經濟部
Ministry of Economic Affairs

計畫編號：B11205

經濟部地質調查及礦業管理中心
112 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(1/3)」
（第一年度）

全程計畫：自 112 年 3 月至 114 年 12 月止
本年度計畫：自 112 年 3 月至 112 年 12 月止

委託機關：經濟部地質調查及礦業管理中心
執行單位：國立東華大學
計畫主持人：顏君毅

中華民國 112 年 12 月

計畫編號：B11205

經濟部地質調查及礦業管理中心

112 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(1/3)」

（第一年度）

全程計畫：自 112 年 3 月至 114 年 12 月止

本年度計畫：自 112 年 3 月至 112 年 12 月止

委託機關：經濟部地質調查及礦業管理中心

執行單位：國立東華大學

計畫主持人：顏君毅

中華民國 112 年 12 月

目錄

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

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年度計畫成果概述.....7
1-4 111年度計畫成果概述.....13
1-5 計畫工作方法概述.....17
1-5-1 合成孔徑雷達差分干涉(Interferometry.....17
Synthetic Aperture Radar, InSAR).....17
1-5-2 多時序雷達差分干涉技術(Multi-Temporal InSAR).....17
1-5-3解算垂直變形速率.....21
1-5-4 資料比對.....21
1-5-5 斷層幾何與滑移量模擬.....22
1-5-6 計畫成果效益及其應用.....23
1-6 本年度計畫概述.....24
1-6-1 本年度研究區域背景簡介.....24
1-6-1-1 山腳斷層.....24
1-6-1-2 湖口斷層.....28
1-6-1-3 新竹斷層.....30
1-6-1-4 新城斷層.....32
1-6-1-5 獅潭斷層.....35
1-6-1-6 三義斷層.....38
1-6-1-7 屯子腳斷層.....41
1-6-2 本年度工作項目.....42
1-6-2-1 本年度計畫期中交付工作項目.....43
1-6-2-2 本年度計畫期末交付工作項目.....43

第二章、計畫執行方法及進行步驟.....45
2-1 雷達差分干涉.....45

2-1-1 永久散射體雷達差分干涉技術(PSI)的基本概念.....47
2-1-2 StaMPS技術的PS點位選取概念.....49
2-1-3 技術上需克服之困難.....53
2-2GNSS、水準測量與雷達差分干涉資料對比.....53
2-2-1 工作內容概述.....53
2-2-2 資料對比之執行方法及進行步驟.....55
2-3 二維剖面模擬.....57
2-3-1 方法與執行步驟.....57
2-3-2 跨斷層之速度剖面分析.....59
2-4 垂直速度場解析.....62

第三章、北部地區雷達影像分析.....65
3-1 StaMPS參數測試與律定.....65
3-2 2014-2018年雷達影像成果.....66
3-2-1 升降軌道的LOS速度場成果.....67
3-3 2018-2021年雷達影像成果.....70
3-3-1 升降軌道的LOS速度場成果.....70
3-4 2022年雷達影像成果.....74
3-4-1 升降軌道的LOS速度場成果.....74
3-5 垂直速度場解析.....78
3-6 跨斷層的速度場剖面分析.....84
3-6-1 山腳斷層(SCO).....86
3-6-2 湖口斷層(HKO).....99
3-6-3 新城斷層(HCG).....109
3-6-4 三義斷層(SYI).....125
3-6-5 桃園臺地.....141
3-6-6 2018-2021年跨斷層垂直速度場剖面.....154
3-7 重點區域時間序列分析.....163
3-7-1 2018-2021年PSI與GNSS時間序列分析.....163
3-7-2 2018-2021年PSI與地下水時間序列分析.....167
3-7-3 跨斷層時間序列.....172

第四章、北部地區雷達資料與其他大地測量觀測資料的比對.....175
4-1 GNSS連續站與PSI資料比對.....176
4-1-1 2014-2018年.....178
4-1-2 2018-2021年.....182
4-1-3 2022年.....187

4-2GNSS連續站及移動站與PSI資料比對 193
4-2-1 2014年-2018年 195
4-2-2 2018年-2021年 199
4-2-3 2022年 204
4-3 水準測量資料與雷達資料比對成果 210
4-1-1 石門至萬里測線 212
4-1-2 士林至三芝測線 214
4-3-3 淡水至士林測線 216
4-3-4 五股至臺北測線 218
4-3-5 新屋至童話世界測線 220
4-3-6 新竹至五峰測線 222
4-3-7 新竹至峨嵋測線 224
4-3-8 苗栗至南庄測線 226
4-3-9 大安至東勢測線 228

第五章 二維剖面模擬 231
5-1 方法與執行步驟 231
5-2 山腳斷層模擬結果 234
5-3 新城斷層模擬結果 244
5-4 三義斷層模擬結果 253

第六章 討論 261
6-1 雷達結果與其他大地測量資料比較 261
6-1-1 雷達差分干涉資料與GNSS比對 261
6-1-2 雷達差分干涉資料與水準測線的比對 263
6-2 雷達影像成果 264
6-2-1 北臺灣地區垂直速度場 264
6-2-2重要跨斷層剖面 264
6-3 桃園臺地地表變形 269
6-5 斷層錯位模擬 275

第七章 結論 277

Chapter 7 : Conclusions 278
參考文獻 281
期中委員審查意見 293
期末委員審查意見 297

（附錄請參閱光碟）

附錄A、斷層剖面成果

附錄B、地質剖面成果

附錄C、垂直速度場剖面成果

附錄D、GNSS與PSI時間序列

附錄E、地下水位時間序列

附錄F、三維向量於衛星視角方向的影響

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：(左圖) 2018-2020年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。(右圖) 2018-2020年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....8
圖1-5：2018-2020 雷達視衛星方向速率與GNSS投影至雷達視衛星方向速率之比較。.....9
圖1-6：車瓜林斷層附近地表變形狀況。.....10
圖1-7：車瓜林斷層附近地表變形剖面。.....11
圖1-8：小崗山斷層2018-2020升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。.....12
圖1-9：(左圖) 2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。(右圖) 2018-2021年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....14
圖1-10：三時期雷達視衛星方向速率與GNSS投影至雷達視衛星方向速率之比較。.....15
圖1-11：後甲里斷層附近地表變形狀況。.....16
圖1-12：後甲里斷層附近地表變形剖面。.....16
圖1-13：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)。.....18
圖1-14：冰島Eyjafjallajökull火山周圍的PSI時間序列地表變形量 (Hooper, 2008)。.....21
圖1-15：山腳斷層條帶地質圖 (北段；林啟文等，2007)。.....26
圖1-16：山腳斷層條帶地質圖 (南段；林啟文等，2007)。.....27
圖1-17：湖口斷層條帶地質圖。.....30
圖1-18：新竹斷層條帶地質圖 (林啟文等，2007)。.....32
圖1-19：新城斷層條帶地質圖 (林啟文等，2007)。.....34
圖1-20：獅潭斷層條帶地質圖 (林啟文等，2008)。.....37
圖1-21：三義斷層條帶地質圖 (林啟文等，2008)。.....40
圖1-22：屯子腳斷層條帶地質圖 (林啟文等，2008)。.....42
圖2-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。.....46
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) 48
圖2-3：永久散射體對相位的影響示意圖。.....48
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。.....51
圖2-5：雷達影像處理流程第二階段 - PSI處理流程圖。.....52
圖2-6：SENTINEL-1東西方向與垂直方向年平均變動量 (單位：mm/yr)。.....54

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。.....55
圖2-8：GipsyX軟體處理流程。.....57
圖2-9：(a) 斷層幾何參數，(b)由圖(a)提供的斷層幾何參數與滑動量，經過彈性半無限空間錯動理論計算的地表變形（Okada, 1985）。.....60
圖2-10：藉由在空間上連續的地表變形資訊，採用彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992），推估斷層參數（Kuo et al., 2019）。.....6l
圖2-11：工作流程圖。.....62
圖3-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與本次研究區域分佈圖。.....66
圖3-2：2014-2018升軌道影像LOS平均速度場。.....68
圖3-3：2014-2018降軌道影像LOS平均速度場。.....69
圖3-4：2018-2021升軌道影像LOS平均速度場。.....72
圖3-5：2018-2021降軌道影像LOS平均速度場。.....73
圖3-6：2022升軌道影像LOS平均速度場。.....76
圖3-7：2022降軌道影像LOS平均速度場。.....77
圖3-8：2018年至2021北臺灣地區升軌方向PSI與內插結果。.....80
圖3-9：2018年至2021年北臺灣地區降軌方向PSI與內插結果。.....81
圖3-10：上圖左為2018-2021 GNSS東西向速度內插圖，內插使用克利金的線性模式。.....82
圖3-11：上圖左為2018-2021 GNSS垂直向速度內插圖，內插使用克利金的線性模式。.....83
圖3-12：北臺灣地區地質剖面分佈圖。.....85
圖3-13：2014-2018山腳斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....87
圖3-14：2014-2018山腳斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面成果圖。.....88
圖3-15：2014-2018山腳斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....89
圖3-16：2014-2018山腳斷層降軌道影像的剖面圖成果。.....90
圖3-17：2018-2021山腳斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....91
圖3-18：2018-2021山腳斷層升軌道影像的剖面成果。.....92
圖3-19：2018-2021山腳斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....93
圖3-20：2018-2021山腳斷層降軌道影像的與剖面成果。.....94
圖3-21：2022山腳斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....95
圖3-22：2022山腳斷層升軌道影像的剖面成果。.....96
圖3-23：2022山腳斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....97
圖3-24：2022山腳斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。.....98
圖3-25：2014-2018湖口斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....100
圖3-26：2014-2018湖口斷層升軌道影像的剖面成果。.....100

圖3-27：2014-2018湖口斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....101
圖3-28：2014-2018湖口斷層降軌道影像的剖面成果。.....101
圖3-29：2018-2021湖口斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....102
圖3-30：2018-2021湖口斷層升軌道影像的剖面成果。.....102
圖3-31：2018-2021湖口斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....103
圖3-32：2018-2021湖口斷層降軌道影像的剖面成果。.....103
圖3-33：2022湖口斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....104
圖3-34：2022湖口斷層升軌道影像的剖面成果。.....104
圖3-35：2022湖口斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....105
圖3-36：2022湖口斷層降軌道影像的剖面圖成果。.....105
圖3-37：湖口斷層地質剖面分佈圖。.....106
圖3-38：地質剖面1與該沿線三期升降軌速度場之比較。.....107
圖3-39：地質剖面2與該沿線三期升降軌速度場之比較。.....108
圖3-40：2014-2018新城斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....110
圖3-41：2014-2018新城斷層升軌道影像的剖面圖成果。.....111
圖3-42：2014-2018新城斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....112
圖3-43：2014-2018新城斷層降軌道影像的剖面成果。.....113
圖3-44：2018-2021新城斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....114
圖3-45：2018-2021新城斷層升軌道影像的剖面成果。.....115
圖3-46：2018-2021新城斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....116
圖3-47：2018-2021新城斷層降軌道影像的剖面成果。.....117
圖3-48：2022新城斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....118
圖3-49：2022新城斷層升軌道影像的剖面成果。.....119
圖3-50：2022新城斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....120
圖3-51：2022新城斷層降軌道影像的剖面成果。.....121
圖3-52：新城斷層地質剖面分佈圖。.....122
圖3-53：地質剖面5與該沿線三期升降軌速度場之比較。.....123
圖3-54：地質剖面6與該沿線三期升降軌速度場之比較。.....124
圖3-55：2014-2018三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....126
圖3-56：2014-2018三義斷層升軌道影像的剖面成果。.....127
圖3-57：2014-2018三義斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....128
圖3-58：2014-2018三義斷層降軌道影像的剖面成果。.....129
圖3-59：2018-2021三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....130
圖3-60：2018-2021三義斷層升軌道影像的剖面成果。.....131
圖3-61：2018-2021三義斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....132
圖3-62：2018-2021三義斷層降軌道影像的剖面成果。.....133

圖3-63：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....134
圖3-64：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果。.....135
圖3-65：2022三義斷層降軌道影像的剖面成果圖。.....136
圖3-66：2022三義斷層降軌道影像的剖面成果。.....137
圖3-67：三義斷層地質剖面分佈圖。.....138
圖3-68：地質剖面9與該沿線三期升降軌速度場之比較。.....139
圖3-69：地質剖面10與該沿線三期升降軌速度場之比較。.....140
圖3-70：2014-2018桃園臺地升軌道影像的剖面成果圖。.....142
圖3-71：2014-2018桃園臺地升軌道影像的與剖面成果。.....143
圖3-72：2014-2018桃園臺地降軌道影像的剖面成果圖。.....144
圖3-73：2014-2018桃園臺地降軌道影像的剖面成果。.....145
圖3-74：2018-2021桃園臺地升軌道影像的剖面成果圖。.....146
圖3-75：2018-2021桃園臺地升軌道影像的剖面圖成果。.....147
圖3-76：2018-2021桃園臺地降軌道影像的剖面成果圖。.....148
圖3-77：2018-2021桃園臺地降軌道影像的剖面成果。.....149
圖3-78：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。.....150
圖3-79：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果。.....151
圖3-80：2022桃園臺地降軌道影像的剖面成果圖。.....152
圖3-81：2022桃園臺地降軌道影像的剖面成果。.....153
圖3-82：2018-2021山腳斷層垂直平均速度場。.....155
圖3-83：2018-2021山腳斷層垂直平均速度場的剖面圖。.....156
圖3-84：2018-2021湖口斷層垂直平均速度場。.....157
圖3-85：2018-2021湖口斷層垂直平均速度場的剖面圖。.....158
圖3-86：2018-2021新城斷層垂直平均速度場。.....159
圖3-87：2018-2021新城斷層垂直平均速度場的剖面圖。.....160
圖3-88：2018-2021三義斷層垂直平均速度場與剖面圖。.....161
圖3-89：2018-2021三義斷層垂直平均速度場的剖面圖。.....162
圖3-90：重點區域GNSS測站位置分佈圖。.....164
圖3-91：2018-2021年升軌方向BANC、CWBN、GBRS、YMSM、GS15、GS16、JUNA、PAO2、TCMS及YAME測站的PSI時間序列。.....165
圖3-92：2018-2021年降軌方向BANC、CWBN、GBRS、YMSM、GS15、GS16、JUNA、PAO2、TCMS及YAME測站的PSI時間序列。.....166
圖3-93：臺北盆地2018-2021年Sentinel-1 升軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。.....168
圖3-94：臺北盆地2018-2021年Sentinel-1 降軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。.....168

圖3-95：2018-2021年臺北盆地地下水觀測井與PSI時間序列。.....169
圖3-96：桃園地區2018-2021年Sentinel-1 升軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。.....170
圖3-97：桃園地區2018-2021年Sentinel-1 降軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。.....170
圖3-98：2018-2021年桃園地區地下水觀測井與PSI時間序列。.....171
圖3-99：2018-2021年跨斷層時間序列。.....173
圖4-1：GNSS測站位置分佈圖。.....177
圖4-2：2014-2018年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....179
圖4-3：2014-2018 Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。.....180
圖4-4：2014-2018年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....181
圖4-5：2014-2018 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。.....182
圖4-6：2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....184
圖4-7：2018-2021 Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。.....185
圖4-8：2018-2021年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....186
圖4-9：2018-2021 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。.....187
圖4-10：2022年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....189
圖4-11：2022 Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。.....190
圖4-12：2022年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。.....191
圖4-13：2022 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。.....192
圖4-14：GNSS移動站與連續站位置分佈圖。.....194
圖4-15：2014-2018年Ascending平均速度場與所有GNSS移動站速度場。.....196
圖4-16：2014-2018 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。.....197
圖4-17：2014-2018年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。.....198
圖4-18：2014-2018 降軌道雷達資料與所有GNSS比對。.....199
圖4-19：2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。.....201
圖4-20：2018-2021 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。.....202
圖4-21：2018-2021年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。.....203
圖4-22：2018-2021 降軌道雷達資料與2018-2021所有 GPS比對。.....204
圖4-23：2022年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。.....206
圖4-24：2022 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。.....207
圖4-25：2022年Descending平均速度場與GNSS移動站速度場。.....208
圖4-26：2022 降軌道雷達資料與移動站的比對。.....209
圖4-27：北部水準測線分布。.....211
圖4-28：水準測線-石門至萬里測線與PSI資料比對(Ascending)。.....212
圖4-29：水準測線-石門至萬里測線與PSI資料比對(Descending)。.....213

圖4-30：水準測線-士林至三芝測線與PSI資料比對(Ascending)。.....214
圖4-31：水準測線-士林至三芝測線與PSI資料比對(Descending)。.....215
圖4-32：水準測線-淡水至士林測線與PSI資料比對(Ascending)。.....216
圖4-33：水準測線-淡水至士林測線與PSI資料比對(Descending)。.....217
圖4-34：水準測線-五股至臺北測線與PSI資料比對(Ascending)。.....218
圖4-35：水準測線-五股至臺北測線與PSI資料比對(Descending)。.....219
圖4-36：水準測線-新屋至童話世界測線與PSI資料比對(Ascending)。.....220
圖4-37：水準測線-新屋至童話世界測線與PSI資料比對(Descending)。.....221
圖4-38：水準測線-新竹至五峰測線與PSI資料比對(Ascending)。.....222
圖4-39：水準測線-新竹至五峰測線與PSI資料比對(Descending)。.....223
圖4-40：水準測線-新竹至峨嵋測線與PSI資料比對(Ascending)。.....224
圖4-41：水準測線-新竹至峨嵋測線與PSI資料比對(Descending)。.....225
圖4-42：水準測線-苗栗至南庄測線與PSI資料比對(Ascending)。.....226
圖4-43：水準測線-苗栗至南庄測線與PSI資料比對(Descending)。.....227
圖4-44：水準測線-大安至東勢測線與PSI資料比對(Ascending)。.....228
圖4-45：水準測線-大安至東勢測線與PSI資料比對(Descending)。.....229
圖5-1：斷層錯位模型模擬結果示意圖組。.....232
圖5-2：山腳斷層附近雷達影像上升及下降軌道視衛星方向速率剖面資料。...233
圖5-3：新城斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。.....233
圖5-4：三義斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。.....234
圖5-5：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....235
圖5-6：含走滑但不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....235
圖5-7：不含走滑但含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....236
圖5-8：不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。....236
圖5-9：含走滑與滑脫面之模擬。.....237
圖5-10：含走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00456385，所有參數的個數百分比分布圖。.....238
圖5-11：無走滑含滑脫面之模擬RMSE小於0.005150255，所有參數的個數百分比分布圖。.....239
圖5-12：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00455435，所有參數的個數百分比分布圖。.....240
圖5-13：重設邊界條件下，不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....241
圖5-14：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.004653995，所有參數的個數百分比分布圖。.....242
圖5-15：無走滑無滑脫面之模擬RMSE前5%與10%數量百分比等值圖。.....243

圖5-16：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....244
圖5-17：含走滑但不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....245
圖5-18：不含走滑但含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....245
圖5-19：不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。..246
圖5-20：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE小於0.00126749，所有參數的個數百分比分布圖。.....247
圖5-21：含走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00118484，所有參數的個數百分比分布圖。.....248
圖5-22：無走滑含滑脫面之模擬RMSE小於0.001294095，所有參數的個數百分比分布圖。.....249
圖5-23：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.001200335，所有參數的個數百分比分布圖。.....250
圖5-24：重設邊界條件下，不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....251
圖5-25：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00111564，所有參數的個數百分比分布圖。.....252
圖5-26：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....253
圖5-27：含走滑但不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....254
圖5-28：不含走滑但含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。.....254
圖5-29：不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖。..255
圖5-30：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE小於0.001588715，所有參數的個數百分比分布圖。.....256
圖5-31：含走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.0014654，所有參數的個數百分比分布圖。.....257
圖5-32：無走滑含滑脫面之模擬RMSE小於0.001616645，所有參數的個數百分比分布圖。.....258
圖5-33：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00142918，所有參數的個數百分比分布圖。.....259
圖6-1：2018-2021年升軌道PSI與GNSS連續站速度場對比。.....262
圖6-2：2018-2021年GNSS西山測站（MIAO）三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。.....263
圖6-3：探井位置與基盤形貌（鄧屬予，2006）。.....266
圖6-4：X-Y剖面成果。.....267
圖6-5：（左）臺北盆地基盤深度圖（許劭禎，2013）（右）2018-2021垂直速度場（圖3-82）。.....268
圖6-6：2018-2021桃園臺地平均速度場變化及鄰近構造。.....271

圖6-7：桃園臺地變形邊界之地形特徵與雙連坡構造相關性。.....272
圖6-8：桃園臺地變形邊界西側調查結果。.....273
圖6-9：桃園臺地變形邊界東側調查結果。.....274

表目錄

表1-1：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。.....20
表2-1：Sentinel-1衛星影像資訊。.....46
表3-1：Sentinel-1A衛星影像使用幅數。.....65
表4-1：Sentinel-1A衛星影像使用幅數。.....175
表4-2：各時期GNSS測站數量。.....176
表4-3：2014-2018年PSI與GNSS比對成果。.....178
表4-4：2018-2021年PSI與GNSS比對成果。.....183
表4-5：2022年PSI與GNSS比對成果。.....188
表4-6：：2014-2018年PSI與GNSS比對成果。.....195
表4-7：：2018-2021年PSI與GNSS比對成果。.....200
表4-8：：2022年PSI與GNSS比對成果。.....205

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(1/3)													
月次 工作項目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	備註
2014-2018視衛星方向地殼變動分析													
2018-2021視衛星方向地殼變動分析													
2022視衛星方向地殼變動分析													
期中簡報會議													
2014-2018跨斷層垂直速度剖面分析													
2018-2021跨斷層垂直速度剖面分析													
2022跨斷層垂直速度剖面分析													
跨斷層時間序列分析													
重要觀測位置時間序列分析													
二維剖面模擬													
期末簡報會議與成果報告撰寫													
預定進度（累積數）	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	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	原工作計畫書繳交、契約書簽訂	3月3日	工作計畫書修正與契約書簽訂
2	契約變更之工作計畫書繳交、契約書簽訂	6月1日	契約變更之工作計畫書修正與契約書簽訂
3	期中報告繳交	8月1日	已繳交
4	期中審查會議	8月15日	已完成
5	期末報告繳交	11月24日	已繳交
6	期末審查會議	12月8日	已完成
7	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. 2014-2018視衛星方向地殼變動分析。	3-2與第四章
2. 2018-2021視衛星方向地殼變動分析。	3-3與第四章
3. 2022視衛星方向地殼變動分析。	3-4與第四章
4. 2014-2018跨斷層垂直速度剖面分析。	3-5
5. 2018-2021跨斷層垂直速度剖面分析。	3-5
6. 跨斷層時間序列分析。	3-7-3
7. 重要觀測位置時間序列。	3-7
8.二維剖面模擬。	第五章

摘要

本計畫利用雷達差分干涉方法針對北部地區監測地表變形，並特別針對斷層沿線的地表變形觀測，觀測範圍包含北部地區七條斷層（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、臺北都會區等重要區域。

在本次計畫中我們解算了三個時間段的雷達資料，分別是2014-2018、2018-2021、以及2022三個時間段。根據雷達影像在臺灣拍攝的特性區分成這三個時間段。然而本期由於Sentinel-1B衛星故障，2022年度影像品質狀況不確定，因此特別分離2022年的影像處理，避免影響其他年份資料。

針對解算後的速度場，我們在研究區切不同的剖面，藉此觀察跨斷層、以及重要區域的速度場的變化。此外，我們亦將雷達成果與同時期水準測量及移動站GNSS資料進行比對，並以雷達資料解析水平與垂直速度場，以了解北部地區地表變形，以及其造成的影響。

關鍵詞：雷達差分干涉、活斷層、地表變形、新竹科學園區、臺北都會區。

Abstract

This project uses Persistent Scatterer SAR Interferometry (PSI) method to uncover the surface deformation in the northern Taiwan. The main targets include the Sanchiao Fault, Hukou Fault, Husinchu Fault, Hsincheng Fault, Shihtan Fault, Sanyi Fault, Tuntzuchiao Fault, as well as Hsinchu Science and Industrial Park and Taipei metropolitan area.

We have completed mean velocity in three time intervals (2014-2018, 2018-2021, and 2022). The division is based on the data availability, calculation time, and possibly data quality. Because of the malfunction of the Sentinel-1B satellite, we divided the satellite data into the aforementioned 3 segments.

The calculated radar data then were used to extract profiles from important area for further investigation. In addition, we compared the contemporary GNSS and leveling data to validate the quality of radar data. The verified data will be used to investigate surface deformation in northern Taiwan, and their implications.

KEYWORDS：Radar interferometry, active fault, surface deformation, Hsinchu Science and Industrial Park, Taipei metropolitan area.

第一章、緒論

1-1 計畫整體概述

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊間，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。

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三號高速公路的田寮隧道，而由地震造成的快速變化則例如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。

為了解其他區域的地表變形，預計延續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。預計在112年度針對北部地區的七條斷層（包含山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層、屯子腳斷層等區域）與新竹科學園區、臺北都會區等重點區域做觀測，在113年度針對中部地區的六條斷層（包含大甲斷層、鐵砧山斷層、彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔-雙冬斷層、初鄉斷層等區域）與中部科學園區、臺中都會區等重點區域做觀測，以及114年度針對東部地區的八條斷層（包含米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層等區域）與板

塊交界地震頻繁之建物、人口密集區等保全對象做觀測，並且對觀測結果進行分析。（圖1-1）

圖1-2顯示未來三年預計觀察區域以及範圍內的活動斷層與重要交通、民生設施以及相關都會區。可能存在之地表變形、斷層與交通系統在研究範圍內的幾何關係，這些交通系統也連結著各個可能的重要區域。

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

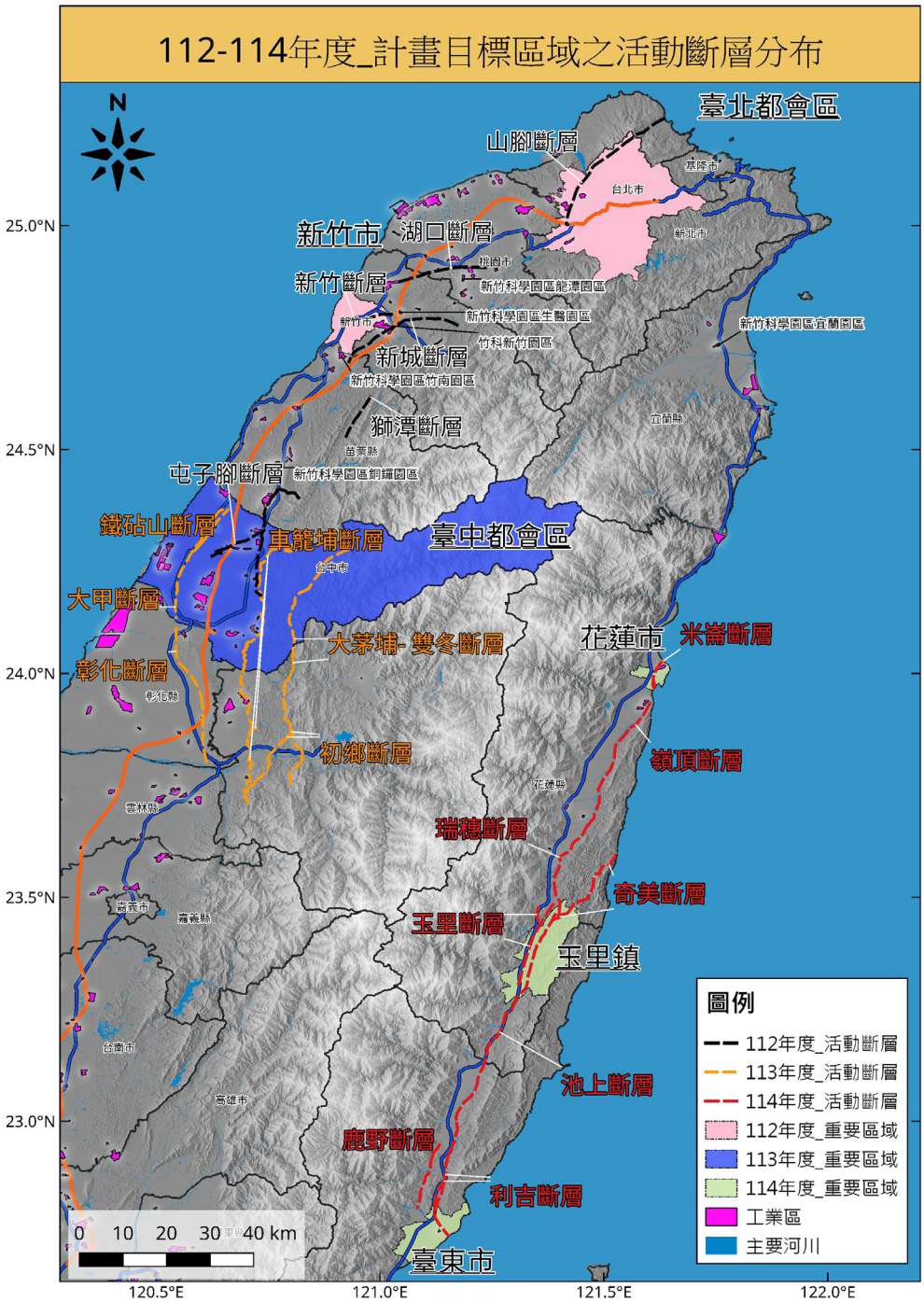


圖1-1：目標區域。112年度預計針對北部地區黑色標示之斷層以及粉紅與紫色區塊標示之重要區域做觀測與分析；113年度針對中部地區橘色標示之斷層以及紫色與藍色區塊標示之重要區域做觀測與分析；114年度針對東部地區紅色標示之斷層以及紫色與綠色區塊標示重要區域做觀測與分析。

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

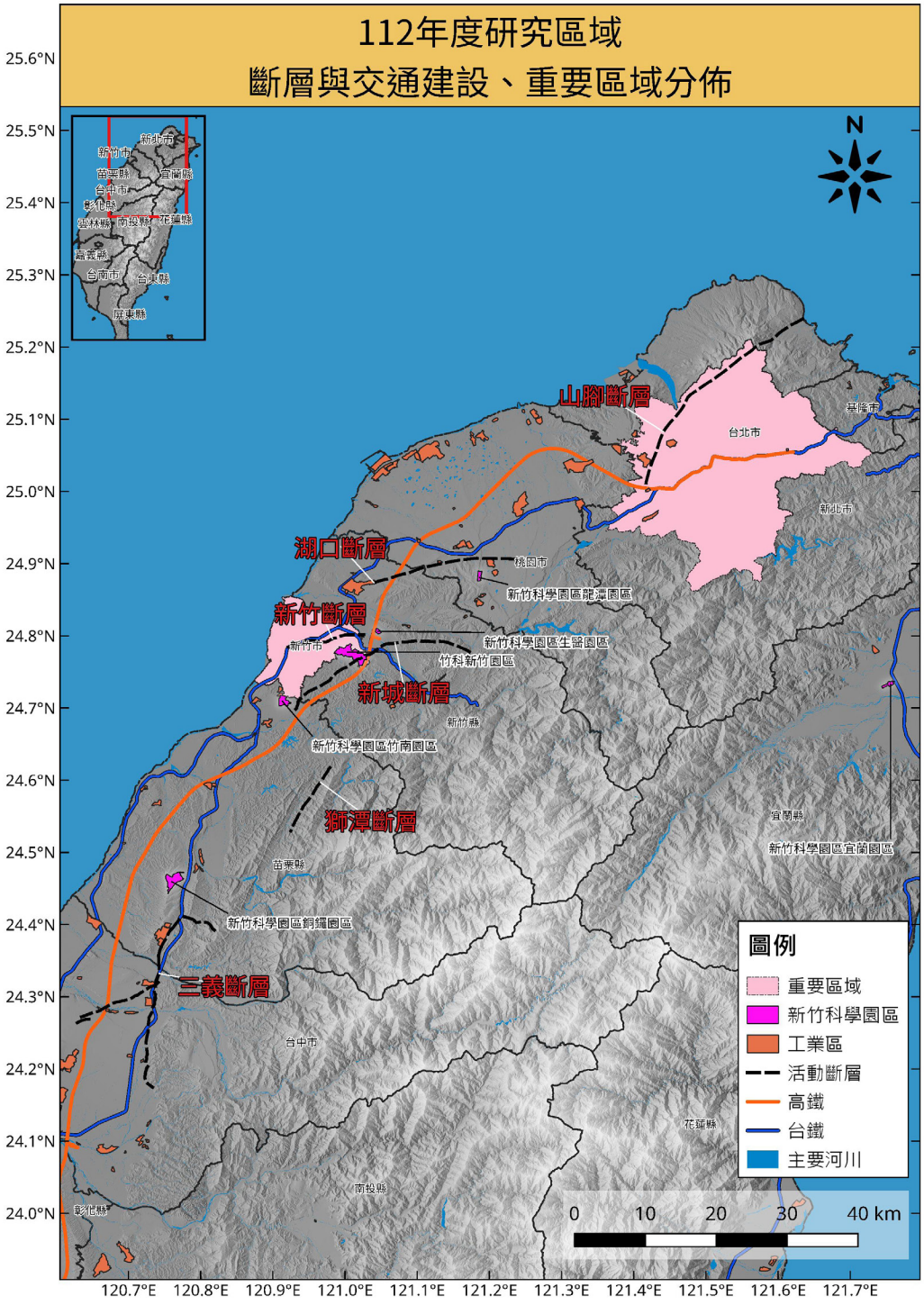


圖1-2：研究區域中的道路與斷層分佈情形。黑色線段為研究區域內的活動斷層分佈位置（如圖1-1）。橘色線段為臺灣高速鐵路的行經路線。藍色線段為臺灣鐵路的行經路線。粉色區塊為目標重要區域。紫色區塊為新竹科學園區。棕色區塊為工業區。

Figure 1-2：Roads and faults in the study area. Black lines depict the active faults, blue lines are railroads, orange line is high speed railways. Pink areas are the target important areas. Purple areas are Hsinchu Science and Industrial Parks. Brown areas are industrial districts.

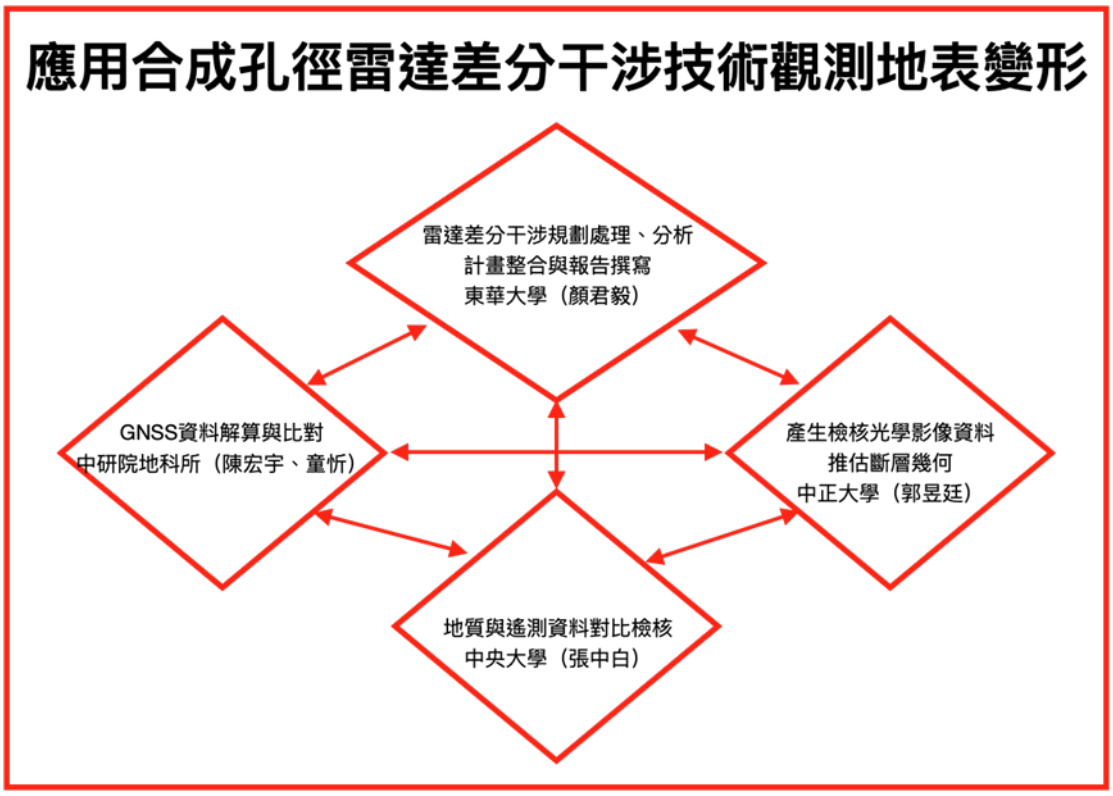


圖1-3：工作團隊與主要工作項目。

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

1-2 計畫目的

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

因此，為延續經濟部地質調查及礦業管理中心上一期的「斷層觀測性研究第四階段–地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」計畫中最新之研究成果，並搭配新版臺灣活動斷層分布圖中新增的活動斷層，於110–111年度執行「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形第一階段」計畫。本期計畫將延續110年至111年

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

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

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

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

1-3 110年度計畫成果概述

A. 成果

110年度我們將雷達資料劃分為三個時段分別是2014-2016、2016-2018、2018-2020進行雷達差分干涉處理（圖1-4），過程中與GNSS資料比對去除誤差後得到品質很好的結果（圖1-5）。例如車瓜林斷層在2018-2020年的速度圖顯示（圖1-6）其周遭的速度變化相當大。該斷層直接切過橋頭科學園區，也繼續往西南延伸。其錯移量在某些區域可接近 10 mm/yr （圖1-7）。

B. 教育訓練

在期中教育訓練時，我們針對雷達基本原理以及操作在地礦中心新北辦公室舉辦一整天的教育訓練，將概念到操作步驟等展示給地礦中心同仁。

C. 協助地質敏感區劃分

本期計畫包含了小崗山斷層，也恰巧地礦中心正在推動小崗山斷層的地質敏感區劃設。在討論中我們提供了相關資訊協助佐證該斷層位置、滑動速率等相關資訊供做參考使用（圖1-8）。

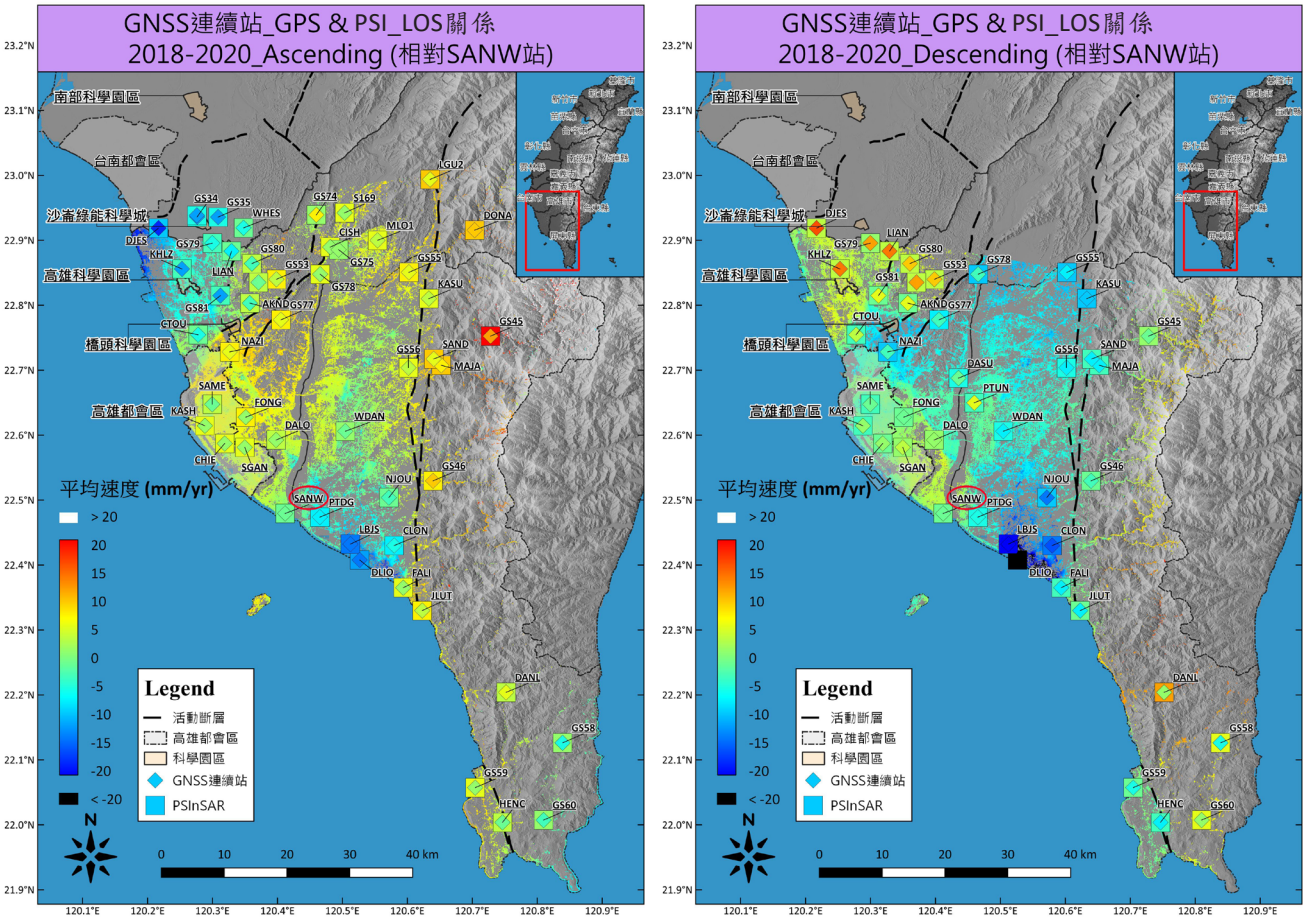


圖1-4：（左圖）2018-2020年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。（右圖）2018-2020年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站SANW，菱形為連續同時期GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 1-4：（Left） LOS Velocity field in ascending track between 2018 and 2020 in the Kaohsiung-Pingtung area. （Right） LOS Velocity field in descending track between 2018 and 2020. Shortening in slant range direction （rate in positive with warm colors） represents toward the satellite and elongation in slant range direction （rate in negative with cold colors） represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station SANW. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

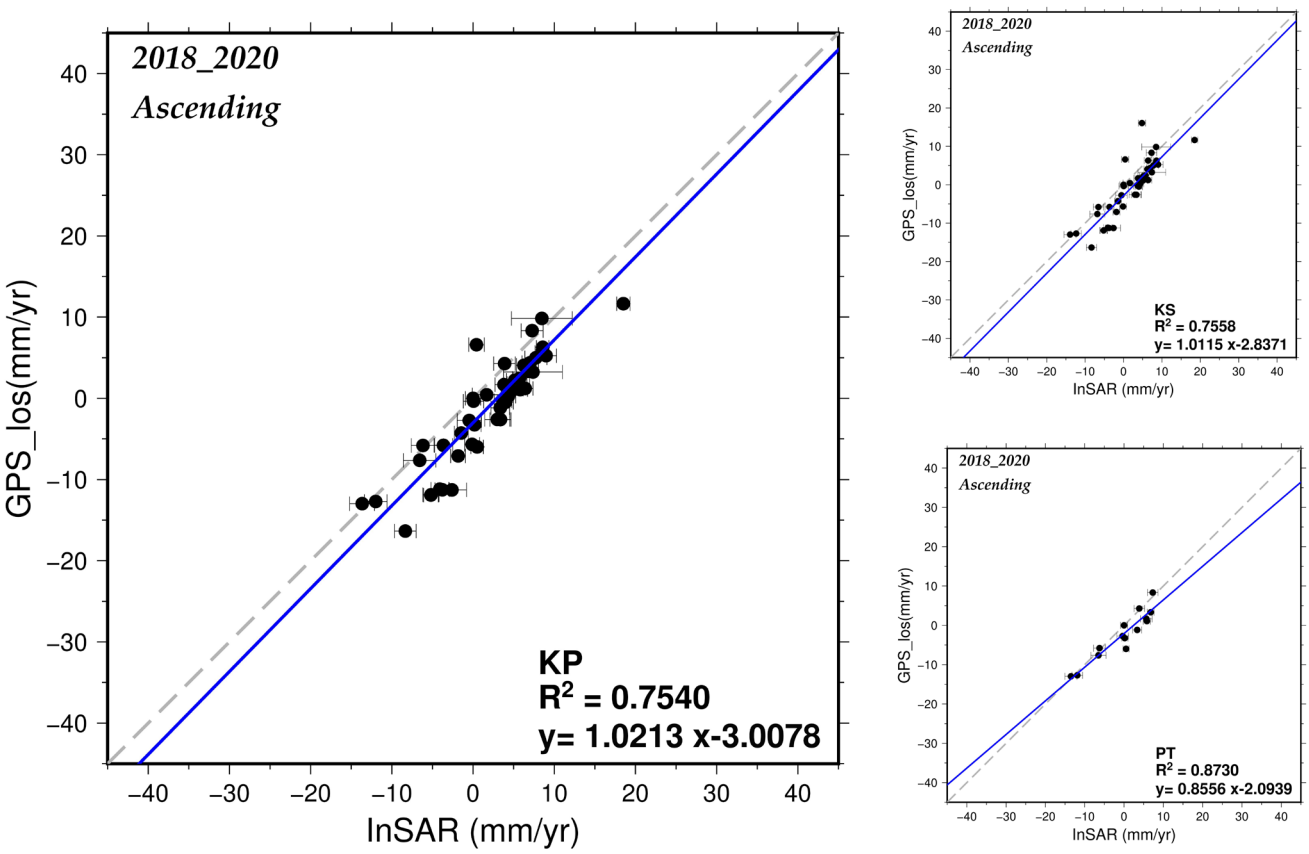


圖1-5：2018-2020 雷達視衛星方向速率與GNSS投影至雷達視衛星方向速率之比較。在去除誤差與雜訊後，兩種資料幾乎相同。

Figure 1-5：2018-2020 comparison between PSI ascending data and GPS. The two datasets show a mutual agreement after the process of removing errors and noises.

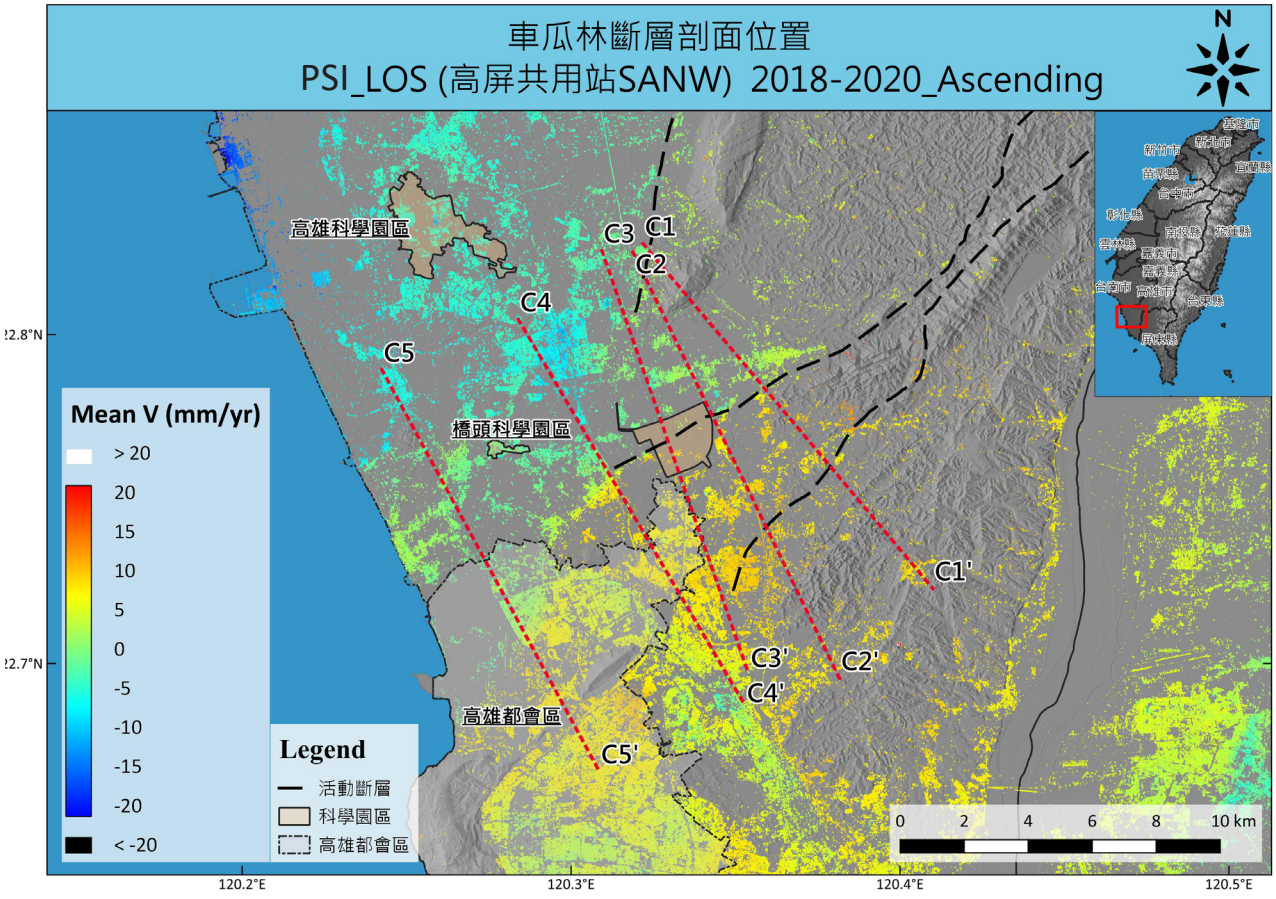


圖1-6：車瓜林斷層附近地表變形狀況。

Figure 1-6：Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of ascending orbits around the CheKuaLin Fault.

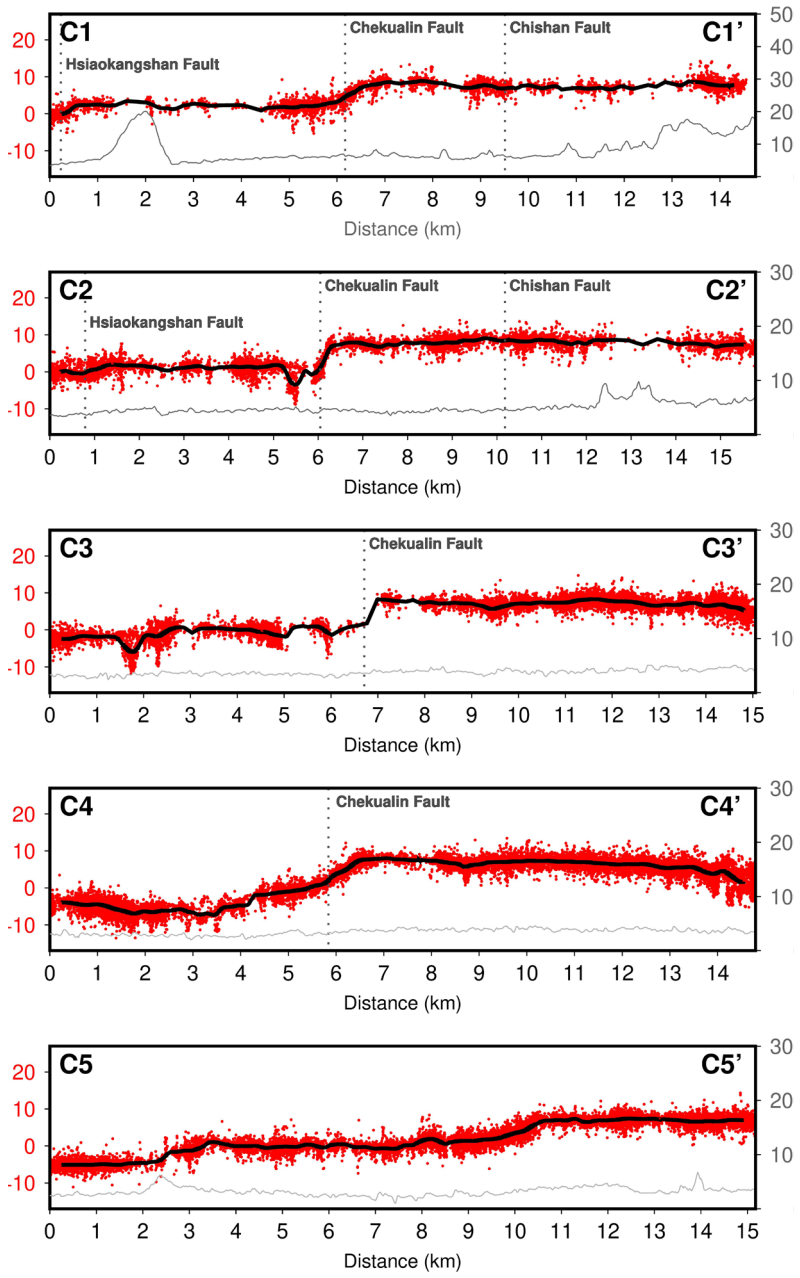


圖1-7：車瓜林斷層附近地表變形剖面。紅點為PSI速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 1-7：Profiles across the CheKuaLin Fault. The red dots are the PSI velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

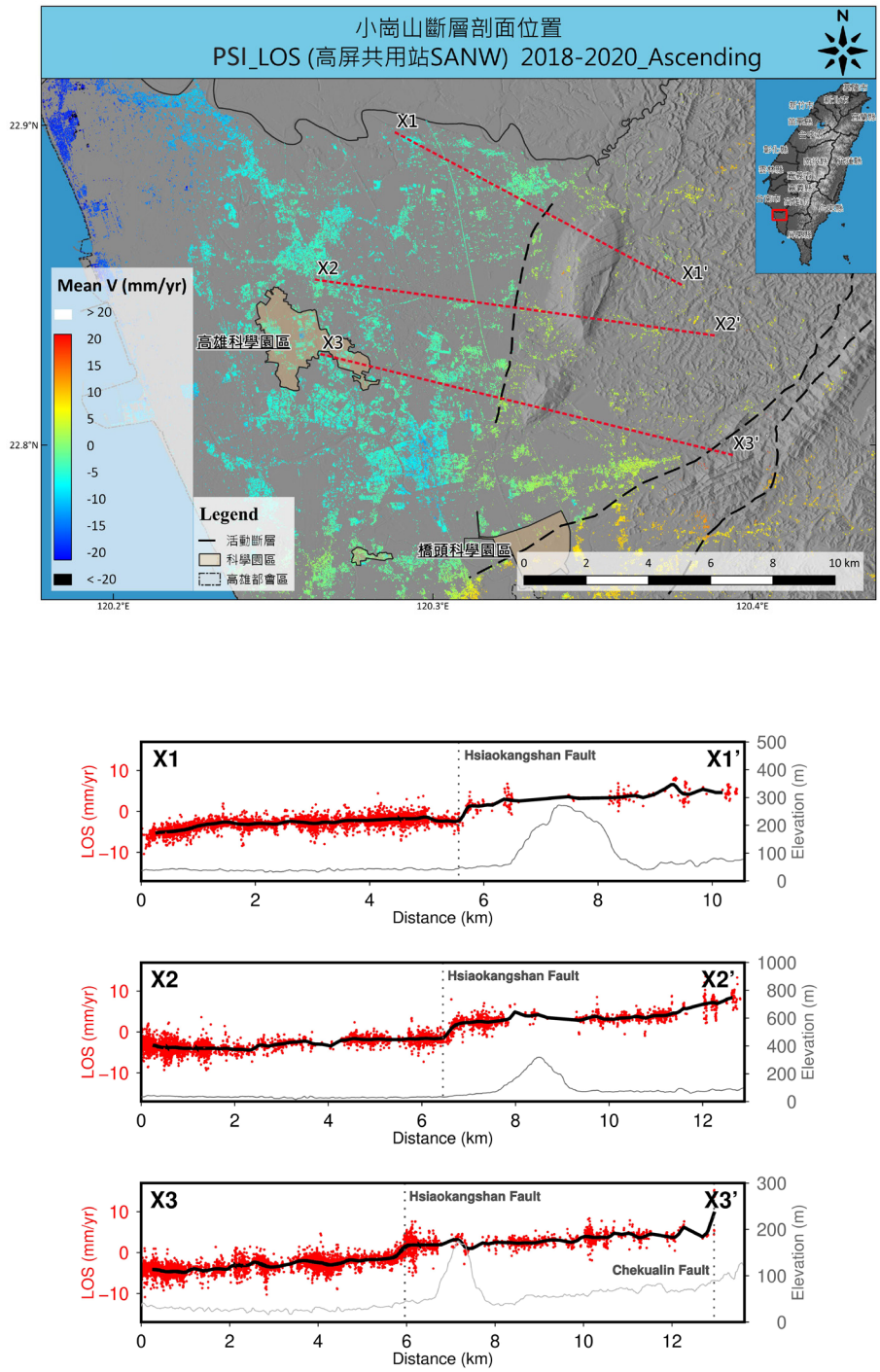


圖1-8：小崗山斷層2018-2020升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 1-8：Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of ascending orbits and profiles across the HsiaoKangShan Fault. The red dots are the PSI velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

1-4 111年度計畫成果概述

A. 成果

在111年度我們將嘉義臺南地區的雷達資料劃分為三個時段，進行雷大差分干涉處理，時間段分別為2014-2016、2016-2018、2018-2021（圖1-9），藉由110年度成果經驗，於嘉南地區獲得品質良好的的成果，與地區中的GNSS資料比對成果顯示兩資料趨勢吻合（圖1-10）。例如後甲里斷層在2018-2021年的速度圖顯示（圖1-11）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1-12）。

B. 教育訓練

在期中教育訓練時，我們針對雷達衛星獲取地表變形的過程與同震同調性差異分析在地礦中心新北辦公室舉辦教育訓練，將概念、操作步驟以及成果等展示給地礦中心同仁。

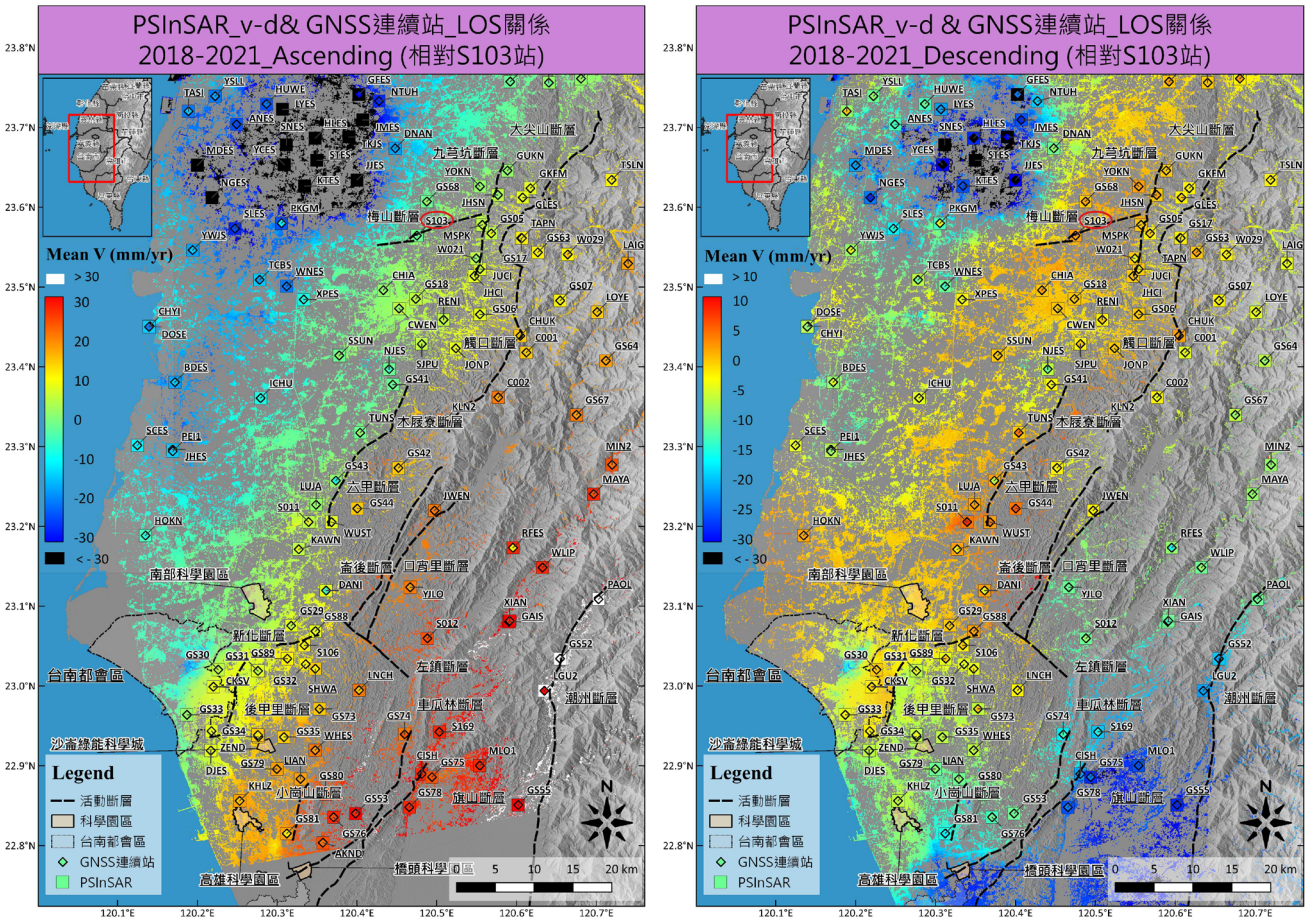


圖1-9：（左圖）2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。（右圖）2018-2021年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為連續同時期GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 1-9：（Left） LOS Velocity field in ascending track between 2018 and 2021 in the Kaohsiung-Pingtung area. （Right） LOS Velocity field in descending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction （rate in positive with warm colors） represents toward the satellite and elongation in slant range direction （rate in negative with cold colors） represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S103. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

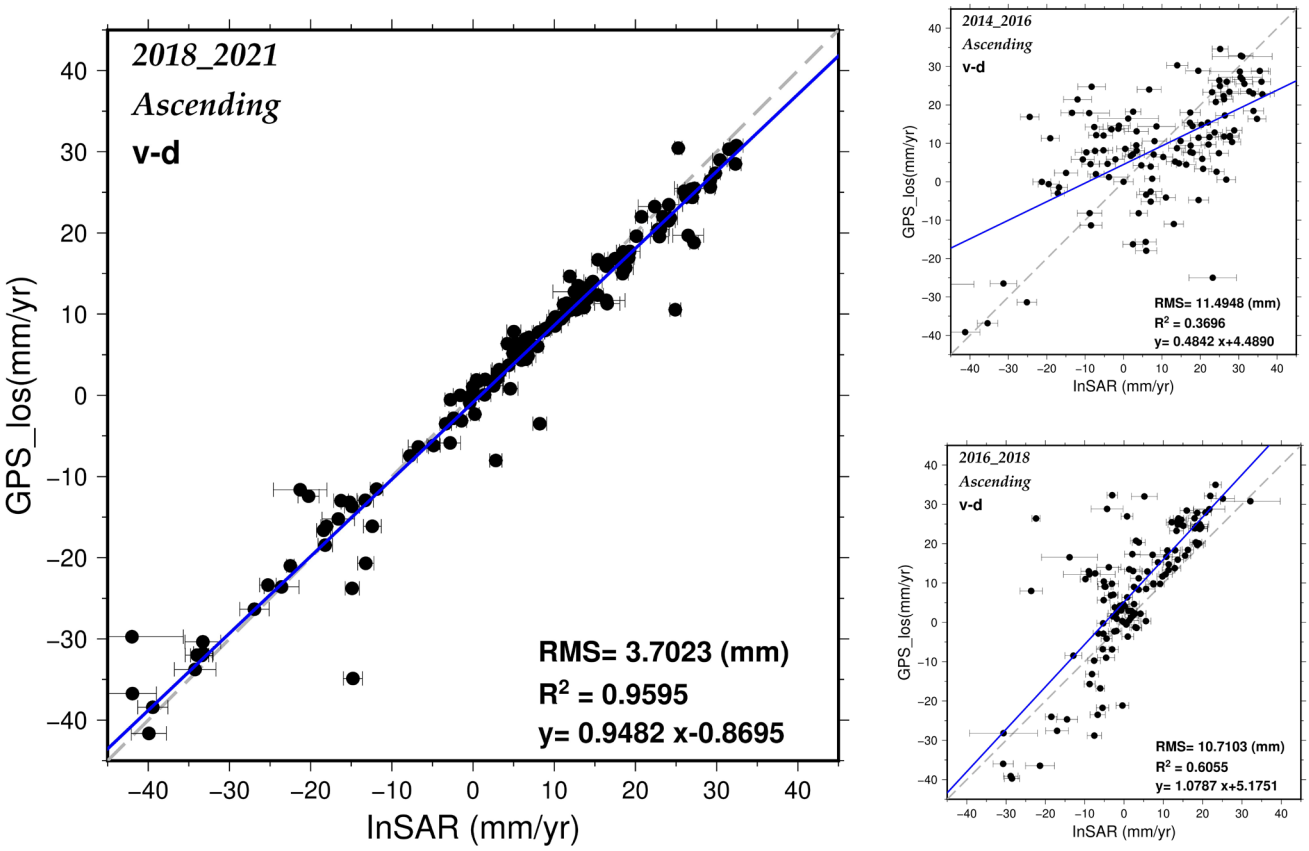


圖1-10：三時期雷達視衛星方向速率與GNSS投影至雷達視衛星方向速率之比較。2018-2021年成果顯示兩種資料幾乎相同。

Figure 1-10：Comparison of surface deformation derived from radar interferometry and GNSS. The data in the 2nd time period (2018-2021) has almost perfect correlation.

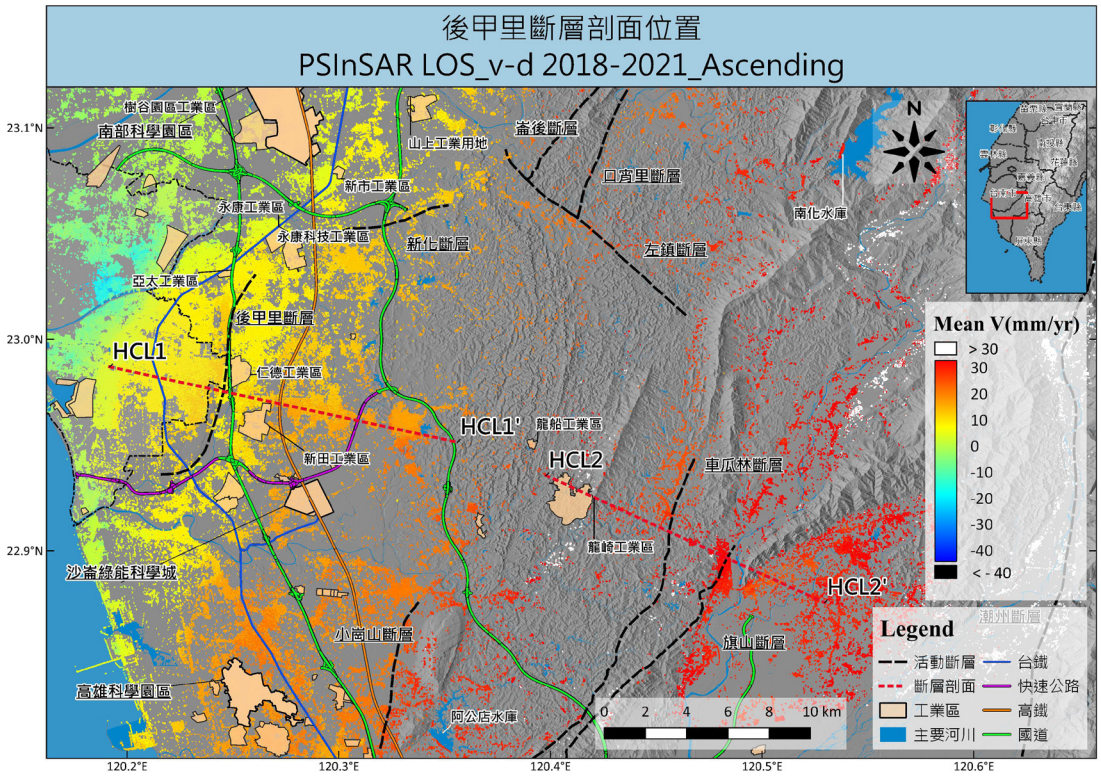


圖1-11：後甲里斷層附近地表變形狀況。

Figure 1-11：Surface deformation status near the Houchiali Fault.

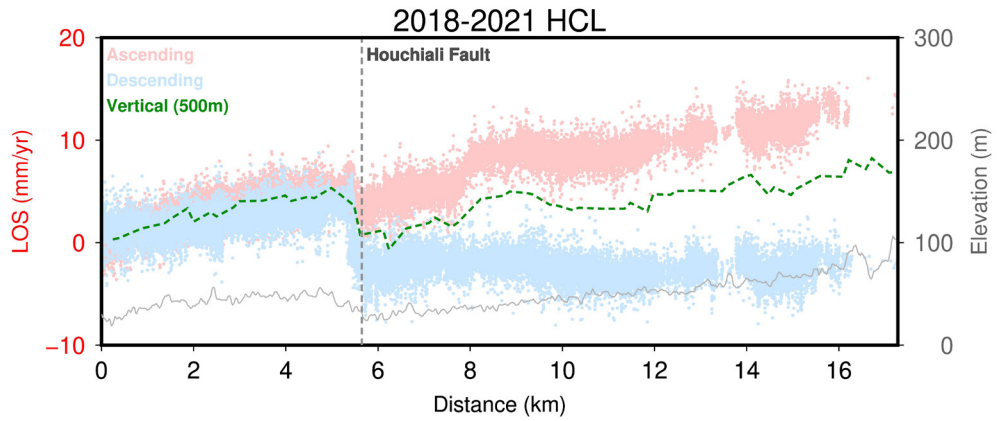


圖1-12：後甲里斷層附近地表變形剖面。

Figure 1-12：Surface deformation profile near the Houchiali Fault.

1-5 計畫工作方法概述

1-5-1 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1-13）。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。

1-5-2 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

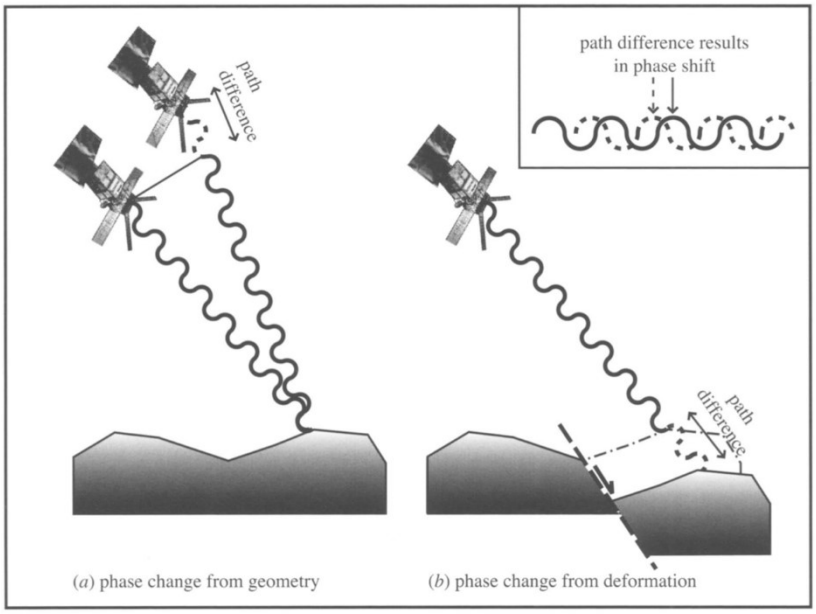


圖1-13：雷達差分干涉影像對的相位變化與地表變形之間的示意關係圖（Wright, 2002）。

Figure 1-13：Figure shows how InSAR images detect phase changes resulting from surface deformation.（Wright, 2002）

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1-14）。

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

表1-1：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。

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

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

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

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

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

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

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

6. SqueeSAR™（Ferretti et al., 2011）;

7. TPC（Zhang et al., 2011）

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

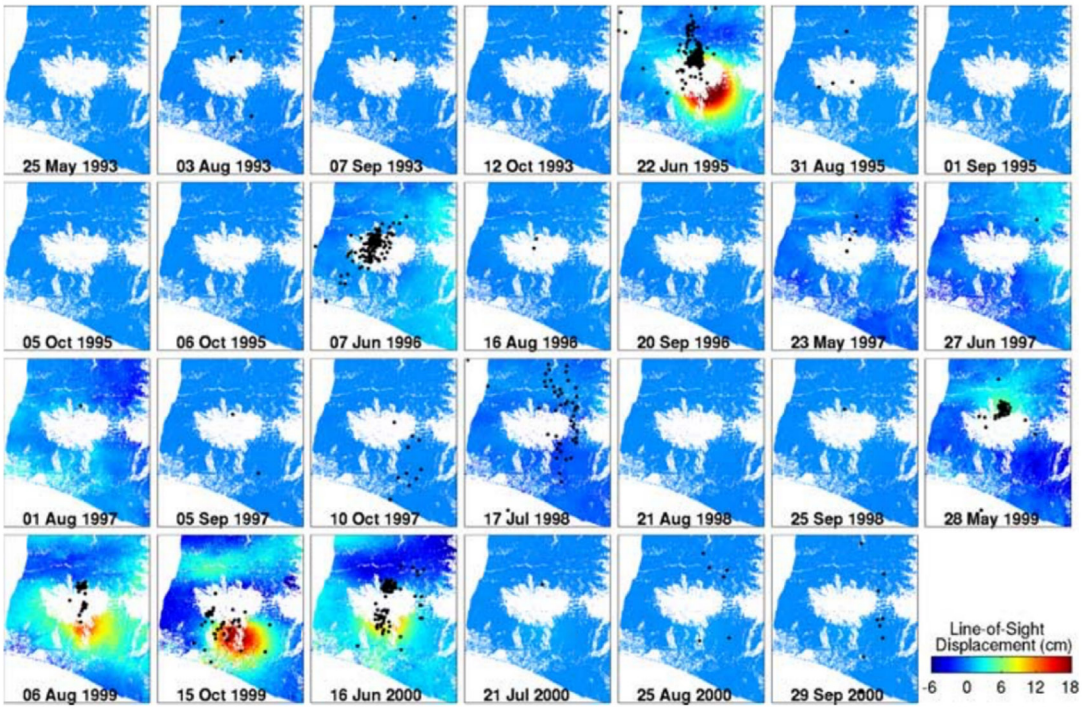


圖1-14：冰島Eyjafjallajökull火山周圍的PSI時間序列地表變形量（Hooper, 2008）。

Figure 1-14：Figure shows time series of PSI-extracted surface deformation around Eyjafjallajökull Volcano, Iceland.

1-5-3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。理論上這樣的計算會帶入一些誤差到最後結果，然而垂直速度場以及東西向的速度場還是比雷達斜距方向的速度場更容易呈現與理解。因此在犧牲一些準確度、解析度的狀況下，我們會在其中一個時段嘗試解算垂直變形速率。

1-5-4 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。

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

根據PSI與GNSS比對結果，可以發現PSI處理過程中潛在的誤差需要在處理過程中去除。例如在110年的結果中，成功發現處理過程中明顯的相位回復解算錯誤(unwrapping　error)，並成功去除。在111年結果也發現影像的時間密度高也可以減少unwrapping error。

1-5-5 斷層幾何與滑移量模擬

地表變形是協助我們了解構造活動性的重要參考資訊，利用PSI與GNSS對比後的資料在指定斷層的垂直方向取出速度剖面可以釐清斷層活動之特性。PSI因影像拍攝時間間隔的縮短，也能提供更密集的時序資訊，大幅度地提高地表變形在空間資訊上的解析。

這些高解析時空資料，可利用簡易的二維彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985； Okada, 1992）推估斷層幾何參數，並探討斷層滑移或累積速度分佈（Hsu et al., 2003； Kuo et al., 2019），進而評估斷層的潛勢。

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

1-5-6 計畫成果效益及其應用

i. 利用衛星雷達影像解算北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北部地區的地表變形做觀測與分析

iv. 利用地表變形資料估算監測範圍內之目標斷層之幾何以及滑移量

v. 利用以上資訊對重要區域可能受到之影響分析

1-6 本年度計畫概述

1-6-1 本年度研究區域背景簡介

本年度（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、臺北都會區等重要區域進行研究（圖1-2）。北部地區主要地質區包含西部麓山帶的第三紀碎屑沉積岩區，以及由土、砂和礫石為主的濱海平原地區沖積層。以下就調查範圍內的七條斷層由北而南分別簡述其地質及構造背景。

1-6-1-1 山腳斷層

山腳斷層，為一北北東走向的正移斷層，往北而南可以分為2段（圖1-15、圖1-16）：北段由北投向北延伸至臺北縣金山，長約21公里；南段自臺北縣樹林向北延伸至臺北市北投區，長約13公里（丹桂之助，1939；林朝棨，1957；王執明等，1978；林朝宗，2001）。山腳斷層的最近一次活動時間，可能在距今約 1 萬年以前，暫列為第二類活動斷層。

本區地形包括臺北盆地、林口臺地（坪頂臺地）、大屯火山群、金山沖積平原與西部衝上斷層山地的加裏山山脈（林朝棨等，1957）。以臺北盆地為中心，西側為林口臺地，北側為大屯火山群，南側與東側為加裏山山脈；金山沖積平原位於大屯火山群的東北側，北側臨東海外，其西側與東南側為加裏山山脈。

本區出露的地層包括西部麓山帶第三紀地層、大屯火山群的火山岩與火山碎屑岩，以及林口臺地與臺北盆地的第四紀地層。山腳斷層的南段為第四紀沉積物所掩覆，沒有直接露頭可供調查，但前人研究多建議此處有地形崖特徵（沈淑敏等，2005；林朝棨，1957；詹瑜璋等，2005），然此地形崖可能與實際斷層位置有所差距。北段，陳文山等（2003）與林朝宗（2005）由地形特徵，研判山腳斷層的線形大致通過大屯山與七星山間的鞍部。最北端金山沖積平原處，黃鑑水等（1991）與詹瑜璋等（2005，2006）皆認為地形上可判讀出正斷層的線形特徵。詹瑜璋等（2006）於北磺溪北側支流曾報導斷層露

頭，其斷面資料指示正移斷層兼具左移性質，且根據 LIDAR 製成的 DTM 影像亦可看到斷層上下盤有落差，斷面呈東北走向，與區域地形崖的方向一致。

從地形特徵來看，林口臺地東南緣與臺北盆地之間有地形崖特徵；但此線狀崖與鑽井結果研判的斷層位置有所差距（約數百公尺）；大屯火山區域由於被火山岩覆蓋，所以斷層跡位置並不明顯，大部份位於火山地形崩塌嚴重的區域，例如大屯山與七星山之間以及北磺溪等地；至於在金山沖積平原的斷層跡則多沿著線形崖。因此，山腳斷層的地形特徵，可能由新莊向北延伸，經大屯火山至金山地區。

地礦中心(原中央地質調查所)自1991年進行臺北盆地調查，共完成16口鑽井岩芯取樣，多數皆鑽至第三紀基盤，顯示臺北盆地的基盤在西北側最深（五股工業區的 WK-1E井基盤深度為 679 公尺），且根據第三紀基盤的落差，可以瞭解山腳斷層的特性以及臺北盆地西緣的地下構造形貌。鑽探結果顯示，在山腳斷層南段，斷層跡的位置距林口臺地東緣數百公尺以上，盆地內斷層兩側的基盤落差約 60~220 公尺。北段，在大屯火山區，斷層約沿著大屯山與七星山交界的鞍部；在金山地區，斷層約沿著山地與平原的交界，鑽探顯示斷層北段兩側的基盤落差超過 600 公尺，因此由鑽探結果來看，斷層的斷距似乎有由南向北增加的趨勢。此外，楊燦堯等（2004）在山腳斷層沿線的土壤氣體分析，以氡氣超過5.40ppm為異常值，判斷山腳斷層南端可能延伸至丹鳳地區。

郁永河（1697）於「裨海遊記」記載，西元1694年（康熙33年）臺北盆地曾因地震活動而形成一個大湖。林朝棨（1957）認為該次地震地面陷落不過5公尺，之後關渡水隙內成一大湖，後人稱為「康熙臺北湖」，因此認為該次地震為山腳斷層最近一次的活動。然而李錦發等（1999）考證康熙臺北湖的淹沒範圍與文獻資料，認為無法確定此事件與山腳斷層有關，且無相關斷層崖證據。黃柏壽等（2006）在大屯火山區與臺北盆地的微震觀測結果，僅2006年4月24日大屯山附近發生一規模3.1的地震，震源機制為正移斷層兼具橫移性質，但亦無法確認是否與山腳斷層有關。

林口臺地的沈積物來源為古新店溪（林朝棨，1957），臺地停止堆積是因盆地陷落並開始接受沈積物，因此臺北盆地的形成可能與

山腳斷層的發育有關。由於盆地內沉積層並未明顯受到大屯火山及觀音火山的影響，而觀音火山最年輕年代距今30~40萬年前（莊文星與陳汝勤，1994），因此臺北盆地可能於距今40萬年前之後才開始形成。另外，根據地礦中心鑽探資料（林朝宗，2001；蘇泰維等，1993），位於成子寮的鑽井剖面中深度60公尺以上的沉積層無明顯錯動，（皆約10,000年），因此研判山腳斷層最近10,000年來無明顯的活動。

另一方面，黃韶怡（Huang, 2003）分析成子寮、五股、樹林等區地山腳斷層兩側的鑽井岩芯紀錄與定年資料，認為在14,000年內山腳斷層造成的落差至少有10公尺，且其間至少有3次古地震事件，分別為11,100年前左右、9,100~9,300年前及8,400~8,600年前，分別各有2.3公尺、3.3~4.5公尺及3.7公尺的垂直位移量，由此可推算山腳斷層南段在過去1萬年內造成上盤下的陷速率約為1.8公厘/年。近期的大地測量結果顯示，山腳斷層兩側並未有明顯的水平位移速度變化，但斷層的上盤有明顯的下陷趨勢（劉桓吉等，2000；饒瑞鈞等，2006）。

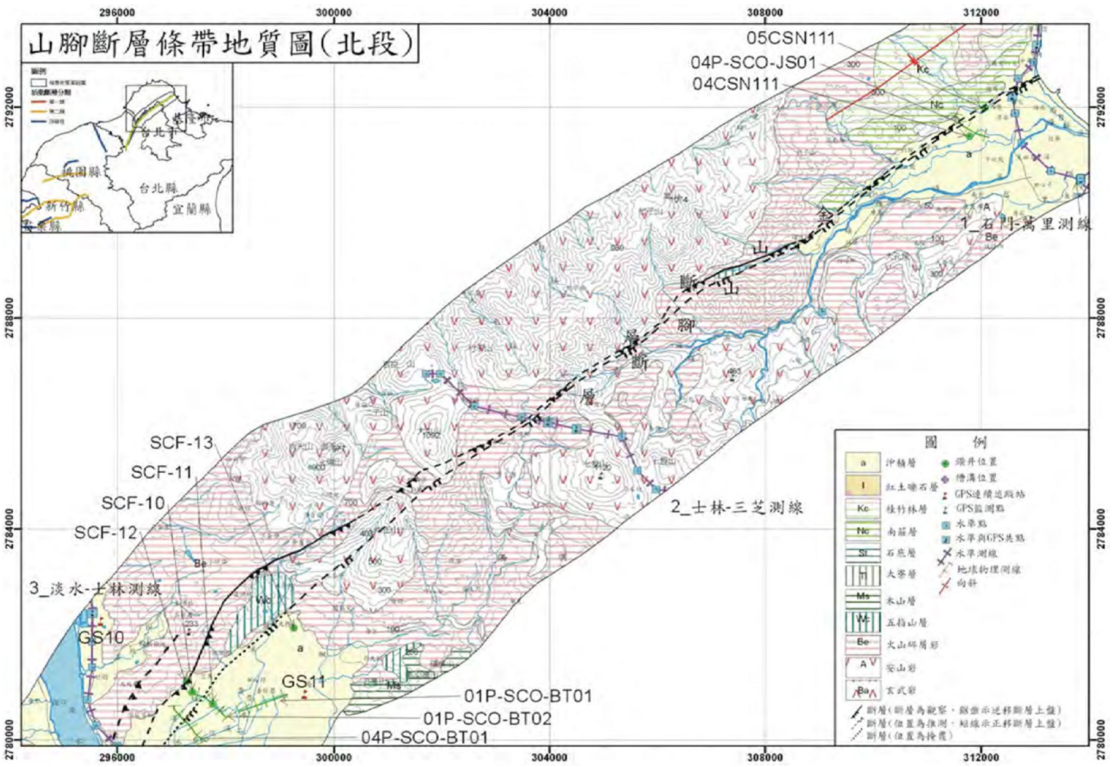


圖1-15：山腳斷層條帶地質圖（北段；林啟文等，2007）。

Figure 1-15：Strip Map of the Sanchiao Fault.（Northern part）

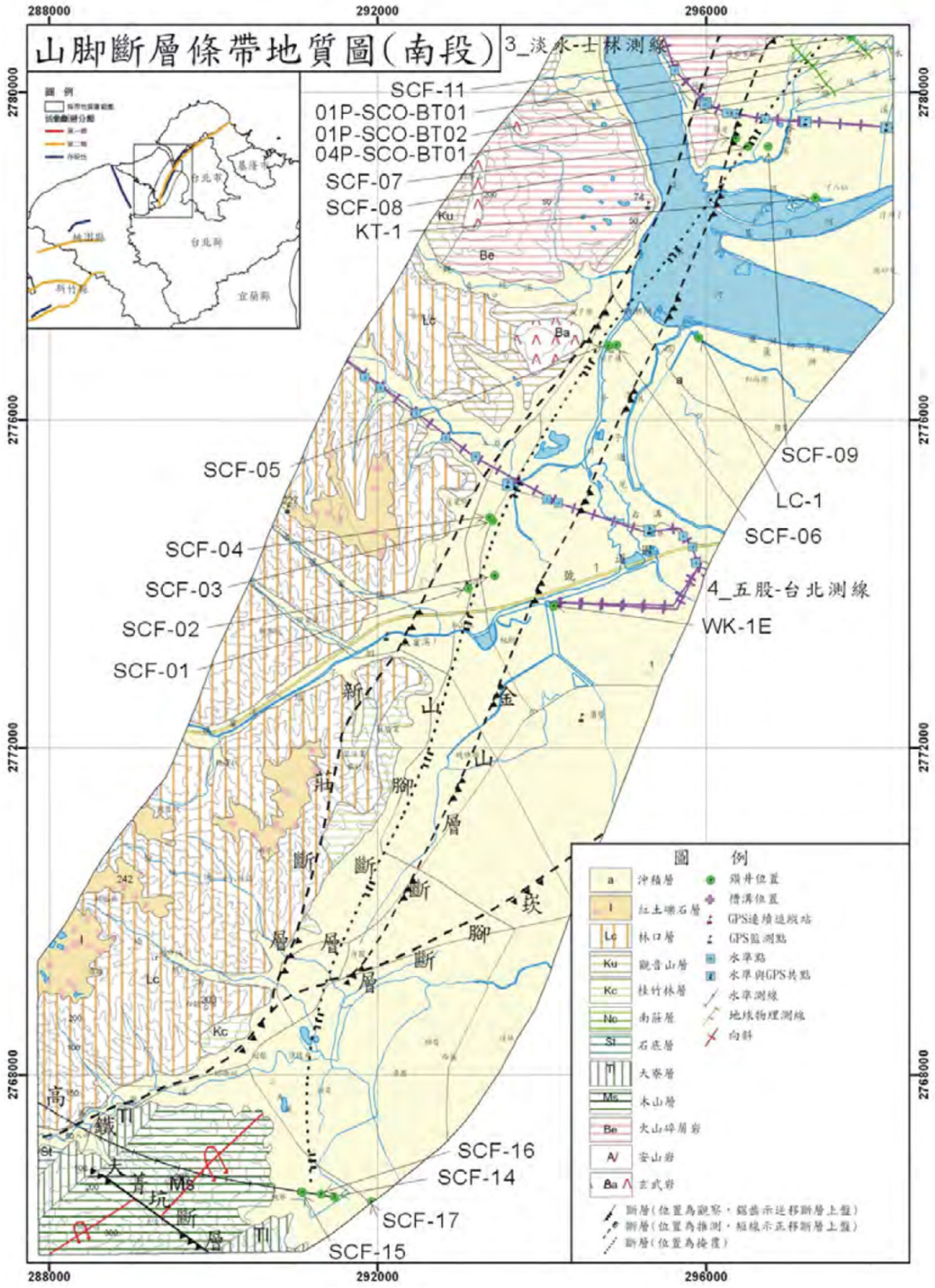


圖1-16：山腳斷層條帶地質圖(南段；林啟文等，2007)。

Figure 1-16：Strip Map of the Sanchiao Fault.(Southern part)

1-6-1-2 湖口斷層

湖口斷層由新竹縣湖口鎮，向東經楊梅至桃園市平鎮區，呈東北東走向，全長約21公里，為向西北西逆衝之逆斷層（圖1-17；花井重次，1930；中國石油公司，1978）。因觀察到湖口斷層上盤的背衝斷層，造成楊梅層逆衝於年輕的紅壤礫岩層上（朱傚祖等，2012），加上湖口臺地的傾動面與定年結果，顯示湖口斷層可能至少在距今70,000年內曾經活動過，暫列為第二類活動斷層。

在桃園地區有數個臺地群，分別為桃園、中壢、大崙、平鎮、楊梅、伯公岡、富岡與湖口等臺地，形成於更新世中期至晚期（陳于高等，2006），為由東南向西北緩傾的階面（林朝棨，1957）。透過航照判釋，利用地形特徵可於此區域繪製兩條平行的線狀崖，北側崖位於楊梅臺地北緣，稱為楊梅北斷層，南側崖位於湖口臺地北緣的線狀崖，高差約80公尺，稱為楊梅南斷層（石再添等，1983），該斷層即為湖口斷層（盧詩丁等，2000）。湖口斷層位於湖口背斜北翼，在湖口臺地北側形成線形崖，可依其形貌分成東西兩段，在楊梅以東，地形崖較筆直，但在楊梅西側，線形崖則較為彎曲（王昱，2003）。

前人透過地形研究分析，判斷湖口斷層有許多活動的構造地形特徵。由構造階地的階數及前緣斷層崖坡上肩狀面分布的分析，推測湖口斷層至少有過七次的變位活動（陳建汝，2003）。透過航照判釋結果，研判湖口斷層階切富岡面（LT1）、楊梅面（LT2）、中壢a面（LT4a）及中壢b面（LT4b），造成10~50公尺的斷層崖，且在LT1階面上有向斷層方向傾動，並隆起呈穹丘狀，研判是斷層活動造成的（沈淑敏等，2005）。進一步以崖坡發育估算階地下切的年代，推測楊梅北斷層最後活動期間約在距今3萬3年前（諶凱英，1995）。透過湖口斷層在桃園臺地階面上可觀察到活動跡象，研判湖口斷層在最近三萬年內仍有持續活動（王昱，2003）。

湖口斷層發育在更新世的臺地之上，上盤主要為楊梅層和中壢層，下盤為中壢層及店子湖層。楊梅層可分為兩段，下段為照鏡段，主要由厚層砂岩、砂岩與泥岩互層所組成，上段為照門段，主要由礫岩、砂岩及泥岩的互層為主。店子湖層下部為礫岩層，上部為紅土層。中壢層則由礫岩與砂所組成，頂部有紅土化。湖口斷層上盤為湖口背斜，背斜軸部的岩層位態接近水平，局部有高角度的小斷層，移距約

數十公分。背斜北翼的岩層向北傾斜並向北逐漸變陡，至湖口斷層前緣，傾角轉為80度至倒轉（林啟文等，2007）。在湖口斷層上盤距地形線崖約400公尺處，可在湖口背斜前緣發現寬4公尺的斷層系統，楊梅層逆衝到紅壤礫岩之上，斷層走向為東西向，向北傾斜約40度，斷層淨移距約2公尺，水平移距約1.6公尺，垂直移距約1.2公尺，推測該斷層為湖口斷層的背衝斷層（朱傚祖等，2012）。

根據地質鑽探結果顯示，在大金山下1號井（04HK0211，湖口斷層上盤）鑽至115公尺時，在楊梅層中可觀察到局部破碎帶（林啟文等，2007），在TY-04鑽井岩心內，亦可於地下約27公尺觀察到地層錯位的現象；未紅土化的老礫石逆衝於晚更新世的紅土之上（可能為三萬年左右），研判湖口斷層前緣的近地表錯動（邵屏華等，2006）。

透過震測資料，亦可以觀察到湖口斷層截切湖口背斜北翼，斷層面向南傾斜約60度，層位落差約200公尺（Elishewitz,1963；Tang, 1963），並在平鎮工業區的反射震測中（YM4），觀察到岩層出現正斷層型態的錯斷（石瑞銓等，1999）。由重力調查、震測資料並配合鑽井資料指示湖口斷層向西延伸至坑口子南側，同時也可發現楊梅北斷層的存在（潘玉生，1965； Tang and Hsu, 1970）。綜合以上資料，可描繪湖口斷層的地質剖面（ Suppe and Namson, 1979；石瑞銓，1999，2009；林良安，1999；楊耿明，2002；黃旭燦，2004），另透過地質平衡剖面亦指示本區的地下構造型態，是以兩個對衝的褶皺-盲斷層系統變形為主，湖口背斜即為上覆的斷層擴展褶皺（fault-propagation folding；王昱，2003）。

由近期的GPS觀測結果，指示本區未有明顯的位移，但湖口斷層略顯右移特性，上下盤呈壓縮型態（陳建良，2005），由橫跨湖口斷層的GPS速度場分析，垂直斷層走向的分量為5.2公厘/年，平行斷層走向的分量為-1.2公厘/年，呈現壓縮右移的運動形式，高程方向的沉陷量為0.7公厘/年；研判本斷層於2002-2006年呈現鎖定狀態（饒瑞鈞，2006）。

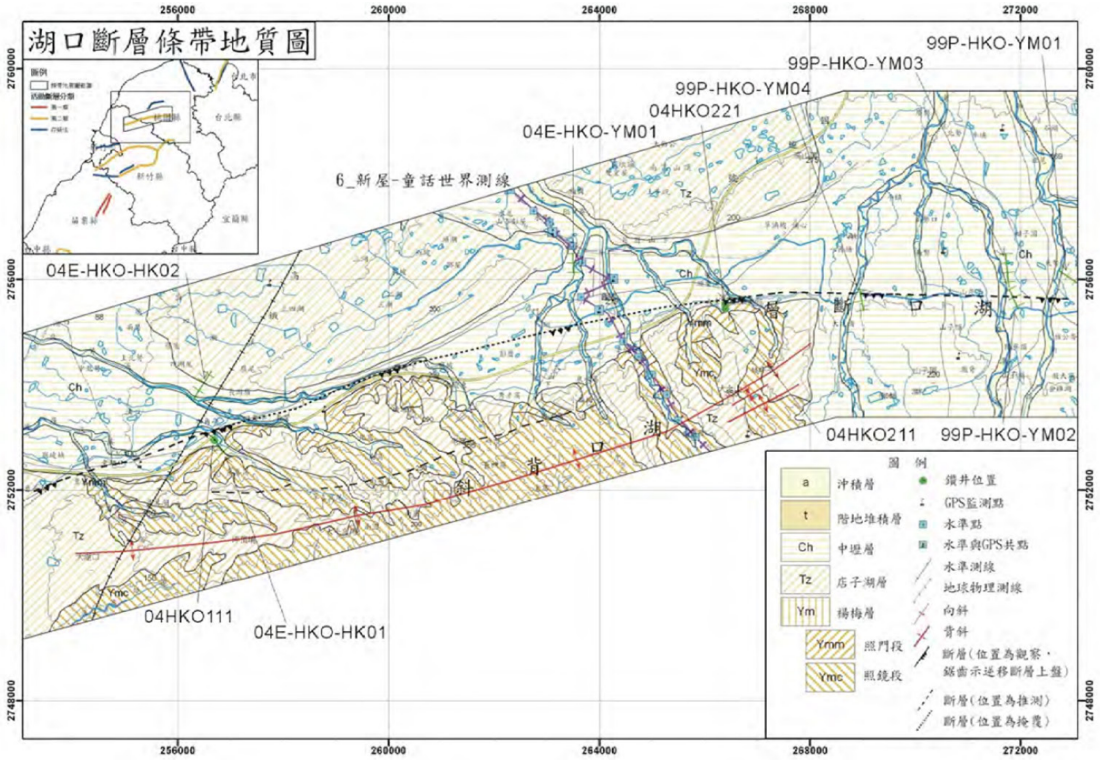


圖1-17：湖口斷層條帶地質圖。

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

1-6-1-3 新竹斷層

新竹斷層為逆移斷層，由新竹市西方大庄里美山海岸東側山麓向東延伸至頭前溪南岸，約呈東西走向，長約9公里（圖1-18；Pan, 1965；石再添等，1985）。新竹斷層具有地形特徵，但缺乏出露地表的證據。由地質鑽探結果顯示，斷層截切更新世晚期的地層，暫列第二類活動斷層。

新竹斷層兩側的地形差異甚大，斷層上盤（南側）屬於竹東丘陵及河階地形，下盤（北側）受晚更新世以來海岸侵蝕與堆積作用，形成平坦的海岸沖積平原；竹東丘陵的邊緣形成一明顯的地形崖（Ku, 1963），地形崖高差約50公尺，呈東北東走向，應是受到新竹斷層影響，而後又因侵蝕作用而後退形成的斷層線崖，斷層線崖的走向與青草湖背斜軸平行，陡峭的背斜北翼被斷層截切（Tang and Hsu, 1970）。新竹斷層往東在頭前溪、客雅溪及三姓公溪的階地上，造成西北西走向的小線狀崖，並在斷層上盤的十八尖山形成壓力脊（石再添等，1985）。三姓公溪口的FT1和FT2河階面受到斷層

截切，分別形成3.7公尺和0.7公尺的高差（楊貴三與蔡怡真，2004）。客雅溪口沖積扇因斷層截切，形成約2公尺高差的崖，頭前溪南岸的關東橋面（LT5），則有10公尺高差的崖（沈淑敏，2005）。透過階地定年資料估算新竹斷層近五年來的垂直錯移速率約為1.0公厘/年（丁權，2012）。

新竹斷層上盤為更新世的大茅埔礫岩層及楊梅層（相當於頭嵙山層），下盤則是沖積層，沖積層下方即為楊梅層。根據鑽井資料顯示，新竹斷層沿線兩側落差從750公尺（CTH-4井）、200公尺（CTH-3井），到200公尺（CTH-6井），顯示新竹斷層為逆移斷層（Tang and Hsu, 1970），且斷層面向南傾斜約45~50度（Chiu, 1970；林啟文等，2007）。

透過震測資料研判新竹斷層為高傾角斷層，並有2條分支斷層，在地下合併後為1條轉為層間斷層，且新竹斷層可能有延伸至地表（Yang et al., 1994），並在上盤前緣形成青草湖背斜，部分學者認為此為斷層轉折褶皺（fault-bend fold；Namson, 1984；Lee et al., 1993；黃旭燦等，2004），另一派覺得為斷層擴展褶皺（fault-propagation fault；Chung, 1963；Tang and Hsu, 1970；Yang et al., 1994）。利用微震逆推之三維速度構造可觀察在新竹斷層東側速度明顯地較西側為大，呈現典型之逆衝斷層特性，斷層面略沿著等速度線延伸至地表（林正洪等，2006）。

根據GPS觀測資料顯示，新竹斷層上盤向東南方向位移，速度為5~15公厘/年，下盤則向東南方或南方移動，斷層兩側呈現壓縮作用，並兼具右移的趨勢（林啟文等，2005；鍾瑋，2005）。透過區域性GPS資料分析，在涵蓋新竹斷層、新城斷層、竹東斷層、斗煥坪斷層及大平地斷層的剖面上，跨新竹斷層的速度場變化量在垂直斷層走向的速度變化量為3.1公厘/年，呈壓縮型式，在平行斷層走向的分量為-2.3公厘/年，呈右移型式，在垂直方向則是每年以1.7公厘的速度沉陷（饒瑞鈞等，2006）；根據速度分析結果顯示，新竹斷層在2002~2012年間並沒有活動，呈現鎖定狀態（饒瑞鈞等，2006，林燕慧等，2010；黃宣維等，2014）。透過精密水準測量橫跨結果新竹斷層、新城斷層與大平地斷層的新竹-五峰水準測線，顯示高程變化量在8公厘內，並未有明顯的高程變化（饒瑞鈞等，2006）。

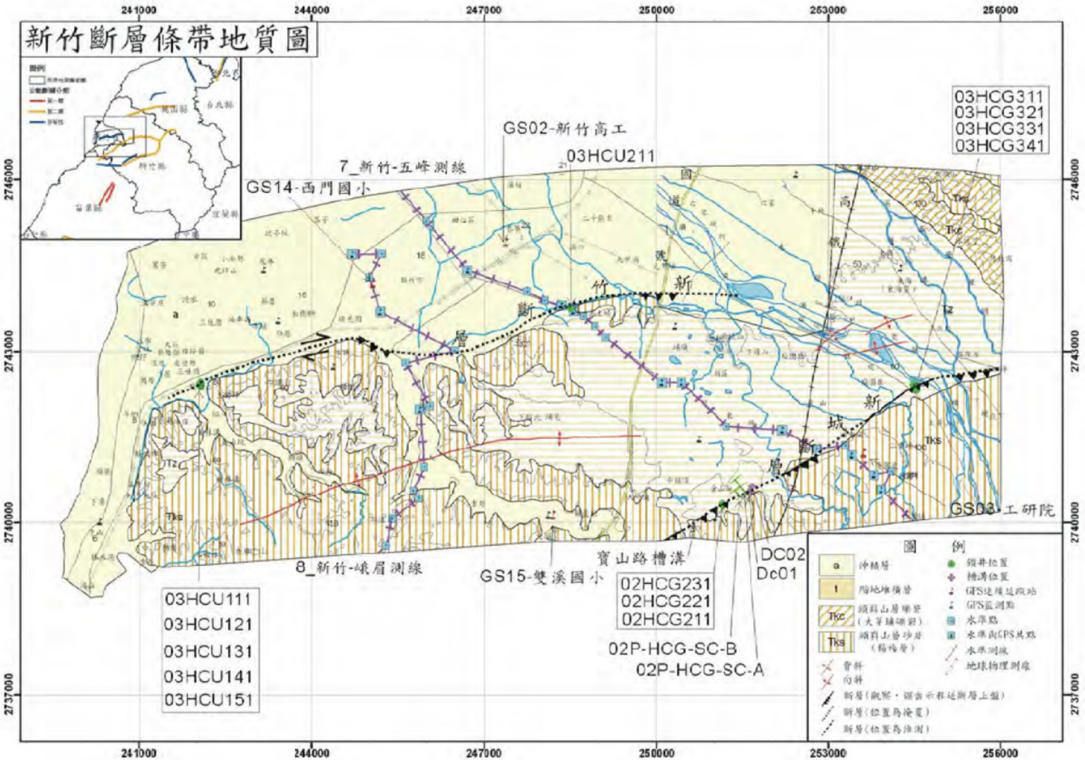


圖1-18：新竹斷層條帶地質圖（林啟文等，2007）。

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

1-6-1-4 新城斷層

新城斷層屬於逆衝斷層，依地質和地形特性可分成2段，斷層北段在頭前溪以北，斷層跡經過新竹縣芎林鄉丘陵地，向東延伸至關西南方，呈東北東走向，長約12公里；南段為頭前溪以南的區域，由竹東鎮向南延伸至苗栗頭份東北方的頂埔里，呈東北走向，長約16公里（圖1-19；Tang, 1968；塗明寬與陳文政，1991；張徽正等，1998；林啟文等，2005，2007）。因新城斷層截切距今270年前的階地礫石層，為全新世仍活躍的一條逆移斷層，列為第一類活動斷層。

新城斷層截切頭前溪南岸紅土化階地與低位河階，許多階地形成10-40公尺高的斷層崖，造成越老的階面高差越大，並在部分階面上有左移的性質，研判階地是受到新城斷層多次活動變形所致（石再添，1985；楊貴三與蔡怡真，2003；詹瑜璋等，2003；沈淑敏等，2006）。除了河階面外，中港溪河道在頭份鎮三板橋至中肚一帶呈現直角急彎現象，研判是受到斷層活動影響的曲流作用（劉力豪，2004）。

新城斷層北段在飛鳳山丘陵有出露斷層露頭，斷層下盤為楊梅層上段，岩性為厚層砂岩夾礫岩層，岩層向北緩傾斜，持續往北則為大茅埔礫岩，構成同斜構造（homocline），斷層上盤則為楊梅層下段，岩性為厚層砂岩夾砂頁互層，岩層向西北方向傾斜，且傾斜角度大，斷層屬逆移型式（林啟文等，2005）。新城斷層南段在中正大橋下游的頭前溪北側河床出露，斷層帶寬約20公尺，可得知斷層走向約為N50°E/30°S，根據斷層擦痕得知新城斷層南段為兼具左移的逆衝斷層；斷層上盤為上新世的卓蘭層逆衝覆蓋在更新世的楊梅層之上。在頭前溪南岸，亦可觀察到河階堆積物受到斷層拖曳作用影響，造成礫石長軸方向與斷層面平行（李元希等，2002），斷層兩側的垂直錯動量約3.4公尺，階地堆積物的碳14年代為270±35年，顯示新城斷層在距今300年內曾經活動（陳文山等，2003）。由新城村一帶剖面，可得知新城斷層中段由數條小規模的斷層共同組成，斷層主要位態接近南北向，向東傾斜10於度，並向西逆移。新城斷層向南在切過鹽港溪後，因無明顯露頭，僅能以地形判釋，最南端則順著南北向的中港溪階地延伸，往南隱伏到沖積層之下（江婉綺與陳柏村，2021）。

根據新城斷層的槽溝剖面及定年記錄來看，至少有兩次古地震事件，近一次地震約發生在300年前左右，地震造成地表的垂直移距約1.3~1.85公尺。比對臺灣歷史地震記錄，可得知新竹地區約發生三次較大規模的地震，分別於1811、1815及1881年，受震範圍遠至福建及臺灣南部地區，並於桃竹苗地區造成重大傷亡；以受震範圍進行評估，推測1811與1815年的地震屬規模7以上的大地震（蔡義本，1978；徐明同，1983；鄭世楠與葉永田，1989），可能與新城斷層的活動相關。

近年來陸續在新城斷層沿線進行淺層震測，顯示新城斷層在淺層為高傾角斷層，傾角約40~60度，呈北北東走向，平行寶山背斜並截切背斜的西翼（楊潔豪與郭泰融，1991；王乾盈，1991；Yang et al., 1994；1996），且大部分在斷層上盤的岩層傾角較大，偶有地層破裂或不連續的現象，下盤岩層的傾角較緩，抑或為平整地層（石瑞銓等，2003；鄭永森等，2003）。根據2004年4月~2006年7月在新竹地區的微震觀測結果顯示，從西北-東南方向之垂直剖面資料中可以看到很多呈線形分佈的地震帶，其角度大多呈約45度向東南傾斜，而且有些地震帶延伸至很接近新城斷層的位置（林正洪等，2006）。

透過階地定年估算新城斷層近五年來垂直錯移速率約1.1±0.3公厘/年（丁權，2012）。由近期的GPS觀測資料分析結果，新城斷層上盤呈現向西北或西北西方向位移，位移速度在10公厘/年以內，新城斷層下盤則呈現向東南方位移的趨勢，位移速度為5~15公厘/年，斷層兩側仍以壓縮作用而維持逆斷層形式（林啟文等，2005）。透過區域性GPS資料分析，在涵蓋新竹斷層、新城斷層、竹東斷層、斗煥坪斷層及大平地斷層的剖面上，跨新城斷層的速度場變化量在垂直斷層走向的速度變化量為1.5公厘/年，呈壓縮型式，在平行斷層走向的分量為0.7公厘/年，呈右移型式，在垂直方向則是以1.9公厘/年的速度沉陷（饒瑞鈞等，2006）；根據速度分析結果顯示，新城斷層在2001~2012年間並沒有活動（饒瑞鈞等，2006；林燕慧等，2010；黃宣維，2014）。

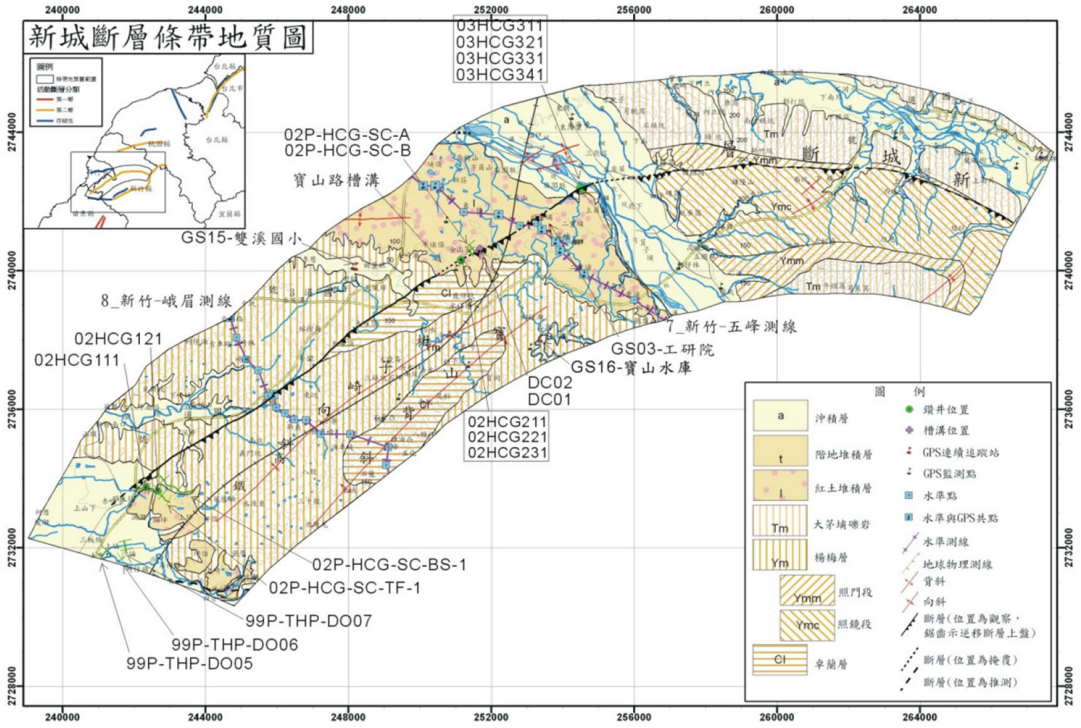


圖1-19：新城斷層條帶地質圖（林啟文等，2007）。

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

1-6-1-5 獅潭斷層

獅潭斷層由苗栗縣獅潭鄉竹木村向北延伸至三灣鄉大河村的上十股，長約12公里（圖1-20；大江二郎，1936；顏滄波，1985），亦稱為紙湖地震斷層（大塚彌之助，1936），斷層走向呈北偏東30度，斷層面向西傾70~85度，為高角度的逆移斷層。因在1935年新竹-臺中地震時，斷層沿線有發生地表位移且破裂的現象，列為第一類活動斷層。

獅潭斷層位於八卦力山與獅頭山的山區內，在獅潭斷層跡附近產生一系列北北東走向的線形，包括一系列線形的鞍部及小丘，這些線形大多位於膠結較差的上福基砂岩上，受侵蝕後形成凹地，與相鄰的關刀山砂岩構成的獨立山丘，共組成”斷層鞍部-斷側丘”（kerncol-kernbut）的地形（潘國樑等，1983，1985）。本區水系受到斷層影響，兩側水系有顯著差異；在獅潭斷層東側（上游）的河谷寬，呈樹枝狀水系，而西側的河谷較窄且河道深，有許多與地形線形正交的河谷，略呈格子狀水系；主要因為斷層活動時，造成西側（下游）抬高，東側相對變低，河水被阻於斷層附近，斷層東側產生沉積作用，西側河道則在抬升後，因劇烈的下切作用形成峽谷（林啟文等，2000）。獅潭斷層的水平位移不明顯，多以垂直位移為主；在小東勢至三洽溪坑亦具有明顯垂直落差，最大陷落量達3公尺，平均為0.6公尺（大江二郎，1936；顏滄波，1985），在中港溪南岸四灣附近的高位河階，有受到獅潭斷層影響而形成的反斜斷層小崖，崖高2-3公尺，下游側隆起呈背斜狀（楊貴三，1986）。

本區地質構造以緊密褶皺構造型態為主，地層位態呈北北東走向，傾角多大於60度，有時近乎垂直，甚至呈現倒轉狀態。獅潭斷層位在獅潭向斜東翼，地層呈現倒轉，向東傾斜約80度；獅潭斷層主要發育在上福基砂岩內，上盤西側為晚中新世的關刀山砂岩，下盤東側則為晚中新世的東坑層。東坑層以淺灰色細至中粒砂岩與深灰色頁岩之互層為主，偶夾厚層或塊狀砂岩及煤層，上福基砂岩性以厚層至塊狀之白色疏鬆砂岩為主，並夾有砂頁岩薄互層或泥岩。關刀山砂岩上部由灰色泥質砂岩夾薄層灰色砂質頁岩及黃白色細粒砂岩所構成，間夾少許深灰色砂質泥岩及礫石條帶（林啟文等，2008）。

在1935年4月21日發生新竹-臺中大地震，地震規模7.1，震央位於大安溪中游（120°49'E, 24°21'N），在獅潭斷層、神卓山斷層與屯子腳斷層沿線產生許多地表破裂。根據地表破裂調查中，可觀察獅潭斷層的斷層跡延伸約15公里長；在大東勢至十股之間岩層斷裂且有明顯的錯動量，長度約12公里；在上十股至竹湖之間僅有斷續的地表破裂，長度約3公里（大塚彌之助，1936；大江二郎，1936）。獅潭斷層在上大窩及北寮兩處有出露斷層露頭；在北寮（百壽東方1.5公里處）的斷層露頭，上盤（西側）為頁岩，下盤為階地堆積物及白色砂岩層，上盤的頁岩層接近垂直，不整合面高差約4.7公尺。在上大窩的斷層露頭中，可觀察階地堆積物和上福基砂岩的錯動，階地南側河床上的白色砂岩（上福基砂岩）頂部的不整合面高差約6.4公尺，根據上大窩北側河溝的槽溝開挖亦顯示獅潭斷層的垂直錯動量約5公尺，其中1935年的地震約造成3公尺的崖高，說明獅潭斷層可能有多次的活動記錄（潘國樑等，1983）。

透過馬麟社（05E-STN-ML01）及上大窩地區（05E-STN-DW01）的兩條地電阻測線，可觀察到斷層兩側電阻率的不連續面；下盤的低電阻為東坑層，與上盤的高電阻的上福基砂岩形呈明顯的對比，透過電阻率不連續的現象，即可推測獅潭斷層出露地表的位置。獅潭斷層向西傾斜，在馬麟社測線中，斷層移距約25公尺，視傾角約60度，大窩測線的斷層移距75公尺，視傾角約67度（董倫道等，2005）。

透過GPS測量資料分析跨過獅潭斷層的速度場變化，在2002~2006年間，垂直斷層走向的分量為5.5公厘/年，呈壓縮形式，平行斷層走向的分量為-4.5公厘/年，呈右移形式，上盤的抬升約為3.6公厘/年；由速度分析結果顯示，獅潭斷層在2002~2006年間為鎖定狀態（饒瑞鈞等，2006）。

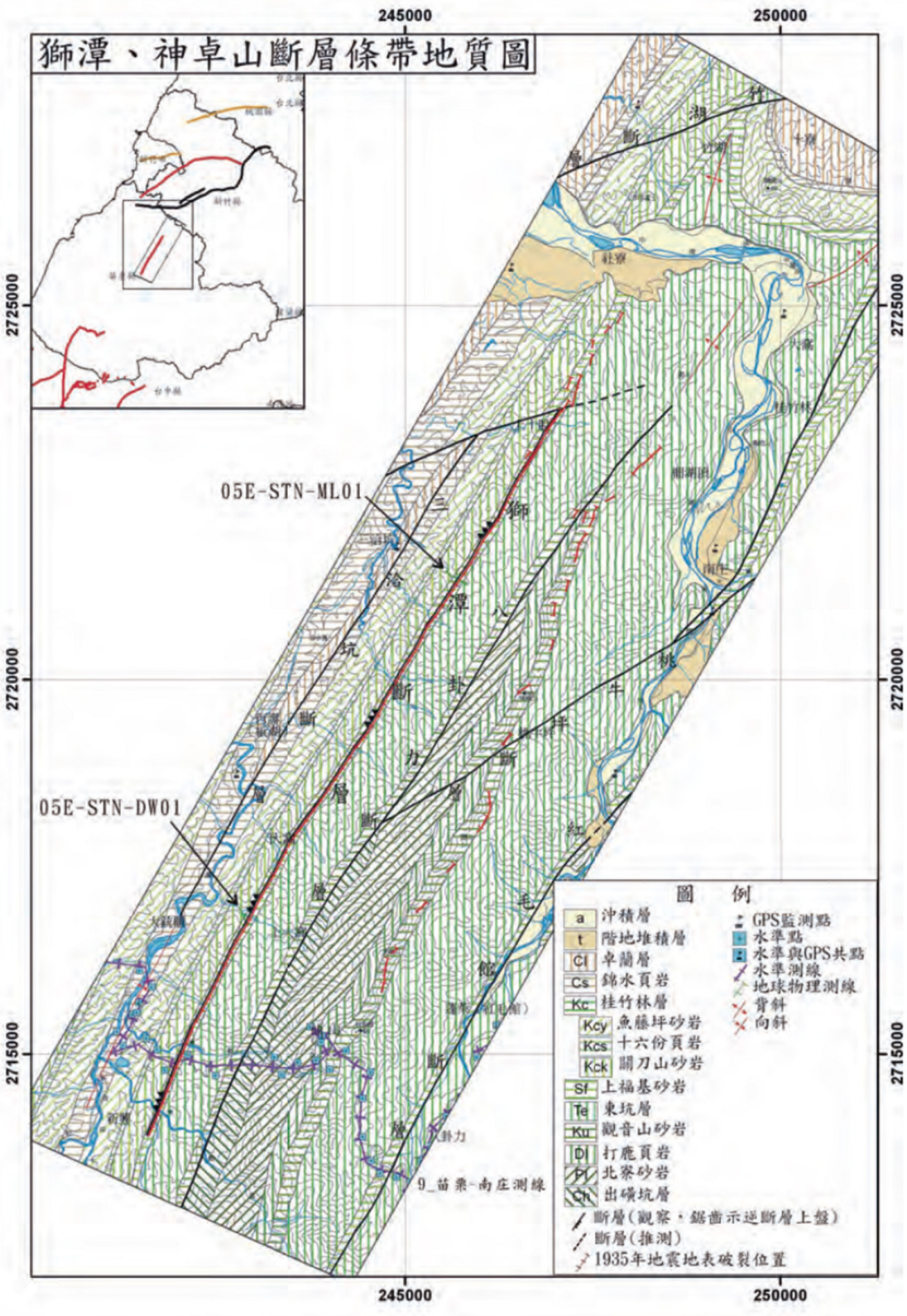


圖1-20：獅潭斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。

Figure 1-20：Geological Map of the Shihtan Fault.

