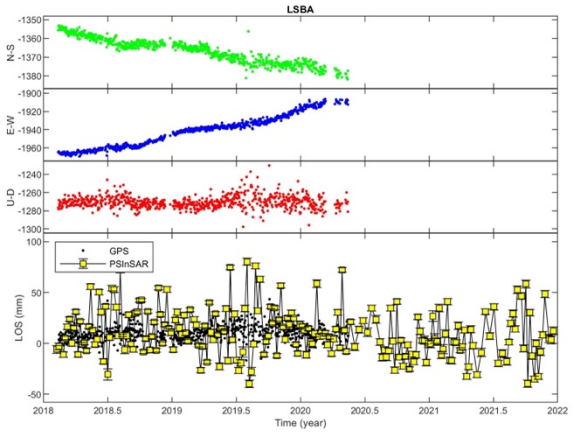

JUCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

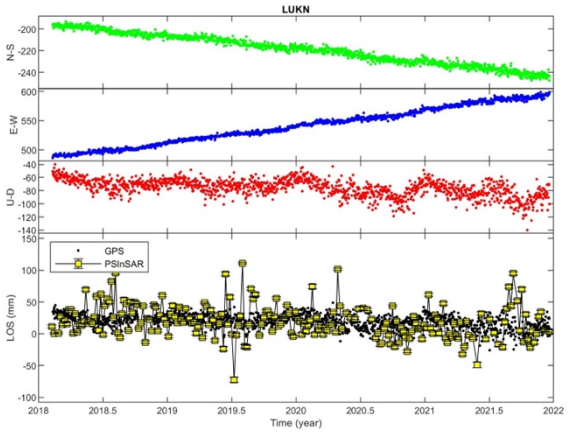

KTES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

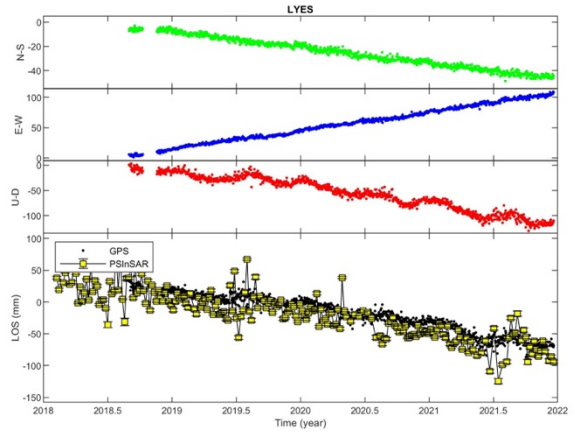

KZN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

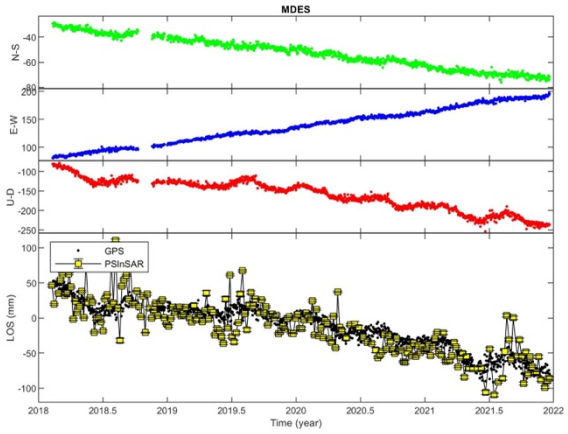

LNJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

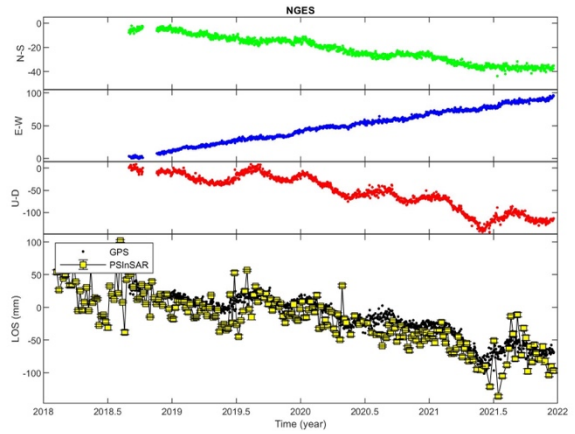

LSB0
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

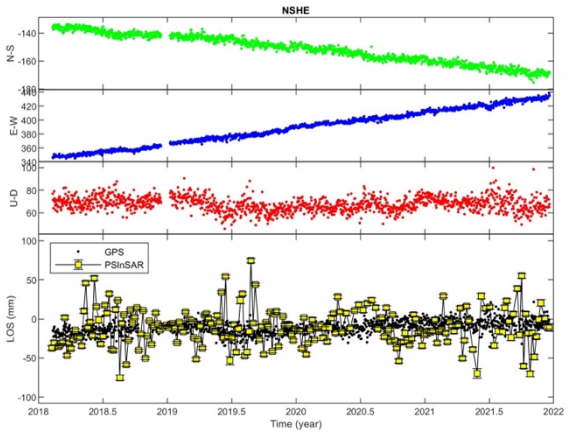

LSBA
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

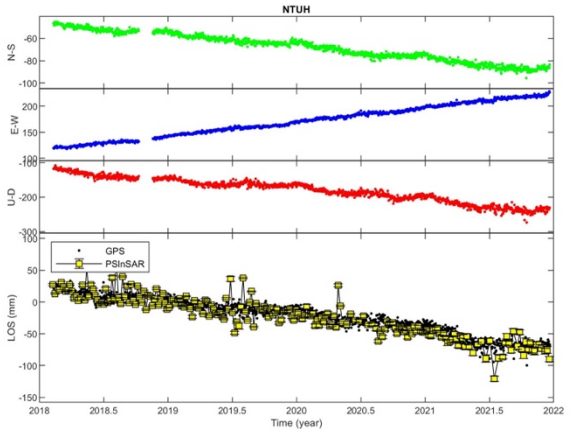

LUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

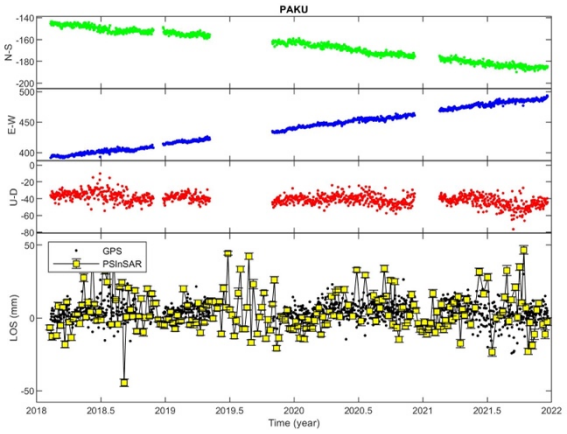

LYES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

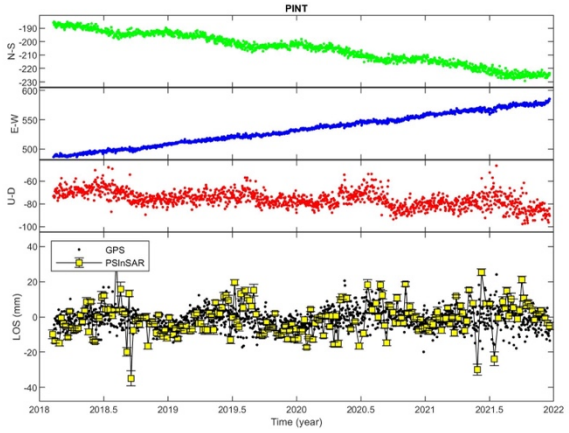

MDES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

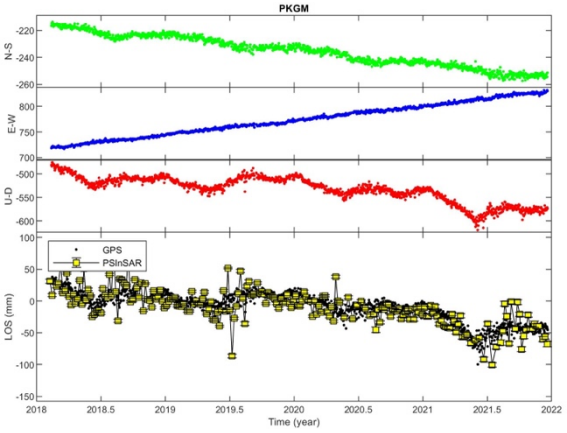

NGES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

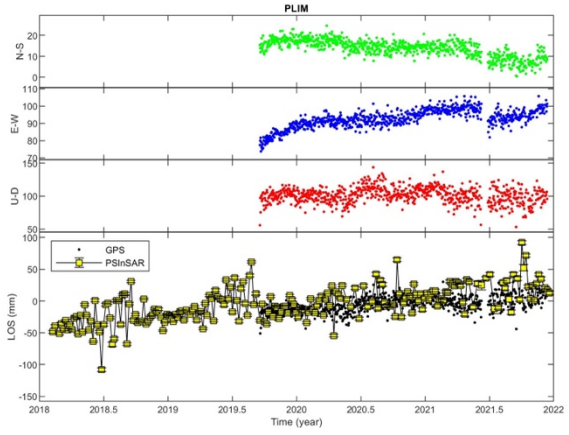

NSHE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

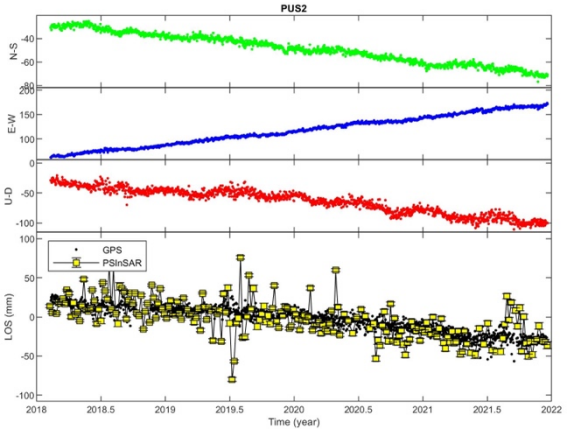

NTUH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

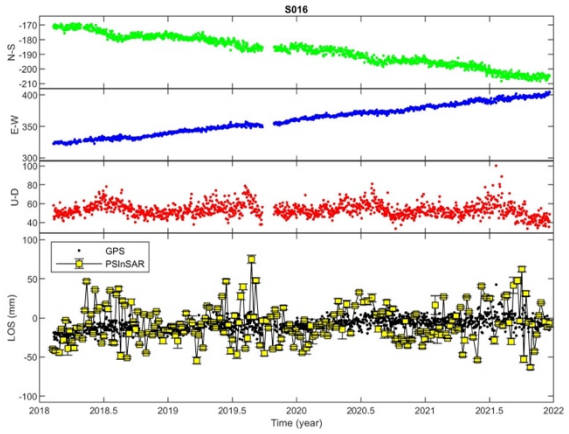

PAKU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

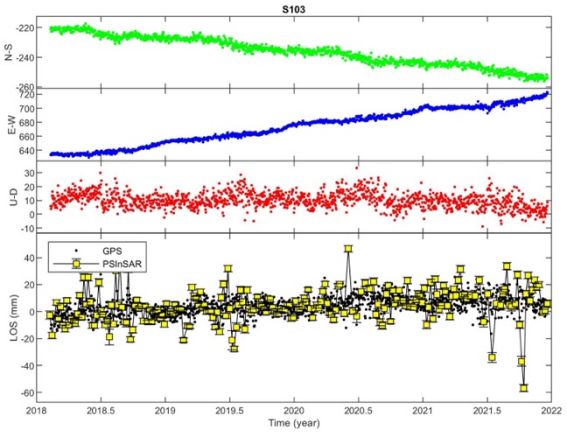

PINT
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

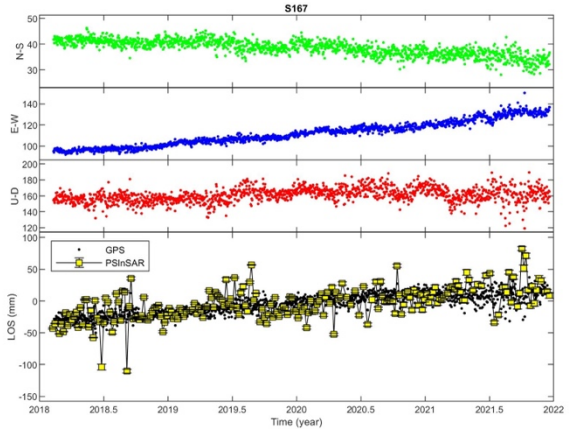

PKGM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

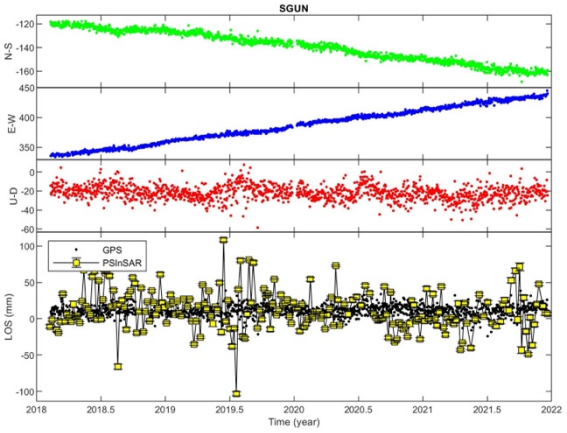

PLIM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

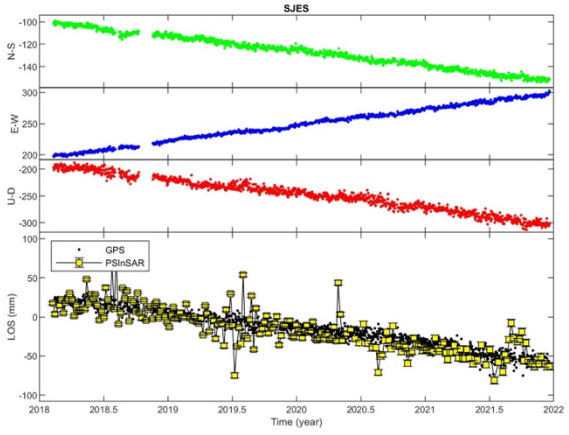

PUS2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

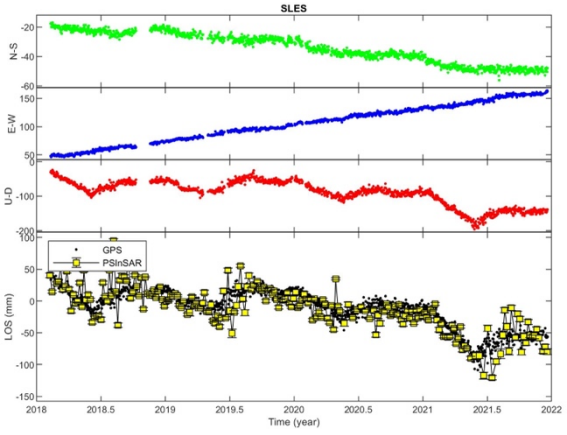

S016
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

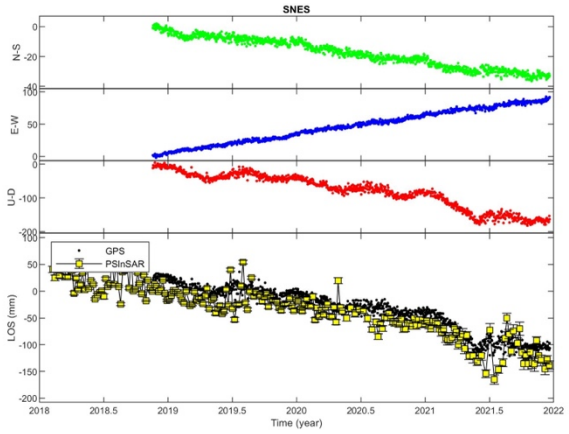

S103
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

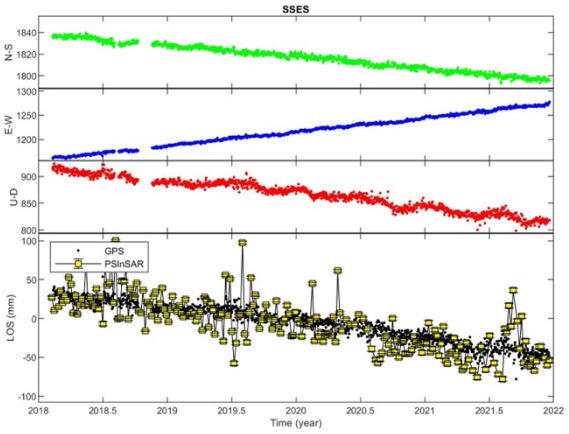

S167
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

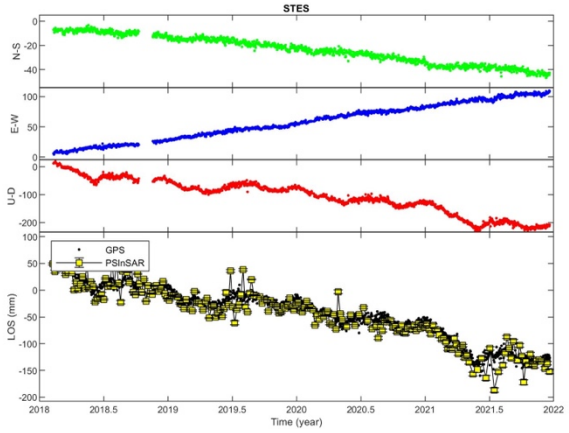

SGUN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

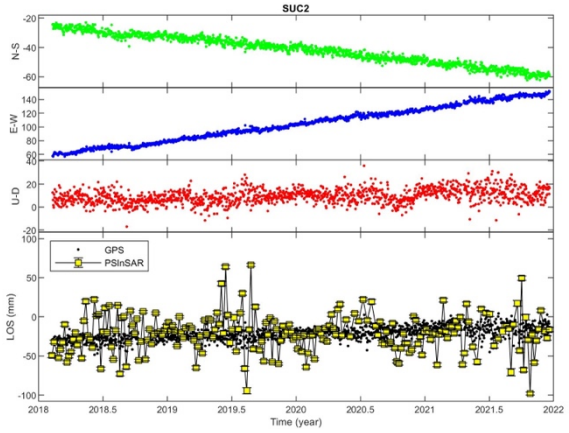

SJES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

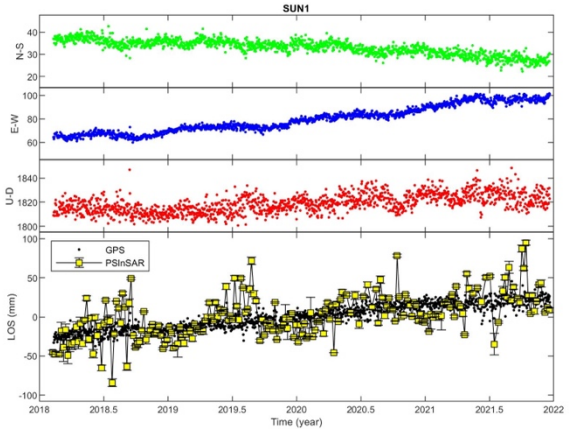

SLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

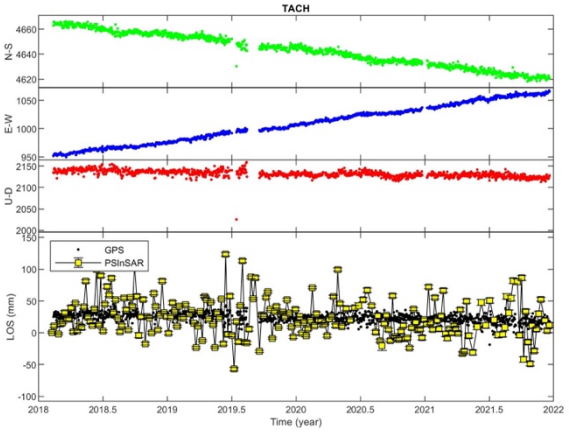

SNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

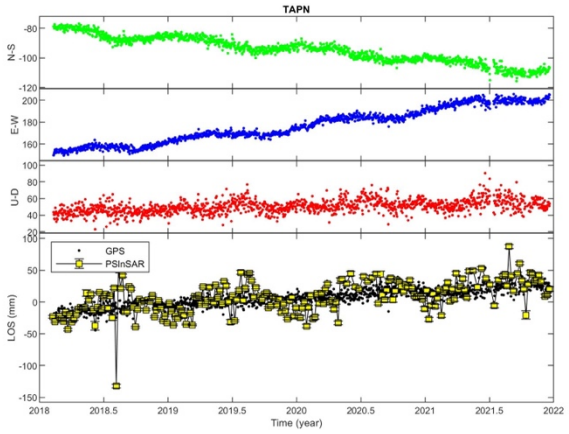

SSES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

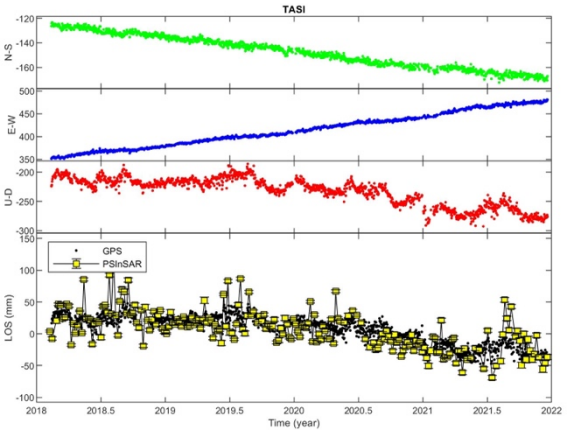

STES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

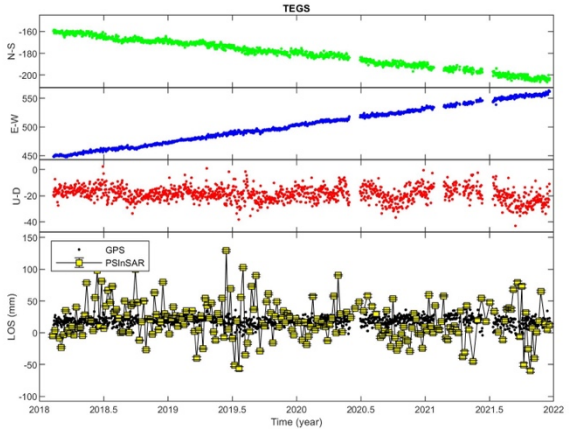

SUC2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

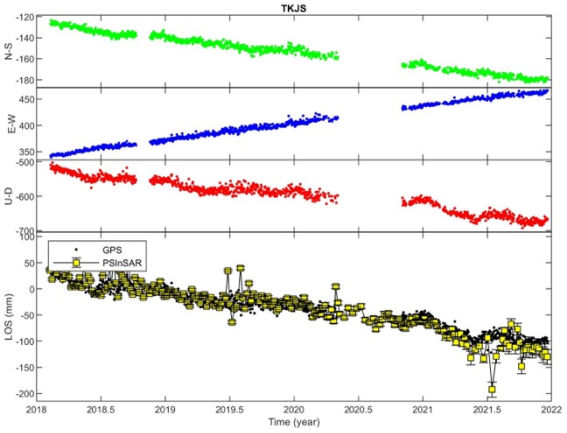

SUN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

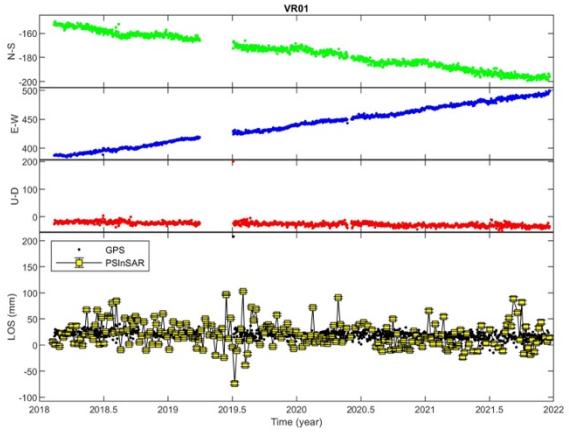

TACH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

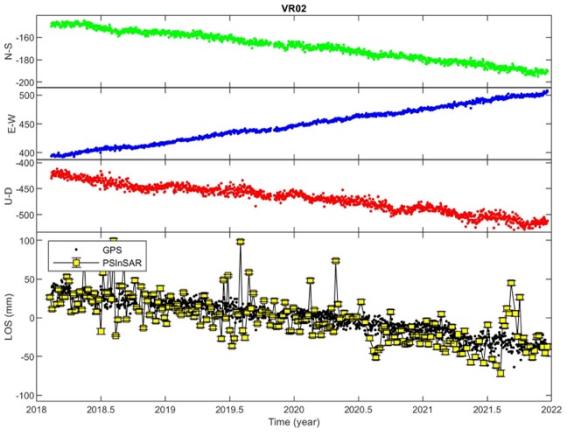

TAPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

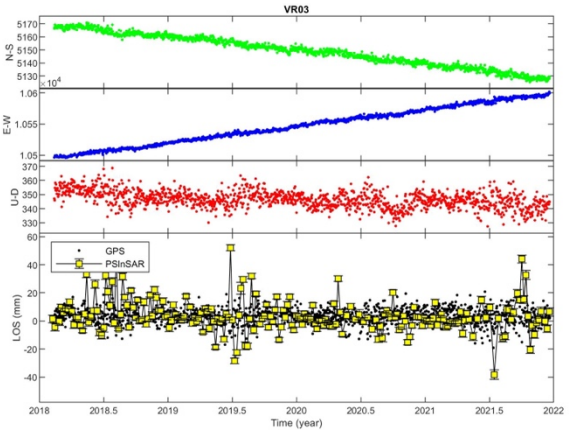

TASI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

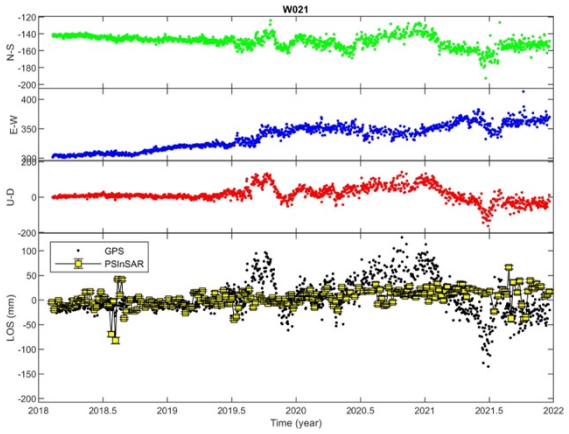

TEGS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

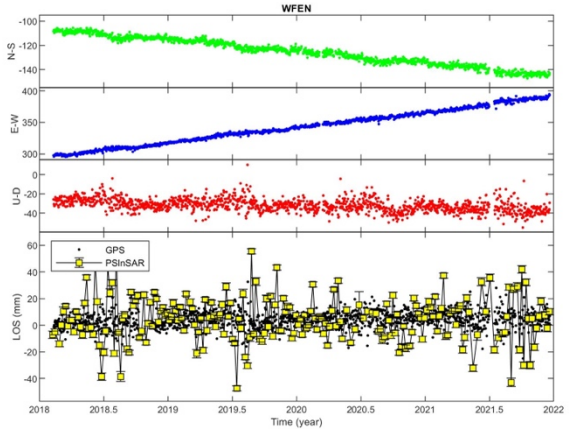

TKJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

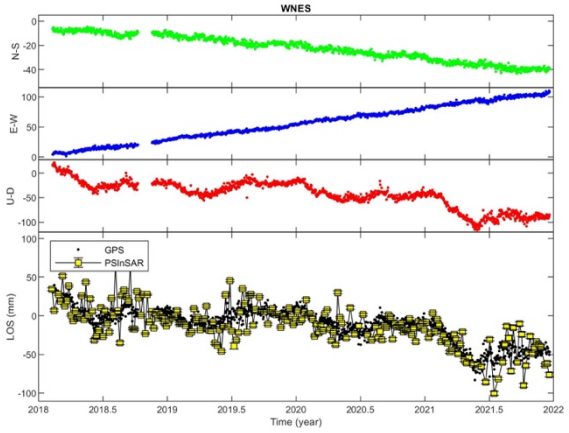

VR01
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

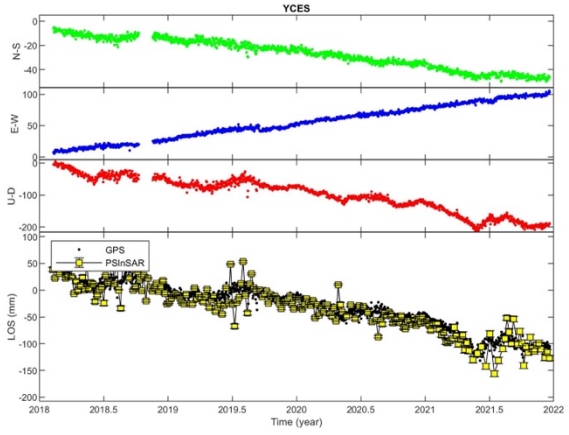

VR02
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

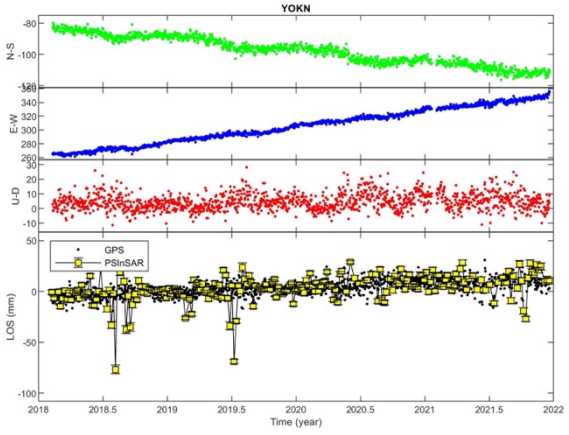

VR03
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


W021
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WFEN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YCES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YOKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

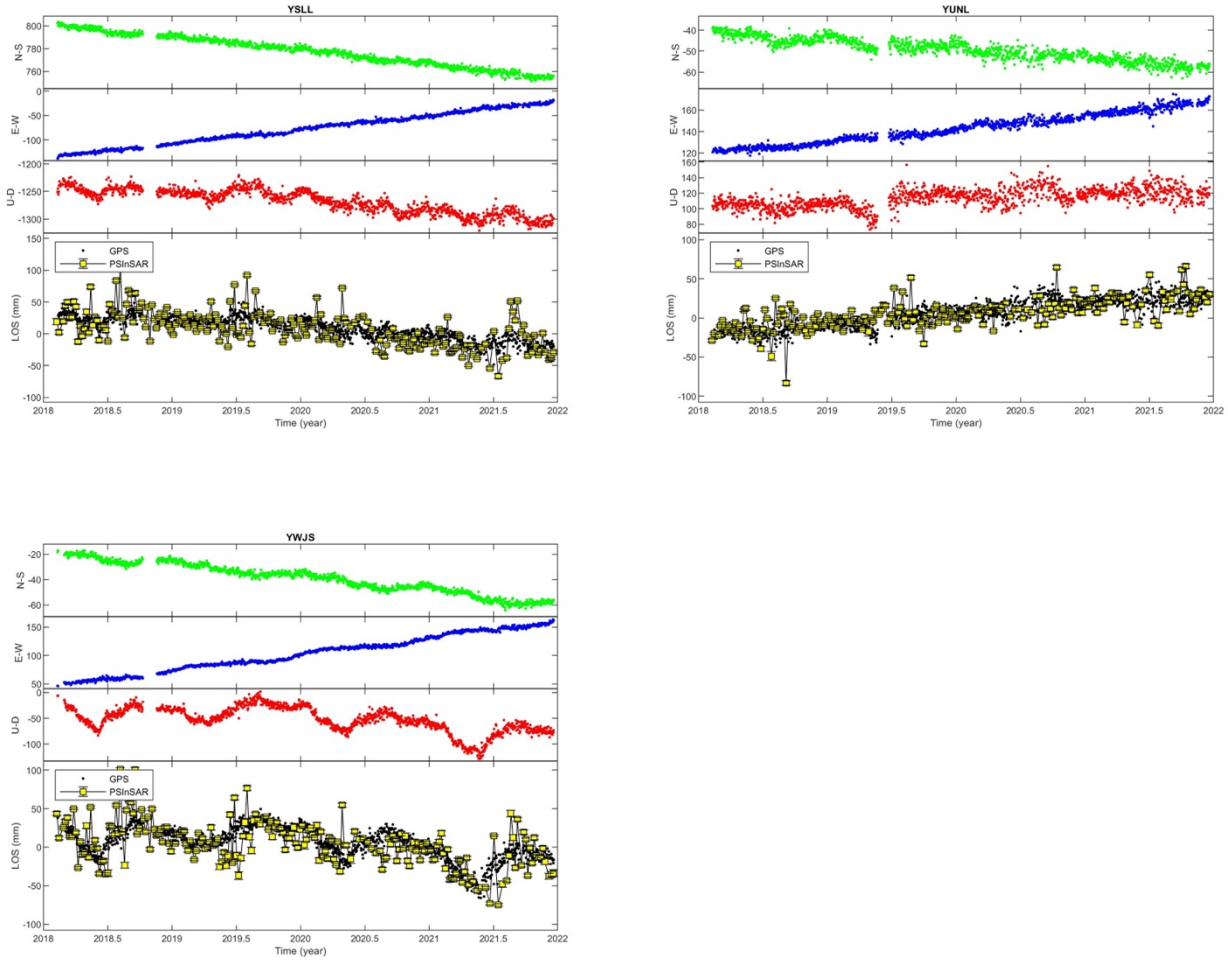
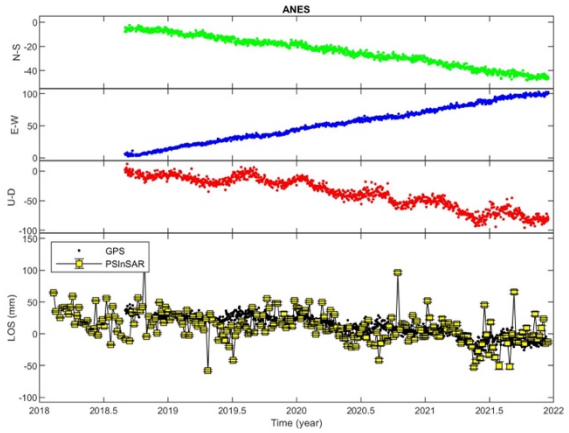
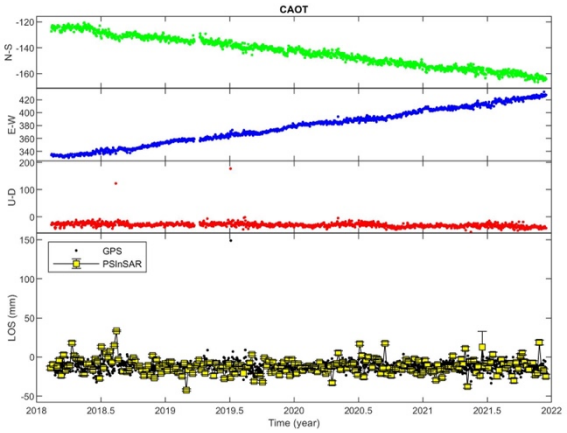


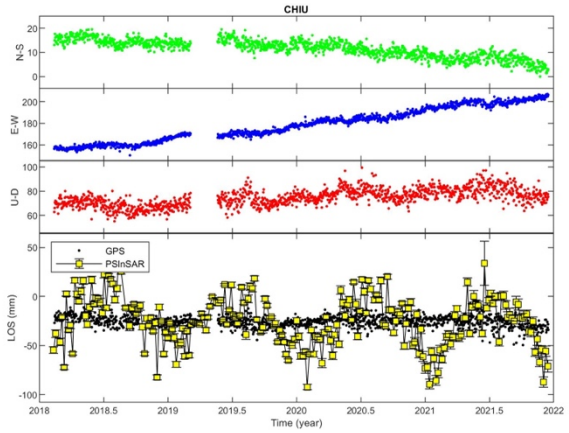
圖 B-3：2018-2021 升軌 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列。

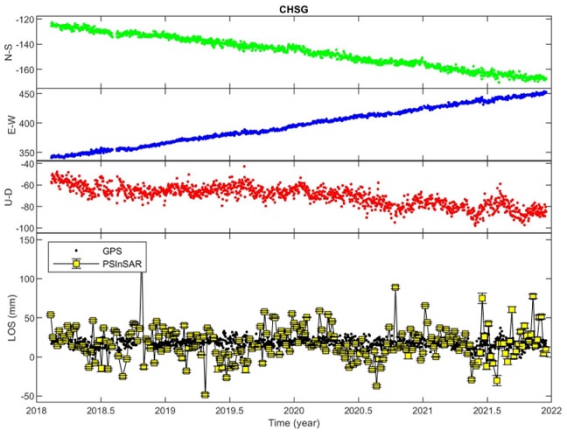
Figure B-3：Time series for GNSS 3-direction, projected GNSS 3-direction into LOS and PSI time series in ascending orbit between 2018 and 2021.

