計畫編號：B114035

經濟部地質調查及礦業管理中心

114 年度委託專業服務計畫執行期末成果報告

（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(3/3)」

（第三年度）

全程計畫：自 112 年 3 月至 114 年 12 月止

本年度計畫：自 114 年 5 月至 114 年 11 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 114 年 12 月

目錄

目錄 I
圖目錄 V
表目錄 XI
摘要 XV
Abstract XVI

第一章、緒論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2 計畫目的.....5
1-3 110-113 年度計畫成果概述.....6
1-4 計畫工作方法概述 20
1-4-1 合成孔徑雷達差分干涉（Interferometry 20
Synthetic Aperture Radar, InSAR） 20
1-4-2 多時序雷達差分干涉技術（Multi-Temporal InSAR） 21
1-4-3 解算垂直變形速率 24
1-4-4 資料比對.....24
1-4-5 計畫成果效益及其應用 26
1-5 本年度計畫概述 26
1-5-1 本年度研究區域背景簡介 26
1-5-1-1 米崙斷層.....27
1-5-1-2 嶺頂斷層.....31
1-5-1-3 瑞穗斷層.....35
1-5-1-4 奇美斷層.....38
1-5-1-5 玉里斷層.....40
1-5-1-6 池上斷層.....44
1-5-1-7 鹿野斷層.....51

1-5-1-8 利吉斷層.....54
1-5-2 本年度工作項目.....58
1-5-3 本年度期末計畫交付項目.....58

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 垂直速度場解析.....71

第三章、東部地區雷達影像分析 75
3-1 StaMPS 參數測試與律定.....76
3-2 2022~2024 年雷達影像成果.....80
3-2-1 2022~2024 平均速度場.....80
3-2-2 2022~2022.09.17 平均速度場.....84
3-2-3 2022.09.19-2024 平均速度場.....87
3-3 重點區域時間序列分析.....90

第四章、討論 103
4-1 2022~2024 年 GNSS 與 PSI 資料比對.....103
4-1-1 2022~2024 年比對結果.....106
4-1-2 2022~2022.09.17 比對結果.....118
4-1-3 2022.09.19~2024 比對結果.....124
4-1-4 2022~2024 GNSS 連續站及移動站與 PSI 資料比對.....130
4-2 跨斷層的速度場剖面分析.....137

4-2-1 P1 剖面 139
4-2-2 P2 剖面 142
4-2-3 P3 剖面 147
4-2-4 P4 剖面 151
4-2-5 P5 剖面 155
4-2-6 P6 剖面 158
4-2-7 P7 剖面 162
4-2-8 P8 剖面 166
4-2-9 P9 剖面 170
4-2-10 P10 剖面 176
4-2-11 P11 剖面 182
4-2-12 跨斷層速度場剖面分析與構造活動討論 185
4-3 水準測量資料與雷達資料比對成果 187
4-3-1 嶺頂至龍澗測線 189
4-3-2 光復至豐濱測線 191
4-3-3 紅葉至靜浦測線 193
4-3-4 東成至富岡測線 195
4-4 同震變形 197
4-4-1 2022 年 03 月 23 日長濱地震 PSI 同震位移 197
4-4-2 2022 年 06 月 20 日光復地震 PSI 同震位移 201
4-4-3 2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震 PSI 同震位移 204
4-4-4 2024 年 04 月 03 日花蓮地震 PSI 同震位移 210
4-5 重要區域觀測結果 216
4-5-1 花蓮市地區 216
4-5-2 玉里鎮地區 217
4-5-3 臺東市地區 217

第五章、結論與建議 219

Chapter 5 : Conclusions and Recommendation 221
參考文獻 225
期末委員審查意見 241
(附錄請參閱電子檔)
附錄 A、亞洲水泥礦區雷達影像分析
附錄 B、2022 至 2024 年地震事件
附錄 C、GNSS 與 PSI 時間序列比對
附錄 D、P1~P11 剖面各時期成果

圖目錄

圖 1-1：目標區域。.....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。.....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 1-14：2018~2021 年車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層平均速度場與 P1 剖面位置圖。.....18
圖 1-15：2018~2021 年車籠埔斷層附近 P1 剖面速度場分析結果。.....19
圖 1-16：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。.....21
圖 1-17：冰島 Eyjafjallajökull 火山周圍的 PSI 時間序列地表變形量。.....24
圖 1-18：米崙斷層條帶地質圖。.....30
圖 1-19：嶺頂斷層條帶地質圖。.....33
圖 1-20：嶺頂斷層斷層跡位置圖。.....34
圖 1-21：瑞穗斷層條帶地質圖。.....37
圖 1-22：奇美斷層條帶地質圖。.....39
圖 1-23：玉里斷層條帶地質圖 (1/2)。.....42
圖 1-24：玉里斷層條帶地質圖 (2/2)。.....43
圖 1-25：池上斷層條帶地質圖 (1/5)。.....46

圖 1-26：池上斷層條帶地質圖 (2/5)。.....47
圖 1-27：車籠池上斷層條帶地質圖 (3/5)。.....48
圖 1-28：池上斷層條帶地質圖 (4/5)。.....49
圖 1-29：池上斷層條帶地質圖 (5/5)。.....50
圖 1-30：鹿野斷層條帶地質圖。.....53
圖 1-31：利吉斷層條帶地質圖 (1/2)。.....56
圖 1-32：利吉斷層條帶地質圖 (2/2)。.....57
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 2-3：永久散射體對相位的影響示意圖。.....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。.....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 3-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與本次研究區域分佈圖。.....77
圖 3-2：2014-2025 年 Sentinel-1 影像時間分布與觀測頻率圖。.....78
圖 3-3：2014–2025 年 Sentinel-1 臺灣各區域影像時間分布圖。.....79
圖 3-4：2022~2024 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。.....82
圖 3-5：2022~2024 降軌道影像 LOS 平均速度場。.....83
圖 3-6：2022~2022.09.17 升軌道影像 LOS 平均速度場。.....85
圖 3-7：2022~2022.09.17 降軌道影像 LOS 平均速度場。.....86
圖 3-8：2022.09.18~2024 年升軌道影像 LOS 平均速度場。.....88
圖 3-9：2022.09.18~2024 年降軌道影像 LOS 平均速度場。.....89
圖 3-10：重要地點與 GNSS 連續站分布圖。.....91
圖 3-11：2022~2024 年花蓮市區時間序列。.....92

圖 3-12：2022~2024 年 HUAL 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。.....93
圖 3-13：2022~2024 年瑞穗時間序列。.....94
圖 3-14：2022~2024 年 JMRS 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。.....95
圖 3-15：2022~2024 年玉里時間序列。.....96
圖 3-16：2022~2024 年 JULI 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。.....97
圖 3-17：2022~2024 年池上時間序列。.....98
圖 3-18：2022~2024 年 TAPE 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。.....99
圖 3-19：2022~2024 年臺東市時間序列。.....100
圖 3-20：2022~2024 年 TTUN 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。.....101
圖 4-1：GNSS 測站位置分佈圖。.....105
圖 4-2：2022-2024 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....110
圖 4-3：2022-2024 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....111
圖 4-4：2022-2024 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....112
圖 4-5：2022-2024 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....113
圖 4-6：2022-2024 升軌道方向時間序列。.....114
圖 4-7：2022-2024 降軌道方向時間序列。.....115
圖 4-8：2022-2024 升軌道方向時間序列。.....116
圖 4-9：2022-2024 降軌道方向時間序列。.....117
圖 4-10：2022-2022.09.17 的 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。120
圖 4-11：2022-2022.09.17 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....121
圖 4-12：2022-2022.09.17 的 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....122
圖 4-13：2022-2022.09.17 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....123
圖 4-14：2022.09.19 - 2024 的 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....126
圖 4-15：2022.09.19 - 2024 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....127

圖 4-16：2022.09.19 - 2024 的 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....128
圖 4-17：2022.09.19 - 2024 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....129
圖 4-18：GNSS 移動站與連續站位置分佈圖。.....132
圖 4-19：2022.09.19 - 2024 的 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....133
圖 4-20：2022.09.19 - 2024 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....134
圖 4-21：2022.09.19 - 2024 的 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。.....135
圖 4-22：2022.09.19 - 2024 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。.....136
圖 4-23：斷層剖面分布圖。.....138
圖 4-24：P1 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....140
圖 4-25：P1 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。.....141
圖 4-26：P2 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....144
圖 4-27：P2 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。.....145
圖 4-28：P2 剖面成果與前人文獻比較圖。.....146
圖 4-29：P3 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....148
圖 4-30：P3 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....149
圖 4-31：P3 剖面成果。.....150
圖 4-32：P4 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....152
圖 4-33：P4 剖面成果。.....153
圖 4-34：P4 剖面成果與前人文獻比較圖。.....154
圖 4-35：P5 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....156
圖 4-36：P5 剖面成果。.....157
圖 4-37：P6 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....159

圖 4-38：P6 剖面成果。.....160
圖 4-39：P6 剖面成果與前人文獻比較圖。.....161
圖 4-40：P7 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....163
圖 4-41：P7 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....164
圖 4-42：P7 剖面成果。.....165
圖 4-43：P8 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....167
圖 4-44：P8 剖面成果。.....168
圖 4-45：P8 剖面成果與前人文獻比較圖。.....169
圖 4-46：P9 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....172
圖 4-47：P9 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....173
圖 4-48：P9 剖面成果。.....174
圖 4-49：P9 剖面成果與前人文獻比較圖。.....175
圖 4-50：P10 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....177
圖 4-51：P10 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....178
圖 4-52：P10 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....179
圖 4-53：P10 剖面成果。.....180
圖 4-54：P10 剖面成果與前人文獻比較圖。.....181
圖 4-55：P11 面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。.....183
圖 4-56：P11 剖面成果。.....184
圖 4-57：水準測線分布。.....188
圖 4-58：水準測線 - 嶺頂至瀧澗測線與 PSI 資料比對。.....190
圖 4-59：水準測線 - 光復至豐濱測線與 PSI 資料比對。.....192
圖 4-60：水準測線 - 紅葉至靜浦測線與 PSI 資料比對。.....194
圖 4-61：水準測線 - 東成至富岡測線與 PSI 資料比對。.....196
圖 4-62：2022 年 3 月 23 日長濱地震升軌道 PSI 之同震變形。.....199
圖 4-63：2022 年 3 月 23 日長濱地震升軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。.....200
圖 4-64：2022 年 06 月 20 日光復地震升軌道 PSI 之同震變形。.....202

圖 4-65：2022 年 6 月 20 日光復地震升軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。.....203
圖 4-66：2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震升軌道 PSI 之同震變形。.....206
圖 4-67：2022 年 9 月 17~18 日關山 - 池上地震升軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。.....207
圖 4-68：2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震降軌道 PSI 之同震變形。.....208
圖 4-69：2022 年 9 月 17~18 日關山 - 池上地震降軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。.....209
圖 4-70：2024 年 04 月 03 日花蓮地震升軌道 PSI 之同震變形。.....212
圖 4-71：2024 年 4 月 3 日花蓮地震升軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。.....213
圖 4-72：2024 年 04 月 03 日花蓮地震降軌道 PSI 之同震變形。.....214
圖 4-73：2024 年 4 月 3 日花蓮地震降軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。.....215

表目錄

表 1-1：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。.....23
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。.....75
表 4-1：各時期 PSI 與 GNSS 比對成果。.....104
表 4-2：2022~2024 年 PSI 與 GNSS 比對成果。.....109
表 4-3：2022 年 PSI 與 GNSS 比對成果。.....119
表 4-4：2023~2024 年 PSI 與 GNSS 比對成果。.....125
表 4-5：2022~2024GNSS 連續站及移動站與 PSI 資料比對。.....131

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(3/3)													
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
2022~2024 視衛星方向地殼變動分析													
2022~2024 跨斷層地表變形分析													
跨斷層時間序列分析													
110~114 年成果總報告書													
110~114 年全臺總成果圖資													
110-114 年全臺持久性散射體的合成孔徑雷達差分干涉圖													
期末簡報會議與成果報告撰寫													
預定進度（累積數）	10	20	40	50	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	5 月 14 日	工作計畫書修正與契約書簽訂
2	期末報告繳交	12 月 01 日	已繳交
3	期末審查會議	12 月 09 日	已完成
4	驗收	12 月 31 日	未完成

表 C：期末交付之各項工作項目。

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

工作項目	章節
1. 2022~2024 視衛星方向地殼變動分析。	3-2
2. 2022~2024 跨斷層地表變形分析。	4-2
3. 跨斷層時間序列分析。	3-3

摘要

本計畫利用雷達差分干涉方法，針對 2022 至 2024 年間的東部地區進行地表變形調查，並針對主要活動斷層周邊的形變行為進行分析，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、利吉斷層等八條斷層。觀測期間共發生五起規模六以上的地震，包括長濱地震、光復地震、關山 - 池上地震及花蓮地震，對區域地表變形造成明顯影響。由於東部地區狹長且地震影響具區域性，本計畫以 2022 年 9 月的關山 - 池上地震為分界，將衛星影像區分為「2022~2024 全期」、「2022 年關山 - 池上地震前」與「關山 - 池上地震後至 2024 年」三個時段，分別進行升、降軌的時序解算。本年度共完成升軌 91 幅與降軌 80 幅影像的資料前處理、配對、解相位與速度場解算。

本計畫亦以同期 GNSS 連續站與移動站資料進行比對，以檢核解算品質。結果顯示關山 - 池上地震後的資料品質最佳，回歸斜率接近 1、R^2 約 0.9、RMSE 多在 3 cm/yr 以內；相較之下，2022 年資料因受多次地震及降軌缺影響，品質較低。東部地區因地形與植被限制，PS 點密度相對不足，也影響整體解算精度。

速度場整體呈現由北至南四個主要變形區段。花蓮市因 2024 花蓮地震出現明顯抬升，但米崙及嶺頂斷層兩側並無顯著速度差。光復地區在嶺頂斷層西側呈現速度高區，與 0620 光復地震的同震變形一致。玉里至關山一帶的瑞穗、玉里與池上斷層則反映 0917~18 地震造成的跨斷層速度梯度。臺東市周邊的鹿野與利吉斷層雖無明顯落差，但地震前後速度場呈現相反趨勢，顯示海岸山脈在震後有持續性相對下陷的傾向。

綜合三時段速度場、剖面分析與 GNSS 比對結果，顯示 2022~2024 年間東部地區地表變形受多次地震、構造活動與材料邊界共同影響，形變場呈現多事件、多構造交互作用，提供理解花東構造動力的重要觀測基礎。

關鍵詞：雷達差分干涉、GNSS、活動斷層、東部、地表變形

Abstract

This project applies interferometric synthetic aperture radar (InSAR) to investigate surface deformation in eastern Taiwan from 2022 to 2024. Deformation behavior near major active faults is analyzed, including the Milun, Linding, Ruisui, Chimei, Yuli, Chihshang, Luye, and Lichi faults. Five earthquakes with magnitudes exceeding six occurred during the study period—the Changbin, Guangfu, Guanshan-Chihshang, and Hualien earthquakes—which exerted significant impacts on regional surface deformation. Owing to the elongated geography of eastern Taiwan and the spatially localized nature of earthquake effects, the 2022 Guanshan-Chihshang earthquake is used as a temporal boundary to divide the satellite data into three intervals: the full period (2022–2024), the pre-Guanshan-Chihshang interval, and the post-Guanshan-Chihshang interval extending to the end of 2024. Time-series PSI analyses were performed separately for ascending and descending orbits. A total of 91 ascending and 80 descending images were processed, including preprocessing, image pairing, phase unwrapping, and velocity estimation.

Data quality was evaluated through comparison with collocated GNSS continuous and campaign-mode stations. The post-Guanshan-Chihshang interval shows the best agreement, with regression slopes near 1, R^2 values around 0.9, and RMSE mostly within 3 cm/yr. In contrast, the 2022 results exhibit lower quality due to multiple earthquake disturbances and missing descending-orbit acquisitions. The mountainous topography and vegetation of eastern Taiwan further limit the spatial density of persistent scatterers, reducing overall PSI accuracy relative to other regions of Taiwan.

The velocity field reveals four major deformation zones from north to south. The Hualien urban area experienced significant uplift following the 2024 Hualien earthquake, although no clear

velocity contrast is observed across the Milun or Linding faults. In the Guangfu area, a high-velocity zone is observed west of the Linding Fault, consistent with coseismic deformation from the 20 June 2022 Guangfu earthquake. From Yuli to Guanshan, distinct cross-fault velocity gradients across the Ruisui, Yuli, and Chihshang faults reflect the 17–18 September 2022 earthquake sequence. Near Taitung City, the Luye and Lichi faults show no clear velocity contrast, but pre- and post-earthquake deformation trends are opposite, indicating sustained post-seismic subsidence of the Coastal Range relative to the Longitudinal Valley.

Integrating the three velocity-field intervals, cross-fault profile analyses, and GNSS comparisons, the results indicate that multiple earthquakes, active tectonics, and lithological boundaries jointly influenced surface deformation in eastern Taiwan between 2022 and 2024. The deformation field reflects a composite response involving interactions among multiple events and structures, providing essential observational evidence for understanding tectonic processes and seismic hazards in eastern Taiwan.

KEYWORDS：InSAR, GNSS, active fault, eastern Taiwan, surface deformation.

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（本年度，圖 1-2）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。

針對計畫的工作我們可以大致分成五個部分（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，由中正大學負責跨斷層地表變形分析，中央大學團隊在構造解析與現地比較，成功大學團隊負責雷達差分干涉計算程序開發與維護。團隊在過去三年已經建立良好的橫向溝通、分工，並且可以適當整合成果。

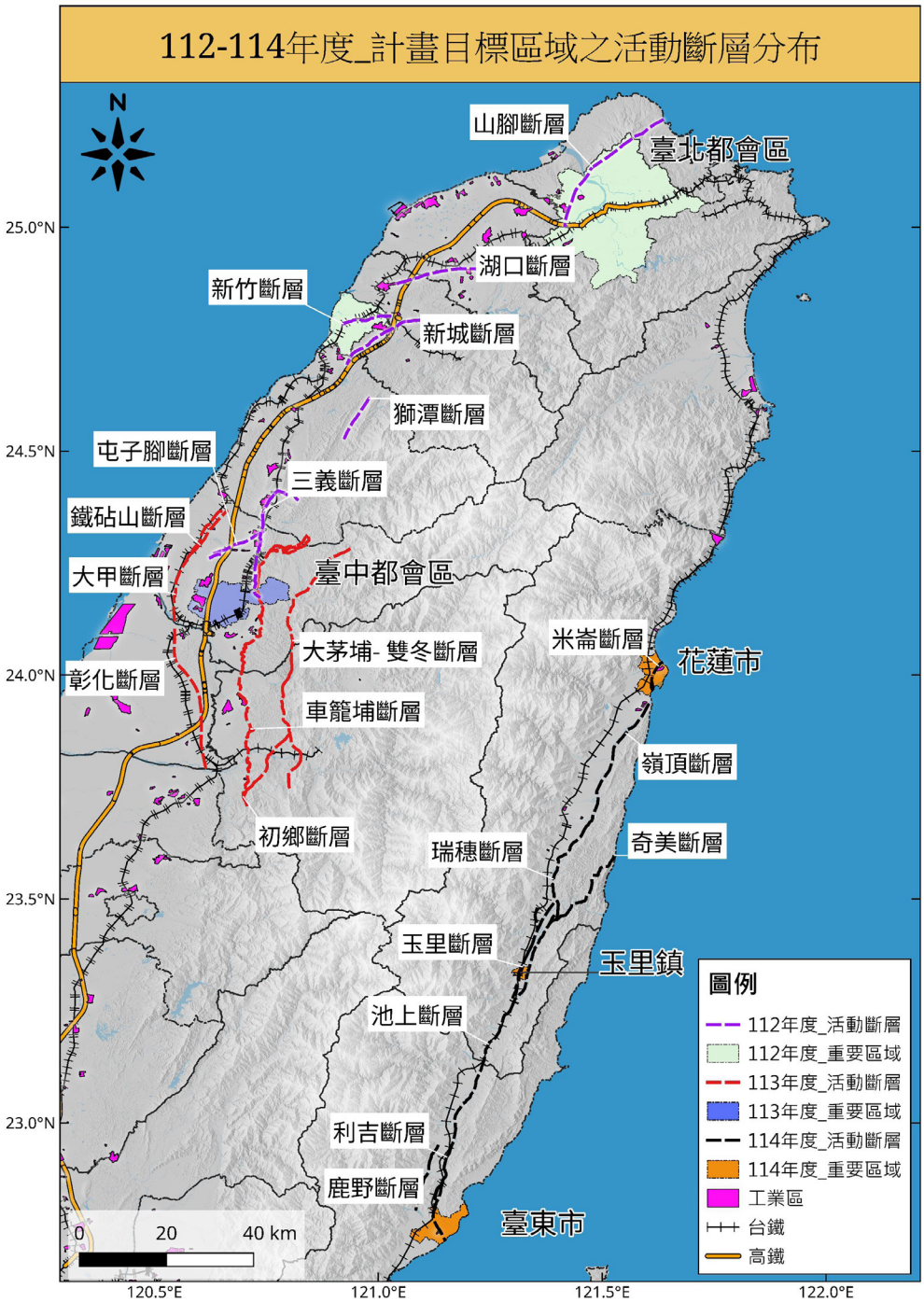


圖 1-1：目標區域。112 年度預計針對北部地區紫色標示之斷層以及綠色與紫色區塊標示之重要區域做觀測與分析；113 年度針對中部地區紅色標示之斷層以及藍色與紫色區塊標示之重要區域做觀測與分析；114 年度針對東部地區黑色標示之斷層以及橘色與紫色區塊標示重要區域做觀測與分析。

Figure 1-1：Target area. In 2023, observations and analyses will focus on fault lines marked in purple and key areas marked in green and purple in northern Taiwan. In 2024, the focus shifts to central Taiwan, targeting fault lines marked in red and important areas marked in blue and purple. In 2025, efforts will concentrate on eastern Taiwan, with fault lines marked in black and key observation areas highlighted in orange and purple.

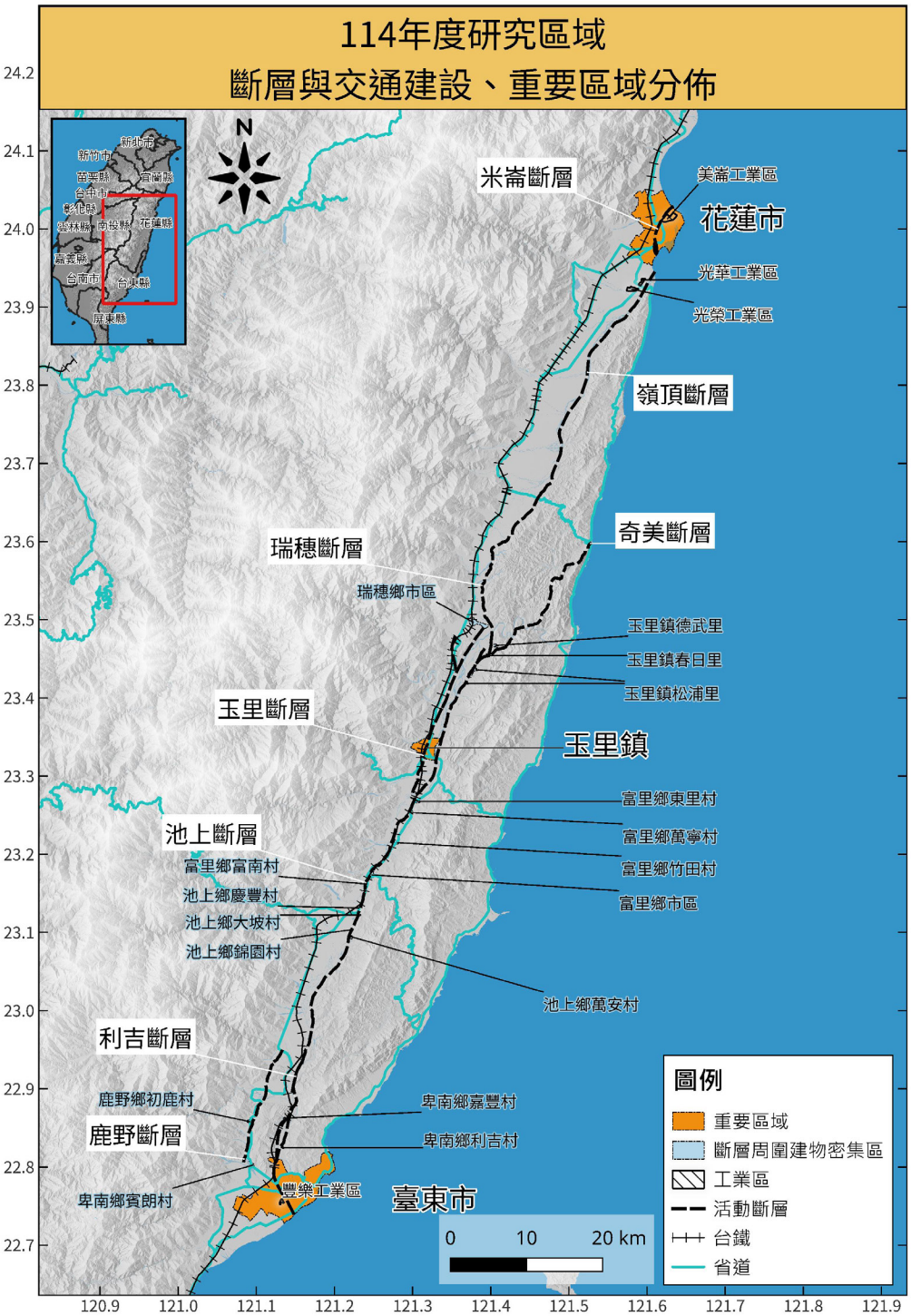


圖 1-2：研究區域中的道路與斷層分佈情形。黑色線段為研究區域內的活動斷層分佈位置（如圖 1-1）。橘色區塊為重要區域。青色線段為省道公路的路線。黑色線段為臺灣鐵路的行經路線。黑色區塊為工業區。藍色區塊為斷層周遭建物密集區。

Figure 1-2：Distribution of Roads and Faults in the Study Area. Black lines indicate the locations of active faults within the study area (see Figure 1-1). Orange areas represent key zones. Cyan lines show the routes of provincial highways. Black lines mark the routes of Taiwan Railways. Purple areas denote industrial zones. Blue areas highlight regions with dense building clusters near fault lines..

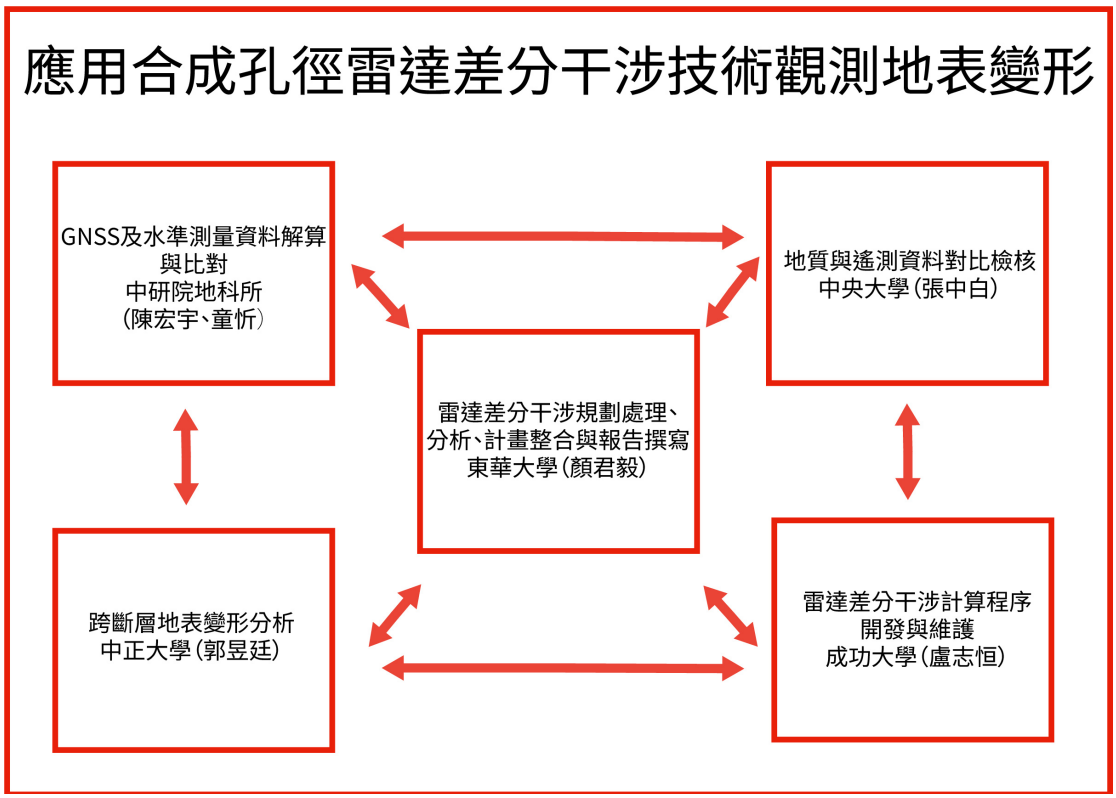


圖 1-3：工作團隊與主要工作項目。

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。

在本年度 (114 年) 計畫中預計使用雷達差分干涉方法調查位於觀測地區內的活動斷層，並且在處理完雷達資料後，配合經濟部地質調查及礦業管理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（3/3）計畫提供之 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. 針對研究區域的範圍，嘗試建立以衛星影像干涉分析結果之地表連續變形資訊圖資，並利用其他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。
2. 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）。
3. 了解東部地區幾次地震事件之斷層，其同震期與監震期的地表速度場變化情形。

1-3 110-113 年度計畫成果概述

1110~113 年度我們分別進行高屏地區、嘉南地區、北臺灣地區以及臺灣中部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 年度平均速度場成果顯示 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 10 mm/yr（圖 1-7），小崗山斷層兩側顯示約有 5~7 mm/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 5~10 mm/yr（圖 1-11）。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 7~12 mm/yr 的速度落差（圖 1-13）。113 年度平均速度場成果顯示 2018~2021 年車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層間有速度變化，跨斷層的速度剖面顯示約有 5~7 mm/yr 的速度落差，已公告的活動斷層兩側的速度變化不明顯，但在岩性邊界有速度變化，新社線形處約有 3~4 mm/yr 的 LOS 速度落差（圖 1-14, 圖 1-15）。

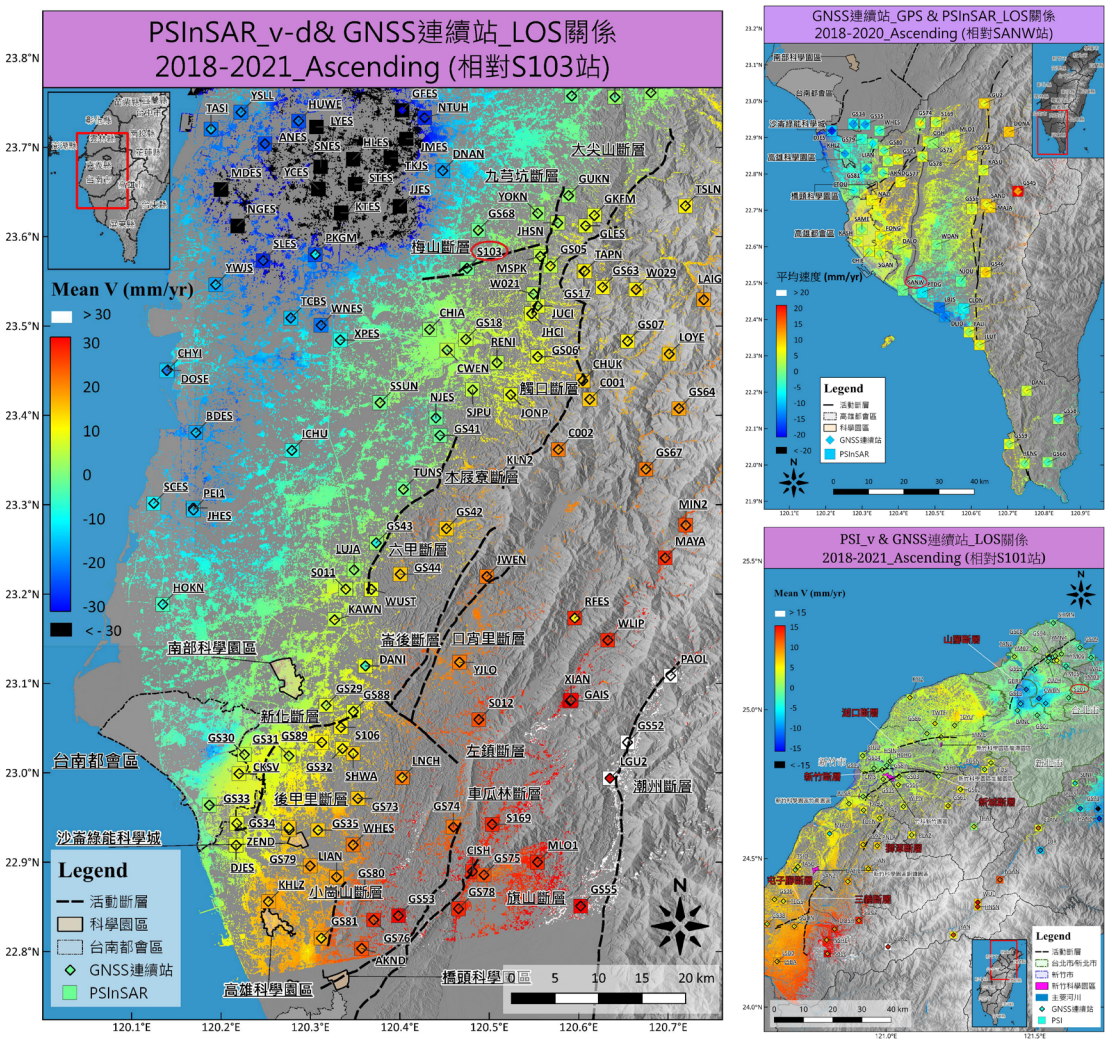


圖 1-4：110 年至 112 年 PSI 與 GNSS 雷達視衛星方向速率圖。(A) 2018-2021 年嘉義臺南地區升軌道方向成果。 (B) 2018-2020 年高雄屏東地區升軌道方向成果。 (C) 2018-2021 年北臺灣地區升軌道方向成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

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.

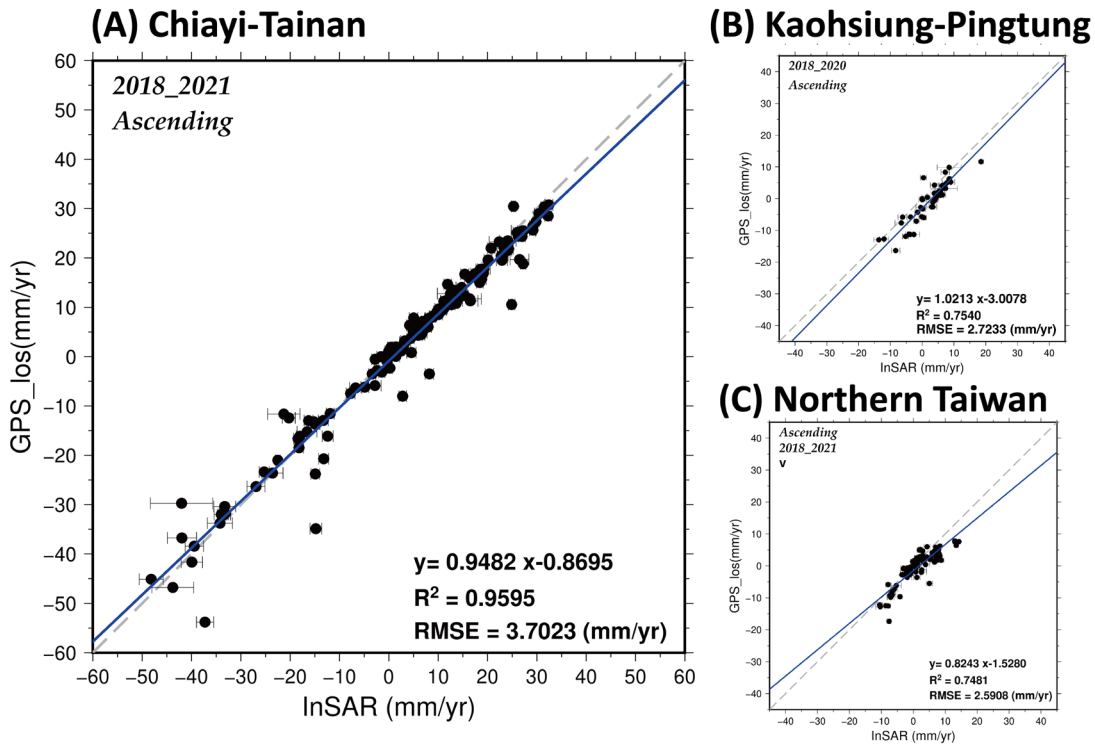


圖 1-5：110 年至 112 年 PSI 與 GNSS 連續站速度場對比。(A) 2018-2021 年嘉義臺南地區升軌道方向成果。(B) 2018-2020 年高雄屏東地區升軌道方向成果。(C) 2018-2021 年北臺灣地區升軌道方向成果。X 軸為 PSI 平均速度值與其標準差，Y 軸為 GNSS 投影至 LOS 方向速度值，於 2018-2021(2020) 時期 PSI 與 GNSS 觀測相似。

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.

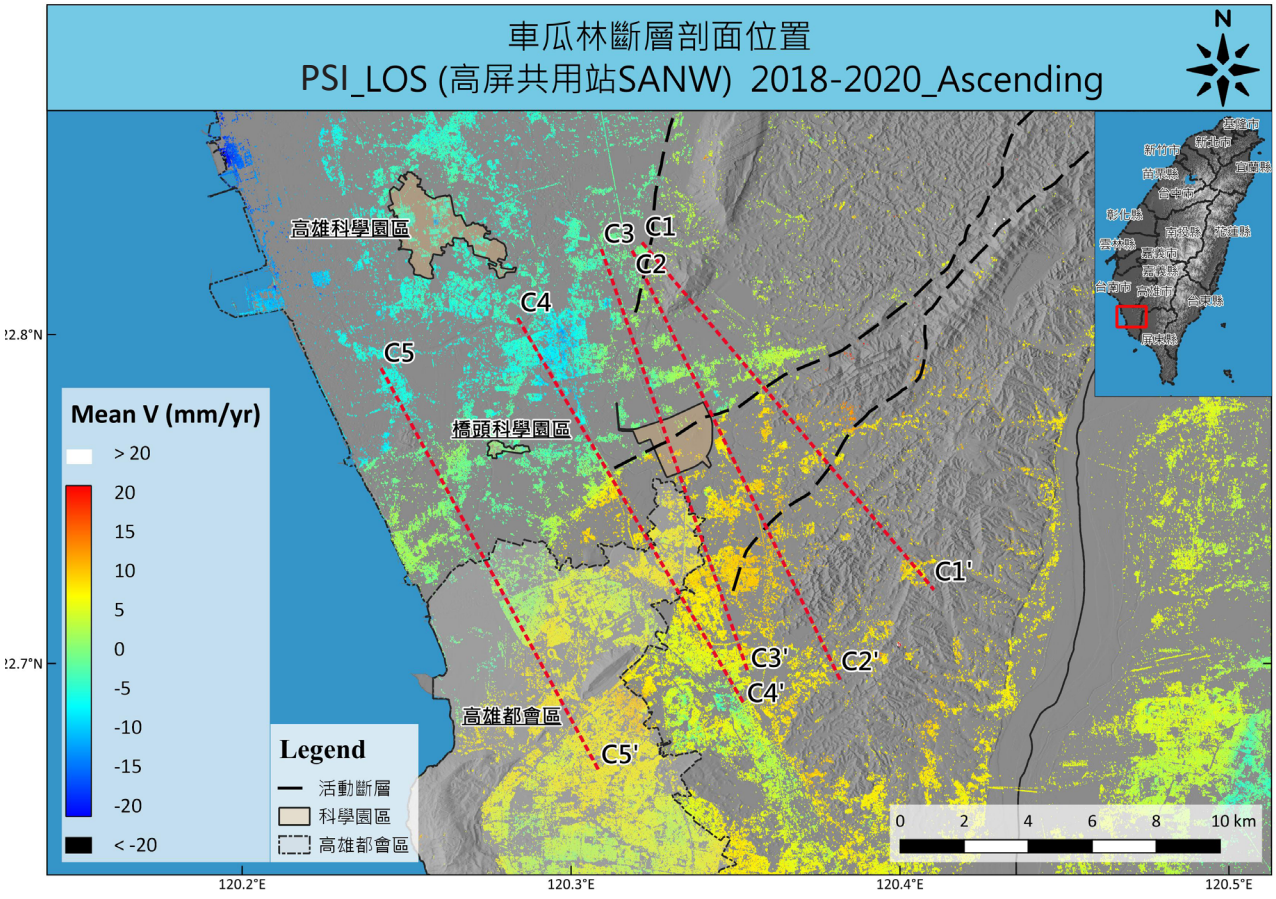


圖 1-6：2018-2020 年車瓜林斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

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.

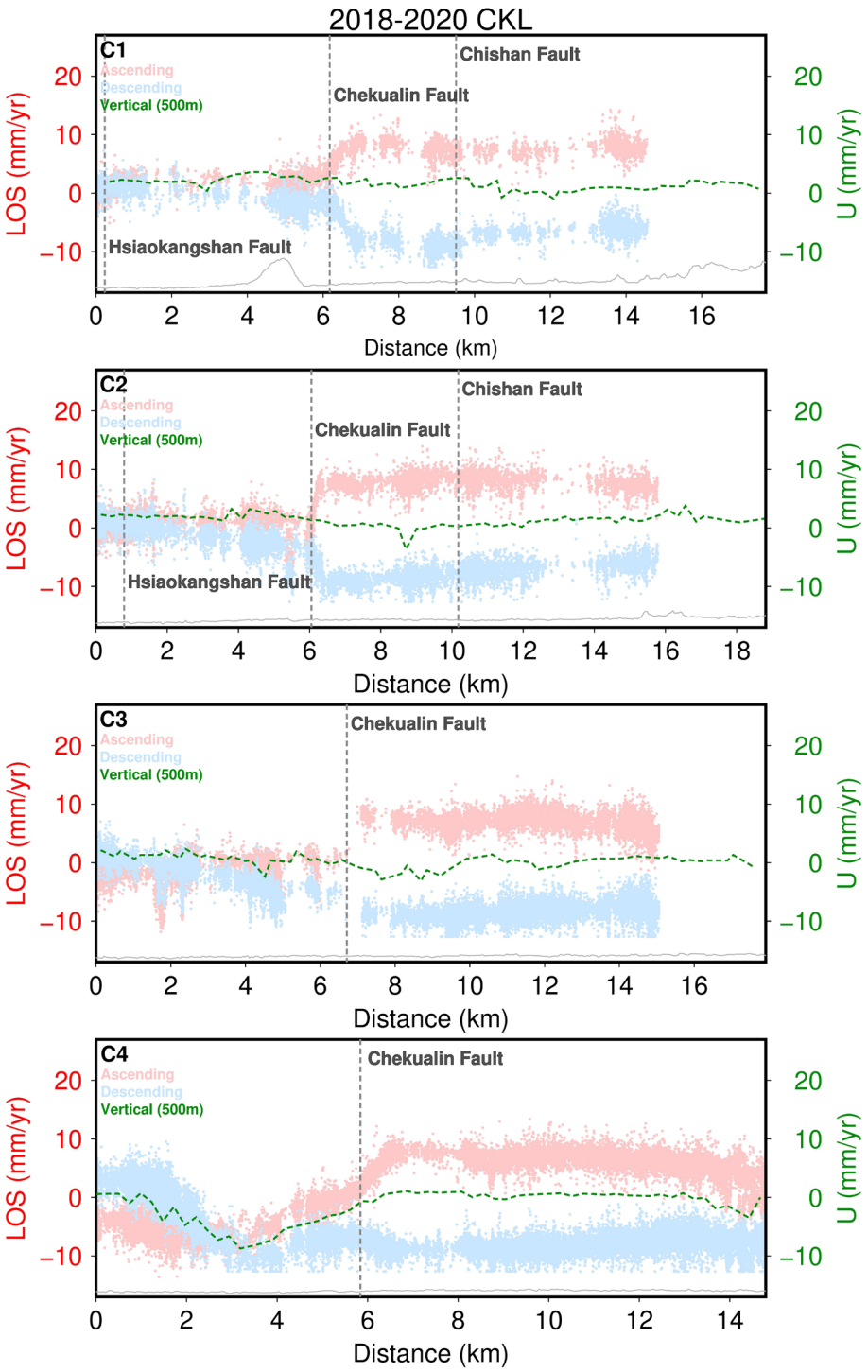


圖 1-7：2018-2020 年車瓜林斷層附近地表變形剖面。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

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.

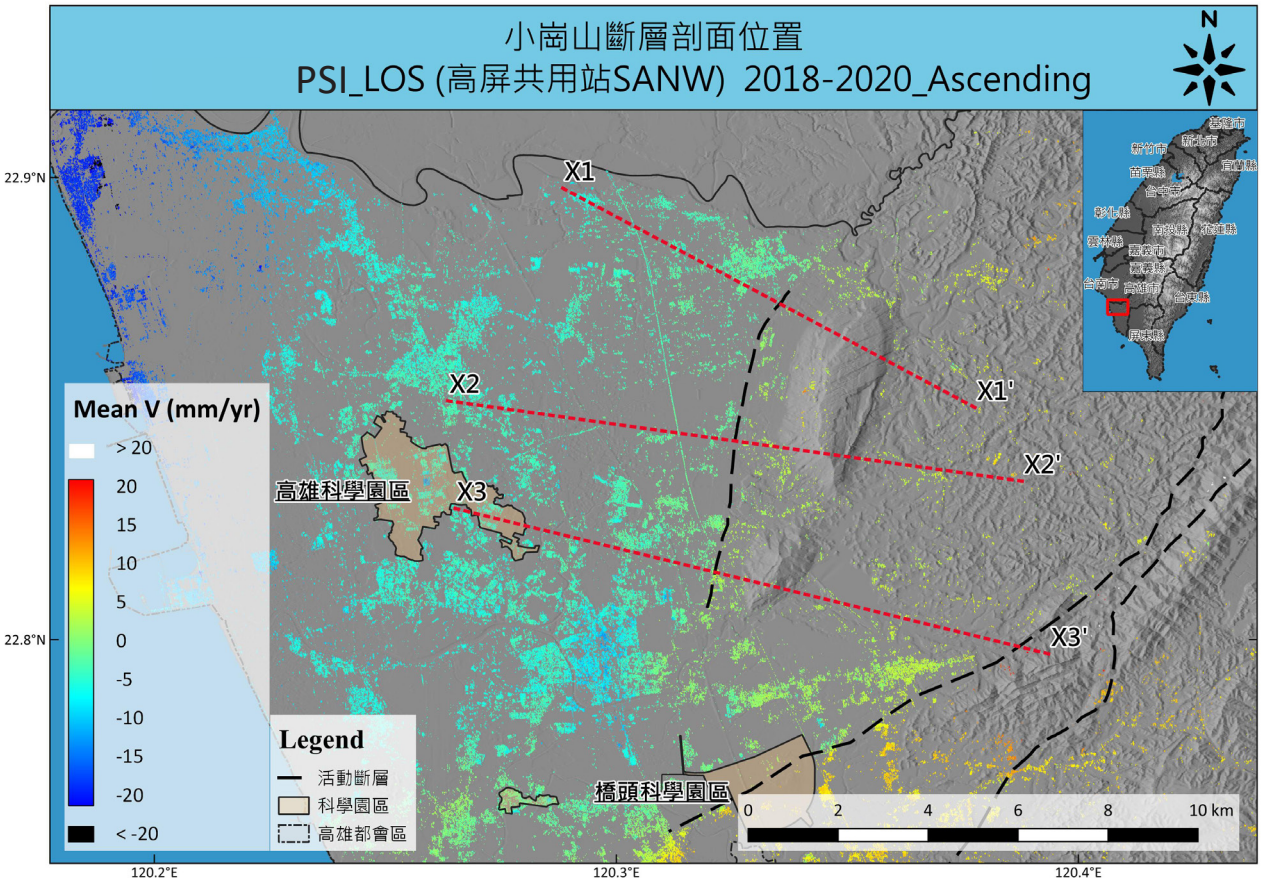


圖 1-8：2018-2020 年小崗山斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

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.

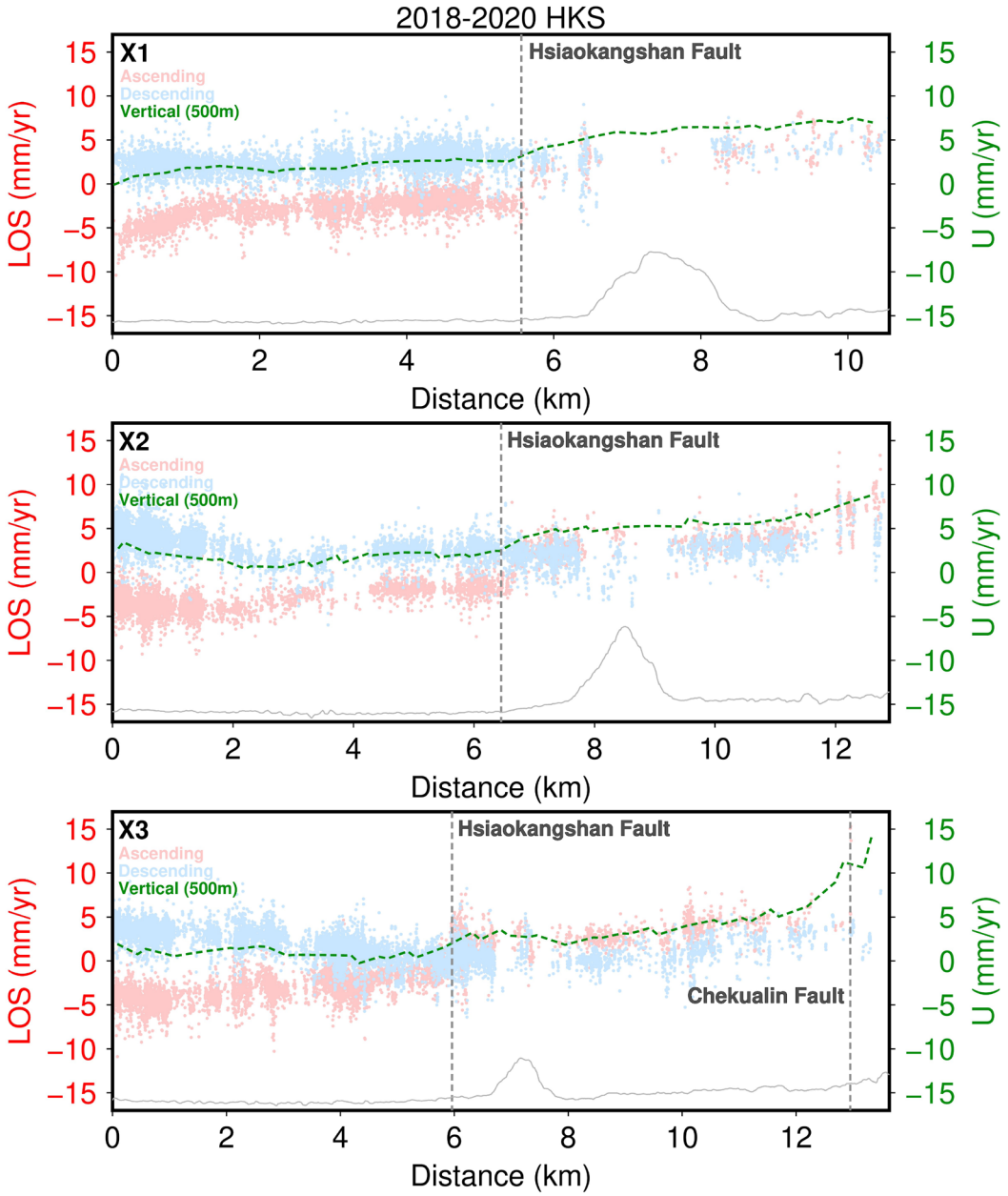


圖 1-9：2018-2020 年小崗山斷層附近剖面萃取之地表變形速率。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

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.

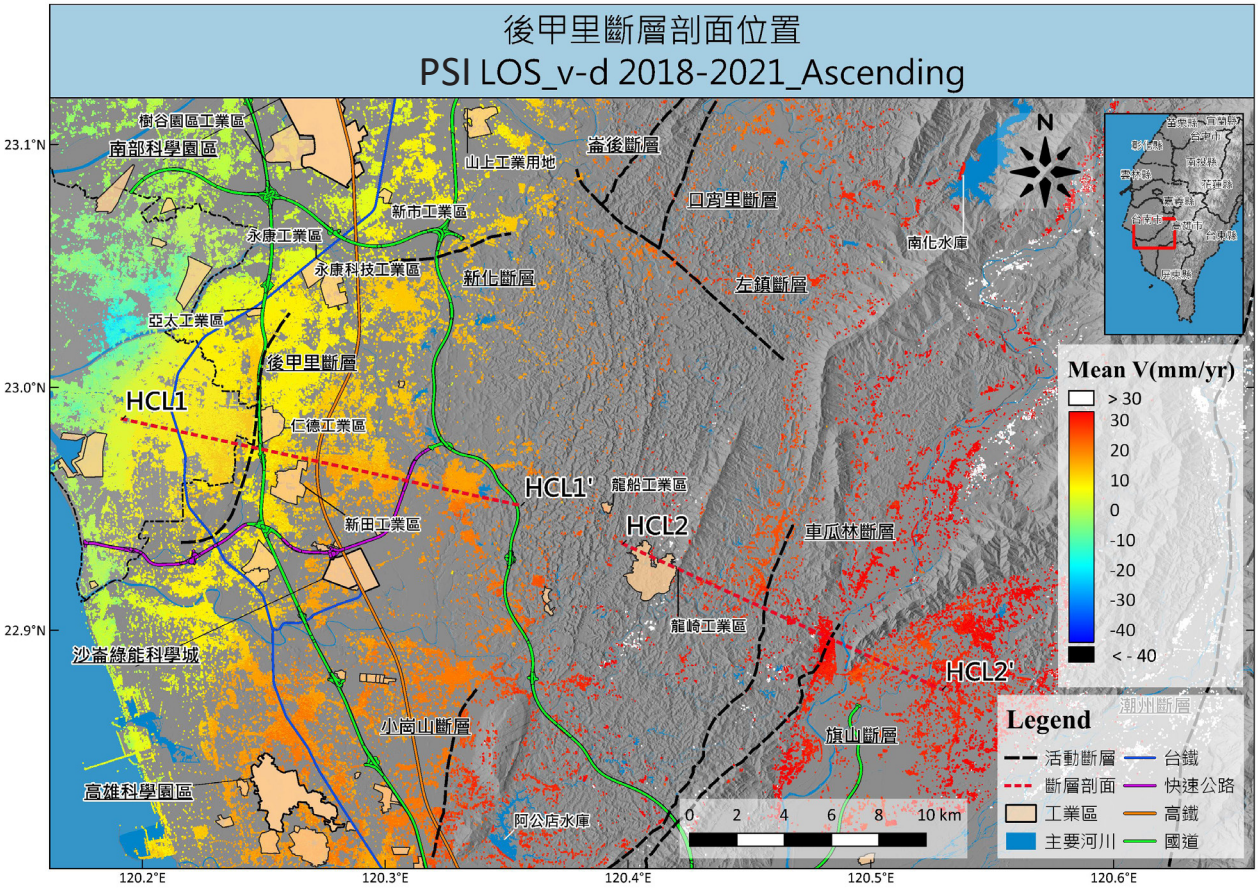


圖 1-10：2018-2021 年後甲里斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

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.

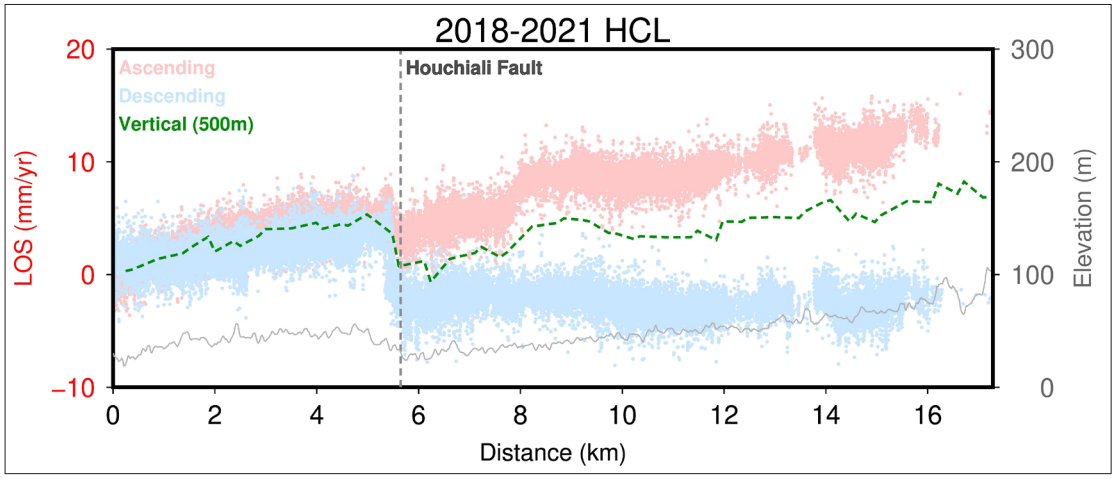


圖 1-11：2018-2021 年後甲里斷層附近地表變形剖面。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

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.

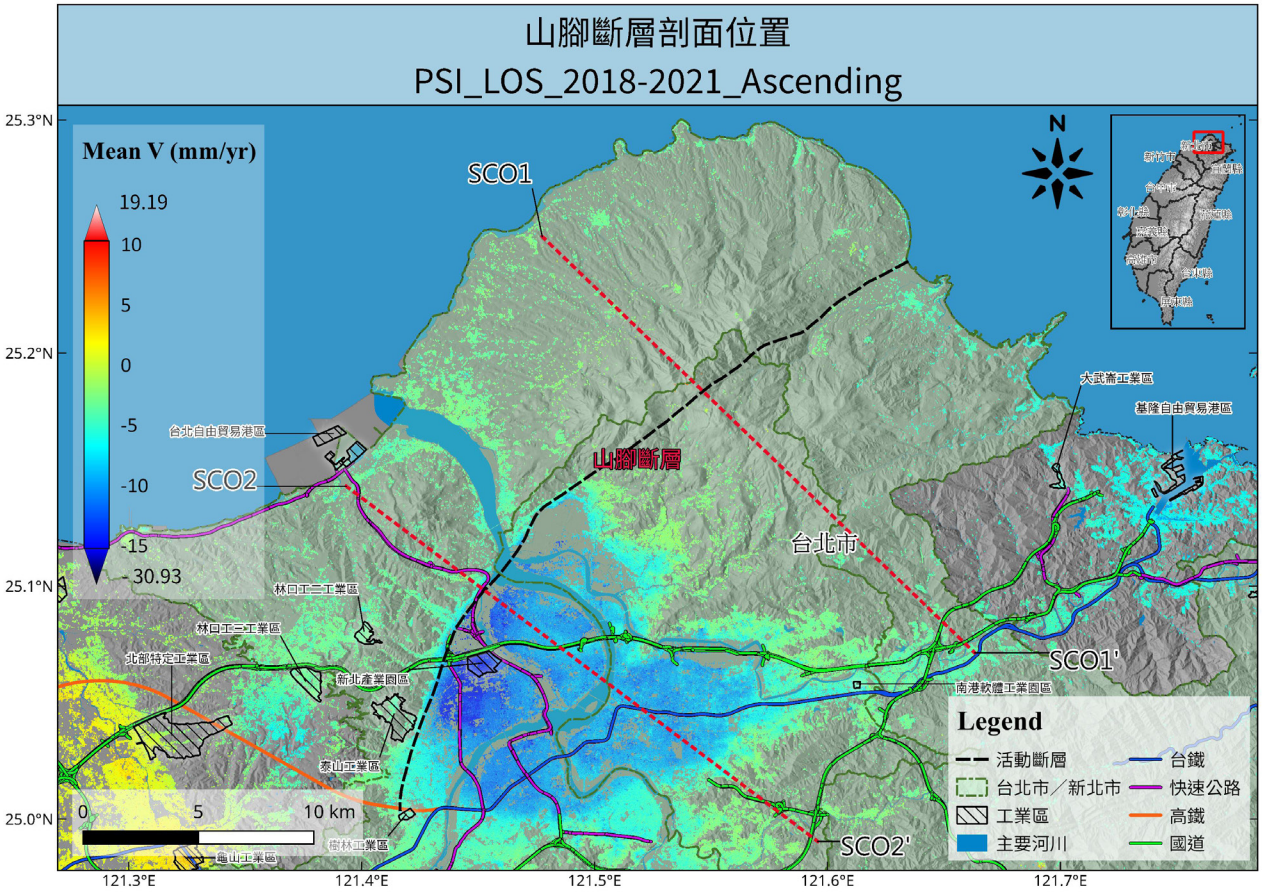


圖 1-12：2018-2021 年山腳斷層附近地表變形狀況。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。黑色虛線為活動斷層位置，紅色虛線為剖面位置。

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.

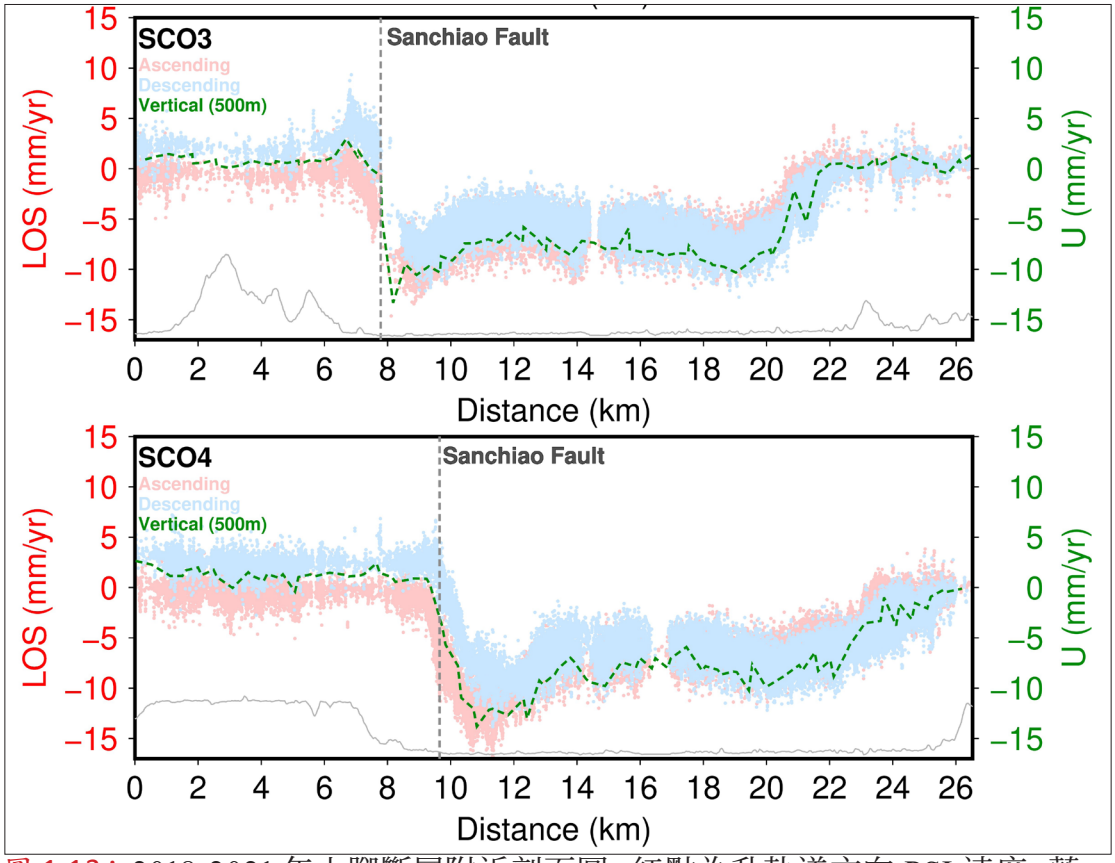


圖 1-13：2018-2021 年山腳斷層附近剖面圖。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠線為垂直方向速度，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

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.

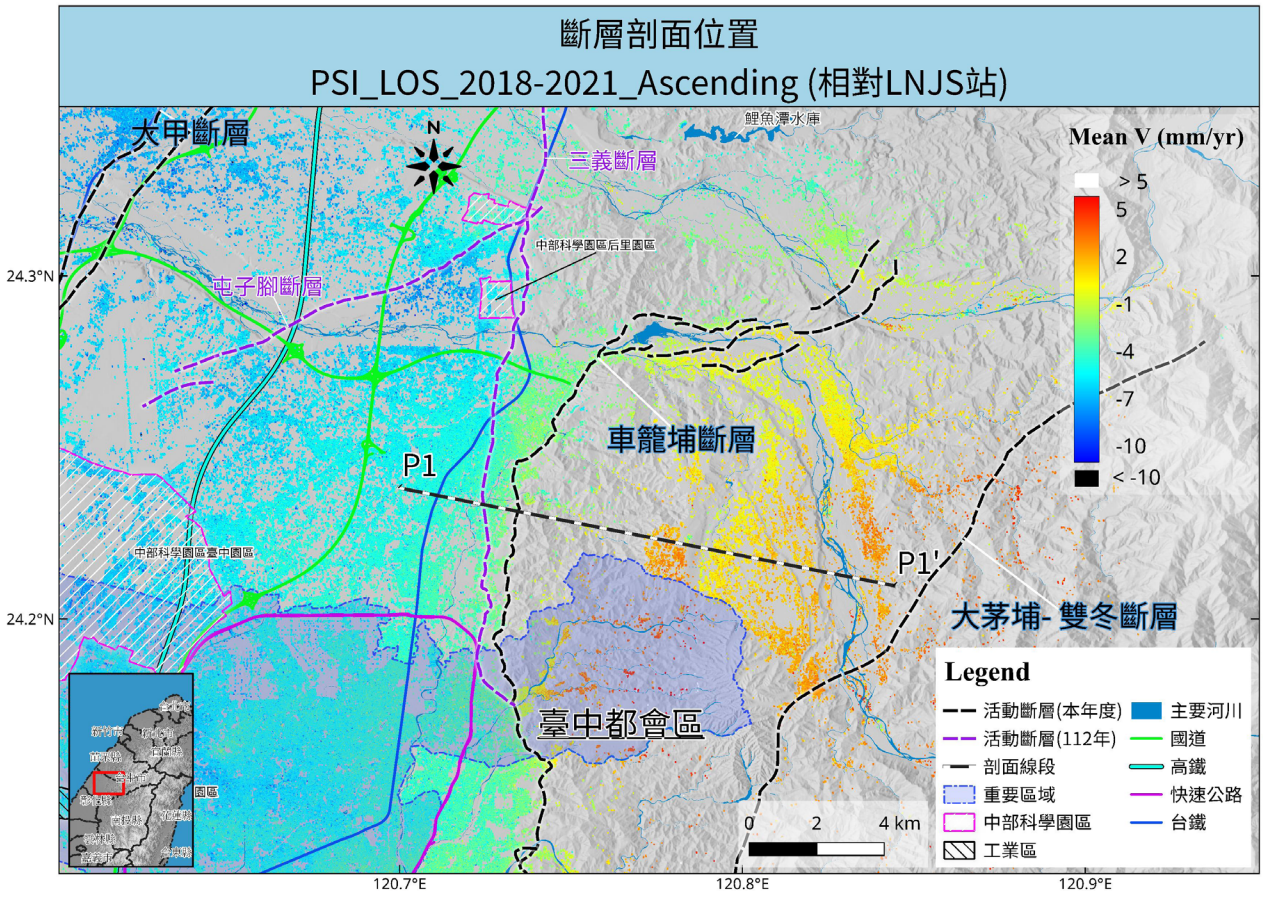


圖 1-14：2018~2021 年車籠埔斷層至大茅埔 - 雙冬斷層平均速度場與 P1 剖面位置圖。

Figure 1-14：Average Velocity Field and P1 Profile Location from the Chelungpu Fault to the Tamaopu–Shuangtung Fault (2018–2021).

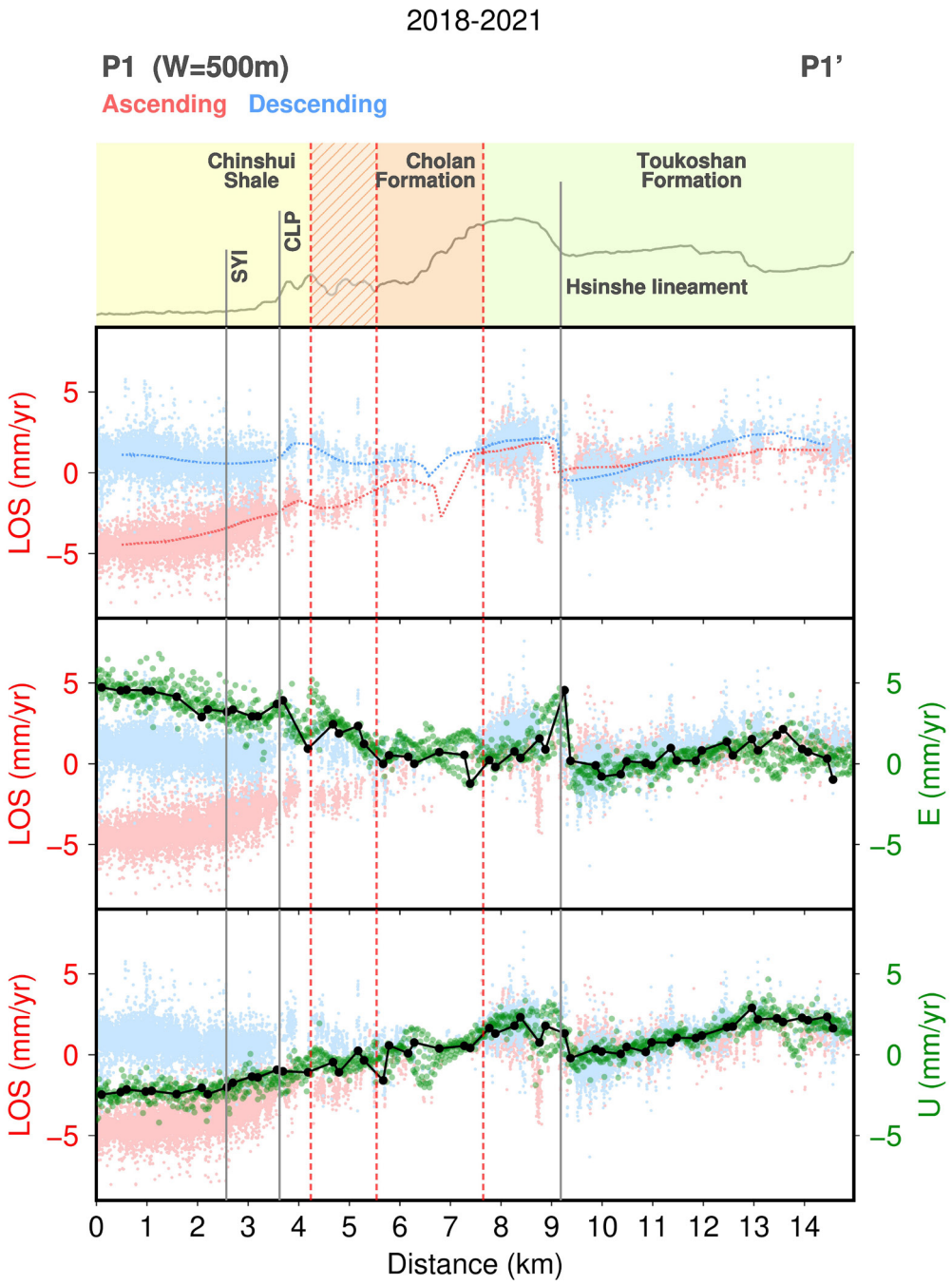


圖 1-15：2018~2021 年車籠埔斷層附近 P1 剖面速度場分析結果。紅點為升軌道方向 PSI 速度，藍點為降軌道方向 PSI 速度，綠點為 100 公尺格點的東西向與垂直向速度，黑線為 500 公尺格點的東西向與垂直向速度，灰線為斷層位置，紅色虛線及背景色塊為岩性。

Figure 1-15：Velocity Field Analysis Along the P1 Profile Near the Chelungpu Fault (2018–2021). Red dots represent PSI velocities in the ascending track direction, while blue dots indicate PSI velocities in the descending track direction. Green vectors show east-west and vertical velocities at 100-meter grid intervals, and black lines represent the same at 500-meter intervals. Gray lines mark the fault location. Red dashed lines and background color blocks indicate lithology.

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 1-16）。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。

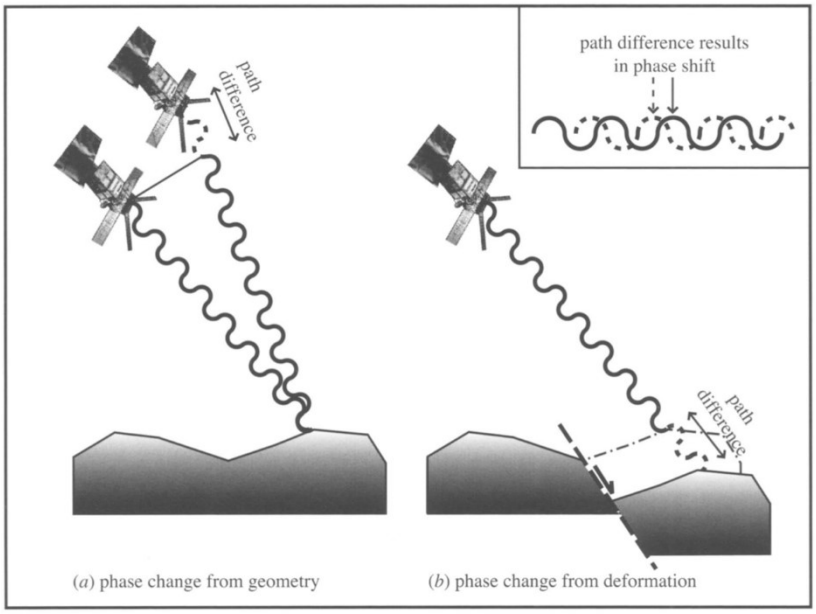


圖 1-16：雷達差分干涉影像對的相位變化與地表變形之間的示意關係圖（Wright, 2002）。

Figure 1-16：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 1-17）。

為了有效監測臺灣的地表變形特性，以及本計畫的目標觀測區域，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）。

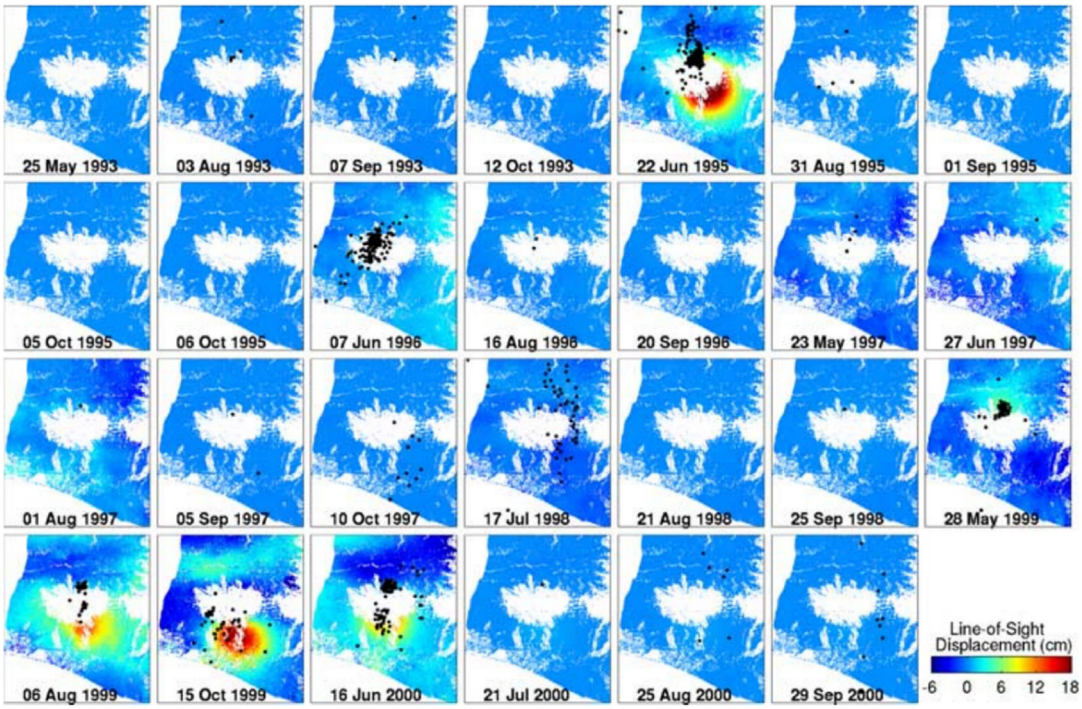


圖 1-17：冰島 Eyjafjallajökull 火山周圍的 PSI 時間序列地表變形量（Hooper, 2008）。

Figure 1-17：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，忽略南北向影響較小。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。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。

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。

本年度研究之東部地區約有近 80 個各單位的連續 GNSS 觀測站，分布從中央山脈最東翼到東部海岸側，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，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 計畫成果效益及其應用

i. 利用衛星雷達影像解算東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東部地區的地表變形做觀測與分析
iv. 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 (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）等區域進行研究 (圖 1-1）。

臺灣東部的花東縱谷是歐亞板塊與菲律賓海板塊聚合的縫合帶，是地體運動活躍的地震帶。根據全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS) 的觀測資料顯示縱谷斷層有相當高的水平縮短速率 (Yu et al., 1997; Yu and Kuo et al., 2001; Chang et al., 2003, Hsu et al., 2009)，近年來，東部地區也發生數起規模較大的地震事件，如 1951 年的東部地震序列、2003 年的成功地震、2018 年的花蓮地震，以及 2022 年的長濱、光復、池上關山地震以及 2024 年的花蓮地震等，皆是由東部的活動斷層所引發之地震。從大地測量資料及地震活動度可知，此區域斷層構造活動十分活躍。

花東縱谷區地形上西有中央山脈，東有海岸山脈，中間的谷地則堆積了近代的沖積層。於 1960 年代末期畢慶昌 (Biq, 1965) 提出花東縱谷下方有向西傾斜的中央山脈斷層及向東傾斜之海岸山脈斷層，並認為縱谷的地形便是由這兩條背向的逆衝斷層所形成。徐明同 (M.-T. Hsu, 1971) 彙整了 1963~1969 年的地震資料，描繪出最早

的臺灣地體構造圖，由地震的分佈即可看出臺灣南部向東隱沒至菲律賓海板塊下，而臺灣東北部至外海的菲律賓海板塊則向北隱沒至歐亞板塊之下，為一組反向的隱沒系統。翟懷慈 (Chai, 1972) 則認為花東縱谷是一個連接不同隱沒系統間的構造斷裂，並帶有左移分量。

本區出露地層主要包括海岸山脈側的奇美火成雜岩、都巒山層、八里灣層、蕃薯寮層、與利吉層，在這些地層之上尚覆有階地堆積層，中央山脈側主要出露板岩，於前緣亦有階地沉積，而縱谷則被沖積層所覆蓋 (大江二郎，1939，Hsu, 1956，Chang, 1968，Ho, 1969，Teng, 1979，陳文山，1988，陳文山與王源，1996)。

現今地礦中心公布的東部活動斷層包含米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、及利吉斷層等共八條斷層，多兼含逆移及左移性質並約呈南北至北北東走向 (林啓文等，2009)。奇美斷層明顯為東北走向，斜切過海岸山脈，將整個縱谷區的斷層分為南北兩大區 (圖 1-2)，北段由北往南分別為米崙斷層、嶺頂斷層、及瑞穗斷層；南段接續奇美斷層，分為西側的玉里斷層及東側的池上斷層，池上斷層往南延續約至坪頂；由坪頂至縱谷最南端，縱谷兩側又出現斷層分支，其中海岸山脈側為利吉斷層，中央山脈側則為鹿野斷層。以下就此八條斷層簡敘其地質、地形、構造特性。

1-5-1-1 米崙斷層

米崙斷層位於花東縱谷區的最北端，為左移斷層兼具逆移分量，走向約呈南北向，斷層由花蓮縣七星潭海岸向南延伸至花蓮市吉安溪出口處，總長度約 8 公里 (圖 1-18)。米崙斷層於 1951 及 2018 年地震皆有地表破裂的紀錄，是很明確的地震斷層；由地表破裂位置、地形特徵、以及淺層地下剖面可知，此斷層於近代確實曾有多次活動 (Cheng et al., 1996； Hsu et al., 2019； Huang et al., 2019；Shyu et al., 2007)。從目前地形地質、地球物理探勘、以及測地結果來看，斷層可能並無延伸至吉安溪以南 (林啓文等，2009； Wu, Yenwt al., 2019)。

本區出露地層由老至新分別為米崙鼻礫岩、米崙山礫岩、米崙層、花蓮層、階地堆積層與沖積層 (圖 1-18)。米崙鼻礫岩僅出露於七星

潭海岸，主要為大型變質岩礫，有出露的厚度約 300 公尺，岩層向南傾斜。米崙山礫岩分布於米崙山，由淘選度差的礫石與砂層組成，地層位態為 N20° W/10° W。米崙山礫岩與米崙鼻礫岩並無露頭顯示有直接的接觸，但由於米崙鼻礫岩的岩層向南傾斜，因此可推斷米崙山礫岩的形成年代應該較晚。米崙層，由下而上可以分為巨礫段、珊瑚礁段、有孔蟲段、小礫段與含礫砂土段，厚度約 10~30 公尺，分布於北米崙傾動臺地與南米崙階地群的最頂層，Chi et al. (1983) 認為沉積年代為更新世晚期。花蓮層，分為黑色含砂泥段和砲臺山沙丘段，前者為古米崙湖的湖相沉積物或古米崙溪的沖積層，厚度約數公尺後者則是米崙臺地上最年輕的沉積物，厚度可達 20 公尺。而近代的階地堆積層與沖積層則由砂、礫石與泥所組成。

米崙斷層沿著米崙臺地西側發展，米崙臺地在地形上可以分成三個區域，涵蓋六個地形單元 (林朝棨，1957)，由北往南分別為北米崙傾動臺地、古米崙溪流域 (內含古米崙湖、砲臺山砂丘與民本里砂丘) 以及南米崙階地群 (內含南部米崙臺地與花崗山臺地)。與臨時臺灣土地調查局 (1904) 的地形圖相比，北米崙傾動臺地與古米崙溪流域的地貌在這一百年間已有所變化，南米崙階地群則沒有明顯改變，而民意斷層 (石再添等，1983) 的地形崖在一百年前即可觀察到。米崙溪原先流過米崙臺地中央，但現代的流向卻已轉彎，這個河流的轉向可能與米崙斷層的活動有關。鍾令和 (2003) 將南米崙階地群以高程差異分出九個相鄰高差各約 4~5 公尺的階地群，他研判這些階地可能是經由多次大地震所造成的抬升，但目前尚無這些階面的年代資訊。

余水倍等 (Yu et al., 1990) 由 1983~1988 年的測量資料分析，米崙臺地相對西側的抬升速率約 4.4±3.3 mm/yr，往北水平位移速率為 8.5±3.0 mm/yr，顯示米崙斷層為左移斷層兼具逆移分量。原地調所曾經認為米崙斷層向南延伸至木瓜溪 (張徽正等，1998，林啓文等，2000)，然根據王乾盈與陳桂寶 (Wang and Chen, 1997)、石瑞銓與陳平護 (2001)、及國道新建工程局 (2001) 在木瓜溪的反射震測結果顯示，在深度 300 公尺之內的岩層皆為水平，無斷層活動的跡象，且木瓜溪向北至吉安溪區域皆為沖積平原所掩覆，並無明顯發現米崙斷層存在的證據。

綜上所述，配合槽溝 (陳文山等，2004a)、震測 (張舜傑，1994；石瑞銓與陳平護，2001；石瑞銓等，2004)、地電阻測量 (石瑞銓等，2004)、及 1951 歷史地震紀錄 (楊蔭清，1953；林朝棨 1962；Hsu, 1962；劉啓清 1988)，林啓文等 (2009) 認為米崙斷層可能成高角度向東傾斜，斷層跡北起七星潭海岸，沿著美崙臺地西緣，經過中正橋附近切入花蓮市區，南端至吉安溪出海口為止 (圖 1-18)。2018 年花蓮地震驗證了地表破裂大致沿此區發生，藉由現地調查、無人機航拍及衛星影像分析，現在我們對於米崙斷層的地震斷層位置也有了更精細的掌握 (Hsu et al., 2019；Huang et al., 2019； Kuo et al., 2018；Lin et al., 2019； Yen et al., 2018)。



圖 1-18：米崙斷層條帶地質圖(林啟文等，2009)。

Figure 1-18：Strip Map of the Milun Fault.

1-5-1-2 嶺頂斷層

嶺頂斷層位於海岸山脈最北段，為左移兼具逆移性質的斷層，走向呈北北東向，由花蓮縣嶺頂向南延伸，經月眉至光復鄉東富村 (陳文山等，2008)，斷層總長度約 30 公里 (圖 1-19)。嶺頂斷層並未在海岸山脈前緣或地表造成明顯的斷層地形特徵，主要的斷層跡可能位於花蓮溪河床中被沖積物所覆蓋；2018 花蓮地震時，花蓮大橋紀錄了約 70 公分的左移錯動，河床中亦出現大量噴砂及張裂縫 (許晉瑋及劉彥求，2018；Lin et al., 2019)。林啓文等 (2009) 由調查結果認為在斷層上盤舊稱月眉斷層的線形多位於都巒山層中，可能在山麓沖積扇堆積前即已形成，嶺頂斷層應是板塊邊界斷層，是海岸山脈向西及向北擠壓的前緣斷層。GNSS 測量結果顯示斷層兩側的垂直與水平速度場皆有明顯變化，目前嶺頂斷層列為第一類活動斷層 (臺灣活動斷層分布圖，2021)。

在海岸山脈的都巒山層內，前人已發現有許多線形或斷層的存在，由於這些線狀崖斷續出現，最早統稱為月眉斷層 (張徽正等，1998，林啓文等，2000)，包括在月眉、米棧、大坪、及山興地區出現的斷錯河、反斜崖、三角切面、斷側丘、及直線型凹谷等等具左移及逆衝性質的地形特徵 (York, 1976；石再添等，1983)。陳文山等 (2006，2008) 則認為縱谷北段的主要斷層應稱為嶺頂斷層，位於海岸山脈西側前緣，是海岸山脈與花東縱谷的交界，而不是位於海岸山脈內的月眉斷層。許晉瑋與劉彥求 (2018) 由 2018 年花蓮地震的震源機制及地表破裂型態推論，縱谷斷層最北段應由嶺頂斷層向外海延伸。

徐鐵良 (1955) 認為縱谷北段近期的地殼抬升活動較不活躍，由地形特徵來看，流出中央山脈的河流在縱谷北段形成大範圍的沖積扇，並且能跨越縱谷往東發育，但縱谷中南段的沖積扇則已被抬升，形成扇階地形，顯示縱谷北段 (光復以北) 在全新世沒有明顯受到擠壓而產生隆起地形。原地調所早期調查認為，嶺頂斷層與南方的瑞穗斷層在富田附近連接，富田以北主要觀察到沖積扇地形，富田以南則為河階地形。嶺頂斷層沿線並未呈現明顯的斷層地形特徵及沖積層的錯移，可能是被海岸山脈西緣的山麓沖積扇與縱谷平原的沖積層所覆蓋。李正兆及顏一勤 (2016) 總和野外調查、地物探勘及鑽探結果，推論嶺頂至加里洞之間，嶺頂斷層的斷層跡位置可能多

分布於花蓮溪的河道中，自加里洞地區向南延伸至自強外役監獄，斷層跡沿著海岸山脈西側的斷層崖地形分布，然而由於此區段無地質鑽探資料控制，只能根據地形特徵佐證來推論斷層跡位置 (圖 1-20)。由多孔岩心內的碳十四定年結果顯示，嶺頂斷層於 39000 年 (晚更新世) 以來有多次活動的跡象。

大地測量資料顯示海岸山脈北段相對於中央山脈往北北東方向移動 (陳佳元，1974；Biq, 1984；Chen et al., 1991)，, 相對水平位移速率約 30 mm/yr (陳佳元，1974；Yu et al., 1990)。原地調所於 2004~2006 年間進行 GNSS 測量 , 從平行斷層走向 (方位角 30°) 的方位分析 , 海岸山脈相對中央山脈約有 19.3 mm/yr 的水平位移速率，而從垂直斷層走向 (方位角 300°) 的方位分析，斷層兩側位移變化量則不明顯。由大地測量資料配合斷層走向位態，嶺頂斷層應為左移斷層。

從 GNSS 資料分析 2004~2008 年間跨嶺頂斷層速度場變化，平行斷層走向的分量為 8.4 mm/yr, 垂直斷層走向的分量為 5.6 mm/yr, 高程方向抬升量為 8.7 mm/yr(饒瑞鈞等，2008)。從速度結果可以看出，嶺頂斷層上盤往北的位移速率大於往西的位移速率 , 顯示斷層為左移兼具逆移性質。而 2004~2008 年間橫跨嶺頂斷層的精密水準測量結果顯示 (饒瑞鈞等 ,2008)，嶺頂至龍澗間抬升速率並無明顯的變化；光復至豐濱精密水準測線，在斷層兩側雖有抬升速率變化，但並不明顯。

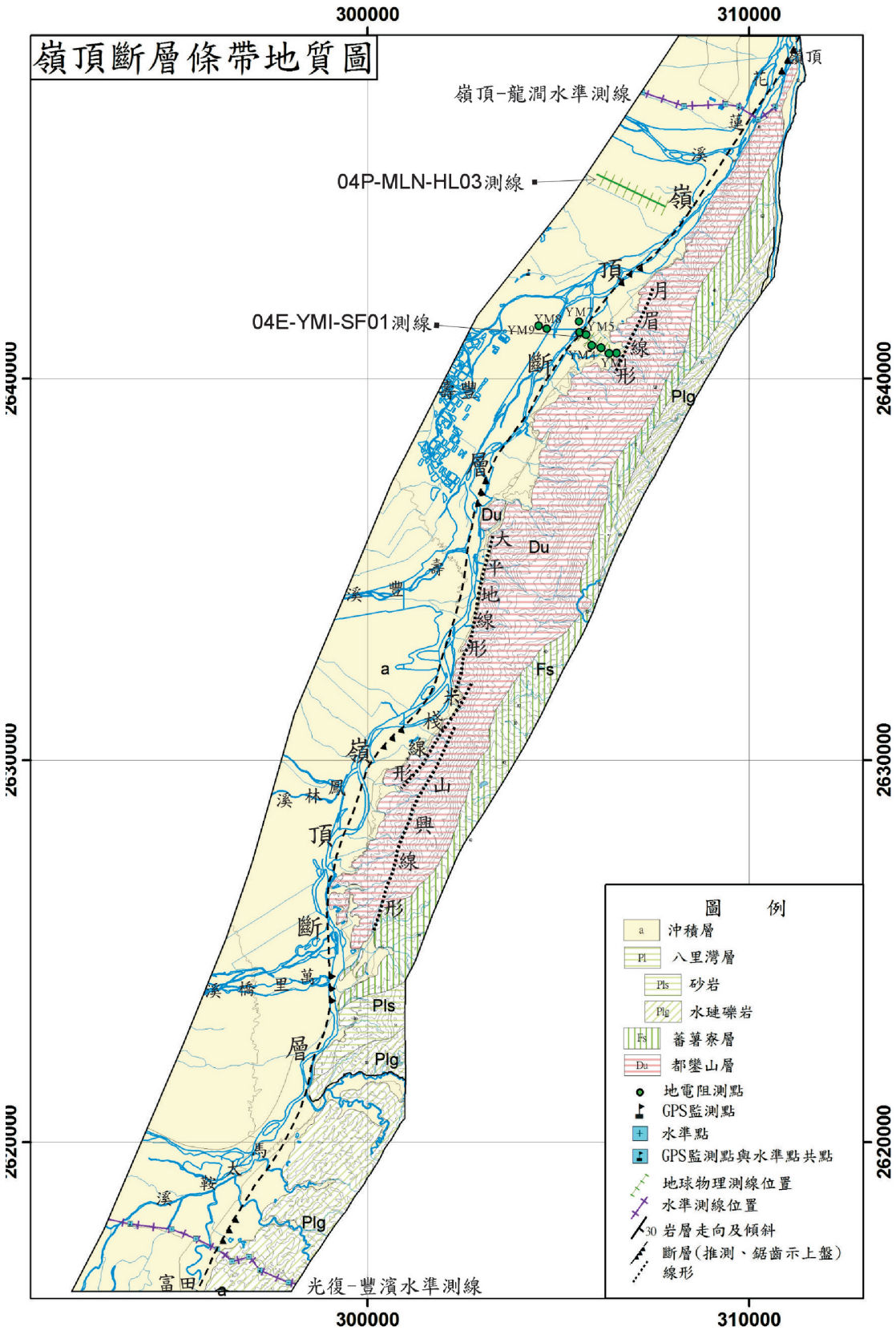


圖 1-19：嶺頂斷層條帶地質圖 (林啟文等，2009)。

Figure 1-19：Strip Map of the Lingding Fault.

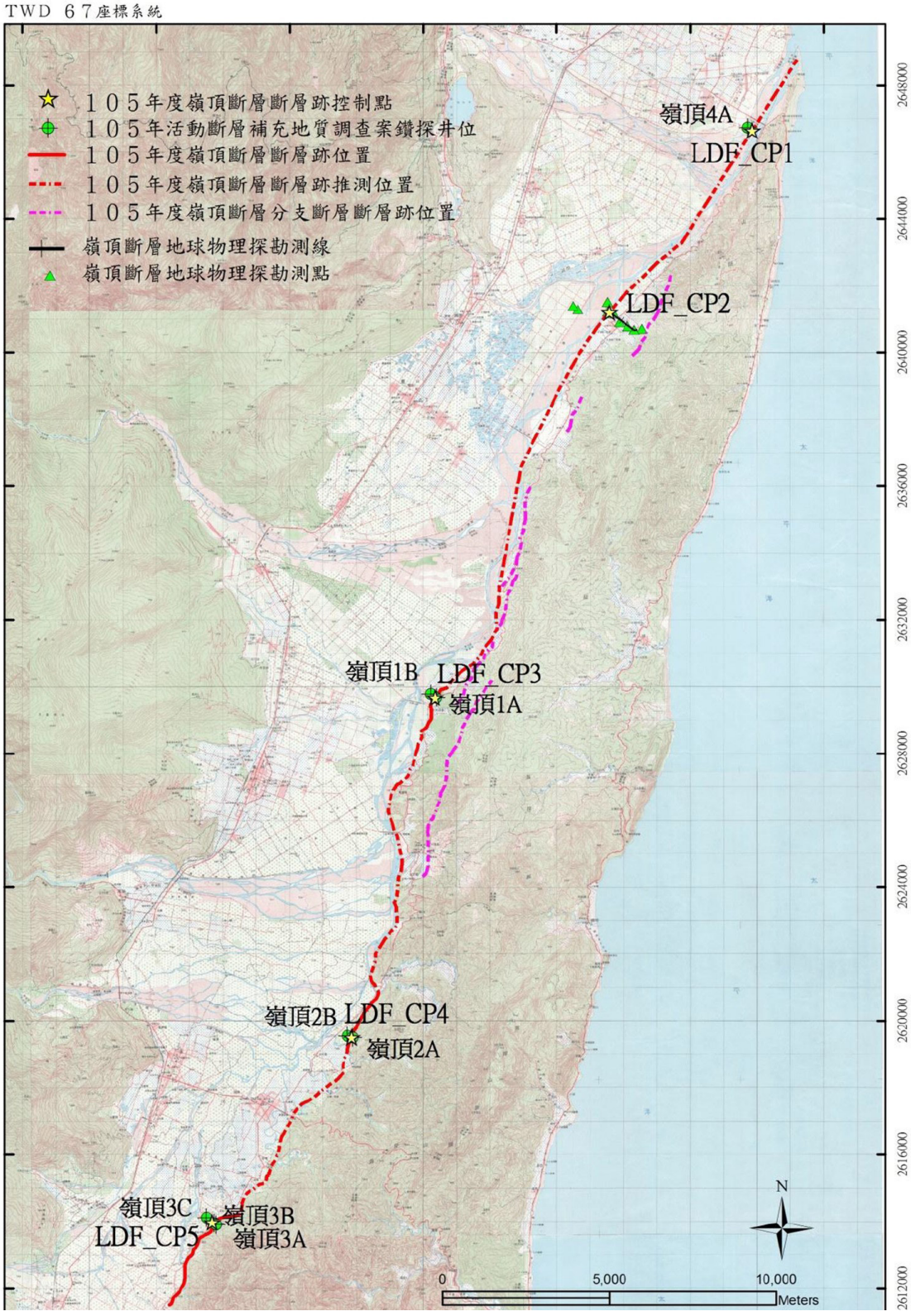


圖 1-20：嶺頂斷層斷層跡位置圖 (李正兆及顏一勤，2016)。

Figure 1-20：Lingding Fault Trace Location Map.

1-5-1-3 瑞穗斷層

嶺頂斷層往南連接至瑞穗斷層，此斷層為逆移斷層兼具左移性質，走向呈東北向 (圖 1-21)，由光復鄉東富村往南至玉里鎮春日里，斷層總長度約 33 公里 (陳文山等，2006，2008)；瑞穗斷層亦為 1951 年地震的地震斷層，一部分等同於徐鐵良 (T. L. Hsu, 1962) 所稱的玉里斷層北段，而斷層的最南端在春日附近可能與奇美斷層連接。由槽溝開挖結果可推論，除了 1951 年的地震之外，此區域至少有過 3 次的古地震事件，古地震的活動週期約 190±20 年 (林啓文等，2009)。

瑞穗斷層位於海岸山脈的西緣，沿線有三段較明顯的線形，富田至加禮灣之間 (安定橋附近) 線形呈南北走向，在未紅土化階地前緣崖高 2~3 公尺，往南延伸崖高可達約 10 公尺；烏漏至鶴岡之間的線形位於鶴岡西緣，地形上有明顯的階地崖；此外，德武至春日之間也有明顯的線形。野外調查顯示，瑞穗斷層由光復鄉大富村向南至富源溪與秀姑巒溪交會口，斷層地形特徵明顯。在自強外役監獄附近，斷層上盤的礫岩往西逆衝至沖積層上，礫岩內的斷層帶寬度超過 680 公尺，斷層面為高角度向東傾。陳文山等 (2004b) 經由槽溝開挖確認該處為斷層崖，地表破裂西側地層維持水平，東側的沖積層傾斜超過 30°且愈近地表破裂愈陡，其上覆蓋近期沉積物，由東西兩側的地層特徵可以看出斷層應有多次活動。再往南，瑞穗斷層南段的地表證據則多為沖積層所掩覆。

瑞穗斷層有數處槽溝開挖調查 (陳文山等，2004b，2006；顏一勤等，2005；Chen et al., 2007；Yen et al., 2008)：自強外役監獄槽溝、大富槽溝、富興槽溝、安定橋槽溝、春日槽溝。由槽溝開挖的結果，除了 1951 年的地震以外，地層紀錄顯示至少還有三次的古地震事件，時間為距今約 260 年前、距今 365±75 至 150 年前之間、以及距今 640 至 500 年前之間，因此瑞穗斷層的古地震活動週期約 190±20 年 (林啓文等，2009)。

畢慶昌 (Biq, 1984) 利用 1914~1921 年與 1976~1979 年兩次的三角點測量資料計算海岸山脈的水平位移量，觀察到海岸山脈南段與中段的三角點大多向西北方向位移，而北段則向北北東方向位移。

李瓊武及余水倍 (1987) 利用 1917~1921 年與 1976~1978 年等兩次的三角點測量也觀測到相似的結果，亦即海岸山脈北段一等點相對中央山脈的水平位移量約為 3.5~4.4 公尺，位移方向由南端的北北西逐漸轉變至北端的北北東方向。由 2004~2008 年間的 GNSS 資料分析跨瑞穗斷層的速度場變化，可以看到平行斷層走向分量為 14.5 mm/yr，垂直斷層走向的分量為 5.6 mm/yr，高程方向抬升速率為 13.2 mm/yr(饒瑞鈞等，2008)；原地調所精密水準測線亦顯示在瑞穗斷層兩側有明顯的水準抬升速率變化 (饒瑞鈞等，2008)。總和來說，瑞穗斷層為逆移兼具左移分量的斷層。

此外，GNSS 觀測資料亦顯現了瑞穗斷層上盤海岸山脈的地表水平位移向量場有由東向西快速遞減的現象，由 36.4 mm/yr 遞減為 12.8 mm/yr(相對中央山脈的水平速率，方位角 294°)，代表海岸山脈內在震間約有每年 23.6mm 的地表壓縮量。這個數值與陳文山等 (Chen et al., 2007) 根據槽溝剖面所推算出的水平滑移速率 21.6~27.7 mm/yr 相當吻合 (以斷層傾角約 30°，長期抬升速率為 12.5~16.0 mm/yr 來估算)。根據彈性回跳理論，瑞穗斷層的同震變形量可以很大程度地補償震間斷層遠端至尖端變形量的差值，亦顯示淺部的斷層面於震間是鎖定的狀態 (Hyndman and Wang, 1995；Reid, 1910)。

地殼呈彈性體變形行為的範圍以及斷層鎖定的深度估算與斷層面角度有密切關係。此區域雖缺乏震測及地震重地位資料，但由秀姑巒溪河階剖面的長期抬升速率可看到，奇美村以東的抬升速率約為 10~13 mm/yr，以西則為 17~19 mm/yr(Shyu et al., 2006)，暗示奇美村以東的斷層面應有變緩的型態，使得東側的長期抬升速率降低。由地表斷層角度推估，瑞穗斷層深部的斷層面約在 40~50°之間，可能在深度約 6~7 公里處轉為約 30°，綜合考慮斷層面幾何與抬升速率，沿著瑞穗斷層的斷層面的長期滑移速率約為 24±2 mm/yr(林啓文等，2009)。



圖 1-21：瑞穗斷層條帶地質圖（林啟文等，2009）。

Figure 1-21：Strip Map of the Rueyshui Fault.

1-5-1-4 奇美斷層

奇美斷層位於海岸山脈的中段，為一東北走向的逆移斷層，斷層斜切過海岸山脈，南端在春日附近可能連接瑞穗斷層與池上斷層，向東北延伸經德武、奇美村至花蓮縣豐濱，總長約 30 公里 (圖 1-22)。野外調查顯示斷層截切晚更新世的階地礫石層，但尚未有在全新世活動的紀錄，目前奇美斷層列為第二類活動斷層 (林啓文等，2009)。

奇美斷層沿線於豐濱、奇美村地區皆有線形通過河階階地 (張瑞津等，1992)。羅偉與楊昭男 (2004) 在秀姑巒溪南北岸皆有發現壓力脊、三角錐面、變位河階與斷錯河等地形特徵，在八里灣溪出海口的海階上亦有明顯線形。陳文山等 (2006) 認為在豐濱附近有一破壞帶寬約 1 公尺的斷層截切河階礫石層，斷層位態為 N40° E/ 80° E，可能為奇美斷層在此區的分支斷層。

奇美村附近出露的露頭多顯示此斷層為一斷層面往東傾的逆移兼左滑斷層：賴文基 (1995) 觀察到安山岩逆衝於大港口層 (八里灣層) 之上，斷層面位態為 N81° E/75° S，擦痕顯示逆衝兼左移分量。鄭文弘 (1996) 測量到斷層面上有 2 組擦痕，分別為逆衝及左移性質。

羅偉與楊昭男 (2004) 的調查結果顯示都鑾山層的火成岩逆衝至八里灣層的砂頁互層之上，斷層面位態為 N70° -80° E/70° S，擦痕的傾向補角 (rake) 分別為 80°與 16°，代表此斷層為逆滑兼具左滑形式。在秀姑巒溪奇美泛舟休息站附近的奇美斷層露頭，剖面最西側可見到都鑾山層火成岩逆衝至八里灣層砂頁岩互層之上。在此連續露頭可觀察到火成岩多呈破碎且受熱水換質作用影響，與安山岩相接觸的頁岩受到強烈的剪切，而砂岩層常為左移斷層所切，成為一系列疊瓦狀斷塊。此外，在奇美村東南方處，地表露頭也出現黑色剪裂泥岩與剪裂砂岩層，指示了斷層過去的活動。

三角點資料顯示，奇美斷層的南北兩邊相對於中央山脈有不同的的水平位移，北段為向北北東位移，南段為向北北西位移 (陳佳元，1974；陳惠芬，1984；Biq, 1984；李瓊武與余水倍，1987)。由 2004~2008 年間之 GNSS 資料分析跨斷層剖面的速度場變化 (饒瑞鈞等，2008)，可以見到跨過奇美斷層的速度變化，平行斷層走向的分量為 6.5 mm/yr，垂直斷層走向的分量為 4.1 mm/yr，高程方向抬升量為 7.9 mm/yr。

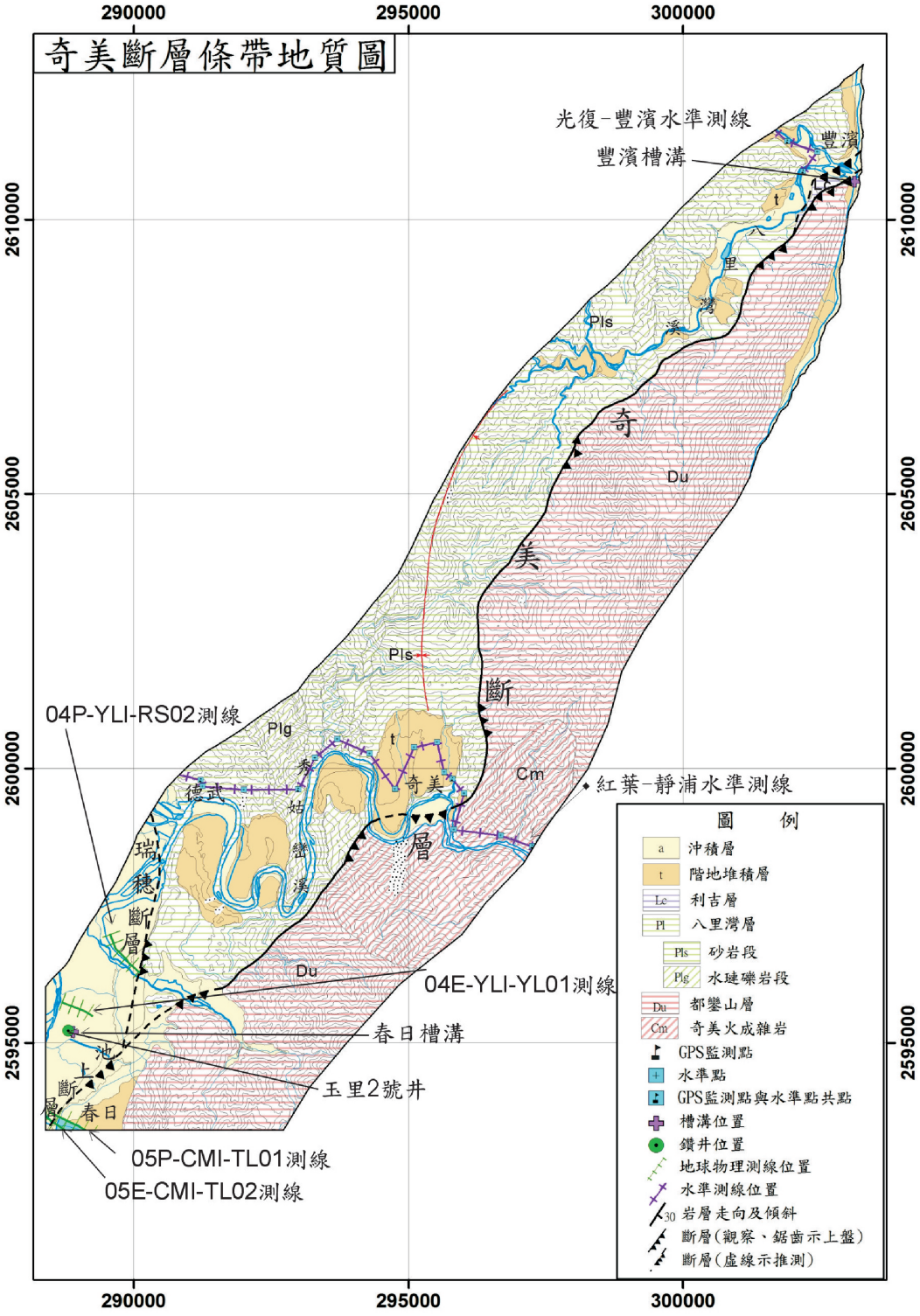


圖 1-22：奇美斷層條帶地質圖 (林啓文等，2009)。

Figure 1-22：Strip Map of the Chimei Fault.

1-5-1-5 玉里斷層

玉里斷層 (圖 1-23、圖 1-24) 為一條兼具左移運動成分的逆斷層，走向約北北東，自瑞穗鄉瑞良村向南延伸至玉里鎮長良，全長約 26 公里。根據地質調查，於舞鶴臺地東北端秀山大橋附近的河谷中可觀察到玉里斷層之出露。河谷東側的舞鶴礫岩層面近乎垂直，岩層受到擠壓破碎，局部可見摩擦線理；而西側礫岩層面則大致保持水平。由此推測，該出露斷層可向北北東方向延伸至瑞良地區之河階崖，顯示玉里斷層應於舞鶴礫岩形成之後才開始活動。玉里斷層為 1951 年 11 月 25 日發生之芮氏規模 7.0 地震的發震斷層，地震時沿斷層出現明顯的地表破裂與錯動現象。之後於 2022 年 9 月 18 日池上地震期間，玉里斷層再度被觸發活動，沿線再次產生地表破裂。破裂向南跨越樂樂溪延伸至長良地區，形成長約 3 公里的新斷層；向北則延伸至大禹里，形成約 750 公尺的新斷層。依據活動特性分類，玉里斷層屬於第一類活動斷層。

玉里斷層位於花東縱谷內，兩側岩層主要為階地堆積層與沖積層。斷層北端切割舞鶴臺地，鄰近區域的地層包括西側的板岩層與舞鶴礫岩。板岩層以板岩為主，夾有千枚岩與薄層砂岩，劈理發達且局部呈現褶皺。舞鶴礫岩則以礫石層為主，礫石來源多屬中央山脈變質岩，頂部可見紅土化現象。根據漂木之碳十四定年，舞鶴礫岩年代早於五萬年前（張瑞津等，1992）。階地堆積層與沖積層則由礫石、砂及黏土所構成。

依據中央地質調查所之反射震測結果（石瑞銓等，2004），在舞鶴臺地東北側測線（04P-YL1-RS01）與南側測線（04P-YL1-RS04）皆可辨識出斷層構造：西側地層向東緩傾且層理連續，東側信號則顯示受錯動與褶皺變形之影響。另據地電阻探測結果（石瑞銓等，2004），在玉里斷層東南方測線（04E-YL1-YL02）中顯示高 - 低 - 高變化的層狀構造，於西北端則趨於尖滅，推測可能存在斷層結構。

1951 年 11 月 25 日連續發生兩次強震，導致玉里斷層沿線出現與縱谷方向平行的地表破裂，破裂帶東側抬升並略向北移（臺灣省氣象所，1952）。楊蔭清（1953）指出當時共出現三條主要地表破裂帶，其中之一位於縱谷西側，由玉里鎮三民里向南延伸至源城里，破裂呈間歇性分布。第二條破裂帶出現在三民地區秀姑巒溪河床，走

向約 N25° E，伴隨噴砂現象，破裂帶通過舊玉里國小（現玉里鎮民廣場），斷層東側上升約 10–30 公分，並向北位移約 40 公分，破裂帶呈 N40° E 走向的雁列排列；在玉里國小南側，地表破裂走向為 N10° E（游明聖，1997），推測此段向北可連接至舞鶴臺地東緣。春日、福音、麻汝與觀音等地的階地顯示拱起或反傾現象，在鍋蓋樑一帶形成一系列平行縱谷走向的小丘。於 2022 年 9 月 18 日池上地震中，玉里斷層再度活動，地表破裂多分布於斷層沿線的沖積層及台地上，從北側大禹地區延伸至南側長良村。根據地表破裂調查結果，破裂帶可分為三段：三民以北破裂不明顯，大禹至客城間破裂發育良好，多沿 1951 年破裂跡線展布，以左移運動為主；客城至長良段則產生新的斷層出露，破裂型態為左移兼向東逆衝，造成西側地塊抬升。在長良地區，左移量與抬升量均達約 1 公尺，據此推估該段斷層走向約為 N10° E 至 N15° E。

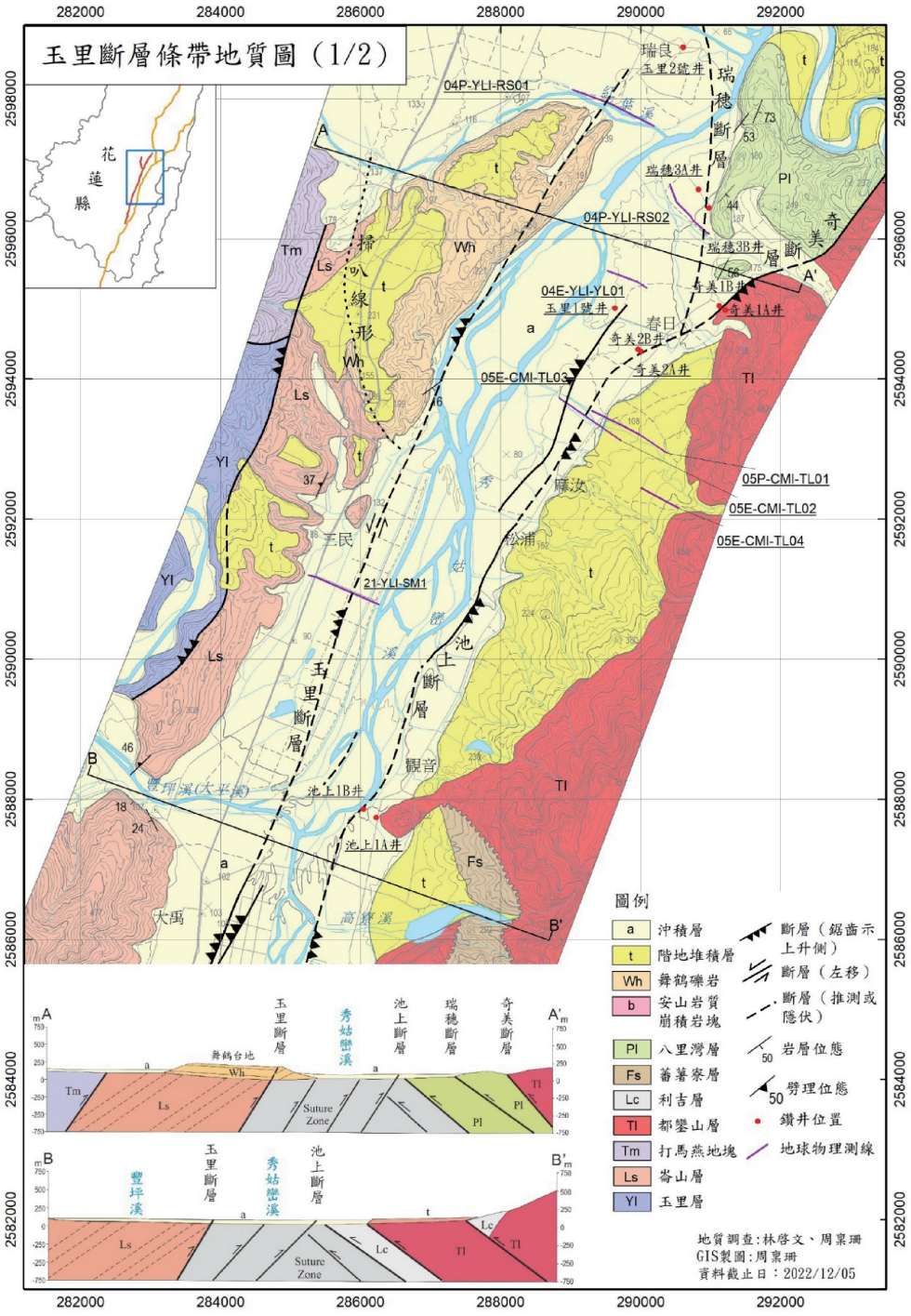


圖 1-23：玉里斷層條帶地質圖 (1/2)(林啟文等，2022)。

Figure 1-23：Strip Map of the Yuli Fault (1/2).

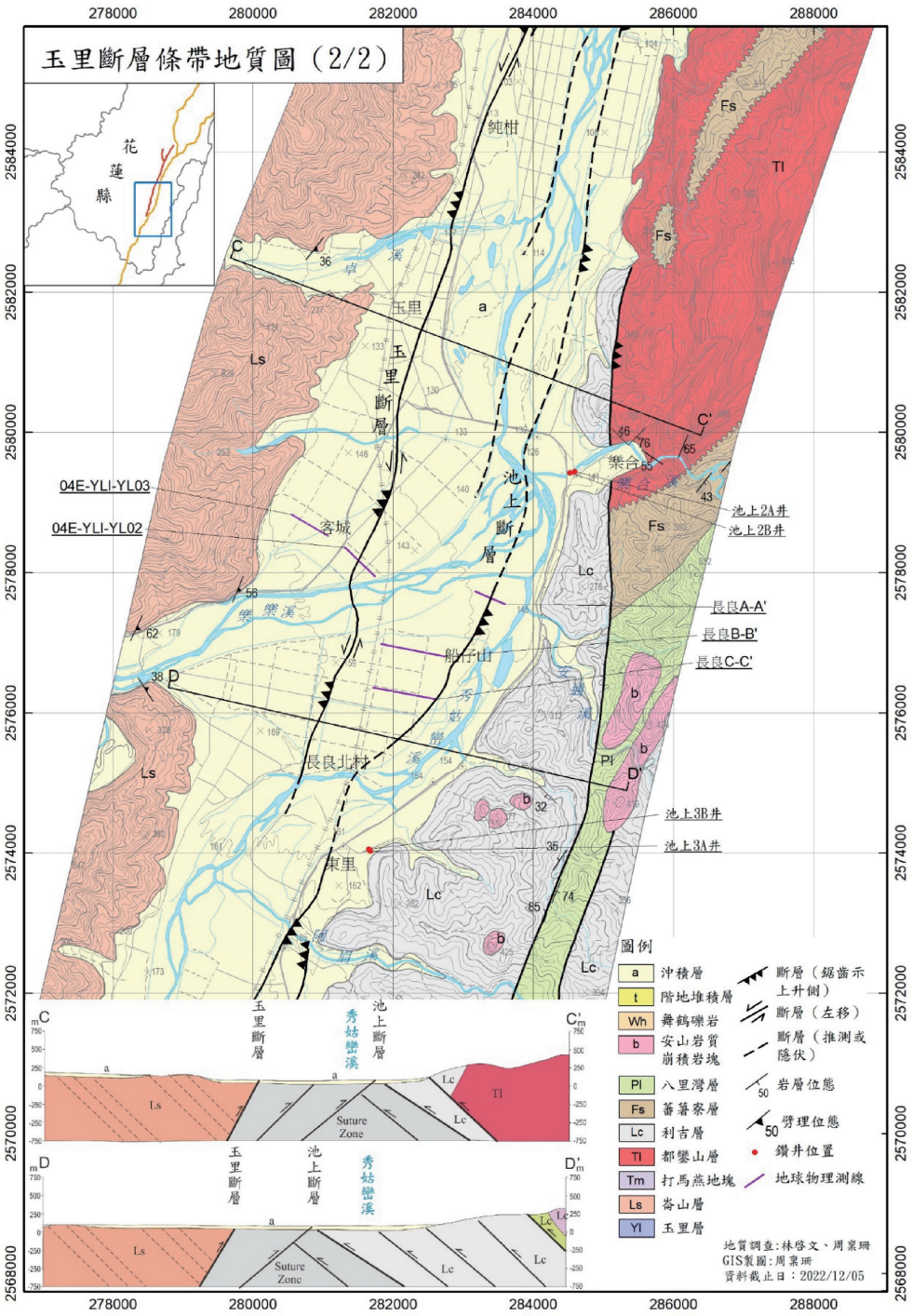


圖 1-24：玉里斷層條帶地質圖 (2/2)(林啟文等，2022)。

Figure 1-24：Strip Map of the Yuli Fault (2/2).