1-6-1-6 三義斷層

三義斷層，為第一類的逆移斷層，分作南北兩段，北段略呈東西走向，由苗栗縣大湖鄉大窩向西延伸至三義，長約 8 公里；南段呈南北走向，由三義向南至大甲溪（丹桂之助，1936；張麗旭，1951；Meng, 1963），向南可能延伸至豐原潭子地區，長約 25 公里（圖1-21）。依上述地礦中心公佈之活動斷層分布，三義斷層長約33公里（林啟文等，2008）。陳文山等（2001）認為主斷層東側的支斷層（后里斷層）為三義斷層現今主要活動區，若考慮三義以南至豐原的斷層走向為南北向，向南延伸至臺中市太平區草湖溪與車籠埔斷層連接，則三義斷層全長達45公里。

在大安溪北岸，斷層上盤岩層為桂竹林層，而下盤為頭嵙山層。大安溪以南（大甲圖幅；張憲卿，1994），三義斷層經過后里臺地東側，桂竹林層逆衝至頭嵙山層之上，但被后里臺地紅土階地礫石層覆蓋，且紅土面沒有產生變形，顯示在晚更新世紅土階地礫石層沉積後，三義斷層（主斷層）沒有活動跡象（陳文山等，2001；Chen et al., 2003）。由大甲溪北岸的地層剖面，發現原來所繪的三義斷層截切於桂竹林層中（大甲圖幅），斷層兩側皆為桂竹林層，與原來三義斷層定義不同。

因此陳文山等（2001；Chen et al., 2003）認為此處應為三義斷層的分支后里斷層，位於三義斷層主斷層與石岡斷層之間。支斷層（后里斷層）位在主斷層（三義斷層）東側約數百公尺至一公里處，斷層截穿過桂竹林層中，並向上截切至后里臺地上覆的紅土階地礫石層，造成紅土階地礫石層撓曲變形。

本區出露的地層由老而新為東坑層、上福基砂岩、桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層、頭嵙山礫石層、階地礫石層與沖積層。大安溪以北三義斷層的上盤為中新世晚期的東坑層（相當於南莊層的下部）。下盤為更新世的頭嵙山層、更新世晚期或全新世的紅土臺地或階地堆積層，或全新世的階地堆積層。大安溪以南，三義斷層上盤為桂竹林層或東坑層。

關於三義斷層的露頭，過去曾有幾處報導：（一）大甲溪北岸斷層露頭，可以見到較老的桂竹林層向西逆掩在較新的頭嵙山層上（

石再添等，1984）；（二）大安溪以北之伯公溪於龍伯橋（舊稱四份橋）北的溪谷中，南莊層逆衝至頭嵙山礫層之上，此處上盤的南莊層因逆衝，尚可見到拖曳褶皺的現象（李錦發，1994）。此外，李錦發也報導大甲溪北岸后豐大橋上約 1500 公尺左右的露頭，認為乃桂竹林逆衝至頭嵙山礫石層上，主斷層帶寬約 30 公尺，且於主斷層下盤的頭嵙山礫層中亦觀察到逆衝斷層。陳文山等（2000）則認為上述的斷層露頭應屬於后里斷層。

三義斷層的南段，劉彥求與李亦亨（2006）報導於縱貫鐵路新山線西側約 300 公尺處有斷層露頭的出露，此處東邊出露桂竹林層，西邊則出露河階礫石層。其斷層上盤桂竹林層有相當發達的層間滑動與小型褶皺，並發育數條分支斷層，逆衝至低位河階礫石層之上，斷層移距超過 2 公尺，斷層下盤的礫石層有拖曳褶皺與剪切現象，且其中一個分支斷層錯移低位河階面及一層灰黑色土壤層，造成約 50 公分的垂直移距，因此研判三義斷層的南段在全新世可能曾經活動。根據地表地質調查結果，三義斷層於此剖面移距最大的主斷層位於鐵橋西側，斷層破損帶超過 500 公尺，且內含許多分支斷層，應是由主斷層向上擴展而形成。

由地質與新期構造地形特性看來，三義主斷層自晚更新世以來沒有活動，而在石岡斷層與三義斷層之間的分支斷層（后里斷層）是主要的變形帶。在大甲溪以南區域，已發現紅土階地的錯斷與變形（李錦發，1994；黃鑑水與張憲卿，1994；陳文山等，2001；Chen et al., 2003），而大安溪以北區域同樣也有晚更新世紅土階地礫石層的錯斷與變形（林啟文等，2008）。雖然后里臺地東側確有斷層崖地形，然而古地震槽溝中無採集到焦碳標本供定年，因此斷層的長期變動速率僅能藉由上述的河階高度及年代來做估算。由Lai et al. （2006）的熱螢光定年年代，利用新社階地估算的滑移速率扣除車籠埔斷層（替代石岡斷層）滑移速率，估算三義斷層（后里斷層）的滑移速率約為2.5±2.2 mm/yr（張竝瑜等，2018）。陳文山等（2014）根據槽溝開挖結果，推論三義斷層的斷層面傾角約為40至60度往東。

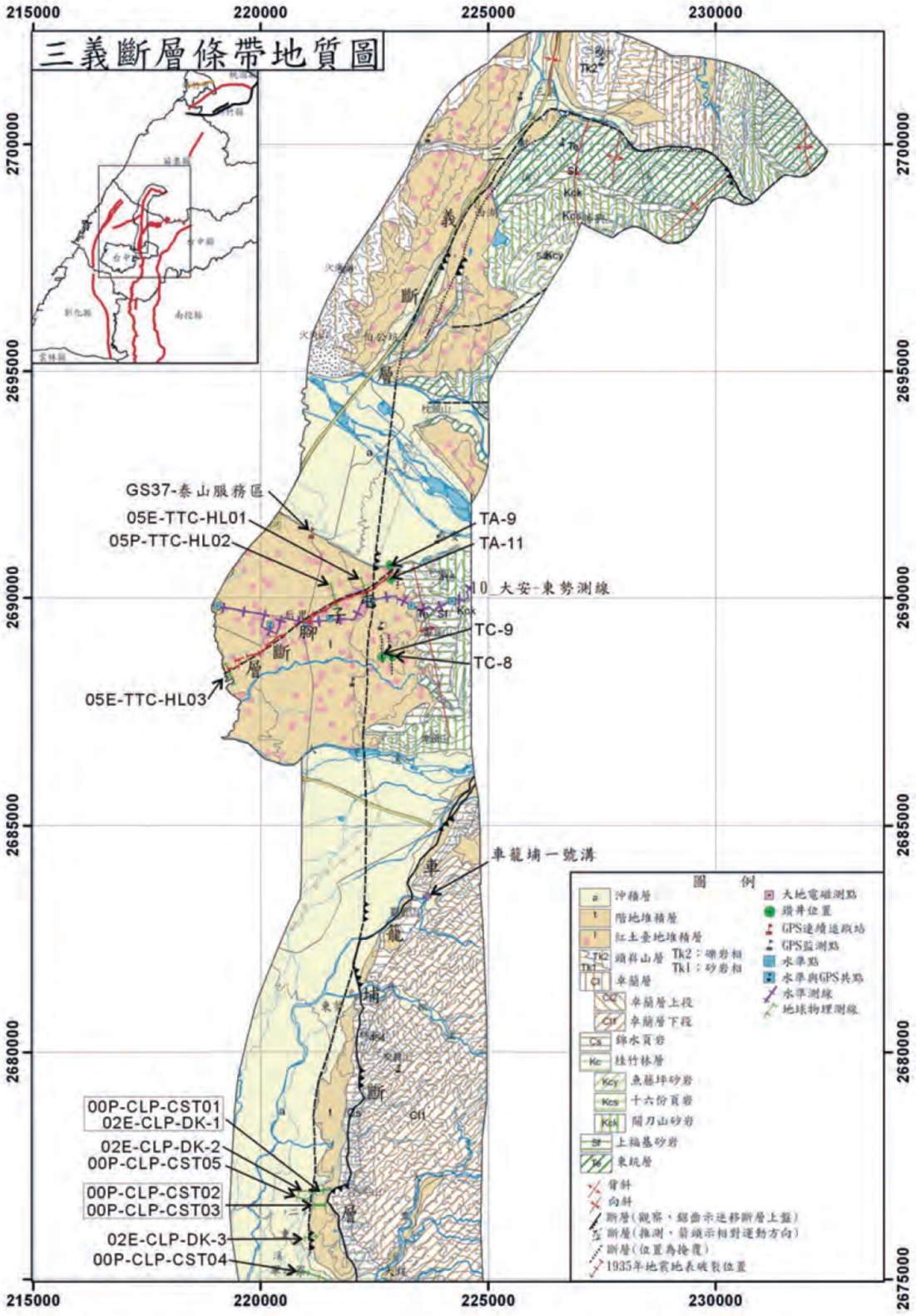


圖1-21：三義斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。

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

1-6-1-7 屯子腳斷層

屯子腳斷層為一東北東走向的右移斷層，由后里臺地東北的泰安附近，經后里、內埔（舊稱屯子腳），跨越大甲溪，再穿過大肚臺地上的清泉崗機場，總長約 15 公里（大江二郎，1936；大塚彌之助，1936）。屯子腳斷層為 1935 年規模 7.1 的臺中新竹大地震造成之地震斷層，目前列為第一類活動斷層。

根據東京大學地震研究所（ERI）的資料，當時地表破裂主要為雁行狀排列的破裂及小斷層，為一兼具垂直位移的右移斷層，垂直方向最大位移約 0.6 公尺，右移最大位移約 2 公尺，但升降側則因地而異。除東北端1公里長部份為西北側上升外，其他部份皆為東南側上升。目前1935 年的地表破裂已難辨認，僅在后里臺地東北殘存一地形崖；而野外測繪資料則顯示屯子腳斷層仍有持續活動（潘國樑等，1983）。

本區出露的地層包括東坑層、上福基砂岩、桂竹林層（下段關刀山砂岩）、頭嵙山層、紅土臺地堆積層、階地堆積層及沖積層。地球物理探勘結果顯示，屯子腳斷層帶的寬度約數百公尺，並呈開花狀構造特徵（董倫道等，2005），饒瑞鈞等（2006）於1996-1999以及2000-2006的大地測量結果顯示，屯子腳斷層以右移形式兼具壓縮為主（饒瑞鈞等，2006），但跨過斷層兩側在水準測量結果上並沒有明顯的高程變化量。

屯子腳斷層的構造線跡因為處於臺地面，地形平坦受大甲溪河道沖淤及人為開發影響，構造線形現已難以辨別，尤其東北側之特徵幾完全不可見。1935年的地震除了造成地震斷層切穿紅土臺地堆積外，在后里臺地最上層的階地堆積沉積層並未見其他岩層傾動或撓曲的現象，顯示紅土臺地堆積之後，可能僅有1935年這一次斷層活動的紀錄。

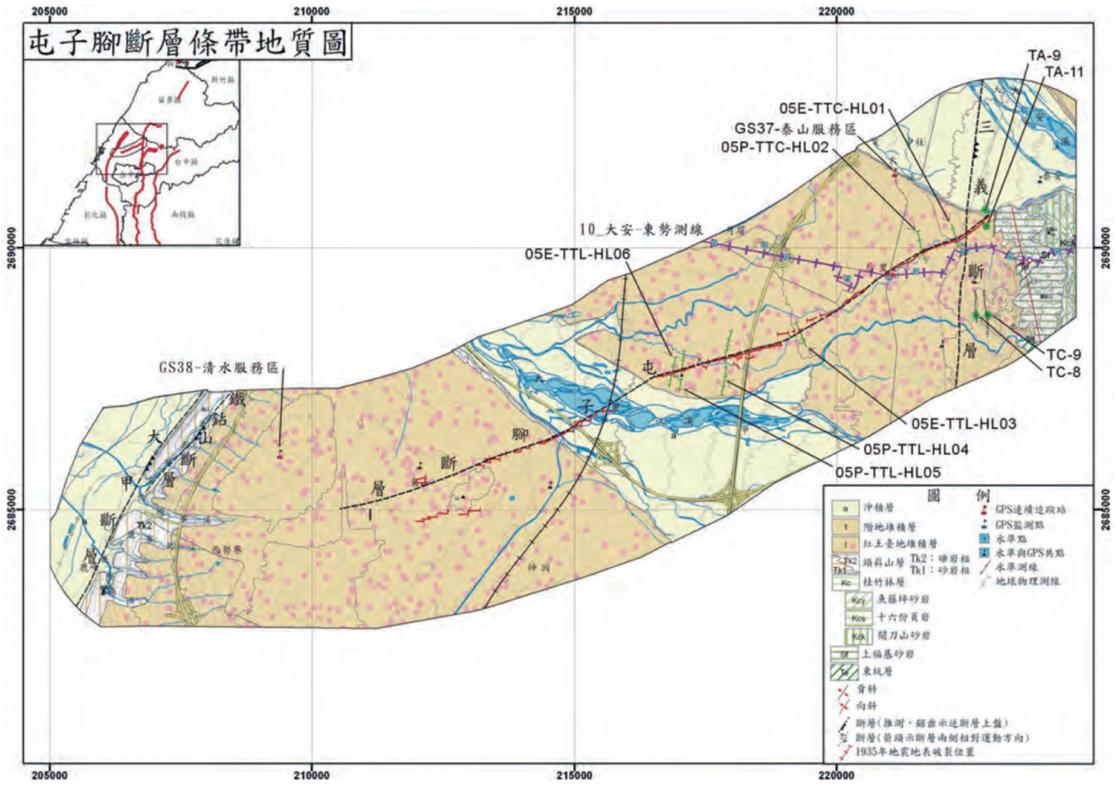


圖1-22：屯子腳斷層條帶地質圖（林啟文等，2008）。

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

1-6-2 本年度工作項目

I. 本年度（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、臺北都會區等重要區域進行研究（圖1-2）。

II. 我們預計利用雷達差分干涉方法觀察地表變形，其中包含 2014-2018年度、2018-2021年度以及2022年度三個時段的雷達差分干涉處理結果。這些結果會與約90個GNSS連續站做對比以及檢測。另外會針對移動站及水準測量做對比。

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

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

1-6-2-1 本年度計畫期中交付工作項目

1. 研究區域中三個時間段（2014-2018, 2018-2021, 2022）的升降軌視衛星方向平均速率。
2. 垂直各斷層方向剖面之視衛星方向平均速率變化。
3. 初步三個時間段（2014-2018, 2018-2021, 2022）的升降軌視衛星方向平均速率與GNSS連續站轉換視衛星方向平均速率之比對。
4. 重點區域的PSI地表變形之時間序列擷取與分析。

1-6-2-2 本年度計畫期末交付工作項目

1. 研究區域中三個時間段雷達視衛星方向速率（2014-2018, 2018-2021, 2022）。
2. 雷達速度場與GNSS資料比對。
3. 每條斷層至少一條與斷層方向垂直之剖面雷達視衛星方向速率分析。
4. 三條利用雷達資料擬合之斷層滑移量模擬與分析。
5. 選定之重要地點之地表變形時間序列分析。
6. 重點區域的GNSS連續站及地表變形之時間序列分析與比對。

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傳感器的狀態、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。臺灣北部地區有多條的活動斷層，並且以往有明顯的地層下陷（早期臺北市），因此地表變形訊號是綜合各項可能造成變形的因素而成。由於北部地區人口稠密，許多重要的公共設施與經濟活動密集，因此任何的地表變形都會影響民眾，其中活動斷層對此的影響又特別明顯。

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

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

段：(I)2014-2018的地表位移、(II)2018-2021的地表位移、(III)2022地表位移，探討不同階段的地表變動量。

表2-1：Sentinel-1衛星影像資訊。

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

影像時間段	飛行軌道	拍攝模式	再訪頻率	處理划幅
時間段(I) 2014-2018	升軌 Path：69	TOPS	12天	Subswath：1+2+3 (F1+F2+F3)
	降軌 Path： 05	TOPS	12天	Subswath： 1+2 (F1+F2)
時間段(II) 2018-2021	升軌 Path：69	TOPS	6-12天	Subswath：1+2+3 (F1+F2+F3)
	降軌 Path： 105	TOPS	6-12天	Subswath： 1+2 (F1+F2)
時間段(III) 2022	升軌 Path：69	TOPS	12天	Subswath：1+2+3 (F1+F2+F3)
	降軌 Path：105	TOPS	12天	Subswath： 1+2 (F1+F2)

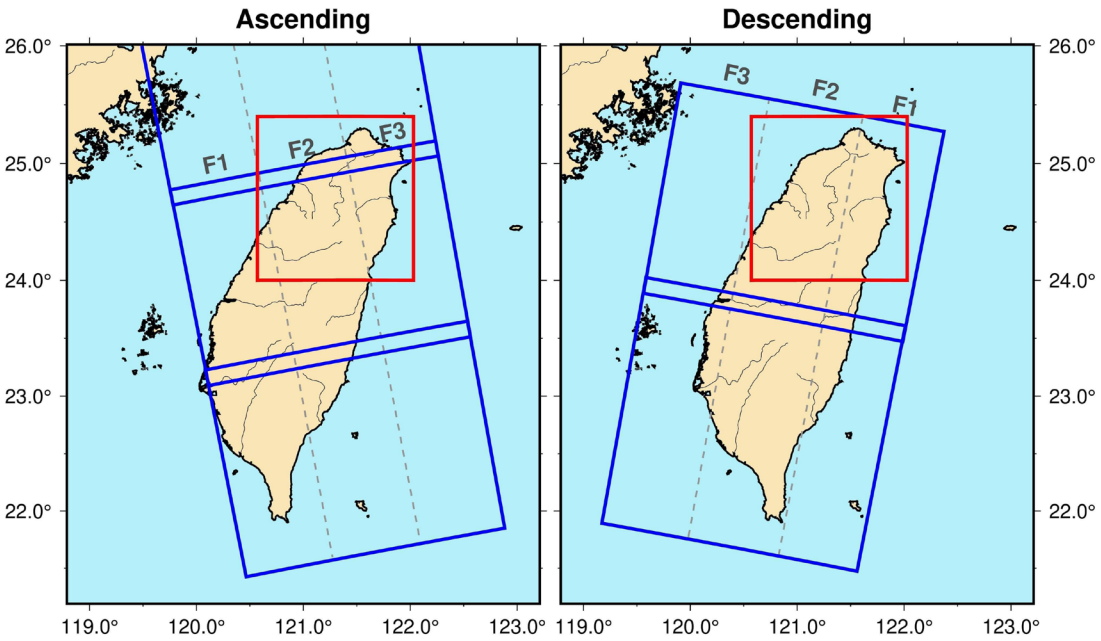


圖2-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。

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)。

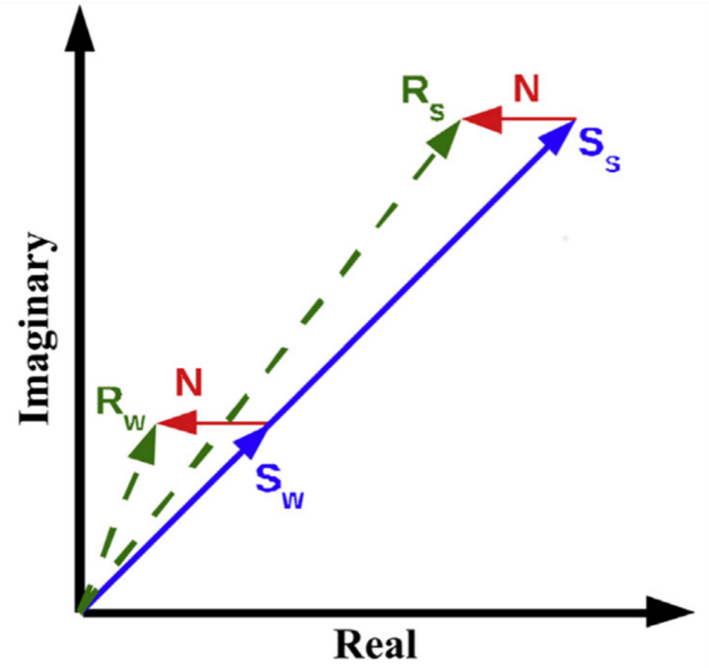


圖2-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。(Osmanoglu et al., 2016)

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

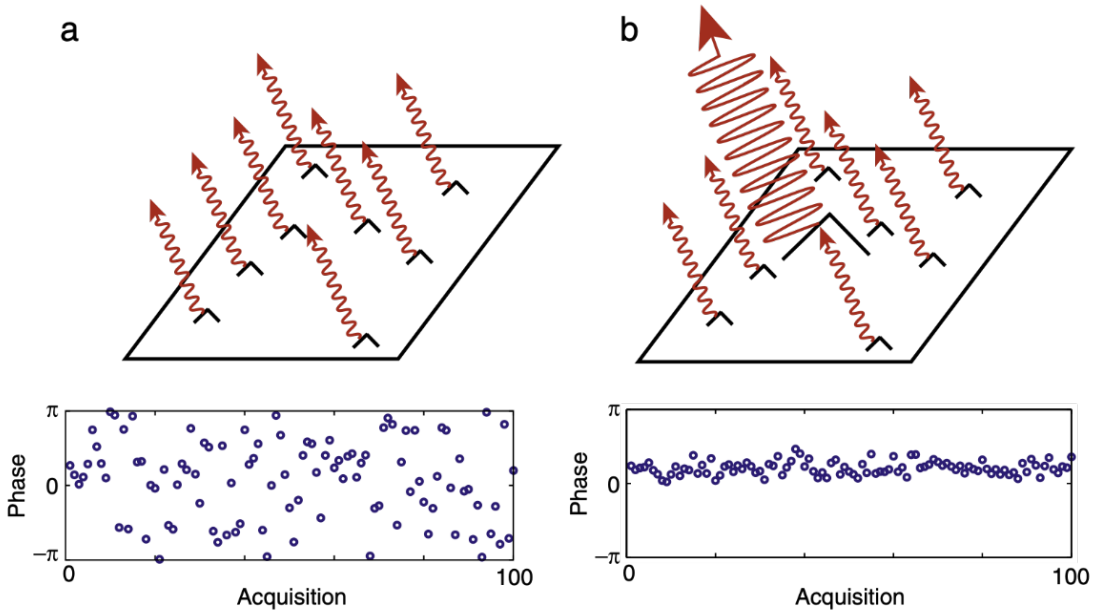


圖2-3：永久散射體對相位的影響示意圖。(a)一般散射體所反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(b)一個像素之中有一個好的永久散射體時，反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(Hooper et al., 2012)

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PSInSAR成果。在第一階段將使用ESA所開發的免費軟體SNAP (Sentinel Application Platform) 進行雷達影像差分干涉處理，主要執行步驟可細分為三個部分：A部分為Sentinel-1影像的前處裡部分。B部分為雷達差分干涉的處理部分。C部分為影像輸出為StaMPS軟體格式的處理部分，圖2-4顯示第一階段的流程圖。

第二個階段(圖2-5)段將使用由Hooper等人(2004, 2007, 2008)所開發的StaMPS軟體，進行PSInSAR的分析與解算。StaMPS的處理流程大致可分為三個部分。第一部分為PS點位的挑選，詳情如前面所述。第二部分為相位解算，將搭配SNAPHU軟體進行三維空間(2D平面加上時間)的時間序列相位回復。第三部分為誤差估算，透過DEM推估DEM誤差，藉由高通濾波和低通濾波推估大氣效應和軌道效應。最後所計算出的結果即為真實地表變動的位移資訊。

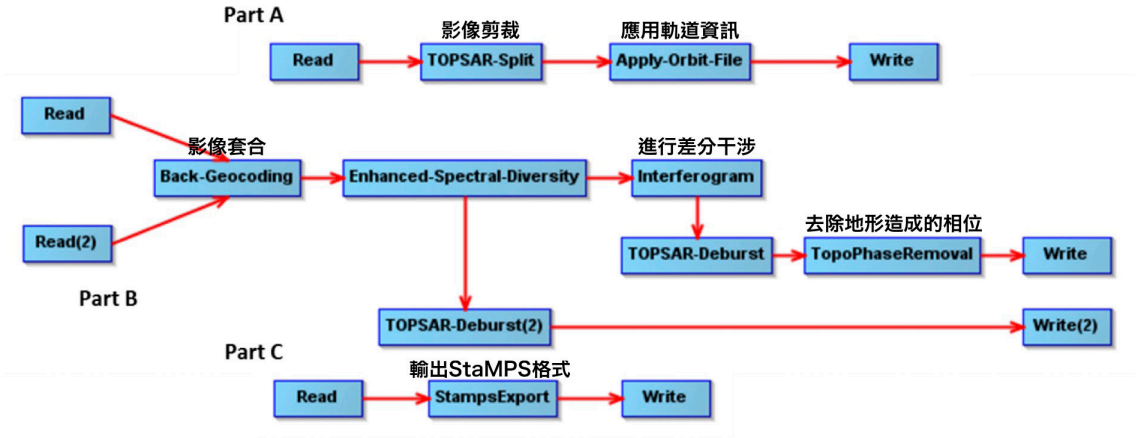


圖2-4：雷達影像處理流程第一階段 - 雷達差分干涉處理流程圖。本階段主要工作為使用SNAP軟體處理Sentinel-1影像的差分干涉，並且將其輸出為StaMPS軟體所能使用的檔案格式。A部分為Sentinel-1影像的前處裡部分。B部分為雷達差分干涉的處理部分。C部分為影像輸出為StaMPS軟體格式的處理部分。(修改自Foumelis et al., 2018)

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. Part A is the preprocessing of Sentinel-1 images. Part B is for radar interferometry. Part C is exporting the data to StaMPS format.

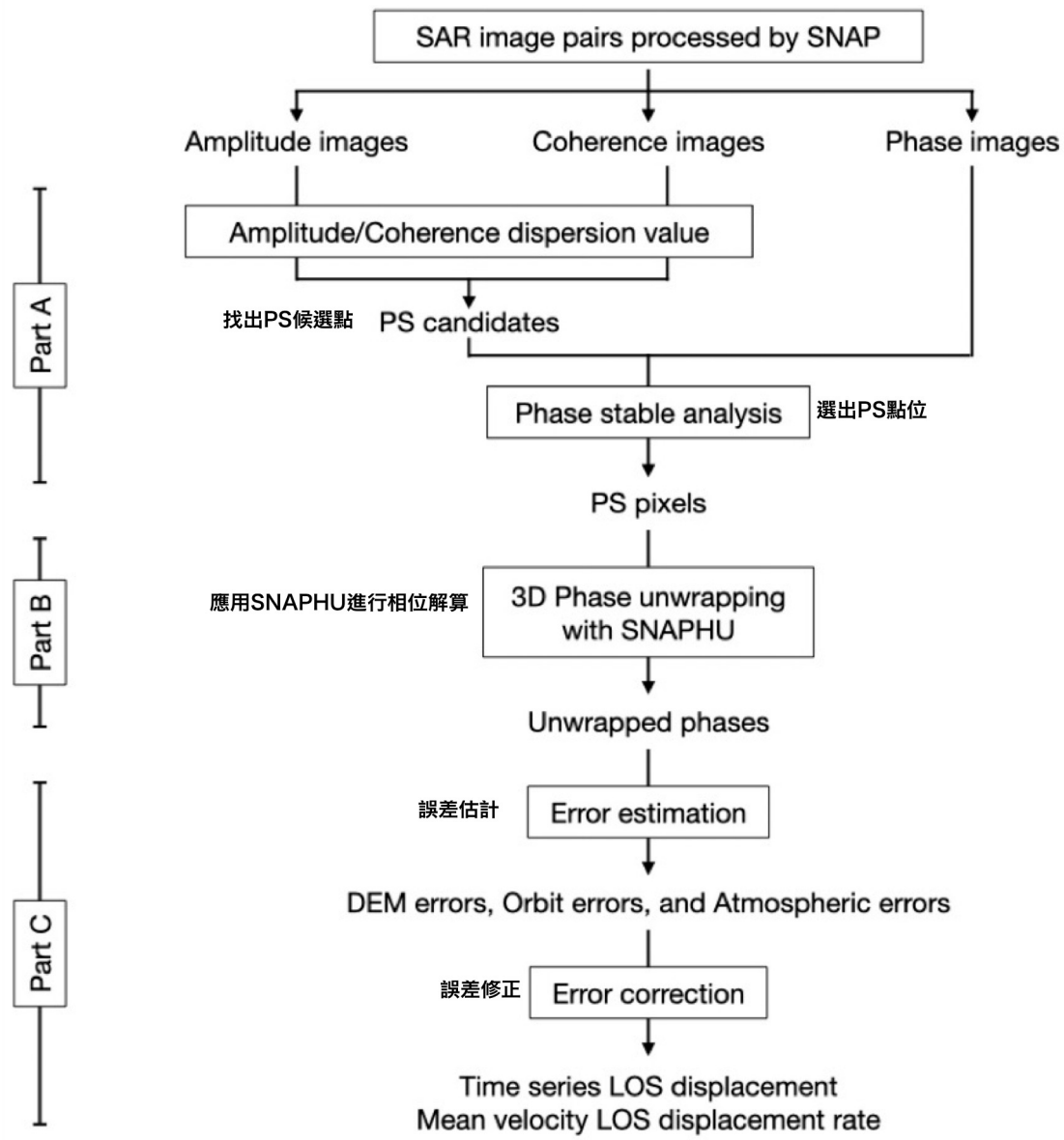


圖2-5：雷達影像處理流程第二階段 - PSI處理流程圖。本階段主要工作為使用StaMPS演算法求得研究區域內地表變形的PSI時間序列與平均速度場之成果。

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，需要利用GNSS資料進行空間上的修正，並透過克利金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。

2-2GNSS、水準測量與雷達差分干涉資料對比

2-2-1 工作內容概述

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

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

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

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

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

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

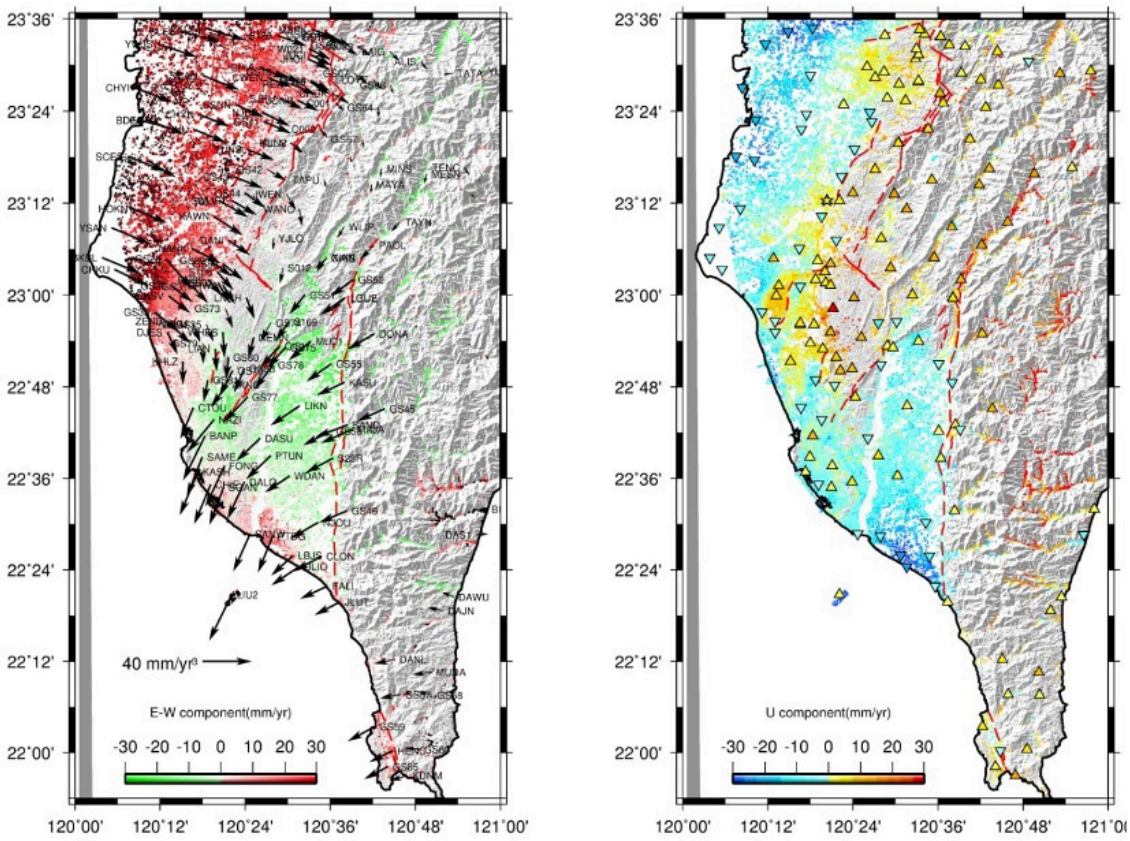


圖2-6：SENTINEL-1東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續GNSS測站水平方向移動速率。圓圈為連續GNSS測站垂直方向移動速率。

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

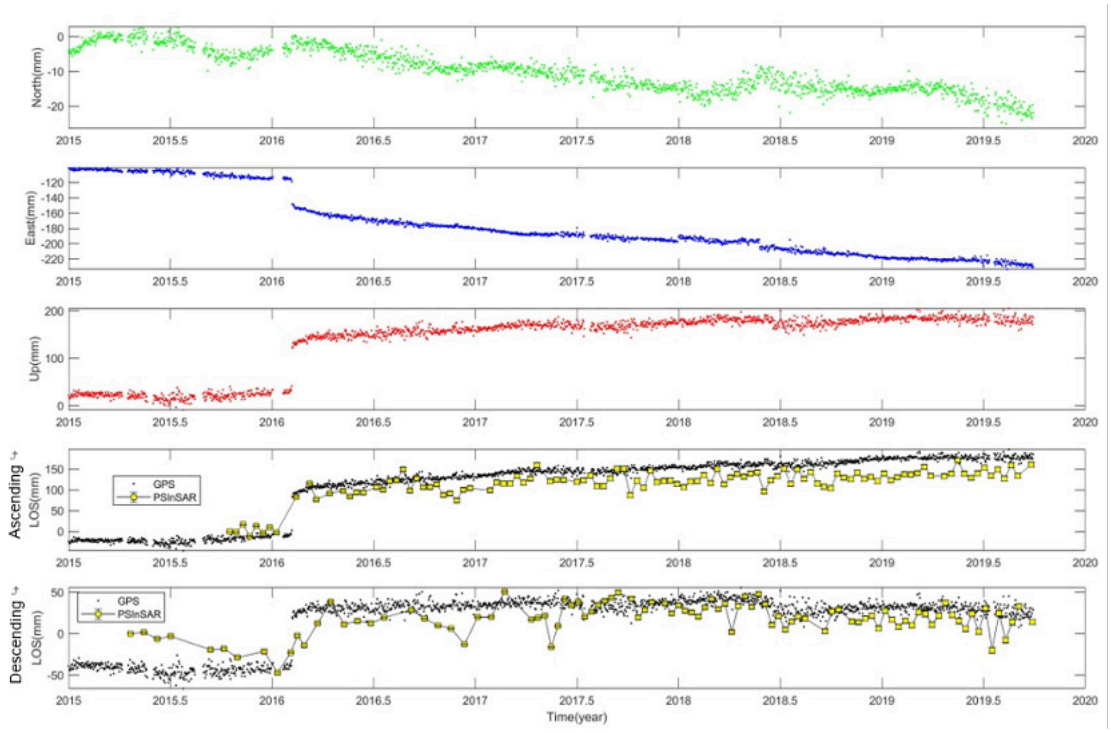


圖2-7：SENTINEL-1 (asc： 2015/10~2019/9; des： 2015/4~2019/9) 雷達影像與GNSS測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為GNSS三方向時間序列；黑色為GNSS投影至視衛星方向。黃色方型為雷達影像時間序列。

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

2-2-2 資料對比之執行方法及進行步驟

本研究利用美國NASA噴射推進研究室（JPL）所開發之GipsyX解算軟體計算求解精密之測站座標(圖2-8)。GipsyX是一種精密單點定位之技術，其優點相較GAMIT/GLOBK是不需要分小網方式解算，解算速度快約數十倍，且各站的解算結果有獨立性，不會受到資料較差的測站干擾。其最突出的特點為利用非差分精密單點定位（Precise Point Positioning，PPP）方式處理數據，在參數上採用JPL的Gerald Bierman改進的卡曼濾波算法，該算法不但計算快速，而且數據穩定、精確。而其缺點在於不能像雙差方法消除共同誤差源的部份，在使用參數處理誤差方面較為麻煩。不過可使用Ambizap利用雙差方法的優點，消除共同誤差改善精度，解算成果略優於利用相對定位的GAMIT或BERNESE解算軟體。本研究計畫

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

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

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

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

對於GNSS時間序列資料之分析，我們考慮長時間的地殼變動、週期性之變化、以及地震引發的同震與震後活動，其時間序列模式可以用下式表示(Nikolaidis, 2002)：

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

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

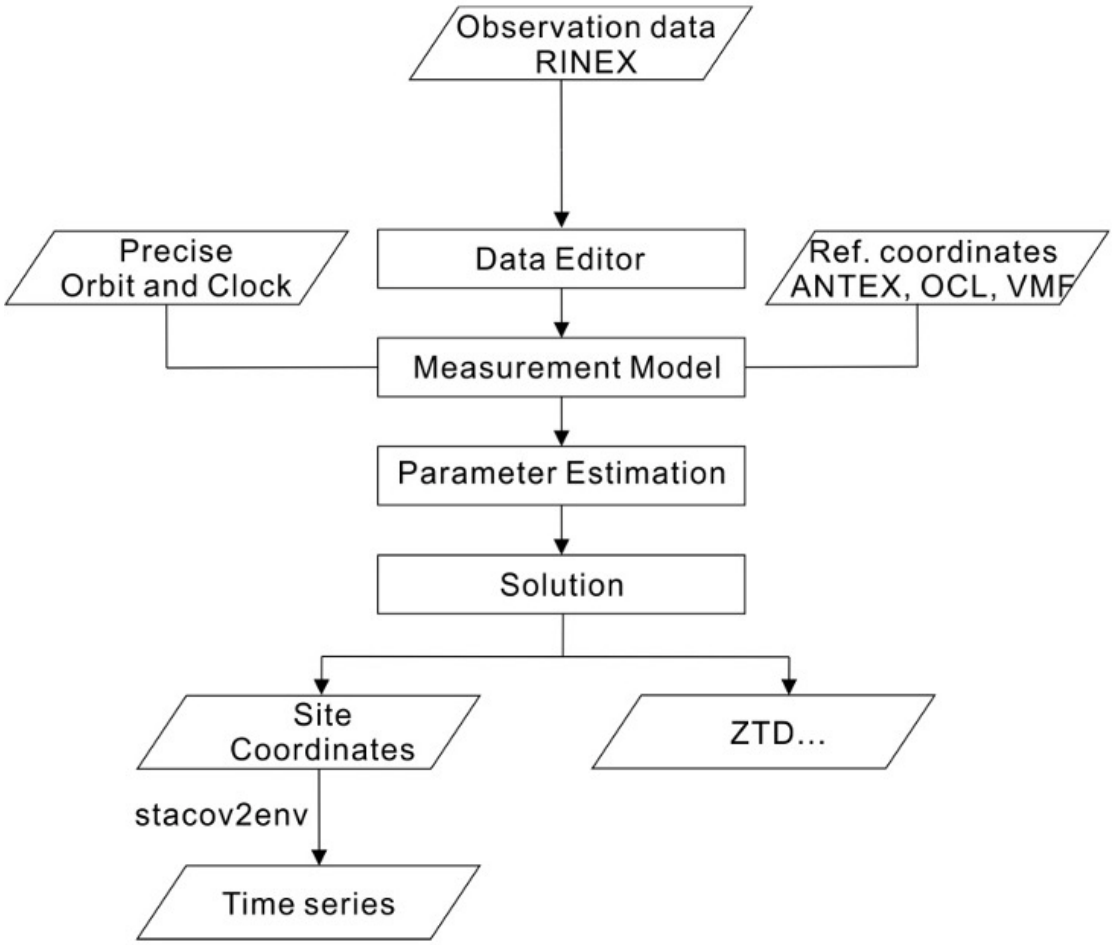


圖2-8：GipsyX軟體處理流程。

Figure 2-8：GipsyX processes.

2-3 二維剖面模擬

2-3-1 方法與執行步驟

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

該模型被廣泛用於模擬由局部擾動產生的地面變形，例如構造斷層（地震）或火山堤（岩漿侵入）。給定矩形斷層的幾何形狀和滑移，它可以計算自由表面的變形（圖2-9）。

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

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

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

2-3-2 跨斷層之速度剖面分析

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

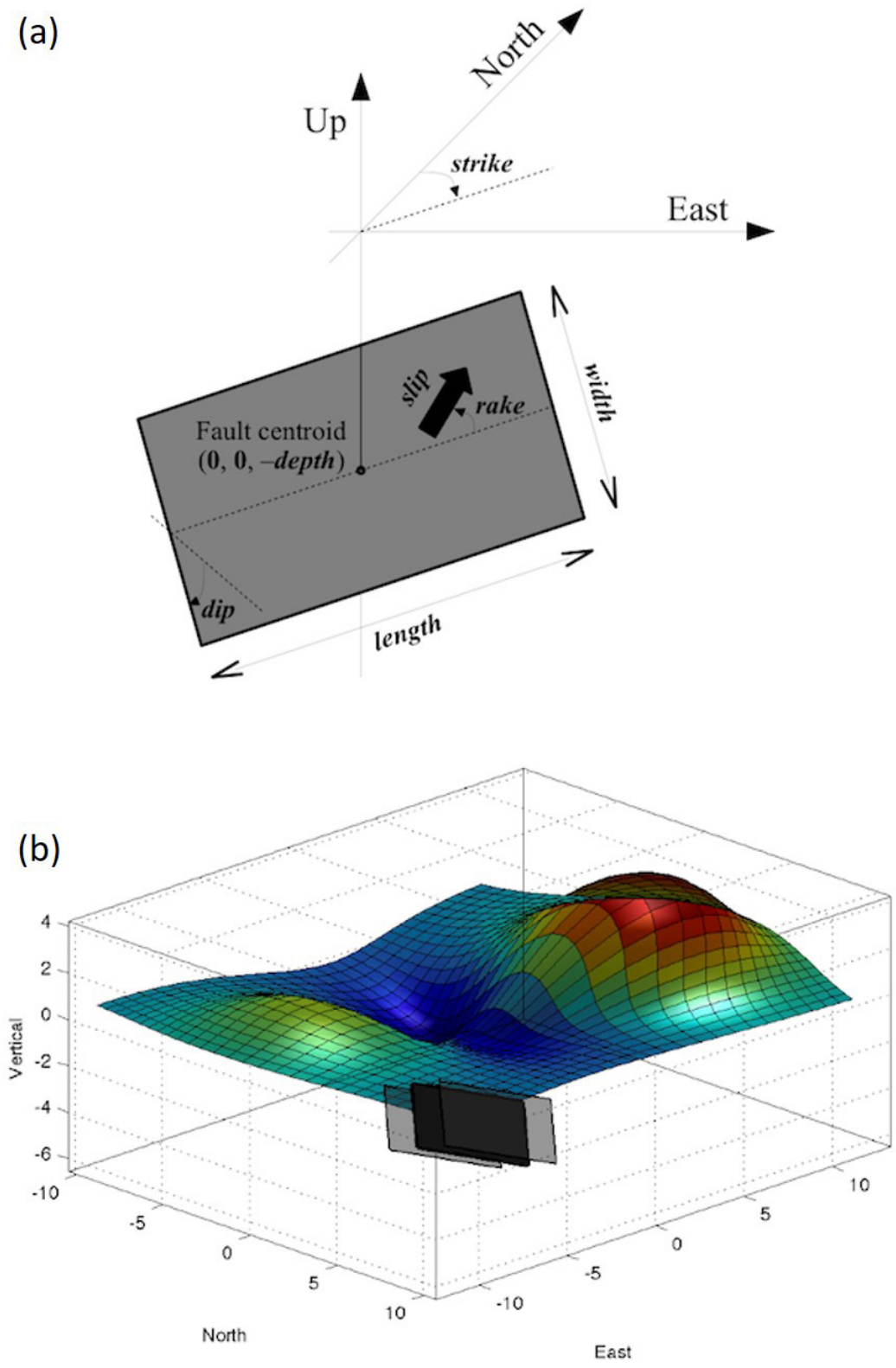


圖2-9：(a) 斷層幾何參數，(b)由圖(a)提供的斷層幾何參數與滑動量，經過彈性半無限空間錯動理論計算的地表變形（Okada, 1985）。

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

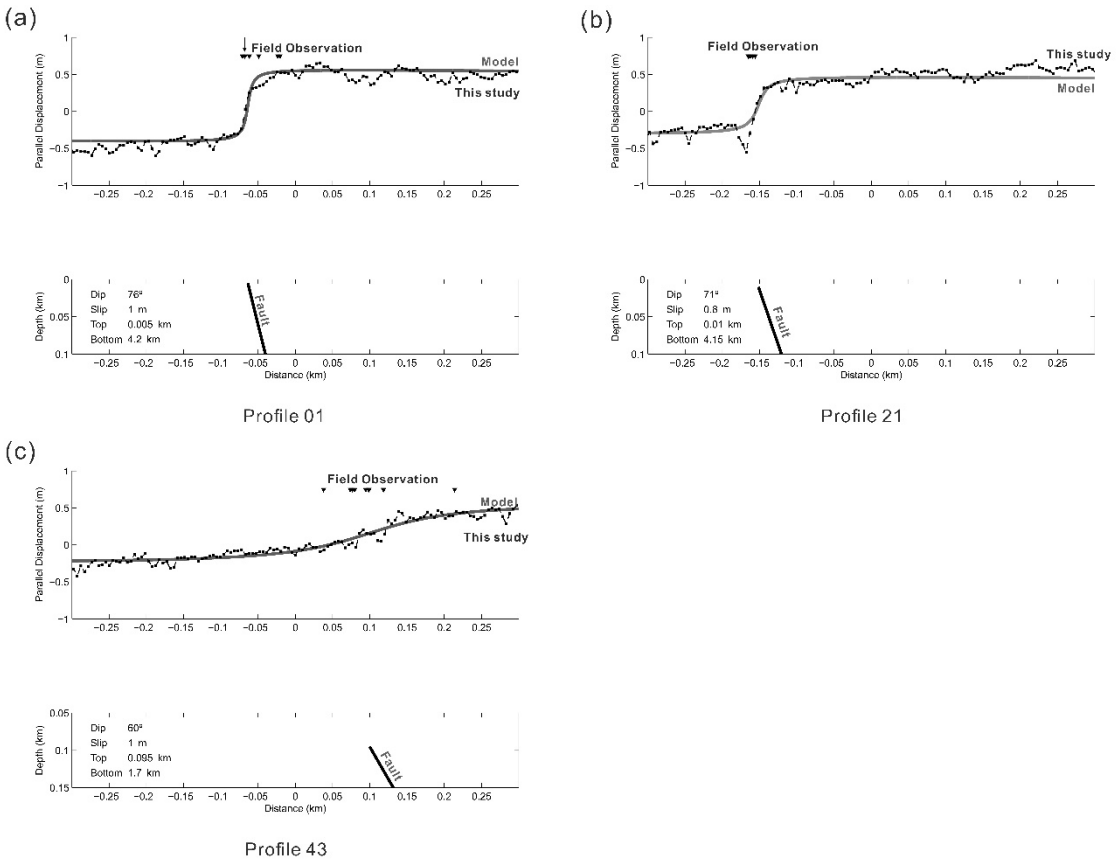


圖2-10：藉由在空間上連續的地表變形資訊，採用彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992），推估斷層參數（Kuo et al., 2019）。

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

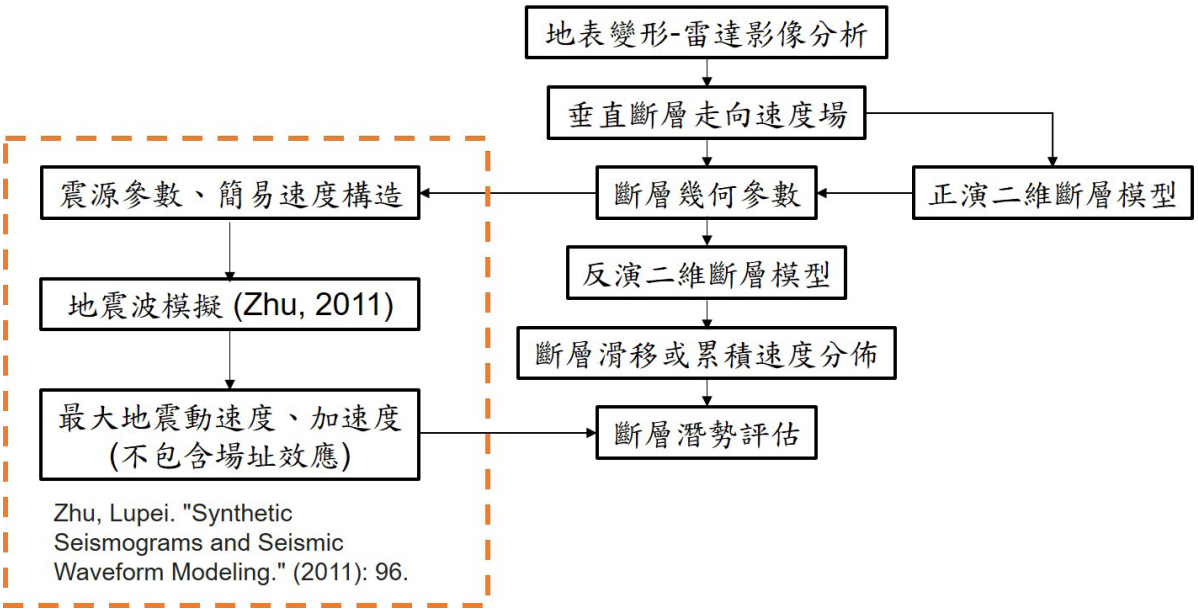


圖2-11：工作流程圖。由雷達影像分析所獲得之速度場，透過簡易模型探討斷層滑移或累積分佈，進而評估斷層潛勢。而完整的斷層幾何參數也可與震源參數、簡易速度構造進行地震波模擬，以求得最大地震動速度與加速度。

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

2-4 垂直速度場解析

要以單分量的衛星斜距方向（LOS）觀測值解析垂直與水平方向分量，至少需要兩組不同觀測方向的資料才能達成。我們先將區域中資料相對於參考站S103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（圖5-1與圖5-2）。

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5.3式改寫為：

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

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

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

m_{vE}、m_{vU} 分別為東西向速度場模型與垂直向速度場模型。

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

應用

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

即可求得每個格點的水平與垂直向速度。

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

第三章、北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2014年10月至2022年12月，分為升軌（Ascending）及降軌（Descending）兩部分，影像使用幅數如表3-1所示。

表3-1：Sentinel-1A衛星影像使用幅數。

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

	2014-2018	2018-2021	2022
升軌（Ascending）	75幅	217幅	27幅
降軌（Descending）	60幅	227幅	16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）。升軌影像需要南北兩圖幅才能完整涵蓋本年度調查區域，而有些日期並非南北兩幅皆有拍攝，因此影像數量與上一年度略有不同。在處理過程會先釐清是否有資料、接合是否有問題、測試接合後是否涵蓋研究區域…等等。這些接合與測試都增加了處理的複雜度。

實際執行時我們先選定調查區域內南北兩個點，將原始資料依照所選範圍合併，本年度升軌需要接合南北圖幅後，再同一圖幅內不同subswath（F1、F2與F3），降軌僅需要合併同一圖幅內不同subswath（F1、F2），過程須先以GMTSAR處理後全部圖幅合併後再裁切，最後使用StaMPS進行PSI流程。

StaMPS軟體的兩項參數：雷達強度散佈率預設門檻值和Weed Standard Deviation（WSD）數值，我們依據以往高屏與嘉南地區經驗，選擇雷達強度散佈率門檻值為0.75、和Weed Standard Deviation（WSD）為1進行處理。

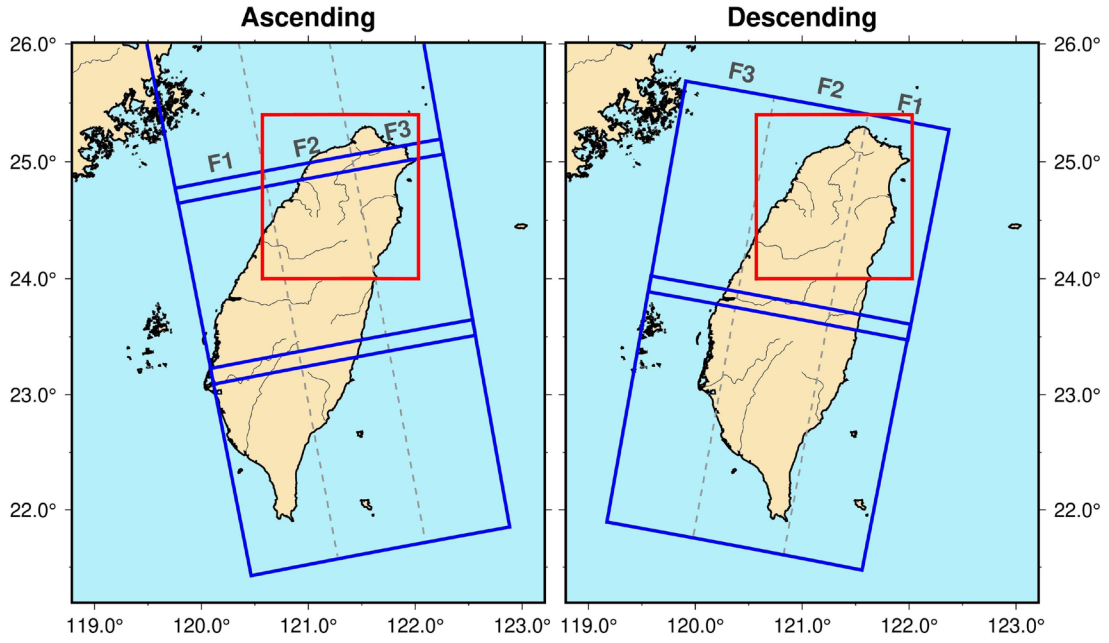


圖3-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與本次研究區域分佈圖。

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

3-2 2014-2018年雷達影像成果

從2014年10月22日開始至2018年02月03日之間，選取75幅Sentinel-1A升軌道（Ascending）影像，並以2016年08月12日為主影像，此外，選取60幅Sentinel-1A降軌道（Descending）影像，並以2016年08月14日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過GMTSAR軟體處理完成，再經由StaMPS軟體搭配先前律定的參數，進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得2014年至2018年研究區域內的衛星視角（LOS）位移速度場。

本小節的分析成果可呈現升軌道與降軌道的LOS速度場成果，以下詳述分析成果。

3-2-1 升降軌道的LOS速度場成果

升軌道的LOS速度場結果如圖3-2所示。PSI的LOS速度場數值大致分布在正負10mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在桃園新竹沿海地區，主要呈現冷色系的地區分佈在臺北盆地及苗栗地區。研究區域內的山腳斷層和湖口斷層兩側速度場差異較為明顯，其餘斷層兩側速度場差異不明顯。臺北盆地相對於林口臺地約有 -5mm/yr 的LOS速度差異。

降軌道的LOS速度場結果如圖3-3所示。PSI系統處理完的數據顯示LOS速度值大致分布在-20mm/yr到20mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在臺北及桃園地區，主要呈現冷色系的地區分佈在新竹以南地區。研究區域內的山腳斷層的兩側有約3~5mm/yr的LOS速度差；湖口斷層兩側約有2mm/yr的LOS速度差；其餘斷層兩側的LOS速度場差異則較不明顯。臺北盆地相對於林口臺地約有-3mm/yr的LOS速度差異。

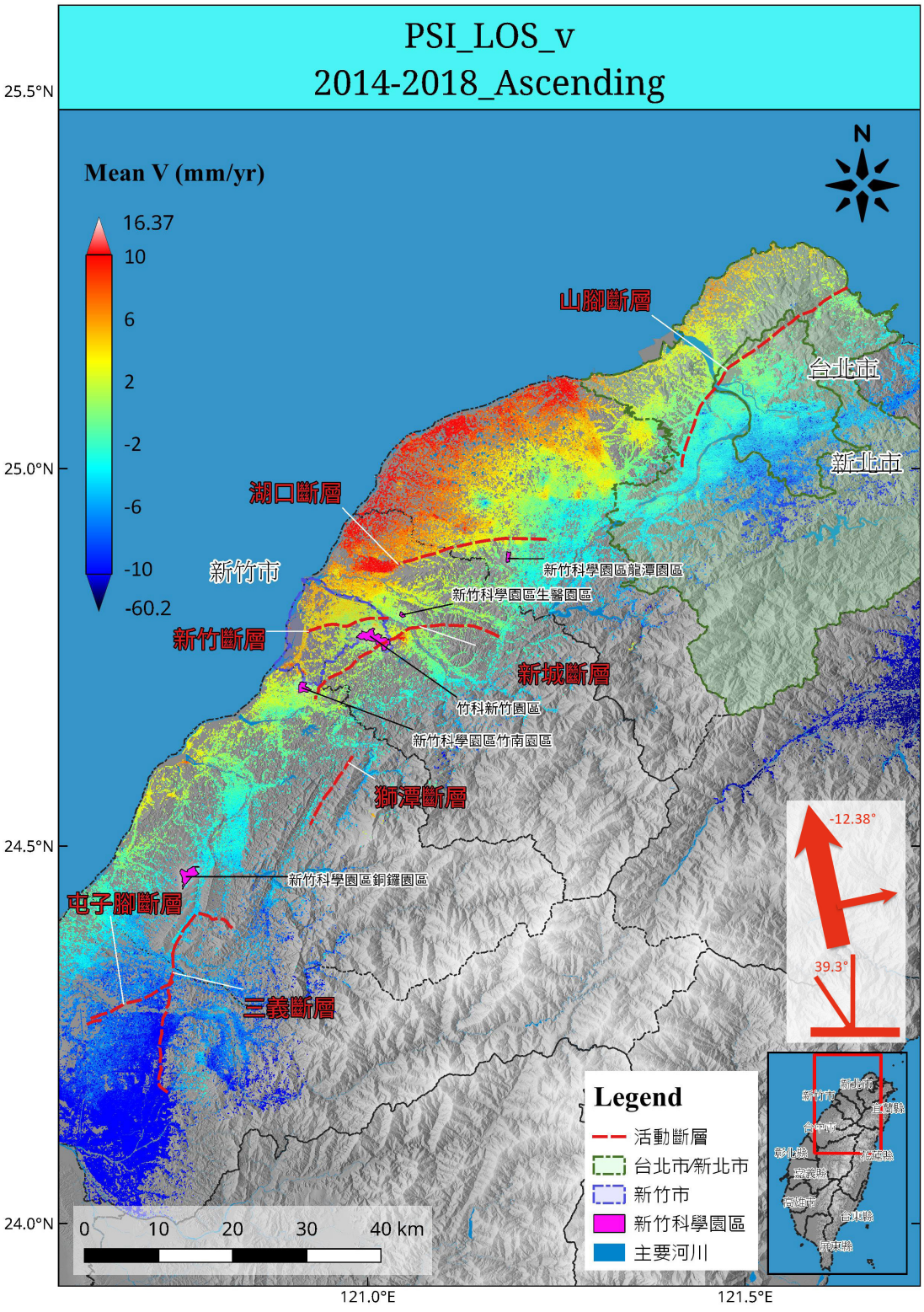


圖3-2：2014-2018升軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-2：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites. The arrows indicate satellite flight direction and incident angle.

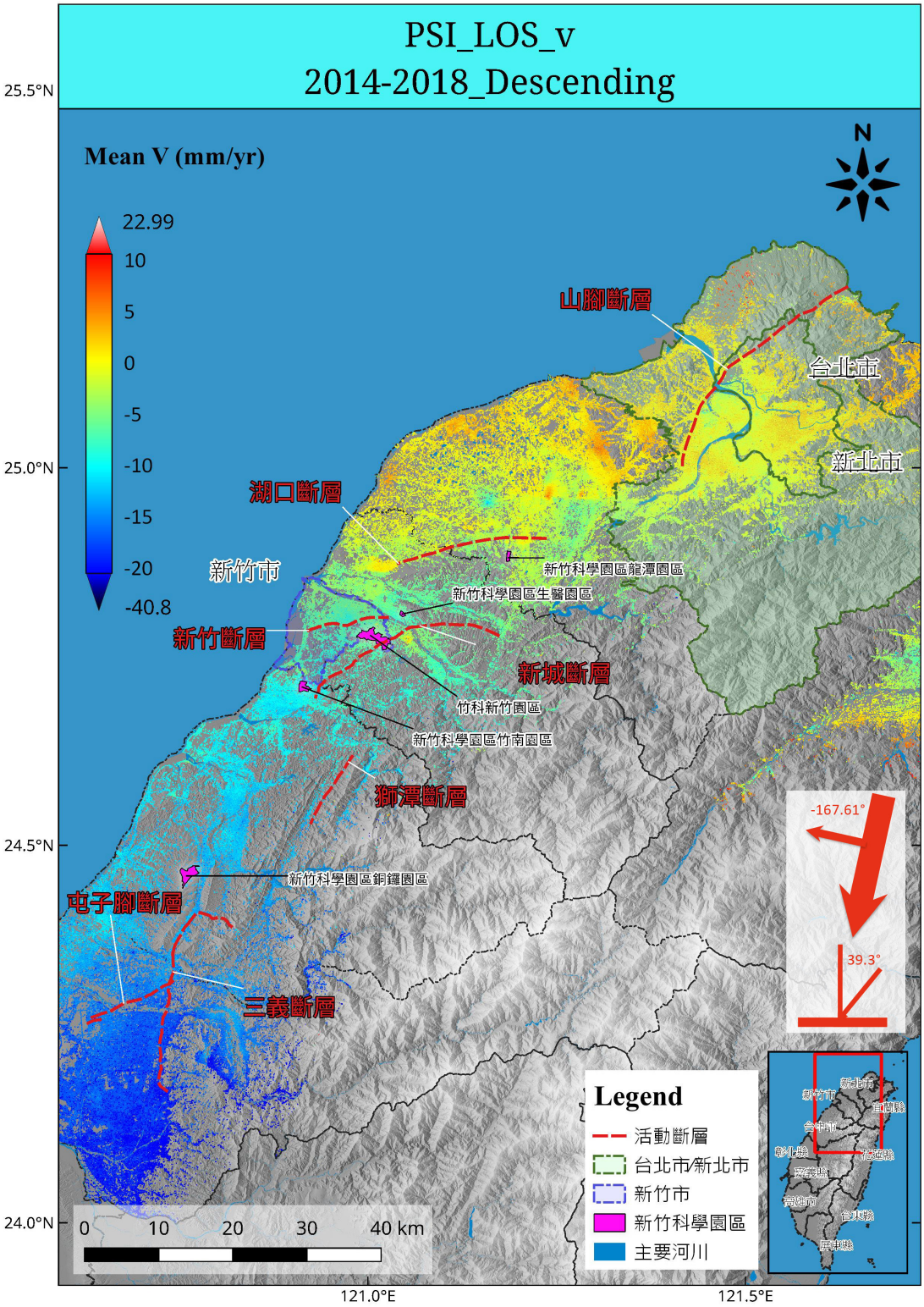


圖3-3：2014-2018降軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

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

3-3 2018-2021年雷達影像成果

自2018年02月09日開始至2021年12月20日之間，選取217幅Sentinel-1A與Sentinel-1B升軌道（Ascending）影像，並以2018年08月14為主影像，此外，選取227幅Sentinel-1A與Sentinel-1B降軌道（Descending）影像，並以2018年08月22日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過GMTSAR軟體處理完成，再經由StaMPS軟體搭配先前律定的參數，進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得2018年至2021年研究區域內LOS位移速度場。

本時期的雷達差分干涉結果，根據第三章表3-4的結果，雖然R^2小於0.75，但是RMSE小於4mm/yr，也就是說誤差不大。　升降軌道PSI與GNSS比對後斜率皆大於0.8，顯示GNSS與PSI趨勢相近。兩者主要的差異在於山區河谷中的永久散射點的誤差，以及新竹以南區域觀測值有所差異，但趨勢接近。

本小節的分析成果可呈現升軌道與降軌道的LOS速度場成果，以下詳述分析成果。

3-3-1 升降軌道的LOS速度場成果

升軌道的LOS速度場結果如圖3-4所示。PSI系統處理完的數據顯示LOS速度值大致分布在正負20mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短；呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在苗栗以南，主要呈現冷色系的地區分佈在臺北盆地。本年度研究區域內的山腳斷層的兩側，有顯著的速度場差異；其他斷層兩側的速度場差異則較不明顯；臺北盆地相對於林口臺地約有-5mm/yr 的LOS速度差異。

降軌道的LOS速度場結果如圖3-5所示。PSI的LOS速度場數值大致分布在-20mm/yr到15mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在桃園地區，主要呈現冷色系的地區分佈在臺北盆地及苗栗以南地區。研究區域內的山腳斷層的兩側有明顯的LOS速度差

異；湖口斷層兩側略有LOS速度場差異；其餘斷層兩側的LOS速度場差異則較不明顯。臺北盆地相對於林口臺地約有-10mm/yr的LOS速度差異。

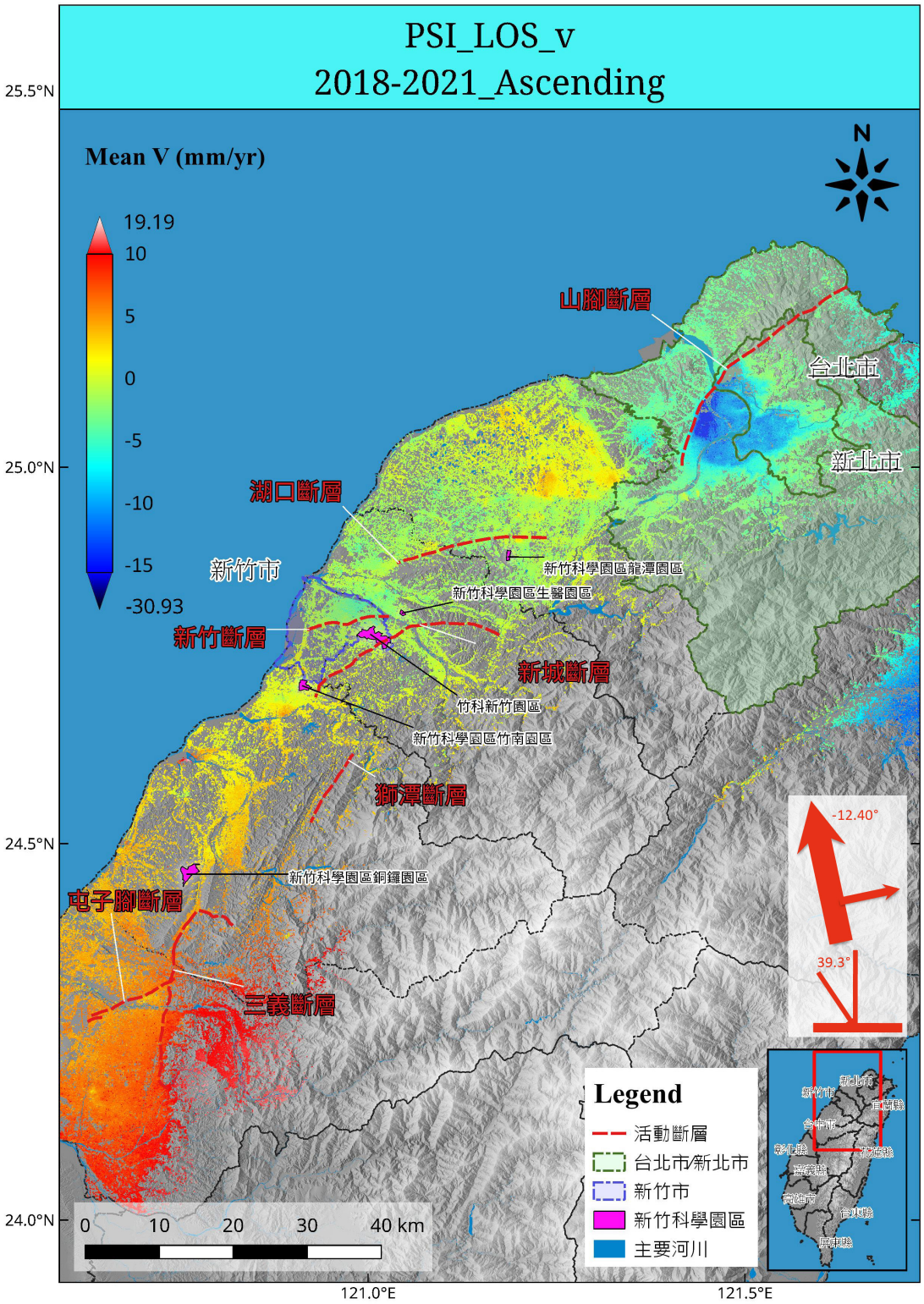


圖3-4：2018-2021升軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-4：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites. The arrows indicate satellite flight direction and incident angle.

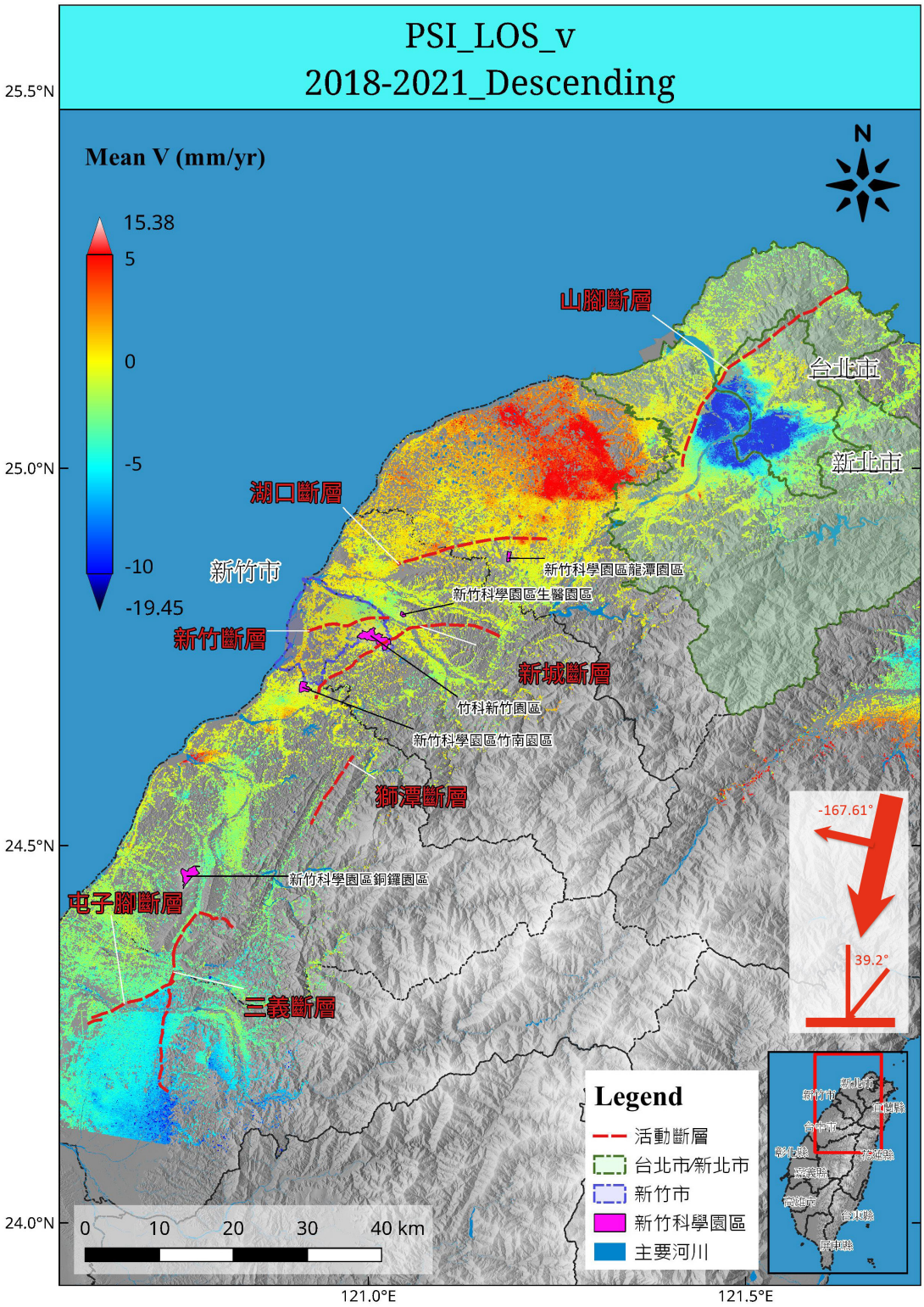


圖3-5：2018-2021降軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-5：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites. The arrows indicate satellite flight direction and incident angle.

3-4 2022年雷達影像成果

從從2022年1月至2022年12月之間，選取27幅Sentinel-1升軌道（Ascending）影像，並以2022年08月17日為主影像，此外，選取16幅Sentinel-1A降軌道（Descending）影像，並以2022年08月22日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過GMTSAR軟體處理完成，再經由StaMPS軟體搭配先前律定的參數，進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得2022年研究區域內LOS位移速度場。

由於Sentinel-1B衛星自2021年12月底開始無法接收資料，於2022年確認衛星電力問題致使無法傳輸資料，2022年僅有拍攝頻率12天一次的Sentinel-1A衛星影像，升軌方向有27幅影像，而降軌道方向於3-6月無資料，僅有16幅影像，根據第三章分析結果，2022時間段之資料為本計畫呈現的三個時間段的資料中影像數目較少、觀測頻率較不穩定的一段（詳見文字 3-1-3節）。因此 2022 之剖面資料品質也較不穩定。

本小節的分析成果可呈現升軌道與降軌道的LOS速度場成果，以下詳述分析成果。

3-4-1 升降軌道的LOS速度場成果

升軌道的LOS速度場結果如圖3-6所示。PSI系統處理完的數據顯示LOS速度值大致分布在20至-20mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在臺北盆地與新竹地區。本時期本研究區域內的山腳斷層兩側約有 10mm/yr的速度差，三義斷層兩側約有 5mm/yr的速度差，其餘斷層於LOS速度場無顯著的速度差異。

降軌道的LOS速度場結果如圖3-7所示。PSI系統處理完的數據顯示LOS速度值大致分布在-20mm/yr到45mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在臺北及北海岸地區，主要呈現冷色系的地區

分佈在新竹以南地區。研究區域內的山腳斷層的兩側有約 15mm/yr 的LOS速度差；其餘斷層兩側的LOS速度場差異則較不明顯。

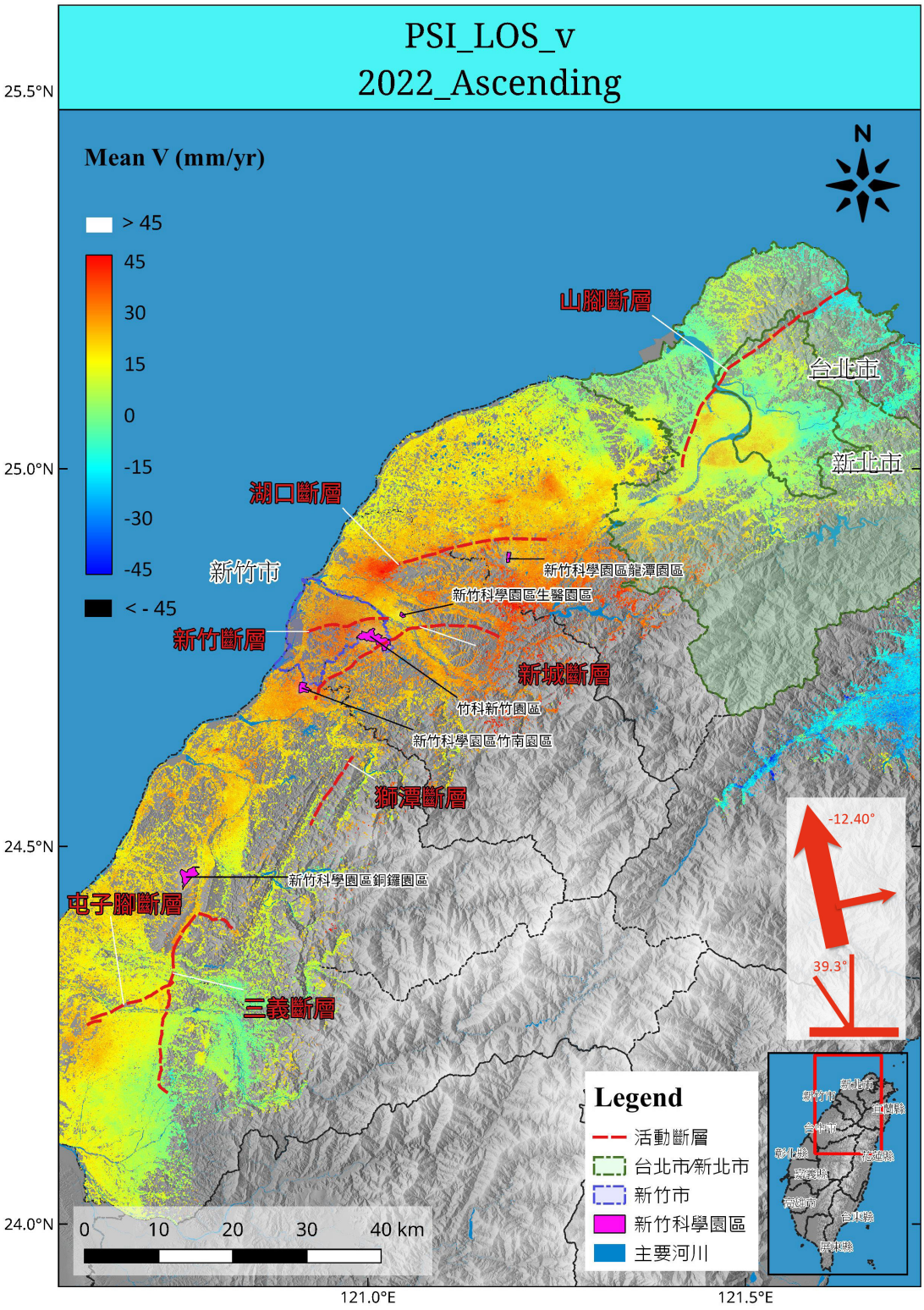


圖3-6：2022升軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-6：Average LOS velocity fields between 2022 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.

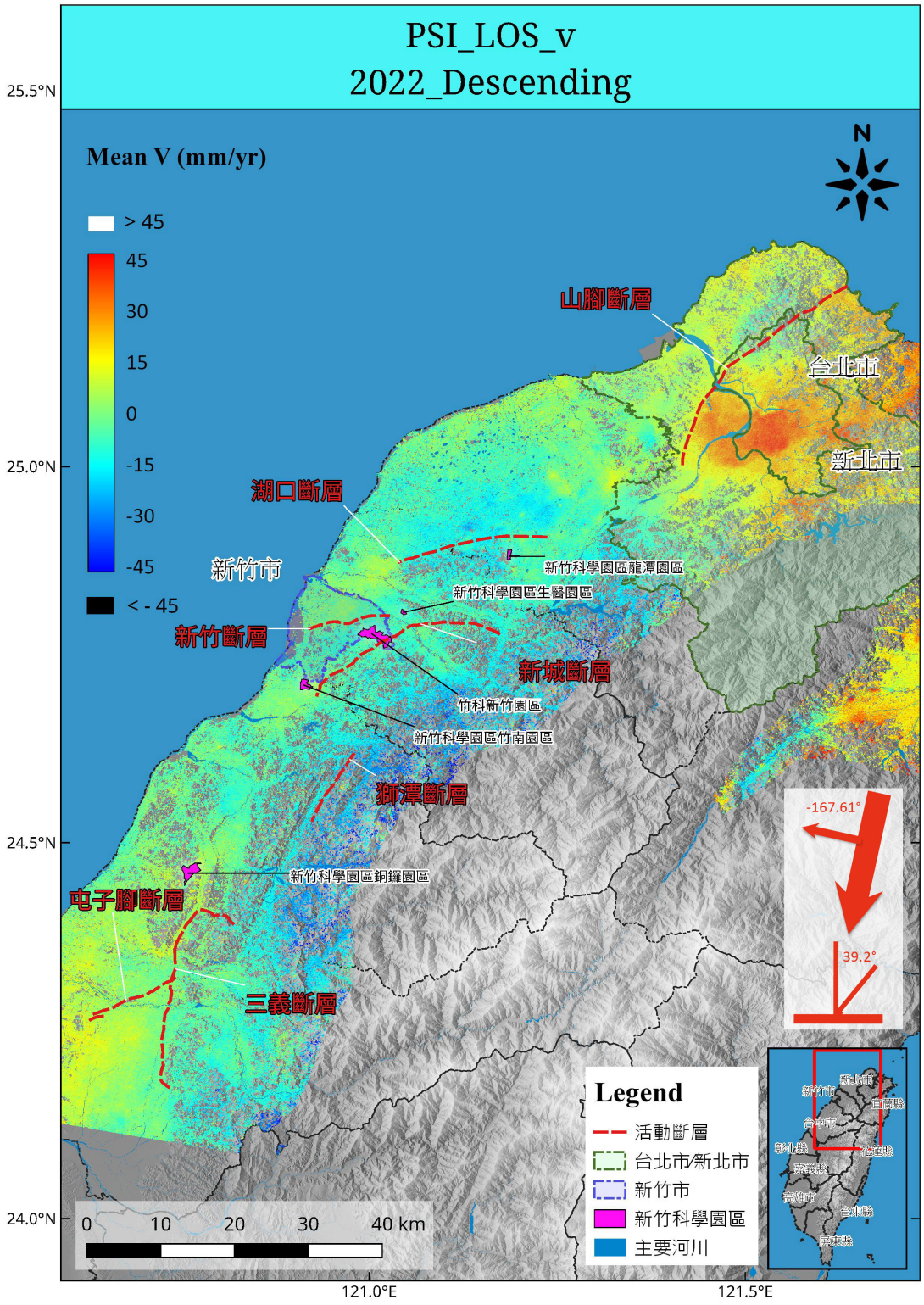


圖3-7：2022降軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。箭頭表示衛星飛行方向與拍攝角度。

Figure 3-7：Average LOS velocity fields between 22022 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.

3-5 垂直速度場解析

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

我們先將區域中資料相對於參考站S103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（圖3-1與圖3-2）。

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

解算後得到垂直以及東西向的速度場。垂直速度大概在-15~18mm/yr 附近。東西向的速度場則是落在-20~10mm/yr 附近。與同時期的GNSS連續站的垂直、東西向的速度比對，垂直向斜率為0.54，R^2為0.35，RMSE為2.69mm/yr。東西向的比對結果更好，斜率接近1，R^2則是為0.84，而且RMSE低到2.3mm/yr（圖3-3及圖3-4）。

從解算出的垂直與東西方向的速度場顯示山腳斷層南段、三義斷層與屯子腳斷層兩側有速度落差，林口臺地至桃園臺地一帶以抬升為主，抬升速度約為5~10mm/yr，山腳斷層東側下陷速度最大可達10 mm/yr，臺北地區以向東速度為主，至苗栗一帶轉換為向西，三義斷層東側向西速度較西側大（圖3-3及圖3-4）。

利用PSI解析的東西向速度（md_E）與GNSS觀測值（E）比對斜率接近1，且誤差（RMSE）小於2.5mm/yr，顯示解析出來的東西

向速度場與此區域GNSS連續站得到的垂直速度相當一致。而垂直向斜率及R^2較低的原因是新竹以南的成果與GNSS差異大，雖然解算的垂直向成果與GNSS變形趨勢一致，都顯示相對於臺北地區（S101測站），新竹以南變形特徵以抬升為主，但數值上GNSS觀測值較解算成果小，尤其是三義斷層附近接近山區的區域，有可能是接近山區資料品質較為不佳，也可能是解算範圍大，參考站設置較遠無法凸顯近場的地表變形特徵，造成結果有高估變形量的可能性。

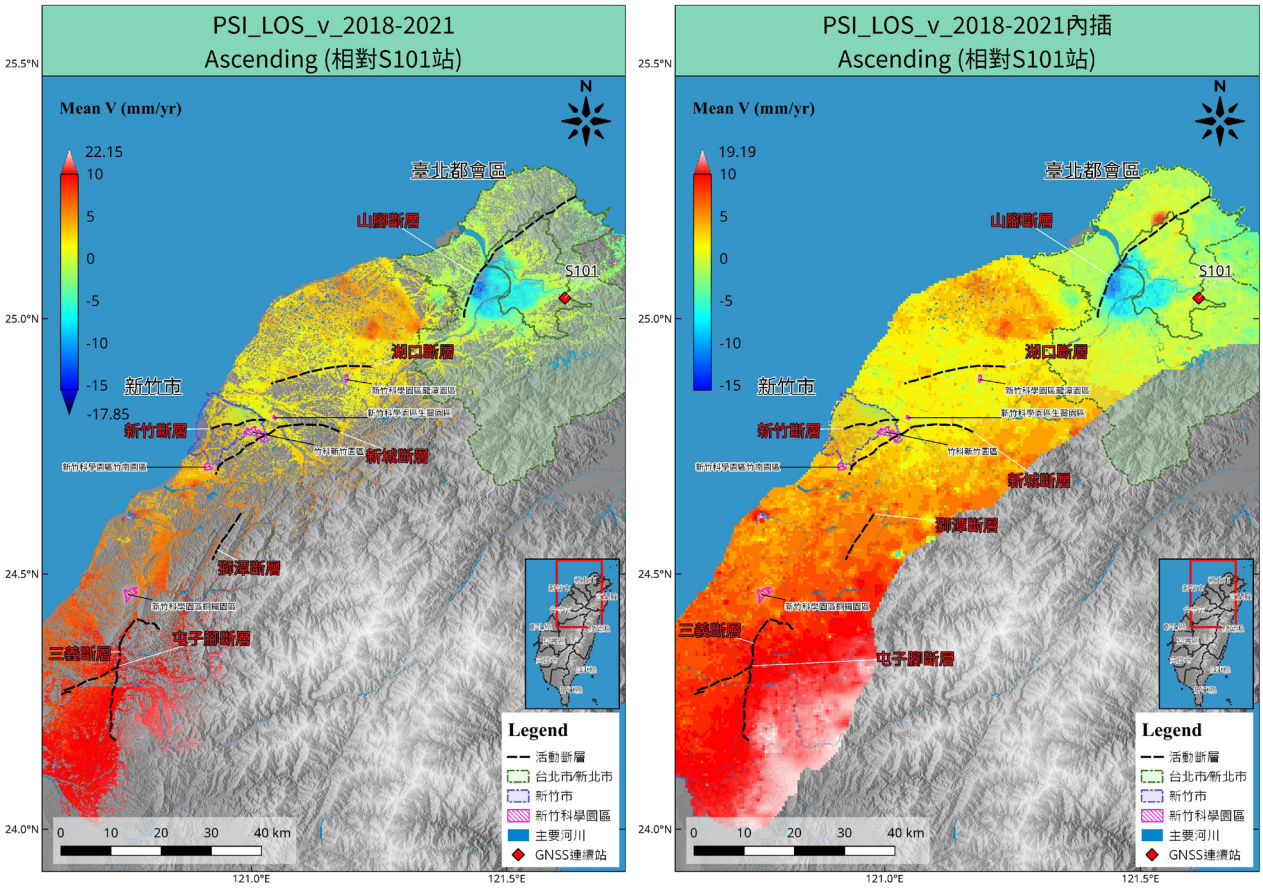


圖3-8：2018年至2021北臺灣地區升軌方向PSI與內插結果。左圖為PSI成果，右圖為以500公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。紅色菱形為參考點為連續GNSS測站S101。

Figure 3-8：(Left) PSI results in ascending track between 2018 and 2021 in northern Taiwan. (Right) PSI results Interpolated with a 500-m grid resolution. Warm colors represent movements toward the satellite and cold colors represent movements away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101.

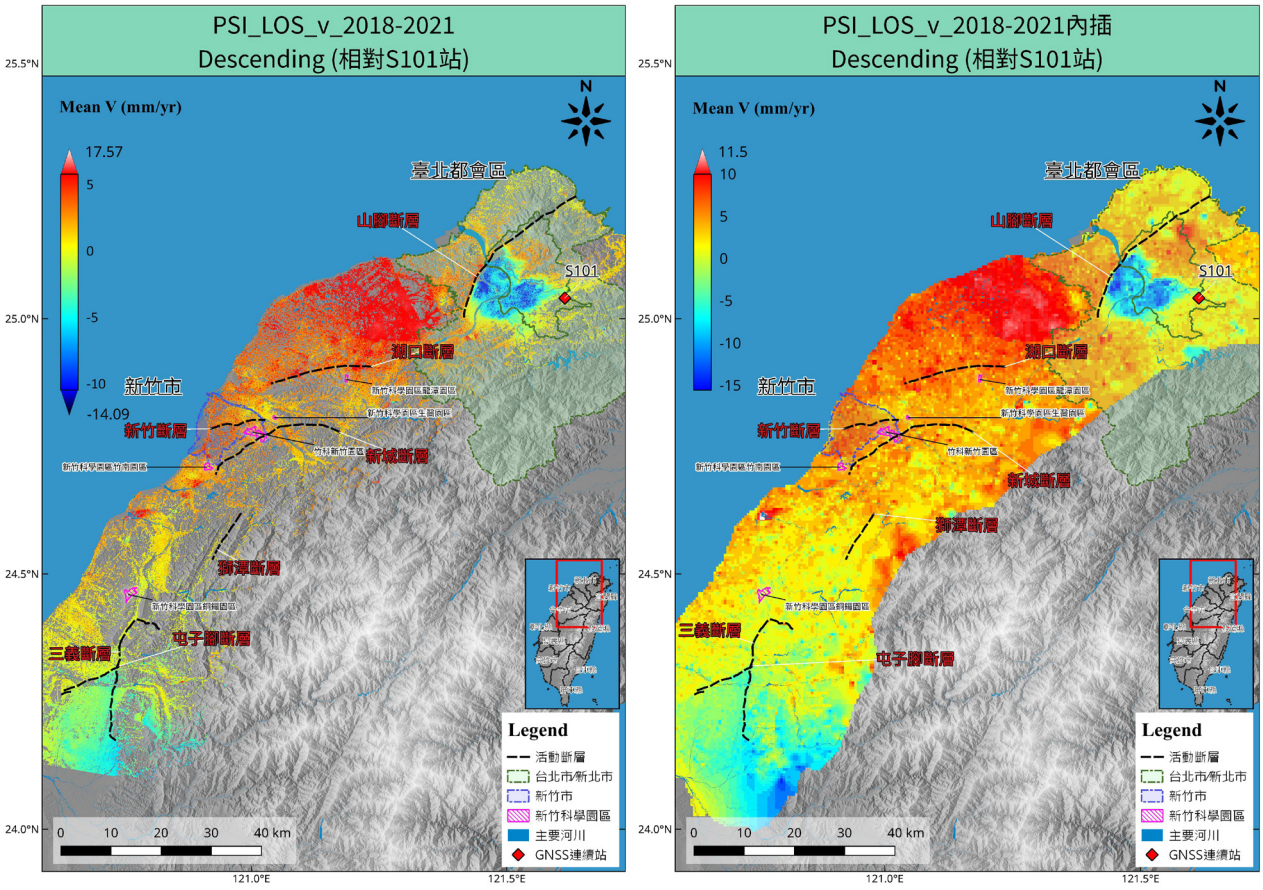


圖3-9：2018年至2021年北臺灣地區降軌方向PSI與內插結果。左圖為PSI成果，右圖為以500公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。紅色菱形為參考點為連續GNSS測站S101。

Figure 3-9：(Left) PSI results in Descending track between 2018 and 2021 in northern Taiwan. (Right) PSI results Interpolated with a 500-m grid resolution. Warm colors represent movements toward the satellite and cold colors represent movements away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101.