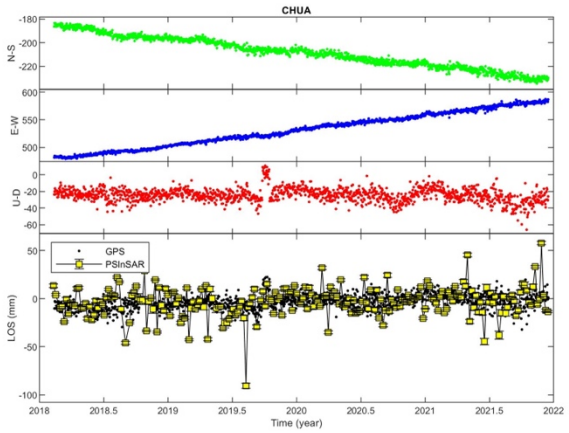
B-4 2018-2021 Descending

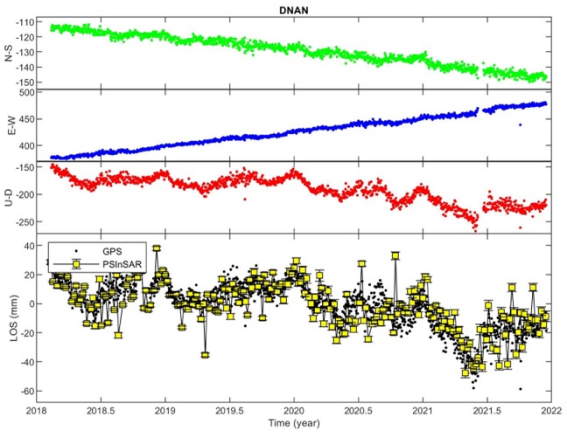


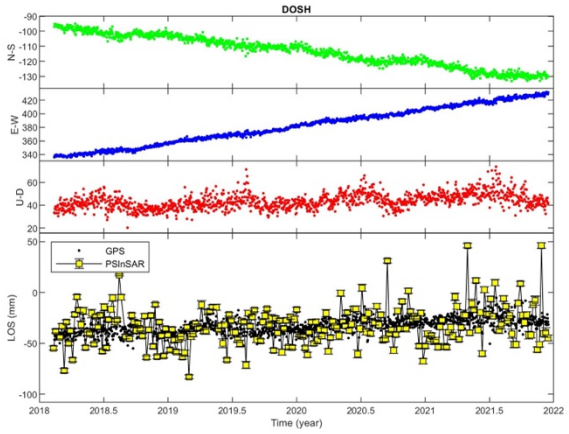


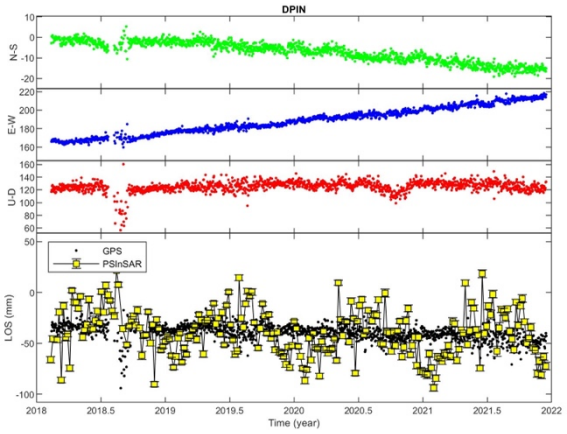


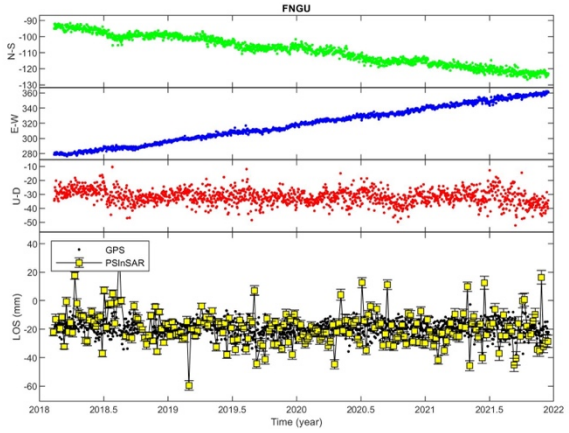


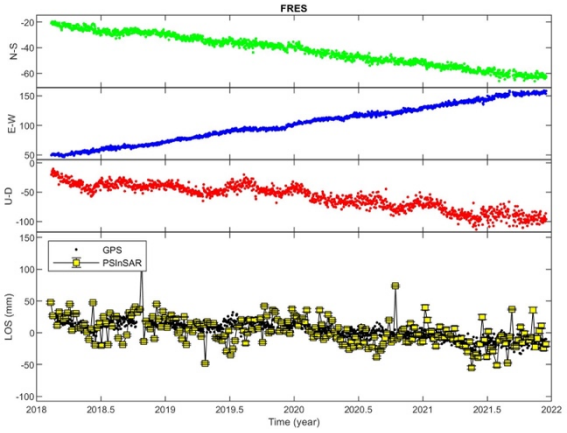


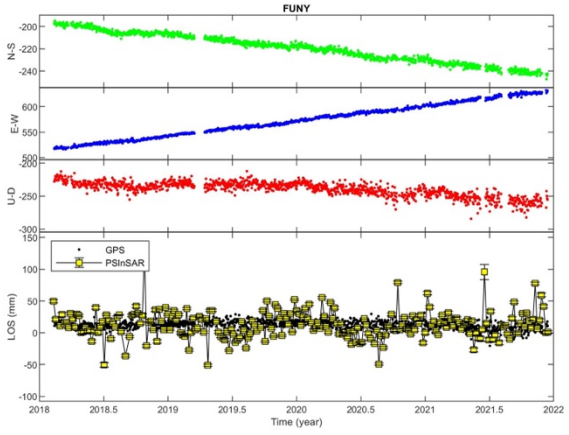


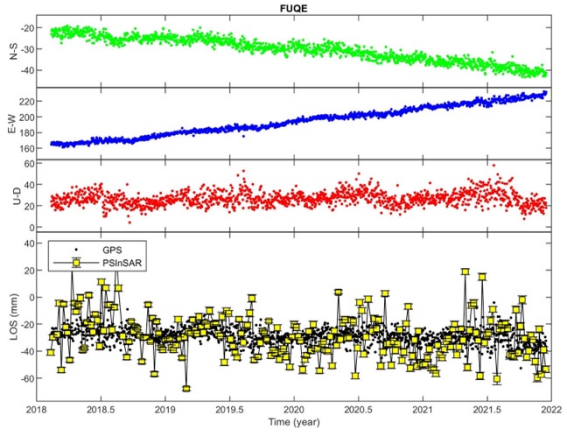

DOSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

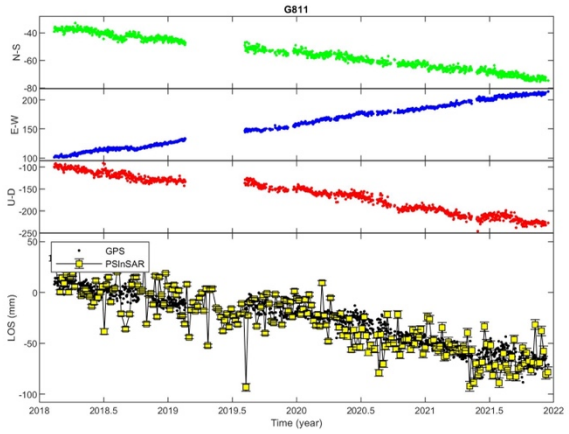

DPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

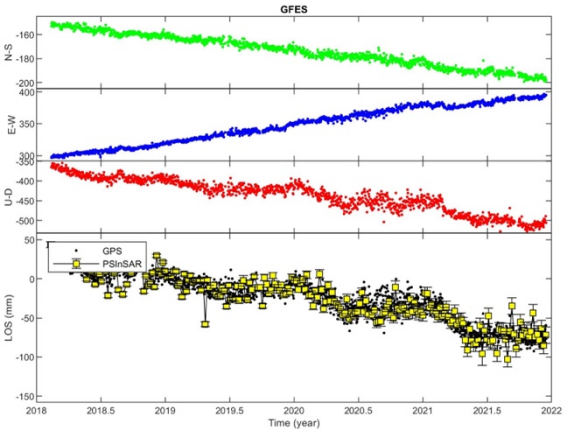

FNGU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

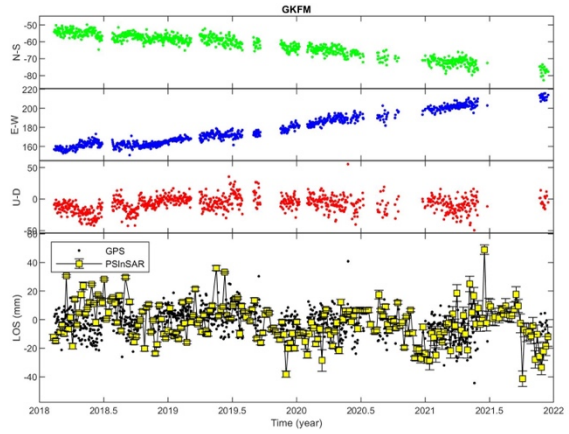

FRES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

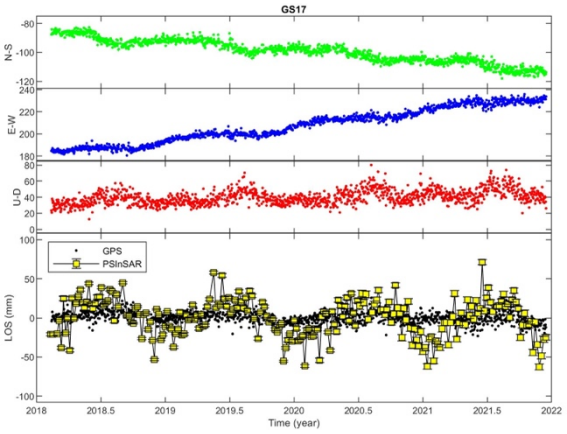

FUNY
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

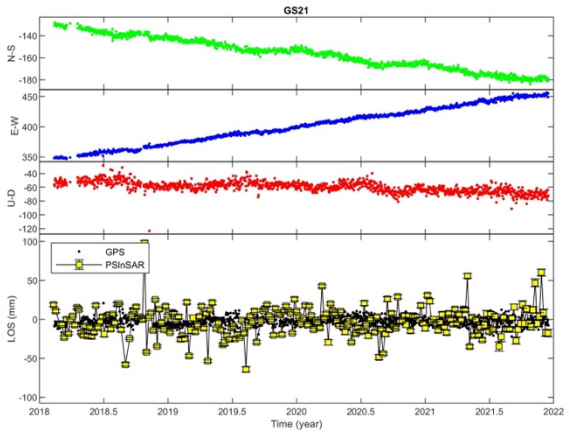

FUQE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

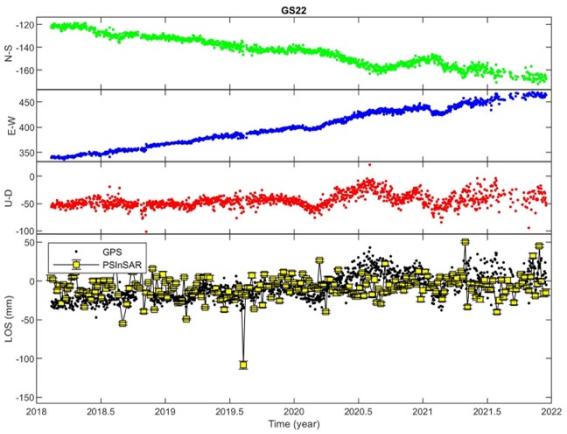

G811
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

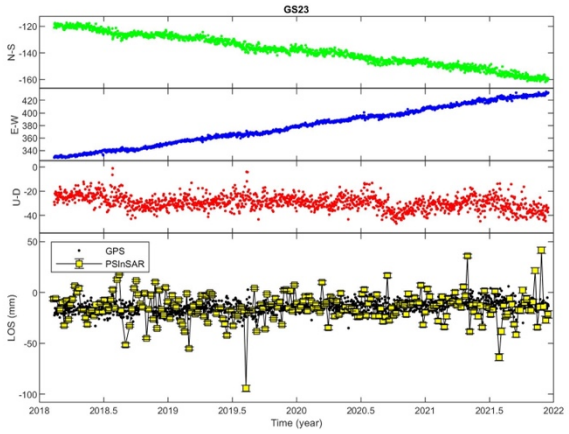

GFES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

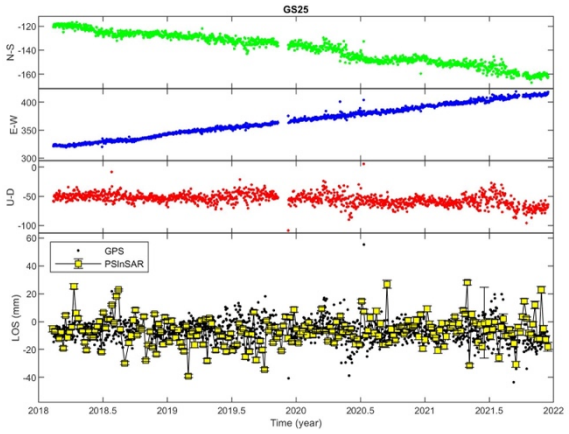

GKFM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

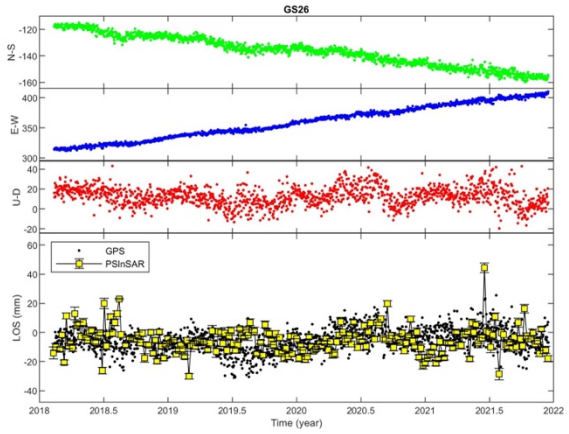

GS17
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

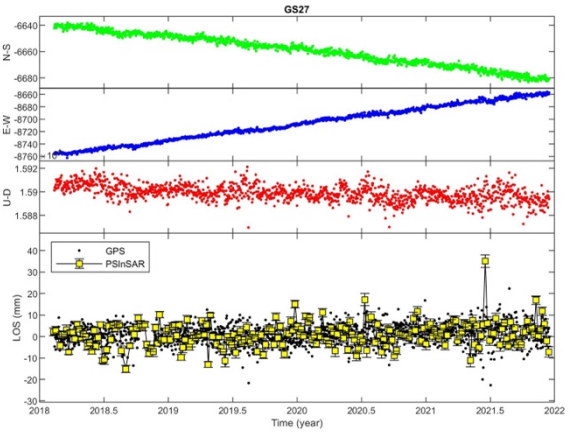

GS21
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

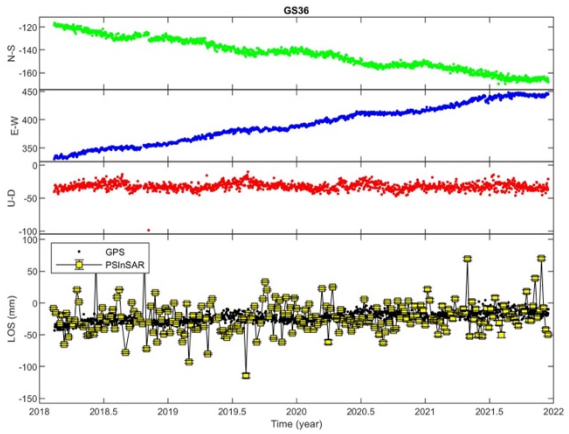

GS22
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

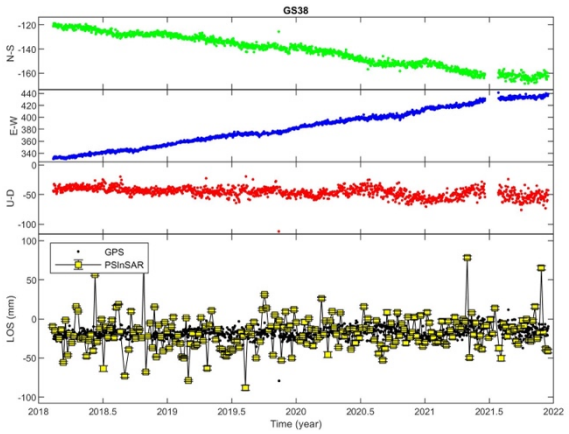

GS23
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

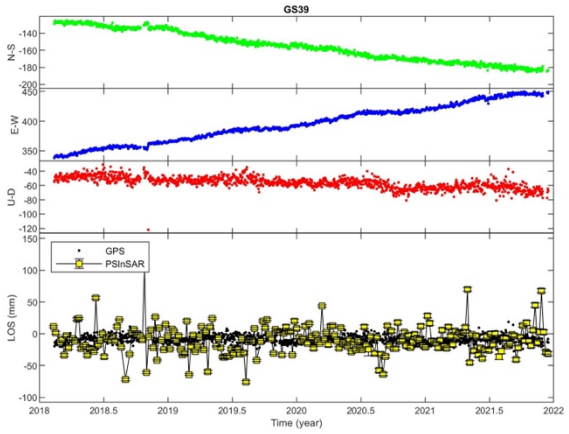

GS25
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

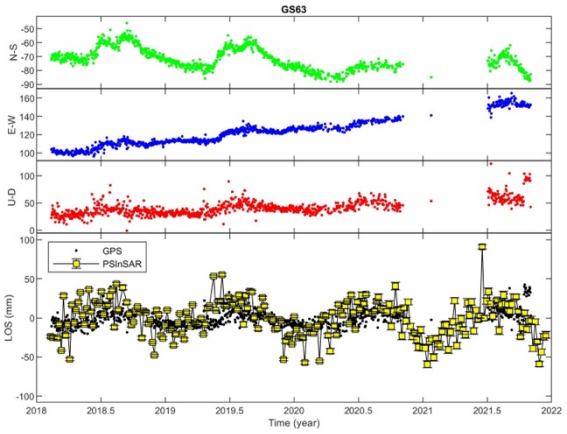

GS26
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

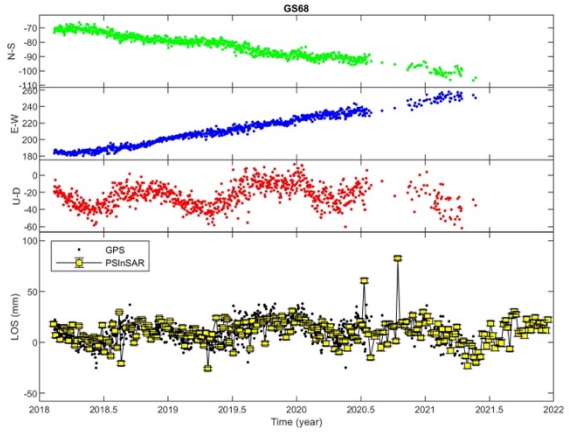

GS27
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

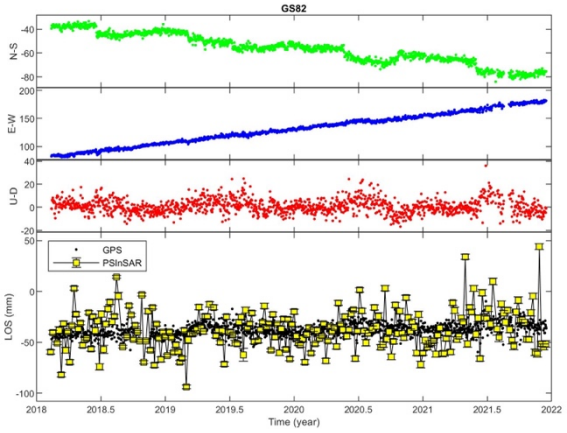

GS36
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

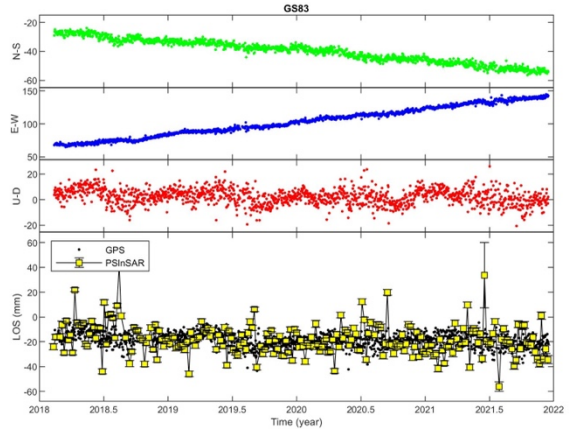

GS38
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

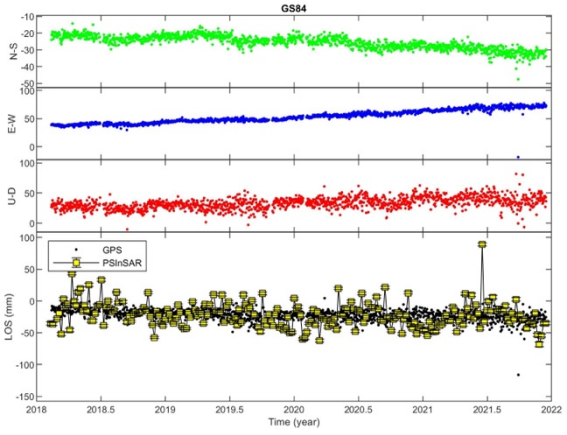

GS39
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

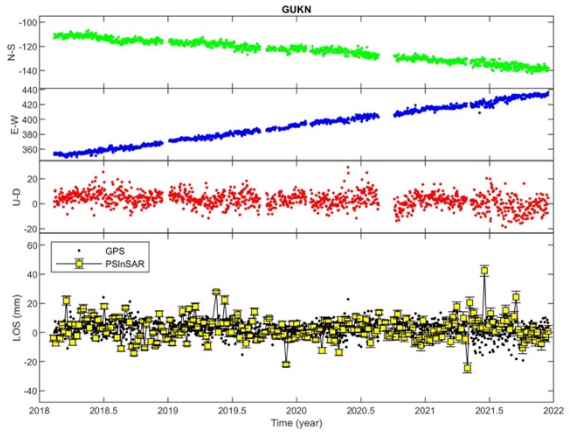

GS63
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

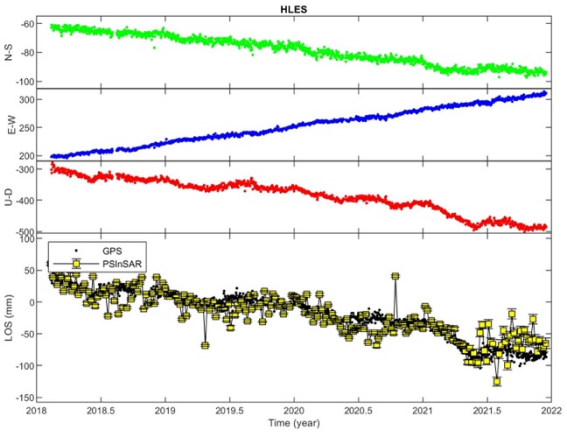

GS68
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

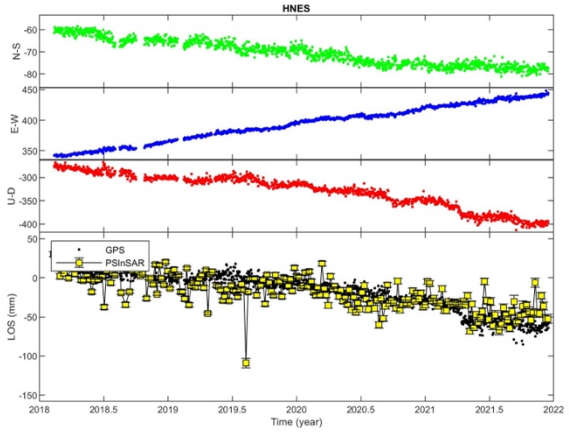

GS82
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

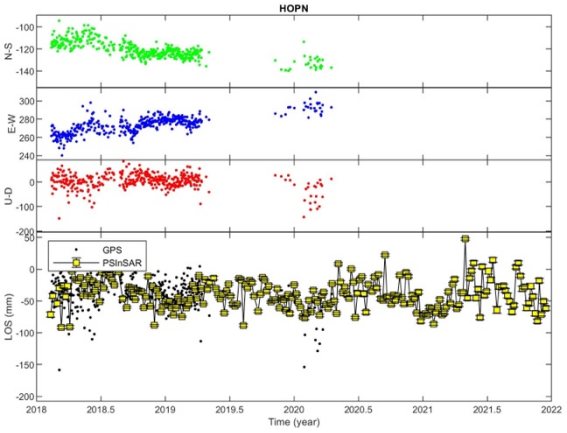

GS83
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

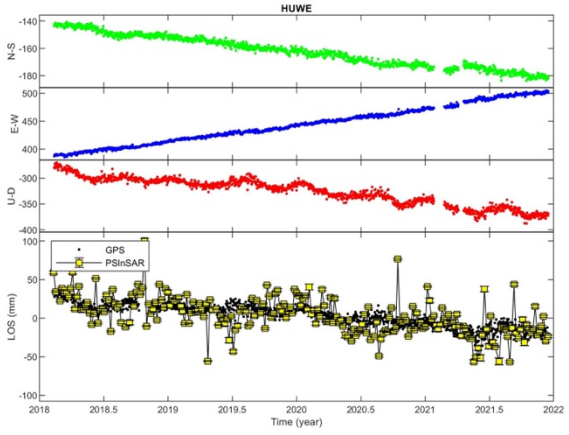

GS84
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

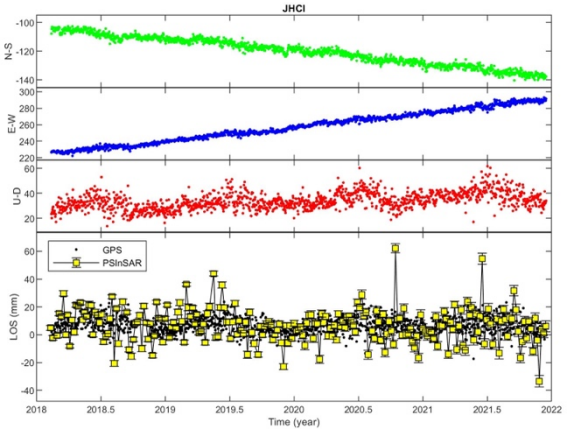

GUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

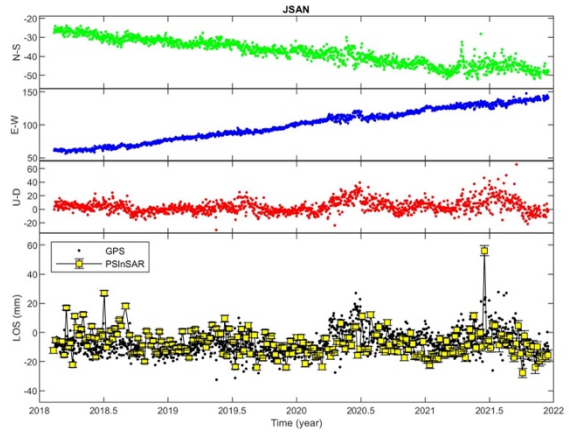

HLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

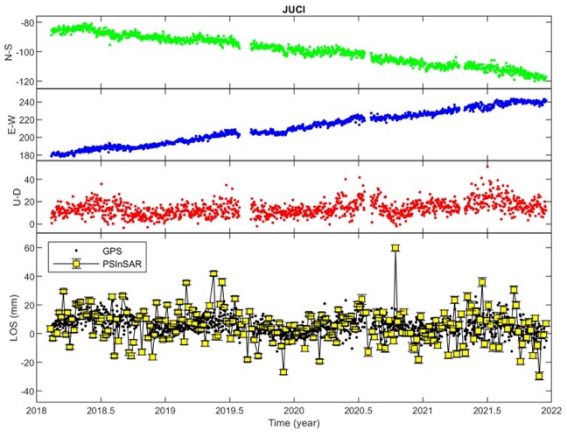

HNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

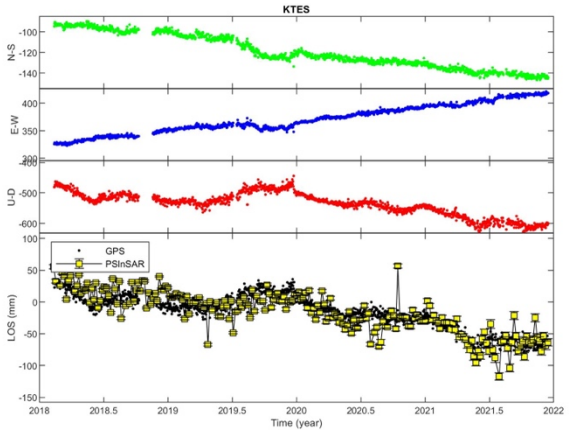

HOPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

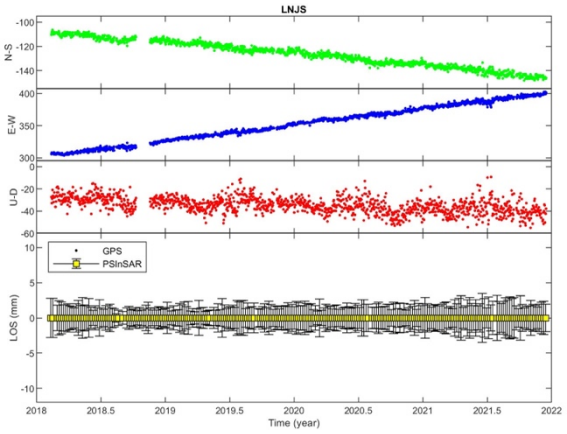

HUWE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

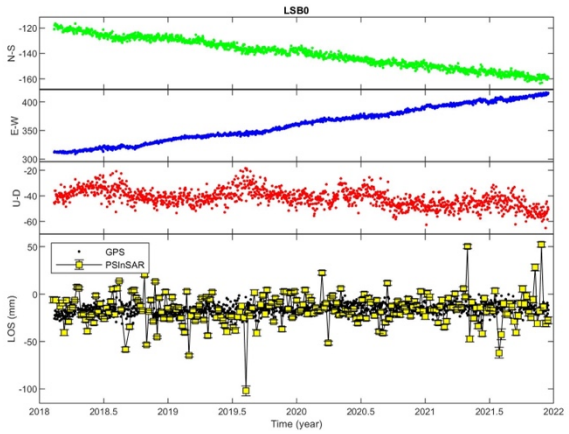

JHCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

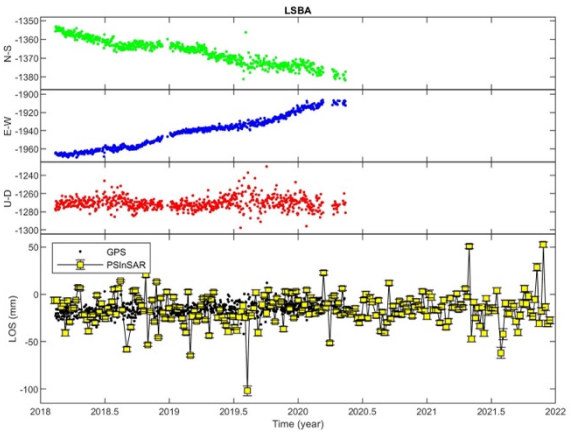

JSAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

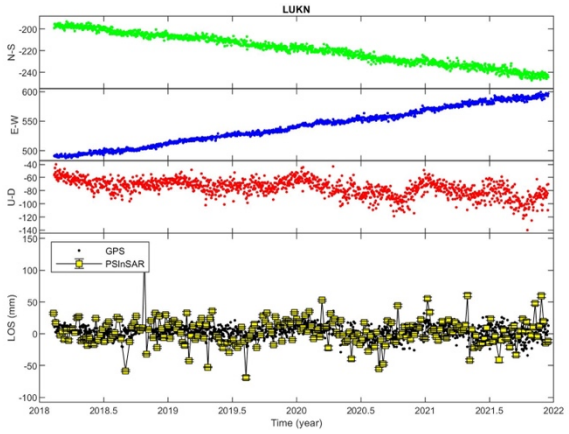

JUCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

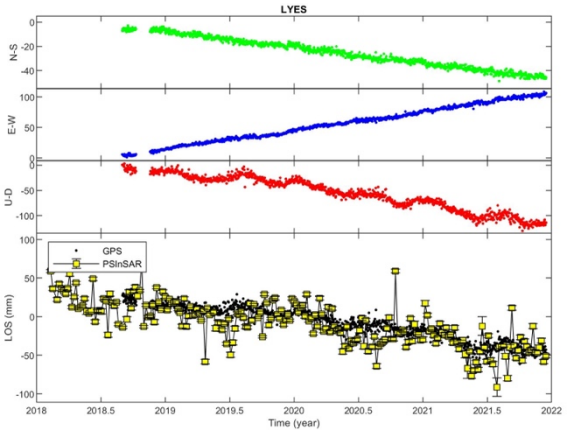

KTES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

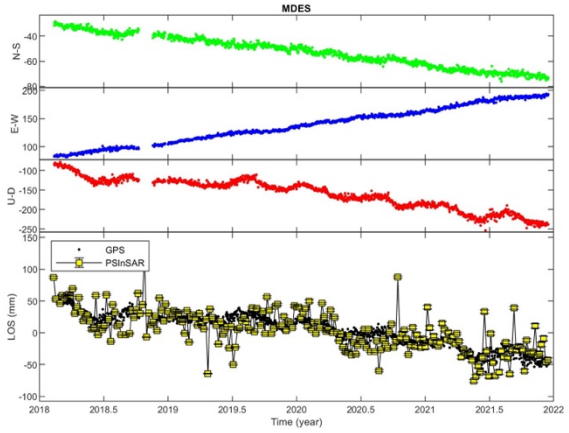

LNJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

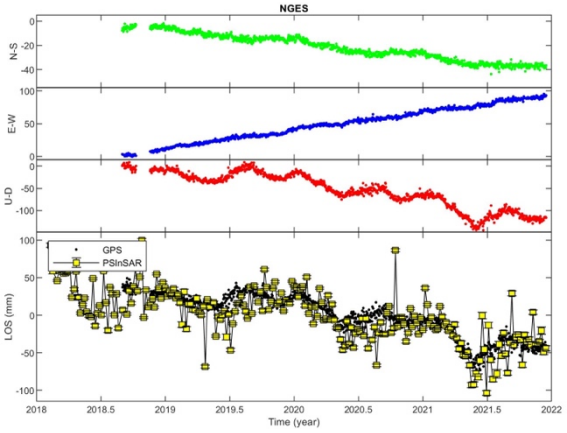

LSB0
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

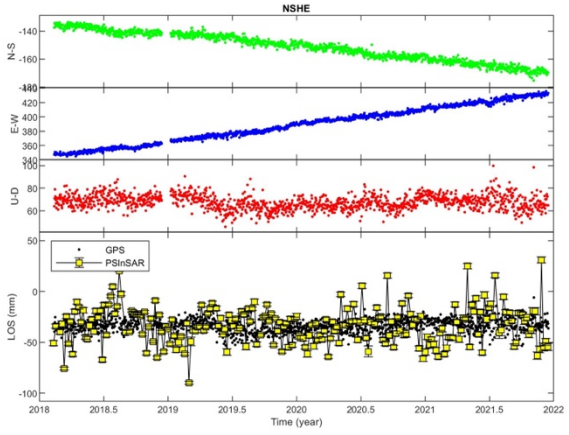

