計畫編號：B11131

經濟部中央地質調查所

111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(2/2)」

(第二年度)

全 程 計 畫：自110 年 4 月至 111 年 12 月止

本年度計畫：自111 年 3 月至 111 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

計畫主持人：顏君毅

中 華 民 國 111 年 12 月

目錄

目錄.....I
圖目錄.....V
表目錄.....XIV
摘要.....XVIII
Abstract.....XIX

第一章、緒論.....1
1-1 計畫整體概述.....1
1-2 計畫目的.....5
1-3 110年度計畫成果概述.....6
1-4 計畫工作方法概述.....13
1-4-1 合成孔徑雷達差分干涉(Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR).....13
1-4-2 多時序雷達差分干涉技術 (Multi-Temporal InSAR).....14
1-4-3 小基線雷達差分干涉技術 (Small BAseline Subset, SBAS).....17
1-4-4 解算垂直變形速率.....18
1-4-5 資料比對.....18
1-4-6 斷層幾何與滑移量模擬.....19
1-5 本年度計畫概述.....20
1-5-1 本年度研究區域背景簡介.....20
1-5-1-1 大尖山斷層.....21
1-5-1-2 觸口斷層.....24
1-5-1-3 崙後斷層.....27
1-5-1-4 口宵里段層.....29
1-5-1-5 左鎮斷層.....31
1-5-1-6 九芎坑斷層.....33
1-5-1-7 梅山斷層.....36
1-5-1-8 木屐寮斷層.....39
1-5-1-9 六甲斷層.....41
1-5-1-10 新化斷層.....43
1-5-1-11 後甲里斷層.....46
1-5-2 本年度工作項目.....48
1-5-2-1 本年度計畫期中交付工作項目.....48
1-5-2-2 本年度計畫期末交付工作項目.....49

第二章、計畫執行方法及進行步驟 51
2-1 雷達差分干涉 51
2-1-1 永久散射體雷達差分干涉技術 (PSInSAR) 的基本概念.....53
2-1-2 StaMPS技術的PS點位選取概念 55
2-1-3 技術上需克服之困難 59
2-2GNSS、水準測量與雷達差分干涉資料對比 59
2-2-1 工作內容概述 59
2-2-2 資料對比之執行方法及進行步驟 61
2-3 跨斷層之速度剖面分析.....63
2-3-1 方法與執行步驟 63
2-3-2 跨斷層之速度剖面分析 67

第三章、嘉南地區雷達資料與其他大地測量觀測資料比對 69
3-1 GNSS連續站與PSI資料比對.....70
3-1-1 2014-2016年 70
3-1-2 2016-2018年 77
3-1-3 2018-2021年 82
3-2GNSS連續站及移動站與PSI資料比對 87
3-2-1 2014年-2016年.....89
3-2-2 2016年-2018年.....94
3-2-3 2018年-2021年.....99
3-3 水準測量資料與雷達資料比對成果 104
3-3-1金湖至瑞峰測線 106
3-3-2 北門至楠西測線 109
3-3-3 善化至關廟測線 112
3-3-4 安平至龍崎測線 115

第四章 嘉南地區雷達影像分析 119
4-1 STAMPS參數測試與律定 9
4-2 2014-2016年雷達影像成果 120
4-3 2016-2018年雷達影像成果 124
4-4 2018-2021年雷達影像成果 127
4-5 跨斷層的速度場剖面分析.....130
4-5-1 木屐寮斷層(MCL).....130
4-5-2 六甲斷層(LCA) 133
4-5-3 口宵里斷層(KSL).....136
4-5-4 後甲里斷層(HCL) 139

4-6 地質剖面的速度場剖面分析.....142
4-6-1 17號剖面.....144
4-6-2 18號剖面.....146
4-6-3 19, 20, 21號剖面.....147
4-6-4 22號剖面.....151
4-6-5 23號剖面.....153
4-6-6 24號剖面.....155
4-6-7 25號剖面.....157
4-6-8 26號剖面.....159
4-6-9 27號剖面.....161
4-6-10 28號剖面.....163
4-7 重點區域剖面及時間序列分析.....165
4-7-1 重點區域剖面分析.....165
4-7-1-1 沙崙綠能科學城(SL).....166
4-7-1-2 南部科學園區(ST).....166
4-7-1-3 臺南都會區(TN).....166
4-7-1-4 臺南平原(TNP).....166
4-7-1-5 烏山頭水庫(WSTR).....167
4-7-2 重點區域時間序列分析.....170

第五章、垂直速度場解析.....173

第六章、嘉南地區小基線雷達差分干涉技術成果.....181

第七章、二維剖面模擬.....183
7-1 方法與執行步驟.....183
7-2 六甲斷層模擬結果.....186
7-3 木屐寮斷層模擬結果.....188
7-4 口宵里斷層模擬結果.....190

第八章、討論.....193
8-1 雷達結果與其他大地測量資料比較.....193
8-1-1 雷達差分干涉資料與GNSS比對.....193
8-1-2 雷達差分干涉資料與水準測線的比對.....193
8-1-2-1 善化至關廟測線.....194
8-1-2-2 安平至龍崎測線.....194
8-2 雷達影像成果.....194

8-2-1 各時段跨斷層的剖面比較.....194
8-2-1-1 木屐寮斷層.....195
8-2-1-2 六甲斷層.....195
8-2-1-3 口宵里斷層.....196
8-2-1-4 後甲里斷層.....198
8-2-2 地質剖面比較.....199
8-2-3 嘉南地區垂直速度場.....199
8-2-4 小基線雷達差分干涉測試.....200
8-3 斷層錯位模擬.....201
8-4 綜合討論.....202

第九章 結論.....205

Chapter 9 : Conclusions.....206
參考文獻.....207
教育訓練.....213
期中委員審查意見.....215
期中委員審查意見.....219

(附錄請參閱光碟)
附錄A、三維向量於衛星視角方向的影響
附錄B、2022年地震事件
附錄C、各斷層三時期速度剖面成果
附錄D、各地質剖面與PS速度剖面成果
附錄E、重要區域速度剖面與時間序列成果

圖目錄

圖1-1：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。 3
圖1-2：研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。 4
圖1-3：工作團隊與主要工作項目。.....5
圖1-4：(左圖)2018-2020年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。(右圖)2018-2020年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。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。 8
圖1-5：2018-2020 雷達視衛星方向速率與GNSS投影至雷達視衛星方向速率之比較。在去除誤差與雜訊後，兩種資料幾乎相同。 9
圖1-6：圖 6：車瓜林斷層附近地表變形狀況。 10
圖1-7：車瓜林斷層附近地表變形剖面。紅點為PSI速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 11
圖1-8：小崗山斷層2018-2020升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....12
圖1-9：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）。 14
圖1-10：冰島Eyjafjallajökull火山周圍的PSI時間序列地表變形量(Hooper, 2008)。.....17
圖1-11：大尖山斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。.....23
圖1-12：觸口斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。.....26
圖1-13：崙後斷層條帶地質圖。.....28
圖1-14：口宵里斷層附近區域地質圖，改自中央地質調查所五萬分之一新化圖幅（何信昌等，2005）。.....30
圖1-15：左鎮斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。.....32
圖1-16：九芎坑斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。.....35
圖1-17：梅山斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。 38
圖1-18：木屐寮斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。 40
圖1-19：六甲斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。 42

圖1-20：新化斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。.....45
圖1-21：後甲里斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。.....47
圖2-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。.....52
圖2-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。(Osmanoglu et al., 2015) 54
圖2-3：永久散射體對相位的影響示意圖。(a)一般散射體所反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(b)一個像素之中有一個好的永久散射體時，反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(Hooper et al., 2012).....54
圖2-4：雷達影像處理流程第一階段 - 雷達差分干涉處理流程圖。本階段主要工作為使用SNAP軟體處理Sentinel-1影像的差分干涉，並且將其輸出為StaMPS軟體所能使用的檔案格式。A部分為Sentinel-1影像的前處裡部分。B部分為雷達差分干涉的處理部分。C部分為影像輸出為StaMPS軟體格式的處理部分。(修改自Foumelis et al., 2018) 57
圖2-5：雷達影像處理流程第二階段 - PSI處理流程圖。本階段主要工作為使用StaMPS演算法求得研究區域內地表變形的PSI時間序列與平均速度場之成果。.....58
圖2-6：SENTINEL-1東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續GNSS測站水平方向移動速率。圓圈為連續GNSS測站垂直方向移動速率。.....60
圖2-7：SENTINEL-1 (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9) 雷達影像與GNSS測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為GNSS三方向時間序列；黑色為GNSS投影至視衛星方向。黃色方型為雷達影像時間序列。.....61
圖2-8：GipsyX軟體處理流程。.....63
圖2-9：(a) 斷層幾何參數，(b)由圖(a)提供的斷層幾何參數與滑動量，經過彈性半無限空間錯動理論計算的地表變形（Okada, 1985）。.....65
圖2-10：藉由在空間上連續的地表變形資訊，採用彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992），推估斷層參數（Kuo et al., 2019）。.....66
圖2-11：工作流程圖。由雷達影像分析所獲得之速度場，透過簡易模型探討斷層滑移或累積分佈，進而評估斷層潛勢。而完整的斷層幾何參數也可與震源參數、簡易速度構造進行地震波模擬，以求得最大地震動速度與加速度。.....67
圖3-1：GNSS測站位置分佈圖。.....71
圖3-2：2014-2016年Ascending平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。.....73

圖3-3：2014-2016 Ascending去除地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。 74
圖3-4：2014-2016年Descending去除地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。 75
圖3-5：2014-2016 Descending平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。 76
圖3-6：2016-2018年Ascending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。 78
圖3-7：2016-2018 Ascending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。 79
圖3-8：2016-2018年Descending平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。 80
圖3-9：2016-2018 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。 81
圖3-10：2018-2021年Ascending去除地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。 83
圖3-11：2018-2021 Ascending去除地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。 84
圖3-12：2018-2021年Descending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。 85
圖3-13：2018-2021 Descending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。 86
圖3-14：GNSS移動站位置分佈圖。 88
圖3-15：2014-2016年Ascending平均速度場與所有GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。 90
圖3-16：2014-2016 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。 91

圖3-17：2014-2016年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。.....92
圖3-18：2014-2016 降軌道雷達資料與所有GNSS比對。 93
圖3-19：2016-2018年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。 95
圖3-20：2016-2018 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。.....96
圖3-21： 2016-2018年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。 97
圖3-22：圖 3-22：2016-2018 降軌道雷達資料與2016-2018所有 GPS比對。.....98
圖3-23：2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期GNSS移動站三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期GNSS三維向量投影至視衛星方向。.....100
圖3-24：2018-2021 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。 101
圖3-25：圖 3-25：2018-2021年Descending平均速度場與GNSS移動站速度場。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。102
圖3-26：2018-2021 降軌道雷達資料與移動站的比對。 103
圖3-27：嘉義台南水準測線分布。.....105
圖3-28：水準測線-金湖至瑞峰測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點S103(G742)。MSN 為梅山斷層、CCK 為九芎坑斷層、CKU為觸口斷層。 107
圖3-29：水準測線-金湖至瑞峰測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點S103(G742)。MSN 為梅山斷層、CCK 為九芎坑斷層、CKU為觸口斷層。 108
圖3-30：水準測線-北門至楠西測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS43(G813)。LCA 為六甲斷層。 110

圖3-31：水準測線-北門至楠西測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS43(G813)。LCA 為六甲斷層。 111
圖3-32：水準測線-善化至關廟測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS29(G377)。HHA 為新化斷層。 113
圖3-33：水準測線-善化至關廟測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS29(G377)。HHA 為新化斷層。 114
圖3-34：水準測線-安平至龍崎測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS73(G358)。HCL 為後甲里斷層。 116
圖3-35：水準測線-安平至龍崎測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、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PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS73(G358)。HCL 為後甲里斷層。 117
圖4-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。 120
圖4-2：2014-2016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。 122
圖4-3：2014-2016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。 123
圖4-4：2016-2018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。 125
圖4-5：2016-2018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。 126
圖4-6：2018-2021升軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。 128
圖4-7：2018-2021降軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。 129
圖4-8：2018-2021木屐寮斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 131
圖4-9：2018-2021木屐寮斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI

速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 132
圖4-10：2018-2021六甲斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 134
圖4-11：2018-2021六甲斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 135
圖4-12：2018-2021口宵里斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 137
圖4-13：2018-2021口宵里斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 138
圖4-14：2018-2021後甲里斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 140
圖4-15：2018-2021後甲里斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 141
圖4-16：嘉南地區地質剖面分佈圖。紅色虛線為活動斷層，黑線為地質剖面。（黃旭燦等，2004） 143
圖4-17：2018年至2021年嘉南地區PSI速度場與地質剖面分佈圖。 144
圖4-18：Line 17剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 145
圖4-19：Line 18剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 146
圖4-20：Line 19剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 148
圖4-21：Line 20剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。 149

圖4-22：Line 21剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....150
圖4-23：Line 22剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....152
圖4-24：Line 23剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....154
圖4-25：Line 24剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....156
圖4-26：Line 25剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....158
圖4-27：Line 26剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層大概位置，灰色實線為地形。崙後斷層的錯動在升降軌資料位置不同是因為資料投影造成，詳見內文。.....160
圖4-28：Line 27剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....162
圖4-29：Line 28剖面成果。(上)剖面地下構造形貌(黃旭燦等，2004)。(中)(下)分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....164
圖4-30：嘉南地區重要區域剖面位置圖。.....165
圖4-31：2018-2021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PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線

為地形。.....168
圖4-32：2018-2021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PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。.....169
圖4-33：重點區域GNSS測站位置分佈圖。.....170
圖4-34：我們選取了十個GPS站位將其2018-2021升軌方向時間序列呈現，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）。CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。.....171
圖4-35：我們選取了十個GPS站位將其2018-2021降軌方向時間序列呈現，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）。CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。.....172
圖5-1：2018年至2021嘉南地區升軌方向PSI與內插結果。左圖為PSI成果，右圖為以500公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。紅色菱形為參考點為連續GNSS測站S103。.....176
圖5-2： 2018年至2021年嘉南地區降軌方向PSI與內插結果。左圖為PSI成果，右圖為以500公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。紅色菱形為參考點為連續GNSS測站S103。.....177
圖5-3：上圖左為2018-2021 GNSS東西向速度內插圖，內插使用最基本的IDW模式。上圖右為2018年至2021年嘉南地區東西向速度解析結果。下圖為GNSS比對圖。參考點為連續GNSS測站S103，菱形及其填色為GNSS連續站垂直速度。暖色代表向東，冷色表示向西。.....178
圖5-4：上圖左為2018-2021 GNSS垂直向速度內插圖，內插使用最基本的IDW模式。上圖右上圖為2018年至2021年嘉南地區垂直向速度解析結果。由於GNSS內插的原因，圖面上看起來與雷達資料有一些差異。下圖為GNSS比對圖。參考點為連續GNSS測站S103，菱形及其填色為GNSS連續站垂直速度。暖色代表抬升，冷色表示下陷。.....179
圖6-1：（左）2014-2016降軌道影像SBAS的LOS平均速度場與（右）2014-2016降軌道影像PSI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。.....182
圖7-1：斷層錯位模型模擬結果示意圖組，假設斷層幾何與滑動量，透過斷層錯位

模型推估地表變形行為，左邊由上到下分別為水平方向垂直斷層走向速率、水平方向平行斷層走向速率、垂直方向速率，右邊由上到下分別為上升軌道視衛星方向速率、下降軌道視衛星方向速率與斷層幾何、運動方向及參數。.....184
圖7-2：口宵里斷層附近雷達影像上升及下降軌道視衛星方向速率剖面資料。此斷層在本次模擬採用 KSL2 剖面來模擬。.....184
圖7-3：六甲斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。此斷層本次使用LCA1剖面資料來模擬。.....185
圖7-4：木屐寮斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。在此斷層，本次採用 MCL剖面來模擬斷層。.....185
圖7-5：RMSE小於0.0035，所有參數的個數分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計個數，而顏色與等值線表示統計個數。.....186
圖7-6：六甲斷層剖面LCA1，利用升降軌之資料，計算RMSE最小之擬合結果。右下圖數字由上到下為：斷層傾角為30°向東傾、斷層頂部為0.6 km、斷層底部為15km、dip slip為0.02 m/yr、strike slip為0.02 m/yr。.....187
圖7-7：RMSE小於0.003，所有參數的個數分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計個數，而顏色與等值線表示統計個數。.....188
圖7-8：木屐寮斷層剖面最佳擬合結果。斷層傾角(°)為70、斷層頂部為0km、斷層底部為10 km、dip slip(m/yr)為0.02、strike slip(m/yr)也為0.02。.....189
圖7-9：RMSE小於0.004，所有參數的個數分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計個數，而顏色與等值線表示統計個數。.....190
圖7-10：口宵里斷層剖面KSL2，利用升降軌之資料，計算RMSE最小之擬合結果。數字由上到下為：斷層傾角為10°向西傾、斷層頂部為0.2 km、斷層底部為6km、dip slip為-0.02 m/yr、strike slip為-0.06 m/yr。.....191
圖8-1：木屐寮斷層各時段剖面的比較結果。.....194
圖8-2：六甲斷層各時段剖面的比較結果。.....195
圖8-3：口宵里斷層各時段剖面的比較結果。.....196
圖8-4：後甲里斷層各時段剖面的比較結果。.....197

表目錄

表1-2：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。.....16
表2-1：Sentinel-1衛星影像資訊。.....52
表3-1：Sentinel-1A衛星影像使用幅數。.....69
表3-2：各時期GNSS測站數量。.....70
表3-3：2014-2016年PSI與GNSS比對成果。.....72
表3-4：2016-2018年PSI與GNSS比對成果。.....77
表3-5：2018-2021年PSI與GNSS比對成果。.....82
表3-6：2014-2016年PSI與GNSS比對成果。.....89
表3-7：2016-2018年PSI與GNSS比對成果。.....94
表3-8：2018-2021年PSI與GNSS比對成果。.....99
表4-1：Sentinel-1A衛星影像使用幅數。.....119

表A：本年度預期進度甘梯圖 (Gantt Chart)。

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

計畫名稱：應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形(2/2)													
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													
2018-2021 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													
2018-2021 跨斷層垂直速度剖面分析													
跨斷層時間序列分析													
都會區及重要觀測位置時間序列分析													
二維剖面模擬													
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	45	55	65	75	85	95	100		

說明：

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

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

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

表B：預期進度查核點 (Check Point)。

Table B： Check point of expected prgress.

序號	查核點(交付項目)	預定達成日期	完成狀態
1	工作企劃書繳交、契約書簽訂	3月10日	工作計劃書修正與契約書簽訂
2	期中報告繳交	7月19日	已完成
3	期中審查會議	8月2日	已完成
4	教育訓練	11月4日	已完成
5	期末報告繳交	11月25日	已完成
6	期末審查會議	12月7日	已完成
7	驗收	12月31日	未完成

表C：期末交付之各項工作項目。

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

工作項目	章節
1. 研究區域中三個時間段（2014-2016, 2016-2018, 2018-2021）的升軌視衛星方向平均速率。	4-1至4-4
2. 垂直斷層方向剖面之視衛星方向平均速率變化。	4-5
3. 雷達資料與其他大地測量(GNSS連續站、GNSS移動站、水準測量)觀測資料比對	第三章
4. 重點區域時間地表變型時間序列分析。	4-7-1
5. 三條垂直斷層的斷層幾何與滑移量模擬與分析。	第七章
6.至少一時段(升軌或降軌)雷達視衛星方向平均速率使用SBAS方式處理。	第六章
7. 選擇觀測區域部分GNSS連續站作時間序列分析。	4-7-2

摘要

本計畫利用雷達差分干涉方法針對嘉義、台南地區監測地表變形，觀測範圍包含嘉南地區十一條斷層（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、崙後斷層等區域）與南部科學園區、沙崙綠能科學城、臺南都會區等重要區域。

目前解算完的資料，分成三個時間段，分別為2014-2016, 2016-2018, 以及2018-2021三個時間段。 這三個時間段的影像數目因為衛星拍攝以及其他因素，越後期的時間段影像數量越多。 根據與同時段GNSS對比結果，早期的RMSE大約在 10 mm/yr 附近，而最後的時間段（2018-2021）則是低於 4 mm/yr。

針對解算後的速度場，在研究區切不同的剖面，其中包含沿著已知文獻中地下地質剖面而萃取之地表變形訊號以及橫跨幾條變形較明顯的斷層剖面，藉此更進一步觀察跨斷層速度場的變化。此外，我們亦將雷達成果與同時期水準測量及移動站GNSS資料進行比對，並以雷達資料解析水平與垂直速度場，以了解嘉南地區地表變形。

除了升、降軌各自三個時段的永久散射體雷達差分干涉資料之外，本計畫也利用這筆資料推算了此區2018-2021年的東西向以及垂直向的速度場，這樣解算出的速度場雖然會導入些許誤差，但是讓雷達資料可以更容易了解與運用。

關鍵詞：雷達差分干涉、嘉義、台南、活斷斷層

Abstract

This project uses Persistent Scatterer SAR Interferometry (PSI) method to uncover the surface deformation in the Chiayi-Tainan area. The main targets include Jiuqiongkeng fault, Meishan fault, Dajianshan fault, Chukou fault, Mujiliao fault, Liujia fault, Hsinhua fault, Houjiali fault, Tzozhen fault, Kouhsiaoli fault, Lunhou fault, as well as the South Taiwan Science Park, the Shalun Green Energy Technology Park, and the Tainan metropolitan area.

We have completed mean velocity in three time intervals (2014-2016, 2016-2018, and 2018-2021). When the derived PSI velocity compared to the coeval GNSS data, we found the RMSE to be around 10 mm/yr in the early period, and get improved to be around 4 mm/yr in the last period.

Profiles were extracted and compared to the profiles with geological models from literatures, and some profiles perpendicular to fault with significant slips.

In addition to the LOS velocity, we also calculated vertical and east-west velocity from radar data for the 2018-2021 period. The derived data, albeit introduced errors during calculation, will be easier to visualize and explain.

KEYWORDS：Radar interferometry, Chiayi, Tainan, active fault

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，每年以大約八公分的速度聚合。板塊間的相對運動導致臺灣斷層密集、地震頻繁、地表變形劇烈。因此，經濟部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，包含在106~109年度執行「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，利用全球衛星定位系統、精密水準測量、以及雷達等方法得到目標區域之地表變形、斷層位置、活動性等資料。

地表變形是長期地質作用所造成的影響，對像臺灣這樣活躍的造山帶來說，快速又不等量的地表變形會直接對公共設施與社會安全造成衝擊。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，都有可能因為地表變形而造成損害。而公共設施如醫院、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，更是容易在劇烈地表變形的影響下而造成難以估計的生命與財產損失。

有鑑於此，本計畫在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」利用雷達差分干涉技術針對目標區做地表變形的觀測與分析。 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，並持續於111年度針對嘉南地區十一條斷層（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、崙後（烏山頭）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做觀測，並且對觀測結果做分析（圖1-1）。

下圖1-2標示了研究區域中可能會造成地表變形之斷層系統與公共交通網絡之間的地理關係，這些交通系統也連結了本年度調查

的重要區域。111年度於本計畫中使用了雷達差分干涉方法調查位於嘉南地區的第一類活動斷層，在處理資料並且減低雷達差分干涉本身的誤差後，我們將雷達結果與地質調查所提供之GNSS資料對比，找出雷達與GNSS之間的相關特性。此外，經由上述雷達成果，我們進一步沿著垂直斷層的方向繪製剖面，由此推估斷層之幾何與滑移速率。本年度計畫進行的工作分為三大項目（圖1-3），由東華大學負責雷達資料規劃產生以及整體計畫統合，由中研院地球所負責資料比對，並由中正大學負責斷層幾何與滑移量推估。

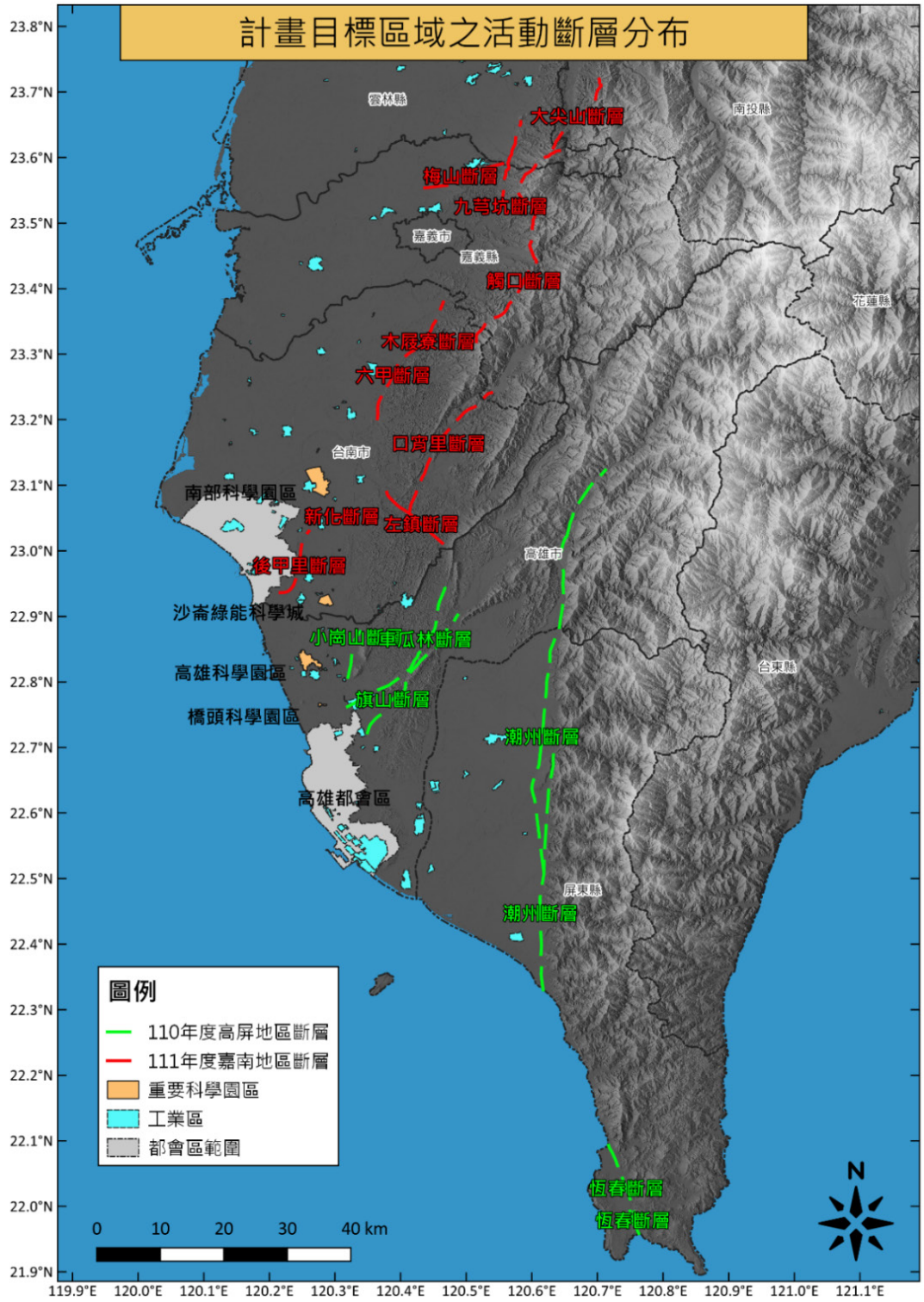


圖1-1：目標區域。110年度預計針對南部地區綠色標示之斷層以及橘色、灰色與青色區塊標示重要區域做觀測與分析；111年度針對嘉南地區紅色標示之斷層以及橘黃與青色標示之重要區域做觀測與分析。

Figure 1-1：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.

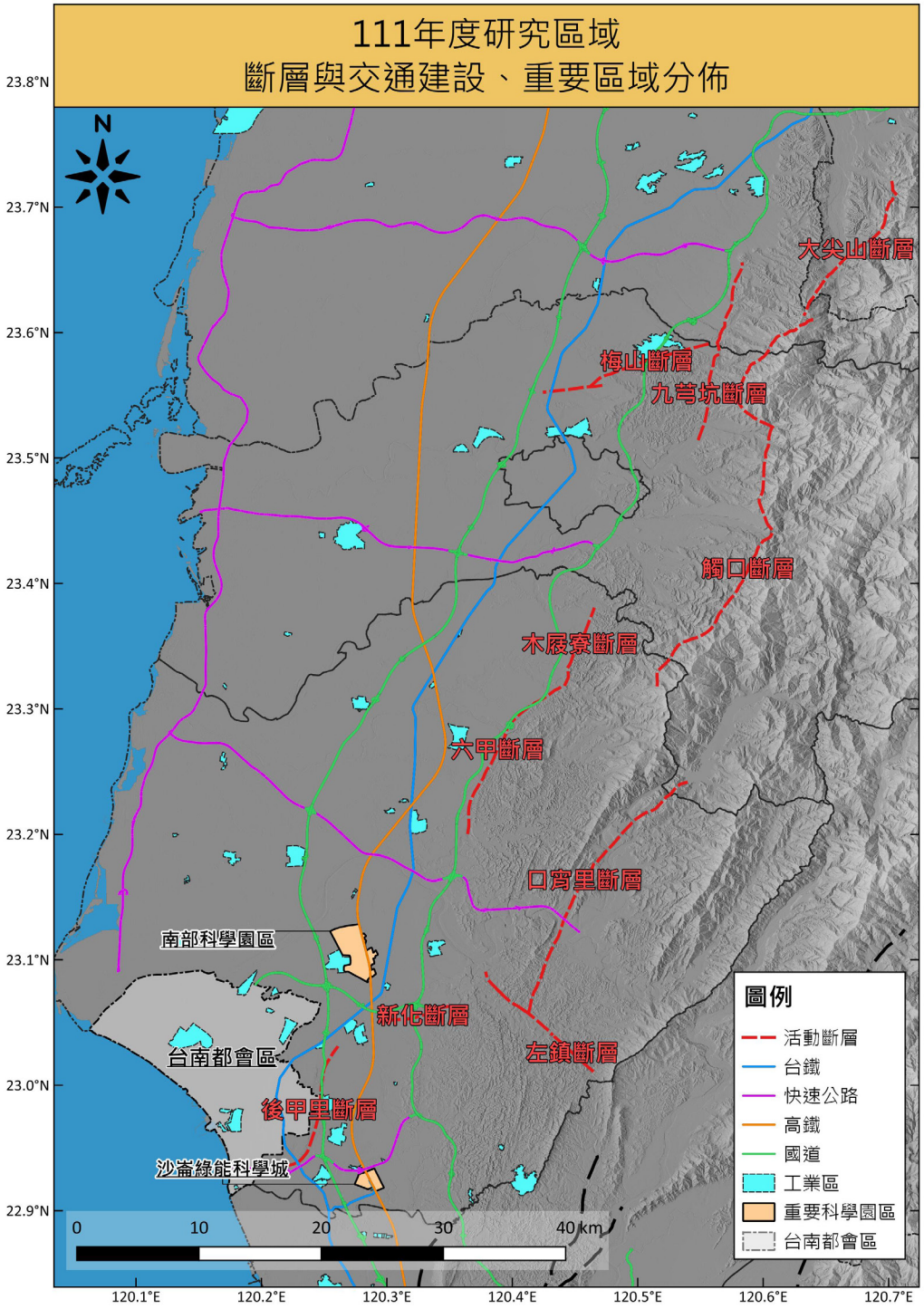


圖1-2：研究區域中的道路與斷層分佈情形。紅色線段為研究區域內的活動斷層分佈位置（如圖1-2-1）。青綠色線段為國道高速公路的路線。藍色線段為臺灣鐵路的行經路線。橘色線段為臺灣高速鐵路的行經路線。紫色線段為快速公路的路線。橘色區塊為重要科學園區。青色區塊為工業區。灰色區塊為都會區。

Figure 1-2：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.

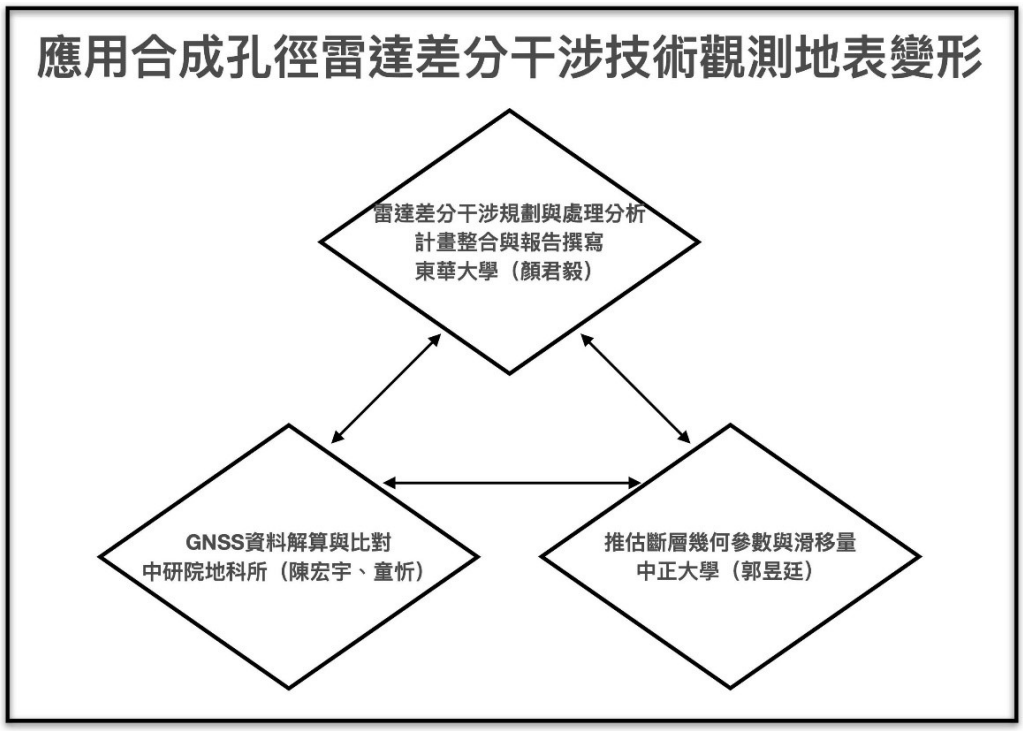


圖1-3：工作團隊與主要工作項目。

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

1-2 計畫目的

經濟部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PSI雷達衛星影像技術，完成分析全臺近500站的GPS連續全球定位系統測站、767站的GPS移動站施測、29條精密水準測線，以及應用PSI技術分析2015–2020年總共1040幅升軌及867幅降軌的臺灣東部地區干涉衛星影像，獲得大面積的地表變形速度場與地殼變形的時空分布，並建置臺灣東部地區8條活動斷層之斷層模型，計算出各斷層的加權平均滑移虧損速率。

因此，為延續經濟部地質調查所上一期的「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，本計畫在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 針對嘉南地區十一條斷層（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、及崙後(烏山頭)斷層等區域）與南部科學園區、沙崙綠能科學城、台南都會區等重要區域進行觀測與分析(圖1-1）。

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，本計畫期望能由此達成以下目的：

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

1-3 110年度計畫成果概述

A. 成果

在110年度我們處理了三個時段的雷達差分干涉資料，分別是2014-2016、2016-2018、2018-2020（圖1-4），這些資料在處理過程中經由與GNSS資料比對去除誤差後，得到不錯的結果（圖1-5）。例如車瓜林斷層在2018-2020年的速度圖顯

示（圖1-6）其周遭的速度變化相當大。該斷層直接切過橋頭科學園區，也繼續往西南延伸。其錯移量在某些區域可接近10mm/yr（圖1-7）。

B. 教育訓練

依規劃我們已於地調所舉辦一天的教育訓練，針對雷達基本原理以及操作流程，藉由期中教育訓練，將雷達資料處理的基礎概念乃至操作步驟逐步展示，與地調所同仁一同交流。

C. 協助地質敏感區劃分

由於110年度計畫調查範圍涵蓋小崗山斷層，在成果與討論中我們提供了相關資訊，協助佐證小崗山斷層的可能位置以及滑動速率，供做地調所小崗山斷層地質敏感區劃設之參考使用（圖1-8）。

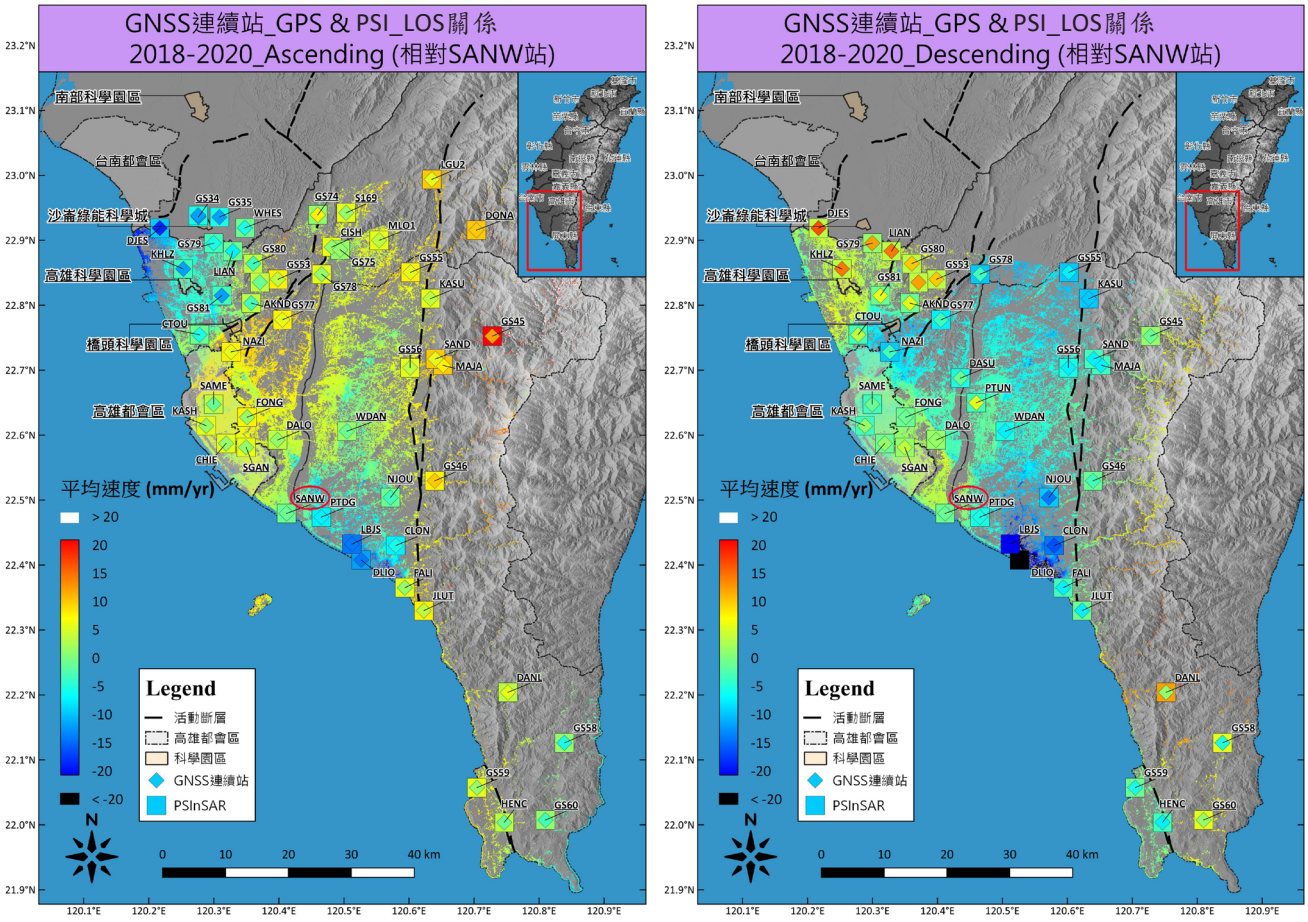


圖1-4：(左圖)2018-2020年Ascending平均速度場與GNSS連續站速度場。(右圖)2018-2020年Descending平均速度場與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站SANW，菱形為連續同時期GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

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

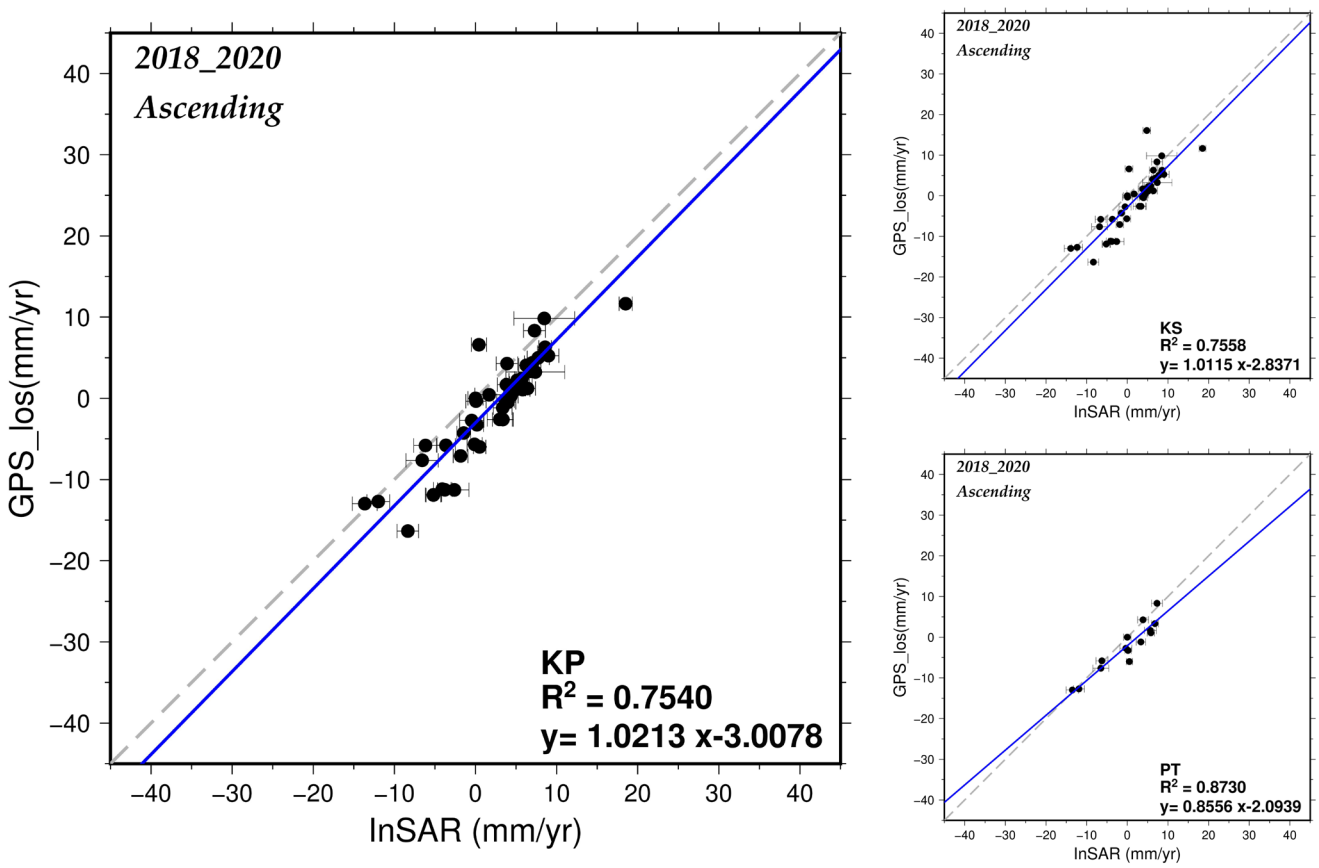


圖1-5：2018-2020 雷達視衛星方向速率與GNSS投影至雷達視衛星方向速率之比較。 在去除誤差與雜訊後，兩種資料幾乎相同。

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

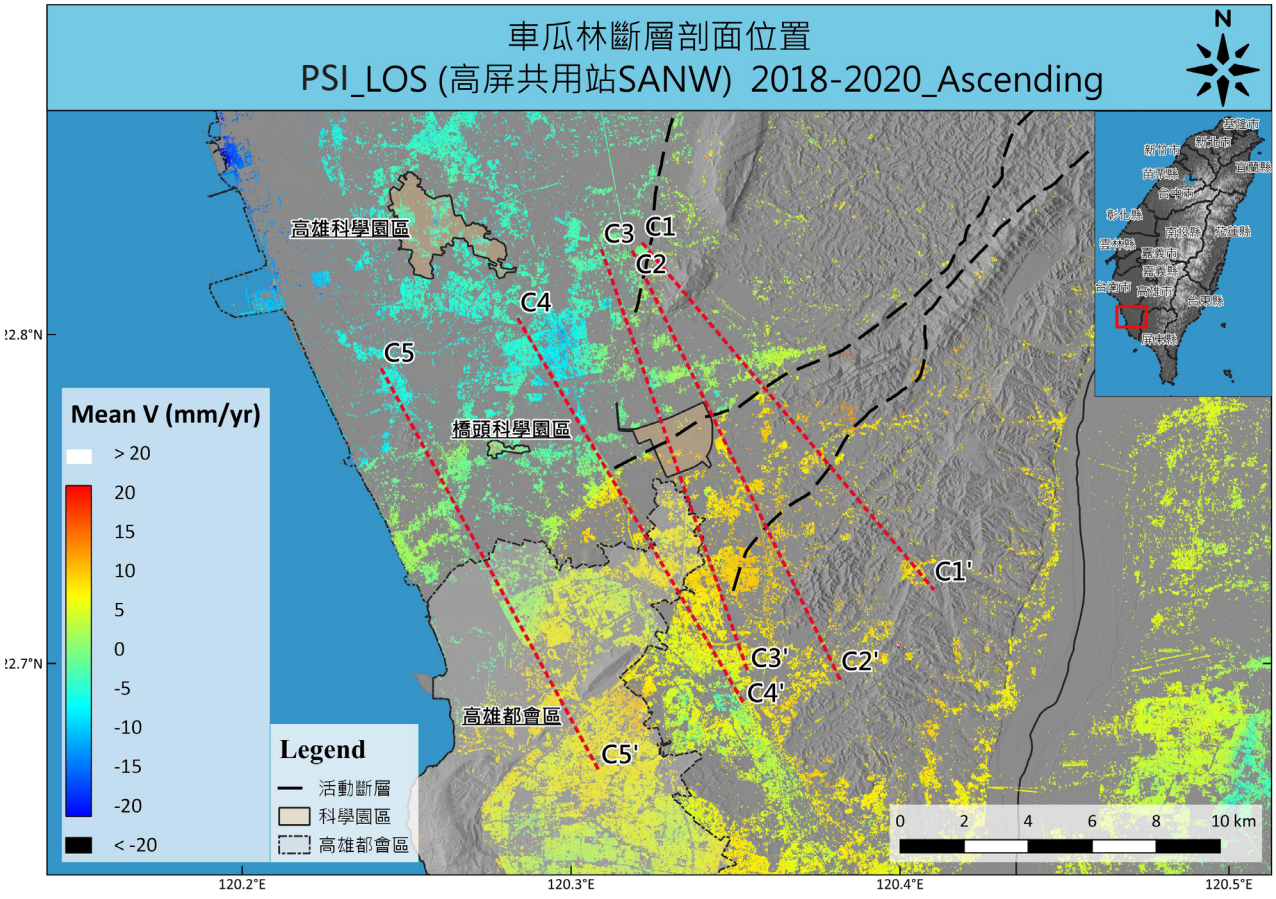


圖1-6：圖 6：車瓜林斷層附近地表變形狀況。

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

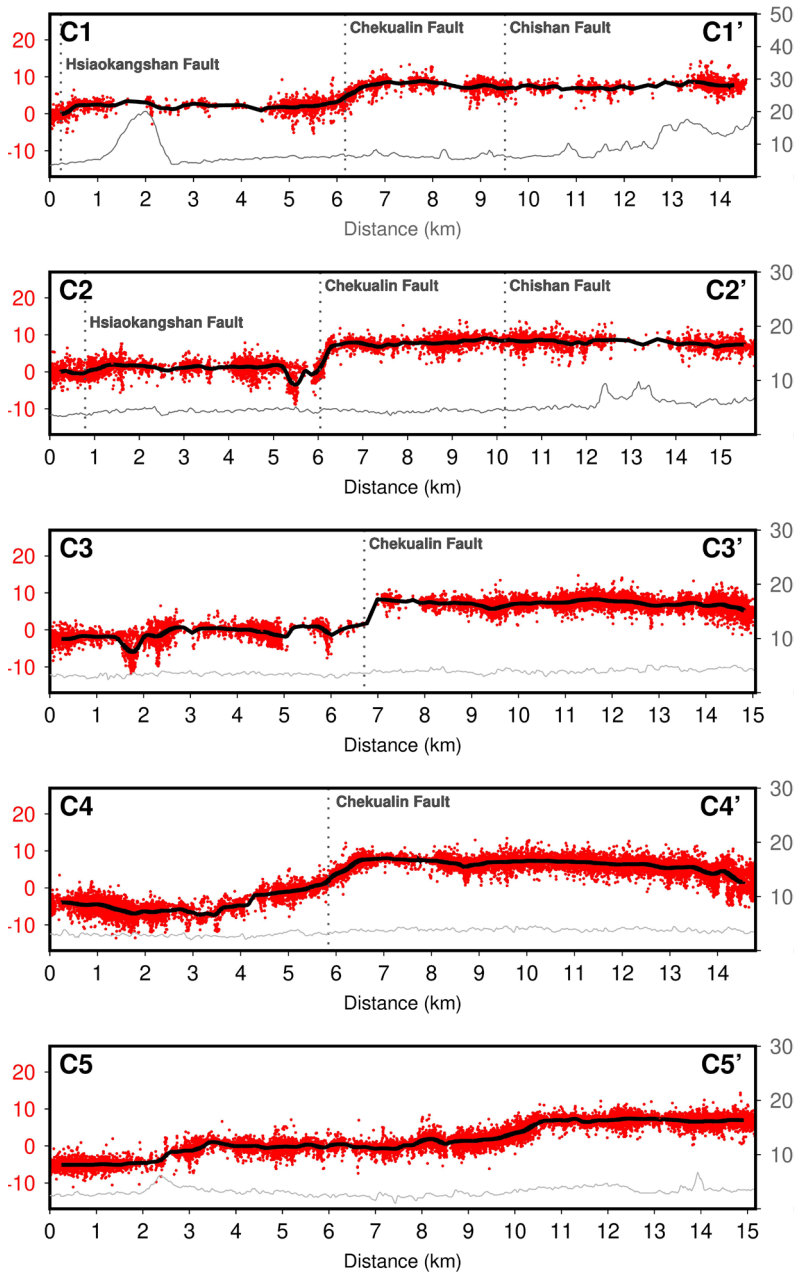


圖1-7：車瓜林斷層附近地表變形剖面。紅點為PSI速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

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

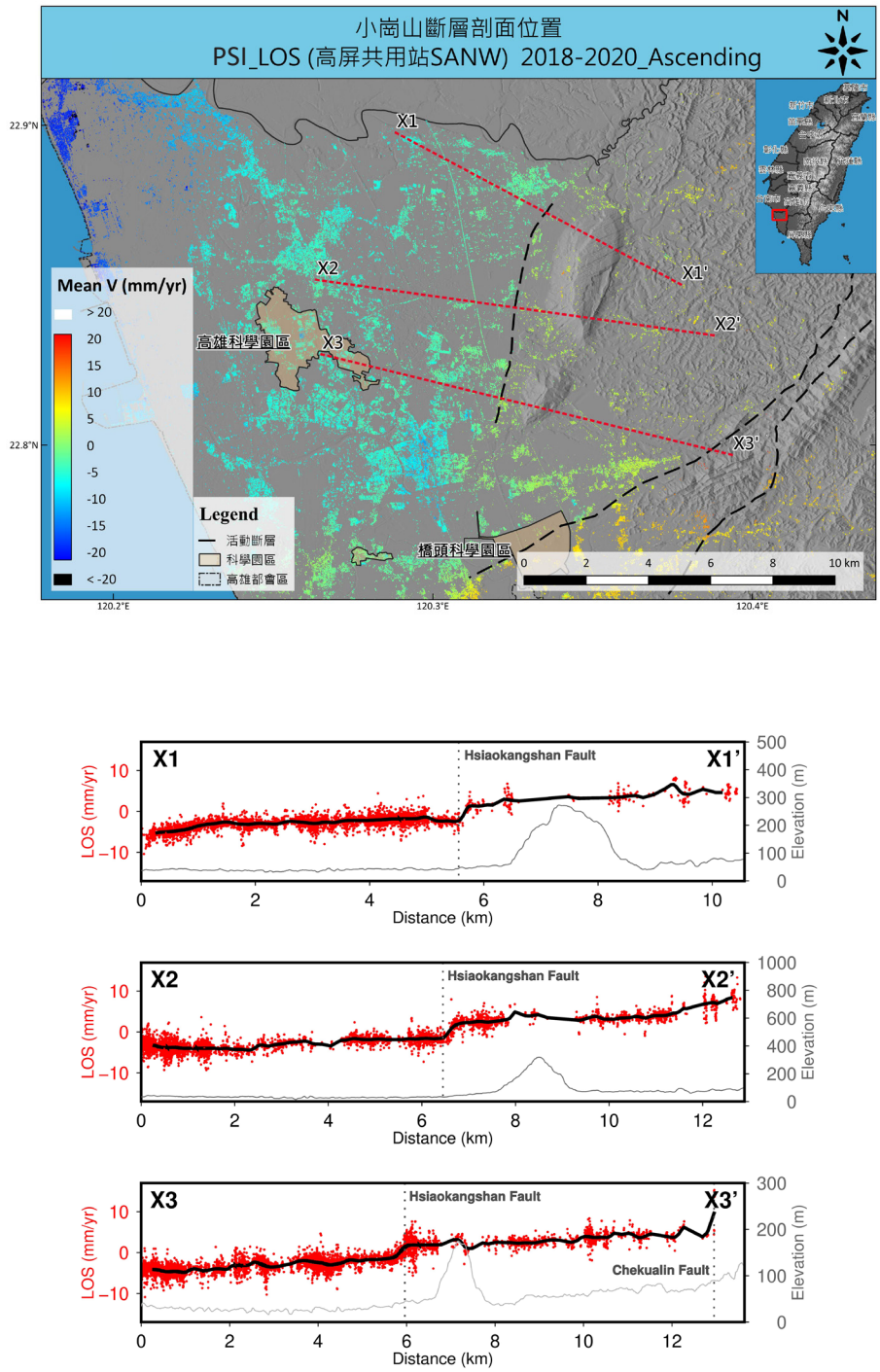


圖1-8：小崗山斷層2018-2020升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，黑線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

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

1-4 計畫工作方法概述

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

合成孔徑雷達差分干涉技術的原理是將雷達系統搭載於衛星上且不斷發射脈衝，而天線會接收地表目標物的回波，當衛星依軌道重複運行時，即可於不同的時間點獲取到同一地區的SAR影像。將同區域不同時間的兩幅影像進行差分干涉，可獲得此區域在這兩個拍攝時間點之間，因地表與衛星間距離變化所造成的雷達波相位差($\varphi x,i$)，再經由相位解算則可得到此時段內的地表變化量(圖1-9)。真實的雷達波相位差可用以下方程式表示（Wright, 2002）：

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

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

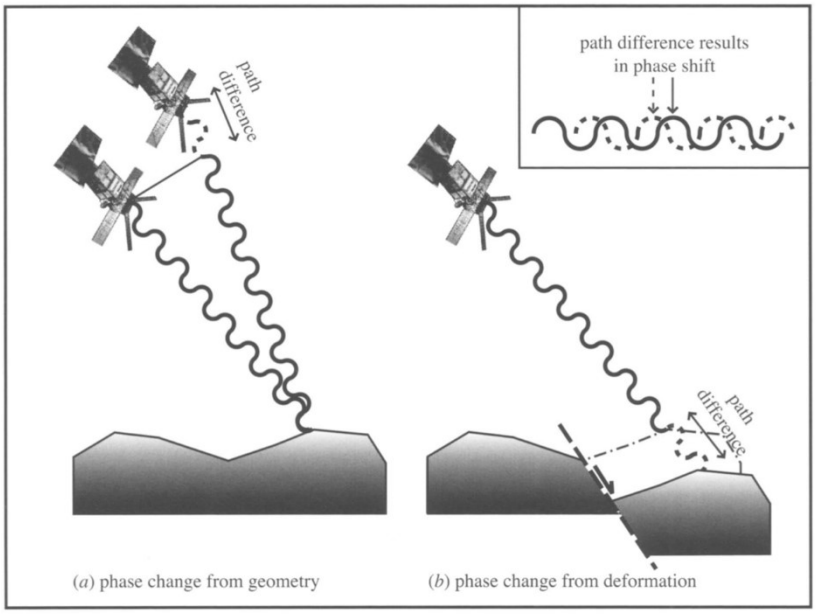


圖1-9：雷達差分干涉影像對的相位變化與地表變形之間的示意關係圖（Wright, 2002）。

Figure 1-9：Figure shows how InSAR images detect phase changes resulting from surface deformation. (Wright, 2002)

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

多時序雷達差分干涉技術裡透過不同的主副影像配置、初始門檻值的挑選設定、變形模型的假設、以及相位回復的方式等，發展出各式的演算法，表1-1顯示較為知名的演算方法。這些各式演算法中，Crosetto等人(2016)認為最具代表性的四種演算技術（表1-1灰階底色所示）為永久散射體差分干涉(Permanent Scatterer InSAR, PSI™) 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)。

其中永久散射體差分干涉 (Permanent Scatterer InSAR, PSI™) 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PSI™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1-10）。

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，解算該像素之地表位移量，獲得傳統差分干涉技術無法觀察的緩慢地表變形區域之活動情形。

表1-2：多時序雷達差分干涉技術演算法彙整。

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

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

1. PSI™ (Permanent Scatterer InSAR, Ferretti et al., 2000, 2001);
2. SBAS (Small Baseline Subset, Berardino et al., 2002);
3. IPTA (Interferometric Point Target Analysis, Werner et al., 2003);
4. StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers, Hooper et al., 2004, 2007; Hooper, 2008);
5. PSP (Persistent Scatterer Pairs, Costantini et al., 2008, 2012);
6. SqueeSAR™ (Ferretti et al., 2011);
7. TPC (Zhang et al., 2011)
8. QPS (Quasi Persistent Scatterers,) (Perissin and Wang, 2012)。

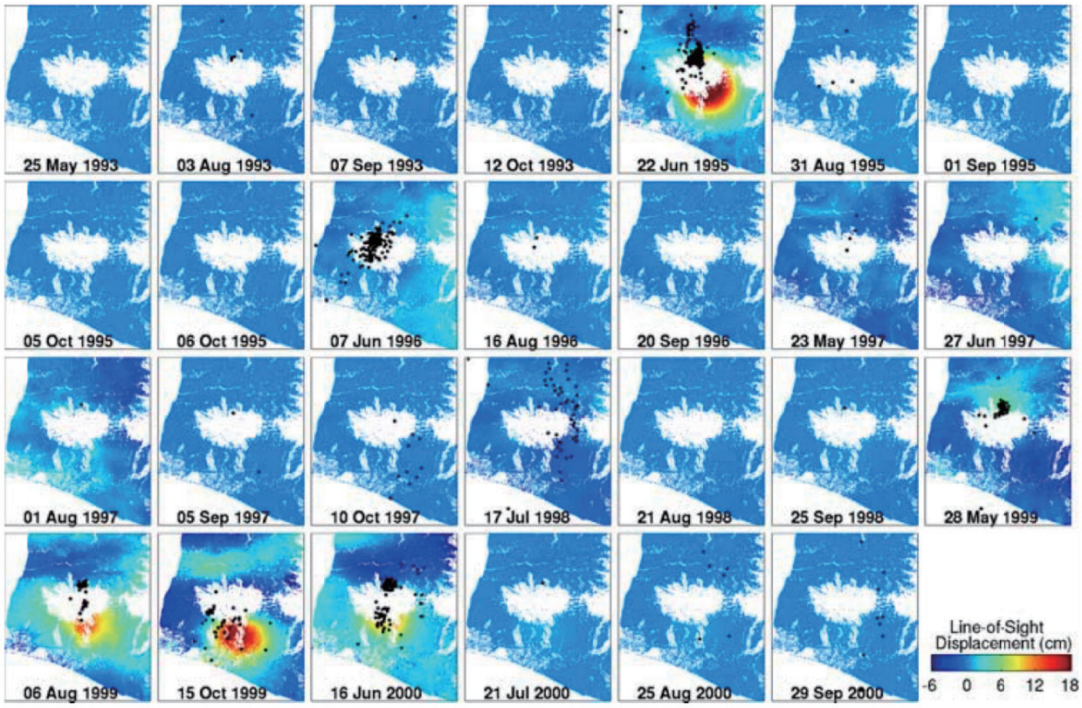


圖1-10：冰島Eyjafjallajökull火山周圍的PSI時間序列地表變形量(Hooper, 2008)。

Figure 1-10：Figure shows time series of PSI-extracted surface deformation around Eyjafjallajökull Volcano, Iceland.

1-4-3 小基線雷達差分干涉技術 (Small BAseline Subset, SBAS)

本年度（111年）觀測的斷層大部分都接近麓山帶，植被較平原區、都會區更為茂盛，由110年度執行成果已發現這些因素確實會造成InSAR觀測上的問題。如上一小節所述，我們在本計畫中採用的PSI技術可以大幅改善非都會區的適用性，且由110年的雷達解算成果與GNSS之比較顯示，當雷達影像數量越多時，資料比對結果普遍越佳。 然而影像時間間隔越長則會造成雷達影像的 temporal decorrelation，亦即因為時間差異造成地表狀況有變動，例如植物因為時間與季節差異的生長狀況差異，或是其他地表狀況的變動。在學理上，為了改善地表地物因為時間間隔過長的改變，可以採取Small Baseline Subset (SBAS)方法，讓影像的時間基線以及軌道基線都控制在適當間隔以及時間之內來縮小誤差 (Berrardino et al., 2002)。 雖然現代衛星的軌道較以往的衛星有長足的進步，因此軌

道基線不再造成太大的誤差，但是時間基線的差異仍然可以造成相當大的誤差。

我們在111年度的工作項目中，除了使用PSI技術來處理資料以外，另外還進一步測試，選擇2014-2016時段的下降軌道使用 SBAS的方式產生雷達差分干涉時間序列，由此來因應在靠近麓山帶雷達永久散射點品質降低的現象，以萃取較穩定的散射體。

1-4-4 解算垂直變形速率

本期計畫中在資料品質允許狀況下，我們會利用同一時期之升軌與降軌資料推估該時期的垂直方向以及東西方向之速度場，並且將這些資料與GNSS比對。 理論上這樣的計算會帶入一些誤差到最後結果，然而垂直速度場以及東西向的速度場還是比雷達斜距方向的速度場更容易呈現與理解。 因此在犧牲一些準確度、解析度的狀況下，我們會在其中一個時段嘗試解算垂直變形速率。

1-4-5 資料比對

本計畫預計採用GNSS連續觀測站資料解算分析處理地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。預計對雷達影像與GNSS觀測資料、精密水準結果比對。 工作會將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以及垂直方向速度值，並套疊至與GNSS同一座標系統進行視覺化比對。 也會將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，我們會先選取適當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。 再萃取重要區域與重要點位對其地表變形之時間序列做分析。

本團隊在PSI與GNSS及水準結果比對上，無論是視衛星方向上的速度場比對、轉換至東西方向與高程方向上的比對或是單站時間

序列比對…等，都有相當豐富的經驗，對於各種測量資料的優勢與劣勢也相當清楚。此外，隨著PSI技術的進步與普遍應用，不同資料之間比對的方法也有相當大的改進，本團隊也會挑選最適用研究區域之比對方式來確定PSI結果的可信度。

本年度研究之嘉義臺南地區約有近100個連續GNSS觀測站，算是臺灣地區連續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PSI獲得之大面積地表變形觀測對於目標斷層及重要區域做較完整的分析研究。除了連續GNSS觀測站以外，搭配地調所提供之跨斷層精密水測線也將能增加對於PSI結果精度之控制，期望利用現有資料就能發揮最大的效用。

根據雷達與GNSS比對結果，可以發現雷達資料處理過程中潛在的誤差並在處理過程中去除。　例如在110年的結果中，成功發現處理過程中明顯的 unwrapping error，並成功去除。

1-4-6 斷層幾何與滑移量模擬

地表變形是協助我們了解構造活動性的重要參考資訊，利用雷達遙測與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（PSI）因影像拍攝時間間隔的縮短，也能提供更密集的時序資訊，大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2-10），其中包含了斷層的幾何參數，如斷層平面位置(km)、深度(km)、長度 (km)、寬度(km)、走向(°)、傾角(°)等，斷層平面位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層面下緣的深度。一組斷層幾何參數，即可提供每個位置上的地表變形資訊，透過地質構造模型、各點觀測資料與模型結果比較，將可獲得較符合之斷層幾何參數及其

滑移量。每種斷層幾何參數在地表上的連續變化是不一樣的，透過遙測的觀測投影資料與模型結果進行擬合，將可獲得最匹配之斷層幾何參數，包含了斷層頂部、深部、角度及滑移量。因連續性的地表觀測點位數目多於要解析的參數個數，所以透過這樣的計算方式，不論是從斷層幾何與滑動來估算地表變形，或是從地表變形來回算斷層幾何與滑動，都是可行的。

1-5 本年度計畫概述

1-5-1 本年度研究區域背景簡介

本年度（111年度）針對嘉南地區的十一條斷層（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、及崙後(烏山頭)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研究（圖1-2）。

由地震活動與大地測量結果可知，臺灣的西南部(雲林、嘉義與臺南地區)之地殼變動較為活躍，且已發生過數次災害性地震（Tsai et al., 1977； Wu, 1978； Tsai, 1986；Yu et al., 1997；侯進雄等，2002，2003；饒瑞鈞等，2006）。雲嘉南地區主要可分為三個地質區，由東到西分別為：雪山南段的低度砂泥質變質岩區以及脊梁山脈最西緣的硬頁岩、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。臺灣西南部主要由一系列以東北走向的斷層褶皺帶組成，僅左鎮斷層呈西北走向，這些斷層系統多為向西逆衝的逆斷層，斷層系統間由平移斷層連接，如梅山、新化斷層為右移斷層，左鎮斷層為左移斷層。以下就調查範圍內的十一條斷層分別簡述其地質及構造背景，由北而南分別為內麓山帶之大尖山-觸口-崙後斷層系統、口宵里斷層、與截斷崙後及口宵里斷層之左鎮斷層、繼之以外麓山帶之九芎坑、梅山、木屐寮、六甲斷層，以及由外麓山帶轉進西部平原區之新化斷層及後甲里斷層。

1-5-1-1 大尖山斷層

大尖山斷層(圖1-11)由南投縣竹山鎮嶺腳，向西南方向延伸至嘉義縣竹崎鄉金獅寮，全長約25公里；依斷層的特性可以分為南北2段，界限為內磅斷層（又稱樟湖山斷層或古坑斷層）。北段為逆移斷層，在1999年集集地震時曾活動，故列為第一類活動斷層，地表破裂顯現右移特性(經濟部中央地質調查所，1999a,b；林啟文等，2000a)；南段則為低角度向東傾斜的逆移斷層，可能往南與觸口斷層連接，但缺少可供觀察的露頭（中國石油公司，1986；黃鑑水等，1994；劉桓吉與李錦發，1998；張徽正等，1998；林啟文等，2000a）。本區位於西南部斗六丘陵與竹山丘陵的交接帶，竹山丘陵東側為西部衝上斷層山地（林朝棨，1957）。大尖山斷層的北段位於竹山丘陵與西部衝上斷層山地交界，南段則位於斗六丘陵與西部衝上斷層山地的交界，南段在地形上呈現明顯向西凸出的弧形。

大尖山斷層上盤主要出露的地層為南莊層、桂竹林層、錦水頁岩與卓蘭層，下盤則出露頭嵙山層、階地堆積層與沖積層。(劉彥求等，2007)。野外調查結果顯示，大尖山斷層的北段為一高角度向東南傾斜的逆移斷層，在1999年集集地震時有活動，但主要為右移形式兼逆移性質；在竹山至桶頭間斷層具有較寬的斷層帶，下盤岩層受擾動現象強烈，上達橋溪至桶頭間斷層帶的寬度為250-400公尺，但桶頭尾至過寮之間則沒有寬廣的斷層帶，下盤礫岩受擾動情形不明顯。大尖山斷層的南段為低傾角的逆移斷層，目前尚未發現有近期活動。

由岩芯資料綜合分析大尖山斷層的地下剖面，桶頭附近的斷層面傾角大於72度，岩芯中有數個桂竹林層與頭嵙山層礫岩接觸的斷面，皆呈現高角度傾斜，此處桂竹林層的大窩砂岩，岩層傾角普遍大於60度以上，斷層帶中的滑動面傾角則多大於72度，並形成走向滑移形式的擦痕，與集集地震地表破裂於大尖山斷層段表現出的右移形式相同，顯示現今大尖山斷層在桶頭以北是由逆移形式轉為以右移形式的橫移作用為主，地表上則是由一系列覆瓦狀的分支斷層構成整個斷層帶。此外，由斷層南段福建坪的鑽井可推知，斷層面在淺部的傾角約43度(劉彥求等，2007)。

綜合地電、震測探勘結果，桶頭階地下方跨越集集地震的地表破裂處，此區斷層帶的寬度約有300公尺，斷層帶中可見到岩層受到強烈擾動，形成緊密的小波長褶皺與破碎帶，並具有數組高角度傾斜的分支斷層，呈現走向滑移斷層於接近地表開叉的花狀構造特徵，此破裂特徵與地表以及林頂臺地南側剖面類似。

由地殼變形的監測結果可知，大尖山斷層在 1996-1999 年間，上下盤的水平位移變化量不大，但1999年集集地震後上下盤的水平位移變化量超過100公厘/年，至2005年之後，斷層上下盤的水平位移變化量逐漸回復至5-30公厘/年。橫跨斷層的速度場變化，在1996-1999 年間呈左移形式兼具逆移性質；2000-2005年間的速度場變化量，為逆移形式兼具右移分量；2003-2005年的精密水準測量結果明顯的變化量，高程變化量則維持在10-20公厘之間；這些資料指示大尖山斷層仍具相當的活動潛勢(饒瑞鈞等，2005，2006)。

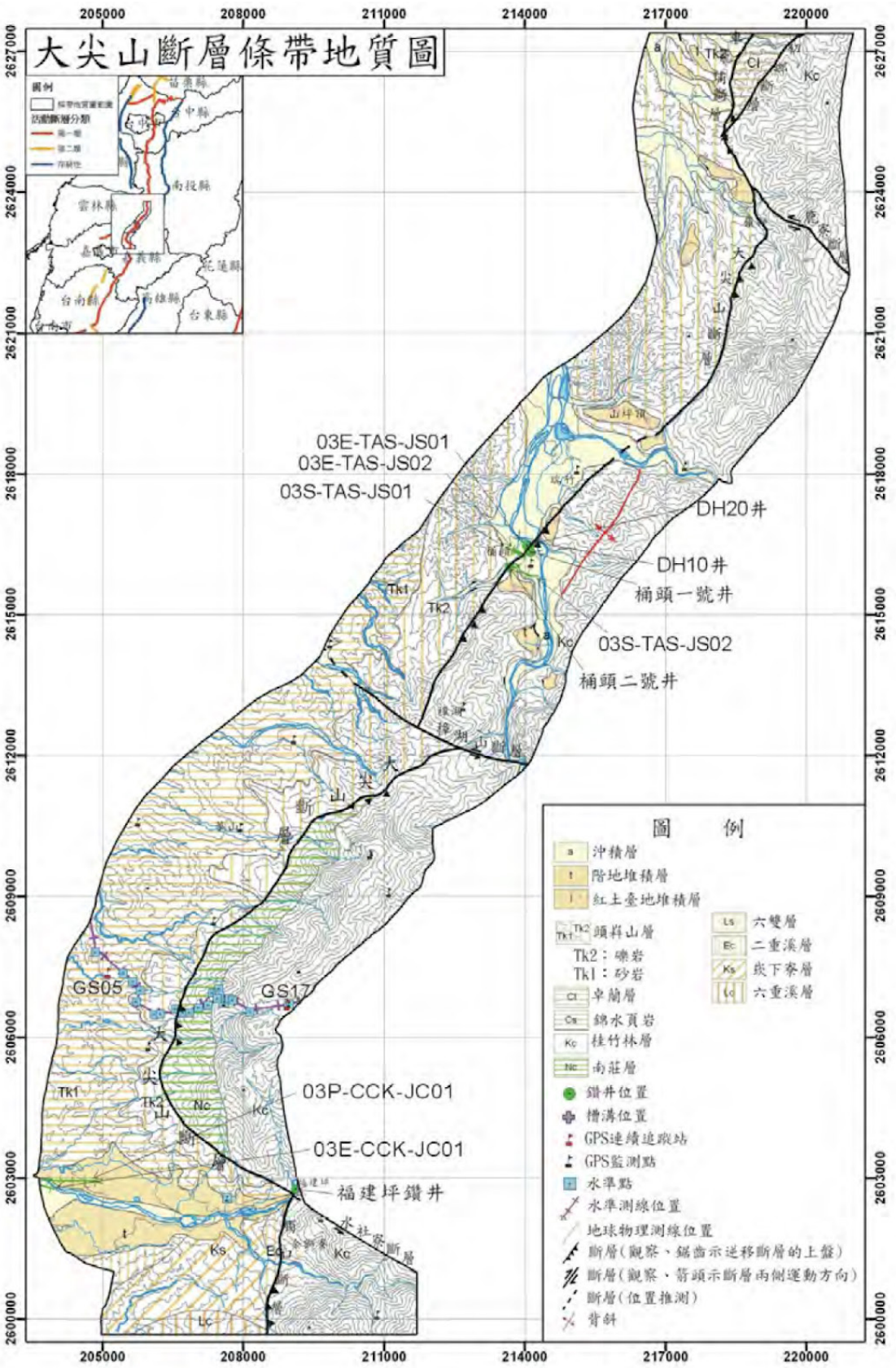


圖1-11：大尖山斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。

Figure 1-11：Strip Map of the Tachienshan Fault.

1-5-1-2 觸口斷層

觸口斷層依地質特性分為2段(圖1-12)：北段呈南北走向，由嘉義縣牛稠溪北側福建坪至觸口；南段約呈北北東走向，由觸口延伸至臺南縣關子嶺東方；兩段長度合計約28公里（吉田要，1931）。在關子嶺以南，觸口斷層的向南延伸部分稱為崙後斷層（烏山頭斷層），崙後斷層一直延伸至臺南縣新化的菜寮溪北岸，長度約48公里。根據地殼變形監測以及野外調查結果，觸口斷層為斷層面向東傾斜的逆移斷層，斷層具有潛移特性，斷層兩側的位移量變動量相當大，暫列為第一類活動斷層。(劉彥求等，2007)。在地形上，觸口斷層位於丘陵區與西部衝上斷層山地的交接界：斷層西側為斗六丘陵與嘉義丘陵，為一系列向西傾斜的坡面；東側則為山地。斗六丘陵上分布許多向西緩傾斜的階地，這些階地構成丘陵的最頂面，屬於觸口斷層前緣的沖積扇（陳文山等，2004a）。

在中新世晚期以後，臺灣西南部所沉積的地層岩相變化相當大，因此觸口斷層兩側有不同的地層劃分（Stach, 1956；中國石油公司，1986）。觸口斷層上盤出露的地層包括南莊層與桂竹林層，下盤則出露中崙層、鳥嘴層、濁水溪層、六重溪層、崁下寮層、二重溪層、階地堆積層與沖積層。(劉彥求，2007)。依據地質調查所野外探勘結果，由於觸口斷層兩側的岩性差異大，地形上很容易可判斷其位置，在牛稠溪上游斷層上盤存在局部小型斷層剪動帶。陳文山等（2004a）以獺頭斷層南北兩側觸口斷層的層位落差不同，研判在該處為觸口斷層的一個重要區段界限（segment boundary），然而野外並未能發現觸口斷層被獺頭斷層錯移的露頭。在中崙地區，觸口斷層上盤發育許多小型褶皺，但是中崙以南，觸口斷層缺乏露頭不易追蹤。在中崙地區的瑤池橋附近，與地表垂直的砂岩層與傾角30-40度的砂頁岩互層接觸；剪切現象多為層間滑動或砂岩顆粒受剪動變細，不過尚未達到斷層泥程度。

Chang (1967）由中崙地區的鑽井岩芯資料研判，觸口斷層在地表為高角度向東南傾斜的斷層，而至地下深部斷層的傾角逐漸變緩。地調所於觸口地區靈隱寺鑽井探測，配合地表地形特徵與岩芯中斷層帶的深度，研判該處觸口斷層的傾角約51度(劉彥求，2007)。綜合淺層震測與地電測勘分析結果，觸口斷層為高角度向東傾斜，斷層

帶內的岩層受到強烈的擠壓變形作用，近地表的斷層面約60度，向下傾角漸緩約30-40度。由地球物理探勘結果，觸口斷層的斷層帶寬度可能超過100公尺，斷層帶內有許多滑動面，其內岩層有褶皺變形現象。

黃鑑水等（1994）由階地的定年結果，研判觸口斷層曾在38,000年前活動過，此外，由於階地下伏的頭嵙山層為斷層接觸，他研判80萬年以來觸口斷層至少活動過3次。洪日豪等（Hung et al., 1999）由地層的層位落差計算觸口斷層上盤相對下盤的長期滑移速率約14.0公厘/年。由大地測量資料顯示，1990-1997年間，觸口斷層上下盤的水平位移變化量，在北段約6.3公厘/年，南段約13公厘/年。1999-2005年間，觸口斷層上下盤的水平位移變化量約18公厘/年，無明顯的高程變化；由近斷層水平位移分析橫跨觸口斷層的速度場變化，可以觀察到觸口斷層於1999-2006年間為逆移形式(Yu and Chen, 1998；饒瑞鈞，2006)。

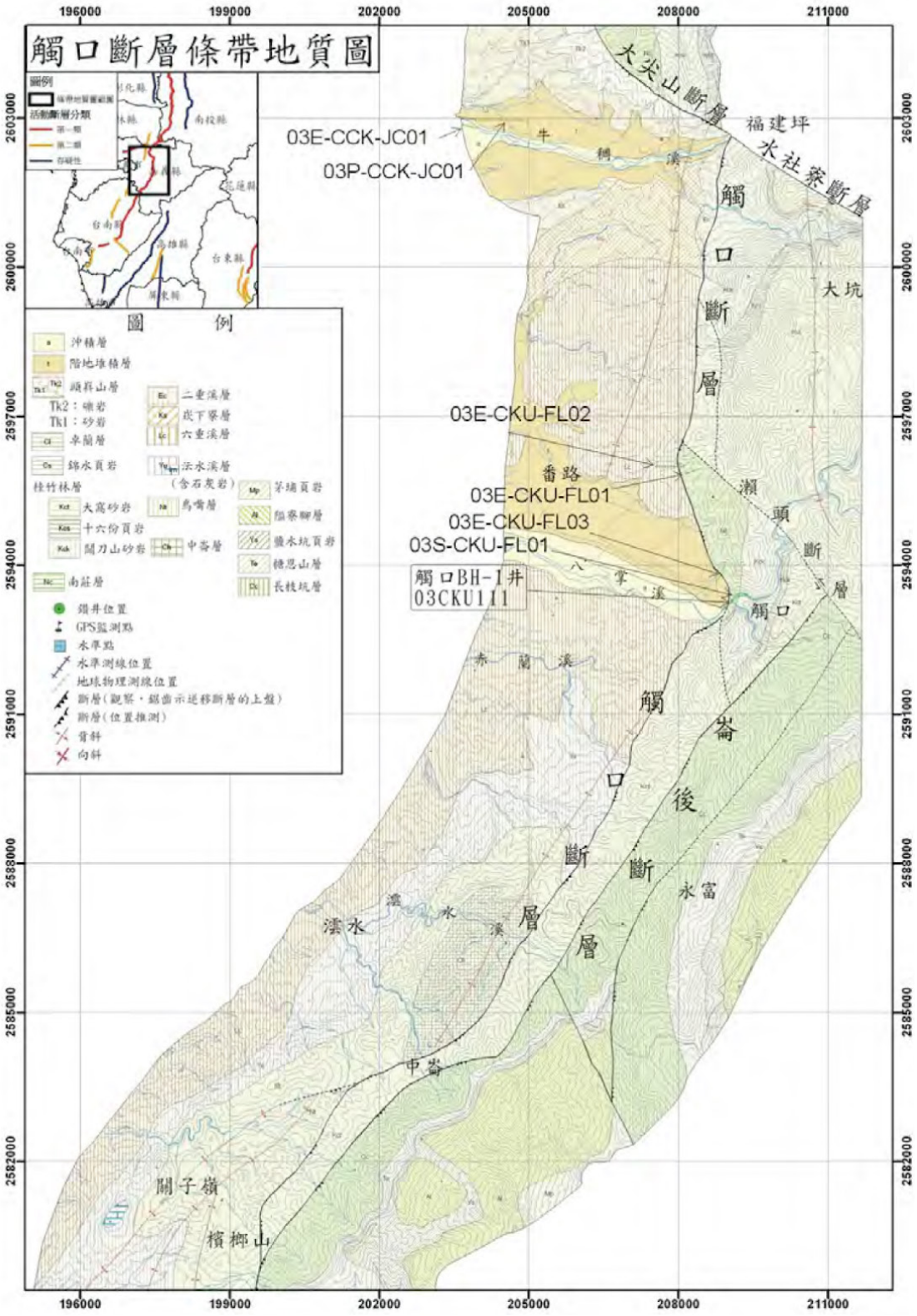


圖1-12：觸口斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。

Figure 1-12：Strip Map of the Chukou Fault.

1-5-1-3 崙後斷層

崙後斷層，是南部地區一條主要的逆移斷層，呈東北走向，由嘉義觸口東方向西南延伸至臺南縣左鎮鄉榮和村（圖1-13），長約48公里（中國石油公司，1986；劉彥求等，2007）。崙後斷層又稱烏山頭斷層，於地形上呈現觸口斷層的南向延伸，也是一個區分臺灣西南部外麓山帶與內麓山帶的重要界線斷層（中國石油公司，1986；林啟文等，2000c；何信昌等，2005；陳文山等，2003a；張徽正等，1998）。

崙後斷層上盤，主要出露中—上新統地層包括長枝坑層、糖恩山砂岩、鹽水坑頁岩、隘寮腳層、茅埔頁岩與竹頭崎層。崙後斷層下盤，主要出露上—更新統地層包括濁水溪層、六重溪層、崁下寮層與二重溪層(陳文山等，2003a；劉彥求等，2007)。由前人岩象分析結果可知，六重溪以上地層開始出現輕度變質岩屑，至六雙層又轉變為沉積岩岩屑為主(陳文山等，2003a)。楊志成等（2005）由沉積物的供應來源推論崙後斷層的構造發育應於二重溪層沉積後及六雙層沉積同時(約53萬年前)。

崙後斷層北接至觸口斷層，洪日豪等（Hung et al., 1999）由平衡剖面看出，崙後斷層之上下盤的層位落差量相當大，推論在此區域主要逆移量已由觸口斷層轉至崙後斷層。崙後斷層截切的最年輕地層為更新世中期之二重溪層，在曾文溪與菜寮溪流域，斷層於更新世晚期之後至今的活動還未有證據。野外調查顯示（黃文正等, 2020），崙後斷層於曾文溪以北的走馬瀨橋某面出露60~70度高角度剪切帶與小斷層，斷層帶寬度約為15~20公尺；然而在曾文溪以南的蘆芝坑溝剖面，剪裂帶內含2~3組剪切帶，總分布範圍約為120公尺寬，斷層面推估為N18^{o}E，傾角30^{o}E，較北邊緩和許多。且由上下盤河階年代對比，可知崙後斷層於兩千年內應無活動。

由1990-1997年之GPS資料顯示崙後（烏山頭）斷層兩側的平均水平縮短速度量不低，在楠西附近17~23公厘/年，玉井附近22公厘/年（Yu and Chen, 1998）。觸口（崙後）斷層的鄰近地區，應變速率約為0.48~2.01 μstrain/年（91^{o} - 135^{o}），為中度至顯著的壓縮速率。崙後斷層的地震活動並不顯著，但具有高應變率，暗示此區域之地殼應變正快速累積，可能有較大的地震潛勢，另一方面，近期的水平位移量也顯示斷層可能以非震性的潛移方式活動(陳文山等，2003a；饒瑞鈞等，2006)。

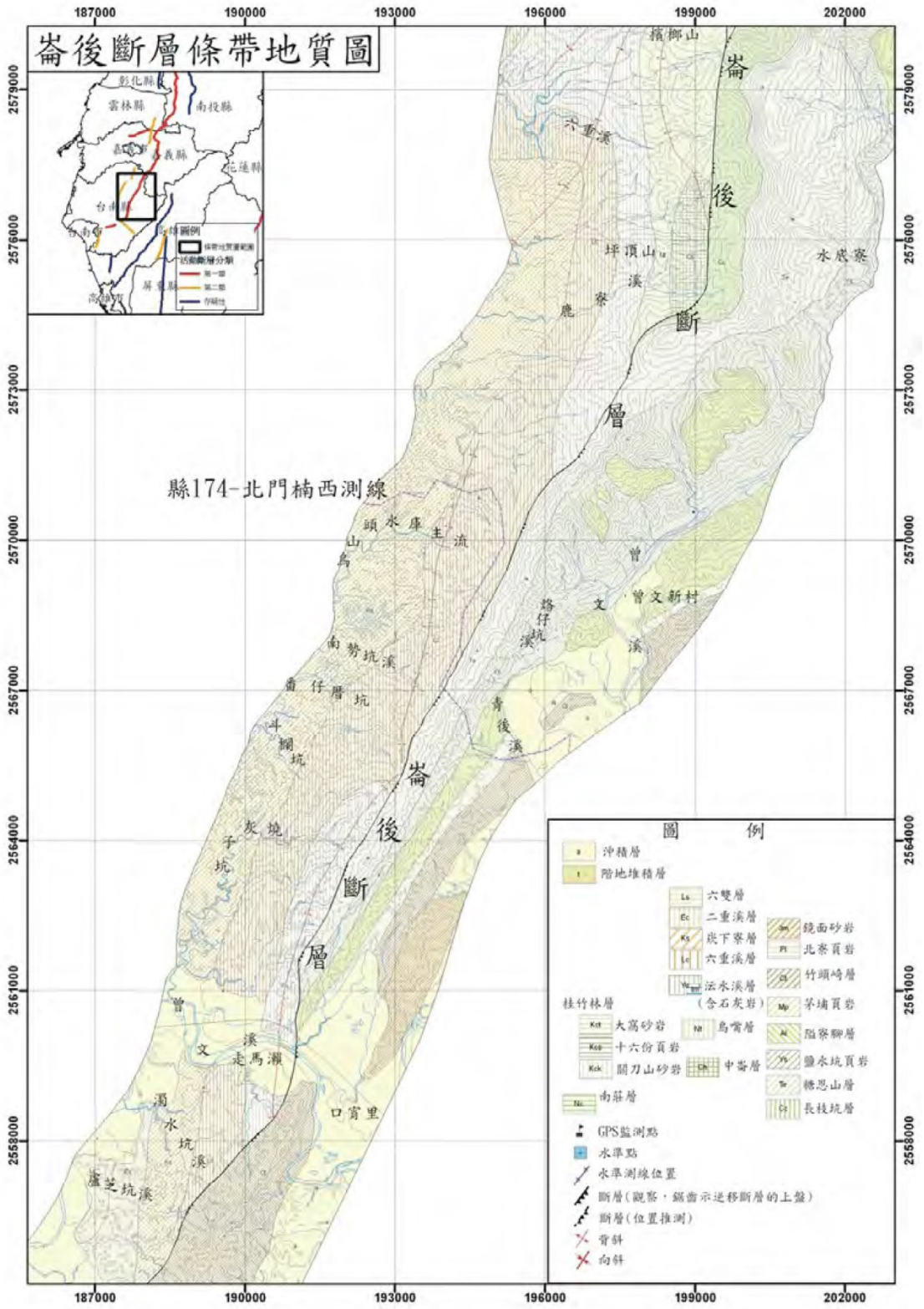


圖1-13：崙後斷層條帶地質圖。

Figure 1-13：Strip Map of the Lunhou Fault.

1-5-1-4 口宵里段層

口宵里斷層位於崙後（烏山頭）斷層上盤(圖1-14)，斷面西傾之背衝斷層，呈北北東走向，北起嘉義縣大埔鄉，南延經臺南市玉井區劉陳灣，南端在左鎮區附近尖滅或為左鎮斷層截失，長約20-25公里(劉彥求等，2020)。玉井區曾文溪劉陳灣剖面斷層帶上盤的竹頭崎層向東逆衝至階地礫石之上，下盤階地堆積層受拖曳呈現向斜形撓曲，並顯示至少有2次活動事件，礫石層底部碳十四採樣定年結果顯示為12670 ±40 BP，因此口宵里斷層目前列於第二類活動斷層。

口宵里斷層上盤出露地層主要為竹頭崎層或北寮層，下盤為北寮層或玉井頁岩以及上覆的階地堆積層；隨著口宵里斷層滑移量向南北兩端逐漸減小，構造形貌也漸轉為褶皺之單斜與其軸部破裂，其北端上盤局部移至隘寮腳層與茅埔頁岩，下盤為竹頭崎層；南端上下盤均為玉井頁岩。

口宵里斷層沿線斷層露頭不多，在曾文溪以南主要出露泥岩，此斷層為崙後（烏山頭）斷層之背衝斷層，斷層走向約N20°-40°E，向西傾斜約40度，落差最大位置在斷層中段，約位於劉陳灣附近，竹頭崎層向東逆衝至北寮層之上，並拖曳或發育分支斷層，北寮頁岩更向東逆衝至鏡面砂岩與階地堆積層上，斷層帶與擾動帶寬度向南北兩側迅速減小。由曾文溪南岸露頭可知（黃文正等, 2020），口宵里斷層帶切穿全新世的河階沉積物，斷層活動性應仍為活躍。由河階年代對比可推論，口宵里斷層若四千年來持續活動。垂直滑移率應小於9.5公厘/每年，斷層滑移速率須小於13.9公厘/每年；若為1.2萬年內持續活動，垂直滑移率應小於3.2公厘/每年，斷層滑移速率須小於4.6公厘/每年。

由大地變形觀測，兩者沿線所在區域也可見到相當高的位移速率，由水平速度場來看，跨越口宵里斷層–崙後（烏山頭）斷層約有1-3mm/yr的速度差；由抬升速率來看，臺南山區則有約7 mm/yr的平均抬升速率（景國恩等，2019）。以口宵里斷層–崙後（烏山頭）斷層沿線為核心約有5-10mm/yr的抬升速度。



圖1-14：口寮里斷層附近區域地質圖，改自中央地質調查所五萬分之一新化圖幅（何信昌等，2005）。

Figure 1-14：Geological Map of the Kouhsiaoli Fault.

