計畫編號：B11036

經濟部中央地質調查所110年度委託專業服務計畫執行期末報告書

(定稿)

「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形(1/2)」

(第一年度)

全 程 計 畫：自 110 年 4 月至 111 年 12 月止
本年度計畫：自 110 年 4 月至 110 年 12 月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立東華大學

中 華 民 國 110 年 12 月

目錄

目錄 I
表目錄 V
圖目錄 VI
摘要 XIII
ABSTRACT XIV
第一章 、緒論 1
1-1 計畫整體概述 1
1-2 計畫目的 3
1-3 計畫工作內容概述 6
1-3-1 合成孔徑雷達差分干涉技術(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR) 6
1-3-2 多時序雷達差分干涉技術(Multi-Temporal InSAR, MTInSAR) 8
1-3-3 資料比對 12
1-3-4 斷層幾何與滑移量估算 13
1-4 本年度計畫概述 14
1-4-1 本年度研究區域背景簡介 16
1-4-2 本年度工作項目 28
1-4-3 本年度計畫交付工作項目 29
第二章 、計畫執行方法及進行步驟 31
2-1 雷達差分干涉 31
2-1-1 永久散射體雷達差分干涉技術 (PSI) 的基本概念 33
2-1-2 StaMPS 技術的 PS 點位選取概念 35
2-1-3 技術上需克服之困難 40
2-2 GNSS、水準測量與雷達差分干涉資料對比 40
2-2-1 工作內容概述 40
2-2-2 資料對比之執行方法及進行步驟 43
2-3 跨斷層之垂直速度剖面分析 46
2-3-1 方法與執行步驟 46
2-3-2 跨斷層之垂直速度剖面分析 48
第三章 、高屏地區雷達資料與其他大地測量觀測資料的比對 53
3-1 GNSS 連續站與 PSInSAR 資料比對 54
3-1-1 校正前雷達資料 56

3-1-1-1 2014-2016 年 56
3-1-1-2 2016-2018 年 59
3-1-1-3 2018-2020 年 62
3-1-2 校正後雷達資料 64
3-1-2-1 2014-2016 年 64
3-1-2-2 2016-2018 年 67
3-1-2-3 2018-2020 年 71
3-2 GNSS 移動站與 PSInSAR 資料比對 74
3-2-1 2014-2016 年 75
3-2-2 2016-2018 年 77
3-2-3 2018-2020 年 79
3-3 GNSS 連續站及移動站與 PSInSAR 資料比對 80
3-4 水準測量資料 83
3-4-1 路竹至茂林測線 84
3-4-2 岡山至安坡測線 88
3-4-3 佳冬至七佳測線 91
3-4-4 恆春西臺地至佳樂水測線 94
第四章 、高屏地區雷達影像分析 97
4-1 StaMPS 參數測試與律定 97
4-2 2014-2016 年雷達影像成果 101
4-2-1 升降軌道的 LOS 速度場成果 101
4-2-2 跨斷層的速度場剖面分析 105
4-2-2-1 小崗山斷層 105
4-2-2-2 車瓜林斷層 106
4-2-2-3 恆春斷層 107
4-2-3 科學園區和都會區剖面分析 118
4-2-3-1 橋頭科學園區 118
4-2-3-2 高雄科學園區 118
4-2-3-3 高雄都會區 119
4-2-3-4 北高雄平原區 119
4-3 2016-2018 年雷達影像成果 124
4-3-1 升降軌道的 LOS 速度場成果 124
4-3-2 跨斷層的速度場剖面分析 128
4-3-2-1 小崗山斷層 128
4-3-2-2 車瓜林斷層 129
4-3-2-3 恆春斷層 130

4-3-3 科學園區與都會區剖面分析 142
4-3-3-1 橋頭科學園區 142
4-3-3-2 高雄科學園區 142
4-3-3-3 高雄都會區 143
4-3-3-4 北高雄平原區 143
4-4 2018-2020 年雷達影像成果 147
4-4-1 升降軌道的 LOS 速度場成果 147
4-4-2 斷層的速度場剖面分析 151
4-4-2-1 小崗山斷層 151
4-4-2-2 車瓜林斷層 151
4-4-2-3 恆春斷層 152
4-4-3 科學園區與都會區剖面分析 166
4-4-3-1 橋頭科學園區 166
4-4-3-2 高雄科學園區 166
4-4-3-3 高雄都會區 167
4-4-3-4 北高雄平原區 167
4-5 重點區域時間序列 172
4-5-1 重要地點地表變形時間序列分析 175
4-6 ALOS 衛星資料結果 177
第五章 、二維剖面模擬 185
5-1 方法與執行步驟 185
5-2 車瓜林斷層模擬結果 193
5-3 恆春斷層模擬結果 199
5-4 小崗山斷層模擬結果 205
第六章 、討論 211
6-1 雷達結果與其他大地測量資料比較 211
6-1-1 雷達差分干涉資料與 GNSS 連續站的比對與改善 211
6-1-2 雷達差分干涉資料與 GNSS 移動站的比對 212
6-1-3 雷達差分干涉資料與水準測線的比對 212
6-2 雷達影像成果 214
6-2-1 各時段跨斷層的剖面比較 214
6-2-1-1 小崗山斷層 214
6-2-1-2 車瓜林斷層 215
6-2-1-3 恆春斷層 215
6-2-2 科學園區與都會區的剖面比較 216
6-2-2-1 橋頭科學園區 216

6-2-2-2 高雄科學園區 217
6-2-2-3 高雄都會區 217
6-2-2-4 北高雄平原區 218
6-3 ALOS 衛星資料結果 218
6-4 斷層錯位模擬 219
6-5 綜合討論 221
第七章 、結論 223
CHAPTER 7 : CONCLUSIONS 225
參考文獻 227
雷達影像處理教育訓練 231
期中委員審查意見 233
期末委員審查意見 237
附錄 A PSINSAR 結果時間序列 ..... - 1 -
附錄 B GNSS 連續站與移動站速度場 ..... - 23 -
附錄 C 水準測量與雷達資料分布位置圖 ..... - 31 -
附錄 D GNSS 測站分布圖 ..... - 37 -
附錄 E ALOS 衛星 PSINSAR 結果時間序列 ..... - 39 -

表目錄

表　A：本年度預期進度甘梯圖 (Gantt Chart)。 X
表　B：預期進度查核點 (Check Point)。 XI
表　C：期末交付之各項工作項目。 XII

表 1-3-1：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。 9
表 2-1-1：Sentinel-1 衛星影像資訊。 33
表 2-3-1：中興工程顧問社彙整南部斷層參數。 49
表 3-1：Sentinel-1A 衛星影像使用幅數。 53
表 3-1-1： 雷達資料再處理後改善程度對照表。 55
表 4-1-1：2014-2016 處理參數及 PS 點數表。主影像為 2015/08/18。
..... 100
表 6-4-1：地質調查紀錄與最佳斷層擬合結果列表。 220

圖目錄

圖 1-2-1：目標區域。 5
圖 1-3-1：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）。 7
圖 1-3-2：冰島 Eyjafjallajökull 火山周圍的 PSI 時間序列地表變形量(Hooper, 2008)。 11
圖 1-4-1：工作團隊與主要工作項目。 15
圖 1-4-2：究區域中的道路與斷層分佈情形。 17
圖 1-4-3：旗山斷層地質條帶圖(林啟文等，2009)。 18
圖 1-4-4：小崗山斷層地質條帶圖(林啟文等，2009)。 20
圖 1-4-5：車瓜林斷層地質條帶圖(劉彥求等，2019)。 22
圖 1-4-6：潮州斷層地質條帶圖北段(林啟文等，2009)。 24
圖 1-4-7：潮州斷層地質條帶圖南段(林啟文等，2009)。 25
圖 1-4-8：恆春斷層地質條帶圖(林啟文等，2009)。 27
圖 2-1-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。 32
圖 2-1-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。 34
圖 2-1-3：永久散射體對相位的影響示意圖。 35
圖 2-1-4：雷達影像處理流程第一階段－雷達差分干涉處理流程圖。 38
圖 2-1-5：雷達影像處理流程第二階段－PSI 處理流程圖。 39
圖 2-2-1：SENTINEL-1 東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。 . 42
圖 2-2-2：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。 43
圖 2-2-3：GipsyX 軟體處理流程。 45
圖 2-3-1： (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）。 50
圖 2-3-2：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）。 51
圖 2-3-3：工作流程圖。 52
圖 3-1-1：2014-2016 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 56
圖 3-1-2：2014-2016 Ascending 雷達資料與 GNSS 資料比對。 57
圖 3-1-3：2014-2016 降軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 57
圖 3-1-4：2016-2018 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 59
圖 3-1-5：2016-2018 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 60
圖 3-1-6：2016-2018 降軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 60
圖 3-1-7：2018-2020 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 62
圖 3-1-8：2018-2020 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 63
圖 3-1-9：2018-2020 降軌雷達資料與 GNSS 資料比對。 63
圖 3-1-10：(左圖)2014-2016 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。 65
圖 3-1-11：2014-2016 年 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 SANW。 66
圖 3-1-12：2014-2016 年 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 SANW。 66
圖 3-1-13：(左圖)2016-2018 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。 67
圖 3-1-14：2016-2018 PSI 升軌資料與 GPS 投影至雷達斜距方向比對。個離散點。 68
圖 3-1-15：去掉 GS45 站位附近 PSI 資料與其比對後（詳內文），2016-2018 升軌資料 InSAR 與 GPS 對比之斜率到達 0.92，R^2 到達 0.7。 69
圖 3-1-16：2016-2018 PSI 降軌資料與 GPS 投影至雷達斜距方向比對。 70
圖 3-1-17：(左圖)2018-2020 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。 71
圖 3-1-18：2018-2020 雷達升軌資料與 GPS 比對。 72
圖 3-1-19：2018-2020 雷達降軌資料與 GPS 比對。 73
圖 3-2-1：(左圖)2014-2016 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。 75
圖 3-2-2：2014-2016 雷達資料與 2015-2016 GPS 移動站比對。 76
圖 3-2-3：(左圖) 2016-2018 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。 77
圖 3-2-4：2016-2018 雷達資料與 2016-2018 GPS 移動站比對。 78
圖 3-2-5：(左圖) 2018-2020 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。 79
圖 3-2-6：2018-2020 雷達資料與移動站的比對。 升軌資料表現相當不錯，而降軌資料則是不理想。 80
圖 3-3-1：2014-2016 年 所有 GPS 站與雷達資料對比（左）升軌資料 （右）降軌資料。 81
圖 3-3-2：2016-2018 年 所有 GPS 站與雷達資料對比（左）升軌資料 （右）降軌資料。 81
圖 3-3-3：2018-2020 年 所有 GPS 站與雷達資料對比（左）降軌資料 （右）生軌資料。 82
圖 3-4-1：高雄屏東水準測線分布。 83
圖 3-4-2：水準測線-路竹至茂林測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。 86
圖 3-4-3：水準測線-路竹至茂林測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。 87
圖 3-4-4：水準測線-岡山至安坡測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。 89
圖 3-4-5：水準測線-岡山至安坡測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。 90
圖 3-4-6：水準測線-佳冬至七佳測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。 92
圖 3-4-7：水準測線-佳冬至七佳測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。 93
圖 3-4-8：水準測線-恆春西台地至佳樂水測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。 95
圖 3-4-9：水準測線-恆春西台地至佳樂水測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。 96
圖 4-1-1：資料處理門檻值 0.6 之 2014-2016 平均速度場。 98
圖 4-1-2：資料處理門檻值 0.75 之 2014-2016 平均速度場。 99
圖 4-2-1：2014-2016 升軌道影像的 LOS 平均速度場。 103
圖 4-2-2：2014-2016 降軌道影像 LOS 平均速度場。 104
圖 4-2-3：2014-2016 小崗山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...108
圖 4-2-4：2014-2016 小崗山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...109
圖 4-2-5：2014-2016 車瓜林斷層升軌道影像的 LOS 速度場與剖面圖。 111
圖 4-2-6：2014-2016 車瓜林斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...113

圖 4-2-7：2014-2016 恆春斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 115
圖 4-2-8：2014-2016 恆春斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 117
圖 4-2-9：2014-2016 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 121
圖 4-2-10：2014-2016 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 123
圖 4-3-1：2016-2018 升軌道影像 LOS 平均速度場。 126
圖 4-3-2：2016-2018 降軌道影像 LOS 平均速度場。 127
圖 4-3-3：2016-2018 小崗山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...131
圖 4-3-4：2016-2018 小崗山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...133
圖 4-3-5：2016-2018 車瓜林斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...135
圖 4-3-6：2016-2018 車瓜林斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...137
圖 4-3-7：2016-2018 恆春斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 139
圖 4-3-8：2016-2018 恆春斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 141
圖 4-3-9：2016-2018 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 145
圖 4-3-10：2016-2018 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 146
圖 4-4-1：2018-2020 升軌道影像 LOS 平均速度場。 149
圖 4-4-2：2018-2020 降軌道影像 LOS 平均速度場。 150
圖 4-4-3：2018-2020 小崗山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...155
圖 4-4-4：2018-2020 小崗山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...157
圖 4-4-5：2018-2020 車瓜林斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。..159
圖 4-4-6：2018-2020 車瓜林斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。...161
圖 4-4-7：2018-2020 恆春斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 163
圖 4-4-8：2018-2020 恆春斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 165
圖 4-4-9：2018-2020 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 169
圖 4-4-10：2018-2020 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。 171
圖 4-5-1：2018-2020 六個重要觀測區域變形時間序列（升軌）。 173
圖 4-5-2：2018-2020 六個重要觀測區域變形時間序列（降軌）。 174
圖 4-5-3：我們選取了六個 GPS 站位將其 2018-2020 時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 176
圖 4-6-1： 2007-2011 ALOS 雷達影像解算之視衛星方向變形速率。 178
圖 5-1-1：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，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、垂直方向速率與斷層幾何、運動方向及參數。 186
圖 5-1-2：2018-2020 年車瓜林斷層附近雷達影像上升軌道之剖面資料。.....188
圖 5-1-3：2018-2020 年恆春斷層附近雷達影像上升軌道之剖面資料。 190
圖 5-1-4：小崗山斷層附近雷達影像上升軌道之剖面資料。.....192
圖 5-2-1：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與傾滑(Dip Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分布圖。.....194
圖 5-2-2：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....194

圖 5-2-3：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....195
圖 5-2-4：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與走滑(Strike Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....195
圖 5-2-5：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....196
圖 5-2-6：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....196
圖 5-2-7：車瓜林斷層剖面 C1 只計算傾滑的最佳擬合結果。.....197
圖 5-2-8：車瓜林斷層剖面 C1 只計算走滑的最佳擬合結果。.....198
圖 5-3-1：恆春斷層剖面 H1 只計算傾滑的最佳擬合結果。.....200
圖 5-3-2：恆春斷層剖面 H1 只計算走滑的最佳擬合結果。.....201
圖 5-3-3：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與傾滑(Dip Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分布圖。.....202
圖 5-3-4：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....202
圖 5-3-5：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....203
圖 5-3-6：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與走滑(Strike Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....203
圖 5-3-7：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....204
圖 5-3-8：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....204
圖 5-4-1：小崗山斷層剖面 X2 只計算傾滑的最佳擬合結果。.....206
圖 5-4-2：小崗山斷層剖面 X1 只計算走滑的最佳擬合結果。.....207
圖 5-4-3：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與傾滑(Dip Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分布圖。.....208
圖 5-4-4：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....208
圖 5-4-5：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....209
圖 5-4-6：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與走滑(Strike Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....209
圖 5-4-7：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....210
圖 5-4-8：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。.....210

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：應用雷達孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形													
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
2014-2016 視衛星方向地殼變動分析													
2016-2018 視衛星方向地殼變動分析													
2018-2020 視衛星方向地殼變動分析													
期中簡報會議													
2014-2016 跨斷層垂直速度剖面分析													
2016-2018 跨斷層垂直速度剖面分析													
2018-2020 跨斷層垂直速度剖面分析													
跨斷層時間序列分析													
都會區重要觀測位置時間序列分析													
科學園區時間序列分析													
教育訓練													
期末簡報會議與成果報告撰寫													
預定進度（累積數）	5	15	25	35	50	70	85	90	100				

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

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

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

表 B：預期進度查核點 (Check Point)。

Tabke B： Check point of expected prgress.

序號	查核點(交付項目)	預定達成日期	完成狀態
1	工作計劃書繳交、契約書簽訂	4 月 7 日	工作計劃書修正與契約書簽訂
2	期中報告繳交	7 月 30 日	已繳交期中報告書面
3	期中審查會議	8 月 13 日	已於線上召開期中審查會議
4	教育訓練	10 月 22 日	已於地調所舉辦 6 小時教育訓練
5	期末報告繳交	11 月 24 日	已繳交期末報告書面初稿
6	期末審查會議	12 月 8 日	已於地調所召開期末審查會議
7	驗收	12 月 31 日	提送期末報告書定稿 20 份、含數值資料之光碟 20 份，及本年度計劃分析結果整合圖資 20 份

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. 雷達速度場與 GNSS 速度場的比較。	3-1 3-2
2. 垂直斷層方向至少三條之剖面之速度變化。	4-2 4-3 4-4
3. 三條剖面經過之斷層幾何與滑移量分析。	5-2 5-3 5-4
4. 選擇研究區域部分連續 GPS 站做時間序列分析。	4-5
5. 針對重要重要地點做地表變形之時間序列分析。	4-5
6. Sentinel 雷達分析速度結果與 ALOS 雷達分析結果比較。	4-6
7. 於期末簡報前在中央地質調查所舉辦一次教育訓練，時間 6 小時以上。	教育訓練

摘要

本計畫利用雷達差分干涉方法針對南部地區監測地表變形，主要針對目標區域內五條斷層（包含 小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層、車瓜林斷層），橋頭科學園區、高雄科學園區與高雄都會區等區域。

在這一期報告中，我們完成了 2014-2016、2016-2018、2018-2020 三個不同時段的雷達差分干涉資料，各時間段的升軌與降軌成果分別由 28/18 幅、58/42 幅、86/84 幅的 Sentinel-1 雷達影像處理完成。 根據雷達資料與 GNSS 連續站比對結果，我們發現直接產出之雷達資訊含有許多 unwrapping error 造成雷達資料與 GNSS 趨勢差異。 藉由重新規劃與重新處理，我們在資料中可以降低 unwrapping error，在第二期以及第三期資料中看到雷達資料準確度大幅提升。 根據修正的資料，我們切出重要剖面，對重要調查地區做觀察。

我們也利用修正後的資料對垂直斷層的剖面觀察其速度趨勢，也利用此剖面資料做斷層幾何模擬。 在三條斷層中（車瓜林、小崗山、恆春），我們得出了初步的模擬結果與 GNSS 資料做對比。雖然模擬結果與測量觀察以及野外調查結果有一些差異，然而以一期升軌資料以及相對基本的模擬設定，如此的差異應可以接受。

關鍵詞：雷達差分干涉、地表變形、斷層滑移

Abstract

In this project, we used time series radar interferometry to investigate surface deformation in southern Taiwan. Our main targets include 5 active faults (Hsiaokangshan fault, Chishan fault, Chaochou fault, Hengchun fault, CheKuaLin fault) and Chiaotou industrial park, Kaohsiung industrial park, and Kaohsiung metropolitan area.

In this work, we completed radar interferometry analyses in southern Taiwan in the period through 2014-2016, 2016-2018, and 2018-2020. These were composed of 28/18 images, 58/42 images, and 86/84 images, respectively. After comparing the radar data to the GNSS data of the same time, we discovered remnant unwrapping errors in original datasets. After redesign the processing chain, we were able to remove the unwrapping errors in the datasets, and realize a better comparison between radar and GPS data. Profiles extracted from the corrected datasets can be used to uncover the detailed surface deformation features in the region of interest.

Profiles extracted perpendicular to the faults of interests can be used to observe the velocity profiles and use that for fault geometry simulation. Our results showed that although our results differed from geodetic and geological observations, however, the differences are minimal compared to the basic model setup and few constraints.

KEYWORDS：Radar interferometry (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar), surface deformation, fault slip

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，也讓臺灣成為世界上地震頻率最高的地區之一，甚至在過去的一百年中發生過 7 次芮氏規模超過 7 以上的大地震。除此之外，地狹人稠的臺灣也是全世界人口密度最高的地區之一，根據經濟部中央地質調查所於 2012 年公布之全臺 33 條活動斷層資料，大部分的人口都居住在活動斷層主要分布的西部平原、西部麓山帶前緣與花東縱谷等地區。

為此，地調所已經在過去多年執行了斷層活動性觀測研究之計畫，如：民國 91–95 年「**地震地質調查及活動斷層資料庫建置**」計畫、民國 96–99 年「**地震地質與變動潛勢分析**」計畫、民國 98–101 年「**斷層觀測性研究第二階段–斷層監測與潛勢分析研究**」計畫、民國 102–105 年「**斷層觀測性研究第三階段–斷層整合性觀測與潛勢分析**」計畫與民國 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**」計畫等，目前也持續推動相關計畫進行，如：本期的「**重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估**」計畫與本計畫，期望透過這些計畫逐步累績於活動斷層上設置的全球定位系統（Global Positioning System，簡稱 GPS）、精密水準測線與 PSInSAR 雷達衛星影像技術

之觀測成果，了解地表變形狀況、斷層位置，以及各斷層於間震、同震以及震後的地表變形型態變化，並嘗試建置各種斷層模型，進而推算出間震期的斷層滑移速率與同震及震後的斷層面滑移特性。

地表變形不僅在長期地質作用上造成影響，在臺灣快速以及不等量的地表變形會直接對公共設施與社會安全造成影響。 例如高速公路的安全性（田寮隧道）、高鐵的安全性（雲彰地區）、橋樑的安全性（玉里大橋、七星潭大橋）等都是由於地表變形造成公共設施的損害。 同樣的，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。因此，本計畫著重於利用 PSInSAR 雷達衛星影像技術與 GPS 連續站之觀測結果，並搭配過往的計畫成果，製作斷層模型，試圖獲得觀測區域不同時期之連續的地表變形情形及斷層滑移速率的變化。

1-2 計畫目的

經濟部中央地質調查所於民國 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 PSInSAR 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 PSInSAR 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所上一期的「**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，本計畫規劃於 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」，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，並期望能配合其他地調所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。

此計畫規劃 2 年期程，分別在 110 年度針對南部地區的五條斷層（包含小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、 恆春斷層、車瓜

林斷層等區域）與橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區等重要區域，以及在 111 年度針對嘉南地區十條斷層（包含九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、觸口斷層、木屐寮斷層、六甲斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、口宵里斷層等區域）與南部科學園區、沙崙綠能科學城、臺南都會區等重要區域進行觀測與分析（圖 1-2-1）。

由雷達影像分析結果，配合地調所之 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，本計畫於 110 年度主要達成以下項目：

1. 產製調查區域三個時段的雷達差分干涉變形資料（2014-2016, 2016-2018, 2018-2020）。
2. 利用連續 GPS 站確認雷達資料正確程度。
3. 利用正確雷達資料對調查區域之重點區域的地表變形之時空變化做更深入的了解。
4. 建置活動斷層模型，並據以推估斷層幾何與滑移量。

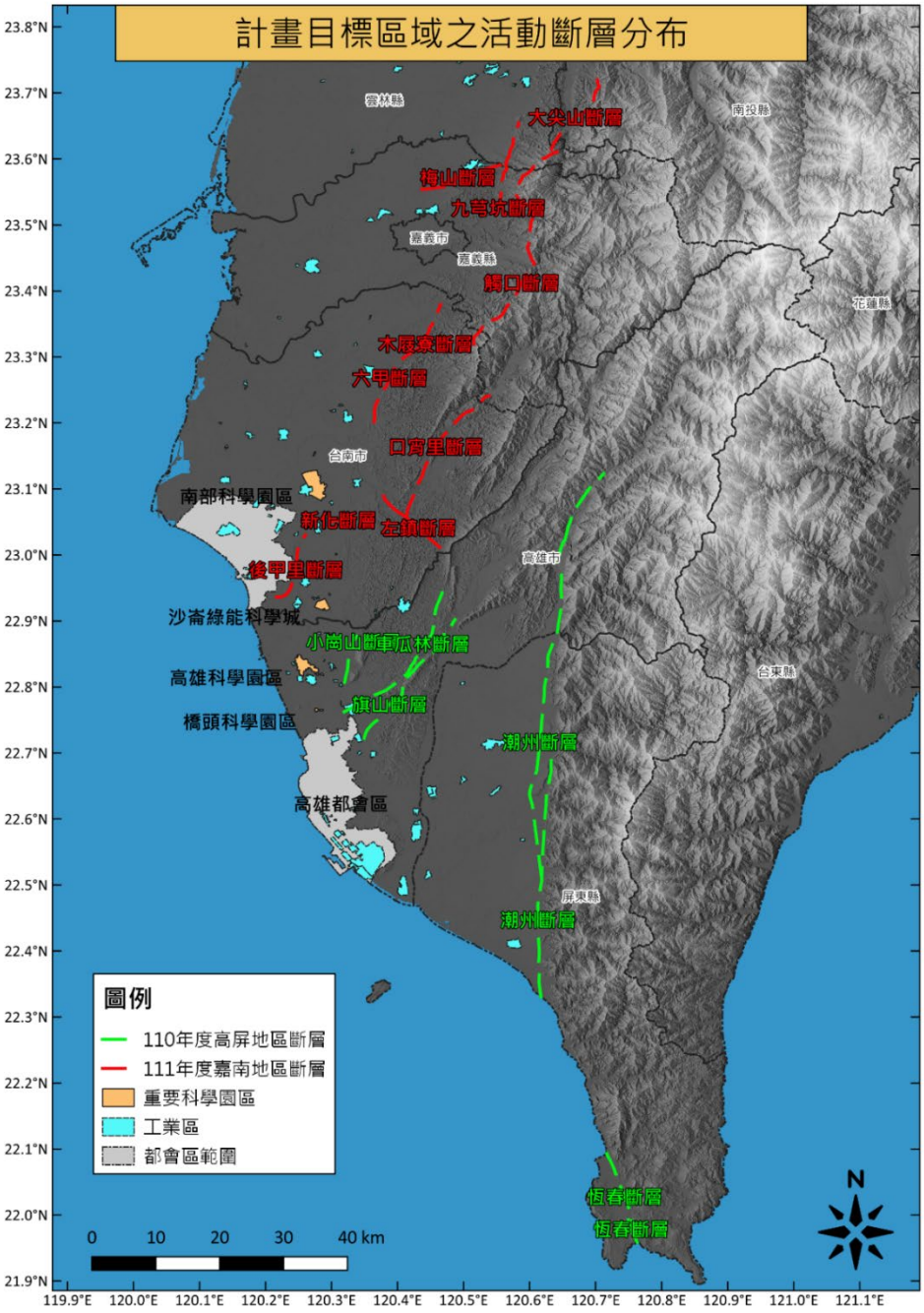


圖 1-2-1：目標區域。110 年度預計針對南部地區綠色標示之斷層以及橘色、灰色與青色區塊標示重要區域做觀測與分析；111 年度針對嘉南地區紅色標示之斷層以及橘黃與青色標示之重要區域做觀測與分析。

Figure 1-2-1：Target area. 2021 targets in southern Taiwan, where faults are labeled in green. Other important areas were labeled in grey and green. 2022 targets the Tainan-Chiayi area, and faults are labeled in red. Orange and green areas are the important areas for observation.

1-3 計畫工作內容概述

1-3-1 合 成 孔 徑 雷 達 差 分 干 涉 技 術

(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 ($\phi x,i$)，再經由相位解算則可得到此時段內的地表變化量 (圖 1-3-1)。真實的雷達波相位差可用以下方程式表示（Wright, 2002）：

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

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

性的像素之相位資訊進行解算，從而萃取出時間序列的地表位移量。這一類時序分析概念的技術，通稱為多時序雷達差分干涉技術。

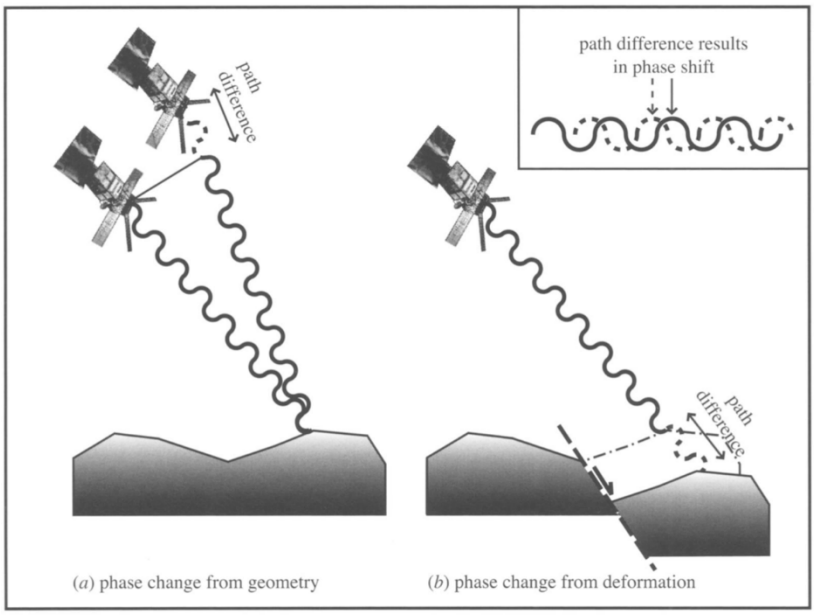


圖 1-3-1：雷達差分干涉影像對的相位變化與地表變形之間的示意關係圖（Wright, 2002）。

Figure 1-3-1：Figure shows how InSAR images detect phase changes resulting from surface deformation.

1-3-2 多時序雷達差分干涉技術(Multi-Temporal InSAR, MTInSAR)

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，表一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 1-3-1 灰階底色所示）為永久散射體差分干涉 (Permanent Scatterer InSAR, PSInSAR™) 技術 (Ferretti et al., 2000, 2001)、短基線長子集 (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)。

表 1-3-1：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。

Table 1-3-1：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
PSInSAR™[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. PSInSAR™ (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)。

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』，但礙於英文寫法已有版權登記，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 1-3-2）。

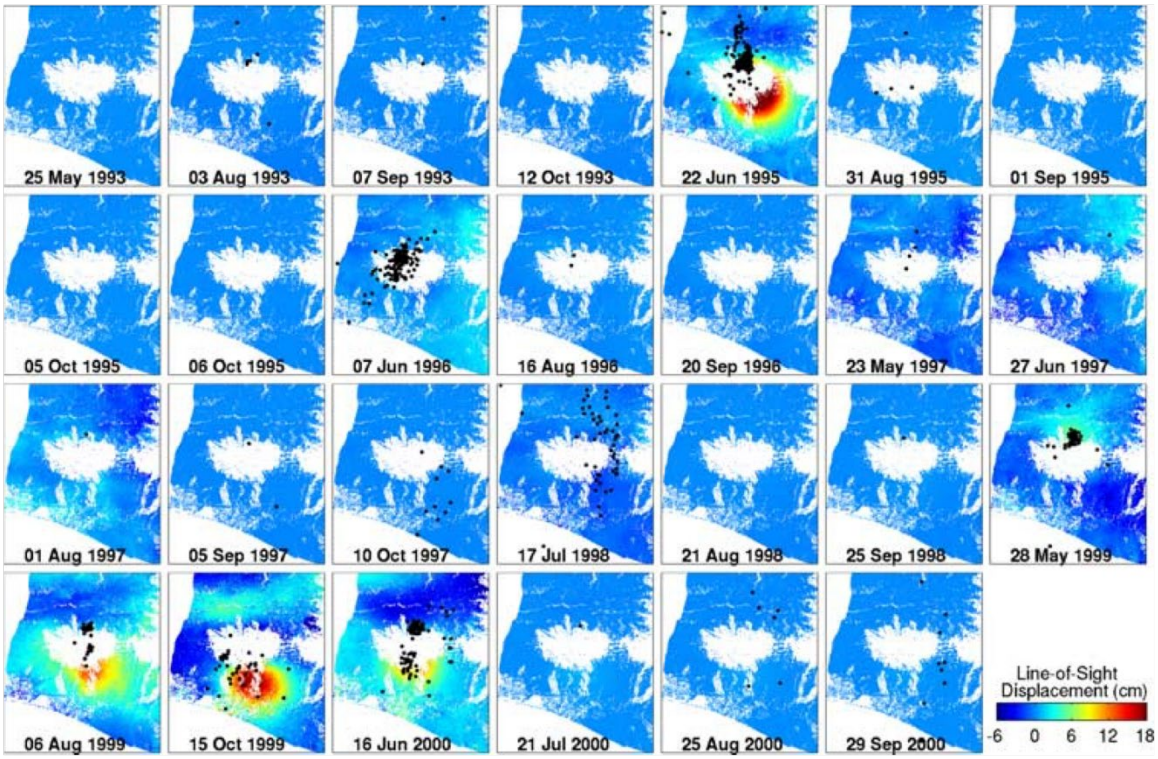


圖 1-3-2：冰島 Eyjafjallajökull 火山周圍的 PSI 時間序列地表變形量 (Hooper, 2008)。

Figure 1-3-2：Figure shows time series of PSI-extracted surface deformation around Eyjafjallajökull Volcano, Iceland.

為了有效監測臺灣西南部的地表變形特性，以及本計畫的重要區域都位在都市地區，因此使用本計畫將使用 StaMPS 的 PSI 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，解算該像素之的地表位移量，獲得傳統差分干涉技術無法觀察的緩慢地表變型區域之活動情形。

1-3-3 資料比對

本計畫採用 GNSS 連續觀測站資料解算分析處理地調所設置及與其它單位交換之 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，並對雷達影像與 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)。 工作內容包括將 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，以及將 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。 此外，也將 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。

針對時間序列的資料，我們選取適當 GNSS 測站進行資料整理、速度值計算，並與雷達影像時間序列值比對。 再萃取重要區域重要點位對其地表變形之時間序列做分析。

本團隊在 PSInSAR 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 PSInSAR 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，本團隊也挑選最適用研究區域之比對方式來確定 PSInSAR 結果的可信度。

本年度研究之南部地區約有近 100 個連續 GNSS 觀測站，算是台

灣地區連續 GNSS 測站密度相對高的區域，然而大部分測站主要集中於西南部平原區域，山區測站較少。因此主要以此 GNSS 測站作為控制參考點，再藉以利用 PSInSAR 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，搭配地調所提供之跨斷層精密水測線也將能增加對於 PSInSAR 結果精度之控制，期望利用現有資料就能發揮最大的效用。

1-3-4 斷層幾何與滑移量估算

地表變形是協助我們了解構造活動性的重要參考資訊，利用雷達遙測與 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。雷達分析技術（PSInSAR）因影像拍攝時間間隔的縮短，也能提供更密集的時序資訊，大大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; 圖 2-3-3），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。

1-4 本年度計畫概述

本計畫使用雷達差分干涉方法，分析南部地區（110 年度）以及嘉南地區（111 年度）可能的地表變形。在處理資料並且減低雷達差分干涉本身的誤差後，我們將雷達資料與地質調查所提供之其他大地測量資料（精密水準測量、GNSS 連續站及移動站資料）對比，找出雷達與 GNSS 之間相關特性與可能原因後，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。儘管地表變形不僅限於斷層活動所導致，如：屏東縣林邊地區的地層下陷，且斷層活動影響範圍也不僅有人口較多的平原地區，如：斷層活動間接導致的邊坡滑動、山崩與地滑等災害，但由於計畫預計使用的雷達遙測技術與 GNSS 技術在植披較密集的山區具有一定限制，計畫所關注的目標也鎖定在斷層的活動範圍，以及周圍鄰近之人口密集區域，如：工業區、科學園區及市鎮都會區，因此本計畫並不會討論地層下陷與邊坡活動等災害。

本計畫由三方偕同團隊進行(圖 1-4-1),由東華大學負責雷達資料規劃產生以及整體計畫統合以及計畫書撰寫與出圖，由中研院地科所負責資料比對，由中正大學負責斷層幾何與滑移量推估。團隊中有良好的橫向溝通與足夠的專業。

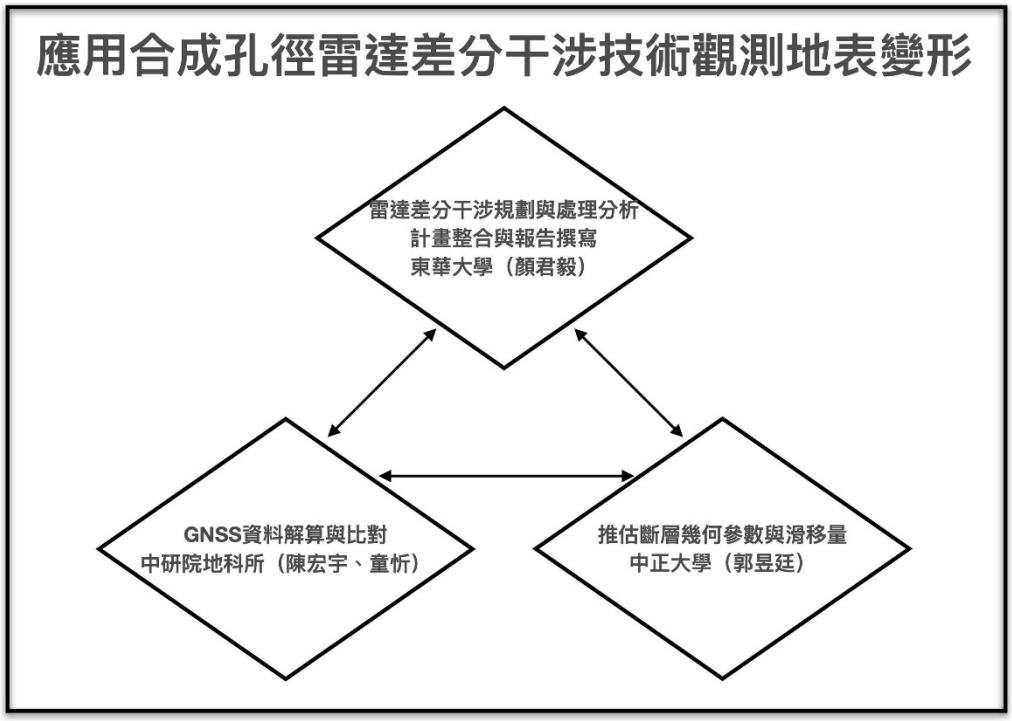


圖 1-4-1：工作團隊與主要工作項目。

Figure 1-4-1： Team members and main topics of focus.

1-4-1 本年度研究區域背景簡介

本年度(110 年度)針對南部地區的五條斷層（包含小崗山斷層、車瓜林斷層、旗山斷層、潮州斷層、 恆春斷層等區域）與橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區等重要區域進行研究圖 1-4-2)。

位於臺灣島西南部的高雄市由東北山地區、中部丘陵區與西至西南部平原區三區地形所組成，屬於臺灣第一高峰的玉山主峰(海拔 3952 公尺)也坐落於高雄市、嘉義縣和南投縣交界處。高雄市境內可分為三個主要地質區：位於東部山區的砂泥質變質岩區，變質程度由西向東增強，從輕度變質泥岩直至東側脊梁山脈帶的硬頁岩、板岩與千枚岩；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。

其中，屬於第一類活動斷層的**旗山斷層**(圖 1-4-3)，為一段面向東的傾斜的逆移斷層，呈東北走向，北起旗山，往南則延伸到燕巢附近，斷層由一個主斷層帶及多個分支斷層帶組成寬約 40-400 公尺的斷層變形帶，其中主斷層的變形帶寬約 9-30 公尺，並截切全新世的砂礫石層(林啟文等，2009)。斷層上下盤變形狀況不對稱，上盤為主要變形側，下盤為非主要變形側，為南臺灣的主要斷層，地表軌跡約 25 公里，通過國道與高鐵路段，並鄰近大社及仁武工業區。大地測量結果顯示旗山斷層有明顯的逆移斷層壓縮量，惟各分支斷層之左移及右移分量仍有歧異(侯進雄等，2003；饒瑞鈞等，2006；Hu et al., 2007；饒瑞鈞等，2008)。

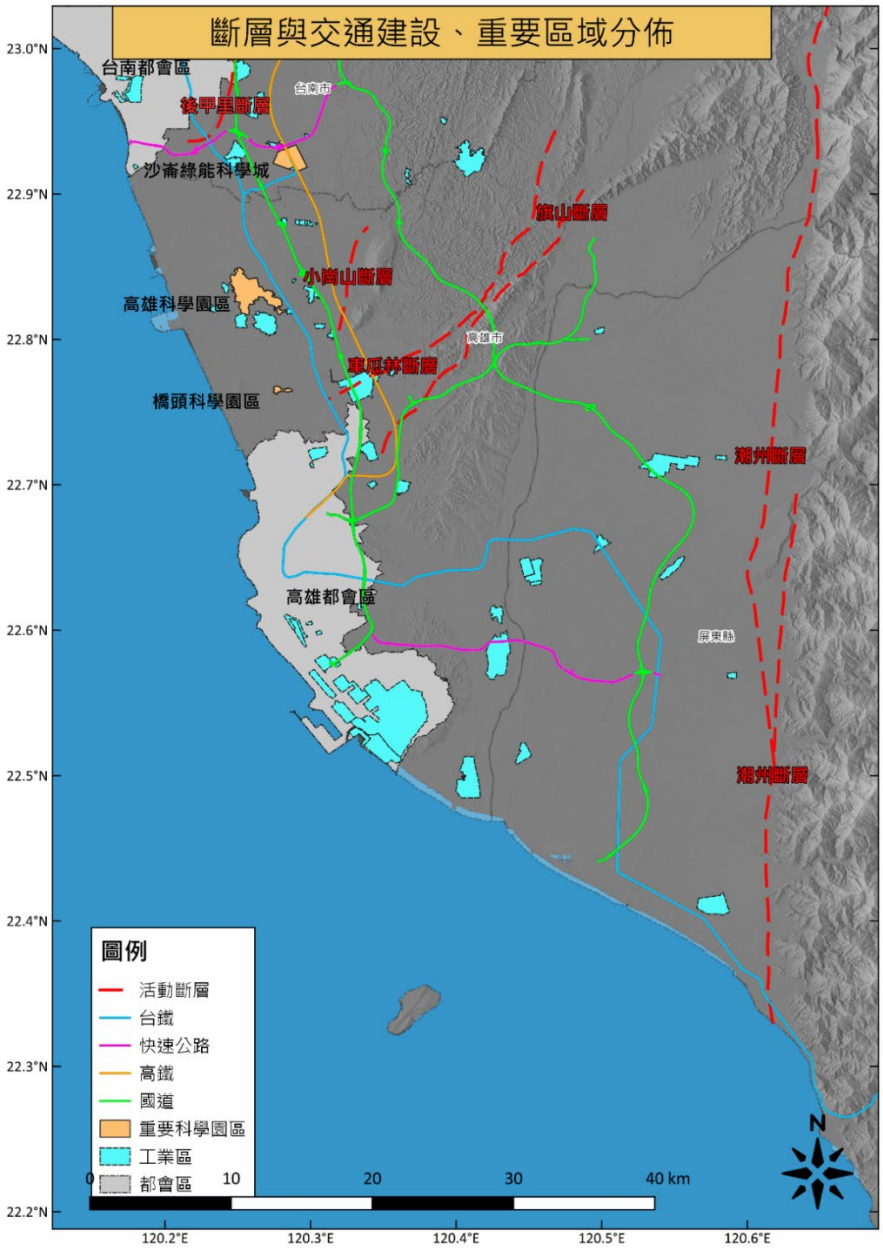


圖 1-4-2：究區域中的道路與斷層分佈情形。紅色線段為研究區域內的活動斷層分佈位置（如圖 1-2-1）。青綠色線段為國道高速公路的路線。藍色線段為臺灣鐵路的行經路線。橘色線段為臺灣高速鐵路的行經路線。紫色線段為快速公路的路線。橘色區塊為重要科學園區。青色區塊為工業區。灰色區塊為都會區。

Figure 1-4-2：Roads and faults in the study area. Red lines depict the active faults, green lines are national highways, blue lines are railroads, orange line is high speed railways, purple lines are general highways. Orange areas are important industrial parks, and green area are industrial districts. Grey areas are metropolitan areas.

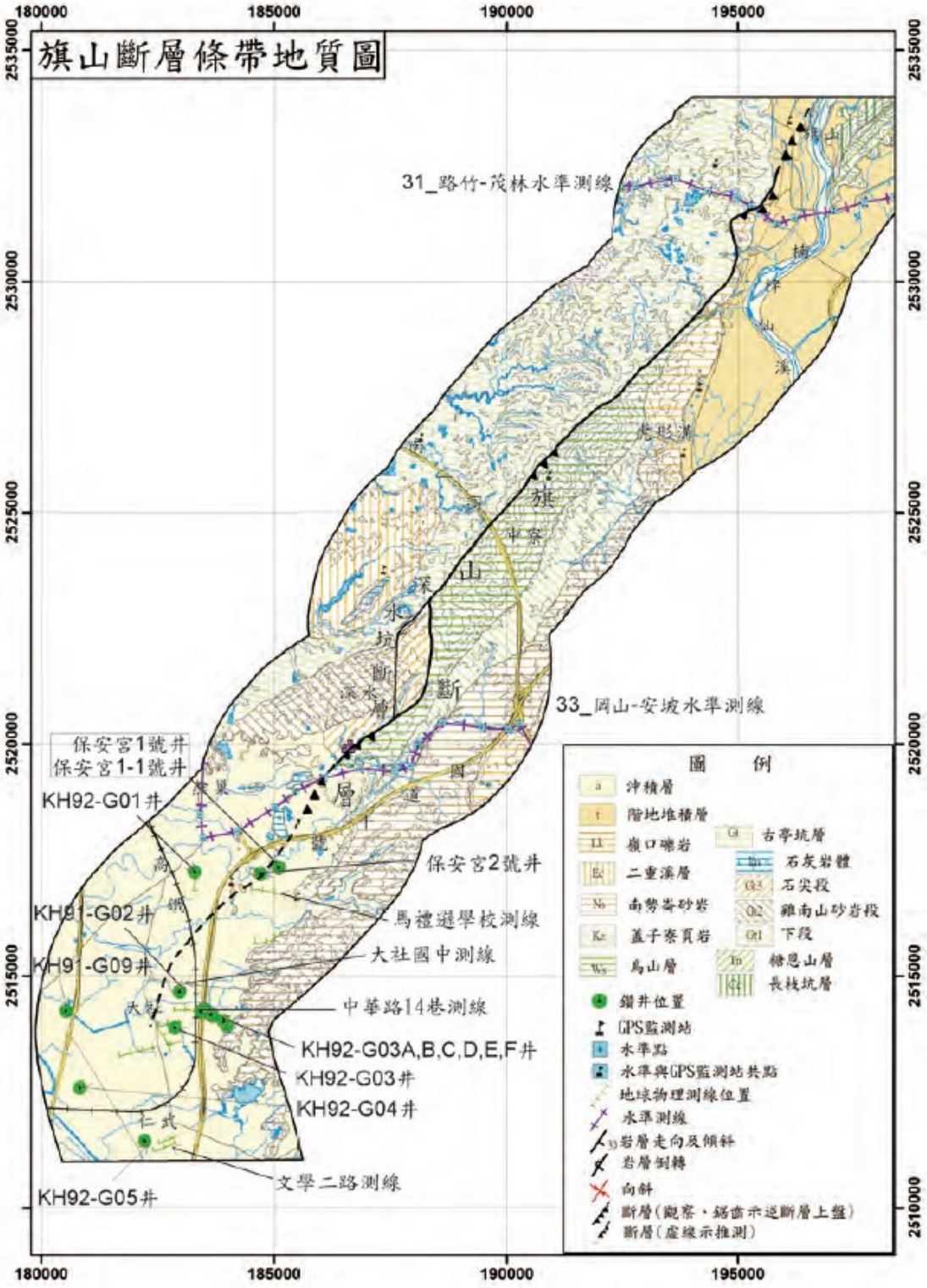


圖 1-4-3：旗山斷層地質條帶圖(林啟文等，2009)。

Figure 1-4-3：Strip Map of the Chishan Fault.

屬於第二類活動斷層的**小崗山斷層**(圖 1-4-4)，可能為一逆移斷層，呈北北東走向，地質鑽探調查顯示地下剪裂面約 35-45°往東傾(宏偉工程顧問有限公司，2012)，由高雄市阿蓮區市區向南延伸至岡山區大庄里，長約 8 公里（林啟文等，2009），通過高鐵路段，並鄰近國道與大德工業區。小崗山斷層於地表雖無明顯之斷層跡，然井下岩芯及地物資料皆顯示此斷層帶於全新世可能有所活動(林啟文等，2009)，陳文山等(2009)由近斷層岩心之碳十四定年估算小崗山斷層之長期淨滑移速率約為 5.7±1.4 公厘/年。近期的大地測量資料(饒瑞鈞等，2008；林啟文等，2009)顯示小崗山線形東側有明顯的高程差變化。

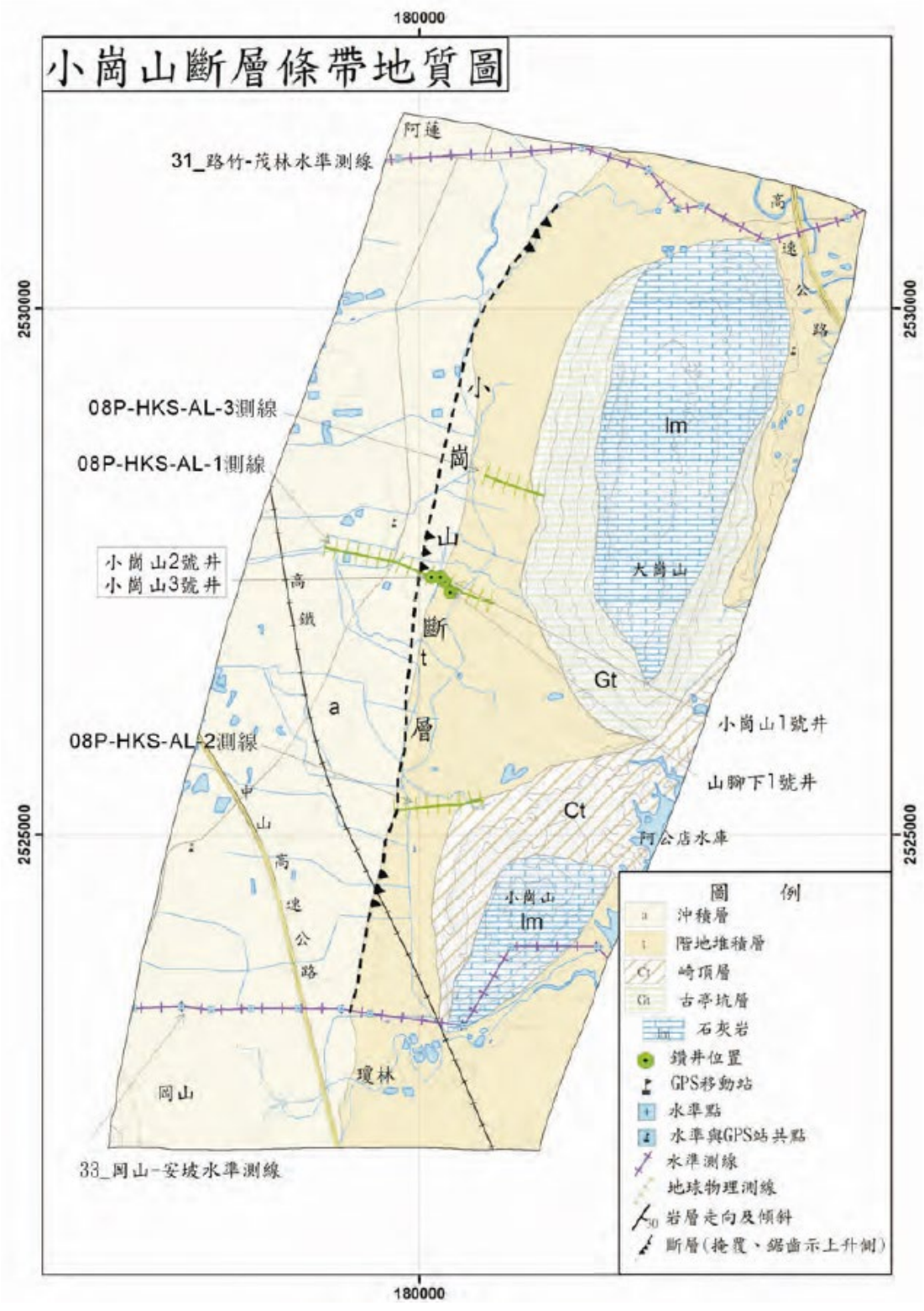


圖 1-4-4：小崗山斷層地質條帶圖(林啟文等，2009)。

Figure 1-4-4：Strip Map of the Hsiaokangshan Fault.

同屬於第二類活動斷層的**車瓜林斷層**(圖 1-4-5)，為一逆移斷層，呈東北走向，野外多處出露斷層帶傾角約 50-80°往東(劉彥求等，2019)，北起高雄甲仙的大廓亭山向西南延伸至崎溜附近，呈北東走向，全長至少 20 公里，於燕巢雞冠山以南不遠處，隱伏於沖積層之下，通過國道、臺鐵與高鐵，且通過橋頭科學園區、中鋼燕巢工業區等。由活動斷層地質調查指出(顏一勤，2020)，井下岩芯於晚更新世晚期至全新世早期(7500 年)出現剪切紋理，顯示斷層曾經活動，然年輕的全新世沖積層目前尚無明顯剪切及錯動紀錄。

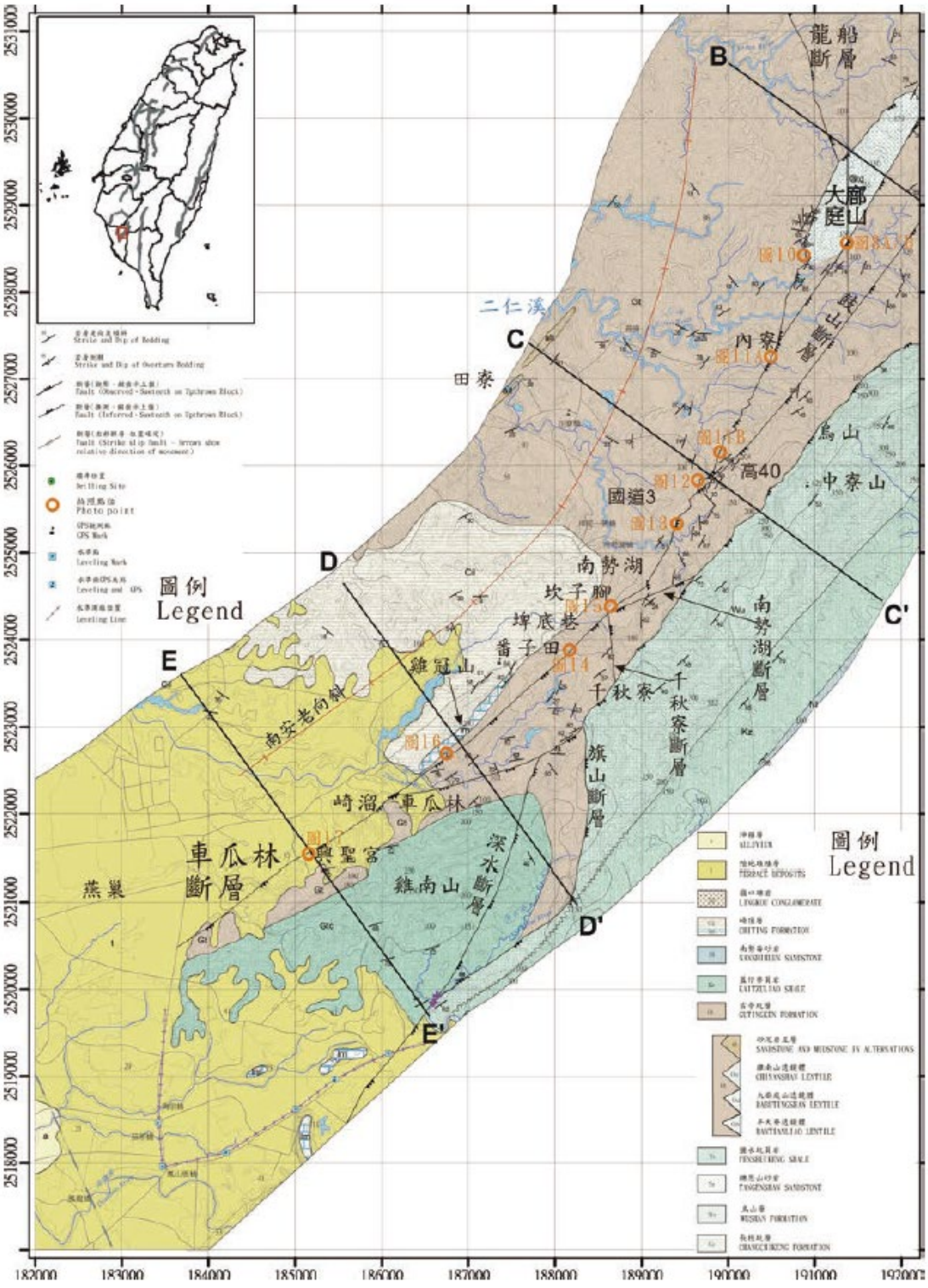


圖 1-4-5：車瓜林斷層地質條帶圖(劉彥求等，2019)。

Figure 1-4-5：Strip Map of the Chekualin Fault.

屏東縣位於臺灣島最南端，西部為臺灣第二大平原區，往東以丘陵及山地為主，由潮州斷層劃分山地與平地分界，海拔最高為北大武山的 3092 公尺，山區地勢由北往南陡降延伸至南部的恆春半島。屏東縣的地質特性主要可分為脊梁山脈與恆春半島兩地質區。分布於屏東縣東側的脊梁山脈地質區，大部分由變質的第三紀泥質沉積岩組成，以硬頁岩、板岩及千枚岩為主；分布於屏東縣南部的恆春半島地質區，大部分以中新世深海濁流沉積岩及不同時代的石灰岩所組成，以砂頁岩互層為主。

屏東縣境內有**潮州斷層**與**恆春斷層**兩條第二類活動斷層存在。其中，位於屏東縣北段劃分平地與山地的**潮州斷層**(圖 1-4-6/7)，北起高雄市六龜區向南延伸至屏東縣枋寮鄉，呈南北走向，是臺灣南部劃分中央山脈與西部麓山帶地質構造區的主要構造線，為一高角度逆移斷層兼具左移特性，其南北延伸約至少 85 公里，並通過臺鐵路段。潮州斷層北段約為南北走向，為階地礫岩層及沖積扇礫石所覆蓋，無出露斷層跡；南段在近地表處造成沖積扇礫石層的撓曲，並出露板岩逆衝於礫石層之上，顯示潮州斷層於更新世晚期內可能有活動。然近期大地測量於此區無顯著的水平及高程差紀錄，尚待較長期觀測資料確認(侯進雄等，2003；饒瑞鈞等，2008；林啟文等，2009)。

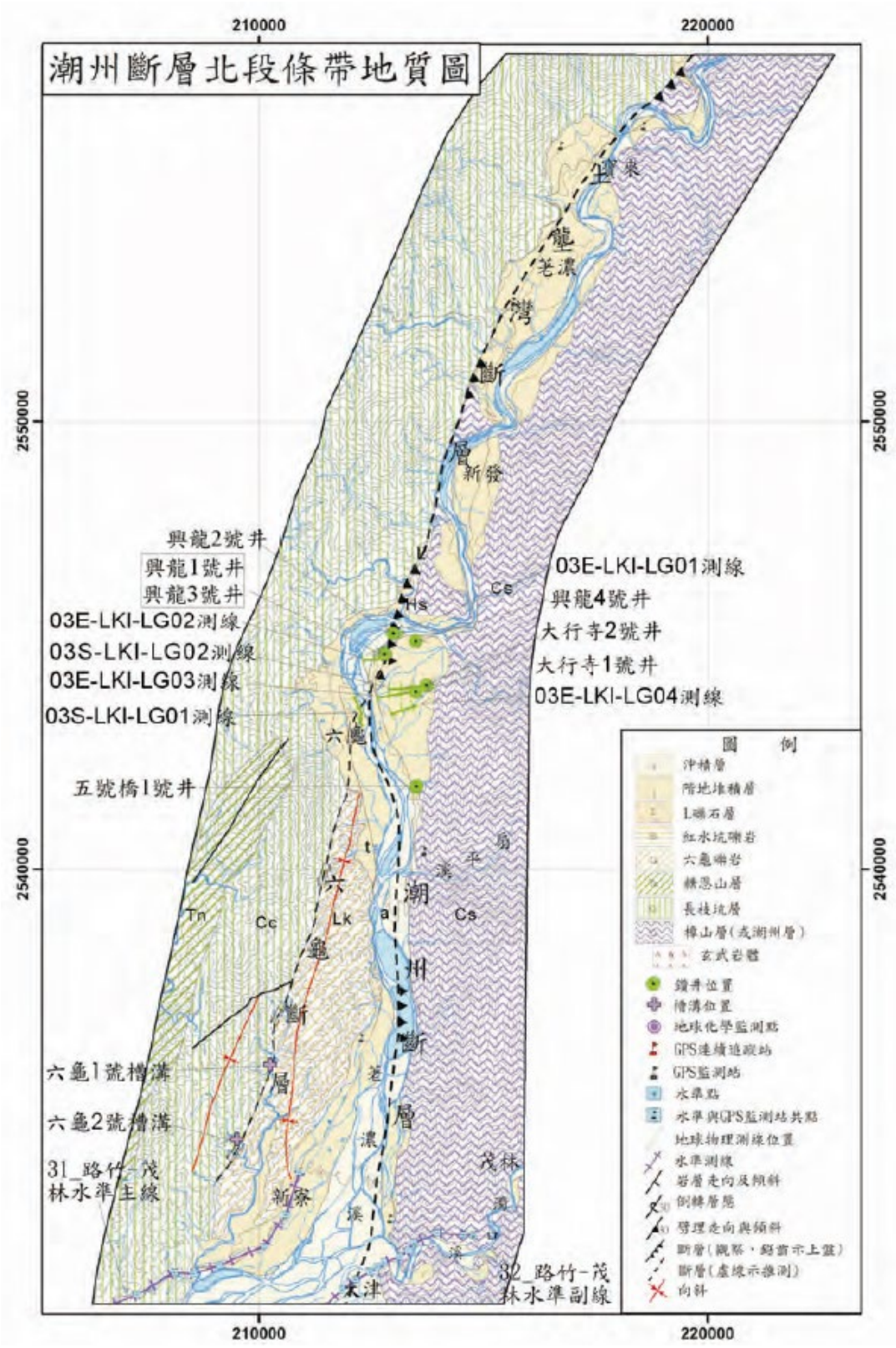


圖 1-4-6：潮州斷層地質條帶圖北段(林啟文等，2009)。

Figure 1-4-6：Strip Map of the Chaochou Fault, north section.

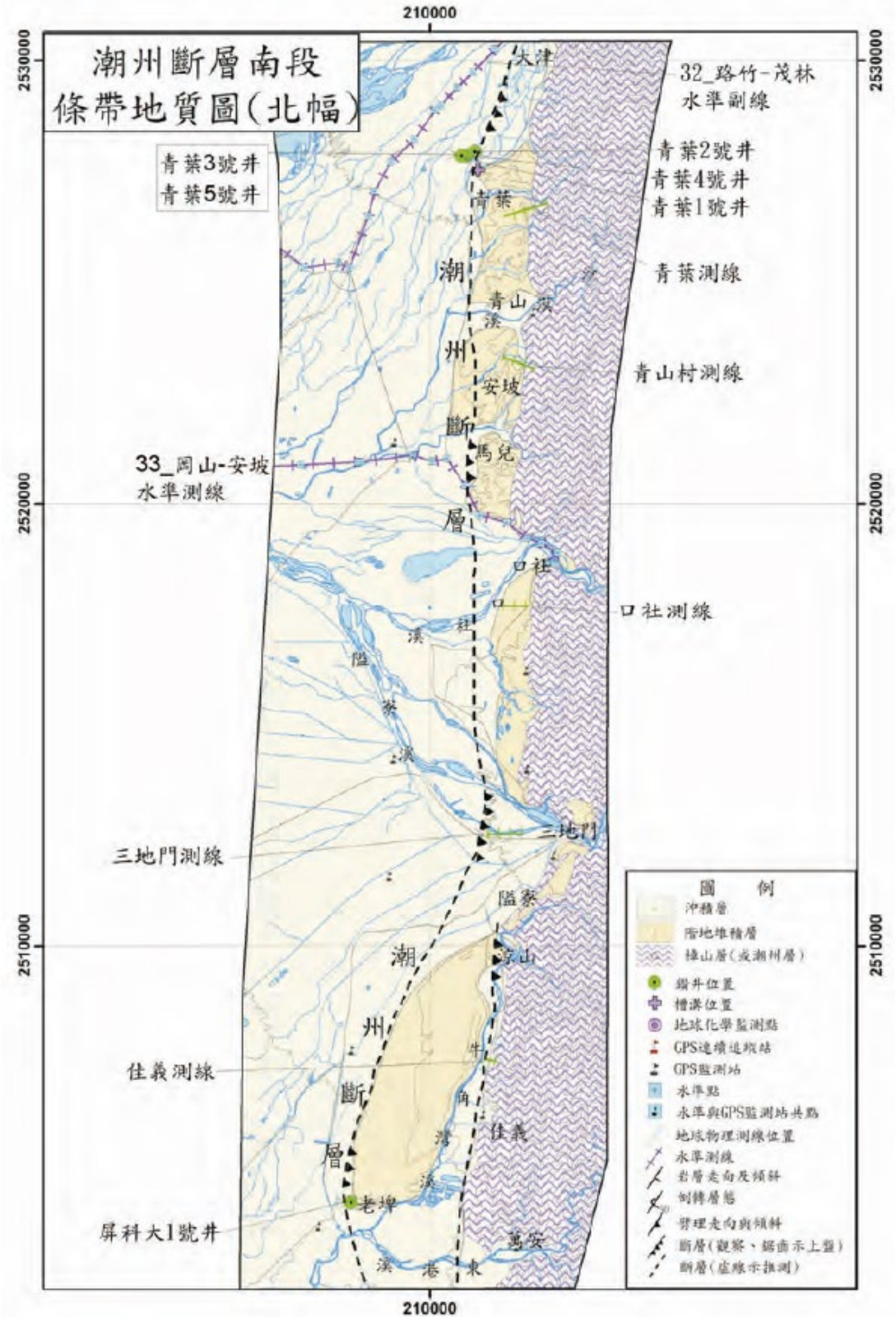


圖 1-4-7：潮州斷層地質條帶圖南段(林啟文等，2009)。

Figure 1-4-7：Strip Map of the Chaochou Fault, south section.

恆春斷層(圖 1-4-8)北起車城鄉海口向南延伸至恆春鎮附近，約在南灣北側往南出海，為一逆移斷層，斷層在地表呈北北西-南南東方向，陸地上長度約 16 公里，地質鑽探顯示地下剪切面約為 45°往東傾(中興工程顧問股份有限公司，2012)。近期的大地測量資料顯示，恆春斷層兩側無明顯位移差異(陳建良等，2005；饒瑞鈞等，2008；林啟文等，2009)，井下岩芯及地形構造顯示，此斷層雖切穿更新世石灰岩，但於全新世無明顯的活動性(陳文山等，2004)。另一方面，恆春西台地的傾斜作用相當明顯，顯示西側外海可能有逆移斷層的存在(林啟文等，2009)。

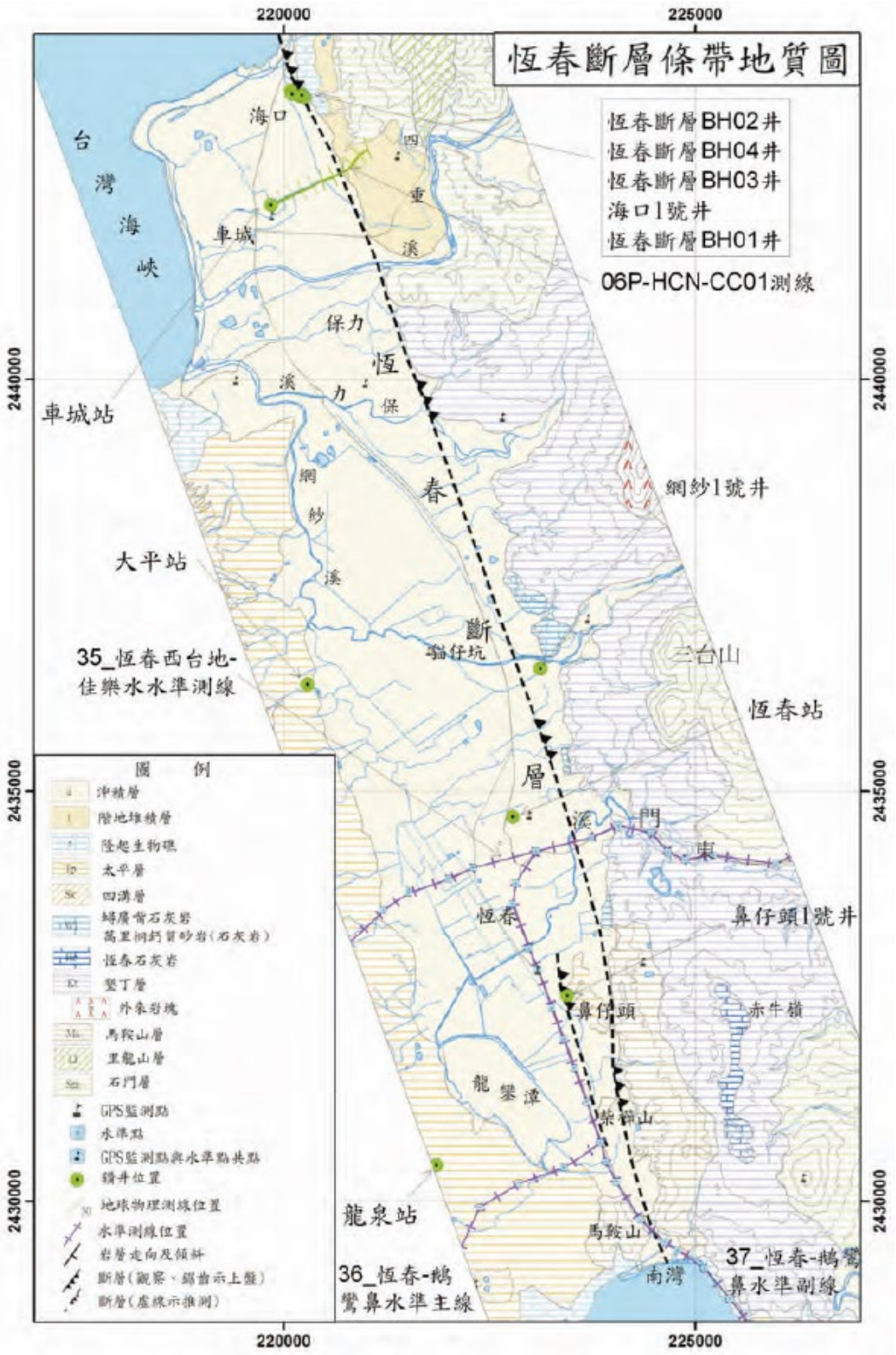


圖 1-4-8：恆春斷層地質條帶圖(林啟文等，2009)。

Figure 1-4-8：Strip Map of the Hengchun Fault.

上述說明的活動斷層分布都相當鄰近人口較多的平原區，且部分鄰近工業區、科學園區與高雄都會區等重要區域，因此皆需長期關注地表變形以及其可能帶來的影響。圖 1-3-2 顯示可能會有地表變形之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。

1-4-2 本年度工作項目

- 本年度工作針對南部地區的五條斷層（包含小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、 恆春斷層、車瓜林斷層等區域）與橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區等重要區域，利用雷達差分干涉的方法觀察地表變形，包含 2014–2016 年度、2016–2018 年度及 2018–2020 年度之雷達差分干涉處理結果。另外，我們會在 2007–2011 年間選用一段時間的 ALOS 雷達衛星影像將重要區域監測之時間跨距拉長，以參照觀察長期變化狀況與較短時間變化狀況的異同。
- 在雷達資料與 GNSS 與水準測量比對後，在分析區域中至少北、中、南各一條剖面，利用斷層反演模型推估斷層滑移速率。
- 針對研究區域內所有 GNSS 連續站附近做時間序列之分析與比對，確認兩類資料之異同，並於重要區域與地點分析其地表變形時間序列。

1-4-3 本年度計畫交付工作項目

- 雷達速度場與 GNSS 速度場的比較。
- 垂直斷層方向至少三條之剖面之速度變化。
- 三條剖面經過之斷層幾何與滑移量分析。
- 選擇研究區域部分連續 GPS 站做時間序列分析
- 針對重要重要地點做地表變形之時間序列分析。
- 整合為一張圖資的分析結果，其中包含視衛星方向年平均變動量圖、三條剖面顯示斷層滑移速率，及大地測量觀測之時間序列成果。
- 於期末簡報前在中央地質調查所舉辦一次教育訓練，時間 6 小時以上。

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。在 2016 年 2 月 6 日，高雄美濃地區發生了芮氏規模 Mw 6.4 的美濃地震，造成臺南市區許多房屋損毀和土壤液化的災害。當時的同震地表變形與災害判釋的研究已有許多成果產出(cite)，但是對於地震前後、甚至長期間震時期的地表變形卻甚少探討，因此透過 PSI 技術針對臺灣西南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。

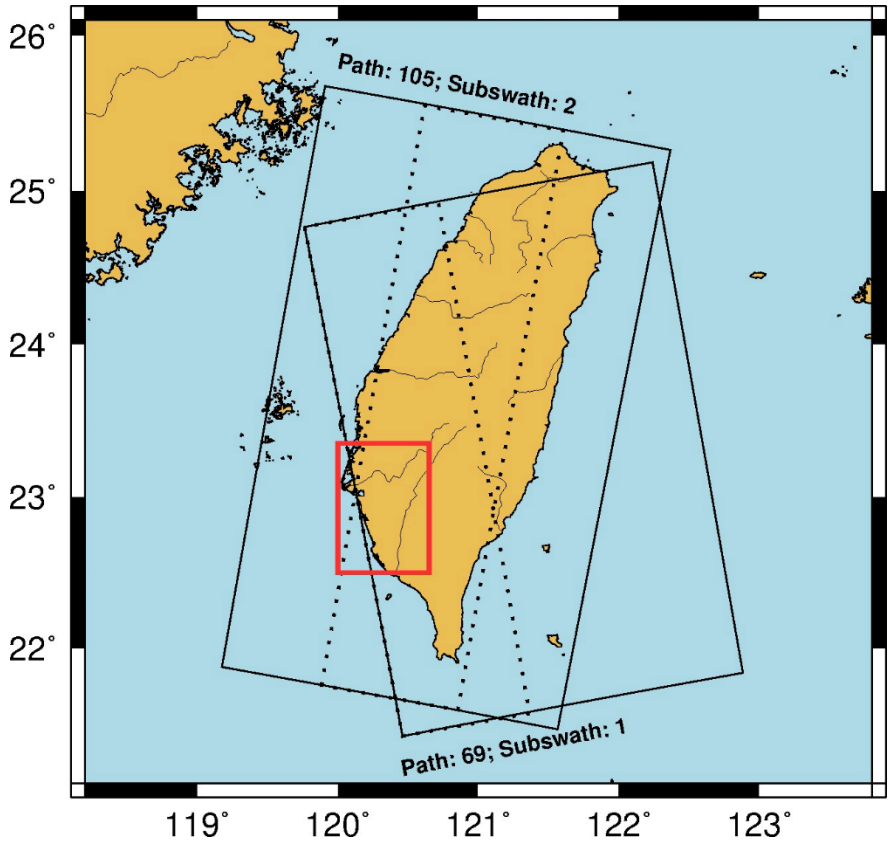


圖 2-1-1：Sentinel-1 衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。

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

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 2-1-1)，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 2-1-1。此外，根據美濃地震發生的時間點，以及西南部斷層的活動特性，將影像處理的時間段分為三個階段：(I) 2014-2016 震前的地表位移、(II) 2016-2018 震後的地表位移、(III) 2018-2020 震後回歸至間震的地表位移，探討不同階段的地表變動量。

表 2-1-1：Sentinel-1 衛星影像資訊。

Table 2-1-1 : 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 - 2016	升軌 (Path: 69)	TOPS	12天	Subswath: 1
	降軌 (Path: 105)	TOPS	12天	Subswath: 2
時間段 (II) 2016 - 2018	升軌 (Path: 69)	TOPS	6-12天	Subswath: 1
	降軌 (Path: 105)	TOPS	6-12天	Subswath: 2
時間段 (III) 2018 - 2020	升軌 (Path: 69)	TOPS	6-12天	Subswath: 1
	降軌 (Path: 105)	TOPS	6-12天	Subswath: 2

2-1-1 永久散射體雷達差分干涉技術 (PSI) 的基本概念

永久散射體需具備穩定的雷達波散射特性，於地面上能夠成為永久散射體的物體通常有表面不容易改變且對雷達波的散射不隨時間而改變的特性，如建築物、裸露岩石、道路等物體，而由這類點位所獲得的訊號可信度超過湖泊、植被等其他區域，因而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。從振幅資訊的角度來看(圖 2-1-2)，強振幅的散射體(Strong Scatterer, Ss)和弱振幅的散射體(Weak Scatterer, Sw)，假設遭受到一致的雜訊(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)。

從圖 2-1-2 所示，可以發現 Rw 訊號的徑度改變相較於 Rs 來得大，代表雜訊干擾對於強振幅散射體的影響比例較小，如能找出這些訊號，則可獲去較為可信的雷達振幅資訊。另外，在相位資訊的角度來看(圖 2-1-3)，當一個像素(pixel)中有一個強反射體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，如：建物、大石頭。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。

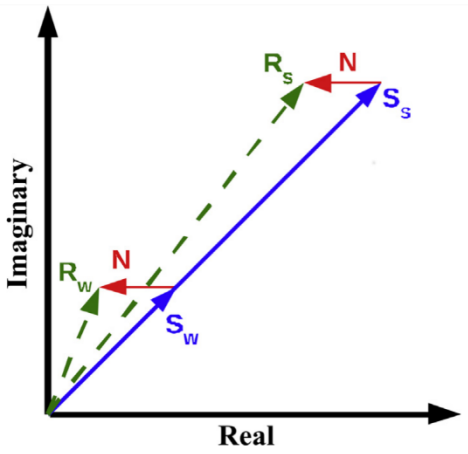


圖 2-1-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。(Osmanoglu et al., 2015)
Figure 2-1-2 ：Scatterer can generates various scatter and noise with different amplitudes. (Osmanoglu et al., 2015)

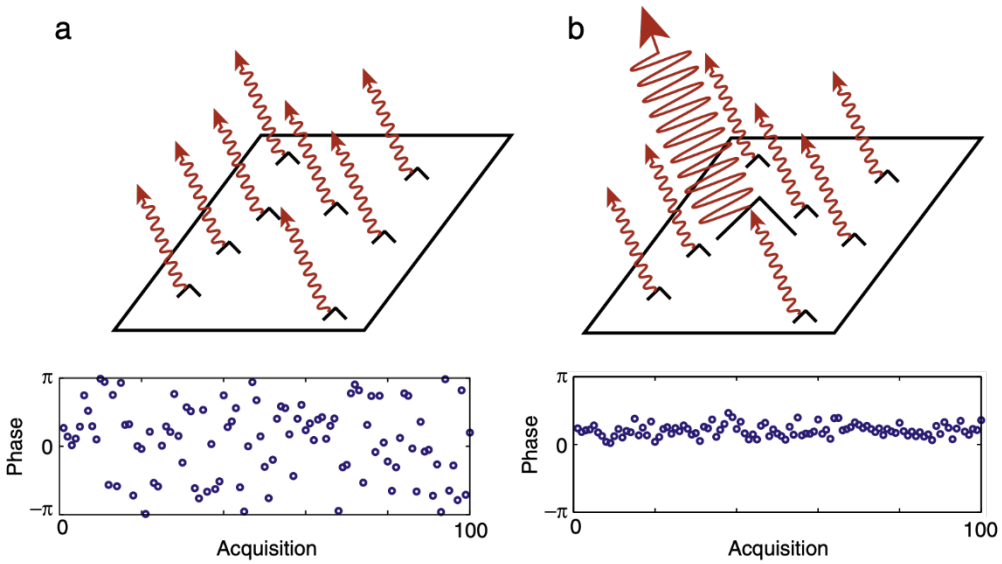


圖 2-1-3：永久散射體對相位的影響示意圖。(a)一般散射體所反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(b)一個像素之中有一個好的永久散射體時，反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(Hooper et al., 2012)

Figure 2-1-3：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：

$$D_A = \frac{\sigma}{\mu_A} \quad \text{(公式 2)}$$

其中 DA 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，μA 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($\bar{\phi}_{x,i}$)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($\hat{\phi}_{\epsilon,x,i}$)。當 PSC 的相位差($\phi_{x,i}$)減去平均的相位差($\bar{\phi}_{x,i}$)和 DEM 誤差($\hat{\phi}_{\epsilon,x,i}$)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：

$$\gamma_x = (1/N)\sum_{i=1}^{N} exp\sqrt{-1}(\phi_{x,i} - \bar{\phi_{x,i}} - \hat{\phi_{x,i}}) \quad \text{(公式 3)}$$

其中 為第 x 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-sign, 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 PSI 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 PSI 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渡反射訊號，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 PSI 和 SBAS 之成果整合(Hooper, 2008)，另外，當面臨大氣干擾的問題時，可以直接加裝 TRAIN(2015)演算技術在 StaMPS 之中，藉由大氣模式所產生之資料修正大氣效應。

本計畫的雷達影像處理流程主要分為兩個階段，第一階段是雷達差分干涉處理；第二階段是 StaMPS 技術解算 PSI 成果。在第一階段將使用 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 2-1-4 顯示第一階段的流程圖。

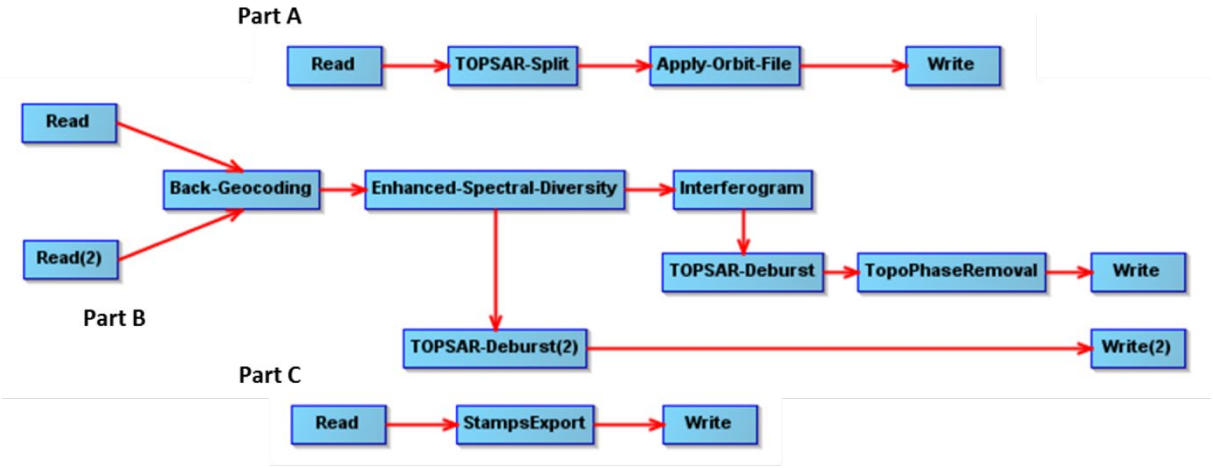


圖 2-1-4：雷達影像處理流程第一階段－雷達差分干涉處理流程圖。本階段主要工作為使用 SNAP 軟體處理 Sentinel-1 影像的差分干涉，並且將其輸出為 StaMPS 軟體所能使用的檔案格式。A 部分為 Sentinel-1 影像的前處裡部分。B 部分為雷達差分干涉的處理部分。C 部分為影像輸出為 StaMPS 軟體格式的處理部分。(修改自 Foumelis et al., 2018)

Figure 2-1-4：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.

第二個階段將使用由 Hooper 等人(2004, 2007, 2008)所開發的 StaMPS 軟體，進行 PSI 的分析與解算。StaMPS 的處理流程大致可分為三個部分。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。

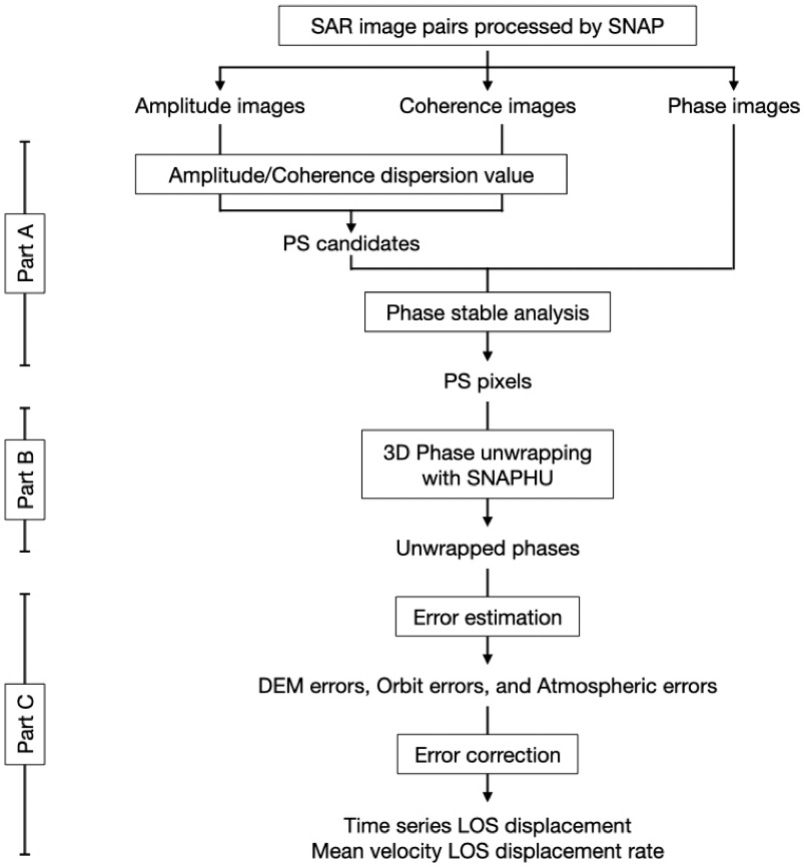


圖 2-1-5：雷達影像處理流程第二階段－PSI 處理流程圖。本階段主要工作為使用 StaMPS 演算法求得研究區域內地表變形的 PSI 時間序列與平均速度場之成果。

Figure 2-1-5：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

1. 雖然 PSI 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。因此當遭遇這樣的問題時，本計畫運用短基線子集合技術進行時間序列之分析，以利交互驗證 PSI 之結果。
2. 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。

2-2 GNSS、水準測量與雷達差分干涉資料對比

2-2-1 工作內容概述

預計選擇部分 GNSS 連續觀測站資料解算分析：處理地調所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 2-2-1)。

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 2-2-2)。

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。

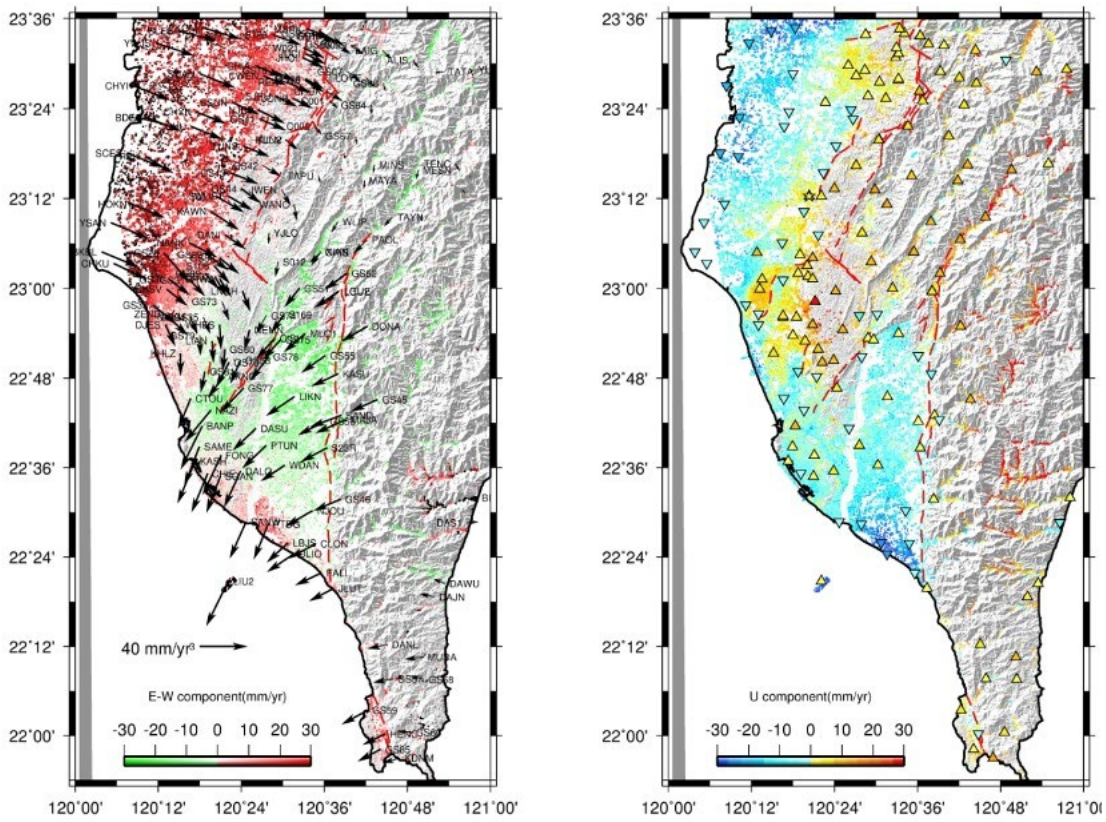


圖 2-2-1：SENTINEL-1 東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續 GNSS 測站水平方向移動速率。圓圈為連續 GNSS 測站垂直方向移動速率。

Figure 2-2-1：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.