1-5-1-6 池上斷層

池上斷層 (圖 1-25~ 圖 1-29) 由玉里鎮春日里向南南西延伸，經池上鄉萬安、錦園一帶，南至鹿野鄉瑞隆村，總長約 67 公里 (陳文山，2008；林啟文等，2000, 2009, 2021)。斷層走向北北東，斷層面呈上陡下緩之向東傾斜曲面，近地表傾角約 60°，深至 25 ～ 30 公里則轉為近水平。池上斷層除具逆衝性質外，亦伴隨左移分量。除 1951 年地震造成的地表破裂外，2003 年 12 月 10 日成功地震以及 2022 年 9 月 17 日與 18 日池上地震時，沿線亦觀測到多處地表破裂現象。此外，斷層具有明顯的潛移（creeping）活動，因此被列為第一類活動斷層。

池上斷層上盤主要出露海岸山脈的利吉層與都巒山層，局部覆以河階堆積層；下盤則為縱谷內的晚新世至全新世沖積層（王源與陳文山，1993；陳文山與王源，1996）。在富里鄉富池橋鱉溪可見池上斷層露頭，顯示利吉層逆衝於晚新世至全新世河階礫岩層之上，斷層面向東傾斜約 60°（陳文山，1993；Angelier et al., 1997；林啟文等，2009）。

池上斷層地表變形集中於寬數十公尺的斷層帶內，具每年約 2 ～ 3 公分的水平縮短潛移速率（朱傚祖等，1994；Yu et al., 1997；Angelier et al., 1997；Lee et al., 2000, 2001, 2003）。此長期變形使縱谷內形成一系列斷層地形特徵：春日、福音、麻汝至觀音地區階地邊緣出現拱起與反傾現象；東竹至東里間則可見與走向平行的細長丘陵，推測為河階受擠壓後形成的壓力脊構造。富里至池上間之斷層崖地形尤為明顯，大坡至萬安村之間階面高差約 15 ～ 25 公尺（Hsu, 1962），萬安地區的大坡池則可能為斷層前緣陷落所形成的斷層池（林啟文等，2009）。

淺層震測資料顯示，池上斷層除主斷層外尚有多條分支斷層（Chow et al., 2001；黃宏元，2002；曾彥祺，2008）。在錦園村與萬安村測線的高解析震測中，可見上盤存在一系列褶皺與開花構造（陳昱菘，2022），與地表破裂帶位置相互對應。沿線破裂調查（姜彥麟等，2012）亦顯示除主斷層外，分支斷層亦具明顯地表破裂。根據地形與破裂特徵，池上斷層可分為兩段：北段自春日至東竹，長約 30 公里，破裂與地形不明顯，近年亦未發生規模大於 5 之地震（Kuochen et

al., 2004）；南段自東竹至瑞源，長約 35 公里，沿線斷層崖發育連續，並有地震引致的地表破裂。

根據萬安至錦園一帶的槽溝剖面揭示池上斷層在此段曾記錄 1951 年臺東地震與 2003 年成功地震之活動。斷層以逆滑為主，近地表傾角約 30°，在過去約 800 年間至少發生 5 ～ 10 次古地震事件，每次垂直位移數十公分，最大約 60 公分。估算其長期抬升速率逾 20 mm/yr，水平位移速率約 30 mm/yr，推得活動週期約 50 ～ 160 年。

1951 年 11 月 25 日凌晨 02:47 與 02:50，臺灣東部連續發生兩次強震（池上 Ms 6.8；花東山 Ms 7.1），引起與縱谷平行的地表破裂。其一段分布於麻汝、東里、東竹及富里國小一帶，另一段則自池上鄉慶豐、錦園延伸至鹿野鄉巒山村，東側地塊抬升並略向北移（Hsu, 1962；Cheng et al., 1996）。2003 年成功地震（Mw 6.8）亦沿斷層帶產生數十公分垂直位移（Wu et al., 2006；Lee et al., 2006）。2022 年 9 月 17 ～ 18 日池上地震雖非由池上斷層觸發，惟該斷層於震時再度被誘發活動，沿線產生連續地表破裂並伴隨噴砂與液化現象。破裂自玉里鎮松浦南延至鹿野鄉瑞榮村二層坪。調查顯示，北段春日至東里以向西逆衝破裂為主，埤尾至松浦間變形量最大，逆衝位移可達 50 公分；東里至萬寧間及崙天大橋以南至錦園村之破裂呈北北東走向，為向西逆衝兼左移性質，東側抬升約 5 ～ 10 公分。在 2022 年地震期間，池上斷層上盤出現一條新地表破裂，命名為東寧斷層，由富里鄉萬寧向西南延至竹田，長約 3.5 公里，走向 N30° E。該斷層位於池上斷層上盤，富北國中操場附近可見雁列小斷層（N42° E ～ N48° E），西北側為上盤，抬升量小於 15 公分；東寧地區水田亦可見西側抬升破裂，向北延伸至萬寧附近。

池上斷層除同震變形外，池上斷層在震間亦持續以潛移形式活動，造成路面、水溝與建物損壞，尤以大坡、錦園、萬安地區最為明顯。自 1980 年代起，地表變形量測顯示池上斷層具約 3 cm/yr 的水平縮短速率（Yu and Kuo, 2001），由建物破裂變形推算每年滑移量約 2.5 cm（Angelier et al., 2000）。根據大坡國小與錦園村潛變儀觀測，平均年錯移量約 2 cm（Angelier et al., 1997；Lee et al., 2001, 2003），且潛移速率受季節性水分變化影響，於濕季顯著高於乾季（Lee et al., 2003, 2005）。

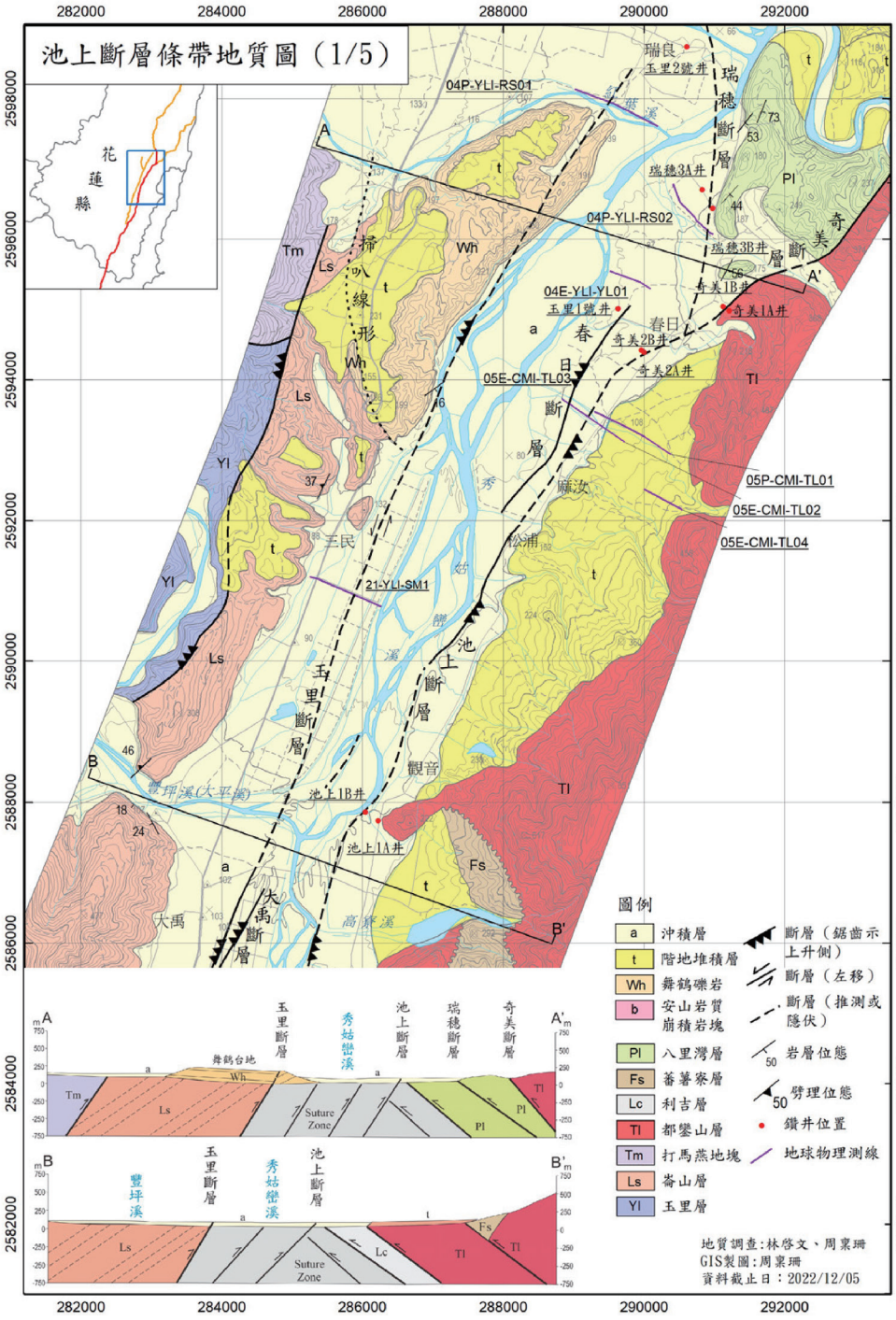


圖 1-25：池上斷層條帶地質圖 (1/5) (林啟文，2023)。

Figure 1-25：Strip Map of the northern Chihshang Fault(1/5).

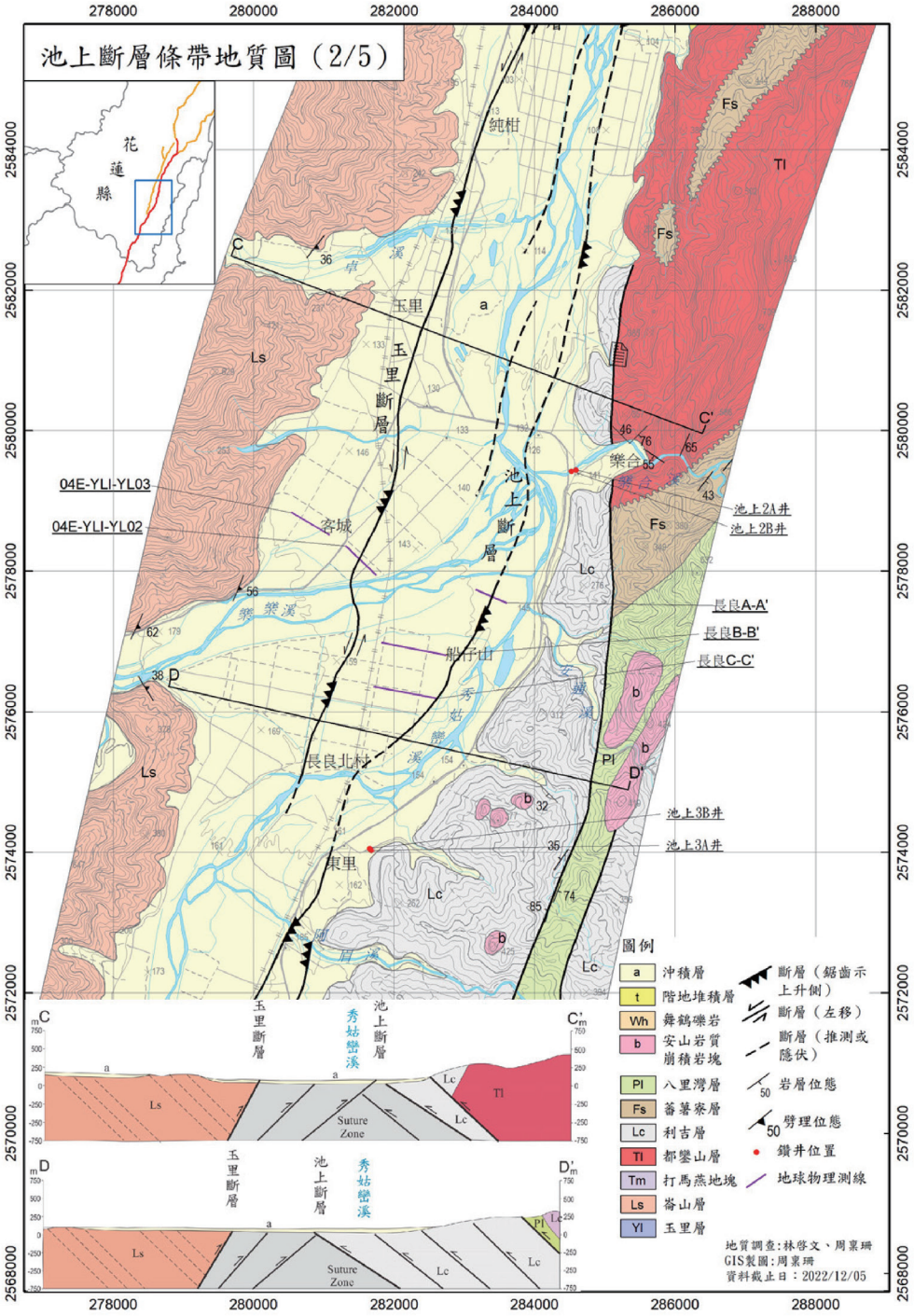


圖 1-26：池上斷層條帶地質圖 (2/5) (林啟文，2023)。

Figure 1-26：Strip Map of the southern Chihshang Fault(2/5).

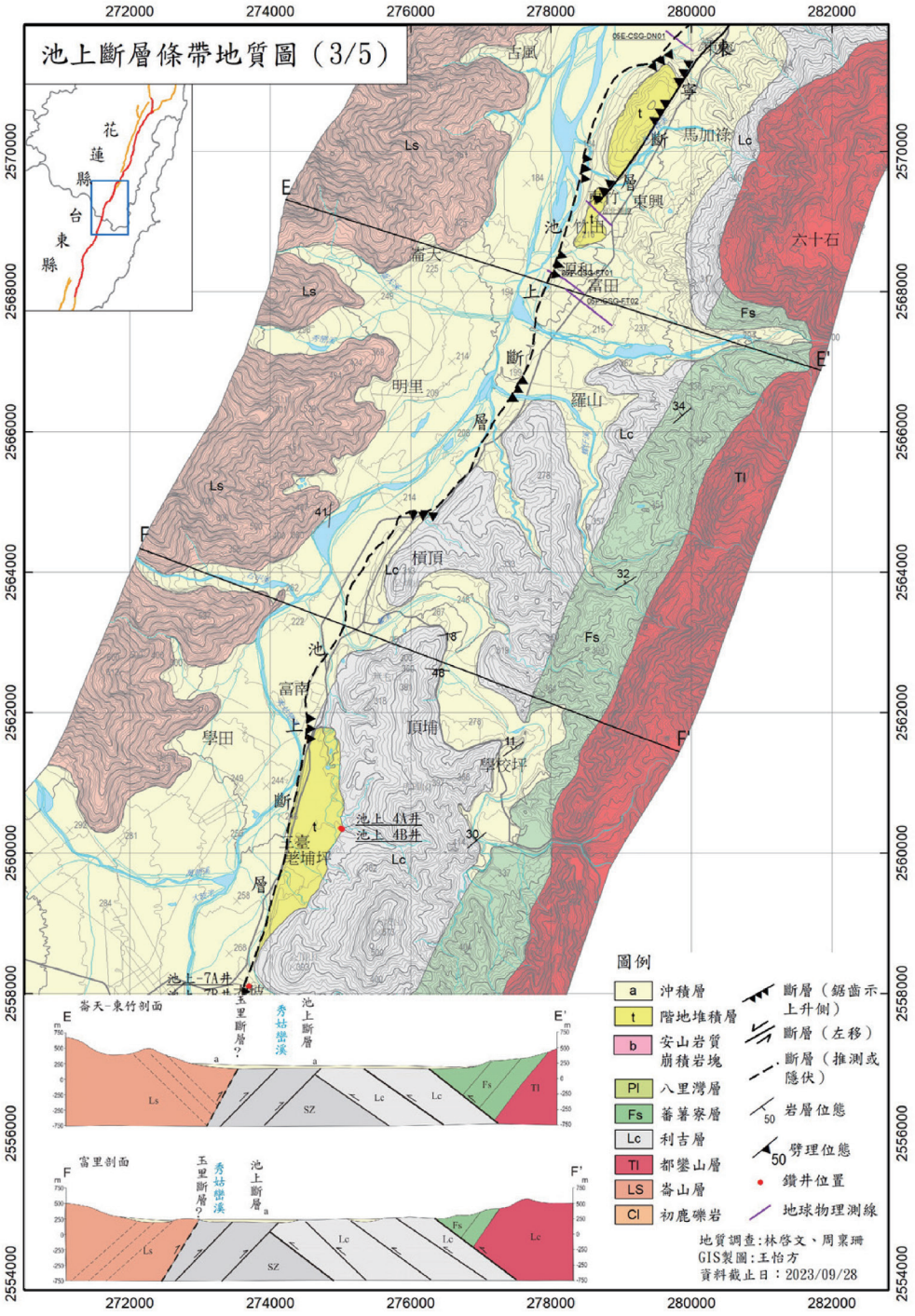


圖 1-27：車籠池上斷層條帶地質圖 (3/5) (林啟文，2023)。

Figure 1-27：Strip Map of the southern Chihshang Fault(3/5).

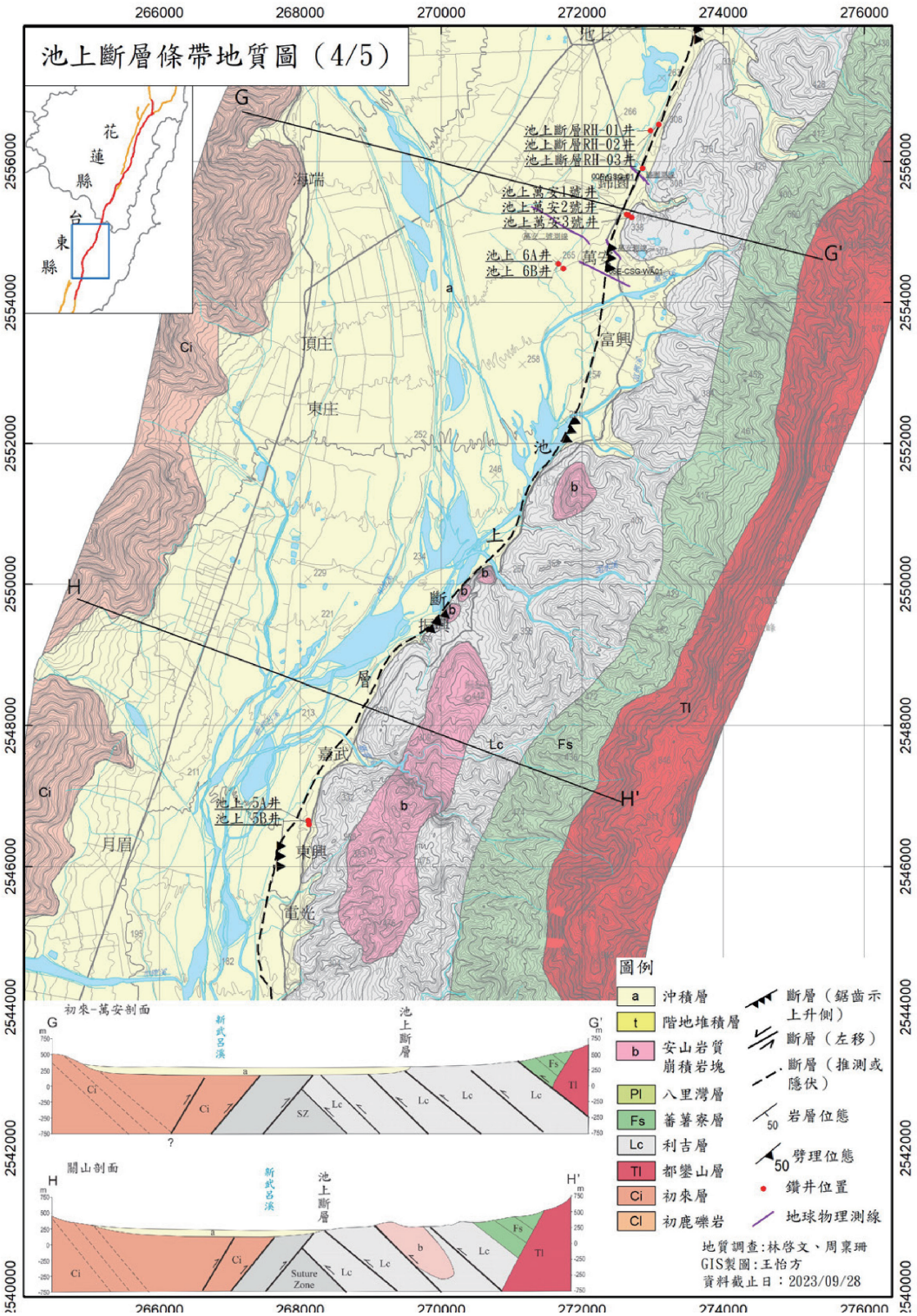


圖 1-28：池上斷層條帶地質圖 (4/5) (林啟文，2023)。

Figure 1-28：Strip Map of the southern Chihshang Fault(4/5).

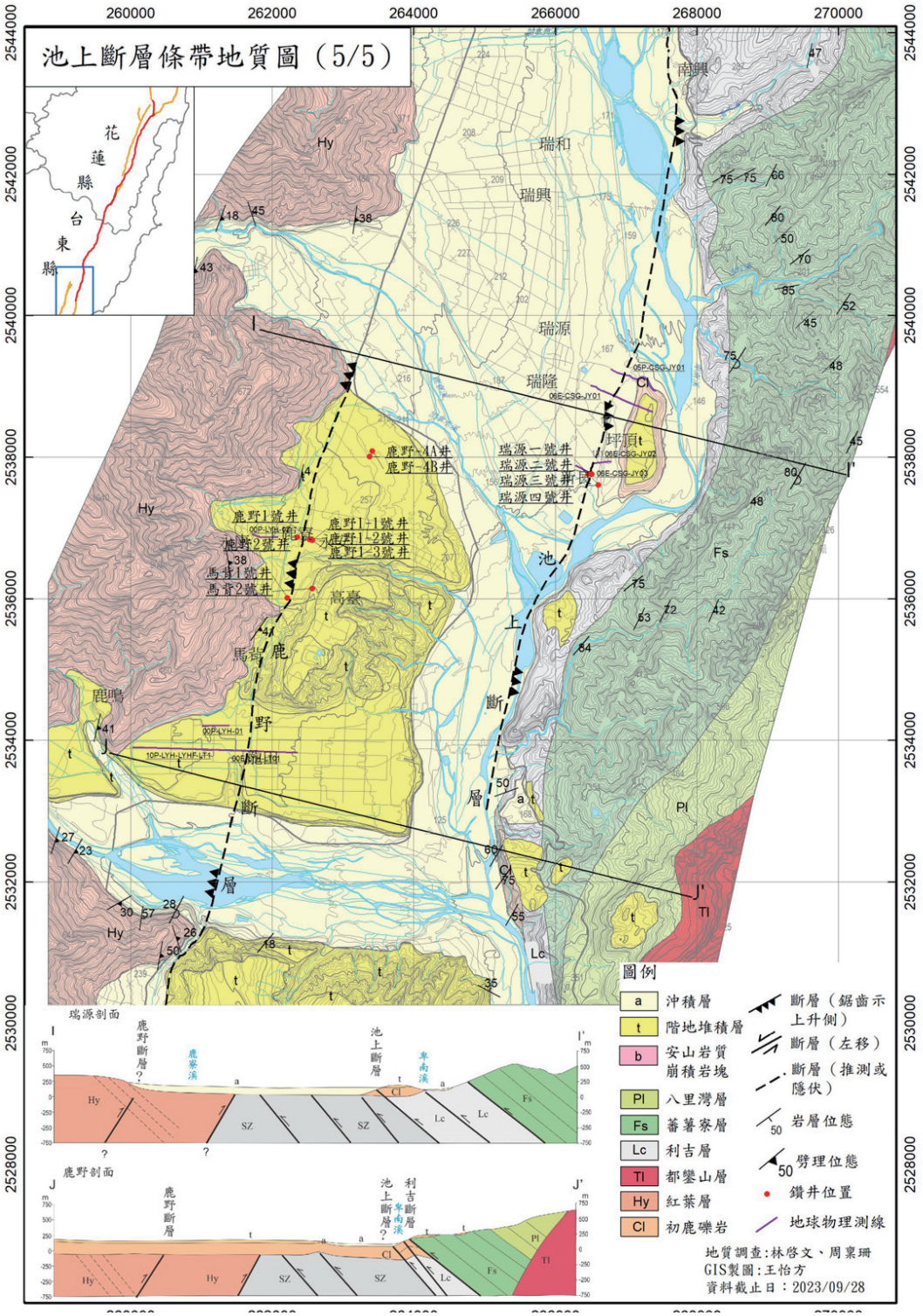


圖 1-29：池上斷層條帶地質圖 (5/5) (林啟文，2023)。

Figure 1-29：Strip Map of the southern Chihshang Fault(5/5).

1-5-1-7 鹿野斷層

鹿野斷層位於縱谷南段，由臺東縣鹿野鄉鹿寮向南延伸至卑南鄉檳榔附近 (圖 1-30)，長約 18 公里，斷層呈南北走向、向東傾斜，為逆衝斷層 (林朝棨，1957；Lee et al., 1998；林啟文等，2009)。鹿野斷層位於卑南山礫岩與中央山脈板岩層的接觸帶，因根據龍田階面上有錯移的地形面及撓曲崖之特徵，顯示斷層在該階地形成後又有活動，此外，槽溝挖掘亦顯示全新世沉積層已受到褶皺與斷層剪切作用 (陳文山，2010)，故將鹿野斷層改列第一類活動斷層。

由野外調查結果顯示，鹿野斷層東側出露岩層為更新世晚期的初鹿礫岩層和卑南山礫岩 (紀權宥，2007)，以及上覆的階地堆積物和沖積層，西側出露中新世板岩層 (林啟文和林偉雄，2005)，在鹿野溪南岸的嘉豐橋與龍田北邊的馬背附近，皆可觀察到斷層西側的板岩層受到擾動，但未見礫岩層和板岩層的接觸面。依據永安槽溝挖掘結果，顯示鹿野斷層為逆衝斷層型態，剪切面截切至淺層全新世的沉積層內，使得全新世礫岩層產生褶皺變形。根據古地震研究以及定年結果，可發現鹿野斷層有三次古地震事件，時間間距約為 2100 年，近一次古地震事件為 < 1890~2110yr BP(N3)，並推算鹿野斷層的長期抬升速率約為 1.85 mm/yr，淨滑移速率 5.4 mm/yr (陳文山等，2010)。

鹿野斷層呈現南北走向的線形，截切過鹿寮溪至鹿野溪一帶的沖積扇及河階地形，階地和沖積扇受到鹿野斷層活動影響，有撓曲錯動的斷層地形特徵。透過鹿野斷層的地形特徵與地質調查結果，可將鹿野斷層細分成五段，最北段為鹿寮至馬背段，沖積扇有明顯的反斜崖及斷層階地形，崖的東側伴隨背斜狀隆起 (石再添等，1983；朱傚祖和游明聖，1995)，但受到後期侵蝕作用影響，斷層崖階退後 (姜彥麟等，2014)。第二段為馬背至龍田段，鹿野斷層於此區主要呈現主斷層與分支斷層並存之現象，應受到斷層下盤為較堅硬的板岩層影響，造成上覆沖積層和礫岩層除向西逆衝外另伴隨褶皺變形 (姜彥麟等，2014)，此段的鹿野高臺階地西緣有明顯的斷層線谷 (林朝棨，1957；沈淑敏等，2006)。第三段為龍田段，鹿野斷層在此區位於卑南山礫岩層內，並在龍田階面上形成反斜小崖，形成 4~7 公尺的斷崖現象 (林朝棨，1957；沈淑敏等，2006)，根據 2006 年 10 月 -2007

年 5 月間的水準測量資料，顯示此區的鹿野斷層變形帶約 250 公尺寬，並有 11mm 的垂直抬升量 (姜彥麟，2007)。第四段為稻葉至斑鳩，在鹿野溪以南，沿著卑南山臺地西側之稻葉至舊斑鳩溪北岸，鹿野斷層於卑南山西側發育小的階地面，並形成南北向的斷層崖階。第五段為檳榔段，從舊斑鳩溪南岸至卑南國中北側，於卑南山礫岩西側有一明顯的斷層線形，稱之為檳榔線形，推測此為鹿野斷層南端的分支斷層作用所致，線形北段成反斜崖，南段東側伴有背斜狀地形 (林啟文等，2009)；透過岩心分析，可得知主斷層僅在晚更新世有剪切的現象，全新世無明顯活動證據 (顏一勤，2013；姜彥麟等，2014)，與 GNSS 觀測 (Chen et al., 2013) 顯示此段在近地表斷層活動為鎖定可相互呼應。

透過初鹿臺地西南方的淺層震測結果，顯示卑南山礫岩向西覆蓋在中央山脈板岩之上，研判鹿野斷層為低角度向東傾斜的斷層 (王執明和王乾盈，1991)。龍田反射震測 (00P-LYH-01) 結果顯示，在對應地表階面凹陷處和地形崖下方，可能為鹿野斷層主要位置，此外，在斷層下盤亦觀察到向西傾斜的斷層，非鹿野斷層系統 (石瑞銓和陳平護，2001)，根據 2010 年的震測資料顯示，鹿野斷層在龍田階面下方為切穿卑南山礫岩，並非分隔板岩帶與卑南山礫岩層；鹿野斷層為高角度向東傾斜，其上盤 (東側) 的礫岩層有向上抬升錯動，下盤的礫岩層亦受到擠壓變形產生背斜形貌 (王蘭榛，2008)。在永安反射震測剖面 (00P-LYH-02)，顯示岩層不連續之處，存在向東傾斜的逆衝斷層，斷層延伸至地表會與鹿野斷層跡的位置吻合 (石瑞銓和陳平護，2001)。在鹿野斷層南段的淺層震測中，可能因斷層位於沖積扇堆積的礫石層內，層序較不明顯，並未發現斷層截切構造 (董倫道等，2006)。

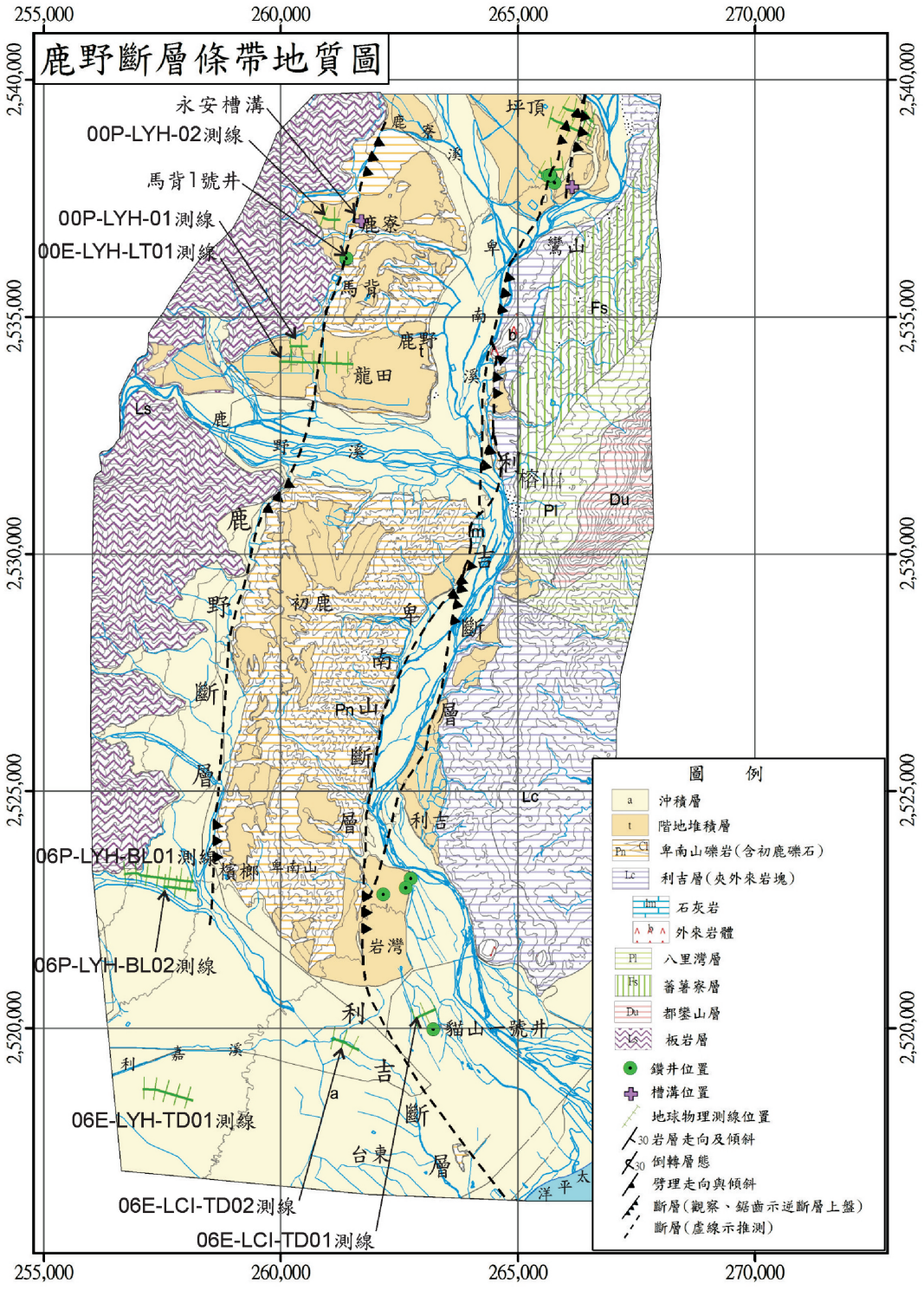


圖 1-30：鹿野斷層條帶地質圖 (林啟文等，2009)。

Figure 1-30：Strip Map of the Luyeh Fault.

1-5-1-8 利吉斷層

利吉斷層 (圖 1-31、圖 1-32) 為一條向東傾的逆衝斷層，兼具左移分量，走向由北北東逐漸轉為南南東。斷層自臺東縣新良地區向南延伸，經鸞山西側河床至岩灣一帶後轉向東南，隱伏於臺東市沖積層之下，全長約 23.1 公里（Hsu, 1956；Bonilla, 1977；紀權窅，2007；陳文山等，2008）。根據大地測量資料，利吉斷層於震間期主要呈現水平運動，位移速率約 20 mm/yr。槽溝開挖與地質鑽井資料顯示，該斷層於全新世仍具活動性，且在 2022 年關山地震中沿線亦出現地表破裂，確認其屬於第一類活動斷層。

徐鐵良（1976）指出，利吉斷層沿卑南溪東岸發育，並於初鹿臺地東側形成分支斷層——卑南山斷層（Hsu, 1956, 1976）。該分支為兼具左移分量的逆斷層，斷層基位於卑南溪河床中，僅於西岸山里沖積扇階地上形成線狀崖。

利吉斷層主要分隔上盤的利吉層與下盤的卑南山礫岩。根據覆蓋於斷層上的階地礫石層未見錯移現象，推測斷層活動起源於更新世晚期。野外調查顯示（林啟文等，2004；紀權窅，2007），在榕山西北方露頭中，利吉層內泥岩受剪劇烈，逆衝於向東南傾斜的卑南山礫岩之上，惟斷層前緣未切穿上覆階地堆積層。在主斷層西側（下盤），亦可見分支斷層發育於卑南山礫岩層內，西北側礫岩層向西北傾，東南側則向東南傾，夾有約 10 公尺厚砂質泥岩。另於山里東北方露頭可觀察到向東北傾的石灰岩塊逆衝於向西北傾之卑南山礫岩之上；利吉國小附近露頭則顯示利吉層逆衝於河階礫岩上，斷層面向東傾斜約 65°。利吉斷層亦造成新良階地人工結構物的變形，其中 1998 年建造之圍牆縮短量達 8 公分，推估水平縮短速率約 10 mm/yr（紀

權窅，2007），顯示其潛移速率相當高。新良槽溝剖面顯示，河階礫石層與利吉層之間被 N15° E/63° E 與 N40° W/60° E 兩組斷層面切割，下盤礫石層不整合覆於利吉層之上。三層河階礫石層中之礫質砂層碳十四定年為 1,315±45 yr BP（陳文山等，2006）。

根據 1992–1999 年間 GNSS 觀測資料，利吉斷層兩側之水平位移速率約為 8.7 mm/yr（Yu and Kuo, 2001）；但若以利吉斷層上盤（海岸山脈地塊）相對下盤（鹿野斷層上盤）於震間期的相對水平位移推算，速率約 13 mm/yr（陳文山等，2008）。此結果顯示，利吉斷層雖近期未發生顯著活動，但其水平縮短可能部分由利吉混同層內部之錯動吸收。

2022 年 9 月 17 日關山地震後的地質調查亦於臺東新良附近觀察到沿利吉斷層分布的地表破裂（梁勝雄等，2022；劉彥求等，2022；Hsu et al., 2024）。在新良地區及坪頂山階地的破裂帶中，分析顯示存在雷德剪裂（Riedel shear）構造，且最大水平主應力方位呈現區域性差異（Hsu et al., 2024）。根據近年的 GPS 與地表觀測結果，利吉斷層上盤相對下盤的水平位移速率約 13 mm/yr，約為池上斷層的二分之一（Chen et al., 2013；陳文山等，2014）。

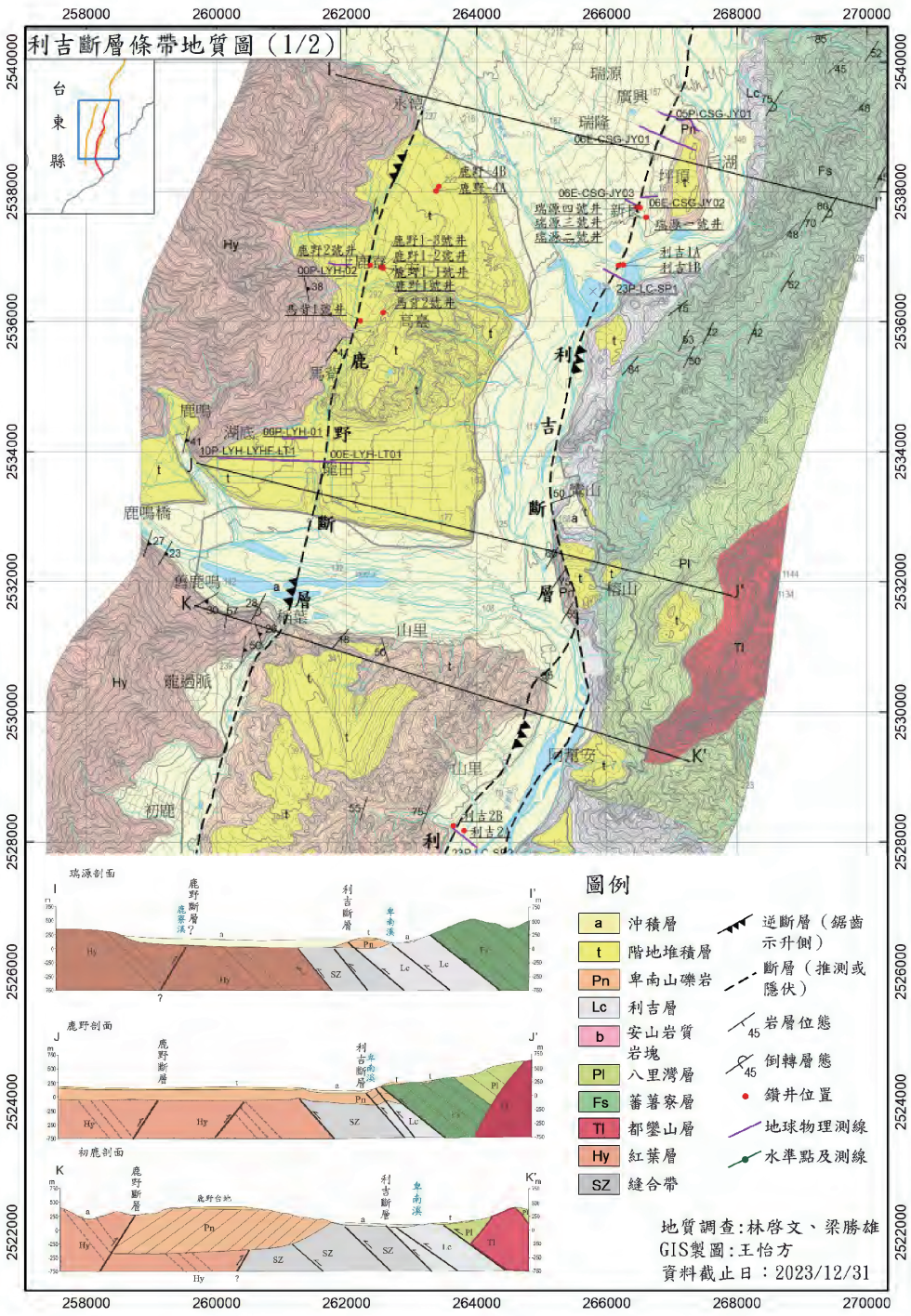


圖 1-31：利吉斷層條帶地質圖 (1/2) (梁勝雄等，2024)。

Figure 1-31：Strip Map of the Lichi Fault(1/2).

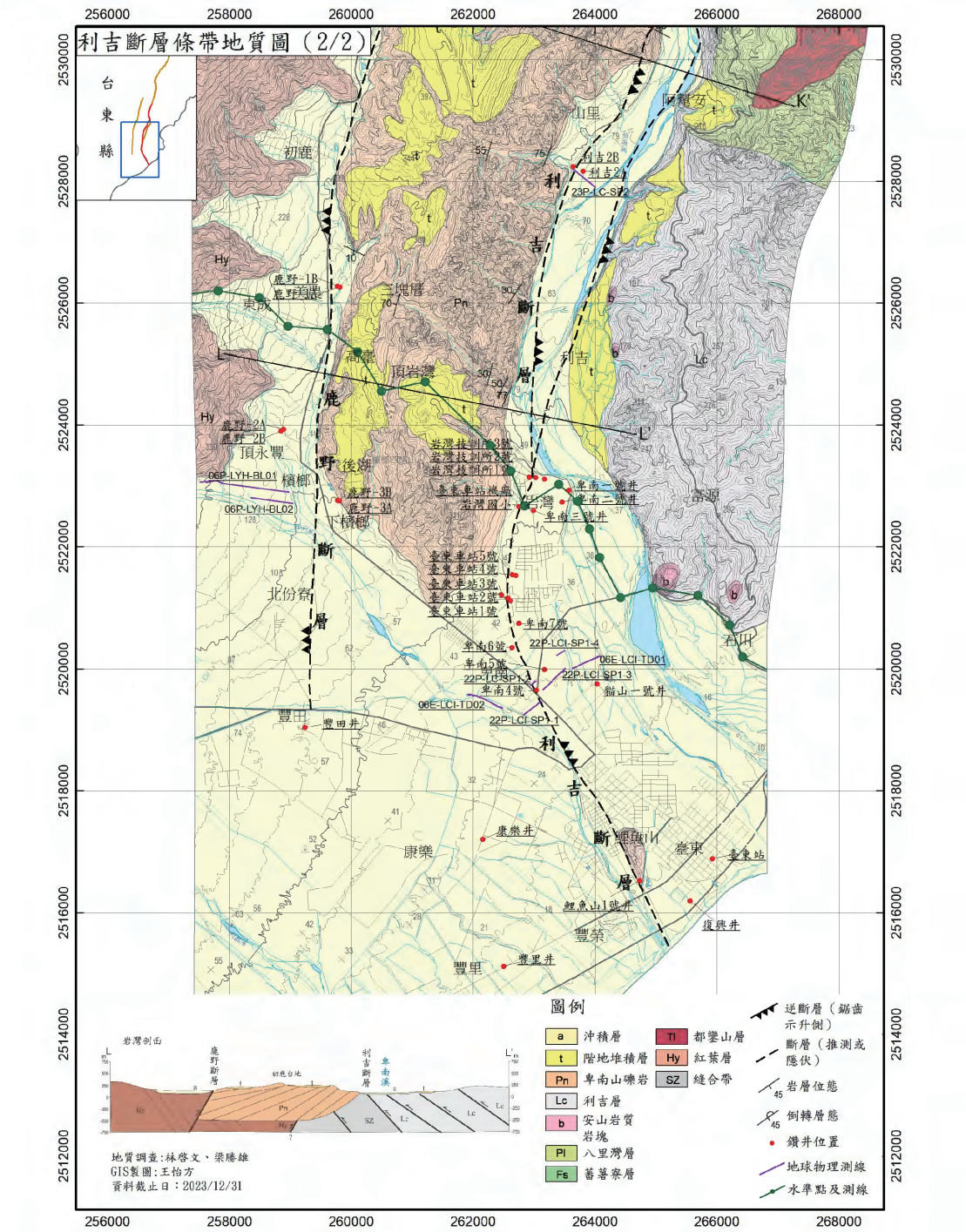


圖 1-32：利吉斷層條帶地質圖 (2/2) (梁勝雄等，2024)。

Figure 1-32：Strip Map of the Lichi Fault(2/2).

1-5-2 本年度工作項目

I. 本年度 (114 年度) 將針對花蓮及臺東地區的八條斷層 (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) 進行研究 (圖 1-2)。

II. 我們預計利用雷達差分干涉方法觀察 2022~2024 年的地表變形狀況。這些結果會與約 80 個 GNSS 連續站做對比以及檢測。另外會針對移動站及精密水準測量做對比。

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。

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。

1-5-3 本年度期末計畫交付項目

1. 研究區域中 2022~2024 年雷達視衛星方向速率分析結果。
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. 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。臺灣東部地區為地震活動頻繁地區，2018 年 2 月 6 日，花蓮地區發生芮氏規模 Mw 6.2 花蓮地震，造成房屋毀損及道路損壞；2022 年 9 月 17 日臺東地區發生芮氏規模 Mw 6.6 的關山地震與 2022 年 9 月 18 日發生芮氏規模 Mw 6.8 的池上地震，造成房屋毀損、道路損壞及交通中斷。同震地表變形與災害判釋有許多團隊於第一時間前往調查，然而對於地震前後、甚至長期間震時期的地表變形卻甚少有監測與探討，雖然東部地區不似西部人口密集，卻是板塊聚合交界，地震造成的災害亦為當地帶來不便。

因此透過 PSI 技術針對臺灣東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。本年度我們將探討 2022~2024 年的地表變動量。

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 2022~2024	升軌 Path：69	TOPS	12 天	Subswath： 2 (F2)	91
	降軌 Path：105	TOPS	12 天	Subswath： 1 (F1)	80

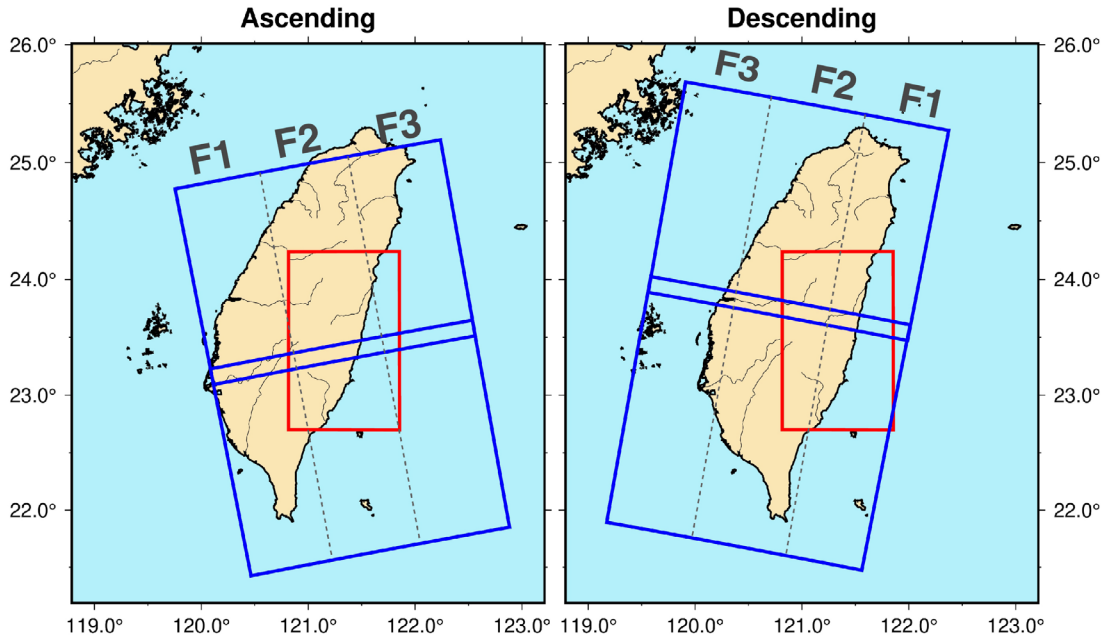


圖 2-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。

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)。

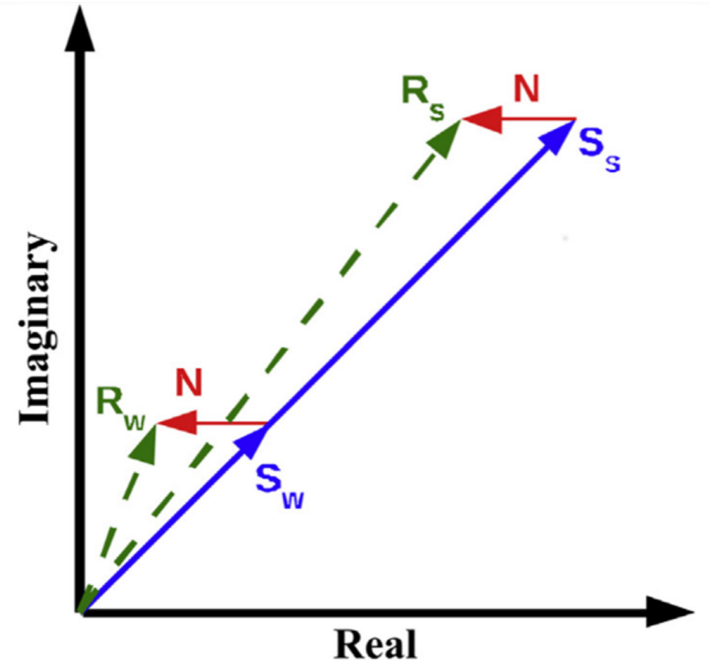


圖 2-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。(Osmanoglu et al., 2016)

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

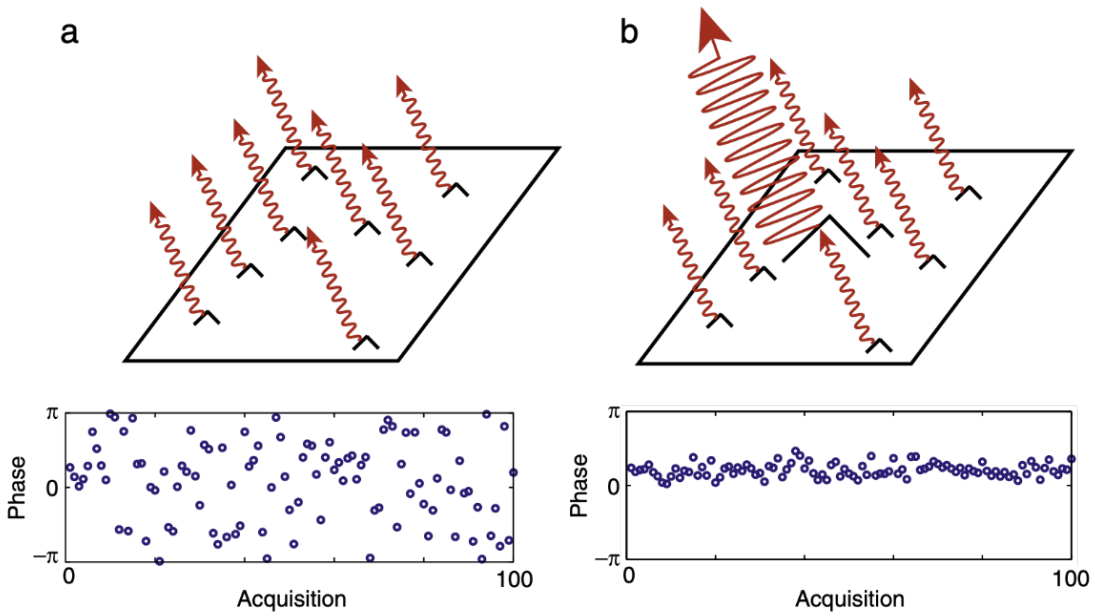


圖 2-3：永久散射體對相位的影響示意圖。(a) 一般散射體所反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(b) 一個像素之中有一個好的永久散射體時，反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(Hooper et al., 2012)

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。

其中，本研究使用 ALOS 15 m 解析度之 DEM 進行處理。由於東部地區整體變形量相對較大，DEM 誤差對 PSI 解算結果之影響相對不顯著，實際測試顯示 15 m DEM 已可提供穩定且可靠之成果。內政部光達 DEM 雖具較高解析度，但需另行申請且資料使用上有攜出限制，故未納入本研究使用。花東地區地形起伏大，大氣延遲誤差較西部明顯，TRAIN 中的大氣模式由於空間解析度大，對小尺度水氣變化不敏感，不適用於臺灣，TRAIN 亦可使用高程相關模型在山區進行大氣修正，然而花東地區屬於狹長縱谷地形，地形起伏劇烈，大氣延遲的空間分布常與地形高度及坡向高度相關，這些區域同時也是斷層分布密集、地表變形幅度較大的區域。實際測試結果顯示，TRAIN 在部分區域會將與地形相關之真實地表變形一併視為大氣訊號加以移除，導致變形幅度被低估，甚至削弱跨斷層的變形梯度。因此，為避免過度校正而影響構造變形訊號的判識，本研究最終未採用 TRAIN 修正成果，而仍以傳統濾波方式作為主要的大氣誤差處理方法。

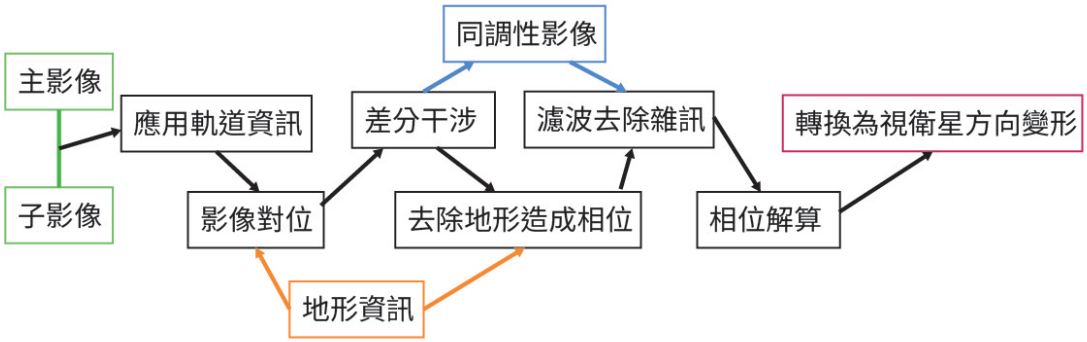


圖 2-4：雷達影像處理流程第一階段 - 雷達差分干涉處理流程圖。本階段主要工作為使用 GMTSAR 軟體處理 Sentinel-1 影像的差分干涉，並且將其輸出為 StaMPS 軟體所能使用的檔案格式。(團隊自行產出)

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.

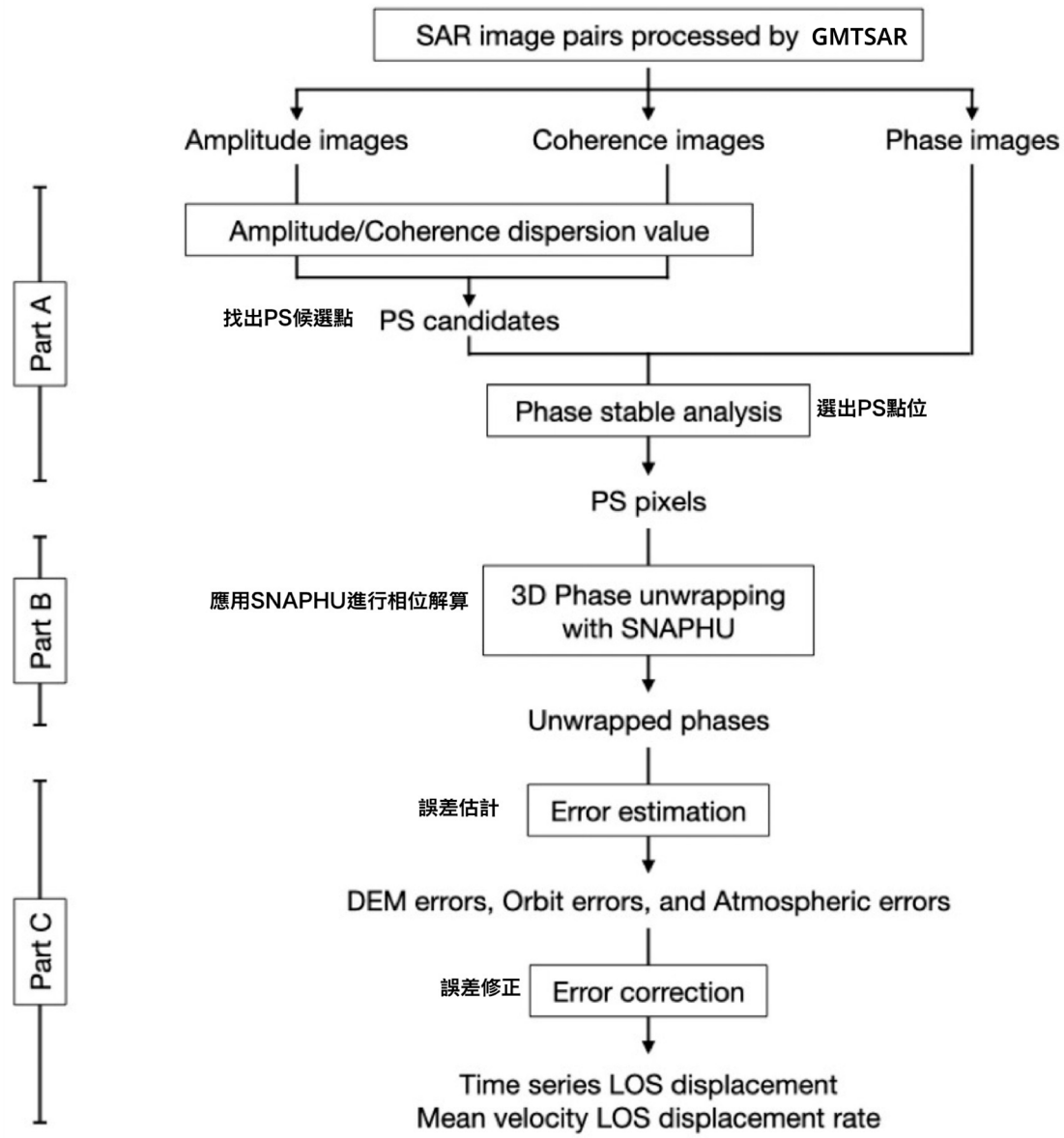


圖 2-5：雷達影像處理流程第二階段- PSI 處理流程圖。本階段主要工作為使用 StaMPS 演算法求得研究區域內地表變形的 PSI 時間序列與平均速度場之成果。(團隊自行產出)

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 (圖 2-6)。

b. 將 PSI 速度場以 GNSS 測站為中心挑選 100~500 公尺內的點位，取其平均 LOS 速度，作為 GNSS 測站位置的 PSI 觀測值，最後分別將 PSI 與 GNSS 觀測值相對同一參考站位置，比對兩者觀測值相關性。。

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。

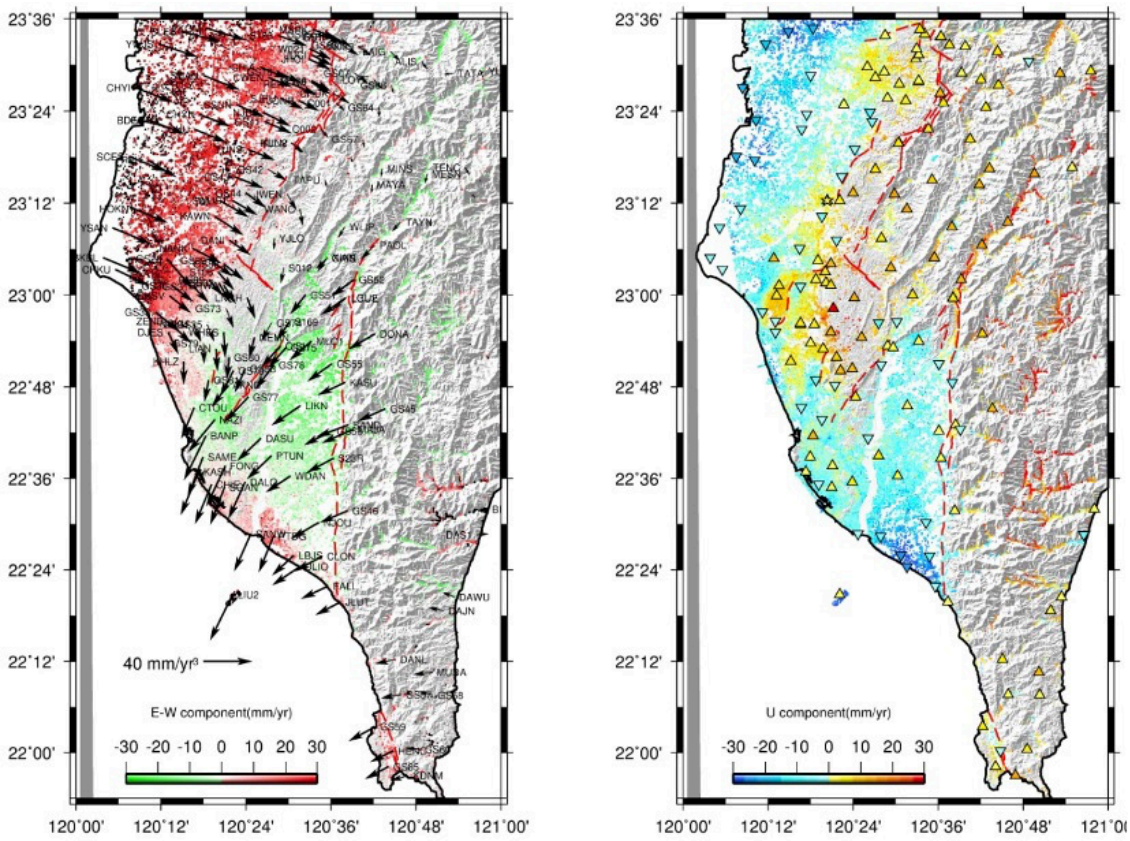


圖 2-6：SENTINEL-1 東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續 GNSS 測站水平方向移動速率。圓圈為連續 GNSS 測站垂直方向移動速率。

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.

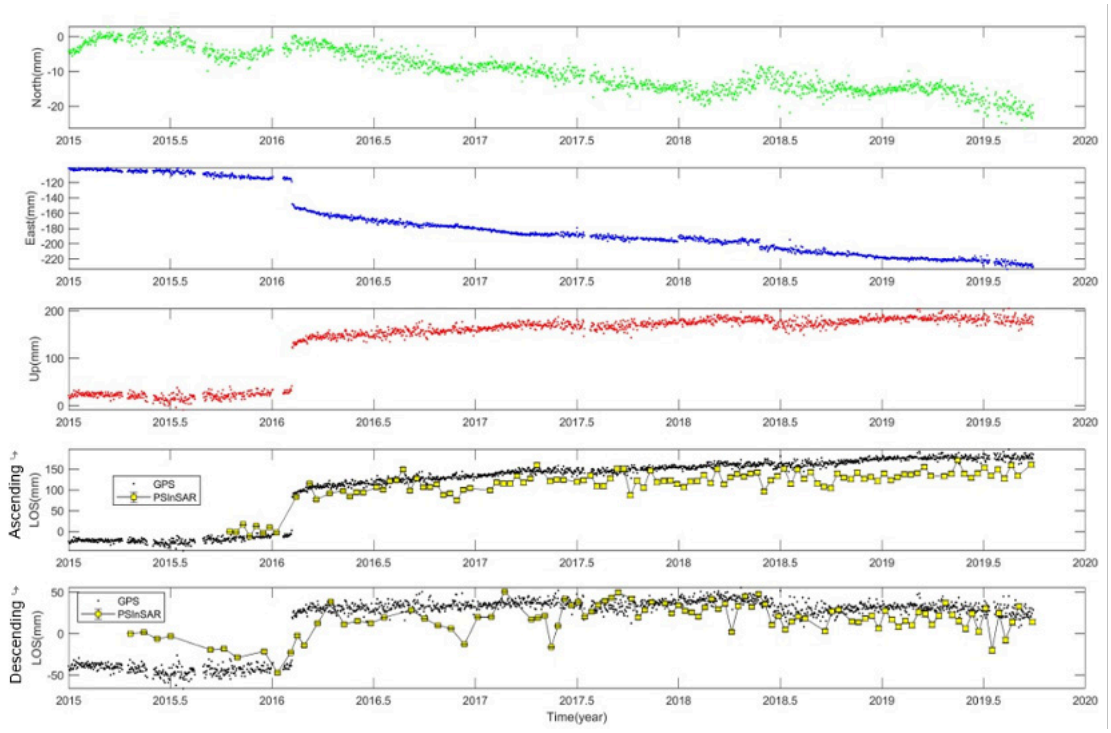


圖 2-7：SENTINEL-1 (asc： 2015/10~2019/9; des： 2015/4~2019/9) 雷達影像與 GNSS 測站龍崎 (LNCH) 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GNSS 三方向時間序列；黑色為 GNSS 投影至視衛星方向。黃色方型為雷達影像時間序列。

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。

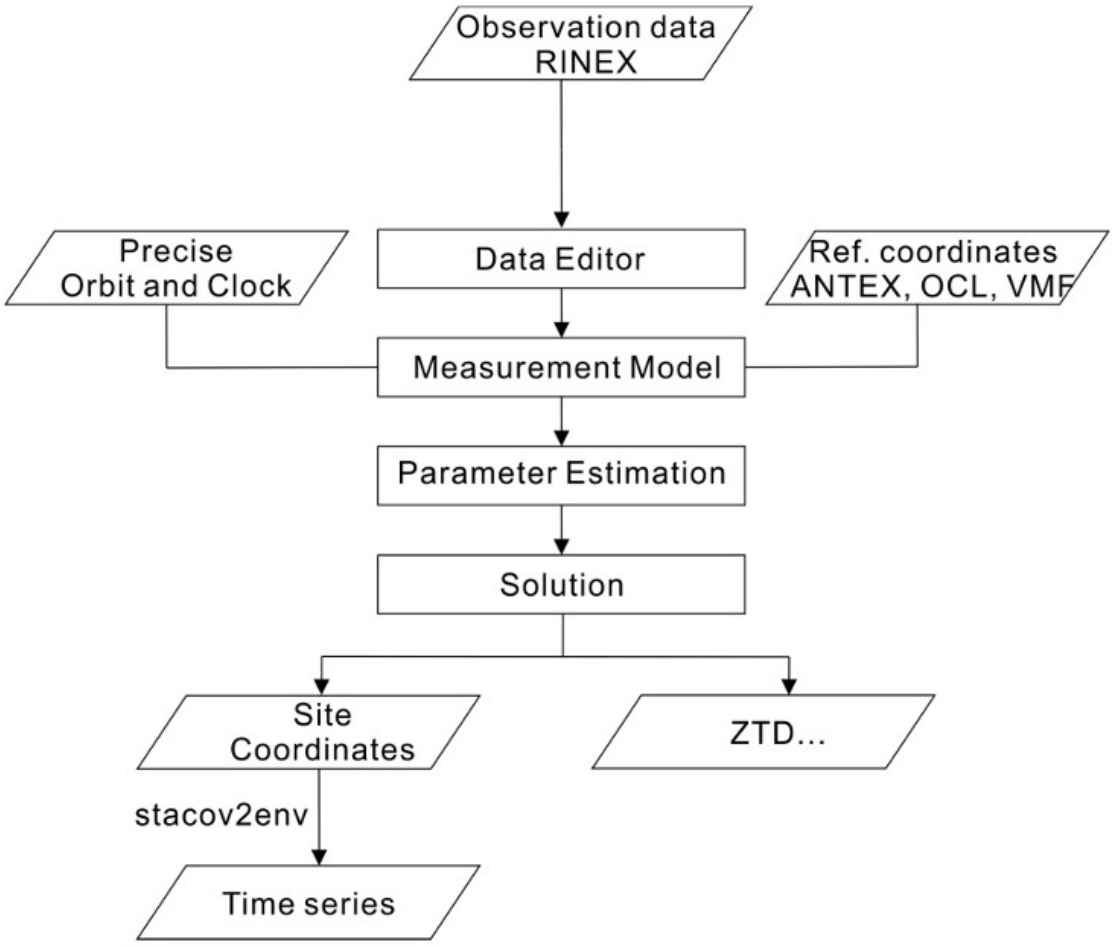


圖 2-8：GipsyX 軟體處理流程。

Figure 2-8：GipsyX processes.

2-3 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。

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

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 2-6 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。

可將 2-7 式應用線性觀測方程（2-8 式），表示觀測值資料向量 d 與東西向與垂直向速度模型參數向量 m 之間的關係。

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

最後可利用最小平方法逆推東西向與垂直向速度模型參數 m。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、東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12天，使用的影像時間自2021年12月至2025年1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，降軌道方向長達半年無觀測資料，此後僅剩 Sentinel-1A 衛星影像。本年度觀測時間為 2022 年 1 月至 2024 年 12 月，由於 2022 年 6 月前的影像頻率不穩定，且有數個地震發生於觀測時間內，因此我們取用 2021 年 12 月至 2024 年 12 月底的影像，希望增加影像數量及時間跨距活得較好的成果。影像經將不符合範圍以及成像不佳的影像踢除，最終使用幅數如表 3-1 所示。

表 3-1：Sentinel-1 衛星影像使用幅數。

Table 3-1：Numbers of Sentinel-1A satellite images used in this project.

	2022~2024
升軌（Ascending）	91 幅
降軌（Descending）	80 幅

3-1 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）。升降軌影像皆需要上下兩圖幅才能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後以 GMTSAR 處理後全部圖幅再裁切，最後使用 StaMPS 進行 PSI 流程。

我們使用 Sentinel-1 衛星影像，自有臺灣影像後的觀測頻率如圖 3-2 所示，升軌道與降軌道影像在 2018 年至 2021 年觀測再訪週期為 6 天，每個月最多可達五幅影像，2022 年後再訪週期最高為 12 天，影像偶有空窗，降軌道方向於 2022 年有長達六個月時間無觀測影像。圖 3-3 為不同區域比較影像佔有率與時序分布，臺灣北部、中部與西部地區（如 TP、TC、TN 與 Kao）在整段觀測期間內皆維持較高且穩定的取像頻率，使其具備密集的干涉對與良好的時間覆蓋；相較之下，臺灣東部（TE）在 2022–2024 年期間的影像密度與時序連續性較為不足，且可見多處空窗期，形成資料時間序列的不完整性。由於 PSI 解算高度依賴多時段穩定、連續的相位資訊，這樣的取像差異直接反映在解算品質上，使東部的 PSI 點密度及時序穩定性相對偏弱。另外，臺灣東部地區地表植被覆蓋率遠高於西部都會區，在地形方面，中央山脈與海岸山脈之陡峭地形，幾何畸變使有效觀測點位顯著減少，尤其在升降軌視角差異下空間不連續更為明顯。加上 2022–2024 年間東部經歷長濱、光復、池上與花蓮等地震活動，地殼變形以非線性模式表現，震後鬆弛、餘震帶與局部破裂反應均使相位行為偏離 PSI 所假設之緩變與穩態模型，使部分區段難以維持長期相關性，這些因素都會降低相位穩定度。相較於西部平原區，東部地區確實較需要透過短基線差分干涉技術（SBAS）補足影像密度不足的問題，惟受限於地形起伏劇烈、植被覆蓋率高及同調性快速衰減等因素，目前仍未產出具穩定性與可解釋性的 SBAS 解算成果，

尚需進一步針對演算法參數設定與資料配置進行調整與測試。因此，本研究仍以 PSI 作為主要分析方法。

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，一開始我們依據以往經驗，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，但東部地區多為山區植被茂密區域，而且使用影像數量相較過去區域少得多，獲得的 PSI 點數少許多，在其他處理參數維持程式預設，門檻參數與西部相同的組合，西部可獲得的點數至少為 200 萬 PS 點位，東部則為 10 萬點左右，因此我們在硬體許可前提下，逐次測試選點門檻直到硬體當機無法執行為止，盡可能獲得較多點數，最終我們選擇以雷達強度散佈率門檻值為 0.85、和 Weed Standard Deviation (WSD) 為 1 進行處理，獲得近 50 萬點成果。

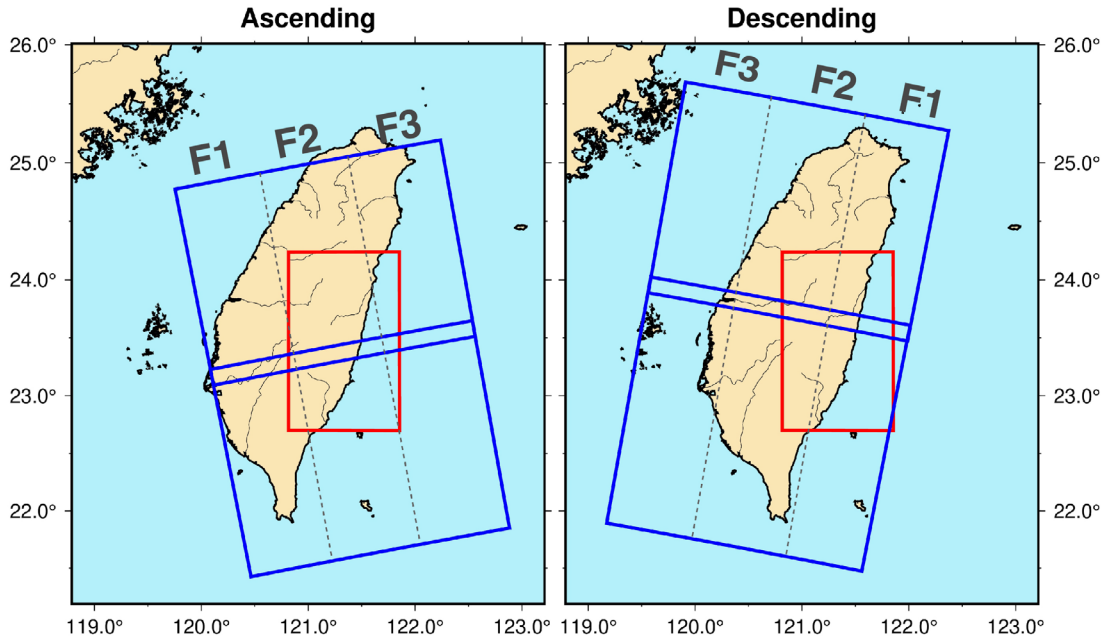


圖 3-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與本次研究區域分佈圖。

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

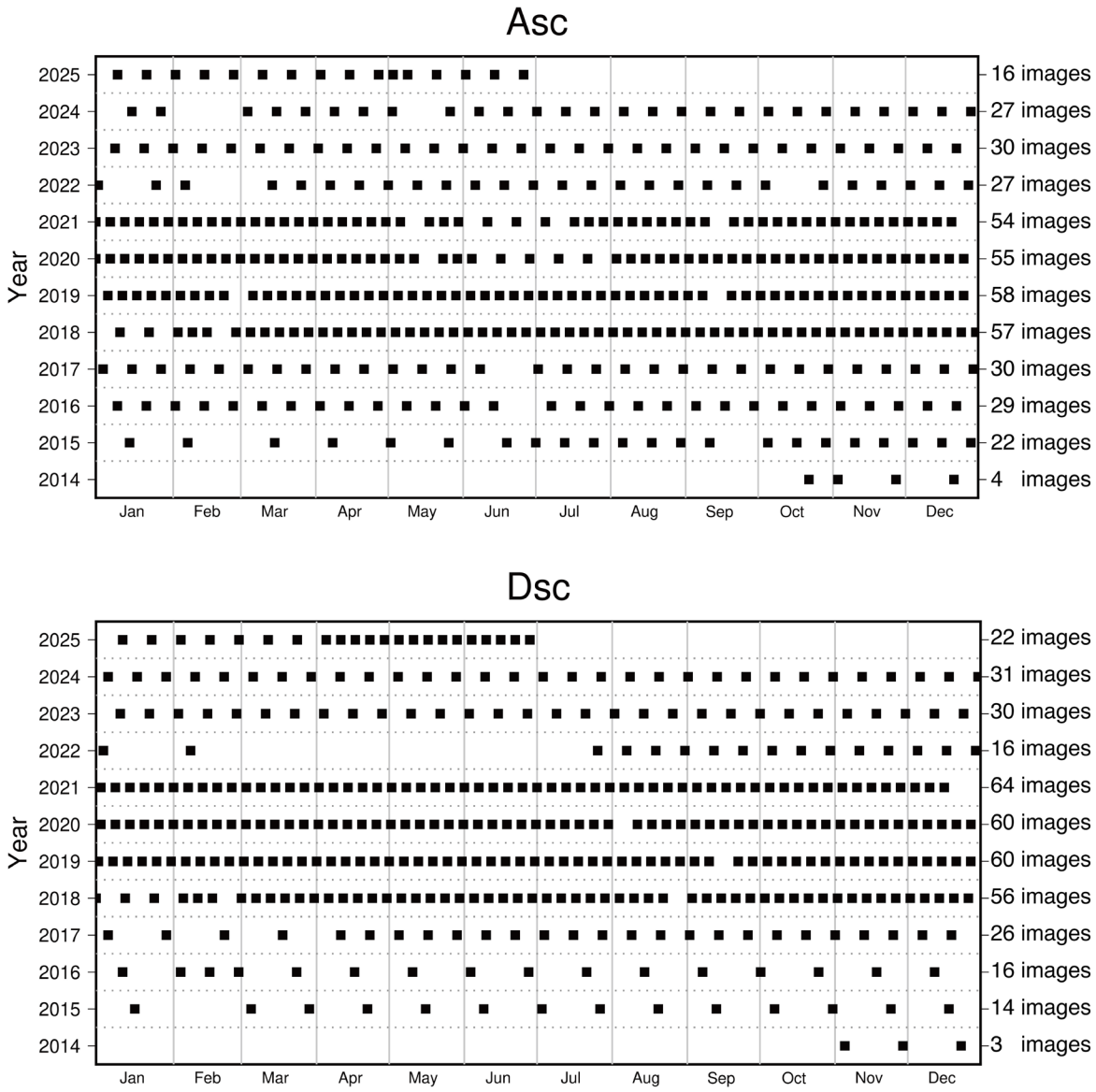


圖 3-2：2014-2025 年 Sentinel-1 影像時間分布與觀測頻率圖。上圖為升軌道影像，下圖為降軌道影像。每一個黑色方框代表一次衛星影像拍攝日期，x 軸為月份，y 軸為年份，並於右側標示各年度的影像數量。整體而言，2018 年後影像取得頻率明顯提升，約維持在每年 50–60 張以上。

Figure 3-2: Temporal distribution and acquisition frequency of Sentinel-1 images from 2014 to 2025. The upper panel shows ascending-orbit images, while the lower panel displays descending-orbit images. Each black square represents a single satellite acquisition date, with the X-axis indicating months and the Y-axis indicating years. Annual image counts are listed on the right side of each panel. Overall, the image acquisition frequency increases significantly after 2018, generally maintaining more than 50–60 images per year.

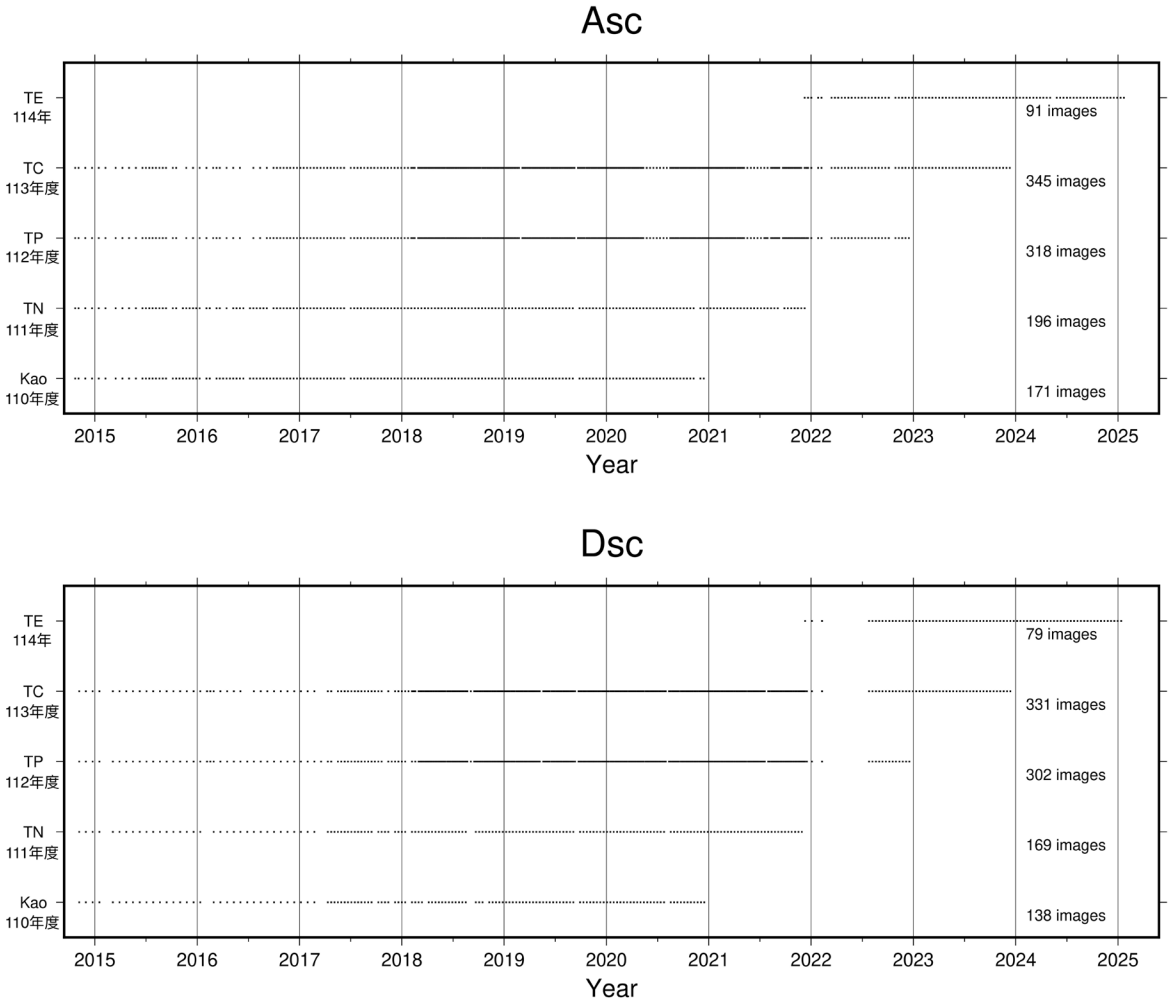


圖 3-3：2014–2025 年 Sentinel-1 臺灣各區域影像時間分布圖。上圖為升軌道影像，下圖為降軌道影像，顯示臺灣各區域之影像取得情形，x 軸為年份，y 軸為各區域影像數量，TE 為東部地區，TC 為中部地區，TP 為北部地區，TN 為嘉南地區，Kao 為高屏地區。每一個黑點代表一次影像取得時間；右側標示各區域累積影像總數。

Figure 3-3: Temporal distribution of Sentinel-1 images over different regions of Taiwan from 2014 to 2025.The upper panel shows ascending-orbit images and the lower panel shows descending-orbit images, illustrating the acquisition coverage across Taiwan. The X-axis represents years and the Y-axis represents the number of images acquired in each region. TE denotes eastern Taiwan, TC denotes central Taiwan, TP denotes northern Taiwan, TN denotes the Chia-Nan (southern plains) region, and Kao denotes the Kaohsiung–Pingtung region. Each black dot corresponds to an individual image acquisition date, and the cumulative number of images for each region is listed on the right side.

3-2 2022~2024 年雷達影像成果

從 2021 年 12 月 08 日開始至 2025 年 01 月 21 日之間，選取 91 幅 Sentinel-1A 升軌道（Ascending）影像，以 2023 年 07 月 19 日為主影像，此外，選取 80 幅 Sentinel-1A 降軌道（Descending）影像，以 2023 年 09 月 07 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，取得 2022 年至 2024 年研究區域內的衛星視角（LOS）時間序列，隨後對時間序列進行線性擬合，以得到 2022 年至 2024 年間的平均速度場。本研究以臺東體中（TTUN）作為參考點，對 PSI LOS 速度場進行平移修正，使速度基準一致。

雖然本年度計畫主要針對 2022 年至 2024 年間的變形進行觀測，但由於東部地區狹長範圍較大，且 2022 年期就有四起規模大於六的地震事件發生，每個地震影響的範圍並未涵蓋整個研究區，因此以 2022 年 09 月 17~18 日的關山 - 池上地震作為時間分界，將時間序列分為兩段：(1) 2022 至 2022 年 09 月 17 日，以及 (2) 2022 年 09 月 19 日至 2024 年，分別進行線性擬合，以獲得兩個時段的平均速度場。以下各子節分別敘述全時期（2022 年至 2024 年）及兩時段（2022 至 2022 年 09 月 17 日 及 2022 年 09 月 19 日至 2024 年）平均速度場成果。

3-2-1 2022~2024 平均速度場

圖 3-4 顯示 2022 年至 2024 年間花東地區升軌道方向 LOS 速度場，相對於臺東體中 (TTUN) 的 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 -4~16 cm/yr，圖中 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。本次 PSI 時間序列擬合的速度場尚未扣除 2022 年長濱、光復、關山 - 池上地震以及 2024 年花蓮地震的同震變形，結果顯示花蓮市北側及米崙斷層附近出現顯著靠近衛星移動 LOS 速度，約為 10~16 cm/yr，與 2024 年 04 月 03 日花蓮地震相關，米崙斷層未顯現速度差異。光復地區 LOS 速度約為 4~6

cm/yr，與 2022 年 06 月 20 日光復地震相關，嶺頂斷層兩側有 LOS 速度差異。花東縱谷中南段（池上、鹿野一帶）LOS 速度值約 1~6 cm/yr，與 2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震相關，池上斷層與利吉斷層兩側約有 2 cm/yr 的速度差異。

圖 3-5 為 2022 年至 2024 年間花東地區降軌道方向 LOS 速度場，相對於臺東體中 (TTUN) 的 PSI 成果顯示 LOS 速度值大致分布在 -5~23 cm/yr，PS 點位呈現暖色系代表地表靠近衛星，冷色系代表遠離衛星。本段的 PSI 時間序列擬合的速度場尚未扣除 2022 年關山 - 池上地震以及 2024 年花蓮地震的同震變形，但由於 Descending 影像在 2022 年長濱地震與光復地震發生時恰有觀測空窗，因此兩事件在降軌資料中無同震訊號。其餘事件部分，花蓮市北側及米崙斷層附近出現顯著靠近衛星移動 LOS 速度，最大 LOS 速度約達 15~23 cm/yr，為 2024 年 04 月 03 日花蓮地震同震位移影響。沿花東縱谷向南（瑞穗、玉里、池上至鹿野）亦可觀察到 LOS 速度高區，大約介於 2~8 cm/yr，海岸山脈一帶則呈現 -5 – 0 cm/yr 的 LOS 速度值，與 2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震相關，池上斷層與利吉斷層兩側約有 3~4 cm/yr 的速度差異。

整體而言，2022 年至 2024 年間花東地區的 LOS 速度高區多與 2022 年與 2024 年發生的地震事件高度相關，反映未扣除同震位移時 PSI 速度場中所保留的突發性變形訊號。

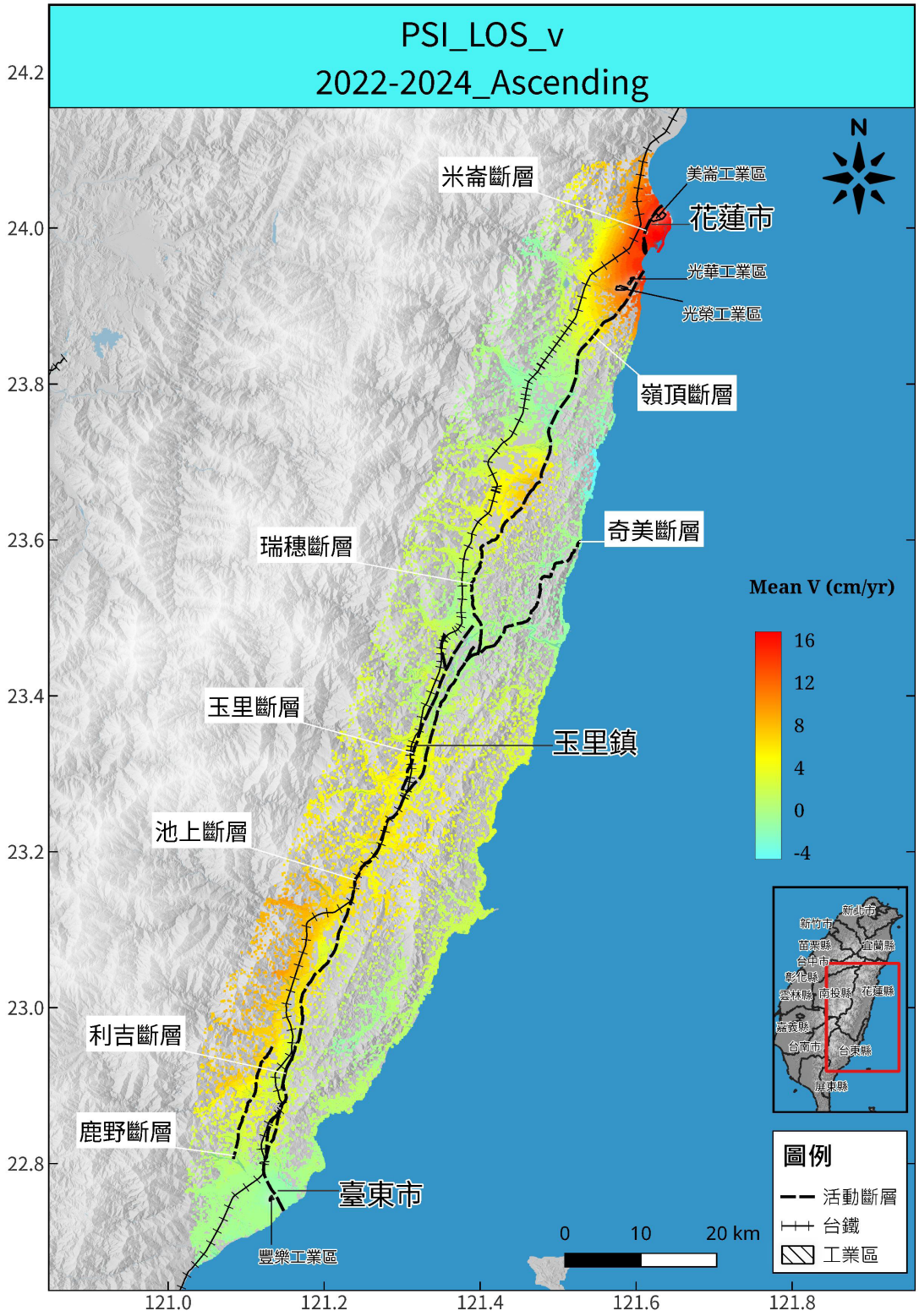


圖 3-4：2022~2024 升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-4：Average LOS velocity fields between 2014 and 2024 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.

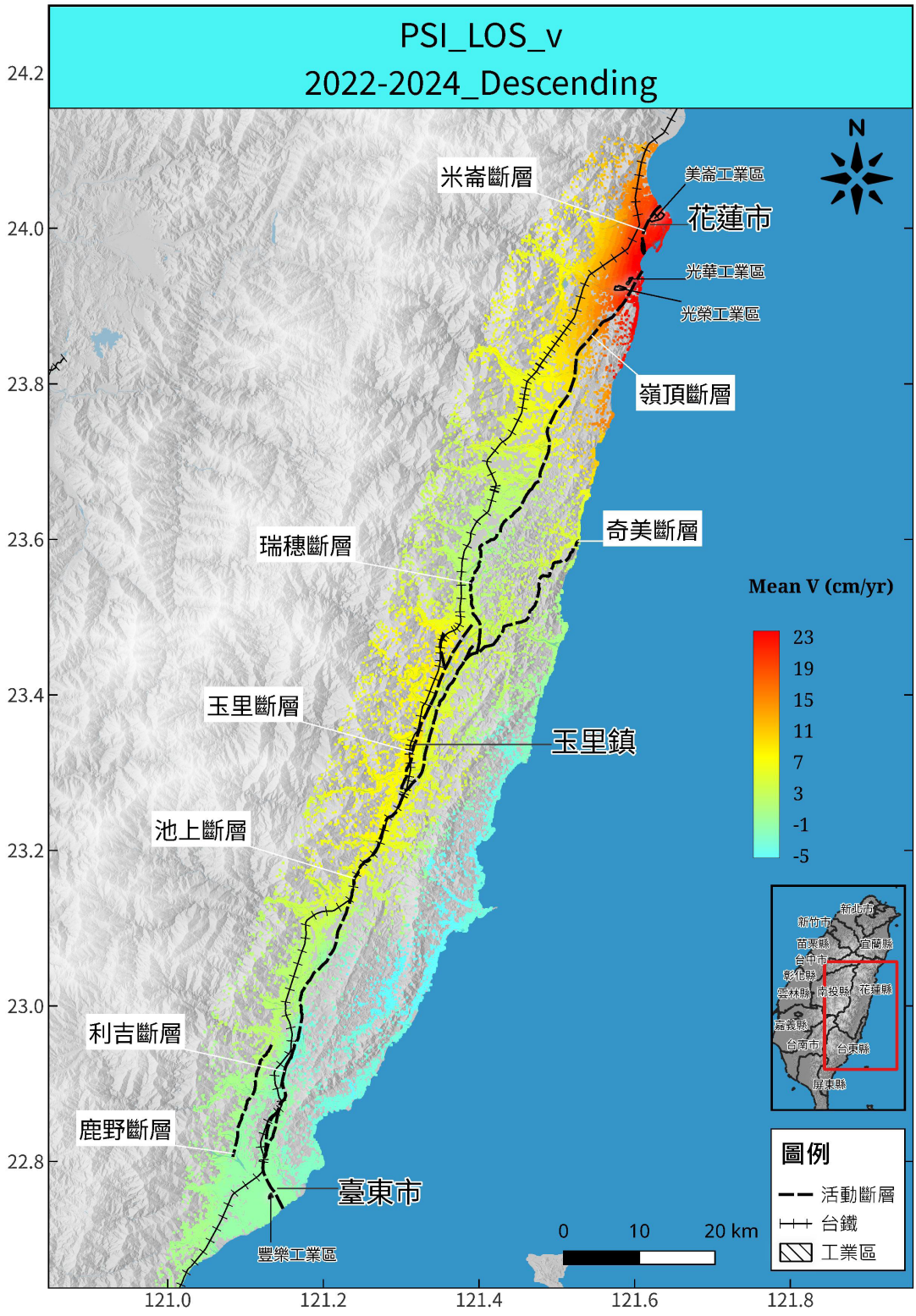


圖 3-5：2022~2024 降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-5：Average LOS velocity fields between 2014 and 2024 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.

3-2-2 2022~2022.09.17 平均速度場

2022 年是花東地區地震活動頻繁的一年，該年度發生四起規模大於 6 的地震，分別是 2022 年 03 月 23 日地震規模 6.2 的長濱地震、2022 年 06 月 20 日地震規模 6 的光復地震以及 2022 年 09 月 17、18 日地震發生規模 6.6 及 6.8 的關山 - 池上地震，這四起地震事件的影響範圍廣泛，對花東縱谷造成明顯的同震地表變形。關山 - 池上地震後，規模大於 6 以上的地震事件僅有 2024 年 04 月 03 日的花蓮地震 (ML 7.1)，且地震影響範圍相對侷限在花蓮北部地區，因此我們以 2022 年 09 月 17~18 日的關山 - 池上地震為時間分界，以區分地震前後的變形型態並釐清地表變形來源。

圖 3-6 為 2022 年至 2022 年 09 月 17 日升軌道影像的 LOS 速度場，實際使用的影像日期為 2021 年 12 月 08 日至 2022 年 09 月 10 日，包含長濱地震與光復地震的同震變形，成果顯示變形主要沿花東縱谷分布，相對於臺東體中 (TTNU)，花蓮市至壽豐地區呈現遠離衛星移動，速度約為 -5~-8 cm/yr，米崙斷層附近並未出現明顯速度梯度，光復地區則出現一明顯速度高區，最高可達 15 cm/yr，並自嶺頂斷層向外遞減，此區變化為主要反映 2022 年 06 月 20 日光復地震同震效應。玉里、池上至鹿野一帶的玉里斷層與池上斷層兩側亦呈現速度差異；東側呈現向衛星方向移動約 3~10 cm/yr，西側靠近中央山脈地區則呈現 -3~-10 cm/yr 的速度遠離衛星移動，此變化量主要與 2022 年 03 月 23 日長濱地震的同震位移有關。

圖 3-7 為 2022 年至 2022 年 09 月 17 日降軌道影像速度場，使用的影像日期為 2021 年 12 月 10 日至 2022 年 09 月 12 日，由於 Sentinel-1 衛星在降軌道方向於 2022 年 02 月 09 日至 2022 年 07 月 25 日期間存在觀測空窗，因此本時段的降軌道速度場並不包含 2022 年長濱和光復地震的同震觀測資訊。成果顯示，相對於臺東體中 (TTUN)，大部分區域呈現靠近衛星移動；花蓮至壽豐一帶 LOS 速度值約為 9~11 cm/yr，光復至池上一帶 LOS 速度值約為 10~20 cm/yr，本時段觀測區域內的八條斷層，沿著斷層兩側皆未觀察到明顯的速度差異。

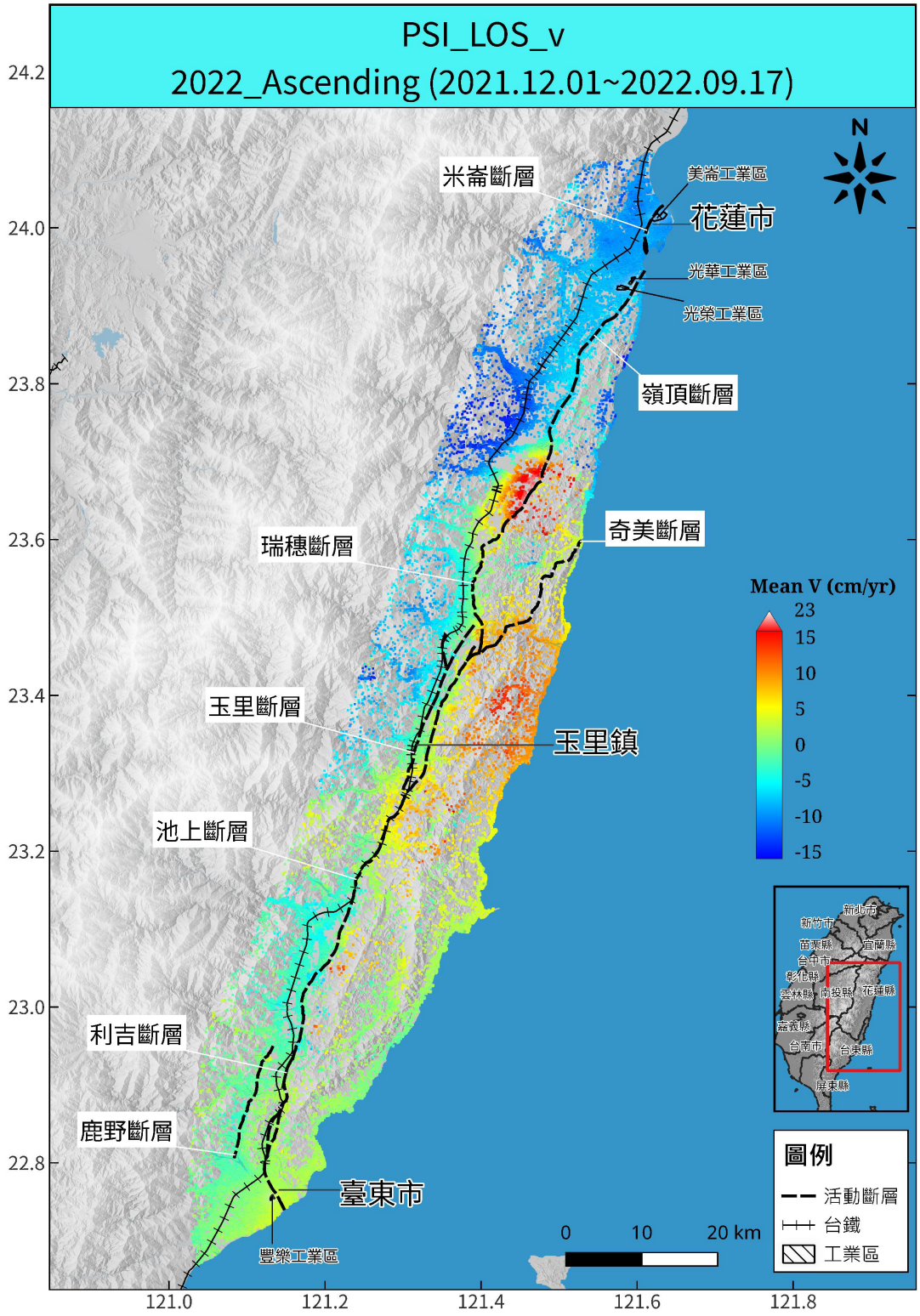


圖 3-6：2022~2022.09.17 升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-6：Average LOS velocity fields between 2014 and 2022.09.17 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.

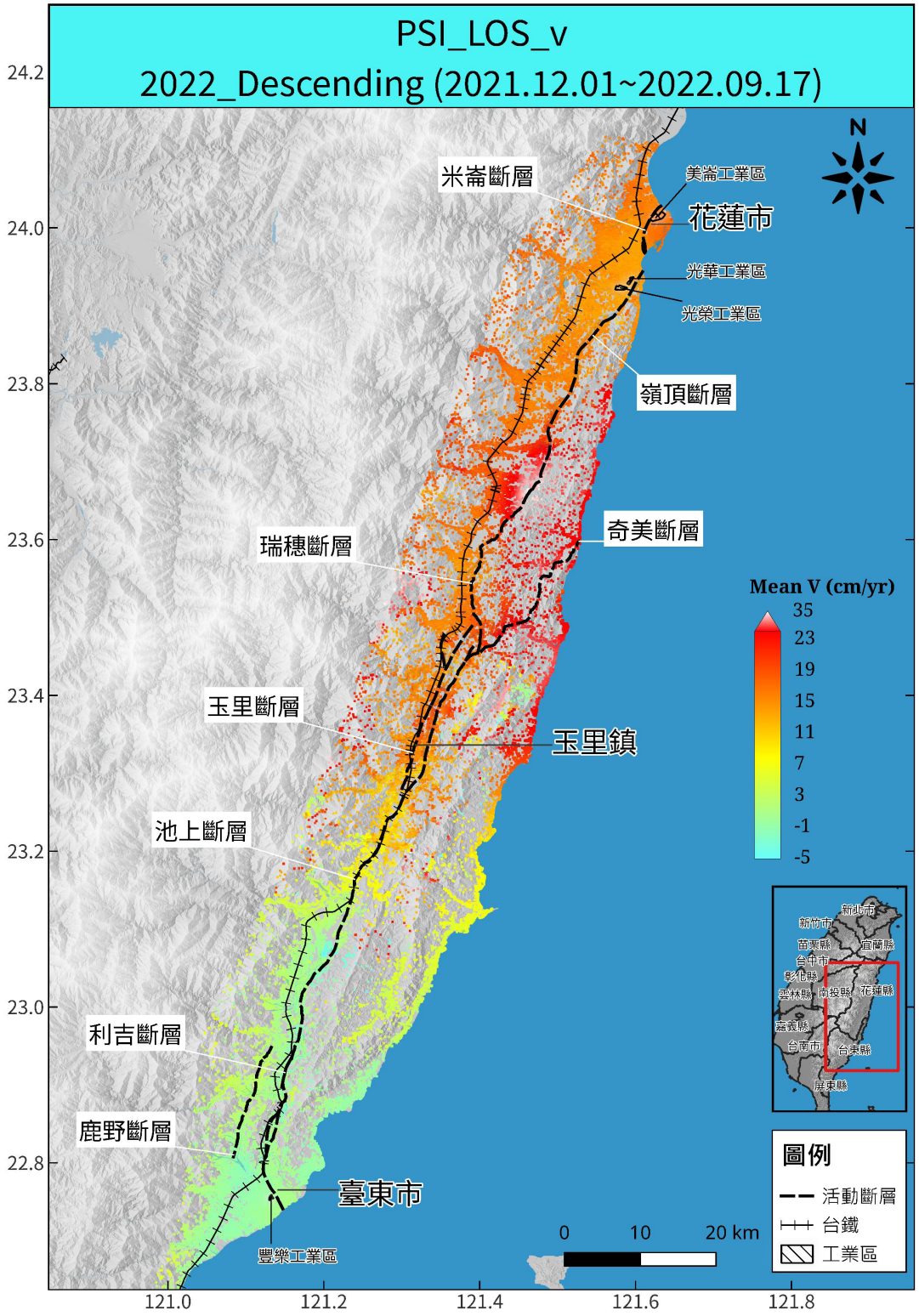


圖 3-7：2022~2022.09.17 降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-7：Average LOS velocity fields between 2022 and 2022.09.17 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.

3-2-3 2022.09.19-2024 平均速度場

2022 年 09 月 19 日關山 - 池上地震之後，地震規模大於 6 的事件僅有 2024 年 04 月 03 日地震規模 7.1 的花蓮地震。該地震事件在花蓮港潮位站觀測到約 45 公分的高程變化，花蓮市多處亦出現同震地表破裂，但其影響範圍集中於花蓮市至壽豐一帶。為保留震後的地表變形行為，本研究並未對花蓮地震的同震位移進行扣除，以觀察關山 - 池上地震後至 2024 年間的地表變形特徵。

圖 3-8 為 2022 年 09 月 19 日至 2024 年升軌道影像 LOS 速度場，實際使用的影像日期為 2022 年 09 月 22 日至 2025 年 01 月 21 日，其中包含花蓮地震的同震變形，結果顯示，花東地區相對於臺東體中 (TTUN) 的速度變化主要集中於北部區域；米崙臺地呈現靠近衛星移動，LOS 速度場約為 10~27 cm/yr，壽豐至光復一帶呈現遠離衛星移動，LOS 速度約為 -1~-5 cm/yr，在嶺頂斷層兩側亦可觀察到速度差異，惟在海岸山脈內的 PS 點數受限於植被影響而較為稀疏，無法獲得更細部的變形分布資訊。其餘區域則為呈現較期明顯的速度變化。

圖 3-9 為 2022 年 09 月 19 日至 2024 年降軌道影像速度場，實際使用的影像日期為 2022 年 09 月 24 日至 2025 年 01 月 23 日，包含花蓮地震的同震變形。結果顯示花東地區相對於臺東體中 (TTUN) 的速度變化亦集中在北部；米崙臺地至光復一帶呈現靠近衛星移動，LOS 速度場約為 10~28 cm/yr，光復以南的斷層兩側可見些微速度差異，在靠近中央山脈一側呈現 0~3 cm/yr 的 LOS 速度，靠近海岸山脈側則呈現遠離衛星移動，LOS 速度約為 0~-4 cm/yr。

此時段升、降軌道速度場皆顯示米崙臺地整體呈現為靠近衛星移動，顯示此區域以抬升變形為主，與 2024 年 04 月 03 日花蓮地震的地表破裂觀察一致。至於壽豐至光復一代，以及縱谷和海岸山脈區域，升軌道與降軌道成果相反，暗示這些區域可能以水平運動為主。由於除花蓮地震影響區外，各地未呈現顯著的同震型速度變化，因此本時段可視為關山 - 池上地震之後的間震期速度場分布。

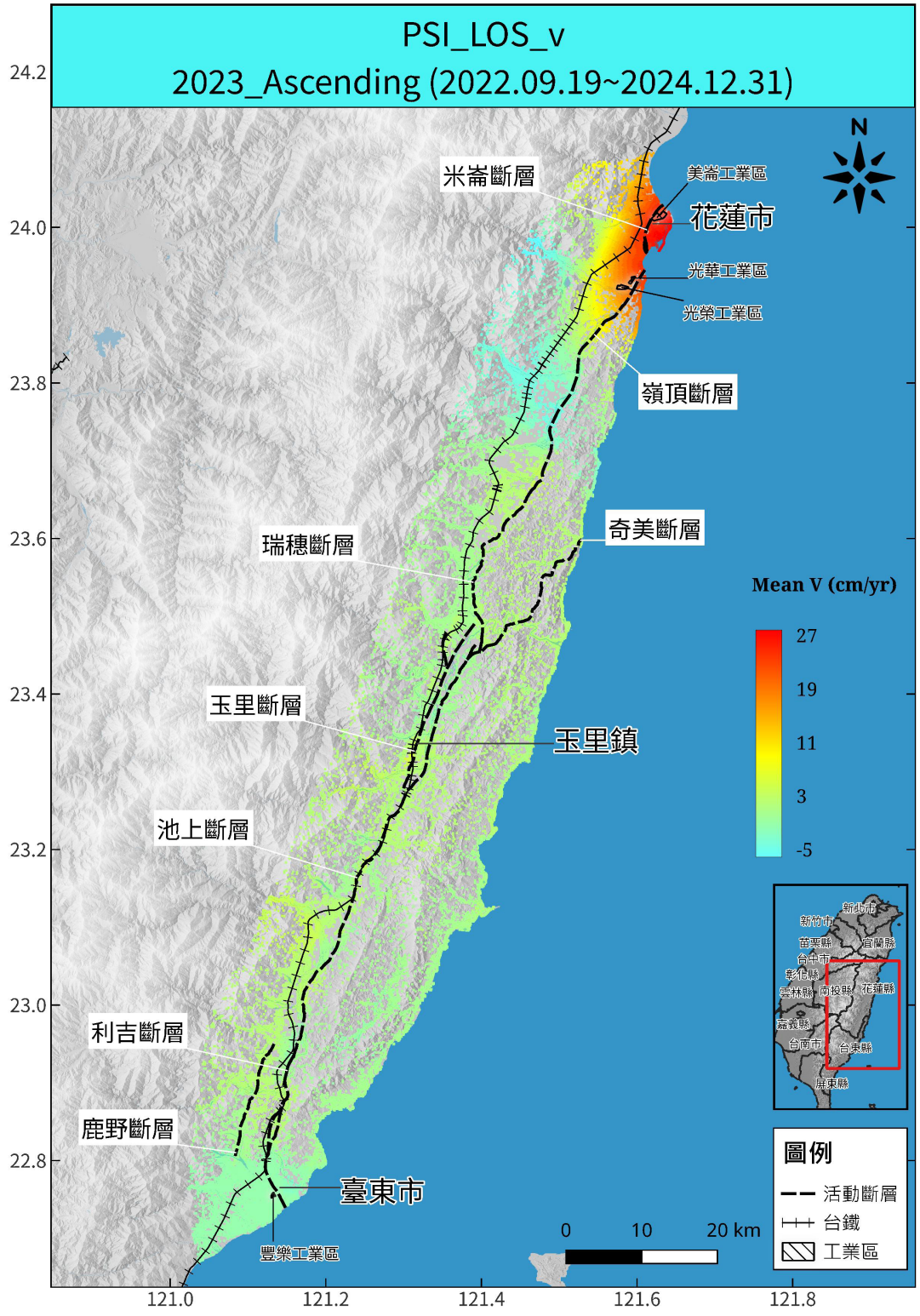


圖 3-8：2022.09.18~2024 年升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 3-8：Average LOS velocity fields between 2022.09.18 and 2024 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

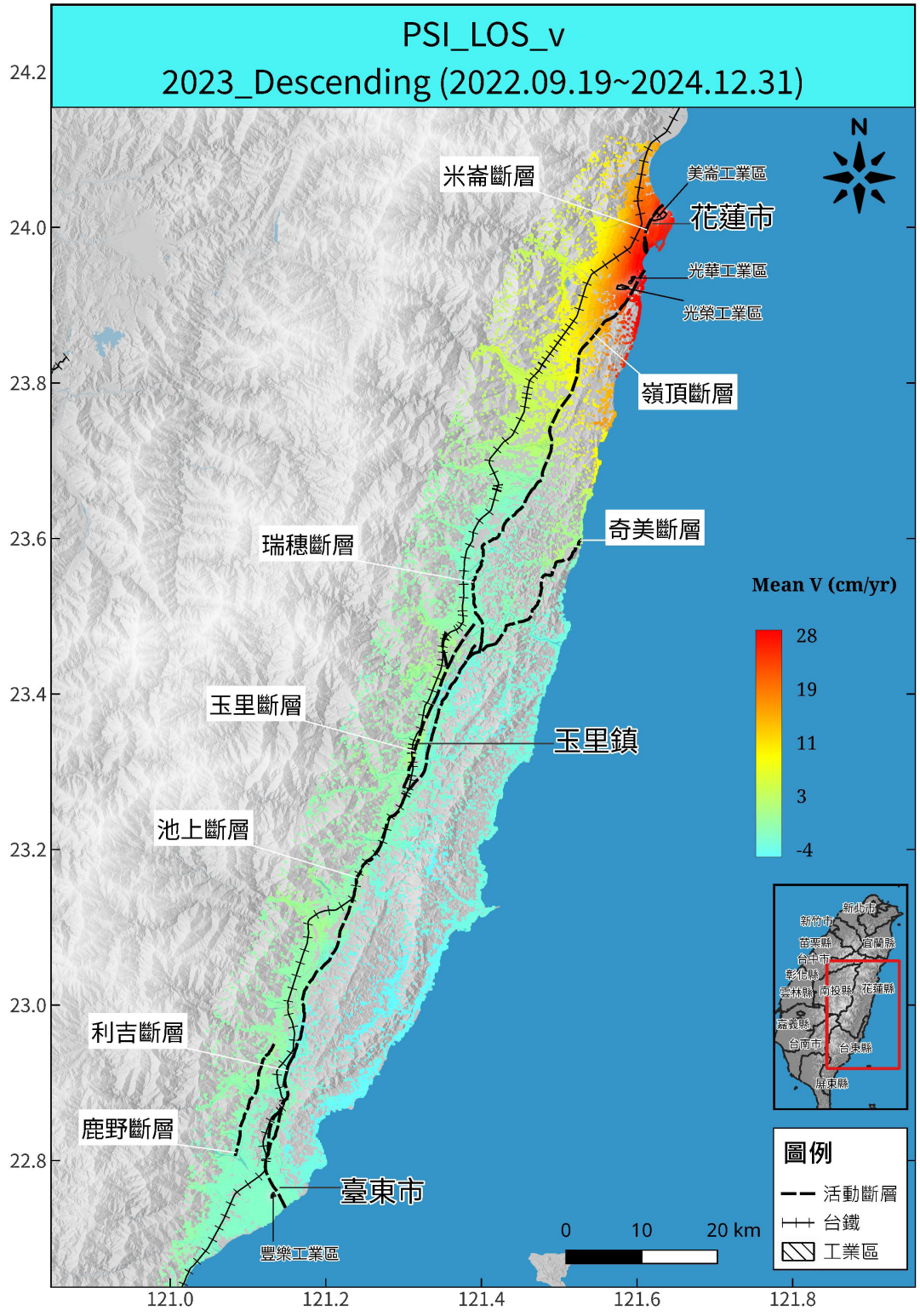


圖 3-9：2022.09.18~2024 年降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 3-9：Average LOS velocity fields between 2022.09.18 and 2024 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

3-3 重點區域時間序列分析

本年度的研究區域涵蓋範圍廣大，但相較於臺灣西部，人口密度較低，且缺乏科學園區或大型工業區，因此，本研究聚焦於數個人口較為集中且位於主要斷層帶附近的城鎮，於區域中選點進行 PSI 時間序列分析，並也挑選鄰近 GNSS 測站做時間序列分析。PSI 時間序列不受站址影響，所以在重要區域內選取東側及西側兩點，檢視東側相對西側的變化量，而 GNSS 測站則因站址分布較稀疏，僅呈現個別測站相對臺東高中站（TTSH）與測站周圍 PSI（亦相對臺東高中）的比對結果。

PSI 時間序列選定的觀測點包括花蓮市（HL1、HL2）、瑞穗鄉（RS）、玉里鎮（YL）、池上鄉（CS）及臺東市（TT）。每個區域均選取一組成對測點，包含西側的參考點與東側的觀察點，例如：HL1-HL1’、RS-RS’、YL-YL’、CS-CS’與 TT-TT’，藉由比較成對測點之相對位移，可評估斷層兩側的變形差異。GNSS 時間序列選定的觀測站為鄰近各 PSI 時間序列選點的周圍一個測站，分別為花蓮站（HUAL）、瑞美國小站（JMRS）、玉里站（JULI）、大坡國小站（TAPE）及臺東體中站（TTUN）。

圖 3-10 展示了上述重要地點的位置分布，並示意 GNSS 測站和時間序列點位的配置圖。圖 3-11 為花蓮市兩個點 HL1 及 HL2 跨米崙斷層在升軌道與降軌道方向的 PSI 時間序列，結果顯示，相對米崙斷層西側，斷層東側在 2022 年四起地震事件前後雖然出現些微變化，但地震後會隨即速回復至 0~2 cm 位置，但在 2024 年 4 月 3 日的花蓮地震中，斷層東側相對西側有 4~6 cm 的變化量，圖 3-12 為位於花蓮市的 GNSS 連續站 HUAL 的時間序列。GNSS 在 2022 年的四起地震中未呈現顯著同震位移，但在 2024 年 4 月 3 日花蓮地震時則顯示明顯位移。將其投影至 LOS 方向後，可見時間序列與鄰近 PS 點的升、降軌觀測趨勢相符，顯示兩種觀測方式在花蓮地區具有良好的相互驗證性。

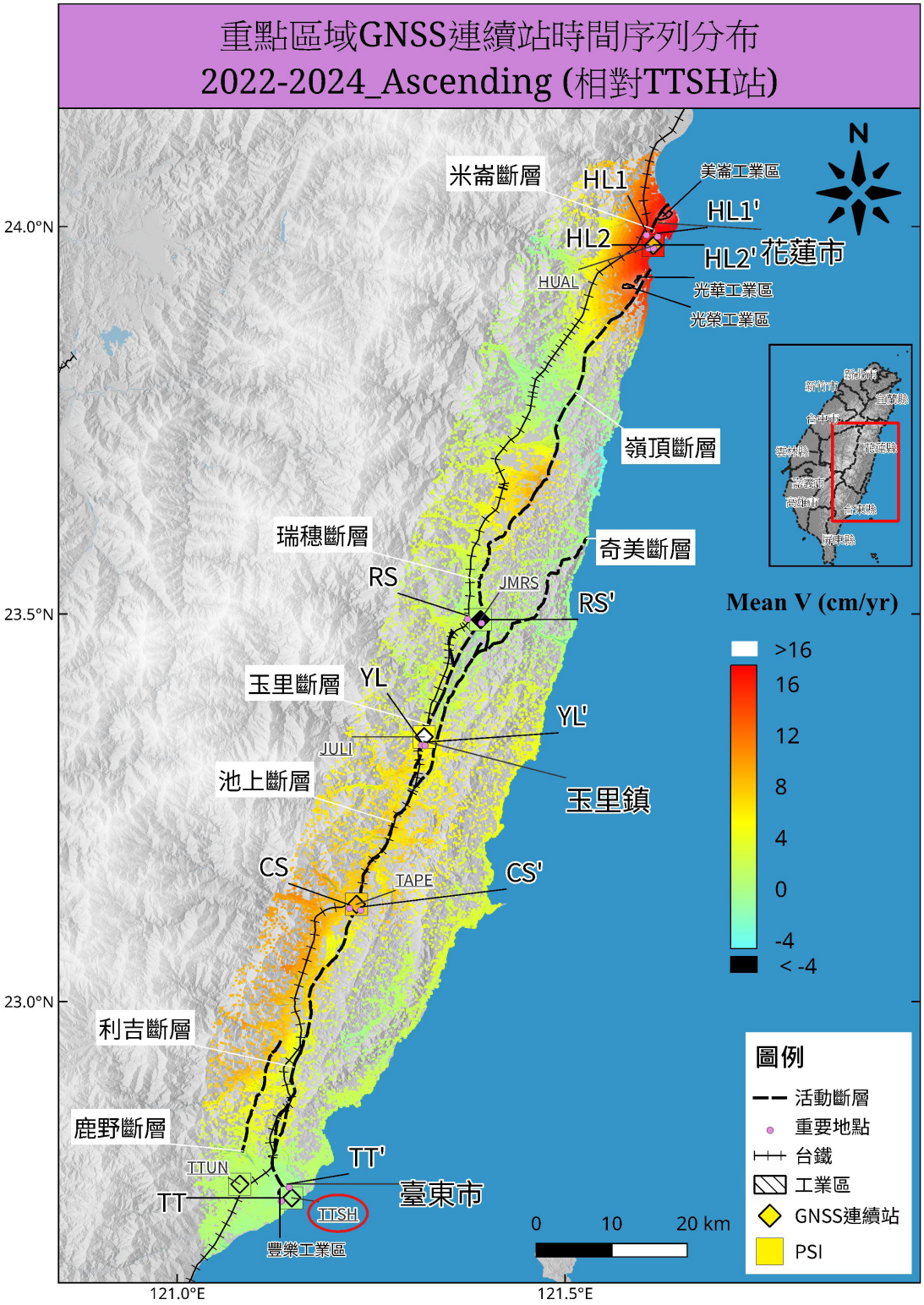


圖 3-10：重要地點與 GNSS 連續站分布圖。

Figure 3-10: The map of the important area and the continuous GNSS station.

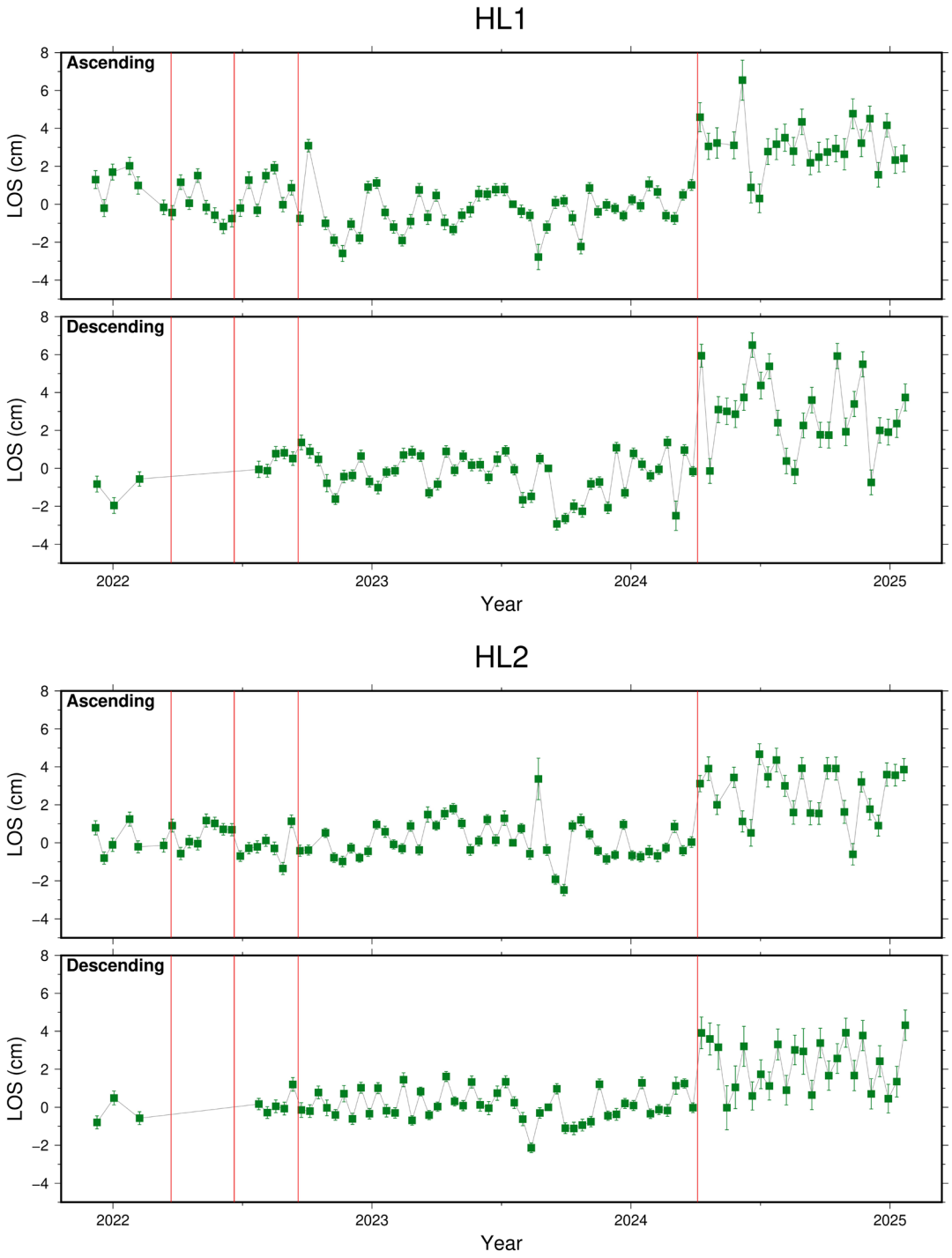


圖 3-11：2022~2024 年花蓮市區時間序列。上圖為 HL1，下圖為 HL2，綠點為每幅影像相對主影像於雷達視角方向（LOS）位移量，紅線分別為 20220323、20220620、20220917~18 以及 20240403 地震事件。

Figure 3-11: Time series for Hualien City from 2022 to 2024.The upper panel shows HL1, and the lower panel shows HL2. The green dots represent the LOS-direction displacement of each image relative to the master image. The red vertical lines indicate the earthquake events on 2022-03-23, 2022-06-20, 2022-09-17~18, and 2024-04-03.