1-5-1-5 左鎮斷層

左鎮斷層約呈西北走向(圖1-15)，由臺南縣山上鄉新庄附近至南化鄉心仔寮附近，長約10公里(Wang, 1976；中國石油公司，1989；張徽正等，1998；林啟文等，2000b)。左鎮斷層為左移斷層，目前仍未發現有截切更新世晚期地層的證據，暫列為第二類活動斷層。本區位於新化丘陵，曾文溪的支流菜寮溪穿流其間，發育顯著的曲流地形。由於斷層兩側均為泥質岩層，並無明顯斷層地形特徵；因此地形調查結果，僅在左鎮以西的區域才有較明顯的斷層地形，在山上鄉新庄至左鎮之間，斷層北側的地勢超過 100 公尺，而斷層南側的海拔則在70 公尺以下，地勢有明顯差異，左鎮斷層北側出露的地層包括竹頭崎層、北寮頁岩與玉井頁岩，斷層南側出露的地層則包括古亭坑層、崎頂層，此外菜寮溪兩岸則分布階地堆積層與沖積層。(劉彥求，2007)。此斷層最早僅由衛星影像辨認出線形，經野外調查發現沿斷層線形位置有小型斷層泥帶，並常群聚拼合成一寬約數公尺至十數公尺的斷層泥帶，但僅限於斷層西段。

綜合野外調查結果，左鎮斷層的提出基於兩點理由：1.在航照及遙測影像上有明顯的線形；2.斷層兩側構造型態不同。在左鎮以西，線形、岩層分布、構造型態及野外露頭均可確認斷層存在；左鎮至三角潭間則無明顯地形與地質特徵；三角潭以南亦無明顯地形與地質特徵，其差異僅在兩側地層與構造型態不同。就構造型態而言，斷層北側為一系列向斜與背斜構成的褶皺串列（fold chain），斷層南側則為向西傾斜的同斜構造。由於斷層北側主要褶皺軸呈現由遠離斷層至接近斷層、軸的方位由東北轉向南北；而斷層南側的地層界線的方位，由遠離斷層至接近斷層、由北北西轉向西北，顯示出左移性質的橫移斷層構造特徵，其活動時代應屬六雙層沉積之後，亦即更新世晚期。依據 GPS 測量資料分析結果，左鎮斷層兩側仍有明顯的水平速度變化量，跨斷層的速度場變化分析結果，1996-2006年間的運動為逆移形式兼具右移分量(饒瑞鈞等，2005，2006)。

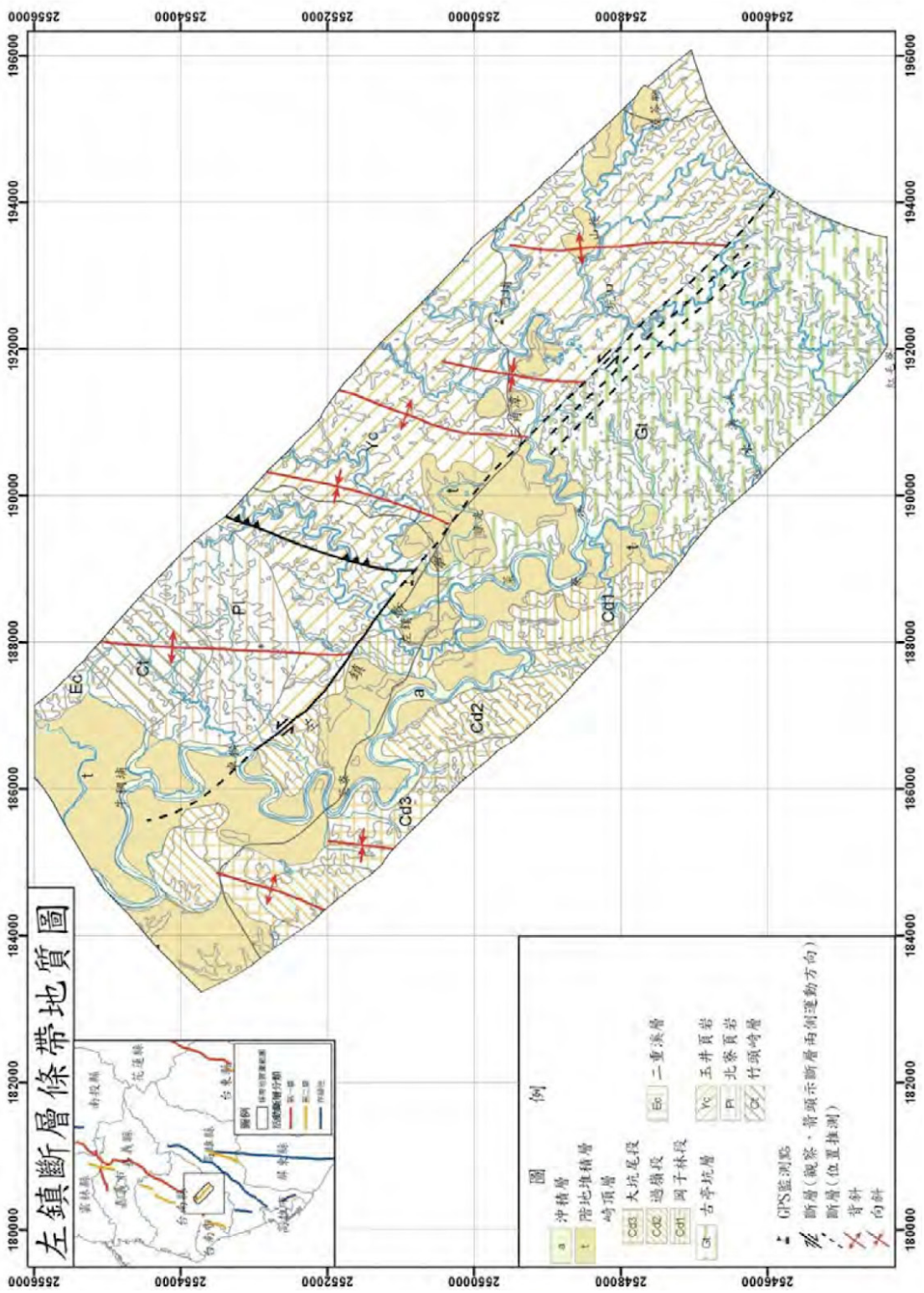


圖1-15：左鎮斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。

Figure 1-15：Strip Map of the Tsochen Fault.

1-5-1-6 九芎坑斷層

九芎坑斷層，約呈北北東走向(圖1-16)，由雲林縣古坑向南延伸至嘉義縣竹崎附近，長約17公里(劉彥求等，2007)。九芎坑斷層為逆移斷層，斷層截切更新世晚期的階地礫石層，林啟文等(2000a)列為第二類活斷斷層。九芎坑斷層位於嘉南平原與嘉義丘陵的交界，斷層西側有一系列的階地分布，是古沖積扇的遺跡。九芎坑斷層東側與大尖山斷層之間，另有一群沖積扇階地，這些階地的扇頂位於大尖山斷層西緣（大尖山斷層下盤），因為斷層作用造成大尖山斷層上盤岩層抬升，河流急速下切後在斷層帶西側形成沖積扇，其後由於西側九芎坑斷層的活動，造成沖積扇隆起，殘留階地分布於現今山麓。

九芎坑斷層兩側出露的地層，包括卓蘭層、頭嵙山層、紅土臺地堆積層、階地堆積層與沖積層(劉彥求等，2007)。卓蘭層主要岩性為砂岩與頁岩，僅分布於斷層的上盤。頭嵙山層的下段主要為粉砂岩與砂頁岩的互層，頭嵙山層上段主要出露礫岩與砂岩。紅土礫石層與階地礫石層，都是由未膠結的礫石、砂與粉砂所組成，但前者已有紅壤化現象；沖積層主要由泥、粉砂、砂和礫石所組成。陳文山等（2003b）研究本區的地層特性結果，將斷層上盤出露的卓蘭層對比沄水溪層與六重溪層，頭嵙山層則對比崁下寮層與二重溪層；而下盤出露的頭嵙山層則對比六雙層。

九芎坑斷層沿線，在數個剖面可以見到完整的斷層帶與上下盤，例如於石牛溪剖面可以觀察到4條規模不同的逆移斷層，集中未變形岩層、斷層泥帶（gouge zone）與毀壞圍岩（damaged host rock）交互出現，總寬度約850公尺（劉彥求等，2003；陳文山等，2003），愈往南斷層帶的寬度逐漸減小。在最西緣的主斷層，卓蘭層的粉砂岩逆衝至河階礫石層之上，斷層截切水平層態的礫石層；主斷層面位態為N24°E/24°E，為逆移形式兼具右移分量，斷層面傾向補角（rake）約60度，斷層的垂直斷距大於13公尺。由野外露頭調查可判斷石牛溪剖面之斷層擾動帶是由主斷面逐漸向上盤方向擴展發育，形成前端覆瓦扇狀形貌（leading imbricate fan）。此外，其他剖面的調查也顯示九芎坑斷層變形帶的內部普遍存在分支斷層及伴隨的拖曳褶皺。由石牛溪剖面及大湖口溪剖面露頭可觀察到斷層位態多為東北走向、斷面往東傾(大湖口溪剖面分支斷層位態為N10°W/60°E

及N20°E/32°E)。然而地質鑽探結果判讀之斷層面傾角較地表露頭低，例如由竹崎一號井的斷面深度配合地形研判，斷層面傾角應小於17度。

許晉耀（2003）在石牛溪、大湖口溪與永興社區等地採得碳質物以測定階地的年代，其中最年輕個標本的年代為距今18,540±130年，因此可以研判九芎坑斷層最晚在距今18,540 年內曾經活動過。在1996-1999年間，九芎坑斷層兩側的平均水平位移速度皆小於10公厘/年，而1999-2005年間的平均位移場則顯示，斷層上盤與下盤的速度向量差約13 公厘/年。另一方面，近斷層的速場變化則顯示，1996-2005年間橫跨九芎坑斷層的平行斷層走向之水平分量速率均小於1.0公厘/年，而1999-2005年間垂直斷層走向的水平分量速率，由0.2公厘/年增加至9.7公厘/年；大地測量的結果指示九芎坑斷層運動方式為逆移形式兼具左移分量，並且具有一定的活動潛勢(侯進雄等，2003；饒瑞鈞等，2006；劉彥求等；2007)。

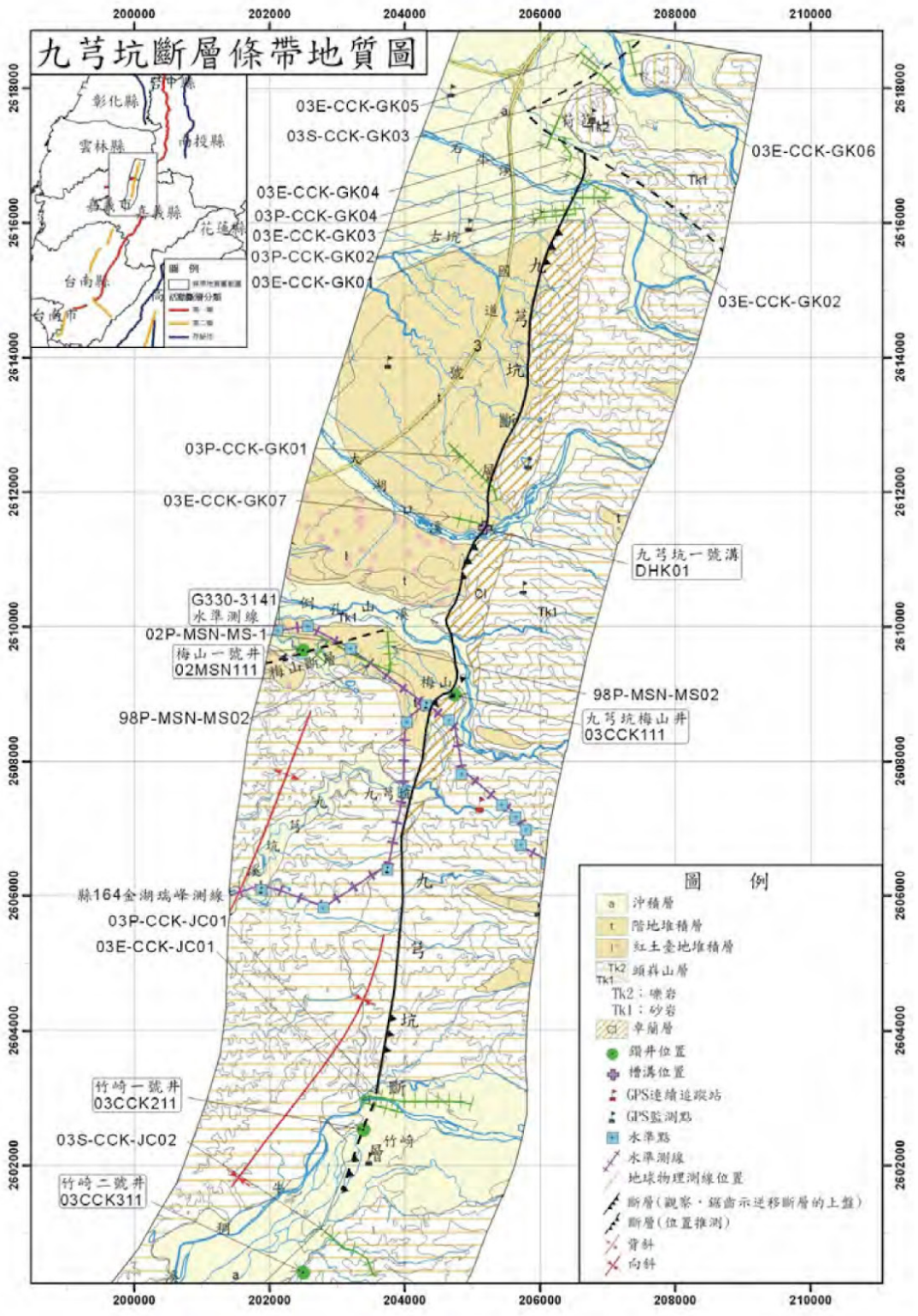


圖1-16：九芎坑斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。

Figure 1-16：Strip Map of the Chiuchiungkeng Fault.

1-5-1-7 梅山斷層

梅山斷層（圖1-17）為右移斷層，曾在1906年發生梅山地震（規模7.1），故為第一類活動斷層，斷層由嘉義縣梅山延伸至民雄，呈東北東走向，長約13公里（劉彥求等，2007）。本區位於嘉南平原與斗六丘陵的交接帶，由西至東包括平原區、隆起河階 - 沖積扇區與丘陵區；丘陵區以東則為西部衝上斷層山地（林朝棨，1957）。梅山斷層附近有許多明顯的線形，董德輝（1987）利用航照辨認梅山斷層的沿線有7段線形，這些線形的兩側均有明顯高差，構成1-6公尺不等的崖階。前人研究多顯示梅山斷層位於1906地表破裂跡以北，陳柏村等（2020）推測這是因為梅山斷層右移時帶動表層沉積物，經過拉張、擠壓、與橫移作用導致地表產生的變形結果。

本區主要出露的地層包括頭嵙山層、紅土臺地堆積層、階地堆積層與沖積層。頭嵙山層，以厚層砂岩夾薄層泥岩為主；陳文山等（2003b）將本區的頭嵙山層劃分為六雙層。紅土臺地堆積層以礫石、砂與泥為主，表層有紅壤化現象，主要分布於前述的沖積扇；階地堆積層以礫石、砂與泥為主，主要分布在低位階地；沖積層以礫石、砂與泥為主。值得注意的是，此區域已被報導有許多正斷層的出露，推測應為梅山斷層相關之副斷層系統（黃明哲等，1985；董德輝，1987）。

謝昭輝與辛在勤（1988）與謝昭輝（1989）由反射震測探勘結果，研判在梅山地區斷層面向南傾斜約70度，且斷層北側相對上升。淺層反射震測結果，梅山斷層在淺部岩層展現寬廣的破裂帶，常見開花狀構造，反映梅山斷層主要以走向滑移形式運動，主斷層為高角度向南傾斜，地表下構成的破裂帶寬度可達450公尺；斷層延伸至中坑以西，可能以潛伏方式持續向西延伸。

1906年嘉義發生規模7.1的地震，震央位於三美莊（尾莊）與開元后之間，當時所形成的地表破裂稱為梅仔坑斷層（梅山斷層）與陳厝寮斷層（Omori, 1907a, b）。梅仔坑斷層約呈東北東走向，最大右移量為2.4公尺，最大垂直位移量為1.8公尺；開元后以東為北側上升，開元后以西為南側上升；斷層自民雄向西可能以潛伏斷層形式延伸至新港附近，根據航照判釋亦顯示梅山斷層有向東延伸的跡象（Omori, 1907a, b）。由地形地質、槽溝開挖等古地震調查結果來看，

梅山斷層在12000年內曾經活動過，但目前對1906年以前的活動年代與活動週期仍不清楚。大地測量結果顯示，梅山斷層東段的高程變化量較西段顯著，而GPS　測量結果指示，梅山斷層近期主要以右移形式運動。

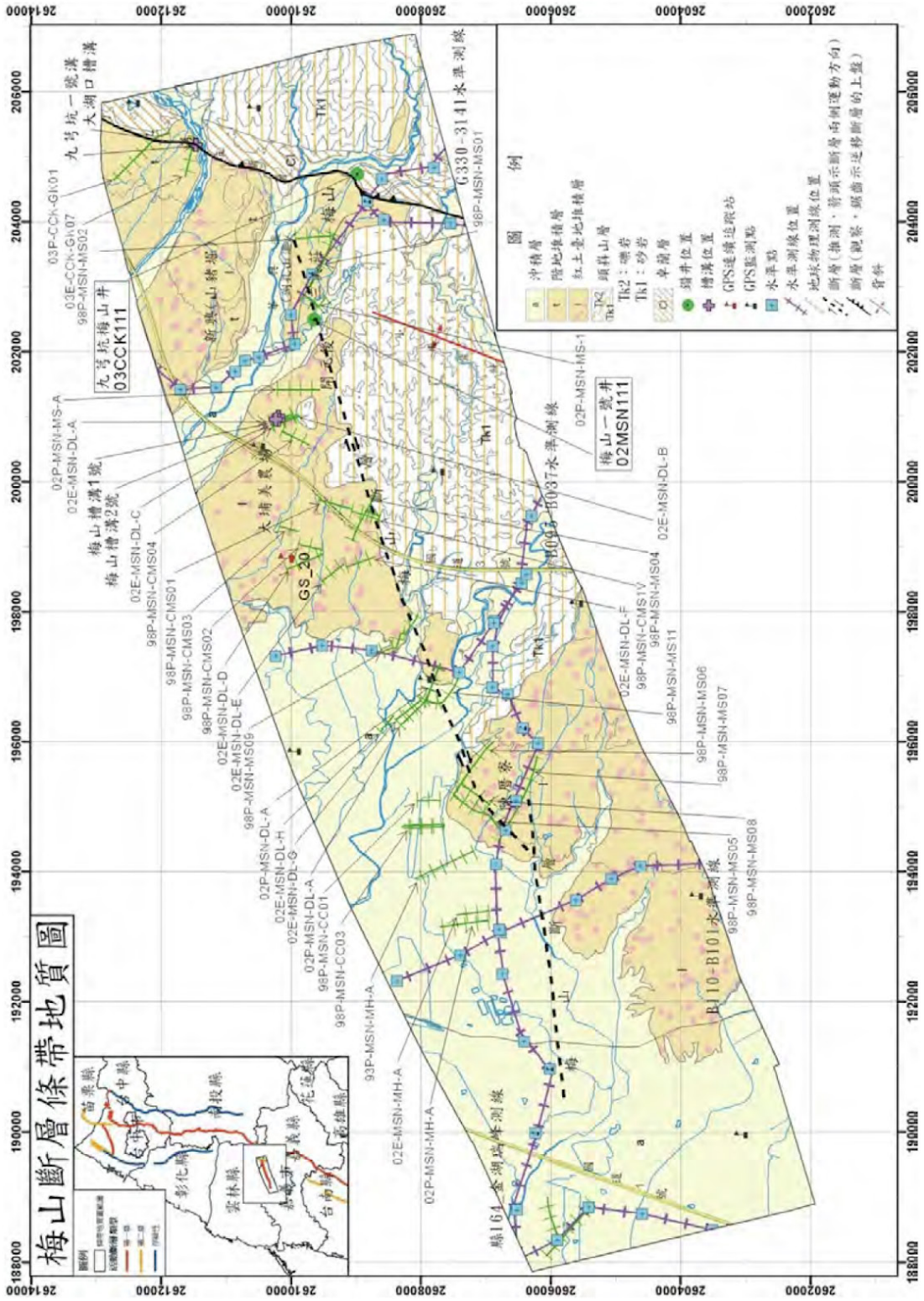


圖1-17：梅山斷層條帶地質圖(劉彥求等，2007)。

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

1-5-1-8 木屐寮斷層

木屐寮斷層位於臺南白河東方山豬崁（圖1-18），向南延伸至六重溪北岸，呈北北東走向，長約7公里(劉彥求等，2007)。木屐寮斷層為逆移斷層，截切第四紀晚期的地層，列為第二類活動斷層。木屐寮斷層位於嘉南隆起海岸平原與嘉義丘陵的交接帶。由航照。數值地形模型（DTM）與衛星遙測影像發現，在木屐寮斷層跡附近呈現明顯的線形，北起頭前溪橋南側的山豬崁，南至六重溪北岸，此線形區隔東側較高的丘陵區與西側平緩的平原區，兩側落差約數十公尺。

本區出露的地層包括崁下寮層、二重溪層、六雙層、階地堆積層與沖積層。崁下寮層主要由暗灰色泥岩所組成；二重溪層以灰色砂質泥岩與泥質砂岩為主；六雙層下段為棕黃色砂岩和厚層泥岩，上段以棕黃色砂岩為主；階地堆積層與沖積層，均以礫石、砂與泥為主。綜合地質調查結果，野外雖有崖狀特徵，且更新世晚期的六雙層有傾動現象(低於30度)，指示地表下可能存在斷層，但地表尚無發現斷層出露痕跡，可能為盲斷層。

地球物理探勘結果顯示，在木屐寮斷層西側地下淺部可能有分支斷層存在。此外， 根據GPS 測量結果，除了集集地震的影響以外，2002 年以後木屐寮斷層兩側岩層的水平位移出現明顯變化量，顯示斷層兩側為壓縮形式的逆移斷層的特性。



圖1-18：木屐寮斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。

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

1-5-1-9 六甲斷層

六甲斷層約呈北北東走向，由嘉義縣六重溪附近向南延伸至烏山頭水庫的臥牛山（圖1-19），長約17-21公里（石再添等，1986；張徽正等，1998；林啟文等，2000b；楊志成等，2005；劉彥求等，2007）。六甲斷層為逆移斷層，在地下淺部截切全新世地層，現列為第一類活動斷層。六甲斷層位於嘉義丘陵與嘉南平原的交接帶。本區地勢東高西低，在丘陵區西緣為古沖積扇。六甲斷層東側丘陵區，出露的地層包括六重溪層、崁下寮層、二重溪層與六雙層。這些地層在斷層上盤構成一背斜構造，稱為牛山背斜，不對稱的牛山背斜的發育可能與六甲斷層的發展有關。六甲斷層西側則零星分布階地堆積層，平原區則覆蓋沖積層，兩者均以礫石、砂與泥為主。

六甲斷層在地形上呈現明顯的線形，鑽探結果證實六甲斷層在近地表處為一向東傾斜30度的斷層，但此斷層可能尚未穿出地表，而斷層的形成方式可能是沿著向斜軸部發育的逆移斷層。由各個鑽井資料連結所建立的剖面顯示（陳文山等，2006），六甲斷層在地下淺部的斷層面位態為N40°E/30°E，為兼具左移分量的逆移斷層。由野外露頭、鑽井及定年資料的分析結果，六甲斷層的長期垂直滑移速率約為5.5-6.3 公厘/年，長期水平滑移速率約為11.0-12.7 公厘/年(楊志成等，2005；陳文山等，2006；吳樂群等，1999)。依據GPS 監測結果，1999-2005 年間九芎坑斷層 - 木屐寮斷層 - 六甲斷層系統間有明顯的速度差異，在斷層上下盤的速度向量變化量約13 公厘/年；而2003-2005 年間六甲斷層上下盤的水平位移並無明顯的變化量。依據近斷層的水平位移剖面結果，1999-2006 年間橫跨六甲斷層的速度場變化顯示斷層為逆移形式兼具右移分量饒瑞鈞等，2006)。



圖1-19：六甲斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。

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

1-5-1-10 新化斷層

新化斷層約呈東北東走向（圖1-20），由臺南縣新化東北方那菝林至新化西北方北勢，長度約6公里。新化斷層為右移斷層，1946年曾誘發地震（芮氏規模6.3），故為第一類活動斷層。由古地震調查結果顯示過去10,000年至少有3次的活動紀錄（張麗旭等，1947；劉彥求等，2007）。新化斷層位於新化丘陵西緣，於那菝林至深坑橋有明顯線形，往南連接深坑子溪，河道流路亦呈現右移錯移的河流轉向地形，研判應為斷層錯移造成。由五千分之一像片基本圖與明治時代地形圖比對，斷層地形早已存在，並已經累積超過數十公尺的右移錯移量，暗示已經歷多次斷層活動。

本區出露的地層包括六雙層、階地堆積層與沖積層。六雙層下段為棕黃色砂岩和厚層泥岩，上段以棕黃色砂岩為主；本層在新化圖幅中又稱為崎頂層（何信昌等，2005）。階地堆積層，以礫石、砂與泥為主；沖積層，也以礫石、砂與泥為主。

那菝林附近調查斷層通過位置可見2 組雁行排列的裂隙，分別N70°-80°W 及N60°E ，此2 組破裂與橫移斷層系統中R1 與P 的破裂方向相符，指示約N80°E之斷層走向。在新化丘陵附近的露頭顯示岩層大多向北呈緩傾斜，但在臺南新化鎮臺南農業改良場東側的小河溝中觀察到陡直的泥質地層，推斷應受到新化斷層的影響，地層內含有半淡水相的貝類化石（Tarebia granifera Lamarck），其碳十四定年結果約7,700 年，顯示斷層在全新世內的活動性。由新化斷層沿線鑽井岩芯資料研判，斷層的傾角相當陡，與河溝內所見陡直的岩層相符。

綜合淺層震測結果，新化斷層淺部地下構造出現寬廣的剪切帶，可見明顯的開花構造，斷層帶以北的水平地層連續性佳，剪切帶內岩層則被高角度的不連續面截切，形成一東窄西寬的斷層帶。新化斷層東段的不連續帶向下收斂的現象較明顯，地層雖有垂直的層位落差，但錯距不大，並與地表地形有一致的變化；新化斷層的西段，淺部地層向北呈緩傾斜，而剪切帶也向西逐漸變寬，開花狀構造往西向下收斂的型態逐漸消失，地形上的表現也漸單調，而斷層至北勢附近仍有向西延伸的可能。李錫堤(2000)及陳文山等（2002，2004b）

之槽溝開挖調查皆顯示新化斷層在一萬年內應有多次古地震活動，並可清楚看到開花構造的斷層型態。

由 1999-2005 年的GPS 測量結果，新化斷層兩側的水平速度場增加約20公厘/年，顯示新化斷層的運動以右移形式為主。1999-2006年間橫跨新化斷層的速度場變化顯示，主要位移方向平行斷層的走向，顯示斷層在19992006 年間為右移形式（侯進雄等，2002；饒瑞鈞等，2005，2006；劉彥求等，2007）。

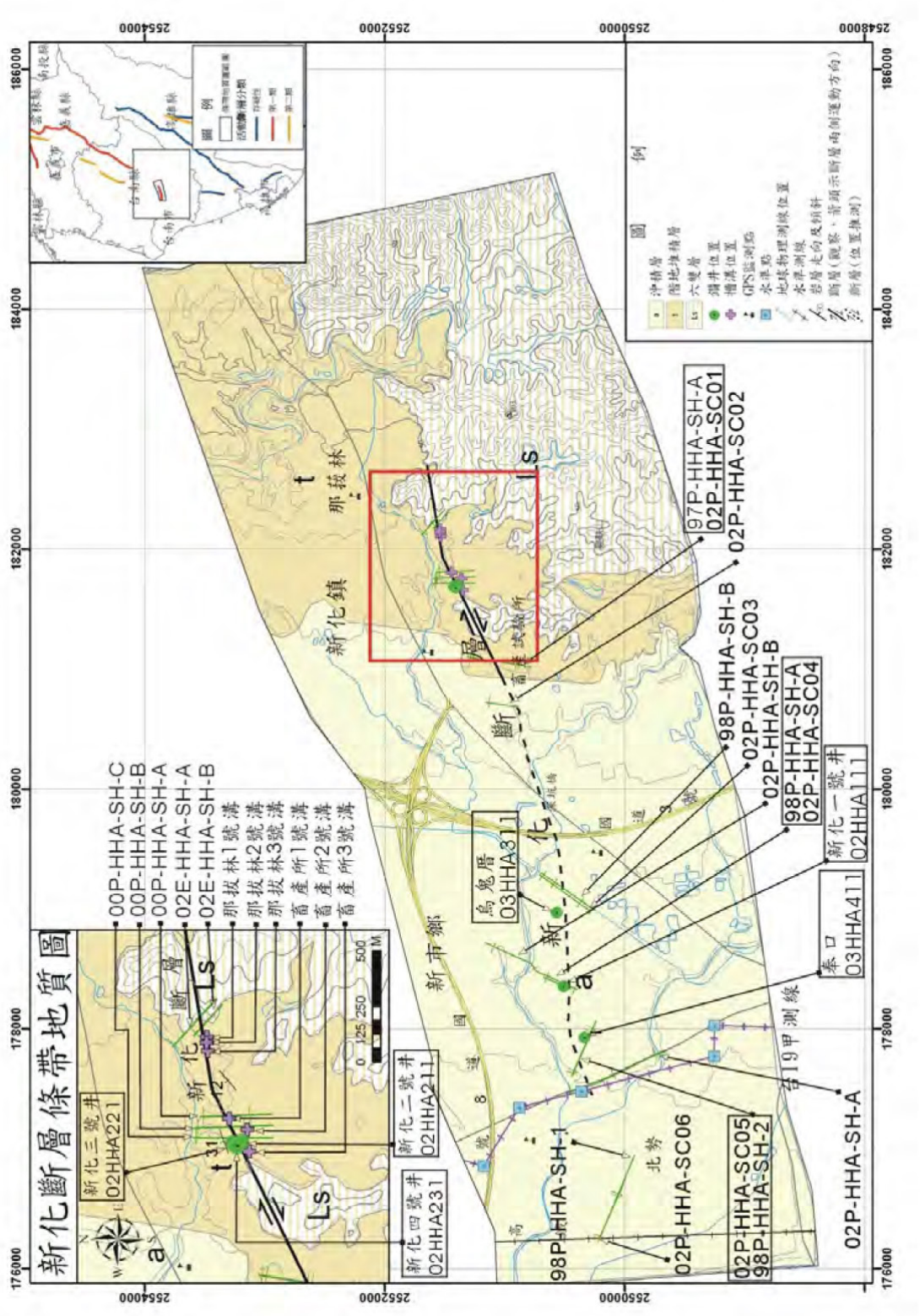


圖1-20：新化斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。

Figure 1-20：Strip Map of the Hsinhua Fault.

1-5-1-11 後甲里斷層

後甲里斷層約呈南北走向（圖1-21），由臺南縣永康沿至虎山，長約12公里（劉彥求等，2007）。依據地下地質探查結果研判為一斷層面向西傾斜的逆移斷層，斷層截切更新世晚期的地層，造成全新世地層的褶皺，但尚未發現穿出地表的證據，暫列為第二類活動斷層。

臺南臺地為一長軸為南北向的橢圓，由地形判釋與野外調查結果，臺地東緣有數階的地形崖。孫習之（Sun, 1964）由航照判釋發現臺地臺地東緣有明顯的斷層崖，其中段高約30公尺，並被一約15公尺高的侵蝕平臺所隔，因此推測後甲里斷層為一向西傾斜的逆移斷層，且在臺南層沉積之後歷經2次的抬升作用。

本區出露的地層包括臺南層與沖積層，但臺地上的露頭有限。臺南層以膠結疏鬆的厚層細至中粒砂岩為主，偶夾薄層頁岩。沖積層則以未膠結的砂、礫石與泥為主。由北向南的基地開挖調查可以見到臺南層的岩層傾角逐漸變陡，顯示臺南臺地在臺南層沉積後有不等量抬升現象。由虎山地區地質鑽探岩心中剪切變形帶的深度分布，可確定後甲里斷層為一向西傾斜的逆移斷層，且斷層的傾角應大於35度。由淺層震測、地電與地質鑽井資料研判，後甲里斷層為一向西傾的盲斷層，斷層上盤伴生拖曳褶皺現象，此拖曳褶皺由許多小波長的褶皺組成（石瑞銓等，1998；石瑞銓等，2003）。

臺南臺地的槽溝開挖結果均未挖掘到後甲里斷層的主斷層帶（李錫堤，2002；陳文山等，2003a，2006），但是槽溝中可見到多組不同方向的小型斷層，顯示臺南層及其上更年輕的地層受劇烈擾動，造成岩層撓曲、傾斜及液化等現象。因並無發現後甲里斷層出露或截切全新世臺南層的證據，故推論後甲里斷層應為盲斷層（劉彥求等，2007）。

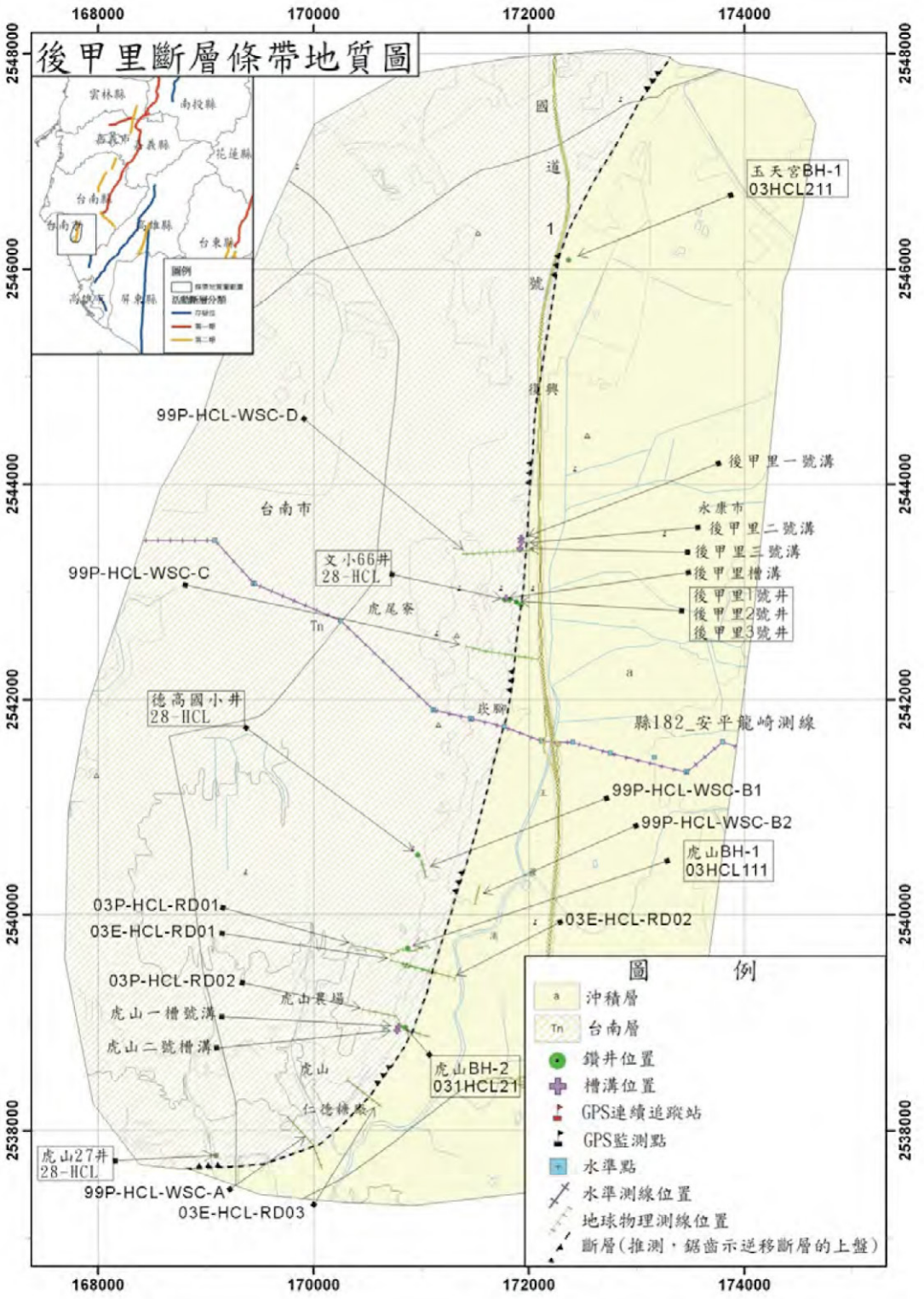


圖1-21：後甲里斷層條帶地質圖（劉彥求等，2007）。

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

1-5-2 本年度工作項目

- 本年度（111年度）針對嘉南地區的十一條斷層（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、口寮里斷層、崙後（烏山頭）等區域）與南部科學園區、沙崙綠能科學城、台南都會區等重要區域進行研究（圖1-2）。
- 本計畫利用雷達差分干涉方法觀察地表變形，其中包含 2014-2016年度、2016-2018年度以及2018-2021年度三個時段的雷達差分干涉處理結果。 雷達解算結果除與GNSS連續站做對比及檢測外，亦針對移動站及水準測量做對比。
- 經過對比後，於觀測區域中所包含的十一條斷層帶，配合已知的地質構造剖面，每條斷層皆由選定方位產製北中南三條剖面，呈現雷達解算後的地表變形速率。並選取木屐寮，六甲，崙後/口寮里等斷層帶區域由垂直斷層剖面萃取速度資訊，利用斷層反演模型推估斷層滑移速率。
- 針對觀測區域的GNSS連續站的時間序列做分析與比對，並選取十個重要區域做地表變形時間序列分析與呈現。

1-5-2-1 本年度計畫期中交付工作項目

1. 研究區域中三個時間段（2014-2016, 2016-2018, 2018-2021）的升軌視衛星方向平均速率。
2. 垂直各斷層方向剖面之視衛星方向平均速率變化。
3. 初步三個時間段（2014-2016, 2016-2018, 2018-2021）的升軌視衛星方向平均速率與GNSS連續站轉換視衛星方向平均速率之比對。
4. 雷達視距方向速度轉換垂直與東西向試驗成果：利用110年度（去年度）高屏地區2018-2020 PSI視衛星方向平均速率轉換水平及垂直速度與GNSS連續站水平及垂直速度比對。

1-5-2-2 本年度計畫期末交付工作項目

1. 研究區域中三個時間段雷達視衛星方向速率（2014-2016, 2016-2018, 2018-2021）。
2. 雷達速度場與GNSS資料比對。
3. 至少一個時間段使用SBAS方法處理雷達差分干涉之成果。
4. 至少一個時段雷達資訊轉換成垂直與東西方向之成果。
5. 與斷層方向垂直之剖面，每條斷層至少一條。
6. 三條利用雷達資料擬合之斷層滑移量模擬與分析。
7. 選定之重要地點之地表時間序列分析。

第二章、計畫執行方法及進行步驟

2-1 雷達差分干涉

早期處理PSI的過程中，必須注意SAR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。

綜合上述考量，本計畫使用Sentinel-1衛星作為主要之分析影像，其影像可覆蓋整個研究區域(如圖2-1)，飛行軌道包含升軌和降軌，可獲得不同拍攝角度之成果，再搭配重複拍攝頻率為6-12天，是非常適合用來監測本計畫的研究區域，更多的影像相關資訊，請詳見表2-1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) 2018-2021 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：Sentinel-1衛星影像資訊。

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

影像時間段	飛行軌道	拍攝模式	再訪頻率	處理划幅
時間段(I) 2014-2016	升軌 Path: 69	TOPS	12天	Subswath: 1 (F1)
	降軌 Path: 105	TOPS	12天	Subswath: 2+3 (F2+F3)
時間段(II) 2016-2018	升軌 Path: 69	TOPS	6-12天	Subswath: 1 (F1)
	降軌 Path: 105	TOPS	6-12天	Subswath: 2+3 (F2+F3)
時間段(III) 2018-2021	升軌 Path: 69	TOPS	6-12天	Subswath: 1 (F1)
	降軌 Path: 105	TOPS	6-12天	Subswath: 2+3 (F2+F3)

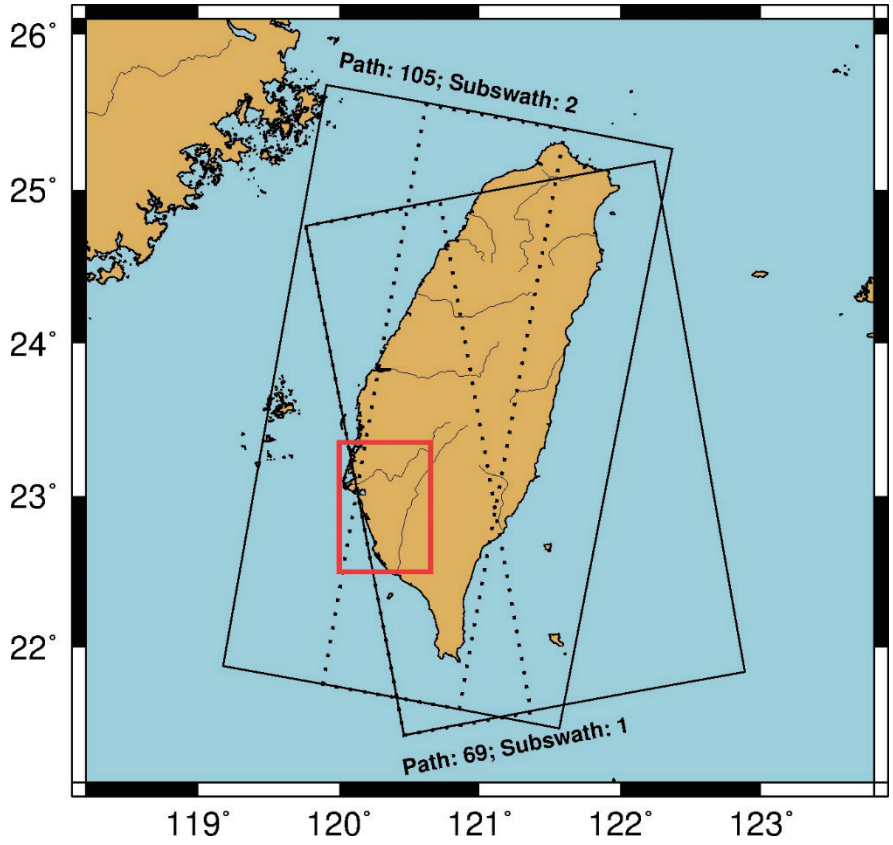


圖2-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。

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

2-1-1 永久散射體雷達差分干涉技術 (PSInSAR) 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2-2)，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2-2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，則可獲取較為可信的雷達振幅資訊。另外，在相位資訊的角度來看(圖2-3)，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PSInSAR這個演算法裡最重要的核心技術。

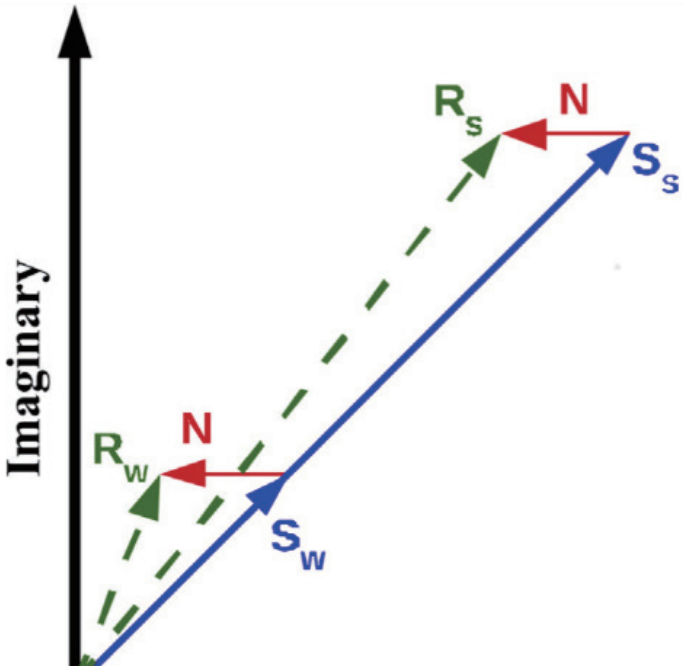


圖2-2：不同振幅的散射體受到雜訊干擾之示意圖。(Osmanoglu et al., 2015)

Figure 2-2 ：Scatterer can generates various scatter and noise with different amplitudes. (Osmanoglu et al., 2015)

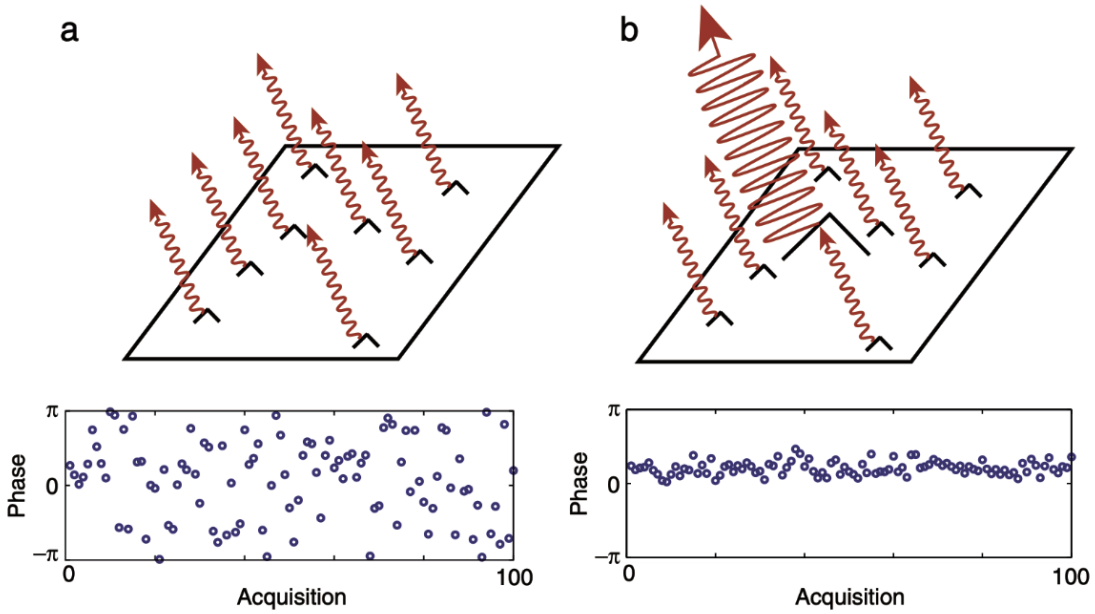


圖2-3：永久散射體對相位的影響示意圖。(a)一般散射體所反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(b)一個像素之中有一個好的永久散射體時，反射的雷達相位資訊在時間序列上之示意圖。(Hooper et al., 2012)

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

2-1-2 StaMPS技術的PS點位選取概念

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

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

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

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

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

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

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-sight, LOS)方向的變形速率，並且可以時間序列的方式展現空間上的變異。

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

本計畫的雷達影像處理流程主要分為兩個階段，第一階段是雷達差分干涉處理；第二階段是StaMPS技術解算PSInSAR成果。在第一階段將使用ESA所開發的免費軟體SNAP (Sentinel Application Platform) 進行雷達影像差分干涉處理，主要執行步驟可細分為三個部分：A部分為Sentinel-1影像的前處裡部分。B部分為雷達差分干涉的處理部分。C部分為影像輸出為StaMPS軟體格式的處理部分，圖2-4顯示第一階段的流程圖。

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

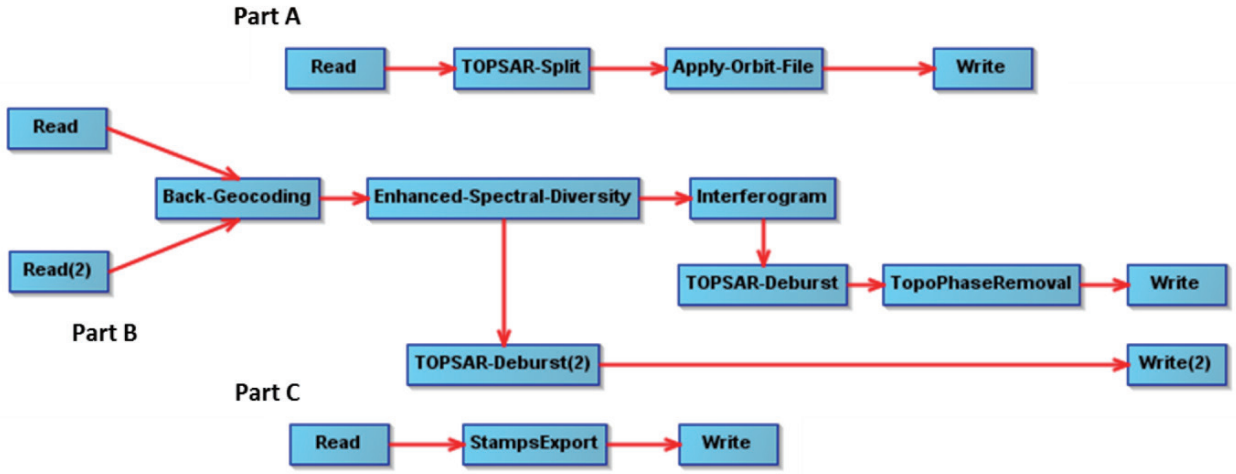


圖2-4：雷達影像處理流程第一階段-雷達差分干涉處理流程圖。本階段主要工作為使用SNAP軟體處理Sentinel-1影像的差分干涉，並且將其輸出為StaMPS軟體所能使用的檔案格式。A部分為Sentinel-1影像的前處裡部分。B部分為雷達差分干涉的處理部分。C部分為影像輸出為StaMPS軟體格式的處理部分。(修改自Foumelis et al., 2018)

Figure 2-4：First stage of radar processing - flow chart of radar interferometry. In this stage, we use GMTSAR for radar interferometry, and export it to STaMPS format. Part A is the preprocessing of Sentinel-1 images. Part B is for radar interferometry. Part C is exporting the data to StaMPS format.

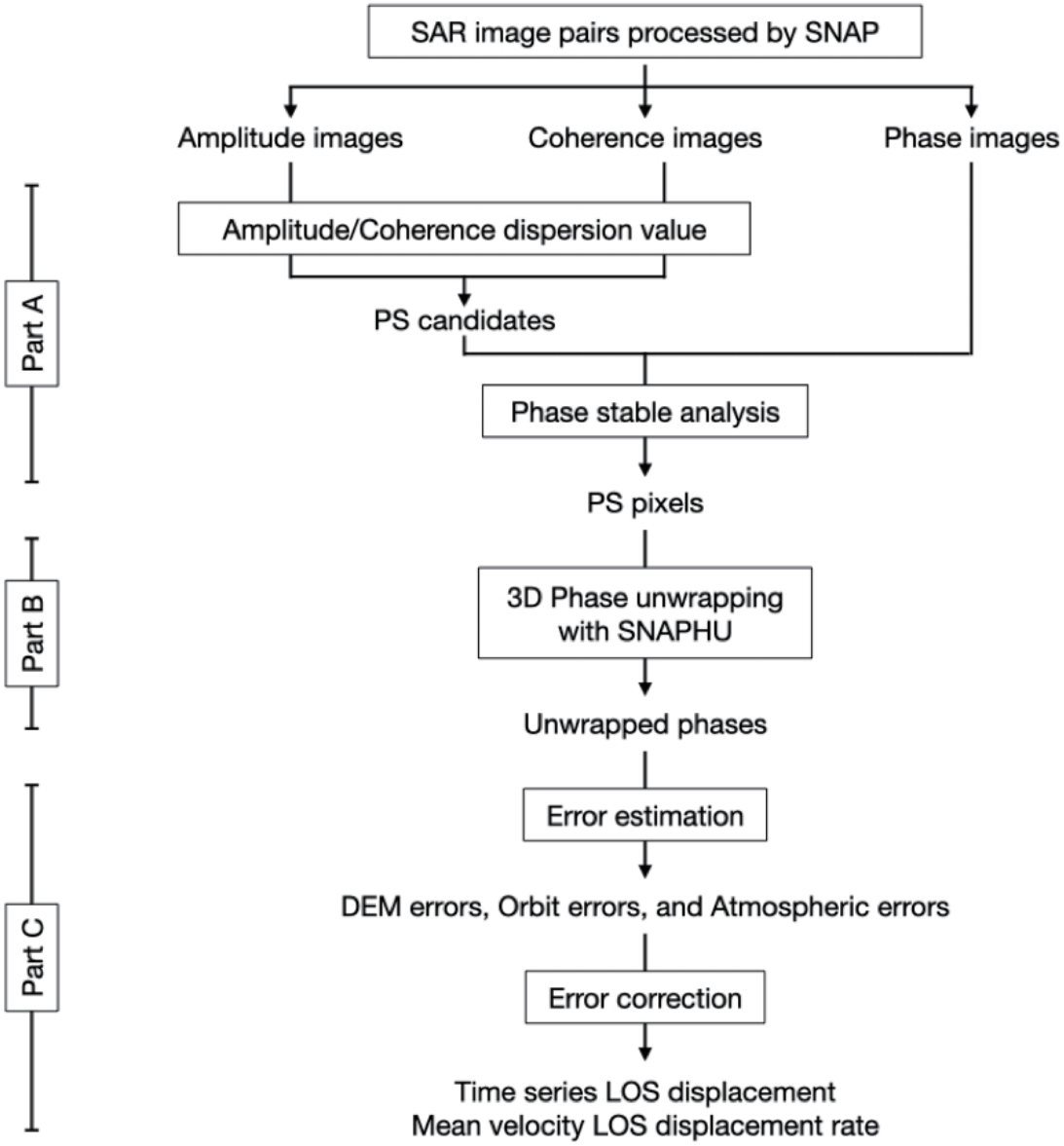


圖2-5：雷達影像處理流程第二階段 - PSI處理流程圖。本階段主要工作為使用StaMPS演算法求得研究區域內地表變形的PSI時間序列與平均速度場之成果。

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

2-1-3 技術上需克服之困難

1. 雖然PSInSAR技術可以有效萃取出永久散射體的位移資訊，但是在植被過於茂密地區或是因為影像對所跨越的時間段落過長時，會導致空間上的永久散射體分佈較為稀疏，因而導致演算法的計算誤差。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2-6)。
c. 將GNSS的時間序列資料計算至視衛星方向的速度值，與雷達影像獲得之時間序列進行比對，以評估雷達影像結果的準確性(圖2-7)。

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

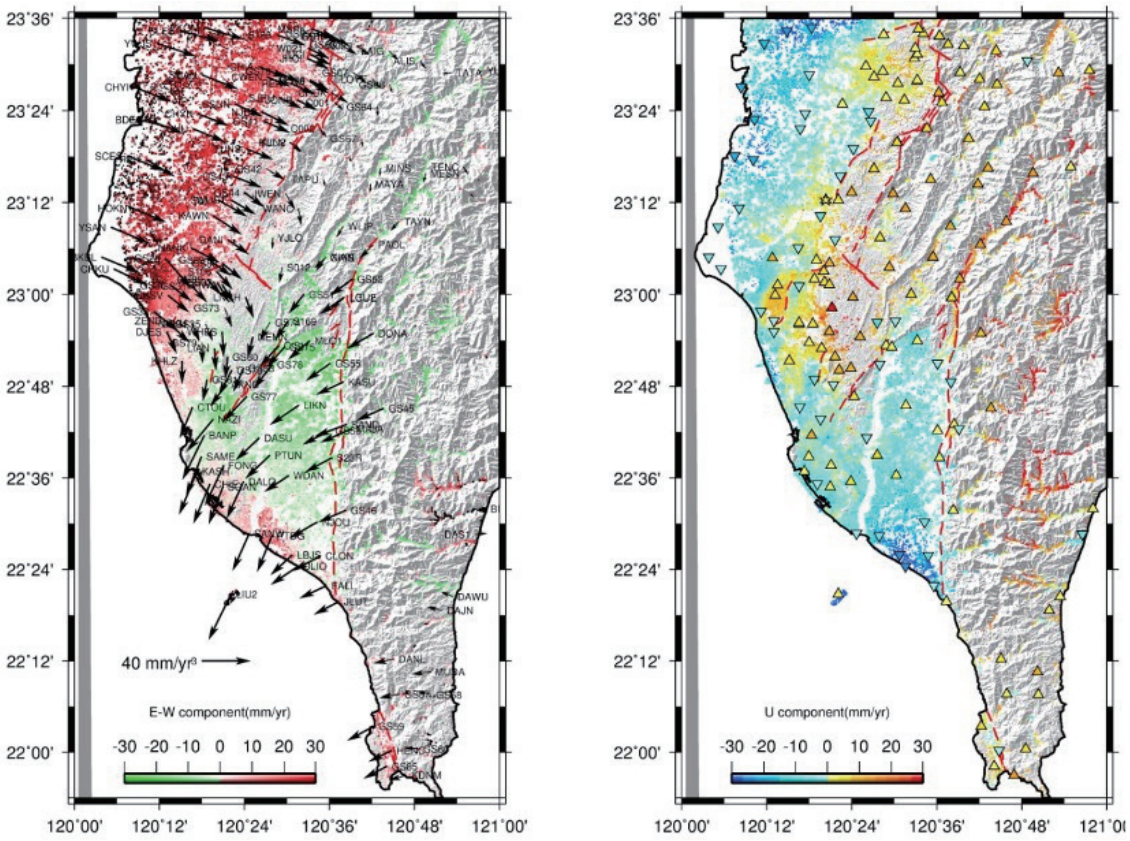


圖2-6：SENTINEL-1東西方向與垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東與抬升；冷色系代表地表變形向西與下降。箭頭為連續GNSS測站水平方向移動速率。圓圈為連續GNSS測站垂直方向移動速率。

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

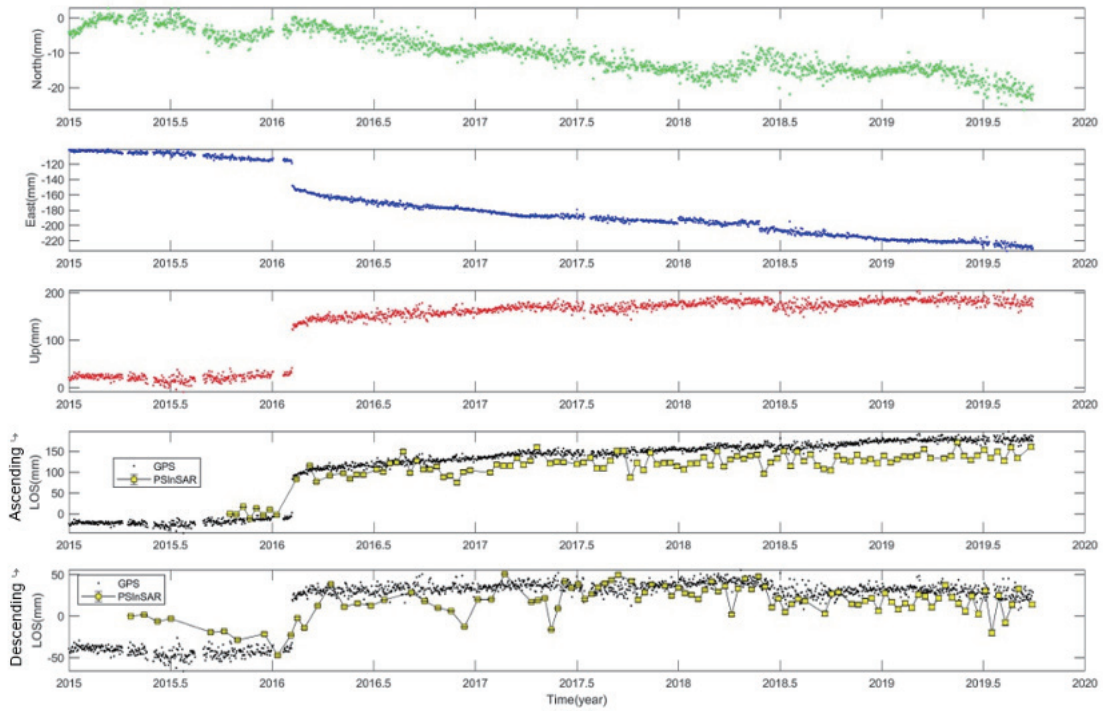


圖2-7：SENTINEL-1 (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9) 雷達影像與GNSS測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為GNSS三方向時間序列；黑色為GNSS投影至視衛星方向。黃色方型為雷達影像時間序列。

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

2-2-2 資料對比之執行方法及進行步驟

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

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

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

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

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

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

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

(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。

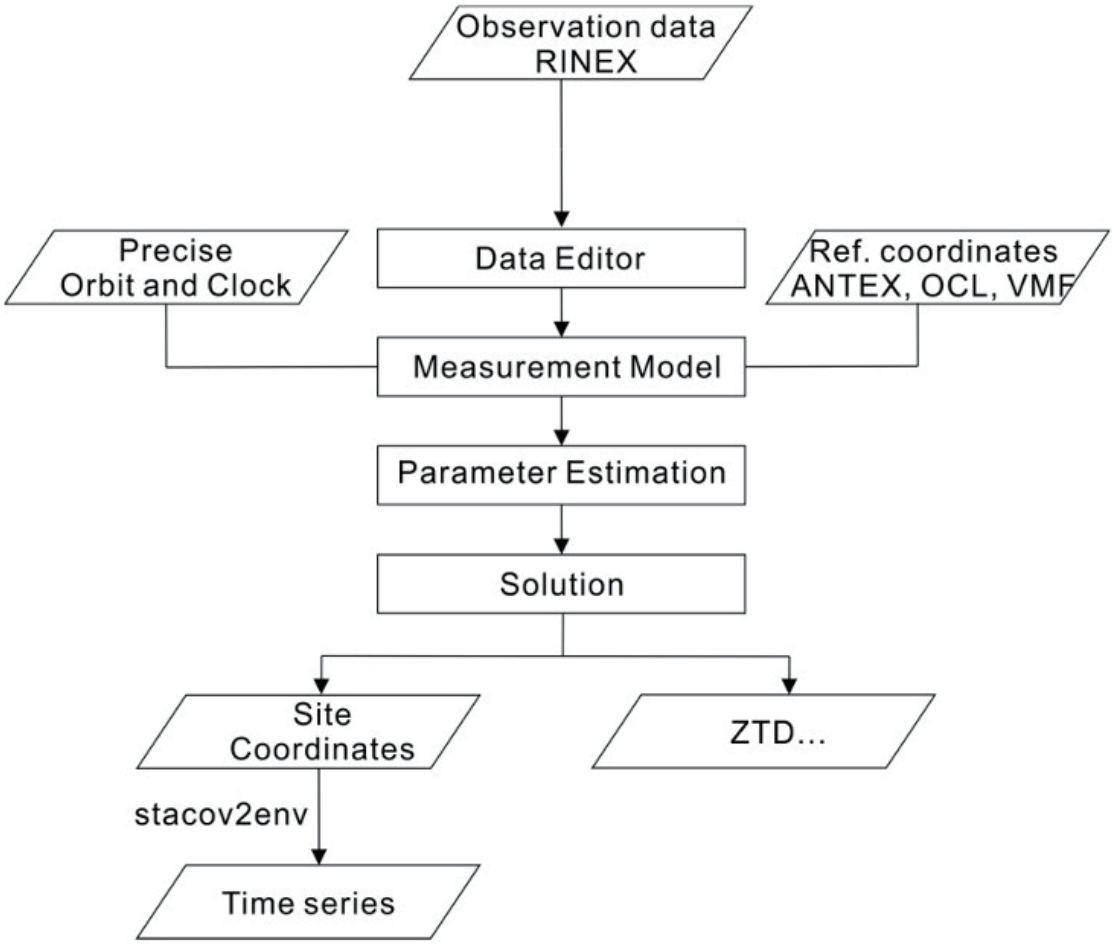


圖2-8：GipsyX軟體處理流程。

Figure 2-8：GipsyX processes.

2-3 跨斷層之速度剖面分析

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2-9）。

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

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

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

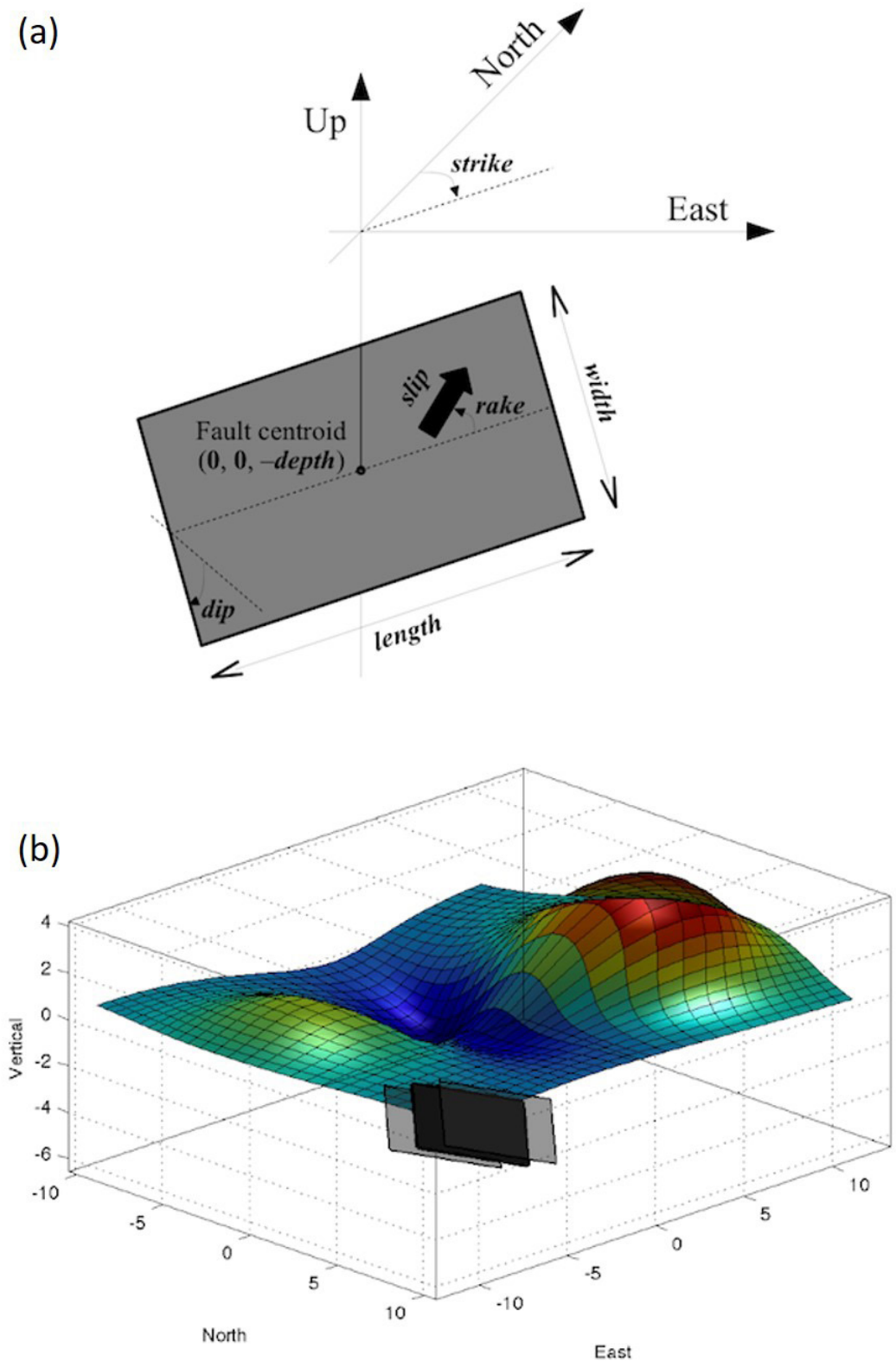


圖2-9：(a) 斷層幾何參數，(b)由圖(a)提供的斷層幾何參數與滑動量，經過彈性半無限空間錯動理論計算的地表變形（Okada, 1985）。

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

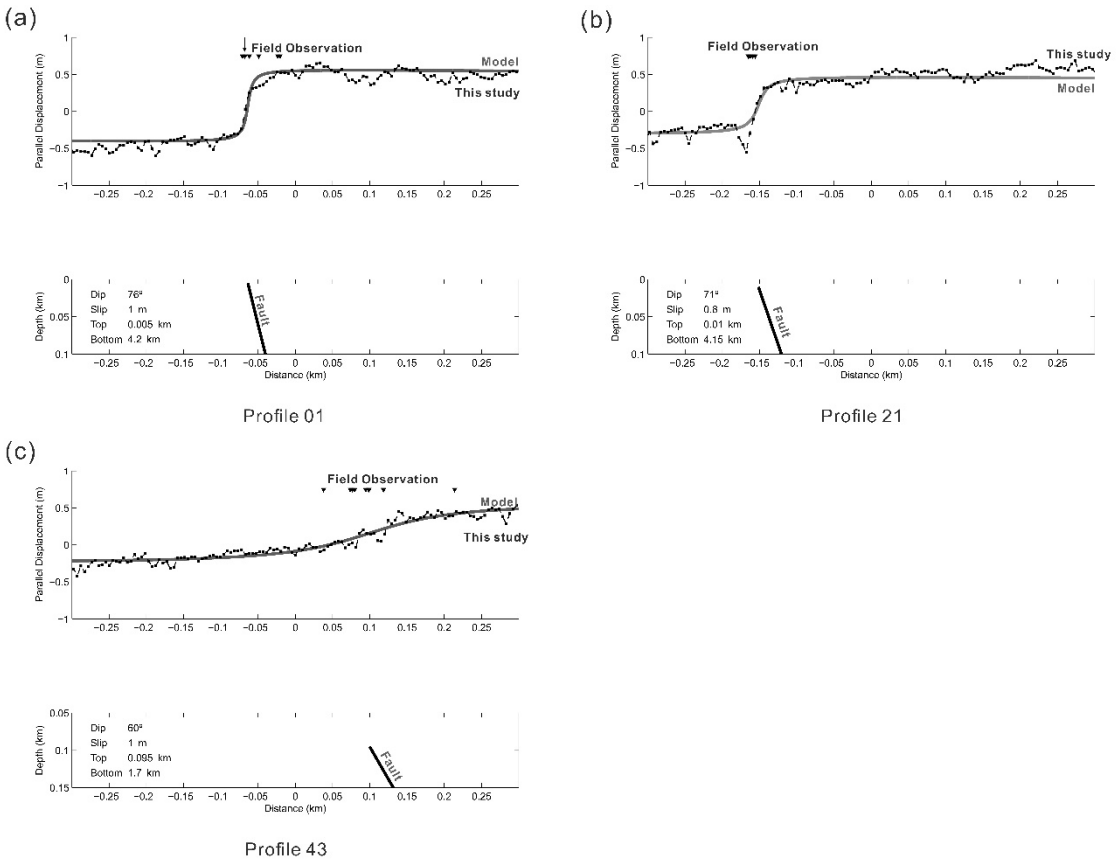


圖2-10：藉由在空間上連續的地表變形資訊，採用彈性半無限空間錯位模型（Okada, 1985; Okada, 1992），推估斷層參數（Kuo et al., 2019）。

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

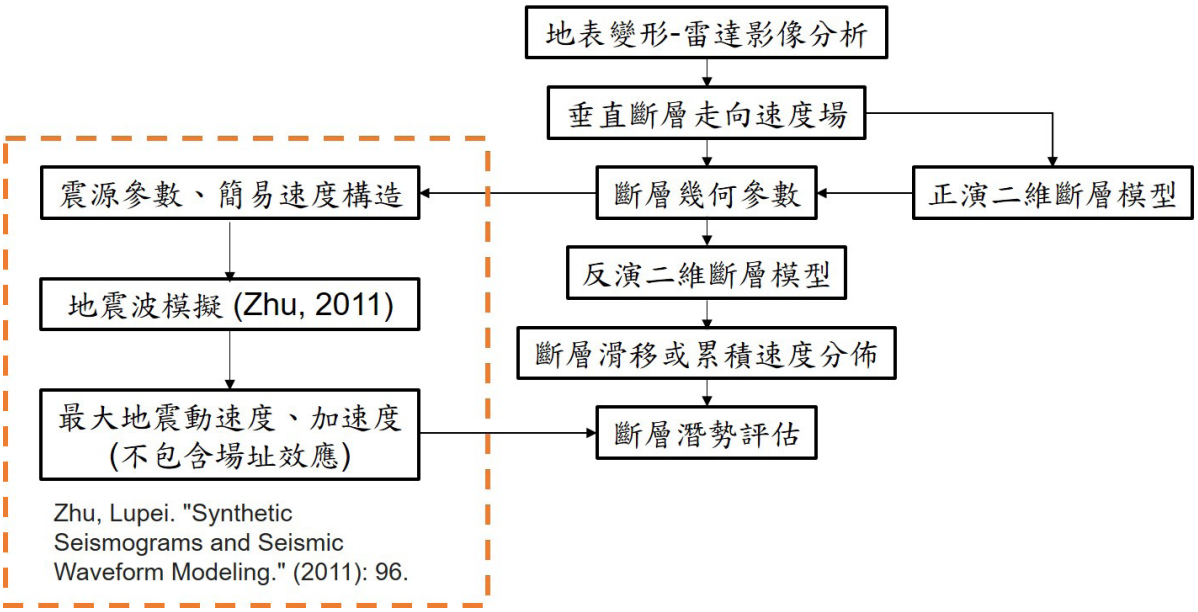


圖2-11：工作流程圖。由雷達影像分析所獲得之速度場，透過簡易模型探討斷層滑移或累積分佈，進而評估斷層潛勢。而完整的斷層幾何參數也可與震源參數、簡易速度構造進行地震波模擬，以求得最大地震動速度與加速度。

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

2-3-2 跨斷層之速度剖面分析

透過本計畫內應用合成孔徑雷達差分干涉技術所獲得之地表變形，針對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。

第三章、嘉南地區雷達資料與其他大地測量觀測資料比對

在這個章節中，我們呈現了升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的雷達差分干涉資料與GNSS連續站的比對成果、雷達差分干涉資料與GNSS連續站及移動站的比對成果，以及雷達差分干涉資料與水準測量的比對成果。藉由不同來源的資料對比，我們可以將資料的相同與差異之處找出，並且進而對其異同探討，這個比對的結果除了可以讓我們針對資料品質做探討之外，也可以提供更多調查區域的特性。

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台南地區，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2021年12月，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	2018-2021
升軌(Ascending)	27幅	55幅	115幅
降軌(Descending)	18幅	39幅	113幅

3-1 GNSS連續站與PSI資料比對

我們分別解算了2014–2016、2016–2018、2018–2021三個時段在調查範圍內的GNSS資料，並且先將這些計算資料轉換成雷達斜距方向的速度；再以GNSS測站座標為中心，搜尋周圍500公尺以內的PS點，取速度場平均值作為PSI於GNSS測站的觀測值，而標準差代表資料的離散程度。我們將PSI結果與GNSS比對，所有結果相對於S103測站，並且畫在同一張圖上做比對。各時期GNSS數量如表3-2，測站位置如圖3-1。

整體而言，在第一個時段 (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，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雷達結果與GNSS連續站對比而言相似度較低的原因之一。2016-2018與2018-2021隨著衛星狀態穩定，觀測時間長，影像張數多，GNSS連續站與PSI比對相似度越來越高，2018-2021年升軌（Ascending）成果計算出的迴歸線斜率接近1，R^2 高達0.95，殘差值小於4 公釐（mm）； 2018-2021年降軌（Descending）成果計算出的迴歸線斜率接近1，R^2 高達0.88，殘差值小於3.5 公釐（mm）。

3-1-1 2014-2016年

表3-2: 各時期GNSS測站數量。

Table 3-2 : Numbers of GNSS stations in each period.

	2014-2016	2016-2018	2018-2021
升軌(Ascending)	113	126	137
降軌(Descending)	94	123	132

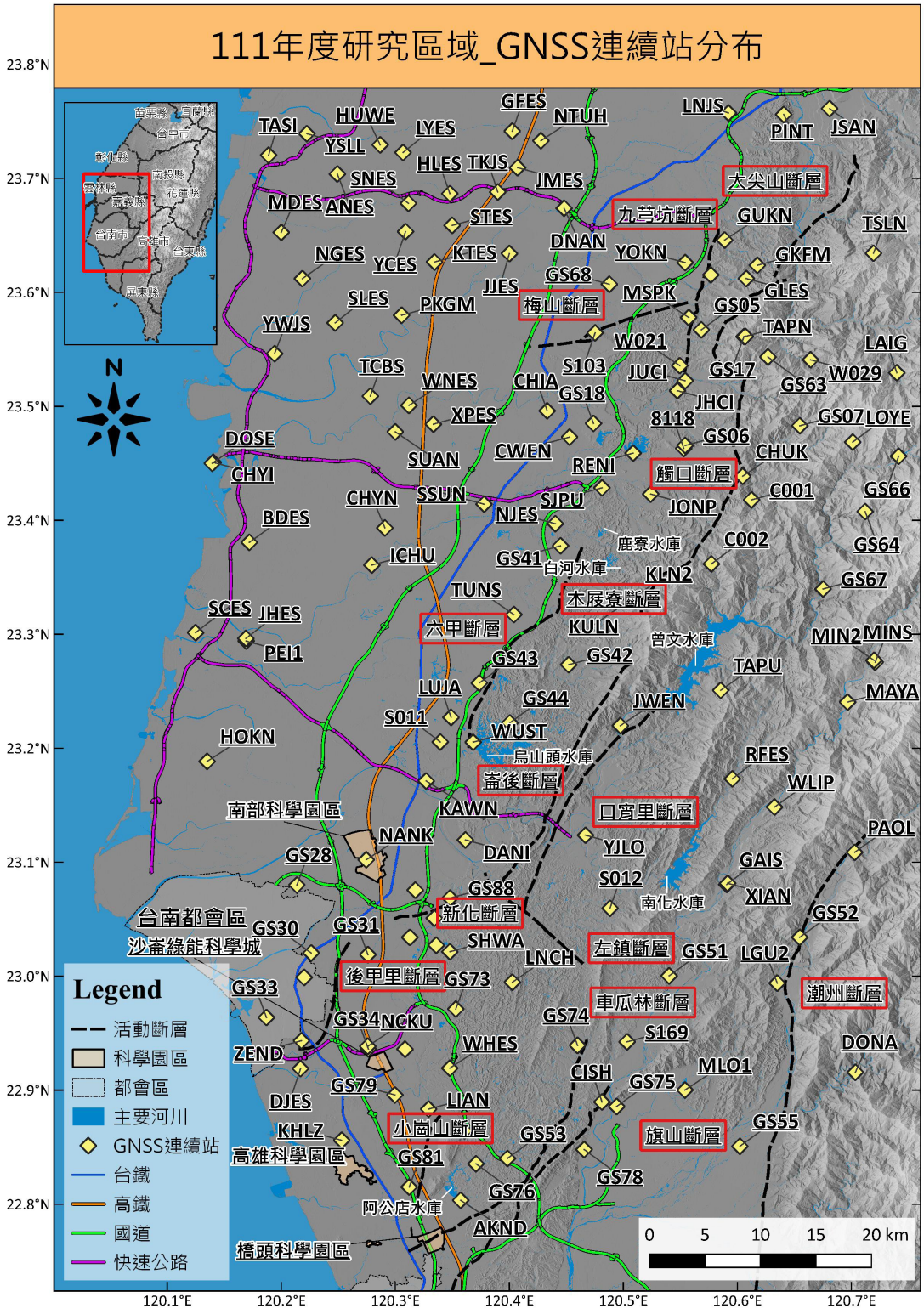


圖3-1：GNSS測站位置分佈圖。

Figure 3-1：The map for the GNSS stations.

圖3-2、3-4分別為2014-2016年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果。取用「扣掉地形殘差誤差的速度場」與GNSS結果作比較。圖3-3、3-5則是分別為研究區域GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表 3-3 列出2014-2016年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與GNSS資料比對結果。從表3-1與3-3的結果大致上可以得到，雖然此時期降軌道（Descending）的影像數量比升軌道（Ascending）少，但降軌道（Descending）斜率較升軌道（Ascending）高，R^2 也較高，殘差值則比升軌道（Ascending）小。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料受限於影線數目，資料品質不佳。 通常影像數目不足可以透過觀測時間加長來解決，但是由於20160206 的美濃地震在此處造成相當大的同震位移，因此觀測時間不能直接加長，需要在地震時間前後做一個分割， 這一時期的雷達速度場的參考價值較低。

表3-3: 2014-2016年PSI與GNSS比對成果。

Table 3-3 : Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2014-2016.

		slope	R^2	RMSE
Ascending	v-d	0.4842	0.3696	11.4948
Descending	v-d	0.5659	0.4216	7.3527

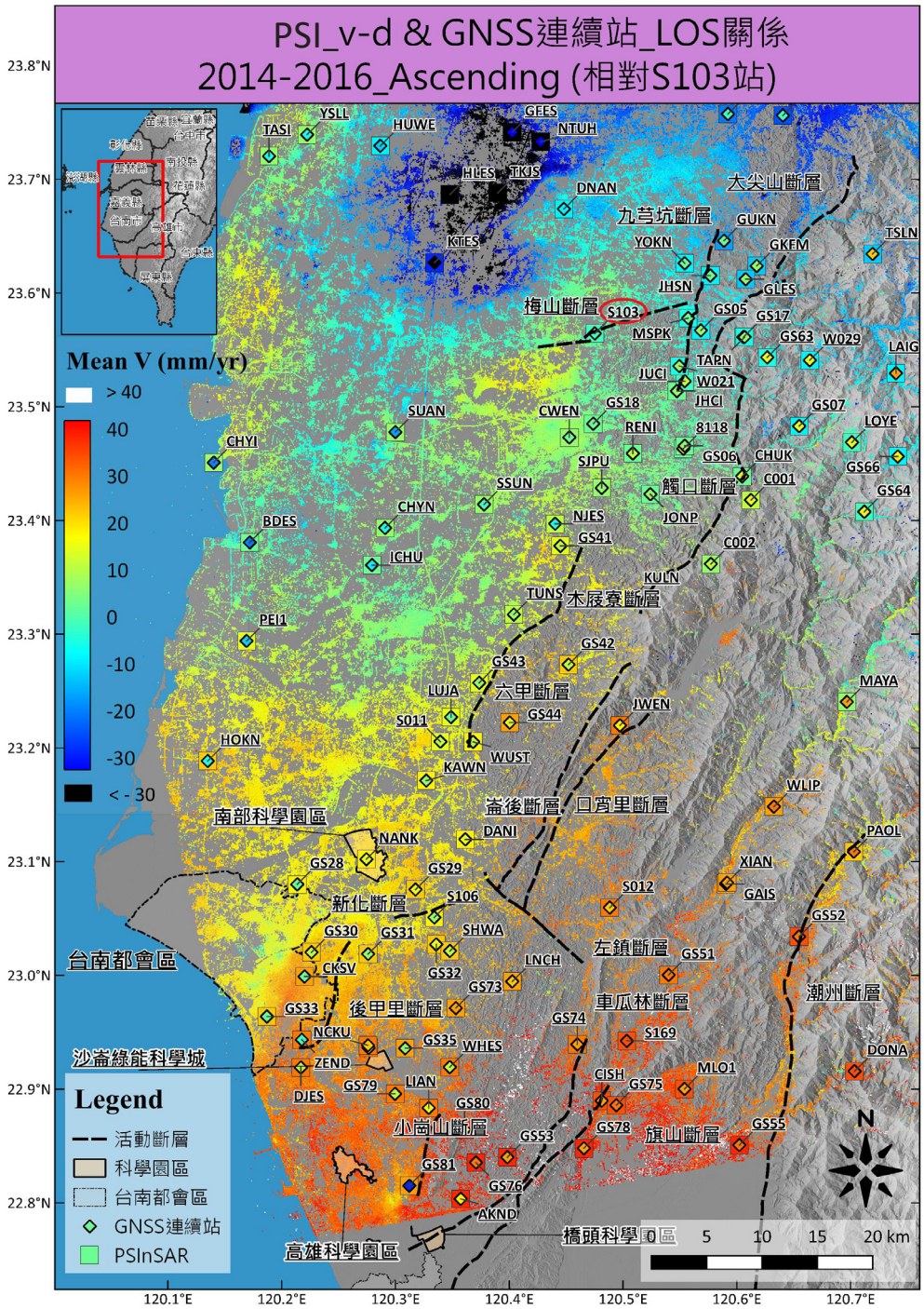


圖3-2：2014-2016年Ascending平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-2：Mean velocity field (v-d) 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 S103. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

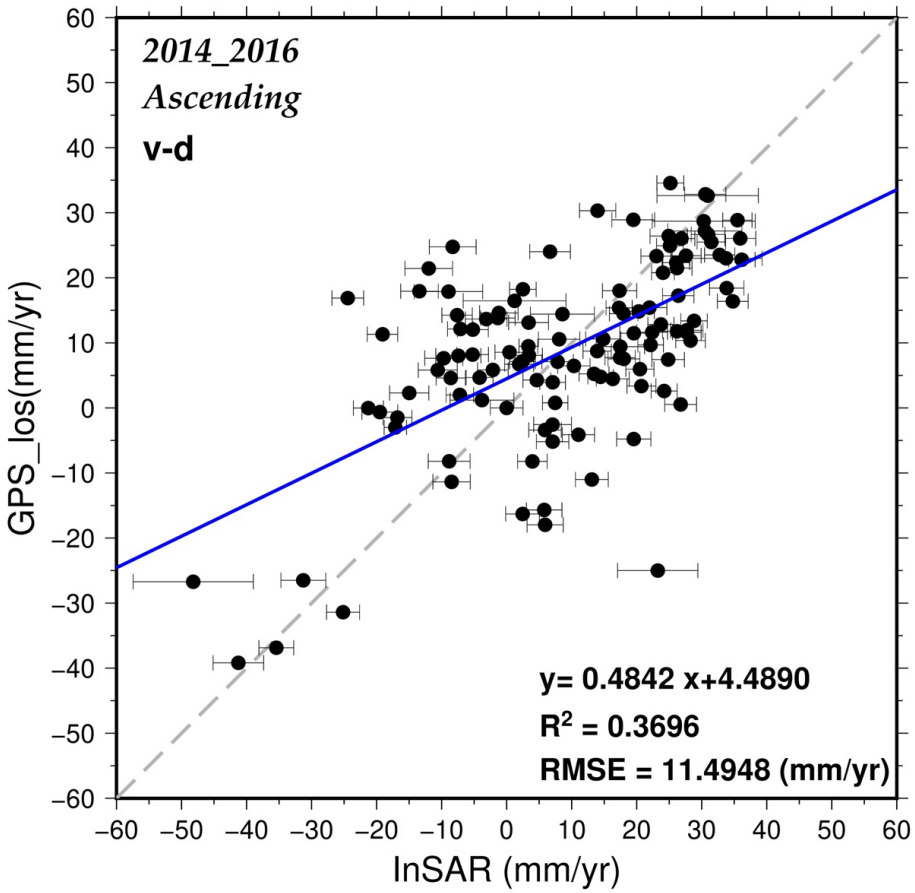


圖3-3：2014-2016 Ascending去除地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 3-3：2014-2016 ascending PSI velocity field minus DEM error (v-d) compared to continuous GNSS of the same period. Station S103 was used as the reference station.