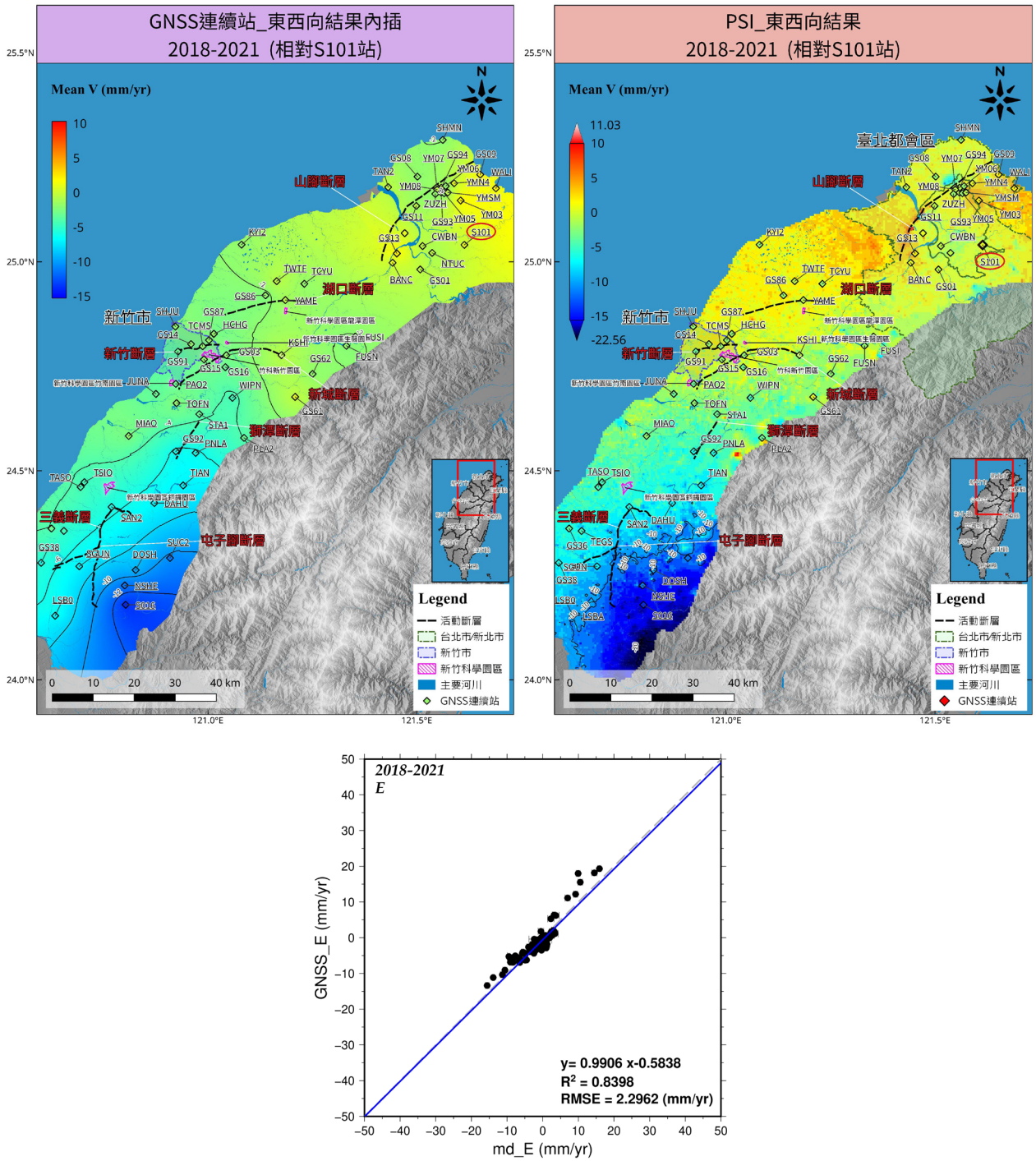


圖3-10：上圖左為2018-2021 GNSS東西向速度內插圖，內插使用克利金的線性模式。上圖右為2018年至2021年東西向速度解析結果。下圖為GNSS比對圖。參考點為連續GNSS測站S101，菱形及其填色為GNSS連續站垂直速度。暖色代表向東，冷色表示向西。

Figure 3-10：(Upper Left) East-West Interpolated Velocity field from GNSS between 2018 and 2021 in the Chiayi and Tainan area. Velocity is interpolated with the Kringing liner model. (Upper Right) East-West Velocity field resolved from Radar data between 2018 and 2021 in this area. (Lower) Comparison between PSI and GPS results. Reference point is the continuous GNSS station S101. Colored diamonds represent the vertical velocity of the continuous stations. Warm colors represent eastward and cold colors represent westward.

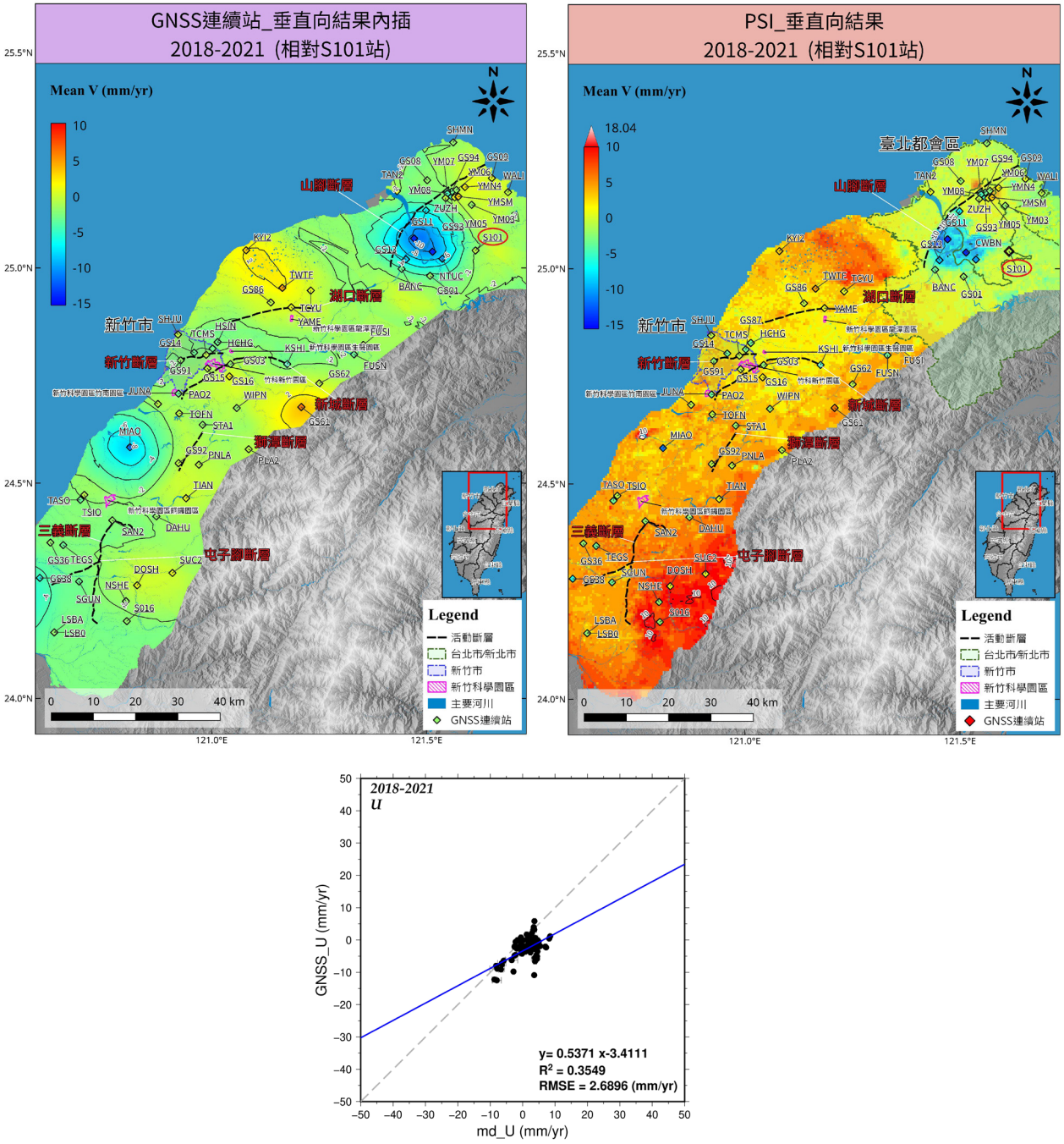


圖3-11：上圖左為2018-2021 GNSS垂直向速度內插圖，內插使用克利金的線性模式。上圖右上圖為2018年至2021年垂直向速度解析結果。由於GNSS內插的原因，圖面上看起來與雷達資料有一些差異。下圖為GNSS比對圖。參考點為連續GNSS測站S101，菱形及其填色為GNSS連續站垂直速度。暖色代表抬升，冷色表示下陷。

Figure 3-11：(Upper Left) East-West Interpolated Velocity field from GNSS between 2018 and 2021 in the Chiayi and Tainan area. Velocity is interpolated with the Kringing liner model. (Upper Right) East-West Velocity field resolved from Radar data between 2018 and 2021 in this area. (Lower) Comparison between PSI and GPS results. Reference point is the continuous GNSS station S101. Colored diamonds represent the vertical velocity of the continuous stations. Warm colors represent eastward and cold colors represent westward.

3-6 跨斷層的速度場剖面分析

本研究為了深入探討山腳斷層、湖口斷層、新竹斷層、新城斷層、獅潭斷層、三義斷層及屯子腳斷層等區域的活動特性，我們以地礦中心(原地調所)地下地質剖面成果（黃旭燦等，2004）擷取PSI速度剖面，並在各個斷層沿線劃設1至3條跨斷層之剖面進行分析。每條剖面選取兩側500公尺內的PS點位，將其投影至剖面走向之上，並沿著剖面距離進行一維空間的濾波，獲得連續的剖面LOS位移資訊。

地礦中心地下地質剖面（黃旭燦等，2004）的位置與分布如圖3-12所示，由北到南從剖面1到剖面11共11條。每一條根據原來地下資料的特性而形成大致東西方向的折線。由於發表年代上的差異，地下地質剖面標示之斷層名稱與目前地礦中心公布的斷層不盡相同。成果中，斷層位置以110年中央地質調查所公告的活動斷層資訊為依據。

整體而言，各斷層於三個時期皆有良好成果。本節呈現升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的山腳斷層、湖口斷層、新城斷層以及三義斷層剖面鄰近的地質剖面成果，其餘斷層剖面成果列於附錄。以下就此四個斷層的分析成果進行詳細描述。



圖3-12：北臺灣地區地質剖面分佈圖。黑色虛線為活動斷層，黑色實線為地質剖面。（黃旭燦等，2004）。

Figure 3-12：The profiles of geological structures in the northern Taiwan. Dotted black lines are active faults and black lines are the profiles (Huang et al., 2004).

3-6-1 山腳斷層（SCO）

山腳斷層取三條西北-東南向及一條近東西向共四條剖面，SCO1通過於北海岸及山腳斷層，2022年升軌道方向成果顯示於斷層兩側有約5~7mm/yr的LOS速度落差（圖3-19、圖3-20），同期的降軌道方向與其餘時期皆無明顯落差。SCO2位於台北盆地與大屯火山群交界並通過山腳斷層，2018-2021時期升降軌道成果於斷層兩側約有3~5mm/yr的LOS速度落差（圖3-17、圖3-18），其餘時期則無明顯落差。SCO3通過台北盆地與山腳斷層，2014-2018升軌道的LOS速度場顯示山腳斷層兩側有些微差異（圖3-13），降軌道則是無明顯差異（圖3-15）；2018-2021與2022的升降軌道LOS速度場皆顯示山腳斷層兩側有明顯差異，2018-2021為遠離衛星移動，2022則呈現接近衛星移動，然而如前述此時期的影像拍攝間隔不一、也較長，所以誤差比較大。LOS速度剖面顯示2014-2018時期山腳斷層東側相對於西側約有2~3mm/yr的LOS速度落差（遠離衛星移動）（圖3-14、圖3-16），2018-2021時期約有7~10mm/yr的LOS速度落差（遠離衛星移動）（圖3-18、圖3-20），2022時期則是約有15mm/yr的LOS速度落差（靠近衛星移動），運動方向與前兩時期相反（圖3-22、圖3-24）。SCO4為一通過台北盆地與山腳斷層接近東西向的剖面，2014-2018升軌道的LOS速度場顯示山腳斷層兩側有些微差異（圖3-13），降軌道則是無明顯差異（圖3-15）；2018-2021與2022的升降軌道LOS速度場皆顯示山腳斷層兩側有明顯差異，2018-2021為遠離衛星移動（圖3-17、圖3-19），2022為接近衛星移動（圖3-21、圖3-23）。LOS速度剖面顯示2014-2018時期山腳斷層東側相對於西側約有3~5mm/yr的LOS速度落差（遠離衛星移動）（圖3-14、圖3-16），2018-2021時期約有10~12mm/yr的LOS速度落差（遠離衛星移動）（圖3-18、圖3-20），2022時期則是約有20mm/yr的LOS速度落差（靠近衛星移動），運動方向與前兩時期相反（圖3-22、圖3-24）。

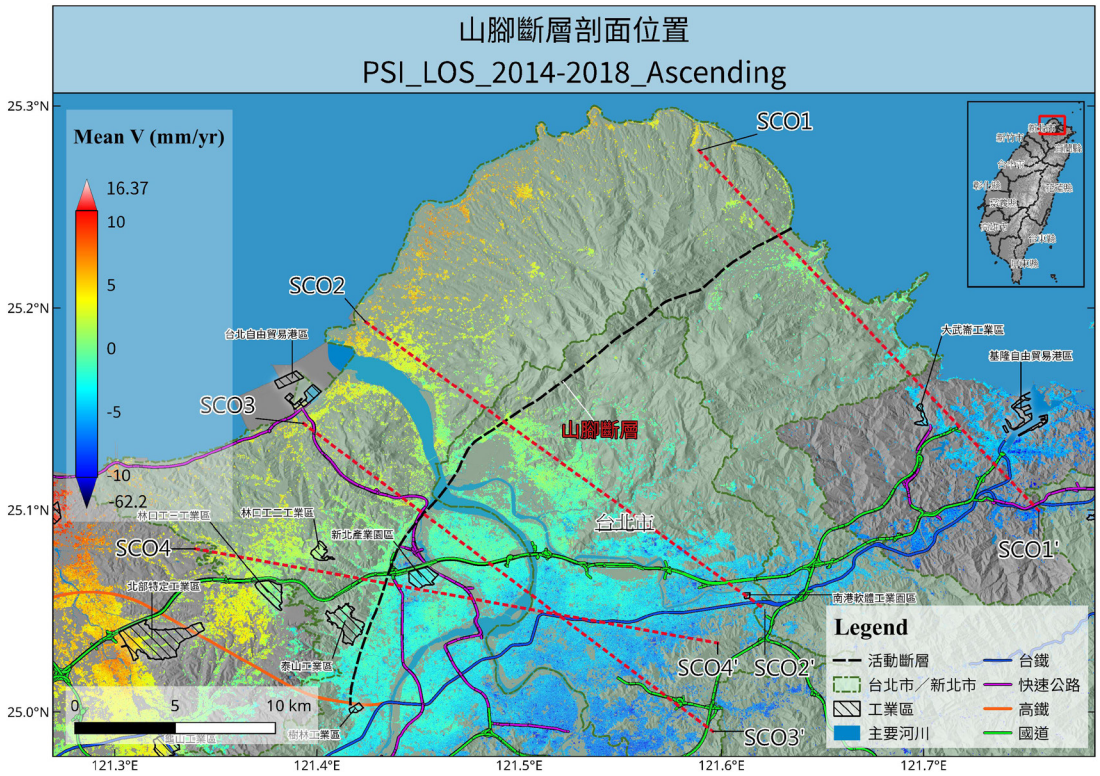


圖3-13：2014-2018山腳斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-13：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the Sanchiao Fault.

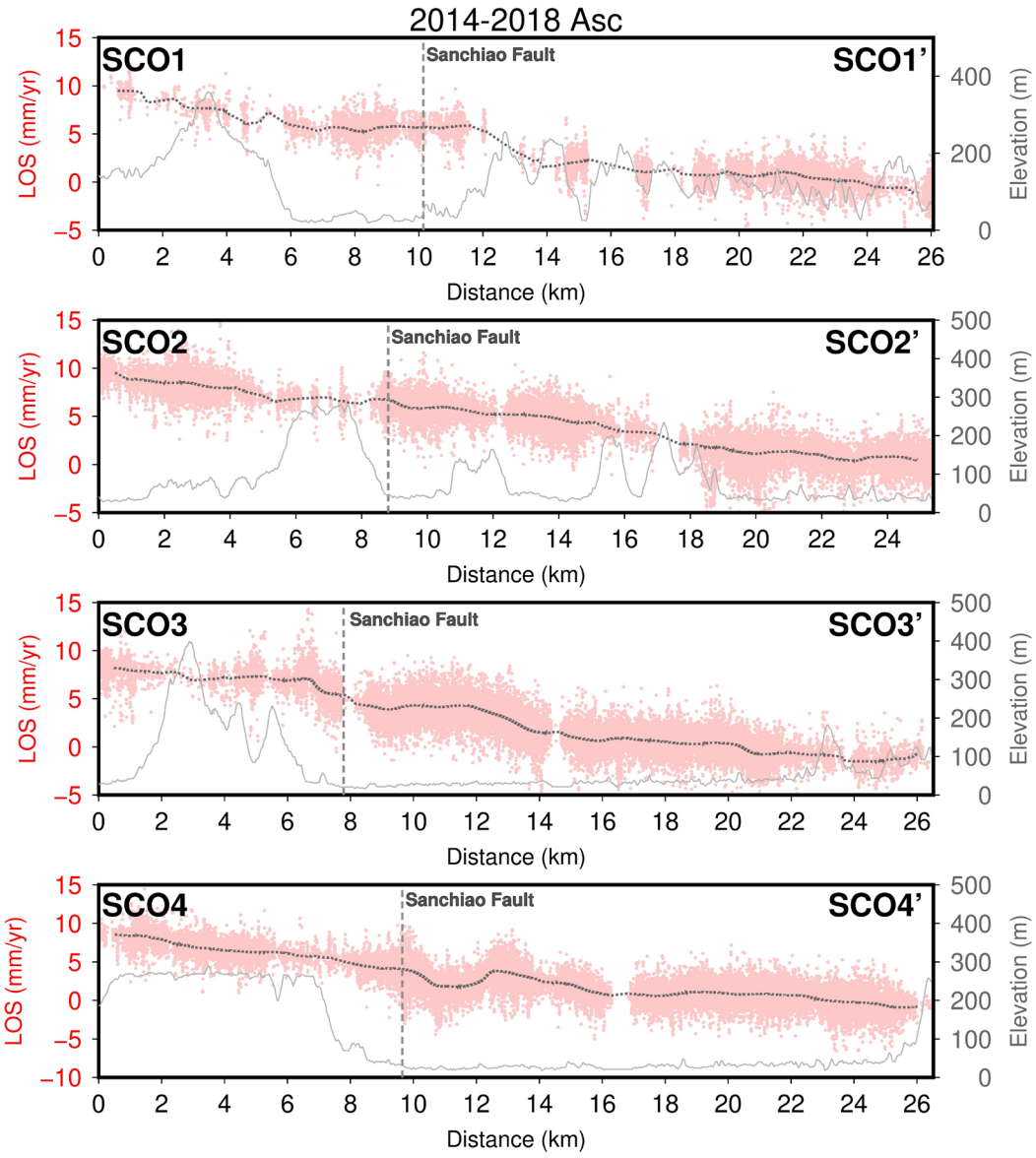


圖3-14：2014-2018山腳斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面成果圖。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-14：Result of profiles across the Sanchiao Fault between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

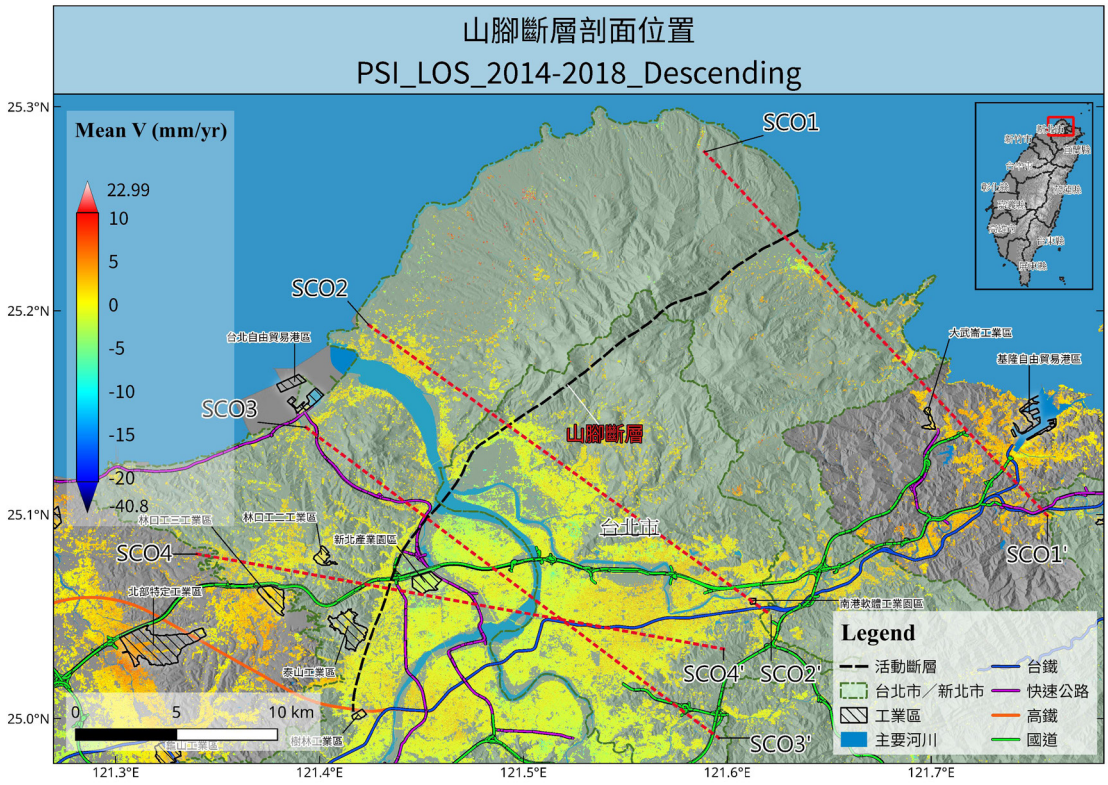


圖3-15：2014-2018山腳斷層降軌道影像的剖面成果圖。

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

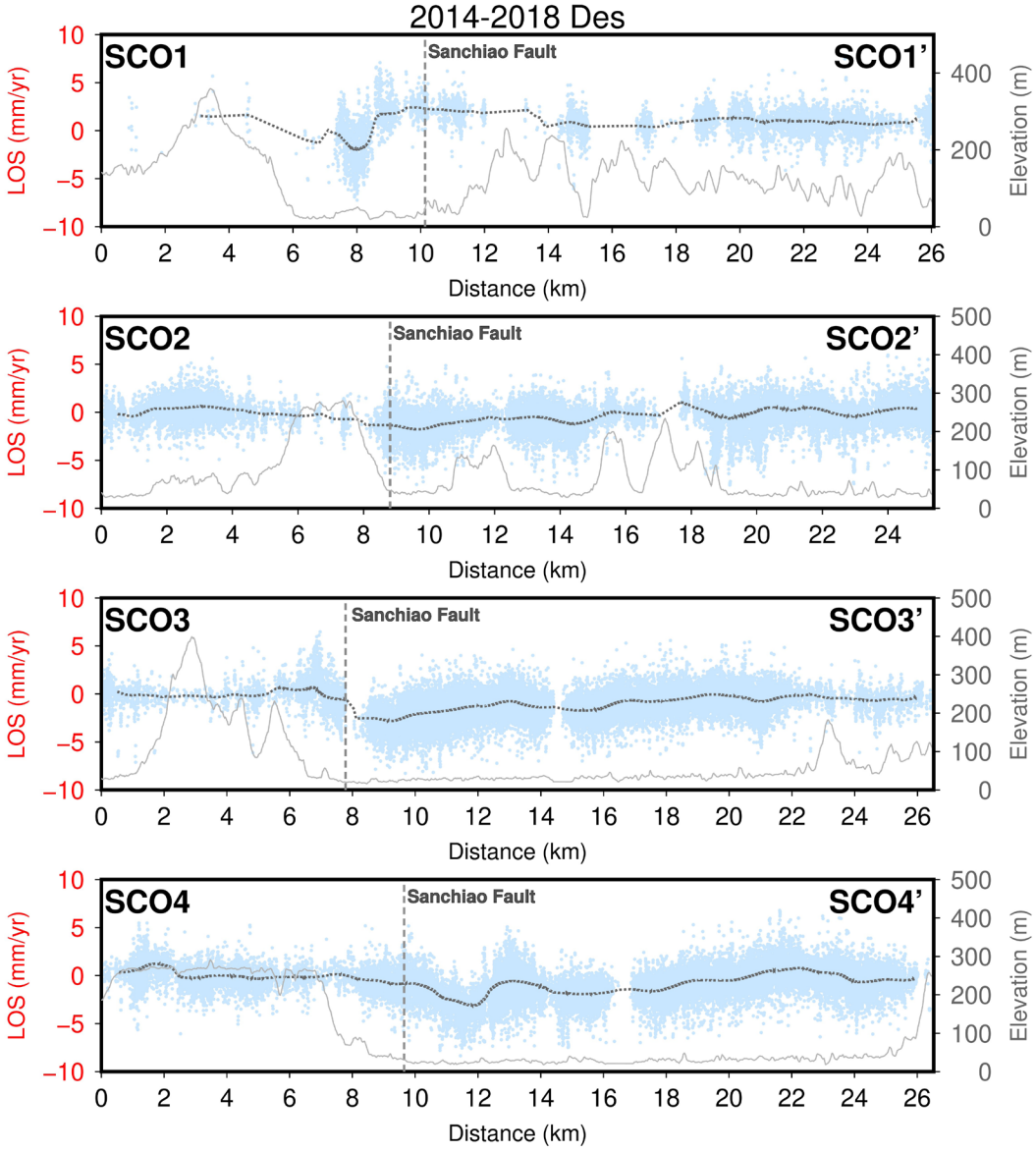


圖3-16： 2014-2018山腳斷層降軌道影像的剖面圖成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-16：Result of profiles across the Sanchiao Fault between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

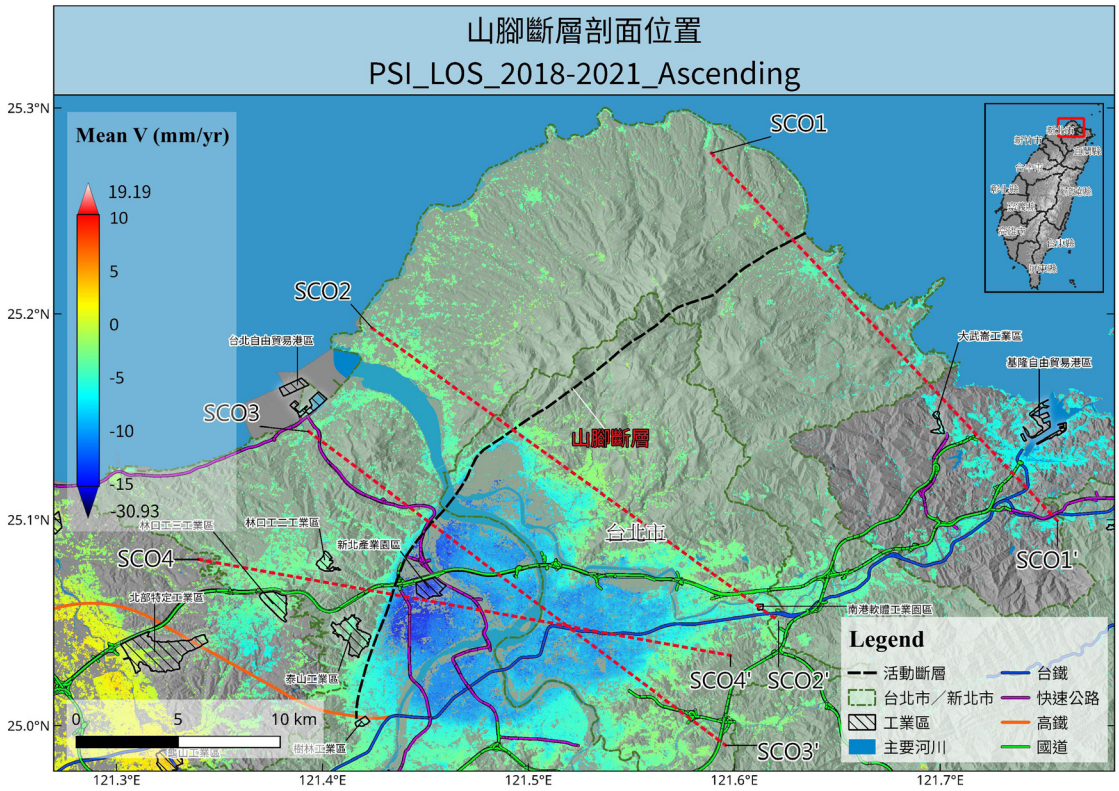


圖3-17：2018-2021山腳斷層升軌道影像的剖面成果圖。

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

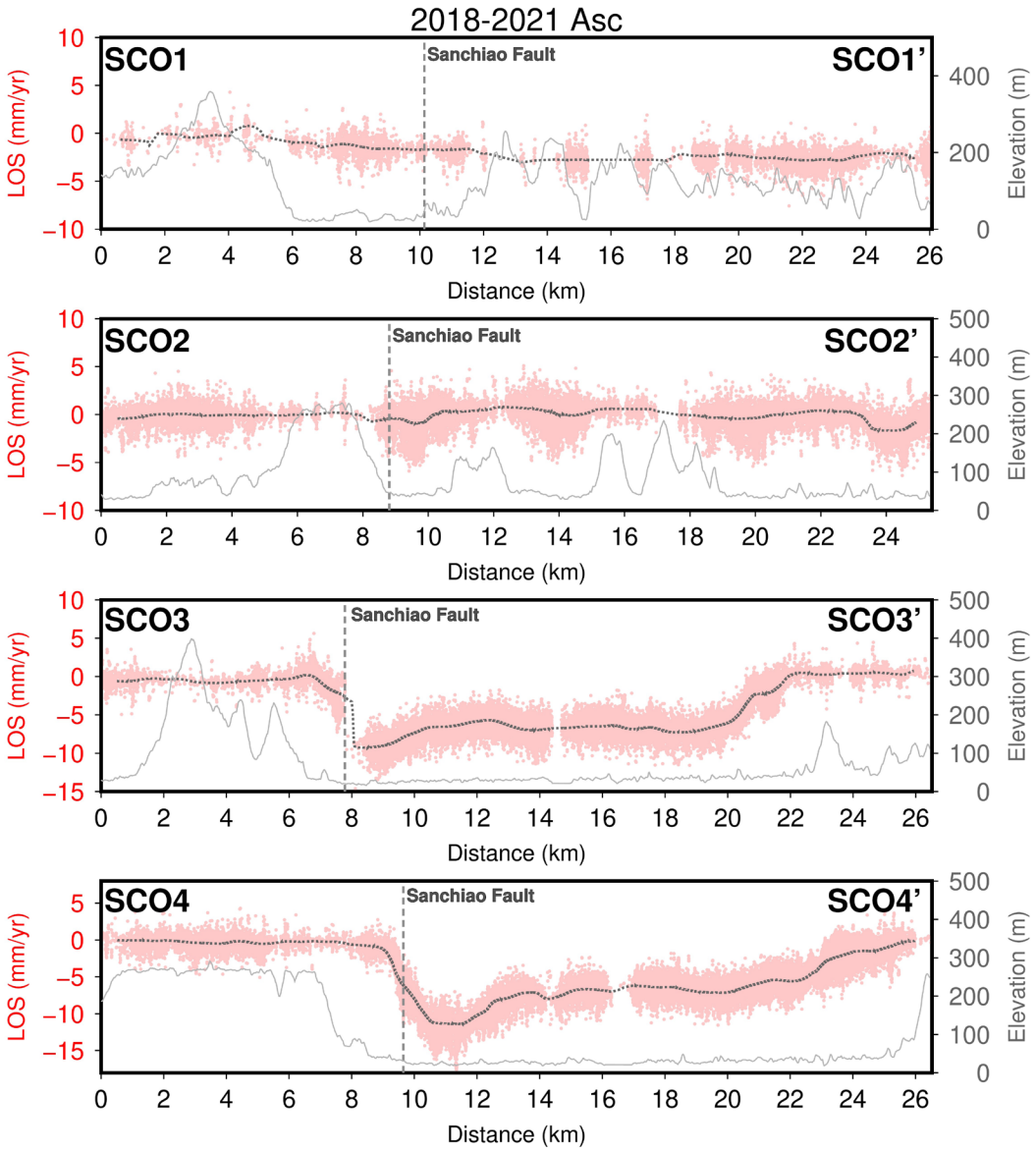


圖3-18：2018-2021山腳斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-18：Result of profiles across the Sanchiao Fault between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

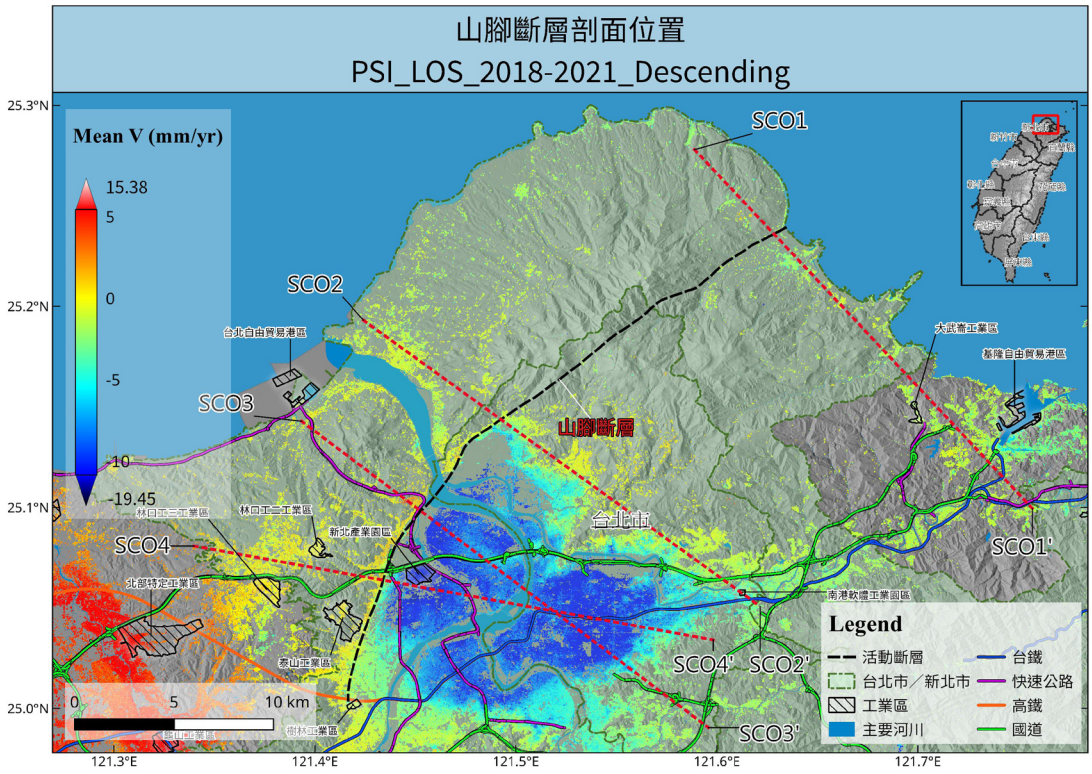


圖3-19：2018-2021山腳斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-19：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Sanchiao Fault.

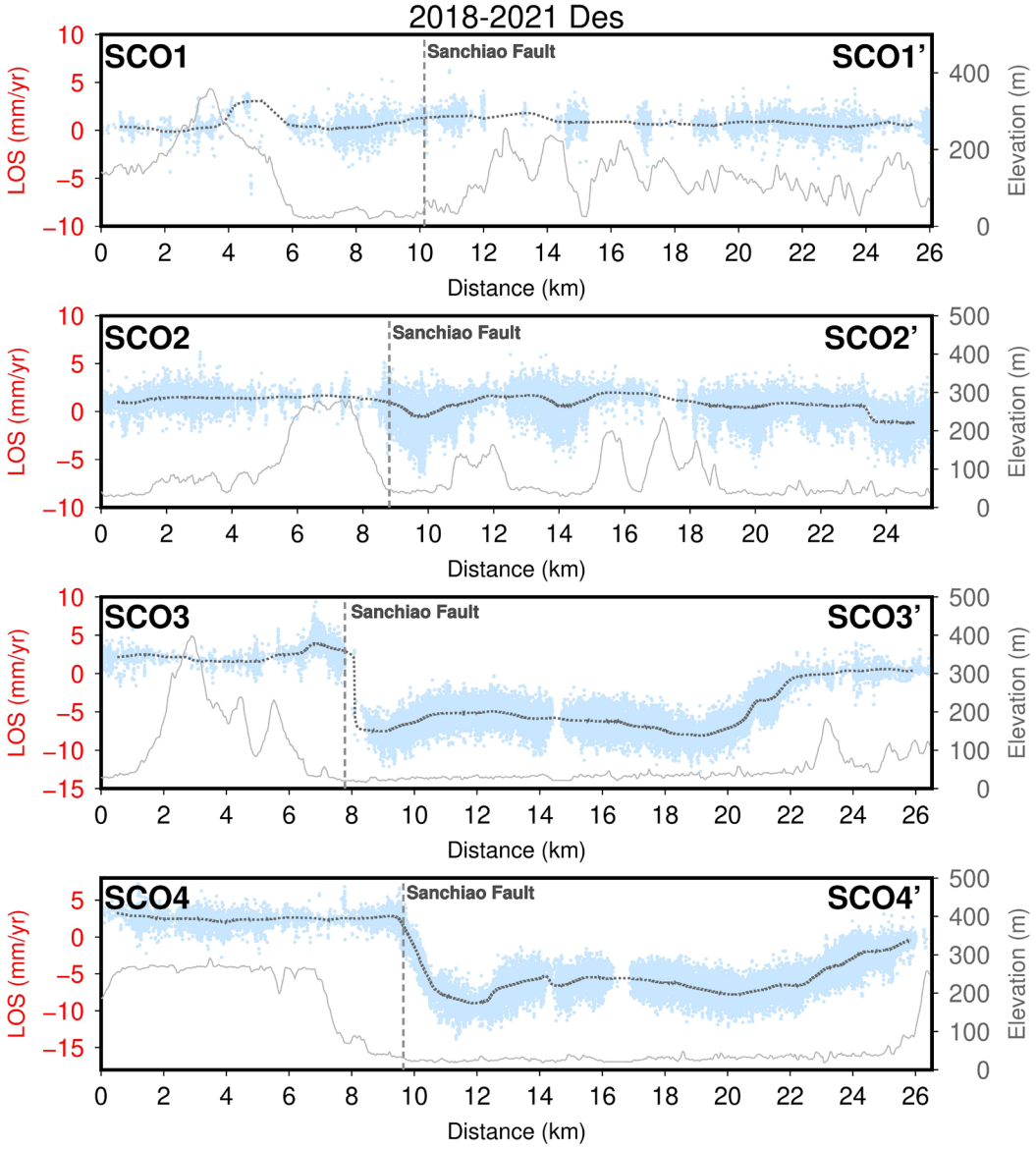


圖3-20：2018-2021山腳斷層降軌道影像的與剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-20：Result of profiles across the Sanchiao Fault between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

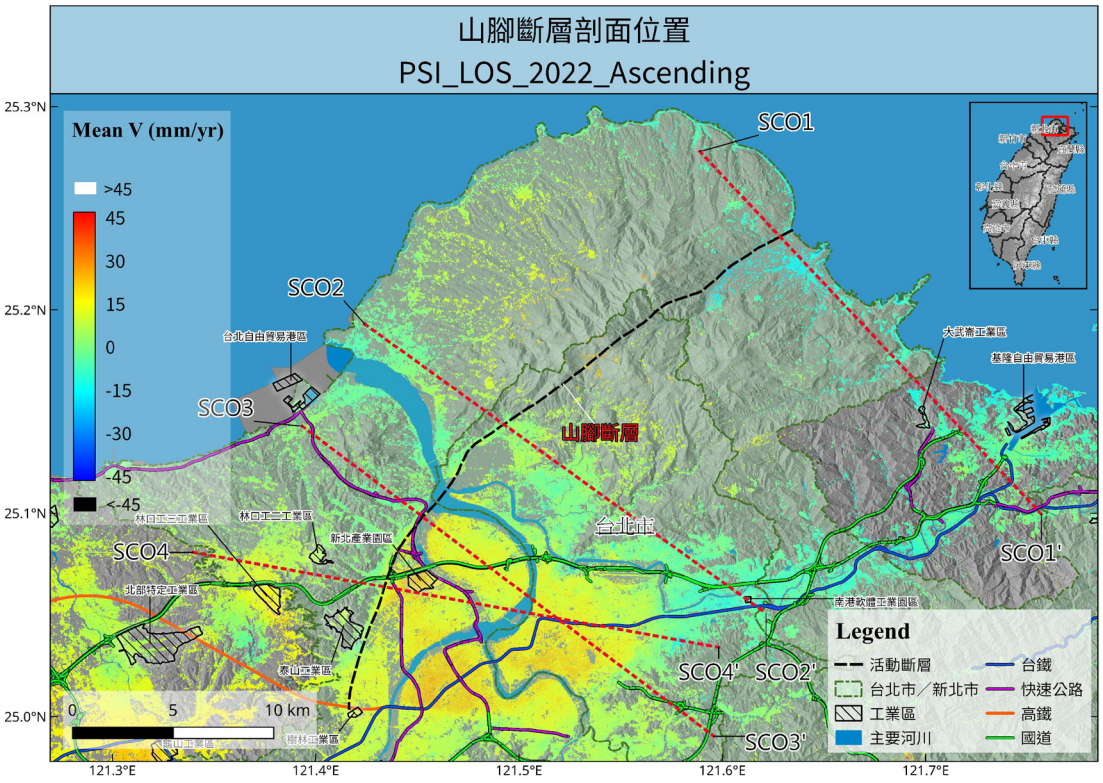


圖3-21：2022山腳斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-21：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of ascending orbits and profiles across the Sanchiao Fault.

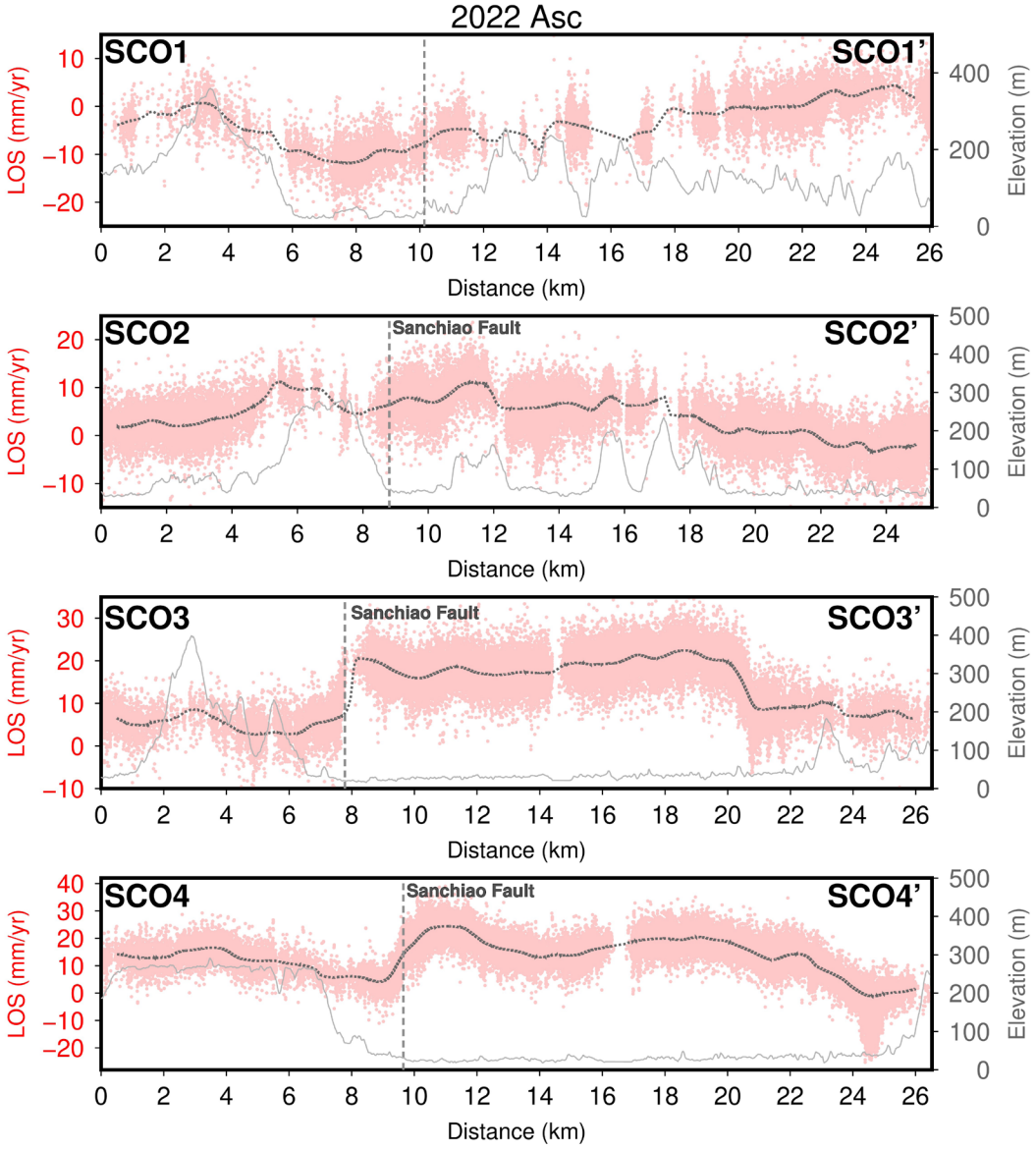


圖3-22：2022山腳斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。本期速度場在解算時收斂較差，與前兩期的速度比較此期的速度場散佈較大並且速度遠超過前兩期的數值。

Figure 3-22：Result of profiles across the Sanchiao Fault between 2022 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain. The velocity field of this period has poor convergence for the solution. Compared with the velocities of the previous two periods, the velocity field of this period is widely spread and the velocity is much higher than the values of the previous two periods.

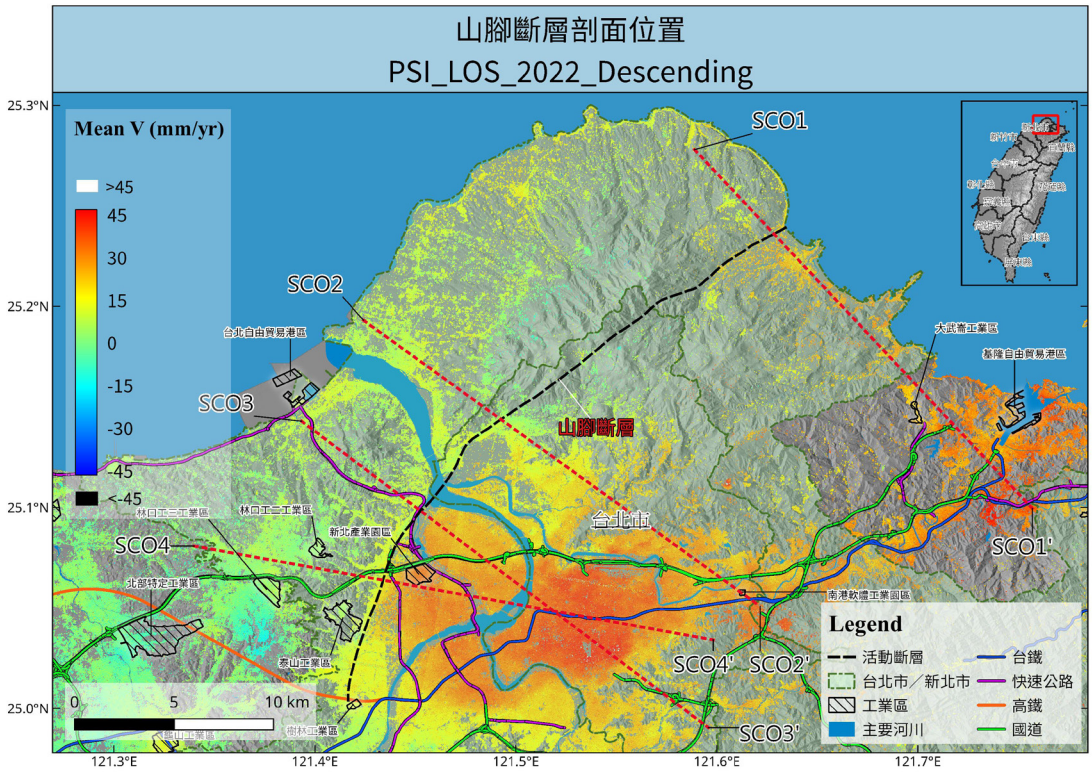


圖3-23：2022山腳斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-23：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of descending orbits and profiles across the Sanchiao Fault.

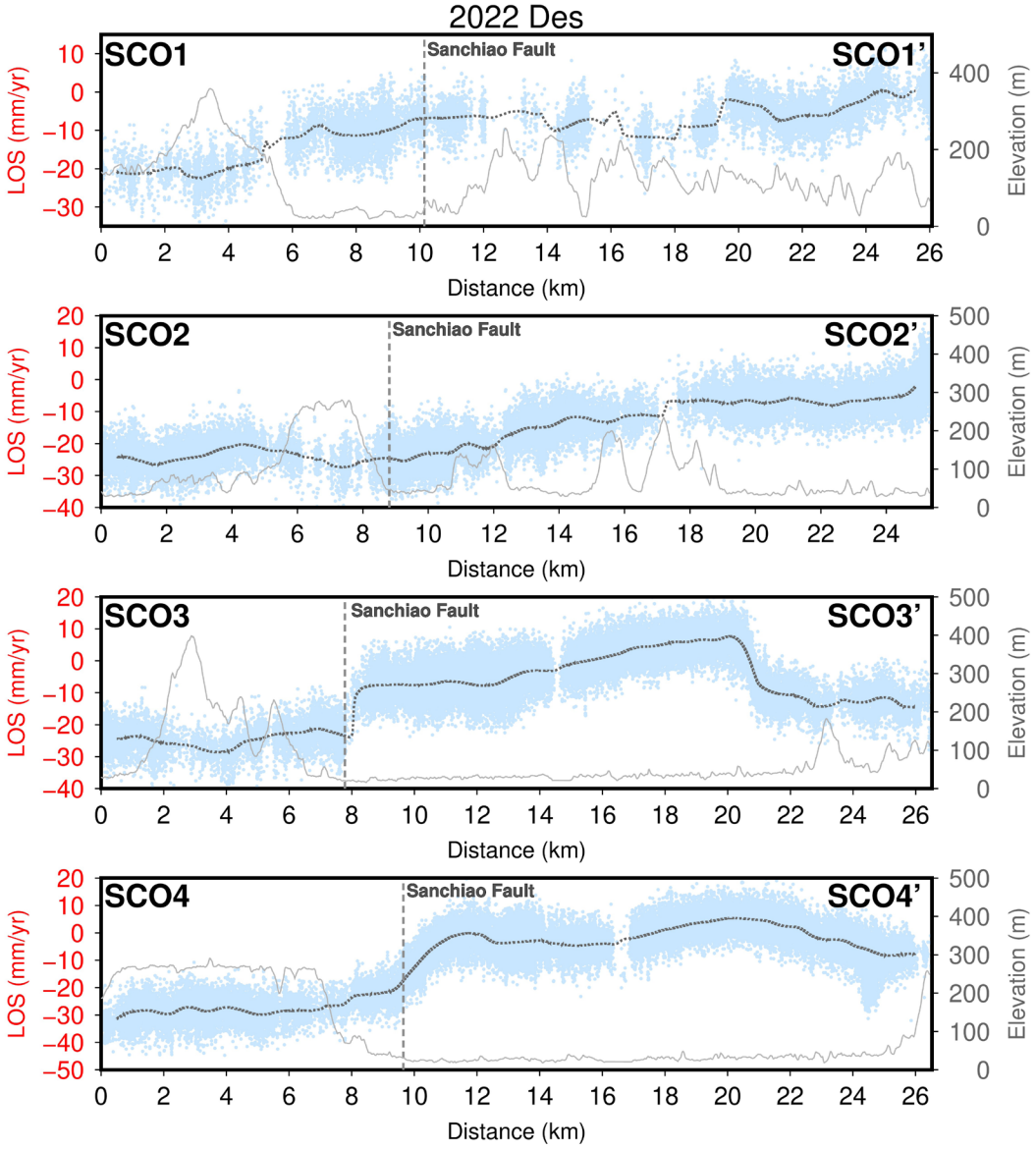


圖3-24：2022山腳斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。本期速度場在解算時收斂較差，與前兩期的速度比較此期的速度場散佈較大並且速度遠超過前兩期的數值。

Figure 3-24：Result of profiles across the Sanchiao Fault between 2022 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain. The velocity field of this period has poor convergence for the solution. Compared with the velocities of the previous two periods, the velocity field of this period is widely spread and the velocity is much higher than the values of the previous two periods.

3-6-2 湖口斷層（HKO）

湖口斷層取二條北 - 南向的剖面。LOS速度場顯三時期二條剖面於湖口斷層附近無明顯差異，但HKO1剖面在中壢工業區有一LOS速度高區。剖面圖顯示兩條剖面在近斷層處皆無明顯落差，但在桃園台地附近有速度變化，HKO1在3-6公里於2014-2018年間約有3-5mm/yr的LOS速度變化（圖3-25~圖3-28），在2018-2021年間約有3mm/yr的LOS速度變化（圖3-29~圖3-32），2022年間約有5-8mm/yr的LOS速度變化，但範圍較前兩時期小，約落在4公里處（圖3-33~圖3-36）。HKO2於2014-2018時期在九公里處有一LOS速度高區，其餘兩時期則無（圖3-26、圖3-28）。

鄰近湖口斷層區域有三條地質剖面（圖3-37），這裡呈現剖面1與剖面2，其餘剖面於附錄呈現。

地質剖面1顯示沒有通過湖口斷層，經過雙連坡向斜與八德背斜，各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。在此剖面中雙連坡向斜與八德背斜在第一期有顯著的速度變化，然而在後面兩期的資料中則較不顯著（圖3-38）。

地質剖面2在地圖上標記通過湖口斷層（圖3-37），但地質剖面圖中未標記湖口斷層位置，除了湖口楊梅背斜還通過新莊斷層，各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。在此剖面中湖口楊梅背斜與新莊斷層為主要地質構造，湖口楊梅背斜在第一期有可觀察之速度變化，然而在後面兩期的資料中則較不顯著（圖3-39）。

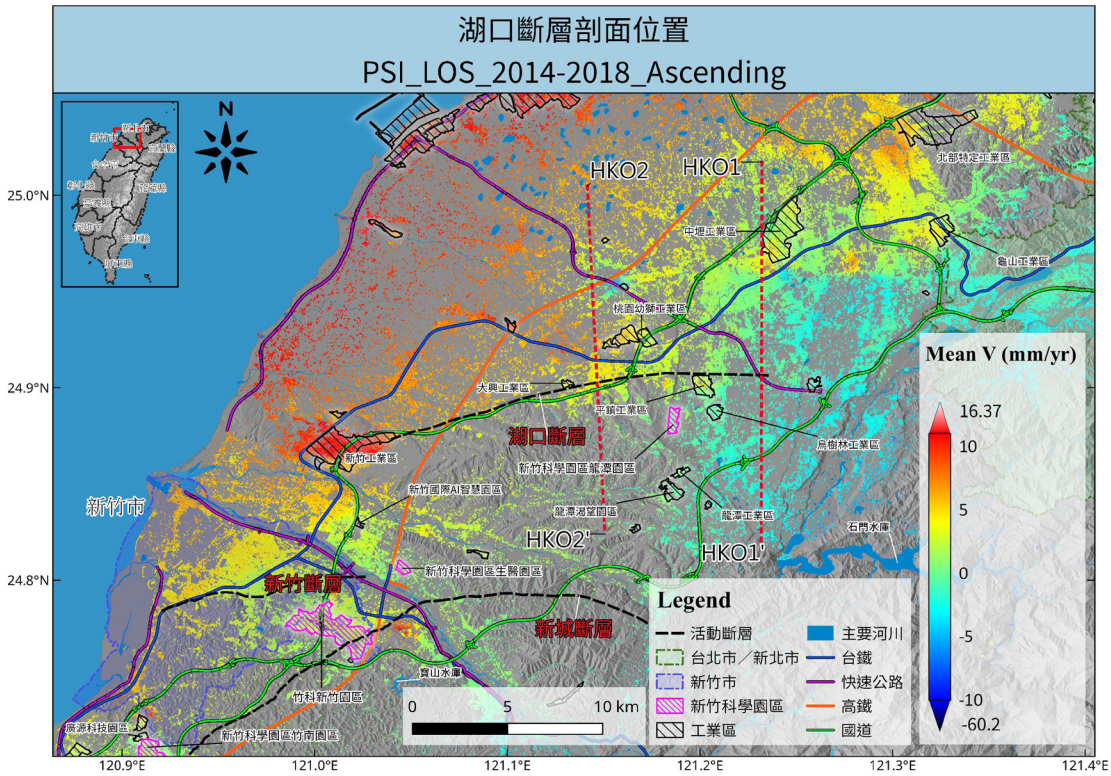


圖3-25：2014-2018湖口斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-21：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the Hukou Fault.

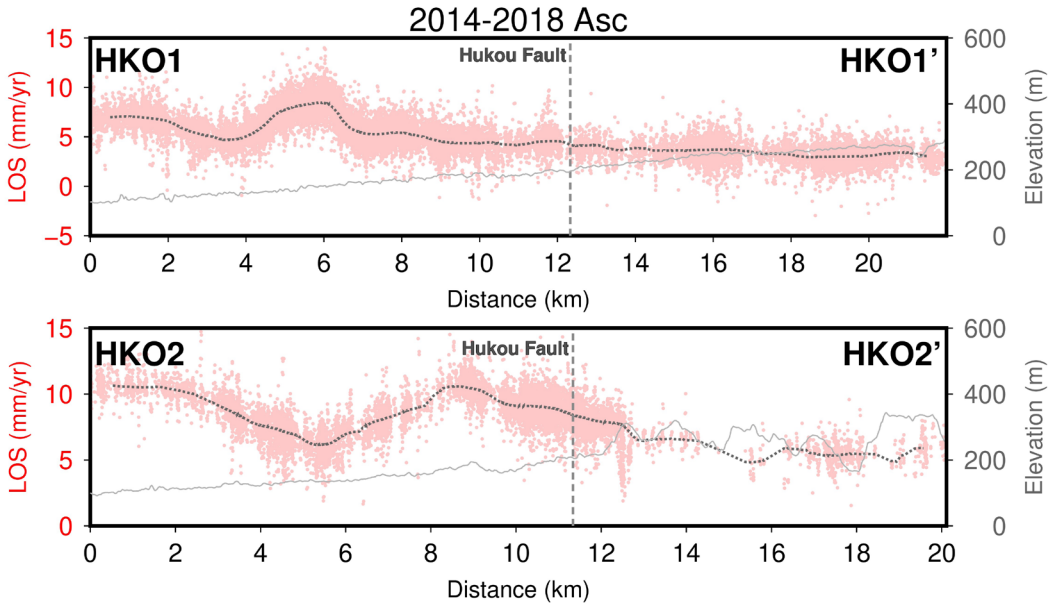


圖3-26：2014-2018湖口斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-26：Result of profiles across the Hukou Fault between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

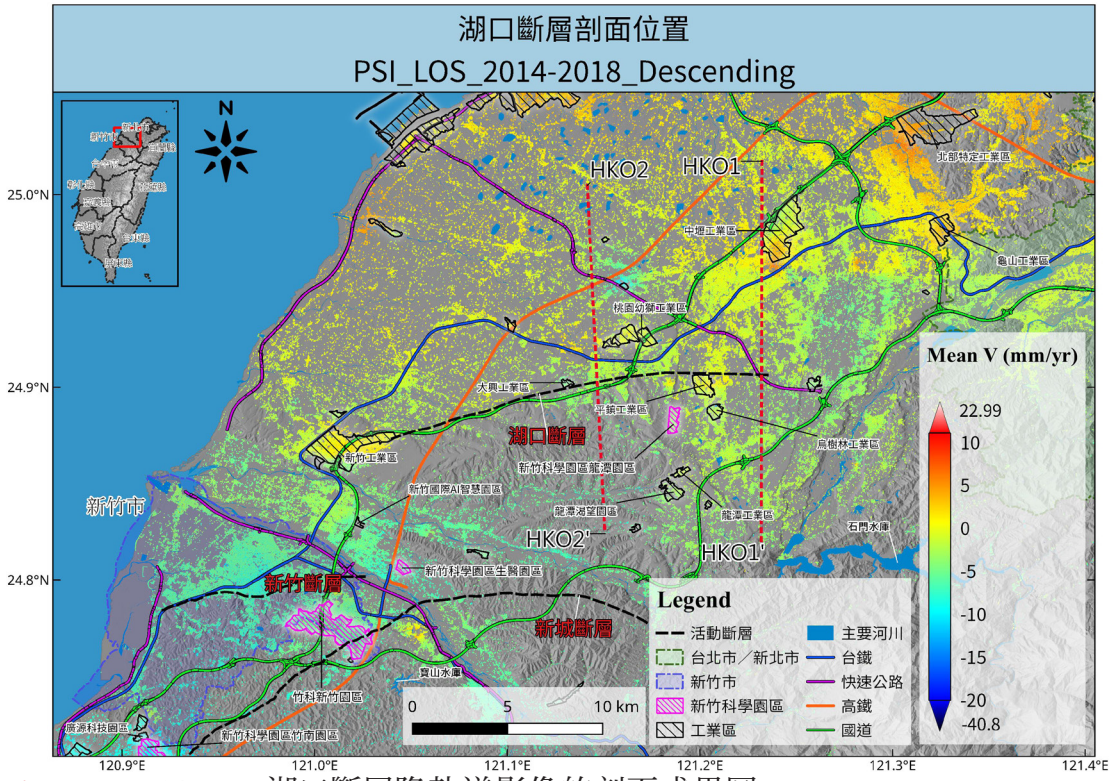


圖3-27：2014-2018湖口斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-23：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the Hukou Fault.

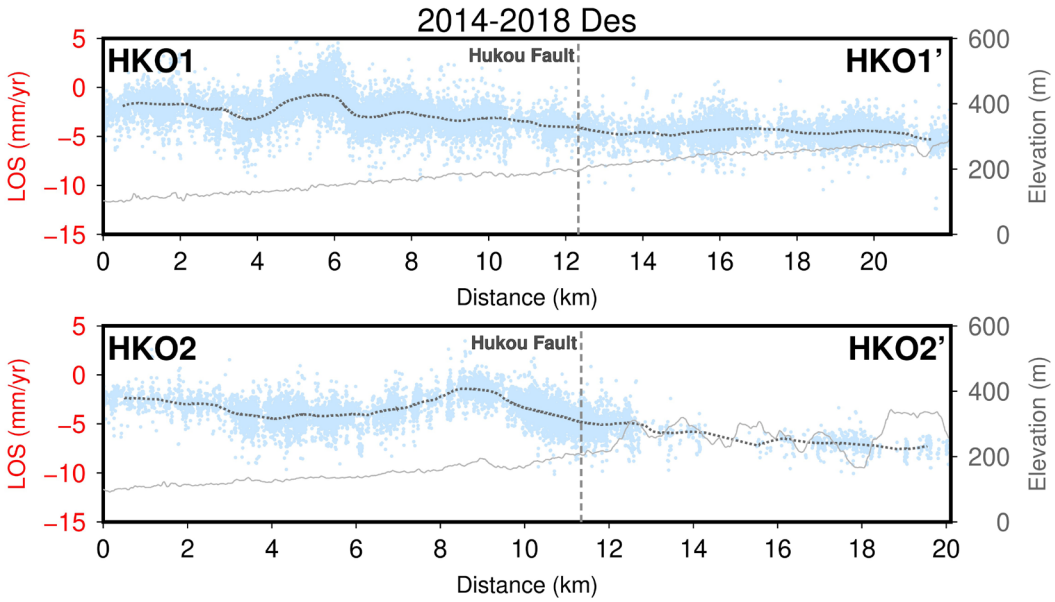


圖3-28：2014-2018湖口斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-28：Result of profiles across the Hukou Fault between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

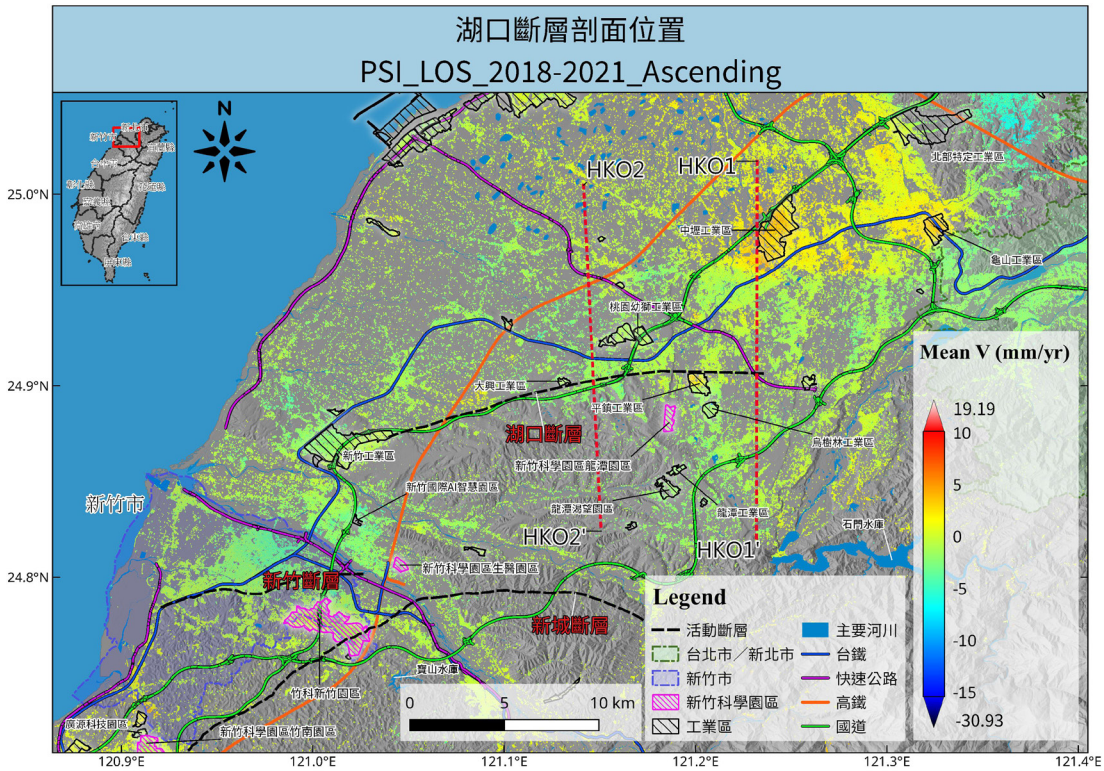


圖3-29：2018-2021湖口斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-29：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Hukou Fault.

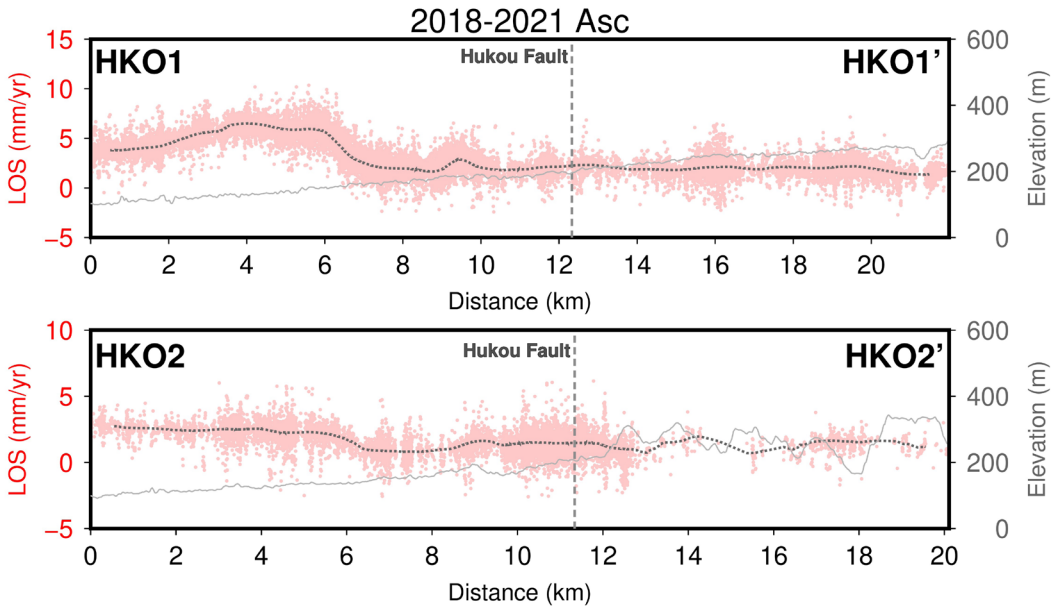


圖3-30：2018-2021湖口斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-30：Result of profiles across the Hukou Fault between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

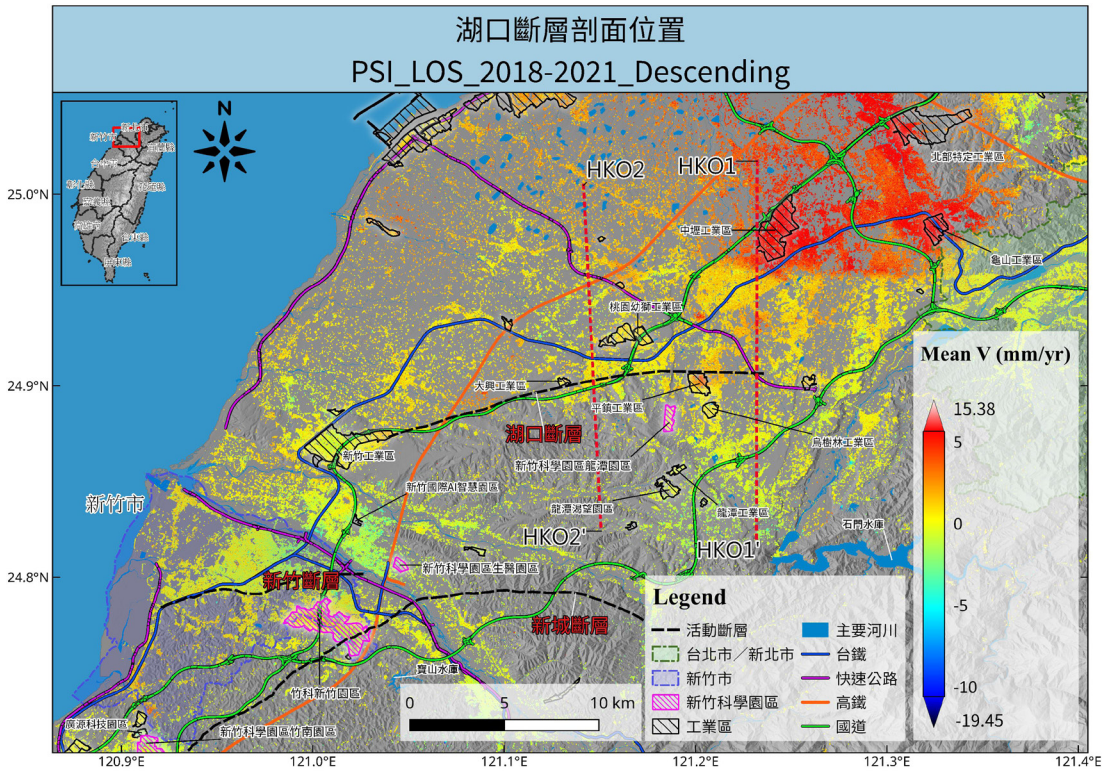


圖3-31：2018-2021湖口斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-31：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Hukou Fault.

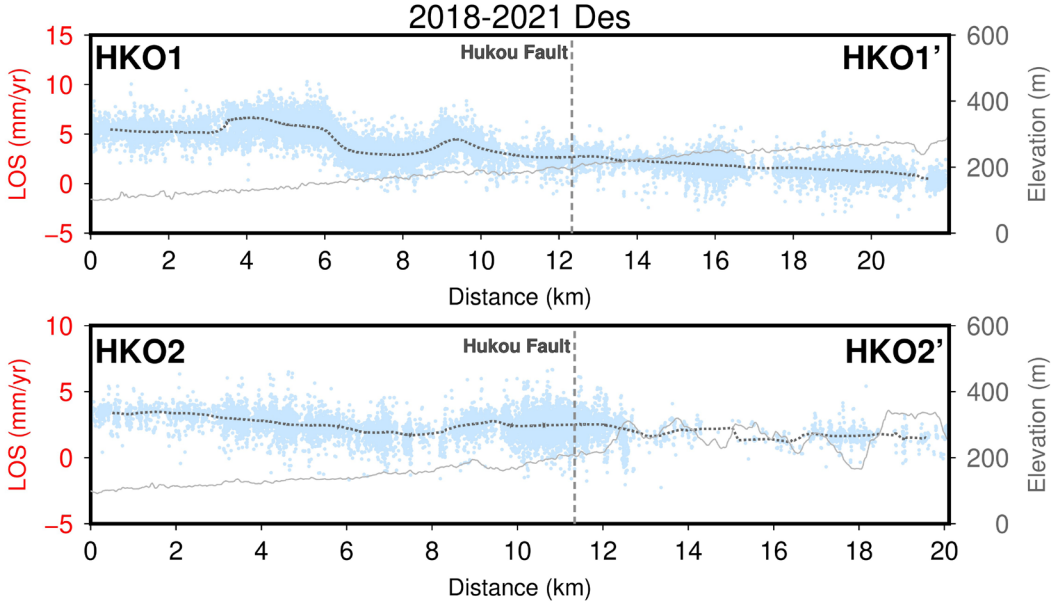


圖3-32：2018-2021湖口斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-32：Result of profiles across the Hukou Fault between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

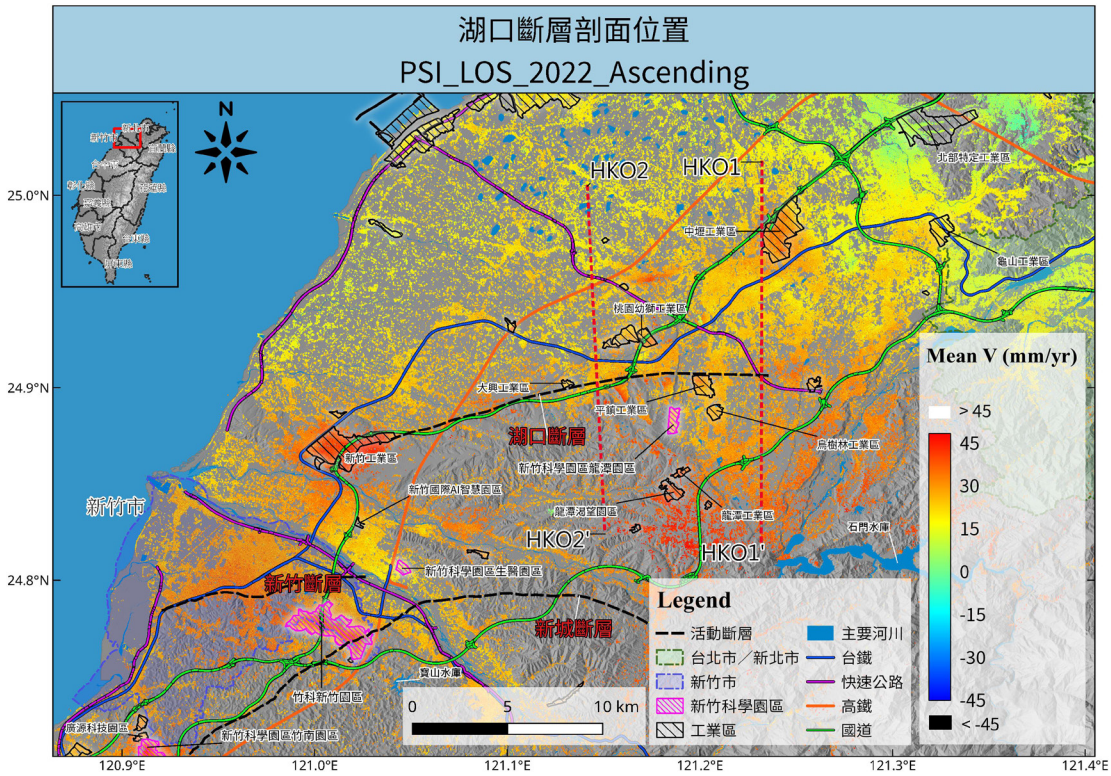


圖3-33：2022湖口斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-33：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of ascending orbits and profiles across the Hukou Fault.

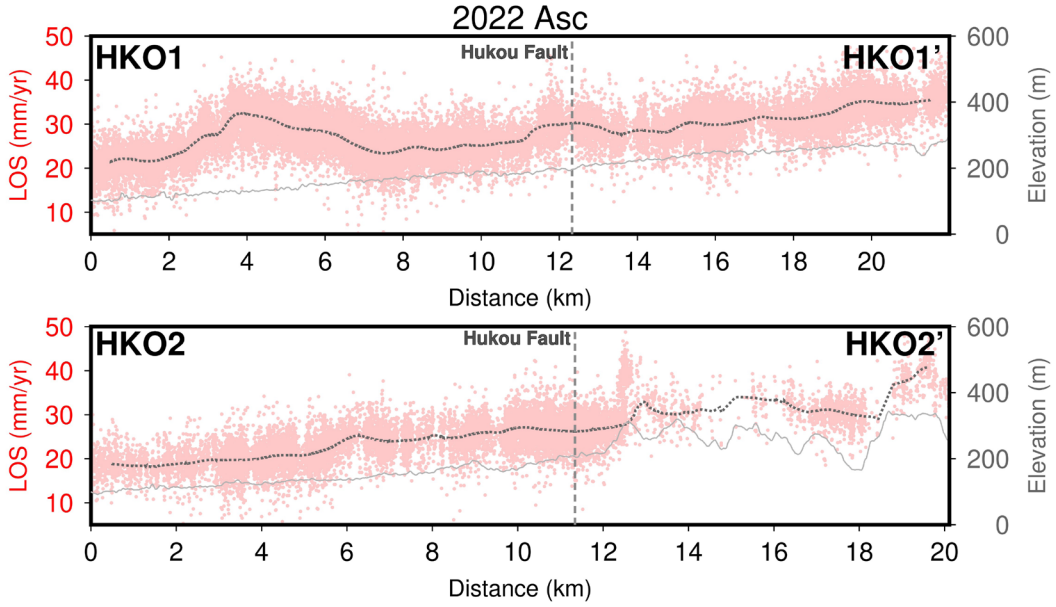


圖3-34：2022湖口斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-34：Result of profiles across the Hukou Fault between 2022 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

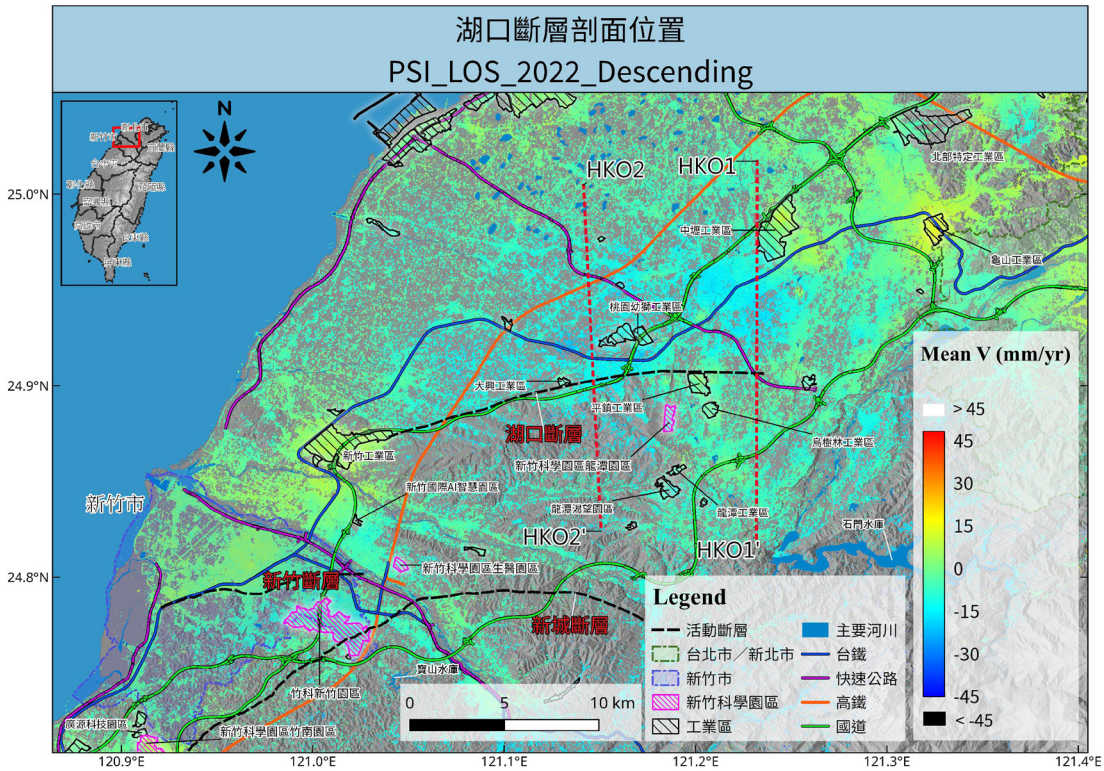


圖3-35：2022湖口斷層降軌道影像的剖面成果圖。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-35：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of descending orbits and profiles across the Hukou Fault.

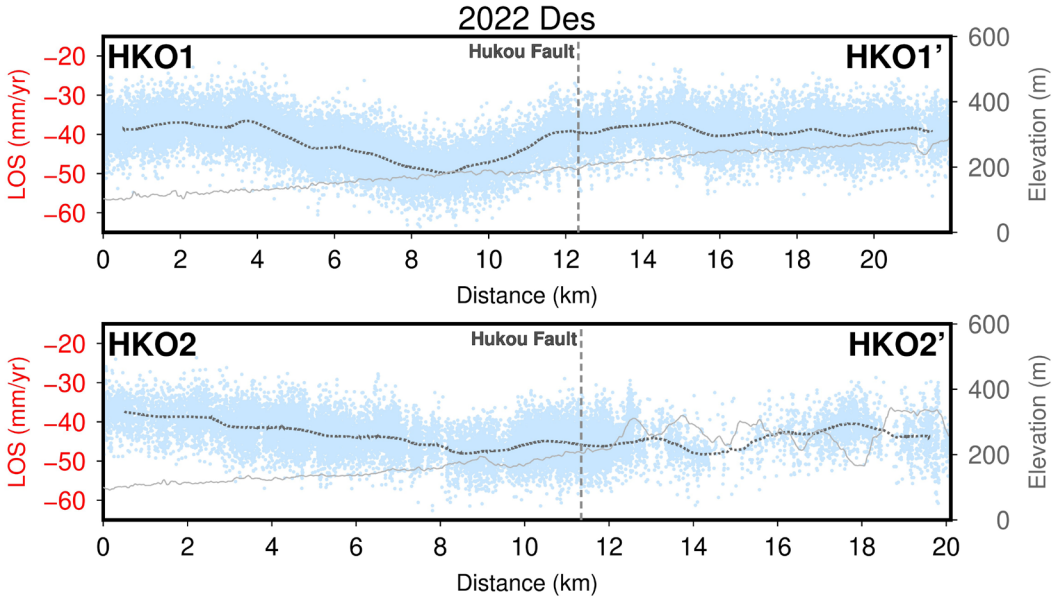


圖3-36：2022湖口斷層降軌道影像的剖面圖成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-36：Result of profiles across the Hukou Fault between 2022 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

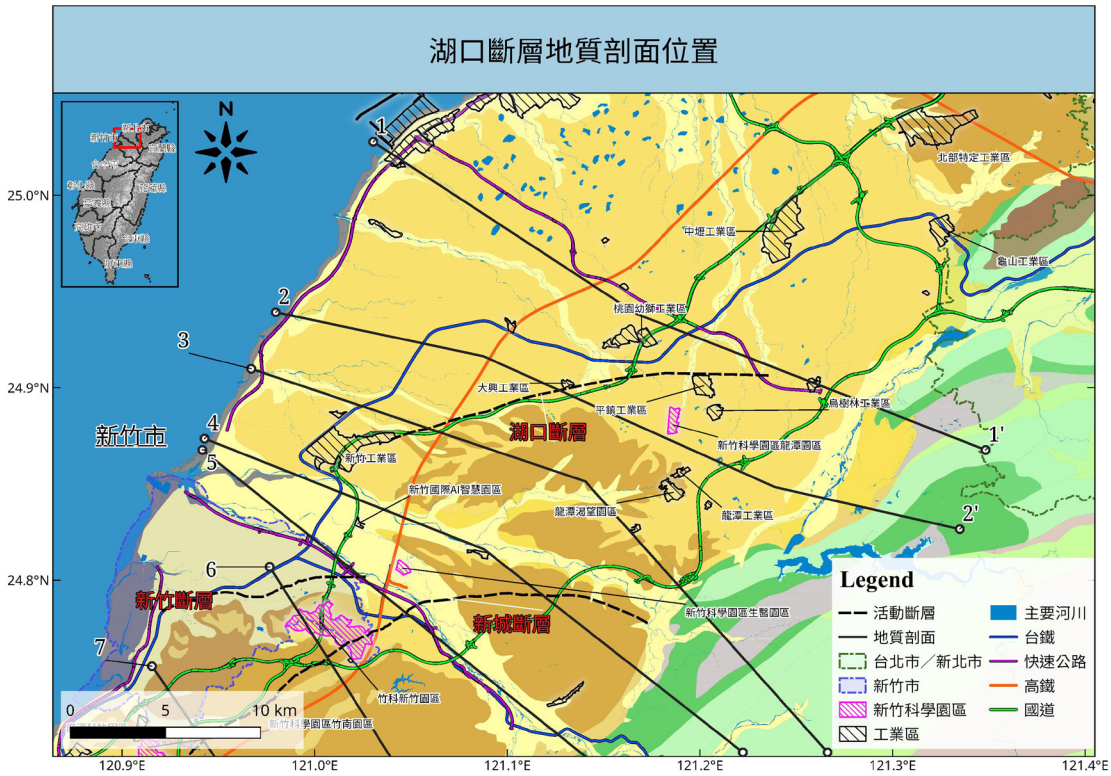


圖3-37：湖口斷層地質剖面分佈圖。紅色虛線為活動斷層，黑色實線為地質剖面。（黃旭燦等，2004）。

Figure 3-37：The profiles of geological structures near the Hukou Fault. Dotted red lines are active faults and black lines are the profiles (Huang et al., 2004).

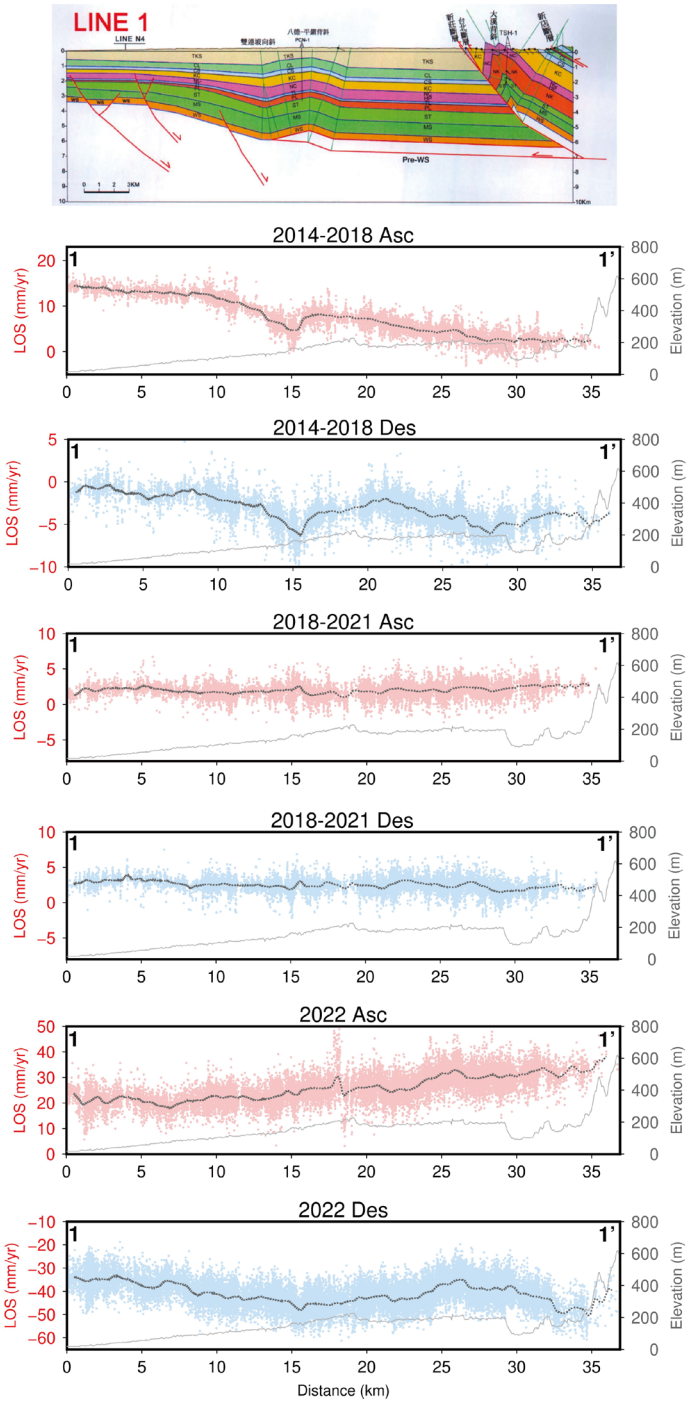


圖3-38：地質剖面1與該沿線三期升降軌速度場之比較。 各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。 在此剖面中雙連坡向斜與八德背斜在第一期有顯著的速度變化，然而在後面兩期的資料中則較不顯著。

Figure 3-38：Average LOS velocity fields in three periods processed with images of ascending and descending orbits along the geological profile 1. Among the data in each period, 2018-2021 is the most convergent, followed by 2014-2018. However, the time span is shorter, and the number of images is fewer in 2022, so it can only show trends. In this profile, the Shuanglianpo syncline and the Bade anticline had significant difference of velocity in the first period but were not obvious in the next two periods.

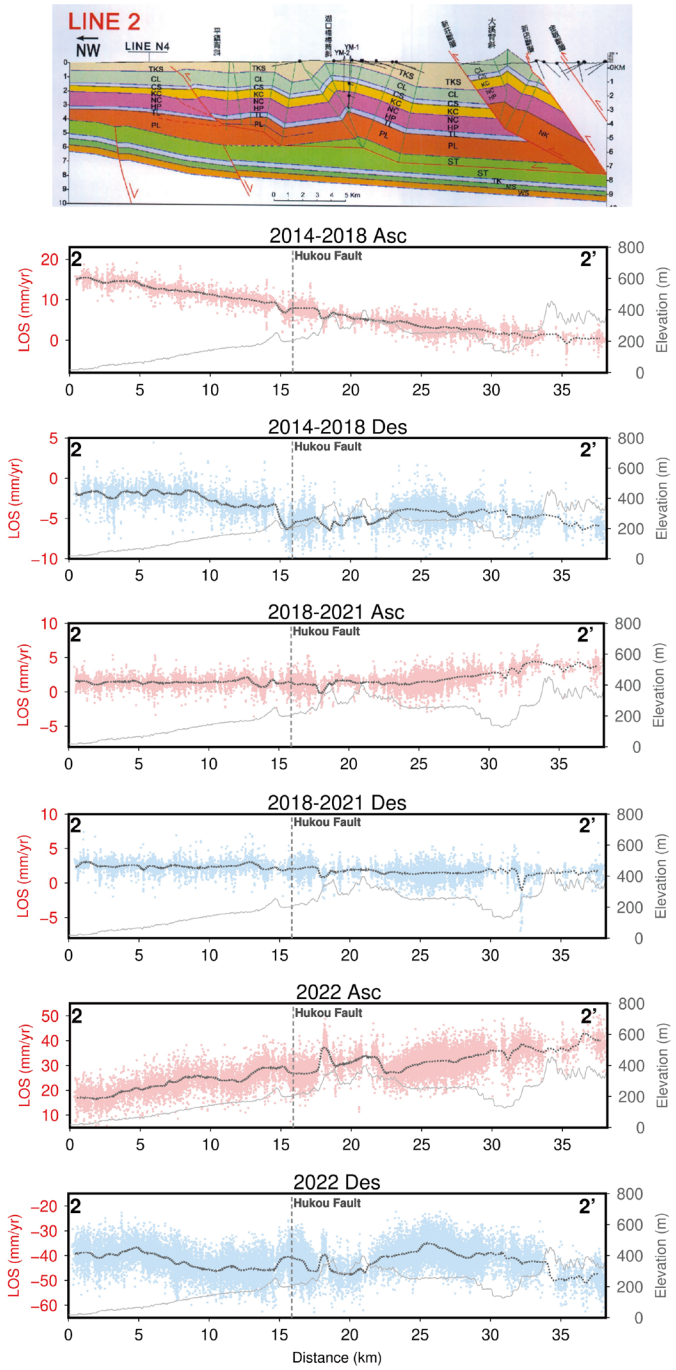


圖3-39：地質剖面2與該沿線三期升降軌速度場之比較。 各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。在此剖面中湖口楊梅背斜與新莊斷層為主要地質構造，湖口楊梅背斜在第一期有可觀察之速度變化，然而在後面兩期的資料中則較不顯著。

Figure 3-39：Average LOS velocity fields in three periods processed with images of ascending and descending orbits along the geological profile 2. Among the data in each period, 2018-2021 is the most convergent, followed by 2014-2018. However, the time span is shorter, and the number of images is fewer in 2022, so it can only show trends. The Hukou Yangmei anticline and the Xinzhuang fault are the main geological structures. The Hukou Yangmei anticline has observable difference of velocity in the first period, but not obvious in the next two periods.

3-6-3 新城斷層（HCG）

新城斷層總共有三條西北 - 東南向垂直斷層的剖面，HCG1通過新城斷層，HCG2通過新竹斷層、新竹科學園區及新城斷層，HCG3通過新竹科學園區竹南園區與新城斷層。LOS速度場顯示三條剖面在近斷層處皆無明顯的LOS速度變化，HCG1剖面於2014-2018時期在近斷層處約有3~4mm/yr的LOS速度落差，其餘時期則無明顯差異（圖3-40~圖3-43）。HCG2剖面於斷層附近無明顯速度落差，但三時期在新竹斷層與新城斷層之間的LOS速度有變化（圖3-41、圖3-43、圖3-45、圖3-47、圖3-49及圖3-51）。HCG3剖面的LOS速度在新城斷層兩側無明顯變化，2022年期間於3~5公里處有明顯的LOS速度變化（圖3-48~3-51）。

研究區域中有四條地質剖面通過新城斷層（圖3-52），本章節呈現地質剖面5與地質剖面6，其餘剖面於附錄呈現。

地質剖面5通過新竹斷層與新城斷層，各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。在此剖面中新城斷層在第一期有顯著的速度變化、在第二期也有些微速度場變化。在最後期的資料中則不顯著（圖3-53）。

地質剖面6於地圖中通過新竹斷層與新城斷層（圖3-52），但地質剖面圖中未標示新竹斷層，各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。在此剖面中新竹斷層與新城斷層的活動都不顯著（圖3-54）。

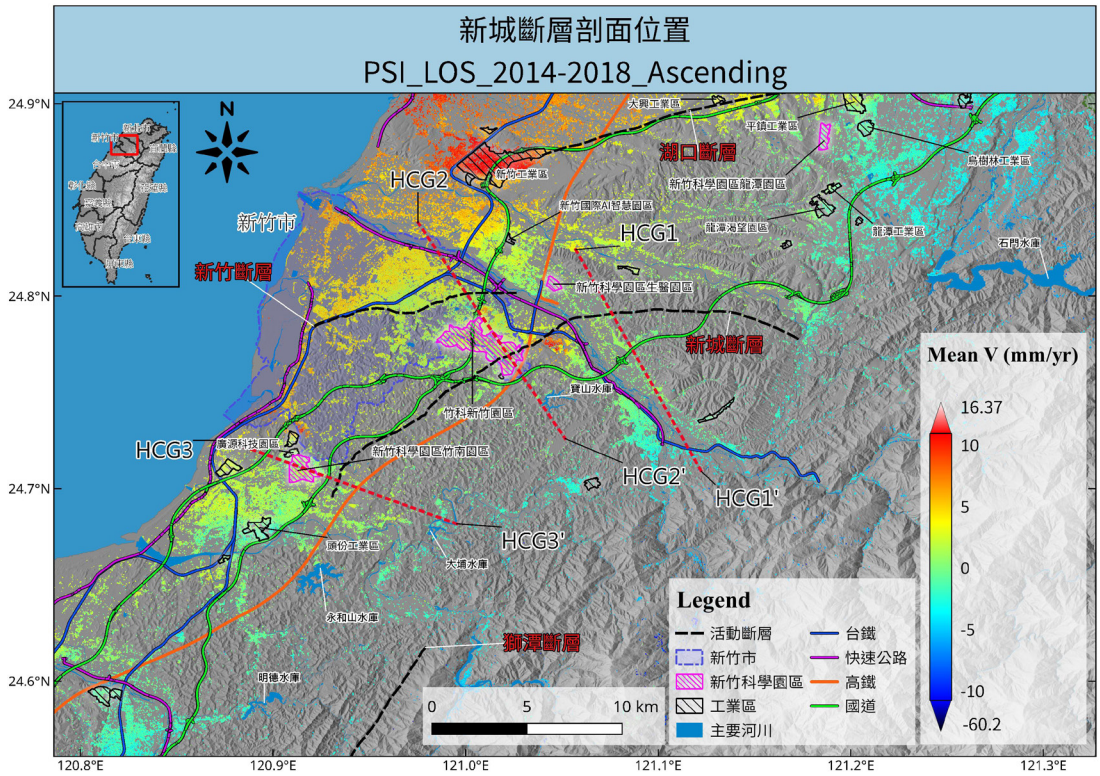


圖3-40：2014-2018新城斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-40：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the Hsincheng Fault.

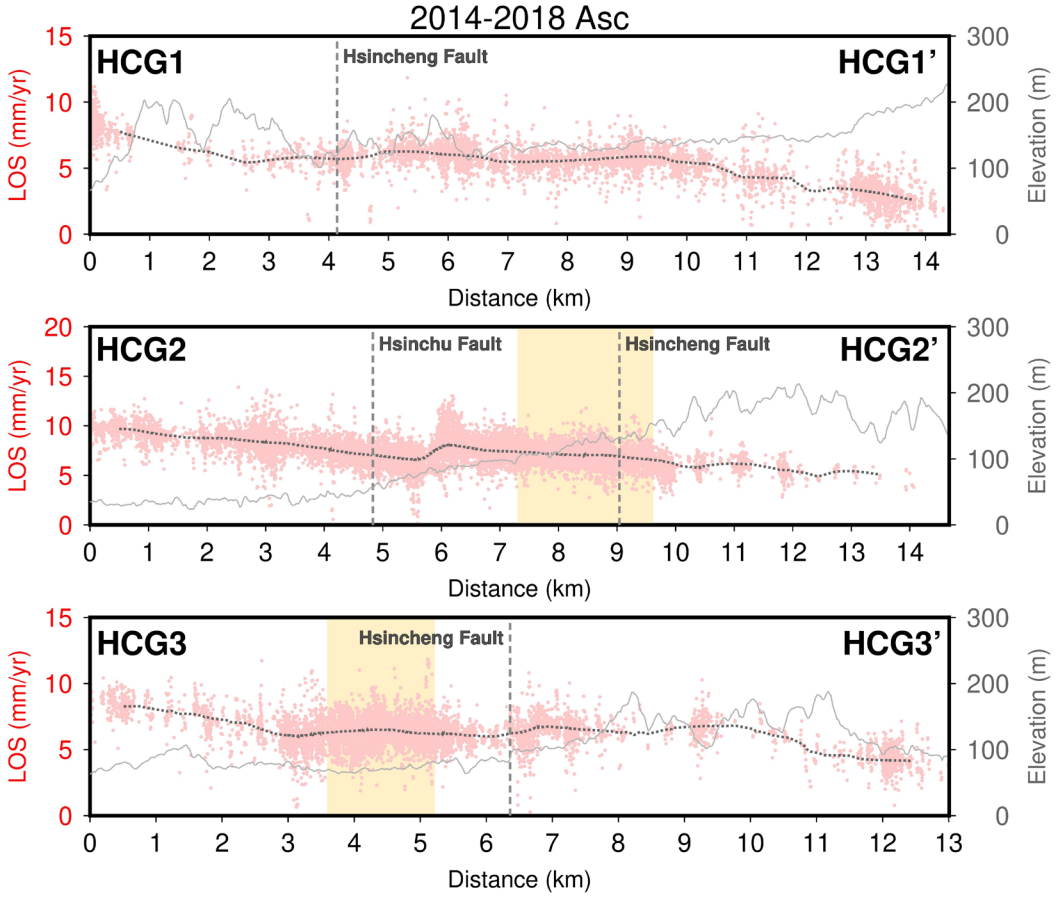


圖3-41：2014-2018新城斷層升軌道影像的剖面圖成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形，黃色區域為新竹科學園區。在HCG2 6公里處有一些值得持續注意的擾動。

Figure 3-41：Result of profiles across the Hsincheng Fault between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain, yellow area is Hsinchu Science and Industrial Parks.