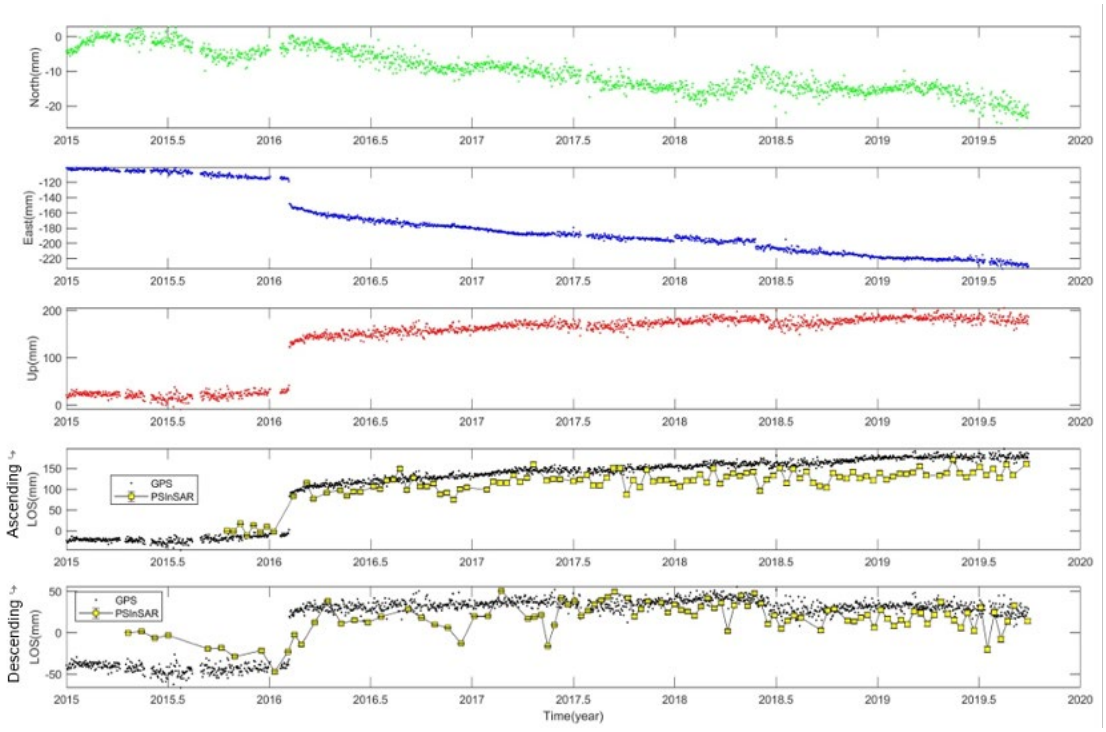


圖 2-2-2：SENTINEL-1 (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9) 雷達影像與 GNSS 測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GNSS 三方向時間序列；黑色為 GNSS 投影至視衛星方向。黃色方型為雷達影像時間序列。

Figure 2-2-2：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 2-2-3)。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：

1. 在 International GNSS Service(IGS)網站上獲取相應觀測日的精密衛星軌道、精密衛星時鐘改正、衛星掩蔽信息及有關地球的時間、極移、旋轉和極軸方向等資料。這些資料在數據處理中當作已知，不再進行解算。
2. 採用精密單點定位方法對本地網各觀測日的所有站點進行單獨處理，獲得各點的單日座標解，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。

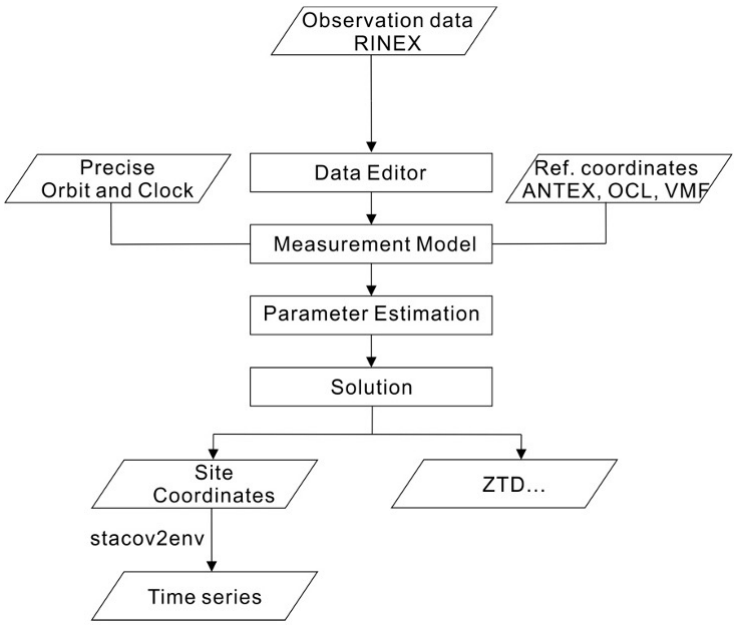


圖 2-2-3：GipsyX 軟體處理流程。

Figure 2-2-3：GipsyX processes.

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)：

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

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。

2-3 跨斷層之垂直速度剖面分析

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 2-3-1）。

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 2-3-2），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。如圖 2-3-2，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；表 2-3-1），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 2-3-3），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 跨斷層之垂直速度剖面分析

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，針對南部地區內之重點斷層，各選擇北、中、南各一條垂直於重點斷層走向之剖面，其長度涵蓋斷層兩側各兩公里，將變形速率投影於剖面上，分別進行同震、間震模擬，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。

表 2-3-1：中興工程顧問社彙整南部斷層參數。

Table 2-3-1：Fault parameters in southern Taiwan compiled by Sinotech Engineering Consultants Inc..

斷層名稱	傾角(degree)	斷層底部深度(km)
小崗山斷層	45.0	10.0
旗山斷層	60.0	13.0
潮州斷層	60.0	17.5
恆春斷層	75.0	20.0

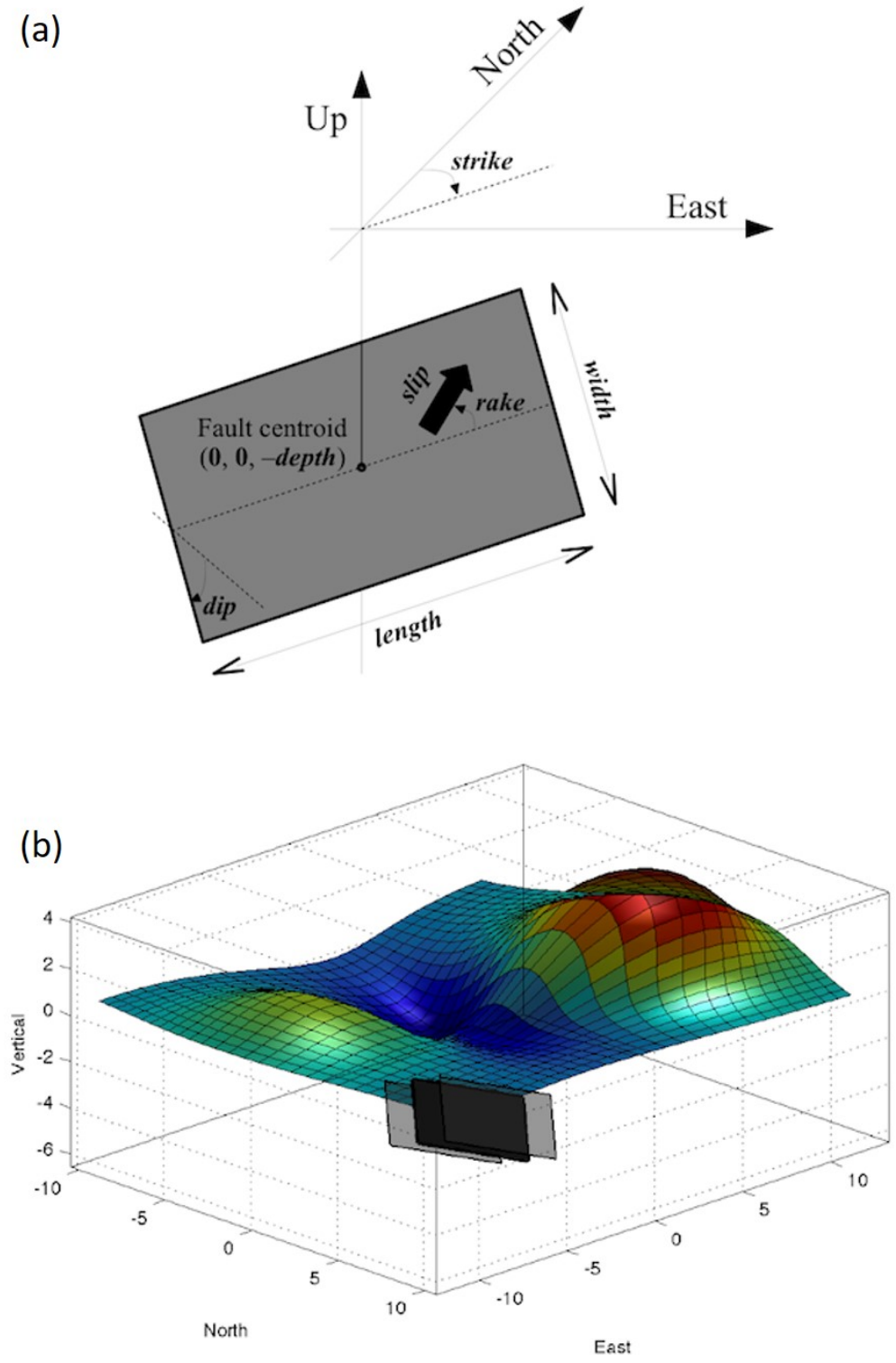


圖 2-3-1： (a) 斷層幾何參數，(b)由圖(a)提供的斷層幾何參數與滑動量，經過彈性半無限空間錯動理論計算的地表變形（Okada, 1985）。

Figure 2-3-1：(a) Fault parameters; (b) parameters from (a) can be fed into Okada model.

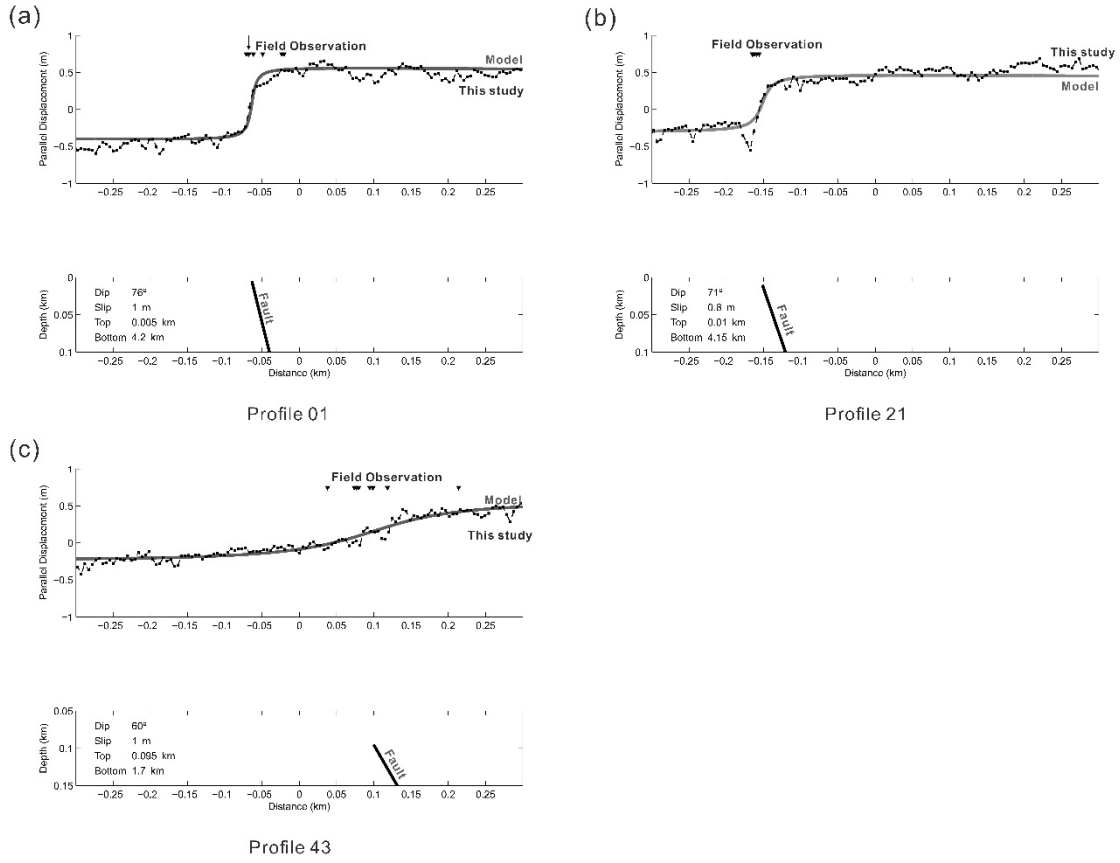


圖 2-3-2：藉由在空間上連續的地表變形資訊，採用彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992），推估斷層參數（Kuo et al., 2019）。

Figure 2-3-2：Using continuous deformation information in Okada model to calculate fault geometry.

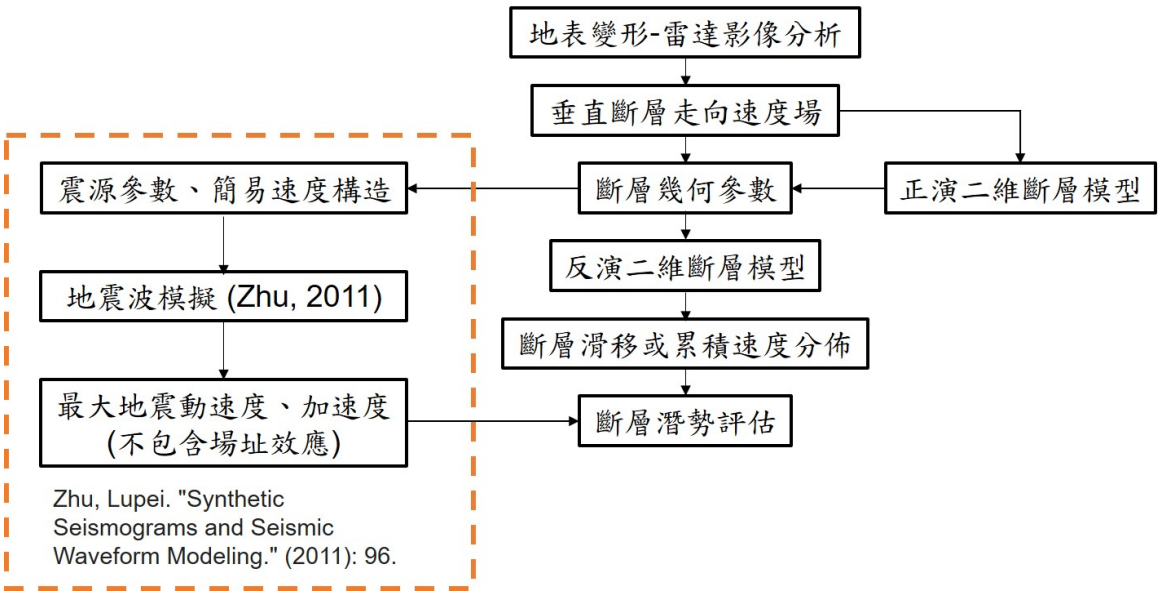


圖 2-3-3：工作流程圖。由雷達影像分析所獲得之速度場，透過簡易模型探討斷層滑移或累積分佈，進而評估斷層潛勢。而完整的斷層幾何參數也可與震源參數、簡易速度構造進行地震波模擬，以求得最大地震動速度與加速度。

Figure 2-3-3：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.

第三章、高屏地區雷達資料與其他大地測量觀測資料的比對

在這個章節中，我們呈現了雷達差分干涉資料與其他大地測量資料的比對。 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。 由於採用於對比的資料的不同,也會有不同的比對結果出現,除了可以針對資料品質做探討之外,也可能可以對調查區域的特性有更多的了解。

我們將這個章節大致份成兩大部分，第一部分是雷達差分干涉資料與 GNSS 連續站的對比。 第二部分則是雷達差分干涉資料與 GNSS 移動站以及水準測站的比對。

本計畫選取 Sentinel-1A 衛星 SAR 影像作為資料分析對象，由於 Sentinel-1B 衛星拍攝範圍並無覆蓋高雄屏東地區，因此僅使用 Sentinel-1A 的影像，其軌道重複週期為 12 天，使用的影像時間自 2014 年 10 月至 2020 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.

	2014-2016	2016-2018	2018-2020
升軌(Ascending)	28 幅	58 幅	86 幅
降軌(Descending)	18 幅	42 幅	84 幅

3-1 GNSS 連續站與 PSInSAR 資料比對

我們分別將連續 GNSS 測站時間序列依照 PSInSAR 時間段分為 2014–2016、2016–2018、2018–2020 三個時段，並將調查範圍內的 GNSS 連續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，並且畫在同一張圖上做初步比對（圖 3-1-1 至圖 3-1-6）。

整體而言，第一個時段 2014-2016 受限於 Sentinel-1A 在四月時才發射，待軌道穩定、十月才開始在台灣拍攝。 因此此時段的時間並不似分隔區間那麼長，影像張數相對其他第二、第三時段較少。 這可能是造成此段時間與 GNSS 連續站對比而言相似度較低的原因之一。尤其在 Descending 部分在研究區域中心的部分有一明顯的是衛星方向遠離行為，似乎與構造活動較不相關。Ascending 部分也與後兩個時期的變形行為相當不同，是否是美濃地震前後變形行為真的有如此大的差別，可能有待商確。然而，以 2016-2018 及 2018-2020 兩個時期的比對結果而言，Ascending 部分與 GNSS 連續觀測站的相似度都較高，Descending 部分則在研究區域西北方都有較顯著的差異。

從我們處理流程直接輸出去除衛星軌道以及地形殘差的速度場與同時期的 GNSS 站比對（站位資訊列於圖 3-1-1、圖 3-1-4、圖 3-1-7）的結果，除了第三個時段（2018-2020）降軌資料的斜率差強人意以外，其他資料與 GNSS 連續站的比對結果都非常不理想（表 3-1-1）。這樣的結果確實出乎我們自己意料之外。 根據過去經驗，在台灣其他區域（例如中部）處理類似資料，斜率多在 0.6 以上，而 R^2 也常

常到 0.5~0.6 之間。 也就是說，這樣的雷達資料雖然呈現了相當多的細節，但是整體趨勢卻與大家比較相信、可以估算出誤差值的 GNSS 趨勢不盡相同（圖 3-1-1）。 我們再仔細觀察資料與比對結果後，找出資料處理鏈中可能問題後，重新處理了資料。 經過比對後發現重新處理的資料與同時期的 GNSS 資料比對有相當大的改善。 除了第一時期如前述可能的問題之外，第二時期(2016-2018)、第三時期(2018-2020)的對比都呈現了相當大的進步，改善包含了雷達資料與 GNSS 相似度（斜率）改善程度從大約 40%到 95%，而資料比對離散程度改善從約 70%到超過 200%。 以第三時期升軌資料到達斜率 1 附近、R^2 超過 0.75 的程度（表 3-1-1）。

我們在以下分別敘述資料比對，以及改善狀況。

表 3-1-1： 雷達資料再處理後改善程度對照表。

Table 3-1-1：Slopes and R^2 before and after reprocessing the radar data.

	校正前			校正後					
	軌道	斜率	R^2	斜率	R^2	**校正前**斜率距離理想	**校正後**斜率距離理想	斜率改善	R^2 改善
2014_2016	升軌	0.4683	0.0426	0.264	0.0494	0.5317	0.736	-38.4%	16.0%
	降軌	0.3618	0.1127	0.3028	0.0258	0.6382	0.6972	-9.2%	-77.1%
2016_2018	升軌	0.5069	0.2549	0.7221	0.5004	0.4931	0.2779	43.6%	96.3%
	降軌	0.5094	0.2038	0.7179	0.3548	0.4906	0.2821	42.5%	74.1%
2018_2020	升軌	0.5689	0.2272	1.0213	0.754	0.4311	0.0213	95.1%	231.9%
	降軌	0.7786	0.2924	1.0092	0.5845	0.2214	0.0092	95.8%	99.9%

3-1-1 校正前雷達資料

3-1-1-1 2014-2016 年

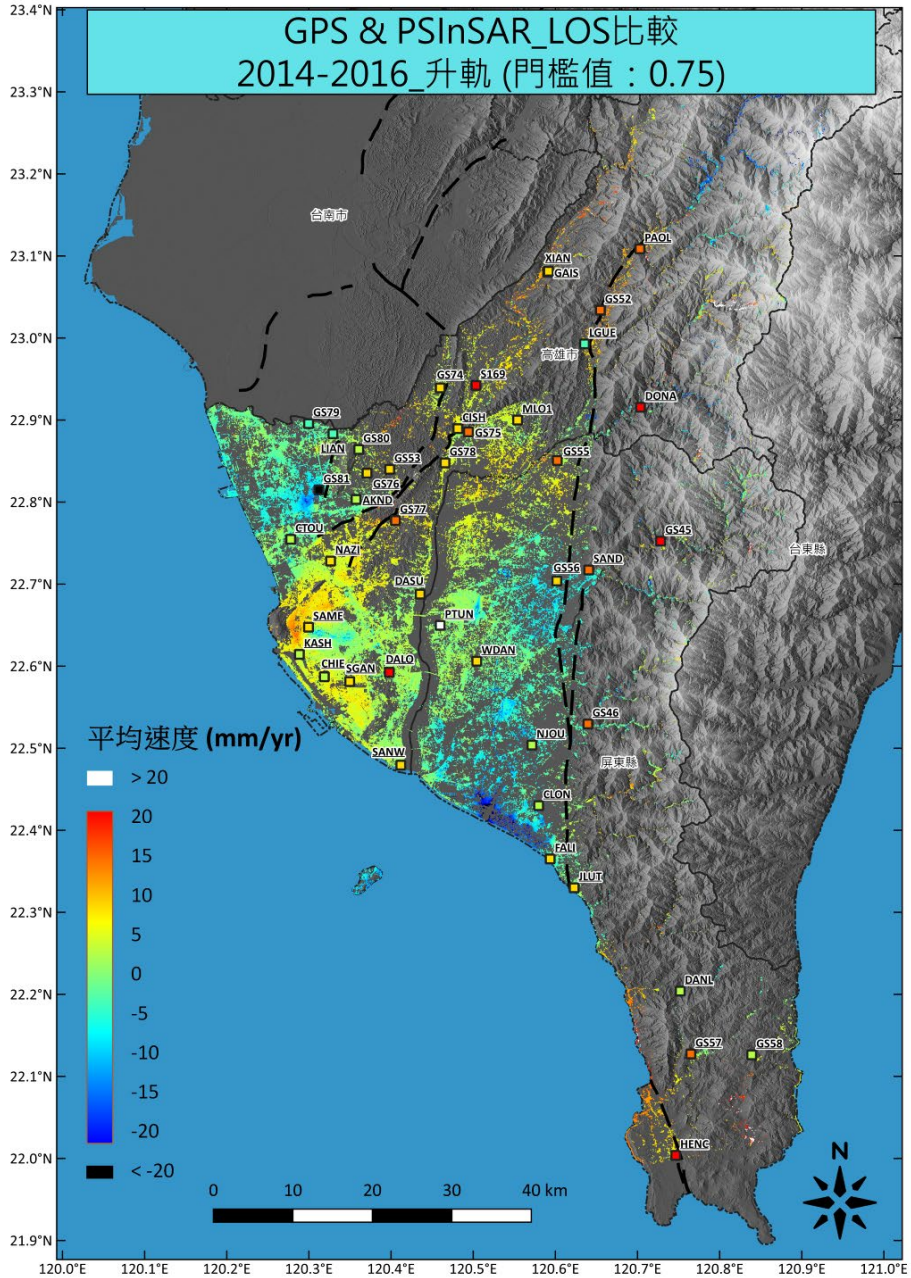


圖 3-1-1：2014-2016 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-1：2014-2016 Ascending comparison between PSI and GNSS data.

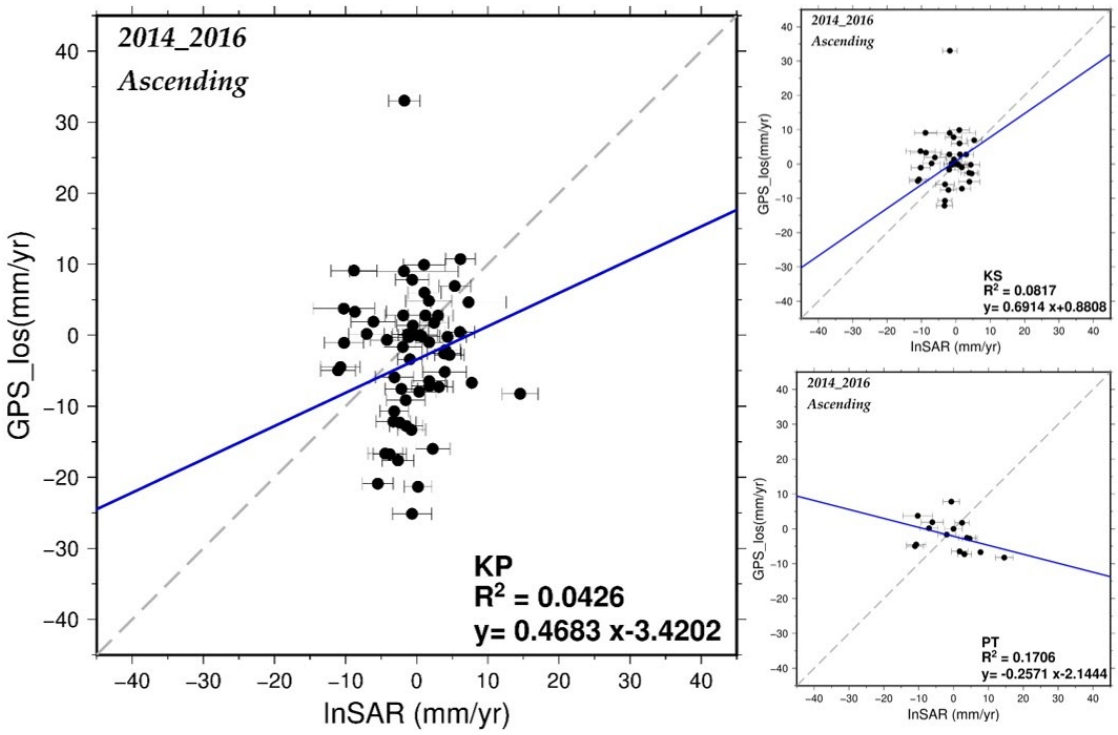


圖 3-1-2：2014-2016 Ascending 雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-2：2014-2016 Ascending comparison between PSI and GNSS data.

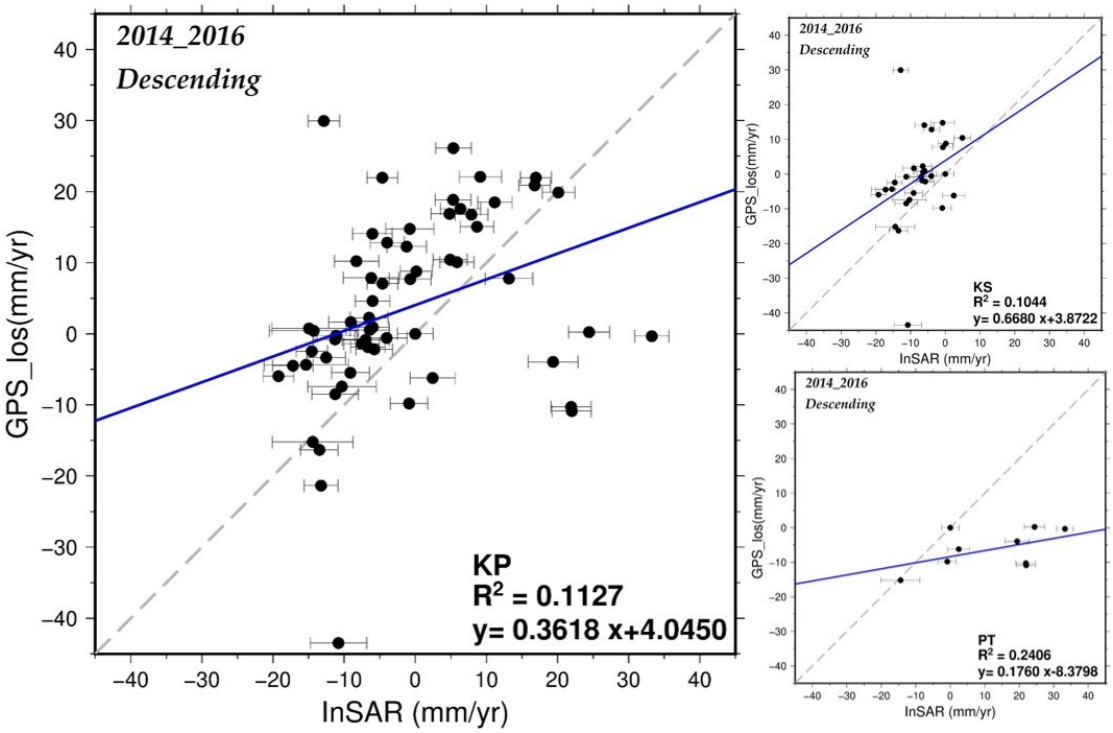


圖 3-1-3：2014-2016 降軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-2：2014-2016 Descending comparison between PSI and GNSS data.

第一時期 2014-2016 升軌雷達資料與 GNSS 資料對比(圖 3-1-1)，不管是斜率或是 R^2 的狀況都不如預期（圖 3-1-2）。 同樣的降軌資料（圖 3-1-3）狀況更是雜亂。 然而我們在這些資料中，觀察到離散的點通常都聚集在某些區域，我們先嘗試將高雄與屏東地區分開觀察資料對比情形。 分開後，在視覺上對比的線性較為明顯（圖 3-1-2、圖 3-1-3 右）。

3-1-1-2 2016-2018 年

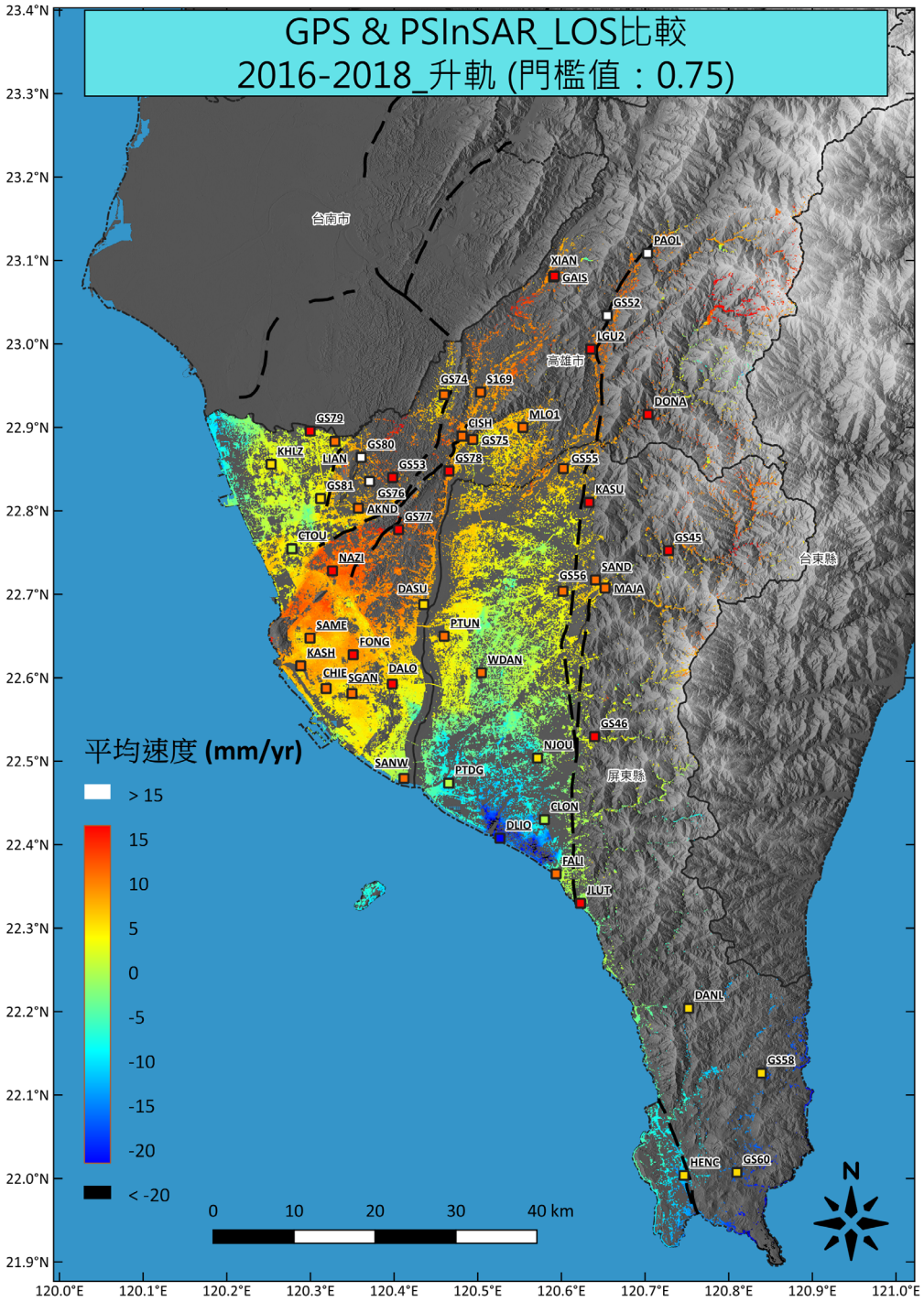


圖 3-1-4：2016-2018 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-4：2016-2018 Ascending comparison between PSI and GNSS data.

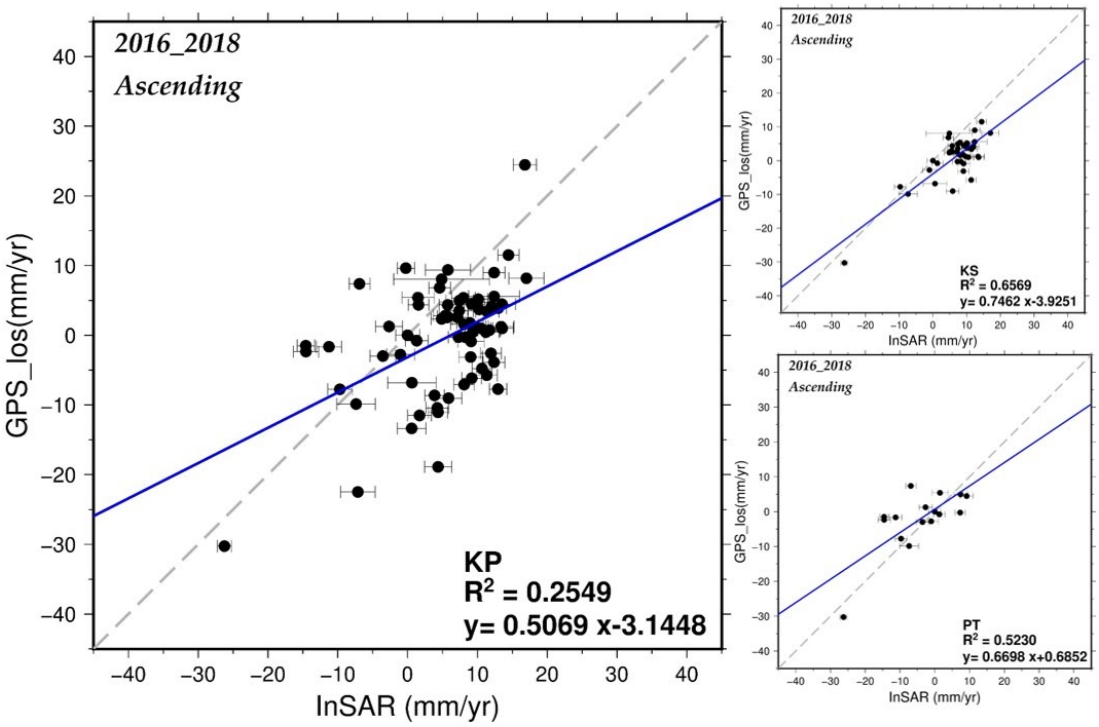


圖 3-1-5：2016-2018 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-5：2016-2018 Ascending comparison between PSI and GNSS data.

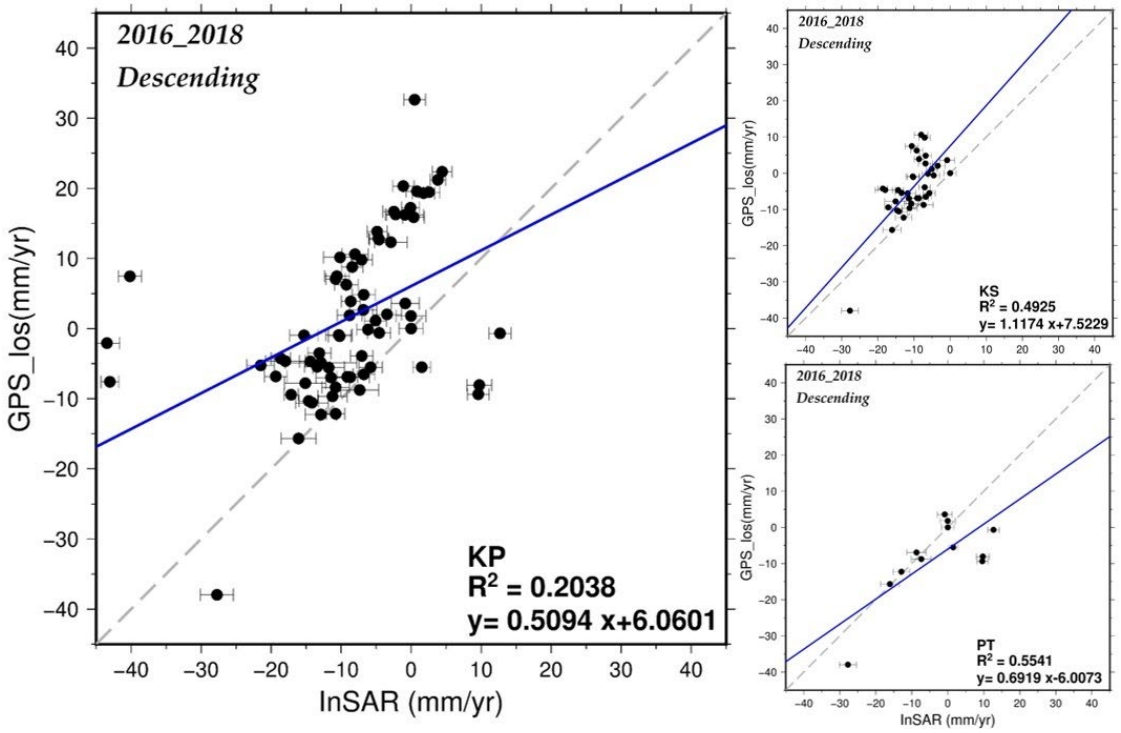


圖 3-1-6：2016-2018 降軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-6：2016-2018 Descending comparison between PSI and GNSS data.

雖然比第一時期稍佳，但是狀況也都不如預期（圖 3-1-5）。 同樣的降軌資料（圖 3-1-6）狀況也不符合預期。 同樣的我們在這些資料中觀察到離散的點通常都聚集在某些區域，同樣的嘗試將高雄與屏東地區分開觀察資料對比情形。 分開後，資料對比的迴歸狀況改善許多（圖 3-1-5、圖 3-1-6 右）。

3-1-1-3 2018-2020 年

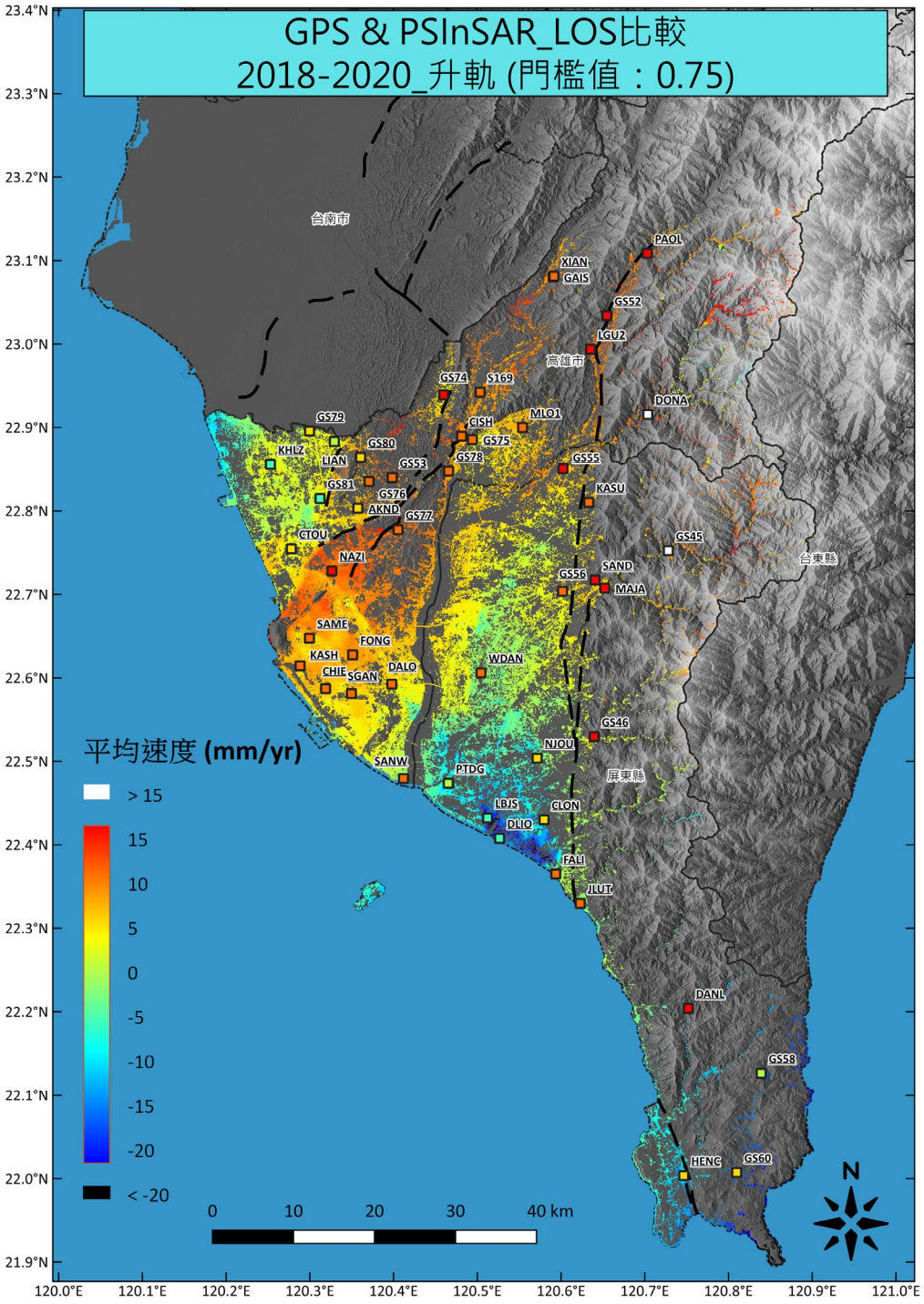


圖 3-1-7：2018-2020 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-7：2018-2020 Ascending comparison between PSI and GNSS data.

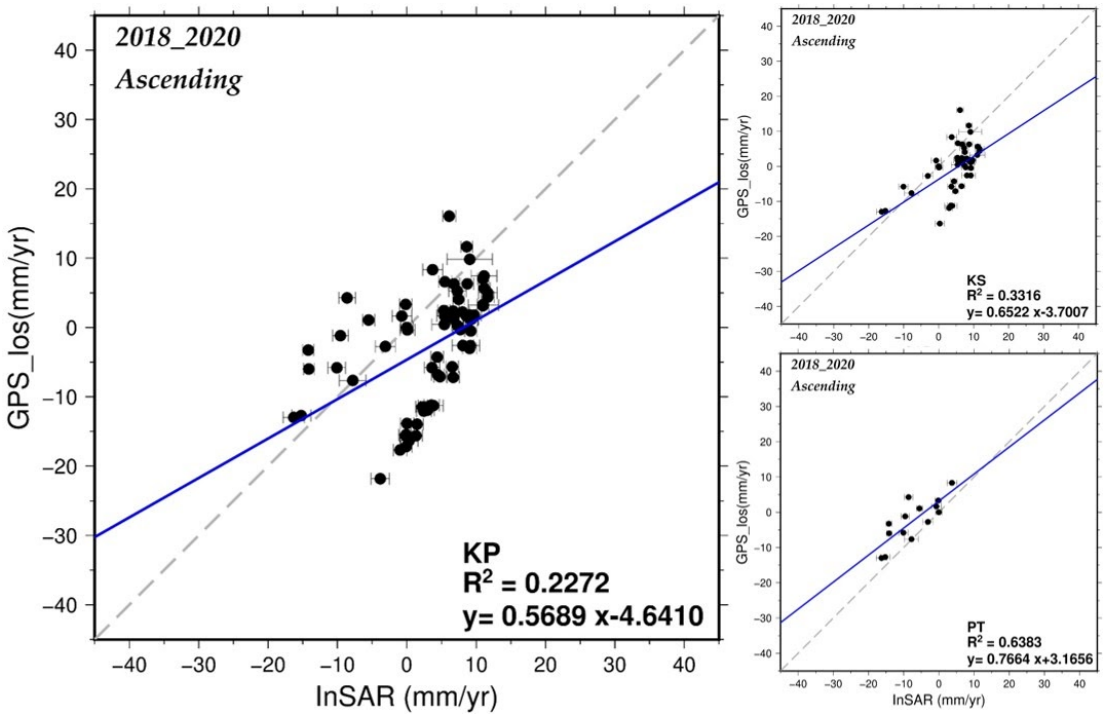


圖 3-1-8：2018-2020 升軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-8：2018-2020 Ascending comparison between PSI and GNSS data.

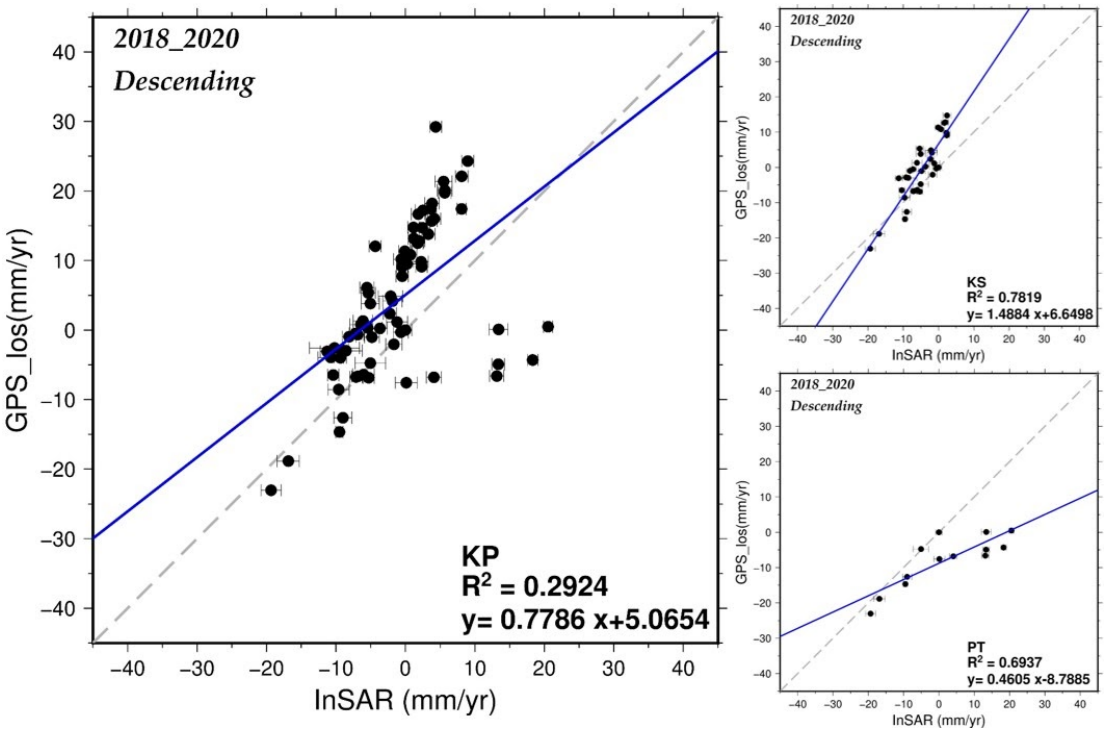


圖 3-1-9：2018-2020 降軌雷達資料與 GNSS 資料比對。

Figure 3-1-9：2018-2020 Descending comparison between PSI and GNSS data.

第三時期 2018-2020 升軌雷達資料與 GNSS 資料對比(圖 3-1-7)，斜率到達 0.56，算是與 GNSS 資料趨勢接近，然而離散程度還是相當大，R^2 僅有 0.2（圖 3-1-8）。 在降軌資料（圖 3-1-9）狀況也較前期為佳，斜率到達 0.77，然而離散程度 R^2 還是僅有 0.3 左右。 同樣的我們在這些資料中觀察到離散的點通常都聚集在某些區域，同樣的嘗試將高雄與屏東地區分開觀察資料對比情形。 分開後，資料對比的迴歸狀況改善許多（圖 3-1-8、圖 3-1-9 右）。

3-1-2 校正後雷達資料

3-1-2-1 2014-2016 年

在經過分區處理再藉由連續站 SANW 接合起來的資料，在 2014-2016 的資料其實是退步（表 3-1-1）。 也就是說這一時期的資料，可能因為衛星剛發射不久、影像數量相對其他時期較少，因此在處理大區域的資料時，可能有除了 unwrapping 之外的問題在影響資料品質。這一時期的資料，我們可能未來需要持續使用不同方法測試改善。

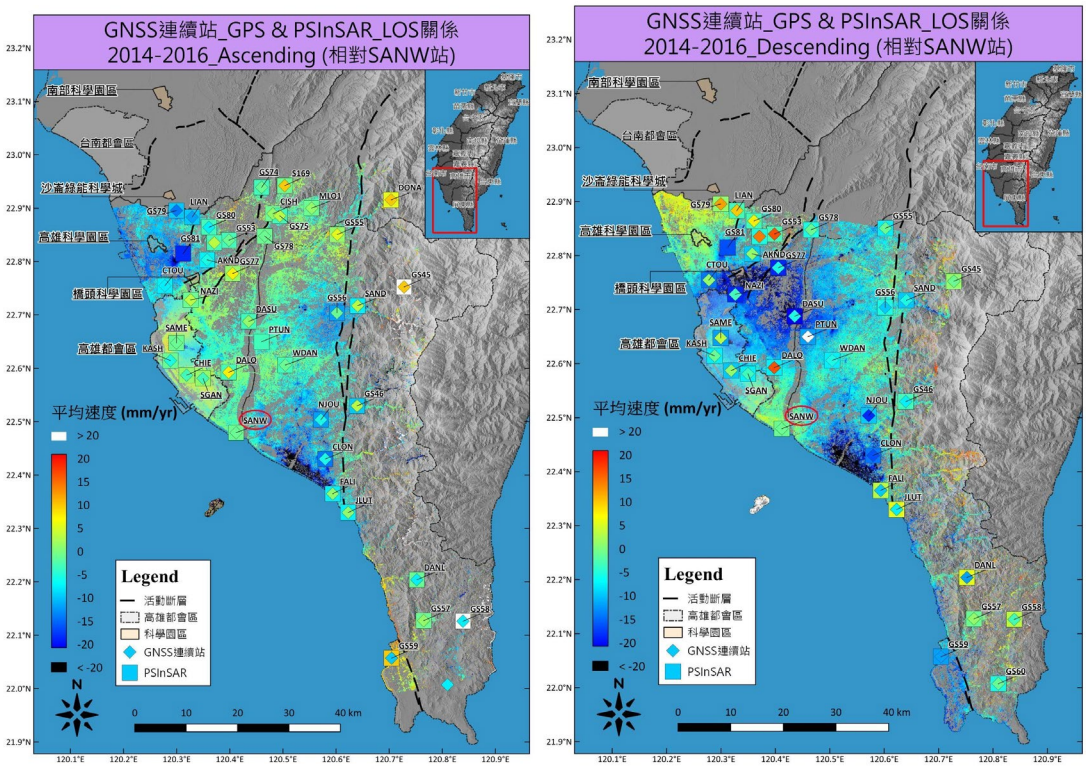


圖 3-1-10：(左圖)2014-2016 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。(右圖)2014-2016 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 SANW，菱形為連續同時期 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-1-10 : (Left) Velocity field in ascending track between 2014 and 2016. 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. (Right) Velocity field in descending track between 2014 and 2016.

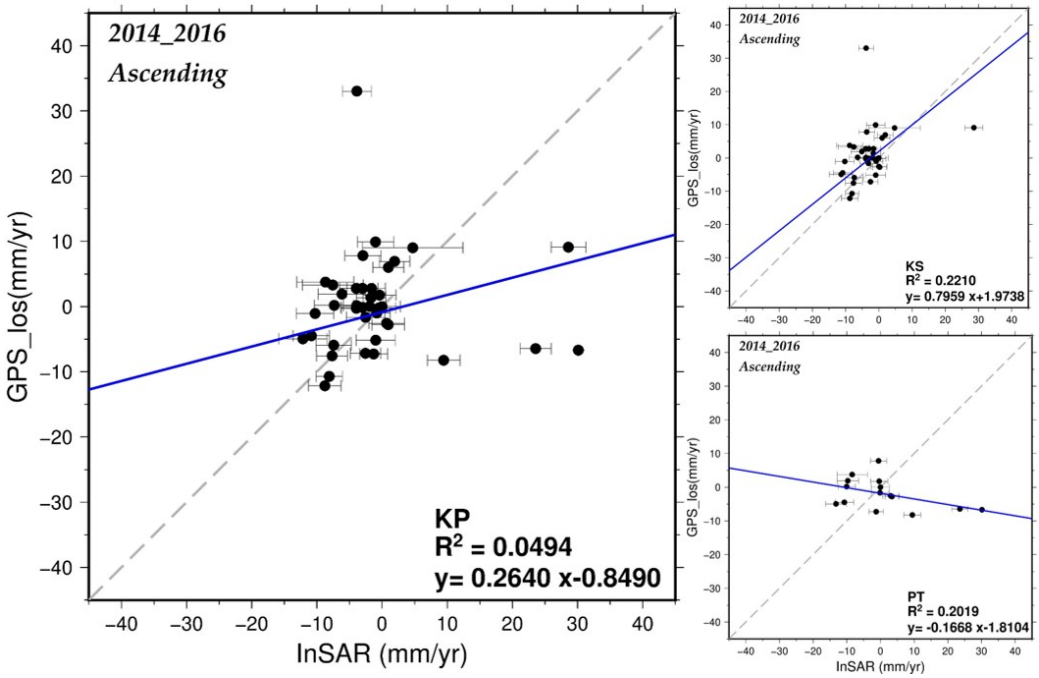


圖 3-1-11：2014-2016 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 SANW。

Figure 3-1-11：2014-2016 ascending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station SANW was used as the reference station.

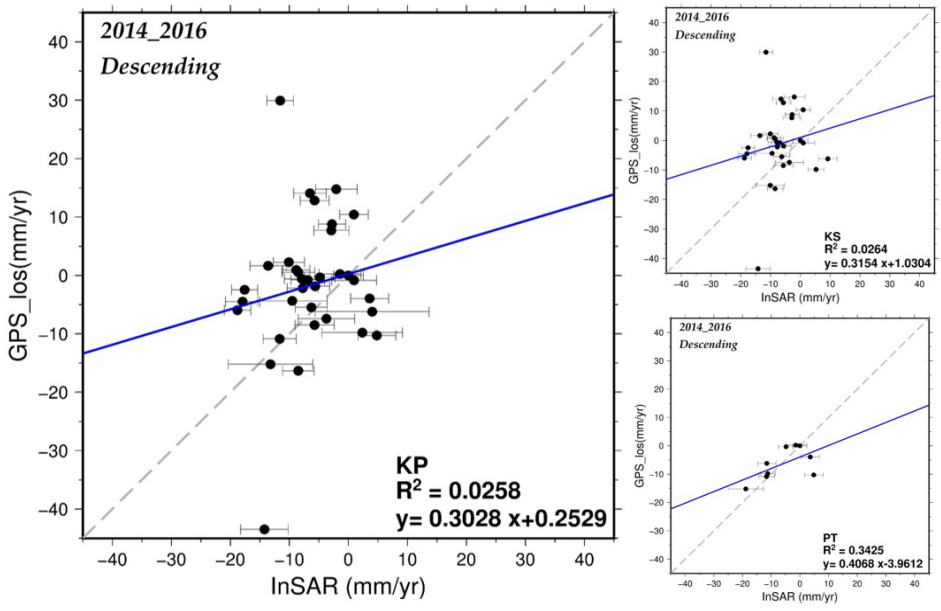


圖 3-1-12：2014-2016 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場對比。參考點為連續 GNSS 測站 SANW。

Figure 3-1-12：2014-2016 descending PSI velocity field compared to continuous GNSS of the same period. Station SANW was used as the reference station.

3-1-2-2 2016-2018 年

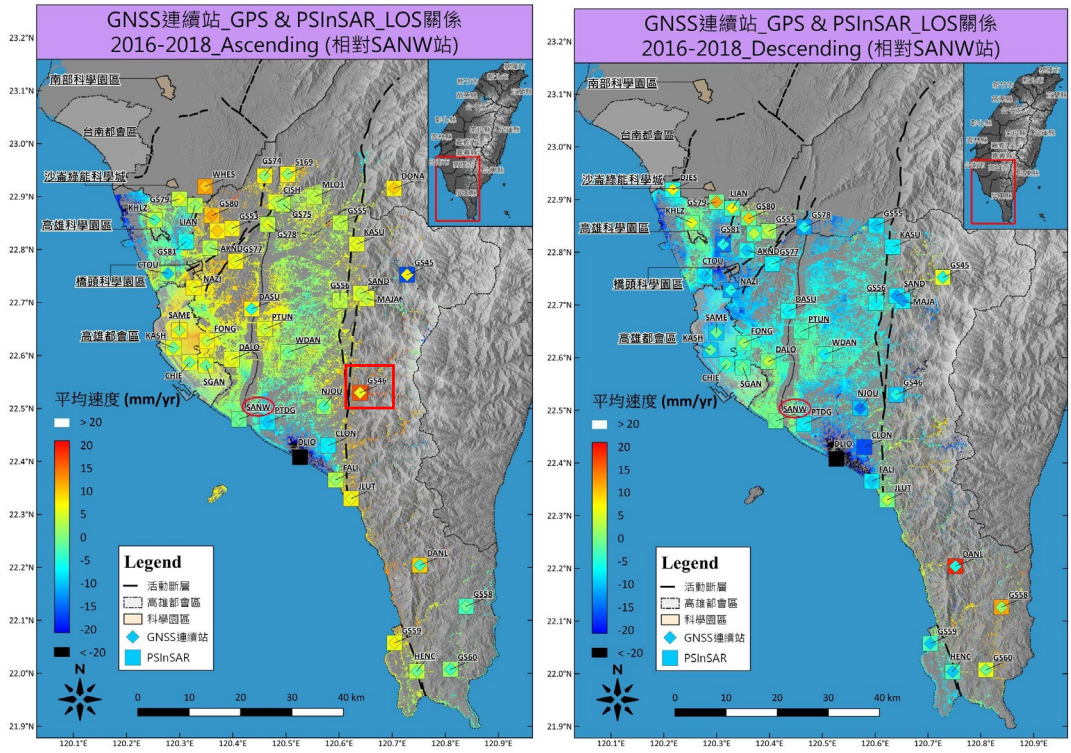


圖 3-1-13：(左圖)2016-2018 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。(右圖)2016-2018 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 SANW，菱形為連續同時期 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-1-13：(**Left**) Velocity field in ascending track between 2016 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 SANW. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite. (**Right)** Velocity field in descending track between 2016 and 2018.

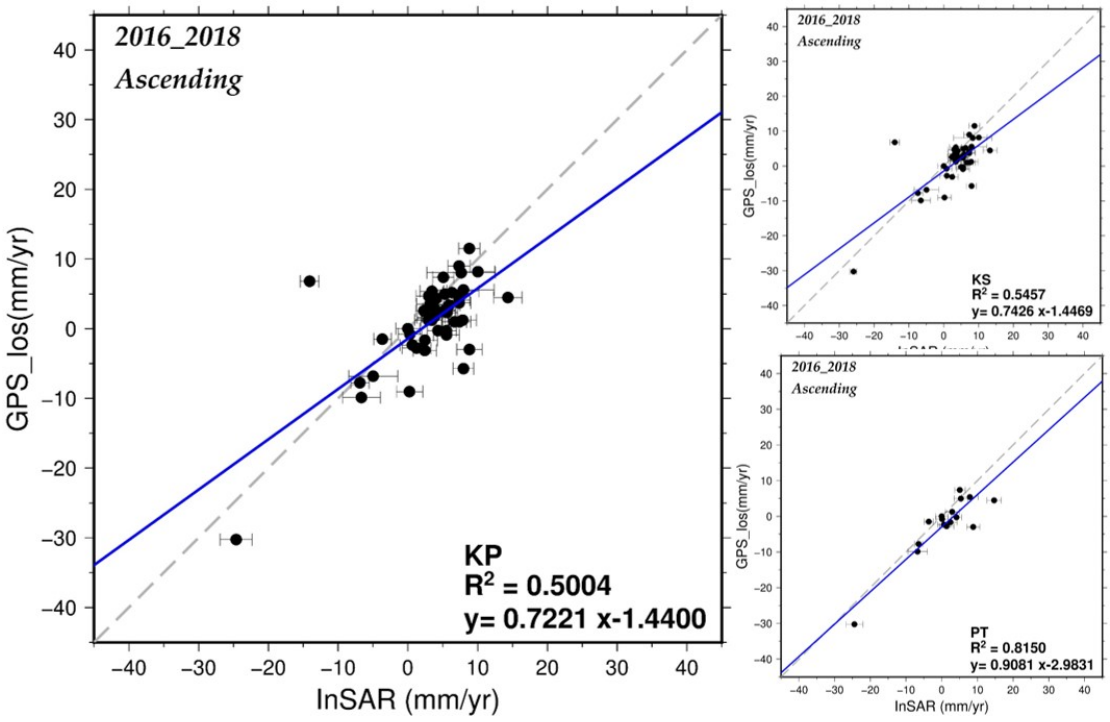


圖 3-1-14：2016-2018 PSI 升軌資料與 GPS 投影至雷達斜距方向比對。 右圖上為高雄地區的比對，右圖下則為屏東地區的比對。圖中可以看出有個離散點。

Figure 3-1-14：2016-2018 comparison between PSI ascending data and GPS data. An outlier was shown in the figure.

相對於第一時期的資料，第二時期的資料改善程度相當多，R^2 改善在 70~95%、斜率改善在 45%附近。 如果仔細觀察 scatter plot（圖 3-1-14），可以發現在高雄有一個離散點，我們可以討論該點的是否有特殊狀況，造成該點在雷達資料上為遠離衛星到-10mm/yr 的量值，而在 GPS 轉到 LOS 方向卻是每年靠近衛星到達 10mm/yr。 該離散點是圖 3-1-13(左)中的 GS45，由圖可以看出該點附近的雷達速度場呈現冷色系，然而 GS45 站位得到的資料卻是暖色系。 該區域已進入山區，PS 點密度較低。 可能在三地門再往更高處時，發生 unwrapping error 而造成該區解纏錯誤，造成可能與真實反向的小區域資訊。如果只看屏東地區的對比，斜率到達 0.9 而 R^2 到達 0.8，也就是在趨勢

上，雷達與 GNSS 同期資料非常相似。在高雄地區，如果忽略 GS45 附近 unwrapping 錯誤的區域，整個潮州斷層以西附近的資料與 GNSS 會有類似的趨勢，離散程度也相對理想。

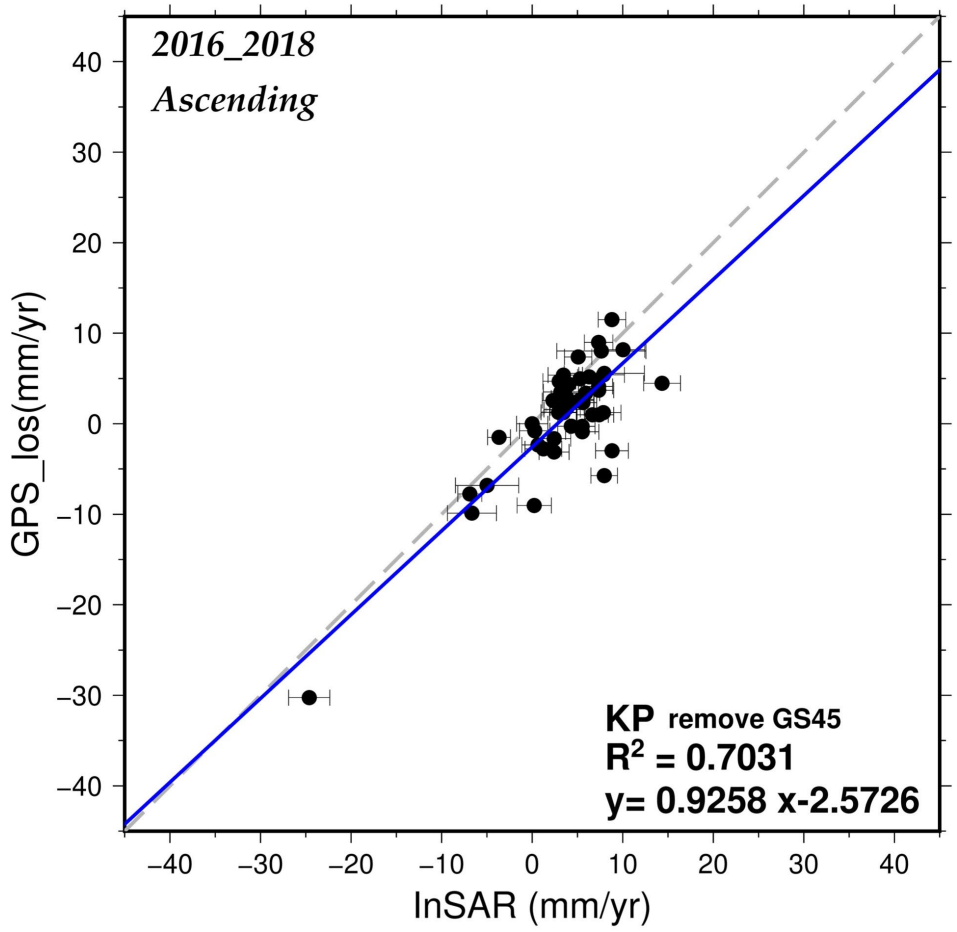


圖 3-1-15：去掉 GS45 站位附近 PSI 資料與其比對後（詳內文），2016-2018 升軌資料 InSAR 與 GPS 對比之斜率到達 0.92，R^2 到達 0.7。

Figure 3-1-15：Comparison between PSI ascending data (2016-2018) and GPS data after removing GS45 station and its adjacent PSI data. Slope is ~0.92, and R^2 is ~0.7.

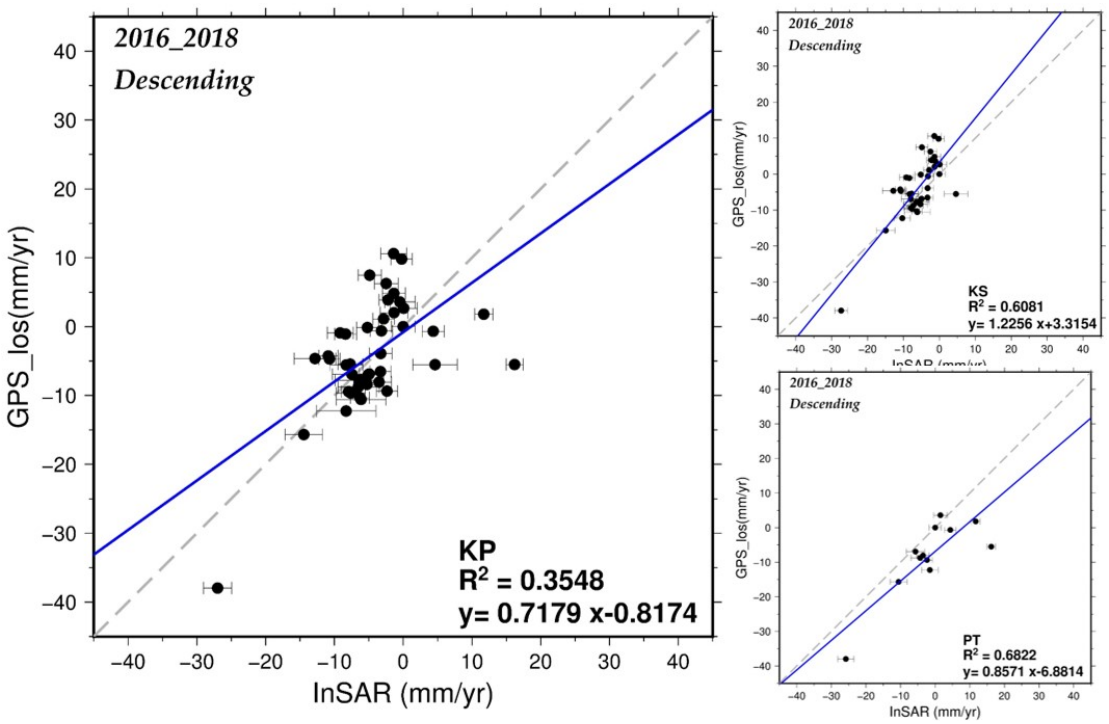


圖 3-1-16：2016-2018 PSI 降軌資料與 GPS 投影至雷達斜距方向比對。 右圖上為高雄地區的比對，右圖下則為屏東地區的比對。圖中可以看出有個離散點。

Figure 3-1-16：2016-2018 comparison between PSI descending data and GPS data. An outlier was shown in the figure.

雖然在降軌資料上，資料比升軌離散一點，但是 GNSS 與雷達趨勢相當一致，特別是高雄與屏東分開觀察的狀況下。 同樣的降軌資料也有離散點，例如 DANL 站位附近也是有相當大的差異。 這個站位與上述 GS45 同樣位於中央山脈，同樣附近的 PS 點位稀疏，似乎同樣有 unwrapping error 的狀況發生。 平均來看，此時段降軌的資料離散程度較升軌的資料大。

3-1-2-3 2018-2020 年

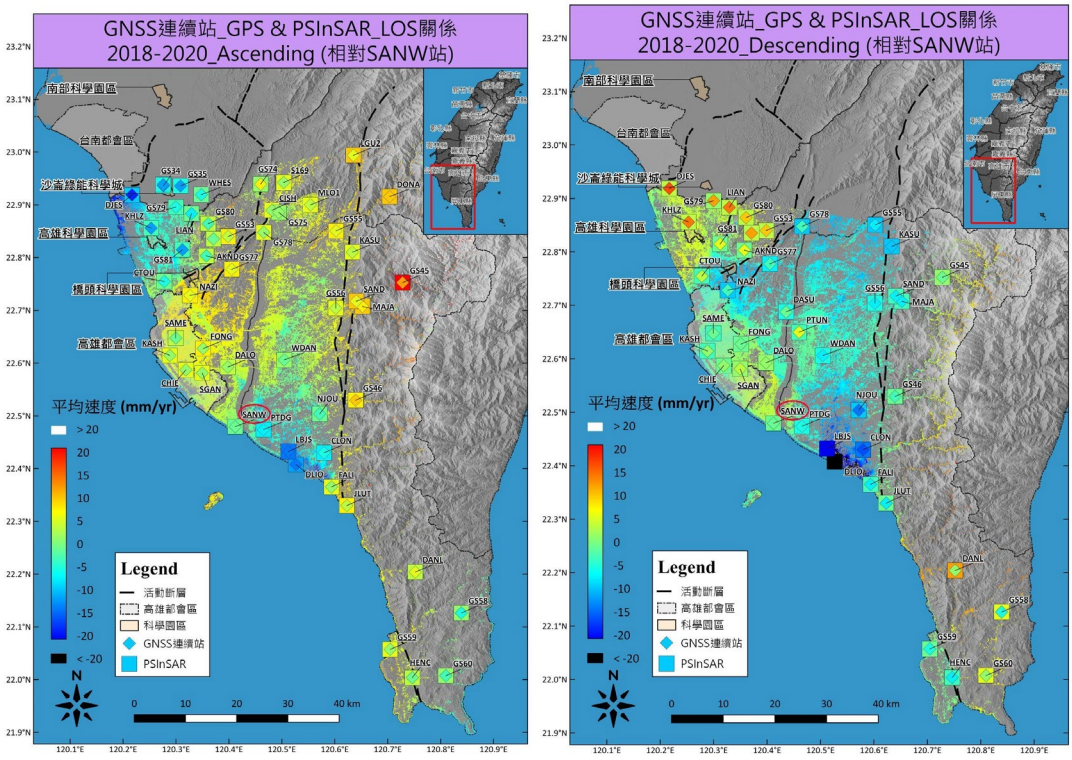


圖 3-1-17：(左圖)2018-2020 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。(右圖)2018-2020 年 Descending 平均速度場與 GNSS 連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續 GNSS 測站 SANW，菱形為連續同時期 GNSS 站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-1-17：(**Left**) Velocity field in ascending track between 2018 and 2020. (**Right**) 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.

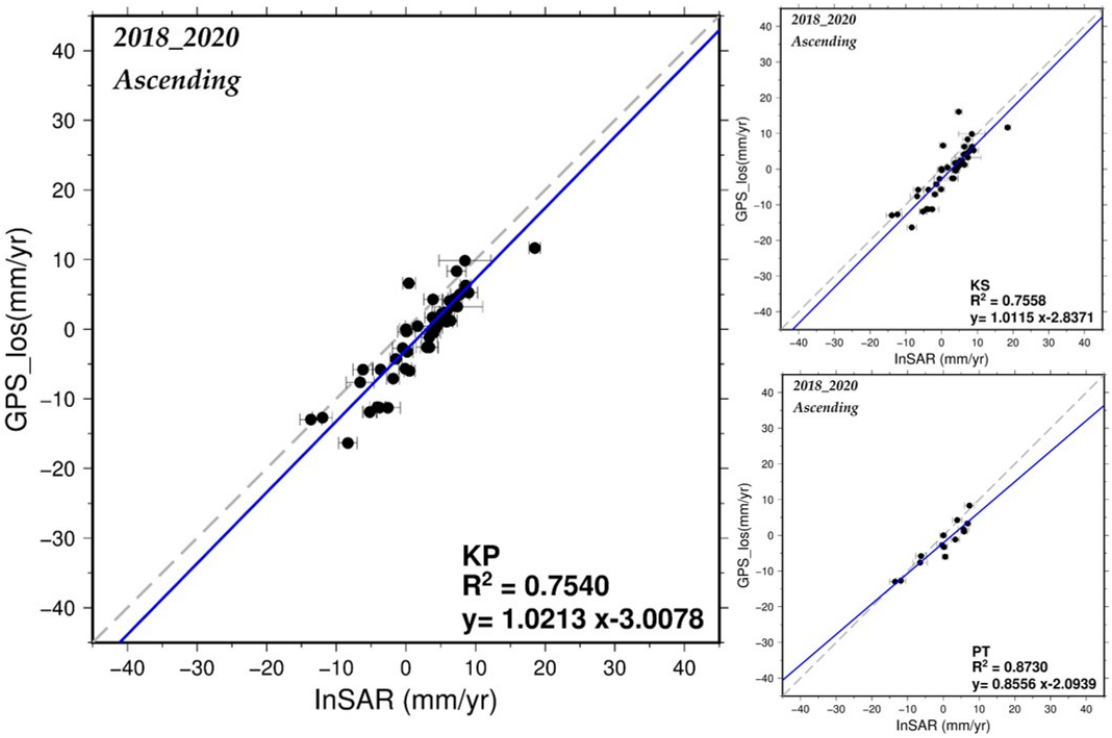


圖 3-1-18：2018-2020 雷達升軌資料與 GPS 比對。斜率接近 1、而 R^2 大概是 0.75，顯示雷達與 GPS 資料趨勢大致相同。 右側分開高雄與屏東區域各自也呈現相當不錯的關係。

Figure 3-1-18：2018-2020 comparison between PSI ascending data and GPS. Slope of the regression line is approximately 1, and R^2 is around 0.75, showing the mutual agreement between these two data set.

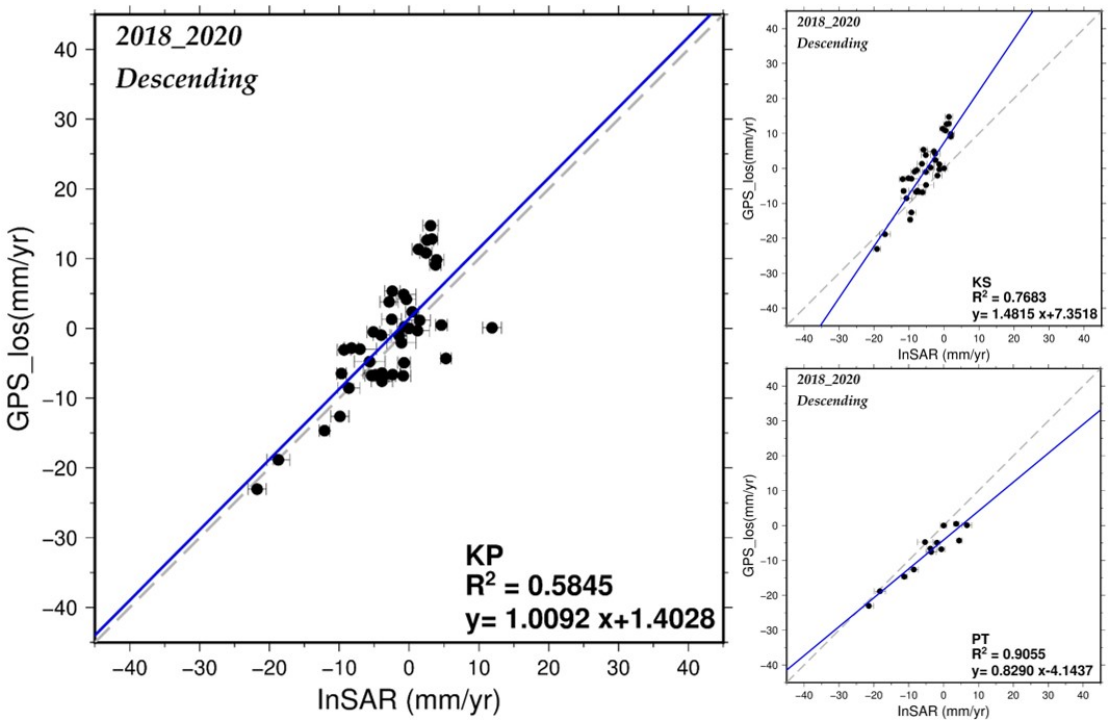


圖 3-1-19：2018-2020 雷達降軌資料與 GPS 比對。斜率接近 1、而 R^2 大概是 0.58，顯示雷達與 GPS 資料趨勢大致相同，但是離散程度稍微比升軌大。 右側分開高雄與屏東區域各自也呈現相當不錯的關係。

Figure 3-1-19：2018-2020 comparison between PSI descending data and GPS. Slope of the regression line is approximately 1, and R^2 is around 0.58, showing the mutual agreement between these two data sets, with more scattering than the ascending one.

第三時期(2018-2020)資料品質為三個時期中與 GNSS 資料趨勢最接近。 升軌部分的斜率到達 1.02 而 R^2 則到達 0.7，在降軌部分則是斜率接近 1 而 R^2 約為 0.58，較升軌較為離散。 在這一時期的資料中，雷達資料幾乎可以代表該處若有設置 GNSS 測站會得到的資料。雖然降軌的資料還是稍微有離散狀況在高雄北區，這可能是由於降軌資料邊界大概落在該處，邊界部分沒有資料可以約制。

3-2 GNSS 移動站與 PSInSAR 資料比對

針對 GNSS 移動觀測站，我們盡量挑選 PSInSAR 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，並且畫在同一張圖上做初步比對（圖 3-2-1~圖 3-2-6）。其中，在 2014-2016 時間段對比方面，由於 GNSS 移動觀測站資料時段畫分為 2013-2015 及 2015-2016，但經由比對，調查範圍內之 GNSS 移動觀測站速度值於兩個時間段速度相同，因此我們利用 2015-2016 與 PSInSAR 的 2014-2016 時間段比對。

與連續 GNSS 觀測站相同，以 2014-2016 時間段而言，與 GNSS 移動站對比而言相似度較低。以 2016-2018 及 2018-2020 兩個時期的比對結果而言，Descending 部分則在研究區域西北方都有較顯著的差異，Ascending 部分與 GNSS 連續觀測站的相似度都較高。尤其以近期衛星資料數量越來越多，技術越來越成熟。以本期結果看來，PS 資料與 GNSS 資料的比對會越來越可信。

總結來看雷達資料與移動站的對比，由於雷達的時間與移動站的時段並不完全相同，所以測量數值有本質上的差異。 第一時段的雷達資料由於張數較少，導致有較大的誤差使該段資料比較無法有信心的使用。 第二時段、第三時段資料品質越來越好，這也可以從對比的斜率、離散度看出。 雷達拍攝方向似乎也對資料品質有影響，通常降軌資料的資料比對狀況比較差，而升軌資料會比較好。 我們列出移動站的比對結果如下。

3-2-1 2014-2016 年

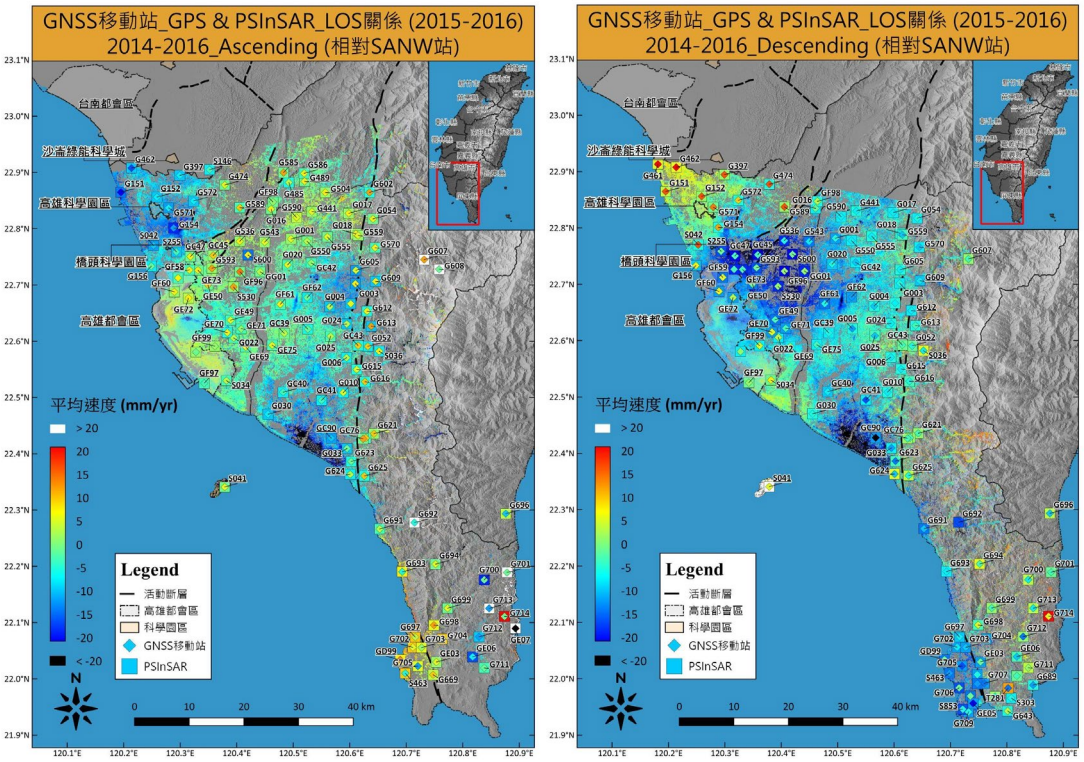


圖 3-2-1：(左圖)2014-2016 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為 2015 至 2016 年 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。(右圖) 2014-2016 年 Descending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為 2015 至 2016 年 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-2-1：(**Left**) Velocity field in ascending track between 2014 and 2016. (**Right**) Velocity field in descending track between 2014 and 2016. 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 2015 and 2016.

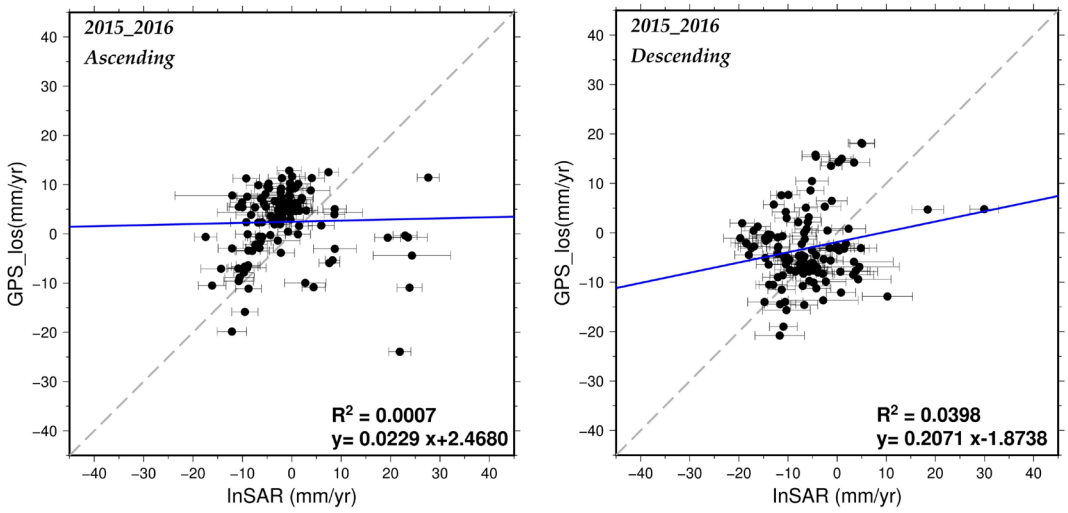


圖 3-2-2：2014-2016 雷達資料與 2015-2016 GPS 移動站比對。 不論升降軌的比對狀況都不理想。

Figure 3-2-2：2014-2016 Radar data compared to the 2016-2018 campaign GPS data. These two datasets have very low correlation.

3-2-2 2016-2018 年

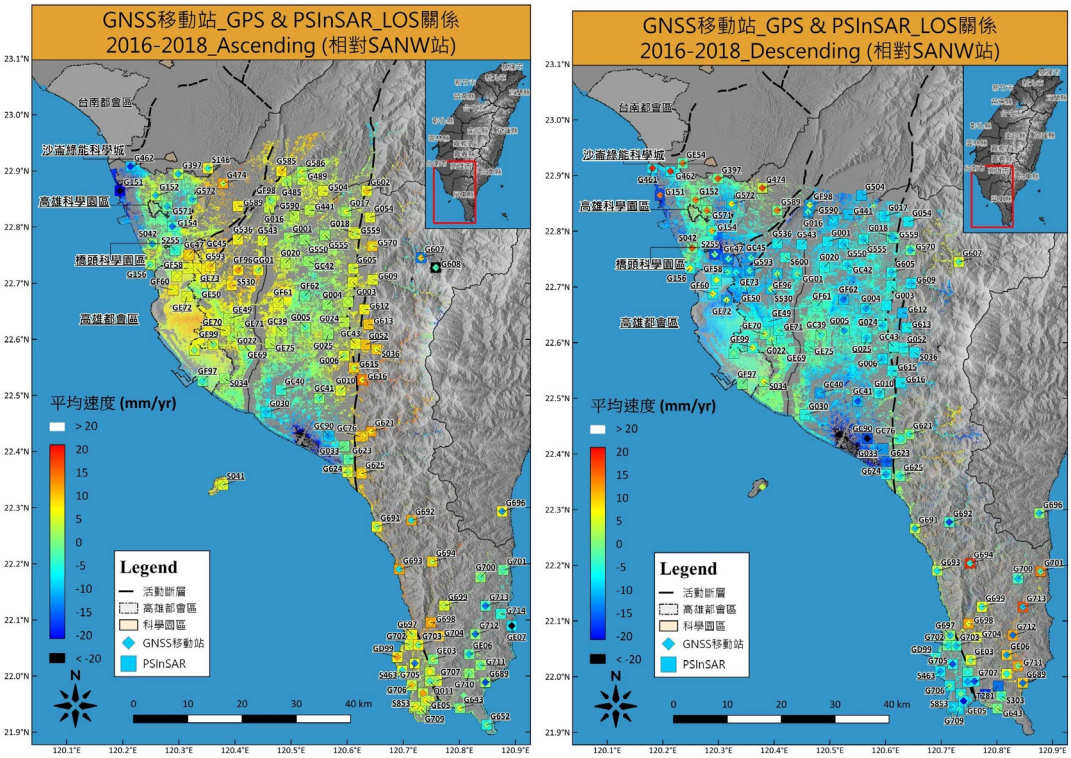


圖 3-2-3：(左圖) 2016-2018 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。(右圖)2016-2018 年 Descending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-2-3： (**Left**) Velocity field in ascending track between 2016 and 2018. (**Right**) Velocity field in descending track between 2016 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.

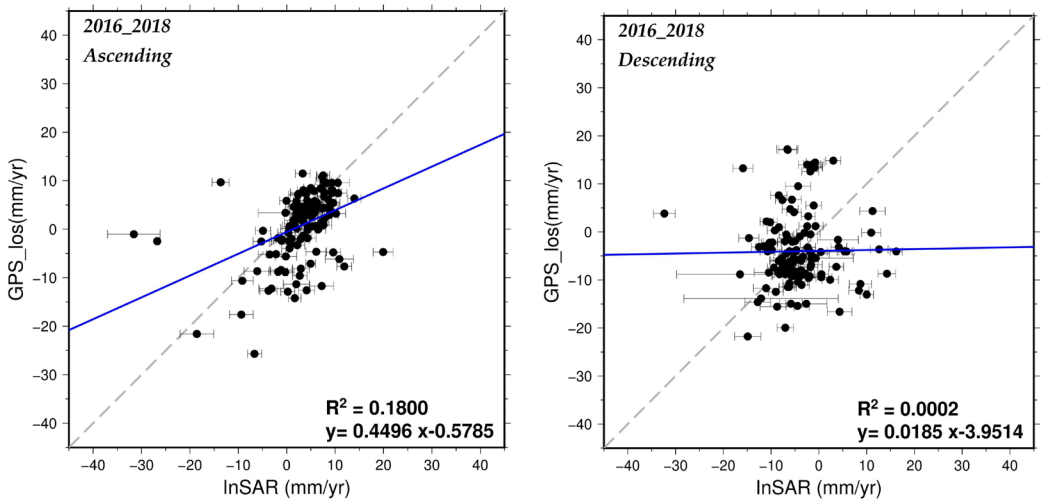


圖 3-2-4：2016-2018 雷達資料與 2016-2018 GPS 移動站比對。 升軌斜率接近 0.5 但是資料有幾個離散點，導致斜率與 R^2 狀況不佳。 降軌的比對狀況相當不理想。

Figure 3-2-4：2016-2018 Radar data compares to the 2016-2018 campaign GPS data. The ascending dataset shows improvement over the 2015-2016 comparison; the descending dataset still shows very low correlation.

3-2-3 2018-2020 年

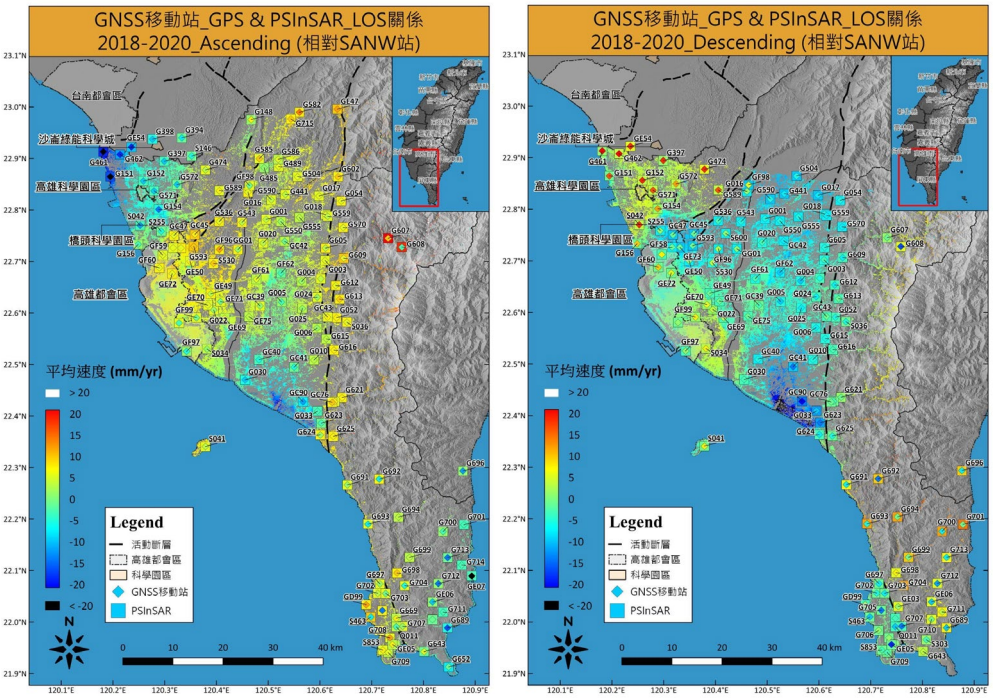


圖 3-2-5：(左圖) 2018-2020 年 Ascending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。(右圖) 2018-2020 年 Descending 平均速度場與 GNSS 移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期 GNSS 移動站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-2-5：(**Left**) Velocity field in ascending track between 2018 and 2020. (**Right**) Velocity field in descending track between 2014 and 2016. 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.