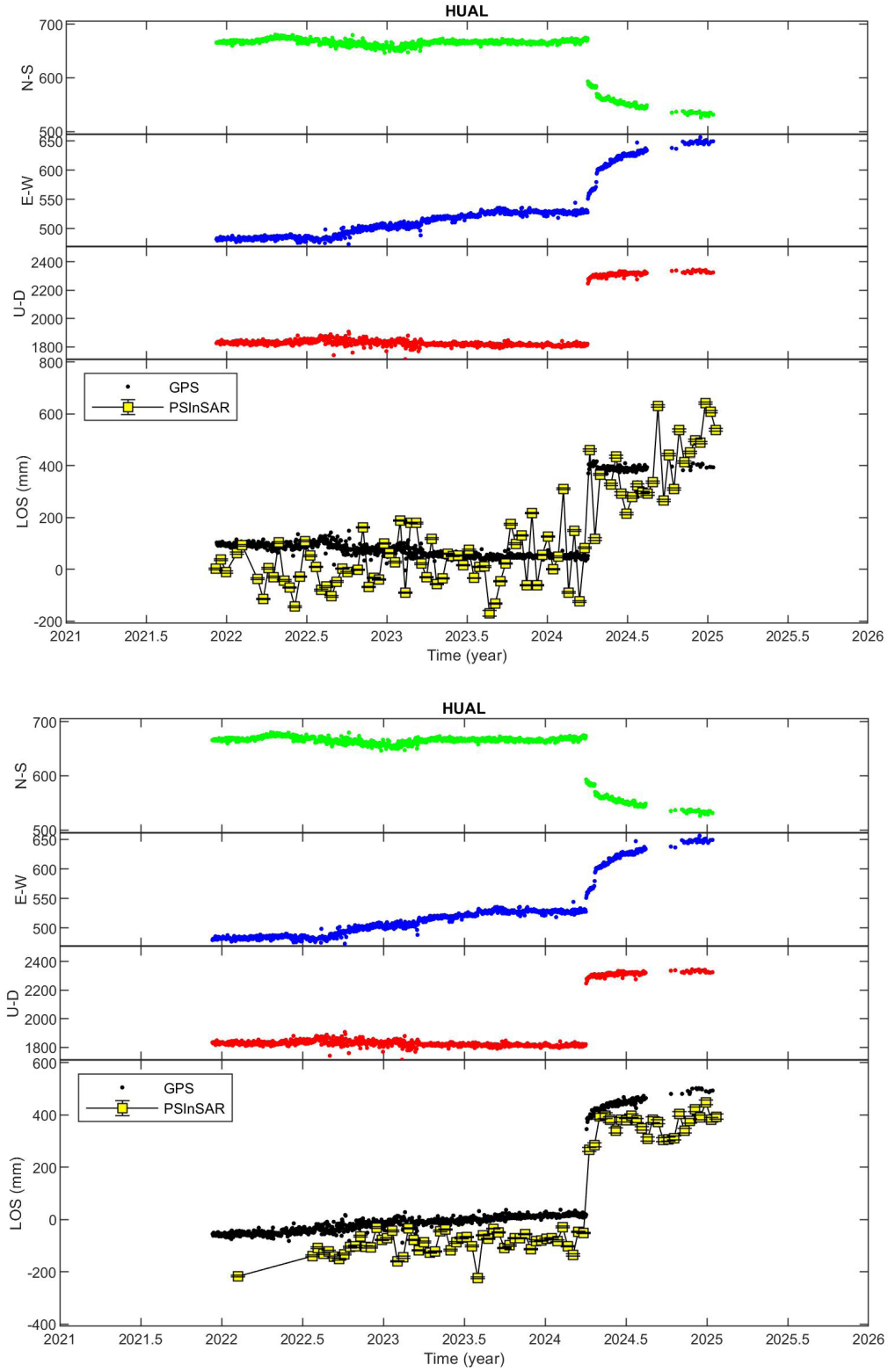


圖 3-12：2022~2024 年 HUAL 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，自上而下分別為南北向、東西向、垂直向以及衛星視方向。

Figure 3-12：GNSS three-component and PSI time series for the HUAL station from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. From top to bottom, the panels represent the north–south, east–west, vertical, and line-of-sight (LOS) components.

圖 3-13 為瑞穗地區 (RS) 跨瑞穗斷層的升、降軌道相對時間序列。結果顯示瑞穗地區在各次地震前後均可觀察明顯的同震位移跳動，但在震後數日至數周內會逐漸回復至震前水準，顯示變形並未持續累積位移量，且升軌與降軌的變化趨勢一致，表示兩軌道觀測具有良好的一致性。圖 3-14 顯示位於瑞穗的 GNSS 連續站 JMRS 之時間序列，並將 GNSS 投影至 LOS 方向後，並與鄰近 PS 點的升軌資料進行比較。由於部分時段資料中斷，該期間的 GNSS 記錄無法與 PSI 觀測進行可靠比對。當 GNSS 資料在後期恢復穩定後，其 LOS 投影的變化趨勢與 PSI 升、降軌結果相當一致，顯示在資料品質良好時，兩者對區域地表變形的判識具良好一致性。

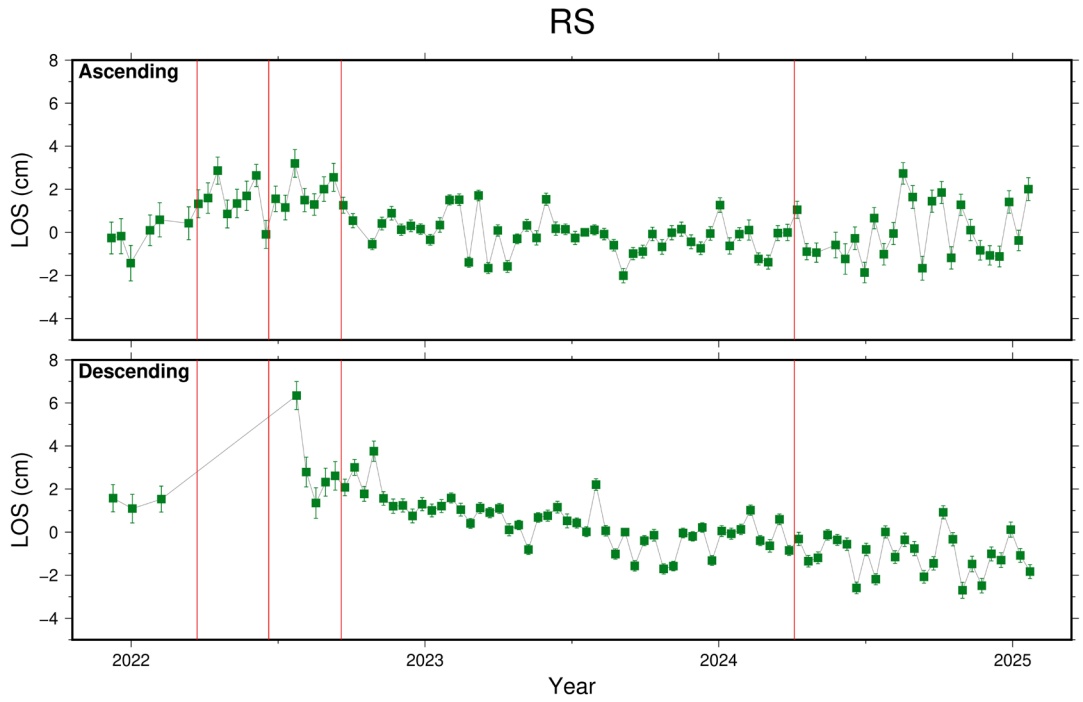


圖 3-13：2022~2024 年瑞穗時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，綠點為每幅影像相對主影像於雷達視角方向（LOS）位移量，紅線分別為 20220323、20220620、20220917~18 以及 20240403 地震事件。

Figure 3-13: Time series for Ruisui from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. The green dots represent the LOS-direction displacement of each image relative to the master image. The red vertical lines indicate the earthquake events on 2022-03-23, 2022-06-20, 2022-09-17~18, and 2024-04-03.

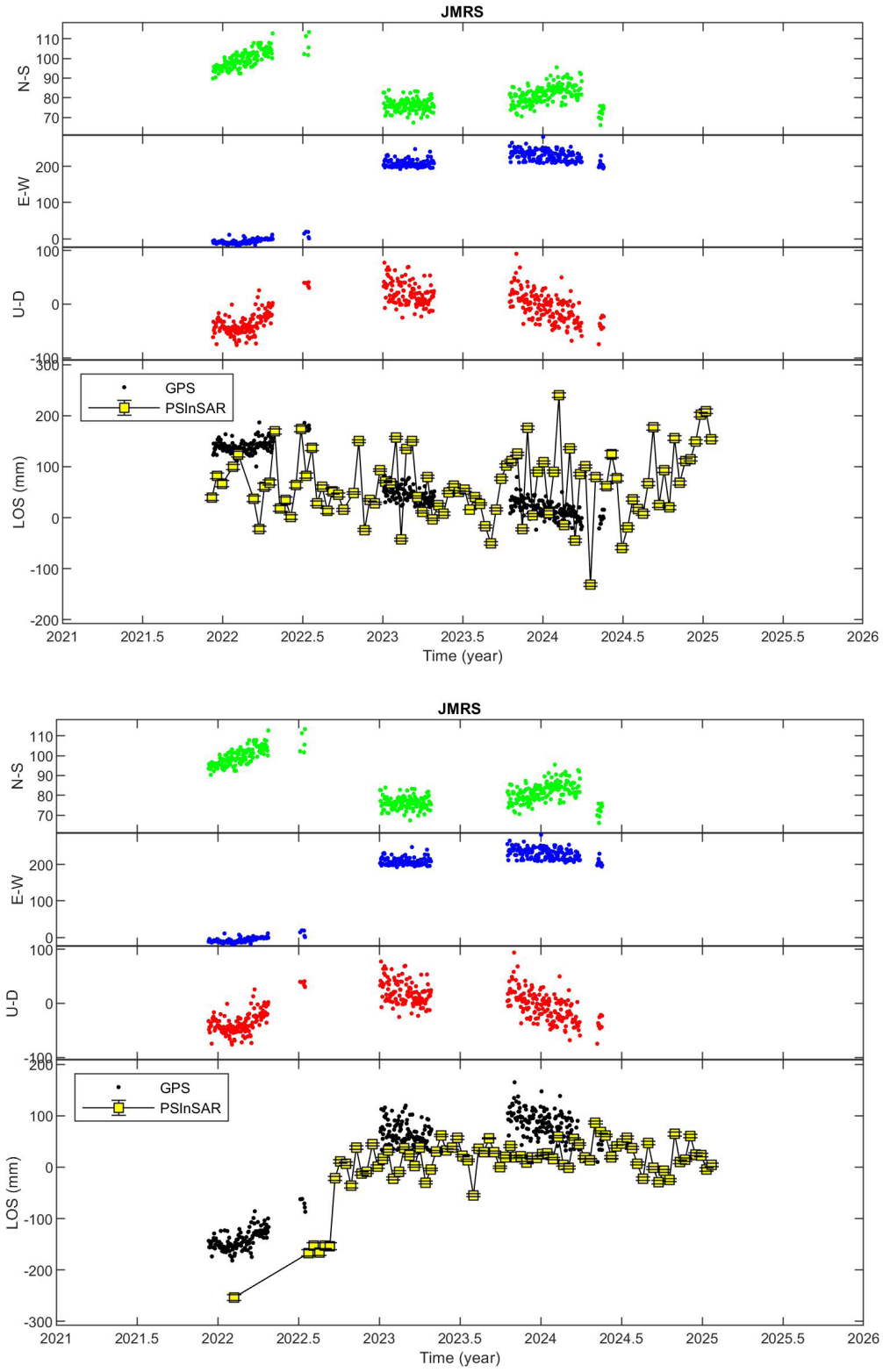


圖 3-14：2022~2024 年 JMRS 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，自上而下分別為南北向、東西向、垂直向以及衛星視方向。

Figure 3-14：GNSS three-component and PSI time series for the JMRS station from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. From top to bottom, the panels represent the north–south, east–west, vertical, and line-of-sight (LOS) components.

圖 3-15 為玉里地區跨玉里斷層的升、降軌道相對位移時間序列。成果顯示，相對於西側點位，斷層東側在 2022 年的長濱、光復地震以及 2024 年花蓮地震事件前後皆可觀察到明顯的同震位移跳動，且震後在數日至數週內逐漸回復至震前水準，顯示變形並未持續累積。由於降軌長濱和光復地震期間無可用影像，因此無變形資訊。在 2022 年 9 月 17~18 日的地震事件中，升、降軌道皆可觀察到較大範圍的同震位移跳變。升軌方向位移量約為 2 cm，而降軌方向則呈現約 6 cm 的明顯同震位移，反映該事件的主要變形方向與降軌視線幾何更為一致。圖 3-16 為玉里 GNSS 連續站 JULI 的時間序列，顯示在 2022 年 9 月 17~18 日事件中，三分量均出現明顯同震位移。將 GNSS 觀測投影至 LOS 方向後，可見其變化趨勢與鄰近 PS 點的升軌資料並不一致，但與降軌觀測相符。然而，PSI 所推估的震後位移量普遍小於 GNSS，可能與 PSI 震後影像的取得時機、永久散射點分布密度以及視線幾何敏感度差異等因素有關。

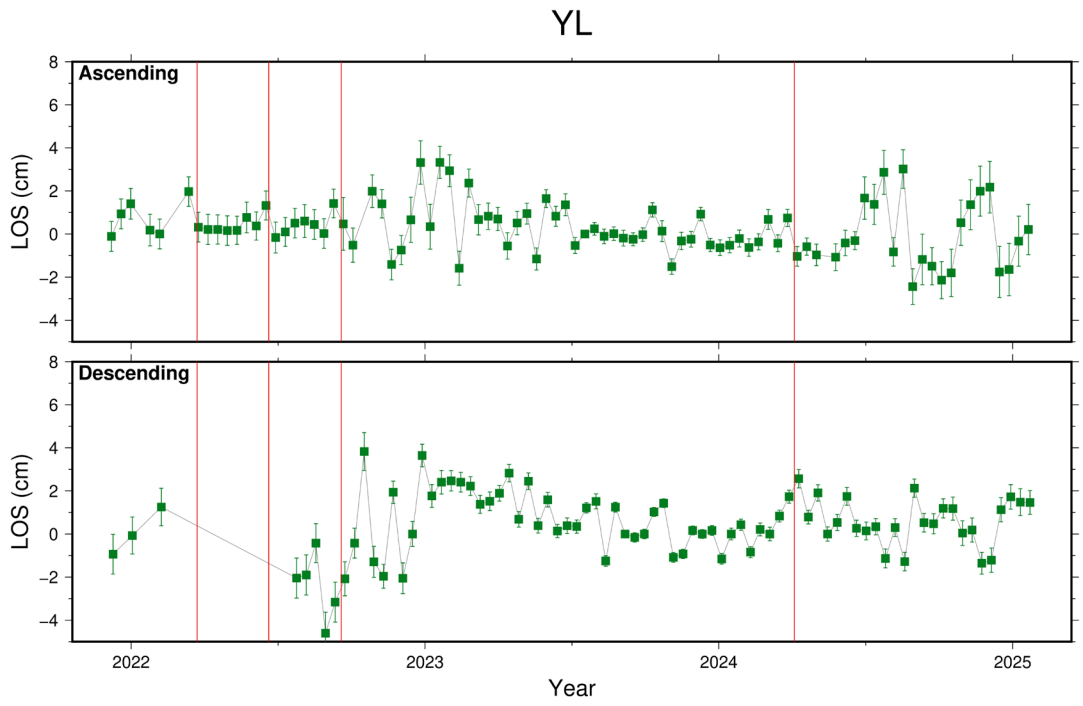


圖 3-15：2022~2024 年玉里時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，綠點為每幅影像相對主影像於雷達視角方向（LOS）位移量，紅線分別為 20220323、20220620、20220917~18 以及 20240403 地震事件。

Figure 3-15: Time series for Yuli from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. The green dots represent the LOS-direction displacement of each image relative to the master image. The red vertical lines indicate the earthquake events on 2022-03-23, 2022-06-20, 2022-09-18, and 2024-04-03.

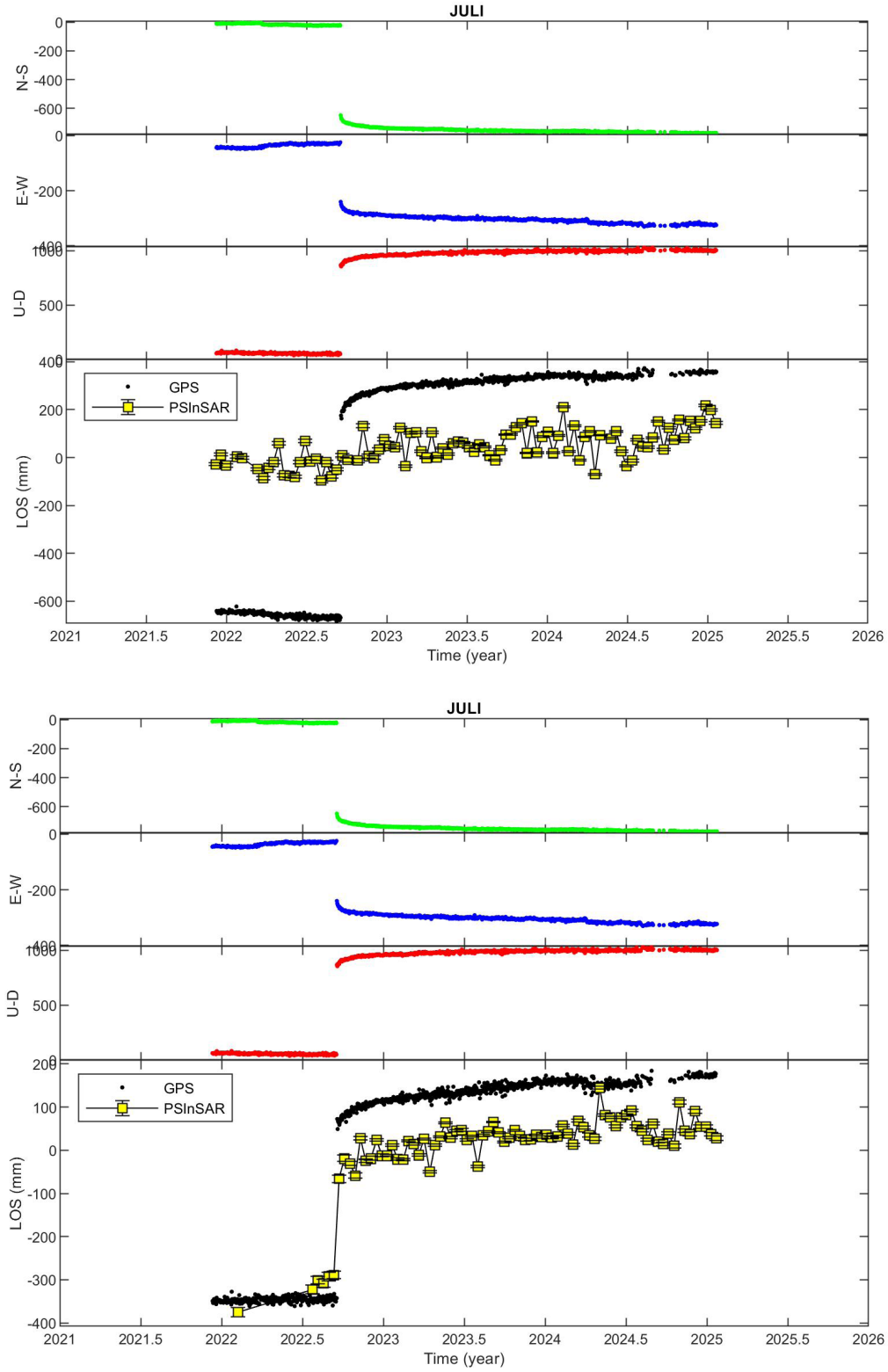


圖 3-16：2022~2024 年 JULI 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，自上而下分別為南北向、東西向、垂直向以及衛星視方向。

Figure 3-16：GNSS three-component and PSI time series for the JULI station from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. From top to bottom, the panels represent the north–south, east–west, vertical, and line-of-sight (LOS) components.

圖 3-17 為池上地區跨池上斷層的升、降軌相對位移時間序列。結果顯示，池上斷層東側相對於西側，在長濱地震、光復地震及 2024 年花蓮地震前後皆可觀察到明顯的同震位移跳動，且震後於數日至數週內逐漸回復至震前水準，顯示變形並未持續累積。於 2022 年 9 月 17~18 日關山 - 池上地震中，升軌方向未呈現顯著累積位移，而降軌方向則可見約 3 cm 的明顯同震位移。圖 3-18 為池上 GNSS 連續站 TAPE 的時間序列，可見在 2022 年 9 月 17~18 日地震時，GNSS 三分量均記錄到明顯同震位移。將 GNSS 觀測投影至 LOS 方向後，其變化趨勢與鄰近 PS 點的升軌 PSI 結果一致，但與降軌方向並不相符，顯示該事件的主要位移方向與升軌視線幾何較為接近，而降軌方向對此事件的敏感度相對較低。

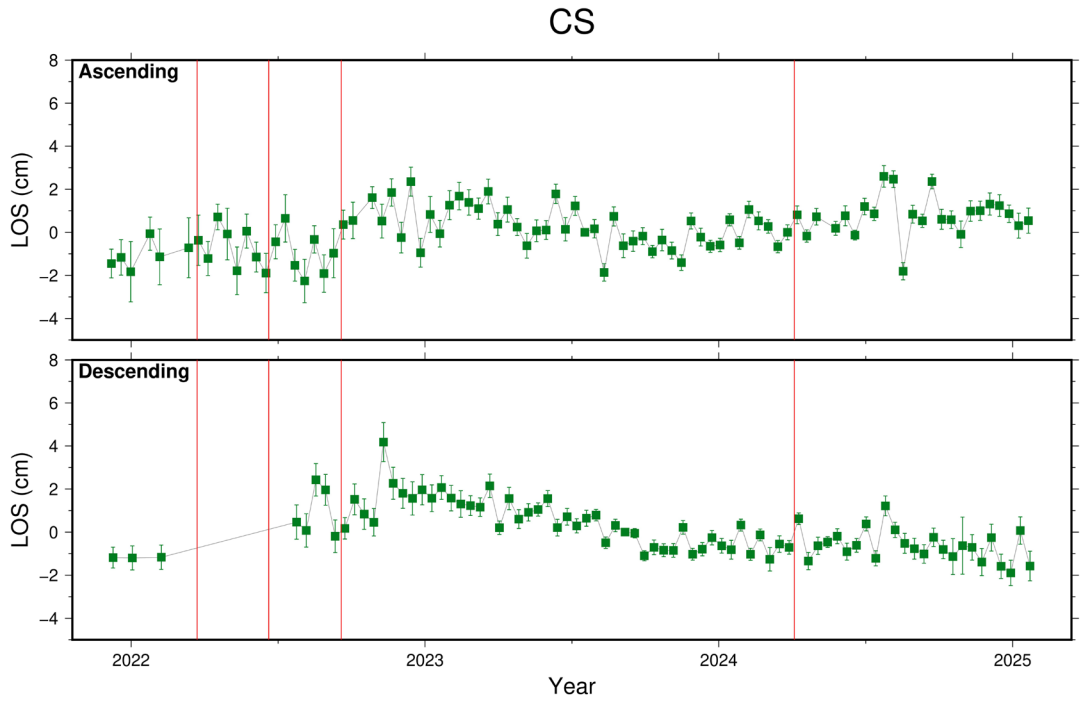


圖 3-17：2022~2024 年池上時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，綠點為每幅影像相對主影像於雷達視角方向（LOS）位移量，紅線分別為 20220323、20220620、20220917~18 以及 20240403 地震事件。

Figure 3-17: Time series for Chishang from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. The green dots represent the LOS-direction displacement of each image relative to the master image. The red vertical lines indicate the earthquake events on 2022-03-23, 2022-06-20, 2022-09-17~18, and 2024-04-03.

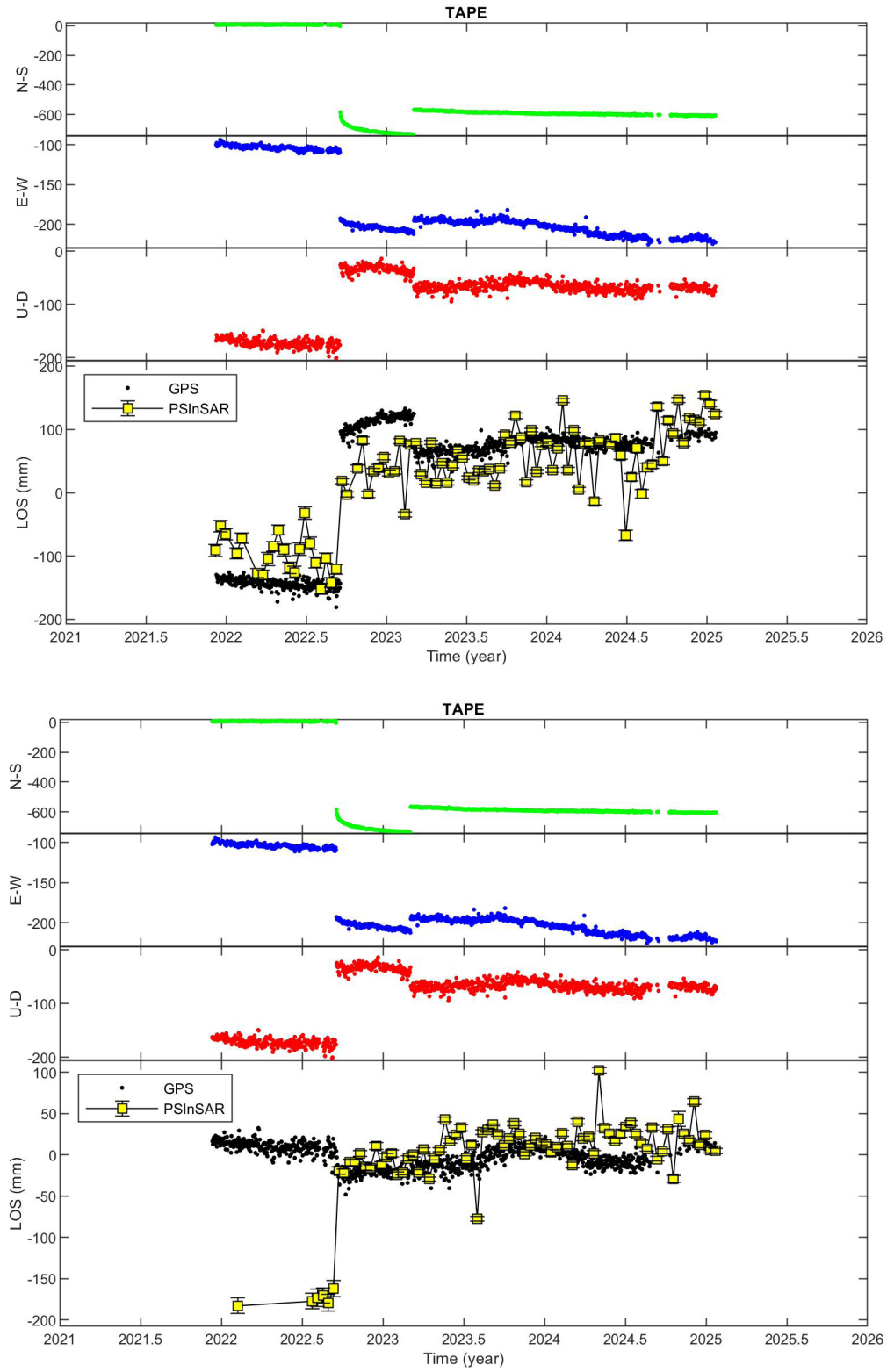


圖 3-18：2022~2024 年 TAPE 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，自上而下分別為南北向、東西向、垂直向以及衛星視方向。

Figure 3-18：GNSS three-component and PSI time series for the TAPE station from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. From top to bottom, the panels represent the north–south, east–west, vertical, and line-of-sight (LOS) components.

圖 3-19 為臺東地區跨利吉斷層的升、降軌相對位移時間序列。結果顯示，斷層東側相對於西側在四起地震事件中雖出現短暫的同震變化，但震後皆於短時間內恢復至震前水準，顯示變形並未持續累積，整體表現相對穩定。圖 3-20 為臺東 GNSS 連續站 TTUN 的時間序列。在 2022 年 9 月 17~18 日地震期間，南北與東西向分量均呈現明顯的同震位移，而垂直向則未顯著變化。將 GNSS 資料投影至 LOS 方向後，其變化趨勢與鄰近的 PSI 之升、降軌結果一致，顯示兩者在臺東地區具有良好的相互驗證性。

綜合上述分析，東部地區各重要城鎮周邊的地表形變呈現明顯的時空異質性，不同斷層區段對地震的敏感度與變形回復特性亦有所差異，反映該區域構造活動頻繁且具有複雜性。未來仍需持續透過 PSI 與 GNSS 等多元技術進行監測，以掌握其潛在風險與地殼動態變化。

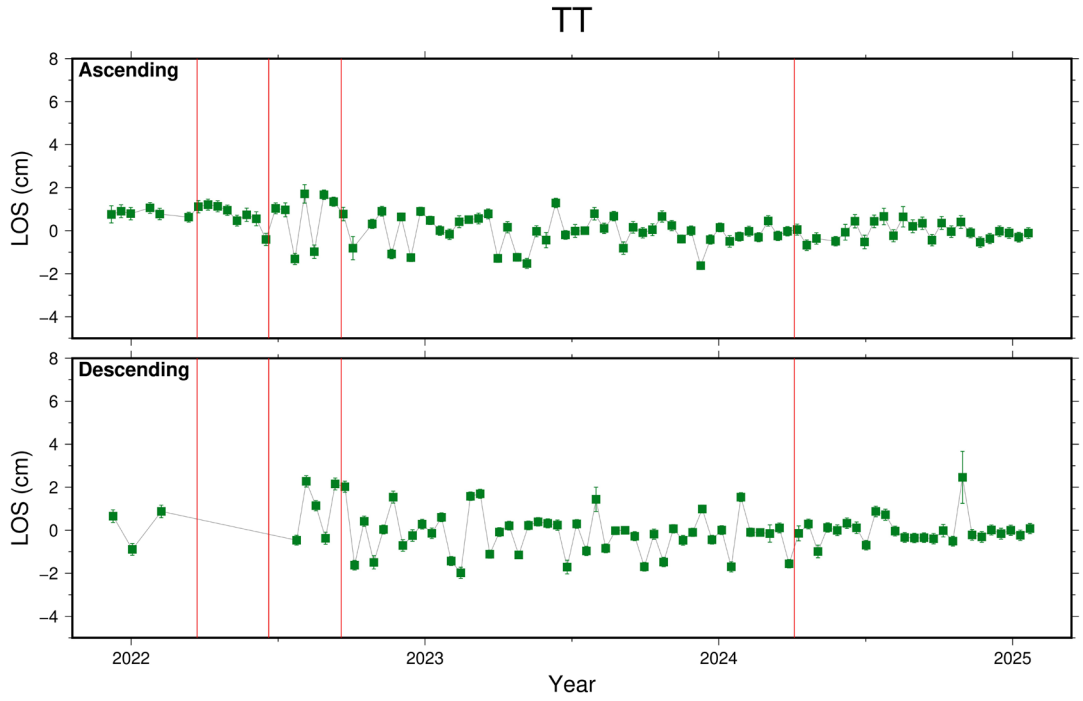


圖 3-19：2022~2024 年臺東市時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，綠點為每幅影像相對主影像於雷達視角方向（LOS）位移量，紅線分別為 20220323、20220620、20220917~18 以及 20240403 地震事件。

Figure 3-19: Time series for Taitung city from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. The green dots represent the LOS-direction displacement of each image relative to the master image. The red vertical lines indicate the earthquake events on 2022-03-23, 2022-06-20, 2022-09-17~18, and 2024-04-03.

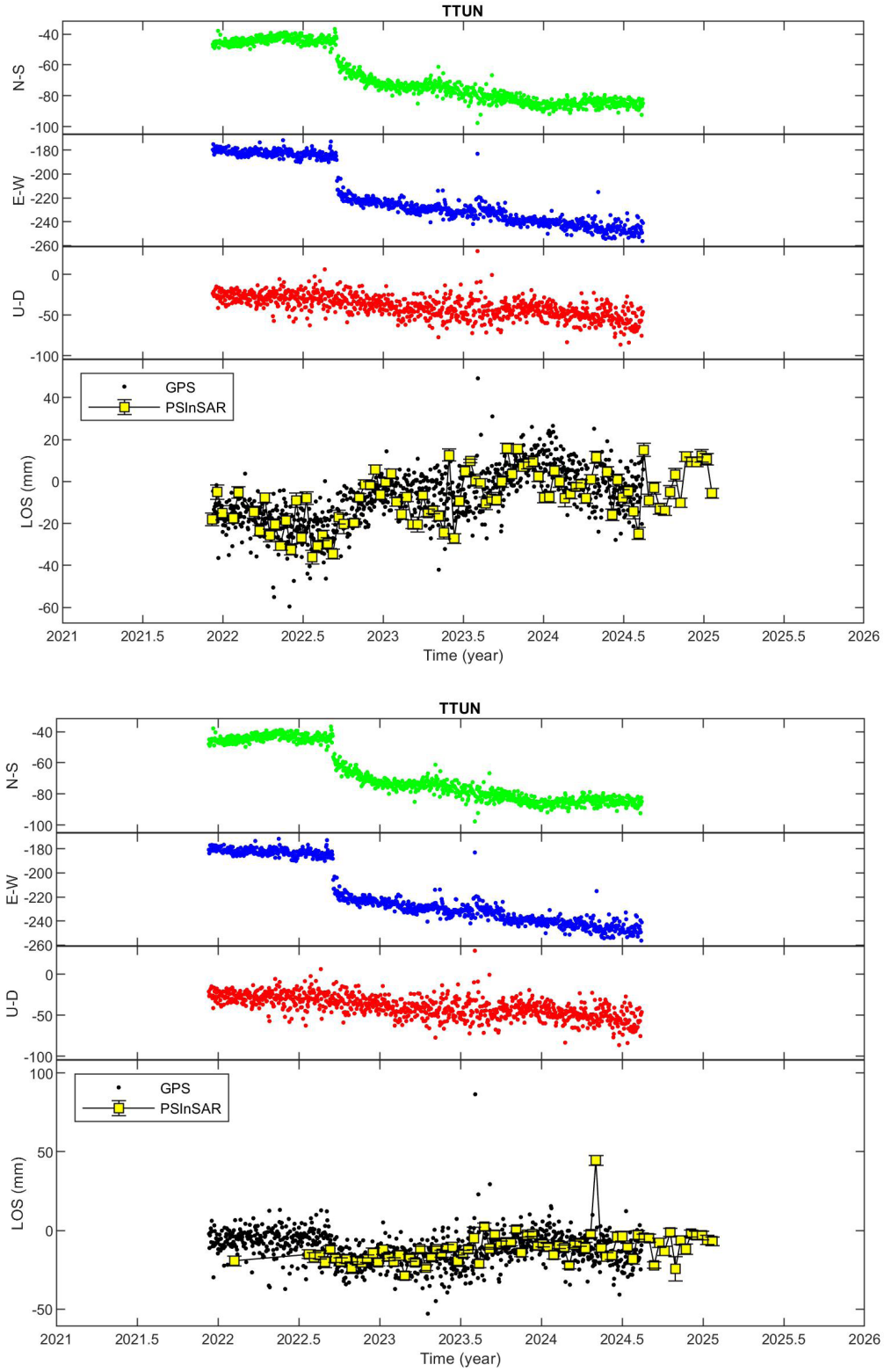


圖 3-20：2022~2024 年 TTUN 測站的 GNSS 三分量與 PSI 時間序列。上圖為升軌道成果，下圖為降軌道成果，自上而下分別為南北向、東西向、垂直向以及衛星視方向。

Figure 3-20：GNSS three-component and PSI time series for the TTUN station from 2022 to 2024. The upper figure shows the ascending-track results, and the lower figure shows the descending-track results. From top to bottom, the panels represent the north–south, east–west, vertical, and line-of-sight (LOS) components.

第四章、討論

本年度計劃利用雷達衛星影像解算台灣東部的地表變形，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，我們也針對花東地區選取了多條剖面呈現於期末報告，我們都在本章節進行討論。

4-1 2022~2024 年 GNSS 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（3/3）計畫提供的全球衛星導航系統移動觀測站及中央研究院的全球衛星導航系統連續觀測站時間序列資料。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。

我們以 2022 年至 2024 年的 PSI 時間序列以 2022 年 09 月 18 日池上地震為分界，擬合三個時段的速度場，分別為（1）2022 年至 2024 年（2）2022 年至 2022 年 09 月 17 日以及（3）2022 年 09 月 19 日至 2024 年。另外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初步比對，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，

評估回歸模型的準確度。各時期比對線性回歸成果如表 4-1，測站位置如圖 4-1。

綜合而言，花東區域在 2022 年至 2024 年 PSI 解算品質較其他區域低，並非資料處理問題，而是多重自然與幾何因素共同造成。高植被覆蓋與地形崎嶇削弱了穩定散射點的存在，大氣環境複雜度提升相位噪訊，而地震觸發亦加劇非穩態變形行為，這些條件疊加於影像取得密度相對較低的時段，最終表現為 PS 密度下降與時序穩定性不足。將 2022 年 09 月 18 日以前的時間序列分開後，比對品質大幅提升，代表以 PSI 監測花東地區間震期的地表變形資訊仍為可行。各時期比對成果詳述於以下各子節。

表 4-1：各時期 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-1：Comparisons of velocity fields between PSI andGNSSresults through every period.

	Track	slope	R^2	RMSE (cm/yr)
2022~2024	Ascending	1.71	0.15	16.46
	Descending	1.40	0.40	11.84
2022~2022.09.17	Ascending	0.52	0.41	3.47
	Descending	0.47	0.48	3.99
2022.09.19~2024	Ascending	0.90	0.83	2.20
	Descending	1.12	0.91	2.73

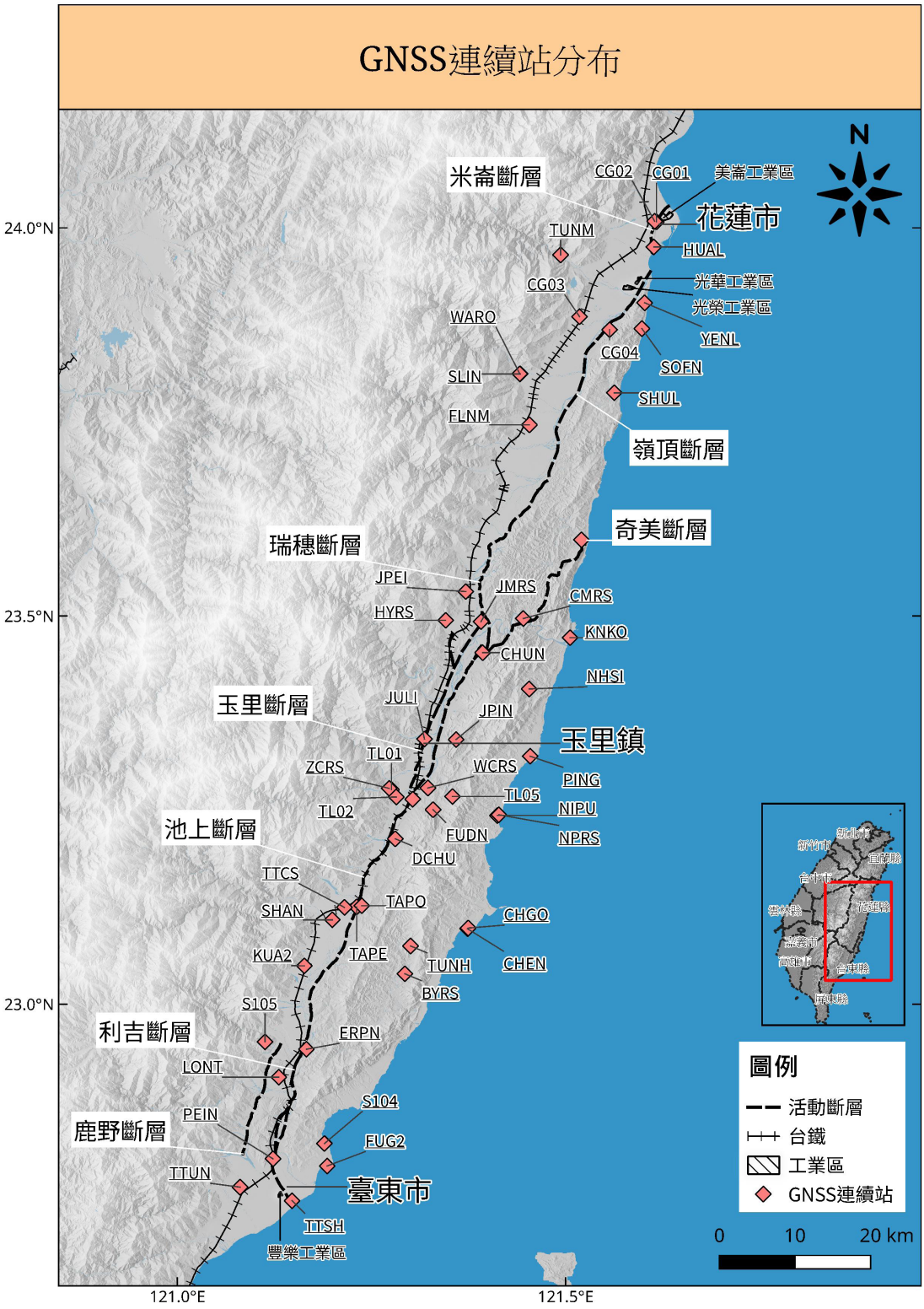


圖 4-1：GNSS 測站位置分佈圖。

Figure 4-1：The map for theGNSSstations.

4-1-1 2022~2024 年比對結果

圖 4-2, 4-4 分別為 2022-2024 年研究區域升軌道與降軌道的永久散射體 PSI 速度場及其對應的 GNSS 連續站速度分布；圖 4-3, 4-5 則呈現 GNSS 測站速度與測站周圍 500 公尺範圍內 PSI 點位平均速度的比較情形。

表 4-2 統整 2022-2024 年升、降軌道 PSI 與 GNSS 資料比對結果。初步比對顯示，升軌道與降軌道方向的相關性皆不理想，升軌道的 R^2 只有 0.15，降軌道方向成果較佳，但 R^2 仍只有 0.40，兩者的 RMSE 皆大於 10 cm/yr。檢視速度場成果 (圖 4-2、圖 4-4)，可發現玉里至池上地區 GNSS 測站與周邊 PSI 速度差異過大，是造成整體比對結果偏移的主要來源。因此將此區的測站排除不列入計算，可以看到比對成果大幅改善；升軌道的 R^2 提升為 0.59，降軌道 R^2 亦提升至 0.74，升降軌道的 RMSE 皆由原本大於 10 cm/yr 下降至小於 6 cm/yr。

圖 4-2 顯示升軌 PSI 與 GNSS 觀測相對於臺東高中 (TTSH) 的地表變形比較結果。在臺東市及海岸山脈 GNSS 觀測值與 PSI 觀測值接近，在花蓮市至壽豐一帶，PSI 和 GNSS 皆呈現靠近衛星移動的 LOS 速度，但多數測站 PSI 速度值大於 GNSS 觀測值。瑞穗斷層附近的 JPEI 與 JMRS 測站差異特別明顯，因此進一步檢視這兩站與鄰近測站的時間序列，根據比較結果發現（圖 4-6），JPEI（圖 4-6A）與同在瑞穗斷層西側的 HYRS（圖 4-6C）兩站的 PSI 時間序列趨勢很接近，GNSS 時間序列東西跟南北向的趨勢幾乎一樣，垂直向 HYRS 有觀測到 2022 年關山 - 池上地震的抬升變形，JPEI 則無出現同震變形，因此在垂直向的速度場 HYRS 為向上，JPEI 為向下，使得 JPEI 在投影到 LOS 方向時呈現較大的遠離衛星方向速度。JMRS（圖 4-6B）時間序列則是有中斷，與鄰近的 CHUN 測站（圖 4-6D）觀測到不同的變化趨勢，投影到 LOS 呈現較明顯的遠離衛星方向速度，雖然 JMRS 在 2022 年與 2023 年各有一段時間無資料，但因花東的 GNSS 測站密度有限，仍予以保留。

在縱谷內，多數測站無論是靠近衛星移動或是遠離衛星移動，其 GNSS 觀測量值皆大於 PSI 觀測值，鄰近玉里斷層、池上斷層以

及利吉斷層的測站甚至呈現斷層西側速度遠大於斷層東側，但 PSI 並未觀測到此現象。在升軌道方向 PSI 與 GNSS 投影至 LOS 方向的散布圖中顯示（圖 4-3 上），紅色點代表玉里斷層西側的 GNSS 測站，綠色點為玉里斷層東側的測站，這些測站在 PSI 的觀測值大約都落於 5~7 cm/yr，但在 GNSS 的觀測中，斷層西側的測站（紅點）觀測值皆為靠近衛星移動，除了 TAPE 觀測值接近，其餘測站大約為 40~73 cm/yr，斷層東側的測站（綠點）除了 ERPN 與 TAPO 呈現靠近衛星移動，其餘測站皆為遠離衛星移動，觀測值約為 -4~-1 cm/yr，與 PSI 差值較西側測站小。若我們將這 12 個測站排除不列入回歸，GNSS 觀測值大約介於 -7~28 cm/yr，PSI 觀測值大約介於 -1~16 cm/yr，R^2 由 0.15 提升為 0.59，RMSE 由 16.46 cm/yr 下降為 5.19 cm/yr（圖 4-3）。

圖 4-4 顯示降軌 PSI 與 GNSS 的速度比較對於臺東高中 (TTSH) 的速度比較。在臺東市 GNSS 觀測值與 PSI 觀測值接近，花蓮市至壽豐一帶皆觀測到靠近衛星移動的 LOS 速度，但多數測站 GNSS 觀測值大於 PSI 觀測值。瑞穗斷層附近三測站的差異較明顯，在海岸山脈地區，PSI 與 GNSS 皆呈現遠離衛星移動，但 GNSS 觀測值大於 PSI 觀測值。鑒於上述的差異，我們逐站比較兩者的時間序列 (圖 4-7)，發現 GNSS 與 PSI 觀測位移其實差距不大，本報告以瑞穗斷層附近的 HYRS（圖 4-7A）、長濱海岸的 NIPU（圖 4-7B）、成功的 CHEN（圖 4-7C）以及東河的 BYRS（圖 4-7D）進行說明，結果顯示上述測站均記錄到 2022 年 09 月 17-18 日的同震位移，將 GNSS 投影至 LOS 方向後，期趨勢與 PSI 一致，甚至部分站點的 PSI 觀測到的同震位移量大於 GNSS。然而，2022 年 2 月底至 2022 年 7 月中旬，Sentinel-1 衛星在降軌道方向無觀測影像，，導致震前資料不足，使速度場擬合時主要受震後資料控制，造成 PSI 的 LOS 年速度普遍偏小。未來若能透過數學或統計方法補償影像缺測期間的資料空窗，可能改善此問題。在縱谷內的測站顯示，無論是靠近衛星移動或是遠離衛星移動，GNSS 觀測量值皆大於 PSI 觀測值。鄰近玉里斷層、池上斷層以及利吉斷層的測站 GNSS 呈現斷層西側 LOS 速度大於斷層東側，甚至完全相反，但 PSI 並未觀測到此現象。在升軌道方向 PSI 與 GNSS 投影至 LOS 方向的散布圖中顯示（圖 4-4 上），紅色點代表玉里斷層西側的 GNSS 測站，綠色點為玉里斷層東

側的測站，這些測站在 PSI 的觀測值大約都落於 -5~10 cm/yr，但在 GNSS 的觀測中，斷層西側的測站（紅點）觀測值皆為靠近衛星移動，除了 TAPE 觀測值接近，其餘測站大約為 30~45 cm/yr，斷層東側的測站（綠點）除了 TAPO 呈現靠近衛星移動，其餘測站皆為遠離衛星移動，觀測值約為 -1~-28 cm/yr，與 PSI 差值較西側測站小。若我們將這 12 個測站排除不列入回歸，GNSS 觀測值大約介於 -18~40 cm/yr，PSI 觀測值大約介於 -4~24 cm/yr，R^2 由 0.40 提升為 0.74，RMSE 由 11.84 cm/yr下降為 5.89 cm/yr（圖 4-4下）。

為釐清 PSI 與 GNSS 在玉里斷層與池上斷層兩側的差異，我們檢視斷層兩側 12 個測站的 GNSS 以及升、降軌道的時間序列。整體而言，同一地區的測站呈現相似的變化趨勢，因此報告選取三組位於西側與東側的測站說明與展示，包括鄰近玉里斷層的（1）JULI – JPIN（圖 4-8~ 圖 4-9A、B），（2）ZCRS – FUDN（圖 4-8~ 圖 4-9C、D）以及池上斷層的（3）TAPE – TAPO（圖 4-8~ 圖 4-9E、F）。在 GNSS 三分量時間序列中，這六個測站在 2022 年 09 月 17-18 日的關山 - 池上地震中皆有明顯的同震位移。無論是玉里斷層或池上斷層，西側的測站都觀測到相同方向的同震位移，即向南、向西以及向上。然而，玉里斷層東側的兩測站（JPIN 及 FUDN）在南北向與垂直向的位移與西邊測站（JULI 及 ZCRS）相反，但在東西向一致，皆呈現向西的位移。池上斷層東側的 TAPO 測站則是在東西向與南北向皆與西側測站相反，但垂直向一致皆呈現向上（圖 4-8~ 圖 4-9 E~F）。將 GNSS 三分量投影至升軌道與降軌道 LOS 方向後，玉里斷層兩側呈現明顯的跨斷層梯度，西側皆靠近衛星方向移動，東側則遠離衛星方向移動（圖 4-8~ 圖 4-9 A~D），池上斷層於升軌道方向顯示斷層兩側皆呈現靠近衛星移動，在降軌道方向，斷層西側以較小速度值遠離衛星移動，東側呈現靠近衛星移動。然而，在 PSI 資料的部分，升軌道方向在玉里斷層附近觀測到的同震位移不明顯，僅顯較小幅靠近衛星的 LOS 速度場。池上斷層的 TAPE 測站有觀測到同震變形，與 GNSS 觀測 LOS 速度值相近，TAPO 測站的 LOS 速度較小約為 1.5 cm/yr（圖 4-8 E~F），降軌道方向雖有觀測到同震變形，於斷層西側的的同震位移趨勢也與 GNSS 一致，但由於地震前降軌影像較少，速度場擬合時受震後資料主導，使得 LOS 速度偏向小幅靠近衛星移動，這是造成斷層西側 PSI 與 GNSS 速度差異的主要原因。

無論升軌或降軌道，PSI 在玉里斷層鄰近區域得到的時間序列趨勢相當接近，雖然觀測到同震變形，但在短距離尺度無法如 GNSS 觀測可解析跨斷層的細部變化，亦無法呈現 GNSS 所揭示的明顯相反的同震位移。推測此現象可能與斷層破裂到地表有關，使變形集中於較短的距離間，超出 C 波段衛星 PSI 的空間解析度能力；衛星視線幾何限制與花東地區高植被覆蓋造成的去相干效應亦是影響因素。這些都顯示 Sentinel-1（C-band）之解析度不足以捕捉近場斷層兩側的急遽變化，未來若採用具較佳穿透力與較高解析度的 L 波段衛星，可能更能有效解析此區域的跨斷層變形特徵。整體而言，除了玉里斷層兩側同震變形與 GNSS 差異較大，其餘區域的 PSI 時間序列仍具參考價值。排除玉里斷層周邊測站後，升軌資料整體品質尚可，降軌資料則表現更佳。若未來能透過資料內插、加權擬合或其他統計方法改善降軌速度場在震前資料缺乏下的擬合偏差，預期可進一步提升 PSI 速度場品質；相關方法仍需後續討論以尋求最適化策略。

表 4-2：2022~2024 年 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-2：Comparisons of velocity fields between PSI andGNSSresults through 2022~2024.

	slope	R^2	RMSE (cm/yr)
Ascending	1.71	0.15	16.46
移除玉里地區測站	1.37	0.59	5.19
Descending	1.40	0.40	11.84
移除玉里地區測站	1.29	0.74	5.89

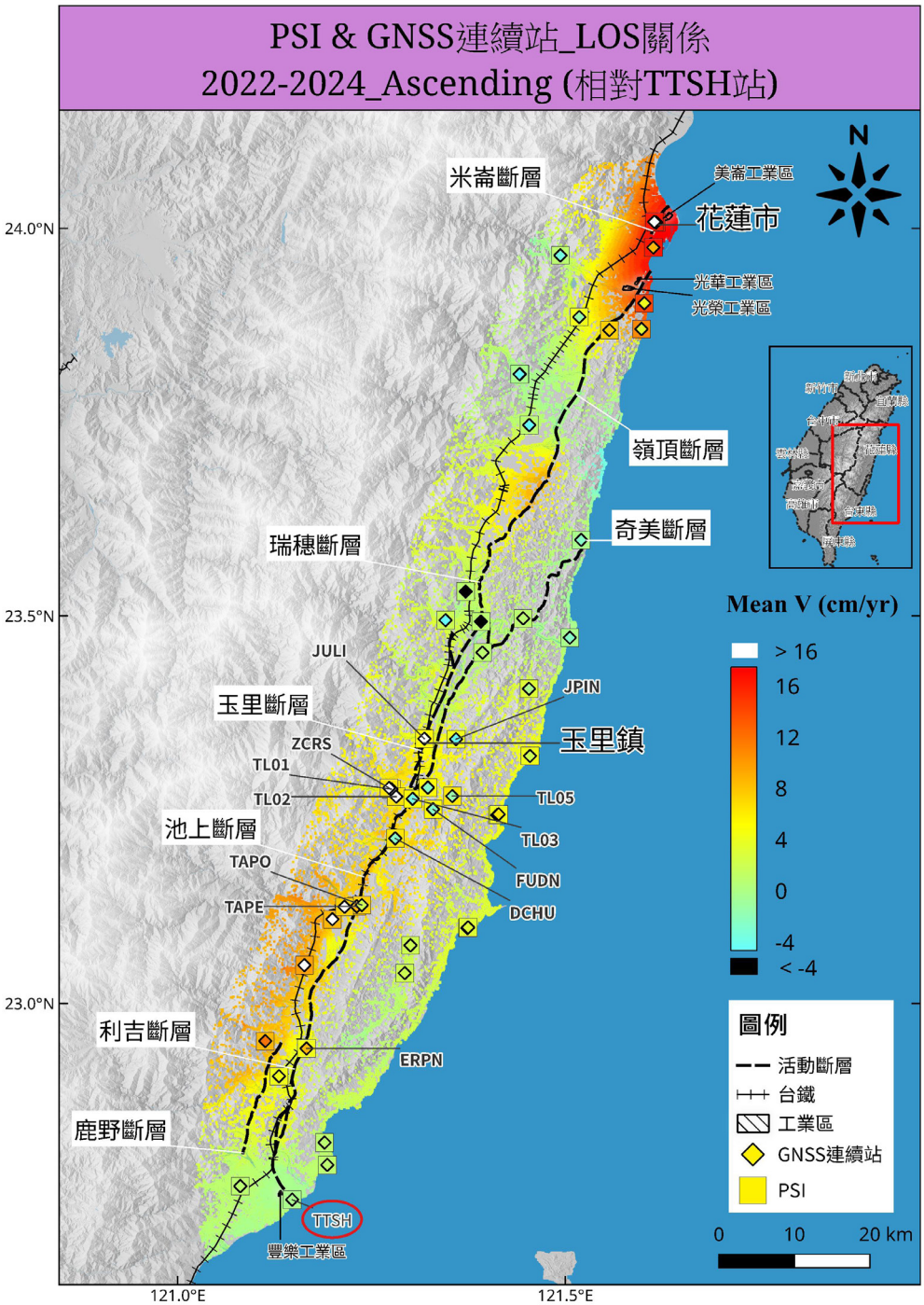


圖 4-2：2022-2024 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-2：Mean velocity field in ascending track between 2022 and 2024. 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. The reference point is the continuous GNSSstation TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directionsGNSSvelocity to the LOS directions towards the satellite.

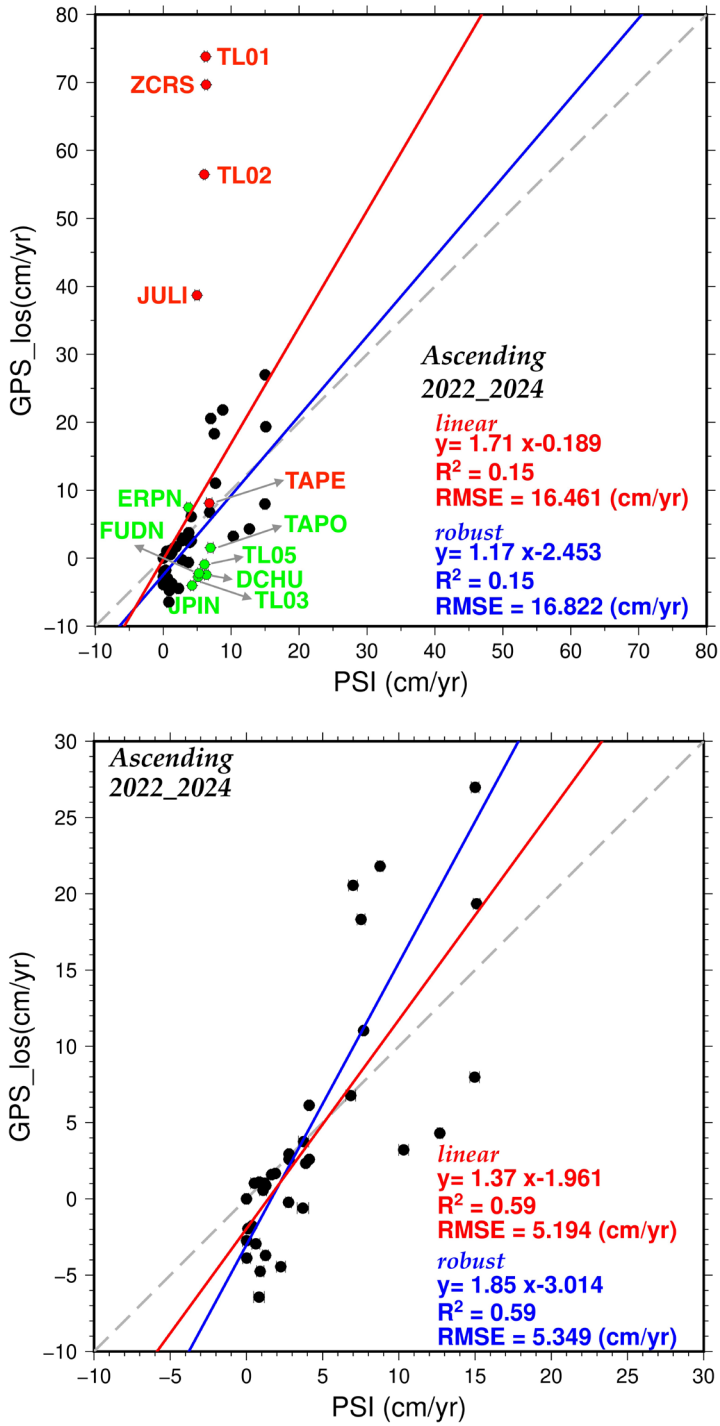


圖 4-3：2022-2024 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。上圖為全部測站比對成果，下圖為排除玉里斷層至池上斷層兩側測站成果。紅點為玉里斷層與池上斷層西側測站資料，綠點為斷層東側資料，參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。

Figure 4-3：Comparison between the 2022–2024 ascending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The upper panel shows the comparison using all stations, while the lower panel shows results excluding stations located on both sides of the Yuli Fault and the Chihshang Fault. Red points represent stations on the western side of the Yuli and Chihshang Faults, whereas green points represent stations on the eastern side. The reference station is the continuousGNSS

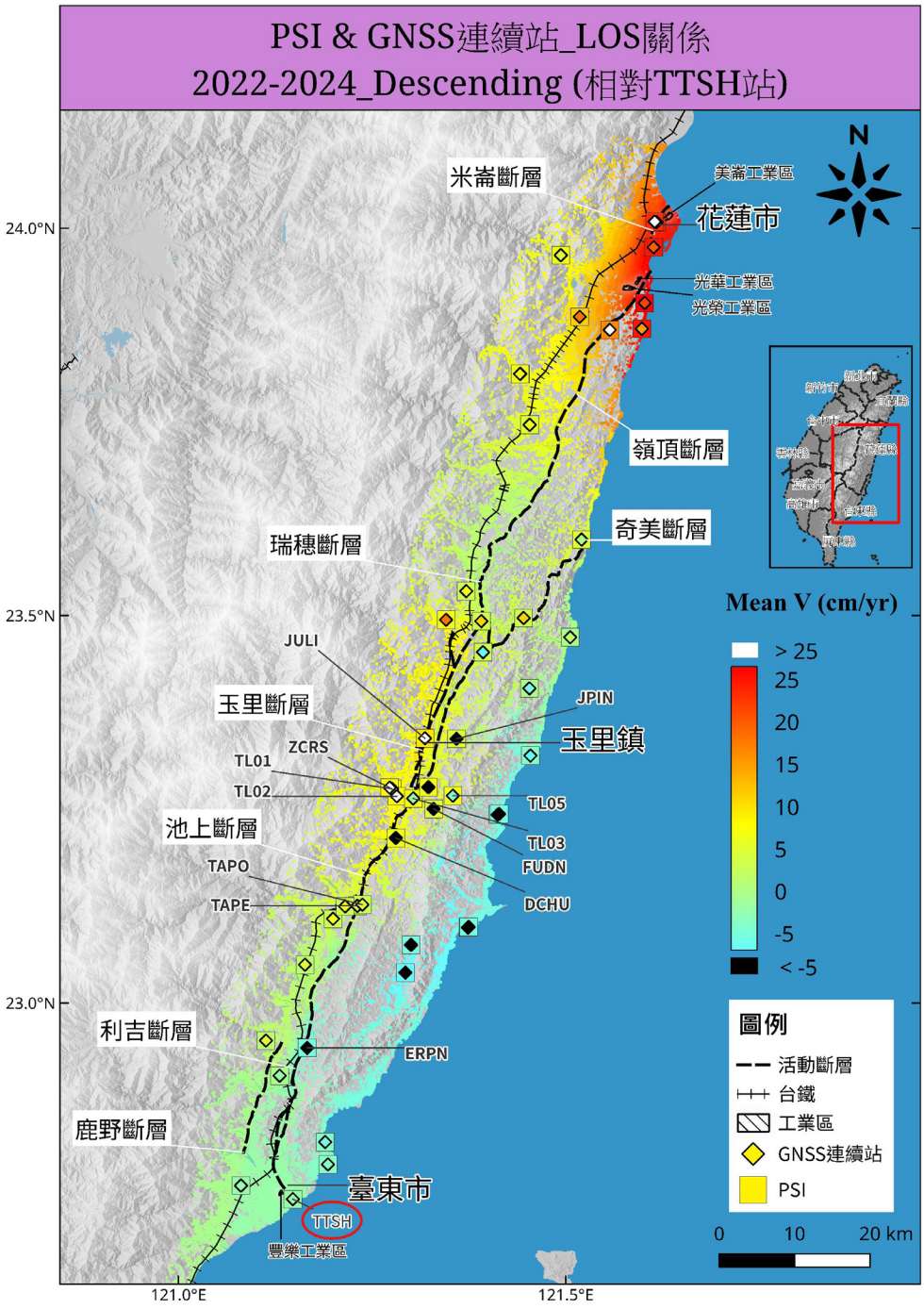


圖 4-4：2022-2024 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-4：Mean velocity in dscending track between 2022 and 2024. 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. The reference point is the continuous GNSSstation TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directionsGNSSvelocity to the LOS directions towards the satellite.

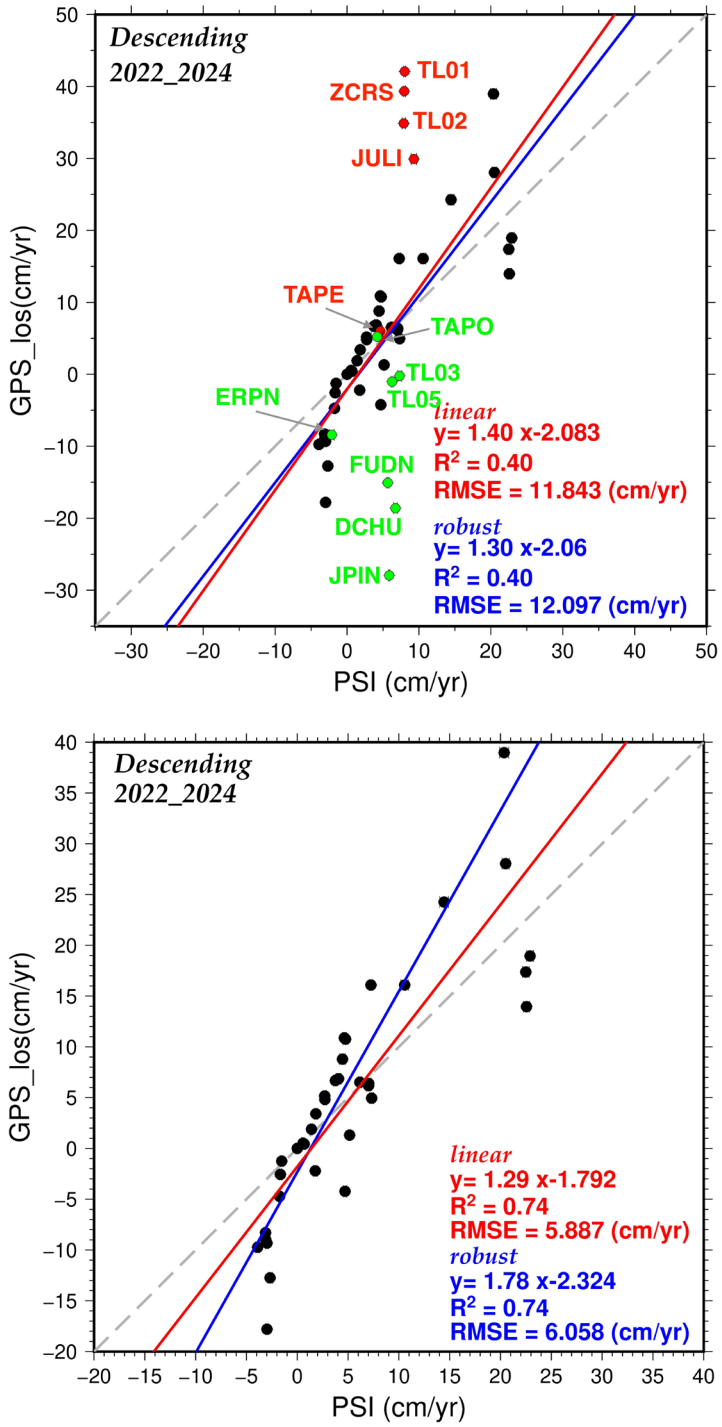


圖 4-5：2022-2024 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。上圖為全部測站比對成果，下圖為排除玉里斷層至池上斷層兩側測站成果。紅點為玉里斷層與池上斷層西側測站資料，綠點為斷層東側資料，參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。

Figure 4-5：Comparison between the 2022–2024 descending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The upper panel shows the comparison using all stations, while the lower panel shows results excluding stations located on both sides of the Yuli Fault and the Chihshang Fault. Red points represent stations on the western side of the Yuli and Chihshang Faults, whereas green points represent stations on the eastern side. The reference station is the continuousGNSSsite TTSH.

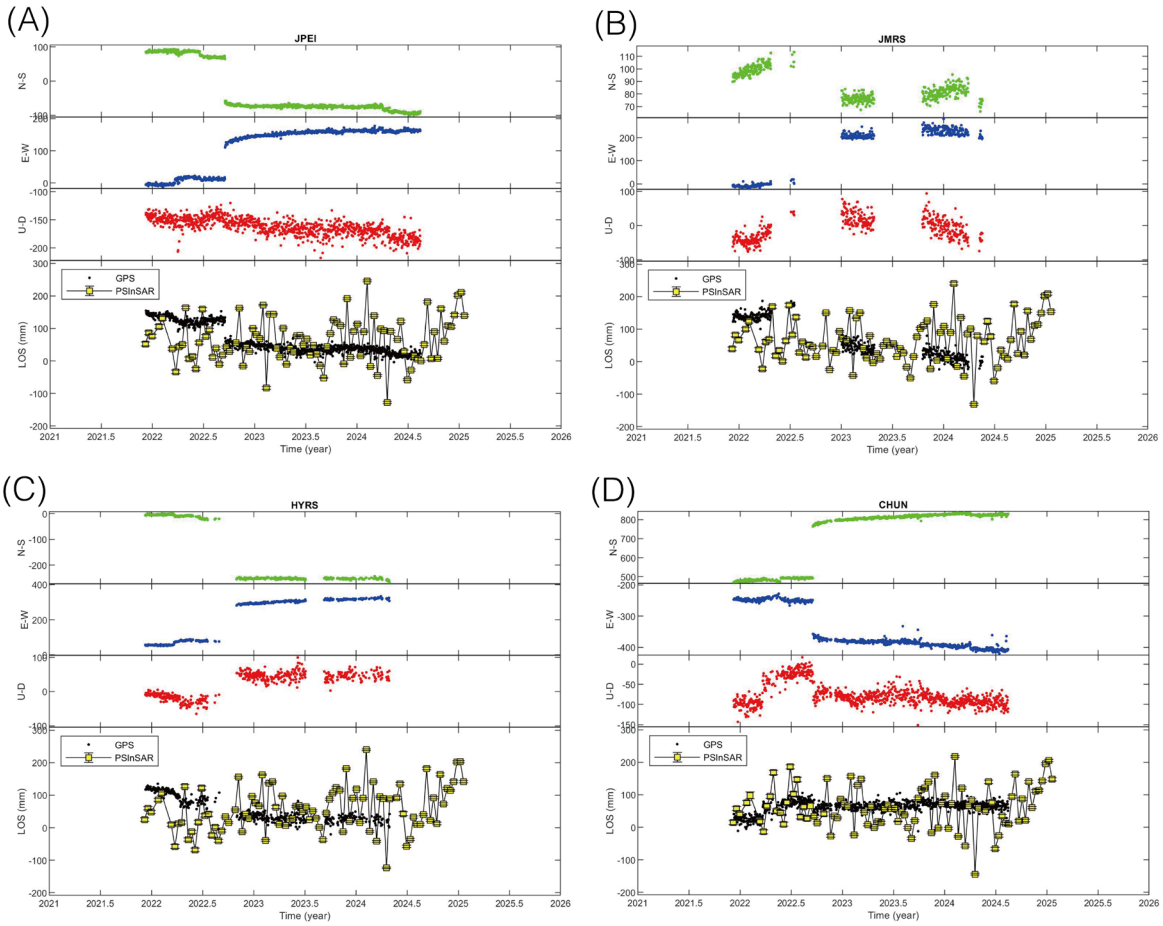


圖 4-6：2022-2024 升軌道方向時間序列。綠點為 GNSS 南北向時間序列，藍點為 GNSS 東西向時間序列，紅點為 GNSS 垂直向時間序列，黑點為 GNSS 三分量投影至 LOS 方向時間序列，黃色正方形及其連線為 PSI 時間序列。分別為以下測站 (A) JPEI (B)JMRS (C)HYRS (D)CHUN。

Figure 4-6：2022–2024 ascending-orbit LOS time series. Green points represent theGNSSnorth–south component, blue points represent theGNSSeast–west component, and red points represent theGNSSvertical component. The black points show the three-componentGNSSdisplacement projected into the LOS direction, while the yellow squares and connecting line represent the PSI time series. The stations shown are (A) JPEI, (B) JMRS, (C) HYRS, and (D) CHUN.

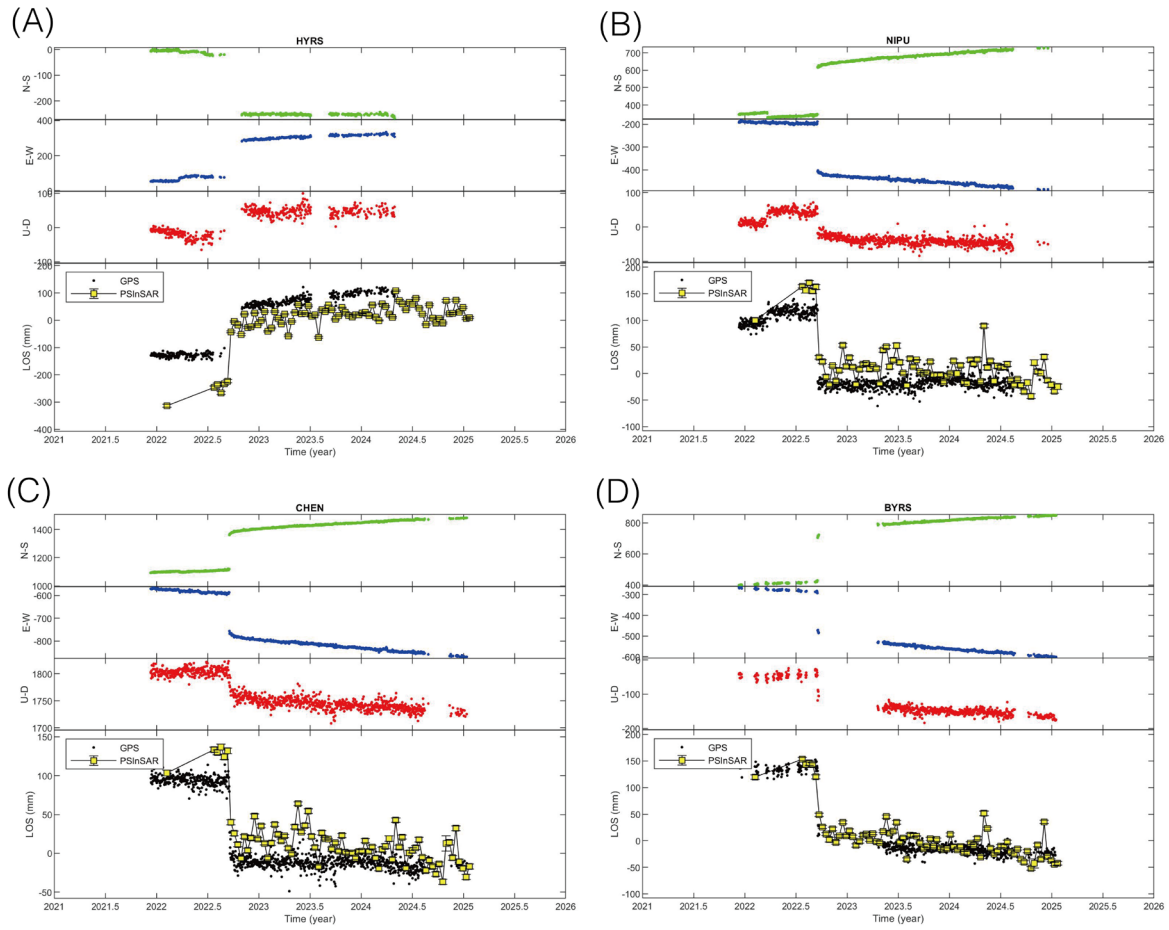


圖 4-7：2022-2024 降軌道方向時間序列。綠點為 GNSS 南北向時間序列，藍點為 GNSS 東西向時間序列，紅點為 GNSS 垂直向時間序列，黑點為 GNSS 三分量投影至 LOS 方向時間序列，黃色正方形及其連線為 PSI 時間序列。分別為以下測站 (A) HYRS (B)NIPU (C)CHEN (D)BYRS。

Figure 4-7：2022–2024 descending-orbit LOS time series. Green points represent theGNSSnorth–south component, blue points represent theGNSSeast–west component, and red points represent theGNSSvertical component. The black points show the three-componentGNSSdisplacement projected into the LOS direction, while the yellow squares and connecting line represent the PSI time series. The stations shown are (A) HYRS, (B) NIPU, (C)CHEN, and (D)BYRS.

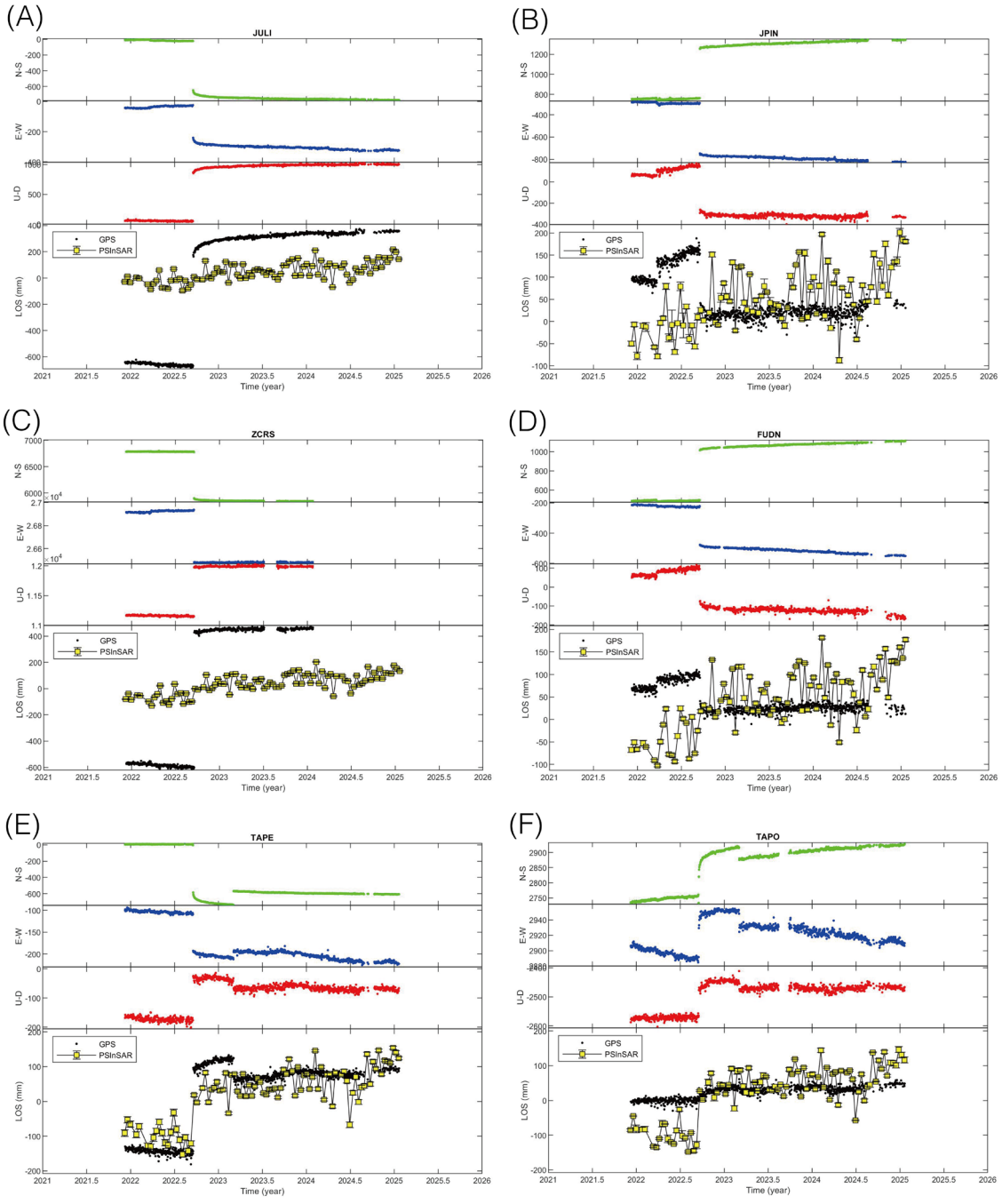


圖 4-8：2022-2024 升軌道方向時間序列。綠點為 GNSS 南北向時間序列，藍點為 GNSS 東西向時間序列，紅點為 GNSS 垂直向時間序列，黑點為 GNSS 三分量投影至 LOS 方向時間序列，黃色正方形及其連線為 PSI 時間序列。分別為以下測站 (A) JULI (B)JPIN (C)ZCRS (D)FUDN (E) TAPE (F)TAPO。

Figure 4-8：2022–2024 ascending-orbit LOS time series. Green points represent theGNSSnorth–south component, blue points represent theGNSSeast–west component, and red points represent theGNSSvertical component. The black points show the three-componentGNSSdisplacement projected into the LOS direction, while the yellow squares and connecting line represent the PSI time series. The stations shown are(A) JULI, (B)JPIN, (C)ZCRS, (D)FUDN, (E) TAPE, and (F)TAPO.

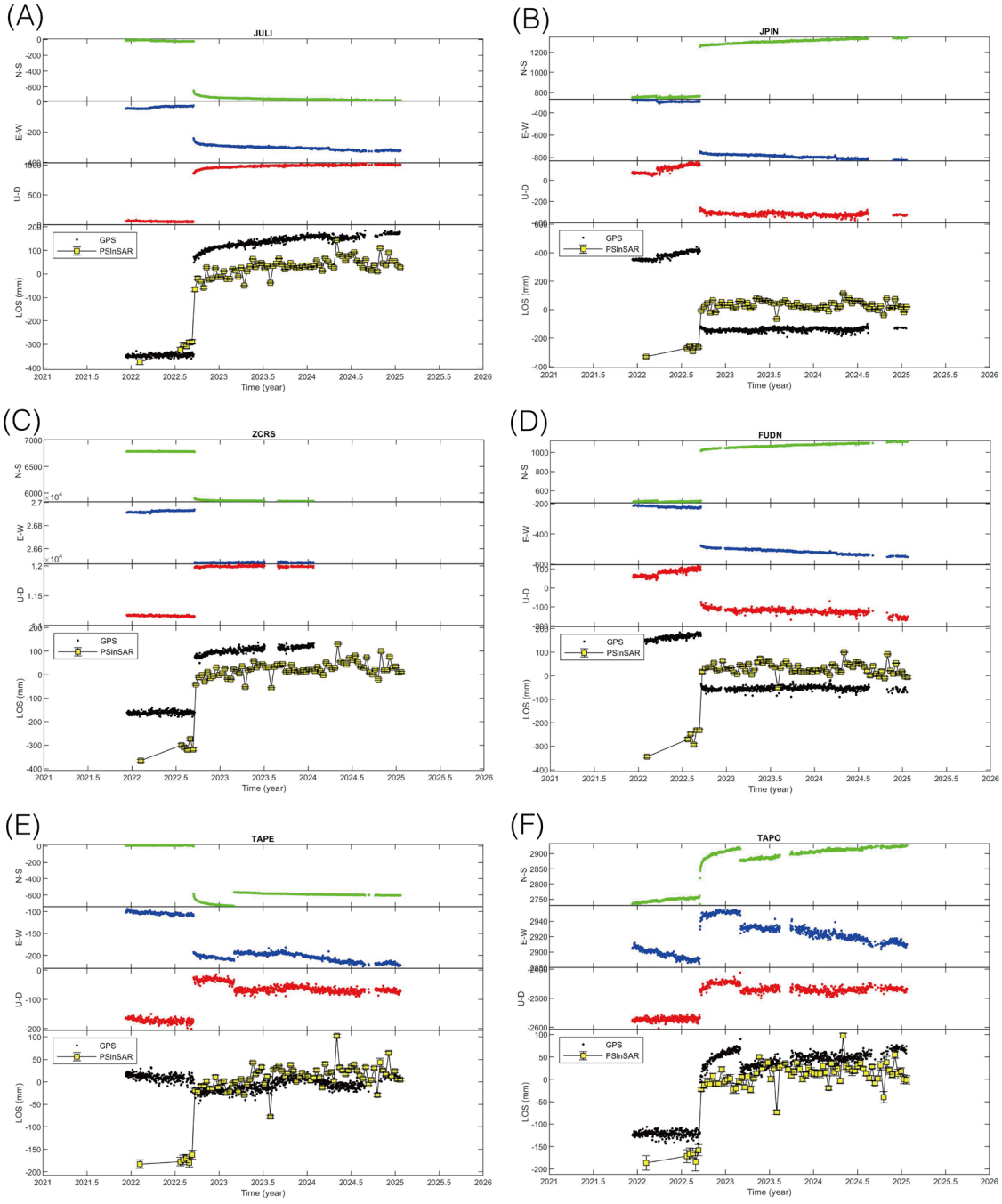


圖 4-9：2022-2024 降軌道方向時間序列。綠點為 GNSS 南北向時間序列，藍點為 GNSS 東西向時間序列，紅點為 GNSS 垂直向時間序列，黑點為 GNSS 三分量投影至 LOS 方向時間序列，黃色正方形及其連線為 PSI 時間序列。分別為以下測站 (A) JULI (B)JPIN (C)ZCRS (D)FUDN (E) TAPE (F)TAPO。

Figure 4-9：2022–2024 descending-orbit LOS time series. Green points represent theGNSSnorth–south component, blue points represent theGNSSeast–west component, and red points represent theGNSSvertical component. The black points show the three-componentGNSSdisplacement projected into the LOS direction, while the yellow squares and connecting line represent the PSI time series. The stations shown are(A) JULI, (B)JPIN, (C)ZCRS, (D)FUDN, (E) TAPE, and (F)TAPO.

4-1-2 2022~2022.09.17 比對結果

由全年度的成果我們發現 2022 年 09 月 18 日的池上地震對速度場擬合有影響，因此我們嘗試先以時間區隔，分別求得地震前後的速度場，本子節呈現 2021 年 12 月 1 日至 2022 年 09 月 17 日前影像的速度場，以下簡稱為 2022 年速度場。

圖 4-10 與圖 4-12 分別呈現 2022 年升軌道與降軌道的永久散射體 PSI 速度場及其對應的 GNSS 連續站速度分布。圖 4-11 與圖 4-13 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 則是統整 PSI 與 GNSS 資料比對結果，結果顯示，相較於全時段使用全部測站的情況，兩軌向的比對表現均明顯改善：升軌 R^2 為 0.41、降軌 R^2 為 0.48，而兩軌 RMSE 皆低於 4 cm/yr。

圖 4-10 顯示升軌 PSI 與 GNSS 觀測相對於臺東高中 (TTSH) 測站的地表變形資訊，其整體的變形趨勢一致；在光復至玉里呈現靠近衛星的變形，僅少數測站顯示 GNSS 觀測值略大於 PSI 觀測值。光復以北地區，兩者資料皆呈現遠離衛星移動，但是 GNSS 觀測值與大約為 2~-5 cm/yr，PSI 觀測值為 -7~-15 cm/yr。在臺東市及海岸山脈 GNSS 觀測值與 PSI 觀測值接近。圖 4-11 顯示除了北區的測站，其餘測站分布於斜率為 1 的灰色虛線附近，代表在光復以南的測站的速度場變化仍有一定品質可供參考。

圖 4-12 顯示降軌 PSI 與 GNSS 觀測相對於臺東高中 (TTSH) 的地表變形資訊，可以看到 PSI 與 GNSS 區域變形趨勢一致，在池上以北均呈現靠近衛星移動；斷層西側及北部的測站顯示 PSI 觀測值大於 GNSS 觀測值，PSI 觀測值大約介於 7~25 cm/yr GNSS 觀測值大約介於 0~21 cm/yr，在臺東市及海岸山脈 GNSS 觀測值與 PSI 觀測值接近。圖 4-13 顯示部分測站分布於斜率為 1 的灰色虛線附近，其餘測站則是集中於迴歸線附近，因此有著較高的 R^2。

升軌道方向呈現 2022 年 06 月 20 日光復地震的同震變形資訊，降軌道方向雖然在 3 月至 7 月無影像，但仍舊在光復地區記錄了較高的變形資訊，可能代表同震變形的影響時間持續，但因缺乏資料無法顯示太多細節，降軌道的速度場比對斜率雖然較小，由 R^2 來看

GNSS 與 PSI 觀測還是有一定相關性，只是有系統性偏差，推測為使用的時間跨距短，且有近半年的時間無影像資料所致。以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料在雖然比對結果不盡理想，但仍可參考其趨勢。

表 4-3：2022 年 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-3：Comparisons of velocity fields between PSI andGNSSresults through 2022.

	slope	R^2	RMSE (cm/yr)
Ascending	0.52	0.41	3.47
Descending	0.47	0.48	3.99

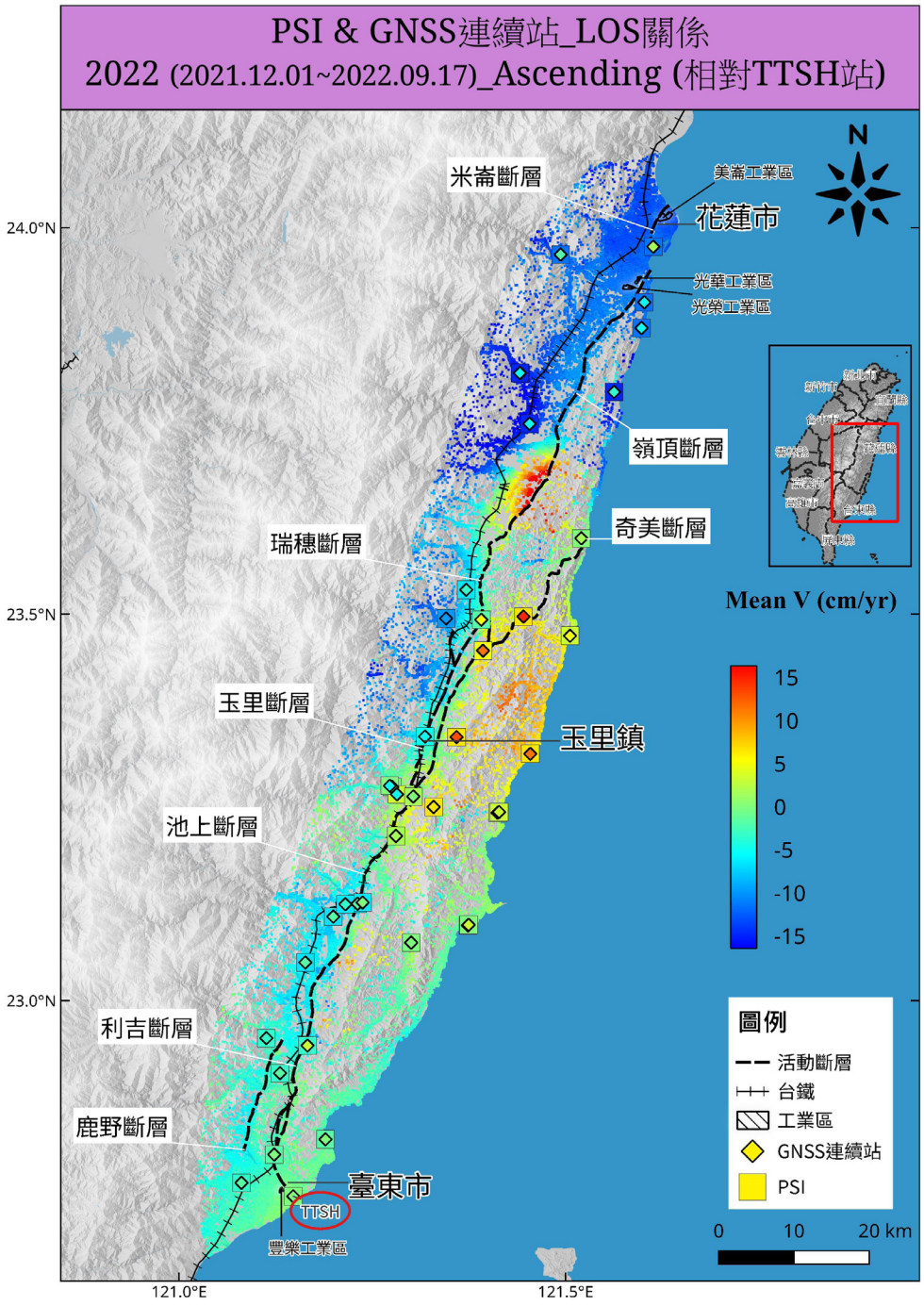


圖 4-10：2022-2022.09.17 的 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-10：Mean velocity field in ascending track between 2022 and 2022.09.17. 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. The reference point is the continuous GNSS station TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

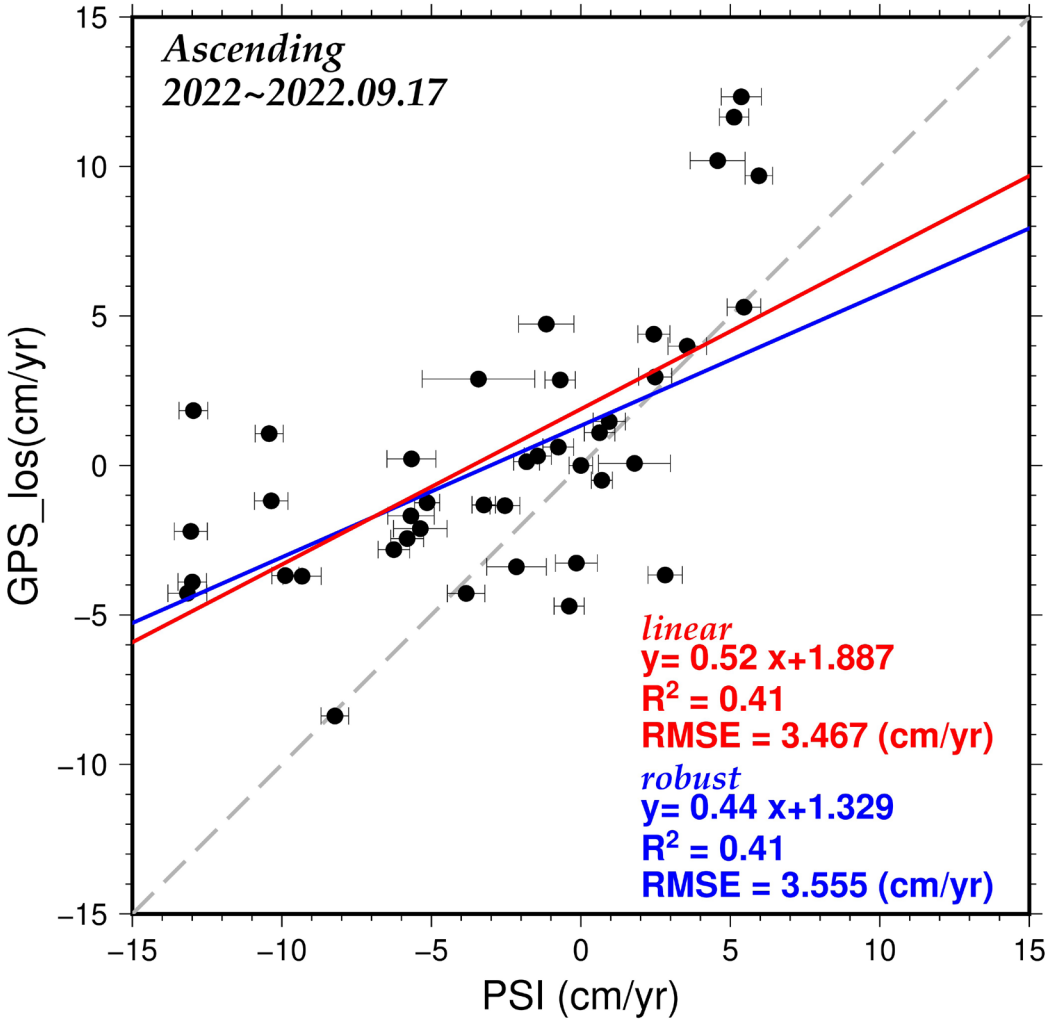


圖 4-11：2022-2022.09.17 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。

Figure 4-11：Comparison between the 2022-2022.09.17 ascending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The reference station is the continuousGNSSsite TTSH.

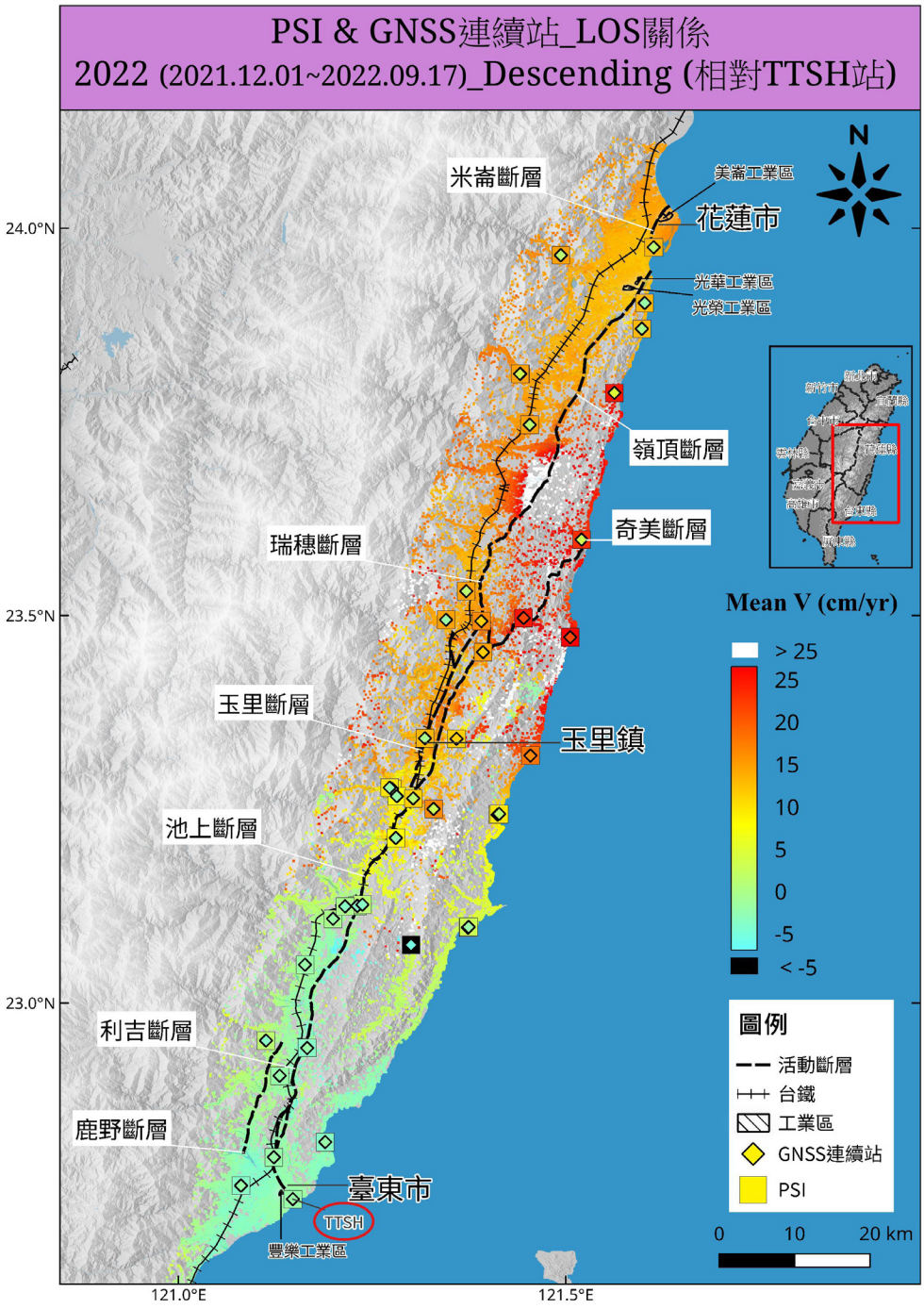


圖 4-12：2022-2022.09.17 的 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-12：Mean velocity field in descending track between 2022 and 2022.09.17. 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. The reference point is the continuous GNSS station TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

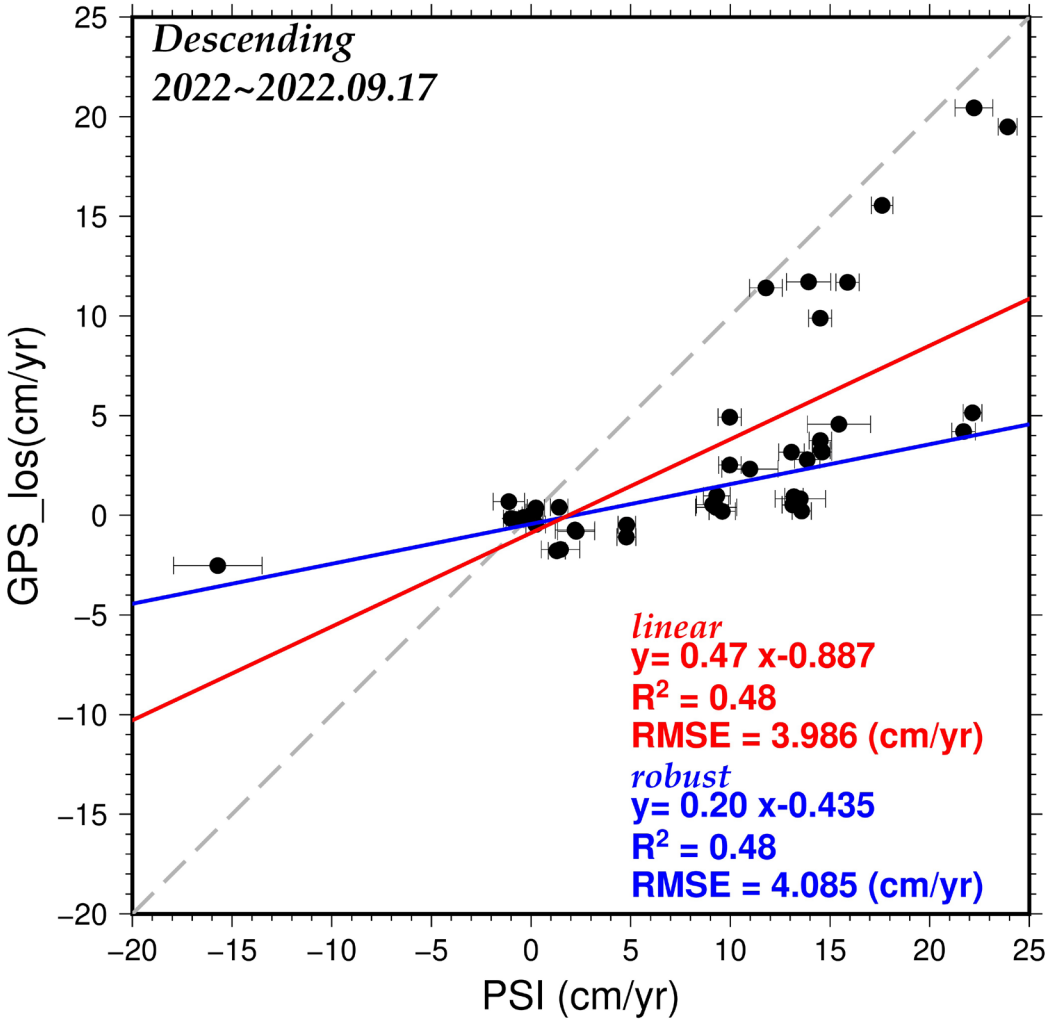


圖 4-13：2022-2022.09.17 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。

Figure 4-13：Comparison between the 2022-2022.09.17 descending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The reference station is the continuousGNSSsite TTSH.

4-1-3 2022.09.19~2024 比對結果

本子節呈現 2022 年 09 月 19 日至 2024 年 12 月 31 日前影像的速度場，以下簡稱為 2023-2024 年速度場。

圖 4-14 與圖 4-16 為 2023~2024 年升軌道與降軌道的永久散射體 PSI 速度場及其對應的 GNSS 連續站速度分布。圖 4-15, 4-17 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 則是統整 2023-2024 年升降軌道 PSI 與 GNSS 資料比對，結果顯示，相較於使用全時段資料並納入所有測站的情況，此時段的比對品質大幅提升：升軌道方向的 R^2 為 0.83，降軌道 R^2 為 0.91，升降軌道的 RMSE 皆小於 3 cm/yr。

圖 4-14 顯示升軌 PSI 與 GNSS 觀測相對於臺東高中 (TTSH) 的地表變形資訊，可以看到 PSI 與 GNSS 區域變形趨勢一致，大部分的測站 GNSS 觀測值介於 -5~5 cm/yr，PSI 觀測值介於 -3~5 cm/yr，最大的變形區域為花蓮市至壽豐地區，主要為受到 2024 年 04 月 03 日花蓮地震同震變形影響，兩者觀測值相近。圖 4-15 顯示 2023-2024 年的升軌道資料分布比起前兩個時段來得集中，多數測站分布於斜率為 1 的灰色虛線附近，代表關山 - 池上地震後 PSI 觀測的穩定度顯著提升。

圖 4-16 顯示降軌 PSI 與 GNSS 觀測相對於臺東高中 (TTSH) 的地表變形資訊，可以看到 PSI 與 GNSS 區域變形趨勢呈現良好的一致性，大部分的測站 GNSS 觀測值介於 -3~7 cm/yr，PSI 觀測值介於 -2~7 cm/yr。最大的變形區域為花蓮市至壽豐地區，主要為受到 2024 年 04 月 03 日花蓮地震同震變形影響，兩者觀測值相近，瑞穗斷層以南區域在斷層兩側略有 LOS 速度差，斷層西側約為 3 cm/yr 的 LOS 速度，斷層東側的 LOS 速則大約為 -2~-1 cm/yr。圖 4-17 顯示 2023~2024 年的升軌道資料分布比起前兩個時段來得集中，多數測站分布於斜率為 1 的灰色虛線附近，代表關山 - 池上地震後的 PSI 觀測品質佳。

升、降軌道在花蓮市至壽豐的速度場趨勢一致，顯示在 2024 年花蓮地震的同震變形主要為垂直向的抬升分量。此外，米崙斷層東側降軌道的 LOS 速度大於升軌道的速度，反映該區除了垂直抬

升分量，亦伴隨向東的為水平變化量所致。瑞穗以南的區域，升軌道方向在斷層兩側無明顯變化，降軌道方向則有些微變化，代表斷層系統東側有東西方向的運動，但在降軌道 LOS 速度略小，暗示該區域受到東西向的壓力影響，反映臺灣的板塊運動趨勢。整體而言，2023~2024 年的 PSI 資料在速度場與同震變形的呈現上均與 GNSS 高度一致，是三個分析時段中品質最佳的一段，能可靠反映東部地區地表變形的時空分布特性。

表 4-4：2023~2024 年 PSI 與 GNSS 比對成果。

Table 4-4：Comparisons of velocity fields between PSI andGNSSresults through 2023~2024.

	slope	R^2	RMSE (cm/yr)
Ascending	0.90	0.83	2.20
Descending	1.12	0.91	2.73

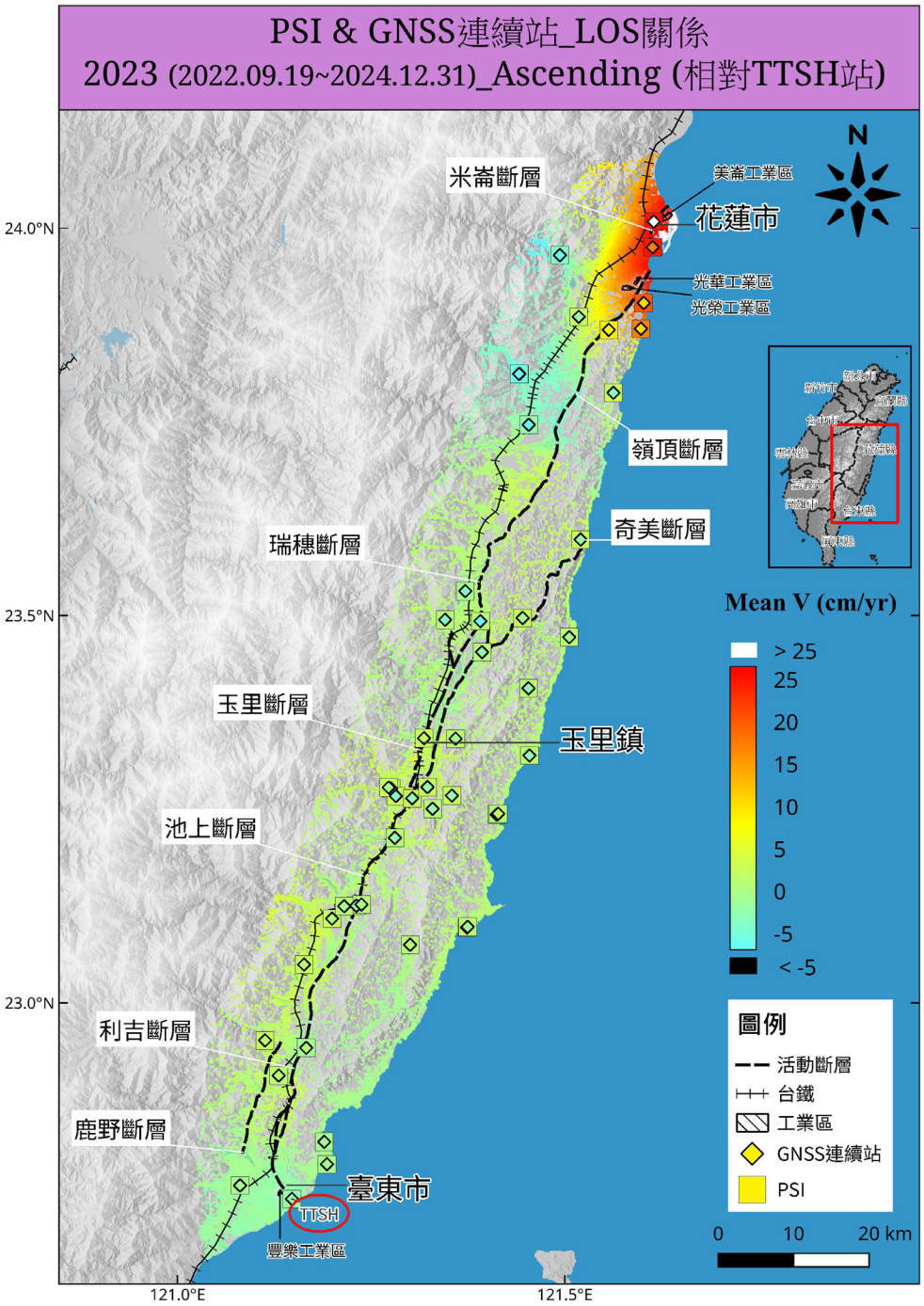


圖 4-14：2022.09.19 - 2024 的 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-14：Mean velocity field in ascending track between 2022.09.19 and 2024. 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. The reference point is the continuous GNSS station TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

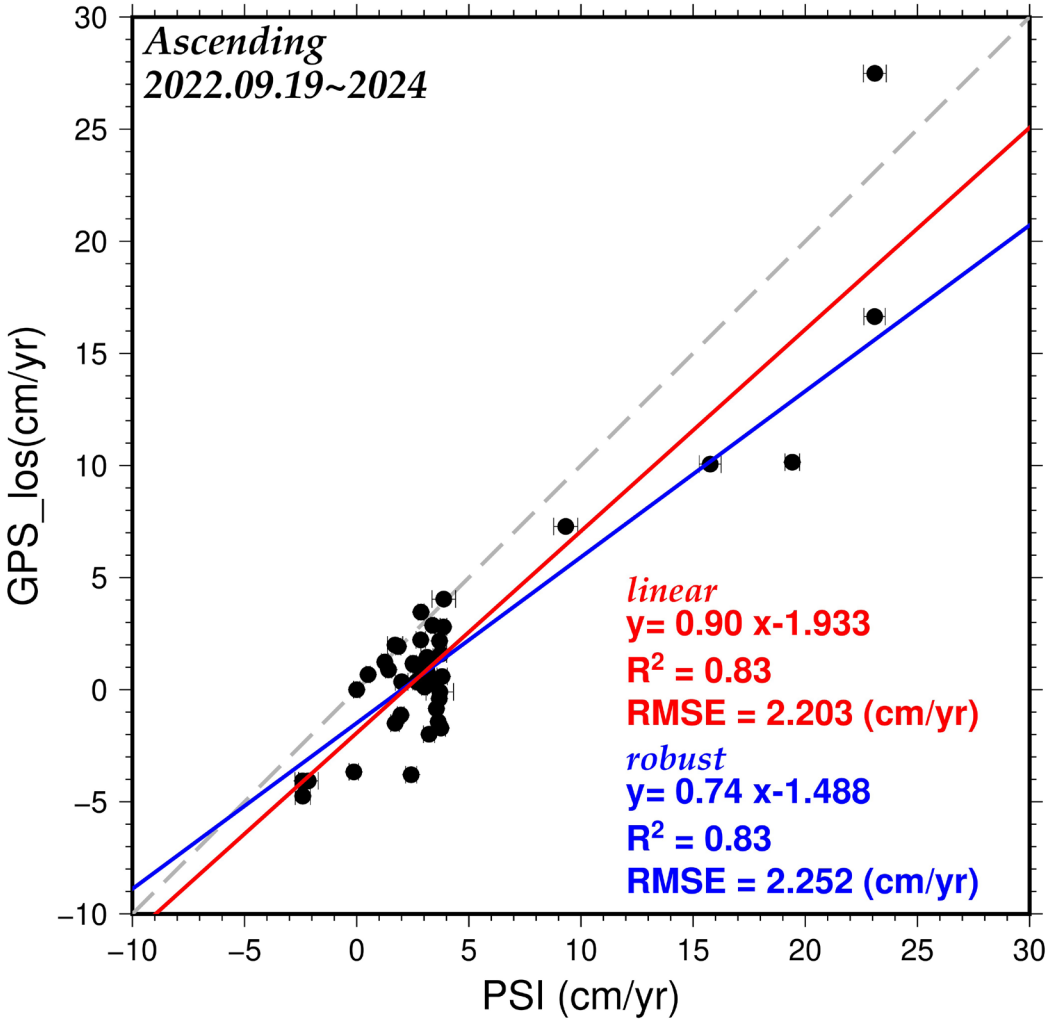


圖 4-15：2022.09.19 - 2024 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。

Figure 4-15：Comparison between the 2022.09.19 - 2024 ascending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The reference station is the continuousGNSSsite TTSH.

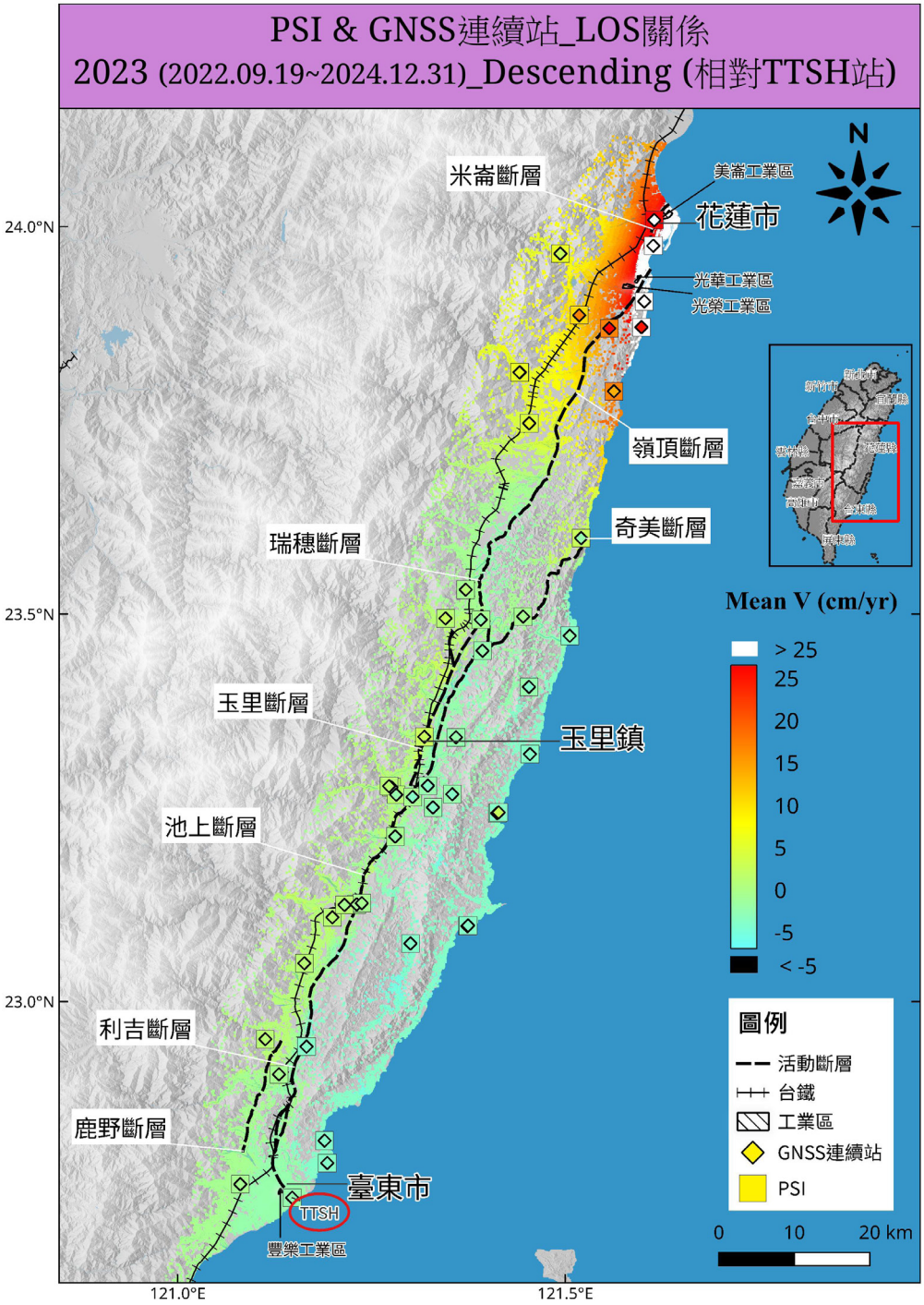


圖 4-16：2022.09.19 - 2024 的 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-16：Mean velocity field in descending track between 2022.09.19 and 2024. 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. The reference point is the continuous GNSS station TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

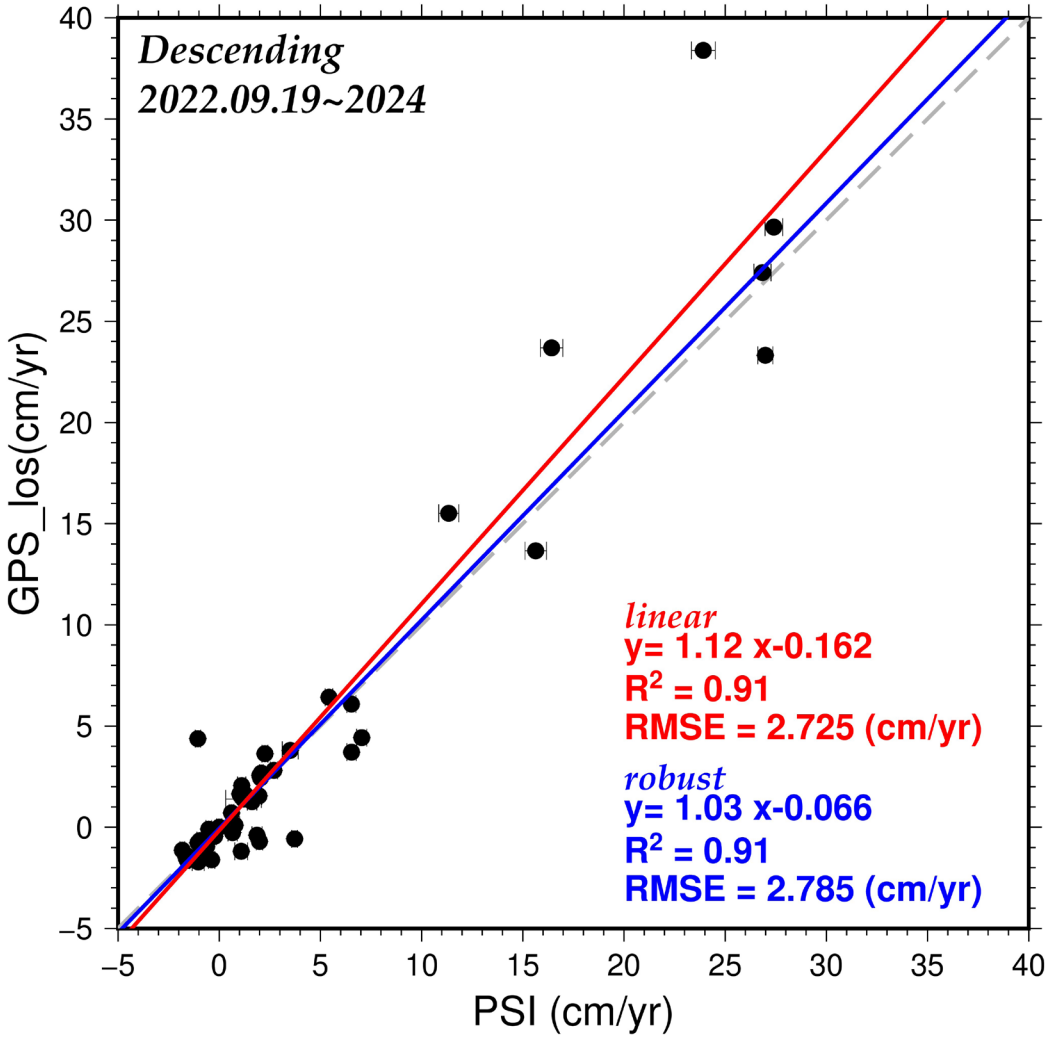


圖 4-17：2022.09.19 - 2024 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。

Figure 4-17：Comparison between the 2022.09.19 - 2024 descending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The reference station is the continuousGNSSsite TTSH.