LSBA
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

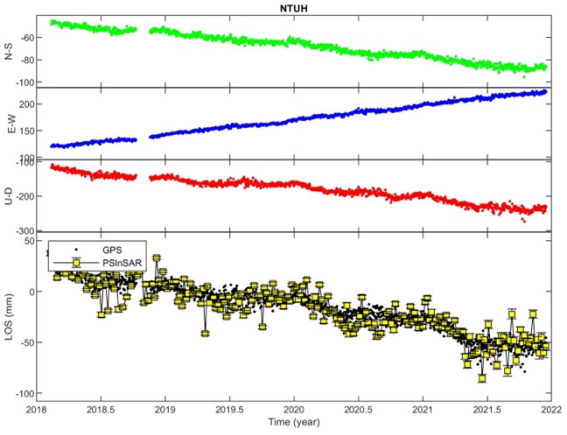

LUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

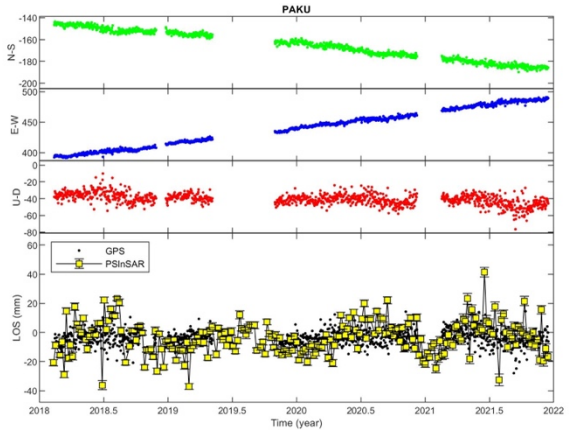

LYES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

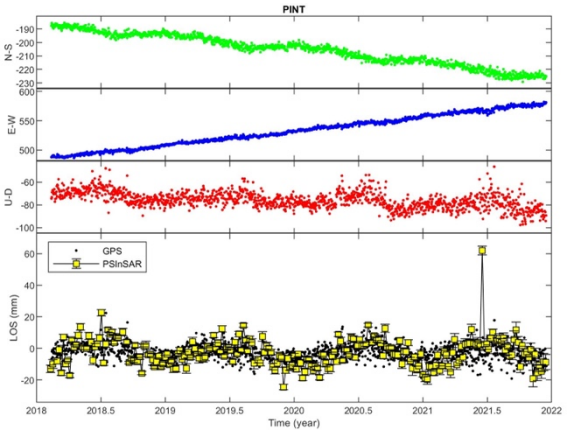

MDES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

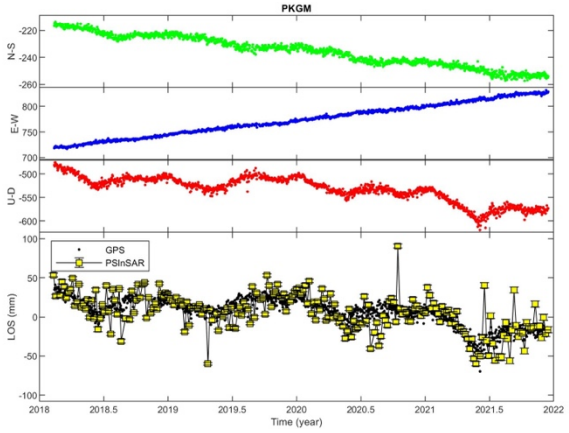

NGES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

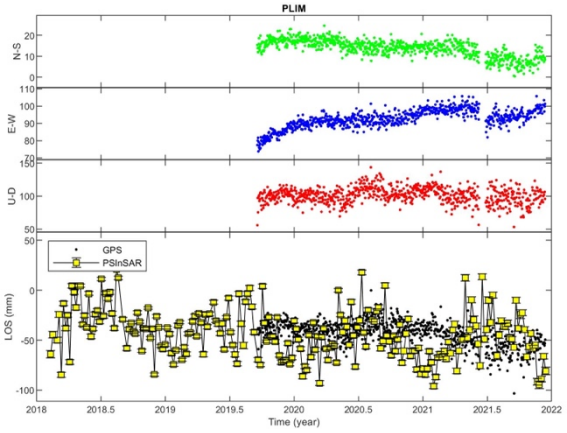

NSHE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

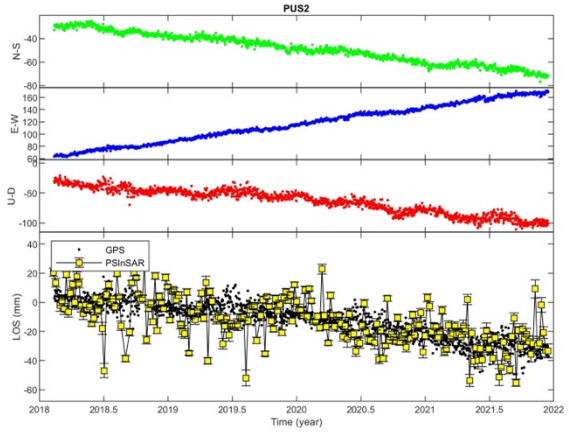

NTUH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

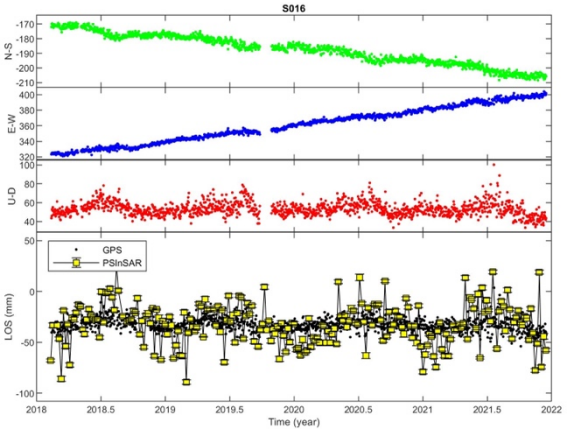

PAKU
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

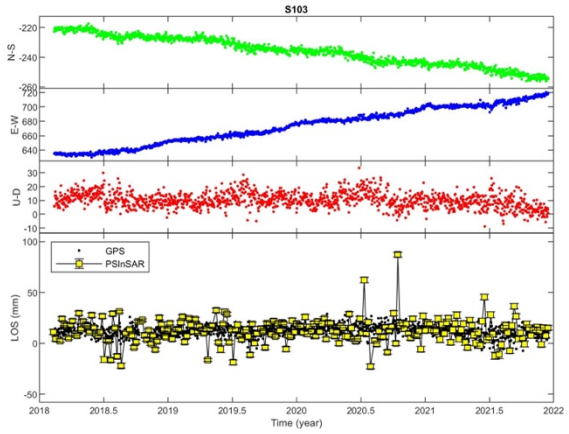

PINT
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

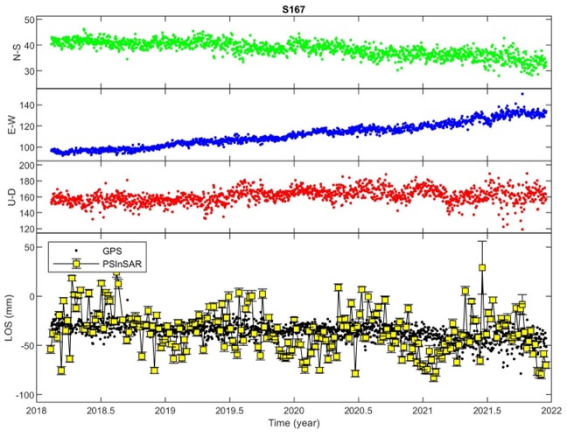

PKGM
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

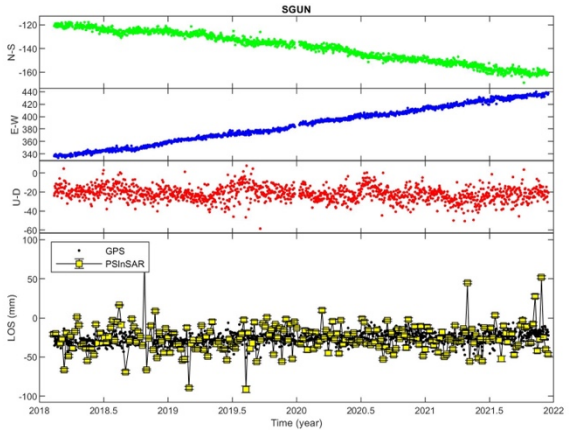

PLIM
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

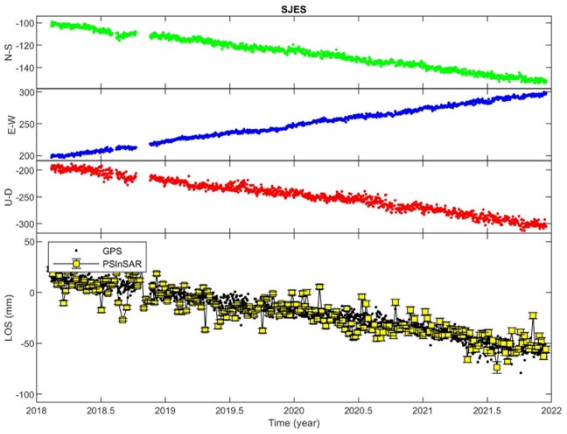

PUS2
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

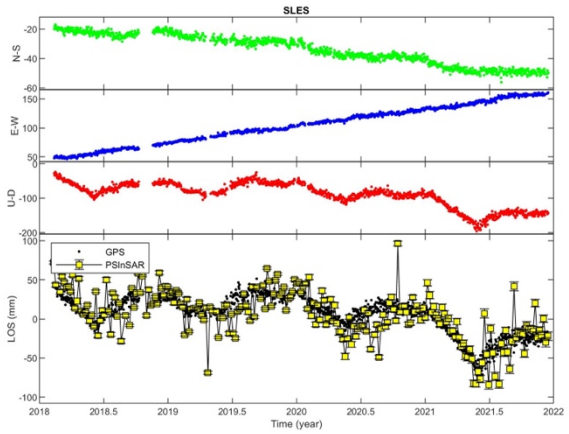

S016
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

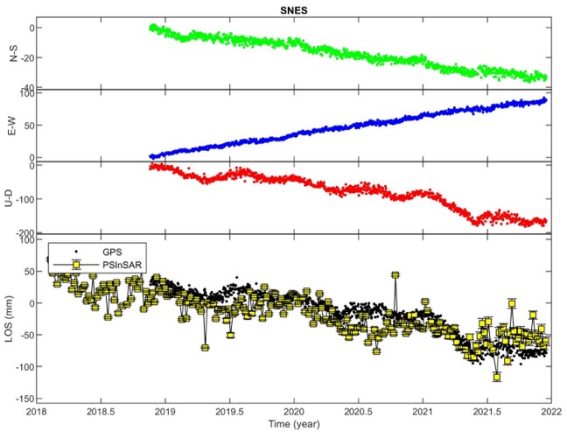

S103
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

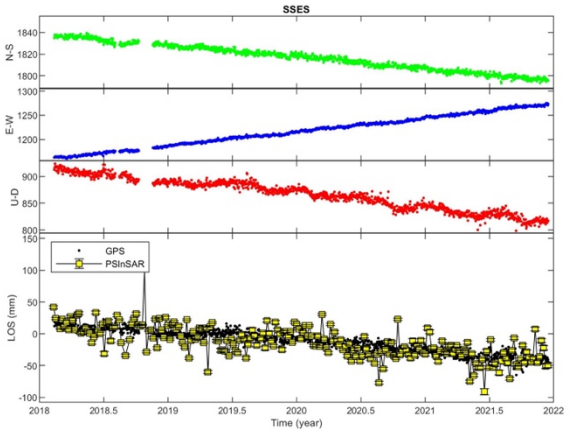

S167
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

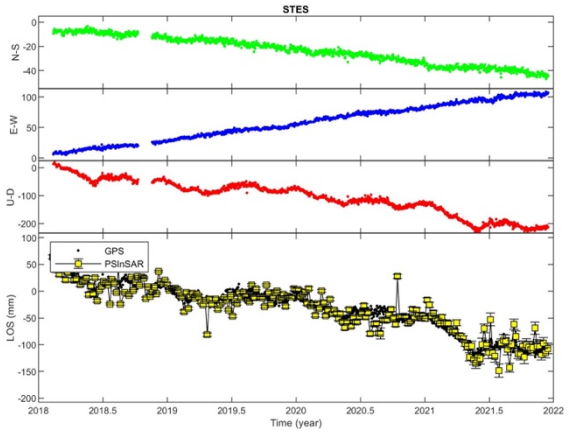

SGUN
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

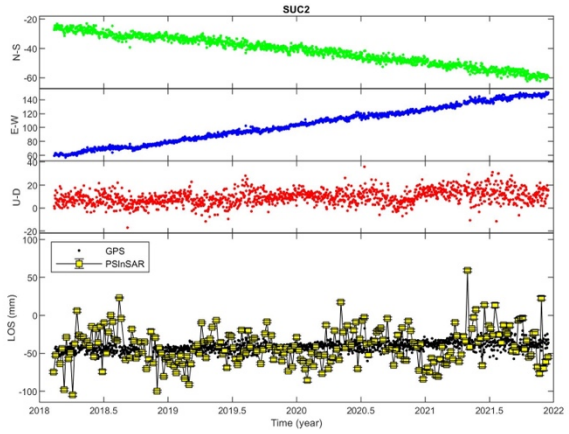

SJES
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

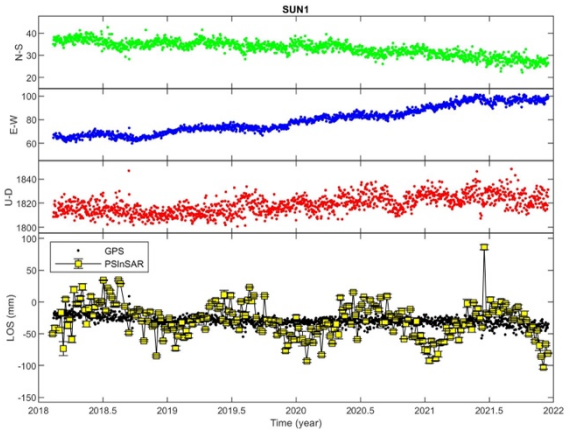

SLES
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

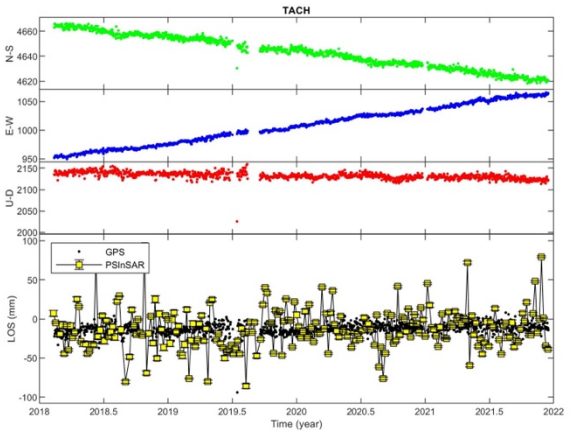

SNES
N-S
E-W
U-D
GPS
PSInSAR
LOS (mm)
Time (year)

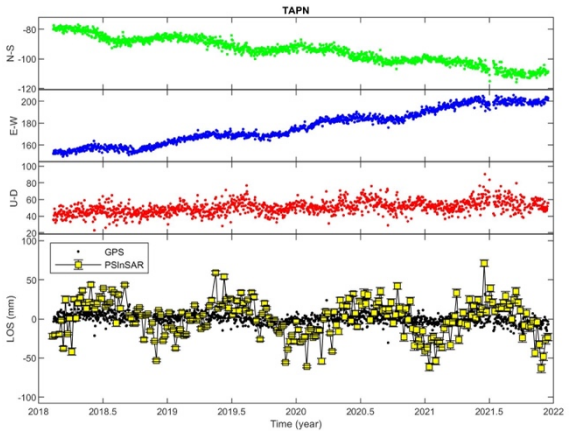

SSES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

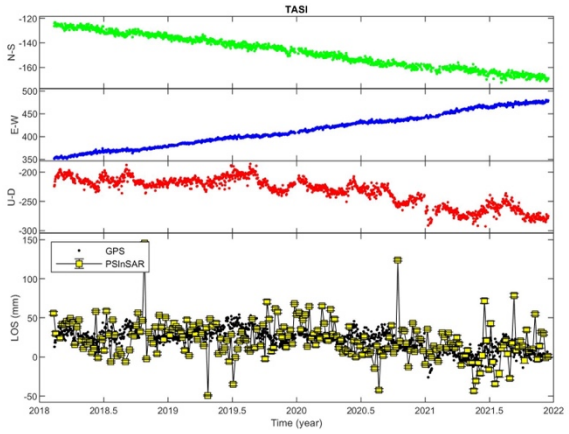

STES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

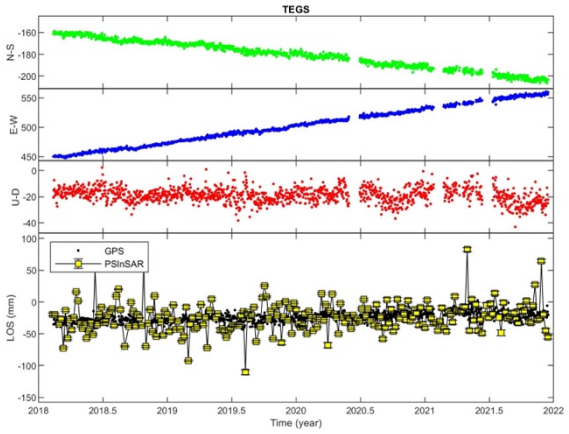

SUC2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

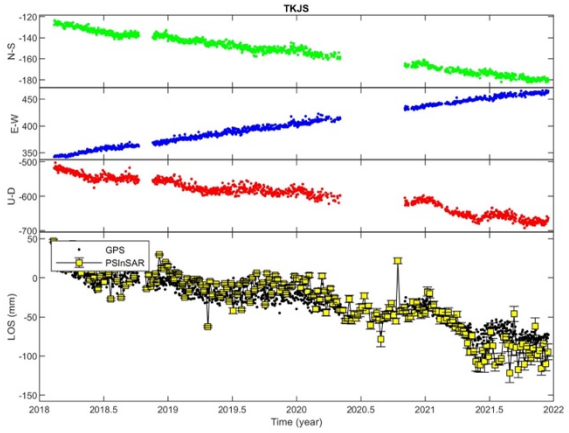

SUN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

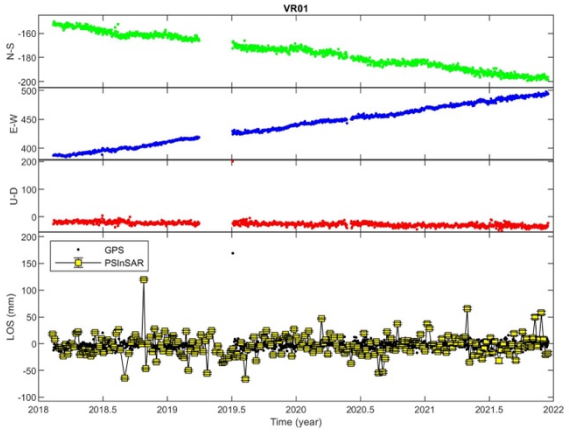

TACH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

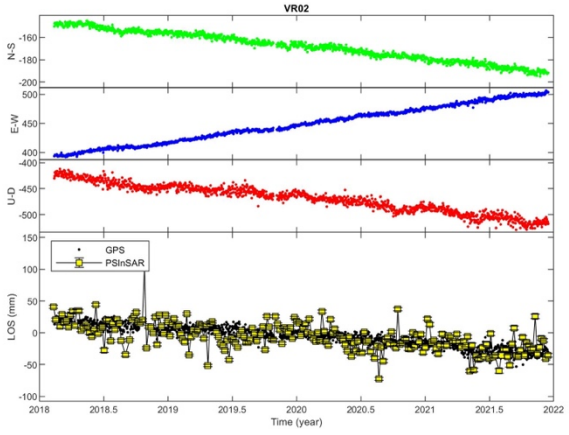

TAPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

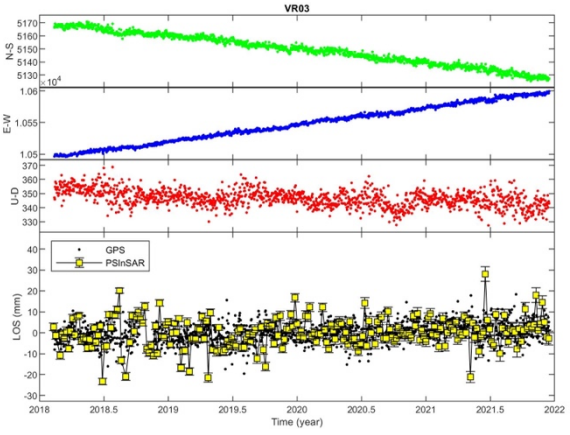

TASI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

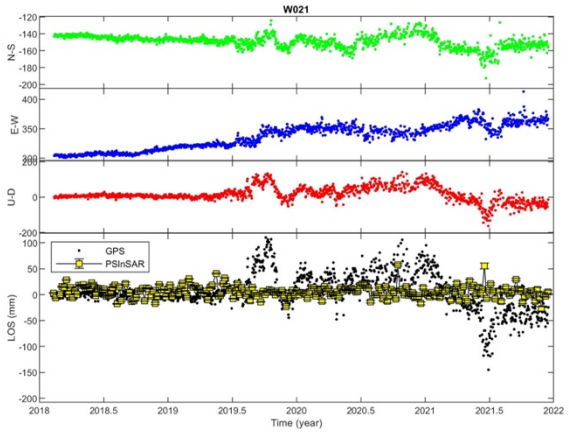

TEGS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

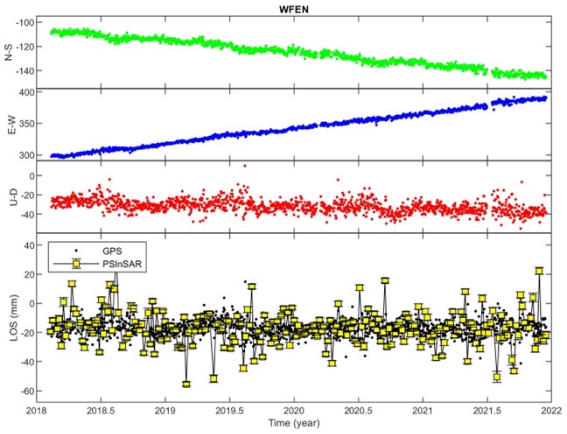

TKJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

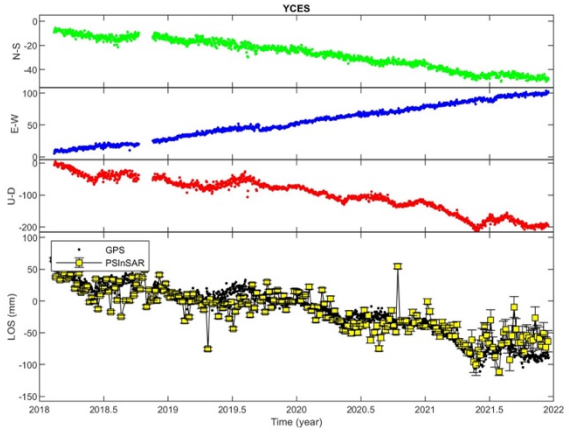

VR01
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

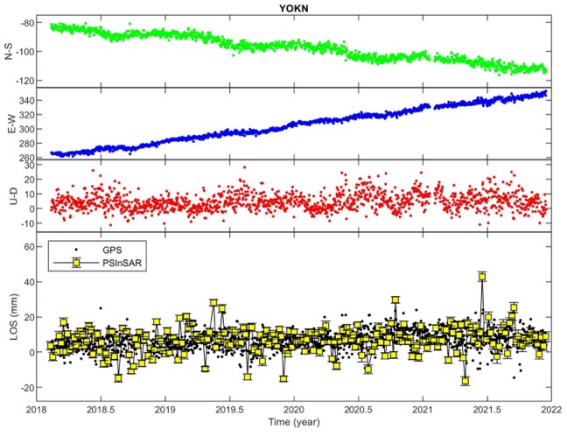

VR02
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

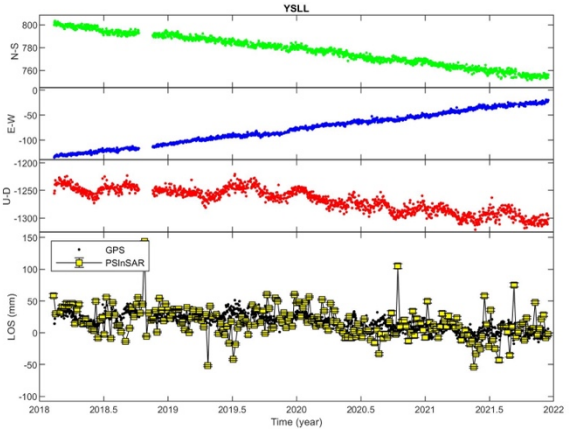

VR03
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

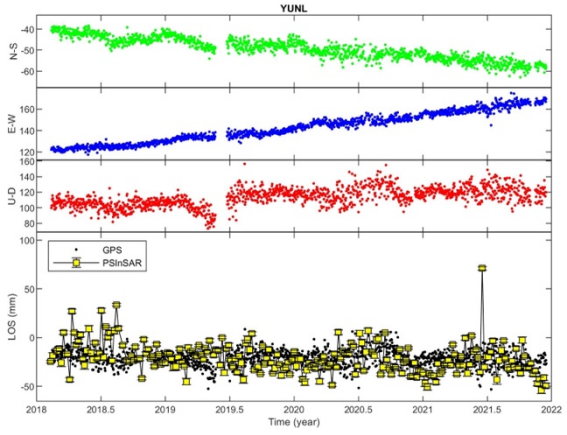

W021
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WFEN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YCES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YOKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YSLL
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YUNL
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

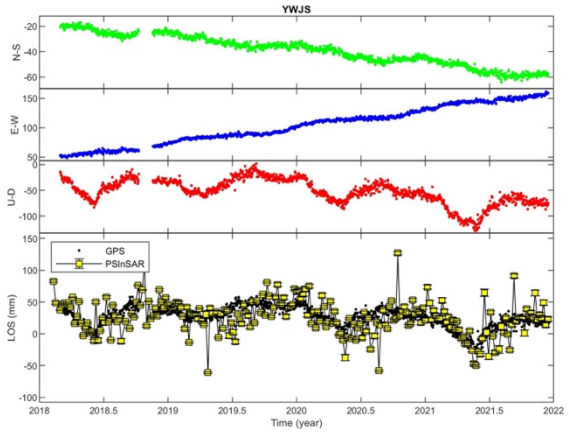
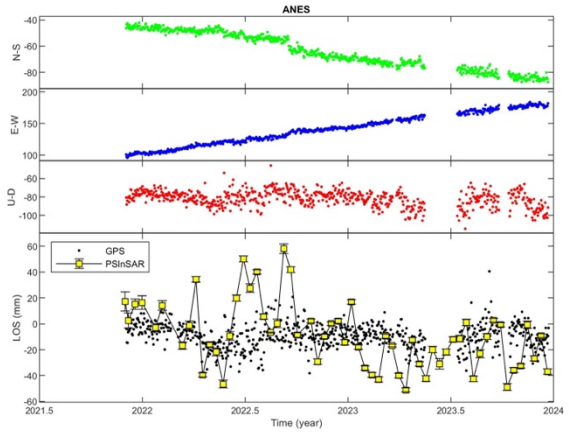
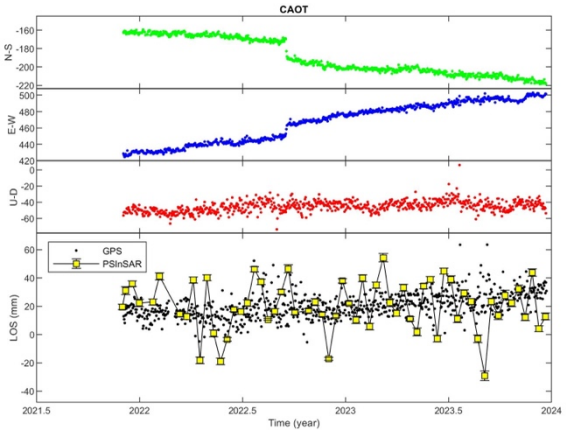


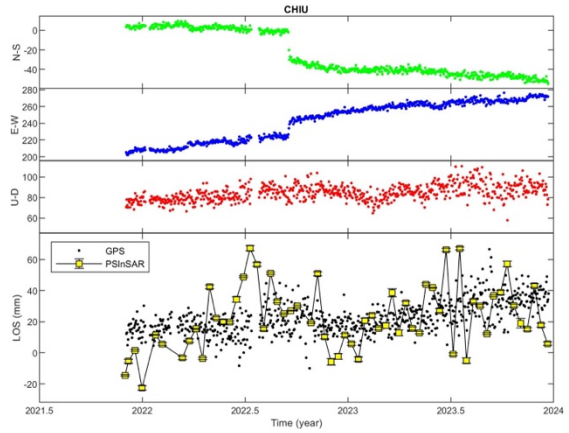
圖 B-4：2018-2021 降軌 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列。

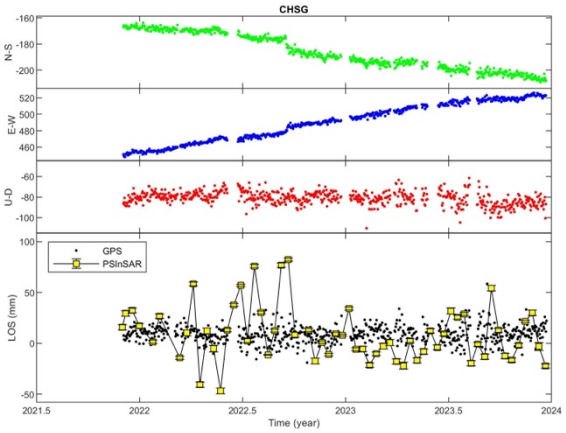
Figure B-4：Time series for GNSS 3-direction, projected GNSS 3-direction into LOS and PSI time series in descending orbit between 2018 and 2021.