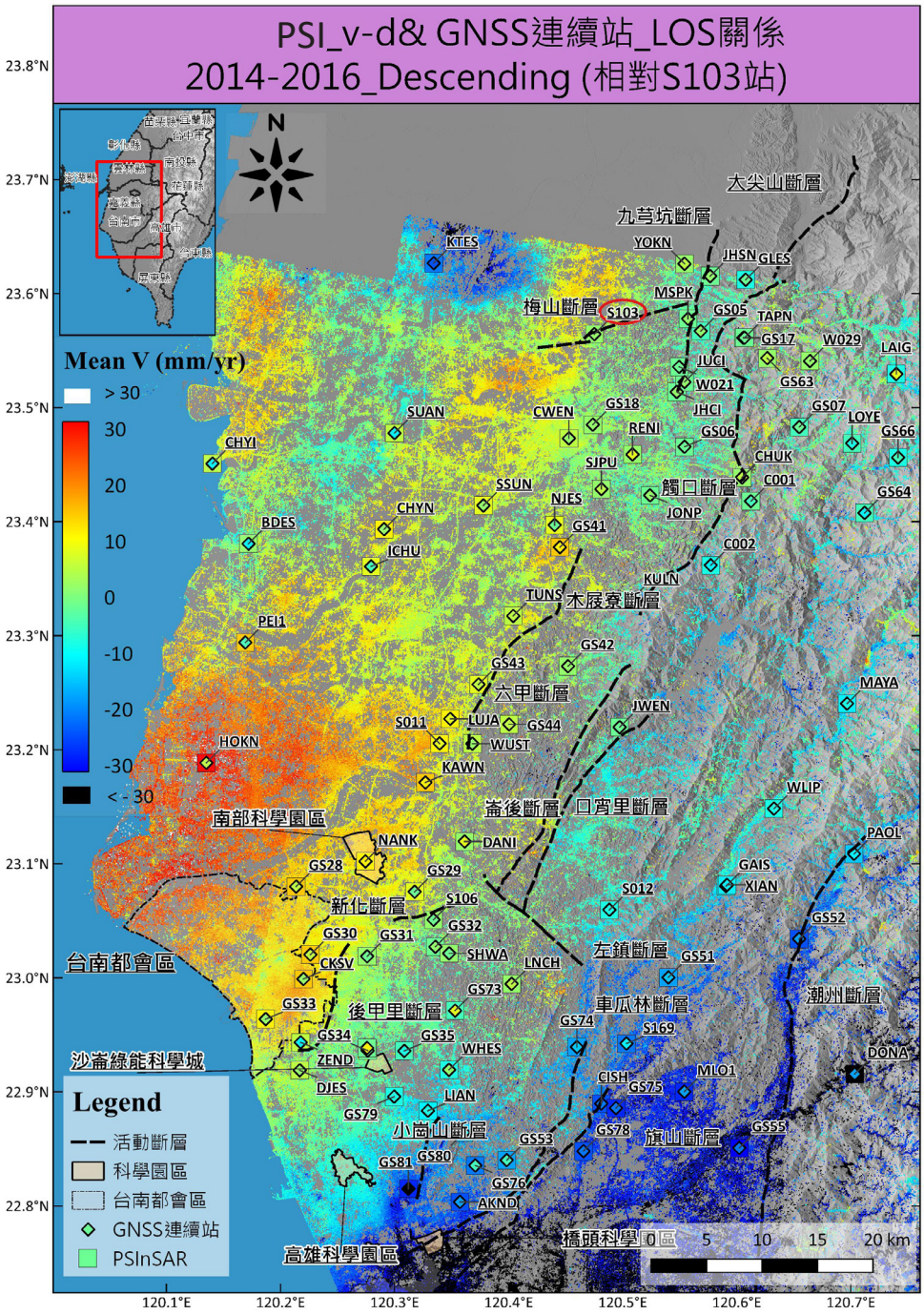


圖3-4：2014-2016年Descending去除地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-4：Mean velocity field minus DEM error (v-d) 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. Reference point is the continuous GNSS station S103. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

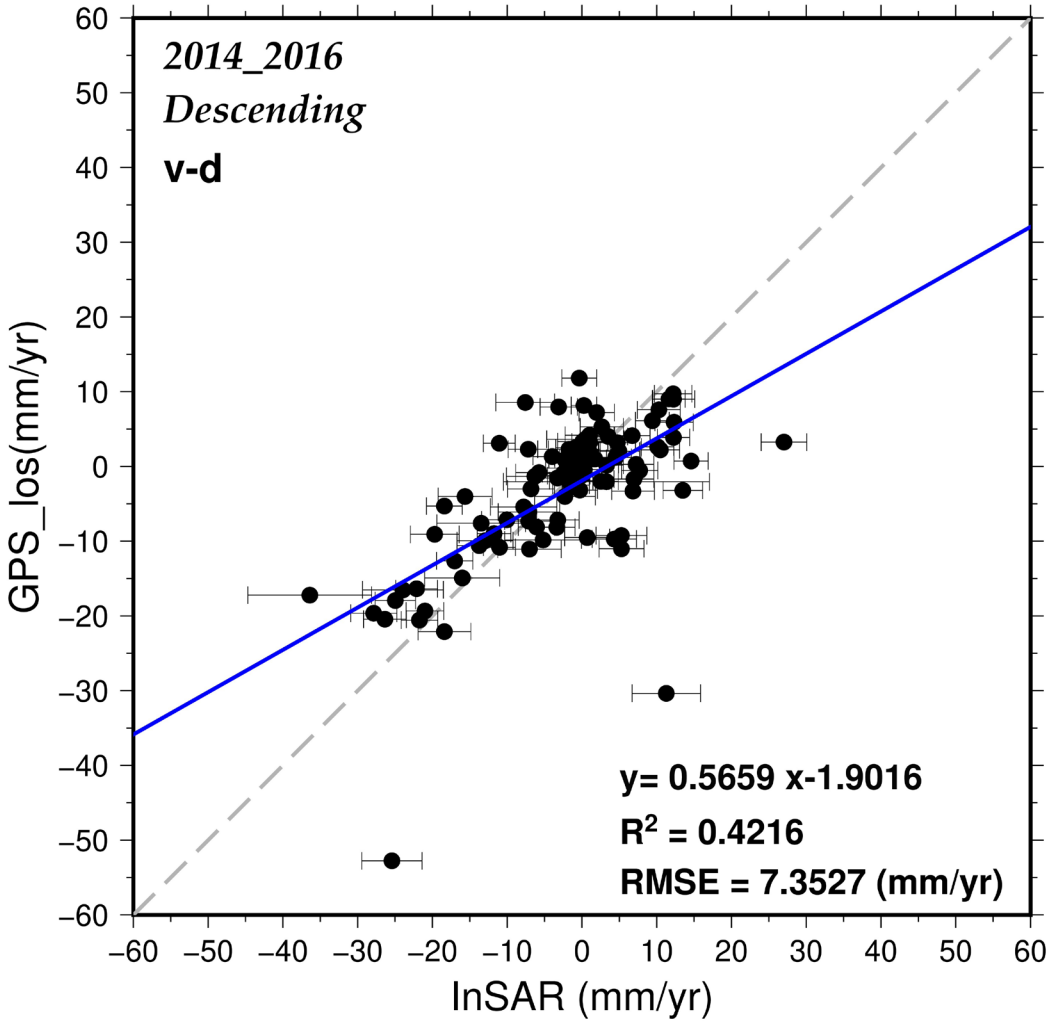


圖3-5：2014-2016 Descending平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 3-5：2014-2016 descending PSI velocity field (v-d) compared to continuous GNSS of the same period. Station S103 was used as the reference station.

3-1-2 2016-2018年

圖3-6、3-8分別為2016-2018年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果。取用「扣掉地形殘差誤差的速度場」成果與GNSS結果比較。 圖 3-7、3-9則是分別為研究區域GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表3-4則是2016-2018年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與GNSS資料比對結果。從表3-4的結果大致上可以觀察到，升軌道（Ascending）的斜率接近1，也就是說，此時期升軌道（Ascending）的雷達資料與此區域GNSS連續站得到的速度相當一致。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料除了有部分離散點之外，大部分都與GNSS觀測相當符合。而離散點大多為在山區的河谷中，通常為雷達同調性低、永久散射體相對稀少之區域，因而在解算時出現錯誤。本時段除開山區河谷部分的雷達資料之外，大部分平原地區的結果品質都相當好。

表3-4: 2016-2018年PSI與GNSS比對成果。

Table 3-3 : Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2016-2018.

		slope	R^2	RMSE
Ascending	v-d	1.0787	0.6055	10.7103
Descending	v-d	0.6045	0.5693	6.0730

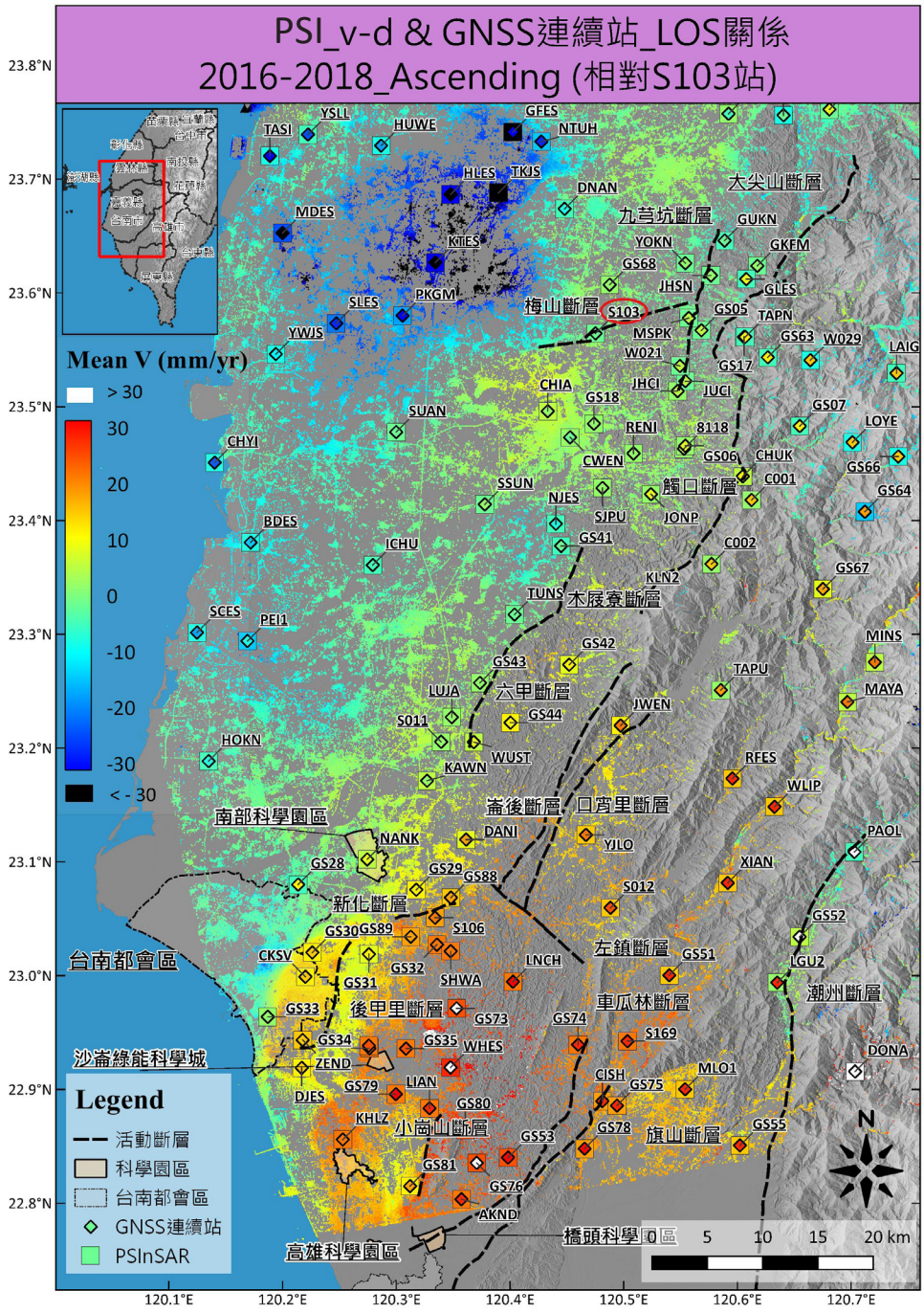


圖3-6：2016-2018年Ascending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-6：Mean velocity field minus DEM error and orbital ramps (v-do) 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 S103. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

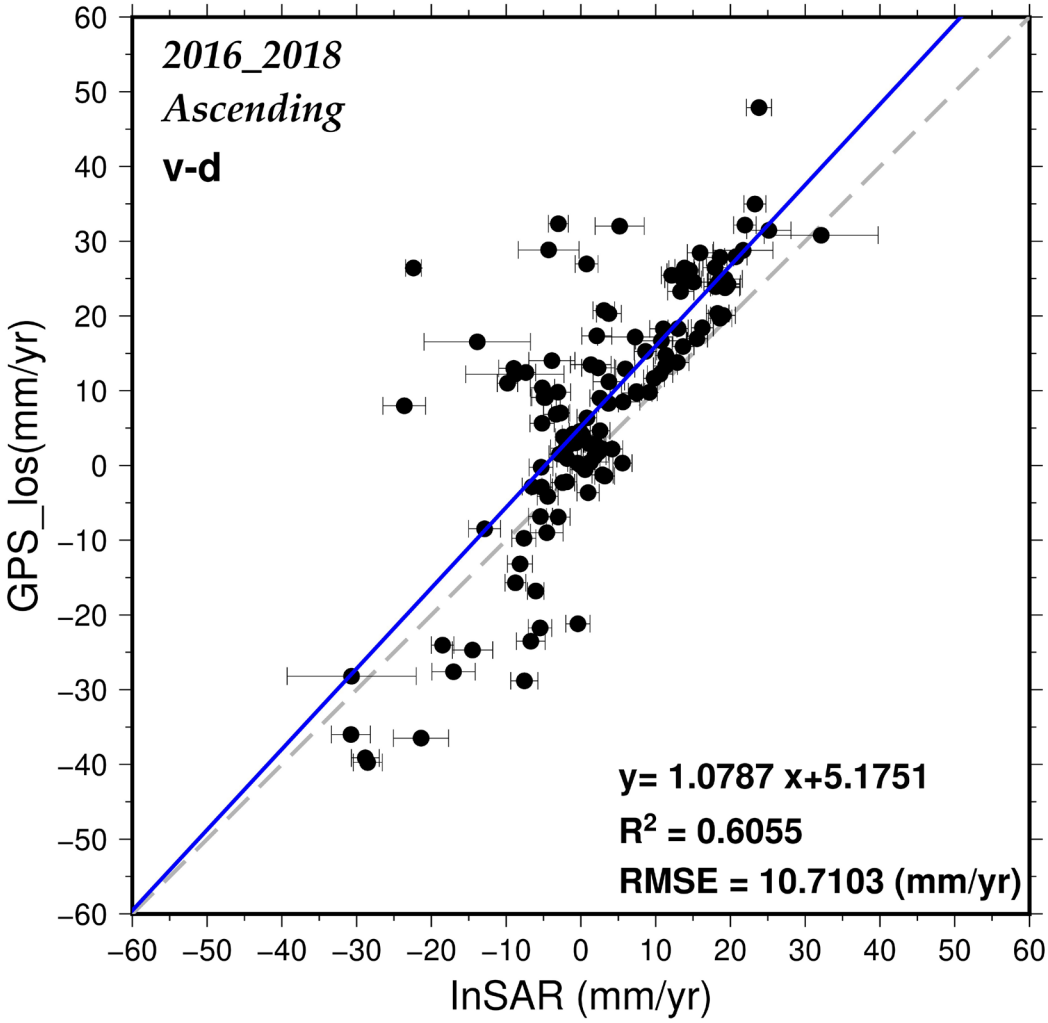


圖3-7：2016-2018 Ascending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 3-7：2016-2018 ascending PSI velocity field minus DEM error and orbital ramps (v-d) compared to continuous GNSS of the same period. Station S103 was used as the reference station.

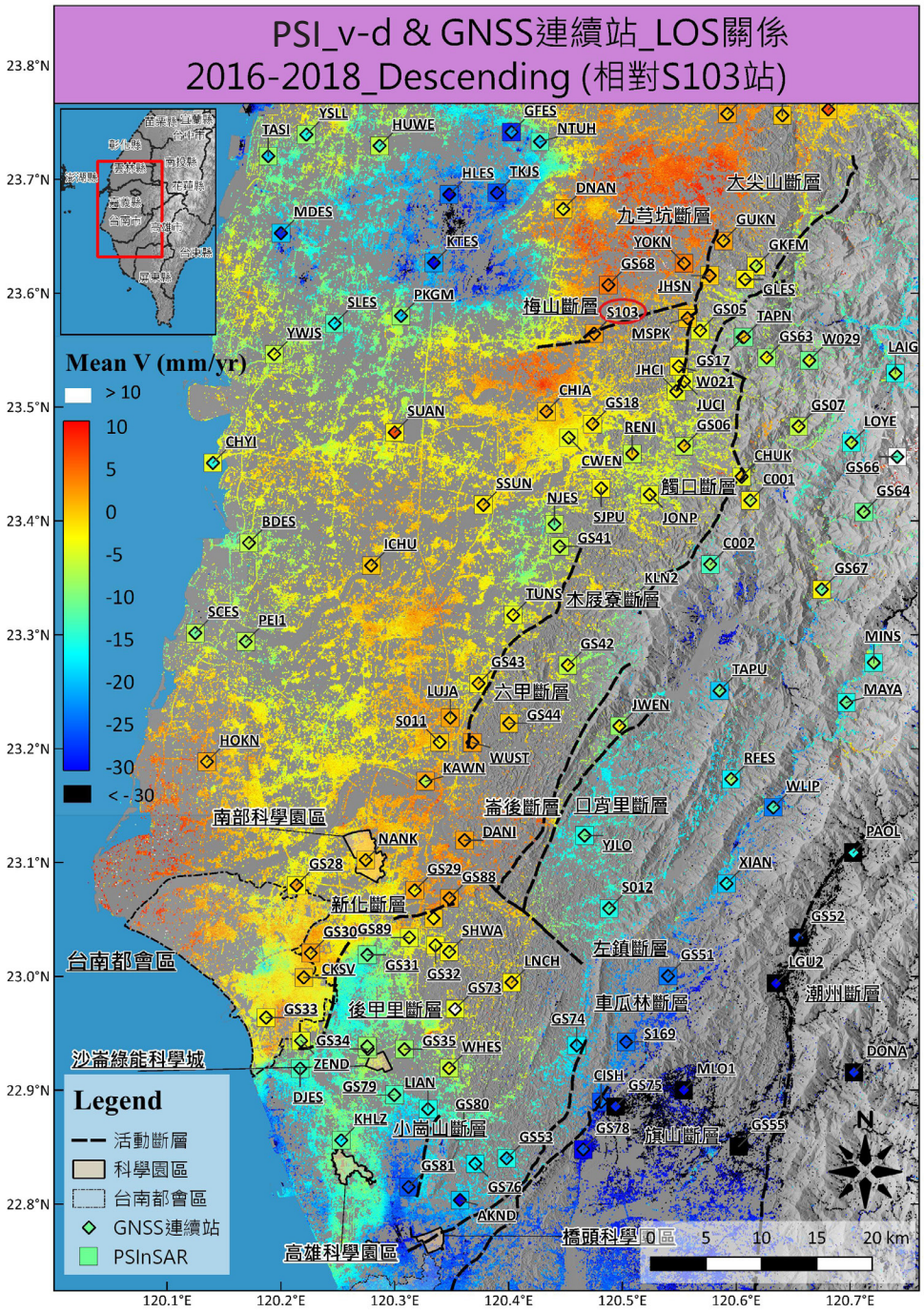


圖3-8：2016-2018年Descending平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-8：Mean velocity field (v-d) 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. Reference point is the continuous GNSS station S103. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

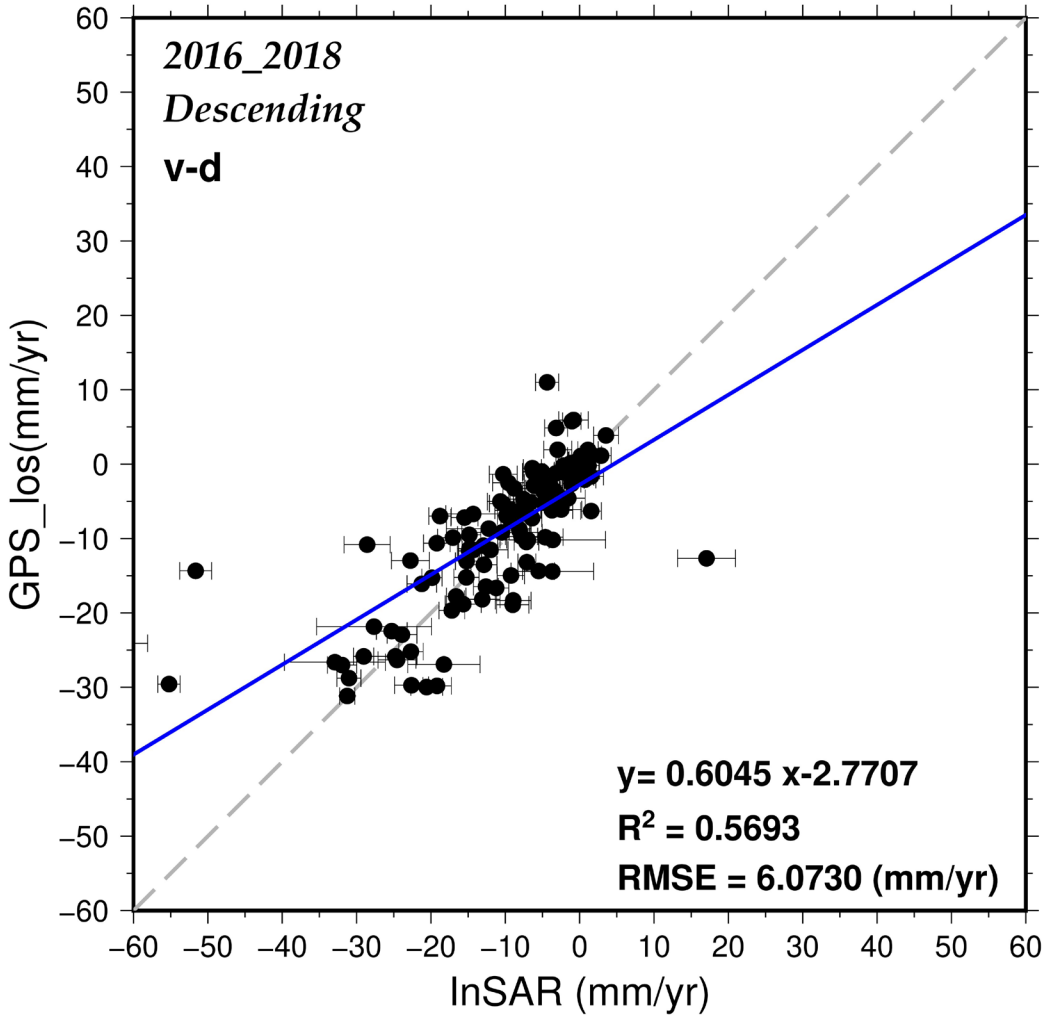


圖3-9：2016-2018 Descending平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 3-9：2016-2018 descending PSI velocity field (v-d) compared to continuous GNSS of the same period. Station S103 was used as the reference station.

3-1-3 2018-2021年

圖3-10、3-12分別為2018-2021年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果。取用「扣掉地形殘差誤差的速度場」成果與GNSS連續站結果作比較。圖 3-11、3-13則是分別為研究區域GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表3-5則是2018-2021年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與GNSS資料比對結果。從表3-5的結果大致上可以觀察到，升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的斜率都接近1，也就是說，雷達資料與此區域GNSS連續站得到的速度相當一致。 同樣的本時期的R^2 與 RMSE也都遠較前兩個時間段佳。由斜率看起來，雷達資料與GNSS資料在斜距方向幾乎一致，升軌道（Ascending）成果斜率超過 0.9 ，接近 0.95 ，而降軌道（Descending）成果斜率為1.03，兩者資料接近1的斜率、配合極低的誤差值（小於 4 mm/yr）顯示資料品質相當可靠。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料除了有少部分稍微離開回歸線以外，絕大部分都與GNSS觀測相當符合。甚至在山區的河谷雷達資料通常比較不好的地方，趨勢、數量都與GNSS相當符合，所以本時段資料品質相當可靠。

表3-5: 2018-2021年PSI與GNSS比對成果。

Table 3-3 : Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2018-2021.

		slope	R^2	RMSE
Ascending	v-d	0.9482	0.9595	3.7023
Descending	v-d	1.0289	0.8775	3.3212

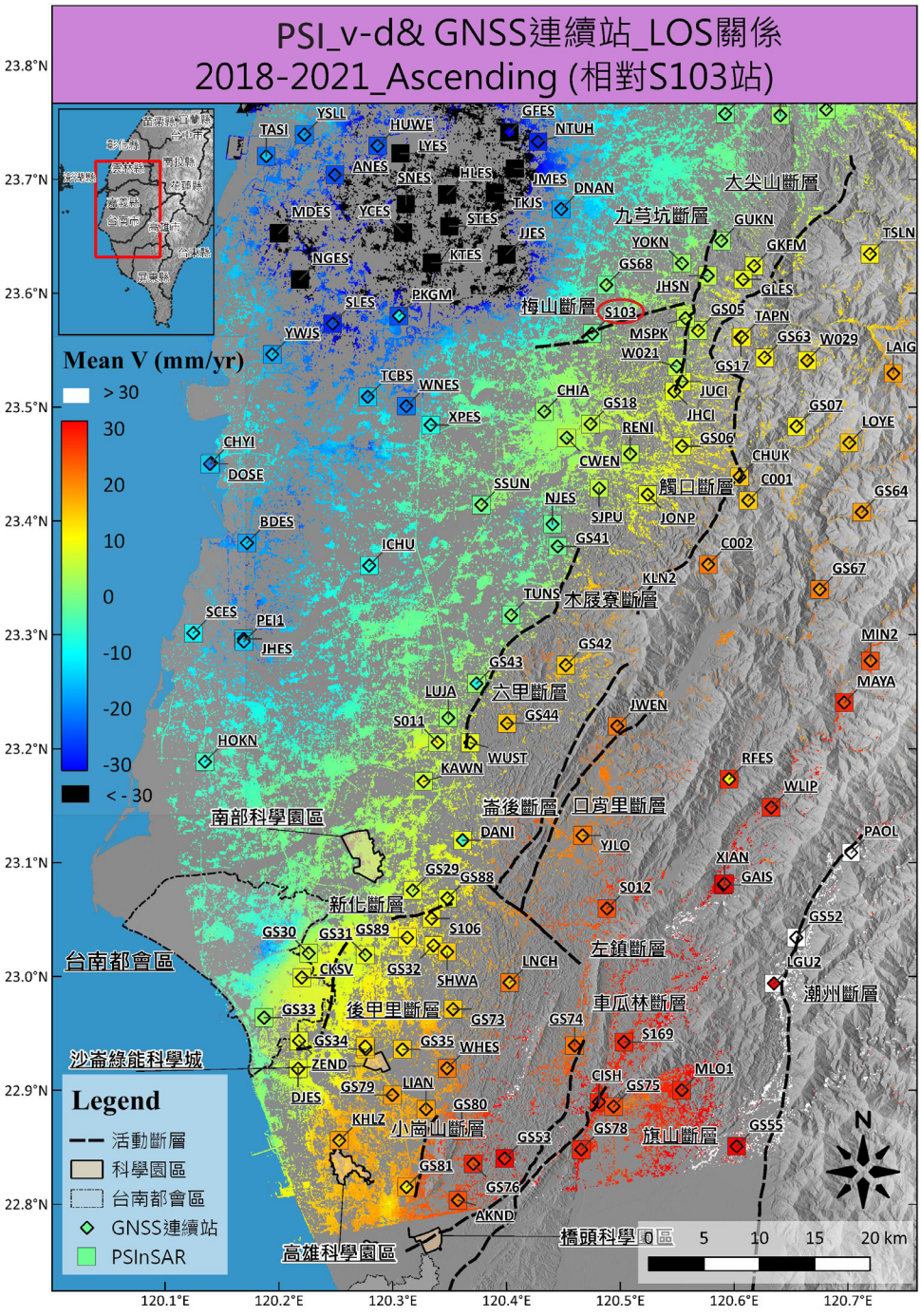


圖3-10：2018-2021年Ascending去除地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-10：Mean velocity field minus DEM error (v-d) in ascending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S103. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

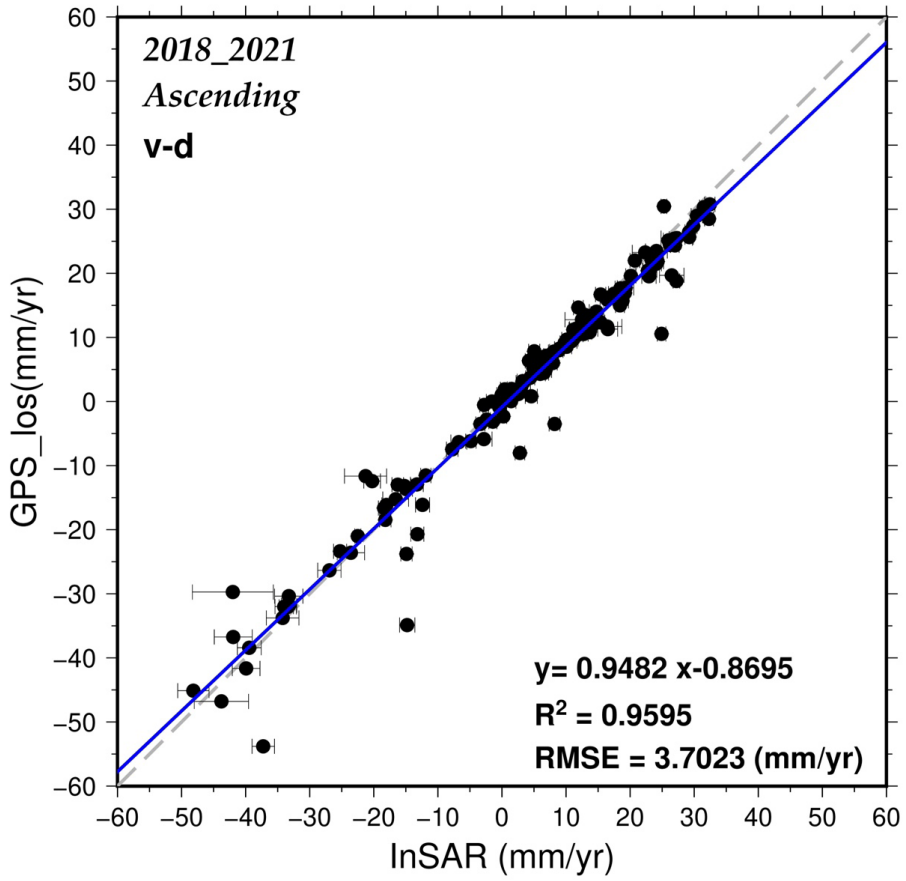


圖3-11：2018-2021 Ascending去除地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 3-11：2018-2021 ascending PSI velocity field minus DEM error (v-d) compared to continuous GNSS of the same period. Station S103 was used as the reference station.

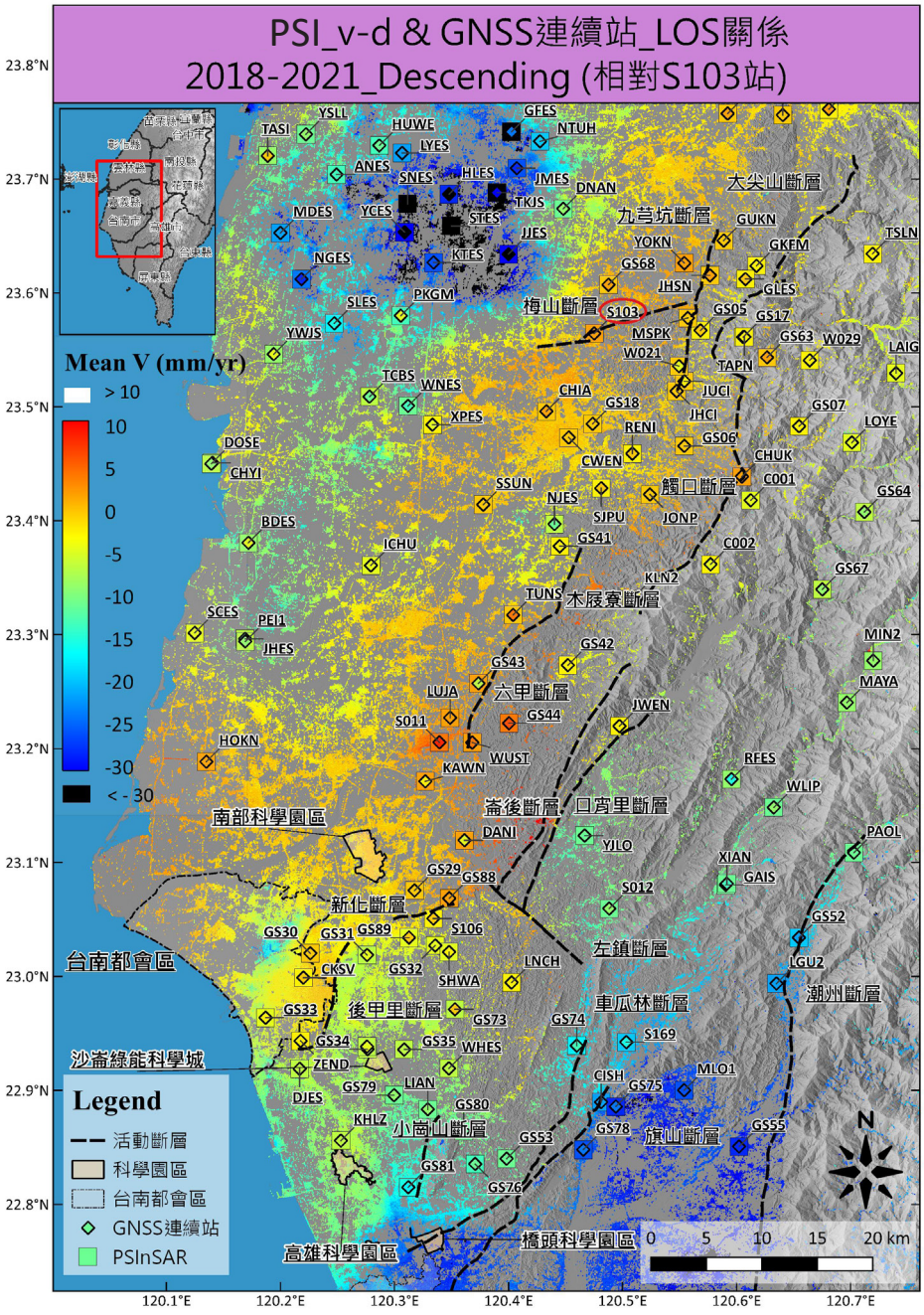


圖3-12：2018-2021年Descending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場（v-d）與GNSS連續站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。參考點為連續GNSS測站S103，菱形為同時期連續GNSS站三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-12：Mean velocity field minus DEM error and orbital ramps (v-d) in descending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S103. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

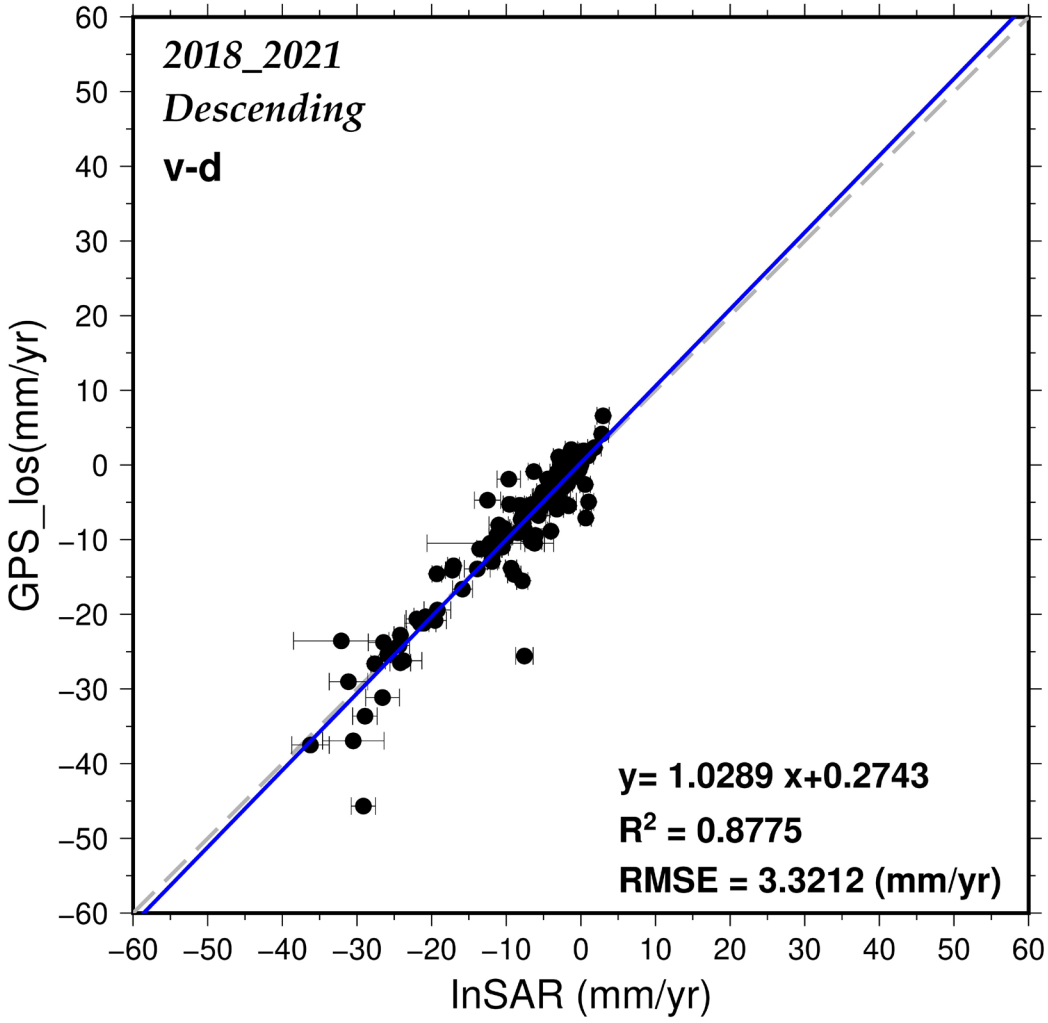


圖3-13：2018-2021 Descending去除衛星軌道及地形殘差後的平均速度場與GNSS連續站速度場對比。參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 3-13：2018-2021 descending PSI velocity field minus DEM error and orbital ramps (v-d) compared to continuous GNSS of the same period. Station S103 was used as the reference station.

3-2 GNSS連續站及移動站與PSI資料比對

針對GNSS移動觀測站，我們盡量挑選PSI同時段的觀測資料，同樣將調查範圍內的GNSS移動觀測站計算得到的三方向速度值轉換為在雷達斜距方向上的速度，並搜尋測站周圍500公尺的PS點，取其平均作為GNSS移動觀測站的PSI觀測值，GNSS移動站位置如圖3-14。將所有的GNSS資料與雷達資料畫在同一張圖上比對，在第一時期的資料比對（圖3-15至圖3-18），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。 第二時期升降軌道斜率都接近1，顯示資料品質已經有顯著改善（圖3-19至圖3-22）。到了第三時期的升降軌資料斜率接近於1，而R^2接近0.9，且RMSE 皆小於5 mm/yr（圖3-23至圖3-26）。 代表我們可以有足夠信心將該時期雷達資料代表GNSS在該點為測量之資料。以下各節針對各時期資料說明。

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。

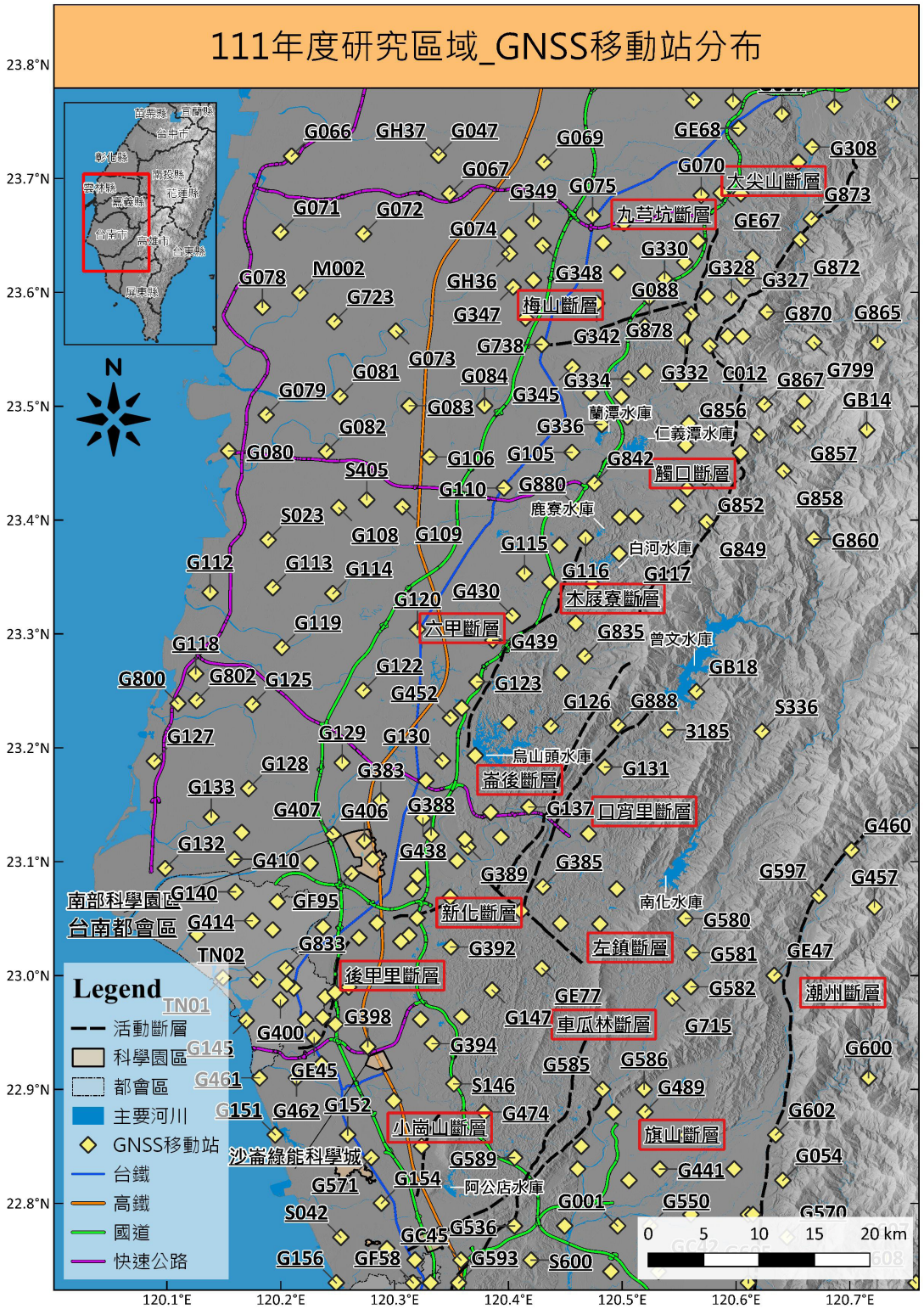


圖3-14：GNSS移動站位置分佈圖。

Figure 3-14：The map for the campaign GNSS stations.

3-2-1 2014年-2016年

圖3-15、3-17分別為2014-2016年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與GNSS連續站及移動站結果作比較。圖 3-16、3-18則是分別為研究區域GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表3-6則是2014-2016年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與GNSS資料比對結果。從表3-1與表3-6的結果大致上可以得到，雖然此時期降軌道（Descending）的影像數量比升軌道（Ascending）少，但降軌道（Descending）斜率較升軌道（Ascending）高，R^2 也較高，殘差值則比升軌道（Ascending）小。

以整體資料狀況看來加入移動站比對結果與連續GNSS觀測站相同，以2014-2016時間段而言，PSI與GNSS移動站對比而言相似度較低。這一個時間段的雷達資料受限於影像數目，資料品質不佳，這一時期的雷達速度場的參考價值較低。

表3-6: 2014-2016年PSI與GNSS比對成果。

Table 3-6 : Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2014-2016.

		slope	R^2	RMSE
Ascending	v-d	0.4898	0.3324	12.1669
Descending	v-d	0.6841	0.7088	7.4059

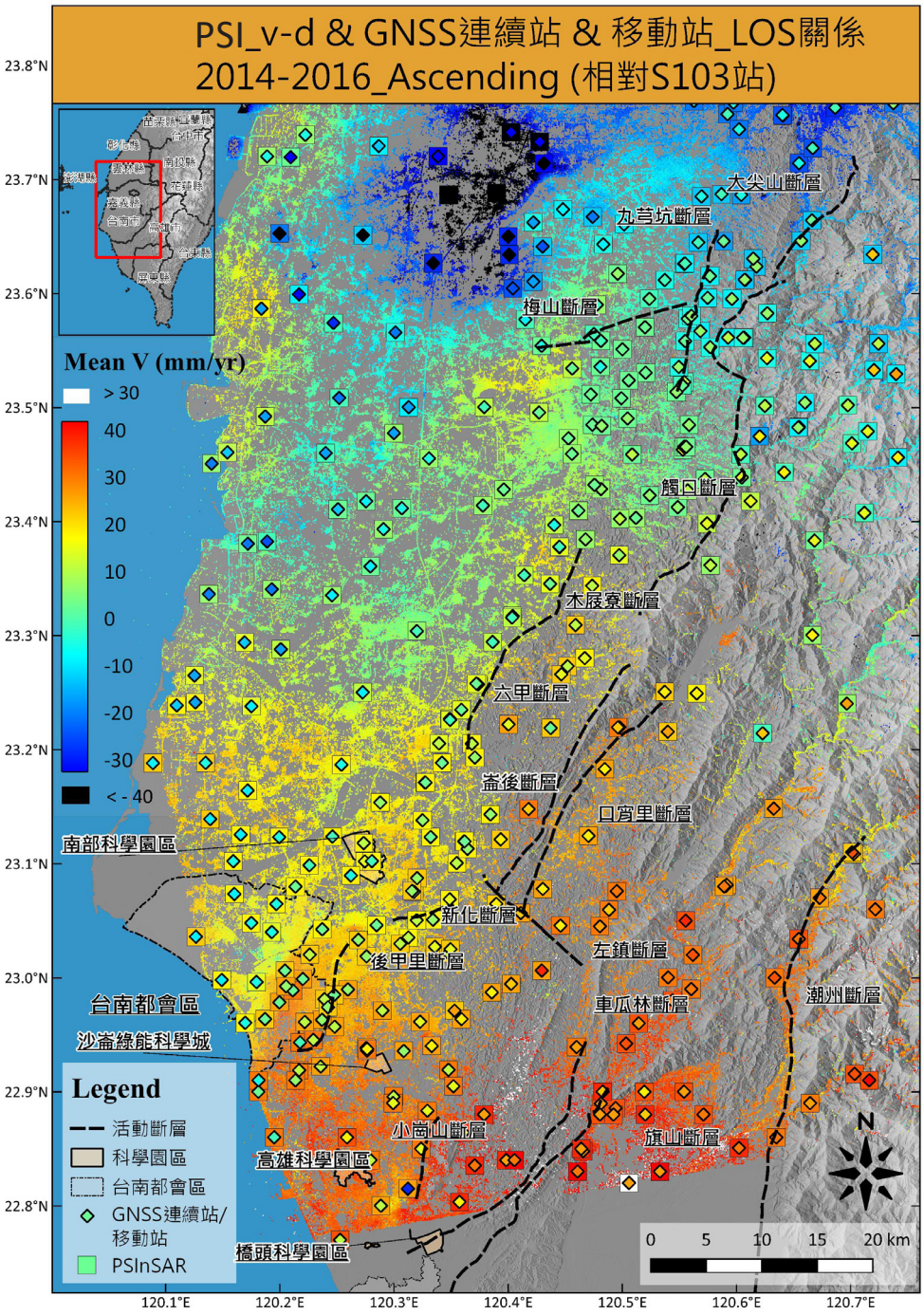


圖3-15：2014-2016年Ascending平均速度場與所有GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-15：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data 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. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite between 2014 and 2016.

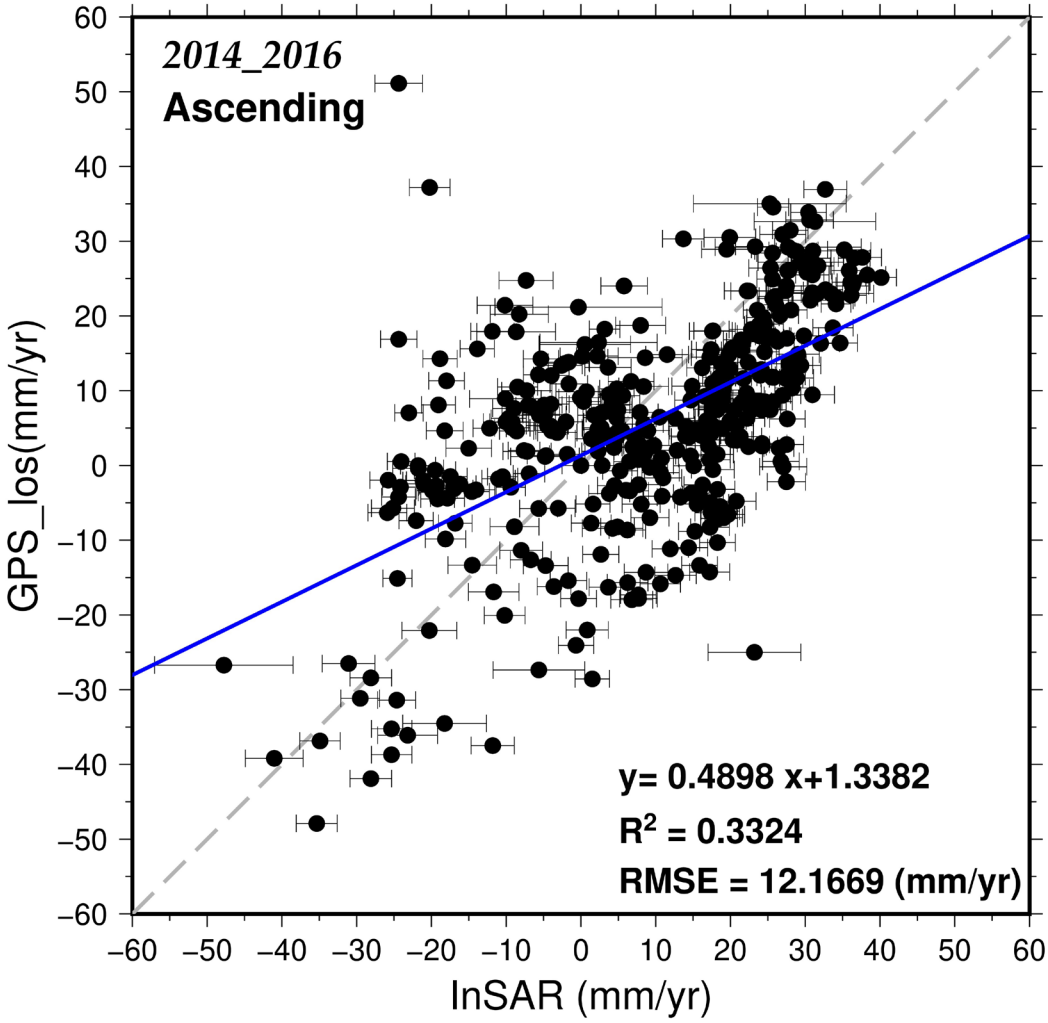


圖3-16：2014-2016 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 3-16：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2014-2016.

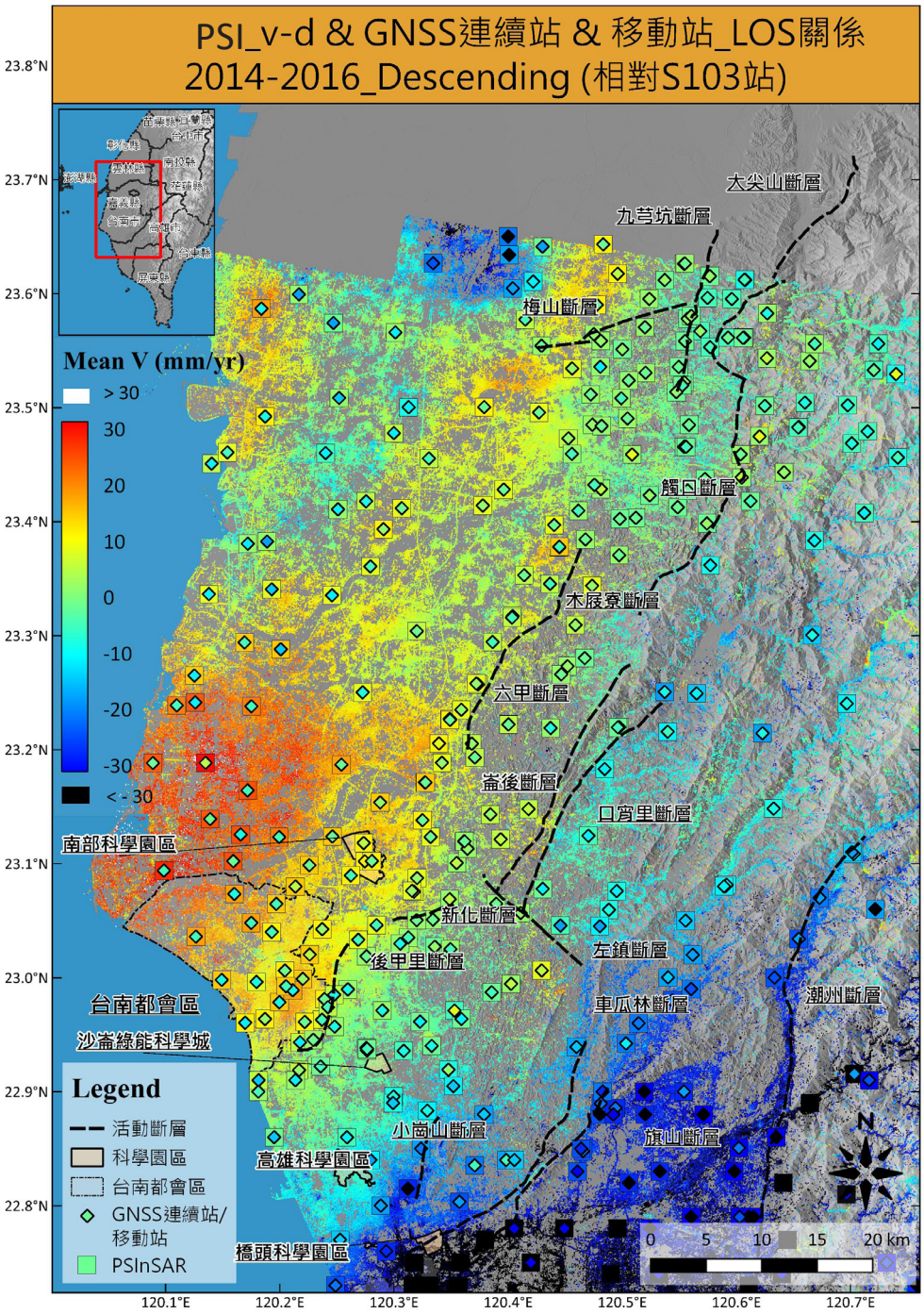


圖3-17：2014-2016年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 3-17：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data 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 2014 and 2016.

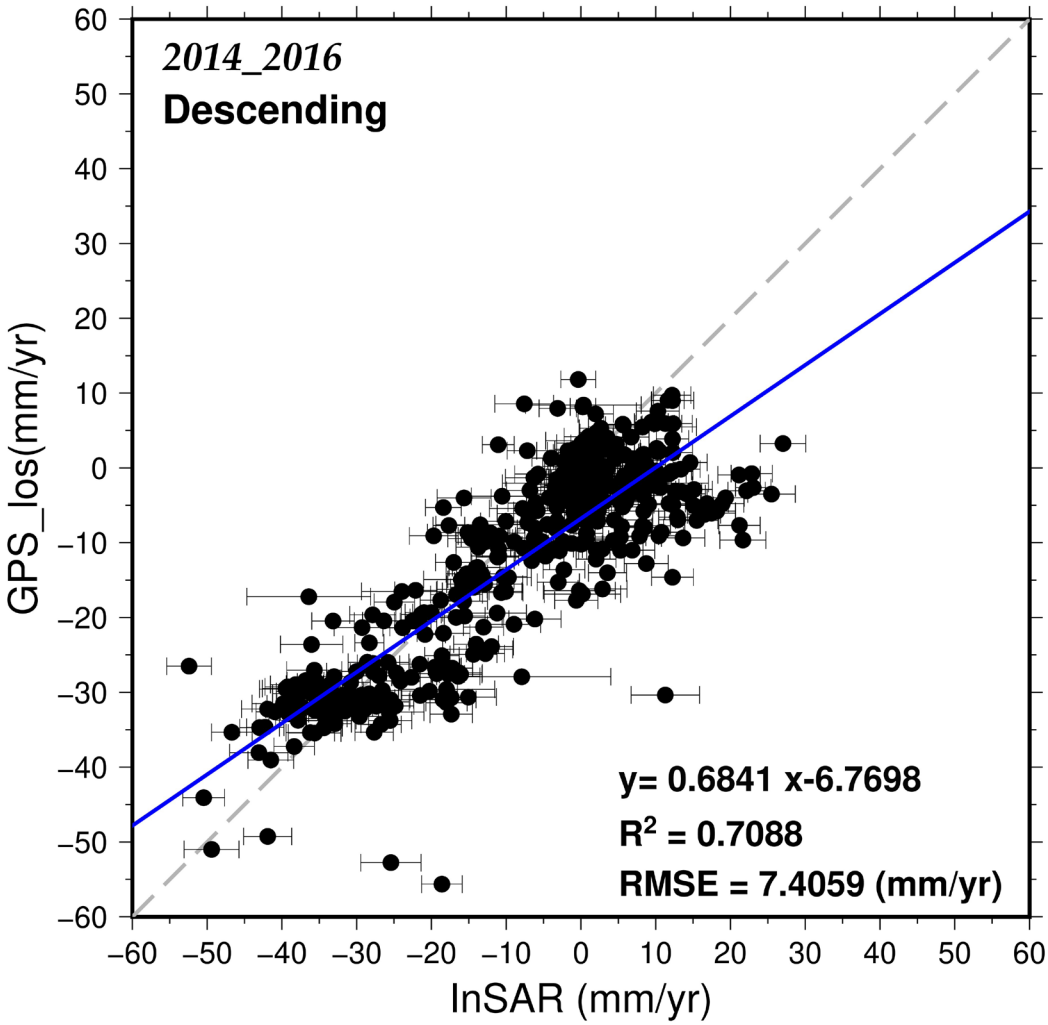


圖3-18：2014-2016 降軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 3-18：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2014-2016.

3-2-2 2016年-2018年

圖3-19、3-21分別為2016-2018年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與GNSS連續站及移動站結果比較。圖3-20、3-22則是分別為研究區域所有GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表3-7則是2016-2018年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與所有GNSS資料比對結果。 從表3-7的結果大致上可以觀察到，升軌道（Ascending）的斜率接近1，R^2約0.53，RMSE大於10mm/yr，而降軌道資料斜率為0.82，R^2較升軌道資料高為0.68，RMSE則小於10mm/yr。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的升降軌道雷達資料有相大的改善，除了有部分離散點之外，大部分都與GNSS觀測相當符合。而離散點大多為在山區的河谷中，通常為雷達同調性低、永久散射體相對稀少之區域，因而在解算時出現錯誤。本時段除了山區河谷部分的雷達資料之外，大部分平原地區的結果品質都相當好。

表3-7: 2016-2018年PSI與GNSS比對成果。

Table 3-7 : Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2016-2018.

		slope	R^2	RMSE
Ascending	v-d	1.0799	0.5250	11.4016
Descending	v-d	0.8233	0.6783	7.1498

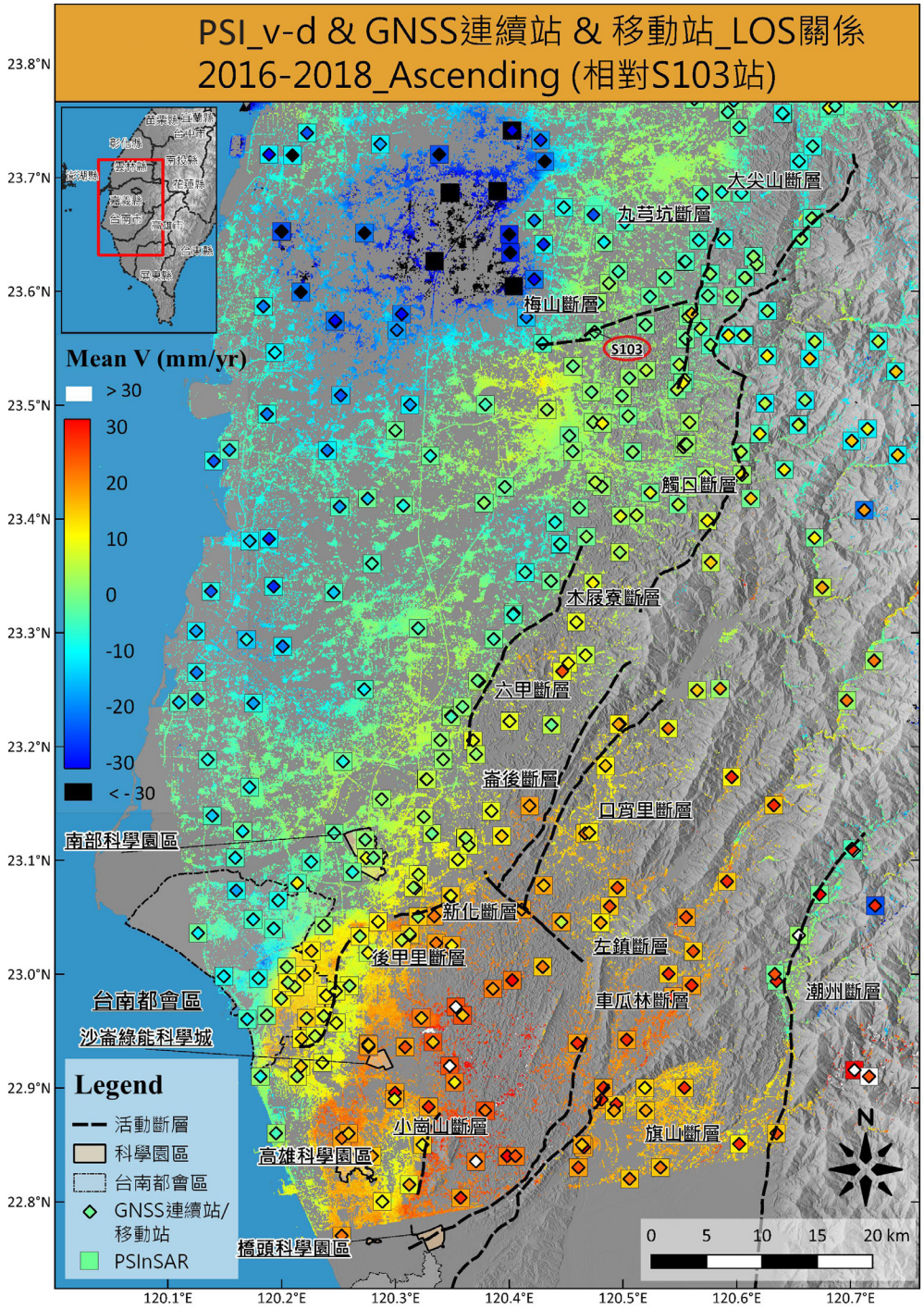


圖3-19：2016-2018年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-19：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. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

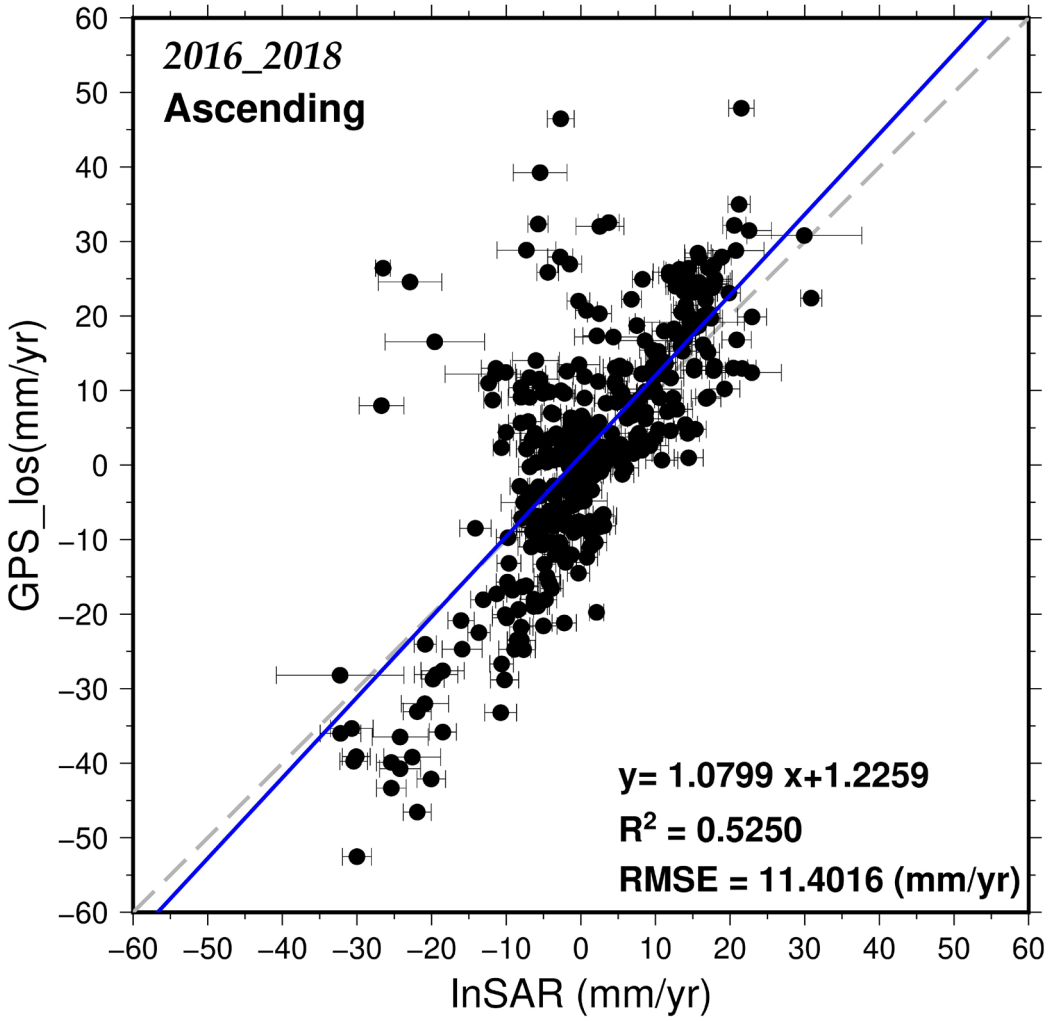


圖3-20：2016-2018 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 3-20：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2016-2018.

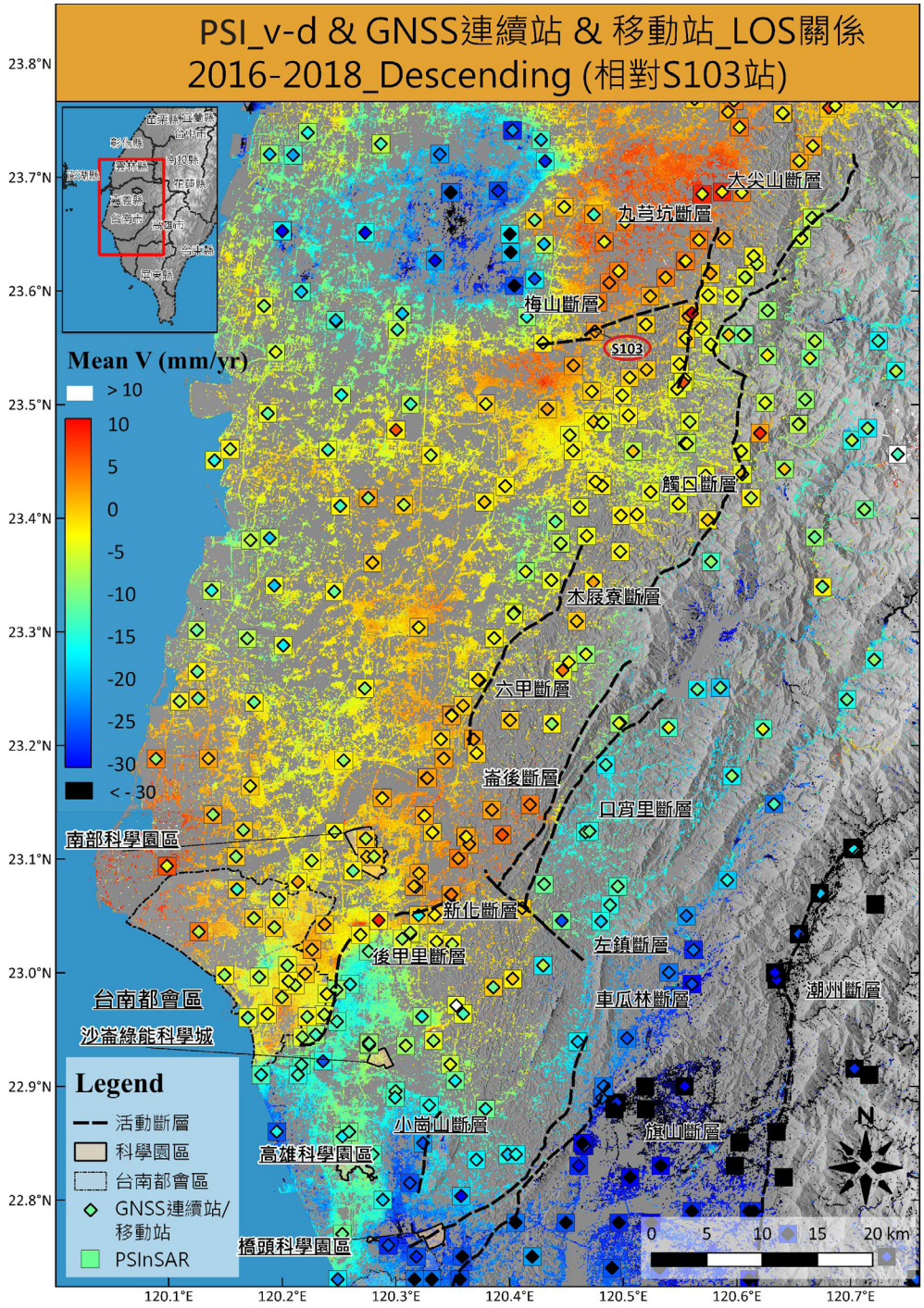


圖3-21： 2016-2018年Descending平均速度場與所有GNSS速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-21：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.

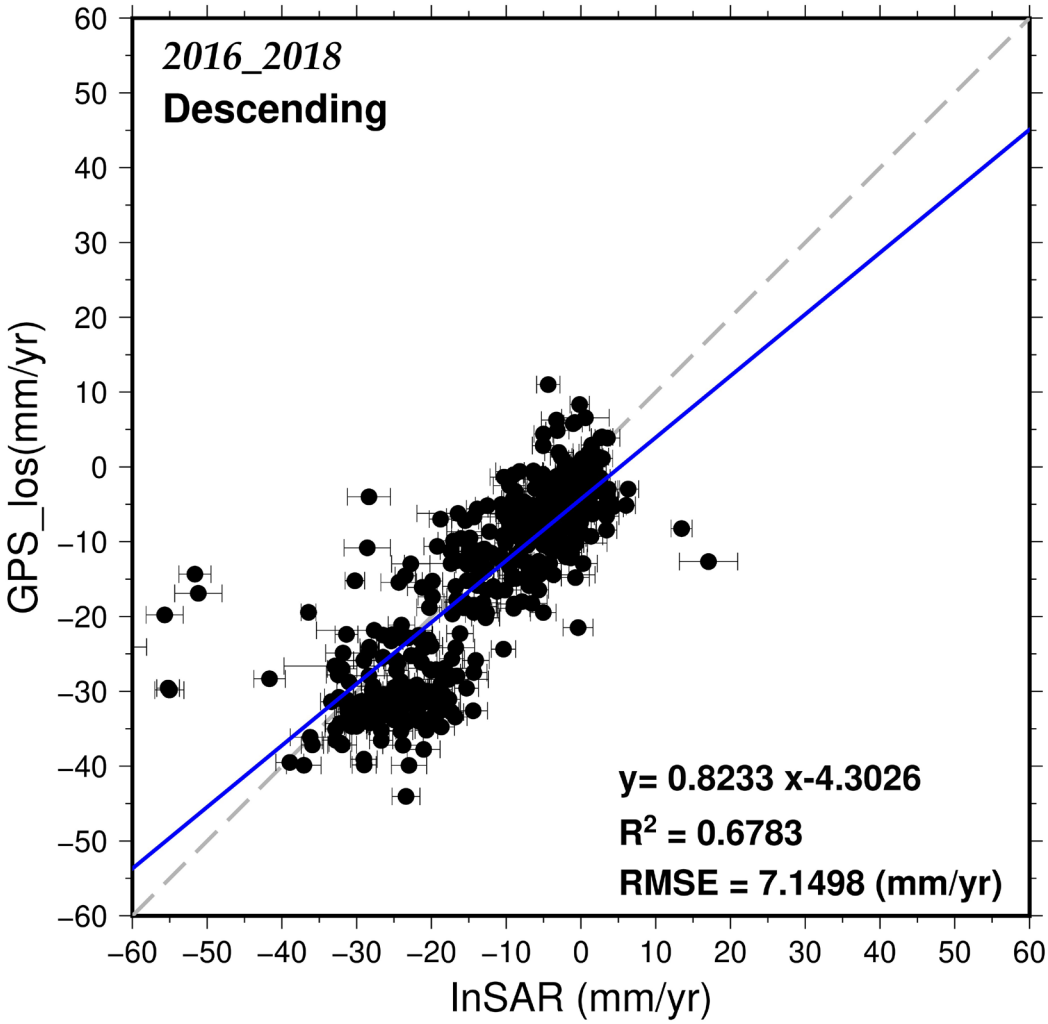


圖3-22：圖 3-22：2016-2018 降軌道雷達資料與2016-2018所有 GPS比對。

Figure 3-22：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2016-2018.

3-2-3 2018年-2021年

圖3-23、3-25分別為2018-2021年研究區域升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的永久散射體雷達差分干涉成果，與GNSS連續站及移動站結果作比較。圖3-24、3-26則是分別為研究區域所有GNSS測站速度與測站周圍500公尺的永久散射體之速度場做比較的狀況。

表3-8則是2018-2021年的升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）速度場與所有GNSS資料比對結果。從表3-8的結果大致上可以得到，升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的斜率都接近 1 ，也就是說，雷達資料與此區域所有GNSS得到的速度相當一致。 同樣的本時期的R^2與 RMSE也都遠較前兩個時間段佳。由斜率看起來，雷達資料與GNSS資料在斜距方向幾乎一致，升軌道（Ascending）成果斜率超過0.95，接近0.98，R^2超過0.9，RMSE約為5 mm/yr；降軌道（Descending）成果斜率為1.11，R2超過0.85，RMSE小於5 mm/yr，雖然比起僅使用GNSS比對的成果，斜率與RMSE都有稍微降低，但兩者資料接近 1 的斜率、配合極低的誤差值（小於 5 mm/yr）顯示加入移動站的資料品質依舊相當可靠。

以整體資料狀況看來，這一個時間段的雷達資料除了有少部分稍微離開回歸線以外，絕大部分都與GNSS觀測相當符合。甚至在山區的河谷雷達資料通常比較不好的地方，趨勢、數量都與GNSS相當符合，所以本時段資料品質相當可靠。

表3-8: 2018-2021年PSI與GNSS比對成果。

Table 3-8 : Comparisons of velocity fields between PSI and GNSS results through 2018-2021.

		slope	R^2	RMSE
Ascending	v-d	0.9755	0.9063	5.0950
Descending	v-d	1.1137	0.8814	4.3621

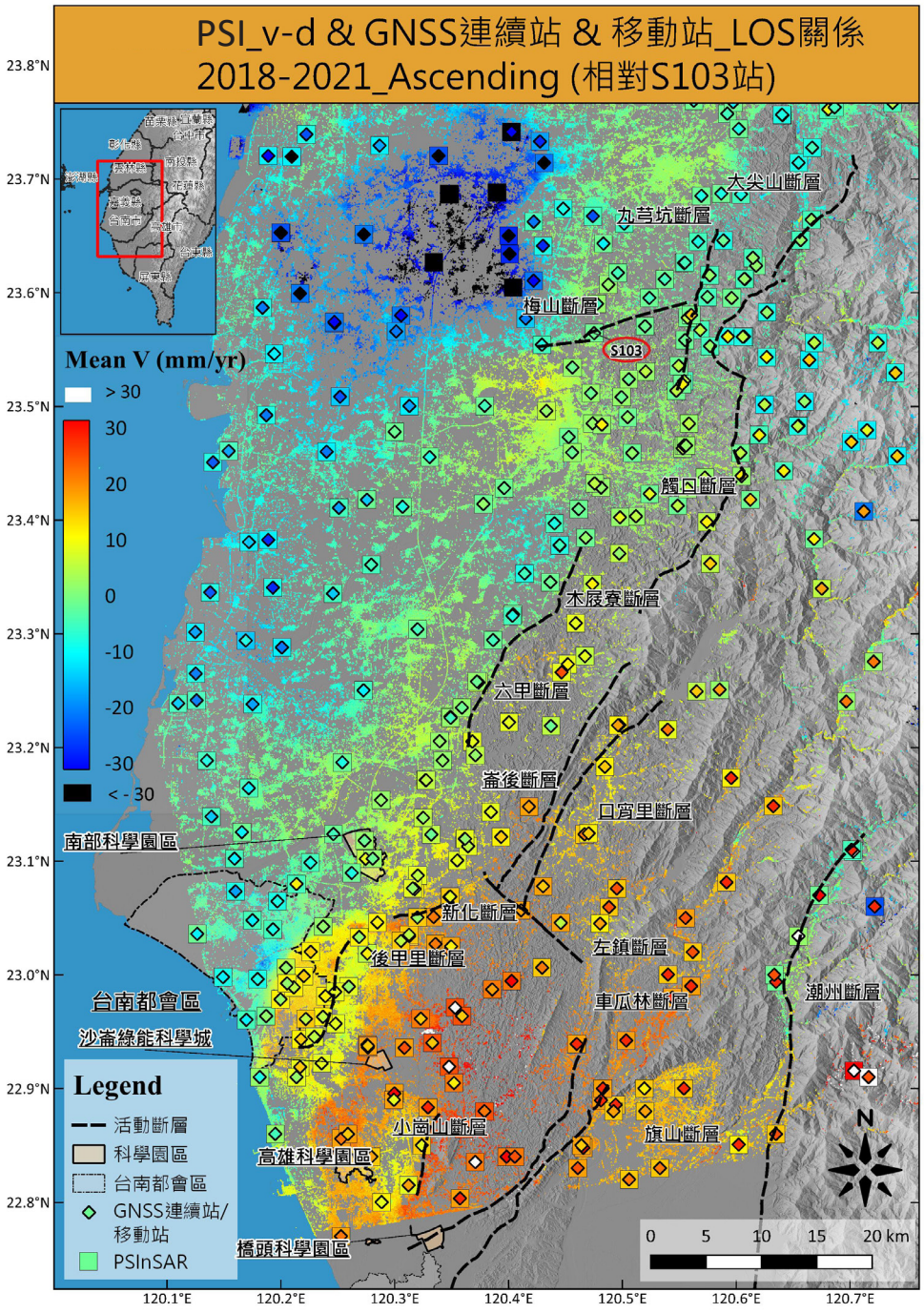


圖3-23：2018-2021年Ascending平均速度場與GNSS移動站速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期GNSS移動站三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為同時期GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-23：Velocity field in ascending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

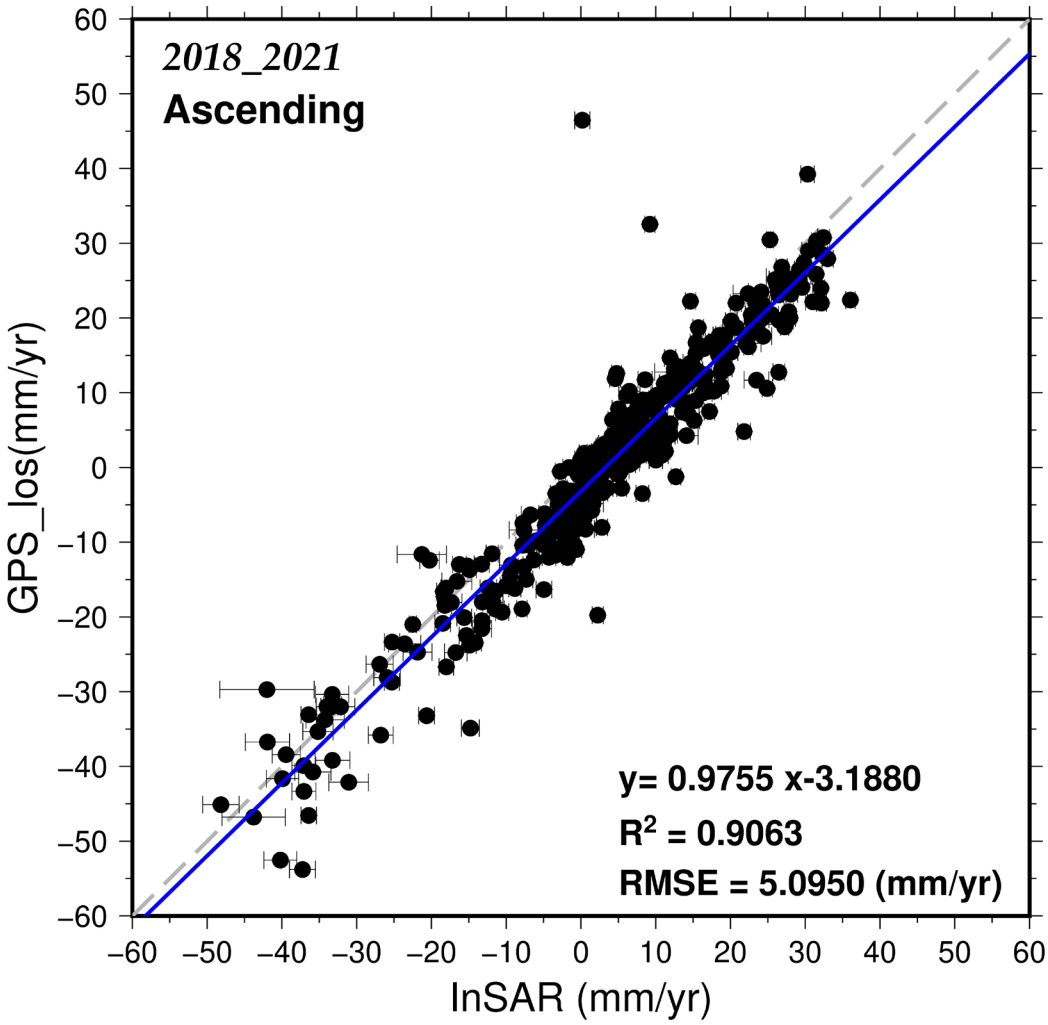


圖3-24：2018-2021 升軌道雷達資料與所有GNSS比對。

Figure 3-24：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in ascending track between 2018-2021.

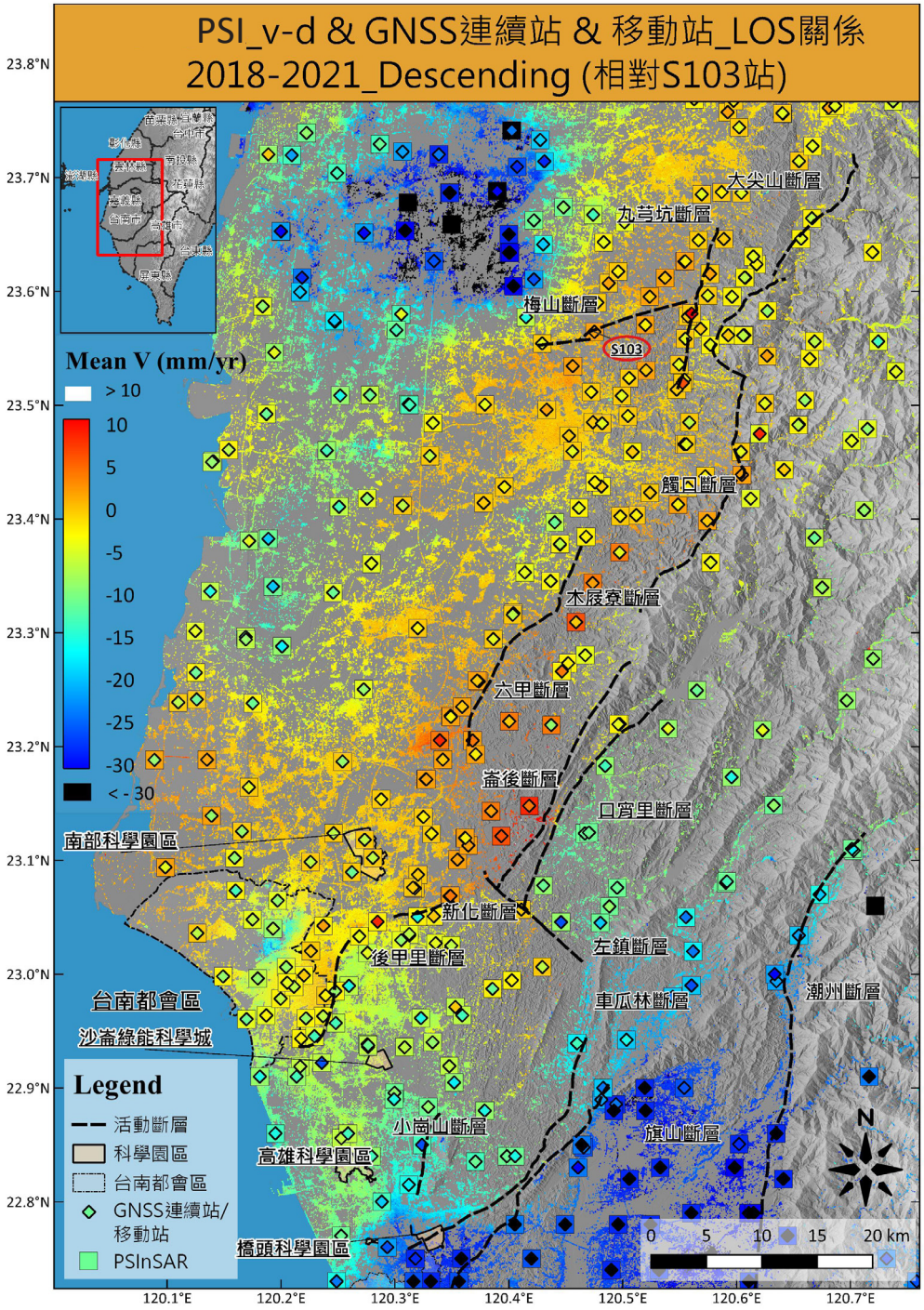


圖3-25：圖 3-25：2018-2021年Descending平均速度場與GNSS移動站速度場。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。菱形為所有GNSS三維向量投影至視衛星方向。

Figure 3-25：Velocity field in descending track between 2018 and 2021. Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents toward the satellite and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents away from the satellite. Color-coded diamonds represent projection of 3-directions GNSS velocity to LOS direction towards the satellite.

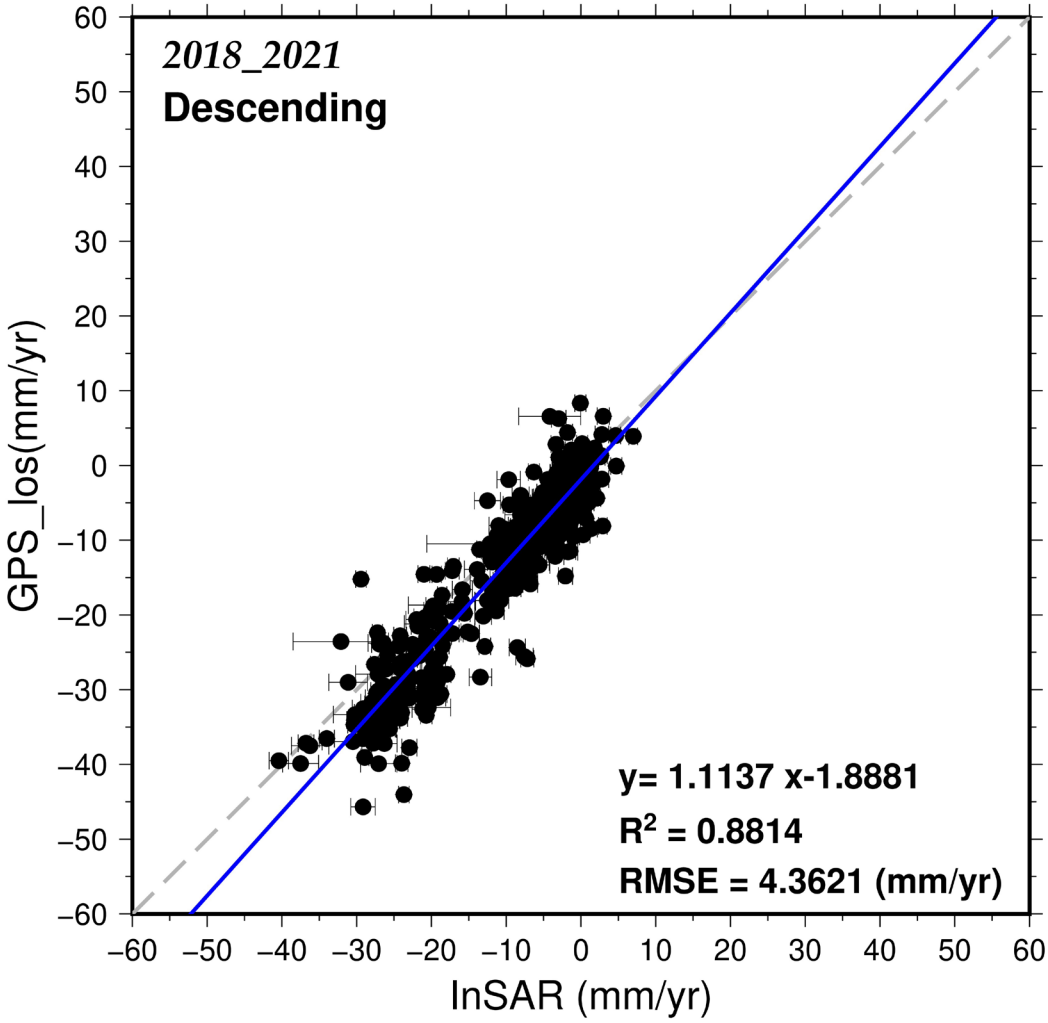


圖3-26：2018-2021 降軌道雷達資料與移動站的比對。

Figure 3-26：Comparison of combined continuous and campaign GNSS with PSI data in descending track between 2018-2021.