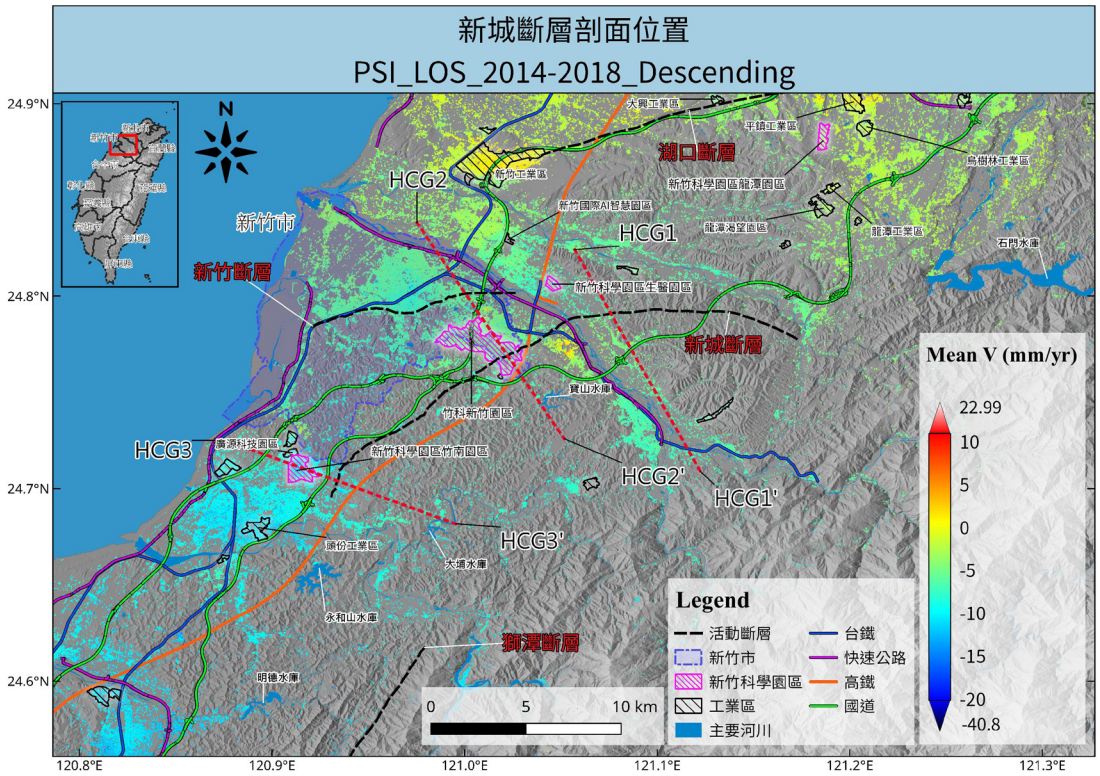


圖3-42：2014-2018新城斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-42：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the Hsincheng Fault.

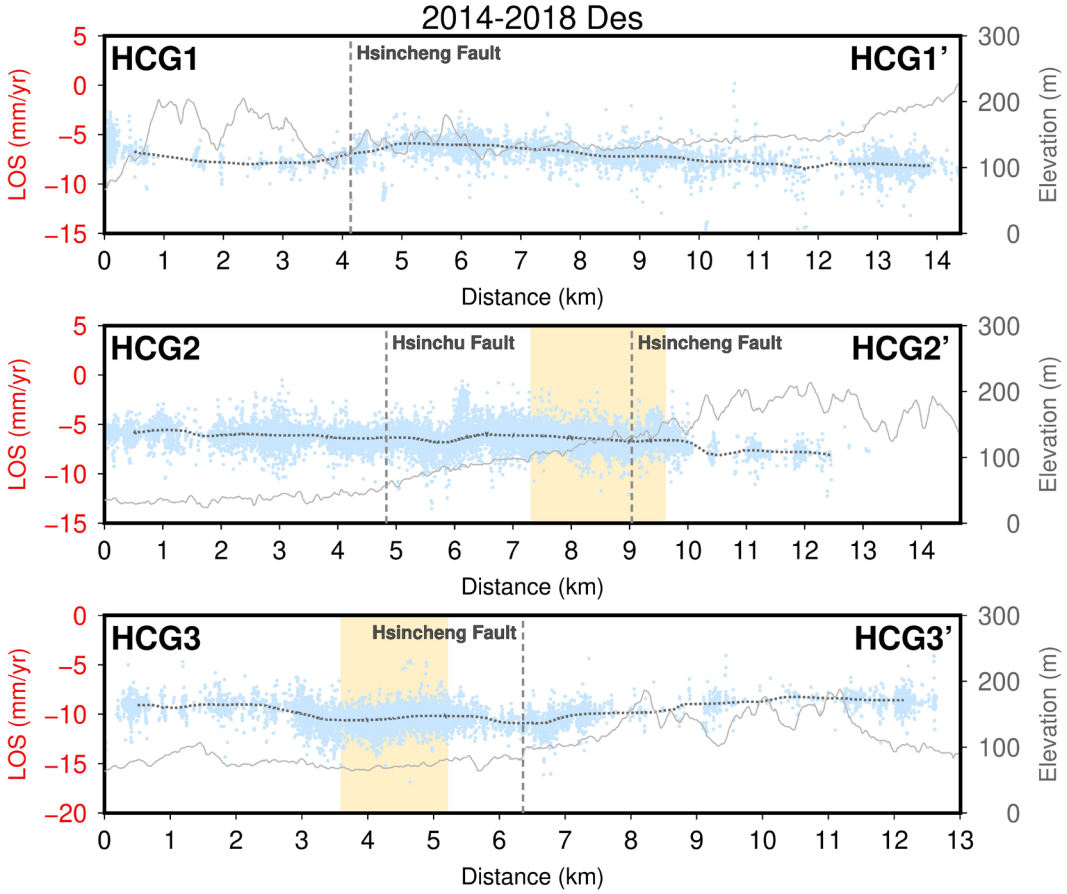


圖3-43：2014-2018新城斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形，黃色區域為新竹科學園區。

Figure 3-43：Result of profiles across the Hsincheng Fault between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain, yellow area is Hsinchu Science and Industrial Parks.

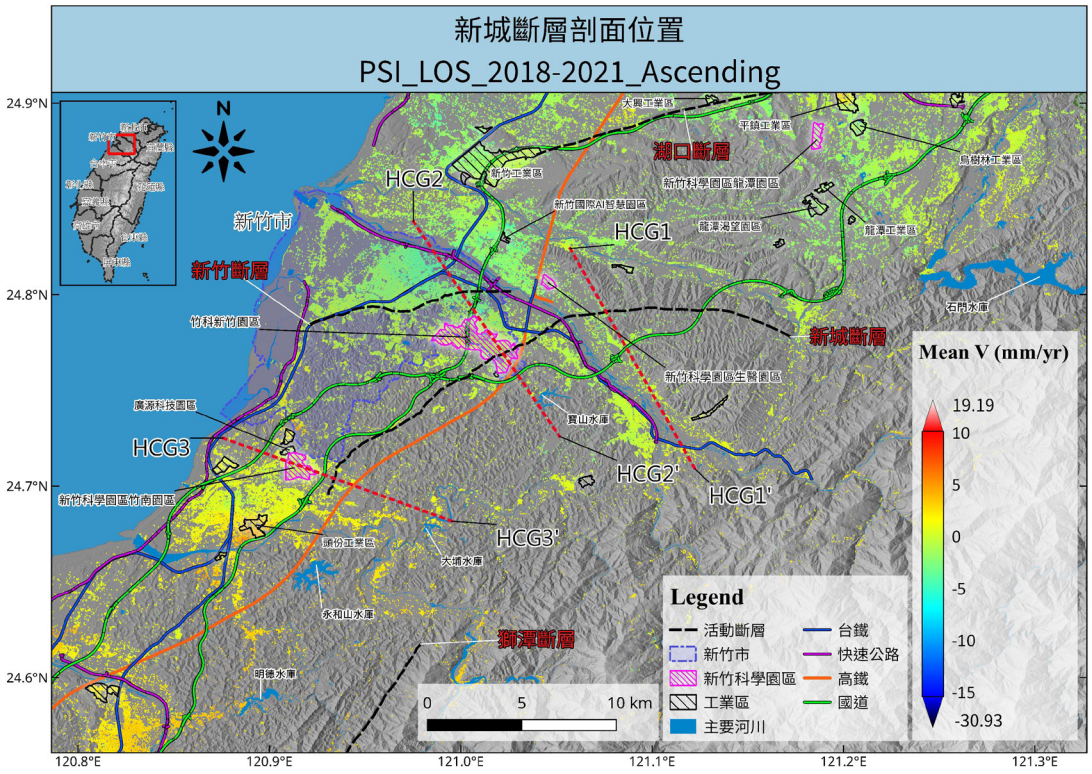


圖3-44：2018-2021新城斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-44：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Hsincheng Fault.

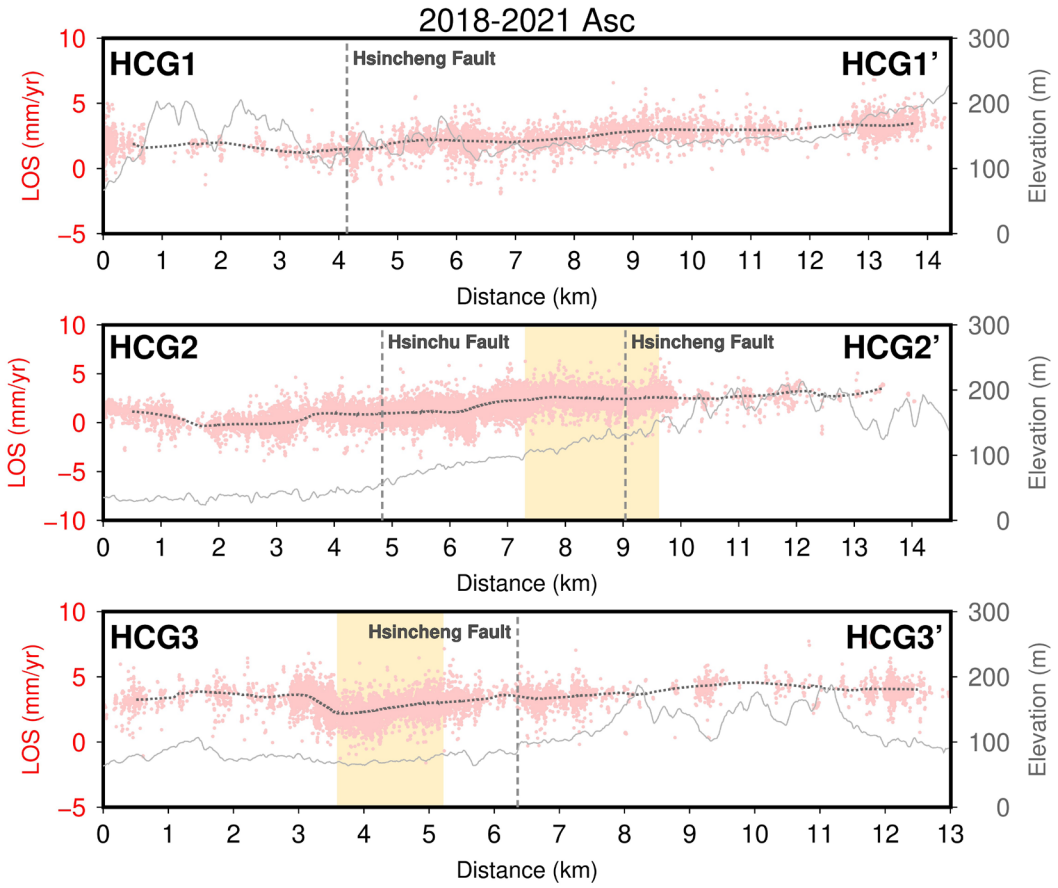


圖3-45：2018-2021新城斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形，黃色區域為新竹科學園區。在HCG2 6公里處，如同第一期，有一些值得持續注意的擾動，然而數字遠比第一期小。

Figure 3-45：Result of profiles across the Hsincheng Fault between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain, yellow area is Hsinchu Science and Industrial Parks.

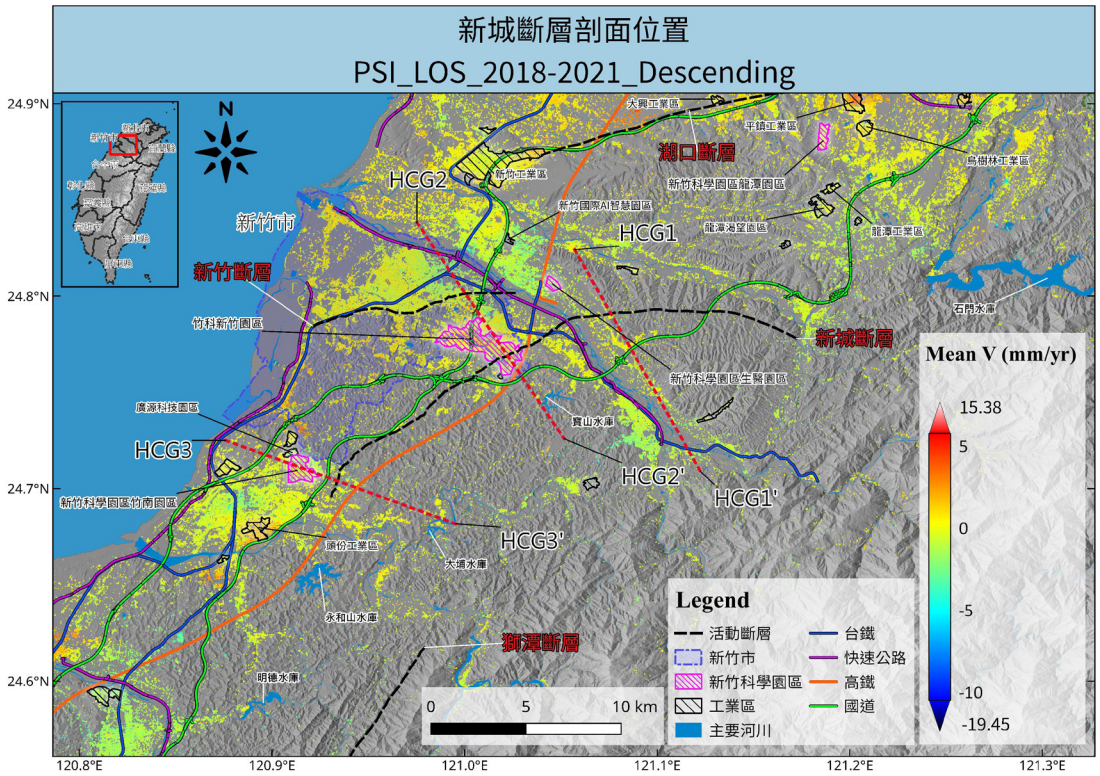


圖3-46：2018-2021新城斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-46：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Hsincheng Fault.

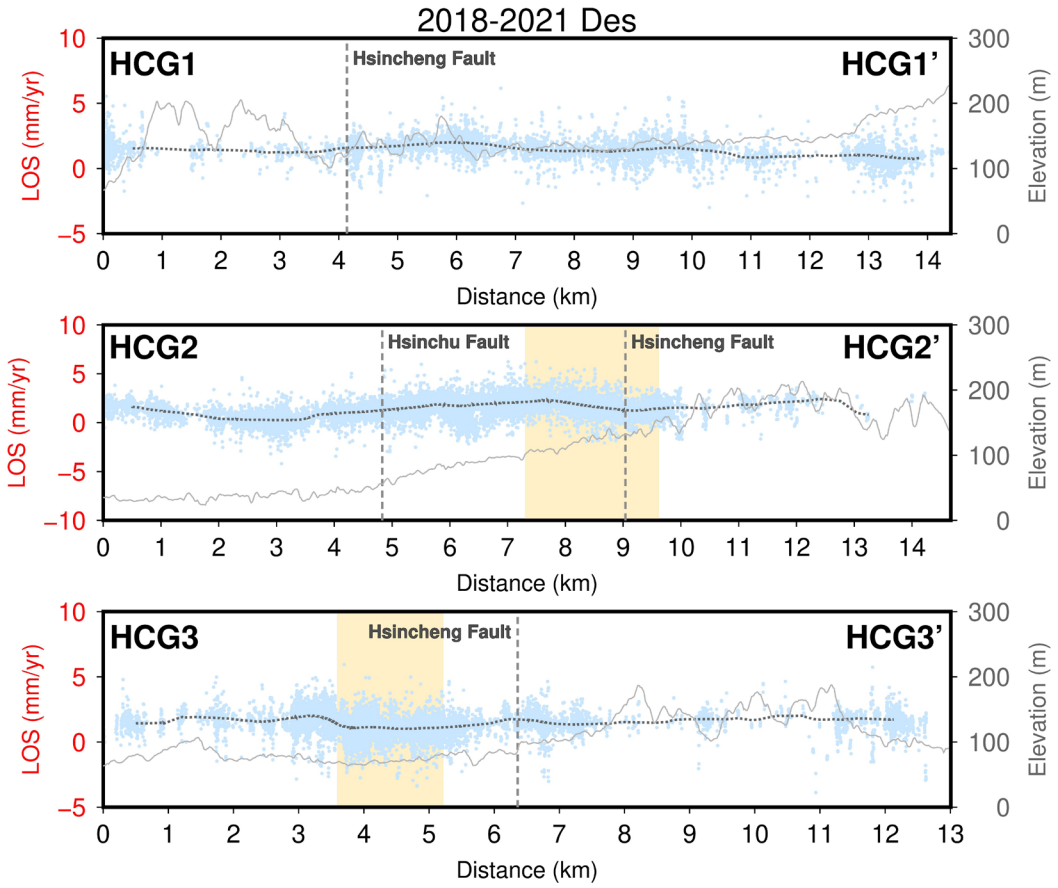


圖3-47：2018-2021新城斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形，黃色區域為新竹科學園區。

Figure 3-47：Result of profiles across the Hsincheng Fault between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain, yellow area is Hsinchu Science and Industrial Parks.

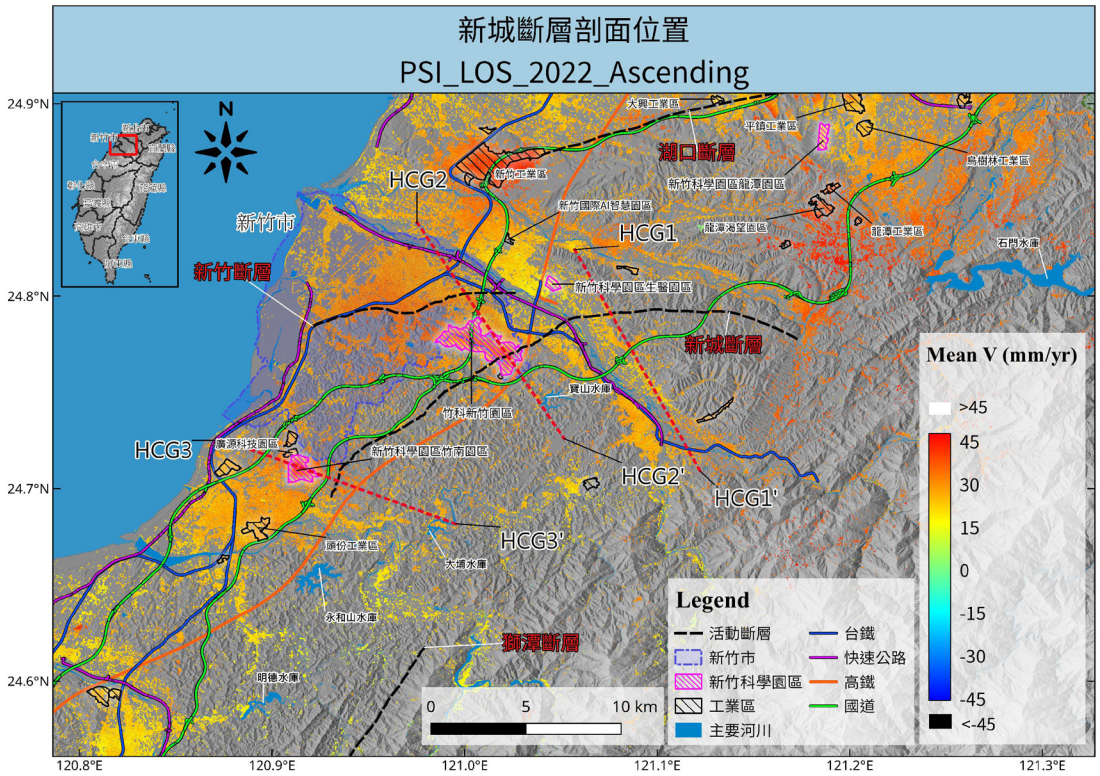


圖3-48：2022新城斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-48：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of ascending orbits and profiles across the Hsincheng Fault.

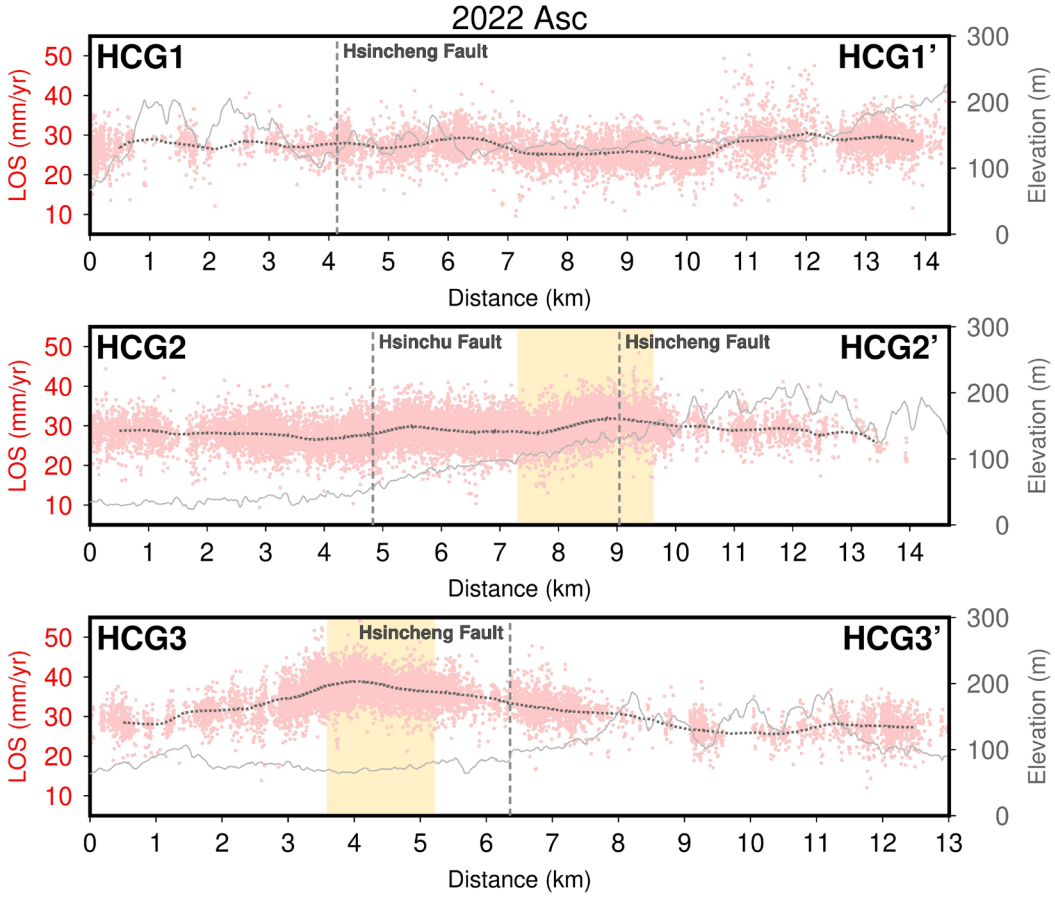


圖3-49：2022新城斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形，黃色區域為新竹科學園區。

Figure 3-49：Result of profiles across the Hsincheng Fault between 2022 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain, yellow area is Hsinchu Science and Industrial Parks.

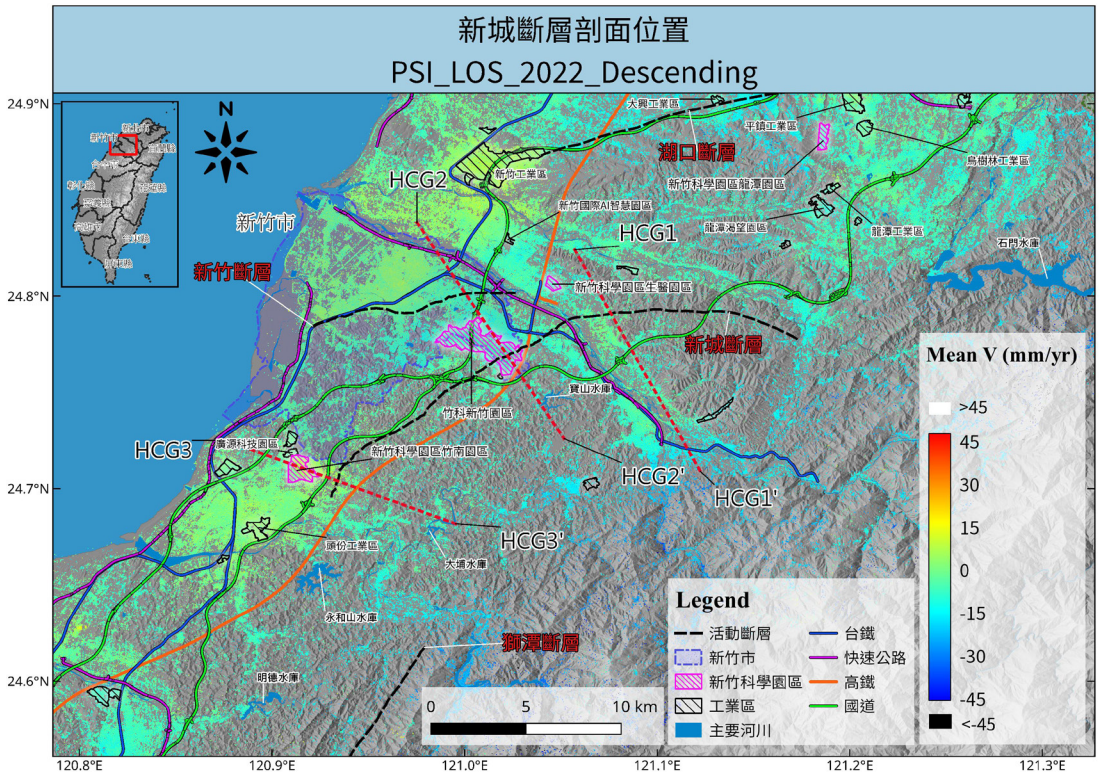


圖3-50：2022新城斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-50：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of descending orbits and profiles across the Hsincheng Fault.

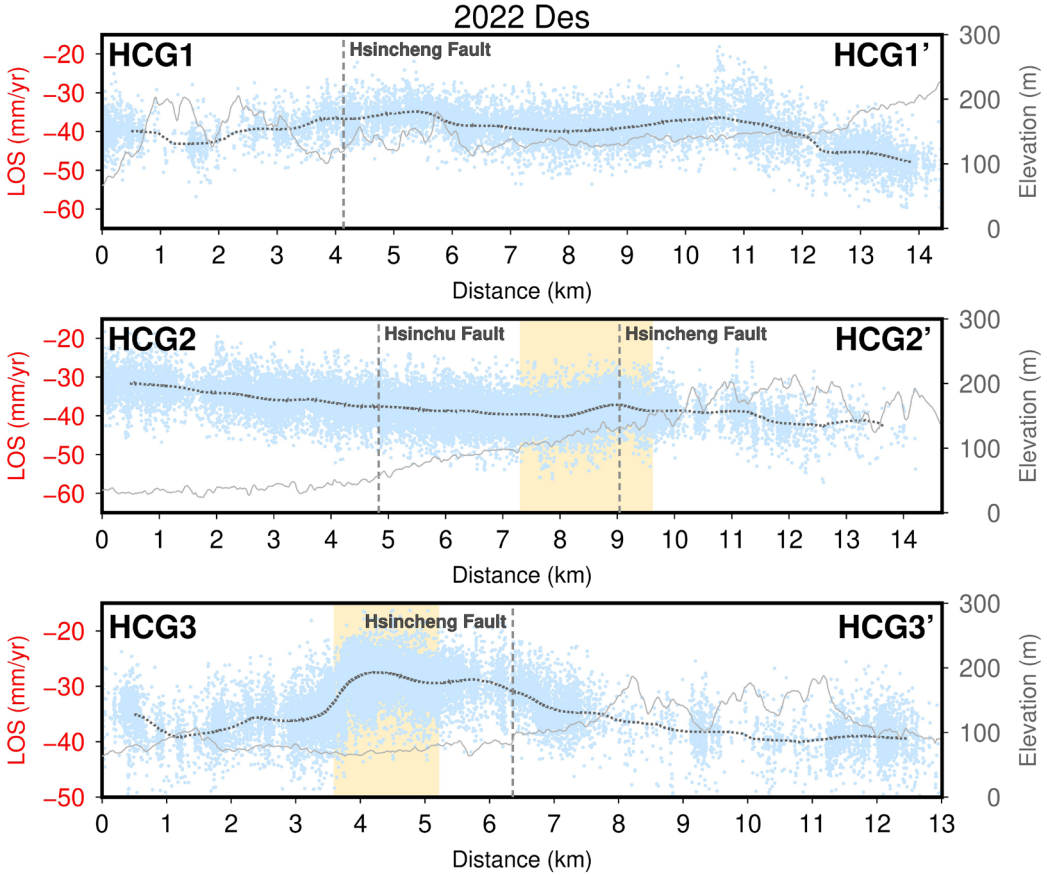


圖3-51：2022新城斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形，黃色區域為新竹科學園區。

Figure 3-51：Result of between 2022 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain, yellow area is Hsinchu Science and Industrial Parks.

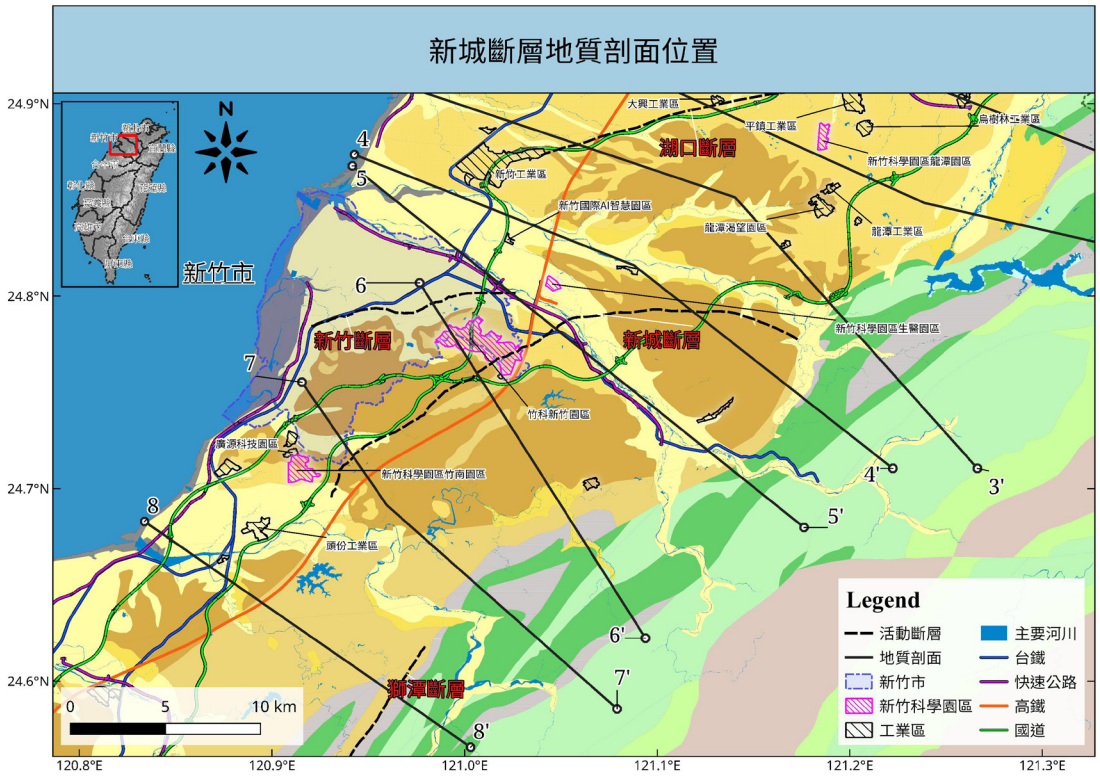


圖3-52：新城斷層地質剖面分佈圖。紅色虛線為活動斷層，黑色實線為地質剖面。（黃旭燦等，2004）。

Figure 3-52：The profiles of geological structures near the Hsincheng Fault. Dotted red lines are active faults and black lines are the profiles (Huang et al., 2004).

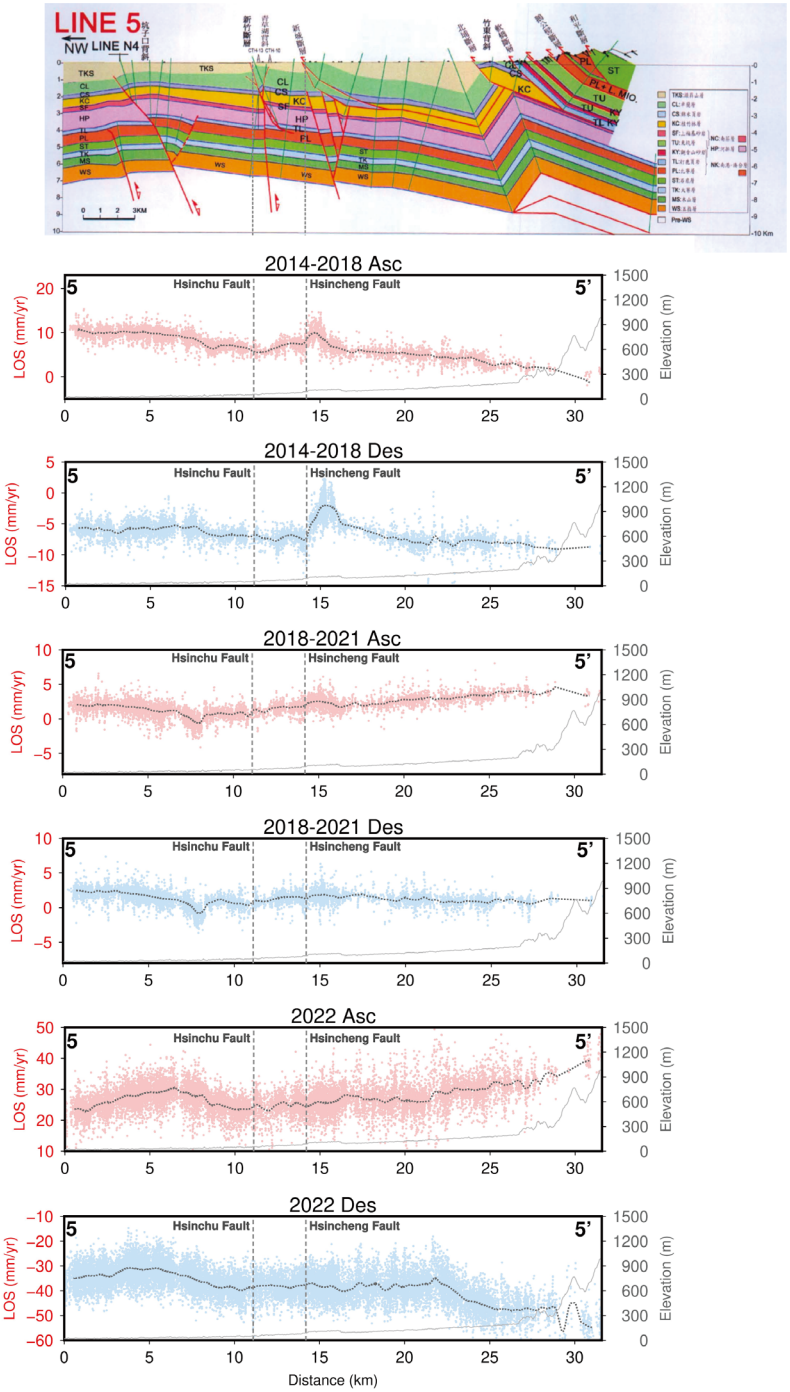


圖3-53：地質剖面5與該沿線三期升降軌速度場之比較。 各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。 在此剖面中新城斷層在第一期有顯著的速度變化、在第二期也有些微速度場變化。在最後期的資料中則不顯著。

Figure 3-53：Average LOS velocity fields in three periods processed with images of ascending and descending orbits along the geological profile 5. Among the data in each period, 2018-2021 is the most convergent, followed by 2014-2018. However, the time span is shorter, and the number of images is fewer in 2022, so it can only show trends. The Hsincheng fault has significant difference of velocity in the first period and slightly difference of velocity in the second period. It is not significant in the latest data.

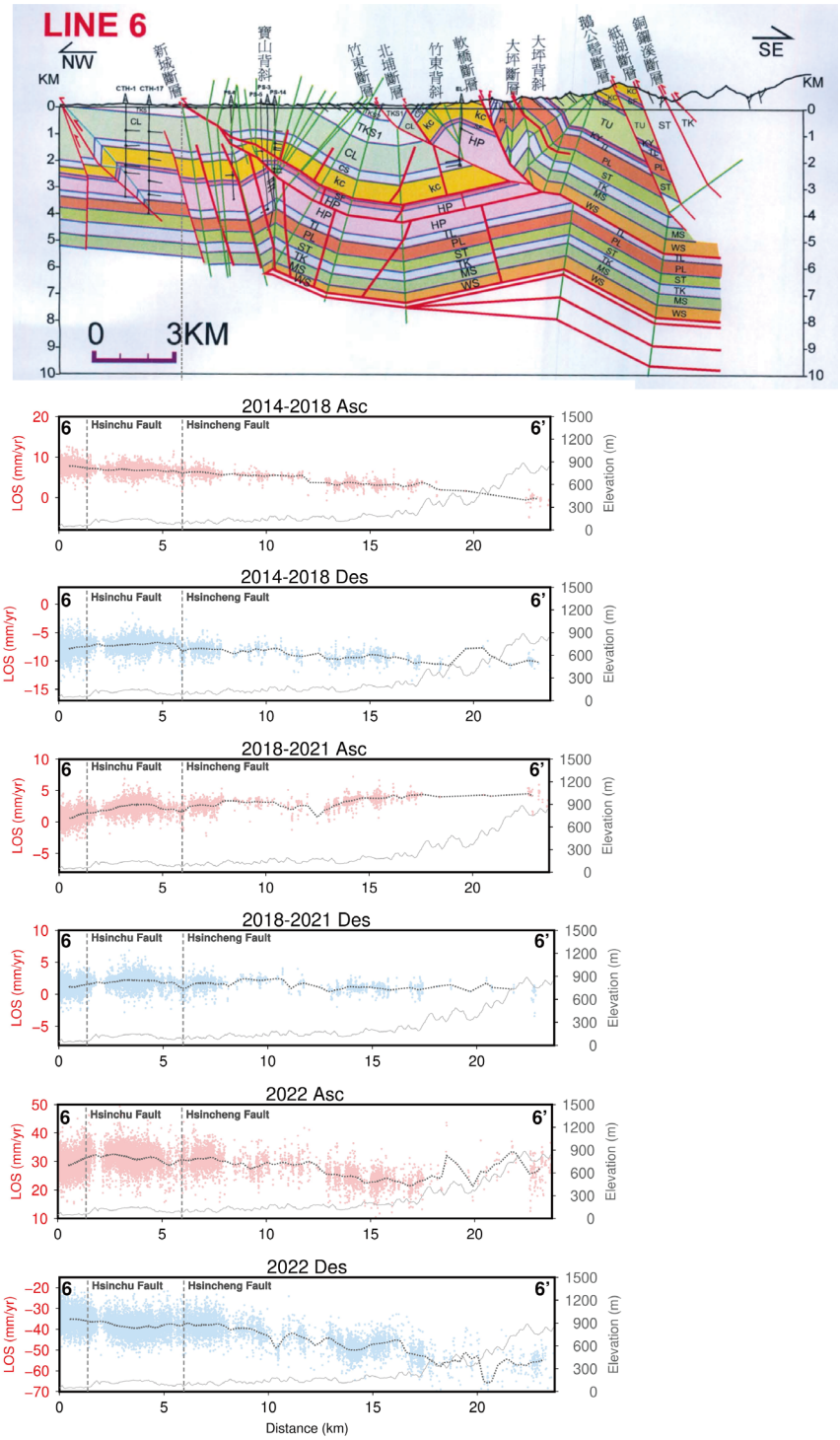


圖3-54：地質剖面6與該沿線三期升降軌速度場之比較。 各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。 在此剖面中新竹斷層與新城斷層的活動都不顯著。

Figure 3-54：Average LOS velocity fields in three periods processed with images of ascending and descending orbits along the geological profile 6. Among the data in each period, 2018-2021 is the most convergent, followed by 2014-2018. However, the time span is shorter, and the number of images is fewer in 2022, so it can only show trends. The activities of the Hsinchu fault and the Hsincheng fault are not significant.

3-6-4 三義斷層（SYI）

三義斷層取一條接近北向-南向與三條西北-東南向的剖面，SYI1剖面通過三義斷層與新竹科學園區銅鑼園區，SYI2剖面通過三義斷層與三義工業區，SYI3通過屯子腳斷層與三義斷層的交界以及中部科學園區后里園區，SYI4通過三義斷層與中部科學園區台中園區。三時期的LOS速度場在三義斷層附近無明顯落差，2014-2018時期SYI1剖面於升軌道方向無明顯落差（圖3-55、圖3-56），降軌道方向約有1~2mm/yr的LOS速度落差（圖3-57、圖3-58），2018-2021與2022時期在三義斷層皆有2~4mm/yr的LOS速度落差（圖3-59~圖3-66）。SYI2在2018-2021期間在近三義斷層約有1~3mm/yr的LOS速度落差（圖3-60、圖3-62），在2022期間在近三義斷層約有8~10 mm/yr的LOS速度落差（圖3-64、圖3-66），其餘時期無明顯落差。SYI3在2018-2021期間在近三義斷層約有1~3 mm/yr的LOS速度落差（圖3-60、圖3-62），在2022期間於升軌道方向在近三義斷層約有5~7mm/yr的LOS速度落差（圖3-64、圖3-66），其餘時期無明顯落差。SYI4剖面於近斷層處無明顯LOS速度變化。

研究區域中有三條地質剖面通過三義斷層（圖3-67），本章節呈現地質剖面9與地質剖面10，其餘剖面於附錄呈現。

地質剖面9除了通過三義斷層亦標註鐵砧山背斜、小南勢斷層及細道山背斜，各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。在此剖面中三義斷層的活動不顯著（圖3-68）。

地質剖面10除了通過三義斷層亦標註鐵砧山背斜、小南勢斷層及新開斷層，各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。在此剖面中三義斷層的活動不顯著（圖3-69）。

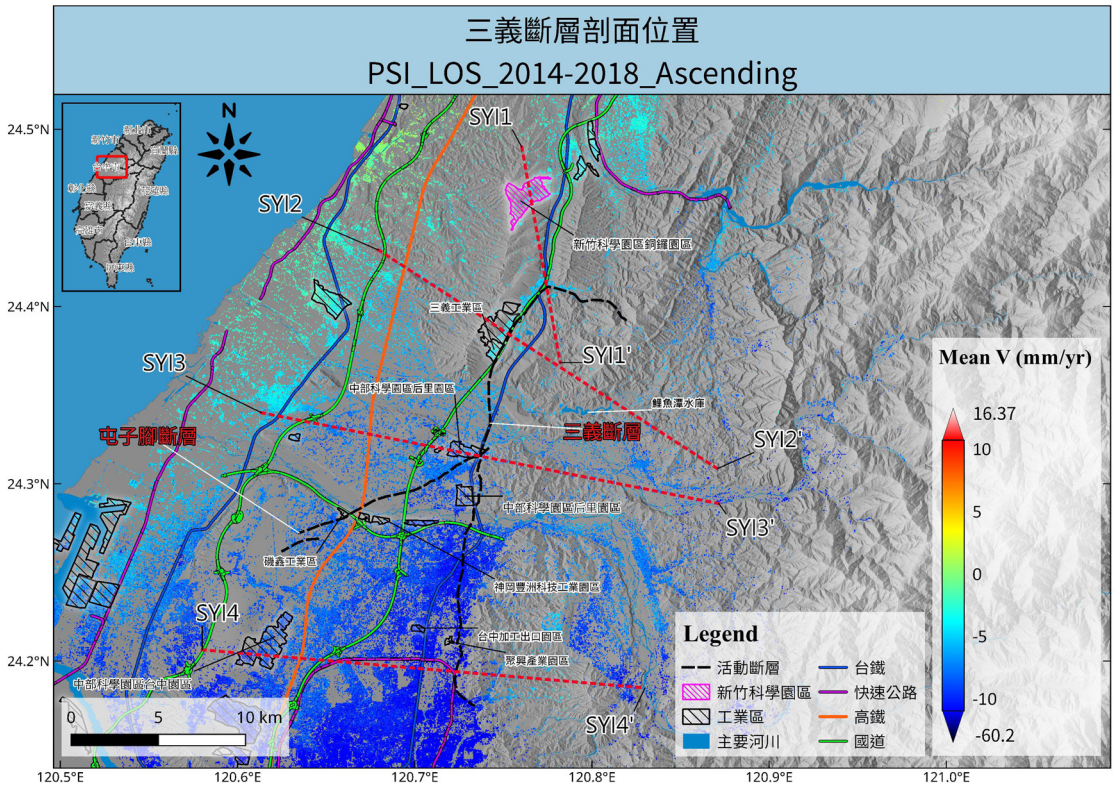


圖3-55：2014-2018三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-55：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the Sanyi Fault.

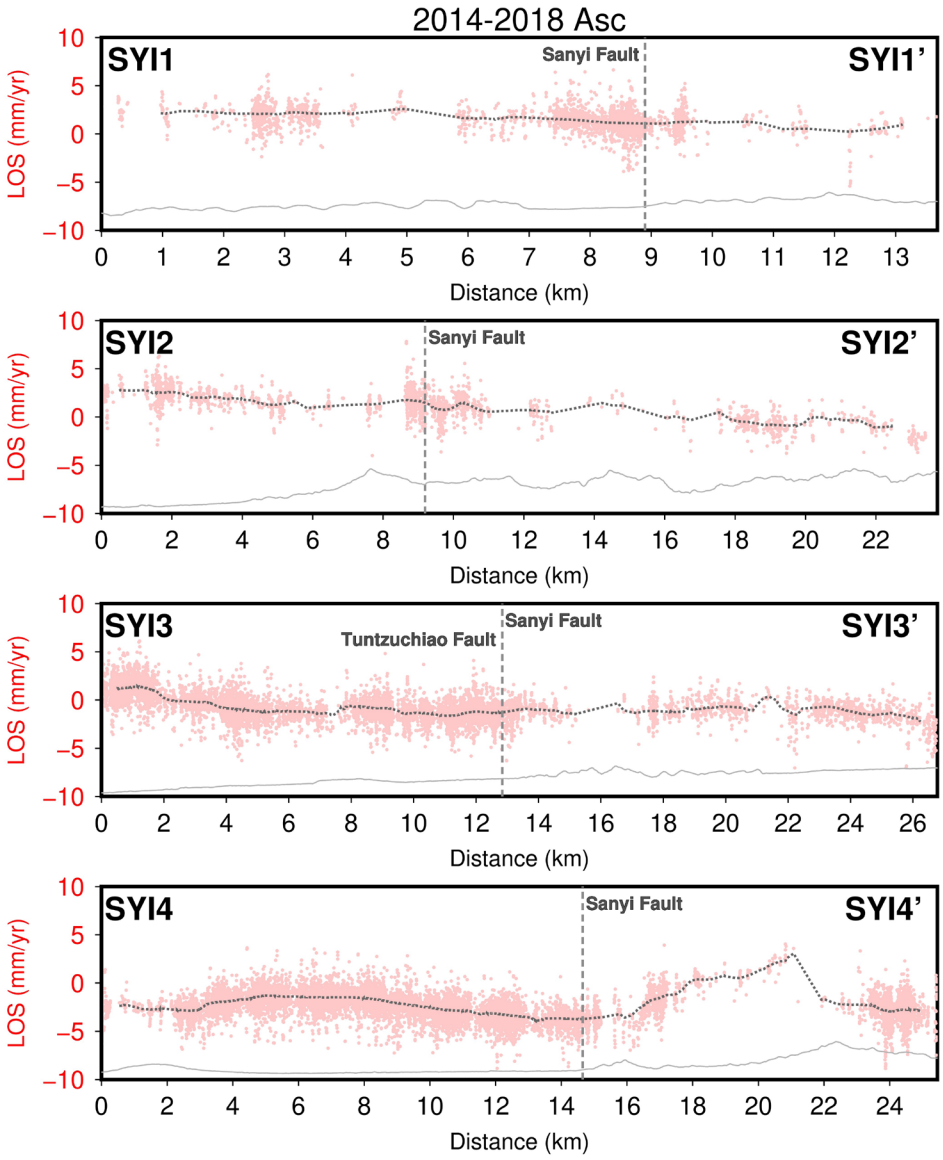


圖3-56：2014-2018三義斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-56：Result of profiles across the Sanyi Fault between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

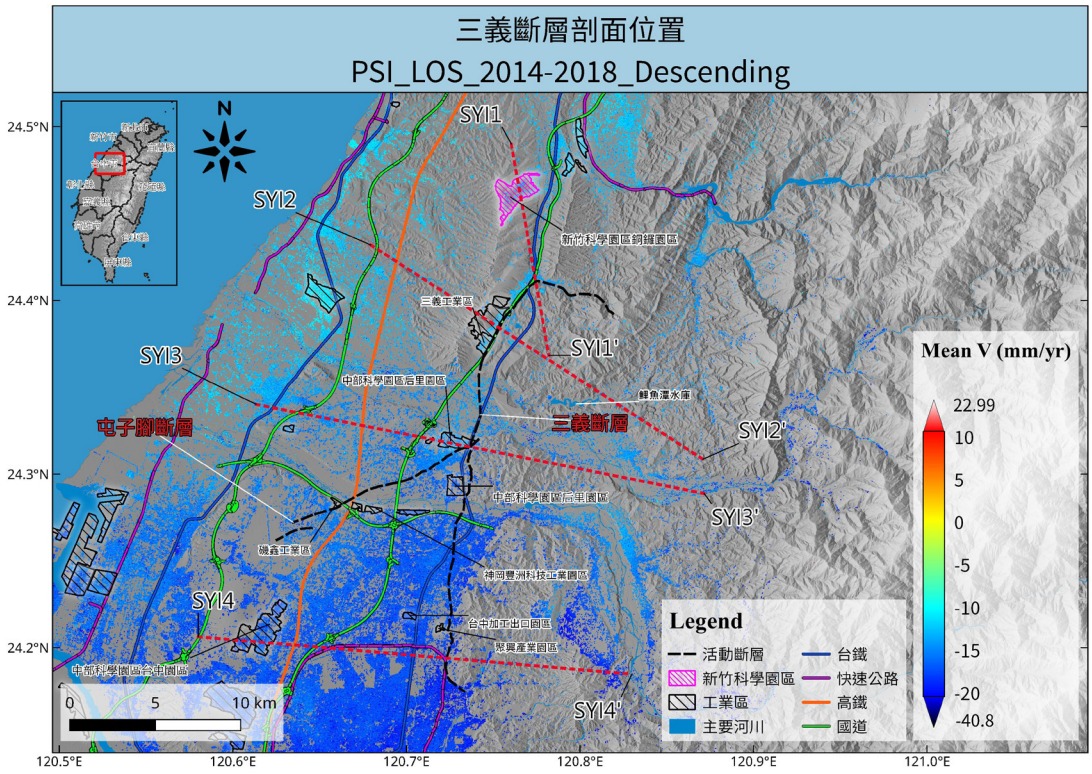


圖3-57：2014-2018三義斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-57：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the Sanyi Fault.

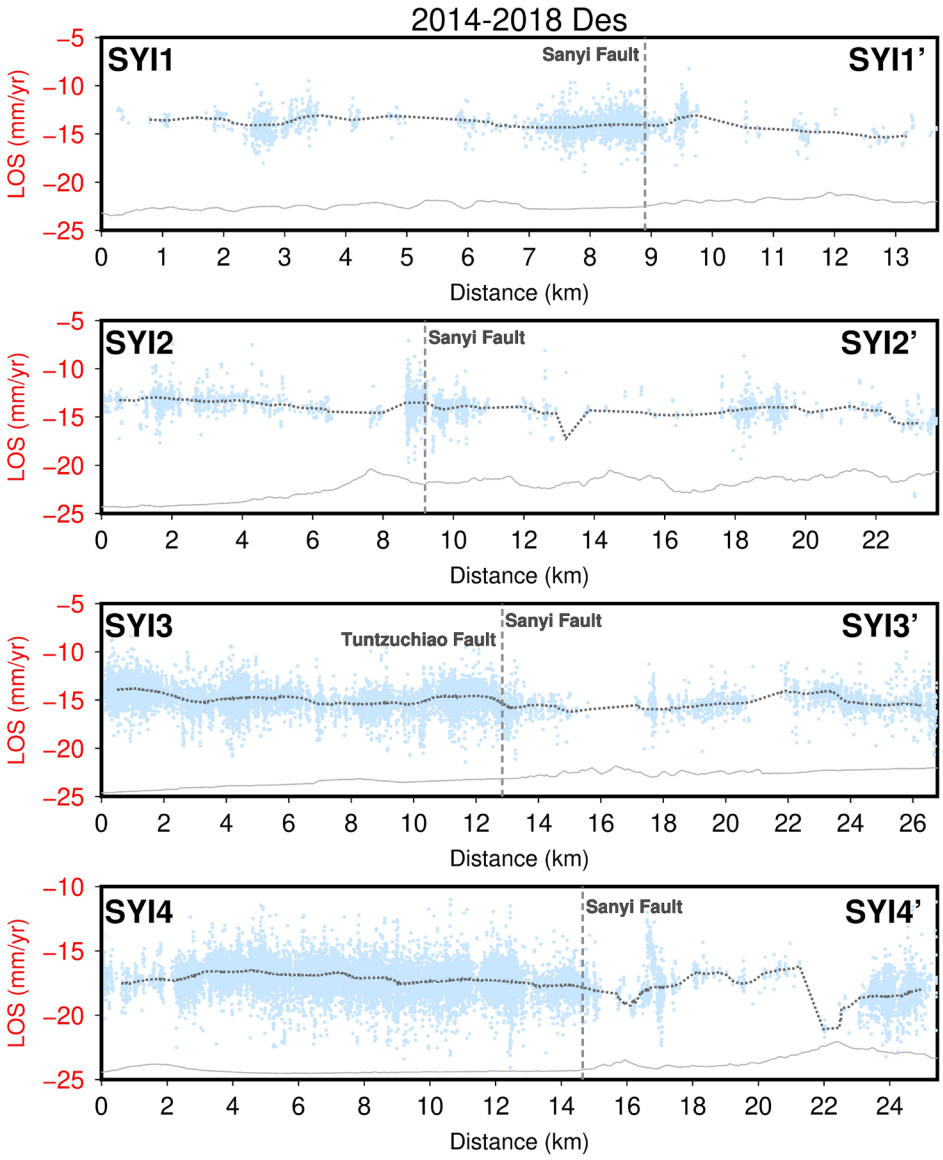


圖3-58：2014-2018三義斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-58：Result of profiles across the Sanyi Fault between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

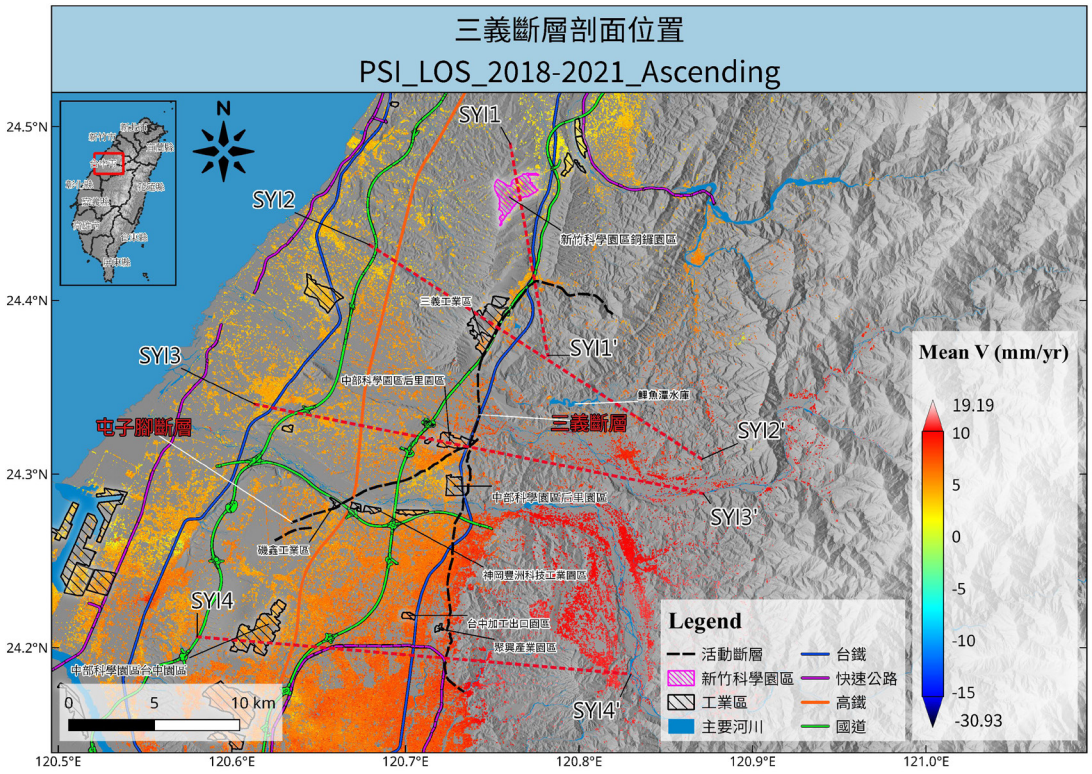


圖3-59：2018-2021三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-59：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Sanyi Fault.

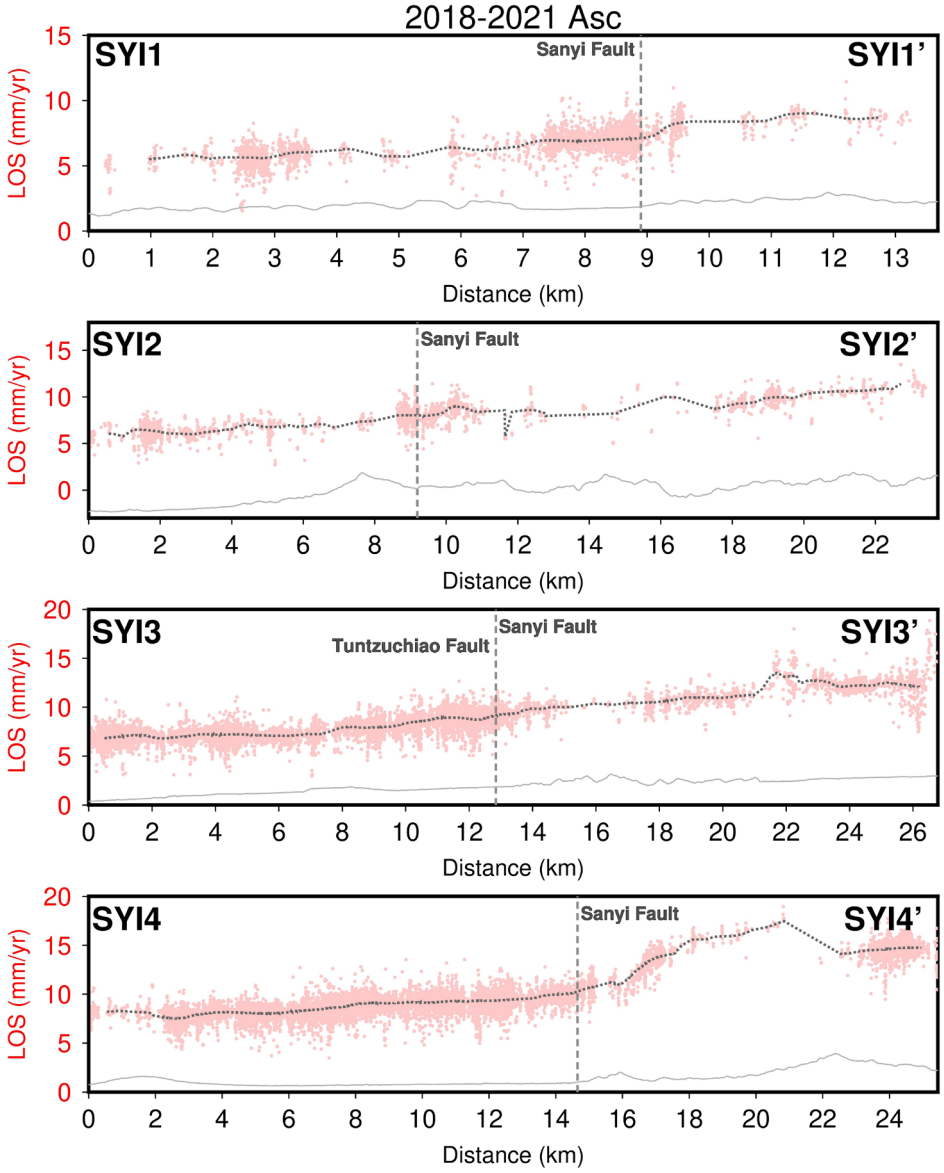


圖3-60：2018-2021三義斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-60：Result of profiles across the Sanyi Fault between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

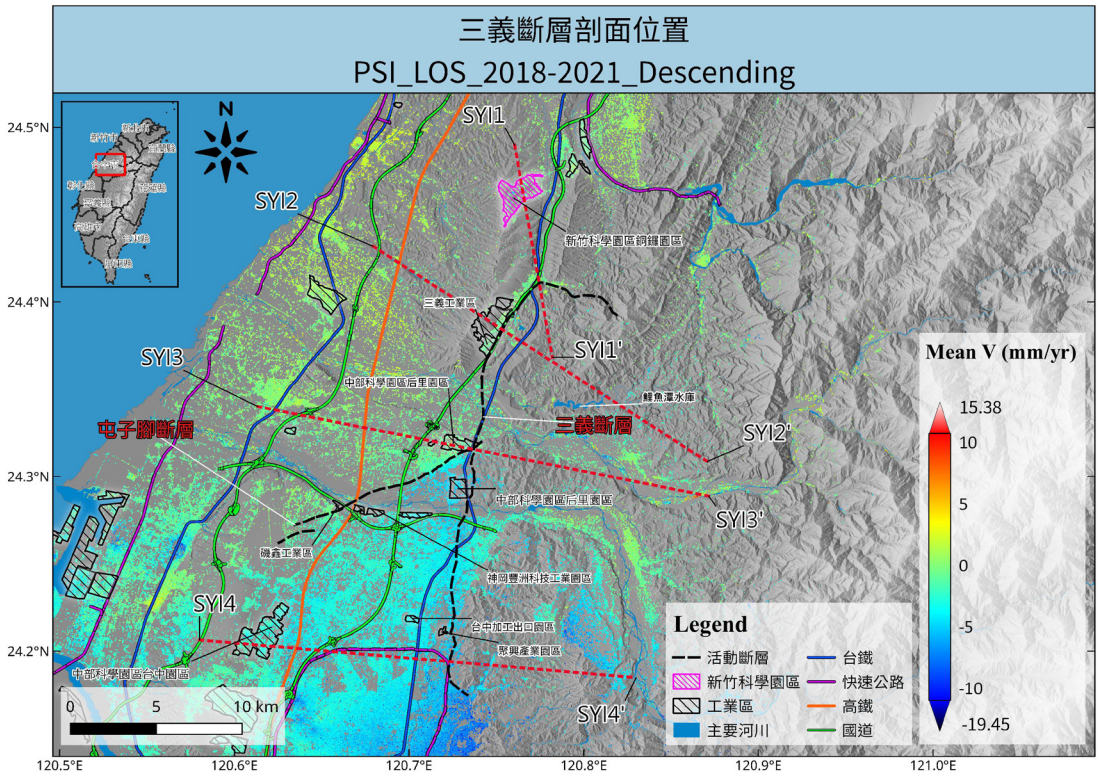


圖3-61：2018-2021三義斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-61：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Sanyi Fault.

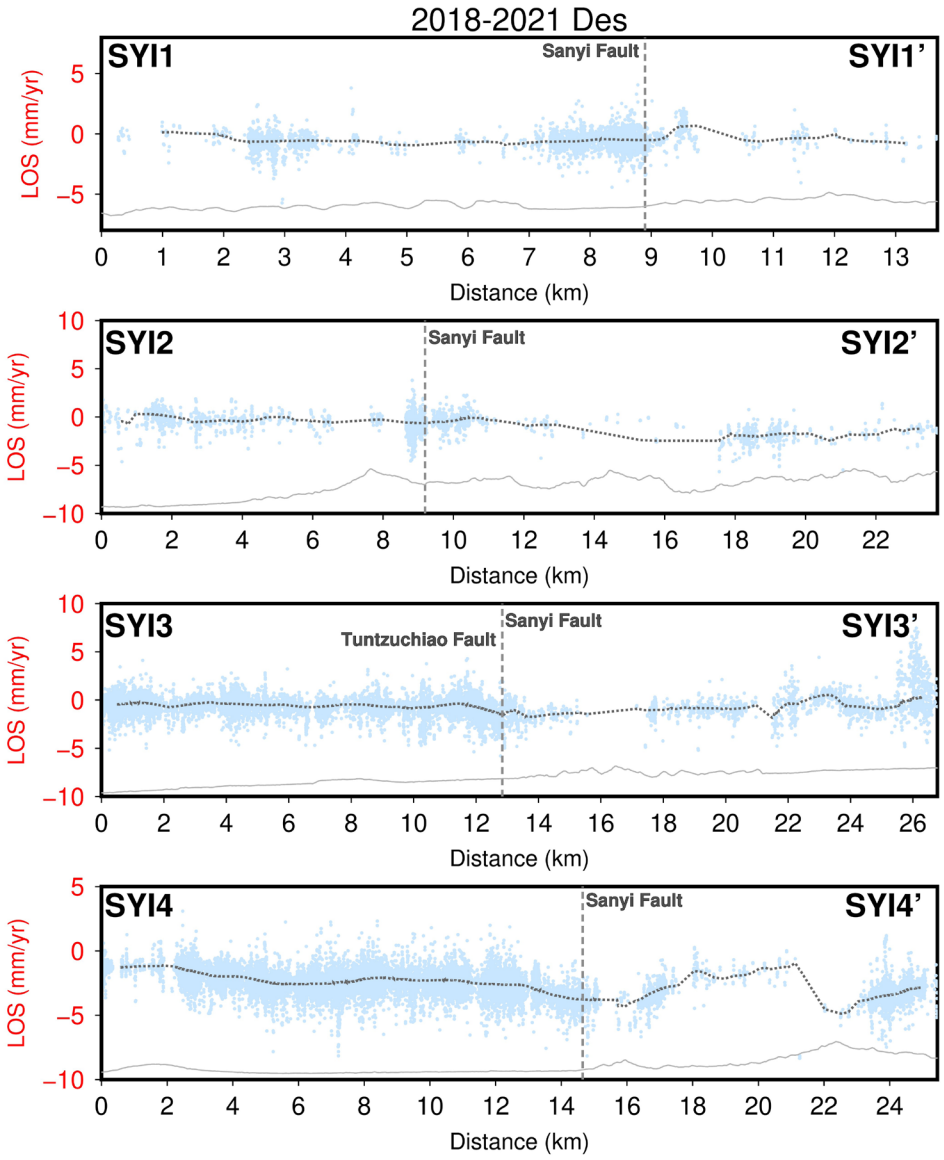


圖3-62：2018-2021三義斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-62：Result of profiles across the Sanyi Fault between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

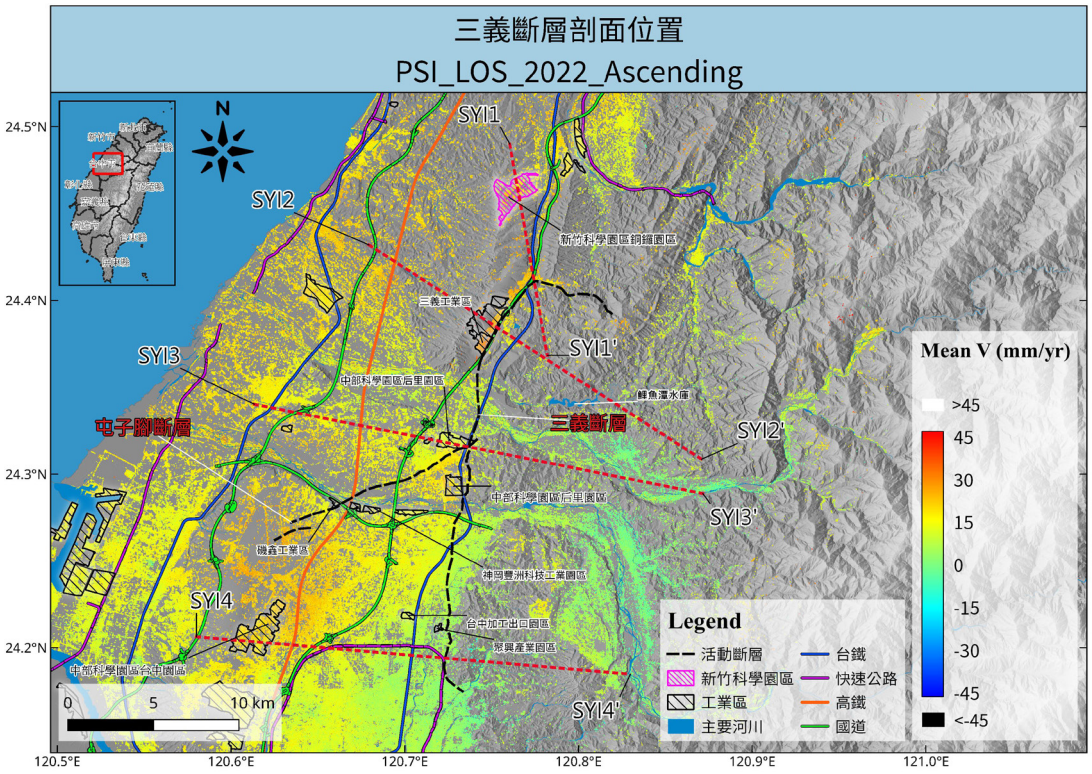


圖3-63：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-63：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of ascending orbits and profiles across the Sanyi Fault.

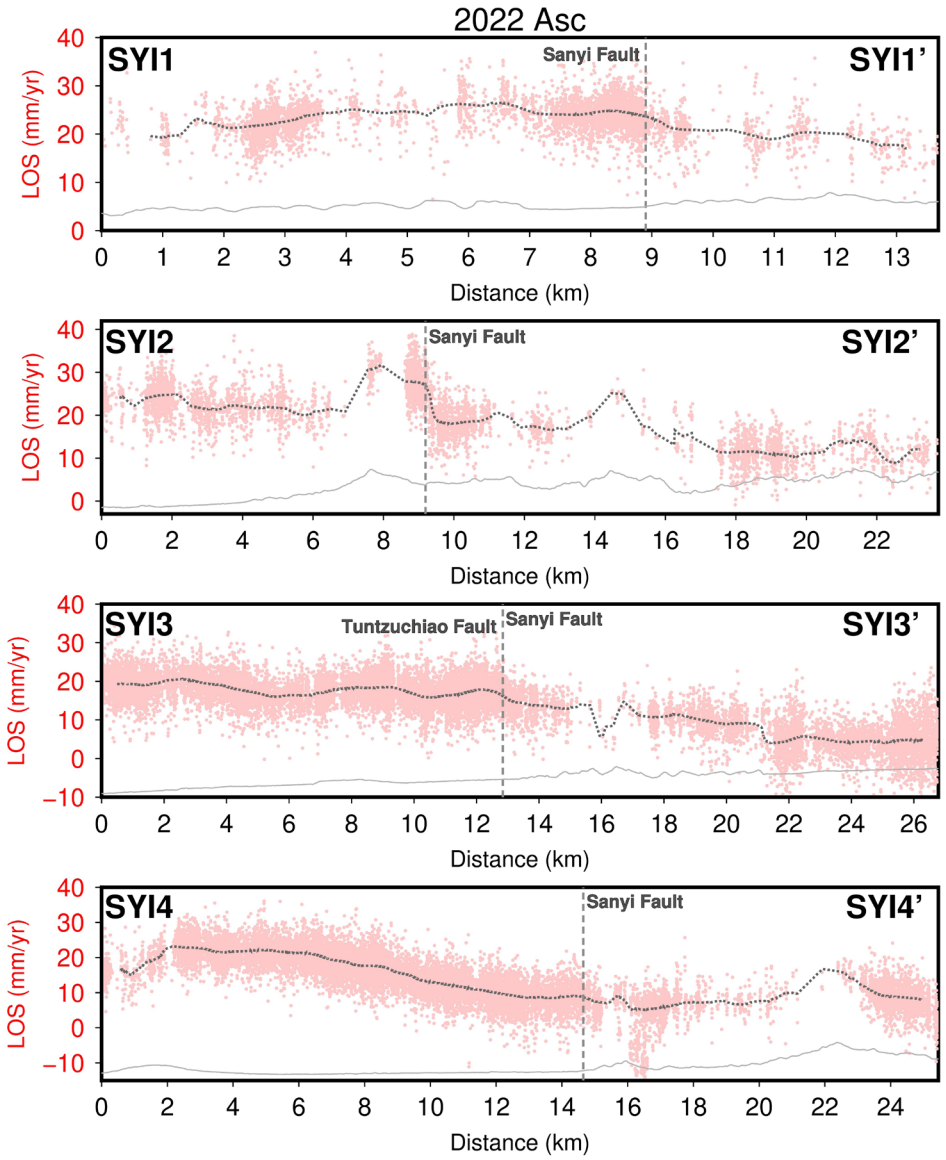


圖3-64：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-64：Result of profiles across the Sanyi Fault between 2022 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault.

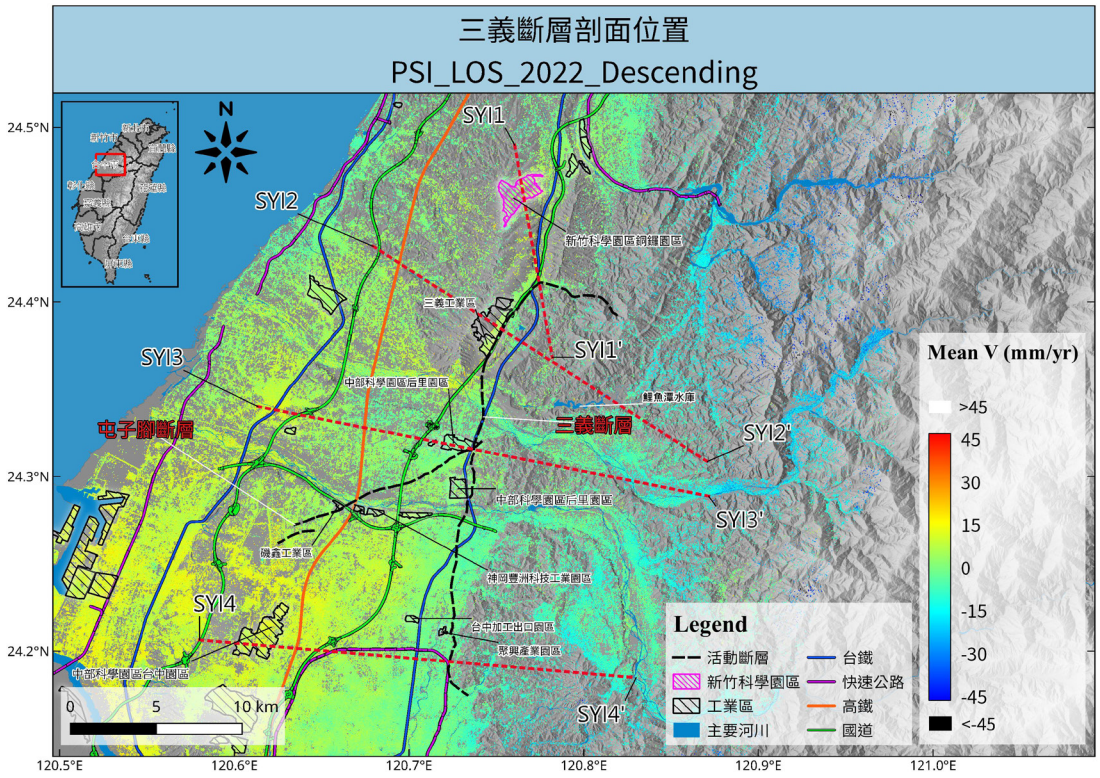


圖3-65：2022三義斷層降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-65：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of descending orbits and profiles across the Sanyi Fault.

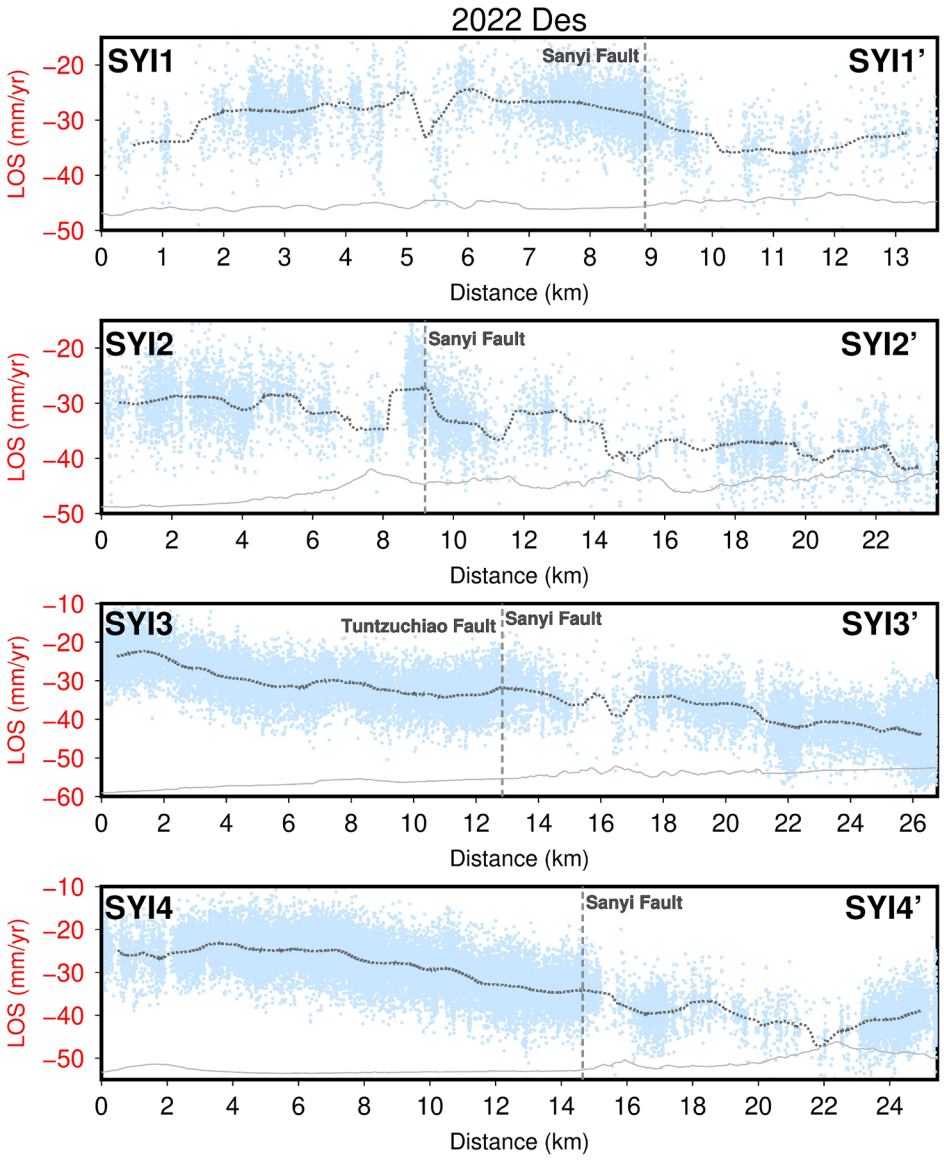


圖3-66：2022三義斷層降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-66：Result of profiles across the Sanyi Fault between 2022 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault.

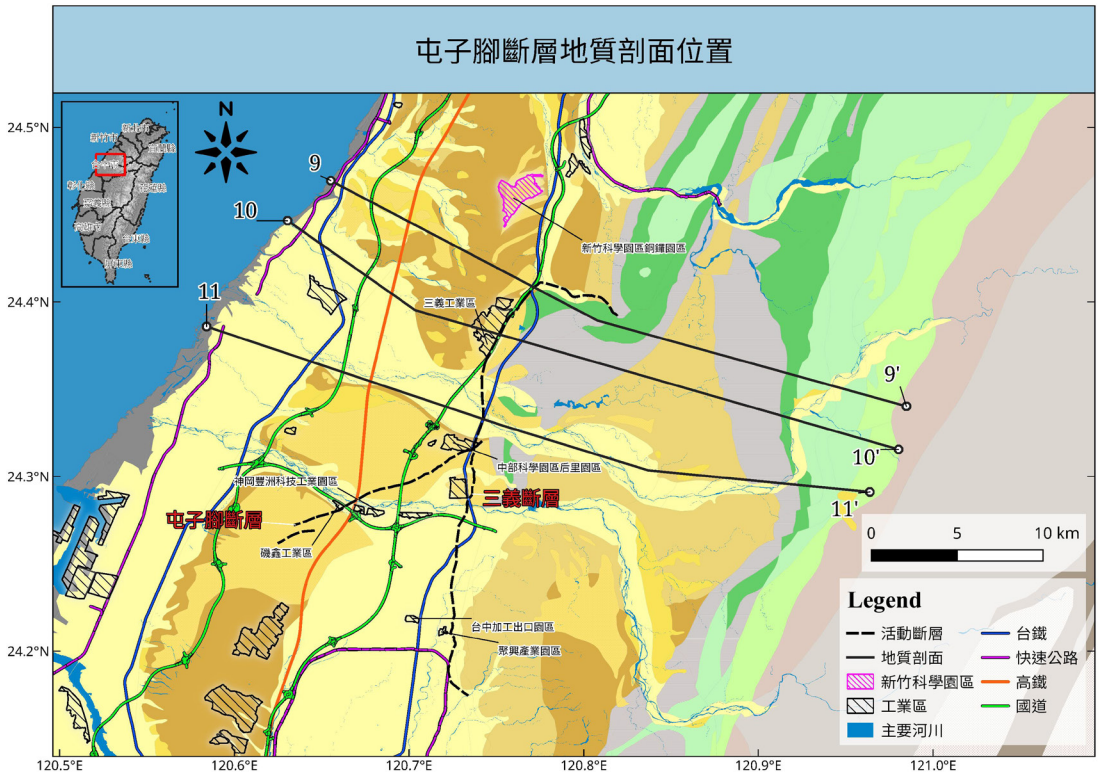


圖3-67：三義斷層地質剖面分佈圖。紅色虛線為活動斷層，黑色實線為地質剖面。（黃旭燦等，2004）。

Figure 3-67：The profiles of geological structures near the Sanyi Fault. Dotted red lines are active faults and black lines are the profiles (Huang et al., 2004).

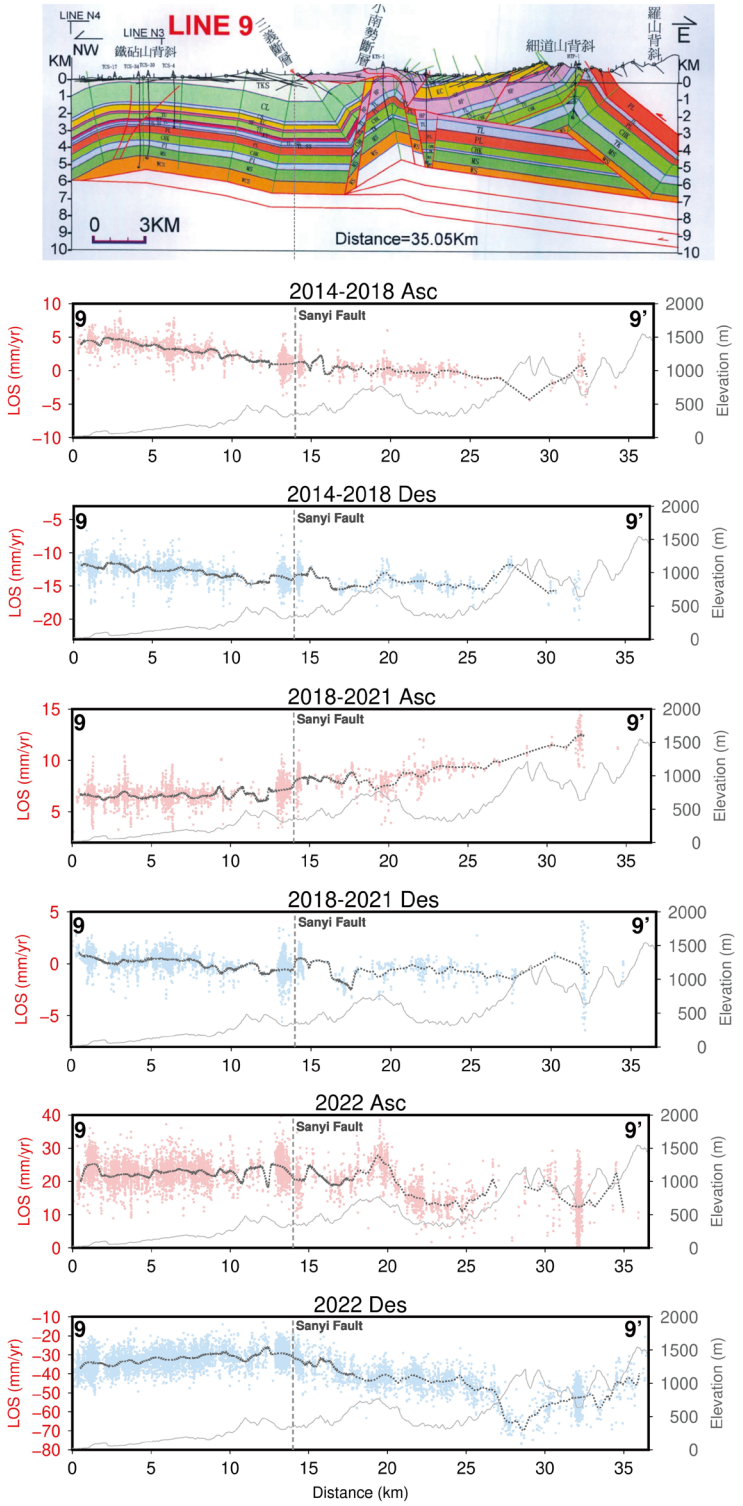


圖3-68：地質剖面9與該沿線三期升降軌速度場之比較。 各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。 在此剖面中三義斷層的活動不顯著。

Figure 3-68：Average LOS velocity fields in three periods processed with images of ascending and descending orbits along the geological profile 9. Among the data in each period, 2018-2021 is the most convergent, followed by 2014-2018. However, the time span is shorter and the number of images is fewer in 2022, so it can only show trends. The activities of the Sanyi fault is not significant.

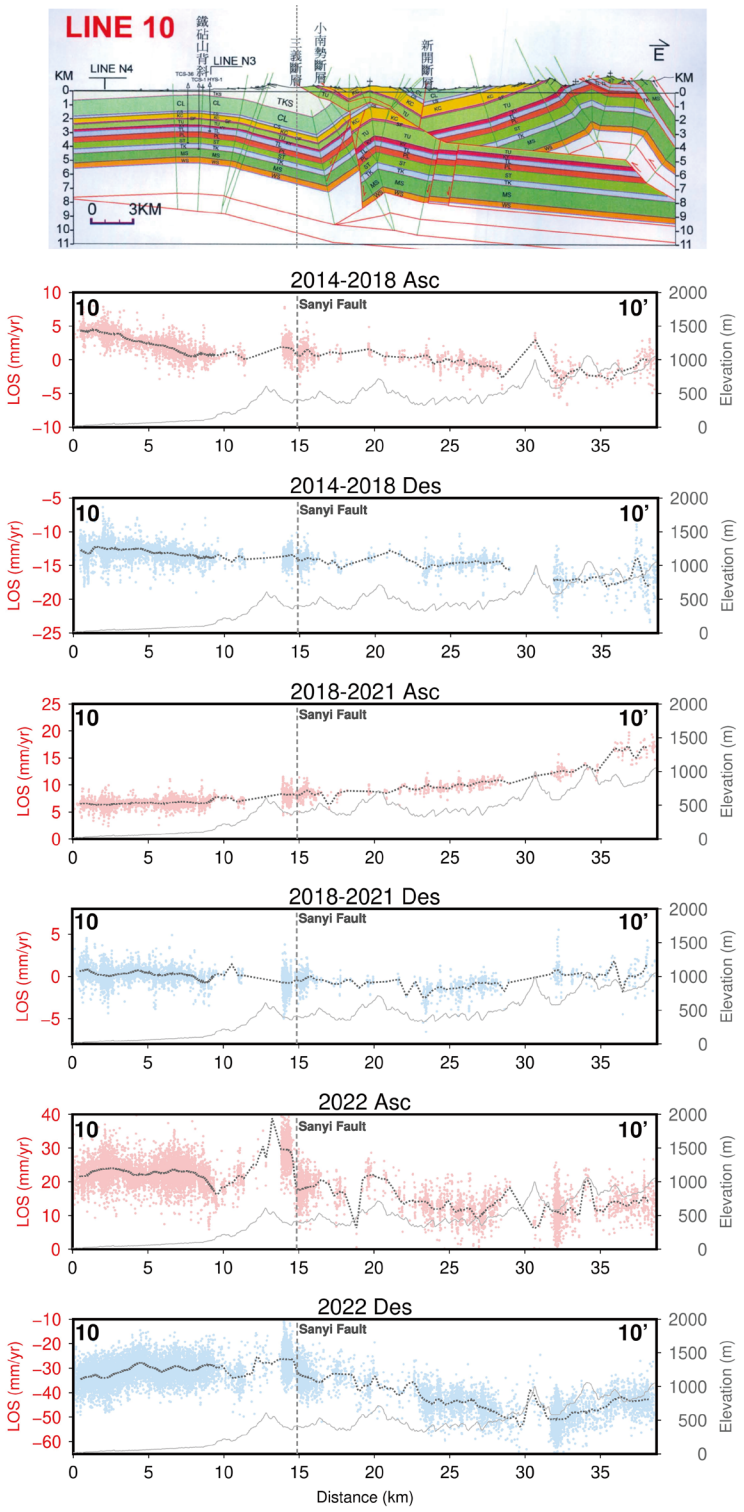


圖3-69：地質剖面10與該沿線三期升降軌速度場之比較。 各期資料中，2018-2021資料最收斂，2014-2018次之，而2022年時間段較短、影像數目較少，只能顯示趨勢。 在此剖面中三義斷層的活動不顯著。

Figure 3-69：Average LOS velocity fields in three periods processed with images of ascending and descending orbits along the geological profile 9. Among the data in each period, 2018-2021 is the most convergent, followed by 2014-2018. However, the time span is shorter and the number of images is fewer in 2022, so it can only show trends. The activities of the Sanyi fault is not significant.

3-6-5 桃園臺地

由我們解算的資料中觀察到三個時期升降軌PSI速度場皆顯示桃園台地有一些未預期的速度變化，且有一明顯速度差異邊界，因此我們以2018年至2021年的成果，在桃園台地取四條剖面進行分析。AB與CD剖面為西南-東北向，自桃園台地延伸至林口台地，通過變形邊界，EF剖面為西北-東南向，GH剖面為東北-西南向通過中壢工業區及變形邊界（圖3-70、圖3-72、圖3-74、圖3-76、圖3-78及圖3-80）。

剖面成果顯示在AB與CD剖面於三時期變形趨勢相近，EF剖面於2014-2018年在6-10公里處有一速度高區，但在後兩個時期並未觀測到此變化（圖3-71），GH剖面在三時期皆有觀測到一速度高區，但在2014-2018年範圍較小約在6-8公里處，2018-2021年與2022年範圍約為4-8公里處（圖3-71、圖3-73、圖3-75、圖3-77、圖3-79及圖3-81），四條剖面皆無明顯落差。

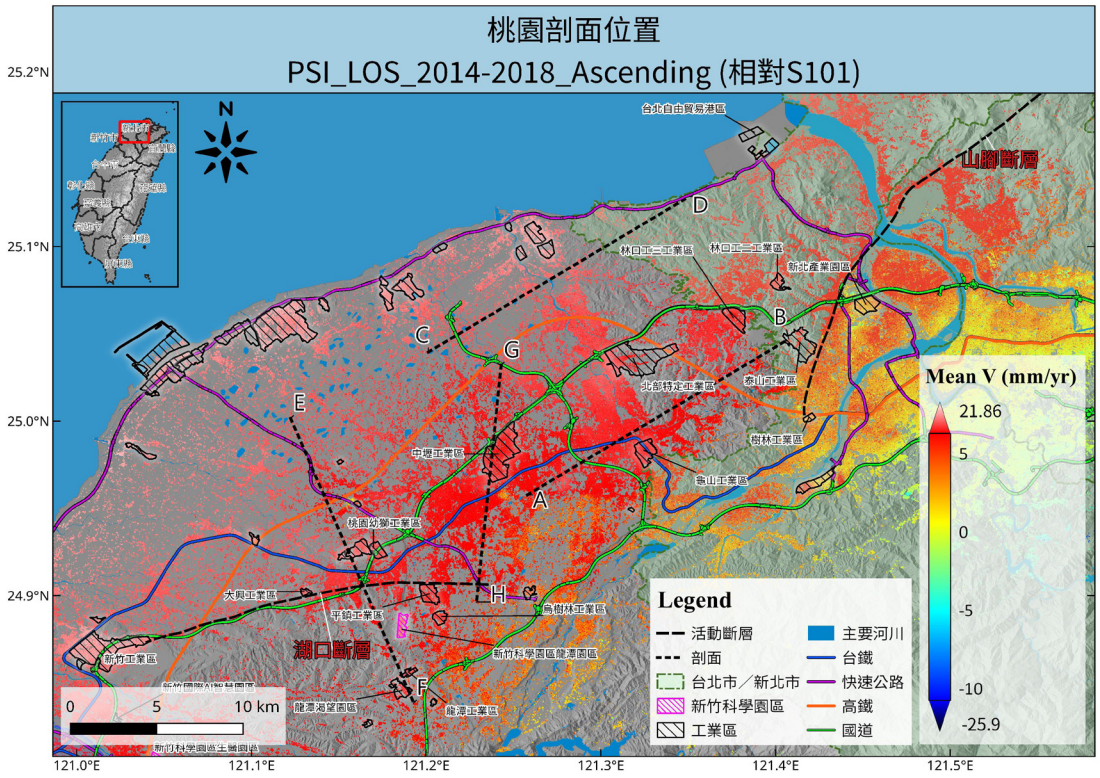


圖3-70：2014-2018桃園臺地升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-70：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the Taoyuan tableland.

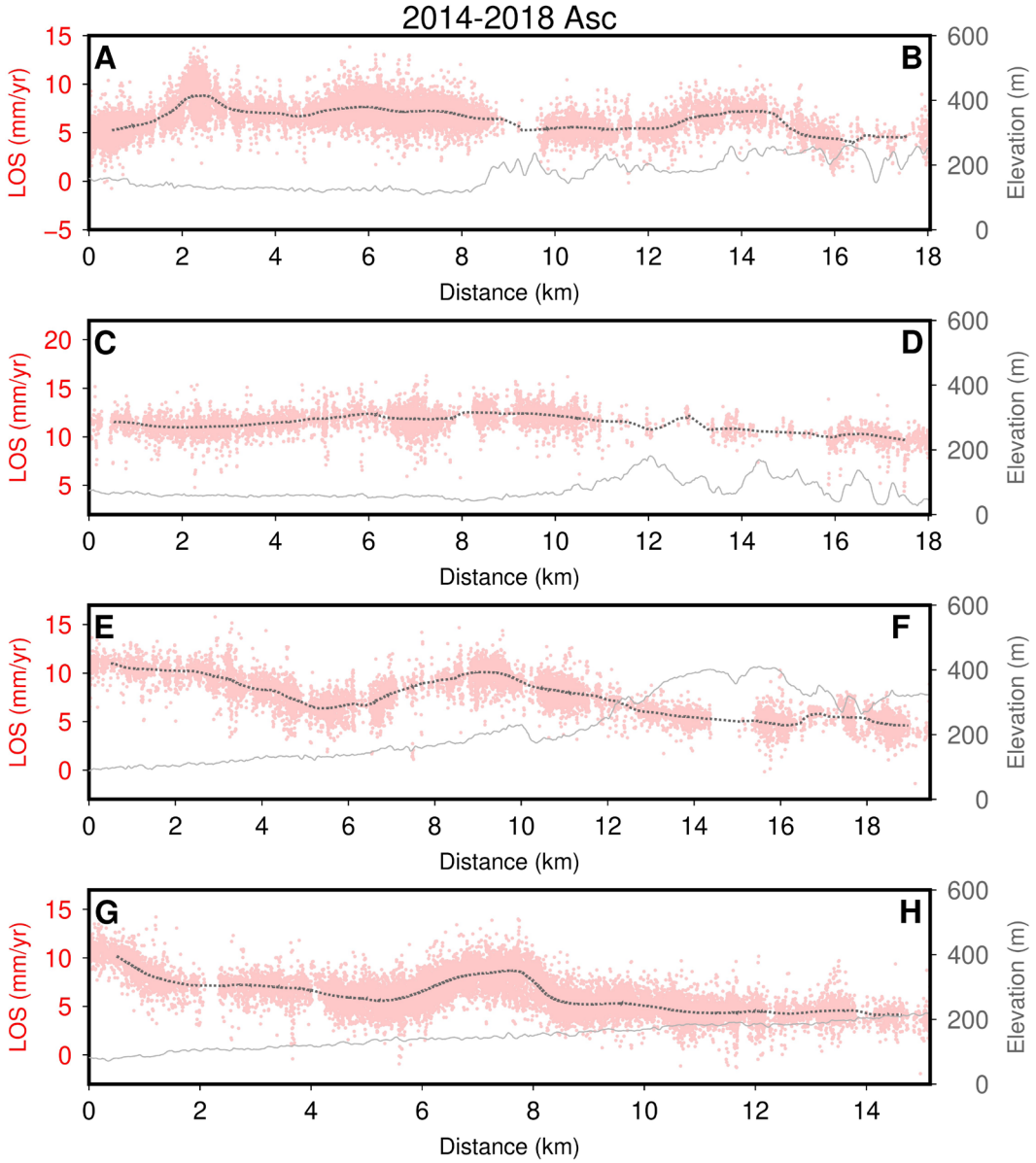


圖3-71：2014-2018桃園臺地升軌道影像的與剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-71：Result of profiles across the Taoyuan tableland between 2014 and 2018 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

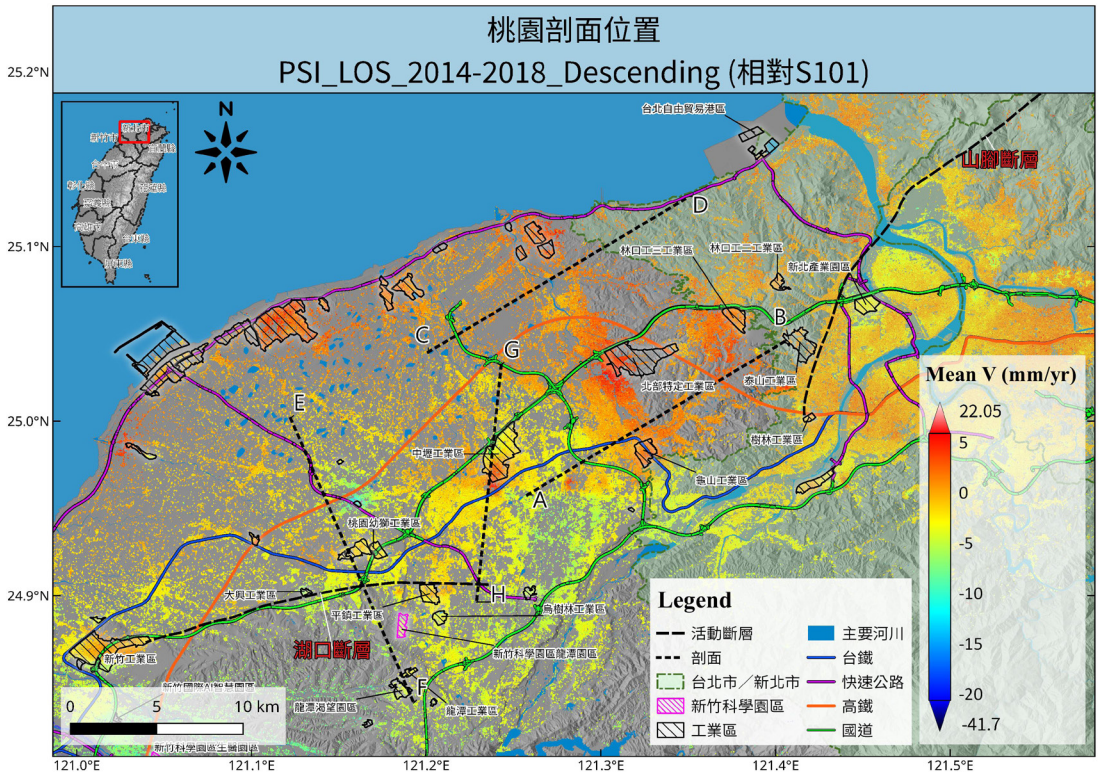


圖3-72：2014-2018桃園臺地降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-72：Average LOS velocity fields between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the Taoyuan tableland.

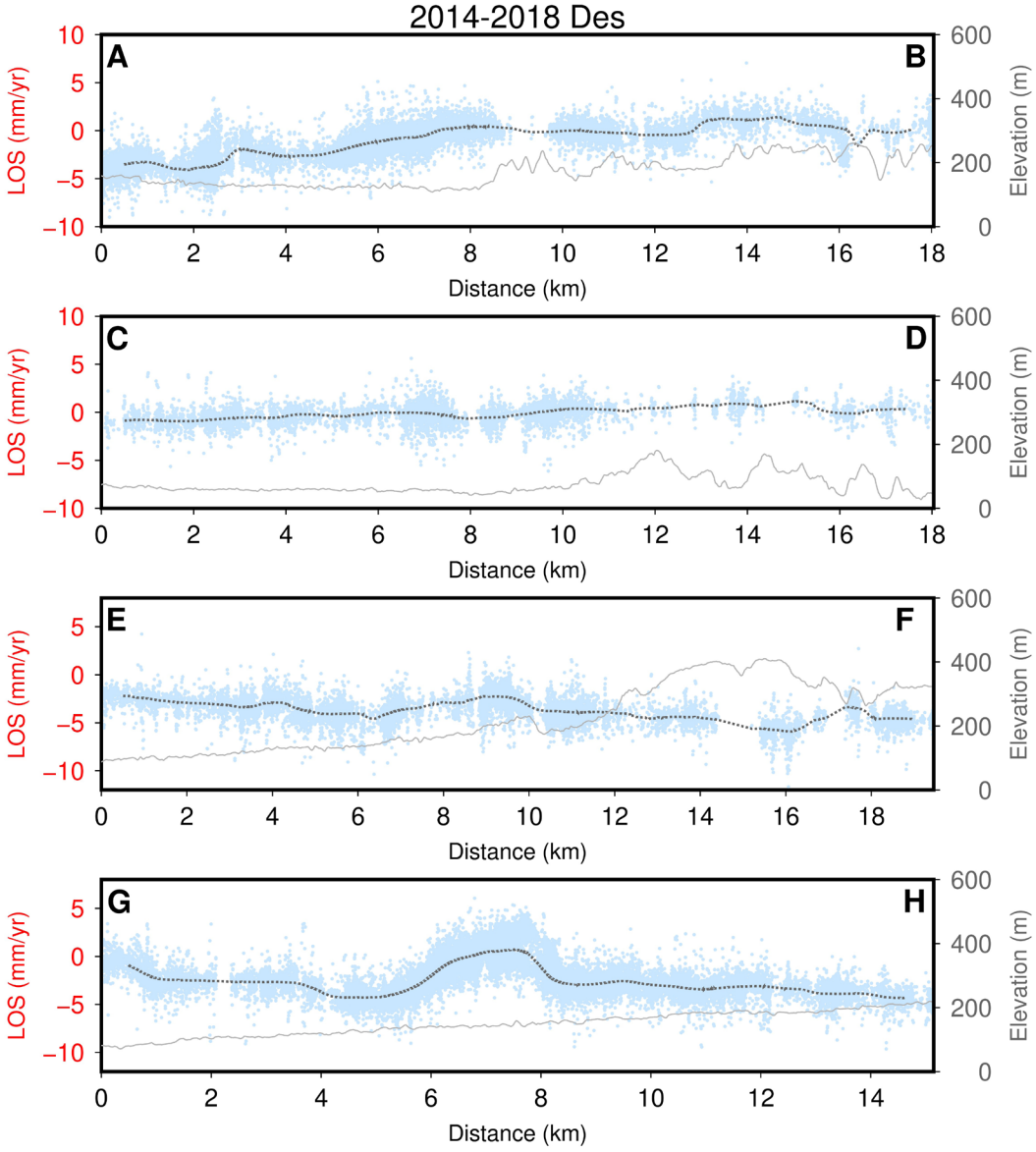


圖3-73： 2014-2018桃園臺地降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-73：Result of profiles across the Taoyuan tableland between 2014 and 2018 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

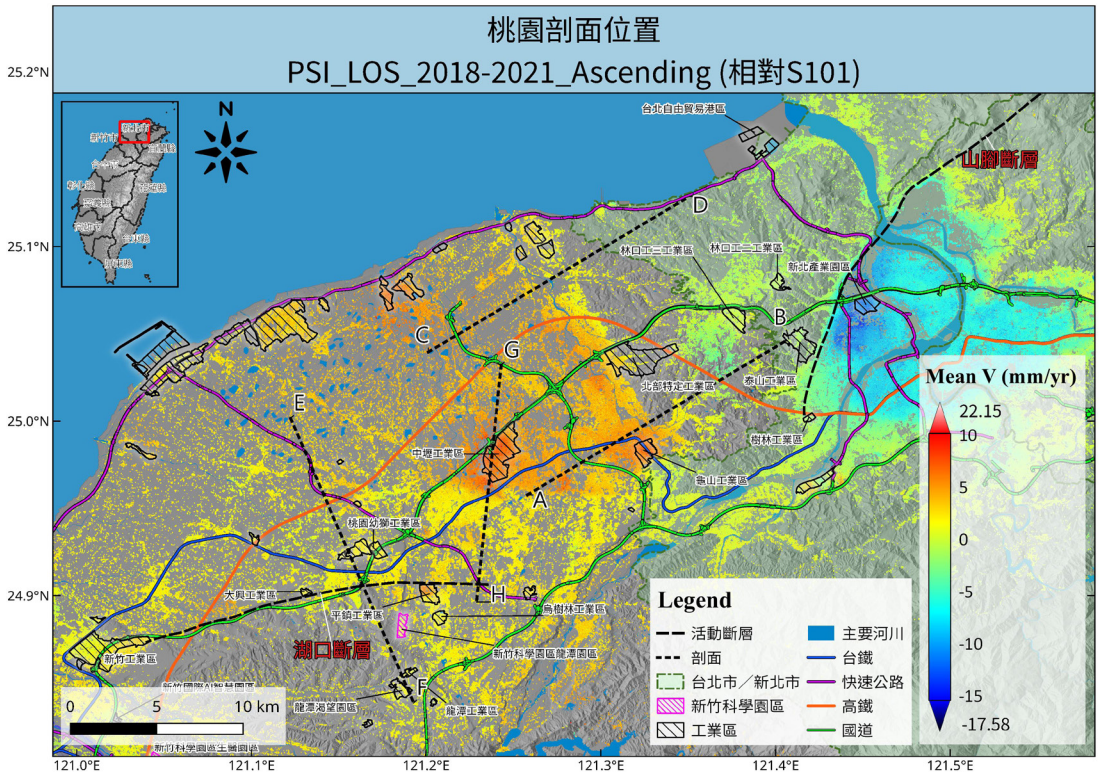


圖3-74：2018-2021桃園臺地升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-74：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Taoyuan tableland.