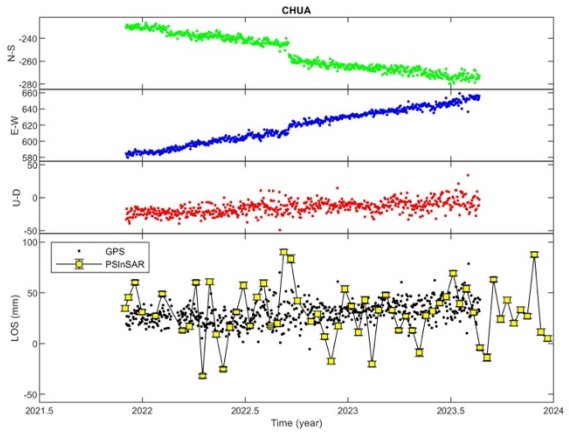
B-5 2022-2023 Ascending

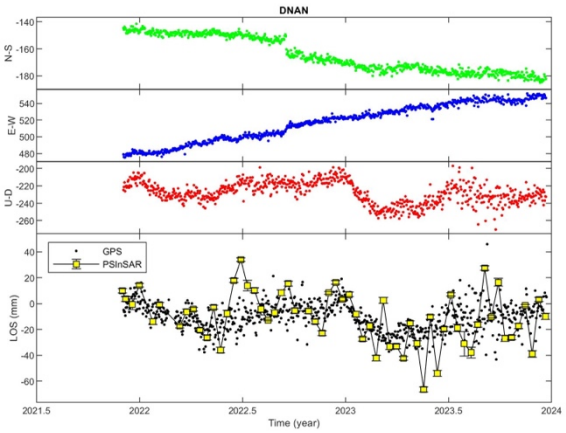


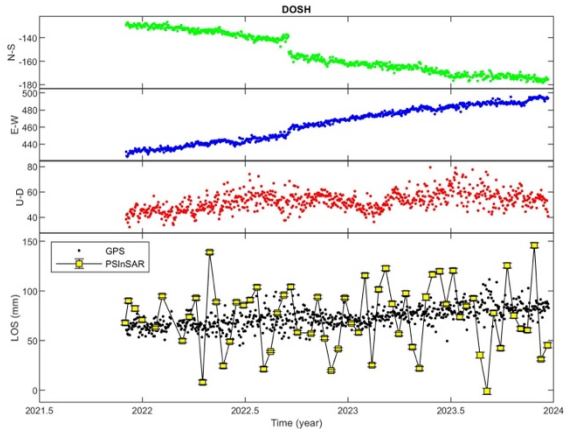


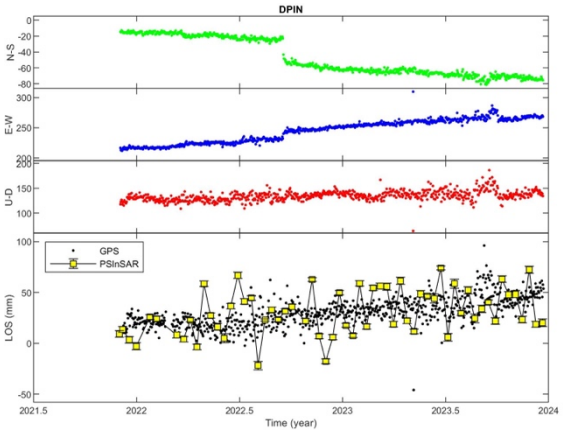


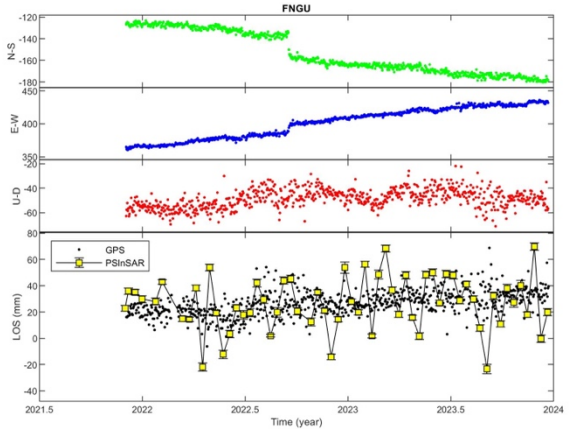


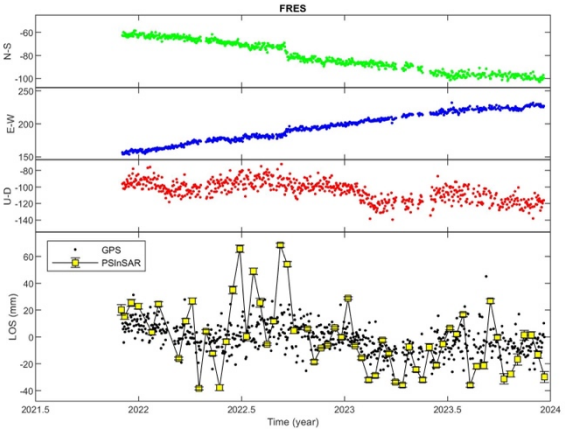


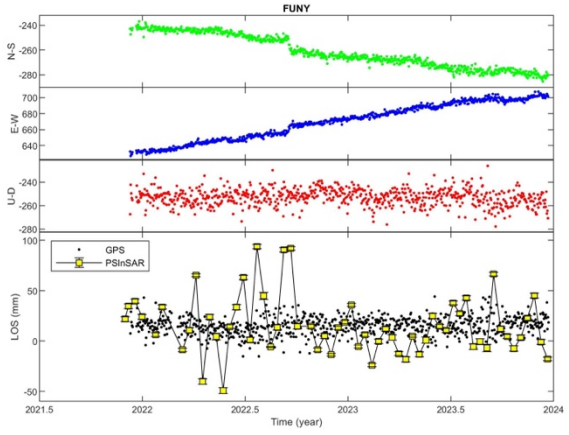


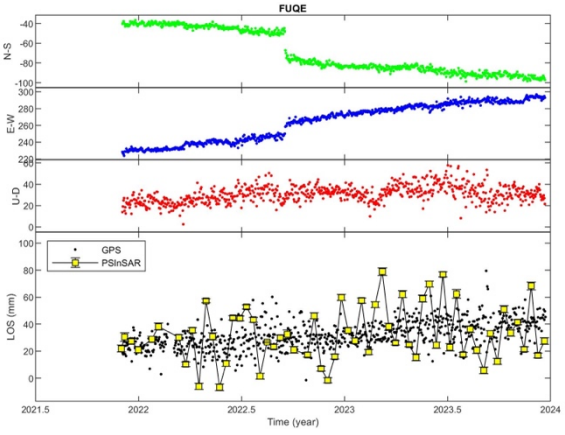

DOSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

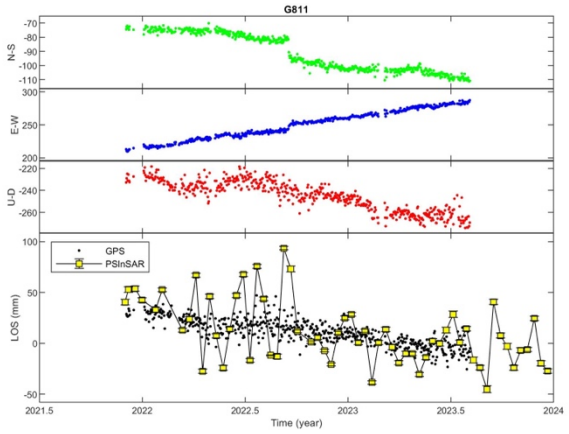

DPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

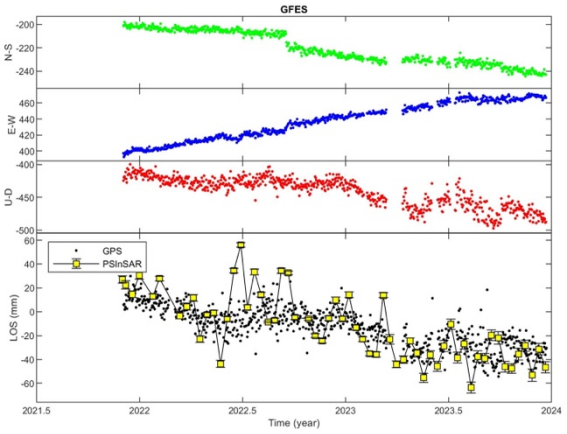

FNGU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

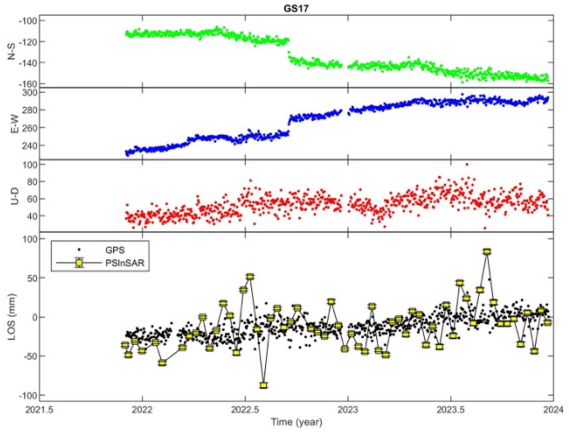

FRES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

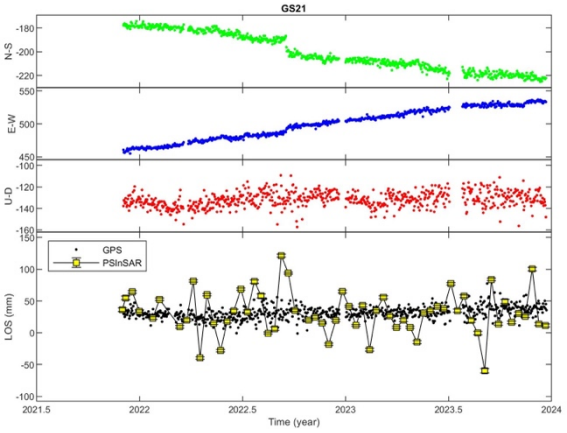

FUNY
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

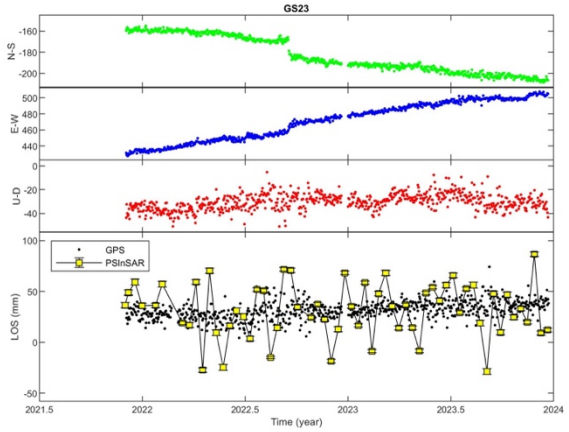

FUQE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

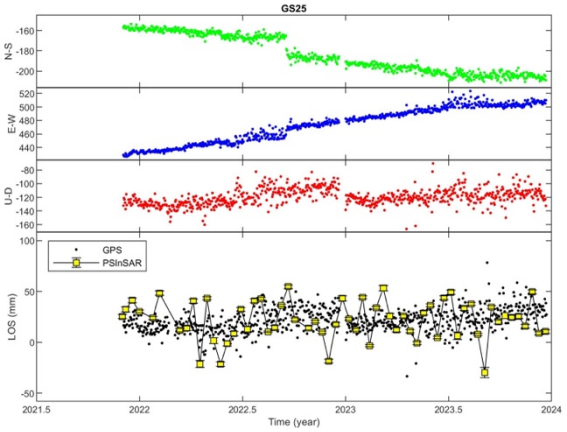

G811
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

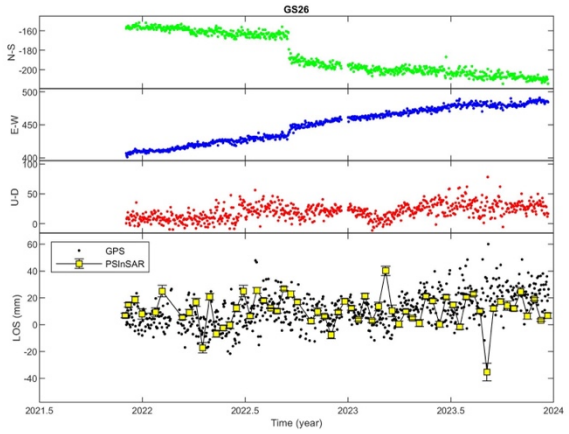

GFES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

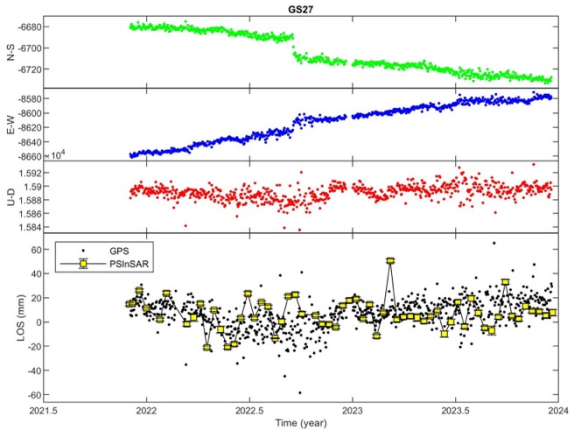

GS17
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

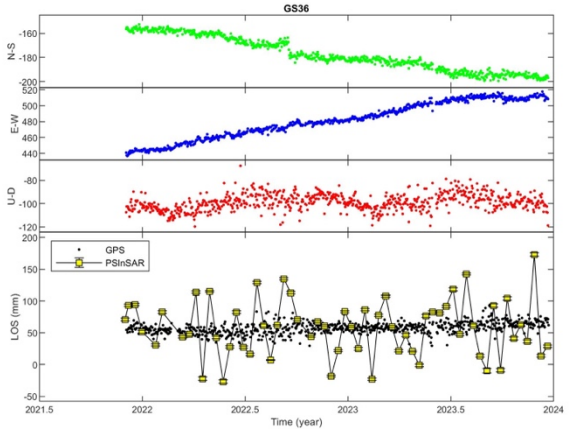

GS21
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

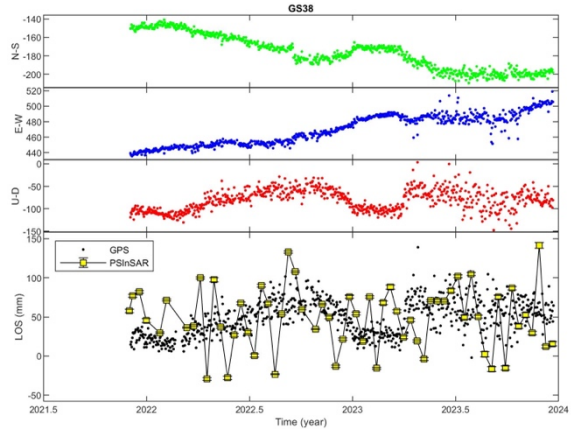

GS23
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

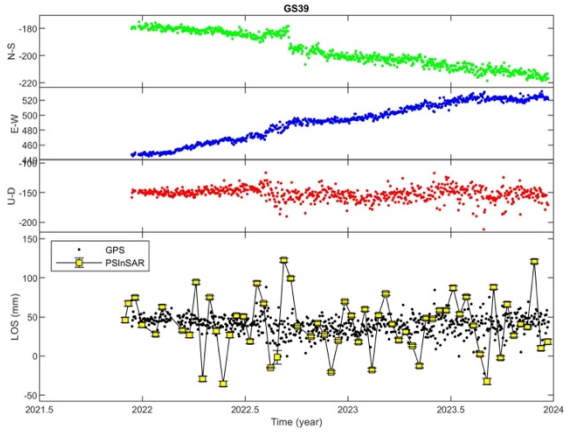

GS25
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

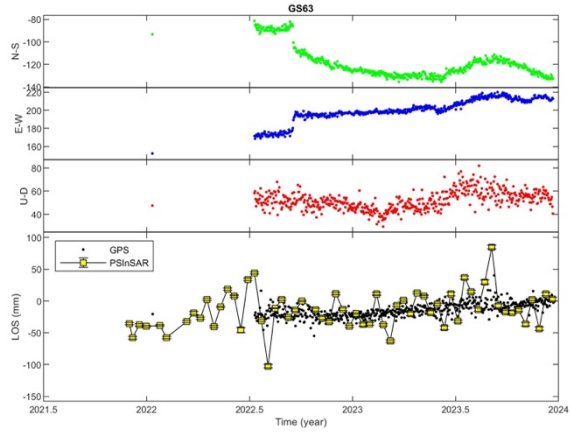

GS26
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

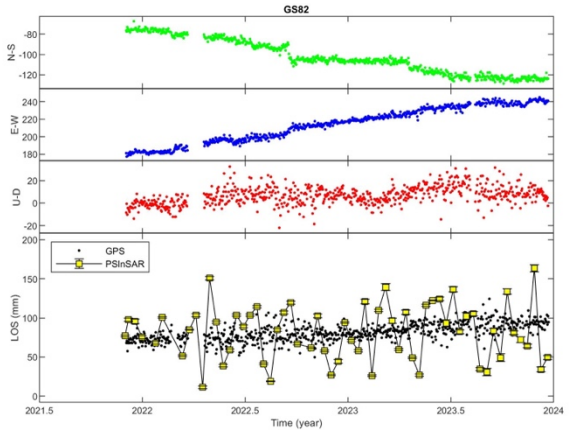

GS27
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

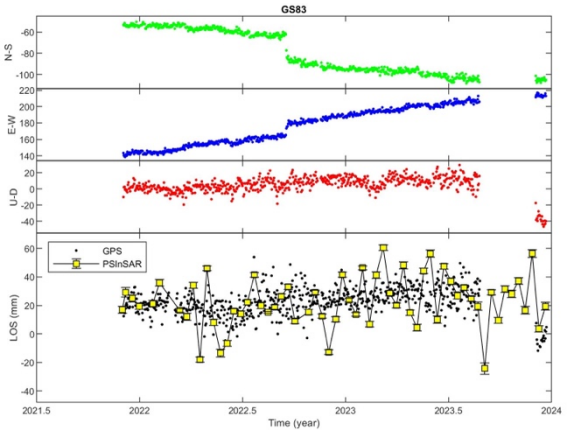

GS36
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

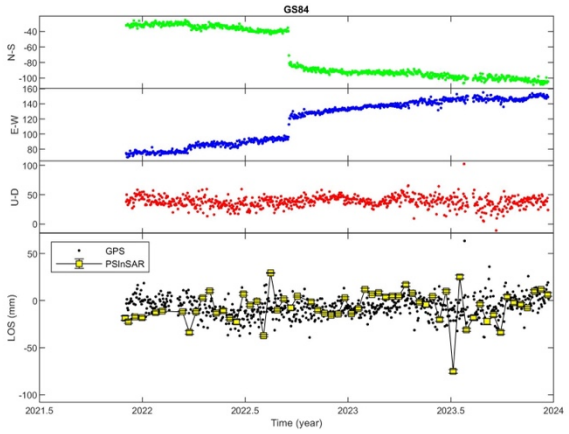

GS38
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

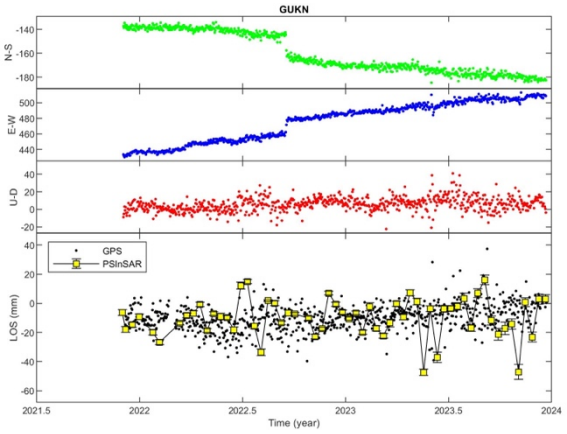

GS39
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

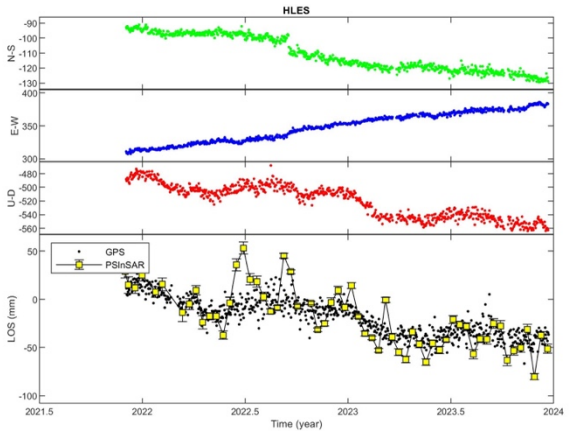

GS63
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

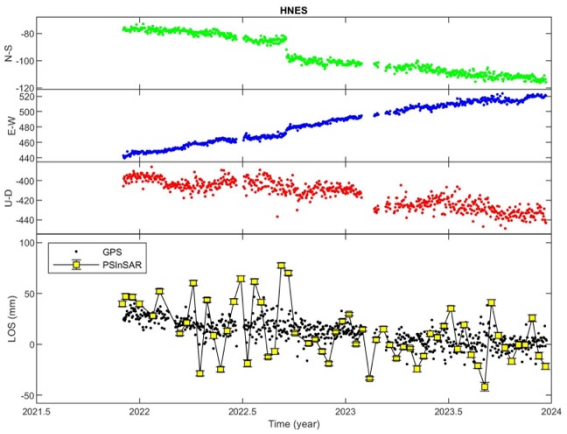

GS82
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

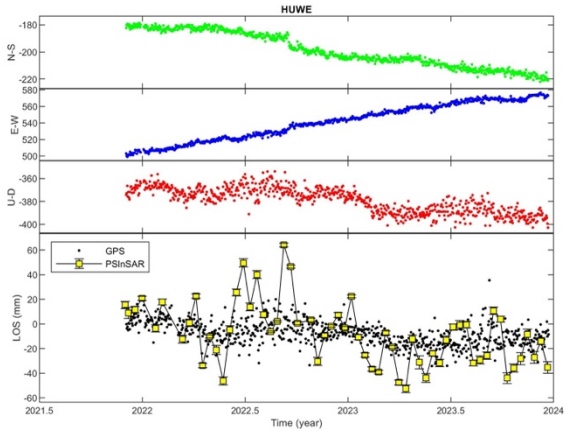

GS83
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

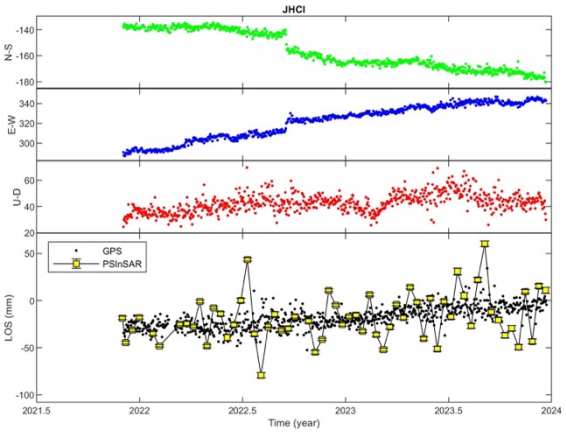

GS84
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

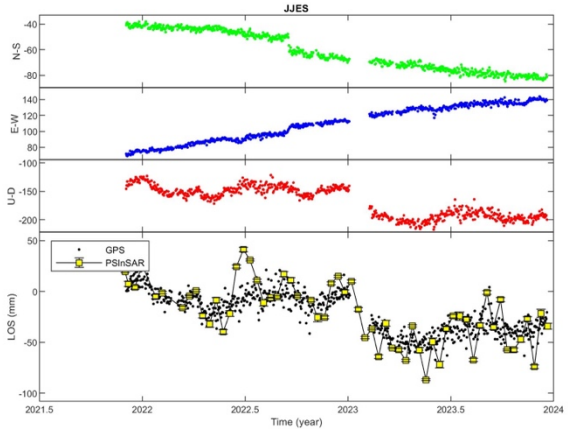

GUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

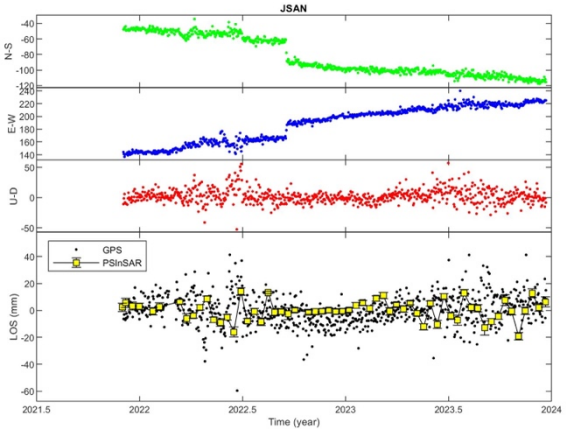

HLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

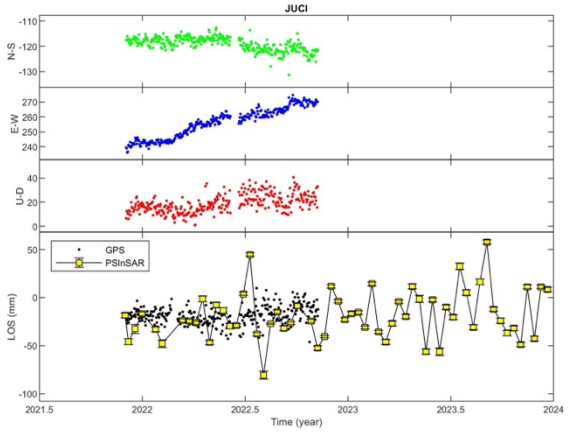

HNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

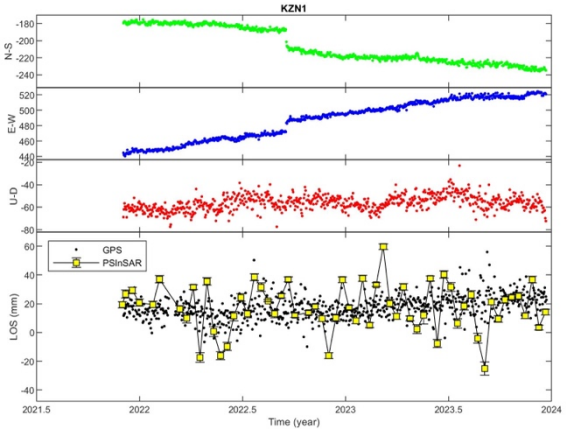

HUWE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

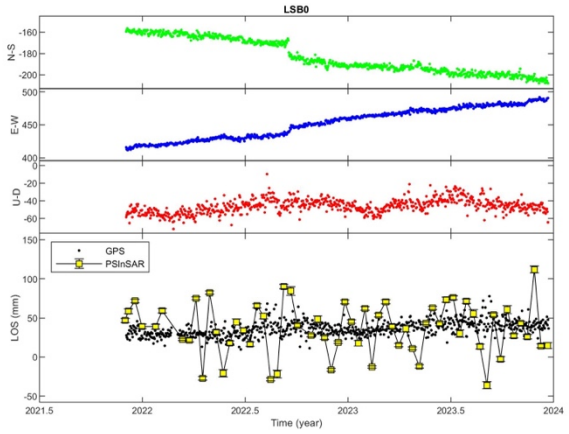

JHCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

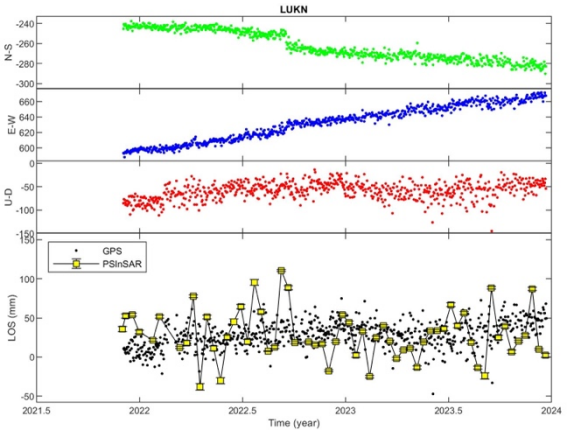

JJES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

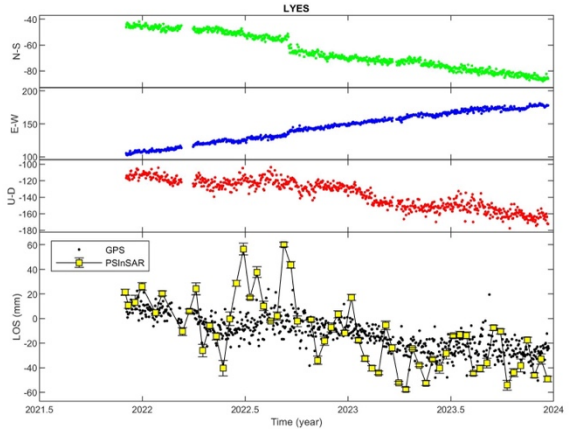

JSAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

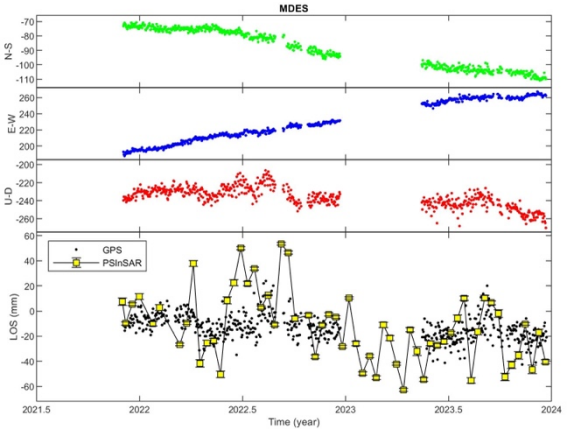

JUCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

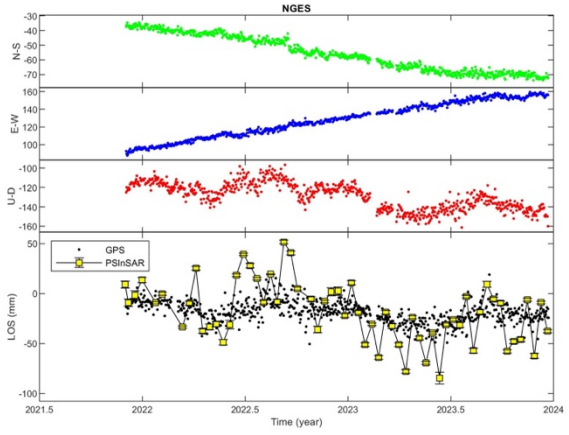

KZN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

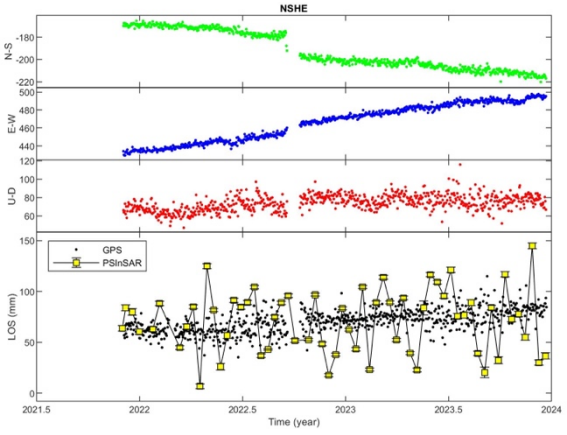

LSB0
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

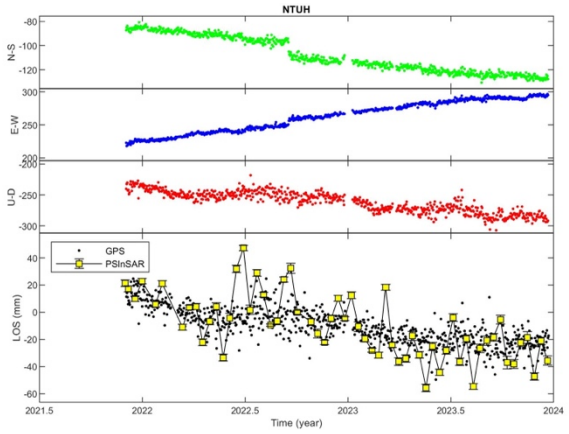

LUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