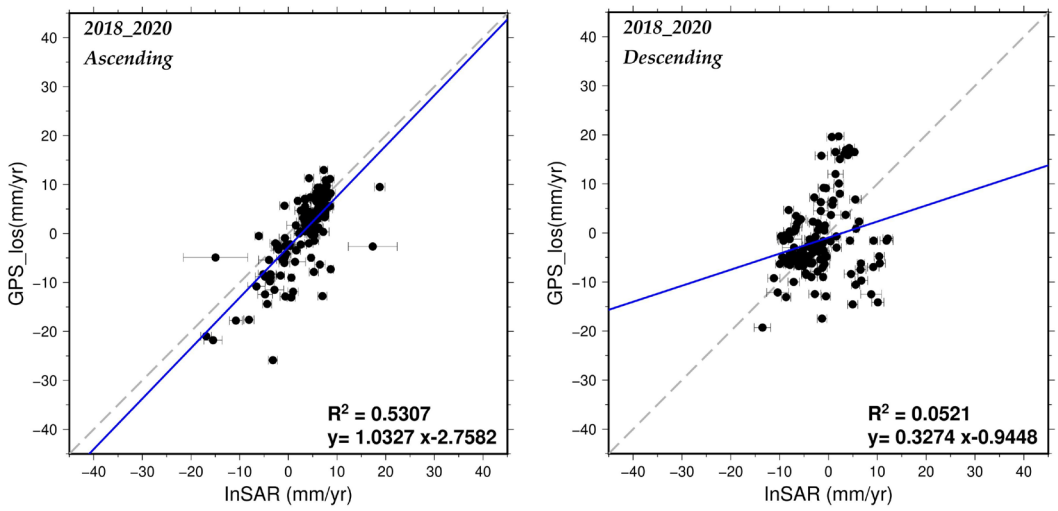


圖 3-2-6：2018-2020 雷達資料與移動站的比對。 升軌資料表現相當不錯，而降軌資料則是不理想。

Figure 3-2-6：Comparison of 2018-2020 InSAR and campaign GPS. Ascending dataset is ideal in slope with a bit of scattered data. Descending dataset is still not ideal.

3-3 GNSS 連續站及移動站與 PSInSAR 資料比對

將所有 GNSS 資料與雷達資料對比時，對比狀況會受到前述兩項對比影響。 在第一時期的資料比對（圖 3-3-1），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。 這個情形隨著時間演進、影像幅數增加而持續改善。 第二時期資料品質已經有顯著改善（圖 3-3-2）。到了第三時期的升軌資料斜率已經接近於 1，而 R^2 接近 0.6（圖 3-3-3）。 代表我們可以有足夠信心將該時期升軌雷達資料代表 GNSS 在該點為測量之資料。

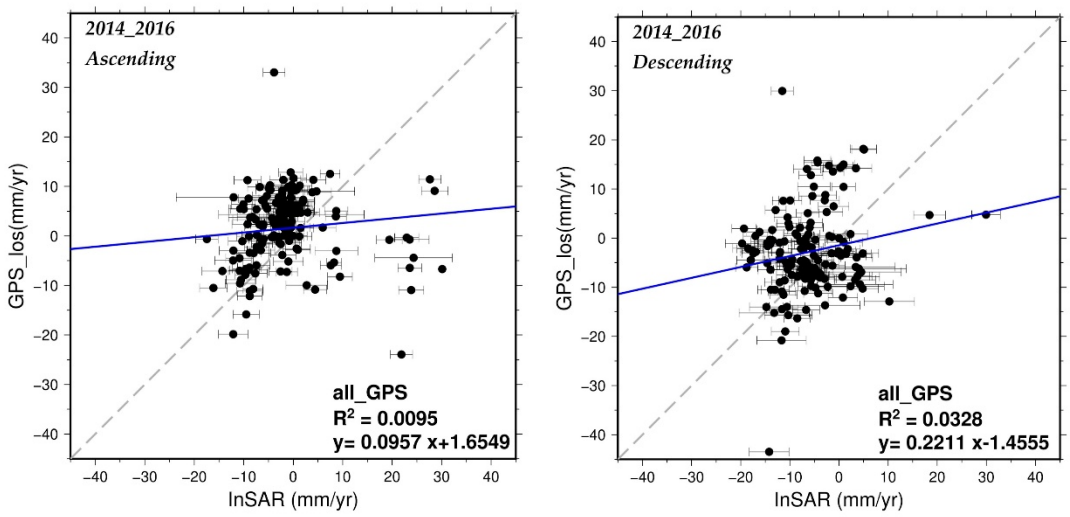


圖 3-3-1：2014-2016 年 所有 GPS 站與雷達資料對比（左）升軌資料 （右）降軌資料。 此年度資料受限於雷達影像幅數，資料品質與信心程度不高。

Figure 3-3-1：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data. (Left) ascending data (Right) descending data. There are relatively fewer radar images that result in the low confidence of radar data depicted by slope of the equation and R^2.

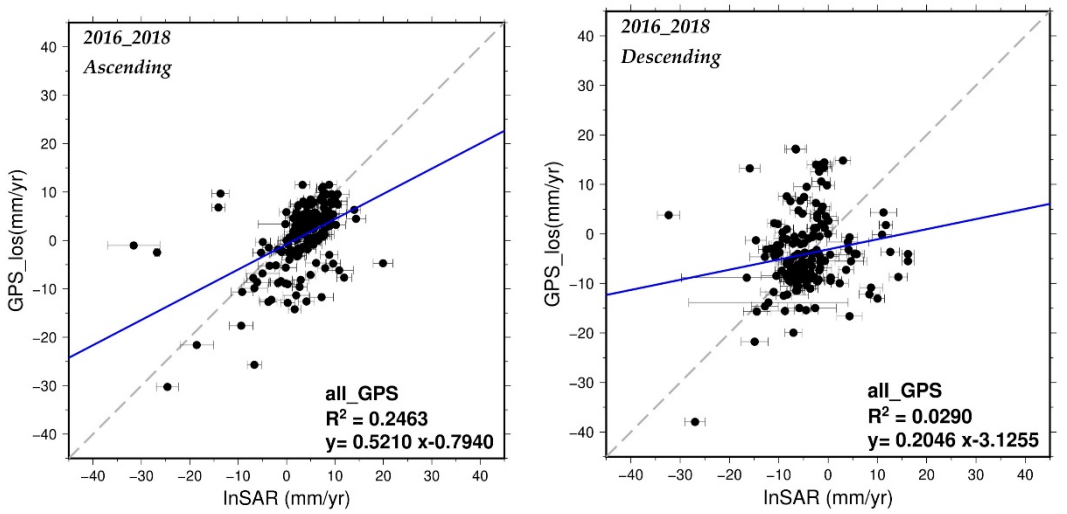


圖 3-3-2：2016-2018 年 所有 GPS 站與雷達資料對比（左）升軌資料 （右）降軌資料。此時段在升軌資料部分已經呈現明顯線性趨勢，然而在降軌資料部分還是有些散亂。

Figure 3-3-2：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data. (Left) ascending data (Right) descending data. The 2nd period has improved ascending data and still scattered descending data that can be depicted by slope of the equation and R^2.

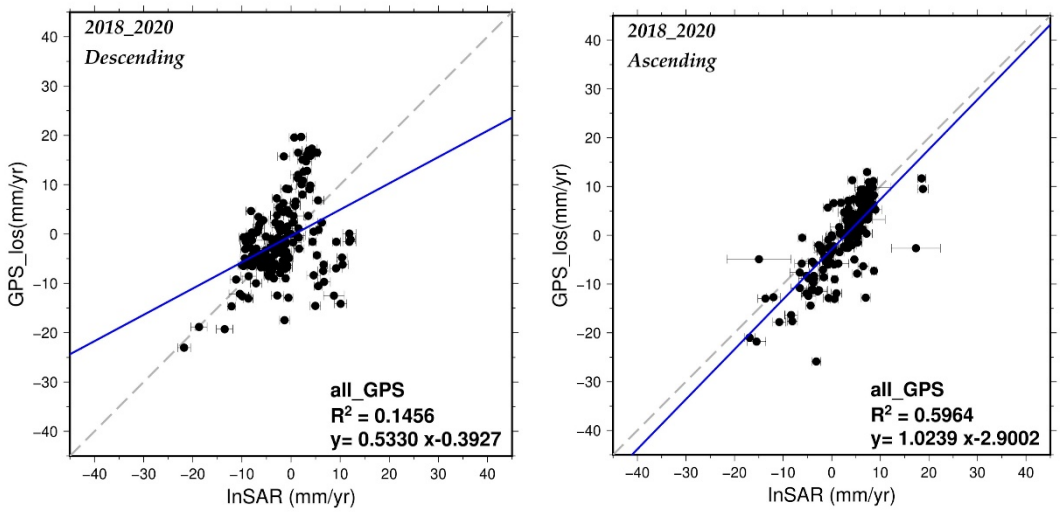


圖 3-3-3：2018-2020 年 所有 GPS 站與雷達資料對比（左）降軌資料 （右）生軌資料。此時段在升軌資料部分已經呈現明顯線性趨勢，然而在降軌資料部分還是有些散亂。

Figure 3-3-3：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data. (Left) descending data (Right) ascending data. The 3rd period has improved ascending data and still less scattered descending data that can be depicted by slope of the equation and R^2.

3-4 水準測量資料

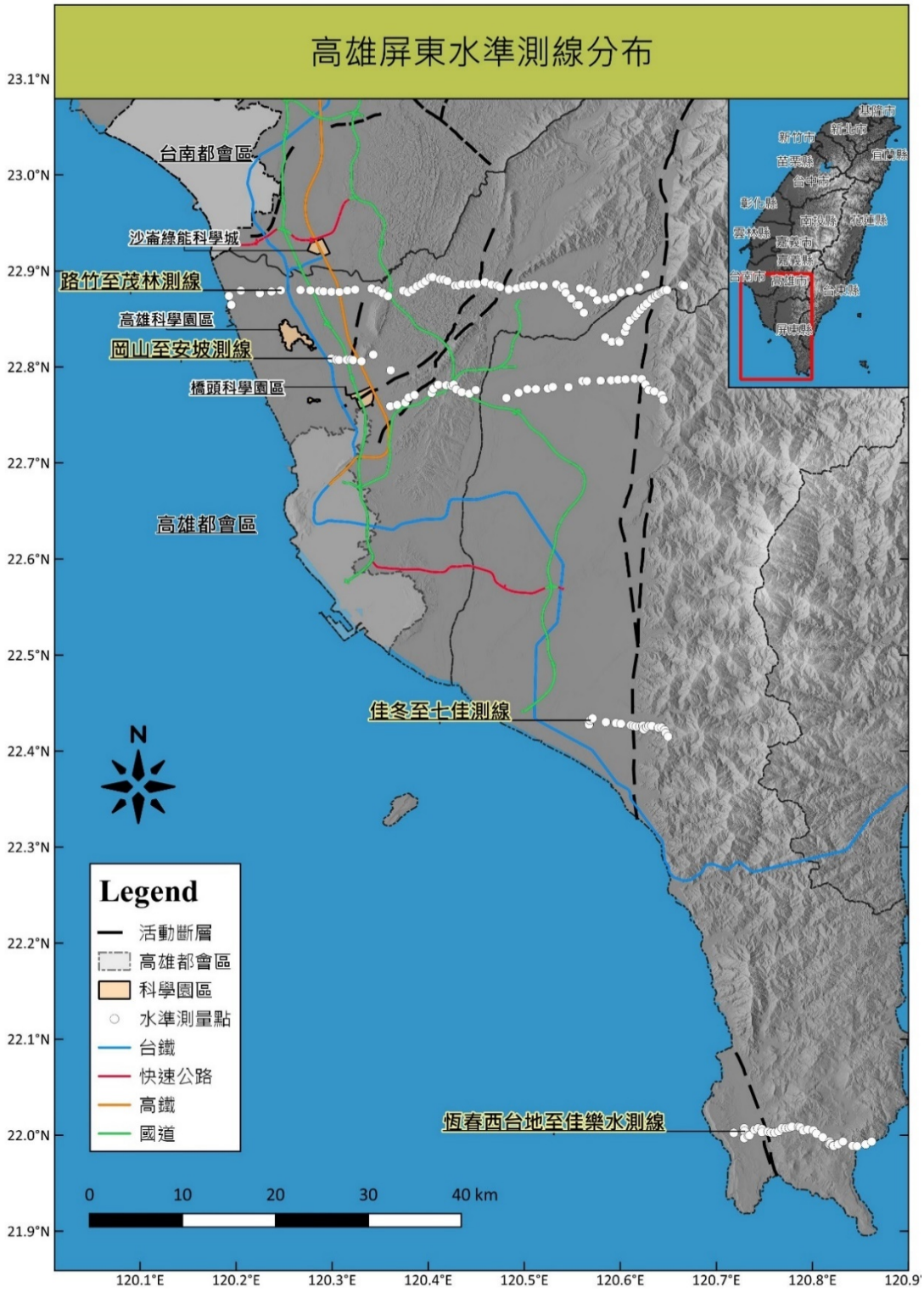


圖 3-4-1：高雄屏東水準測線分布。

Figure 3-4-1：Locations of leveling profiles in Kaohsiung-Pingtung area.

調查區域中有四條長期觀察之水準測線，由北到南分別是路竹至茂林測線、岡山到安坡測線、佳冬至七佳測線、以及恆春西台地至佳樂水測線。這些水準測量資料與雷達資料對比來比較整體趨勢、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，所以經過投影還是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。 當然依照前述雷達資料與 GNSS 比對，我們可以看出第一時期的資料比對成果較差、第三時期資料比對成果較好，然而，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。

3-4-1 路竹至茂林測線

路竹-茂林測線（圖 3-4-2），其橫跨小岡山、車瓜林、旗山及潮州斷層，路線長約 50 公里（投影至剖面的長度），以 GNSS 連續站 GS55 做為參考點(綠色三角形)來校正水準點位 R016 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 GS55 校正後，除了 2014-2016 時段的部分區域， ascending 雷達影像結果與水

準測量結果相當一致，均為跨過小崗山斷層向東有一速度抬升趨勢，此速度量值在繼續向東跨越旗山斷層後開始減少，而在車瓜林斷層在升軌資料顯示了接近 5mm/yr 的速度差。而 descending 影像因為只包含到一半的水準測線，無法涵蓋到參考點，因此比對上相對困難，然而在比對中也看到第二、第三時段的比對較好。

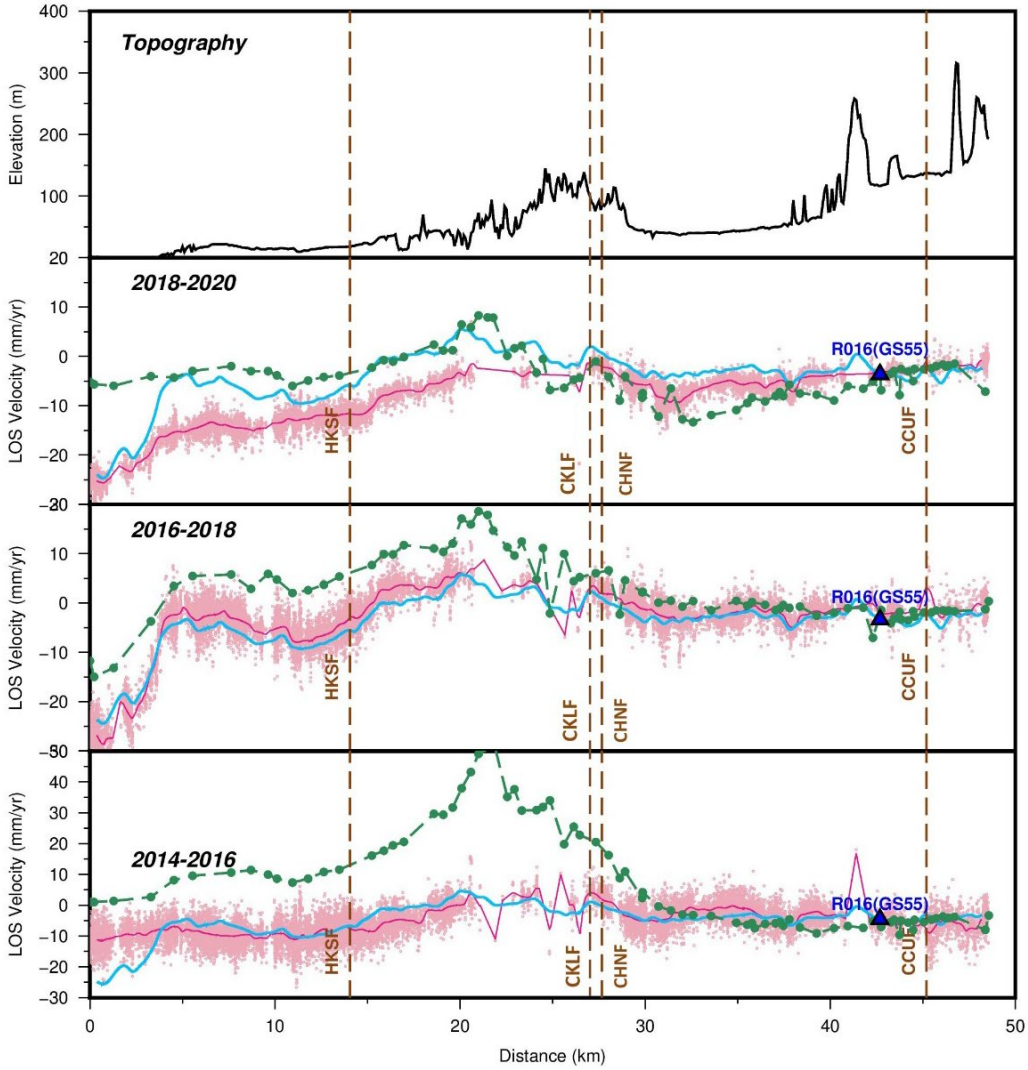


圖 3-4-2：水準測線-路竹至茂林測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 R016(GS55)。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。HKSF 為小岡山斷層、CHNF 為旗山斷層、CKLF 為車瓜林斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 3-4-2 : Comparison of PSInSAR and Luzhu-Maolin leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station R016(GS55). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, CKLF is CheKuaLin fault, and CCUF is Chaochou fault.

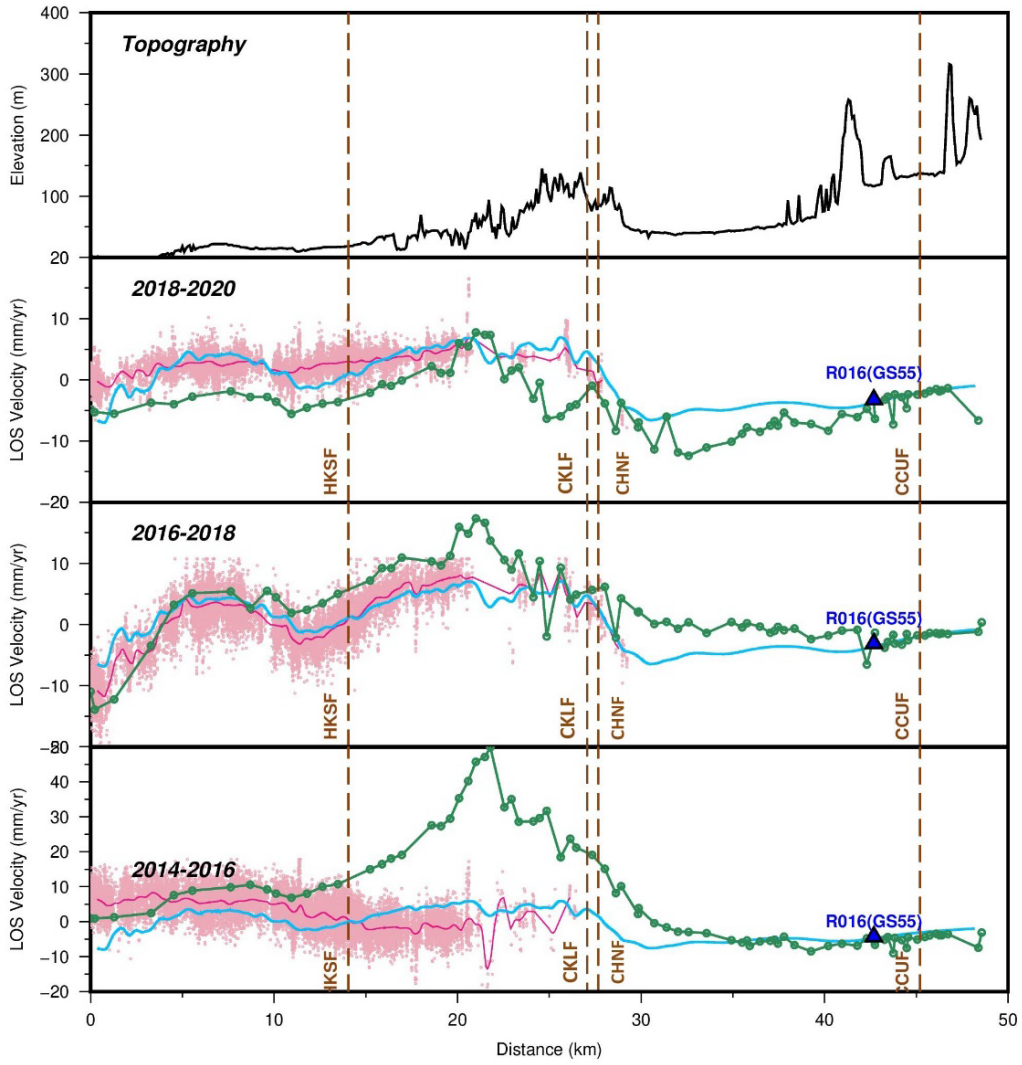


圖 3-4-3：水準測線-路竹至茂林測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 R016(GS55)。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。HKSF 為小岡山斷層、CHNF 為旗山斷層、CKLF 為車瓜林斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 3-4-3：Comparison of PSInSAR and Luzhu-Maolin leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station R016(GS55). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, CKLF is CheKuaLin fault, and CCUF is Chaochou fault.

3-4-2 岡山至安坡測線

岡山至安坡測線橫跨小崗山斷層、車瓜林斷層、旗山斷層及潮州斷層，測線長約 36 公里(投影至剖面的長度)，以 GNSS 連續站 AKND 做為參考點(綠色三角形)來校正水準點位 G525 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。根據圖 3-4-4、圖 3-4-5，無論是水準測線資料或是雷達資料均可以看出在跨越小岡山斷層有一明顯速度值差異，約為 5-10 mm/yr 。跨越車瓜林斷層與旗山斷層因為地形起伏較大，PSInSAR 點較不密集，但是這些點還是顯示在 2018-2020 時段在此區域有超過 10mm/yr 的速度差異在很短的距離發生，這樣的差異並沒有被多期的水準測量紀錄。 這是否代表此區域的變形最主要是走向滑移因此未被水準測量紀錄，反而在雷達資料中顯現，值得近一步探討。 同樣的，在降軌資料中雷達也記錄到跨車瓜林、旗山斷層的速度差異。

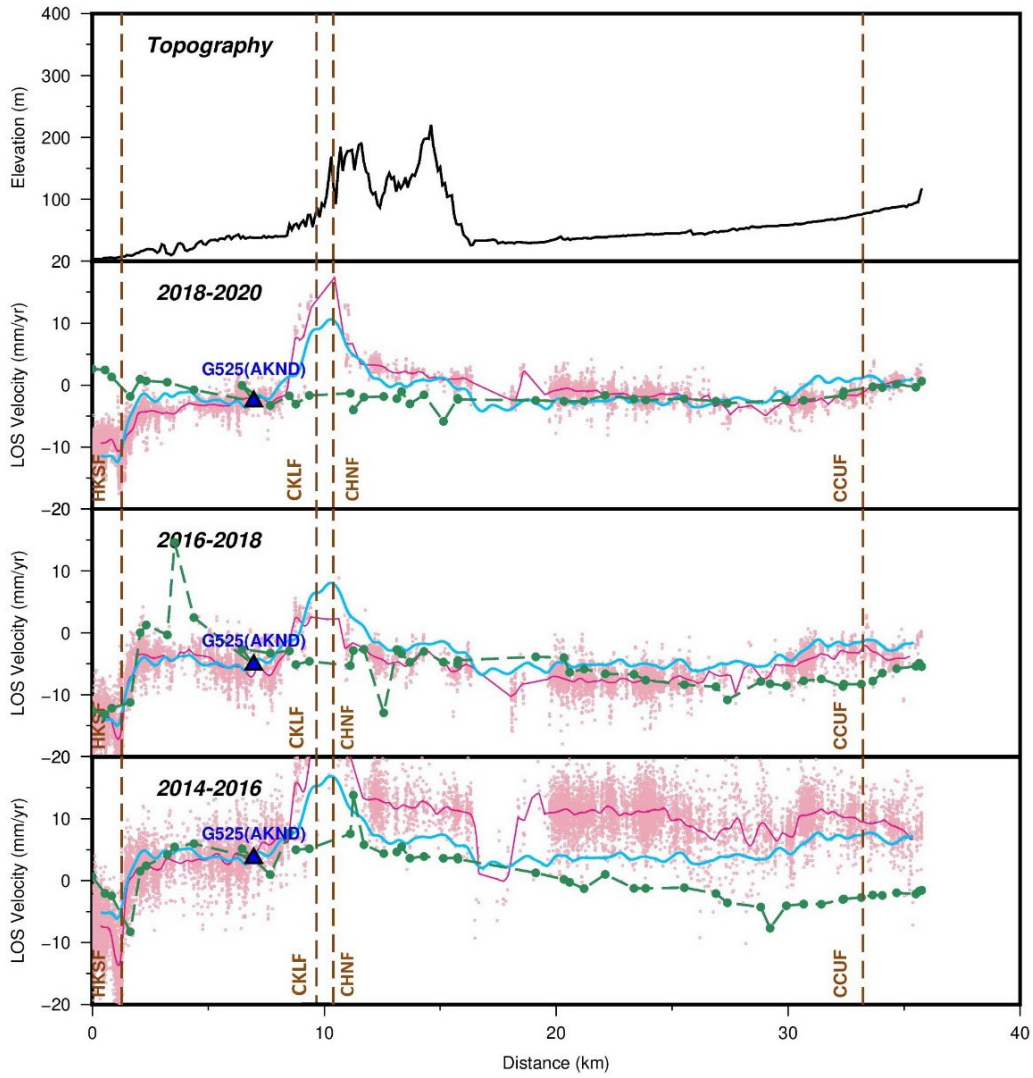


圖 3-4-4：水準測線-岡山至安坡測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 G525(AKND)。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。HKSF 為小岡山斷層、CHNF 為旗山斷層、CKLF 為車瓜林斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 3-4-4 : Comparison of PSInSAR and Kangshan-Anpo leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station G525(AKND). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, CKLF is CheKuaLin fault, and CCUF is Chaochou fault.

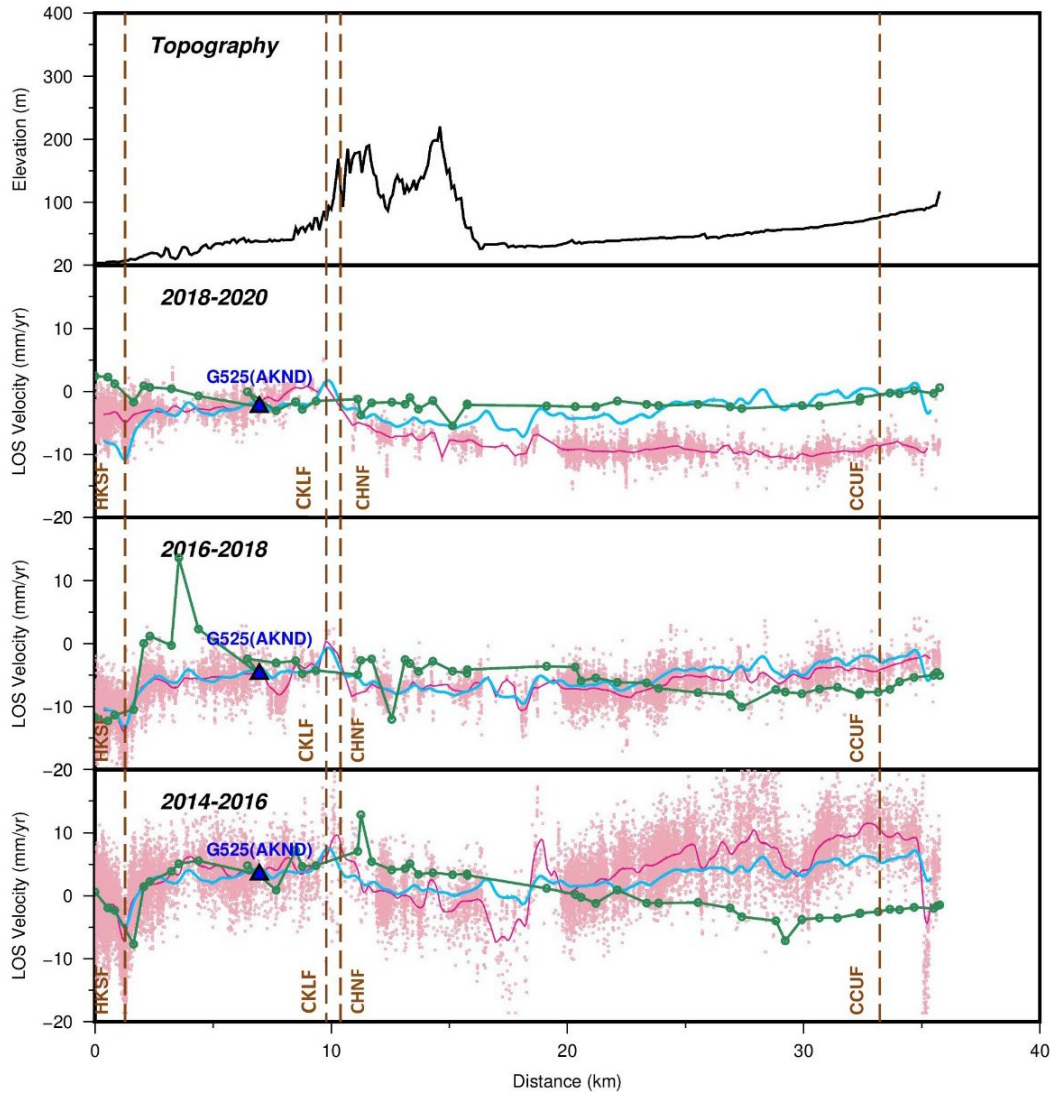


圖 3-4-5：水準測線-岡山至安坡測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 G525(AKND)。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。HKSF 為小岡山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure3-4-5: Comparison of PSInSAR and Kangshan-Anpo leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station G525(AKND). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里(投影至剖面的長度)，以 GNSS 連續站 CLON 做為參考點(綠色三角形)來校正水準點位 GC85 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。根據圖 3-4-6、圖 3-4-7，無論是水準測線資料或是雷達資料均可以看出在跨越潮州斷層有一明顯速度值差異，約為 10 mm/yr 。

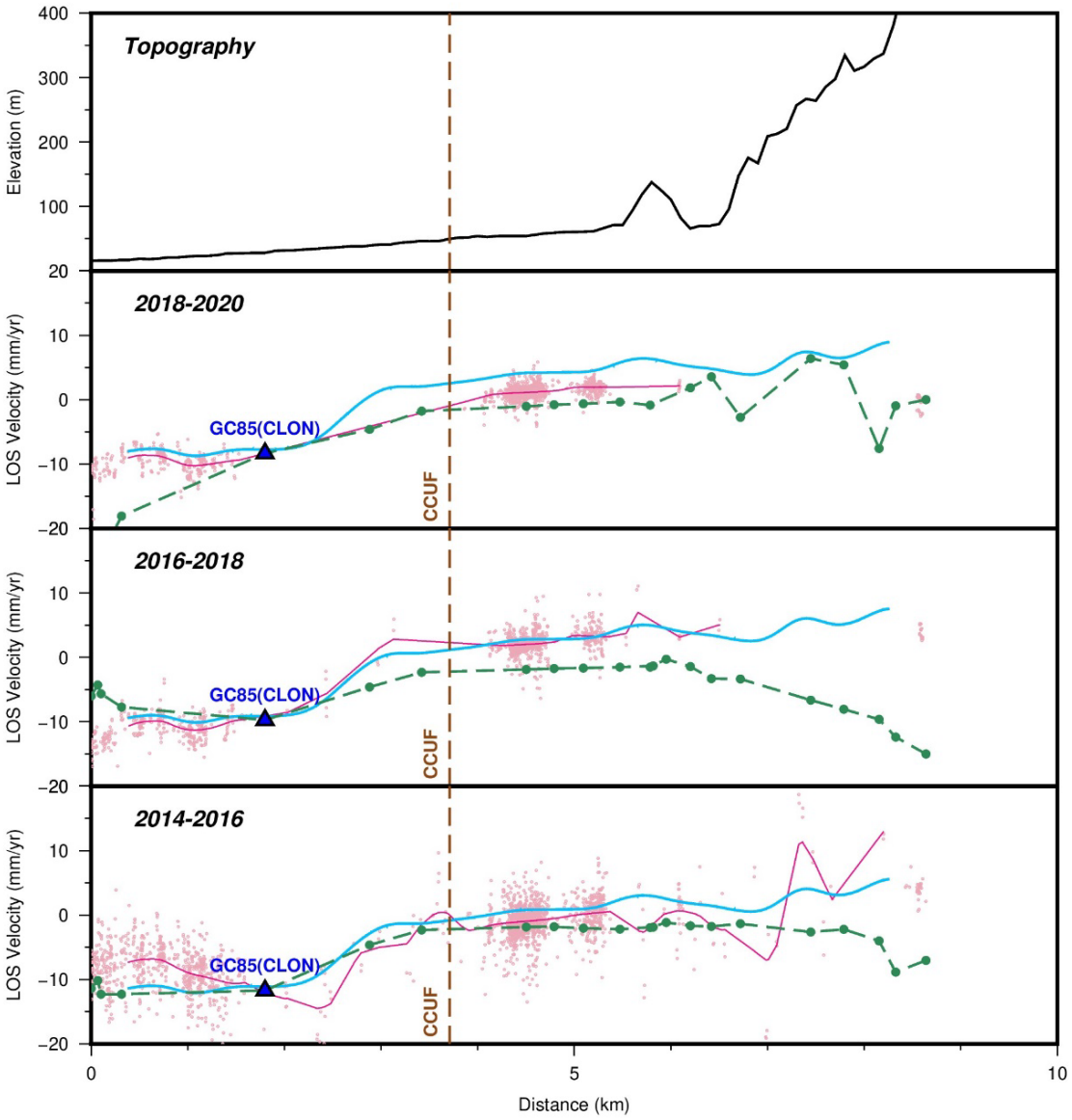


圖 3-4-6：水準測線-佳冬至七佳測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。藍色三角形為參考點 GC85(CLON)。CCUF 為潮州斷層。

Figure 3-4-6：Comparison of PSInSAR and Jiadong-Qijia leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station GC85(CLON). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CCUF is Chaochou fault.

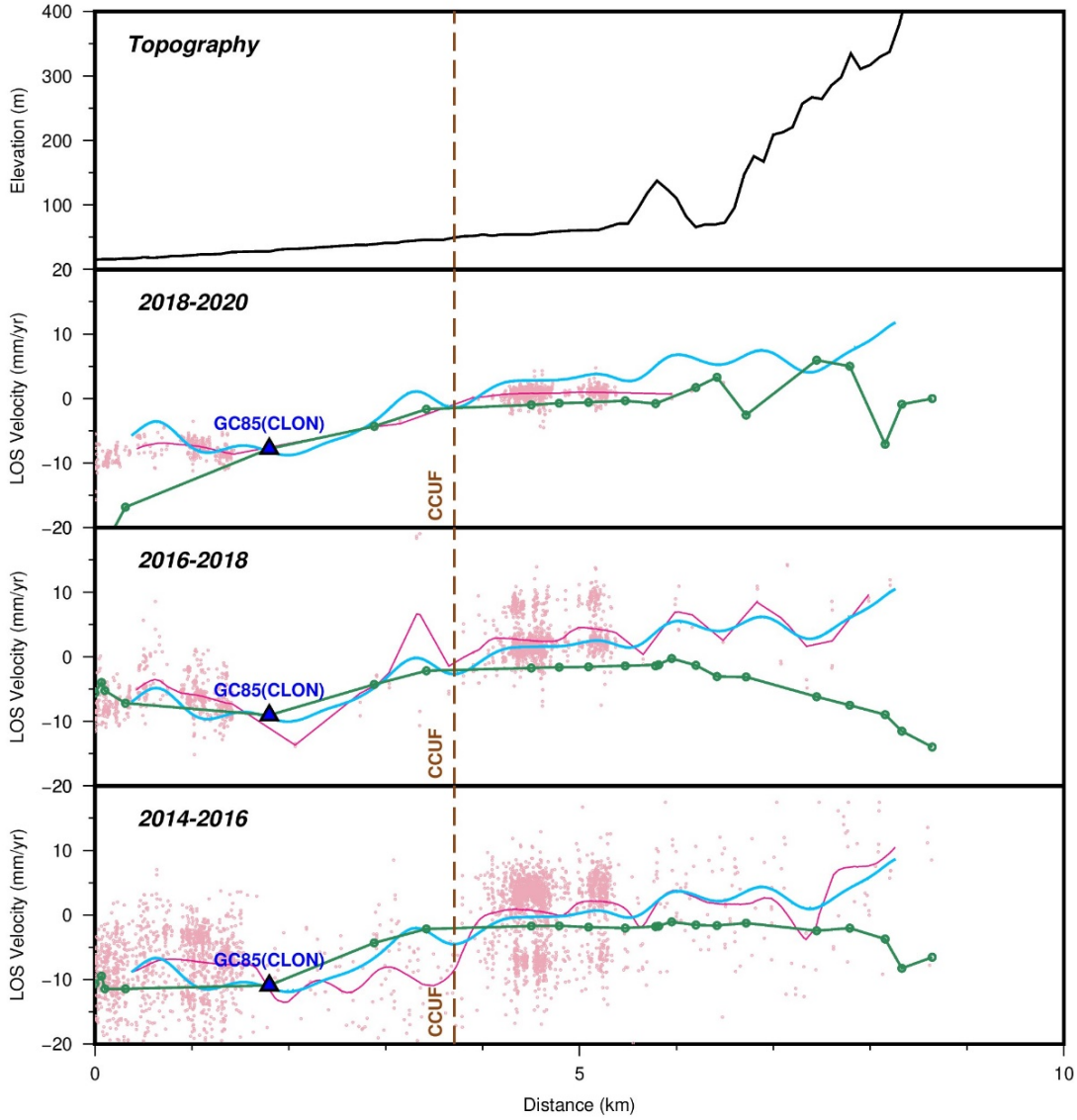


圖 3-4-7：水準測線-佳冬至七佳測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。藍色三角形為參考點 GC85(CLON)。CCUF 為潮州斷層。

Figure 3-4-7：Comparison of PSInSAR and Jiadong-Qijia leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station GC85(CLON). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, CCUF is Chaochou fault.

3-4-3 恆春西臺地至佳樂水測線

恆春西臺地至佳樂水測線橫跨恆春斷層，長約 15 公里(投影至剖面的長度)，以 GNSS 連續站 HENC 做為參考點(綠色三角形)來校正水準點位 G670 及雷達資料。利用水準點為第一點與最後一點構成之直線，將雷達資料寬度總共一公里，水準測線寬度共十公里投影至剖面上比較。根據圖 3-4-8、圖 3-4-9，無論是水準測線資料或是雷達資料均可以看出在跨越恆春斷層並無明顯速度值差異，而是恆春斷層往東約 1.5 公里處可看到一速度值改變，尤其以 Descending 影像更為明顯，其變化量約為 5 mm/yr。

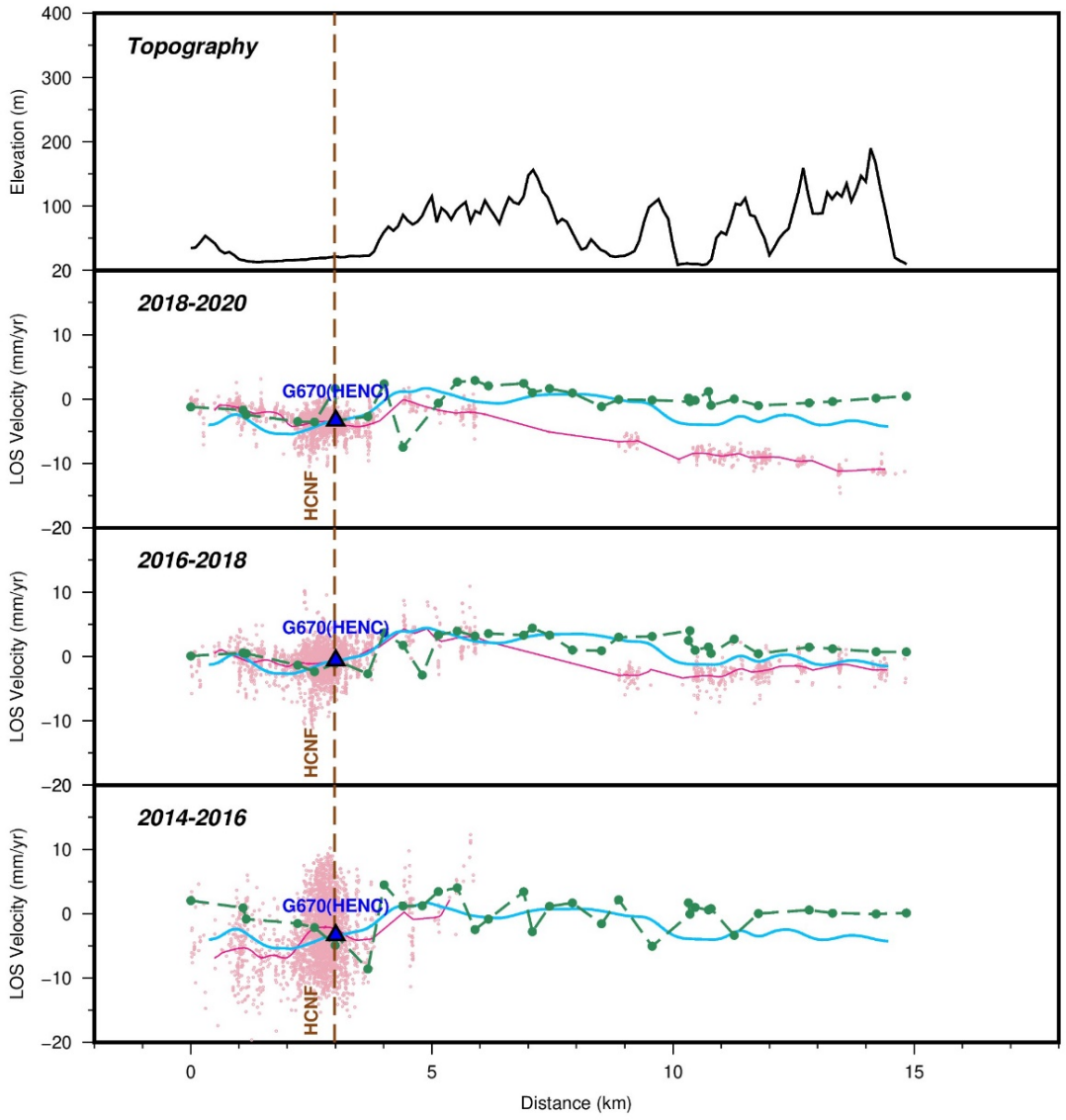


圖 3-4-8：水準測線-恆春西台地至佳樂水測線與 PSInSAR 資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 G670(HENC)。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。HCNF 為恆春斷層。

Figure 3-4-8 : Comparison of PSInSAR and Hengchun-Jialeshuei leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station G670(HENC). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCNF is Hengchun fault.

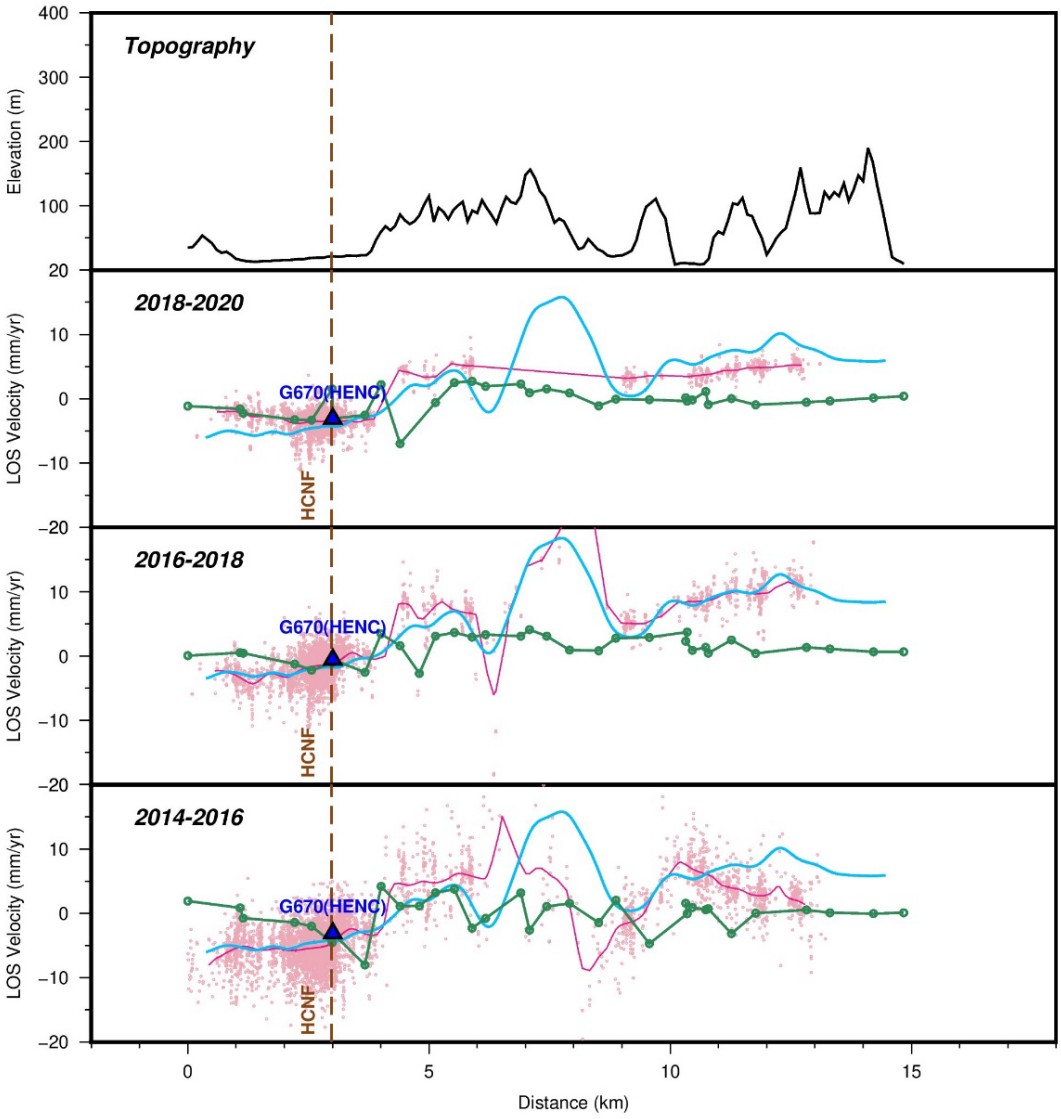


圖 3-4-9：水準測線-恆春西台地至佳樂水測線與 PSInSAR 資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2020 時間段比對、2016-2018 時間段比對及 2014-2016 時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為 PSInSAR 速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點 G670(HENC)。紅色線為 PSInSAR 在此時段的區域平均值、而藍色線則是自 2014 至 2020 的雷達平均速率。HCNF 為恆春斷層。

Figure 3-4-9 : Comparison of PSInSAR and Hengchun-Jialeshuei leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2020 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots is the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSInSAR velocity project to the leveling route; Red line and blue line indicate average LOS velocity of the specific time span and average between 2014 to 2020, respectively; blue triangle is the reference station G670(HENC). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCNF is Hengchun fault.

第四章、高屏地區雷達影像分析

4-1 StaMPS 參數測試與律定

為了律定出 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，首先取用 2014/10/22 至 2016/02/02 期間 Sentinel-1A 共 28 幅升軌道影像，以 2015/08/18 所拍攝的影像為主影像，進行七組的參數測試。首先以雷達強度散佈率預設門檻值 Threshold：0.6 和 Weed Standard Deviation (WSD)：1 為第 1 組的參數設定，萃取出約 141 萬 PS 點數（1418027），如圖 4-1-1 所示。其餘 6 組根據這兩項參數進行微調，雖然選取的 PS 點數有所差異，但整體研究區域的地表變形在空間上的趨勢和數值變化大致相同，相關的參數設定與 PS 點位數量可見表 4-1-1。考慮處理過程耗時及檔案大小因素，最終律定雷達強度散佈率門檻值為 0.75 和 WSD 為 1（表 4-1-1 第七組測試）作為本研究的 StaMPS 軟體參數數值，其萃取約 350 萬 PS 點數（3507807），如圖 4-1-2 所示，平均每平方公里的面積中約有 1753 個 PS 點數，足夠用以分析西南部的地表變形。

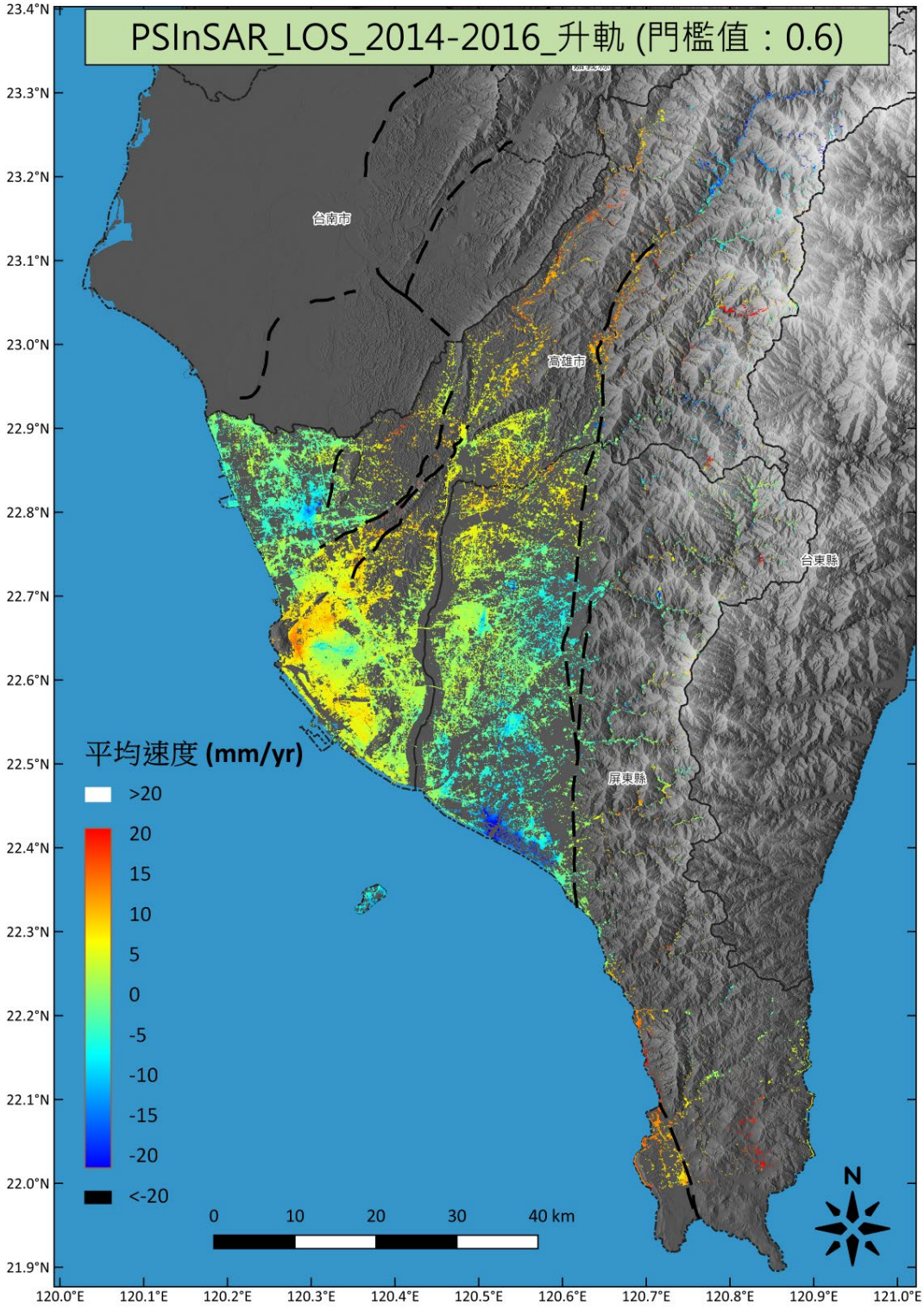


圖 4-1-1：資料處理門檻值 0.6 之 2014-2016 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-1-1 : Average velocity field between 2014 and 2016 processed with threshold of 0.6. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

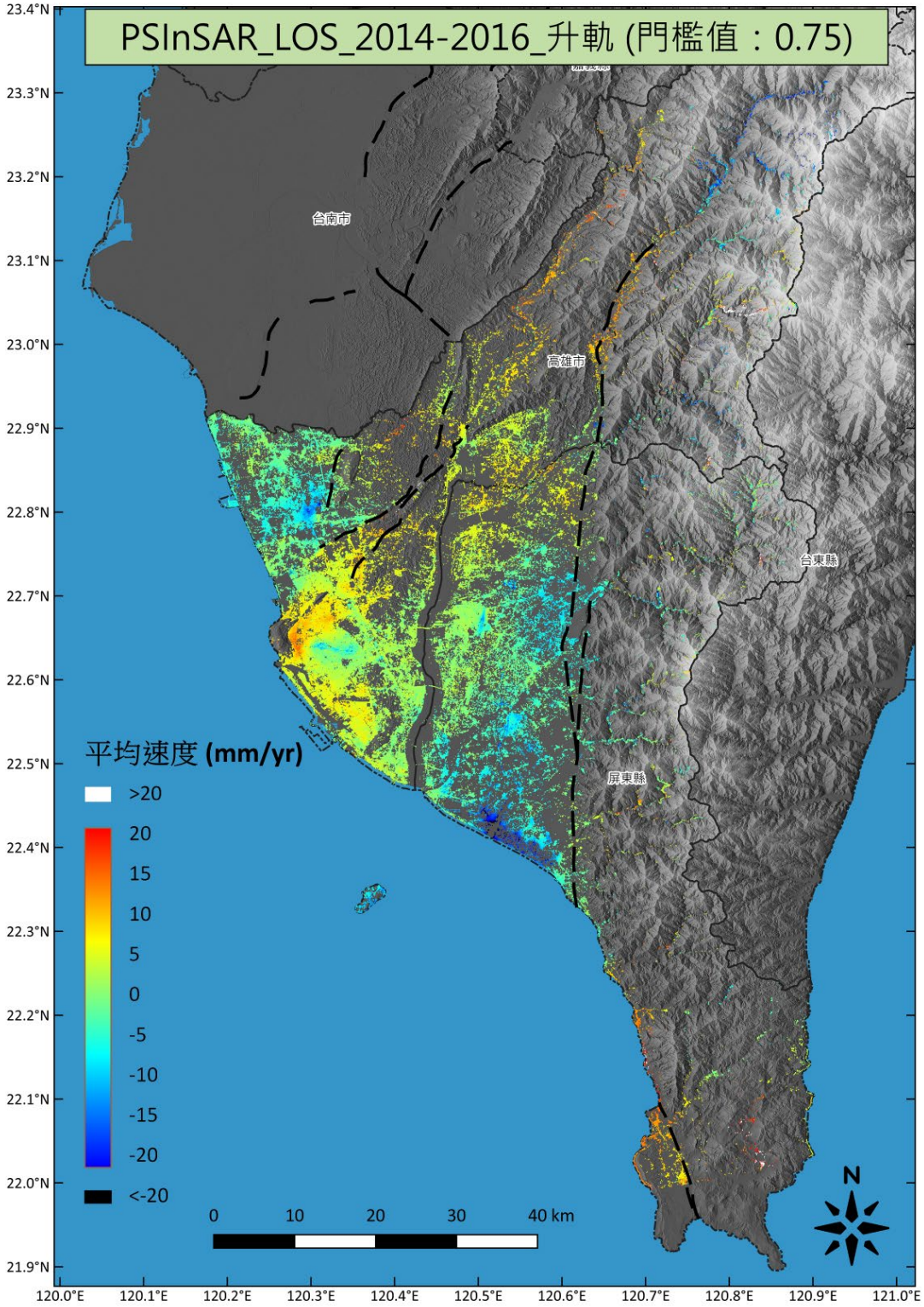


圖 4-1-2：資料處理門檻值 0.75 之 2014-2016 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-1-2 : Average velocity field between 2014 and 2016 processed with threshold of 0.75. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

表 4-1-1：2014-2016 處理參數及 PS 點數表。主影像為 2015/08/18。
Table 4-1-1 : Parameters and numbers of PSI points used in the 2014-2016 time slot. Master image was 2015/08/18.

測試組別	Threshold	WSD	PS 點數	其他
1	0.6	1	1418027	
2	0.7	1	2648608	
3	0.8	1	4509686	
4	0.8	0.9	4290253	density=25
5	0.8	0.9	4265394	
6	0.8	0.8	4012176	
7	0.75	1	3507807	

4-2 2014-2016 年雷達影像成果

從 2014/10/22 開始至 2016/02/02 之間，選取 28 幅 Sentinel-1A 升軌道（Ascending）影像，並以 2015/08/18 為主影像，此外，選取 18 幅 Sentinel-1A 降軌道（Descending）影像，並以 2015/08/20 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 2016 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分為三個部分：升降軌道的 LOS 速度場成果、跨斷層的速度場剖面分析、以及科學園區與都會區剖面分析，以下詳述各子節的分析成果。

4-2-1 升降軌道的 LOS 速度場成果

升軌道的 LOS 速度場結果如圖 4-2-1 所示。PSI 的 LOS 速度場數值大致分布在正負 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車瓜林斷層以南至高雄市沿海地區，主要呈現冷色系的地區分佈在小崗山斷層西側和屏東平原沿海地區。研究區域內的小崗山斷層和車瓜林斷層的兩側，有顯著的速度場差異；相對於上述兩個斷層，旗山斷層兩側的速度場差異則較不明顯；雖然潮州斷層的東側緊鄰山區，斷層上盤的 PS 點位資訊較少，但整體來說斷層兩側的差異不顯著；恆春斷層南段則因為衛星影像拍攝的限制，所以無法獲得 LOS 速度場的分析

成果。

降軌道的 LOS 速度場結果如圖 4-2-2 所示。PSI 的 LOS 速度場數值大致分布在正負 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小崗山斷層西側和高屏溪出海口兩側的地區，主要呈現冷色系的地區分佈在車瓜林斷層以南至高屏溪和屏東平原沿海地區。研究區域內的小崗山斷層的兩側有顯著的 LOS 速度場差異；車瓜林斷層南北段的 LOS 速度場有所差異；旗山斷層兩側的 LOS 速度場差異則較不明顯；雖然潮州斷層的東側緊鄰山區，斷層上盤的 PS 點位資訊較少，但整體來說斷層兩側的 LOS 速度場差異不顯著；恆春斷層兩側的 LOS 速度場差異整體來說也不顯著。

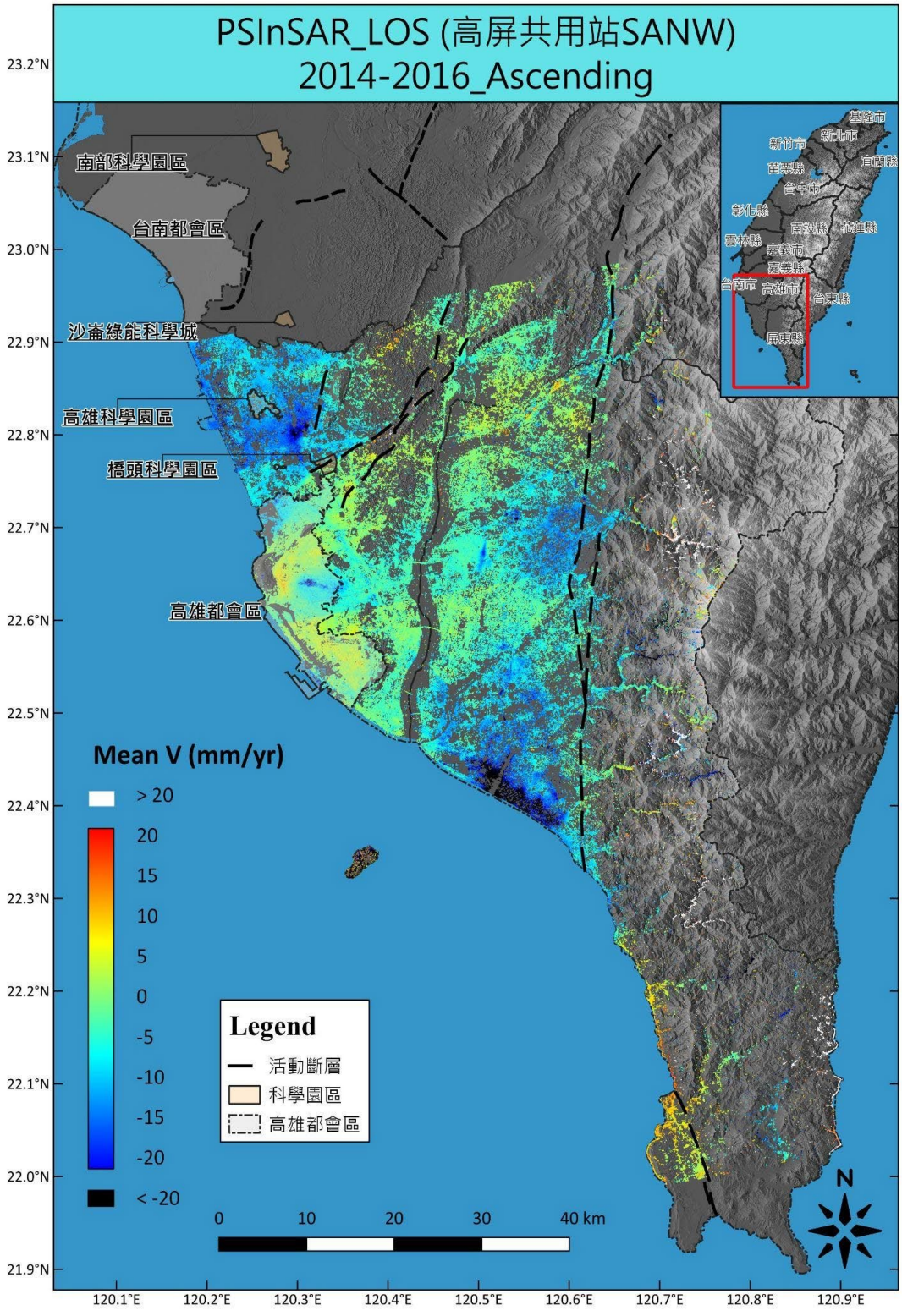


圖 4-2-1：2014-2016 升軌道影像的 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-2-1 : Average line of sight (LOS) velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

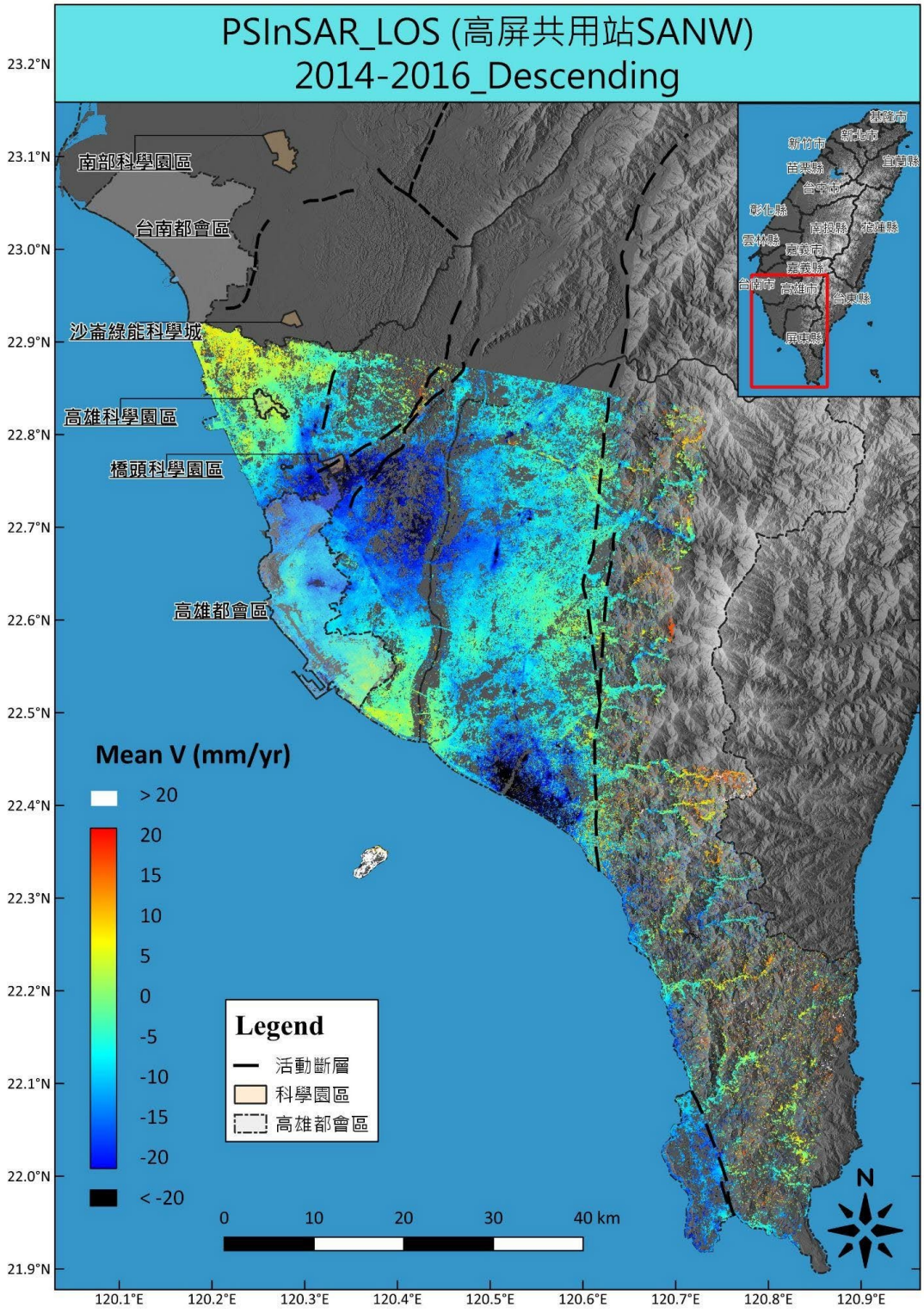


圖 4-2-2：2014-2016 降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-2-2 : Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

4-2-2 跨斷層的速度場剖面分析

本研究為了深入探討小崗山斷層、車瓜林斷層和恆春斷層在 2014 年至 2016 年的活動特性，因此在各個斷層沿線劃設數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。以下就各個斷層的分析成果進行詳細描述。

4-2-2-1 小崗山斷層

小崗山斷層總共有三條剖面，座落在斷層的北、中、南段三個位置。從升軌道的 LOS 速度場結果來看，中段和南段的斷層兩側差異比北段明顯（圖 4-2-3）。位於斷層北段的剖面 X1 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 3 至 4 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；在剖面 4.5 公里處有每年 3 至 4 mm 的 LOS 差異；在剖面 6 至 8 公里處是位在小崗山上，植被較為茂密因此 PS 點位較少且震盪較為劇烈。位於斷層中段的剖面 X2 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 5 至 6 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤。位於斷層南段的剖面 X3 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 6 至 7 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；在剖面 2 至 5 公里處顯示明顯的 LOS 速度場低值，其位移速率可達每年-10 至-20 mm，對應空間上的分佈應為斷層西南方區域性的地表活動所致。

從降軌道的 LOS 速度場結果來看，北段和南段的斷層兩側差異比中段明顯（圖 4-2-4）。剖面 X1 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 5 至 6 mm/yr

的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤；在剖面 3 和 4 公里處每年有 3 至 4 mm 的 LOS 差異；在剖面 6 至 8 公里處也因為小崗山的植被較為茂密，因此 PS 點位較少。剖面 X2 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 2 至 3 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤；在剖面 3 和 4 公里處每年有 5 至 6 mm 的 LOS 差異。剖面 X3 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 5 至 6 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率小於上盤；在剖面 2 至 5 公里處顯示明顯的 LOS 速度場低值，其位移速率可達每年-10 至-20mm，對應空間上的分佈應為斷層西南方區域性的地表活動所致，此現象與升軌道的剖面一致。

4-2-2-2 車瓜林斷層

車瓜林斷層總共有五條西北－東南走向的剖面，由東向西座落在斷層上。前兩條剖面跨過車瓜林和旗山斷層，第三和第四條剖面只有跨過車瓜林斷層，最西側的第五條剖面鄰近海岸線，並未跨過斷層。從升軌道的 LOS 速度場結果來看，車瓜林斷層兩側的 LOS 差異顯著（圖 4-2-5）。從剖面 C1 至 C4 結果可以發現，在跨過車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場皆有 10 mm/yr 以上的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 C5 雖然沒有顯示車瓜林斷層通過，但是順著空間上斷層的分佈與線性差異的延伸，可以在剖面 P5 的 10 公里處交錯，此處也存在 5mm/yr 的差異，此外，在 7 至 8 公里之間有顯著的 LOS 速度場低區，其值約在 -15mm/yr。

從降軌道的 LOS 速度場結果來看，車瓜林斷層兩側的 LOS 差異顯著（圖 4-2-6）。從剖面 C1 至 C3 結果可以發現，在跨過車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場皆有 10 至 15 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 遠離速率大於下盤；剖面 C2 的結果在旗山斷層的兩側有每年 5mm 的 LOS 速度場差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於

上盤；剖面 C4 結果並未顯示車瓜林斷層兩側有速度場的差異；剖面 C5 結果指出在 10 公里處約有 2mm/yr 的 LOS 速度場差異，在 7 至 8 公里之間也有顯著的 LOS 速度場低區，其值約在-20mm/yr，這與升軌道的結果相互吻合，可能是局部區域的地表沉降行為。

4-2-2-3 恆春斷層

恆春斷層總共有六條東西方向的剖面，自北向南逐一排列。這個時間段的升軌道影像受到拍攝的限制，所以只有斷層中段以北的 LOS 速度場（圖 4-2-7）。剖面 H1 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 4 至 5 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H2 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 1 至 3 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H3 結果指出在斷層跨過的位置，其 LOS 速度場相較於兩側是較低，約有 2 至 3 mm/yr 的差異，斷層上盤與下盤之間的差異不明顯。

從降軌道的 LOS 速度場結果來看，恆春斷層北段兩側的 LOS 差異相較其他地方顯著（圖 4-2-8）。剖面 H1 結果顯示在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場有 5 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H2 至 H6 結果顯示在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場差異皆小於 2 mm/yr。

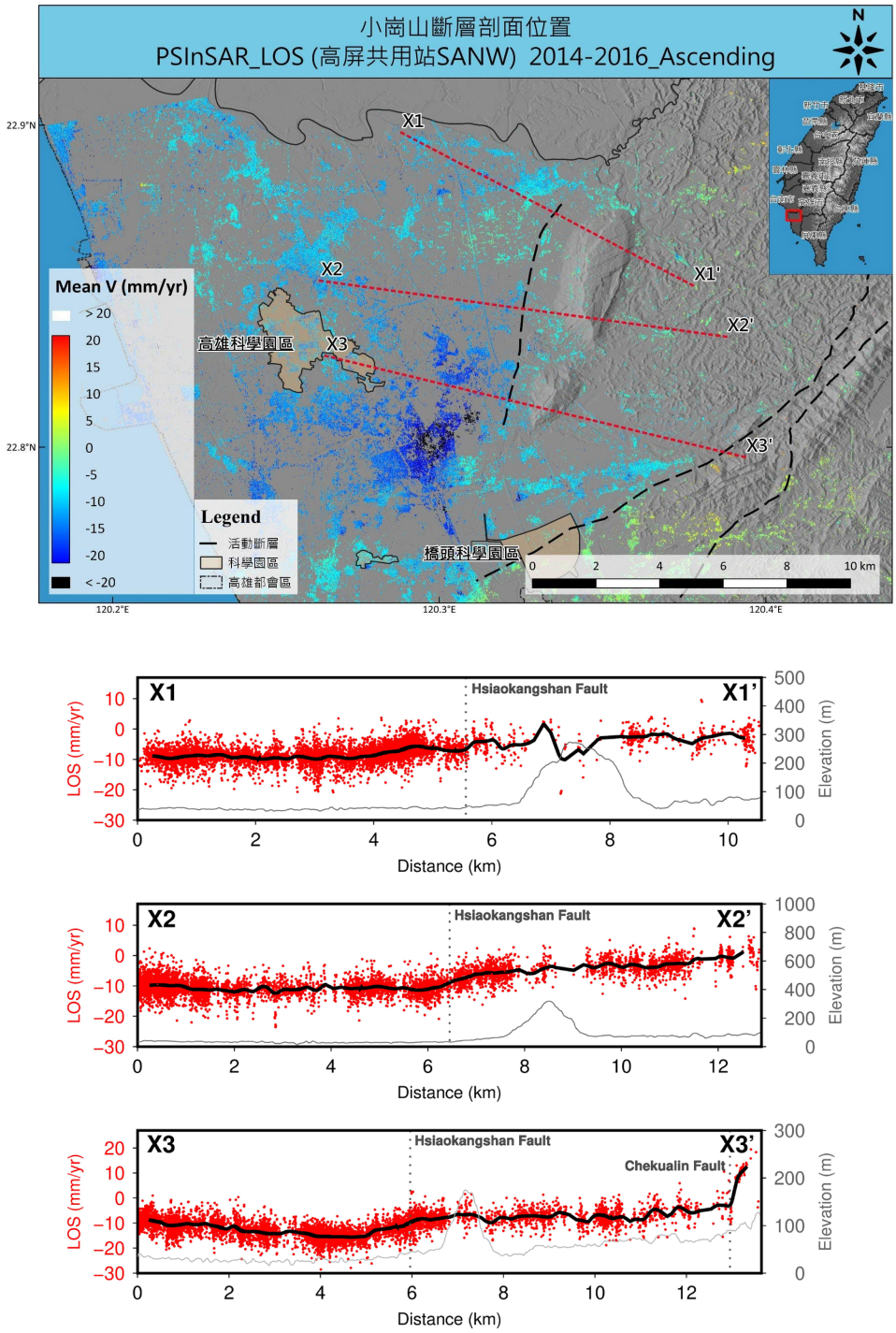


圖 4-2-3：2014-2016 小崗山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-3：Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of ascending orbits and profiles across the HsiaoKangShan Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

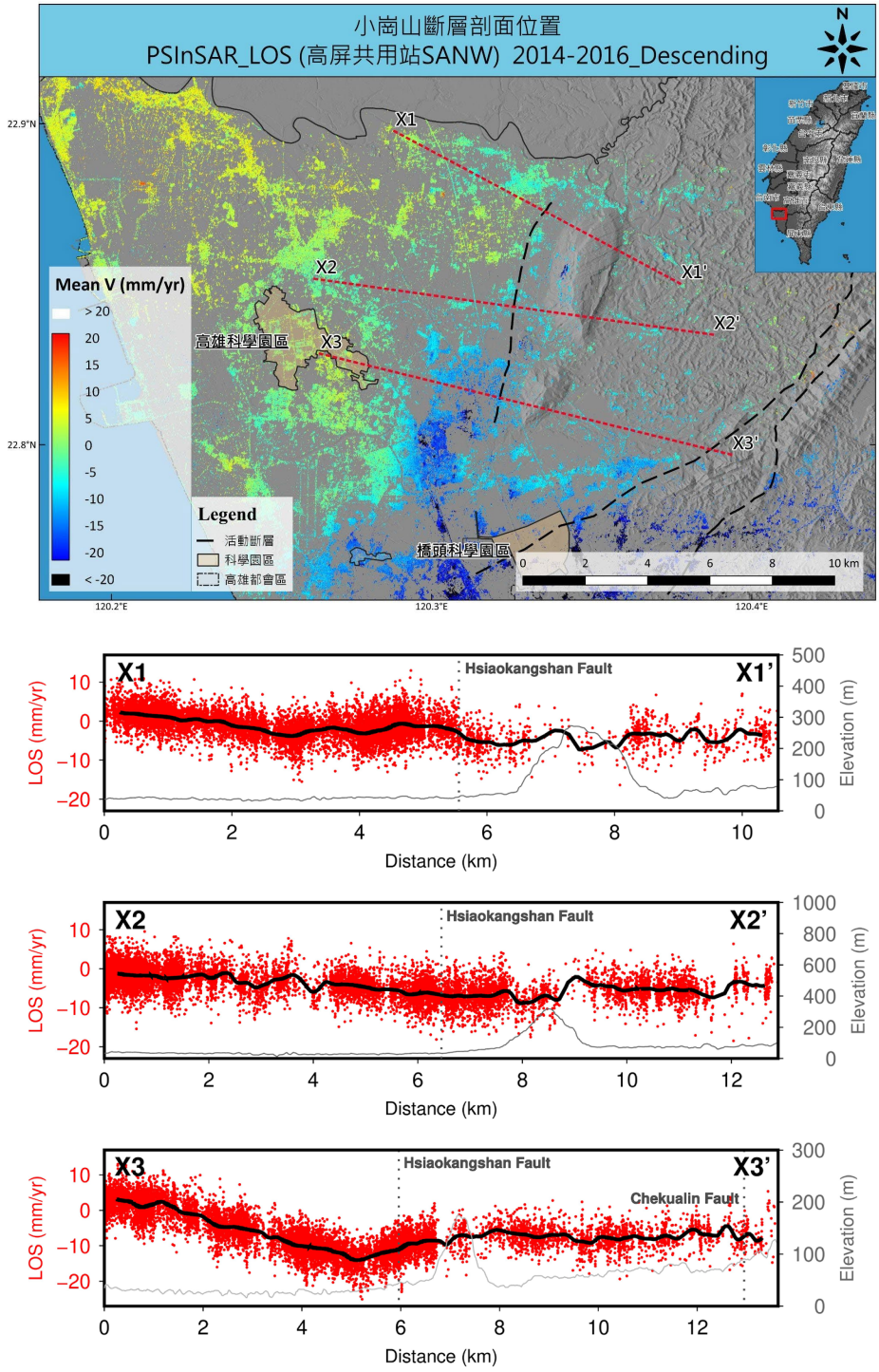
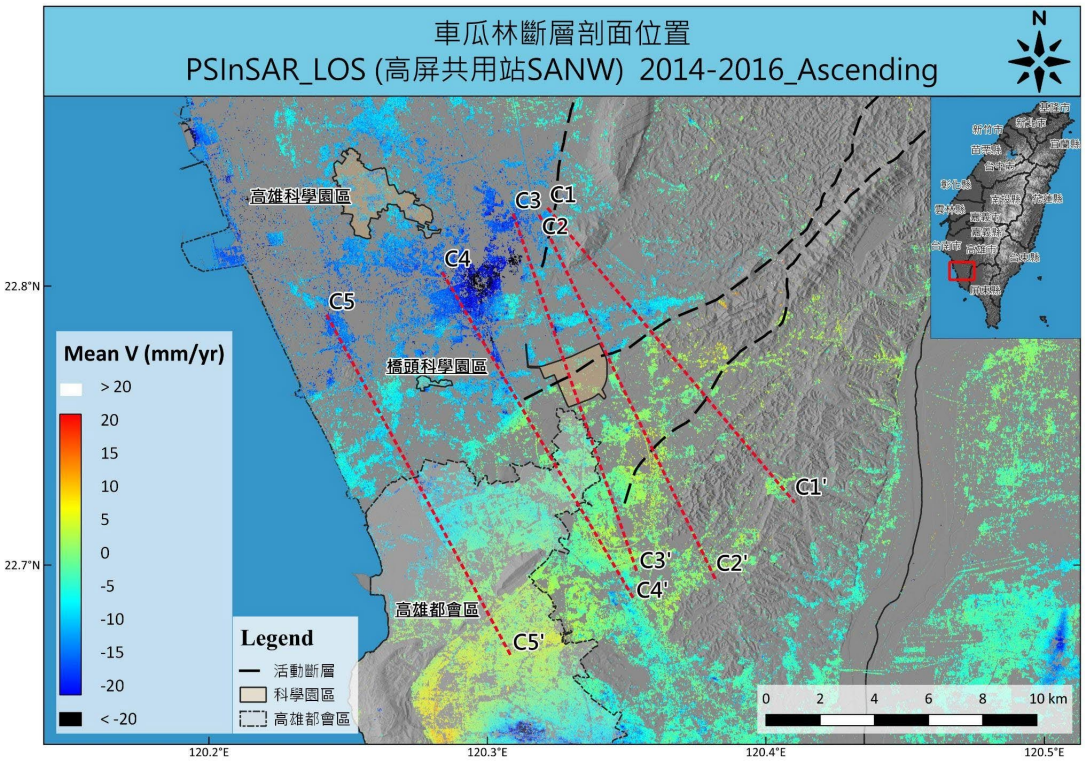


圖 4-2-4：2014-2016 小崗山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-4：Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of descending orbits and profiles across the HsiaoKangShan Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


車瓜林斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2014-2016_Ascending
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

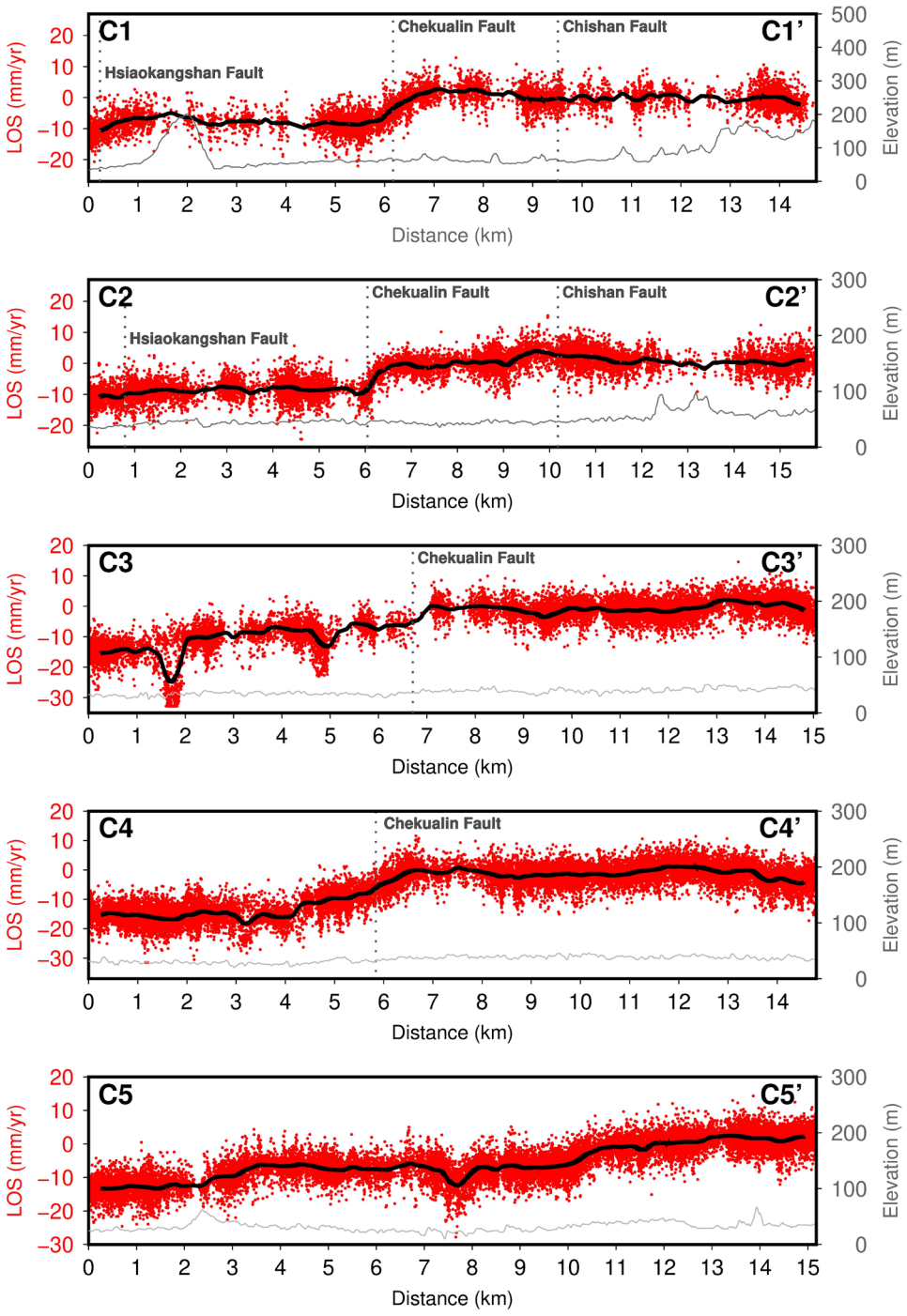
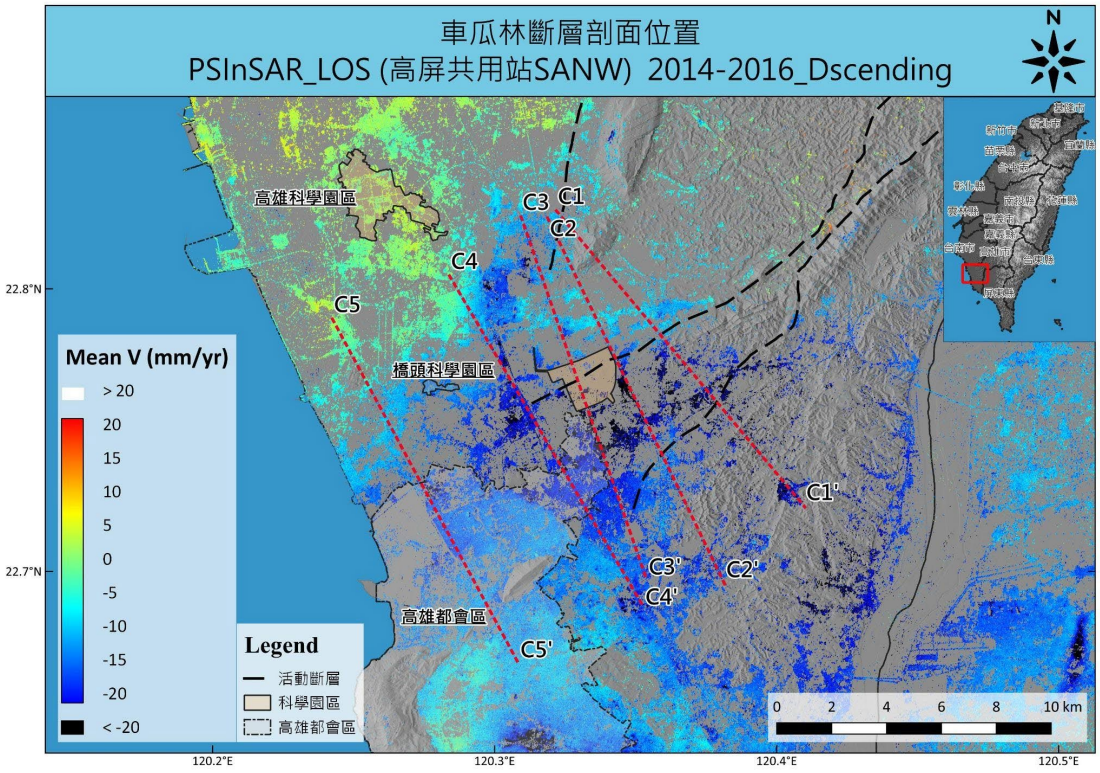


圖 4-2-5：2014-2016 車瓜林斷層升軌道影像的 LOS 速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-5 : Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of ascending orbits and profiles across the CheKuaLin Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


車瓜林斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2014-2016_Dscending
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