3-3 水準測量資料與雷達資料比對成果

調查區域中有四條長期觀察之水準測線，分別是金湖至瑞峰測線、北門到楠西測線、善化至關廟測線、以及安平至龍崎測線（圖3-27）。我們運用這些水準測量資料來與雷達資料對比，藉此比較整體趨勢以及細節部分的差異。

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

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

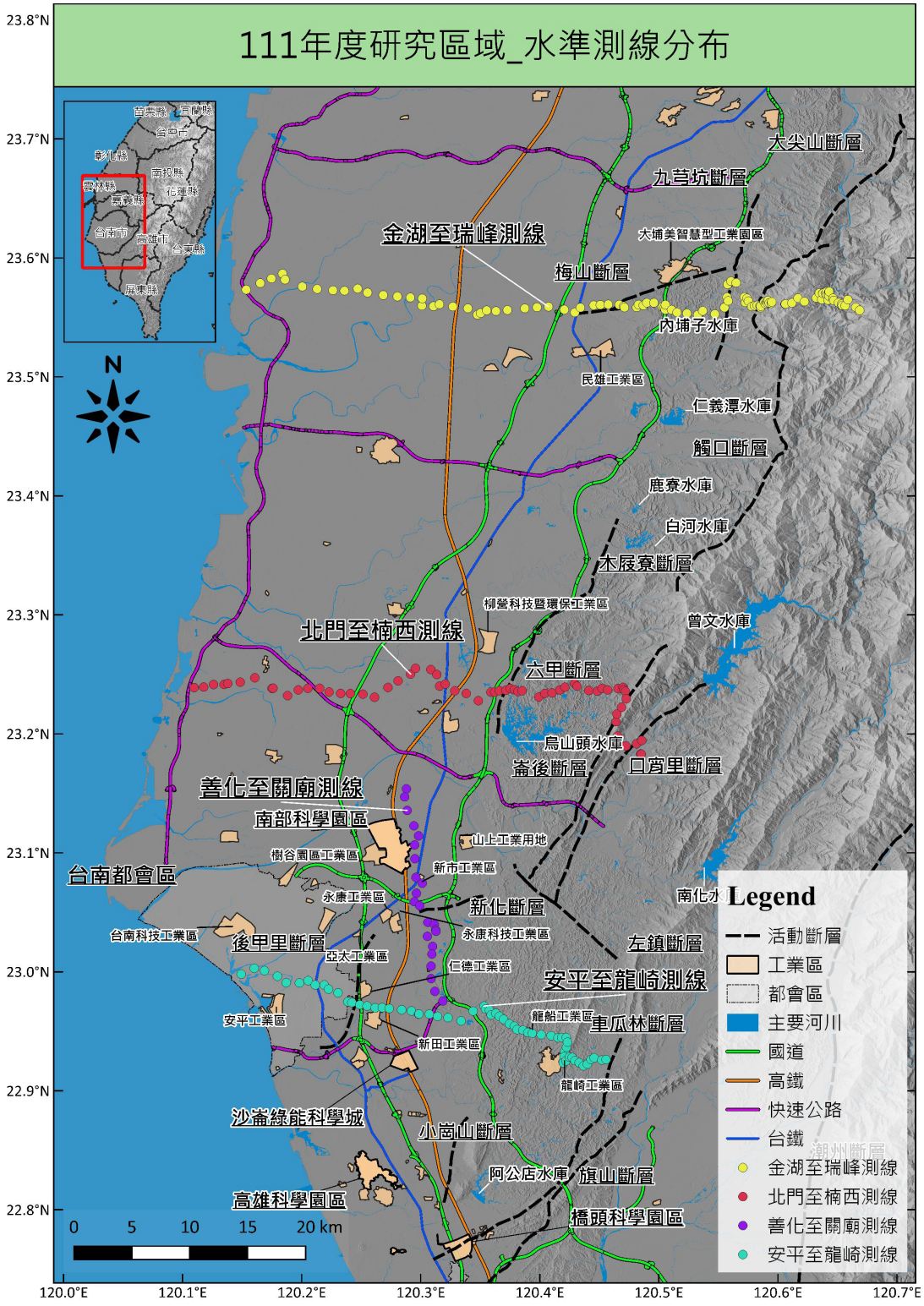


圖3-27：嘉義台南水準測線分布。

Figure 3-27：Locations of leveling profiles in Chiayi-Tainan area.

3-3-1金湖至瑞峰測線

金湖至瑞峰測線（圖3-28與圖3-29），其橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層，路線長約54公里（投影至剖面的長度），以GNSS連續站S103做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位G742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S103校正後，2016-2018及2018-2021兩個時期的兩個方向(ascending及descending)雷達影像結果與水準測量結果相當一致，均為梅山斷層以西有一速度下陷趨勢，以東至九芎坑斷層間速度較無變化，九芎坑斷層以東則因為進入山區遮蔽較嚴重，因此可以比對的雷達資料較少。

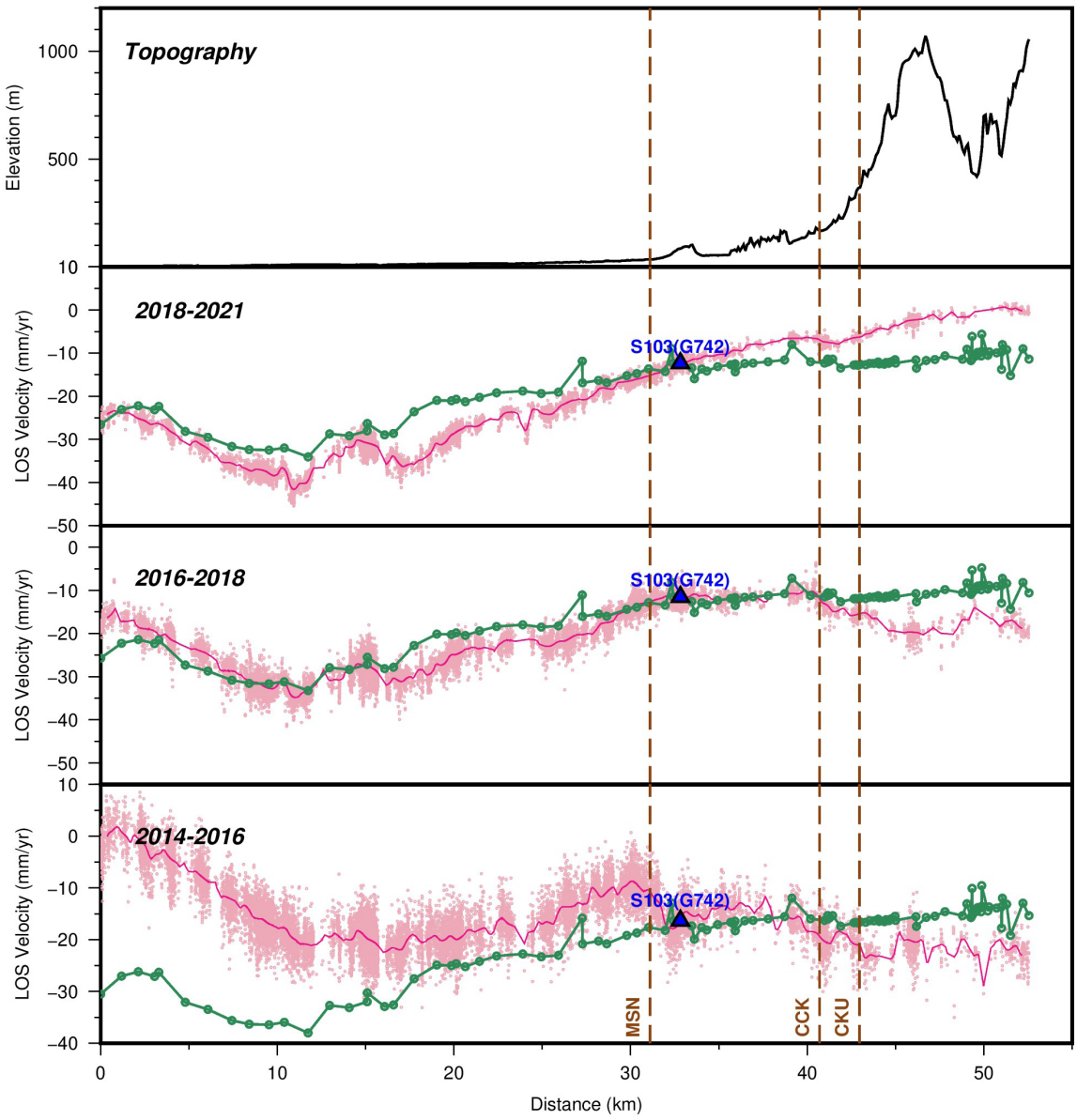


圖3-28：水準測線-金湖至瑞峰測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點S103(G742)。MSN 為梅山斷層、CCK 為九芎坑斷層、CKU為觸口斷層。

Figure 3-28 : Comparison of PSI and Jinhu-Ruifeng leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station S103(G742). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, MSN is Meishan fault, CCK is Chiuchiungkeng fault, and CKU is Chukou fault.

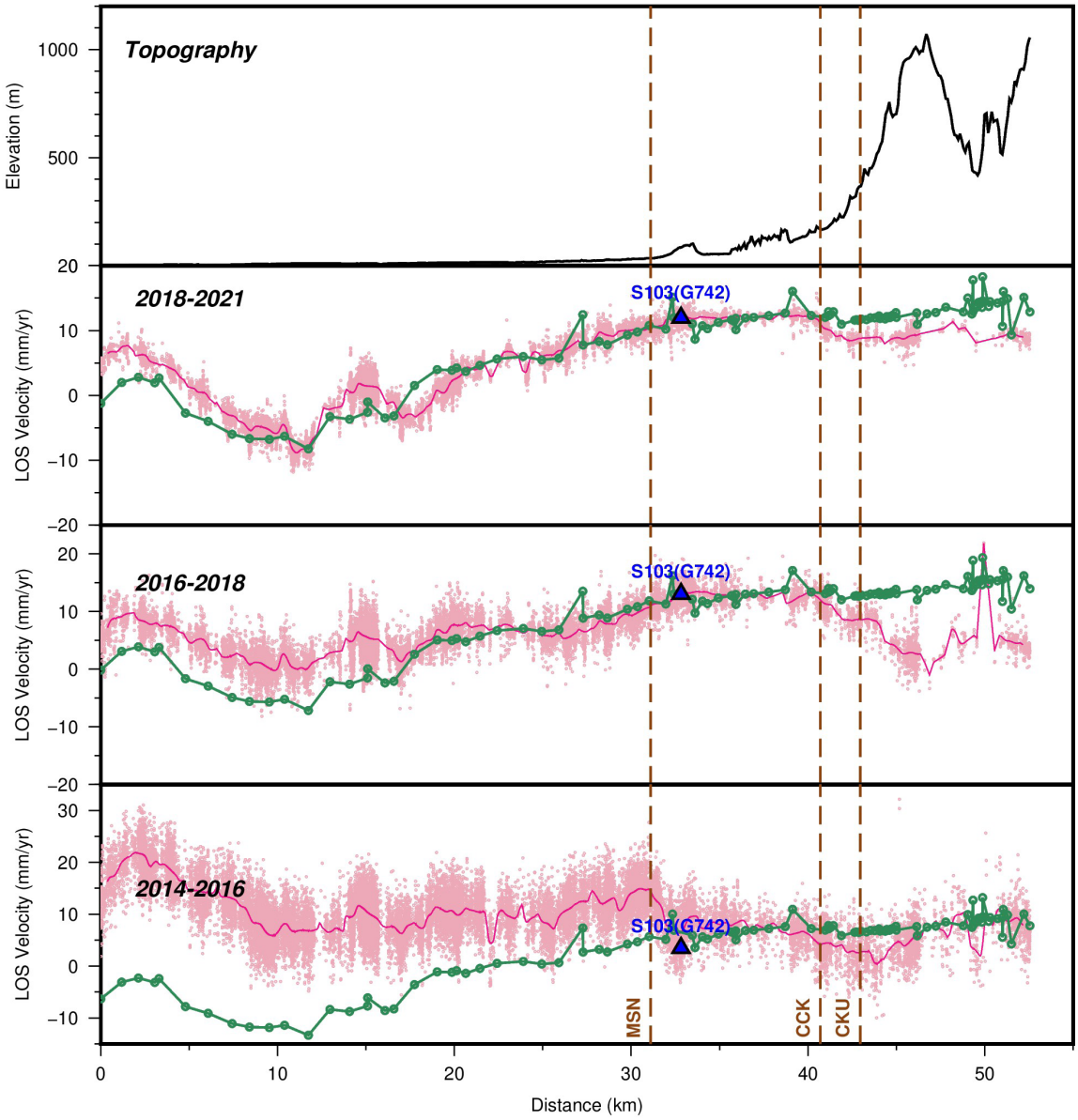


圖3-29：水準測線-金湖至瑞峰測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點S103(G742)。MSN 為梅山斷層、CCK 為九芎坑斷層、CKU為觸口斷層。

Figure 3-29：Comparison of PSI and Jinhu-Ruifeng leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station S103(G742). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, MSN is Meishan fault, CCK is Chiuchiungkeng fault, and CKU is Chukou fault.

3-3-2 北門至楠西測線

北門至楠西測線橫跨六甲斷層，測線長約40公里(投影至剖面的長度)，以GNSS連續站　　GS43做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位G813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3-30、圖3-31，與金湖至瑞峰測線相似，以參考點GS43校正後，2016-2018及2018-2021兩個時期的兩個方向(ascending及descending)雷達影像結果與水準測量結果相當一致，均為六甲斷層以西有一速度下陷趨勢，但下陷速率較低，約10mm/yr，以東跨越六甲斷層因為進入山區遮蔽較嚴重，地形起伏較大，PSI點較不密集，因此可以比對的雷達資料較少。

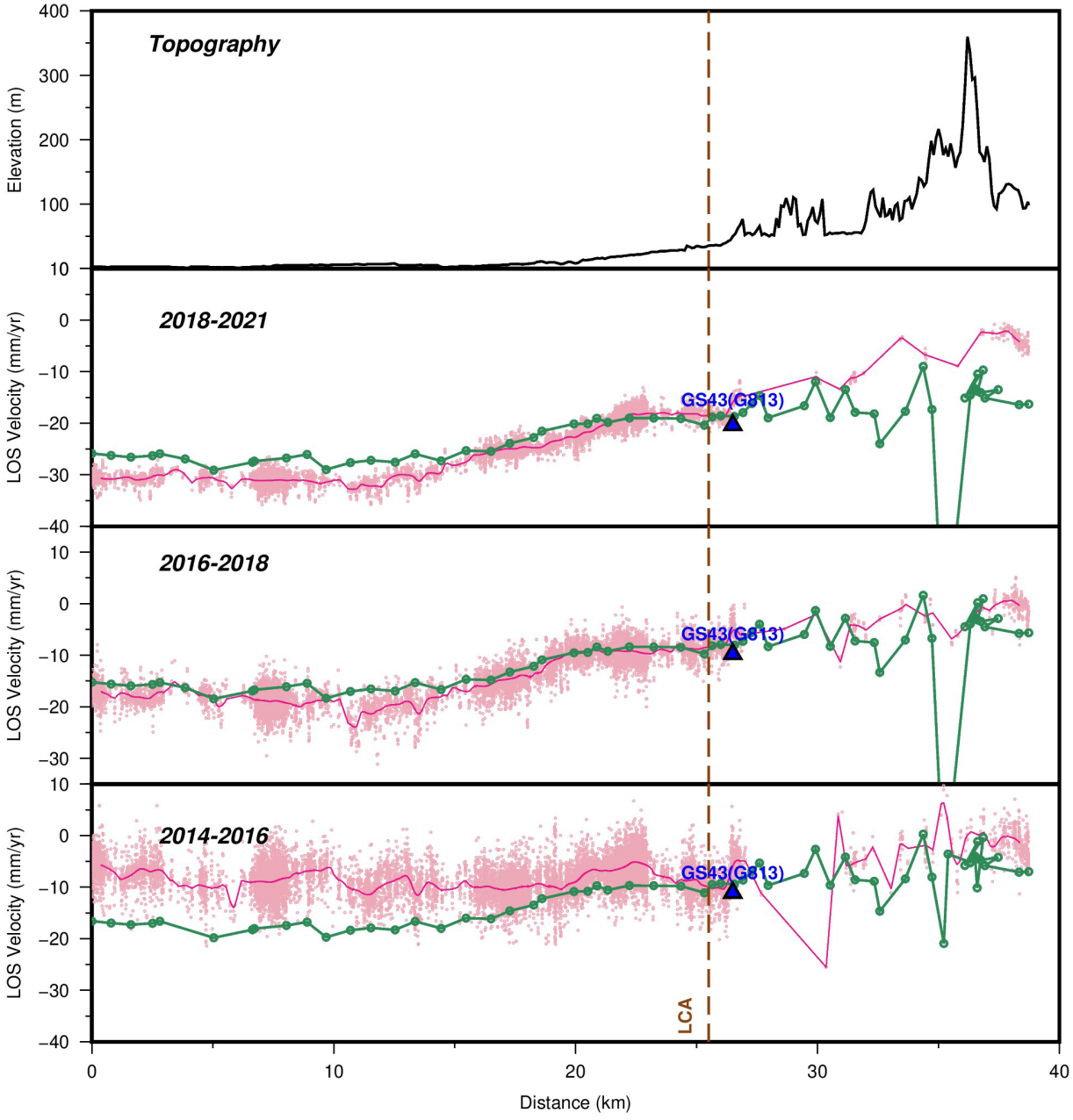


圖3-30：水準測線-北門至楠西測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS43(G813)。LCA 為六甲斷層。

Figure 3-30 : Comparison of PSI and Beimen-Nanxi leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS43(G813). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, LCA is Liuchia fault.

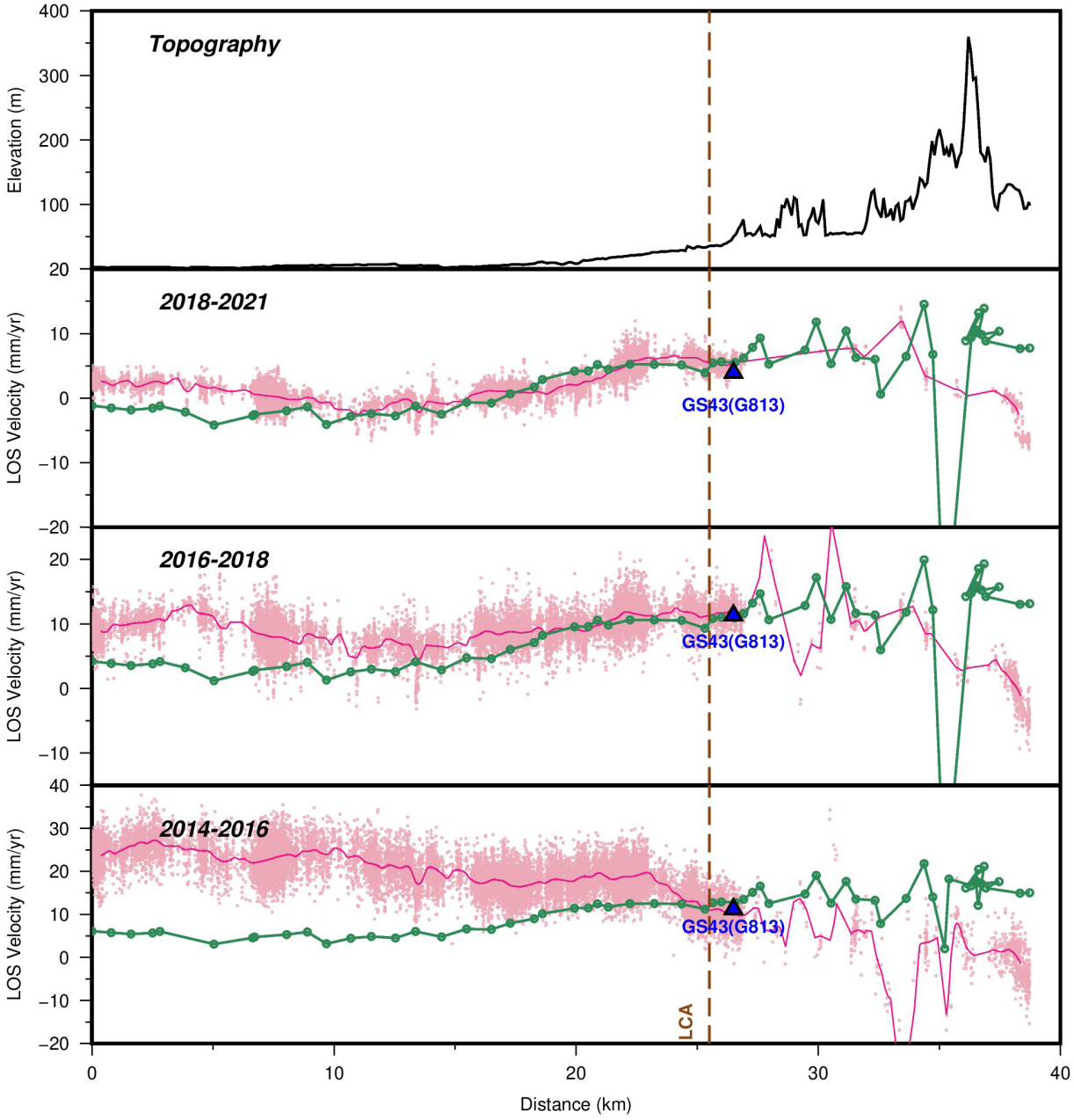


圖3-31：水準測線-北門至楠西測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS43(G813)。LCA 為六甲斷層。

Figure 3-31: Comparison of PSI and Beimen-Nanxi leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS43(G813). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, LCA is Liuchia fault.

3-3-3 善化至關廟測線

善化至關廟測線橫跨新化斷層，長約22公里(投影至剖面的長度），以GNSS連續站GS29做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位G377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3-32、圖3-33，無論是水準測線資料或是雷達資料均可以看出在向南跨越新化斷層有一明顯速度值差異，約為10mm/yr，但水準測線結果向南為下陷，雷達資料為抬升，其差異原因還有待釐清。

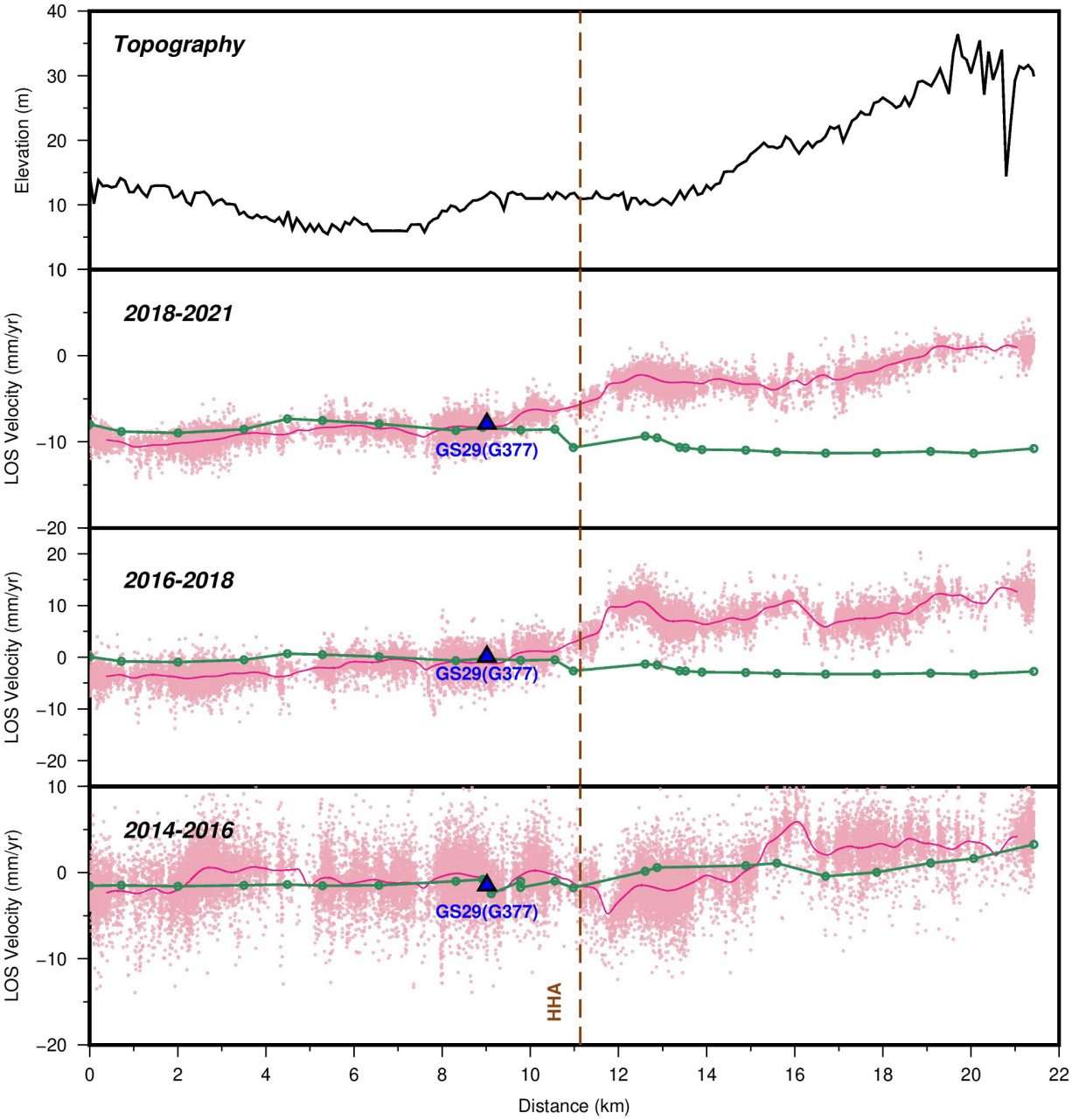


圖3-32：水準測線-善化至關廟測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS29(G377)。HHA 為新化斷層。

Figure 3-32：Comparison of PSI and Shanhua-Guanmiao leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS29(G377). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HHA is Hsinhua fault.

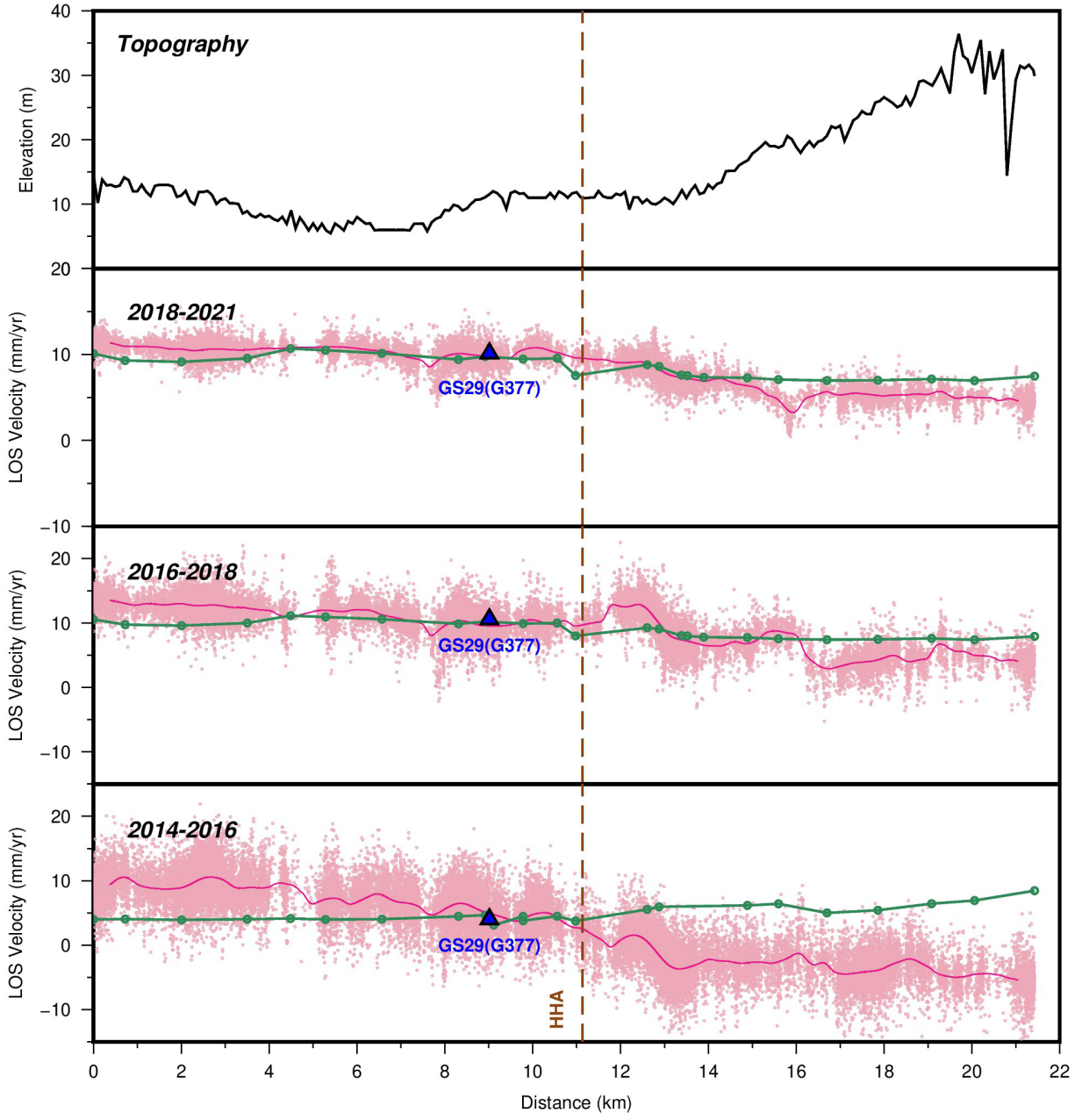


圖3-33：水準測線-善化至關廟測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS29(G377)。HHA 為新化斷層。

Figure 3-33：Comparison of PSI and Shanhua-Guanmiao leveling route in des cending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS29(G377). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HHA is Hsinhua fault.

3-3-4 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨後甲里斷層，長約 33 公里(投影至剖面的長度），以 GNSS 連續站 GS73 做為參考點(藍色三角形)來校正水準點位 G358 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3-34、圖3-35，兩個方向的雷達資料可以看出在向東跨越後甲里斷層有一明顯速度值差異，尤其以Descending影像更為明顯，其變化量約為 5 mm/yr (2018-2021) 到10 mm/yr(2016-2018)，但水準測量結果並無此明顯變化。另外，在兩個方向的雷達影像也可觀察到在水準測線最西側有一速度下陷值，約為10mm/yr，水準測量也可以觀察到，但沒有雷達影像來的明顯。

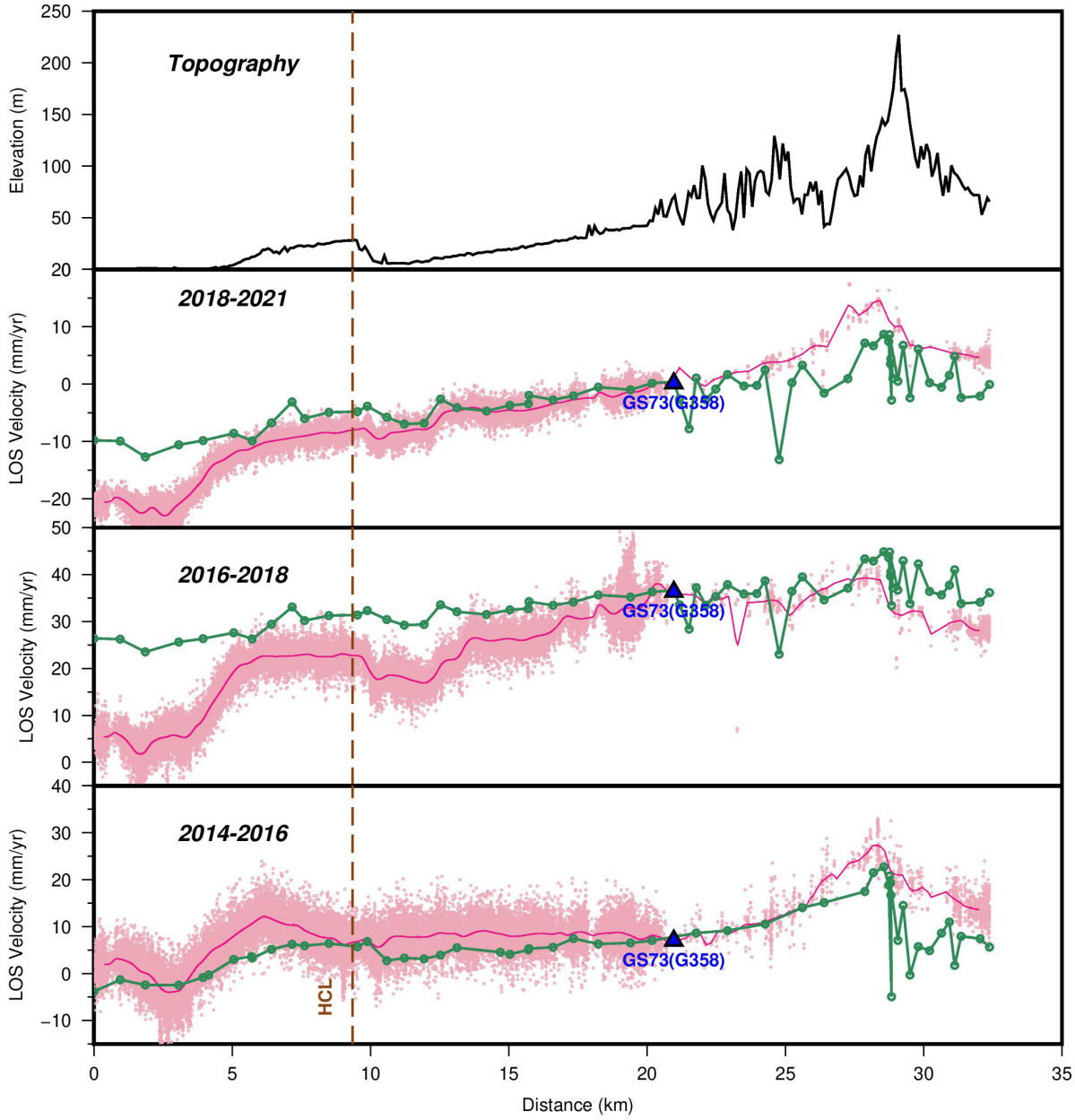


圖3-34：水準測線-安平至龍崎測線與PSI資料比對(Ascending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS73(G358)。HCL 為後甲里斷層。

Figure 3-34 : Comparison of PSI and Anping-Longci leveling route in ascending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS73(G358). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCL is Houchiali fault.

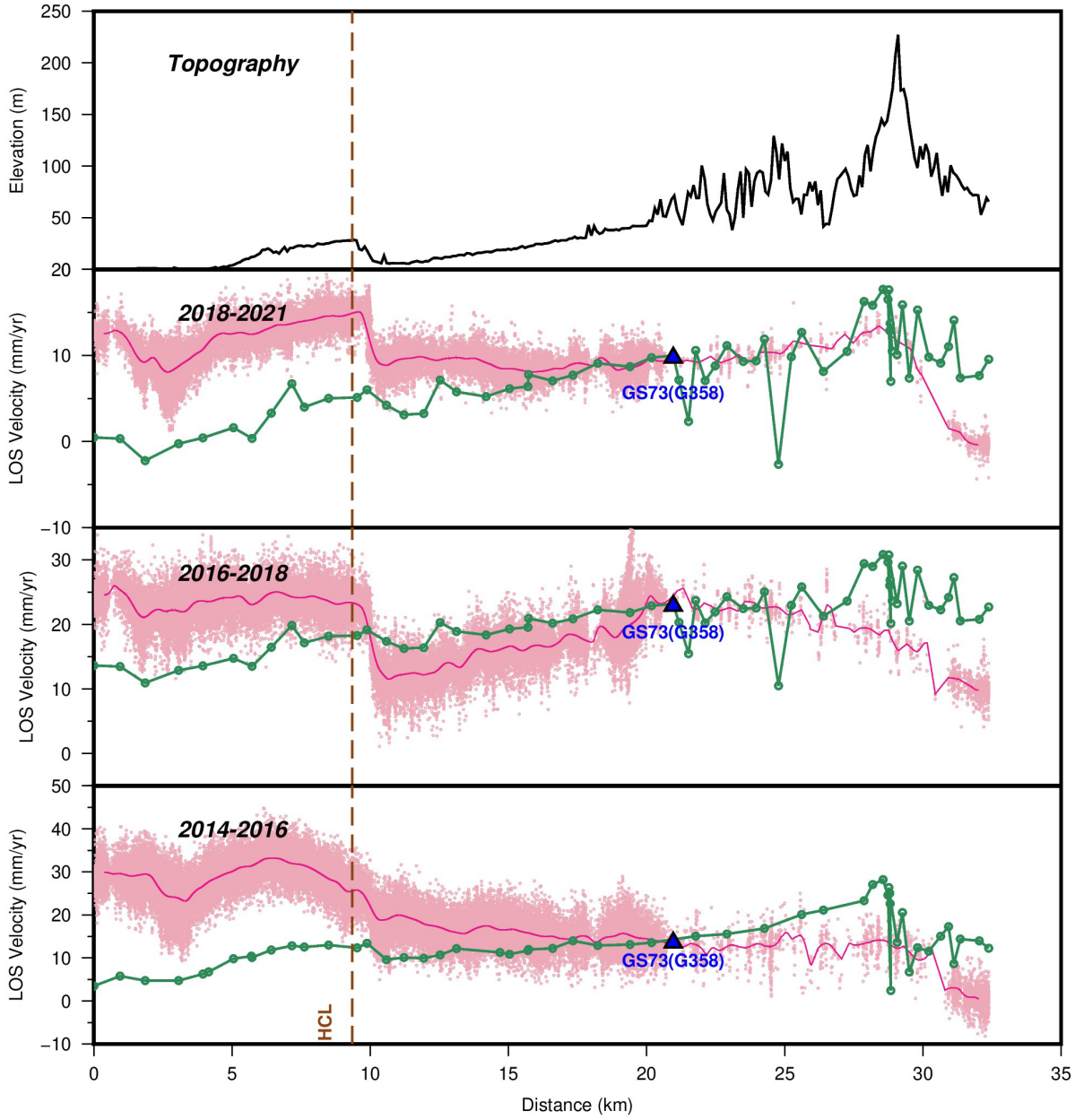


圖3-35：水準測線-安平至龍崎測線與PSI資料比對(Descending)。由上至下為地形高程、2018-2021時間段比對、2016-2018時間段比對及2014-2016時間段比對。綠色點為水準點，粉色點為PSI速度值投影至水準測線上。藍色三角形為參考點GS73(G358)。HCL 為後甲里斷層。

Figure 3-35: Comparison of PSI and Anping-Longci leveling route in descending track. From the top to bottom are topography, 2018-2021 period, 2016-2018 period and 2014-2016 period. green dots are the elevation change in the specific time period; pink dots represent PSI velocity project to the leveling route; blue triangle is the reference station GS73(G358). Vertical dashed lines indicate the location of active faults, HCL is Houchiali fault.

第四章 嘉南地區雷達影像分析

本計畫選取Sentinel-1A衛星SAR影像作為資料分析對象，其軌道重複週期為12天，使用的影像時間自2014年10月至2021年12月，分為升軌（Ascending）及降軌（Descending）兩部分，影像使用幅數如表4-1所示。

表4-1: Sentinel-1A衛星影像使用幅數。

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

	2014-2016	2016-2018	2018-2021
升軌(Ascending)	27幅	55幅	115幅
降軌(Descending)	18幅	39幅	113幅

4-1 STAMPS參數測試與律定

研究調查區域的設定通常是根據議題近似或是鄰近區域等條件而設置，然而雷達影像拍攝區域則不見得與研究區域相符，很多時候需要拼接影像、甚至做一些取捨。 本年度調查區域在升降軌皆需要接合影像，才能夠完整涵蓋調查區域（圖4-1）。升軌影像需要南北兩圖幅才能完整涵蓋本年度調查區域，而有些日期並非南北兩幅皆有拍攝，因此影像數量與上一年度略有不同。在處理過程會先釐清是否有資料、接合是否有問題、測試接合後是否已有適當地涵蓋研究區域，這些接合與測試的步驟都增加了處理的複雜度。

實際執行影像接合時，對於升軌影像我們先選定調查區域內南北兩個點，將原始資料依照所選範圍合併，利用GMTSAR進行DInSAR處理後，最後使用StaMPS進行PSI流程。降軌則是需要接合同一圖幅內不同subswath（F2、F3），與升軌合併方式不同，須先以GMTSAR處理後全部圖幅合併後再裁切，最後使用StaMPS進行

PSI流程，因此處理時間較升軌長，處理過程中每幅影像約需35G容量，對電腦效能及儲存空間都是挑戰。

使用StaMPS軟體時須注意兩項參數：雷達強度散佈率預設門檻值和Weed Standard Deviation (WSD)數值，我們依據上一年度高屏地區經驗，選擇雷達強度散佈率門檻值為0.75、和Weed Standard Deviation (WSD) 1來進行處理。後續分析則以去除地形殘差的速度場（v-d）進行。

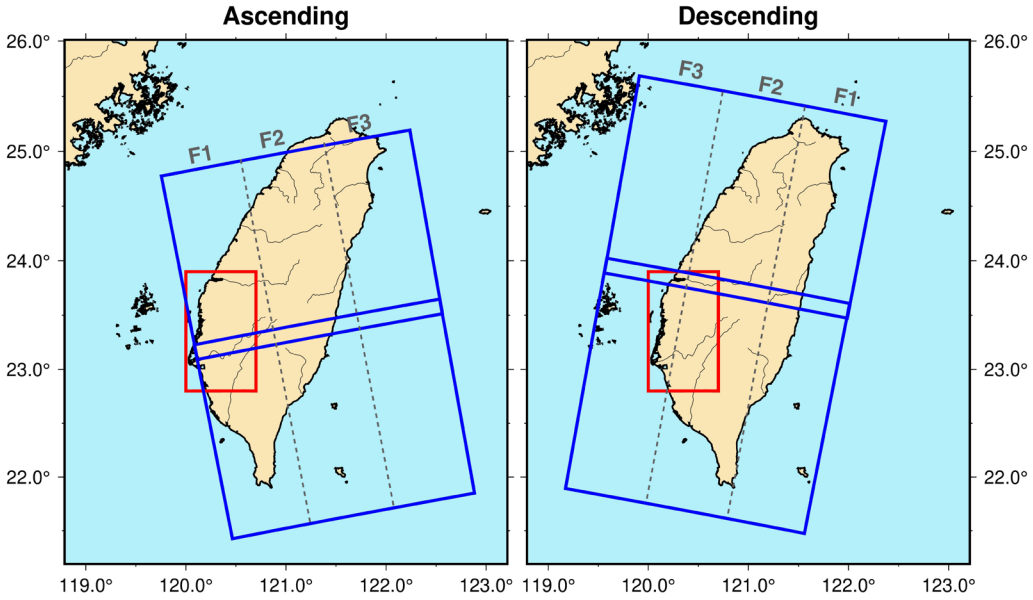


圖4-1：Sentinel-1衛星軌道資訊與研究區域分佈圖。

Figure 4-1：Orbits information of Sentinel-1 in the study area.

4-2 2014-2016年雷達影像成果

從2014年10月22日開始至2016年02月02日之間，我們選取27幅Sentinel-1A升軌道（Ascending）影像，並以2015年08月18日為主影像，而在降軌方面，選取18幅Sentinel-1A降軌道（Descending）影像，並以2015年08月20日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過GMTSAR軟體處理完成，再經由StaMPS軟體搭配先前律定的參數進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得2014年至2016年研究區域內的衛星視角（LOS）位移速度場。

根據第三章分析結果，2014-2016時間段之資料為本計畫呈現的三個時間段中資料影像數目較少、資料品質較不穩定的一段（詳見文字 3-1-1節）， 因此 2014-2016 之剖面資料品質也同樣的較不穩定。

本節呈現升降軌道的LOS速度場成果，升軌道（Ascending）的LOS速度場結果如圖4-2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六甲斷層以南至車瓜林斷層附近，主要呈現冷色系的地區分佈在梅山斷層以北和雲彰地區。研究區域內的斷層兩側速度場差異不明顯。

降軌道的LOS速度場結果如圖4-3所示。PSI的LOS速度場數值大致分布在-40mm/yr到30mm/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後甲里斷層西側和沿海地區，主要呈現冷色系的地區分佈在車瓜林斷層以南。研究區域內的後甲里斷層的兩側有顯著的LOS速度場差異；新化斷層及口宵里斷層兩側LOS速度場有所差異；其餘斷層兩側的LOS速度場差異則較不明顯。降軌道影像因拍攝範圍影響，在2014年至2016年未完整涵蓋九芎坑斷層及大尖山斷層，因此九芎坑斷層及大尖山斷層北段無法獲得LOS速度場的分析成果。

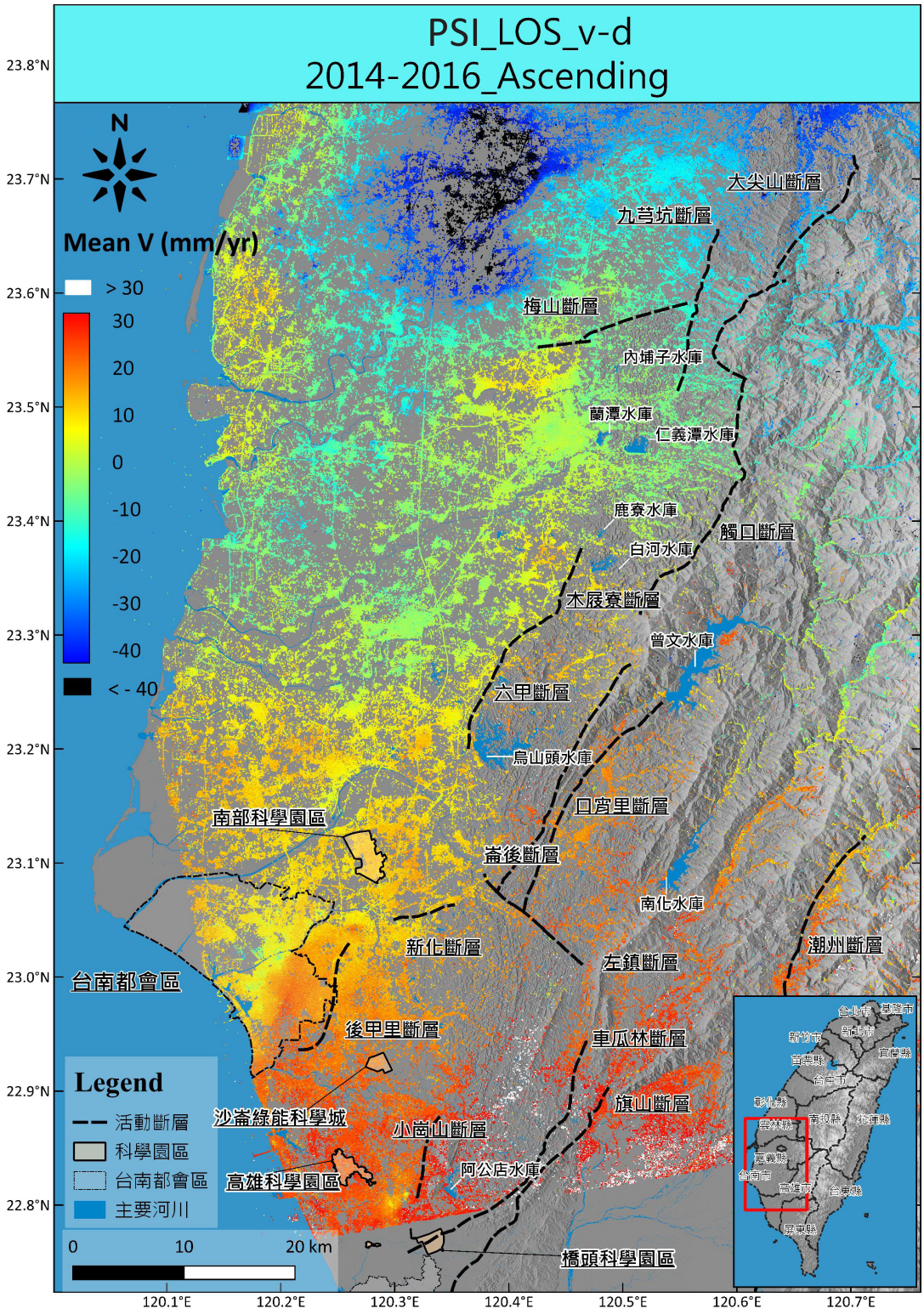


圖4-2：2014-2016升軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-2： Average 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.

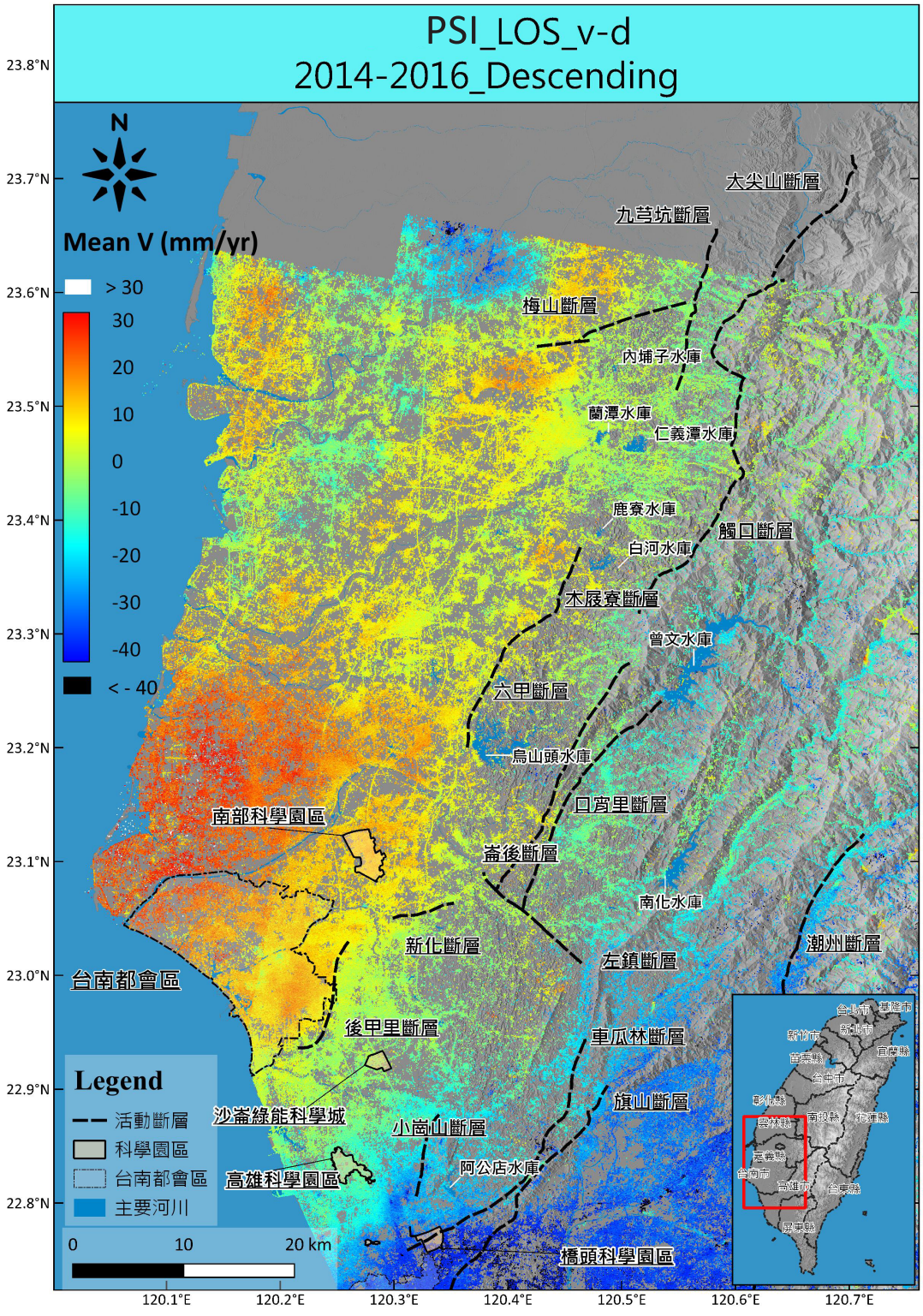


圖4-3：2014-2016降軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-3：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.

4-3 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，因此能提供足夠數量的影像供分析。我們從2016年02月14日開始至2018年02月03日之間，選取55幅Sentinel-1A升軌道（Ascending）影像，並以2016年08月12為主影像，此外，選39幅Sentinel-1A降軌道（Descending）影像，並以2016年08月14日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過GMTSAR軟體處理完成，再經由StaMPS軟體搭配先前律定的參數進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得2016年至2018年研究區域內LOS位移速度場。

本時期的雷達差分干涉結果，根據第三章表3-4的結果，升軌道（Ascending）R^2大於0.6，RMSE大約是10mm/yr；降軌道（Descending）R^2大於0.55，RMSE大約是6 mm/yr。主要的誤差在於山區河谷中的永久散射點的誤差。 除開這一類地區之外，其他地區的速度場資料品質相當好。

本節呈現升降軌道的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後甲里斷層以東至車瓜林斷層之間，主要呈現冷色系的地區分佈在台南都會區以北至沿海及雲彰地區。本年度研究區域內的後甲里斷層的兩側，有顯著的速度場差異；相對於上述斷層，其他斷層兩側的速度場差異則較不明顯；雲彰地區的LOS速度場比2014年至2016年小。

降軌道的LOS速度場結果如圖4-5所示。PSI的LOS速度場數值大致分布在-50mm/yr到20mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在後甲里斷層西側和沿海地區及平原區，主要呈現冷色系的地區分佈在車瓜林斷層以南及彰雲地區。研究區域內的後甲里斷層的兩側有顯著的LOS速度場差異；新化斷層及口宵里斷層兩側LOS速度場有所差異；其餘斷層兩側的LOS速度場差異則較不明顯。

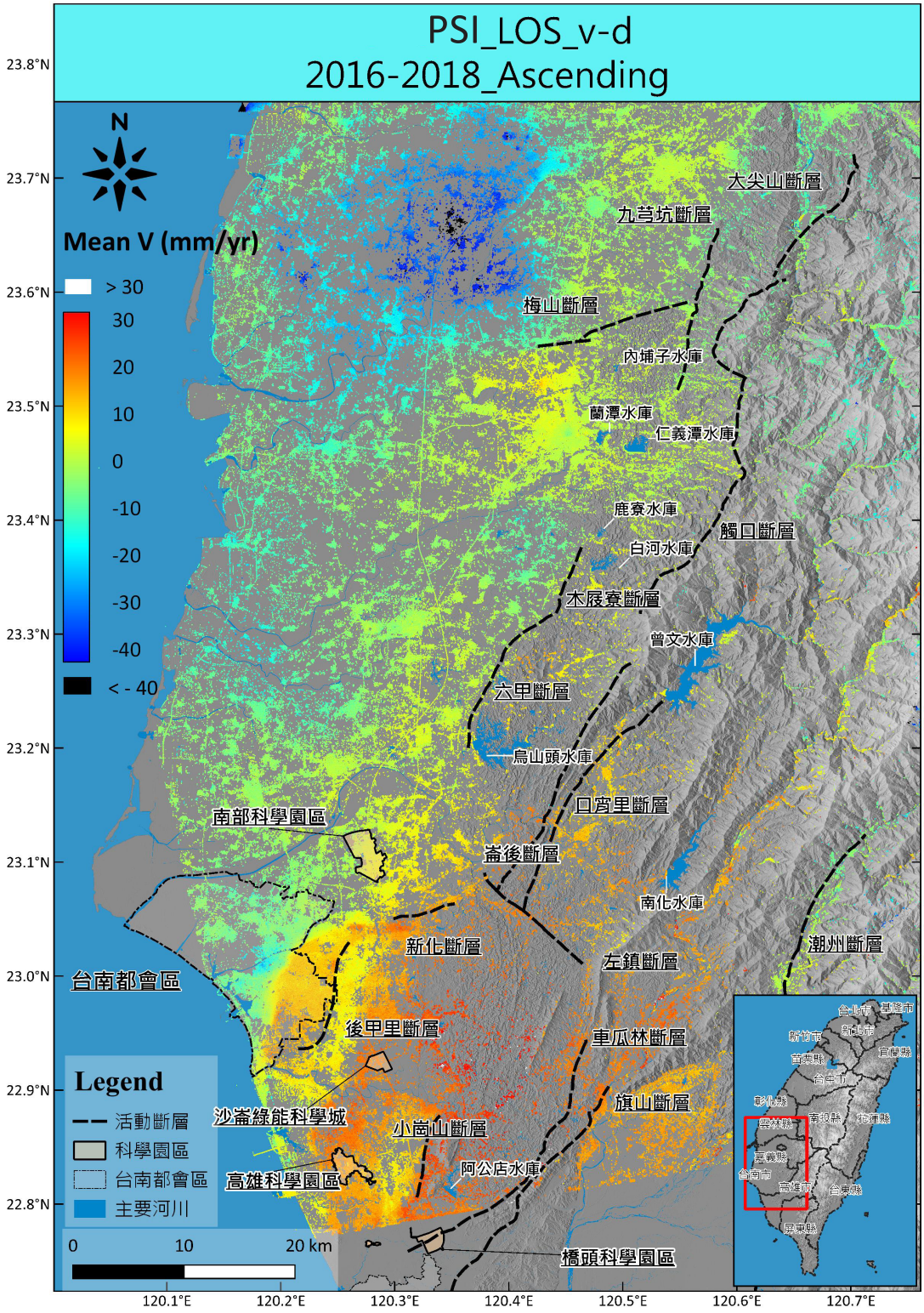


圖4-4：2016-2018升軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-4 : 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.

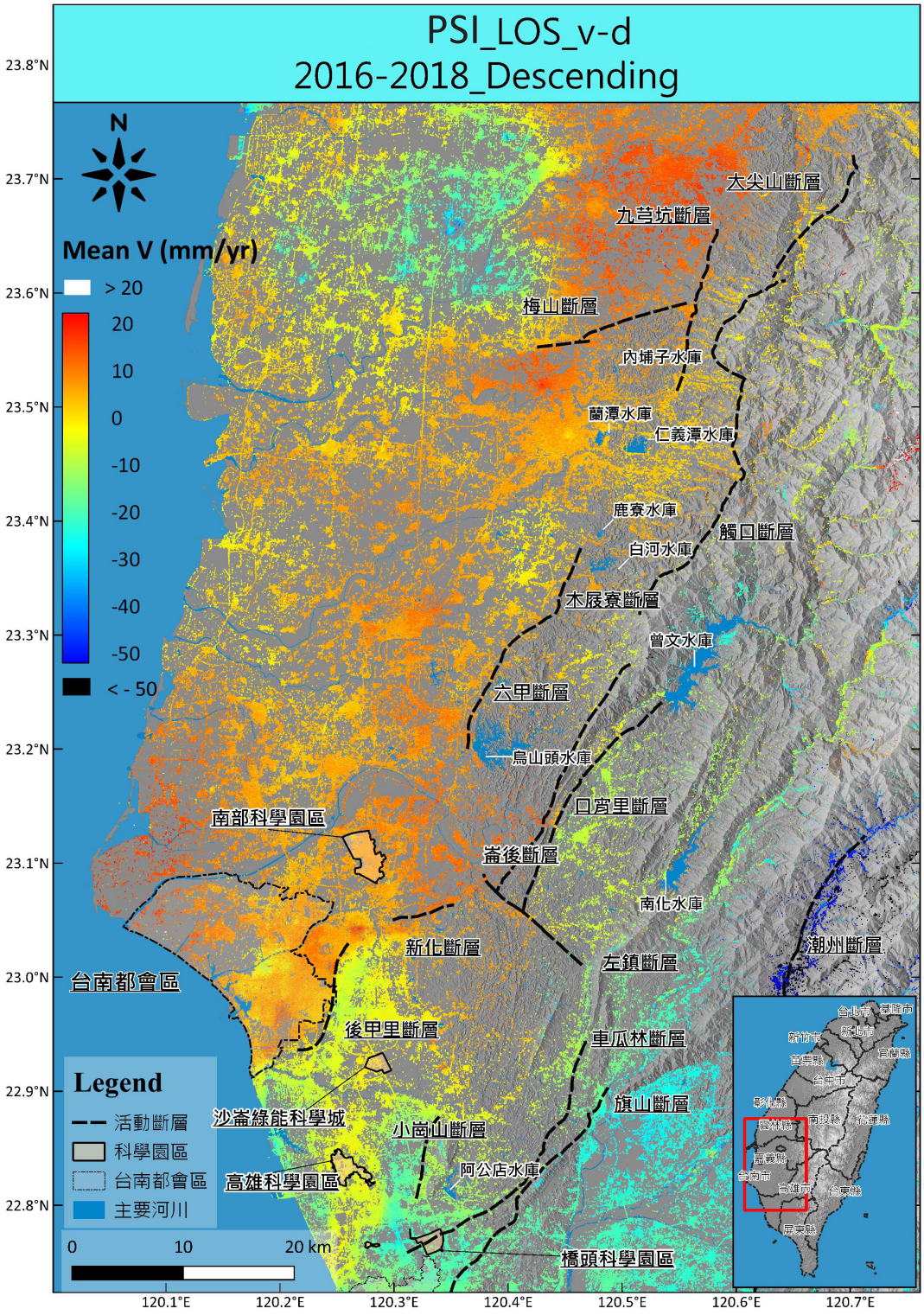


圖4-5：2016-2018降軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-5 : 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.

4-4 2018-2021年雷達影像成果

從2018年3月至2021年12月之間，選取115幅Sentinel-1升軌道影像，並以2018年08月14日為主影像，此外，選113幅Sentinel-1A降軌道（Descending）影像，並以2018年08月16日為主影像。各影像對的雷達差分干涉成果透過GMTSAR軟體處理完成，再經由StaMPS軟體搭配先前律定的參數進行永久散射體差分干涉技術的處理，獲得2018年至2021年研究區域內LOS位移速度場。

根據第三章的結果（表3-5），本時間段之資料成果與GNSS比對成果相當良好。升軌道（Ascending）R^2大於0.95，而RMSE 則小於4mm/yr；降軌道（Descending）R^2大於0.87，而RMSE 則小於 3.5 mm/yr。

本節呈現升降軌道的LOS速度場成果，升軌道的LOS速度場結果如圖4-6所示。PSI的LOS速度場數值大致分布在20至-20mm/yr之間，PS點位呈現暖色系，表示地表朝向衛星方向移動，兩者之間的距離縮短，呈現冷色系表示地表遠離衛星方向移動，兩者之間的距離伸長。主要呈現暖色系的地區分佈在後甲里斷層以東至潮州斷層，主要呈現冷色系的地區分佈在南部科學園區以北和雲彰沿海地區。本時期本年度研究區域內的斷層兩側，於LOS速度場無顯著的速度場差異；雲彰地區的LOS速度場超過-40 mm/yr，遠離衛星的速度相較於前期多。

降軌道的LOS速度場結果如圖4-7所示。PSI的LOS速度場數值大致分布在-30mm/yr到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後甲里斷層西側和沿海地區及平原區，主要呈現冷色系的地區分佈在車瓜林斷層以南及彰雲地區。研究區域內的後甲里斷層的兩側有顯著的LOS速度場差異；新化斷層及口宵里斷層兩側LOS速度場有所差異；其餘斷層兩側的LOS速度場差異則較不明顯。

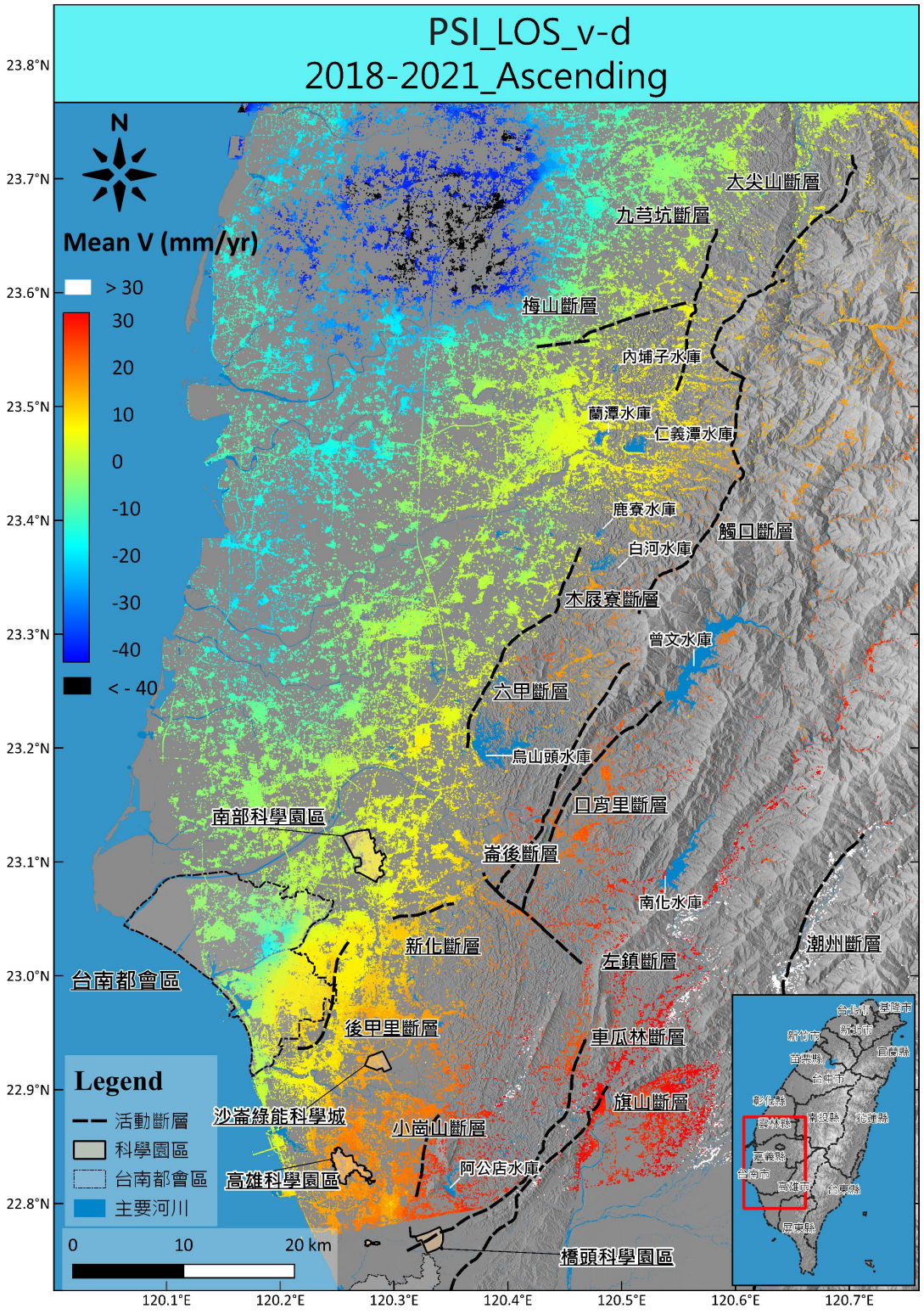


圖4-6：2018-2021升軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-6: Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

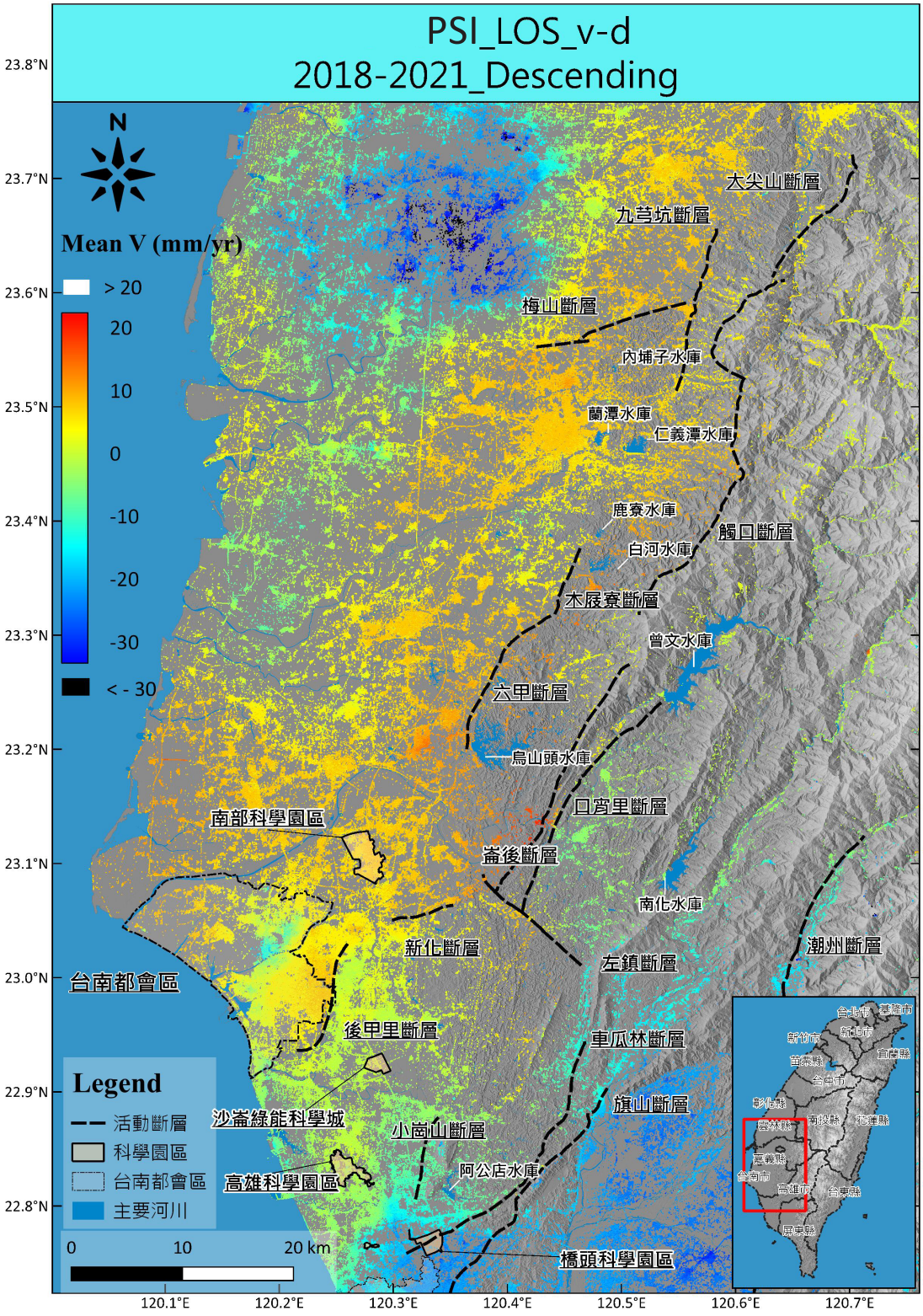


圖4-7：2018-2021降軌道影像LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 4-7: Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits. Warm colors represent surface approaching satellites and cold colors represent surface moving away from satellites.

4-5 跨斷層的速度場剖面分析

本研究為了深入探討九芎坑斷層、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、口宵里斷層及崙後(烏山頭)斷層等區域的活動特性，因此在各個斷層沿線劃設1至3條跨斷層之剖面進行分析。由於此區域有多條斷層在南北走向呈現平行並列的型態，因此某些剖面的繪製會跨過多條斷層。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。

整體而言，各斷層於三個時期皆有良好成果。本節呈現2018年至2021年升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）的木屐寮斷層、六甲斷層、口宵里斷層以及後甲里斷層剖面成果，其餘三時期的斷層剖面列於附錄C。以下就此四個斷層的分析成果進行詳細描述。

4-5-1 木屐寮斷層(MCL)

在木屐寮斷層我們選取一條垂直斷層西北 - 東南向的剖面，除了垂直木屐寮斷層外，再往東南延伸跨過觸口斷層。從升軌道與降軌道剖面可以發現，在PS剖面位置大約3km處，跨過木屐寮斷層兩側的LOS速度場皆約有5mm/yr的差異（圖4-8與圖4-9）。在降軌資料中，7km到8km中間可以觀察到速度場有顯著的降低，這一部分主要應是受到水平位移投影到雷達斜距方向造成的影響。

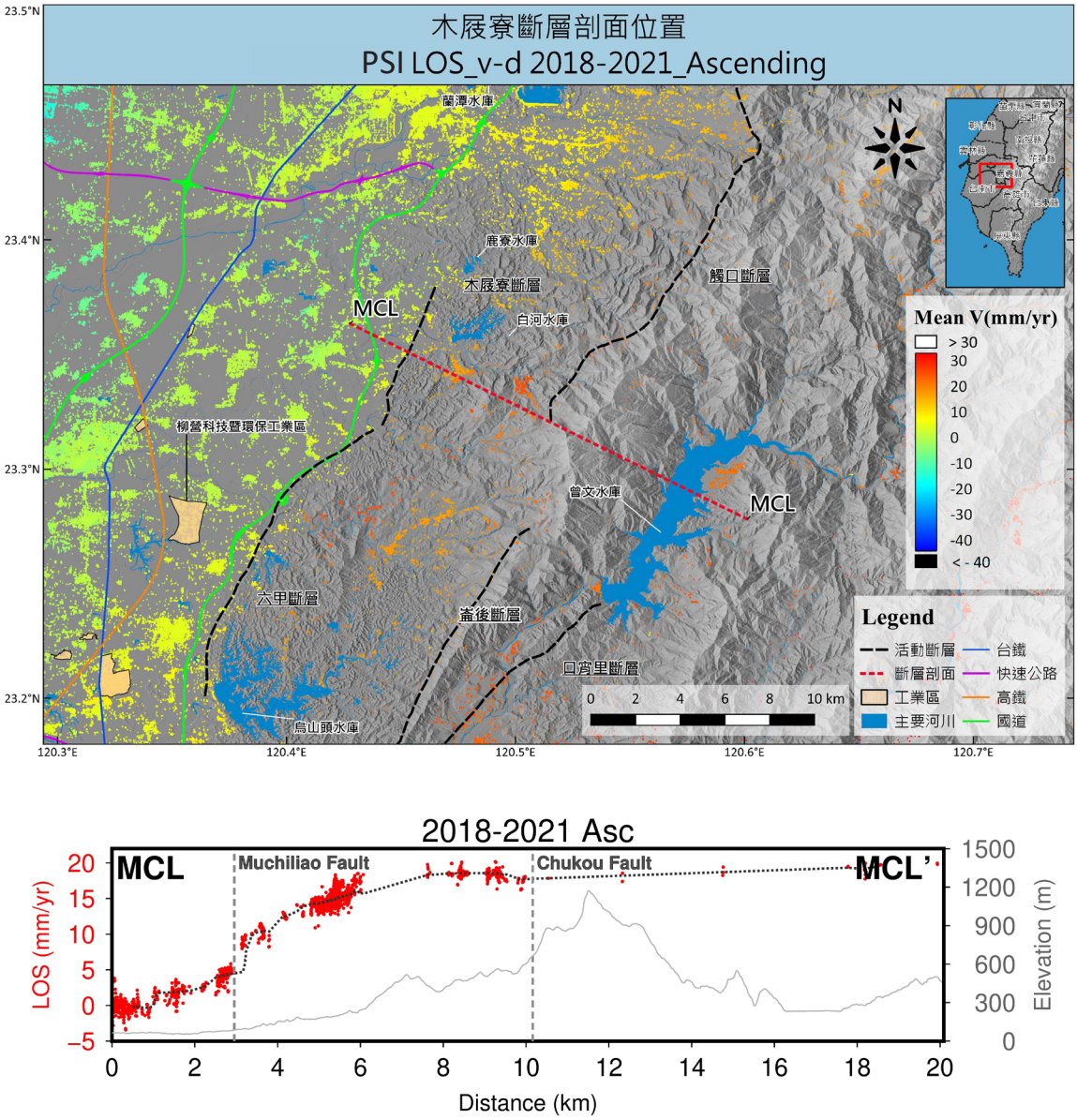


圖4-8：2018-2021木屐寮斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-8 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Muchiliao Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

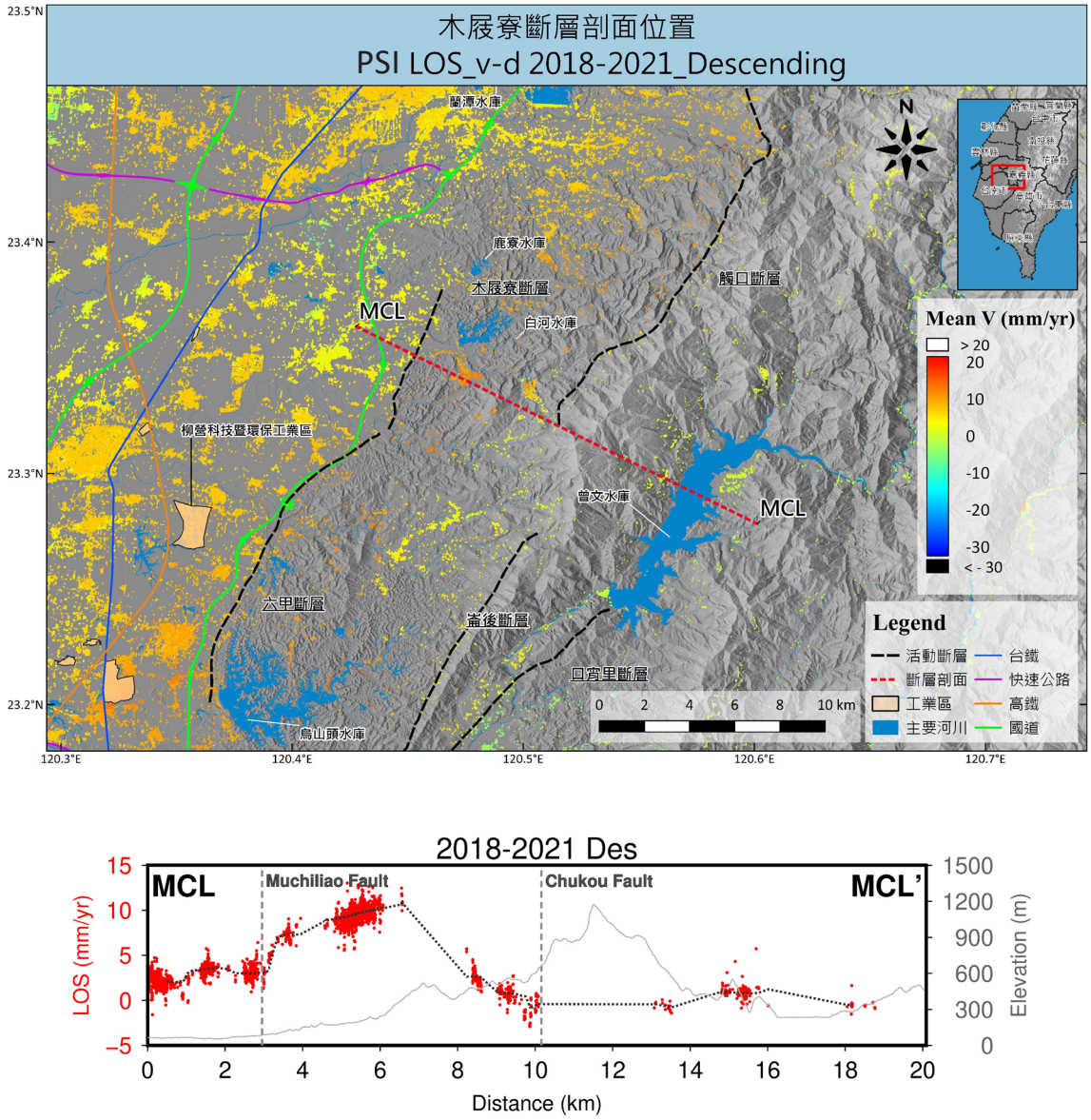


圖4-9：2018-2021木屐寮斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-9 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Muchiliao Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-5-2 六甲斷層(LCA)

在六甲斷層，我們擷取了兩條西北-東南向的剖面，LCA1剖面向東南延伸跨過六甲斷層、崙後斷層及口宵里斷層；LCA2則只跨越六甲斷層。升軌道（Ascending）LOS速度場在六甲斷層兩側約有5~7mm/yr的差異，往東南LOS速度值越高，LCA1剖面圖在六甲斷層附近約有5 mm/yr 落差。LCA2剖面圖在近六甲斷層處約有4~5 mm/yr的落差（圖4-10）。降軌道（Descending）LOS速度場在六甲斷層附近落差不明顯，LCA1剖面圖在六甲斷層附近約有2~3 mm/yr落差，在口宵里斷層約有2~3mm/yr差異。LCA2剖面圖在近六甲斷層附近同樣有2~3 mm/yr的落差。

值得注意的是，在升軌資料標示六甲斷層位置附近，不管 LCA1 或是 LCA2 都在各自剖面的大約 9km跟11km附近有錯動，我們初步懷疑在這兩條剖面附近，六甲斷層接近地表時分岔出現。

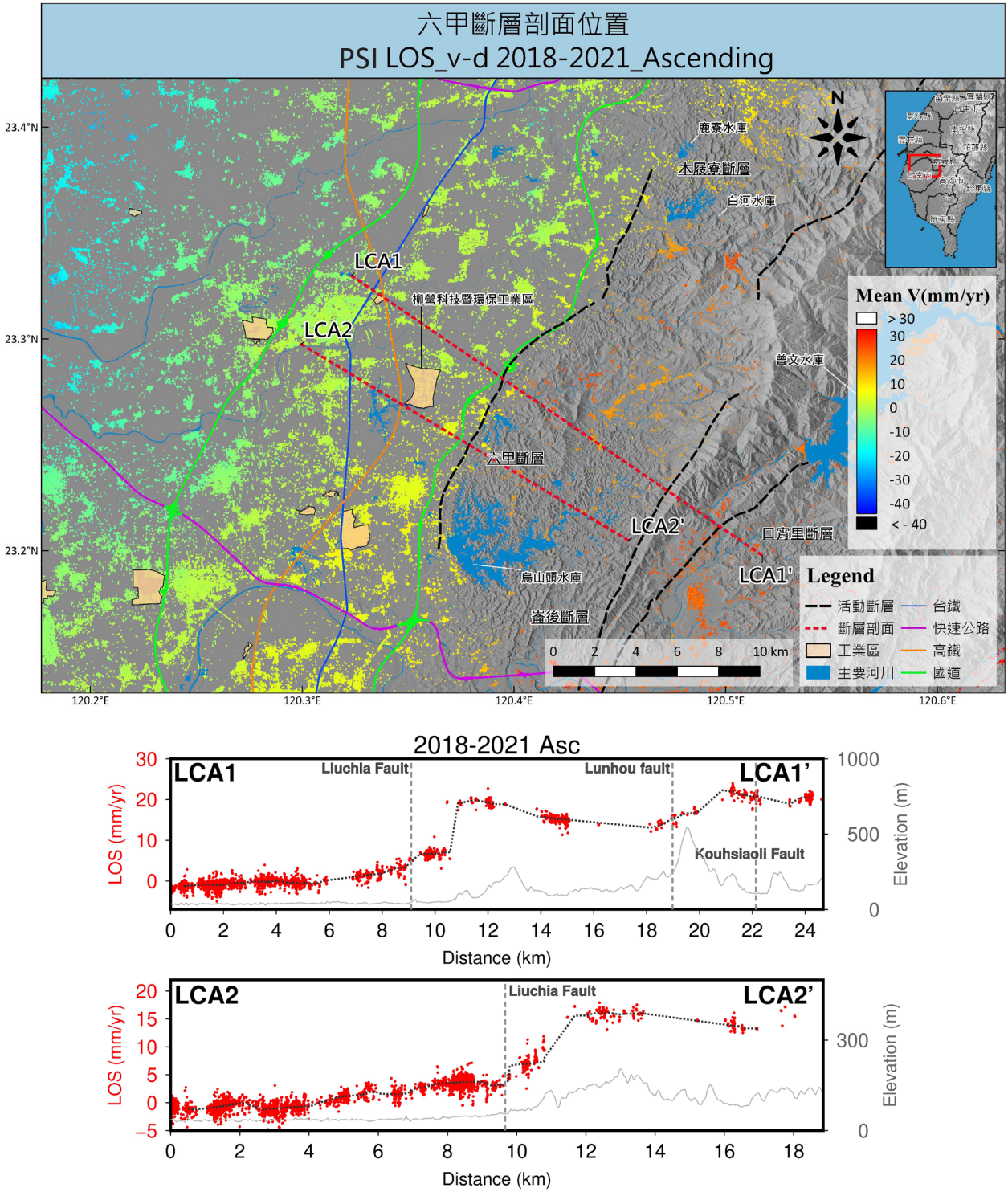


圖4-10：2018-2021六甲斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-10 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Liuchia Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

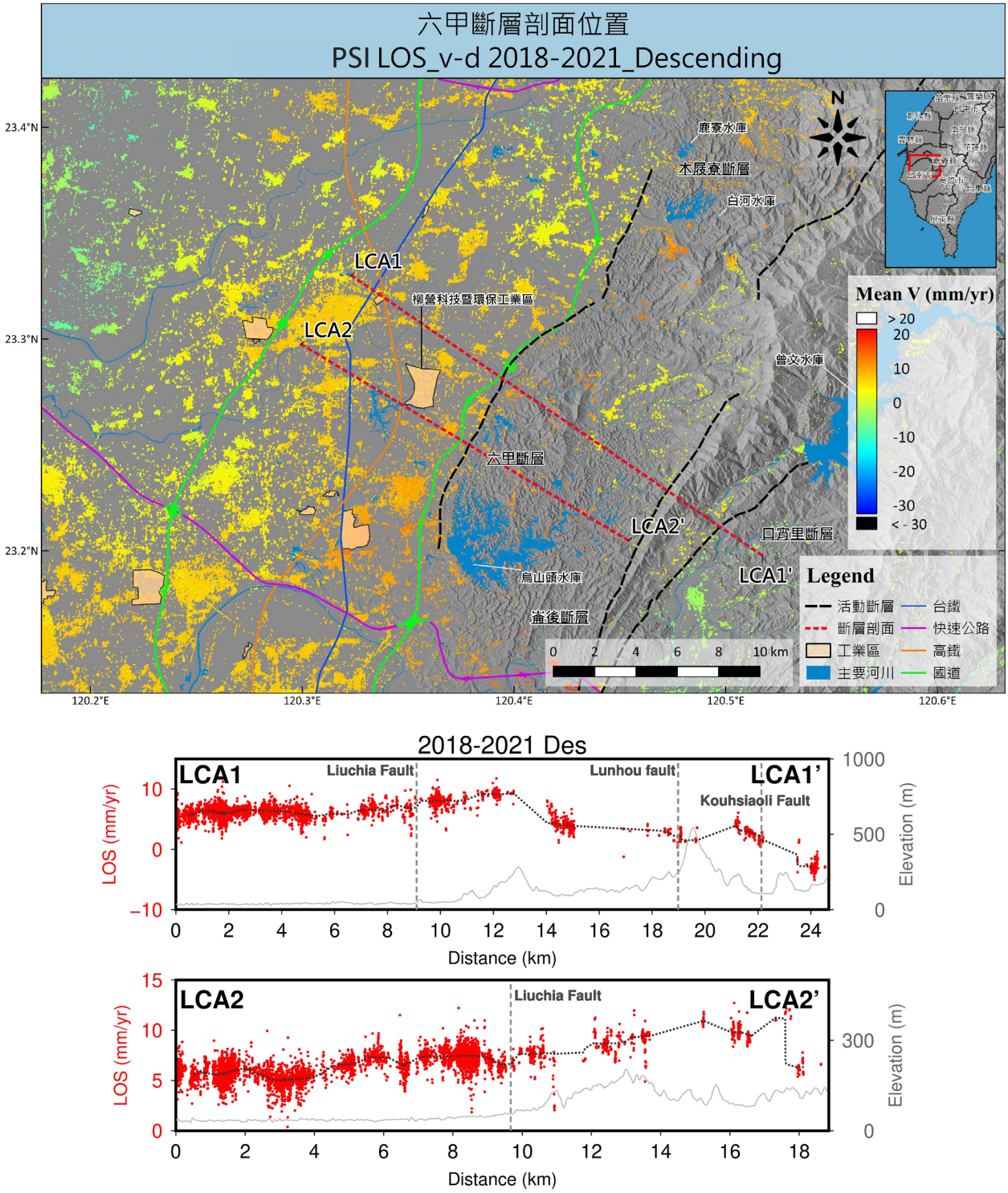


圖4-11：2018-2021六甲斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-11 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Liuchia Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-5-3 口宵里斷層(KSL)

在口宵里斷層，我們選取了三條西北-東南向的剖面，KSL1跨過六甲斷層、崙後斷層及口宵里斷層，KSL2與KSL3跨過崙後斷層及口宵里斷層。升軌道（Ascending）速度剖面KSL1在口宵里斷層兩側LOS速度差約5 mm/yr，KSL2在口宵里斷層兩側LOS速度差異約4 mm/yr，KSL3在口宵里斷層兩側LOS差異約為4 mm/yr。（圖4-12）。

降軌道（Descending）速度場在口宵里斷層兩側約有10 mm/yr的落差，剖面KSL1在口宵里斷層兩側LOS約有8 mm/yr落差，KSL2在口宵里兩側有約20 mm/yr的落差，KSL3在口宵里斷層兩側約有5 mm/yr的落差（圖4-13）。升降軌道皆顯示三條剖面在口宵里斷層東側LOS速度較西側低，且口宵里斷層兩側的速度差在降軌道資料較為明顯，可能與斷層幾何有關。

在升軌資料的KSL2剖面的7km處有約 5mm/yr 的速度落差，這個速度差在平面PS速率圖上也清晰可見，也似乎可以追速度差異分界自六甲斷層最南端到左鎮斷層最西端，甚至更往南。 我們認為這部份值得持續注意。

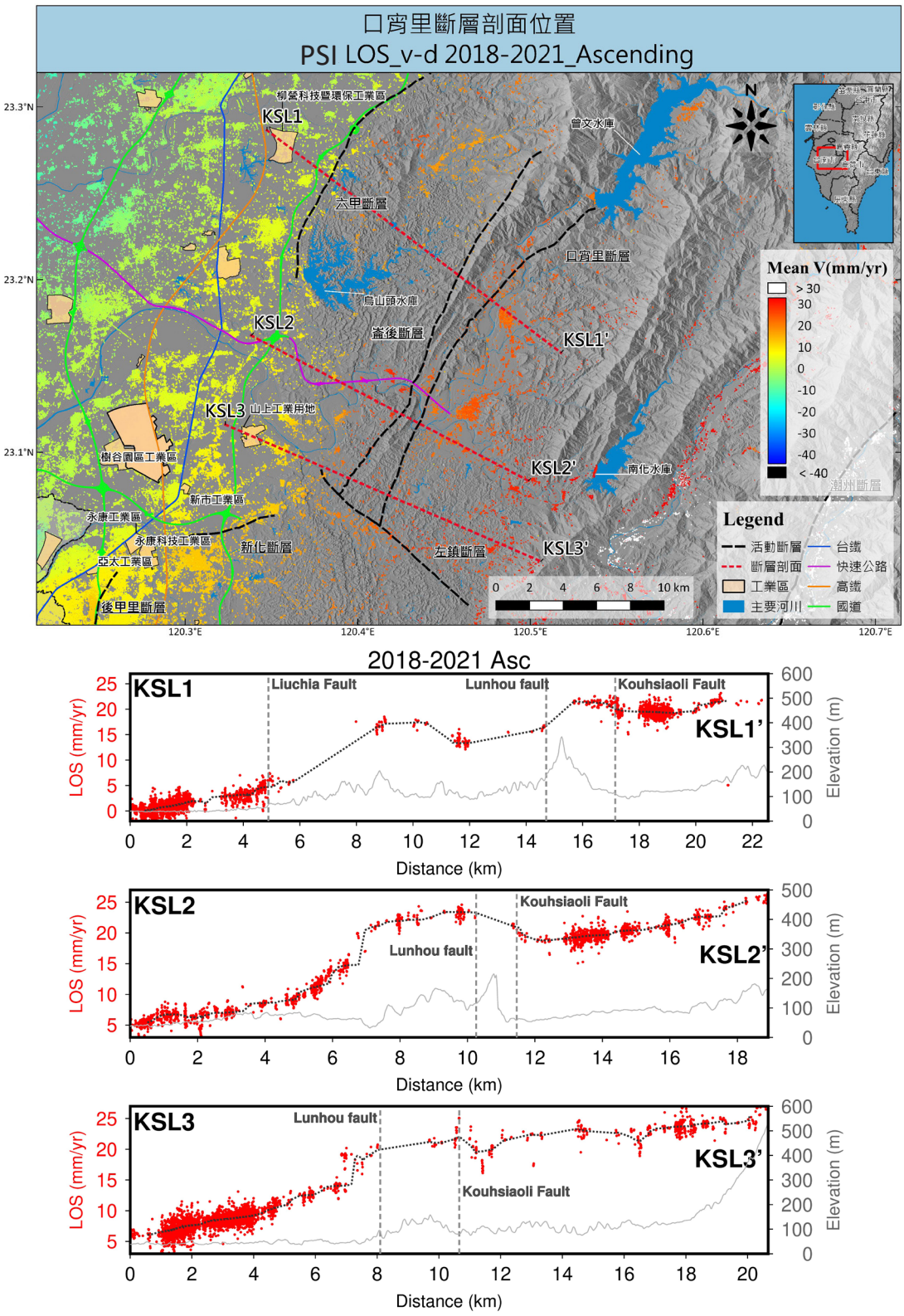


圖4-12：2018-2021口宵里斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-12 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the KSLuhsiaoli Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