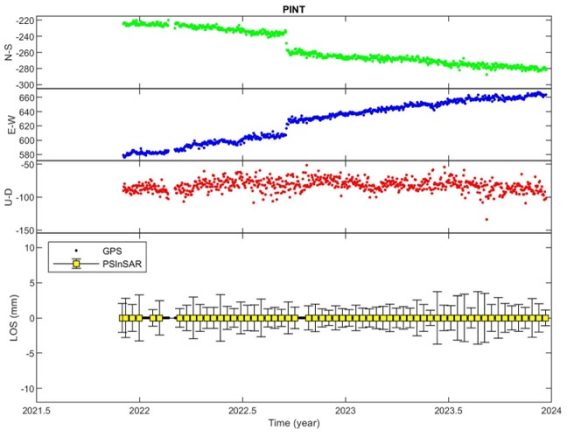

LYES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

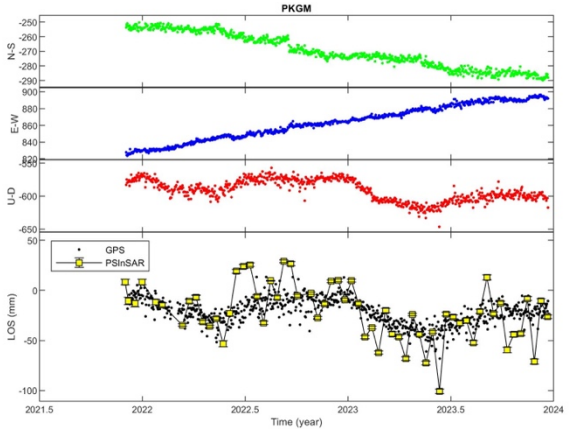

MDES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

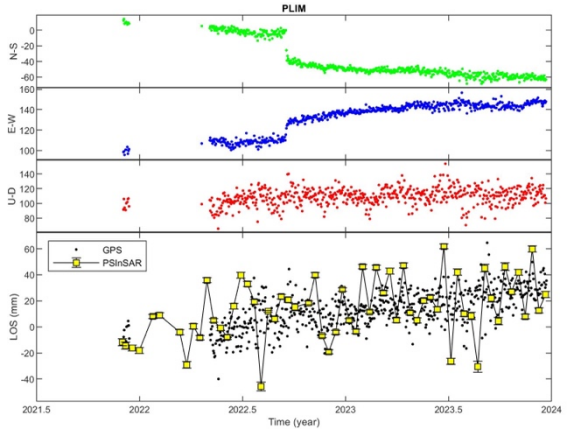

NGES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

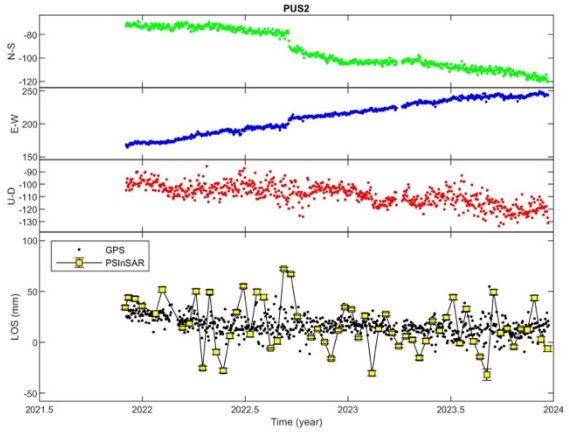

NSHE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

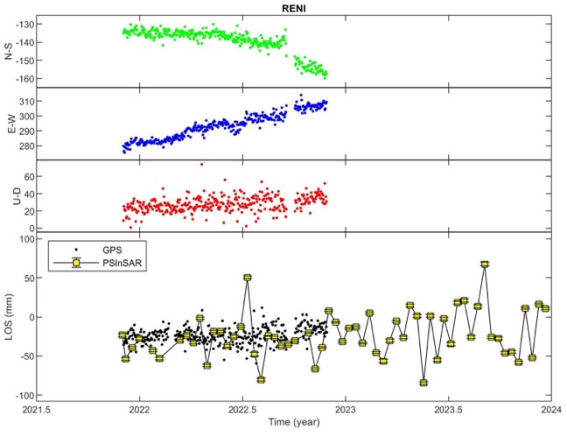

NTUH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

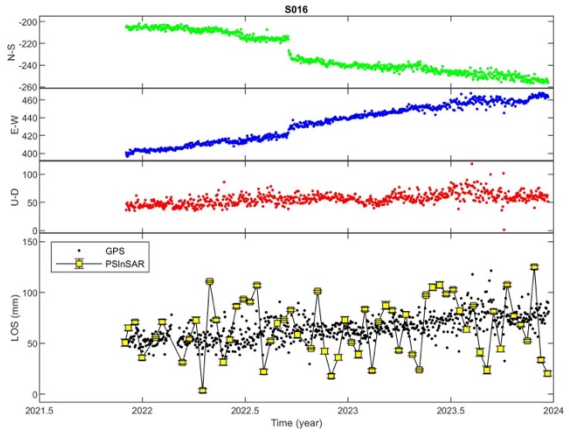

PINT
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

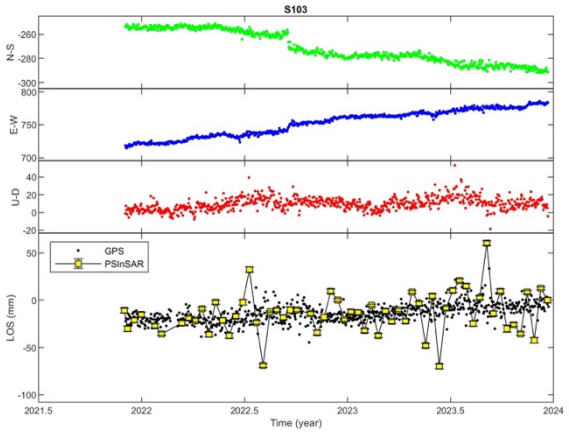

PKGM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

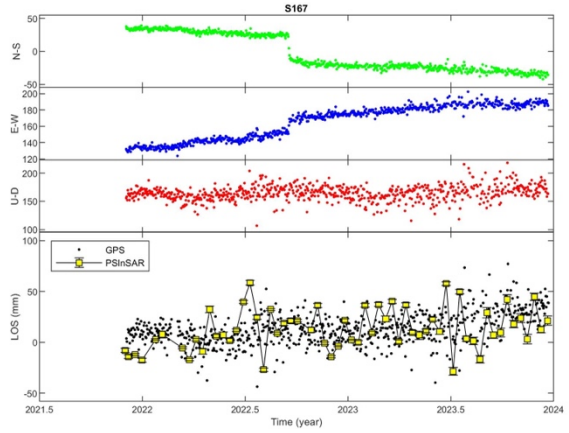

PLIM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

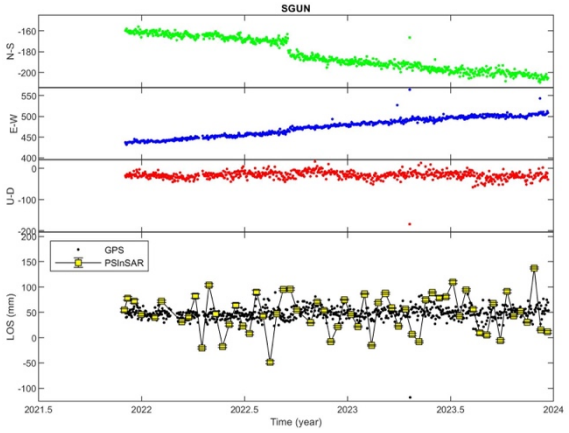

PUS2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

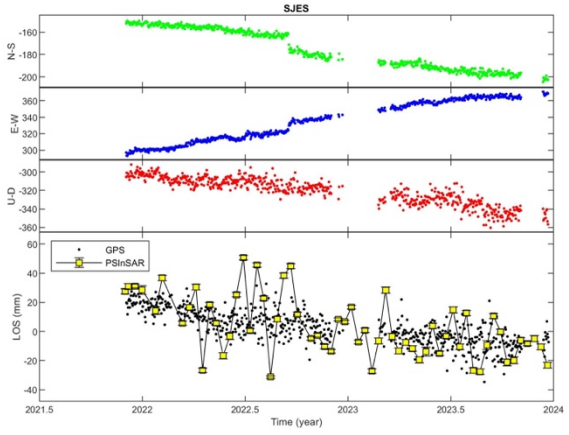

RENI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

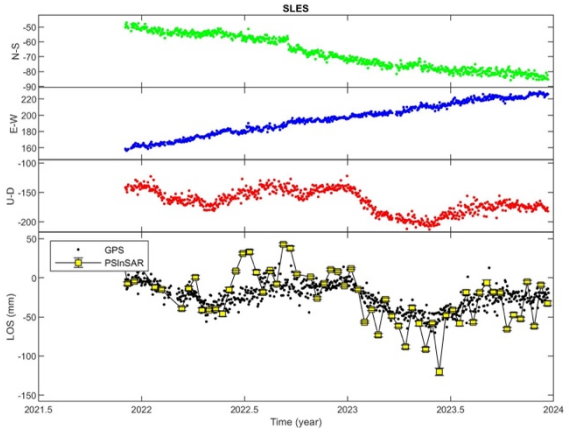

S016
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

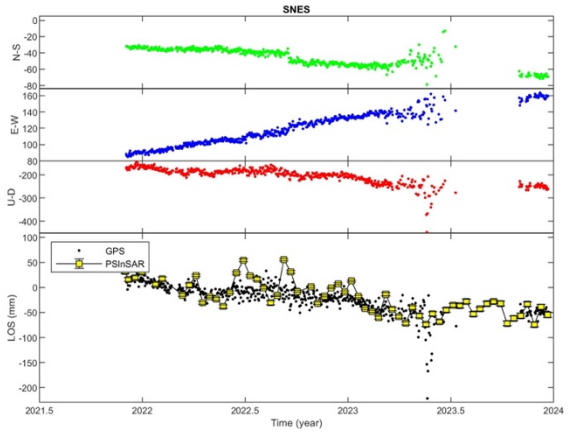

S103
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

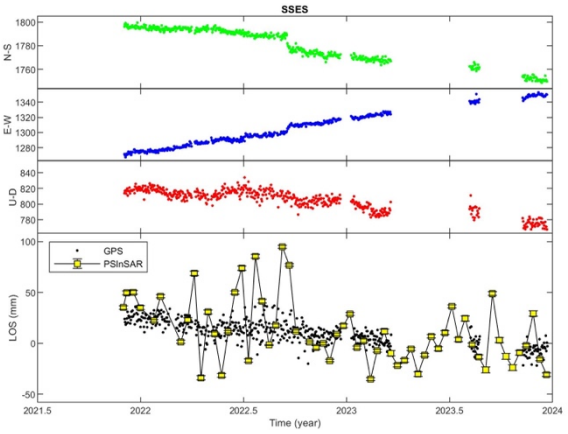

S167
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

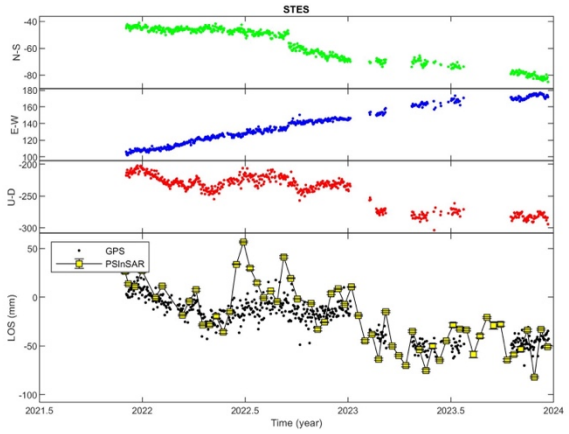

SGUN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

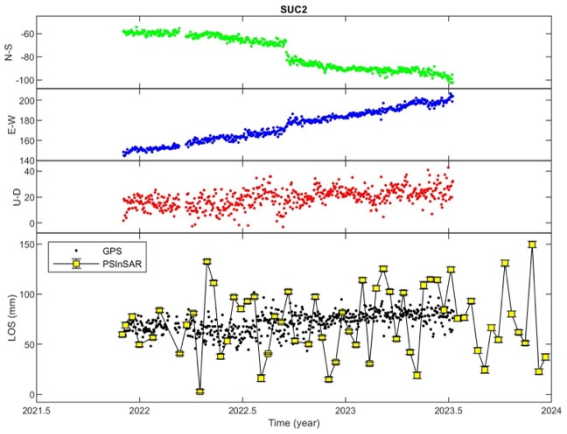

SJES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

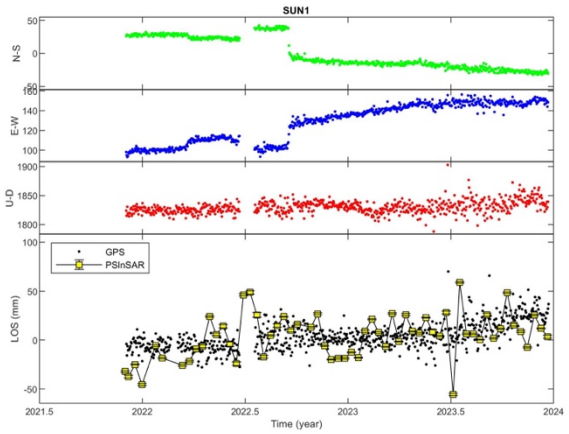

SLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

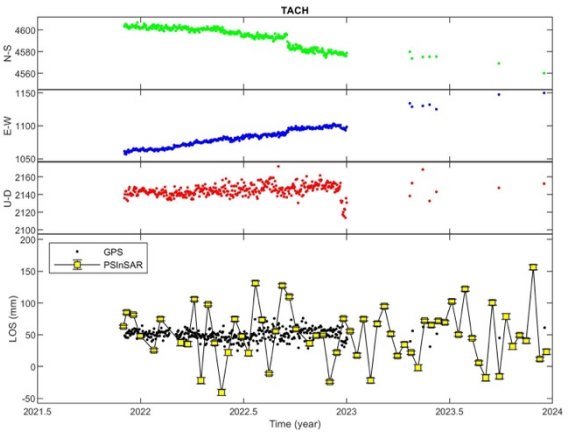

SNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

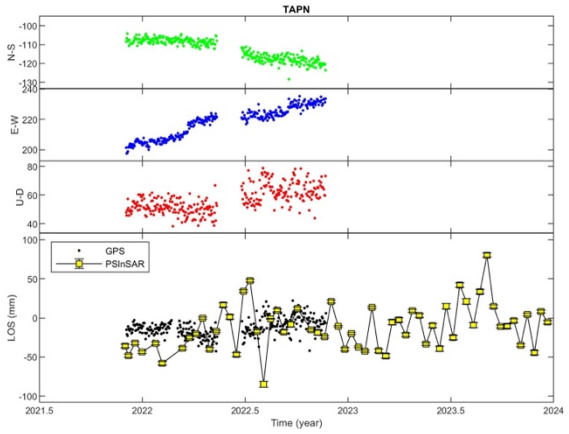

SSES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

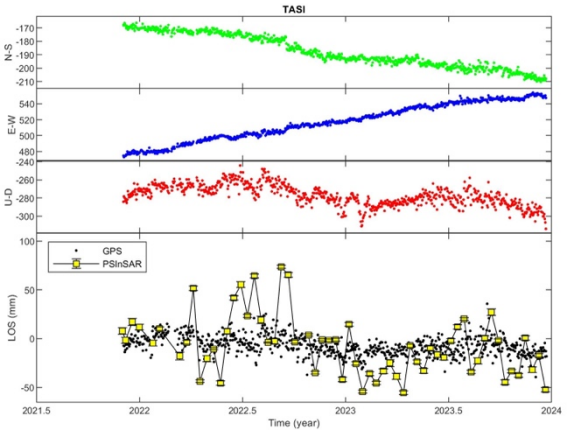

STES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

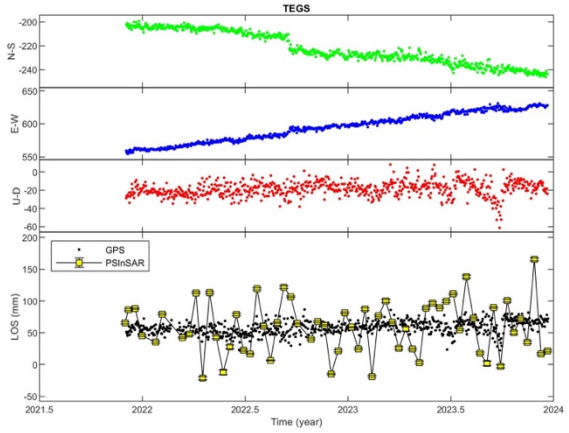

SUC2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

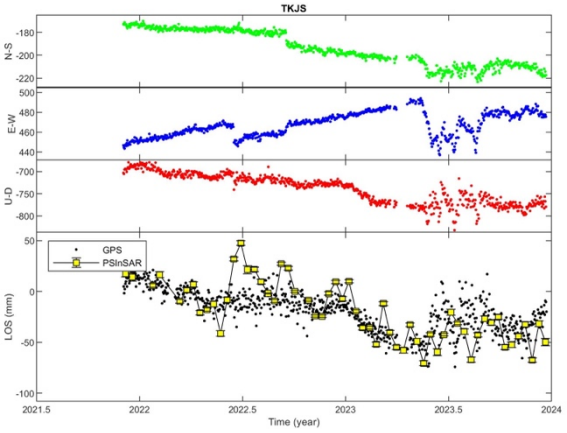

SUN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

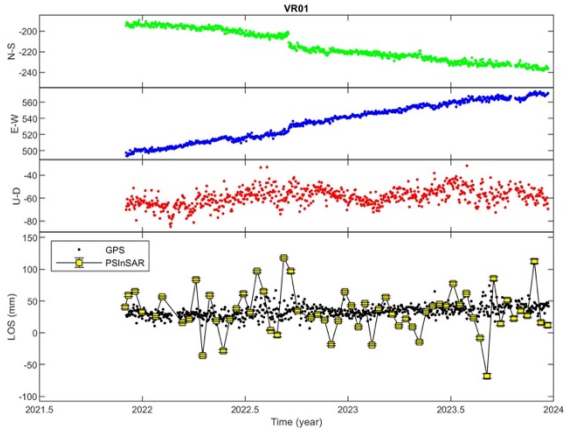

TACH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

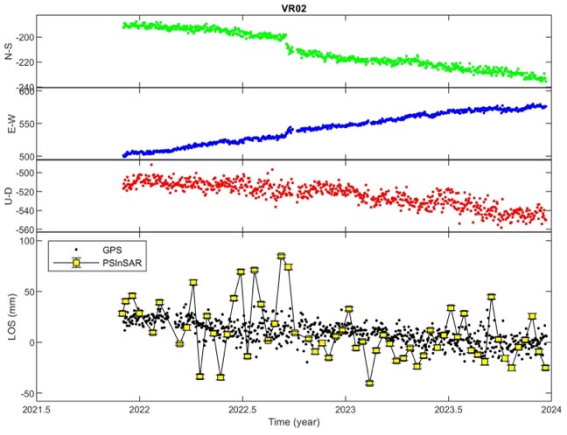

TAPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

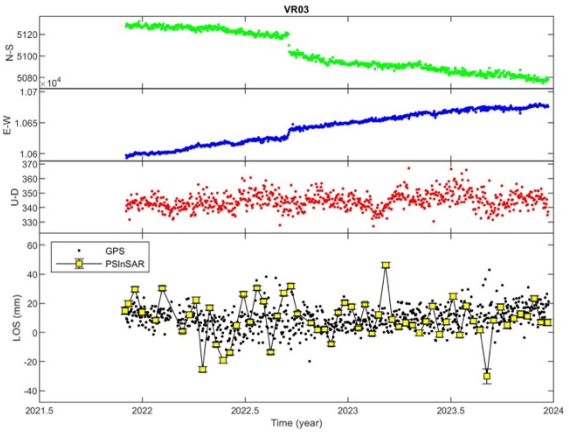

TASI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

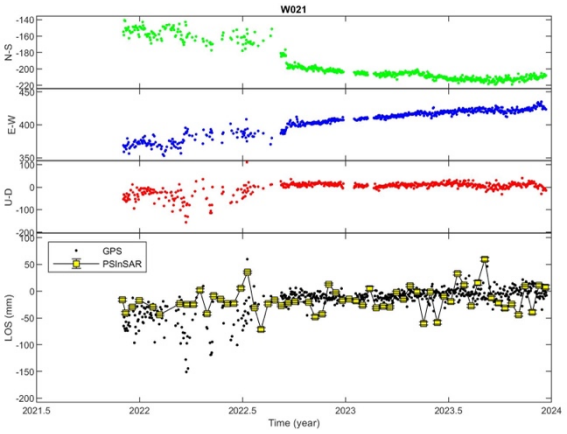

TEGS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

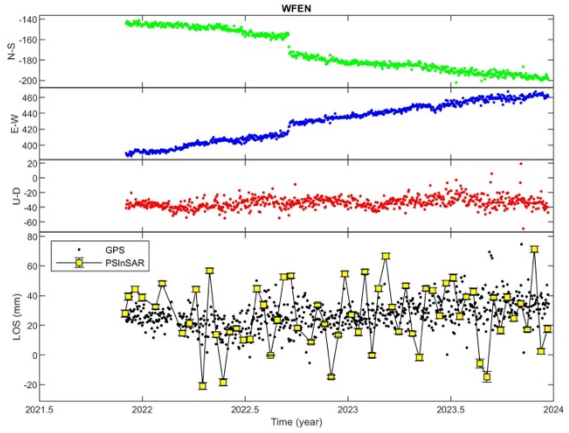

TKJS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

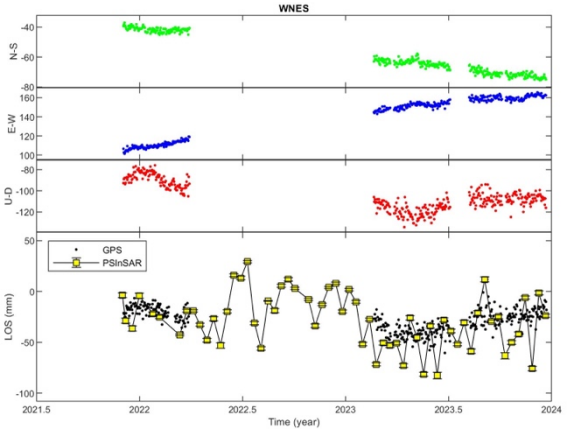

VR01
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

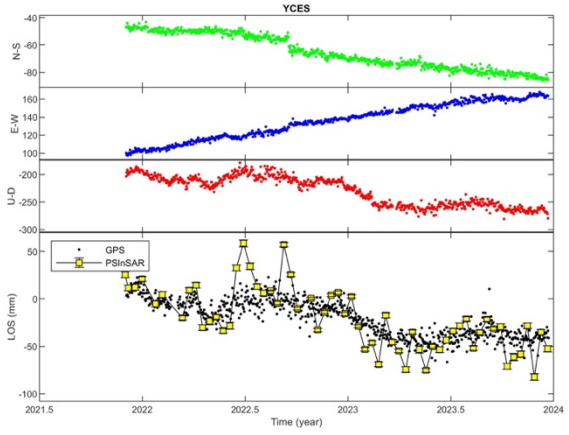

VR02
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

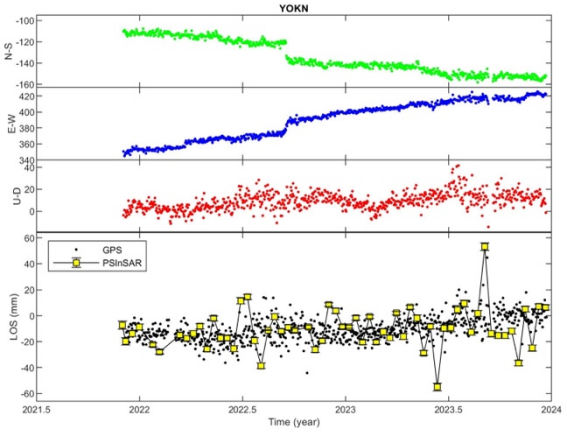

VR03
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


W021
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WFEN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YCES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


YOKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

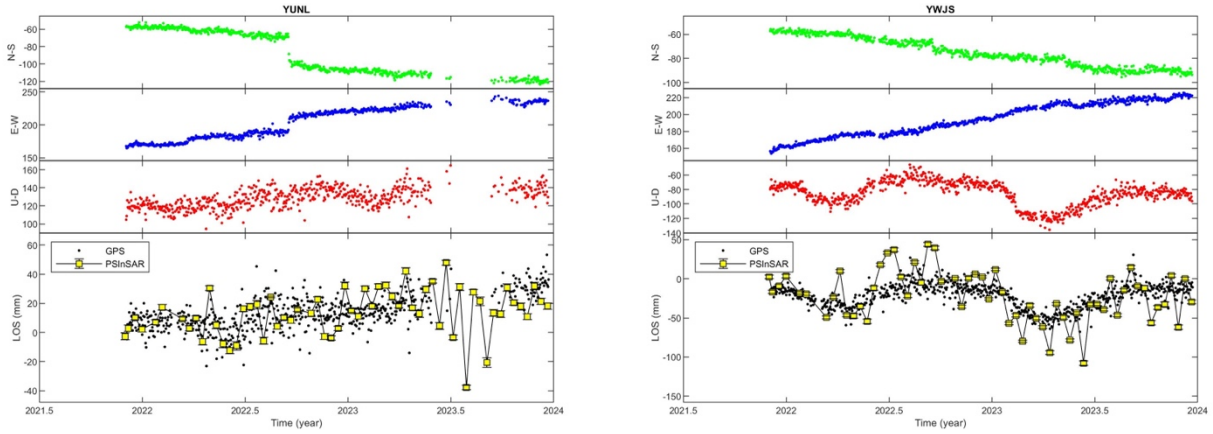
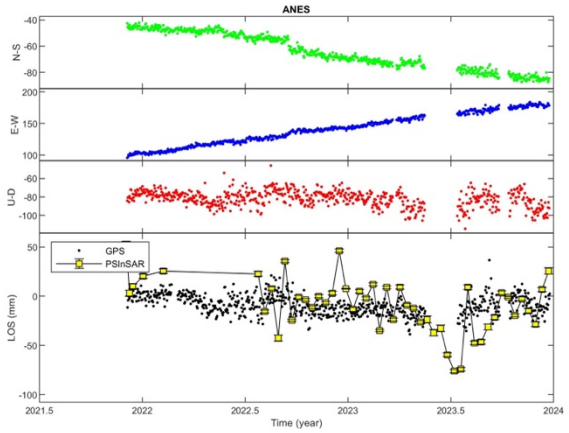
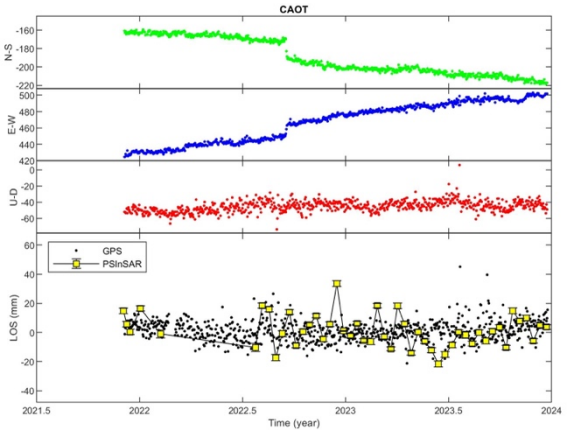


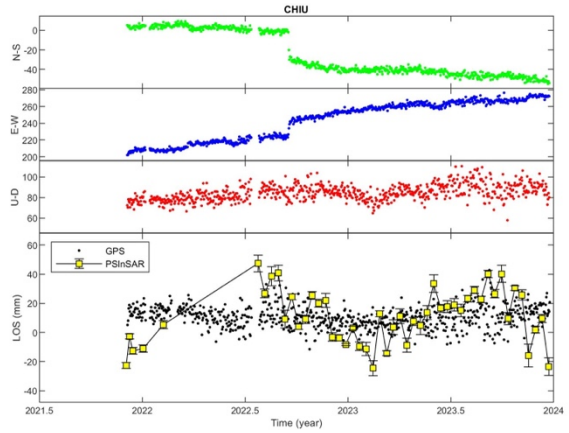
圖 B-5：2022-2023 升軌 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列。

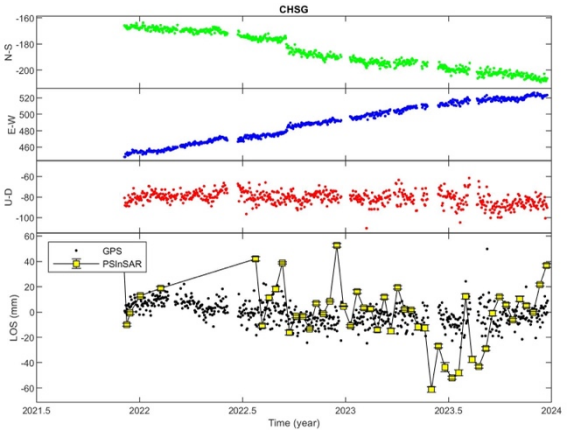
Figure B-5：Time series for GNSS 3-direction, projected GNSS 3-direction into LOS and PSI time series in ascending orbit between 2022 and 2023.