4-1-4 2022~2024 GNSS 連續站及移動站與 PSI 資料比對

在這個章節中，我們針對 GNSS 移動觀測站與 GNSS 連續觀測站，選取 2022~2024 年期間的 PSI 觀測資料進行比對分析。首先，將調查範圍內 GNSS 移動站所估算的三分量速度轉換為雷達視線方向（LOS）的速度，並在每個測站周圍搜尋半徑 500 公尺內的 PS 點，取其平均作為對應的 PSI 速度值。GNSS 移動站分布如圖 4-16 所示。接著，將所有 GNSS 資料與 PSI 的 LOS 速度繪製於同一散佈圖中，並進行一維線性迴歸，以決定係數（Coefficient of determination，R^2）評估兩者線性關係強度，並以均方根誤差 (Root Mean Square Error；RMSE) 檢視預測值和觀測值之間的差異，評估迴歸模型的準確度。

表 4-5 彙整 2022~2024 年 PSI 與 GNSS 連續觀測站及 GNSS 移動觀測站的比對成果。圖 4-19 與圖 4-21 為 2022~2024 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 4-20 與圖 4-22 分別為研究區域 GNSS 連續觀測站及 GNSS 移動觀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 的比對結果顯示，升軌道方向的 R^2 只有 0.16，降軌道方向成果略佳，但 R^2 仍只有 0.41，兩者的 RMSE 皆大於 9 cm/yr。進一步檢視速度場成果圖，可以發現花蓮市區至壽豐一帶的 GNSS 測站比對偏大，推測是受到 2024 年花蓮地震的影響。因此，我們先排除該區測站，再加上移除前述 GNSS 連續站與 PSI 資料比對較差的玉里至池上地區 12 個測站，重新進行迴歸。排除後雖有改善，但幅度有限：升軌道的 R^2 提升至 0.3，降軌道的 R^2 則提升至 0.45，而升軌道的 RMSE 則降到 8 cm/yr 以下，降軌道的 RMSE 則下降到 8.24 cm/yr。

升軌道的 PSI 成果 (圖 4-19) 顯示明顯的分區的特徵；以 TTSH 測站為相對參考站，臺東市周圍大部分測站投影至 LOS 方向速度為 0~4 cm/yr 之間，與 PSI 比對良好。而位在花東縱谷的池上斷層、玉里斷層至瑞穗斷層路徑周邊的測站，其 LOS 方向速度值則與 PSI 比對差異顯著。光復以北至吉安以南的區域，兩者資料比對良好。惟吉安以北至花蓮市區周邊 GNSS 與 PSI 差異再次增大。整

體觀察，升軌比對表現不佳的區域，多與 2022~2024 年五起規模 6 以上地震的震央周邊重疊。

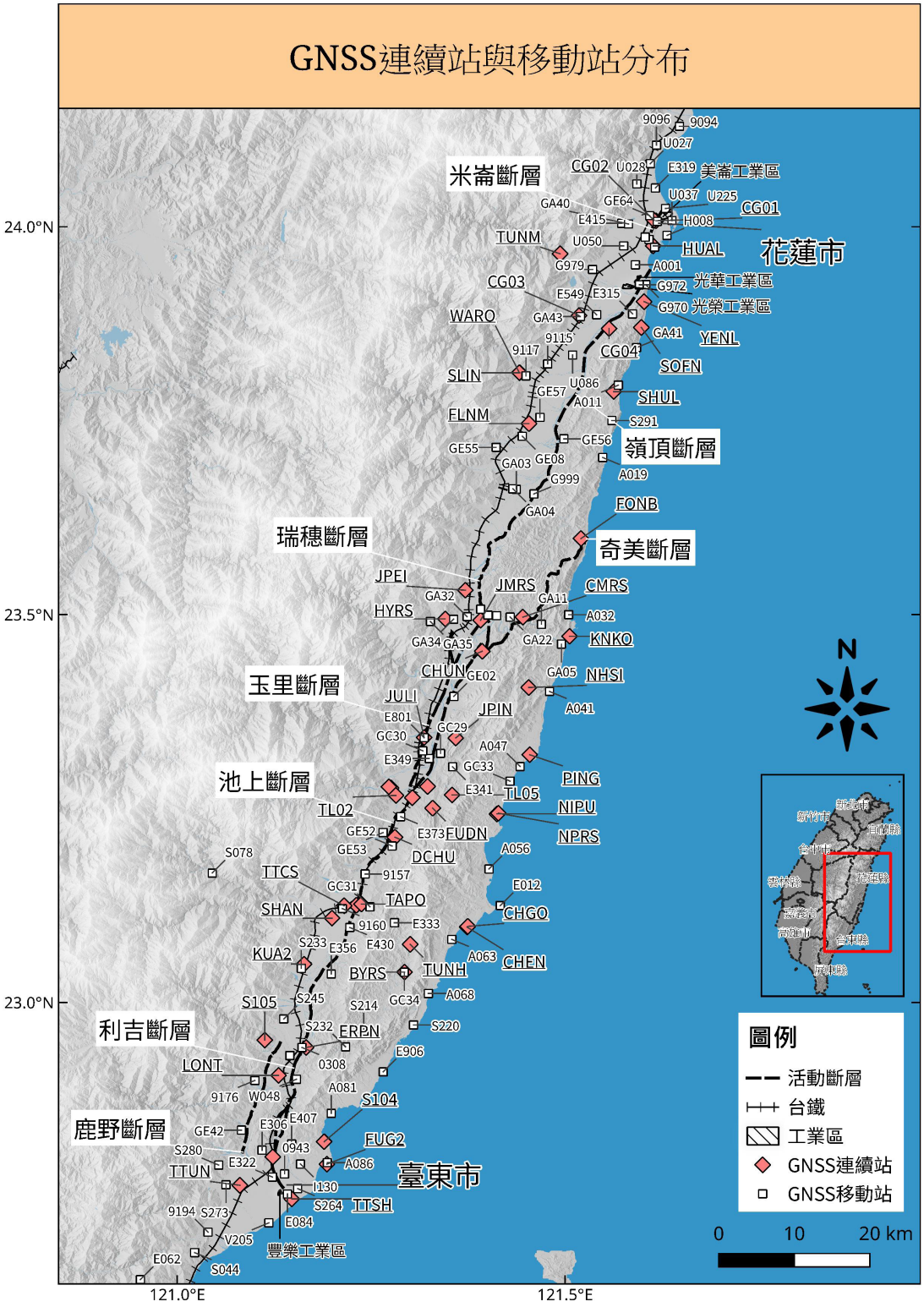
降軌道的成果 (圖 4-21) 比升軌有更多比對不佳的測站，主要集中在長濱以南的海岸山脈東側。空間分布趨勢與升軌結果類似：臺東市至縱谷鹿野以南區域比對良好；池上斷層、玉里斷層及瑞穗斷層沿線差異明顯；光復以北至吉安以南區域兩者一致度良好；吉安以北至花蓮市區雖仍有顯著差異，但比升軌方向減少。

整體而言，如前章節中所述，花東地區因地質條件複雜、穩定反射面的平原面積有限且區域狹長，再加上構造活動頻繁，於 2022~2024 年間即發生五起規模 6 以上之地震，皆影響 PSI 解算品質。此外，GNSS 移動站一年僅兩次觀測，在此類變形頻繁區域資料密度不足，使速度估算的誤差偏大，亦影響與 PSI 的比對結果。因此整體比對品質不佳。然而，若不考慮大型地震影響區域，在臺東市至縱谷鹿野以南，以及光復至吉安以南區域，GNSS（含連續站與移動站）與 PSI 的 LOS 速度比對仍具有相當一致性。

表 4-5：2022~2024GNSS 連續站及移動站與 PSI 資料比對。

Table 4-5：Comparisons of velocity fields between PSI and the campaign and continuesGNSSresults from 2022 to 2024.

	slope	R^2	RMSE (cm/yr)
Ascending	1.16	0.16	12.2
移除花蓮市與玉里地區測站	1.08	0.30	7.84
Descending	1.08	0.41	9.77
移除花蓮市與玉里地區測站	1.27	0.45	8.24


GNSS連續站與移動站分布
米崙斷層
CG02
U028
E319
美崙工業區
U037
U225
CG01
H008
花蓮市
HUAL
A001
光華工業區
G972
光榮工業區
G970
YENL
SOEN
SHUL
S291
嶺頂斷層
A019
FONB
奇美斷層
CMRS
A032
KNKO
NHSI
A041
PING
NIPU
NPRS
A056
E012
CHGO
A063
CHEN
TUNH
A068
S220
E906
S104
EUG2
A086
臺東市
TTSH
豐樂工業區
瑞穗斷層
玉里斷層
池上斷層
利吉斷層
鹿野斷層
TUNM
CG03
WARO
CG04
SLIN
FLNM
JPEI
JMRS
HYRS
CHUN
JULI
JPIN
TL05
TL02
EUDN
DCHU
TTCS
TAPO
SHAN
KUA2
BYRS
S105
ERPN
LONT
TTUN
S078
S084
S044
V205
S273
S280
S264
S245
S232
S233
S214
GC34
GC31
GC30
GC29
GC33
GE02
GE08
GE41
GE42
GE52
GE53
GE55
GE56
GE57
GE64
GA03
GA04
GA05
GA11
GA22
GA32
GA34
GA35
GA40
GA41
GA43
E315
E322
E333
E341
E349
E356
E373
E407
E415
E430
E549
E801
A011
A041
A047
A081
A086
A111
A112
A115
A116
A117
A118
A119
A120
A121
A122
A123
A124
A125
A126
A127
A128
A129
A130
A131
A132
A133
A134
A135
A136
A137
A138
A139
A140
A141
A142
A143
A144
A145
A146
A147
A148
A149
A150
A151
A152
A153
A154
A155
A156
A157
A158
A159
A160
A161
A162
A163
A164
A165
A166
A167
A168
A169
A170
A171
A172
A173
A174
A175
A176
A177
A178
A179
A180
A181
A182
A183
A184
A185
A186
A187
A188
A189
A190
A191
A192
A193
A194
A195
A196
A197
A198
A199
A200
A201
A202
A203
A204
A205
A206
A207
A208
A209
A210
A211
A212
A213
A214
A215
A216
A217
A218
A219
A220
A221
A222
A223
A224
A225
A226
A227
A228
A229
A230
A231
A232
A233
A234
A235
A236
A237
A238
A239
A240
A241
A242
A243
A244
A245
A246
A247
A248
A249
A250
A251
A252
A253
A254
A255
A256
A257
A258
A259
A260
A261
A262
A263
A264
A265
A266
A267
A268
A269
A270
A271
A272
A273
A274
A275
A276
A277
A278
A279
A280
A281
A282
A283
A284
A285
A286
A287
A288
A289
A290
A291
A292
A293
A294
A295
A296
A297
A298
A299
A300
A301
A302
A303
A304
A305
A306
A307
A308
A309
A310
A311
A312
A313
A314
A315
A316
A317
A318
A319
A320
A321
A322
A323
A324
A325
A326
A327
A328
A329
A330
A331
A332
A333
A334
A335
A336
A337
A338
A339
A340
A341
A342
A343
A344
A345
A346
A347
A348
A349
A350
A351
A352
A353
A354
A355
A356
A357
A358
A359
A360
A361
A362
A363
A364
A365
A366
A367
A368
A369
A370
A371
A372
A373
A374
A375
A376
A377
A378
A379
A380
A381
A382
A383
A384
A385
A386
A387
A388
A389
A390
A391
A392
A393
A394
A395
A396
A397
A398
A399
A400
A401
A402
A403
A404
A405
A406
A407
A408
A409
A410
A411
A412
A413
A414
A415
A416
A417
A418
A419
A420
A421
A422
A423
A424
A425
A426
A427
A428
A429
A430
A431
A432
A433
A434
A435
A436
A437
A438
A439
A440
A441
A442
A443
A444
A445
A446
A447
A448
A449
A450
A451
A452
A453
A454
A455
A456
A457
A458
A459
A460
A461
A462
A463
A464
A465
A466
A467
A468
A469
A470
A471
A472
A473
A474
A475
A476
A477
A478
A479
A480
A481
A482
A483
A484
A485
A486
A487
A488
A489
A490
A491
A492
A493
A494
A495
A496
A497
A498
A499
A500
A501
A502
A503
A504
A505
A506
A507
A508
A509
A510
A511
A512
A513
A514
A515
A516
A517
A518
A519
A520
A521
A522
A523
A524
A525
A526
A527
A528
A529
A530
A531
A532
A533
A534
A535
A536
A537
A538
A539
A540
A541
A542
A543
A544
A545
A546
A547
A548
A549
A550
A551
A552
A553
A554
A555
A556
A557
A558
A559
A560
A561
A562
A563
A564
A565
A566
A567
A568
A569
A570
A571
A572
A573
A574
A575
A576
A577
A578
A579
A580
A581
A582
A583
A584
A585
A586
A587
A588
A589
A590
A591
A592
A593
A594
A595
A596
A597
A598
A599
A600
A601
A602
A603
A604
A605
A606
A607
A608
A609
A610
A611
A612
A613
A614
A615
A616
A617
A618
A619
A620
A621
A622
A623
A624
A625
A626
A627
A628
A629
A630
A631
A632
A633
A634
A635
A636
A637
A638
A639
A640
A641
A642
A643
A644
A645
A646
A647
A648
A649
A650
A651
A652
A653
A654
A655
A656
A657
A658
A659
A660
A661
A662
A663
A664
A665
A666
A667
A668
A669
A670
A671
A672
A673
A674
A675
A676
A677
A678
A679
A680
A681
A682
A683
A684
A685
A686
A687
A688
A689
A690
A691
A692
A693
A694
A695
A696
A697
A698
A699
A700
A701
A702
A703
A704
A705
A706
A707
A708
A709
A710
A711
A712
A713
A714
A715
A716
A717
A718
A719
A720
A721
A722
A723
A724
A725
A726
A727
A728
A729
A730
A731
A732
A733
A734
A735
A736
A737
A738
A739
A740
A741
A742
A743
A744
A745
A746
A747
A748
A749
A750
A751
A752
A753
A754
A755
A756
A757
A758
A759
A760
A761
A762
A763
A764
A765
A766
A767
A768
A769
A770
A771
A772
A773
A774
A775
A776
A777
A778
A779
A780
A781
A782
A783
A784
A785
A786
A787
A788
A789
A790
A791
A792
A793
A794
A795
A796
A797
A798
A799
A800
A801
A802
A803
A804
A805
A806
A807
A808
A809
A810
A811
A812
A813
A814
A815
A816
A817
A818
A819
A820
A821
A822
A823
A824
A825
A826
A827
A828
A829
A830
A831
A832
A833
A834
A835
A836
A837
A838
A839
A840
A841
A842
A843
A844
A845
A846
A847
A848
A849
A850
A851
A852
A853
A854
A855
A856
A857
A858
A859
A860
A861
A862
A863
A864
A865
A866
A867
A868
A869
A870
A871
A872
A873
A874
A875
A876
A877
A878
A879
A880
A881
A882
A883
A884
A885
A886
A887
A888
A889
A890
A891
A892
A893
A894
A895
A896
A897
A898
A899
A900
A901
A902
A903
A904
A905
A906
A907
A908
A909
A910
A911
A912
A913
A914
A915
A916
A917
A918
A919
A920
A921
A922
A923
A924
A925
A926
A927
A928
A929
A930
A931
A932
A933
A934
A935
A936
A937
A938
A939
A940
A941
A942
A943
A944
A945
A946
A947
A948
A949
A950
A951
A952
A953
A954
A955
A956
A957
A958
A959
A960
A961
A962
A963
A964
A965
A966
A967
A968
A969
A970
A971
A972
A973
A974
A975
A976
A977
A978
A979
A980
A981
A982
A983
A984
A985
A986
A987
A988
A989
A990
A991
A992
A993
A994
A995
A996
A997
A998
A999
A1000
A1001
A1002
A1003
A1004
A1005
A1006
A1007
A1008
A1009
A1010
A1011
A1012
A1013
A1014
A1015
A1016
A1017
A1018
A1019
A1020
A1021
A1022
A1023
A1024
A1025
A1026
A1027
A1028
A1029
A1030
A1031
A1032
A1033
A1034
A1035
A1036
A1037
A1038
A1039
A1040
A1041
A1042
A1043
A1044
A1045
A1046
A1047
A1048
A1049
A1050
A1051
A1052
A1053
A1054
A1055
A1056
A1057
A1058
A1059
A1060
A1061
A1062
A1063
A1064
A1065
A1066
A1067
A1068
A1069
A1070
A1071
A1072
A1073
A1074
A1075
A1076
A1077
A1078
A1079
A1080
A1081
A1082
A1083
A1084
A1085
A1086
A1087
A1088
A1089
A1090
A1091
A1092
A1093
A1094
A1095
A1096
A1097
A1098
A1099
A1100
A1101
A1102
A1103
A1104
A1105
A1106
A1107
A1108
A1109
A1110
A1111
A1112
A1113
A1114
A1115
A1116
A1117
A1118
A1119
A1120
A1121
A1122
A1123
A1124
A1125
A1126
A1127
A1128
A1129
A1130
A1131
A1132
A1133
A1134
A1135
A1136
A1137
A1138
A1139
A1140
A1141
A1142
A1143
A1144
A1145
A1146
A1147
A1148
A1149
A1150
A1151
A1152
A1153
A1154
A1155
A1156
A1157
A1158
A1159
A1160
A1161
A1162
A1163
A1164
A1165
A1166
A1167
A1168
A1169
A1170
A1171
A1172
A1173
A1174
A1175
A1176
A1177
A1178
A1179
A1180
A1181
A1182
A1183
A1184
A1185
A1186
A1187
A1188
A1189
A1190
A1191
A1192
A1193
A1194
A1195
A1196
A1197
A1198
A1199
A1200
A1201
A1202
A1203
A1204
A1205
A1206
A1207
A1208
A1209
A1210
A1211
A1212
A1213
A1214
A1215
A1216
A1217
A1218
A1219
A1220
A1221
A1222
A1223
A1224
A1225
A1226
A1227
A1228
A1229
A1230
A1231
A1232
A1233
A1234
A1235
A1236
A1237
A1238
A1239
A1240
A1241
A1242
A1243
A1244
A1245
A1246
A1247
A1248
A1249
A1250
A1251
A1252
A1253
A1254
A1255
A1256
A1257
A1258
A1259
A1260
A1261
A1262
A1263
A1264
A1265
A1266
A1267
A1268
A1269
A1270
A1271
A1272
A1273
A1274
A1275
A1276
A1277
A1278
A1279
A1280
A1281
A1282
A1283
A1284
A1285
A1286
A1287
A1288
A1289
A1290
A1291
A1292
A1293
A1294
A1295
A1296
A1297
A1298
A1299
A1300
A1301
A1302
A1303
A1304
A1305
A1306
A1307
A1308
A1309
A1310
A1311
A1312
A1313
A1314
A1315
A1316
A1317
A1318
A1319
A1320
A1321
A1322
A1323
A1324
A1325
A1326
A1327
A1328
A1329
A1330
A1331
A1332
A1333
A1334
A1335
A1336
A1337
A1338
A1339
A1340
A1341
A1342
A1343
A1344
A1345
A1346
A1347
A1348
A1349
A1350
A1351
A1352
A1353
A1354
A1355
A1356
A1357
A1358
A1359
A1360
A1361
A1362
A1363
A1364
A1365
A1366
A1367
A1368
A1369
A1370
A1371
A1372
A1373
A1374
A1375
A1376
A1377
A1378
A1379
A1380
A1381
A1382
A1383
A1384
A1385
A1386
A1387
A1388
A1389
A1390
A1391
A1392
A1393
A1394
A1395
A1396
A1397
A1398
A1399
A1400
A1401
A1402
A1403
A1404
A1405
A1406
A1407
A1408
A1409
A1410
A1411
A1412
A1413
A1414
A1415
A1416
A1417
A1418
A1419
A1420
A1421
A1422
A1423
A1424
A1425
A1426
A1427
A1428
A1429
A1430
A1431
A1432
A1433
A1434
A1435
A1436
A1437
A1438
A1439
A1440
A1441
A1442
A1443
A1444
A1445
A1446
A1447
A1448
A1449
A1450
A1451
A1452
A1453
A1454
A1455
A1456
A1457
A1458
A1459
A1460
A1461
A1462
A1463
A1464
A1465
A1466
A1467
A1468
A1469
A1470
A1471
A1472
A1473
A1474
A1475
A1476
A1477
A1478
A1479
A1480
A1481
A1482
A1483
A1484
A1485
A1486
A1487
A1488
A1489
A1490
A1491
A1492
A1493
A1494
A1495
A1496
A1497
A1498
A1499
A1500
A1501
A1502
A1503
A1504
A1505
A1506
A1507
A1508
A1509
A1510
A1511
A1512
A1513
A1514
A1515
A1516
A1517
A1518
A1519
A1520
A1521
A1522
A1523
A1524
A1525
A1526
A1527
A1528
A1529
A1530
A1531
A1532
A1533
A1534
A1535
A1536
A1537
A1538
A1539
A1540
A1541
A1542
A1543
A1544
A1545
A1546
A1547
A1548
A1549
A1550
A1551
A1552
A1553
A1554
A1555
A1556
A1557
A1558
A1559
A1560
A1561
A1562
A1563
A1564
A1565
A1566
A1567
A1568
A1569
A1570
A1571
A1572
A1573
A1574
A1575
A1576
A1577
A1578
A1579
A1580
A1581
A1582
A1583
A1584
A1585
A1586
A1587
A1588
A1589
A1590
A1591
A1592
A1593
A1594
A1595
A1596
A1597
A1598
A1599
A1600
A1601
A1602
A1603
A1604
A1605
A1606
A1607
A1608
A1609
A1610
A1611
A1612
A1613
A1614
A1615
A1616
A1617
A1618
A1619
A1620
A1621
A1622
A1623
A1624
A1625
A1626
A1627
A1628
A1629
A1630
A1631
A1632
A1633
A1634
A1635
A1636
A1637
A1638
A1639
A1640
A1641
A1642
A1643
A1644
A1645
A1646
A1647
A1648
A1649
A1650
A1651
A1652
A1653
A1654
A1655
A1656
A1657
A1658
A1659
A1660
A1661
A1662
A1663
A1664
A1665
A1666
A1667
A1668
A1669
A1670
A1671
A1672
A1673
A1674
A1675
A1676
A1677
A1678
A1679
A1680
A1681
A1682
A1683
A1684
A1685
A1686
A1687
A1688
A1689
A1690
A1691
A1692
A1693
A1694
A1695
A1696
A1697
A1698
A1699
A1700
A1701
A1702
A1703
A1704
A1705
A1706
A1707
A1708
A1709
A1710
A1711
A1712
A1713
A1714
A1715
A1716
A1717
A1718
A1719
A1720
A1721
A1722
A1723
A1724
A1725
A1726
A1727
A1728
A1729
A1730
A1731
A1732
A1733
A1734
A1735
A1736
A1737
A1738
A1739
A1740
A1741
A1742
A1743
A1744
A1745
A1746
A1747
A1748
A1749
A1750
A1751
A1752
A1753
A1754
A1755
A1756
A1757
A1758
A1759
A1760
A1761
A1762
A1763
A1764
A1765
A1766
A1767
A1768
A1769
A1770
A1771
A1772
A1773
A1774
A1775
A1776
A1777
A1778
A1779
A1780
A1781
A1782
A1783
A1784
A1785
A1786
A1787
A1788
A1789
A1790
A1791
A1792
A1793
A1794
A1795
A1796
A1797
A1798
A1799
A1800
A1801
A1802
A1803
A1804
A1805
A1806
A1807
A1808
A1809
A1810
A1811
A1812
A1813
A1814
A1815
A1816
A1817
A1818
A1819
A1820
A1821
A1822
A1823
A1824
A1825
A1826
A1827
A1828
A1829
A1830
A1831
A1832
A1833
A1834
A1835
A1836
A1837
A1838
A1839
A1840
A1841
A1842
A1843
A1844
A1845
A1846
A1847
A1848
A1849
A1850
A1851
A1852
A1853
A1854
A1855
A1856
A1857
A1858
A1859
A1860
A1861
A1862
A1863
A1864
A1865
A1866
A1867
A1868
A1869
A1870
A1871
A1872
A1873
A1874
A1875
A1876
A1877
A1878
A1879
A1880
A1881
A1882
A1883
A1884
A1885
A1886
A1887
A1888
A1889
A1890
A1891
A1892
A1893
A1894
A1895
A1896
A1897
A1898
A1899
A1900
A1901
A1902
A1903
A1904
A1905
A1906
A1907
A1908
A1909
A1910
A1911
A1912
A1913
A1914
A1915
A1916
A1917
A1918
A1919
A1920
A1921
A1922
A1923
A1924
A1925
A1926
A1927
A1928
A1929
A1930
A1931
A1932
A1933
A1934
A1935
A1936
A1937
A1938
A1939
A1940
A1941
A1942
A1943
A1944
A1945
A1946
A1947
A1948
A1949
A1950
A1951
A1952
A1953
A1954
A1955
A1956
A1957
A1958
A1959
A1960
A1961
A1962
A1963
A1964
A1965
A1966
A1967
A1968
A1969
A1970
A1971
A1972
A1973
A1974
A1975
A1976
A1977
A1978
A1979
A1980
A1981
A1982
A1983
A1984
A1985
A1986
A1987
A1988
A1989
A1990
A1991
A1992
A1993
A1994
A1995
A1996
A1997
A1998
A1999
A2000
A2001
A2002
A2003
A2004
A2005
A2006
A2007
A2008
A2009
A2010
A2011
A2012
A2013
A2014
A2015
A2016
A2017
A2018
A2019
A2020
A2021
A2022
A2023
A2024
A2025
A2026
A2027
A2028
A2029
A2030
A2031
A2032
A2033
A2034
A2035
A2036
A2037
A2038
A2039
A2040
A2041
A2042
A2043
A2044
A2045
A2046
A2047
A2048
A2049
A2050
A2051
A2052
A2053
A2054
A2055
A2056
A2057
A2058
A2059
A2060
A2061
A2062
A2063
A2064
A2065
A2066
A2067
A2068
A2069
A2070
A2071
A2072
A2073
A2074
A2075
A2076
A2077
A2078
A2079
A2080
A2081
A2082
A2083
A2084
A2085
A2086
A2087
A2088
A2089
A2090
A2091
A2092
A2093
A2094
A2095
A2096
A2097
A2098
A2099
A2100
A2101
A2102
A2103
A2104
A2105
A2106
A2107
A2108
A2109
A2110
A2111
A2112
A2113
A2114
A2115
A2116
A2117
A2118
A2119
A2120
A2121
A2122
A2123
A2124
A2125
A2126
A2127
A2128
A2129
A2130
A2131
A2132
A2133
A2134
A2135
A2136
A2137
A2138
A2139
A2140
A2141
A2142
A2143
A2144
A2145
A2146
A2147
A2148
A2149
A2150
A2151
A2152
A2153
A2154
A2155
A2156
A2157
A2158
A2159
A2160
A2161
A2162
A2163
A2164
A2165
A2166
A2167
A2168
A2169
A2170
A2171
A2172
A2173
A2174
A2175
A2176
A2177
A2178
A2179
A2180
A2181
A2182
A2183
A2184
A2185
A2186
A2187
A2188
A2189
A2190
A2191
A2192
A2193
A2194
A2195
A2196
A2197
A2198
A2199
A2200
A2201
A2202
A2203
A2204
A2205
A2206
A2207
A2208
A2209
A2210
A2211
A2212
A2213
A2214
A2215
A2216
A2217
A2218
A2219
A2220
A2221
A2222
A2223
A2224
A2225
A2226
A2227
A2228
A2229
A2230
A2231
A2232
A2233
A2234
A2235
A2236
A2237
A2238
A2239
A2240
A2241
A2242
A2243
A2244
A2245
A2246
A2247
A2248
A2249
A2250
A2251
A2252
A2253
A2254
A2255
A2256
A2257
A2258
A2259
A2260
A2261
A2262
A2263
A2264
A2265
A2266
A2267
A2268
A2269
A2270
A2271
A2272
A2273
A2274
A2275
A2276
A2277
A2278
A2279
A2280
A2281
A2282
A2283
A2284
A2285
A2286
A2287
A2288
A2289
A2290
A2291
A2292
A2293
A2294
A2295
A2296
A2297
A2298
A2299
A2300
A2301
A2302
A2303
A2304
A2305
A2306
A2307
A2308
A2309
A2310
A2311
A2312
A2313
A2314
A2315
A2316
A2317
A2318
A2319
A2320
A2321
A2322
A2323
A2324
A2325
A2326
A2327
A2328
A2329
A2330
A2331
A2332
A2333
A2334
A2335
A2336
A2337
A2338
A2339
A2340
A2341
A2342
A2343
A2344
A2345
A2346
A2347
A2348
A2349
A2350
A2351
A2352
A2353
A2354
A2355
A2356
A2357
A2358
A2359
A2360
A2361
A2362
A2363
A2364
A2365
A2366
A2367
A2368
A2369
A2370
A2371
A2372
A2373
A2374
A2375
A2376
A2377
A2378
A2379
A2380
A2381
A2382
A2383
A2384
A2385
A2386
A2387
A2388
A2389
A2390
A2391
A2392
A2393
A2394
A2395
A2396
A2397
A2398
A2399
A2400
A2401
A2402
A2403
A2404
A2405
A2406
A2407
A2408
A2409
A2410
A2411
A2412
A2413
A2414
A2415
A2416
A2417
A2418
A2419
A2420
A2421
A2422
A2423
A2424
A2425
A2426
A2427
A2428
A2429
A2430
A2431
A2432
A2433
A2434
A2435
A2436
A2437
A2438
A2439
A2440
A2441
A2442
A2443
A2444
A2445
A2446
A2447
A2448
A2449
A2450
A2451
A2452
A2453
A2454
A2455
A2456
A2457
A2458
A2459
A2460
A2461
A2462
A2463
A2464
A2465
A2466
A2467
A2468
A2469
A2470
A2471
A2472
A2473
A2474
A2475
A2476
A2477
A2478
A2479
A2480
A2481
A2482
A2483
A2484
A2485
A2486
A2487
A2488
A2489
A2490
A2491
A2492
A2493
A2494
A2495
A2496
A2497
A2498
A2499
A2500
A2501
A2502
A2503
A2504
A2505
A2506
A2507
A2508
A2509
A2510
A2511
A2512
A2513
A2514
A2515
A2516
A2517
A2518
A2519
A2520
A2521
A2522
A2523
A2524
A2525
A2526
A2527
A2528
A2529
A2530
A2531
A2532
A2533
A2534
A2535
A2536
A2537
A2538
A2539
A2540
A2541
A2542
A2543
A2544
A2545
A2546
A2547
A2548
A2549
A2550
A2551
A2552
A2553
A2554
A2555
A2556
A2557
A2558
A2559
A2560
A2561
A2562
A2563
A2564
A2565
A2566
A2567
A2568
A2569
A2570
A2571
A2572
A2573
A2574
A2575
A2576
A2577
A2578
A2579
A2580
A2581
A2582
A2583
A2584
A2585
A2586
A2587
A2588
A2589
A2590
A2591
A2592
A2593
A2594
A2595
A2596
A2597
A2598
A2599
A2600
A2601
A2602
A2603
A2604
A2605
A2606
A2607
A2608
A2609
A2610
A2611
A2612
A2613
A2614
A2615
A2616
A2617
A2618
A2619
A2620
A2621
A2622
A2623
A2624
A2625
A2626
A2627
A2628
A2629
A2630
A2631
A2632
A2633
A2634
A2635
A2636
A2637
A2638
A2639
A2640
A2641
A2642
A2643
A2644
A2645
A2646
A2647
A2648
A2649
A2650
A2651
A2652
A2653
A2654
A2655
A2656
A2657
A2658
A2659
A2660
A2661
A2662
A2663
A2664
A2665
A2666
A2667
A2668
A2669
A2670
A2671
A2672
A2673
A2674
A2675
A2676
A2677
A2678
A2679
A2680
A2681
A2682
A2683
A2684
A2685
A2686
A2687
A2688
A2689
A2690
A2691
A2692
A2693
A2694
A2695
A2696
A2697
A2698
A2699
A2700
A2701
A2702
A2703
A2704
A2705
A2706
A2707
A2708
A2709
A2710
A2711
A2712
A2713
A2714
A2715
A2716
A2717
A2718
A2719
A2720
A2721
A2722
A2723
A2724
A2725
A2726
A2727
A2728
A2729
A2730
A2731
A2732
A2733
A2734
A2735
A2736
A2737
A2738
A2739
A2740
A2741
A2742
A2743
A2744
A2745
A2746
A2747
A2748
A2749
A2750
A2751
A2752
A2753
A2754
A2755
A2756
A2757
A2758
A2759
A2760
A2761
A2762
A2763
A2764
A2765
A2766
A2767
A2768
A2769
A2770
A2771
A2772
A2773
A2774
A2775
A2776
A2777
A2778
A2779
A2780
A2781
A2782
A2783
A2784
A2785
A2786
A2787
A2788
A2789
A2790
A2791
A2792
A2793
A2794
A2795
A2796
A2797
A2798
A2799
A2800
A2801
A2802
A2803
A2804
A2805
A2806
A2807
A2808
A2809
A2810
A2811
A2812
A2813
A2814
A2815
A2816
A2817
A2818
A2819
A2820
A2821
A2822
A2823
A2824
A2825
A2826
A2827
A2828
A2829
A2830
A2831
A2832
A2833
A2834
A2835
A2836
A2837
A2838
A2839
A2840
A2841
A2842
A2843
A2844
A2845
A2846
A2847
A2848
A2849
A2850
A2851
A2852
A2853
A2854
A2855
A2856
A2857
A2858
A2859
A2860
A2861
A2862
A2863
A2864
A2865
A2866
A2867
A2868
A2869
A2870
A2871
A2872
A2873
A2874
A2875
A2876
A2877
A2878
A2879
A2880
A2881
A2882
A2883
A2884
A2885
A2886
A2887
A2888
A2889
A2890
A2891
A2892
A2893
A2894
A2895
A2896
A2897
A2898
A2899
A2900
A2901
A2902
A2903
A2904
A2905
A2906
A2907
A2908
A2909
A2910
A2911
A2912
A2913
A2914
A2915
A2916
A2917
A2918
A2919
A2920
A2921
A2922
A2923
A2924
A2925
A2926
A2927
A2928
A2929
A2930
A2931
A2932
A2933
A2934
A2935
A2936
A2937
A2938
A2939
A2940
A2941
A2942
A2943
A2944
A2945
A2946
A2947
A2948
A2949
A2950
A2951
A2952
A2953
A2954
A2955
A2956
A2957
A2958
A2959
A2960
A2961
A2962
A2963
A2964
A2965
A2966
A2967
A2968
A2969
A2970
A2971
A2972
A2973
A2974
A2975
A2976
A2977
A2978
A2979
A2980
A2981
A2982
A2983
A2984
A2985
A2986
A2987
A2988
A2989
A2990
A2991
A2992
A2993
A2994
A2995
A2996
A2997
A2998
A2999
A3000
A3001
A3002
A3003
A3004
A3005
A3006
A3007
A3008
A3009
A3010
A3011
A3012
A3013
A3014
A3015
A3016
A3017
A3018
A3019
A3020
A3021
A3022
A3023
A3024
A3025
A3026
A3027
A3028
A3029
A3030
A3031
A3032
A3033
A3034
A3035
A3036
A3037
A3038
A3039
A3040
A3041
A3042
A3043
A3044
A3045
A3046
A3047
A3048
A3049
A3050
A3051
A3052
A3053
A3054
A3055
A3056
A3057
A3058
A3059
A3060
A3061
A3062
A3063
A3064
A3065
A3066
A3067
A3068
A3069
A3070
A3071
A3072
A3073
A3074
A3075
A3076
A3077
A3078
A3079
A3080
A3081
A3082
A3083
A3084
A3085
A3086
A3087
A3088
A3089
A3090
A3091
A3092
A3093
A3094
A3095
A3096
A3097
A3098
A3099
A3100
A3101
A3102
A3103
A3104
A3105
A3106
A3107
A3108
A3109
A3110
A3111
A3112
A3113
A3114
A3115
A3116
A3117
A3118
A3119
A3120
A3121
A3122
A3123
A3124
A3125
A3126
A3127
A3128
A3129
A3130
A3131
A3132
A3133
A3134
A3135
A3136
A3137
A3138
A3139
A3140
A3141
A3142
A3143
A3144
A3145
A3146
A3147
A3148
A3149
A3150
A3151
A3152
A3153
A3154
A3155
A3156
A3157
A3158
A3159
A3160
A3161
A3162
A3163
A3164
A3165
A3166
A3167
A3168
A3169
A3170
A3171
A3172
A3173
A3174
A3175
A3176
A3177
A3178
A3179
A3180
A3181
A3182
A3183
A3184
A3185
A3186
A3187
A3188
A3189
A3190
A3191
A3192
A3193
A3194
A3195
A3196
A3197
A3198
A3199
A3200
A3201
A3202
A3203
A3204
A3205
A3206
A3207
A3208
A3209
A3210
A3211
A3212
A3213
A3214
A3215
A3216
A3217
A3218
A3219
A3220
A3221
A3222
A3223
A3224
A3225
A3226
A3227
A3228
A3229
A3230
A3231
A3232
A3233
A3234
A3235
A3236
A3237
A3238
A3239
A3240
A3241
A3242
A3243
A3244
A3245
A3246
A3247
A3248
A3249
A3250
A3251
A3252
A3253
A3254
A3255
A3256
A3257
A3258
A3259
A3260
A3261
A3262
A3263
A3264
A3265
A3266
A3267
A3268
A3269
A3270
A3271
A3272
A3273
A3274
A3275
A3276
A3277
A3278
A3279
A3280
A3281
A3282
A3283
A3284
A3285
A3286
A3287
A3288
A3289
A3290
A3291
A3292
A3293
A3294
A3295
A3296
A3297
A3298
A3299
A3300
A3301
A3302
A3303
A3304
A3305
A3306
A3307
A3308
A3309
A3310
A3311
A3312
A3313
A3314
A3315
A3316
A3317
A3318
A3319
A3320
A3321
A3322
A3323
A3324
A3325
A3326
A3327
A3328
A3329
A3330
A3331
A3332
A3333
A3334
A3335
A3336
A3337
A3338
A3339
A3340
A3341
A3342
A3343
A3344
A3345
A3346
A3347
A3348
A3349
A3350
A3351
A3352
A3353
A3354
A3355
A3356
A3357
A3358
A3359
A3360
A3361
A3362
A3363
A3364
A3365
A3366
A3367
A3368
A3369
A3370
A3371
A3372
A3373
A3374
A3375
A3376
A3377
A3378
A3379
A3380
A3381
A3382
A3383
A3384
A3385
A3386
A3387
A3388
A3389
A3390
A3391
A3392
A3393
A3394
A3395
A3396
A3397
A3398
A3399
A3400
A3401
A3402
A3403
A3404
A3405
A3406
A3407
A3408
A3409
A3410
A3411
A3412
A3413
A3414
A3415
A3416
A3417
A3418
A3419
A3420
A3421
A3422
A3423
A3424
A3425
A3426
A3427
A3428
A3429
A3430
A3431
A3432
A3433
A3434
A3435
A3436
A3437
A3438
A3439
A3440
A3441
A3442
A3443
A3444
A3445
A3446
A3447
A3448
A3449
A3450
A3451
A3452
A3453
A3454
A3455
A3456
A3457
A3458
A3459
A3460
A3461
A3462
A3463
A3464
A3465
A3466
A3467
A3468
A3469
A3470
A3471
A3472
A3473
A3474
A3475
A3476
A3477
A3478
A3479
A3480
A3481
A3482
A3483
A3484
A3485
A3486
A3487
A3488
A3489
A3490
A3491
A3492
A3493
A3494
A3495
A3496
A3497
A3498
A3499
A3500
A3501
A3502
A3503
A3504
A3505
A3506
A3507
A3508
A3509
A3510
A3511
A3512
A3513
A3514
A3515
A3516
A3517
A3518
A3519
A3520
A3521
A3522
A3523
A3524
A3525
A3526
A3527
A3528
A3529
A3530
A3531
A3532
A3533
A3534
A3535
A3536
A3537
A3538
A3539
A3540
A3541
A3542
A3543
A3544
A3545
A3546
A3547
A3548
A3549
A3550
A3551
A3552
A3553
A3554
A3555
A3556
A3557
A3558
A3559
A3560
A3561
A3562
A3563
A3564
A3565
A3566
A3567
A3568
A3569
A3570
A3571
A3572
A3573
A3574
A3575
A3576
A3577
A3578
A3579
A3580
A3581
A3582
A3583
A3584
A3585
A3586
A3587
A3588
A3589
A3590
A3591
A3592
A3593
A3594
A3595
A3596
A3597
A3598
A3599
A3600
A3601
A3602
A3603
A3604
A3605
A3606
A3607
A3608
A3609
A3610
A3611
A3612
A3613
A3614
A3615
A3616
A3617
A3618
A3619
A3620
A3621
A3622
A3623
A3624
A3625
A3626
A3627
A3628
A3629
A3630
A3631
A3632
A3633
A3634
A3635
A3636
A3637
A3638
A3639
A3640
A3641
A3642
A3643
A3644
A3645
A3646
A3647
A3648
A3649
A3650
A3651
A3652
A3653
A3654
A3655
A3656
A3657
A3658
A3659
A3660
A3661
A3662
A3663
A3664
A3665
A3666
A3667
A3668
A3669
A3670
A3671
A3672
A3673
A3674
A3675
A3676
A3677
A3678
A3679
A3680
A3681
A3682
A3683
A3684
A3685
A3686
A3687
A3688
A3689
A3690
A3691
A3692
A3693
A3694
A3695
A3696
A3697
A3698
A3699
A3700
A3701
A3702
A3703
A3704
A3705
A3706
A3707
A3708
A3709
A3710
A3711
A3712
A3713
A3714
A3715
A3716
A3717
A3718
A3719
A3720
A3721
A3722
A3723
A3724
A3725
A3726
A3727
A3728
A3729
A3730
A3731
A3732
A3733
A3734
A3735
A3736
A3737
A3738
A3739
A3740
A3741
A3742
A3743
A3744
A3745
A3746
A3747
A3748
A3749
A3750
A3751
A3752
A3753
A3754
A3755
A3756
A3757
A3758
A3759
A3760
A3761
A3762
A3763
A3764
A3765
A3766
A3767
A3768
A3769
A3770
A3771
A3772
A3773
A3774
A3775
A3776
A3777
A3778
A3779
A3780
A3781
A3782
A3783
A3784
A3785
A3786
A3787
A3788
A3789
A3790
A3791
A3792
A3793
A3794
A3795
A3796
A3797
A3798
A3799
A3800
A3801
A3802
A3803
A3804
A3805
A3806
A3807
A3808
A3809
A3810
A3811
A3812
A3813
A3814
A3815
A3816
A3817
A3818
A3819
A3820
A3821
A3822
A3823
A3824
A3825
A3826
A3827
A3828
A3829
A3830
A3831
A3832
A3833
A3834
A3835
A3836
A3837
A3838
A3839
A3840
A3841
A3842
A3843
A3844
A3845
A3846
A3847
A3848
A3849
A3850
A3851
A3852
A3853
A3854
A3855
A3856
A3857
A3858
A3859
A3860
A3861
A3862
A3863
A3864
A3865
A3866
A3867
A3868
A3869
A3870
A3871
A3872
A3873
A3874
A3875
A3876
A3877
A3878
A3879
A3880
A3881
A3882
A3883
A3884
A3885
A3886
A3887
A3888
A3889
A3890
A3891
A3892
A3893
A3894
A3895
A3896
A3897
A3898
A3899
A3900
A3901
A3902
A3903
A3904
A3905
A3906
A3907
A3908
A3909
A3910
A3911
A3912
A3913
A3914
A3915
A3916
A3917
A3918
A3919
A3920
A3921
A3922
A3923
A3924
A3925
A3926
A3927
A3928
A3929
A3930
A3931
A3932
A3933
A3934
A3935
A3936
A3937
A3938
A3939
A3940
A3941
A3942
A3943
A3944
A3945
A3946
A3947
A3948
A3949
A3950
A3951
A3952
A3953
A3954
A3955
A3956
A3957
A3958
A3959
A3960
A3961
A3962
A3963
A3964
A3965
A3966
A3967
A3968
A3969
A3970
A3971
A3972
A3973
A3974
A3975
A3976
A3977
A3978
A3979
A3980
A3981
A3982
A3983
A3984
A3985
A3986
A3987
A3988
A3989
A3990
A3991
A3992
A3993
A3994
A3995
A3996
A3997
A3998
A3999
A4000
A4001
A4002
A4003
A4004
A4005
A4006
A4007
A4008
A4009
A4010
A4011
A4012
A4013
A4014
A4015
A4016
A4017
A4018
A4019
A4020
A4021
A4022
A4023
A4024
A4025
A4026
A4027
A4028
A4029
A4030
A4031
A4032
A4033
A4034
A4035
A4036
A4037
A4038
A4039
A4040
A4041
A4042
A4043
A4044
A4045
A4046
A4047
A4048
A4049
A4050
A4051
A4052
A4053
A4054
A4055
A4056
A4057
A4058
A4059
A4060
A4061
A4062
A4063
A4064
A4065
A4066
A4067
A4068
A4069
A4070
A4071
A4072
A4073
A4074
A4075
A4076
A4077
A4078
A4079
A4080
A4081
A4082
A4083
A4084
A4085
A4086
A4087
A4088
A4089
A4090
A4091
A4092
A4093
A4094
A4095
A4096
A4097
A4098
A4099
A4100
A4101
A4102
A4103
A4104
A4105
A4106
A4107
A4108
A4109
A4110
A4111
A4112
A4113
A4114
A4115
A4116
A4117
A4118
A4119
A4120
A4121
A4122
A4123
A4124
A4125
A4126
A4127
A4128
A4129
A4130
A4131
A4132
A4133
A4134
A4135
A4136
A4137
A4138
A4139
A4140
A4141
A4142
A4143
A4144
A4145
A4146
A4147
A4148
A4149
A4150
A4151
A4152
A4153
A4154
A4155
A4156
A4157
A4158
A4159
A4160
A4161
A4162
A4163
A4164
A4165
A4166
A4167
A4168
A4169
A4170
A4171
A4172
A4173
A4174
A4175
A4176
A4177
A4178
A4179
A4180

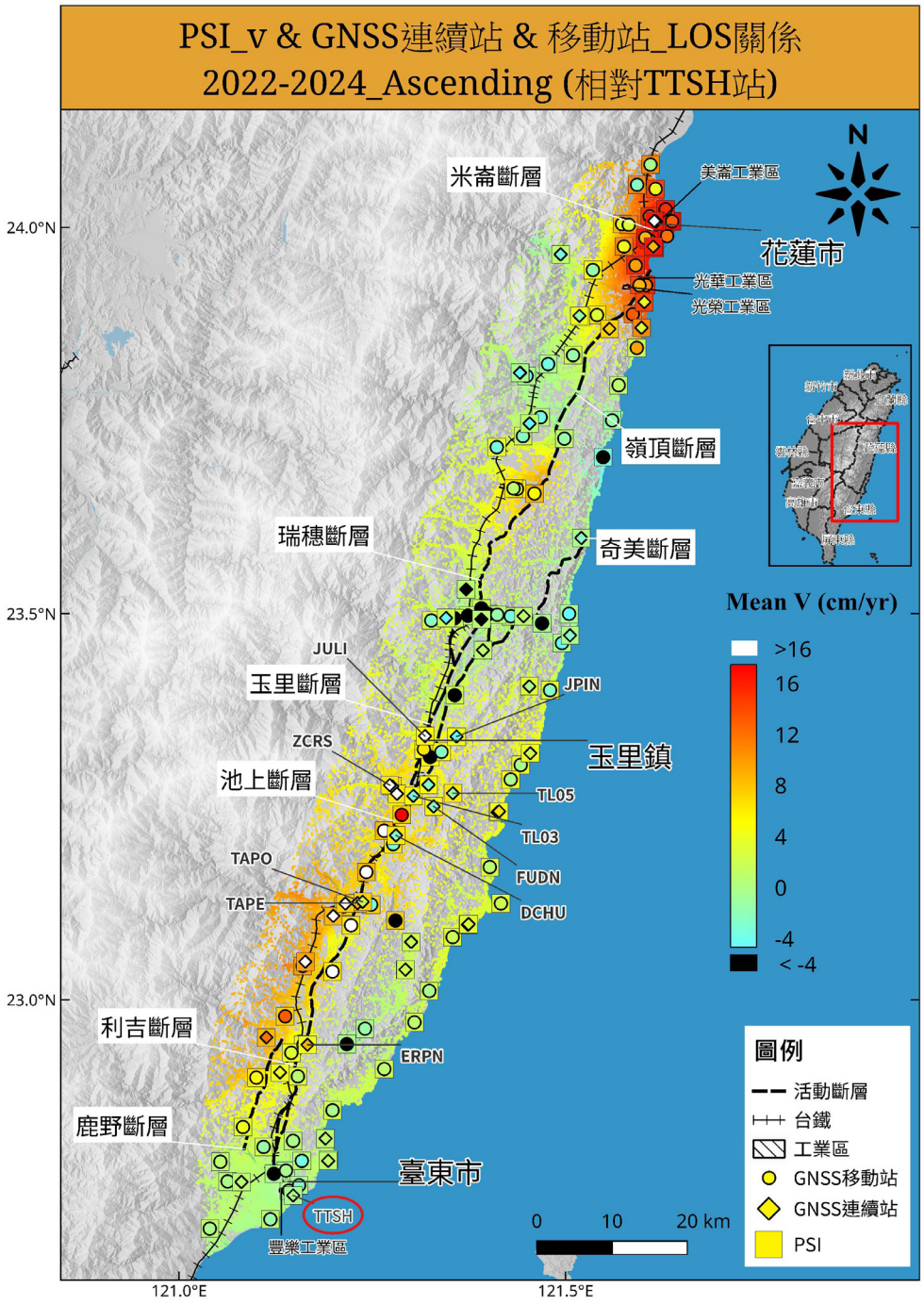


圖 4-19：2022.09.19 - 2024 的 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-19：Mean velocity field in ascending track between 2022.09.19 and 2024. 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. The reference point is the continuous GNSS station TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

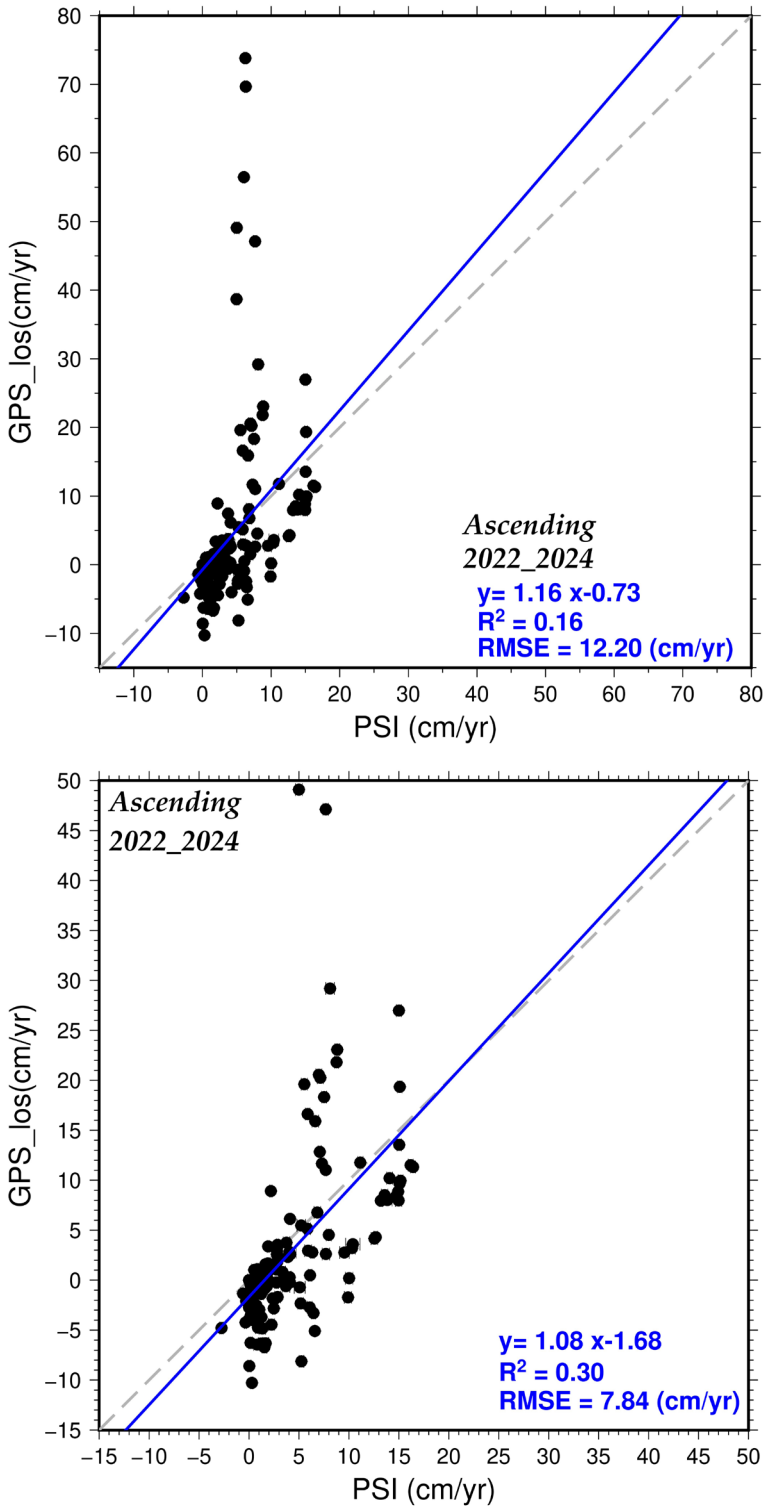


圖 4-20：2022.09.19 - 2024 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。上圖為全部測站結果，下圖為去除花蓮市及玉里地區測站後的結果。

Figure 4-20：Comparison between the 2022.09.19 - 2024 ascending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The reference station is the continuousGNSSsite TTSH. The top figure presents velocity results from allGNSSstations, while the bottom figure excludes stations located in Hualien City and the Yuli region.

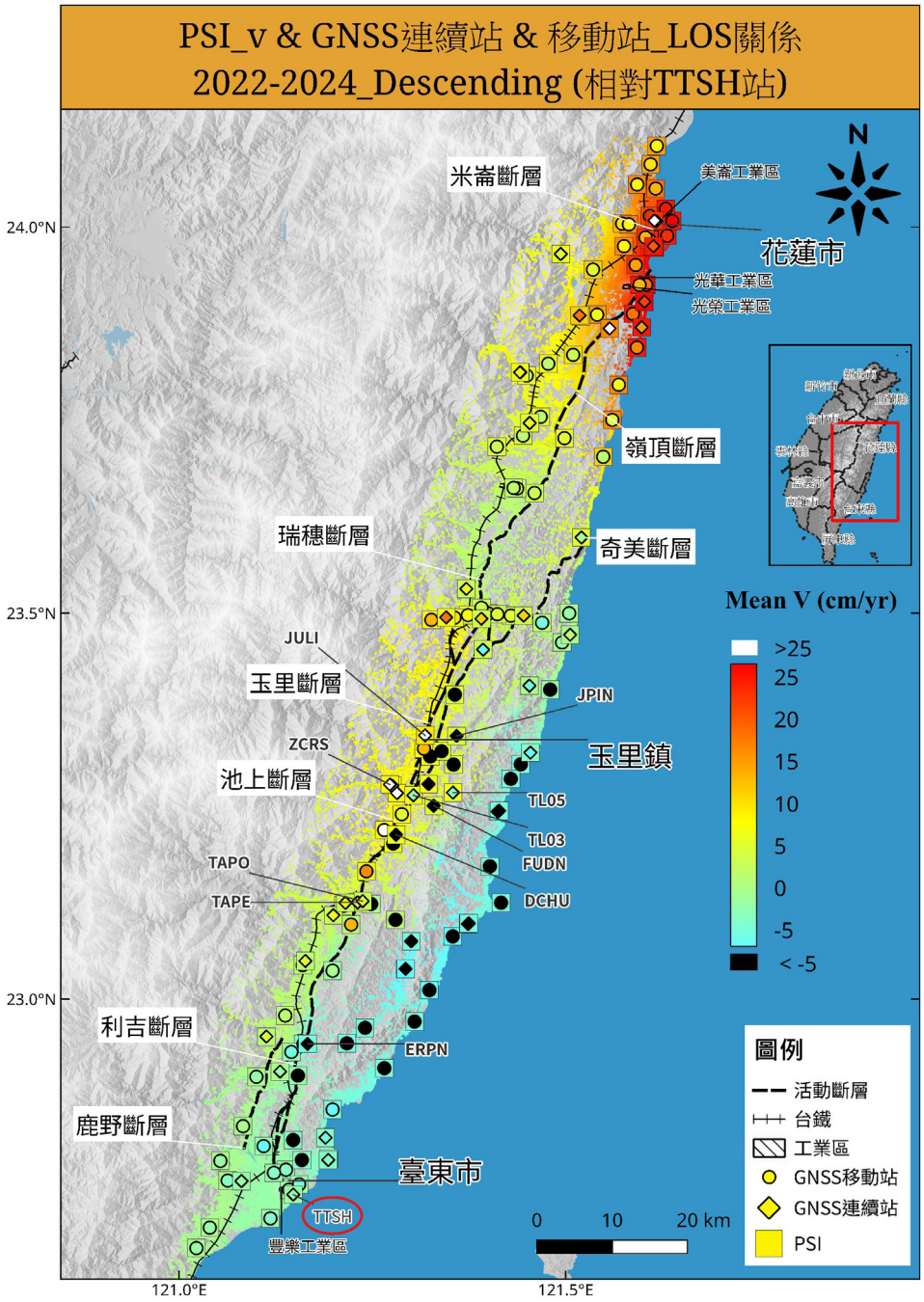


圖 4-21：2022.09.19 - 2024 的 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-21：Mean velocity field in descending track between 2022.09.19 and 2024. 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. The reference point is the continuous GNSS station TTSH. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

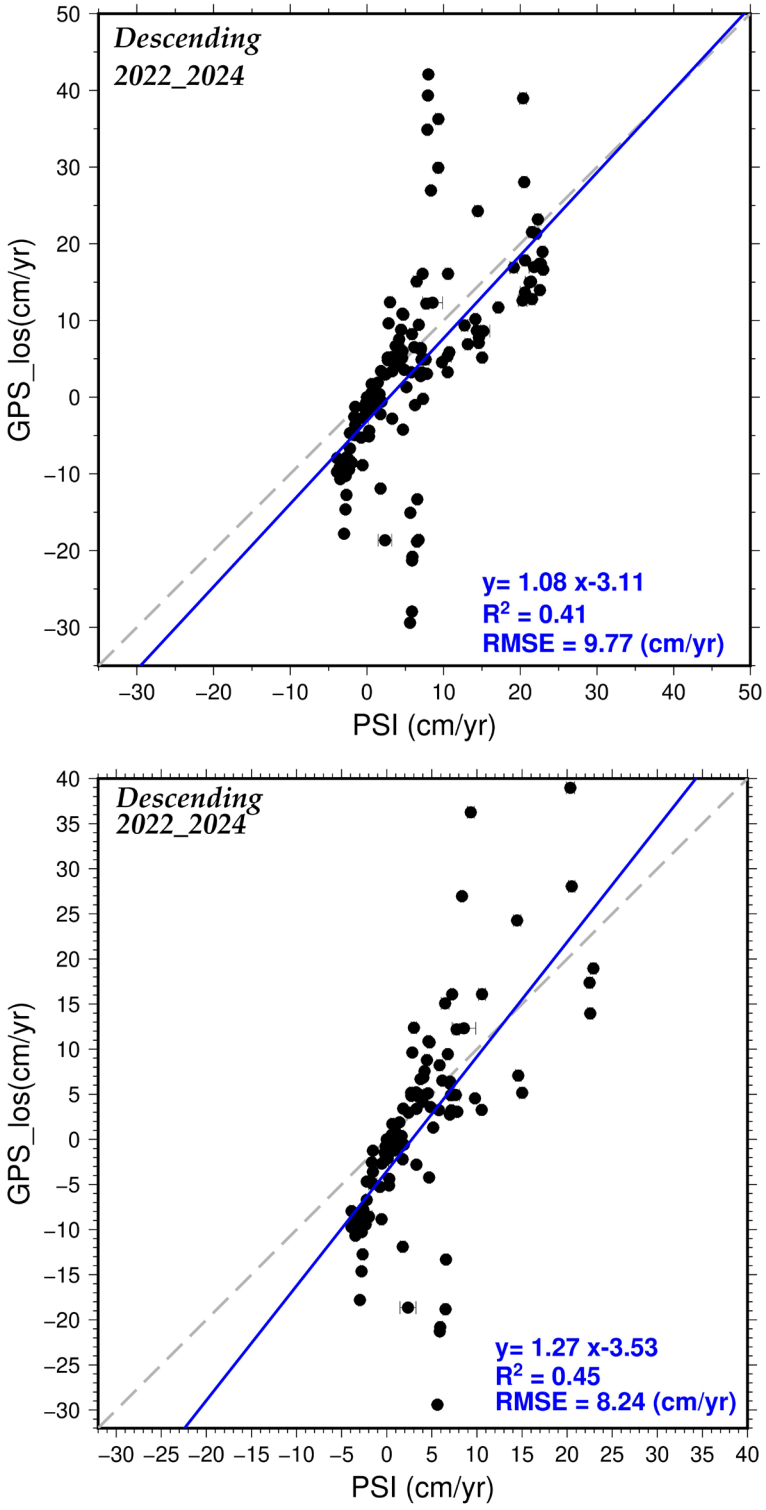


圖 4-22：2022.09.19 - 2024 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。參考點為連續 GNSS 測站 TTSH。上圖為全部測站結果，下圖為去除花蓮市及玉里地區測站後的結果。

Figure 4-22：Comparison between the 2022.09.19 - 2024 descending-orbit mean PSI velocity field and continuous GNSS station velocities. The reference station is the continuousGNSSsite TTSH. The top figure presents velocity results from allGNSSstations, while the bottom figure excludes stations located in Hualien City and the Yuli region.

4-2 跨斷層的速度場剖面分析

為深入探討米崙斷層、嶺頂斷層、奇美斷層、瑞穗斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層等主要構造帶的地表變形特性，本計畫以 PSI 推算的 LOS 速度場及 PSI 解析的垂直向速度場為基礎，擷取跨斷層的剖面進行分析（圖 4-23）。由北往南共配置了 11 條剖面（P1~P11 剖面），其中，有 6 條剖面（P2、P4、P6、P8、P9 與 P10）沿用陳文山等（2008）所提出的地質剖面位置，以確保剖面穿越構造帶的位置具地質代表性；其餘 5 條剖面（P1、P3、P5、P7 及 P11 剖面）則依據本研究關注的構造區域補強，以涵蓋前述剖面未能完整穿越的斷層地帶。在剖面資料的建立上，每條剖面選取兩側 1 公里內的 PS 點位，並將其投影至剖面走向上，並沿著剖面進行一維空間的濾波，可獲得連續的剖面 LOS 速度變化曲線。所有剖面的距離軸均以西側端點作為距離 0 公里，向東側累積，以便比較剖面由西向東的變形梯度與跨斷層的速度差異。在剖面分析的比較資料中，本研究選用品質最佳的 2022 年 9 月 19 日至 2024 年期間的 PSI 東西向與垂直向速度場作為主要依據，然而東部地區斷層活動型態複雜，除西向逆衝外，普遍伴隨顯著走向滑移，地表水平變形同時包含東西向與南北向分量。在此情況下，僅依賴單一升、降軌 LOS 觀測，難以穩定拆解出可靠的東西向或南北向速度場，於解算過程中易引入較大不確定性與誤差。相較之下，LOS 觀測對垂直向位移的敏感度較高，且垂直向解算結果之可信度相對較佳，因此本研究以垂直向速度作為主要呈現成果，並同時搭配升軌與降軌成果，以提供三種觀測角度的交叉驗證。

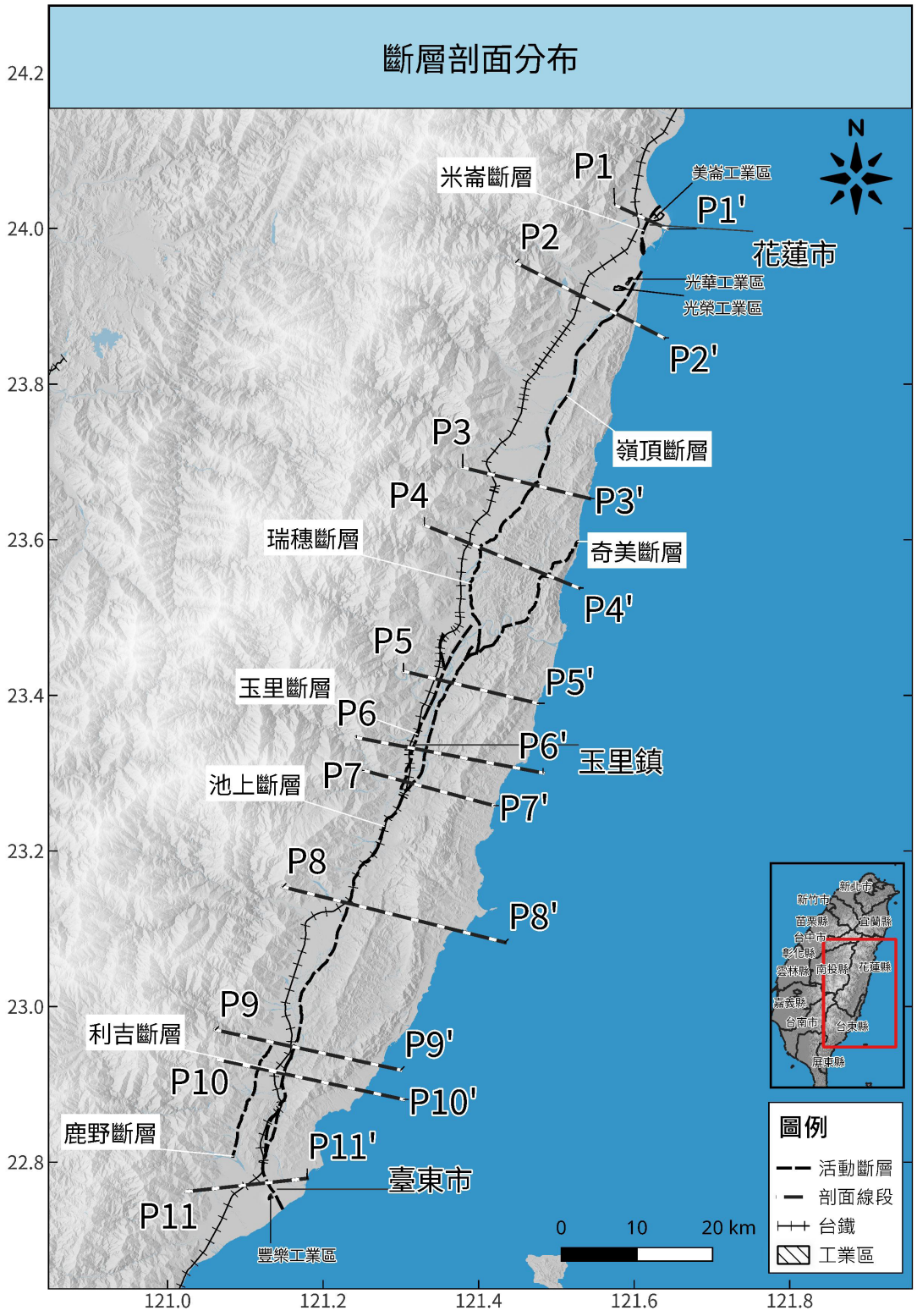


圖 4-23：斷層剖面分布圖。

Figure 4-23: Map of Fault Section Locations.

4-2-1 P1 剖面

圖 4-24 分別為 2022~2024 年升、降軌道 PSI 速度場結果，P1 剖面通過花蓮市區與米崙斷層 (MLN)，相對於起點 P1，升降軌道的速度變化相似，升軌道方向的 LOS 速度分佈為 0~8 cm/yr，降軌道為 0~12 cm/yr，斷層兩側 LOS 速度無明顯速度落差。整體而言，剖面東側的 LOS 速度普遍高於西側，呈現向衛星靠近的趨勢，但變化呈現連續漸變，並非明顯的跨斷層位移差，顯示米崙斷層在此期間並未表現出可辨識的漸進性活動。圖 4-25 顯示三個時段的 LOS 速度剖面，於 2022~2022.09.17 的地震前期，剖面東西兩側的 LOS 速度差異並不顯著；然而，在 2022~2024 年全時段與 2022.09.19~2024 剖面中，東側速度相對提升，與西側形成約有 10~13 cm/yr 的速度差異。垂直向速度場亦呈現類似的空間趨勢，剖面東側與西側約有 17 cm/yr 的變化量，顯示此區域在震後期間具有明顯的垂直抬升成分。2024 年 04 月 03 日花蓮地震後的地表觀測亦支持 PSI 的結果；花蓮港區沿岸可見藤壺與牡蠣被抬升至滿潮水位以上，潮位站紀錄顯示港區相對抬升量接近 49 公分（地礦中心，2024）。由此可知，P1 剖面所呈現的東側高速度並非斷層活動的表現，而主要反映 2024 花蓮地震所造成的區域性抬升。

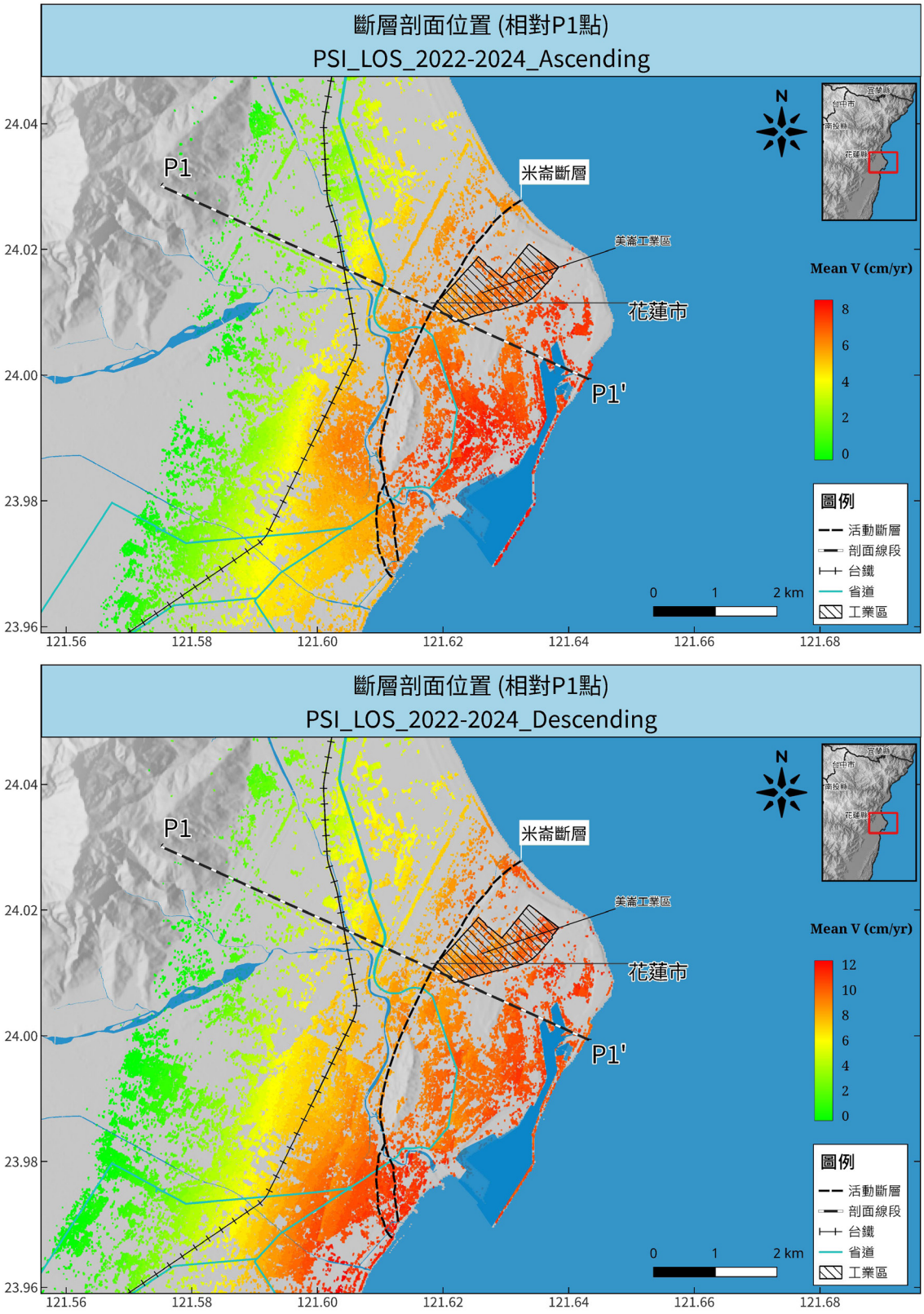


圖 4-24：P1 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P1 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-24: Average LOS velocity field and profile location for section P1 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P1 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

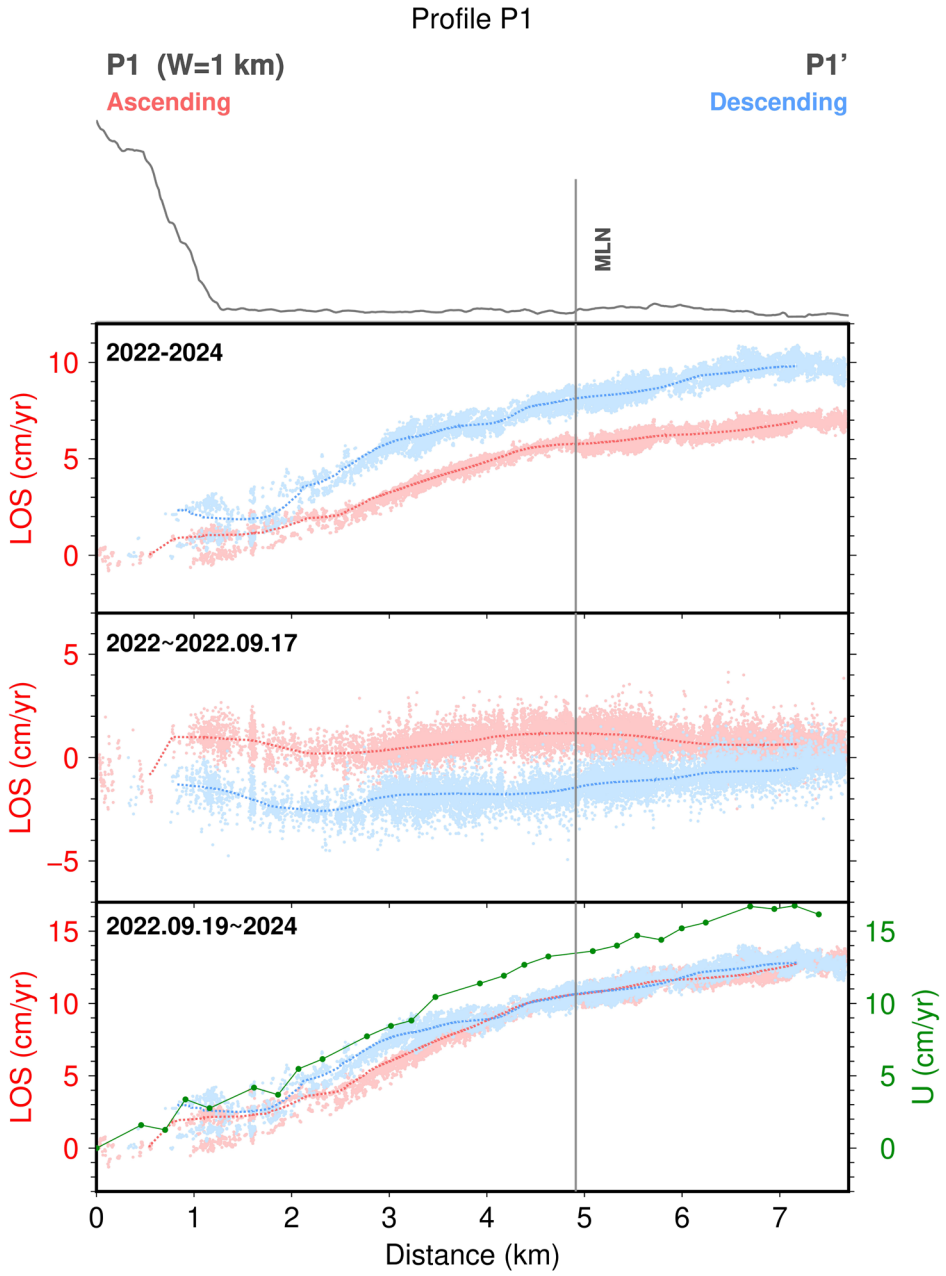


圖 4-25：P1 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：米崙斷層（MLN）。

Figure 4-25: Results for profile P1. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Milun Fault (MLN).

4-2-2 P2 剖面

圖 4-26 分別為 2022~2024 年升降軌道 PSI 速度場及剖面位置圖，P2 剖面通過嶺頂斷層（LDG），相對於起點 P2，升降軌道的速度變化相似，LOS 速度大致介於 0~16 cm/yr 之間，斷層未出現明顯的速度落差，而是呈現由西向東連續漸變的分布。整體而言，剖面東側的 LOS 速度普遍高於西側，呈現靠近衛星的移動，但變化為漸進型，並非清晰的跨斷層速度差。圖 4-27 為三個時段的 LOS 速度剖面，三個時間分段都顯示在通過斷層後有速度變化，降軌道方向約有 2~4 cm/yr 的變化量，升軌道方向約有 2 cm/yr 的變化量，垂直向僅有 1 cm/yr 的變化量。若聚焦於 2022.09.19~2024 的速度剖面，顯示在 7.5 及 13 公里處均出現明顯速度轉折點，且 LOS 速度的增加具有較大的斜率，反映此區段速度場的空間梯度較強。圖 4-28 將 PSI 剖面與陳文山等（2008）提供的地質剖面與 GNSS 水平速度進行比較。前人 GNSS 測站速度投影至 P2–P2’ 剖面後（圖 4-28C），在方位角 30°（平行斷層走向）的水平速度變化顯示綠色曲線的轉折位置，與 PSI 剖面速度變化的位置相當接近。該區段在地質剖面中對應於晚更新世沉積層，顯示岩性差異亦可能是速度變化加劇的重要原因之一。值得注意的是，地質剖面中的嶺頂斷層位置與地礦中心現行公告的嶺頂斷層位置約有 1.5 公里差距。然而，地質剖面所指的嶺頂斷層位置（紅色虛線），PSI 仍可觀察到約 3 cm/yr 的 LOS 速度變化，顯示該處確實存在構造或岩性邊界，未來值得進一步探討其是否為嶺頂斷層的實際位置或一個與斷層相關的材料邊界。另外，圖 4-28B 以及 4-28C 的速度變化差異顯著，主因在於圖 4-28B 包含 2024 年 0403 花蓮地震的同震抬升訊號。由於該地震並未產生地表破裂，變形以廣域性抬升為主，使得中央山脈至海岸山脈之間呈現連續上升，跨越嶺頂斷層也未出現變形中斷或折變。在 2022~20220917 時間段的升、降軌速度場顯示：降軌方向往東進入海岸山脈時與衛星距離拉長，而升軌方向則是距離縮短，顯示在該期間海岸山脈可能呈現相對下陷的趨勢。此結果與饒瑞鈞等 (2010) 於地調所執行的活動斷層計畫之 GNSS 結果相符，皆指出海岸山脈具有相對沉陷的長期變形特性。整體而言，P2 剖面除了反映嶺頂斷層作為材料邊界的性質外，也揭示該區域的變形行為牽涉多重構造作用，且不同期段可能受

不同地震事件主導。0403 地震所造成的大尺度抬升顯示該區並非單純的斷層活動，而是多種構造與岩層差異共同作用下的結果。

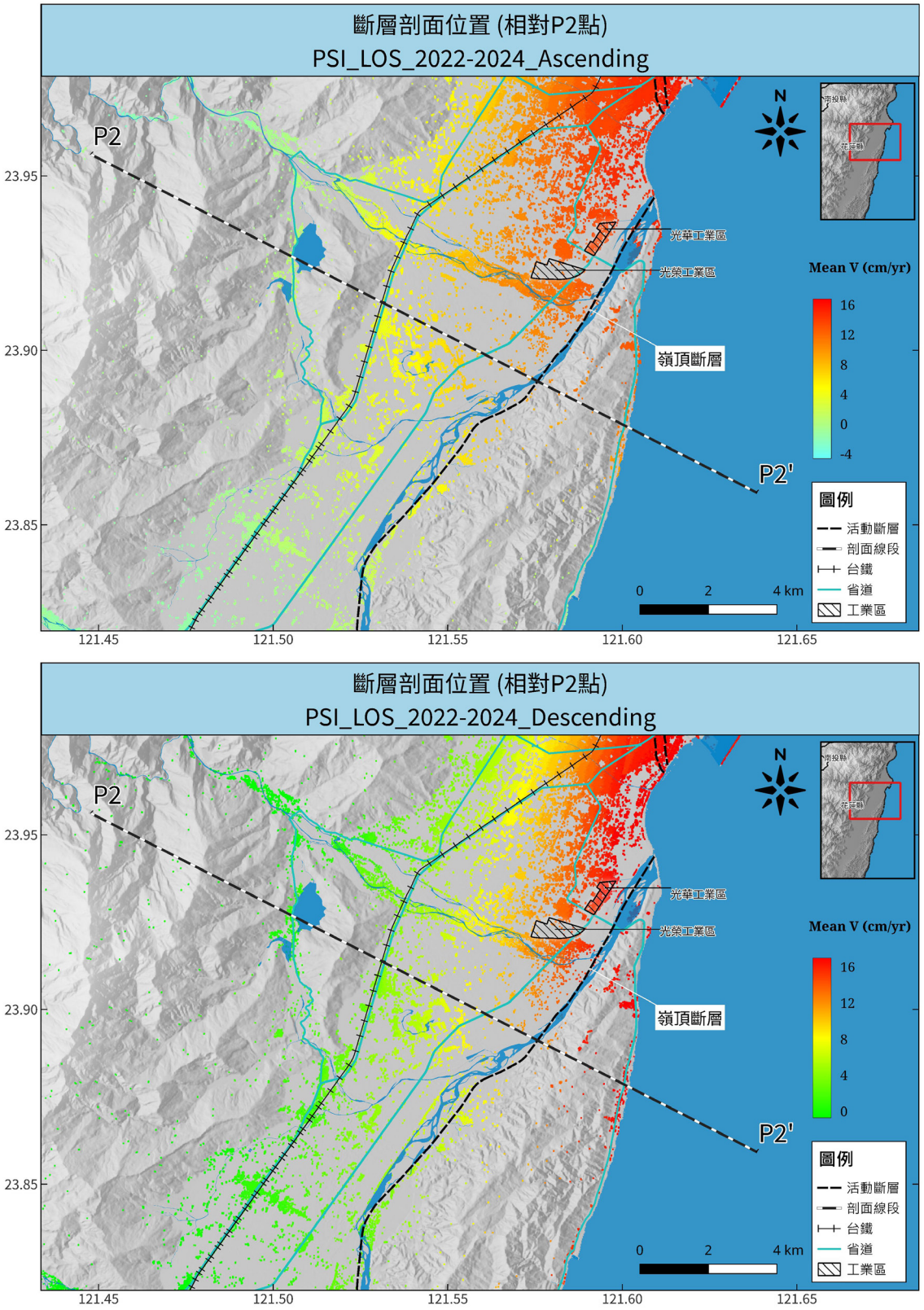


圖 4-26：P2 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P2 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-26: Average LOS velocity field and profile location for section P2 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P2 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

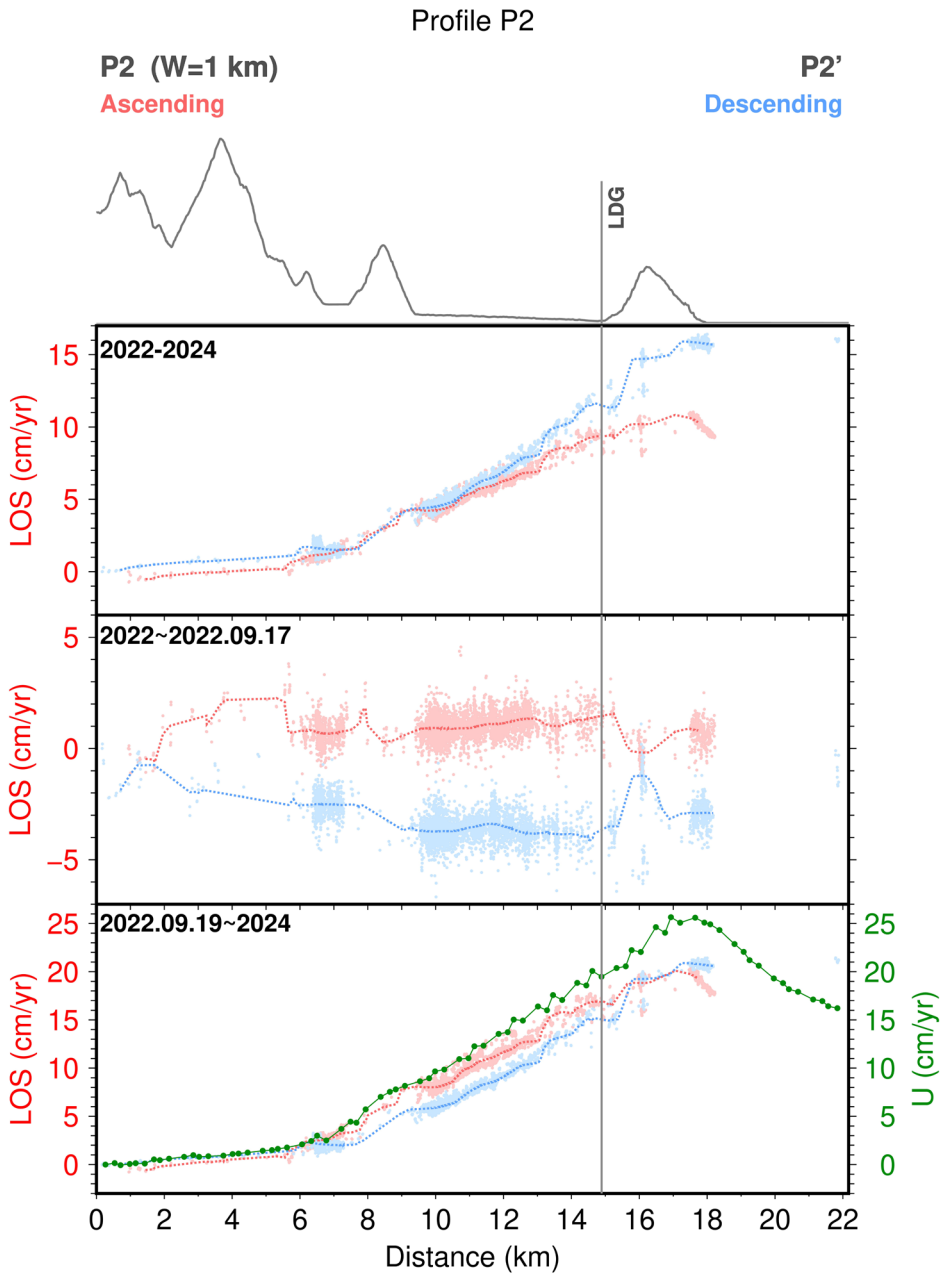


圖 4-27：P2 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：嶺頂斷層（LDG）。

Figure 4-27: Results for profile P2. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Linding Fault (LDG).

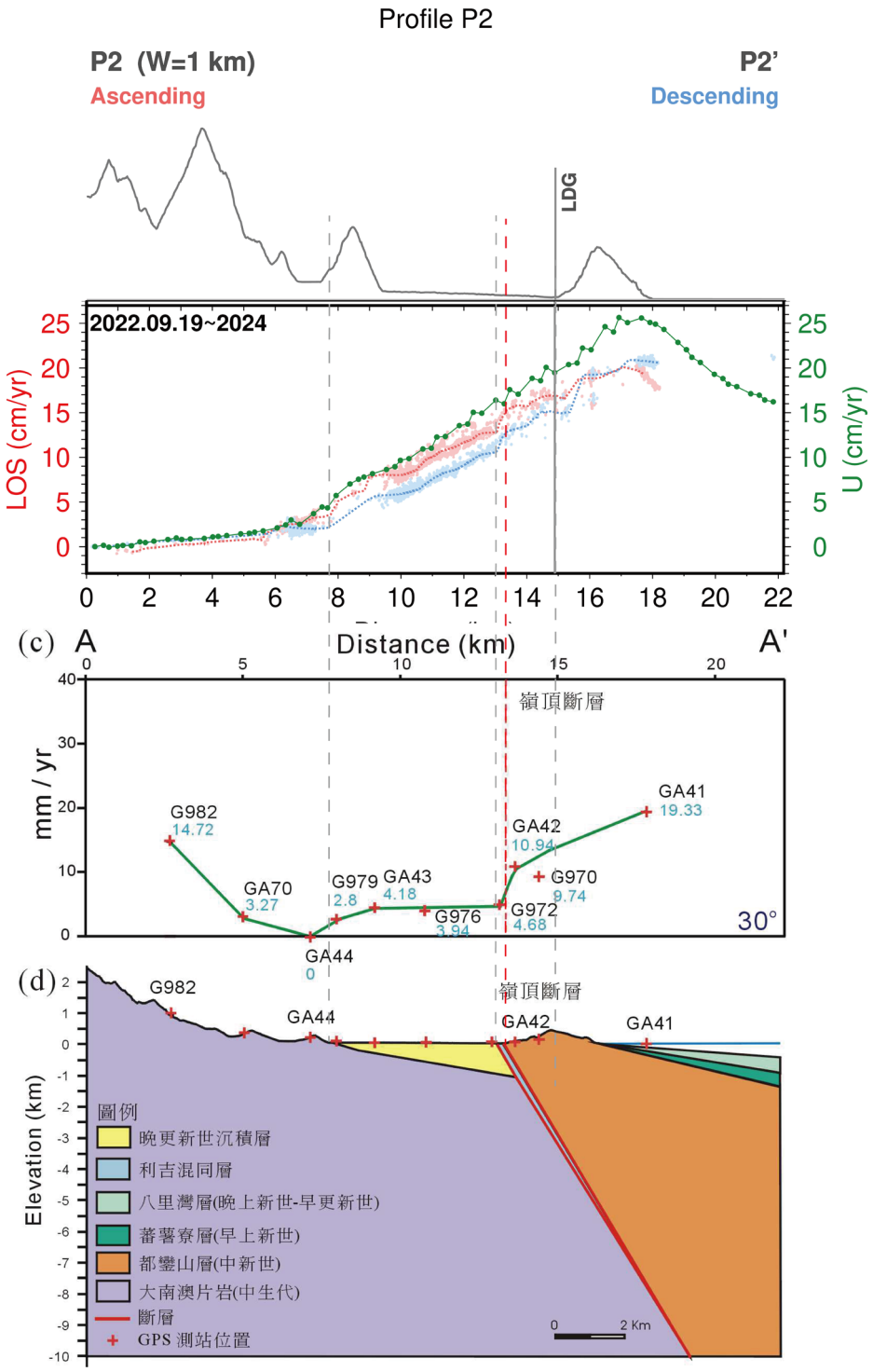


圖 4-28：P2 剖面成果與前人文獻比較圖 (陳文山等，2008)。上圖為 2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。中圖 (c) 為陳文山等 (2008) 中的 GNSS 量測資料投射至 P2 剖面的水平速度場變化，綠色曲線為量測剖面在方位角 30°（平行斷層走向）的水平速度場變化。下圖 (d) 為陳文山等 (2008) 中的地質剖面。

Figure 4-28: Comparison of profile P2 results with previous studies (Chen et al., 2008). The top panel shows PSI results from September 19, 2022 to 2024. Panel (c) presents horizontal velocity variations projected onto profile P2 fromGNSSmeasurements in Chen et al. (2008), with the green curve indicating velocity variations along an azimuth of 30° , parallel to the fault strike. Panel (d) displays the geological cross-section from Chen et al. (2008).

4-2-3 P3 剖面

圖 4-29 分別為 2022~2022.09.17 的升、降軌道 PSI 速度場及剖面位置圖，P3 剖面自馬太鞍起沿馬太鞍溪向東跨越嶺頂斷層（LDG），期望藉由堤防與河床的反射特性獲得較高密度的 PSI 資料。相對於起點 P3，升降軌皆可見一處較高的 LOS 速度區，但在剖面西側，升軌道的 LOS 速度普遍大於降軌方向。通過嶺頂斷層後雖因植被使 PSI 點位減少，仍可辨識升軌道方向存在明顯速度變化，斷層西側約為 22 cm/yr，東側約為 10 cm/yr；降軌道在此時段則未呈現相同幅度的變化。圖 4-30 顯示 2022.09.18-2024 的升降軌道 PSI 速度場剖面圖，相對於起點 P3，升降軌道的速度變化呈現相反的趨勢，但在跨越斷層後不再表現出明顯的速度落差。圖 4-31 為三個時段的 LOS 速度剖面，可以觀察到剖面西側至嶺頂斷層位置的 PSI 點較密集，而通過斷層後，因進入海岸山脈，PSI 點顯著稀疏。於 2022~2022.09.17 的升軌道資料中，嶺頂斷層兩側約存在 12 cm/yr 的顯著差異，這一變化與 2022 年 6 月 20 日光復地震的破裂行為高度相關。地震震央距離 P3 剖面不足 2 公里，曾在光復至海岸山脈一帶產生最大約 20 公分的同震變形（Lu et al., 2024），反映在此時段的 LOS 速度場中，使斷層附近表現出明顯異常，此速度變化亦反映在 2022 年至 2024 年的 LOS 速度變化。由於 2022 年 02 月 09 日至 2022 年 07 月 25 日間並無降軌道方向的影像，因此無法觀測到地震期間斷層兩側的變化量。進入 2022.09.19 至 2024 年時期，斷層兩側無明顯變化量，但嶺頂斷層西側顯示升軌與降軌方向的 LOS 速度相反，而垂直向速度並未呈現對應的變化，顯示此處的 LOS 差異主要源於水平方向的地表運動。

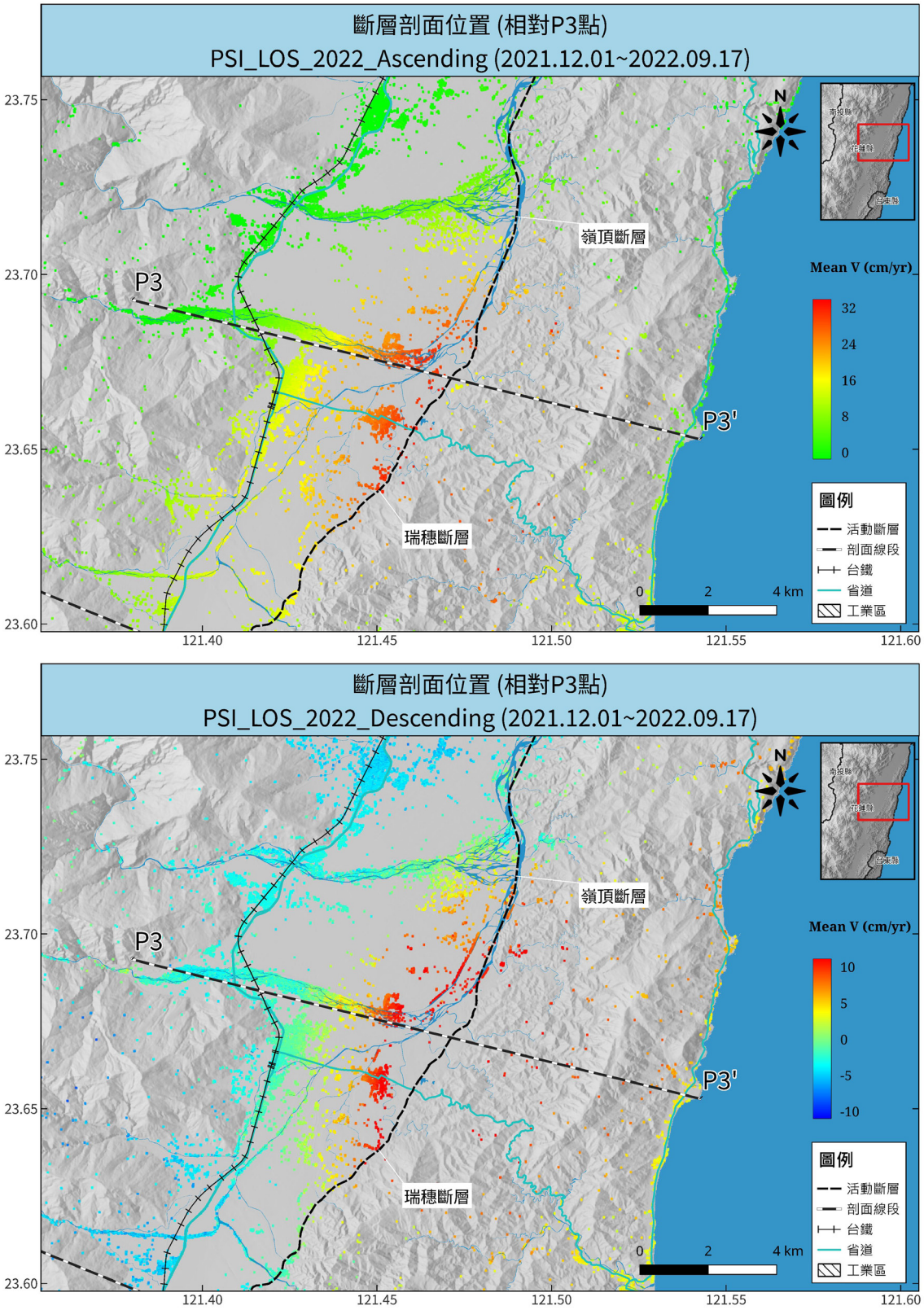


圖 4-29：P3 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P3 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-29: Average LOS velocity field and profile location for section P3 (2022). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P3 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

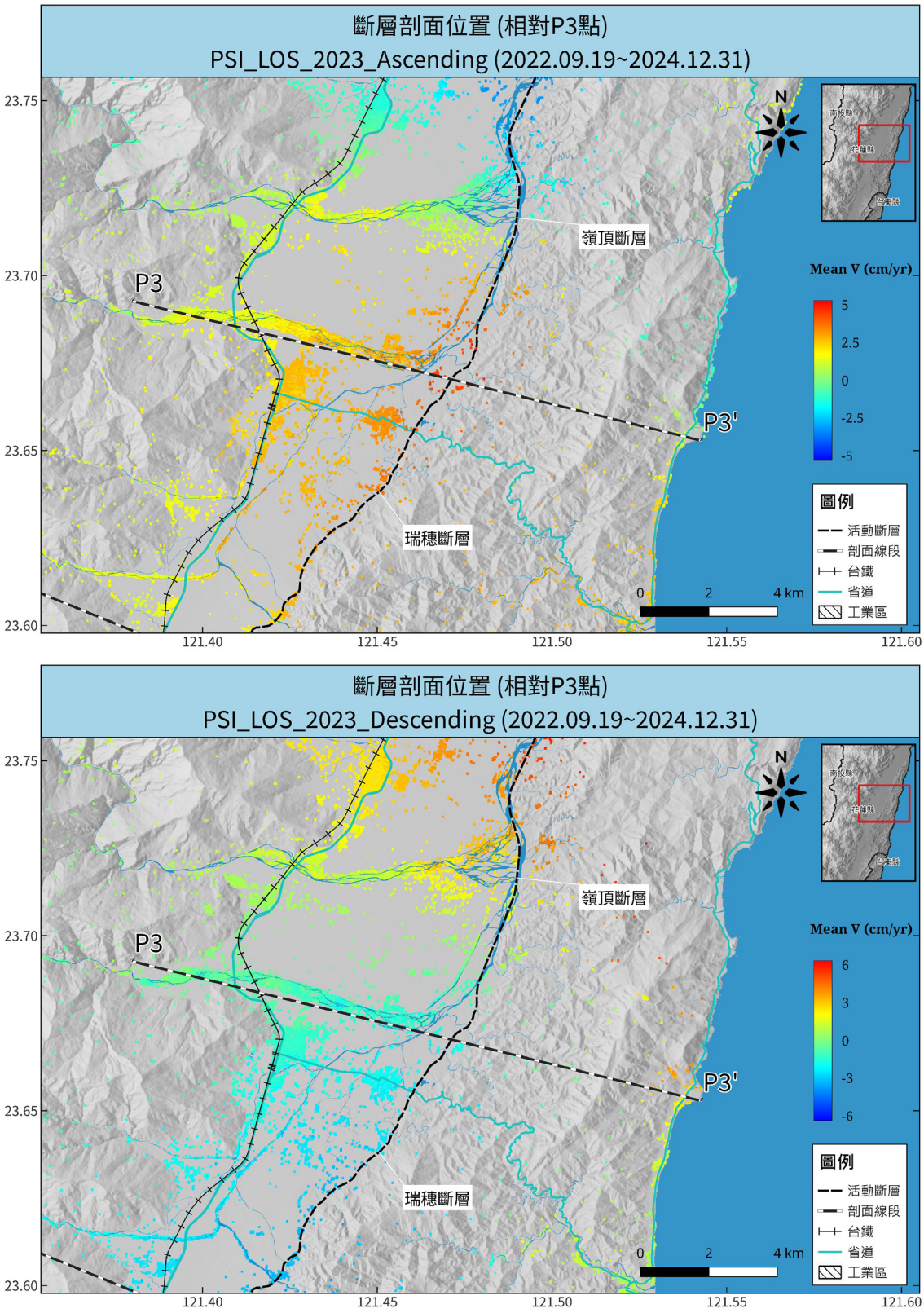


圖 4-30：P3 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P3 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-30: Average LOS velocity field and profile location for section P3 (2023). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P3 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

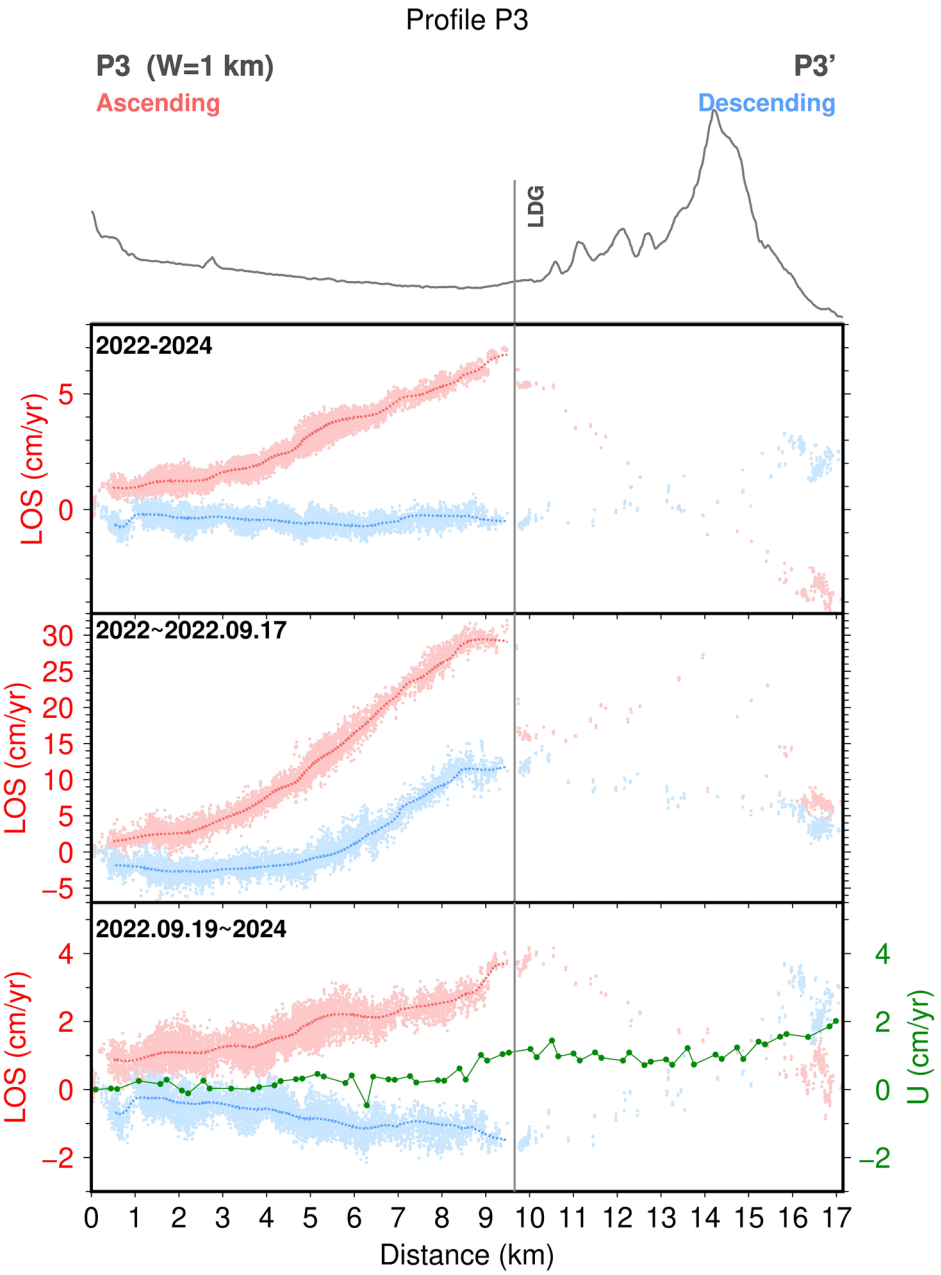


圖 4-31：P3 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：嶺頂斷層（LDG）。

Figure 4-31: Results for profile P3. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Linding Fault (LDG).

4-2-4 P4 剖面

圖 4-32 分別為 2022~2024 的升降軌道 PSI 速度場及剖面位置圖，P4 剖面通過瑞穗斷層（RSI）與奇美斷層（CMI），相對於起點 P4，剖面在靠近斷層的位置皆未呈現明顯的色階變化，顯示跨斷層的 LOS 速度場於全時段並無大幅度的差異。圖 4-33 為三個時段的 LOS 速度剖面，在 2022~2022.09.17 的升軌資料中，瑞穗斷層兩側約有 2~3 cm/yr 的 LOS 速度落差，應為 2022 年 6 月 20 日光復地震的同震與震後效應一致。在降軌道方向無此現象，主要是因為 2022 年 02 月 09 日至 2022 年 07 月 25 日間無影像所致。通過奇美斷層處，PSI 點為因植被數與地形遮蔽而明顯減少，使剖面難以呈現連續的速度變化。圖 4-34 將 P4 剖面與地質剖面及前人的 GNSS 水平速度（陳文山等，2008）進行比較，其中將 GNSS 水平數度投射至 P4 - P4’ 剖面後可見瑞穗斷層與奇美斷層在水平方向上皆未顯示顯著的速度梯度，與 PSI 的整體趨勢相符。然而，在圖 4-34B 中，升軌道方向的速度場及解算得垂直的速度中，顯示在瑞穗斷層東側一公里（約剖面 9 公里處）有明顯的抬升，另外，在大約 15 公里處亦出現一處較大的變形，兩者皆與斷層位置並不完全對應。這些變形累積的空間分布與 2022 年光復地震於此區的最大變形位置一致（Lu et al., 2024），推測仍主要受同震或震後恢復過程的影響，而非反映斷層本身的長期滑移速率。

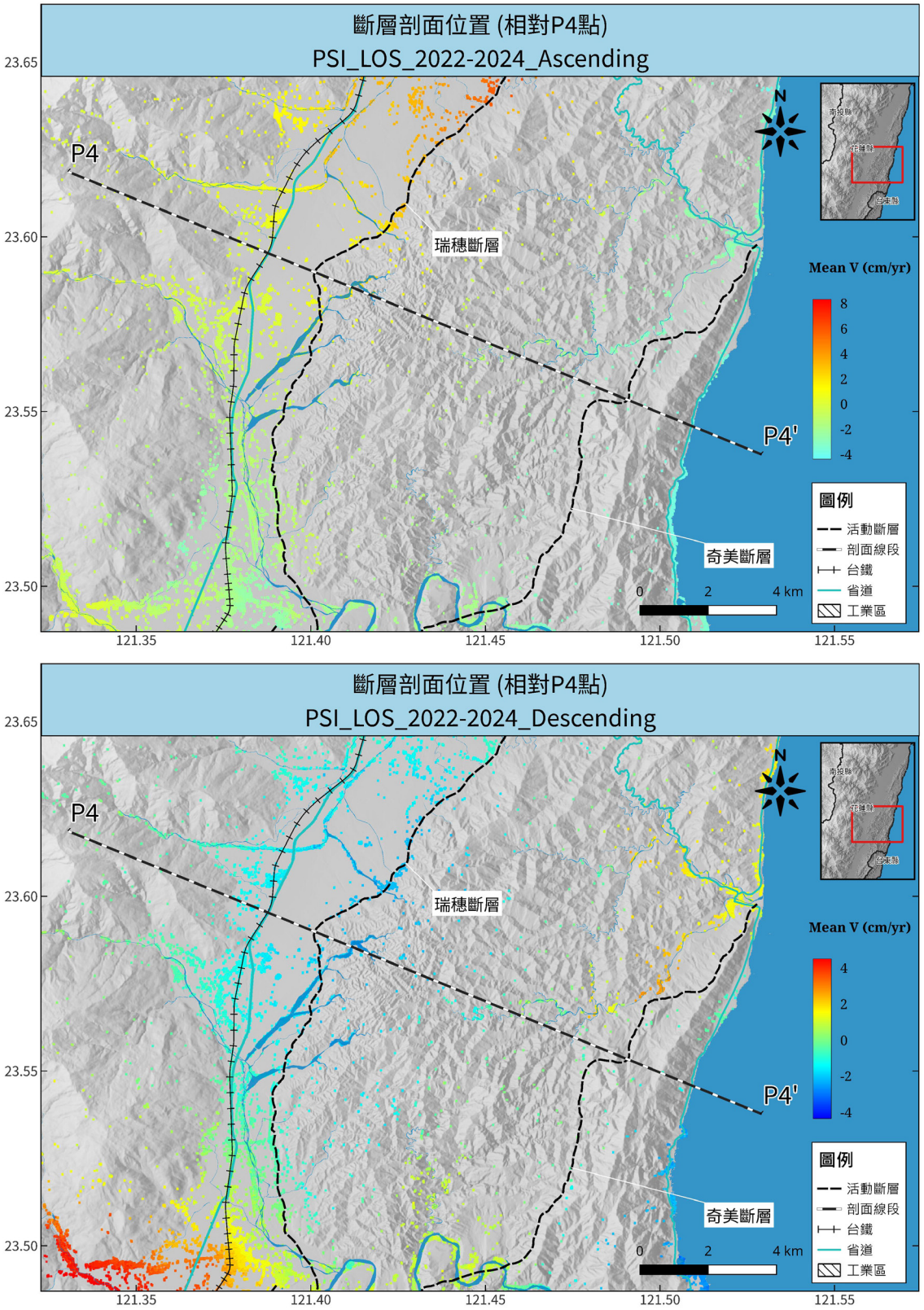


圖 4-32：P4 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P4 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-32: Average LOS velocity field and profile location for section P4 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P4 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

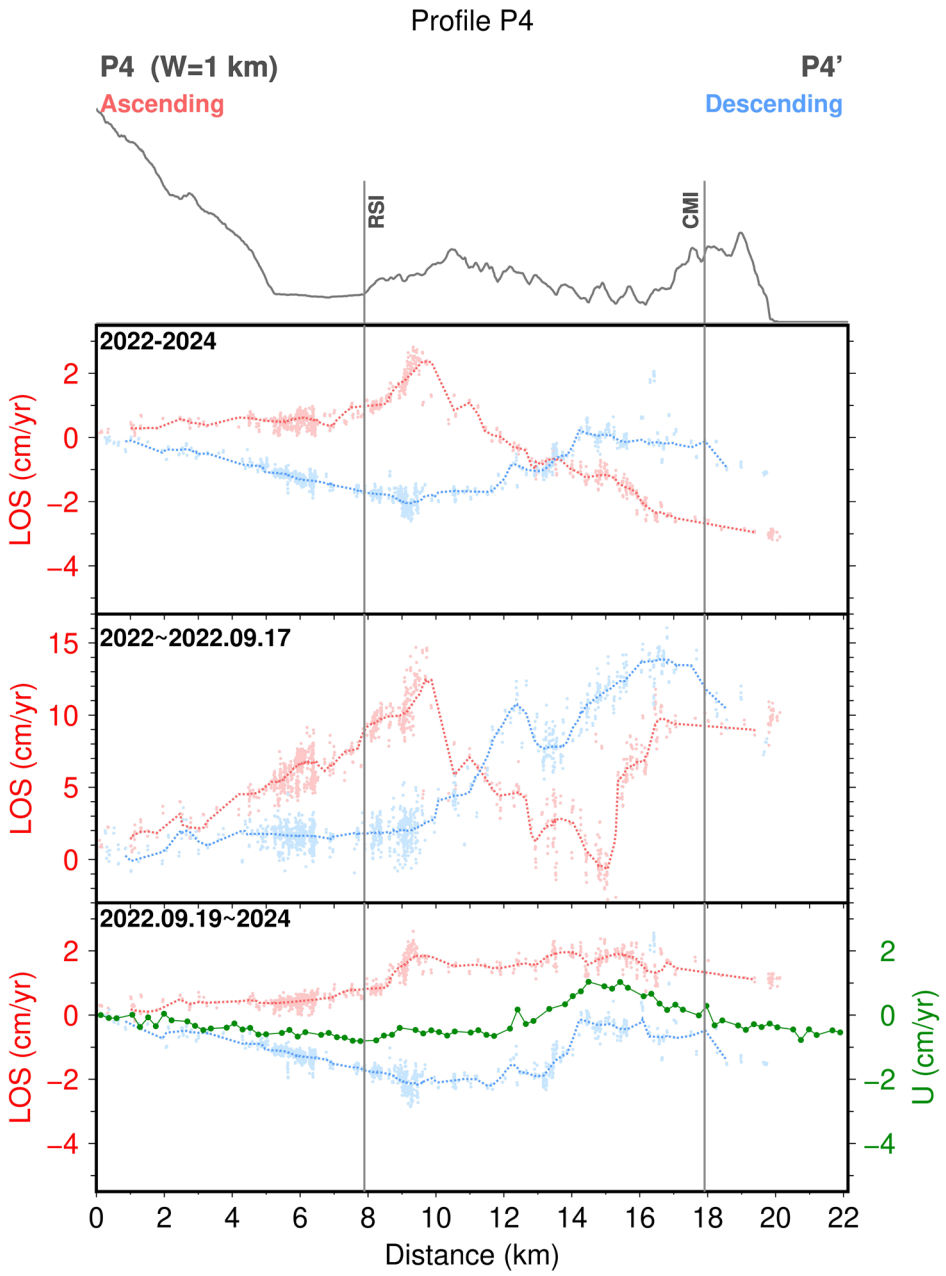


圖 4-33：P4 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：瑞穗斷層（RSI）、奇美斷層（CMI）。

Figure 4-33: Results for profile P4. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Rueyshui Fault (RSI), and Chimei Fault (CMI).

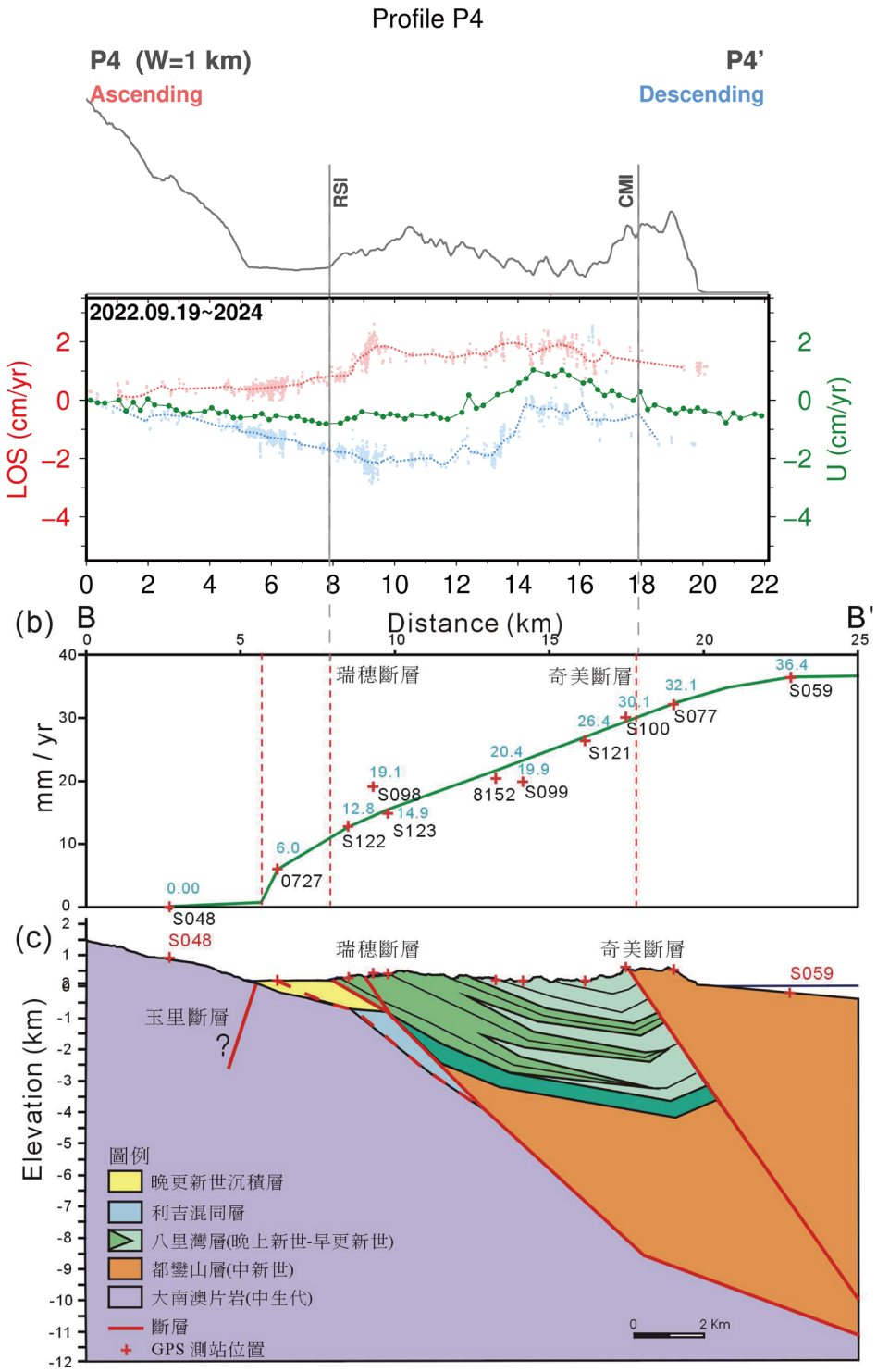


圖 4-34：P4 剖面成果與前人文獻比較圖 (陳文山等，2008)。上圖為 2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。中圖 (b) 為陳文山等 (2008) 中的 GNSS 量測資料投射至 P4 剖面的水平速度場變化，綠色曲線為量測剖面在方位角 30°（平行斷層走向）的水平速度場變化。下圖 (c) 為陳文山等 (2008) 中的地質剖面。

Figure 4-34: Comparison of profile P4 results with previous studies (Chen et al., 2008). The top panel shows PSI results from September 19, 2022 to 2024. Panel (b) presents horizontal velocity variations projected onto profile P4 fromGNSSmeasurements in Chen et al. (2008), with the green curve indicating velocity variations along an azimuth of 30° , parallel to the fault strike. Panel (c) displays the geological cross-section from Chen et al. (2008)..