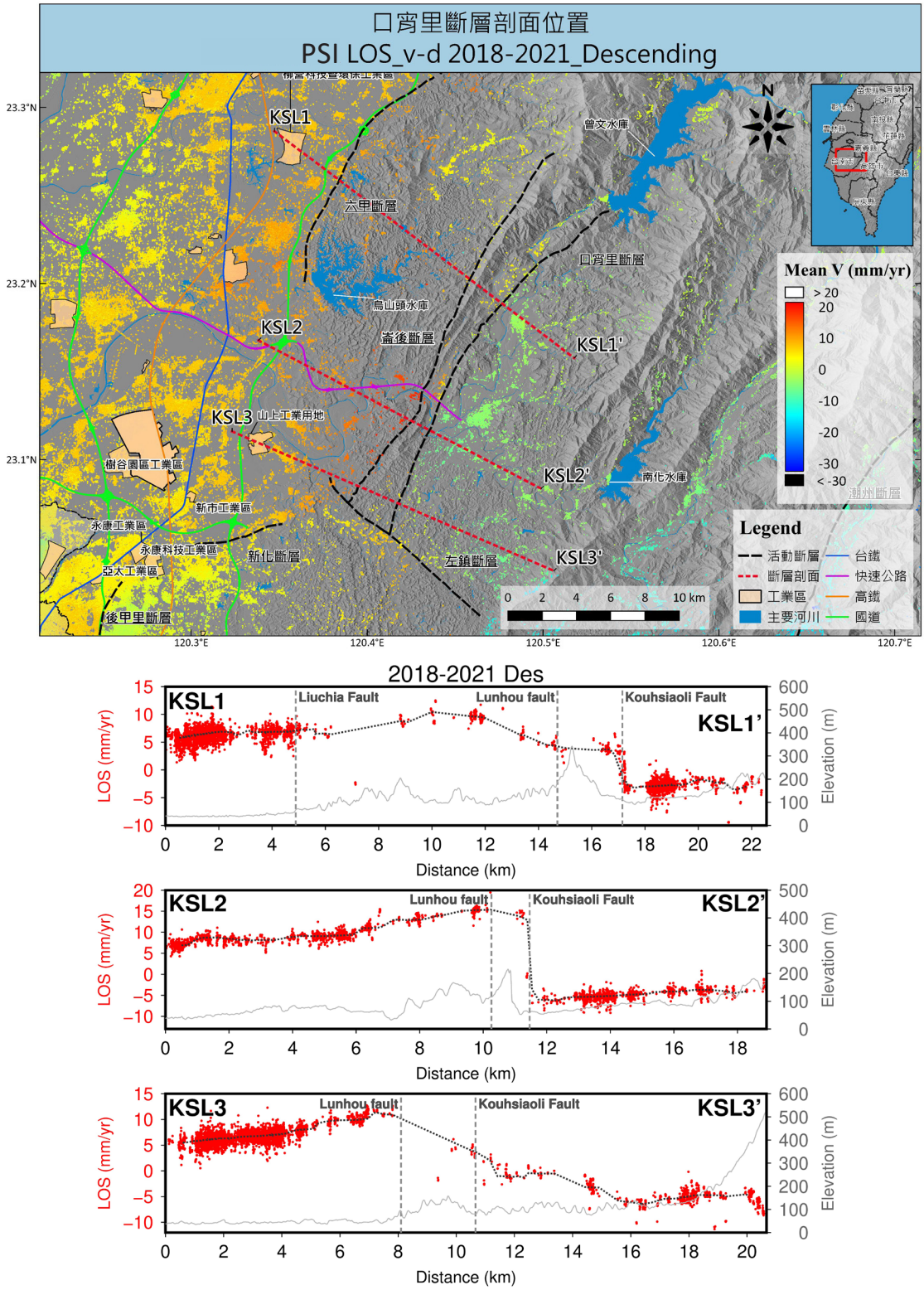


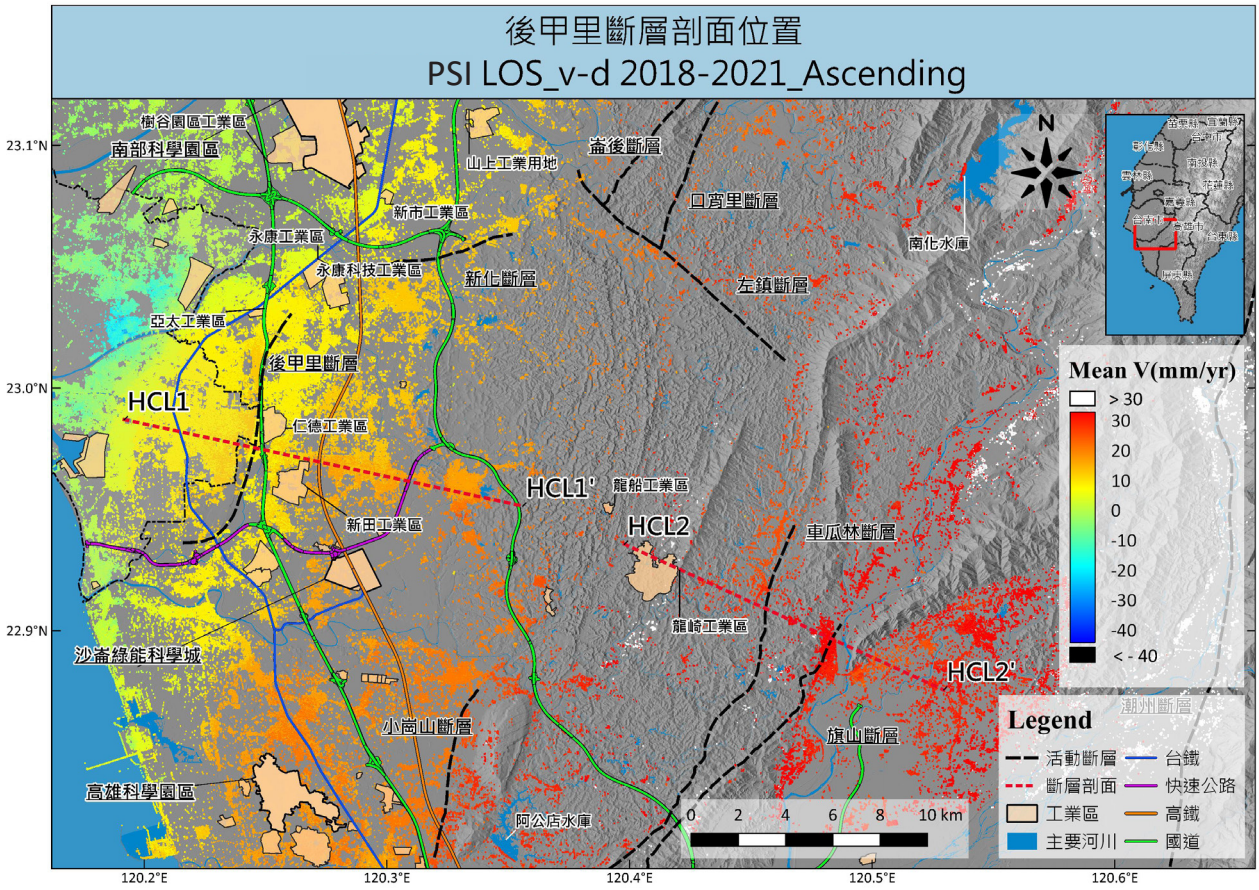
圖4-13：2018-2021口宵里斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-13 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the KSLuhsiaoli Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-5-4 後甲里斷層(HCL)

在後甲里斷層，我們擷取了二條西北-東南向的剖面，HCL1跨過後甲里斷層，HCL2則通過車瓜林斷層與旗山斷層。由升軌道（Ascending）LOS速度場圖顯示後甲里斷層兩側差異不明顯，往東至車瓜林斷層附近LOS速度逐漸增加，剖面圖顯示HCL1剖面在後甲里斷層附近約有2~3mm/yr的LOS速度差異，HCL2在車瓜林斷層兩側約有3mm/yr落差，旗山斷層附近則無明顯差異（圖4-14）。降軌道（Descending）LOS速度場圖顯示後甲里斷層兩側有約10mm/yr的明顯落差，剖面圖顯示HCL1在後甲里斷層兩側有10mm/yr的落差，HCL2在車瓜林斷層與旗山斷層附近則未觀測到明顯差異。HCL1剖面落差在降軌道（Descending）方向觀測較為明顯，且在三個時期都有觀測到約10mm/yr的差異。

另外，HCL1在大灣地區在剖面8km附近有一點速度變化，但是在降軌卻看不到，值得持續研究。



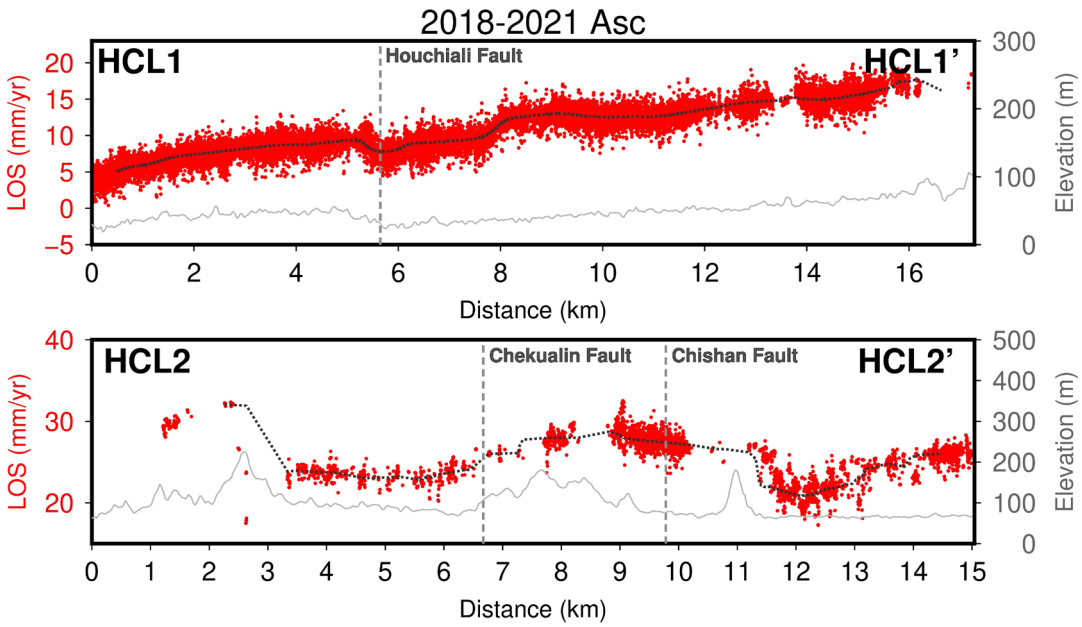


圖4-14：2018-2021後甲里斷層升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-14 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the Houchiali Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

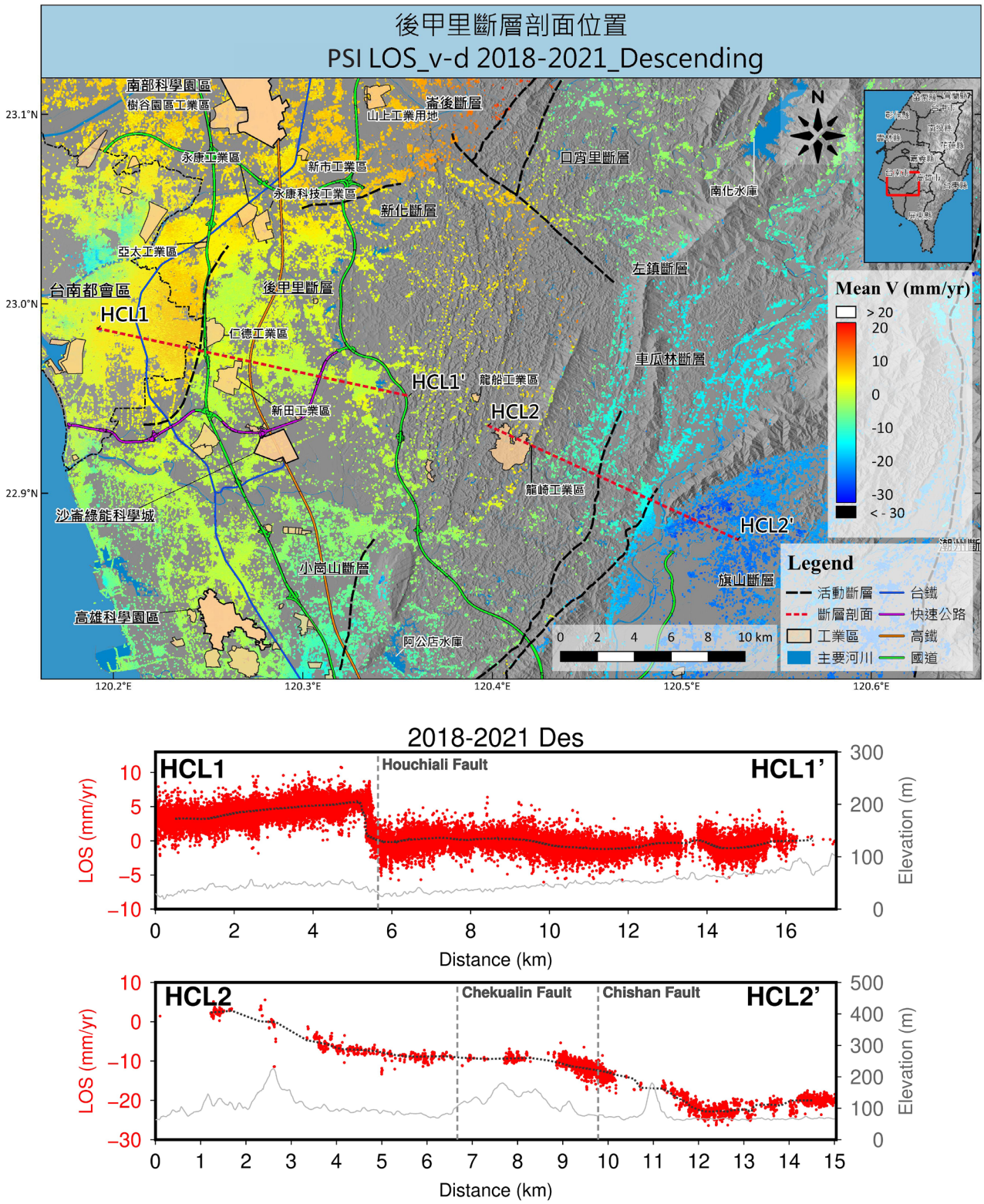


圖4-15：2018-2021後甲里斷層降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-15 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the Houchiali Fault. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-6 地質剖面的速度場剖面分析

地調所地下地質剖面（黃旭燦等，2004）的位置與分布如圖4-16所示，由北到南從剖面17到剖面28共12條。每一條都是西從平原地區往東延伸到麓山帶，並且根據原來地下資料的特性而形成大致東西方向的折線。由於發表年代上的差異，地下地質剖面標示之斷層名稱與目前地調所公布的斷層不盡相同。由於剖面長度相當長並且延伸進入西部麓山帶，對雷達資料來說，山區植被較高易導致PS點密度較低，容易造成部分剖面的PS點位不連續，比較不容易判斷整體趨勢，但在平原區則無這樣的問題，可以很容易由雷達結果判斷是否有相對位移。在第三章已展示過本年度雷達資料與GNSS資料比對在2018-2021年成效非常良好，比對的回歸結果斜率大約等於1，而RMSE 都小於4 mm/yr。

本節以2018年至2021年成果作為展示與說明(圖4-17)，2014年至2016年與2016年至2018年成果列於附錄D。成果中，斷層位置以110年中央地質調查所公告的活動斷層資訊為依據。

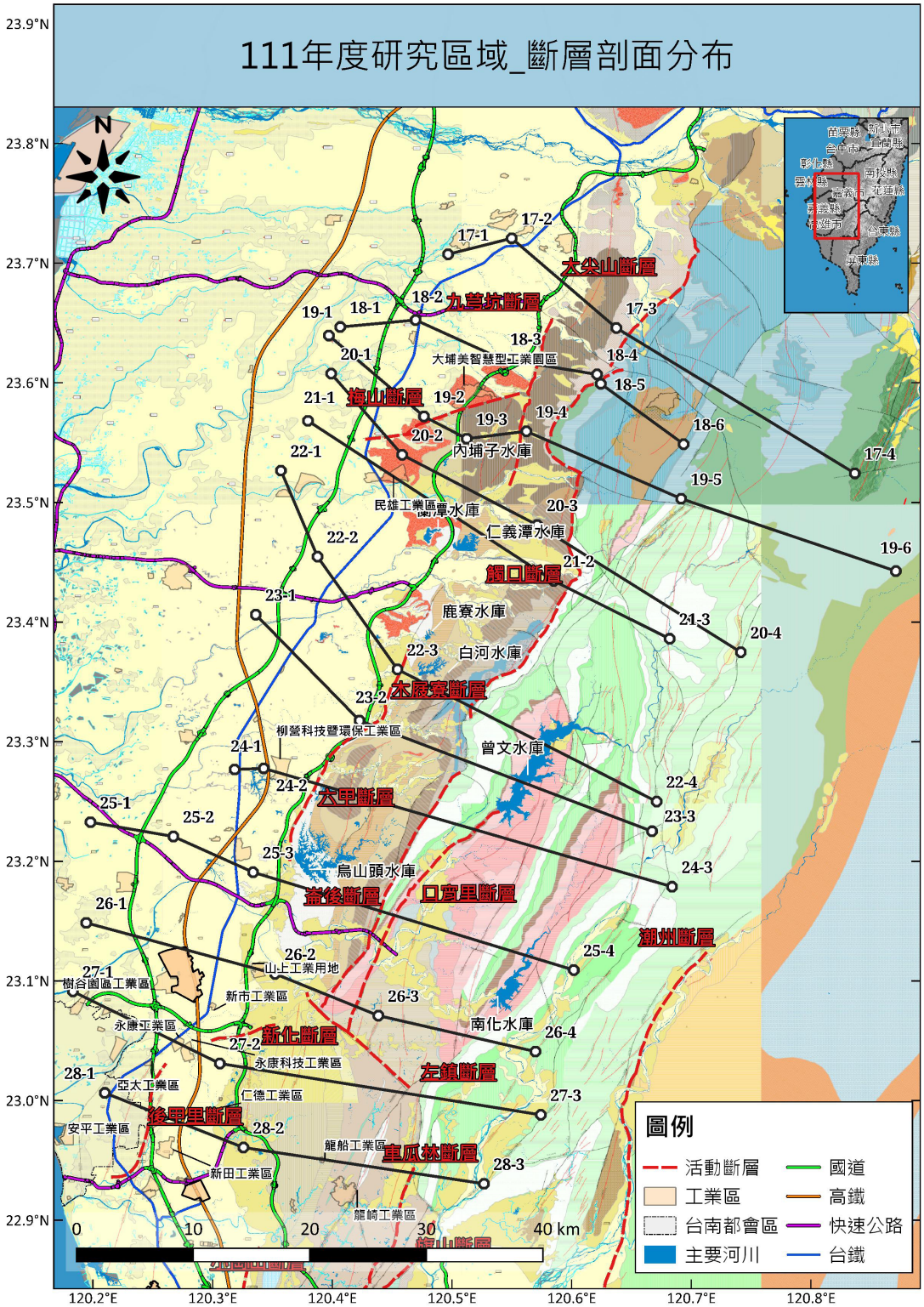


圖4-16：嘉南地區地質剖面分佈圖。紅色虛線為活動斷層，黑線為地質剖面。（黃旭燦等，2004）

Figure 4-16: The profiles of geological structures in the Chiayi-Tainan Area. Dotted red lines are active faults and black lines are the profiles (Huang et al., 2004).

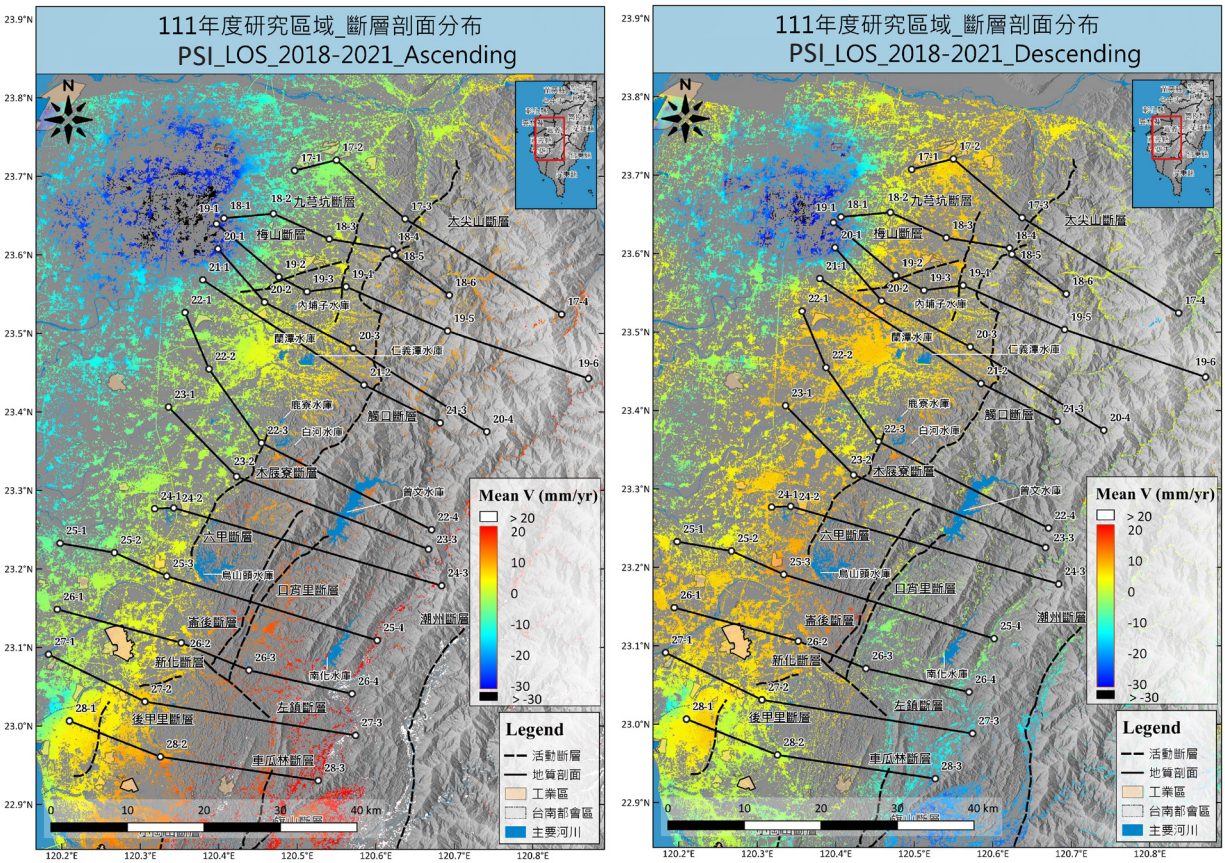


圖4-17：2018年至2021年嘉南地區PSI速度場與地質剖面分佈圖。

Figure 4-17: The PSI profiles of velocity fields for 2018-2021 and the geological structures in the Chiayi-Tainan Area.

4-6-1 17號剖面

在第17號剖面中，主要切過地調所公告的大尖山斷層，而地下地質剖面中則有標示了九芎坑斷層、大尖山斷層、檳榔宅斷層、石崁湖背斜、以及鹿窟斷層等構造（黃旭燦等，2004）。雖然圖4-18在大尖山斷層附近的訊號不連續，但若與圖4-3配合可以看出跨越大尖山斷層有些微的速度差。而在大約16km處有微小錯動，可能是九芎坑斷層延續至此處的徵兆。其他的構造在此剖面並沒有明顯的變形活動。

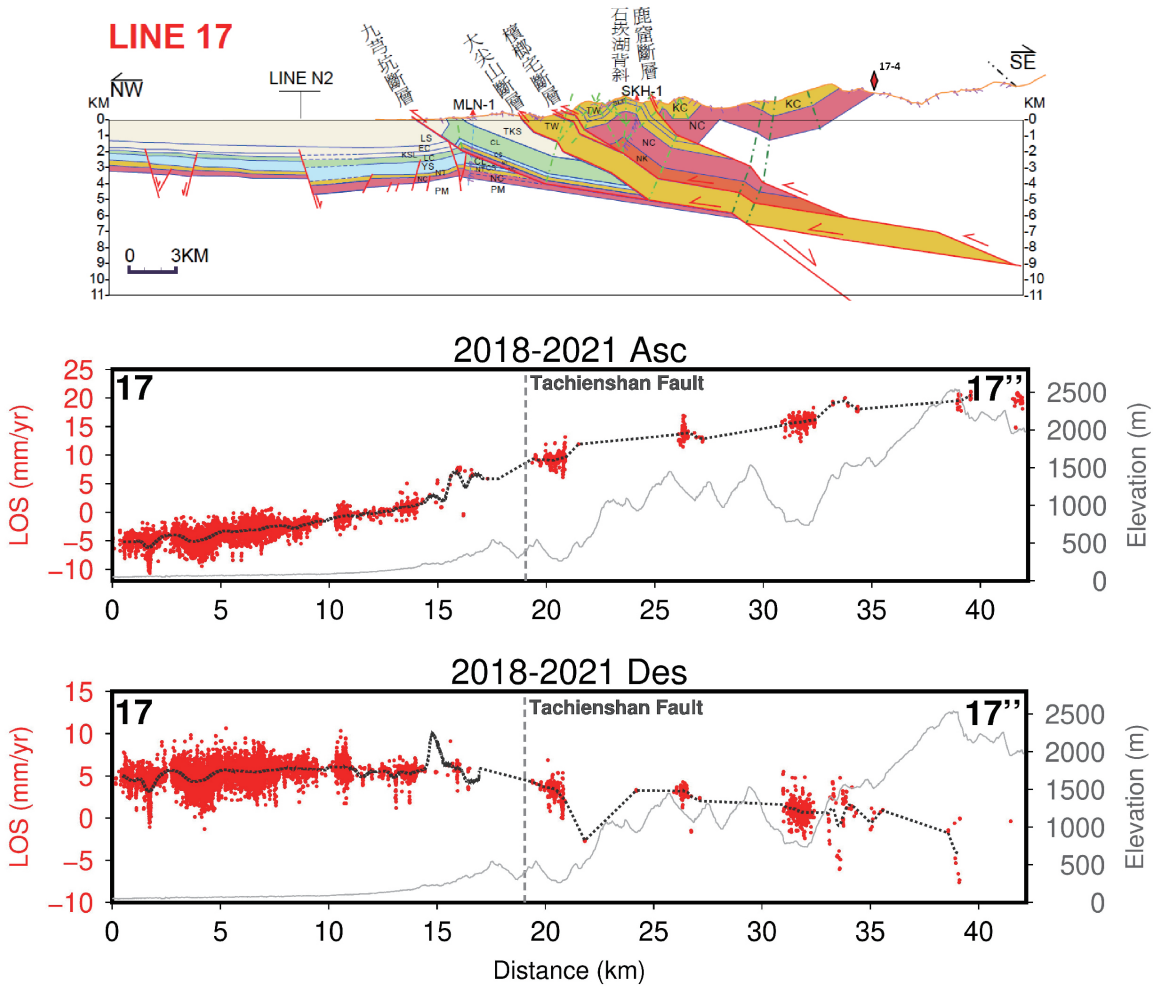


圖4-18：Line 17剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-18: The profiles of Line 17. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-2 18號剖面

在剖面18中，通過地調所公告之九芎坑斷層與大尖山斷層，然而不管在此剖線標示斷層處，或者是現今通過地調所標示斷層之位置，地表都沒有明顯變形（圖4-19）。

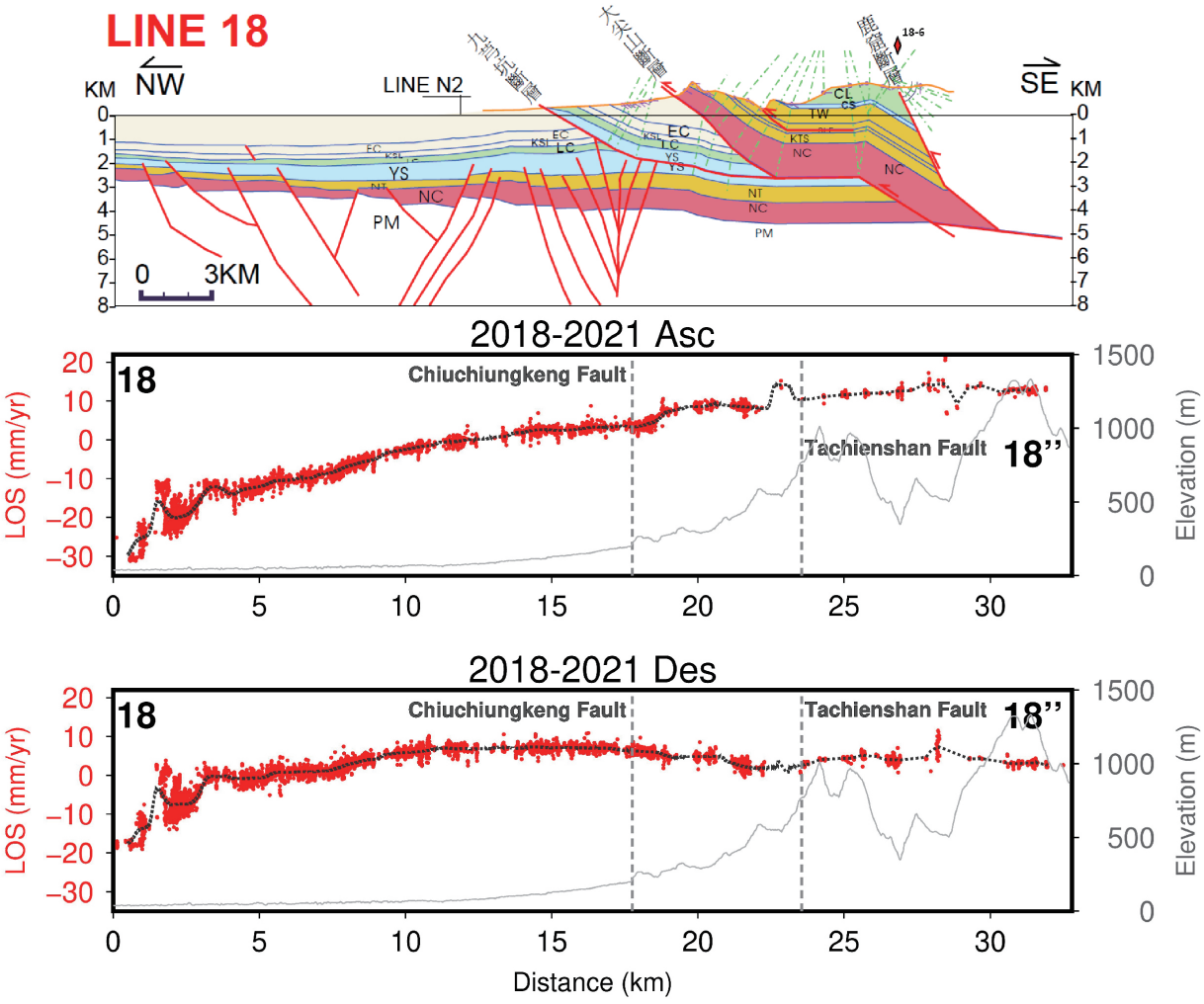


圖4-19：Line 18剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-19: The profiles of Line 18. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-3 19, 20, 21號剖面

第19號剖面，由北港附近向東南東方向延伸到中央山脈。此處的九芎坑斷層左右有明顯的速度差異，往東部的大尖山斷層以及往西邊的梅山斷層附近都沒有觀測到的地表位移。在速度場剖面的0~5km處有明顯的地表變形速度落差，不管升軌、降軌數量都超過20 mm/yr。此地表變形為雲林地區地層下陷區的表現。此剖面西側（約5km處）為地層下陷區、東側在20km處為九芎坑斷層，而在此區間附近則是小梅背斜，此構造在此區間似乎有一點活動跡象，然而受到兩側活動與活動量影響，不易確認。未來需要持續觀察（圖4-20）。

20號剖面與19號剖面距離不遠，在地表變形的表現類似。 此處小梅背斜的拱起較不明顯（圖4-21）。

21號剖面經過了地調所公告的觸口斷層，在地質剖面中則多了崙後斷層與馬頭山斷層。重疊觸口斷層後顯示其為明顯的地表變形特徵之邊界，觸口斷層以東，特別是在降軌的圖上，斷層兩側有明顯速度落差（圖4-22）。 搭配圖4-6與圖4-7觀察，觸口斷層西側有相對東側的抬升。

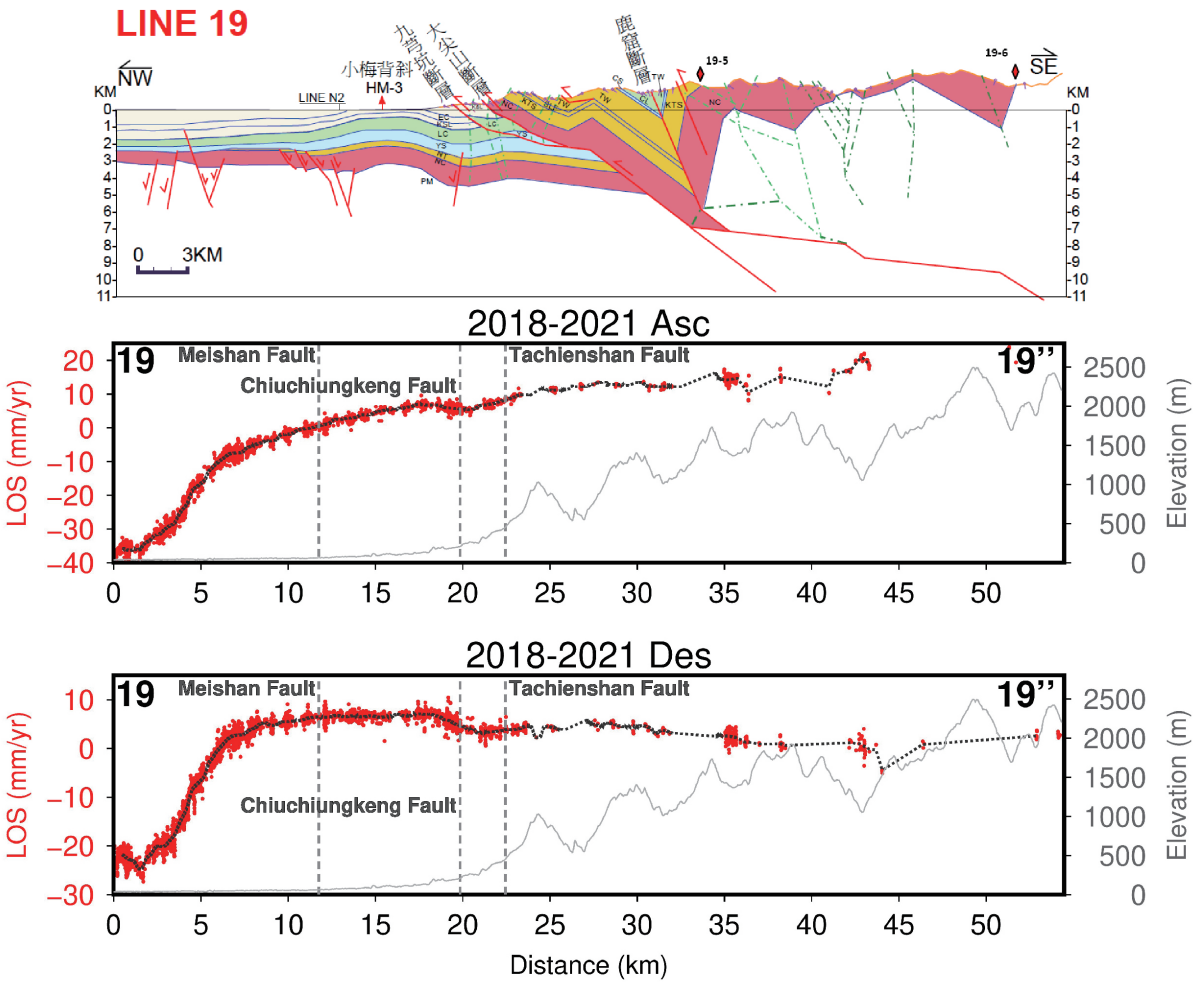


圖4-20：Line 19剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-20: The profiles of Line 19. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

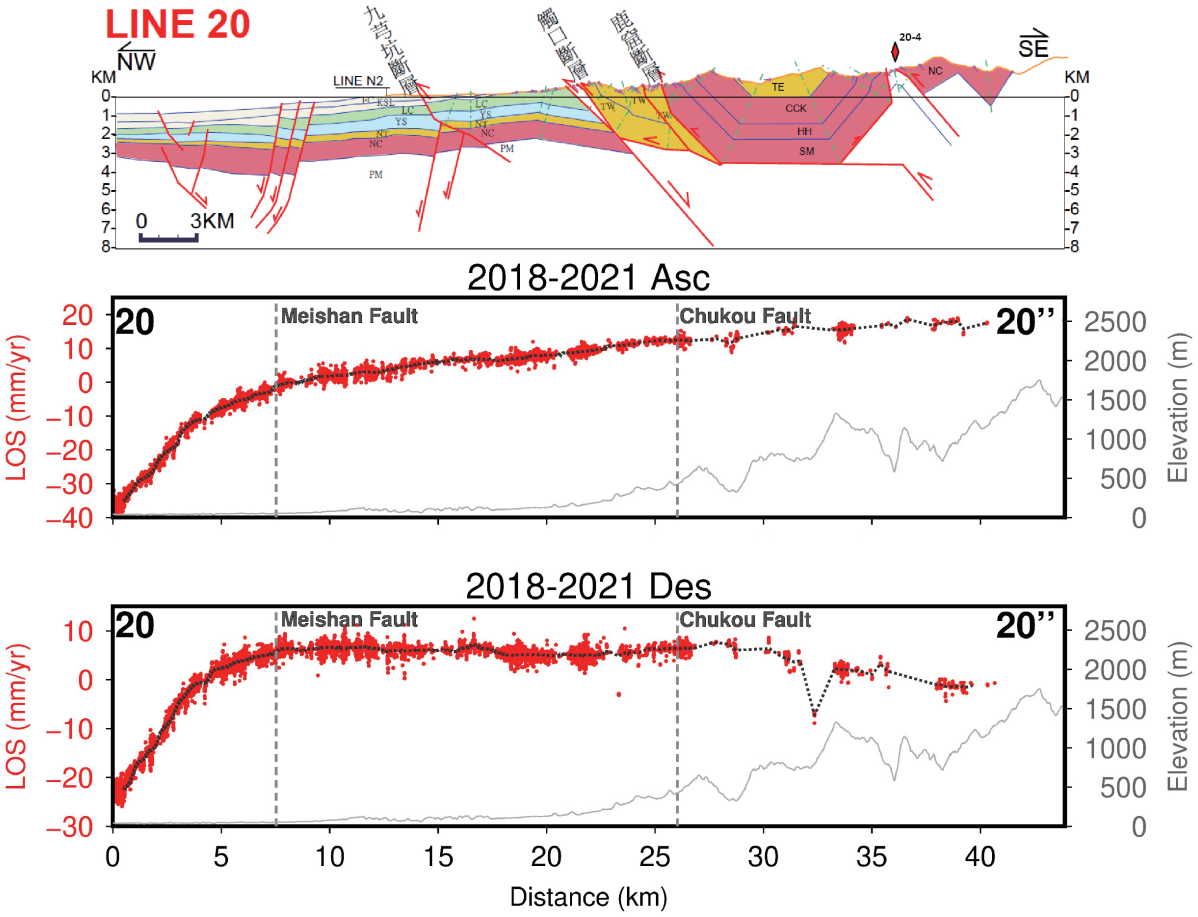


圖4-21：Line 20剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-21: The profiles of Line 20. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

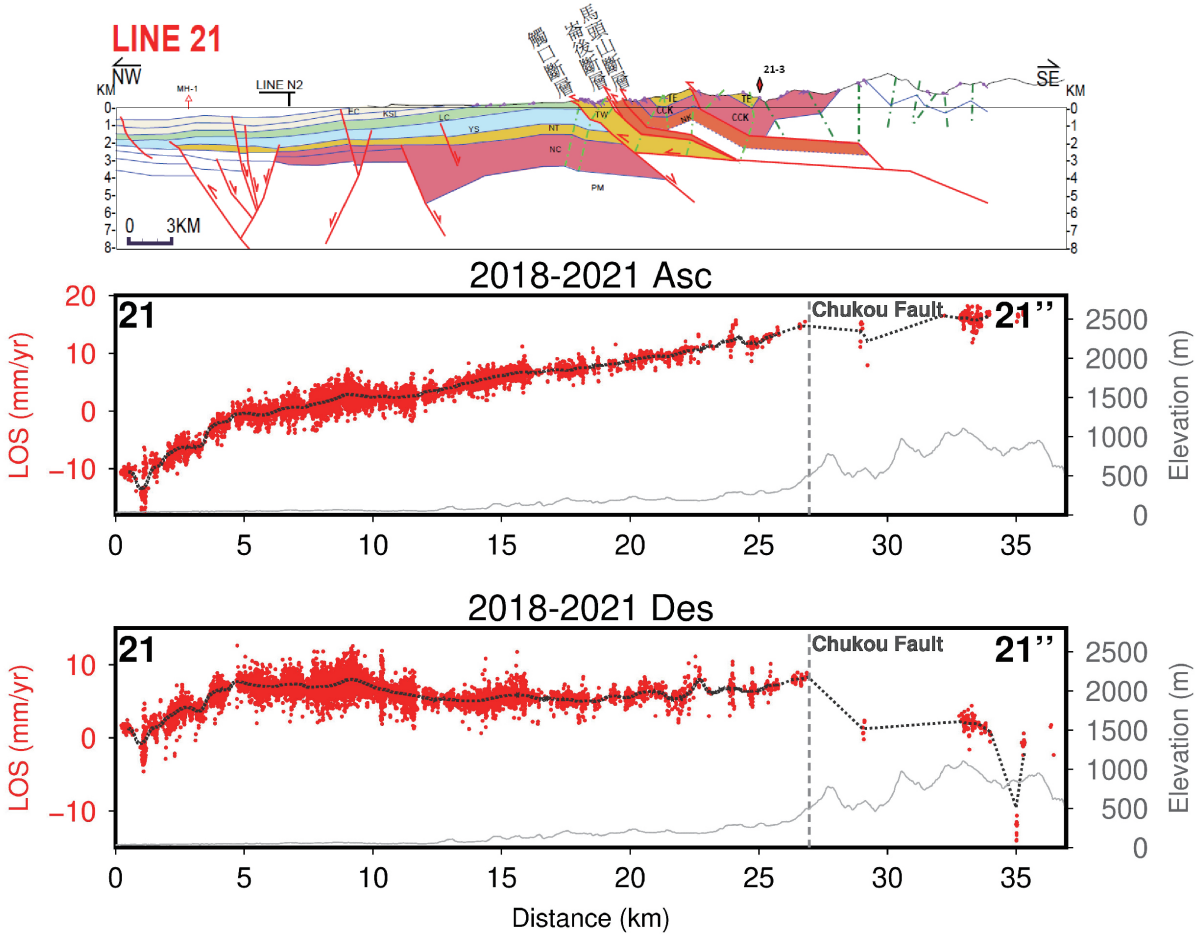


圖4-22：Line 21剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-22: The profiles of Line 21. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-4 22號剖面

剖面22在地下地質剖面上以南寮背斜以及崙後斷層為最主要的構造，而雷達資料在同一位置的地表變形剖面則經過了地調所公布的木屐寮斷層與觸口斷層。如果以PSI剖面上30KM的地形對比到崙後斷層東側山頭，則此處的觸口斷層與地下地質剖面的崙後斷層重疊。斷層本身也許沒有直接錯動，然而其西側約在21~30km中間確實有速度的穹丘，可能對應於此處之南寮背斜。在21km處的速度落差則與木屐寮斷層位置重疊。（圖4-23）

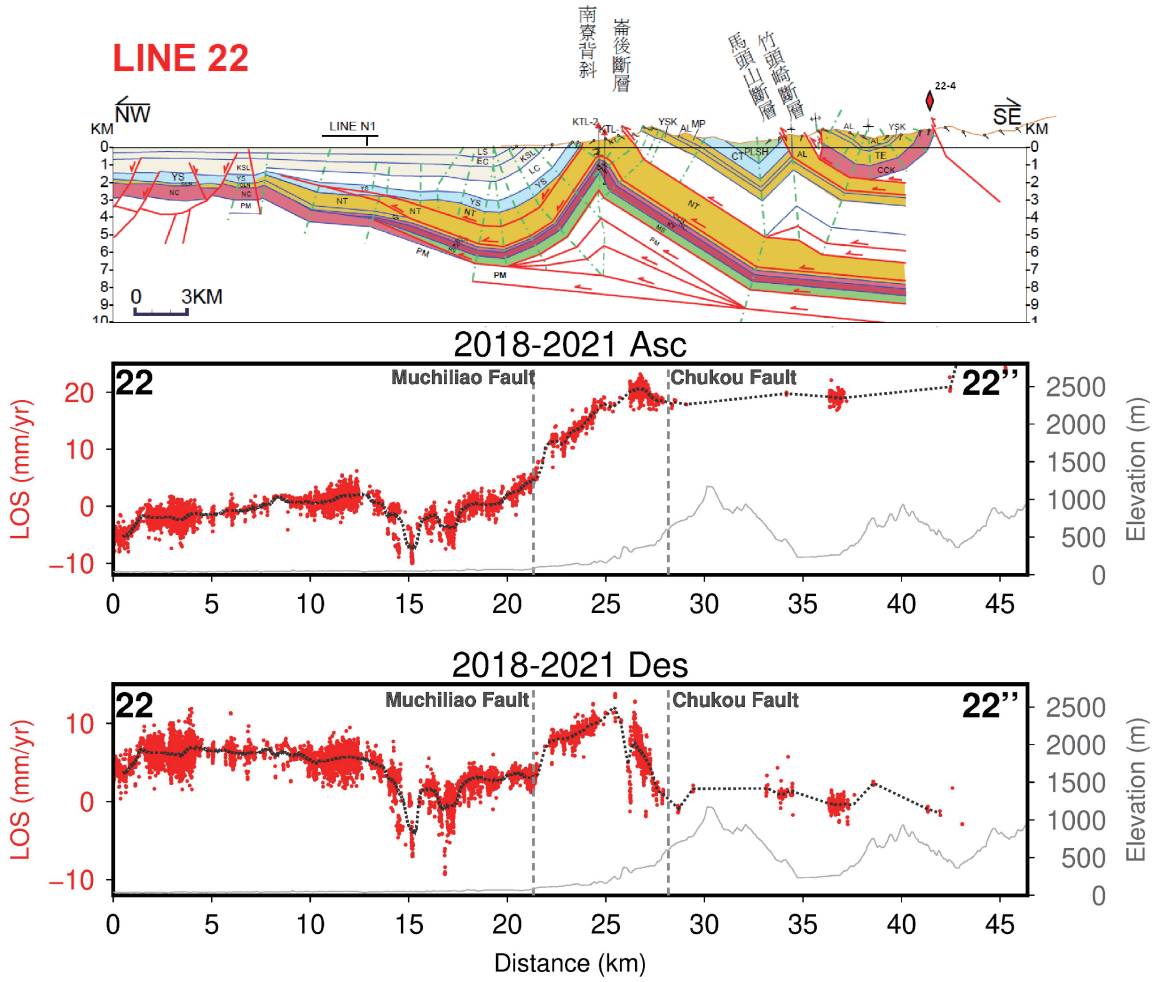


圖4-23：Line 22剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-23: The profiles of Line 22. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-5 23號剖面

23號剖面在地下地質剖面上有標示相當多的構造，然而雷達資料在同一位置的地表變形剖面僅跨過地調所目前公告之六甲斷層。在六甲斷層兩側升軌資料有約20mm/yr的速度差、而在降軌資料也有接近10mm/yr的速度差，對應至地下地質剖面，六甲斷層位置可以比對到地下地質剖面上六重溪背斜左側的構造樞紐線於地表的分叉。 在六甲斷層以西的平原地帶，沒有明顯的地表變形（圖4-24）。

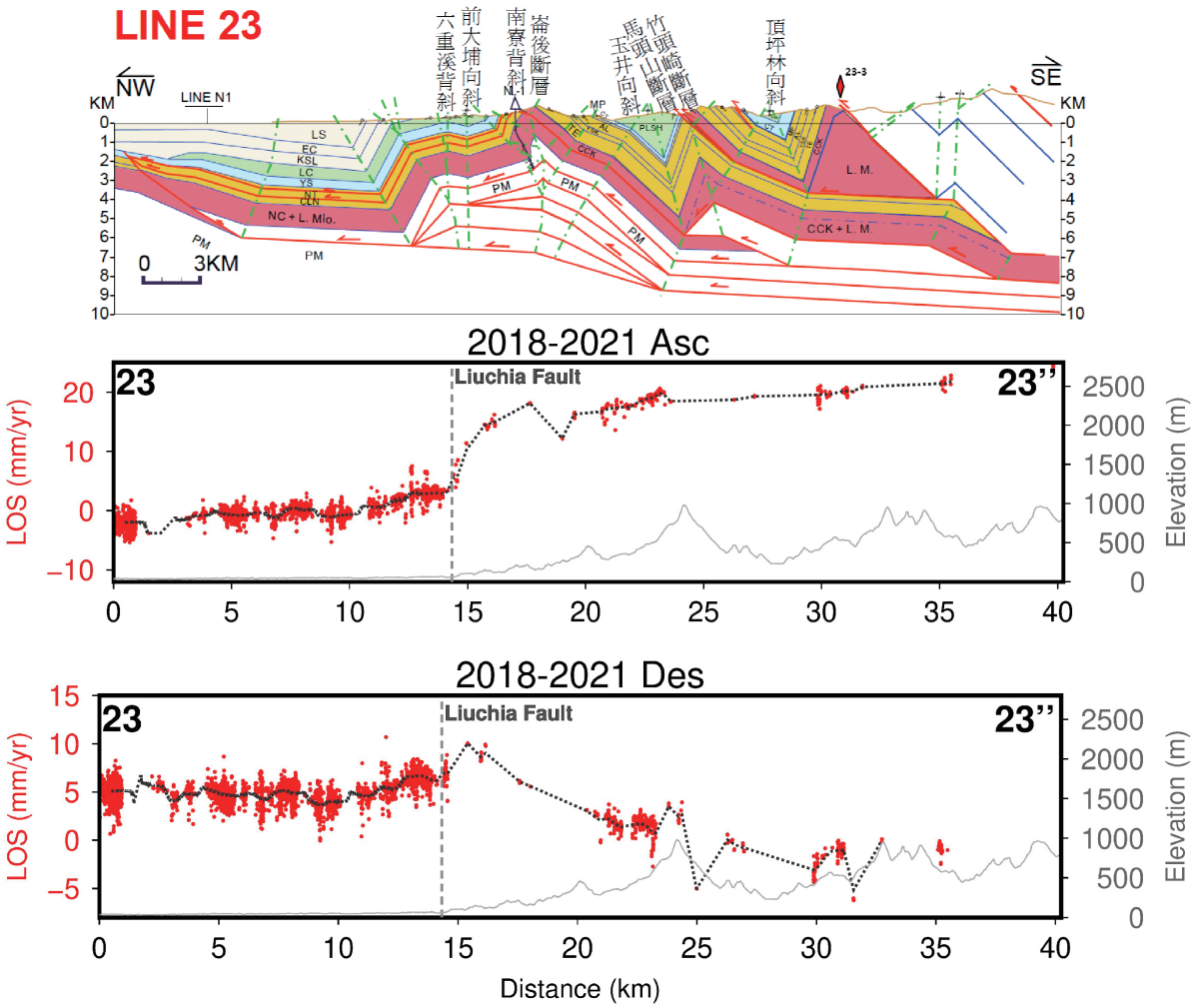


圖4-24：Line 23剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-24: The profiles of Line 23. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-6 24號剖面

24號地下地質剖面最西側顯示為牛山背斜，背斜西翼即為六甲斷層（楊志成等，2005），牛山背斜與六甲斷層加成的作用在升軌資料中可以清楚的看到，而在降軌資料上則由於水平位移抵銷部分垂直位移在雷達斜距上的表現，所以此一現象較不明顯（圖4-25）。

崙後斷層與口宵里斷層附近的PS資料點較稀疏，但是配合圖4-6, 圖4-7顯示斷層兩側有些微的速度差異。

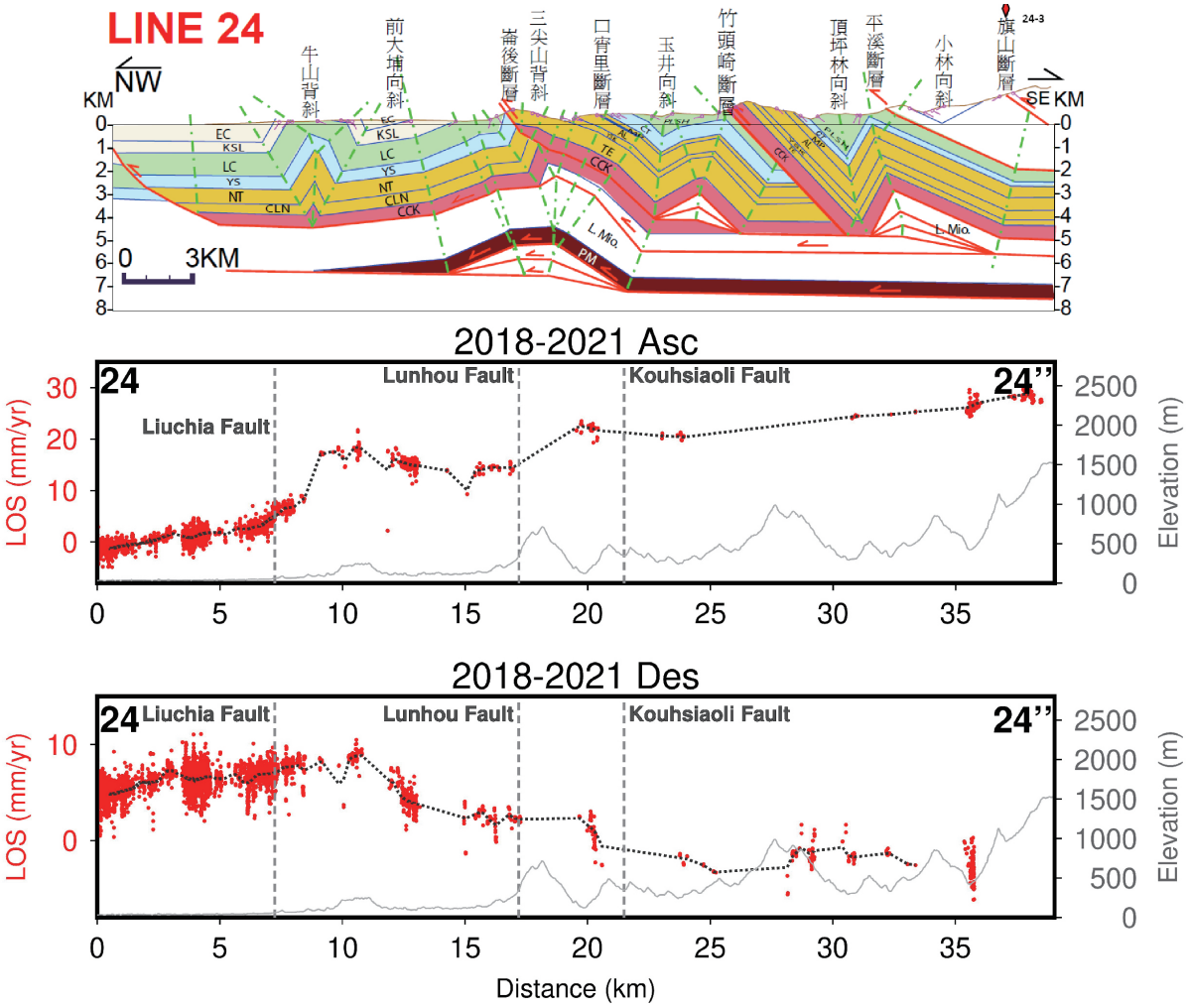


圖4-25：Line 24剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-25: The profiles of Line 24. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-7 25號剖面

25號剖面通過了地調所公布的崙後斷層，在地下地質剖面上有口宵里斷層在其東側。將崙後、口宵里斷層在地下地質剖面與PS剖面上對齊後，可以觀察到口宵里斷層兩側有明顯的速度差異，而崙後斷層兩側速度差異則不明顯。

在崙後斷層西側於PS資料剖面中可以看到相當明顯的速度落差（約22km處），雖然在地下地質剖面中沒有可以對應的構造， 但由於距離地調所公布的六甲斷層不遠，可能有延續性的關係，值得密切關注。 此外，在剖面12~13km處有一速度落差，與地下地質剖面的盲斷層位置接近，有可能為該構造之地表表現（圖4-26）。

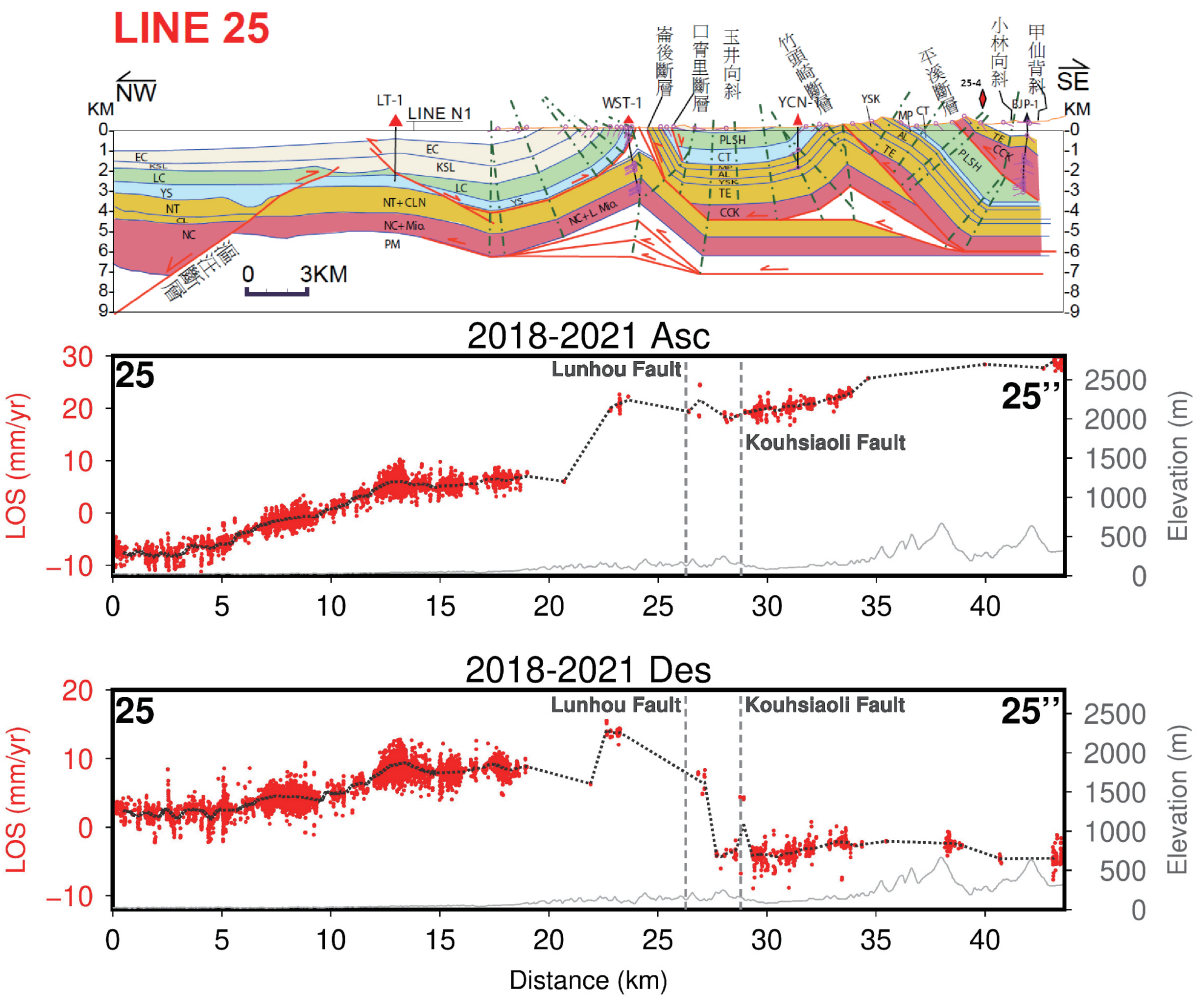


圖4-26：Line 25剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-26: The profiles of Line 25. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-8 26號剖面

26號剖面在地下地質剖面中主要經過崙後斷層與口宵里斷層，與PS地表變形剖面跨越之構造相同（圖4-27）。將剖面成果對照於圖4-6、圖4-7可以看出不管升軌、降軌資料中，崙後斷層東西兩側，以及口宵里斷層兩側之速度差異皆極大。在PS速度剖面中崙後斷層的錯動在升降軌資料位置並不相同，這個現象有可能是因為此區PS點數較少，升降軌資料萃取出來的點位不相同，加上斷層線幾合一併投影到剖面資料時，位置造成差異。圖4-6、圖4-7中可以清楚看到斷層兩側有明顯差異。

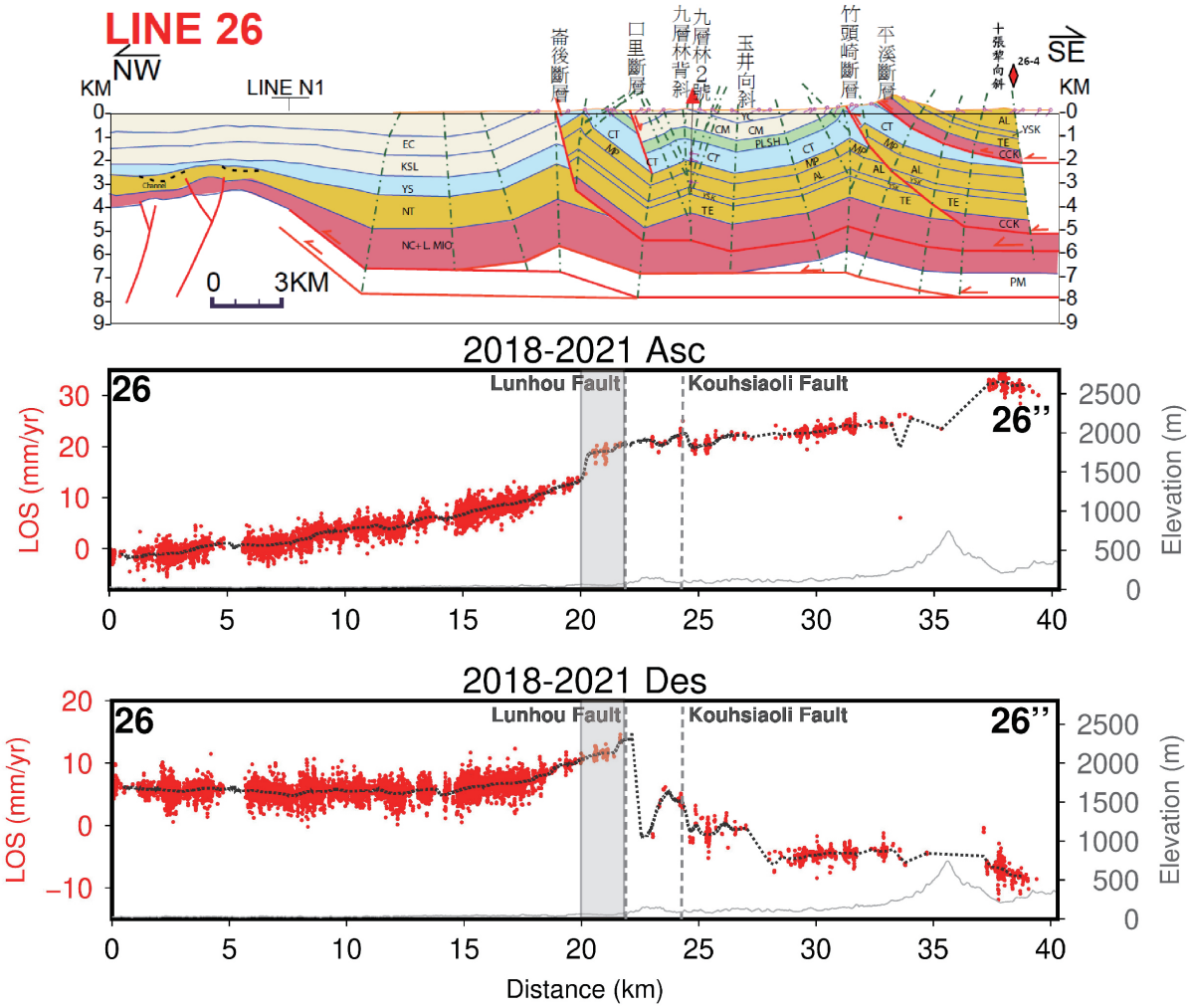


圖4-27：Line 26剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層大概位置，灰色實線為地形。 崙後斷層的錯動在升降軌資料位置不同是因為資料投影造成，詳見內文。

Figure 4-27: The profiles of Line 26. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-9 27號剖面

27號地下地質剖面主要標示有新化斷層，雖然其位置並未經過目前地調所公告之新化斷層，但是距離不遠。在PS剖面相對應的位置大概在12-13km左右，該區域有不甚明顯的速度差異（小於 2mm/yr），這個數字小於這一筆資料的RMSE，所以不能確認此處是否有錯動（圖4-28）。

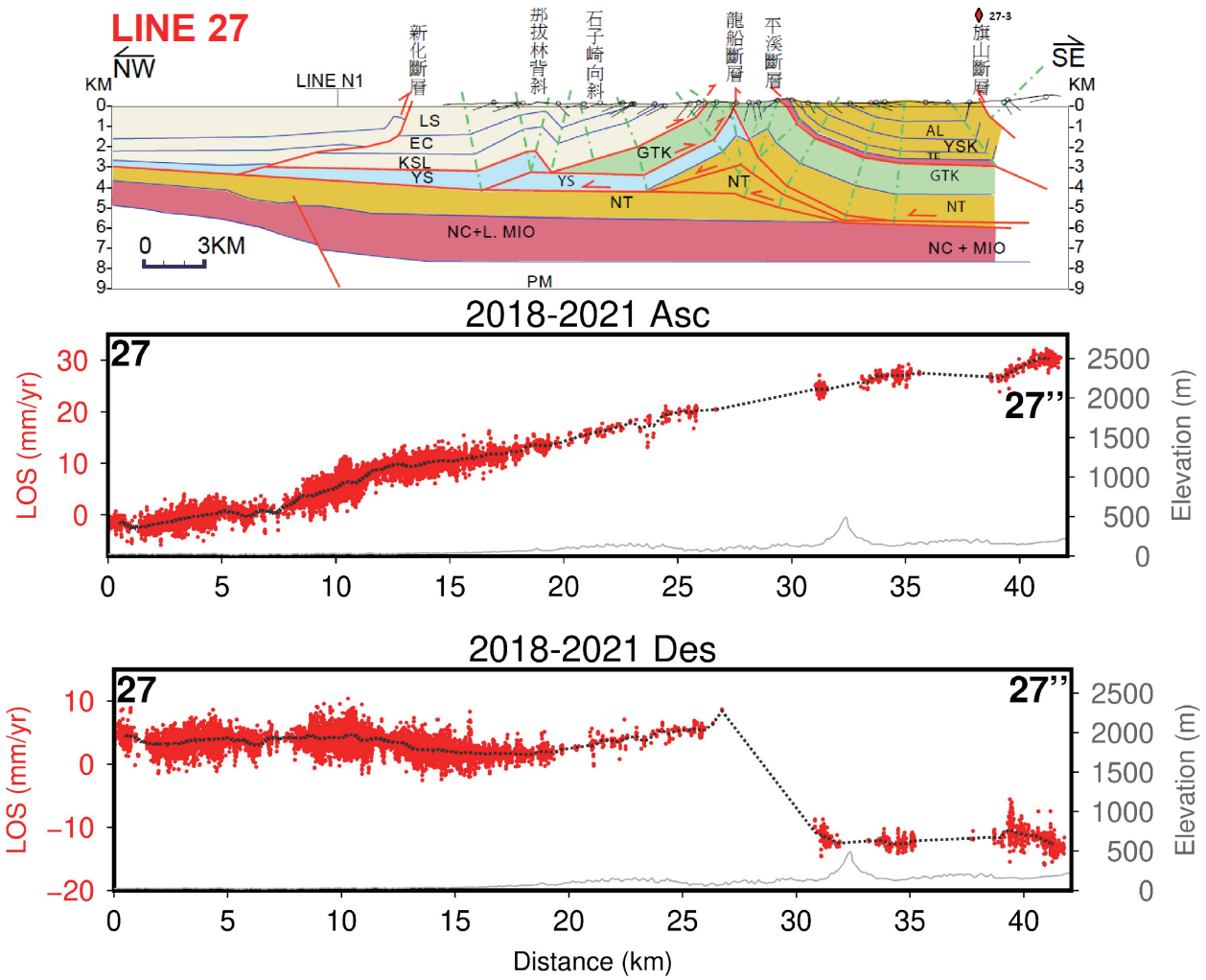


圖4-28：Line 27剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-28: The profiles of Line 27. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-6-10 28號剖面

28號地質剖面主要標示有後甲里斷層並且向東南延伸至旗山斷層，在PS剖面上顯示跨越地調所公告之後甲里斷層以及車瓜林斷層。後甲里斷層錯動明顯，在升軌資料顯示約5mm/yr、而在降軌資料則顯示大約 10mm/yr的速度差。Fruneau 等人(2001) 以及劉彥求等(2007)均認為後甲里斷層為西傾的逆斷層，可能沒有截切全新世地層。在23km（地下地質剖面龍船斷層）附近，升軌資料明顯的上升，顯然有受到地下地質影響（圖4-29）。

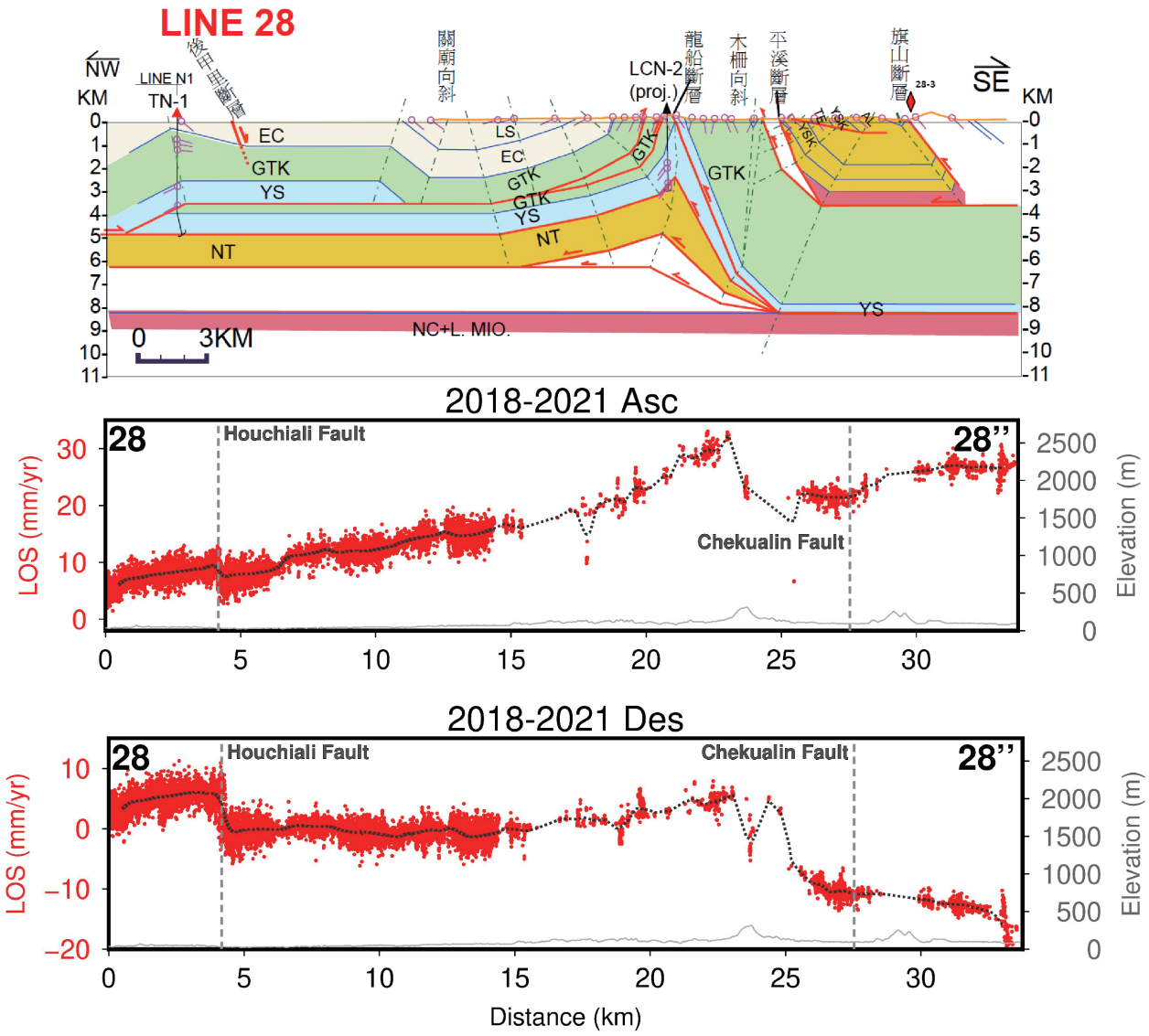


圖4-29：Line 28剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。（中）（下）分別為2018年至2021年升軌道與降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與PSI速度場剖面長度一致。紅點為PSI速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-29: The profiles of Line 28. (Upper)The profile of geological structures (Huang et al., 2004). (Middle) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Ascending images. (Lower) LOS average velocity field and profiles for 2018-2021 from Descending images. Red dots are the velocity from PSI, the dark gray lines are the average line, dotted gray lines are the locations of the faults, and solid gray lines represent the topography.

4-7 重點區域剖面及時間序列分析

4-7-1 重點區域剖面分析

本研究為了深入了解都會區和科學園區的地表活動特性，因此分別在沙崙綠能科學城、南部科學園區、台南都會區、台南平原和烏山頭水庫，劃設數條橫跨南北和東西方向的剖面進行分析（圖4-30）。每條剖面選取兩側250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。

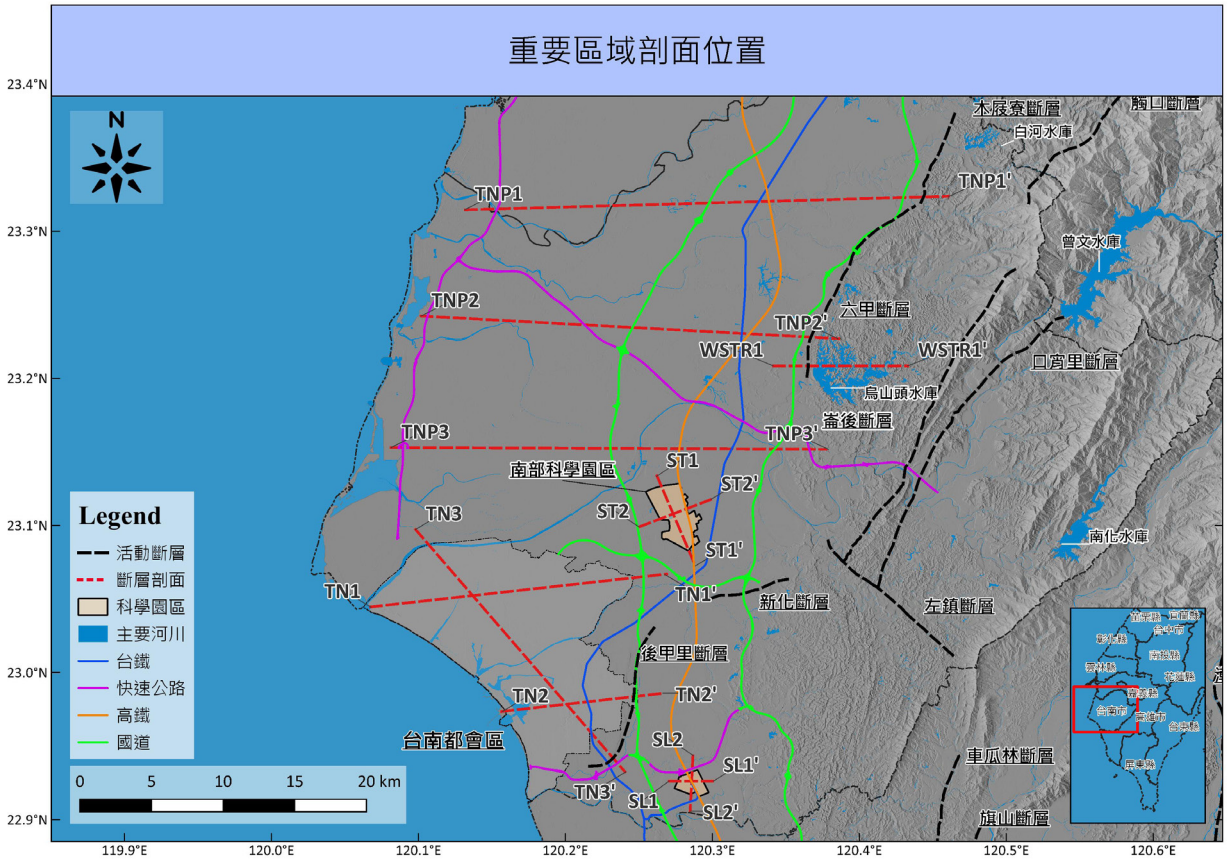


圖4-30：嘉南地區重要區域剖面位置圖。

Figure 4-30: Profiles for the important areas of the Chiayi-Tainan region.

4-7-1-1 沙崙綠能科學城(SL)

沙崙綠能科學城有兩條剖面通過，SL1是東西方向剖面，SL2是南北方向剖面。升軌道的SL1剖面和SL2剖面（圖4-31）的數值都維持在15mm/yr左右，而降軌道的SL1剖面和SL2剖面（圖4-32）的數值都維持在0mm/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。

4-7-1-2 南部科學園區(ST)

南部科學園區有兩條剖面通過，ST1是南北方向剖面，ST2是東西方向剖面。升軌道的ST1剖面和ST2剖面（圖4-31）的數值都維持在0-5mm/yr左右，而降軌道的ST1剖面和ST2剖面（圖4-32）的數值都維持在5mm/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。

4-7-1-3 臺南都會區(TN)

臺南都會區有三條剖面通過，TN1和TN2是東西方向剖面，TN3是南北方向剖面。TN1剖面的升軌道（圖4-31）和降軌道（圖4-32）的結果都指出在12至14公里處有速度落差，其值都約為3-5 mm/yr。TN2剖面的升軌道（圖4-31）和降軌道（圖4-32）結果一致，都在後甲里斷層兩側有明顯的落差，升軌道約為3-5 mm/yr；降軌道約為7-10 mm/yr。TN3剖面的升軌道與降軌道結果顯示自13公里處LOS速度逐漸增加，至後甲里斷層兩側有明顯落差，約為3-5 mm/yr（圖4-31與圖4-32）。

4-7-1-4 臺南平原(TNP)

臺南平原區有三條東西向剖面通過。剖面TNP1通過木屐寮斷層，剖面TNP2通過六甲斷層，總觀TNP1、TNP2剖面在升軌道與降軌道皆呈現剖面東側的LOS速度較西側快，TNP3剖面在升軌道觀測結果也有此趨勢，但在降軌道則無（圖4-31與圖4-32）。TNP1剖面於升軌道資料顯示28公里處LOS速度開始增加，在木屐寮斷層兩側因為PSI點稀少，無法觀測是否有明顯落差；降軌道結果顯示木屐寮

斷層附近約有5 mm/yr落差。TNP2剖面於升軌道資料顯示16公里處LOS速度開始增加，在六甲斷層約有5 mm/yr落差；降軌道結果在六甲斷層兩側無明顯差異。

4-7-1-5 烏山頭水庫(WSTR)

WSTR1剖面的升軌道結果指出（圖4-31）跨過六甲斷層約有5 mm/yr的差異；WSTR1　剖面的降軌道結果指出（圖4-32）於六甲斷層則無明顯差異。

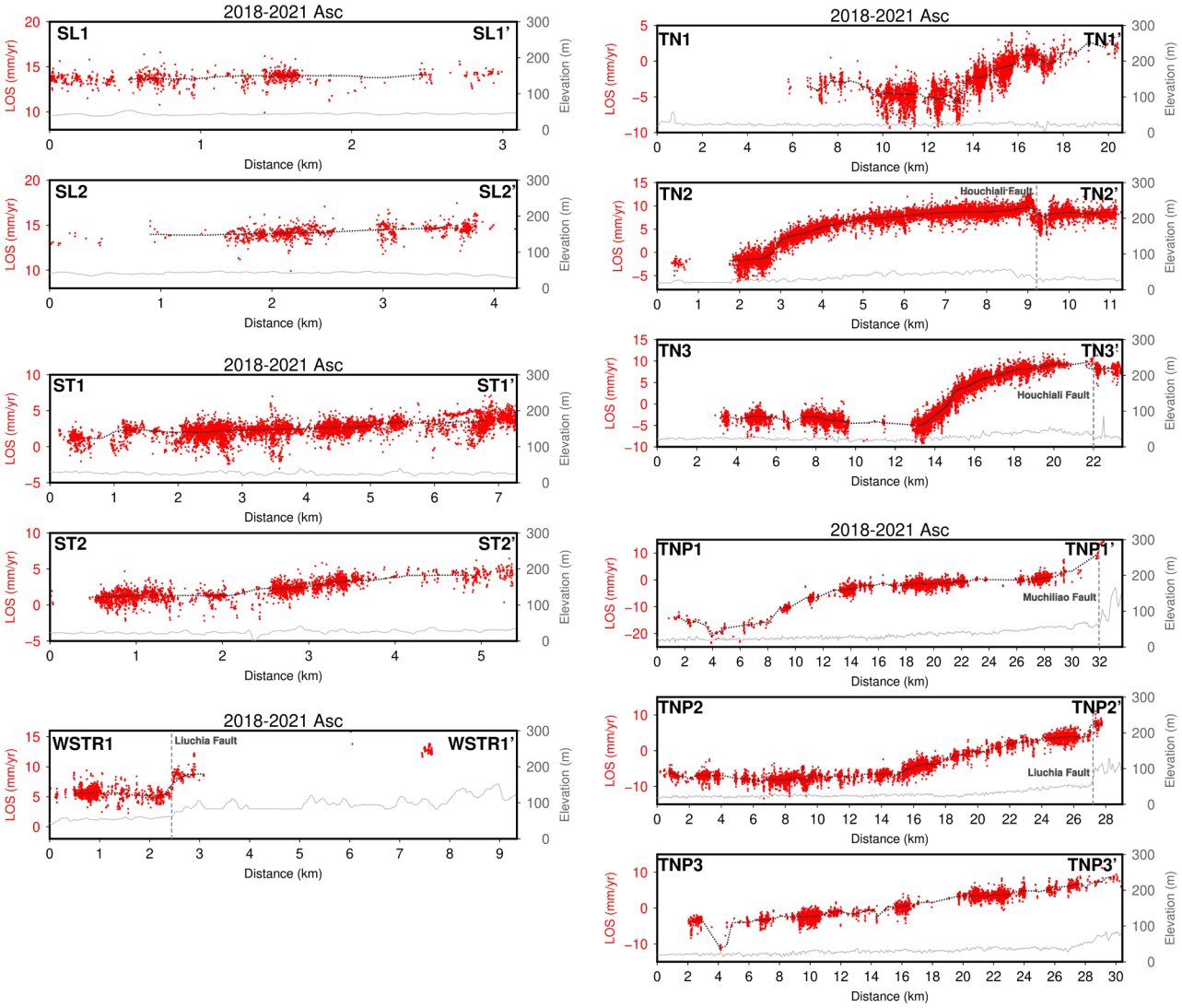


圖4-31：2018-2021科學園區與都會區升軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-31: Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of ascending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

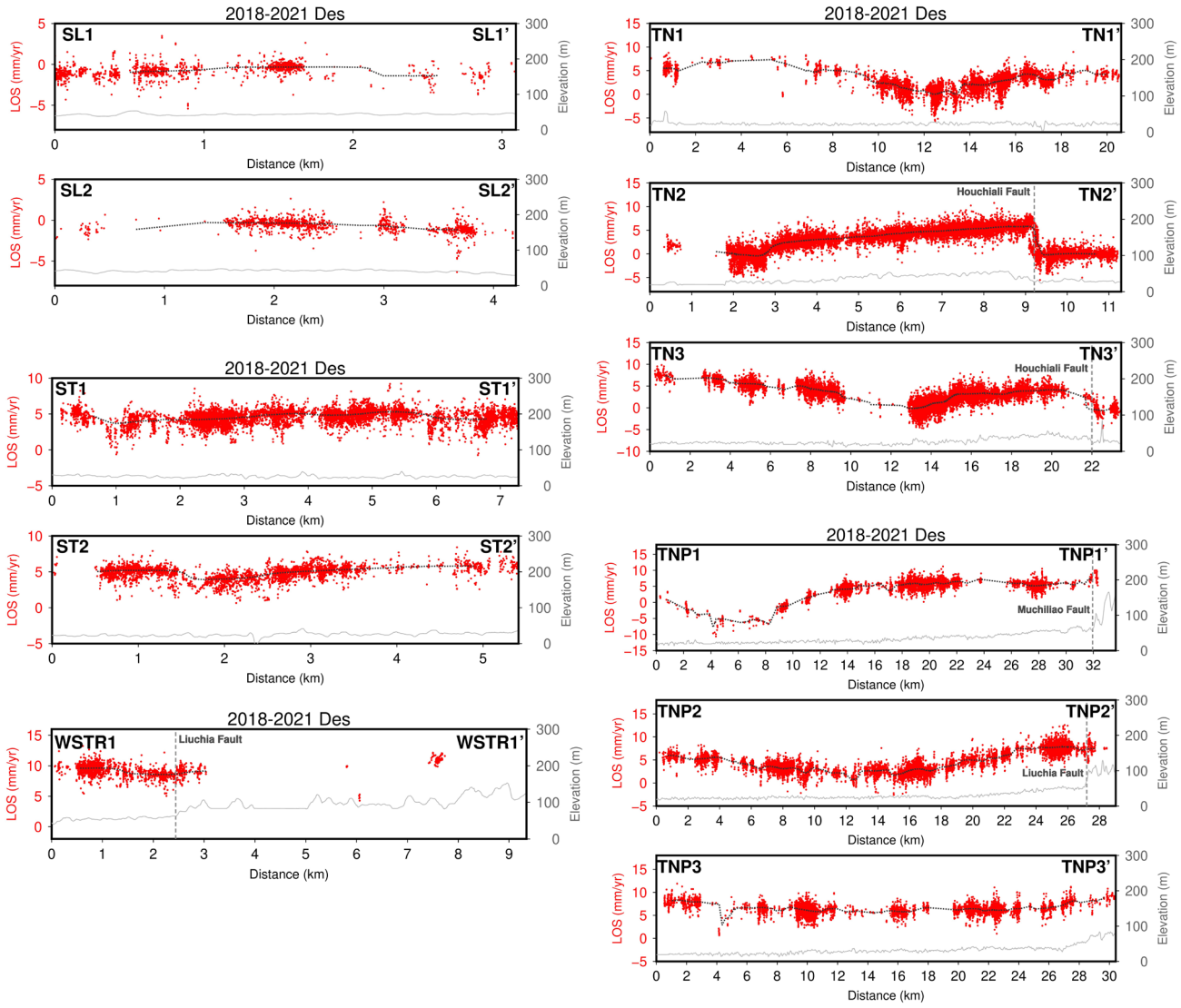


圖4-32：2018-2021科學園區與都會區降軌道影像的LOS平均速度場與剖面圖。紅點為PSI速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

Figure 4-32 : Average LOS velocity fields between 2018 and 2021 processed with images of descending orbits and profiles across the industrial parks and the metropolitan areas. The red dots are the PSI velocity, the dark gray dashed line is the average line, the gray dashed lines are the fault location, and the gray solid line is the terrain.