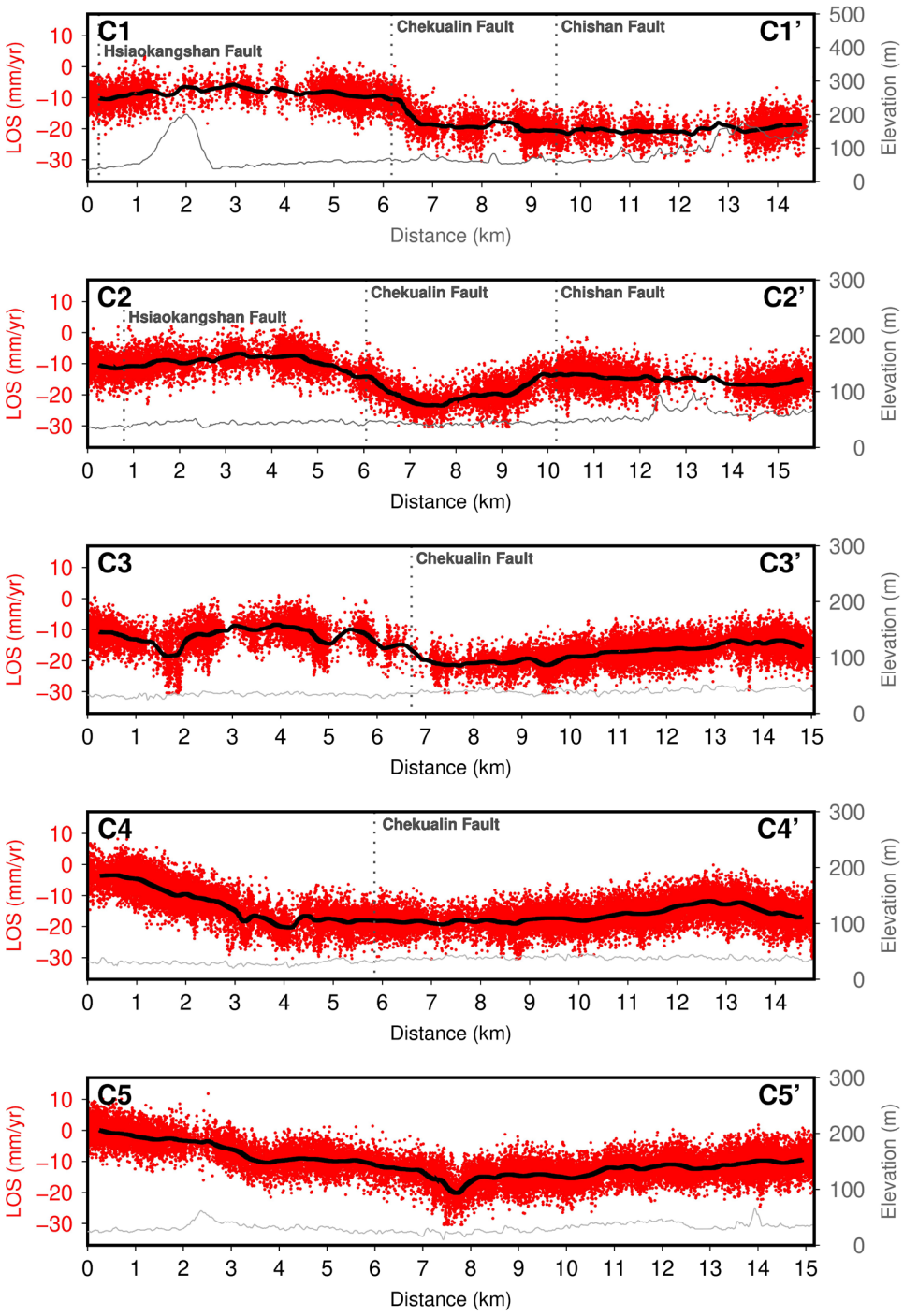
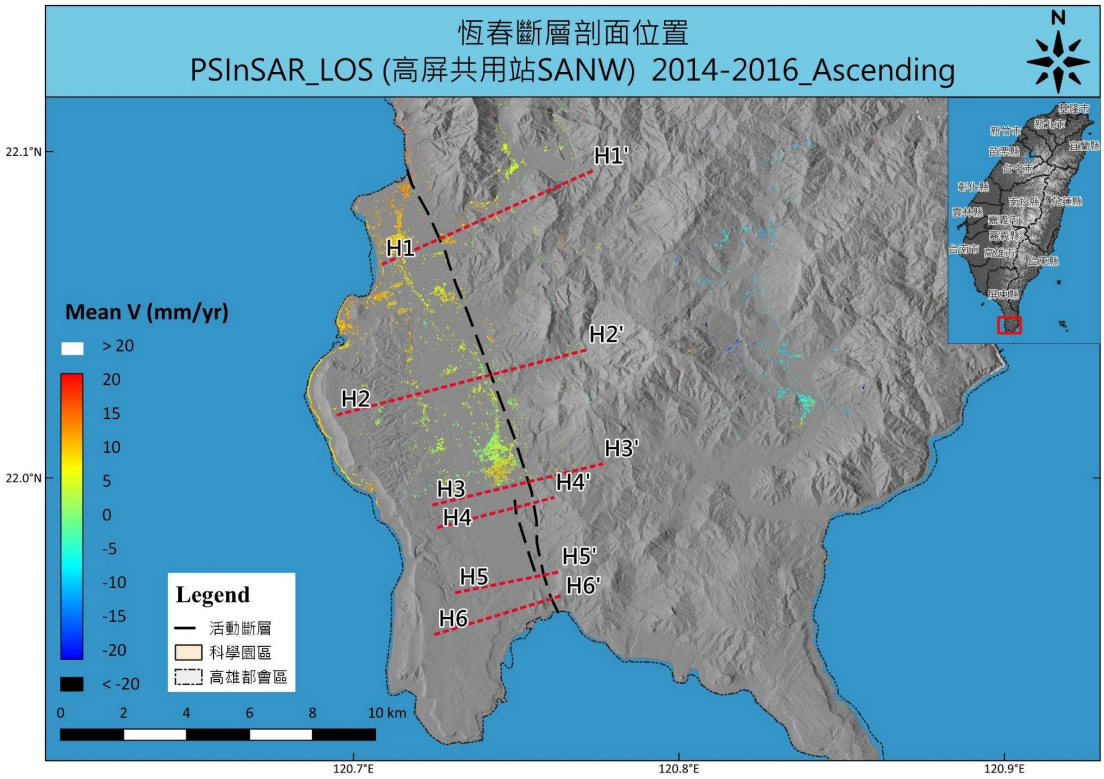


圖 4-2-6：2014-2016 車瓜林斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-6 : Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of descending orbits and profiles across the CheKuaLin Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


恆春斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2014-2016_Ascending
N
22.1°N
22.0°N
120.7°E
120.8°E
120.9°E
H1'
H1
H2'
H2
H3'
H3
H4'
H4
H5'
H5
H6'
H6
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km

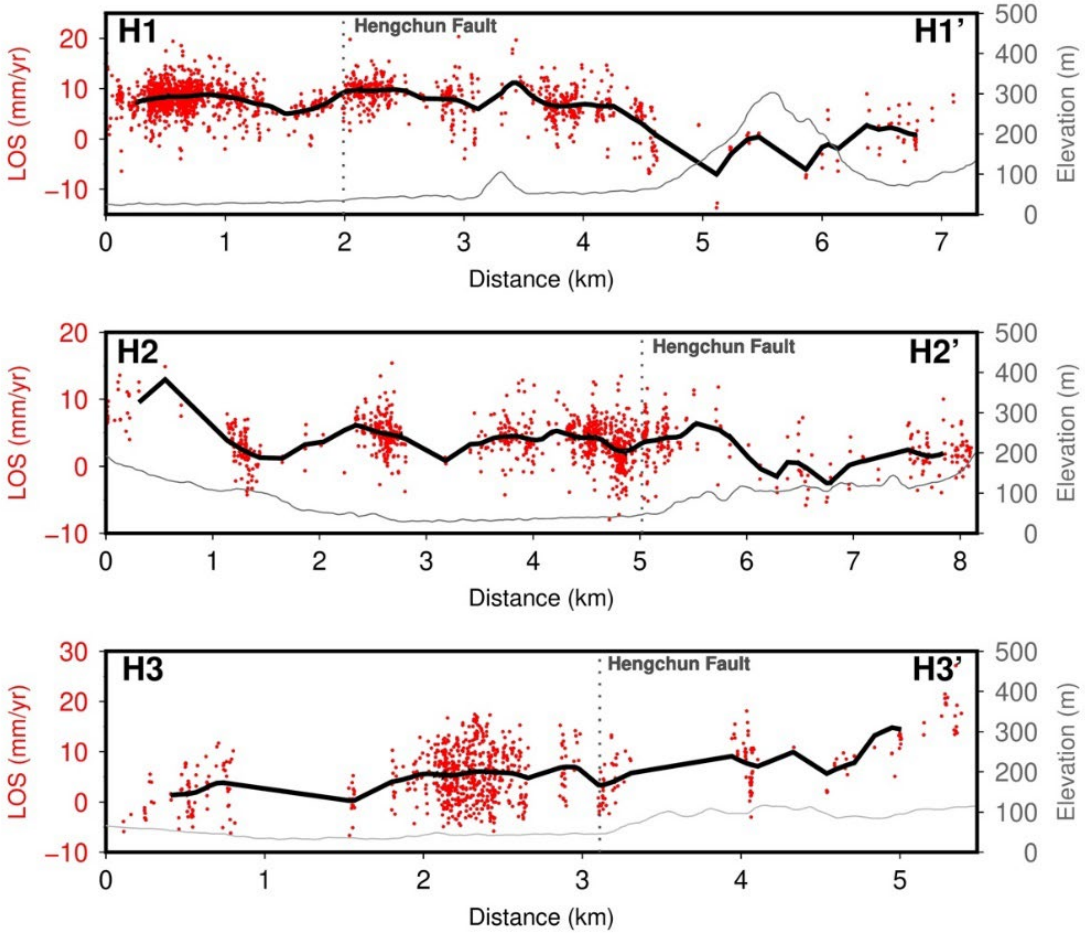
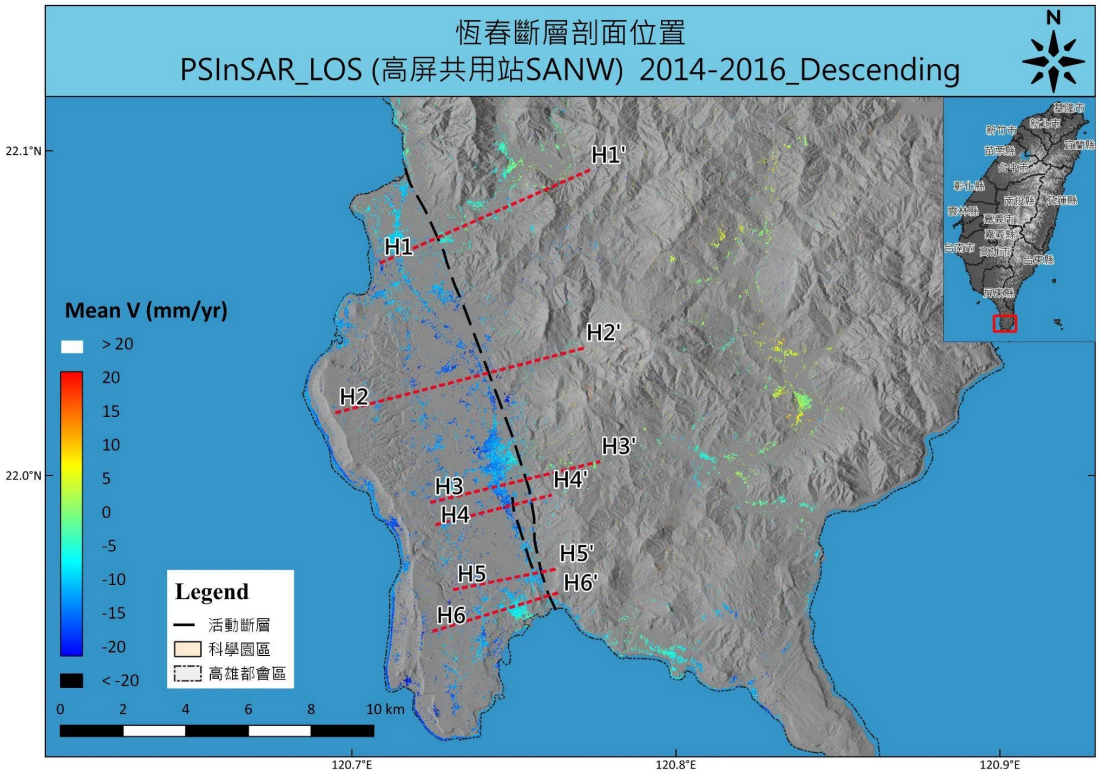


圖 4-2-7：2014-2016 恆春斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-7：Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of ascending orbits and profiles across the HengChun Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


恆春斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2014-2016_Descending
N
22.1°N
22.0°N
120.7°E
120.8°E
120.9°E
H1'
H1
H2'
H2
H3'
H3
H4'
H4
H5'
H5
H6'
H6
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km

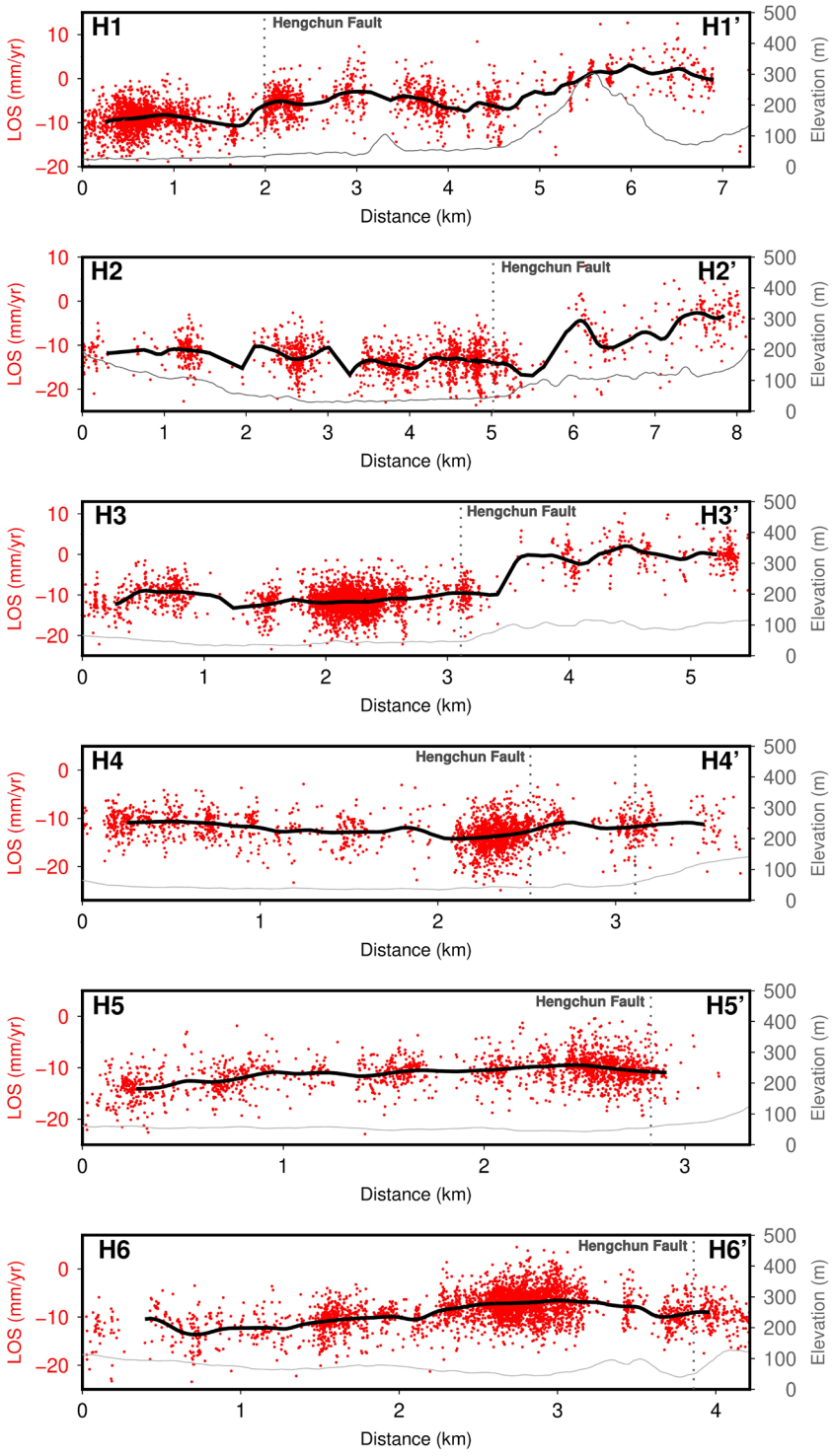


圖 4-2-8：2014-2016 恆春斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-8 : Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of descending orbits and profiles across the HengChun Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-2-3 科學園區和都會區剖面分析

本研究為了深入了解都會區和科學園區的地表活動特性，因此分別在橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區和北高雄平原區，劃設數條橫跨南北和東西方向的剖面進行分析。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。以下就各區的分析成果進行詳細描述。

4-2-3-1 橋頭科學園區

橋頭科學園區有兩條剖面通過，SC1 是南北方向剖面，SC2 是東西方向剖面。SC1 剖面的升軌道結果指出（圖 4-2-9）跨過車瓜斷層約有 5 至 10 mm/yr 的差異，斷層斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；SC1 剖面的降軌道結果指出（圖 4-2-10）跨過車瓜斷層約有 5 至 10 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤。SC2 剖面的升軌道結果指出（圖 4-2-9）跨過車瓜斷層約有 5 至 10 mm/yr 的差異，斷層斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；SC2 剖面的降軌道結果指出（圖 4-2-10）跨過車瓜斷層約有 5-10 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤。兩個飛行方向所觀測到的地表位移行為正好相反，表示此區域的地表變形應以水平方向活動為主。

4-2-3-2 高雄科學園區

高雄科學園區有兩條剖面通過，SK1 是南北方向剖面，SK2 是東西方向剖面。升軌道的 SK1 剖面和 SK2 剖面（圖 4-2-9）的數值都維持在-10 mm/yr 左右，而降

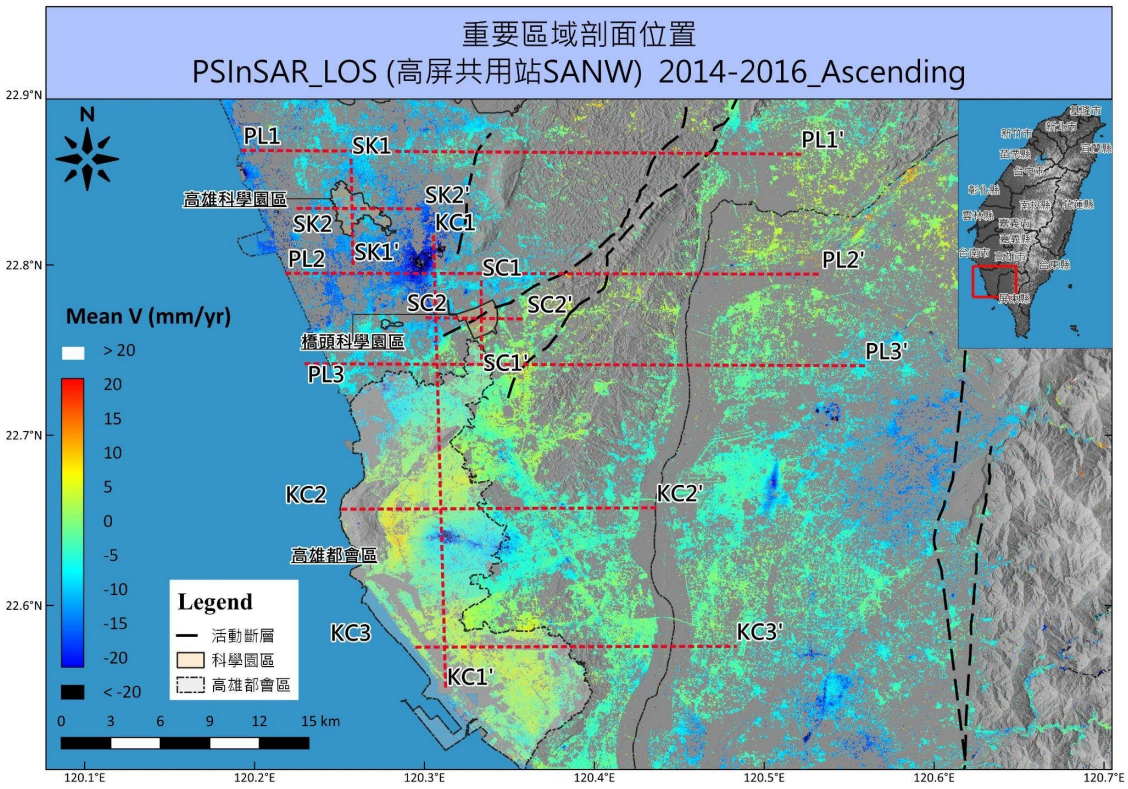
軌道的 SK1 剖面和 SK2 剖面（圖 4-2-10）的數值都維持在 0 mm/yr 左右，總合兩個飛行方向所觀測到的 PSI 地表位移結果，可初步推測此區域的地表變形應以水平方向活動為主，其中往南位移的分量為主導。

4-2-3-3 高雄都會區

高雄都會區有三條剖面通過，KC1 是南北方向剖面，KC2 和 KC3 是東西方向剖面。KC1 剖面的升軌道（圖 4-2-9）和降軌道（圖 4--210）的結果都指出在 20 公里處有顯著的 LOS 遠離訊號，其值都可達-20 至-30 mm/yr，代表該處有地表沉降的行為，相對應空間位置則座落在高雄都會區之中；在 KC1 剖面 20 公里之後，升軌道和降軌道的結果相當一致，但是在 20 公里前的 LOS 速度場則不一致，應與該地區有數條斷層通過相關。KC2 剖面的升軌道（圖 4-2-9）和降軌道（圖 4-2-10）結果都在 15 至 16 公里處有明顯的低值出現，可能與鳳山斷層的活動有關。KC3 剖面的升軌道結果顯示（圖 4-2-9）LOS 位移速率大多都在 5mm/yr 之間，降軌道結果顯示（圖 4-9-10）LOS 位移速率大多都在 0 至-10mm/yr 之間，其餘數值震盪較大的地方都是 PS 點位較稀疏的地區。

4-2-3-4 北高雄平原區

北高雄平原區有三條剖面通過，剖面 PL1、剖面 PL2 和剖面 PL3 都是東西方向的剖面。總觀 PL1、PL2 和 PL3 剖面在升軌道（圖 4-2-9）和降軌道（圖 4-2-10）的觀測結果，除了 PL2 剖面在八公里處的低值現象是相同的之外，在車瓜林斷層以北和旗山斷層以南的 LOS 位移速率都呈現相反的趨勢，可初步推測這兩個區域的活動特性為水平運動，同時兩者的活動方向正好相反。


重要區域剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2014-2016_Ascending
N
PL1
SK1
PL1'
高雄科學園區
SK2'
SK2
KC1
PL2
SK1'
SC1
PL2'
SC2
SC2'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
橋頭科學園區
SC1'
PL3
PL3'
KC2
KC2'
高雄都會區
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
KC3
KC3'
KC1'
0 3 6 9 12 15 km
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E

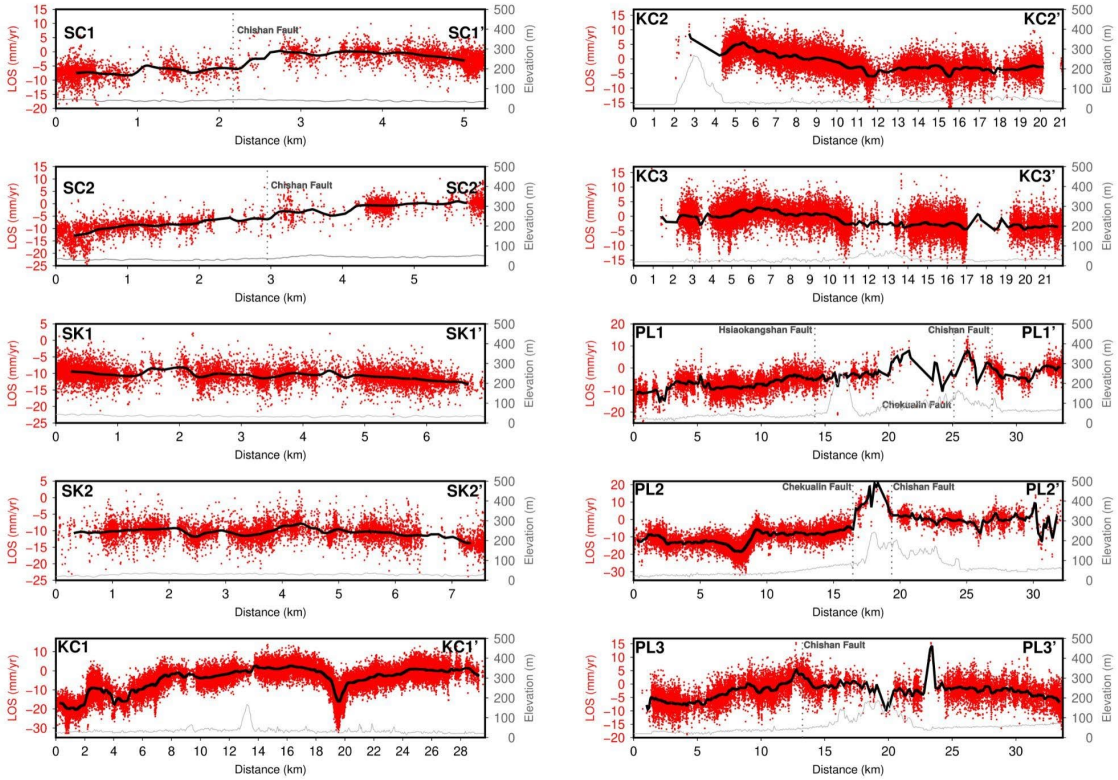
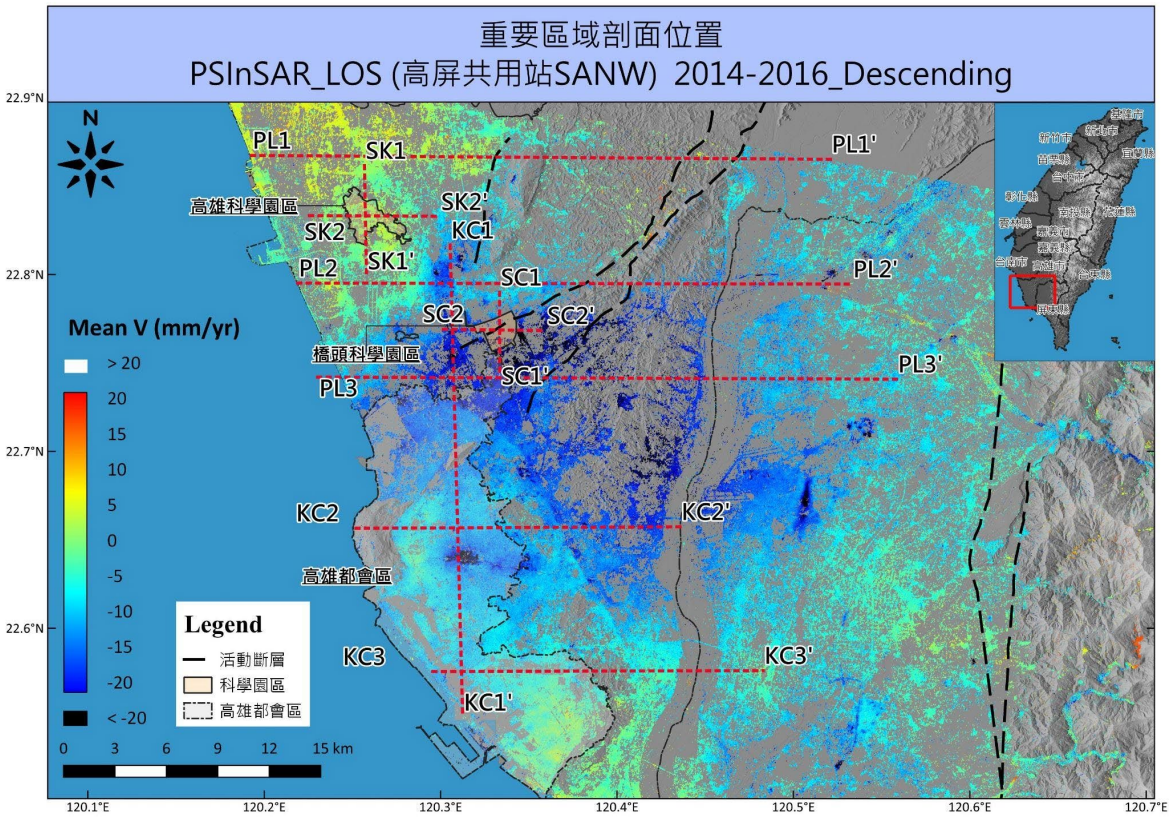


圖 4-2-9：2014-2016 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-9 : Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of ascending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


重要區域剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2014-2016_Descending
N
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
0 3 6 9 12 15 km
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
PL1
PL1'
SK1
SK2'
高雄科學園區
SK2
KC1
PL2
SK1'
PL2'
SC1
SC2
SC2'
橋頭科學園區
SC1'
PL3
PL3'
KC2
KC2'
高雄都會區
KC3
KC3'
KC1'
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E

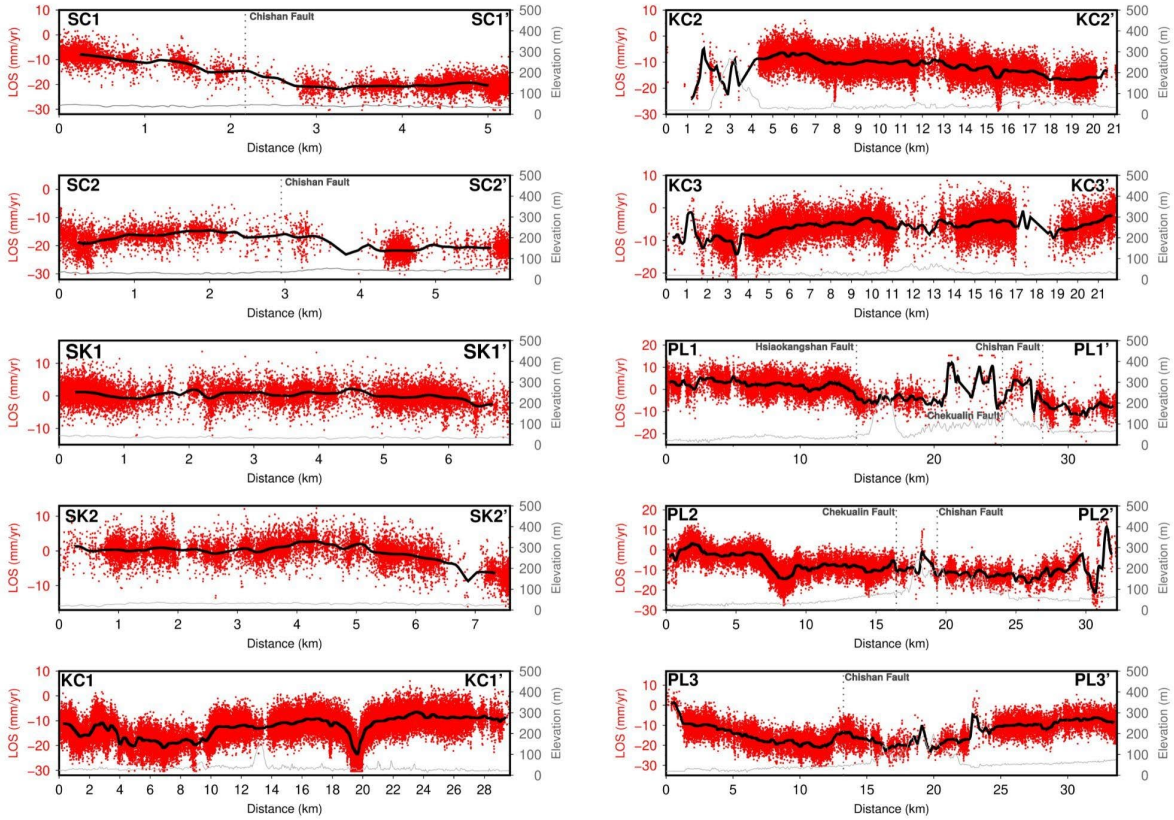


圖 4-2-10：2014-2016 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-2-10 : Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of descending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-3 2016-2018 年雷達影像成果

自 2016 年開始，Sentinel-1A 衛星規律的以每 12 天的頻率拍攝研究區域一次，同時墾丁半島也被完整的拍攝。從 2016/02/14 開始至 2018/02/03 之間，選取 58 幅 Sentinel-1A 升軌道影像，並以 2016/08/12 為主影像，此外，選取 42 幅 Sentinel-1A 降軌道影像，並以 2016/08/14 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 2016 年至 2018 年研究區域內 LOS 位移速度場。本小節的分析成果可分為三個部分：升降軌道的 LOS 速度場成果、跨斷層的速度場剖面分析、以及科學園區與都會區剖面分析，以下詳述各子節的分析成果。

4-3-1 升降軌道的 LOS 速度場成果

升軌道的 LOS 速度場結果如圖 4-3-1 所示。PSI 的 LOS 速度場數值大致分布在正負 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小崗山斷層以東至高屏溪以西，南至高雄市沿海地區，主要呈現冷色系的地區分佈在高雄科學園區以西至沿海地區，以及屏東平原沿海地區，另外，在高雄都會區東側有顯著的線型分佈。研究區域內的小崗山斷層和車瓜林斷層的兩側，有顯著的速度場差異；相對於上述兩個斷層，旗山斷層兩側的速度場差異則較不明顯；潮州斷層東側山區的 PS 點位資訊雖然較少，但整體來說斷層兩側的差異不顯著；恆春斷層北段兩側的 LOS 速度場差異比南段來得大。

降軌道的 LOS 速度場結果如圖 4-3-2 所示。PSI 的 LOS 速度場數值大致分布在 5 至-20 mm/yr 之間，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在高雄科學園區、小崗山斷層東側和高屏溪出海口兩側的地區，主要呈現冷色系的地區分佈在小崗山斷層西側、車瓜林斷層以南至高屏溪、以及屏東平原沿海地區。研究區域內的小崗山斷層的兩側有顯著的 LOS 速度場差異；車瓜林斷層南北段的 LOS 速度場有所差異；旗山斷層兩側的 LOS 速度場差異則較不明顯；潮州斷層南北兩段的 LOS 速度場有所差異；恆春斷層北段兩側的 LOS 速度場差異比南段來得大。

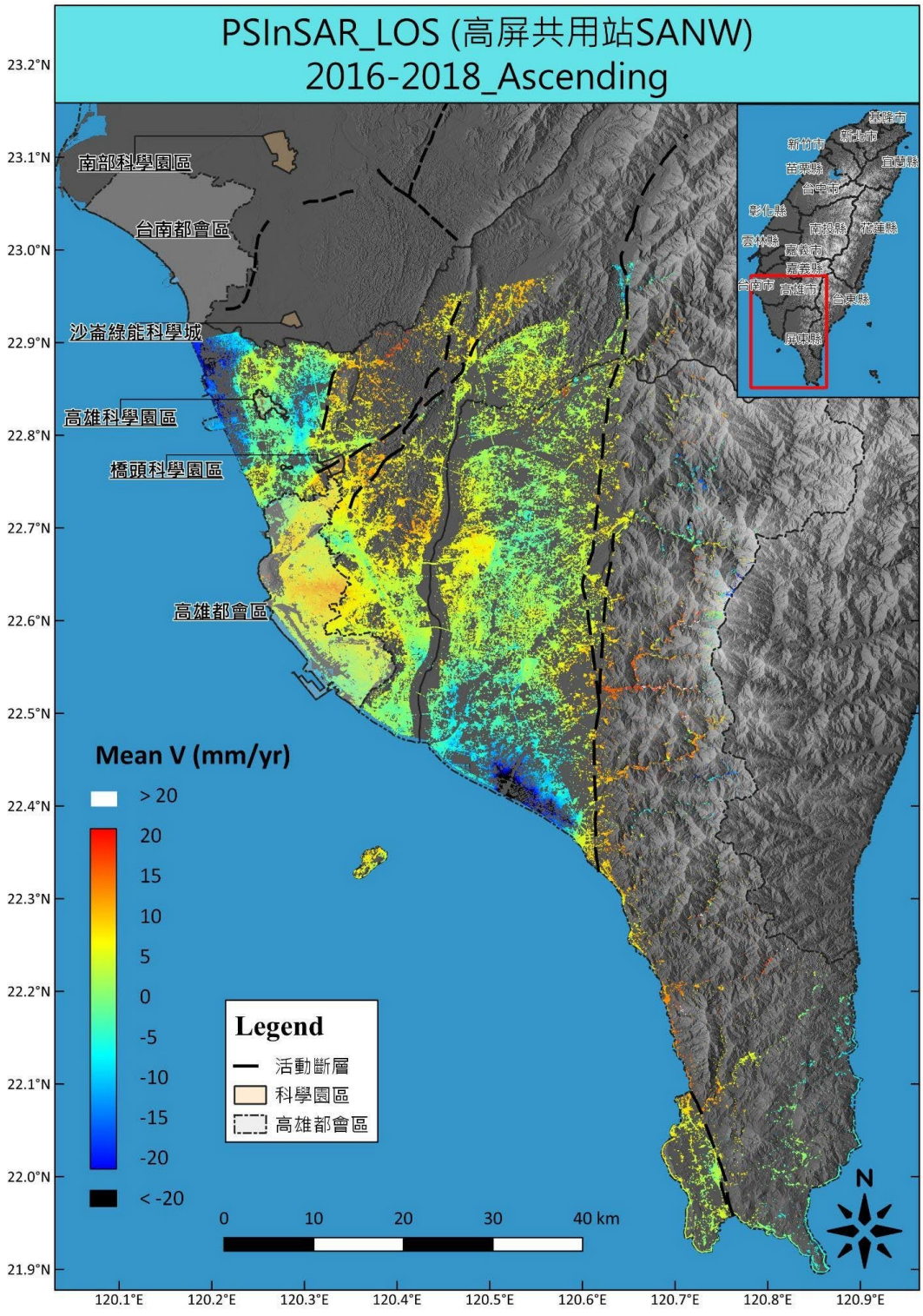


圖 4-3-1：2016-2018 升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-3-1 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

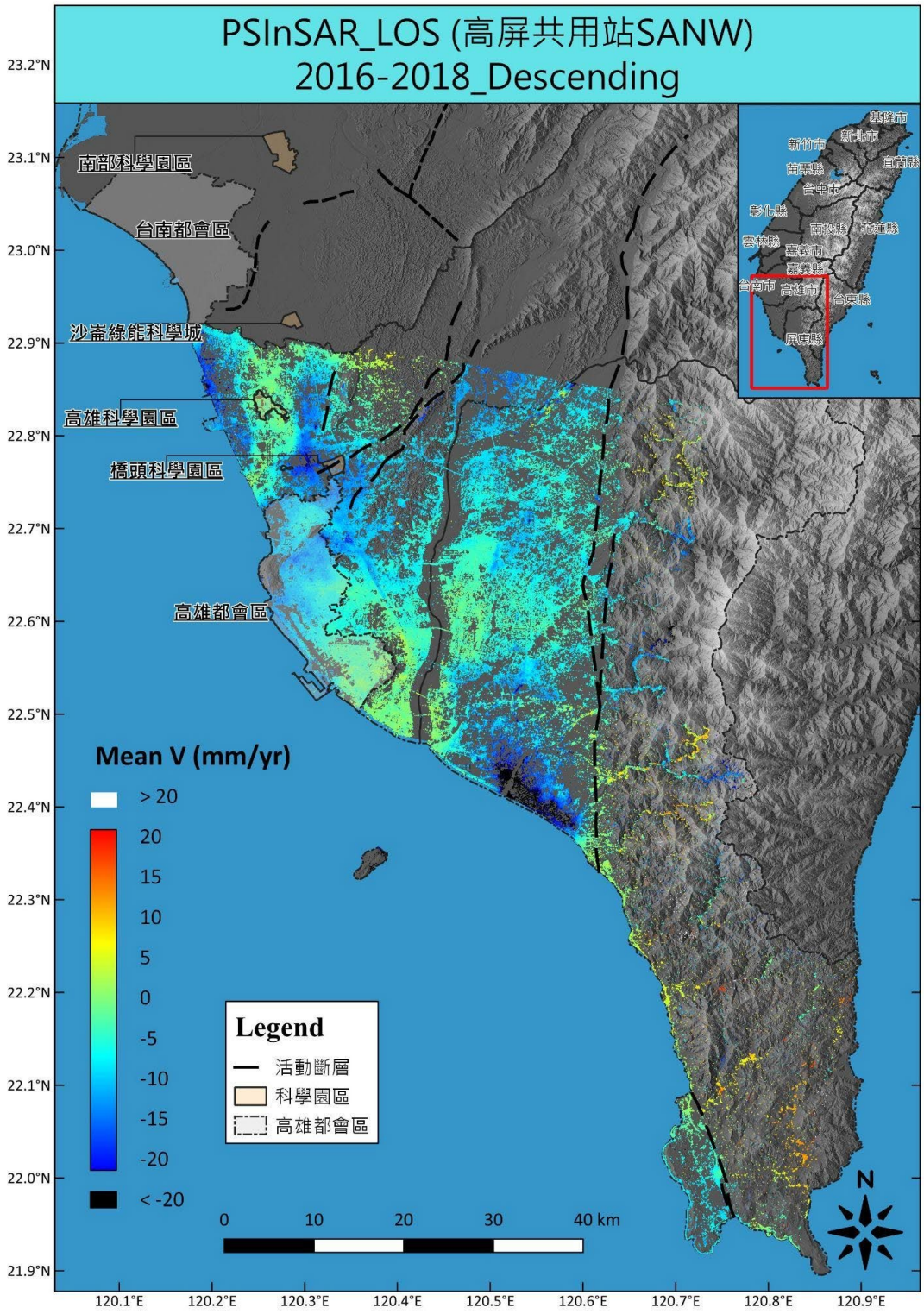


圖 4-3-2：2016-2018 降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-3-2 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

4-3-2 跨斷層的速度場剖面分析

本研究為了深入探討小崗山斷層、車瓜林斷層和恆春斷層在 2016 至 2018 年的活動特性，因此在各個斷層沿線劃設數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。以下就各個斷層的分析成果進行詳細描述。

4-3-2-1 小崗山斷層

小崗山斷層總共有三條剖面，座落在斷層的北、中、南段三個位置。從升軌道的 LOS 速度場結果來看，北段和中段的斷層兩側差異比南段明顯（圖 4-3-3）。位於斷層北段的剖面 X1 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 8-10 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；在剖面 6 至 8 公里處是位在小崗山上，植被較為茂密，因此 PS 點位較少。位於斷層中段的剖面 X2 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 10-15 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；在剖面 3 至 4 公里處，LOS 速度場有顯著低值呈現，其伸張速率約為每年 8-10 mm。位於斷層南段的剖面 X3 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 5-6 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；在剖面 3 公里處顯示明顯的 LOS 速度場低值，其位移速率可達每年-10 mm，對應空間上的分佈應為斷層西南方區域性的地表活動所致。

從降軌道的 LOS 速度場結果來看，中段和南段的斷層兩側差異比北段明顯（圖 4-3-4）。剖面 X1 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場未有明顯的差異。

剖面 X2 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 7 至 8 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤;在剖面 2 和 4 公里處每年有超過 10 mm 的 LOS 差異；在剖面 8 至 9 公里處也因為小崗山的植被較為茂密，因此 PS 點位較少，數值也較為震盪。剖面 X3 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 7 至 8 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；在剖面 2 至 4 公里處顯示明顯的 LOS 速度場低值，其位移速率可達每年-15mm，對應空間上的分佈應為斷層西南方區域性的地表活動所致，此現象與升軌道的剖面一致。

4-3-2-2 車瓜林斷層

車瓜林斷層總共有五條西北－東南走向的剖面，由東向西座落在斷層上。前兩條剖面跨過車瓜林和旗山斷層，第三和第四條剖面只有跨過車瓜林斷層，最西側的第五條剖面鄰近海岸線，並未跨過斷層。從升軌道的 LOS 速度場結果來看，車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場有顯著差異（圖 4-3-5）。從剖面 C1 至 C4 結果可以發現，在跨過車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場差異自東向西逐漸變大，從 5 mm/y 的差異漸增至 10 mm/yr 以上的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 P5 雖然沒有顯示車瓜林斷層通過，但是順著空間上斷層的分佈與線性差異的延伸，可以在剖面 C5 的 10 公里處交錯，此處也存在 4 至 5 mm/yr 的差異。

從降軌道的 LOS 速度場結果來看，車瓜林斷層兩側的 LOS 差異並未如升軌道顯著（圖 4-3-6）。從剖面 C1 至 C4 結果可以發現，在跨過車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場皆低於 6 mm/yr 的差異，剖面 C1 和 C2 斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤，剖面 C3 斷層下盤的 LOS 位移速率等於上盤，剖面 C4 則是斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤。；剖面 C4 結果指出在 3 至 4 公里處有 LOS 速度場的低區，其值約在-20mm/yr；剖面 C5 結果指出 LOS 速度場大多分佈在 0 至-10 mm/yr 之

間，在 10 公里的交錯處並未像升軌道結果有顯著的差異。

4-3-2-3 恆春斷層

恆春斷層總共有六條東西方向的剖面，自北向南逐一排列。從升軌道的 LOS 速度場結果來看（圖 4-2-7），剖面 H1 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 5-6 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H2 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 3-4 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H3 和 H4 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 2-3 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H5 和 H6 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場差異皆低於 2 mm/yr，斷層上下盤無明顯活動性。

從降軌道的 LOS 速度場結果來看，恆春斷層北段兩側的 LOS 差異相較其他地方顯著（圖 4-2-8）。剖面 H1 結果顯示在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場有 5 至 6 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H2 結果顯示在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場有 3 至 4 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤；剖面 H3 至 H6 結果顯示在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場差異皆小於 2mm/yr。

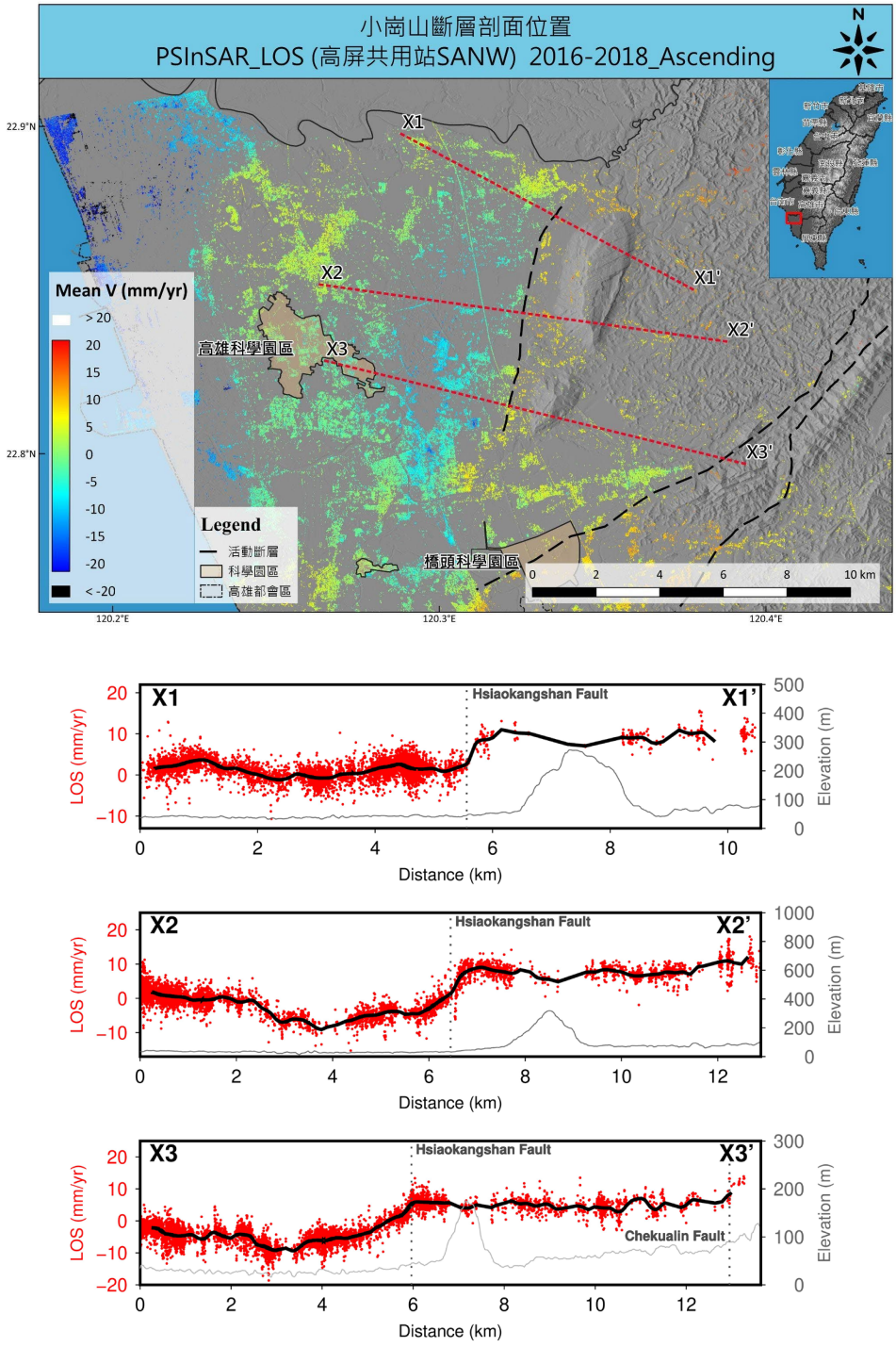
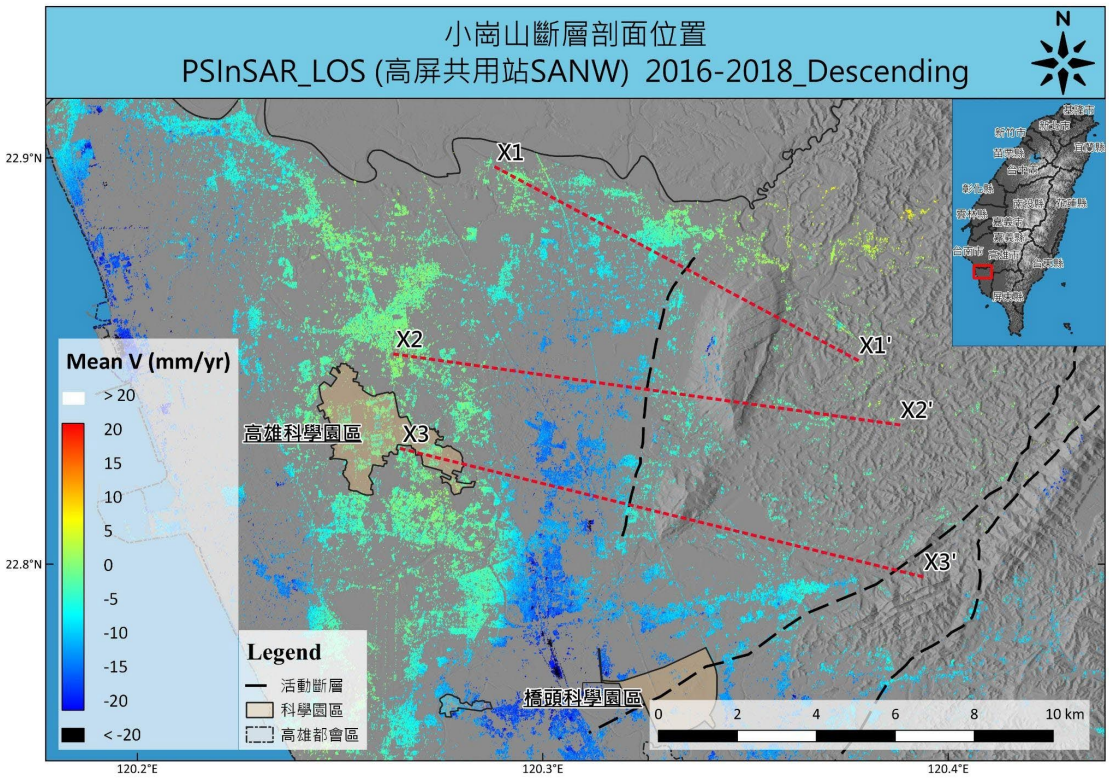
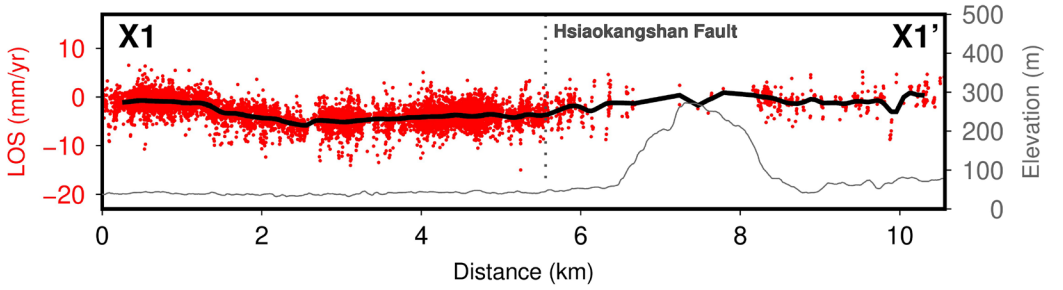
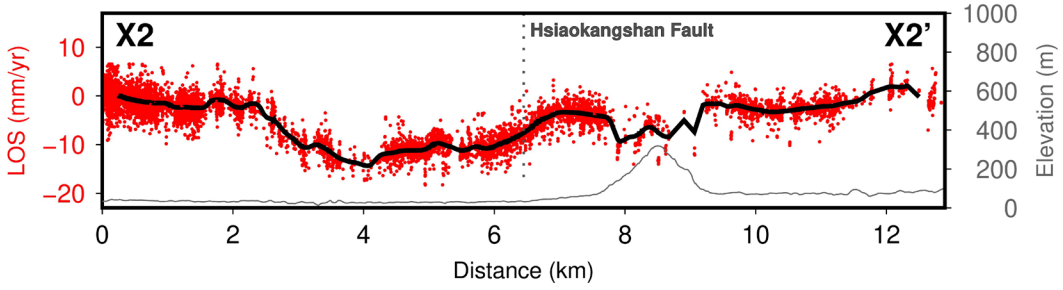


圖 4-3-3：2016-2018 小崗山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-3-3：Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the HsiaoKangShan Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


小崗山斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2016-2018_Descending
N
X1
X1'
X2
X2'
X3
X3'
高雄科學園區
橋頭科學園區
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.9°N
22.8°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E


X1
Hsiaokangshan Fault
X1'
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)


X2
Hsiaokangshan Fault
X2'
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)

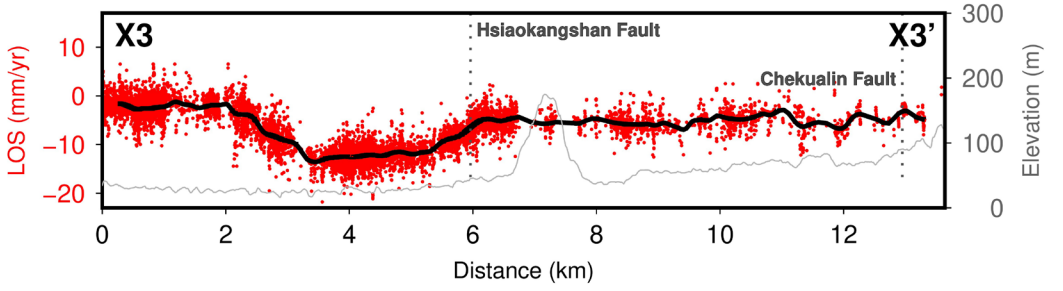
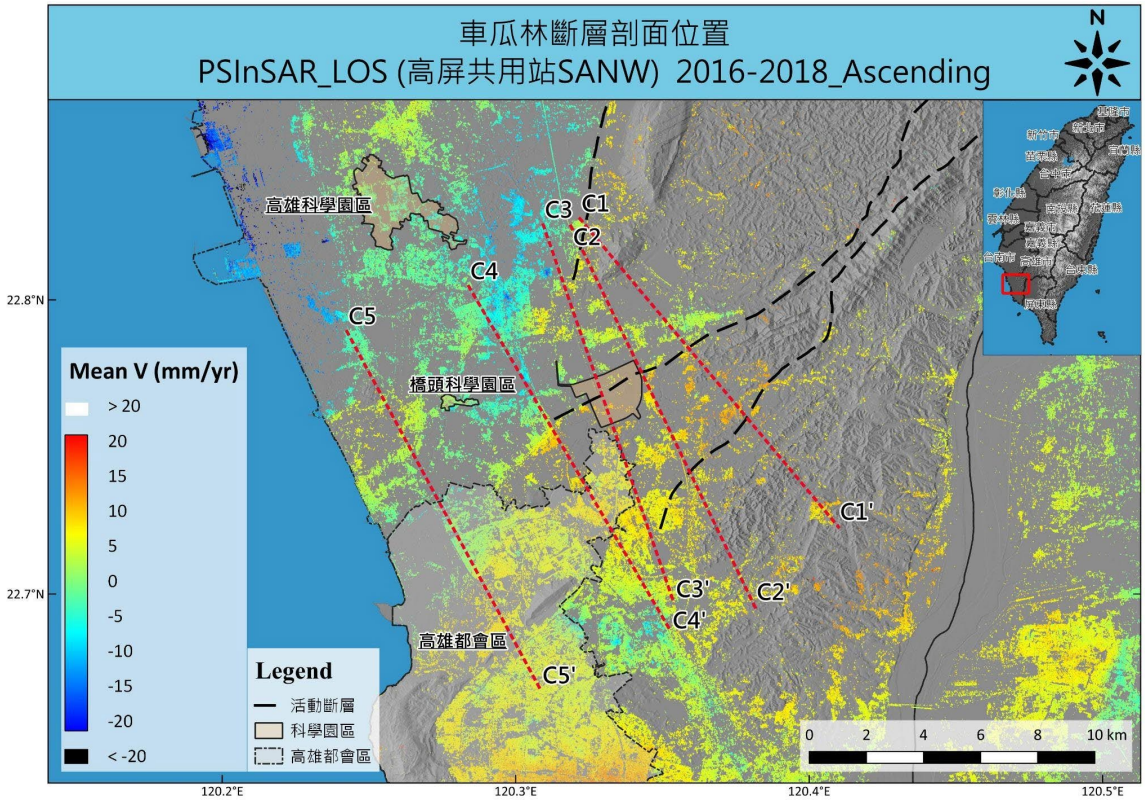

X3
Hsiaokangshan Fault
X3'
Chekualin Fault
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)

圖 4-3-4：2016-2018 小崗山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 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 4-3-4：Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the HsiaoKangShan Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


車瓜林斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2016-2018_Ascending
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

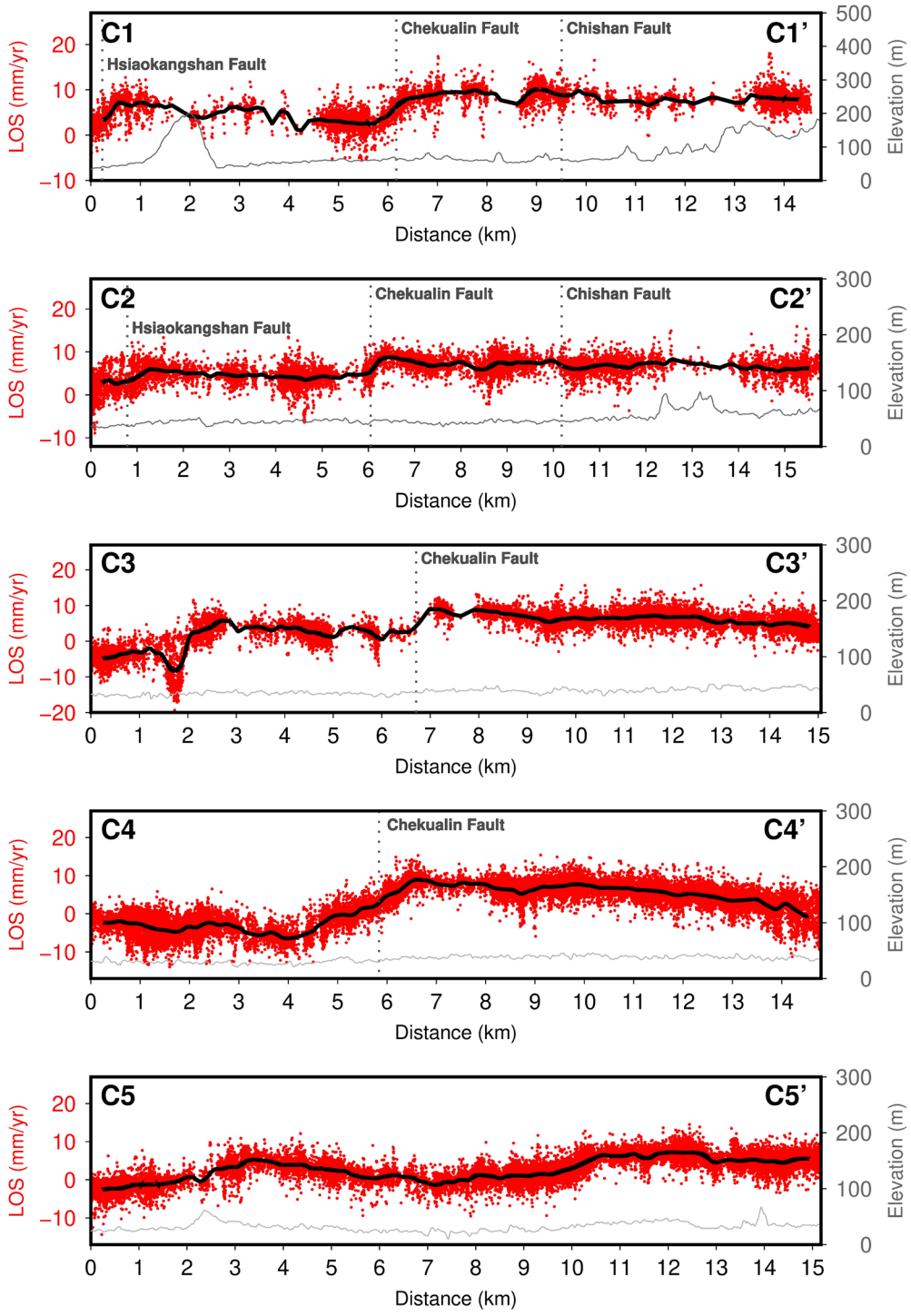
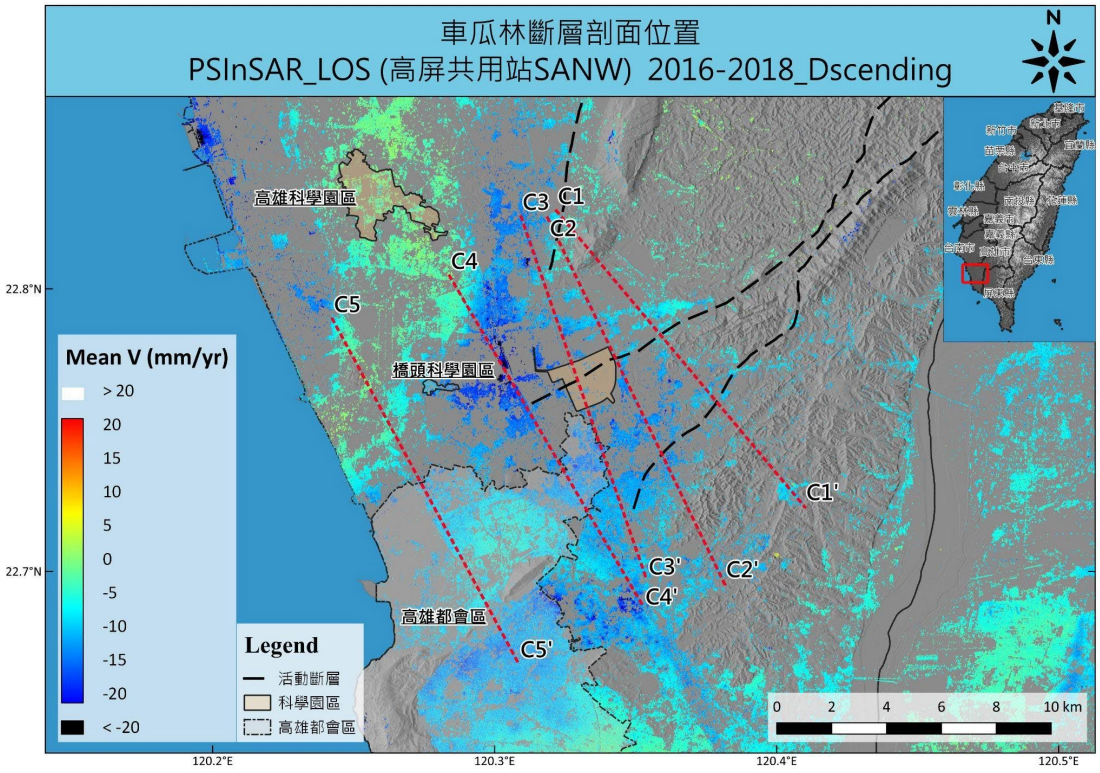


圖 4-3-5：2016-2018 車瓜林斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-3-5 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the CheKuaLin Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


車瓜林斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2016-2018_Dscending
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

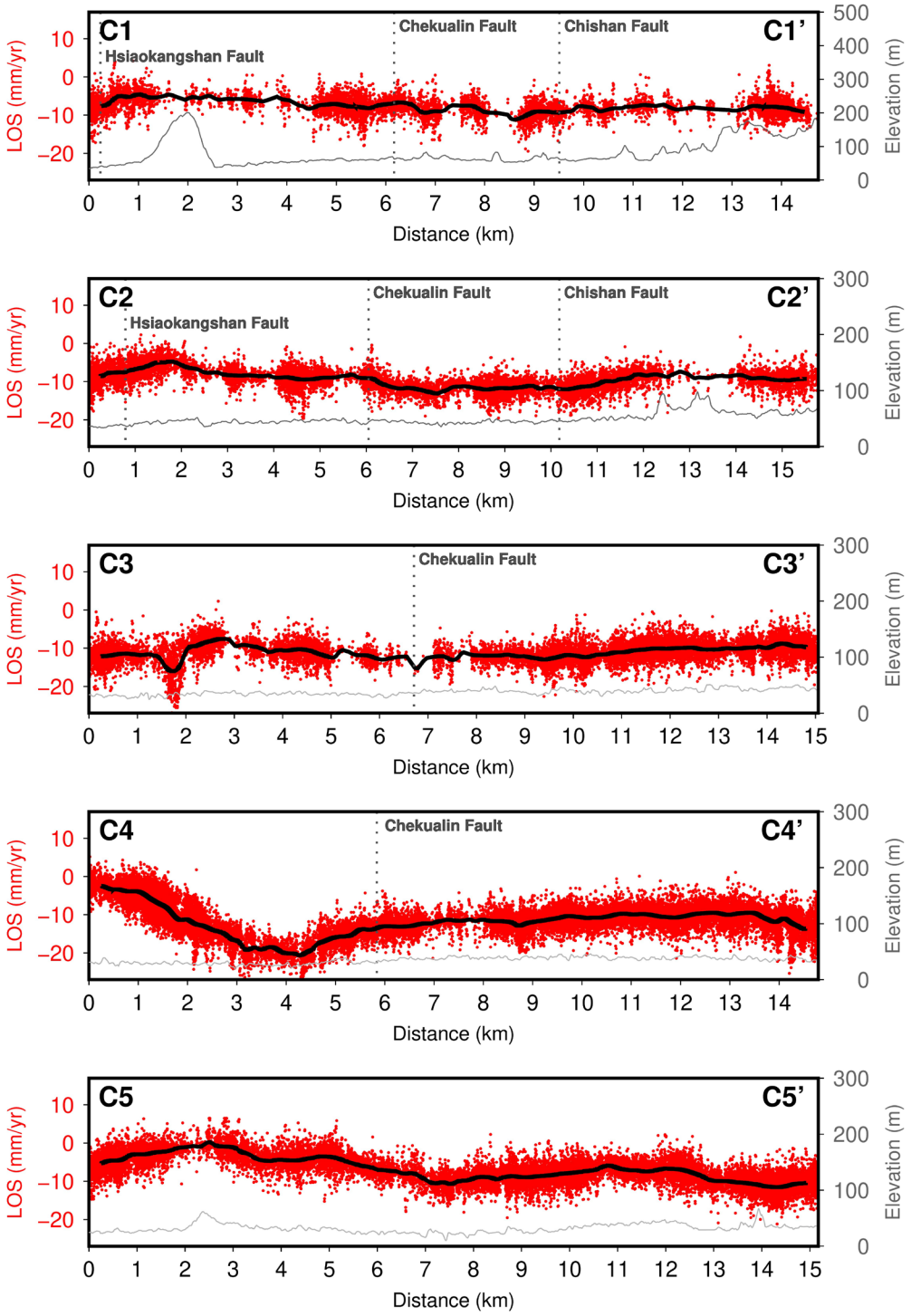
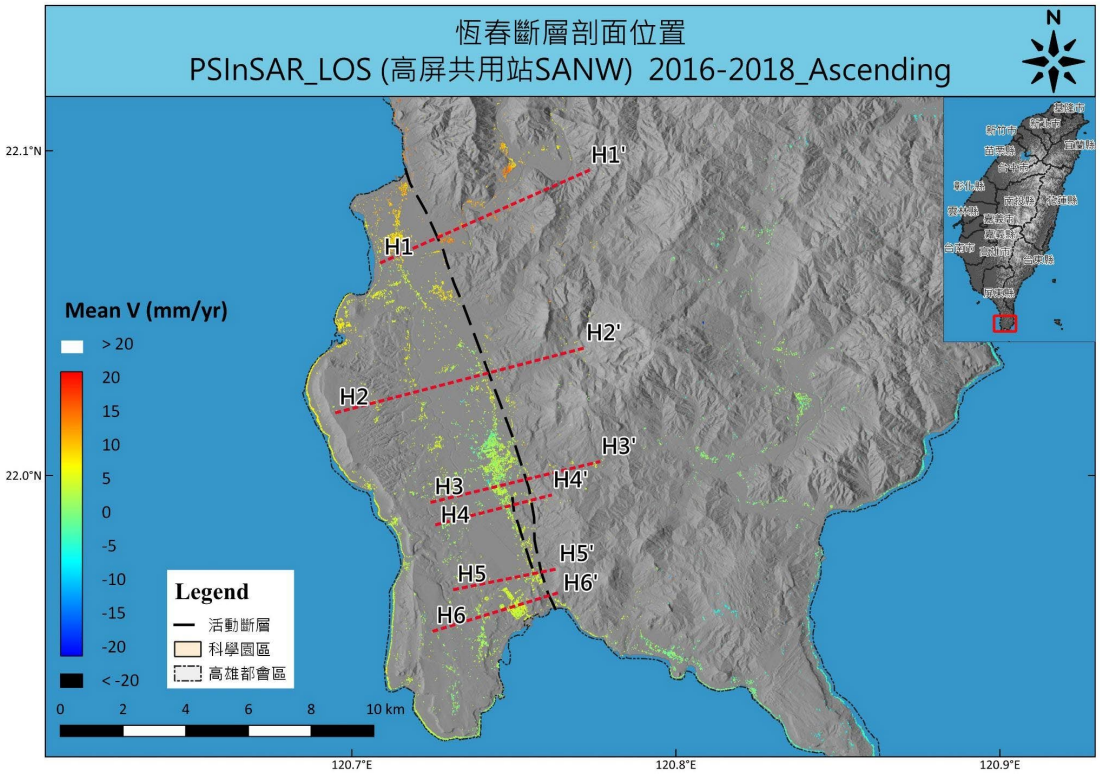


圖 4-3-6：2016-2018 車瓜林斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-3-6 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the CheKuaLin Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


恆春斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2016-2018_Ascending
N
22.1°N
22.0°N
120.7°E
120.8°E
120.9°E
H1'
H1
H2'
H2
H3'
H3
H4'
H4
H5'
H5
H6'
H6
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km

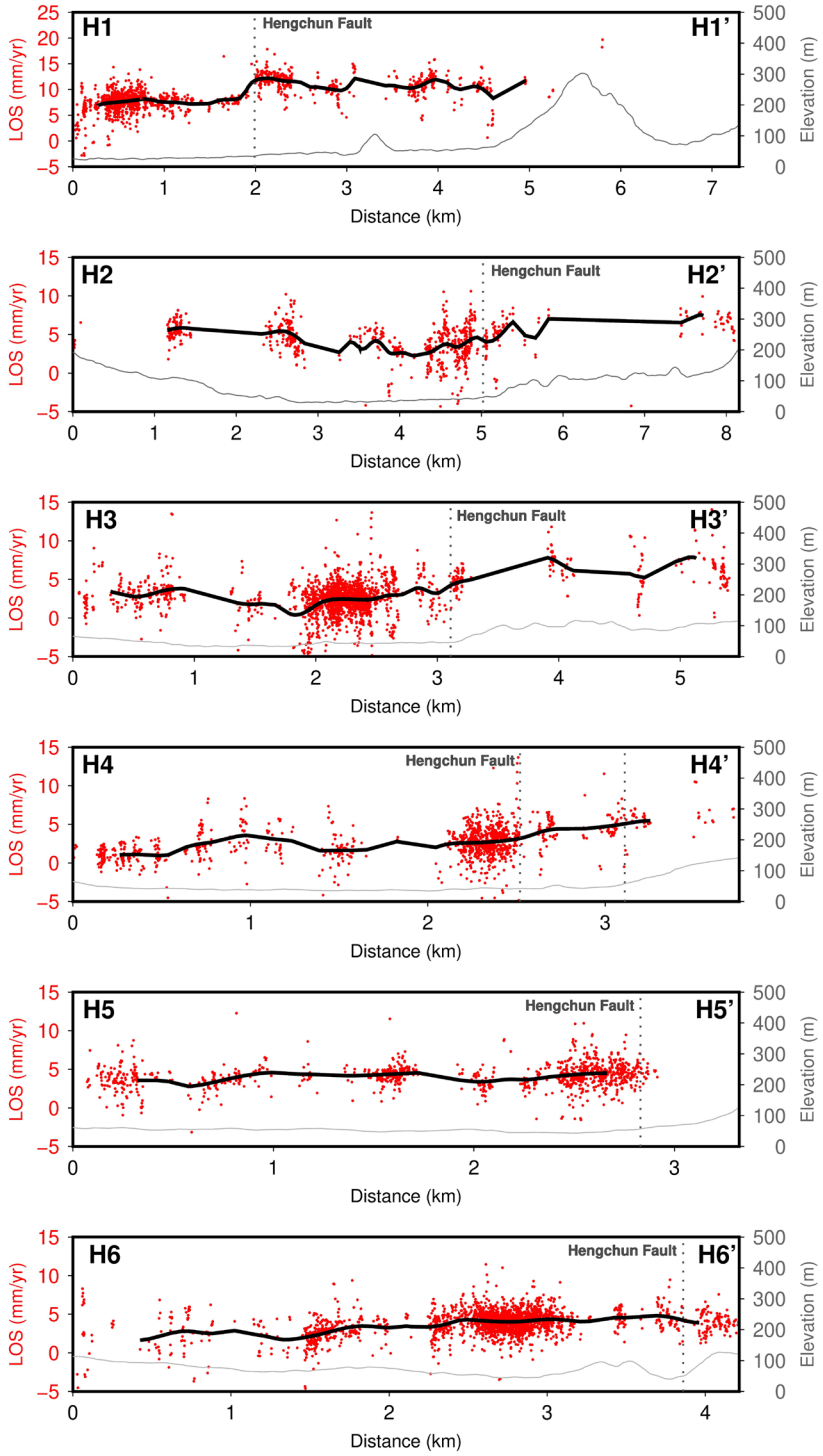
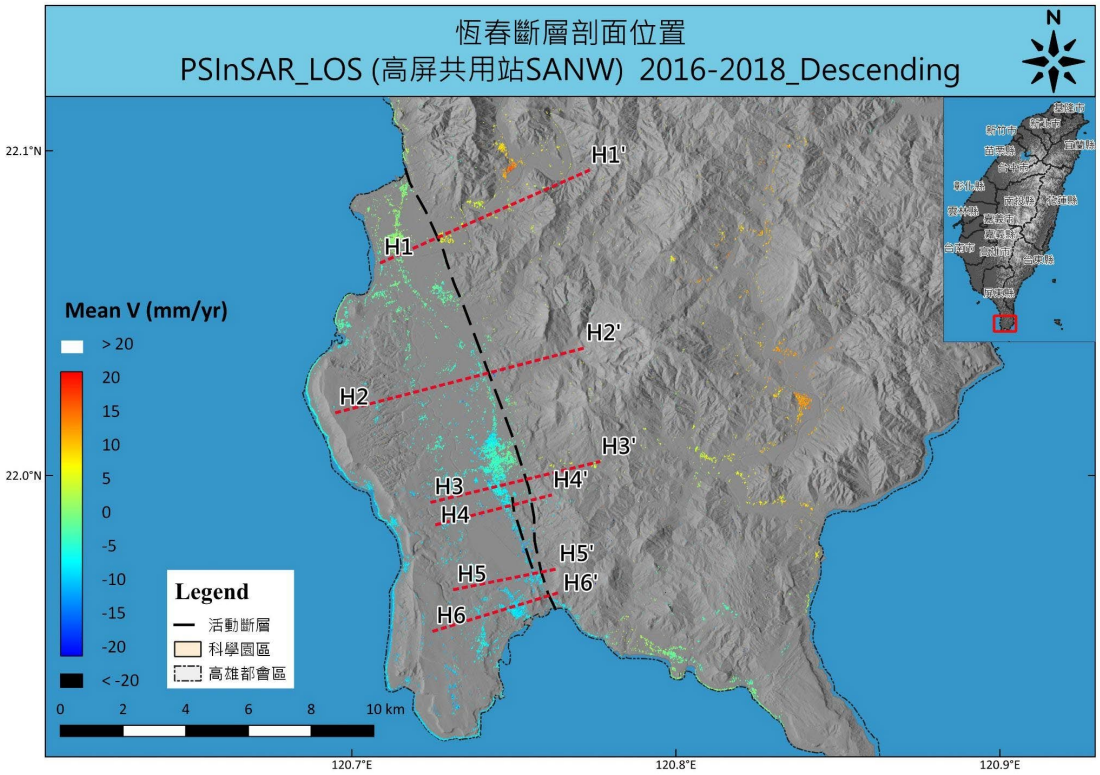


圖 4-3-7：2016-2018 恆春斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-3-7 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the HengChun Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


恆春斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2016-2018_Descending
N
22.1°N
22.0°N
120.7°E
120.8°E
120.9°E
H1'
H1
H2'
H2
H3'
H3
H4'
H4
H5'
H5
H6'
H6
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km

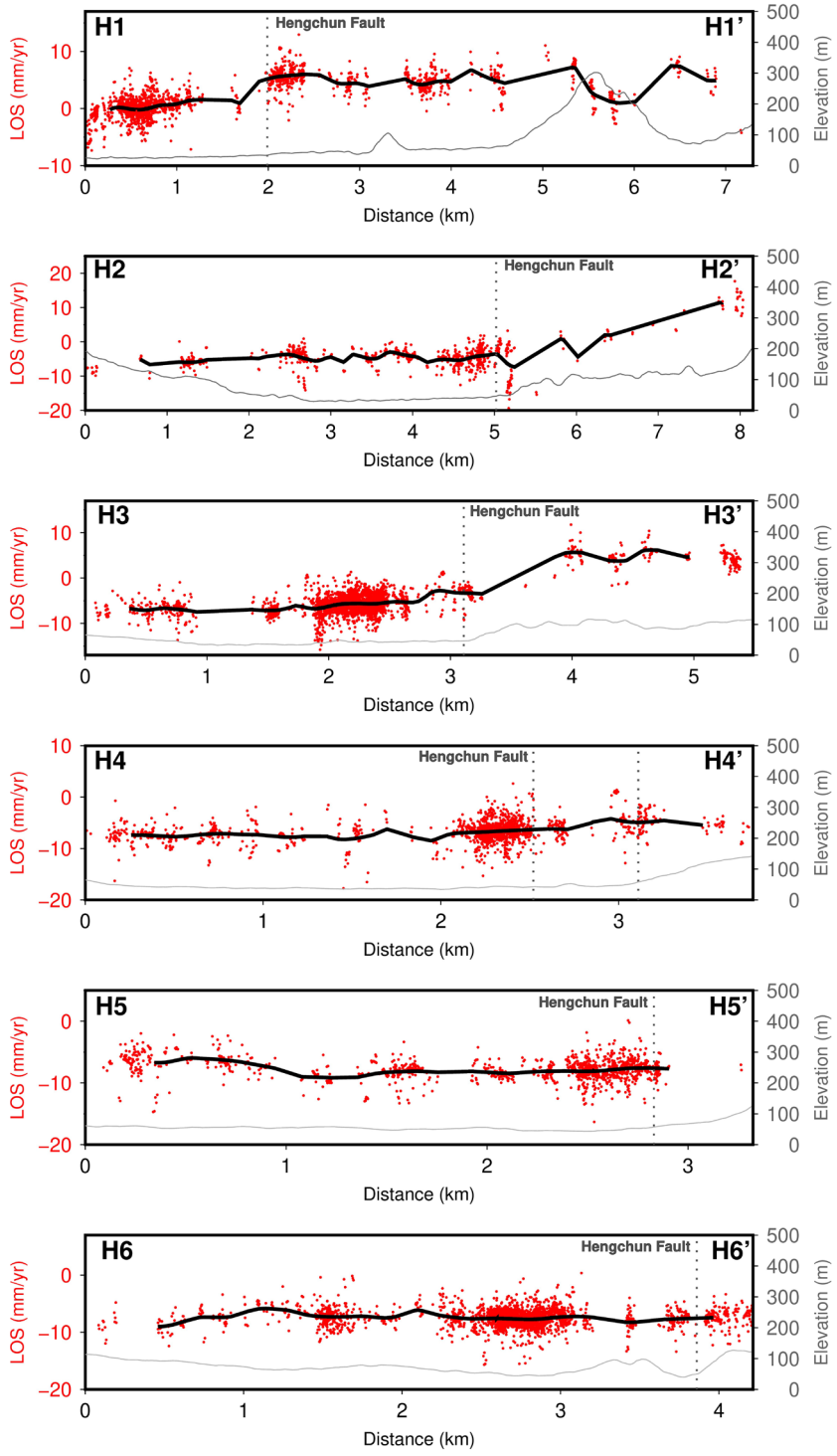


圖 4-3-8：2016-2018 恆春斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-3-8 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the HengChun Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-3-3 科學園區與都會區剖面分析

本研究為了深入了解科學園區和都會區的地表活動特性，因此分別在橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區和北高雄平原區，劃設數條橫跨南北和東西方向的剖面進行分析。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。以下就各區的分析成果進行詳細描述。

4-3-3-1 橋頭科學園區

橋頭科學園區有兩條剖面通過，SC1 是南北方向剖面，SC2 是東西方向剖面。SC1 剖面的升軌道結果（圖 4-3-9）指出跨過車瓜斷層約有 8 mm/yr 的差異，斷層斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；SC1 剖面的降軌道結果（圖 4-3-10）指出跨過車瓜斷層約有 3-5 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤。SC2 剖面的升軌道結果（圖 4-3-9）指出跨過車瓜斷層約有 2-3 mm/yr 的差異，斷層斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；SC2 剖面的降軌道結果（圖 4-3-10）指出跨過車瓜斷層約有 2-3 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤。

4-3-3-2 高雄科學園區

高雄科學園區有兩條剖面通過，SK1 是南北方向剖面，SK2 是東西方向剖面。升軌道（圖 4-3-9）和降軌道（圖 4-3-10）的 SK1 剖面的數值都維持在-5 至 5 mm/yr 之間，兩個軌道觀測的結果都顯示北邊的縮短速率大於南邊；升軌道（圖 4-3-9）和降軌道（圖 4-3-10）的 SK2 剖面的數值也都維持在 0 至-10 mm/yr 之間，但是

整體呈現剖面 2 至 6 公里的縮短速率較兩側大，而且兩個軌道觀測的結果都在 7 公里處有顯著的 7 至 8 mm/yr 的差異。總合兩個飛行方向所觀測到的 PSI 地表位移結果，初步可以推測此區域的中央位置應以垂直抬升的活動為主。

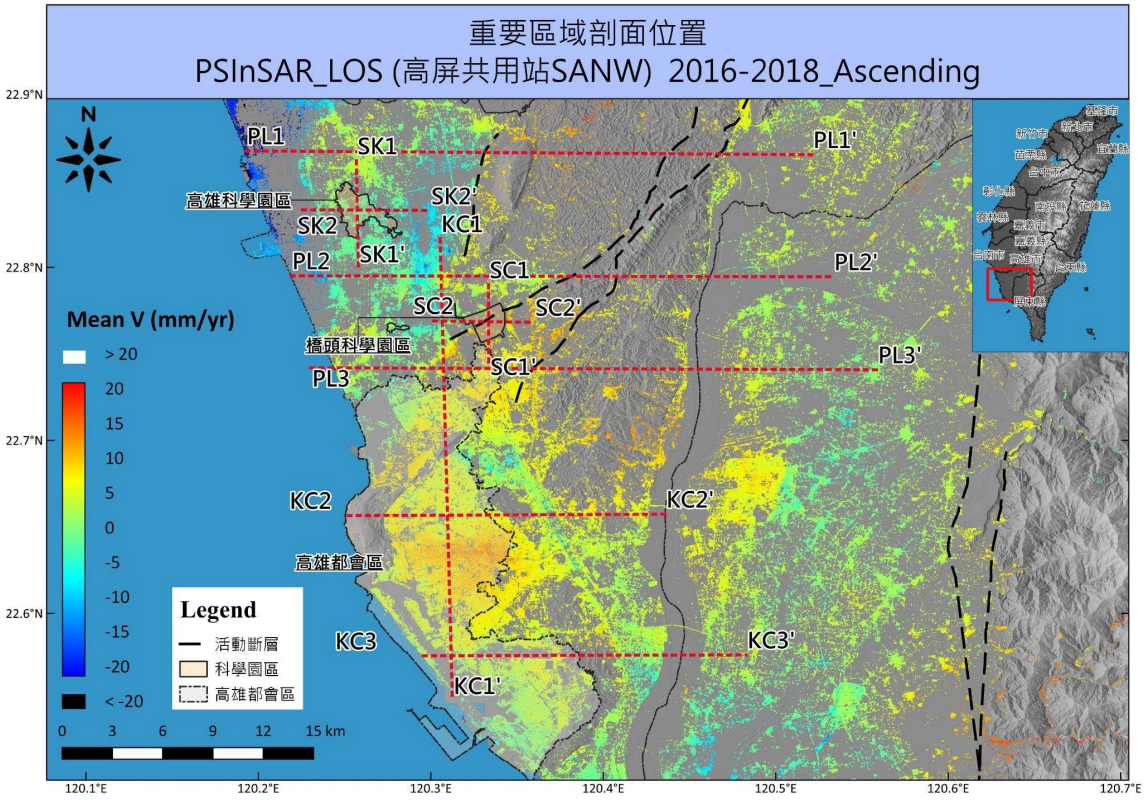
4-3-3-3 高雄都會區

高雄都會區有三條剖面通過，KC1 是南北方向剖面，KC2 和 KC3 是東西方向剖面。KC1 剖面的升軌道（圖 4-3-9）和降軌道（圖 4-3-10）的結果都指出在 4 至 5 公里處有顯著的 LOS 遠離訊號，其值都可達-10 至-20 mm/yr，代表該處有地表沉降的行為，相對應的空間位置座落在高雄科學園區和橋頭科學園區之間；跨過剖面 20 公里處有 5 mm/yr 縮短的 LOS 差異量值，此區域在 2014-2016 年是呈現顯著的遠離訊號；另外，在 10 公里和 14 公里處有明確的變形梯度產生，說明這段區域內的地表活動異於其他地區。KC2 剖面的升軌道（圖 4-3-9）和降軌道（圖 4-3-10）結果都在 14 至 15 公里處有明顯的低值出現，可能與鳳山斷層的活動有關。KC3 剖面的升軌道結果顯示（圖 4-3-9）LOS 位移速率大多都-5 至 10 mm/yr 之間，降軌道結果顯示（圖 4-3-10）LOS 位移速率大多都在-10 至 5 mm/yr 之間，兩個剖面的變形趨勢相當一致。

4-3-3-4 北高雄平原區

北高雄平原區有三條剖面通過，剖面 PL1、剖面 PL2 和剖面 PL3 都是東西方向的剖面。PL1 剖面的升軌道（圖 4-3-9）和降軌道（圖 4-3-10）的結果顯示在 14 公里處跨過小崗山段層時，有 10 至 15 mm/yr 的 LOS 速度場差異，斷層上盤相對於下盤來說縮短的速率較快；此外，在 2 至 4 公里處也都有 20 至 25 mm/yr 差異

的變形梯度發生，初步推測東側的地表相對於西側有較明顯的抬升情形。PL2 剖面的升軌道（圖 4-3-9）和降軌道（圖 4-3-10）的結果顯示在 2 至 7 公里之間的 LOS 縮短速率相較兩側有明顯的縮短；但是在 10 至 15 公里之間，升軌道的結果是比 2 至 7 公里的 LOS 縮短速率更快，而降軌道的結果則是比 2 至 7 公里的 LOS 縮短速率更慢；除此之外，在 16 公里處跨過車瓜林斷層的位置，升軌道有 10 mm/yr 的差異，但是降軌道只有 3 mm/yr 的差異。PL3 剖面的升軌道（圖 4-3-9）和降軌道（圖 4-3-10）的結果在 5 至 20 公里之間的 LOS 位移速率趨勢呈現相反的趨勢，升軌道是呈現比 5 公里之前還快的 LOS 縮短速率，而降軌道則是呈現比 5 公里之前還慢的 LOS 縮短速率。



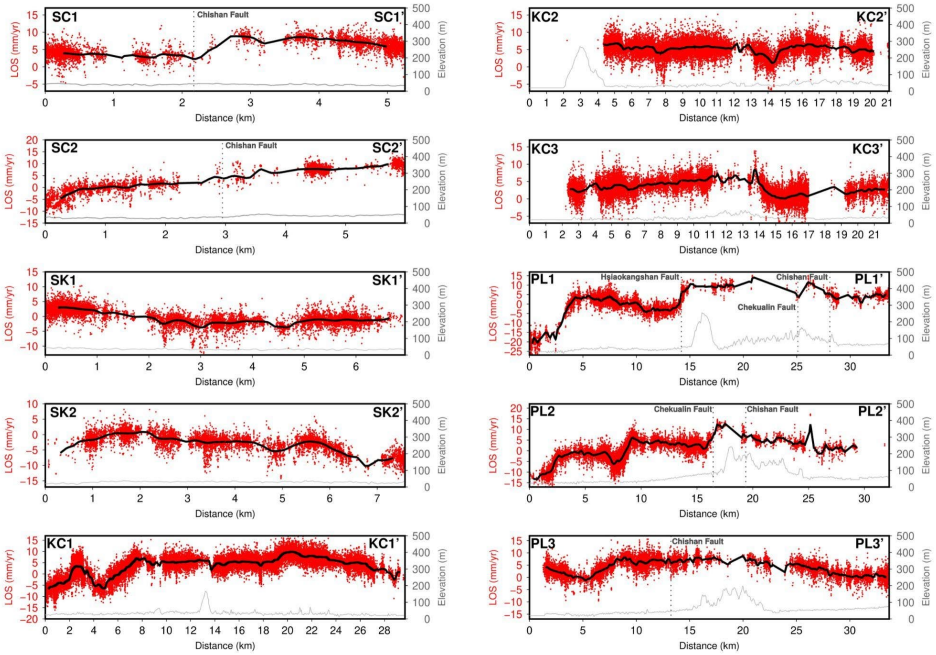


圖 4-3-9：2016-2018 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-3-9 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of ascending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

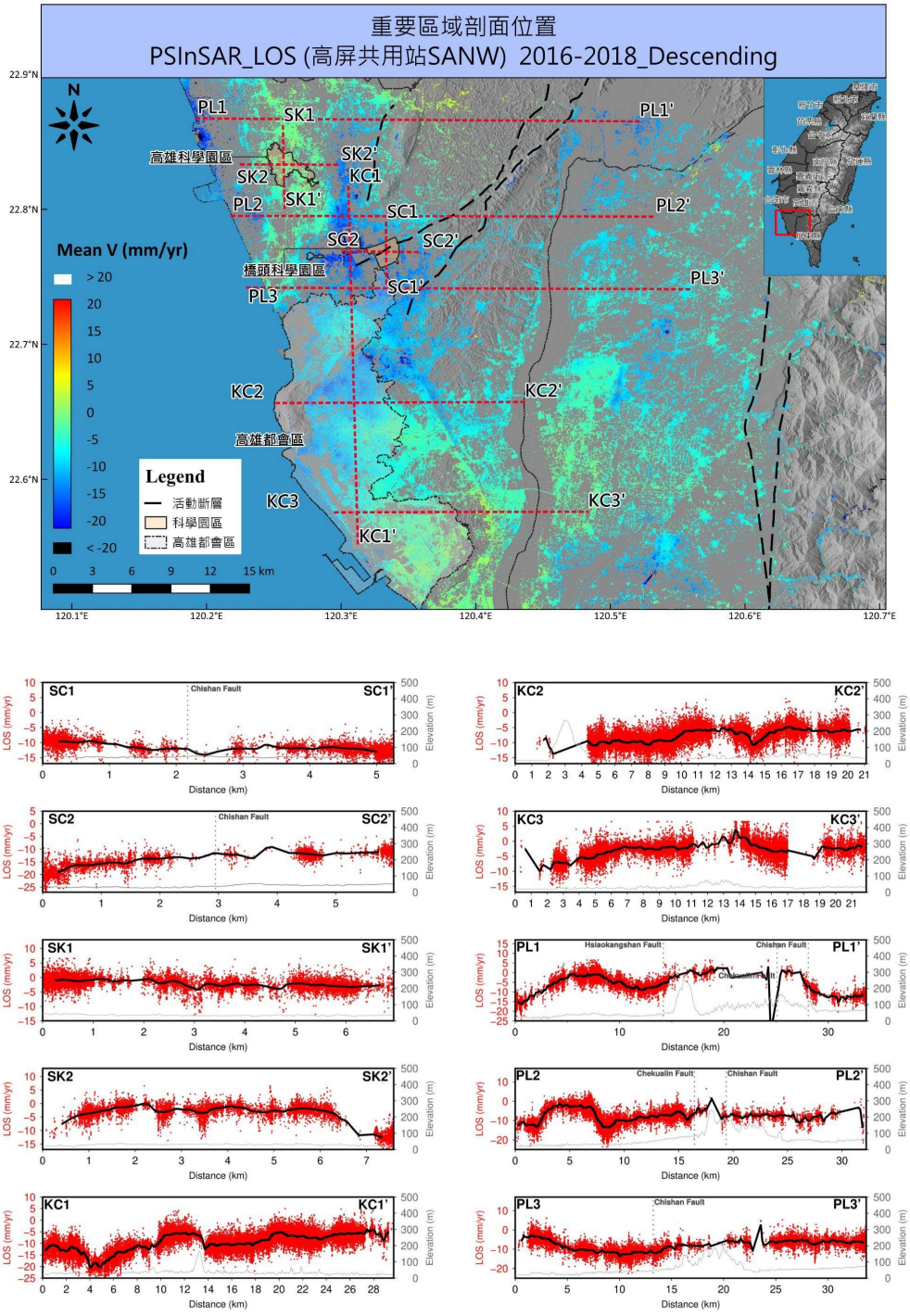


圖 4-3-10：2016-2018 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-3-10 : Average LOS velocity fields between 2016 and 2018 processed with images of descending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-4 2018-2020 年雷達影像成果