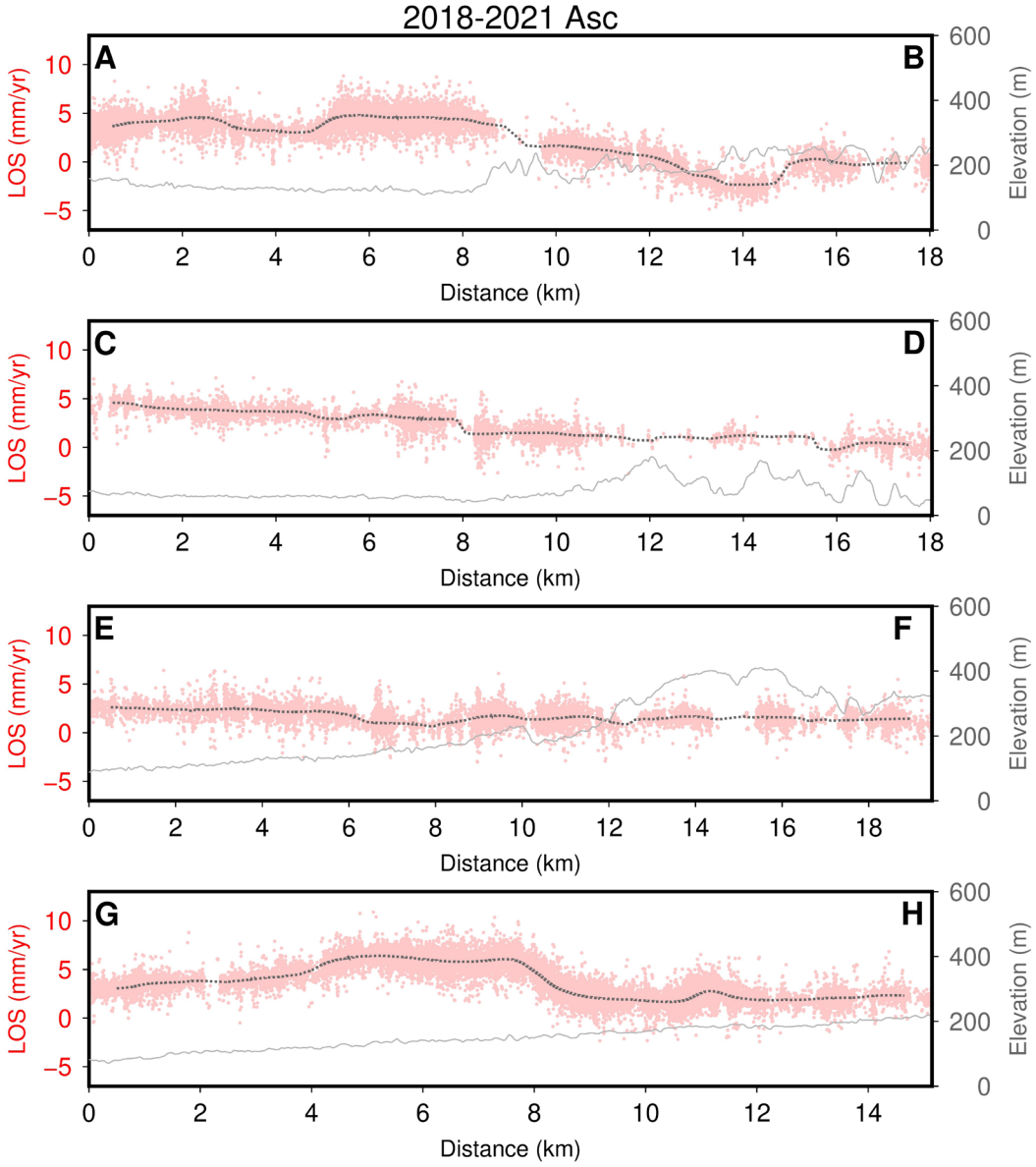


圖3-75：2018-2021桃園臺地升軌道影像的剖面圖成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-75：Result of profiles across the Taoyuan between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

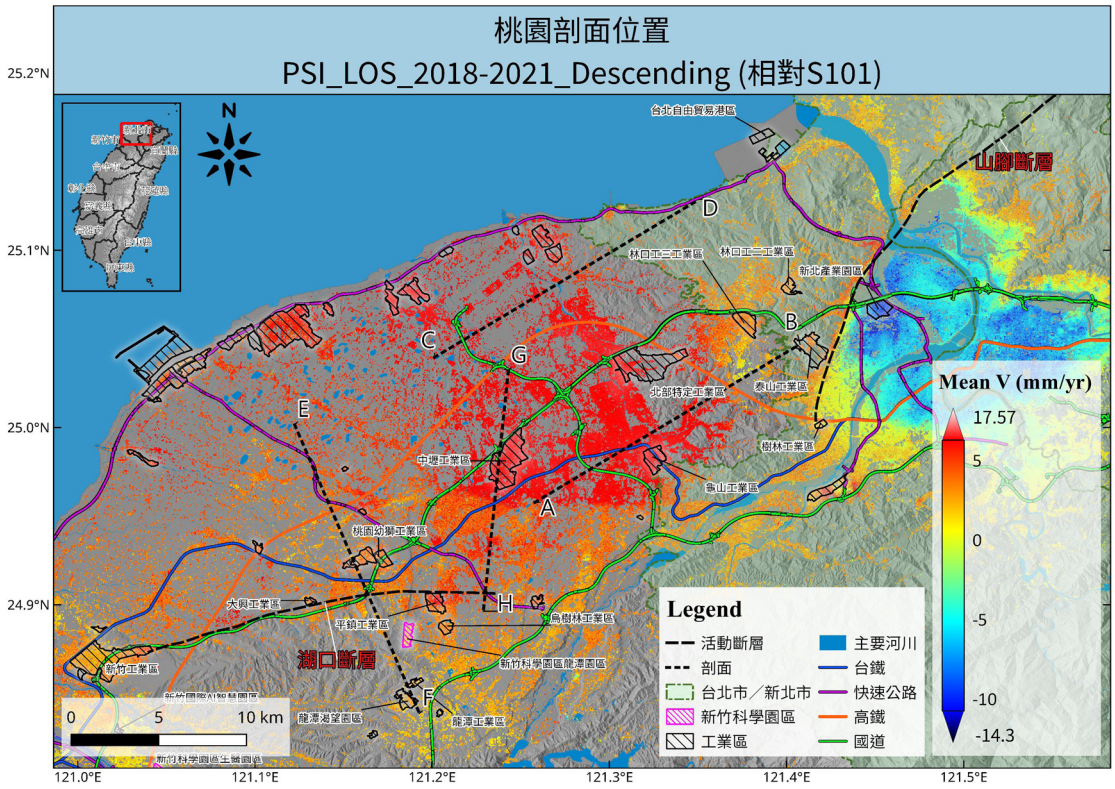


圖3-76：2018-2021桃園臺地降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-76：Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Taoyuan tableland.

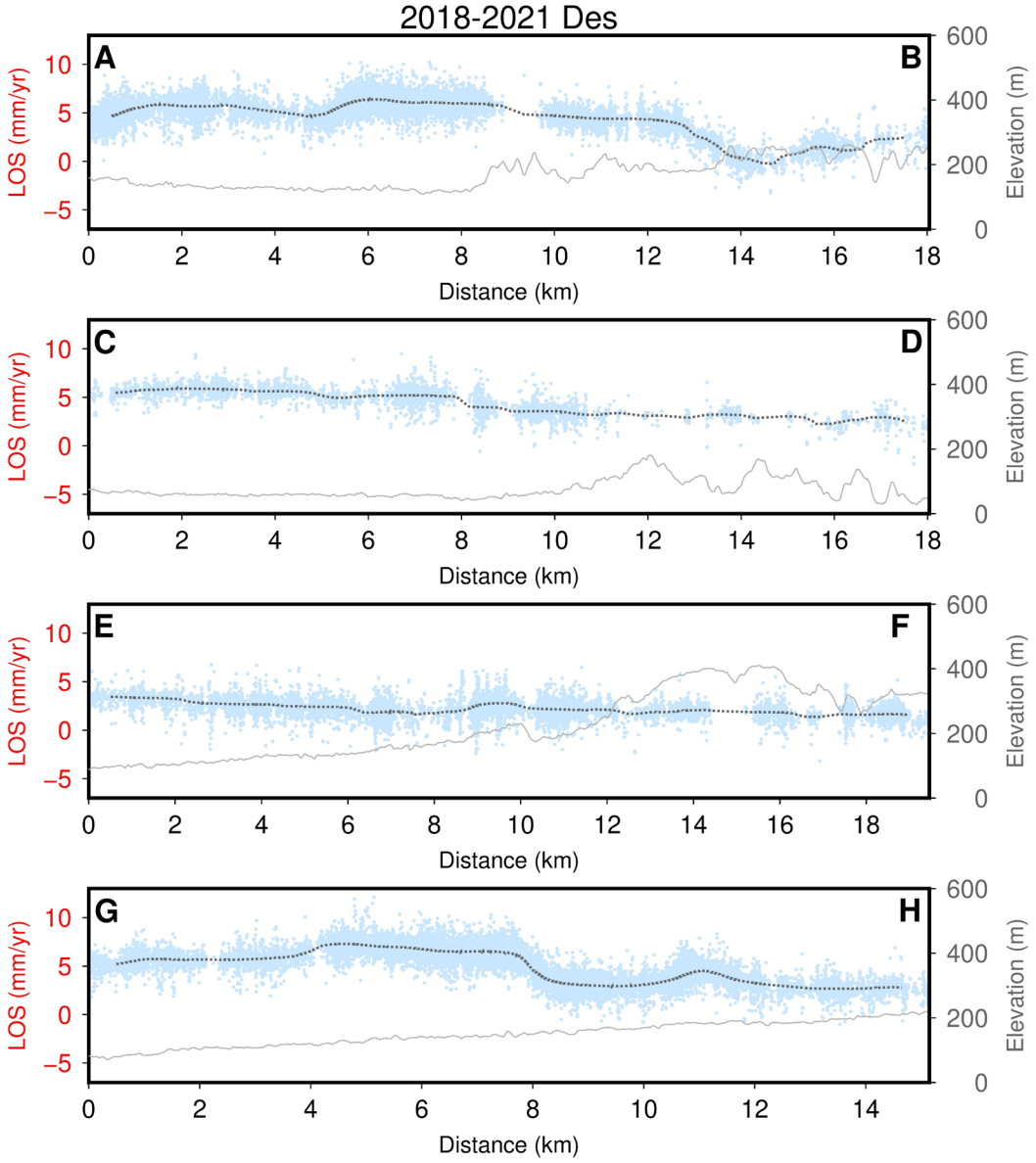


圖3-77：2018-2021桃園臺地降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-77：Result of profiles across the Taoyuan tableland between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

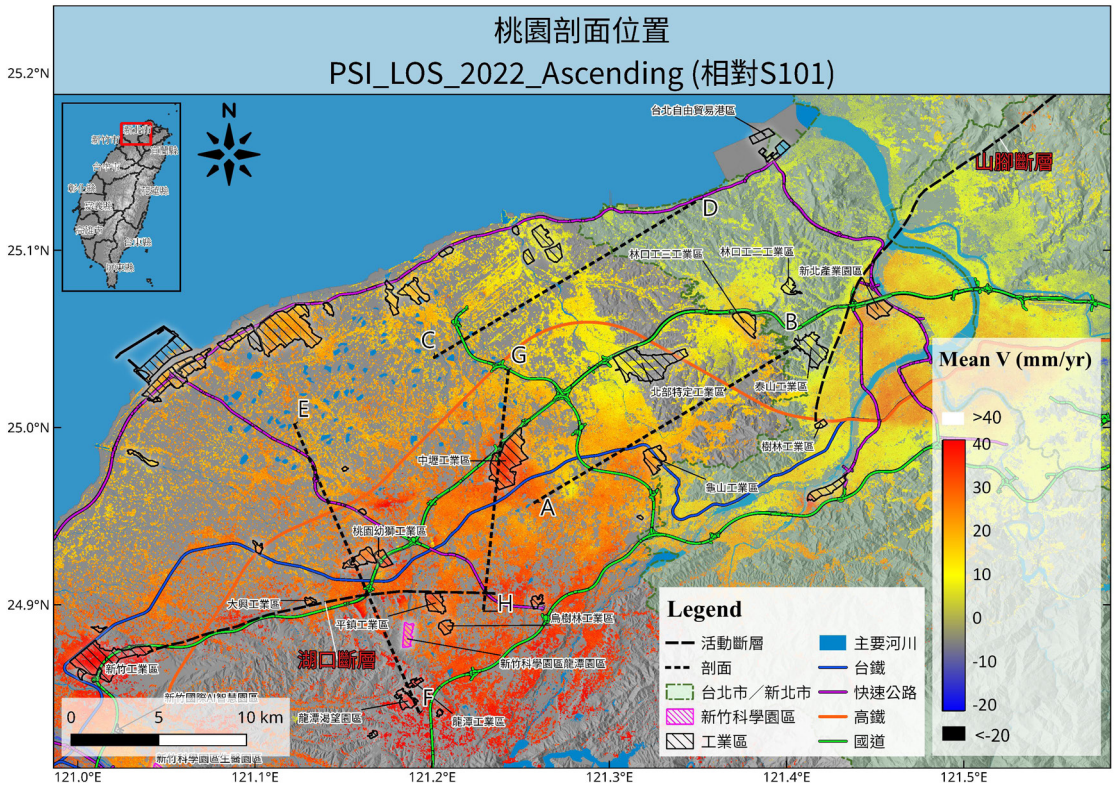


圖3-78：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-78：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of ascending orbits and profiles across the Taoyuan tableland.

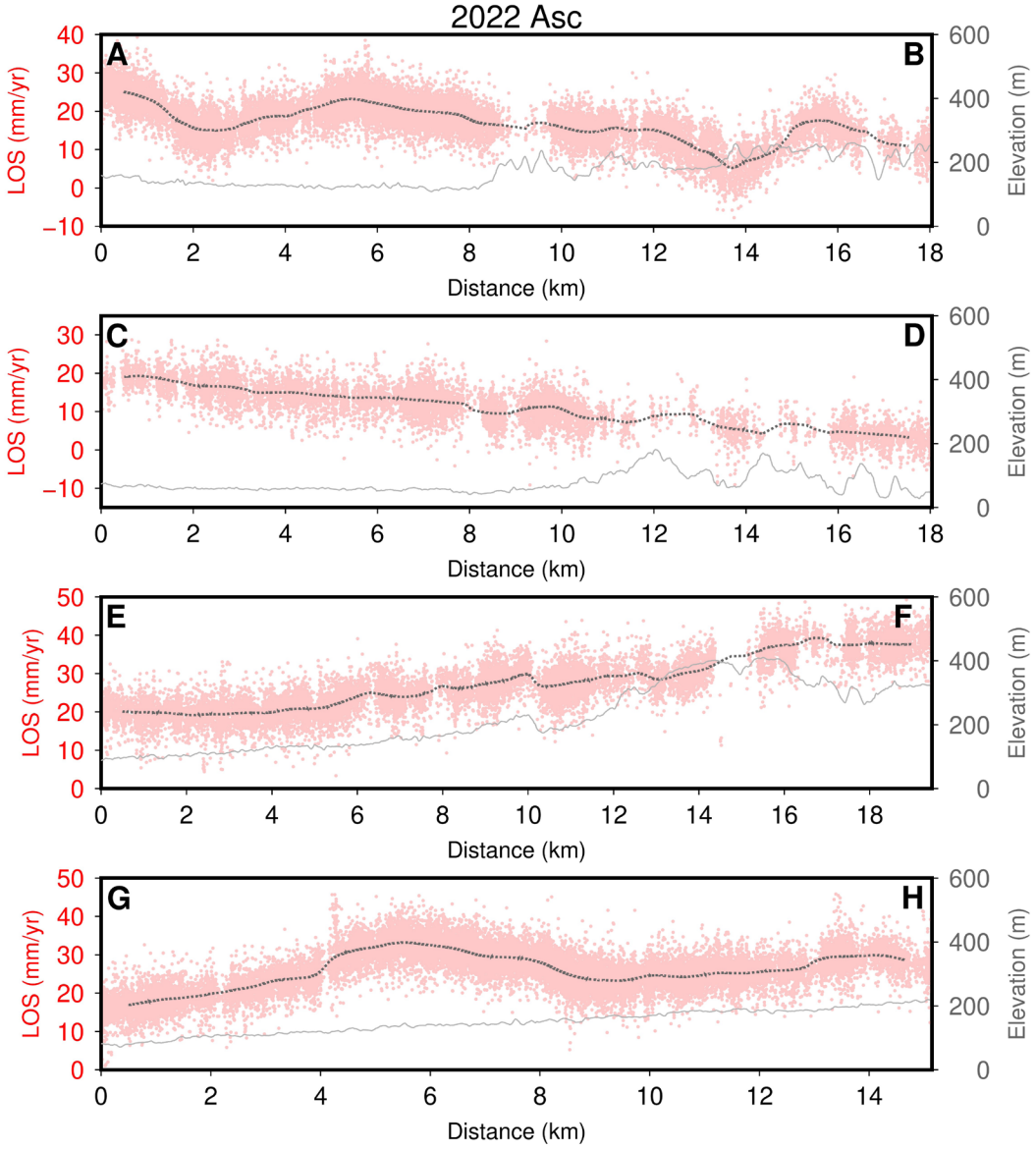


圖3-79：2022三義斷層升軌道影像的剖面成果。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-79：Result of profiles across the Taoyuan tableland between 2022 processed with images of ascending orbits. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault.

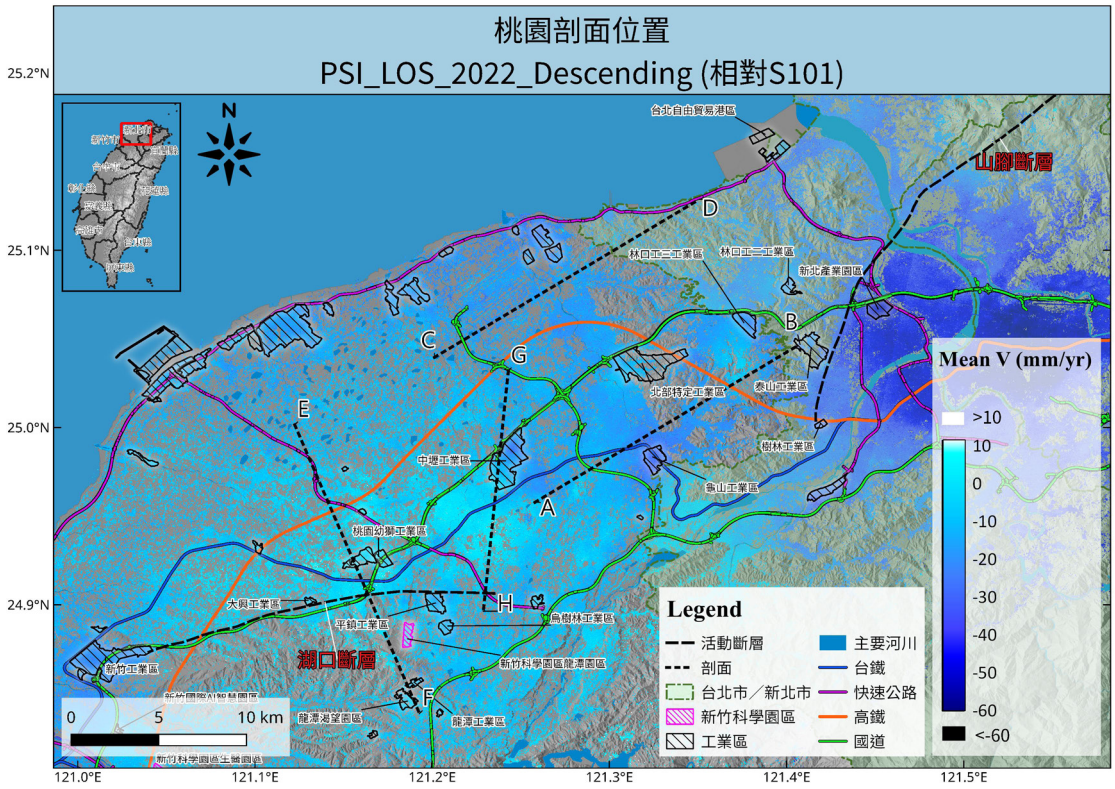


圖3-80：2022桃園臺地降軌道影像的剖面成果圖。

Figure 3-80：Average LOS velocity fields between 2022 processed with images of descending orbits and profiles across the Taoyuan tableland

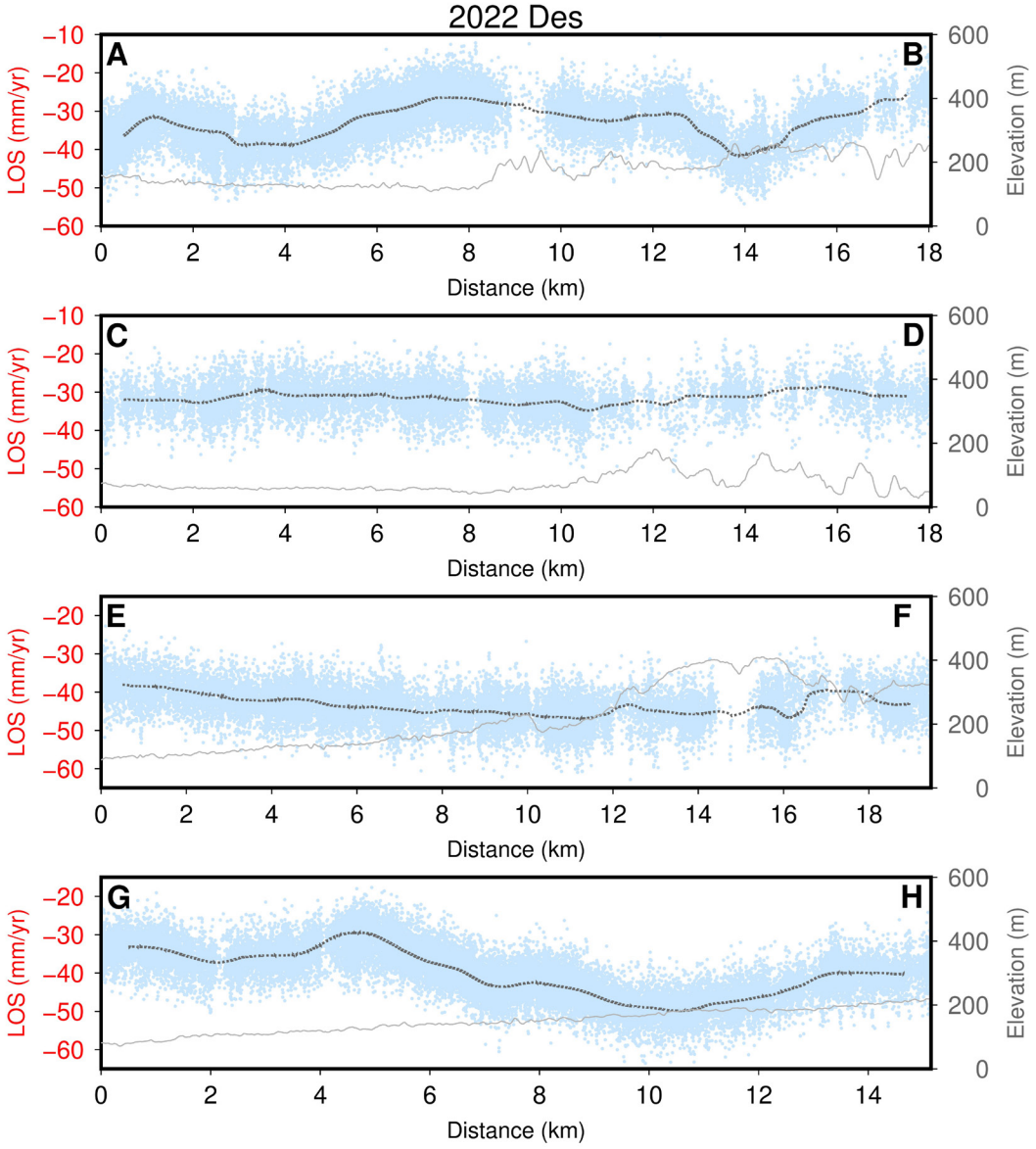


圖3-81：2022桃園臺地降軌道影像的剖面成果。藍點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-81：Result of profiles across the Taoyuan tableland between 2022 processed with images of descending orbits. The blue dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault.

3-6-6 2018-2021年跨斷層垂直速度場剖面

我們以斷層剖面、地質剖面與桃園台地剖面擷取解算後的垂直速度剖面，每條剖面選取兩側500公尺內的點位，將其投影至剖面走向之上，並沿著剖面距離進行一維空間的濾波，獲得連續的剖面垂直速度變化。綜觀所有垂直速度剖面成果與升軌、降軌LOS速度剖面成果趨勢接近，本節我們展示山腳斷層、湖口斷層、新城斷層與三義斷層的2018-2021年間升降軌道LOS速度剖面與垂直速度剖面，其餘成果於附錄呈現。

山腳斷層於SCO1沒有明顯的垂直速度變化，SCO2於山腳斷層兩側約有3mm/yr的垂直速度差，SCO3及SCO4顯示相對於山腳斷層西側，東側以12~15mm/yr 速度下陷（圖3-82、圖3-83），這些地表變形是否與山腳斷層移動相關，後續章節會再討論。

湖口斷層的兩條剖面於近斷層處無明顯的垂直速度變化，但在桃園台地有一明顯的抬升邊界，約在HKO1的5~6公里處（圖3-84、圖3-85）。新城斷層的三條剖面在近斷層處無明顯的垂直速度變化（圖3-86、圖3-87）。三義斷層在垂直速度場中可以看到在斷層兩側有些許的垂直速度差異，約為2-5mm/yr，剖面圖中SYI1與SYI2有些微垂直速度變化約為2~3mm/yr，SYI3與SYI4無明顯的垂直速度變化（圖3-88、圖3-89）。

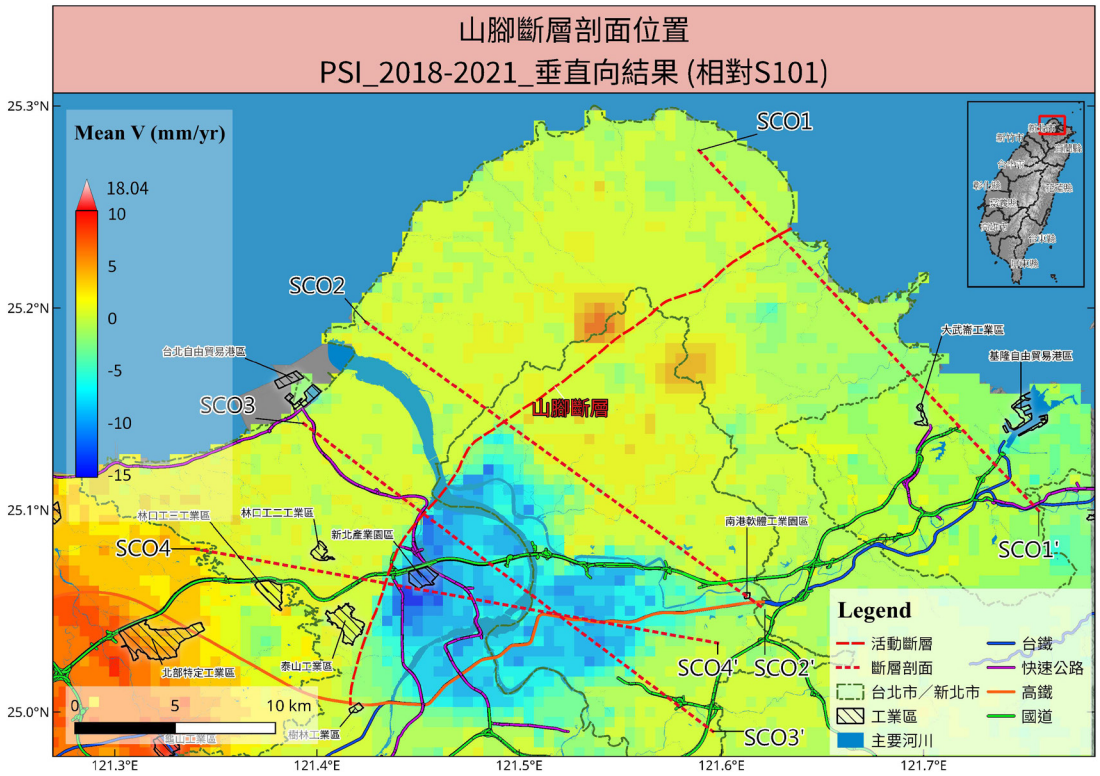


圖3-82：2018-2021山腳斷層垂直平均速度場。

Figure 3-82： Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Sanchiao Fault.

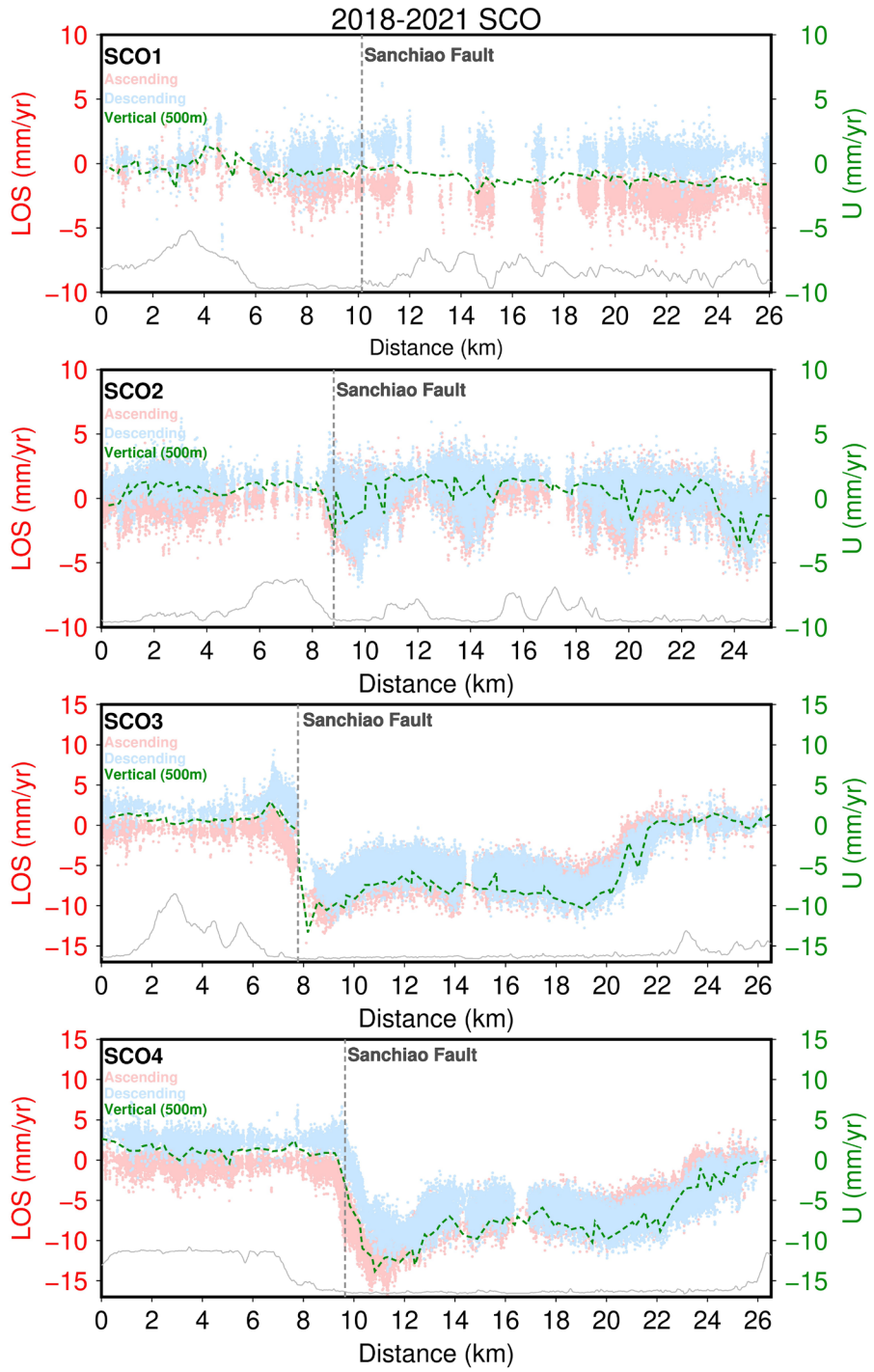


圖3-83：2018-2021山腳斷層垂直平均速度場的剖面圖。紅點為升軌道方向PSI速度，藍點為降軌道方向PSI速度，綠線為垂直方向速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-83：Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Sanchiao Fault. The red dots are the PSI velocity in ascending orbit, the blue dots are the PSI velocity in descending orbit, the green line is the vertical velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

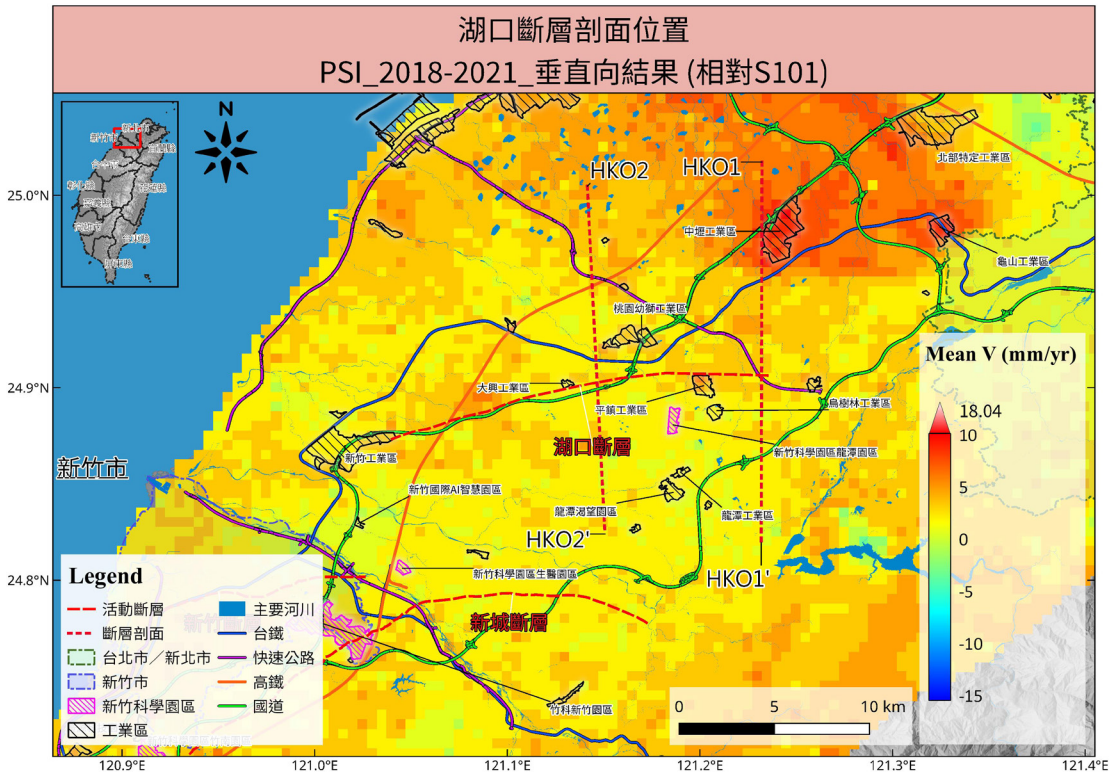


圖3-84：2018-2021湖口斷層垂直平均速度場。

Figure 3-84：Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Hukou Fault.

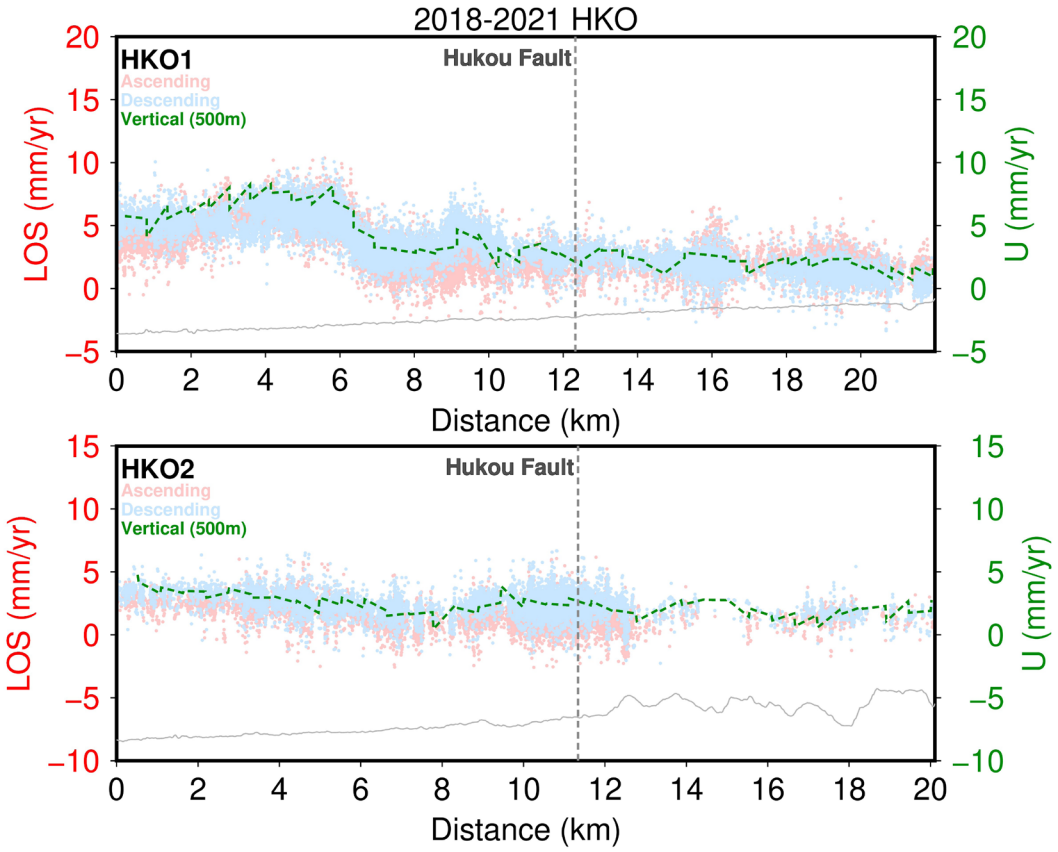


圖3-85：2018-2021湖口斷層垂直平均速度場的剖面圖。紅點為升軌道方向PSI速度，藍點為降軌道方向PSI速度，綠線為垂直方向速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-85：Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Hukou Fault. The red dots are the PSI velocity in ascending orbit, the blue dots are the PSI velocity in descending orbit, the green line is the vertical velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

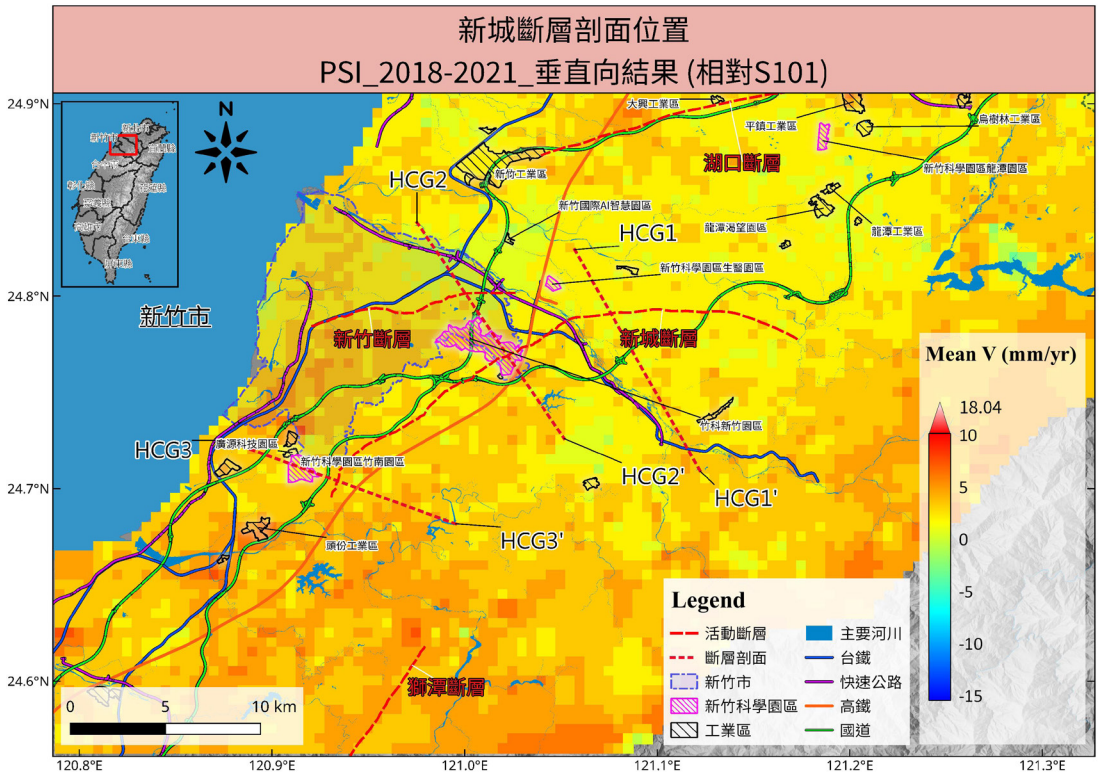


圖3-86：2018-2021新城斷層垂直平均速度場。

Figure 3-86：Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Hsincheng Fault.

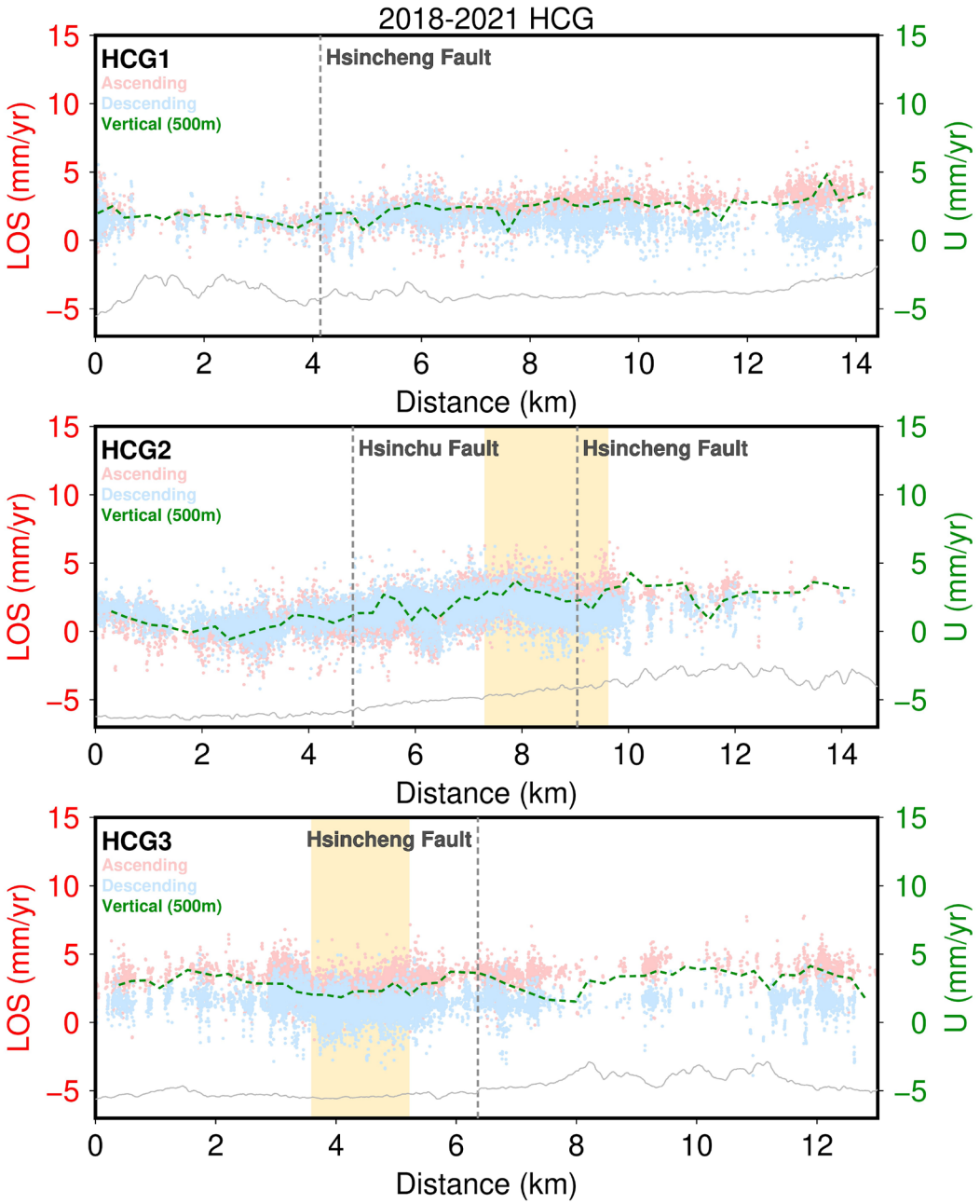


圖3-87：2018-2021新城斷層垂直平均速度場的剖面圖。紅點為升軌道方向PSI速度，藍點為降軌道方向PSI速度，綠線為垂直方向速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-87：Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Hsincheng Fault. The red dots are the PSI velocity in ascending orbit, the blue dots are the PSI velocity in descending orbit, the green line is the vertical velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

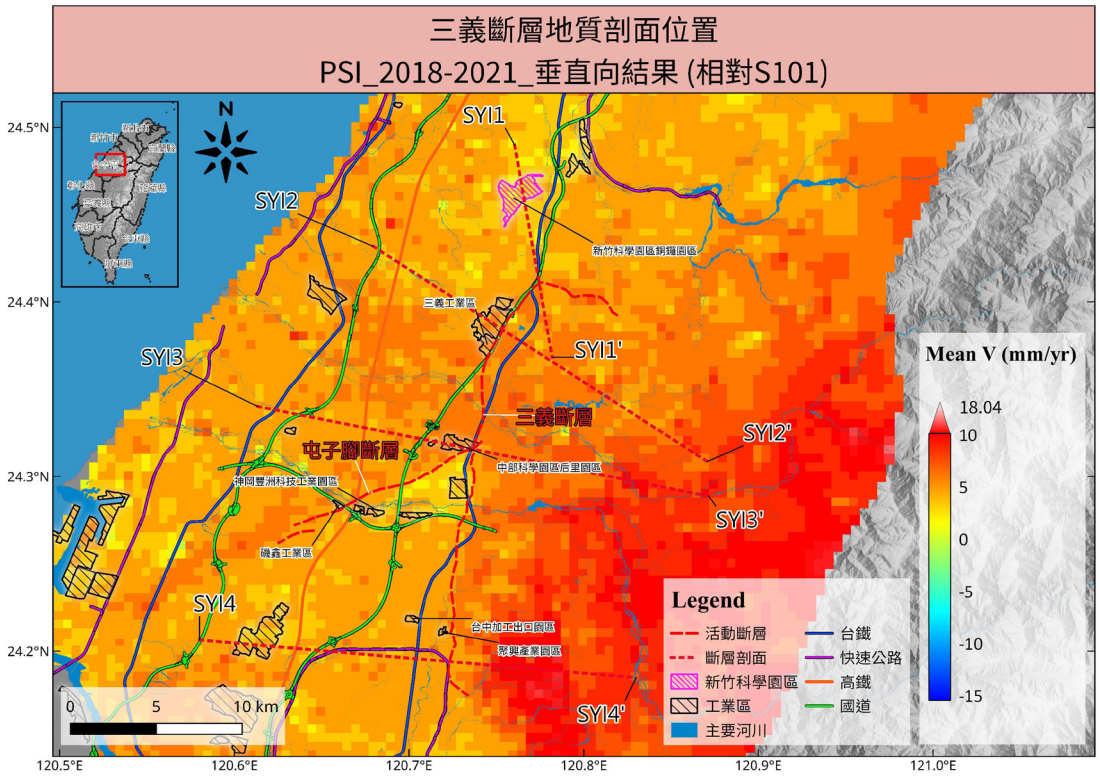


圖3-88：2018-2021三義斷層垂直平均速度場與剖面圖。

Figure 3-88：Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Sanyi Fault.

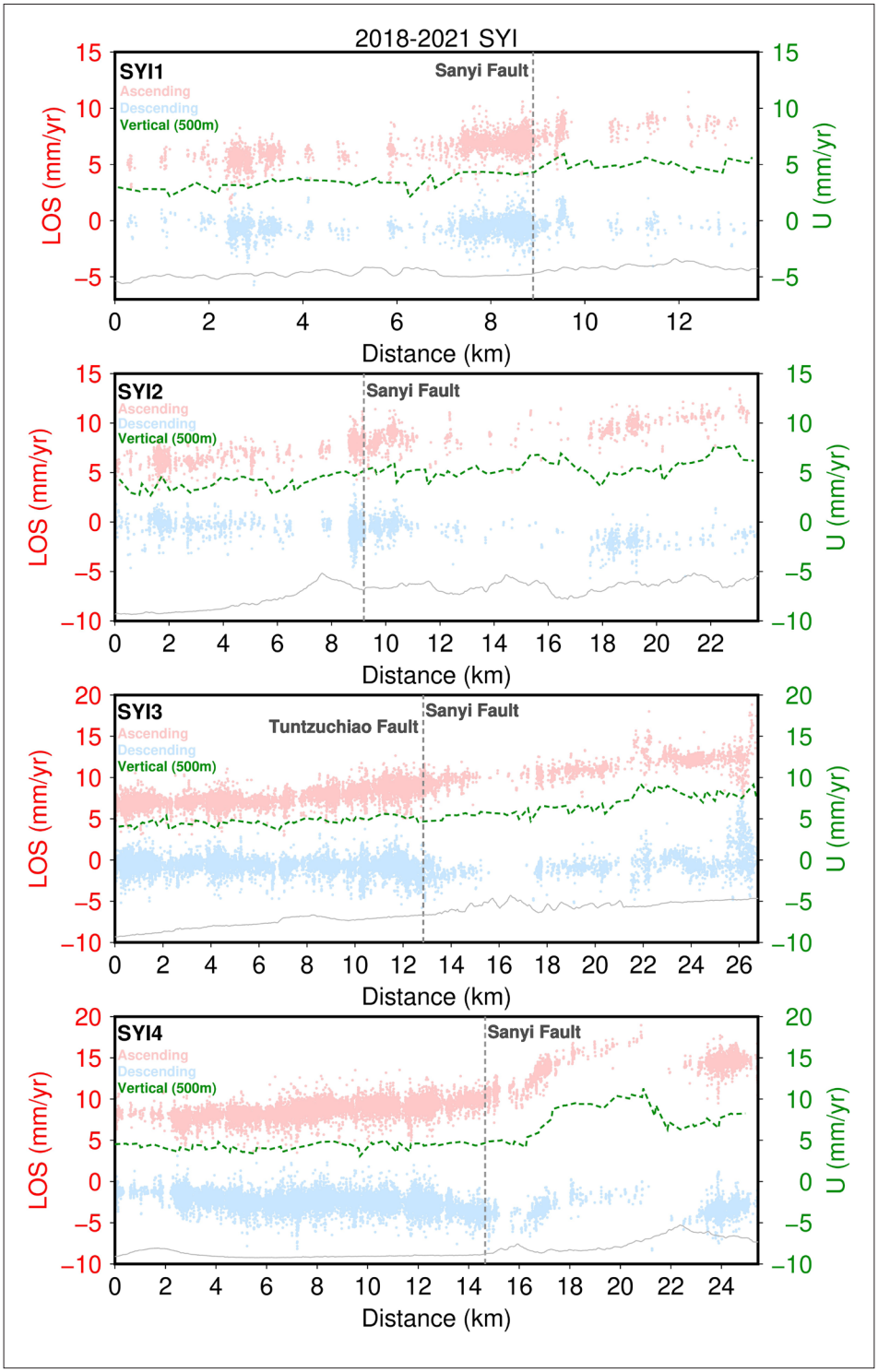


圖3-89：2018-2021三義斷層垂直平均速度場的剖面圖。紅點為升軌道方向PSI速度，藍點為降軌道方向PSI速度，綠線為垂直方向速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 3-89：Average vertical velocity fields between 2018 and 2021 across the Sanyi Fault. The red dots are the PSI velocity in ascending orbit, the blue dots are the PSI velocity in descending orbit, the green line is the vertical velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

3-7 重點區域時間序列分析

3-7-1 2018-2021年PSI與GNSS時間序列分析

我們在台北都會區內選取BANC、CWBN及GBRS與位於陽明山的YMSM，在新竹科學園區選取GS15、GS16、JUNA、PAO2、TCMS及YAME共10個GNSS點位（圖3-90），擷取座標範圍內500公尺的PS點，每幅影像取平均值作為該站點的PSI時間序列與GNSS時間序列進行比對，以下呈現2018-2021時期升軌道與降方向重點區域時間序列。

比對成果顯示，絕大部分情況下，雷達解算出來的時間序列與GNSS資料推算雷達的資料的趨勢都近似，雖然雷達資料偶爾會有離群資料，但是並不會影響整體趨勢。雷達資料在GNSS站為資料缺失時候，也可以提供參考。

無論是升軌道或是降軌道的時間序列，在台北與新竹地區PSI與GNSS時間序列都很接近，台北都會區的三個站時間序列呈現LOS隨時間遠離衛星移動的趨勢，陽明山的YMSM似乎有季節性的變化，新竹科學園區的成果則呈現平緩（圖3-91-圖3-92）。

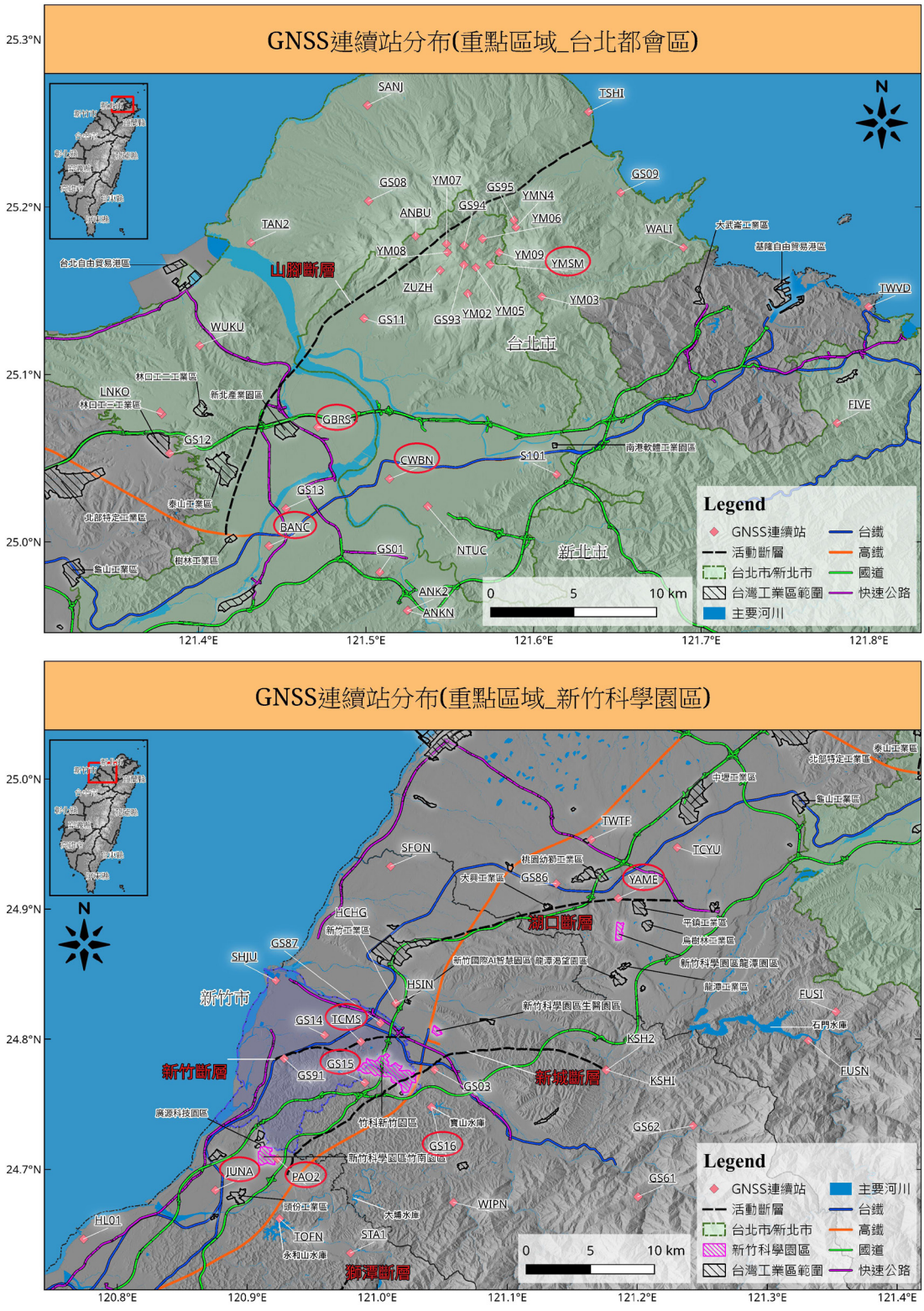


圖3-90：重點區域GNSS測站位置分佈圖。

Figure 3-90：The map for the GNSS stations of the important area.

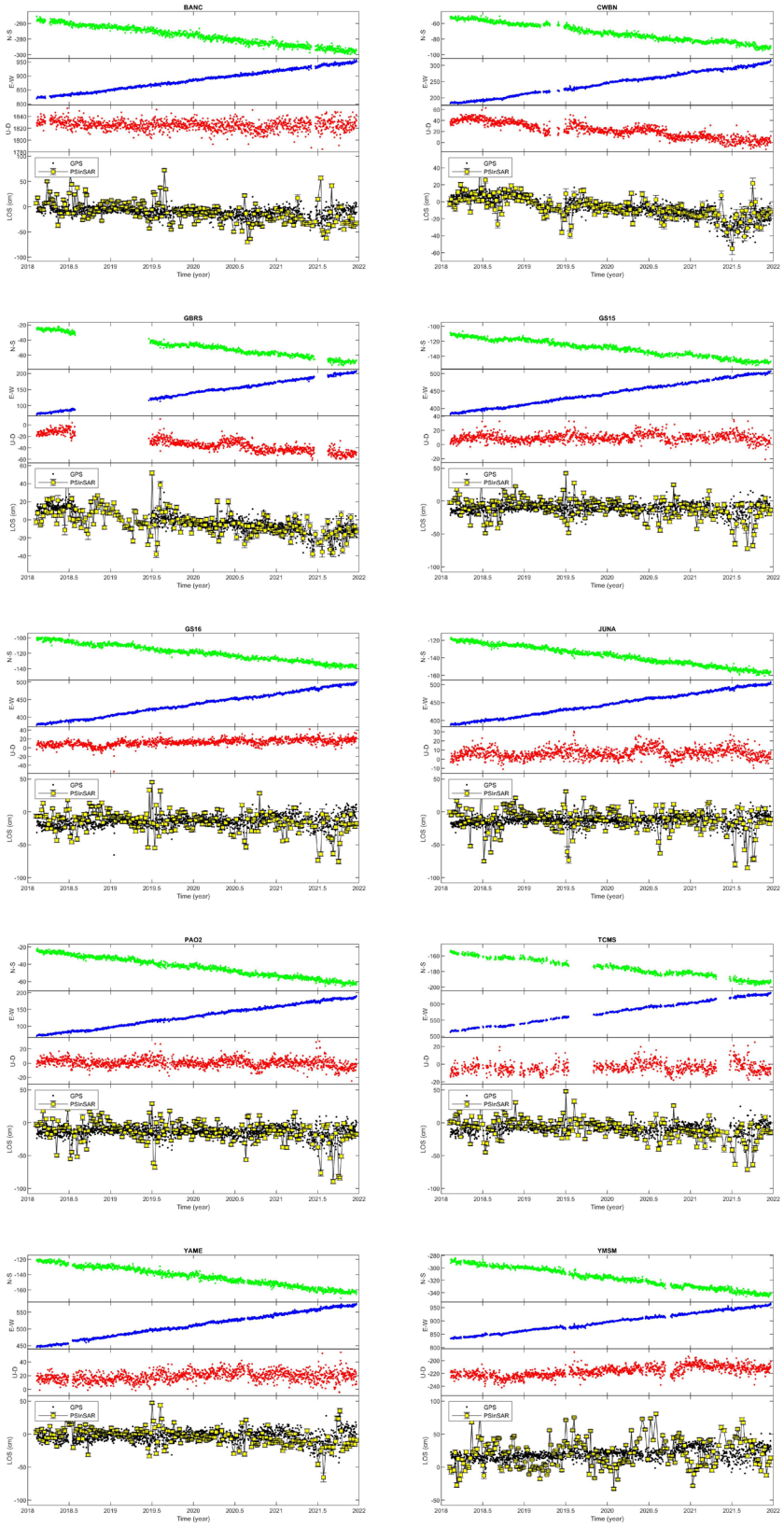


圖3-91：2018-2021年升軌方向BANC、CWBN、GBRS、YMSM、GS15、GS16、JUNA、PAO2、TCMS及YAME測站的PSI時間序列。

Figure 3-91：PSI time series of the GNSS stations BANC, CWBN, GBRS, YMSM, GS15, GS16, JUNA, PAO2, TCMS and YAME for ascending orbits between 2018 and 2021.

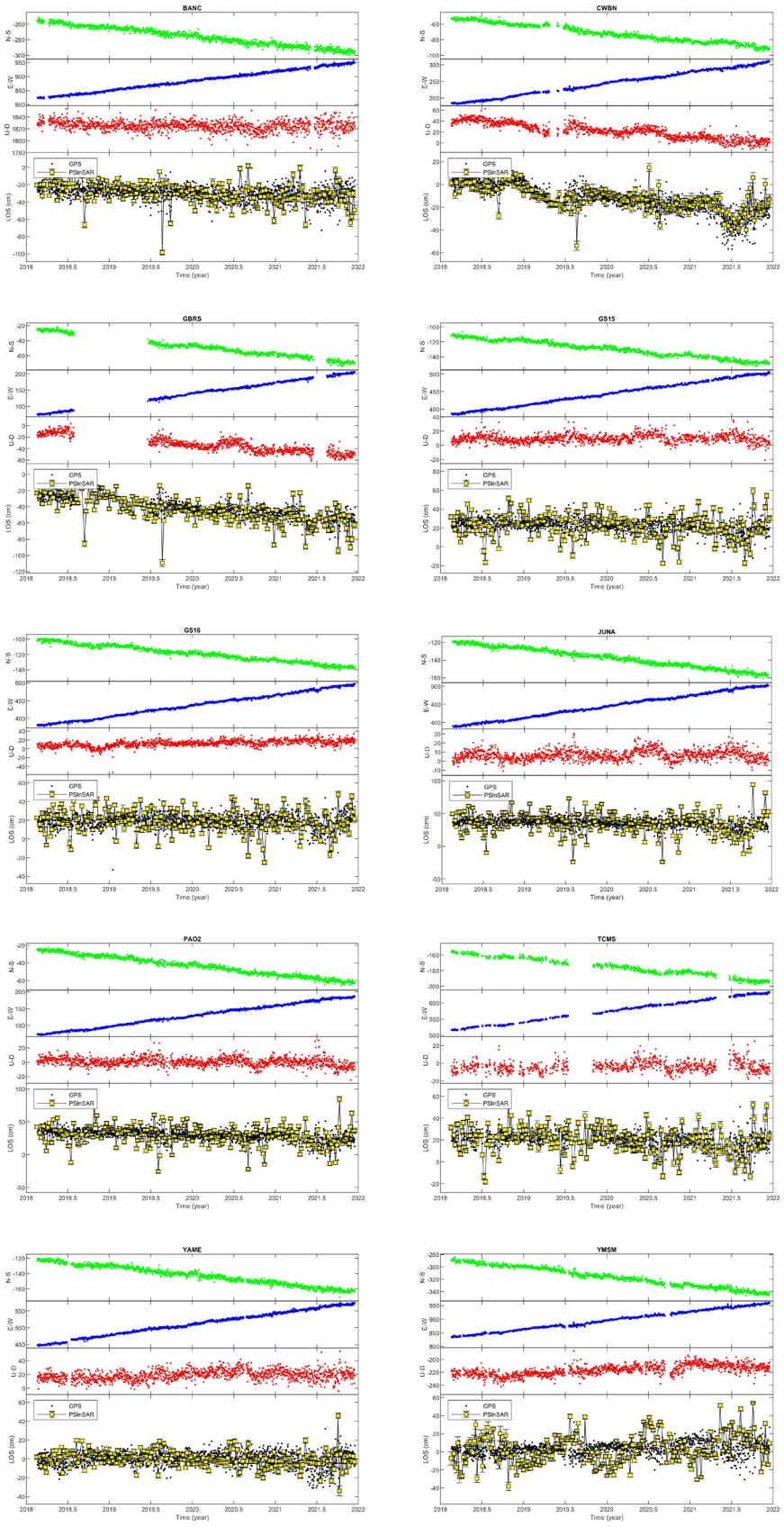


圖3-92：2018-2021年降軌方向BANC、CWBN、GBRS、YMSM、GS15、GS16、JUNA、PAO2、TCMS及YAME測站的PSI時間序列。

Figure 3-92：PSI time series of the GNSS stations BANC, CWBN, GBRS, YMSM, GS15, GS16, JUNA, PAO2, TCMS and YAME for descending orbits between 2018 and 2021.

3-7-2 2018-2021年PSI與地下水時間序列分析

我們擷取地下水觀測井座標範圍內500公尺的PS點，每幅影像取平均值作為該站點的PSI時間序列，在台北盆地內與桃園台地的地下水觀測井觀測資料進行比對（圖3-93、圖3-94），在台北盆地內PSI速度遠離衛星移動（近似下陷）的區域如五股、新莊、三重、蘆洲、永和及板橋，PSI時間序列與地下水位變化趨勢類似，同樣都呈現了季節性訊號，並且在2022年中之前都有下陷與遠離衛星的趨勢，因此地下水位變化可能為造成2018-2021年間PSI速度場呈現遠離衛星移動的原因之一（圖3-95），但是這樣並不能排除地表變形為沈積物壓密或是斷層活動所造成。桃園台地LOS速度高區的PSI時間序列與地下水位變化趨勢較不相似，推測此區域的地表變形行為與地下水位變化無關，可能與桃園台地構造活動有關（圖3-96~3-98）。

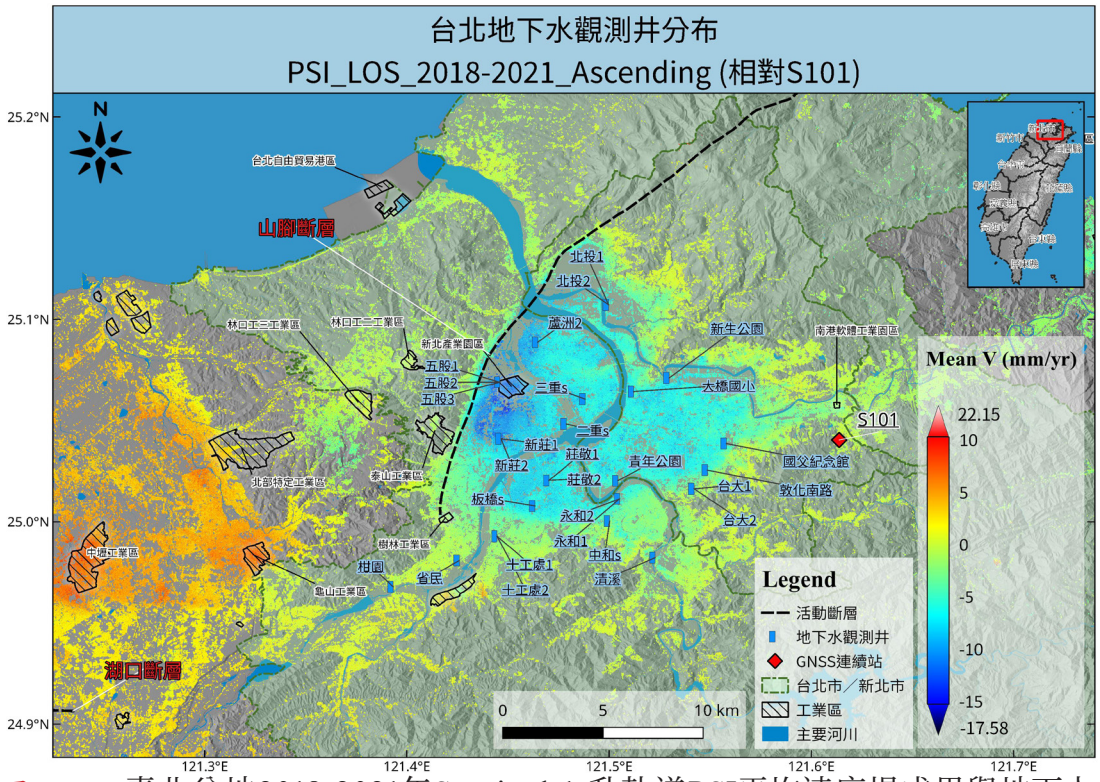


圖3-93：臺北盆地2018-2021年Sentinel-1 升軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。

Figure 3-93：The map for the observation well of groundwater with PSI result for ascending orbits between 2018 and 2021 in Taipei basin.

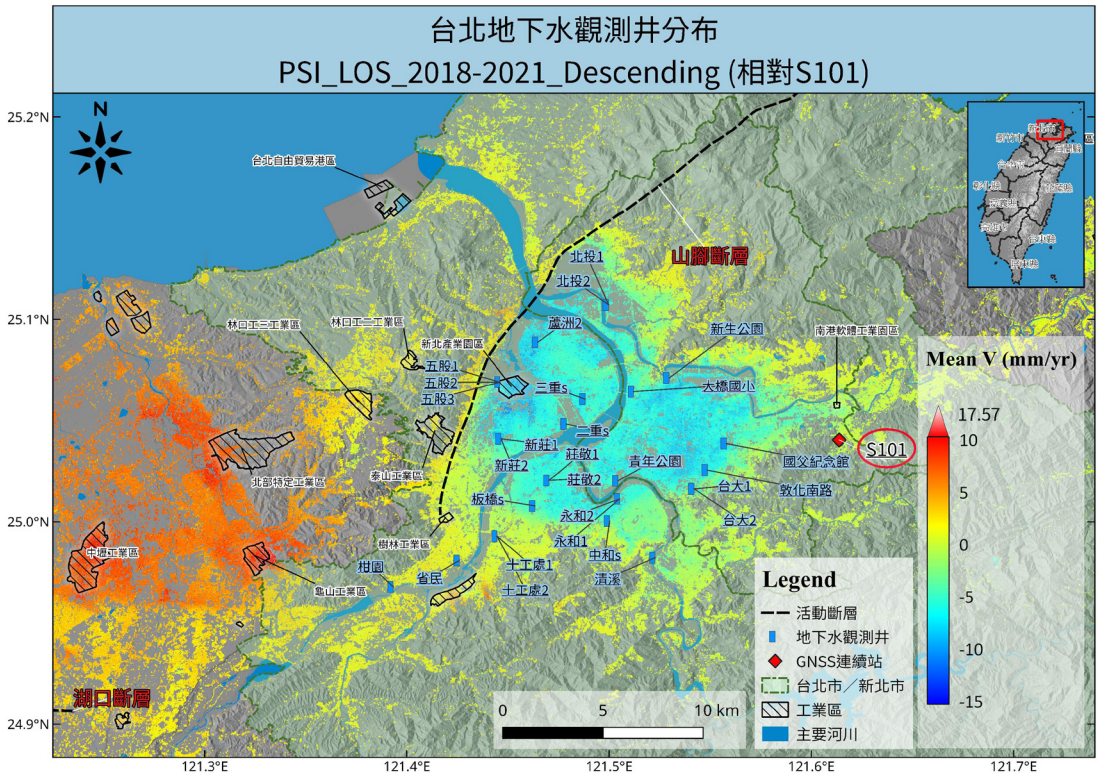


圖3-94：臺北盆地2018-2021年Sentinel-1 降軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。

Figure 3-94：The map for the observation well of groundwater with PSI result for descending orbits between 2018 and 2021 in Taipei basin.

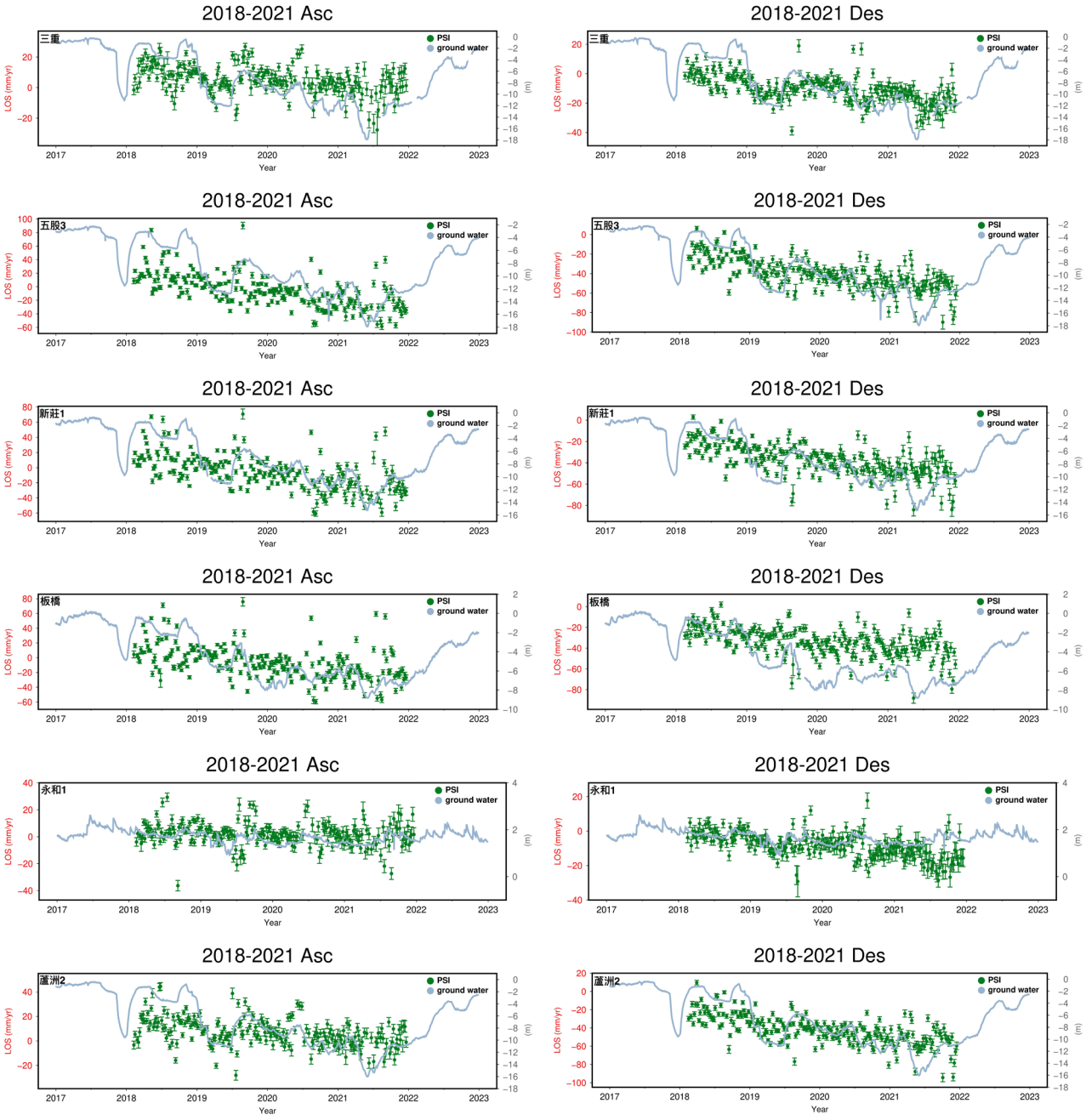


圖3-95：2018-2021年臺北盆地地下水觀測井與PSI時間序列。左圖為升軌道結果，右圖為降軌道結果，綠點為PSI時間序列，藍線為地下水位變化。

Figure 3-95：PSI and observation well of groundwater time series in Taipei basin. Figures of left are the results for the ascending orbits and right are the results for the descending orbits between 2018 to 2021. The green dots are the PSI time series, and the blue line is groundwater level.

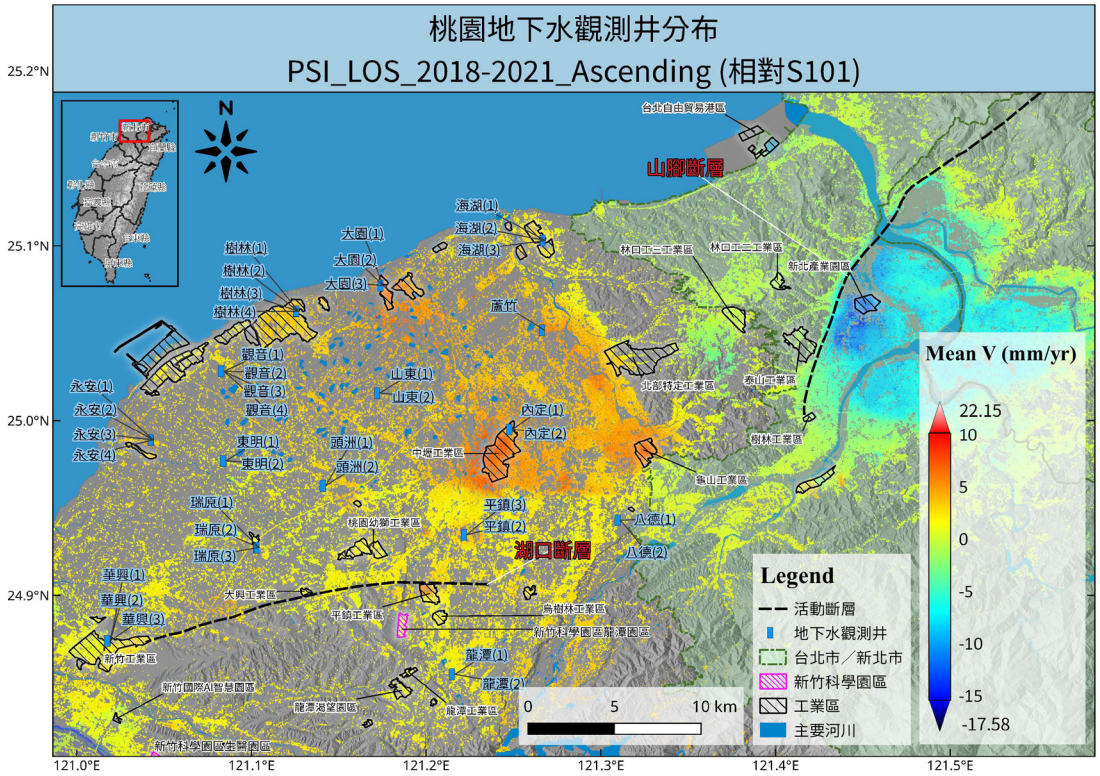


圖3-96：桃園地區2018-2021年Sentinel-1 升軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。

Figure 3-96：The map for the observation well of groundwater with PSI result for ascending orbits between 2018 and 2021 in Taoyuan area.

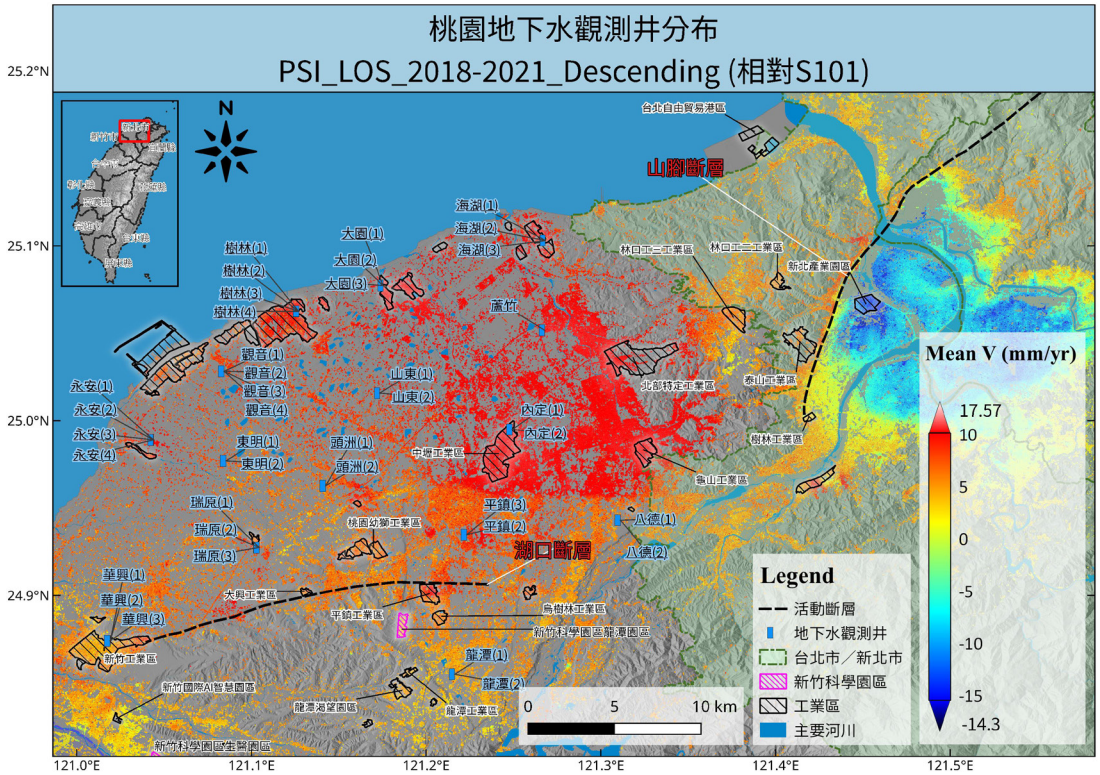


圖3-97：桃園地區2018-2021年Sentinel-1 降軌道PSI平均速度場成果與地下水觀測井分佈圖。

Figure 3-97：The map for the observation well of groundwater with PSI result for descending orbits between 2018 and 2021 in Taoyuan area.

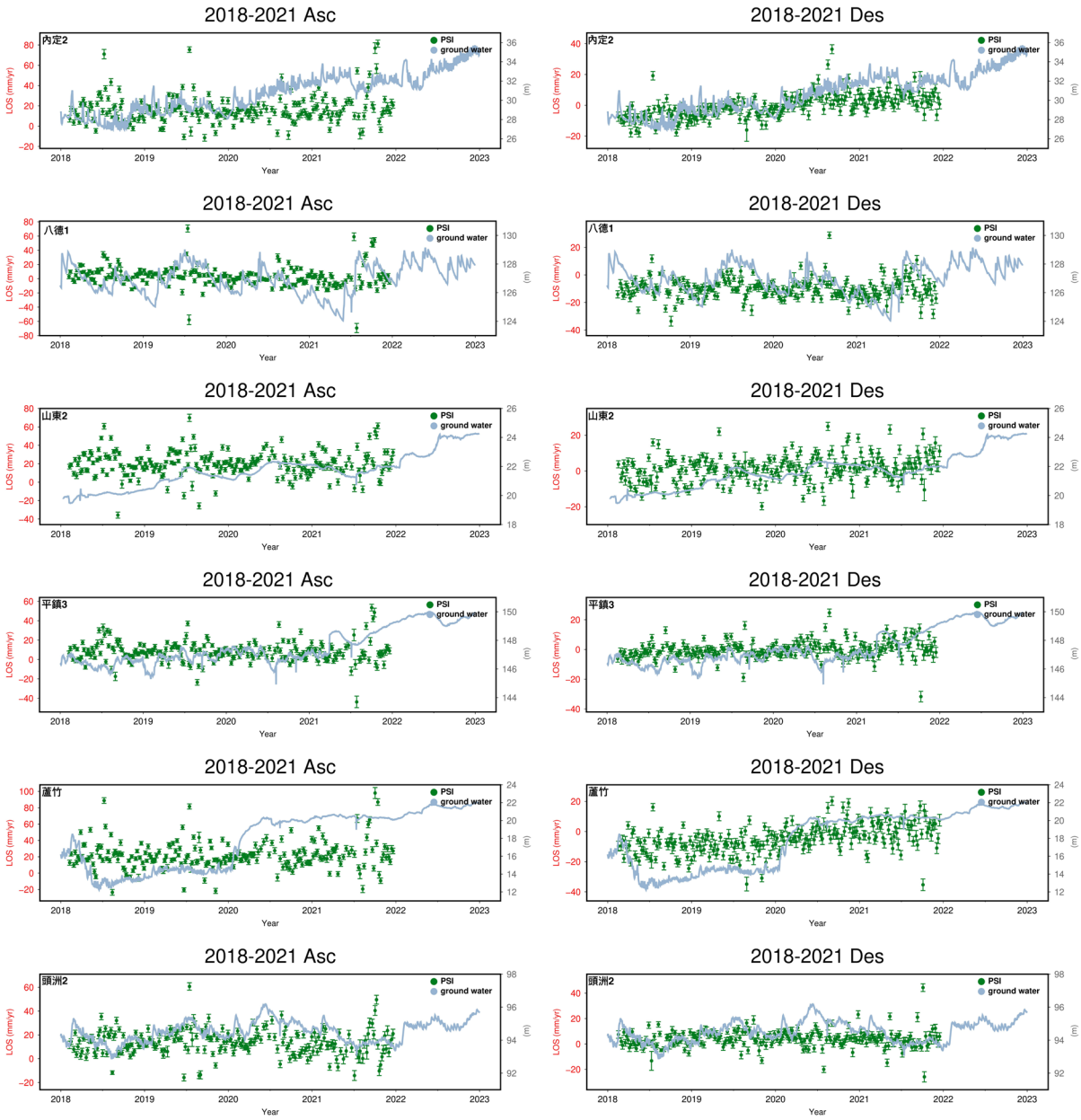


圖3-98：2018-2021年桃園地區地下水觀測井與PSI時間序列。左圖為升軌道結果，右圖為降軌道結果，綠點為PSI時間序列，藍線為地下水位變化。

Figure 3-98：PSI and observation well of groundwater time series in Taoyuan area. Figures of left are the results for the ascending orbits and right are the results for the descending orbits between 2018 to 2021. The green dots are the PSI time series, and the blue line is groundwater level.

3-7-3 跨斷層時間序列

由於永久散射體雷達差分干涉不僅包含高空間解析度的資訊，也包含了相對密集的時間序列資訊。在這樣的資料中，我們幾乎可以在任何適當地方觀察該區域相對於某個點的地表變形。雖然這樣的時間序列精確度無法跟GNSS連續站相提並論，但是GNSS連續站也有總體價錢高，無法隨處設置的條件，因此利用雷達時間序列觀察關注地點之變形是雷達資料有用的工作之一。

我們選擇了山腳斷層（SCO）、湖口斷層（HKO）、新城斷層（HCG）及三義斷層（SYI）各取一個參考點與觀測點。在斷層剖面上，以北（西）邊端點為參考點，觀察南（東）邊端點的相對運動。

山腳斷層（SCO）在降軌資訊中顯示在2019年底有一約10mm的位移量，但在升軌資訊並無此現象。新城斷層（HCG）與三義斷層（SYI）部分看來，西北端點相對東南端點有足夠明顯的活動，兩端點的雷達斜距方向位移可達到超過15mm。湖口斷層（HKO）兩側的端點之相對移動較不明顯（圖3-99）。

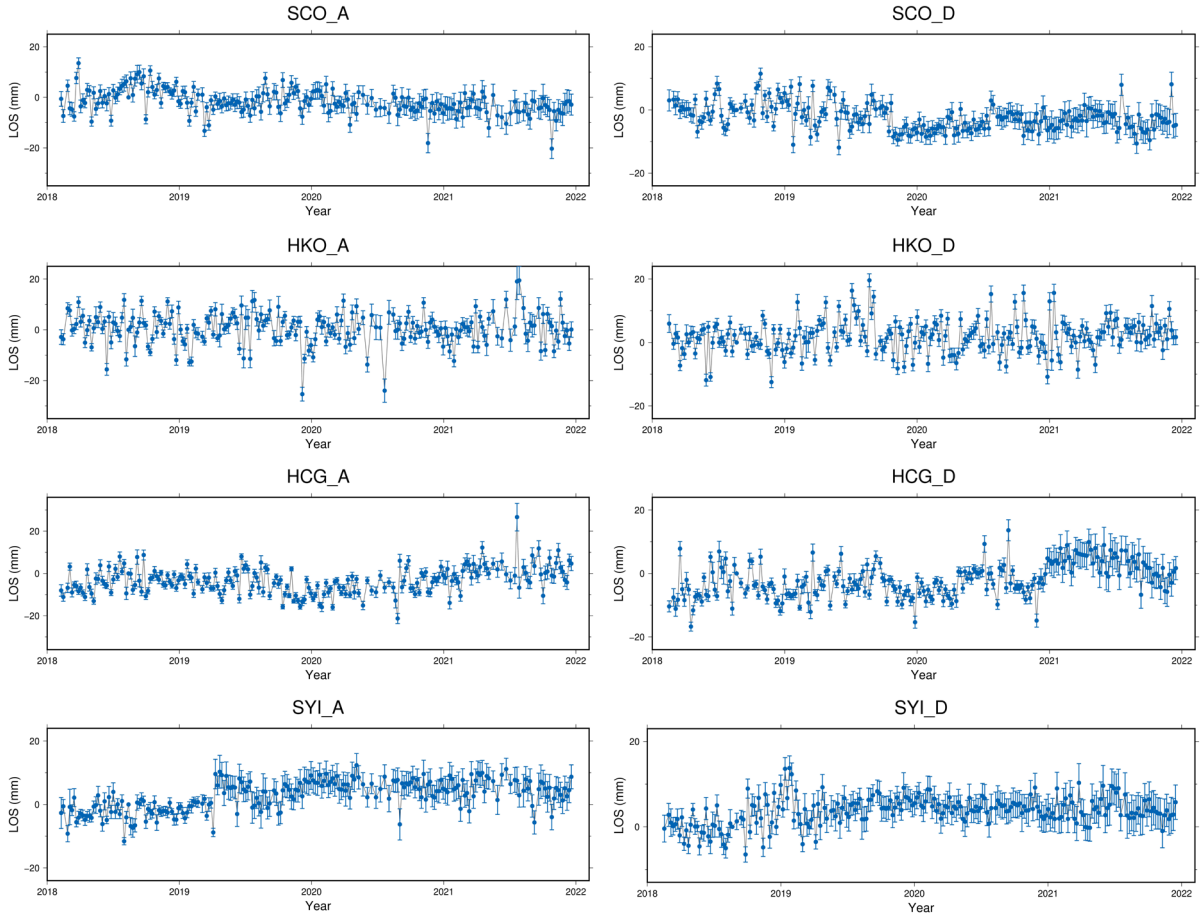


圖3-99：2018-2021年跨斷層時間序列。左圖為升軌道成果，右圖為降軌道成果，由上至下分別為山腳斷層（SCO）、湖口斷層（HKO）、新城斷層（HCG）及三義斷層（SYI）。藍點為每幅影像相對主影像於雷達視角方向（LOS）位移量。

Figure 3-99：Time series from 2018 to 2021 across the faults in northern Taiwan. (left) The results of ascending orbit, (right) the results of descending orbit. From top to bottom are Sanchiao Fault (SCO), Hukou Fault (HKO), Hsincheng Fault (HCG) and Sanyi Fault (SYI). The blue dots are the displacement of each image relative to the master image in the line-of-sight(LOS) direction.

第四章、北部地區雷達資料與其他大地測量觀測資料的比對

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

本計畫選取Sentinel-1A與Sentinel-1B衛星SAR影像作為資料分析對象，由於Sentinel-1B衛星自2018年2月後固定拍攝臺灣，至2021年底無法接收訊號，僅2018-2021時期使用Sentinel-1B的影像，因此於2014-2018與2022時期衛星軌道重複週期為12天，2018-2021時期加入Sentinel-1B影像頻率為6天，使用的影像時間自2014年10月至2022年12月，影像使用幅數如表4-1所示。

表4-1：Sentinel-1A衛星影像使用幅數。

Table 4-1：Numbers of Sentinel-1A satellite images used in this project.

	2014-2018	2016-2018	2018-2021
升軌(Ascending)	75幅	217幅	27幅
降軌(Descending)	60幅	227幅	16幅

4-1 GNSS連續站與PSI資料比對

我們分別解算了2014–2018、2018–2021、2022三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。我們將所有結果相對於S101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（R^2）檢視PSI與GNSS資料之直線關係的強度，以根均方誤差（RMSE）檢視預測值和觀測值之間的平均差異，評估回歸模型的準確度。各時期GNSS數量如表4-2，測站位置如圖4-1。

整體而言，第一個時段2014-2018受限於前期Sentinel-1A在2014年4月時發射，待軌道穩定、十月才開始在臺灣拍攝，而Sentinel-1B在此時期並未拍攝臺灣地區，因此此時段的時間影像間隔與頻率相對2018-2021時期不穩定，這可能是造成此段時間與GNSS連續站對比而言相似度低的原因之一。2018-2021隨著衛星狀態穩定，觀測時間長，影像張數多GNSS連續站與PSI比對相似度越來越高，2018-2021年計算出的迴歸線斜率接近1。而2022年，由於Sentinel-1B故障，僅有Sentinel-1A衛星一年的觀測資料，且降軌道方向於3-6月期間無觀測資料，使得影像數量比前兩個時期少得多，而僅使用一年的GNSS觀測資料擬合速度場也比長時間觀測資料容易有誤差，因此2022年的PSI與GNSS比對成果不佳，只能顯示趨勢。

由於山區植被茂密，PSI與GNSS觀測誤差大，因此在對比結果中我們試著將山區的測站移除不列入計算，三時期的比對成果於R^2與RMSE皆有改善，成果詳述於以下各子節。

表4-2：各時期GNSS測站數量。

Table 4-2：Numbers of GNSS stations in each period.

	2014-2016	2016-2018	2018-2021
升軌(Ascending)	84	92	72
降軌(Descending)	98	100	79

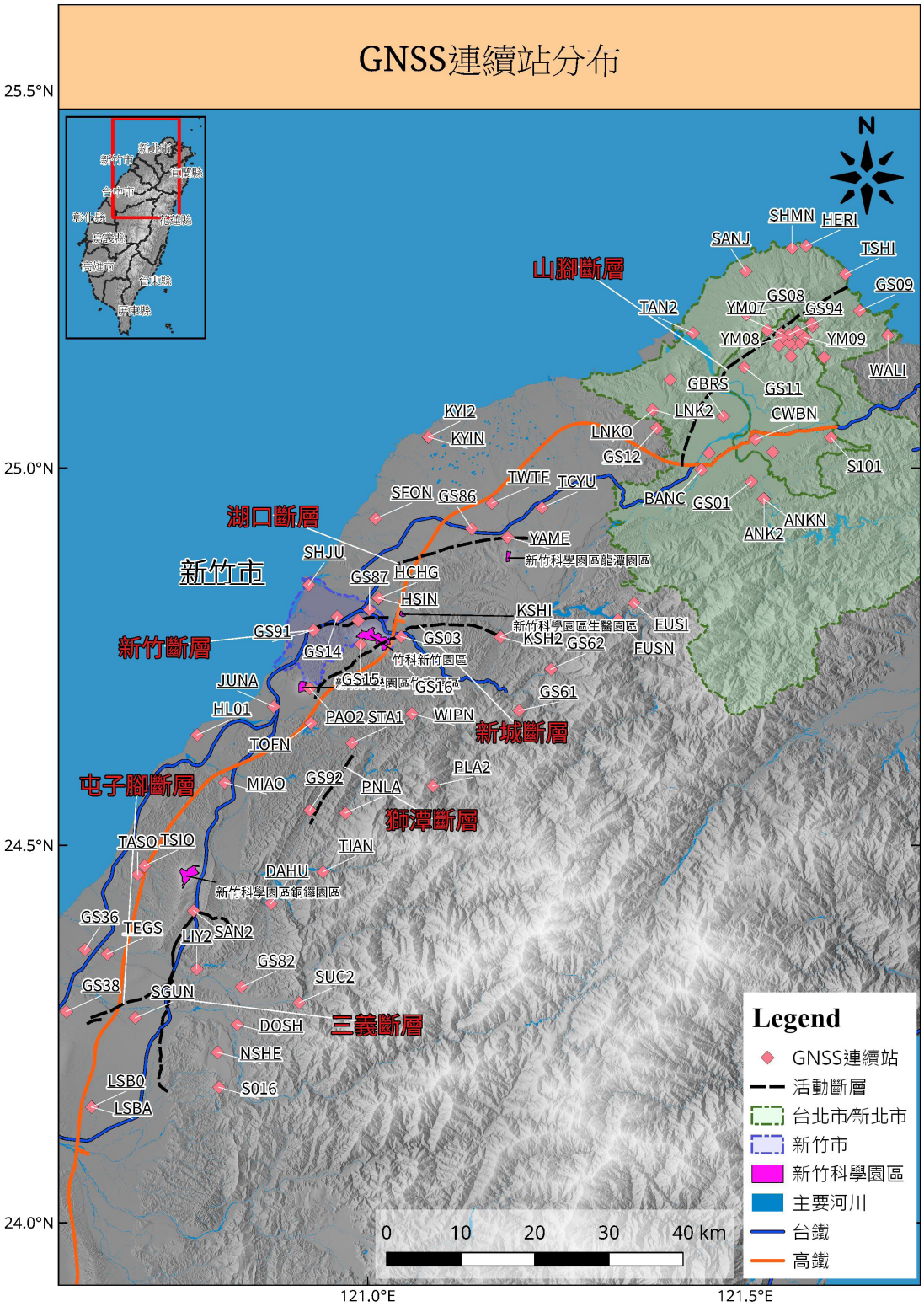


圖4-1：GNSS測站位置分佈圖。

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

4-1-1 2014-2018年

圖4-2、3-4為2014-2018年研究區域升軌道與降軌道的永久散射體雷達差分干涉成果。圖 3-3, 3-5分別為研究區域GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表4-3則是2014-2018年升降軌道PSI與GNSS資料比對結果。從表4-3的結果可以看到PSI與GNSS的斜率與R^2不盡理想，RMSE都小於4.5mm/yr，移除山區測站後之斜率、R^2及RMSE皆有改善。

圖4-2、3-4顯示PSI升降軌道成果與GNSS比對顯示在山區比對差異大，甚至有些測站速度方向相反，除去這些測站，PSI與GNSS的變形趨勢接近。圖4-3顯示GNSS投影至升軌方向的LOS速度大約介於-15~10mm/yr間，PSI觀測值大約介於-35~15mm/yr間，圖4-5顯示GNSS投影至降軌方向的LOS速度大約介於-20~15mm/yr間，PSI觀測值大約介於-18~10mm/yr間，大屯火山群與林口臺地升降軌有部分測站顯示雷達觀測值大於GNSS連續站觀測值，苗栗以南地區測站在升軌方向GNSS觀測值大於PSI觀測值，降軌方向是PSI觀測值大於GNSS觀測值。雖然資料有所差異，不至於離散，且兩者資料間的RMSE皆小於4.5mm/yr，移除山區測站後斜率、R^2及RMSE皆有改善，顯示資料仍有可信度。

表4-3：2014-2018年PSI與GNSS比對成果。

Table 4-3：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2014-2018.

	slope	R^2	RMSE
Ascending	0.2527	0.3198	4.2605
移除山區測站	0.3180	0.4855	3.3075
Descending	0.3535	0.3882	3.1755
移除山區測站	0.4160	0.4078	3.1392

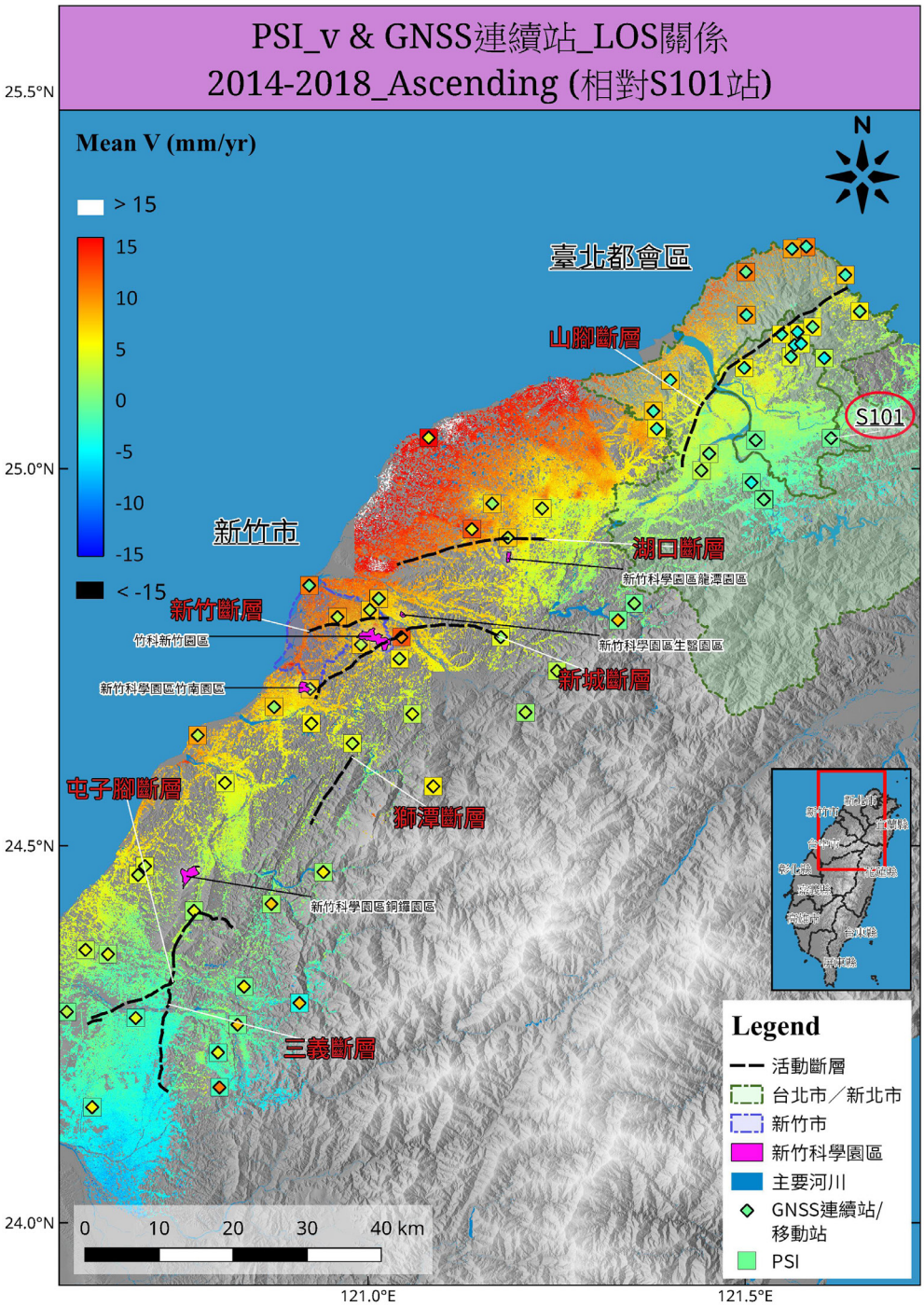


圖4-2：2014-2018年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S101，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-2：Mean velocity field in ascending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

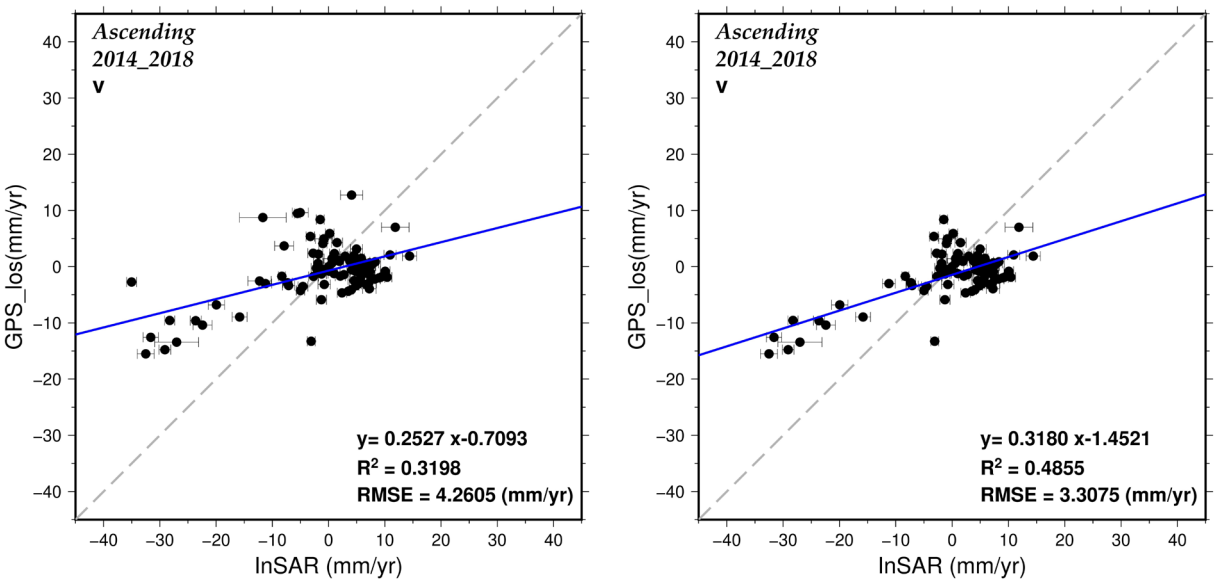


圖4-3：2014-2018 Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S101。左圖為所有測站成果，右圖為移除山區測站成果。雖然斜率與理想有相當的差異，然而雷達資料與GNSS呈現線性相關，所以雷達的趨勢與GNSS一致，而數量不同。

Figure 4-3：2014-2018 ascending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station S101 was used as the reference station. (Left) result of all GNSS stations. (Right) result of removing GNSS stations in the mountain area. Although the slope of the fitted line is far from ideal, the correlation between PSI and GNSS data is linear with limited dispersion from the fitted line.