4-7-2 重點區域時間序列分析

我們在重點區域內選取10個三個時期皆有觀測資料GNSS連續測站（圖4-33），擷取座標範圍內500公尺的PS點，每幅影像取平均值作為該站點的PSI時間序列，並與GNSS時間序列進行比對，本節呈現2018年至2021年重點區域時間序列分析成果，2014年至2016年與2016年至2018年成果列於附錄E。

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。僅中路國小(GS79)與渡拔國小(KAWN)兩站在降軌道方向觀測較為不符合。

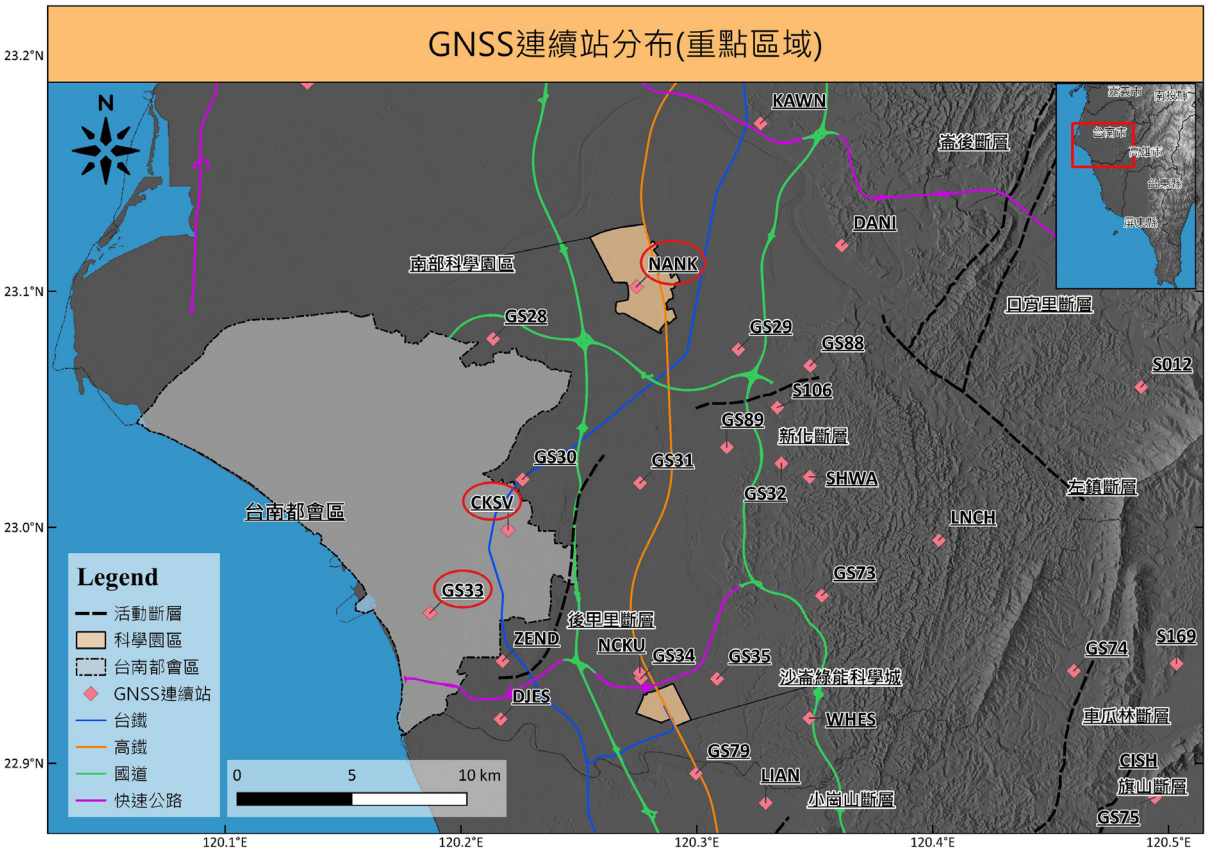


圖4-33：重點區域GNSS測站位置分佈圖。

Figure 4-33：The map for the GNSS stations of the important area.

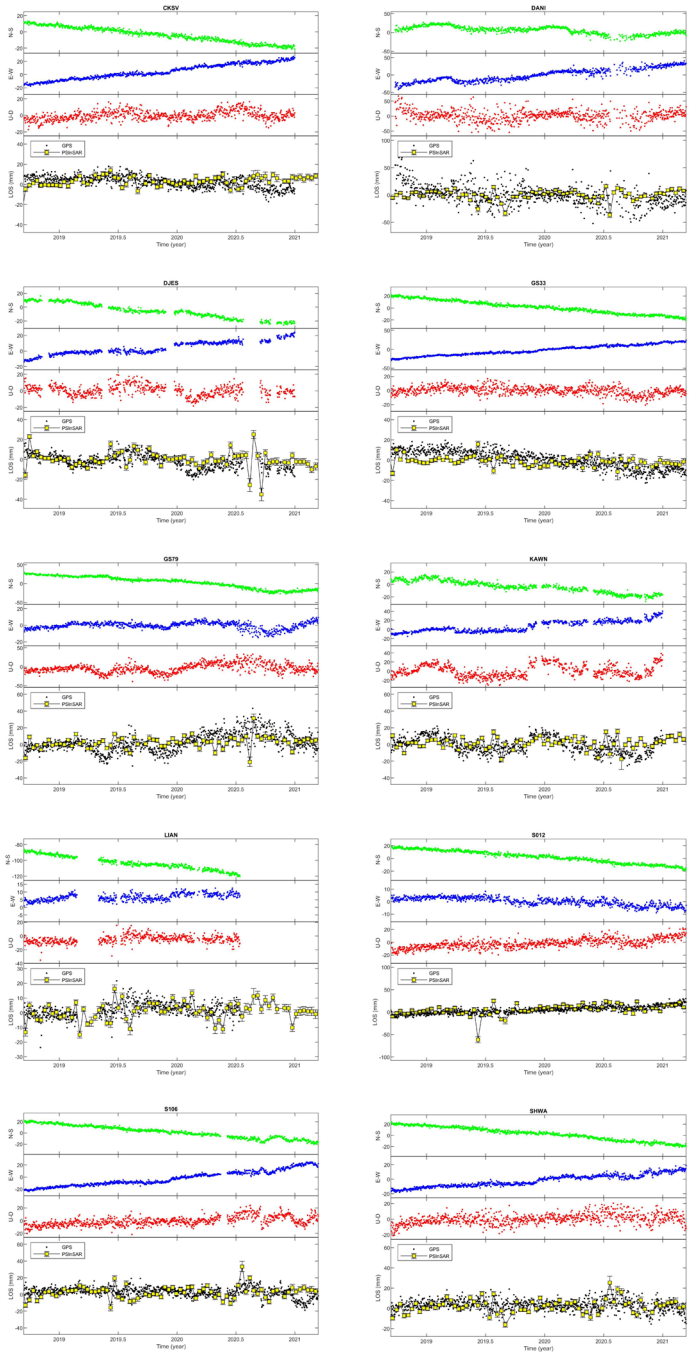


圖4-34：我們選取了十個GPS站位將其2018-2021升軌方向時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 黑色點則為GPS投影至雷達視衛星方向、亦即是斜距方向（雷達為升軌方向），並且與附近之雷達資料比對（黃色方框）。 CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。

Figure 4-34：Ten GPS stations and their adjacent PSI signals in ascending track between 2018 and 2021. The green dots are the N-S component, the blue dots are the E-W component, the red dots are the U-D component, the black dots are the GNSS projected to LOS direction and the yellow squares are the PSI observation.

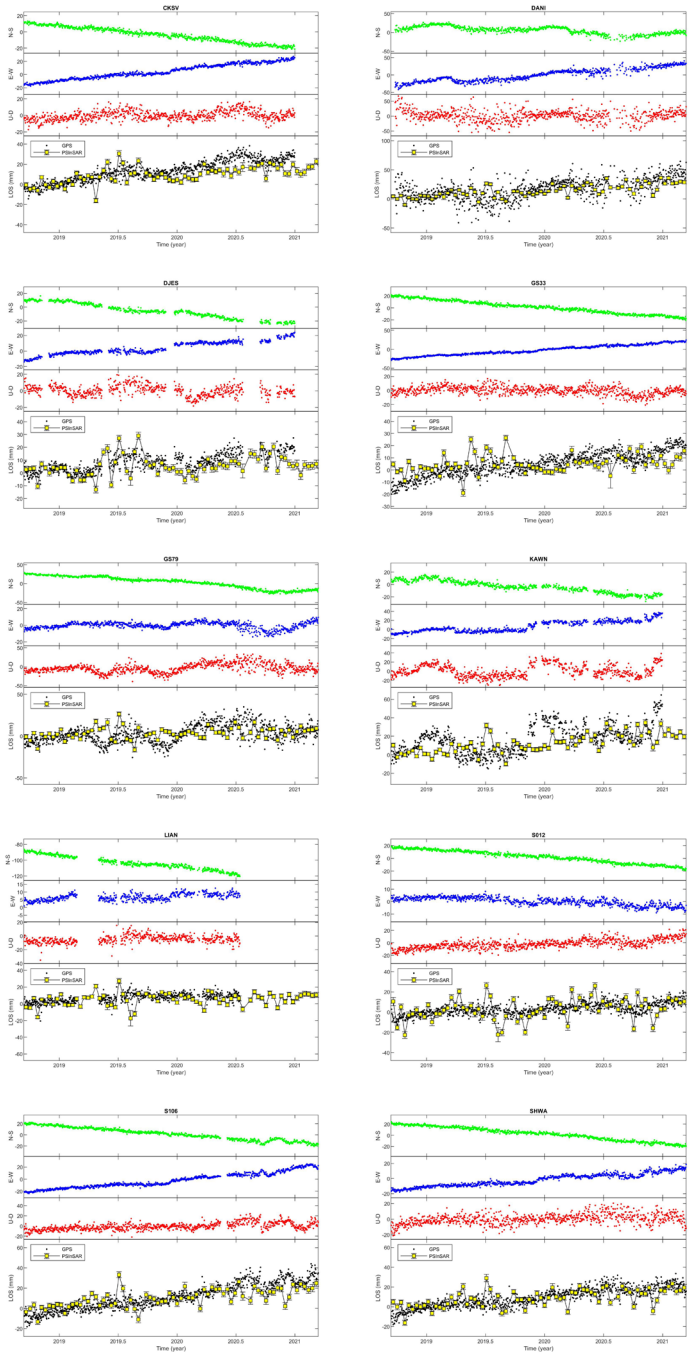


圖4-35：我們選取了十個GPS站位將其2018-2021降軌方向時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 黑色點則為GPS投影至雷達視衛星方向、亦即是斜距方向（雷達為升軌方向），並且與附近之雷達資料比對（黃色方框）。 CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。

Figure 4-35：Ten GPS stations and their adjacent PSI signals in descending track between 2018 and 2021. The green dots are the N-S component, the blue dots are the E-W component, the red dots are the U-D component, the black dots are the GNSS projected to LOS direction and the yellow squares are the PSI observation.

第五章、垂直速度場解析

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

要以單分量的衛星斜距方向（LOS）觀測值解析垂直與水平方向分量，至少需要兩組不同觀測方向的資料才能達成。我們先將區域中資料相對於參考站S103後格點化及內插，讓升軌與降軌資料位置一致。為了避免格點化結果過於平滑，我們選取格點大小為500公尺，希望構造活動的地表變形資訊不至於失真（圖5-1與圖5-2）。

接著我們對每一個格點利用三分量合成衛星斜距方向理論公式（公式5.1），再以最小平方法擬合求得該格點的水平與垂直向速度。

$$d_{LOS} = \begin{bmatrix} -sin\theta cos\alpha & sin\theta sin\alpha & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} \qquad (5.1)$$

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

由於我們只有兩個方向的觀測值，由公式5.1可知南北分量在衛星斜距方向的貢獻量小，因此計算時選擇忽略不不計，可將5.1式改寫為：

$$d_{LOS} = \begin{bmatrix} -sin\theta cos\alpha & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_U \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

應用5.2式，每個格點的計算公式為：

$$\begin{bmatrix} -sin\theta_{SA} cos\alpha_{SA} & cos\theta_{SA} \\ -sin\theta_{SD} cos\alpha_{SD} & cos\theta_{SD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_E \\ V_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{SA} \\ d_{SD} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

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

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

V_E、V_U分別為東西向速度與垂直向速度。

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

將5.3式改寫為：

$$\begin{bmatrix} GSA_E & GSA_U \\ GSD_E & GSD_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{vE} \\ m_{vU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{SA} \\ d_{SD} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

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

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

m_{vE}、m_{vU} 分別為東西向速度場模型與垂直向速度場模型。

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

應用

$$Gm = d \tag{5.5}$$

即可求得每個格點的水平與垂直向速度。

$$m = G\backslash d \tag{5.6}$$

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

解算後得到垂直以及東西向的速度場。垂直速度大概在-60~38mm/yr 附近。 東西向的速度場則是落在-60~30 mm/yr 附近。 與同時期的GNSS連續站的垂直、東西向的速度比對，垂直向斜率接近1，R^2為0.93，RMSE為4.03mm/yr。東西向的比對結果更好，斜率在0.93附近，R^2則是相當高到達0.98，而且RMSE低到1.6mm/yr。可信度相當高（圖5-3及圖5-4）。

從解出之垂直與東西方向的速度場，可以看出從後甲里斷層向北到六甲斷層與木屐寮斷層兩側有速度落差，彰化雲林地區沿海以下陷為主，下陷量最大可達60mm/yr，六甲斷層與木屐寮斷層到觸口斷層、口宵里斷層以及車瓜林斷層之間則是以抬升為主，抬升速率最高可達20 mm/yr。（圖5-3及圖5-4）。

利用PSI解析的垂直速度（md_U）與GNSS觀測值（U）比對斜率接近1，且誤差（RMSE）小於 4 mm/yr，顯示解析出來的垂直速度場與此區域GNSS連續站得到的垂直速度相當一致。

由本計畫在嘉南地區PSI結果解析垂直速度場成果顯示，此研究方法可成功取得大區域範圍的垂直速度場，補足GNSS或其他測地資料空間分佈不足的情形。然而在過度內插的地區，可能必須進行適度地遮罩，以改善必須過度解釋內插資料的困擾。除嘉南地區外，未來此法也可應用於須解讀大面積範圍的工作區域，增加區域地表變形趨勢在圖像上之確實度。

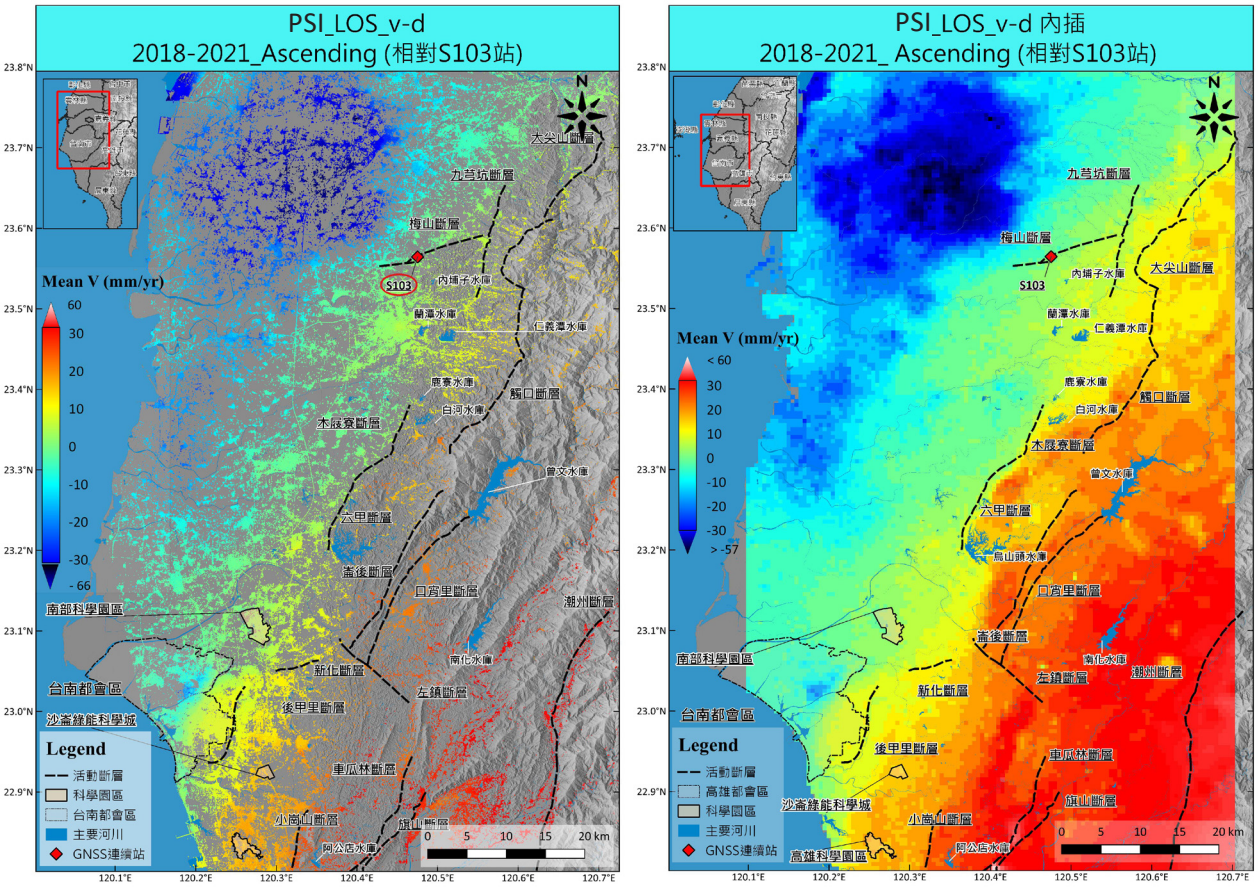


圖5-1：2018年至2021嘉南地區升軌方向PSI與內插結果。左圖為PSI成果，右圖為以500公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。紅色菱形為參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 5-1：(Left) PSI results in ascending track between 2018 and 2021 in the Chiayi and Tainan area. (Right) PSI results Interpolated with a 500-m grid resolution. Warm colors represent movements toward the satellite and cold colors represent movements away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S103.

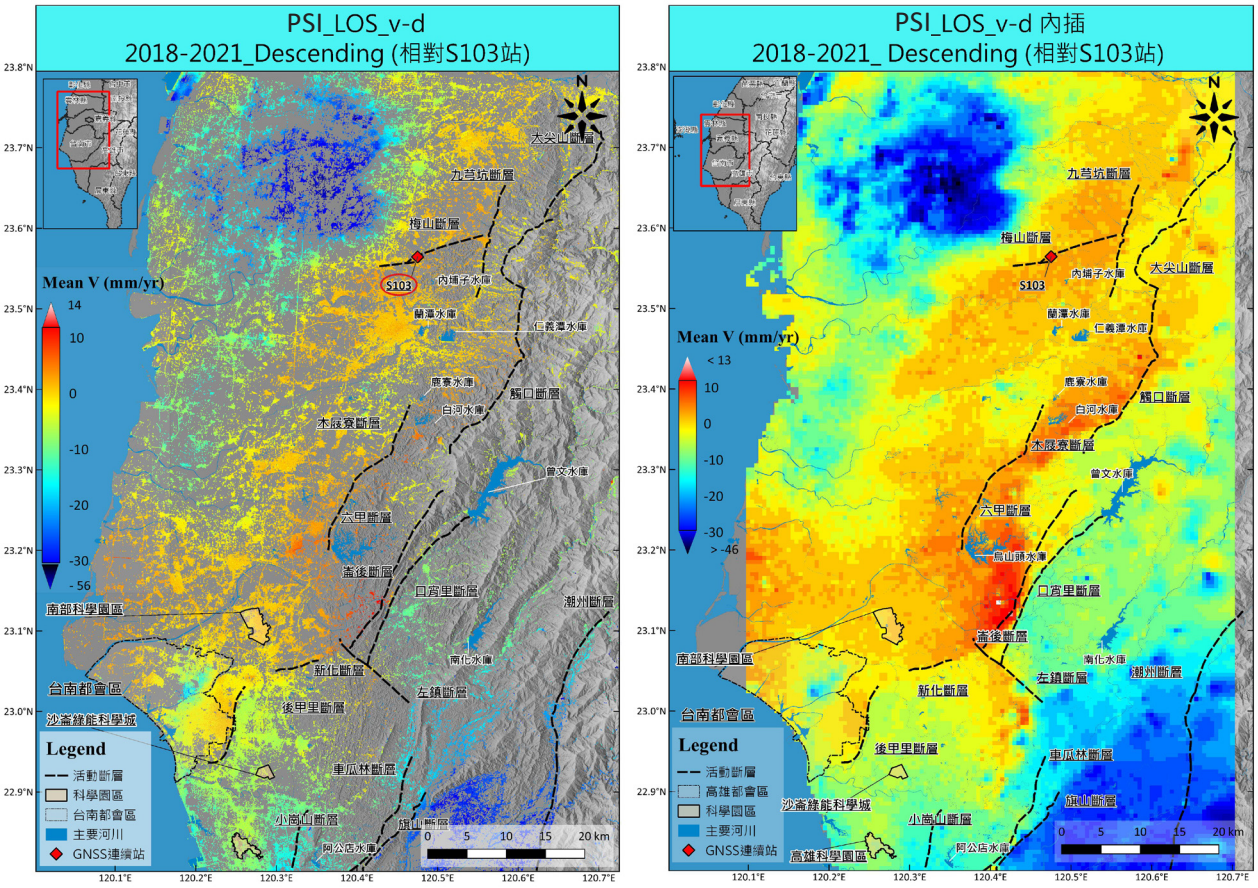


圖5-2： 2018年至2021年嘉南地區降軌方向PSI與內插結果。左圖為PSI成果，右圖為以500公尺為格點大小內插成果。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。紅色菱形為參考點為連續GNSS測站S103。

Figure 5-2：(Left) PSI results in Descending track between 2018 and 2021 in the Chiayi and Tainan area. (Right) PSI results Interpolated with a 500-m grid resolution. Warm colors represent movements toward the satellite and cold colors represent movements away from the satellite. Reference point is the continuous GNSS station S103.

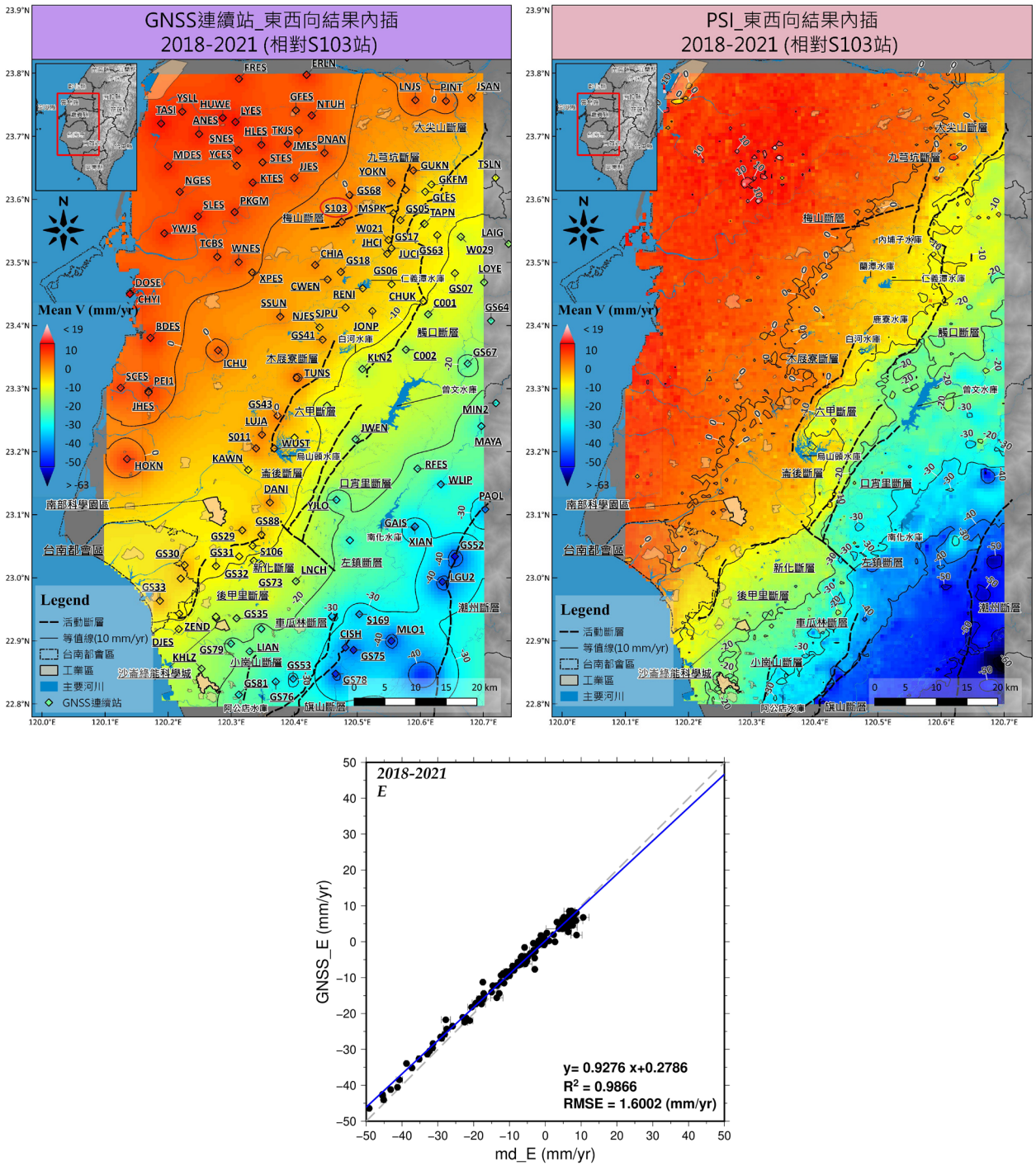


圖5-3：上圖左為2018-2021 GNSS東西向速度內插圖，內插使用最基本的IDW模式。上圖右為2018年至2021年嘉南地區東西向速度解析結果。下圖為GNSS比對圖。參考點為連續GNSS測站S103，菱形及其填色為GNSS連續站垂直速度。暖色代表向東，冷色表示向西。

Figure 5-3：(Upper Left) East-West Interpolated Velocity field from GNSS between 2018 and 2021 in the Chiayi and Tainan area. Velocity is interpolated with the basic IDW model. (Upper Right) East-West Velocity field resolved from Radar data between 2018 and 2021 in this area. (Lower) Comparison between PSI and GPS results. Reference point is the continuous GNSS station 103. Colored diamonds represent the vertical velocity of the continuous stations. Warm colors represent eastward and cold colors represent westward.

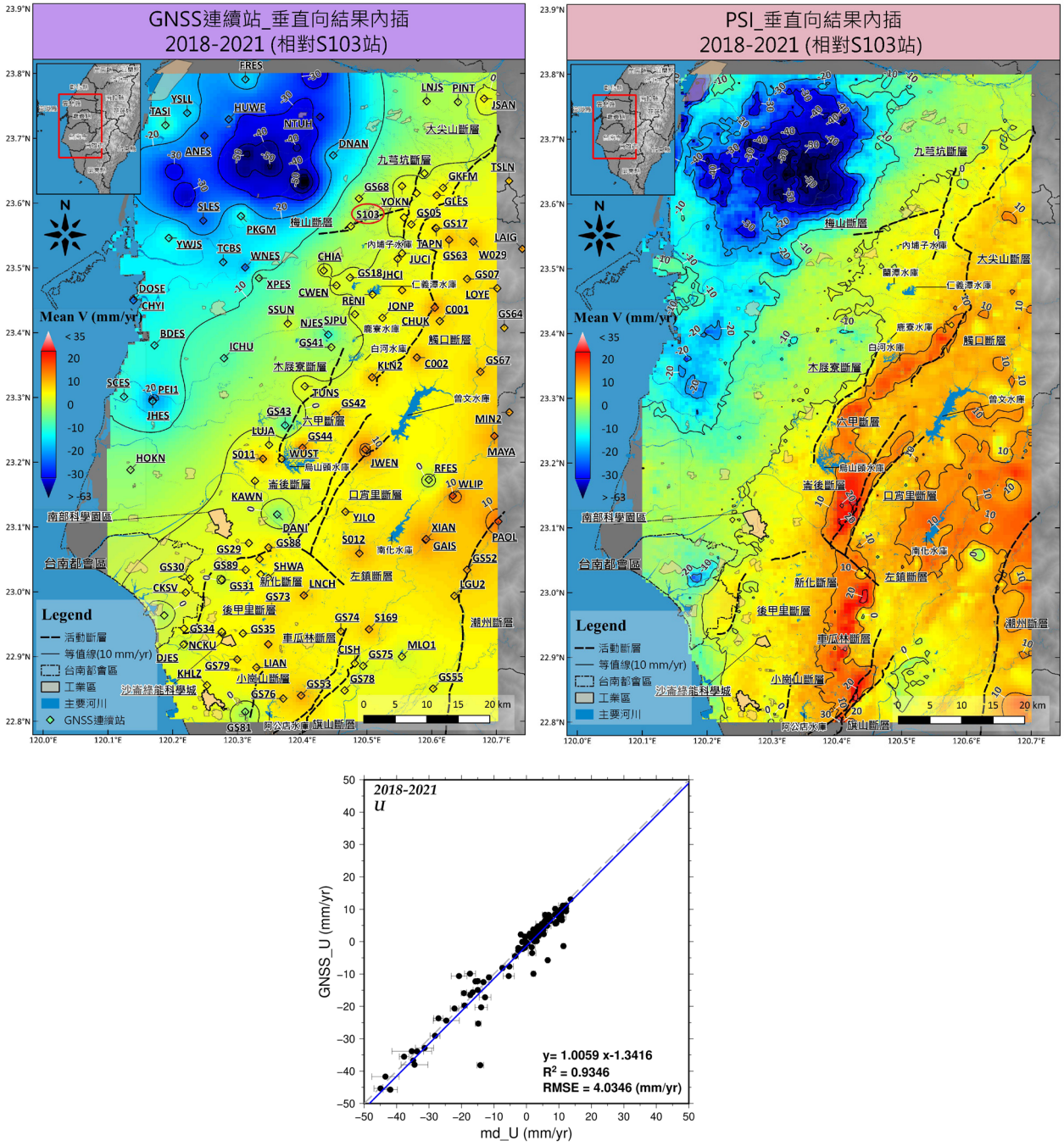


圖5-4：上圖左為2018-2021 GNSS垂直向速度內插圖，內插使用最基本的IDW模式。上圖右上圖為2018年至2021年嘉南地區垂直向速度解析結果。由於GNSS內插的原因，圖面上看起來與雷達資料有一些差異。下圖為GNSS比對圖。參考點為連續GNSS測站S103，菱形及其填色為GNSS連續站垂直速度。暖色代表抬升，冷色表示下陷。

Figure 5-4：(Upper Left) East-West Interpolated Velocity field from GNSS between 2018 and 2021 in the Chiayi and Tainan area. Velocity is interpolated with the basic IDW model. (Upper Right) East-West Velocity field resolved from Radar data between 2018 and 2021 in this area. (Lower) Comparison between PSI and GPS results. Reference point is the continuous GNSS station 103. Colored diamonds represent the vertical velocity of the continuous stations. Warm colors represent eastward and cold colors represent westward.

(Upper Left) East-West Interpolated Velocity field from GNSS between 2018 and 2021 in the Chiayi and Tainan area. Velocity is interpolated with the basic IDW model. (Upper Right) East-West Velocity field resolved from Radar data between 2018 and 2021 in this area. (Lower) Comparison between PSI and GPS results. Reference point is the continuous GNSS station 103. Colored diamonds represent the vertical velocity of the continuous stations. Warm colors represent eastward and cold colors represent westward.

第六章、嘉南地區小基線雷達差分干涉技術成果

在雷達觀測中，當影像觀測時間間隔越長，越容易造成雷達影像的temporal decorrelation，亦即因為時間差異而遇到的地表狀況變動，例如植物因為時間與季節差異的生長產生高度差異或是其他地表狀況的變動。為了改善地表地物因為時間間隔過長的改變，便有 Small Baseline Subset (SBAS)方法產生，讓影像的時間基線以及軌道基線都控制在適當間隔、時間之內來縮小誤差(Berrardino et al., 2002)。 雖然現代衛星的軌道較以往的衛星有長足的進步，因此軌道基線不再造成太大差異，但是時間基線的差異仍然可以造成相當大的誤差。因此我們選擇以2014年至2016年18幅降軌道（Descending）影像測試GMTSAR軟體的SBAS方法流程，並獲得2014年至2016年SBAS的LOS平均速度場。

我們選用2014年11月5日至2016年1月11日共18幅影像，組成27對時間間隔50天內，且垂直基線長小於100公尺的影像對，進行SBAS流程處理。由於全區域圖幅較廣，解相位過程非常耗時，因此選擇較小區域進行流程測試，成功獲得2014年至2016年SBAS的LOS平均速度場（圖6-1）。

SBAS降軌道的LOS速度場結果如圖6-1所示。SBAS的LOS速度場數值大致分布在-30mm/yr到50mm/yr之間，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後甲里斷層西側和沿海地區，主要呈現冷色系的地區分佈在車瓜林斷層以南。研究區域內的後甲里斷層的兩側有顯著的LOS速度場差異；新化斷層及口宵里斷層兩側LOS速度場有所差異；其餘斷層兩側的LOS速度場差異則較不明顯。SBAS成果與PSI成趨勢接近，但數值有所差距，尤其在六甲斷層與木屐寮斷層西側的區域。這個差距可能是因為SBAS山區萃取的資訊較少，使得解相位（unwrap）錯誤所致。整體而言，SBAS法對於速度場的判釋，由目前的測試結果來看趨勢一致，但細部參數會需要調整，未來若要將SBAS法應用至其他地區，必須先對處理參數進行調校，以確保觀測區域能產出良好的結果。

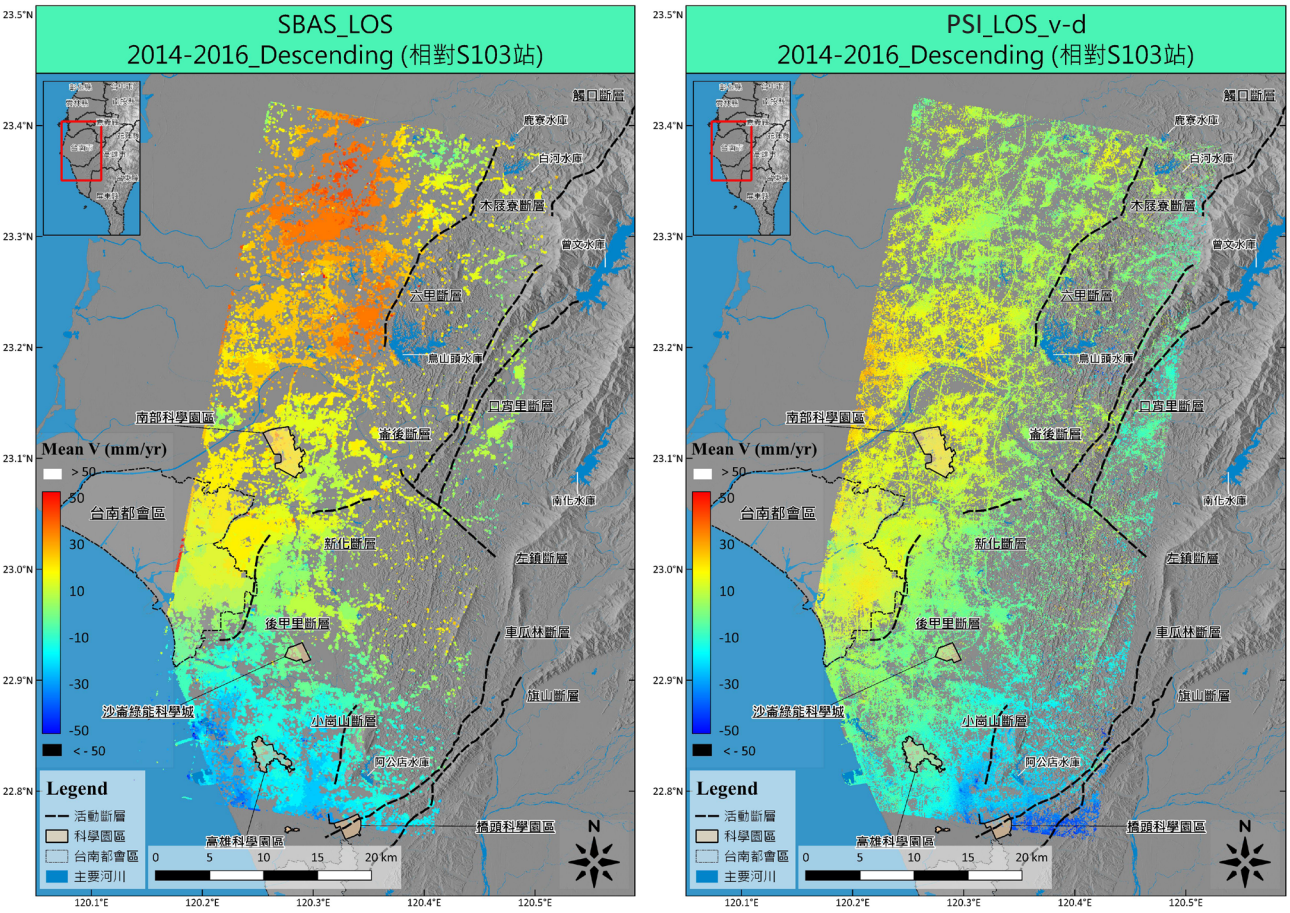


圖6-1：（左）2014-2016降軌道影像SBAS的LOS平均速度場與（右）2014-2016降軌道影像PSI的LOS平均速度場。暖色代表靠近衛星移動，冷色表示遠離衛星移動。

Figure 6-1：(Left) SBAS Average LOS velocity fields between 2014 and 2016 processed with images of descending orbits. (Right) SBAS 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.

第七章、二維剖面模擬

7-1 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7-1），與本計畫所計算2018-2021之雷達影像上升與下降軌道剖面資料進行擬合。分別針對橫跨三條斷層(六甲、木屐寮與口宵里，圖7-2~4)的剖面，利用不同斷層幾何與滑動量所產生東西、南北與垂直方向之地表變形，轉投影至LOS方向後，與計畫內所獲得之速度場剖面進行匹配，選擇均方根誤差(Root Mean Square Error；RMSE)作爲篩選機制，並參考各參數的分佈來討論利用單一維度資料、剖面模擬方式可以怎麼幫助我們了解模擬的斷層系統。

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) 1000~15000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0.02公尺，並往深度延伸1公里與角度為1的滑脫面，每個剖面總搜尋筆數為317520（約31萬種參數組合）。

透過RMSE當門檻值進行統計，將呈現出每個參數在門檻值內的統計，另外也將每兩種參數進行數量統計，以便顯示個別參數與兩兩參數對中，在哪些參數組合有較多的統計量值，進而討論該斷層幾何與滑動特性。

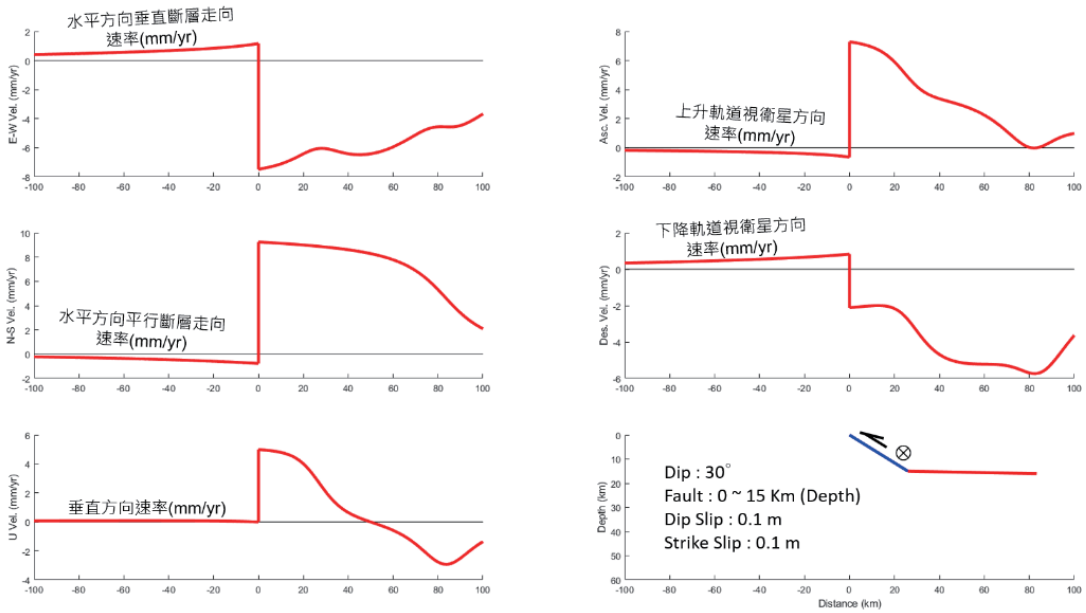


圖7-1：斷層錯位模型模擬結果示意圖組，假設斷層幾何與滑動量，透過斷層錯位模型推估地表變形行為，左邊由上到下分別為水平方向垂直斷層走向速率、水平方向平行斷層走向速率、垂直方向速率，右邊由上到下分別為上升軌道視衛星方向速率、下降軌道視衛星方向速率與斷層幾何、運動方向及參數。

Figure 7-1 :To estimate surface deformation under fault dislocation model with versatile fault geometry and fault slip. Left column: (upper) velocity perpendicular to the strike (E-W direction), (middle) velocity along the strike (N-S direction), (lower) vertical velocity. Right column: (upper) LOS velocity of ascending orbit, (middle) LOS velocity of descending orbit, (lower) fault geometry

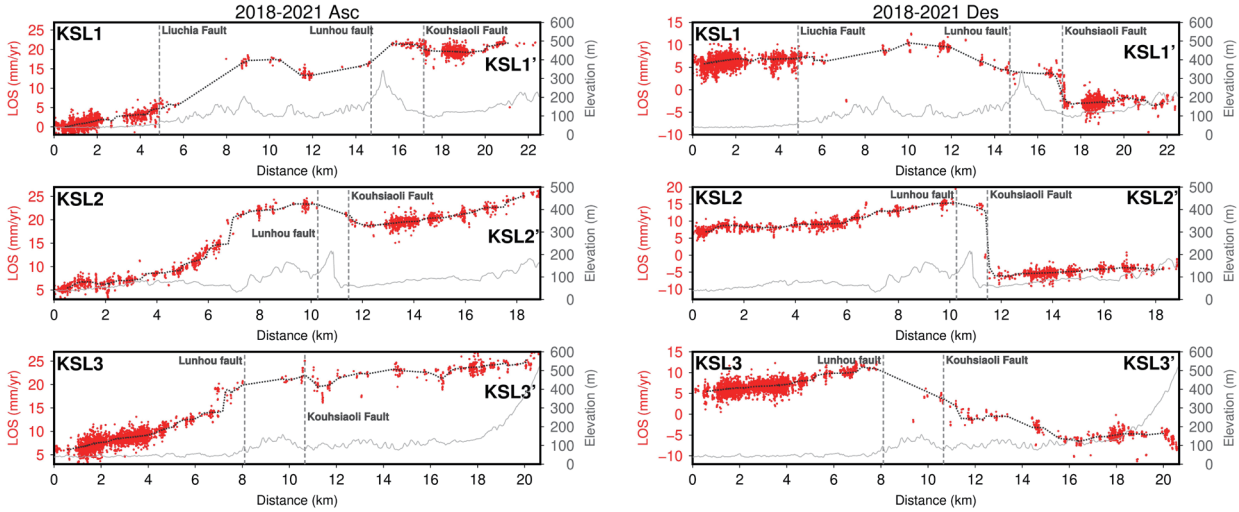


圖7-2：口宵里斷層附近雷達影像上升及下降軌道視衛星方向速率剖面資料。此斷層在本次模擬採用 KSL2 剖面來模擬。

Figure 7-2 : Velocity profiles extracted from InSAR results (assending and descending orbits) across the Kouhsiaoli Fault. Profile KSL2 is picked to perform the modelling for this fault.

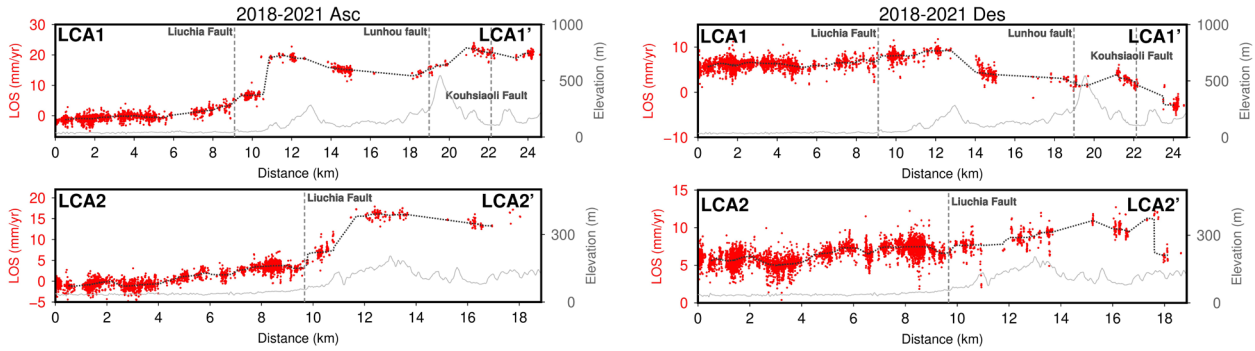


圖7-3：六甲斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。 此斷層本次使用LCA1剖面資料來模擬。

Figure 7-3 : Velocity profiles extracted from InSAR results (assending and descending orbits) across the Liuchia Fault. Profile LCA1 is picked to perform the modelling for this fault.

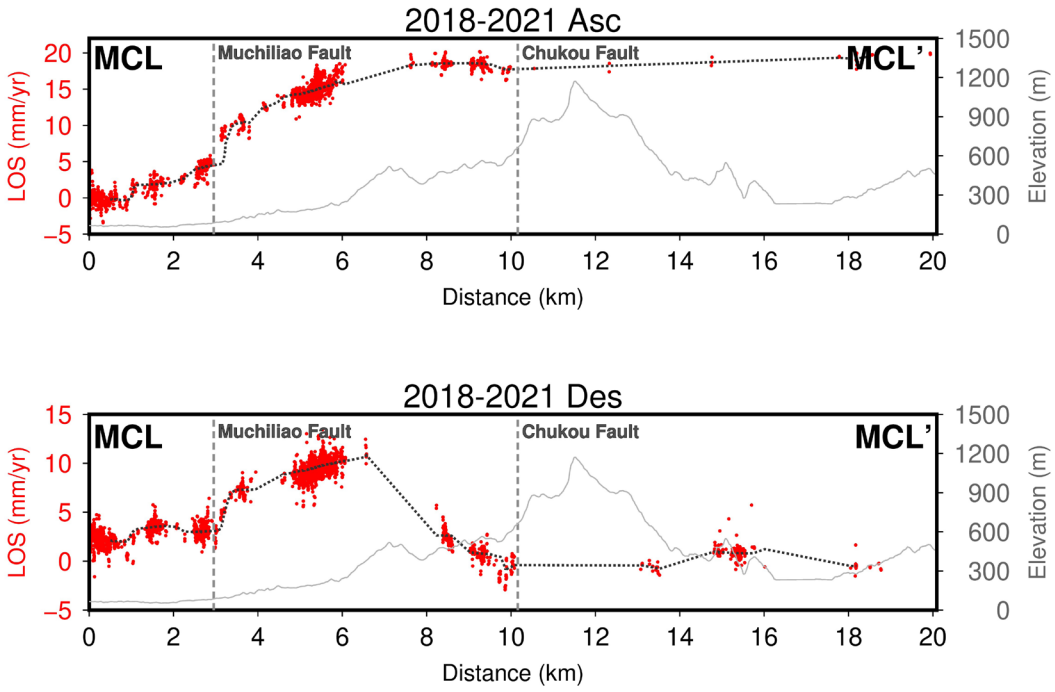


圖7-4：木屐寮斷層附近雷達影像上升及下降軌道之剖面資料。在此斷層，本次採用 MCL剖面來模擬斷層。

Figure 7-4 : Velocity profiles extracted from InSAR results (assending and descending orbits) across the Muchiliao Fault. Profile MCL is picked to perform the modelling for this fault.

7-2 六甲斷層模擬結果

針對六甲斷層的模擬結果，選擇RMSE小於0.0035的結果，圖7-5呈現傾角、傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 走滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 走滑、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、走滑 - 斷層頂部、走滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計圖。

由圖中可以看出，LCA1透過升降軌道的資料來做二維模擬，經過搜尋後，可得到最佳擬合結果(圖7-6)。針對六甲斷層的最佳擬合結果，傾角集中在30~50度上，傾滑集中於0.02 m/yr，走滑分量比較分散(0~0.04 m/yr)，斷層頂部分布於200~600m，斷層底部可以深至15km。

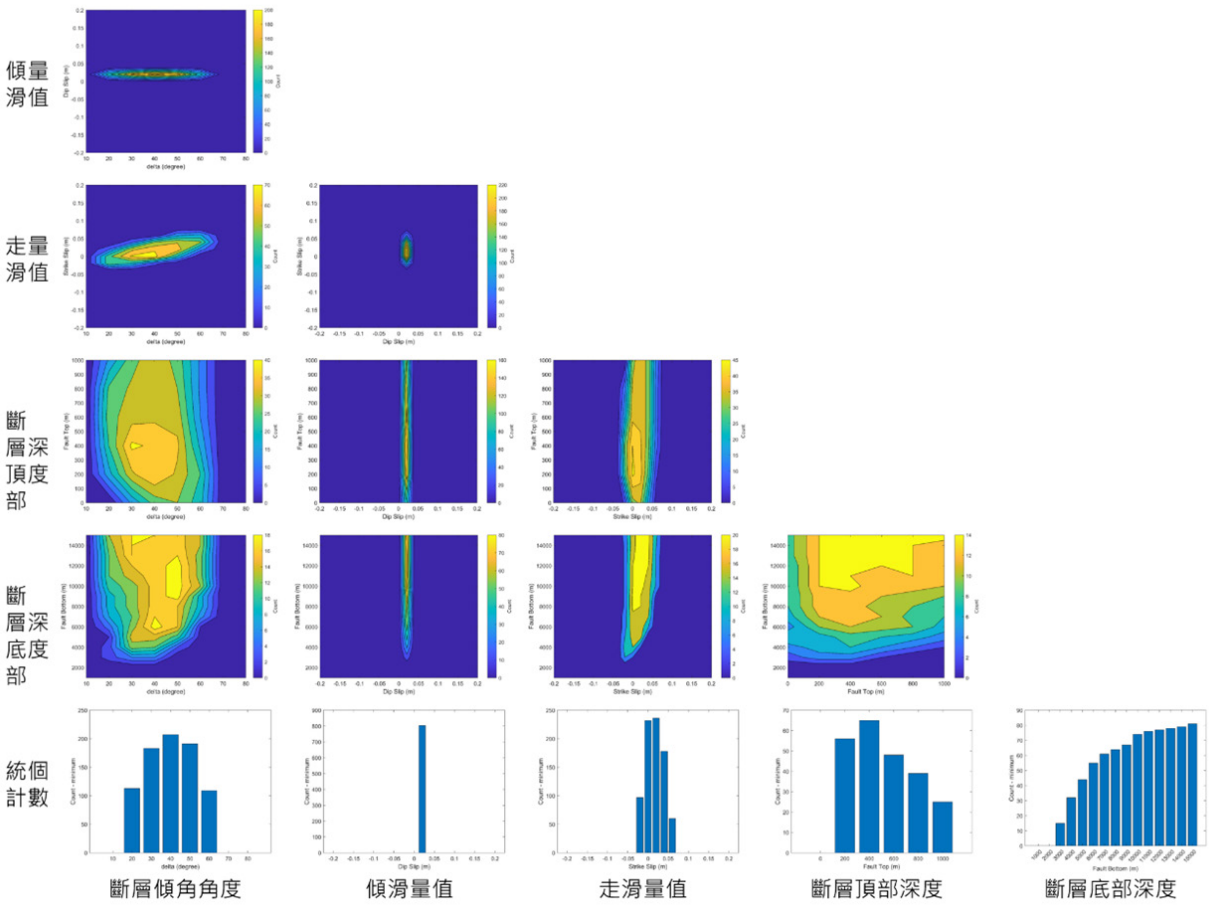


圖7-5：RMSE小於0.0035，所有參數的個數分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計個數，而顏色與等值線表示統計個數。

Figure 7-5 : Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.0035.

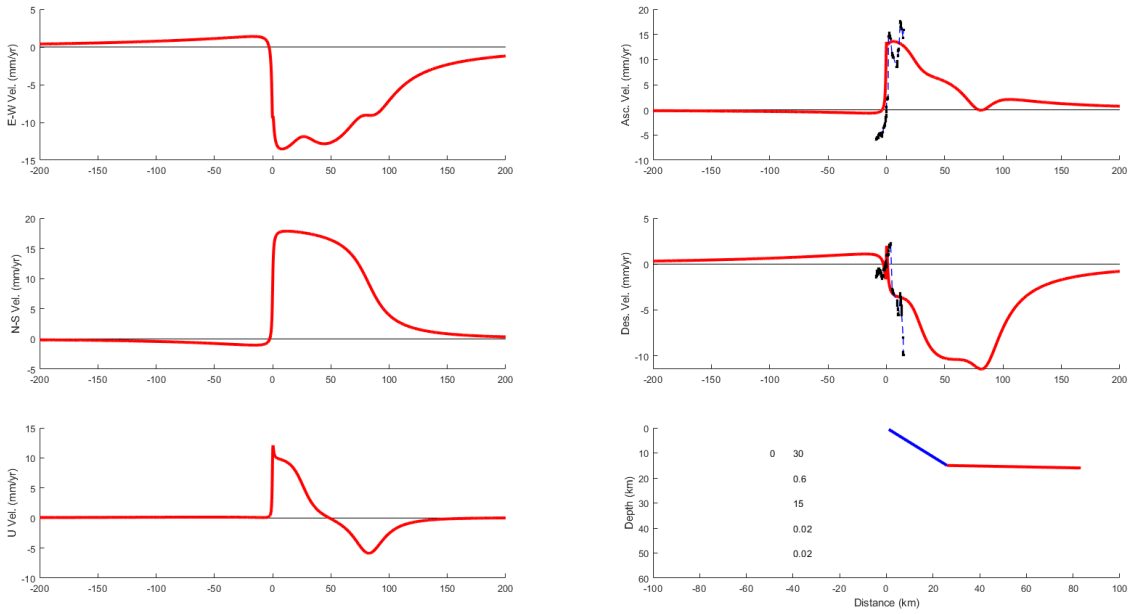


圖7-6：六甲斷層剖面LCA1，利用升降軌之資料，計算RMSE最小之擬合結果。右下圖數字由上到下為：斷層傾角為30°向東傾、斷層頂部為0.6 km、斷層底部為15km、dip slip為0.02 m/yr、strike slip為0.02 m/yr。

Figure 7-20 : Best-fit results of the Liuchia Fault in profile LCA1 with both ascending and descending orbits. Numbers present in the lower right inset are dip angle: 30° to esat, fault top: 0.6 km, fault bottom: 15 km, dip slip: 0.02 m/yr, strike slip: 0.02 m/yr.

前人的地表調查及鑽探研究認為六甲斷層在近地表處為一向東傾30度的逆衝斷層帶左移分量，但可能尚未穿出地表（楊志成等，2005；陳文山等，2006)；1999-2006間的GPS資料則顯示此斷層為逆移帶右移分量(饒瑞鈞等，2006 ）。我們的模擬結果相當吻合東傾30度的斷層幾合，斷層頂部雖接近地表，可能尚未接觸地面。而在斷層的運動方向上，逆衝及左移分量皆有產出合理的擬合值。

7-3 木屐寮斷層模擬結果

木屐寮斷層(MCL)模擬結果，將RMSE小於0.003的成果顯示於圖7-7，為傾角、傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 走滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 走滑、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、走滑 - 斷層頂部、走滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計圖。

MCL透過升降軌的資料來做二維模擬，而最佳擬合結果顯示於圖7-8，看來是高角度的斷層幾何　，由圖中可以看出，傾角集中在60~70度上，傾滑集中於0.02 m/yr，走滑分布於 0~0.04 m/yr)，斷層頂部應該非常靠近地表。

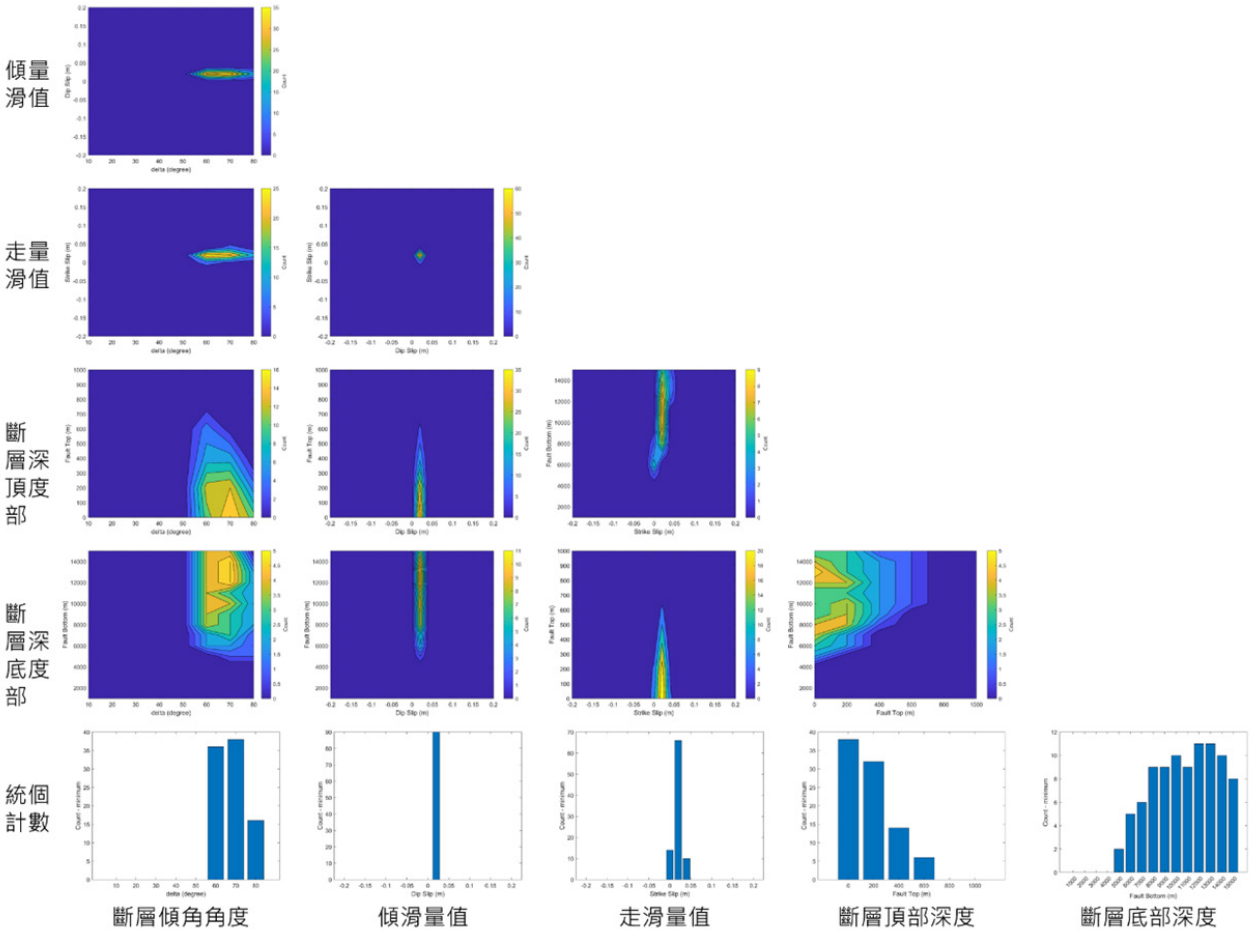


圖7-7：RMSE小於0.003，所有參數的個數分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計個數，而顏色與等值線表示統計個數。

Figure 7-7 : Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.003.

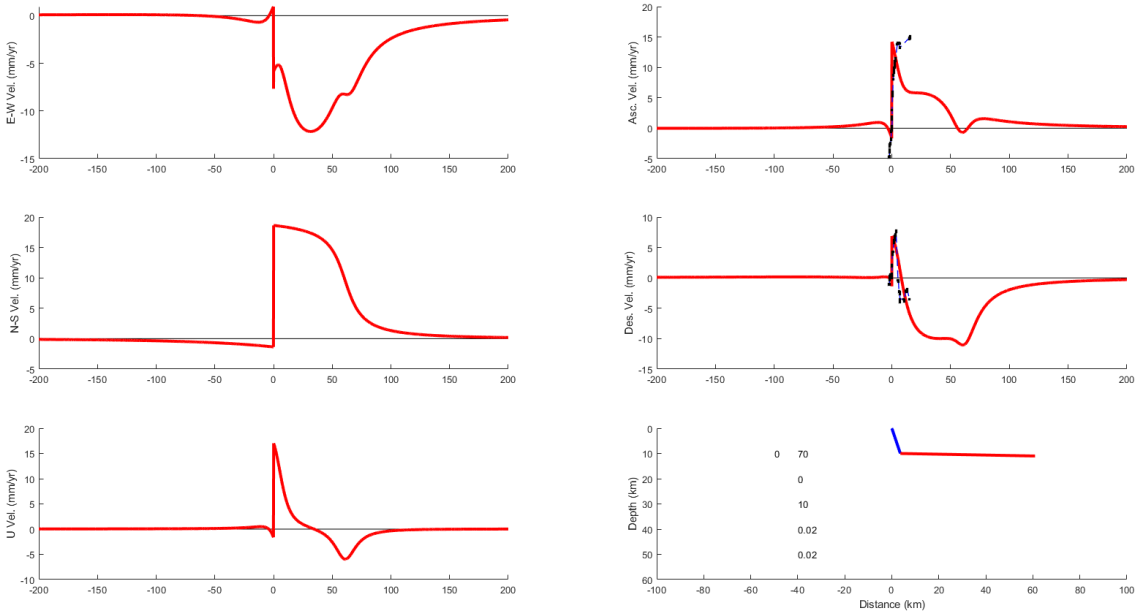


圖7-8：木屐寮斷層剖面最佳擬合結果。斷層傾角(°)為70、斷層頂部為0km、斷層底部為10 km、dip slip(m/yr)為0.02、strike slip(m/yr)也為0.02。

Figure 7-8 : Best-fit results of the Muchiliao Fault. Numbers present in the lower right inset are dip angle: 70° to esat, fault top: 0 km, fault bottom: 10 km, dip slip: 0.02 m/yr, strike slip: 0.02 m/yr.

根據前人研究 (劉彥求等，2007) ，木屐寮斷層可能尚為一盲斷層，GPS 測量結果顯示2002 年以後木屐寮斷層兩側有明顯壓縮的逆移特性，而我們的擬合結果也觀察到木屐寮斷層的逆衝分量。較值得注意的是，擬合結果顯示斷層已經非常接近地表，且帶有左移的分量，未來可以持續觀察此區域的地表變形特性。

7-4 口宵里斷層模擬結果

口宵里斷層模擬結果，將RMSE小於0.004的成果顯示於圖7-9，為傾角、傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部、傾角 - 傾滑、傾角 - 走滑、傾角 - 斷層頂部、傾角 - 斷層底部、傾滑 - 走滑、傾滑 - 斷層頂部、傾滑 - 斷層底部、走滑 - 斷層頂部、走滑 - 斷層底部、斷層頂部 - 底部的統計圖)。

而最佳擬合結果顯示於圖7-10，透過升降軌的資料來做做二維模擬，呈現口宵里斷層為向西傾，角度較緩的幾何型態，由圖中可以看出，傾角集中在向西的小角度上，傾滑集中於-0.02　m/yr，並相較於走滑較小(-0.04~-0.06 m/yr)，斷層頂部應該靠近地表(200m)。

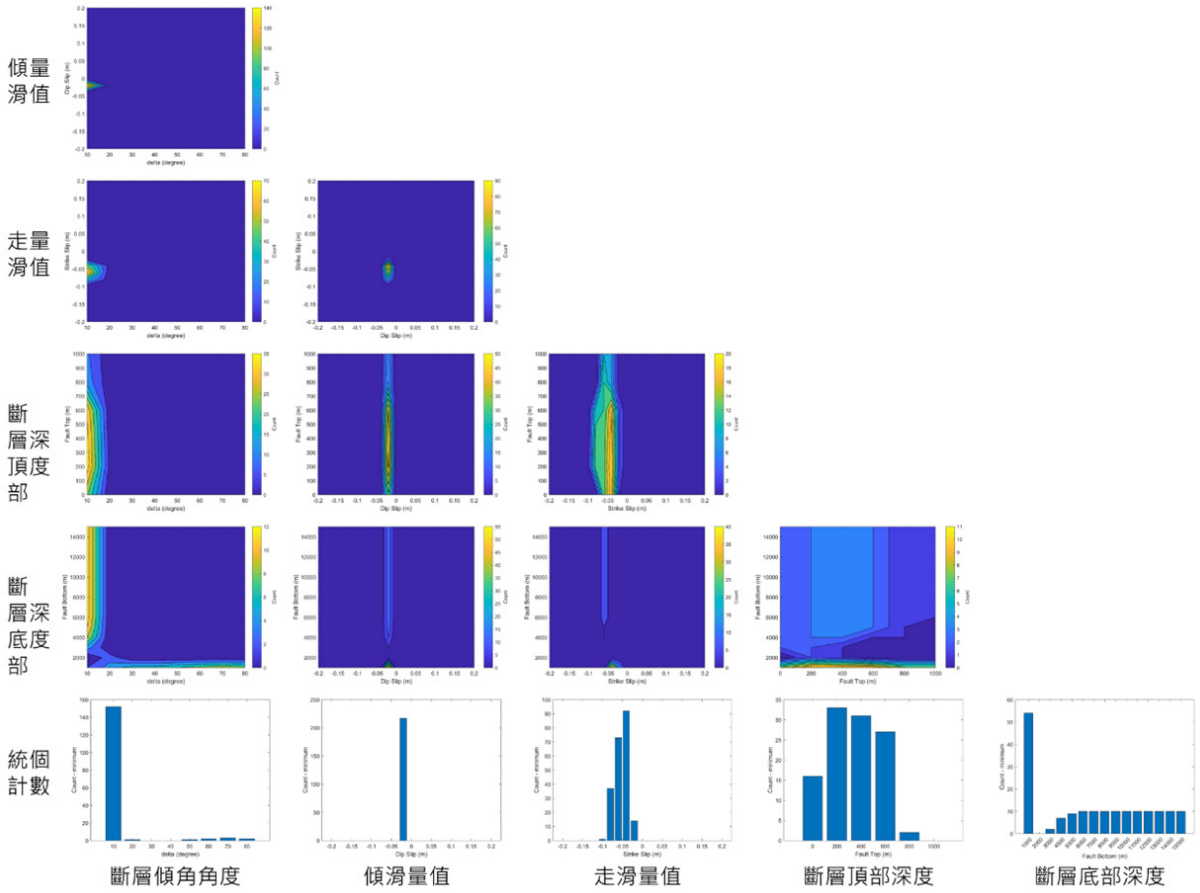


圖7-9：RMSE小於0.004，所有參數的個數分布圖，X軸依序為角、傾滑、走滑、斷層頂部與斷層底部，Y軸依序為傾滑、走滑、斷層頂部、斷層底部與統計個數，而顏色與等值線表示統計個數。

Figure 7-9 : Distribution of estimated Dip Angle, Dip Slip, Strike Slip, Fault Top and Fault Bottom with RMSE lower than 0.004.

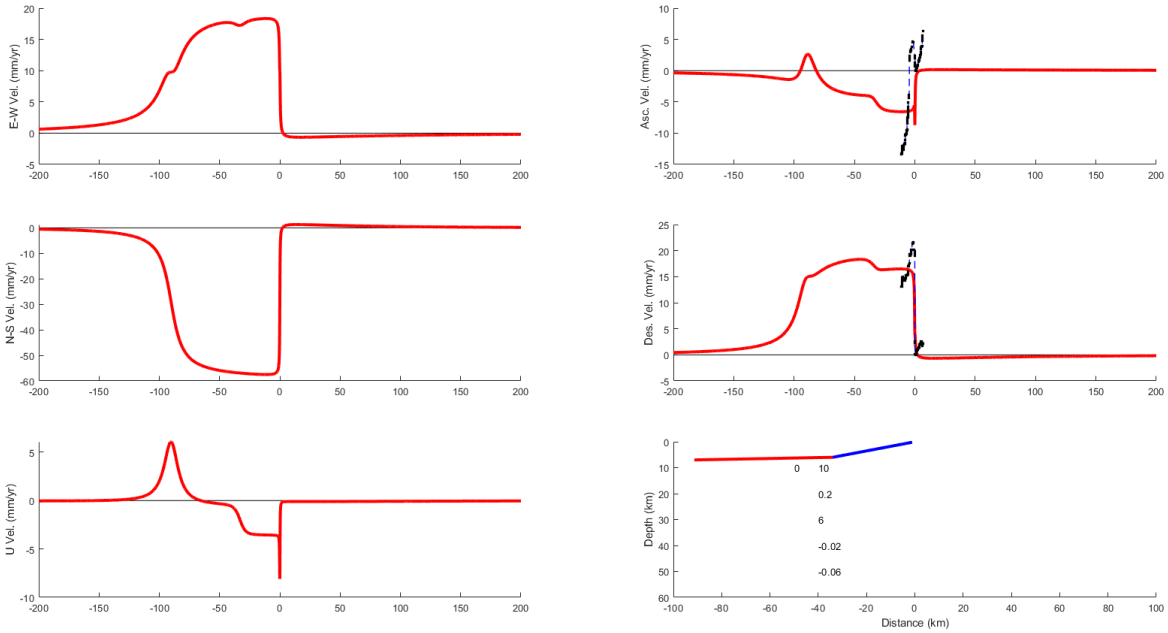


圖7-10：口宵里斷層剖面KSL2，利用升降軌之資料，計算RMSE最小之擬合結果。 數字由上到下為：斷層傾角為10°向西傾、斷層頂部為0.2 km、斷層底部為6km、dip slip為-0.02 m/yr、strike slip為-0.06 m/yr。

Figure 7-10 : Best-fit results of the Kouhsiaoli Fault in profile KSL2 with both ascending and descending orbits. Numbers present in the lower right inset are dip angle: 10° to west, fault top: 0.2 km, fault bottom: 6 km, dip slip: -0.02 m/yr, strike slip: -0.06 m/yr.

劉彥求等(2020)調查口宵里斷層，認為它是位於崙後(烏山頭)斷層東方，一個斷面西傾之背衝斷層，露頭顯示向西傾斜約40度 。而在黃旭燦等(2004)的地質剖面裡，口宵里斷層當時則繪製為一東傾的正斷層(第四章，Line 24-26)。由大地觀測可知，水平速度場跨越口宵里斷層–崙後（烏山頭）斷層約有1-3mm/yr的速度差；由抬升速率來看，以口宵里斷層–崙後（烏山頭）斷層沿線為核心則有約5-10mm/yr的抬升速度（景國恩等，2019）。

由於崙後與口宵里斷層的位置十分接近，加上可能有背衝斷層系統幾何型態的影響，使用單一斷層剖面模擬的方式也許無法完美呈現斷層的狀態，使得我們的擬合結果與前人文獻皆不盡相似。但如以西傾的擬合面來看，可以觀察到斷層的頂部及底部可能皆處於非常淺的位置，符合背衝斷層的架構，而在斷層傾角及及運動方向上則尚未能與地質資料有較好的匹配。

第八章 、討論

8-1 雷達結果與其他大地測量資料比較

8-1-1 雷達差分干涉資料與GNSS比對

本計畫的雷達結果和GNSS資料的比對成果明確顯示，當衛星影像的幅數逐漸增加時，兩種資料之間的差異就越小，代表增加衛星在時序上的觀測頻率有助於觀測品質的提升。以目前三個時間段的雷達速度場結果顯示，平原地區要獲得可以信賴的雷達成果，其圖幅需要有40張以上；如果要獲得山區可信賴的雷達成果，其圖幅數目可能需要有100張以上。

三個時間段裡，降軌道的RMSE表現都比升軌道的RMSE理想，但是並未反映在R^2的結果上。主要原因來自於R^2所代表的是資料本身分佈與線性迴歸線段之間的相關性，所以雖然降軌道的RMSE比較低，但是降軌道的LOS數值主要集中在-30至10mm/yr之間，比對結果的分佈趨勢呈現細長矩形。反之，升軌道的數值分佈較大從-30至30mm/yr之間，比對結果的分佈趨勢較類似線性的分佈，因此當兩個軌道的觀測結果都與GNSS非常相似時，升軌道的R^2數值可能會更高，如2018-2021年的成果（表3-5和表3-8）。

雖然GNSS移動站本身的測量精準度比連續站稍差，但是GNSS的移動站彌補了連續站在空間上的密度，同時也增加了與雷達結果比對的統計數量，讓統計更具意義。因此，加入移動站的GNSS資料和PSI的比對成果即使造成了RMSE的增加，但是兩種資料的線性回歸斜率數值也有所提升，代表PSI在空間上的變形趨勢更符合GNSS所量測到的地表變形。

8-1-2 雷達差分干涉資料與水準測線的比對

雷達的LOS結果是將地表三維的總位移向量，投影成衛星視角方向的一維遠近資訊，因此直接比對這兩種資料時，將會需要考慮

地表本身的水平活動特性，例如：善化至關廟測線的新化斷層南北兩側的差異以及安平至龍崎測線的後甲里斷層東西兩側的差異。

8-1-2-1 善化至關廟測線

從水準測量的結果來看，整體的垂直變化量都在正負五個mm/yr之間，但是從GNSS資料可以發現（圖5-3），跨過新化斷層兩側，有顯著的東西分量差異，新化斷層以北是往東，新化斷層以南是往西，因此本條測線以斷層北側的GS29作為基準點時，代表南側的位移在升軌道的視角中，會朝衛星視角接近，在降軌道中則是會遠離衛星視角。

8-1-2-2 安平至龍崎測線

從GNSS資料可以發現後甲里斷層的西側相對於東側具有比較大的垂直，而西側相對於東側具有比較大的向西分量（圖5-3和圖5-4）。因此，從升軌道的視角來看，這兩側的分量都會朝向衛星視角靠近，因此差異較低，反之，從降軌道的視角來看，西側會朝向衛星視角靠近，東側則會遠離衛星視角，因此兩側的差異就會比較顯著。另外，靠近側線最西邊海岸地區的10mm/yr差異值，由於在兩個軌道都顯示遠離的結果，因此可以認定地表是向下移動，但是在水準測量的結果裡沒有相互對應，可能是有局部下陷的狀況發生，未來需要有更精細的現場測量資料用以相互驗證。

8-2 雷達影像成果

8-2-1 各時段跨斷層的剖面比較

由於雷達計算的結果是相對的位移變化量，因此本節在對比各個時間段剖面的變化時，主要著重在比較斷層兩側的速率差異，以下列舉四個斷層：木屐寮斷層、六甲斷層、口宵里斷層以及後甲里斷層，探討升降軌道的LOS在三個時期的差異與斷層可能的活動特性。

8-2-1-1 木屐寮斷層

升軌道的LOS顯示，木屐寮斷層的西側自2016-2018時段開始，比東側多約10mm/yr的遠離差異量。降軌道的LOS則是在2018-2021時段開始，西側比東側多7mm/yr的遠離差異。總合兩個軌道的觀測成果，木屐寮斷層的西側可能在2016-2018年間具有向東和向下的活動特性，到了2018-2021年轉為以向下的活動特性為主。

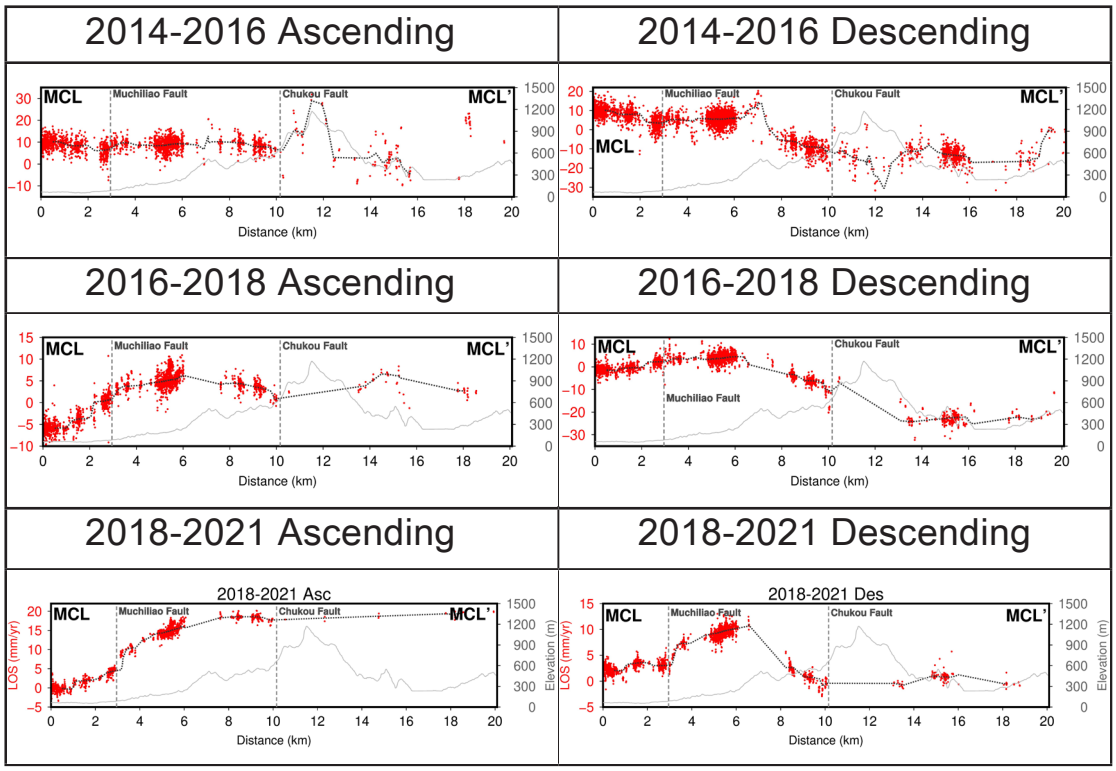


圖8-1：木屐寮斷層各時段剖面的比較結果。

Figure 8-1: The LOS velocity for both orbits in three time periods and the profiles across the Muchiliao Fault.

8-2-1-2 六甲斷層

升軌道的LOS顯示，在三個時段裡，六甲斷層的兩側都維持相近的差異，在LCA1剖面裡大約是5-7mm/yr，在LCA2剖面裡大約是5mm/yr。在三個時段的降軌道LOS結果中，都顯示LCA1和LCA2的斷層兩側LOS差異皆少於3mm/yr。總合兩個軌道的觀測成果，六甲斷層在本計畫的觀測時間裡是維持穩定的，斷層西側相對於斷層東側具有較多向東和向下的活動特性。

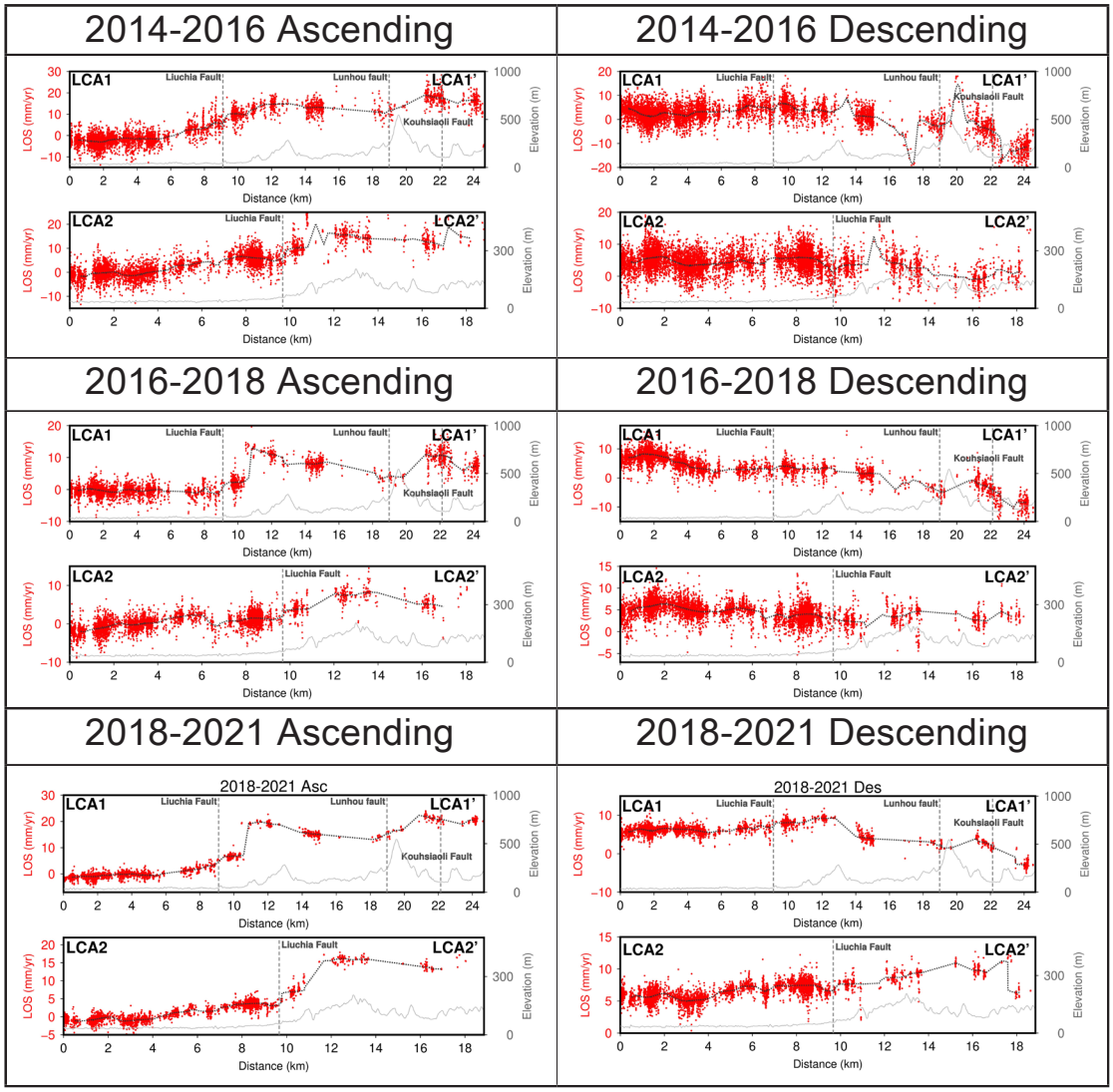


圖8-2：六甲斷層各時段剖面的比較結果。

Figure 8-2: The LOS velocity for both orbits in three time periods and the profiles across the Liuchia Fault.

8-2-1-3 口宵里斷層

升軌道的LOS顯示，在三個時段裡，口宵里斷層的兩側都維持相近的差異，在KSL1剖面裡大約是5mm/yr，在KSL2和KSL3剖面裡大約都是4mm/yr。降軌道的LOS顯示，KSL1和KSL2剖面裡的斷層兩側，在2018-2021的差異變化量都比從前兩個時段高，在KSL1是從4-5mm/yr增加到約10mm/yr，而KSL2則是從10mm/yr增加至20mm/yr，KSL3剖面則是在三個時段裡，差異變化不顯著。總合兩個軌道的觀測成果，口宵里斷層在前兩個時段是比較穩定的狀態，

但是到了第三個時段，斷層北段的活動性大於南段，而且斷層北段東側的地表活動特性為向西與向下移動。

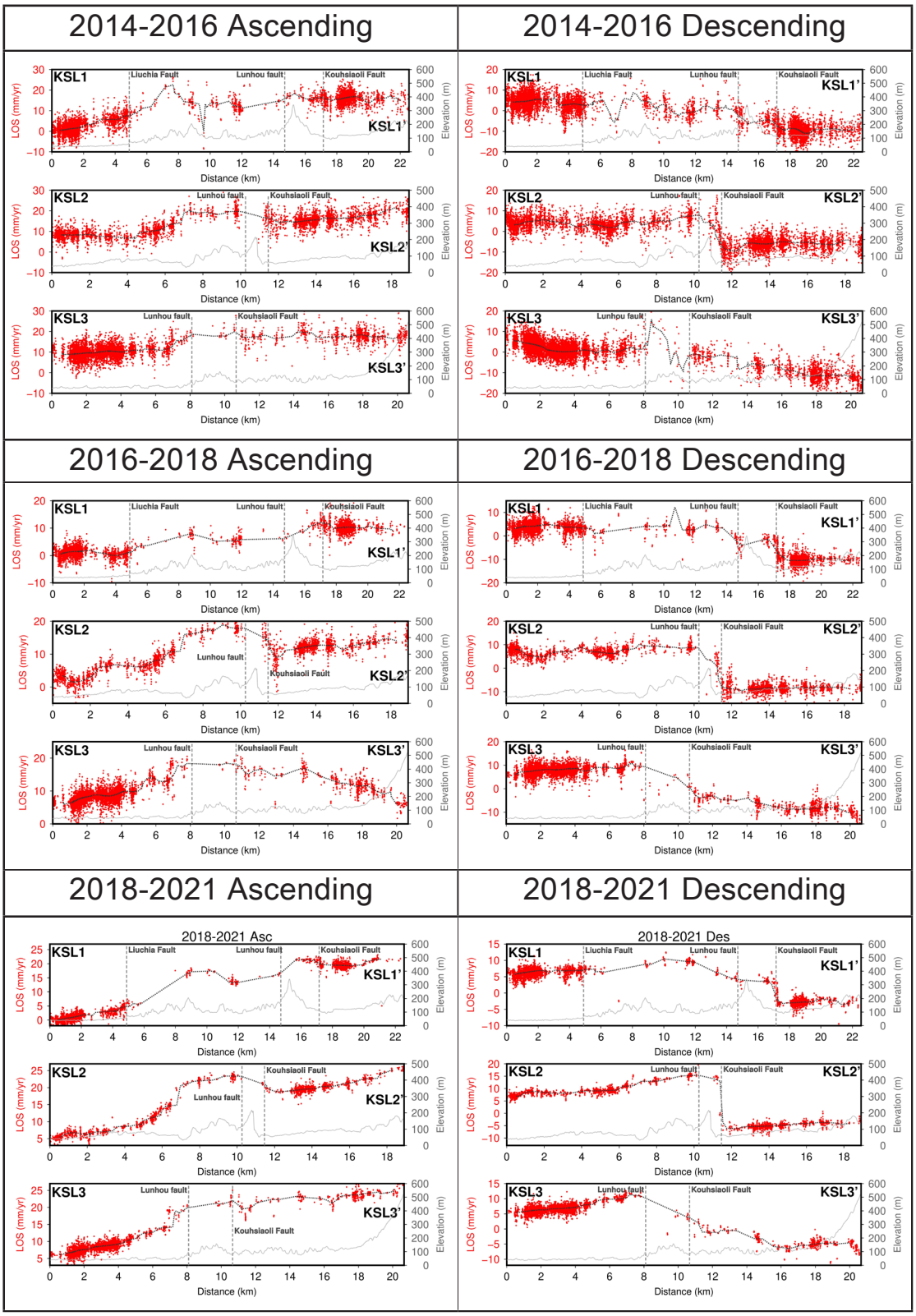


圖8-3：口宵里斷層各時段剖面的比較結果。

Figure 8-3: The LOS velocity for both orbits in three time periods and the profiles across the Kouhsiaoli Fault.

8-2-1-4 後甲里斷層

升軌道的LOS顯示，HCL1的斷層兩側在2014-2016的速率差異少於3mm/yr，之後在2016-2018的速率差異增至約8mm/yr，到了2018-2021的速率差異降為5mm/yr。降軌道的LOS顯示，HCL1的斷層兩側在在2014-2016的速率差異為5mm/yr，之後在2016-2018的速率差異增至12mm/yr，到了2018-2021的速率差異降為10mm/yr。總合兩個軌道的觀測成果，後甲里斷層的東側在2016-2018年開始活躍，主要的運動方向為往西和往下，這可能與美濃地震的震後地表變形有關，但是在2018-2021年時，斷層兩側的位移量差異則開始減少，可能代表震後地表變形逐漸轉換成間震的變形行為。

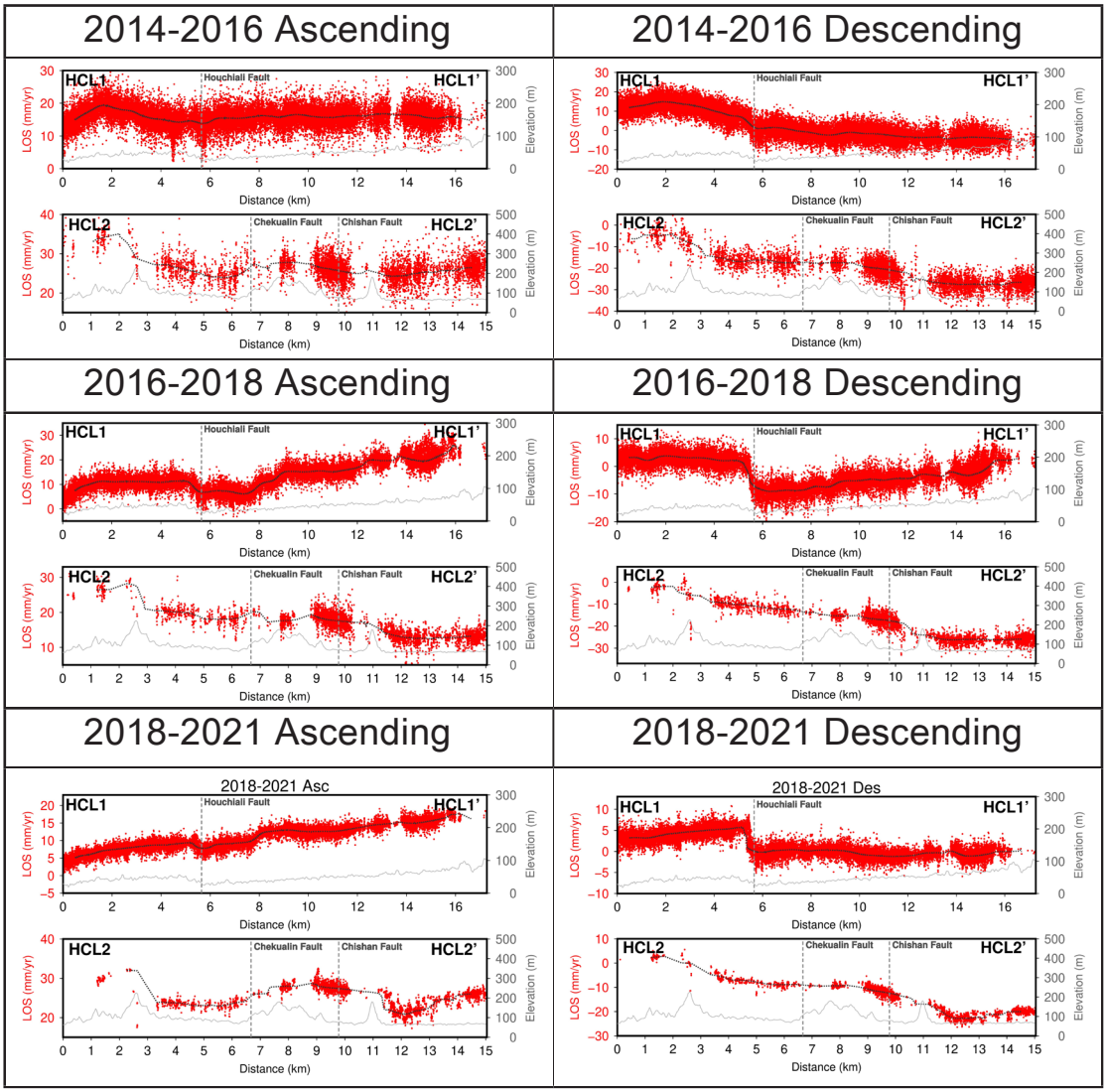


圖8-4：後甲里斷層各時段剖面的比較結果。

Figure 8-4: The LOS velocity for both orbits in three time periods and the profiles across the Houchiali Fault.