4-2-5 P5 剖面

圖 4-35 分別為 2022~2024 的升降軌道 PSI 速度場及剖面位置圖，P5 剖面通過玉里斷層（YLI）及池上斷層（CSG），相對於起點 P5，速度場在兩條主要斷層附近並未呈現清楚的色階跳變，但在玉里斷層與池上斷層之間仍可見到緩慢的區域性趨勢：升軌道方向約有 2 cm/yr 的 LOS 速度變化，降軌道方向約有 -4 cm/yr 的 LOS 速度變化。圖 4-36 為三個時段的 LOS 速度剖面，灰線標示為 2021 年地礦中心公告的玉里斷層位置，紅線為 2022 年 09 月 17-18 日地震後地礦中心公告的玉里斷層位置。新版玉里斷層位置約為剖面 5 公里處。無論在 2022~2024 全時段或 2022.09.19~2024 的資料中，通過玉里斷層後往東側，因受到秀姑巒溪河道與河床環境影響，PSI 難以取得穩定且可靠的永久散射點，導致剖面東側在降軌道方向之資料明顯稀疏。然而，即便在資料點數有限的情況下，仍可於該區域辨識出顯著的 LOS 速度落差。根據 2022 年關山 - 池上地震之地表破裂調查結果，該速度變化位置可對應至松浦地區。調查顯示，松浦地區於地震期間產生約 30 公分的地表抬升（地質調查及礦業管理中心，2022；徐等人，2023），後續研究亦推測此一變形區可能與中央山脈斷層之松浦段活動有關（Yen et al., 2025）。

整體而言，P5 剖面在跨越玉里斷層與池上斷層時，並未呈現明顯的跨斷層速度跳變；然而，在跨越秀姑巒溪河床後，則出現顯著的速度梯度變化。該變形特徵可能反映中央山脈斷層松浦段之構造活動影響，但受限於水體分布與地物性質，使 PSI 在此區段難以維持足夠的資料密度。後續仍須結合 GNSS 或現地地質與地表變形觀測資料，方能進一步釐清該區跨斷層變形之真實空間分布與構造意義。

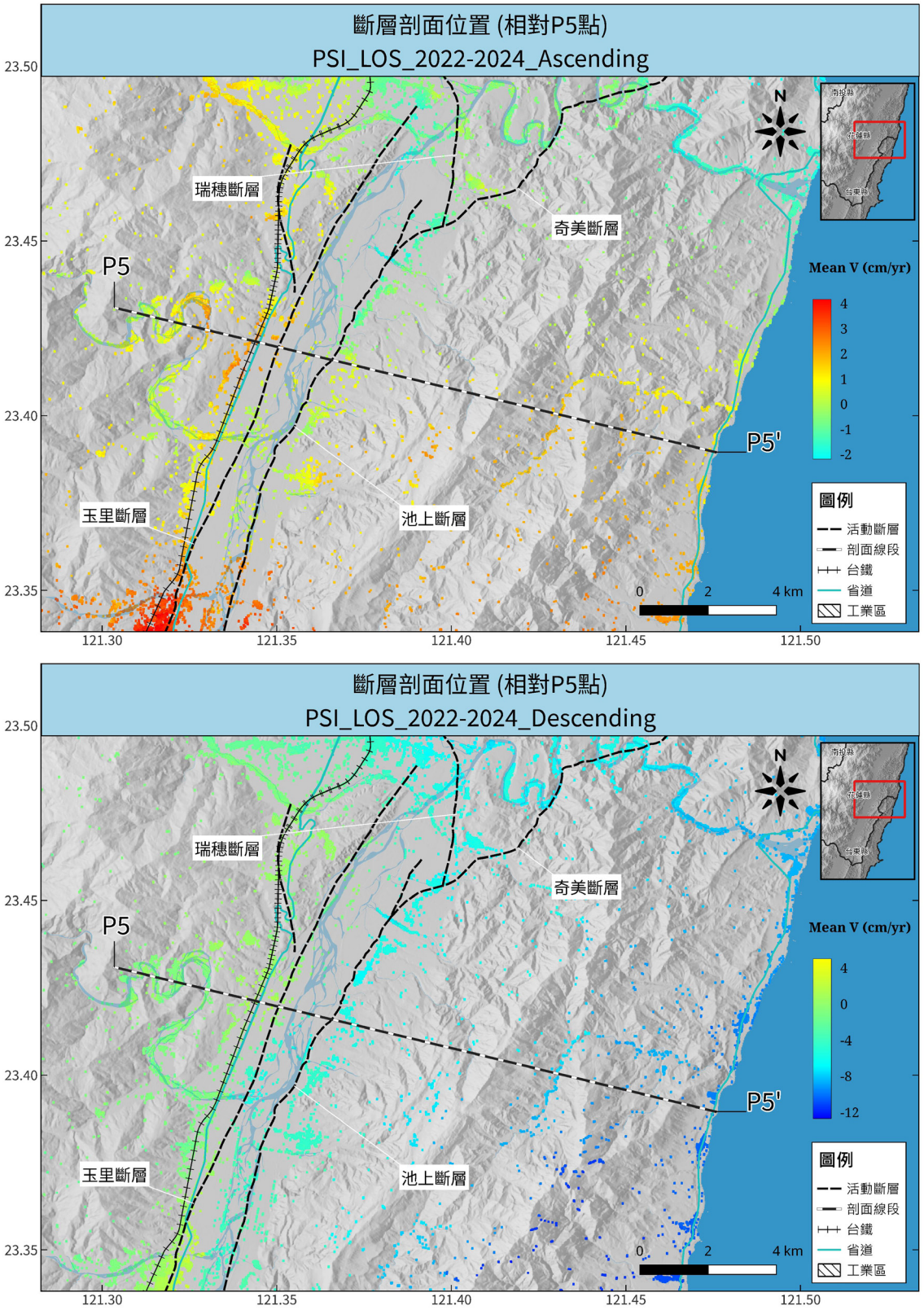


圖 4-35：P5 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P5 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-35: Average LOS velocity field and profile location for section P5 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P5 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

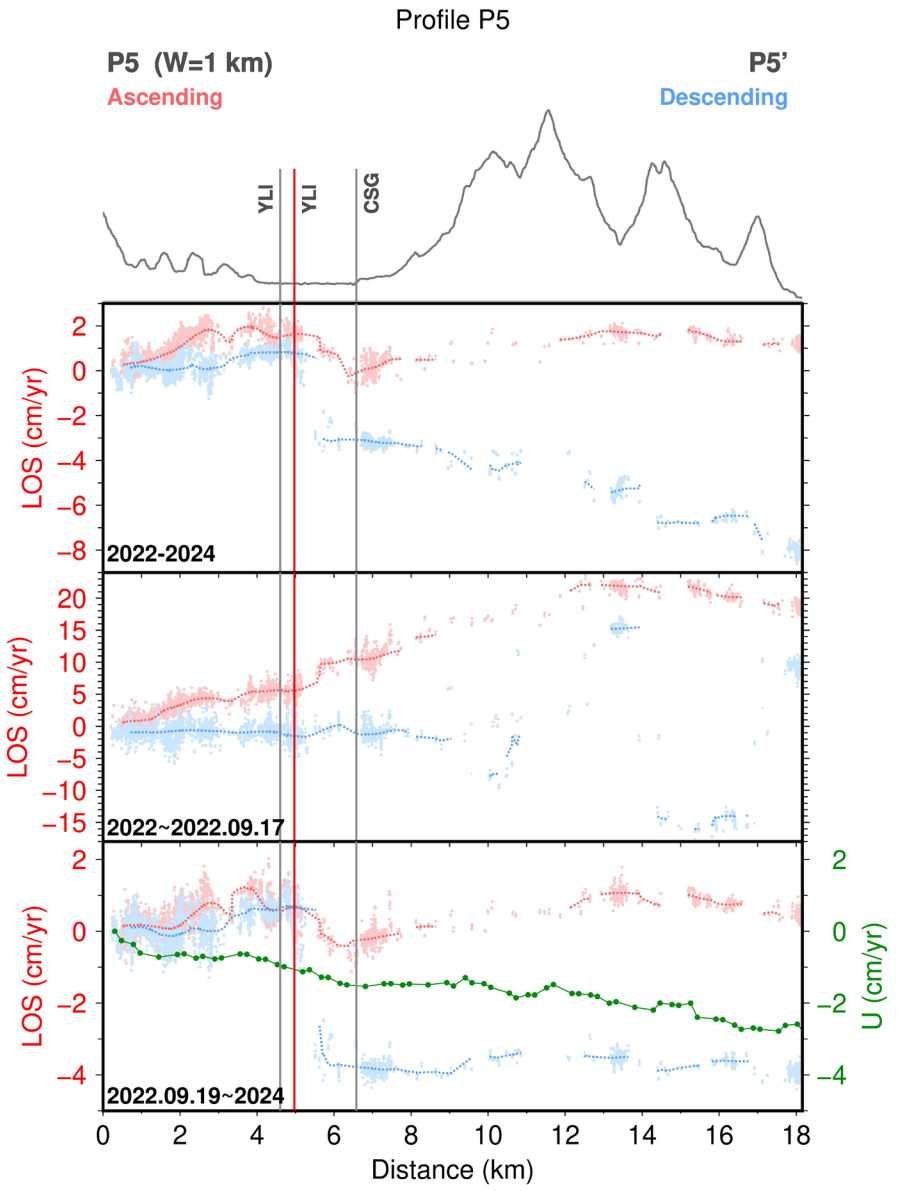


圖 4-36：P5 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：玉里斷層（YLI）、池上斷層（CSG），紅色直線為 0918 池上地震後地礦中心公告的玉里斷層（YLI）位置。

Figure 4-36: Results for profile P5. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Yuli Fault (YLI), Chihshang Fault (CSG), and the red straight line indicates the location of the Yuli fault (YLI) as announced by GSMMA following the 0918 Chihshang earthquake.

4-2-6 P6 剖面

圖 4-37 分別為 2022~2024 的升、降軌道 PSI 速度場及剖面位置圖。P6 剖面通過玉里斷層（YLI）與池上斷層（CSG），相對於起點 P6，升軌道方向在玉里斷層兩側有明顯的 LOS 速度差異，西側約為 2 cm/yr，東側約為 -1~0 cm/yr。降軌道在近斷層處與鄰近區域亦呈現約 4 cm/yr 的 LOS 速度差異。圖 4-38 為三個時段的 LOS 速度剖面，圖中灰線為地礦中心公告的斷層位置，升、降軌道資料皆顯示剖面 6 公里處 LOS 速度開始增加，跨越玉里斷層後逐漸減小，至池上斷層附近趨於平緩。升軌道方向變化量約 1~1.5 cm/yr，降軌道方向可達 3~4 cm/yr，垂直向速度場則在玉里斷層西側呈現約 3 cm/yr 的緩慢抬升，通過斷層後轉為約− 1 cm/yr 的下陷，至海岸線呈現 -3 cm/yr 的下陷速度，反映此剖面區域具有明顯的沉降趨勢。圖 4-39 結合 P6 剖面與地質剖面及前人的 GNSS 水平速度（陳文山等，2008），圖中灰線為地礦中心公告的斷層位置，紅色虛線為陳文山地質剖面中指示的位置，顯示玉里斷層與池上斷層位置大在不同資料來源中位置略有差異。速度變化梯度大的區域與晚更新代沈積層位置接近，此部分值得後續深入討論。P6 剖面最具特徵性的現象出現在 2022 年 0918 池上地震前後速度場的差異。在圖 4-38 中，顯示 2022 年 09 月 17~18 日的地震前、後速度場的差異。雖然在資料中排除了同震變形，然而 0919 之後的資料，在玉里斷層附近仍有持續變形與抬升，地震前的變形則是比較廣域的從玉里斷層到池上斷層持續的變化，並且在跨池上斷層時兩側有明顯差異，後者與圖 4-39b 類似，在跨池上斷層有明顯變化的情形。 這樣「間震與地震後行為迥異」的現象與 Murase et al. (2013, 2024) 使用高精度水準測量所指出的結果一致，顯示玉里斷層和池上斷層具有彈性潛移 (episodic creep) 的特性，斷層此區在 0918 之後，持續受到該地震影響而變形，並且與地震前的變形趨勢完全不同。基於此，P6 剖面所呈現的速度轉折不僅反映斷層活動本身，也揭示了池上地震後持續的地表調整過程，並突顯該區構造活動的時空複雜性。

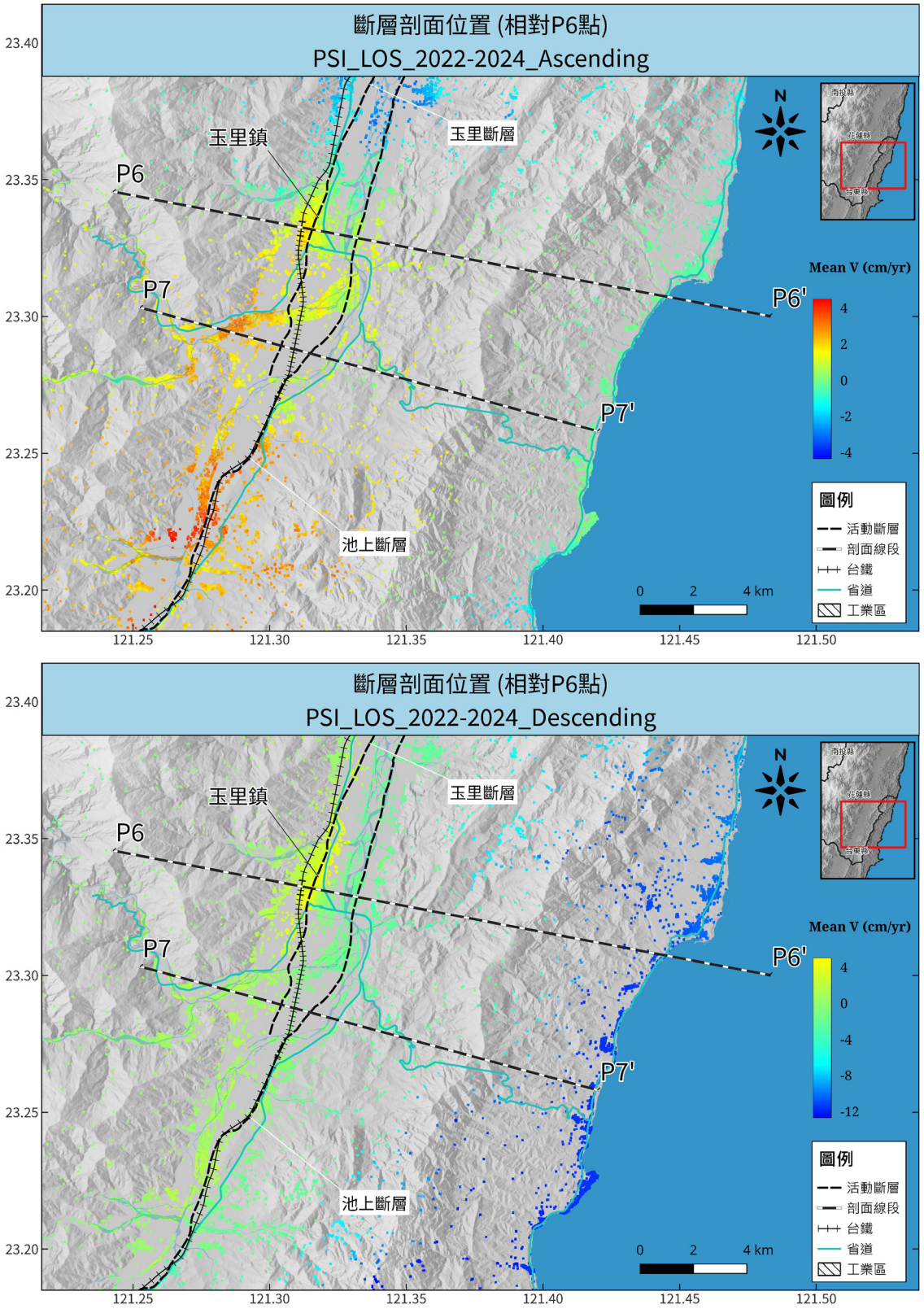


圖 4-37：P6 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P6 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-37: Average LOS velocity field and profile location for section P6 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P6 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

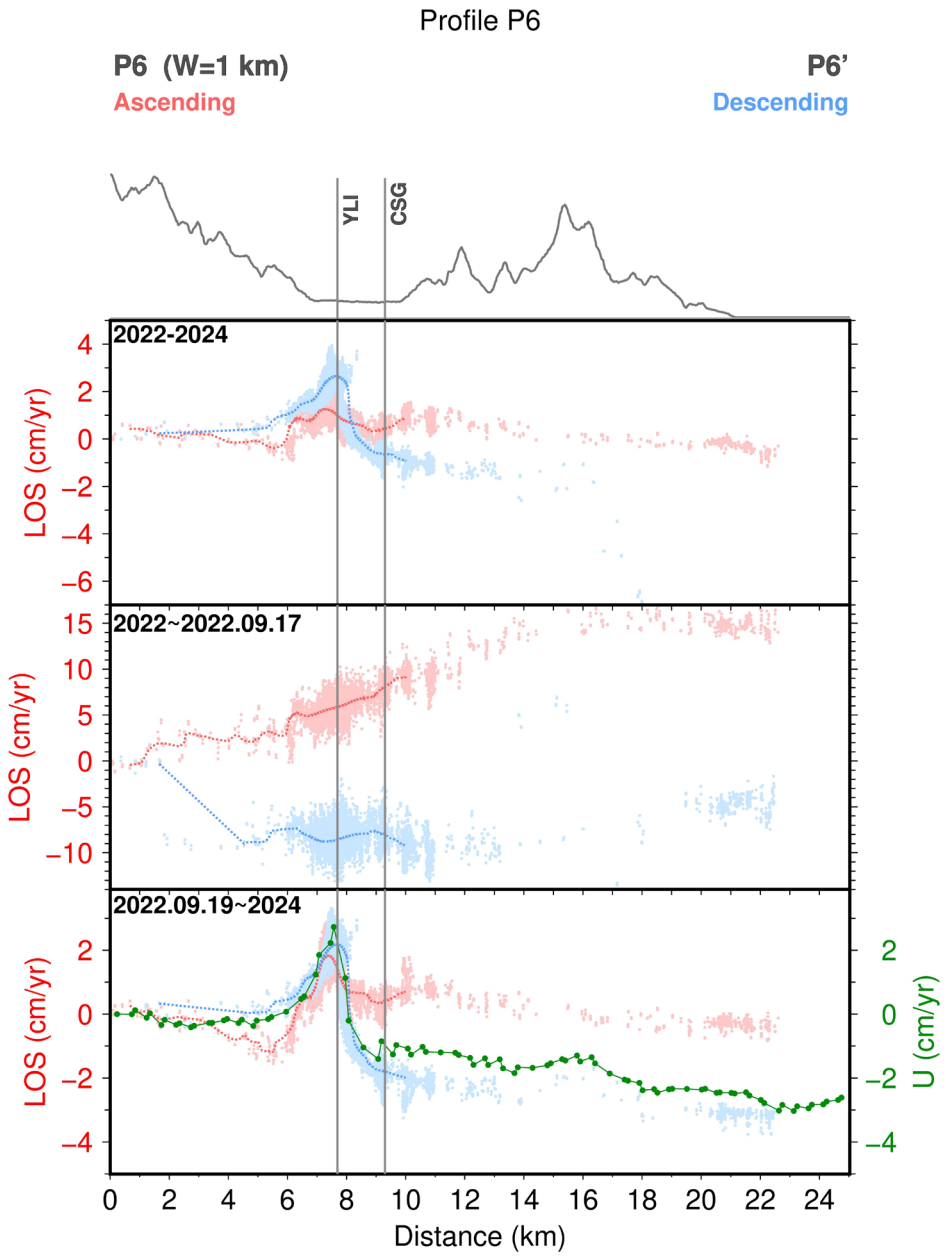


圖 4-38：P6 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：玉里斷層（YLI）、池上斷層（CSG）。

Figure 4-38: Results for profile P6. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Yuli Fault (YLI), and Chihshang Fault (CSG).

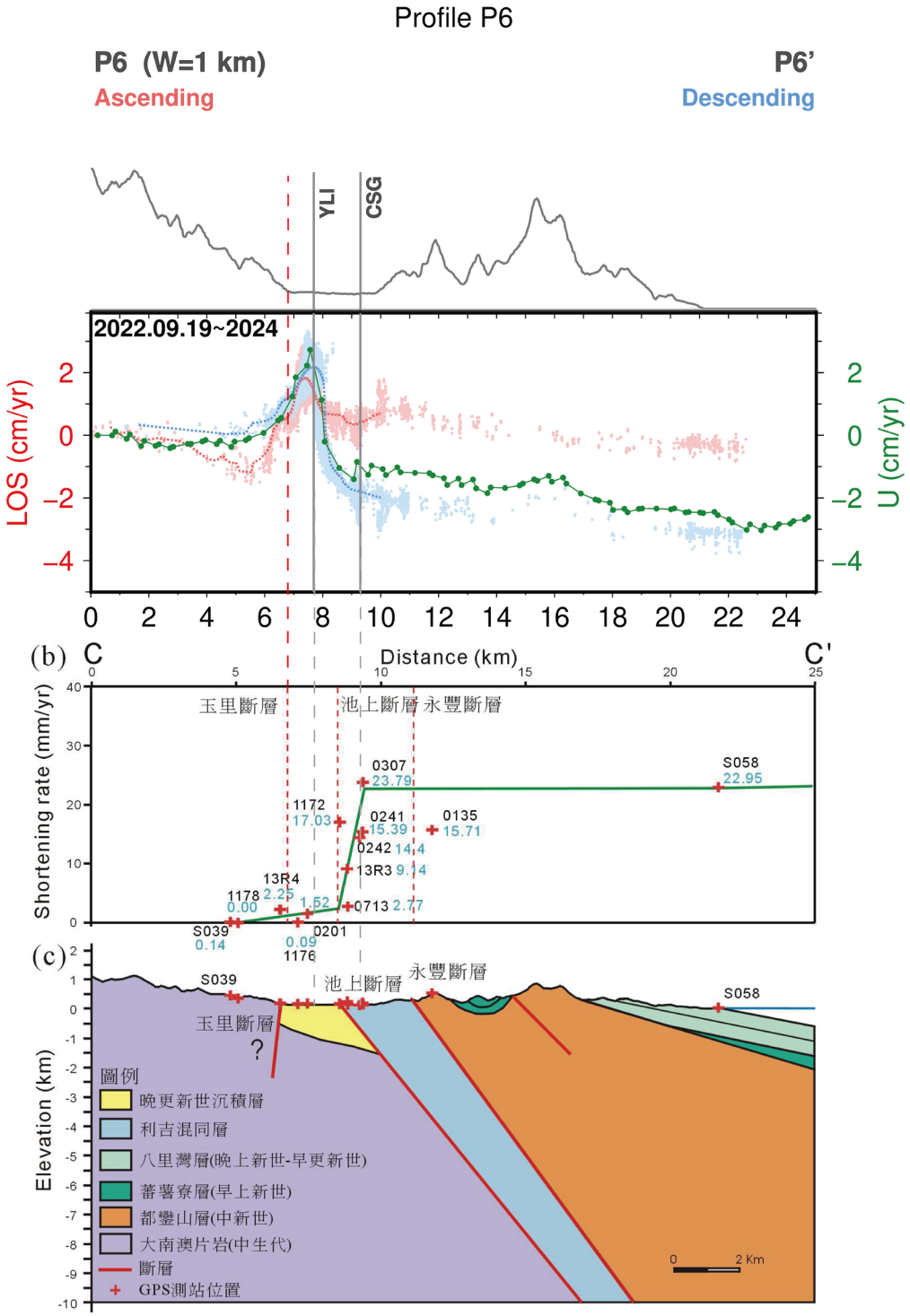


圖 4-39：P6 剖面成果與前人文獻比較圖 (陳文山等，2008)。上圖為 2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。中圖 (b) 為陳文山等 (2008) 中的 GNSS 量測資料投射至 P6 剖面的水平速度場變化，綠色曲線為量測剖面在方位角 30°（平行斷層走向）的水平速度場變化。下圖 (c) 為陳文山等 (2008) 中的地質剖面。

Figure 4-39: Comparison of profile P6 results with previous studies (Chen et al., 2008). The top panel shows PSI results from September 19, 2022 to 2024. Panel (b) presents horizontal velocity variations projected onto profile P6 fromGNSSmeasurements in Chen et al. (2008), with the green curve indicating velocity variations along an azimuth of 30° , parallel to the fault strike. Panel (c) displays the geological cross-section from Chen et al. (2008).

4-2-7 P7 剖面

圖 4-40 分別為 2022~2024 的升、降軌道 PSI 速度場與剖面位置圖。P7 剖面通過玉里斷層（YLI）與池上斷層（CSG），相對於起點 P7，升、降軌道整體的變化趨勢相近，近斷層處並未呈現明顯的色階跳變，沿剖面往海岸方向，LOS 速度呈現遠離衛星移動，升軌道約為 -2 cm/yr，降軌道約為 -10 cm/yr，反映南段縱谷至海岸之間具有明顯的沉降與水平運動分量。圖 4-41 分別為 2022~2022.09.17 的升降軌道 PSI 速度場剖面圖，相對於起點 P7，升降軌道趨勢相反，升軌道方向於通過池上斷層有約 3 cm/yr 的 LOS 速度變化。圖 4-42 為三個時段的 LOS 速度剖面，可見 2022~2024 的剖面東、西側速度差異大；為呈現近斷層趨勢，我們另將斷層附近剖面距離放大顯示。升、降軌道成果顯示玉里斷層兩側有約 1 cm/yr 的 LOS 速度差，池上斷層在關山 - 池上地震前 (2022~2022.09.17) 具有 2~5 cm/yr 的變化；在地震後 (2022.09.19~2024) 玉里斷層兩側則逐漸減弱，斷層兩側約有 1~1.2 cm/yr 的 LOS 速度變化，垂直向速度場顯示 P7 剖面東側相對西側約呈現 1 cm/yr 的差異，整體上剖面東側具有約− 3 cm/yr 的沉陷趨勢，與升降軌 LOS 速度皆偏向遠離衛星一致，說明此區段的變形主要由下沉與東向水平運動共同組成。

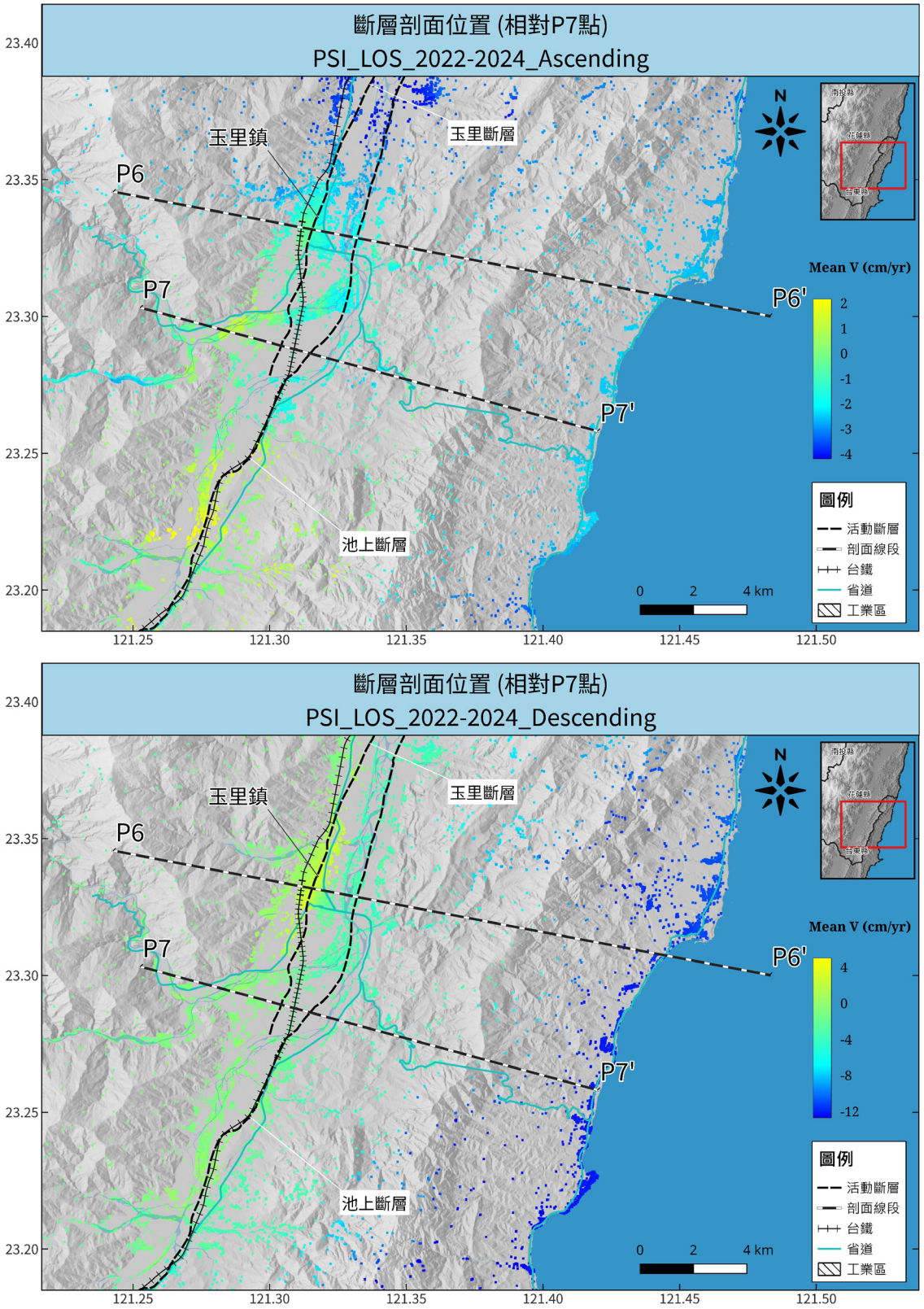


圖 4-40：P7 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P7 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-40: Average LOS velocity field and profile location for section P7 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P7 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

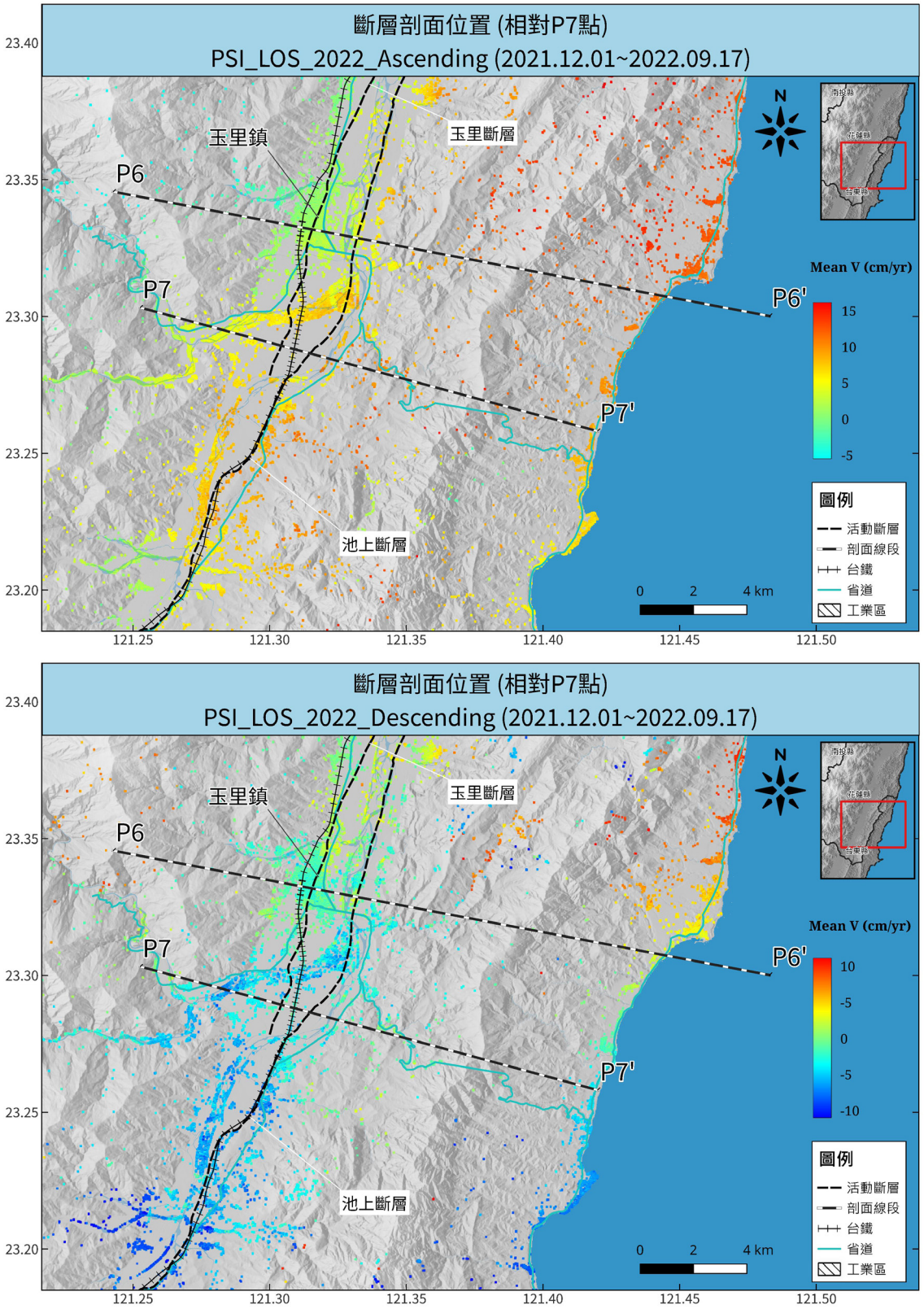


圖 4-41：P7 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P7 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-41: Average LOS velocity field and profile location for section P7 (2022). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P7 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

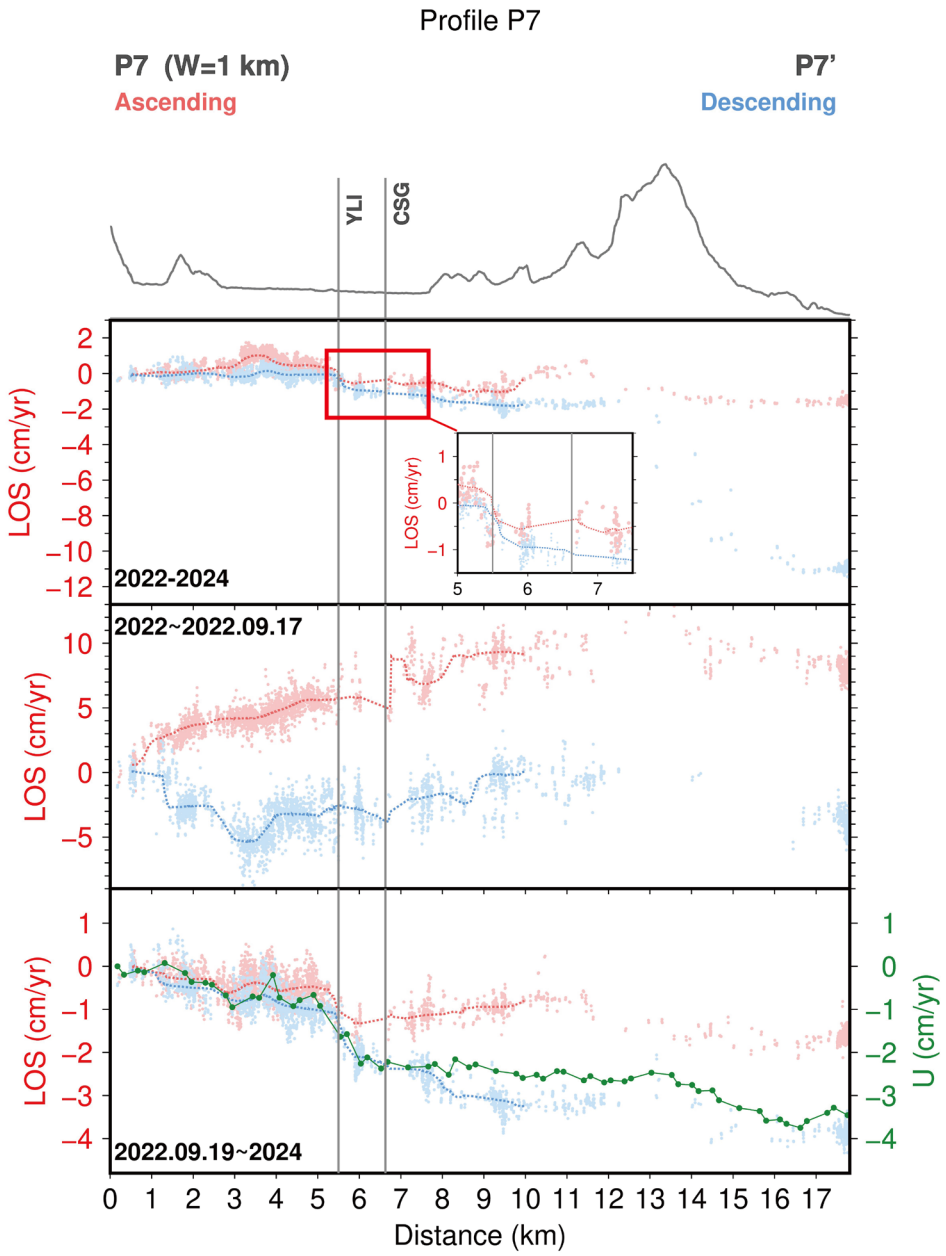


圖 4-42：P7 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：玉里斷層（YLI）、池上斷層（CSG）。

Figure 4-42: Results for profile P7. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Yuli Fault (YLI), and Chihshang Fault (CSG).

4-2-8 P8 剖面

圖 4-43 分別為 2022~2024 的升降軌道 PSI 速度場剖面位置圖。P8 剖面通過池上斷層（CSG），相對於起點 P8，升降軌道 LOS 速度整體趨勢相近，在近斷層處並未表現出明顯的色階跳變，剖面至海岸線呈現遠離衛星移動，升軌道約為 -5 cm/yr，降軌道約為 -10 cm/yr，反映縱谷東側至海岸山脈之間具有明顯的沉降與水平運動分量。圖 4-44 為三個時段的 LOS 速度剖面，P8 剖面通過池上斷層後，約在 11 公里處進入山區，因植被茂密以致 PSI 點數少。雖然資料密度降低，但三個時期均呈現一致的變形特徵；池上斷層左側 8 公里處開始，LOS 速度場會逐漸增加；跨越斷層至右側約 10 公里處則迅速下降。靠近衛星方向的量值（上升分量）約 1~2 cm/yr，而遠離衛星方向（下沉分量）則約 0.5~3.5 cm/yr，顯示池上斷層附近仍存在可辨識的速度梯度。圖 4-45 將 P8 剖面與地質剖面比對成果進行比對，灰線為地礦中心公告的斷層位置，紅色虛線為陳文山地質剖面中指示的位置（陳文山等，2008），池上斷層位置大約與現今公告位置差距 1 公里，而速度剖面顯示的主要速度變化帶落在距起點約 8 公里 LOS 速度。該區域亦靠近利吉混同層的位置，是否為造成速度梯度變化的控制因素，仍值得進一步探討 26.4 mm/yr（陳文山等，2008）。在 2022.09.19 至 2024 年底的速度場中，顯示在垂直分量，由縱谷往東跨越池上斷層呈現下陷行為，這與整體縱谷處於東西向壓縮、海岸山脈抬升的趨勢不同。這種「跨斷層下陷」的特性與 0918 池上地震後海岸山脈的震後位移行為一致 (Widiatmoko, F.R. et al, 2023) 震後反應可能持續影響區域長達數年，使本研究觀察期內呈現平均約 2 cm 的跨斷層下陷量，反映池上斷層周邊在地震後的持續形變並非立即恢復，而具有一定的長期調整效應。

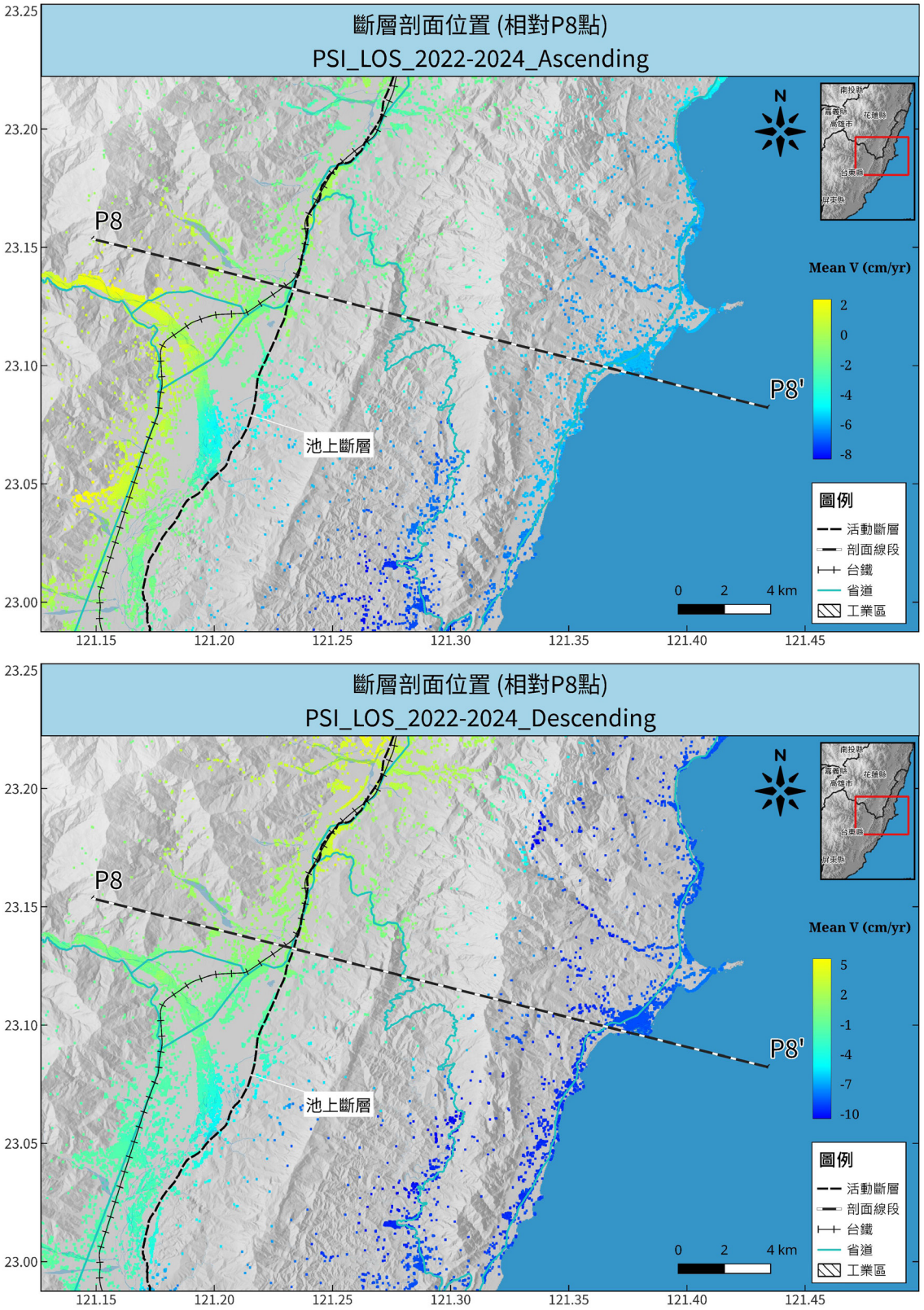


圖 4-43：P8 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P8 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-43: Average LOS velocity field and profile location for section P8 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P8 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

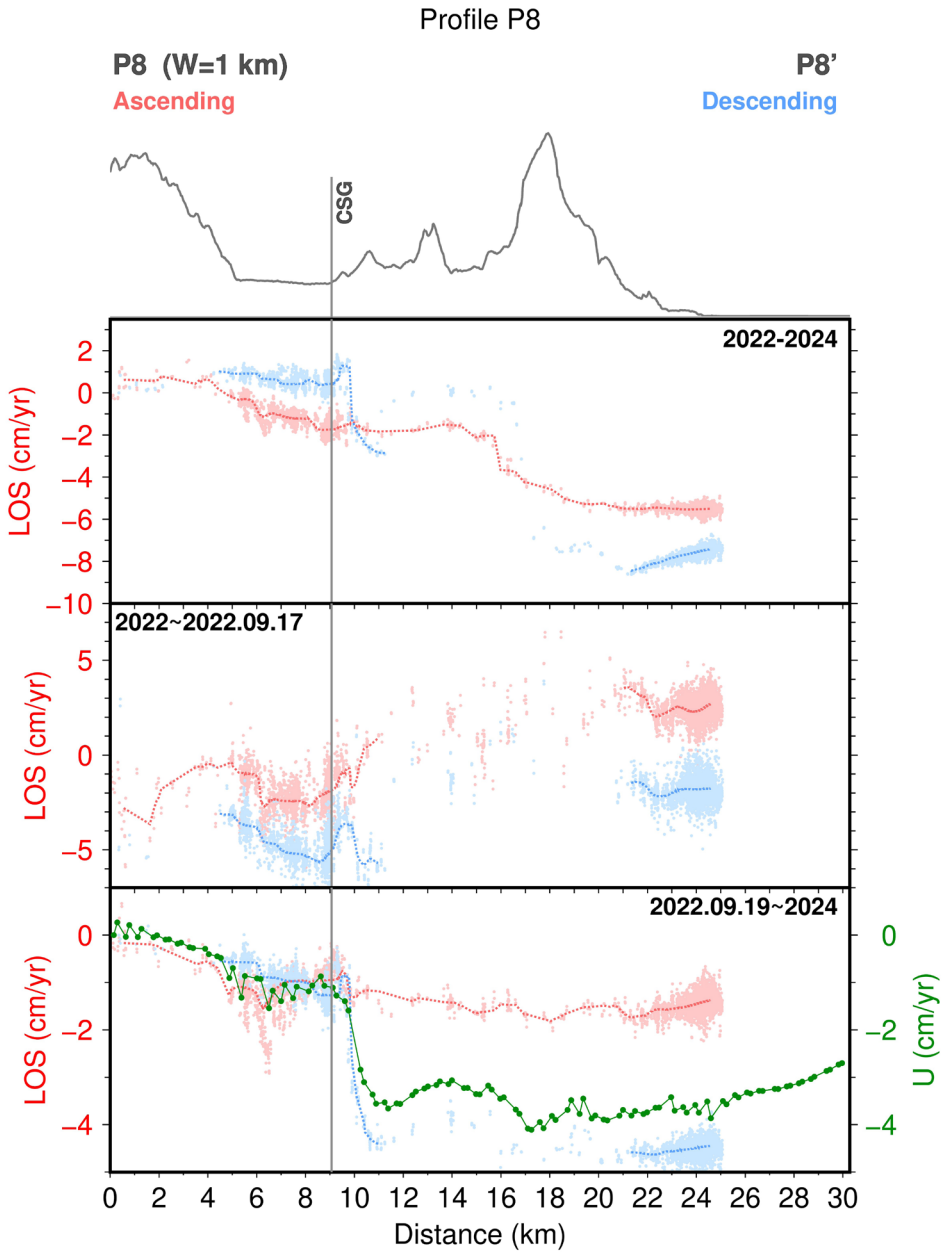


圖 4-44：P8 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：池上斷層（CSG）。

Figure 4-44: Results for profile P8. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Chihshang Fault (CSG).

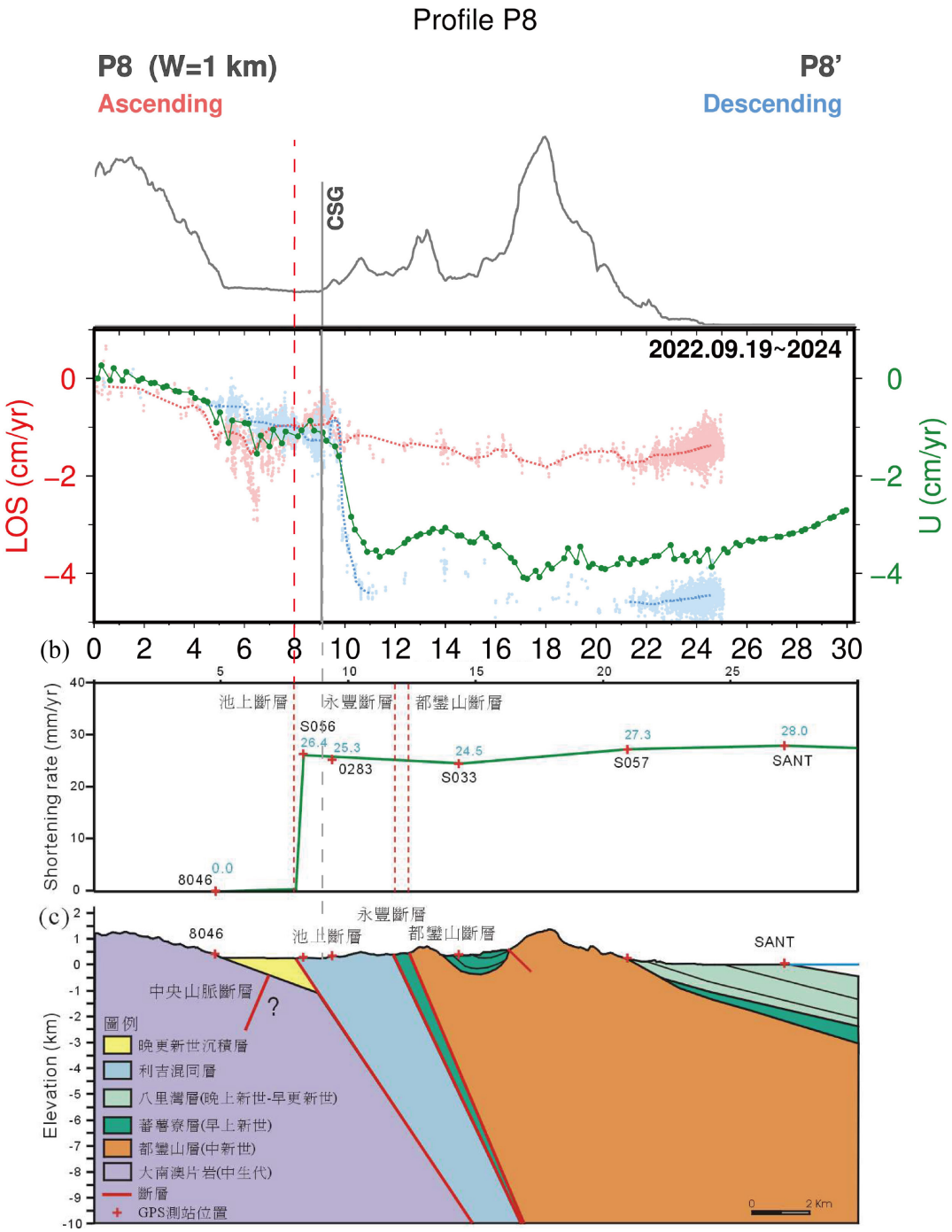


圖 4-45：P8 剖面成果與前人文獻比較圖 (陳文山等，2008)。上圖為 2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。中圖 (b) 為陳文山等 (2008) 中的 GNSS 量測資料投射至 P8 剖面的水平速度場變化，綠色曲線為量測剖面在方位角 30°（平行斷層走向）的水平速度場變化。下圖 (c) 為陳文山等 (2008) 中的地質剖面。

Figure 4-45: Comparison of profile P8 results with previous studies (Chen et al., 2008). The top panel shows PSI results from September 19, 2022 to 2024. Panel (b) presents horizontal velocity variations projected onto profile P8 fromGNSSmeasurements in Chen et al. (2008), with the green curve indicating velocity variations along an azimuth of 30° , parallel to the fault strike. Panel (c) displays the geological cross-section from Chen et al. (2008).

4-2-9 P9 剖面

圖 4-46 分別為 2022-2022.09.17 的升降軌道 PSI 速度場及剖面位置圖。P9 剖面通過池上斷層（CSG），相對於起點 P9，升軌道方向成果顯示在近池上斷層處有速度變化；斷層西側約為 2 cm/yr 的 LOS 速度，東側則為 -2 cm/yr 的 LOS 速度，通過斷層後回復至 0~1 cm/yr 的 LOS 速度；降軌道在此期間則未顯示明顯的色階跳變。圖 4-47 為 2022.09.19~2024 的升、降軌道的 PSI 速度場剖面圖。相對於起點 P9，升軌道在剖面西段呈現 LOS 速度逐漸增加，但至池上斷層附近速度下降至約 22 cm/yr；降軌道的變化趨勢與升軌道相似，斷層附近的 LOS 速度約 23 cm/yr，反映震後形變的持續調整效應。圖 4-48 為三個時段的 LOS 速度剖面，顯示池上斷層兩側的速度場具有明顯的時段差異。2022~2022.09.17 升軌道方向呈現向下（遠離衛星）的 LOS 速度，兩側速度差 2.5 cm/yr；然而在 2022.09.19~2024，升軌道則轉為呈現向上（靠近衛星）的趨勢，速度差約僅 0.8 cm/yr。降軌道在 2022~2022.09.17 期間沒有明顯變化，但在 2022.09.19~2024 時期則呈現向下（遠離衛星）的 LOS 速度，兩側速度差約 1.2 cm/yr。綜合三個時段的結果顯示，在 2022~2024 全期中，升軌剖面在池上斷層兩側並無顯著速度落差，而降軌剖面則保留約 1.2 cm/yr 的跨斷層差異。進一步由剖面可觀察到，除跨越池上斷層本身的速度差異外，在斷層西側尚存在一處速度梯度明顯增大的區域，其垂直速度顯示東側呈現下降趨勢；此外，在池上斷層東側亦可辨識一處寬約 1 公里的顯著變形區，呈現明顯的抬升速度。圖 4-49 為 P9 剖面與地質剖面比對成果，其中灰線為地礦中心公告的池上斷層位置，紅色虛線為陳文山地質剖面中指示的位置（陳文山等，2008），池上斷層位置大約與現今公告位置差距 2.5 公里。此次 PSI 觀測顯示 LOS 速度開始下降的位置位於距起點約 8 公里處，是該區亦接近利吉混同層的分布範圍，顯示沉積構造可能為控制 LOS 速度梯度的重要因素之一（陳文山等，2008）。此外，在跨過池上斷層亦可觀察明顯的抬升變化，其位置恰位於坪頂階地 (二層坪) 的範圍內。根據前人研究，該階地為受池上斷層與利吉斷層共同作用所形成之構造階地（沈淑敏等，2006；紀權窅，2007；林啟文等，2009；姜彥麟等，2012；經濟部中央地質調查所，2011）。測地資

料顯示該階地整體向西北方向移動，且不同階地之移動速率存在顯著差異（Chuang et al., 2012；Deffontaines et al., 2017）。進一步結合 2022 年關山地震的同震地表破裂調查結果可知，該構造階地位於斷層走向改變的轉換帶，易形成擠壓型花狀構造，進而造成快速抬升（Hsu et al., 2024）。因此，坪頂階地的構造活動為 P9 剖面中 LOS 速度梯度顯著的重要控制因素之一，其震後變形行為值得進一步深入探討。

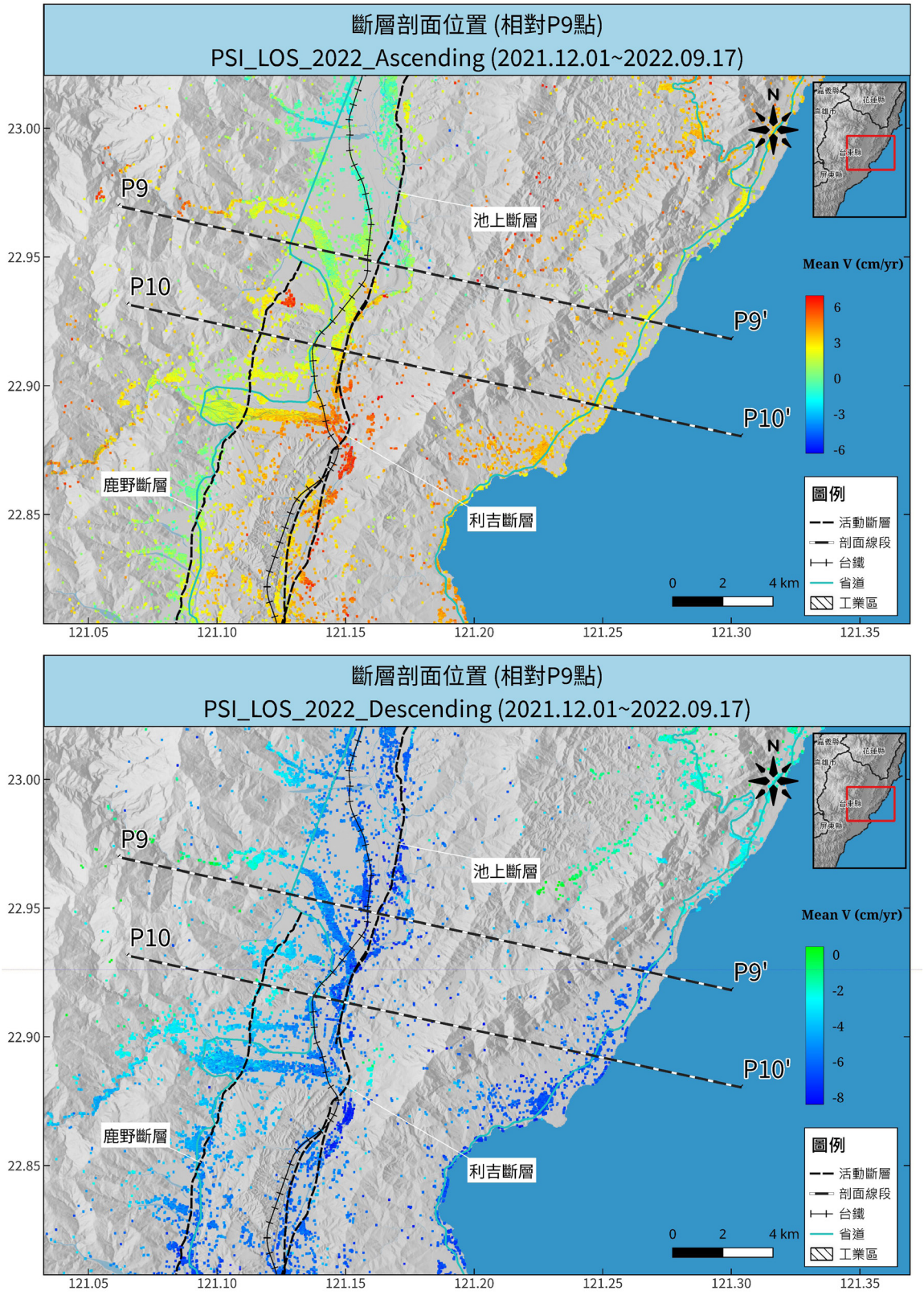


圖 4-46：P9 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P9 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-46: Average LOS velocity field and profile location for section P9 (2022). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P9 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

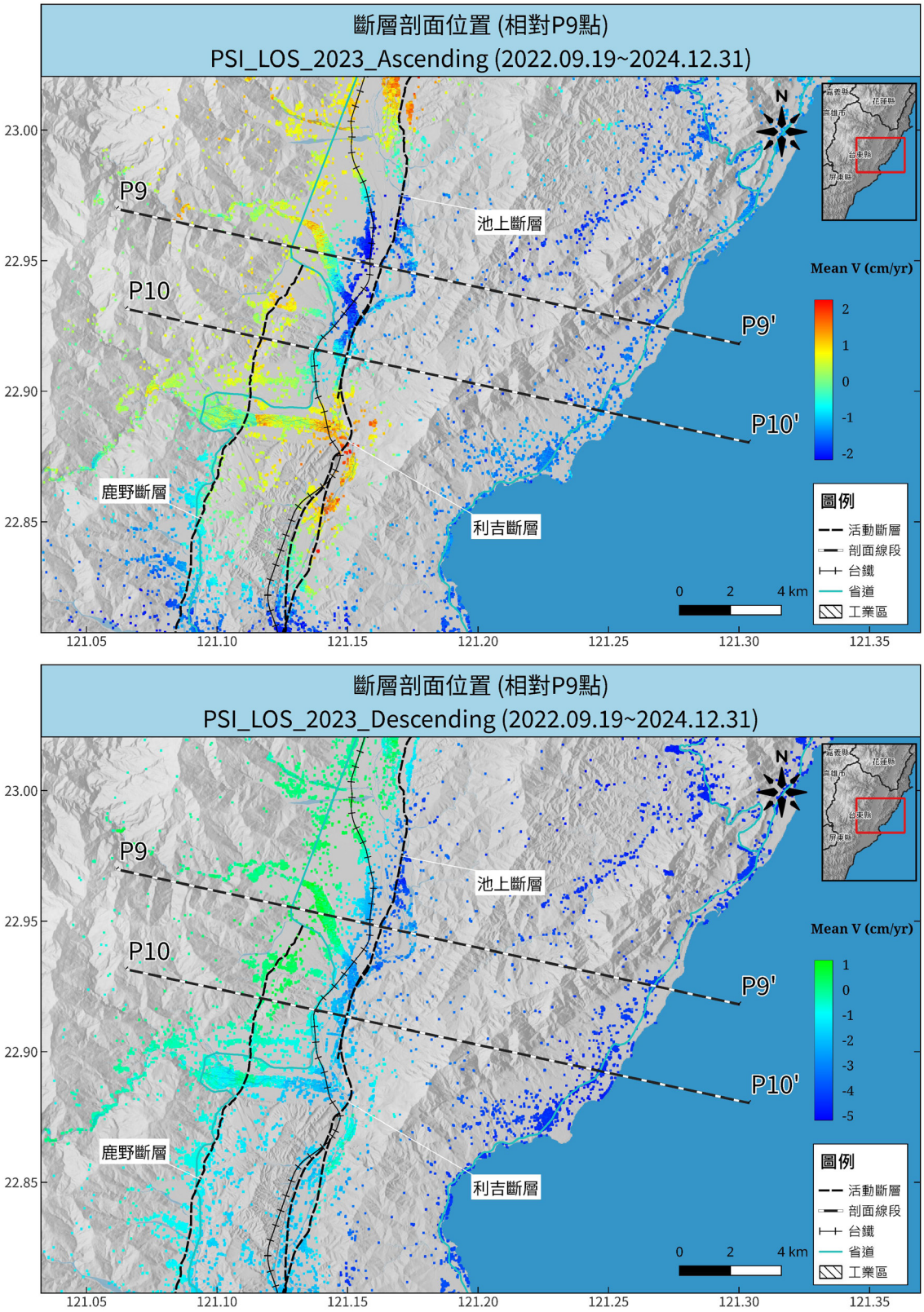


圖 4-47：P9 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P9 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-47: Average LOS velocity field and profile location for section P1 (2023). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P9 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

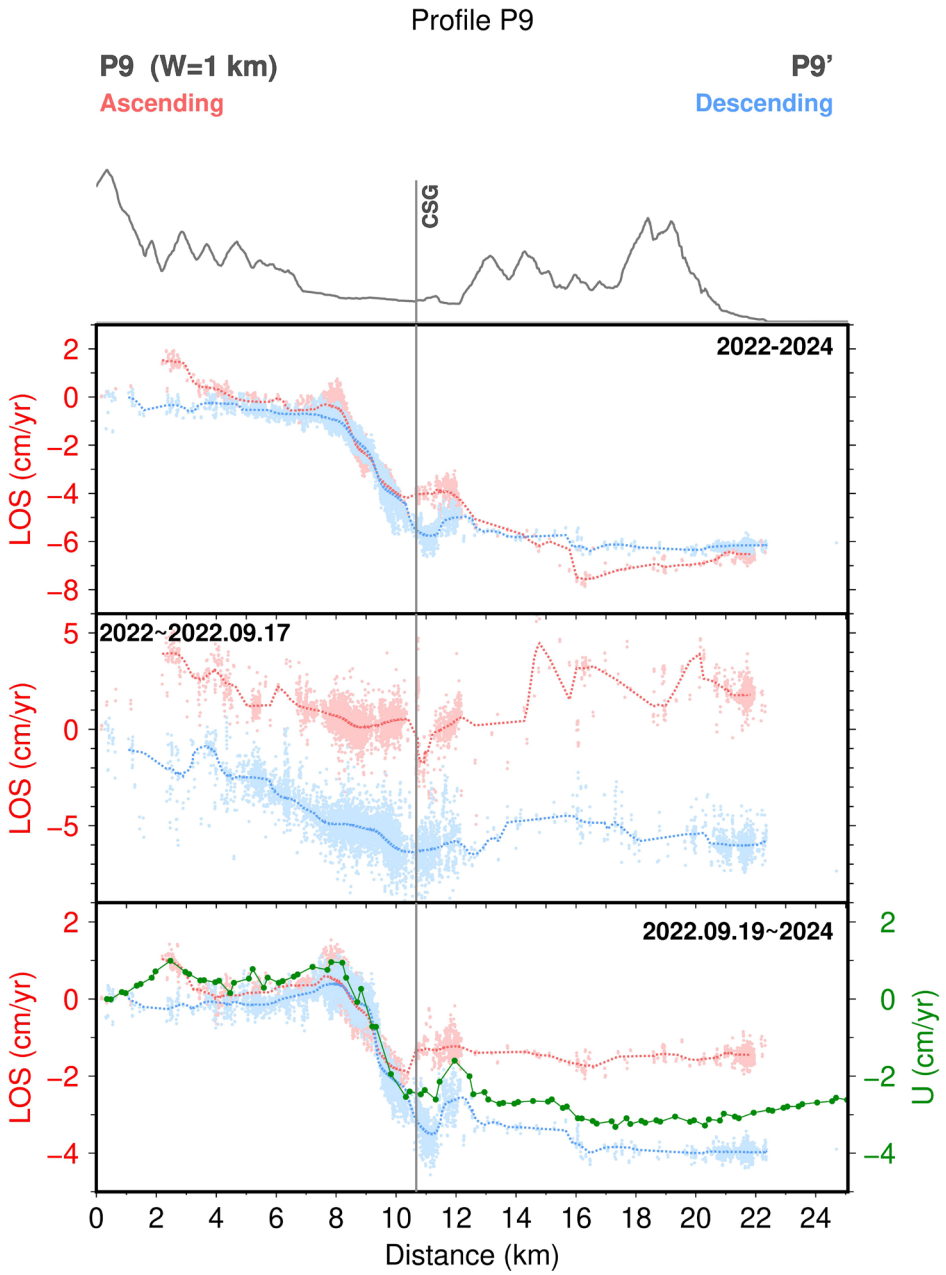


圖 4-48：P9 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置池上斷層（CSG）。

Figure 4-48: Results for profile P9. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Chihshang Fault (CSG).

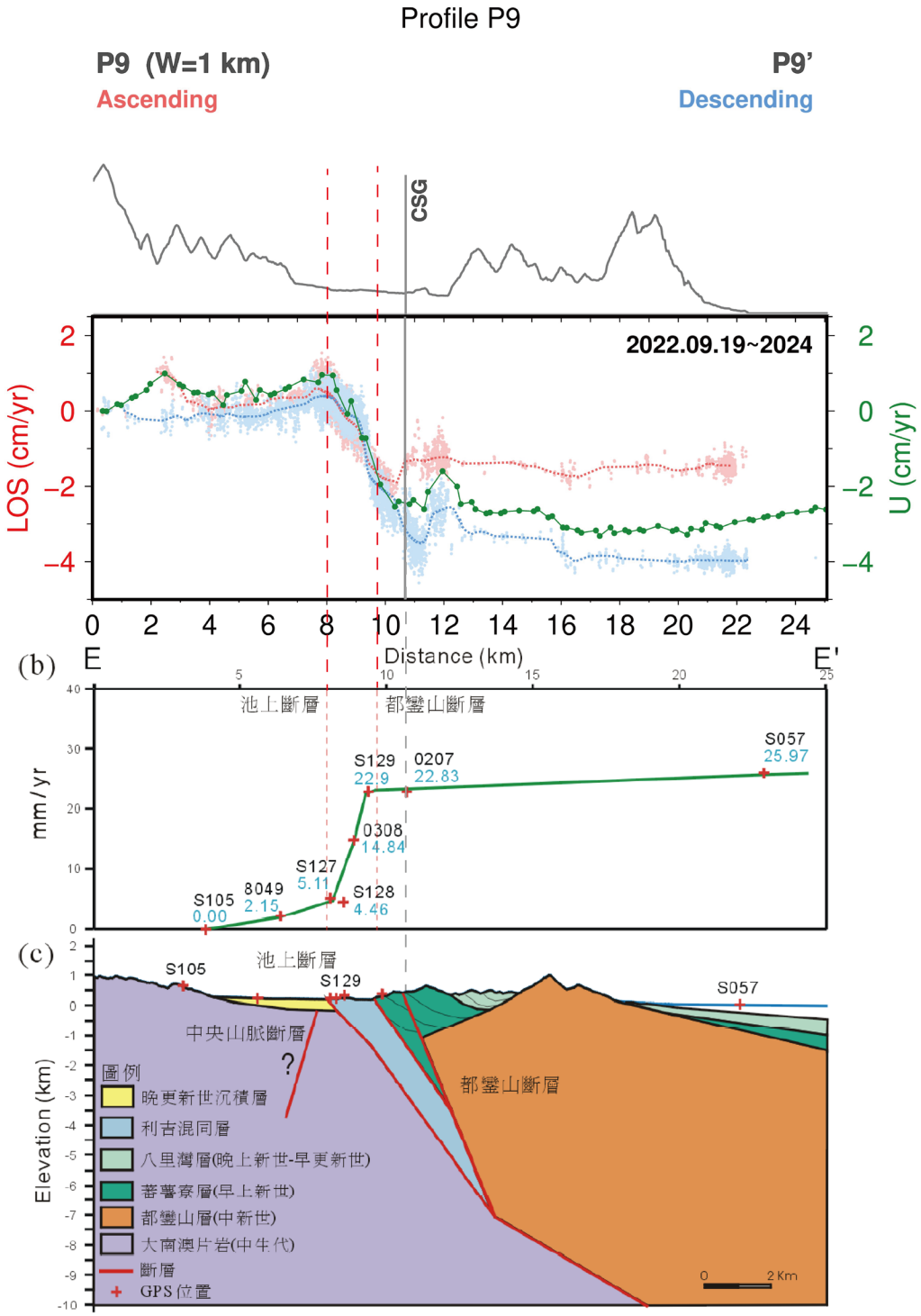


圖 4-49：P9 剖面成果與前人文獻比較圖 (陳文山等，2008)。上圖為 2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。中圖 (b) 為陳文山等 (2008) 中的 GNSS 量測資料投射至 92 剖面的水平速度場變化，綠色曲線為量測剖面在方位角 30°（平行斷層走向）的水平速度場變化。下圖 (c) 為陳文山等 (2008) 中的地質剖面。

Figure 4-49: Comparison of profile P9 results with previous studies (Chen et al., 2008). The top panel shows PSI results from September 19, 2022 to 2024. Panel (b) presents horizontal velocity variations projected onto profile P9 fromGNSSmeasurements in Chen et al. (2008), with the green curve indicating velocity variations along an azimuth of 30° , parallel to the fault strike. Panel (c) displays the geological cross-section from Chen et al. (2008).

4-2-10 P10 剖面

圖 4-50 分別為 2022~2024 的升降軌道 PSI 速度場和剖面位置圖。P10 剖面通過鹿野斷層（LYH）與利吉斷層（LCI），相對於起點 P10，升降軌道的 LOS 變化趨勢接近，在鹿野斷層至池上斷層之間有明顯速度變化，約有 3 cm/yr 的 LOS 速度差。圖 4-51 分別為 2022-2022.09.17 其升降軌道 PSI 速度場剖面圖，相對於起點 P10，升軌道方向在通過池上斷層處有約 2.5 cm/yr 的 LOS 速度變化，降軌道方向則無明顯色階變化。圖 4-52 分別為 2022.09.19~2024 的升降軌道 PSI 速度場剖面圖，相對於起 P10，升降軌道的 LOS 變化趨勢接近，在鹿野斷層至池上斷層之間有明顯速度變化，升軌道方向約有 2 cm/yr 的 LOS 速度差，降軌道約有 3 cm/yr 的 LOS 速度差。綜整三個時段的 LOS 速度剖面 (圖 4-53)，鹿野斷層在 2022~2022.09.17 升降軌道方向均未出現明顯變化；在 2022.09.19~2024 升、降軌道方向約各有 0.5 cm/yr 的速度落差，但方向相反；若觀察 2022~2024 全期在升、降軌道方向約有 0.8 cm/yr 的速度落差，方向一致。利吉斷層處在 2022~2022.09.17 升軌道方向有 1.5 cm/yr 的速度差，但降軌道方向無明顯變化，2022.09.19~2024 升軌道方向無明顯變化，降軌道則出現 0.8 cm/yr 的變化量，2022~2024 全期的利吉斷層在降軌道方向約有 0.8 cm/yr 的速度落差，升軌道無明顯落差。圖 4-54 為 P10 剖面與地質剖面比對成果，圖中灰線為地礦中心公告的斷層位置，紅色虛線為陳文山地質剖面中指示的位置（陳文山等，2008），鹿野斷層與現今位置一致，利吉斷層約有 0.2 公里差距，地質剖面顯示兩斷層間為初鹿礫石層，此區間有較快速的 LOS 速度變化梯度，岩性是否為造成因素可進一步探討。利吉斷層上盤的速度場沒有明顯的變化，但跨越斷層時水平速度場由 23.7 mm/yr 遽減至 13.8 mm/yr。而跨越鹿野斷層的水平速度場則遽減 13.8 mm/yr（陳文山等，2008）。 在垂直方向解算速度剖面顯示，6~7 公里處（鹿野斷層東側）在 20220917~2024 年底有每年約兩公分的下陷，而在利吉斷層東側 (剖面 12 公里附近) 有每年約一公分的下陷，同樣的這與整體縱谷下陷、海岸山脈抬升的趨勢不同，然而這也同樣顯示在 0917~18 大地震影響下，這些變形都顯示海岸山脈以斷層附近為界相對縱谷下陷。

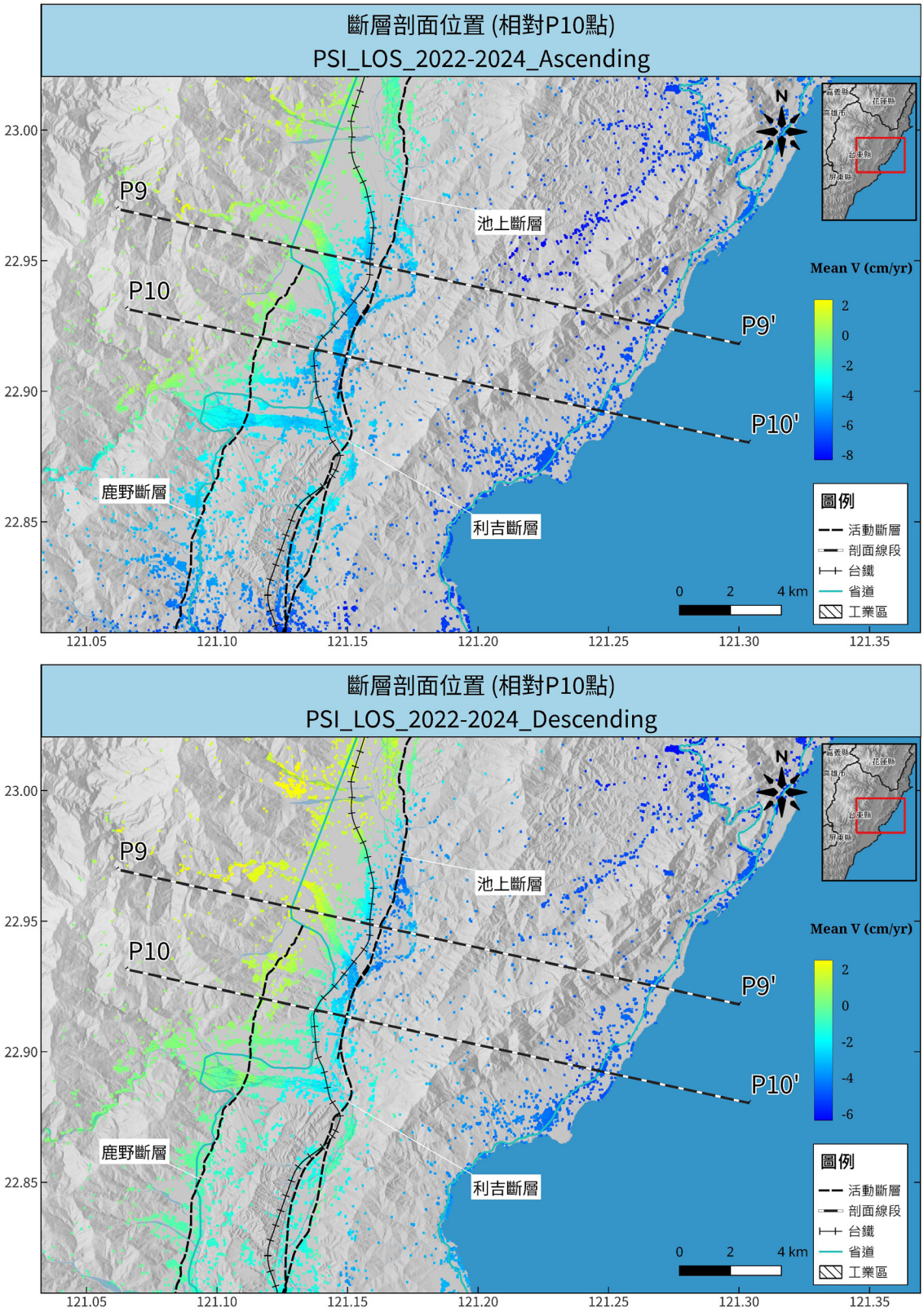


圖 4-50：P10 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P10 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-50: Average LOS velocity field and profile location for section P10 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P10 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

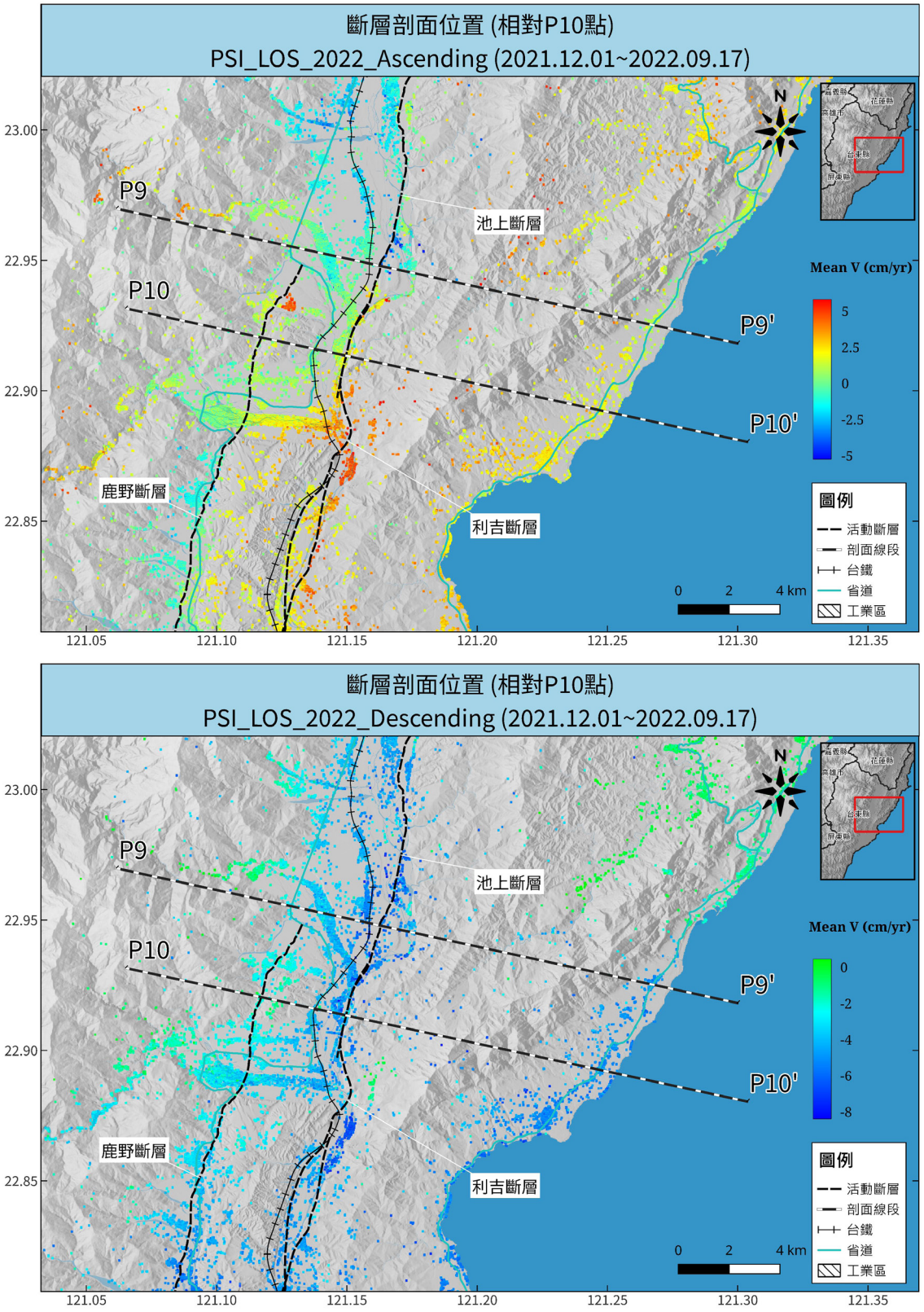


圖 4-51：P10 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P10 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-51: Average LOS velocity field and profile location for section P10 (2022). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P10 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

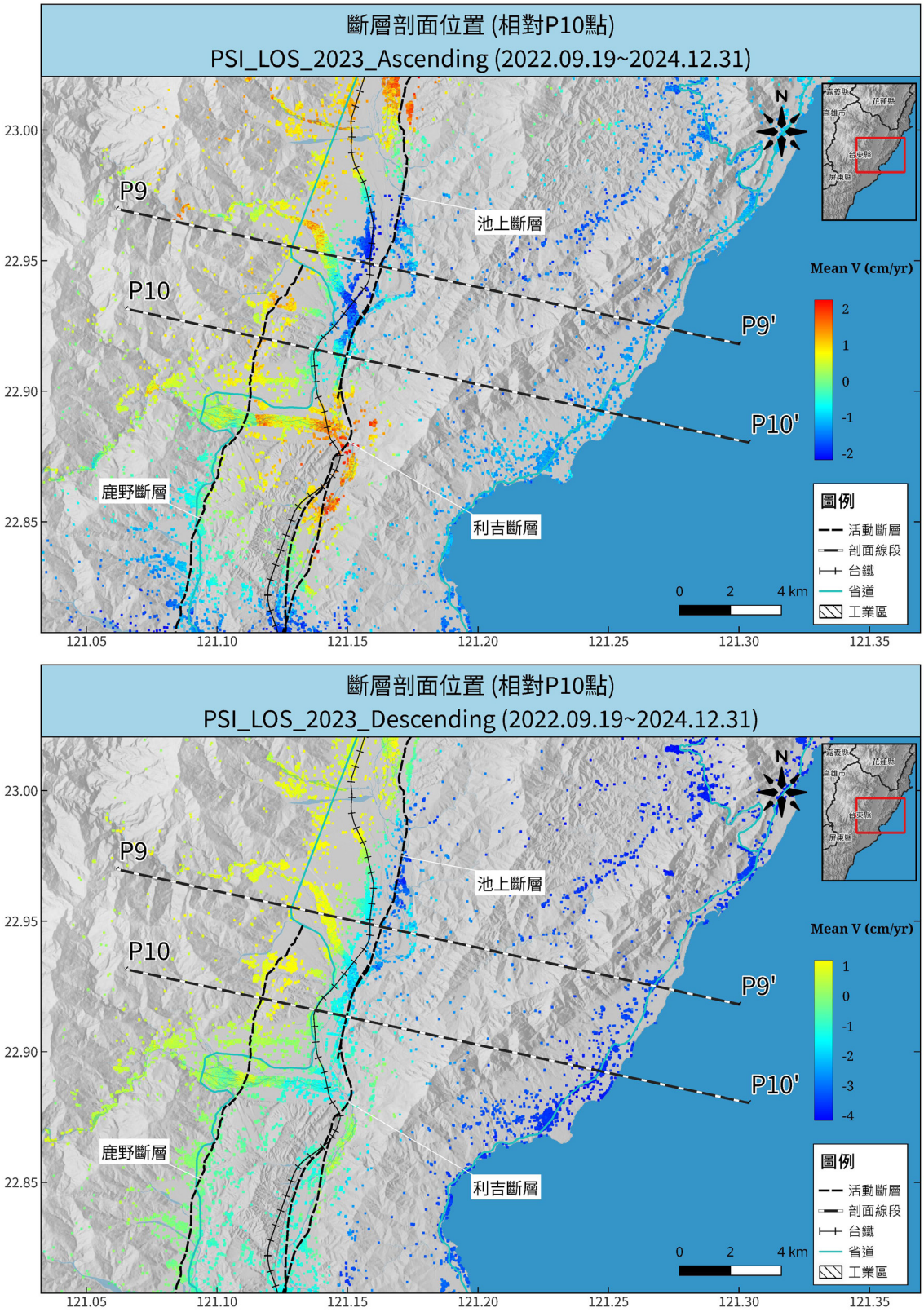


圖 4-52：P10 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P10 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-52: Average LOS velocity field and profile location for section P10 (2023). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P10 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

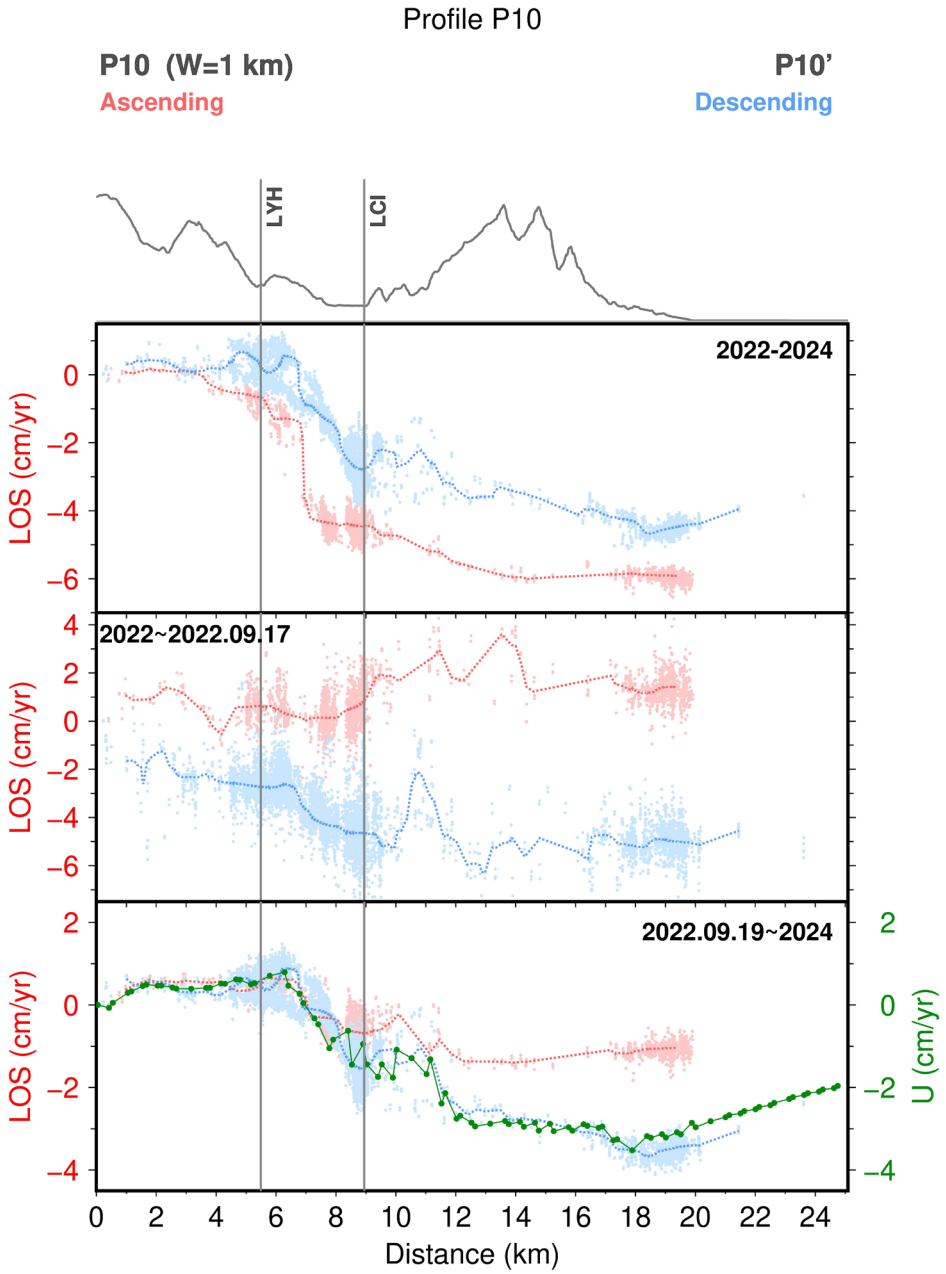


圖 4-53：P10 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：鹿野斷層（LYH）、利吉斷層（LCI）。

Figure 4-53: Results for profile P10. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Luyeh Fault (LYH), and Lichi Fault (LCI).

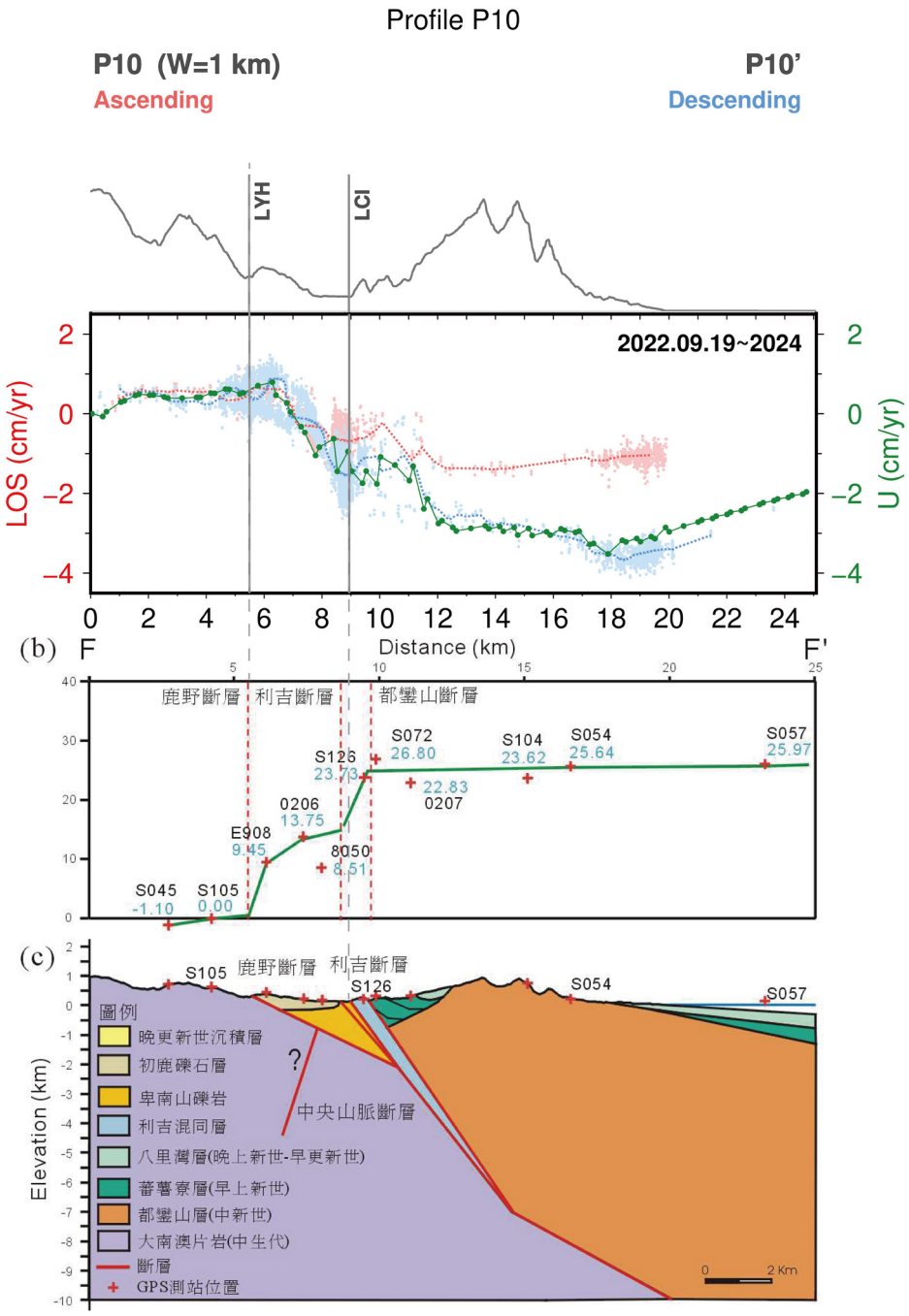


圖 4-54：P10 剖面成果與前人文獻比較圖 (陳文山等，2008)。上圖為 2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。中圖 (b) 為陳文山等 (2008) 中的 GNSS 量測資料投射至 P10 剖面的水平速度場變化，綠色曲線為量測剖面在方位角 30°（平行斷層走向）的水平速度場變化。下圖 (c) 為陳文山等 (2008) 中的地質剖面。

Figure 4-54: Comparison of profile P10 results with previous studies (Chen et al., 2008). The top panel shows PSI results from September 19, 2022 to 2024. Panel (b) presents horizontal velocity variations projected onto profile P10 fromGNSSmeasurements in Chen et al. (2008), with the green curve indicating velocity variations along an azimuth of 30° , parallel to the fault strike. Panel (c) displays the geological cross-section from Chen et al. (2008).

4-2-11 P11 剖面

圖 4-55 分別為 2022~2024 的升降軌道 PSI 速度場剖面位置，P11 剖面通過利吉斷層（LCI），相對於起點 P11，升降軌道於近斷層處無明顯變化，升軌道方向剖面隨著距離呈現遠離衛星移動，至利吉斷層周遭有最大遠離 LOS 速度約為 -2 cm/yr，至剖面東側則略升為 -0.5 cm/yr，降軌道方向亦隨距離呈現遠離衛星移動，至利吉斷層周遭約為 -1.5 cm/yr 的 LOS 速度，至剖面東側有最大遠離 LOS 速度約為 -3 cm/yr。圖 4-56 為三個時段的 LOS 速度剖面，三時段皆顯示近斷層處無明顯落差，2022~2022.09.17 與 2022.09.19~2024 成果顯示利吉斷層西側 LOS 速度趨勢方向相反。

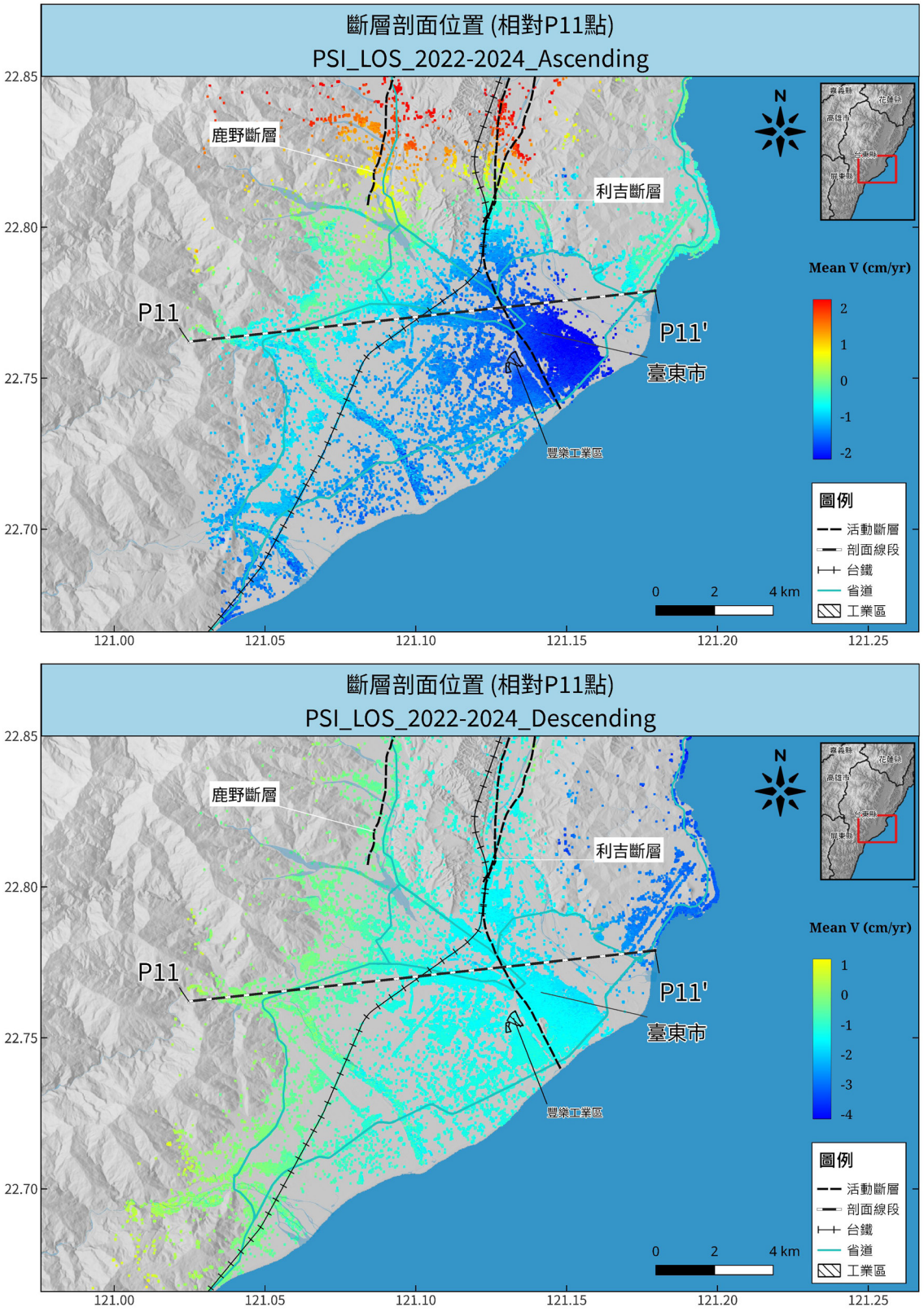


圖 4-55：P11 面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P11 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

Figure 4-55: Average LOS velocity field and profile location for section P11 (2022~2024). All velocity values are referenced to the starting point of the profile (P11 point). The top figure displays results from the ascending orbit; the bottom figure shows results from the descending orbit.

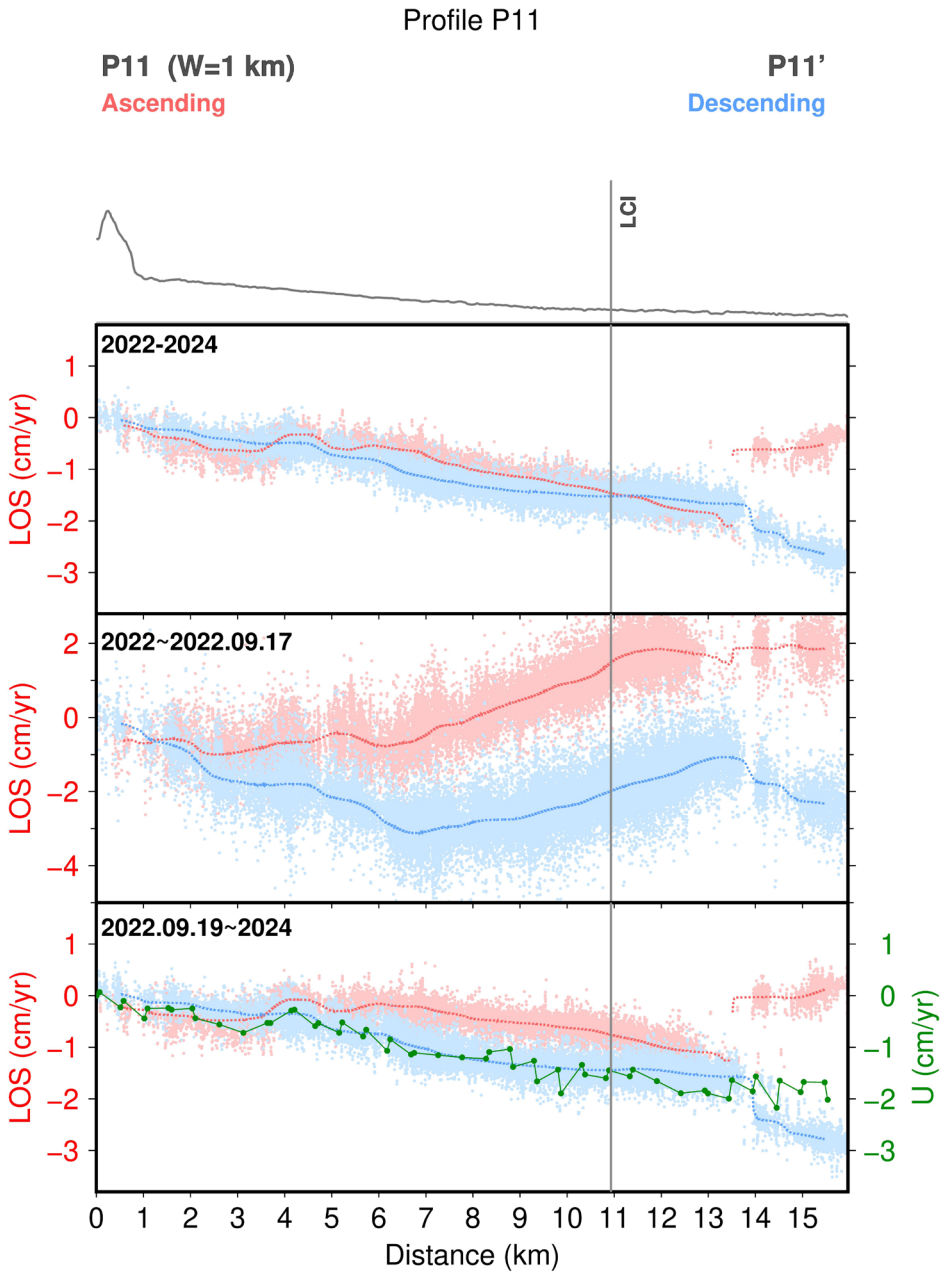


圖 4-56：P11 剖面成果。由上而下為地形，2022~2024 年成果，2022 至 2022 年 9 月 17 日成果，2022 年 9 月 19 日至 2024 年成果。紅點為 PSI 升軌道方向 LOS 速度，紅色虛線為升軌道方向 LOS 速度平均值線，藍點為降軌道方向 LOS 速度，藍色虛線為降軌道方向 LOS 速度平均值線，綠點與綠色線段為 PSI 的 LOS 方向速度解算之垂直向速度，灰色直線為斷層位置：利吉斷層（LCI）。

Figure 4-56: Results for profile P11. From top to bottom, the panels show: terrain elevation, results from 2022 to 2024, results from 2022 to September 17, 2022, and results from September 19, 2022 to 2024. Red dots represent PSI LOS velocities from the ascending orbit, with red dashed lines indicating the average LOS velocity in the ascending direction. Blue dots represent LOS velocities from the descending orbit, with blue dashed lines indicating the average LOS velocity in the descending direction. Green dots and green line segments denote the vertical velocity component derived from PSI LOS measurements. The gray straight line marks the fault location of the Lichi Fault (LCI).

4-2-12 跨斷層速度場剖面分析與構造活動討論

綜合 P1~P11 剖面的跨斷層速度場分析結果顯示，透過 PSI 所解析之地表變形資訊，可清楚辨識多處具有構造意義的變形特徵。這些結果顯示，研究區內活動斷層之變形行為，除受淺部構造與岩性條件控制外，亦可能反映更深層構造系統的影響，顯示其構造活動型態具有一定的複雜性，值得進一步探討。

在 P2 剖面顯示主要的速度梯度變化區域位於嶺頂斷層東側的岩性邊界位置。P4 剖面則顯示主要速度變化幅度並非出現在斷層位置，而是位於海岸山脈內部。根據 Lu et al.（2024）對光復地震的地質與地表變形調查結果，推測該區同震變形可能受到海岸山脈內部丁子漏斷層活動的影響，且在震後資料中仍可觀察到該構造相關的持續變形行為。在 P5 剖面顯示玉里斷層與池上斷層之間可觀察到明顯速度梯度變化，配合 2022 年關山 - 池上地震之地表破裂調查，可知該區域存在多處同震破裂現象，如松浦與鍋蓋樑一帶，後續研究亦指出該區可能為中央山脈斷層松浦段之分支（Yen et al., 2025）。P6 剖面則顯示玉里斷層於震前呈現相對平滑的速度變化，而於 0918 地震後轉為持續抬升，變形趨勢與震前顯著不同，與 Murase et al.（2013, 2024）所指出之間震與震後行為差異相符，顯示地震事件造成斷層活動型態之轉變。P7 剖面中，池上斷層於震前仍保有小幅速度變化，但於震後呈現相反的變形趨勢。在 P8 與 P9 剖面顯示跨越池上斷層後的 LOS 速度變化位置，與利吉混同層分布範圍高度一致，且 P9 剖面中，LOS 抬升區則可對應至坪頂階地（二層坪）。依據前人研究與 2022 年關山地震調查結果，該區位於池上斷層與利吉斷層之交會區域，斷層走向變化可能形成擠壓型花狀構造，導致階地快速抬升（Hsu et al., 2024）。P10 剖面顯示鹿野斷層與利吉斷層之間之初鹿礫石層具有較大的速度梯度，推測其下方可能尚存在未明確辨識之構造活動。

除個別斷層附近的跨斷層速度梯度外，整體剖面結果亦呈現明顯的南北向變形差異。在 P1~P4 剖面（花蓮市至嶺頂斷層一帶）中，可觀察到海岸山脈北段於 2022 年關山 - 池上地震後呈現整體抬升趨勢；相對地，在 P5~P10 剖面（玉里以南至利吉斷層一帶），海岸山脈南段於地震事件後則普遍呈現相對下陷的變形行為。此種北段抬

升、南段下陷的變形分區，難以僅以單一淺層活動斷層加以解釋，較可能反映控制花東縱谷與海岸山脈之深部構造作用，或與板塊隱沒相關之構造幾何差異有關。該現象顯示海岸山脈近期活動型態，可能受到其下方構造系統之影響，例如中央山脈斷層與縱谷斷層之整體活動特性。其中，中央山脈斷層是否向東延伸並截切海岸山脈，進而造成南北段構造回應差異，為一項值得後續深入探討的議題；其幾何型態可由地震分布特徵加以推測（Huang and Wang, 2022），顯示花東地區地表變形具有明顯的深部構造控制特性。此類震後構造行為轉變與南北差異現象，為理解花東地區構造演化與地震動力學的重要線索，亦值得於後續研究中進一步整合地震學、地質調查與高解析度地表變形資料加以驗證。

4-3 水準測量資料與雷達資料比對成果

調查區域中有四條長期觀察之水準測線，分別是嶺頂至龍澗測線、光復至豐濱測線、紅葉至靜浦測線、以及東成至富岡測線（圖 4-57）。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。最後選用品質最佳的 2022 年 9 月 19 日至 2024 年期間的 PSI 東西向與垂直向速度場作為主要依據，然而東部地區斷層活動型態複雜，除西向逆衝外，普遍伴隨顯著走向滑移，地表水平變形同時包含東西向與南北向分量。在此情況下，僅依賴單一升、降軌 LOS 觀測，難以穩定拆解出可靠的東西向或南北向速度場，於解算過程中易引入較大不確定性與誤差。相較之下，LOS 觀測對垂直向位移的敏感度較高，且垂直向解算結果之可信度相對較佳，因此本研究以垂直向速度作為主要呈現成果，並同時搭配升軌與降軌成果，以提供三種觀測角度的交叉驗證。垂直向速度場未包含 20220323 長濱地震、20220620 光復地震以及 20220917~18 關山 - 池上地震的同震變形，水準測量施測時間為 2022 年 4 月至 2024 年 4 月，兩者資料除了觀測時間有差異外，水準測線在震後皆有進行測量，觀測資料包含同震變形，垂直向僅供輔助判斷。

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。

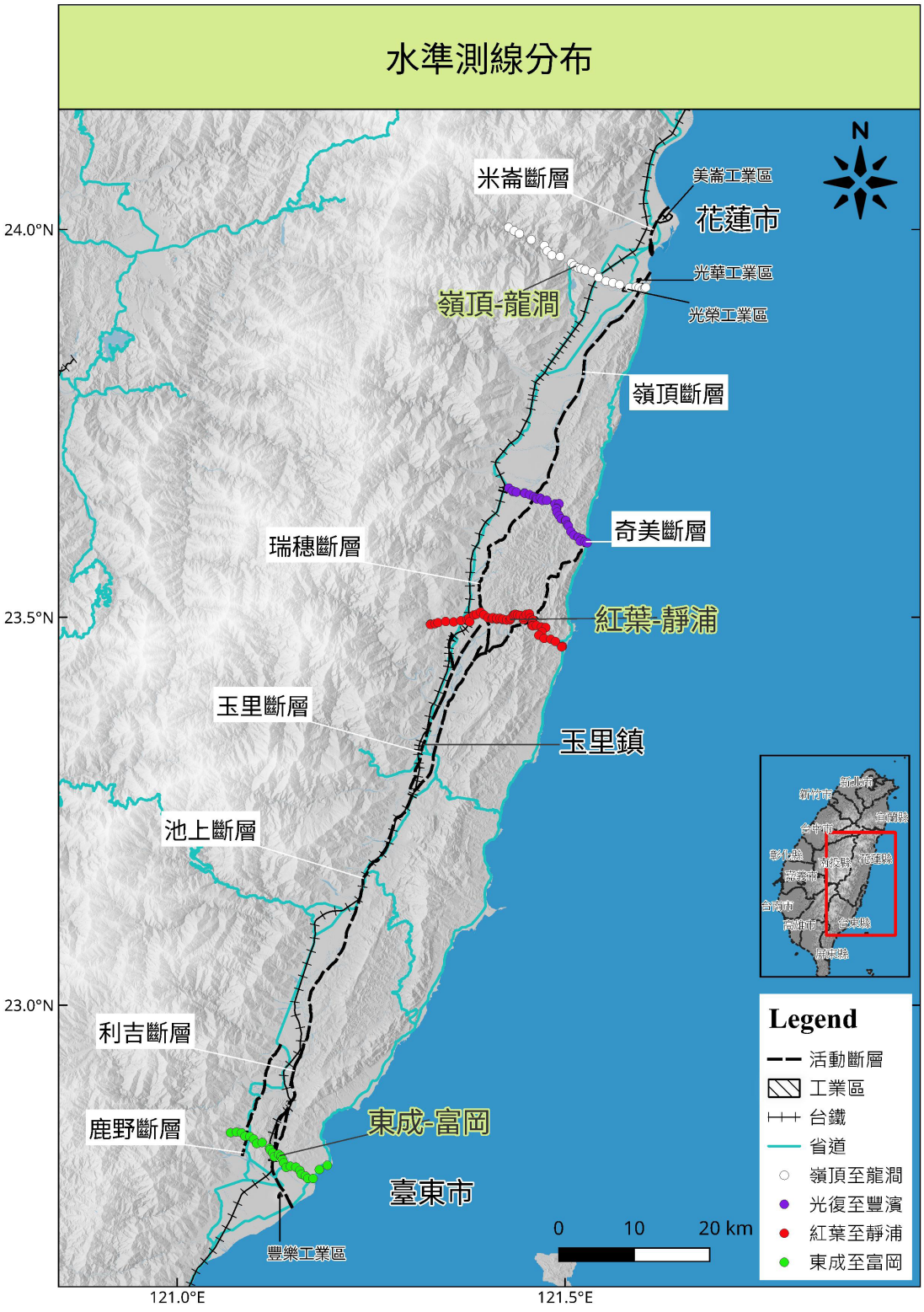


圖 4-57：水準測線分布。

Figure 4-57：Locations of leveling profiles.

4-3-1 嶺頂至龍澗測線

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層，剖面（圖 4-58）長約 20 公里（投影至剖面方向）。以 GNSS 連續站 TUNM（藍色三角形）為參考點，對水準點 9108 及雷達資料進行校正。從圖中可見，升軌與降軌 PSI 結果均呈現明顯向東視衛星方向的縮短（抬升）趨勢，與水準測量的抬升結果一致，顯示兩者在變形方向上相互印證。靠近嶺頂斷層（LDG）處，兩種資料皆未顯示明顯的速率梯度，表示在 2022~2024 年期間該斷層活動性有限。整體變形以區域性抬升為主，推測可能與 2024 年 4 月 3 日花蓮地震的同震變形效應相關。局部地形較高區域的 PSI 速率略為離散，可能受山區回波訊號較弱及幾何失配影響。

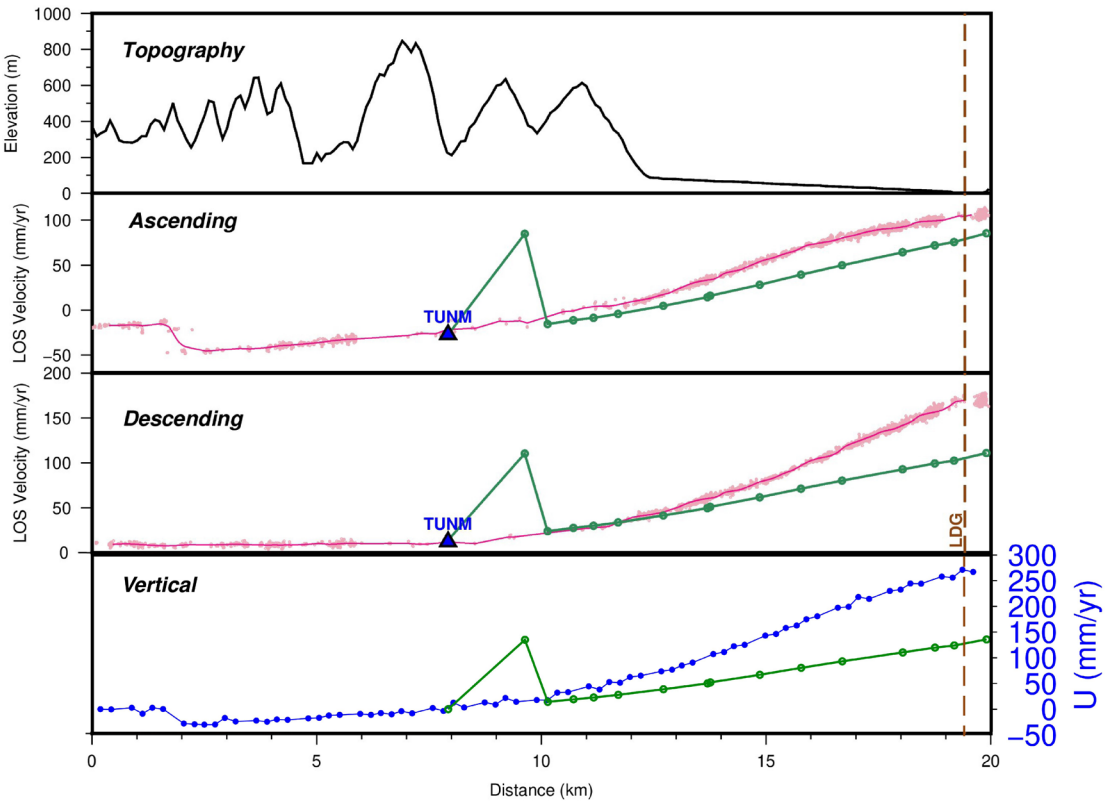


圖 4-58：水準測線 - 嶺頂至瀧澗測線與 PSI 資料比對。由上至下為地形高程、升軌 (Ascending) 影像比對、降軌 (Descending) 影像比對及垂直向比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSI 速度值投影至水準測線上，藍點為 500 公尺格點垂直向速度值投影至水準測線上，使用影像區間為 20220919~2024，未包含 20220323 長濱地震、20220620 光復地震以及 20220917~18 關山 - 池上地震的同震變形。藍色三角形為參考點 TUNM(9108)。LDG 為嶺頂斷層。

Figure 4-58: Comparison of PSI and Lingding-Takigami leveling route. From top to bottom are topography, ascending track, and descending track and vertical velocity; green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity projected to the leveling route; blue dots represent vertical velocity projected to the leveling route, vertical velocity derived from SAR images spanning 20220919-2024, and excluding coseismic deformation of the 20220323, the 20220620 and the 20220917-18 earthquakes; the blue triangle is the reference station TUNM(9108). Vertical dashed lines indicate the location of active faults; LDG is the Lingding fault.

4-3-2 光復至豐濱測線

光復至豐濱測線橫跨瑞穗斷層（RSI）與奇美斷層（CMI），剖面（圖 4-59）長約 13 公里。由於側線最東側的 GNSS 連續站 FONB（藍色三角形）為參考點，校正水準點 G991 及雷達資料。由圖可見，升軌與水準測量結果在東側（靠近豐濱）吻合度高，均呈現向東方向輕微抬升的趨勢；而在西側（靠近光復），PSI 速率略為偏離水準結果，顯示相位回復誤差或 PS 點稀疏造成的影響。瑞穗斷層附近可見輕微速率變化，但幅度不大，未達顯著構造變形程度。整體而言，2022~2024 年期間該測線變形幅度低，主要差異集中於中央山脈邊緣，可能與地形遮蔽與資料品質有關。

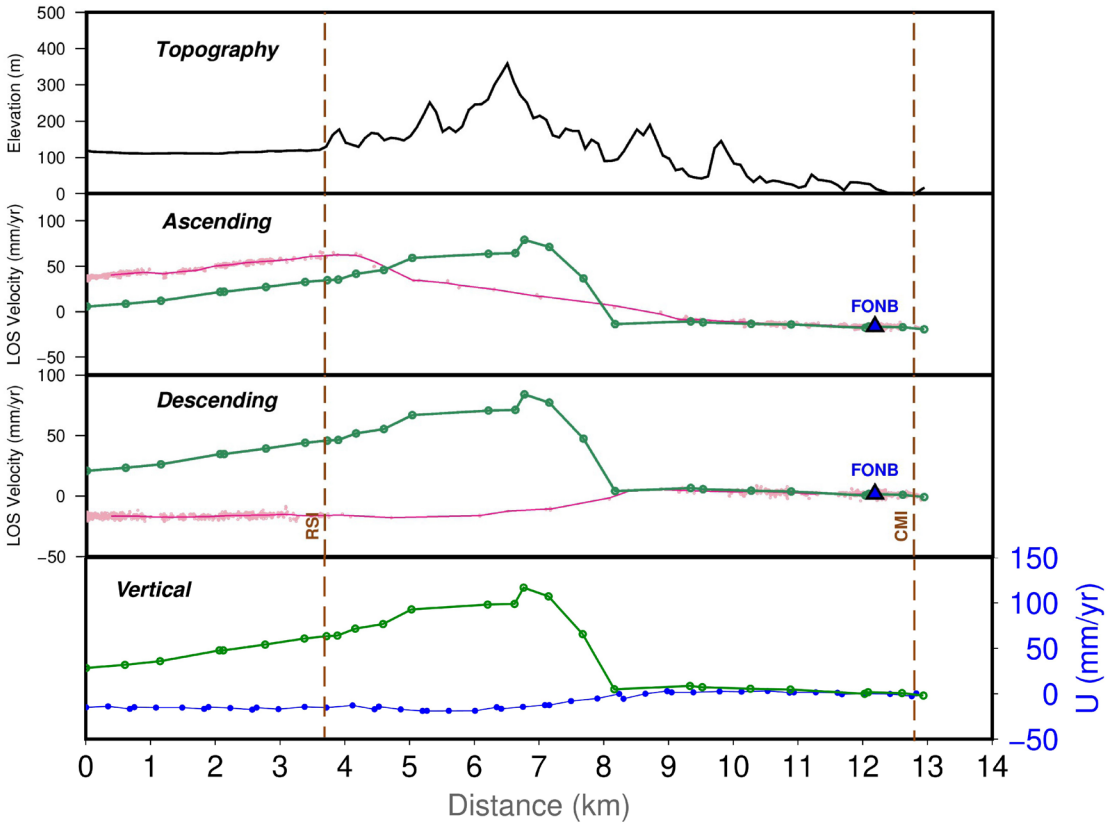


圖 4-59：水準測線 - 光復至豐濱測線與 PSI 資料比對。由上至下為地形高程、升軌 (Ascending) 影像比對、降軌 (Descending) 影像比對及垂直向比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSI 速度值投影至水準測線上，藍點為 500 公尺格點垂直向速度值投影至水準測線上，使用影像區間為 20220919~2024，未包含 20220323 長濱地震、20220620 光復地震以及 20220917~18 關山 - 池上地震的同震變形。藍色三角形為參考點 FONB(G991)。RSI 為瑞穗斷層、CMI 為奇美斷層。

Figure 4-59: Comparison of PSI and Guangfu-Toyohama leveling route in ascending track. From top to bottom are topography, ascending track, descending track and vertical velocity; green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity projected to the leveling route; blue dots represent vertical velocity projected to the leveling route, vertical velocity derived from SAR images spanning 20220919-2024, and excluding coseismic deformation of the 20220323, the 20220620 and the 20220917-18 earthquakes; the blue triangle is the reference station FONB(G991). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, RSI is the Rueyshui fault, and CMI is the Chimei fault.

4-3-3 紅葉至靜浦測線

紅葉至靜浦測線橫跨玉里斷層（YLI）、瑞穗斷層（RSI）及奇美斷層（CMI），剖面（圖 4-60）長約 18 公里。以 GNSS 連續站 JMRS（藍色三角形）為參考點，校正水準點 GA27 及雷達資料。根據圖中結果，升軌影像在整體趨勢上與水準測量相符，僅於海岸山脈段因植被覆蓋導致 PS 點稀疏可能存在相位回復誤差。降軌資料整體變化幅度較大，可能原因為相位回復誤差。升軌資料在跨越瑞穗斷層處可見速率梯度變化，顯示潛在的構造活動跡象；兩種影像跨越奇美斷層的區域則因植被遮蔽，無法明確辨識速度差異。

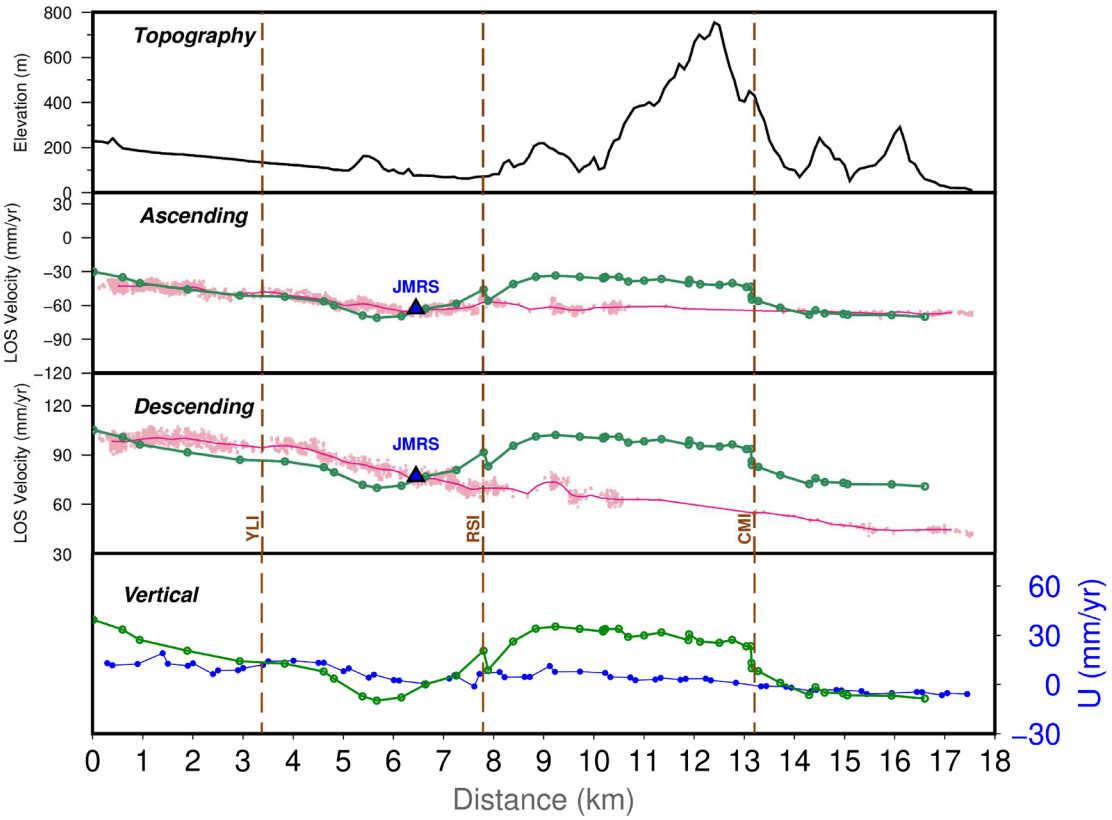


圖 4-60：水準測線 - 紅葉至靜浦測線與 PSI 資料比對。由上至下為地形高程、升軌 (Ascending) 影像比對、降軌 (Descending) 影像比對及垂直向比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSI 速度值投影至水準測線上，藍點為 500 公尺格點垂直向速度值投影至水準測線上，使用影像區間為 20220919~2024，未包含 20220323 長濱地震、20220620 光復地震以及 20220917~18 關山～池上地震的同震變形。藍色三角形為參考點 JMRS(GA27)。YLI 為玉里斷層、RSI 為瑞穗斷層、CMI 為奇美斷層。

Figure 4-60: Comparison of PSI and Hongye-Jingpu leveling route in ascending track. From top to bottom are topography, ascending track, and descending track and vertical velocity; green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity projected to the leveling route; blue dots represent vertical velocity projected to the leveling route, vertical velocity derived from SAR images spanning 20220919-2024, and excluding coseismic deformation of the 20220323, the 20220620 and the 20220917-18 earthquakes; the blue triangle is the reference station JMRS(GA27). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, YLI is the Yuli fault, RSI is the Rueyshui fault, and CMI is the Chimei fault.