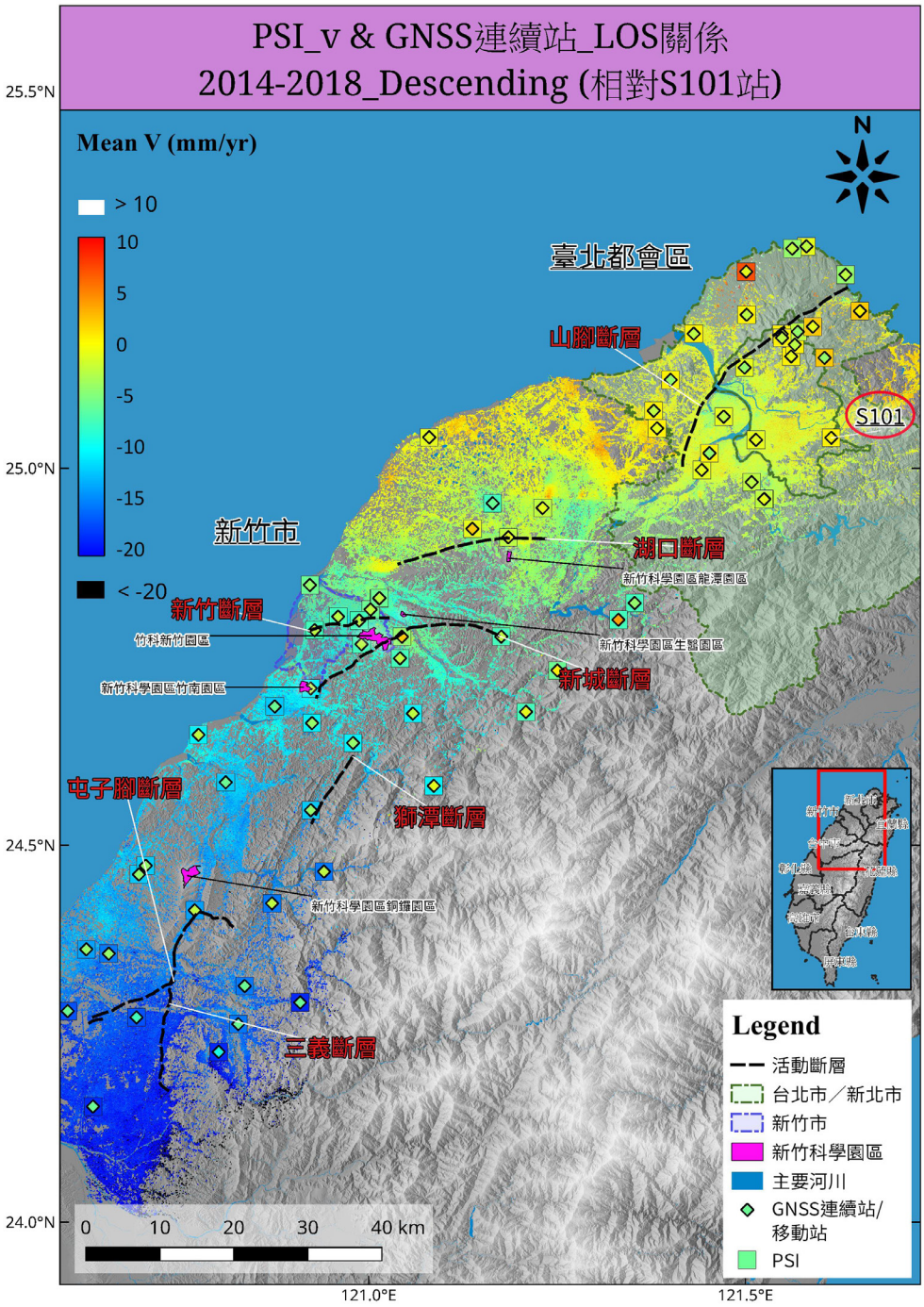


圖4-4：2014-2018年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S101，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-4：Mean velocity in dscending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

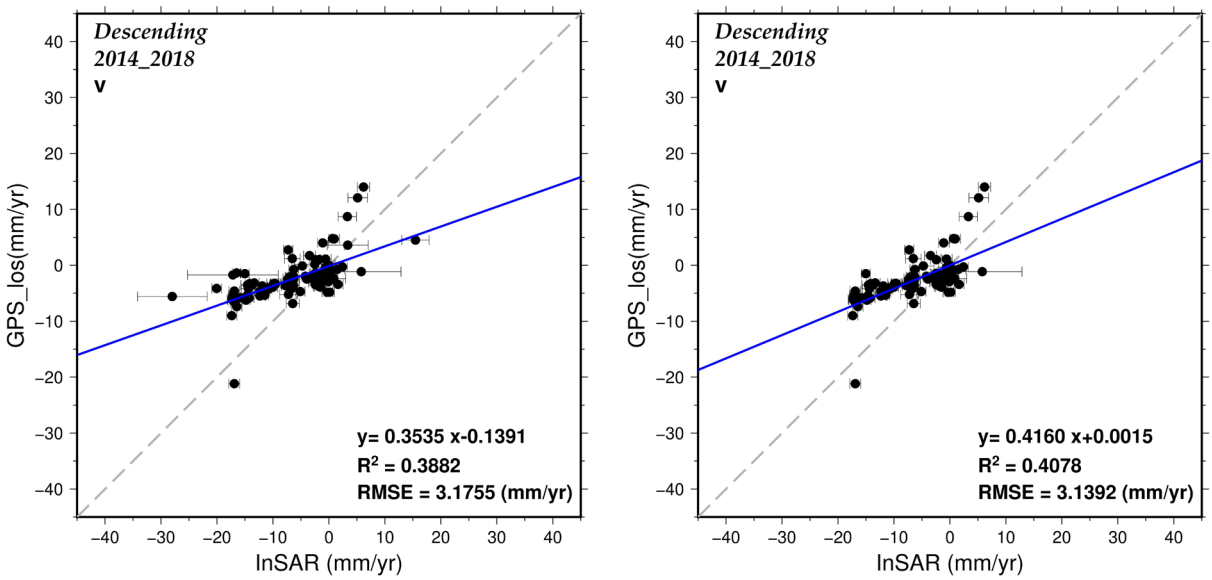


圖4-5：2014-2018 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S101。左圖為所有測站成果，右圖為移除山區測站成果。雖然斜率與理想有相當的差異，然而雷達資料與GNSS呈現線性相關，所以雷達的趨勢與GNSS一致，而數量不同。

Figure 4-5：2014-2018 descending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station S101 was used as the reference station. (Left) result of all GNSS stations. (Right) result of removing GNSS stations in the mountain area. Although the slope of the fitted line is far from ideal, the correlation between PSI and GNSS data is linear with limited dispersion from the fitted line.

4-1-2 2018-2021年

圖4-6、3-8為2018-2021年研究區域升降軌道的永久散射體雷達差分干涉成果。圖 3-7, 3-9分別為研究區域GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表4-4則是2018-2021年升降軌道的PSI與GNSS資料比對結果。從表4-4的結果可以得到升降軌道的斜率都大於0.85，RMSE是三時期中最佳，移除山區測站後升軌道方向的斜率略低，但降軌道方向斜率非常接近1，兩個軌道方向的R^2也有改善，RMSE約在2.5mm/yr，也就是說，雷達資料與此區域GNSS連續站得到的速度趨勢一致。

圖4-6顯示大部分的測站PSI升軌道成果與GNSS比對趨勢一致，圖4-8顯示PSI降軌道成果與GNSS比對在苗栗至三義斷層比對

差異大，PSI顯示相對S101測站苗栗至三義斷層一帶呈現約-5~0mm/yr的LOS速度值，而GNSS約為-10~-5mm/yr的速度值，除去這些測站，PSI與GNSS的變形趨勢大致一致。圖4-7顯示GNSS投影至升軌方向的LOS速度大約介於-17~8mm/yr間，PSI觀測值大約介於-10~15mm/yr間，圖4-9顯示GNSS投影至降軌方向的LOS速度大約介於-12~8mm/yr間，PSI觀測值大約介於-8~10mm/yr間。

以整體資料狀況看來，除了有部分離散點之外，大部分都與GNSS觀測相當符合。本時段雖然R^2數值不如高屏與嘉南成果高，但RMSE是三個區域中最小的，造成R^2較低的原因可能為北臺灣地區PSI與GNSS的觀測值都比南部地區小，微小的數值偏差都會使得R^2有所變化，因此我們認為本時期的結果品質可信度高。

表4-4：2018-2021年PSI與GNSS比對成果。

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

	slope	R^2	RMSE
Ascending	0.8699	0.7219	3.0860
移除山區測站	0.8243	0.7481	2.5908
Descending	0.8670	0.4324	2.8995
移除山區測站	1.0232	0.6260	2.0796

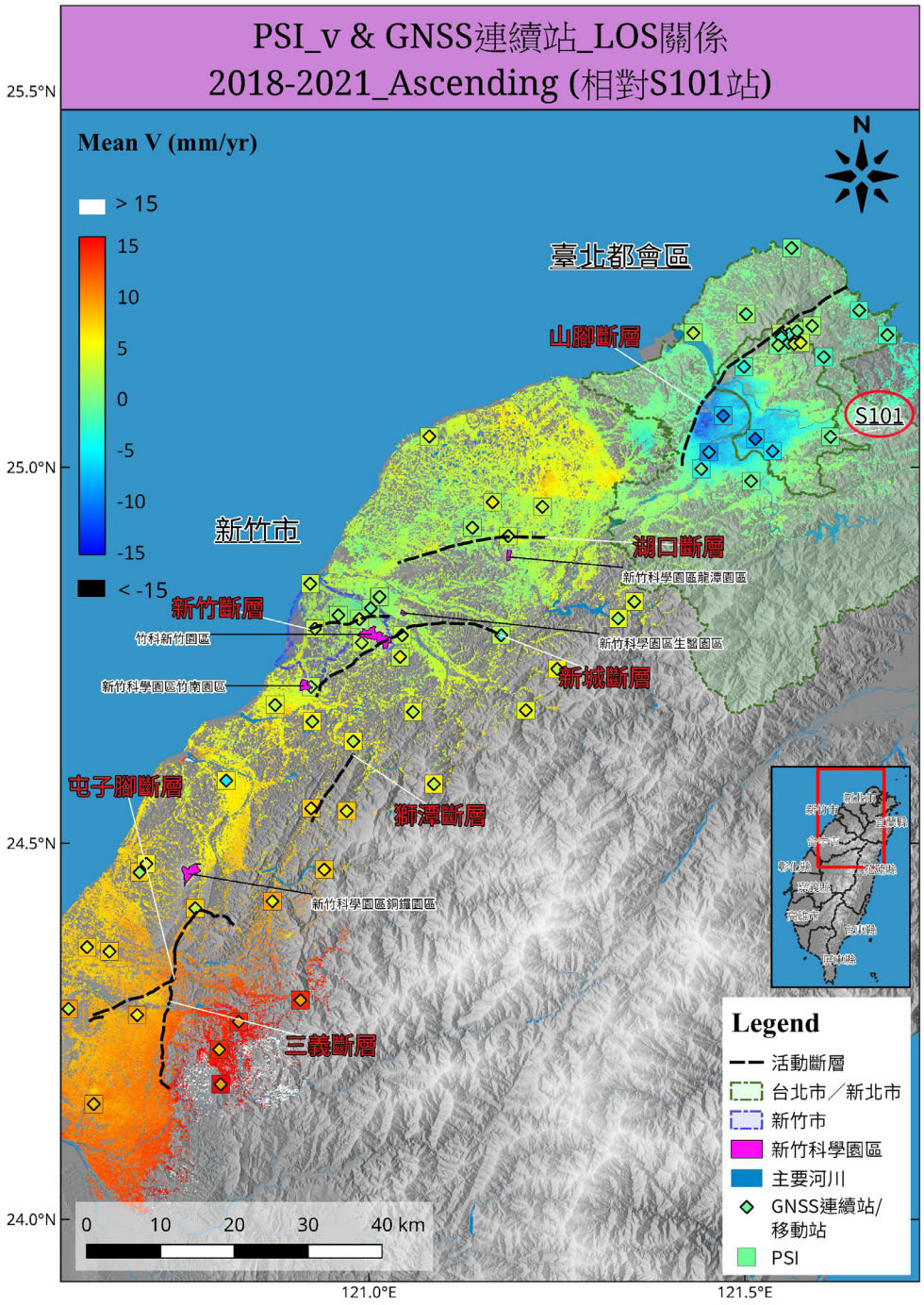


圖4-6：2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S101，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-6：Mean velocity field in ascending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

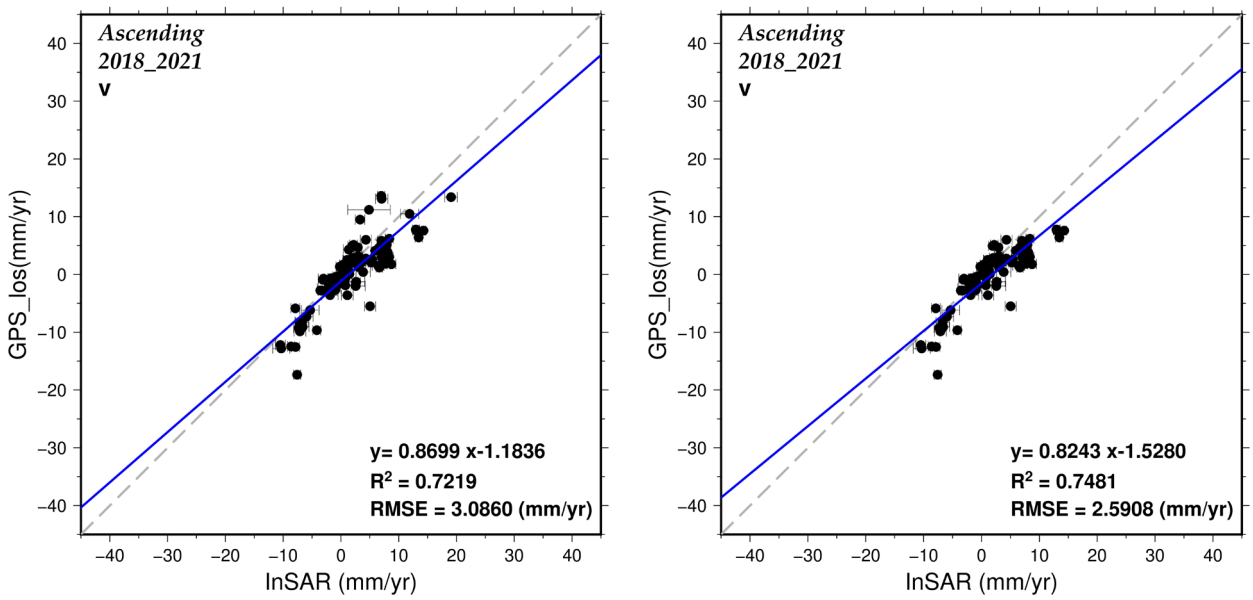


圖4-7：2018-2021 Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S101。左圖為所有測站成果，右圖為移除山區測站成果。

Figure 4-7：2018-2021 ascending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station S101 was used as the reference station. (Left) result of all GNSS stations. (Right) result of removing GNSS stations in the mountain area.

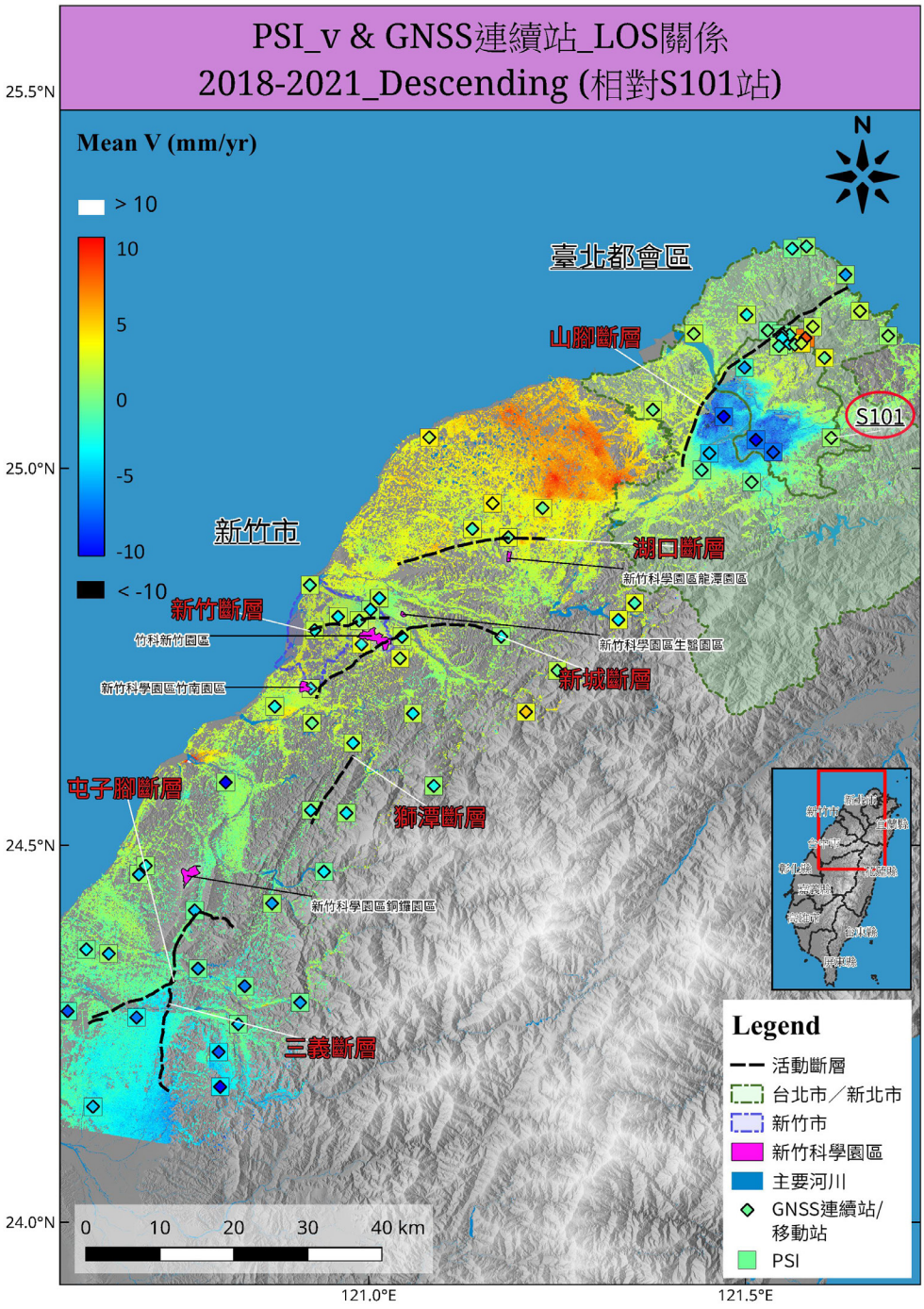


圖4-8：2018-2021年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S101，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-8：Mean velocity field in descending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

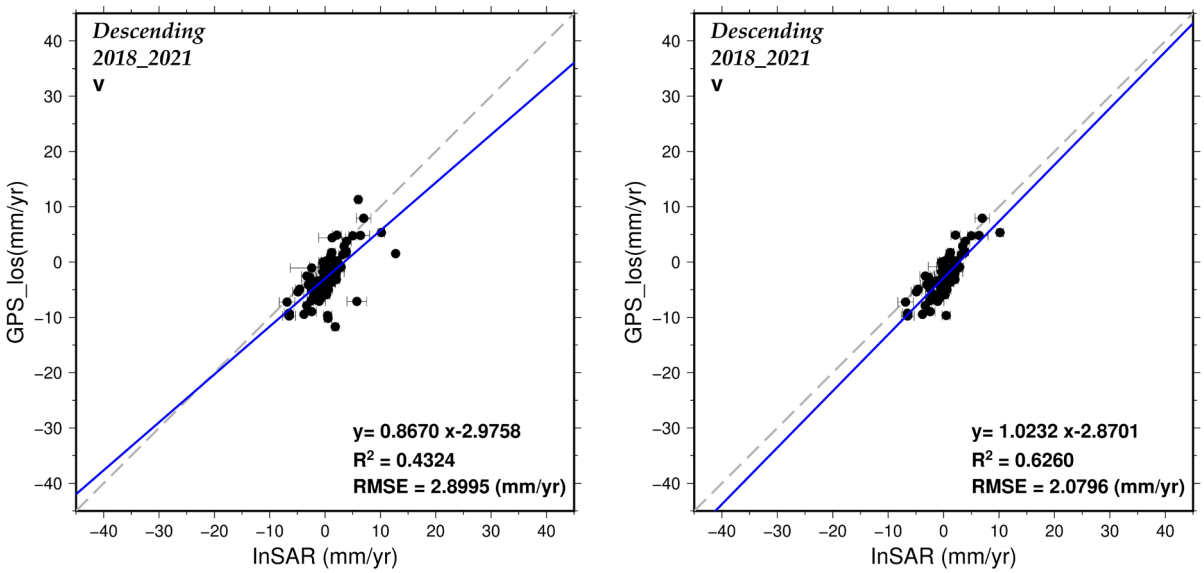


圖4-9：2018-2021 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S101。左圖為所有測站成果，右圖為移除山區測站成果。

Figure 4-9：2018-2021 descending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station S101 was used as the reference station. (Left) result of all GNSS stations. (Right) result of removing GNSS stations in the mountain area.

4-1-3 2022年

圖4-10、3-12為2022年研究區域升降軌道的永久散射體雷達差分干涉成果。圖4-11、3-13分別為研究區域的GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。由於Sentinel-1B衛星於2021年底開始無法傳輸資料，因此2022年僅有Sentinel-1A衛星觀測資料，升軌方向僅有27幅影像，降軌方向於3月到6月間無影像，僅有16幅影像，所以本時期的比對成果受到很大的影響。

表4-5則是2022年升降軌道的PSI與GNSS資料比對結果。升軌與降軌的RMSE都偏高（大於6mm/yr），降軌道的R^2是三時期中最低的，移除山區測站後雖然升降軌道的斜率、R^2與RMSE皆有改善，但這時期受限於影像數量，資料品質不理想。

圖4-11顯示GNSS投影至升軌方向的LOS速度大約介於-30~20mm/yr間，PSI觀測值大約介於-40~35mm/yr間，圖4-13顯示GNSS投影至降軌方向的LOS速度大約介於-20~35mm/yr間，PSI觀測值大約介於-55~5mm/yr間。升軌方向的PSI觀測值與GNSS觀

測值雖然有所差異，資料分布散亂，但在桃園以北地勢平緩地區可看出LOS速度變化趨勢相近（圖4-10、圖4-11），降軌方向相當的凌亂，顯示資料品質不佳（圖4-12、圖4-13）。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料受限於影線數目，資料品質不佳。通常影像數目不足可以透過觀測時間加長來解決，但是降軌道於2022年3月至6月無影像，此時期的速度場擬合會受到影響。這一時期的雷達速度場的參考價值較低，僅能參考趨勢。

表4-5：2022年PSI與GNSS比對成果。

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

	slope	R^2	RMSE
Ascending	0.3223	0.3592	6.8054
移除山區測站	0.3276	0.3731	6.6843
Descending	0.0161	0.0008	7.9250
移除山區測站	0.0211	0.0016	7.6471

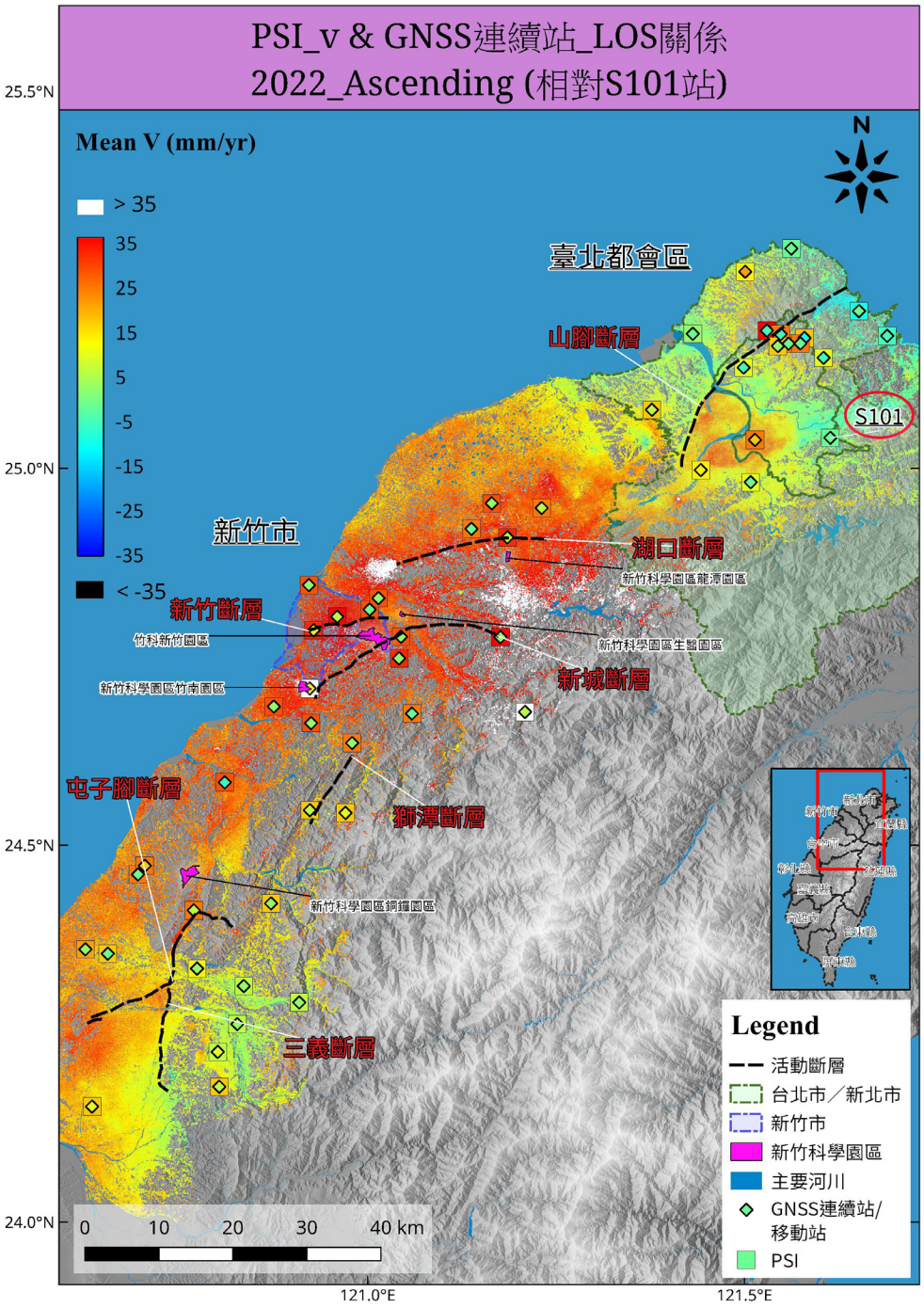


圖4-10：2022年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S101，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-10：Mean velocity field in ascending track between 2022. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

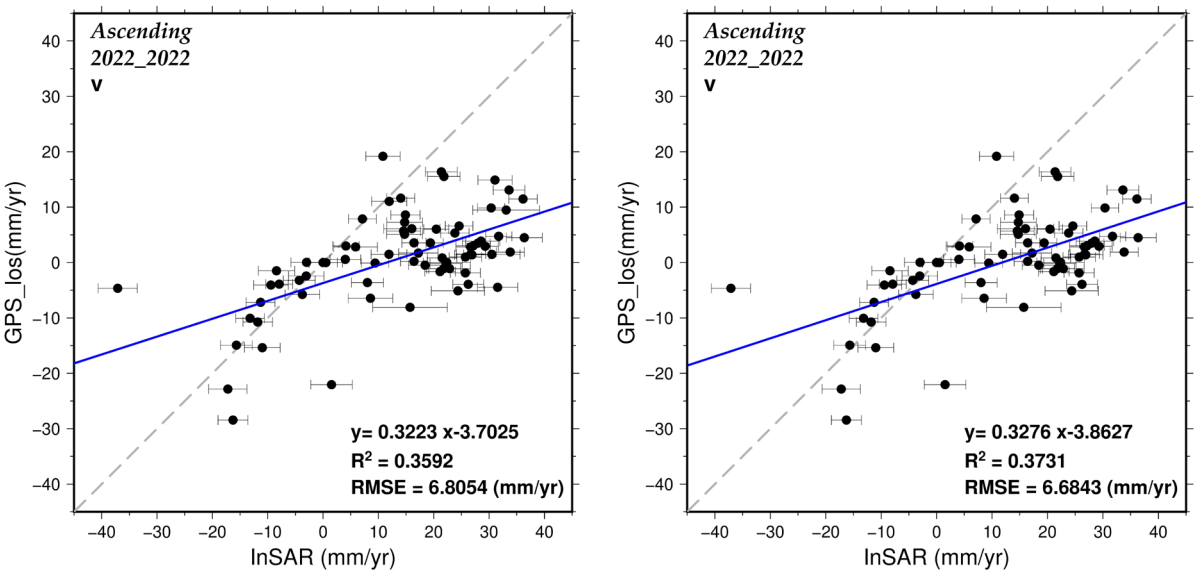


圖4-11：2022 Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S101。左圖為所有測站成果，右圖為移除山區測站成果。

Figure 4-11：2022 ascending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station S101 was used as the reference station. (Left) result of all GNSS stations. (Right) result of removing GNSS stations in the mountain area.

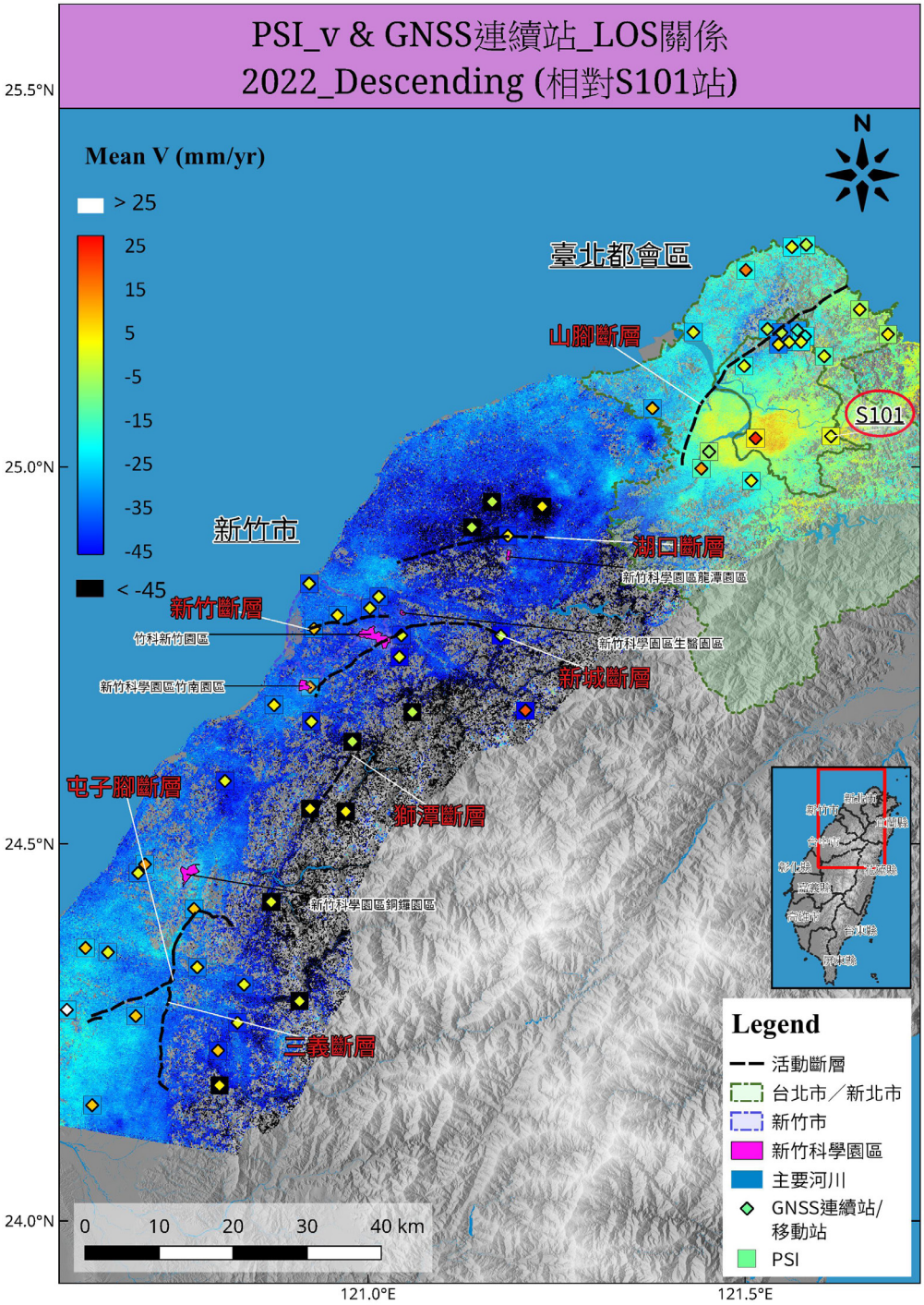


圖4-12：2022年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S101，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-12：Mean velocity field in descending track between 2022. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S101. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

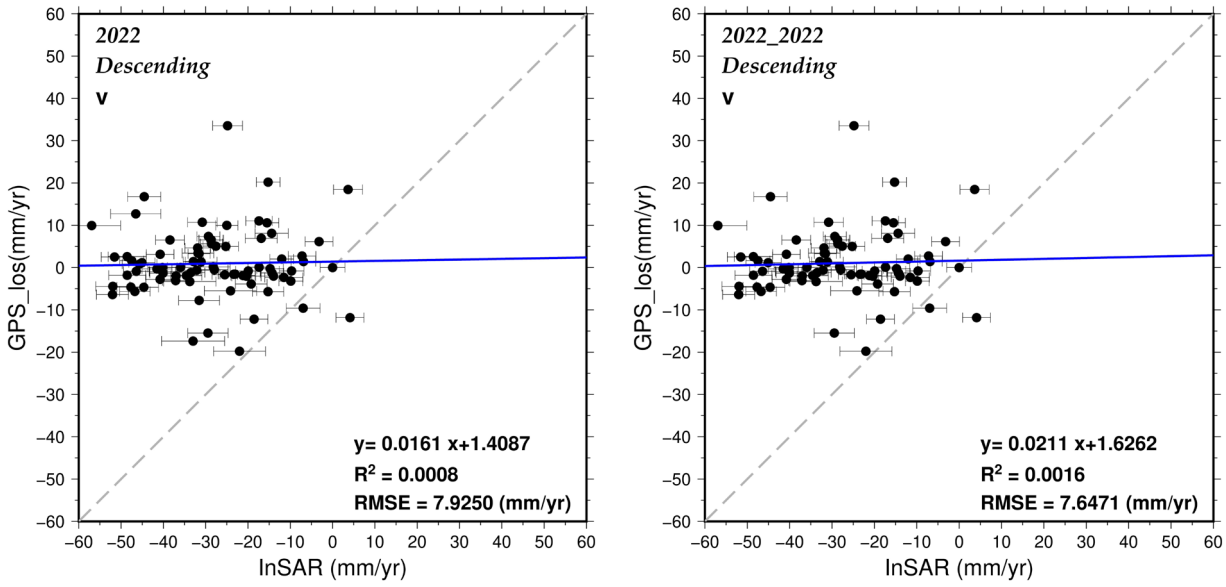


圖4-13：2022 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S101。左圖為所有測站成果，右圖為移除山區測站成果。此期資料由於Sentinel-1B故障，影像數目也少，結果幾乎無法使用。

Figure 4-13：2022 descending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station S101 was used as the reference station. (Left) result of all GNSS stations. (Right) result of removing GNSS stations in the mountain area. Because of the malfunction of the Sentinel-1B, number of image acquisition is low, hence the radar data is almost unusable.

4-2 GNSS連續站及移動站與PSI資料比對

針對GNSS移動觀測站，我們盡量挑選PSI同時段的觀測資料，同樣將調查範圍內的GNSS移動觀測站計算得到的三方向速度值轉換為在雷達斜距方向上的速度，並搜尋測站周圍500公尺的PS點，取其平均作為GNSS移動觀測站的PSI觀測值，GNSS移動站位置如圖4-14。將所有的GNSS資料與雷達資料畫在同一張圖上比對，在前兩個時期的資料比對（圖4-15至圖4-22），雖然R^2與RMSE的數值不佳，但可以看到PSI與GNSS在整體區域的變形趨勢一致，甚至在桃園臺地與臺北盆地PSI點位較多、較穩定的區域兩者資料相似度高，而差異大的地方多為山區或地勢起伏較大的區域。第三時期由於觀測時間跨距短，且在降軌道方向3-6月無影像資料，如同前面的比對，依然受到該時期影像數目少的影響，而造成資料品質與信心度不佳（圖4-23至圖4-26）。以下各節針對各時期資料說明。

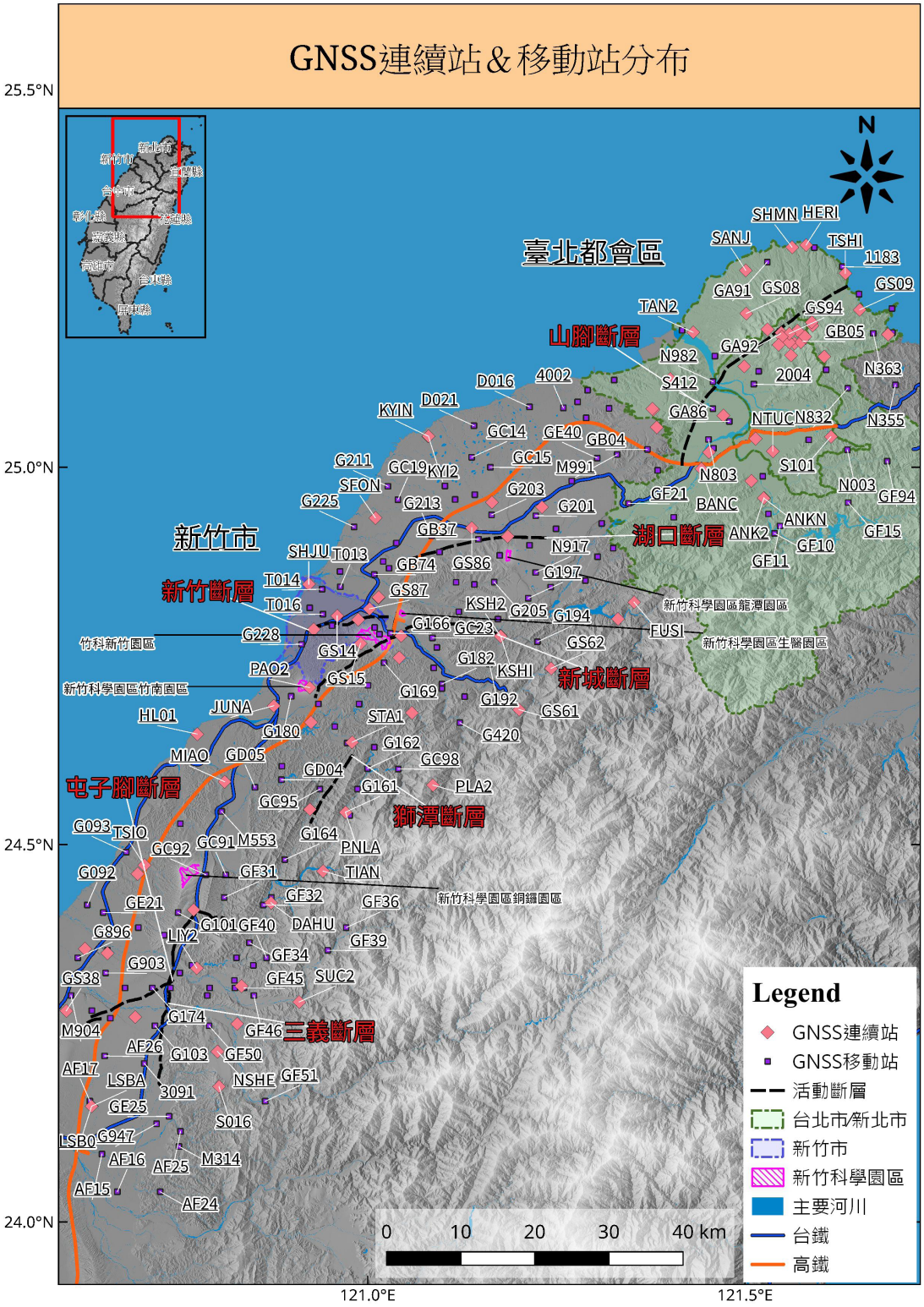


圖4-14：GNSS移動站與連續站位置分佈圖。

Figure 4-14：The map for the campaign and continues GNSS stations.

4-2-1 2014年-2018年

圖4-15、3-17分別為2014-2018年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與GNSS連續站及移動站結果作比較。圖4-16、3-18則是分別為研究區域GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。表4-6則是2014-2018年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與GNSS資料比對結果。

升軌道成果顯示臺北盆地PSI與GNSS的觀測值接近，在桃園新竹沿海地區差異大，苗栗以南三義斷層附近雖然有些測站兩者觀測值差異大，但仍有多數測站觀測值與趨勢接近（圖4-15）。降軌道成果的R^2與RMSE都較升軌道成果佳，PSI與GNSS觀測值在大部分的測站與趨勢一致，苗栗以南三義斷層一帶PSI與GNSS觀測值差異較大，但兩者資料皆顯示此區域相對S101測站呈現遠離衛星移動（圖4-17）。

圖4-16顯示GNSS投影至升軌方向的LOS速度大約介於-35~15mm/yr間，PSI觀測值大約介於-35~15mm/yr間，圖4-18顯示GNSS投影至降軌方向的LOS速度大約介於-35~10mm/yr間，PSI觀測值大約介於-35~15mm/yr間，雖然資料較為分散且多數測站落於-10~10mm/yr區間，但仍有許多測站分佈於1：1附近。

以整體資料狀況看來加入移動站比對結果有提升PSI與GNSS的相似度，以2014-2018時間段而言，本時段資料品質值得參考。

表4-6：：2014-2018年PSI與GNSS比對成果。

Table 4-6 ：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2014-2018.

	slope	R^2	RMSE
Ascending	0.3025	0.3025	4.5121
Descending	0.4794	0.643	2.8124

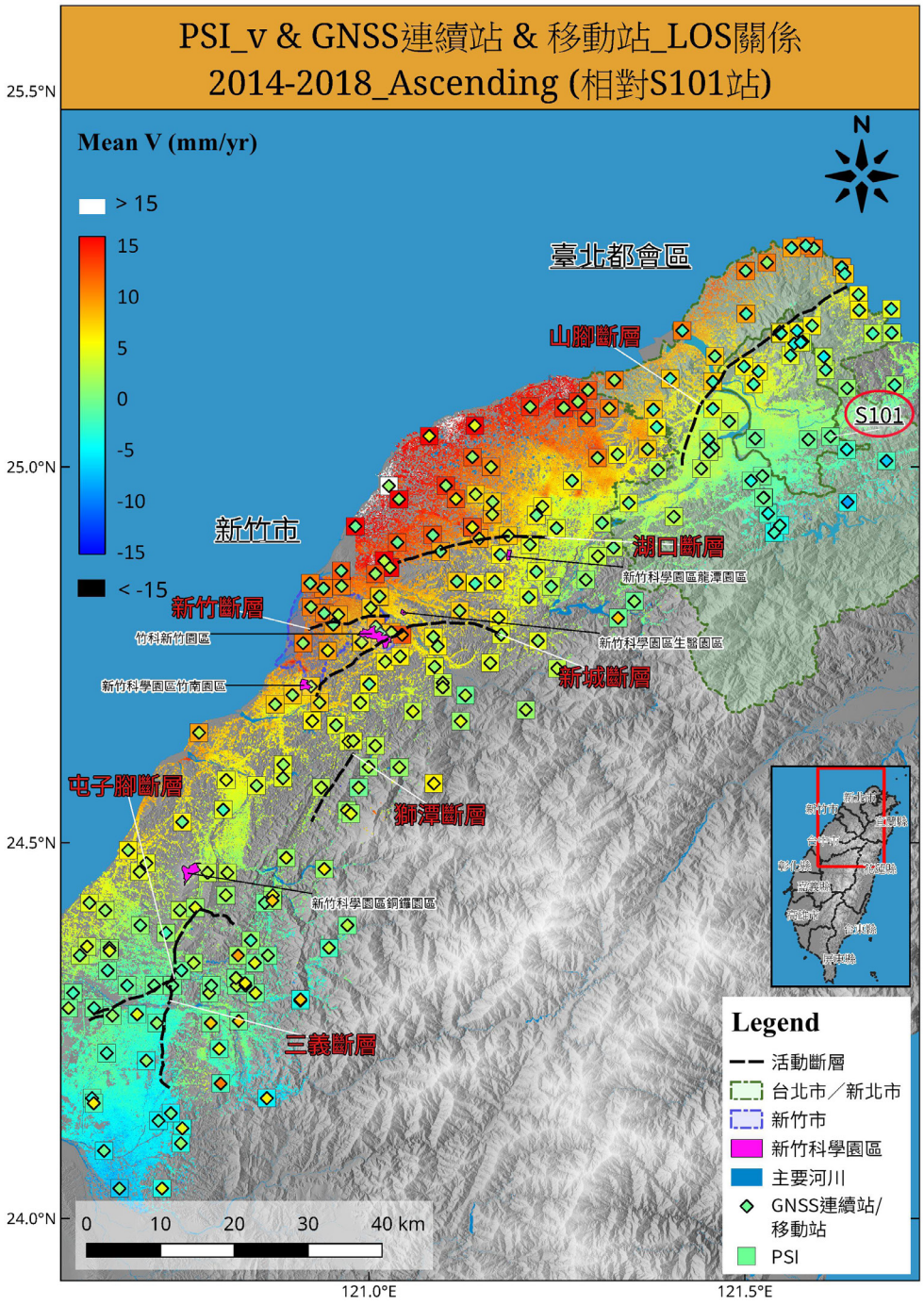


圖4-15：2014-2018年Ascending平均速度場與所有GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-15：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite between 2014 and 2018.

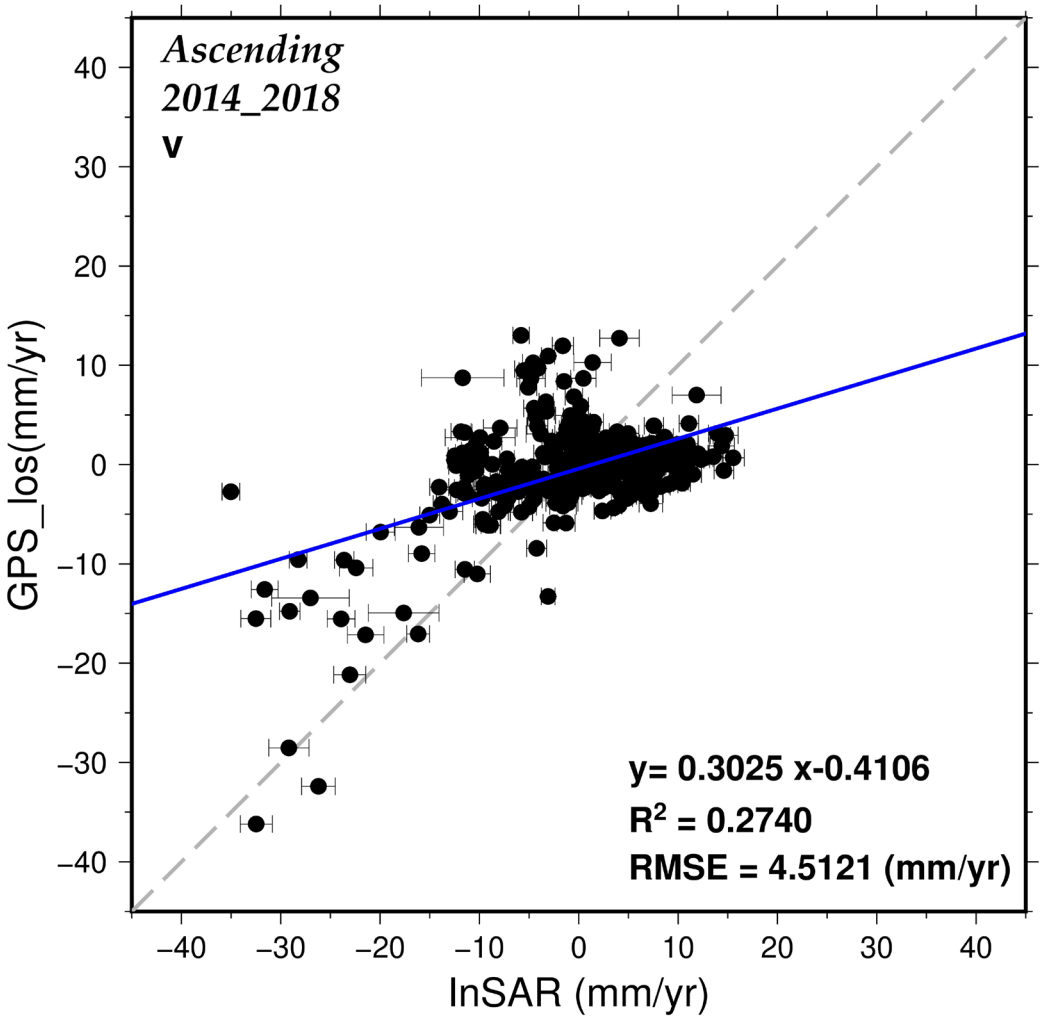


圖4-16：2014-2018 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 4-16：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2014-2018.

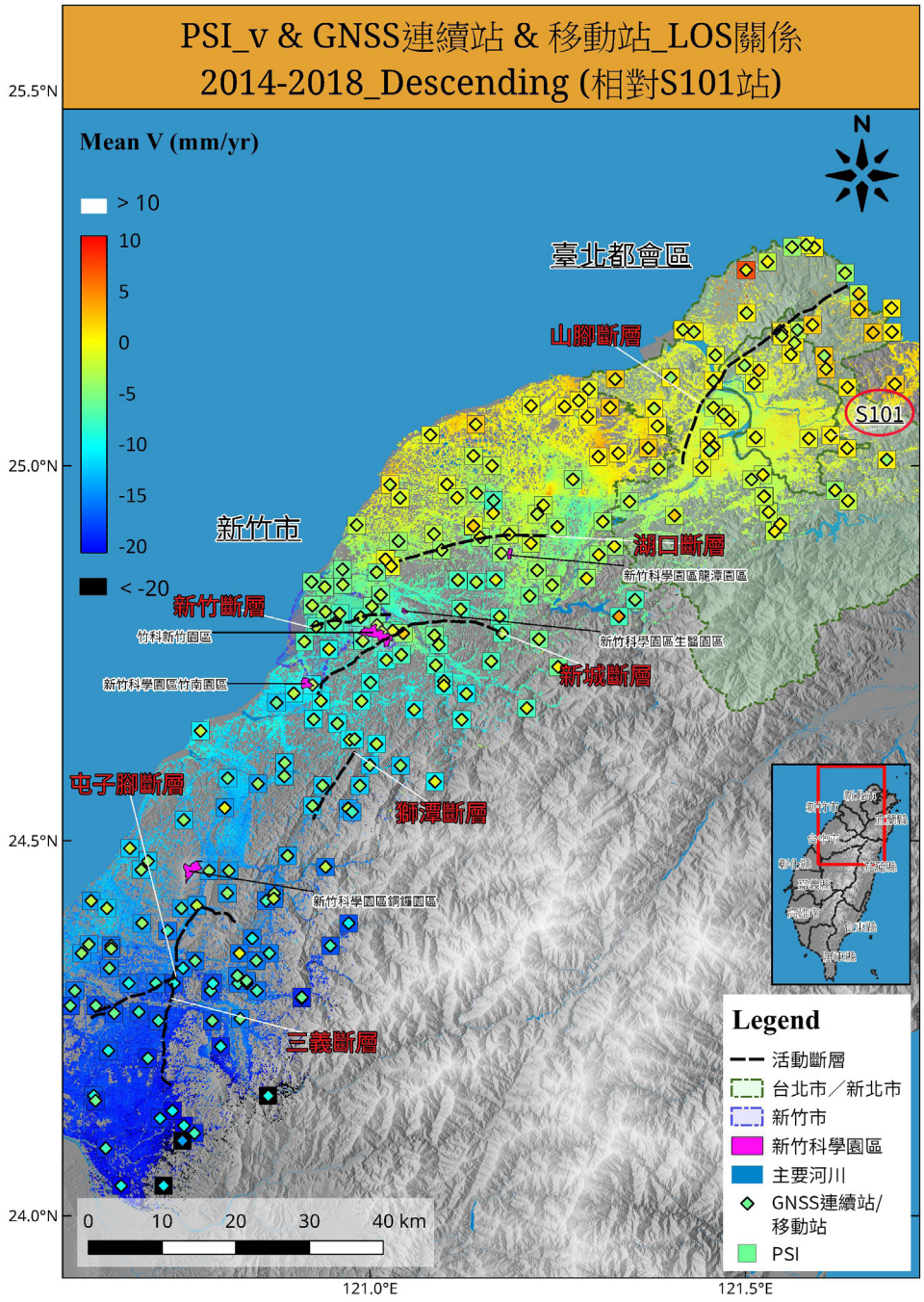


圖4-17：2014-2018年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-17：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2014 and 2018. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite between 2014 and 2018.

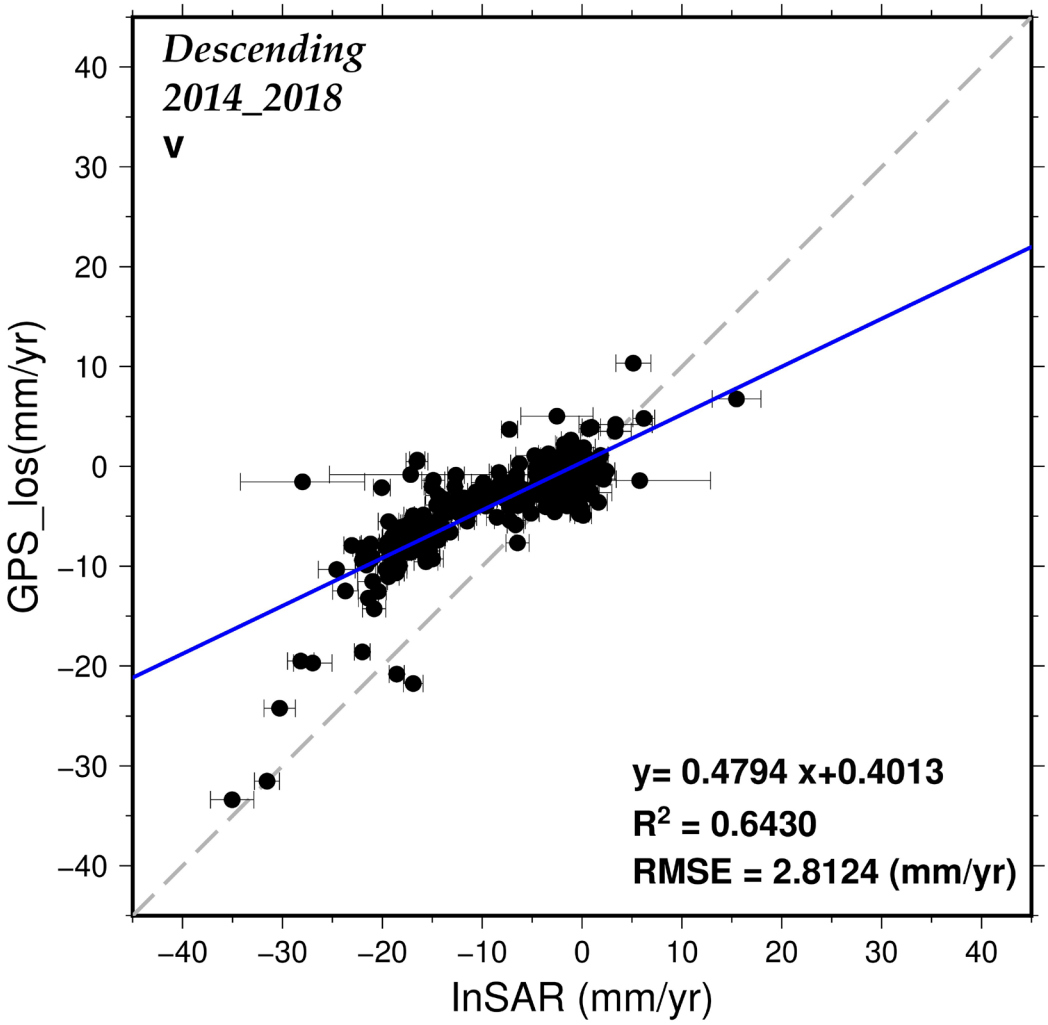


圖4-18：2014-2018 降軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 4-18：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2014-2018.

4-2-2 2018年-2021年

圖4-19、3-21分別為2018-2021年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與GNSS連續站及移動站結果比較。圖4-20、3-22則是分別為研究區域所有GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表4-7則是2018-2021年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與所有GNSS資料比對結果。從表4-7的結果

升軌道（Ascending）的斜率接近0.5，R^2約0.15，RMSE約7.5mm/yr，而降軌道資料斜率接近1，R^2為0.13，RMSE約7.2mm/yr。

升軌道成果顯示相對於S101測站，PSI與GNSS觀測變形趨勢一致，在地勢變化平緩地區如桃園臺地及臺北盆地，大部分測站兩者觀測值接近，在苗栗以南地區，雖然觀測值有所差異，但大部分測站顯示相對S101測站此區域呈現靠近衛星移動速度（圖4-19）。降軌道成果顯示整體區域PSI與GNSS觀測變形趨勢一致，在地勢變化平緩地區如桃園臺地及臺北盆地，大部分測站兩者觀測值接近，在苗栗以南地區，雖然觀測值有所差異，但大部分測站顯示相對S101測站此區域呈現遠離衛星移動速度（圖4-21）。

圖4-20顯示GNSS投影至升軌方向的LOS速度大約介於-30~35mm/yr間，PSI觀測值大約介於-15~25mm/yr間，圖4-22顯示GNSS投影至降軌方向的LOS速度大約介於-28~35mm/yr間，PSI觀測值大約介於-8~13mm/yr間。升降軌道成果皆顯示，多數測站集中於-10~10mm/yr區間，而GNSS觀測值分佈較PSI廣，移動站的資料品質需要檢視其時間序列確認是否適用。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的升降軌道雷達資料相對GNSS資料收斂，因而整體R^2與RMSE較前期差，但在平原區比對結果一致。離散點大多為在山區，通常為雷達同調性低、永久散射體相對稀少之區域，因而在解算時容易出現錯誤。本時段除了山區河谷部分的雷達資料之外，大部分平原地區的結果品質都相當好。

表4-7：：2018-2021年PSI與GNSS比對成果。

Table 4-7 ：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2018-2021.

	slope	R^2	RMSE
Ascending	0.5339	0.1536	7.6863
Descending	1.1711	0.1349	7.2382

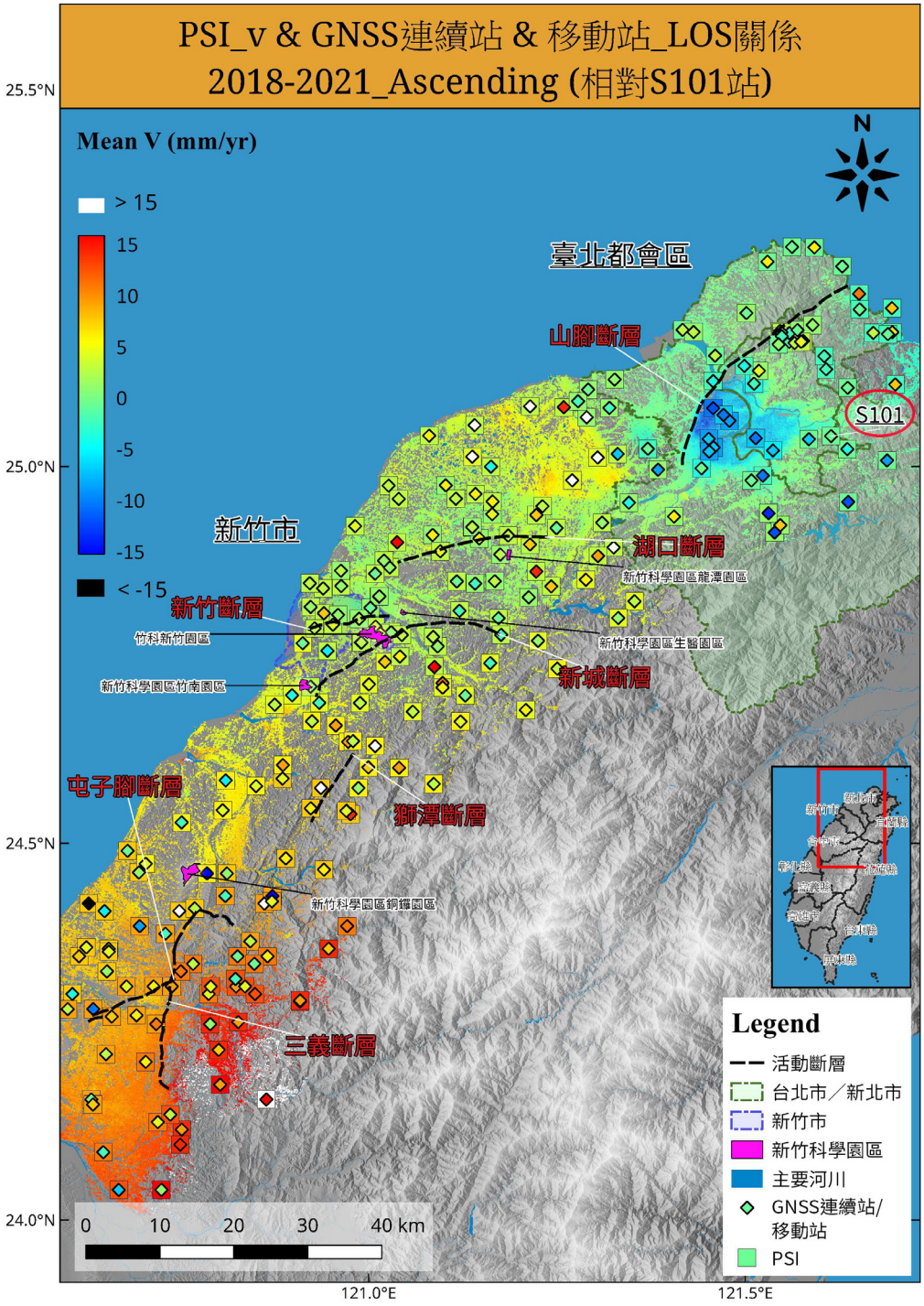


圖4-19：2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-19：Velocity field in ascending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

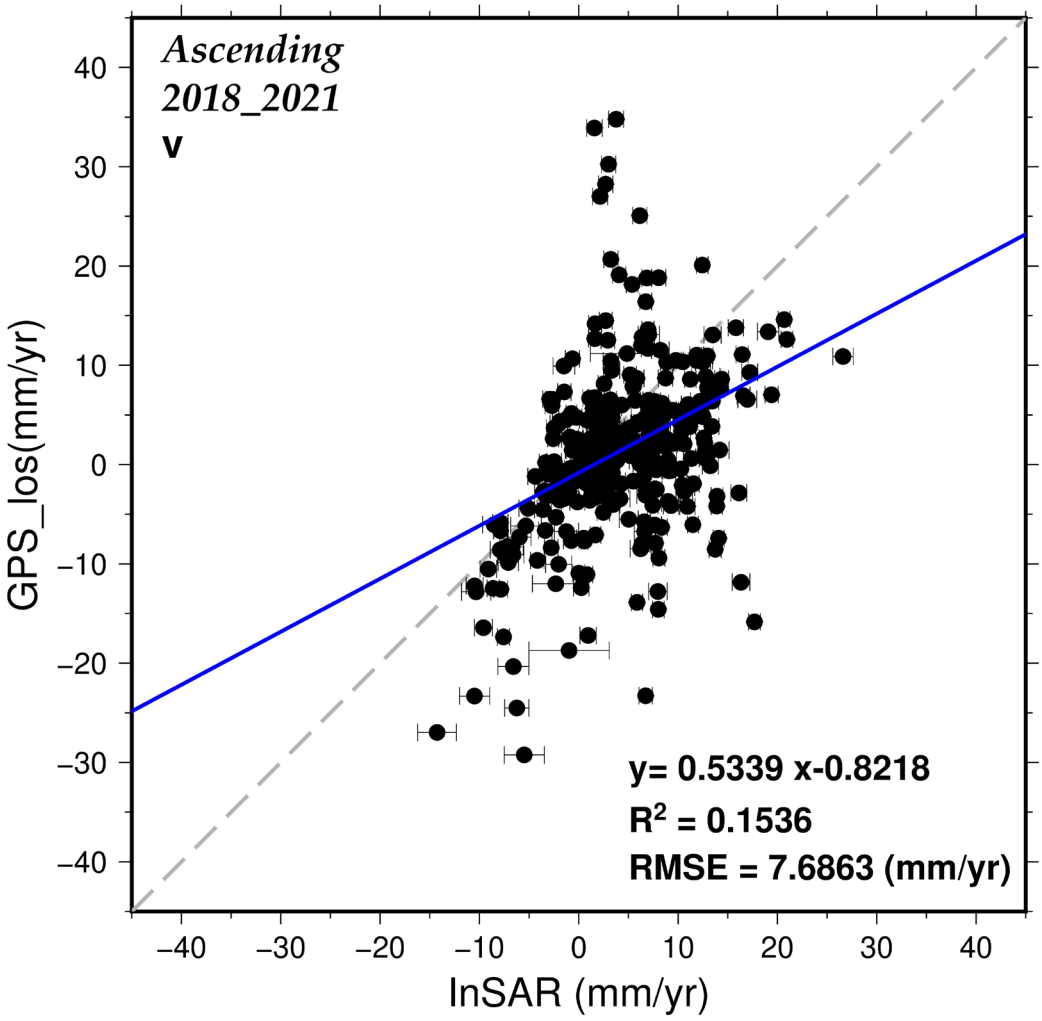


圖4-20：2018-2021 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 4-20：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2018-2021.

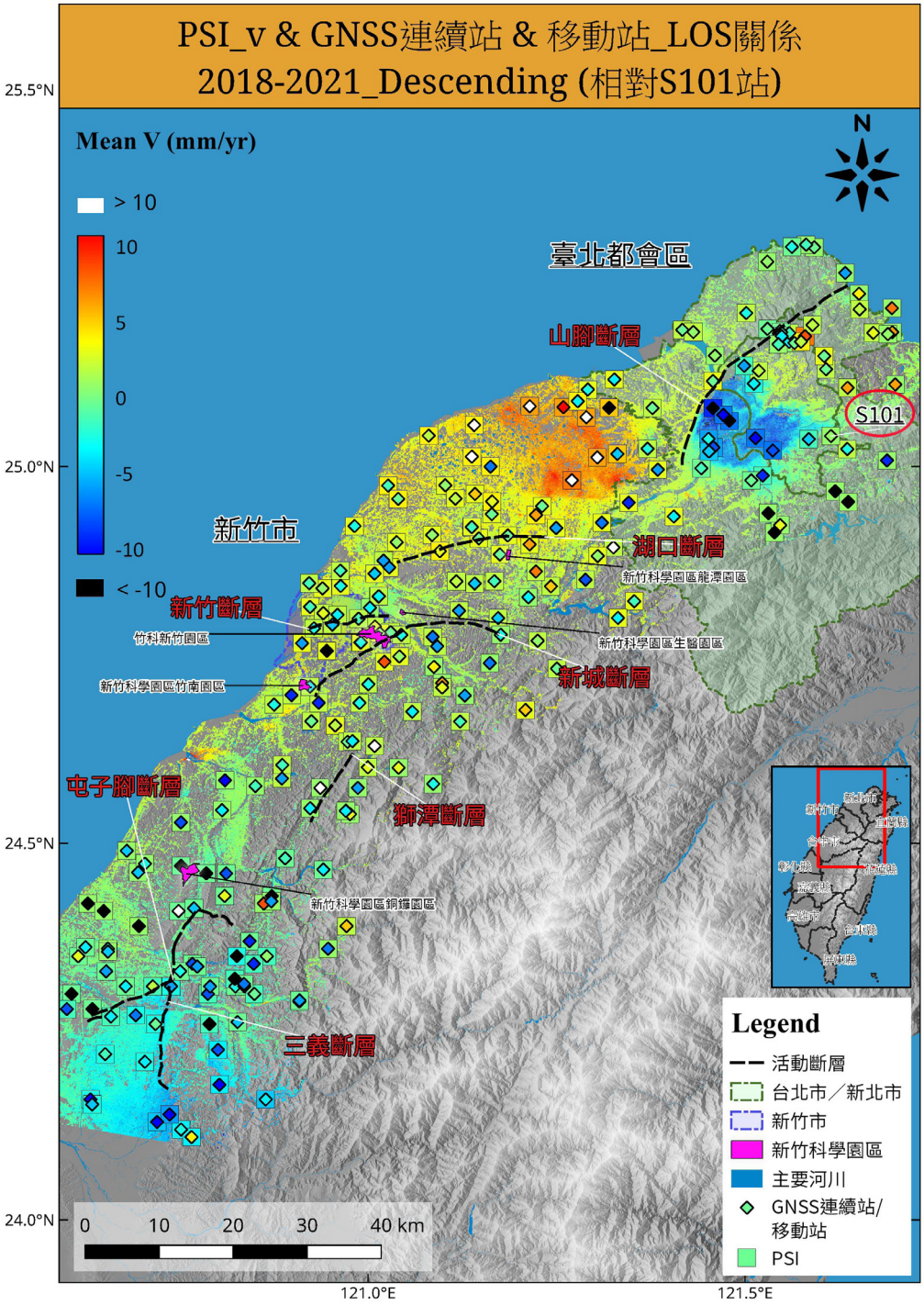


圖4-21：2018-2021年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-21：Velocity field in descending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

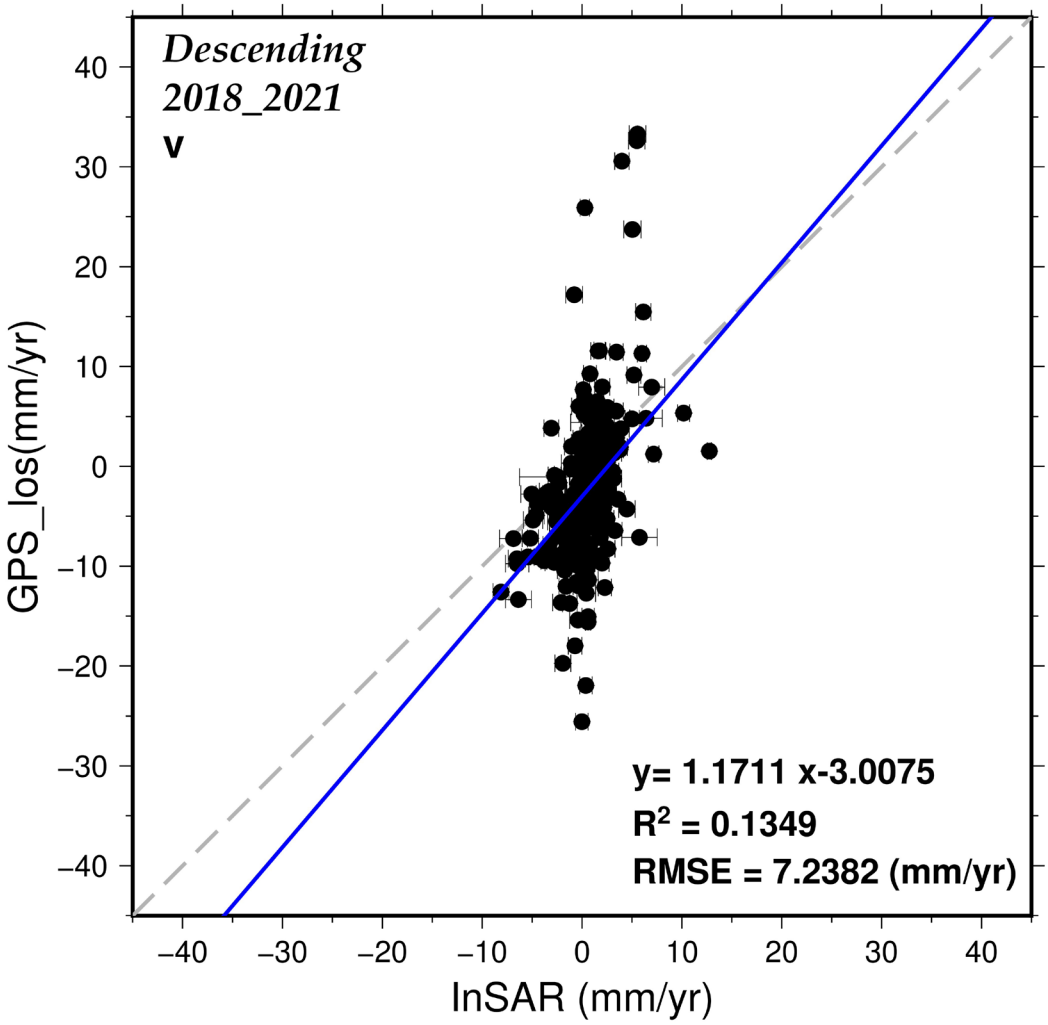


圖4-22：2018-2021 降軌道雷達資料與2018-2021所有 GPS比對。

Figure 4-22：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2018-2021.

4-2-3 2022年

圖4-23、3-25分別為2022年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與GNSS連續站及移動站結果作比較。圖4-24、3-26則是分別為研究區域所有GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表4-8則是2022年的升軌道與降軌道速度場與所有GNSS資料比對結果。從表4-8的結果顯示本時期的PSI與GNSS的R^2與RMSE都比前兩個時期低，兩者資料相似度低。

圖4-24顯示GNSS投影至升軌方向的LOS速度大約介於-80~100mm/yr間，PSI觀測值大約介於-40~40mm/yr間，圖4-26顯示GNSS投影至降軌方向的LOS速度大約介於-75~90mm/yr間，PSI觀測值大約介於-60~5mm/yr間。升降軌道成果皆顯示資料離散，因觀測時間跨距短、影像數量少，使得PSI資料品質不佳，在擬合GNSS速度場時更容易受到離群點影響，尤其是觀測頻率較低的移動站，可能為本時期比對成果不佳的原因。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料受限於影線數目，資料品質不佳，PSI與GNSS移動站對比而言相似度較低。通常影像數目不足可以透過觀測時間加長來解決，但是降軌道於2022年3月至6月無影像，此時期的速度場擬合會受到影響。這一時期的雷達速度場的參考價值較低，僅能參考趨勢。

表4-8：：2022年PSI與GNSS比對成果。

Table 4-8 ：Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2022.

	slope	R^2	RMSE
Ascending	0.2796	0.0135	28.4996
Descending	-0.0944	0.0035	23.5093

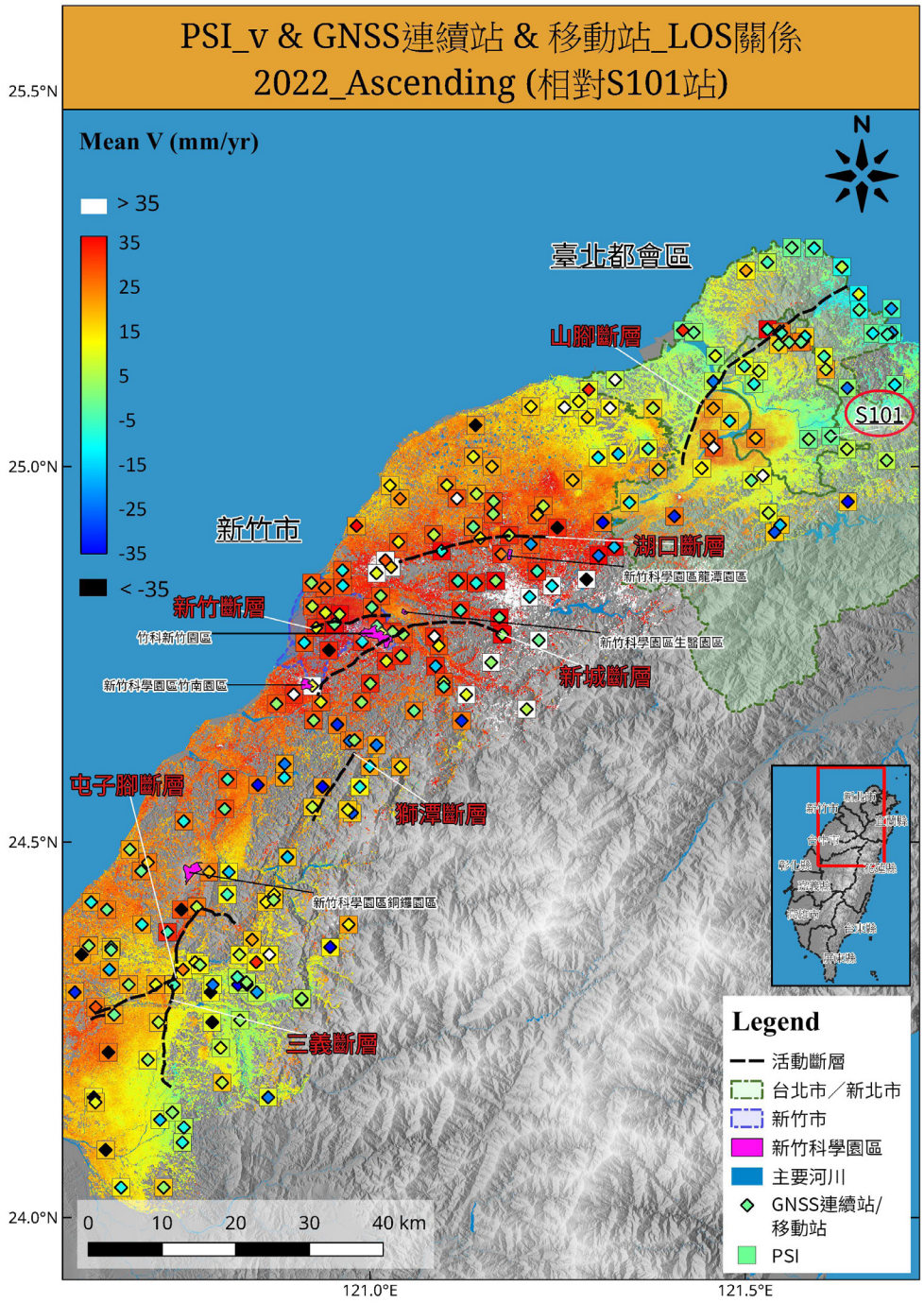


圖4-23：2022年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期GNSS移動站三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-23：Velocity field in ascending track between 2022. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

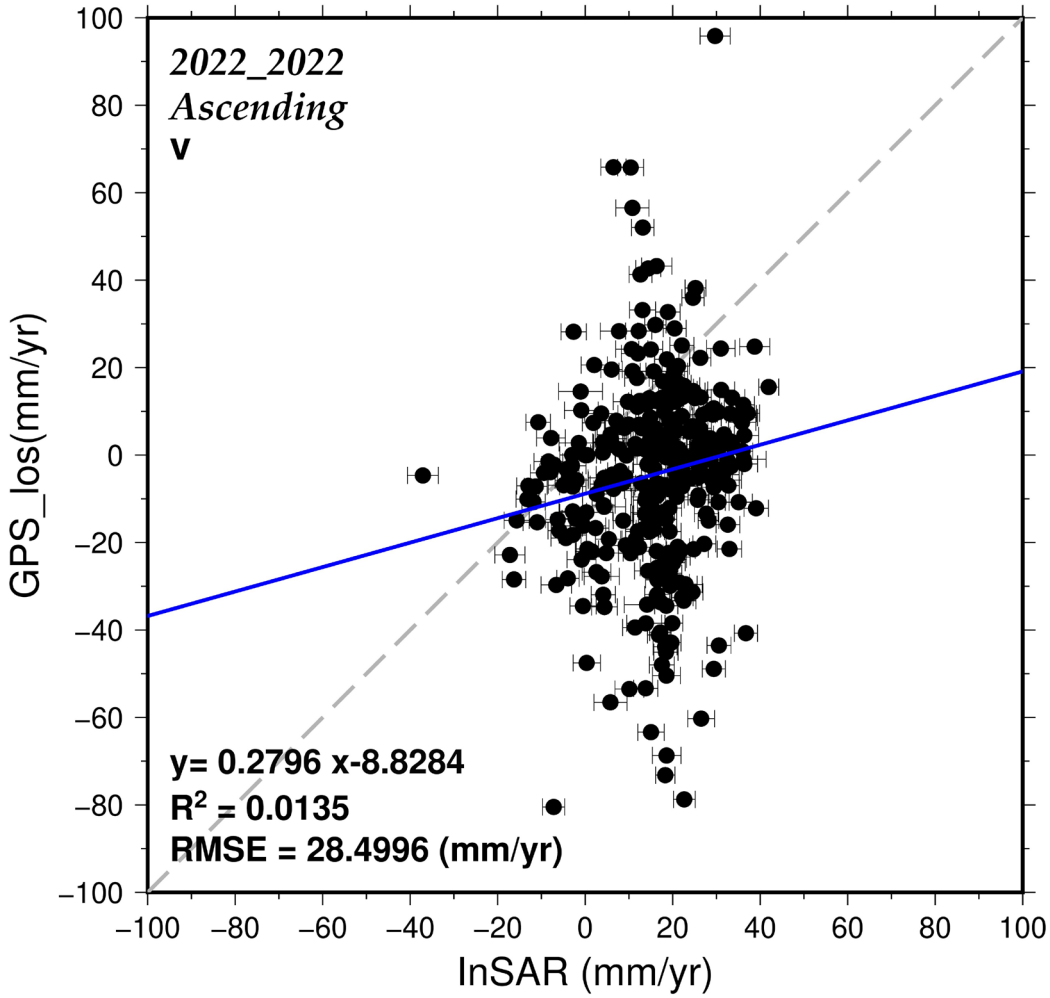


圖4-24：2022 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 4-24：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2022.

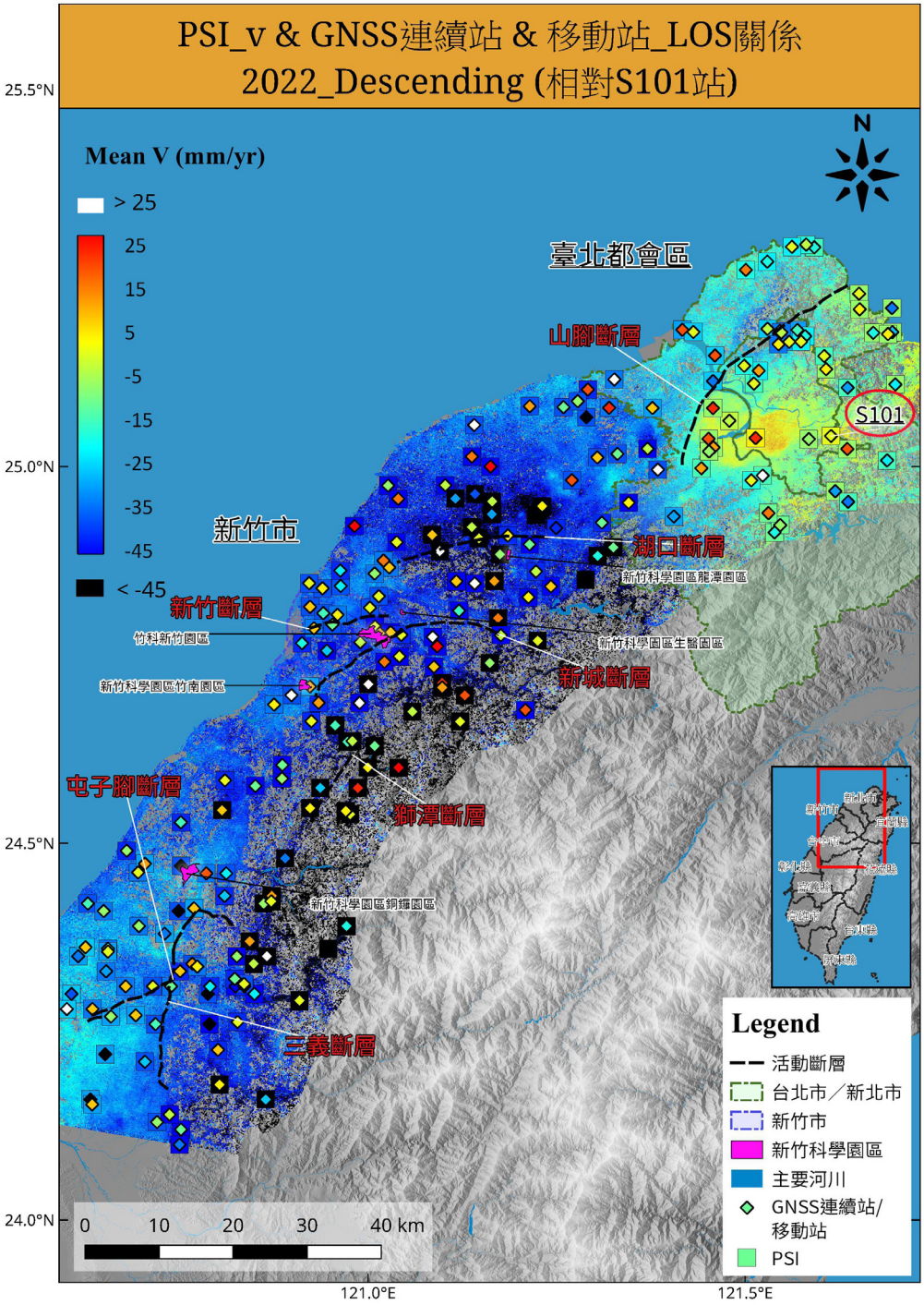


圖4-25：2022年Descending平均速度場與GNSS移動站速度場。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 4-25：Velocity field in descending track between 2022. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

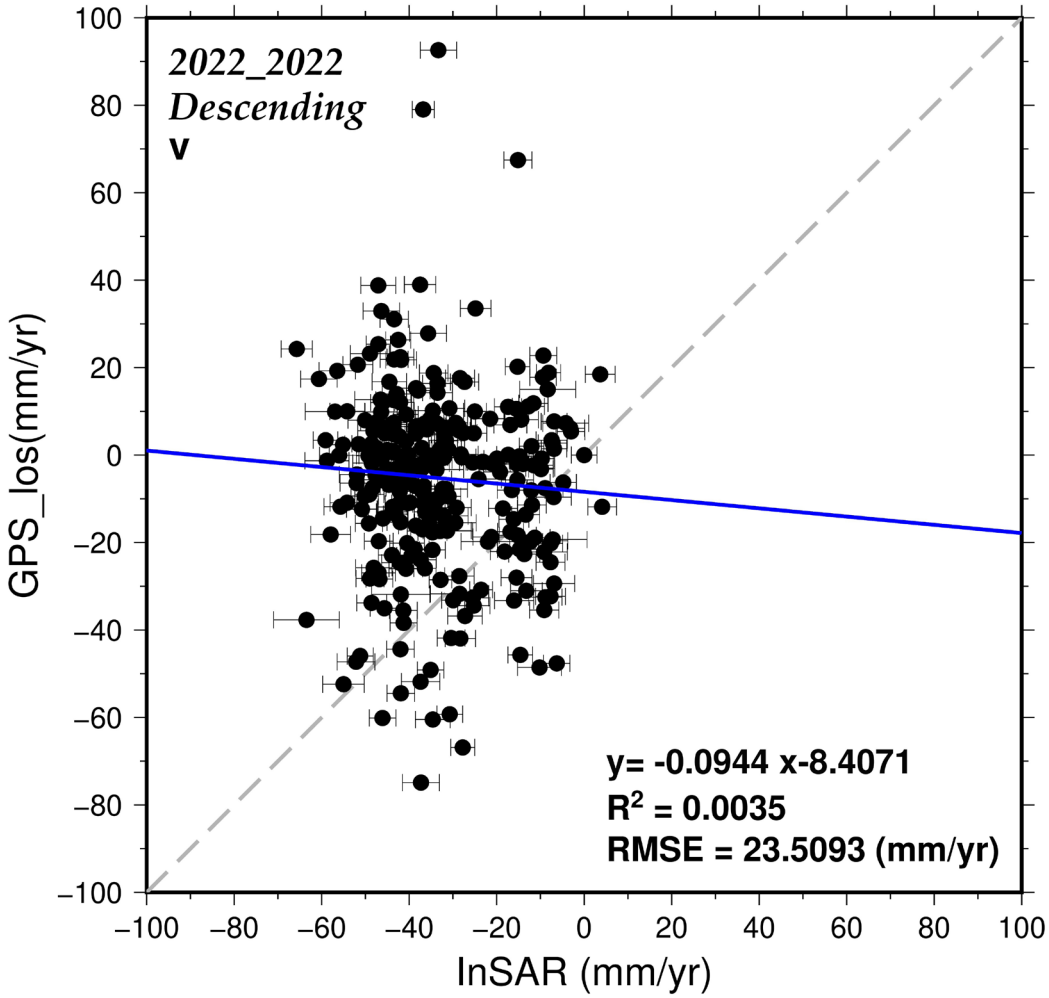


圖4-26：2022 降軌道雷達資料與移動站的比對。

Figure 4-26：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2022.

4-3 水準測量資料與雷達資料比對成果

調查區域中有九條長期觀察之水準測線，分別是石門至萬里測線、士林至三芝測線、淡水至士林測線、五股至臺北測線、新屋至童話世界測線、新竹至五峰測線、新竹至峨眉測線、苗栗至南庄測線、大安至東勢測線（圖4-27）。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。

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GPS測站先將水準資料與雷達資料做校正，將其拉致同一個參考點比對。

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。由於第三時期僅有一年資料，我們僅使用2014-2018與2018-2021兩時期資料進行比對，在進入山區的時候，也有可能有小區域在雷達資料有unwrapping錯誤產生，這些在比對的時候都要注意。

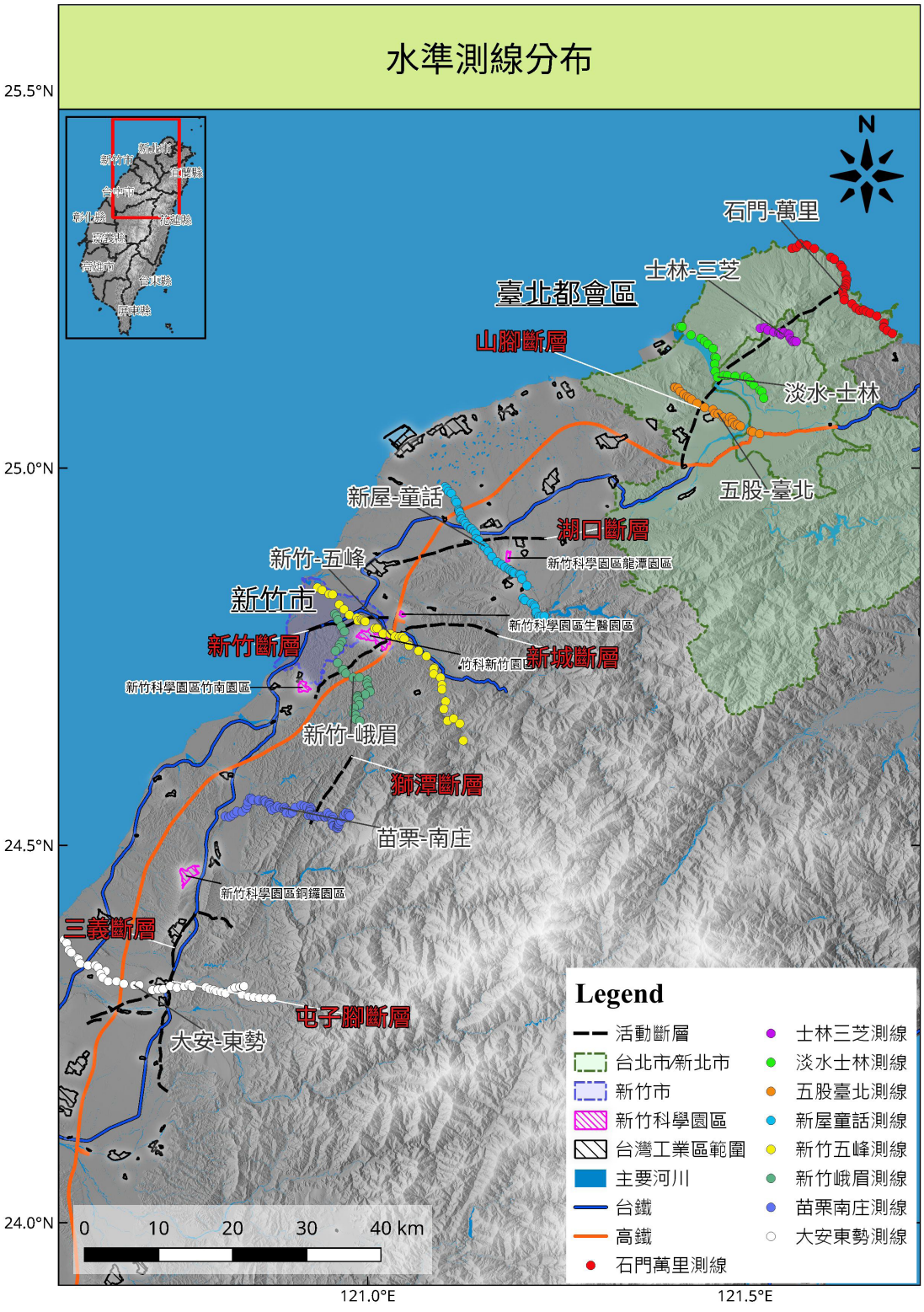


圖4-27：北部水準測線分布。

Figure 4-27：Locations of leveling profiles in northern Taiwan.

4-1-1 石門至萬里測線

石門至萬里測線，其橫跨山腳斷層，路線長約19公里（投影至剖面的長度），以GNSS連續站GS09做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位2027及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點GS09校正後，2014-2018及2018-2021兩個時期的兩個方向(ascending及descending)雷達影像結果與水準測量結果一致，整體速度變化不大，向東跨越山腳斷層間速度無明顯變化。

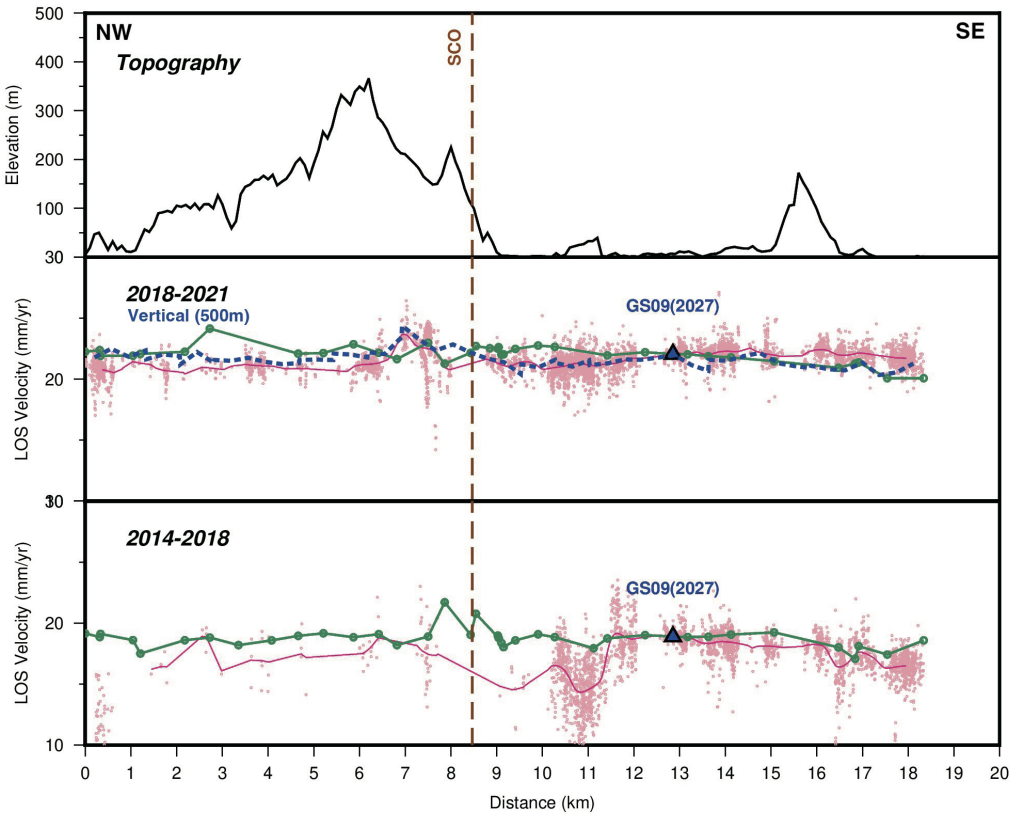


圖4-28：水準測線-石門至萬里測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS09(2027)。SCO為山腳斷層。藍色虛線為PSI垂直向結果。

Figure 4-28：Comparison of PSI and Shihmen-Wanli leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS09(2027). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault. Blue dash line is the vertical velocity.

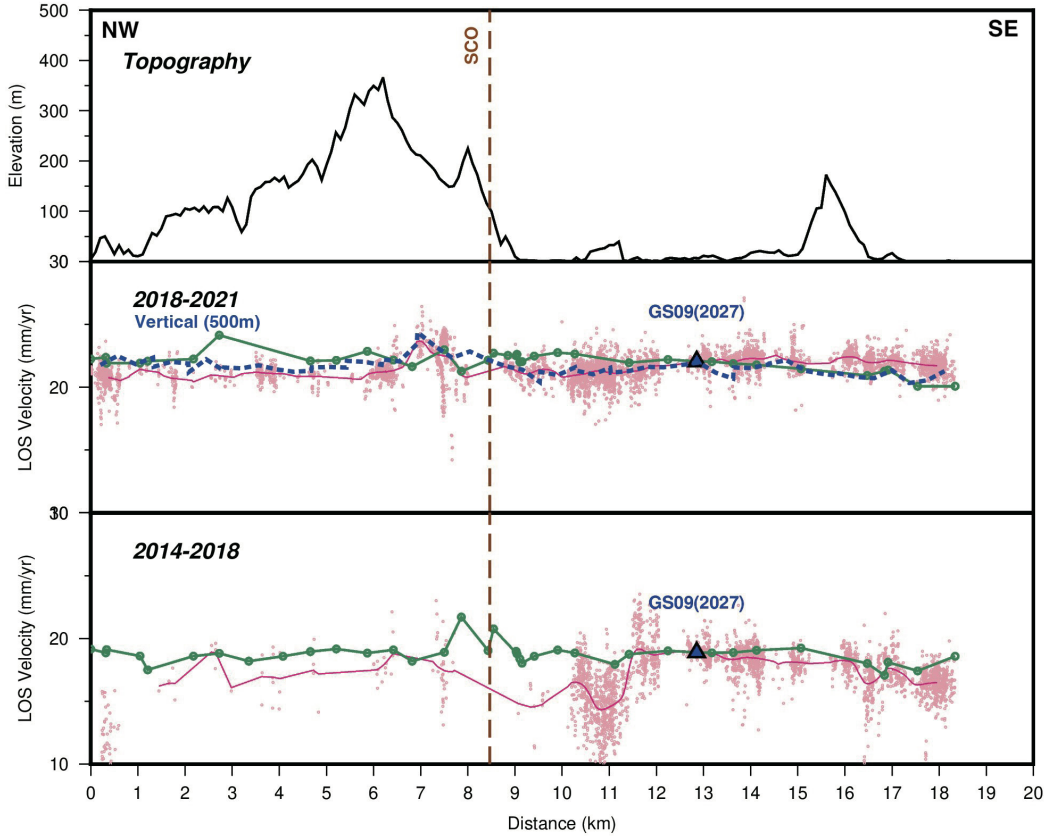


圖4-29：水準測線-石門至萬里測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS09(2027)。SCO為山腳斷層。藍色虛線為PSI垂直向結果。

Figure 4-29：Comparison of PSI and Shihmen-Wanli leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS09(2027). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault. Blue dash line is the vertical velocity.