2018 年 3 月起 Sentinel-1B 衛星加入拍攝，其與 Sentinel-1A 衛星的拍攝相隔為 6 天，但 Sentinel-1B 影像拍攝恆春半島的週期為 24 天一次，因此在 2018-2020 之間雖有處理兩顆衛星影像，但仍以 Sentinel-1A 影像為主，Sentinel-1B 影像為輔。從 2018 年 3 月至 2020 年 12 月之間，選取 86 幅 Sentinel-1 升軌道影像，並以 2018/08/14 為主影像，此外，選取 84 幅 Sentinel-1 降軌道影像，並以 2018/08/16 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 2020 年研究區域內 LOS 位移速度場。本小節的分析成果依舊分為三個部分：升降軌道的 LOS 速度場成果、跨斷層的速度場剖面分析、以及科學園區與都會區剖面分析，以下詳述各子節的分析成果。

4-4-1 升降軌道的 LOS 速度場成果

升軌道的 LOS 速度場結果如圖 4-4-1 所示。PSI 的 LOS 速度場數值大致分布在 15 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小崗山斷層以東至潮州斷層，南至高雄市沿海地區和高屏溪出海口，主要呈現冷色系的地區分佈在小崗山斷層以西和屏東平原沿海地區，此外，在高雄都會區東側與屏東平原中央有顯著的線型分佈。研究區域內的小崗山斷層和車瓜林斷層的兩側，有顯著的速度場差異；旗山斷層和潮州斷層兩側的速度場差異則較不明顯；恆春斷層南北段有些微的速度場差異。

降軌道的 LOS 速度場結果如圖 4-4-2 所示。PSI 的 LOS 速度場數值大致分布

在 10 至-20 mm/yr 之間，PS 點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在高雄科學園區、車瓜林斷層西側和高雄都會區，主要呈現冷色系的地區分佈從車瓜林斷層南側開始，一路至屏東平原的沿海地區。研究區域內的車瓜林斷層的兩側有顯著的 LOS 速度場差異；小崗山斷層和恆春斷層的兩側有微量的 LOS 速度場差異；旗山斷層和潮州斷層兩側的 LOS 速度場差異則較不明顯。

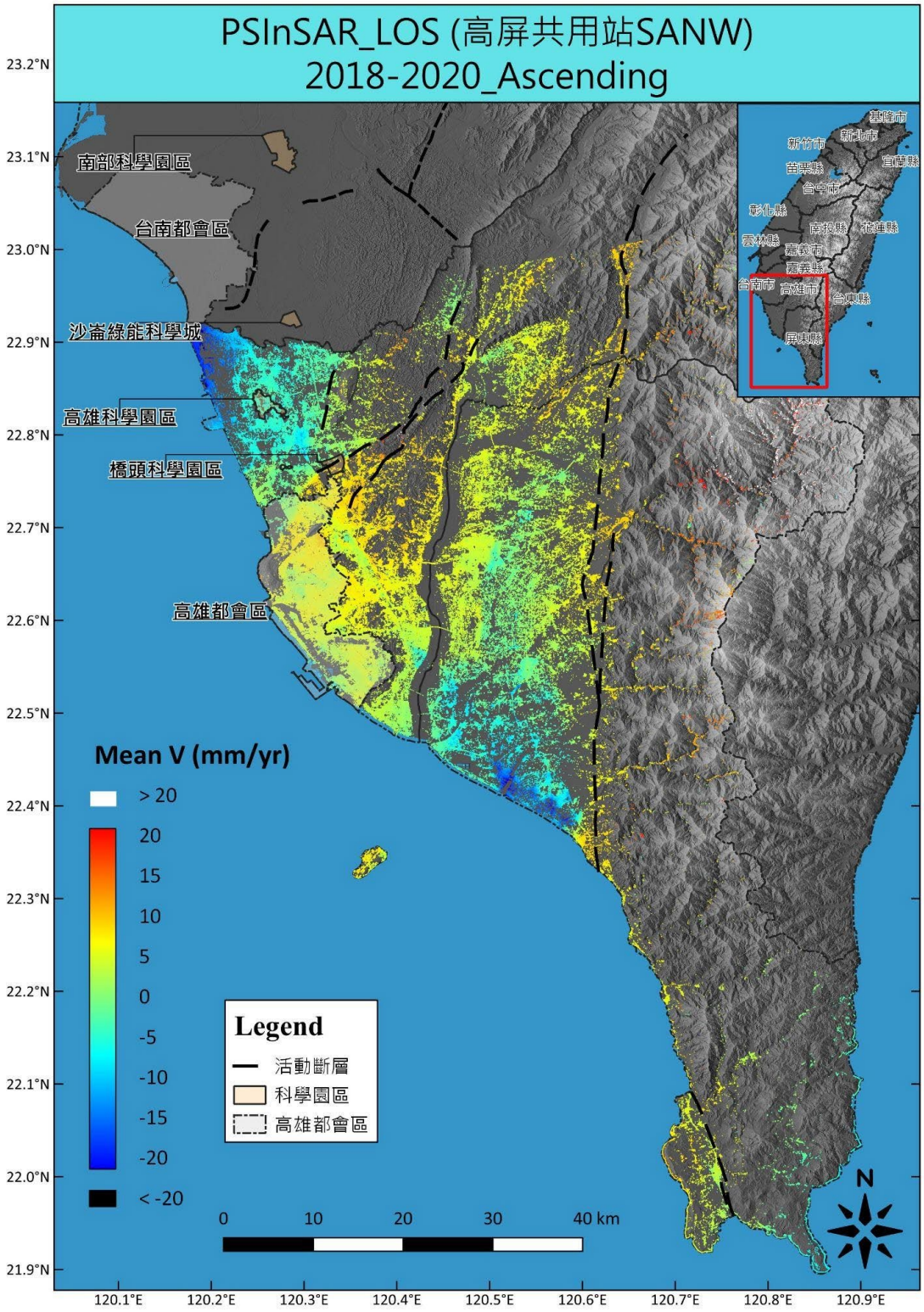


圖 4-4-1：2018-2020 升軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-4-1：Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

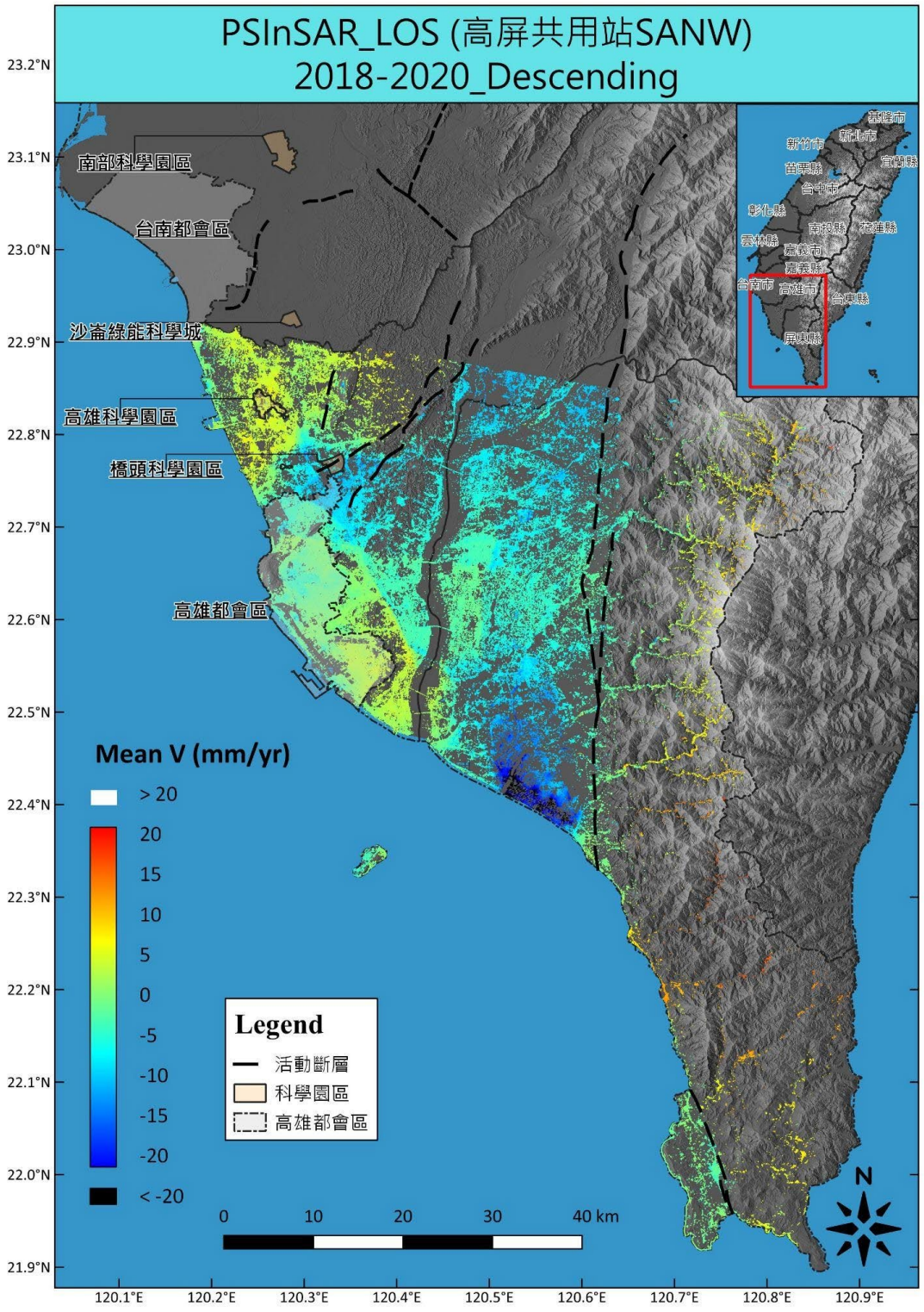


圖 4-4-2：2018-2020 降軌道影像 LOS 平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-4-2：Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

4-4-2 斷層的速度場剖面分析

本研究為了深入探討小崗山斷層、車瓜林斷層和恆春斷層在 2018 至 2020 年的活動特性，因此在各個斷層沿線劃設數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。以下就各個斷層的分析成果進行詳細描述。

4-4-2-1 小崗山斷層

小崗山斷層總共有三條剖面，座落在斷層的北、中、南段三個位置。從升軌道的 LOS 速度場結果來看，三條剖面所經過的斷層兩側 LOS 速度場差異非常相似（圖 4-4-3）。位於斷層北段的剖面 X1 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 4 至 5 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤。位於斷層中段的剖面 X2 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 4 至 5 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤。位於斷層南段的剖面 X3 結果指出，在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 5 至 6 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤。從降軌道的 LOS 速度場結果來看，三條剖面所經過的斷層兩側 LOS 速度場差異非常接近，量值都小於 2mm/yr（圖 4-4-4），整體剖面的 LOS 位移趨勢相當一致。

4-4-2-2 車瓜林斷層

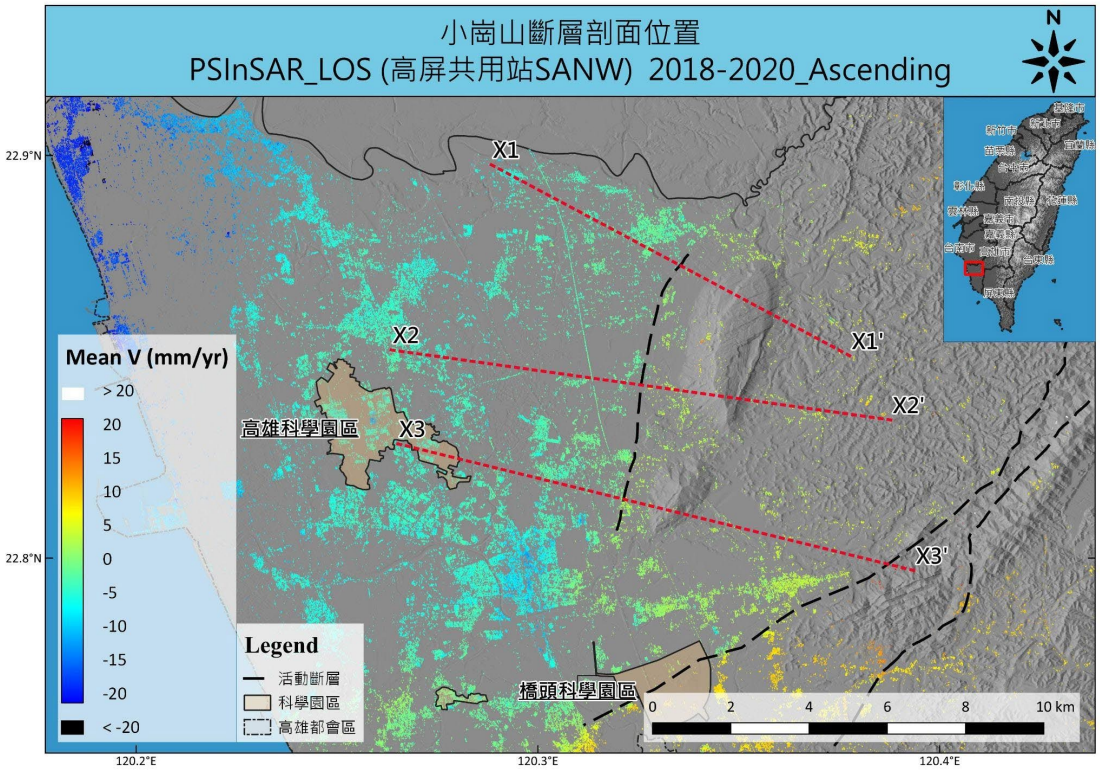
車瓜林斷層總共有五條西北－東南走向的剖面，由東向西座落在斷層上（圖

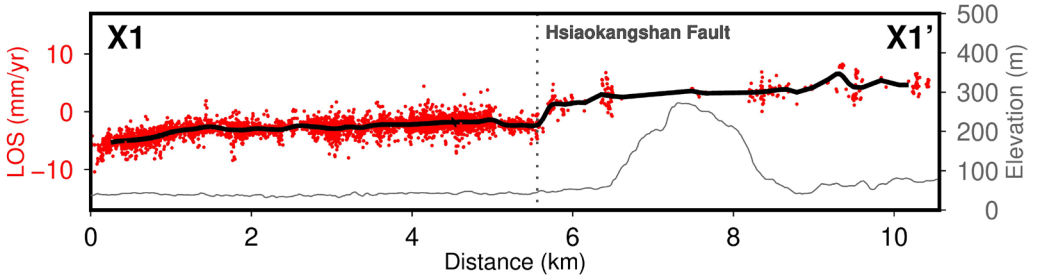
4-4-5）。前兩條剖面跨過車瓜林和旗山斷層，第三和第四條剖面只有跨過車瓜林斷層，最西側的第五條剖面鄰近海岸線，並未跨過斷層。從升軌道的 LOS 速度場結果來看，車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場有顯著差異（圖 4-4-5）。從剖面 C1 至 C4 結果可以發現，在跨過車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場差異自東向西逐漸變大，從 5 mm/y 的差異漸增至 10 mm/yr 以上的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率都大於下盤；剖面 C5 雖然沒有顯示車瓜林斷層通過，但是順著空間上斷層的分佈與線性差異的延伸，可以在剖面 P5 的 10 公里處交錯，此處也存在 4 至 5 mm/yr 的差異。從降軌道的 LOS 速度場結果來看，車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場也有顯著的差異（圖 4-4-6）。從剖面 C1 至 C4 結果可以發現，在跨過車瓜林斷層兩側的 LOS 速度場差異自東向西逐漸變小，從 10 mm/y 的差異漸減至 3 mm/yr 的差異，此特性與升軌道的結果正好相反。剖面 C5 結果指出 LOS 速度場大多分佈在-5 至 5 mm/yr 之間，在 10 公里的交錯處並未像升軌道結果有顯著的差異。

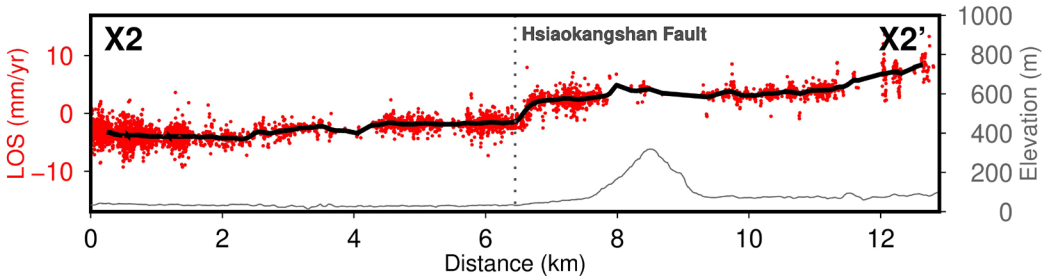
4-4-2-3 恆春斷層

恆春斷層總共有六條東西方向的剖面，自北向南逐一排列（圖 4-4-7）。剖面 H1 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 4 至 5 mm/yr 的差異，斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H2 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場約有 2 至 3 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤；剖面 H3 和 H4 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場也約有 2 至 3 mm/yr 的差異，但是斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H5 和 H6 結果指出在跨過斷層兩側的 LOS 速度場差異皆低於 2 mm/yr，斷層上下盤無明顯活動性。從降軌道的 LOS 速度場結果來看，恆春斷層北段兩側的 LOS 差異相較其他地方顯著（圖 4-4-8）。剖面 P1 結果顯示在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場有 6 至 7 mm/yr 的差異，斷層上盤的

LOS 縮短速率大於下盤；剖面 H2 結果顯示（圖 4-4-8）在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場有 3 至 4 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤；剖面 H3 至 H6 結果顯示（圖 4-4-8）在跨過恆春斷層兩側的 LOS 速度場差異皆小於 2mm/yr。


小崗山斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Ascending
N
X1
X1'
X2
X2'
X3
X3'
高雄科學園區
橋頭科學園區
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.9°N
22.8°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E


X1
Hsiaokangshan Fault
X1'
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)


X2
Hsiaokangshan Fault
X2'
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)

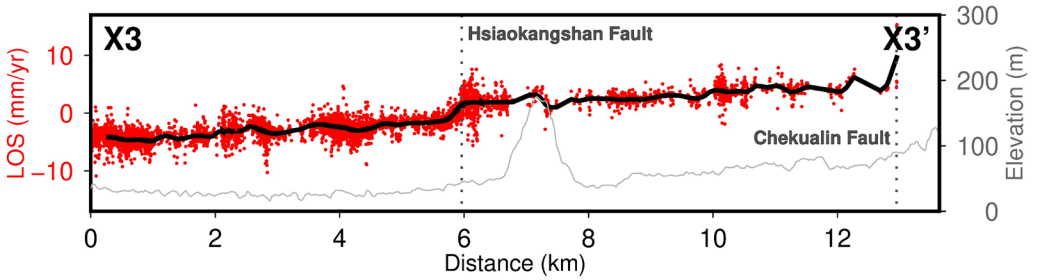
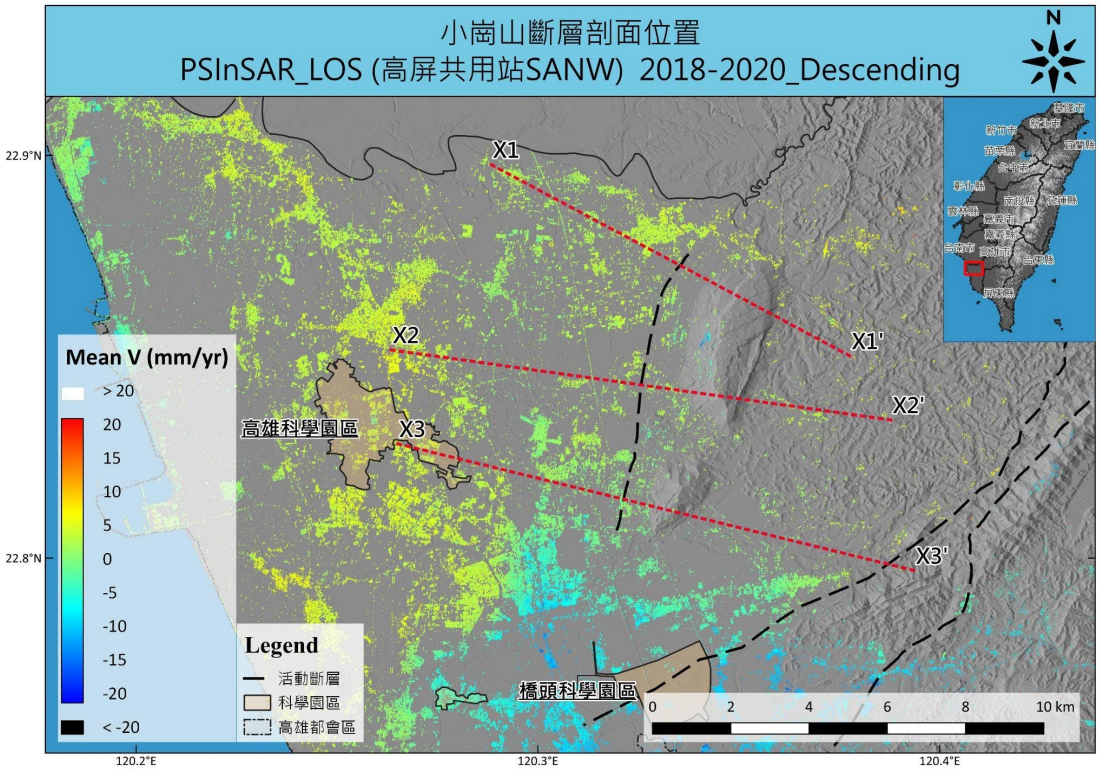
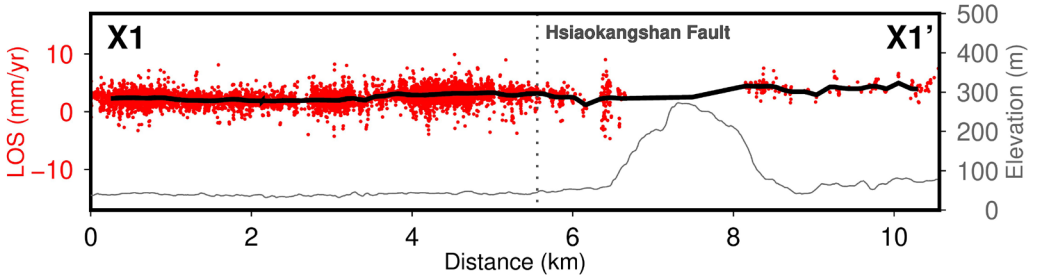
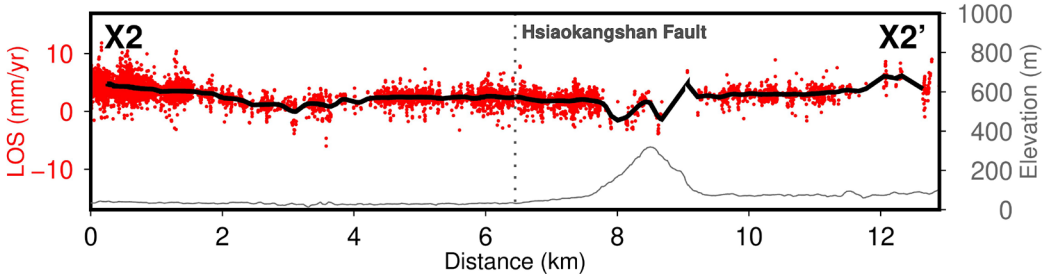

X3
Hsiaokangshan Fault
X3'
Chekualin Fault
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)

圖 4-4-3：2018-2020 小崗山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 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 4-4-3：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 PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


小崗山斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Descending
N
22.9°N
22.8°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
X1
X1'
X2
X2'
X3
X3'
高雄科學園區
橋頭科學園區
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km


X1
Hsiaokangshan Fault
X1'
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)


X2
Hsiaokangshan Fault
X2'
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)

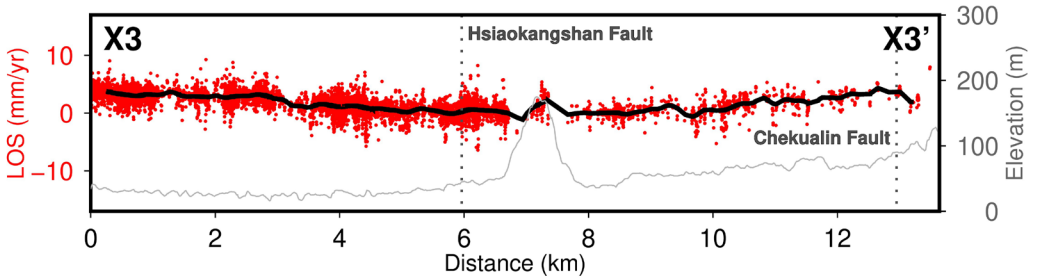
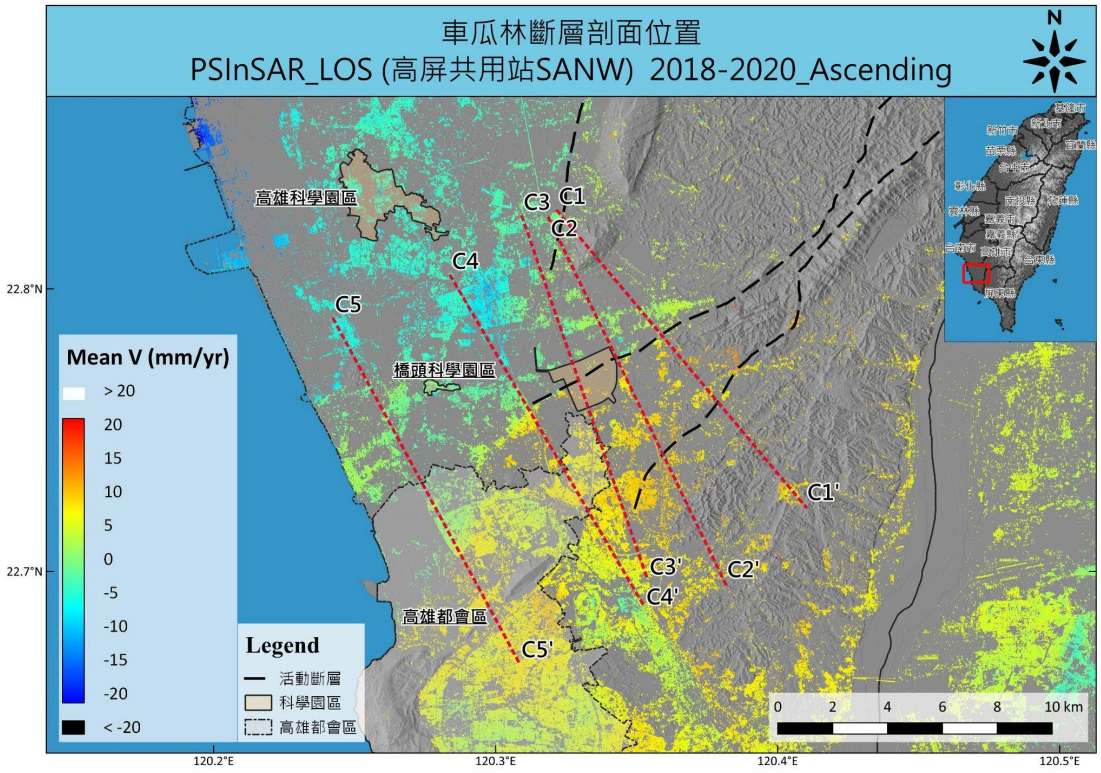

X3
Hsiaokangshan Fault
X3'
Chekualin Fault
LOS (mm/yr)
Elevation (m)
Distance (km)

圖 4-4-4：2018-2020 小崗山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 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 4-4-4：Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of descending orbits and profiles across the HsiaoKangShan Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


車瓜林斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Ascending
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

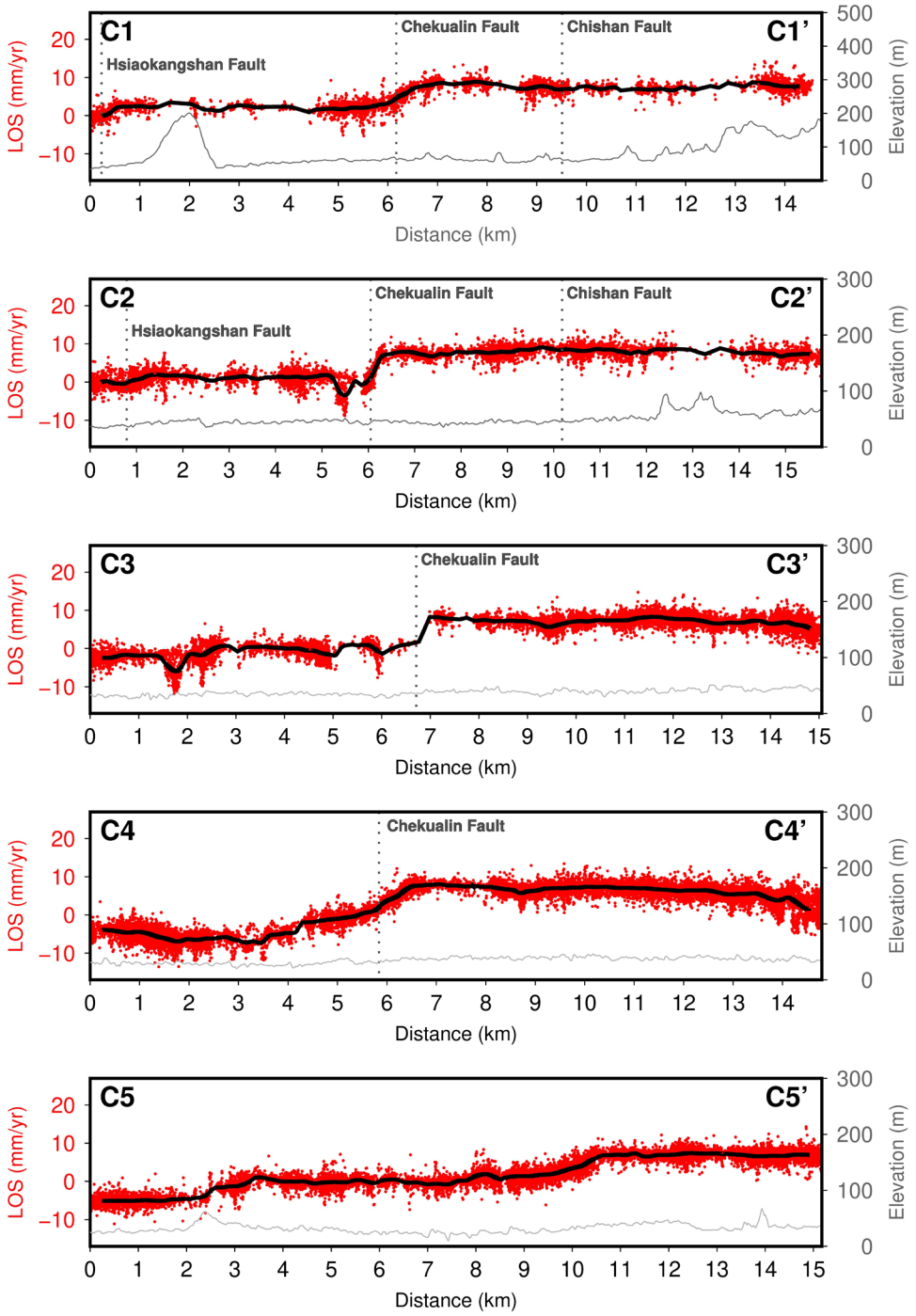
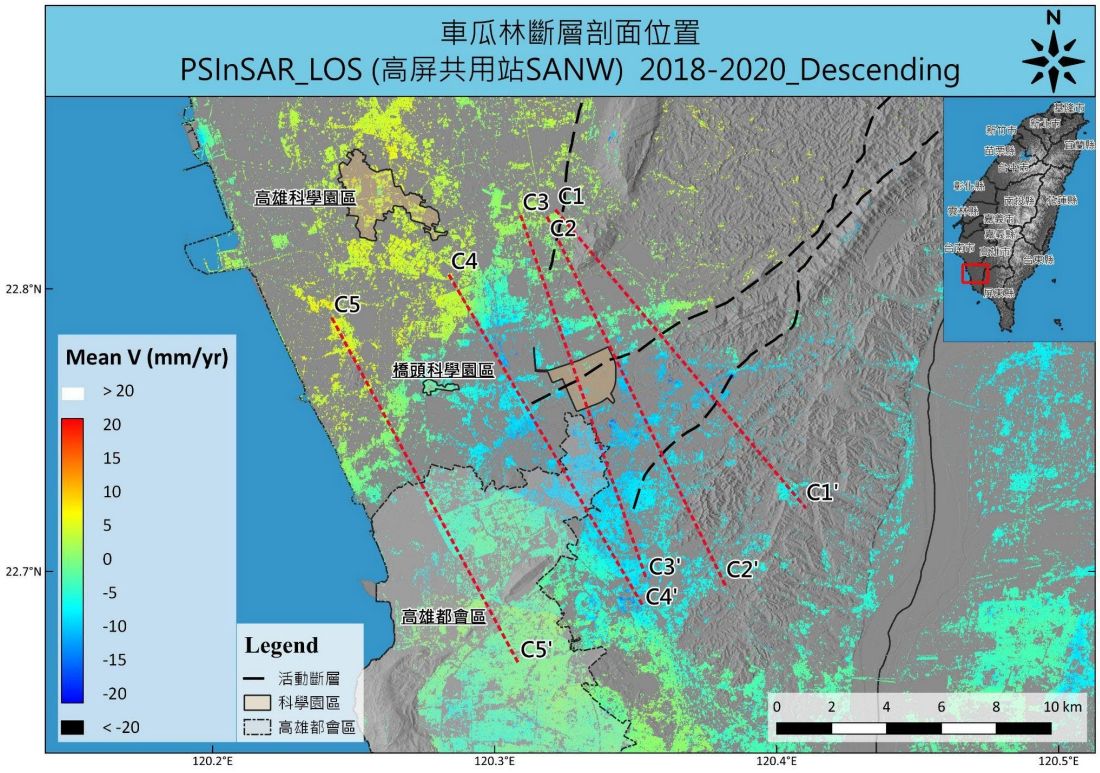


圖 4-4-5：2018-2020 車瓜林斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-4-5 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of ascending orbits and profiles across the CheKuaLin Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


車瓜林斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Descending
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

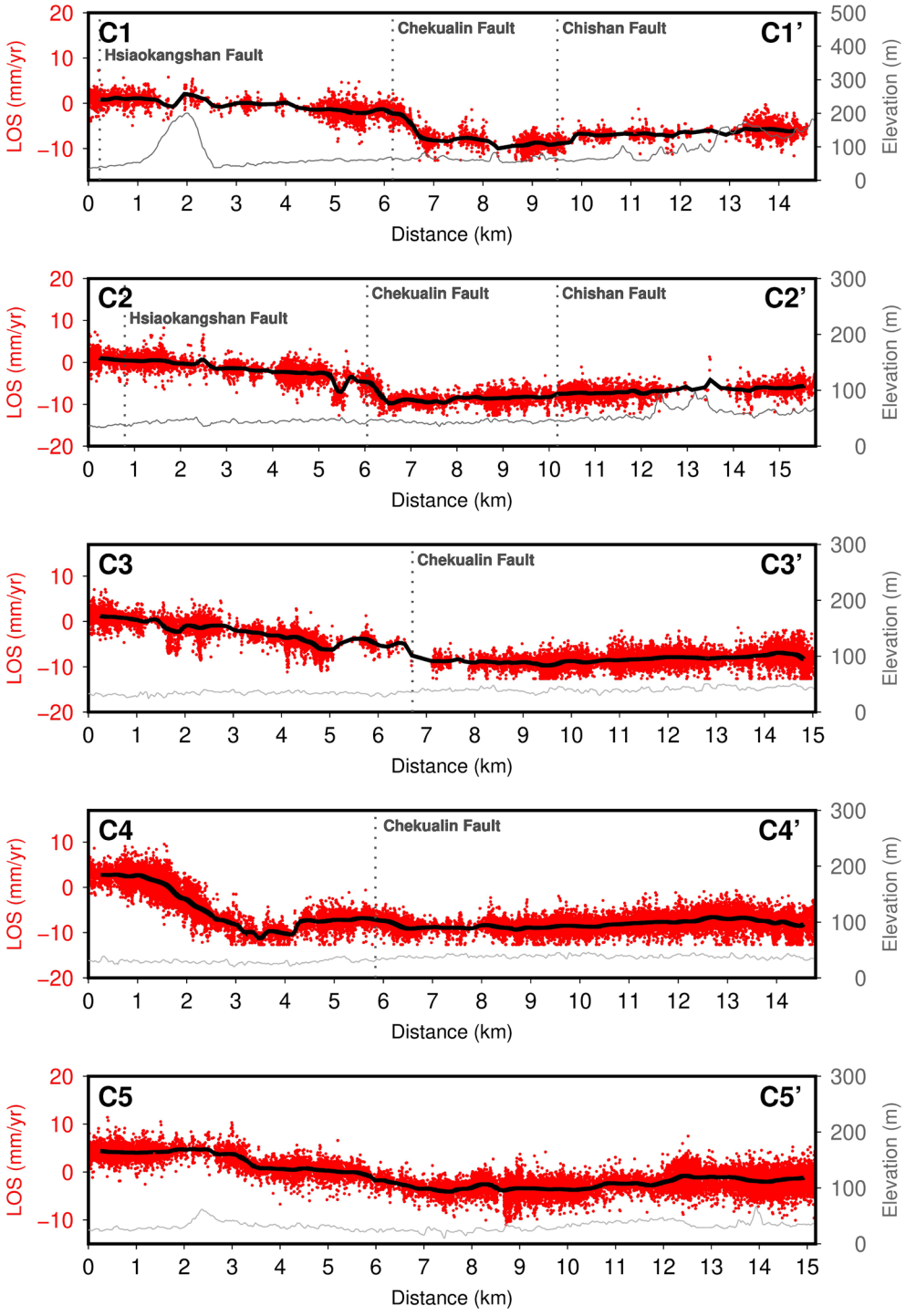
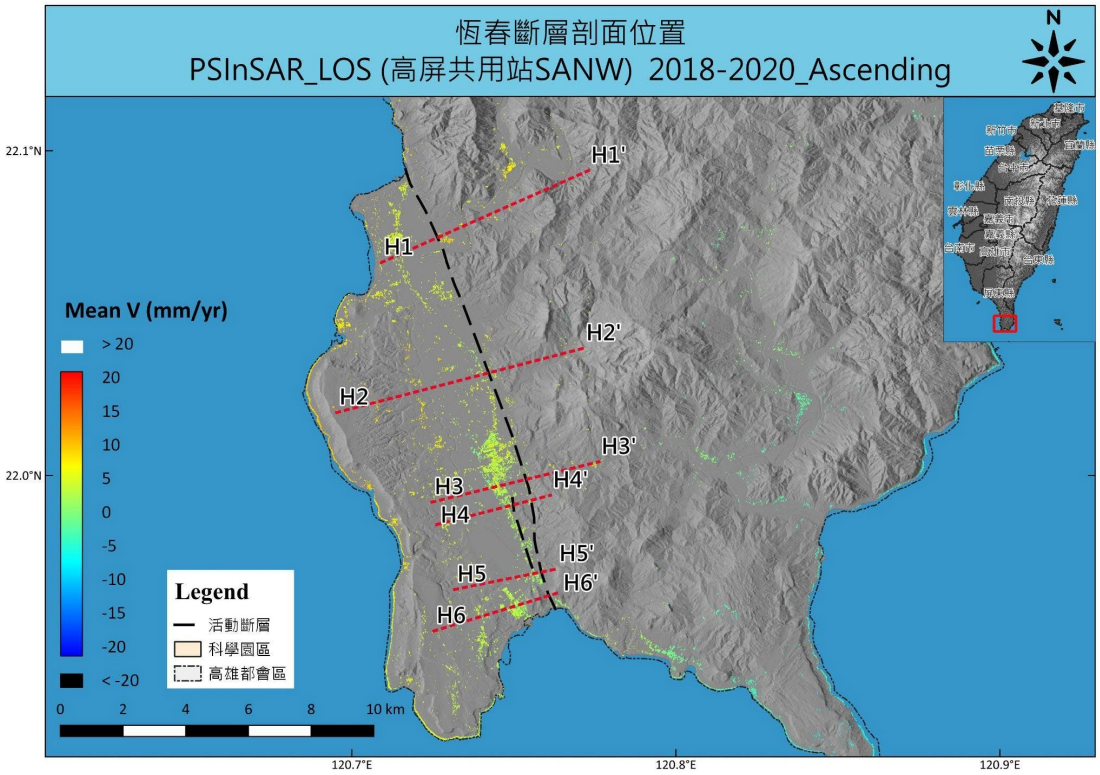


圖 4-4-6：2018-2020 車瓜林斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-4-6 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of descending orbits and profiles across the CheKuaLin Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


恆春斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Ascending
N
22.1°N
22.0°N
120.7°E
120.8°E
120.9°E
H1'
H1
H2'
H2
H3'
H3
H4'
H4
H5'
H5
H6'
H6
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km

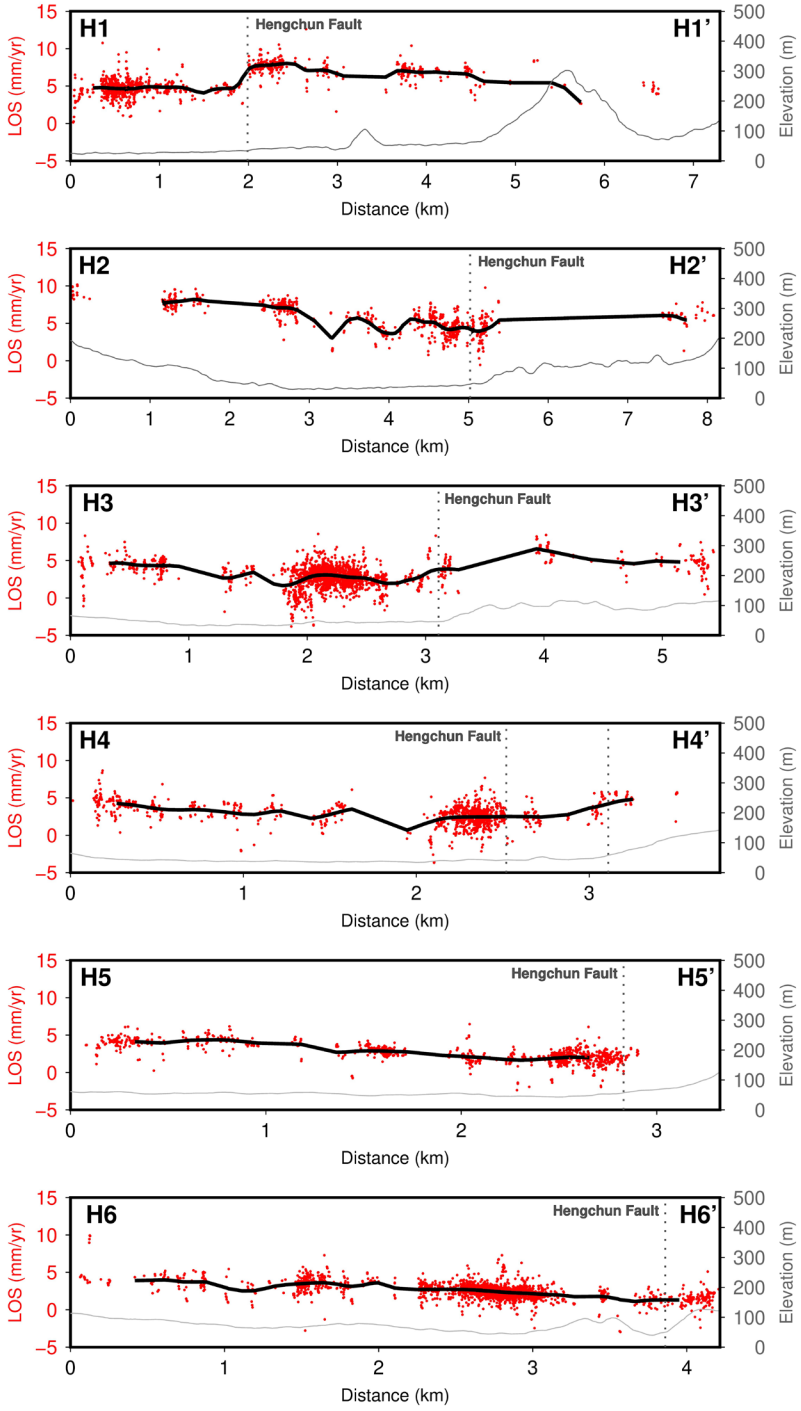
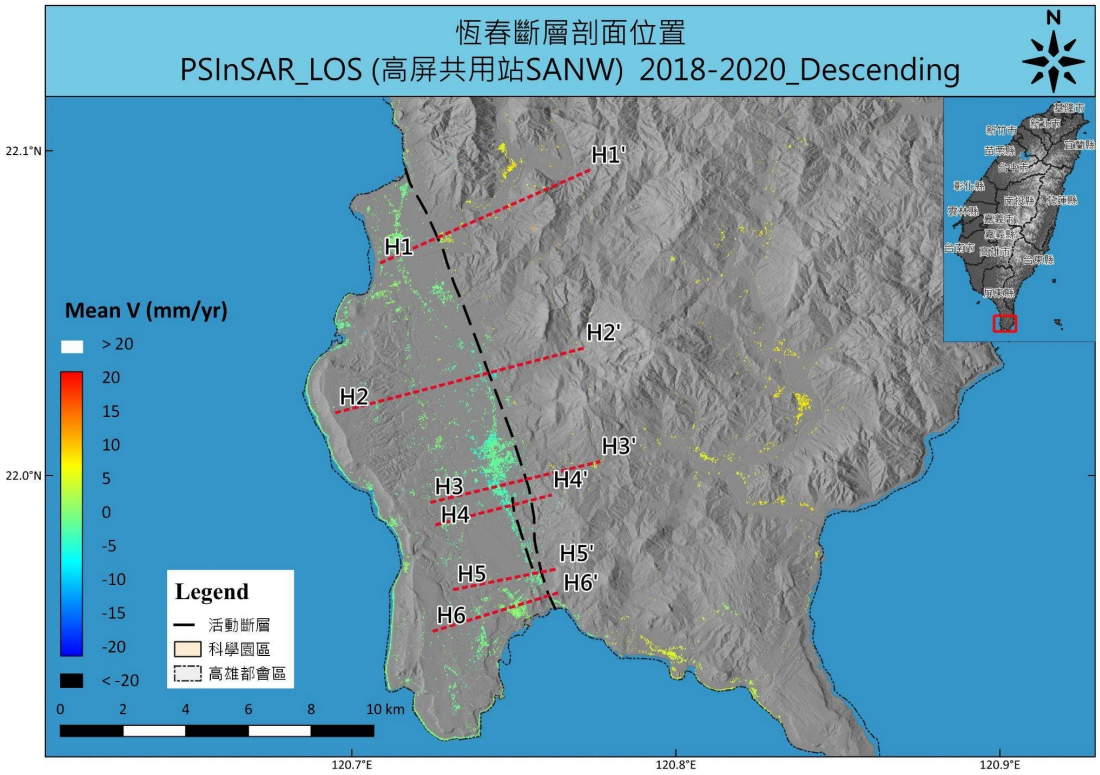


圖 4-4-7：2018-2020 恆春斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-4-7：Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of ascending orbits and profiles across the HengChun Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


恆春斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Descending
N
22.1°N
22.0°N
120.7°E
120.8°E
120.9°E
H1'
H1
H2'
H2
H3'
H3
H4'
H4
H5'
H5
H6'
H6
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km

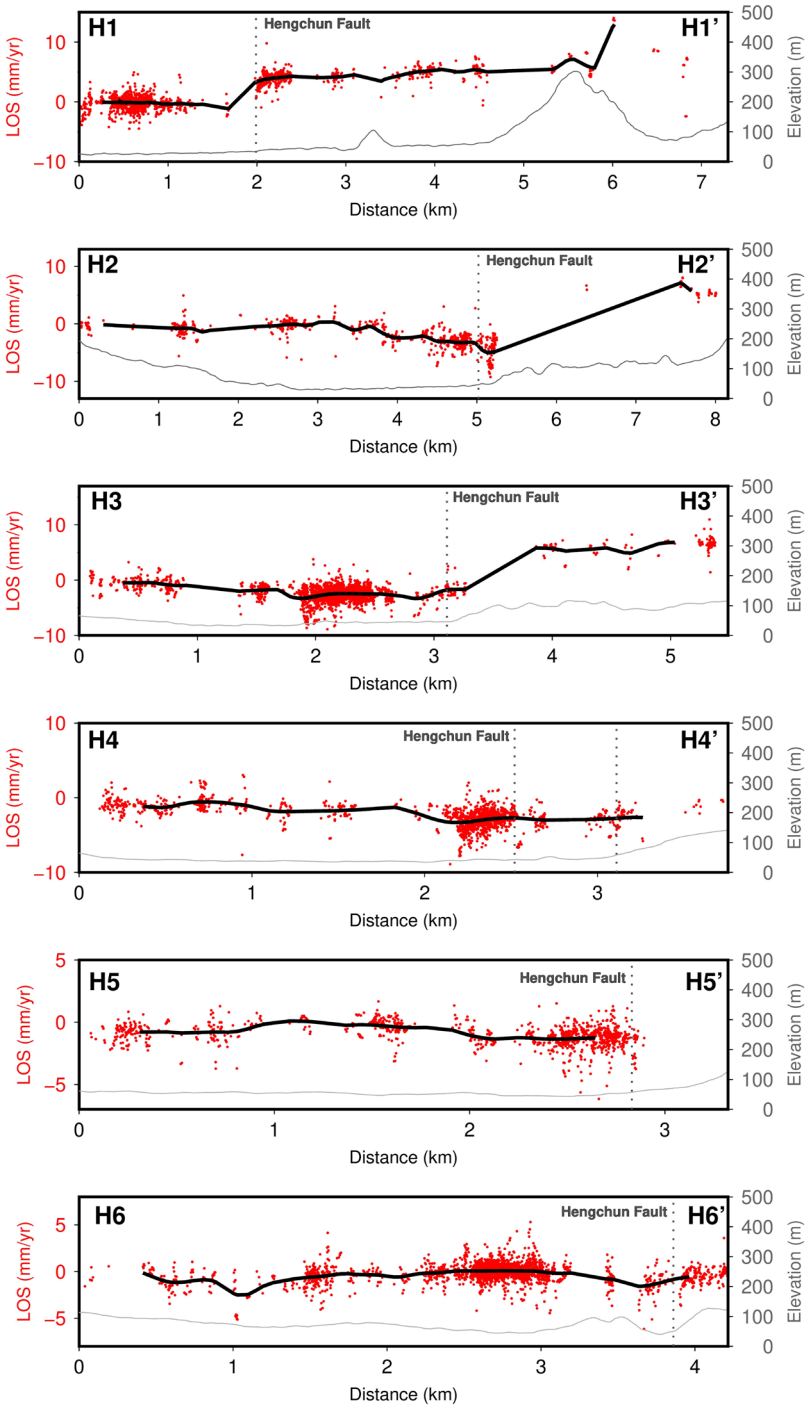


圖 4-4-8：2018-2020 恆春斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-4-8：Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of descending orbits and profiles across the HengChun Fault. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-4-3 科學園區與都會區剖面分析

本研究為了深入了解科學園區和都會區的地表活動特性，因此分別在橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區和北高雄平原區，劃設數條橫跨南北和東西方向的剖面進行分析。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。以下就各區的分析成果進行詳細描述。

4-4-3-1 橋頭科學園區

橋頭科學園區有兩條剖面通過，SC1 是南北方向剖面，SC2 是東西方向剖面。SC1 剖面的升軌道結果（圖 4-4-9）指出跨過車瓜斷層約有 8 mm/yr 的差異，斷層斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；SC1 剖面的降軌道結果（圖 4-4-10）指出跨過車瓜斷層約有 3-5 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤。SC2 剖面的升軌道結果（圖 4-4-9）指出跨過車瓜斷層約有 3-4 mm/yr 的差異，斷層斷層上盤的 LOS 縮短速率大於下盤；SC2 剖面的降軌道結果（圖 4-4-10）指出跨過車瓜斷層約有 2-3 mm/yr 的差異，斷層下盤的 LOS 縮短速率大於上盤。

4-4-3-2 高雄科學園區

高雄科學園區有兩條剖面通過，SK1 是南北方向剖面，SK2 是東西方向剖面。升軌道的 SK1 剖面的數值（圖 4-4-9）都維持在-10 至 0 mm/yr 之間，降軌道的 SK1 剖面的數值（圖 4-4-10）則維持在-5 至 5 mm/yr 之間，兩個軌道的剖面皆顯示在 3 公里處有 5 mm/yr 的 LOS 速度場伸張之差異特性出現。升軌道的 SK2 剖

面的數值（圖 4-4-9）都維持在-10 至 0 mm/yr 之間，降軌道的 SK2 剖面的數值（圖 4-4-10）則維持在-5 至 5 mm/yr 之間，兩個軌道的剖面也皆在 3.5 公里處有 3 mm/yr 的 LOS 速度場伸張之差異特性出現。總合兩個飛行方向所觀測到的 LOS 方向位移結果，初步可以推測此區域的中央位置的地表應以沉降的活動行為為主。

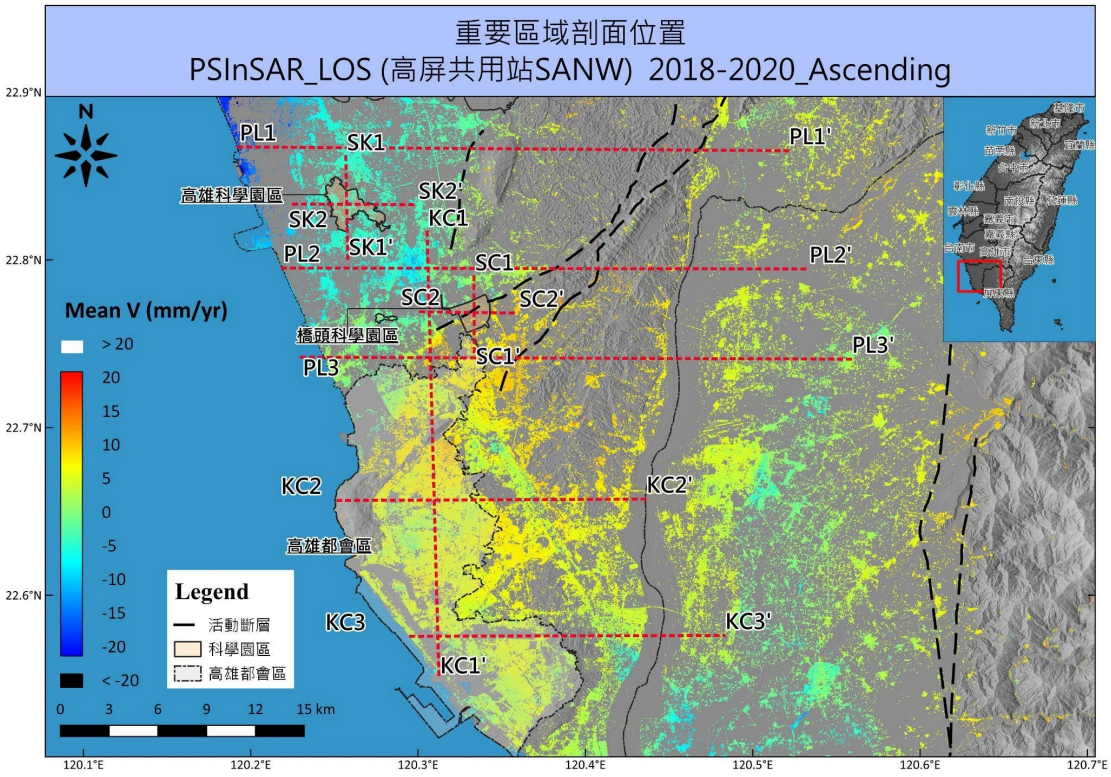
4-4-3-3 高雄都會區

高雄都會區有三條剖面通過，KC1 是南北方向剖面，KC2 和 KC3 是東西方向剖面。KC1 剖面的升軌道（圖 4-4-9）和降軌道（圖 4-4-10）的結果都指出在 4 至 5 公里處有顯著的 LOS 遠離訊號，其值在-5 至-10 mm/yr 之間，代表該處有地表沉降的行為，相對應的空間位置座落在高雄科學園區和橋頭科學園區之間；然而，跨過 5 公里處之後，兩個剖面呈現相反的趨勢。KC2 剖面的升軌道（圖 4-4-9）和降軌道結果（圖 4-4-10）雖都在 14 至 15 公里處有 4 至 5 mm/yr 的差異，但是升軌道是東側的 LOS 縮短速率比西側快，而降軌道卻是西側的 LOS 縮短速率比東側高。KC3 剖面的升軌道（圖 4-4-9）和降軌道結果（圖 4-4-10）也都在 14 至 15 公里處有差異的產生，但是升軌道的差異值約為 3 mm/yr，而降軌道的差異值可達 8 mm/yr。

4-4-3-4 北高雄平原區

北高雄平原區有三條剖面通過，剖面 PL1、剖面 PL2 和剖面 PL3 都是東西方向的剖面。PL1 剖面的升軌道結果（圖 4-4-9）顯示在 2.5 公里處有 LOS 速度差相差 10 mm/yr 的量值出現；在 14 公里處跨過小崗山段層時，有 4 至 5 mm/yr 的 LOS 速度場差異；在跨過車瓜林和旗山斷層的位置，有 6 至 7 mm/yr 的 LOS 速度

場差異；相反的，PL1 剖面的降軌道結果（圖 4-4-10）則只有在跨過車瓜林和旗山斷層的位置，呈現 10 mm/yr 的 LOS 速度場差異，其餘地方的差異沒有如升軌道這樣顯著。PL2 剖面的升軌道（圖 4-4-9）和降軌道的結果（圖 4-4-10）在 7 至 8 公里處都有 5 至 10 mm/yr 的 LOS 速度場差異，但是過了這個位置之後，兩個軌道的 LOS 速度場走勢呈現完全相反之趨勢。PL3 剖面的升軌道（圖 4-4-9）和降軌道的結果（圖 4-4-10）在 5 至 7 公里處都有 10 mm/yr 的 LOS 速度場差異，但是過了這個位置之後，兩個軌道的 LOS 速度場走勢如同 PL2 一樣，呈現完全相反的趨勢。



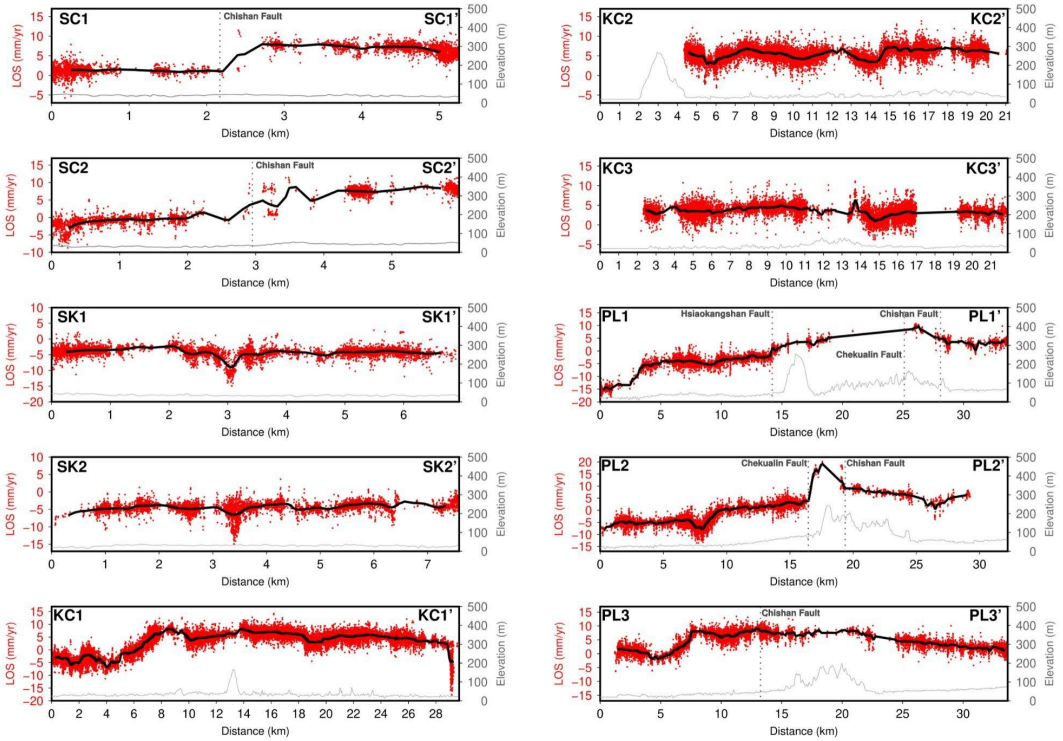
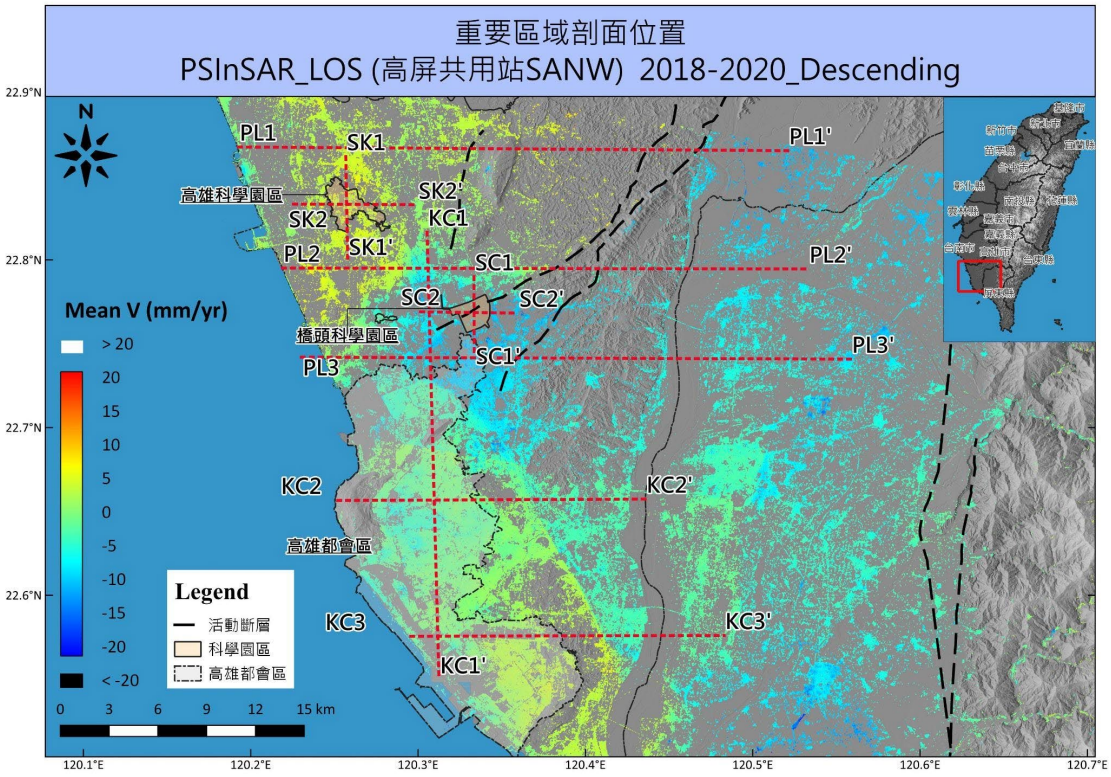


圖 4-4-9：2018-2020 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-4-9 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of ascending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.


重要區域剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Descending
N
PL1
SK1
PL1'
高雄科學園區
SK2'
SK2
KC1
PL2
SK1'
SC1
PL2'
SC2
SC2'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
橋頭科學園區
PL3
SC1'
PL3'
KC2
KC2'
高雄都會區
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
KC3
KC3'
KC1'
0 3 6 9 12 15 km
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E

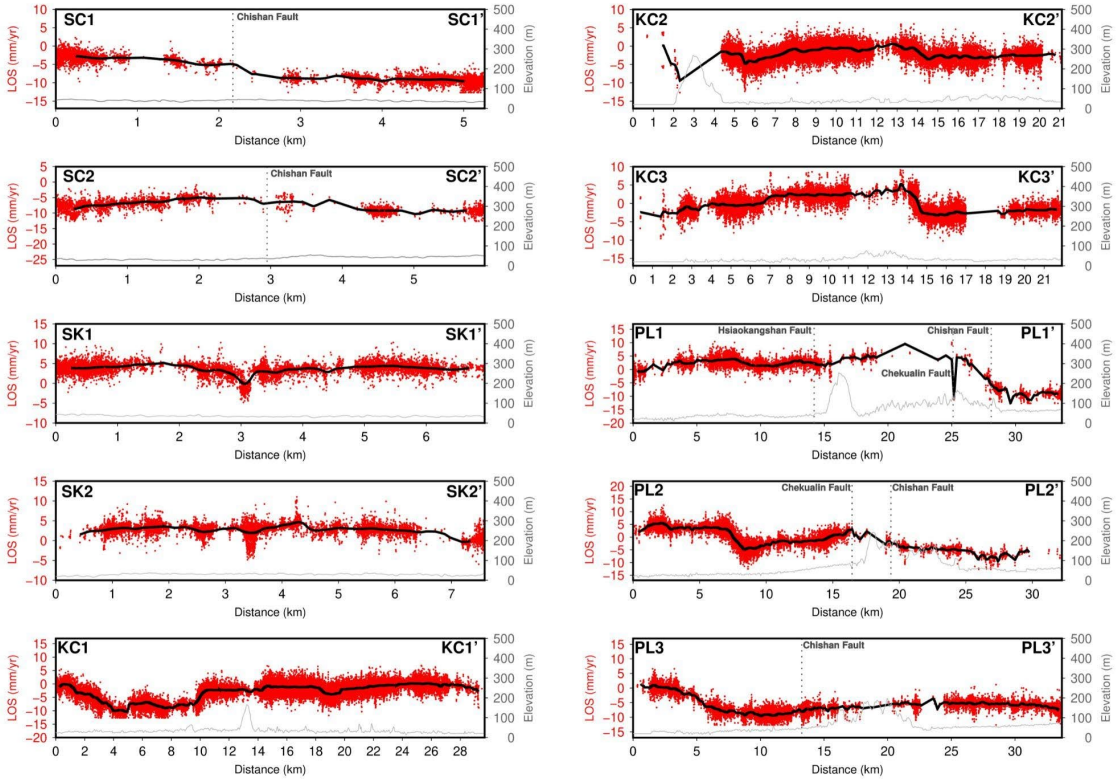


圖 4-4-10：2018-2020 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-4-10 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2020 processed with images of descending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSInSAR velocity, the black line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-5 重點區域時間序列

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。

我們選擇了旗山斷層(C2)、車瓜林斷層(C3)、小崗山斷層剖面(X2)，以及高雄科學園區、橋頭科學園區、高雄都會區六個關注地區上各取一個參考點與觀測點。 在斷層剖面上，以北邊端點為參考點，觀察南邊端點的相對運動。 園區以及高雄都會區方面，我們在其西北、東南角落各取一點，西北方為參考點，觀察東南方點位的相對運動。

在高雄都會區的時間序列中，我們可以觀察到 2018-2020 時間序列中顯示了明顯的季節性訊號，但是沒有明顯的長期趨勢。高雄科學園區也如同高雄都會區，以季節性訊號為主。

橋頭科學園區與車瓜林斷層部分，由升軌資訊看來，東南端點相對西北端點有足夠明顯的活動，三年中在橋頭工業區兩端點的雷達斜距方向位移可達到超過 3cm。 在車瓜林斷層剖面兩端位移雖然不如橋頭工業園區，但是還是有緩慢但是可見的雷達斜距方向位移。 這樣的現象在降軌資料中較不明顯，我們可以初步推測此位移可能比較平行於北北東的降軌觀察方向。

小崗山斷層與旗山斷層在此剖面兩側的端點之相對移動較不明顯。

2018_2020 Ascending

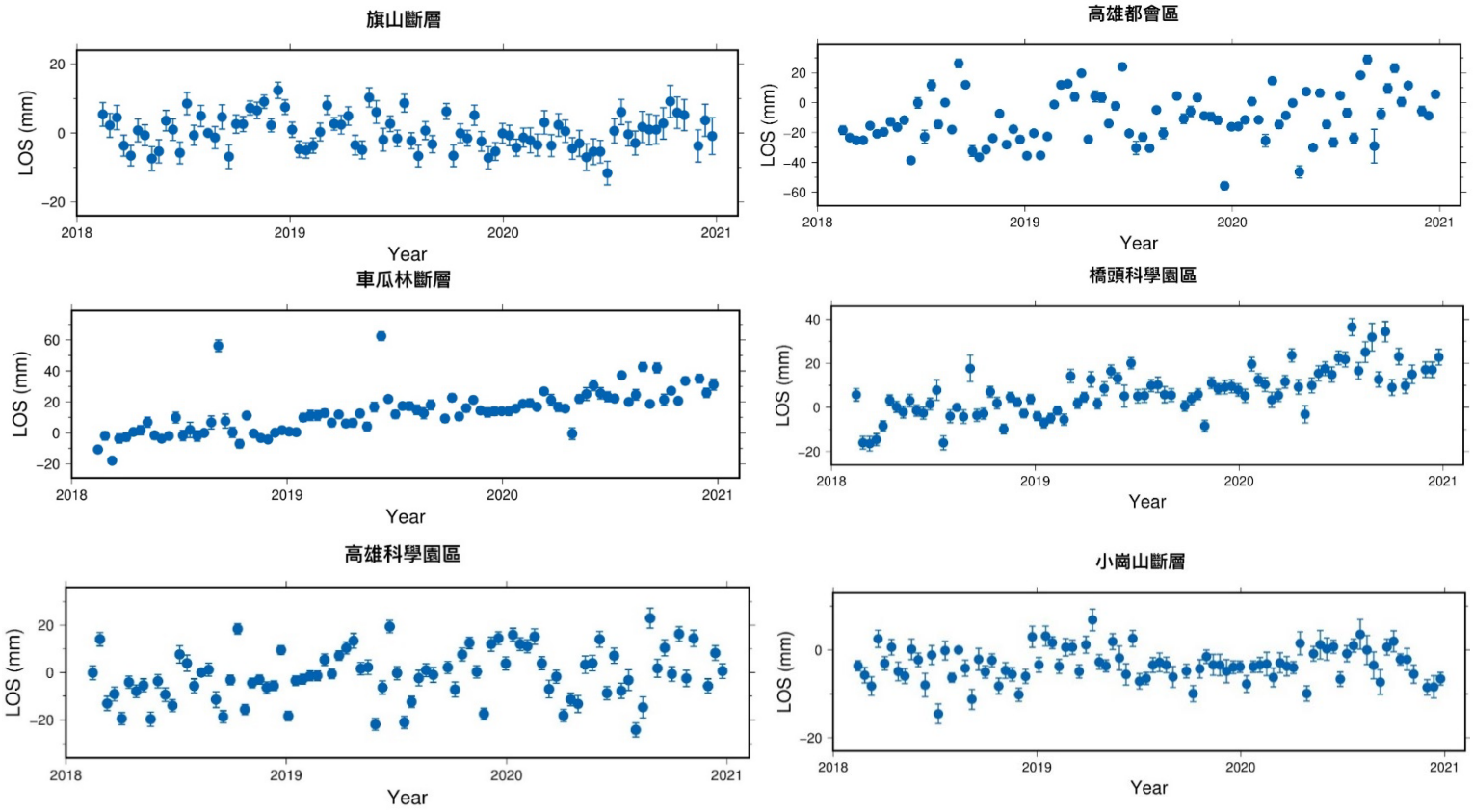


圖 4-5-1：2018-2020 六個重要觀測區域變形時間序列（升軌）。 旗山斷層(C2)、車瓜林斷層(C3)、小崗山斷層剖面(X2)各取該剖面之北端點為參考點，南端點為觀察點。以及高雄科學園區、橋頭科學園區、高雄都會區各取一個參考點（西北端）與觀測點（東南端）。

Figure 4-5-1：2018-2020 Time series of six selected locations (ascending data). We used northern endpoint of the Chishan fault (C2), CheKuaLin fault (C3), XiaoKanShan fault (X2) profiles as reference points, and their southern endpoints as the observation points.

2018_2020 Descending

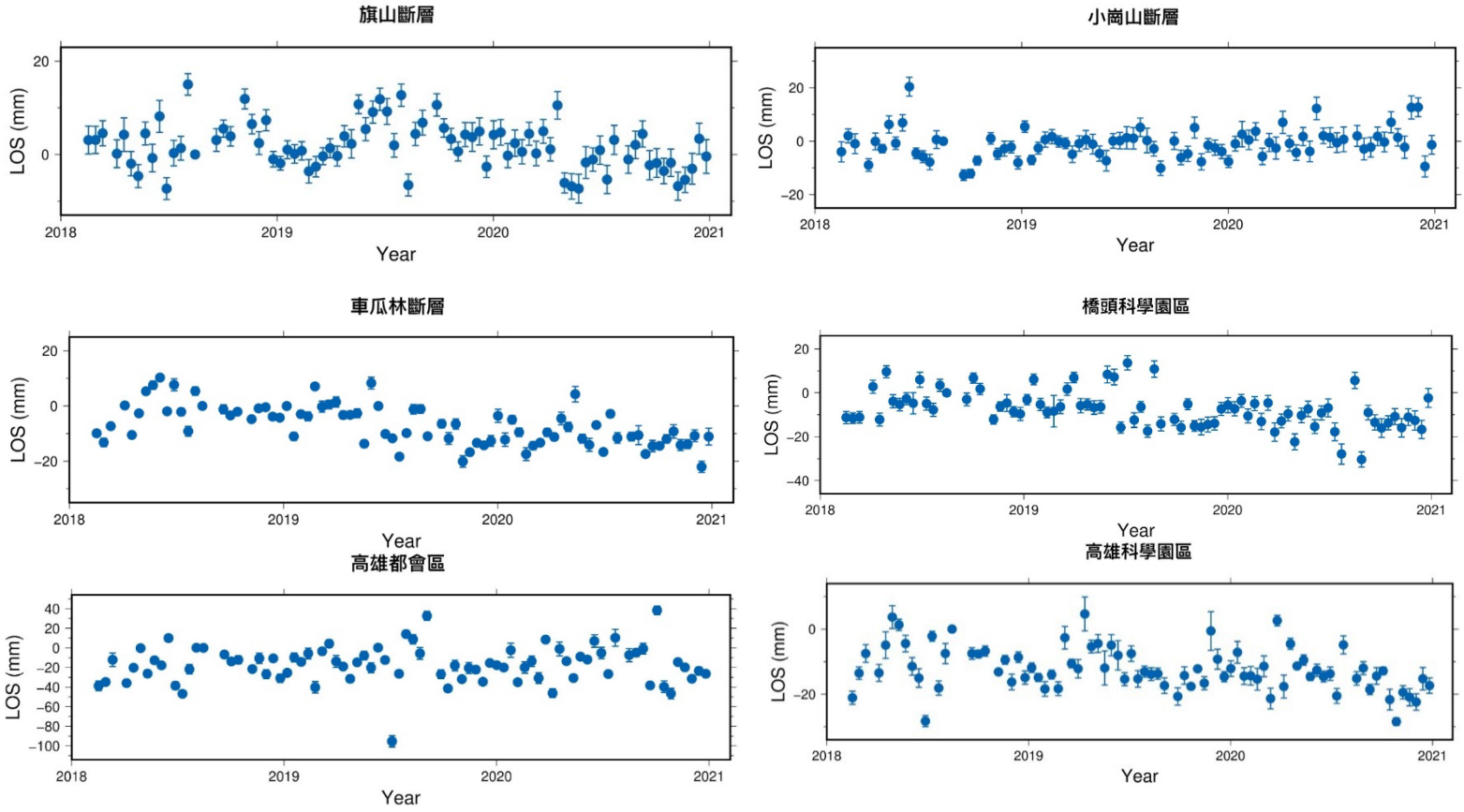


圖 4-5-2：2018-2020 六個重要觀測區域變形時間序列（降軌）。 旗山斷層(C2)、車瓜林斷層(C3)、小崗山斷層剖面(X2)各取該剖面之北端點為參考點，南端點為觀察點。以及高雄科學園區、橋頭科學園區、高雄都會區各取一個參考點（西北端）與觀測點（東南端）。

Figure 4-5-2：2018-2020 Time series of six selected locations (descending data). We used northern endpoint of the Chishan fault (C2), CheKuaLin fault (C3), XiaoKanShan fault (X2) profiles as reference points, and their southern endpoints as the observation points.

4-5-1 重要地點地表變形時間序列分析

我們選取了六個 GPS 點位呈現其時間序列以及與雷達資訊的對比。 GPS 的東西、南北、垂直向資訊投影到雷達斜距方向後，直接跟雷達 LOS 時間序列對比。首先可以看到的是，GPS 的時間序列與雷達時間序列對比相當的好，沒有什麼太大的差異。 在訊號時間序列上，除了嘉興國中（崗山附近）的資訊是明顯以季節性方式移動以外，其他五站都以或快或慢的速率抬升。在橋頭科學園區以及車瓜林斷層附近的阿公店以及深水國小站並沒有顯示明顯的垂直方向運動。這與上節剖面的時間序列分析結果一致。

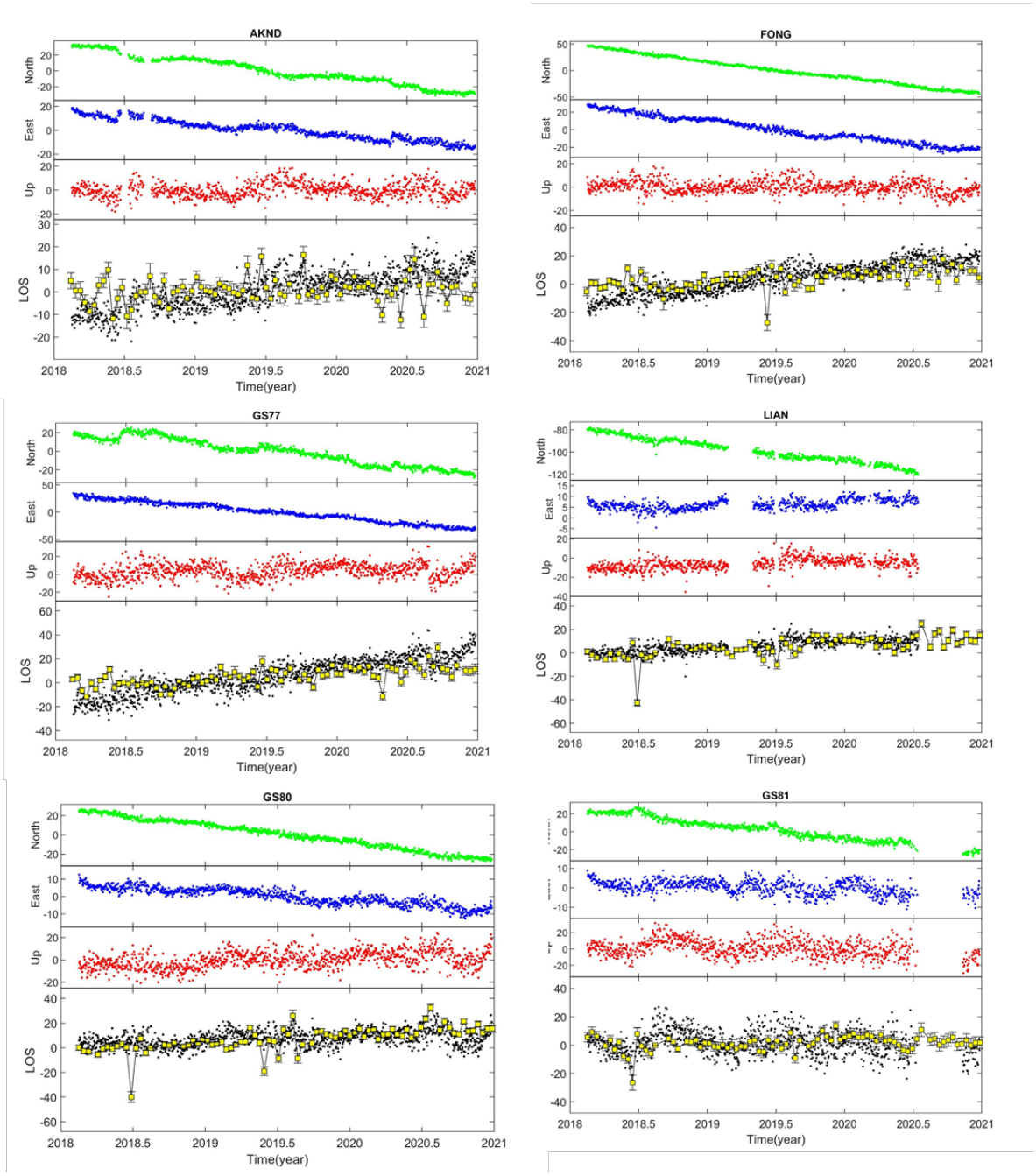


圖 4-5-3：我們選取了六個 GPS 站位將其 2018-2020 時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 黑色點則為 GPS 投影至雷達視衛星方向、亦即是斜距方向（雷達為升軌方向），並且與附近之雷達資料比對（黃色方框）。FONG：鳳山、AKND：阿公店、GS77：深水國小（燕巢）、GS80：田寮國中、GS81：嘉興國中、LIAN：阿蓮國小。

Figure 4-5-3：Six GPS stations and their adjacent PSI signals were plotted. FONG: Fongshan, AKND: Akongdian, GS77: Shenshui elementary school, iLIAN: A-Lian elementary school; GS80: TianLiao junior high school, GS81: Jiahsin junior high school.

4-6 ALOS 衛星資料結果

從 2007/01/17 開始至 2011/01/28 之間，選取 16 幅 ALOS 升軌道(Ascending)影像，並以 2009/10/25 為主影像，各影像對的雷達差分干涉成果透過 Doris 軟體處理完成，再經由 StaMPS 軟體進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得 2007 年至 2011 年研究區域內的衛星視角(LOS)位移速度場。

由於總共可使用的影像數目僅有 16 幅，在現代處理流程中影像稍嫌不足，導致資料不太容易收斂。 這個情形在圖 4-6-1 以相當明顯看到解算之速率在許多平原區域也呈現斑駁的現象。

雖然如此，解算後的資料仍有區域的趨勢。 例如小崗山斷層東西側速率差異、車瓜林斷層南北側速率差異（往西南延伸至海邊）、屏東平原南側下陷區域…等等的大趨勢都可以清楚地在圖中看見。

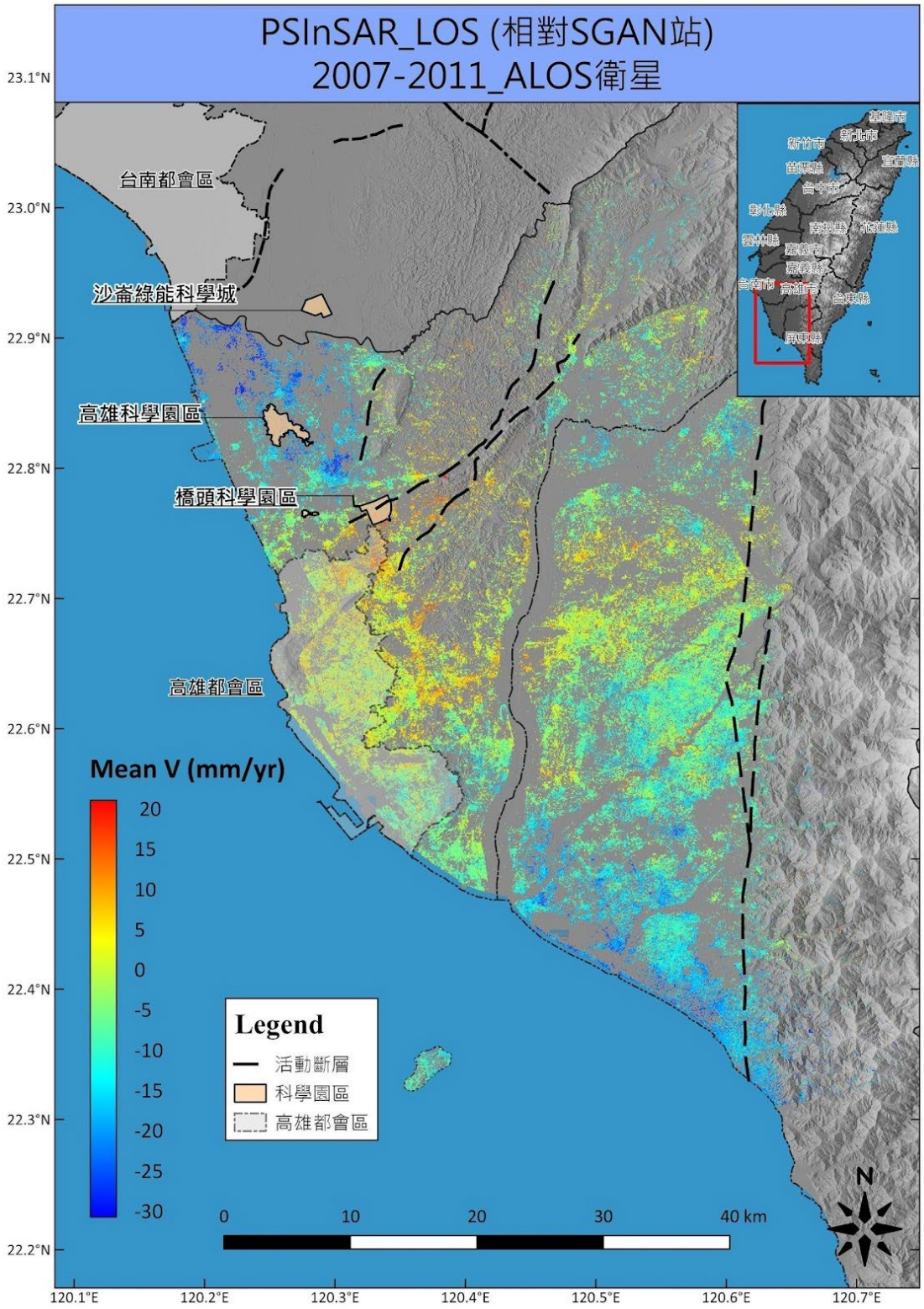


圖 4-6-1：2007-2011 ALOS 雷達影像解算之視衛星方向變形速率。

Figure 4-6-1: 2007-2011 ALOS radar LOS velocity.

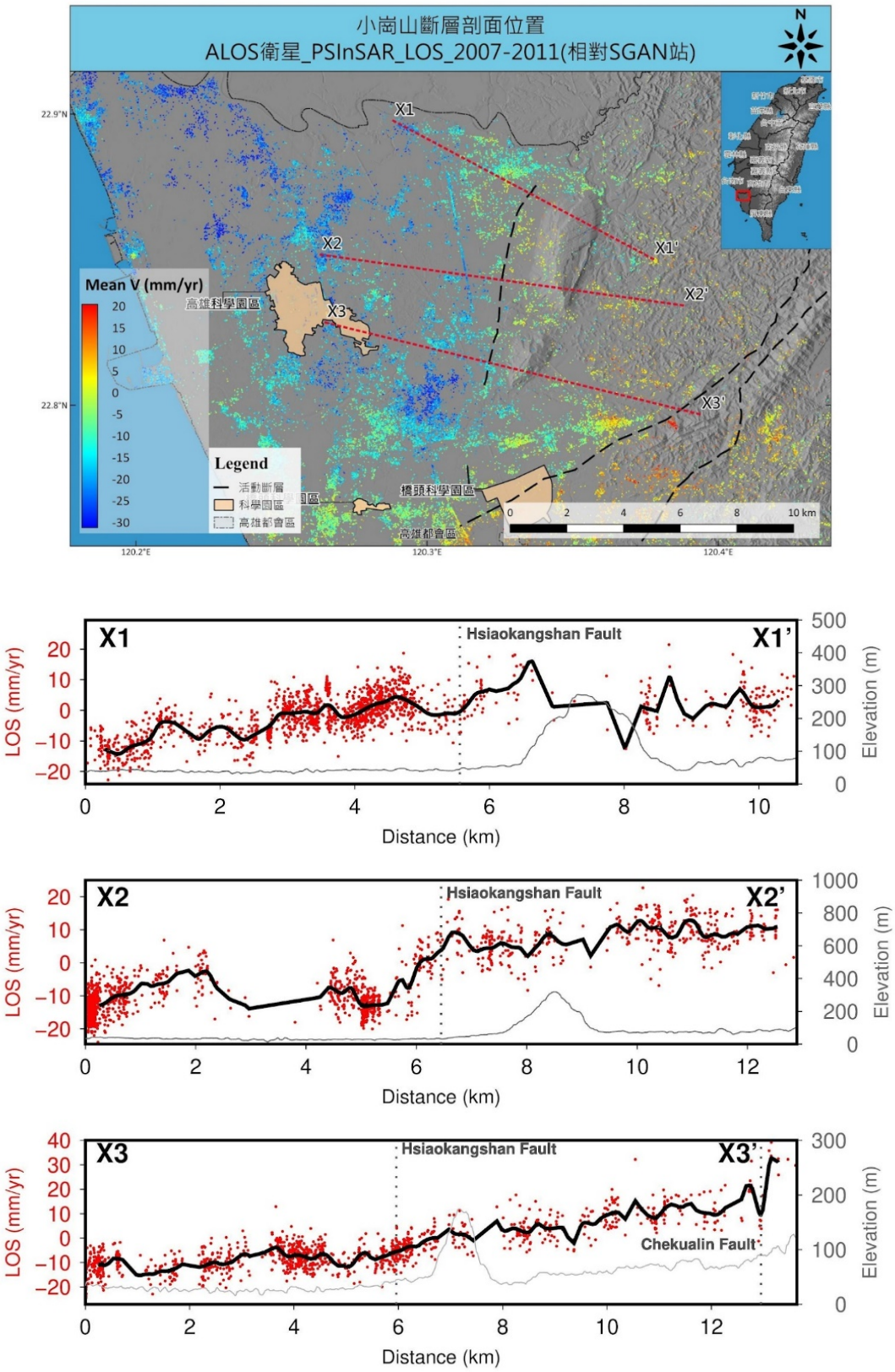
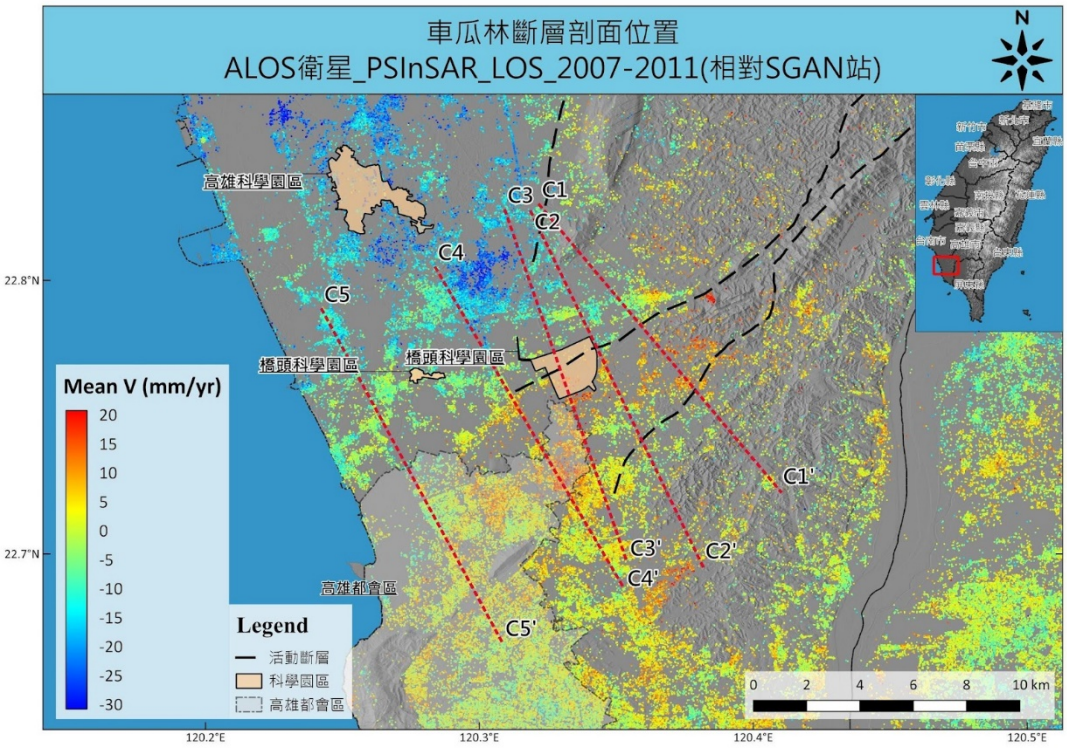


圖 4-6-2：小崗山斷層剖面。 在 X2 剖面中可以清楚看出近斷層的速度差異。

Figure 4-6-2: HsiaoKangShan fault profiles. In X2 profile, an abrupt change in radar LOS velocity can be clearly seen.