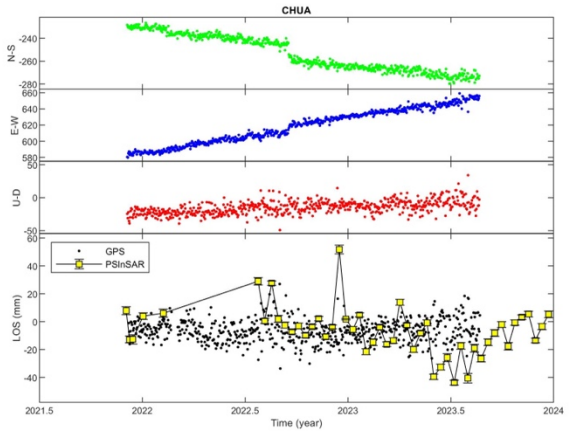
B-6 2022-2023 Descending

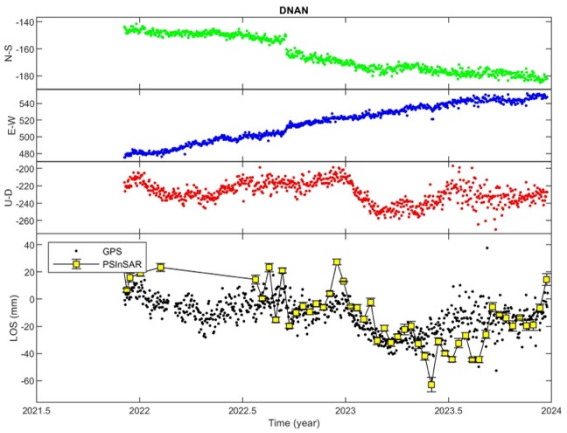


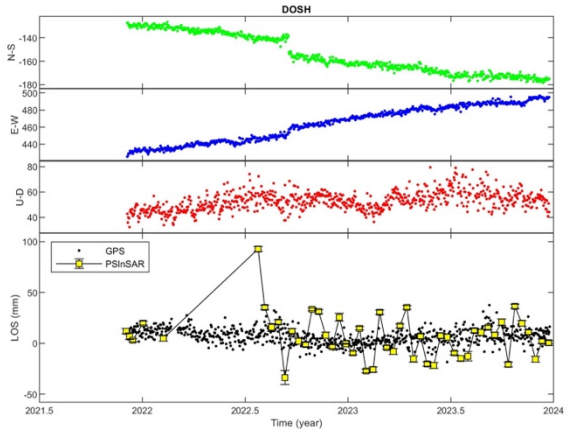


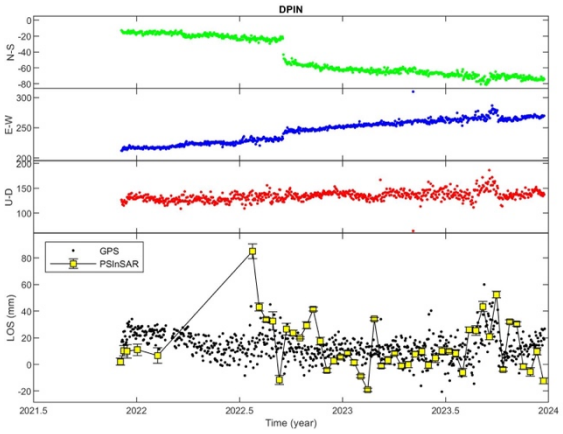


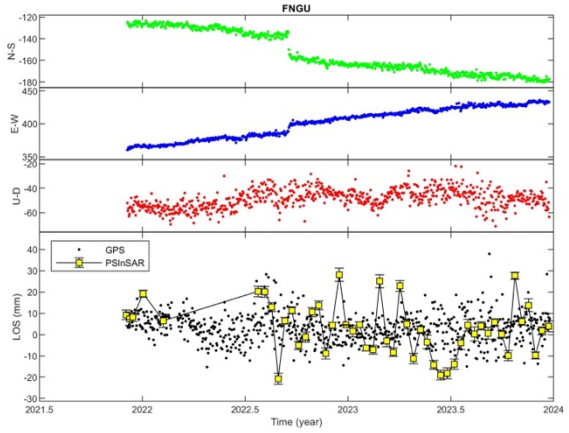


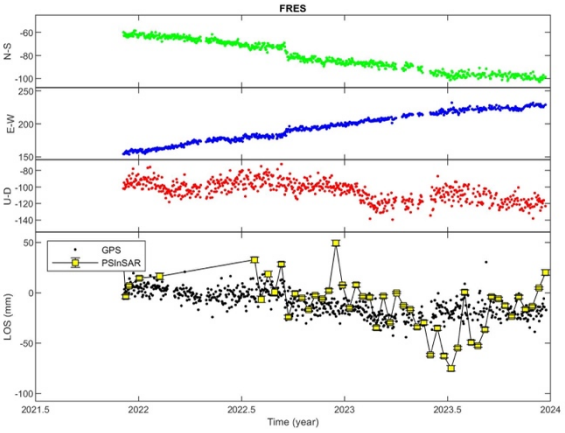


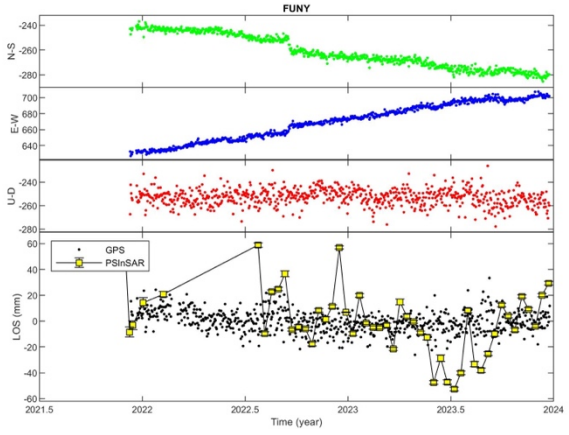


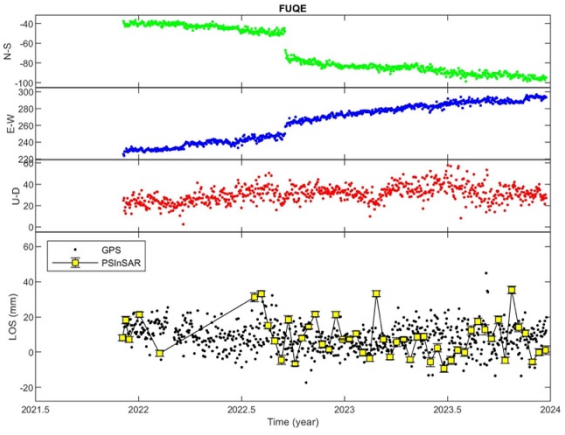

DOSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

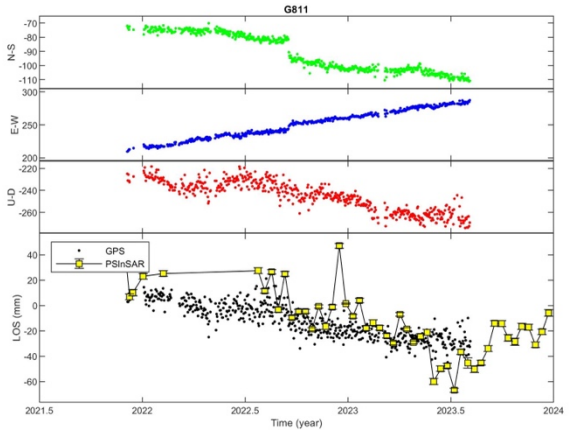

DPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

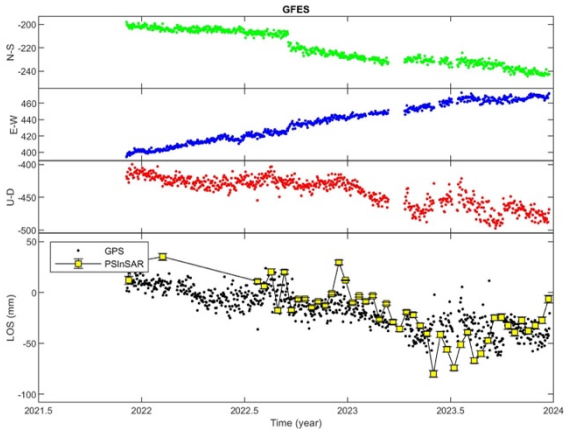

FNGU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

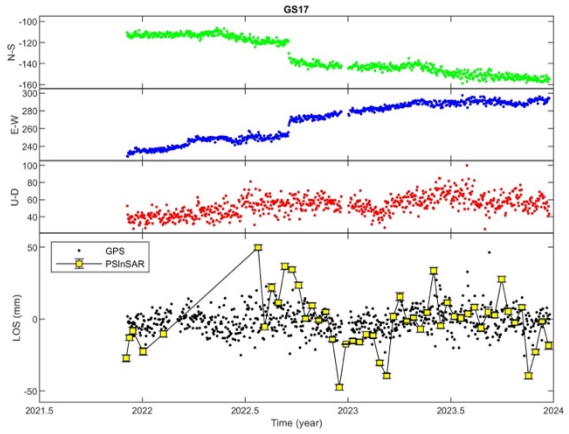

FRES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

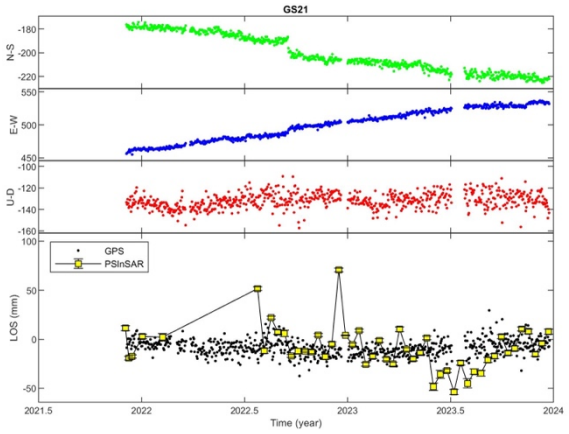

FUNY
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

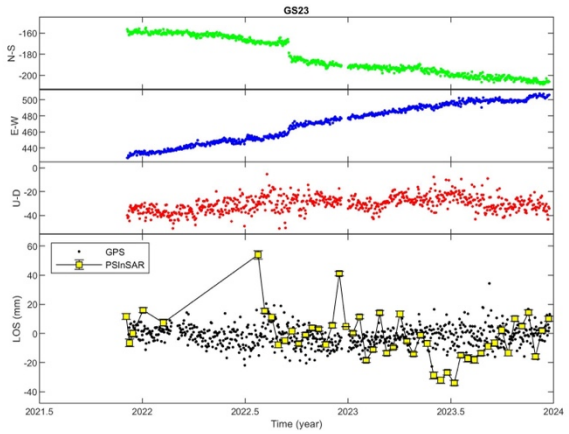

FUQE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

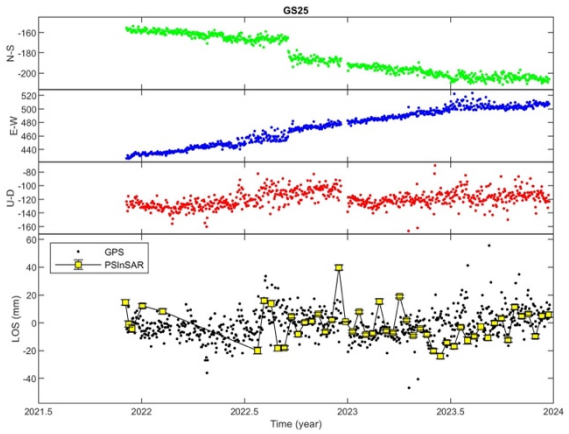

G811
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

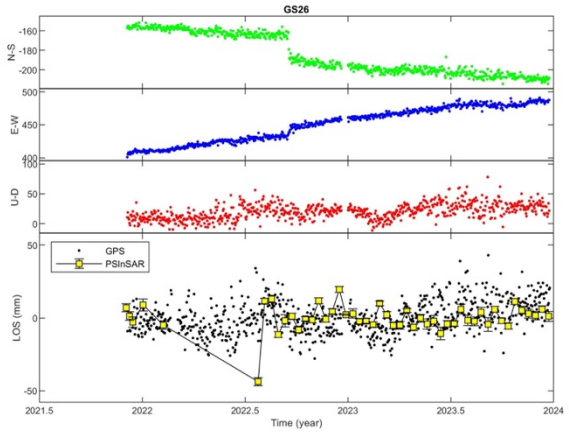

GFES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

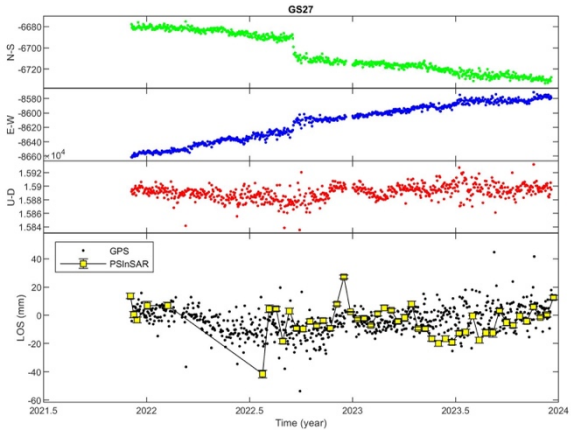

GS17
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

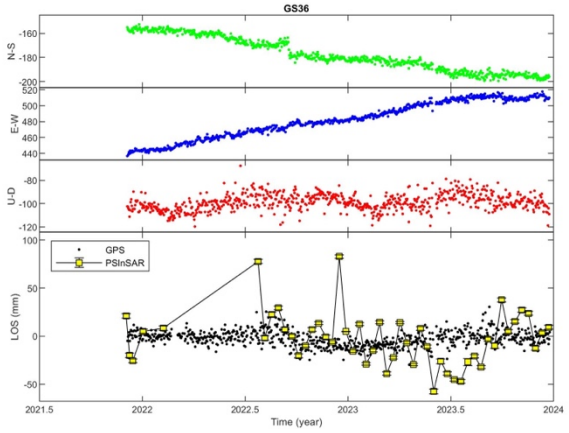

GS21
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

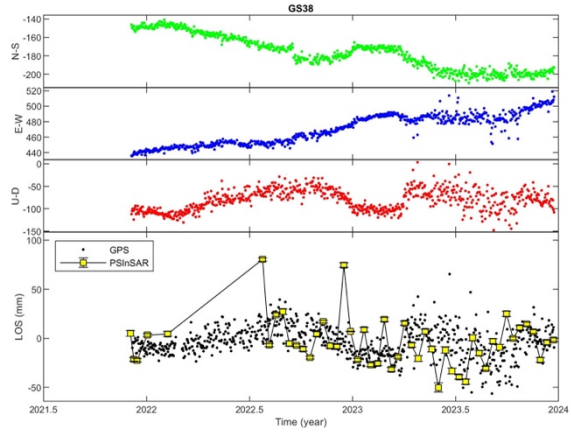

GS23
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

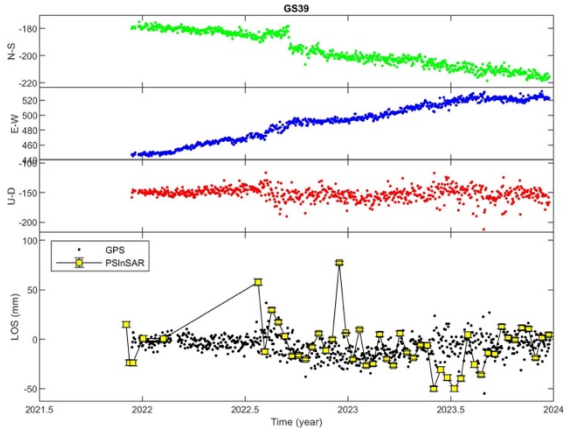

GS25
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

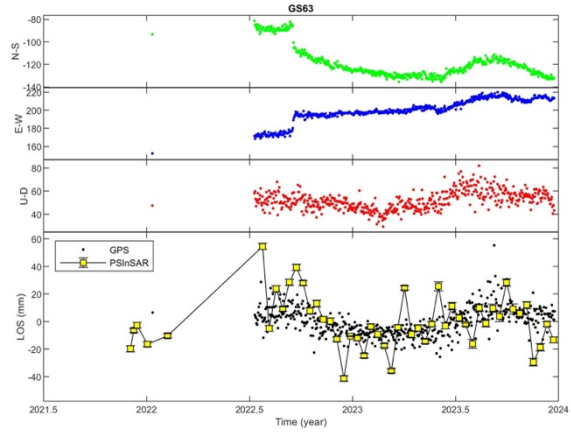

GS26
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

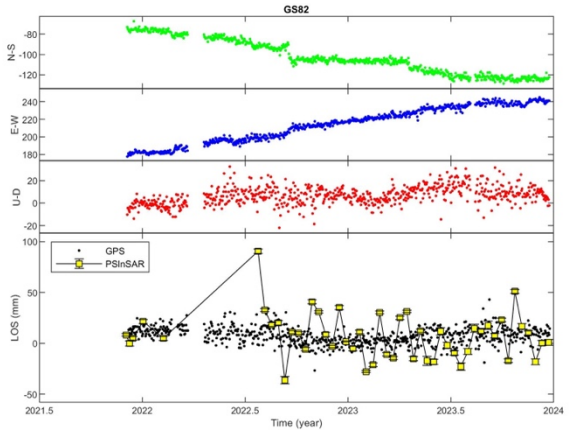

GS27
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

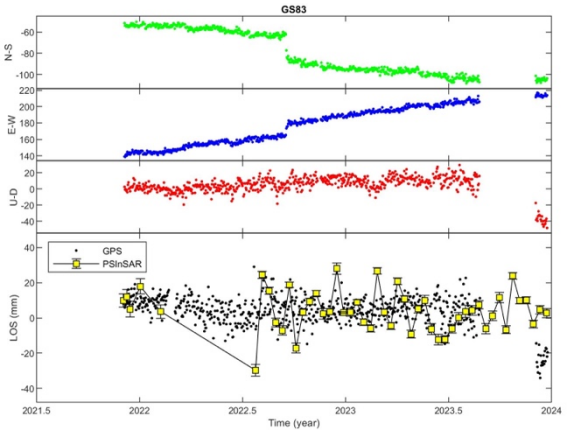

GS36
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

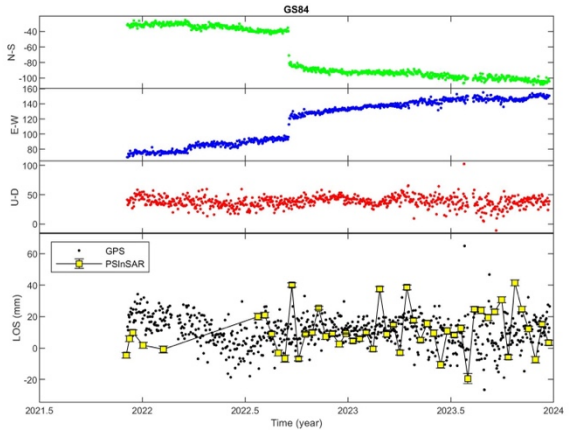

GS38
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

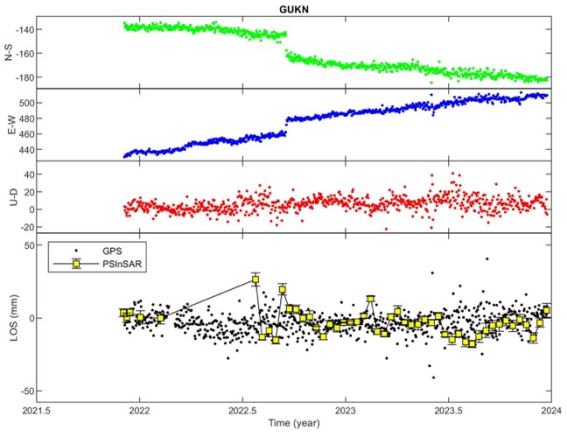

GS39
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

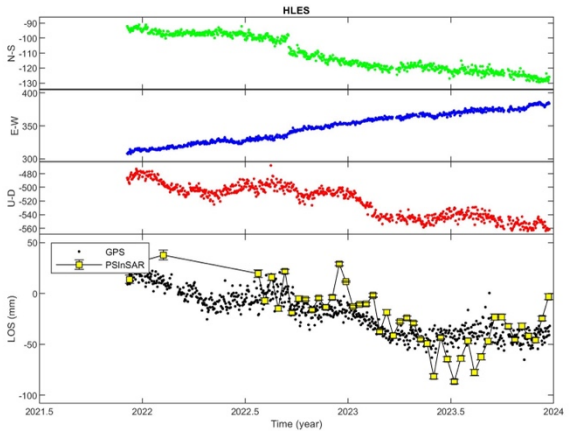

GS63
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

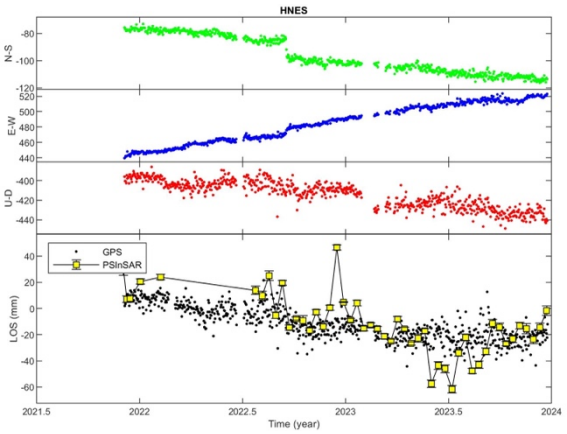

GS82
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

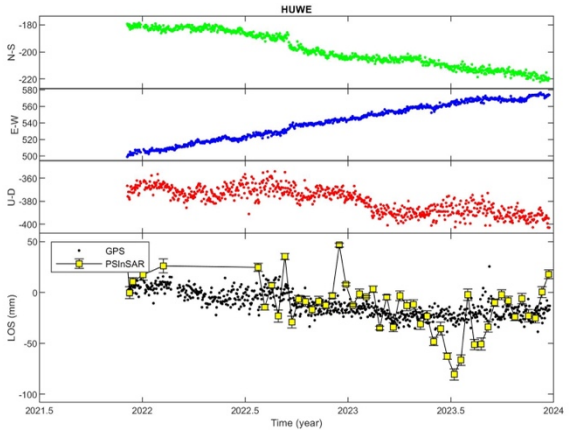

GS83
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

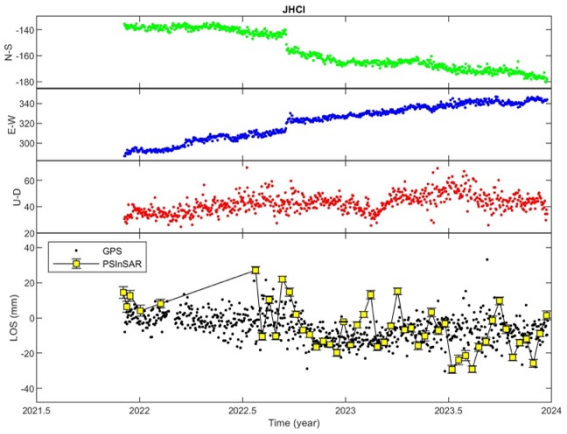

GS84
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

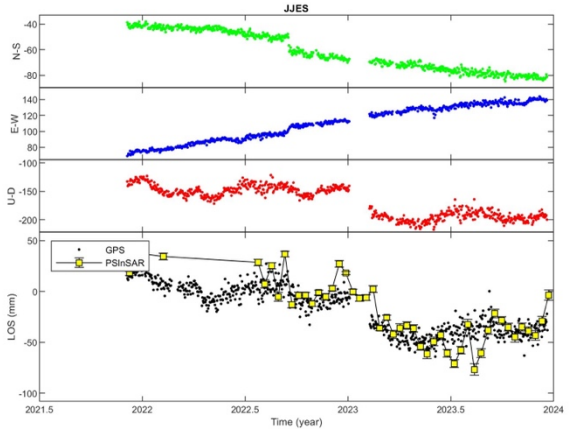

GUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

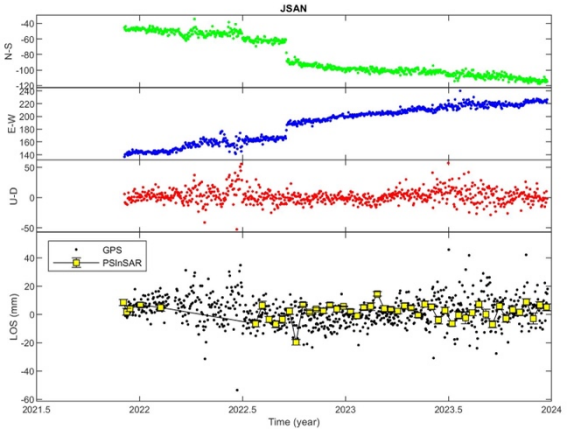

HLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

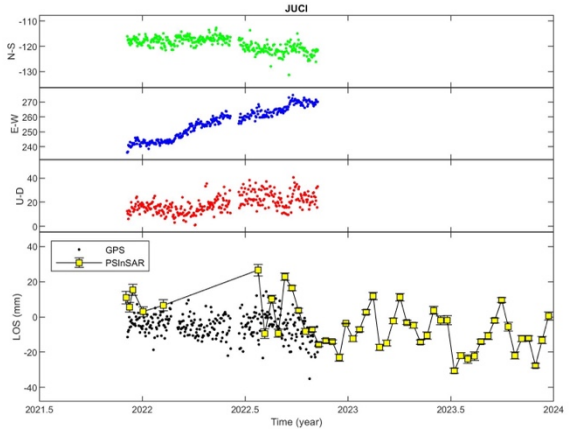

HNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

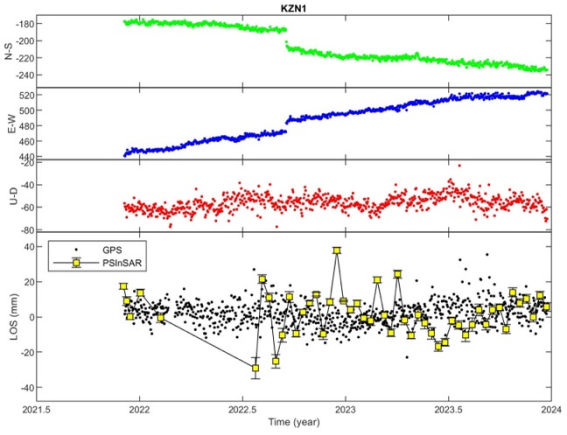

HUWE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

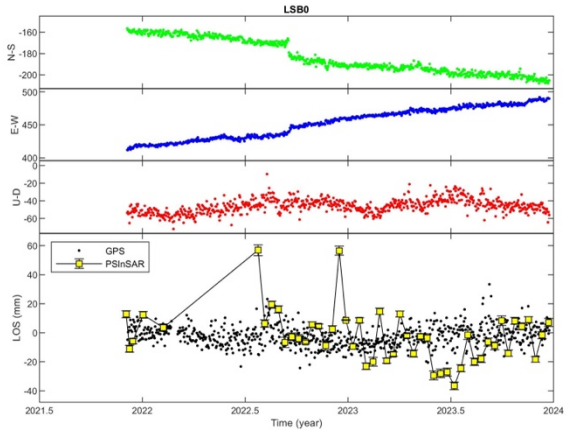

JHCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

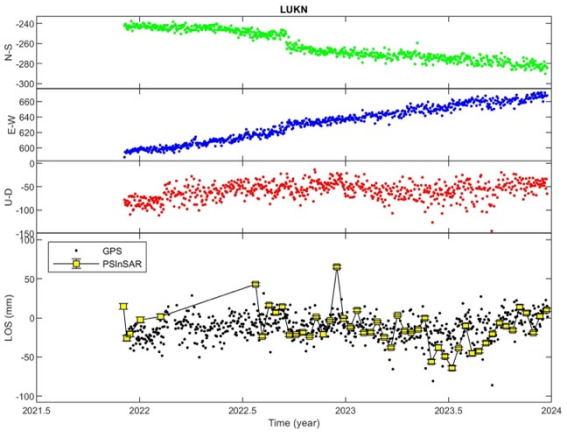

JJES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

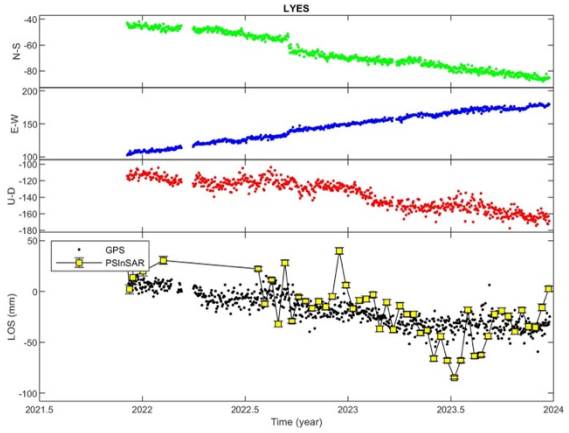

JSAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

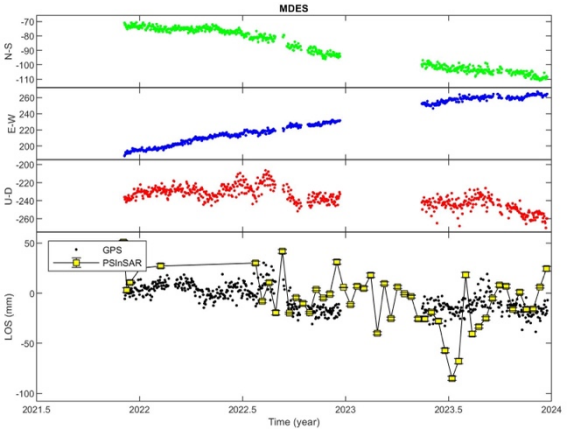

JUCI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

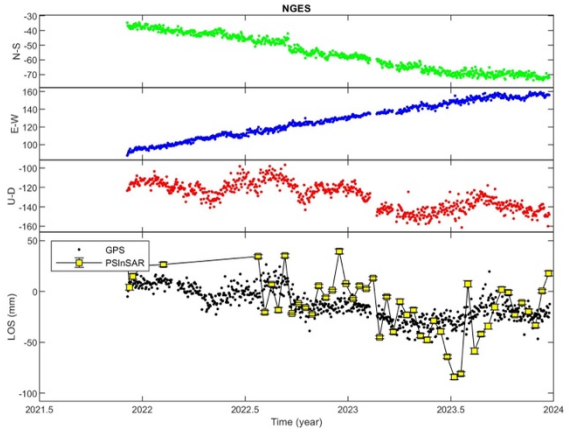

KZN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

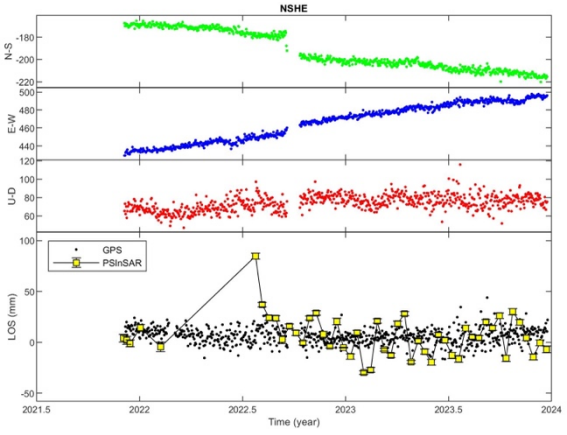

LSB0
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

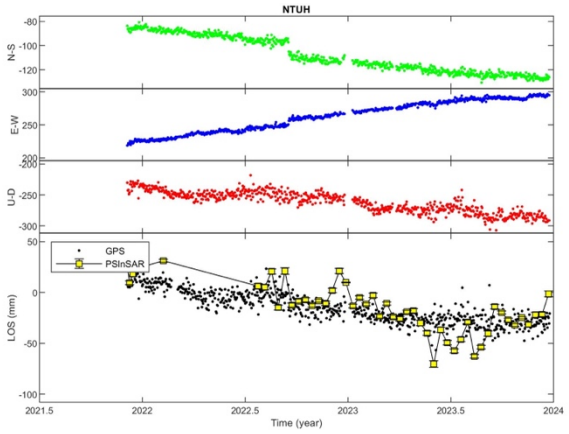

LUKN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

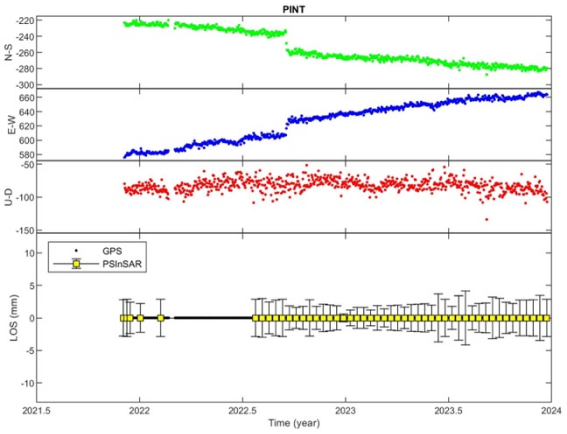

LYES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

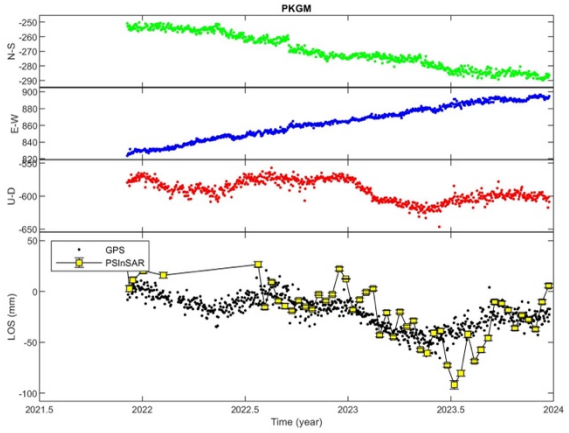

MDES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

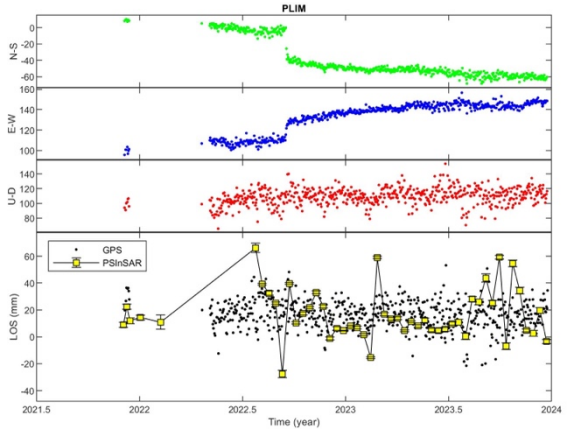

NGES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

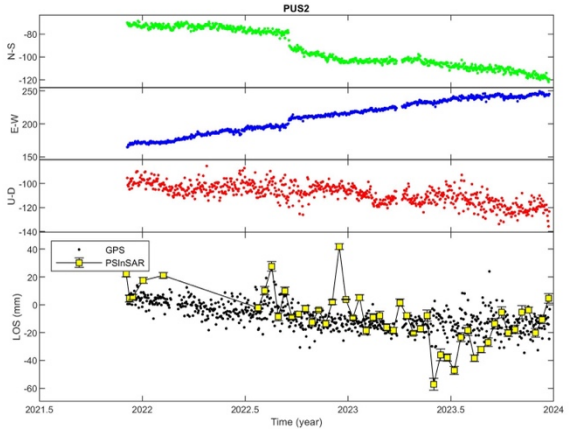

NSHE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

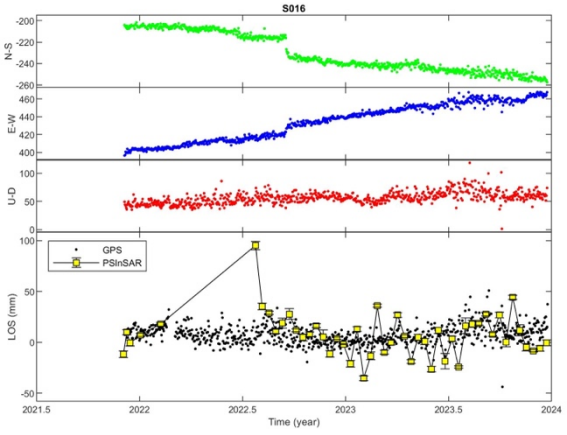

NTUH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

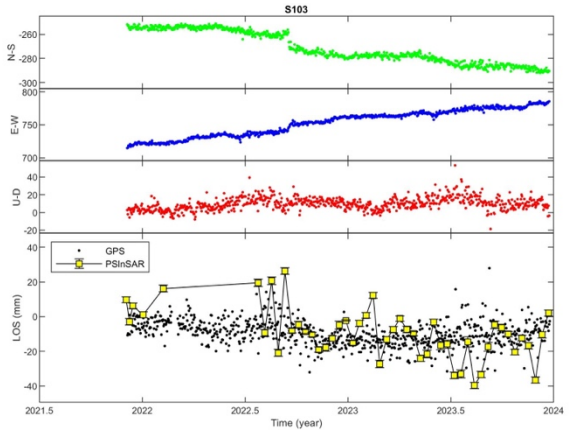

PINT
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

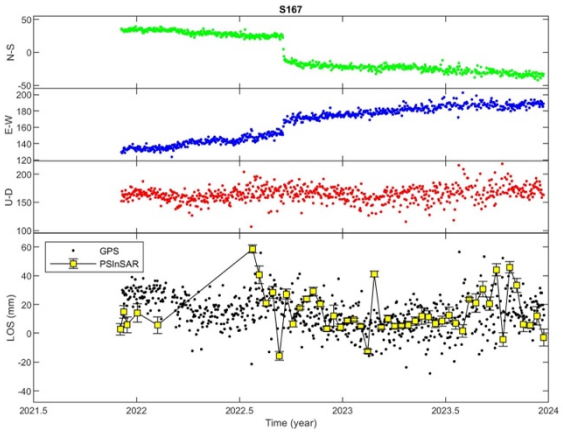

PKGM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

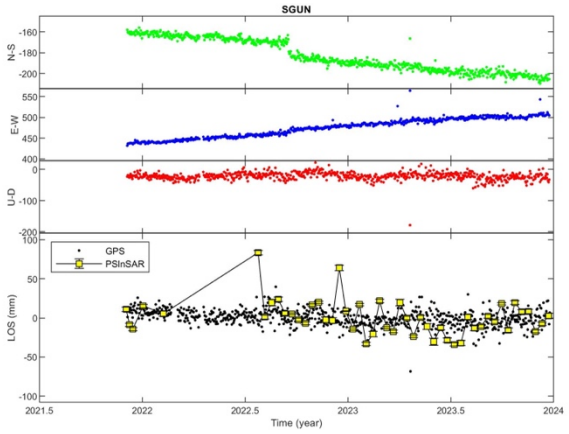

PLIM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

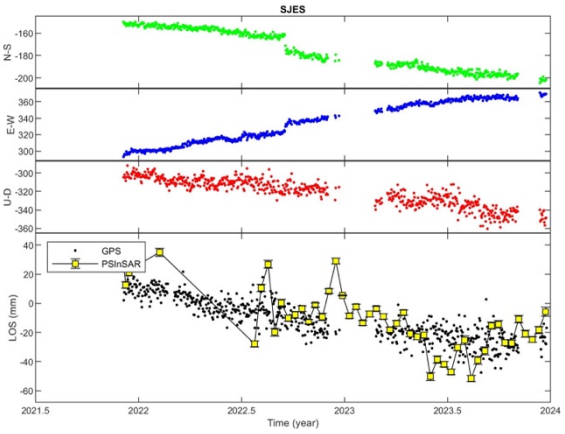

PUS2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

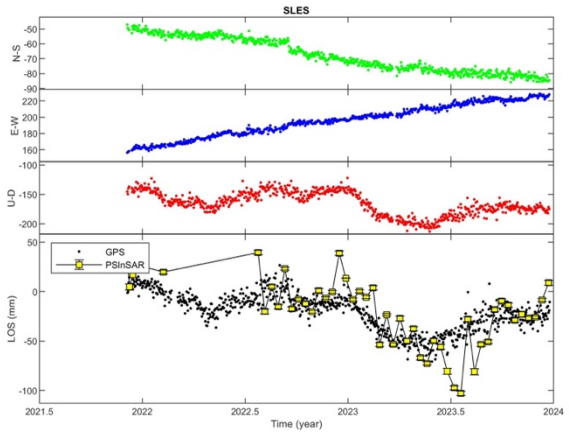

S016
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

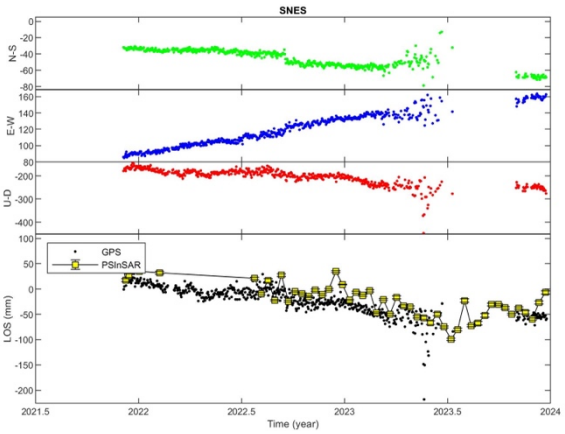

S103
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

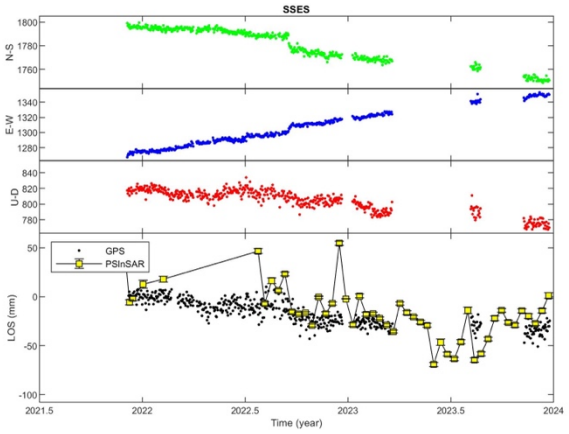

S167
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

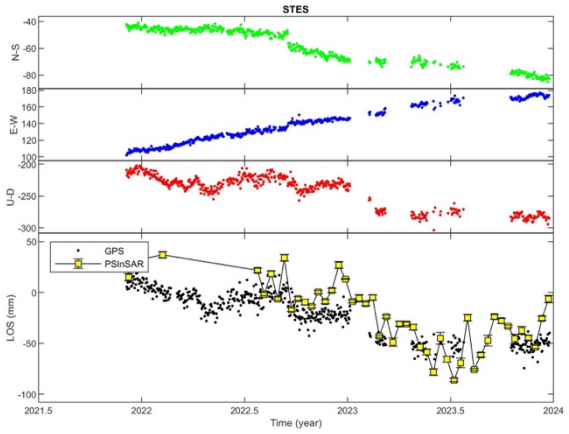

SGUN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

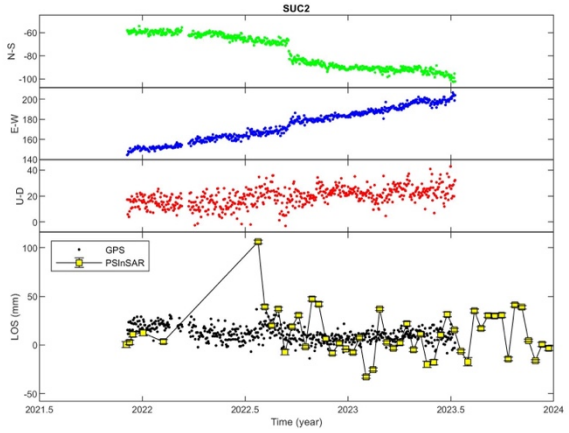

SJES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

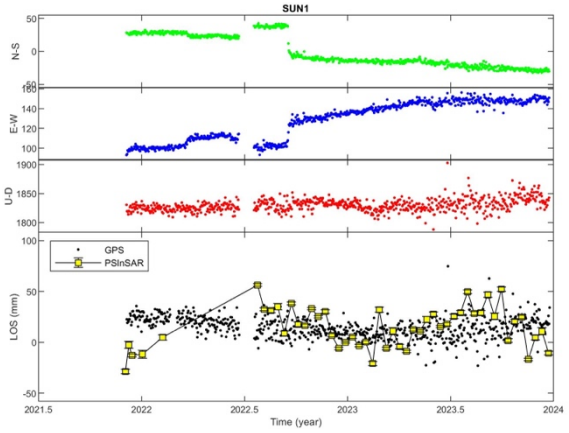

SLES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

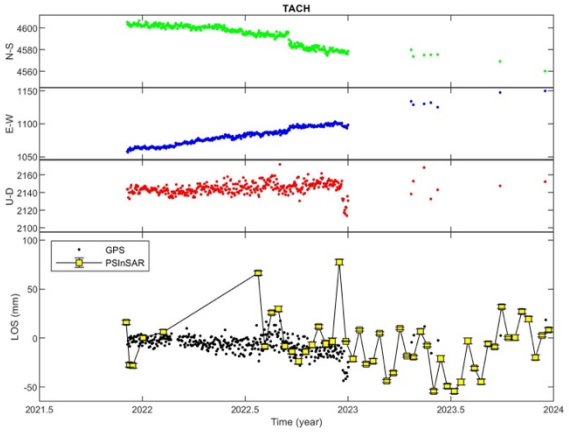

SNES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

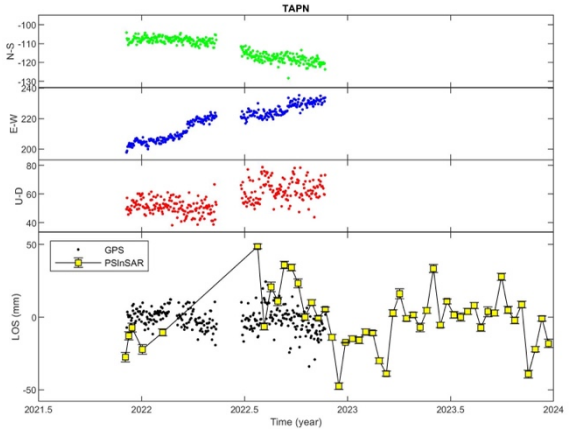

SSES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

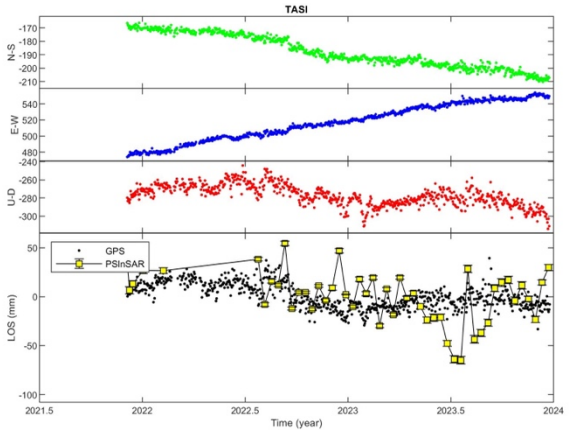

STES
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

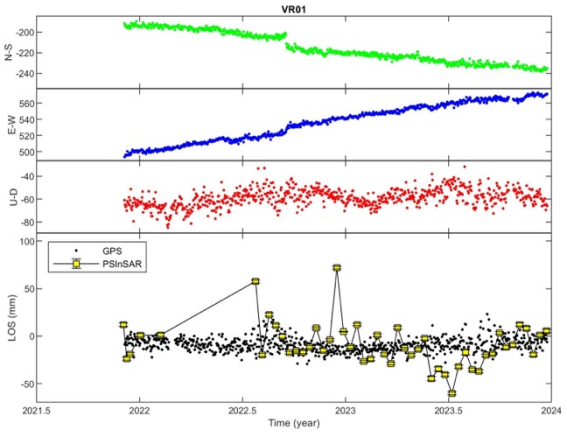

SUC2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

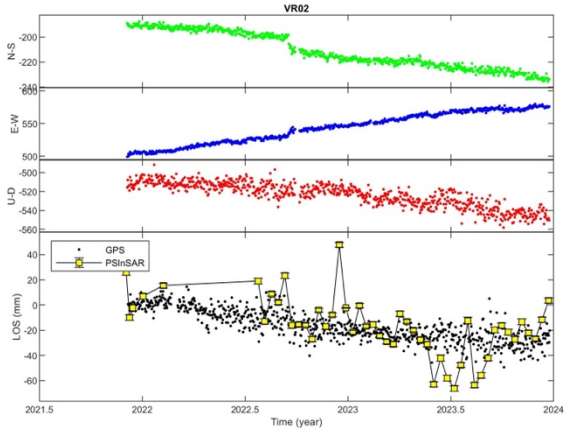

SUN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

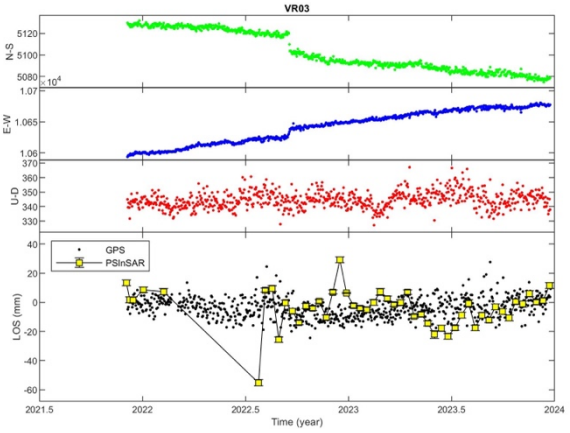

TACH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

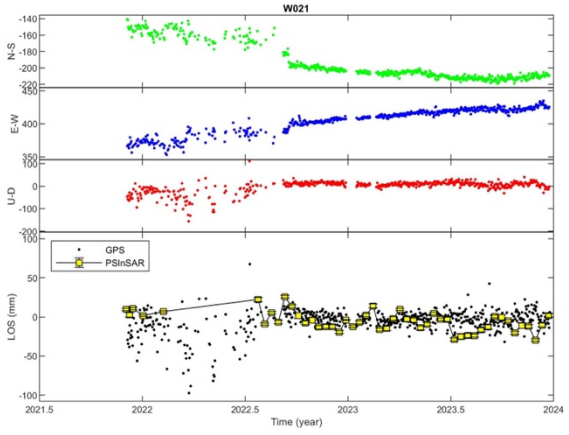

TAPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

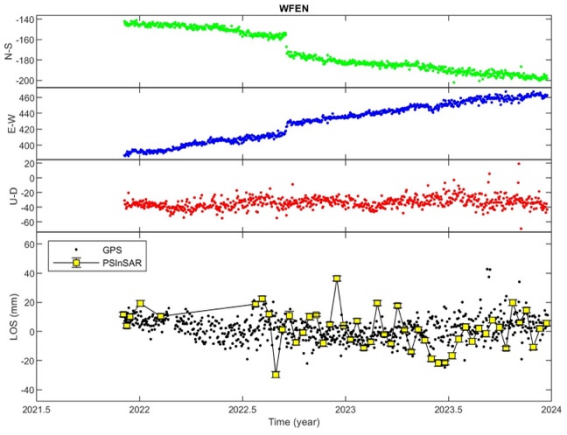

TASI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


VR01
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


VR02
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


VR03
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


W021
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WFEN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