4-1-2 士林至三芝測線

士林至三芝測線橫跨山腳斷層，測線長約5公里(投影至剖面的長度），以GNSS連續站YMSM做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位GB06及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。此測線因位於大屯火山區域，山區遮蔽較嚴重，地形起伏較大，PSI點較不密集，因此可以比對的雷達資料較少。

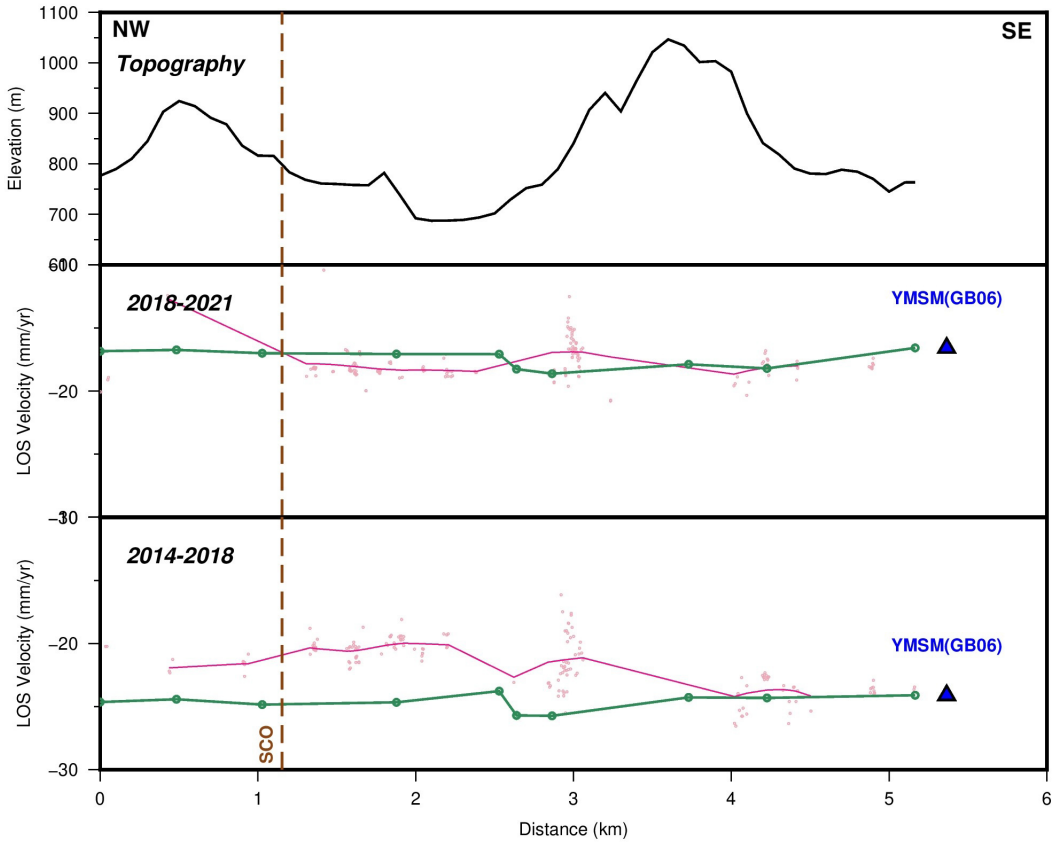


圖4-30：水準測線-士林至三芝測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點YMSM(GB86)。SCO為山腳斷層。

Figure 4-30 ：Comparison of PSI and Shilin-Sanzhi leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station YMSM(GB06). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault.

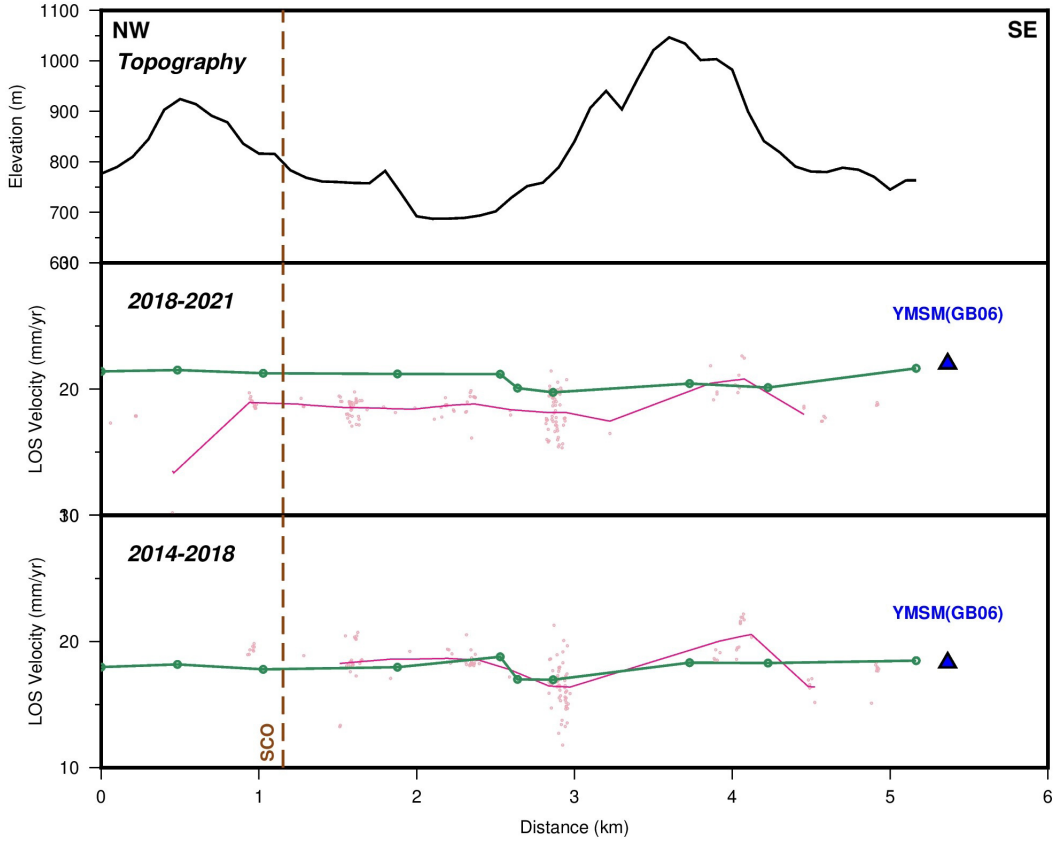


圖4-31：水準測線-士林至三芝測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點YMSM(GB86)。SCO為山腳斷層。

Figure 4-31 ：Comparison of PSI and Shilin-Sanzhi leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station YMSM(GB06). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault.

4-3-3 淡水至士林測線

淡水至士林測線橫跨山腳斷層，長約16公里(投影至剖面的長度），以GNSS連續站GS11做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位B229(2014-2018)及B230(2018-2021)及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。根據圖4-32、圖4-33，水準測線資料均可以看出2018-2021在向東跨越山腳斷層後約1公里處有一明顯速度值差異，約為15mm/yr，但雷達影像只有在降軌影像有明顯數度差異，約為5mm/yr，升軌影像約只有2-3mm/yr。

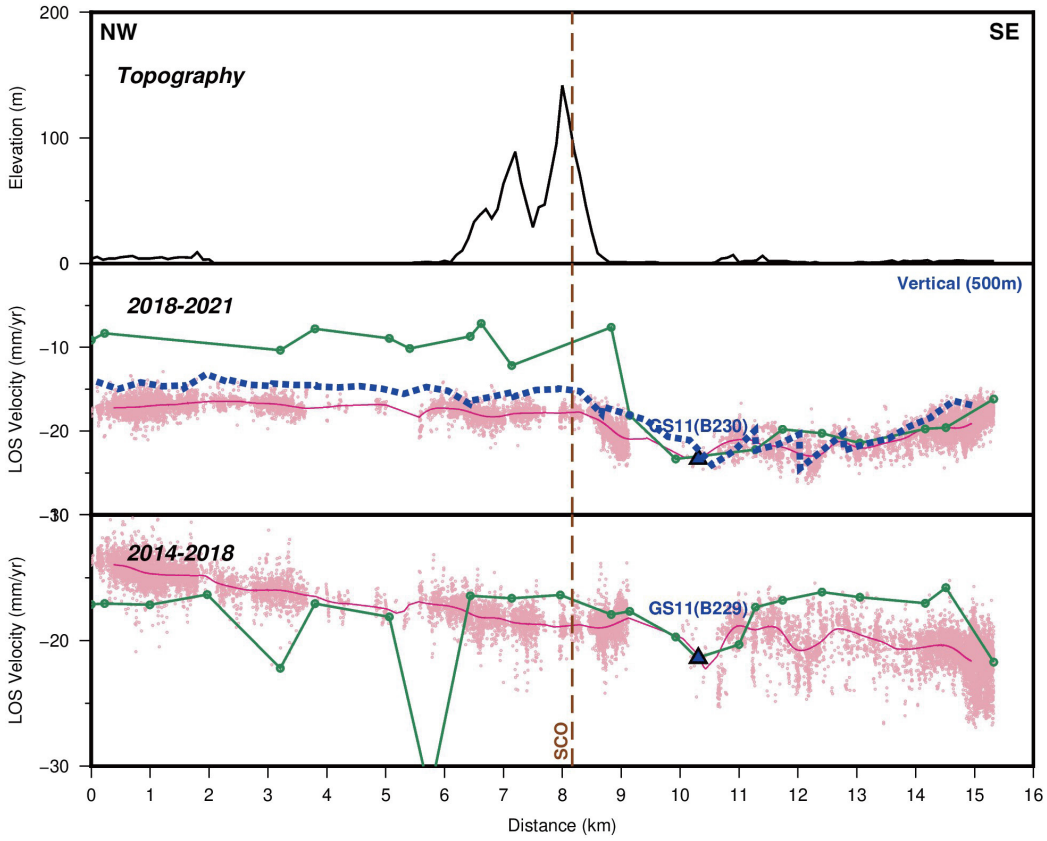


圖4-32：水準測線-淡水至士林測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS11(B229/B230)。SCO為山腳斷層。藍色虛線為PSI垂直向結果。

Figure 4-32：Comparison of PSI and Tamsui-Shihlin leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS11(B229/B230). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault. Blue dash line is the vertical velocity.

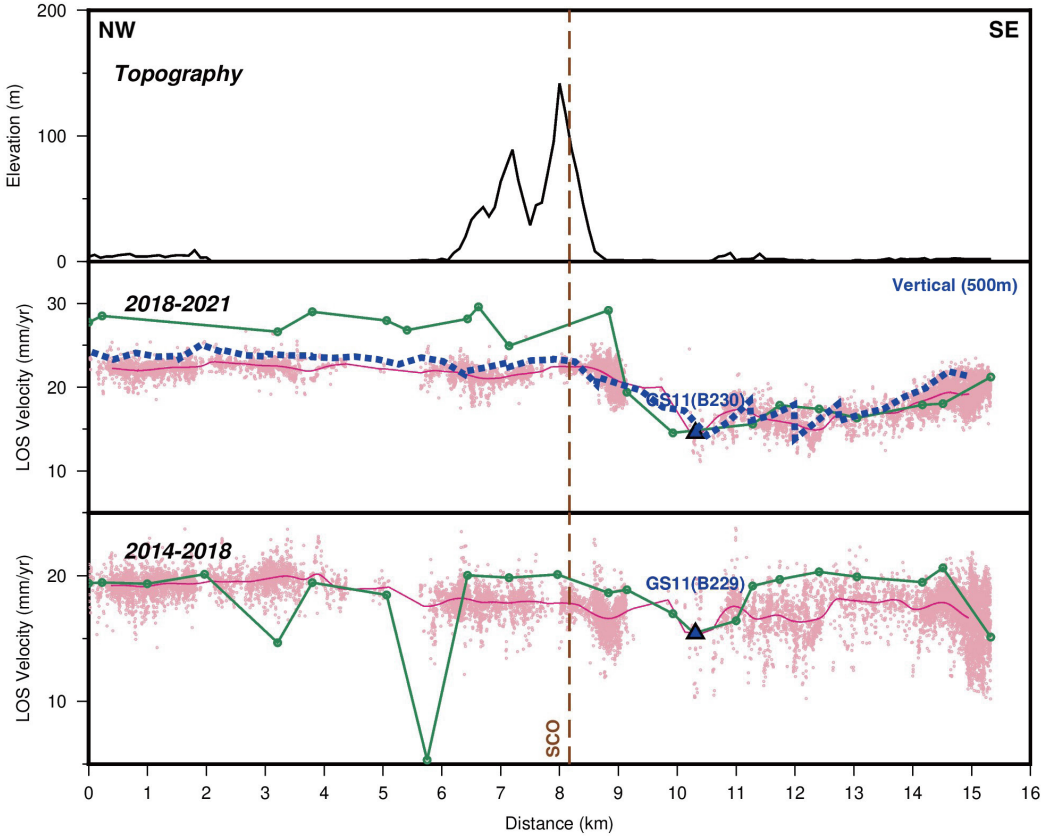


圖4-33：水準測線-淡水至士林測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS11(B229/B230)。SCO為山腳斷層。藍色虛線為PSI垂直向結果。

Figure 4-33：Comparison of PSI and Tamsui-Shihlin leveling route in des cending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS11(B229/B230). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault. Blue dash line is the vertical velocity.

4-3-4 五股至臺北測線

五股至臺北測線橫跨山腳斷層，長約14公里(投影至剖面的長度），以GNSS連續站CWBN做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位X018及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。根據圖4-34、圖4-35，兩個方向的雷達資料可以看出在向東跨越山腳斷層1.5公里處有一明顯速度值差異，尤其以2018-2021期間影像更為明顯，其變化量約為10mm/yr(Ascending)及12-13mm/yr(Descending)，但水準測量結果並無此明顯變化。

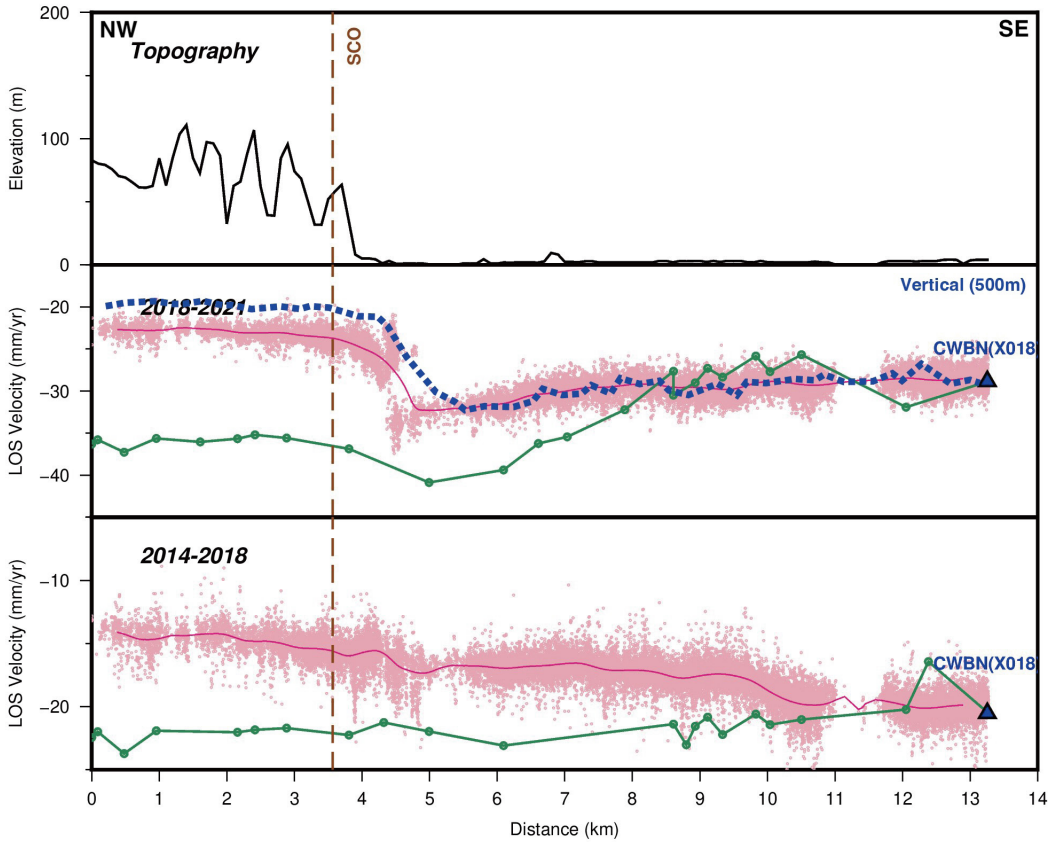


圖4-34：水準測線-五股至臺北測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點CWBN(X018)。SCO為山腳斷層。藍色虛線為PSI垂直向結果。

Figure 4-34：Comparison of PSI and Wugu-Taipei leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station CWBN(X018). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault. Blue dash line is the vertical velocity.

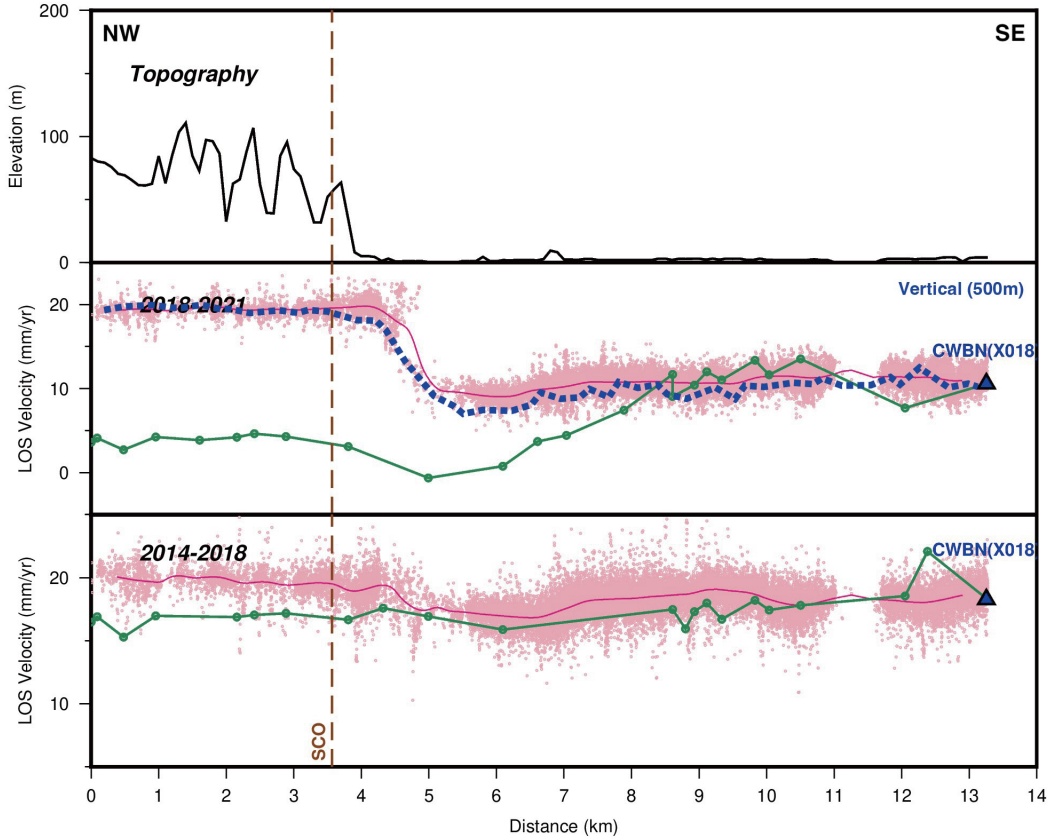


圖4-35：水準測線-五股至臺北測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點YAME(GB40)。SCO為山腳斷層。藍色虛線為PSI垂直向結果。

Figure 4-35：Comparison of PSI and Wugu-Taipei leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station YAME(GB40). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, SCO is Sanchiao fault. 藍色虛線為PSI垂直向結果。

4-3-5 新屋至童話世界測線

新屋至童話世界測線，其橫跨湖口斷層，路線長約24公里（投影至剖面的長度），以GNSS連續站YAME做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位GB40及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點YAME校正後，2014-2018時期影像在南往北跨越湖口斷層有較顯著抬升，尤其以descending影像與水準結果一致，於斷層北側1.5-3km處有一明顯隆起。而2018-2021影像時期則整體速度變化不大。

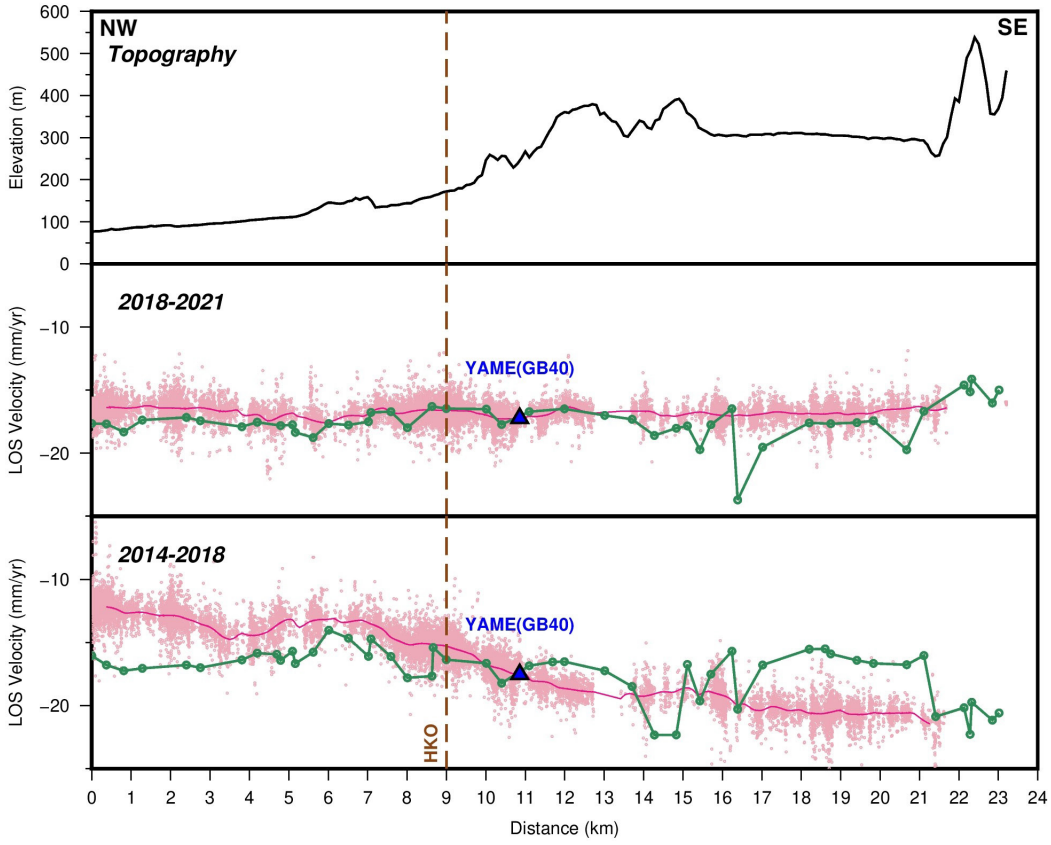


圖4-36：水準測線-新屋至童話世界測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點YAME(GB40)。SCO為山腳斷層。

Figure 4-36：Comparison of PSI and Xinwu-Guanxi leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station YAME(GB40). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HKO is Hukou fault.

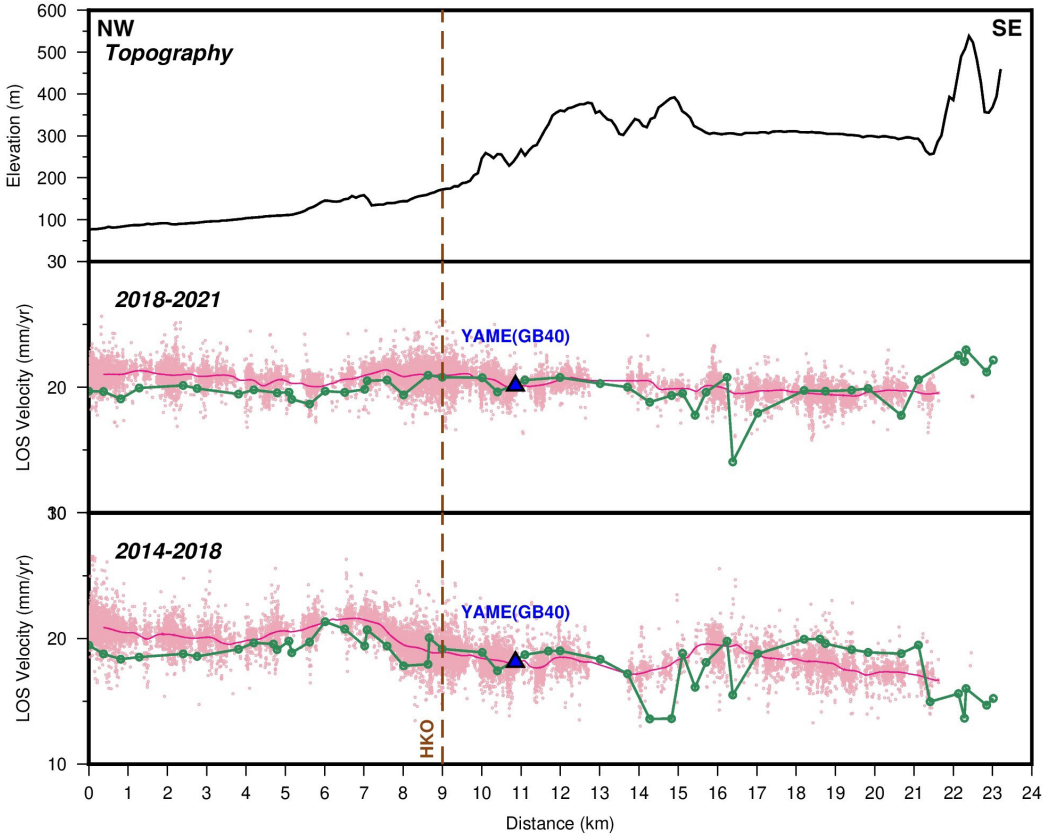


圖4-37：水準測線-新屋至童話世界測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點YAME(GB40)。SCO為山腳斷層。

Figure 4-37：Comparison of PSI and Xinwu-Guanxi leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station YAME(GB40). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HKO is Hukou fault.

4-3-6 新竹至五峰測線

新竹至五峰測線，其橫跨新竹斷層及新城斷層，路線長約30公里（投影至剖面的長度），以GNSS連續站GS03做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位HCCA及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點GS03校正後，此測線跨新竹斷層及新城斷層之速度並無顯著變化。

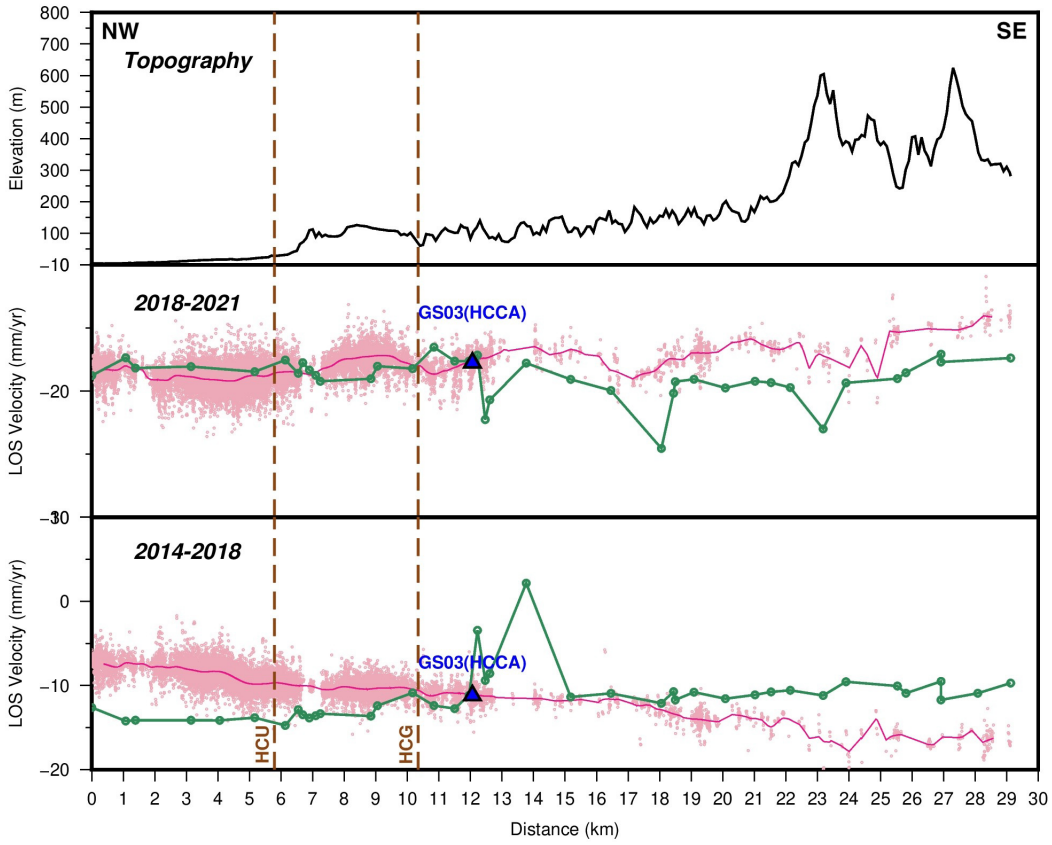


圖4-38：水準測線-新竹至五峰測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS03(HCCA)。HCU為新竹斷層，HCG為新城斷層。

Figure 4-38：Comparison of PSI and Hsinchu-Wufeng leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS03(HCCA). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCU is Hsinchu fault, and HCG is Hsincheng fault.

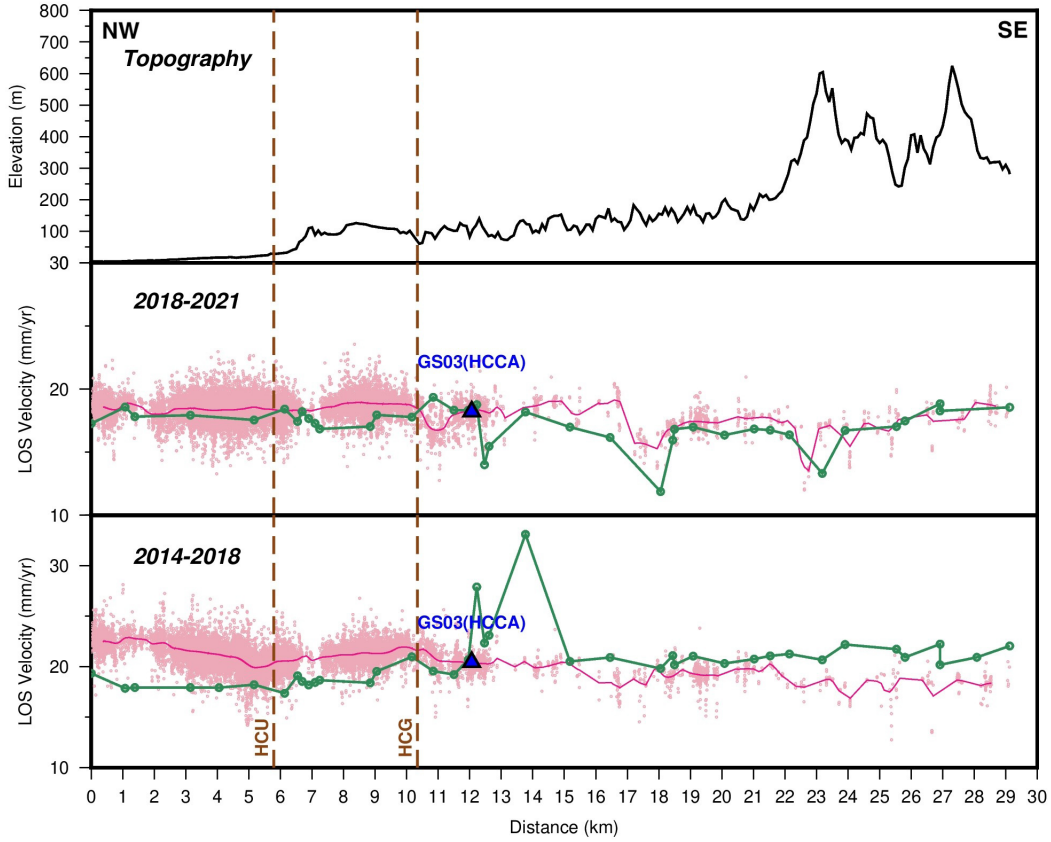


圖4-39：水準測線-新竹至五峰測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS03(HCCA)。HCU為新竹斷層，HCG為新城斷層。

Figure 4-39：Comparison of PSI and Hsinchu-Wufeng leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS03(HCCA). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCU is Hsinchu fault, and HCG is Hsincheng fault.

4-3-7 新竹至峨嵋測線

新竹至峨嵋測線，其橫跨新竹斷層及新城斷層，路線長約17公里（投影至剖面的長度），以GNSS連續站GS14做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位GB72及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點GS14校正後，此測線跨新竹斷層及新城斷層之速度並無顯著變化。

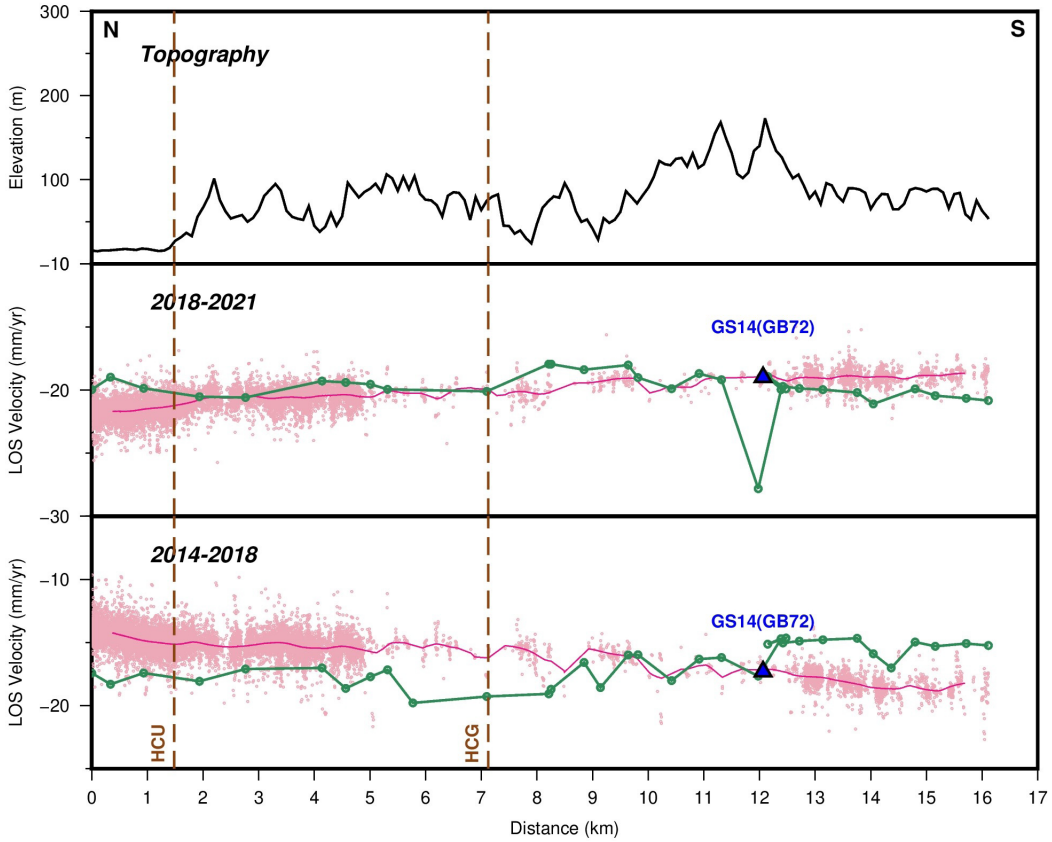


圖4-40：水準測線-新竹至峨嵋測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS14(GB72)。HCU為新竹斷層，HCG為新城斷層。

Figure 4-40：Comparison of PSI and Hsinchu-Emei leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS14(GB72). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCU is Hsinchu fault, and HCG is Hsincheng fault.

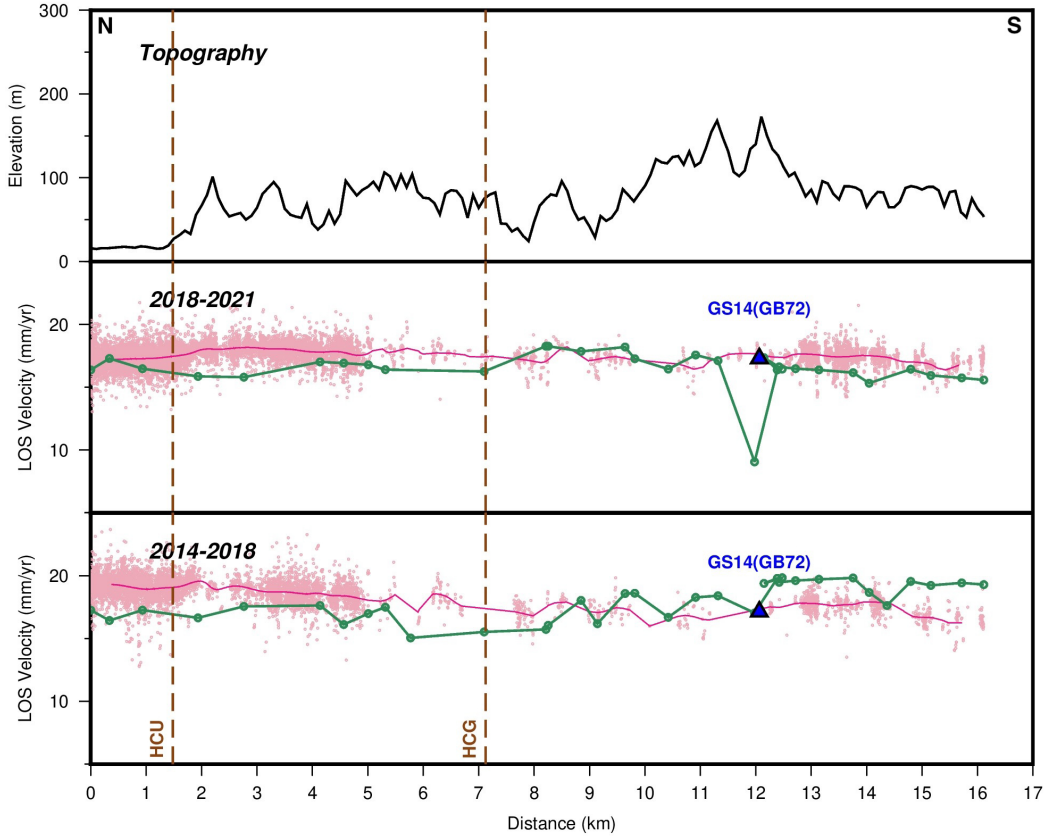


圖4-41：水準測線-新竹至峨嵋測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS14(GB72)。HCU為新竹斷層，HCG為新城斷層。

Figure 4-41：Comparison of PSI and Hsinchu-Emei leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS14(GB72). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCU is Hsinchu fault, and HCG is Hsincheng fault.

4-3-8 苗栗至南庄測線

苗栗至南庄測線，其橫跨獅潭斷層，路線長約18公里（投影至剖面的長度），以GNSS連續站GS92做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位3058及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點GS92校正後，此測線跨獅潭斷層之速度並無顯著變化。

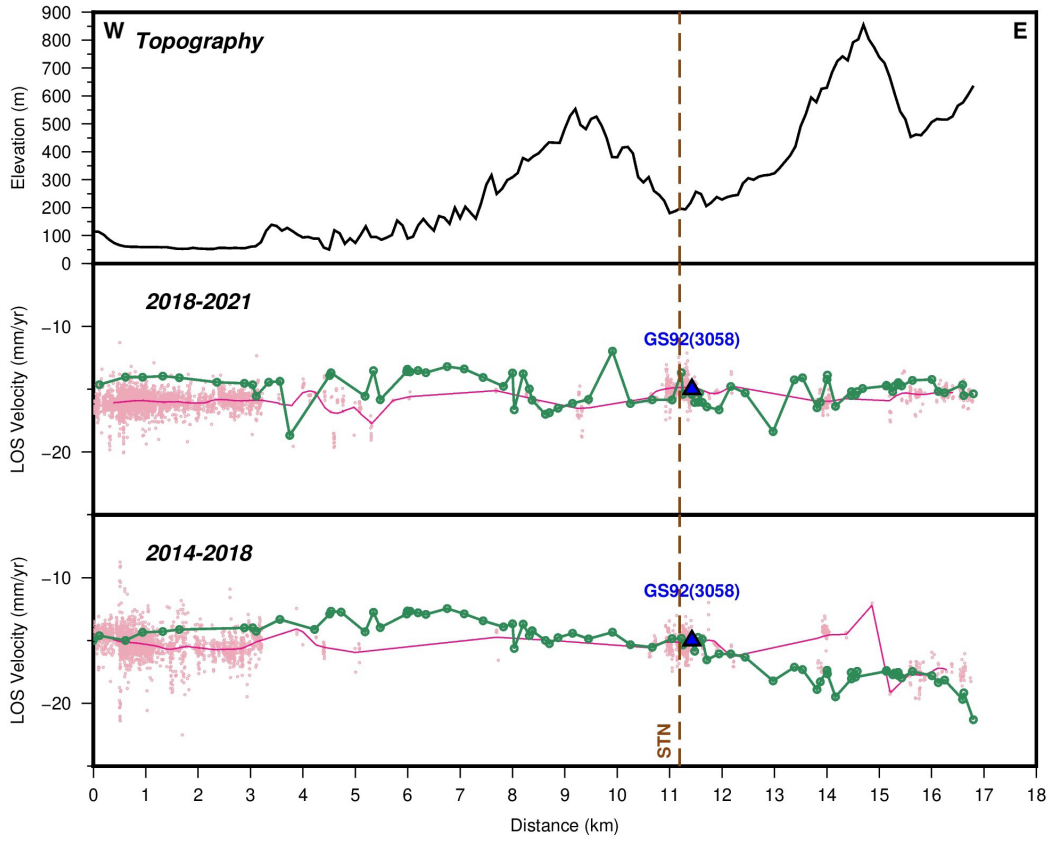


圖4-42：水準測線-苗栗至南庄測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS92(3058)。STN為獅潭斷層。

Figure 4-42：Comparison of PSI and Miaoli-Nanzhuang leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS92(3058). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, STN is Shihtan fault.

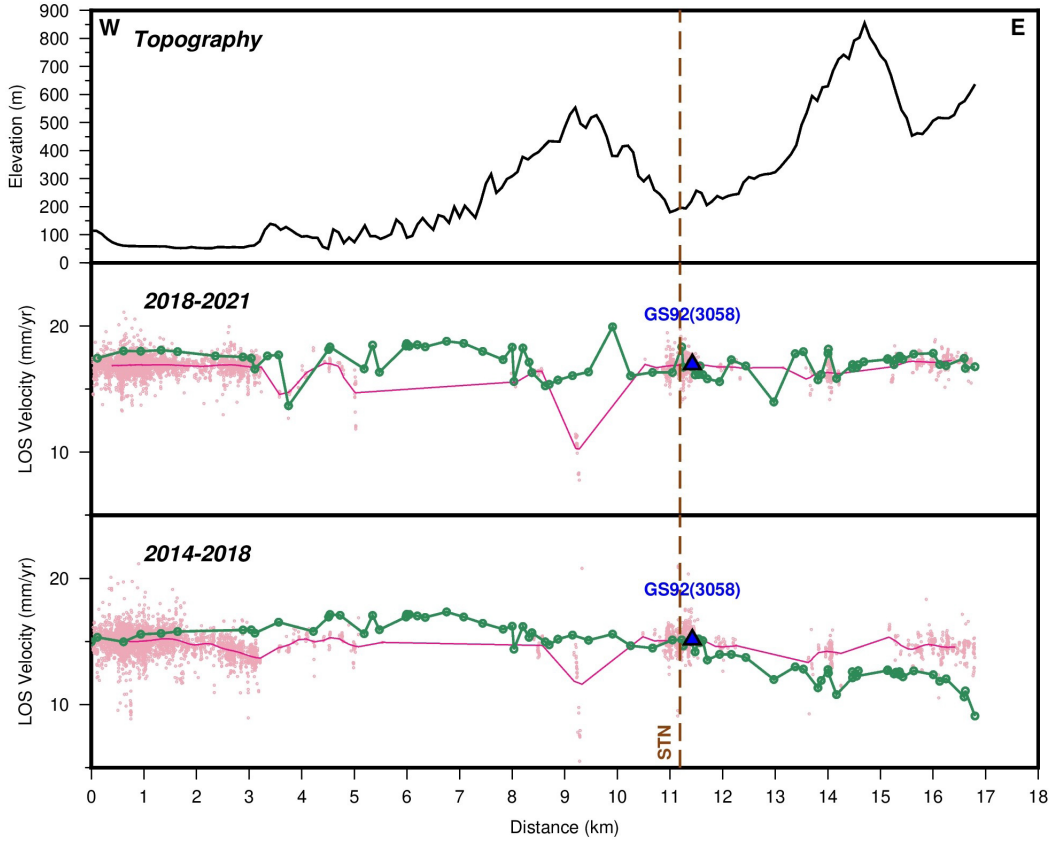


圖4-43：水準測線-苗栗至南庄測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS92(3058)。STN為獅潭斷層。

Figure 4-43：Comparison of PSI and Miaoli-Nanzhuang leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS92(3058). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, STN is Shihtan fault.

4-3-9 大安至東勢測線

大安至東勢測線，其橫跨屯子腳斷層及三義斷層，路線長約31公里（投影至剖面的長度），以GNSS連續站GS82做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位B283及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。以參考點GS82校正後，此測線跨屯子腳斷層及三義斷層之速度並無顯著變化。

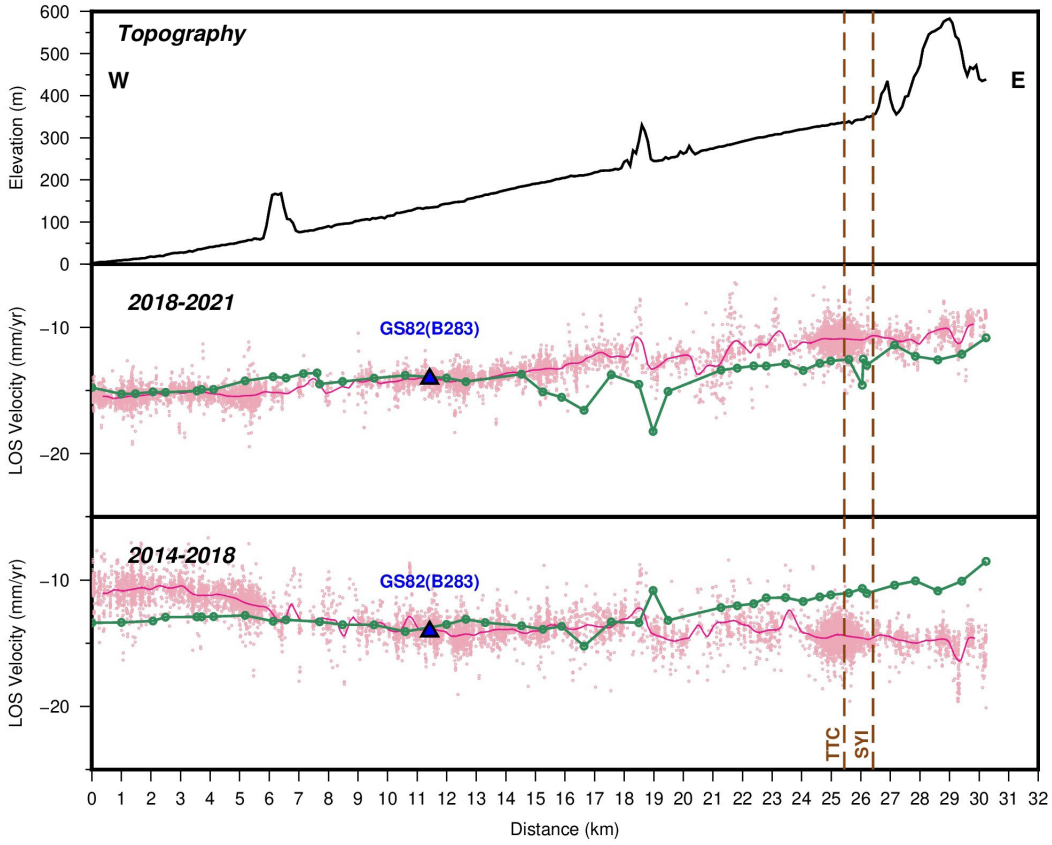


圖4-44：水準測線-大安至東勢測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS92(3058)。TTC為屯子腳斷層，SYI為三義斷層。

Figure 4-44：Comparison of PSI and Da' an-Dongshi leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS82(B283). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TTC is Tuntzuchiao fault, and SYI is Sanyi fault.

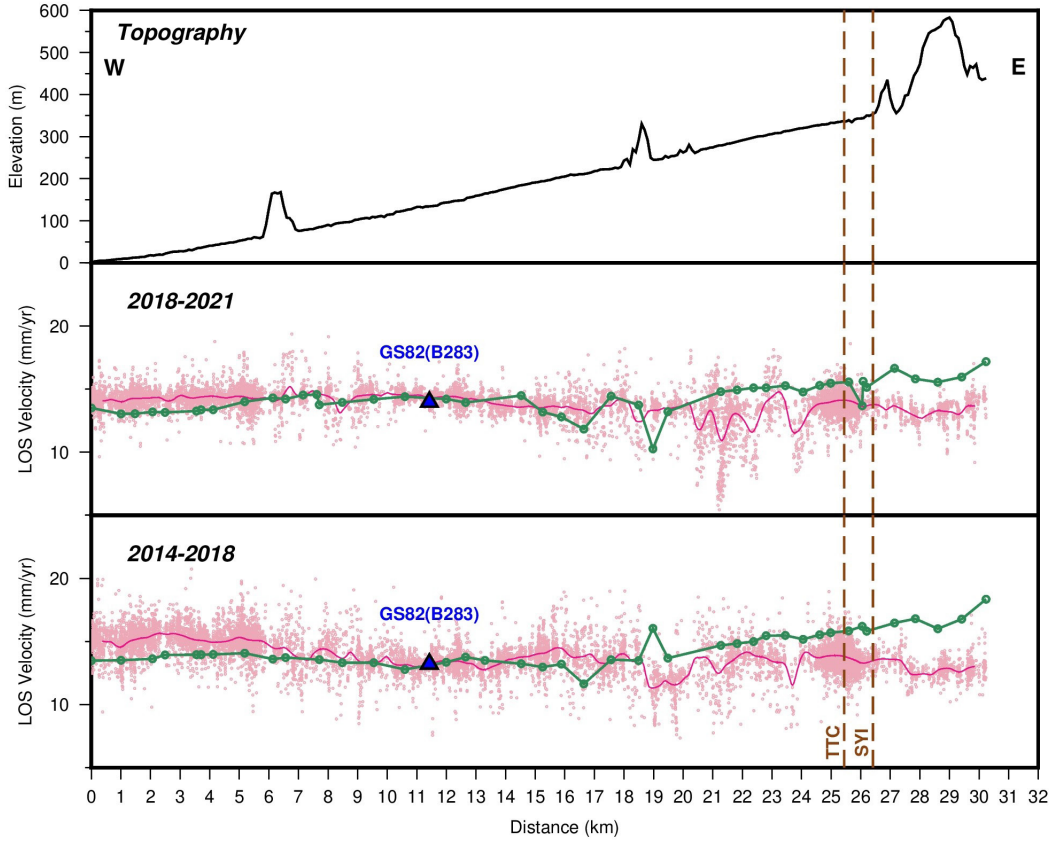


圖4-45：水準測線-大安至東勢測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對及2014-2018時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS92(3058)。TTC為屯子腳斷層，SYI為三義斷層。

Figure 4-45：Comparison of PSI and Da' an-Dongshi leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period and 2014-2018 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS82(B283). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, TTC is Tuntzuchiao fault, and SYI is Sanyi fault.

第五章 二維剖面模擬

5-1 方法與執行步驟

透過前面介紹的斷層錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992，圖5-1），與本計畫所計算2018-2021之雷達影像上升與下降軌道剖面資料進行擬合。分別針對橫跨三條斷層(山腳、新城與三義，圖5-2~4)的剖面，利用不同斷層幾何與滑動量所產生東西、南北與垂直方向之地表變形，轉投影至LOS方向後，與計畫內所獲得之速度場剖面進行匹配，選擇均方根誤差(Root Mean Square Error；RMSE)作爲篩選機制，並參考各參數的分佈來討論利用單一維度資料、剖面模擬方式可以怎麼幫助我們了解模擬的斷層系統。

本計畫的模擬過程對調查斷層之斷層幾何與滑移不做太多預設，僅針對預計控制之斷層傾角、斷層頂部、斷層底部、走向滑移量、傾角滑移量等五項做範圍限制（如下述），在有走向滑移的38萬組可能狀況、與無走向滑移的17萬種組合中正推地表滑移量，並且與觀測值比較，計算差值並以RMSE表示，找出RMSE較小的某個百分比的組合，並且與我們已知的地質條件做比較來增進我們對該斷層的幾何與活動的了解。

所設定參數有五項分成兩大部分，一為與斷層幾何相關之斷層傾角(Dip) 、斷層的頂部(Fault Top)與底部(Fault Bottom)深度，另一為滑動值，其中包含了沿著傾角滑動(Dip Slip)與沿著斷層走向滑動(Strike Slip)的量值；搜尋範圍分別為斷層頂部(Fault Top) 0~2000公尺，格點為200公尺；斷層底部(Fault Bottom) 2000~20000公尺，格點為2000公尺；斷層傾角(Dip)10~80度，格點為10度；走向滑移(Strike Slip)與傾向滑移(Dip Slip) -0.02~0.02公尺，格點為0.002公尺，另外在斷層底部加上一個角度為1並往深度延伸1公里的滑脫面，此次共分四組模擬，分別假設有無走向滑移與有無滑脫面，有走向滑移的搜尋筆數為387200，而無走向滑移的搜尋筆數為17600。

再透過RMSE排序，呈現出每個參數在總數前10%的統計，另外也將每兩種參數進行數量百分比統計，以便顯示個別參數與兩兩

參數對中，在哪些參數組合有較多的百分比，進而討論該斷層幾何與滑動特性。

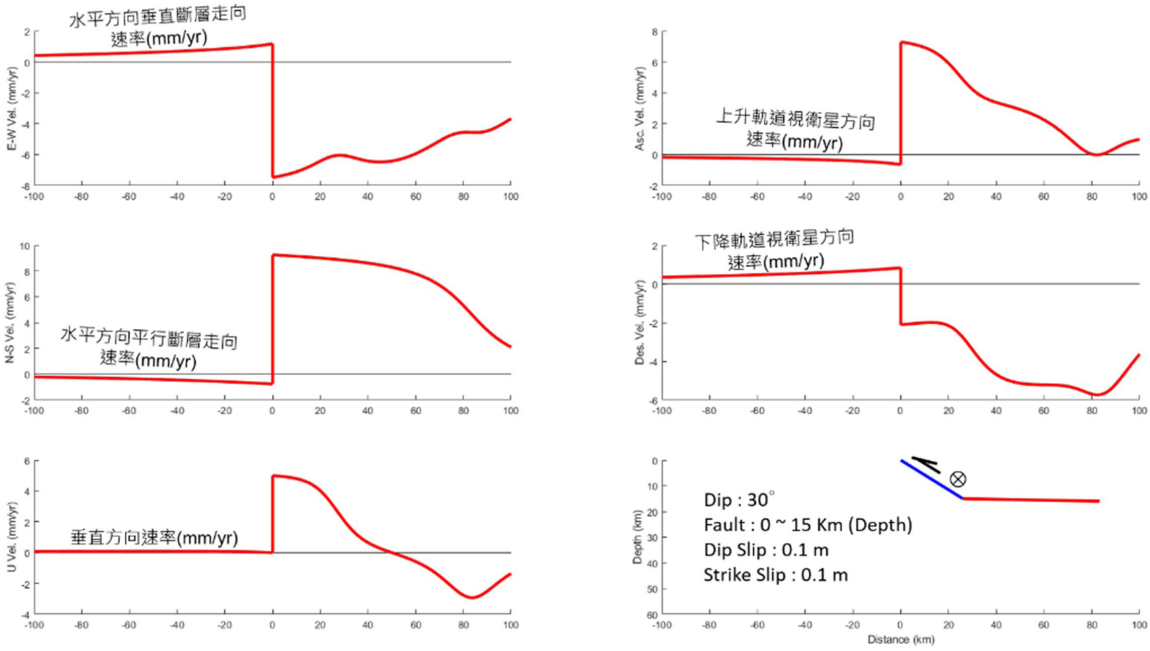


圖5-1：斷層錯位模型模擬結果示意圖組，假設斷層幾何與滑動量，透過斷層錯位模型推估地表變形行為，左邊由上到下分別為水平方向垂直斷層走向速率、水平方向平行斷層走向速率、垂直方向速率，右邊由上到下分別為上升軌道視衛星方向速率、下降軌道視衛星方向速率與斷層幾何、運動方向及參數。

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

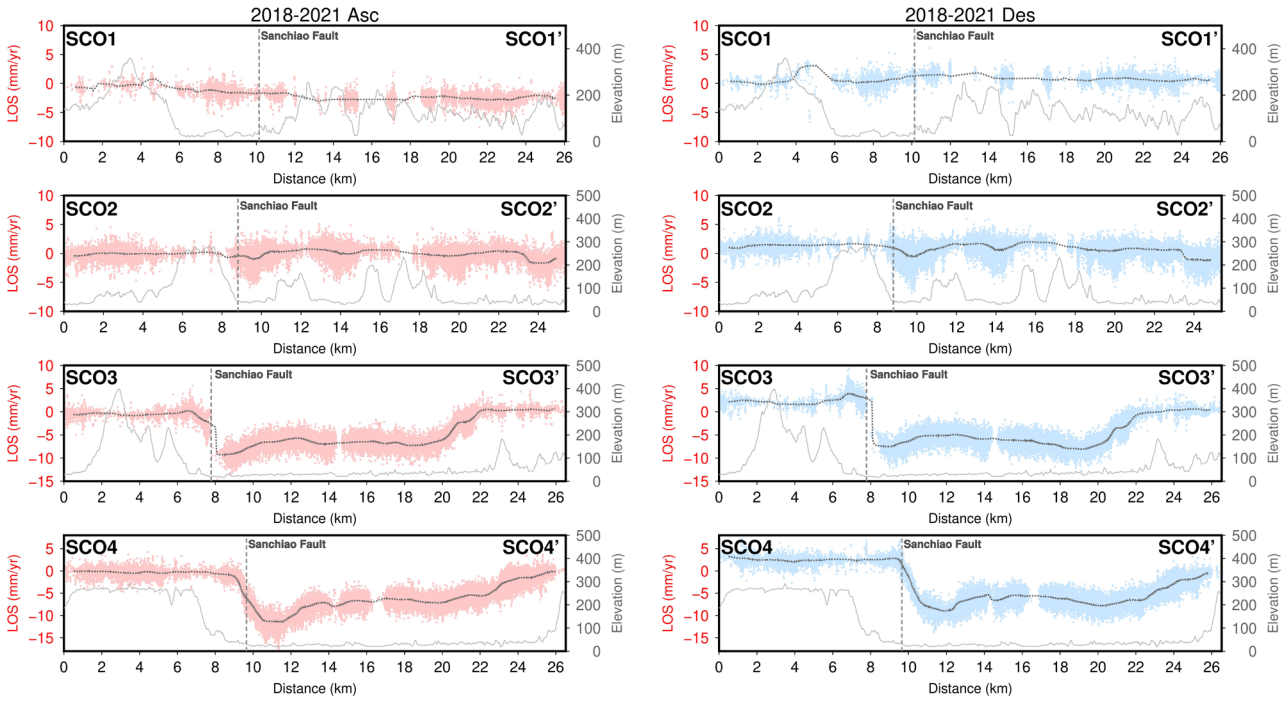


圖5-2：山腳斷層附近雷達影像上升及下降軌道視衛星方向速率剖面資料。此斷層在本次模擬採用 SCO3 剖面來模擬。

Figure 5-2：Velocity profiles extracted from InSAR results (ascending and descending orbits) across the Shanchiao Fault. Profile SCO3 is picked to perform the modelling for this fault.

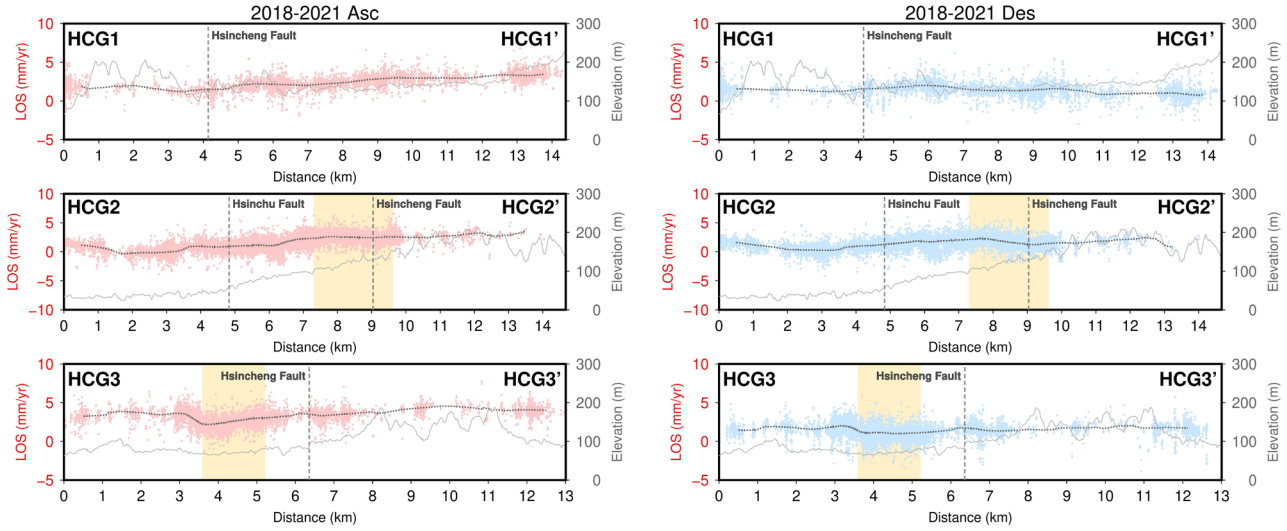


圖5-3：新城斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。 此斷層本次使用HCG2剖面資料來模擬。

Figure 5-3：Velocity profiles extracted from InSAR results (assending and descending orbits) across the Hsincheng Fault. Profile HCG2 is picked to perform the modelling for this fault.

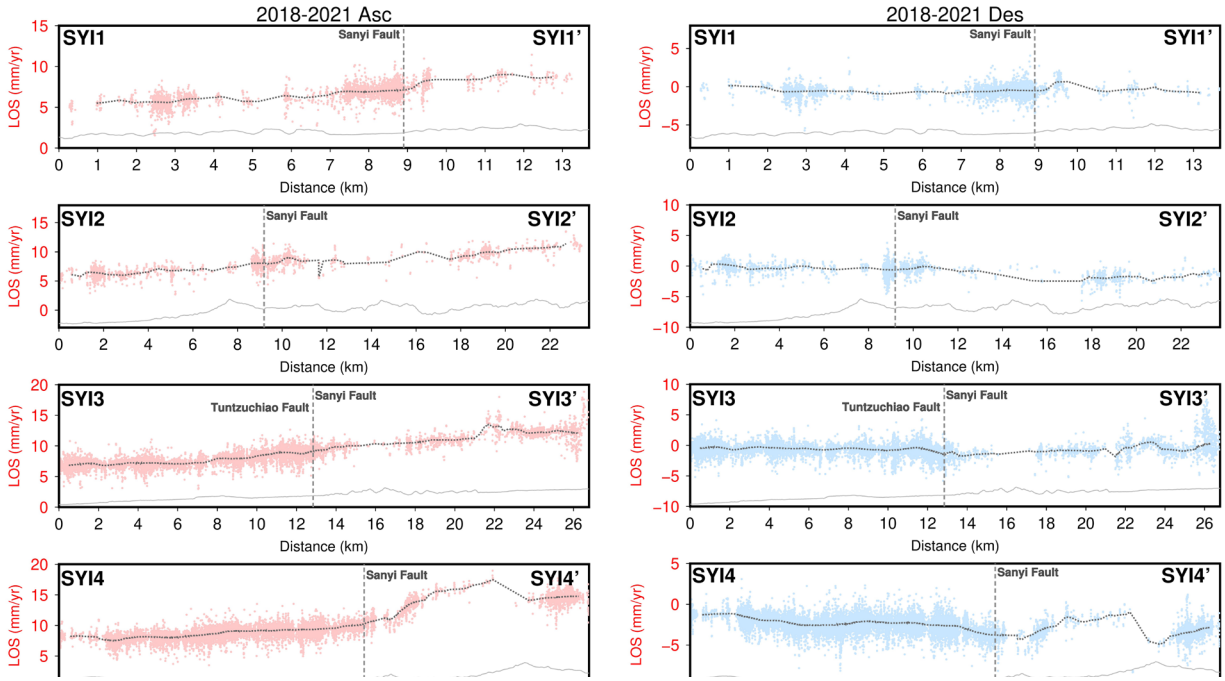


圖5-4：三義斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。在此斷層，本次採用 SYI3剖面來模擬斷層。

Figure 5-4：Velocity profiles extracted from InSAR results (assending and descending orbits) across the Sanyi Fault. Profile SYI3 is picked to perform the modelling for this fault.

5-2 山腳斷層模擬結果

山腳斷層-SCO3的模擬結果，選擇RMSE在總數前10%的結果(圖5-5~8)，分別呈現四組模擬，呈現傾角、傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 走滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 走滑、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、走滑 - 斷層頂部、走滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計百分比圖，其中含走滑與滑脫面為圖5-9，走滑無滑脫面為圖5-10，無走滑有滑脫面為圖5-11，無走滑無滑脫面為圖5-12。另外，針對山腳斷層的部分，將傾滑範圍調整為-0.1 ~ -0.002公尺，格點依舊為0.002公尺，也將斷層底部調整為2000~30000公尺，格點也是為2000公尺，模擬結果於圖5-13~15。

透過簡易模擬地表變形剖面SCO3，結果呈現了高角度正斷層活動，傾角約60~80度，傾滑約2~3cm/yr，與前人研究(黃鑑水，1998)所提近地表為高角度相符，而地表變形則顯示了近期的變動量明顯。

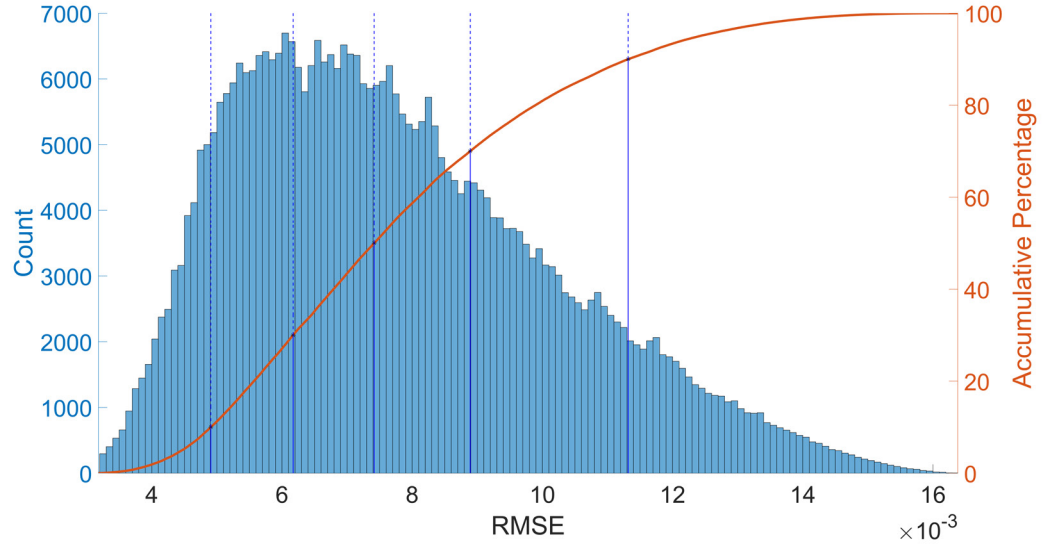


圖5-5：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-5:Distribution of RMSE, Count and Accumulative Percentage in model with strike-slip and detachment. The blue dashed-solid lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

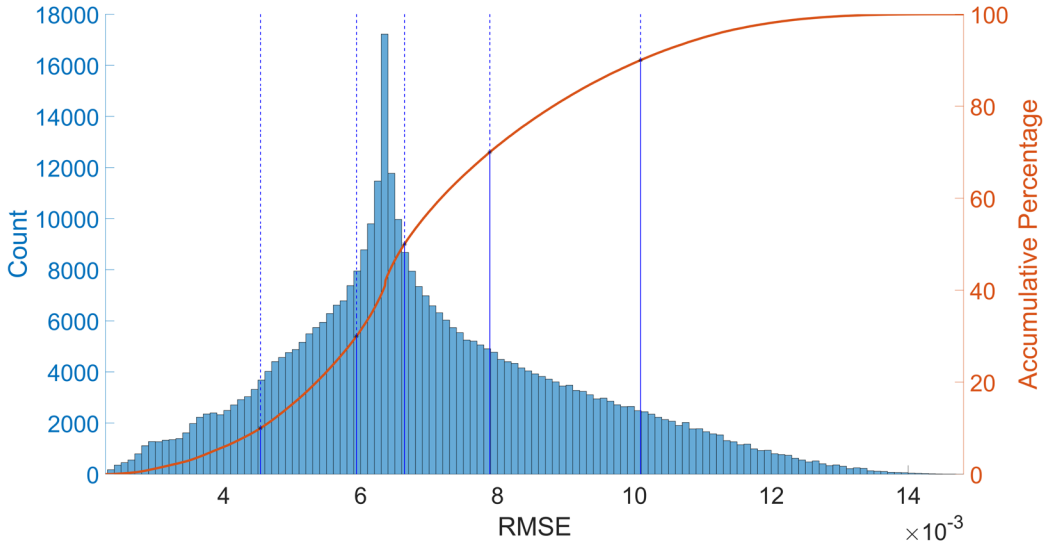


圖5-6：含走滑但不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-6:Distribution of RMSE, number and cumulative percentage in model with strike-slip but without detachment. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

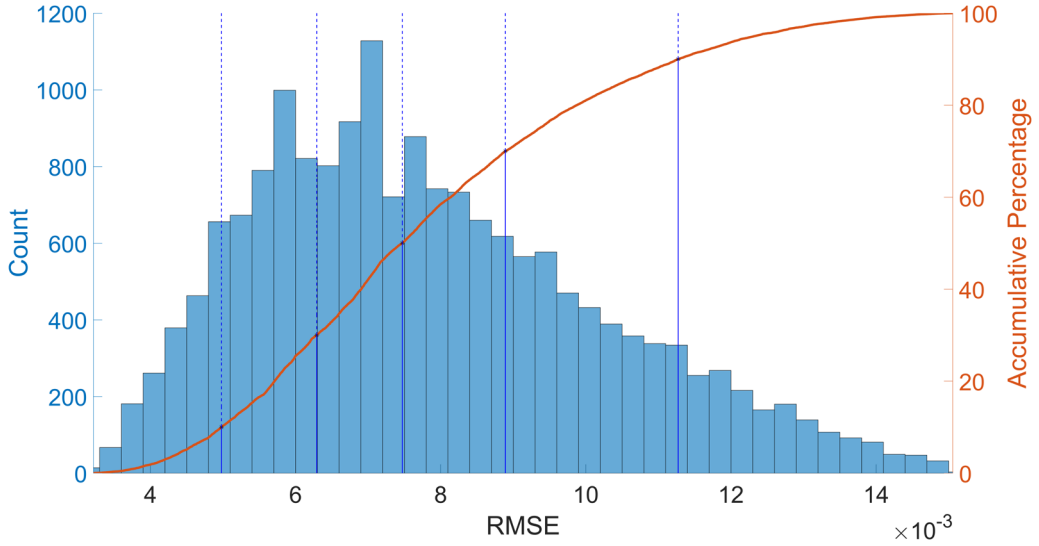


圖5-7：不含走滑但含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-7:Distribution of RMSE, number and cumulative percentage in model with detachment but without strike-slip. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

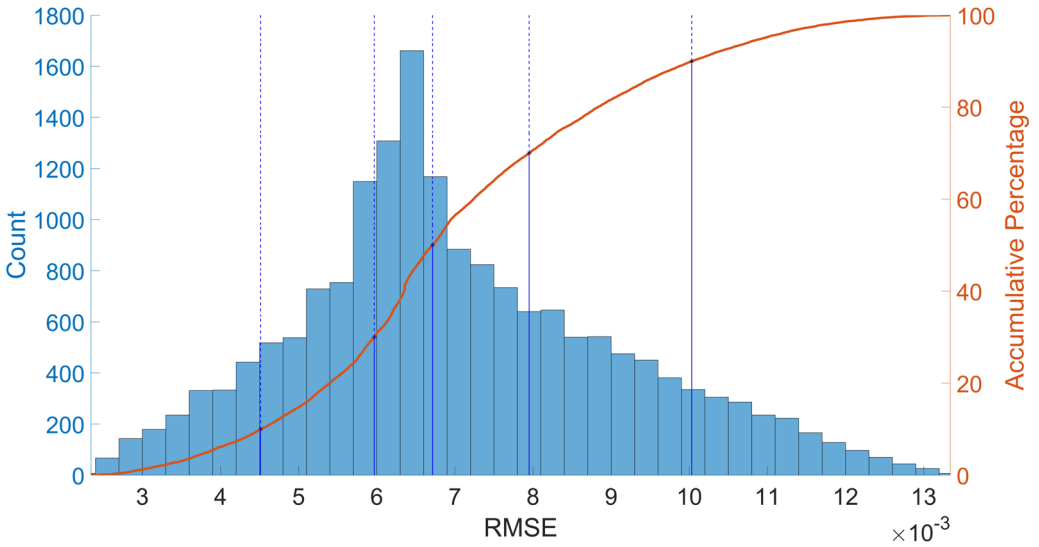


圖5-8：不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-8:Distribution of RMSE, number and cumulative percentage in model without strike-slip and detachment. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

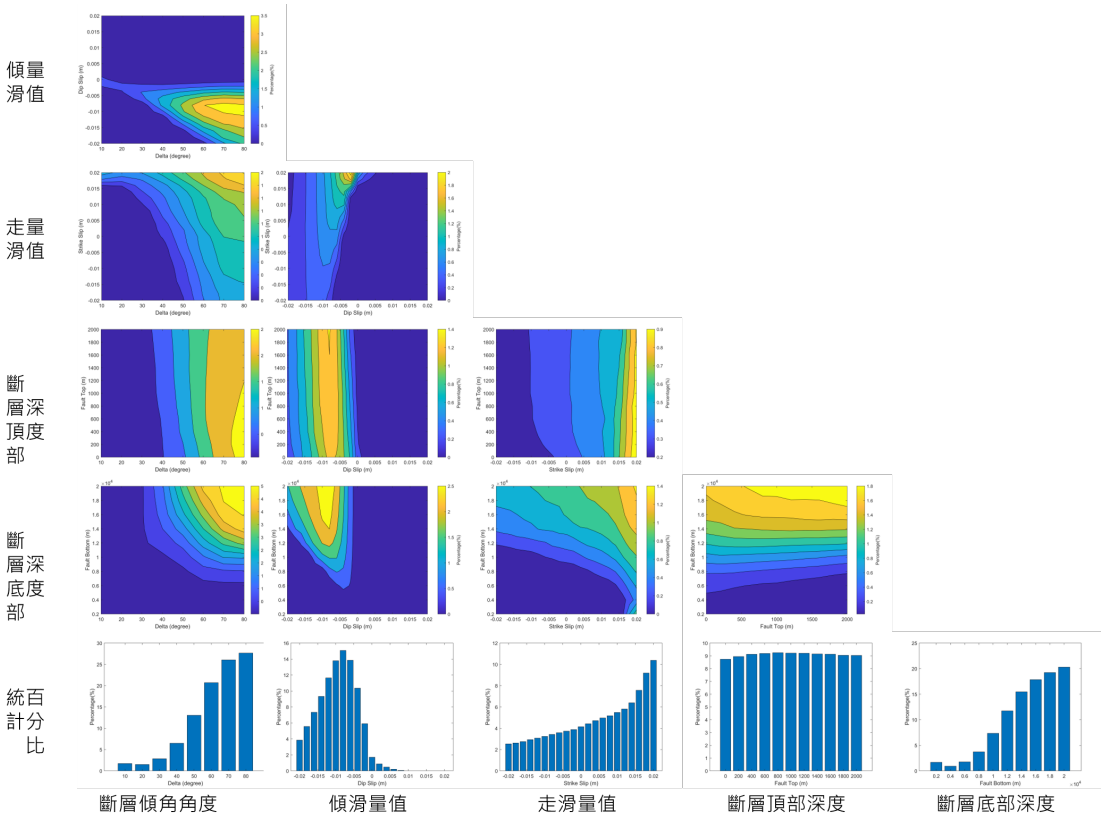


圖5-9：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE小於0.005032135，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-9:Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.005032135 in model with strike-slip and detachment.

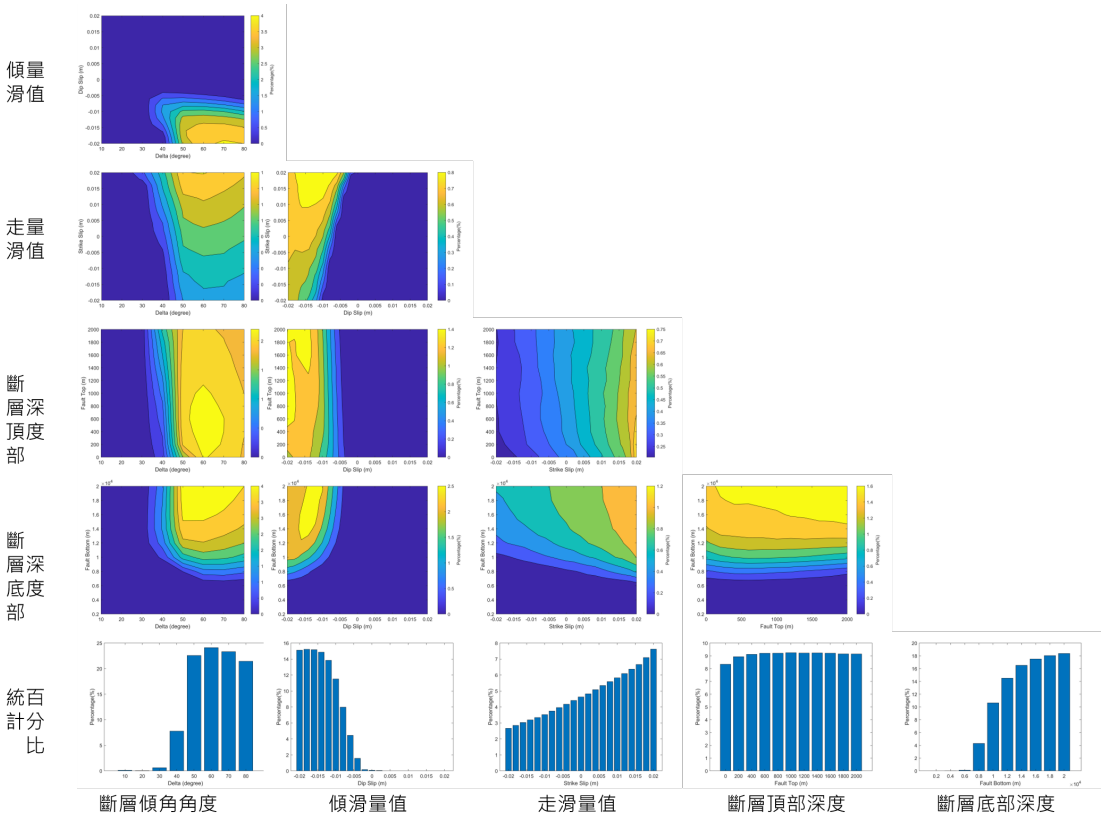


圖5-10：含走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00456385，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-10：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.00456385 in model with strike-slip but without detachment.

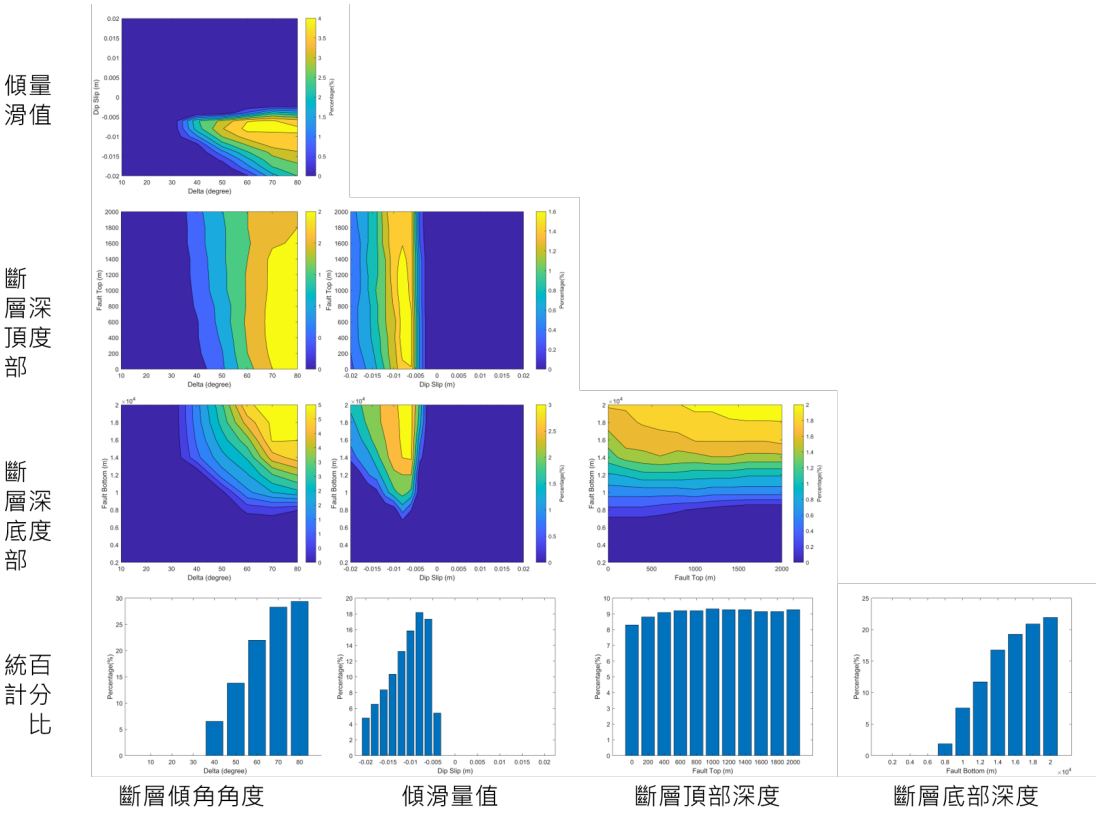


圖5-11：無走滑含滑脫面之模擬RMSE小於0.005150255，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-11：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.005150255 in model with detachment.

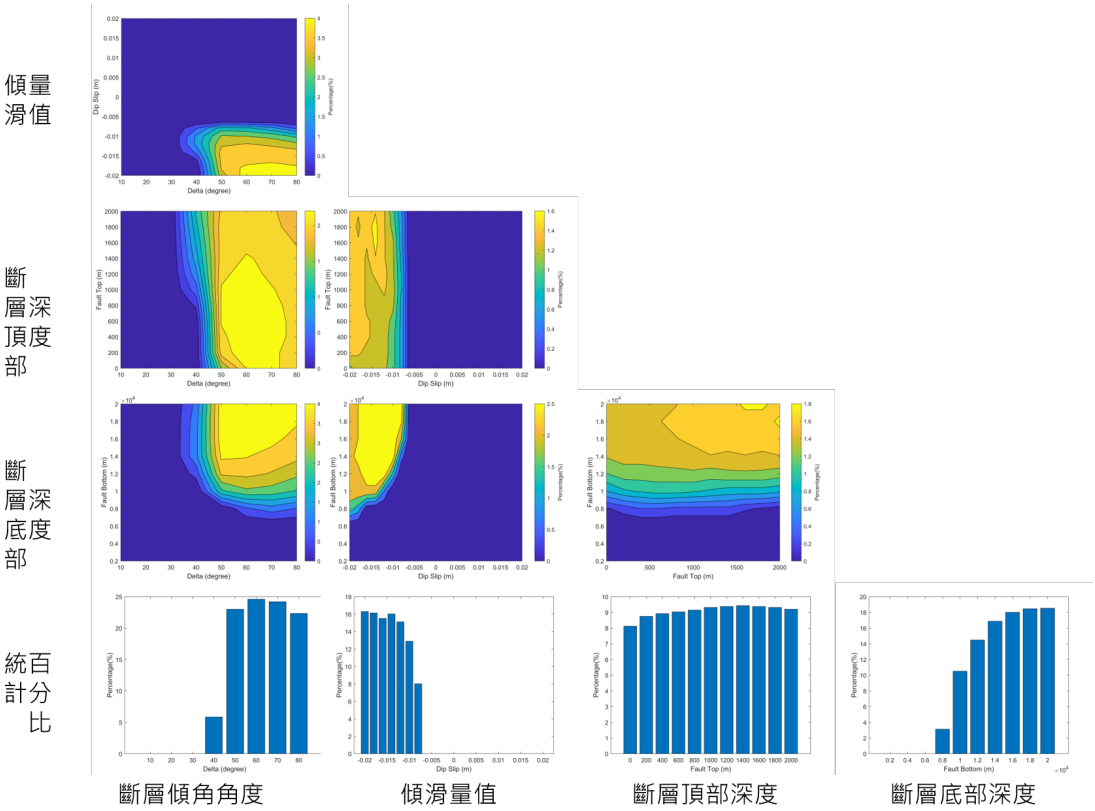


圖5-12：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00455435，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-12：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.00455435 in model without detachment.

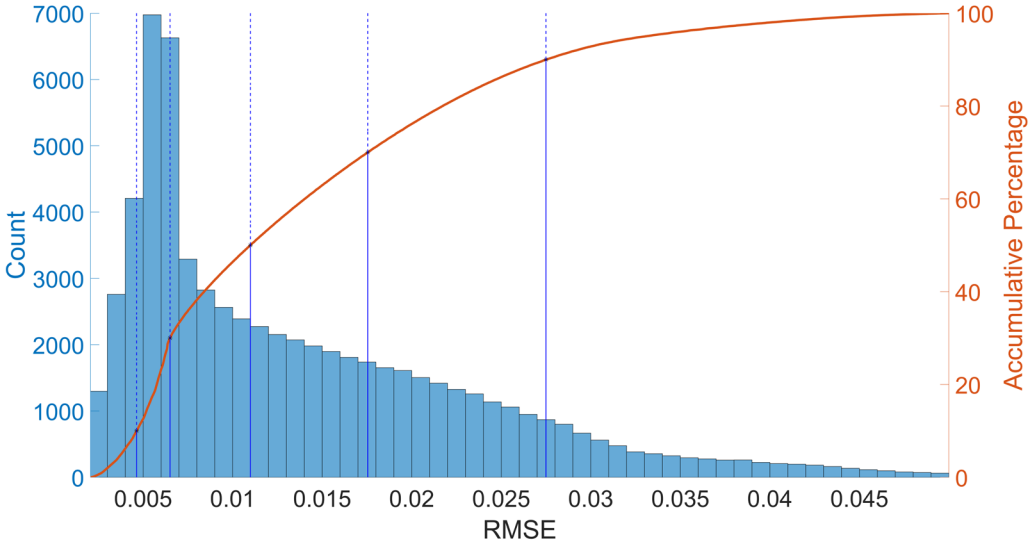


圖5-13：重設邊界條件下，不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-13:Distribution of RMSE, number and cumulative percentage in model without strike-slip and detachment. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

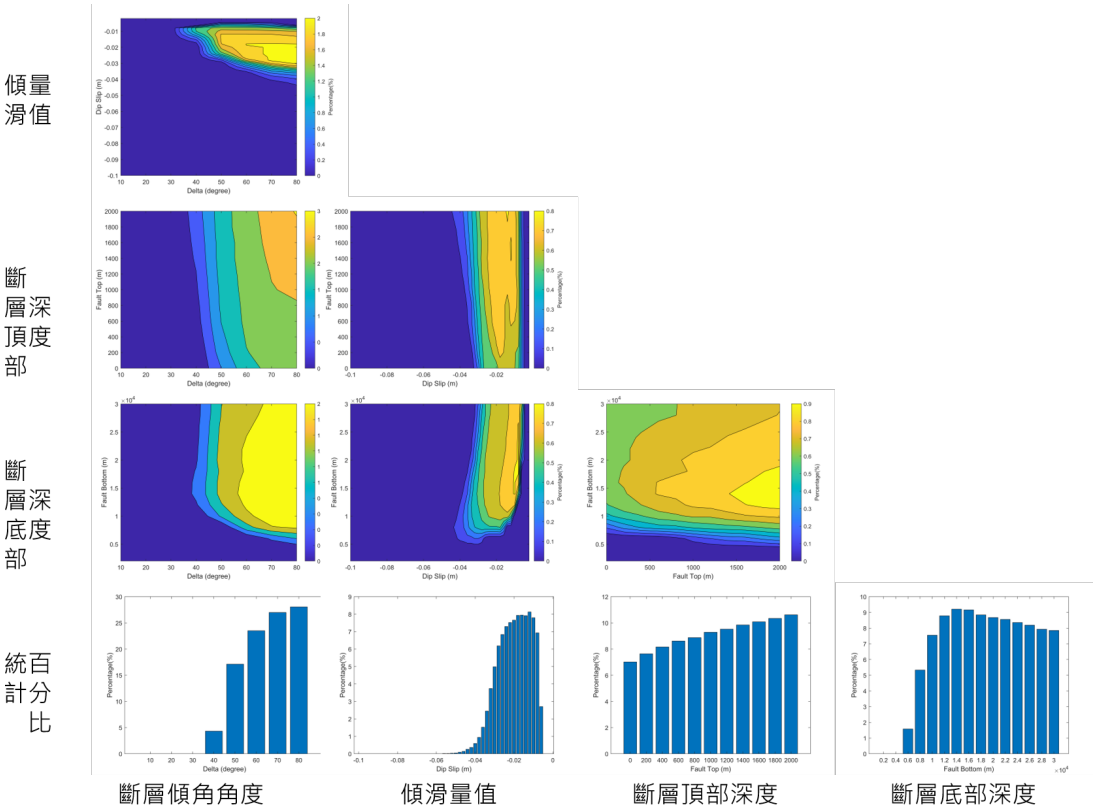


圖5-14：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.004653995，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-14：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.004653995 in model without detachment.

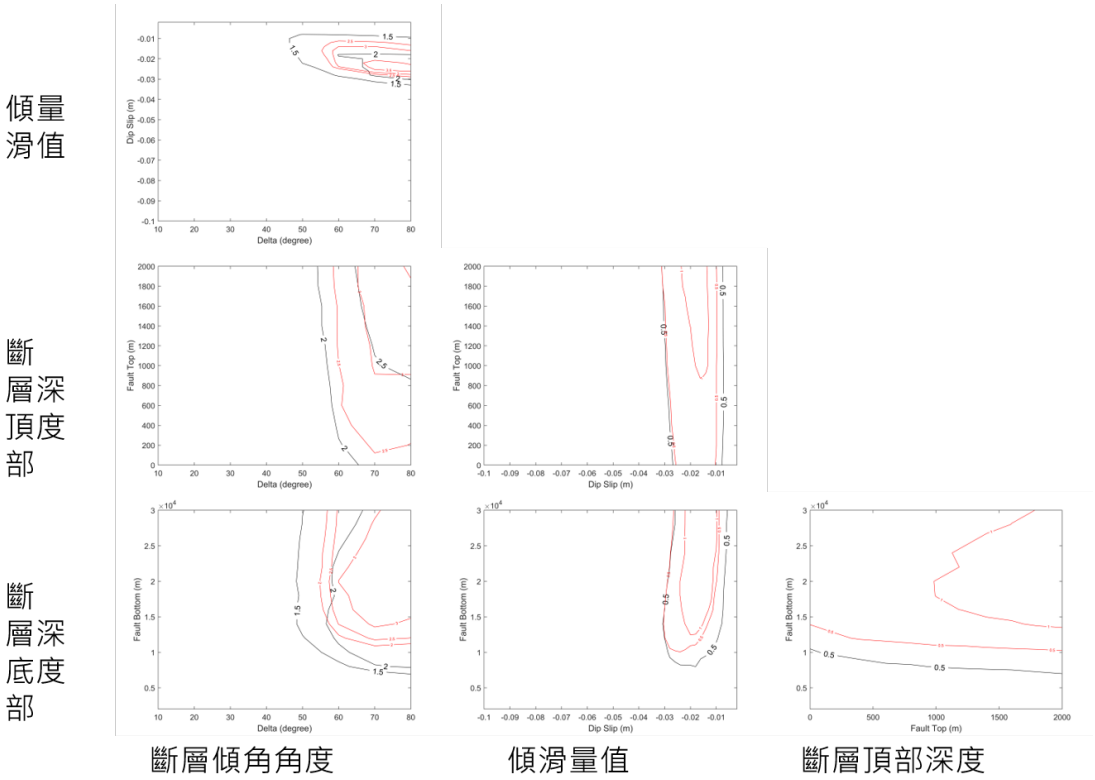


圖5-15：無走滑無滑脫面之模擬RMSE前5%與10%數量百分比等值圖，，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部與斷層底部深度，紅色線為前5%之個數百分比等值線，黑色線為前10%之個數百分比等值線。

Figure 5-15：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.00379094 in red lines and lower than 0.004653995 in black lines.

5-3 新城斷層模擬結果

新城斷層-HCG2的模擬結果，選擇RMSE在總數前10%的結果(圖5-16~19)，分別呈現四組模擬，呈現傾角、傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 走滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 走滑、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、走滑 - 斷層頂部、走滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計百分比圖，其中含走滑與滑脫面為圖5-20，走滑無滑脫面為圖5-21，無走滑有滑脫面為圖5-22，無走滑無滑脫面為圖5-23。

透過HCG2的升降軌資料來做模擬，從結果可知，傾滑量約在2mm/yr，透過RMSE比較，無走滑與無滑脫面的模擬獲得較多較小的RMSE，因此針對此模擬將傾滑範圍調整為-0.005 ~ -0.005公尺，格點依舊為0.001公尺，也將斷層底部深度-斷層頂部深度為0~10000公尺，格點也是為500公尺，模擬結果於圖5-24~25，呈現更收斂的趨勢。

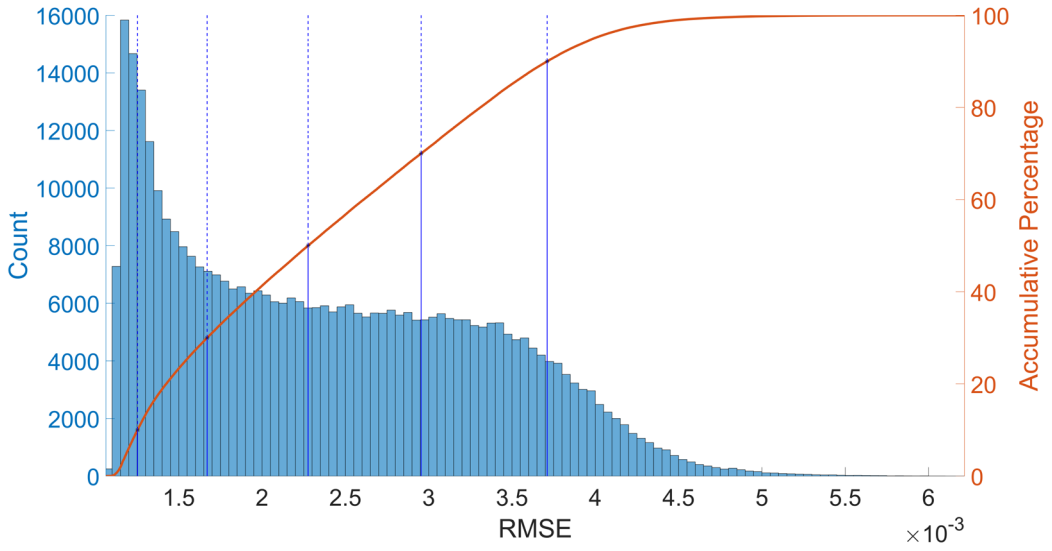


圖5-16：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-16:Distribution of RMSE, Count and Accumulative Percentage in model with strike-slip and detachment. The blue dashed-solid lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

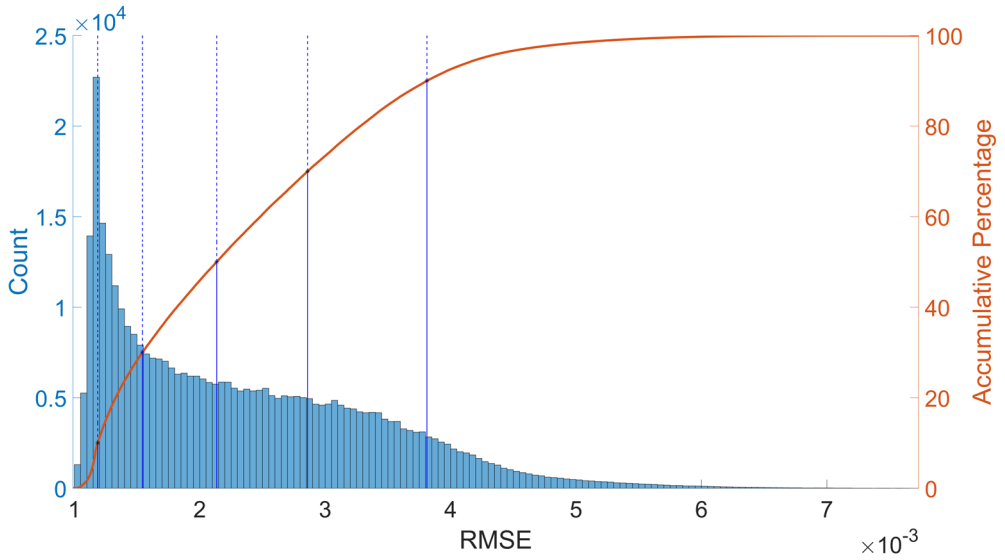


圖5-17：含走滑但不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-17:Distribution of RMSE, number and cumulative percentage in model with strike-slip but without detachment. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

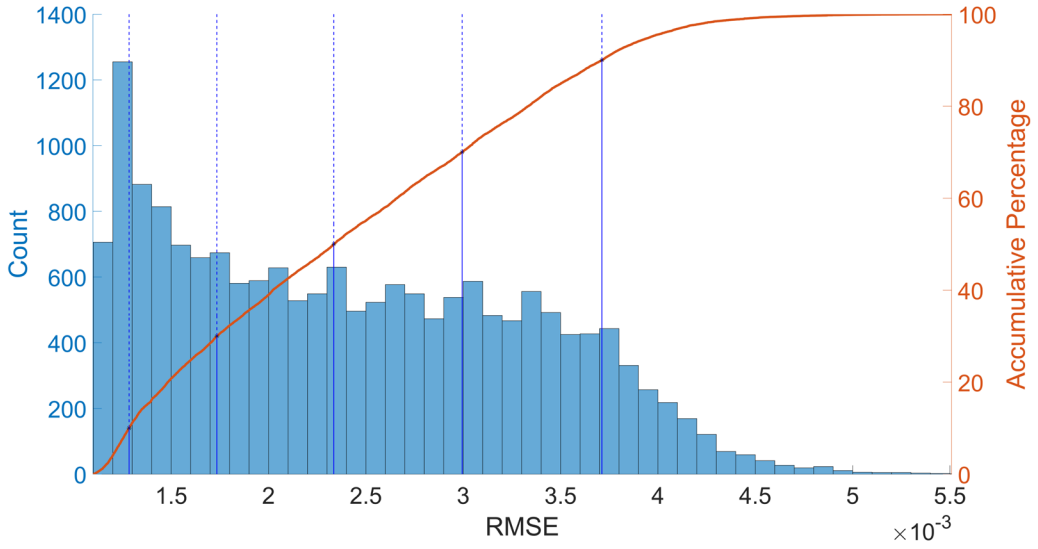


圖5-18：不含走滑但含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-18:Distribution of RMSE, number and cumulative percentage in model with detachment but without strike-slip. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

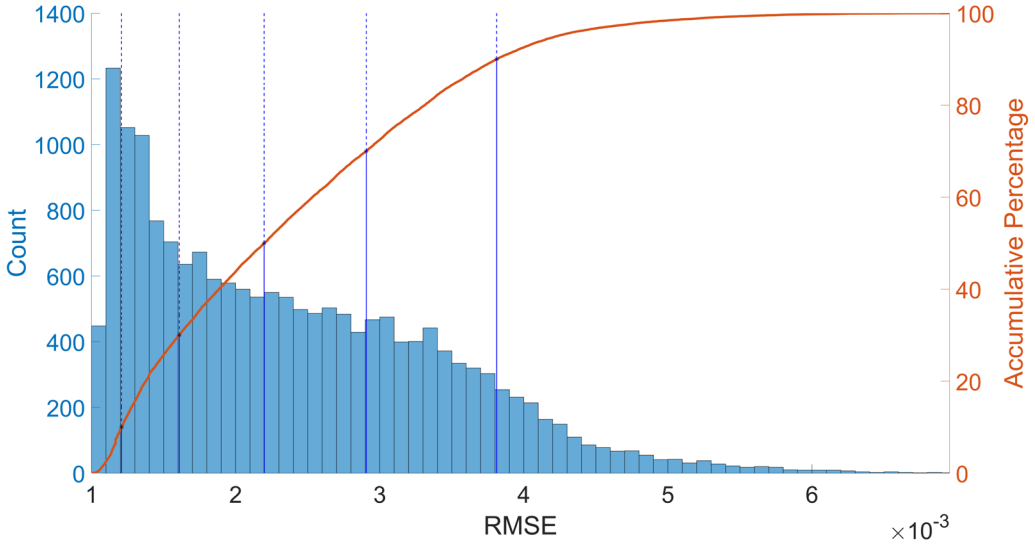


圖5-19：不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-19:Distribution of RMSE, number and cumulative percentage in model without strike-slip and detachment. The blue frame lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

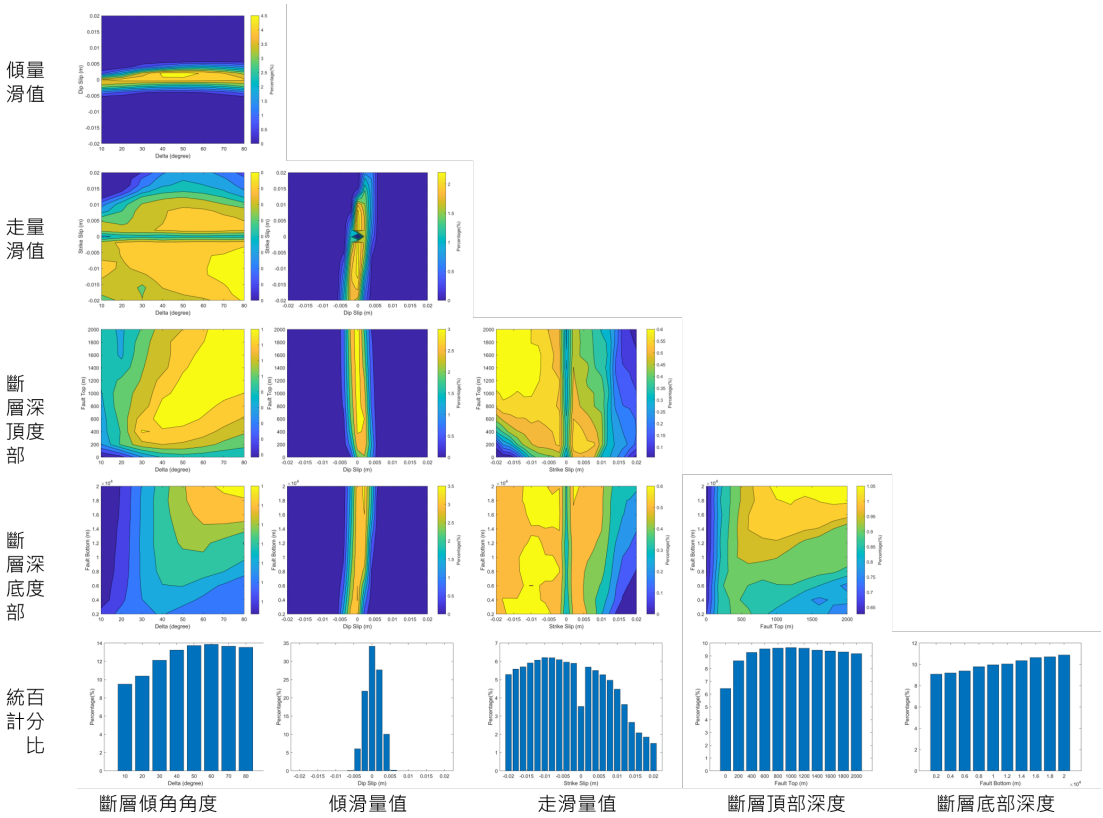


圖5-20：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE小於0.00126749，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-20:Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.00126749 in model with strike-slip and detachment.