4-3-4 東成至富岡測線

東成至富岡測線橫跨鹿野斷層（LYH）與利吉斷層（LCI），剖面（圖 4-61）長約 14 公里。以 GNSS 連續站 S104（藍色三角形）為參考點，校正水準點 A086 及雷達資料。整體而言，2022~2024 年期間，升軌與降軌雷達影像的速率變化均不大，視衛星速率主要分布於 ±20 mm/yr 之間。兩方向的影像在跨越鹿野斷層處可見輕微的視衛星速率轉折，而跨越利吉斷層的變化不明顯。降軌資料於海岸山脈東側呈現輕微下陷（約 10mm/yr），但水準結果未顯示此現象，需進一步確認是否源於相位回復誤差。

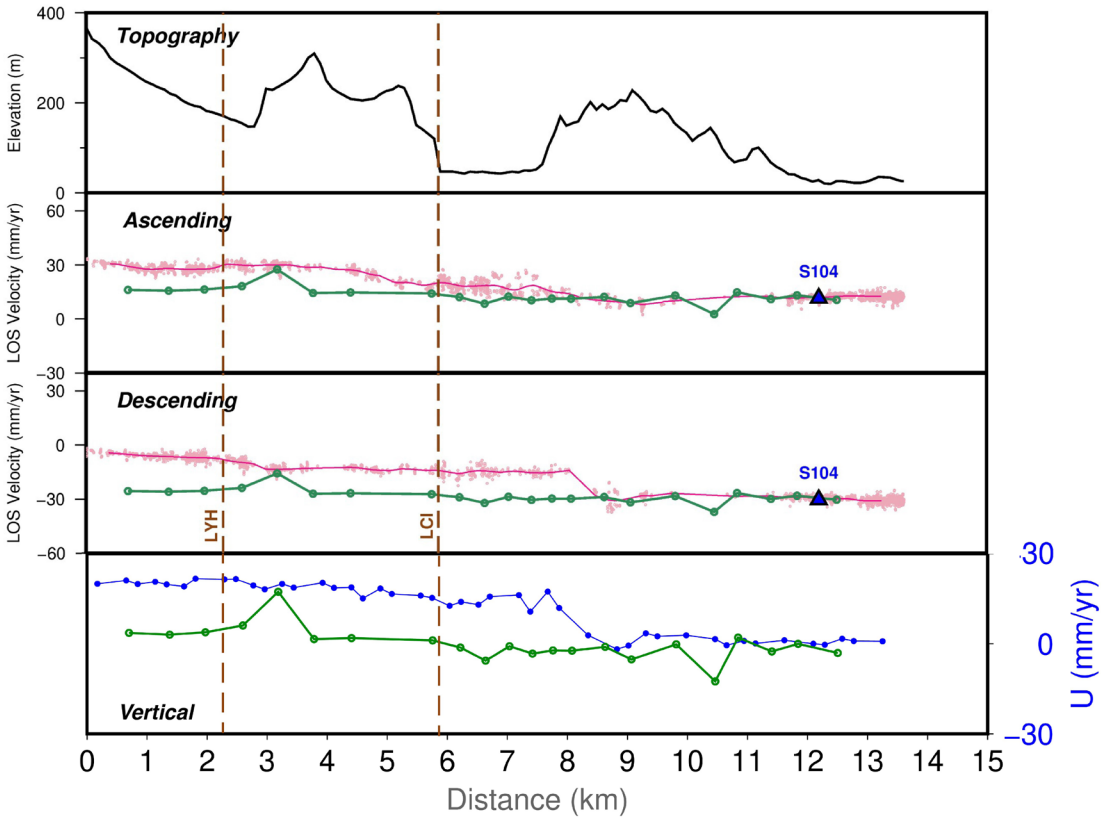


圖 4-61：水準測線 - 東成至富岡測線與 PSI 資料比對。由上至下為地形高程、升軌 (Ascending) 影像比對、降軌 (Descending) 影像比對及垂直向比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSI 速度值投影至水準測線上，藍點為 500 公尺格點垂直向速度值投影至水準測線上，使用影像區間為 20220919~2024，未包含 20220323 長濱地震、20220620 光復地震以及 20220917~18 關山～池上地震的同震變形。藍色三角形為參考點 S104(A086)。LYH 為鹿野斷層、LCI 為利吉斷層。

Figure 4-61: Comparison of PSI and Dongcheng-Fugang leveling route in ascending track. From top to bottom are topography, ascending track, descending track and vertical velocity; green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity projected to the leveling route; blue dots represent vertical velocity projected to the leveling route, vertical velocity derived from SAR images spanning 20220919-2024, and excluding coseismic deformation of the 20220323, the 20220620 and the 20220917-18 earthquakes; the blue triangle is the reference station S104(A086). Vertical dashed lines indicate the location of active faults; LYH is the Luyeh fault, LCI is the Lichi fault.

4-4 同震變形

花東地區位於板塊交界處，地震活動頻繁，於 2022 年至 2024 年發生五起 ML 規模大於 6 的顯著地震事件，我們嘗試以 PSI 時間序列，取出最接近地震事件前後的兩幅影像位移量相減，作為該次事件的同震位移，藉由穩定的 PS 點位評估各地震事件的地表變形資訊。以下個子節針對各地震同震變形敘述。

4-4-1 2022 年 03 月 23 日長濱地震 PSI 同震位移

2022 年 3 月 23 日長濱近海發生芮氏規模 6.7 之顯著地震，震央位於長濱近海，深度約 25.7 公里，兩分鐘後發生芮氏規模 6.2 的餘震，震央位置相近，位於長濱鄉海岸山脈與花東縱谷交界附近，深度約 22.6 公里。由於本次事件前在降軌道方向並無可用影像，本節僅針對升軌道 PSI 成果進行說明。

圖 4-62 為升軌道方向 PSI 時間序列推估的 2022 年 03 月 23 日長濱地震衛星視方向（Line-of-Sight, LOS）同震變形資訊。所使用的震前影像時間為 2022 年 03 月 14 日，震後影像為 2022 年 03 月 26 日，影像間隔 12 日。暖色系為靠近衛星移動，冷色系為遠離衛星移動。結果顯示，花蓮至瑞穗一帶主要呈現冷色系，LOS 位移量約為 -3~-5 cm，至奇美斷層附近轉為靠近衛星移動，震央附近 LOS 位移量約為 5~10 cm，玉里斷層、池上斷層上盤至臺東市 LOS 位移約為 6~10 cm，下盤位移量相對較小。

根據經濟部地質調查及礦業管理中心的地震地質調查報告（2022），池上斷層多處出現因壓縮產生的地表破裂，部分區域在原有的破裂處產生新生破損，包含瑞穗到玉里間可見地表的局部破裂，高寮大橋、玉里舊鐵道橋、長富大橋、崙天大橋與寶華大橋等橋樑伸縮縫亦呈現原已存在之左移與抬升破裂現象，並於此次地震中伴隨產生新生破損。關山鎮、池上鄉萬安、大坡池、富里鄉道路沿線可觀察到建物受擠壓而產生新生破損；池上斷層跡沿線的河堤與道路等人工建物也伴有新生擠壓破損。在瑞穗斷層沿線，則可在泛舟遊客中心建物觀察到新生的擠壓破損，瑞穗大橋下方秀姑巒溪河床

也記錄到裂隙。奇美斷層西南段的玉里鎮春日至德武地區，以及最東北側豐濱地區，其斷層跡上的人工結構物同樣也出現有受擠壓的新生破壞。

整體而言，地質調查顯示本次地震事件主要破裂分布於瑞穗以南至臺東關山一帶，其破裂形式以擠壓與左移變形為主，與 PSI 觀測範圍及升軌道 LOS 觀測呈現衛向衛星移動的變形趨勢相符。然而，GNSS 連續站與 PSI 的 LOS 觀測比對略有差異，升軌道 PSI 與 GNSS 同震變形量比對的結果 (圖 4-63) 呈現低相關性，迴歸斜率僅有 0.17，R^2 也只有 0.07，RMSE 則為 1.77 cm。尤其在玉里斷層以南的測站，其相對 FLNM 的同震位移量多落在 ±2 cm 範圍內，顯著小於 PSI 所推估的位移量，此差異可能與 LOS 觀測幾何、局地場址效應或 GNSS 與 PSI 對地表變形的敏感方向不同等因素有關。

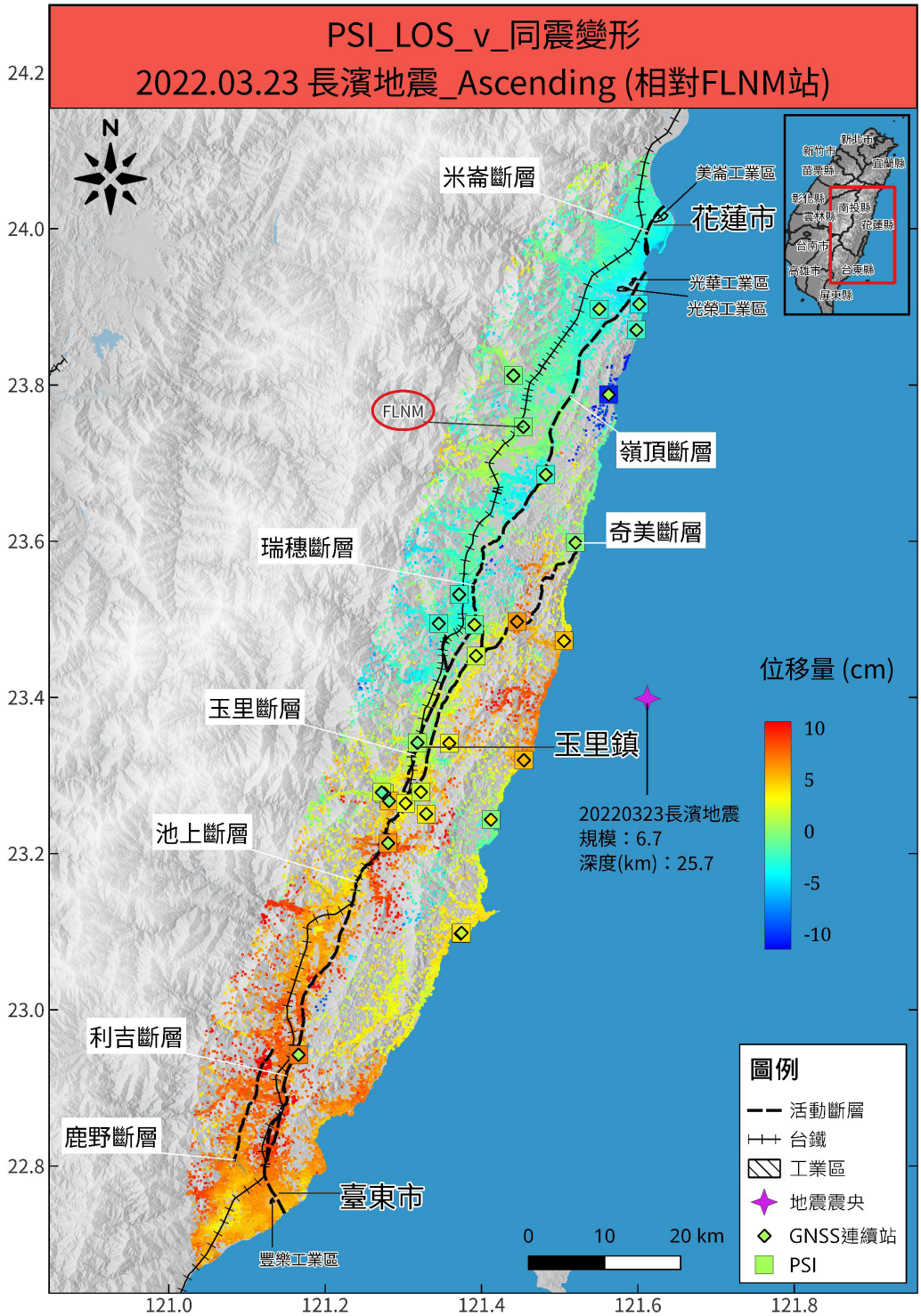


圖 4-62：2022 年 3 月 23 日長濱地震升軌道 PSI 之同震變形。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 FLNM，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-62：Coseismic deformation of the March 23, 2022 Changbin earthquake derived from ascending-orbit PSI. Warm colors indicate motion toward the satellite, while cool colors indicate motion away from the satellite. The reference point is the continuous GNSS station FLNM. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

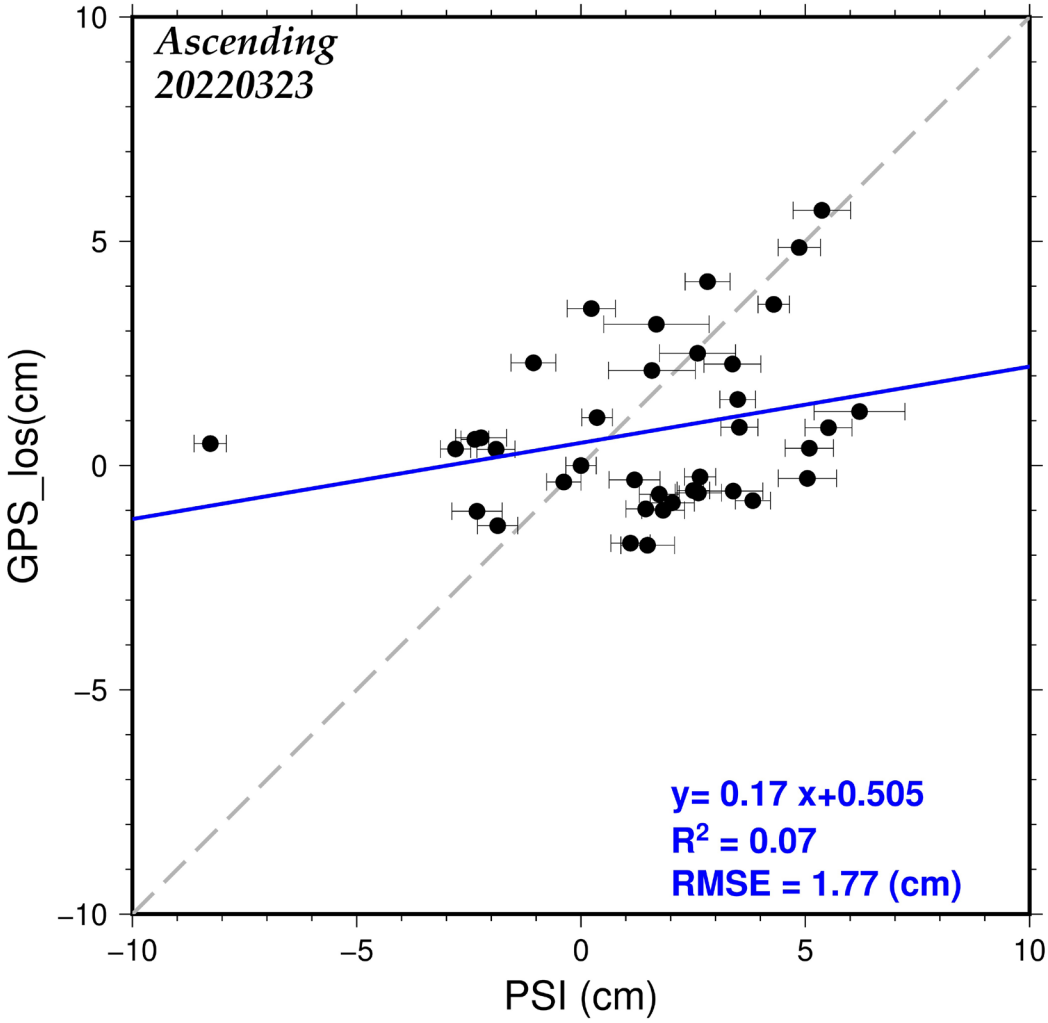


圖 4-63：2022年3月23日長濱地震升軌道PSI與GNSS連續站同震變形量對比。參考站為 GNSS 連續觀測站 FLNM 站。

Figure 4-63: Comparison of coseismic deformation between ascending-orbit PSI and continuous GNSS stations for the Changbin earthquake on March 23, 2022.The reference station is the continuous GNSS station FLNM.

4-4-2 2022 年 06 月 20 日光復地震 PSI 同震位移

2022 年 06 月 20 日，花蓮縣光復鄉發生芮氏規模 6.0 地震，震源深度僅 6.8 公里，屬淺源地震。此次地震未造成大範圍的地表破裂，但可由 PSI 觀測結果到明顯的地表變形。本次事件在降軌道方向並無影像，因此以下僅針對升軌道 PSI 的成果進行說明。

圖 4-64 顯示由升軌道 PSI 時間序列取得 LOS 同震位移資訊，震前影像日期為 2022 年 06 月 18 日，震後影像為 2022 年 06 月 30 日，影像間隔 12 日。圖中暖色系代表靠近衛星移動，冷色系代表遠離衛星移動，整體變形呈現明顯的南北向差異：玉里至臺東一帶主要呈現遠離衛星移動，位移量約介於 -5~-15 cm；而花蓮市至壽豐之間則可見向衛星靠近的位移，約為 5~6 cm。變形最明顯的區域位於震央周邊，尤其是嶺頂斷層上盤，LOS 位移可達 15 cm 以上；相較之下，下盤僅有局部小範圍呈現約 -3~-5 cm 的遠離衛星位移，顯示能量在斷層兩側快速衰減。

根據經濟部地質調查及礦業管理中心的地震地質調查報告（2022），本次地震事件僅有零星地表破裂但破裂帶相當集中，主要位於花蓮溪河床一帶，包括中興大橋、箭瑛大橋、山興西側至加里洞西南側，長度約十公里。PSI 在這些區域確實量測到數公分級的位移，與地質調查觀察相符。此外，壽豐溪口與馬太鞍溪口的沙洲出現噴砂與伸張裂隙的現象，對應位置的 LOS 位移量可達約 15 公分，顯示 PSI 對於捕捉鬆散沉積環境中的局部變形也相當敏感。

綜合地質調查與 PSI 的結果可以看出，此次地震的主變形區集中在鳳林至光復一帶，PSI 的變形分布與地質調查紀錄的破裂與噴砂位置吻合，顯示其具有良好的空間解析能力。在跨方法比較方面，圖 4-65 顯示升軌道 PSI 與 GNSS 同震變形量的比對結果，顯示兩者趨勢一致。迴歸斜率達 0.9，R^2 也有 0.74，RMSE 為 1.78 cm，大部分 GNSS 測站相對於 FLNM 站的同震位移介於 0~3 cm 之間，僅震央附近少數測站達約 15 公分的位移。GNSS 與 PSI 的差異普遍小於 3 cm，顯示兩者在本次事件中兩種技術具有良好的相互驗證性。

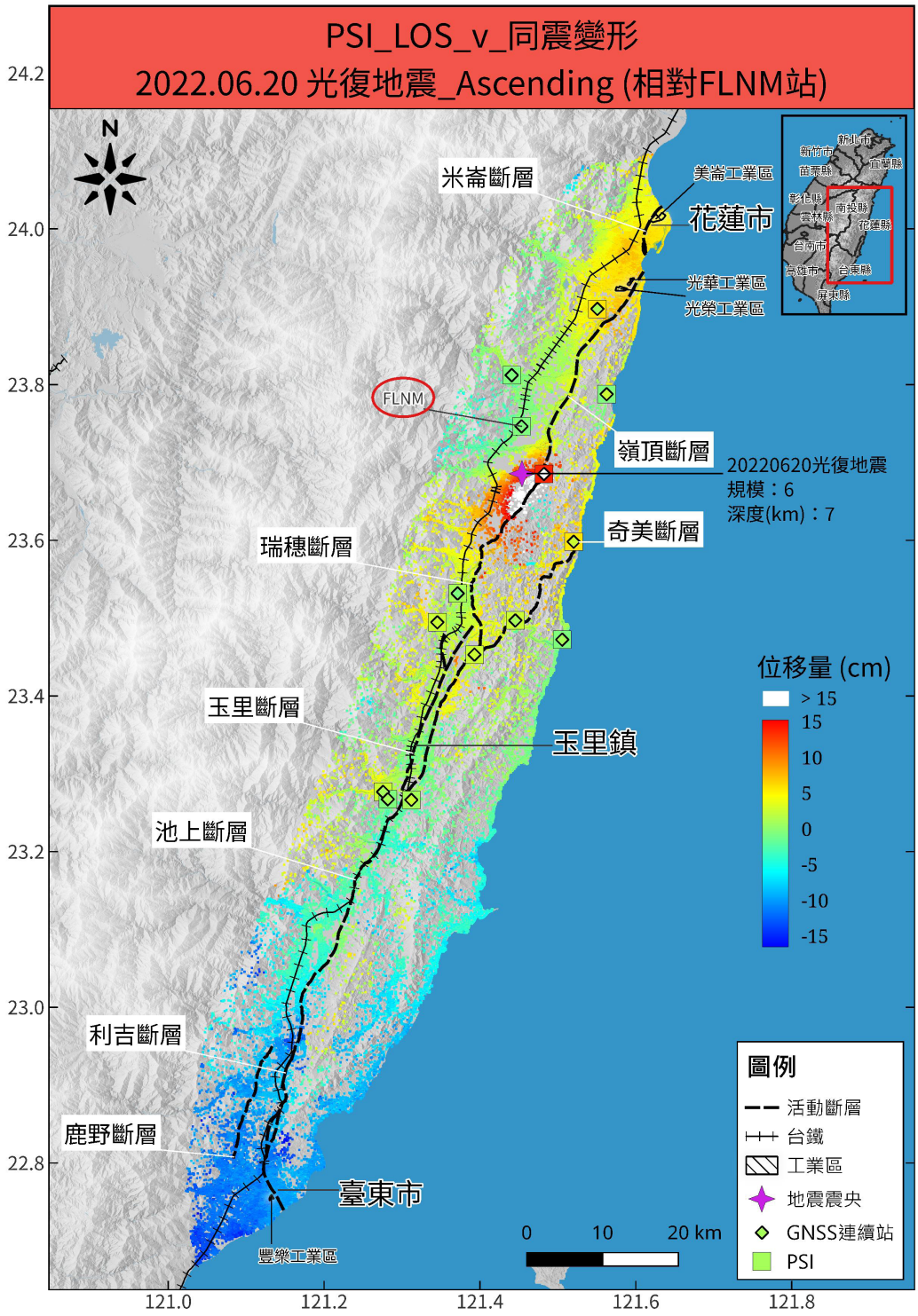


圖 4-64：2022 年 06 月 20 日光復地震升軌道 PSI 之同震變形。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 FLNM，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-64：Coseismic deformation of the June 20, 2022 Guangfu earthquake derived from ascending-orbit PSI. Warm colors indicate motion toward the satellite, while cool colors indicate motion away from the satellite. The reference point is the continuous GNSS station FLNM. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

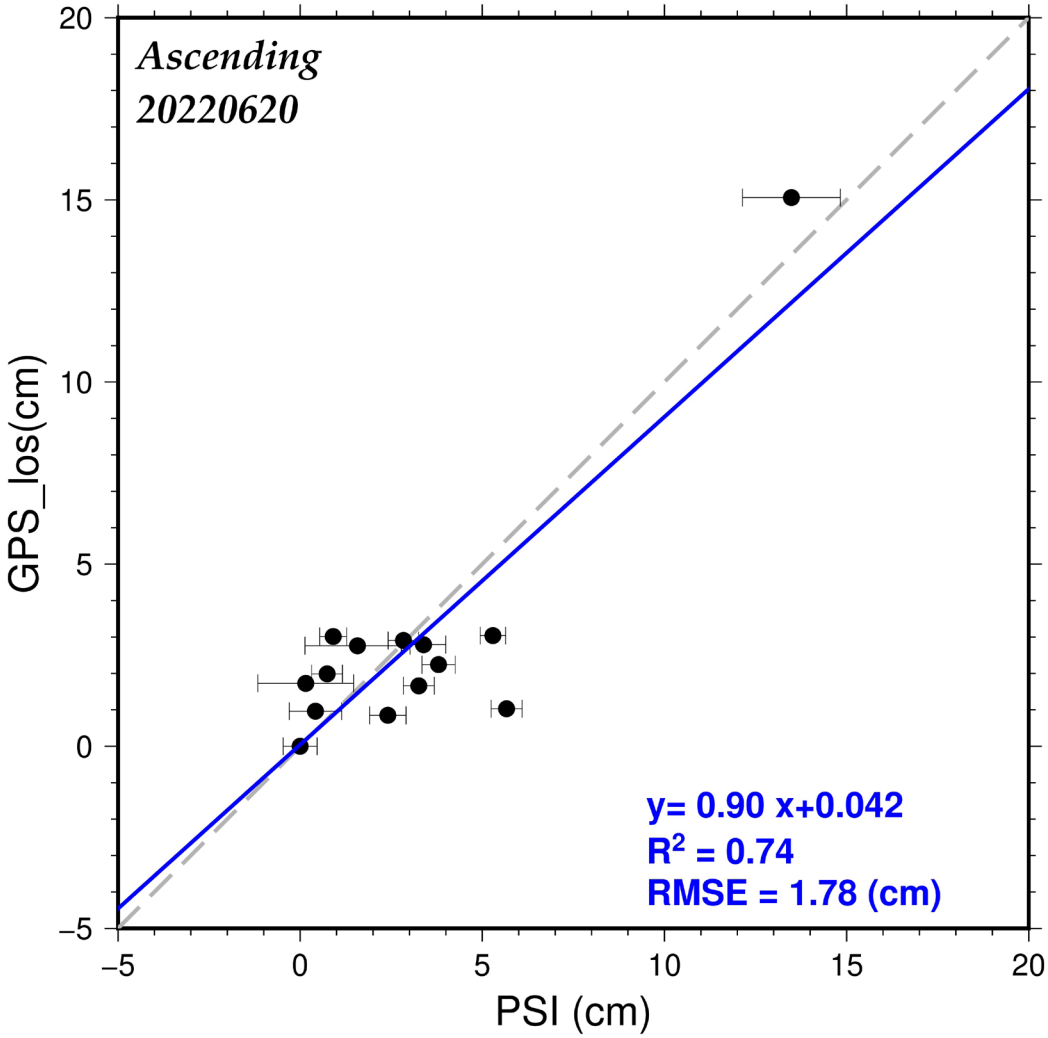


圖 4-65：2022 年 6 月 20 日光復地震升軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。參考站為 GNSS 連續觀測站 FLNM 站。

Figure 4-65: Comparison of coseismic deformation between ascending-orbit PSI and continuous GNSS stations for the Guangfu earthquake on June 20, 2022.The reference station is the continuous GNSS station FLNM.

4-4-3 2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震 PSI 同震位移

2022 年 09 月 17 日臺東關山首先發生芮氏規模 6.6 地震，震源深度約為 7.3 公里，翌日 09 月 18 日於池上再度發生芮氏規模 6.8 地震，震源深度約 7 公里，兩次地震造成玉里、池上與關山一帶多處建物、道路、橋梁與鐵路受損，並沿玉里斷層與池上斷層產生顯著地表破裂。

圖 4-66 顯示自升軌道 PSI 時間序列取得的池上地震 LOS 同震變形，震前影像日期為 2022 年 9 月 10 日，震後影像為 9 月 22 日，影像間隔 12 天。暖色系為靠近衛星移動，冷色系為遠離衛星移動，結果顯示，池上至鹿野一帶為主要的靠近衛星變形區，其 LOS 位移量約 10~15 cm；而池上斷層東側至海岸線以及臺東市區則呈現遠離衛星移動，位移量約 -5~-10 cm，南北向變形呈現明顯的正負對比。玉里以北至瑞穗的變形量逐漸減弱，約介於 -3~4 cm 之間。

圖 4-68 顯示降軌道方向的 LOS 同震變形，震前影像為 9 月 12 日，震後影像為 9 月 24 日。結果顯示震央以北（瑞穗至池上）的靠近衛星位移量更為顯著，可達 15~20 cm；而震央以南至臺東以及沿海區域則呈現 -5~-15 cm 的遠離衛星移動，位移幅度比升軌方向更大，南北兩側同樣呈現分明的正負變形帶。花蓮至瑞穗之間的變形量較小，約介於 -3~3 cm。

根據經濟部地質調查及礦業管理中心的地震地質調查報告（2022），0917 與 0918 地震在玉里斷層及池上斷層皆有發現地表破裂現象，但地表破裂特性不同；玉里斷層的變形主要為左移伴隨西側抬升，破裂集中於玉里至長良一帶，位移量大且連續；池上斷層則呈現西向逆衝伴隨左移運動，但其構造行為更加複雜，在東里至富里區域出現向東逆衝的破裂，使得破裂帶兩側的抬升方向相反，富里至電光之間也局部觀察到東側抬升的破裂型態。

PSI 觀測與地質調查所的破裂分布高度一致，呈現強烈的南北向差異。震央以北，升軌 PSI 主要顯示遠離衛星的變形，而降軌 PSI 則以靠近衛星為主；震央以南則呈現升軌靠近衛星、降軌遠離衛星的組合。此種軌道間方向相反但幅度一致的現象，代表該區域的主要同震位移以向西的水平運動為主，而向上的抬升量相對較小。圖

4-67, 圖 4-69 為升、降軌道 PSI 與 GNSS 同震變形量比對的結果，比對結果顯示兩筆資料相關性不佳，迴歸斜率僅有 0.5，R^2 甚至最高僅有 0.06，RMSE 約為 25~29 cm，差異主要集中於部分區域的極端值，並顯著影響迴歸結果。在升軌道方向中，玉里以北至花蓮市之間的 GNSS 位移與 PSI 相符，而玉里以南至臺東一帶的 GNSS 位移普遍較 PSI 大，尤其在破裂帶密集的玉里—池上區域，GNSS 觀測到的同震位移常較 PSI 高出 10 至 15 公分。降軌道方向的比對亦呈現類似趨勢：瑞穗以北 GNSS 與 PSI 良好吻合，而瑞穗以南至鹿野一帶 GNSS 亦普遍大於 PSI。但在池上斷層東側的上盤，GNSS 顯示沉降行為，而 PSI 觀測到靠近衛星的位移，兩者呈現明顯相反，推測與地震造成的破裂型態差異、LOS 投影方向以及 PSI 在擬合過程中受資料密度與視線幾何影響較大有關。值得注意的是，鹿野往南至臺東市的 GNSS 與 PSI 再度呈現一致，顯示南段的位移型式相對單純且穩定。

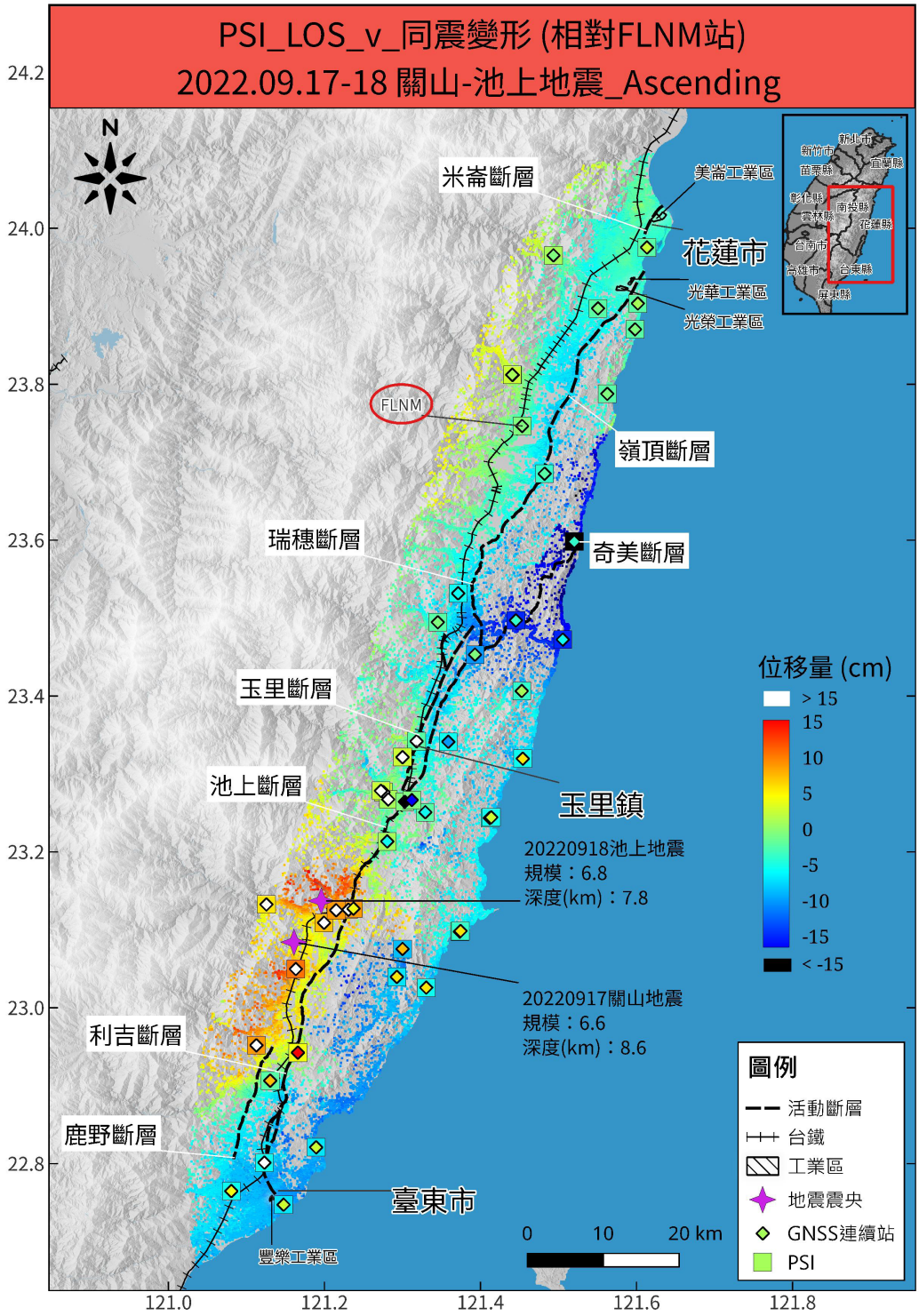


圖 4-66：2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震升軌道 PSI 之同震變形。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 FLNM，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-66：Coseismic deformation of the September 17~18, 2022 Guanshan-Chihshang earthquake derived from ascending-orbit PSI. Warm colors indicate motion toward the satellite, while cool colors indicate motion away from the satellite. The reference point is the continuous GNSS station FLNM. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

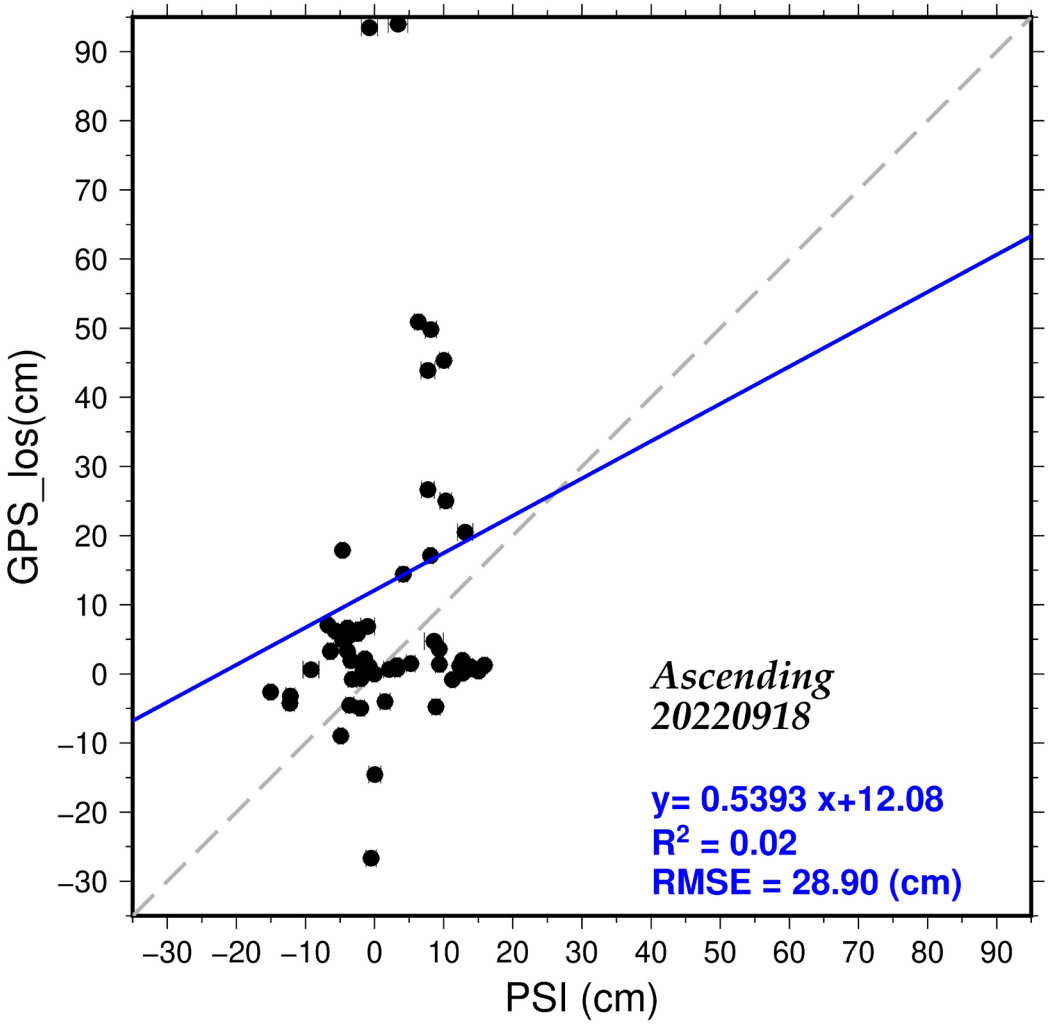


圖 4-67：2022 年 9 月 17~18 日關山 - 池上地震升軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。參考站為 GNSS 連續觀測站 FLNM 站。

Figure 4-67: Comparison of coseismic deformation between ascending-orbit PSI and continuous GNSS stations for the Guanshan-Chihshang earthquake on September 17~18, 2022.The reference station is the continuous GNSS station FLNM.

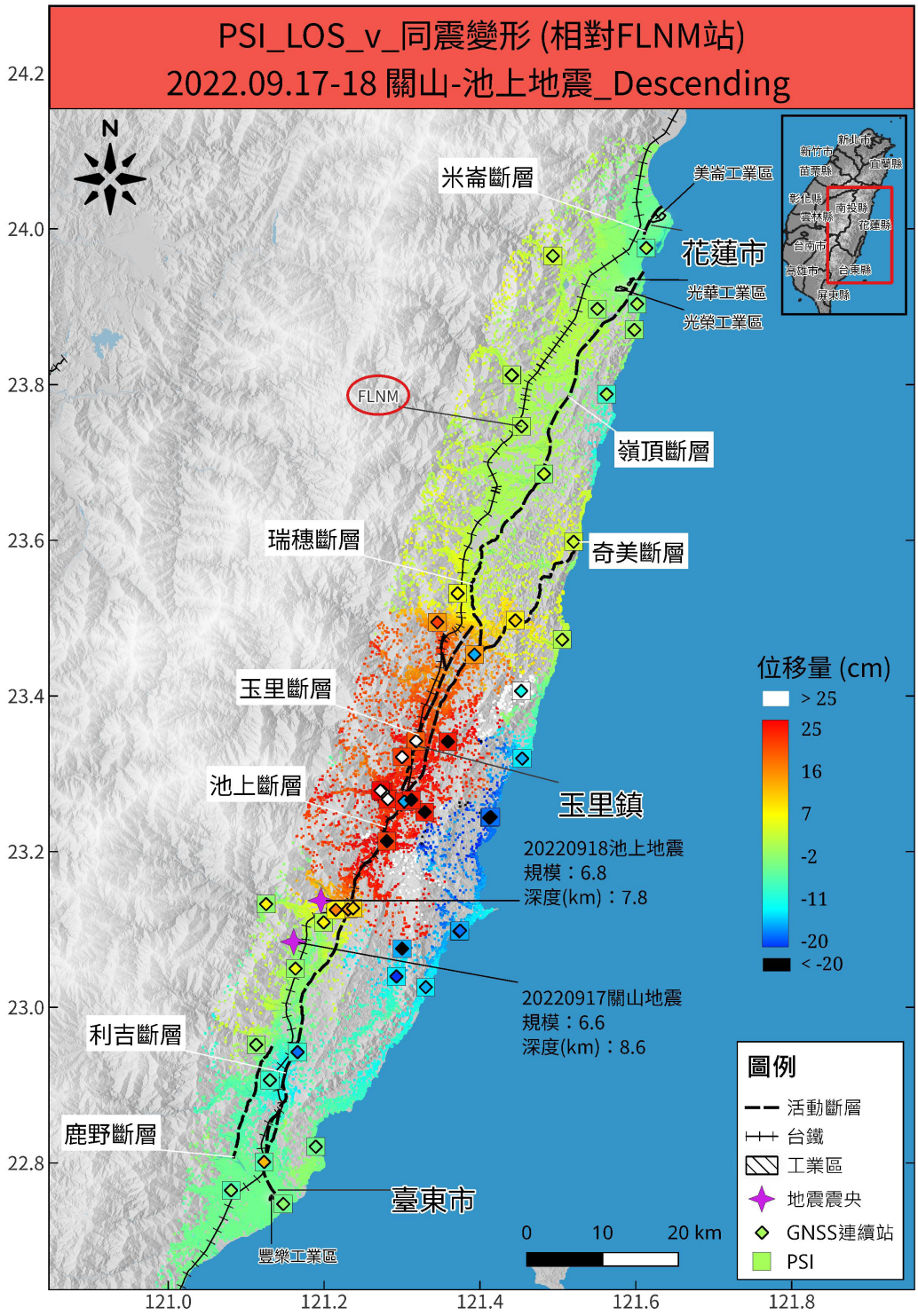


圖 4-68：2022 年 09 月 17~18 日關山 - 池上地震降軌道 PSI 之同震變形。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 FLNM，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-68：Coseismic deformation of the September 17~18, 2022 Guanshan-Chihshang earthquake derived from descending-orbit PSI. Warm colors indicate motion toward the satellite, while cool colors indicate motion away from the satellite. The reference point is the continuous GNSS station FLNM. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

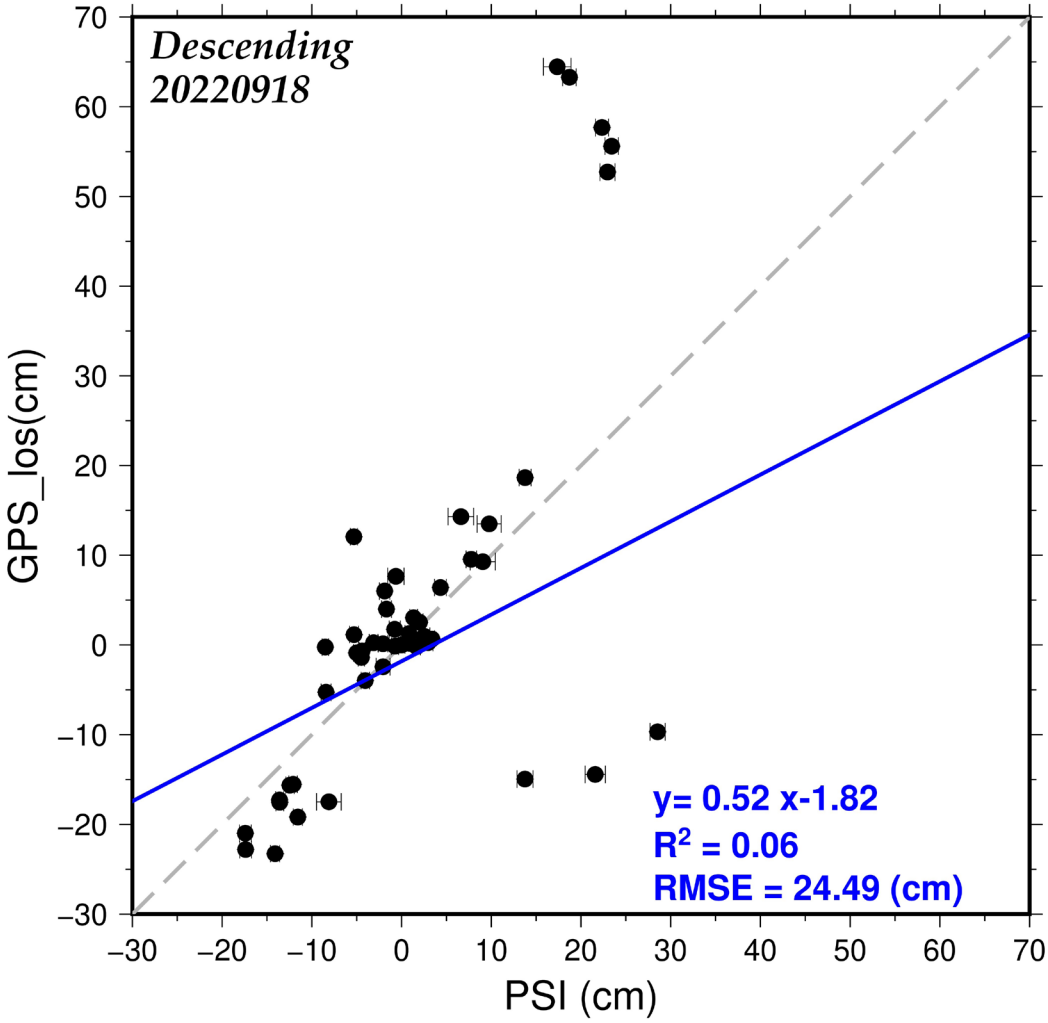


圖 4-69：2022 年 9 月 17~18 日關山 - 池上地震降軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。參考站為 GNSS 連續觀測站 FLNM 站。

Figure 4-69: Comparison of coseismic deformation between descending-orbit PSI and continuous GNSS stations for the Guanshan-Chihshang earthquake on September 17~18, 2022.The reference station is the continuous GNSS station FLNM.

4-4-4 2024 年 04 月 03 日花蓮地震 PSI 同震位移

2024 年 04 月 03 日花蓮發生芮氏規模 7.2 的地震，震央位於壽豐，震源深度約為 22.5 公里，此次地震在花蓮造成花蓮多處建物、道路與公共設施受損，亦引發多起山崩落石事件，影響範圍廣泛，立即受到社會與學界高度關注。

圖 4-70 顯示由升軌道 PSI 時間序列推算的同震 LOS 變形，震前影像為 2024 年 3 月 27 日，震後影像為 4 月 8 日，影像間隔 12 日。結果顯示，同震變形高度集中於震央周邊、花蓮市區與米崙臺地一帶，整體呈現向衛星靠近的位移，LOS 變形量約 35~43 cm，沿花東縱谷南向（瑞穗、玉里、池上、鹿野）同震位移量迅速減弱，約介於 -3~3 cm。

圖 4-72 顯示由降軌道方向 PSI 時間序列推算的同震 LOS 變形，顯示與升軌方向極為一致的空間分布與變形趨勢。震前影像時間為 2024 年 03 月 29 日，震後影像為 2024 年 04 月 10 日，影像間隔 12 日。同震變形集中震央周遭至花蓮市與米崙臺地，呈現靠近衛星移動，LOS 位移量介於 28~34 cm，沿花東縱谷南向（瑞穗、玉里、池上、鹿野）同震形變迅速衰減，同震變形介於 -5~-3 cm。

根據經濟部地質調查及礦業管理中心的地震地質調查報告（2024），本次地震造成的災情多集中於建物損壞與邊坡崩落，並未在米崙斷層、嶺頂斷層等主要活動斷層上觀測到明顯的地表破裂，顯示此事件屬於地震波造成的破壞，而非斷層滑移所致。PSI 在斷層附近亦未觀測到明顯的速度落差，與此結論相符。另一方面，花蓮港及太平洋公園沿海區域出現約 40~60 cm 的抬升，向北至和平港，向南至鹽寮漁港則呈現漸減的空間趨勢，與 PSI 所量測的變形範圍與量級相符，顯示此事件主要表現為廣域性的地殼抬升。

整體而言，升、降軌 PSI 結果呈現高度一致性。圖 4-71, 圖 4-73 為升、降軌道 PSI 與 GNSS 同震變形量的比對結果，顯示無論升軌或降軌道方向，PSI 和 GNSS 的量值均相當接近。升軌道比對的迴歸斜率為 0.85，降軌道為 1.16，R^2 均達 0.9，RMSE 約 3 cm 左右，顯示 PSI 在本次地震中具有高度可靠性。整體的同震變形型態主要

同為垂直向抬升，米崙臺地與沿海地區的強烈抬升最為顯著，且 PSI 所揭示的同震變形範圍亦與花蓮市災損集中區地震破壞分布高度吻合，尤其是花蓮市區建物受損較為集中的區高度吻合，顯示其具有良好的空間解析能力。

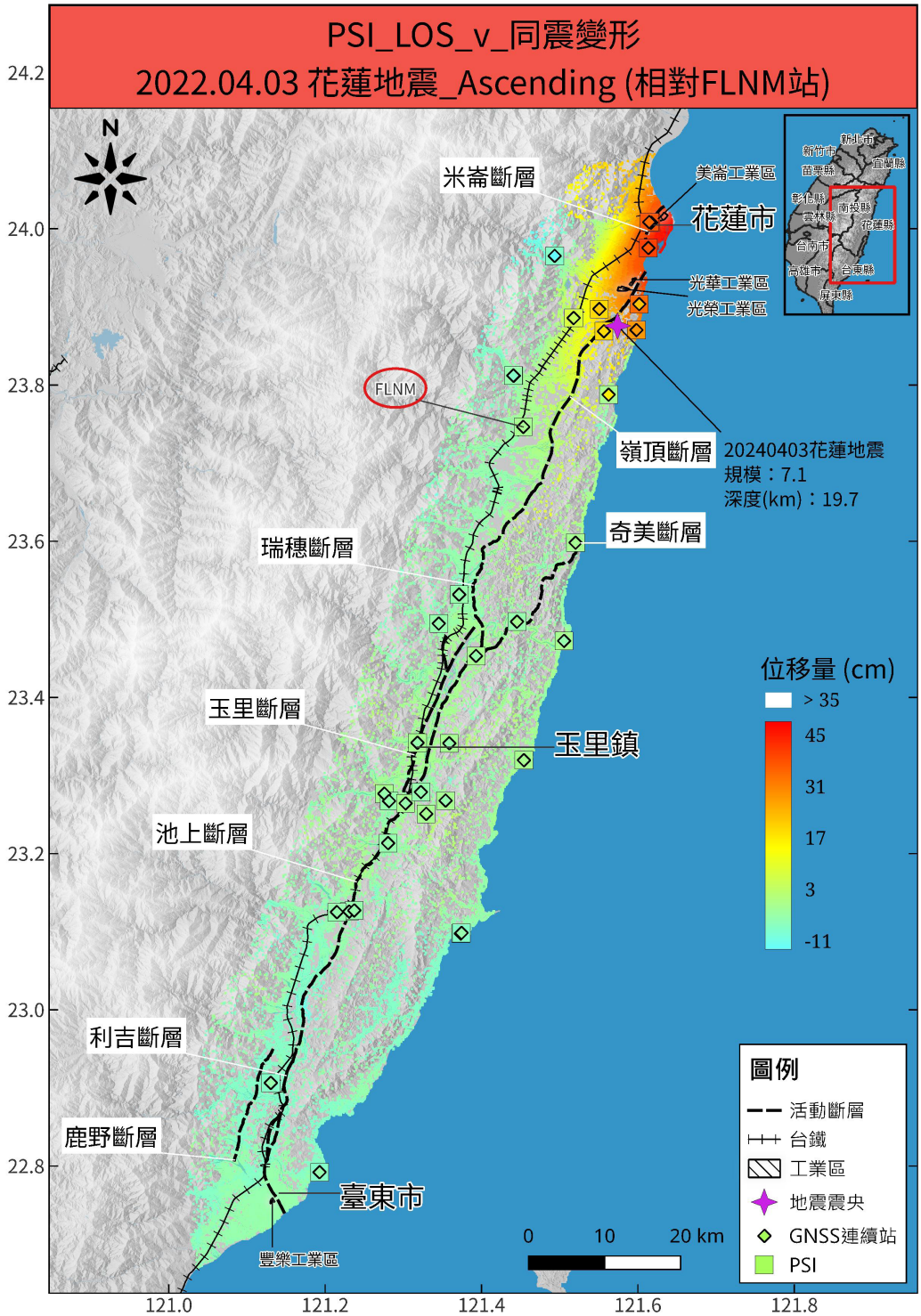


圖 4-70：2024 年 04 月 03 日花蓮地震升軌道 PSI 之同震變形。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 FLNM，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-70：Coseismic deformation of the April 3, 2024 Hualien earthquake derived from ascending-orbit PSI. Warm colors indicate motion toward the satellite, while cool colors indicate motion away from the satellite. The reference point is the continuous GNSS station FLNM. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

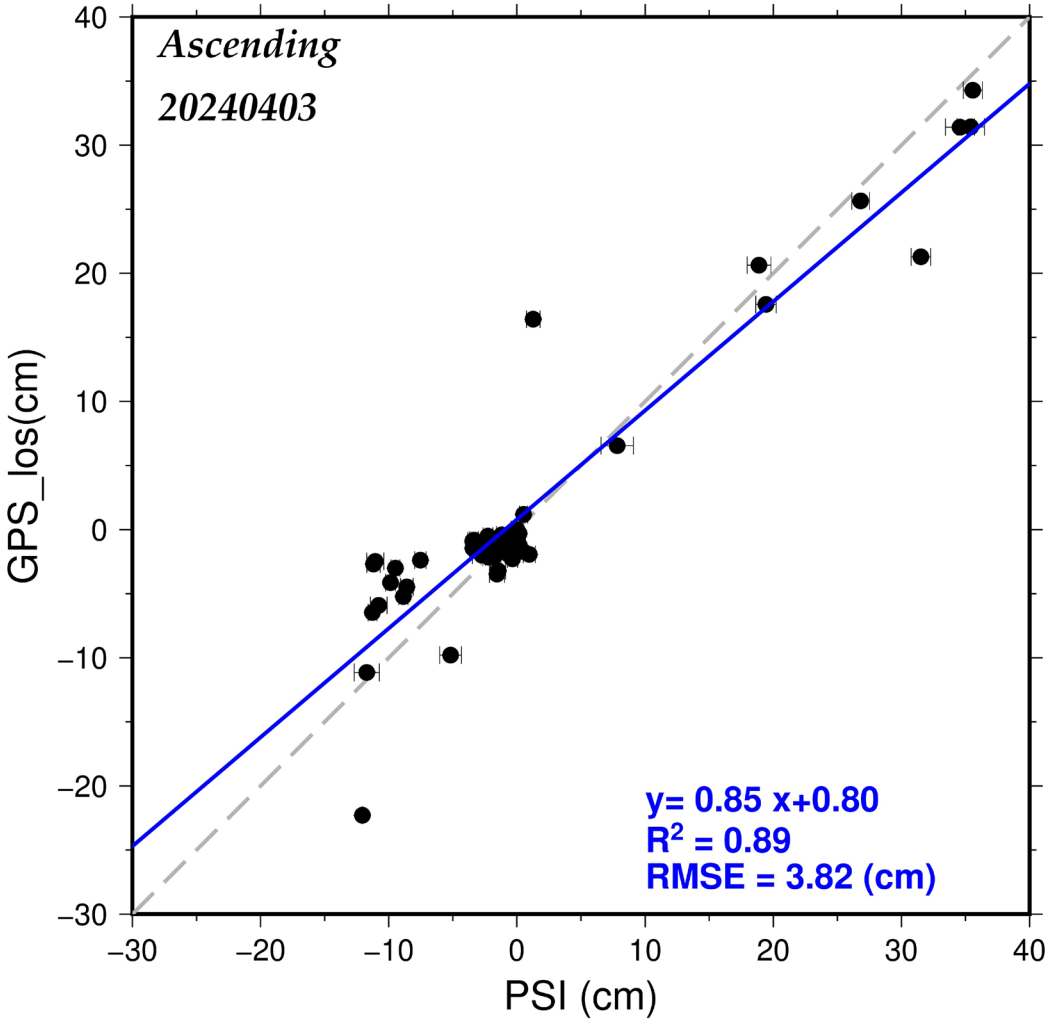


圖 4-71：2024 年 4 月 3 日花蓮地震升軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。參考站為 GNSS 連續觀測站 FLNM 站。

Figure 4-71: Comparison of coseismic deformation between ascending-orbit PSI and continuous GNSS stations for the Hualien earthquake on April 3, 2024.The reference station is the continuous GNSS station FLNM.

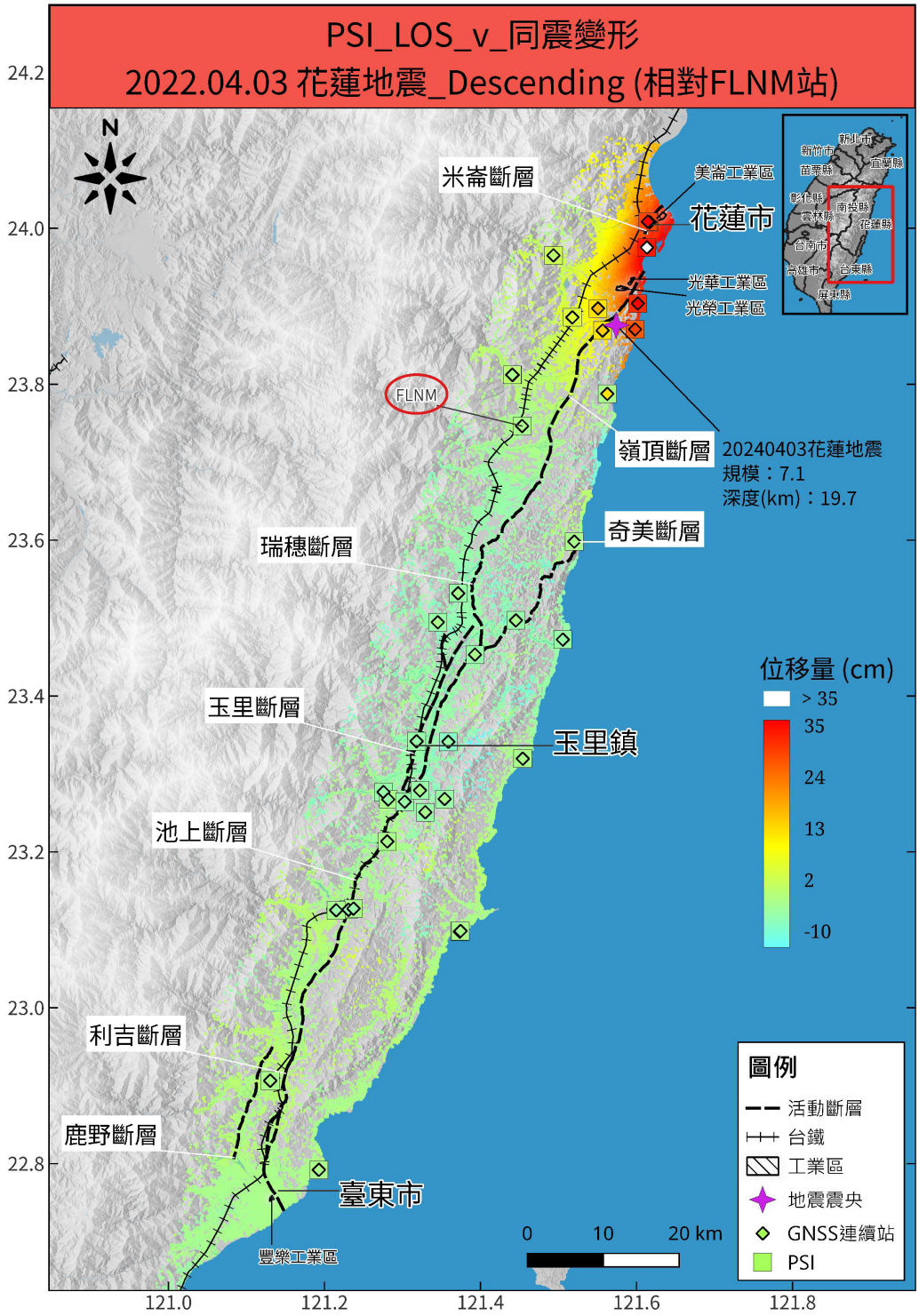


圖 4-72：2024 年 04 月 03 日花蓮地震降軌道 PSI 之同震變形。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 FLNM，菱形為同時期連續 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向，正方形為 PSI 於 GNSS 連續站的 LOS 速度值。

Figure 4-72：Coseismic deformation of the April 3, 2024 Hualien earthquake derived from descending-orbit PSI. Warm colors indicate motion toward the satellite, while cool colors indicate motion away from the satellite. The reference point is the continuous GNSS station FLNM. Color-coded diamonds represent the projection of 3-directions GNSS velocity to the LOS direction towards the satellite.

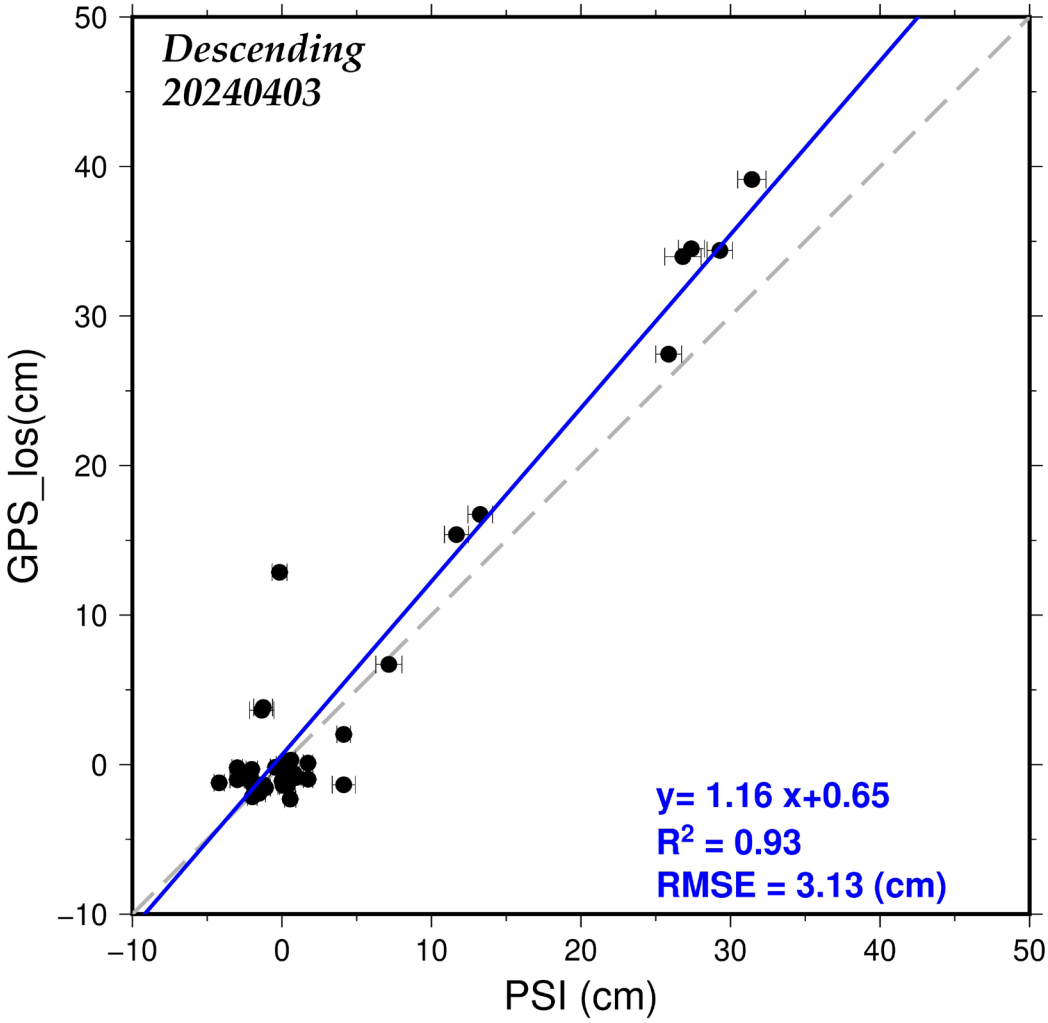


圖 4-73：2024 年 4 月 3 日花蓮地震降軌道 PSI 與 GNSS 連續站同震變形量對比。參考站為 GNSS 連續觀測站 FLNM 站。

Figure 4-73: Comparison of coseismic deformation between descending-orbit PSI and continuous GNSS stations for the Hualien earthquake on April 3, 2024.The reference station is the continuous GNSS station FLNM.

4-5 重要區域觀測結果

本年度計畫於東部地區觀測區域內的板塊交界地震頻繁之人口密集區，選定花蓮市、玉里鎮及臺東市週邊作為重要觀測區域，主要考量其位於花東縱谷與海岸山脈交界帶，且分別鄰近米崙斷層、玉里斷層與利吉斷層等重要活動構造，對區域地表變形與地震災害風險具有高度關聯性。以下將根據本年度利用雷達衛星影像分析解算之 LOS 速度場、雷達速度場剖面分析與雷達速度場時間序列的分析結果，進行重要區域的地表變形分析結果討論。

4-5-1 花蓮市地區

花蓮市位於花東縱谷北段，市區內通過米崙斷層，為區域內具代表性的活動斷層構造。綜合 2022~2024 年雷達影像解算成果顯示，不論是整體觀測期間，或區分關山 - 池上地震前後之時段，升、降軌道的 PSI 速度場皆呈現區域性且連續的整體位移型態，包含通過市中心的米崙斷層周圍，均未觀察到明顯的跨斷層速度梯度變化。跨斷層速度剖面分析結果亦支持上述觀察結果；通過花蓮市之 P1 剖面於 2022~2024 年全期及關山 - 池上地震後之資料中，剖面東西兩側 LOS 速度與雷達資料解算的垂直速度皆呈現由西往東平滑增加的變形趨勢，未出現可對應於米崙斷層之速度落差 ; 而在關山 - 池上地震前時段，剖面兩側則幾乎未見顯著速度變化。

在時間序列分析結果中，位於花蓮市的 HL1-HL1’ 和 HL2-HL2’ 觀測點顯示，米崙斷層主要的速度變化集中在 2024 年 4 月 3 日的花蓮地震事件 ; 相較之下，2022 年長濱、光復及關山 - 池上地震事件，雖然可辨識同震影響，但對長期速度趨勢之影響相對有限，震後多迅速回復至震前狀態。

整體而言，2022~2024 年間花蓮市地區的地表變形型態以平滑且具區域一致性的抬升為主，顯示主要變形訊號可能受到深部構造或整體塊體運動所控制。觀測期間內，通過市區的米崙斷層未顯示可辨識的漸進性活動，而 2024 年 4 月 3 日的花蓮地震及為該區最具影響力的變形事件。

4-5-2 玉里鎮地區

玉里鎮位於花東縱谷中段，市區鄰近玉里斷層，該斷層為花東縱谷內具高活動性的主要構造之一。綜合雷達影像解算結果顯示，在 2022 關山 - 池上地震發生之前，玉里斷層兩側並未呈現顯著的跨斷層速度變化；然而在關山 - 池上地震發生後的時段，玉里斷層相對兩側開始出現明顯的速度差異，使得在 2022~2024 全時段速度場中亦可清楚辨識其變形特徵。跨斷層速度剖面分析結果亦顯示，通過玉里鎮中心的 P6 剖面顯示，在 2022~2024 年全期及關山 - 池上地震後的資料中，剖面 LOS 速度與雷達資料解算之垂直速度，在跨越玉里斷層皆呈現顯著的速度差異，顯示玉里斷層於震後呈現明顯的垂直抬升行為；相較之下，於地震前時段，玉里斷層兩側的變化並不明顯。此一比對結果顯示，關山 - 池上地震事件後，玉里斷層的活動行為可能產生顯著的改變。

在時間序列分析結果中，分布於玉里斷層兩側的 YL-YL’ 觀測點顯示，玉里斷層東側於 2022 年關山 - 池上地震期間出現大幅的同震位移，且震後變形影響持續時間相對較長；相較之下，長濱地震、光復地震及 2024 年花蓮地震雖亦造成可辨識的同震位移，但其震後變形多於數日至數周內回復至震前水準，對長期變形趨勢的影響相對有限。

整體而言，2022~2024 年間玉里鎮地區的地表變形行為主要受到 2022 年關山 - 池上地震所引發的構造活動主導。即使於雷達速度場分析中已扣除同震位移量，仍可清楚觀察到地震前後玉里斷層變形型態的顯著轉變；地震前呈現由玉里斷層到池上斷層延伸的廣域變形趨勢，而地震後則轉以玉里斷層附近為主的顯著的垂直抬升行為。此類構造行為轉變直接反映於玉里鎮市區及其周邊人口密集區之地表變形特徵，顯示玉里鎮為花東縱谷中對大型地震事件反應高度敏感的城鎮之一，未來仍需持續透過高解析度測地監測與現地調查，以掌握其潛在構造風險

4-5-3 臺東市地區

臺東市位於花東縱谷南段，市區北側有利吉斷層通過，為縱谷南段重要構造之一，其活動特性對區域地表變形具有潛在影響。綜合雷達影像速度場成果中顯示，不論在 2022~2024 年整期時段，或關山 - 池上地震前後之時段，升、降軌道 PSI 速度場皆顯示臺東市及利吉斷層周圍呈現區域性且連續的整體位移型態，且 LOS 速度多落於 ±2 cm/yr 以內，未顯示明顯的跨斷層速度梯度。跨斷層速度剖面分析結果顯示，通過臺東市的 P11 剖面在關山 - 池上地震前後呈現不同的變形趨勢。剖面東側相對西側於地震前表現為緩慢抬升的地表活動，於地震後則轉為逐漸下降的變形行為；然而，整體變形仍以連續的區域位移為主，未觀察到可明確對應於利吉斷層的梯度速度變化。

在時間序列分析結果中，位於臺東市並分布於利吉斷層兩側的 TT-TT’ 觀測點顯示，東、西兩側在 2022~2024 年間的長期速度變化量不大，在四起地震事件中均可辨識輕微的同震影響，但其變形多於震後短時間內回復，對長期變形趨勢之影響相對有限。

整體而言，2022~2024 年間臺東市地區的地表變形型態以平滑、區域性的變形場為主，顯示位於市區北側的利吉斷層於觀測期間並未呈現可辨識的漸進性活動。值得注意的是關山 - 池上地震前後，臺東市區相對海岸山脈的地表變形趨勢出現轉變，速度場結果顯示海岸山脈相對臺東市呈現持續下陷的行為，此一現象反映該區變形可能受深部構造或區域性構造調整所控制，未來仍有持續監測與整合分析的必要。

第五章、結論與建議

本年度計畫以2022~2024年間的雷達衛星影像，針對臺灣東部地區進行地表變形監測，並對聚焦於重要活動斷層與人口密集之重點區域，進行地表變形特徵分析及跨斷層速度剖面探討。觀測期間共發生五起規模6以上之地震事件，包括2022年3月23日的長濱地震，6月20日的光復地震、9月17~18日的關山-池上地震，以及2024年4月3日的花蓮地震。由於東部地區呈南北狹長，且各次地震影響範圍具明顯的區域差異性，本計畫以關山-池上地震為時間分界，將雷達影像資料區分為「2022~2024全期」、「關山-池上地震前(2022~20220917)」、「關山-池上地震後(2022019~2024)」三時段，分別進行PSInSAR時序解算，重建升、降軌道之速度場。整體分析共使用升軌道影像91幅及降軌道影像80幅，並與同期GNSS連續站與移動站速度比對，以檢核解算品質。

GNSS比對成果顯示，在關山-池上地震後至2024年底的資料品質最佳，迴歸斜率接近1，R^2約0.9，RMSE多落在3 cm/yr以內，顯示震後地表趨於穩定，PSI解算結果具高度可信度。相較之下，2022年期間受到長濱地震、光復地震以及關山-池上地震等多重事件影響，加上部分時段缺少降軌道影像，使得迴歸斜率僅約0.5，R2約0.4~0.5，RMSE接近或或略小於4 cm/yr，整體解算品質相對較低。此外，東部地區受到山區地形起伏及植被高度覆蓋，永久散射體點位密度有限，相較於臺灣西部及平原地區，亦對整體解算品質造成較為顯著的影響。

綜合長期速度場與跨斷層剖面結果，可將東部地區自北往南劃分為四個主要變形區段。花蓮市一帶於2024年花蓮地震後呈現顯著的抬升，惟米崙斷層與嶺頂斷層兩側並未觀察到明顯的速度差，顯示該區變形並非直接由這兩條斷層錯動所主導。光復地區在嶺頂斷層西側呈現明顯的高速變形區，其空間分布與2022年6月20日光復地震之同震形變範圍相符。進一步向南至玉里—關山一帶，瑞穗斷層、玉里斷層及池上斷層附近普遍出現明顯的跨斷層速度梯度，反映2022年9月17~18日關山-池上地震的同震破裂與後續的餘震調整作用。再往南至臺東市地區，鹿野斷層和利吉斷層兩側未呈現顯著速度差，但關山-池上地震前後的速度場呈現相反趨勢，顯示海岸山脈

於該次地震後相對縱谷呈現持續性下陷，此現象亦與GNSS、精密水準測量及前人研究成果相符。

綜合三時段之速度場分析、11條跨斷層速度剖面，以及GNSS對比結果，本年度成果顯示花東地區的地表變形同時受構造活動、重大地震同震與震後效應、材料邊界與地形環境共同影響。2022~2024年期間之變形場並非單純反映個別活動斷層的獨立錯動，而是呈現多事件、多構造及多尺度交互作用下的複合結果。特別是在長濱地震、光復地震、關山-池上地震及2024花蓮地震等複數事件疊加影響下，多處斷層周邊展現出具空間連續性的顯著同震與震後變形，為理解花東地區構造變形機制與地震活動特性提供了重要觀測依據。

整體而言，永久散射體差分干涉(PSInSAR)為一項具高度潛力之大地測量技術，其優點在於具備高空間點解析度與高點位密度，在適當的資料條件與處理流程下，其速度的精度可達次公分等級，與共站的GNSS觀測結果差異僅為每年數毫米，能有效描繪斷層位置與變形行為。然而，PSInSAR亦存在其方法上的限制，例如影像數量不足、C波段雷達於高植被與山區環境中同調性較低，導致點位密度下降，增加斷層監測的不確定性。雷達差分干涉可以監測地震、也可以相當合理的呈現地震斷層位置，然而當地表變形梯度過大時，可能超出雷達干涉之解析能力，因此在大地震中易產生相位解纏困難。儘管如此，在現有各類大地測量技術中，尚無其他能在大範圍內提供如此高密度的空間變形資訊，使得PSInSAR在區域尺度之全面監測上仍具無可取代的優勢。

本計劃執行結果亦顯示，2022~2024年間東部地區連續發生多起規模較大的地震，並伴隨多處地表破裂，造成幅度大且影響範圍廣泛之地表變形，並與原先即具高度應變速率的背景場疊加。此一情況導致區域內難以選取長期穩定的參考點，增加不同觀測方法間之比對與率定難度。本次計劃遂需透過多個候選參考點進行測試，並評估其適用範圍，此執行經驗亦與往年度計畫存在顯著差異，凸顯東部地區高活動性構造環境對地表監測所帶來的挑戰。

Chapter 5：Conclusions and Recommendation

This project utilized radar satellite imagery acquired between 2022 and 2024 to monitor surface deformation in eastern Taiwan, with a particular focus on major active faults and densely populated key areas. During the observation period, five earthquakes with magnitudes greater than 6 occurred, including the March 23, 2022 Changbin earthquake, the June 20, 2022 Guangfu earthquake, the September 17~18, 2022 Guanshan-Chihshang earthquake, and the April 3, 2024 Hualien earthquake. Owing to the elongated north–south geometry of eastern Taiwan and the pronounced spatial variability of deformation associated with individual earthquakes, the Guanshan–Chihshang earthquake was adopted as a temporal boundary. Radar imagery was therefore divided into three periods: (1) the full period from 2022 to 2024, (2) the pre-Guanshan-Chihshang earthquake period (2022~September 17, 2022), and (3) the post-Guanshan-Chihshang earthquake period (September 19, 2022~2024). PSInSAR time-series analyses were performed for each period to reconstruct velocity fields from both ascending and descending tracks. A total of 91 ascending-track and 80 descending-track images were used, and the results were validated through comparisons with velocities from continuous and campaign GNSS stations.

The GNSS comparisons indicate that data acquired after the Guanshan–Chihshang earthquake and up to the end of 2024 exhibit the highest quality, with regression slopes close to unity, R^2 values of approximately 0.9, and RMSE values generally within 3 cm/yr. These results suggest that surface deformation became relatively stable after the earthquake and that the PSI-derived velocities are highly reliable. In contrast, the 2022 dataset was affected by multiple seismic events, including the Changbin, Guangfu, and Guanshan-

Chihshang earthquakes, as well as by the limited availability of descending-track images during certain periods. Consequently, the regression slopes are approximately 0.5, R^2 values range from 0.4 to 0.5, and RMSE values approach or slightly fall below 4 cm/yr, indicating reduced solution quality. In addition, dense vegetation cover and rugged topography in eastern Taiwan limit the density of permanent scatterers, further degrading the overall PSI performance relative to other regions of Taiwan.

Based on long-term velocity fields and cross-fault profile analyses, eastern Taiwan can be broadly divided into four deformation segments from north to south. In the Hualien area, significant uplift occurred following the 2024 Hualien earthquake; however, no pronounced velocity contrasts were observed across the Milun or Lingding faults, suggesting that the deformation was not directly driven by slip on these faults. In the Guangfu area, a prominent high-velocity zone was identified west of the Lingding fault, consistent with the co-seismic deformation associated with the June 20, 2022 Guangfu earthquake. Farther south, in the Yuli-Guanshan region, clear cross-fault velocity gradients were observed near the Ruisui, Yuli, and Chihshang faults, reflecting co-seismic rupture and subsequent post-seismic adjustment related to the September 17~18, 2022 Guanshan-Chihshang earthquake. In the Taitung area, no significant velocity contrasts were detected across the Luye and Lichi faults; however, opposite deformation trends were observed before and after the Guanshan–Chihshang earthquake, indicating persistent subsidence of the Coastal Range relative to the Longitudinal Valley. This phenomenon is consistent with observations from GNSS measurements, precise leveling, and previous studies.

Integrating the three-period velocity fields, eleven cross-fault profiles, and GNSS comparisons, the results demonstrate that surface deformation in the Hualien-Taitung region is controlled by the combined effects of tectonic activity, co-seismic and post-seismic

deformation from major earthquakes, lithological boundaries, and topographic conditions. The deformation field observed between 2022 and 2024 does not simply reflect independent slip on individual active faults, but rather represents a complex superposition of multiple events, structures, and spatial scales. In particular, the cumulative effects of the Changbin, Guangfu, Guanshan-Chihshang, and 2024 Hualien earthquakes produced spatially continuous co-seismic and post-seismic deformation around several fault zones, providing critical constraints for understanding tectonic deformation and seismic processes in eastern Taiwan.

Overall, Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR) is a powerful geodetic technique. Its principal advantage lies in its high spatial resolution and dense measurement coverage; under favorable conditions, velocity precision can reach the sub-centimeter-per-year level, with differences of only a few millimeters per year relative to co-located GNSS observations. This capability allows detailed characterization of fault locations and deformation behavior. Nevertheless, PSInSAR also has inherent limitations. Limited image availability, reduced coherence in mountainous and densely vegetated areas due to the C-band wavelength, and large deformation gradients that exceed the interferometric resolution can all degrade performance, particularly during large earthquakes when phase unwrapping becomes challenging. Despite these limitations, no other geodetic technique currently provides deformation measurements with comparable spatial density over large areas, making PSInSAR uniquely valuable for regional-scale deformation monitoring.

The results of this project further indicate that multiple large earthquakes occurred in eastern Taiwan between 2022 and 2024, several of which produced surface ruptures. These events generated large-magnitude, spatially extensive deformation that was superimposed on the already high background deformation rates of the region. As a result, identifying long-term stable reference

points proved challenging, complicating cross-method calibration and comparison. Unlike previous project phases, this study required testing multiple candidate reference points and evaluating their applicability, highlighting the methodological challenges posed by the highly active tectonic environment of eastern Taiwan.

參考文獻

大江二郎 (1939) 臺東圖幅及說明書，比例尺十萬分之一。臺灣總督府殖產局出版，第 861 號。

王源、陳文山（1993）十萬分之一海岸山脈地質圖幅。經濟部中央地質調查所。

王蘭榛 (2008) 鹿野斷層之地下構造研究。國立中正大學地震研究所暨應用地球物理研究所碩士論文，共 80 頁。

石再添、張瑞津、黃朝恩、石慶得、楊貴三、孫林耀明 (1983) 臺灣北部與東部活斷層的地形學研究。臺灣師範大學地理研究所地理研究報告，第 9 期，第 20~72 頁。

石瑞銓、陳平護 (2001) 活動斷層地球物理探勘計畫 (4/5)—臺灣東部地區活動斷層地球物理探勘。經濟部中央地質調查所，共 103 頁。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山 (2004) 地震地質調查及活動斷層資料庫 建計畫—淺層地球物理探勘 (3/5)。經濟部中央地質調查所報告第 93~7 號，共 185 頁。

臺灣省氣象所 (1952) 中華民國 41 年地震報告。臺北，共 83 頁。

朱傚祖、游明聖 (1995) 花東縱谷活動斷層調查研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，共 176 頁。

李瓊武、余水倍 (1987) 臺灣東部地殼水平變動之研究。第六眉測量學術及運用研討會論文集，第 127~134 頁。

李正兆、顏一勤 (2016) 旗山斷層向南延伸調查計畫暨 105 年度活動斷層補充地質調查案成果報告書，共 89 頁。

余水倍（1989）臺東縱谷地區之地殼變形研究，國立中央大學地球物理研究所博士論文，共 117 頁。

沈淑敏 （2006）活動構造地形判釋及資料建置分析 - 地震地質調查及活動斷層資料庫建置。經濟部中央地質調查所研究報告，共 97 頁。

林朝棨 (1957) 臺灣地形，臺灣省通志稿，第一卷，第一冊。臺灣文獻委員會出版，共 424 頁。

林朝棨 (1962) 花蓮地方的第四系一臺灣之第四紀研究 (三)。國家長期發展科學委員會研究報告，共 42 頁。

林啟文、石瑞銓、林燕慧（2004）臺東縱谷南段的活動斷層特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 161~174 頁。

林啟文、林偉雄 (2005) 臺灣東部鹿野地區之地質構造研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 18 號，第 29~52 頁。

林啓文、陳文山、劉彥求、陳柏村 (2009) 臺灣東部與南部的活動斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第 23 號。

林啓文、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，第二版。經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，共 122 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 34 號，第 1-40 頁。

陳文山、王源 (1996) 臺灣東部海岸山脈地質。臺灣地質之七，經濟部中央地質調查所出版，共 101 頁。

陳文山 (1988) 海岸山脈沉積盆地之演化及其在地體構造上之意義。國立臺灣大學地質學研究所博士論文，共 304 頁。

陳文山、黃能偉、顏一勤、楊志成、楊小青 (2004a) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究 (3/5) - 恆春斷層條帶地質圖說明書。經濟部中央地質調查所報告第 93-6 號，共 38 頁。

陳文山、顏一勤、楊志成、楊小青、陳勇全、蔡坤志、黃能偉、朱曜國、張徽正、林啓文、林偉雄、劉彥求 (2004b)1951 年花蓮地震斷層的古地震研究 - 瑞穗鄉鶴岡村安定橋槽溝。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 137~145 頁。

陳文山、陳于高、楊小丰 (2006) 地震地質調查及活動斷層資料庫 建置 - 槽溝開挖與古地震研究計畫 (5/5)。經濟部中央地質調查所報告第 95-08-1 號，共 146 頁。

陳文山、林益正、顏一勤、楊志成、紀權寶、黃能偉、林啓文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生、盧詩丁(2008) 從古地震研究與 GPS 資料探討縱谷斷層的分段意義。經濟部中央地質調查所彙刊，第 20 號，第 165~191 頁。

陳昱菘 (2022) 利用高解析反射與折射震測探測池上斷層。國立中央大學地球科學系碩士論文，共 91 頁。

許晉瑋、劉彥求 (2018) 花蓮地震地表破裂及其大地構造隱示。經濟部中央地質調查所特刊，第 35 號，第 89~112 頁。

陳佳元 (1974) 由三角點檢測證實東臺灣海岸山脈向北北東移動。臺灣省地質調查所彙刊，第 24 號，第 119~123 頁。

陳惠芬 (1984) 從三角點檢測成果見到臺灣的地盤升降。經濟部中央地質調查所特刊，第 3 號，第 127~140 頁。

黃宏元 (2002) 利用反射震測觀察池上斷層中、南段於淺地層之表現。國立中正大學應用地球物理研究所碩士論文，共 85 頁。

張育誠 (2000) 臺東縱谷 (瑞穗至池上地區) 之地電研究，國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 100 頁。

張瑞津、石再添、沈淑敏、張政亮 (1992) 花蓮縱谷北段河階的地形學研究。師大地理研究報告，第 18 期，第 241~292 頁。

張舜傑 (1994) 以淺層反射震測法調查花蓮市地區地下地質構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 109 頁。

張徽正、林啓文、陳勉銘、盧詩丁(1998) 臺灣活動斷層概論，五十萬分之一臺灣活動斷層圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 10 號，共 103 頁。

曾彥祺 (2008) 池上斷層南段之地下構造研究。國立中正大學地震研究所碩士論文，共 70 頁

姜彥麟 (2007) 花東縱谷斷層南段地表變形及斷層運動學分析，國立臺灣師範大學地球科學系碩士論文，共 131 頁。

姜彥麟、朱傚祖、李建誠、黃志遠 (2012) 臺灣東部池上斷層全段之地表破裂與變形帶調查及構造特性分析。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，第 101~138 頁。

姜彥麟、顏一勤、劉彥求、黃志遠 (2014) 鹿野斷層之斷層跡精查及地下構造研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 28 號，第 71~111 頁。

紀權宥 (2007) 南段花東縱谷之新期構造研究—利吉斷層與鹿野斷層的活動特性，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 84 頁。

游明聖 (1997) 臺東縱谷活動斷層研究，國立臺灣大學地質學研究所博士論文，共 141 頁。

梁勝雄、劉彥求、陳盈璇、黃志遠（2022）池上斷層南段—因 0917 關山地震造成的地表破裂跡。地質，第 41 卷，第 3-4 期，第 41-45 頁。

楊蔭清 (1953)41 年來之花蓮地震。花蓮文獻，創刊號，第 67~71 頁。

經濟部中央地質調查所（2022）20220323 長濱地震地質調查報告，共 63 頁。

經濟部中央地質調查所（2022）20220620 光復地震地質調查報告，共 36 頁。

經濟部中央地質調查所（2022）20220620 光復地震地質調查報告 - 同震地表變形大地測量成果，共 24 頁。

經濟部中央地質調查所（2022）20220917 關山地震、0918 池上地震地質調查報告，共 48 頁。

經濟部中央地質調查所（2022）20220917 關山地震、0918 池上地震地質調查報告 - 第二部分：大地測量地表變形觀測結果，共 78 頁。

經濟部地質調查及礦業管理中心（2024）20240403 花蓮地震地質調查報告，共 33 頁。

經濟部地質調查及礦業管理中心（2024）20240403 花蓮地震地質調查報告 - 第二部分：地表變形觀測結果，共 65 頁。

臺灣活動斷層分布圖（2021）。經濟部中央地質調查所。

賴文基 (1995) 臺灣東部海岸山脈中段地質構造特性之研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 122 頁。

劉啓清 (1988) 臺灣地區地殼變動對驗潮記錄之影響。第二屆臺灣地區地球物理研討會論文集，第 27 頁。

劉彥求、林燕慧、梁勝雄、周稟珊、陳盈璇、李忠勳、陳建良、石同生、王怡方，2022。20220917 關山地震、0918 池上地震地質調查報告，經濟部中央地質調查所，共 78 頁。

鄭文弘 (1996) 臺灣東部海岸山脈北段地質構造特性之研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 186 頁。

鍾令和 (2003)1951 年池上—玉里地震地表破裂與其所指示之新構造意義。國立臺灣大學地質學研究所碩士論文，共 168 頁。

董倫道、陳文山、李亦亨 (2006) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 地球物理探勘計畫 (5/5)，經濟部中央地質調查所報告第 95-09 號，共 221 頁。

臨時臺灣土地調查局 (1904) 臺灣堡圖—比例尺二萬分之一地形圖。1906 臺灣日日新報社出版，1996 遠流出版社復刻出版。

顏一勤、陳文山、蔡坤志、黃能偉、楊志成、陳勇全、朱曜國、宋時驊、劉彥求、林啓文、林偉雄、侯進雄、林燕慧 (2005) 縱谷斷層中段之古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 16 號，第 17~29 頁。

顏一勤 (2013) 102 年度鹿野及大尖山斷層補充地質調查案。經濟部中央地質調查所報告，共 450 頁。

顏一勤、陳文山、宋時驊、黃能偉、楊志成、劉彥求、林啟文 (2014) 臺灣東部池上斷層於錦園至萬安地區間的古地震學研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 28 號，第 43~70 頁。

羅偉、楊昭男 (2004) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置—奇美斷層條帶地質圖。經濟部中央地質調查所報告第 93-11 號，共 51 頁。

饒瑞鈞、胡植慶、李元希 (2008) 地震地質與地變動潛勢分析—地變動監測分析 (2/4)。經濟部中央地質調查所報告第 97-10 號，共 270 頁。

Angelier, J., Chu, H.T. and Lee, J.C. (1997) Shear concentration in a collision zone: kinematics of the active Chihshang Fault, Longitudinal Valley, eastern Taiwan. Tectonophys., 274, 117~144.

Angelier, J., Chu, H.T., Lee, J.C. and Hu, J.C. (2000) Active faulting and earthquake hazard: The case study of the Chihshang fault, Taiwan. Journal of Geodynamics, 29(3-5), 151~185.

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.

Biq, C. (1965). The East Taiwan Rift. Petroleum Geology of Taiwan, 4, 93-106.

Biq, C. (1984) Present-day manner of movement of the Coastal Range, eastern Taiwan, as reflected by triangulation changes. Mem. Geol. Soc. China, no.6, p.35-40.

Bonilla, M. G. (1975) A review of recently active faults in Taiwan. U.S. Geological Survey, Open-File Report 75-41.

California Department of Conservation（2015）The Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act.

Chai, B. H. T. (1972). Structure and tectonic evolution of Taiwan. American Journal of Science, 272(5), 389-422.

Chang, L.S. (1968) A biostratigraphic study of the Tertiary in the Coastal Range, eastern Taiwan, based on smaller Foraminifera: II. Northern Part. Proc. Geol. Soc. China 11, p.19-33.

Chen, H. Y., Lee, J. C., Tung, H., Yu, S. B., Hsu, Y. J., & Lee, H. (2013). A New Velocity Field from a Dense GPS Array in the Southernmost Longitudinal Valley, Southeastern Taiwan. Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 24(5).

Chen, W.S., Huang, M.T. and Liu, T.k. (1991) Neotectonic significance of the Chimei fault in the coastal range, eastern Taiwan. Proc. Geol. Soc. China, no.34, p.43-56.

Chen, W.S., Yen, I.C., Fengler, K.P., Rubin, C.M., Yang, C.C., Yang, H.C., Chang, H.C., Lin, C.W., Lin, W.H., Liu, Y.C. and Lin, Y.H. (2007) Late Holocene paleoearthquake activity in the middle part of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan. Earth Planet. Sci Lett., 264(3/4), 420-437.

Cheng, S.N., Yeh, Y.T. and Yu, M.S. (1996) The 1951 Taitung Earthquake in Taiwan. J. Geol. Soc.China, no.39(3), p.267-285.

Chow, J., Angelier, J., Hua, J. J., Lee, J. C., & Sun, R. (2001). Paleoseismic event and active faulting: from ground penetrating radar and high-resolution seismic reflection profiles across the Chihshang Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333(1-2), 241-259.

Chuang RY, Miller MM, Chen YG, Chen HY, Shyu JBH, Yu SB, Rubin CM, Sieh K & Chung LH (2012) Interseismic deformation and earthquake hazard along the southernmost Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan. Bulletin of the Seismological Society of America 102(4):1569-1582.

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.

Deffontaines B, Chang KJ, Champenois J, Fruneau B, Pathier E, Hu JC, Lu ST & Liu YC (2017) Active interseismic shallow

deformation of the Pingting Terrace (Longitudinal Valley–Eastern Taiwan) from UAV high-resolution topographic data combined with InSAR time series. Geomatics, Natural Hazards and Risk 8(1):120-136.

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.

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

Ho, C.S. (1969) Geological significance of potassium-argon ages of the Chimei Igneous Complex in eastern Taiwan. Acta. Geol. Taiwanica 26, p.133-160.

Hsu, M. T. (1971). Seismicity of Taiwan and Some Related Problems. Bulletin of International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, 8, 41-160.

Hsu, T. L. (1956) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Bull. Geol. Surv. Taiwan, no.8, p.39-64.

Hsu, T. L. (1962). Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Proc. Geol. Soc. China Mem., 1, 95-102.

Hsu, T. L. (1976) Neotectonic of the Longitudinal Valley, eastern Taiwan: Bull. Geol. Sur. Taiwan, Vol. 25, P. 10.

Hsu, Y.C., Chang, C.P., Yen, J.Y., Kuo-Chen, H. and Wang, C.C. (2019) Investigating the structure of the Milun fault from surface ruptures of the 2018 Hualien earthquake. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 30(3), 337-350.

Hsu, Y. C., Chang, C. P., Yen, I. C., Huang, S. Y., & Yen, J. Y. (2024). Investigating the structure under the Pingting Terrace from the co-seismic surface rupture of the 2022 Guanshan earthquake. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 35(1), 3

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.

Huang, H. H., & Wang, Y. (2022). Seismogenic structure beneath the northern Longitudinal Valley revealed by the 2018–2021 Hualien earthquake sequences and 3-D velocity model. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 33(1), 17.

Huang, S.-Y., Yen, J.-Y., Wu, B.-L., Yen, I.-C., & Chuang, R. Y. (2019). Investigating the Milun Fault: The coseismic surface rupture zone of the 2018/02/06 ML 6.2 Hualien earthquake, Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 30(3), 311-335.

Hyndman, R.D. and Wang, K. (1995) The rupture zone of Cascadia great earthquakes from current deformation and thermal regime. J. Geophys. Res. 100, 22133-22154.

Kuo, Y. T., Wang, Y., Hollingsworth, J., Huang, S.-Y., Chuang, R. Y., Lu, C.-H., . . . Chang, C.-P. (2018). Shallow fault rupture of the Milun Fault in the 2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake: A high resolution approach from optical correlation of Pléiades satellite imagery. Seismological Research Letters.

Kuochen, H., Wu, Y. M., Chang, C. H., Hu, J. C., and Chen, W. S. (2004) Relocationthe eastern Taiwan earthquakes and its tectonic implications. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 15, 647-666.

Lee, J. C. and Angelier, J. (1993). Location of active deformation and geodetic data analysis: an example of the Longitudinal Valley Fault, Taiwan. Bull. Soc. Geol. France, 164, 533-570.

Lee, J. C., Angelier, J., Chu, H. T., Yu, S. B., & Hu, J. C. (1998). Plate-boundary strain partitioning along the sinistral collision suture of the Philippine and Eurasian plates: Analysis of geodetic data and geological observation in southeastern Taiwan. Tectonics, 17(6), 859-871.

Lee, J. C., Jeng, F. S., Chu, H. T., Angelier, J., & Hu, J. C. (2000). A rod-type creepmeter for measurement of displacement in active fault zone. Earth, planets and space, 52(5), 321-328.

Lee, J. C., Angelier, J., Chu, H. T., Hu, J. C., & Jeng, F. S. (2001). Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333(1-2), 219-240.

Lee, J. C., Angelier, J., Chu, H. T., Hu, J. C., Jeng, F. S., & Rau, R. J. (2003). Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998–2001. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B11).

Lee, J. C., Angelier, J., Chu, H. T., Hu, J. C., & Jeng, F. S. (2005). Monitoring active fault creep as a tool in seismic hazard mitigation. Insights from creepmeter study at Chihshang, Taiwan. Comptes Rendus Geoscience, 337(13), 1200-1207.

Lee, J.C., Chu, H.T., Angelier, J., Hu, J.C., Chen, H.Y. and Yu, S.B. (2006) Quantitative analysis of surface coseismic faulting and postseismic creep accompanying the 2003, Mw = 6.5, Chengkung earthquake in eastern Taiwan: J. Geophys. Res., 111, B02405, doi:10.1029/2005JB003612.

Lin, Y. S., Chuang, R. Y., Yen, J. Y., Chen, Y. C., Kuo, Y. T., Wu, B. L., . . . Yang, C. J. (2019). Mapping surface breakages of the 2018 Hualien earthquake by using UAS photogrammetry. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 30(3), 351-366.

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

Reid, H. F. (1910) The mechanism of an earthquake, The California earthquake of April 18, 1906, Report of the earthquake investigation commission, 2: Washington, D.C., Carnegie Institution, p.1-192.

Omori, F. (1907b) Preliminary note on the Formosa earthquake of March 17, 1906: Bull. Imp.Earthquake Investigation Commttee, vol. 1, no. 2, p.53-69.

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.

Shyu, J. B. H., Kerry, S., Avouac, J. P., Chen, W. S. and Chen, Y. G. (2006) Millennial slip rate of the Longitudinal Valley fault from river terraces: Implications for convergence across the active suture of eastern Taiwan, J. Geophys. Res., no.111, B08403.

Shyu, J. B. H., Chung, L. H., Chen, Y. G., Lee, J. C., & Sieh, K. (2007). Re-evaluation of the surface ruptures of the November 1951 earthquake series in eastern Taiwan, and its neotectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 31(3), 317-331.

Shyu, J. B. H., Sieh, K., Chen, Y. G., Chuang, R. Y., Wang, Y., & Chung, L. H. (2008). Geomorphology of the southernmost Longitudinal Valley fault: Implications for evolution of the active suture of eastern Taiwan. Tectonics, 27(1).

Soergel, U. (Ed.), 2010. Radar Remote Sensing of Urban Areas, vol. 15. Springer Science & Business Media.

Teng, L.S. (1979) Petrographical study of the Neogene sandstones of the Fanshuliao Formation, northern Coastal Range, eastern

Taiwan: I. Northern Part. Acta Geol. Taiwanica, no.20, p.129-155.

Yen, I.C., Chen, W.S., Yang, C.C.B., Huang, N.W. and Lin, C.W. (2008) Paleoseismology of the Rueisuei Segment of the Longitudinal Valley Fault, Eastern Taiwan. Bull. Seismo. Soc. Amer. 98, no.4, p.1737-1749.

Yen, J. Y., Lu, C. H., Dorsey, R. J., Kuo-Chen, H., Chang, C. P., Wang, C. C., . . . Chang, W. Y. (2018). Insights into Seismogenic Deformation during the 2018 Hualien, Taiwan, Earthquake Sequence from InSAR, GPS, and Modeling. Seismological Research Letters, 90(1), 78-87.

York, J. E. (1976) Quaternary faulting in eastern Taiwan. Bull. Geol. Surv. Taiwan 25, p.63-75.

Yu, S.B., Jackson, D.D., Yu, G.K. and Liu, C.C. (1990) Dislocation model for crustal deformation in the Longitudinal Valley area, eastern Taiwan. Tectonophysics, vol.183, p.97-109.

Yu, S. B., Chen, H. Y., & Kuo, L. C. (1997). Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics, 274(1-3), 41-59.

Yu, S. B., & Kuo, L. C. (2001). Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333(1-2), 199-217.

Wang, C.Y. and Chen, K.P. (1997) A seismic refraction profile across the Longitudinal Valley Fault near Hualien, Taiwan. Terr. Amos. Ocean. Sci., 8 (3), p.295-312.

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, B.-L., Yen, J.-Y., Huang, S.-Y., Kuo, Y.-T., & Chang, W.-Y. (2019). Surface deformation of 0206 Hualien earthquake revealed by the integrated network of RTK GPS. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 30(3), 301-310.

Wu, Y. M., Chen, Y. G., Chang, C. H., Chung, L. H., Teng, T. L., Wu, F. T., & Wu, C. F. (2006). Seismogenic structure in a tectonic suture zone: With new constraints from 2006 Mw6. 1 Taitung earthquake. Geophysical research letters, 33(22).

Yen, I. C., Yen, J. Y., Huang, S. Y., Hsu, Y. C., Widiatmoko, F. R., Huang, W. J., ... & Chang, C. P. (2025). Neotectonic Framework of Eastern Taiwan: Insights from Coseismic Rupture Patterns of the 2022 Chihshang Earthquake and Paleoseismic Investigations. Bulletin of the Seismological Society of America.

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.

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. 報告書第1~4頁和第5~11頁的剖面比較，相對上，震前和震後的抬升-下沉的區域分布有反差的現象，建議於報告中針對此一現象提供討論。	感謝委員建議。本計畫確實觀察到海岸山脈在南北段於震前與震後呈現不同的變形型態，顯示其深部構造運動可能具有區域性差異。我們已在章節4-2跨斷層剖面分析中補充相關討論，並說明此反差現象可能與震後調整、地層差異或構造活動型態不同有關。
2. 報告書第22頁，提到「本計畫的重要區域都位在都市人口密集地區，因此使用PSInSAR」，與第59頁「東部地區不似西部人口密集」。以上兩論述建議統整。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
3. 考量東部之地勢遠較北、中、西區域起伏劇烈，然第65頁提到大氣誤差仍是使用傳統的高、低通濾波進行估計與移除，是否有嘗試第64頁提到的「StaMPS 軟體亦可直接加裝TRAIN以藉由大氣模式修正」成果進行比較？若無，建議於文內說明原因。	本研究曾嘗試以TRAIN進行大氣校正，但由於花東縱谷地形起伏大，大氣梯度較強的位置往往與斷層活動及高變形區重疊，TRAIN的校正結果會將真實地表變形一併削弱或移除。因此本計畫最終採用傳統的空間高、低通濾波方式以避免誤修正。我們已於文中補充相關原因與限制。

4. 報告書第65頁提到DEM誤差，因為東部地勢起伏劇烈且地震頻繁，建議於文中說明此成果目前是使用何種DEM。是否使用內政部最近期之光達DEM？若無，建議於文內說明原因。	本研究使用ALOS 15 m解析度之DEM進行處理。由於東部地區整體變形量相對較大，DEM誤差對PSI解算結果之影響相對不顯著，實際測試顯示15 m DEM已可提供穩定且可靠之成果。內政部光達DEM雖具較高解析度，但需另行申請且資料使用上有攜出限制，故未納入本研究使用。相關DEM資訊將於文中補充說明。
5. 報告書第67頁的比對方法建議以實際作法對照。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
6. 報告書第77頁提到StaMPS參數有針對東部區域進行調整，建議詳細說明原因及測試之方法以供主辦單位參考。	感謝委員建議，已於報告書中修正。

7. 報告書第76頁，成果參數測試部分提及東部影像密度與時序連續性較之前的北、中、西部更不足，困此解算品質較差，且植被覆蓋率較高，那為何團隊不使用第64頁提到，StaMPS軟體也可執行的SBAS演算法？是否有進行內部評估？建議於文內說明為何成果仍以PSInSAR進行，以供主辦單位參考選擇之依據。	感謝委員建議。本團隊目前已針對SBAS　技術於東部地區進行內部測試與可行性評估。相較於西部平原區，東部地區確實較需要透過SBAS方法補足影像密度不足的問題；惟受限於地形起伏劇烈、植被覆蓋率高及同調性快速衰減等因素，目前仍未產出具穩定性與可解釋性的SBAS解算成果，尚需進一步針對演算法參數設定與資料配置進行調整與測試。因此，本研究仍以PSInSAR作為主要分析方法，並將於文中補充說明選擇PSInSAR之理由，以及 SBAS 技術之測試與評估情形，供主辦單位未來規劃與技術選擇參考。

8. 報告書第98頁、100頁及其他PSInSAR有大幅的同震跳動，是否有引入GPS 資料校正或率定？並請說明升、降軌何以不同?	感謝委員提問。本章節所呈現之PSInSAR 時間序列結果，已引入同期 GNSS 連續站資料進行率定，並以 TTSH 站作為參考站，以降低長波長誤差與系統性偏移。在部分鄰近活動斷層之區域，確實可觀察到 PSInSAR 與 GNSS 在同震變形量與變形趨勢上存在差異，此現象主要與同震變形梯度過大有關。於破裂帶附近，地表位移在短距離內急遽變化，可能超出 PSInSAR 點位空間分布與解析能力，使其無法完全反映局部極值變形。此外，升軌與降軌雷達影像在觀測時間、視線方向（LOS 幾何）與對位移分量的敏感性上均不相同，對於同一事件可能呈現不同的 LOS 變形表現，亦導致其與 GNSS 觀測結果在局部區域出現差異。相關原因將於文中補充說明。

9. 報告書第205頁僅比對垂直方向，建議補充說明水平方向計算限制。	感謝委員建議。本年度成果僅呈現PSInSAR　解算之垂直向速度，主要考量東部地區斷層活動型態複雜，除西向逆衝外，普遍伴隨顯著的走向滑移成分，使得地表水平變形同時包含東西向與南北向分量。在此情況下，僅依賴單一升、降軌LOS觀測，難以穩定拆解出可靠的東西向或南北向速度場，於解算過程中易引入較大不確定性與誤差。相較之下，LOS觀測對垂直向位移的敏感度較高，且垂直向解算結果之可信度相對較佳，因此本研究以垂直向速度作為主要呈現成果，並將於文中補充說明其限制與考量。
10. 由於大地測量工具繁多，建議整理本案使用PSInSAR在跨斷層觀測之優點與限制。	感謝委員建議。本研究將於「結論與建議」章節中，系統性整理PSInSAR於跨斷層觀測上的主要優點與限制，包括其在高空間解析度、長期時序監測上的優勢，以及於本年度多起地震事件中所觀察到，在強同震變形梯度、植被覆蓋與視線幾何限制下可能產生的誤差與不確定性，以利主辦單位未來進行觀測方法選擇與整合應用之參考。

11. 報告書內所呈現的4個地表事件中0403有較好之成果為何？其位移較長濱地震、光復地震大許多。	感謝委員提問。根據地震地質調查相關報告指出，2024年04月03日花蓮地震所造成的同震位移量，在垂直方向上可達約40公分，明顯高於長濱地震與光復地震。雖然本次地震震源較深、發震斷層位於地表深處，但其地表變形型態主要呈現區域性且連續的整體抬升，未於地表觀察到明顯的跨斷層梯度型速度變化，較符合PSInSAR對平滑變形場的解析特性，因此其解算成果與GNSS比對表現相對較佳。此外，本次事件可用的升、降軌影像數量較為充足，亦有助於提升解算穩定度。相較之下，長濱地震與光復地震在震前與震後的降軌影像數量較少，且光復地震於近地表可觀察到明顯的跨斷層變形梯度，因而使其整體成果表現不如0403地震。
12. PSInSAR與水準測線、GNSS連續站之比較建議提供量化的數據。	感謝委員指正。GNSS連續站部分已進行量化比對，並於文中補充R^2與RMSE等統計指標。至於水準測線資料，其主要反映特定時間區間內的垂直位移變化，與PSInSAR所提供之連續時間序列速度場在時間尺度與觀測物理意義上不同，因此本研究未進行直接的量化回歸比較，而以變形趨勢與相對變化量進行對照說明。

13. 由於本階段計畫的工作重點著重在各分區匡列的重要區域，因此建議期末報告書應強調主辦單位在重要區域的觀測成果，例如將重要區域的剖面結果、與區域內GNSS測站或水準的比對再予以加強說明，以達到計畫規劃的構想及目標。	感謝委員建議。期末報告書中已新增第4-5節「重點區域觀測結果」，針對各重要區域進行跨斷層之時間序列與剖面分析，強調其代表性變形特徵與監測意義，以呼應本階段計畫之規劃目標。
14. 建議考慮應與另案合併（此點過往其他委員亦有提出），例如目前此案報告書第27-58　頁均針對東部8　條斷層進行說明，但此案應以InSAR　成果為主，此些論述似乎與另案重疊。	感謝委員建議。本報告中斷層背景說明主要作為InSAR成果詮釋之輔助說明，後續將依主辦單位需求進行調整。
(二) 報告書內容格式以及勘誤相關建議	
1. 圖4-34、4-39、4-45、4-49、4-54 圖說中，圖(c)應改為圖(b)。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
2. 第60與75頁都有圖表說明使用的Sentinel-　1衛星影像資訊，但前者時間段是2022-2024，後者是2021/12-2025/1，建議統整。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
3. 報告書第72　頁提及式5.3，但該頁並無此式。第73　頁式2-8、2-9　建議補充說明其意義。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
4. 報告寫作編排與契約工作項目不易對照，建議可更動排序。	感謝委員建議，已於報告書中修正。

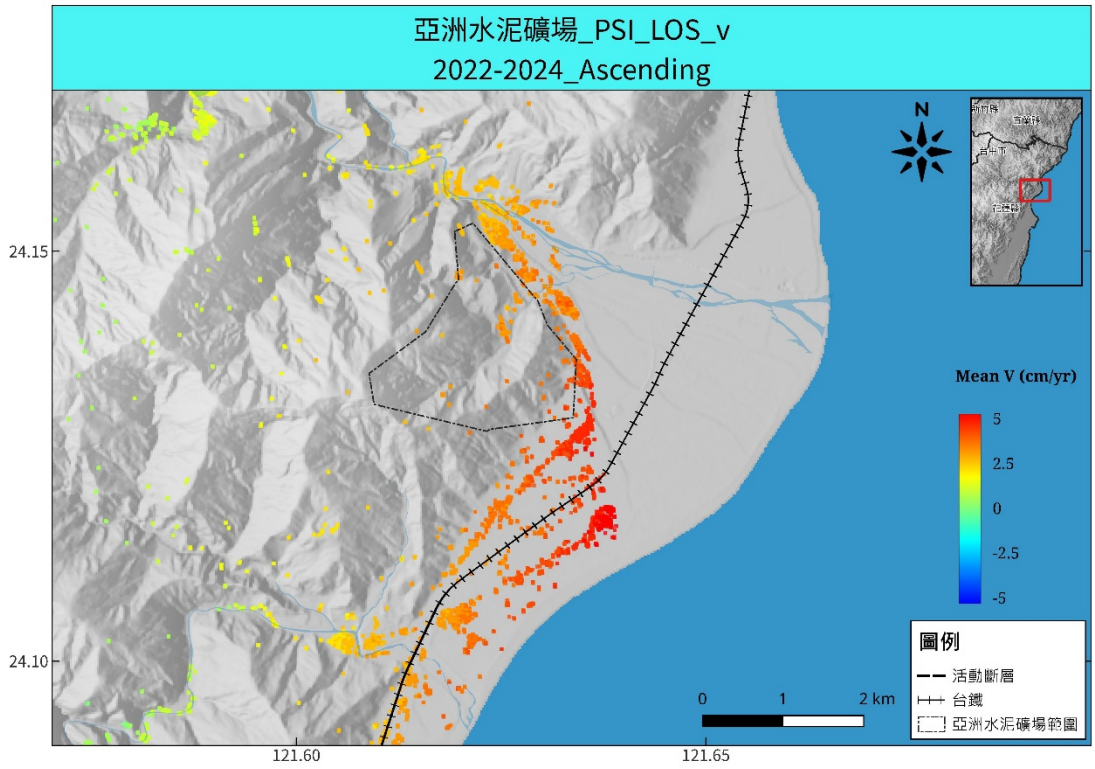
5. 建議團隊將「結論」改為「結論與建議」，針對本階段各年度所遭遇問題及可能改善方法，供主辦單位參考。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
6. 目錄部分，英文結論是否應為第六章?	感謝委員建議，已於報告書中修正。
7. 摘要部分，內文多處提及關山-池上地震，兩地名中間的符號建議統整。	感謝委員建議，已於報告書中修正。

附錄 A、亞洲水泥礦區雷達影像分析

圖 A-1 為 2022 年至 2024 年間亞洲水泥公司於太魯閣地區的礦場周圍的 LOS 速度場結果，礦場內部較無 PS 反射點，此區域大部分的 PS 反射點還是集中在台九線與台八線的道路與平地區。

升軌道的結果顯示礦場周圍 LOS 速度值約 2.5~5 cm/yr，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝衛星方向移動，新城市區的地表移動速度較太魯閣閣口快約 2.5 cm/yr，此區域的速度變化緩慢，抬升速度由太魯閣閣口往新城市區漸增，並沒有急遽的速度差異區塊。

降軌道的結果顯示礦場周圍 LOS 速度值約 4~6 cm/yr，與升軌道結果一樣是地表朝衛星方向移動的抬升速度，從太魯閣閣口至新城市區一樣是緩慢漸增的速度變化，並沒有急遽的速度差異區塊。



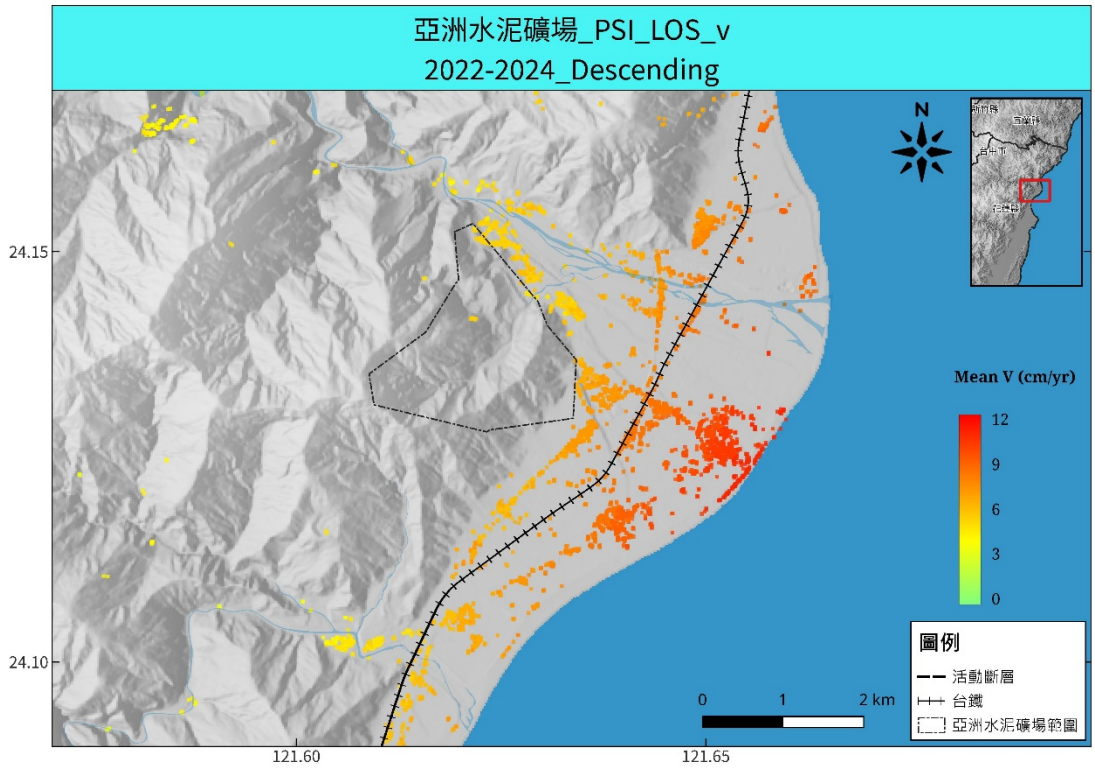


圖 A-1：：2022-2024 年 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。上圖為升軌道結果，下圖為降軌道結果。

附錄 B、2022 至 2024 年地震事件

B1 2022 年 3 月 23 日花蓮玉里的同震地表變形

利用合成孔徑雷達差分干涉技術(DInSAR)分析歐洲太空總署 Sentinel-1A 衛星，分別在 2022 年 3 月 14 日和 3 月 26 日所拍攝的雷達影像，可以協助我們了解地震發生時地表的活動情形。

本次地震的震央位於秀姑巒溪出海口外，距離震央最近的近岸區域理應有較明顯的地表位移，但是礙於海岸山脈植被的影響，造成兩幅影像之間的同調性差異較大，僅約略可見數個模糊的差分干涉條紋分佈在花蓮豐濱和台東長濱之間。此外，在花蓮瑞穗和玉里也發現有局部的干涉環產生（圖 B-1）。

我們在玉里斷層取兩條剖面，A 剖面位於震央北邊，通過玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層，B 剖面位於震央南邊，通過玉里斷層及池上斷層。A 剖面於玉里斷層附近約有 10 mm 的位移量，瑞穗斷層及奇美斷層則無明顯位移量；B 剖面於池上斷層附近約有 5~8 mm 的位移量，於玉里斷層則無明顯位移量（圖 B-2）。

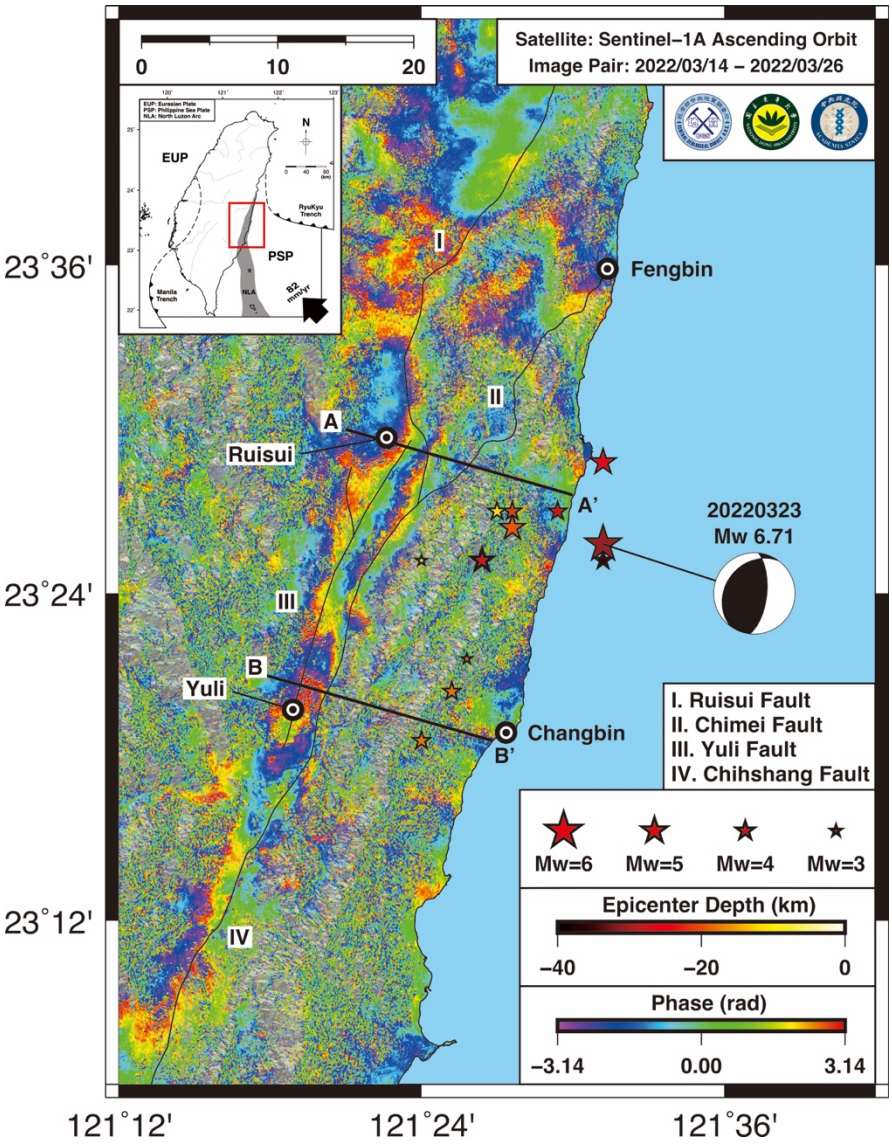


圖 B-1：2022 年 3 月 23 日花蓮玉里地震干涉圖。使用地震前後的兩幅升軌影像（Ascending）：2022 年 3 月 14 日和 3 月 26 日。星形及其填色為地震事件及震源深度。

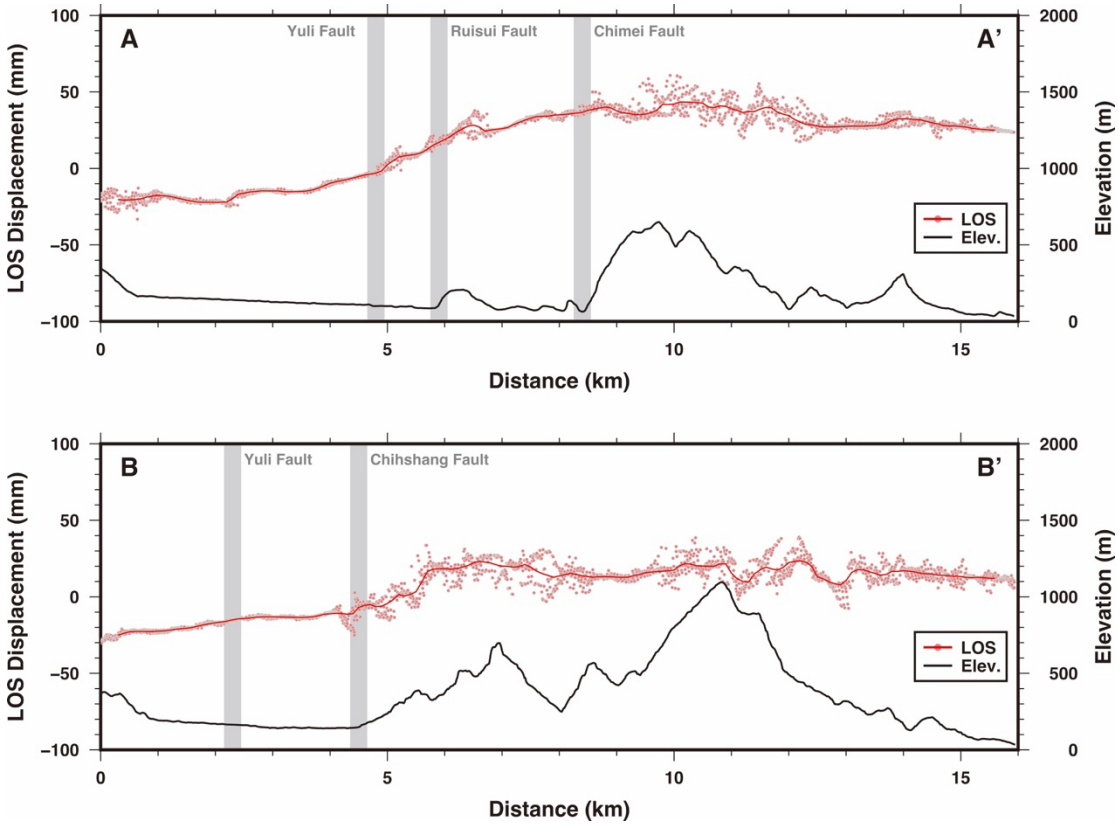


圖 B-2：2022 年 3 月 23 日花蓮玉里地震同震位移剖面圖。紅點為衛星斜距方向（LOS）位移量，紅線為平均值，黑線為地形資訊，灰色條帶為斷層位置。

B-2 2022 年 6 月 20 日 花蓮光復地震的同震地表變形

利用合成孔徑雷達差分干涉技術(DInSAR)分析歐洲太空總署 Sentinel-1A 衛星，分別在 2022 年 6 月 18 日和 6 月 30 日所拍攝的雷達影像，可以協助我們了解該次地震與後續餘震所造成的地表變形。