8-2-2 地質剖面比較

PSI與同區域之地下地質剖面對比可以對地表變形提出可能的構造原因。 不過，一方面是有資料發表年代的差異，一方面是PSI資料密度極高而地下地質剖面則需把附近所有資料考慮進去而形成地下地質模型，這兩種資料在比較上有一些先天的限制與困難。 這種比較為正確方向，但是執行上可能需要慢慢求進步。

以22號剖面為例，主要變化在地調所公布之木屐寮斷層與觸口斷層之間。在地下剖面上同一區域則顯示南寮背斜與崙後斷層。PSI資料除了顯示該區域木屐寮斷層可能的活動性以外，也呈現了與「南寮背斜」可能可以造成的變形類似的地表變形。是否是由南寮背斜或是其他作用造成這一區的變化則值得進一步研究。

在23、24號剖面中，都可以看到六甲斷層以及其東側背斜可能造成的地表變形（六重溪背斜、牛山背斜）;在28號剖面中，除了後甲里斷層之外，也可以看到車瓜林斷層以及車瓜林斷層以西在龍船附近的地表變形。

綜合比較結果，地下地質資料可以提供地表變形資訊的機制解釋，從另一方面想，高解析度、高精度的地表變形資料也可以用來修正地下地質剖面模型。

8-2-3 嘉南地區垂直速度場

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

圖5-3、5-4分別呈現了解算後東西向的速度場以及垂直向的速度場，在東西向速度場與GNSS東西向的RMSE小於 2mm/yr，而在

垂直向與GNSS同方向比較 RMSE約等於 4mm/yr，且兩者與GNSS的比較斜率都非常接近1，代表我們對這些資料有高信心程度。

東西向的資料看來（圖5-3），台灣西南部有一個普遍存在的東西向位移速度場，這與大多數西南部的構造線約略平行，這個趨勢同時存在GNSS測站的東西向資料中（菱形點）。

垂直方向的速度場（圖5-4）亦提供非常豐富的資訊。在梅山斷層西北側，有相對S103測站下陷達30mm/yr的區域，此區屬於雲林地層下陷區。在梅山斷層西南到六甲斷層以西的平原區，大致上與S103測站類似。然而在木屐寮、六甲斷層以東，崙後、觸口斷層以西的區域則有相對S103測站抬升達20mm/yr的條狀帶，這個條帶在觸口、崙後斷層以東漸次降低到大約在0~10mm/yr之間。左鎮斷層以南也有類似南北向較高抬升速率的條帶。

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

8-2-4 小基線雷達差分干涉測試

本計畫中針對2014-2016年18幅Sentinel-1A降軌影像測試小基線雷達差分干涉（Small Baseline Subset Radar Interferometry, SBAS）方法（第六章）。 此測試的目的是因為 Sentinel-1在台灣拍攝的過程一開始拍攝影像時間較不固定，再加上2016年二月的美濃地震在地表造成顯著的同震變形，所以在規劃地表變形調查時需要以地震前後做為分界，因此在2014-2106年的降軌影像僅有18幅，造成靠近頭尾時間段的位移量約制不足。此外，因為傳統PSI作法須在尋找一主影像後，對所有副影像連結，因此會引入由於時間基線、空間基線較大而造成的各種誤差。為了降低這些源自於資料限制的誤差，我們進行SBAS方法的運算，測試是否可以有效降低誤差。

SBAS方法選擇時間、空間基線較小的影像對形成干涉圖，將這些內在誤差小的干涉圖綜合運算而取得各時間段的位移，進而得到時間序列與平均速率。 然而，本次測試結果發現測試區域之西北區塊與PSI結果有相當大的差異（圖6-1），而對比於圖3-4結果，可

以看出木屐寮斷層北側、觸口斷層西側在該時段的變形並沒有特別快速，所以在目前的設定中，SBAS方法暫時不能解決此研究區域早期雷達差分干涉與GNSS結果對比不佳的問題。　不過SBAS方法在學理上可以比PSI方法更少誤差，因此仍然需要由小規模比較來持續測試。

8-3 斷層錯位模擬

我們利用了Okada model (Okada, 1985; Okada, 1992) 建立斷層錯位模型，並且利用升降軌資料與模擬資料進行擬合，將RMSE較小的參數組合挑出來檢視。目的在討論是否能用一個簡單的斷層幾何、以及簡單的滑動行為來解釋觀察到的地表變形。在結果中，木屐寮斷層與六甲斷層透過升軌與降軌資料的約制達到收斂，也就是說在五項參數及31萬多種組合中，會有少數幾種參數是殘差極低的狀況，代表這些參數組合可能與木屐寮、六甲斷層的實際幾何與滑動情形相近。然而在口宵里斷層上，我們的簡單幾何模型無法合理的收斂，不管斷層面往東傾斜或是往西傾斜都無法得到足夠收斂的參數。可能的原因是口宵里斷層與崙後斷層非常近，所以地表變形資訊可能同時包含這兩個斷層造成的影響，導致模型參數無法找到小殘差的組合。口宵里斷層的模型將需要更複雜的模型才能找到足以解釋地表變形的參數組合。

根據我們模擬的結果，木屐寮斷層為高角度向東傾的斷層，大約落在60~70度，dip slip 約落在 1cm/yr逆衝，strike slip 約在 1~2 cm/yr 左移。斷層頂部非常淺，可能在0~200m之間，也就是可能切穿地表，而斷層底部則大約落在12~13公里間。

六甲斷層以LCA1剖面資料來看，大約是傾角約40度，逆衝約2 cm/yr，帶著差不多等量的左移。頂部落在 400m，底部可以深至15km。

8-4 綜合討論

在本期計畫中，我們針對台灣西南部嘉南地區的11條斷層以及幾個科學園區、都會區觀測分析。我們將研究區域的影像分成三個時段，分別是 2014-2016，2016-2018，以及2018-2021三個時段，這三個時段區分的原因分別是美濃地震，以及雷達影像從12天的重返週期變成6天為主的重返週期。三個時段中，升降軌影像各自約在一二十幅、四五十幅、以及一百多幅。同時期同區域中大約各有一百多站的GNSS測站可供比對。

我們將解算的永久散射體雷達差分干涉速度與GNSS投影至雷達斜距方向對比，而對比的成果在2014-2016時段上不甚理想，斜率約0.5附近，R^2落在0.4附近，而RMSE則在 8~12 mm/yr之間。 也就是雷達與GNSS資料幾乎是1:2的比值。到2016-2018的資料，升軌資料斜率已經接近1，然而降軌資料斜率還是0.6，R^2都在0.6附近，誤差RMSE也在10 mm/yr附近。進到2018-2021的資料，整體資料狀態就非常理想，斜率都相當接近1，R^2也接近0.9，RMSE則低於4mm/yr。也就是說2018-2021年的資料品質非常的好，在統計上幾乎跟GNSS沒有顯著的差異。加入了移動站的資訊檢測後，除了誤差微幅增加以外，趨勢大致相同。

與水準測量的比較，除了2014-2016的資料對比稍微有差異以外，2016-2018, 2018-2021的資料與水準測量資料非常類似，只有善化-關廟測線的升軌資料有所不同，我們還需要深入了解為什麼該測線在比對上會有這樣的差異。

我們萃取了既有地下地質剖面沿線的雷達資料做初步比對，地下地質資料的確提供地表變形現象的機制解釋，但另一方面，由於雷達資料解析了地表地形變化的細節，亦為地下地質資料提供了精確的驗證。未來建立地下地質模型時，在地表調查記錄之外，也可以將雷達資料一併考量。

由於2018-2021雷達資料的品質相當好，我們得以進一步利用升軌、降軌資料聯合解算成垂直、東西向位移。將我們的解算結果與GNSS比對，可以發現解算後的資料有相當高的可信度與相當低的誤差。透過這樣的解算，我們可以提供更直觀的地表變形資料供

未來使用。這些資料我們還需要設計方法將較高度內插部分遮蔽，以避免資料過度解釋。 此外，本年度也嘗試了小基線雷達差分干涉方法(SBAS)以改善早期(2014-2016)資料誤差過大的問題，但是目前在這個方法的實作過程中我們尚無法有效去除部分誤差，這部分參數的調整仍然需要持續調整改進。

在本期報告中的KSL2剖面（口宵里斷層）中，觀察到變形前緣比崙後斷層更為西側，該處與往北兩三公里的六甲斷層跡幾乎位置重疊，不管在2018-2021的升降軌速度場（圖4-6、圖4-7），或是解算的垂直速度場圖（圖5-4）都可以看到六甲斷層的變形似乎持續往南延伸，至少到左鎮斷層附近。

第九章 結論

在本期計畫中，我們利用歐洲太空總署Sentinel-1雷達衛星解算台灣西南部的地表變形，並且與中央地調所同時期的GNSS以及水準測量結果比較，以核實雷達解算資料的品質。我們發現2018-2021年之間的資料品質相當好，與GNSS比較斜率可以達到非常接近1，R^2約在0.9附近，而RMSE則大概在4　mm/yr。這樣的資料品質可以讓我們對於研究區域的構造活動程度做高空間解析度的觀察。

除了計算出雷達斜距方向的位移與速率以外，經過適當地假設，我們將這些資料解算成垂直與水平（東西）向的速度場，這樣的解算雖然引入了一些雜訊，也容易因為內插而造成過度解讀，但是這樣類型的資料呈現可以使視覺上的解讀更加直覺並易於運用。

對於研究區域中地調所公告的斷層，我們可以分別觀察到從靜止到公分等級，不同程度的斷層滑移速率，而在同一條斷層也隨著位置不同而有不同滑移速率。此外，有一些斷層的滑移可在公告長度之外觀察到（例如六甲斷層，見綜合討論），需要持續關注。

Chapter 9 : Conclusions

In this project, Sentinel-1 radar images are used to observe the surface deformation in southwest Taiwan. Contemporary GNSS data of the same area are also used to compare and verify the quality of the radar data. In the 2018-2021 dataset, we find our data has a slope of 1 against GNSS data, with R^2 close to 0.9, and RMSE near 4 mm/yr. Our radar results prove to be unprecedented high quality and this kind of high spatial density data can be used to uncover the neotectonic activities in SW Taiwan.

In addition to the slant range displacement and velocity, with some simple assumptions, we also calculate the east-west and vertical velocity fields from the radar data. Although this approach introduces some noises and could be overexploited in the highly interpolated suburbs and mountains, this type of data is more intuitive to use.

In our data, we observe ranges of velocity along the active faults in the region, some activities are observed beyond the listed faults. Further researches are needed to understand these activities.

參考文獻

中國石油公司（1986）十萬分之一地質圖 - 嘉義幅。中國石油公司臺探總處出版。

中國石油公司（1989）十萬分之一地質圖 - 台南幅。中國石油公司臺探總處出版。

石再添、鄧國雄、張瑞津、石慶得、楊貴三（1986）台灣活斷層的地形學研究。師大地理研究報告，第12 期，1-44 頁。

石瑞銓、王乾盈、謝昭輝（1998）雲嘉南地區活動斷層震測調查。經濟部中央地質調查所活動斷層地球物理探勘計畫87　年度報告，共130 頁。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山（2003）地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 地球物理探勘計畫（2/5）。經濟部中央地質調查所報告92-8號，共218頁。.

何信昌、謝凱旋、高銘健、陳華玟（2005）新化圖幅與說明書，五萬分之一台灣地質圖第50 號。經濟部中央地質調查所出版。

吉田要（1931）所謂觸口山層。臺灣地學記事，第2　卷，第2　號，第27~29 頁。

李錫堤、鄭錦桐、紀立民、廖啟雯、廖卿妃（2000）槽溝開挖探查成果簡介。第三屆台灣活斷層調查研討會資料。

李錫堤（2002）後甲里斷層槽溝探查工作成果報告。國立中央大學應用地質研究所印製，共40頁。

林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正（2000a）台灣活動斷層概論 - 五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明書，第二版。經濟部中央地質調查所特刊，第13 號，共122 頁。

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

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

吳樂群（1999）嘉南平原沉積物與沉積環境分析及地層對比研究。中央地質調查所水文地質調查88 年報告，共119 頁。

侯進雄、王菁穗、費立沅（2002）臺灣西南部地區地殼變形監測。第21 屆測量學術及應用研討會論文集，687~694 頁。

侯進雄、陳于高、林啟文、陳建良、胡植慶、王菁穗（2003）臺灣嘉南地區近期地殼變形之初步研究。經濟部中央地質調查所特刊，第14 號，129~136 頁。

許晉耀（2003）九芎坑斷層之研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共90 頁。

黃文正、陳建志、波玫琳、顏一勤（2020）活動斷層特性精細調查（2/4）成果報告書，共 119 頁。

黃明哲、王文龍、潘國樑、顏滄波（1985）活動斷層之航照地研究（二）：嘉義梅山地震斷層研究。行政院國家科學委員會防災科技研究報告73-29 號。

黃旭燦、楊耿明、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏 (2004)斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究:台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)- 台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。經濟部中央地質調查所研究報告93-13號，共72頁。

黃鑑水、張憲卿、劉桓吉（1994）台灣南部觸口斷層地質調查與探勘。經濟部中央地質調查所彙刊，第九號，51-76 頁。

陳文山、李錫堤、陳于高（2002）地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究計畫（1/5）（上冊）。經濟部中央地質調查所研究報告，共 107 頁。

陳文山、楊志成、顏一勤、游能悌、陳勇全（2003a）地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究計畫（2/5）—七、崙後斷層條帶地質圖。經濟部中央地質調查所研究報告92-7號，共24頁。

陳文山、楊志成、石瑞銓、楊小青、顏一勤、陳于高、張徽正、林偉雄、李元希、石同生、盧詩丁（2003b）九芎坑的斷層特性與活動性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第14號，113-128 頁。

陳文山、楊志成、楊小青、吳樂群、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄、李元希、石同生、盧詩丁（2004a）從構造地形探討嘉南地區活動構造及構造分區。經濟部中央地質調查所彙刊，第17號，第53-77 頁。

陳文山、李錫堤、石瑞銓、楊小青、楊志成、顏一勤、劉力豪、張徽正、侯進雄（2004b）新化斷層的構造特性與古地震研究。經濟部中央地質調查所特刊，第15 號，111 ~119頁。

陳文山、陳于高、楊小青（2006）地震地質調查及活動斷層資料庫建置 - 槽溝開挖與古地震研究計畫（5/5）。經濟部中央地質調查所研究報告95-7 號。

陳柏村、陳建良、顏一勤（2020）台灣西南部梅山斷層的構造特性研究，經濟部中央地質調查所特刊，第35 號，47~67頁。

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

張麗旭、周敏、陳培源（1947）民國35 年12 月5 日台南之地震。臺灣省地質調查所彙刊，第1 號，11~18 頁。

景國恩、胡植慶、陳宏宇、張午龍、鄭凱謙、莊昀叡（2019）斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（3/4）。經濟部中央地質調查所報告，計畫編號：108-5226904000-05-01，共269頁。

楊志成、顏一勤、宋時驊、黃能偉、陳勇全、陳文山、陳于高、吳樂群、張徽正、侯進雄、林啟文（2005）六甲斷層近萬年來滑移速率之探討。經濟部中央地質調查所特刊，第16 號，1~16 頁。

經濟部中央地質調查所（1999a）九二一地震車籠埔斷層沿線地表破裂位置圖，比例尺二萬五千分之一。經濟部中央地質調查所出版。

經濟部中央地質調查所（1999b）九二一地震地質調查報告。經濟部中央地質調查所出版。

劉彥求、林燕慧、李明書、林啟文（2003）臺灣西南部石牛溪地區九芎坑斷層的構造特性。經濟部中央地質調查所特刊，第14號，101~112 頁。

劉彥求、林燕慧、盧詩丁、石同生、林偉雄、林啟文(2007)臺灣西南部的活動斷層：二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第17號，共141頁。

劉彥求、許晉瑋、林啓文(2020)口宵里斷層之構造特性與活動調查。經濟部中央地質調查所特刊，第三十五號，第29-46頁。

劉桓吉、李錦發（1998）雲林圖幅及說明書，五萬分之一臺灣地質圖，第38 號。經濟部中央地質調查所，共47 頁。

謝昭輝（1989）梅山斷層的震波測勘研究（II）。行政院國家科學委員會防災科技研究報告77-65 號，共64 頁。

謝昭輝、辛在勤（1988）梅山斷層的震波測勘研究（I）。行政院國家科學委員會防災科技研究報告76-47 號，共24 頁。

董德輝（1987）臺灣西南部梅山活動斷層的活週期及機制。臺灣大學地質學研究所碩士論文，65 頁。

饒瑞鈞、胡植慶、洪日豪、余致義（2005）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（4/5）。經濟部中央地質調查所研究報告94-10號，共147頁。

饒瑞鈞、胡植慶、洪日豪、余致義（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。

Chang, S.L. (1967) Subsurface geologic study of the Tungzechiao and Chunlun structures, Chiayi, Taiwan, China: Petrol. Geol. Taiwan, no.5, 1-21.

Hung, J.H., Wiltschko, D.V., Lin, H.C., Hickman, J.B., Fang, P. and Bock, Y. (1999) Structure and motion of the southwestern Taiwan fold and thrust belt: TAO, Vol.10, no.3, 543-568.

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.

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.

Omori, F. (1907a) Earthquake of the Chiayi area, Taiwan, 1906: Introduction of Earthquake, 103-147. (In Japanese)

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

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

Sun, S.C. (1964) Photogeologic study of the Tainan-Kaohsiung Coastal plain area, Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.3, 39-51.

Wang, S. (1976) ERTS-1 satellite imagery and its application in regional geologic study of southwestern Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.13, 37-57.

Wang, S. (1976) ERTS-1 satellite imagery and its application in regional geologic study of southwestern Taiwan: Petrol. Geol. Taiwan, no.13, 37-57.

Yu, S.B. and Chen, H.Y. (1998) Strain accumulation in southwestern Taiwan: TAO, Vol.9, no.1,31-50.

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.

教育訓練

為履行本案合約規範之交付項目，本案於民國111年11月04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「雷達衛星獲取地表變形之過程與說明」與「同震同調性差異分析與處理」教育訓練。內容包含：

A. 雷達衛星獲取地表變形之過程與說明：

I. 雷達原理簡介

II. 簡介利用雷達衛星相關技術觀測臺灣西南部長期地表變形流程

III. 簡介利用雷達衛星相關技術觀測20220918池上地震同震變形流程

IV. 成果說明

B. 同震同調性差異分析與處理：

I. 同調性原理說明

II. 應用雷達影像判釋土壤液化區域

III. 應用雷達影像判釋同震引發的地震災害

IV. 20220918地震災害與野外成果

以下為教育訓練當日之照片及課程當日參與人員簽到表：





111 年「應用合成孔徑雷達差分干涉技術觀測地表變形（2/2）」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	111 年 11 月 4 日(星期五)10 時	地點	本所地質研究館 2 樓第 2 會議室
出　席　者　簽　名			

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
1. 報告書沒有參考文獻，但文內引用處有標註，請於期末報告書改進；圖與圖說明應在同一頁，方便閱讀；各斷層英文編號請與本所命名一致。	感謝委員建議，我們會在期末報告中改善。
2. 計畫目標有要求「利用合成孔徑雷達干涉技術製作保全對象地區之視衛星方向年平均變動量圖，納入本所GNSS移動站、GNSS連續站及精密水準測量結果，以求得區域內地表連續變形資訊」，請於期末報告納入此部分內容。	感謝委員建議，我們會在期末報告中加入其他大地測量資料與雷達解算成果的比較。
3. 東西向水平速度場的結果，很有意思，也顯示了與主要斷層的關係，雖然在運動學上，受限於LOS視角，不容易做深入的解析；垂直速度場的結果更有意思，是否有季節性的差異？或是有其他可能性存在，值得執行團隊與地調所進一步進行科學探討。	高空間解析度與高精度的雷達資料可以提供其他測量無法觀察到的細微資訊，與其他測量資料有互補的作用。 本次期末報告中確實有利用計算出來的資料再算出垂直速度場。

4. 雷達LOS與GNSS連續站時間序列比對應分析，幾處不一致原因為何？予以描述提供地調所參考。垂直速度場解析除了去年度資料外，建議加入今年度嘉南地區之重要區域及目標活動斷層區域，以符合計畫規劃期程。	在期中報告中 LOS 與 GNSS 部分不一致的狀況主要是因為與 2014-2016 年度資料比對。 如我們所述，此段時間的影像數不足，不以足夠的約制雷達解算結果。 後期資料對比大部分時候都可以相當吻合。 我們確實已經將嘉南地區垂直速度場算出，並至於期末報告中。
5. 利用PSInSAR觀測地表變形在研究中只有針對地調所公布的活動斷層，是否有其他還未公布的活動斷層？若有新發現的疑似活動斷層是否在報告中提出？建議能多著墨提供地調所參考。	本次與地下地質對比時，有一些疑似摺皺構造表現。也有一些可能是斷層需要延伸之區域，主要在「斷層剖面」、「地質剖面」中提及。
6. 各斷層之升軌道影像的LOS平均速度場剖面圖顯示PSInSAR速度和地形剖面，以及斷層位置不盡吻合，應再說明之。	委員的觀察是一個相當複雜現象的組合造成，簡單來說有幾個可能原因（我們在期末報告個別論述時會提到），第一個是變形確實與斷層標示位置不同、第二個是在點位較少時候，萃取的點不在剖面上而是百公尺、數百公尺外，如果斷層不與剖面完全垂直，則會造成三維空間點位投影至二維剖面時候的漂移。通常剖面需要配合雷達速度場繪製於地圖上的資料配合觀看調查。

7. 建議選擇剖面時能與水準測量剖面、地調所地質圖剖面或是楊耿明等前人之研究產製平衡剖面等資料對比。	感謝委員建議，本次期末報告第三章中與水準資料對比的結果。另有一章節比對地質剖面圖以及地表變形資料。
8. 今年資料無法顯示幾條活動斷層的滑移作用，僅在木屐寮、六甲、口宵里斷層顯現出來，期末報告宜就此特徵多加討論解釋，並就區域資料之變化趨勢探討其區域地下地質構造活動意涵。	感謝委員提醒，本次除了各條斷層剖面敘述，我們也針對這三條斷層作斷層錯動模擬。另有一章節在比較地下地質與地表變形。

期中委員審查意見

期末審查意見	處理情形
(一) 綜合意見	
1. 在選取InSAR觀測時段上，為何選2014～2016？不是更長時段，例如2012～2016？考量為何？報告中討論2014-2016、2016-2018、2018-2021三個時段的資料，並說明幅數逐漸增加時，資料品質會提升，但有部分原因是因為當幅數增加時，outlier的影響會變小，比較好的資料分析方法應該是嘗試剔除outlier，而不是把不同品質的資料一起平均；另InSAR資料如何校正同震和震後的影響？前期的資料和GNSS差異大，是否為受地震或震後變形影響？	觀測時段的決定是以觀測區域以及資料面的現實考量。由於觀測地區為台南嘉義地區，在20160206發生了美濃地震，因此以該時段分隔，避免大量的同震位移造成長期速率大量改變。 而在2018年初，一方面因為是花蓮地震，另一方面則是因為 Sentinel-1 衛星影像由12天的再訪週期變成6天的再訪週期、再則因為2016~2018時段也足夠長，並且這樣的時間分段可與前一年地調所計畫高屏地區調查保持一致，因此我們選定這樣的時間分段。 另外，我們的處理方法中，從來不是把outlier挑掉，而是找出根本問題，在計算過程中多次嘗試避免主要問題產生。 InSAR資料對「同震」與「震後」變形的處理與水準測量類似，基本上在觀測時間段內的變形都會一併計算，因此時段選擇、仔細比對event可以避免加入許多假設與衍生問題。

2. 請說明GNSS和InSAR資料差異大的測站在2014-2016、2016-2018、2018-2021三個時段都是類似的嗎？	比對資料後可發現，有差異的測站並非在三個時段皆相似，而是隨各時段有不同的表現。整體來說，將GNSS與PSI觀測值差異大於10 mm/yr的測站列出比對，2014-2016與2016-2018兩時期GNSS觀測值與PSI觀測值差異較大，在升軌方向有18個測站在兩時期觀測值差異皆大於10 mm/yr，降軌方向有1個測站。Ascending與Descending皆無測站於三時期差異都大於10 mm/yr的情形。 以下詳細列出三個時段升降軌方向測站差異的細項： • 2014-2016時期與2016-2018時期，Ascending方向有18個測站差異大，Descending方向僅有一站差異大於10 mm/yr。 • 2014-2016時期與2018-2021時期，Ascending方向有1個測站差異大，Descending方向則無。 • 2016-2018時期與2018-2021時期，Ascending方向有2個測站差異大，Descending方向則無。

3. 在跨斷層速度剖面分析上，與GNSS/leveling資料成果的比較後，成果大致相符。建議進一步利用InSAR結果來分析判釋斷層跡地表位置在「面狀」上的分布？更能發揮InSAR的優勢？	感謝委員建議，這也是團隊會持續加強的目標。
4. 期末交付工作項目中之5.與斷層「方向」垂直之剖面，應為斷層「走向」。此些剖面若包含有二走向不同之剖面，請說明是否有視傾角（Apparent Dip）的修正問題？	我們在選擇剖面的時候，有盡量與斷層「走向」垂直，也許會有微小差異。 地質剖面則是根據前人研究之剖面位置。 這兩者的路線選擇純粹只影響觀測位置的資料，不會有地質上’apparent dip’類的幾何問題。
5. 請說明降軌道影像在應用上有何重要性？在升、降軌道的垂直變化似乎與斷層變動有關，是否表示南部地區斷層在震間時期有較大的潛移作用？	升軌、降軌其實都是觀測到同樣的地表變形，只是由於衛星軌道不同，視距方向的變形表現不太一樣。 本期結果，為了因應這樣的問題，有將升軌、降軌計算成垂直與東西向，品質不錯。 這樣的計算需要同時具有升軌、降軌的資料。

6. 有關各斷層的幾何參數是否使用「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估（2/2）」的參數？還是引用其他資料？請說明。	本計畫所使用之參數，是透過正演的方式，將參數組合後所模擬之地表位移與觀測資料比對，統計其均方根差之個數後呈現，因此並沒有先限制參數範圍。 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)1000~15000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0.02公尺，並往深度延伸1公里與角度為1的滑脫面，每個剖面總計搜尋筆數為317520（約31萬種參數組合）。
7. 建議在單位使用上應慎重。如平均水平縮短量，應為一長度單位（例17-23公厘），而非速率單位（例17-23公厘／年）。	感謝委員提醒，我們已將內文中所提之速率及量值作適當修正。
8. 建議將今年度協助利用DInSAR解析0323地震、0620地震與0918地震等相關成果與簡要說明等資訊放置於報告書附錄。	0323地震、0620地震與0918地震等相關成果已依據建議置於附錄中，請查照。

（二）分頁或分章節之建議	
1. P.14-17，1-4-2節已經說明本報告採用StaMPS和PSI分析技術，但1-4-3節馬上說明因影像時間太長，要採用SBAS方法，建議予以補充說明。	感謝委員提醒，我們已在1-4-3節加強說明為何在PSI技術之外另外又選擇了SBAS方法在2014-2016時段的下降軌道進行測試。
2. P.106 - 117第一時期（2014 - 2016年）的資料比對成果較差，請分析，說明原因為何？各比較圖的縱軸為LOS Velocity（視衛星方向速度）是否代表GNSS連續站及移動站有化算至此方向比較？若是如此，圖3 - 29之S103與G742應重疊，但圖上不是，原因為何？	2014-2016資料對比較差主要是因為雷達解算 unwrapping的時候因為影像較少、時間間隔不夠密集，因此在ps點較少處產生誤差。 所以跟山區的資料就有相當多的差異。 圖3-29的問題，感謝委員仔細檢查，我們發現在比對時有一些程序錯誤，現已修正到期末報告。
3. P.137，在KSL2與KSL3與北側KSL1 同樣在六甲斷層附近有明顯變化，是否暗示六甲斷層可以往南延伸？另外，東西向變化在梅山斷層與新化斷層兩側是否有明顯變化？	以雷達解析成果來看，六甲斷層往南確實仍有東西兩側的速度變化，值得特別注意。至於梅山斷層與新化斷層，目前的資料尚無顯示跨過斷層有明顯的速度差距。 我們在討論與結論部分將六甲斷層疑似往南延伸稍加闡述。

4. P.170-171，中路國小(GS79)與渡拔國小（KAWN）看不出二站在降軌方向較不符合的跡象？能否嘗試將比較予以統計化（或數值化）較客觀。	感謝委員建議，我們未來應該會以數值、統計方式與圖形並呈。
5. P.178-179，在東西、垂直方向的比對相當創新，建議將二種觀測結果分開繪圖並加入等值線再予以比較會更清楚。另外，是否加強垂直速度場解析成果的討論？（獲得成果是“面狀”資訊，應可補足GNSS／Leveling的不足，並可顯示InSAR分析的優勢與長處	感謝委員建議。 我們已經加上等值線、也將GNSS資料內插更新到期末報告。 然而GNSS資料內插，會有許多內插本身的問題，所以圖面上GNSS垂直速度內插與雷達計算垂直速度的圖看起來的差異可能比事實上的大。
6. P.186-211，圖7-5至7-51的個數分布圖屬於各參數（類別）的統計圖，篇幅過多容易失焦，建議整合性的比較，讓資訊表達更清楚。	依委員建議，已經將各斷層統計圖整合，內文與圖說也修正，請查照。

7. Chap7 斷層模型（P194、203、212）所採用之資料只有斷層線二側約20km寬的資料，因此很難約制斷層參數，建議在遠場可以加入GNSS資料約制。另外，此報告得到的斷層長期滑移速率或使用的斷層參數和「重要活動斷層地區地表變形觀測與斷層潛勢評估（2/2）」差異很大，請說明原因。	感謝委員建議可使用遠場資料進行約制，然而因此斷層模型本質為模擬近斷層線之變形活動，即使有遠場控制點，在剖面沿線上並不一定有品質良好的資料可供模擬本身進行運算，另外尚有資料權重問題須討論，本團隊會持續嘗試，希望將來能有更好的整合方式。 關於本計畫與另一個計劃的結果差異，因為本計畫主要是針對雷達影像資料處理後之結果進行分析，在資料的空間解析度上，兩計畫的差異是很大的。本計畫是希望透過近斷層的地表位移表現，搜尋出單一剖面在淺地表的斷層行為，與另一計畫透過區域資料與三維模擬所呈現的宏觀型態難免不盡相同，而這些不一樣的切入觀點與結果呈現，亦可供大眾參考。

附錄A、三維向量於衛星視角方向的影響

差分干涉技術成果為衛星視角方向（LOS）觀測，所以衛星並非只有觀測垂直向的地表變形，水平分量也會被衛星觀測到。為了解三維地表變形資訊如何影響衛星視方向觀測值，我們假設南北向（N）、東西向（E）及垂直向（U）各有 +10 mm的地表變形量，且向北、向東及抬升為正，將Sentinel-1衛星的飛行方向與觀測視角角度代入理論公式(1)，將三分量投影至LOS方向，並繪製示意圖（圖A-1）。

$$d_{LOS} = [-sin\theta cos\alpha \;\; sin\theta sin\alpha \;\; cos\theta] \begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} \quad (1)$$

可以看到在南北向與垂直向，無論是升軌道（Ascending）或是降軌道（Descending），+10 mm/yr （向北或抬升）的地表變形投影至LOS方向皆會造成正貢獻量（靠近衛星移動），東西向對於升軌道（Ascending）是負貢獻量（遠離衛星移動），於降軌道（Descending）則是正貢獻量（靠近衛星移動）。南北向的貢獻量約為觀測值的11% - 13%，東西向貢獻量為觀測值的53% - 61%，垂直向貢獻量則為觀測值的77% - 83%，可見Sentinel-1衛星LOS方向觀測雖然以垂直向影響最大，但東西向地表變形亦不可忽略。

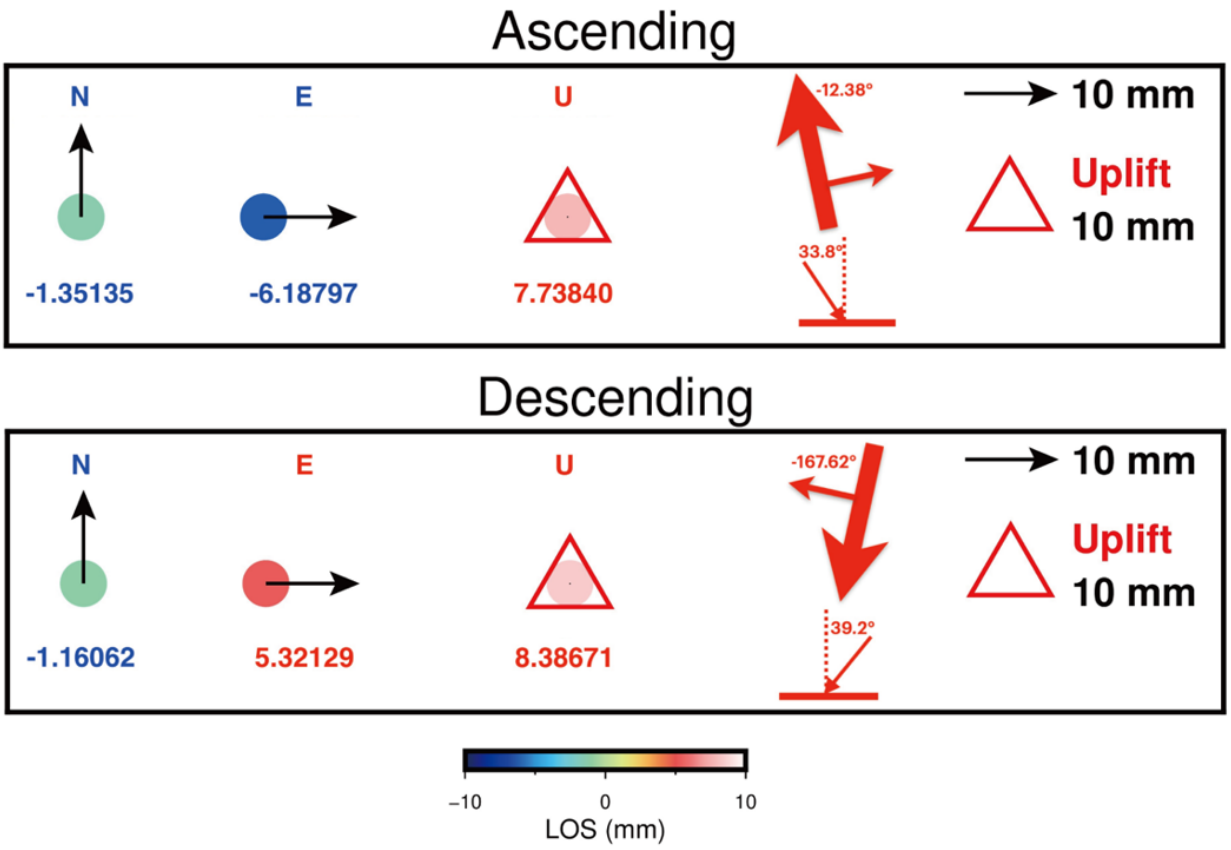
由於東西向在升軌道（Ascending）與降軌道（Descending）是相反的貢獻量，在水平運動明顯的地區，可能會發生上升軌道（Ascending）的觀測值與下降軌道（Descending）的觀測值不同的情形。

以示意圖為例：

向北10 mm、向東 10 mm及抬升10 mm的地區，在升軌道方向的LOS觀測值約為 0.2 mm，但在降軌道方向的LOS觀測約值則為12.55 mm，造成升軌道LOS觀測值遠小於降軌道LOS觀測值的情形；

倘若向西 15 mm 及抬升10 mm的地區，在升軌道的LOS觀測值約為17 mm，但在降軌方向的LOS觀測值約為 0.4 mm，造成升軌道LOS觀測值大於降軌道LOS觀測值的情形。

因此當升軌道與降軌道方向觀測值不同時，必須小心檢視是否為水平向地表變形所造成。



圖A-1: 三維向量投影至衛星視角方向（LOS）貢獻量示意圖。上圖為升軌道（Ascending）方向，下圖為降軌道（Descending）方向。N為南北向，E為東西向，U為垂直向，圓形及其填色為各分量投影至LOS方向量值，紅色箭頭代表衛星飛行方向及視角。

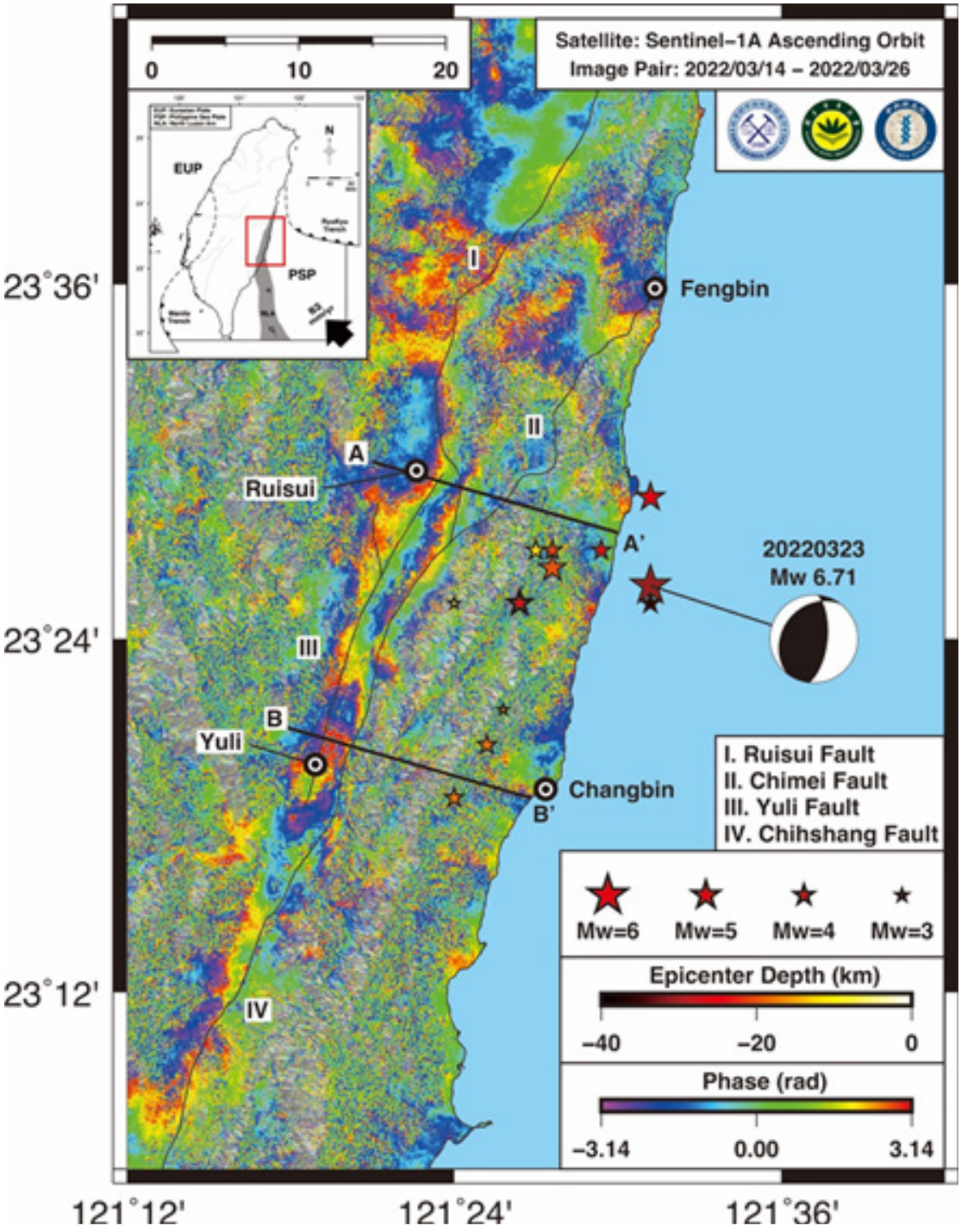
附錄B、2022年地震事件

B-1 2022年3月23日 花蓮玉里地震的同震地表變形

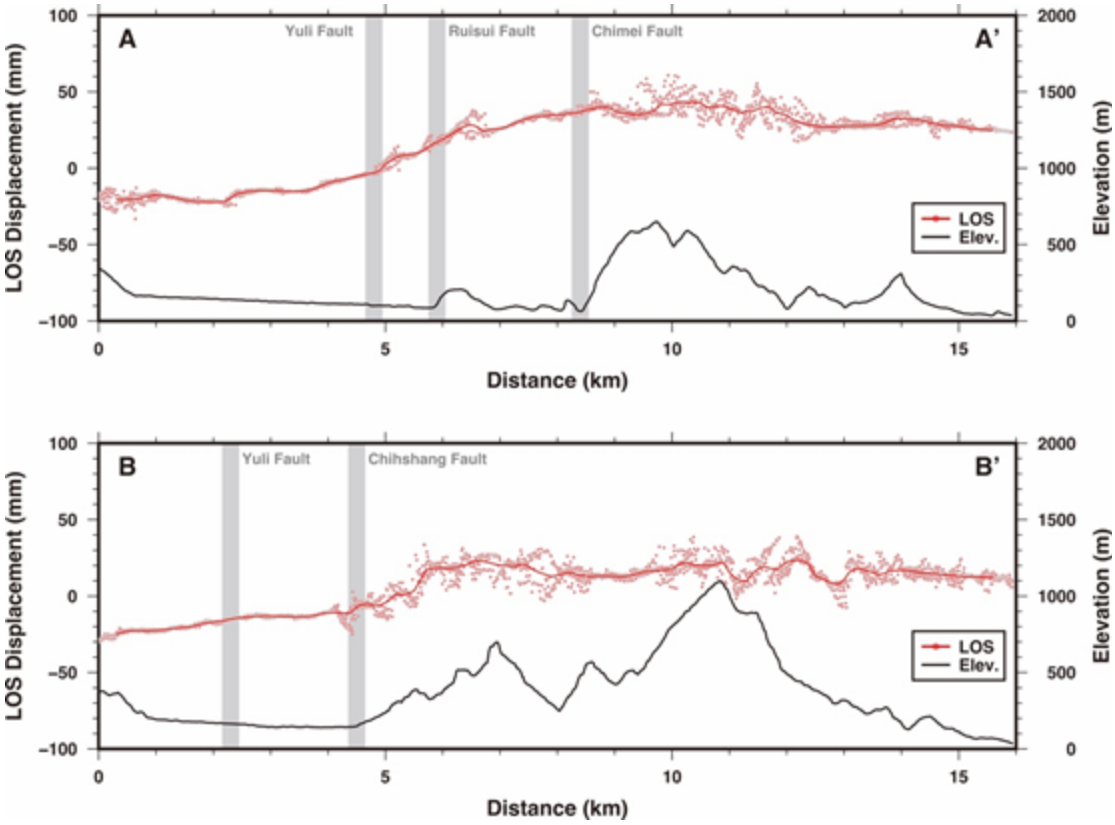
利用合成孔徑雷達差分干涉技術(DInSAR)分析歐洲太空總署Sentinel-1A衛星，分別在2022年3月14日和3月26日所拍攝的雷達影像，可以協助我們了解地震發生時地表的活動情形。

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

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



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



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

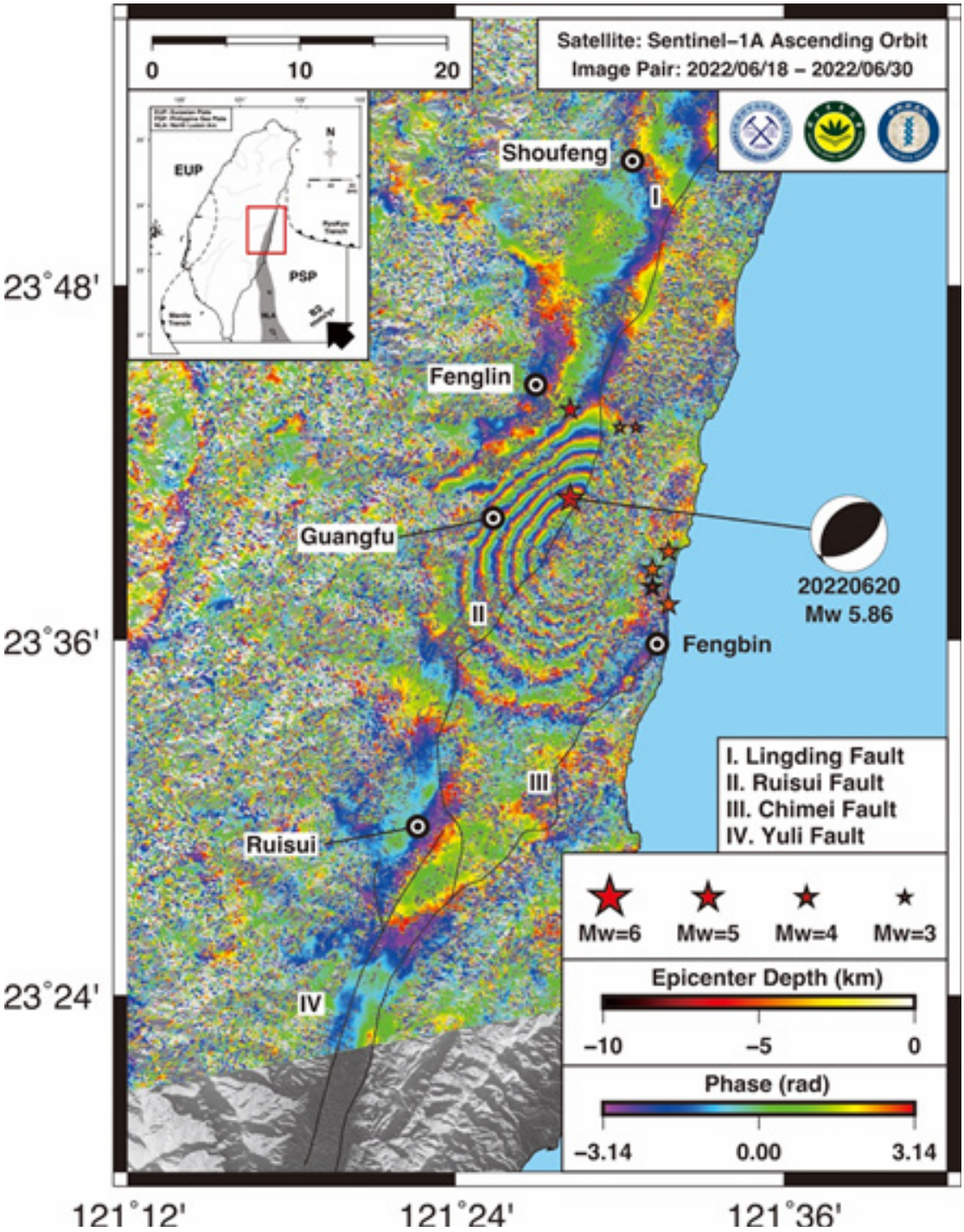
B-2 2022年6月20日 花蓮光復地震的同震地表變形

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

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

未來將持續取得衛星精密軌道資訊進行相位解算，以獲得詳細的同震地表位移變化量，同時配合地震重定位的資訊，確認這兩個

中心點差異的成因，提供本次地震更為精準的地表位移資訊，以利後續相關研究。



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

B-3 2022年9月18日 台東池上地震的同震地表變形

2022年9月17日關山地震和9月18日池上地震的同震地表變形初步分析

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

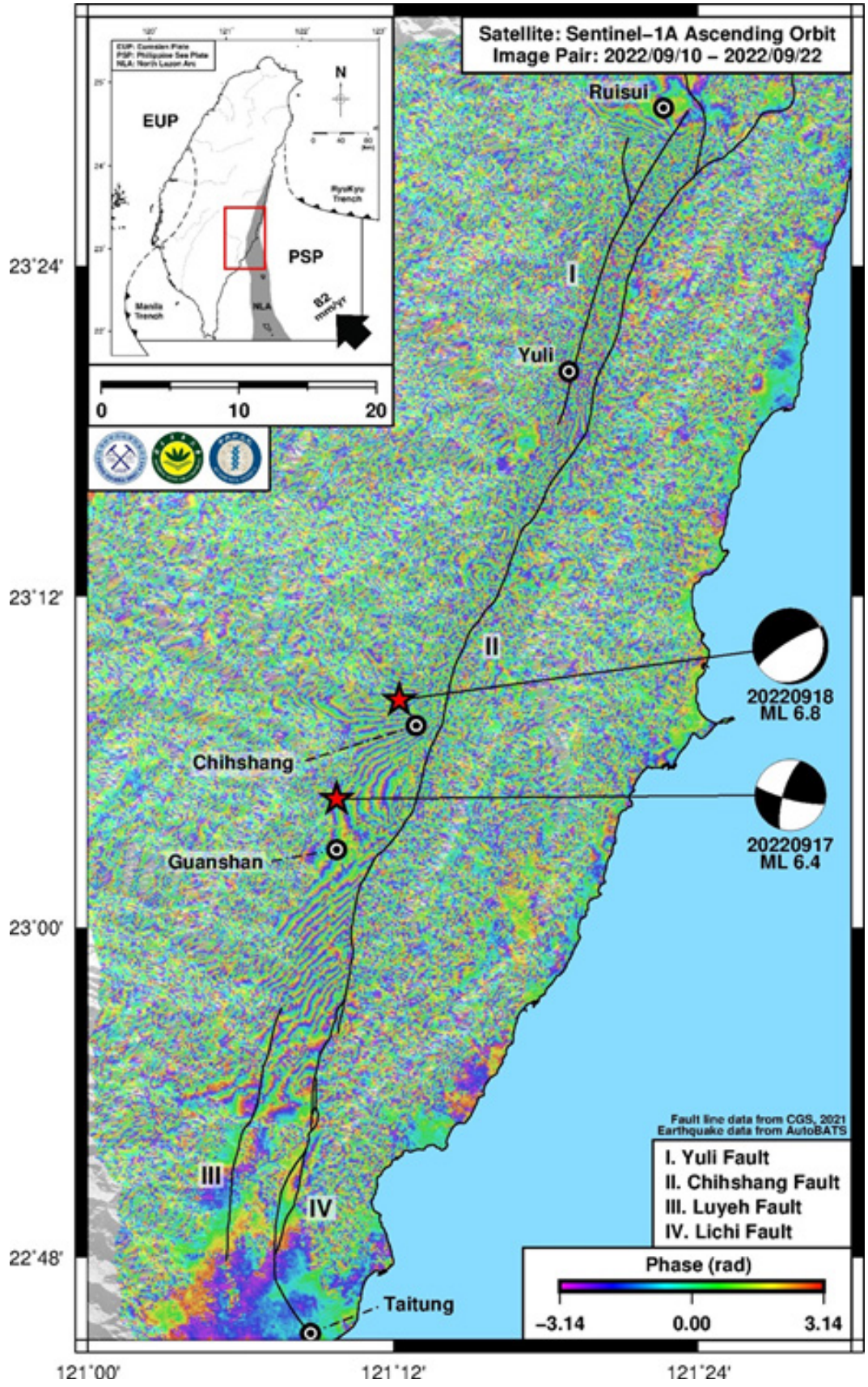
本次兩張影像間包含了9月17日的關山地震(ML=6.4)和9月18日的池上地震(ML=6.8)。從彩虹干涉環的分佈可以得知，兩個地震造成花東縱谷南北長約80公里的地表變形，主要的變形區域除了位於震央的關山和池上外，北邊的玉里和瑞穗也有顯著的地表位移量。隨著餘震分佈的資訊，可以明顯的看到，餘震較少的鹿野和卑南地區也有為數不少的干涉環出現。兩側山區因受到植被擾動影響，導致影像資訊斑駁而不易成相，所以無法確認地表變形狀況。

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

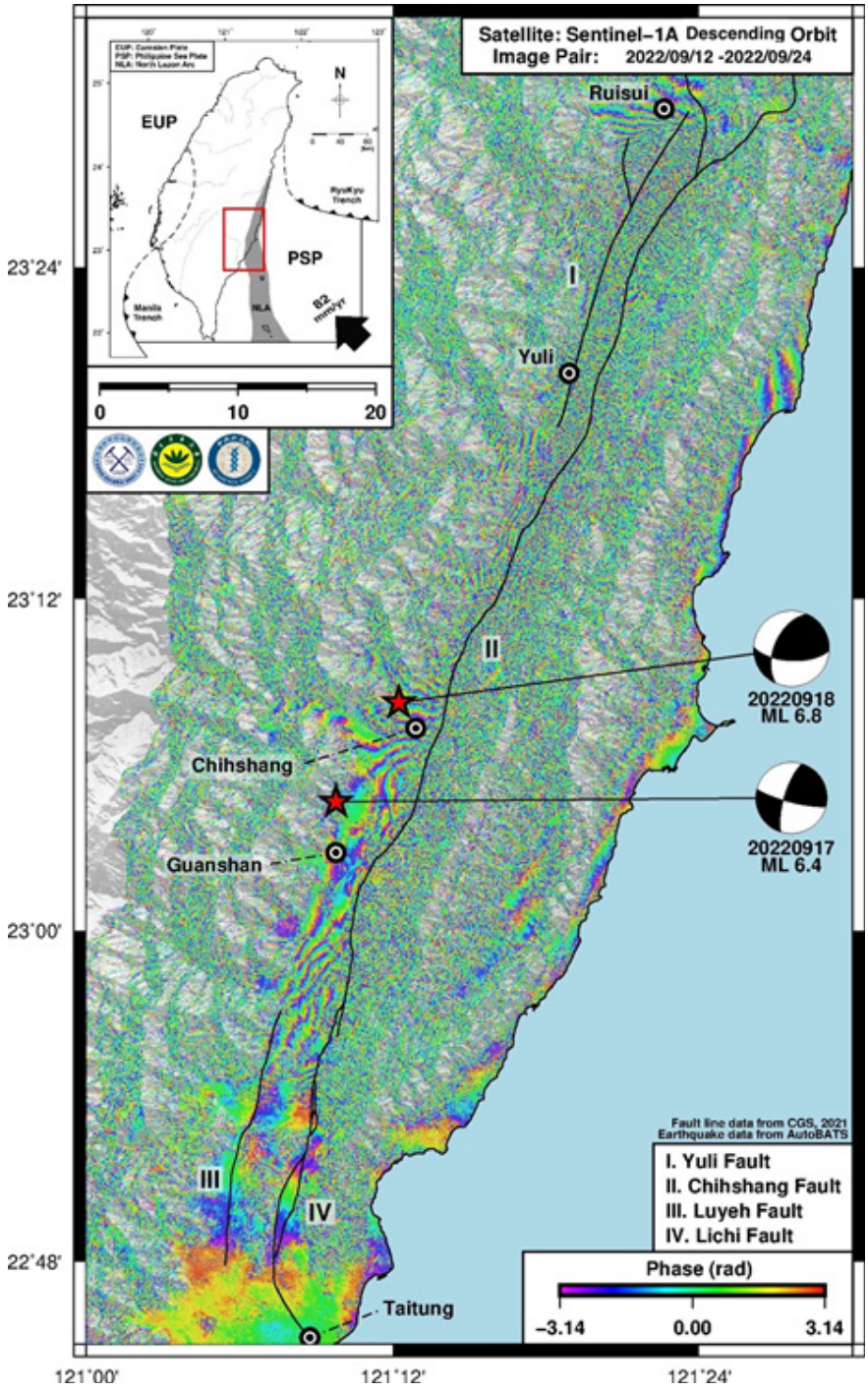
除了Sentinel-1衛星，我們取得日本宇宙航空研究開發機構（JAXA）ALOS2衛星影像，利用WD模式的升軌道分別在2022年8月7日和9月18日所拍攝的雷達影像，及降軌道分別在2022年4月3日和9月18日所拍攝的雷達影像，以及SM模式的升軌道分別在2022年5月19日和9月22日所拍攝的雷達影像，可以協助我們了解這兩個地震與其後續餘震所造成的地表變形（圖B-6至圖B-8）。地震資料來自於台灣寬頻地震觀測網 (Broadband Array in Taiwan for Seismol-

ogy, BATS)的快速解算結果。斷層線資料來自於經濟部地質調查所(Central Geological Survey, MOEA)。

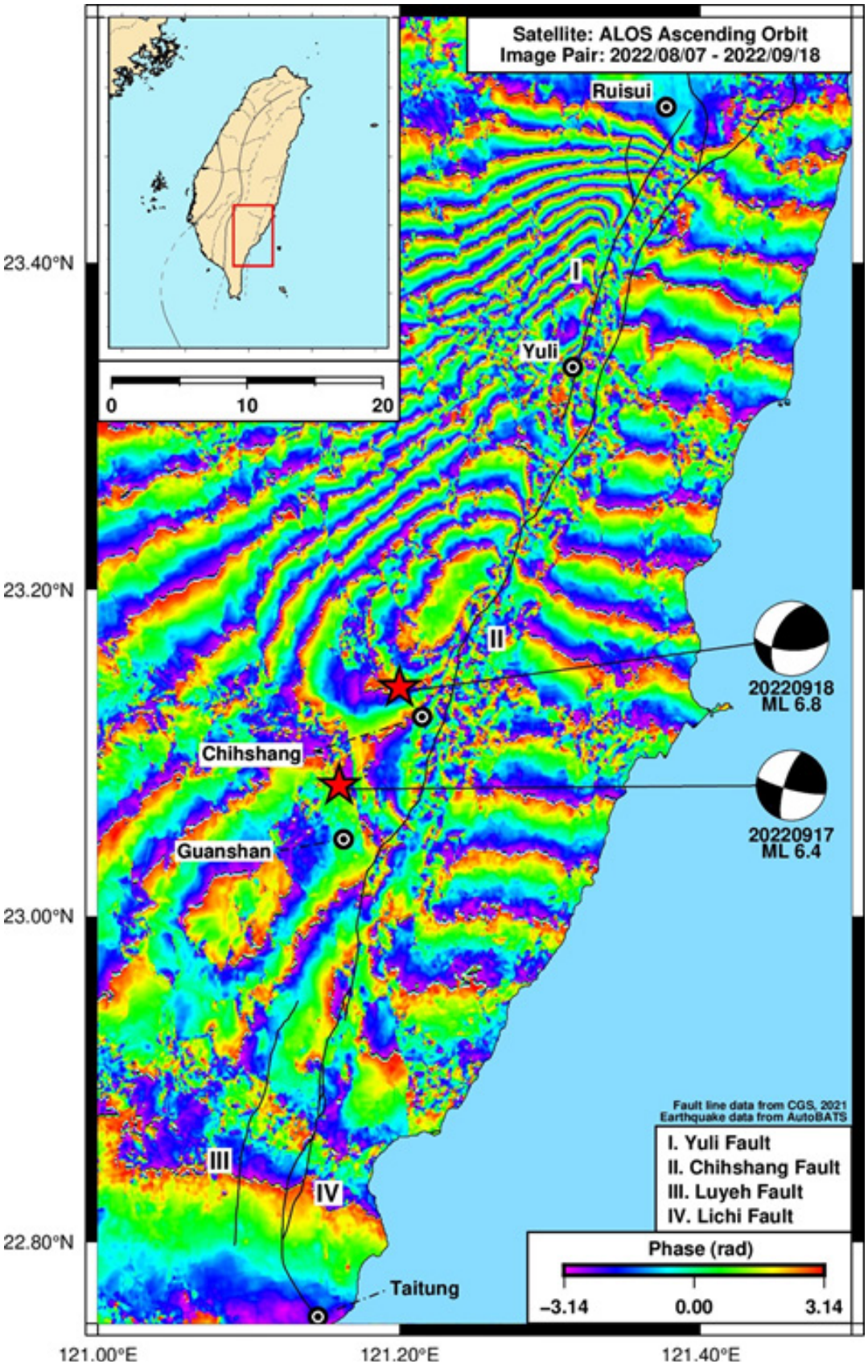
從彩虹干涉環的分佈可以得知，兩個地震造成花東縱谷南北長約80公里的地表變形，主要的變形區域除了位於震央的關山和池上外，北邊的玉里和瑞穗也有顯著的地表位移量。由於ALOS2為L band觀測衛星，波長較C band 的Sentinel-1衛星長，可穿透植被，可以明顯看到山區有較好的干涉環成果，但L band更容易受到大氣與電離層影響，因此需要進行修正。



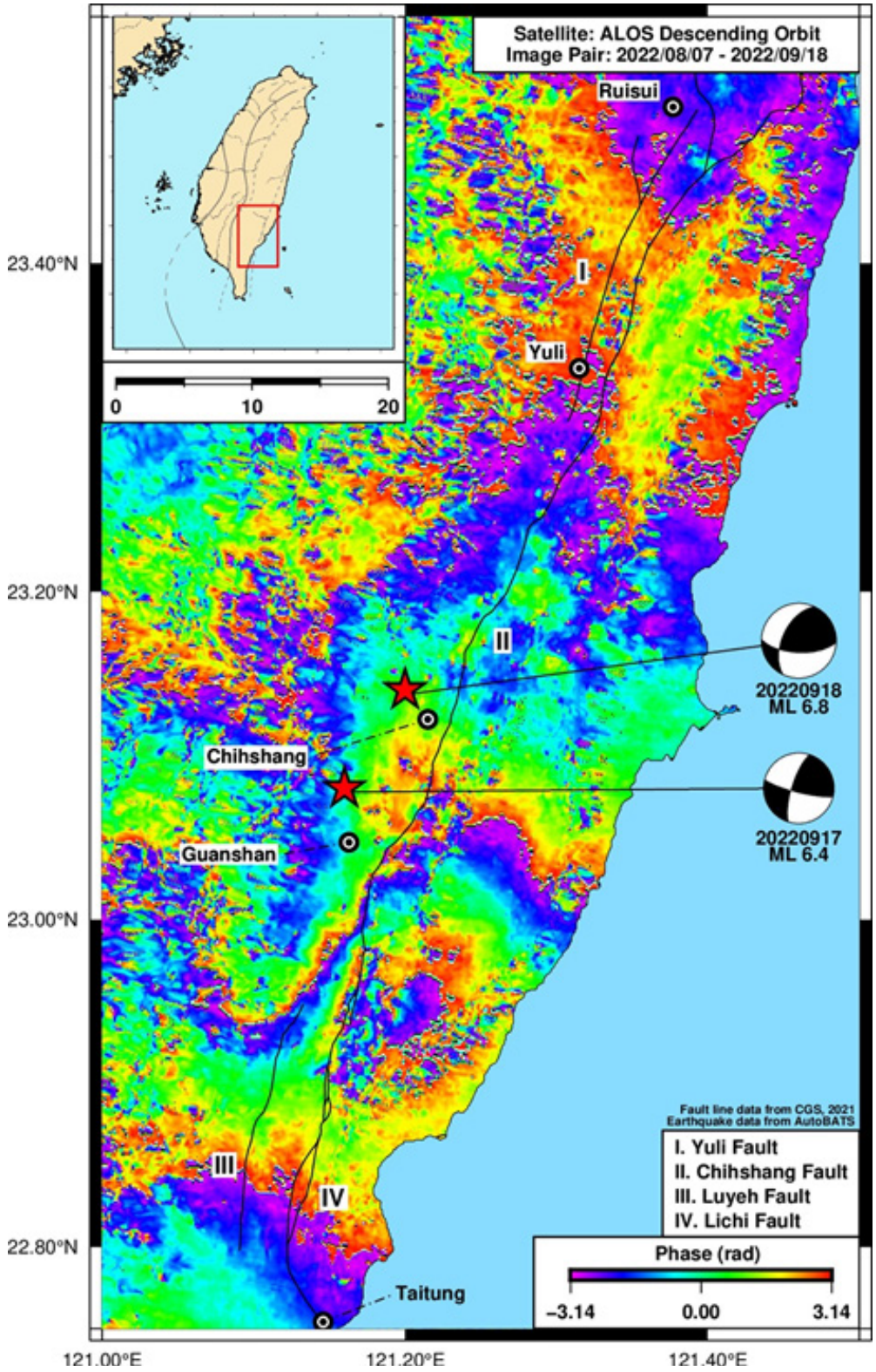
圖B-4：2022年9月18日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅升軌影像（Ascending）：2022年9月10日和9月22日。星形及其填色為地震事件及震源深度。



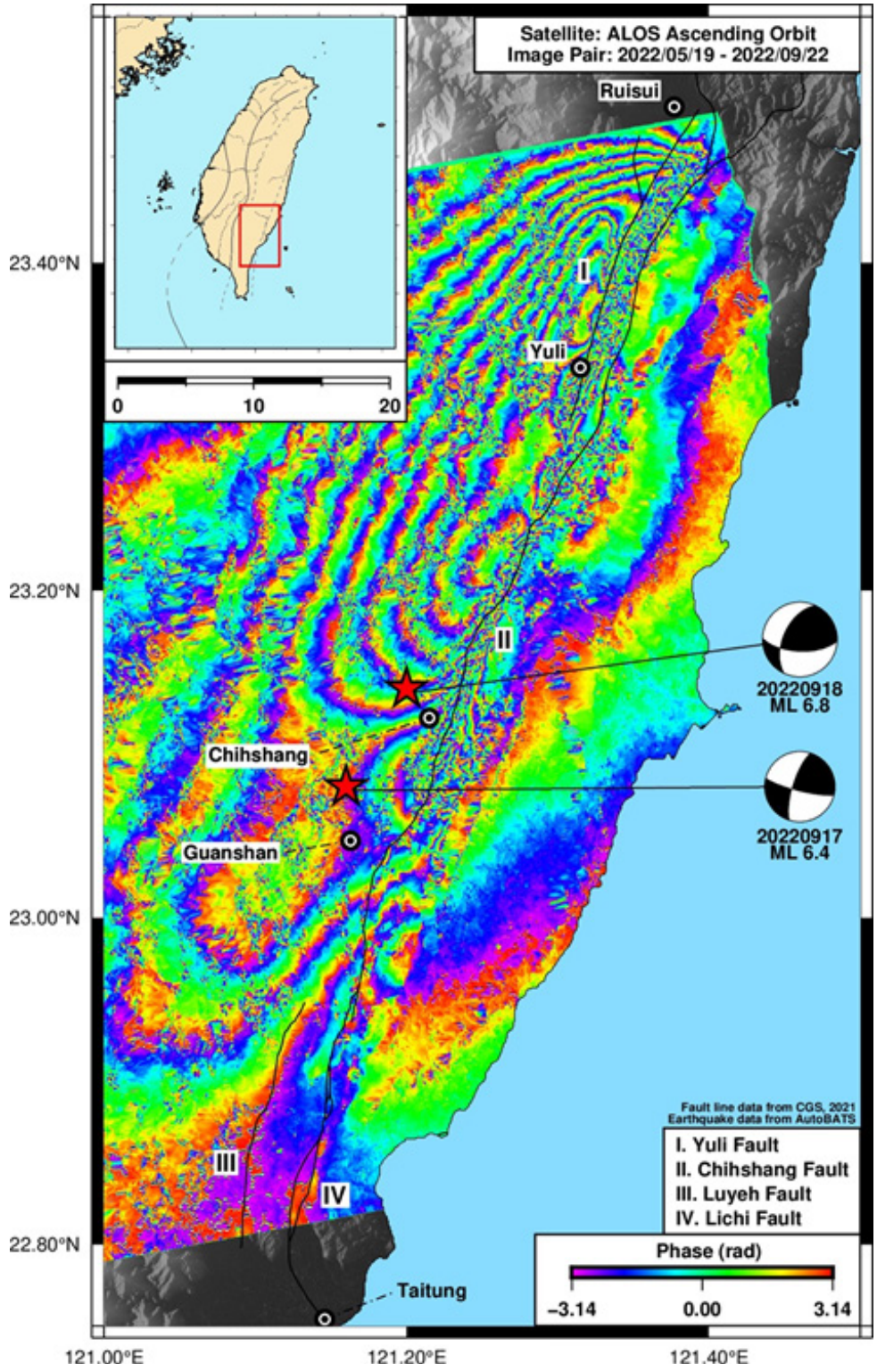
圖B-5：2022年9月18日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅降軌影像（Descending）：2022年9月12日和9月24日。星形及其填色為地震事件及震源深度。



圖B-6：2022年9月18日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅ALOS2 WD升軌影像（Ascending）：2022年08月07日和09月18日。星形及其填色為地震事件及震源深度。



圖B-7：2022年9月18日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅ALOS2 WD降軌影像（Descending）：2022年04月03日和09月18日。星形及其填色為地震事件及震源深度。



圖B-8：2022年9月18日台東池上關山地震干涉圖。使用地震前後的兩幅ALOS2 SM升軌影像（Ascending）：2022年05月19日和9月22日。星形及其填色為地震事件及震源深度。

附錄 C、各斷層三時期速度剖面成果

C-1 九芎坑斷層(CCK)

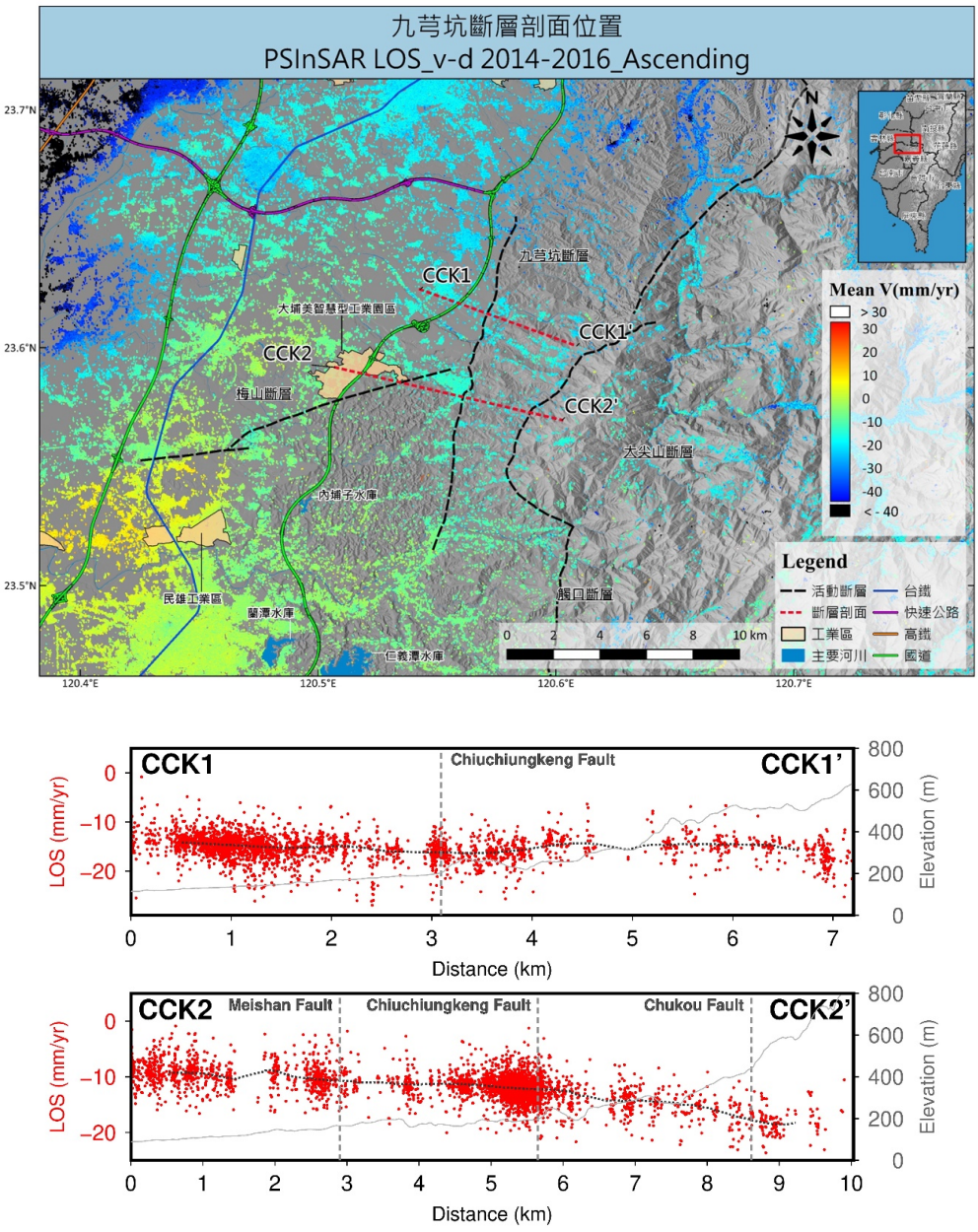


圖 C-1：2014-2016 九芎坑斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

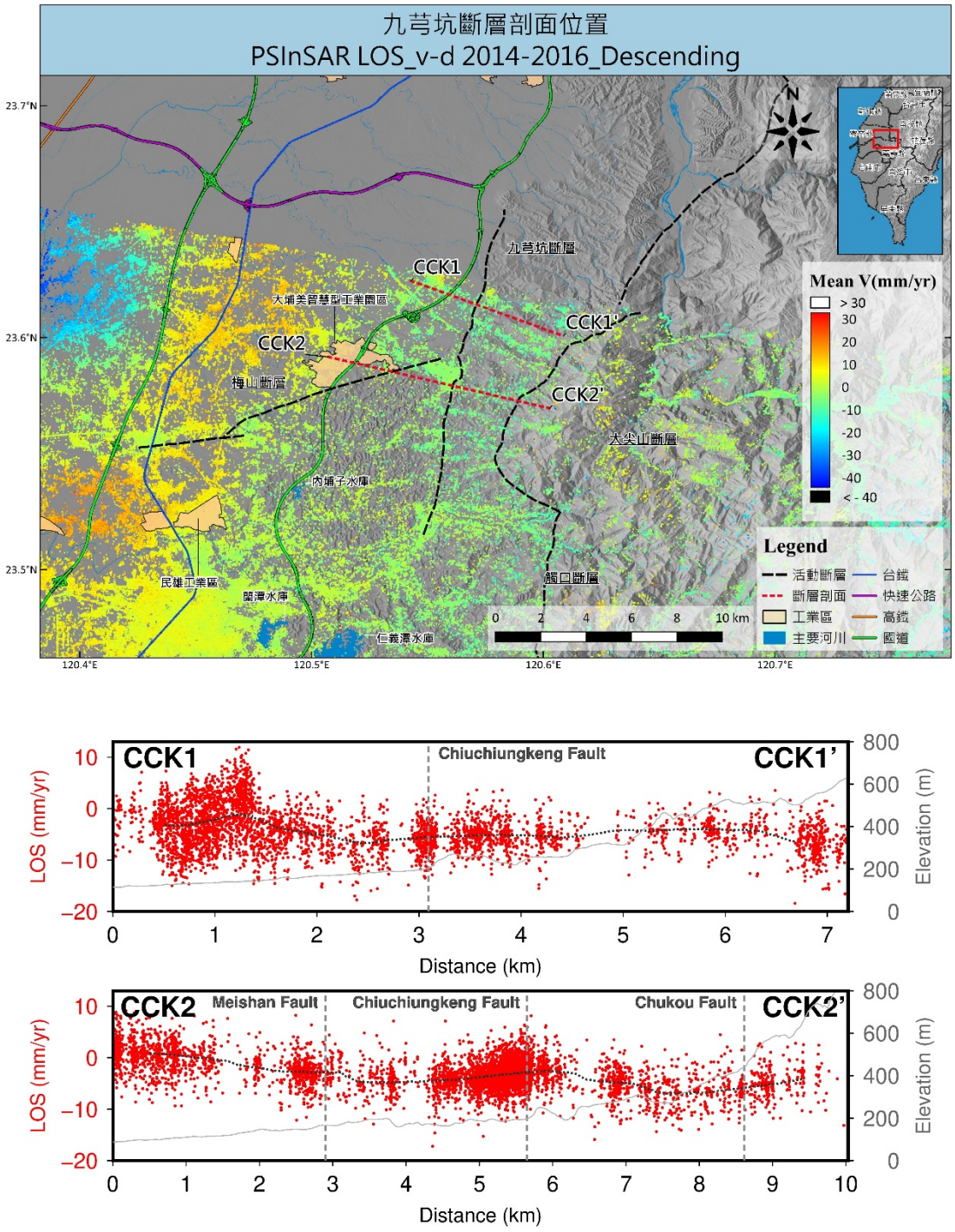


圖 C-2：2014-2016 九芎坑斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

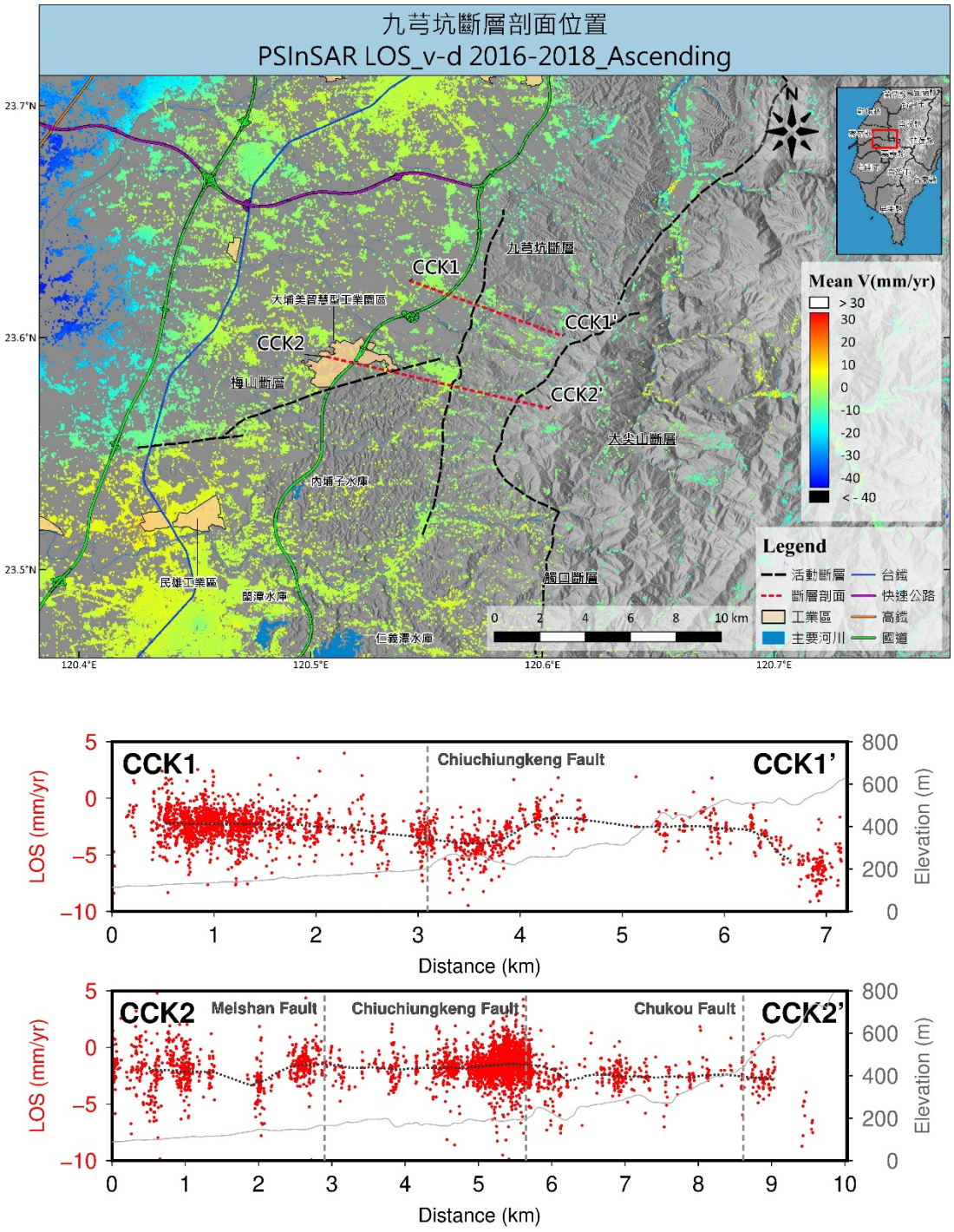


圖 C-3：2016-2018 九芎坑斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

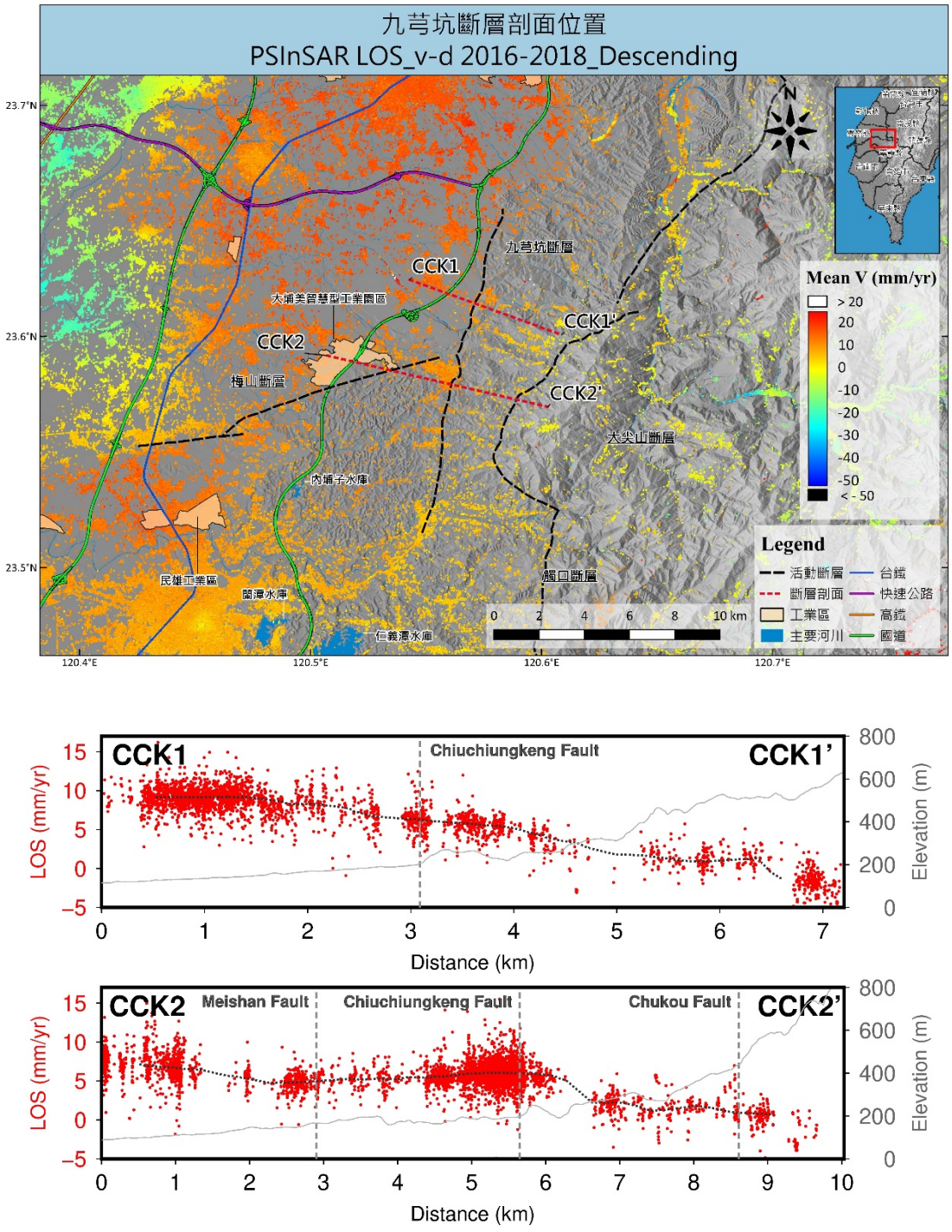


圖 C-4：2016-2018 九芎坑斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

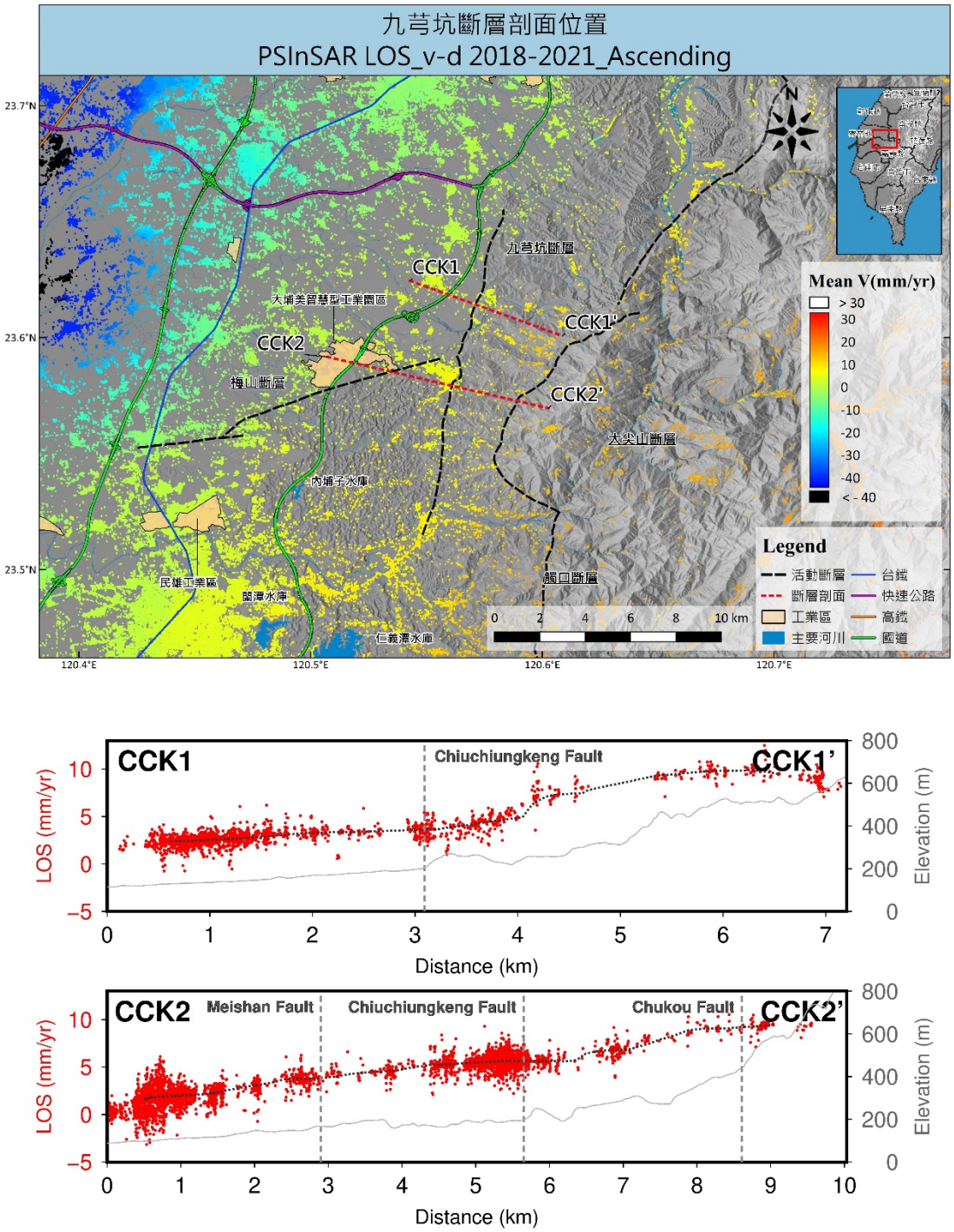


圖 C-5：2018-2021 九芎坑斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

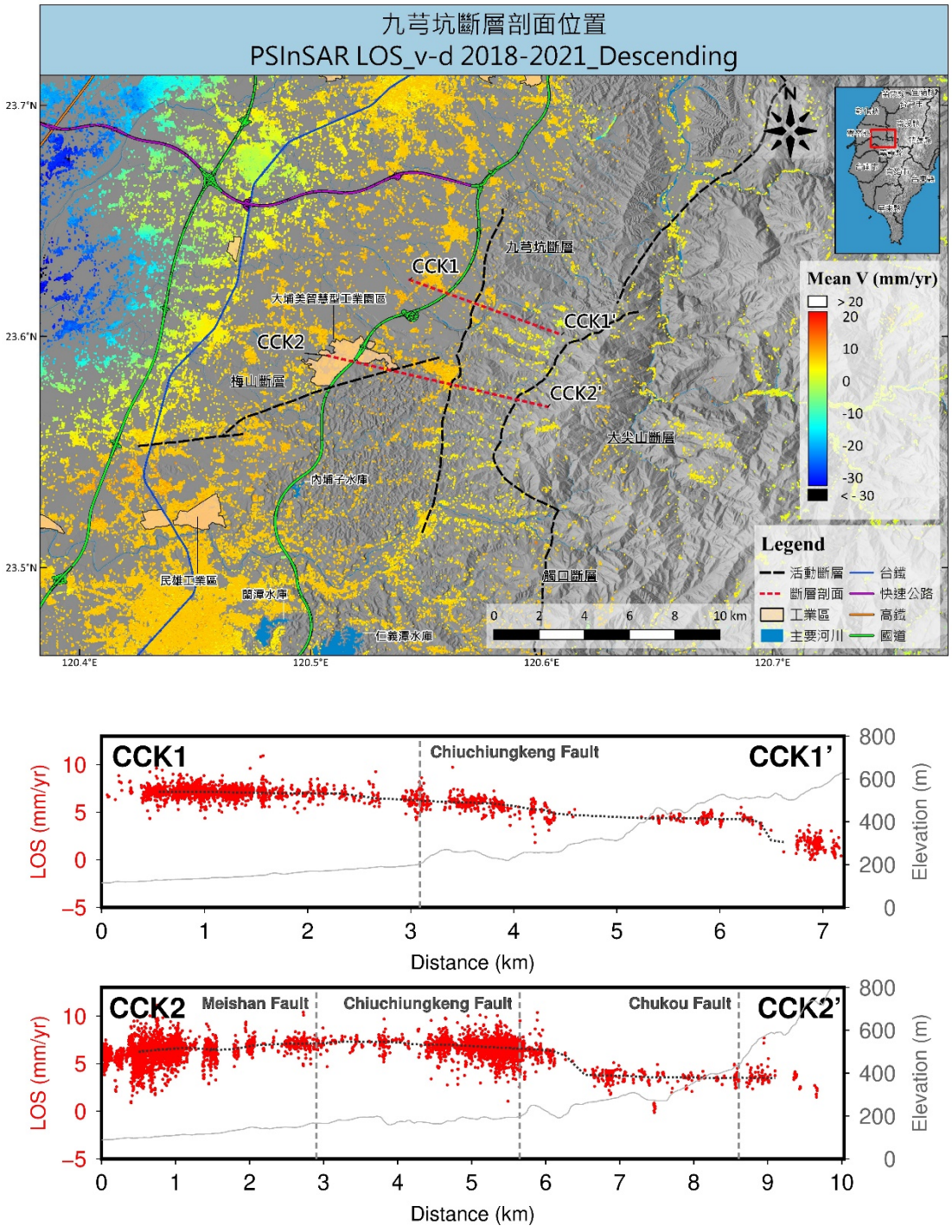


圖 C-6：2018-2021 九芎坑斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-2 梅山斷層(MSN)