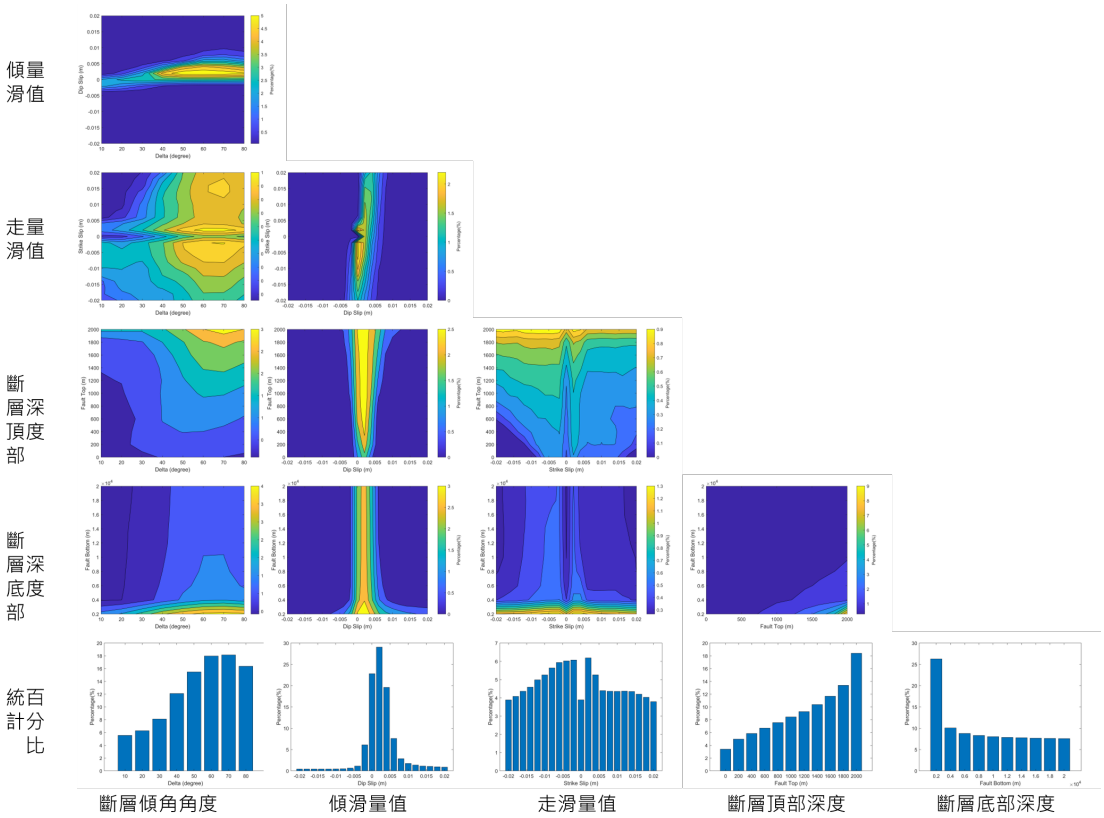


圖5-21：含走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00118484，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-21:Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.00118484 in model with strike-slip but without detachment.

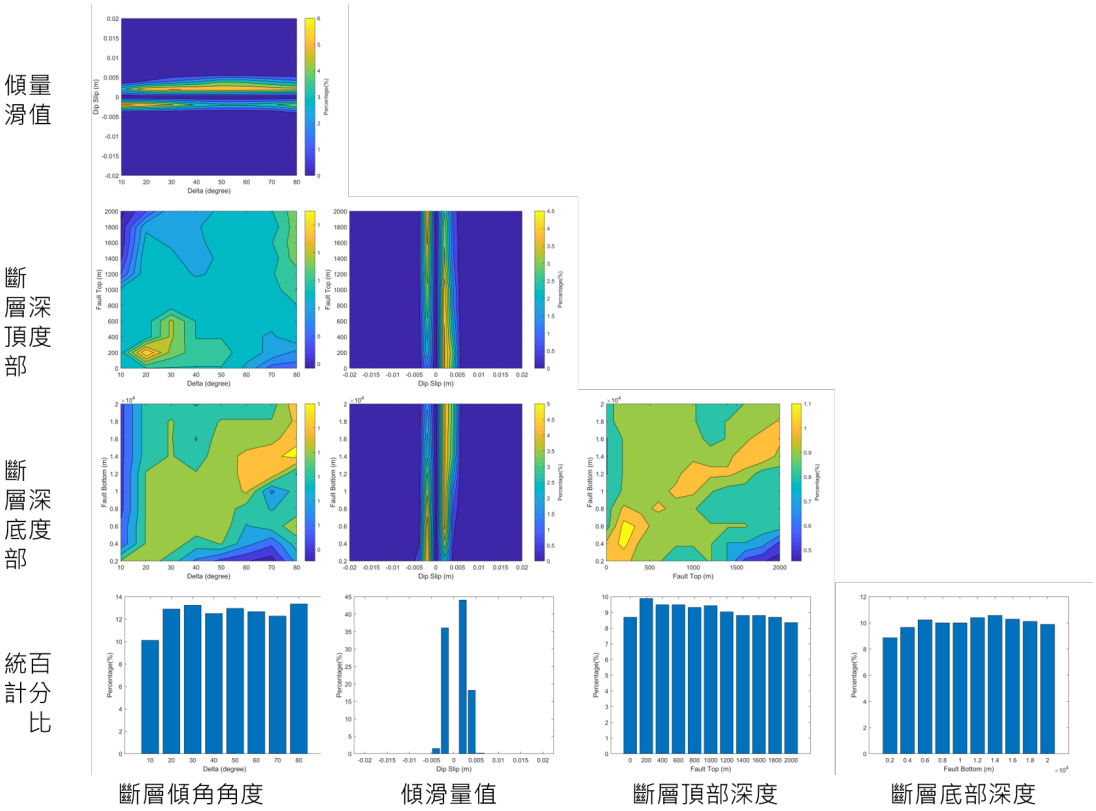


圖5-22：無走滑含滑脫面之模擬RMSE小於0.001294095，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-22：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.001294095 in model with detachment.

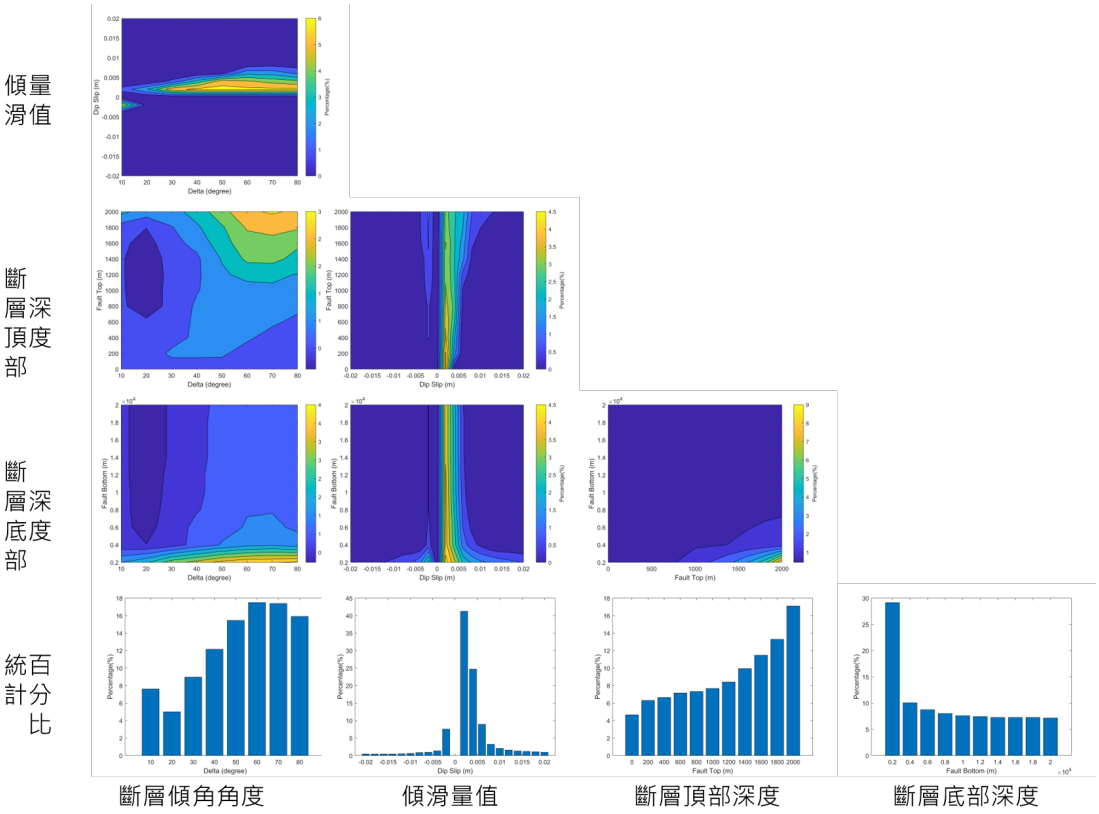


圖5-23：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.001200335，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-23：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.001200335 in model without detachment.

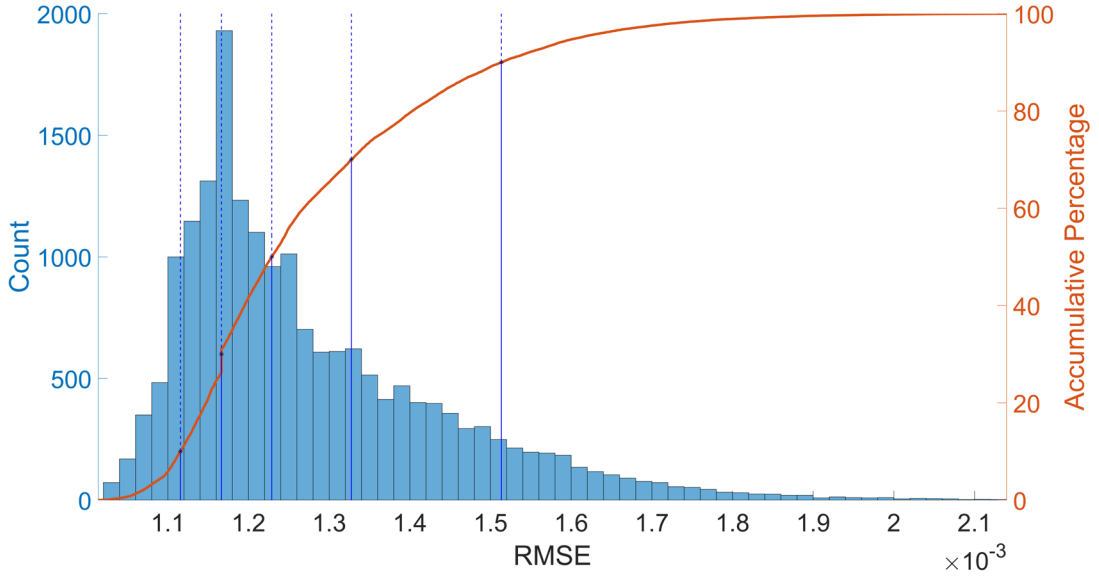


圖5-24：重設邊界條件下，不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-24：Distribution of RMSE, Count and Accumulative Percentage in model with strike-slip and detachment. The blue dashed-solid lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

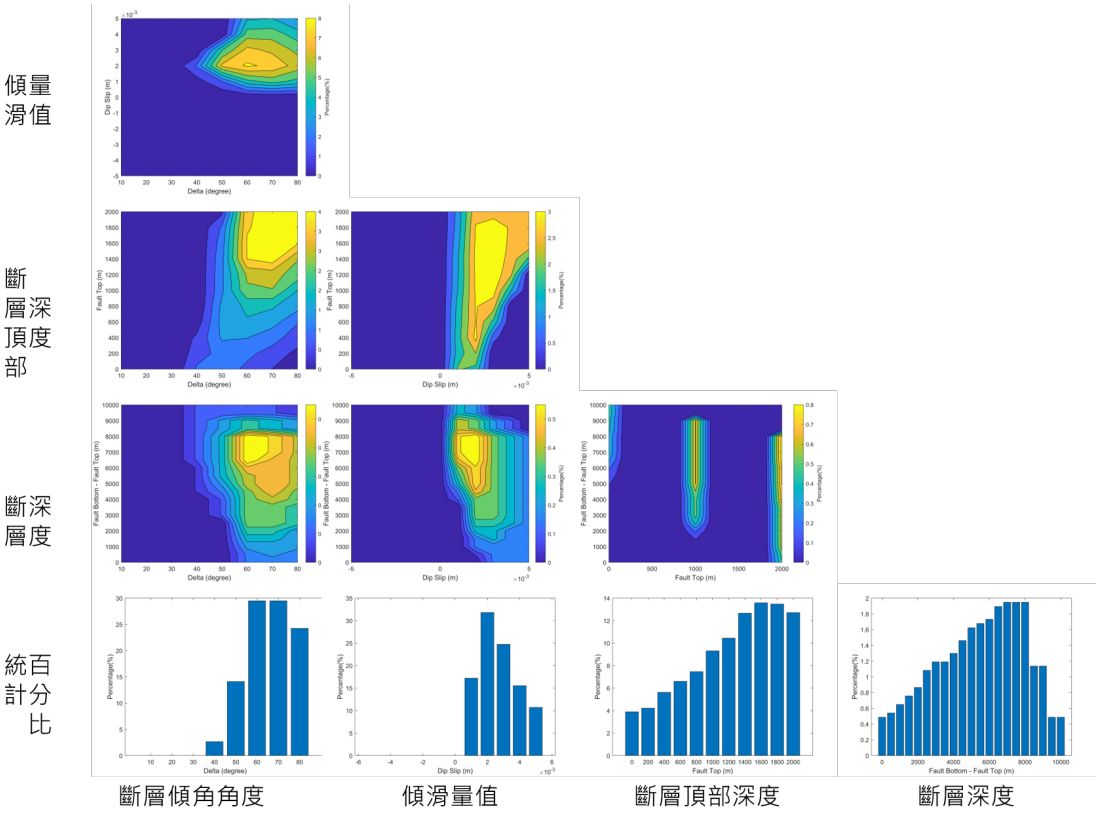


圖5-25：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00111564，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-25：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.00111564 in model without detachment.

5-4 三義斷層模擬結果

三義斷層-SYI3的模擬結果，選擇RMSE在總數前10%的結果(圖5-26~29)，分別呈現四組模擬，呈現傾角、傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 走滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 走滑、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、走滑 - 斷層頂部、走滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計百分比圖，其中含走滑與滑脫面為圖5-30，走滑無滑脫面為圖5-31，無走滑有滑脫面為圖5-32，無走滑無滑脫面為圖5-33。

將SYI3升降軌資料進行模擬，由統計資料來看，有計算滑脫面的斷層幾何傾角(40度)比沒計算滑脫面來的小(60~70度)，而傾滑量值約在2~4mm/yr。

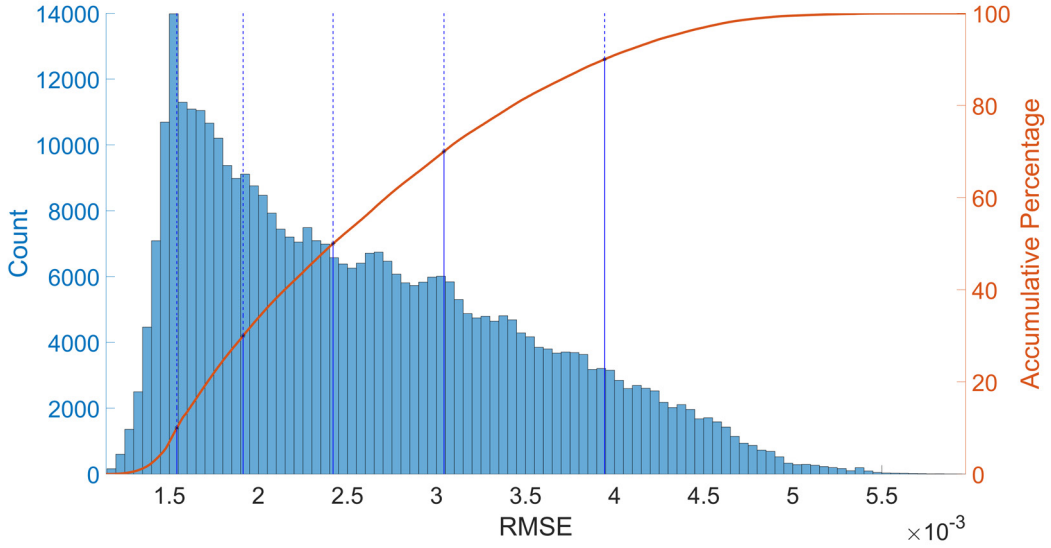


圖5-26：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-26:Distribution of RMSE, Count and Accumulative Percentage in model with strike-slip and detachment. The blue dashed-solid lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

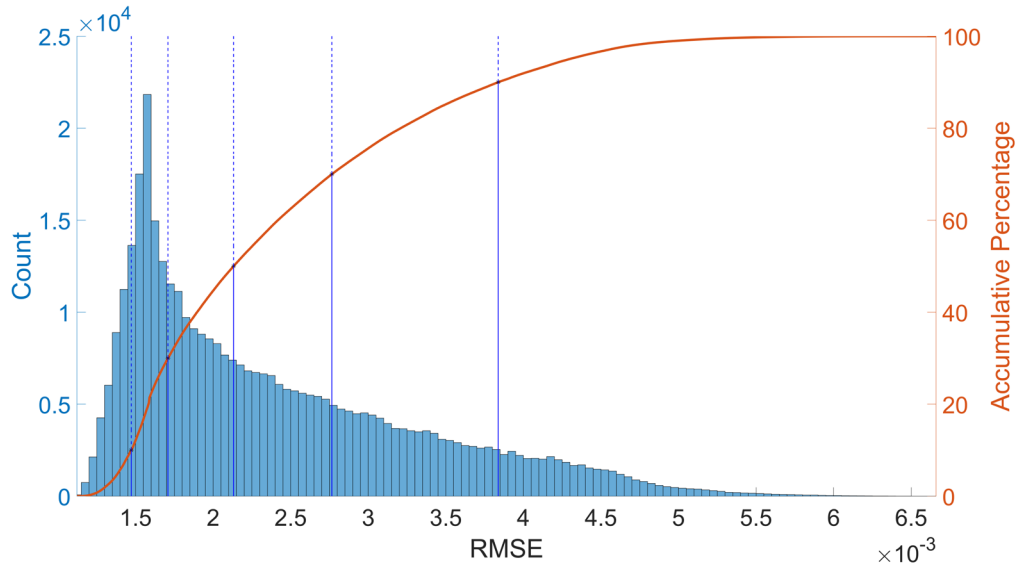


圖5-27：含走滑但不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-27:Distribution of RMSE, Count and Accumulative Percentage in model with strike-slip and detachment. The blue dashed-solid lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

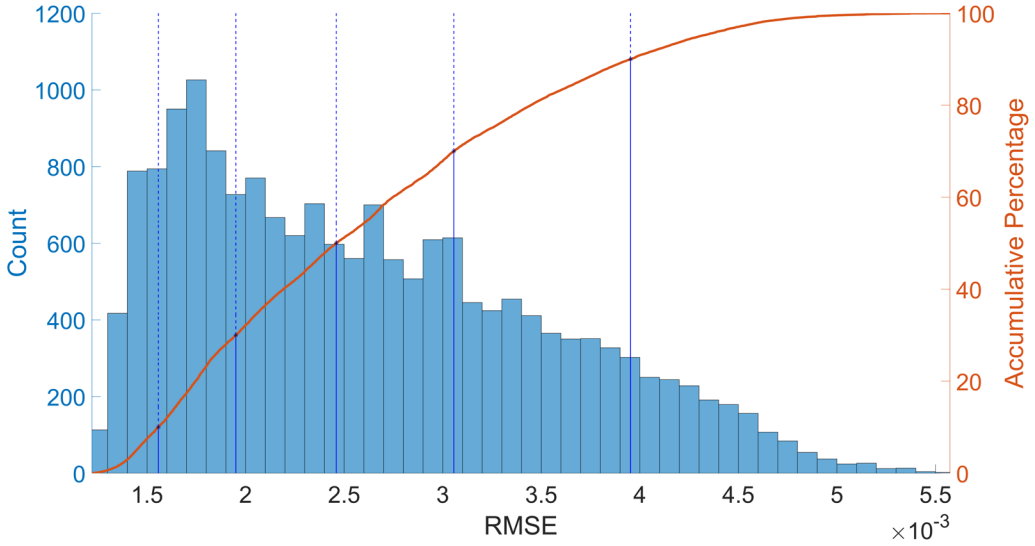


圖5-28：不含走滑但含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-28:Distribution of RMSE, Count and Accumulative Percentage in model with strike-slip and detachment. The blue dashed-solid lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

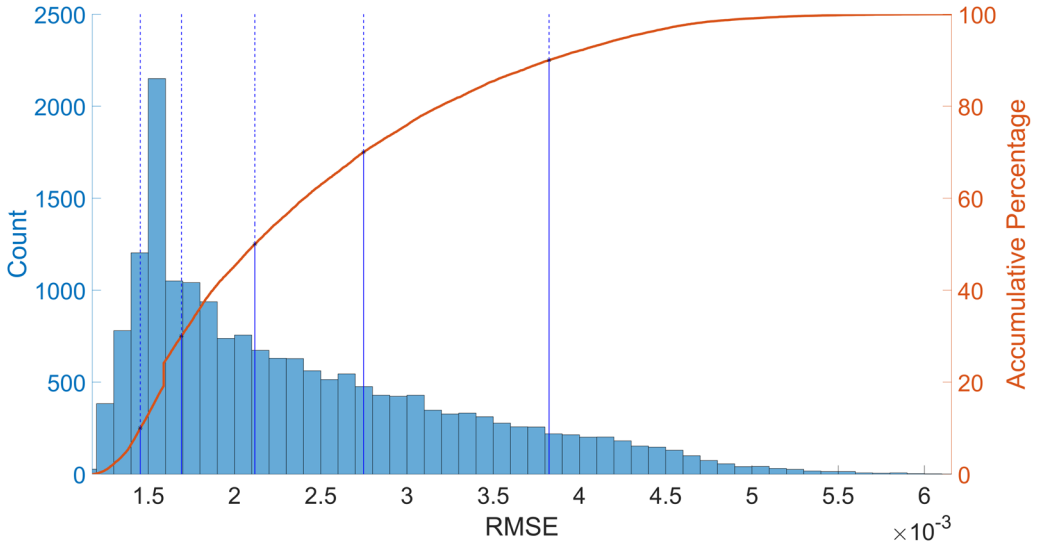


圖5-29：不含走滑也不含滑脫面之模擬，RMSE、個數及累積百分比分布圖，藍色虛實線分別表示10%、30%、50%、70%與90%。

Figure 5-29:Distribution of RMSE, Count and Accumulative Percentage in model with strike-slip and detachment. The blue dashed-solid lines represent 10%, 30%, 50%, 70% and 90% respectively.

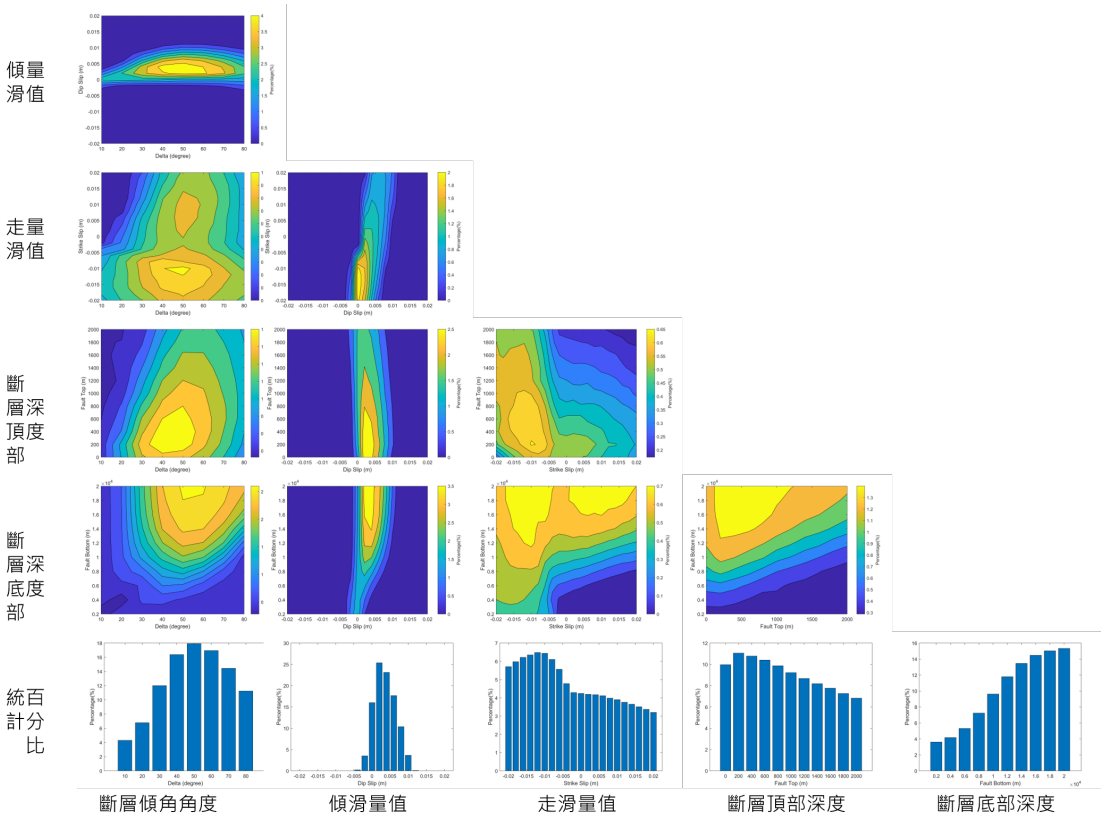


圖5-30：含走滑與滑脫面之模擬，RMSE小於0.001588715，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-30:Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.001588715 in model with strike-slip and detachment.

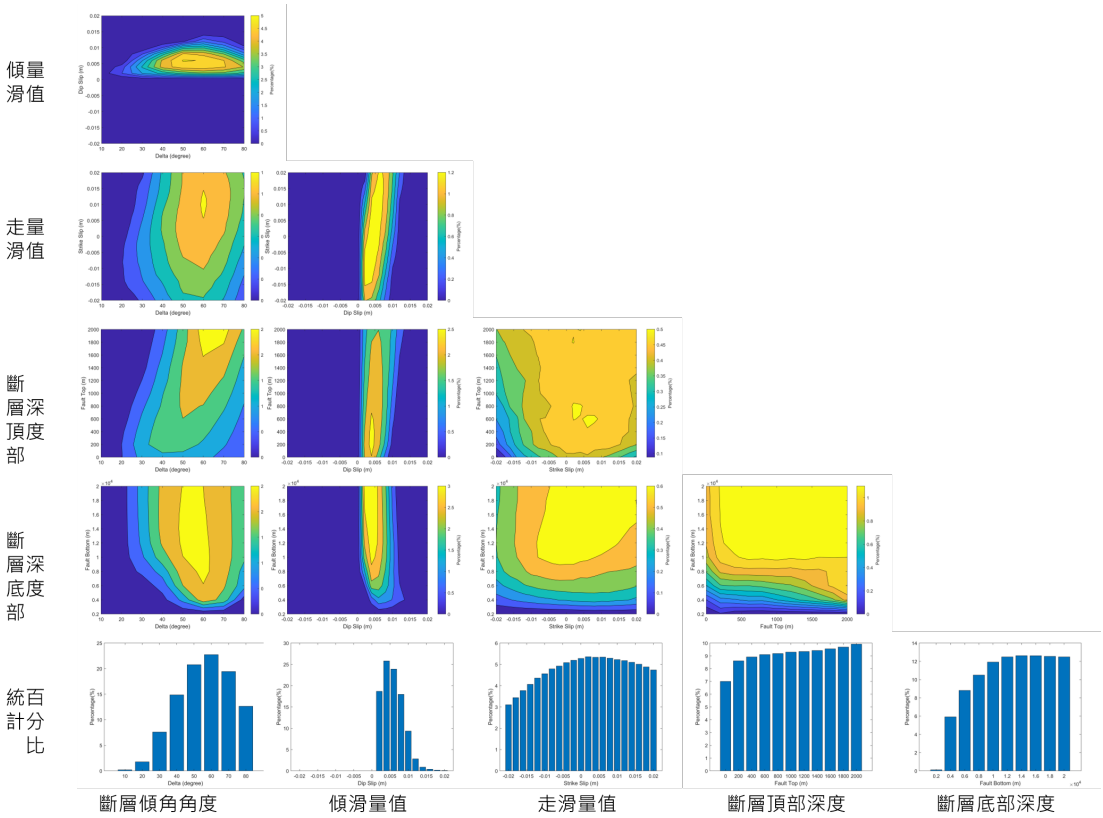


圖5-31：含走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.0014654，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-31:Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.0014654 in model with strike-slip but without detachment.

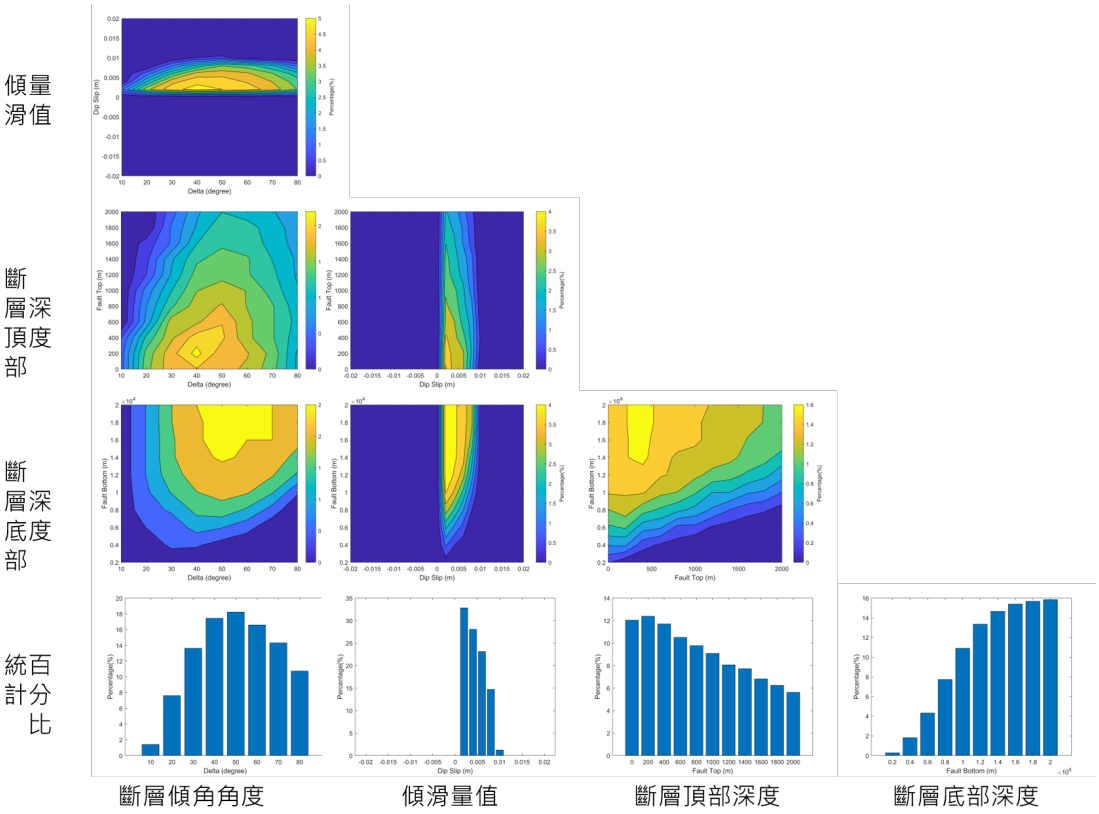


圖5-32：無走滑含滑脫面之模擬RMSE小於0.001616645，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-32：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.001616645 in model with detachment.

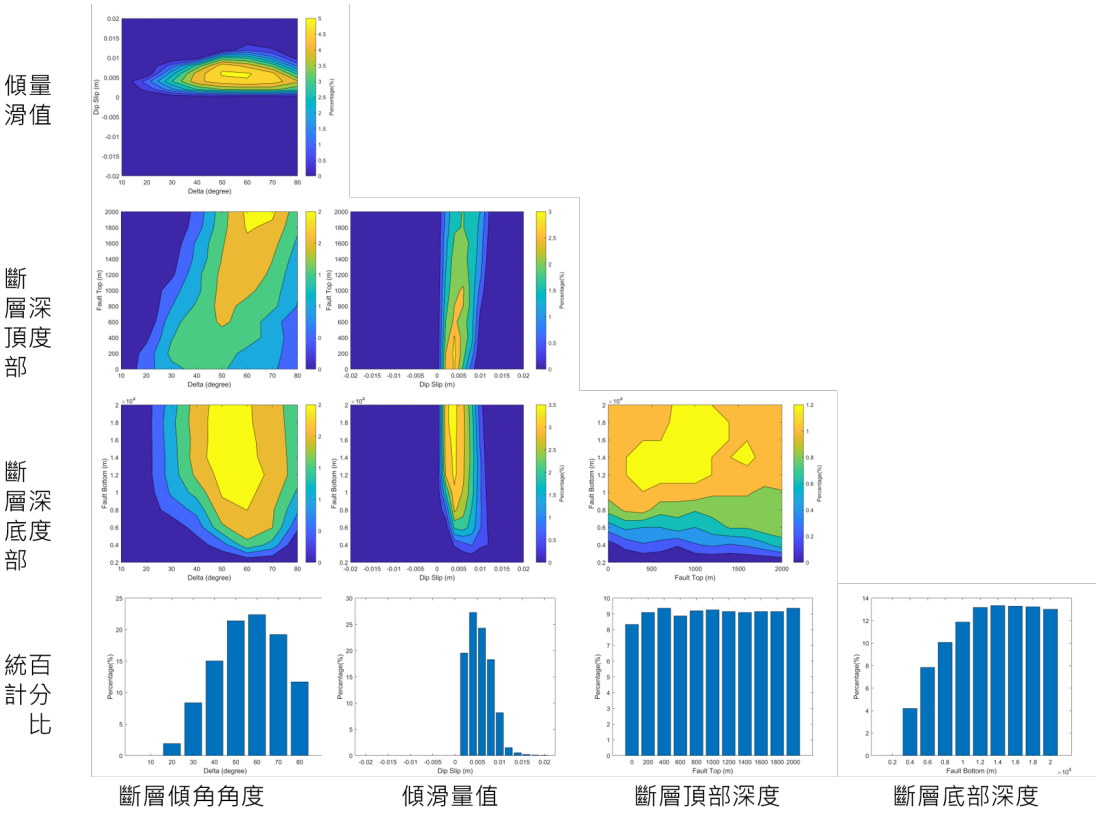


圖5-33：無走滑無滑脫面之模擬RMSE小於0.00142918，所有參數的個數百分比分布圖，X軸依序為角、傾滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、斷層頂部、斷層底部與統計百分比，而顏色與等值線表示統計百分比。

Figure 5-33：Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.00142918 in model without detachment.

第六章 討論

6-1 雷達結果與其他大地測量資料比較

6-1-1 雷達差分干涉資料與GNSS比對

本計畫的雷達結果與GNSS資料的比對成果顯示，2022時期的資料時間跨距不足一年且影像數量不到30張，獲得的PSI速度場數值較無可信度。整體而言，因為影像數量短少的直接影響，2022年的解算結果品質未臻理想，主要僅能參考其趨勢。與前兩年度於高屏及嘉南地區所完成的影像分析結果相比，北部地區在2014-2018時期與2018-2021時期的斜率與1有所偏差，R^2也比前兩年度低。究其原因可能為北臺灣地區地勢起伏小的地區如平原、盆地等地形相較於南部少，因此容易受到植被、水體及強反射體數量的影響，造成雜訊或是解相位錯誤的情形發生。另外，北臺灣地區的PSI速度場與GNSS速度場都比南部地區來的小許多，以2018-2021時期嘉南地區與北臺灣地區為例，嘉南地區的升軌道方向GNSS投影至升軌方向的LOS速度值大約介於-55~30mm/yr，PSI觀測值大約介於-50~33mm/yr，而北臺灣地區的GNSS投影至升軌方向的LOS速度大約介於-17~8mm/yr間，PSI觀測值大約介於-10~15mm/yr間（圖6-1），因此在線性回歸計算時更容易受到微小數值差異的影響，使得斜率與R^2偏低，然而，在三年累積的成果中，本年度的RMSE數值是三年計畫中最好的。

PSI與GNSS速度場比對顯示多數測站相對S101測站的PSI與GNSS變形趨勢接近，但數值上有所差異，時間序列顯示臺北新竹PSI與GNSS比對吻合，但些許測站的PSI時間序列變化起伏較GNSS小，因而造成兩者速度值差異，例如西山測站（MIAO）在2018-2021年升軌道與降軌道速度場都顯示GNSS為遠離衛星移動，PSI為接近衛星移動（圖4-6、圖4-8），但兩者的時間序列呈現並非完全不匹配（圖6-2），因為北臺灣地區的時間序列變化較為平緩，所以微小的差異使得線性擬合速度有所差距。而苗栗以南尤

其是三義斷層一帶有些測站時間序列趨勢不符，可能是近山區PSI資料品質較差，也可能是因為區域範圍大，參考站選取於北部的關係所致。

由於GNSS移動站本身的測量精準度比連續站稍差，雖然可以補足連續站在空間上的密度，但在地表變形速度較小的地區需考慮測量誤差的影響，未必能夠提升兩種資料的線性回歸斜率數值。

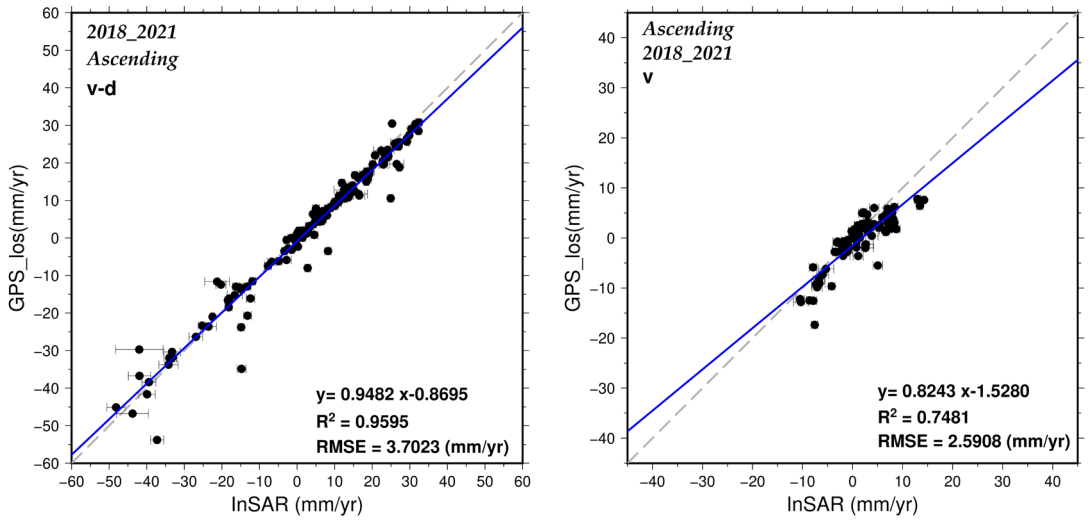


圖6-1：2018-2021年升軌道PSI與GNSS連續站速度場對比。左圖為嘉南地區成果，右圖為北臺灣地區成果。

Figure 6-1：2018-2021 PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period in ascending orbit. (Left) the result of Chiayi-Tainan area. (Right) result of northern Taiwan.

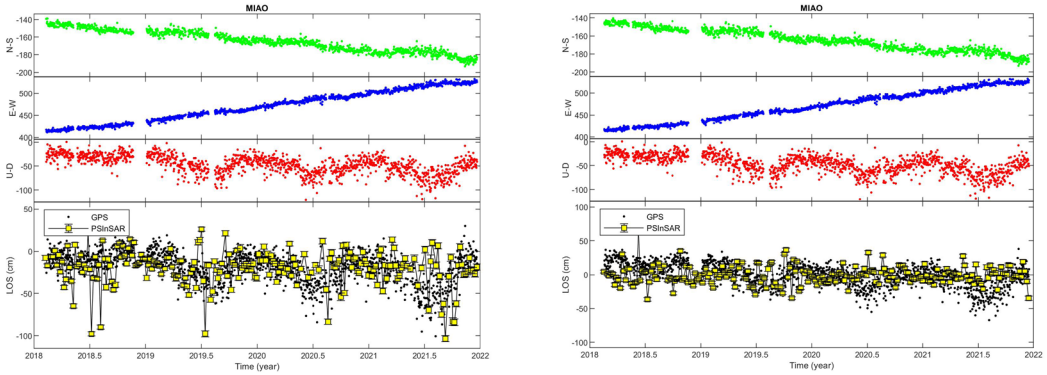


圖6-2：2018-2021年GNSS西山測站（MIAO）三分量GNSS時間序列與PSI時間序列。自上而下為GNSS南-北向（綠點）、東-西向（藍點）、垂直向（紅點）及GNSS投影至LOS方向（黑點）與PSI（黃色方形）時間序列。左圖為升軌道成果，右圖為降軌道成果。

Figure 6-2：The GNSS 3-direction and PSI time series of GNSS station MIAO between 2018 to 2021. From the top to bottom are GNSS time series of N-S direction (green dots), E-W direction (blue dots), U-D direction (red dots), projection of 3-directions GNSS position to LOS direction (black dots) and PSI (yellow square) time series.

6-1-2 雷達差分干涉資料與水準測線的比對

在觀測區域內9條水準測線比對中（圖4-27），經過山腳斷層的淡水-士林測線以及五股-臺北測線有比較大的變化（圖4-32~4-35）。 而同樣經過山腳斷層的石門-萬里測線以及士林-三芝測線則沒有明顯的跨斷層差異。

在淡水-士林測線上，雖然公告的山腳斷層位置約略落在測線8公里處，然而不管是雷達資料或是水準資料都顯示大約在9~10公里處有速度差異。2014~2018時段中，不管是水準資料或是雷達資料都顯示跨斷層有約5mm/yr的速度差異。而在2018-2021時期，雷達觀測到的速度變化遠較水準測量的少，但是同樣是在測線的9~10公里有變化，雷達顯示有5mm/yr的變化，而水準測量則顯示了約15mm/yr的變化。

6-2 雷達影像成果

6-2-1 北臺灣地區垂直速度場

由於雷達測量的距離以及距離的改變都代表著沿著雷達斜距方向的接近與遠離，這會將一般人習慣見到地表位移沿著東西、南北、垂直的三維資訊壓縮到一個維度，我們藉著雷達高空間解析度的資訊，配合對研究區域的基本知識來回推地表真實變形狀況。如果同時有升軌與降軌資料，我們還可以將雷達資料變成兩個維度，然而即使是二維的資料，還是會與傳統的理解方式有所差異。隨著現代解算的資料品質越來越高，我們可以透過一些可以接受的假設，將二維的雷達資料計算為地表東西方向以及垂直方向的速度場，這些方法與結果呈現在第五章中。

圖3-10、圖3-11分別呈現了解算後東西向的速度場以及垂直向的速度場，在東西向速度場與GNSS東西向的RMSE小於2.5mm/yr，且斜率接近1，而在垂直向與GNSS同方向比較RMSE約小於2.7mm/yr，雖然斜率約只有0.54，但多數資料集中於正負5間且接近1：1，顯示這些資料仍有一定可信度。

東西向的資料看來（圖3-10），北臺灣地區自北海岸到苗栗呈現向東轉為向西的位移，這個趨勢同時存在GNSS測站的東西向資料中（菱形點）。垂直方向的速度場（圖3-11）顯示在山腳斷層南段的臺北盆地，有相對S101測站約-10mm/yr的下陷速度。桃園臺地有一明顯的抬升高區與線型邊界，抬升量約10 mm/yr 的抬升速度，此邊界大約與雙連坡線型一致。

在原先PSI資料中，永久散射體在山區的密度極低，然而此計算經過了內插運算，所以目前在山區也能表現出資料，但山區的資料應該適當的遮蔽，在同調性低的地區不應該呈現資料，這也是需要再精進的部分。

6-2-2重要跨斷層剖面

山腳斷層：山腳斷層剖面SCO1~SCO4中，前面兩條跨斷層速度差異並不明顯（圖3-82），然而往南切到臺北盆地邊緣以及臺北盆地

中心的SCO3、SCO4兩條剖面，則可以見到跨山腳斷層兩側有相當大的速度差異。 這部分觀察與上述跨臺北盆地水準側線類似。

以垂直量來看，跨山腳斷層的錯動約在每年一公分到每年1.5公分附近。林美聆等(1999)估算臺北盆地自然壓縮量大約在0.14~0.29mm/yr之間，而Chen et al. (2007) 認為40萬年以來山腳斷層沉陷約為1.75mm/yr。而Huang et al. (2007)認為差異沉陷在盆地中間約為1.8 mm/yr而在盆地北端的山腳斷層則為 0.69 mm/yr。總合來看，2018~2021年跨斷層的下陷速率遠較這些估算值以及背景值來得快。

我們根據臺北盆地探井位置（鄧屬予，2006）取X-Y剖面，盡可能數化井位座標，擷取PSI速度剖面，選取剖面兩側500公尺內的PS點位，將其投影至剖面走向之上，並沿著剖面距離進行一維空間的濾波，獲得連續的剖面2018-2021 升軌道與降軌道的LOS以及垂直地表變形資訊。

由圖6-3萃取座標後，在雷達資料中萃取地表變形資訊，並且將地層厚度、盆地深度與地表變形對比（圖6-4、圖6-5）可以看出，主要的下陷區域為靠近五股區域，也是地層深度最深之地區。然而根據前述背景之前人研究，長時間尺度的跨斷層陷落以及自然壓密速度仍不足以解釋觀察現象。

根據臺北盆地的地下水時間序列（圖3-93~3-95）可看出靠近盆地西側的部分水井在2018到2021之間除了有季節訊號之外，尚有地下水位下降的訊號，這些訊號雖然量值與地表變形不同，但是趨勢相當吻合，也就是說地下水可能也是造成地表下陷的原因之一。由觀察到跨斷層地表沉陷，扣除長時間尺度構造陷落、壓密等因素後，仍有相當數量的殘值，除非地下水完全造成這些差異沉陷，則此區有斷層潛移產生。斷層潛移的量則可以由我們斷層模擬做初步概算，在地表變形完全由斷層產生的狀況下，山腳斷層在臺北盆地中間的部分可由高角度正斷層在深處有2~3cm/yr的滑移量產生。臺北盆地西緣是否有斷層潛移的現象正在發生可能需要有持續觀測地下水位趨勢不同時的地表變形來協助判斷。

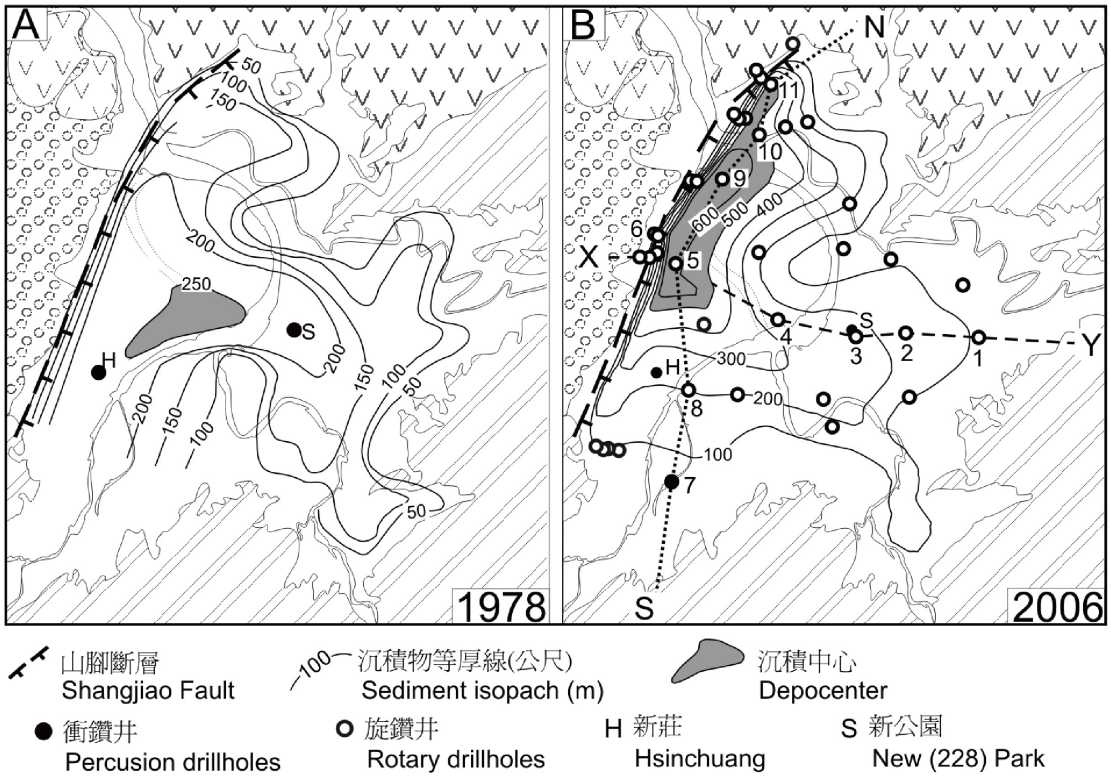


圖6-3：探井位置與基盤形貌（鄧屬予，2006）。

Figure 6-3：Borehole locations and basement configuration. (Teng, 2006).

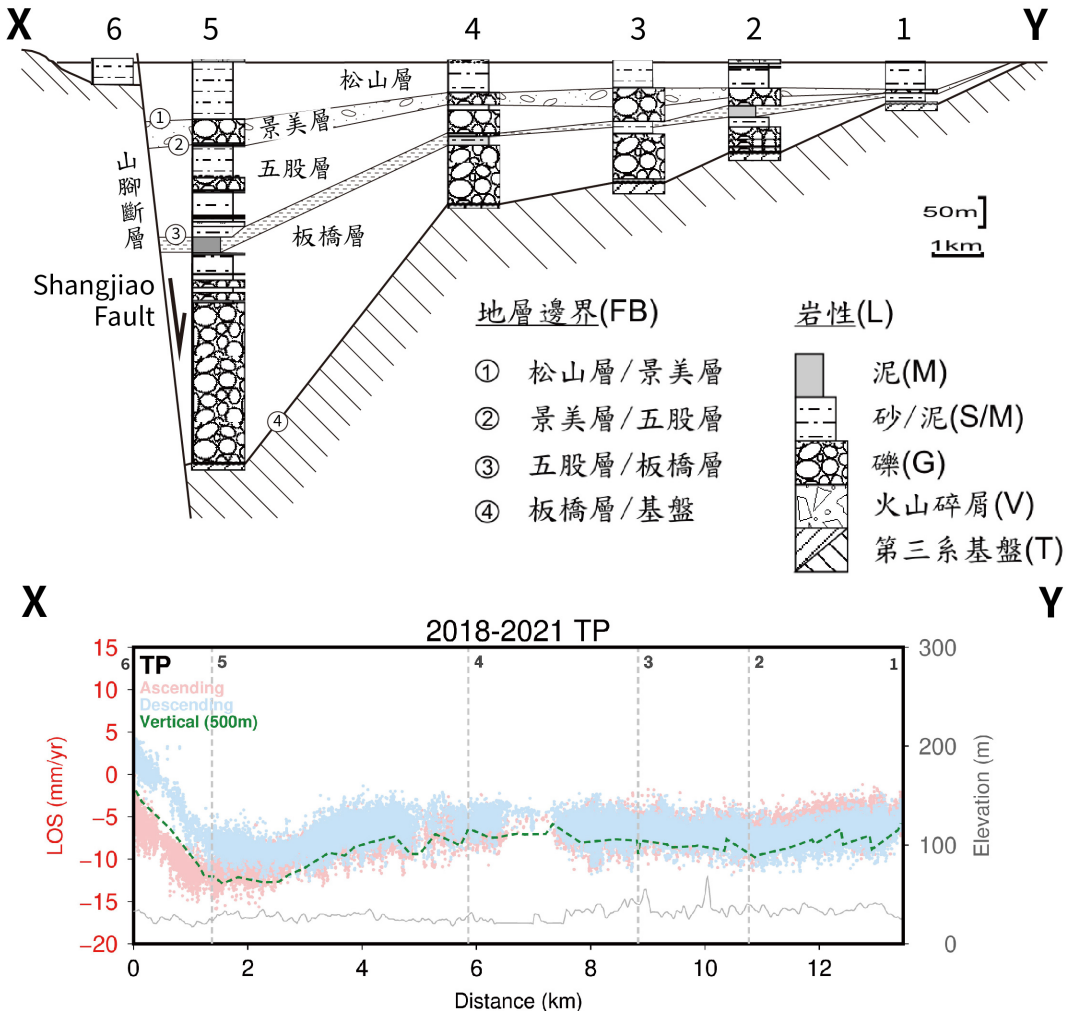


圖6-4：X-Y剖面成果。上圖為X-Y剖面地層架構與沈積物特性，下圖為2018-2021年X-Y剖面升軌（紅點）、降軌LOS（藍點）速度及垂直速度（綠線），數字及灰色虛線為剖面上探井位置，灰色實線為地形。（改自鄧屬予，2006）。

Figure 6-4：Result of profile X-Y. (Upper) Stratigraphic framework and sediment characteristics of profile X-Y. (Lower) The velocity field of profile X-Y between 2018 and 2021. The red dots are the PSI velocity in ascending orbit, the blue dots are the PSI velocity in descending orbit, the green line is the vertical velocity, the gray dashed lines and number are the location of each borehole, and the gray solid line is the terrain.

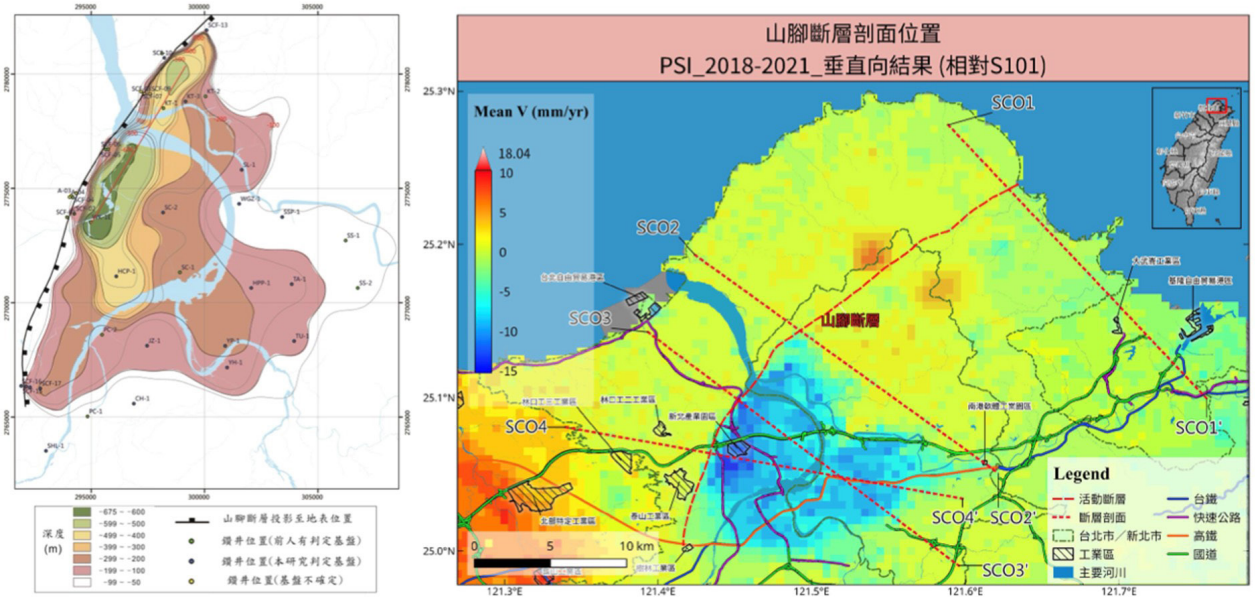


圖6-5：（左）臺北盆地基盤深度圖 （許劭禎，2013）（右）2018-2021垂直速度場（圖3-82）；觀察下陷速度與基盤深度等深線相當類似。

Figure 6-5：(Left) Taipei basin basement height (after Hsu, 2013); (Right) 2018-2021 Calculated vertical deformation rate from figure 3-82; Pattern of subsidence in Taipei basin is similar in shape and location to the depth contour of the basement.

6-3 桃園臺地地表變形

根據2018-2021年間桃園地區升、降軌道的永久散射體雷達差分干涉結果顯示桃園臺地北側呈現暖色系的速度變化(LOS)，說明桃園臺地北側為抬升變形。且有明顯的速度差異邊界，從中壢區往東延伸至八德、鶯歌一帶(圖3-4、圖3-5)。

桃園臺地早期為古大漢溪的沖積扇，又稱古石門沖積扇(市川雄一，1929)，是由一群大型且高度不同的階面所構成，由南而北，包括湖口(LT1)、伯公岡(LT2)、平鎮(LT3)、中壢(LT4)、桃園(LT5)等臺地面(林朝棨，1957)。桃園臺地受造山作用影響，向上抬升，古大漢溪也逐漸向北改道(花井重次,1930)，最後因臺北盆地下陷，大漢溪被襲奪後流入淡水河。桃園臺地上發育了一些近東北-西南走向的構造，如湖口斷層、楊梅北線形、雙連坡構造，湖口背斜、楊梅向斜、平鎮背斜、雙連向斜、坑子口背斜、新埔向斜等構造，顯示桃園臺地處於擠壓的環境。

本計畫成果中2018-2021的速度差異邊界鄰近雙連坡構造，雙連坡構造呈北北東走向，由桃園新屋地區向東延伸至中壢西北方，長約10公里(圖6-6中綠線和粉色線段；花井重次，1930；石再添等，1983；林啟文等，2007)。在地型上，雙連坡線形為向西北凸出的弧形，因切過四段階地面(包括LT1、LT2及LT3)，截斷3個河階崖，且南側有背斜狀隆起，且在雙連坡西方有兩處臺地礫石層有高角度傾斜現象，認為該線形應為構造線形而非沖積扇扇緣(楊貴三，1986)。透過5米解析度的DEM之分析，以及現地勘查，可觀察雙連坡構造在西側的高差可達30公尺，並可往東延伸至內壢地區，至LT4階面(圖6-6中藍色虛線；臺灣地震模型，2020)，但越往東的地形特徵逐漸平緩，坡度變化不明顯(王昱，2003)。

此次的變形邊界可沿著雙連坡構造持續向東延伸至八德及鶯歌地區，雖然從地形上看不出明顯的高度變化，僅有平緩地向南變高(圖6-7)，但本團隊至變形邊界進行沿線調查，可發現在經過變形邊界附近，偶而可觀察到道路有高度變化，但高差從數十公分到一兩公尺不等，且大部分是南側地形較高(圖6-8、圖6-9)，偶有北邊及西北側地形較高。沿線調查後，雖偶有地形的高度變化，但並無觀察到地表破裂。

根據地表變形邊界和實地調查結果，目前我們推測雙連坡構造可往東持續延伸，而此次觀察到的變形行為可能與雙連坡構造有關；桃園台地位於擠壓的應力環境下，雙連坡構造早期雖為南側抬升構造，但在近期轉變成北側抬升的運動方式。

南崁斷層：南崁斷層為林口臺地與桃園臺地間的地形分界，花井重次(1930)根據西北東南向的地形特徵與落差，認為南崁斷層為高角度正斷層，而林口臺地位於下盤。謝昭輝等(1997)利用反射震測法認為南崁斷層為高角度走向滑移兼逆斷層。儘管對於南崁斷層幾何型態看法分歧，大部分的研究皆不認為這是一條活動斷層。

然而根據2018-2021第二期資料的AB以及CD剖面資料（圖3-74～圖3-77），我們可以發現在AB剖面的5~8公里處有大約3mm/yr往接近衛星之變形行為，而CD剖面之8公里處也有約2mm/yr的遠離衛星的變形行為。這些數字雖然小，但是似乎在平面上是一個普遍的現象。在2014-2018這一期的影像也可以觀察到類似現象，但是數量值更小。林啟文等(2007)認為南崁斷層近代調查在平行斷層有2.6mm/yr的錯移速率。而我們解算的水平東西向速率（圖3-10右）顯示林口臺地與桃園臺地之間有足夠顯著的東西向錯動，林口臺地相對桃園臺地向東2-3mm/yr的量級。這樣的地表變形行為，似乎可以同時解釋花井重次認為的正斷層以及謝昭輝等人自震測剖面觀察到的逆衝斷層。南崁斷層在此次調查研究中，似乎有可以觀察到的錯動。

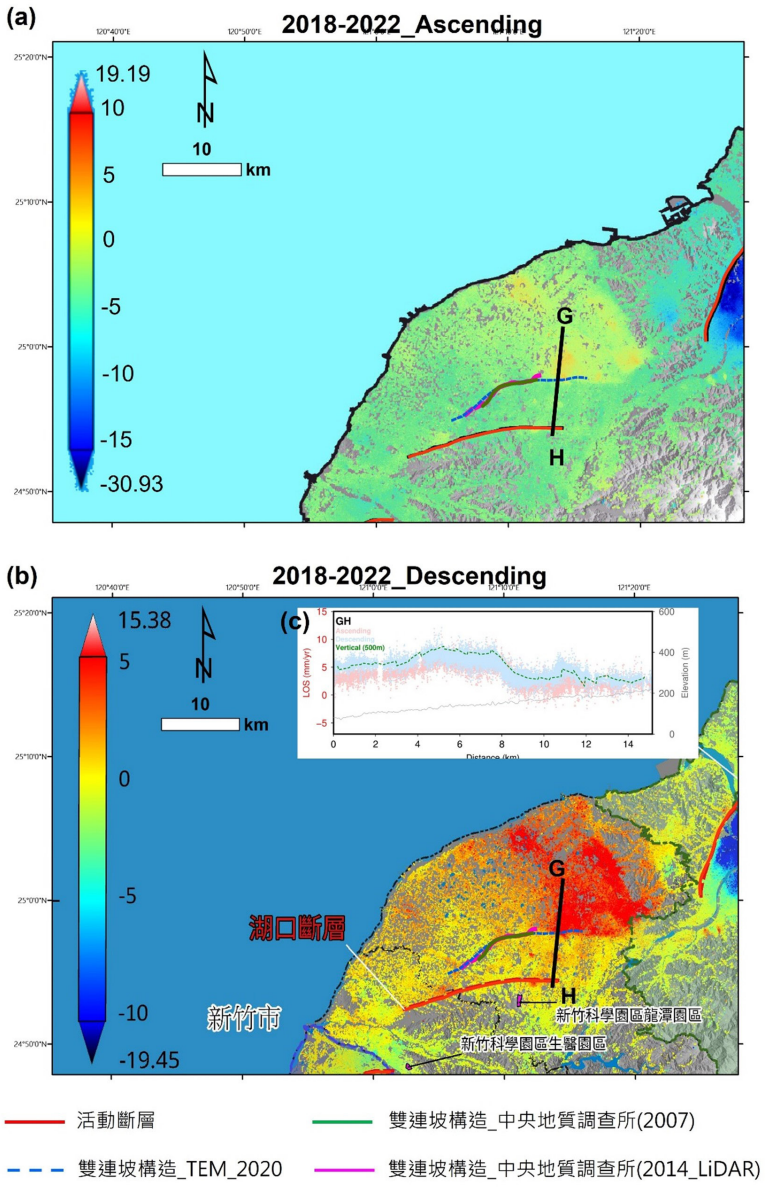


圖6-6：2018-2021桃園臺地平均速度場變化及鄰近構造。(a)升軌衛星影像結果，(b)降軌衛星影像結果，(c)GH剖面的LOS速度變化及垂直速度變化，顯示桃園臺地的變形邊界沿著雙連坡構造向東延伸。紅色線段為經濟部中央地質調查所公告的活動斷層，綠色線段為經濟部中央地質調查所2007年所產製的雙連坡構造，藍色線段為2020臺灣地震模型中的雙連坡構造，粉紫色線段為透過1米解析度LiDAR的地形特徵所繪製的雙連坡構造。

Figure 6-6：Average variations of velocity field in Taoyuan Tableland for 2018-2021 and structures in the vicinity. (a) Results from ascending satellite images. (b) Results from descending satellite images. (c) Variations of LOS velocity and vertical velocity along the GH profile show that the deformational boundary of Taoyuan Tableland extends towards east following the Shuanglienpo structure. Red lines label the active faults announced by the CGS; green line labels the Shuanglienpo structure reported by the CGS (2007); blue line labels the Shuanglienpo structure reported by TEM (2020); pink-purple line labels geographic feature of the Shuanglienpo structure mapped from LiDAR images with 1-m resolution.

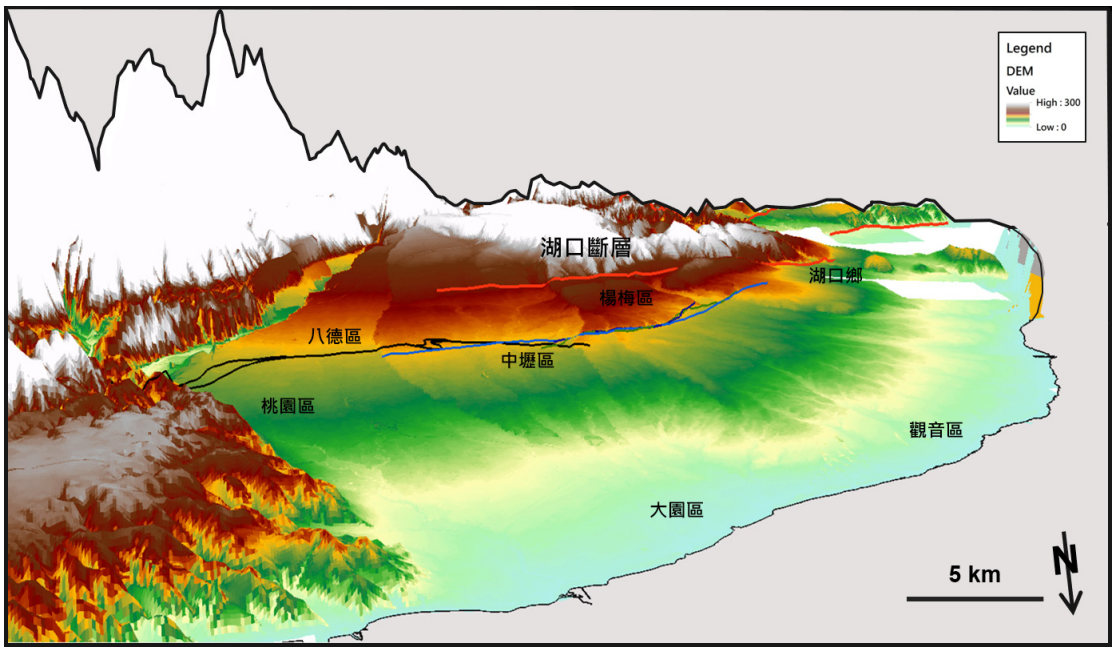


圖6-7：桃園臺地變形邊界之地形特徵與雙連坡構造相關性。地形為5米解析度DEM，垂直方向法大10倍。黑色線段為桃園臺地變形邊界位置，紅色線段為經濟部中央地質調查所公告的活動斷層，藍色的線段為2020臺灣地震模型中的雙連坡構造。

Figure 6-7：Geographic feature of the deformational boundary on Taoyuan Tableland and its relation with the Shuanglienpo structure. Topography is produced by 5-m DEM with 10-fold vertical exaggeration. Black line labels the position of the deformational boundary; red lines label the active faults announced by the CGS; blue line labels the Shuanglienpo structure reported by TEM (2020).

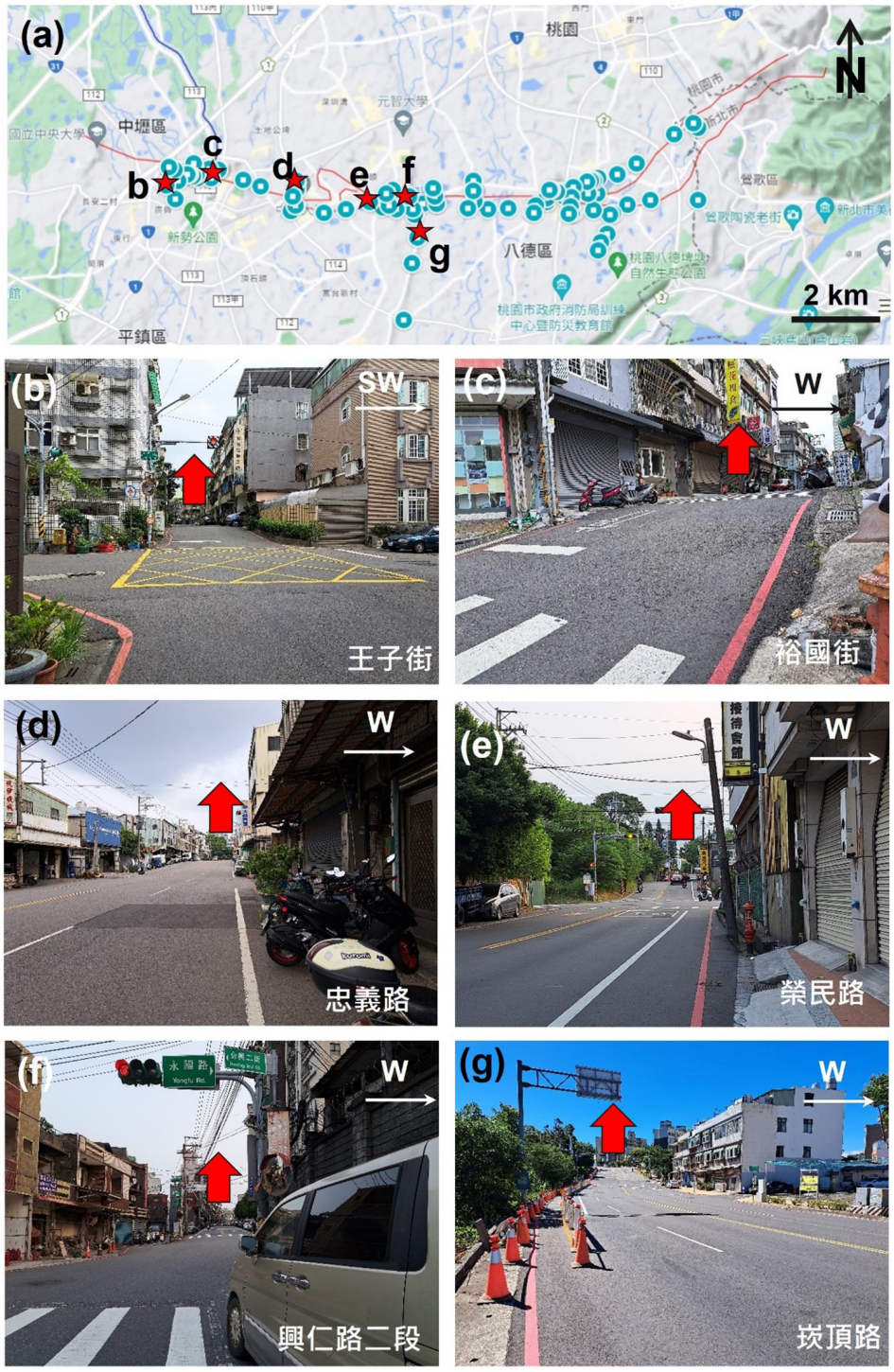


圖6-8：桃園臺地變形邊界西側調查結果。(a)調查點位置，(b)王子街南側的地形較高，(c)裕國街南側的地形較高，(d)忠義路南側的地形較高，(e)榮民路南側的地形較高，(f)興仁路二段南側的地形較高，(g)崁頂路南側的地形較高。

Figure 6-8：On-site investigation for the west part of the deformational boundary. (a) Localities of survey points. (b) Topography is higher to the south of Wangzi St. (c) Topography is higher to the south of South Yuguo St. (d) Topography is higher to the south of Zhongyi St. (e) Topography is higher to the south of South Rongmin St. (f) Topography is higher to the south of Sec. 2, Xingren Rd. (g) Topography is higher to the south of Kanding Rd.



圖6-9：桃園臺地變形邊界東側調查結果。(a)調查點位置，(b)廣福路1142巷南側的地形較高，(c)四維路64巷南側的地形較高，(d)永福街南側的地形較高，(e)忠勇街南側的地形較高，(f)鳳吉四街西南側的地形較高，(g)福隆二街西側的地形較高。

Figure 6-9：On-site investigation for the east part of the deformational boundary. (a) Localities of survey points. (b) Topography is higher to the south of Ln. 1142, Guangfu Rd. (c) Topography is higher to the south of Ln. 64, Siwei Rd. (d) Topography is higher to the south of Yongfu St. (e) Topography is higher to the south of Zhongyong St. (f) Topography is higher to the westsouth of Fengji 4th St. (g) Topography is higher to the west of Fulong 2nd St.

6-5 斷層錯位模擬

我們以地表變形結果假設地表變形皆由於斷層錯動引起，利用簡單的斷層幾何、斷層滑移量等組合來嘗試約制出三條斷層可能的幾何與滑移量。

在臺北盆地內的山腳斷層方面(SCO3)，我們的方法偏好高角度（70~80°）、走滑約2~3公分、斷層深度1~3公里左右的組合。此結果乃是純粹以斷層滑移的方式解釋地表變形，不考慮其他可能因素。然而根據前述，臺北盆地裡面的變形在2018~2021年間有部分時間序列與地下水位變化符合，因此亦不能排除地下水位下降之影響。未來應該持續注意這個區域的活動，以釐清在自然壓密、地下水位下降、以及地震事件錯動之外，山腳斷層是否具有斷層潛移的性質。

而在新城斷層上，我們的模擬結果顯示走滑量應小於5mm/yr，斷層角度在60度附近，透過HCG2的升降軌資料來做模擬，從結果可知，若加入滑脫面一起計算，斷層幾何角度呈現較小趨勢(60~70 度 -> 30~50 度)，而傾滑量約在 2mm/yr。

在三義斷層上，將SYI3剖面資料升降軌資料進行模擬，由統計資料來看，有計算滑脫面的斷層幾何傾角(40度)比沒計算滑脫面來的小(60~70度)，而傾滑量值約在2~4mm/yr。

第七章 結論

本計畫利用雷達差分干涉方法針對北部地區監測地表變形，並特別針對斷層沿線的地表變形觀測，觀測範圍包含北部地區七條斷層（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、臺北都會區等重要區域。

在計畫中，我們完成三個時段的雷達差分干涉資料處理，分別是2014~2018、2018~2021、以及2022年之資料。這些資料並與同時期之GNSS資料、水準測量資料完成對比。我們也用2018-2021升降軌資料解算觀測區域的垂直與東西分量。

在北部區域中，觀察到的地表變形相對於高屏地區以及西南部的變形較慢，整個變形最快到最慢的速率差距大概在30mm/yr附近。在這樣的狀況下，一兩個離群值就容易造成資料迴歸上的差異。因此本次資料結果部分的統計值較差，但是整體趨勢還是相當不錯。

觀測區域有幾個明顯的地表變形差異明顯區域，主要是臺北盆地的山腳斷層，林口臺地與桃園臺地間的南崁斷層與疑似是雙連坡構造的變形。在往南稍微明顯的則是新城斷層以及三義斷層。

經過與地下水時間序列比對後，我們發現臺北盆地西側的水井地下水位與雷達資料時間序列變化趨勢有連動。所以地下水位下降可能是引起臺北盆地西部下陷原因之一。但是由於下陷量值到達每年一公分，我們還是無法排除此段的山腳斷層在這幾年間有滑移的狀況，這部分需要更仔細的做觀察。

雙連坡構造似乎在這次分析結果中有相當明顯的錯移。根據野外觀察，錯移位置與現地地形改變大多重合，然而，地形往南高起、變形卻呈現往南下陷的趨勢，值得持續關注。

另外，南崁斷層似乎有些微錯動的現象，雖然前人研究認為南崁斷層並不活躍，然而地形、地質剖面（陳文福等，1994）與震測剖面都顯示南崁斷層與林口、桃園臺地的地形、地下構造有關。雷達資料觀察的地表變形特徵與南崁斷層的橫移、同時有正斷層與逆斷層的報導可以對比。

Chapter 7 : Conclusions

This study employs the Persistent Scatterer Radar Interferometry technique to discover surface deformations in northern Taiwan. The project specifically focuses on seven active faults identified by the Geological Survey and Mining Management Agency, MOEA, i.e., Sanchiao, Hukou, Hsinchu, Hsincheng, Shihtan, Sanyi, and Tuntzuchiao faults. Additionally, the Taipei metropolitan and Hsinchu Science Park are critical observation locations.

In the project, we generated PSI outcomes for the three time periods: 2014-2018, 2018-2021, and 2022. The produced data underwent comparison with other geodetic measurements, including GNSS and leveling, for the radar data to be verified. Moreover, the 2018-2021 PSI dataset facilitated computation and conversion of the data from radar coordinates to vertical and east-west components, helping the visualization of radar data.

Compared to southern and southwestern Taiwan, northern Taiwan exhibits lower tectonic activity. As a result, surface deformation range observed by PSI is smaller. In this scenario, even slight portions of observation outliers can significantly impact the regression and its associated statistics. Nevertheless, our data exhibits very low RMSE and strong concurrence with continuous GNSS observations.

In the observed area, there are distinct zones of surface deformation, including the Shanchiao fault in Taipei basin, the region between Linkou and Taoyuan tablelands - also known as the Nankan fault and Shuanlianpo structure. Moving further south, the Hsincheng fault and Sanyi fault also demonstrate activity.

Upon comparison with groundwater records in the Taipei basin, we noted similar trends and patterns of changes in groundwater levels as the time series derived from PSI surface deformation. The decline in groundwater level is likely a key factor leading to

subsidence and deformation of the Shanchiao fault in the Taipei Basin. However, given the subsidence rate of over 1 cm per year along the fault, additional research is necessary to determine the extent of fault creeping in this particular fault segment.

Notably, the Shuanlianpo structure, which is infrequently examined in the Taoyuan terrace, exhibits noticeable deformation during observation. Upon our examination, it was revealed that the sites displaying surface deformation in the radar readings are coincident with areas of changes in the landscape. Intriguingly, the upward movement of elevation in the region correlates with the downward movement observed in the radar signals.

Continued observation and analysis of this phenomenon are warranted. The Nankan fault, once believed to be inactive and so-named due to its distinct geomorphic feature, was confirmed to be active based on outcrop and reflection seismology in combination with the radar data. Our data indicates that the Nankan fault has experienced uplift to the south of its fault scarp, as well as subsidence near the scarp.

參考文獻

大江二郎（1936）大安溪地震調查報告。礦物及地質調查報告，第4號，臺灣總督府殖產局。

大塚彌之助（1936）昭和十年四月二一日臺灣中部地方發生之地震所伴生之地震斷層，附地震斷層之諸特徵。東京大學地震研究所彙報別冊，第三號，第22-74頁。（日文）

王昱（2003）桃園-新竹臺地區構造活動與地形特徵。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共105頁。

王執明, 鄭穎敏, 王源. (1978). 臺北盆地之地質及沉積物之研究. 臺灣礦業, 第 30 期, 第 350-380 頁。

王乾盈、楊榮堃、蔡道賜（1991）爆竹震源淺層反射震測探測新城斷層。第3 屆臺灣地區地球物理研討會論文集，382-395 頁。

丹桂之助（1936）三叉衝上斷層附近之地質構造。臺灣地學記事，第7卷，第5-14頁。

丹桂之助（1939）臺北盆地の地質學的考察。矢部教授還曆記念論文集，第 1 卷，第 371-380 頁。（日文）

中國石油公司（1978）十萬分之一地質圖-桃園幅。中油石油公司臺灣油礦探勘總處。

市川雄一(1929) 臺灣桃園台地の礫層に就て ，地學雜誌，第485號，第396-403頁。

石再添、張瑞津、石慶得、黃朝恩、楊貴三（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。

石再添、鄧國雄、張瑞津、楊貴三（1985）竹東臺地的活斷層與地形面。國立臺灣師範大學地理研究所研究報告，第12期，1-44頁。

石瑞銓（1999）北部地區活動斷層地球物理探勘，經濟部中央地質調查所88年度報告，共80頁。

石瑞銓、陳文山、林啟文（2003）新竹東方新城斷層之P 波與SH 波淺層震測調查。經濟部中央地質調查所特刊。第14 號，1~9 頁。

石瑞銓（2009）地震地質與地變動潛勢分析，斷層帶地下構造調查研究（3/4）。經濟部中央地質調查所報告第98-11號，共137頁。

朱傚祖、梁勝雄、李建成、陳建良（2012）湖口斷層新釋：上盤活動背衝斷層之新發現及露頭構造分析。經濟部中央地質調查所特刊，第26號，31-51頁。

江婉綺、陳柏村（2021）新城斷層的野外地質調查與構造特性研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第34 號，137-160頁。

李元希、石同生、盧詩丁、林燕慧、林偉雄（2002）新城斷層與新竹斷層活動性研究。第9屆「臺灣之第四紀」研討會論文集，第12-15頁。

李錦發（1994）三義斷層及其在新構造上的意義。地質，第 14 卷，第 1 期，73-96 頁。

李錦發、林朝宗、賴典章、蘇泰維、邱禎龍、曾俊傑（1999）臺北盆地成因之探討，經濟部中央地質調查所特刊，第 11 號，第 207-226 頁。

沈淑敏、張瑞津、楊貴三（2005）地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-活動構造地形判釋及資料庫建置分析（1/2）。經濟部中央地質調查所報告，第94-13號，共98頁。

沈淑敏、張瑞津、楊貴三、古念偉、蘇惠貞（2006）活動構造地形判釋及資料建置分析（總報告）。經濟部中央地質調查所報告，共105頁。

花井重次（1930）臺灣桃園臺地活斷層。地理學評論，第6卷，第7號，第778-789頁。

邵屏華、陳華玟、游舒麟（2006）基本地質調查研究：北部地區第四紀地質調查。經濟部中央地質調查所年報，94年度，第34-38頁。

林正洪、詹瑜璋、陳光榮、張道明（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置-活動斷層帶之微震研究（3/3），經濟部中央地質調查所報告95-8 號，共80 頁。

林良安（1999）湖口斷層淺層反射震測之研究。中央大學地球物理所碩士論文，共109頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、張徽正、石瑞銓(2000)從野外觀察探討臺灣西南部四條存疑性活動斷層的存在，經濟部中央地質調查所彙刊，第 13號，第 77-101頁。

林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正(2000)臺灣活動斷層概論，五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第13號。

林啟文、鍾瑋、侯進雄（2005）臺灣北部新城斷層與新竹斷層的一些構造特性。經濟部中央地質調查所特刊，第16 號，41-54 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧（2007）臺灣北部的活動斷層 - 二萬五千分之一活動斷層條帶地質圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第19號，共130頁。

林啟文、陳文山、饒瑞鈞（2007）臺灣活動斷層調查的近期發展，經濟部中央地質調查所特刊，第18號，85-110 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村（2008）臺灣中部的活動斷層，兩萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第21 號，共148 頁。

林朝宗（2001）臺北都會區地質環境。臺北都會區地質災害研討會論文集。第 1-1～1-9 頁。

林朝棨（1957）臺灣地形。臺灣省文獻委員會，共424頁。

林燕慧、陳盈璇、侯進雄（2010）臺灣西北部之地殼變形研究。經濟部中央地質調查所特刊，第24號，第171-188頁。

郁永河（1967）裨海遊記。方豪（1950）校勘本，臺灣省文獻委員會出版。

陳于高（2006）熱螢光與光螢光定年總報告，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。經濟部中央地質調查所研究報告，第95-7號，共57頁。

陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰（2000）921　集集大地震的地震斷層特性與構造意義。經濟部中央地質調查所特刊，第 12 期，139-154頁。

陳文山、楊志成、黃柏壽、陳于高、石瑞銓、李元希、張徽正、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰（2001）從臺灣中部地區西部麓山帶的地質構造來看集集地震斷層的特性。地質，第 21 期，1 卷，第 19-36 頁。

陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞銓、陳于高、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁（2003）新城斷層的古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第14號，第11-23頁。

陳文山、游能悌、楊小青（2014）重要活動斷層構造特性調查研究計畫斷層活動特性分析與評估總報告書。經濟部中央地質調查所報告，共205頁。

陳建汝（2003）桃園臺地湖口活動斷層及其構造河階之相關研究。中國文化大學地學研究所碩士論文，共68頁。

陳建良（2005）桃園地區地殼變形監測之研究。經濟部中央地質調查所，94 年度研究發展報告。

徐明同（1983）明清時代破壞性大地震規模之震度評估。中央氣象局氣象學報，第29卷，第4期，1-18頁。

莊文星、陳汝勤（1989）臺灣北部火山岩之定年與地球化學研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 5 號，31~66 頁。

許劭禎（2013）利用鑽井資料建構臺北盆地第三紀之地層與構造。國立中央大學地球科學系碩士論文，共148頁。

國立台北科技大學土木工程系暨土木與防災研究所(2014) 重要活動斷層調查特性研究-近斷層高精度地形資料之判釋與分析。經濟部中央地質調查所委辦計畫，共327頁。

張竝瑜、陳文山、黃文正、郭陳澔（2018）重要活動斷層構造特性調查二期—活動斷層近地表構造特性調查（四年度整合成果報告），共218頁。

張憲卿（1994）大甲圖幅及說明書，五萬分之一臺灣地質圖第17號。經濟部中央地質調查所，共63頁。

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

張麗旭（1951）　「三叉衝上斷層」及其附近之地質構造。臺灣省地質調查所彙刊，第3 號，23-34 頁。

黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏（2004）臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)-新城斷層及其附近地區，經濟部中央地質調查所報告，第93-13號，共72頁。

黃旭燦（2004）斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（5/5）臺灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。經濟部中央地質調查所報告第93-13號，共59頁。

黃柏壽、陳國城、劉忠智、溫國樑、黃文紀、林正洪（2006）大臺北地區特殊地質災害調查與監測 - 地球物理微震調查與監測（3/4）。經濟部中央地質調查所報告 95-04 號，共 99頁。

黃鑑水、李錦發、劉桓吉（1991）臺灣北部金山斷層之地質調查與探勘研究。行政院國家科學委員會防災科技研究報告 80-17 號，共 23 頁。

黃鑑水、張憲卿（1994）臺中縣大甲溪右岸之三義斷層露頭。地質，第 14 卷，第 1 期，248-250 頁。

楊耿明（2002）斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（3/5）新城斷層及其附近地區。經濟部中央地質調查所報告第91-4號，共52頁。

楊貴三 (1986) 臺灣活斷層的地形學研究-特論活斷層與地形面的關係，私立中國文化大學地學研究所博士論文，共178頁。

楊貴三、蔡怡真（2003）臺灣北部新竹與新城斷層之地形學研究。經濟部中央地質調查所特刊，第14號，第25-35頁。

楊燦堯、宋聖榮、傅慶州、蘇春旭、劉聰桂、陳正宏（2004）活動斷層地球化學監測現況與成果。2004　年臺灣活動斷層與地震災害研討會論文集，第 120-137 頁。

塗明寬、陳文政（1991）竹東圖幅及說明書，五萬分之一臺灣地質圖。經濟部中央地質調查所，共87頁。

詹瑜璋、陳于高、史天元（2003）利用空載雷射掃描資料分析新城斷層系統：清晰之地形與其代表之構造作用。中國地質學會92年年會暨學術研討會論文集，第133頁。

詹瑜璋、李建成、鄭鼎耀、劉進金、陳文山、胡植慶、陳柔妃、徐偉城（2005）大臺北地區特殊地質災害調查與監測 - 高精度空載雷射掃描（LIDAR）地形測製與構造地形分析（1/3）。經濟部中央地質調查所研究報告 94-04 號，共 143 頁。

詹瑜璋、李建成、鄭鼎藥、劉進金、陳文山、胡植慶、陳柔妃、徐偉城(2006)大臺北地區特殊地質災害調查與監測—高經度空載雷射掃瞄(LiDAR　地形測製與構造地形分析(2/3)。經濟部中央地質調查所 95 年度委辦計畫報告，共123 頁。

董倫道、陳文山、李奕亨(2005)地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-地球物理探勘計畫(4/5)，經濟部中央地質調查所報告第94-09號，共176頁。

董倫道、陳文山、李奕亨（2007）地震地質調查及活動斷層資料庫建置：淺層地球物理探勘總報告。經濟部中央地質調查所研究報告，共221頁。

蔡義本（1978）二十世紀以前臺灣西部強烈地震之回顧。科學月刊，第9卷，第11期，31-35頁。

鄧屬予（2006）台北盆地之地質研究，西太平洋地質科學，第6卷，1-28頁。

鄭世楠、葉永田（1989）西元1604年至1988年臺灣地震目錄。中央研究院地球科學所，255頁。

劉力豪（2004）竹東丘陵的活動斷層古地震及相關活動性研究，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共90頁。

劉仁正（2001）篤行營區新城斷層調查工作報告。新竹科學工業園區管理局。

劉彥求與李奕亨（2006）三義斷層於大甲溪兩岸剖面與淺層震測結果比對分析。2006 年臺灣地區地球物理學術研討會摘要集，第 97 頁。

劉桓吉、蘇泰維、李錦發、紀宗吉、林朝宗（2000）山腳斷層之活動性及其對工程安全之影響。經濟部 89 年度研究發展報告，共 30 頁。

潘玉生（1965）臺灣西北部諸重力異常與震測結果之比較研究。臺灣石油地質，第4號，第287-301頁。

潘國樑、王文能、胡國興、顏倉波（1983）臺灣中部 1935 年地震斷層航照地質研究。工業技術研究院能源與礦業研究所，共 47 頁。

潘國樑、顏滄波、王文能、胡國興（1983）臺灣中部1935年地震斷層之航照地質研究，工業技術研究院能源與礦業研究所，共44頁。

潘國樑（1985）利用遙測、地質與地震資料分析一九三五年地震斷層。一九三五年新竹-臺中大地震五十周年紀念研討會論文集，第83-92頁。

諶凱英（1995）桃園臺地群崖地形之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共114頁。

盧詩丁、石同生、林啟文、黃文正、陳華玟、李元希、陳致言、張徽正（2000）臺灣北部新竹地區活動斷層調查。中國地質學會89年年會論文集，第308-310頁。

鍾瑋（2005）桃園-新竹地區 GPS 衛星測量之初步研究。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共80頁。

謝昭輝、孫明光、謝盛雄、黃志文（1997）桃園地區南崁斷層之震測調查研究，地工技術，第64期，93-104頁。

顏滄波（1985）一九三五年新竹、臺中地震調查之回顧。一九三五年新竹-臺中大地震五十周年紀念研討會論文集，第11-17頁。

蘇泰維、劉桓吉、劉憲德、黃健政（1993）臺北盆地西緣山腳斷層調查研究初步成果。91年度中央地質調查所年報，118-121 頁。

饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 活動斷層監測系統計畫（5/5）。經濟部中央地質調查所研究報告95-10號，共241 頁。

台灣地震模型(2020)　https://tem.tw/TEM2020/TEM_fault_model.html.

Chen, W.S., Y.G. Chen, Shih, R.C., Liu, T.K., Huang, N.W., Lin, C.C., Sung, S.H. and Lee, K.J. (2003) A modern analog of the out-of-sequence thrust system in relation with the Chi-Chi earthquake ruptures in the Western Foothills, central Taiwan: J. Asian Earth Sci., Vol.21, 473-480.

Chiu, H.T. (1970) Structure features of the area between Hsinchu and Taoyuan, northern Taiwan, Mem. Geol. Soc. China, 13, 63-75.

Chung, C.T. (1963) A study of the geology and petroleum potentialities of the Paoshan and Chingtsaohu area, Hsinchu. Petroleum Geology Taiwan, 2, 221-240.

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.

Elishewitz, B.（1963）Review of the geophysical surveys of the Hukou anticline. Unpublished report, CPC file.

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

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

Ferretti, A., Tamburini, A., Novali, F., Fumagalli, A., Falorni, G. and Rucci, A. (2011) Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring. Energy Procedia, 4, 3465-3471.

Foumelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., ... and Wong, C. (2018) ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 1364-1367). IEEE.

Hooper, A., 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

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. (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.

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, S.Y. (2003) Prehistoric Earthquakes along the Shanchiao Fault, Taipei Basin, Northern Taiwan: A Thesis Presented to the Graduate Faculty of Central Washington University, 83pp.

Ku, C. C. (1963) Photogeologic study of terraces in northwestern Taiwan. Proc. Geol. Soc. China, 6, 51-60.

Kuo, Y.T., Wang, Y., Hollingsworth, J., Huang, S.Y., Chuang, R.Y., Lu, C.H., Hsu, Y.C., Tung, H., Yen, J.Y., Chang, C.P., 2019. Shallow Fault Rupture of the Milun Fault in the 2018 M-w 6.4 Hualien Earthquake: A High-Resolution Approach from Optical Correlation of Pleiades Satellite Imagery. Seismol Res Lett 90, 97-107.

Lai, K.Y., Chen, Y.G., Hung, J.H., Suppe, J., Yue, L.F. and Chen, Y.W. (2006) Surface deformation related to kink-folding above an active fault: Evidence from geomorphic features and co-seismic slips. Quaternary international, 147(1), 44–54.

Lee, C.I., Chang, Y.L., Mao, E.W., Tseng, C.S. (1993) Fault reactivation and structural inversion in the Hsinchu-Miaoli area of northern Taiwan, Petroleum Geology Taiwan, 28, 47-58.

Meng, C.Y. (1963) San-I overthrust: Petrol. Geol. Taiwan, no.2, 1-20.

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

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

Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the seismological society of America 75, 1135-1154.

Okada, Y., 1992. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. Bulletin of the Seismological Society of America 82, 1018-1040.

Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. and Cabral-Cano, E (2016) Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 90-102.

Pan, Y. S. (1965) Interpretation and seismic coordination of the Bouguer gravity anomalies obtained in Northwestern Taiwan. Petroleum Geology Taiwan, 4, 287-301.

Perissin, D., Wang, Z. and Lin, H. (2012) Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 73, 58-67.

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

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

Tang, C.H. (1963) Geology and oil potentialities of the Hukou Anticline, Hsinchu: Petrol. Geol. Taiwan, No. 2, P. 241-252.

Tang, C.H. (1968) Photogeological observations on the low hilly terrain and coastal plain area of Hsinchu, Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.4, 35-52.

Tang, C.H., Hsu, C.H. (1970) Subsurface geology and petroleum deposits in the Hsinchu area. Petroleum Geology Taiwan, 7, 89-101.

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.

Yang, K.M., Wu, J.C., Ting, H.H., Wang, J.B. and Chi, W.R. (1994) Sequential deformation in foothills belt, Hsinchu and Miaoli areas: Implications in hydrocarbon accumulation: Petrol. Geol. Taiwan, no.29, 47-74.

Yang, K.M., Wu, J.C., Wickham, J.S., Ting, H.H., Wang, J.B. and Chi, W.R. (1996) Transverse structures in Hsinchu and Miaoli areas: Structural mode and evolution in the foothills belt, northwestern Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.30, 111-150.

Zhang Lei, Ding Xiaoli, Lu Zhong., 2011. Modeling PSInSAR Time Series without Phase Unwrapping. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,49(1): 547-556.

Zhu, L., 2011. Synthetic Seismograms and Seismic Waveform Modeling.

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
1. 本計畫進行多條斷層之跨斷層速度場及剖面圖的繪製，針對各斷層有條帶地質圖之資料，建議配合「地質」剖面圖之說明檔位置繪製剖面，提供後續討論之參考。	感謝委員建議，我們會在期末報告中改善。
2. 請於期末報告時加入如何運用InSAR判讀地質機制之說明，並提供InSAR的規格以利後續研究參考。	雷達資料精確判讀需要知道衛星飛行方向、拍攝方向，並且將對雷達距離資訊嘗試轉成地表的東西、南北（通常不敏感）、以及垂直向。 我們在附錄F裡面提供這些幾何關係。
3. 請確認並修正HCU1剖面圖上的新城斷層是否應為新竹斷層。	是新竹斷層，此處為誤植。
4. 請釐清SYI1 剖面圖出現兩條三義斷層；第127-133頁描述三義斷層分支及三義斷層，其中三義斷層分支在平面位置圖中無法分辨，請再確認斷層圖資是否正確。	經確認後僅有三義斷層，無三義斷層分支。

5. 斷層幾何的二維模擬建議可參考另一計畫（重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估第二階段）的斷層幾何形貌。	本計畫的斷層幾何二維模擬出發點與另一計畫有一些基本的不同，也就是說，我們並沒有預設斷層的初始可能幾何形貌。更仔細地講，我們設定了大範圍區間的參數，這樣把數萬種幾何可能性都列入計算後，選出與觀測差異較少的部分討論。所以，我們的簡單模擬中，有可能參考到另一計畫的小部分。
6. 流程圖請將英文適當翻譯為中文，以利閱讀。	流程圖中有許多為專有名詞，我們已經將大部分翻譯為中文。
7. 第143頁是否足以表示二種資料結果？綠色點位為GNSS或PSI？請再加強說明。	此結果僅為PSI時間序列，不含GNSS結果，綠色點位為PSI資料。
8. 參考文獻請補列內文提及之著作。	內文提及之參考文獻已經更新至文獻。
9. 圖1-1、圖1-2以及後續提及活動斷層與重要區域等圖片的用色請一致，並請再確認本年度的重要區域範圍與用詞。	我們以資料中的極值作為設定，在期末報告中我們針對這點進行改進，以資料的多數分佈區間決定製圖範圍。
10. 請加強說明4-2-1有關不同時期LOS速度場值的分布範圍如何決定？	我們以資料中的極值作為設定，在期末報告中我們針對這點進行改進，以資料的多數分佈區間決定製圖範圍。

11. 請加強說明第72頁臺北盆地遠離衛星移動的原因可能為何？	我們已經於期末報告呈現包含地下水以及地層資料對比，並於討論中論述。
12. 請說明第94頁2014-2018山腳斷層東側為遠離衛星移動(冷色)，與第69頁山腳斷層東側呈現靠近衛星(暖色)的差異為何？	此兩頁使用色階分佈不同造成誤解，我們會謹慎設計色階分布範圍。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
1. 請將報告書封面經濟部LOGO更新，內文請將地質調查所(或地調所)修正為地質調查及礦業管理中心(地礦中心)。	已於報告書中修正。
2. 有關報告書的架構，建議將本案所使用之方法整合到第二章進行說明，請將第三章跟第四章順序互換以利閱讀。	感謝委員建議，已於報告書中修正第二章及三四章順序互換。
3. 3-3水準測量資料與雷達資料比對成果，請在圖中補上方位，部分測線比對圖漏標斷層縮寫。	已於報告書中修正。
4. 第三章至第六章的成果圖多有下列現象：漏標X軸Y軸、單位跟相關敘述；部分圖沒有標示誤差，建議補充上述資訊並增加圖說。	感謝委員建議，未來會以此建議調整作圖。
5. 建議將圖4-81、4-82 Scale的上下界統一。	感謝委員建議，已於報告書中修正。

6. 4-5跨斷層的速度場剖面分析一節內容建議按所編排之圖號逐一說明，以利讀者閱讀；地質圖沒有地層名稱，請修正。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
7. 4-5-4三義斷層，SYI3剖面是否有切過屯子腳斷層?	SYI3剖面恰好切過三義斷層與屯子腳斷層交界，我們會在結案報告中標示屯子腳斷層。
8. 部分英文縮寫(如RMSE)在文中第一次出現時，請附上中文翻譯並簡單介紹其意義，以利閱讀。	感謝委員建議，已於報告書中修正。
9. 簡報投影片沒有出現在報告書的部分建議加入後者。	感謝委員建議，已於報告書中更新用圖。
10. 建議將資料的誤差加入討論，同時給出未來工作規劃建議。	感謝委員建議，我們會朝這個方向改善、前進。
11. 建議討論沉積物的壓密跟侵蝕作用與地表變形的關聯性。	感謝委員建議。關於侵蝕部分，在目前我們使用方式上，我們解析的訊號幾乎看不到侵蝕。沈積物壓密方面，我們會與地礦中心進一步討論。

12. 建議在比較GPS_LOS和InSAR資料時，每張圖的比例要適當調整(圖3-22)，除了考慮RMSE，資料和回歸線差異的狀況也需考慮給予適當的權重。	感謝委員建議，我們未來會嘗試讓資料填滿方便閱讀。理解測量與誤差的涵義一直是我們追求的目標之一，我們未來會嘗試不同方式讓誤差可以在閱讀時更清楚。
13. 在比對觀測資料隨斷層遠近變化的關係時，建議將X軸換成離斷層線的距離，如此較容易比對斷層沿線是否有橫跨斷層的速度變化(圖4-10)。	感謝委員建議，未來會以此建議調整作圖版面。
14. 當資料有topo、位移量、GNSS速度時，建議topo不要畫在同一個圖中的最下面，放在最上面或是單獨出來會比較清楚。	感謝委員建議，未來會以此建議調整作圖。
15. 當橫跨斷層時出現比較異常的速度變化時，建議比對其他年份的資料。	感謝委員的建議，未來會以此建議調整比對方式。

16. 臺北盆地的下陷速度有可能部分是地層下陷造成，建議避免直接把觀察到的速度直接去做斷層模擬。可以比對地下水季節變化的振幅大小，觀察是否和速度場的空間變化相關。	感謝委員的建議。在本計畫執行過程中，雖然直接將地表變形量與模擬資訊做比對，然而我們並非要用此模擬情境做為最終答案，而是取出這些模擬資料，做更近一步討論。另外，地下水影響台北盆地的現象，我們會持續保持關注。
17. 建議試著拆解InSAR_LOS為東西和南北的分量，比較容易讓讀者理解。	感謝委員建議。在結案報告中，我們大部分討論都有垂直量。主要問題在圖的呈現上，Y軸依然標示成 LOS。 我們會修改這一部分。
18. 二維剖面模擬一章，新城斷層和三義斷層分別採用HCG2和SYI3作為模擬的對象，然而就4-5-3和4-5-4結果觀之，HCG1和SYI2之結果更能顯示斷層活動的現象，建議團隊考慮另以這些剖面從事模擬。	由於新城斷層和三義斷層近期跨斷層的活動速率變化並沒有太明顯，因此這些剖面特性大多相似，且SYI2的觀測點數略少，之後團隊會更加注意，選擇更適合的剖面位置來進行模擬。

19. 請說明二維模擬中每條斷層的四種條件模型當中符合度之比較。	由於新城斷層和三義斷層近期跨斷層的活動速率變化並沒有太明顯，因此這些剖面特性大多相似，且SYI2的觀測點數略少，之後團隊會更加注意，選擇更適合的剖面位置來進行模擬。
20.桃園臺地的變化量現象建議略加說明其可能原因。	感謝委員建議。已於報告書中的討論章節內新增說明。
21.臺北都會區的範圍是否過大(都已包含山區)，建議參考人口及住宅分布資料重新圈繪較符合都會區的定義。	感謝委員建議。我們會嘗試取得人口密度資訊，未來用以判斷都會區使用。
22.山腳斷層模擬的斷層深度1~3公里似乎不符合斷層在仍在深部的認知(鑽井資料顯示)，請再予以說明。	地表變形的變化量，可反映出斷層活動的深淺，而近期與長期活動的差異正是重要的科學議題，也顯示出持續觀測的重要性。山腳斷層模擬結果可能也反映地表變形包含了數種來源的訊號，需要持續關注。