根據台灣寬頻地震觀測網 (Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)的快速解算結果，本次地震震央位於花蓮光復鄉附近（震央經緯度座標：121.47, 23.68），地震矩規模(Mw)為 5.86，深度為 6.8 公里。這個淺層地震造成的地表變形在影像上約呈現 7-8 個彩虹干涉環，相當於在衛星視角的方向上有 20 公分左右的位移量。此外，值得注意的是干涉環在空間上的分佈型態呈現同心圓狀，其圓心約位在震央南方 5 公里處（圖 B-3）。

未來將持續取得衛星精密軌道資訊進行相位解算，以獲得詳細的同震地表位移變化量，同時配合地震重定位的資訊，確認這兩個中心點差異的成因，提供本次地震更為精準的地表位移資訊，以利後續相關研究。

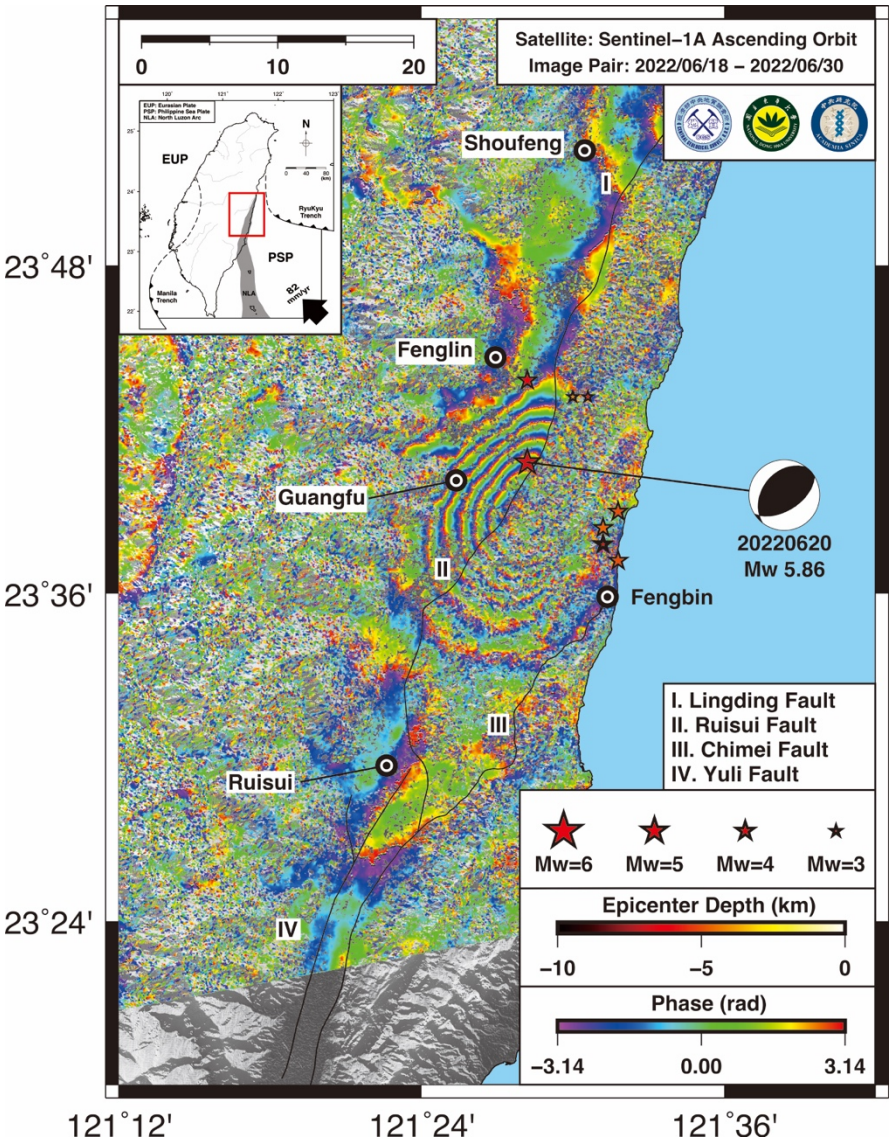


圖 B-3：2022 年 6 月 20 日花蓮光復地震干涉圖。使用地震前後的兩幅升軌影像（Ascending）：2022 年 6 月 18 日和 6 月 30 日。星形及其填色為地震事件及震源深度。

B-3 2022 年 9 月 17-18 日 關山-池上地震的同震地表變形

2022 年 9 月 17 日關山地震和 9 月 18 日池上地震的同震地表變形初步分析

藉由合成孔徑雷達差分干涉技術(DInSAR)分析歐洲太空總署 Sentinel-1A 衛星，升軌道分別在 2022 年 9 月 10 日和 9 月 22 日所拍攝的雷達影像，以及降軌道分別在 2022 年 9 月 12 日和 9 月 24 日所拍攝的雷達影像，可以協助我們了解這兩個地震與其後續餘震所造成的地表變形（圖 B-4 與圖 B-5）。地震資料來自於台灣寬頻地震觀測網 (Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)的快速解算結果。斷層線資料來自於經濟部地質調查及礦業管理中心(Geological Survey and Mining Management Agency, GSMMA)。

本次兩張影像間包含了 9 月 17 日的關山地震(ML=6.4)和 9 月 18 日的池上地震(ML=6.8)。從彩虹干涉環的分佈可以得知，兩個地震造成花東縱谷南北長約 80 公里的地表變形，主要的變形區域除了位於震央的關山和池上外，北邊的玉里和瑞穗也有顯著的地表位移量。隨著餘震分佈的資訊，可以明顯的看到，餘震較少的鹿野和卑南地區也

有為數不少的干涉環出現。兩側山區因受到植被擾動影響，導致影像資訊斑駁而不易成相，所以無法確認地表變形狀況。

當然，本次地震的地表變形較今年發生過的地震複雜，需要搭配許多現場辛苦調查的成果相互驗證，才能確認雷達衛星量測結果之準確性。之後將持續分析降冪飛行軌道的衛星影像，並且取得衛星的精密軌道資訊進行相位解算，獲得更詳細的同震地表位移變化量，以利後續相關研究進行。

除了 Sentinel-1 衛星，我們取得日本宇宙航空研究開發機構（JAXA）ALOS2 衛星影像，利用 WD 模式的升軌道分別在 2022 年 8 月 7 日和 9 月 18 日所拍攝的雷達影像，及降軌道分別在 2022 年 4 月 3 日和 9 月 18 日所拍攝的雷達影像，以及 SM 模式的升軌道分別在 2022 年 5 月 19 日和 9 月 22 日所拍攝的雷達影像，可以協助我們了解這兩個地震與其後續餘震所造成的地表變形（圖 B-6 至圖 B-8）。地震資料來自於台灣寬頻地震觀測網 (Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)的快速解算結果。斷層線資料來自於經濟部地質調查及礦業管理中心(Geological Survey and Mining Management Agency, GSMMA)。

從彩虹干涉環的分佈可以得知，兩個地震造成花東縱谷南北長約80公里的地表變形，主要的變形區域除了位於震央的關山和池上外，北邊的玉里和瑞穗也有顯著的地表位移量。由於ALOS2為L band觀測衛星，波長較C band 的Sentinel-1衛星長，可穿透植被，可以明顯看到山區有較好的干涉環成果，但L band更容易受到大氣與電離層影響，因此需要進行修正。

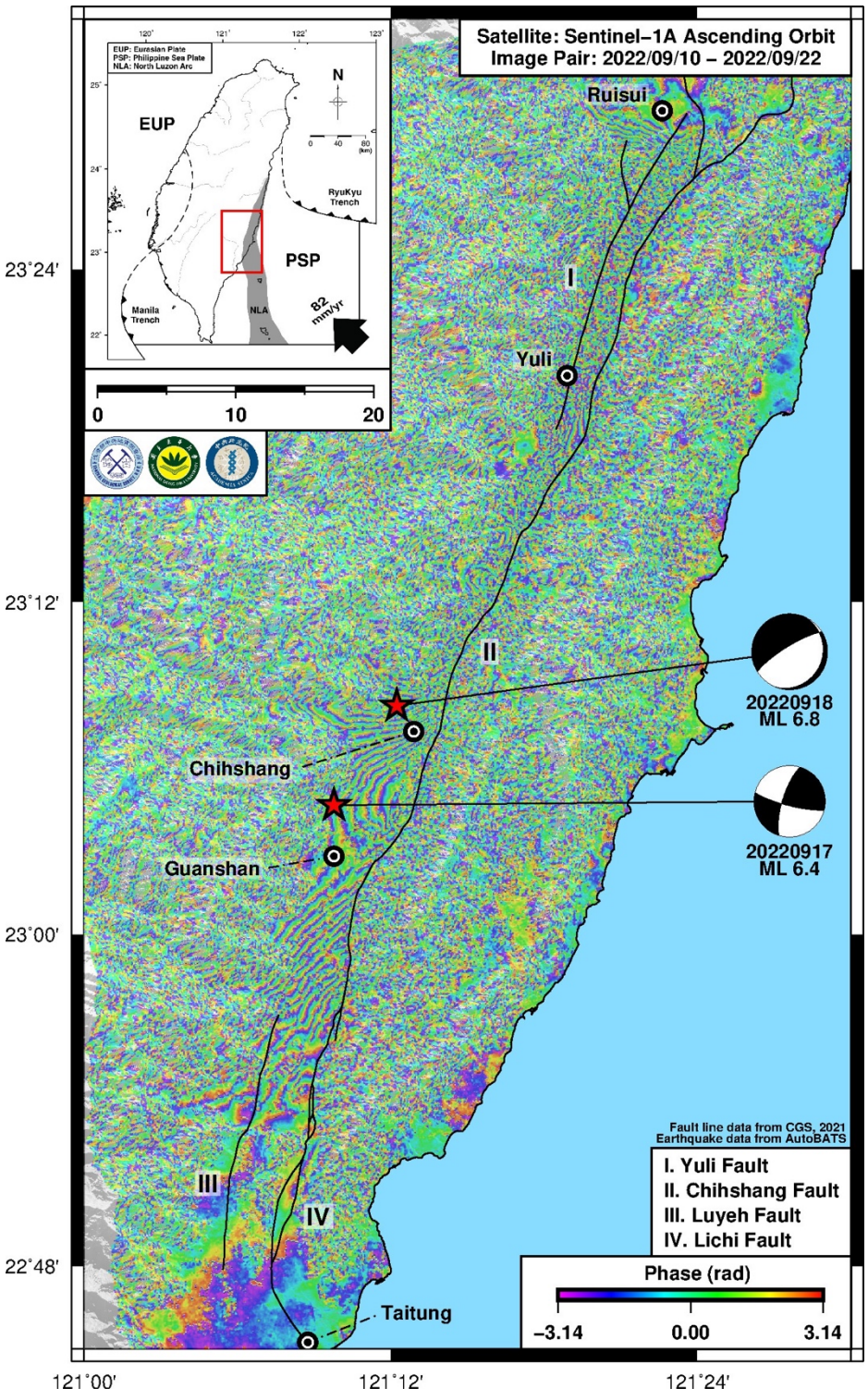


圖 B-4：2022 年 9 月 18 日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅升軌影像（Ascending）：2022 年 9 月 10 日和 9 月 22 日。

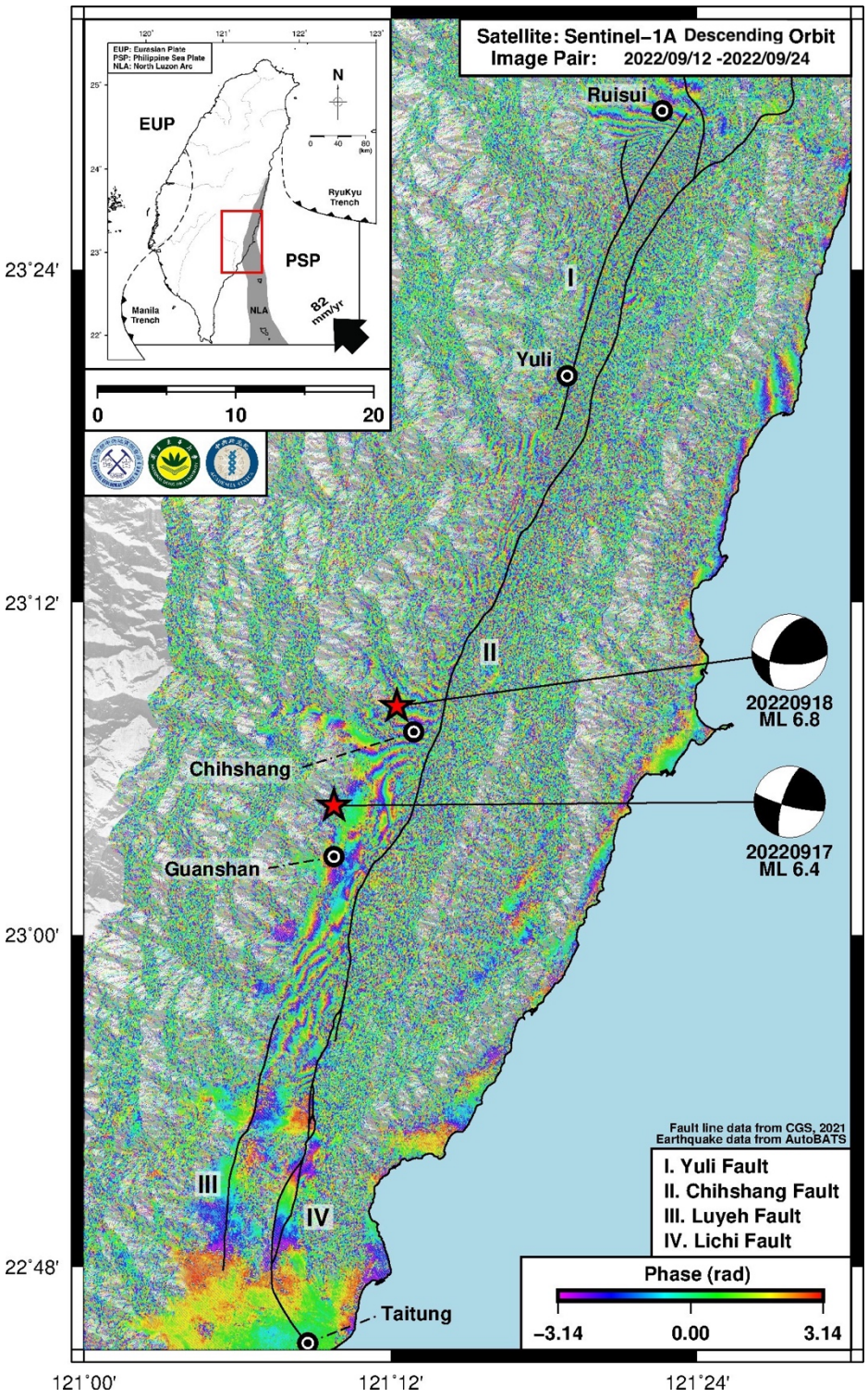


圖 B-5：2022 年 9 月 18 日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅降軌影像（Descending）：2022 年 9 月 12 日和 9 月 24 日。

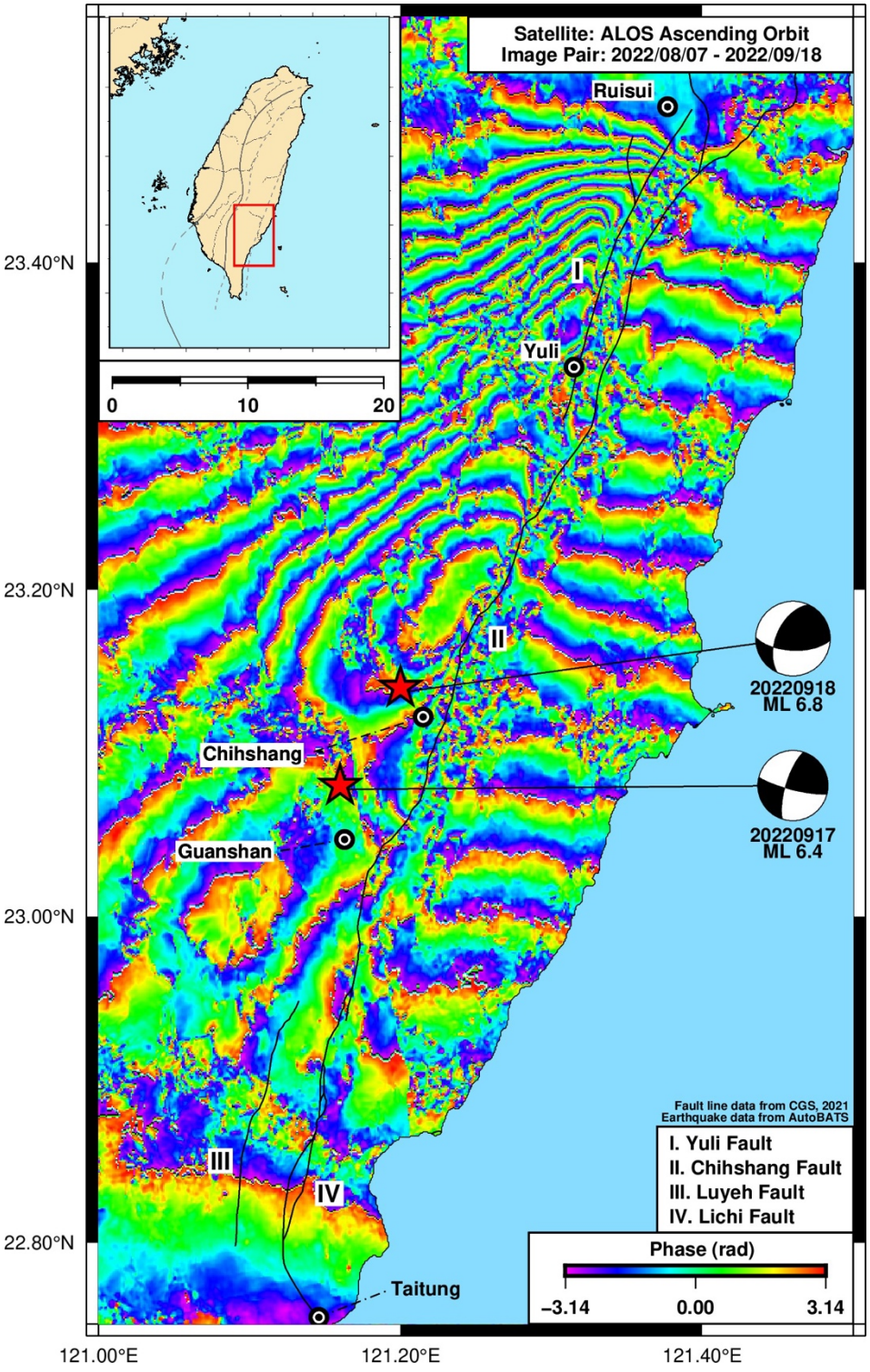


圖 B-6：2022 年 9 月 18 日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅 ALOS2 WD 升軌影像（Ascending）：2022 年 08 月 07 日和 09 月 18 日。

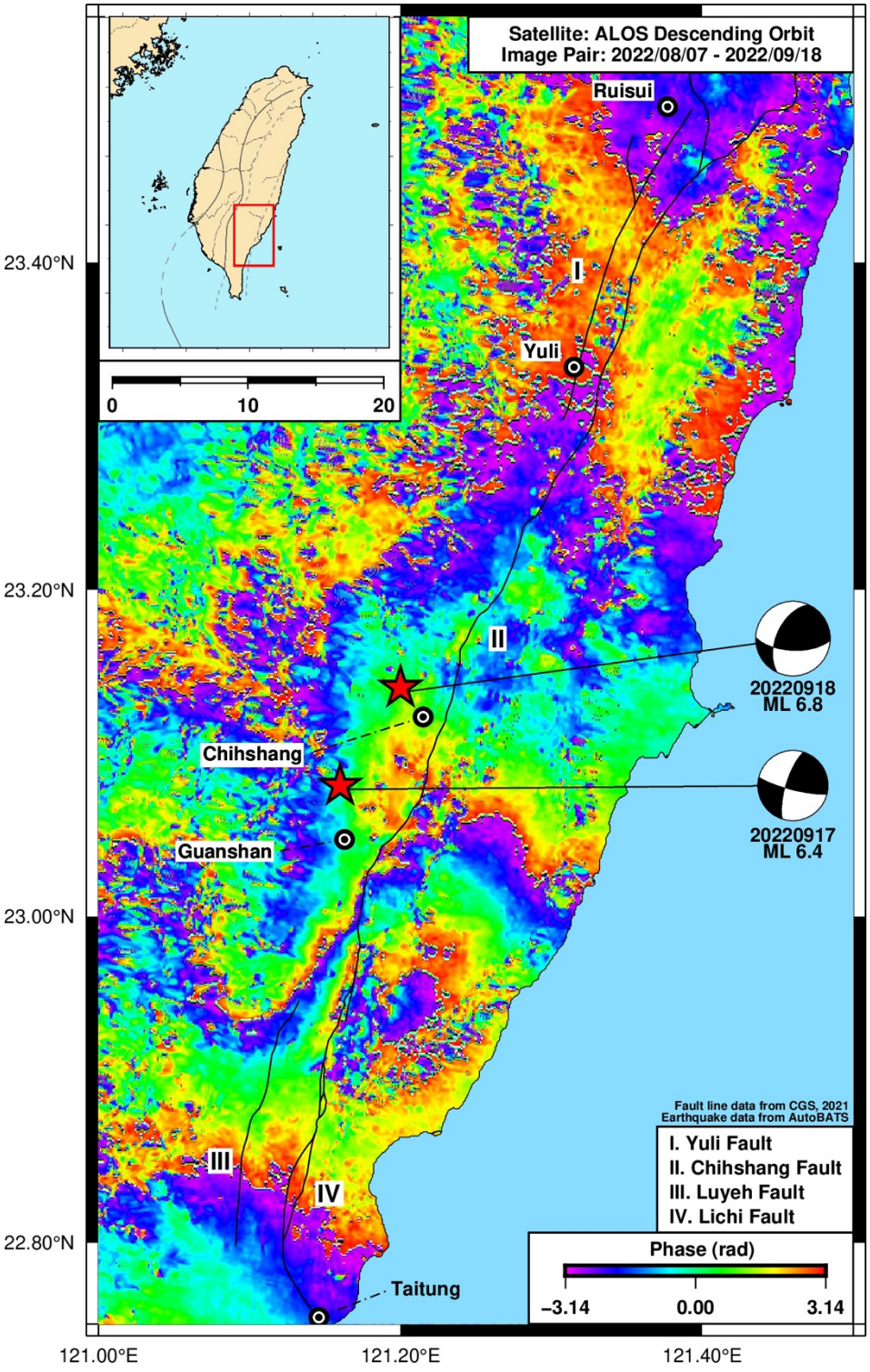


圖 B-7：2022 年 9 月 18 日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅 ALOS2 WD 降軌影像（Descending）：2022 年 04 月 03 日和 09 月 18 日。

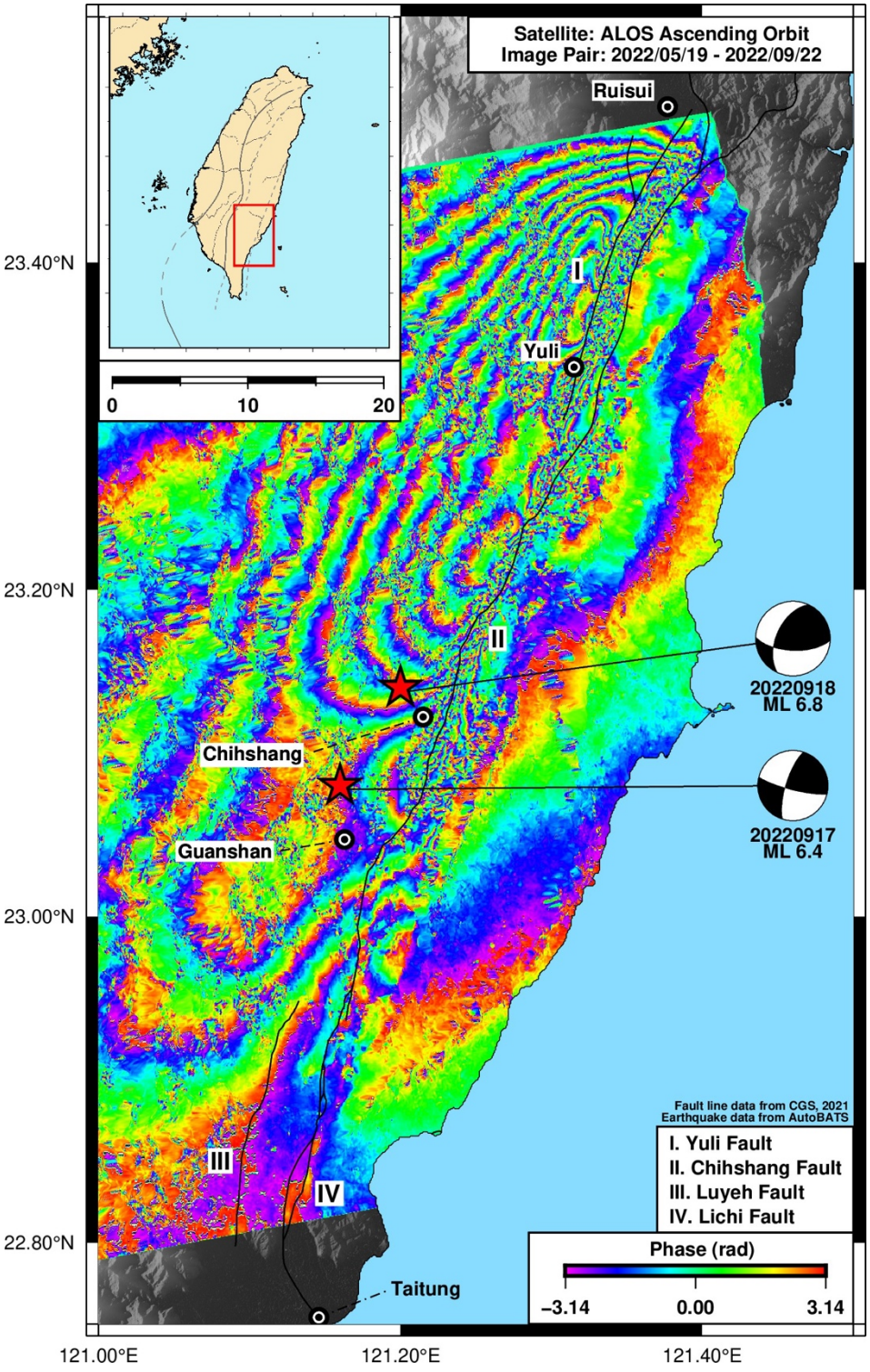


圖 B-8：2022 年 9 月 18 日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅 ALOS2 SM 升軌影像（Ascending）：2022 年 05 月 19 日和 9 月 22 日。

B-4 2024 年 04 月 03 日 花蓮地震的同震地表變形

2024 年 4 月 3 日花蓮地震的同震地表變形初步分析。

藉由合成孔徑雷達差分干涉技術(DInSAR)分析歐洲太空總署 Sentinel-1 衛星，升軌道使用 2024 年 3 月 27 日和 4 月 8 日組成的雷達影像對，而降軌道則使用 2024 年 3 月 29 日和 4 月 10 日所組成的雷達影像對，協助我們了解這次地震和後續餘震對於花蓮市區和縱谷北段所造成的地表變形（圖 B-9 和圖 B-10）。地震資料來自於台灣寬頻地震觀測網(Broadband Array in Taiwan for Seismology, BATS)的快速解算結果。斷層線資料來自於經濟部地質調查及礦業管理中心(Geological Survey and Mining Management Agency, GSMMA)。

從彩虹干涉環的分佈可以得知本次地震所造成的地表變形範圍從北到南為崇德、花連、壽豐和鳳林，長約 60 公里。不論升軌道（17 個干涉環）和降軌道（19 個干涉環）的干涉結果都顯示約有 50 公分左右的衛星視角(line-of-sight, LOS)位移量，此外，透過干涉環的密集程度也可表示地表位移變形的梯度，變形梯度越大，干涉環越密集，主要密集的干涉環分布在花蓮以西的部分，往南北兩側的密度逐漸趨

緩。由於花蓮的西邊是中央山脈，會受到植被擾動之影響，導致雷達影像資訊斑駁而不易成相，所以無法確認地表變形往西延伸的變形狀況。未來，必須要搭配許多現場辛苦調查的成果相互驗證，才能確認本次雷達衛星量測結果之準確性，同時在取得衛星的精密軌道資訊之後，將會進行相位解算的分析，獲得更詳細的同震地表位移變化量，以利後續相關研究的進行。

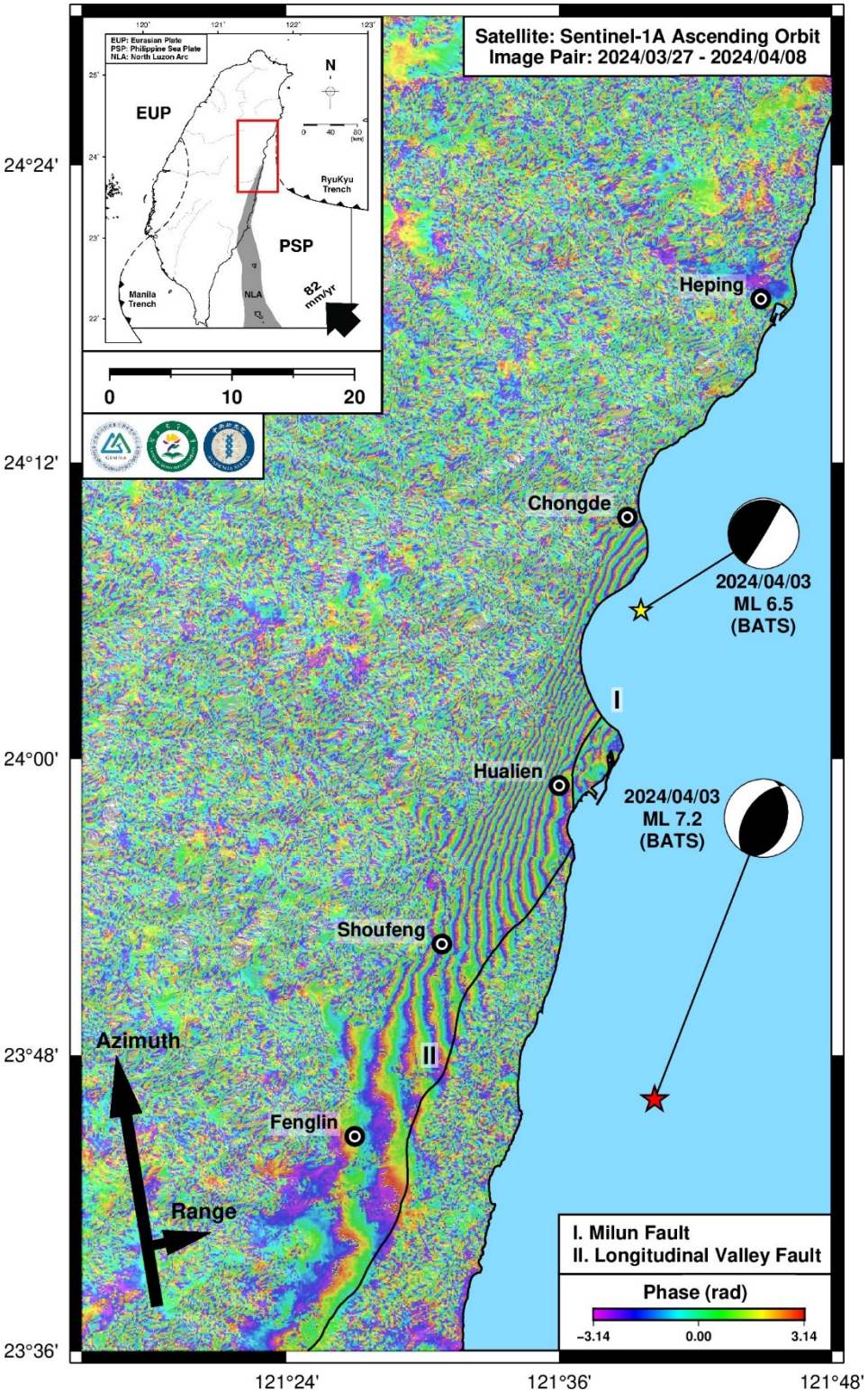


圖 B-9：2024 年 04 月 03 日花蓮地震干涉圖。使用地震前後的兩幅升軌影像（Ascending）：2024 年 3 月 27 日和 4 月 8 日。

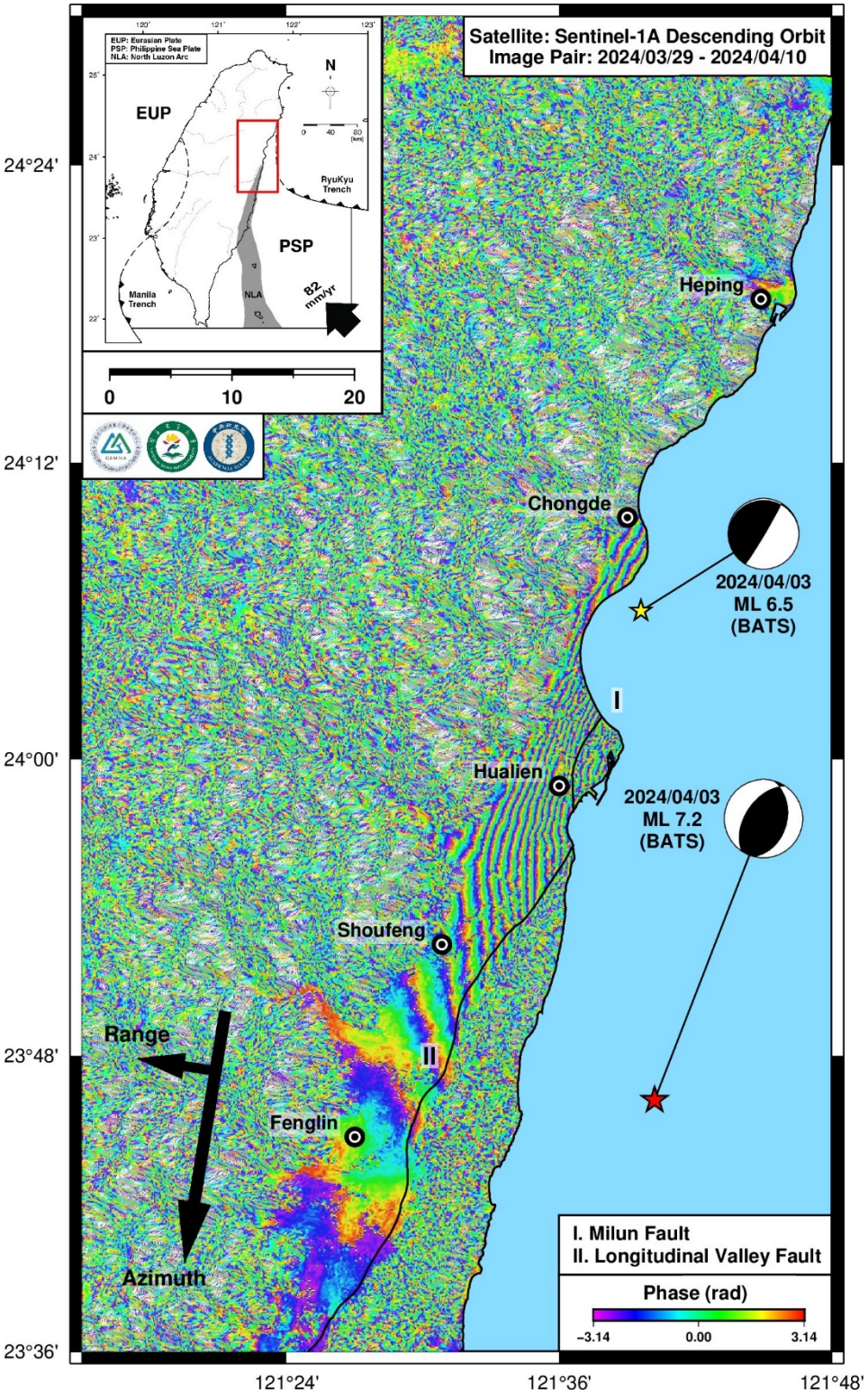
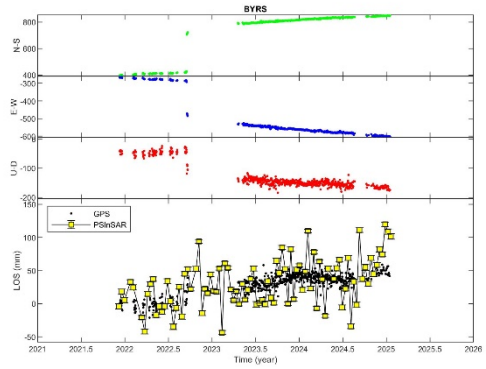
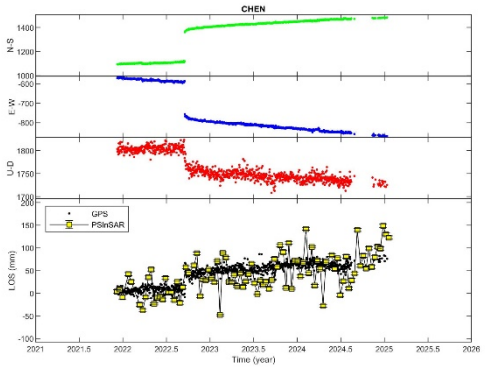


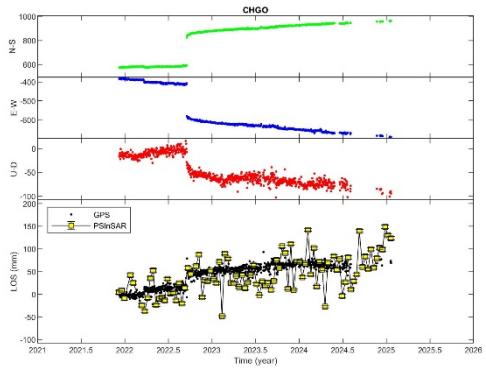
圖 B-10：2024 年 04 月 03 日花蓮地震干涉圖。使用地震前後的兩幅升軌影像（Descending）：2022 年 3 月 29 日和 4 月 10 日。

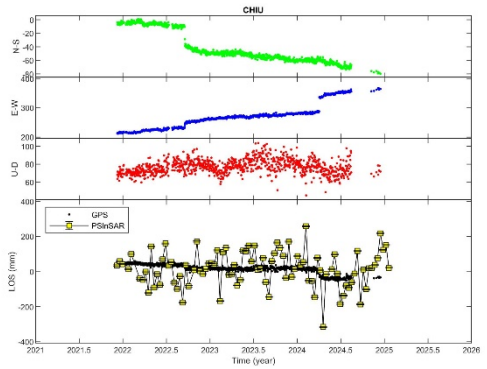
附錄 C、GNSS 與 PSI 時間序列比對

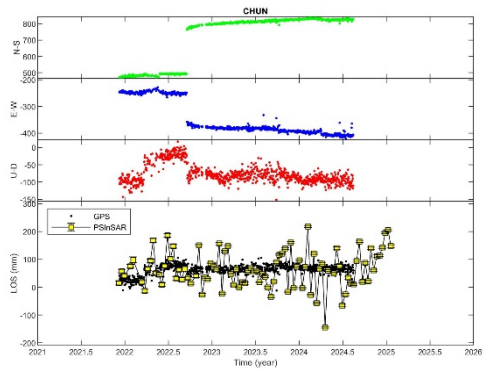
C-1 2022~2024 年 Ascending（相對 TTSH 站）

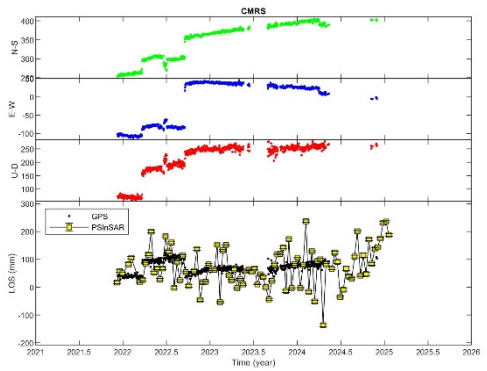


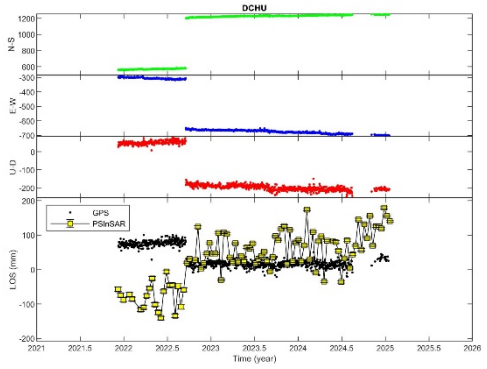


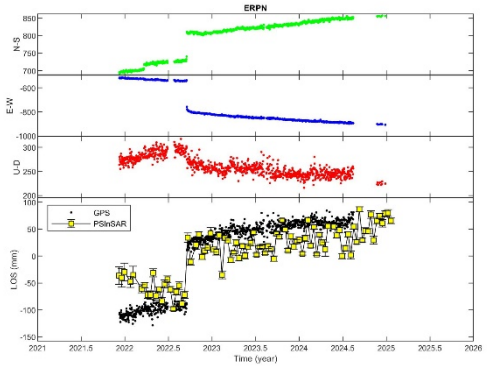


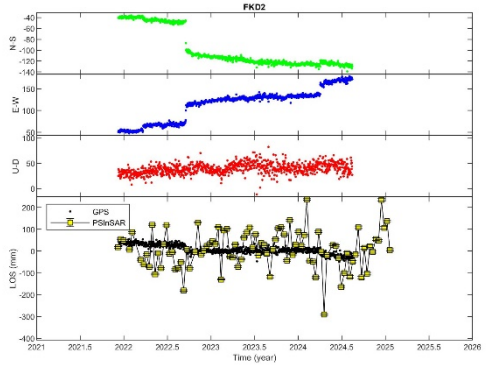


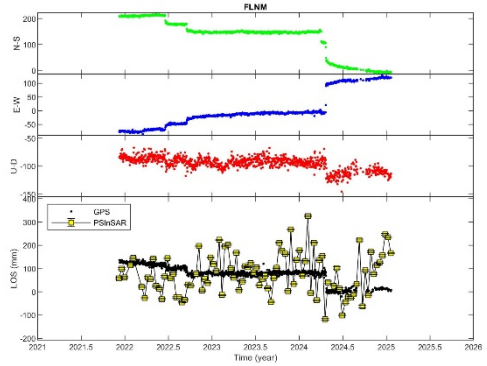


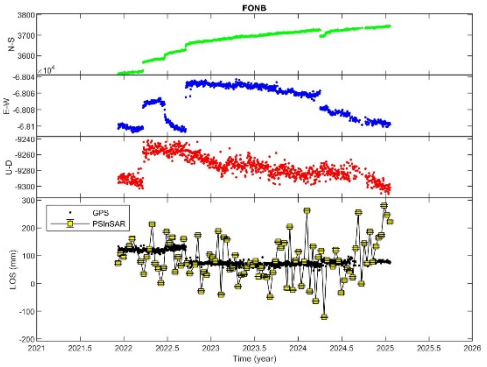


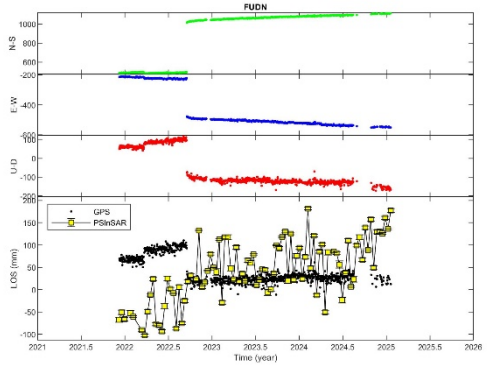

DCHU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

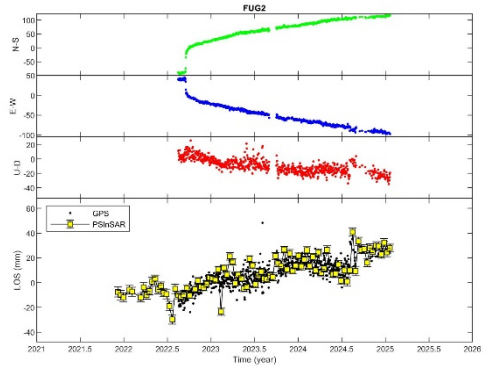

ERPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

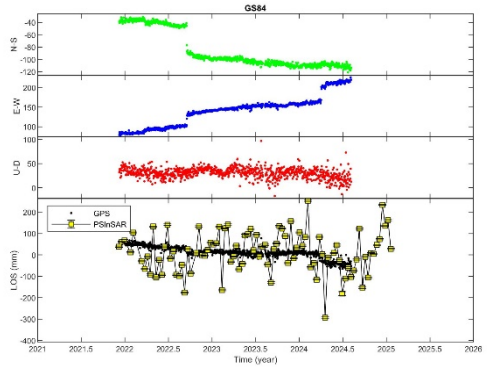

FKD2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

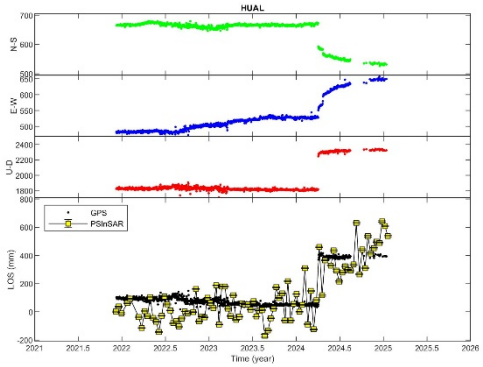

FLNM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

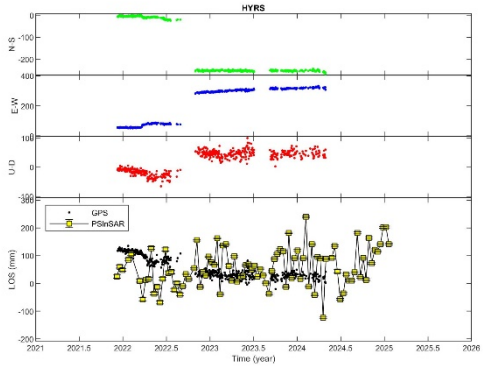

FONB
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

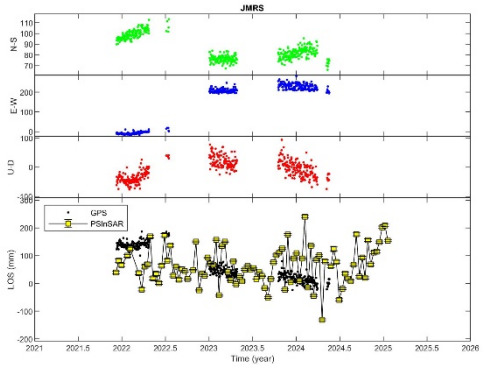

FUDN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

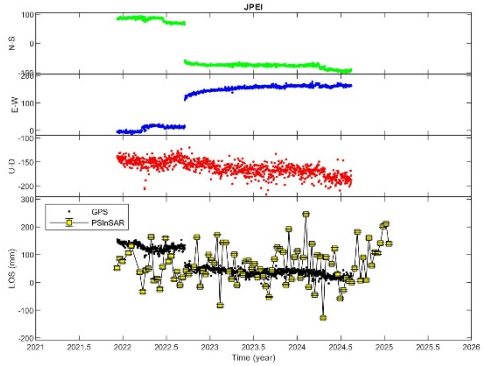

FUG2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

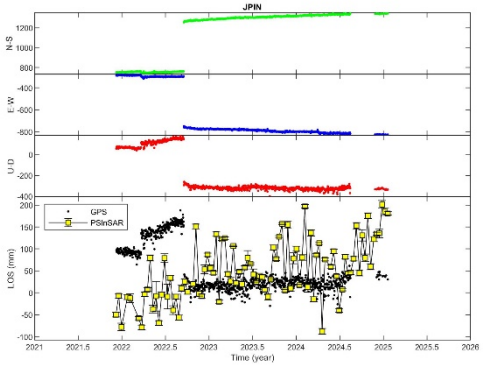

GS84
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

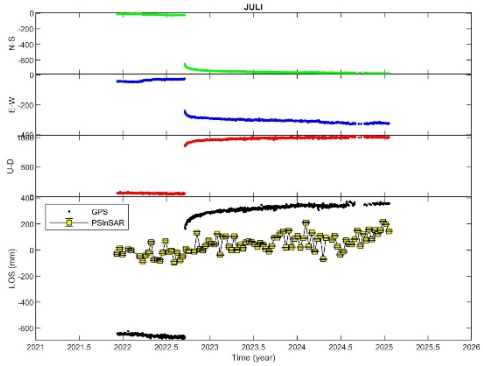

HUAL
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

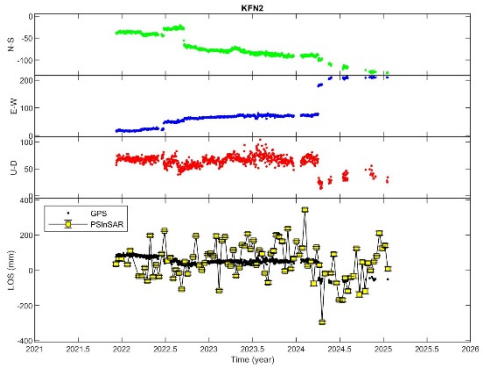

HYRS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

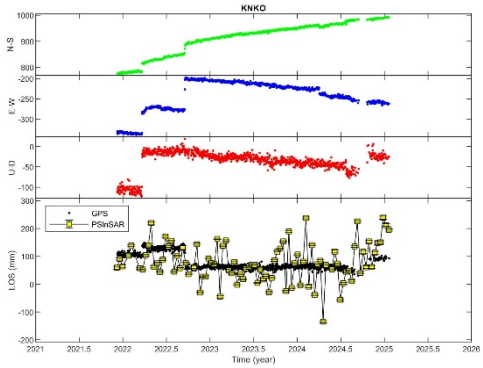

JMRS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

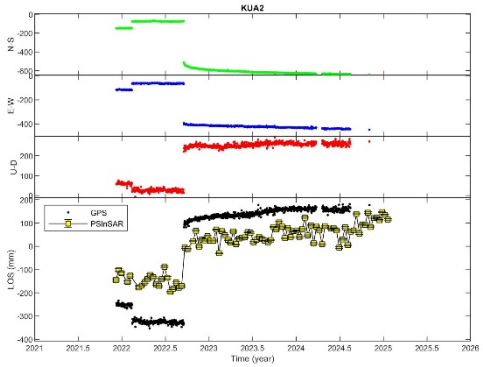

JPEI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

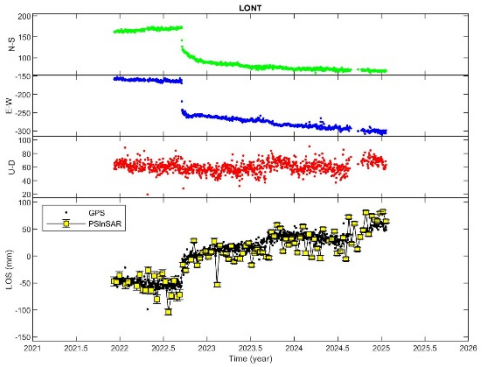

JPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

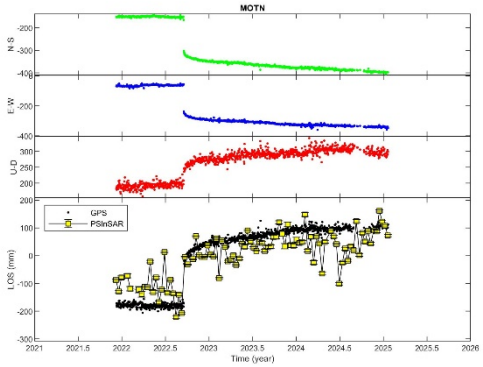

JULI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

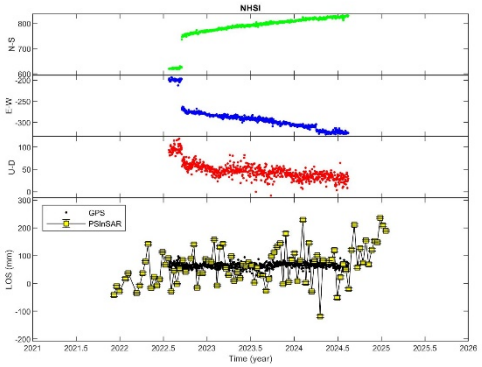

KFN2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

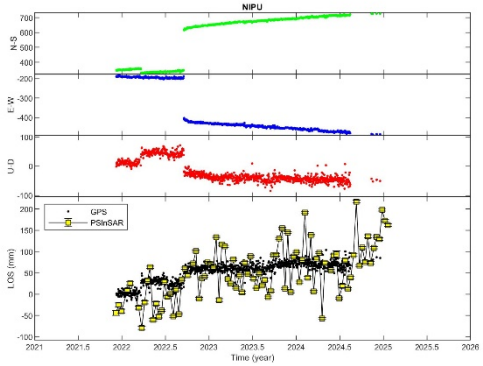

KNKO
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

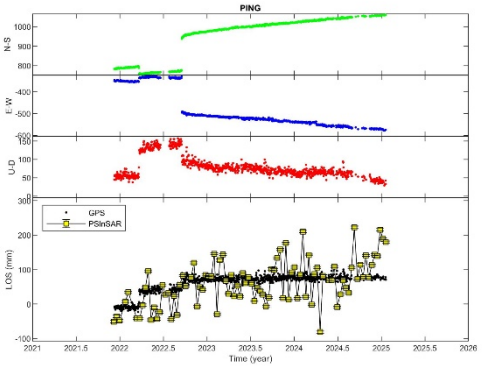

KUA2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

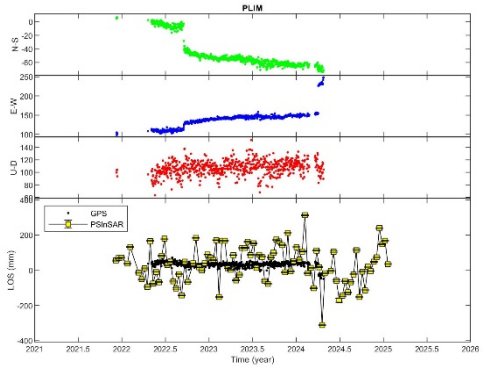

LONT
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

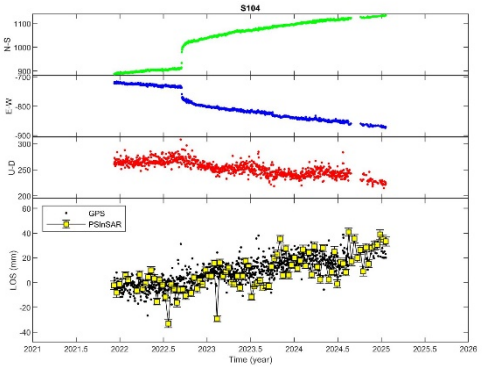

MOTN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

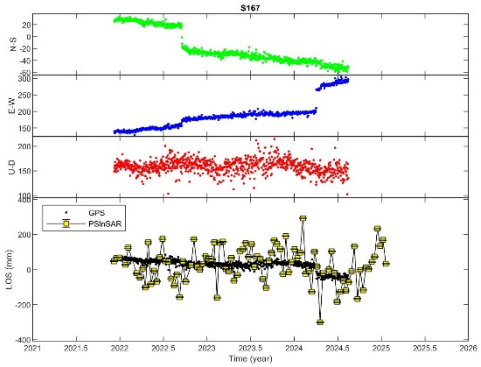

NHSI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

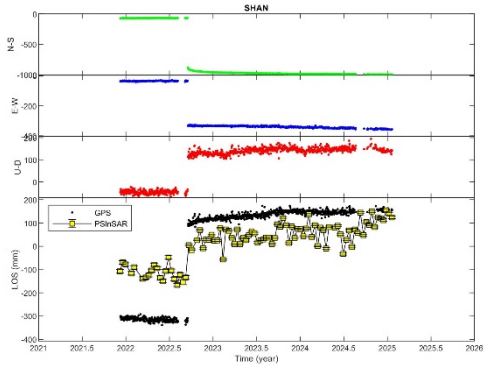

NIPU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

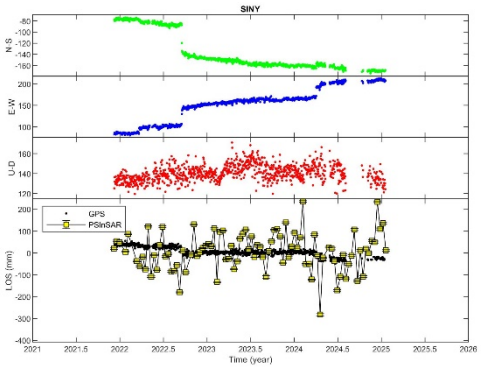

PING
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

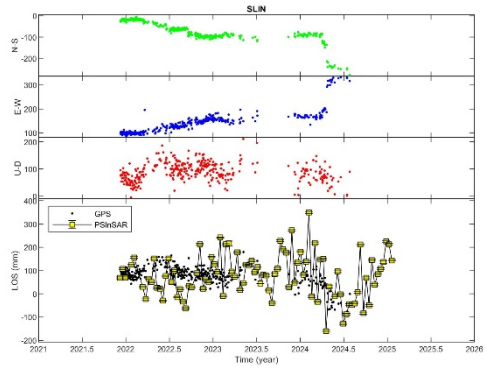

PLIM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

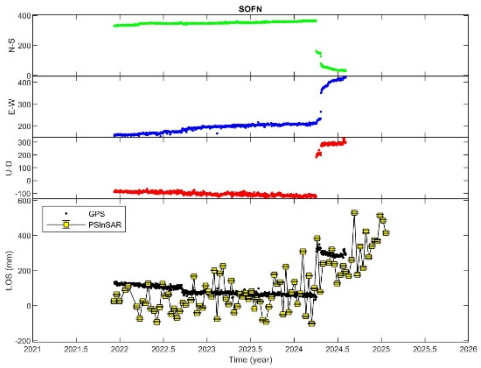

S104
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

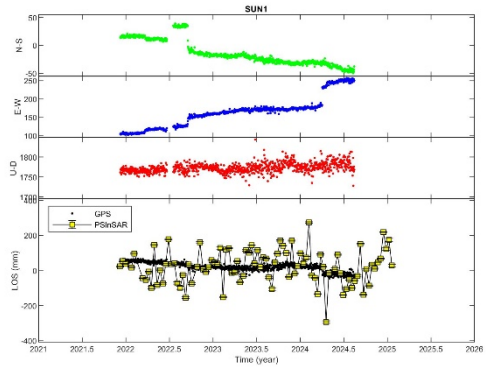

S167
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

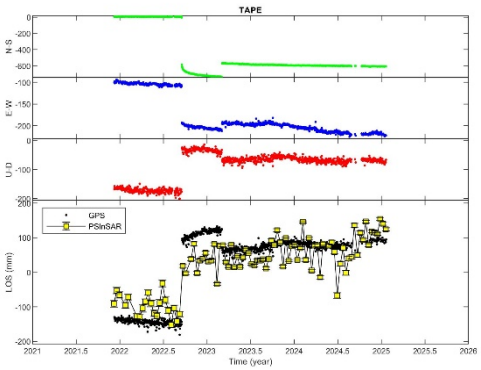

SHAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

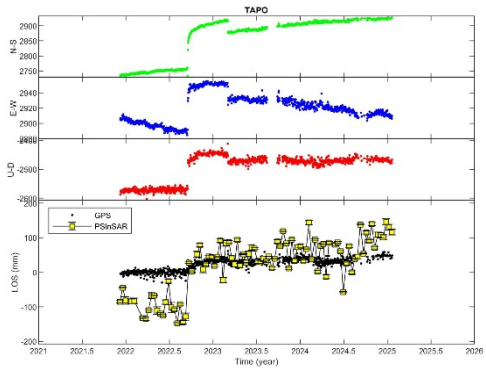

SINY
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

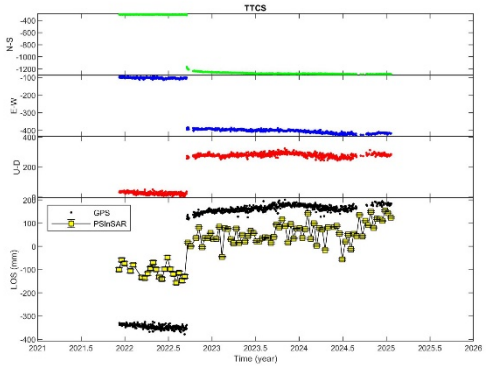

SLIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

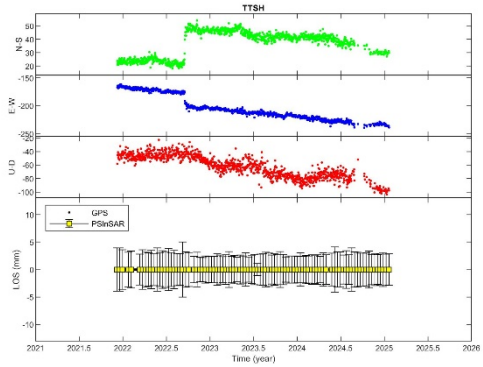

SOFN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

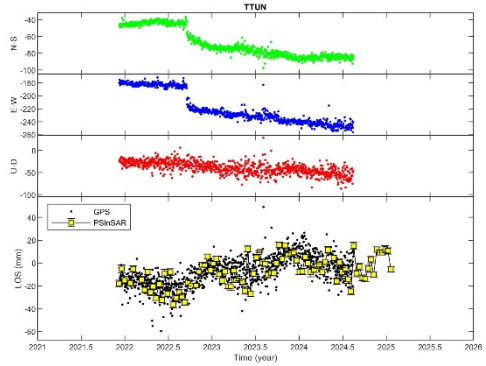

SUN1
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

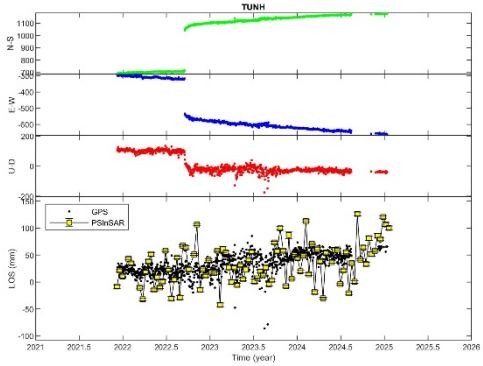

TAPE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

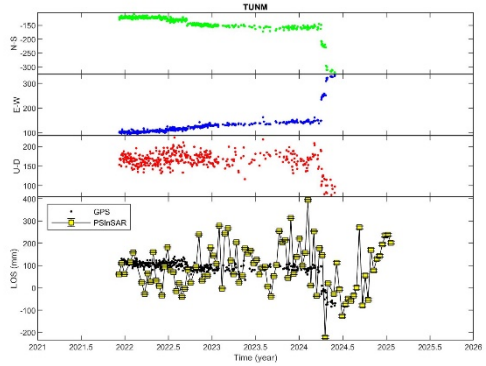

TAPO
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

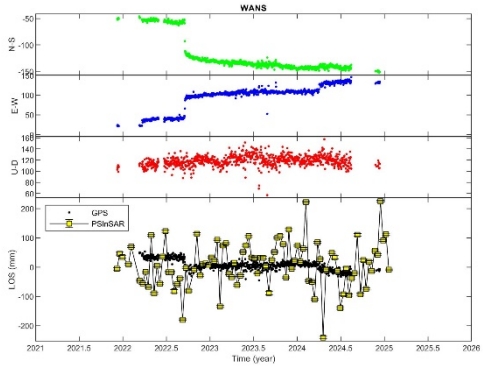

TTCS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

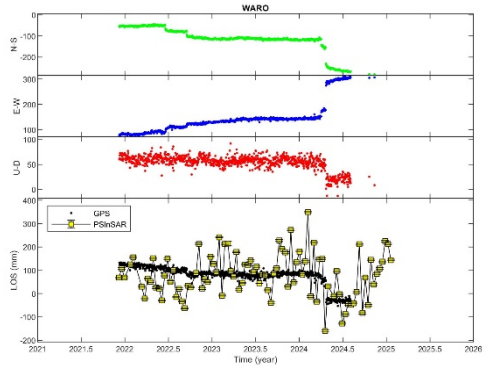

TTSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

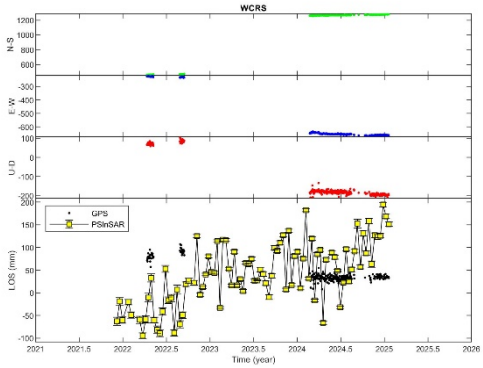

TTUN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


TUNH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


TUNM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WANS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WARO
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WCRS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

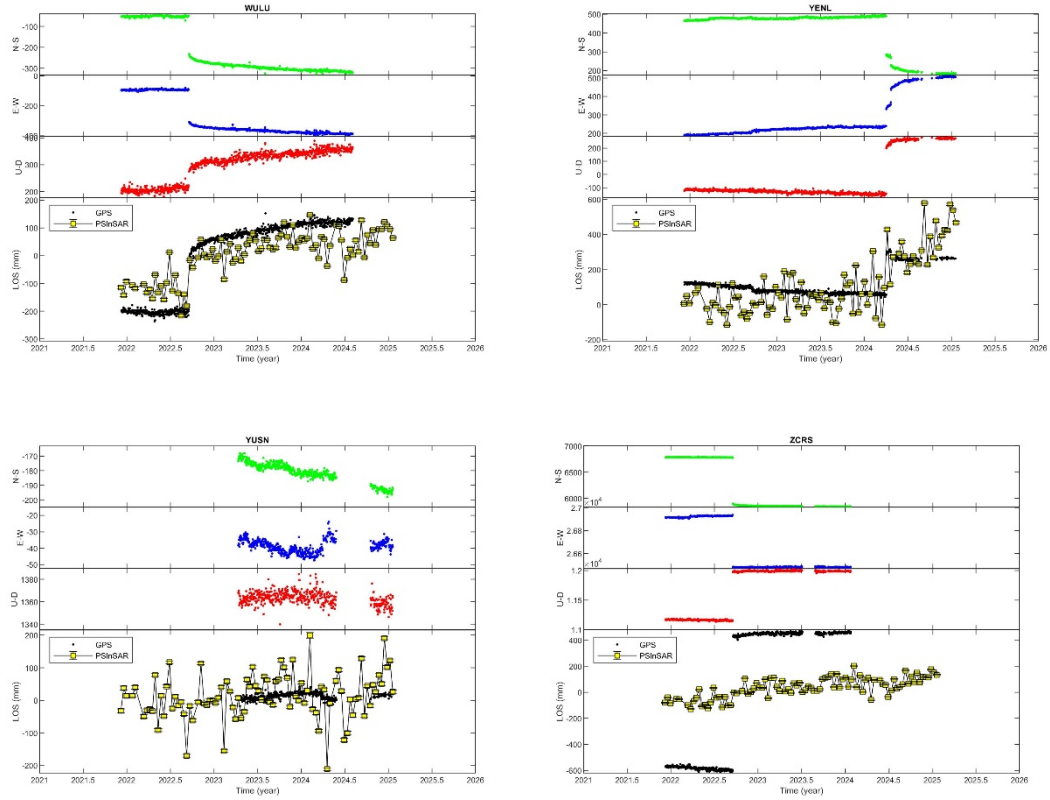
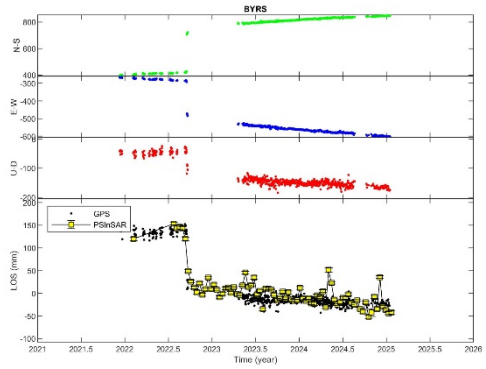
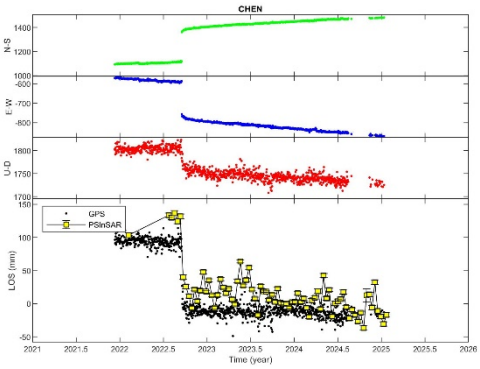
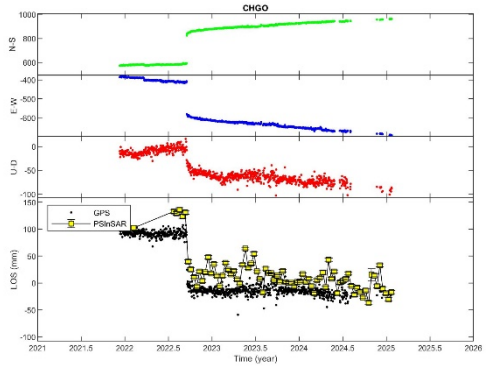


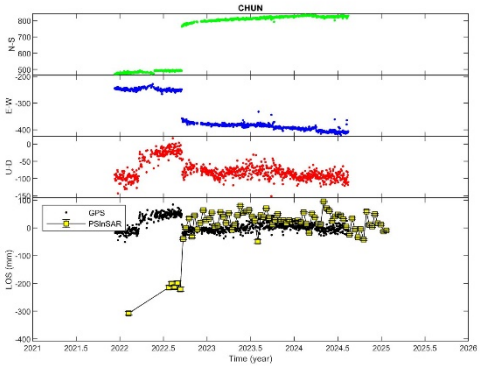
圖 C-1：2022~2024 年升軌道 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列，所有測站接相對 TTSH 測站。

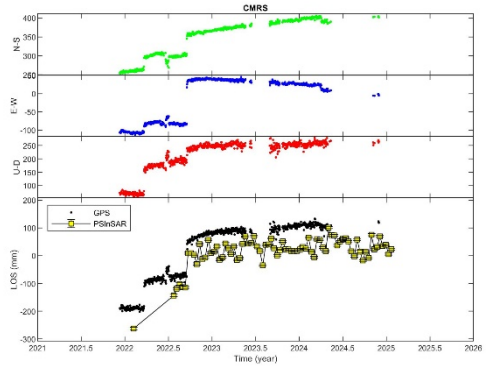
C-2 2022~2024 年 Descending（相對 TTSH 站）

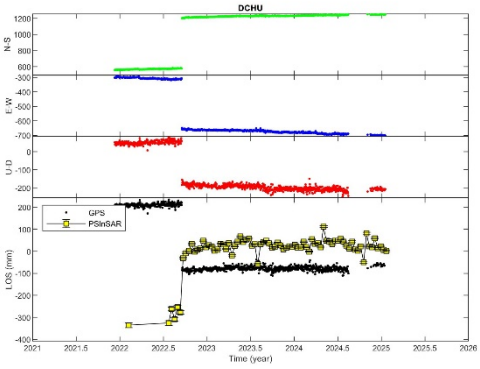


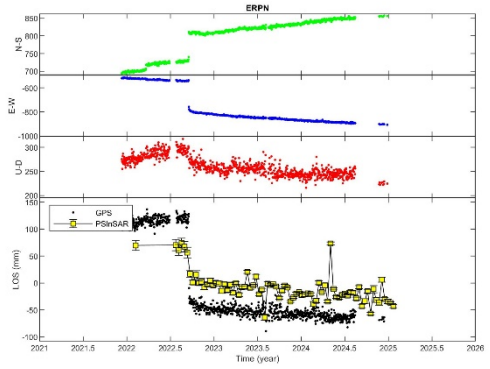


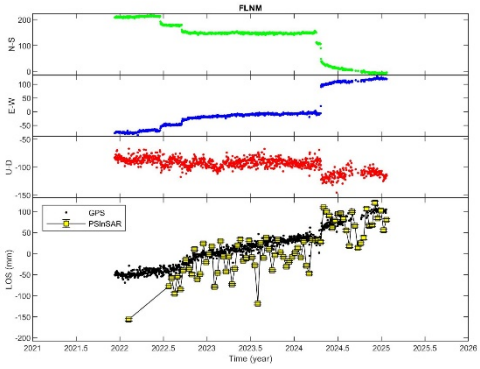


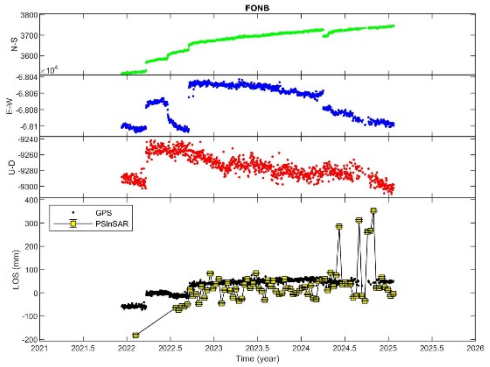


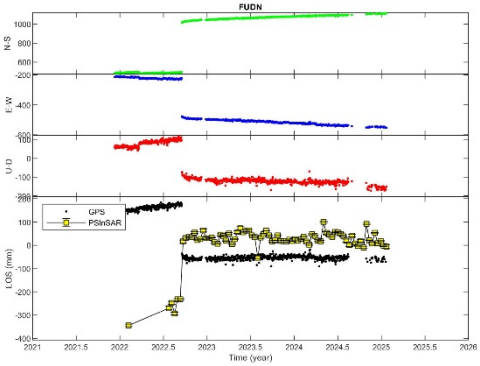


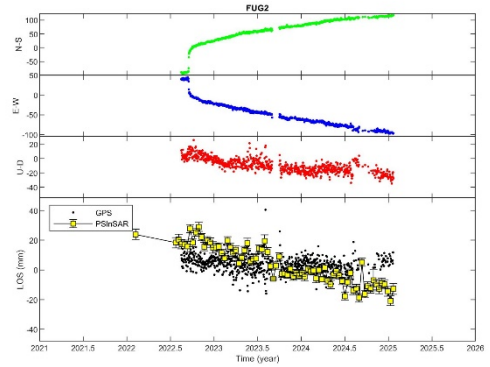


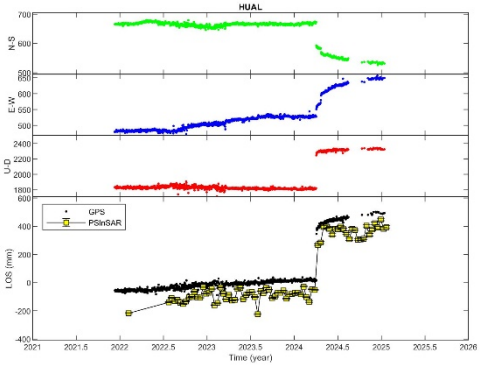

ERPN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

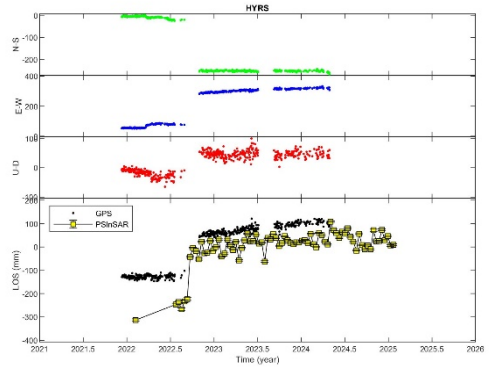

FLNM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

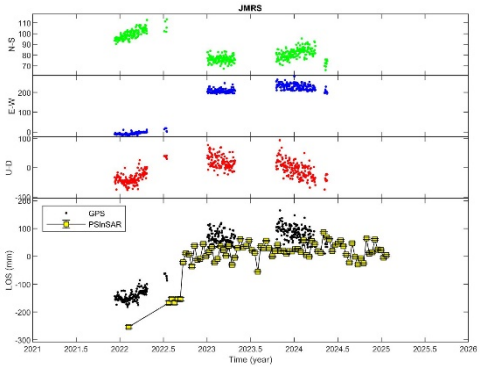

FONB
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

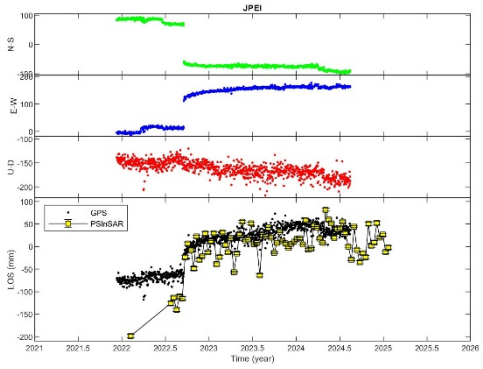

FUDN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

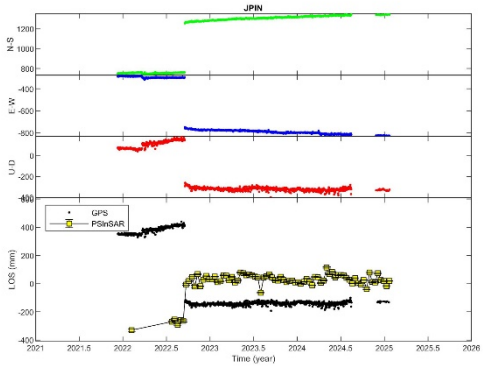

FUG2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

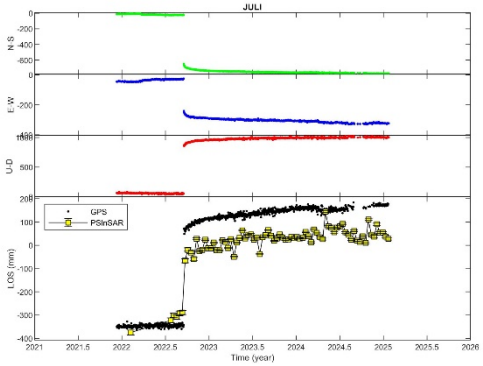

HUAL
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

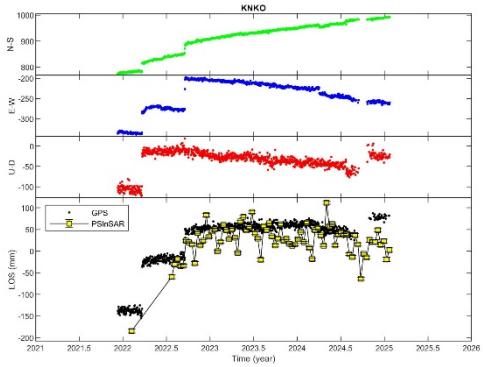

HYRS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

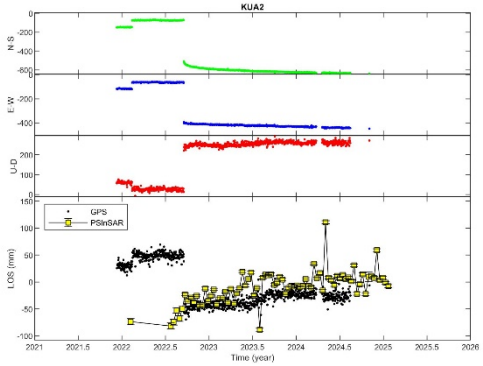

JMRS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

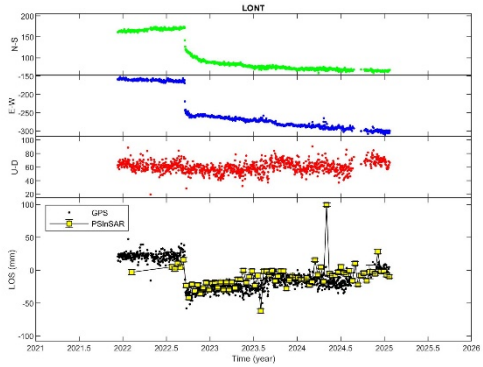

JPEI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

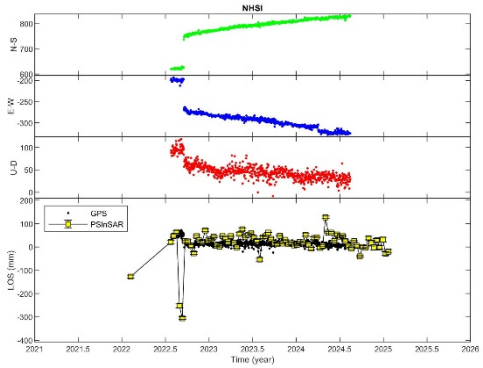

JPIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

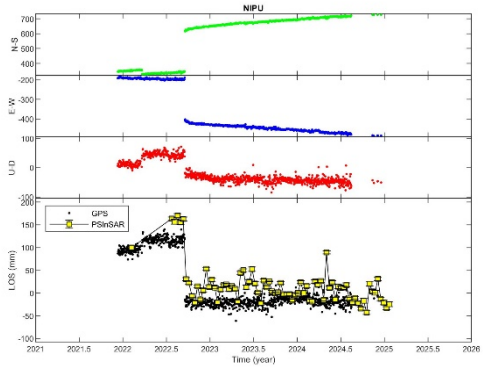

JULI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

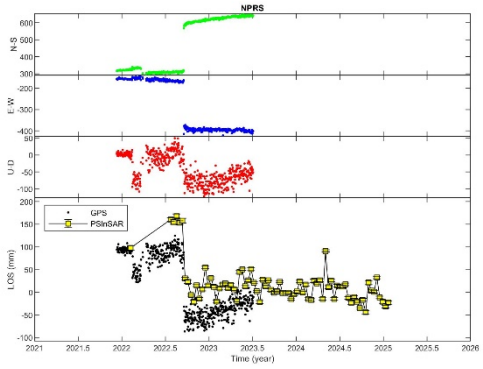

KNKO
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

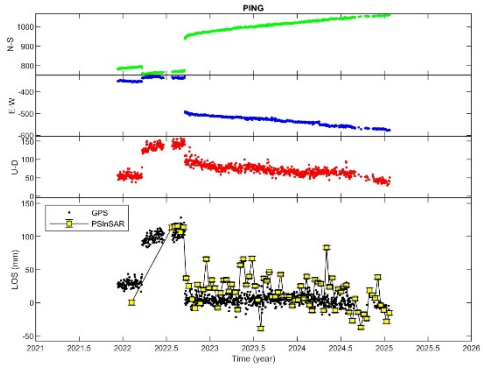

KUA2
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

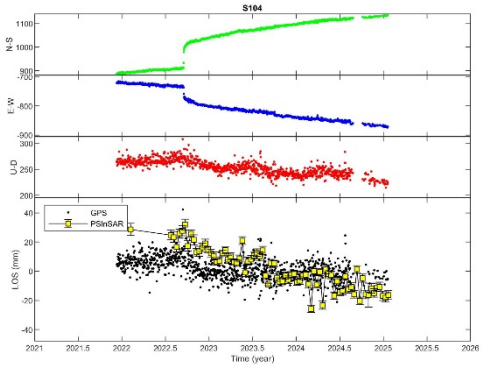

LONT
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

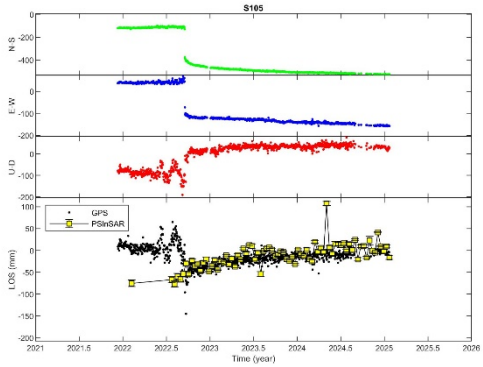

NHSI
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

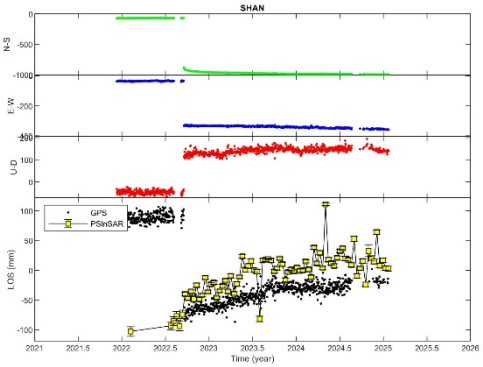

NIPU
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

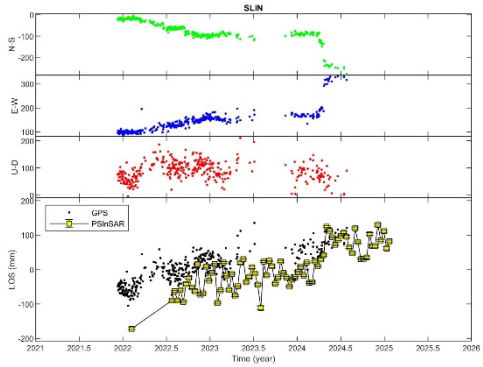

NPRS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

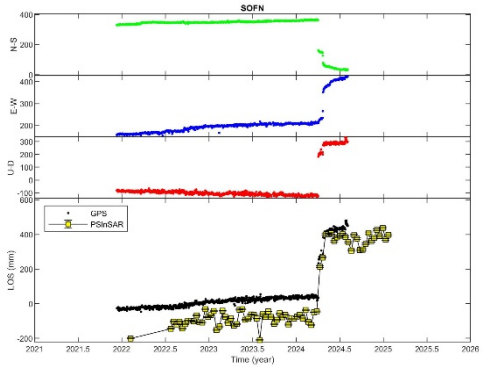

PING
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

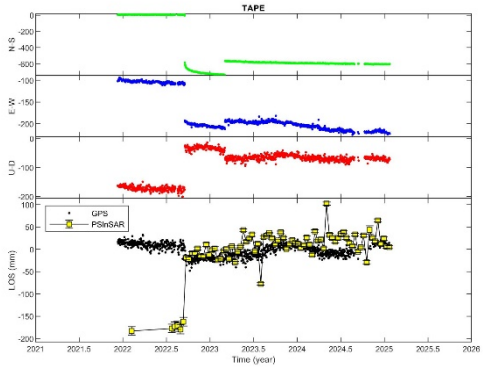

S104
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

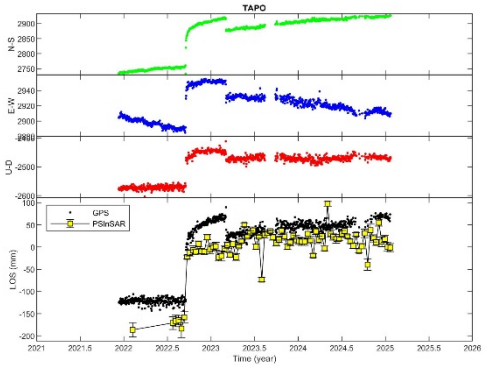

S105
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

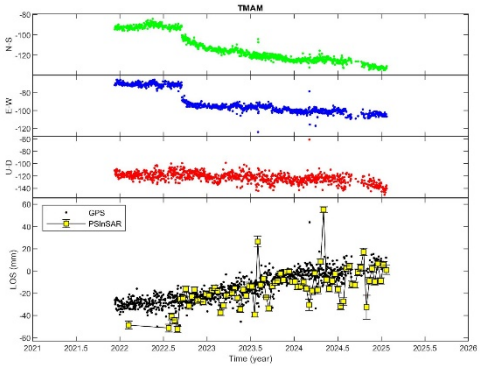

SHAN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

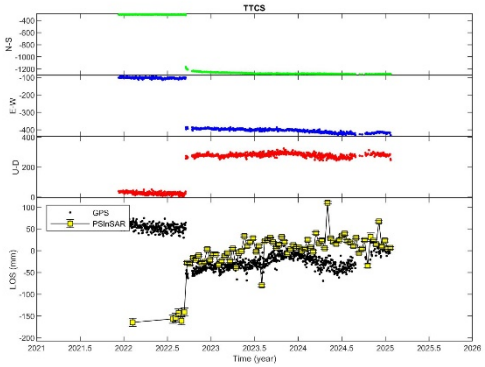

SLIN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

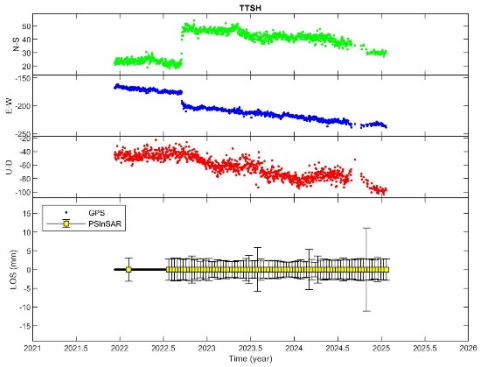

SOFN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

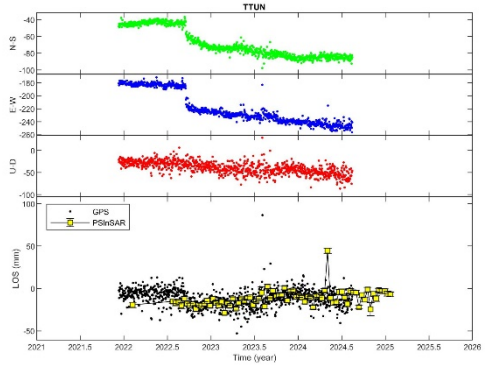

TAPE
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

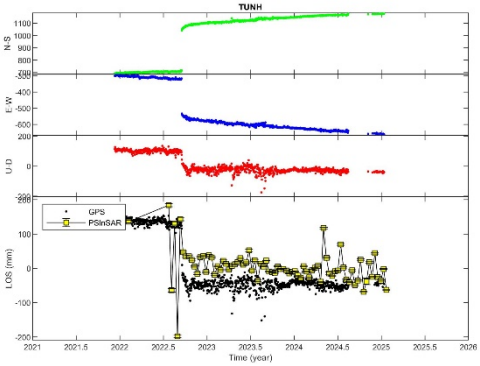

TAPO
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

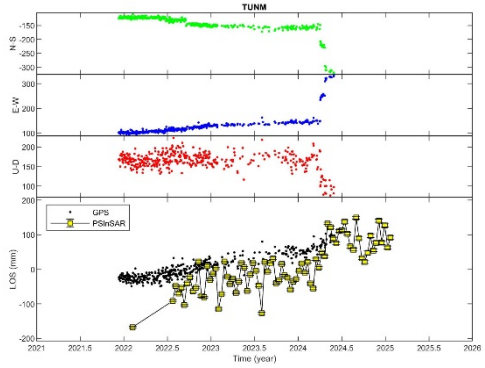

TMAM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

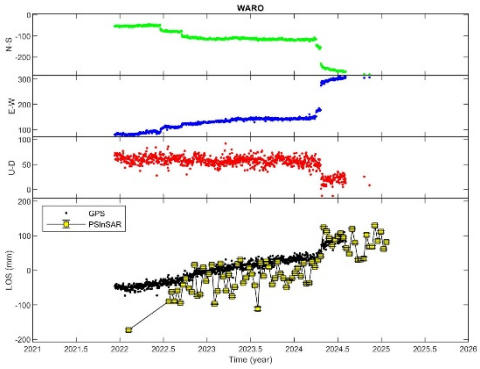

TTCS
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


TTSH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


TTUN
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


TUNH
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


TUNM
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


WARO
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)

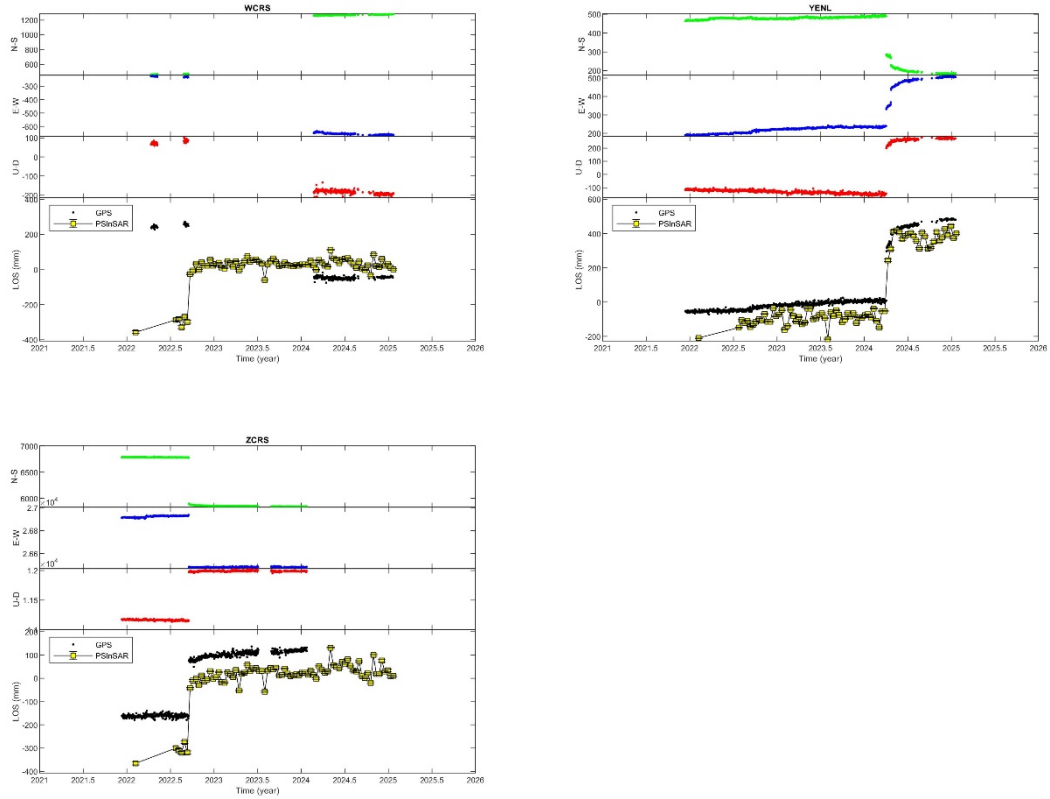


圖 C-2：2022~2024 年降軌道 GNSS 三分量、投影至 LOS 方向與 PSI 時間序列，所有測站接相對 TTSH 測站。

附錄 D、P1~P11 剖面各時期成果

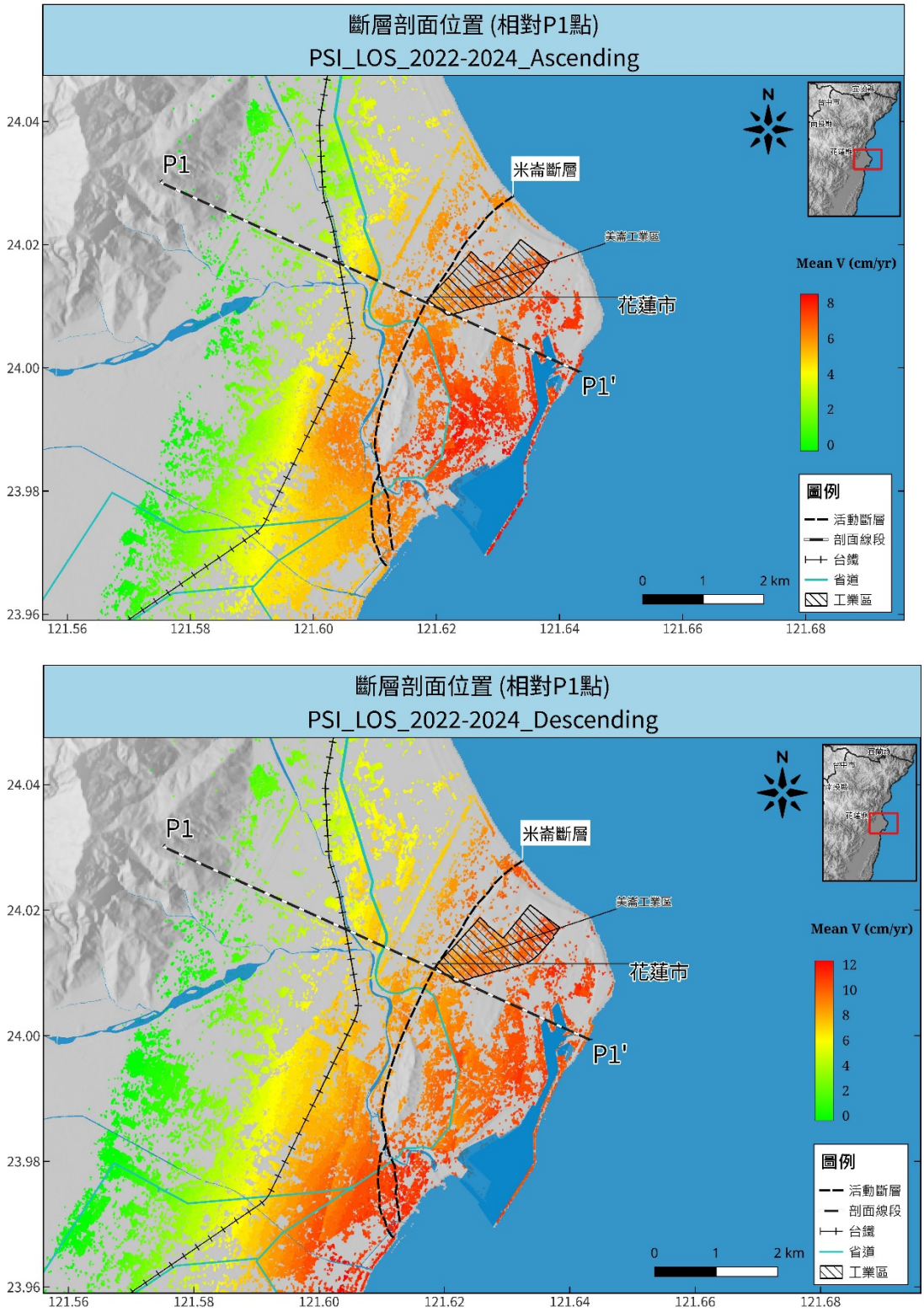
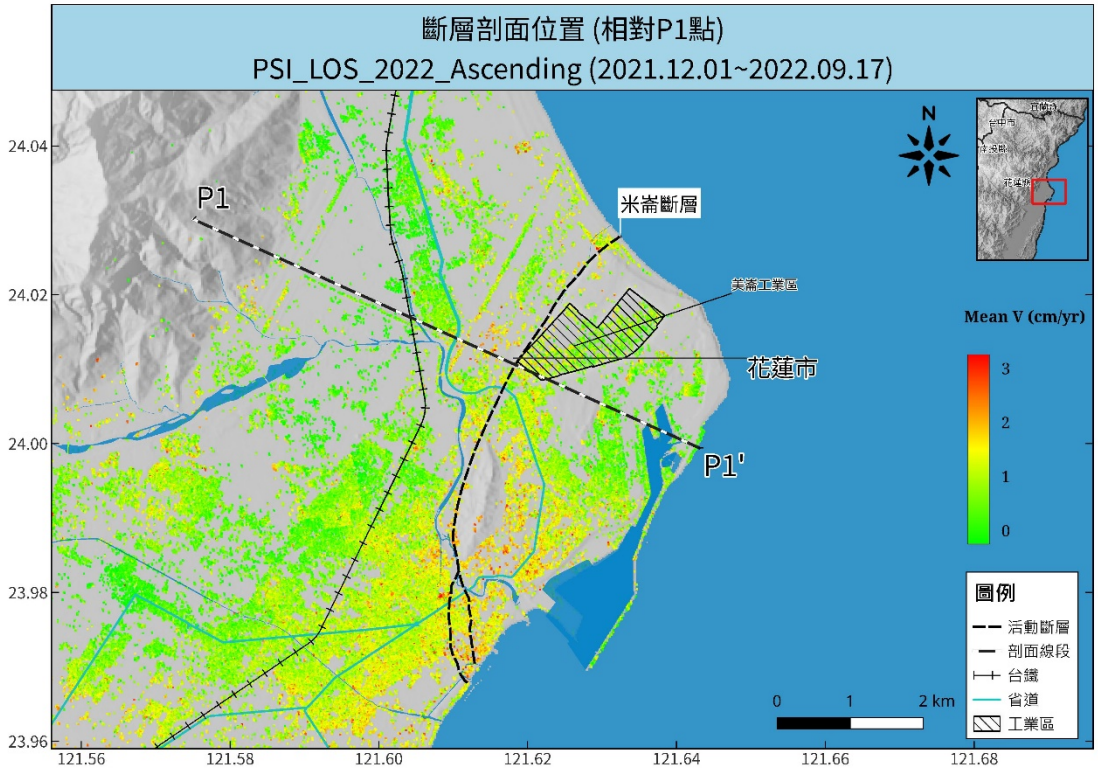


圖 D-1：P1 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P1 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



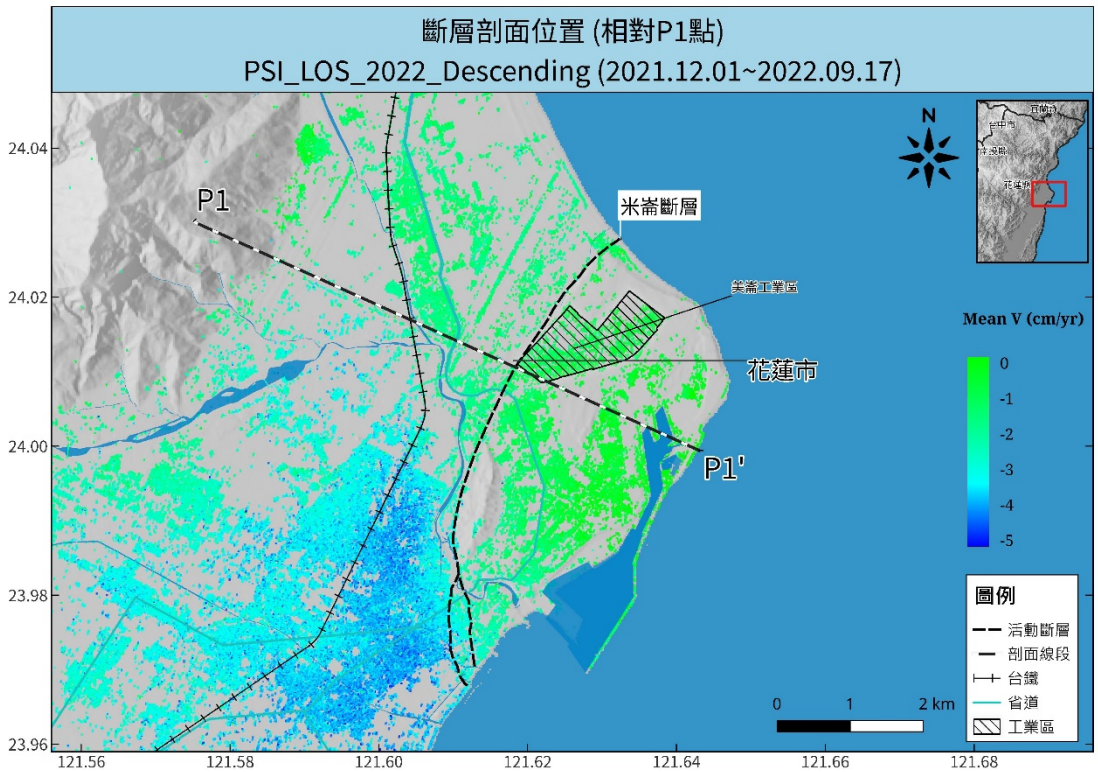
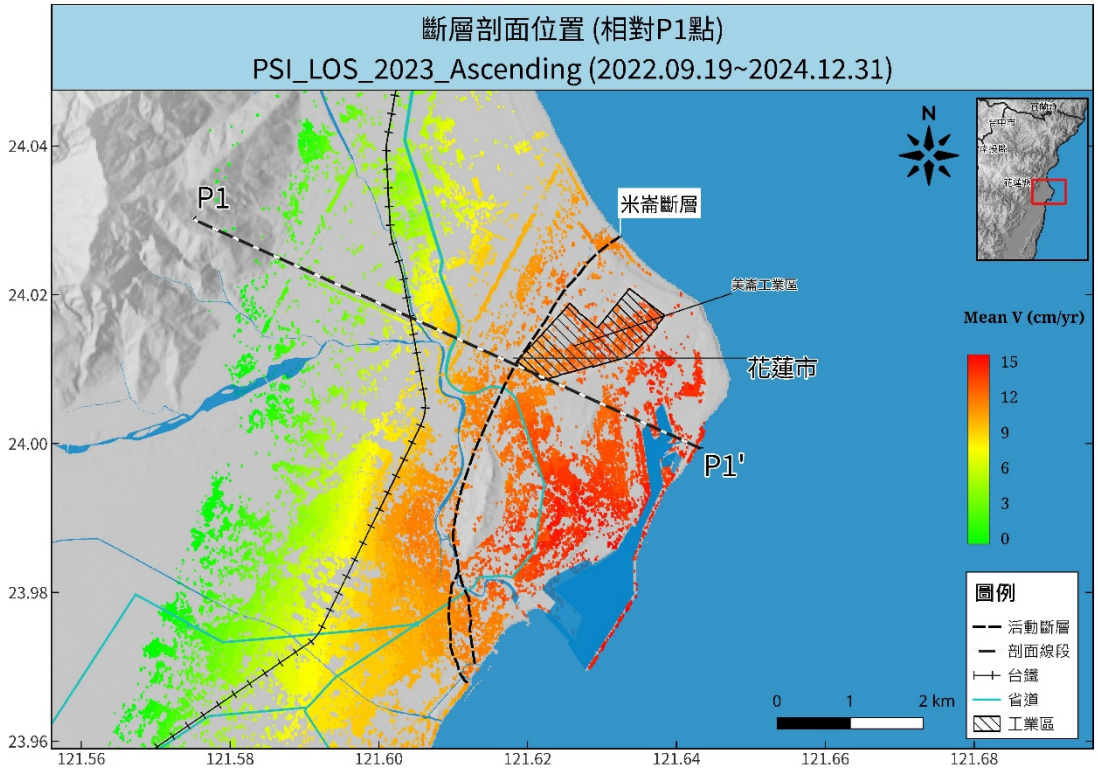


圖 D-2：P1 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P1 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



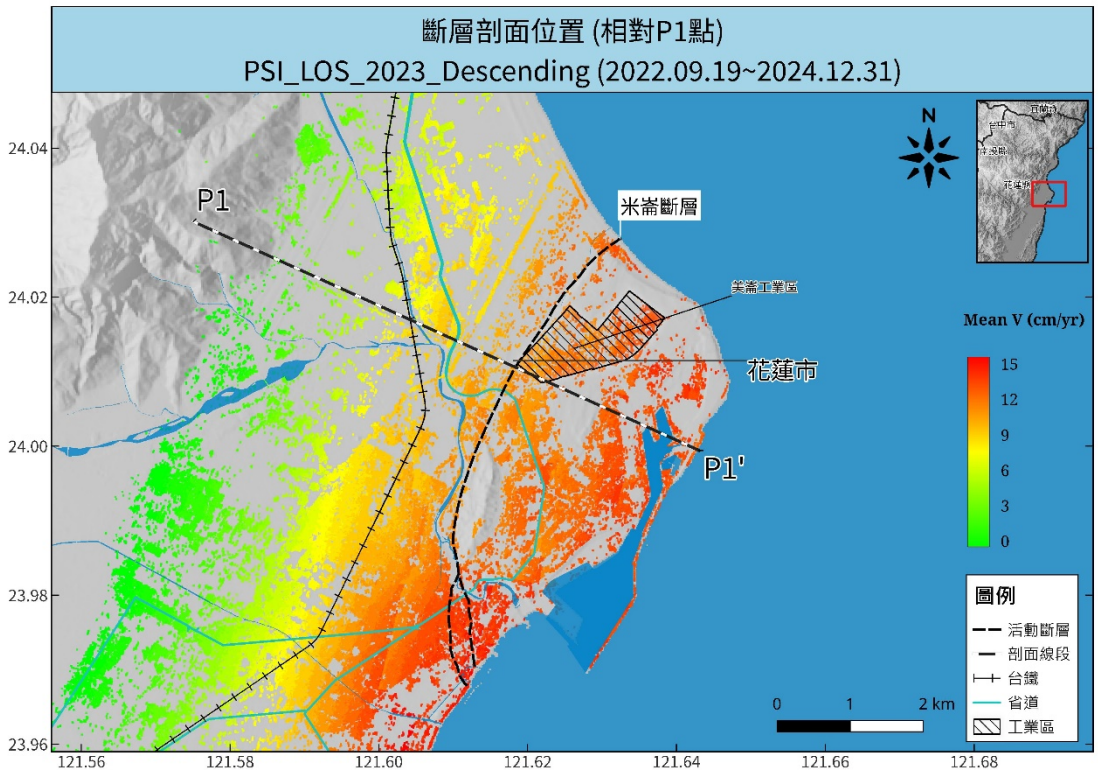
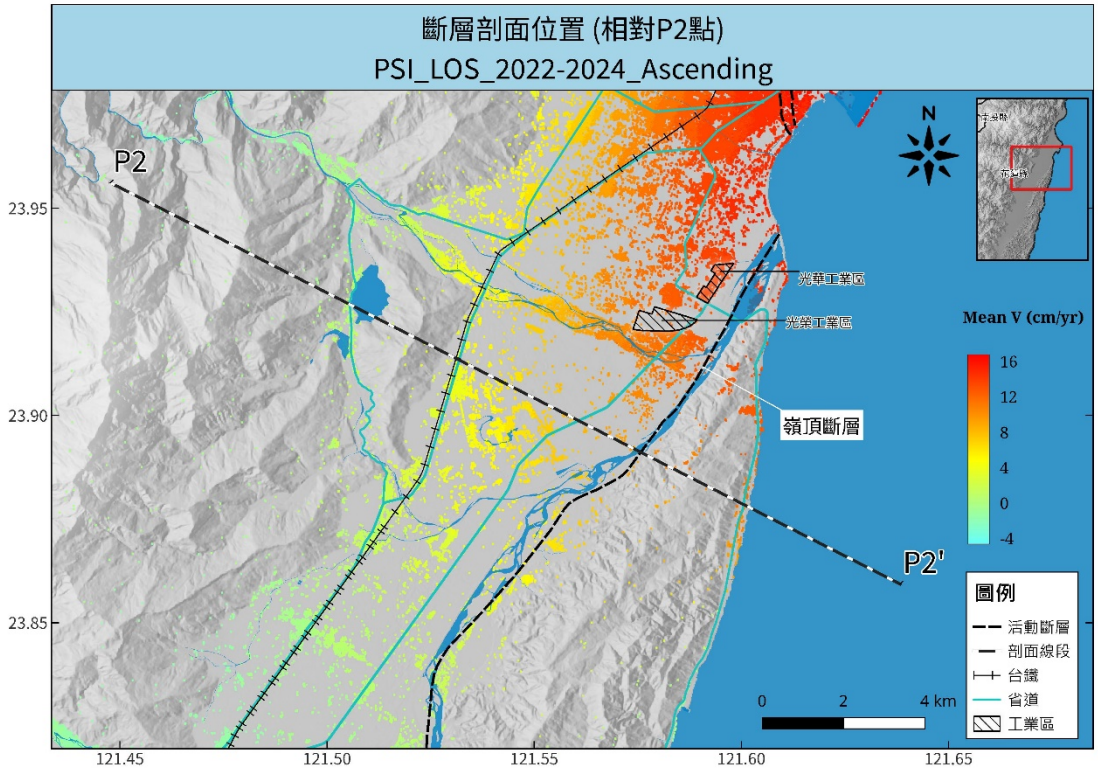


圖 D-3：P1 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P1 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



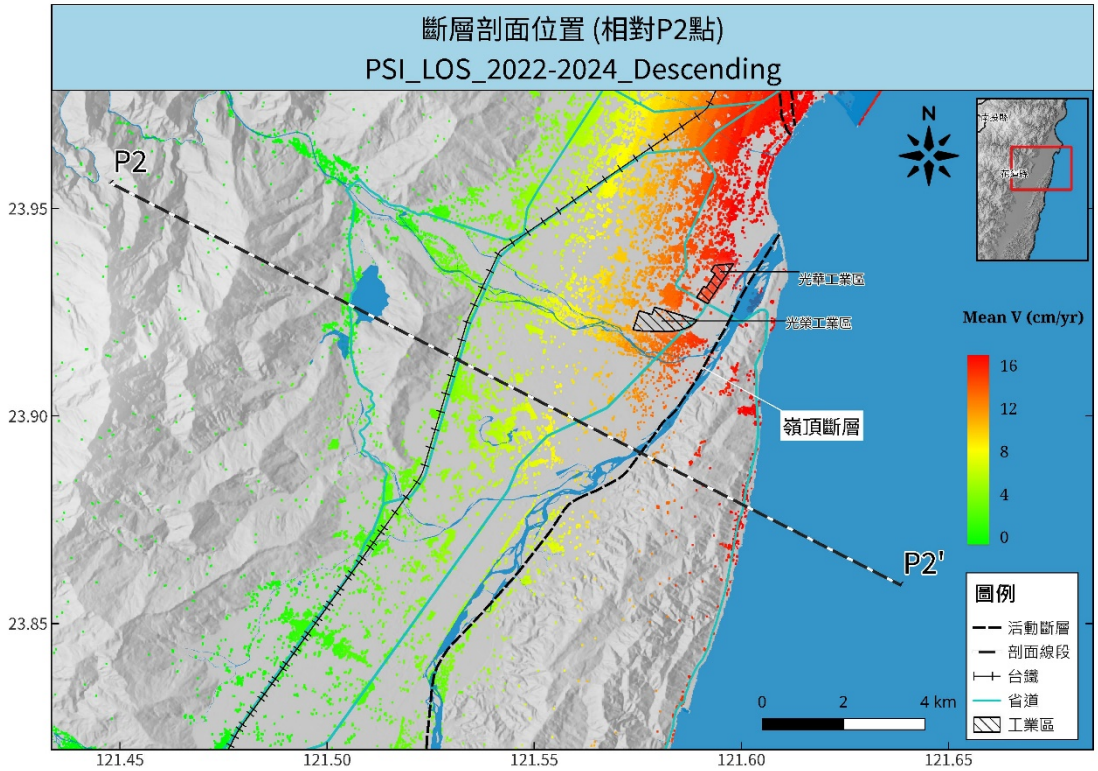
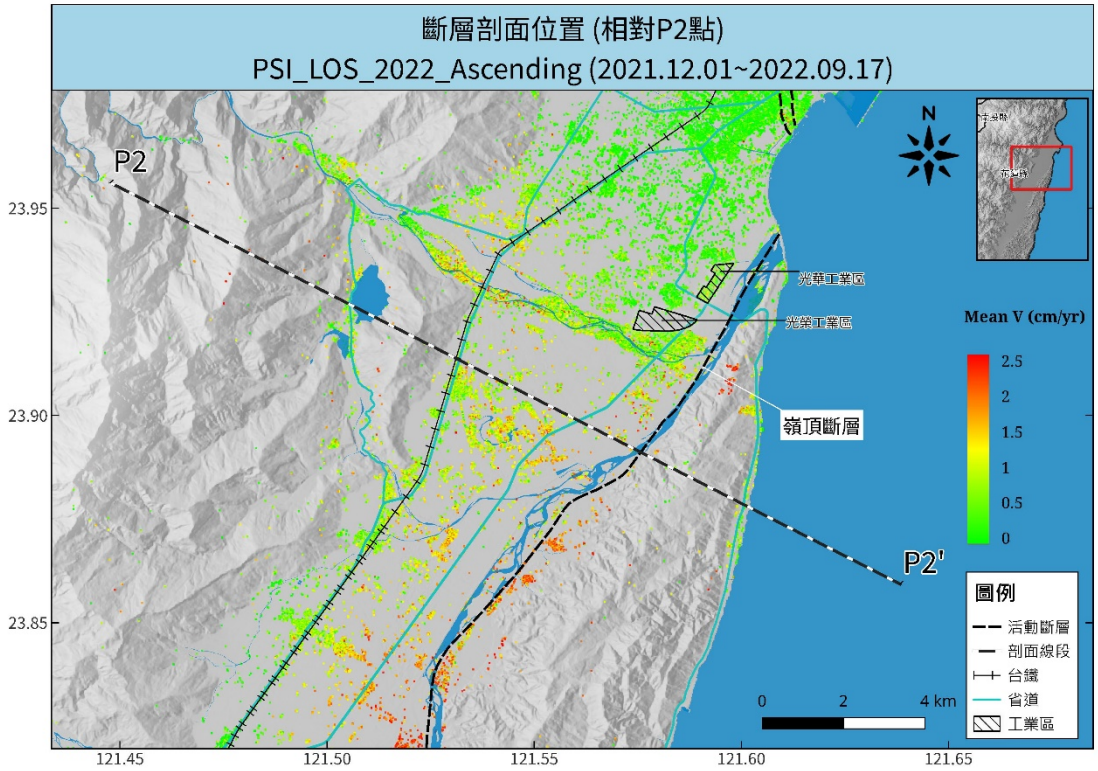


圖 D-4：P2 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P2 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



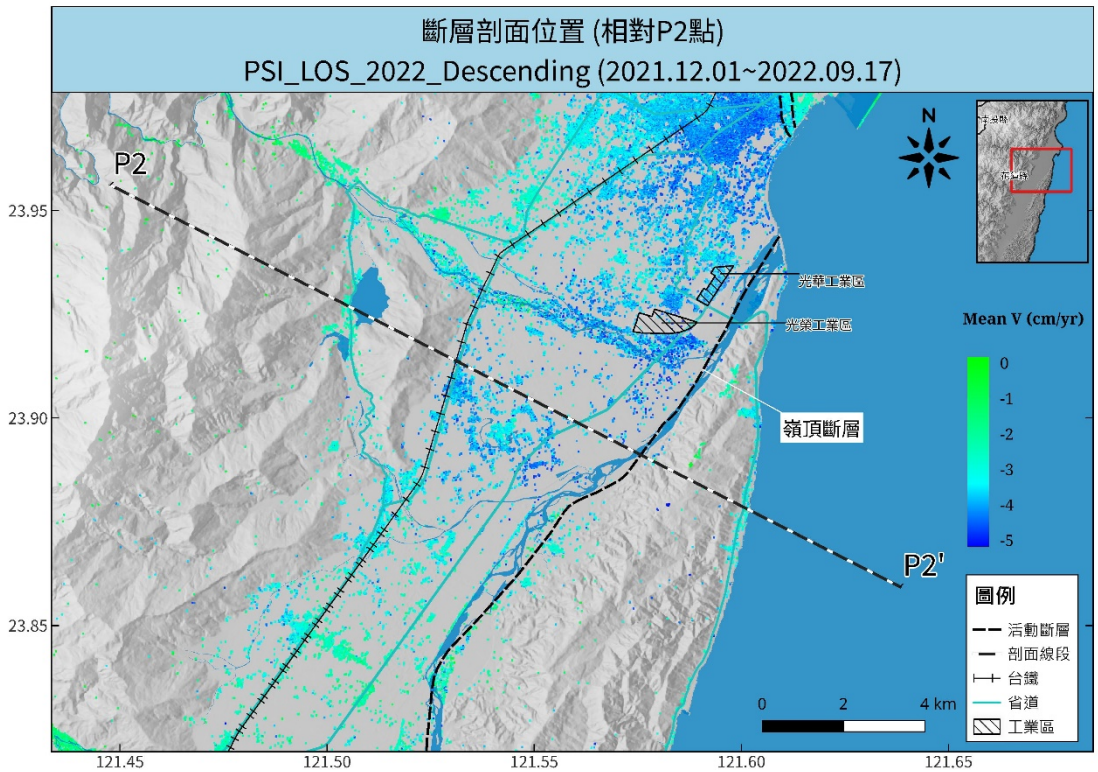


圖 D-5：P2 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P2 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