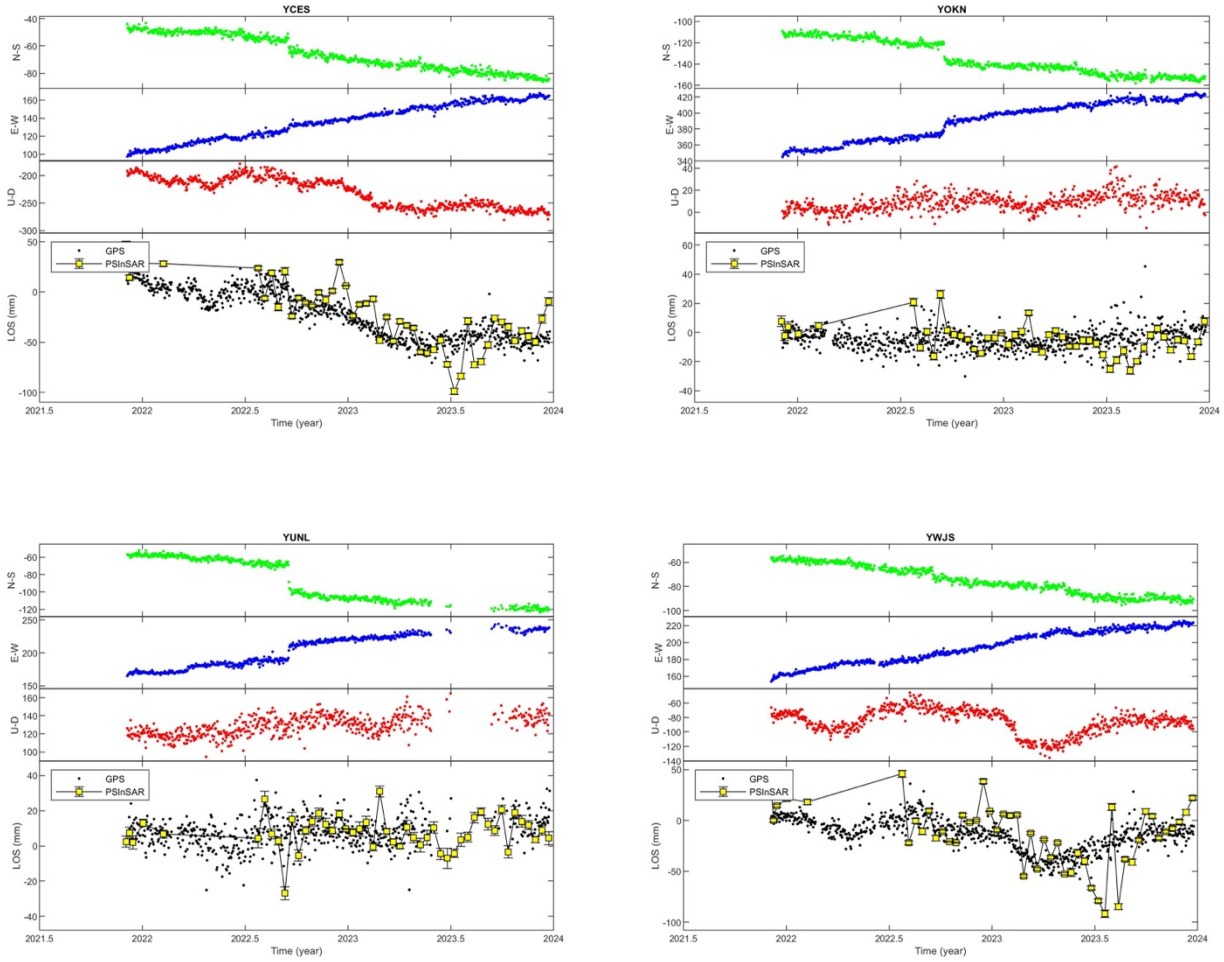


圖 B-6：2022-2023 降軌 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列。

Figure B-6：Time series for GNSS 3-direction, projected GNSS 3-direction into LOS and PSI time series in descending orbit between 2022 and 2023.

附錄 C 各時期 P1~P5 成果

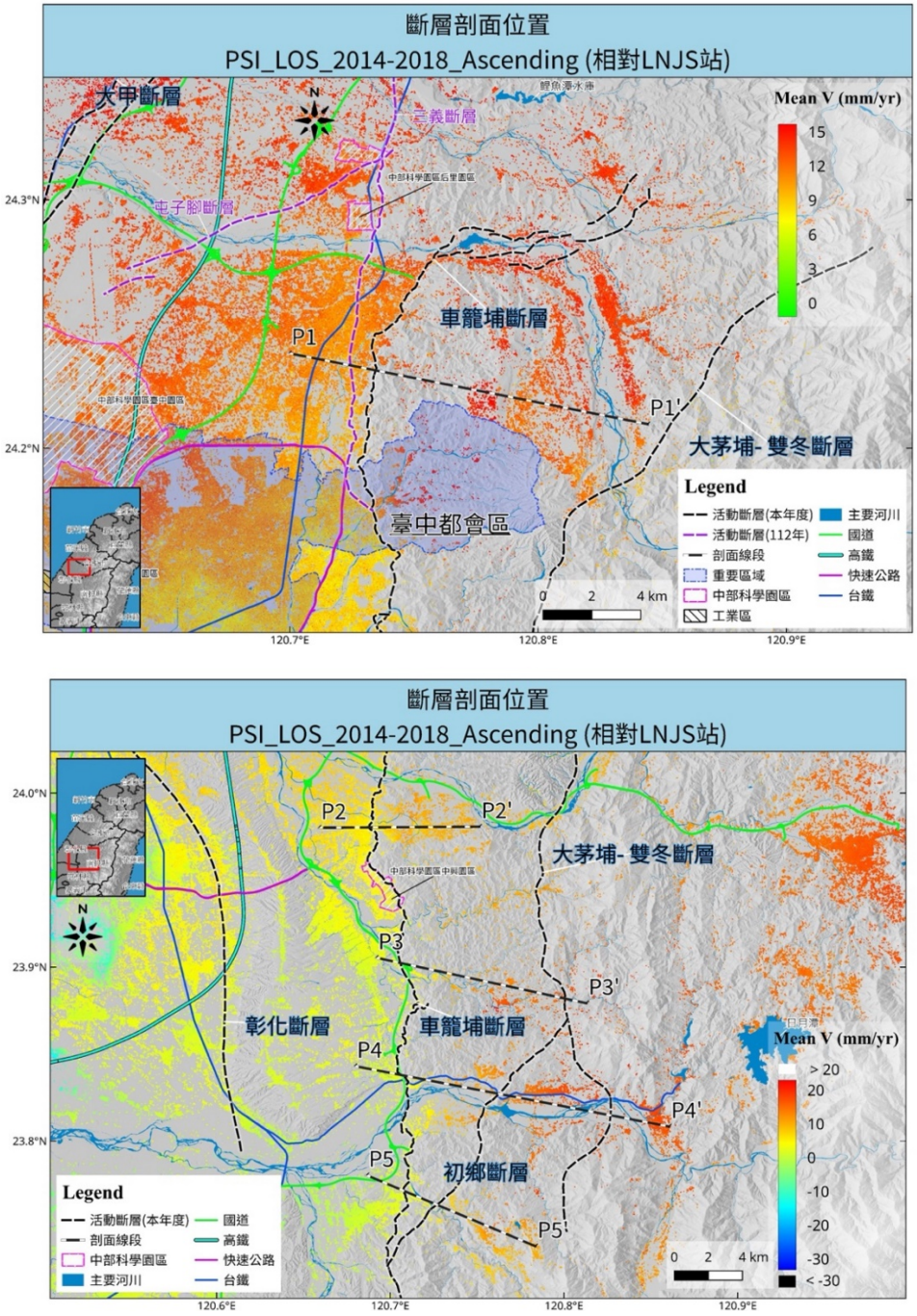


圖 C-1：2014-2018 升軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。上圖為 P1 剖面，下圖為 P2 至 P5 剖面。

Figure C-1：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

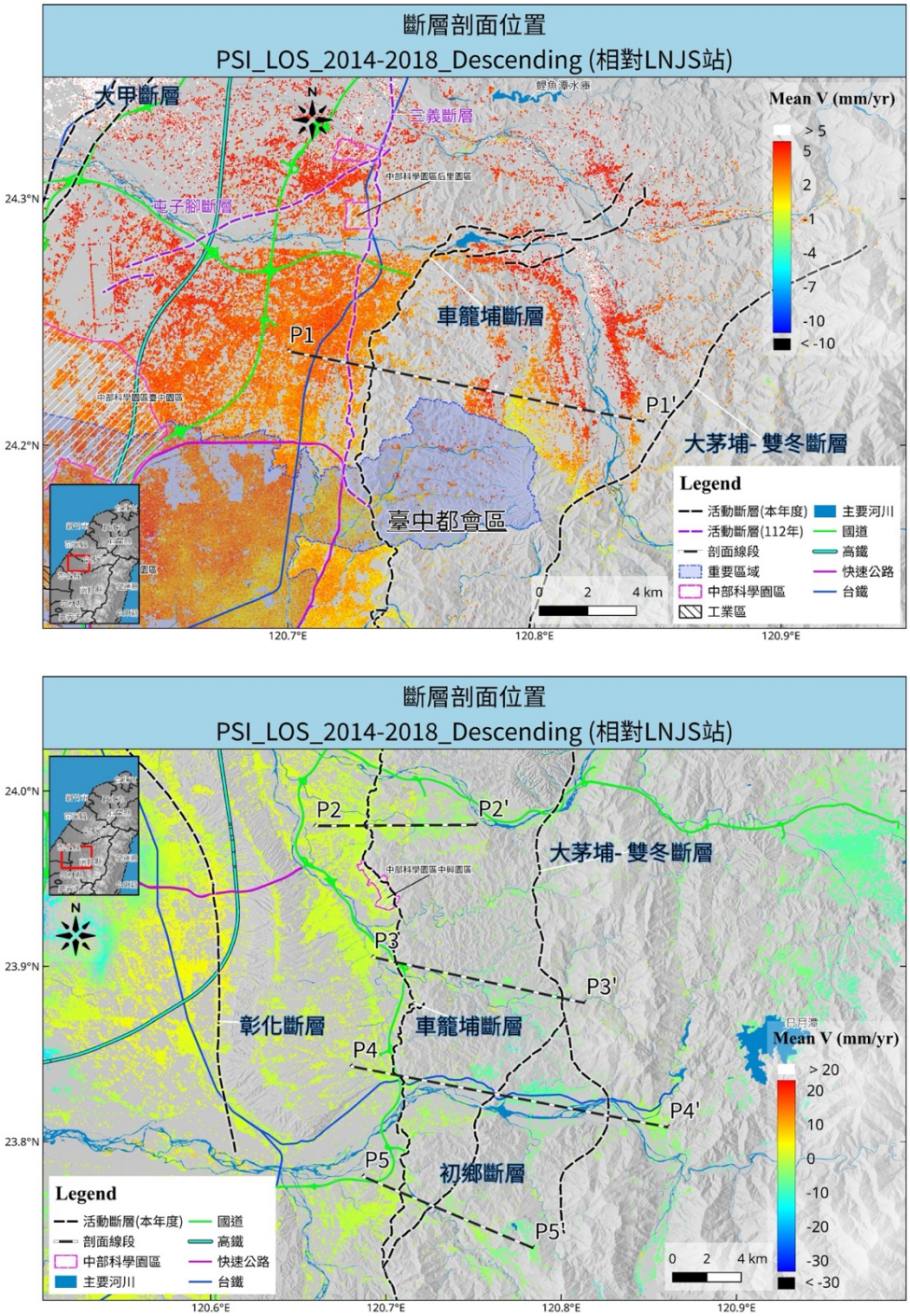


圖 C-2：2014-2018 降軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。上圖為 P1 剖面，下圖為 P2 至 P5 剖面。

Figure C-2：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

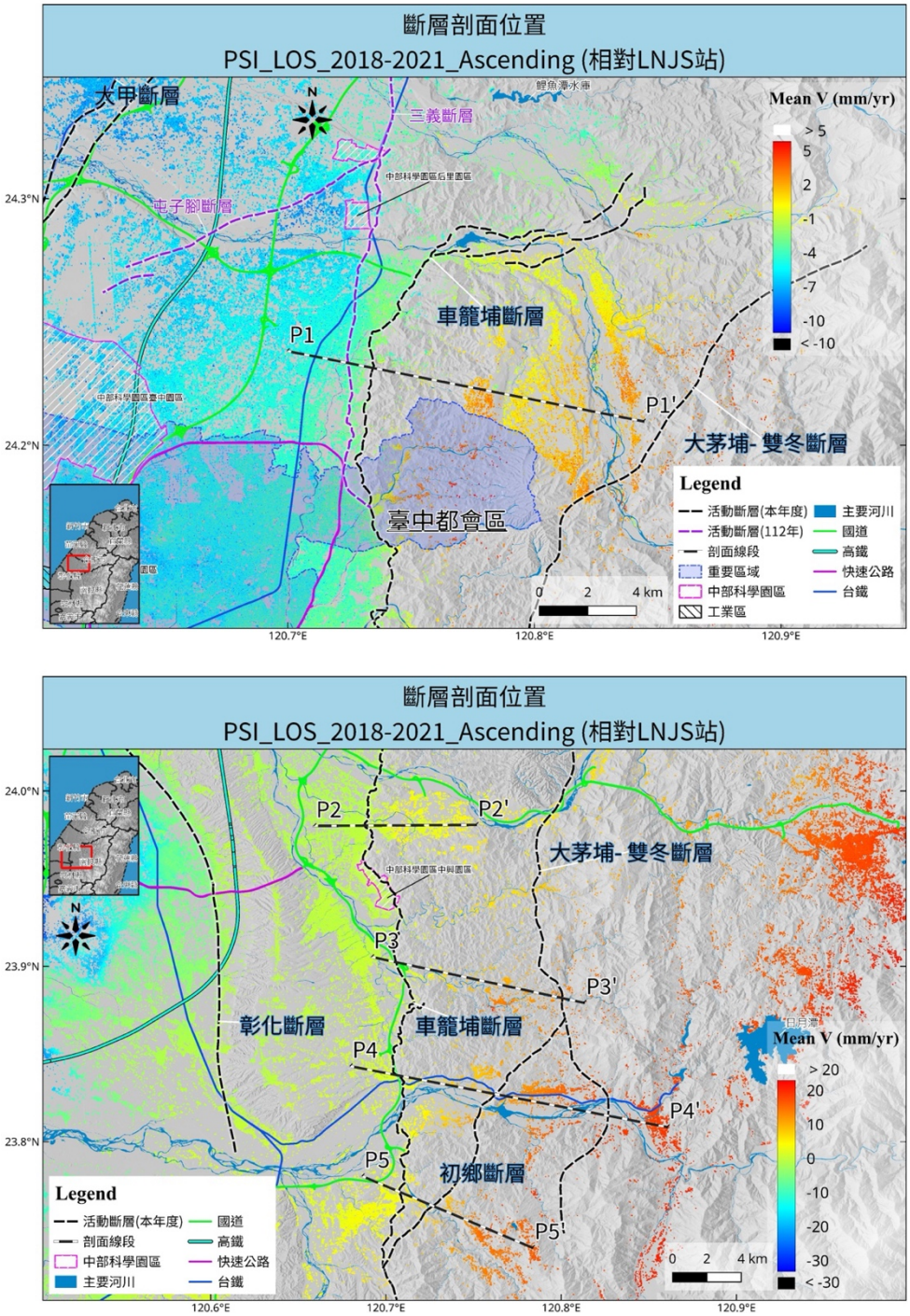


圖 C-3：2018-2021 升軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。上圖為 P1 剖面，下圖為 P2 至 P5 剖面。

Figure C-3：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

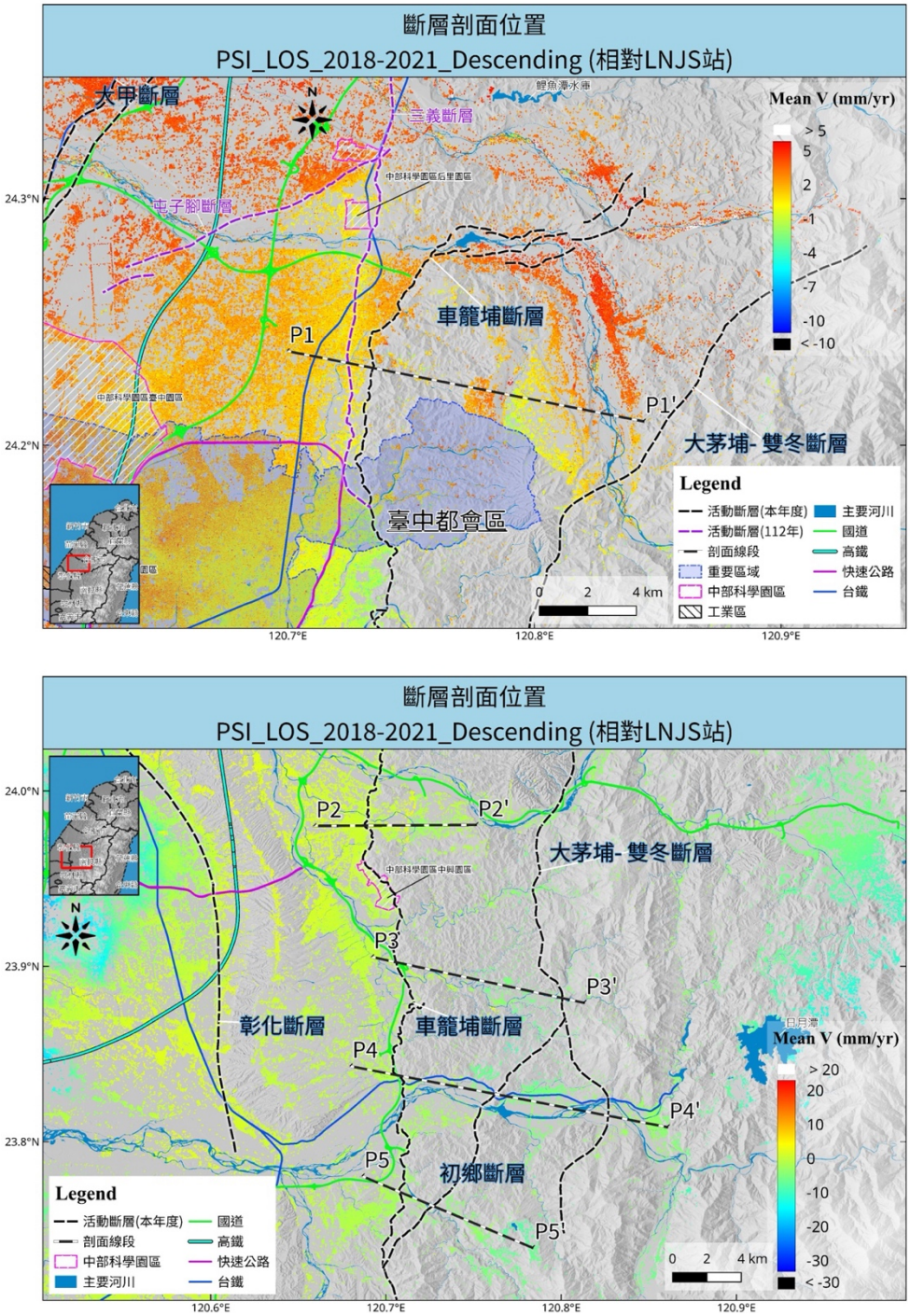


圖 C-4：2018-2021 降軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。上圖為 P1 剖面，下圖為 P2 至 P5 剖面。

Figure C-4：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

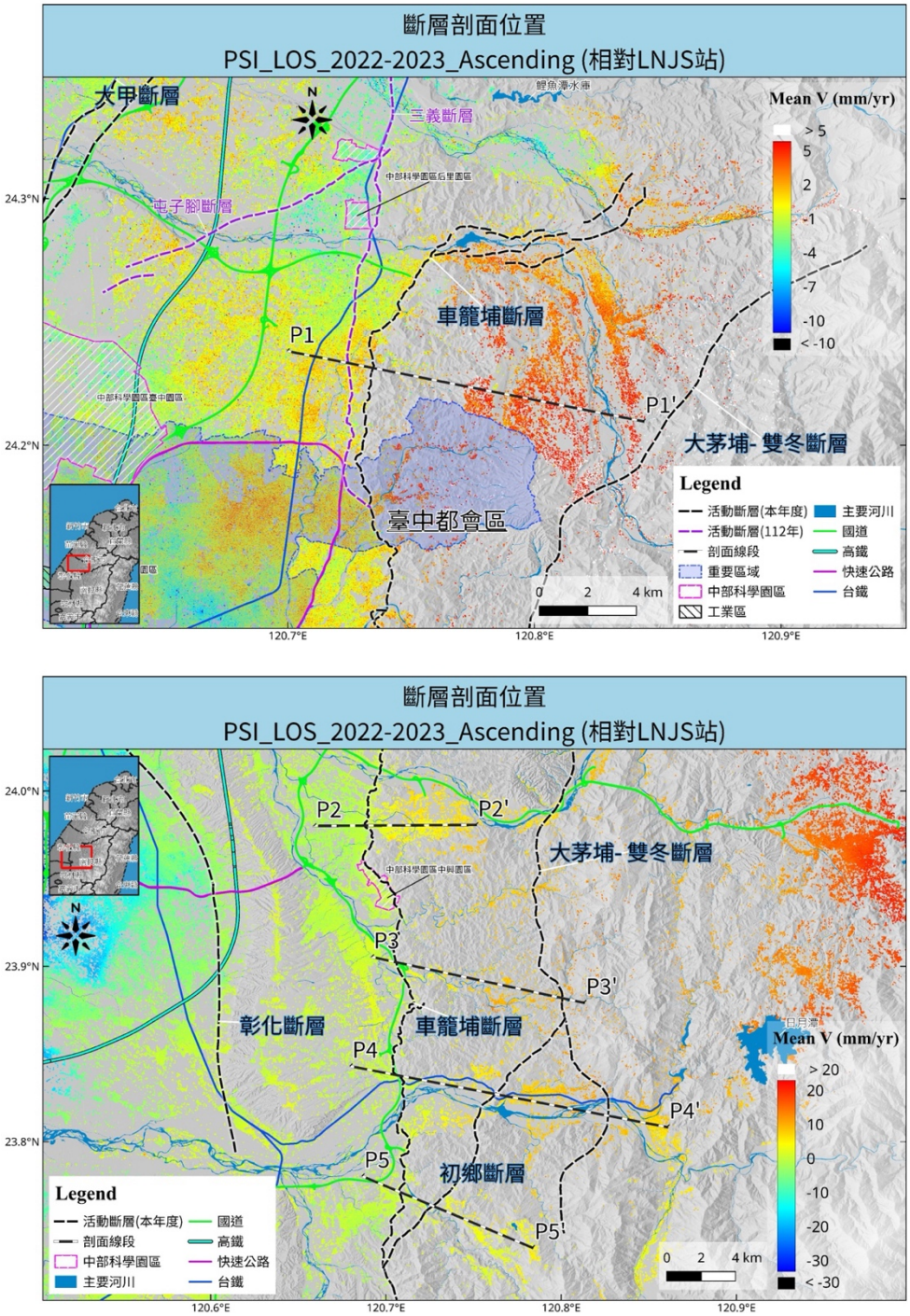


圖 C-5：2022-2023 升軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。上圖為 P1 剖面，下圖為 P2 至 P5 剖面。

Figure C-5：Average LOS velocity fields between 2022 and 2023 processed with images of ascending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

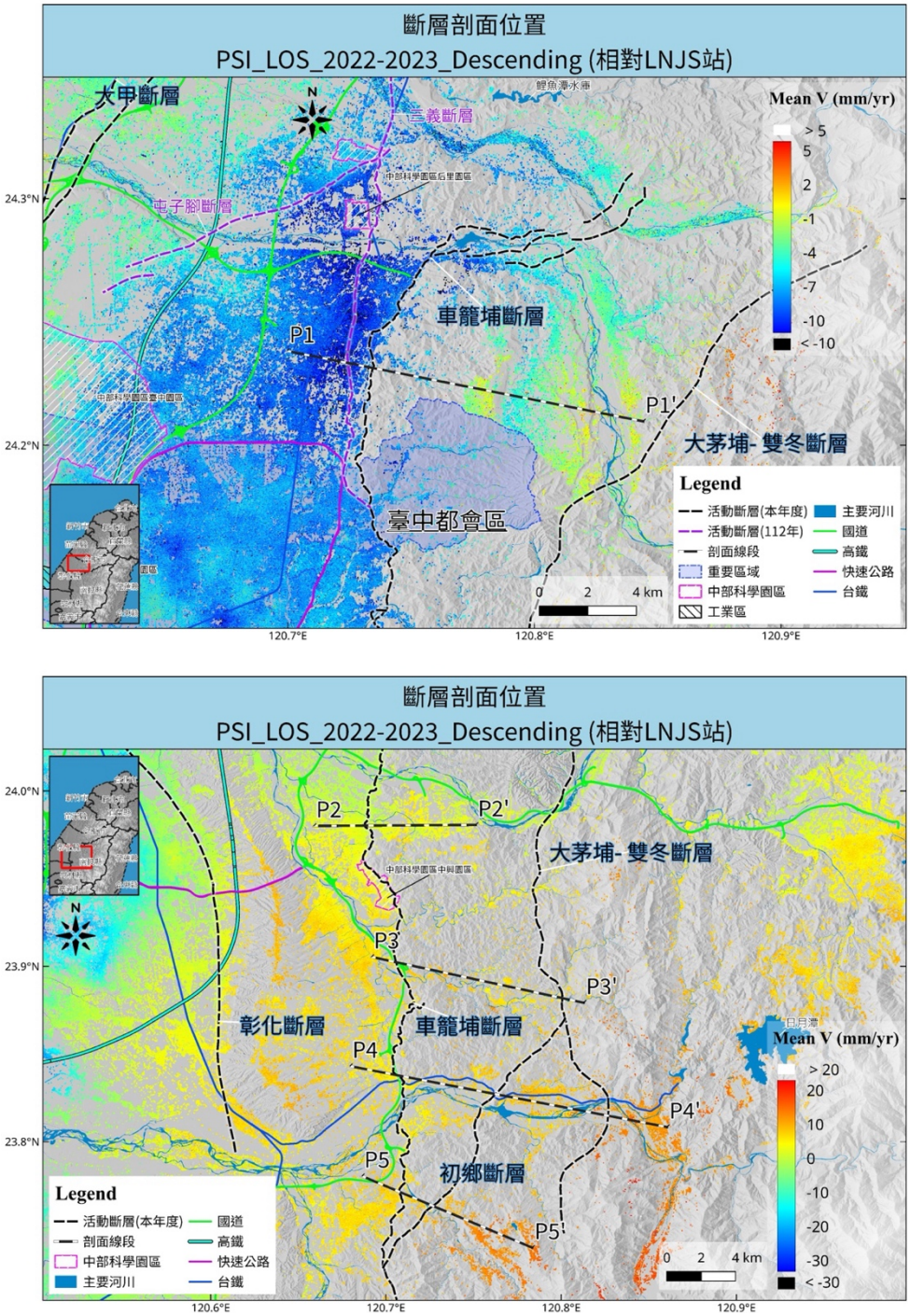


圖 C-6：2022-2023 降軌道方向 LOS 平均速度場與 P1-P5 剖面位置圖。上圖為 P1 剖面，下圖為 P2 至 P5 剖面。

Figure C-6：Average LOS velocity fields between 2022 and 2023 processed with images of descending orbits and P1 – P5 profiles across the Faults. The upper figure shows the P1 profile, while the lower figure shows the profiles from P2 to P5.

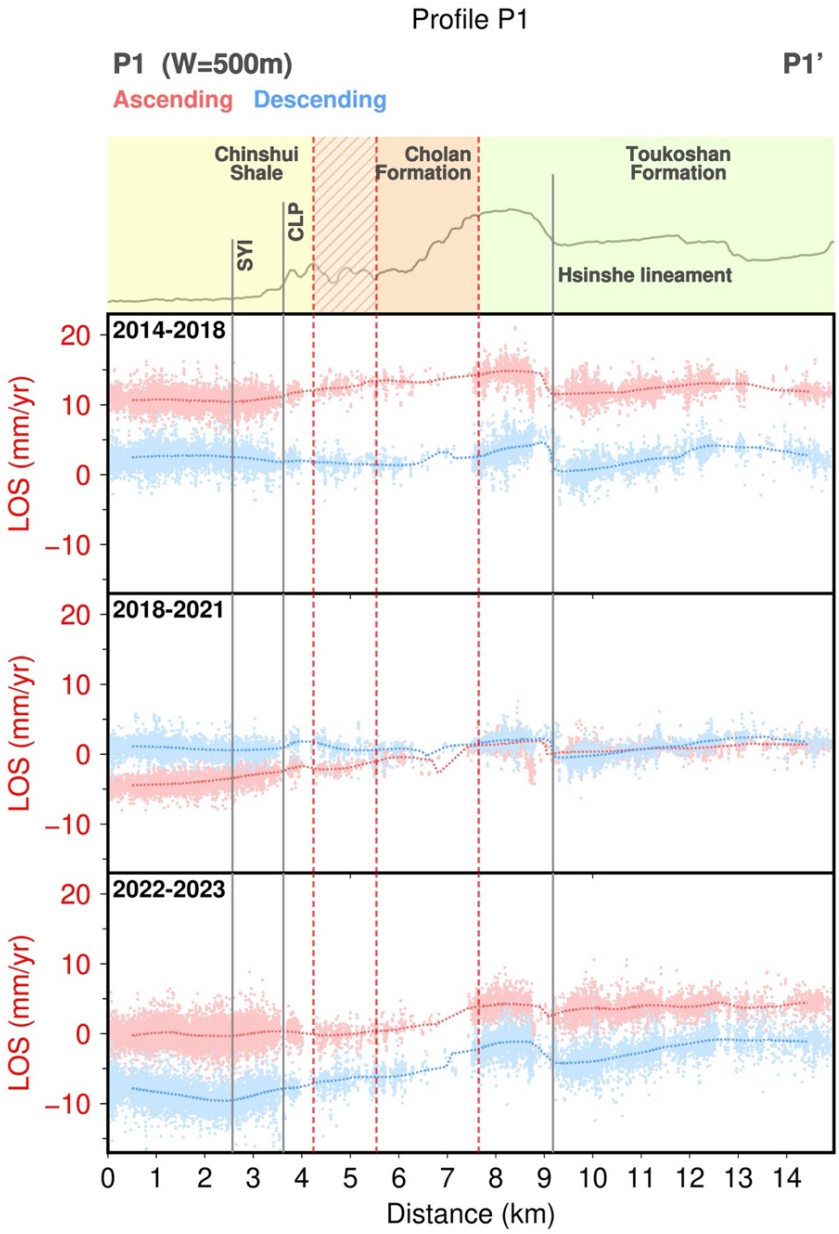


圖 C-7：各時期 P1 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色線為斷層位置分別為三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）以及新社線形（Hsinshe lineament）。

Figure C-7 : Result of profile P1 in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray lines are the fault location for Sanyi Fault (SYI), Chelungpu Fault (CLP) and Hsinshe lineament.