車瓜林斷層剖面位置
ALOS衛星_PSInSAR_LOS_2007-2011(相對SGAN站)
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

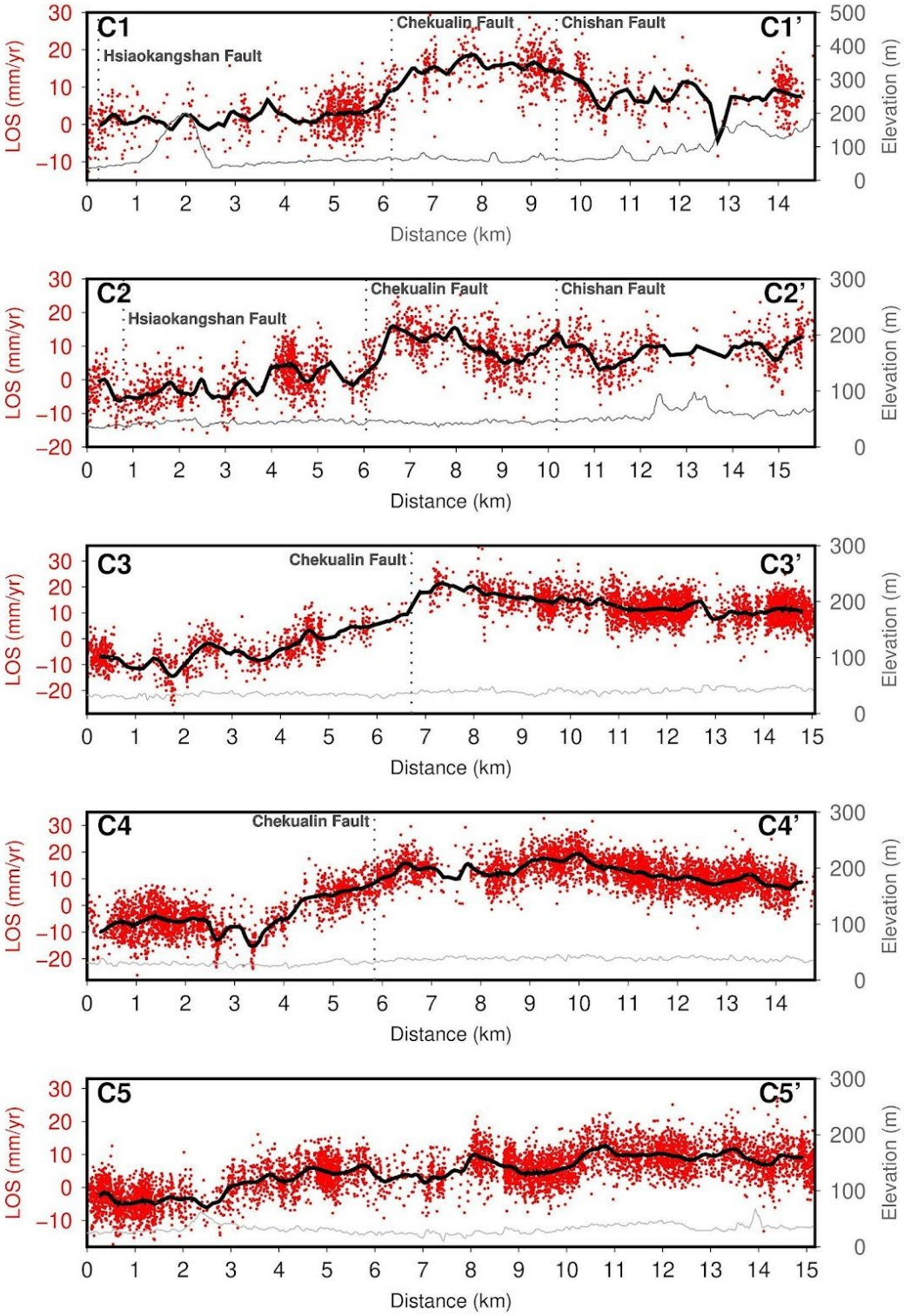
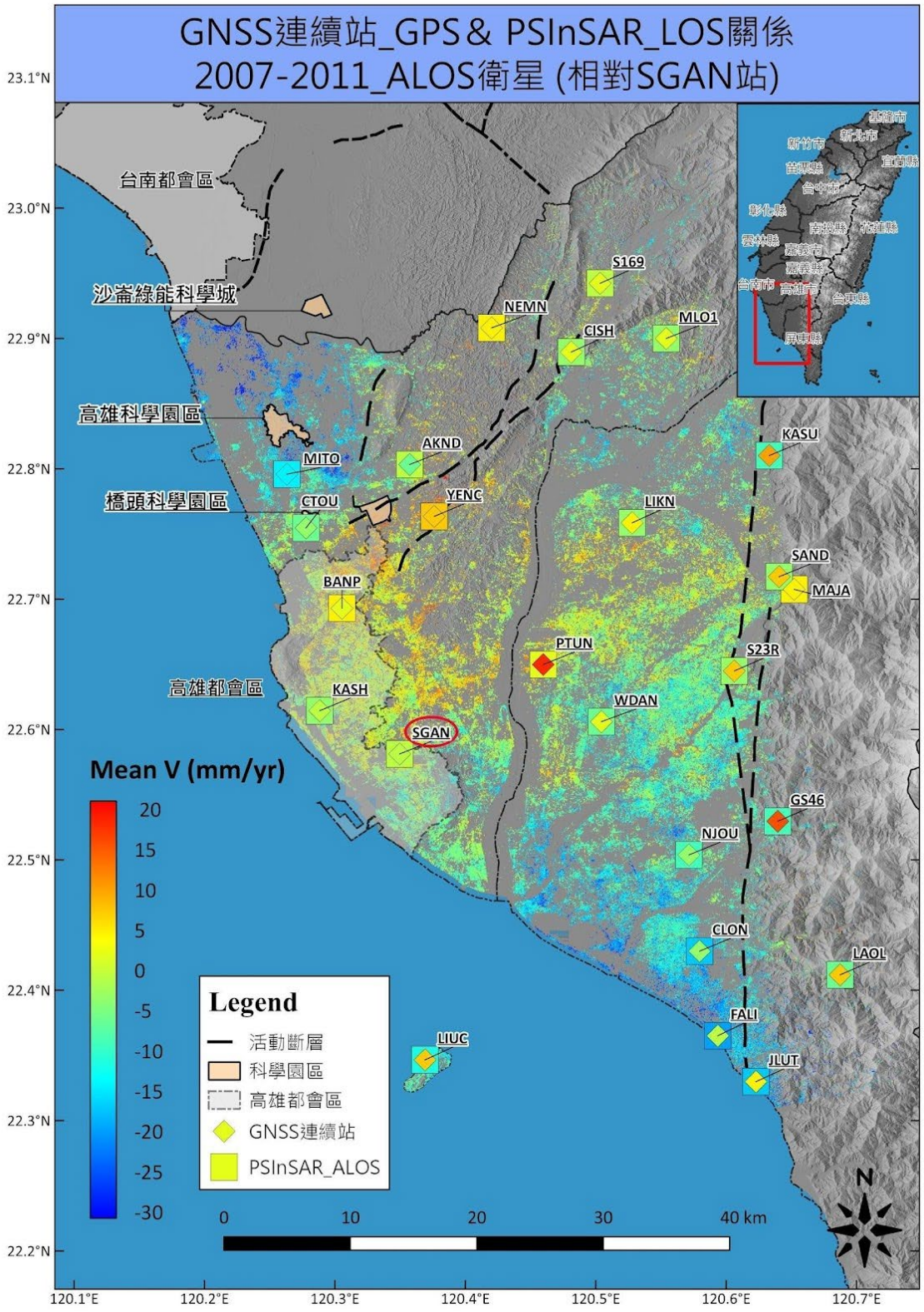


圖 4-6-3：車瓜林斷層剖面。 在 C1 到 C4 剖面中可以清楚看出近斷層的速度差異，C5 剖面的速度差異似乎分佈在剖面的 3 公里處以及 8 公里處。

Figure 4-6-3: CheGuaLin fault profiles. An abrupt change in radar LOS velocity can be clearly seen in profile C1 to C4. Change of velocity can be seen in 3km and 8km marks in profile C5.


GNSS連續站_GPS & PSInSAR_LOS關係
2007-2011_ALOS衛星 (相對SGAN站)
台南都會區
沙崙綠能科學城
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
S169
NEMN
CISH
MLO1
AKND
MITO
CTOU
YENC
LIKN
KASU
SAND
MAJA
BANP
PTUN
S23R
KASH
WDAN
SGAN
GS46
NJOU
CLON
LAOL
FALI
LIUC
JLUT
Mean V (mm/yr)
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
GNSS連續站
PSInSAR_ALOS
0
10
20
30
40 km
N
23.1°N
23.0°N
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
22.5°N
22.4°N
22.3°N
22.2°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E

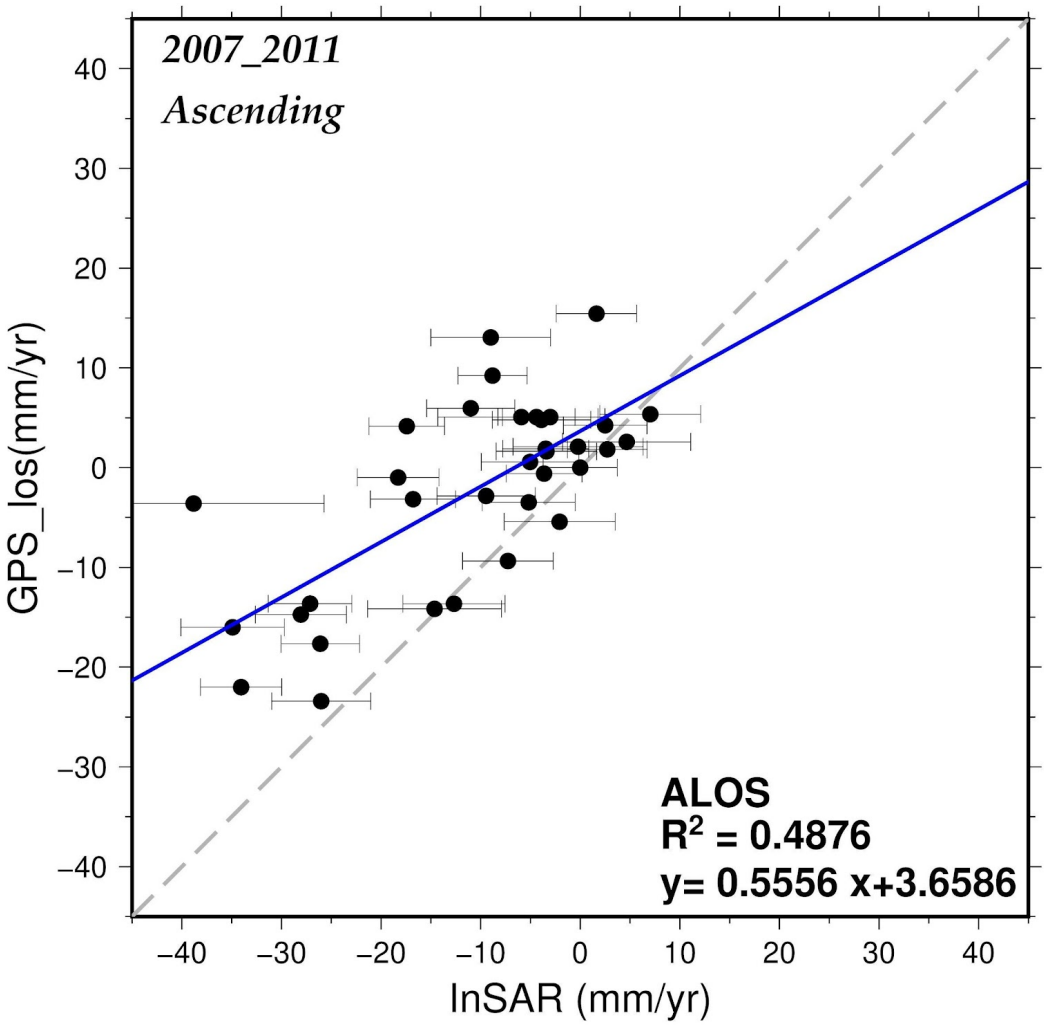


圖 4-6-4：西南部 ALOS 解算之速度場與同時期的 GNSS 資訊比對。其比對斜率為 0.55，R^2 約 0.5。

Figure 4-6-4: Comparison between ALOS LOS velocity and contemporary GNSS velocity. Slope of comparison is 0.55, and R^2 is 0.5.

在小崗山斷層剖面中（圖 4-6-2），X2 剖面位於斷層中段，可以清楚看到斷層的東西兩側的速度差，而在車瓜林斷層剖面中，從 C1 到 C4 剖面都可以清楚看到速度差異，而 C5 剖面的速度差則呈現在 3km 以及 8km 處，顯示車瓜林斷層向西南延伸可能有不一樣的特性。

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 5-1-1），與本計畫所計算 2018-2020 之雷達影像上升軌道剖面資料進行擬合。針對三條斷層(車瓜林、恆春與小崗山，圖 5-2~4)附近各選一條剖面，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。

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) 0~1000 公尺，格點為 200 公尺；斷層底部(Fault Bottom) 2000~15000 公尺，格點為 1000 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) -0.2~0.2 公尺，格點為 0.001 公尺，每個剖面總搜尋筆數為 269472（約 27 萬種參數組合）。

由於五個參數全部開放搜尋時，模型似乎會偏好走向滑移，因此我們在計算時採用兩次計算，一次限制 dip slip 為零去搜尋，一次限制 strike slip 為零去搜尋。 在模擬資料呈現部分，我們將所有 27 萬

個參數組合算過之後，計算其與觀測值之 RMSE，並取出 RMSE 最小的 0.1% 來繪製結果。 在繪製時，利用兩個參數為 X,Y 軸，並將個數作為 Z 軸觀察這些比較好的結果分佈在哪些參數組合中，利用立體的直方圖觀察個數，並討論這些參數組合的狀況。

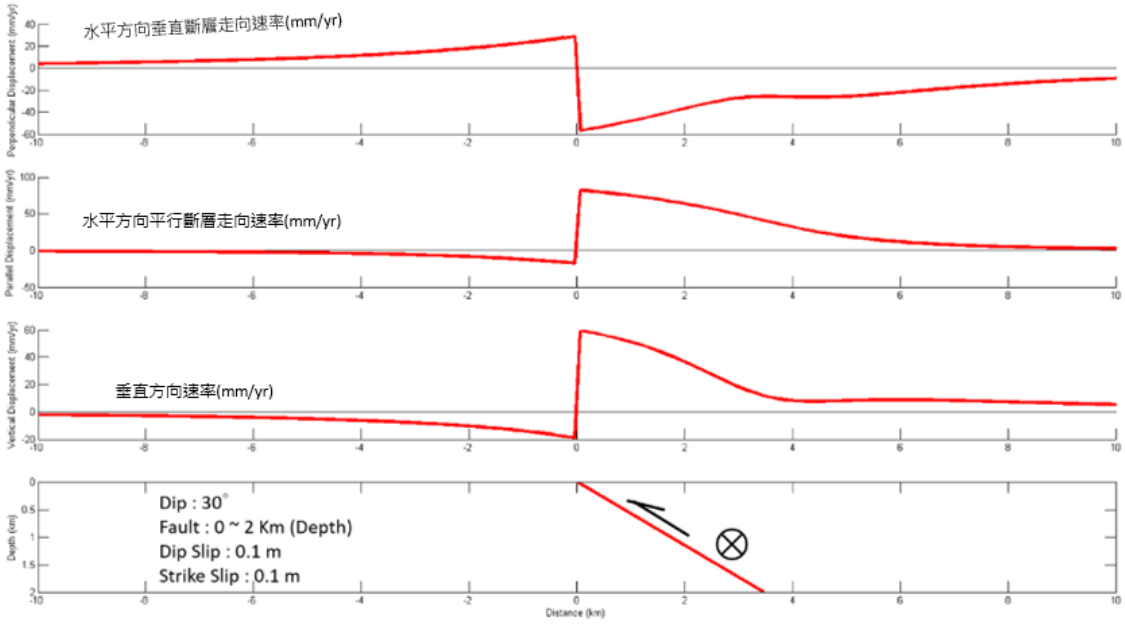
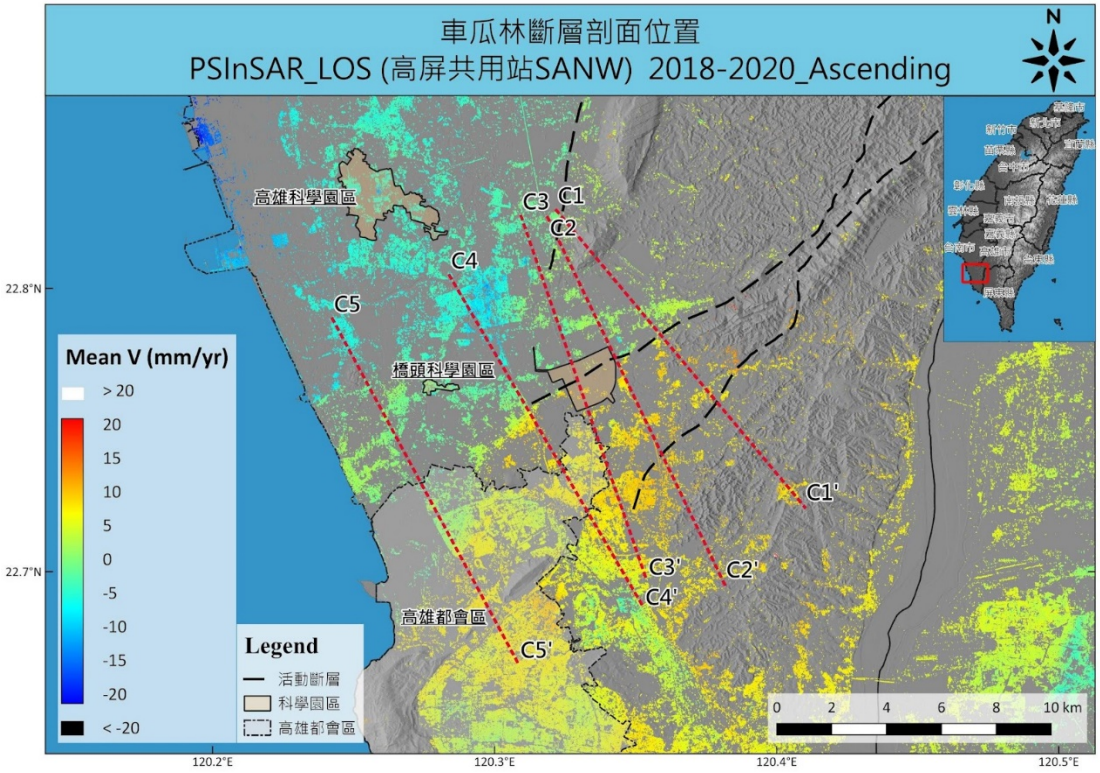


圖 5-1-1：假設斷層幾何與滑動量，透過斷層錯位模型推估地表變形行為，由上到下分別為水平方向垂直斷層走向速率、水平方向平行斷層走向速率、垂直方向速率與斷層幾何、運動方向及參數。

Figure 5-1-1: To estimate surface deformation under fault dislocation model with versatile fault geometry and fault slip. From top to bottom, the four diagrams represent curves of horizontal velocity parallel to strike, curves of horizontal velocity perpendicular to strike, curves of vertical velocity, and the diagram of fault geometry, direction of movement, and associated parameters.


車瓜林斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Ascending
N
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
C1
C2
C3
C4
C5
C1'
C2'
C3'
C4'
C5'
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.8°N
22.7°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E

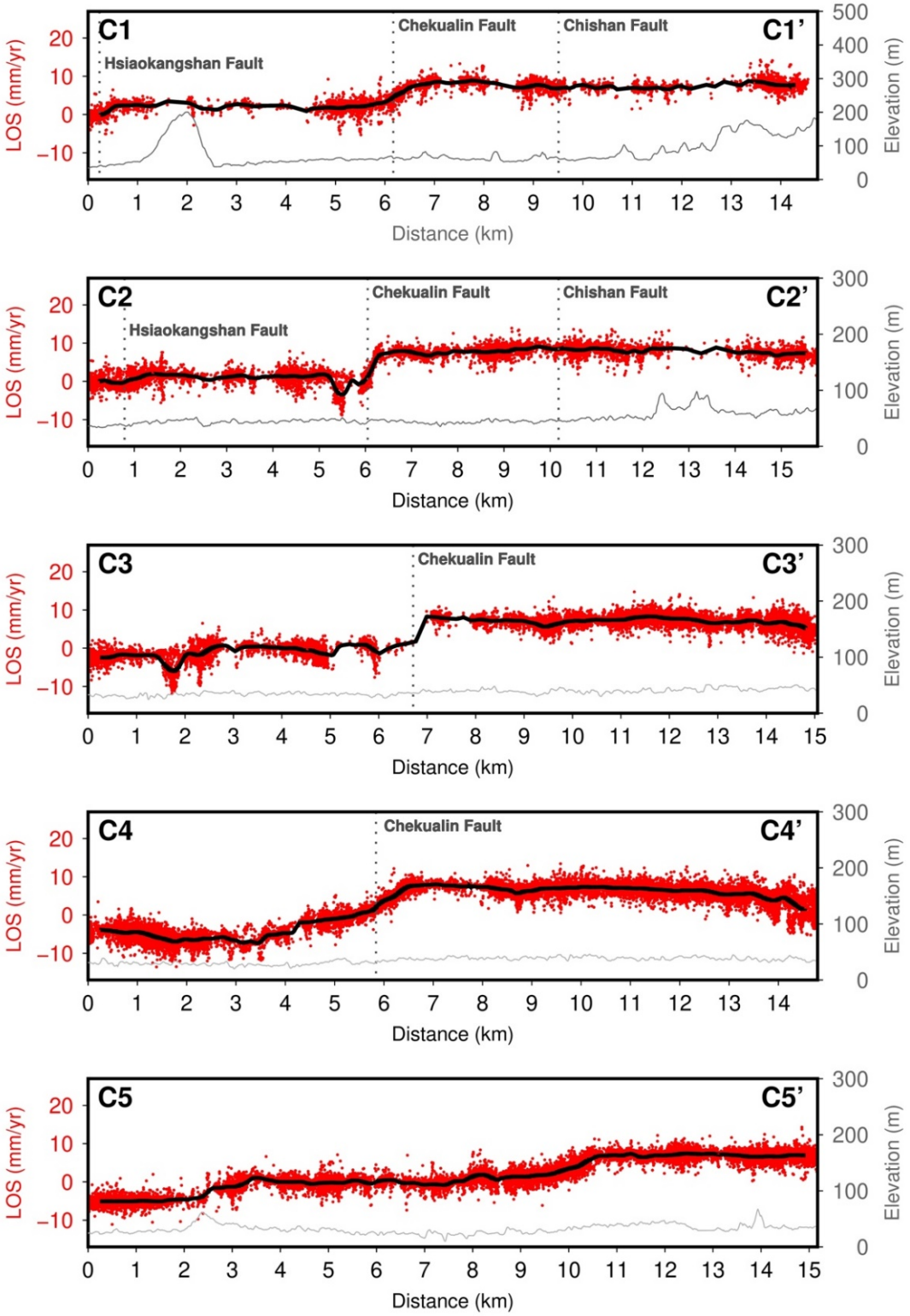
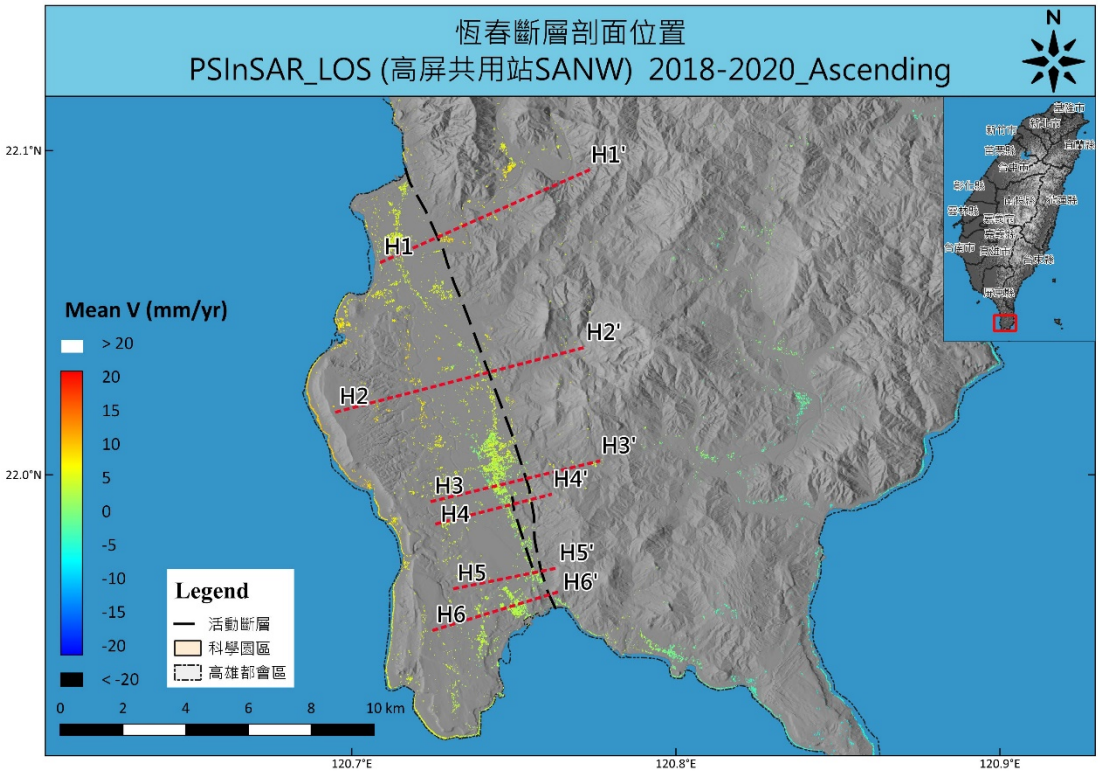


圖 5-1-2：2018-2020 年車瓜林斷層附近雷達影像上升軌道之剖面資料。此斷層在本次模擬採用 C1 剖面來模擬。

Figure 5-1-2：Profiles extracted from InSAR results (assending orbits) across the CheKuaLin Fault. Profile C1 is picked to perform the modelling for this fault.


恆春斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Ascending
N
22.1°N
22.0°N
120.7°E
120.8°E
120.9°E
H1'
H1
H2'
H2
H3'
H3
H4'
H4
H5'
H5
H6'
H6
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km

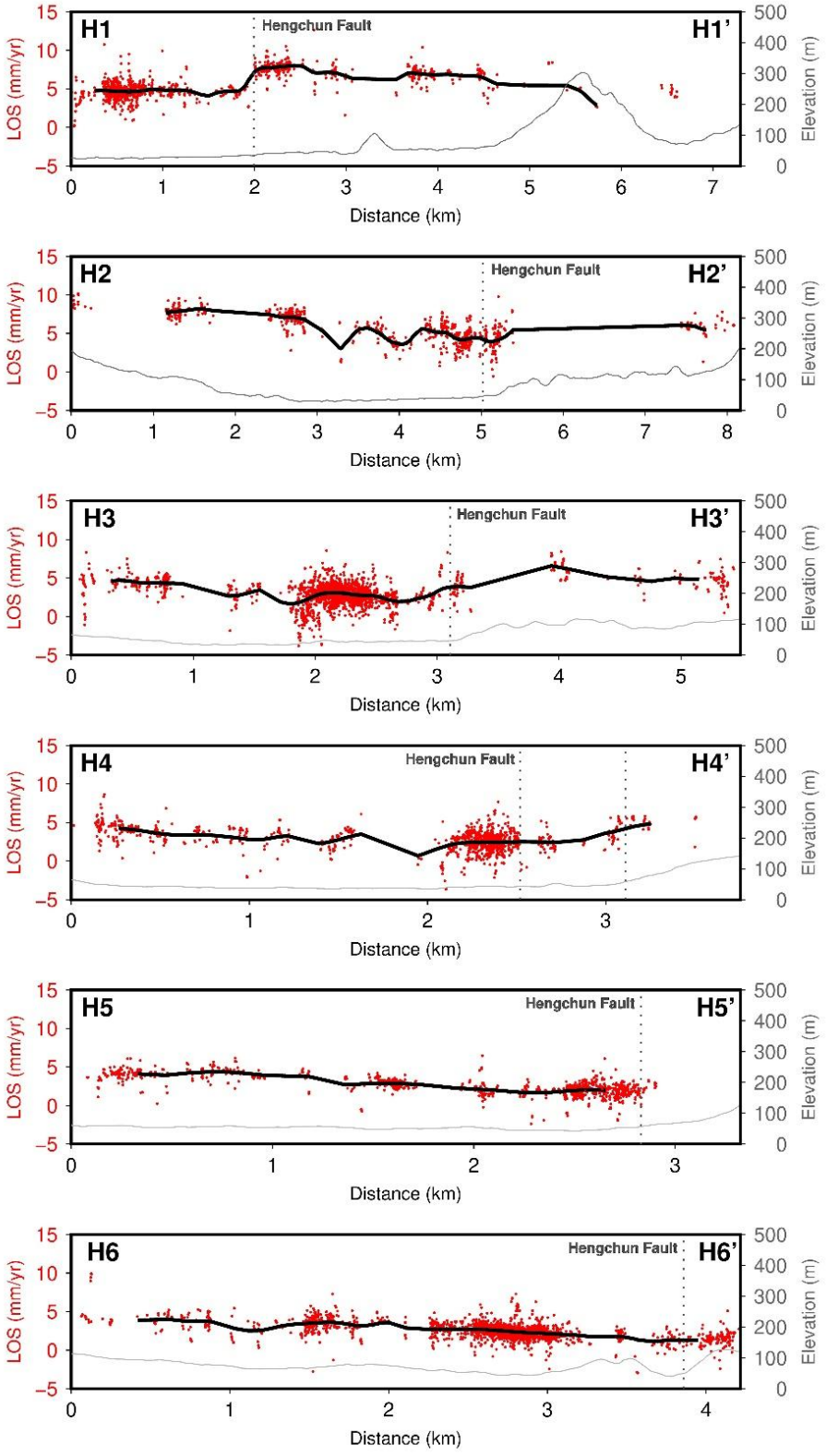
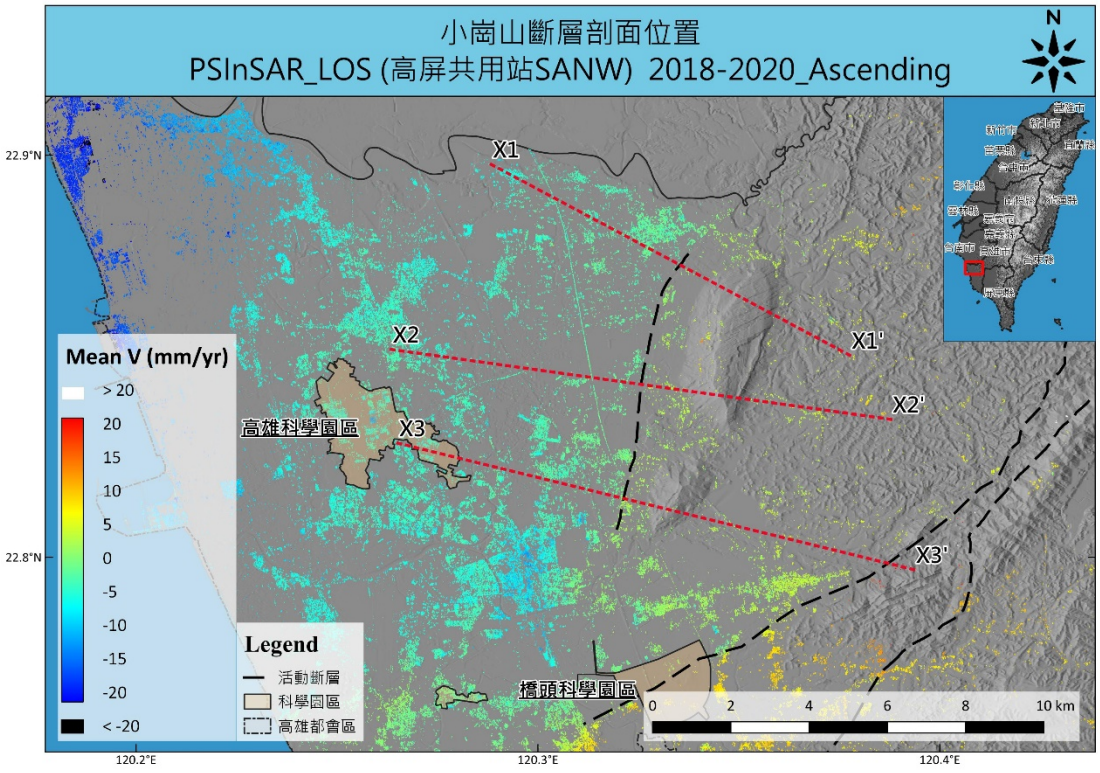


圖 5-1-3：2018-2020 年恆春斷層附近雷達影像上升軌道之剖面資料。 此斷層本次使用 H1 剖面資料來模擬。

Figure 5-1-3：Profiles extracted from InSAR results (assending orbits) across the Hengchun Fault. Profile H1 is picked to perform the modelling for this fault.


小崗山斷層剖面位置
PSInSAR_LOS (高屏共用站SANW) 2018-2020_Ascending
N
X1
X1'
X2
X2'
X3
X3'
高雄科學園區
橋頭科學園區
Mean V (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
科學園區
高雄都會區
0 2 4 6 8 10 km
22.9°N
22.8°N
120.2°E
120.3°E
120.4°E

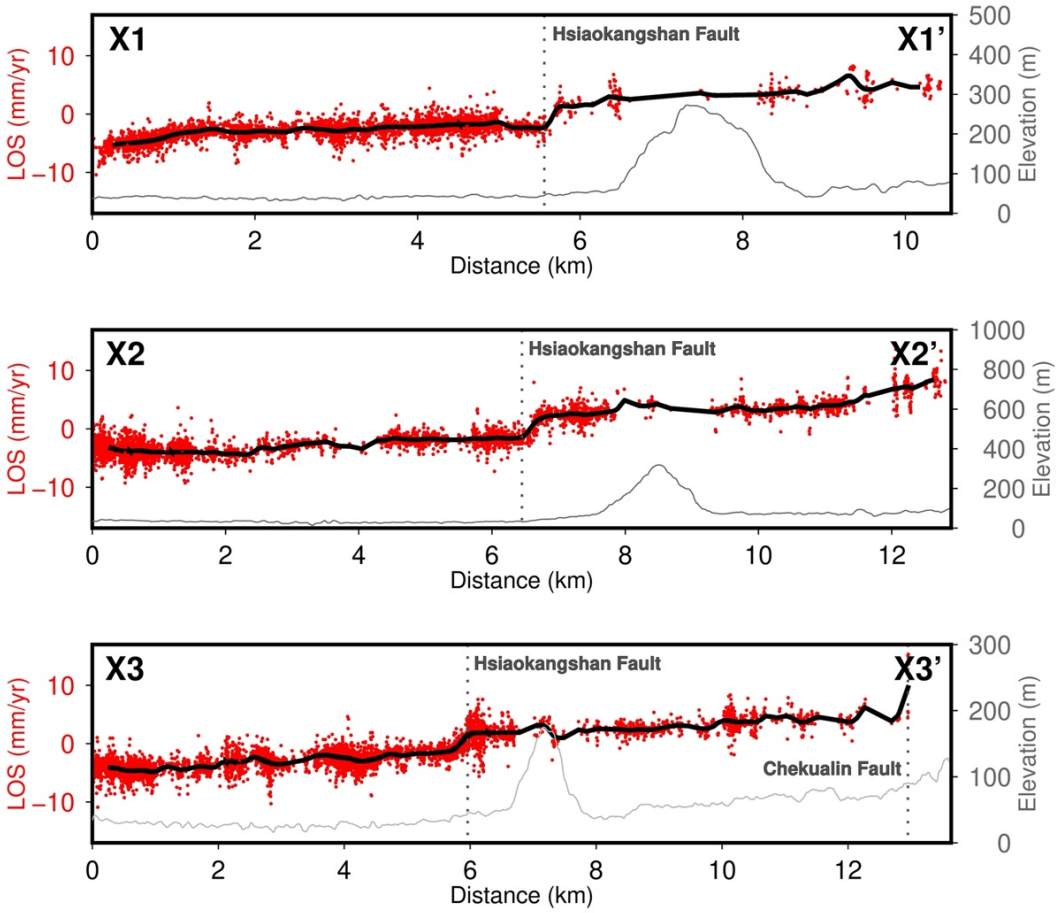


圖 5-1-4：小崗山斷層附近雷達影像上升軌道之剖面資料。在此斷層，本次採用 X2 剖面來模擬斷層。

Figure 5-1-4：Profiles extracted from InSAR results (assending orbits) across the Hsiaokangshan Fault. Profile X2 is picked to perform the modelling for this fault.

5-2 車瓜林斷層模擬結果

車瓜林斷層模擬結果顯示於圖 5-2-1～5-2-8，由圖中可以看出，限制 strike slip 為零時，dip slip 落於 10-15 mm/yr 逆衝而斷層傾角則是落在 50~60 度附近。 反之，在限定 dip slip 為零時，則斷層為右移大約 20 mm/yr，斷層角度則多是落在 80 度附近的高角度。 在模擬中最佳組合群中斷層頂部可能未到地表落在 300~1000m 附近，而斷層底部則是接近條件邊界。 然而頂部底部參數分佈沒有明顯的峰值，顯示在設定中，這個參數不是特別會影響模擬結果。

限制 strike slip 為零時，最佳解落在 70°(dip angle), 0.8km (fault top), 15km (fault bottom), 0.011 (m/yr dip slip), 0 (m/yr strike slip) （圖 5-2-7)。

限制 dip slip 為零時，最佳解落在 80°(dip angle), 0.6km (fault top), 15km (fault bottom), 0 (m/yr dip slip), 0.02 (m/yr strike slip) （圖 5-2-8)。

我們不認為利用升軌資料做二維模擬可以找出車瓜林斷層的真正地下幾何形態，然而從前人研究（敘述於第一章）得到斷層的傾角落於 50-80 度中間，而由 2018-2020 GNSS 資料看出此斷層的有不小的右移分量（見附錄 B）。

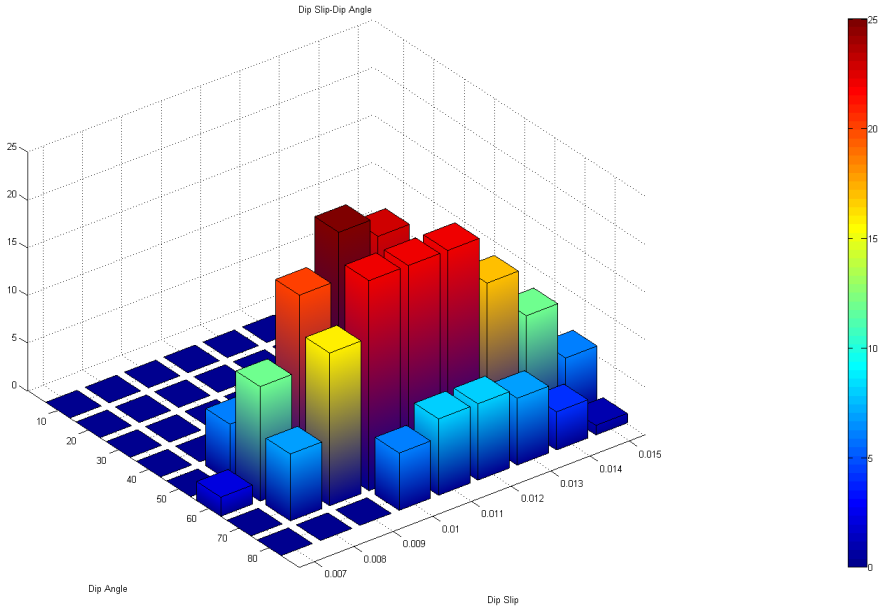


圖 5-2-1：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與傾滑(Dip Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分布圖。

Figure 5-2-1：Figure shows the distribution of Dip Angle and Dip Slip within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

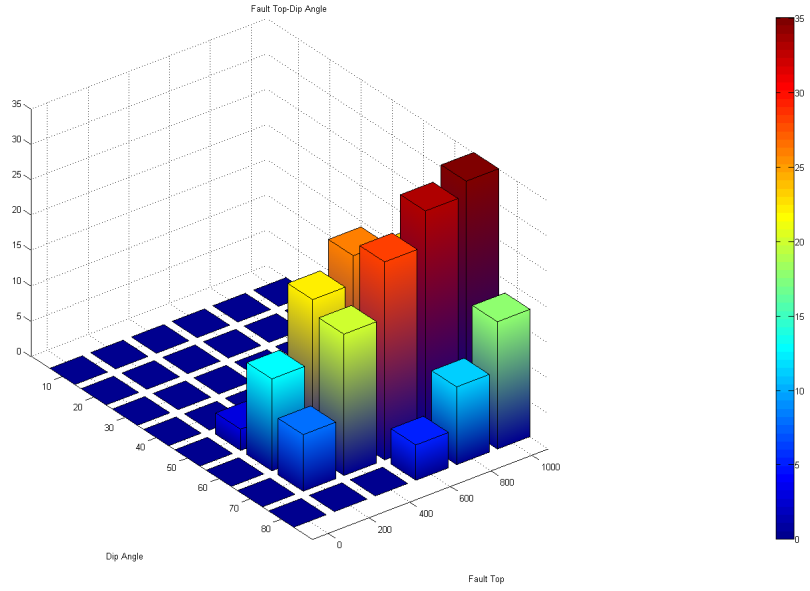


圖 5-2-2：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-2-2：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Top within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

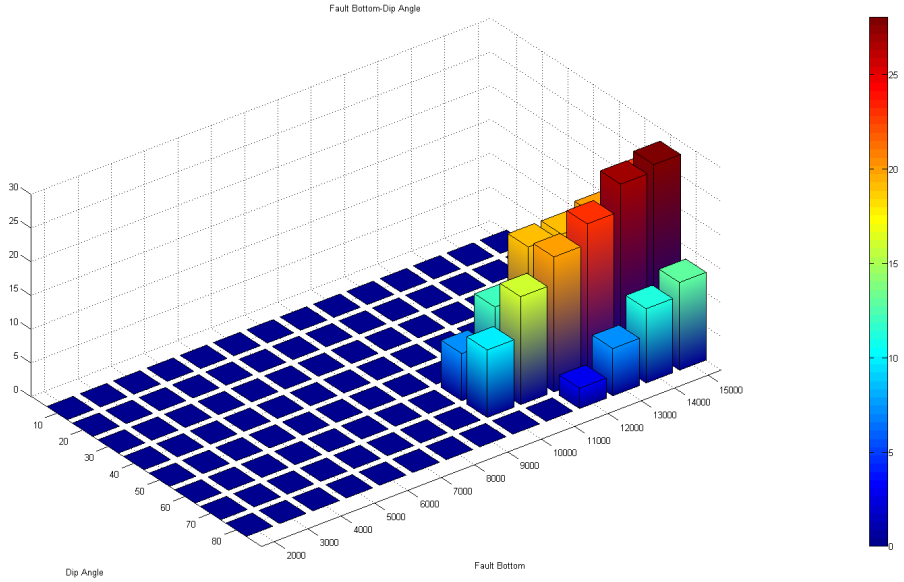


圖 5-2-3：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-2-3：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Bottom within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

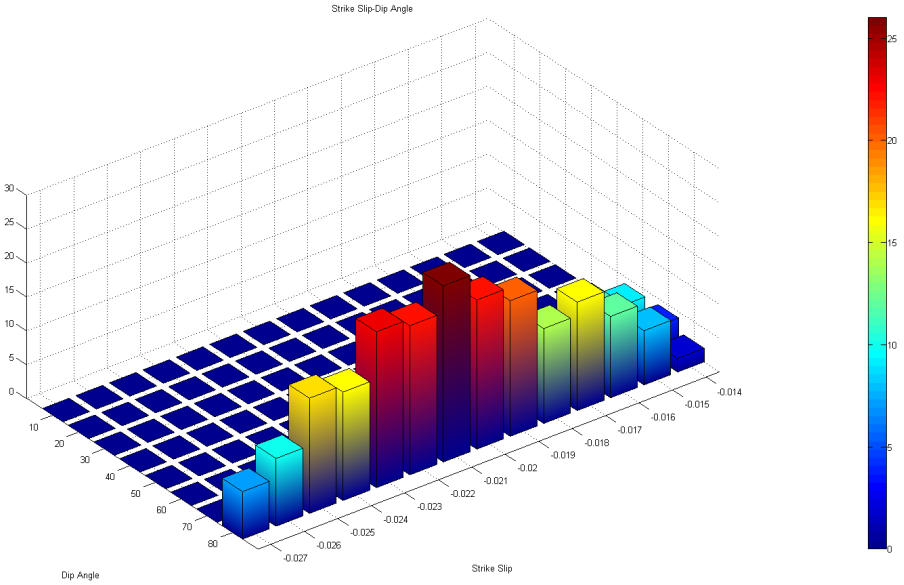


圖 5-2-4：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與走滑(Strike Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-2-4：Figure shows the distribution of Dip Angle and Strike Slip within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

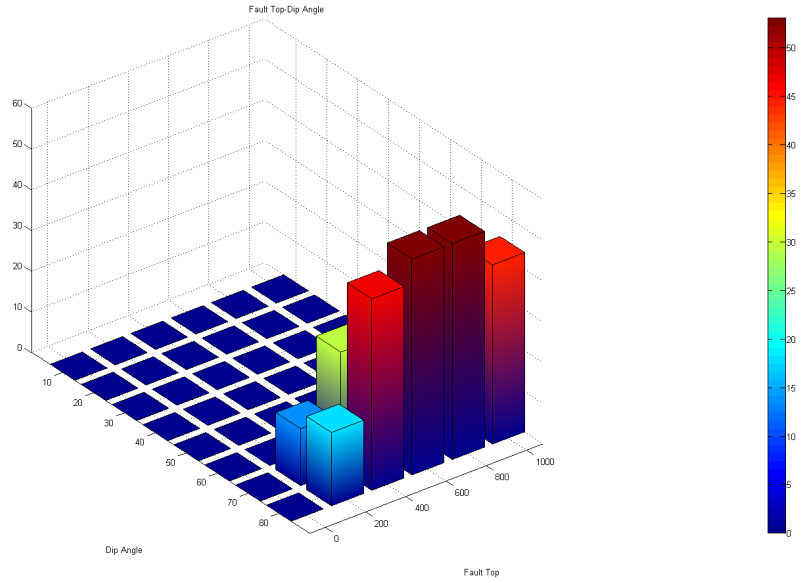


圖 5-2-5：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-2-5：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Top within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

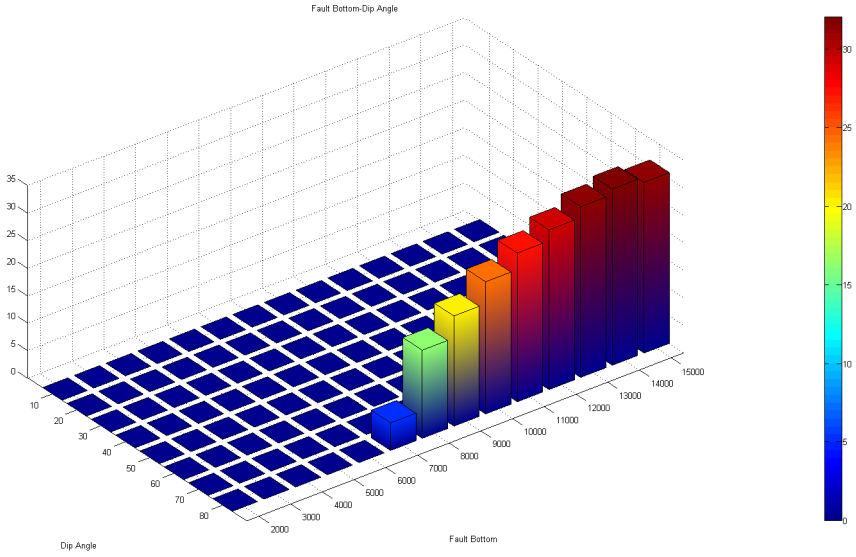


圖 5-2-6：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-2-6：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Bottom within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

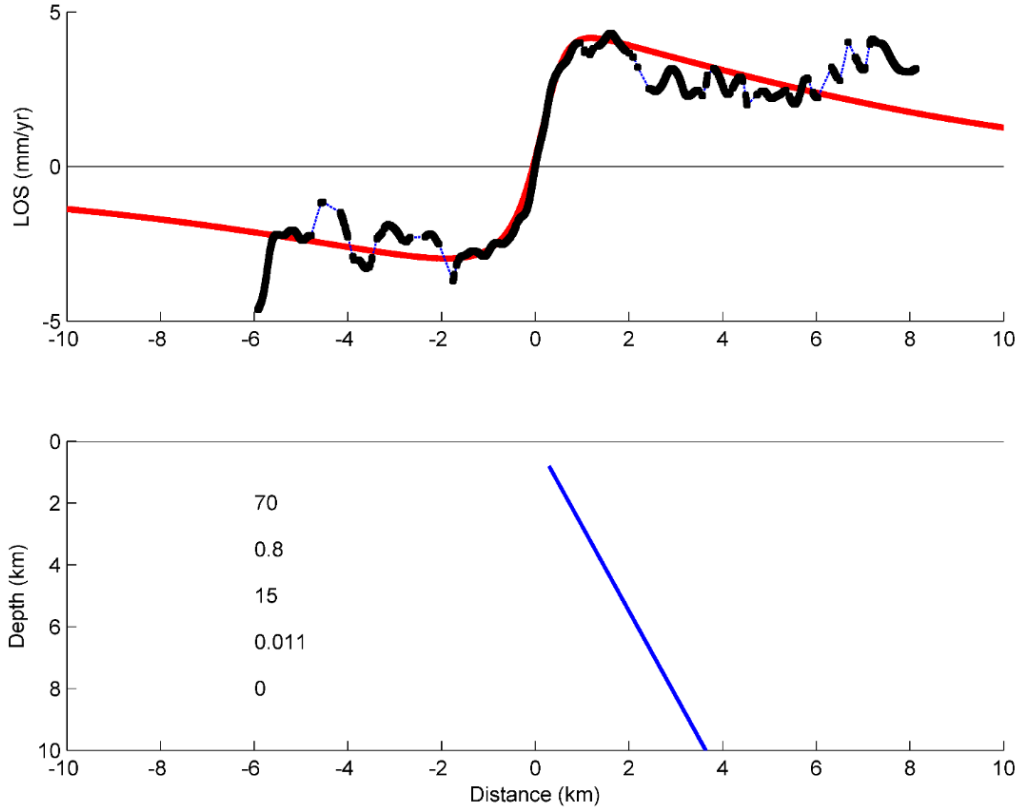


圖 5-2-7：車瓜林斷層剖面 C1 只計算傾滑的最佳擬合結果。 數字由上到下為：斷層傾角(˚)、斷層頂部(km)、斷層底部(km)、dip slip(m/yr)、strike slip(m/yr)。

Figure 5-2-7：Best-fit results of the CheKuaLin Fault in profile C1, considering only dip slip. Numbers present are dip angle (˚), fault top (km), fault bottom (km), dip slip (m/yr), strike slip (m/yr).

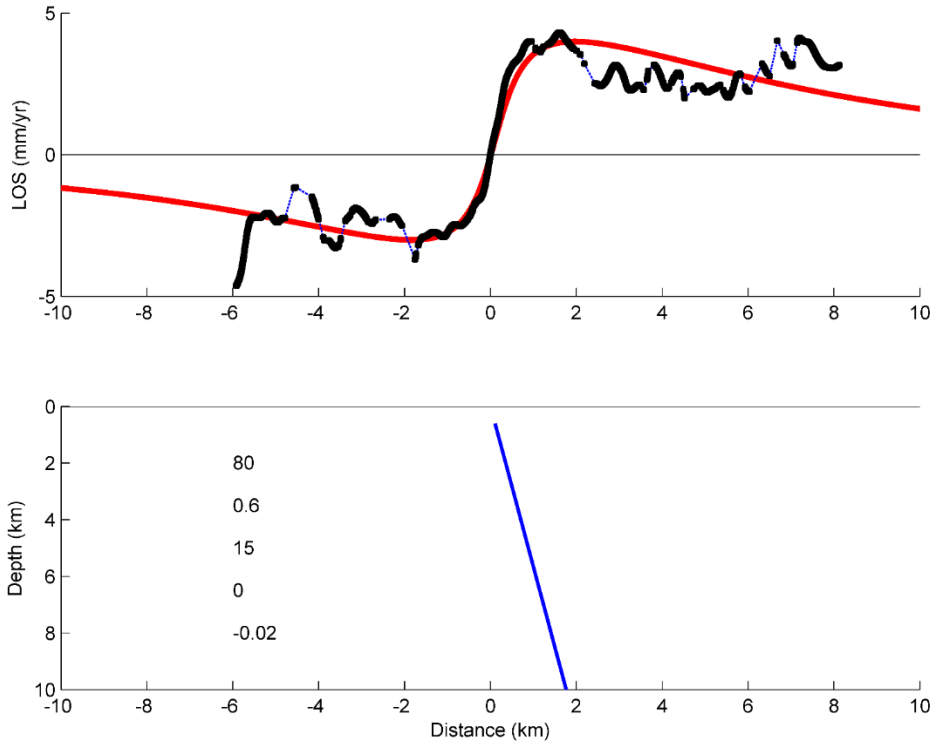


圖 5-2-8：車瓜林斷層剖面 C1 只計算走滑的最佳擬合結果。數字由上到下為：斷層傾角(°)、斷層頂部(km)、斷層底部(km)、dip slip(m/yr)、strike slip(m/yr)。

Figure 5-2-8：Best-fit results of the CheKuaLin Fault in profile C1, considering only strike slip. Numbers present are dip angle (°), fault top (km), fault bottom (km), dip slip (m/yr), strike slip (m/yr).

5-3 恆春斷層模擬結果

經過搜尋後，可分別得到單獨傾滑與走滑的最佳擬合結果(圖 5-3-1& 2)，並且選擇 RMSE 前百分之 0.1 的結果，進行呈現(圖 5-3-3~8)。

不管是限定 strike slip 為零，或是 dip slip 為零，恆春斷層模擬結果都顯示斷層角度相當低，介於 20~30 度之間(圖 5-3-1& 2)，而滑動頂部非常靠近地表(圖 5-3-4&7)，滑動底部可能也不深(圖 5-3-5& 8)。有幾個參數似乎在不同組合狀況個數沒有太大變異。 我們也許需要進一步再看每一個直方圖的 RMSE 去做更細部的區分。

模擬結果的斷層角度比野外觀察到的角度（45°）淺（敘述於第一章）。近期的報告顯示該處移動不明顯，本次研究在恆春斷層北段的剖面位移最明顯處看到約 3mm/yr 跨斷層的移動，相對於其他斷層的活動小。如果是 dip slip，最佳解落在逆衝大約 4mm/yr，而若是 strike slip 則落在左移約 20 mm/yr。然而該處的全新世地層卻未受到斷層的錯移。

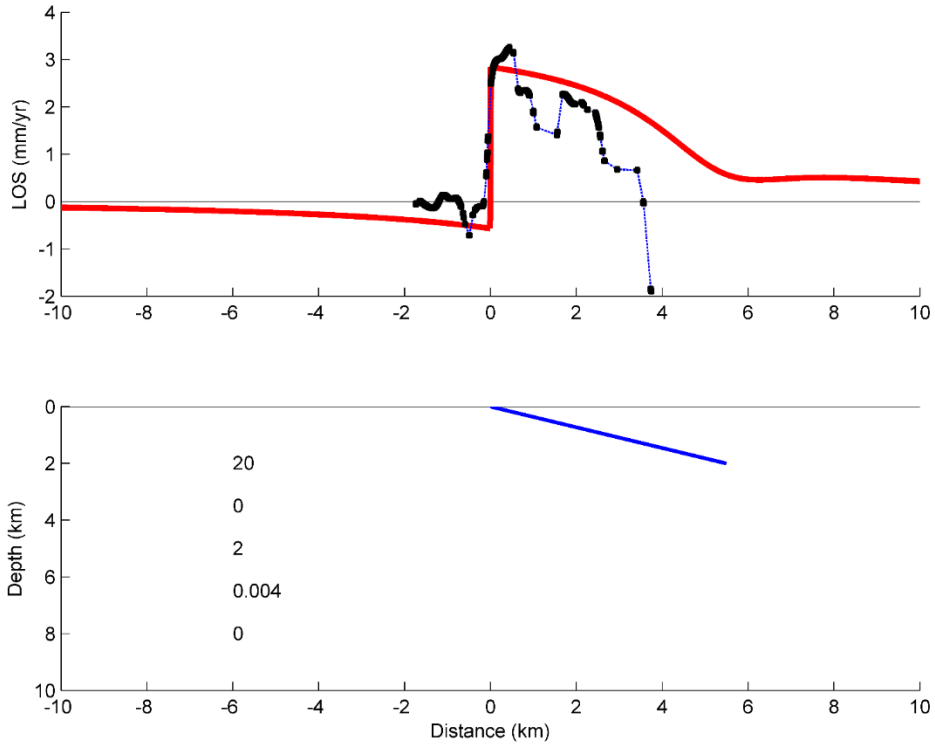


圖 5-3-1：恆春斷層剖面 H1 只計算傾滑的最佳擬合結果。數字由上到下為：斷層傾角(°)、斷層頂部(km)、斷層底部(km)、dip slip(m/yr)、strike slip(m/yr)。

Figure 5-3-1：Best-fit results of the Hengchun Fault in profile H1, considering only dip slip. Numbers present are dip angle (°), fault top (km), fault bottom (km), dip slip (m/yr), strike slip (m/yr).

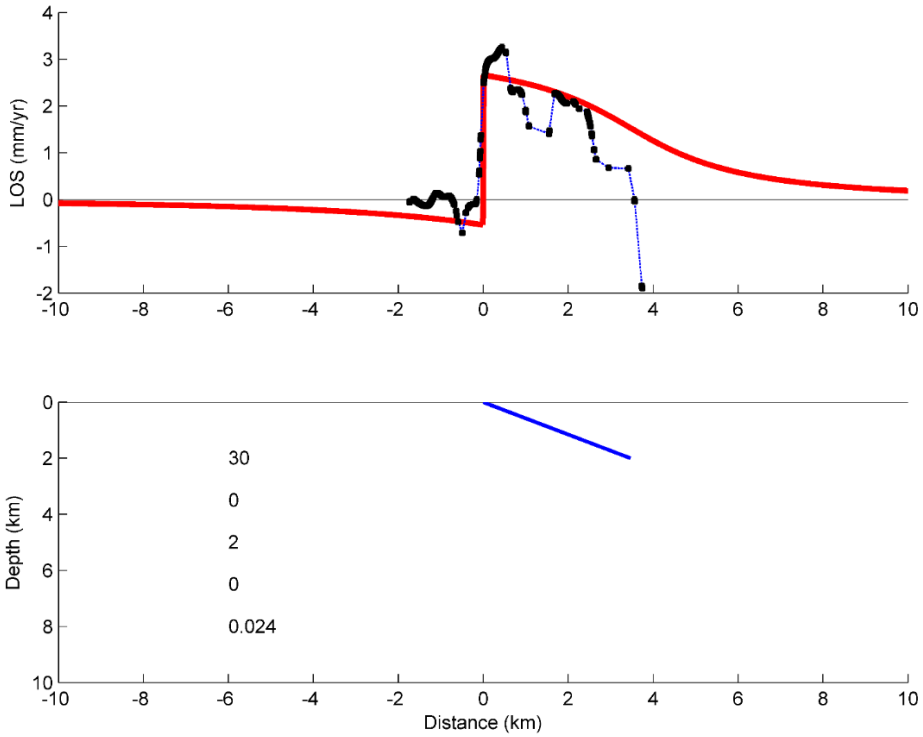


圖 5-3-2：恆春斷層剖面 H1 只計算走滑的最佳擬合結果。數字由上到下為：斷層傾角(°)、斷層頂部(km)、斷層底部(km)、dip slip(m/yr)、strike slip(m/yr)。

Figure 5-3-2：Best-fit results of the Hengchun Fault in profile H1, considering only strike slip. Numbers present are dip angle (°), fault top (km), fault bottom (km), dip slip (m/yr), strike slip (m/yr).

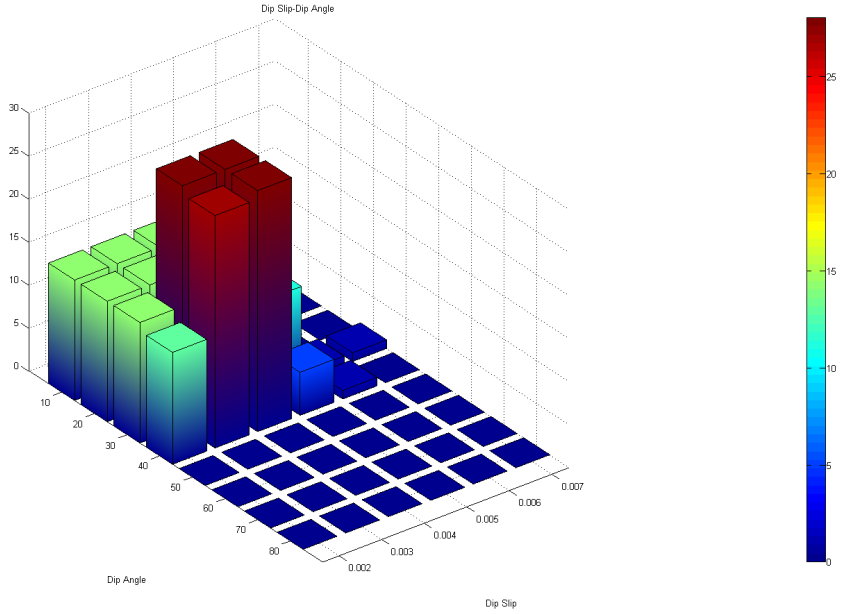


圖 5-3-3：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與傾滑(Dip Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分布圖。

Figure 5-3-3：Figure shows the distribution of Dip Angle and Dip Slip within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

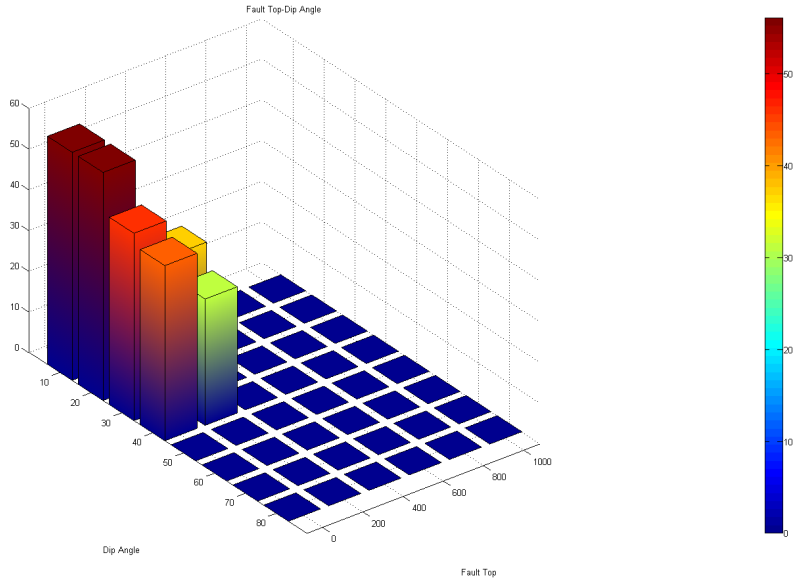


圖 5-3-4：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-3-4：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Top within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

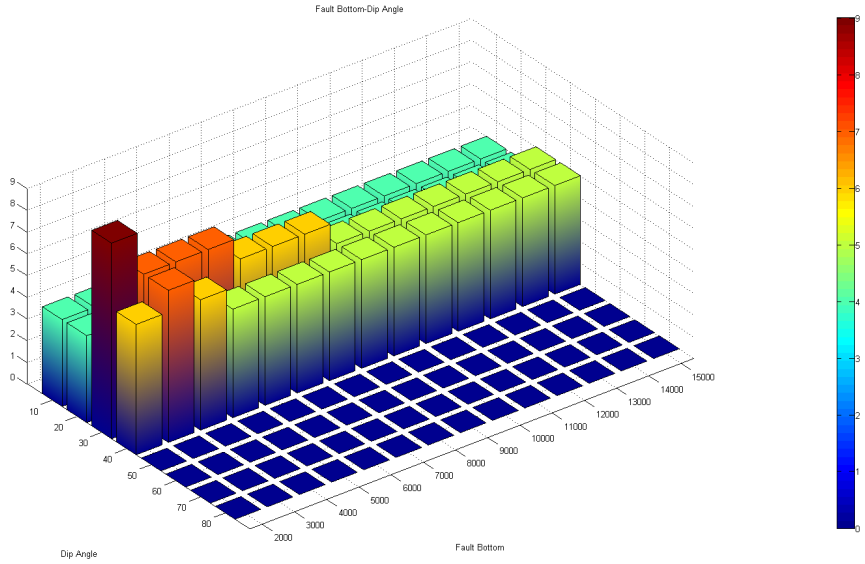


圖 5-3-5：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-3-5：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Bottom within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

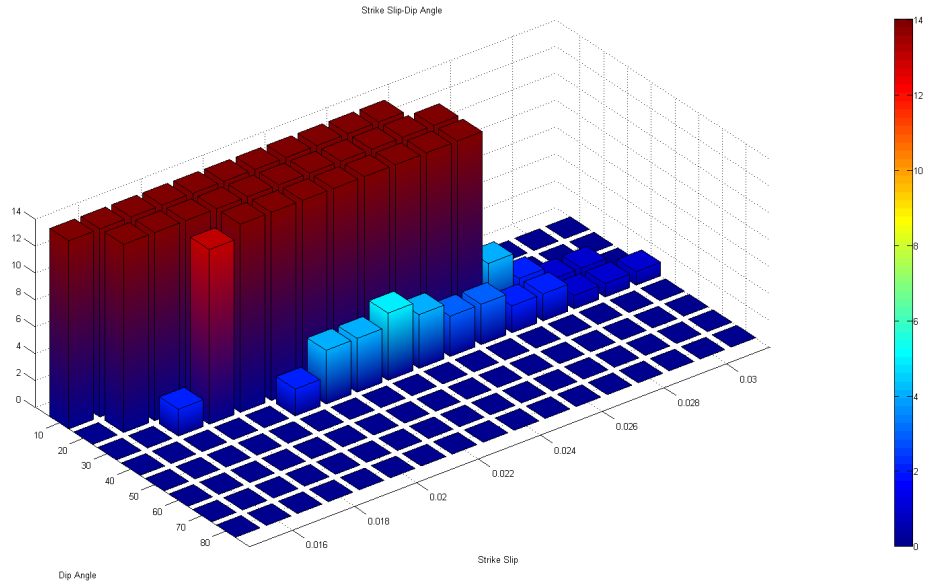


圖 5-3-6：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與走滑(Strike Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-3-6：Figure shows the distribution of Dip Angle and Strike Slip within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

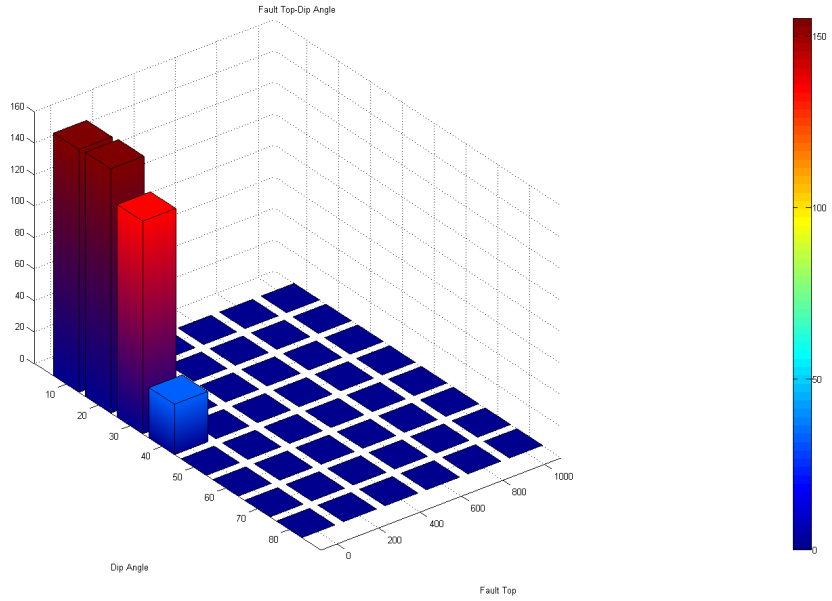


圖 5-3-7：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-3-7：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Top within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

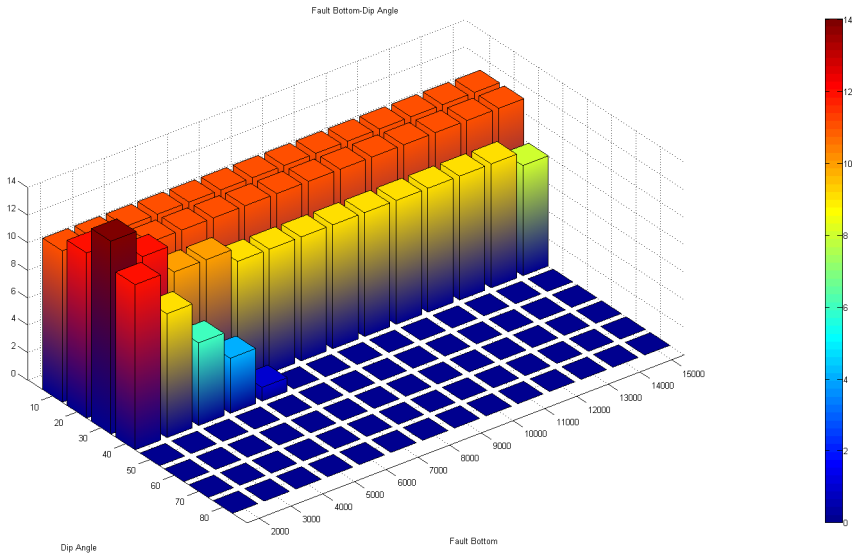


圖 5-3-8：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-3-8：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Bottom within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

5-4 小崗山斷層模擬結果

經過搜尋後，可分別得到單獨傾滑與走滑的最佳擬合結果(圖 5-4-1& 2)，並且選擇 RMSE 前百分之 0.1 的結果，進行呈現 (圖 5-4-3~8)。

從最佳擬合結果的分佈呈現，小崗山斷層傾角為 40~60 度(圖 5-4-1& 2)，滑動為逆衝帶右移(圖 5-4-3& 6)，滑動頂部未觸及到地表(圖 5-4-4& 7)，滑動深度顯較深(圖 5-4-5& 8)。

如果限制 strike slip 為零時，斷層角度為 40°向東、dip slip 大約是 12 mm/yr，若是地表變形由 strike slip 提供，斷層角度落於 60 度右移約是 70mm/yr。 長期資料顯示小崗山有 5.7 mm/yr 的垂直分量（第一章），而我們的觀測跨斷層約是 6~7 mm/yr 的 LOS 速率，與長期觀測差異不大。由 GNSS 資料看來小崗山斷層兩側似乎沒有到達 70 mm/yr 等級的水平分量差異（附錄 B），因此我們比較傾向限制 strike slip 分量為零時候斷層模擬結果。

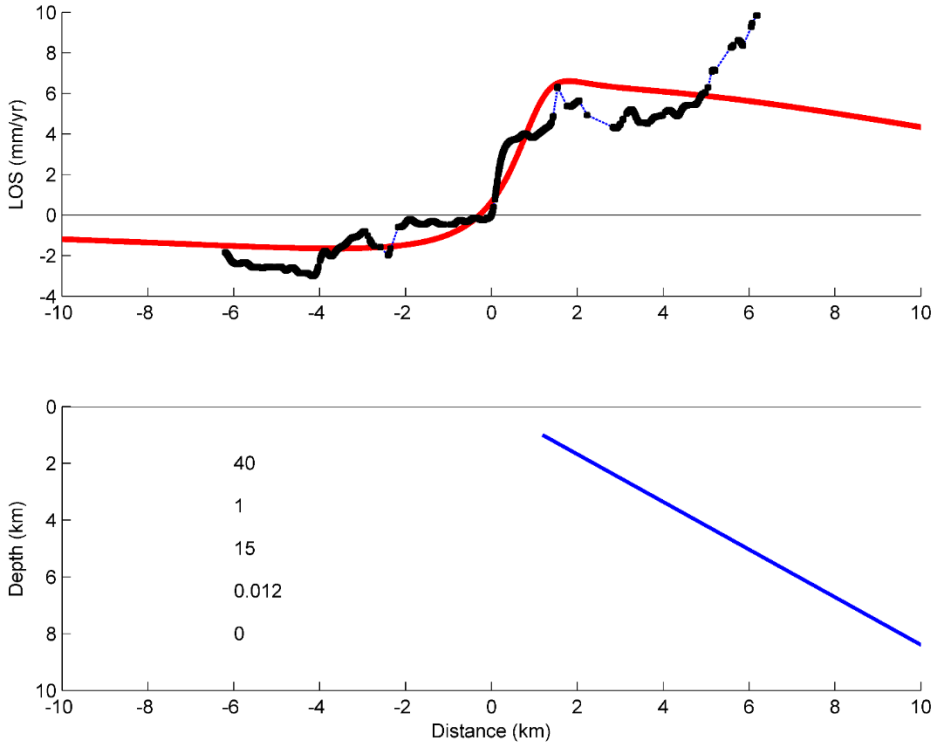


圖 5-4-1：小崗山斷層剖面 X2 只計算傾滑的最佳擬合結果。數字由上到下為：斷層傾角(°)、斷層頂部(km)、斷層底部(km)、dip slip(m/yr)、strike slip(m/yr)。

Figure 5-4-1： Best-fit results of the Hsiaokangshan Fault in profile X2, considering only dip slip. Numbers present are dip angle (°), fault top (km), fault bottom (km), dip slip (m/yr), strike slip (m/yr).

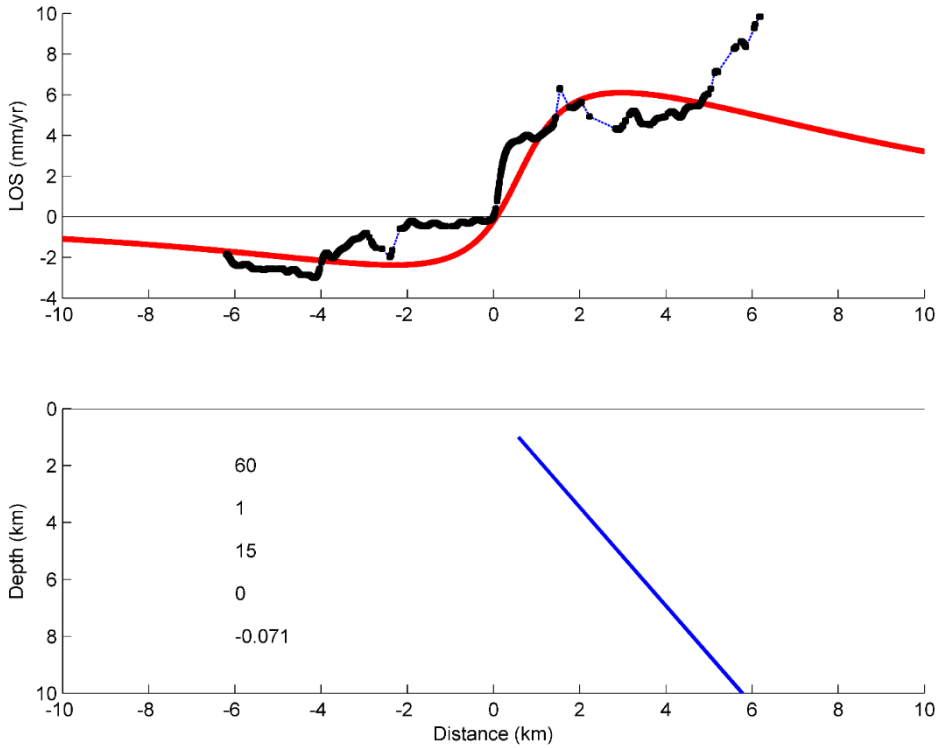


圖 5-4-2：小崗山斷層剖面 X2 只計算走滑的最佳擬合結果。數字由上到下為：斷層傾角(°)、斷層頂部(km)、斷層底部(km)、dip slip(m/yr)、strike slip(m/yr)。

Figure 5-4-2：Best-fit results of the Hsiaokangshan Fault in profile X2, considering only strike slip. Numbers present are dip angle (°), fault top (km), fault bottom (km), dip slip (m/yr), strike slip (m/yr).

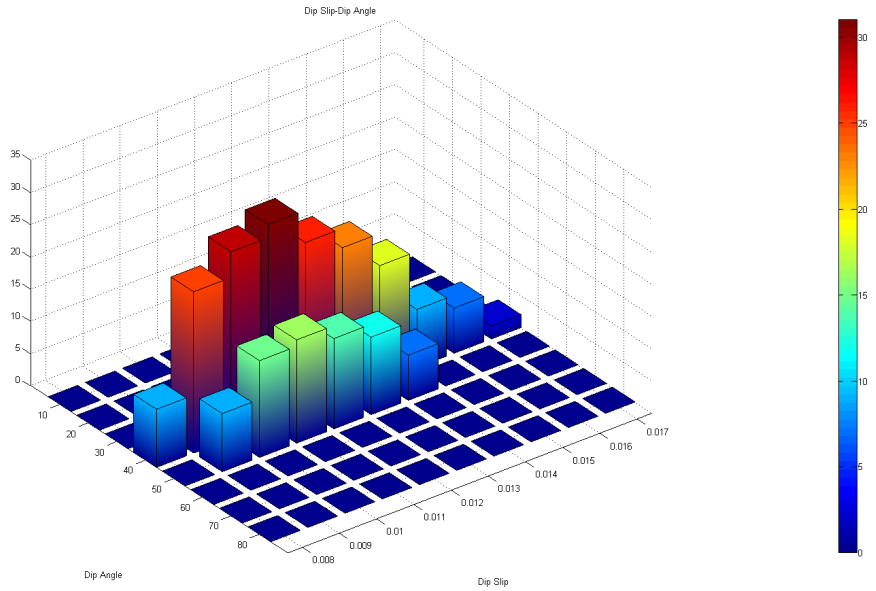


圖 5-4-3：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與傾滑(Dip Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分布圖。

Figure 5-4-3：Figure shows the distribution of Dip Angle and Dip Slip within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

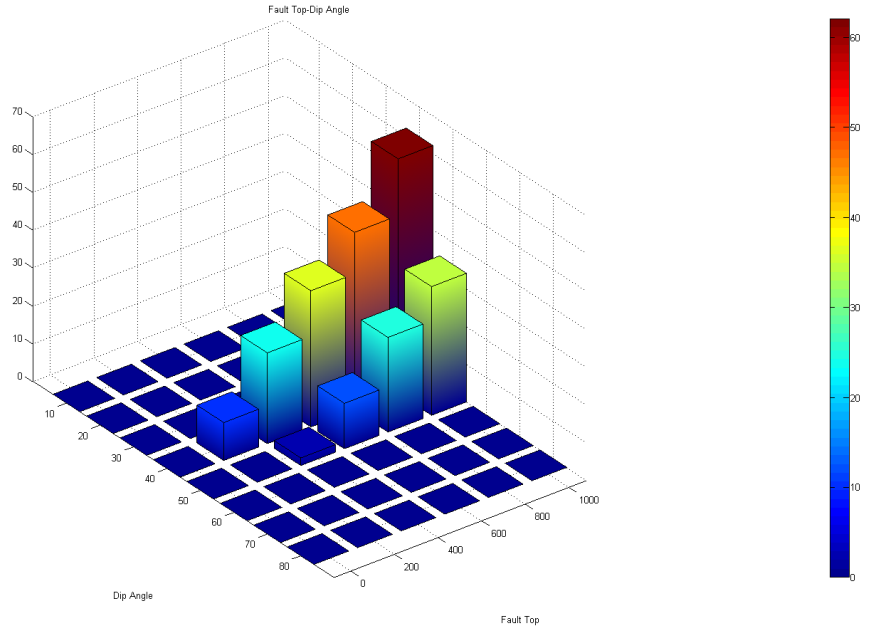


圖 5-4-4：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-4-4：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Top within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

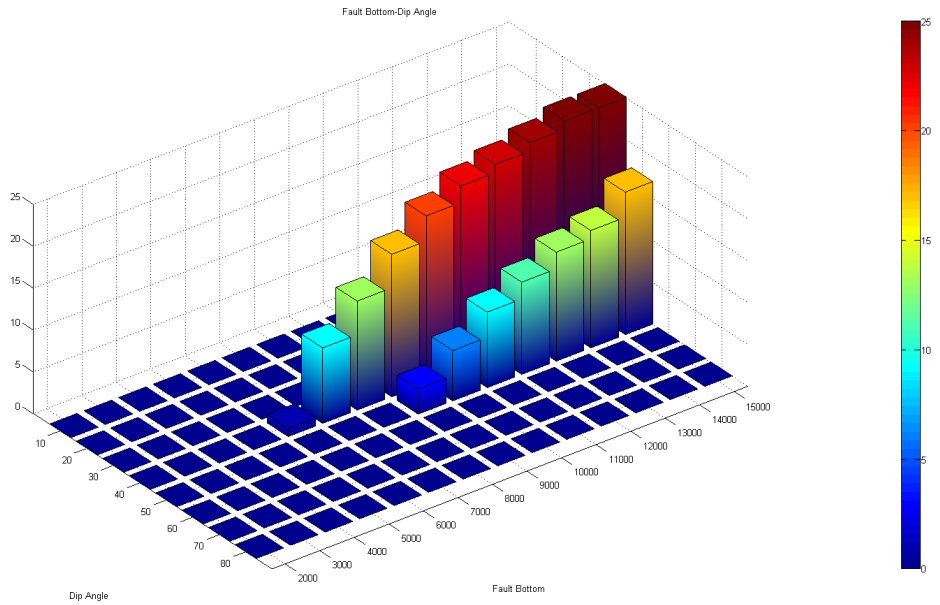


圖 5-4-5：限定走滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-4-5：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Bottom within 0.1% RMSE, when strike slip is zero.

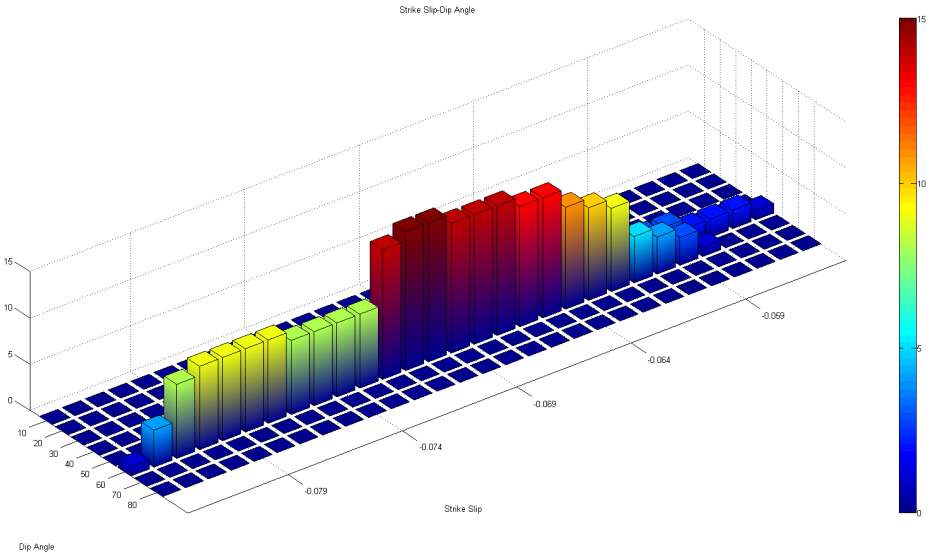


圖 5-4-6：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與走滑(Strike Slip)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-4-6：Figure shows the distribution of Dip Angle and Strike Slip within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

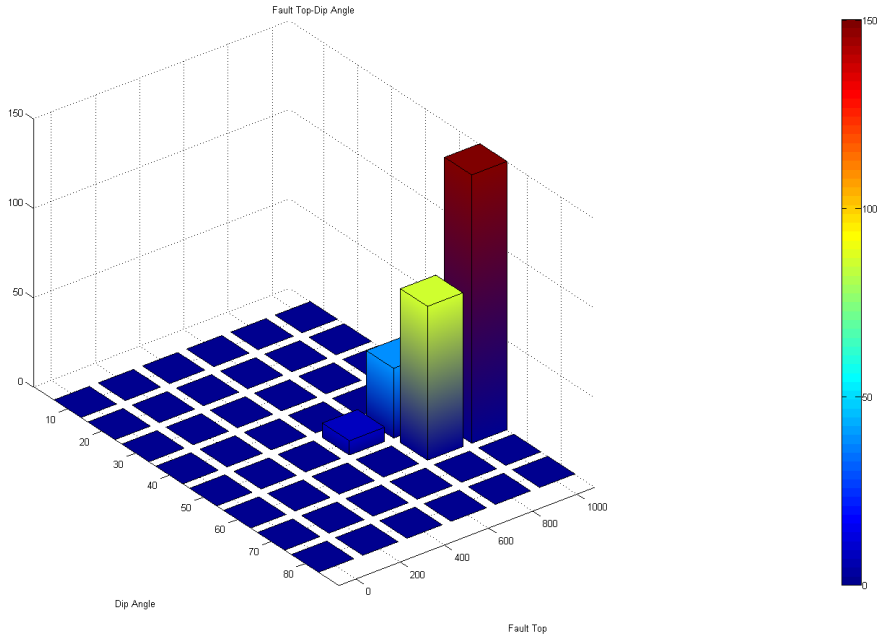


圖 5-4-7：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層頂部(Fault Top)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-4-7：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Top within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

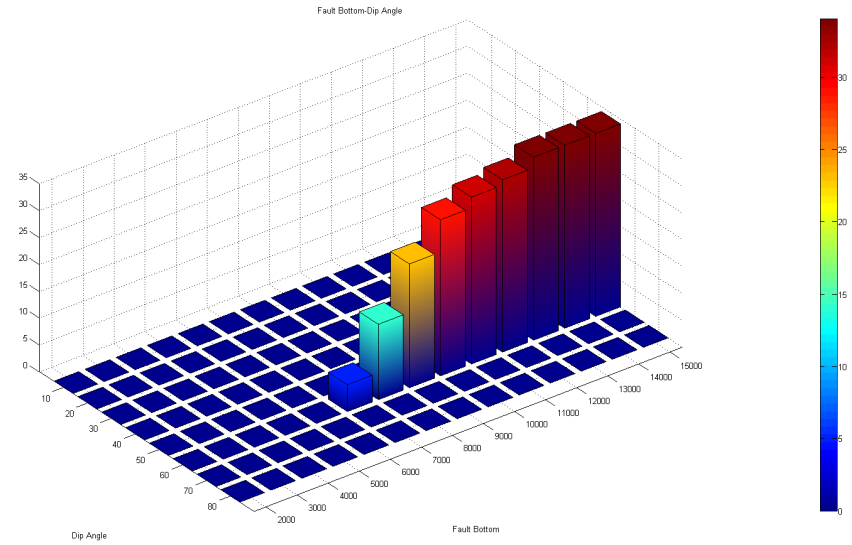


圖 5-4-8：限定傾滑為零下，斷層傾角(Dip Angle)與斷層底部(Fault Bottom)在 RMSE 的前百分之 0.1 的個數分佈圖。

Figure 5-4-8：Figure shows the distribution of Dip Angle and Fault Bottom within 0.1% RMSE, when dip slip is zero.