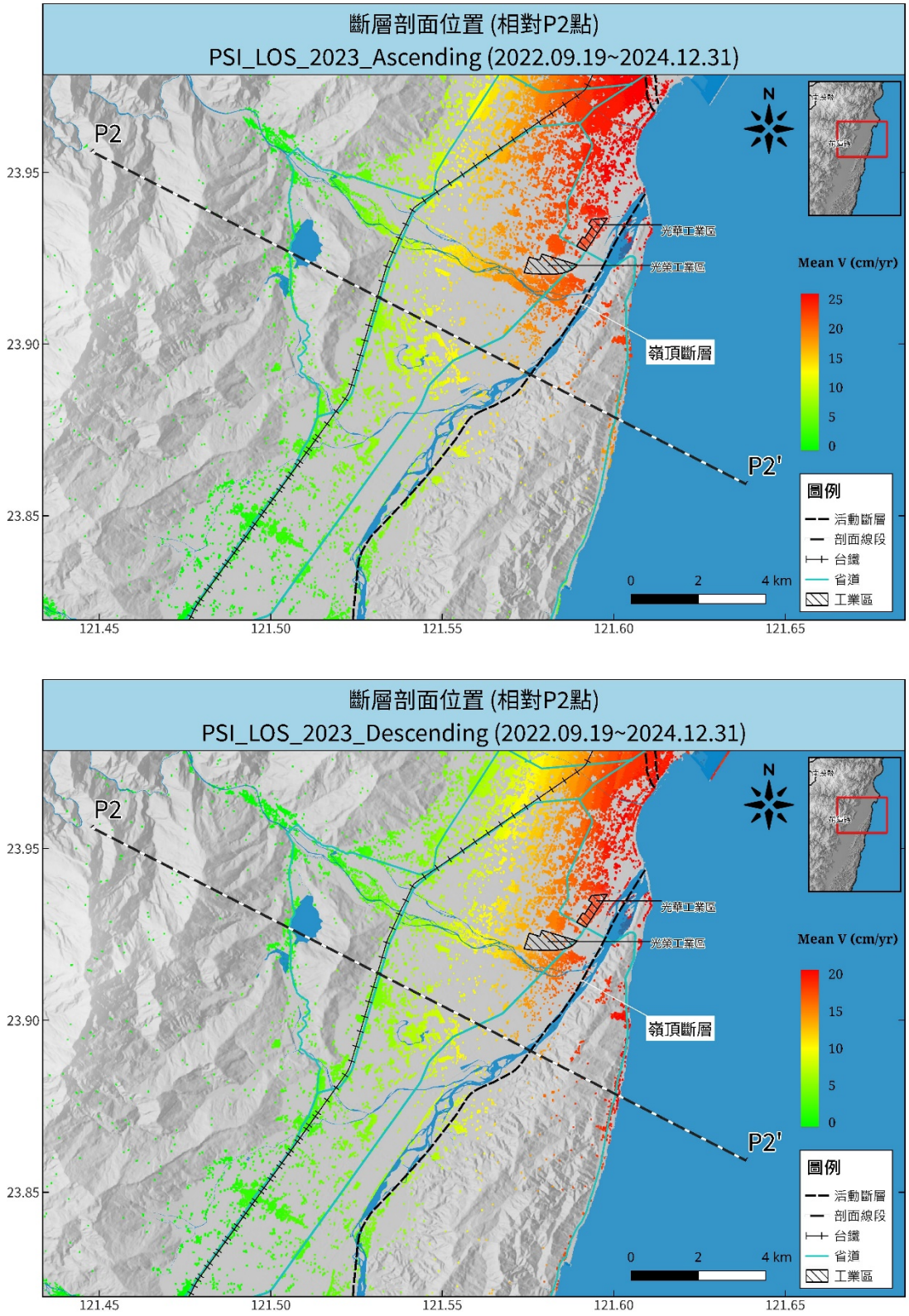
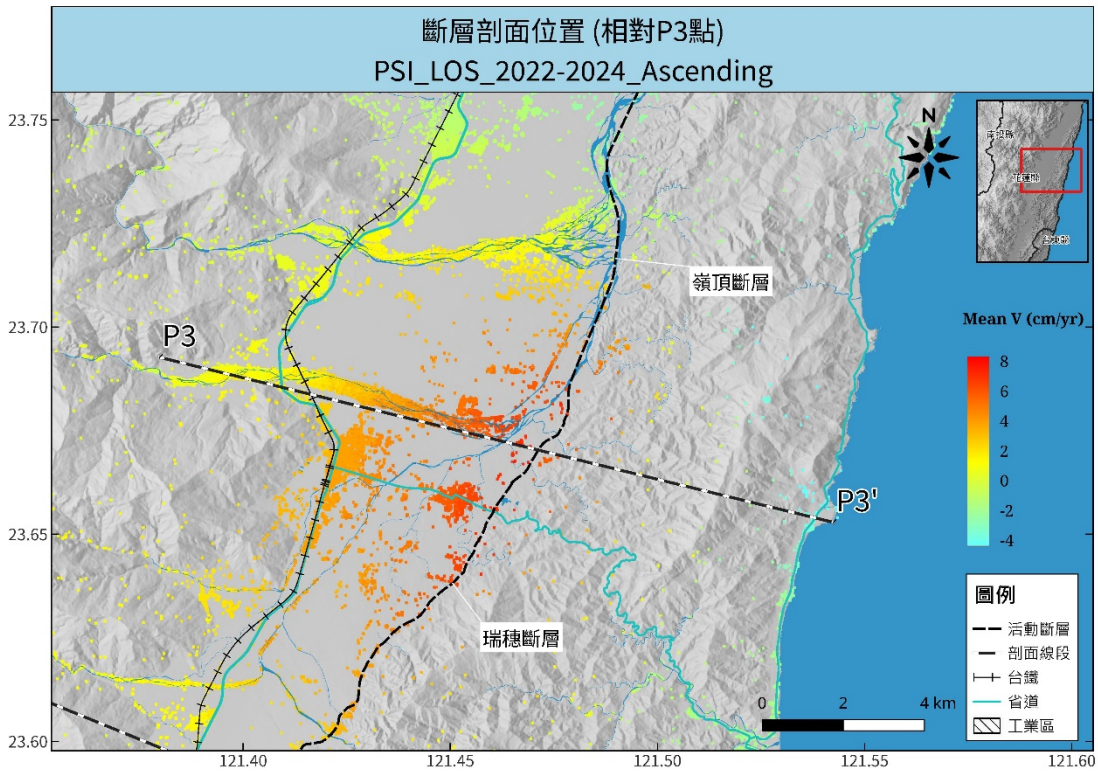


圖 D-6：P2 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P2 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



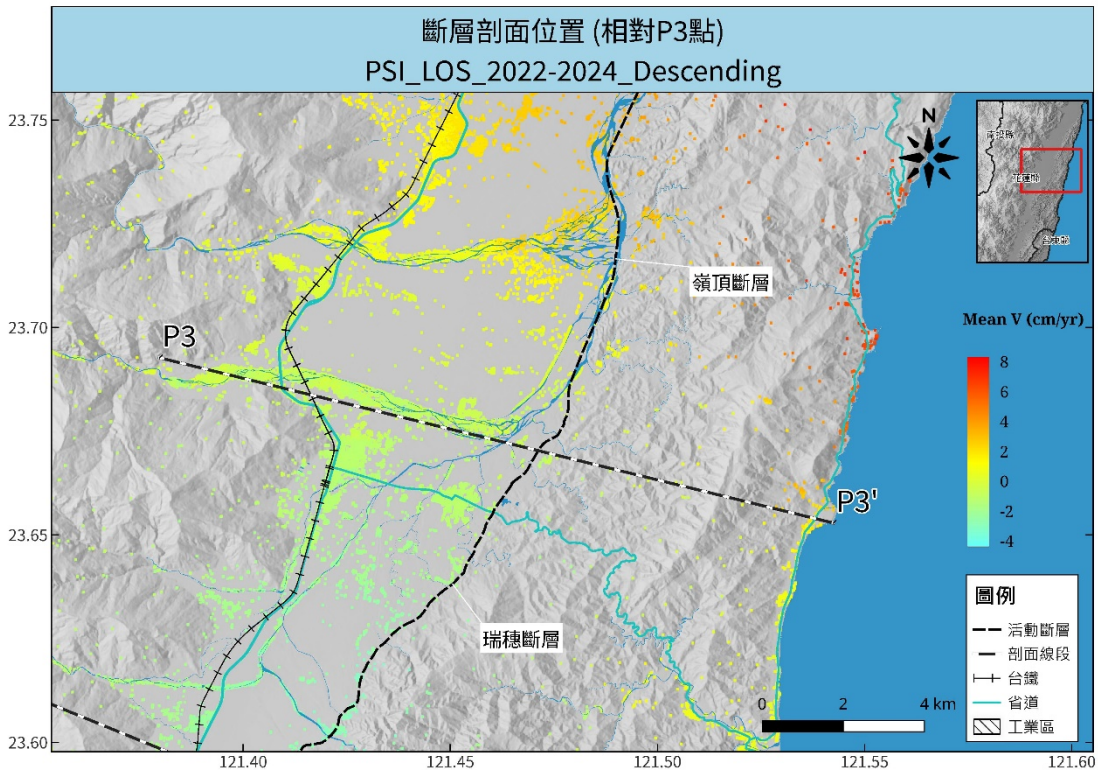
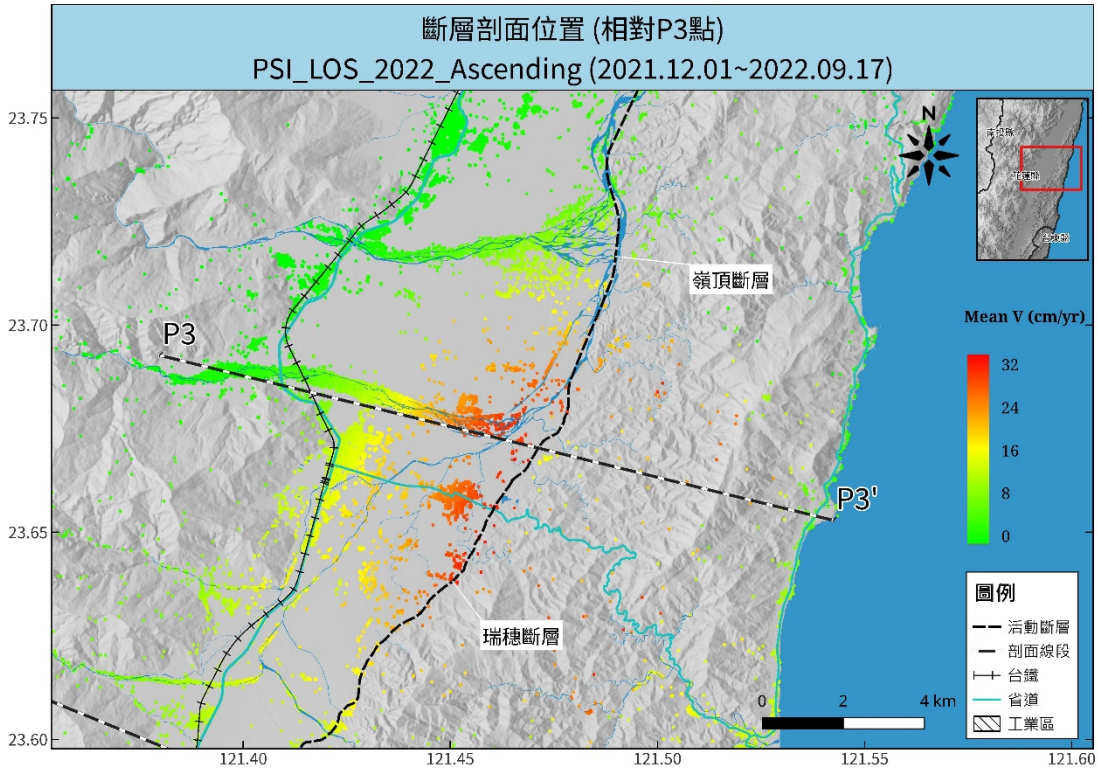


圖 D-7：P3 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P3 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



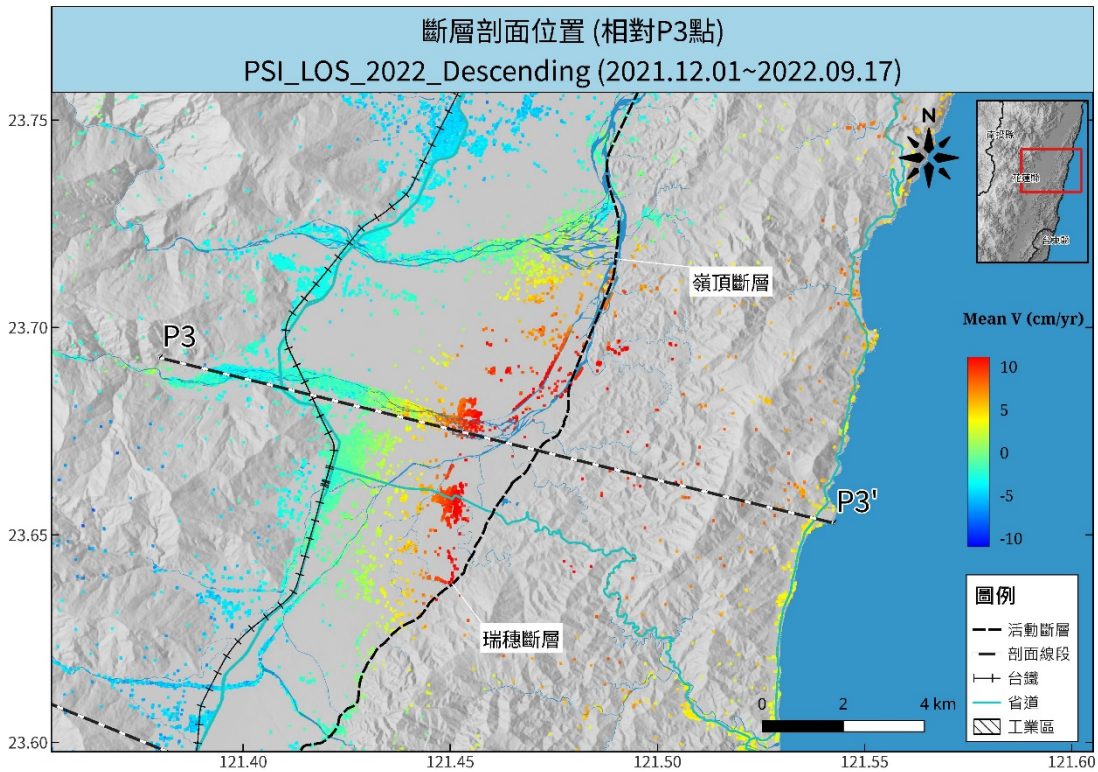
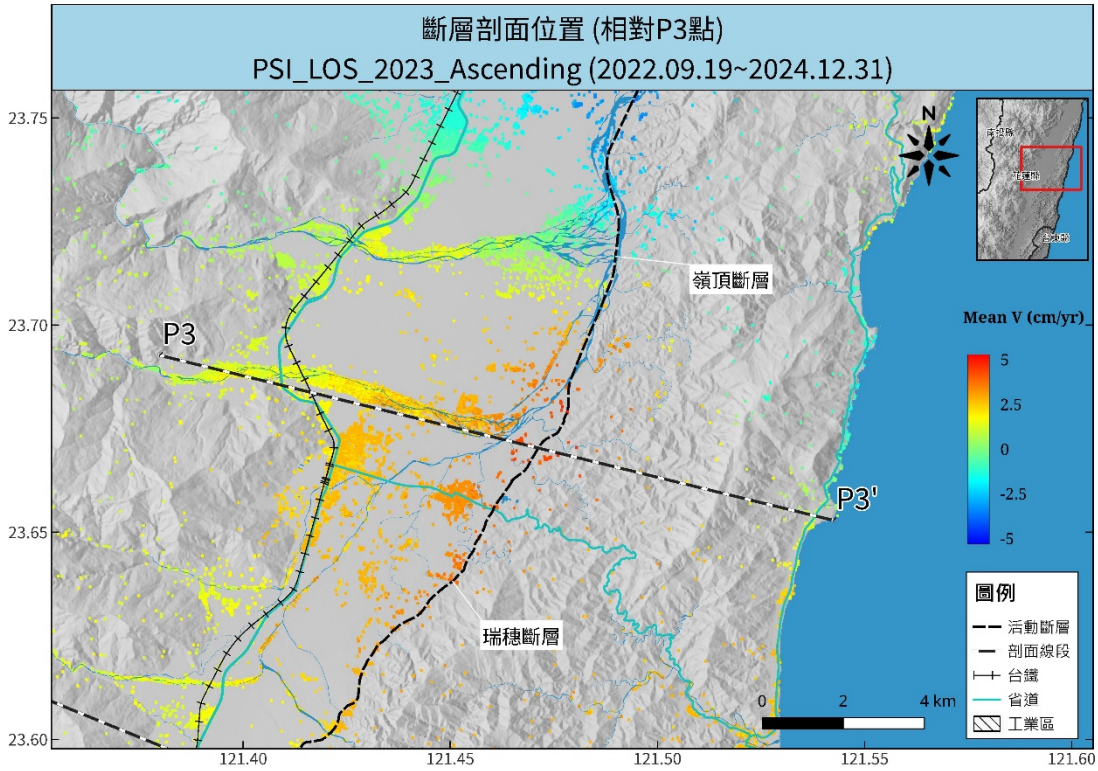


圖 D-8：P3 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P3 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



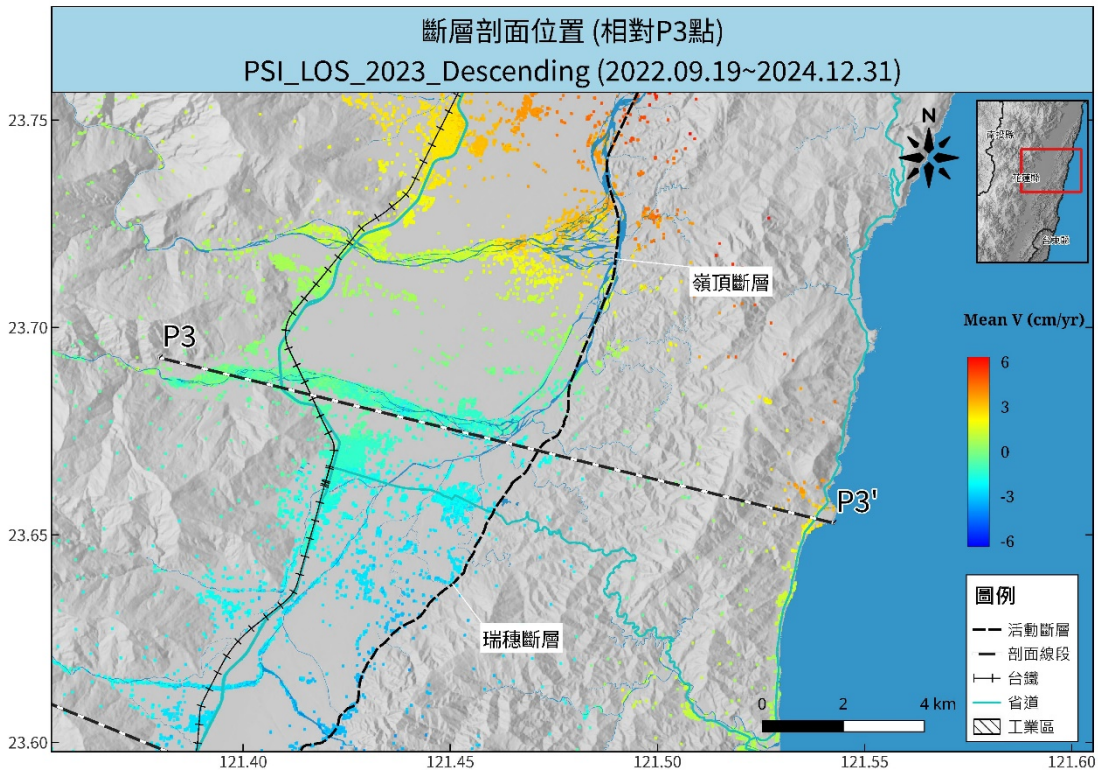
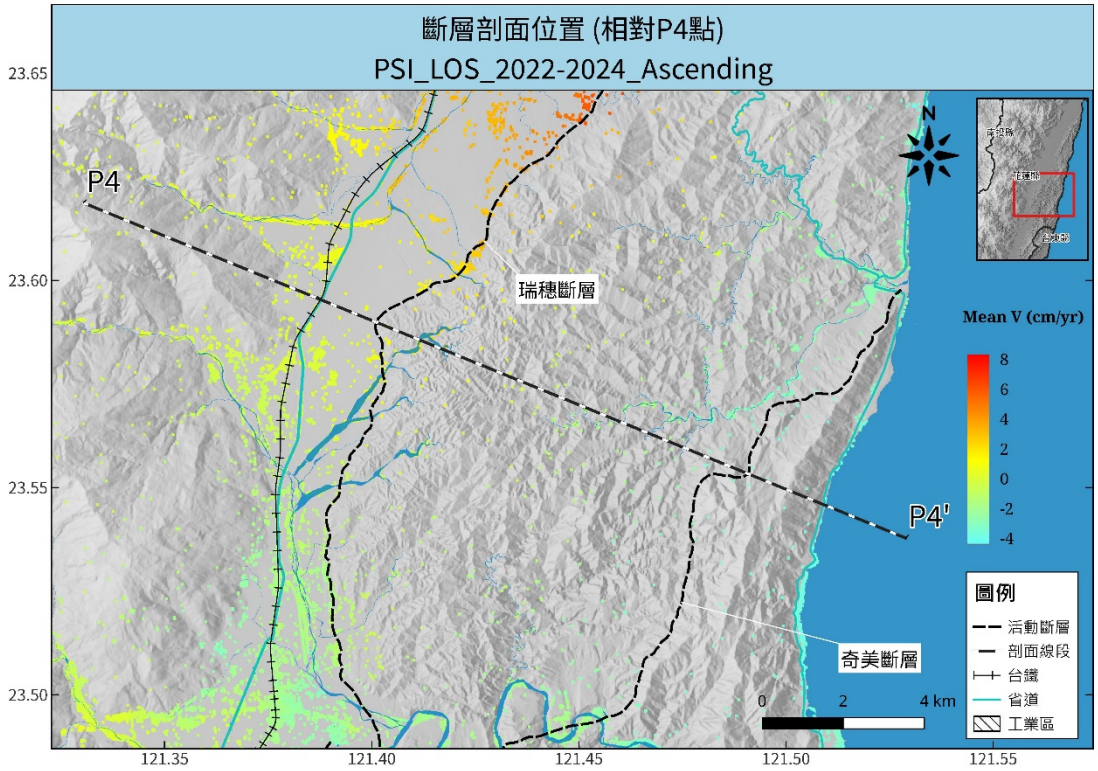


圖 D-9：P3 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P3 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



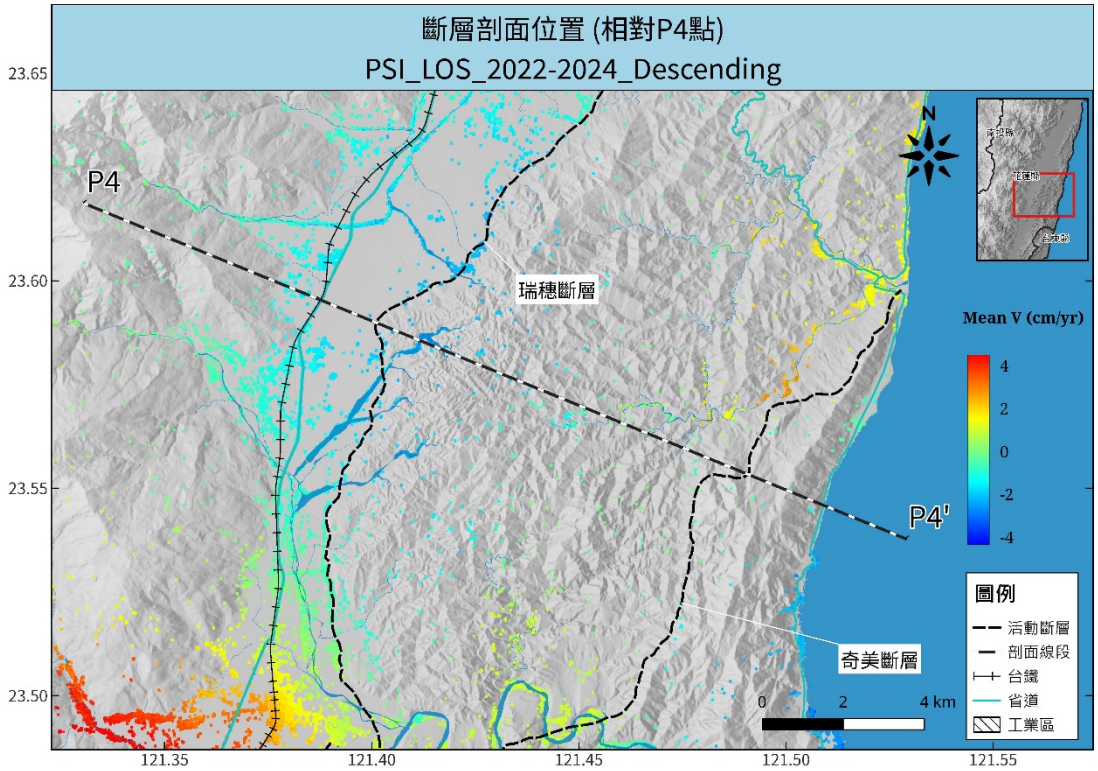
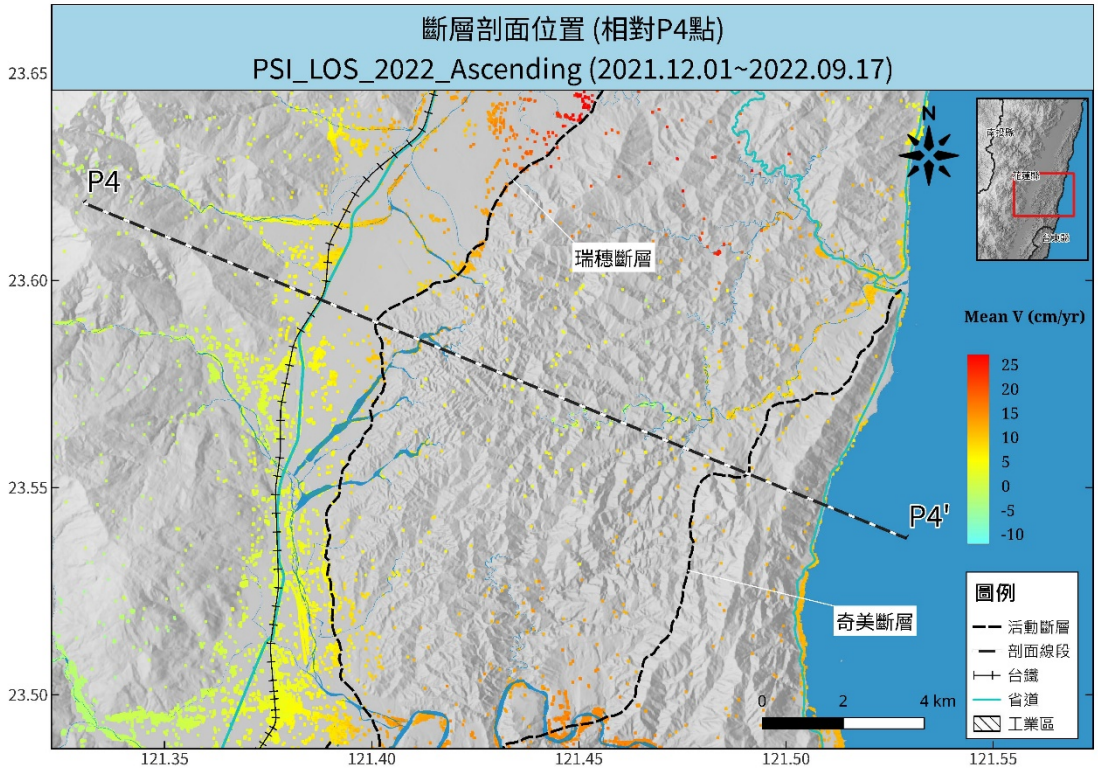


圖 D-10：P4 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P4 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



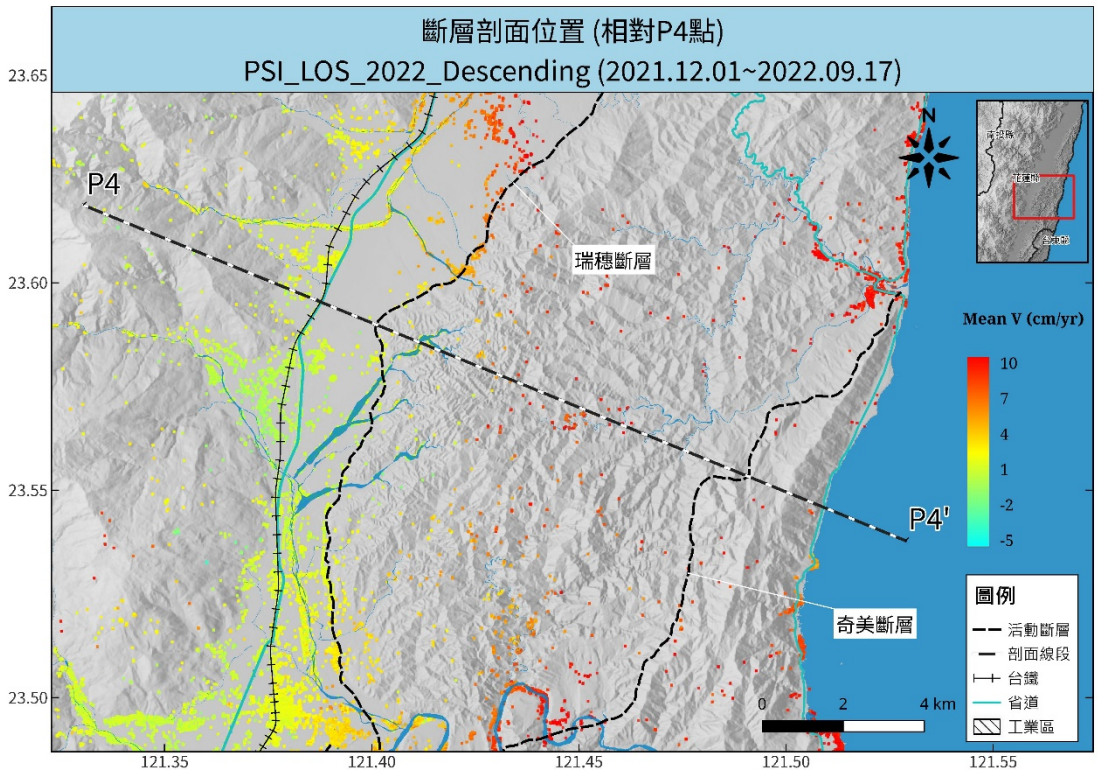


圖 D-11：P4 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P4 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

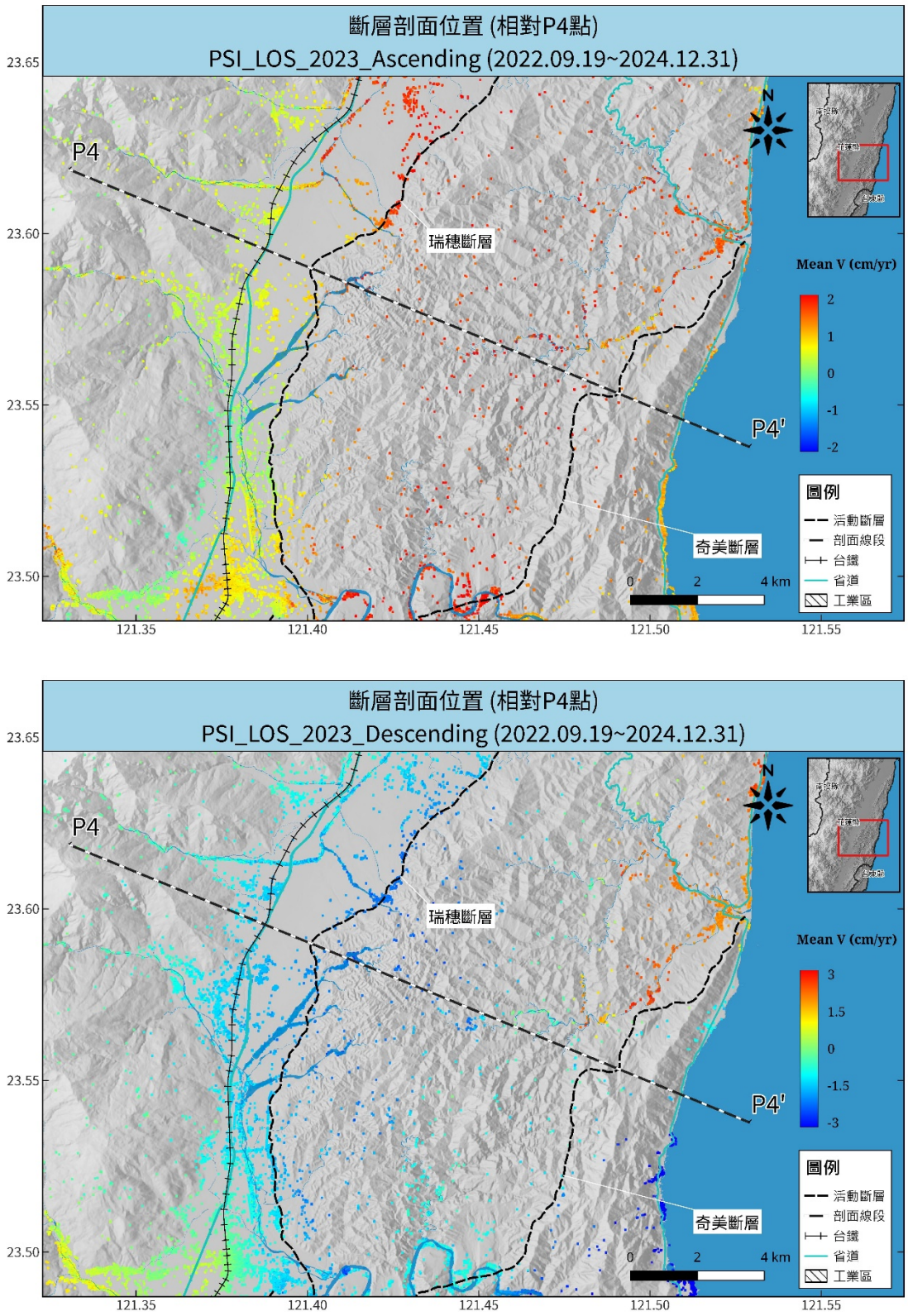
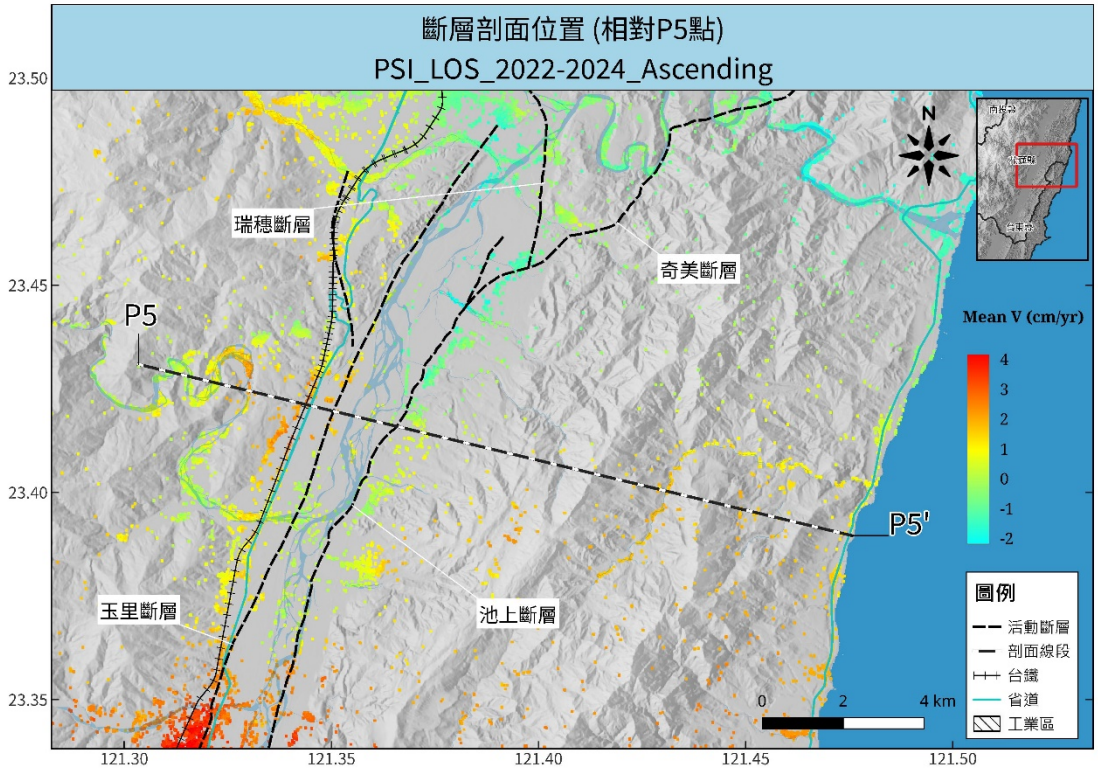


圖 D-12：P4 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P4 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



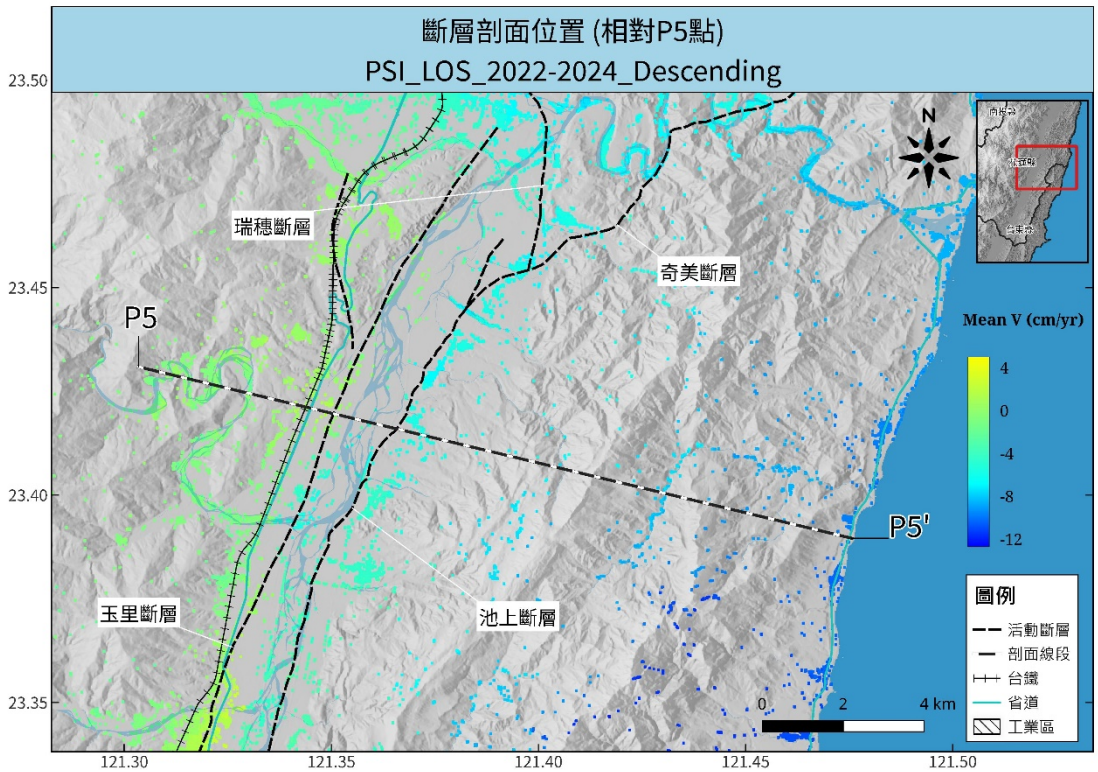


圖 D-13：P5 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P5 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

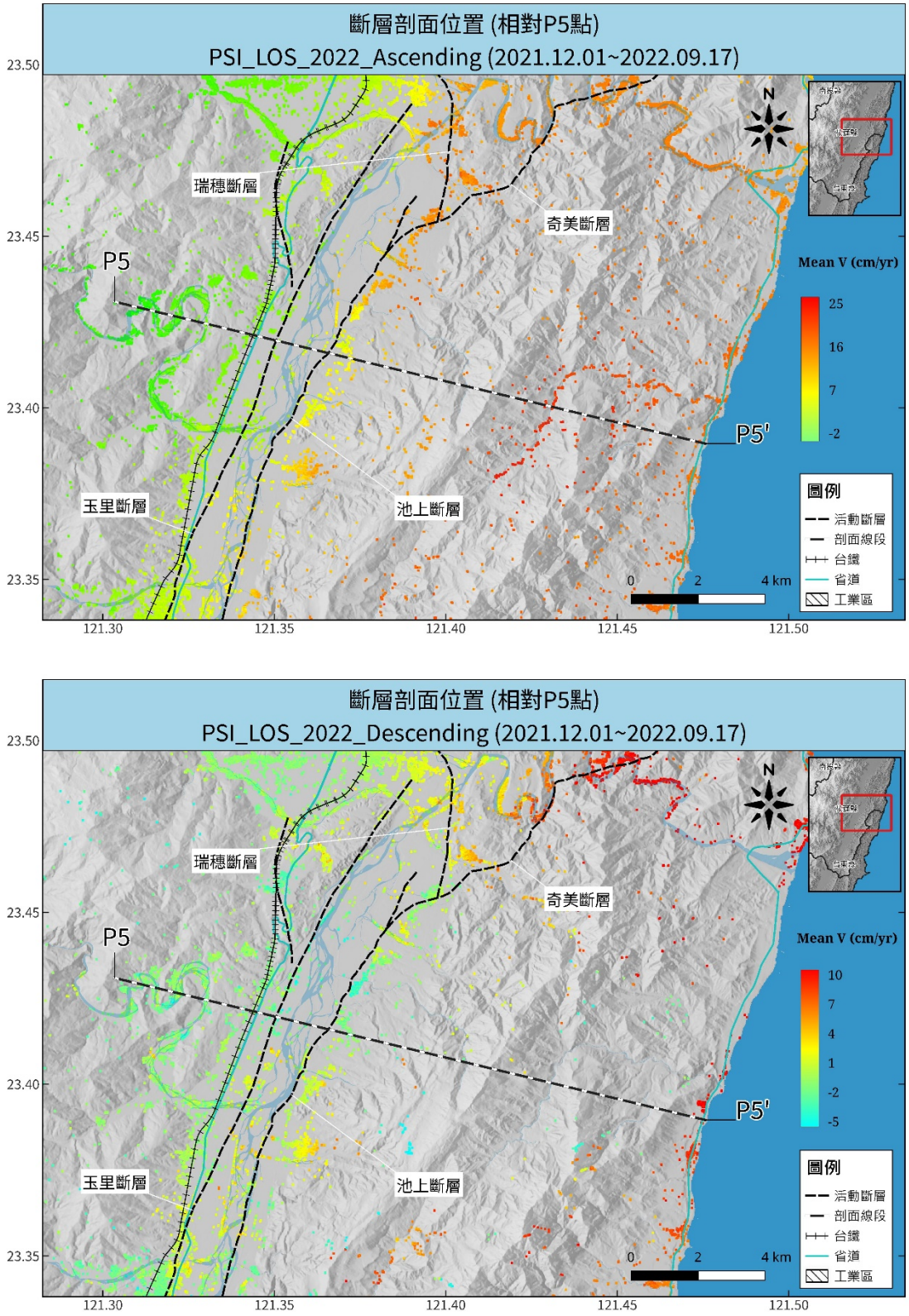


圖 D-14：P5 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P5 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

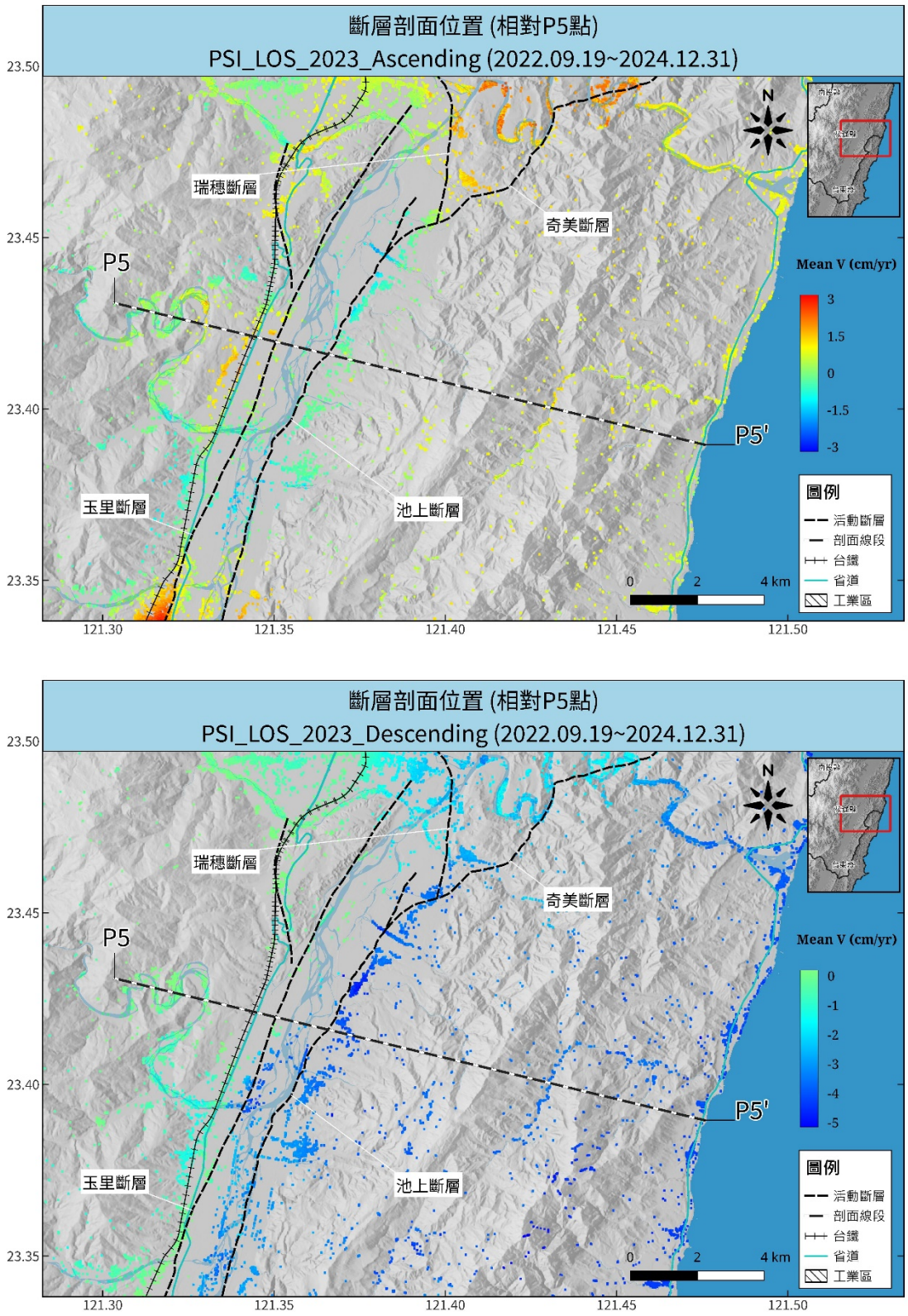


圖 D-15：P5 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P5 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

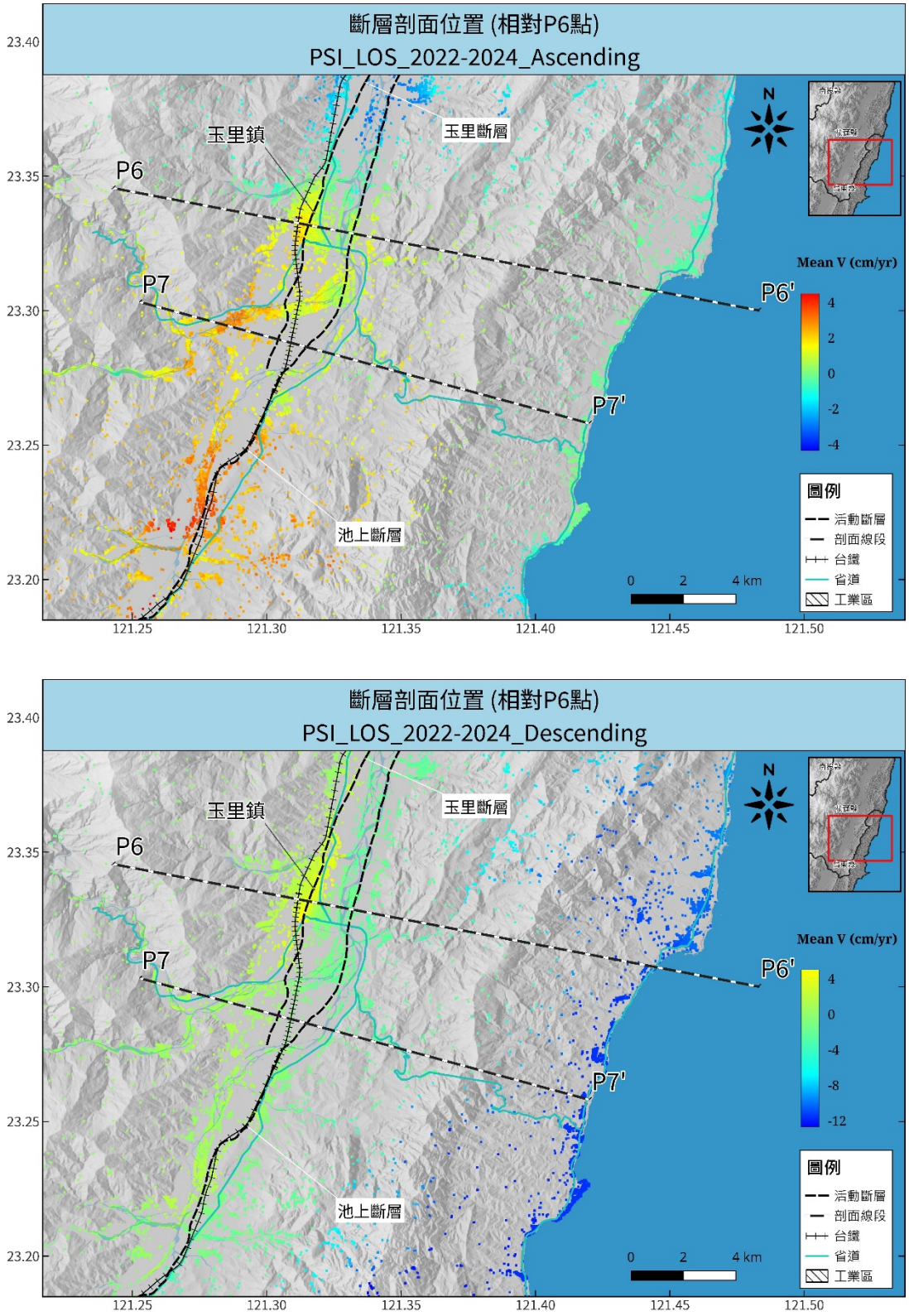


圖 D-16：P6 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P6 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

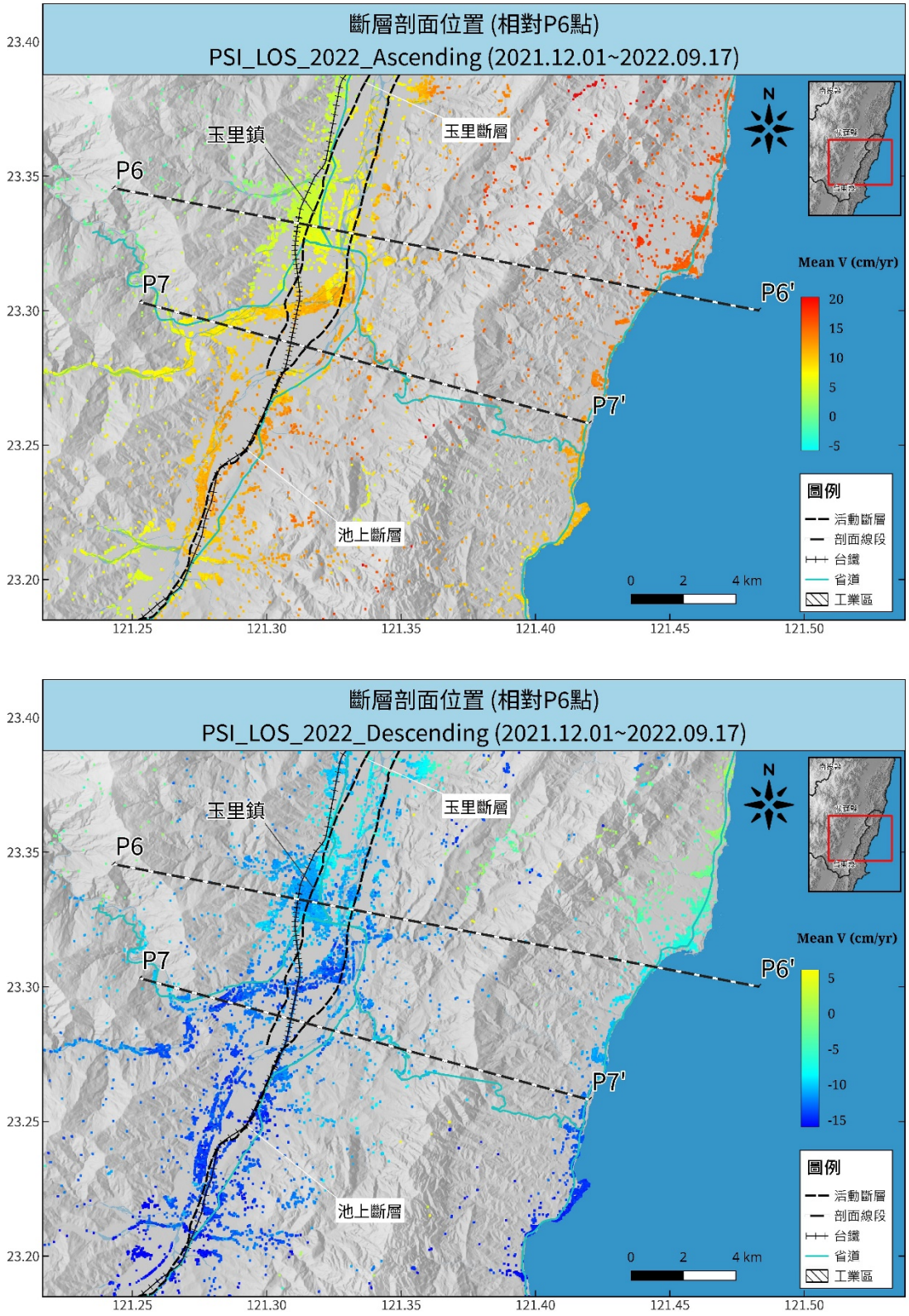


圖 D-17：P6 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P6 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

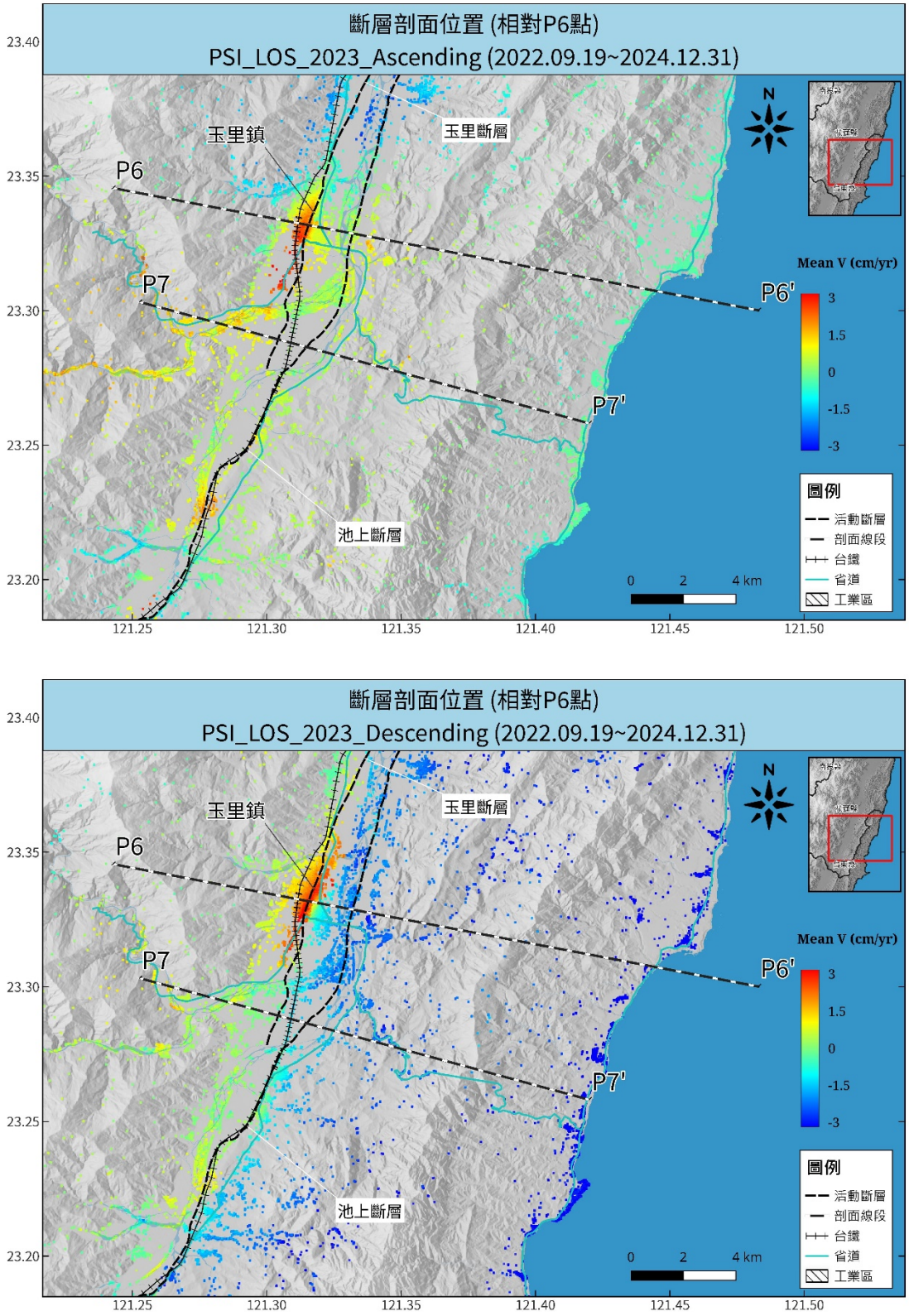


圖 D-18：P6 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P6 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

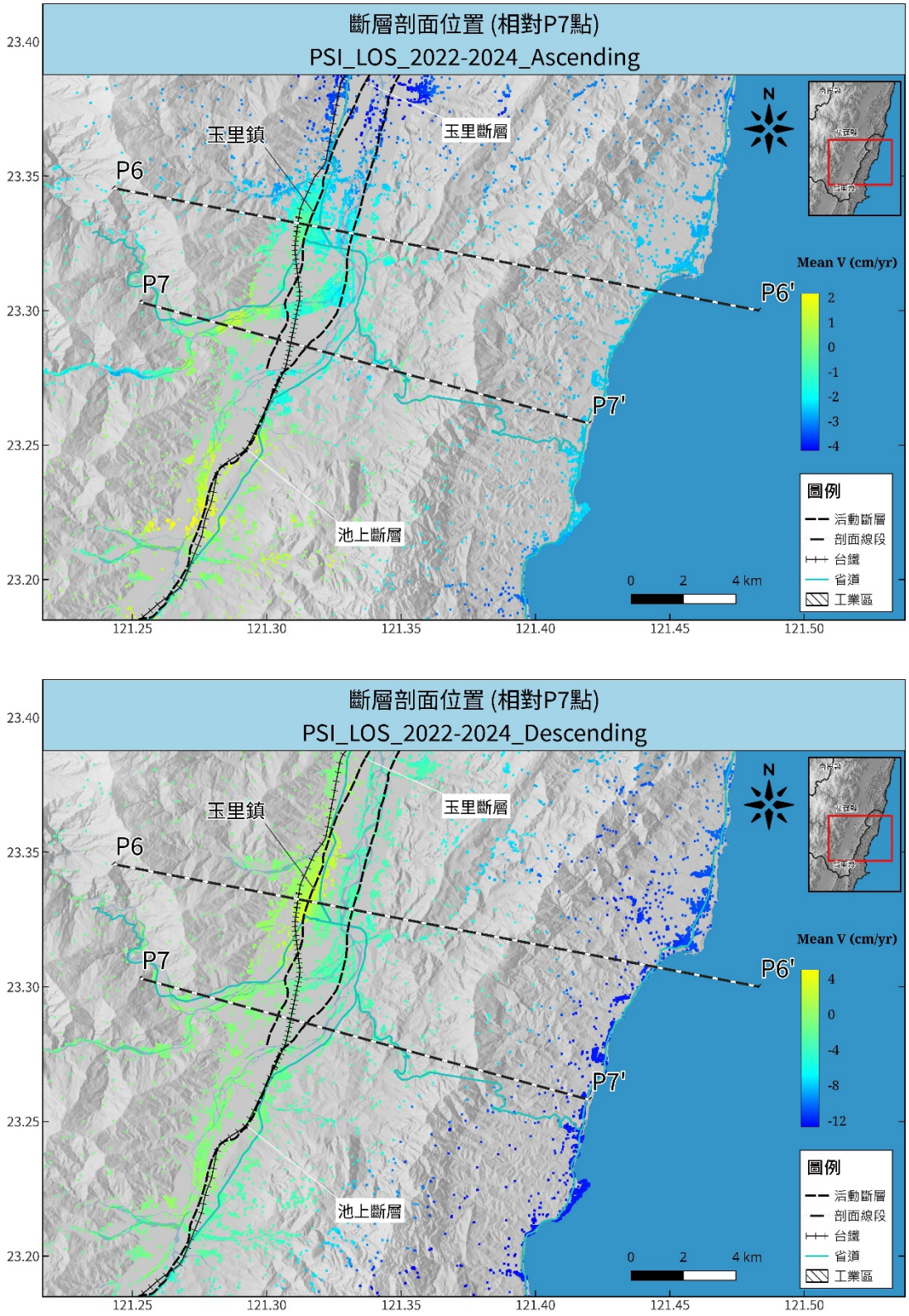


圖 D-19：P7 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P7 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

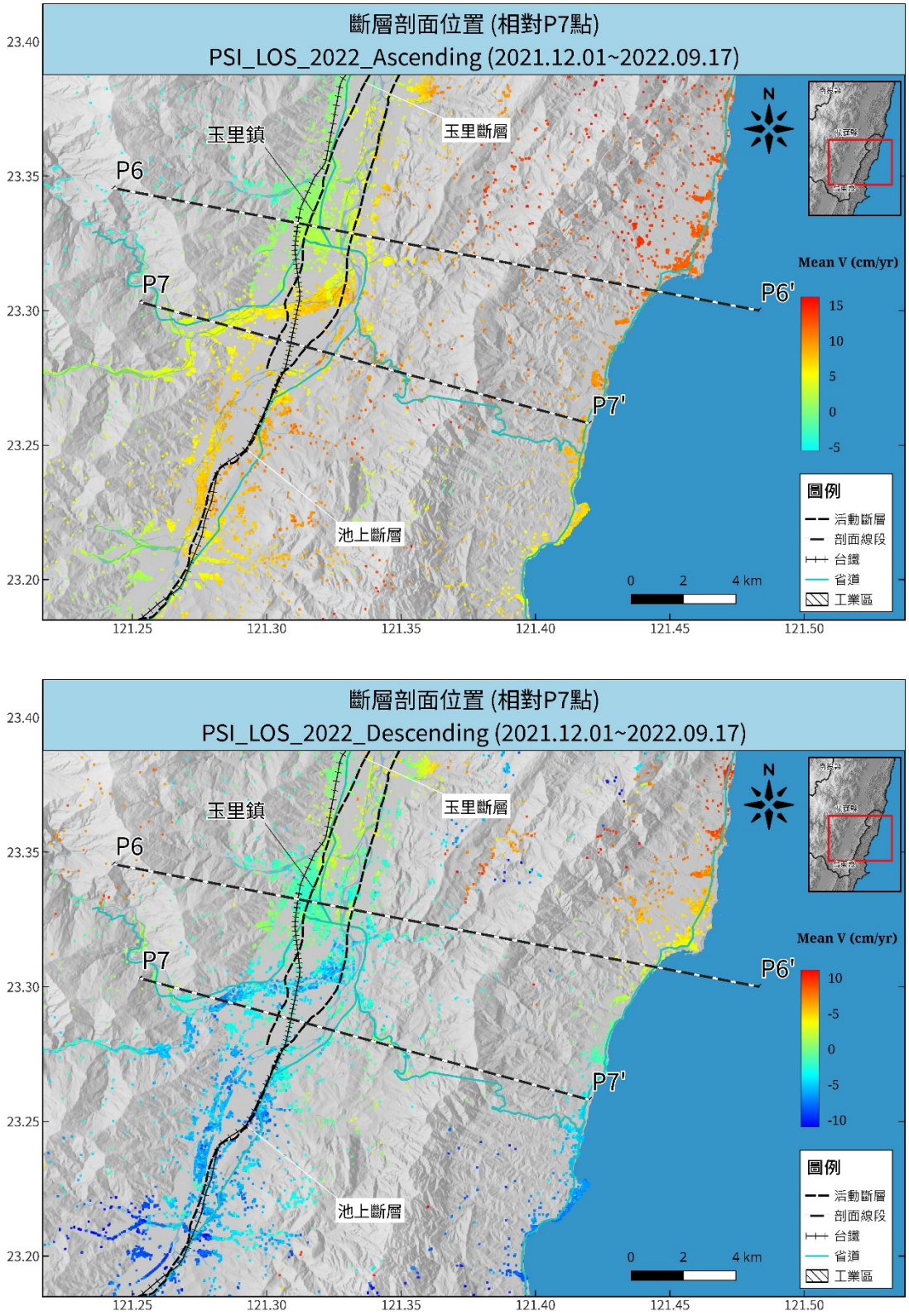


圖 D-20：P7 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P7 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

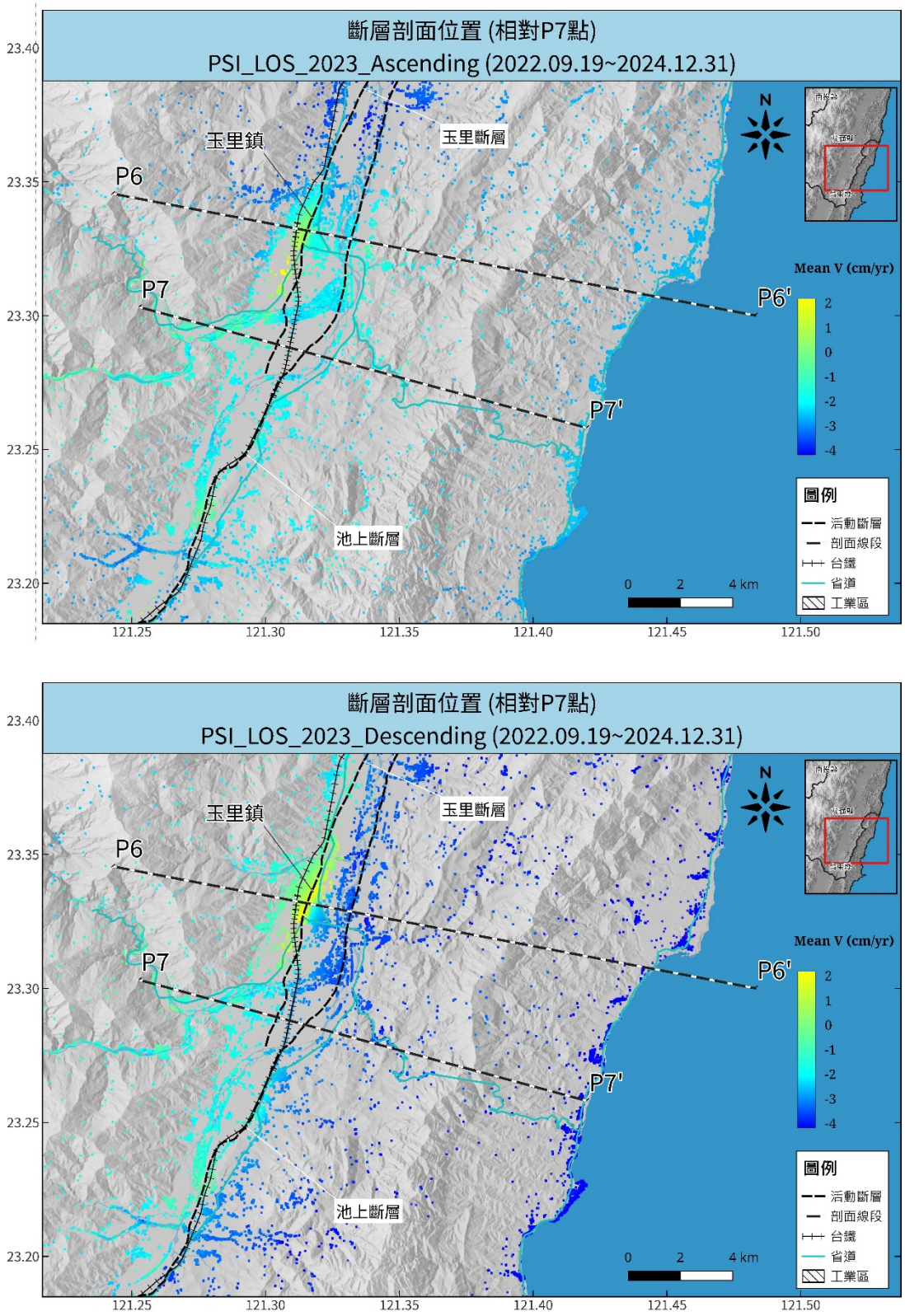
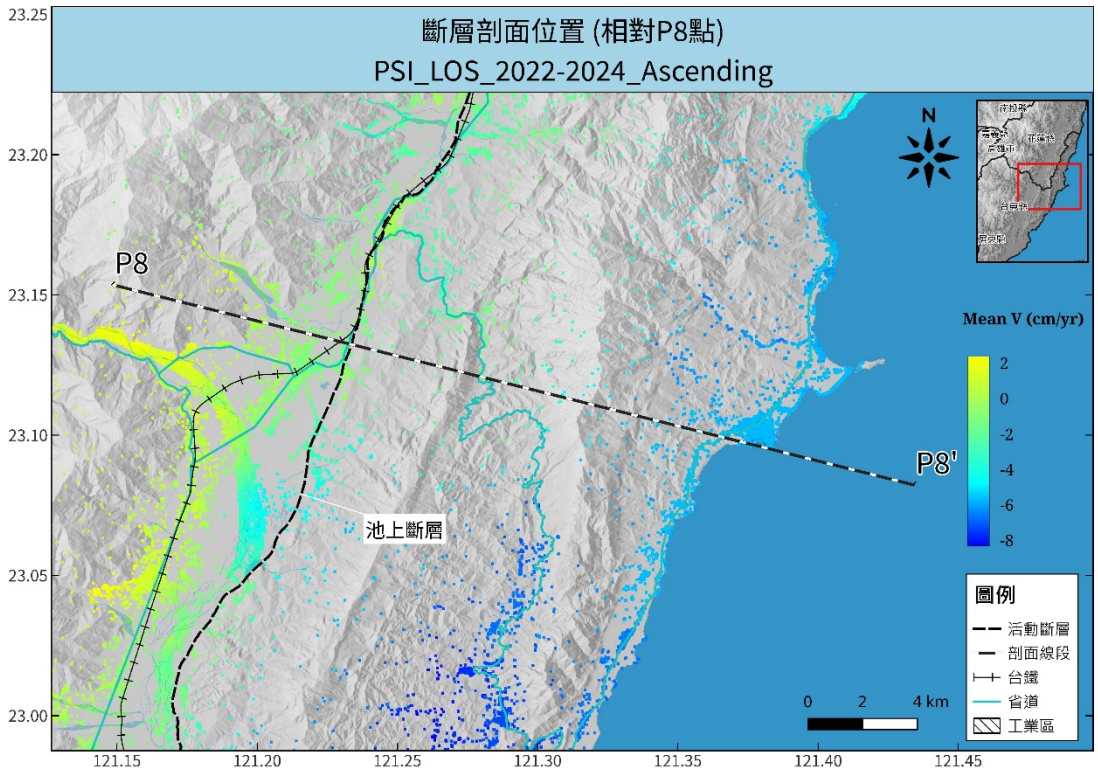


圖 D-21：P7 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P7 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



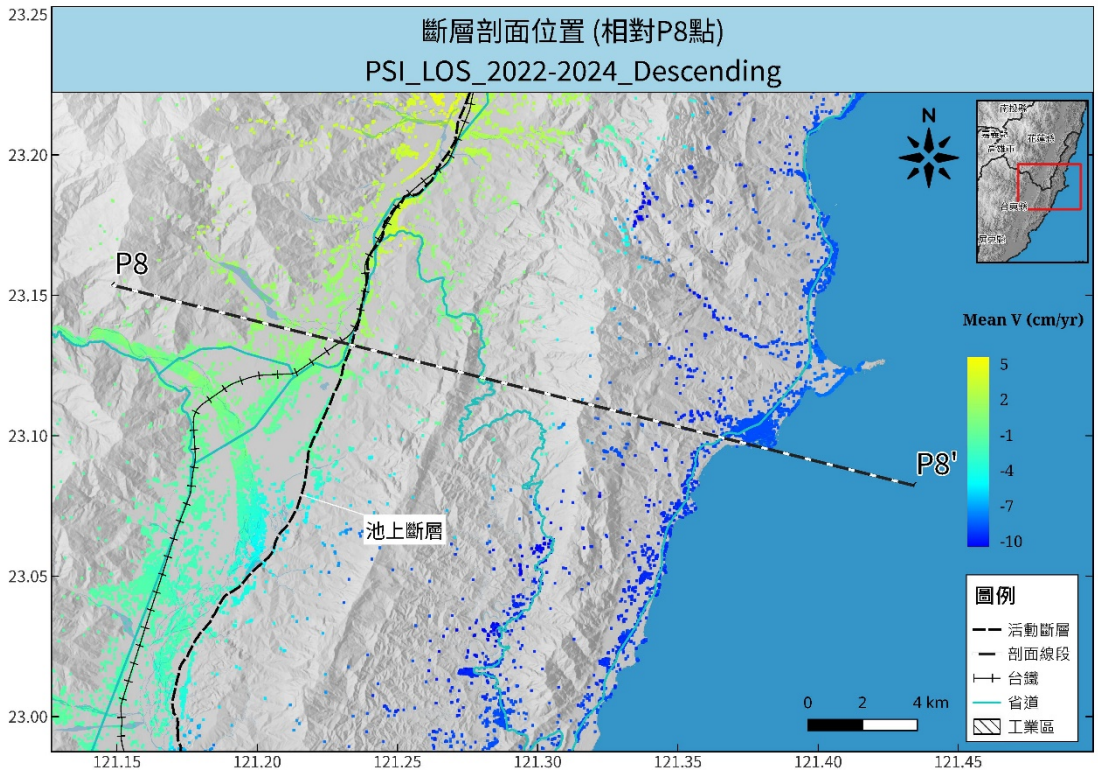
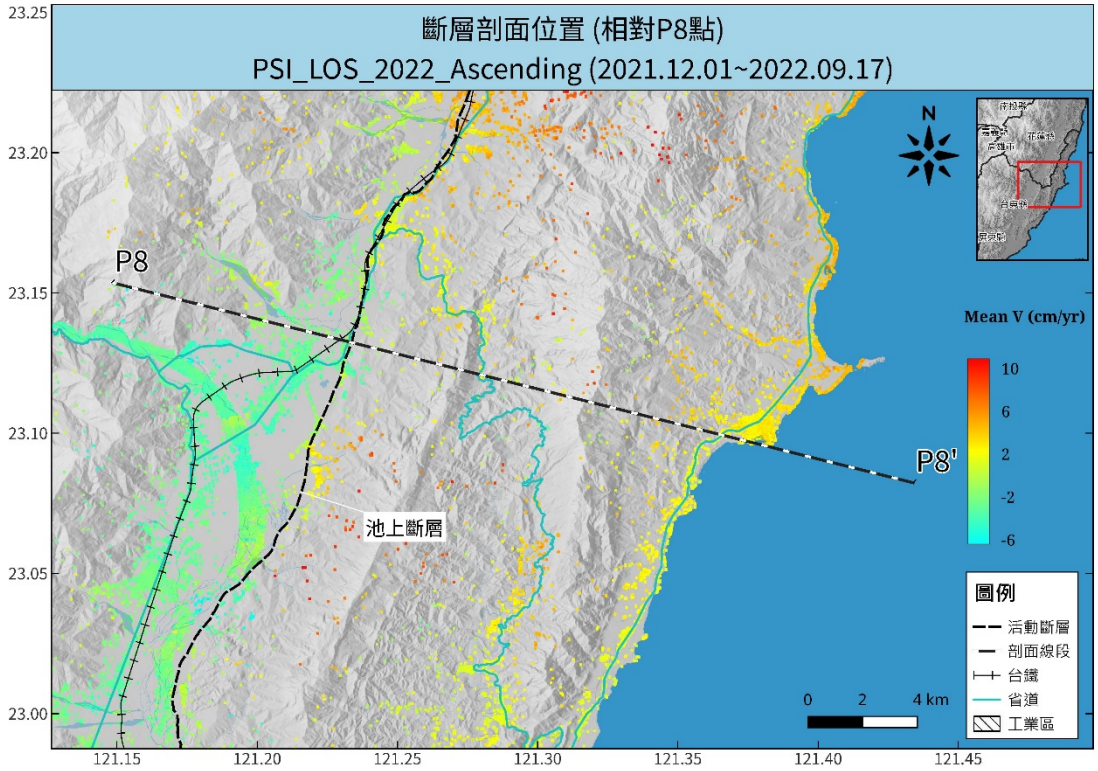


圖 D-22：P8 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P8 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



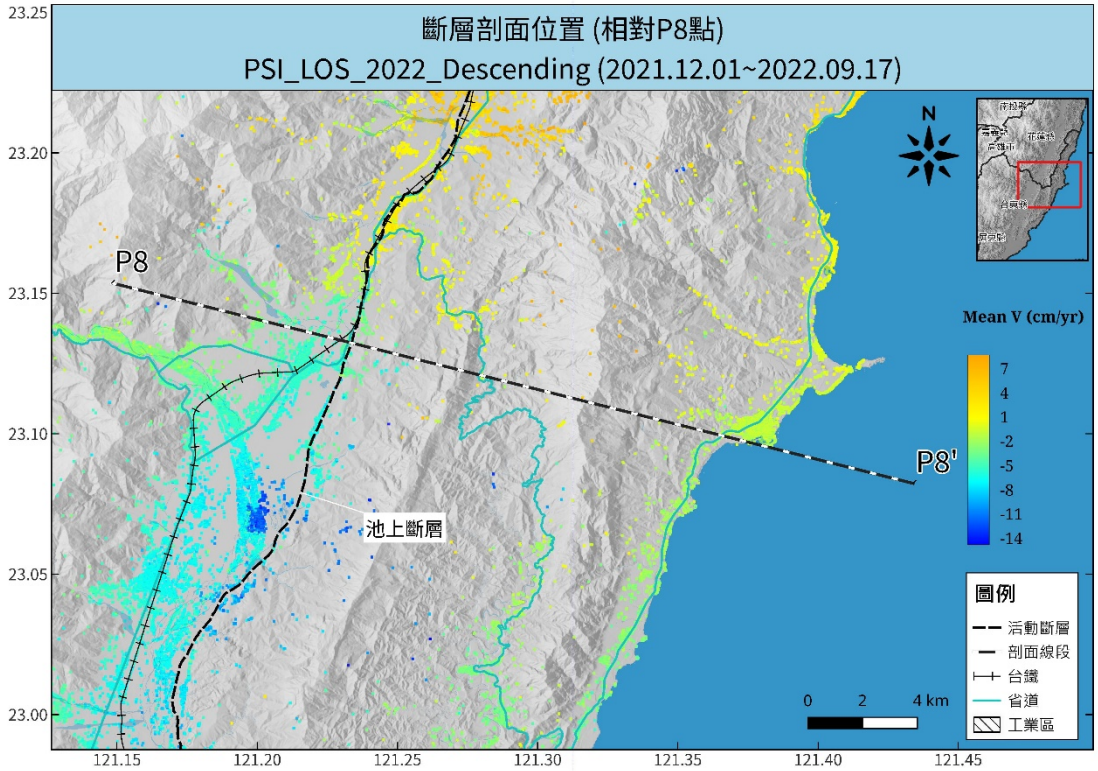
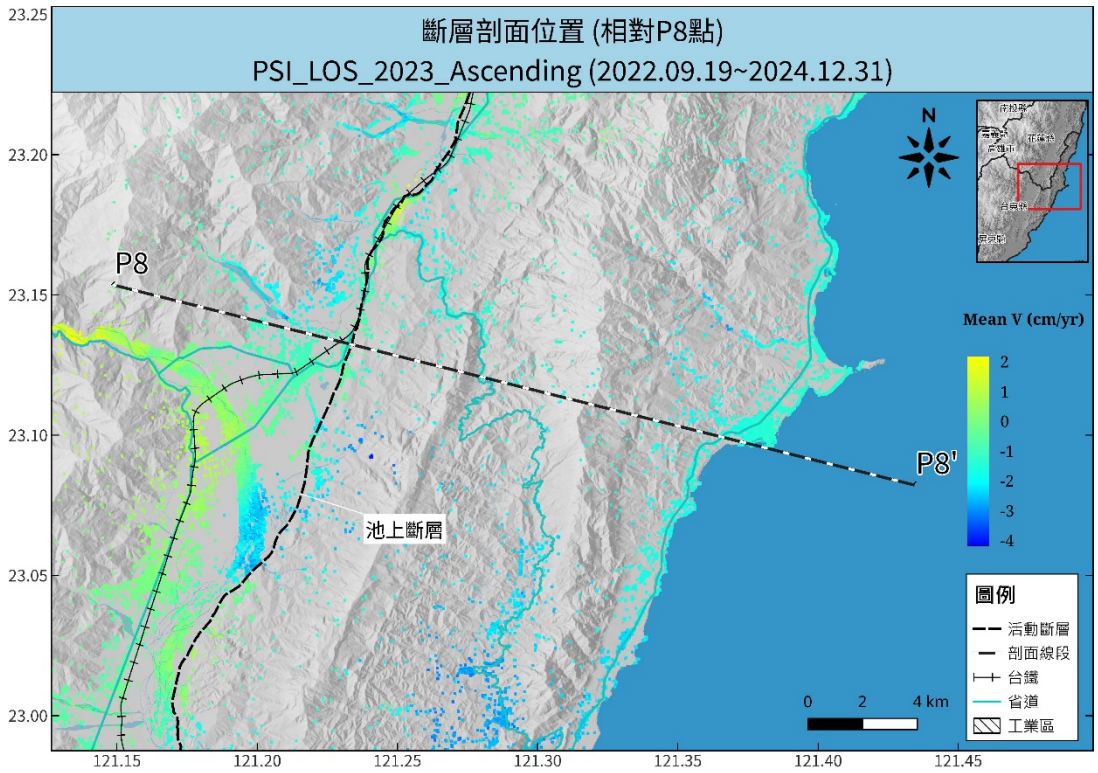


圖 D-23：P8 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P8 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



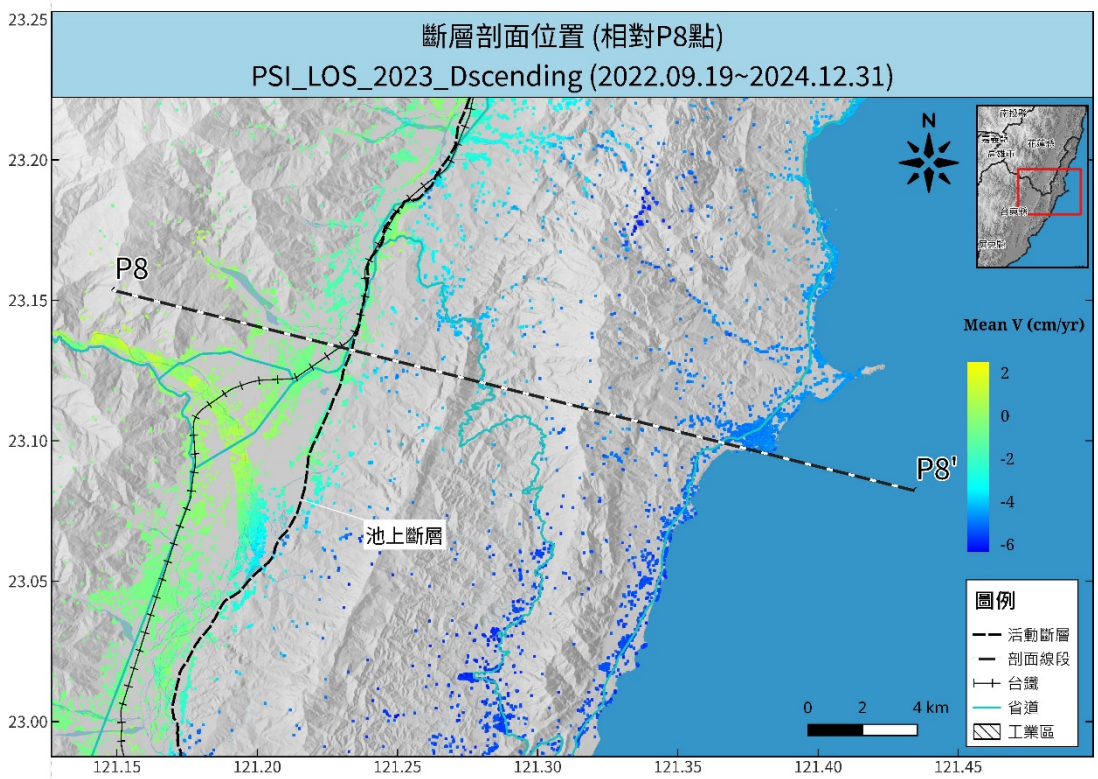
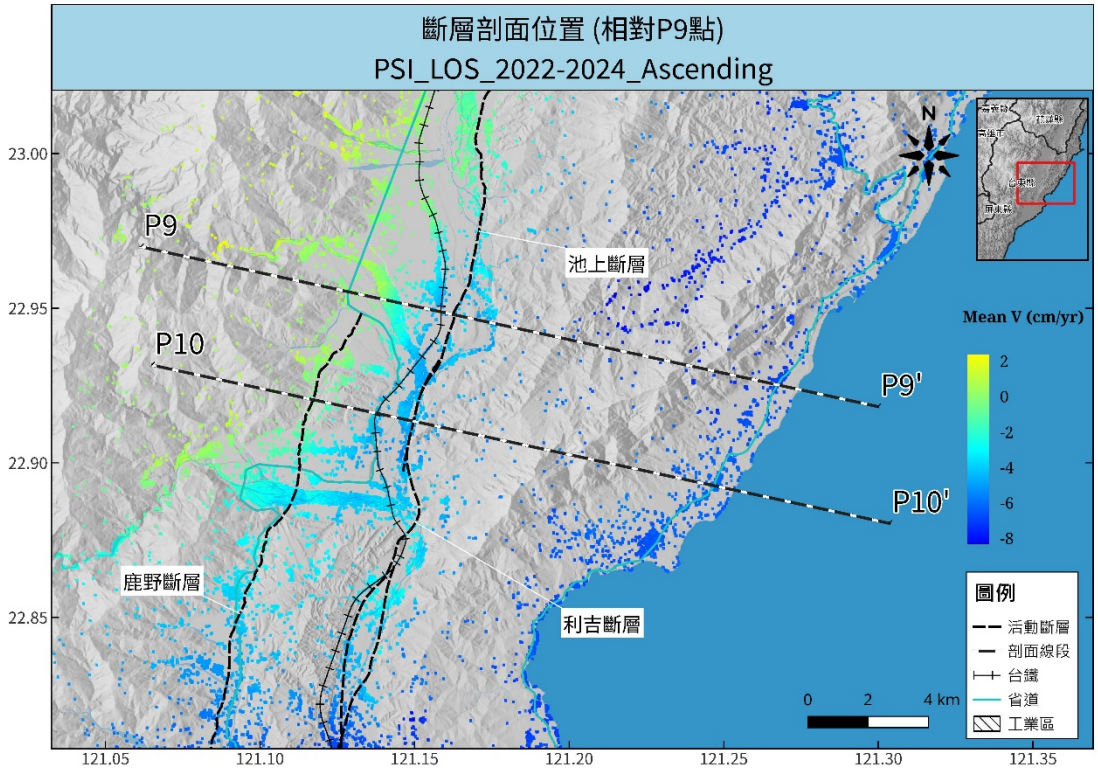


圖 D-24：P8 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P8 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



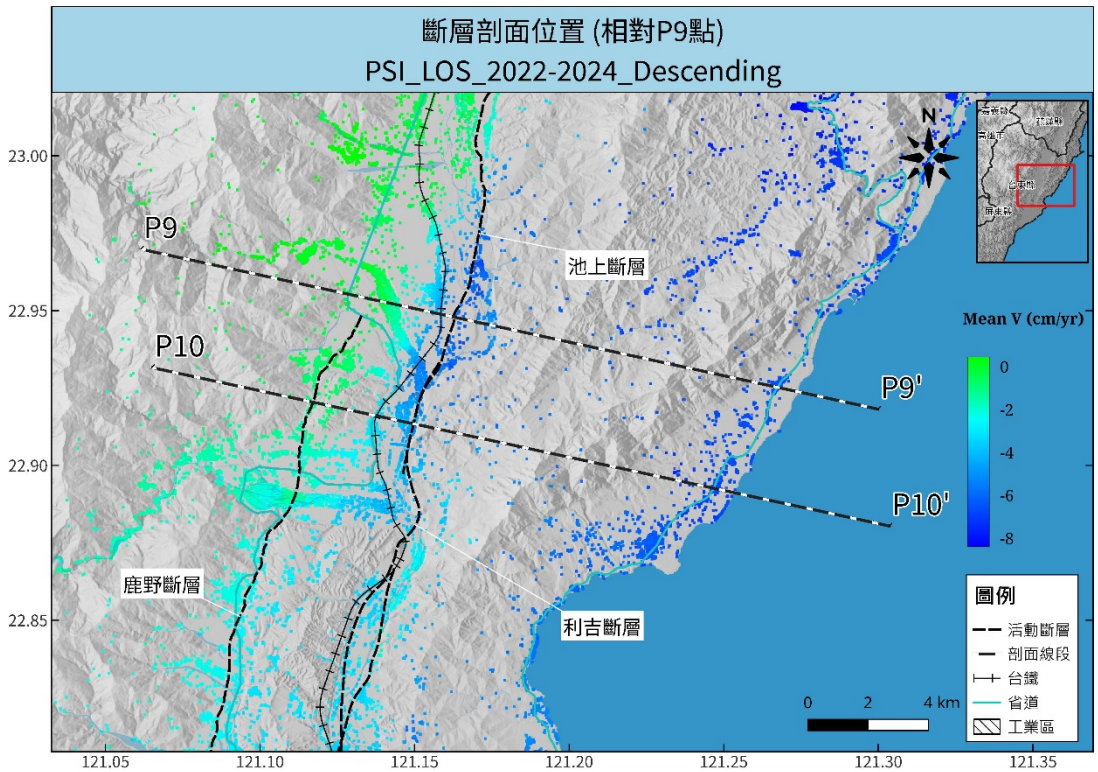


圖 D-25：P9 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P9 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

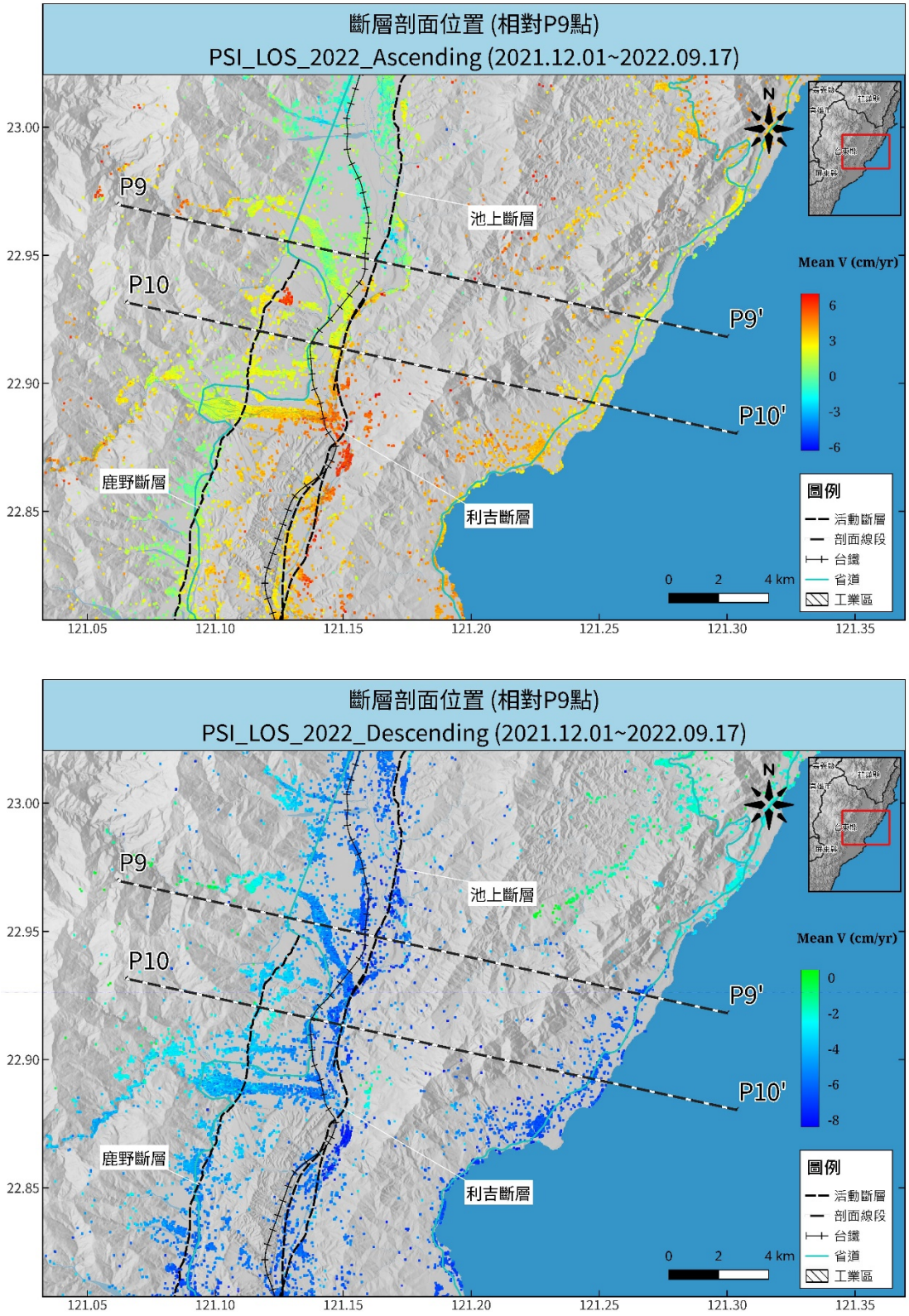


圖 D-26：P9 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P9 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

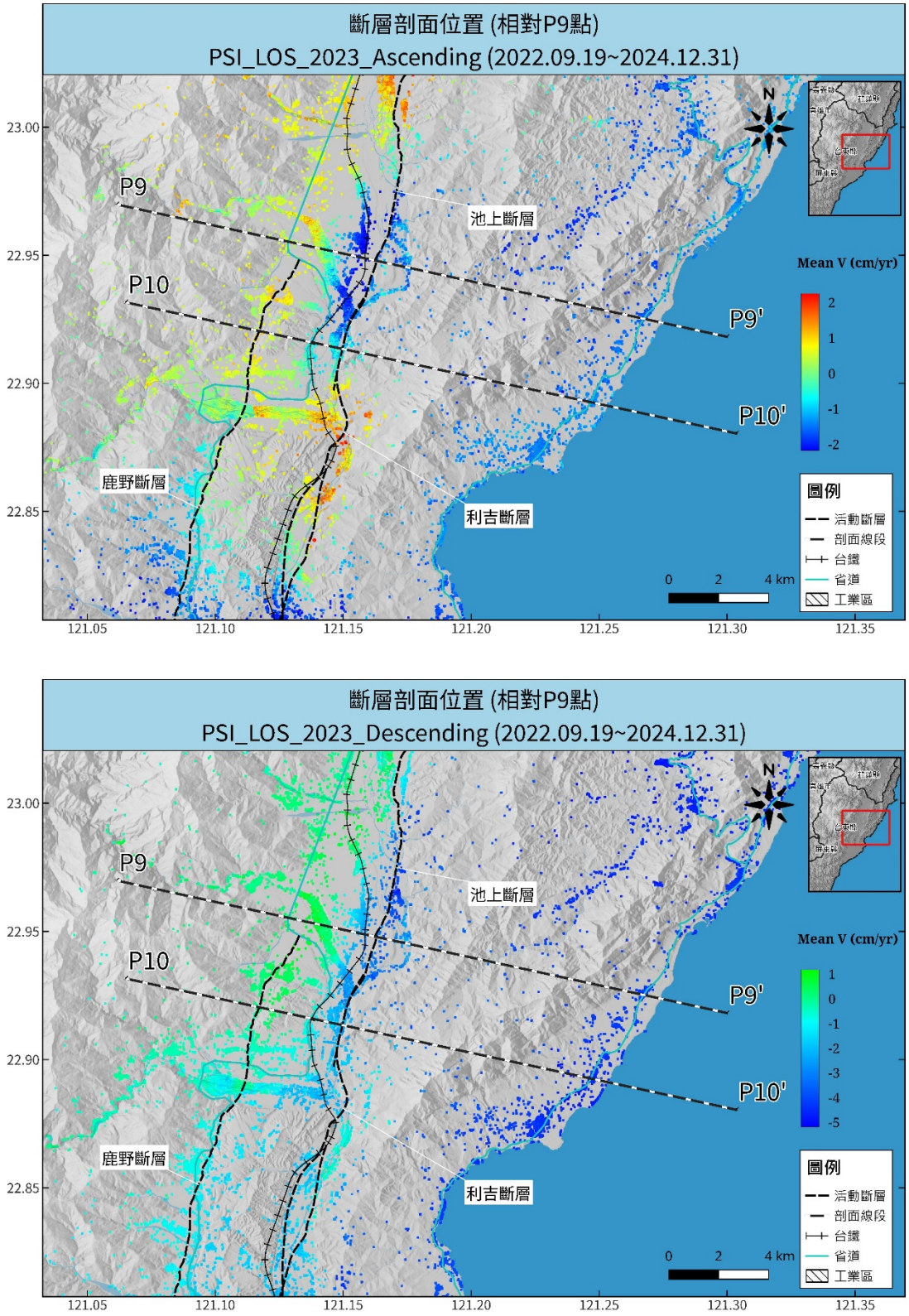
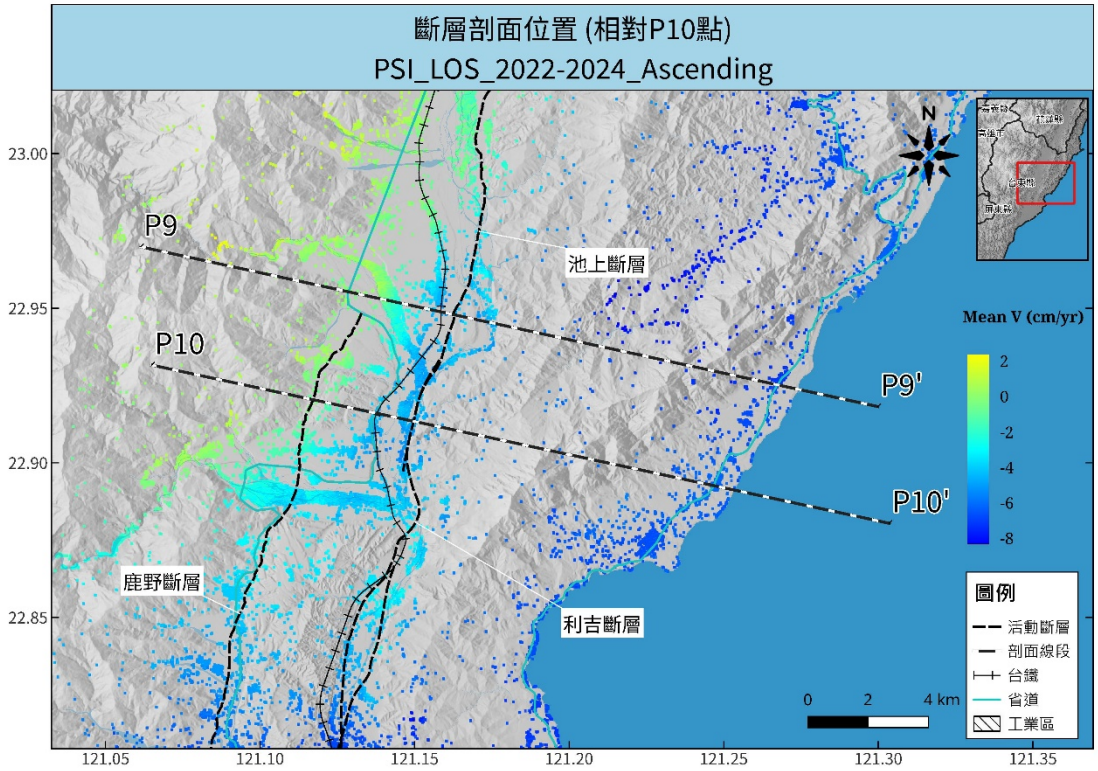


圖 D-27：P9 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P9 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



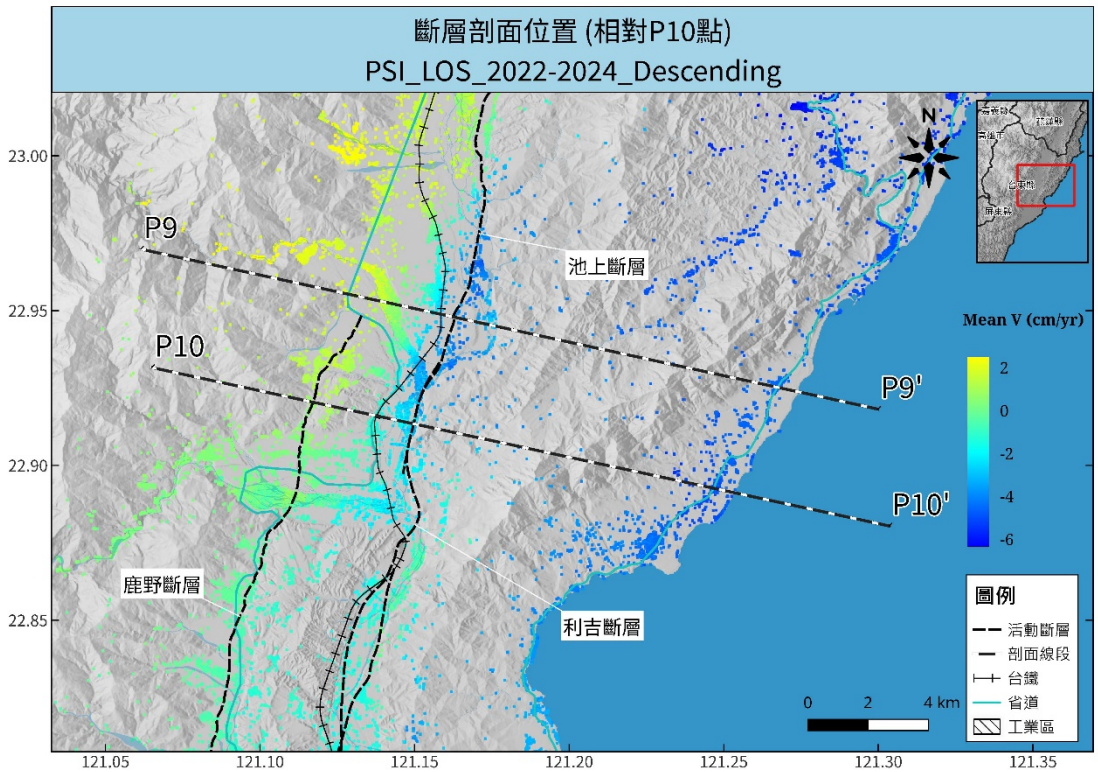


圖 D-28：P10 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P10 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

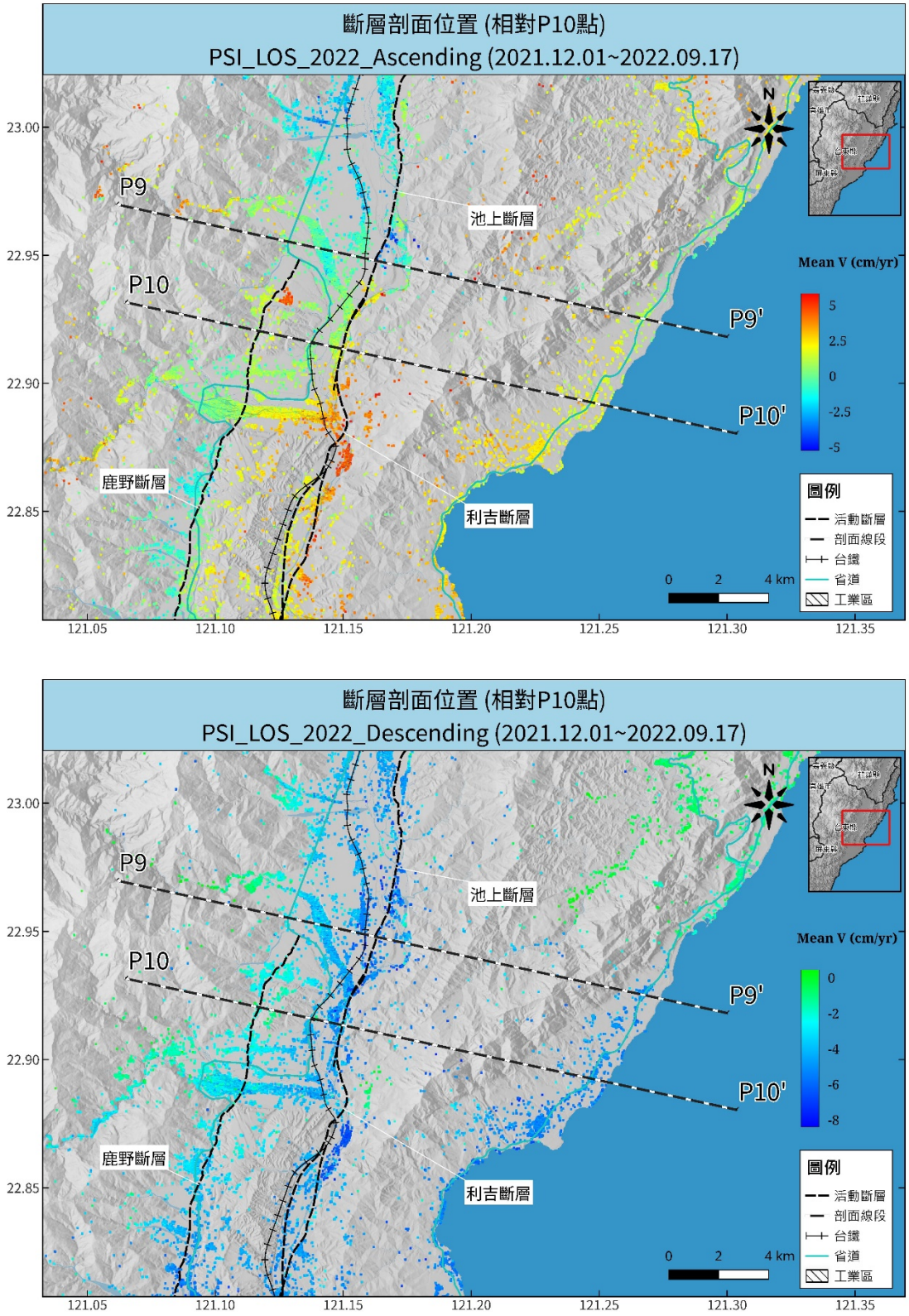


圖 D-29：P10 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P10 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

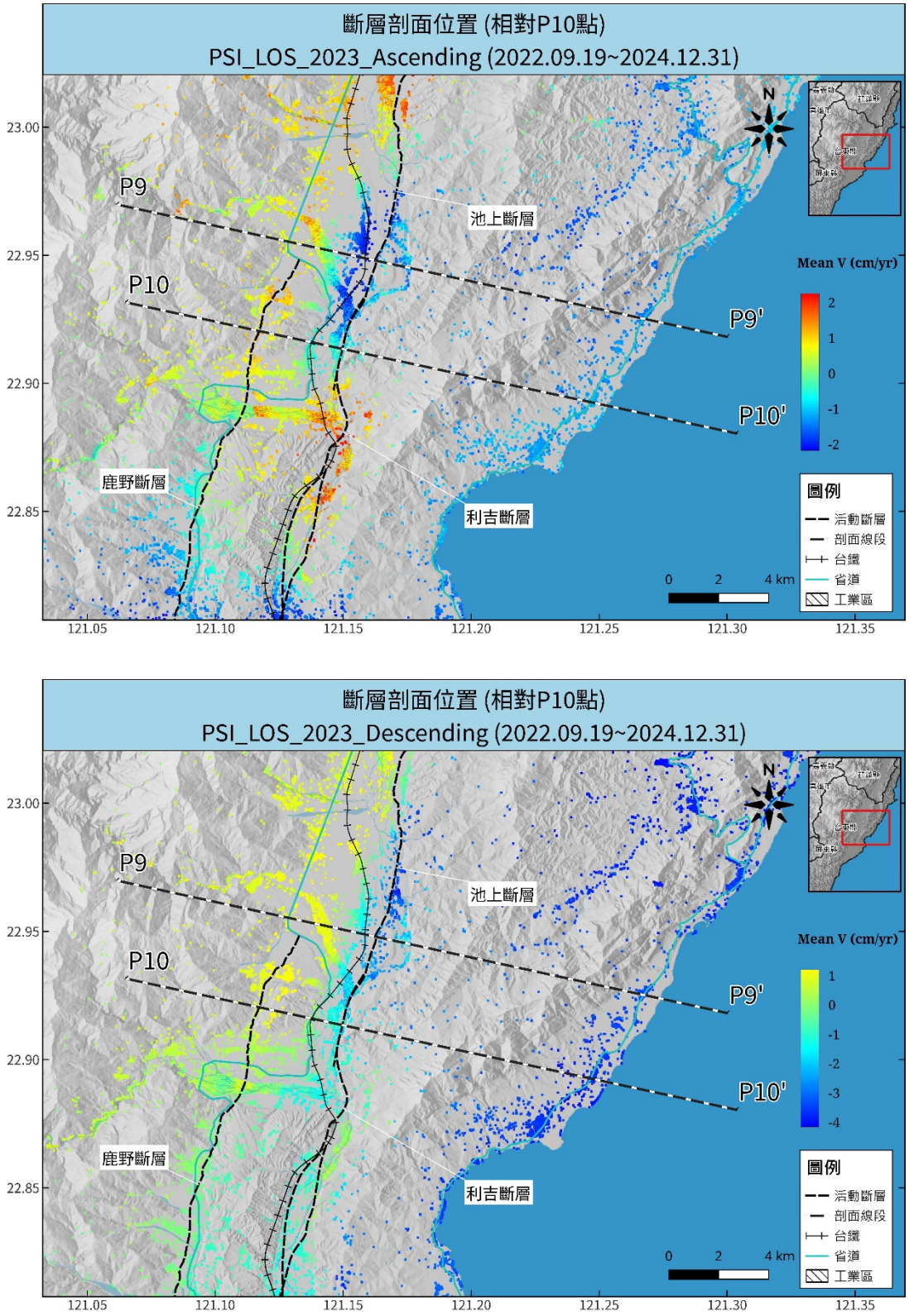
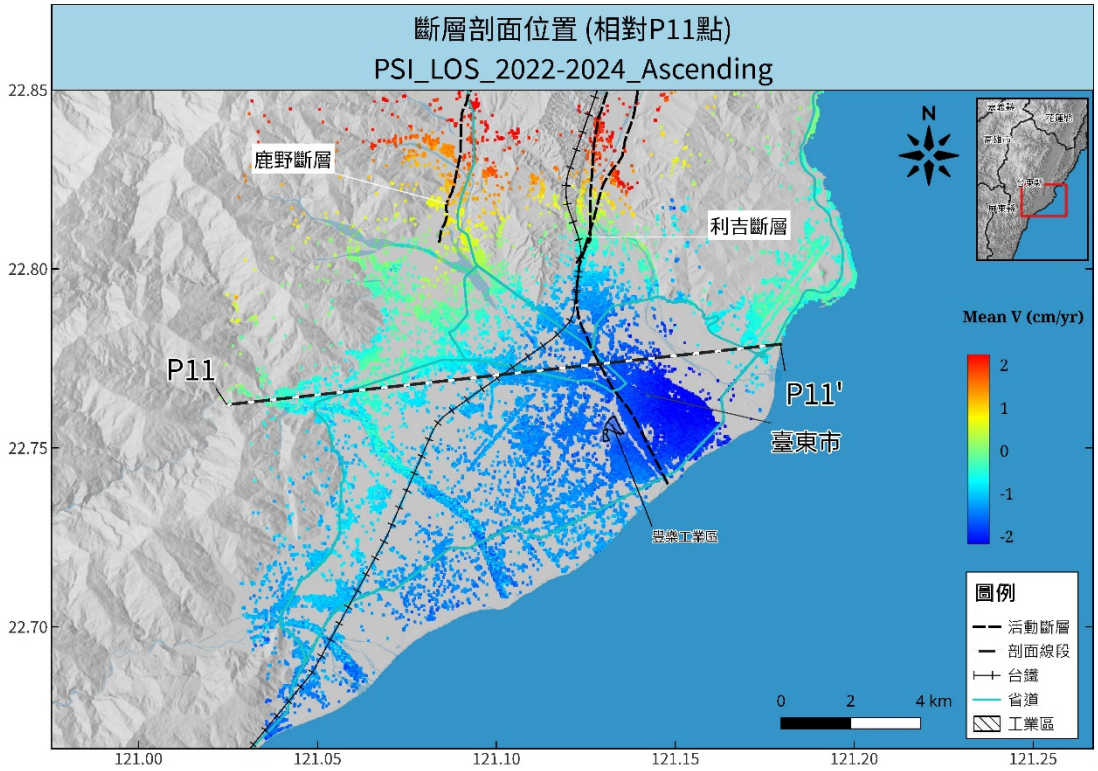


圖 D-30：P10 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P10 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。



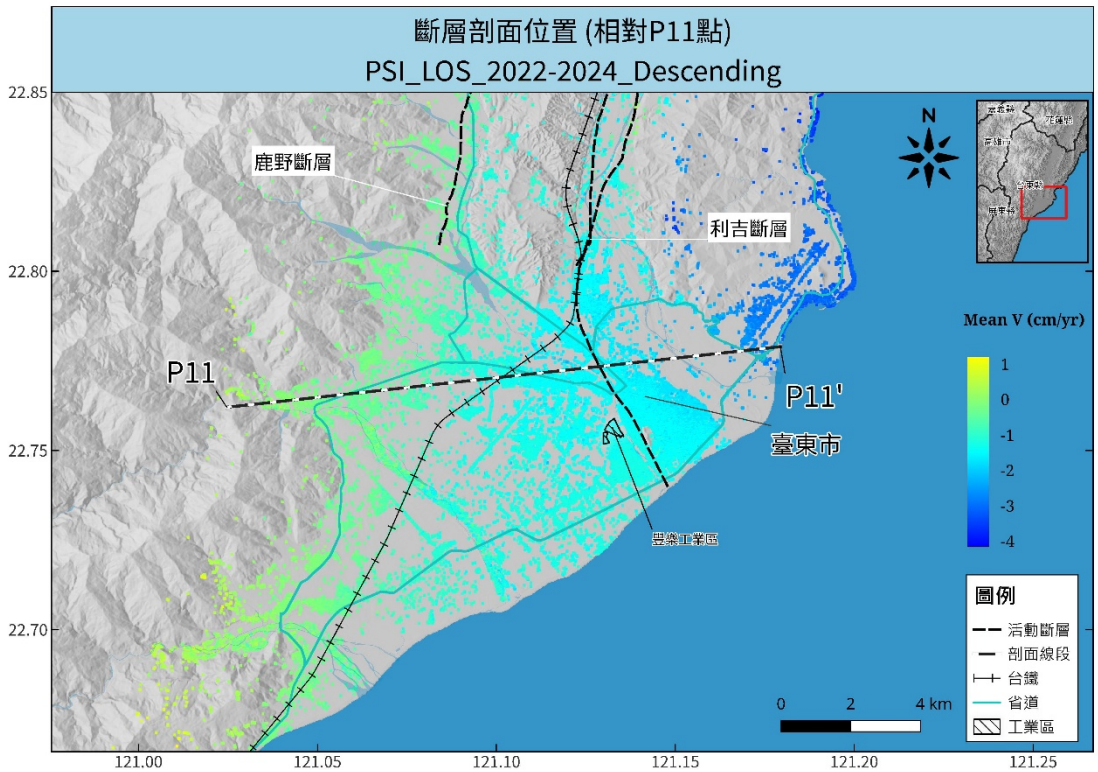


圖 D-31：P11 剖面的 2022~2024 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P11 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

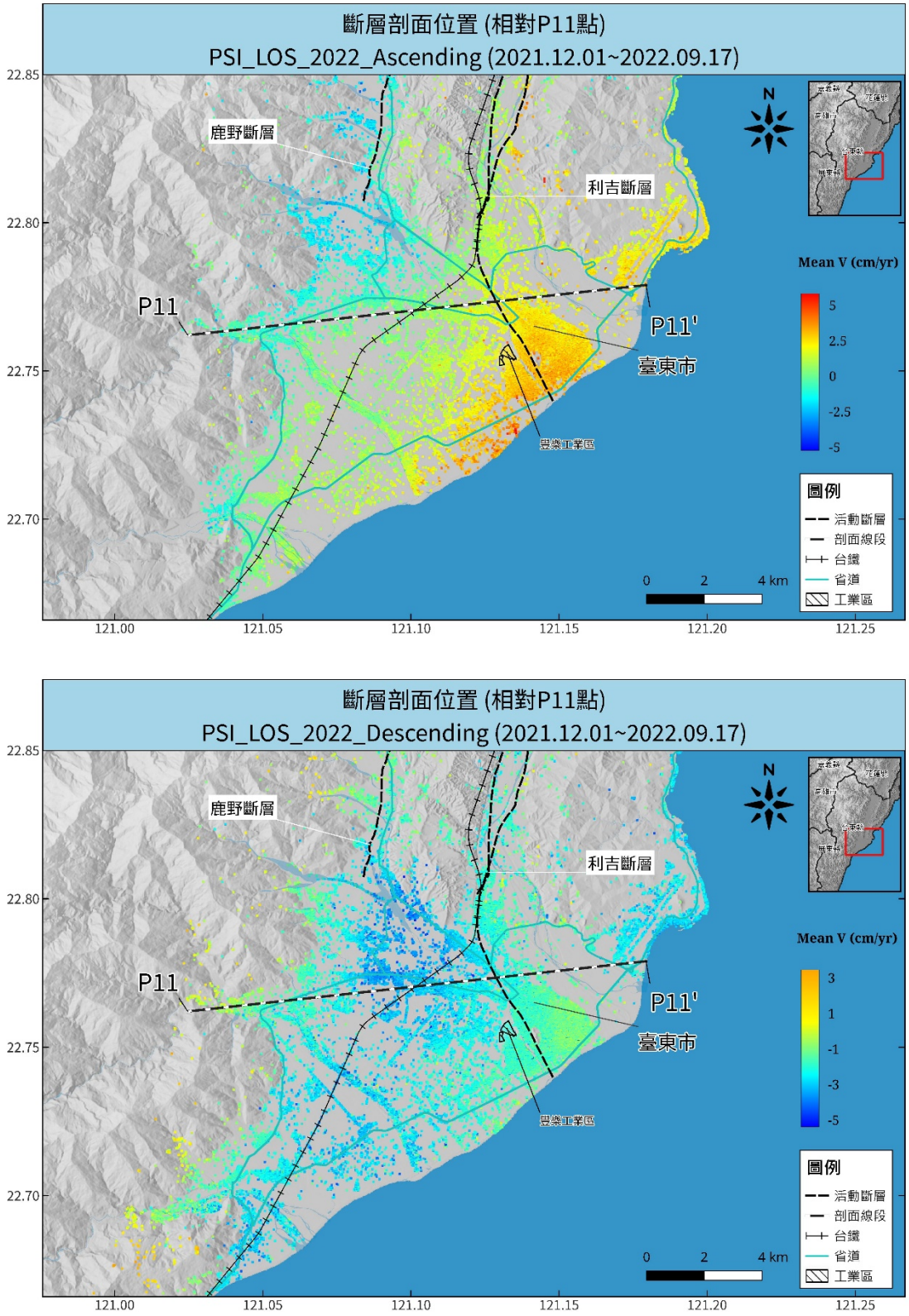


圖 D-32：P11 剖面的 2022 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P11 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。

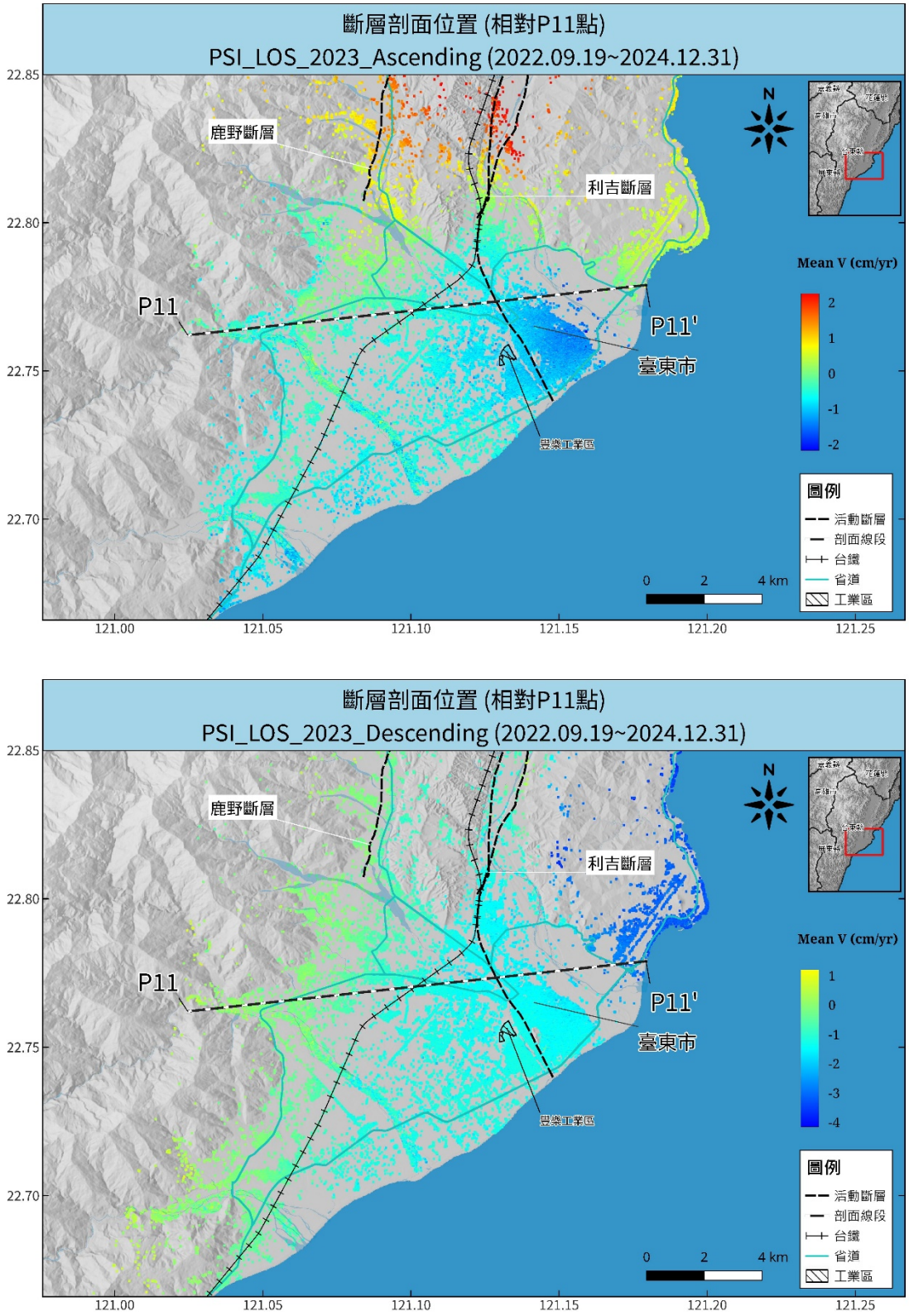


圖 D-33：P11 剖面的 2023 年 LOS 方向平均速度場與剖面位置圖。圖中的速度場結果皆相對剖面起點 P11 之速度。上圖為升軌道之結果，下圖為降軌道之結果。