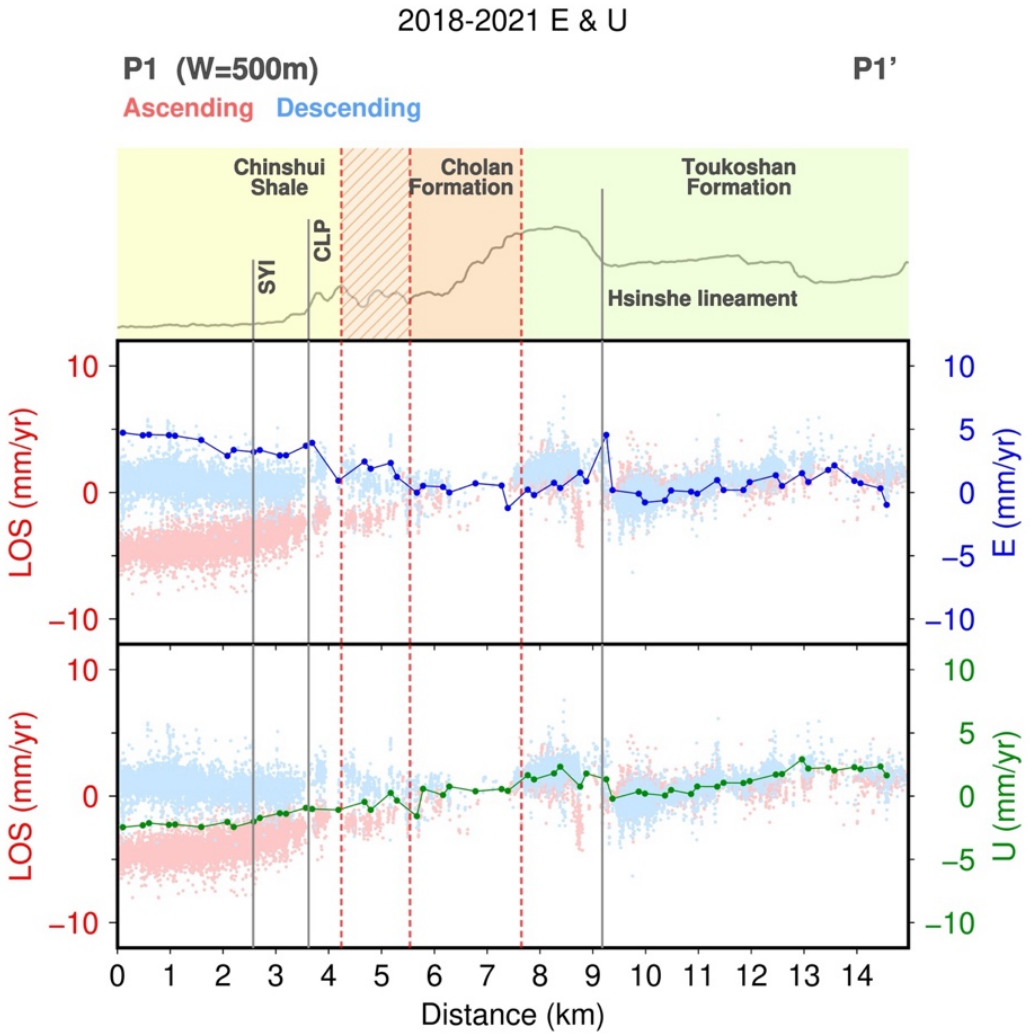


圖 C-8：2018-2021 年 P1 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色線為斷層位置分別為三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）以及新社線形（Hsinshe lineament）。

Figure C-8 : Results of profile P1 from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom: topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray lines are the fault location for Sanyi Fault (SYI), Chelungpu Fault (CLP) and Hsinshe lineament.

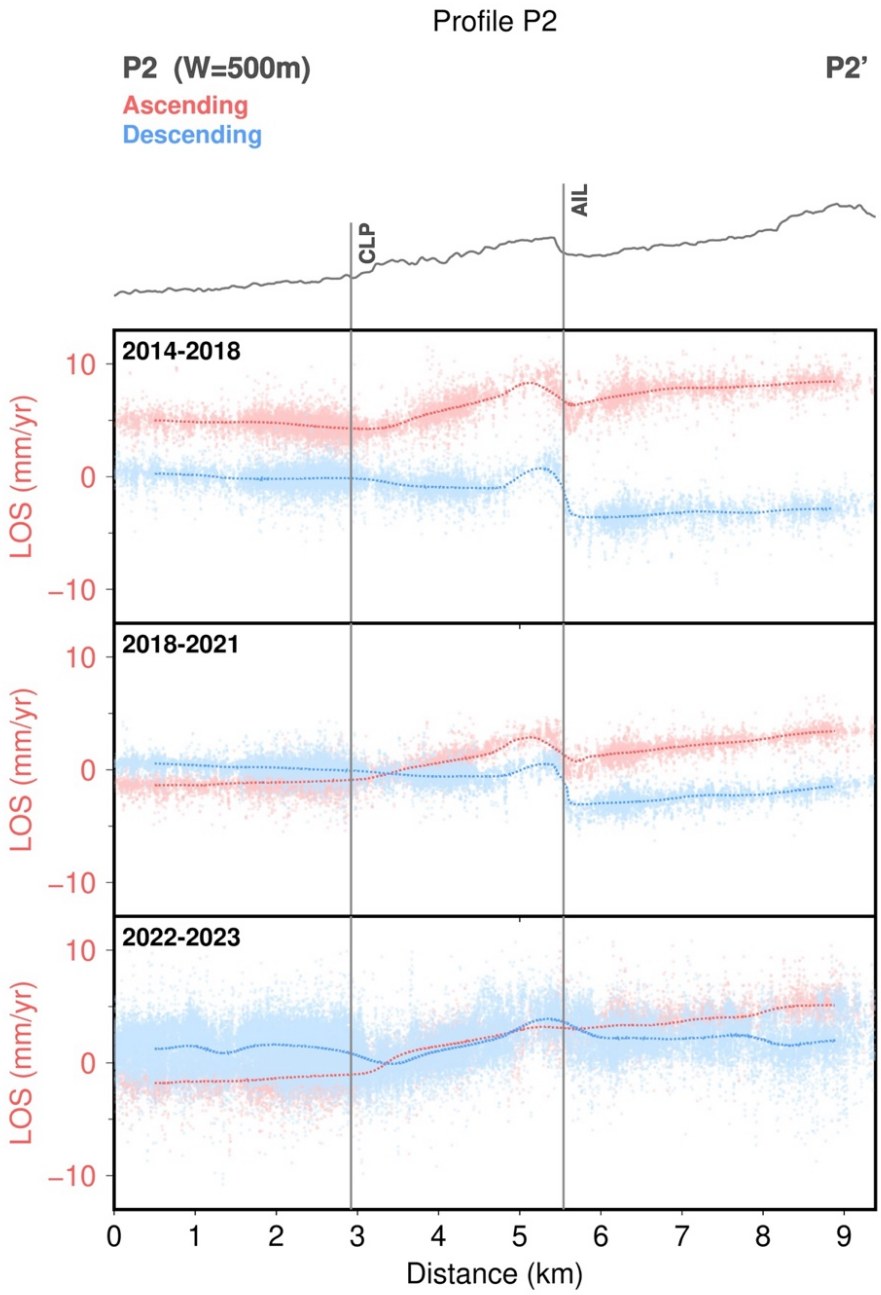


圖 C-9：各時期 P2 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）以及隘寮斷層（AIL）。

Figure C-9 : Result of profile P2 in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP) and Ailiao Fault (AIL).

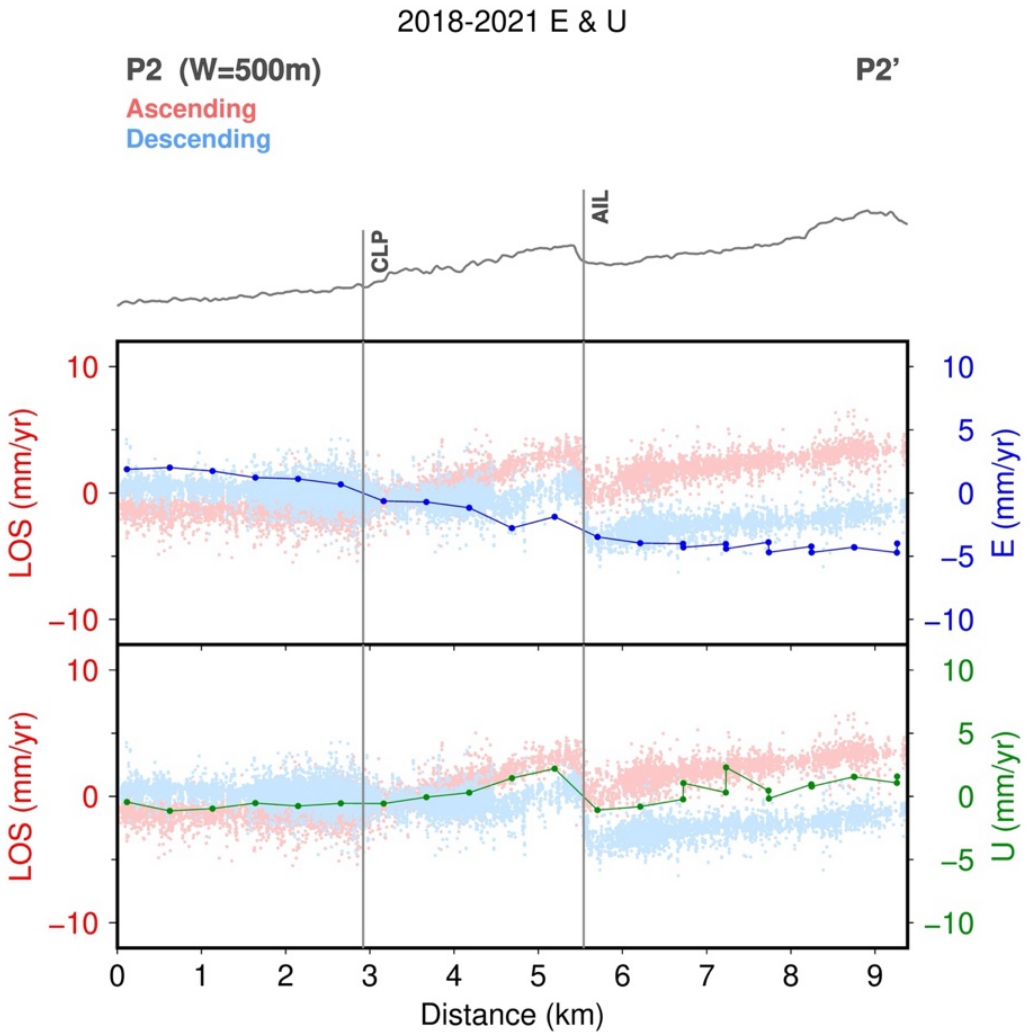


圖 C-10：2018-2021 年 P2 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）以及隘寮斷層（AIL）。

Figure C-10 : Results of profile P2 from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom: topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP) and Ailiao Fault (AIL).

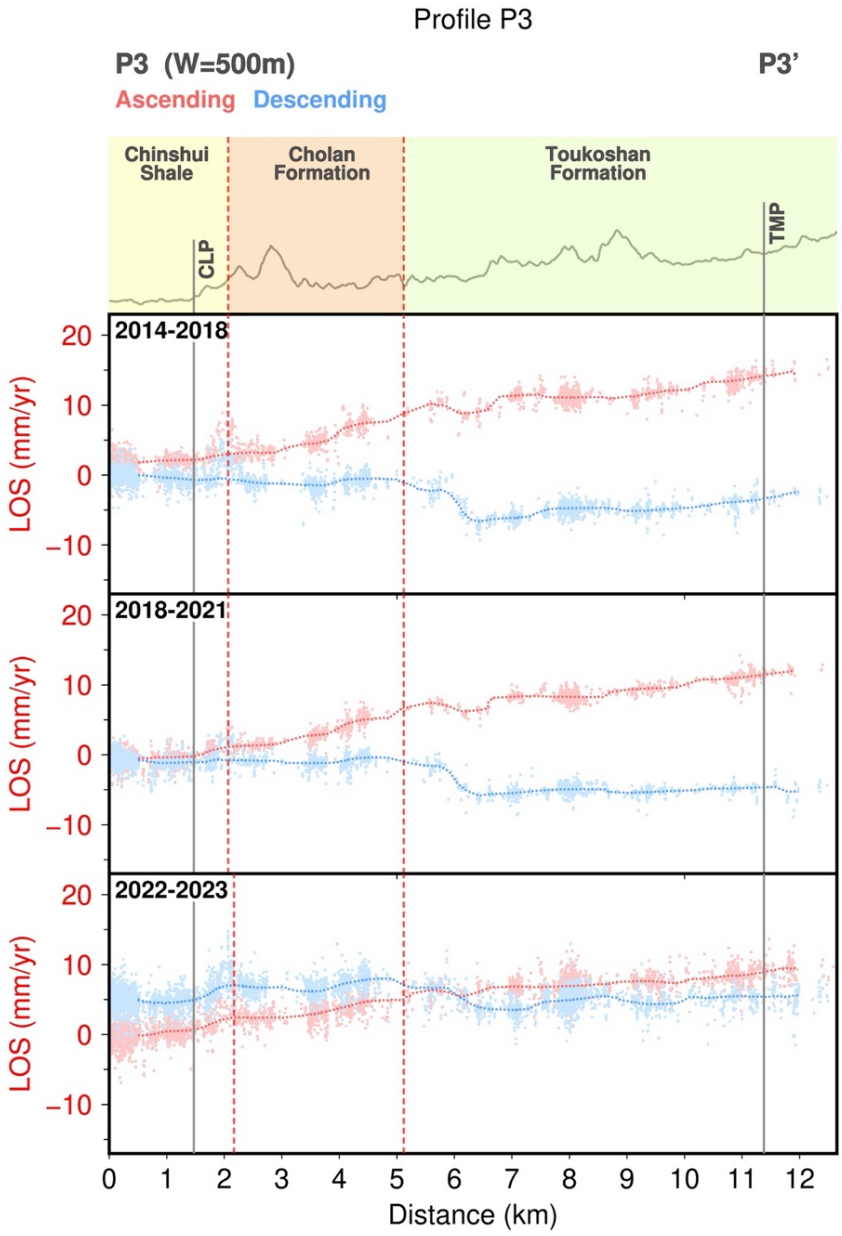


圖 C-11：各時期 P3 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔-雙冬斷層（TMP）。

Figure C-11 : Result of profile P3 in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

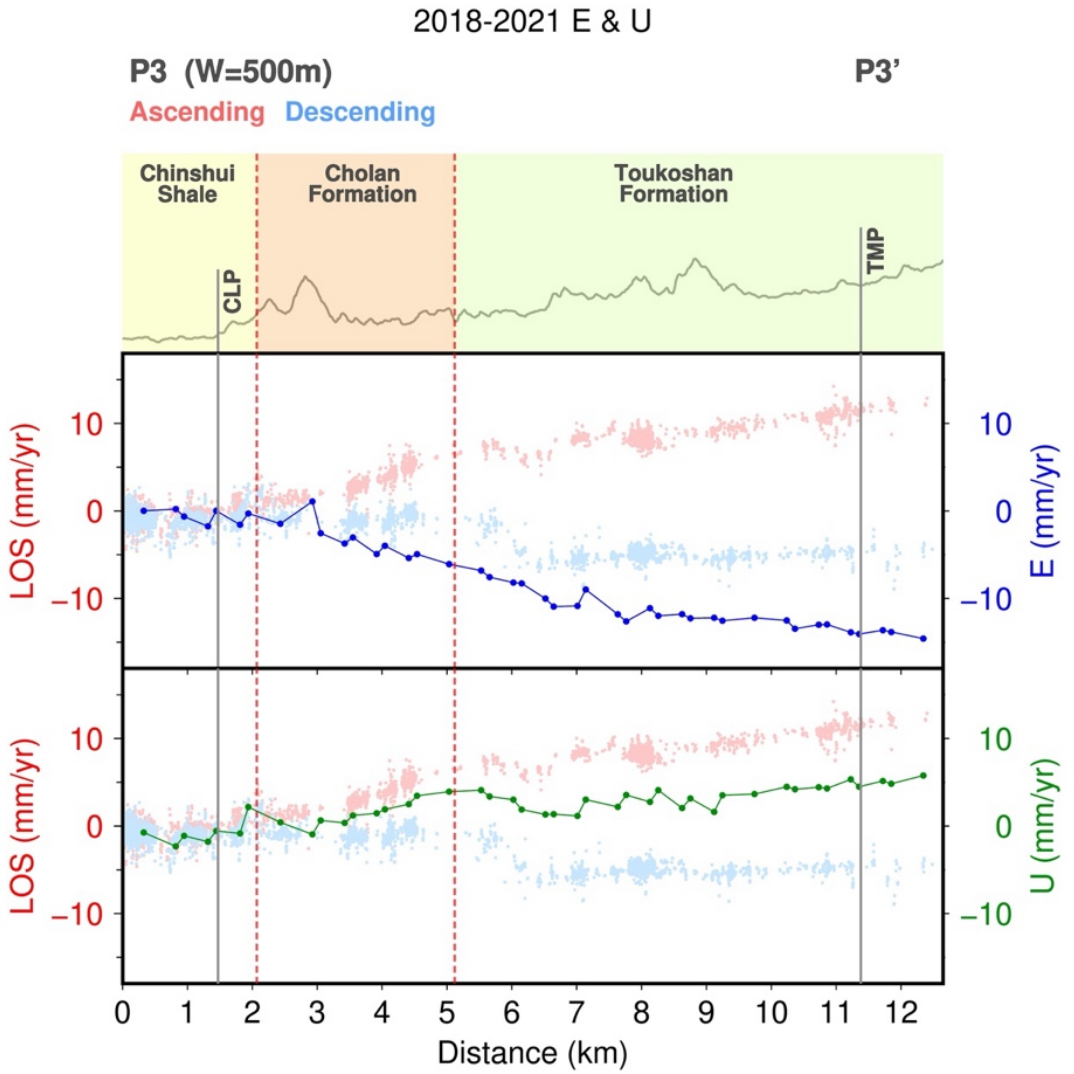


圖 C-12：2018-2021 年 P3 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色線為斷層位置分別為三義斷層（SYI）、車籠埔斷層（CLP）以及大茅埔-雙冬斷層（TMP）。

Figure C-12 : Results of profile P3 from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom: topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

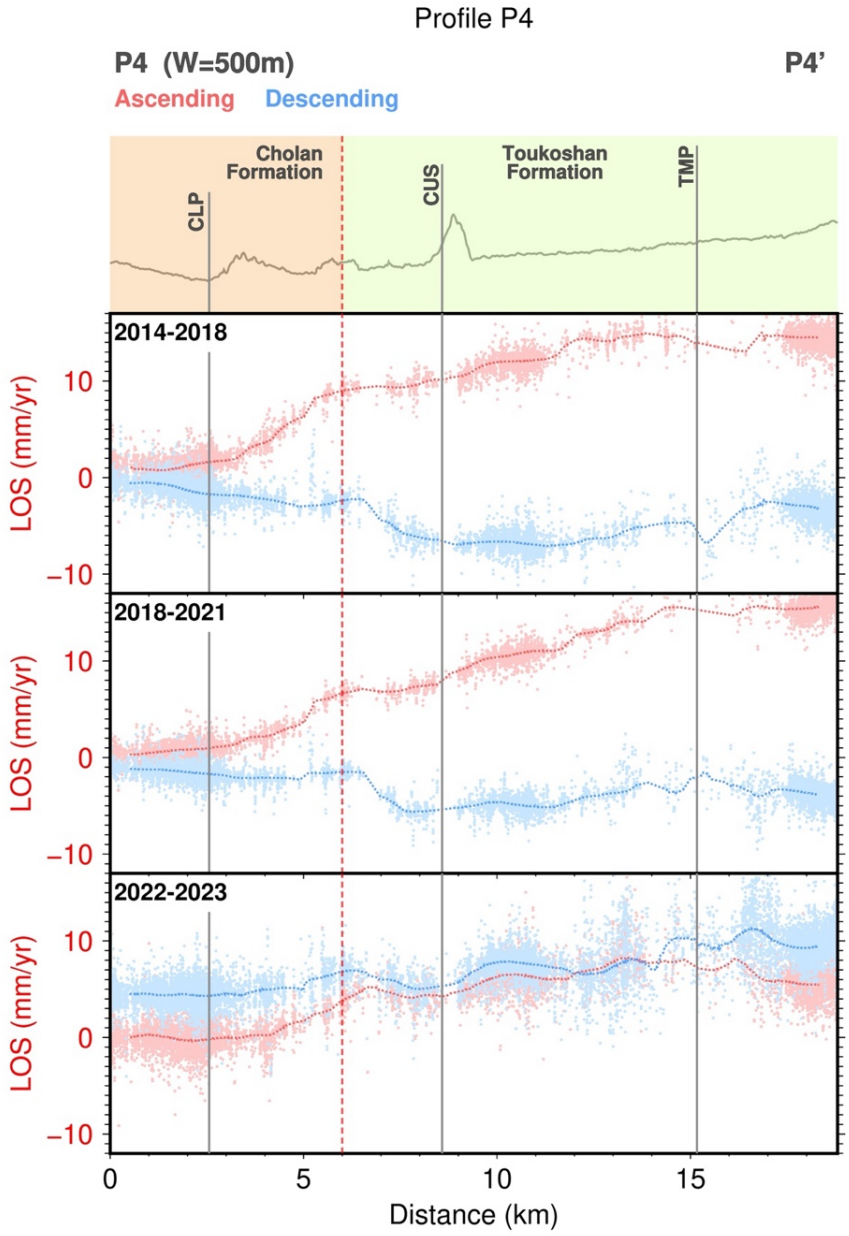


圖 C-13：各時期 P4 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及大茅埔-雙冬斷層（TMP）。

Figure C-13 : Result of profile P1 in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

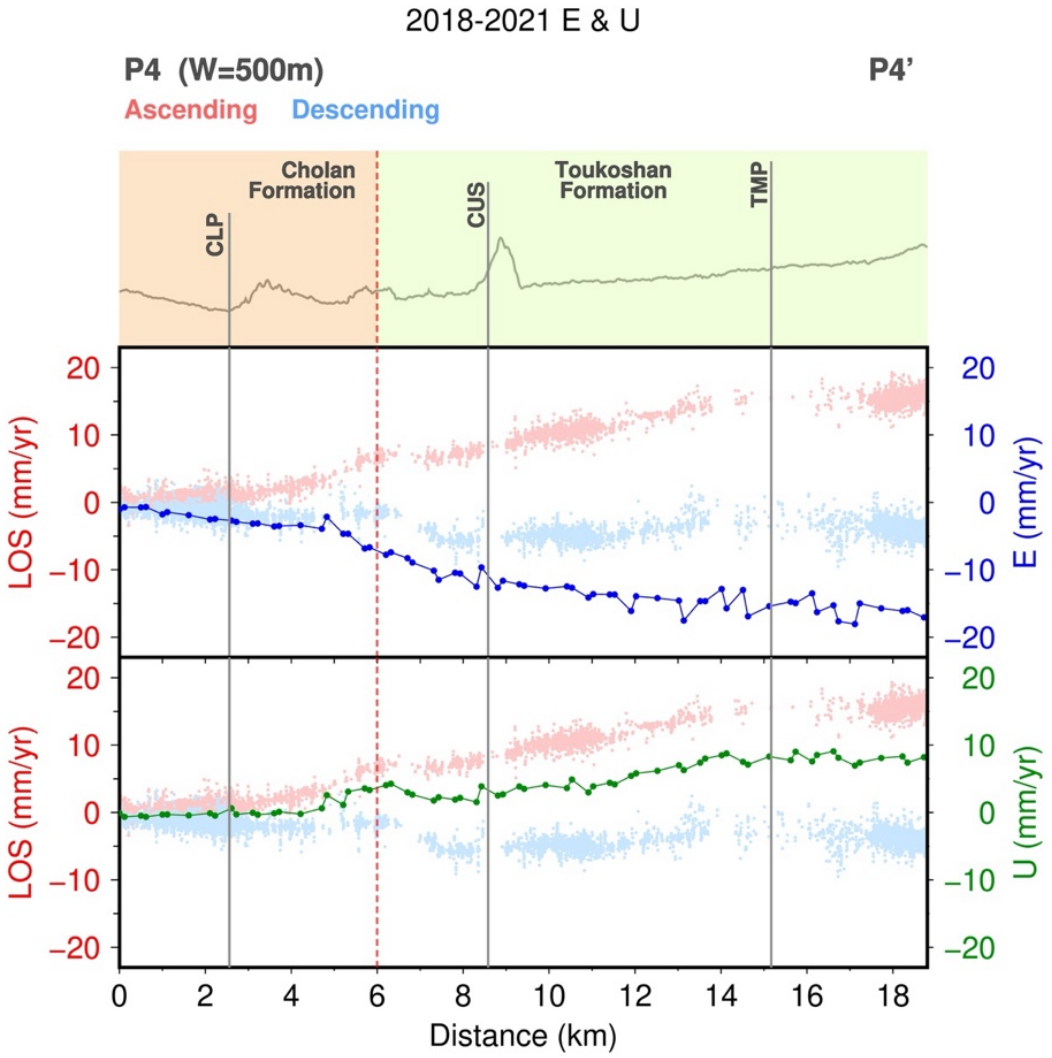


圖 C-14：2018-2021 年 P4 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及大茅埔-雙冬斷層（TMP）。

Figure C-14 : Results of profile P4 from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom: topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS) and Tamaopu-Shuangtung Fault (TMP).

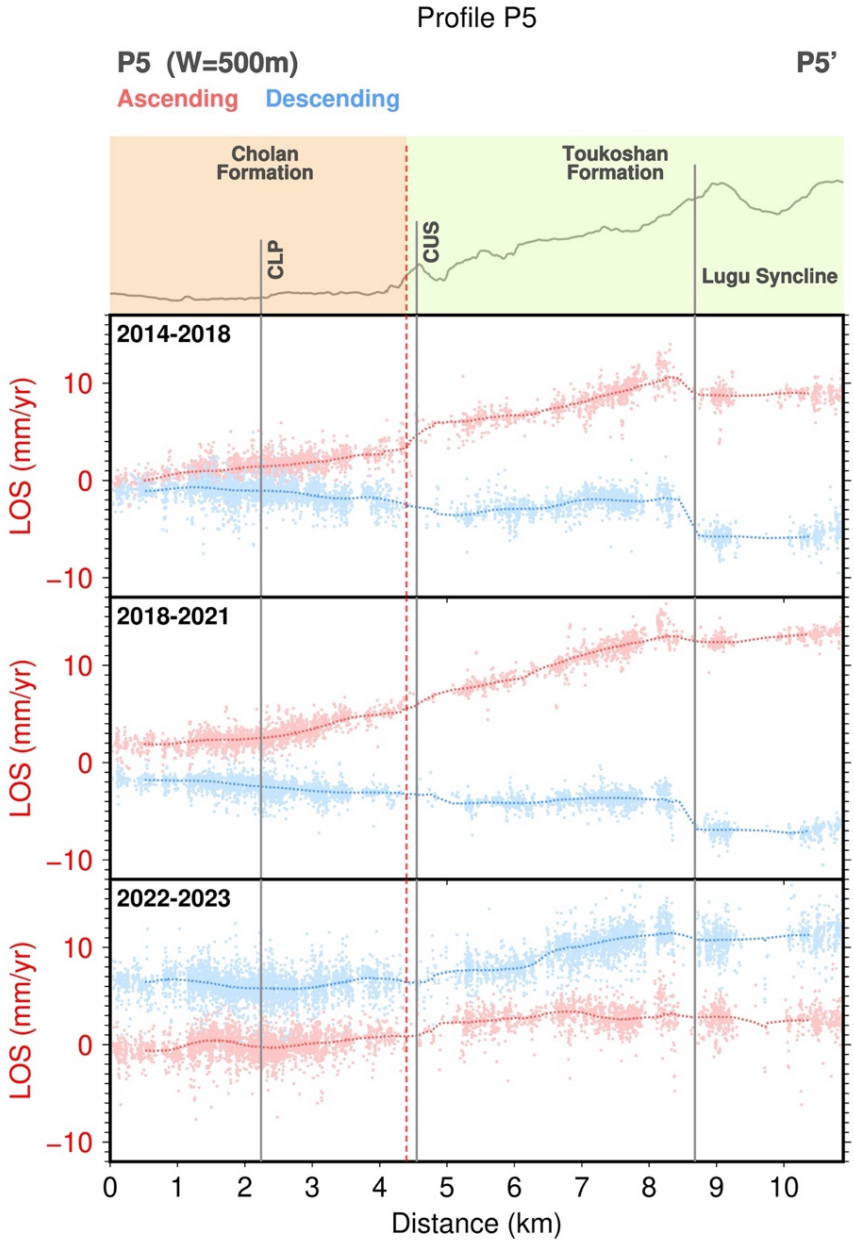


圖 C-15：各時期 P5 剖面成果。由上而下為地形，2014-2018 年成果，2018-2021 年成果，2022-2023 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，灰色線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及鹿谷向斜（Lugu Syncline）。

Figure C-15 : Result of profile P5 in different periods. From top to bottom are terrain, 2014-2018 period, 2018-2021 period and 2022-2023 period. The red dots and red dashed line are the PSI velocity and the average line in ascending orbit, the blue dots and blue dashed line are the PSI velocity and the average line in descending orbit, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS) and Lugu Syncline.

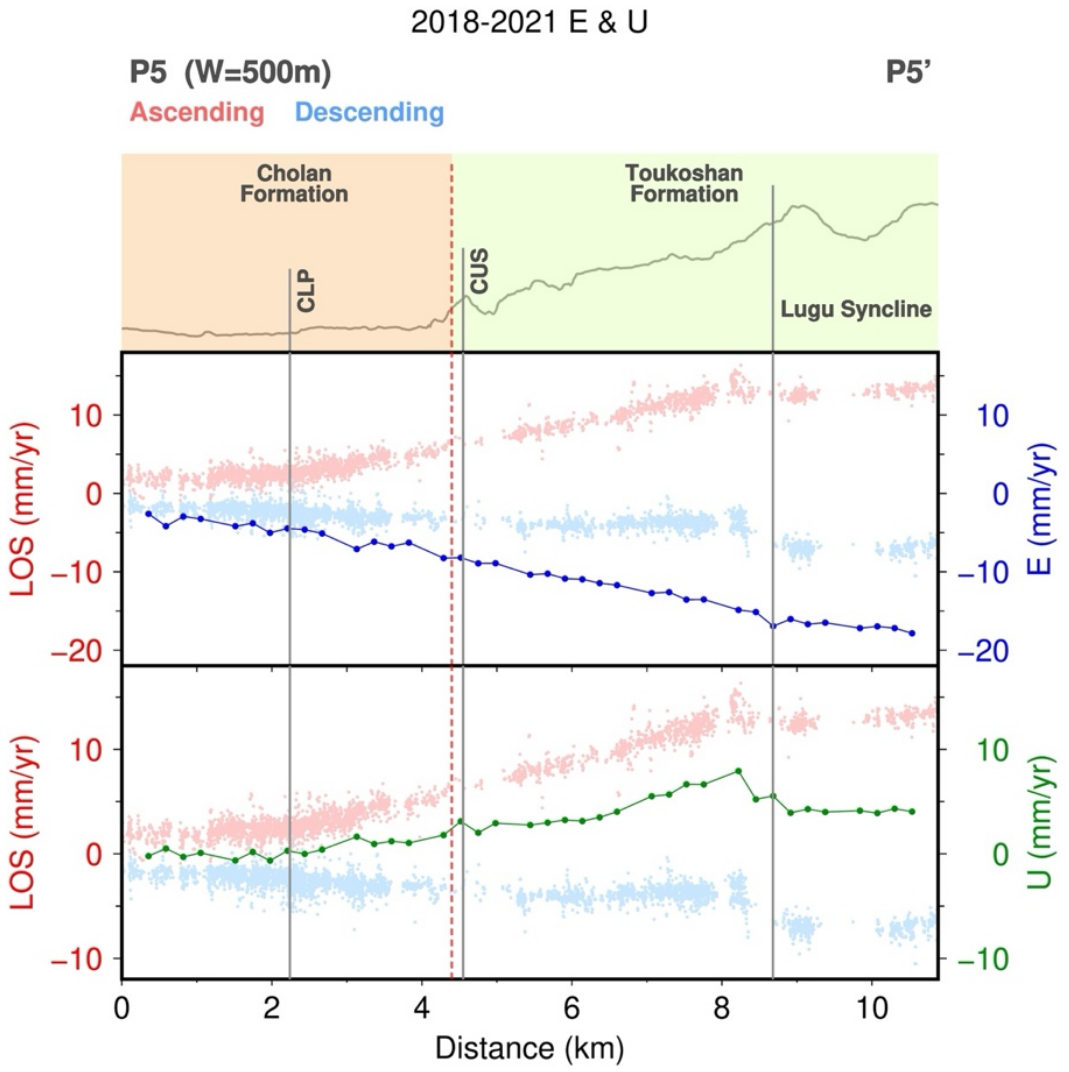


圖 C-16：2018-2021 年 P5 剖面東西向與垂直向成果。由上而下為地形，東西向速度剖面成果，垂直向速度剖面成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍點與藍色線段為東西向速度，綠點與綠色線段為垂直向速度，灰色線為斷層位置分別為車籠埔斷層（CLP）、初鄉斷層（CUS）以及鹿谷向斜（Lugu Syncline）。

Figure C-16 : Results of profile P5 from 2018 to 2021 in the East-West and Vertical directions. From top to bottom: topography, east-west velocity profile results, and vertical velocity profile results. The red dots represent PSI LOS velocity in ascending orbit, while the blue dots represent PSI LOS velocity in descending orbit. The blue dots and blue lines are the east-west velocity, and the green dots and green lines are the vertical velocity, the gray lines are the fault location for Chelungpu Fault (CLP), Chuhsiang Fault (CUS) and Lugu Syncline.