第六章、討論

本計畫針對南部地區的五條斷層（小崗山斷層、車瓜林斷層、旗山斷層、潮州斷層、 及恆春斷層）與橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區等重要區域進行地表變形觀測:首先，運用合成孔徑雷達差分干涉技術，選取 Sentinel-1A 衛星 SAR 影像作為資料分析對象，自 2014 年 10 月至 2020 年 12 月間由衛星拍攝區間之三個時間序列，分別將升軌（Ascending）及降軌（Descending）影像進行 PSInSAR 處理，以觀察區域地表變形量之分佈。其次，將同時期的 GPS 平均速度轉到雷達視衛星方向，將雷達影像速度值與 GNSS 連續及移動站進行比對，觀察雷達資料與 GPS 資料之相關性，並進一步與地調所提供之精密水準資料進行比較。此外，並於 2007/01/17 開始至 2011/01/28 之間，選取 15 幅 ALOS 升軌道(Ascending)影像，並以 2009/10/25 為主影像，獲得 2007 年至 2011 年研究區域內的 PSInSAR 之衛星視角(LOS)位移速度場，來與 2014 至 2020 年區間進行比較。最後，利用雷達影像剖面資料進行擬合，透過斷層錯位模型來進行地表變形匹配，嘗試解析斷層幾何及滑動量。在此，我們將上述三個工作面向之結果分別進行檢視，並一一討論其特性、可能意涵、及改善方式。

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 連續站的比對與改善

初期將雷達差分干涉結果與 GNSS 連續站數據比對，發現兩者趨

勢相當離散，無法取得良好對比。經由檢視個別資料點，我們觀察到資料呈現出區域性的差異，為改善個別區域對比程度，必須將高雄及屏東地區的資料點做妥善區分。 推論這是源自於雷達資料在全區處理狀況下作解算時，雷達解纏(unwrapping)過程中出現錯誤，因而持續將錯誤傳播出去。 因此，我們重新加強了資料處理流程中解纏的部分，並據此取得明顯改善的對比成果。經過適度的處理，目前三個時段的雷達資料都可與 GNSS 連續站數據有相當一致的趨勢，尤其是 2018-2020 區間最具有代表性，幾乎已有可以互為代表的高品質。2014-2016 區間的相似度則較低一些，可能受限於拍攝初始時段影像數量較其他時間段少的影響。

6-1-2 雷達差分干涉資料與 GNSS 移動站的比對

與連續 GNSS 觀測站的比對結果相似，2014-2016 時間區間內，雷達與 GNSS 移動站的資料相似度較低，而 2016-2018 及 2018-2020 兩個時期的比對結果則較佳。這可能是因為雷達資料的時間段與移動站量測的時間段並不完全相同，且 2014-2016 的雷達張數亦較少，導致較大的誤差。整體而言，在相似度較佳的時間段內，降軌資料在本研究區域西北方都呈現出較大的差異，升軌資料則普遍能有較高的相似度，顯示雷達拍攝方向也對資料品質有一定影響。

6-1-3 雷達差分干涉資料與水準測線的比對

本計畫處理之雷達影像結果與水準測量結果相比，整體而言相當

一致，僅有部份時段區間受限於影像與水準測線範圍涵蓋率不足之影響，較難比對。由北至南，跨斷層之活動趨勢皆十分吻合。主要可見趨勢有以下幾點：

1. 橫跨小崗山斷層有明顯速度改變，往東抬升速率升高，速度差值約為 10±5 mm/yr。此外，雖然速率整體往東增加，最大速率大多位於小崗山斷層及旗山斷層間之麓山帶，並非完全一直往旗山斷層增加。
2. 因車瓜林斷層與旗山斷層在選定的測線剖面中距離甚近，較難區分出兩者之間的明顯速率改變。
3. 橫跨旗山斷層，因地形起伏大使雷達數值跳動亦大，整體而言往東跨過斷層線後呈現速率立即降低的趨勢，速度差值約為 5 mm/yr 以內。
4. 橫跨潮州斷層，往東速率增高，速度差值約為 10 mm/yr。但潮州斷層兩側皆同樣有往東增加速率的趨勢。
5. 橫跨恆春斷層，無論雷達或水準資料皆無顯著速度值差異，往斷層東側 1.5 公里處才有明顯速度增加約 5 mm/yr。

6-2 雷達影像成果

6-2-1 各時段跨斷層的剖面比較

6-2-1-1 小崗山斷層

2014-2016 時期：

斷層南段的下盤可能受到區域性的地表沉降所影響，因此斷層本身的活動特徵不易觀測;在斷層北段和中段的活動特性主要以水平活動為主，其中斷層北段的下盤地區約有 3 mm/yr 左右的抬升活動特性。

2016-2018 時期：

斷層上盤的 LOS 速度場縮短的活動特性明顯比斷層下盤快 5 至 10mm/yr，表示斷層上盤相對於斷層下盤約有 3 至 8 mm/yr 的抬升活動特性。

2018-2020 時期：

斷層上盤相較於斷層下盤在升軌道有 5mm/yr 的 LOS 縮短特性，但是在降軌道的結果則沒有差異，此時的斷層上盤應以向西活動為主兼具微量抬升之特性。

6-2-1-2 車瓜林斷層

2014-2016 時期：

不論升軌道或是降軌道的 LOS 速度場差異在斷層上盤與斷層下盤之間都有 10 mm/yr 的差異，雖然差值相似但是 LOS 速度場的位移方向性卻相反，表示斷層以右移方式活動。

2016-2018 時期：

此時期兩個軌道所觀測到的 LOS 速度場位移方向特性與前一個時期相同，斷層上下盤之間的升軌道 LOS 速度場差異仍為 10 mm/yr 左右，但在降軌道的 LOS 速度場差異降低為 5 mm/yr 左右，此結果表示斷層雖仍以右移方式活動為主，但上盤的地表可能兼具些微的抬升特性。

2018-2020 時期：

此時期斷層上下盤之間的 LOS 速度場，不論在升軌道或是降軌道的差異皆為 10 mm/yr 左右，上下盤的 LOS 速度場之位移方向性依舊相反，表示斷層以右移方式活動。

6-2-1-3 恆春斷層

2014-2016 時期：

從升軌道和降軌道的 LOS 速度場結果，可以得知斷層北段相較於

中段和南段來說活動性較高。跨過斷層北段，上盤的 LOS 縮短的速度比下盤快 5mm/yr，其他部分的上下盤之間的差異都低於 2 mm/yr，表示斷層北段的上盤有垂直抬升的活動特性。

2016-2018 時期：

此時期斷層北段的上盤 LOS 縮短速度，不論在升軌道或是降軌道的結果裡，依舊比下盤快 5 mm/yr，但是在中段的部分，斷層上盤 LOS 的縮短速率比下盤快約 3 至 4 mm/yr，南段部分則與前期一樣，跨斷層的速度場差異低於 2 mm/yr，表示斷層北段和中段的上盤有垂直抬升的活動特性。

2018-2020 時期：

此時期斷層的活動特性與 2016-2018 時期一致，斷層北段上盤 LOS 的縮短速率比下盤快 5 至 6 mm/yr，斷層中段上盤 LOS 的縮短速率比下盤快 3 至 4 mm/yr，斷層南段兩側的速度場差異依舊低於 2mm/yr，斷層垂直抬升的活動特性自北往南逐漸降低。

6-2-2 科學園區與都會區的剖面比較

6-2-2-1 橋頭科學園區

橋頭科學園區底下有車瓜林斷層以東西方向穿過，根據本研究三個時期的 LOS 速度場監測結果顯示，車瓜林斷層具有右移活動的特性，跨斷層的 LOS 速度場差異可達每年 10 mm。因此，園區南北兩側

的地表應會受到此斷層的活動而有所影響。

6-2-2-2 高雄科學園區

高雄科學園區在 2014-2016 時期，不論升軌道或是降軌道的 LOS 速度場都相當穩定，沒有顯著的速度場差異發生。在 2016-2018 時期，不論升軌道或是降軌道，東西方向的 SK2 剖面都顯示，園區內 LOS 的縮短速度比東西兩側快 10 mm/yr，代表整個園區在這個時期相對於東西兩側抬升速度較快。在 2018-2020 時期，園區內 LOS 的縮短速度相對於東西兩側以降低為 5 mm/yr，但是從南北方向的 SK1 剖面則顯示，園區中央有個以南北走向為主的下陷中心，從升降軌道的 LOS 速率來看，已達到每年 5 mm 的遠離速度。

6-2-2-3 高雄都會區

在 2014-2016 時期，根據三條剖面的結果可以得知，高雄都會區的北部受到車瓜林斷層向南延伸的影響，地表活動以平移活動特性為主；都會區中心有顯著的下陷中心，從升降軌道的 LOS 速率來看，已達到每年 20 mm 的遠離速度；都會區南部的地表相對於北部來說呈現微幅的抬升。在 2016-2018 時期，原本在都會區中心的下陷中心消失，北部的地表活動仍以平移活動為主，南部的地表相對北部依舊微幅抬升。在 2018-2020 時期，整個都會區的地表活動特性與前一個時期相似。此外，值得注意的是高雄都會區東側外有一條線性構造分佈的 LOS 速度場低區，在本研究的三個時期，此區域每年的 LOS 遠離位

移量都比周遭地表多 5 mm。

6-2-2-4 北高雄平原區

在 2014-2016 時期，本區域除了跨過小崗山斷層和車瓜林斷層的地區都有明顯的地表活動特性外，在高雄科學園區和橋頭科學園區之間，有一個顯著的地表沉陷中心，從升降軌道的 LOS 速率來看，已達到每年 20 mm 的遠離速度。在 2016-2018 時期，原本位在兩科學園區之間的沉陷中心，其 LOS 速率降低至每年 10 mm 的遠離速度，此外，在高雄科學園區和海岸線之間有一線性構造，跨過這兩個地區的 LOS 速度場差異可達 10 mm/yr。在 2018-2020 時期，兩科學園區之間的沉陷中心，維持 LOS 每年 10 mm 的遠離速度，另外，在高雄科學園區和海岸線之間的線性構造，跨過兩側的 LOS 速度場差異則降低至 5 mm/yr。

6-3 ALOS 衛星資料結果

從 2007/01/17 開始至 2011/01/28 之間，選取 15 幅 ALOS 升軌道(Ascending)影像，並以 2009/10/25 為主影像，進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得 2007 年至 2011 年研究區域內的衛星視角(LOS)位移速度場。由於總共可使用的影像數目僅有 16 幅，導致資料不太容易收斂，使得解算之速率在許多平原區域也呈現斑駁的現象。整體而言，區域性的趨勢仍然可見，例如小崗山斷層東西側速率差異、車瓜林斷層南北側速率差異（往西南延伸至海邊）、屏東平原南側出現下陷區域等等，顯示雷達影像資料確實可展現區域性的地表活動。

6-4 斷層錯位模擬

本計畫運用雷達影像上升軌道資料，在小崗山、車瓜林、與恆春三條斷層沿線各選取一條最適剖面來進行擬合，利用不同斷層幾何與滑動量所可能產生之地表變形與雷達剖面資料進行匹配。由於選擇升軌 LOS 方向進行資料解析，受觀測維度限制，恐無法良好區別水平及垂直分量大小，因此更進一步分別考慮純傾滑及純走滑模式來進行擬合(表 6-1)。

由北而南，三條斷層的模擬結果簡述如下：

1. **小崗山斷層:** 從最佳擬合結果的分佈呈現，小崗山斷層傾角為 40~60 度，滑動為逆衝帶右移，滑動頂部未觸及到地表，滑動深度顯較深。
2. **車瓜林斷層**: 限制 strike slip 為零時，最佳解落在 70°(dip angle), 0.8km (fault top), 15km (fault bottom), 0.011 (m/yr dip slip), 0 (m/yr strike slip)。限制 dip slip 為零時，最佳解落在 80°(dip angle), 0.6km (fault top), 15km (fault bottom), 0 (m/yr dip slip), 0.02 (m/yr strike slip)。
3. **恆春斷層**: 不管是限定 strike slip 為零，或是 dip slip 為零，恆春斷層模擬結果都顯示斷層角度相當低，介於 20~30 度之間，而滑動頂部非常靠近地表，滑動底部可能也不深。

考量我們僅用升軌資訊以及最基本的 Okada model，與表 6-1 相比，斷層模擬與野外觀測已經大略相近，但因受選取剖面位置滑移速率分佈及資料展距有限之影響，可能未能完全反映斷層分段的特性。

表 6-4-1：地質調查紀錄與最佳斷層擬合結果列表。

Table 6-1： List of geological records and best-fit results of the analyzed faults.

斷層名稱	野外露頭/岩心傾角 (degree)	最佳擬合斷層傾角 (degree)	最佳擬合傾滑量值 (m/yr)	最佳擬合走滑量值 (m/yr)	最佳擬合斷層頂部 (km)	最佳擬合斷層底部 (km)
小崗山	35-45[a]	40	0.012	0	1	15
		60	0	-0.071	1	15
車瓜林	50-80[b]	70	0.011	0	0.8	15
		80	0	-0.02	0.6	15
恆春	45[c]	20	0.004	0	0	2
		30	0	0.024	0	2

a.宏偉工程顧問有限公司，2012

b.劉彥求等，2019

c.中興工程顧問股份有限公司，2012

模擬結果顯示，初步的斷層擬合深度及傾角範圍可以由地形匹配來建立，然而細究其中，傾滑及走滑分量的比重分配，勢必對於斷層幾何造成一定的影響。由於本計畫目標首要探討雷達影像對研究區域地表地形變化之觀測，因此現階段模擬並未設定任何控制參數，初步僅以雷達影像剖面做最適解搜尋，藉以測試是否能反應地表變形及地質調查之紀錄。為增進模型的完整性，增加控制參數，如斷層長度、傾角範圍、滑移範圍等等應為可行之方法。此外，由於資料受到視角維度限制，無法忠實反應水平及垂直分量，只能反應加成之總和量，更細緻的模型需要搭配其他輔佐資料（如跨斷層速度場分佈）幫助將模型最佳化。

6-5 綜合討論

由本計畫執行結果顯示，若有足夠數量的雷達影像並經過適當的資料處理之後，PSInSAR 可為區域活動構造的判讀提供全面性的概觀資料，雷達影像與其他大地測量資料亦能有良好的相關性，得到相輔相成的效果。由於大部分大地測量受限於量測點或量測線分佈位置的影響，難免有呈現上的侷限性，此時配合 PSInSAR 的雷達影像，在有良好控制點資料(例如 GNSS 移動站、連續站、及水準測線)的基礎上，可以進一步為研究區域提供連續性的鳥瞰細節，幫助辨識地表活動的速率變化及趨勢。例如經濟部(2021)已劃定小崗山為活動斷層地質敏感區域，自高雄市阿蓮區中正路向南延伸至高雄市岡山區大莊里阿公店溪北岸，長約 8.6 公里，計畫書內並表示小崗山斷層在大莊以南可能繼續向南南西或向南延伸，因現階段無明確之近地表地質資料，未劃入小崗山斷層活動斷層地質敏感區範圍內。

由本計畫之 PSInSAR 結果，可以反映小崗山在北段及中段的活動線形及垂直位移，而南段的上下盤目前無觀測到明顯之速率改變。此外，以車瓜林斷層為例，將雷達結果配合水準及 GPS 測量，整體資料皆顯示跨越車瓜林斷層線兩端有明顯的活動性，且可解讀斷層滑移主要以右移的方式為主。車瓜林斷層橫跨橋頭科學園區及北高雄平原，此地區之平移活動將需要持續密切觀測。

第七章、結論

本計畫利用永久散射體雷達差分干涉方法，配合 GNSS 連續站、移動站、以及水準測站資料，將南部五條斷層（小崗山斷層、車瓜林斷層、旗山斷層、潮州斷層、及恆春斷層）與橋頭科學園區、高雄科學園區、高雄都會區等重要區域進行地表變形之觀測調查與研究。

再仔細檢視比對資料、並且重新處理後，三期資料中，除了第一期以外，資料品質都有大幅進步。 第二期（2016-2018）與第三期（2018-2020）的斜率（PS vs. GPS)改善幅度落在 40~95%之間，而 R^2 改善程度在 70%~230%之間。

修正後的雷達資料與 GPS 移動站與水準站的比較也有第一時期(2014-2016)的品質稍差，第二時期、第三時期對比較好的情形。 有一部分的差異可能來自移動站與水準站與雷達資料不完全屬於同一時段。

在水準測線的比較上，大部分水準測線與雷達差分干涉資料大趨勢都接近。 有一些差異可能是時間段不完全相同導致，也有部分可能是目前採用水準測站頭尾連線將資料投影至該線的方式會造成雷達資料與水準資料不完全在同一個點位(雖然足夠接近)的問題。 通常雷達資料會提供比較多細節。

由雷達影像結果，我們可以觀察到五條斷層在不同時期的活動趨勢。 也可以看出斷層在不同位置活動趨勢有差異。 在這些斷層經過的重要結構物以及重要區域，值得參考這些資料重新評估。

針對小崗山斷層、車瓜林斷層、恆春斷層，我們各選了一條剖面利用第三時期(2018-2020)升軌資料做二維斷層模擬。 利用單一維度資料（升軌雷達資料）以及相對簡單的模擬方式，我們看到在剖面位置小崗山斷層傾角可能落於 40~60 度、比較偏向逆衝，斷層頂部未觸及地表的幾何。 車瓜林斷層在剖面位置則可能是落在 70~80 度傾角（向東），頂部可能在 500-1000 公尺。 若以純 strike-slip 移動，則是右移 20mm/yr 附近; dip-slip 則是落在 11mm/yr 附近。 恆春斷層在我們模擬的剖面可能都是呈低角度，在 20~30 度之間，頂部非常靠近地表，滑動底部也不深。 這些模擬結果與我們查到的野外觀察與其他大地測量資訊有些類似，也有一些有相當的出入。 未來也許搭配其他獨立資料可以讓模擬結果更進步。

Chapter 7 : Conclusions

This study uses Persistent Scatter SAR Interferometry with continuous and campaign mode GNSS and leveling data to investigate the surface deformation of 5 faults (including HsiaoKanShan fault, CheKuaLin fault, Chishan fault, Choudhow fault, and Hengchun fault) and Kaohsiung metropolitan and industrial parks (Kaohsiung and Chiaotou) in southern Taiwan.

By carefully investigating the PSI velocity field and compare the data with GNSS data, we are able to redesign the processing chain and reprocess the data to reduce the unwrapping errors. The resultant data are signifantly improved over the uncorrected one, with slopes (PS vs. GNSS) improve around 40~95%, and R^2 improve more than 70% to around 230%. Except the data from the first period (2014-2016), 2nd period (2016-2018) and 3rd period (2018-2020) are very similar to the GNSS data. Canpaign mode GNSS data compared less favorably to the radar data, partly due to the different time interval between the two data types.

Leveling data and Radar data along the leveling profiles compare favorably to each other. Some deviation between the two possibly came from non-colocated data and different surveying period.

With the corrected data, investigation to areas of interest can be done with detail. Fault activities can be seen varied both spatially and temporally with detail. Location of large offset can be mapped and

magnitude estimated. Infrastructures nearby the large offset might need further evaluation to prolong the usage and improve the safety.

With the ascending data of the 3rd period, we performed a preliminary modeling to investigate the fault geometry along the extracted profiles. The results differ from the geological data but not by a large amount.

參考文獻

中興工程顧問股份有限公司(2012)營運中核能電廠補充地質調查工作恆春斷層深孔鑽探，共 248 頁。

宏偉工程顧問公司(2012) 高雄市金屬扣件物流倉儲產業園區活動斷層細部地質鑽探調查作業，共 19 頁。

林啟文, 陳文山, 劉彥求, 陳柏村, 2009,臺灣東部與南部的活動斷層，經濟部中央地質調查所特刊，第 23 號，共 178 頁。

侯進雄、陳于高、林啟文、陳建良、胡植慶、王菁穗(2003)台灣高屏地區近期地殼變形之研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 14 號，第 173-180 頁。

陳文山、陳于高、楊小青(2004)地震地質調查及活動斷層資料庫建置-槽溝開挖與古地震研究(3/5)。經濟部中央地質調查所報告第 93-7 號，共 81 頁。

陳建良、林啟文、陳文山(2005)台灣南部恆春半島地殼變形初步研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 16 號，第 55-73 頁。

劉彥求、林啟文(2019)臺灣南部車瓜林斷層的構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 34 號，第 53-82 頁。

經濟部(2021) 活動斷層地質敏感區劃定計畫書 - F0022 小崗山斷層，共 20 頁。

顏一勤(2020)109 年度活動斷層補充地質調查案成果報告書，共 414 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。

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

Castro-Perdomo, Nicolás, et al. "Interseismic deformation in the Gulf of Aqaba from GPS measurements." Geophysical Journal International (2021).

Chuang, Ray Y., et al. "Interseismic deformation and earthquake hazard along the southernmost Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan." Bulletin of the Seismological Society of America 102.4 (2012): 1569-1582.

Hu, J.-C., Hou, C.-S., Shen, L.-C., Chan, Y.-C., Chen, R.-F., Huang, C., Rau, R.-J., Chen, K.H.-H., Lin, C.-W., Huang, M.-H., Nien, P.-F., 2007. Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan. J. Asian Earth Sci., 35, 287-302, doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.020.

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.

Kaneko, Y., et al. "Interseismic deformation and creep along the central section of the North Anatolian Fault (Turkey): InSAR observations and implications for rate-and-state friction properties." Journal of Geophysical Research: Solid Earth 118.1 (2013): 316-331.

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.

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.

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

Vergne, J., R. Cattin, and J. P. Avouac. "On the use of dislocations to model interseismic strain and stress build-up at intracontinental thrust faults." Geophysical Journal International 147.1 (2001): 155-162.

Yu, Shui-Beih, et al. "Present-day crustal deformation along the Philippine Fault in Luzon, Philippines." Journal of Asian Earth Sciences 65 (2013): 64-74.

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

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.

雷達影像處理教育訓練

為履行本案合約規範之交付項目，本案於民國 110 年 10 月 22 日在中央地質調查所研究館第一會議室，實施針對調查所同仁初步認識雷達差分干涉技術之教育訓練課程，課程時間滿 6 小時以上，內容包含：

A. 雷達差分干涉技術之原理
B. 雷達影像實際處理操作演示：
（1） 雷達影像(Sentinel 衛星)獲得方式
（2） SNAP 雷達影像處理軟體操作演示
（3） StaMPS 軟體演示 PSInSAR 技術處理雷達影像方式

課程結束後已提供雷達影像處理步驟手冊供貴單位使用。以下為教育訓練當日之照片及課程當日參與人員簽到表：





110 年「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形（1/2）」案

教育訓練簽名單

主辦單位：經濟部中央地質調查所構造與地震地質組

時　間	110 年 10 月 22 日(星期五)10 時 10 分	地點	本所地質資料館 2 樓第 2 會議室
出　席　者　簽　名			
楊鈞凱	梁瞻騰	王聖文	
林揚閔	鄭[illegible]	黃[illegible]	
[illegible]	李[illegible]	[illegible]	
王淳瑩	石[illegible]	黃智昌	
陳昱璇	[illegible]	陳建良	
陳信元	林[illegible]	林葉潤	
[illegible]	[illegible]	吳庭瑜	
許鈞傑			

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
1. 計畫主持人及團隊成員都是國內在此領域「應用合成孔徑雷達差分干涉技術」的專家，工作不少、也獲得不少成果，予以肯定。有一些最近的工作成果，如南北區分開資料分析處理，得到更好的結果，是很令人鼓勵的方向。期待未來(期末)能有更進一步的成果。	感謝委員建議。 我們會嘗試將雷達衛星影像所含的資訊盡量萃取出來以提供地調所使用。
2. 今年度計畫目標、工作項目及內容、預期成果及交付項目等內容請再確認與原規劃是否相符，例如第 V 頁高鐵沿線變形資訊應不是計畫要求？建議研究主題應以活動斷層及重要園區為主，而報告書應有前人研究、使用方法與技術、資料來源及參考文獻等章節，圖說明也要有英文對照，相關格式請參考所裡其他計畫，並於期末報告書改進。	感謝委員建議，期末報告以原規劃為主，主要會針對幾個科學園區、都會區以及斷層做分析。
3. 視衛星方向地殼變動分析結果僅有速度分析，與計畫要求圖資應顯示衛星影像干涉條紋分析結果尚有落差，建議可分析不同年度間的變形量差異，繪製干涉條紋圖。	感謝委員建議，雖然慢速變形、時間序列的差分干涉條紋有太多雜訊而不像同震變形的干涉圖那麼有用，我們還是會輸出適當的干涉圖時間序列於附錄中。
4. 第 1 頁與第 20 頁之剖面為南北走向，且未切過斷層，未符合北、中、南各一條剖面的要求，請於期末再適度增加一條東西走向的剖面，並應顯示斷層滑移速率，而第 34 頁剖面變化應與大地測量觀測成果綜合比較，才能增加本計畫	感謝委員建議，我們於期末報告會有多條跨大範圍剖面、多條跨科學園區以及斷層之剖面。 我們也有一整個章節在做資料對比，讓各時期資料的可信度完整呈現。 另外，期末報告的圖雖然多，我們會盡量注意斷層以及其他資訊的標示。

期中審查意見	處理情形
干涉成果的可信度；報告相關圖資請如期中簡報一樣，標示斷層名稱。	
5. 建議此計畫可以和另一個相關計畫(GPS+leveling 及斷層模擬)有更好的橫向溝通及連結，如在討論 GNSS 與 PSInSAR 關係時，請納入密度更高的移動站或水準資料加以討論，如第三章內容皆在討論連續站，不見移動站，而移動站為合約要求項目之一。	我們在期中報告後，馬上與另一計畫之主持人聯絡並且交換資料，在幾個不同場合也有持續溝通。 我們已經將資料交付給該計畫，也從該計劃取得移動站資料，於期末報告也會呈現這一部分的資料。
6. 如何善用 PSInSAR 在提供平面資料上的優勢，有別於 GNSS 與 Leveling 只有點的資料同時也借用 GNSS 連續資料可以去除雜訊(季節變化、人為效應、大氣干擾等)，來幫助本計畫去除雜訊。	如同委員提出的，我們想要努力讓大眾在了解雷達差分干涉的限制、誤差的前提下，發揮其最大的用處。 因此我們致力於了解雷達資料的誤差。 在本年度計畫中，我們發現大多數的資料還包含了許多 unwrapping error，造成其與 GNSS 的比對產生顯著的差異。我們已經針對此部分做處理。 未來我們還會持續對其他的雜訊設計處理方式。
7. 本報告內容與期初計畫書內容諸多重複，應多加研究區域（相關斷層）的地質背景與工作內容之說明以及成果解釋，且建議報告書中應有地質圖或地質剖面圖的配合，更加強發揮 PSInSAR 在面上的優勢，來分析探討構造（斷層、泥貫入體等）在橫向上的地表變形的變化及特徵。	感謝委員建議。 我們在期末報告已經大量加入該區域的報告，特別是斷層調查相關報告。
8. 摘要中寫到有 3 個科學園區，但報告中只提到 2 個，請於相關圖資內標示重要園區的範圍。	感謝委員關注，我們會持續注意。
9. 圖 2-1-8 應如簡報加上活動斷層位	我們在期末報告中，不管是地圖上或

期中審查意見	處理情形
置，如此即可清楚看出圖 2-1-9 地形變動和活動斷層的關係。此外，根據圖 2-1-8 和圖 1-3-2 的比對，圖 2-1-9 接 3 近 330 公里處的尖峰變形和小崗山斷層無關，在其他年段亦無顯著出現類似尖峰變形，請釐清。	是分析剖面上，都會標示斷層位置，適當地方在內文中也會討論觀察結果。
10. 第 24 頁，圖 2-1-9，可否比較沿線 GNSS 資料，了解由里程 280－360 之 LOS 改變原因是因為水平或垂直速度變化造成，第 25 頁文中提及圖 2-2-2 及第 27 頁文中提及圖 2-3-2 並未出現報告內，請釐清。	由於高鐵沿線不列入計畫重點，所以我們會專注在地調所關注區域。
11. 圖 3-1-4 與圖 3-1-45，造成 InSAR 與 GNSS 結果差異很大的原因有可能是在屏東沿海區域有很強的季節性變動，由於報告比較 InSAR 與 GNSS 速度場只用了 2－3 年的時間，所以造成差異，建議釐清。	在後來的調查中，我們發現因為部分區域的 unwrapping error 造成許多對比上的離散點，在設計方法重新處理 unwrapping 部分後，這樣離散的現象在大部分資料上已經不存在。
12. 報告書中，圖面之海岸線與底圖 DEM，以及 PSInSAR 點之坐標不一致，建議應針對報告書內圖資放大檢視，以確認並確保斷層坐標、DEM 坐標、PSInSAR 點之坐標一致。	我們仔細觀察作圖後發現，以 GMT 畫圖時這樣的差異相當明顯，我們在期末報告大部分的地圖都會以 QGIS 處理。 我們初步的檢視發現這樣的方式各種資料位置差異減少很多，但是還是有少數地方存在這樣的問題。 我們會持續關注這樣的問題。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一）綜合建議	
1. 本案將南部地區分成 2014-2016、2016-2018 及 2018-2020 三個時期進行干涉變形分析，考量干涉影像需要二個時間的影像需要有相當的一致性才能獲得較佳的干涉結果，因此在選擇時間段時似乎相當重要，建議研擬出最佳的選擇方法，並適用於不同變形速度的地區。	感謝委員建議，這也是處理本計畫相當重要的部分。 我們在規劃時以觀測地區影像拍攝時間範圍、影像拍攝時間、密度分佈、以及觀測地區的地震等因子考量，分成 2014-2016, 2016-2018, 2018-2020 等三個時段，在執行過程中大致發現這樣的分段相對合理。 然而由於這個自然的分段造成 2014-2016 影像數較少，因而解算的成果不如後面兩期的資料，這可能有一些自然的限制存在而造成。
2. 本報告中許多措辭均為計畫之初的用語，如「預計」、「將」、「預定」等等，例如第 10 頁、第 12 頁、第 27 頁、第 37 頁等。似乎是移植於服務建議書的寫法，建議修正。建議以圖的方式說明，如第 11 頁及第 43 頁斷層的幾何參數等等。	感謝委員建議，已更新。
3. 在比較 GNSS、PSInSAR 結果時，可否把平原和山區的測站分開，了解造成差異真正的原因，而不是根據測站地理位置區分。由於有升軌和降軌資料，建議可結合二種資料轉成垂直分量，再和水準資料比對，而不是直接比較 LOS 視衛星方向的變動和水準的觀測結果。	委員提出的問題可能是因為我們在內文以及口頭報告中的用語太過簡略所造成。 在資料處理上，我們分成「高雄」以及「屏東」兩塊，不是因為利用行政區域來劃分，而是因為高屏溪在處理過程中形成一個 unwrapping 的障礙使得高屏溪兩側的資料無法順利解纏，因而造成 unwrapping error。 這樣的誤差不僅在高屏溪兩側出現，也明顯在部分山區以及恆春半島出現。 我們在資料處理過程中是將最大可能誤

期末審查意見	處理情形
	差來源找出並糾正。 另外，一方面由於升降軌資料各自的可信度不同，另一方面是轉成垂直分量同時其實需要加入假設，因此得到的垂直資料在品質方面會有更多的疑慮，我們在本年度資料暫時不考慮使用此方法。
4. 對於 2014-2016 年的雷達資料，報告中提出可能未來需要「持續使用不同方法測試改善」,此一改善動作是在下年度執行或有其他方式，應明確承諾。第 81 頁，說明「未來可以嘗試選取西側參考點比較之」,此一敘述是否亦是下一年度工作之承諾？	感謝委員細心的建議，我們已經修改內文。
5. 小崗山斷層變形落差似乎在斷層上、下盤二側有顯著差異性，在今年也提供劃設敏感區重要參考，建議可多闡述此一部分的貢獻，提升本案產出成果的價值。	感謝委員建議，已於第六章中更新。
6. A0 或 A1 附圖：由於 PSInSAR 結果為視衛星方向的變形,與 GNSS 及水準測量使用的坐標系定義不同，因此建議成果可以來輔助 GNSS 及水準測量的結果,因此附圖應將 GNSS 及水準測量同時期的結果標示出來；高屏共用站 SANW 在何處應標示，測站中文名稱請說明；重點區域時間序列建議尋找 GNSS 測站共點處進行分析，比較二種資料間的差異。	感謝委員建議，我們已經在附圖中修正。
7. 本案封面文字誤植，請修正；內文報告書排版請再檢視；圖與圖說明請盡量放在同一頁，以利閱	感謝委員建議，已更新。

期末審查意見	處理情形
讀。	
（二）報告書內容修改	
1. 水準測線的分析分為三個時期比較，可以獲得三個時期的變形分析，建議再加入一張平均的分析(例如重要觀測點在不同時間而在趨勢上的迴歸分析)，類似水準歷年的平均(趨勢上的)速度分析，在無地震影響期間，應有較佳速度的結果。	感謝委員建議，我們已經在水準資料比對圖中呈現出研究期間平均速率一起對比。
2. 第 38 頁：GNSS 連續站、水準測量與雷達差分干涉資料對比與修正，GNSS 連續站與水準測量資料是利用何時的比較適當？還是所有年份測量值的平均？因許多地測站或測線的 GNSS 連續站與水準測量資料每年的變化非常大，並可能受到當年度的同震變形影響。因此，這些量測值如何選用？採用雷達差分干涉資料的時間與測量時間的時序不同時，可能會造成很大的誤差。	由於連續站在時間採樣頻率較高，制約比較多，連續站的資料也可以切到與雷達資料觀測幾乎同樣長的時間，因此我們在比對驗證時期，都採取 GPS 連續站的資訊作為對比基礎。 移動站以及水準測站由於施測頻率遠低於雷達，我們會將其用於呈現雷達資料與其之異同。 由這些異同之處，可以看出更多的細節。
3. 第 50 頁：請明確描述 GNSS 和 PSInSAR 差異的確切原因，似乎部分山區和平原的測站都有問題，一般而言大氣的效應在山區會比較不容易校正，為何平原區也會有較大的誤差，值得再深入討論。	我們在後面章節呈現了這些差異絕大多數來自於雷達處理過程的 unwrapping error，也在報告中呈現出辨認出問題、設計處理流程去除 unwrapping error，並且呈現出去除該誤差後的結果。 顯示了去除該誤差後的雷達結果與 GNSS 有高度相關。相對於 unwrapping error ，大氣誤差的重要性在本計畫中並不明顯。
4. 第 71 頁：PSInSAR 與 GNSS 移動站比較差異較大，可能與 GNSS 移動	感謝委員的建議，本期末報告的第四章主要就是利用 GNSS 連續站做比對。

期末審查意見	處理情形
站施測的次數較少有關，建議可以納入 GNSS 連續站一起比較，應有較好的一致性也能達到契約的要求。	
5. 第 79 頁：圖 3-4-1 可將主要交通建設路線如鐵路、高鐵、國道放入圖中；圖 3-4-2 和圖 3-4-3 應在文中加以說明；圖 3-4-4 通過車瓜林斷層和旗山斷層之水準測量資料與 PSInSAR 資料有很大的差異，由於這兩條斷層為該區重要活斷層，且靠近都會區，宜加以說明其差異性。	感謝委員建議。 我們已更新交通建設路線的圖層。 圖 3-4-1.2.3.4 為水準測線比對 SAR 的圖，由於原先獲得的水準資料有誤，導致比對有部分問題。在資料更新過後，可以看出大部分剖面的雷達與水準資料比對相當一致。
6. 第 82 頁：圖 3-4-2，水準測線-路竹至茂林測線與 PSInSAR 資料比對（Ascending）。三個時段所對比的水準測量值都一樣，應不是與同年份的水準測量值進行對比。本計畫應是採用 Feb2014-Mar2015 時段的測量值進行 2014-2016、2016-2018、2018-2020 時期的比對：但是 2014 之後每年的水準測量值都有相當的差異，且 Feb2014-Mar2015 的變動量與趨勢有非常大的差異。對此，這些對比的可信度如何？可能不僅是報告中第三期（2018-2020）的升軌資料較可信。	由於口頭報告時獲得的水準資料有誤，所以比對看起來差異相當大。 現在獲得正確資料後已經更新，在比對上看起來大部分比對狀況都相當好，而且雷達資料可以看出更多的細節。
7. 在水準和 PSInSAR 的資料比對中，路竹-茂竹測線相較於其他測線有明顯的差異，請討論原因。第 82 頁，請說明三個時期的觀測在距離 0-10 公里處為何有顯著的不同？	在口頭報告時期，我們獲得的水準資料有誤。 我們現在獲得正確資料後，已經更新水準測線的圖。 大部分水準測線的沿線與雷達資料比對都在趨勢上大致吻合，數字上差距不大。 少數幾個點會有差異，然而由於雷達資料

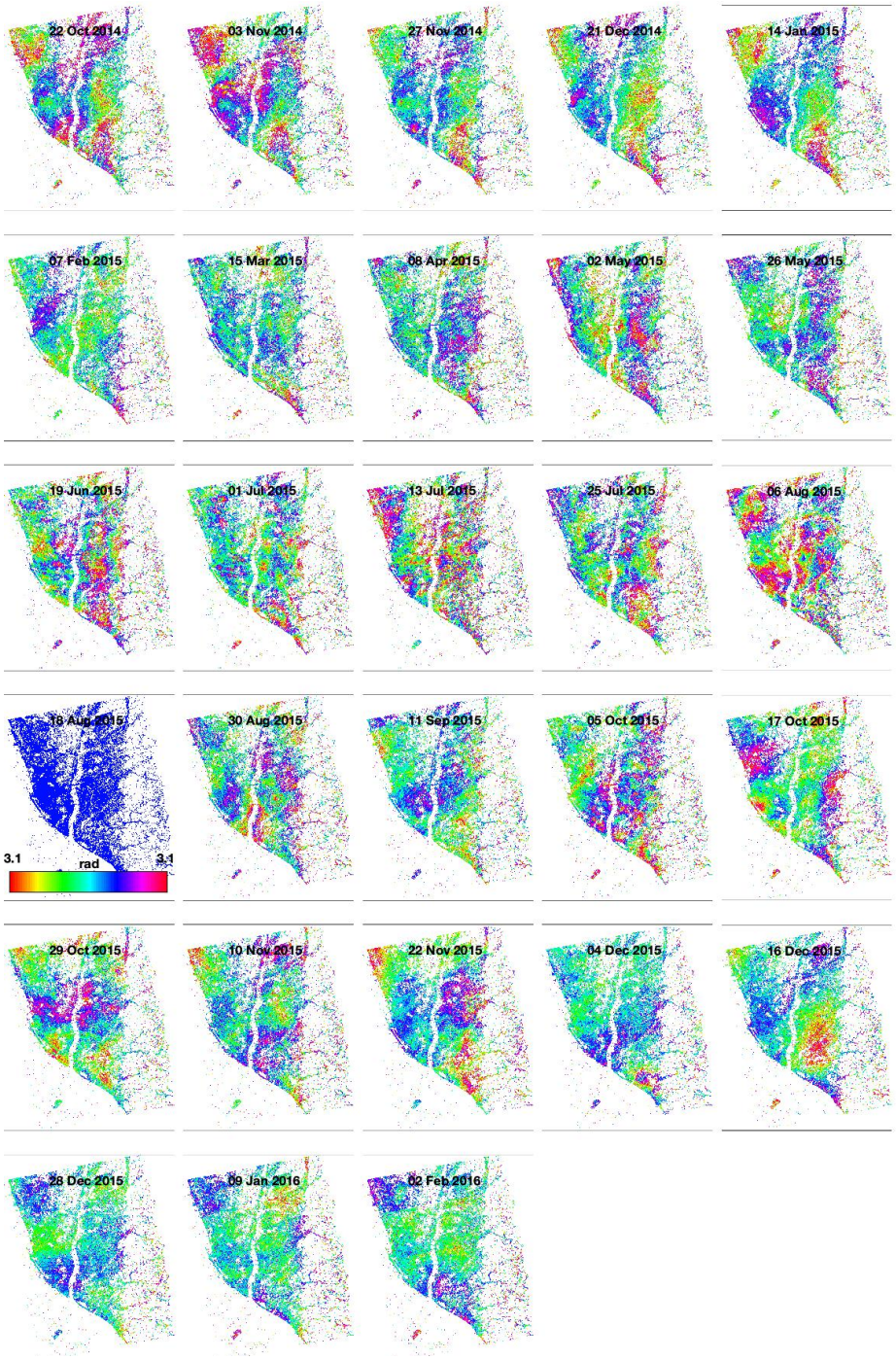
期末審查意見	處理情形
	萃取出水準測線頭尾沿線寬度數公里內的 PS 點，可以看出所有鄰近區域的所有趨勢。
8. 第 83 頁：路竹-茂林測線與 PSInSAR 資料比對（Descending）。似乎 2016-2018 年對比較佳，2018-2020 對比非常差，若看同時段的變動趨勢，則非常相似，但變動量不同，水準測量大多為不太變動至沉陷。	同上述第七項，在更新水準資料後，大部分對比都相當吻合。
9. 第 99 頁：從 2014-2016 升軌道或降軌道影像的 LOS 平均速度場來看，為何小崗山斷層上盤屬於下陷區（雖然上下盤有差異），水準測量值是抬升現象？西側區域鄰近高雄科學園區的降軌道 LOS 平均速度場抬升，但升軌道 LOS 平均速度場是下陷？	感謝委員的重要問題。 我們在報告中呈現因為 2014-2016 台灣西南部的 Sentinel-1 影像較少，然而又因為 2016 的美濃地震我們要避開同震變形的資訊，因此無法將早期資料連著處理。所以該段時間的資料比較直得小心。 在第二時期與第三時期的資料會有比較多的信心。
10. 第 113 頁：兩個飛行方向所觀測到的地表位移為正好相反，表示此區域的地表變形應以水平方向活動為主。鄰近斷層區域的 GNSS 觀測值是否也顯現這種結果?第 116 頁，SC1 與 SC2 剖面中的斷層應該是車瓜林斷層。	感謝委員細心的問題，確實在 SC1, SC2 的斷層為車瓜林斷層，原圖為我們誤植。 已在新版改正。 由於雷達對垂直位移較敏感，所以如果主要變形屬於垂直，升降軌的資料通常會是數值差異而不是行為相反。
11. 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）。該理論是用在彈性變形體，但是震間變形可能不屬於彈性變形，同震變形是彈性變形。因此請評估 Okada 理論是否可應用到本計畫？	彈性錯動理論（Okada, 1985；Okada,1992）通常用於模擬活動斷層附近的震間變形（Vergne et al., 2001），而相關研究中，也不乏使用錯動理論（e.g. Vergne et al., 2001; Hsu et al., 2003; Chuang et al., 2012; Kaneko et al., 2013; Yu et al., 2013; Castro-Perdomo et al., 2021），只是在對於斷層模型上的參數需更加注意與謹慎，避免錯估了

期末審查意見	處理情形
	其行為與機制。
（三）斷層模擬	
1. 二維斷層模擬的方法描述請再說明，在做二維模型時，是將 LOS 速度拆解成平行和垂直斷層的分量，再分別進行逆推？斷層的最頂部也是逆推決定？由於是模擬斷層間震期的滑動行為，而斷層的長寬有限，會造成邊界效應。	已於 5-1 方法與執行步驟內加入說明，是將模擬的東西、南北與垂直方向的位移場轉投影至 LOS 方向，在與計劃內的速度場剖面進行擬合，透過不同的斷層參數，計算出全部觀測點的均方根誤差，在進行討論。其搜尋參數包含了斷層角度、頂部、底部及滑動量。至於邊界效應的部分，由設定斷層長度 1000 公里來避免此效應。
2. 二維斷層模擬中，圖 5-1-1 上面三個紅線圖應予以說明。	已增加說明，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。
3. 車瓜林斷層呈現震間快速潛移現象是否適用於 Okada, （1985）；Okada,（1992）的彈性變形模式？恆春斷層模擬結果，斷層面角度太平緩，是否就是此原因？	在一些研究中也採用了錯動理論進行模擬，只是台灣構造相對複雜，有更多須釐清的地方，因此透過這樣的測試，能更加瞭解其所代表的意義及限制。而恆春斷層的部分，由 SAR 的結果來看，其變形寬度可達兩三公里，且資料展距不夠，對於斷層幾何的模擬會有影響，另外，其變形機制是否參雜其他運動行為，也該被釐清，才能更進一步來探討恆春斷層整體的活動。
4. 第 168 頁，第 2 段的五個參數應予說明。	已增加說明，參數裡面有兩大部分，一為斷層幾何，其中包含了斷層角度、斷層頂部與底部深度，另一部分為滑動值，包含了沿著傾角的滑動與沿著走向的滑動。
5. 建議針對小崗山斷層和車瓜林斷層模擬所使用的剖面宜採用通過斷層中段的剖面為宜。	感謝委員建議，原選的剖面已屬斷層中段位置，但由於希望取得資料的完整性及跨斷層的變化明顯，因此在剖面的位置上有些微調，之後的處理與分析，會盡量採用斷層中段剖面為主。

期末審查意見	處理情形
6. 二維模擬的結果建議與另一計畫比較，以利瞭解其差異。	初步比較，小岡山斷層傾角大約落於40度，而車瓜林比較高角度約70度，兩邊結果類似，而恆春半島的差異性較大，其可能來自於本身斷層活動機制尚未釐清，且兩邊計畫所採用的資料、剖面位置皆不同，所設計的模擬也有所差異，想呈現的目的有所不同，並不容易全部一起比較。

附錄 A PSInSAR 結果時間序列

PSInSAR 結果時間序列



附錄_圖 1：2014 年至 2016 年升軌差分干涉結果。

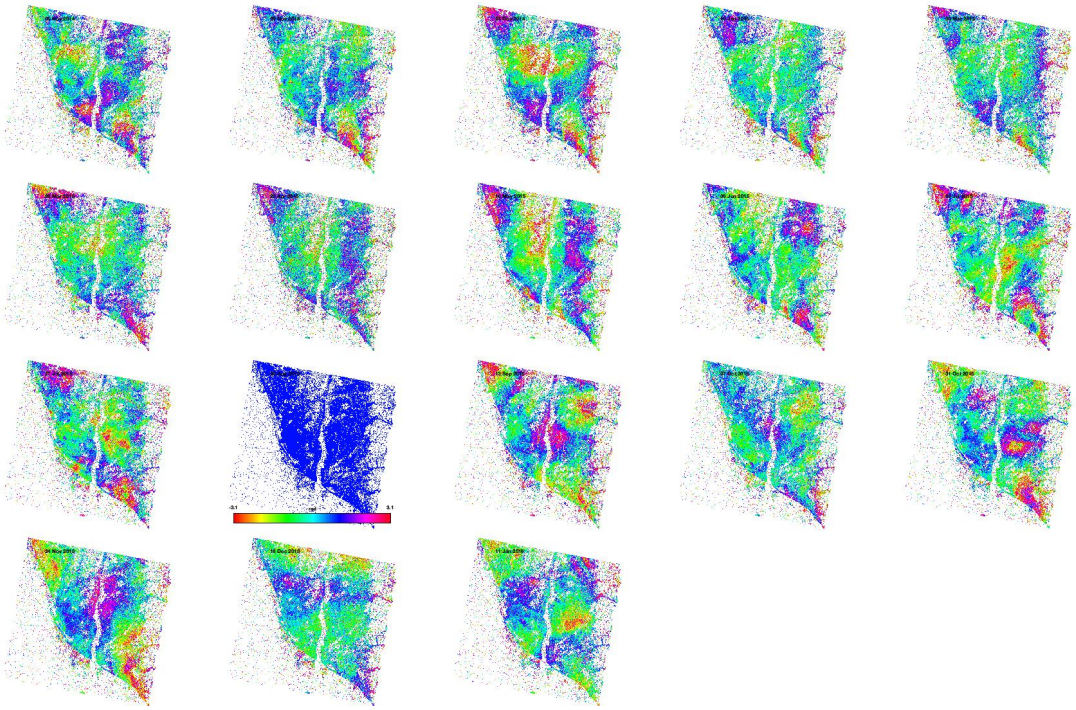
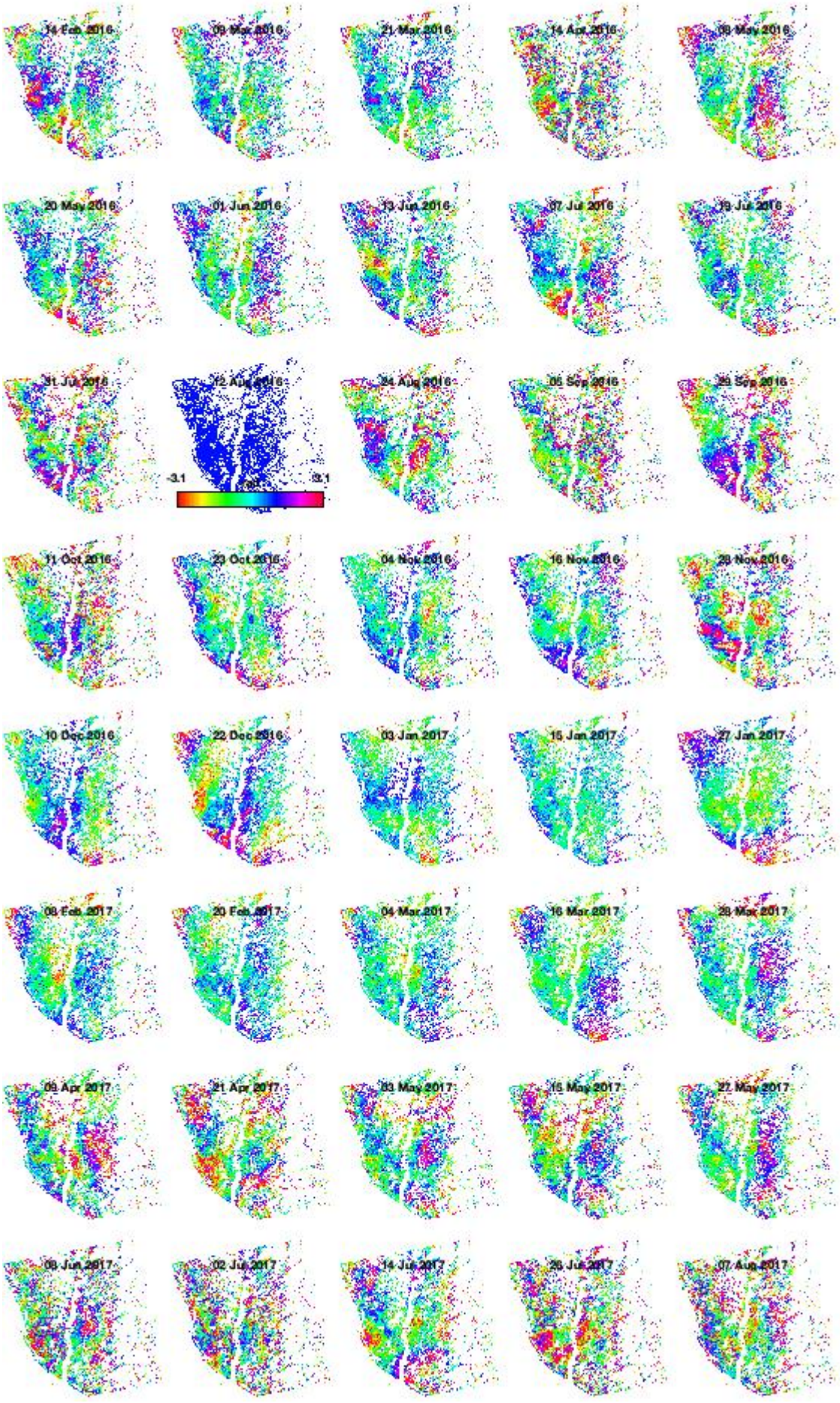


圖 2. 2014 年至 2016 年降軌差分干涉結果。


14 Feb 2016
09 Mar 2016
21 Mar 2016
14 Apr 2016
08 May 2016
20 May 2016
01 Jun 2016
13 Jun 2016
07 Jul 2016
19 Jul 2016
31 Jul 2016
12 Aug 2016
24 Aug 2016
05 Sep 2016
29 Sep 2016
-3.1
3.1
11 Oct 2016
23 Oct 2016
04 Nov 2016
16 Nov 2016
28 Nov 2016
10 Dec 2016
22 Dec 2016
03 Jan 2017
15 Jan 2017
27 Jan 2017
08 Feb 2017
20 Feb 2017
04 Mar 2017
16 Mar 2017
28 Mar 2017
09 Apr 2017
21 Apr 2017
03 May 2017
15 May 2017
27 May 2017
08 Jun 2017
02 Jul 2017
14 Jul 2017
26 Jul 2017
07 Aug 2017

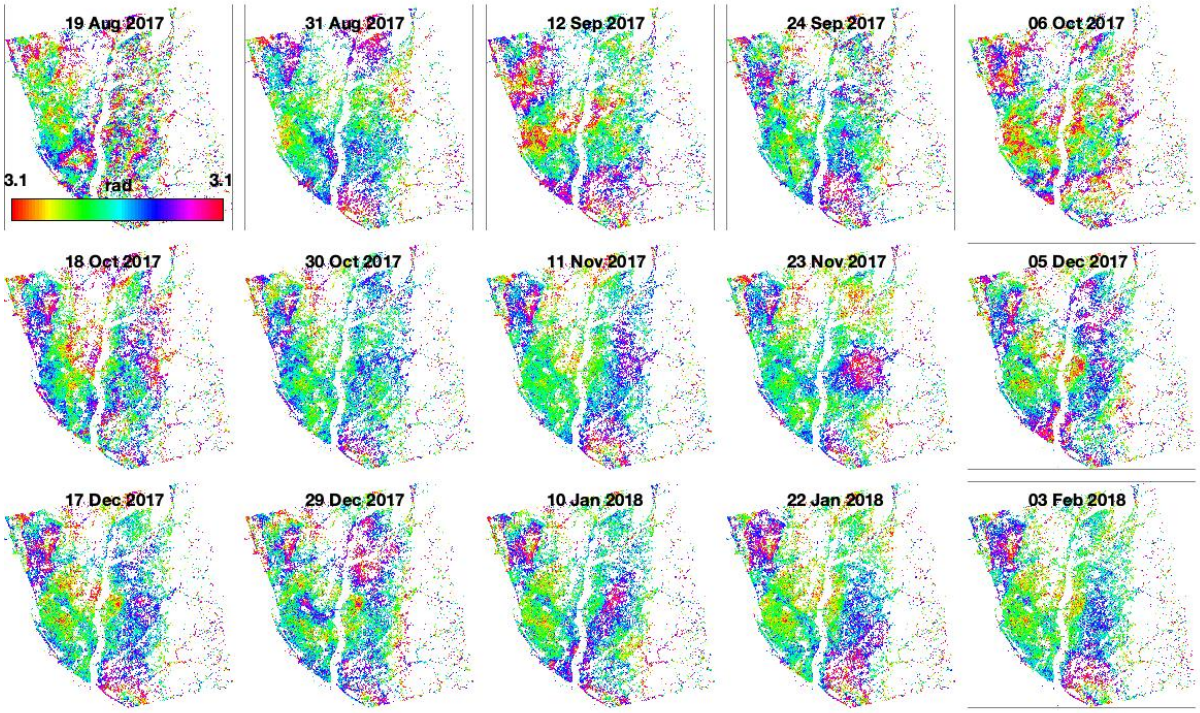


圖 3. 2016 年至 2018 年升軌差分干涉結果。

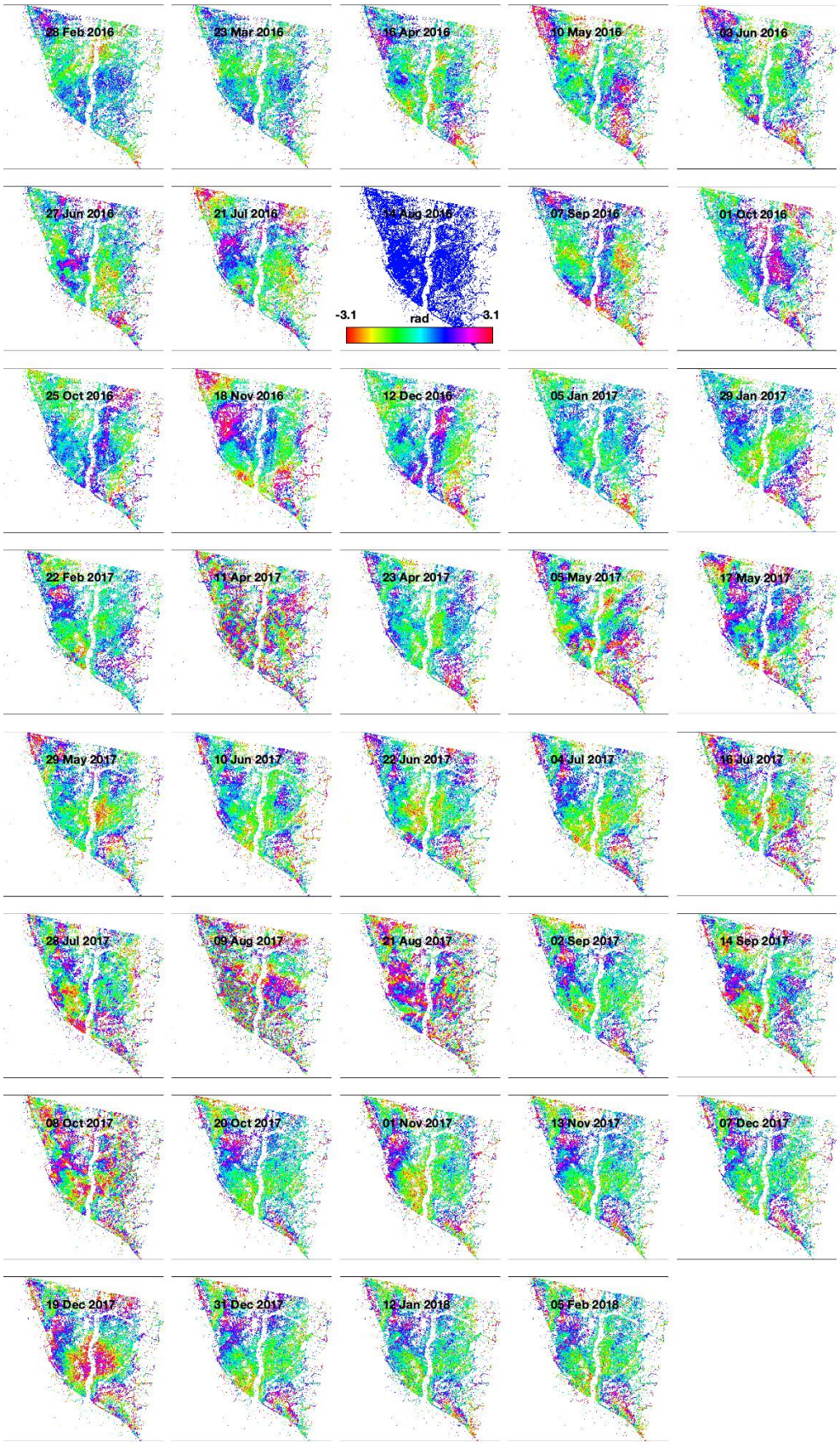
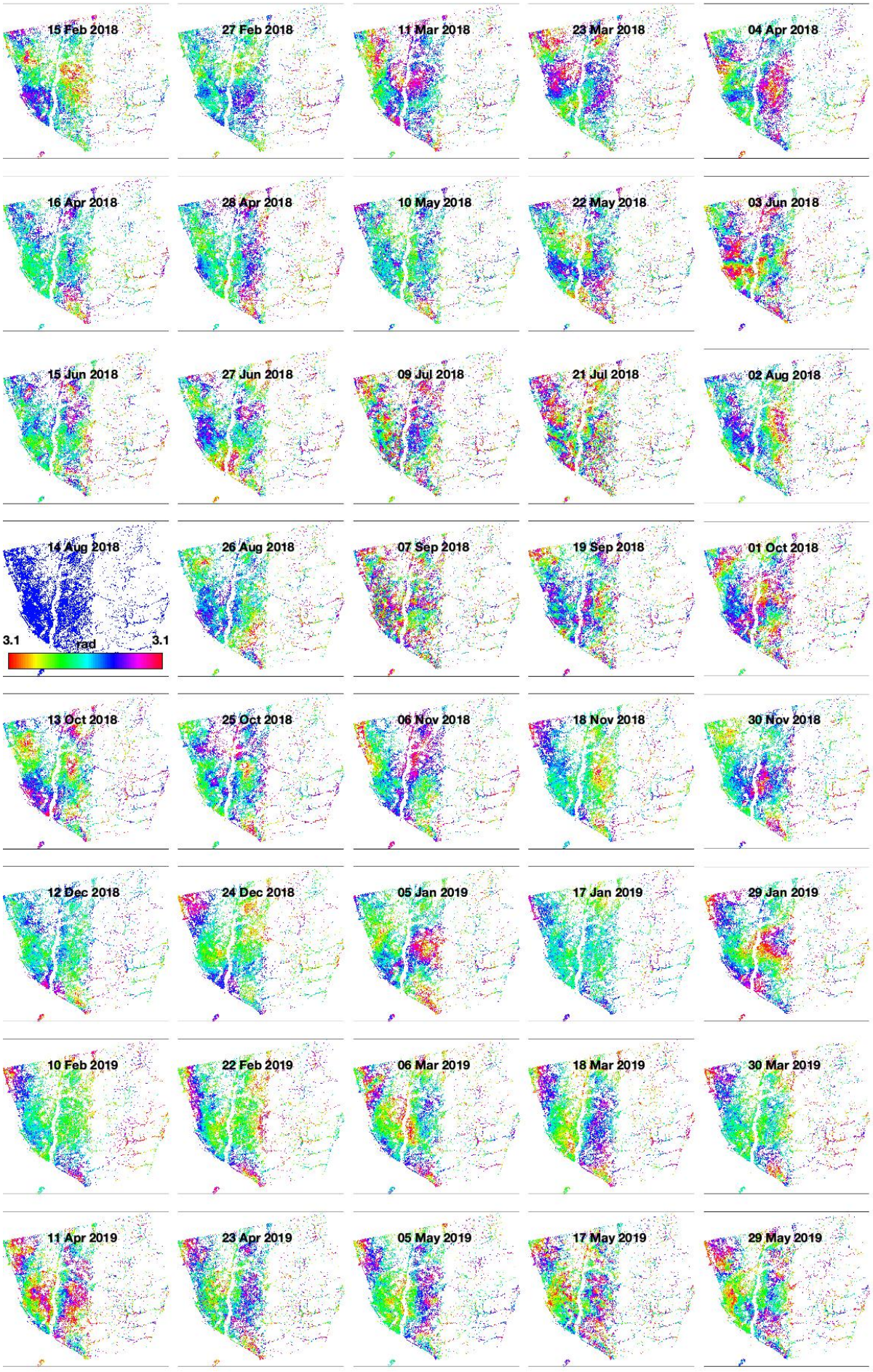
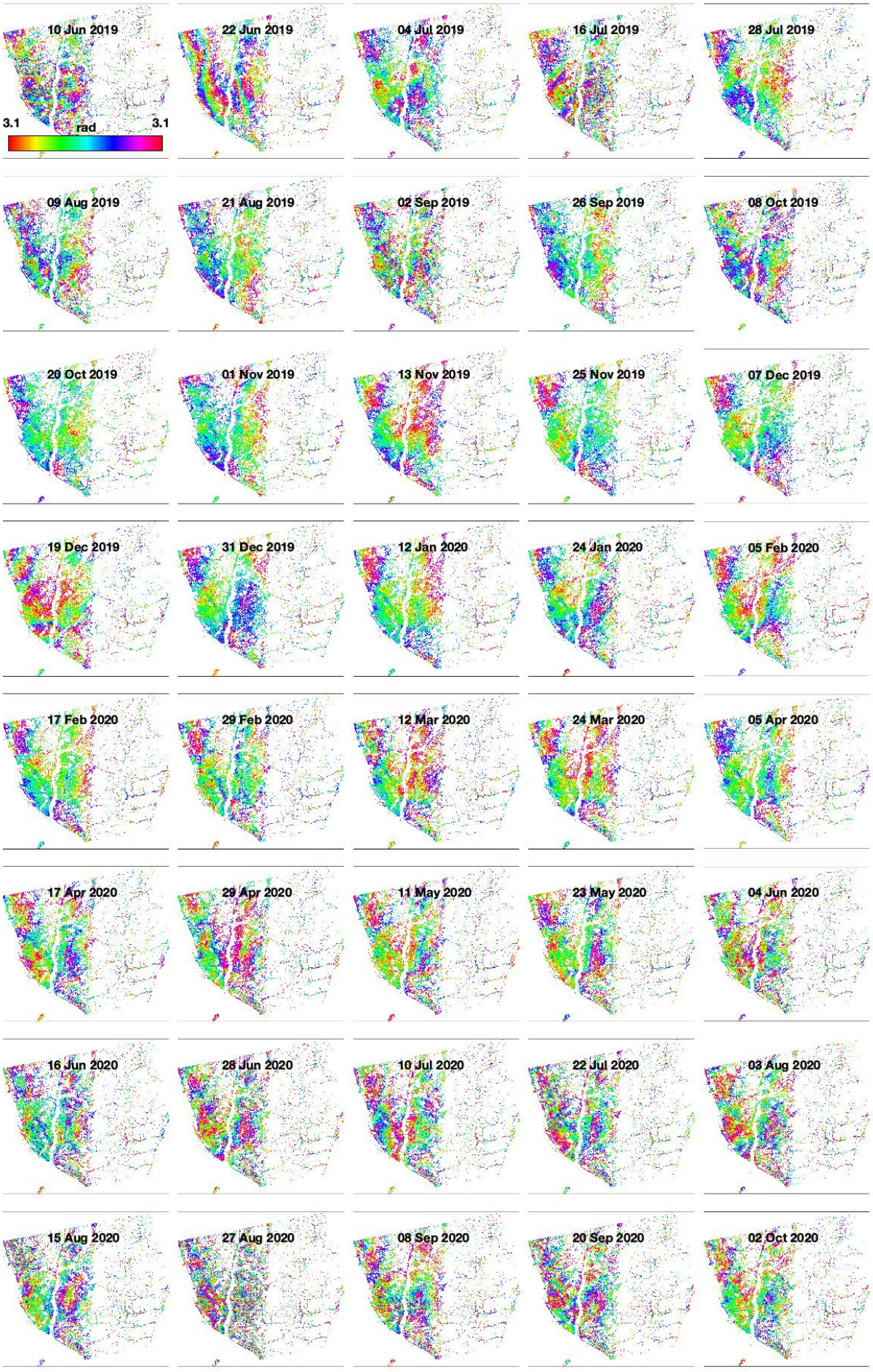


圖 4. 2016 年至 2018 年降軌差分干涉結果。


15 Feb 2018
27 Feb 2018
11 Mar 2018
23 Mar 2018
04 Apr 2018
16 Apr 2018
28 Apr 2018
10 May 2018
22 May 2018
03 Jun 2018
15 Jun 2018
27 Jun 2018
09 Jul 2018
21 Jul 2018
02 Aug 2018
14 Aug 2018
3.1
rad
3.1
26 Aug 2018
07 Sep 2018
19 Sep 2018
01 Oct 2018
13 Oct 2018
25 Oct 2018
06 Nov 2018
18 Nov 2018
30 Nov 2018
12 Dec 2018
24 Dec 2018
05 Jan 2019
17 Jan 2019
29 Jan 2019
10 Feb 2019
22 Feb 2019
06 Mar 2019
18 Mar 2019
30 Mar 2019
11 Apr 2019
23 Apr 2019
05 May 2019
17 May 2019
29 May 2019


10 Jun 2019
3.1
rad
3.1
22 Jun 2019
04 Jul 2019
16 Jul 2019
28 Jul 2019
09 Aug 2019
21 Aug 2019
02 Sep 2019
26 Sep 2019
08 Oct 2019
20 Oct 2019
01 Nov 2019
13 Nov 2019
25 Nov 2019
07 Dec 2019
19 Dec 2019
31 Dec 2019
12 Jan 2020
24 Jan 2020
05 Feb 2020
17 Feb 2020
29 Feb 2020
12 Mar 2020
24 Mar 2020
05 Apr 2020
17 Apr 2020
29 Apr 2020
11 May 2020
23 May 2020
04 Jun 2020
16 Jun 2020
28 Jun 2020
10 Jul 2020
22 Jul 2020
03 Aug 2020
15 Aug 2020
27 Aug 2020
08 Sep 2020
20 Sep 2020
02 Oct 2020

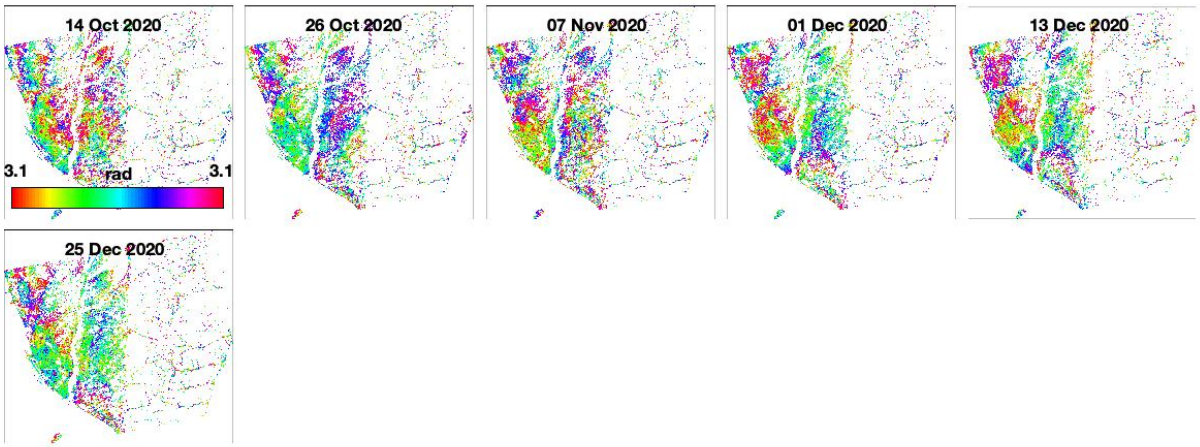
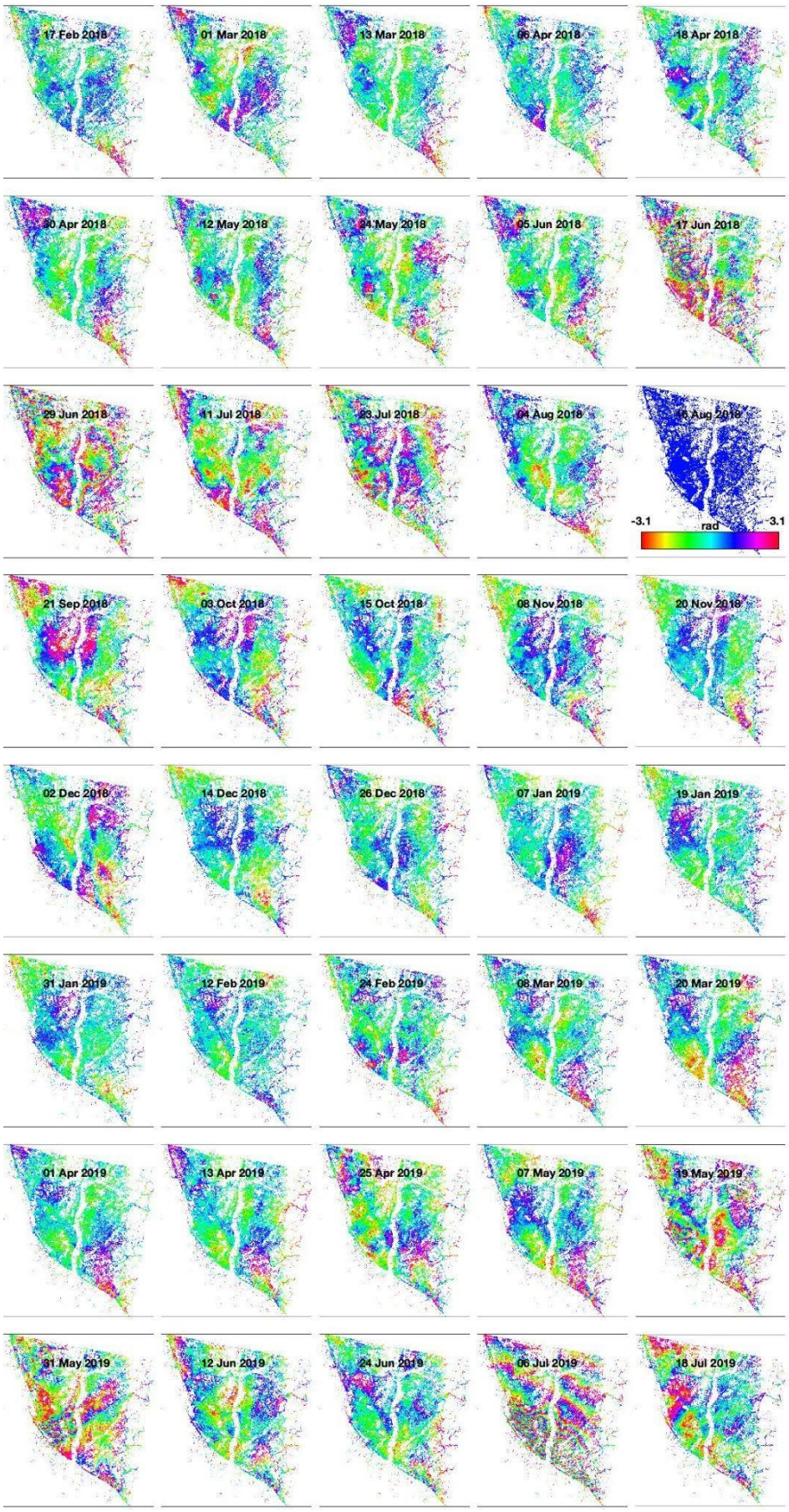
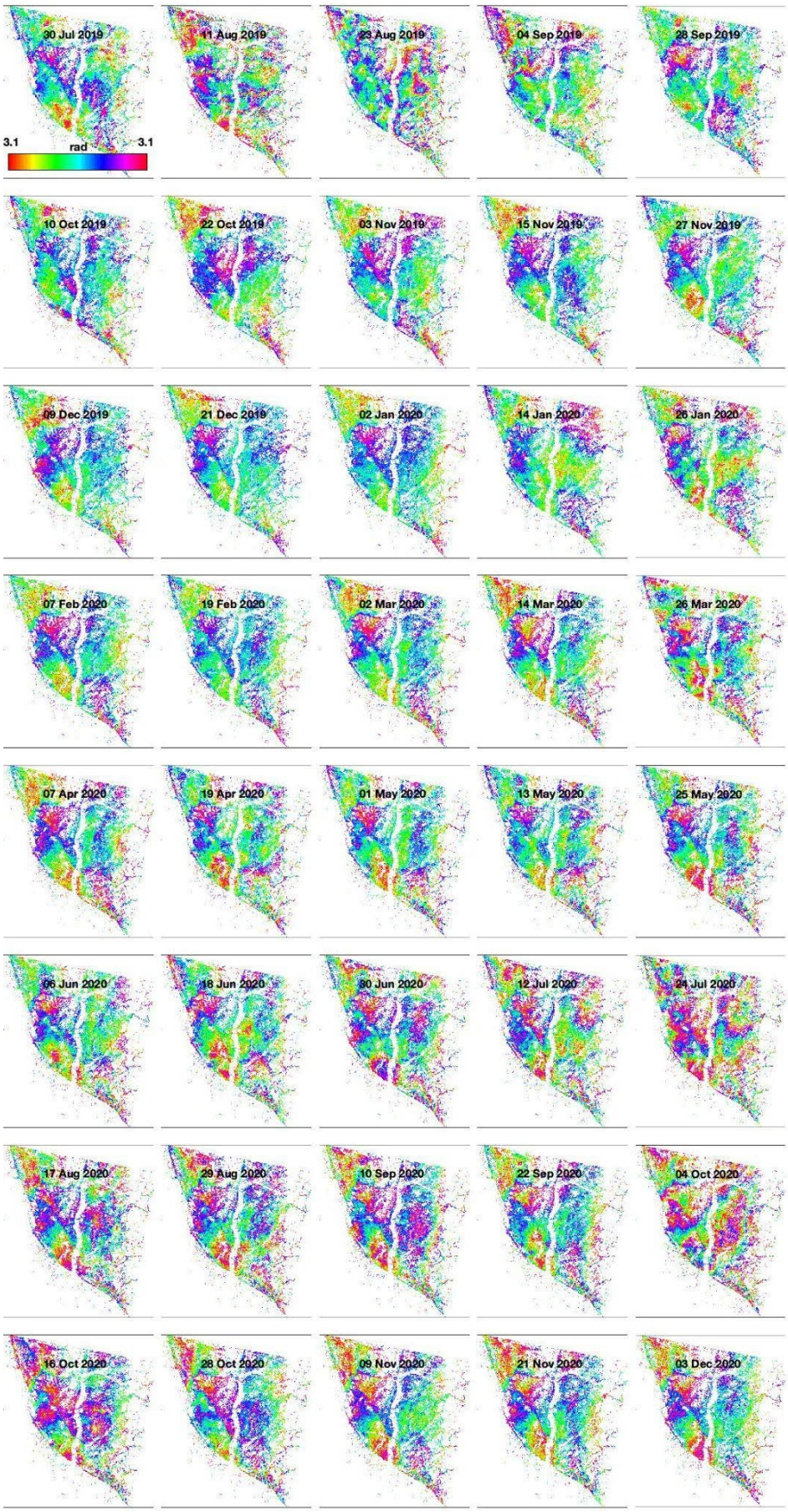


圖 5. 2018 年至 2020 年升軌差分干涉結果。


17 Feb 2018
01 Mar 2018
13 Mar 2018
06 Apr 2018
18 Apr 2018
30 Apr 2018
12 May 2018
24 May 2018
05 Jun 2018
17 Jun 2018
29 Jun 2018
11 Jul 2018
23 Jul 2018
04 Aug 2018
16 Aug 2018
-3.1
rad
-3.1
21 Sep 2018
03 Oct 2018
15 Oct 2018
08 Nov 2018
20 Nov 2018
02 Dec 2018
14 Dec 2018
26 Dec 2018
07 Jan 2019
19 Jan 2019
31 Jan 2019
12 Feb 2019
24 Feb 2019
08 Mar 2019
20 Mar 2019
01 Apr 2019
13 Apr 2019
25 Apr 2019
07 May 2019
19 May 2019
31 May 2019
12 Jun 2019
24 Jun 2019
06 Jul 2019
18 Jul 2019


30 Jul 2019
3.1
rad
3.1
11 Aug 2019
23 Aug 2019
04 Sep 2019
28 Sep 2019
10 Oct 2019
22 Oct 2019
03 Nov 2019
15 Nov 2019
27 Nov 2019
09 Dec 2019
21 Dec 2019
02 Jan 2020
14 Jan 2020
26 Jan 2020
07 Feb 2020
19 Feb 2020
02 Mar 2020
14 Mar 2020
26 Mar 2020
07 Apr 2020
19 Apr 2020
01 May 2020
13 May 2020
25 May 2020
06 Jun 2020
18 Jun 2020
30 Jun 2020
12 Jul 2020
24 Jul 2020
17 Aug 2020
29 Aug 2020
10 Sep 2020
22 Sep 2020
04 Oct 2020
16 Oct 2020
28 Oct 2020
09 Nov 2020
21 Nov 2020
03 Dec 2020

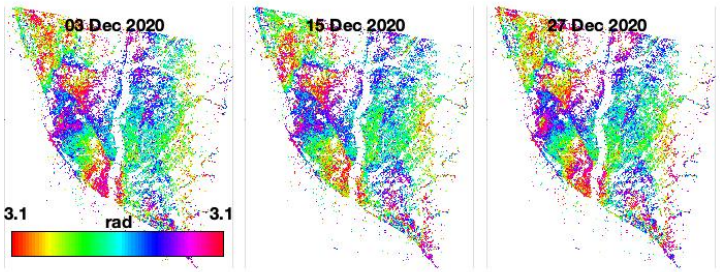


圖 6. 2018 年至 2020 年降軌差分干涉結果。

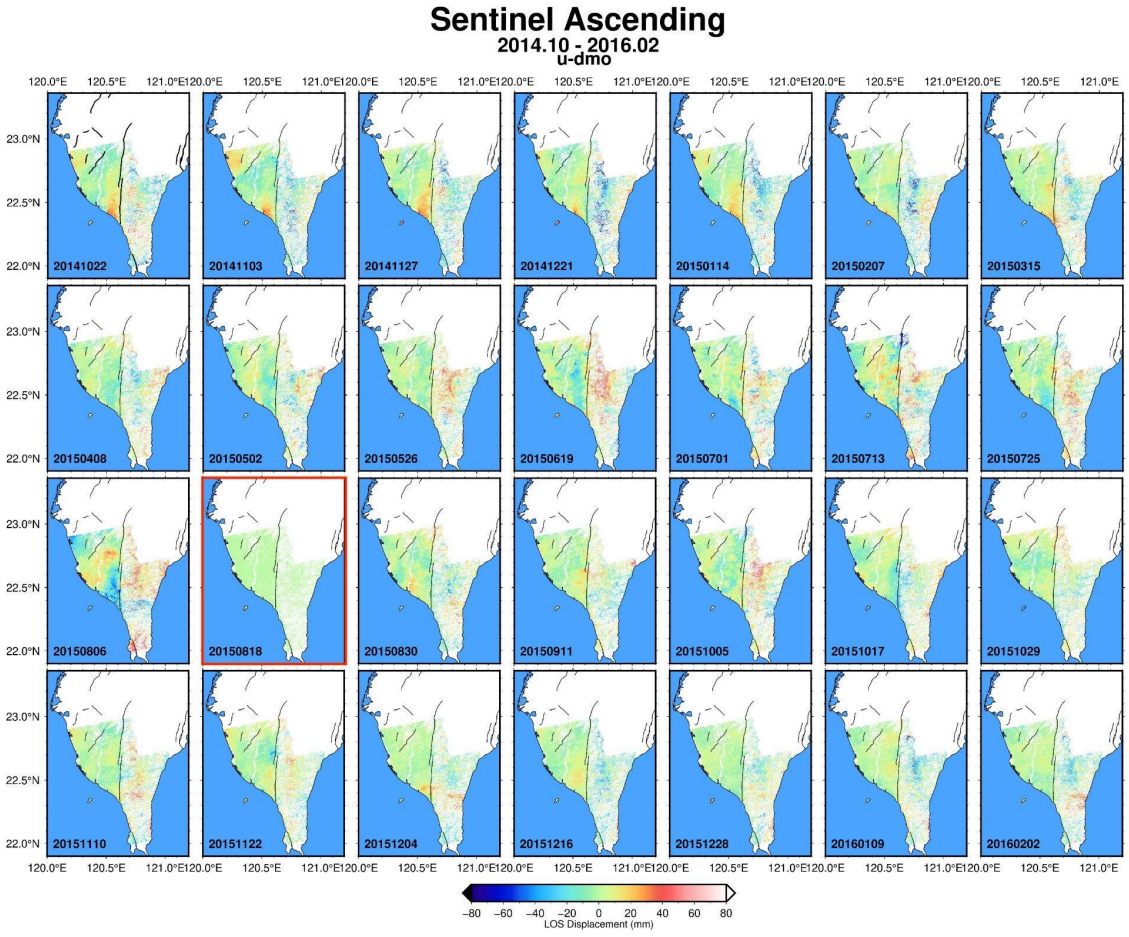


圖 7. 2014-2016 之升軌時間序列，主影像為 2015 年 8 月 18 日。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

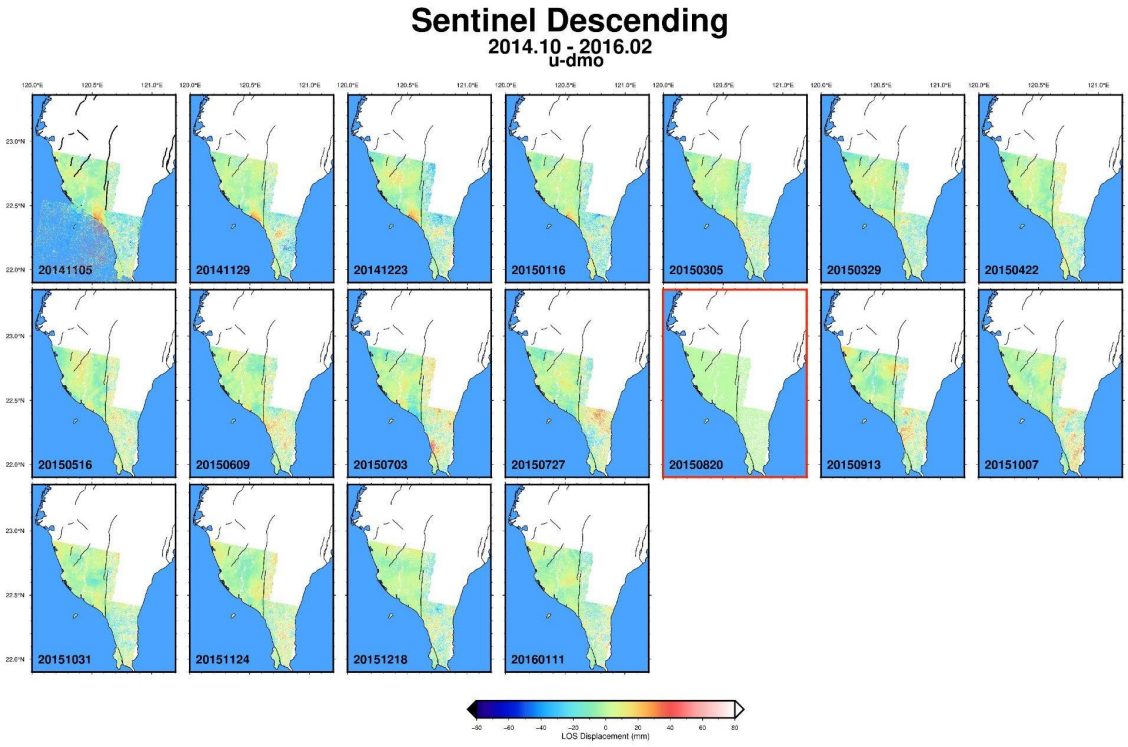
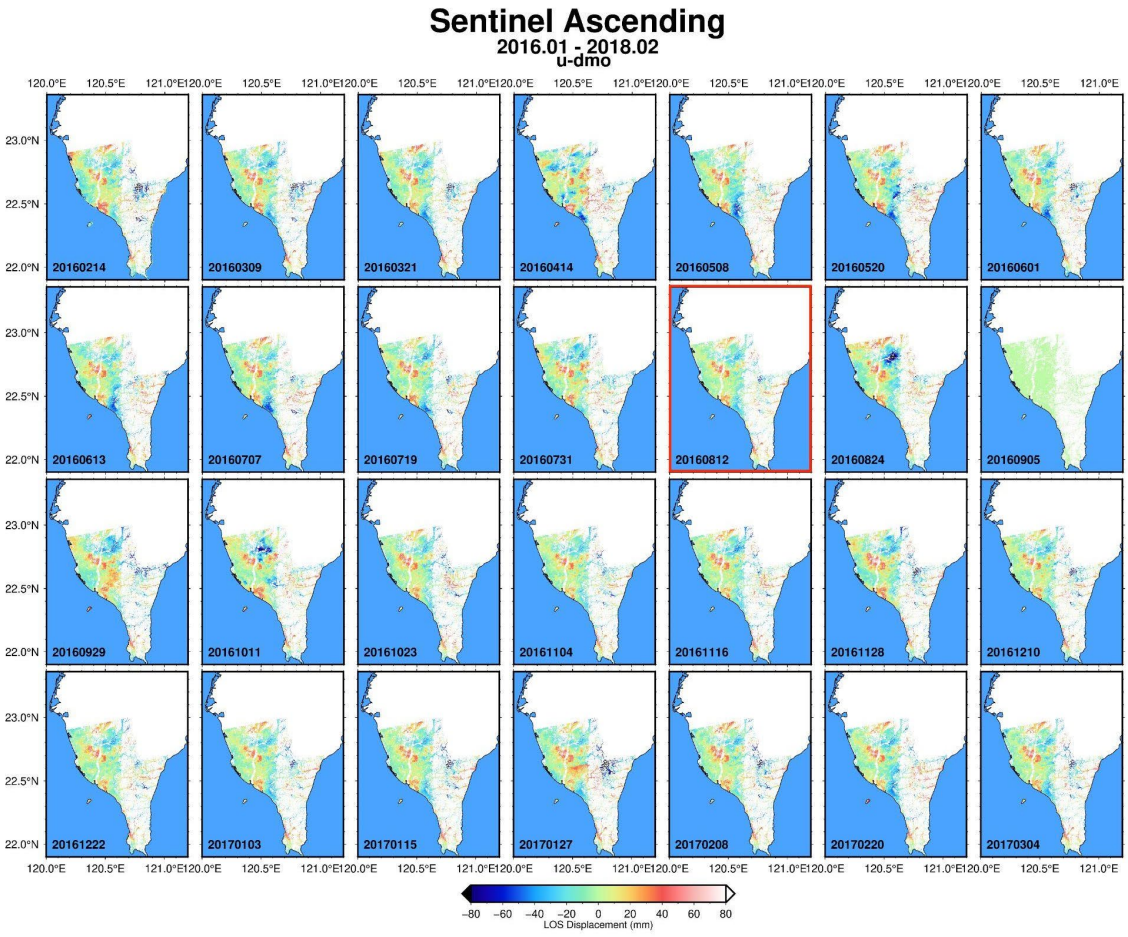


圖 8. 2014-2016 之降軌時間序列，主影像為 2015 年 8 月 20 日。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。


Sentinel Ascending
2016.01 - 2018.02
u-dmo
20160214
20160309
20160321
20160414
20160508
20160520
20160601
20160613
20160707
20160719
20160731
20160812
20160824
20160905
20160929
20161011
20161023
20161104
20161116
20161128
20161210
20161222
20170103
20170115
20170127
20170208
20170220
20170304
120.0°E
120.5°E
121.0°E
22.0°N
22.5°N
23.0°N
−80 −60 −40 −20 0 20 40 60 80
LOS Displacement (mm)

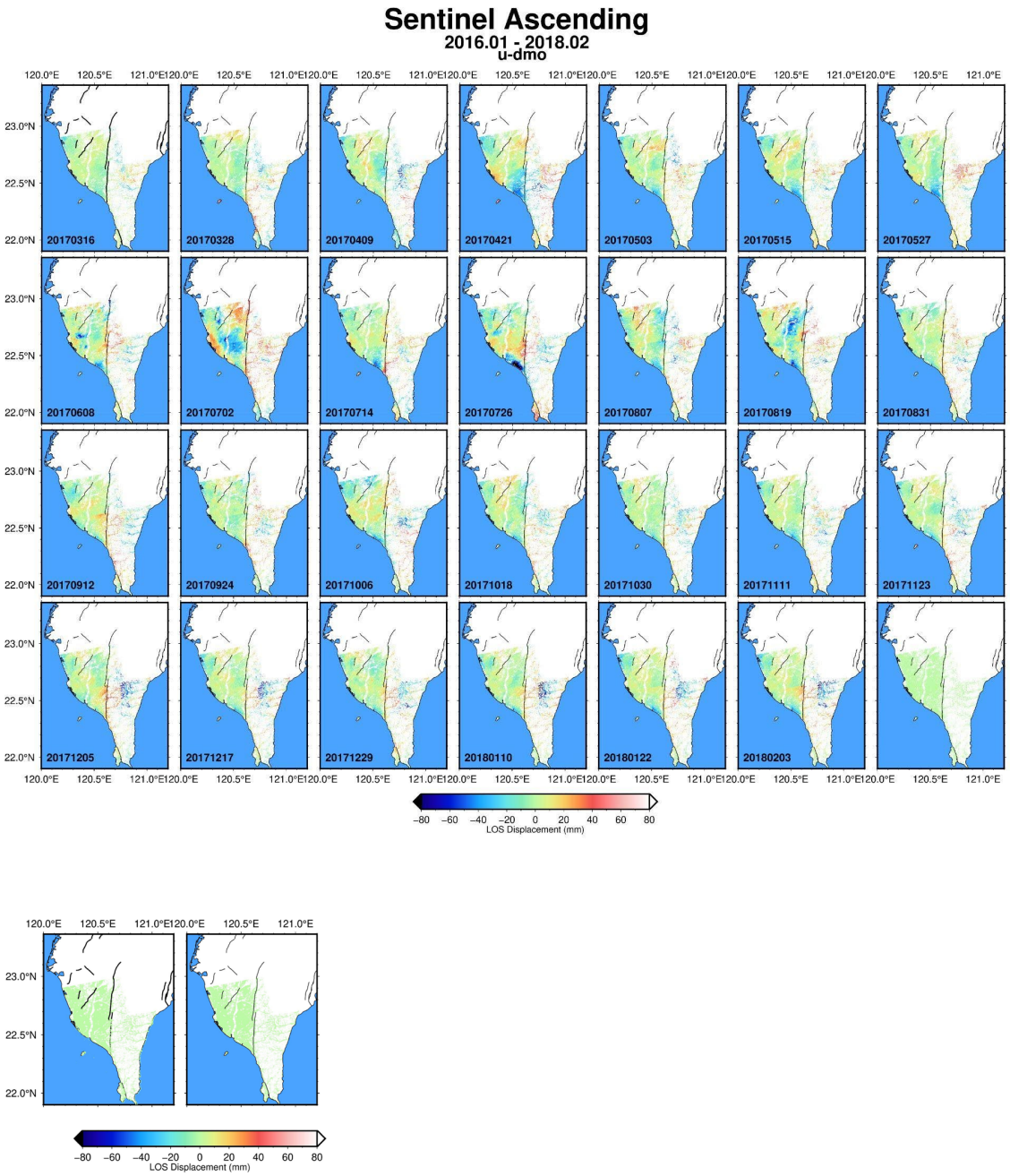
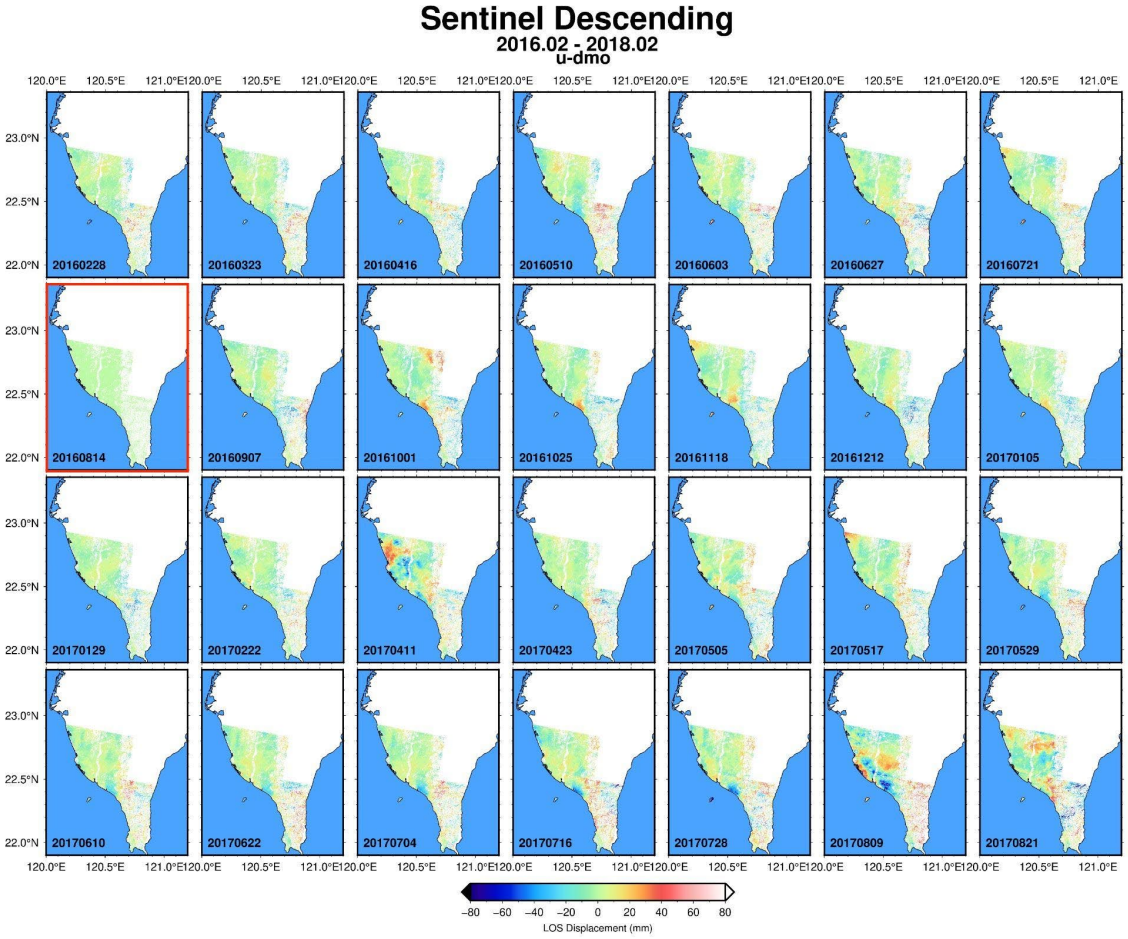


圖 9. 2016-2018 之升軌時間序列，主影像為 2016 年 8 月 12 日。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。



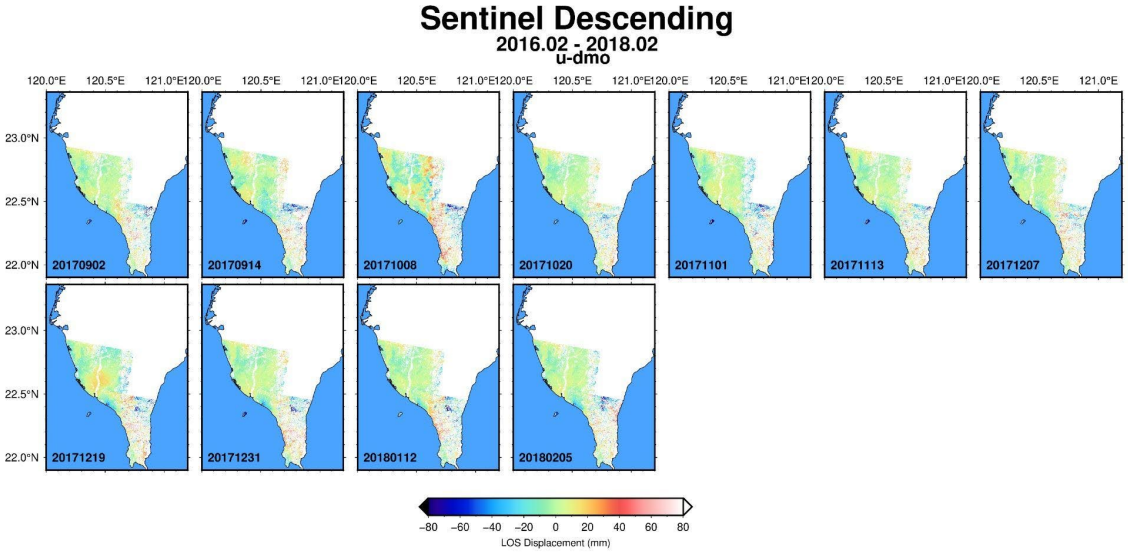
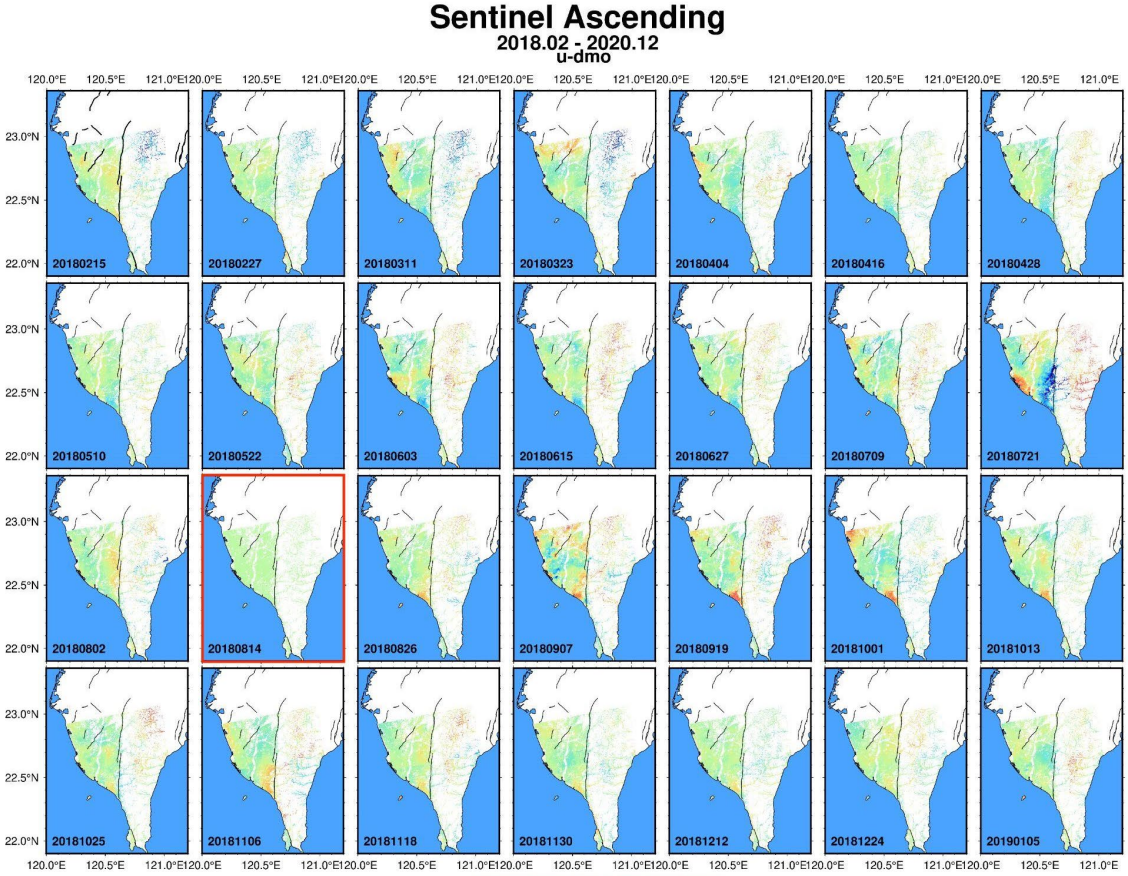
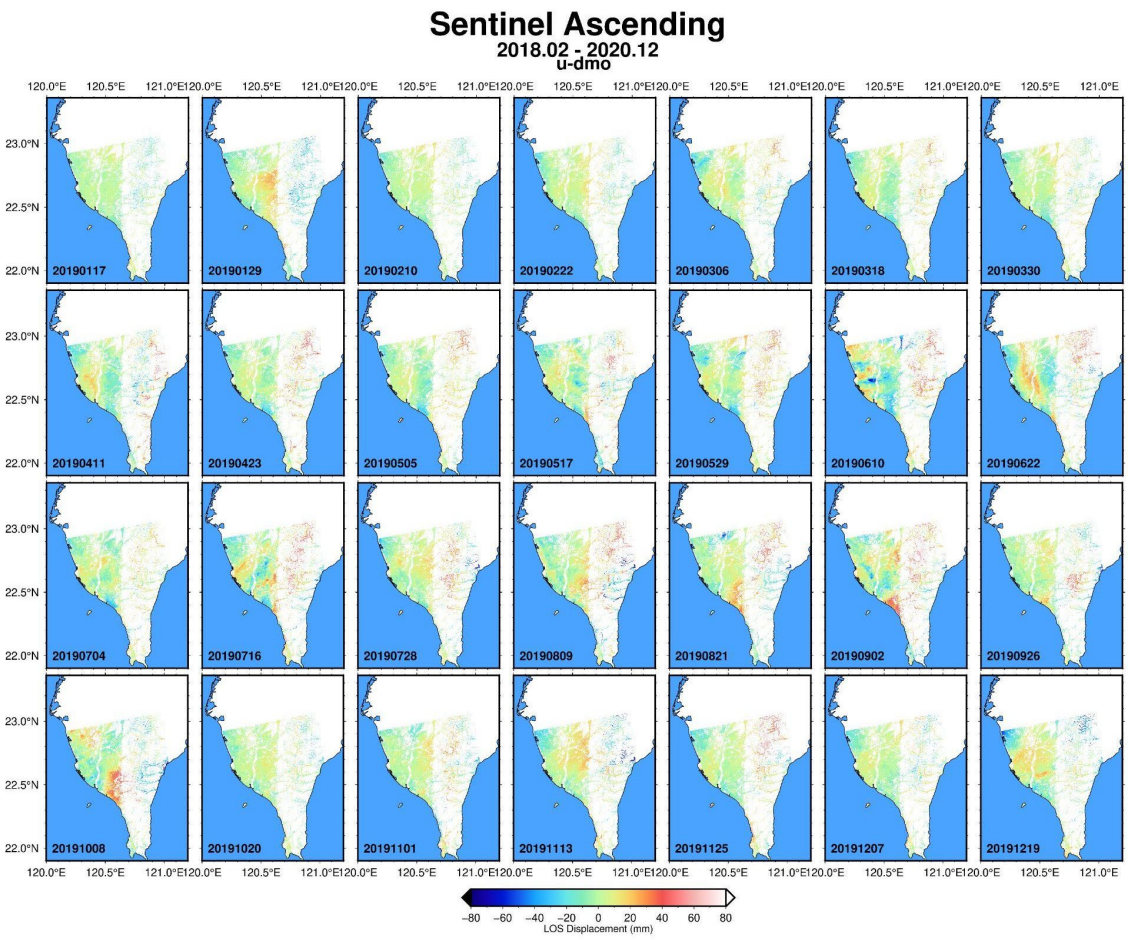
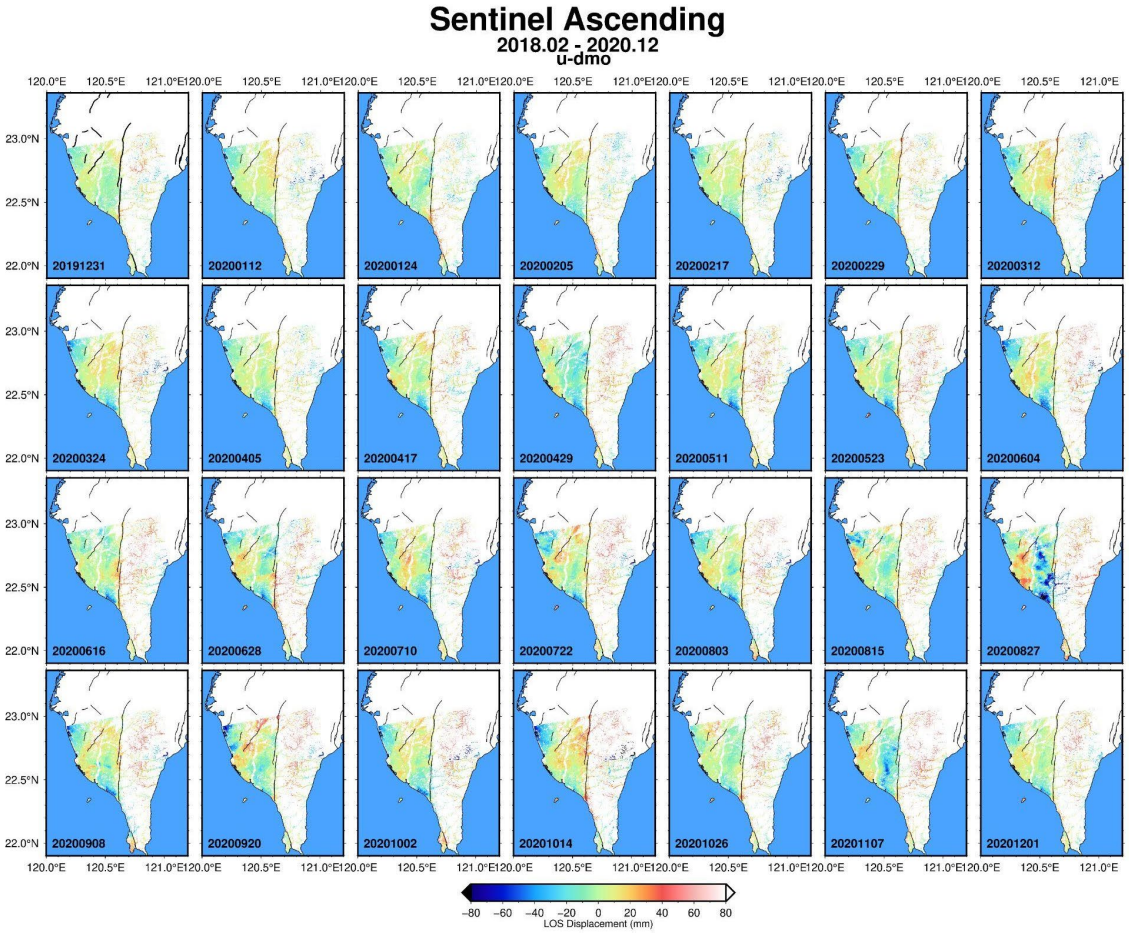


圖 9. 2016-2018 之降軌時間序列，主影像為 2016 年 8 月 14 日。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。


Sentinel Ascending
2018.02 - 2020.12
u-dmo
120.0°E
120.5°E
121.0°E
23.0°N
22.5°N
22.0°N
20180215
20180227
20180311
20180323
20180404
20180416
20180428
20180510
20180522
20180603
20180615
20180627
20180709
20180721
20180802
20180814
20180826
20180907
20180919
20181001
20181013
20181025
20181106
20181118
20181130
20181212
20181224
20190105


Sentinel Ascending
2018.02 - 2020.12
u-dmo
120.0°E
120.5°E
121.0°E
23.0°N
22.5°N
22.0°N
20190117
20190129
20190210
20190222
20190306
20190318
20190330
20190411
20190423
20190505
20190517
20190529
20190610
20190622
20190704
20190716
20190728
20190809
20190821
20190902
20190926
20191008
20191020
20191101
20191113
20191125
20191207
20191219
−80 −60 −40 −20 0 20 40 60 80
LOS Displacement (mm)



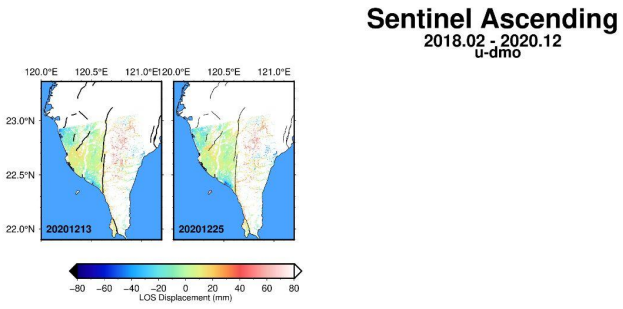
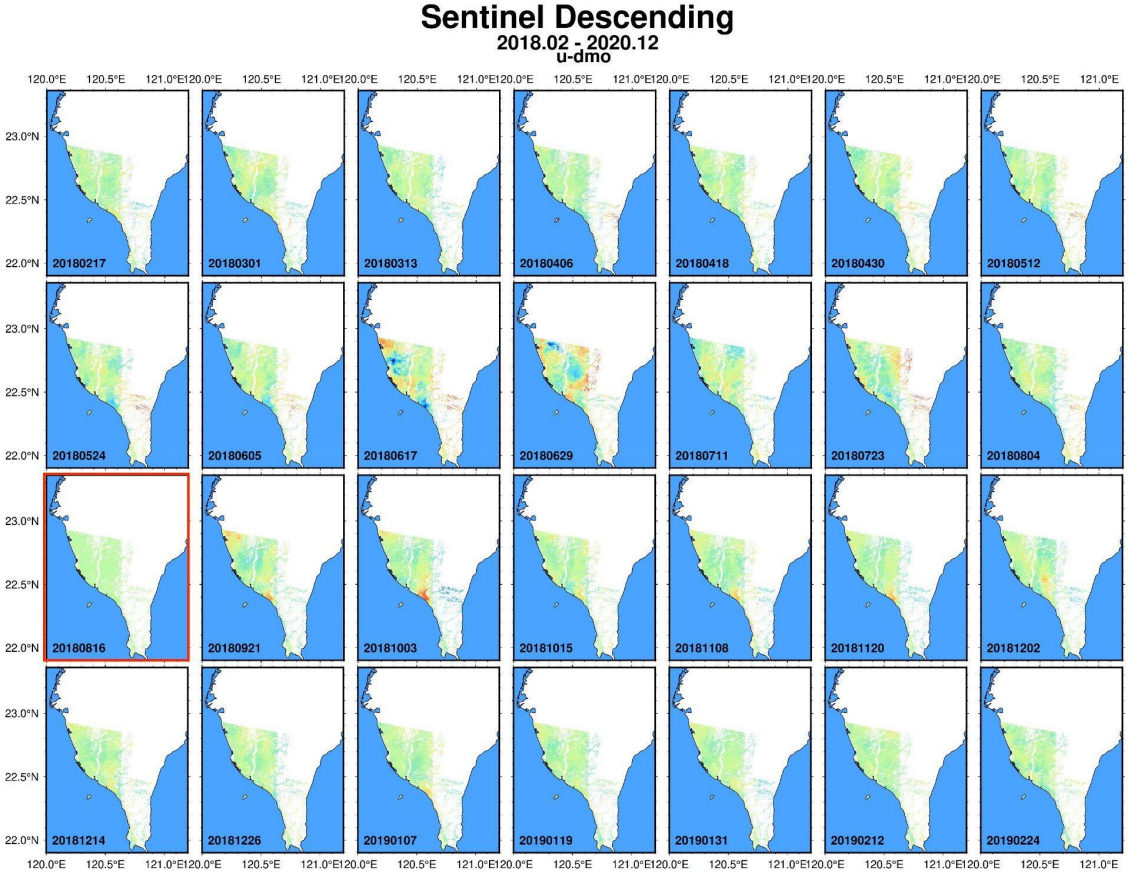
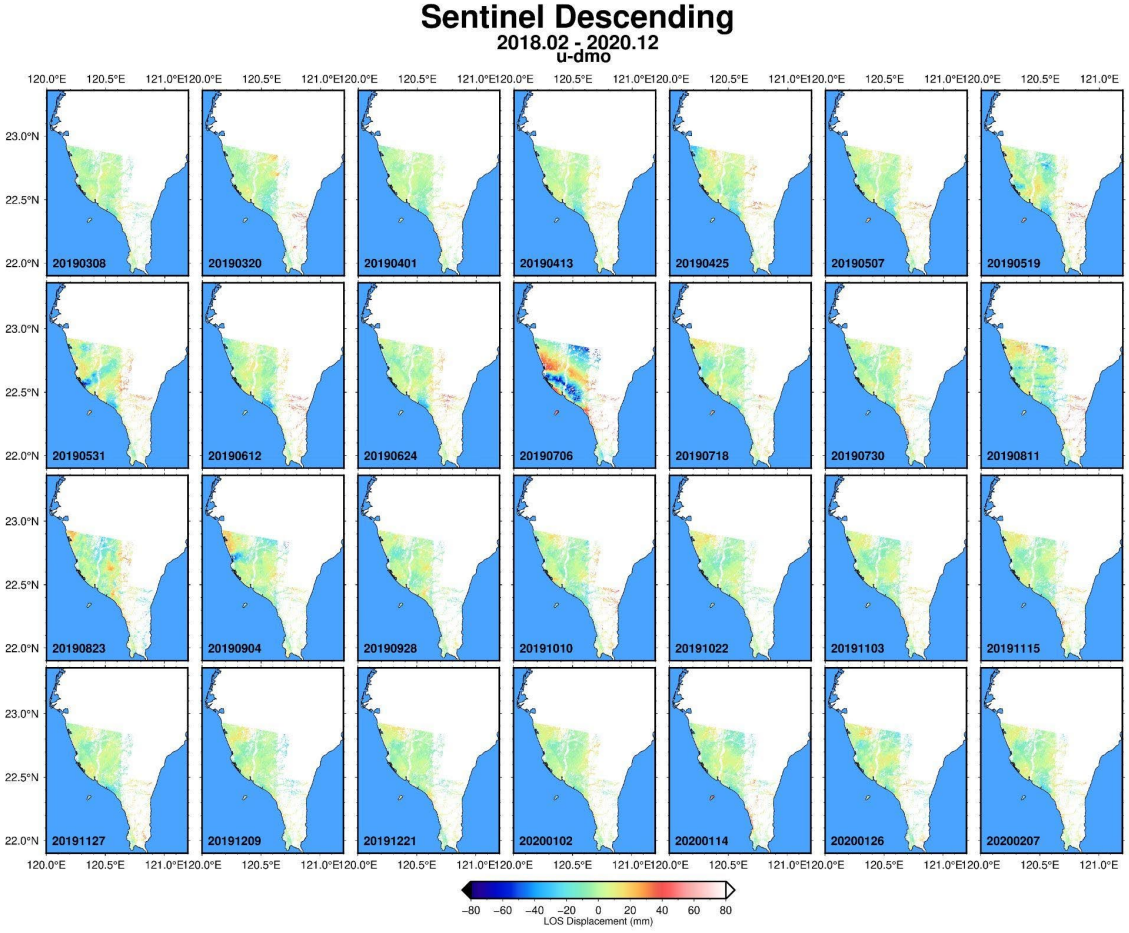


圖 10. 2018-2020 之升軌時間序列，主影像為 2018 年 8 月 14 日。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。


Sentinel Descending
2018.02 - 2020.12
u-dmo
120.0°E
120.5°E
121.0°E
23.0°N
22.5°N
22.0°N
20180217
20180301
20180313
20180406
20180418
20180430
20180512
20180524
20180605
20180617
20180629
20180711
20180723
20180804
20180816
20180921
20181003
20181015
20181108
20181120
20181202
20181214
20181226
20190107
20190119
20190131
20190212
20190224


Sentinel Descending
2018.02 - 2020.12
u-dmo
120.0°E 120.5°E 121.0°E
23.0°N
22.5°N
22.0°N
20190308
20190320
20190401
20190413
20190425
20190507
20190519
20190531
20190612
20190624
20190706
20190718
20190730
20190811
20190823
20190904
20190928
20191010
20191022
20191103
20191115
20191127
20191209
20191221
20200102
20200114
20200126
20200207
−80 −60 −40 −20 0 20 40 60 80
LOS Displacement (mm)

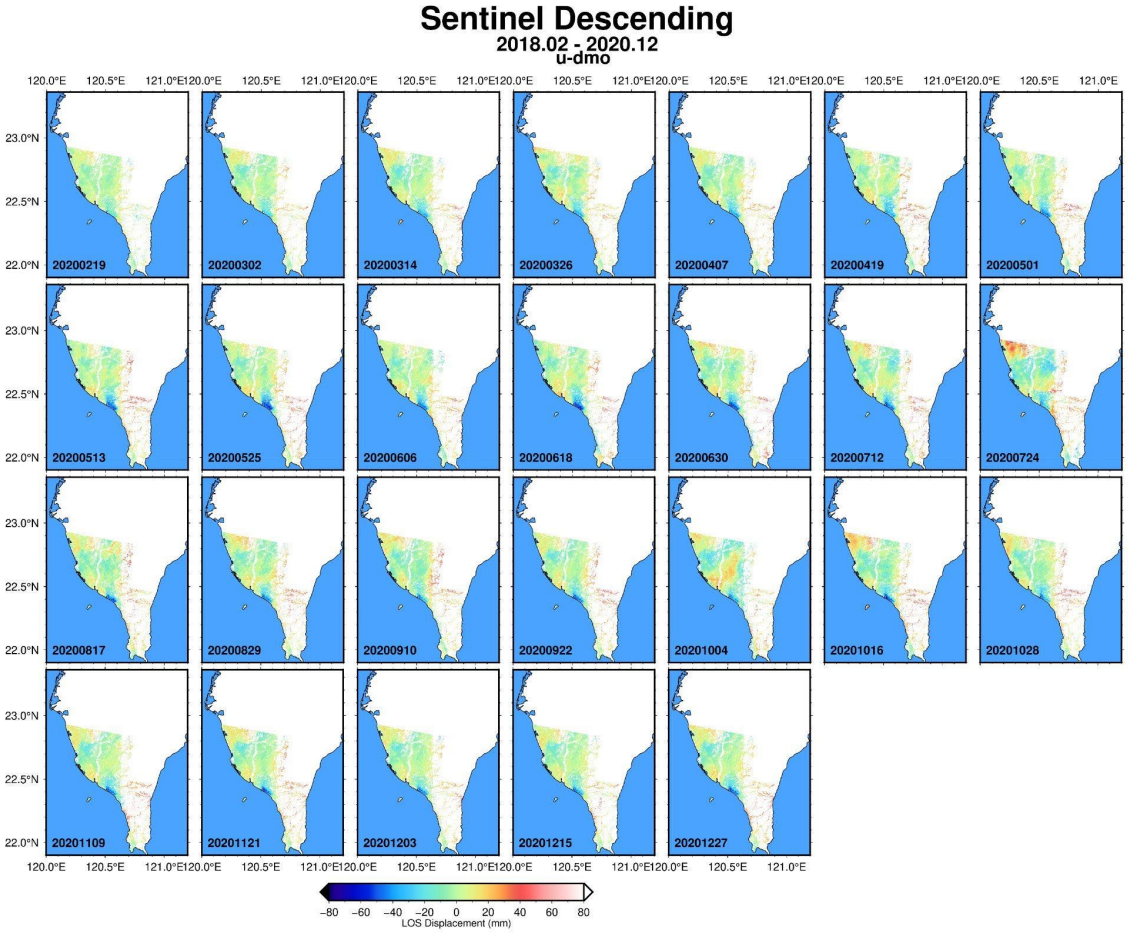
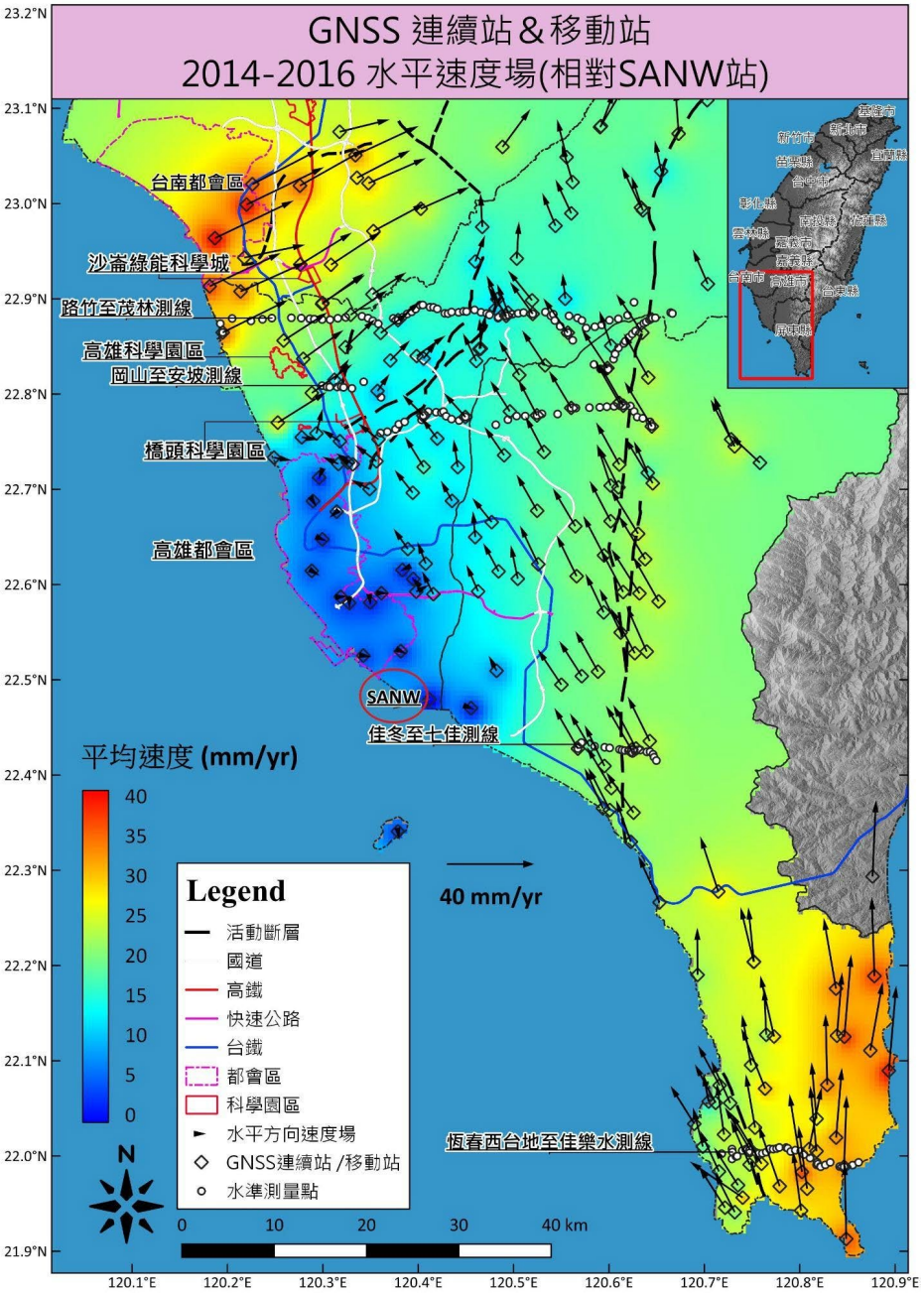


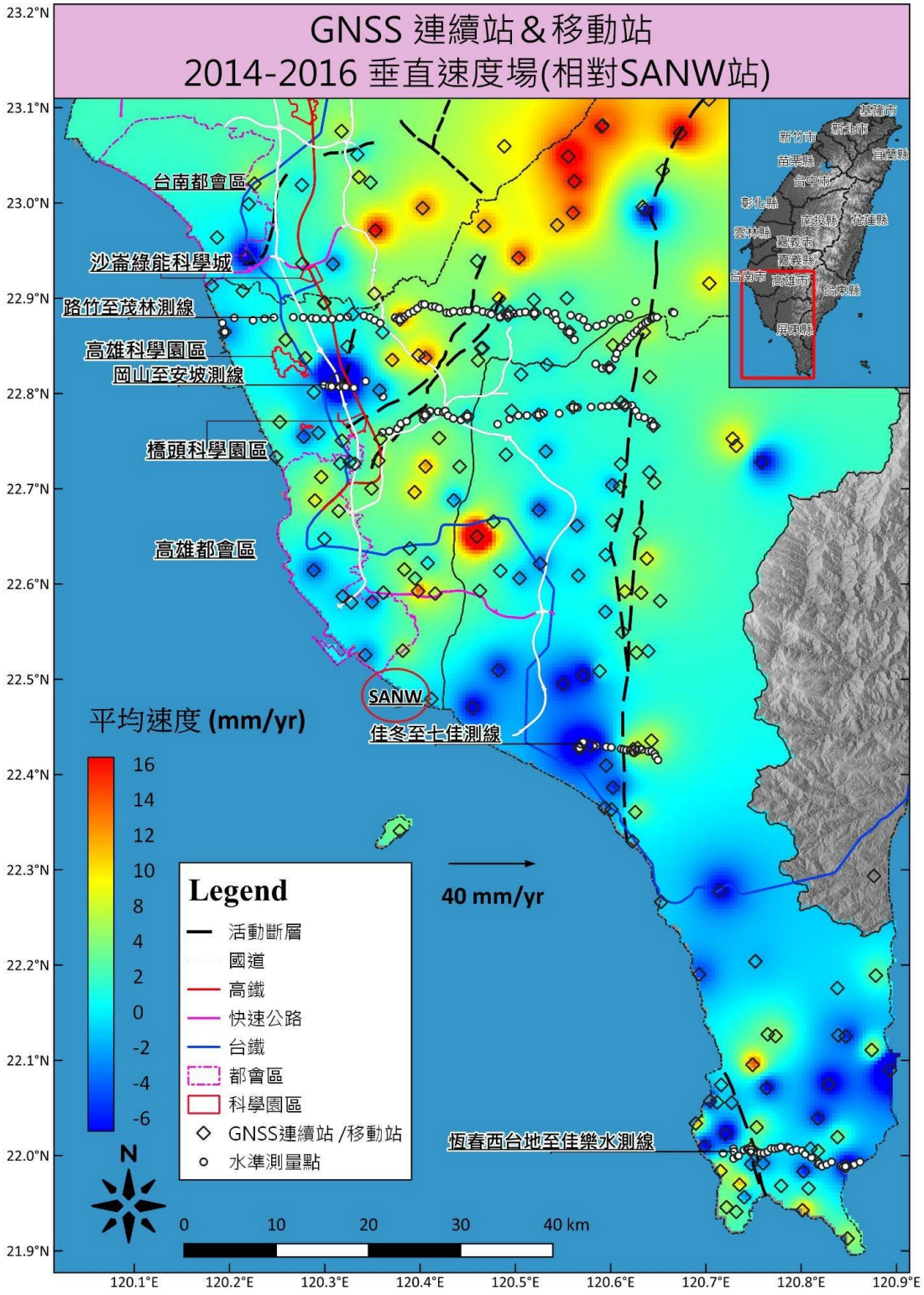
圖 11. 2018-2020 之降軌時間序列，主影像為 2018 年 8 月 16 日。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

附錄 B GNSS 連續站與移動站速度場

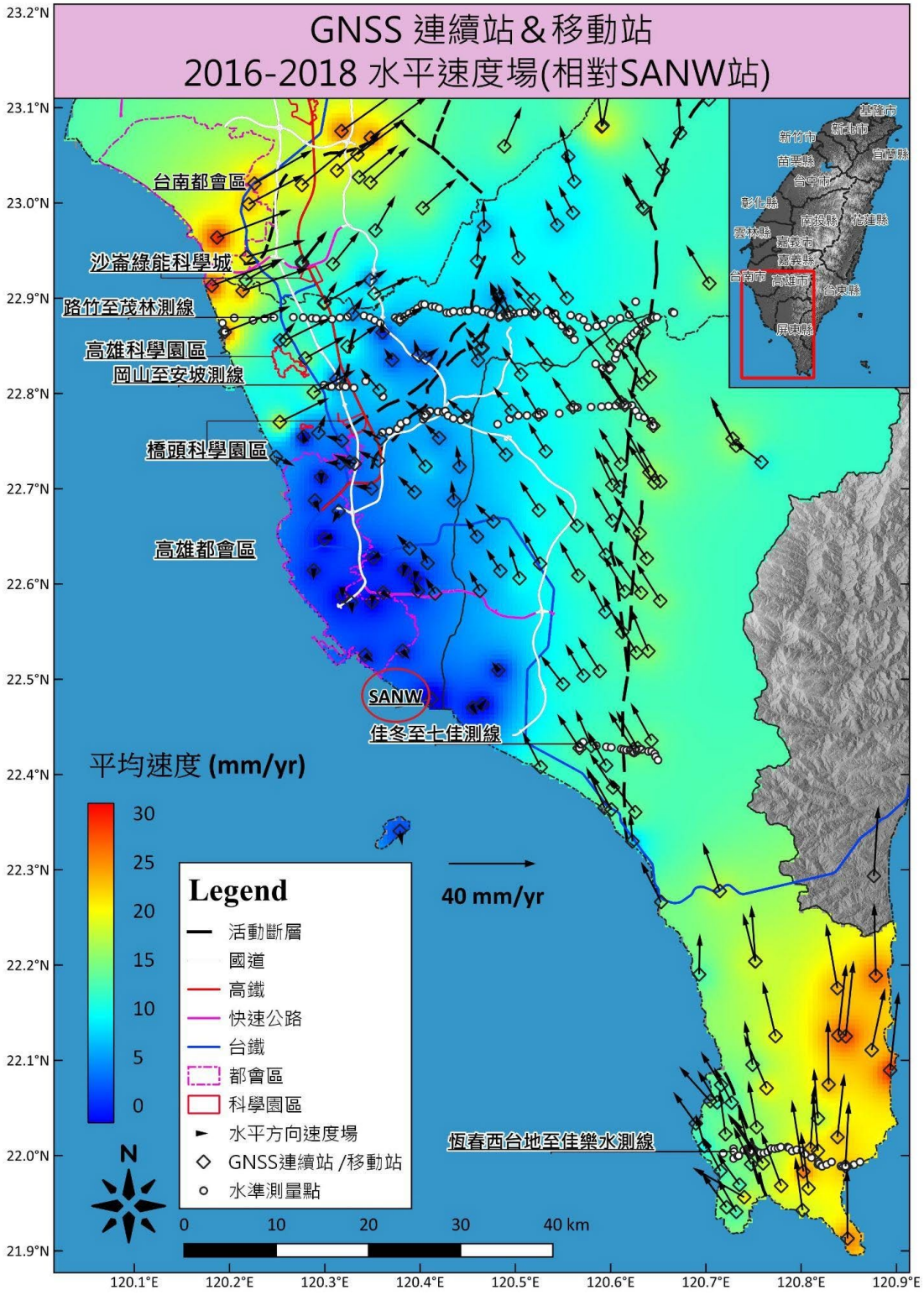
GNSS 連續站與移動站水平速度場



2014-2016 GNSS 測站水平速度場 (連續站+移動站)，內插網格為 1 公里，以 SANW(星號)為參考站。

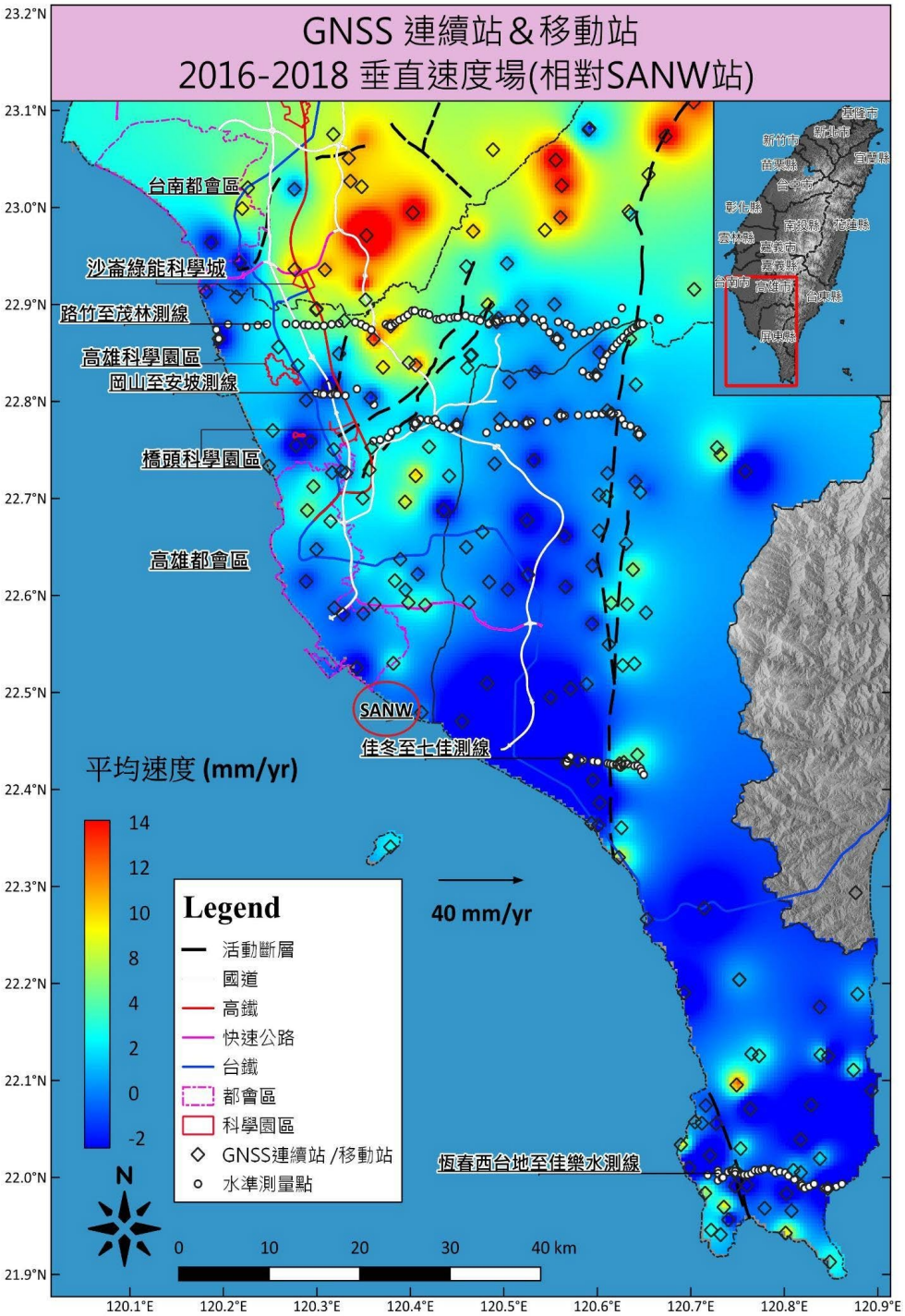


2014-2016 GNSS 測站垂直速度場 (連續站+移動站)，內插網格為 1 公里，以 SANW(星號)為參考站。

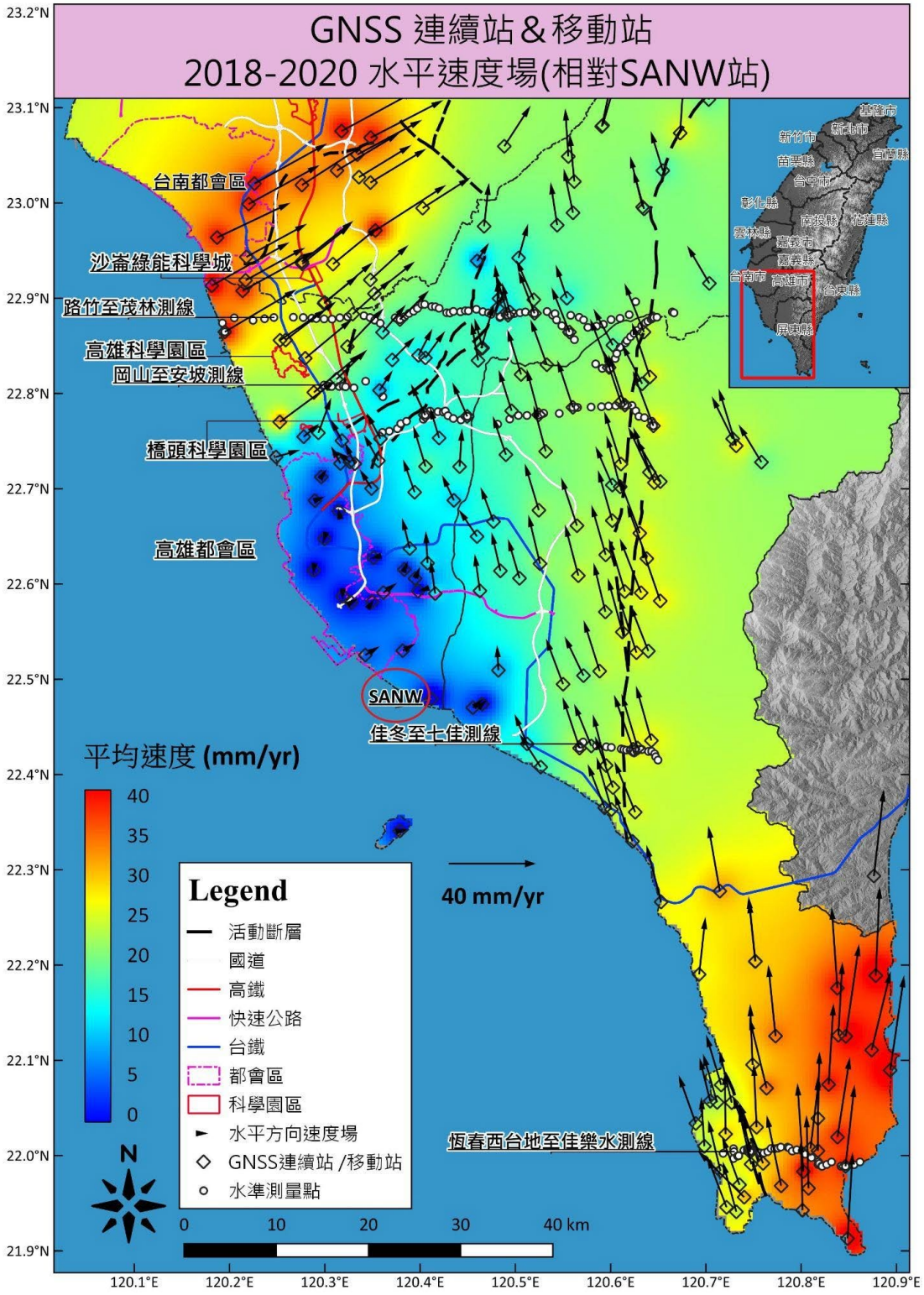


2016-2018 GNSS 測站水平速度場 (連續站+移動站)，內插網格為 1 公里，以SANW(星號)為參考站。

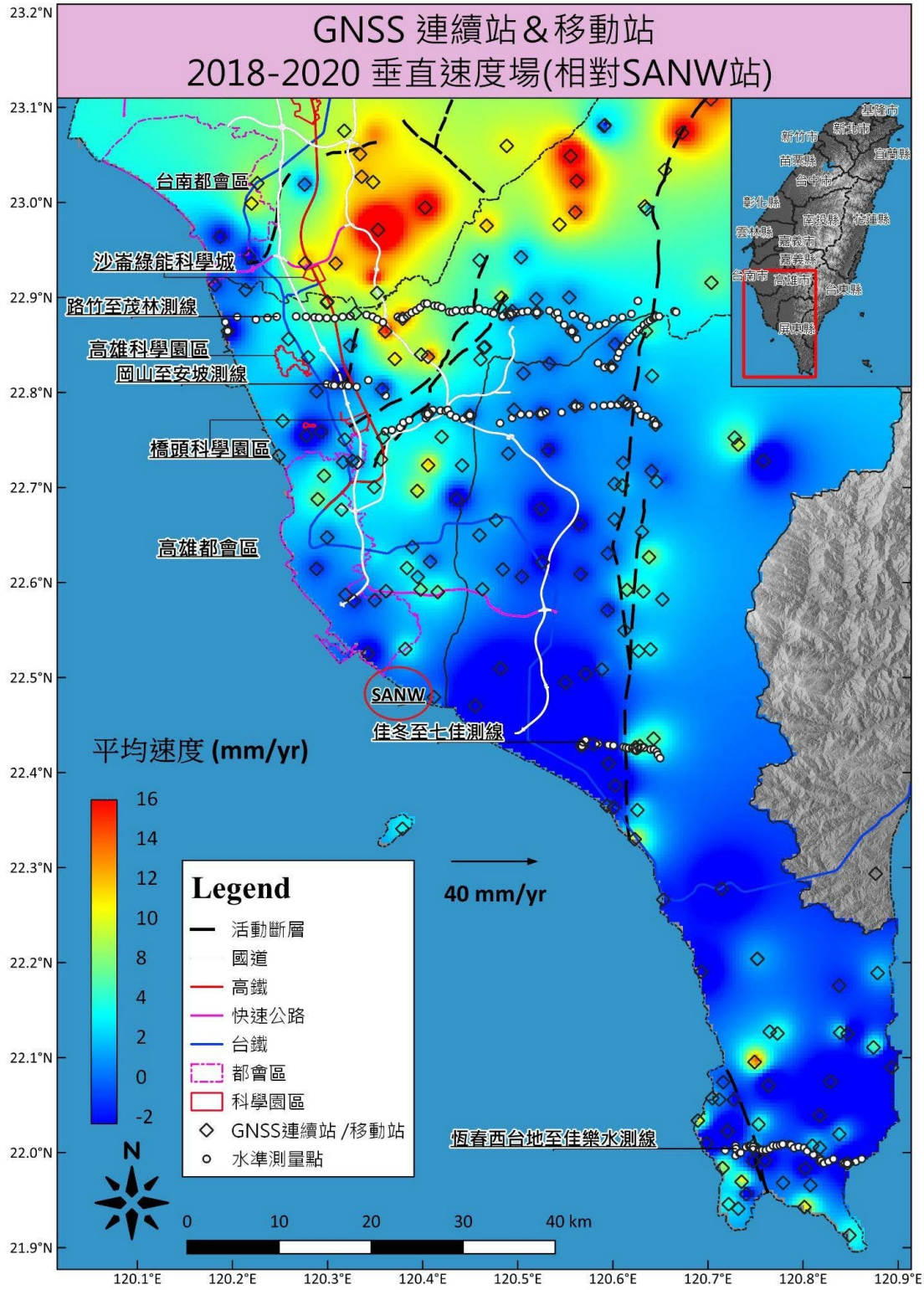
GNSS 連續站與移動站垂直速度場



2016-2018 GNSS 測站垂直速度場 (連續站+移動站)，內插網格為 1 公里，以 SANW(星號)為參考站。



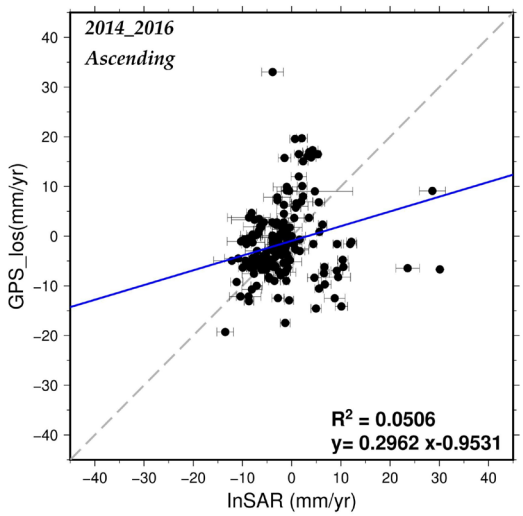
2018-2020 GNSS 測站水平速度場 (連續站+移動站)，內插網格為 1 公里，以 SANW(星號)為參考站。

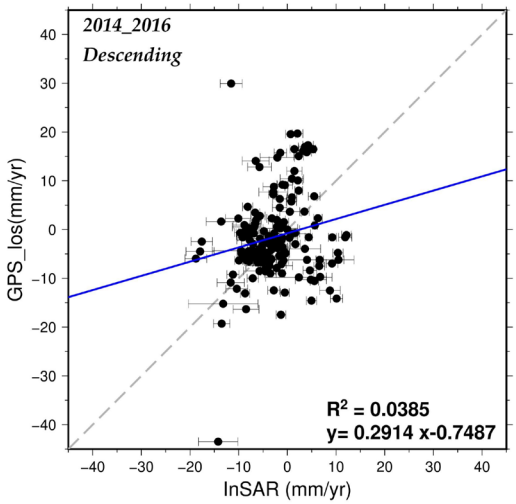


2018-2020 GNSS 測站垂直速度場 (連續站+移動站)，內插網格為 1 公里，以 SANW(星號)為參考站。

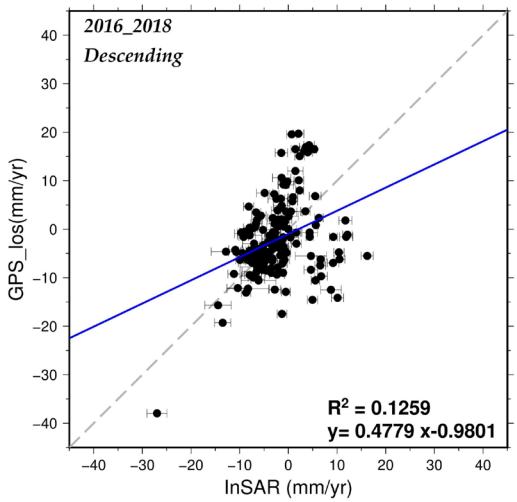
GNSS 連續站、移動站 LOS 與 PSInSAR 資料比對

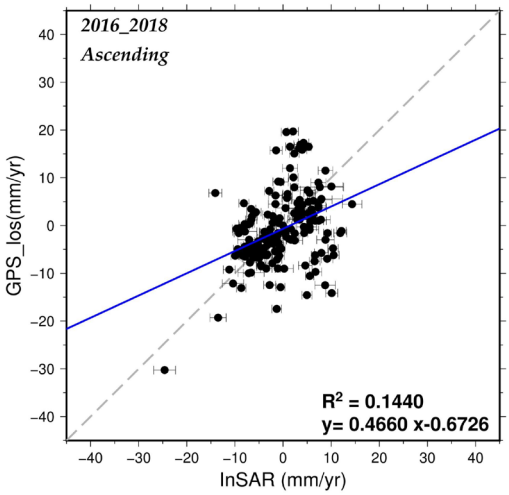
2014-2016



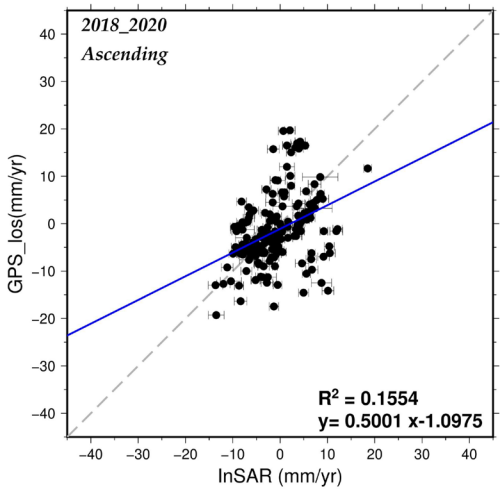


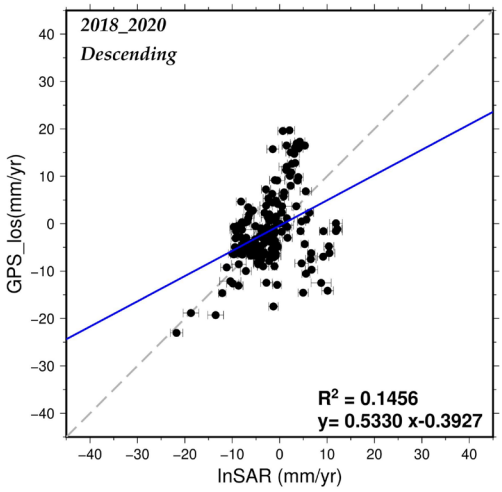
2016-2018



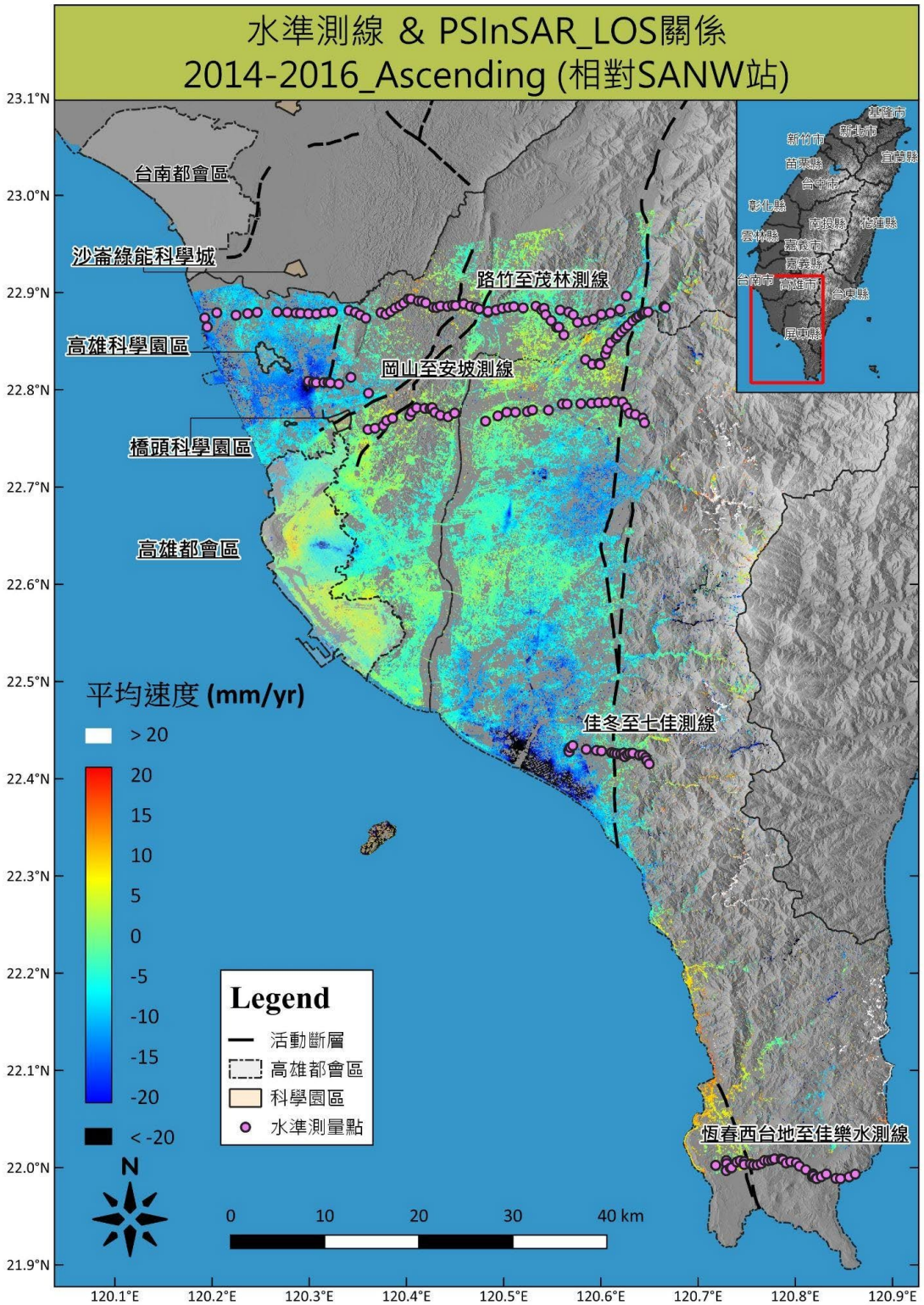


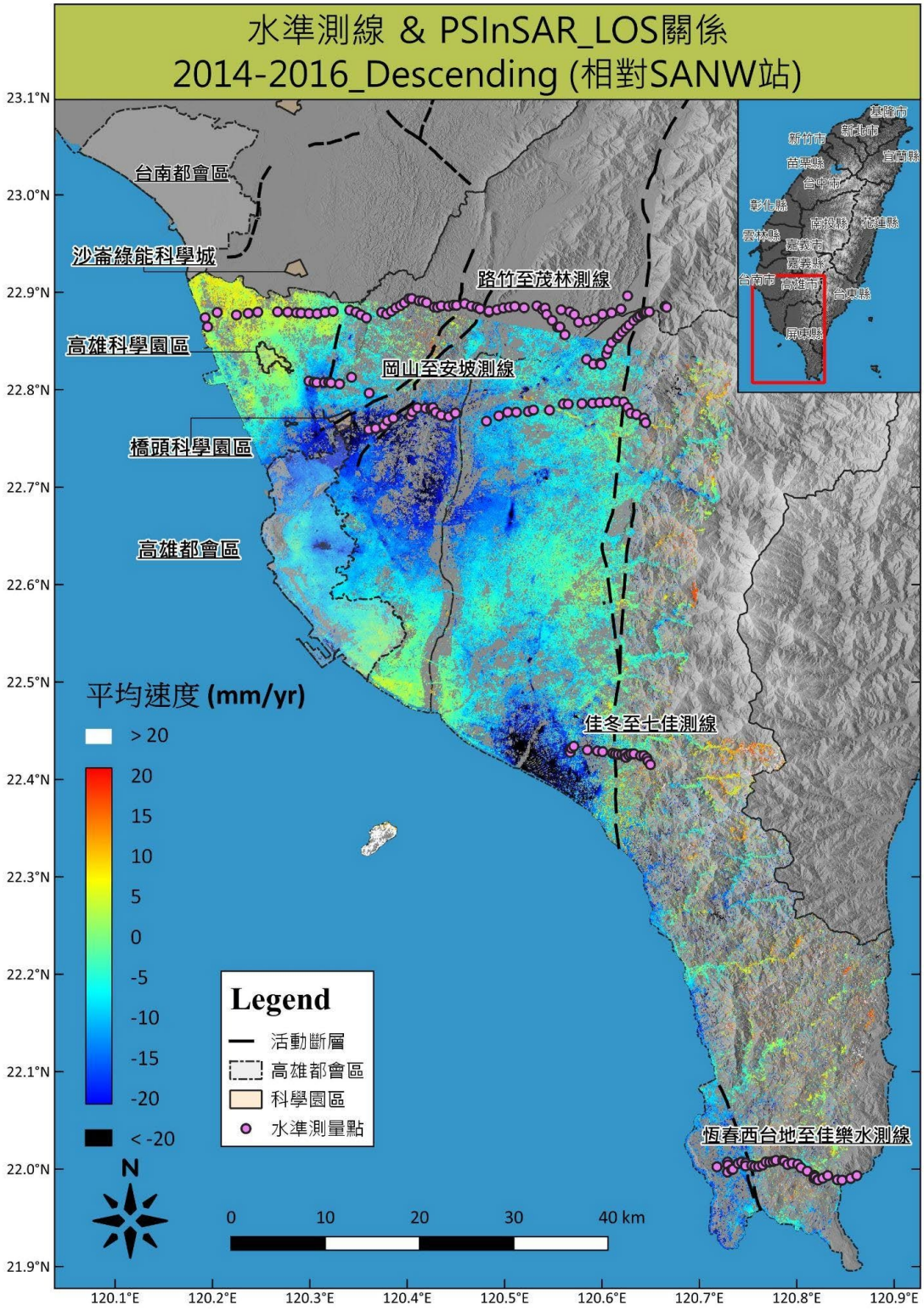
2018-2020

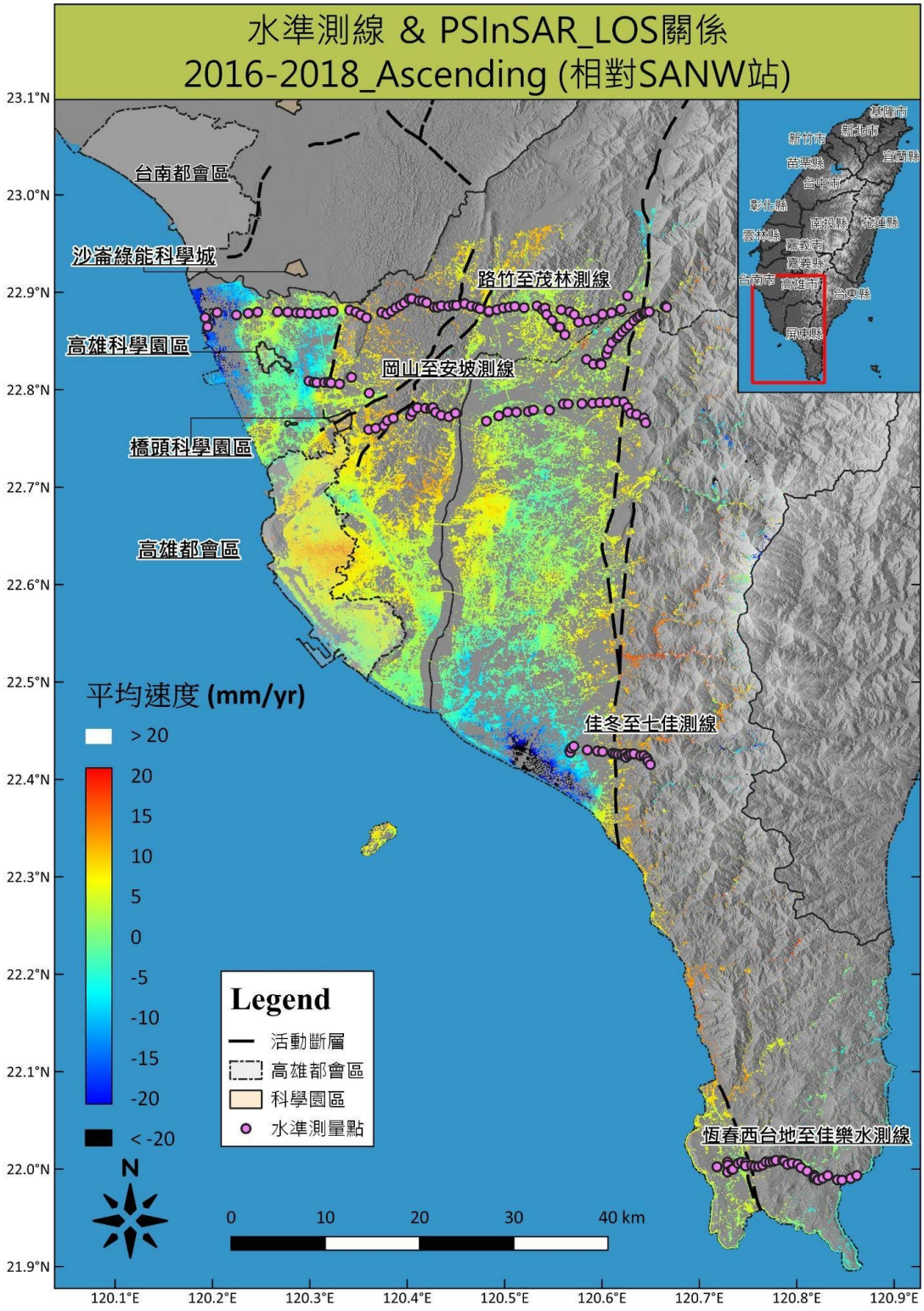

2018_2020
Ascending
GPS_los(mm/yr)
InSAR (mm/yr)
R² = 0.1554
y= 0.5001 x-1.0975

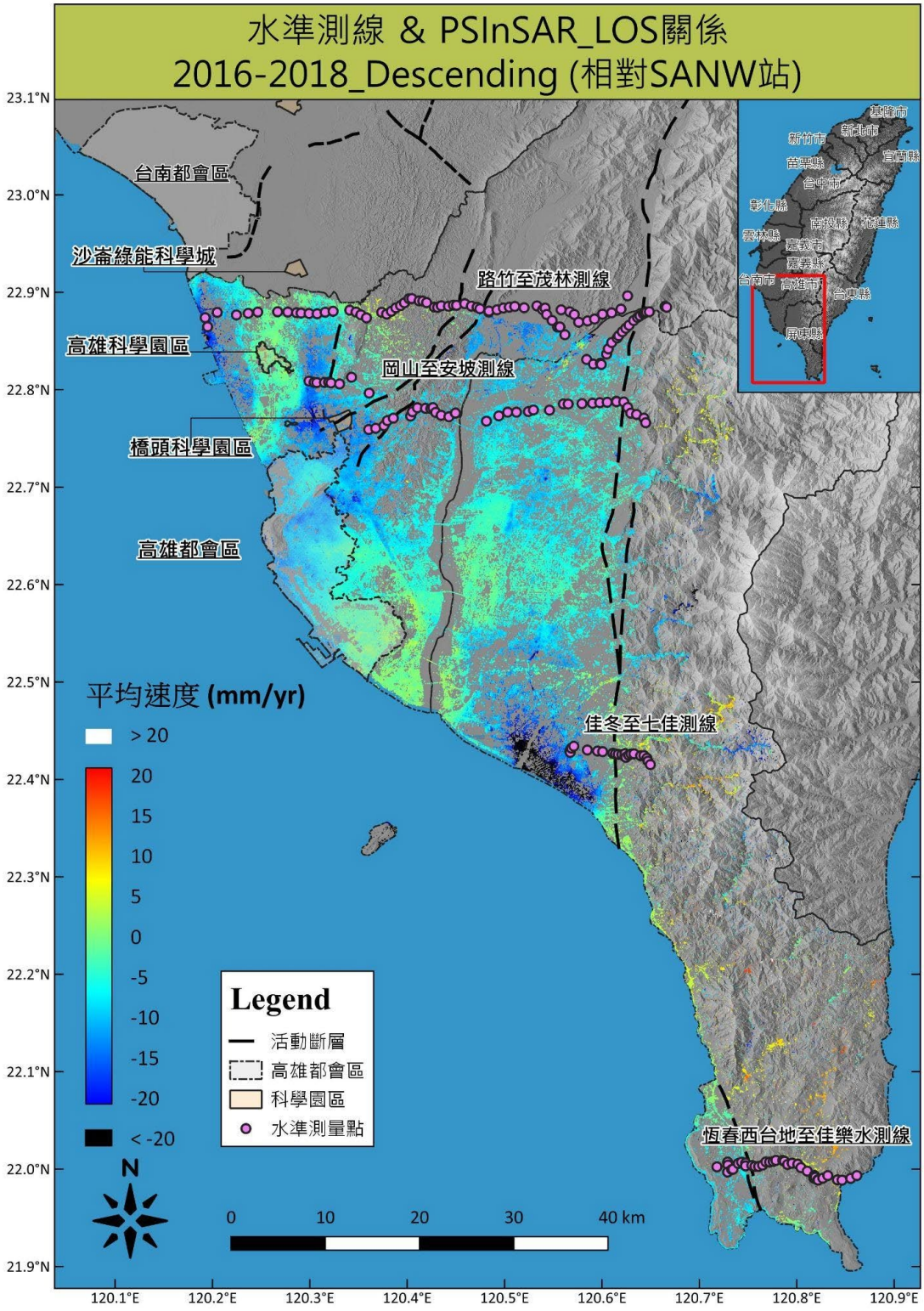

2018_2020
Descending
GPS_los(mm/yr)
InSAR (mm/yr)
R² = 0.1456
y= 0.5330 x-0.3927

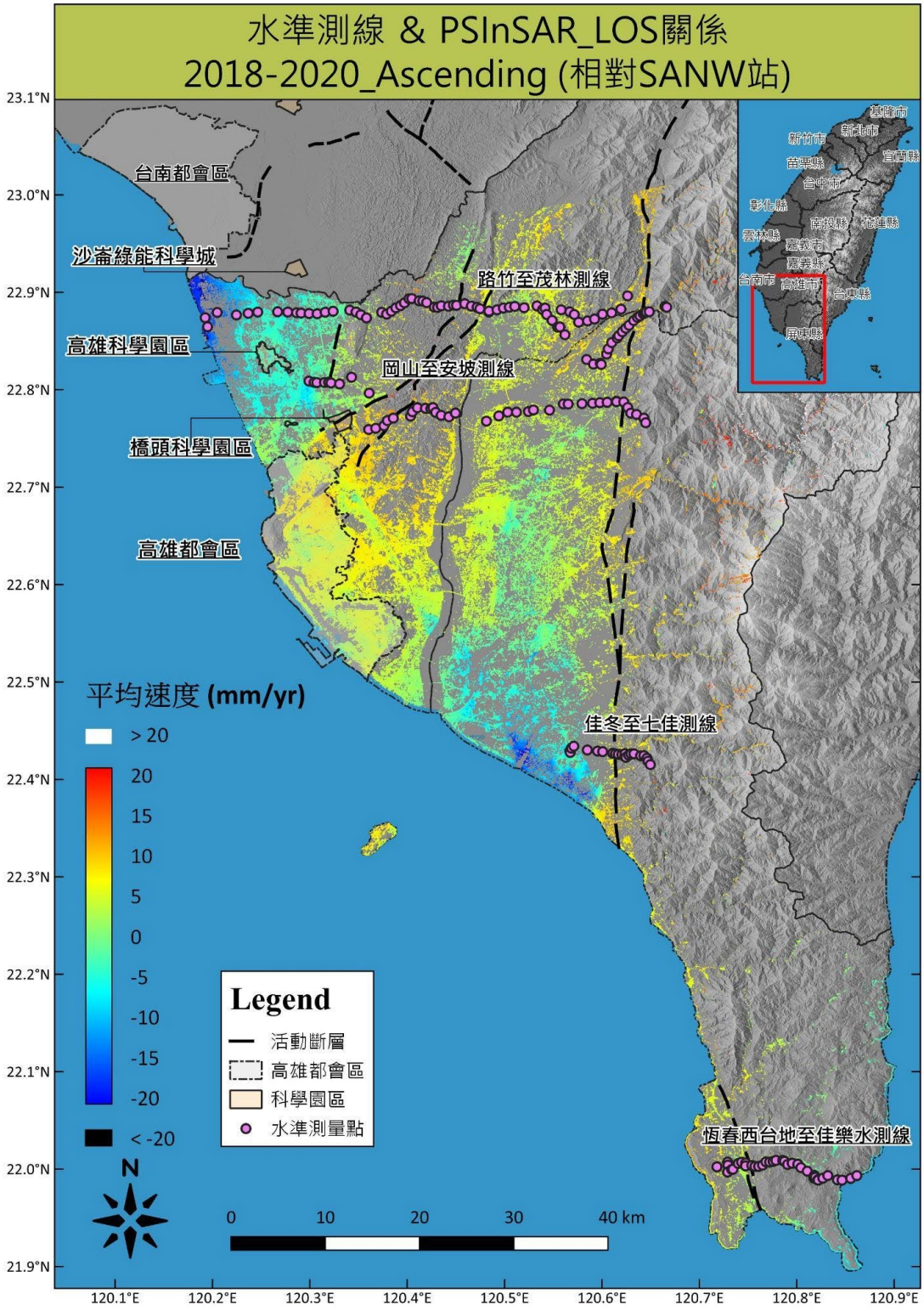
附錄 C 水準測量與雷達資料分布位置圖

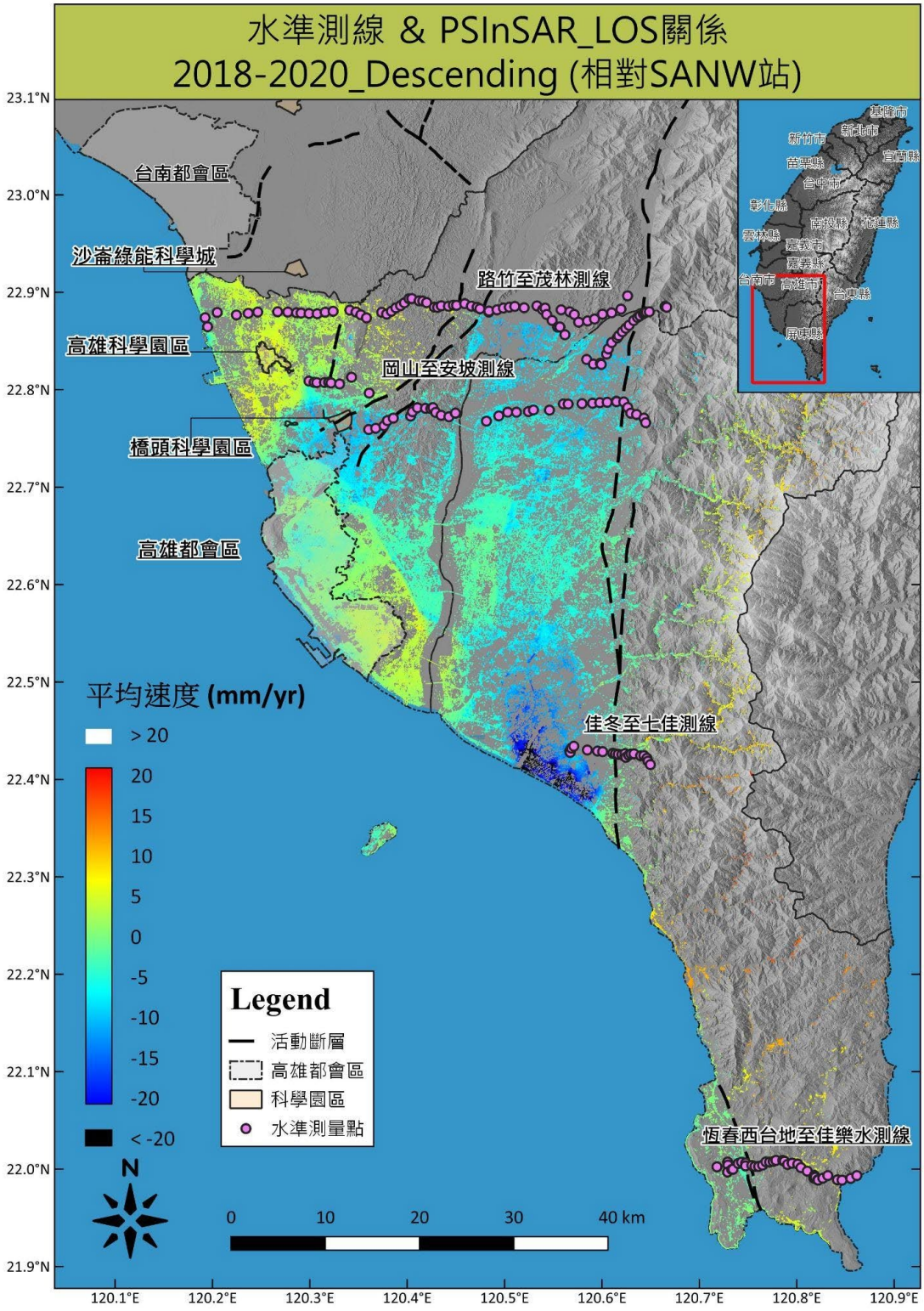



水準測線 & PSInSAR_LOS關係
2014-2016_Descending (相對SANW站)
台南都會區
沙崙線能科學城
路竹至茂林測線
高雄科學園區
岡山至安坡測線
橋頭科學園區
高雄都會區
佳冬至七佳測線
恆春西台地至佳樂水測線
平均速度 (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
高雄都會區
科學園區
水準測量點
N
0
10
20
30
40 km
23.1°N
23.0°N
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
22.5°N
22.4°N
22.3°N
22.2°N
22.1°N
22.0°N
21.9°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E
120.8°E
120.9°E
基隆市
新北市
新竹市
宜蘭縣
苗栗縣
台中市
彰化縣
南投縣
花蓮縣
雲林縣
嘉義市
嘉義縣
台南市
高雄市
台東縣
屏東縣

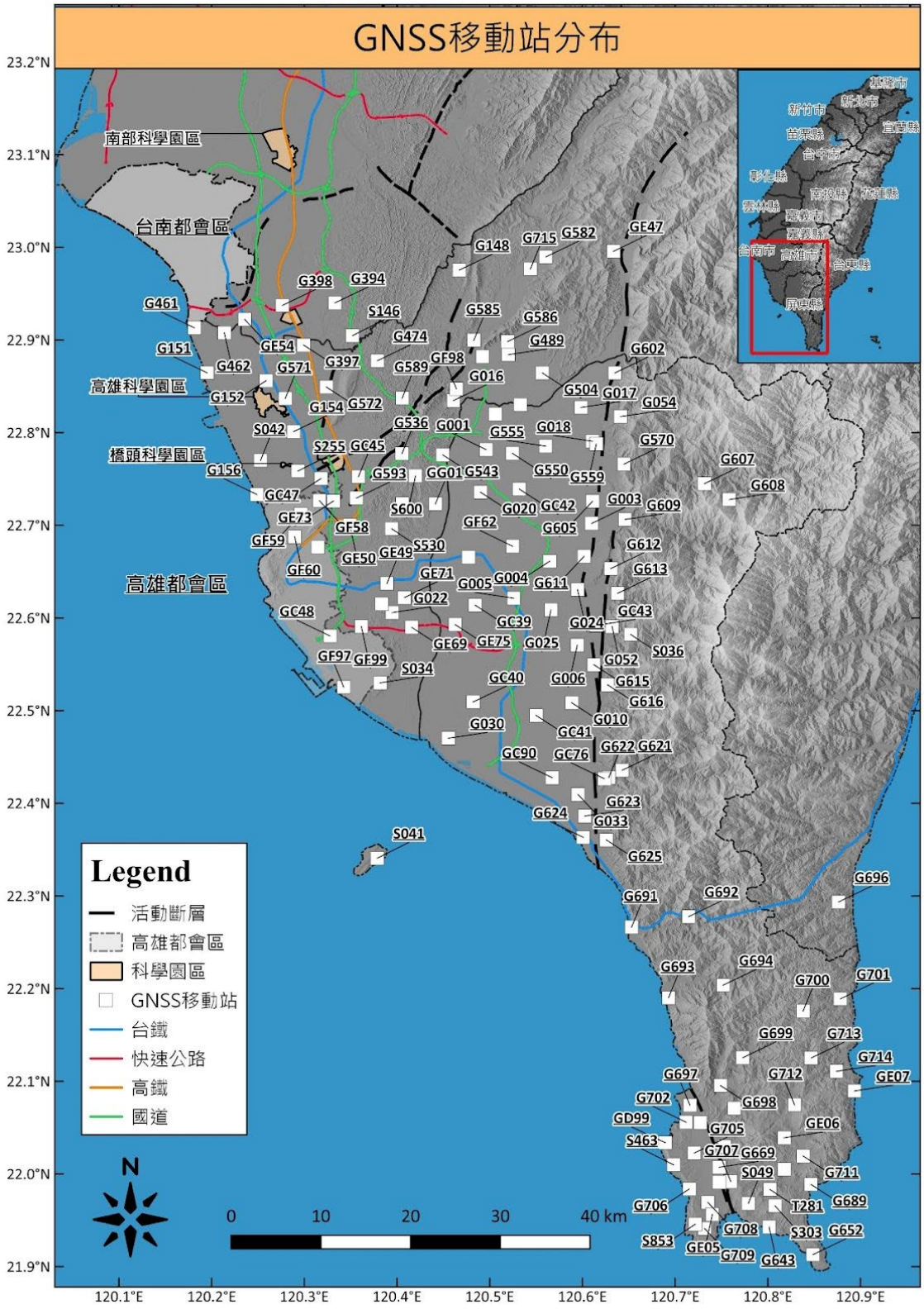

水準測線 & PSInSAR_LOS關係
2016-2018_Ascending (相對SANW站)
台南都會區
沙崙線能科學城
路竹至茂林測線
高雄科學園區
岡山至安坡測線
橋頭科學園區
高雄都會區
佳冬至七佳測線
恆春西台地至佳樂水測線
平均速度 (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
高雄都會區
科學園區
水準測量點
N
0
10
20
30
40 km
23.1°N
23.0°N
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
22.5°N
22.4°N
22.3°N
22.2°N
22.1°N
22.0°N
21.9°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E
120.8°E
120.9°E

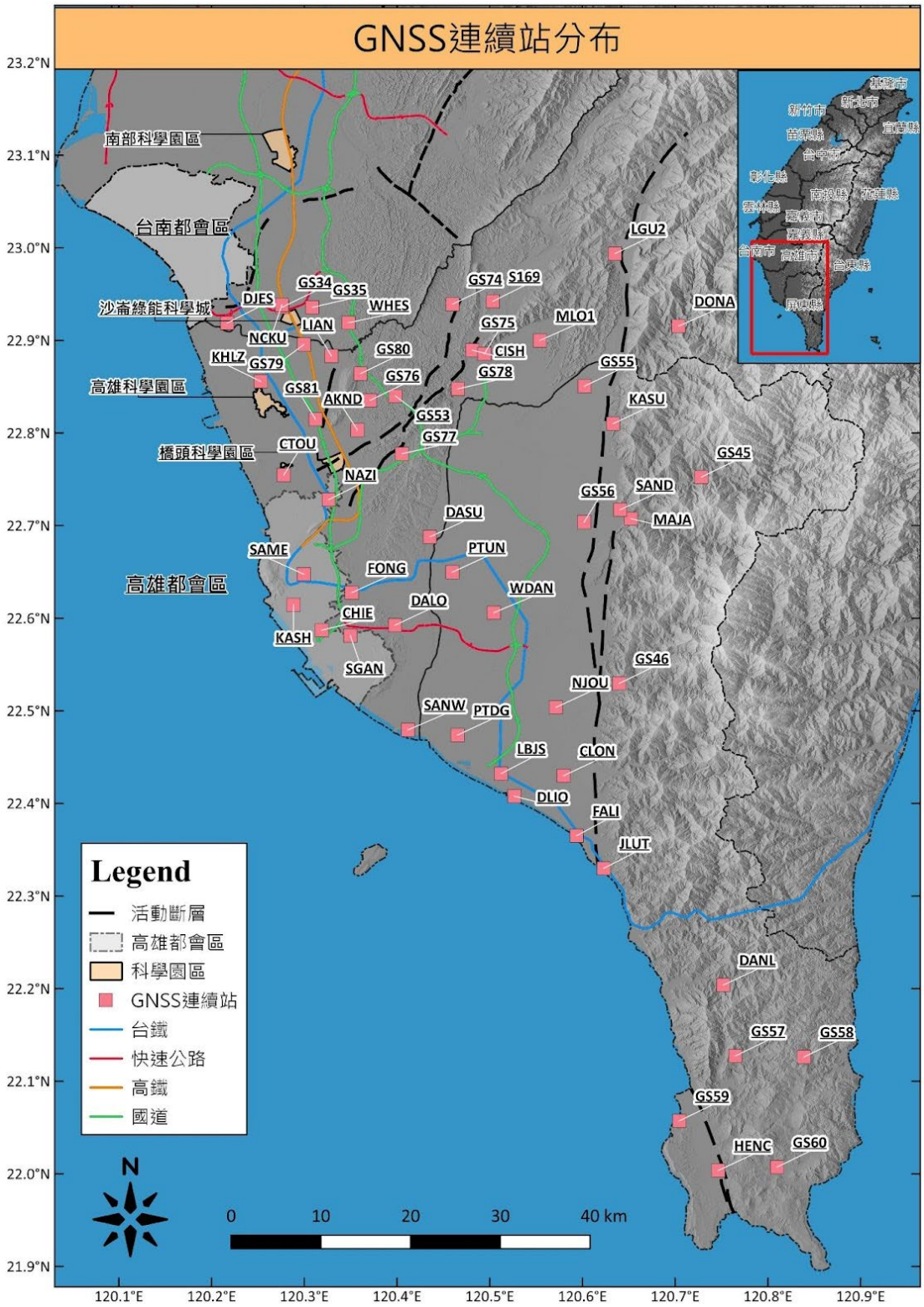

水準測線 & PSInSAR_LOS關係
2016-2018_Descending (相對SANW站)
台南都會區
沙崙線能科學城
路竹至茂林測線
高雄科學園區
岡山至安坡測線
橋頭科學園區
高雄都會區
佳冬至七佳測線
恆春西台地至佳樂水測線
平均速度 (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
高雄都會區
科學園區
水準測量點
N
0
10
20
30
40 km
23.1°N
23.0°N
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
22.5°N
22.4°N
22.3°N
22.2°N
22.1°N
22.0°N
21.9°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E
120.8°E
120.9°E
基隆市
新北市
新竹市
宜蘭縣
苗栗縣
台中市
彰化縣
南投縣
花蓮縣
雲林縣
嘉義市
嘉義縣
台南市
高雄市
台東縣
屏東縣


水準測線 & PSInSAR_LOS關係
2018-2020_Ascending (相對SANW站)
台南都會區
沙崙線能科學城
路竹至茂林測線
高雄科學園區
岡山至安坡測線
橋頭科學園區
高雄都會區
佳冬至七佳測線
恆春西台地至佳樂水測線
平均速度 (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
高雄都會區
科學園區
水準測量點
N
0
10
20
30
40 km
23.1°N
23.0°N
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
22.5°N
22.4°N
22.3°N
22.2°N
22.1°N
22.0°N
21.9°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E
120.8°E
120.9°E


水準測線 & PSInSAR_LOS關係
2018-2020_Descending (相對SANW站)
台南都會區
沙崙線能科學城
路竹至茂林測線
高雄科學園區
岡山至安坡測線
橋頭科學園區
高雄都會區
佳冬至七佳測線
恆春西台地至佳樂水測線
平均速度 (mm/yr)
> 20
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
< -20
Legend
活動斷層
高雄都會區
科學園區
水準測量點
N
0
10
20
30
40 km
23.1°N
23.0°N
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
22.5°N
22.4°N
22.3°N
22.2°N
22.1°N
22.0°N
21.9°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E
120.8°E
120.9°E
基隆市
新北市
新竹市
宜蘭縣
苗栗縣
台中市
彰化縣
南投縣
花蓮縣
雲林縣
嘉義市
嘉義縣
台南市
高雄市
台東縣
屏東縣

附錄 D　GNSS 測站分布圖




GNSS連續站分布
南部科學園區
台南都會區
沙崙綠能科學城
高雄科學園區
橋頭科學園區
高雄都會區
DJES
GS34
GS35
WHES
LIAN
NCKU
KHLZ
GS79
GS81
AKND
CTOU
NAZI
GS80
GS76
GS53
GS77
GS74
S169
GS75
CISH
GS78
MLO1
LGU2
DONA
GS55
KASU
GS45
SAND
GS56
MAJA
DASU
PTUN
WDAN
SAME
FONG
DALO
CHIE
KASH
SGAN
GS46
NJOU
SANW
PTDG
LBJS
CLON
DLIO
FALI
JLUT
DANL
GS57
GS58
GS59
HENC
GS60
Legend
活動斷層
高雄都會區
科學園區
GNSS連續站
台鐵
快速公路
高鐵
國道
N
0
10
20
30
40 km
23.2°N
23.1°N
23.0°N
22.9°N
22.8°N
22.7°N
22.6°N
22.5°N
22.4°N
22.3°N
22.2°N
22.1°N
22.0°N
21.9°N
120.1°E
120.2°E
120.3°E
120.4°E
120.5°E
120.6°E
120.7°E
120.8°E
120.9°E

附錄 E　ALOS 衛星 PSInSAR 結果

時間序列