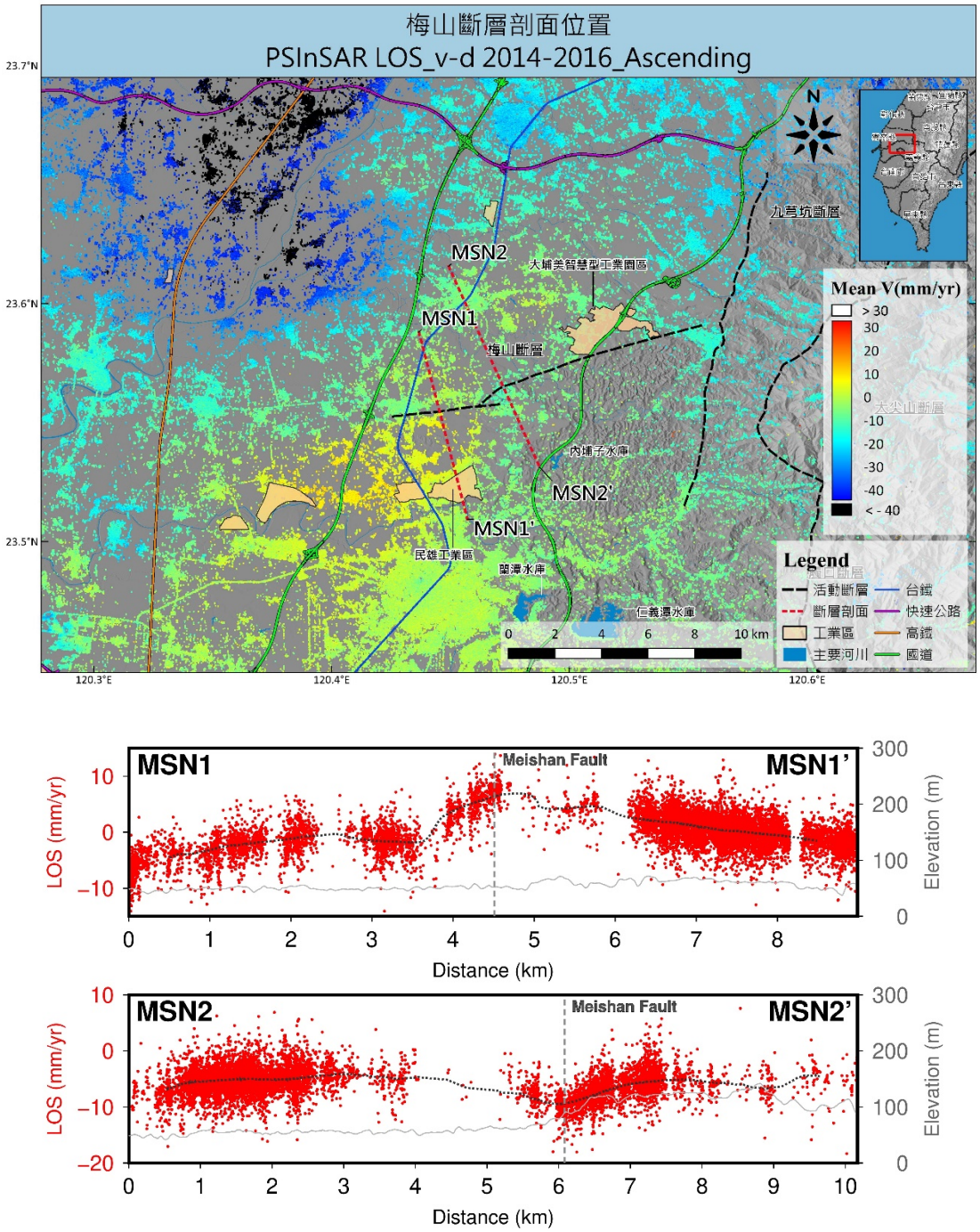


圖 C-7：2014-2016 梅山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

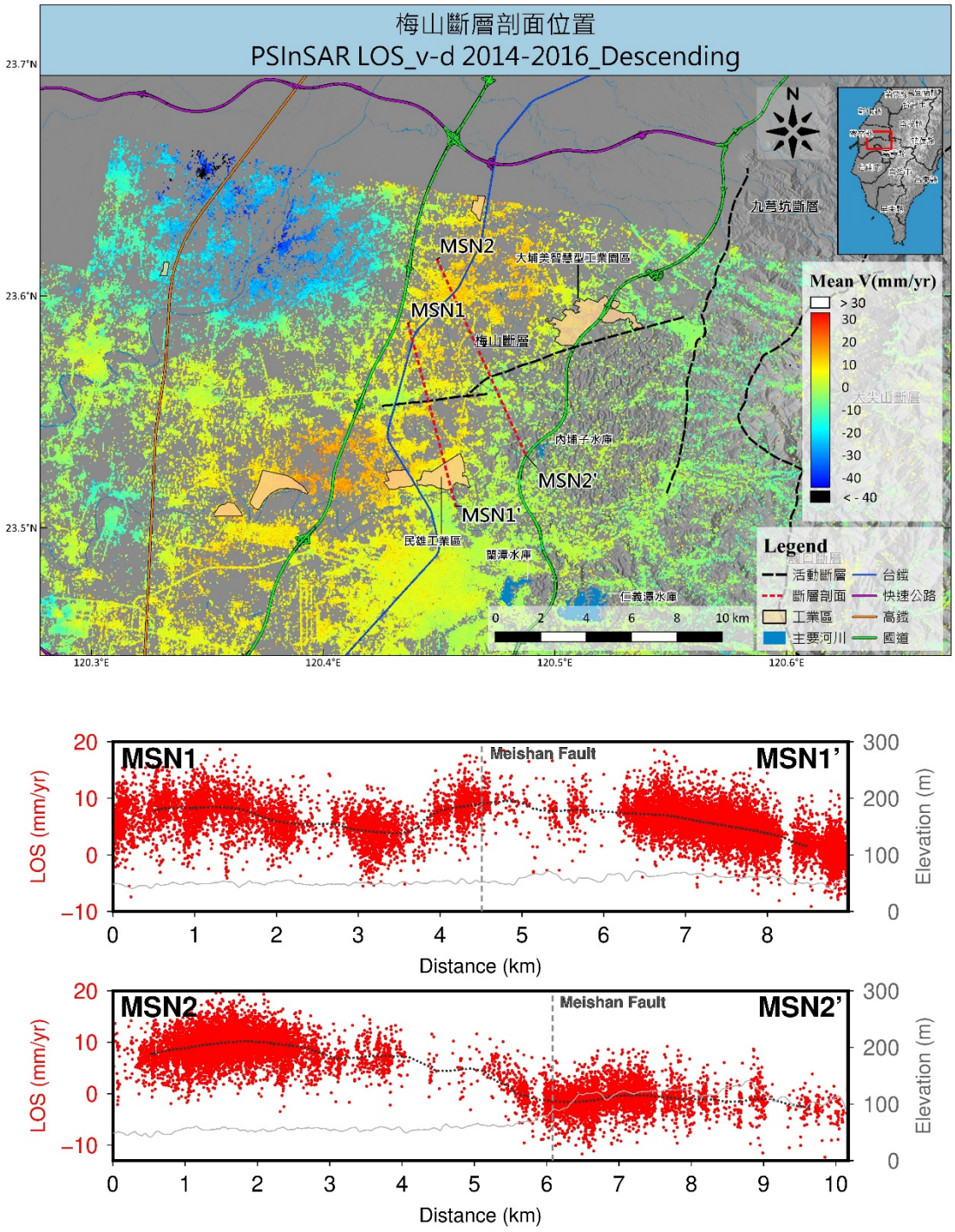


圖 C-8：2014-2016 梅山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

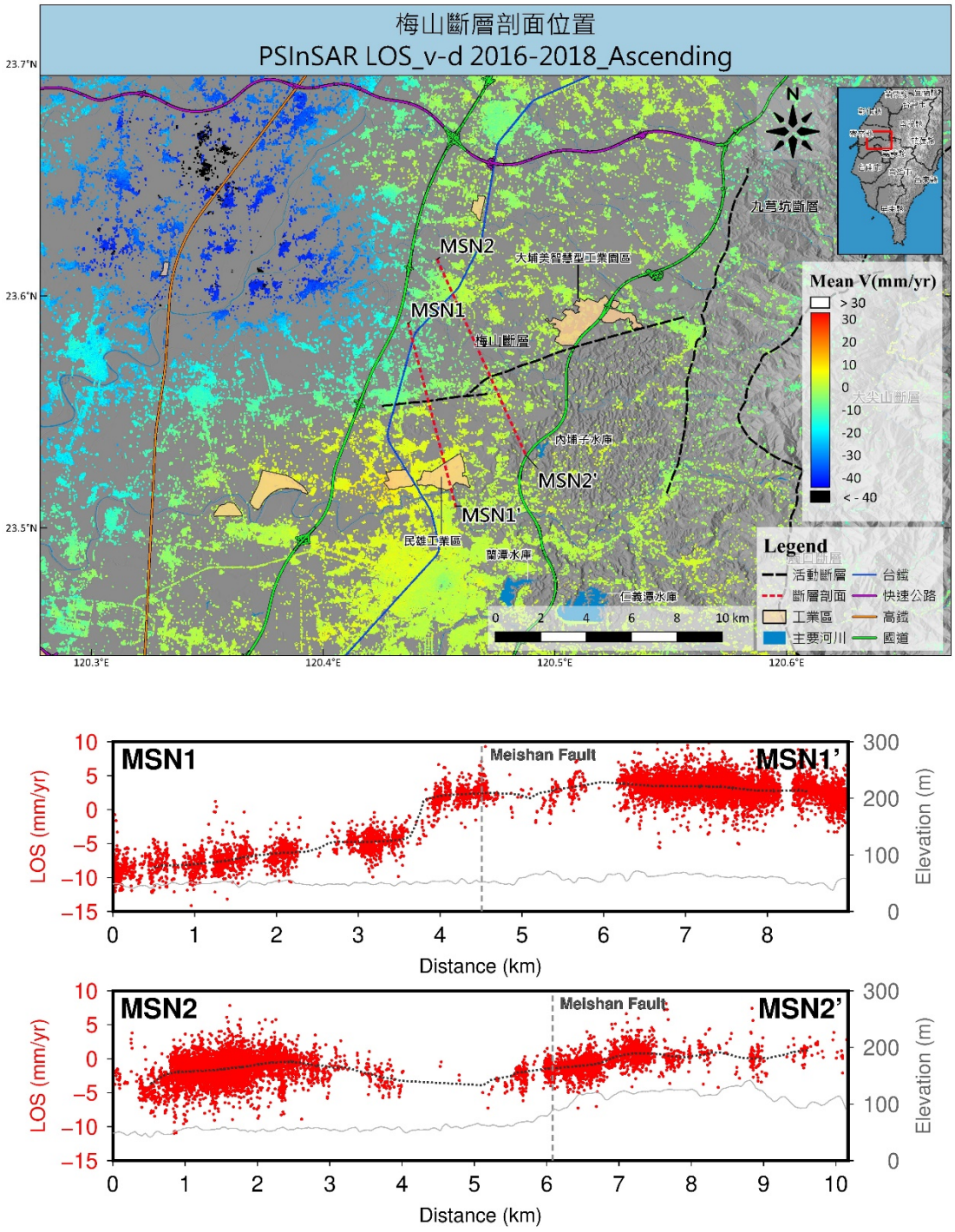


圖 C-9：2016-2018 梅山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

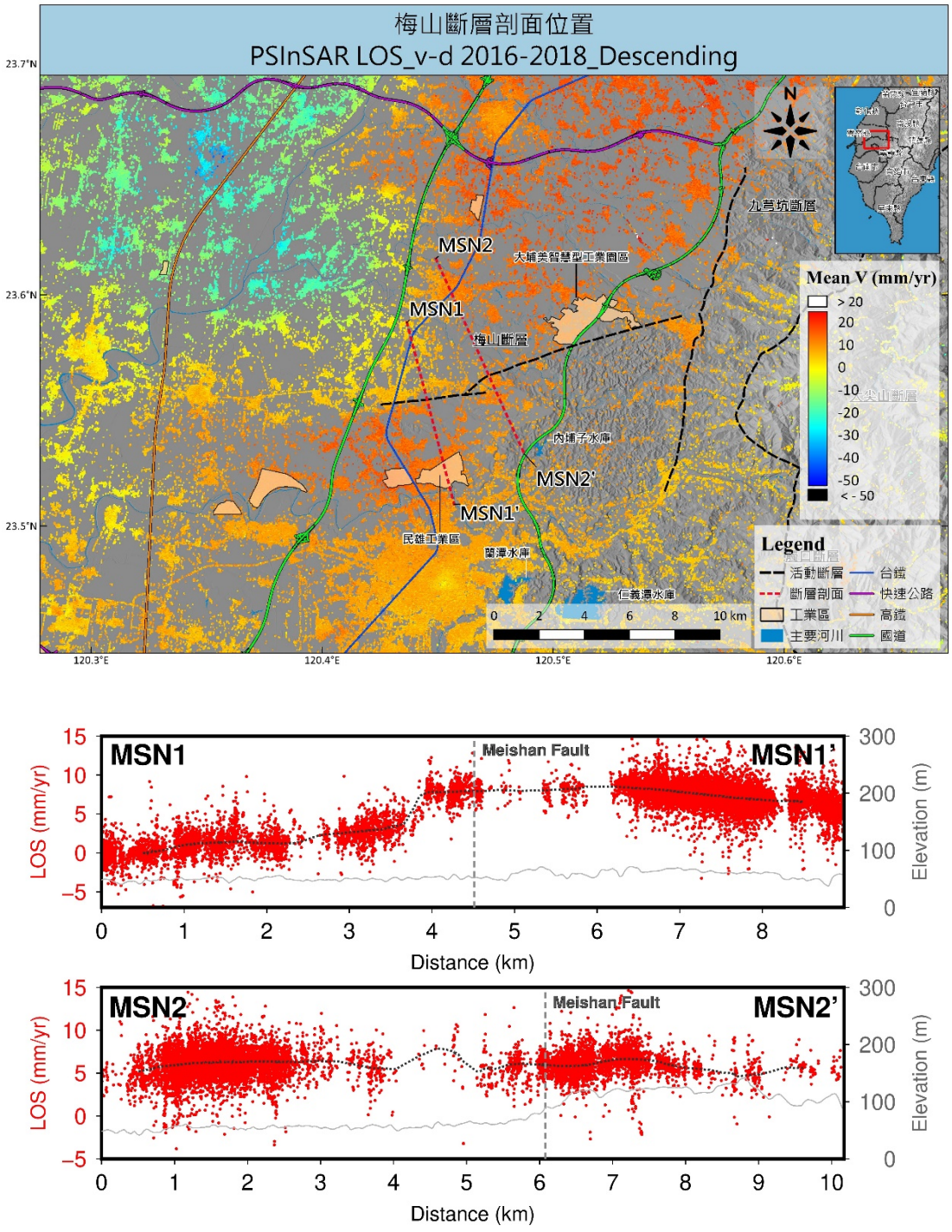


圖 C-10：2016-2018 梅山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

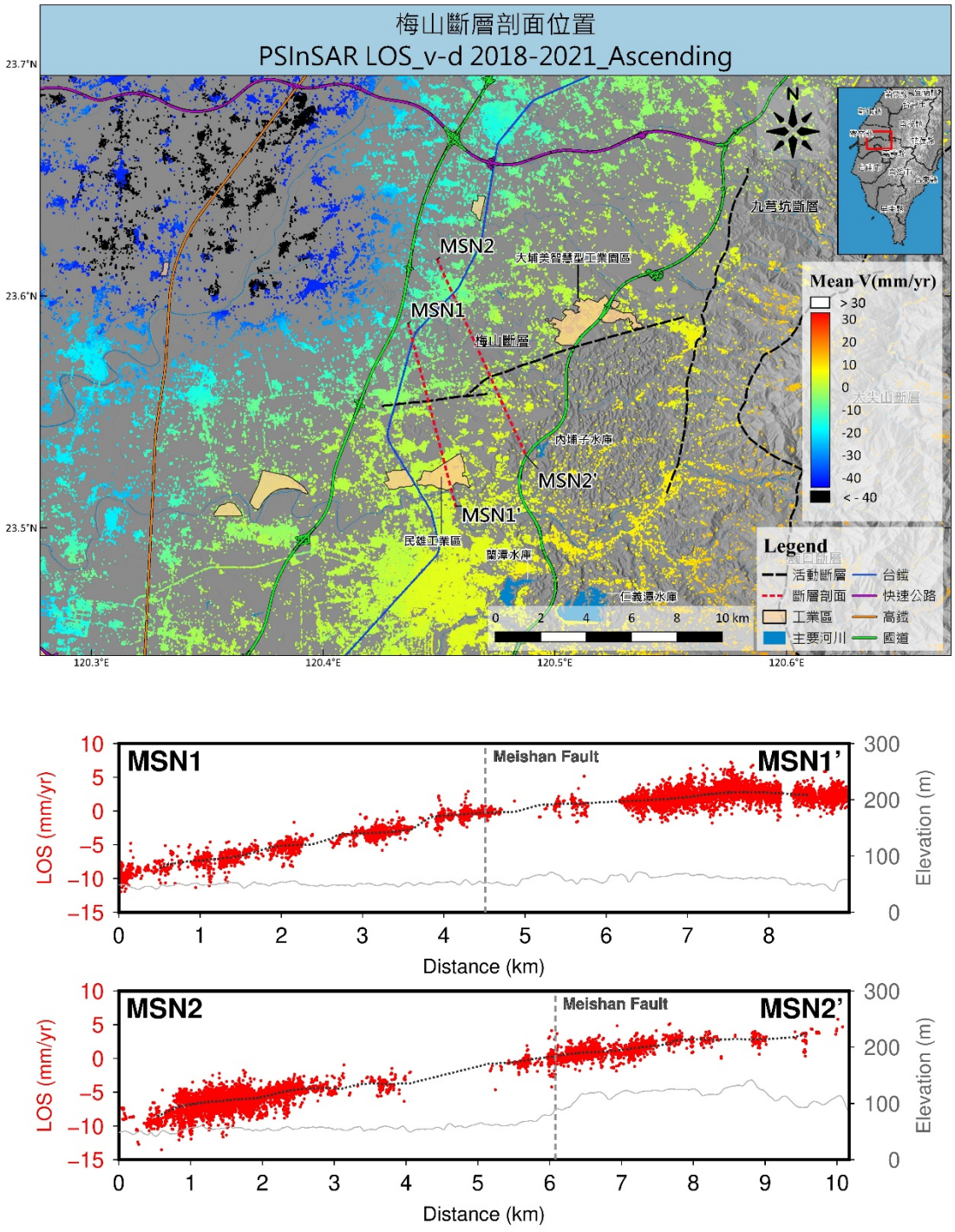


圖 C-11：2018-2021 梅山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

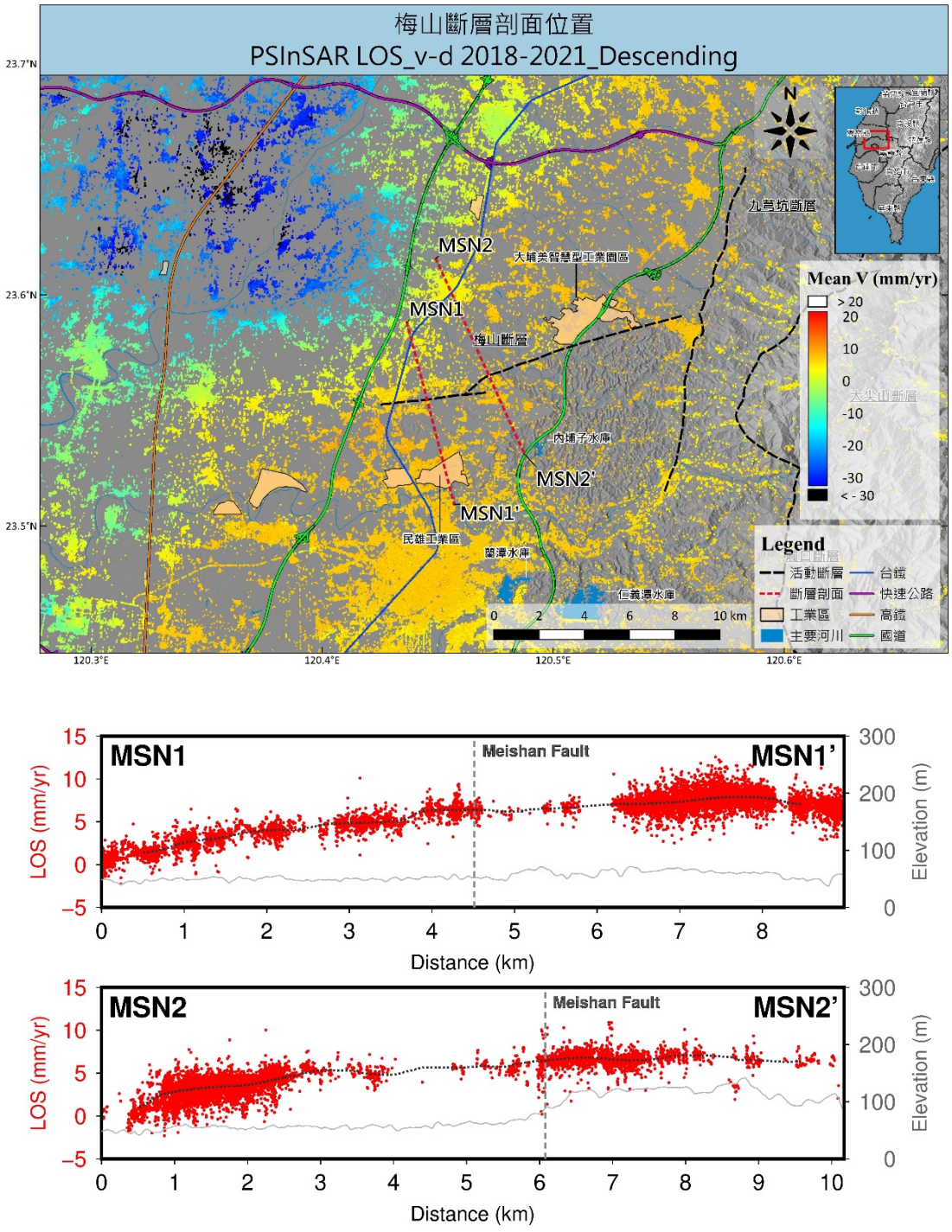


圖 C-12：2018-2021 梅山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-3 大尖山斷層(TAS)

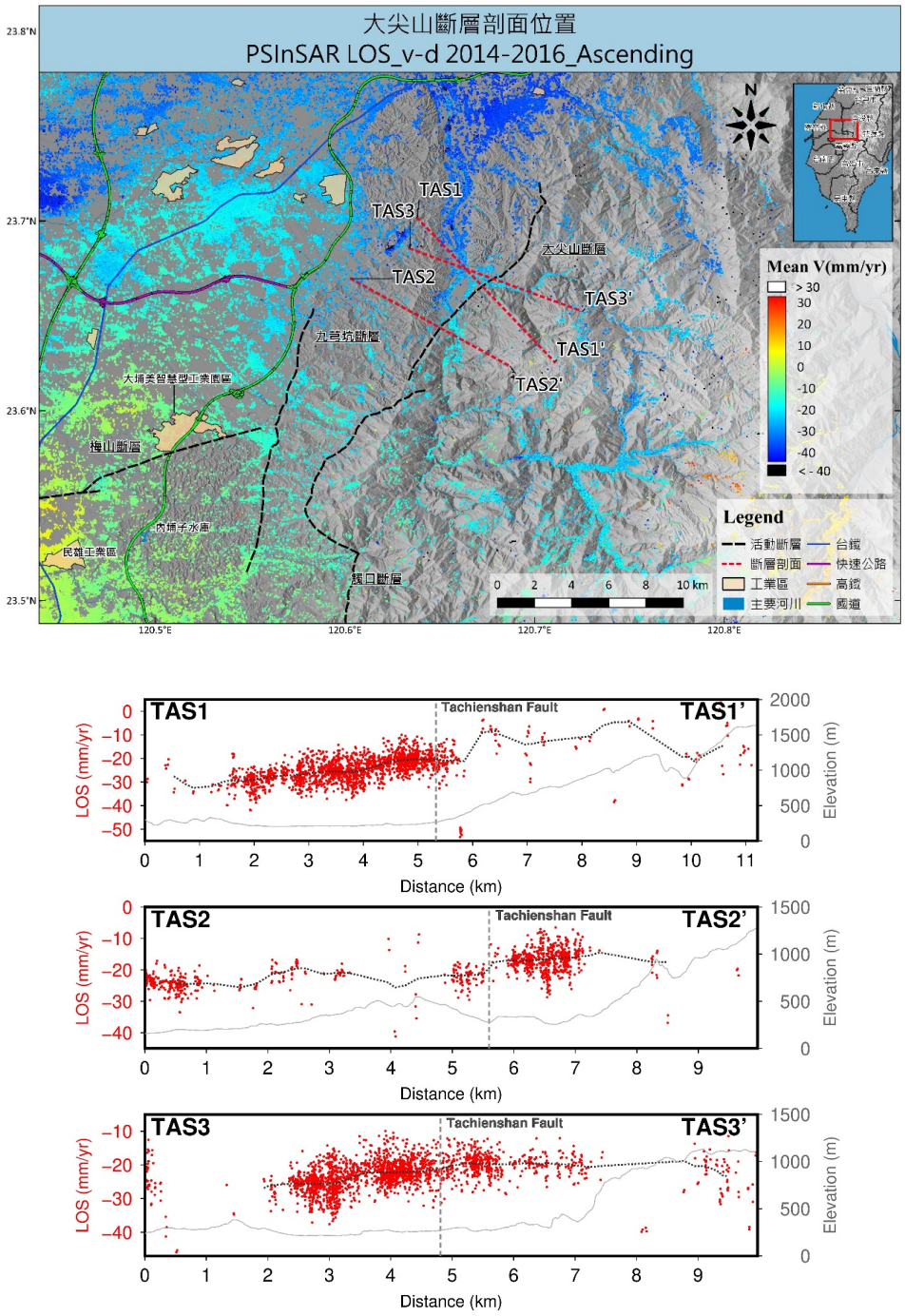


圖 C-13：2014-2016 大尖山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

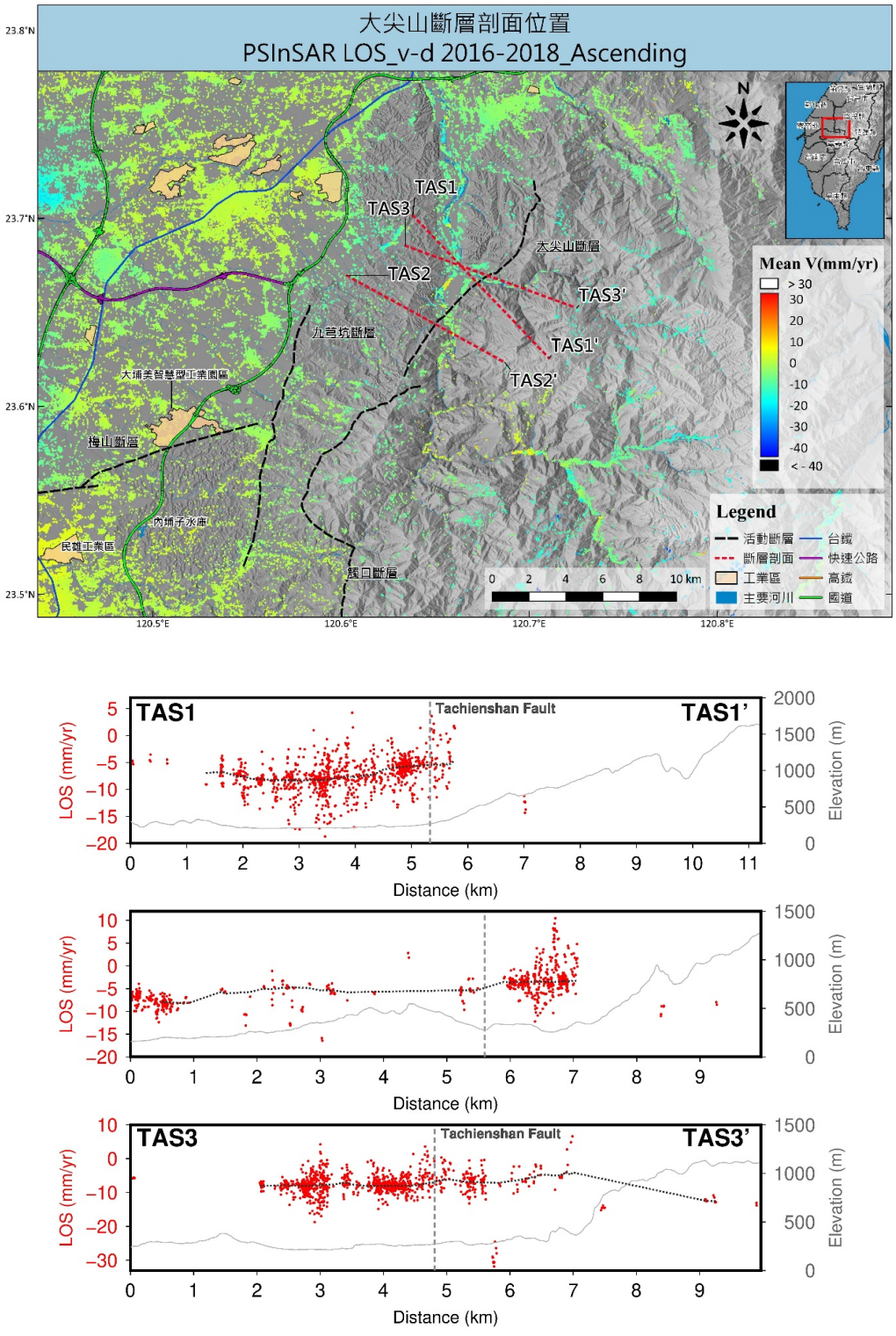


圖 C-14：2016-2018 大尖山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

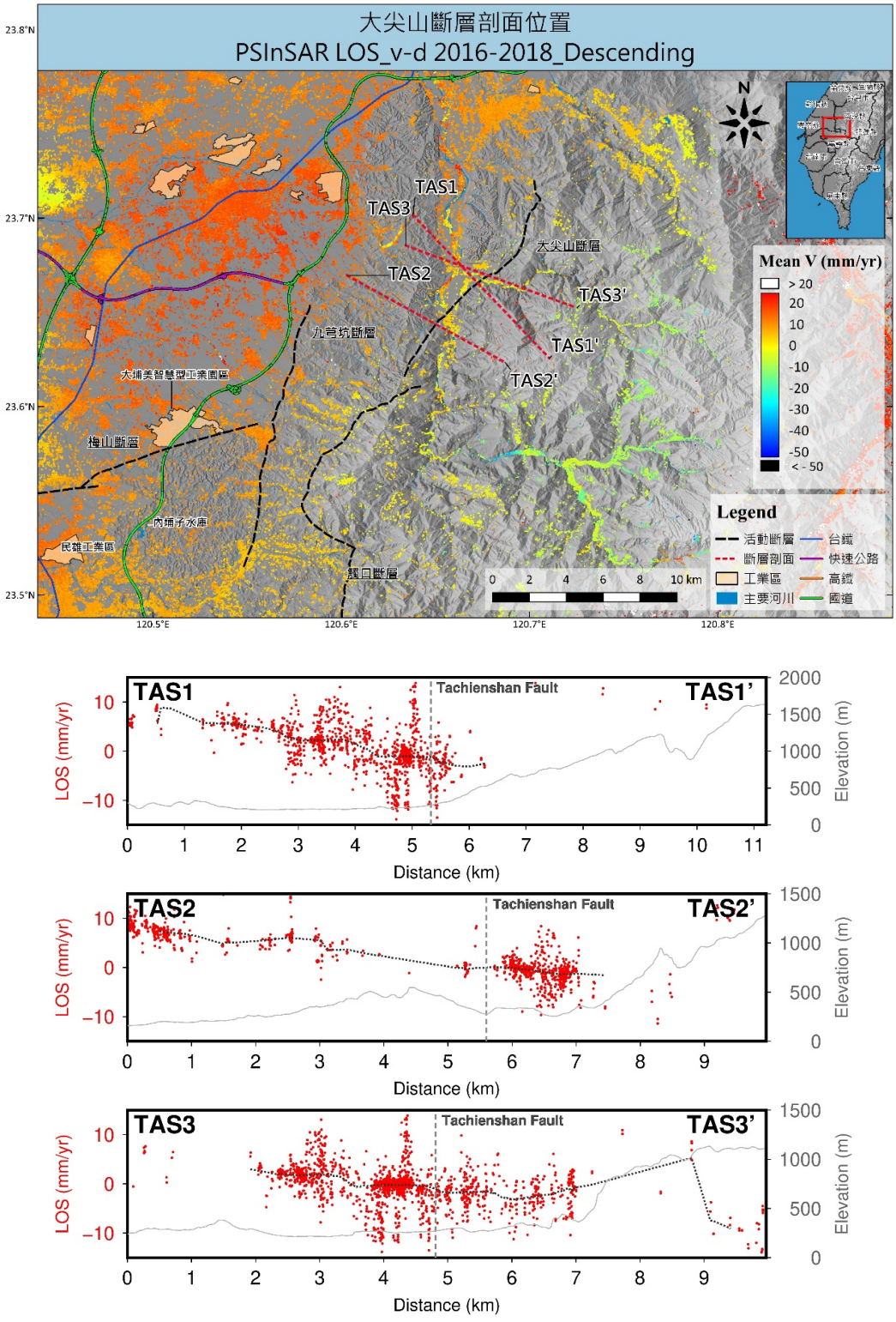


圖 C-15：2016-2018 大尖山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

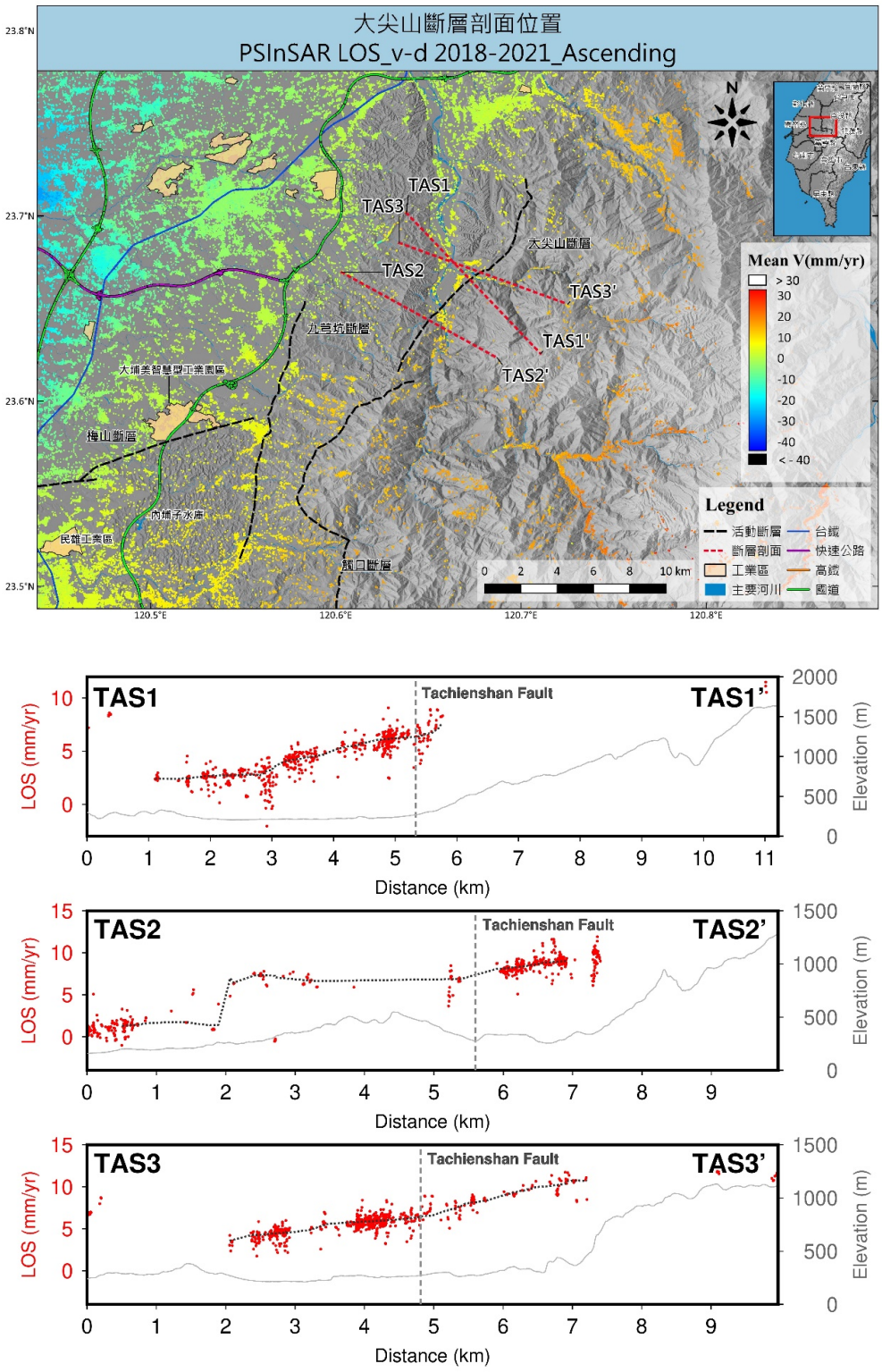


圖 C-16：2018-2021 大尖山斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

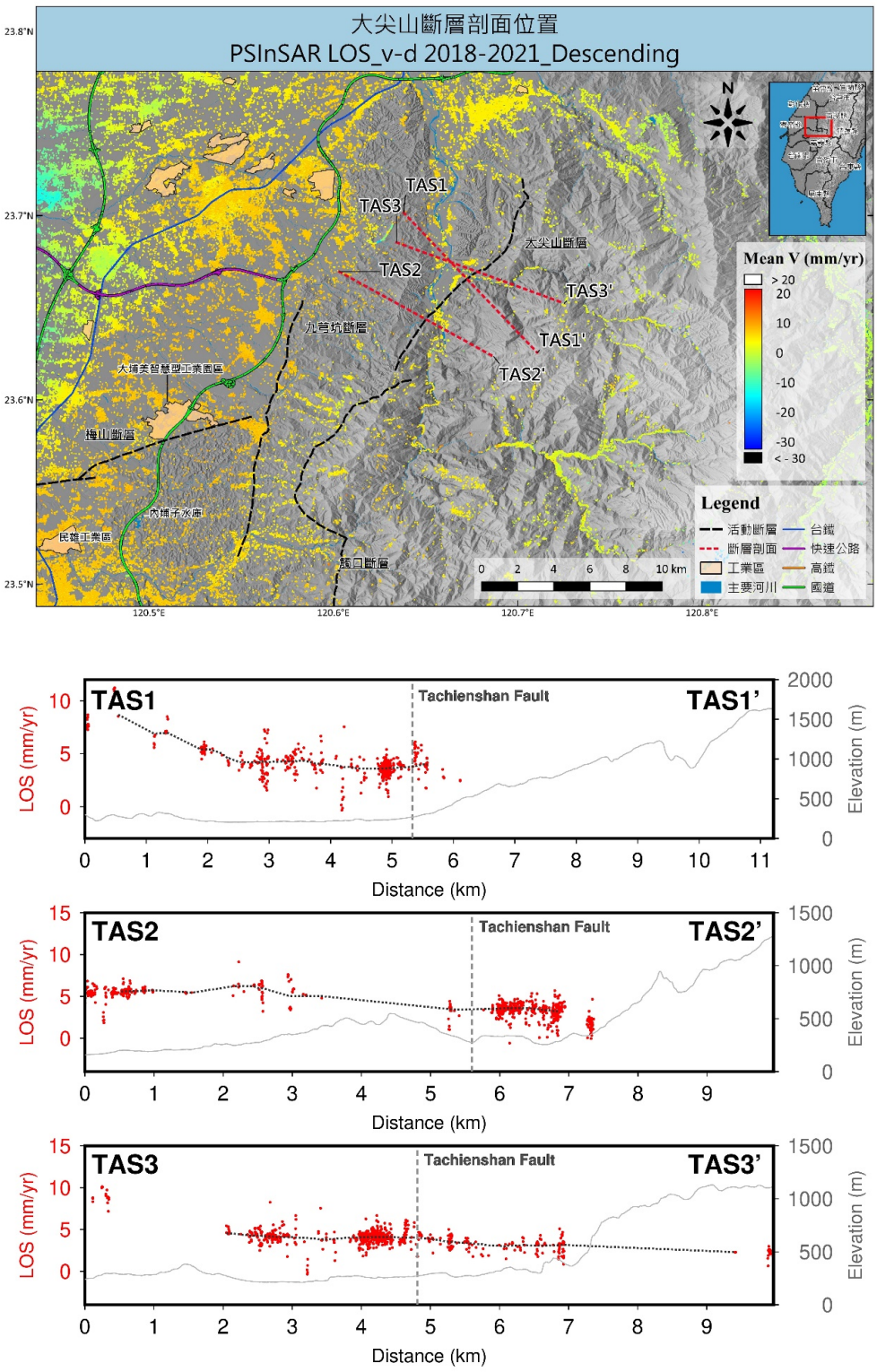


圖 C-17：2018-2021 大尖山斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-4 觸口斷層(CKU)

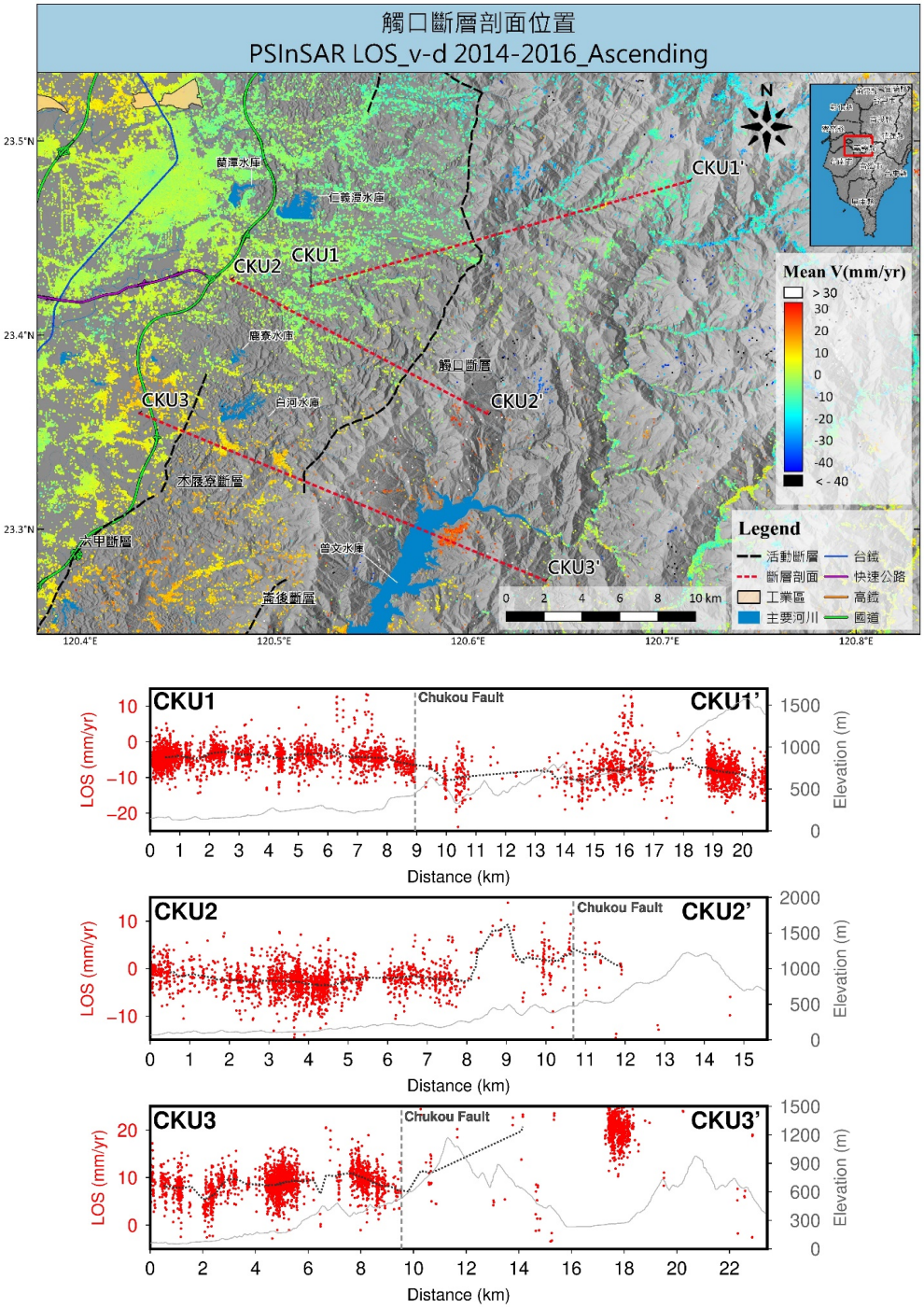


圖 C-18：2014-2016 觸口斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

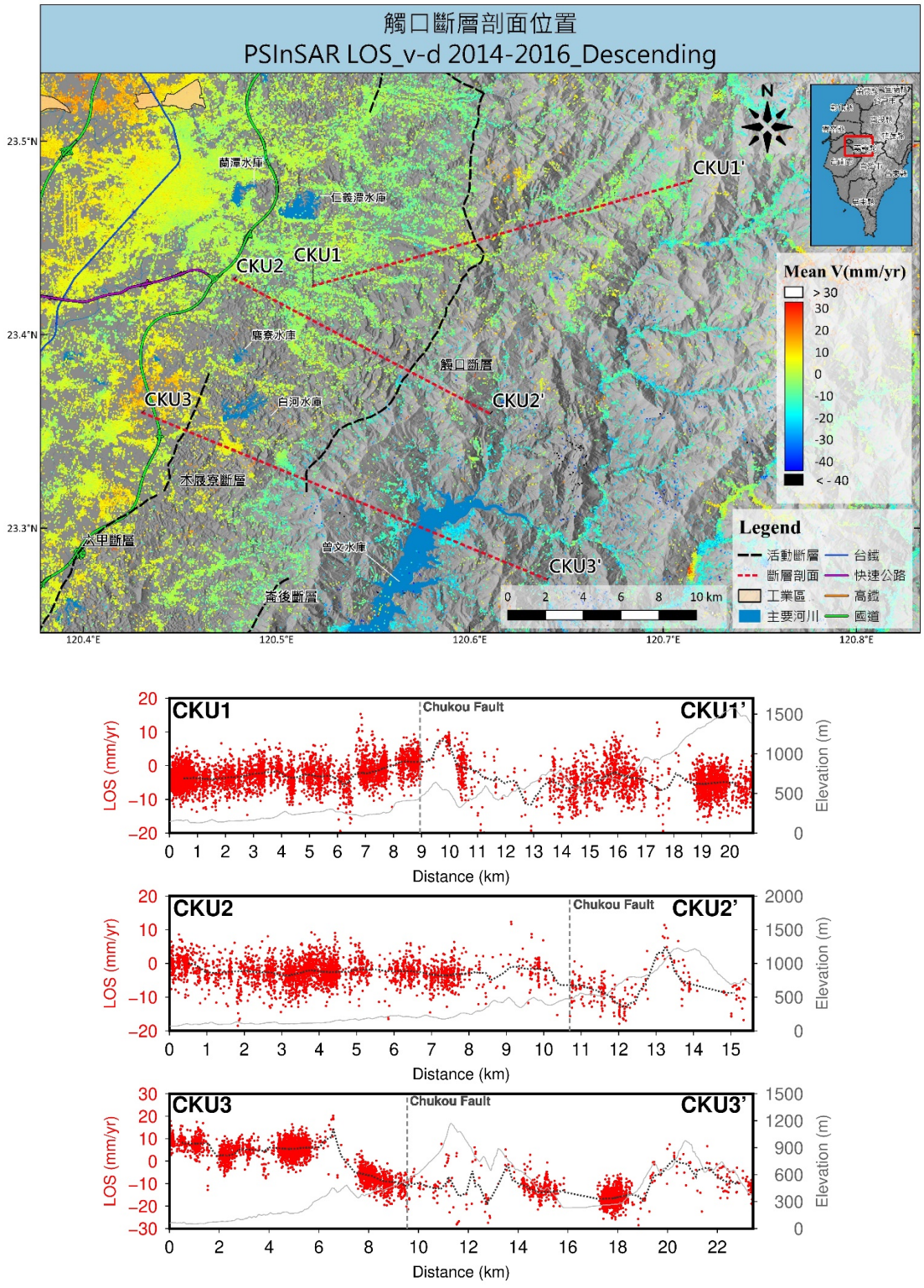


圖 C-19：2014-2016 觸口斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

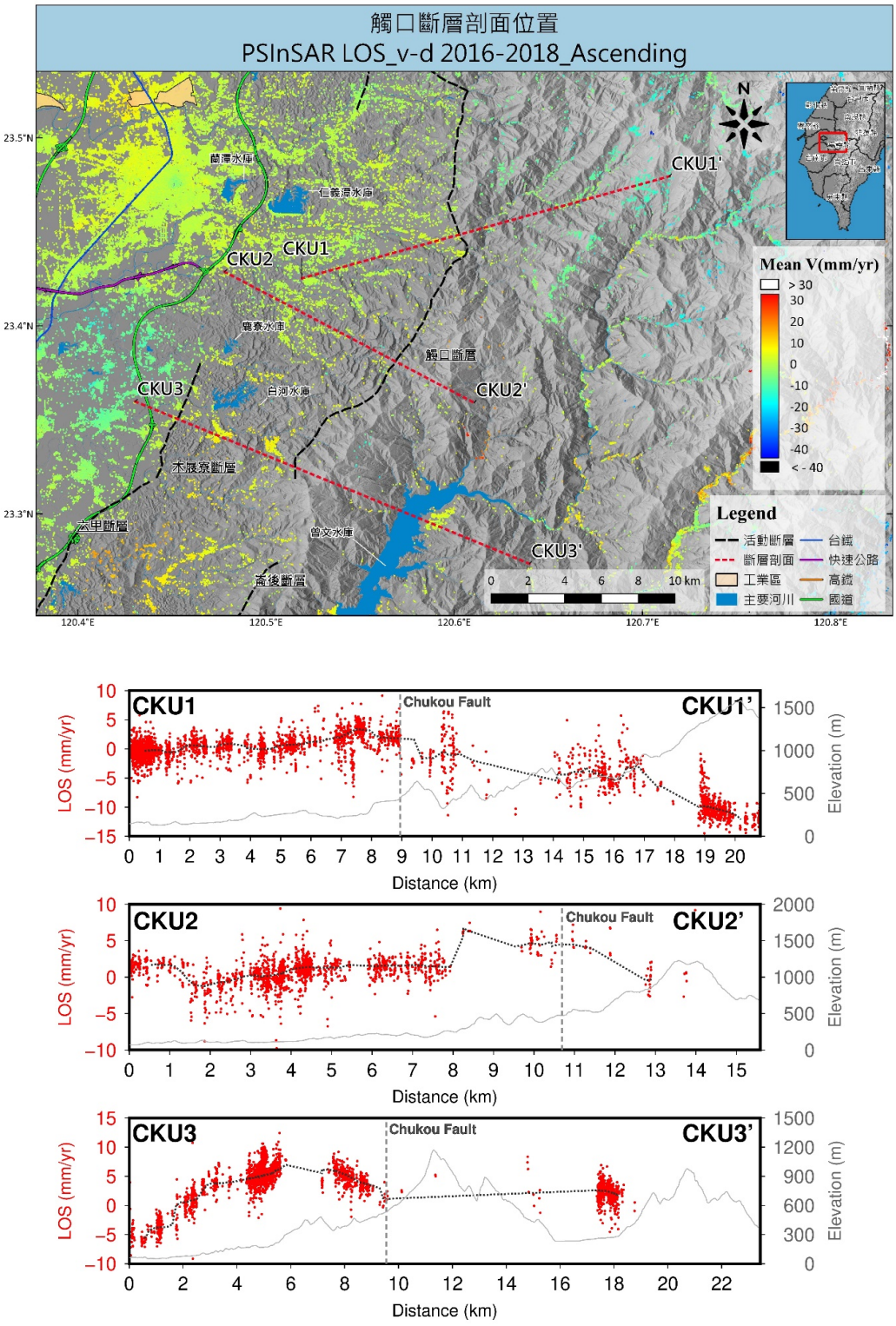


圖 C-20：2016-2018 觸口斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

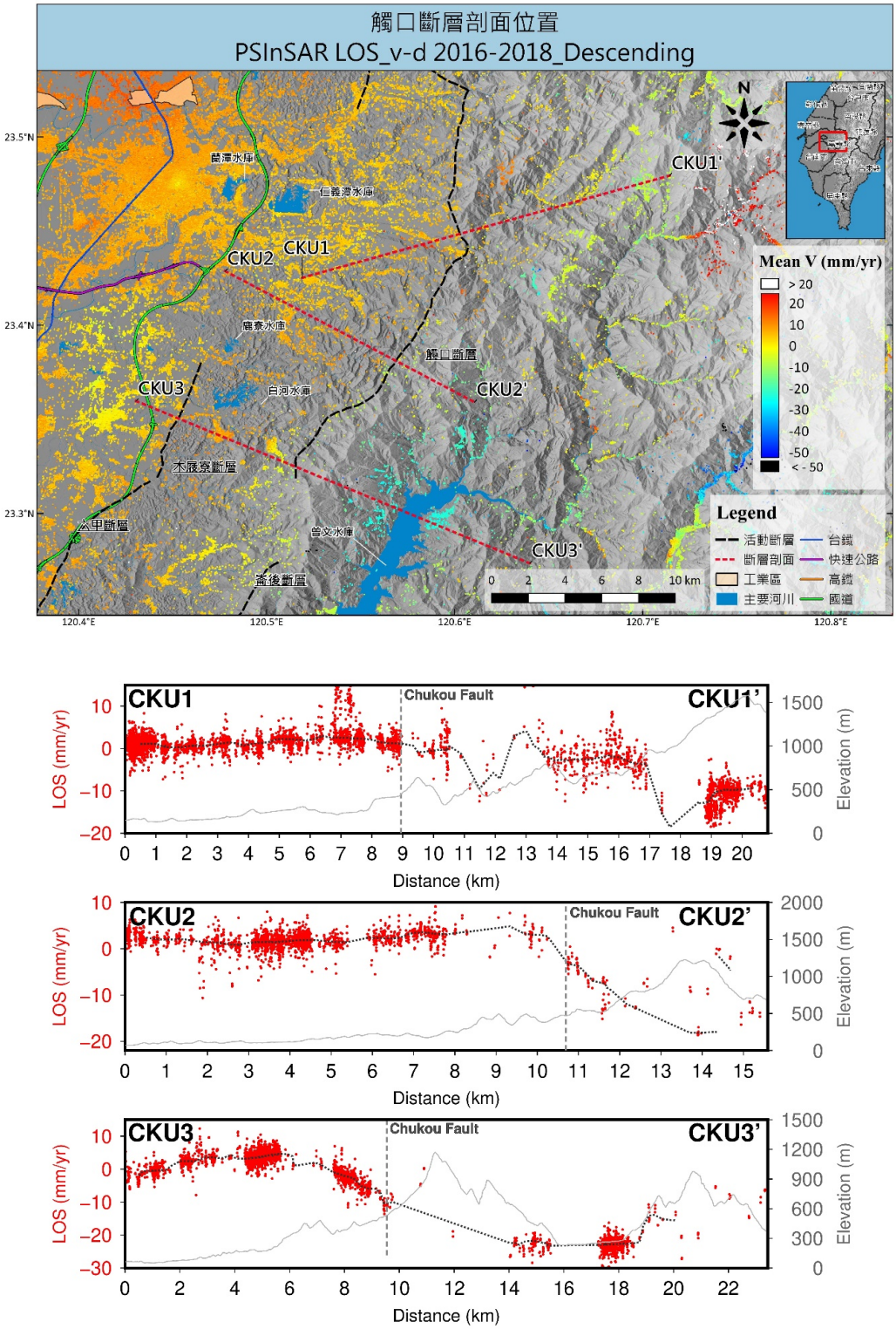


圖 C-21：2016-2018 觸口斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

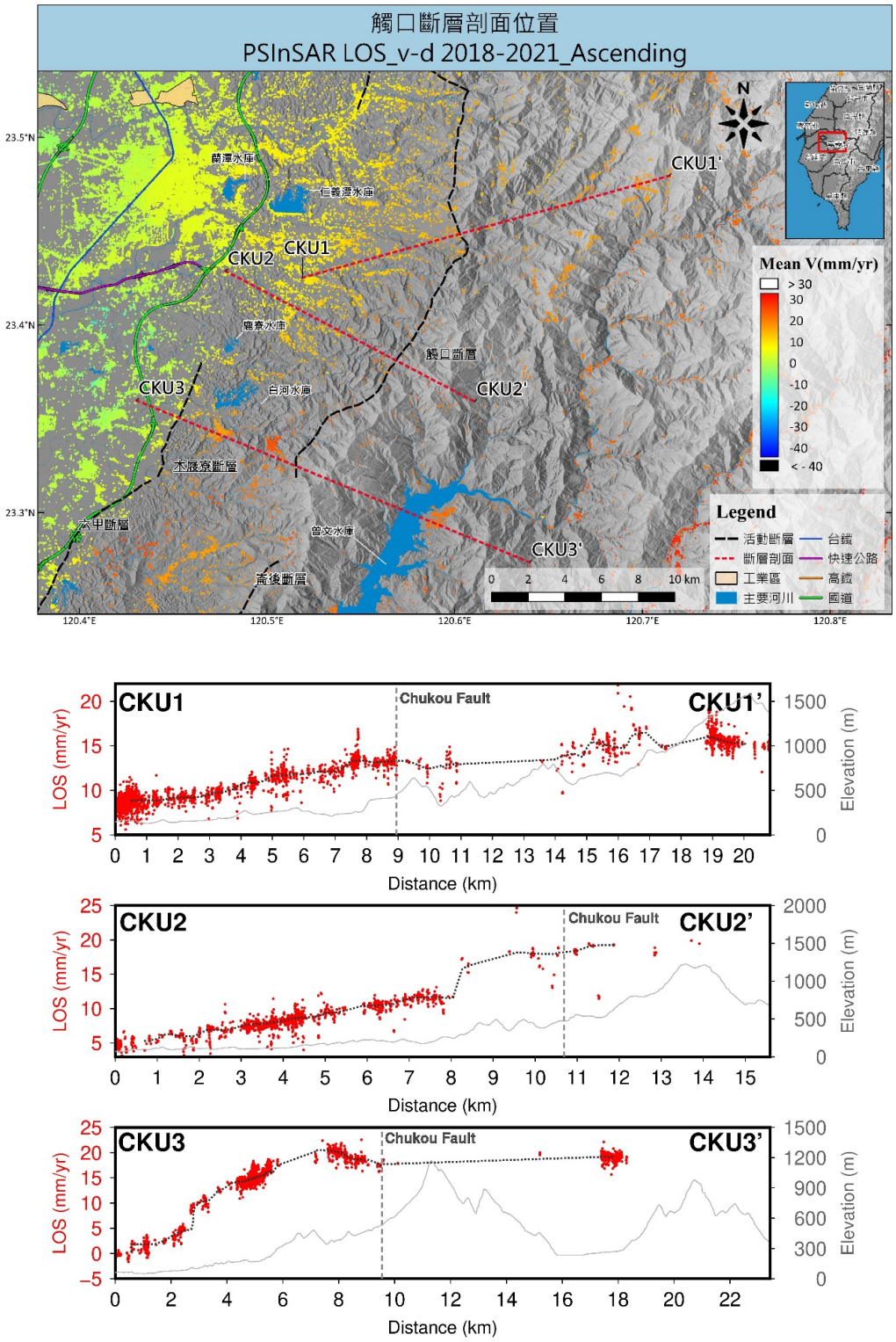


圖 C-22：2018-2021 觸口斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

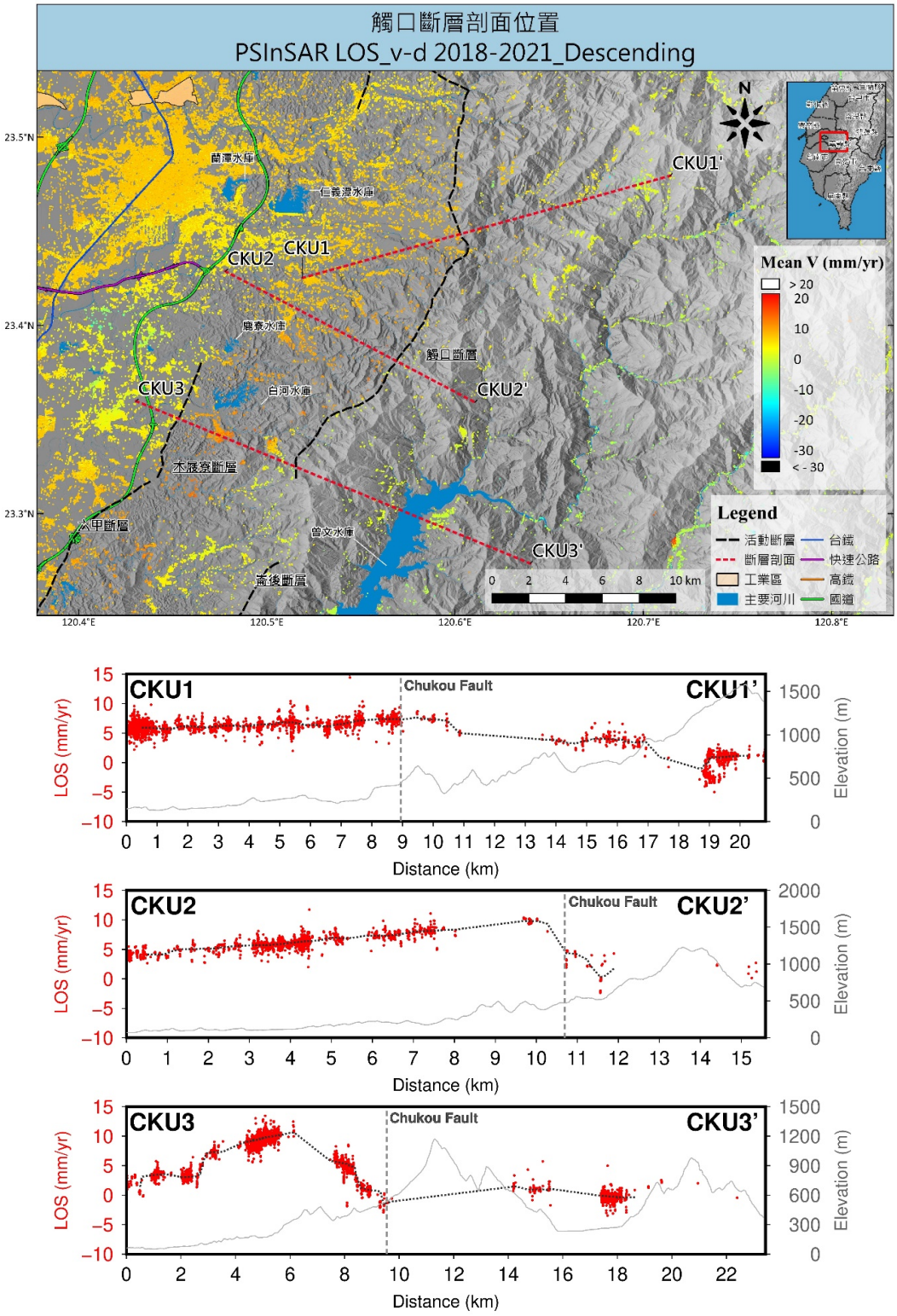


圖 C-23：2018-2021 觸口斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-5 木屐寮斷層(MCL)

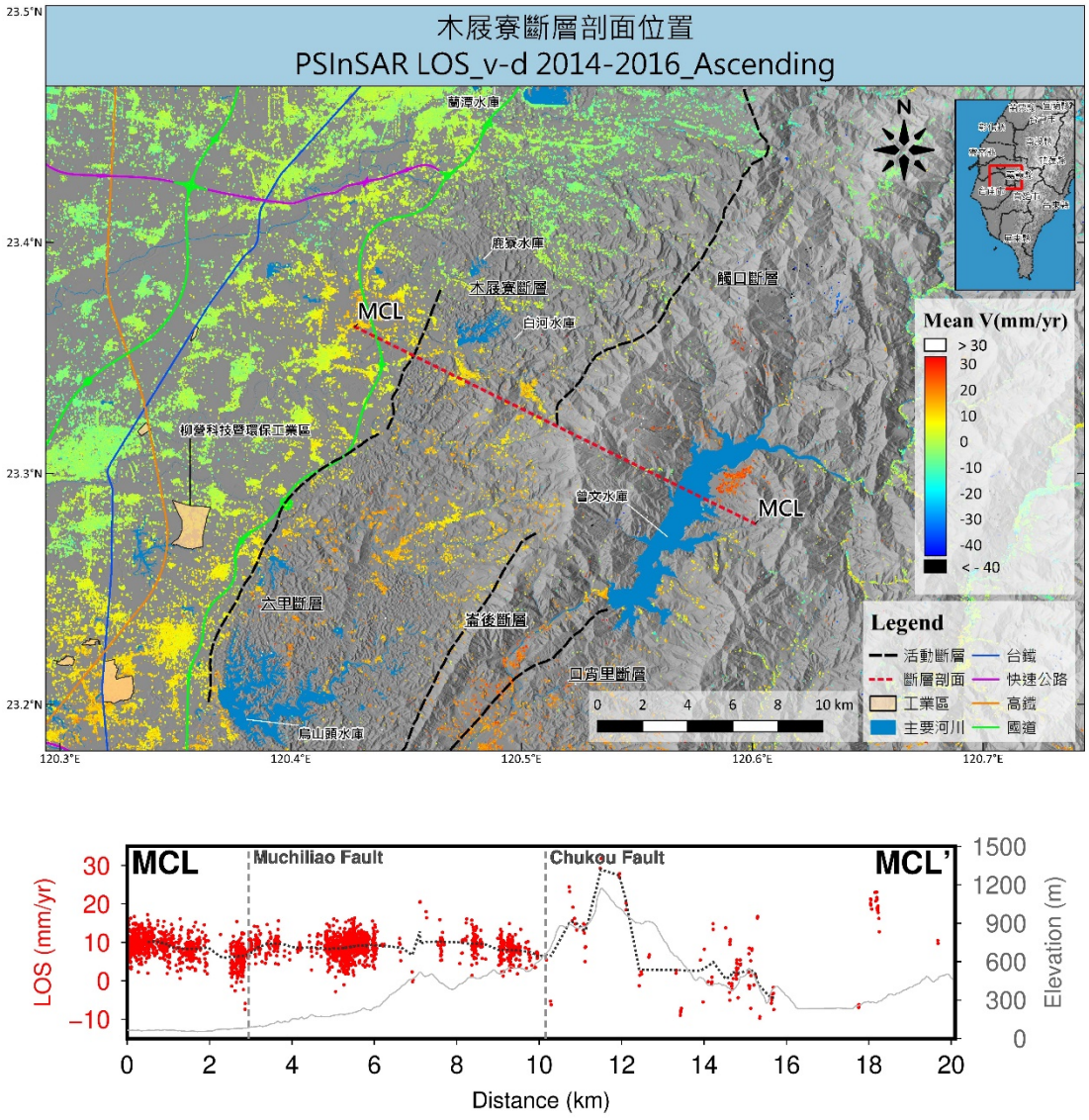


圖 C-24：2014-2016 木屐寮斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

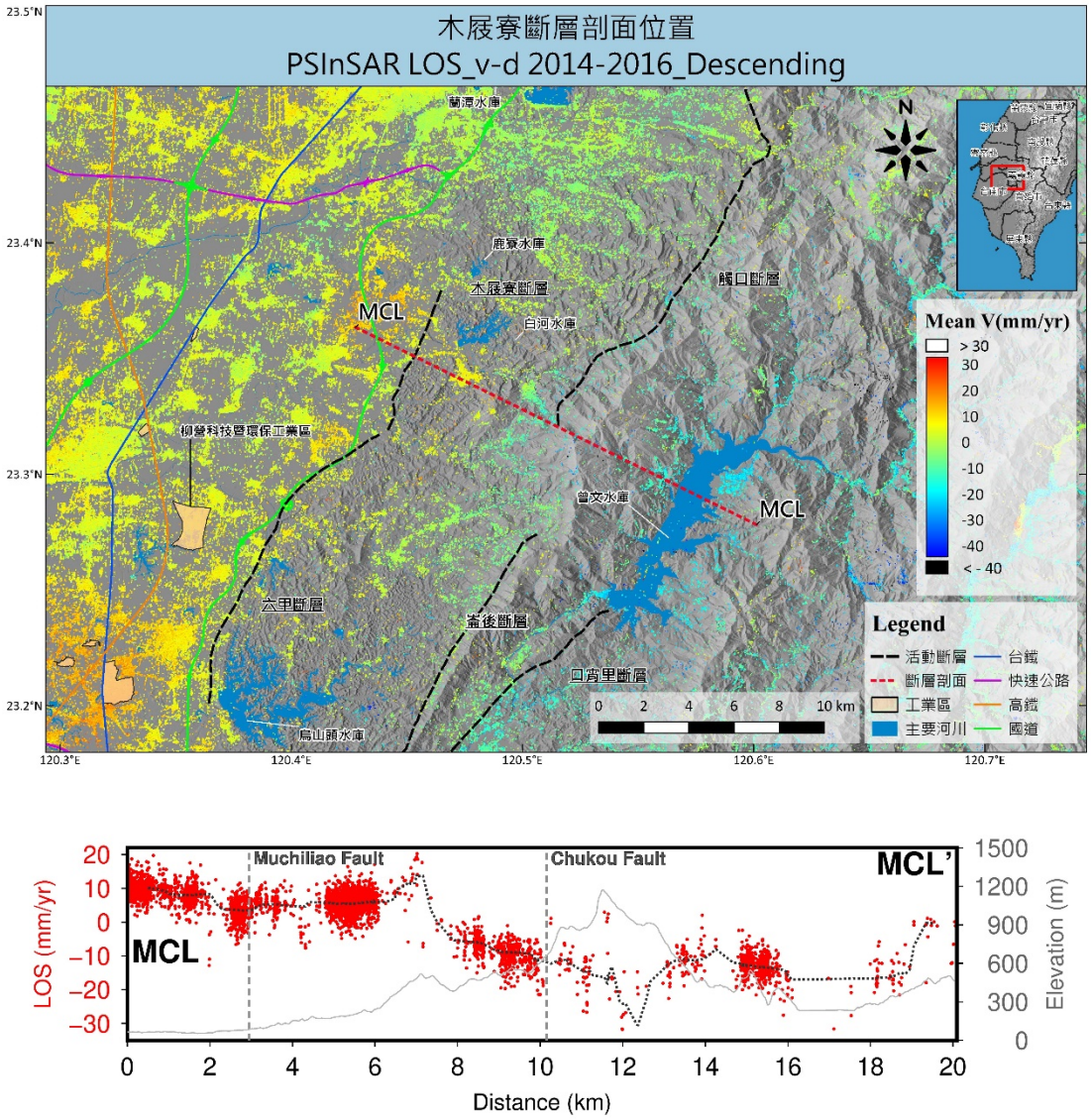


圖 C-25：2014-2016 木屐寮斷層升降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

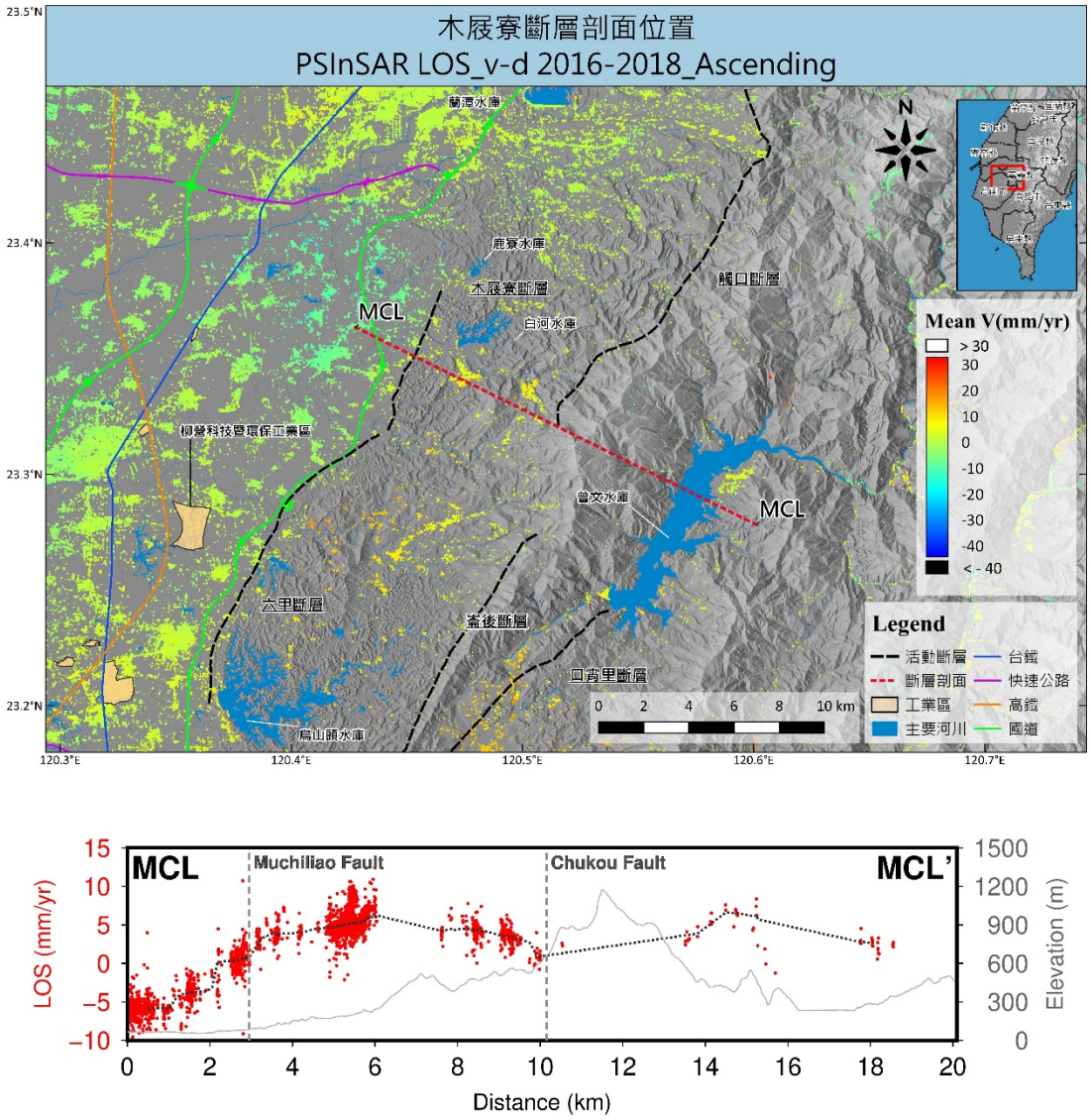


圖 C-26：2016-2018 木屐寮斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

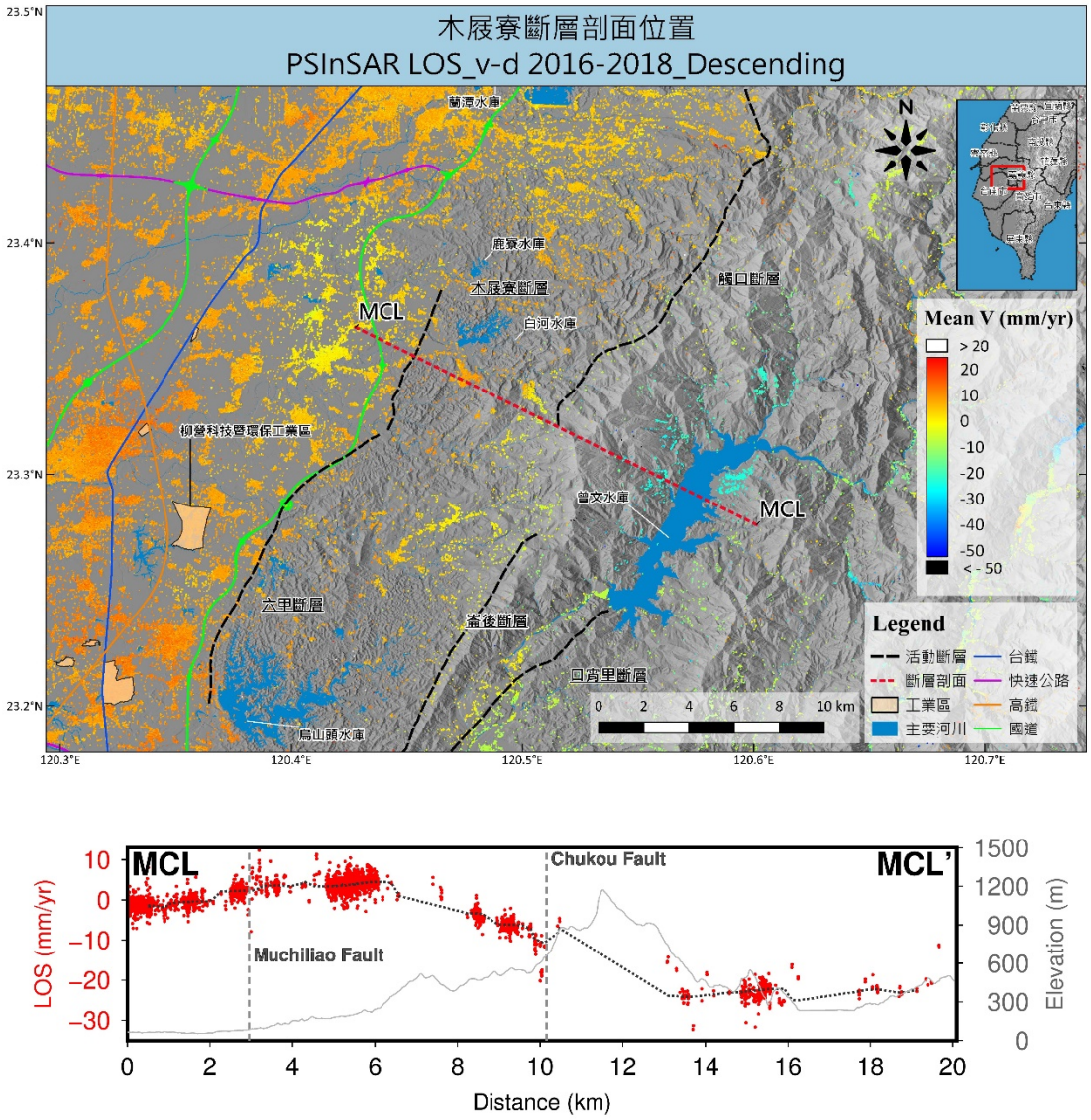


圖 C-27：2016-2018 木屐寮斷層升降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

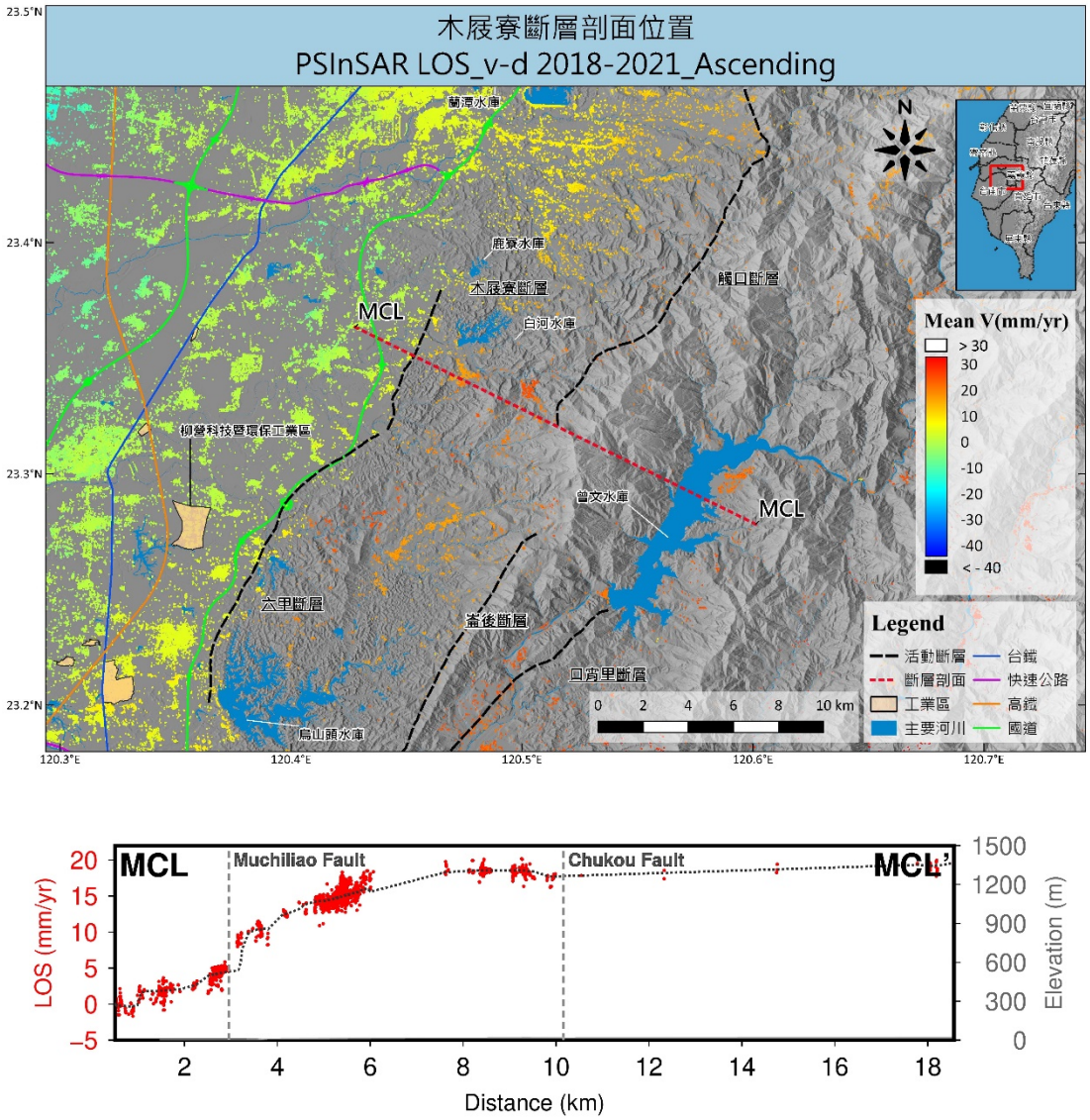


圖 C-28：2018-2021 木屐寮斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

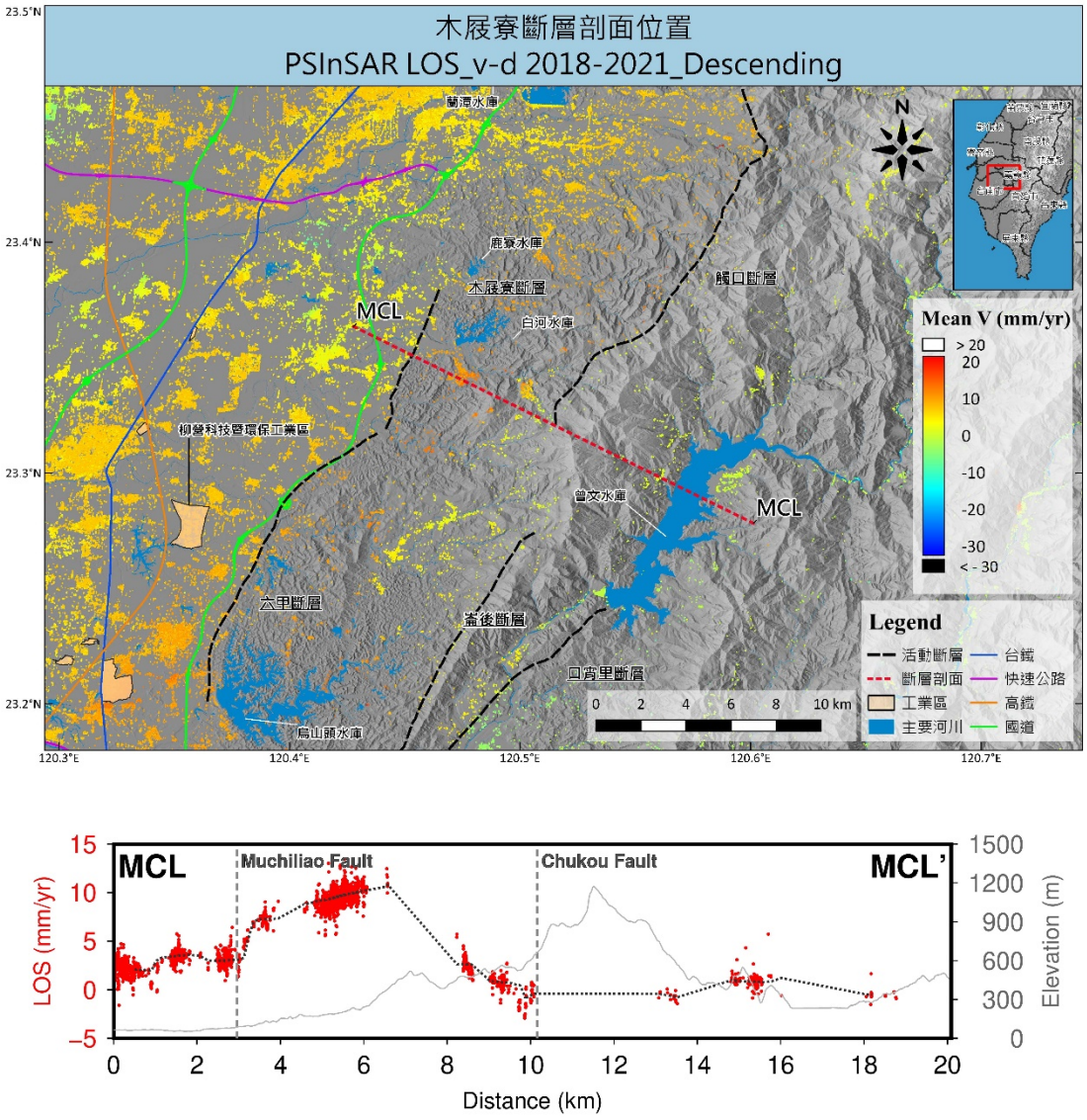


圖 C-29：2018-2021 木屐寮斷層升降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-6 六甲斷層(LCA)

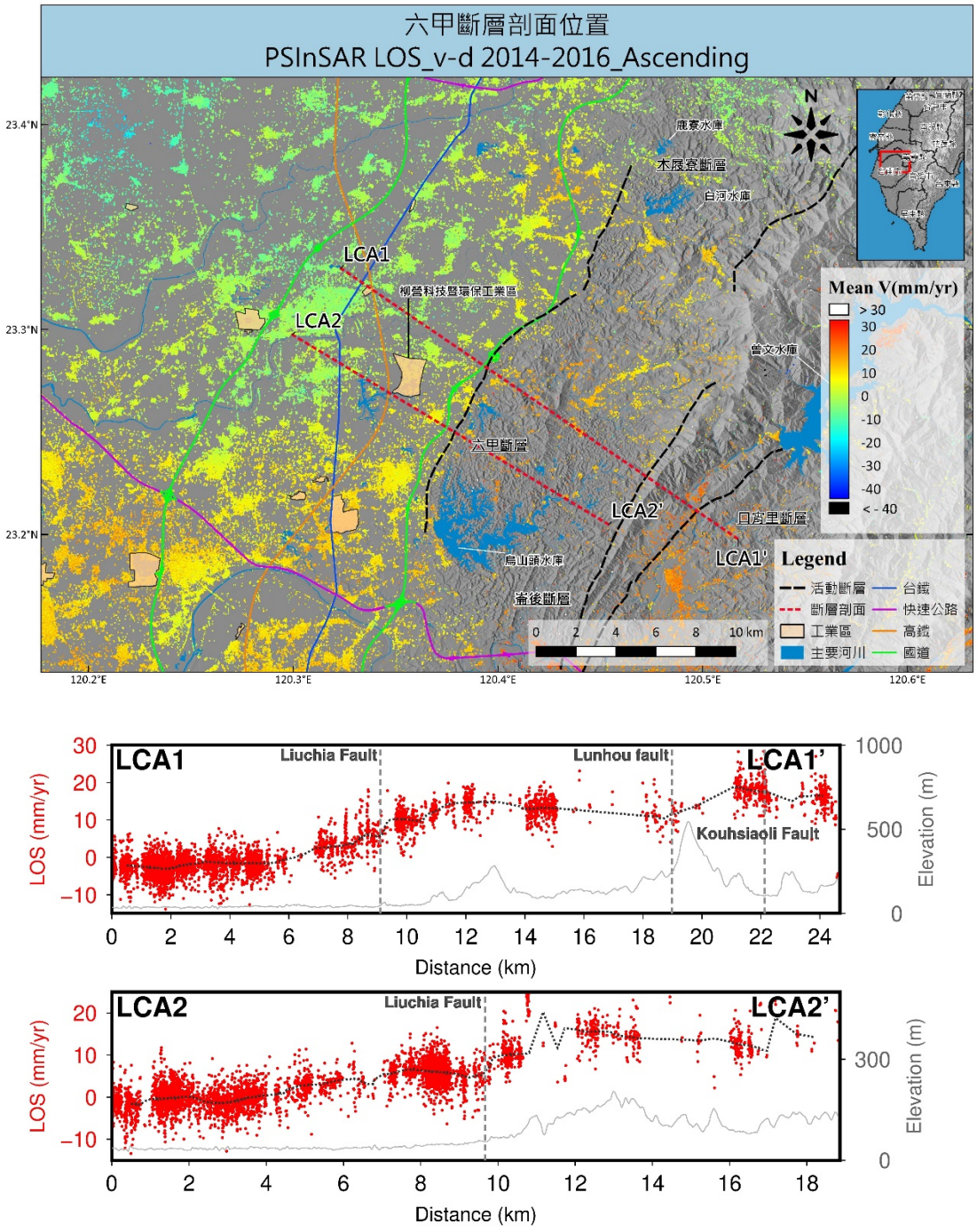


圖 C-30：2014-2016 六甲斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

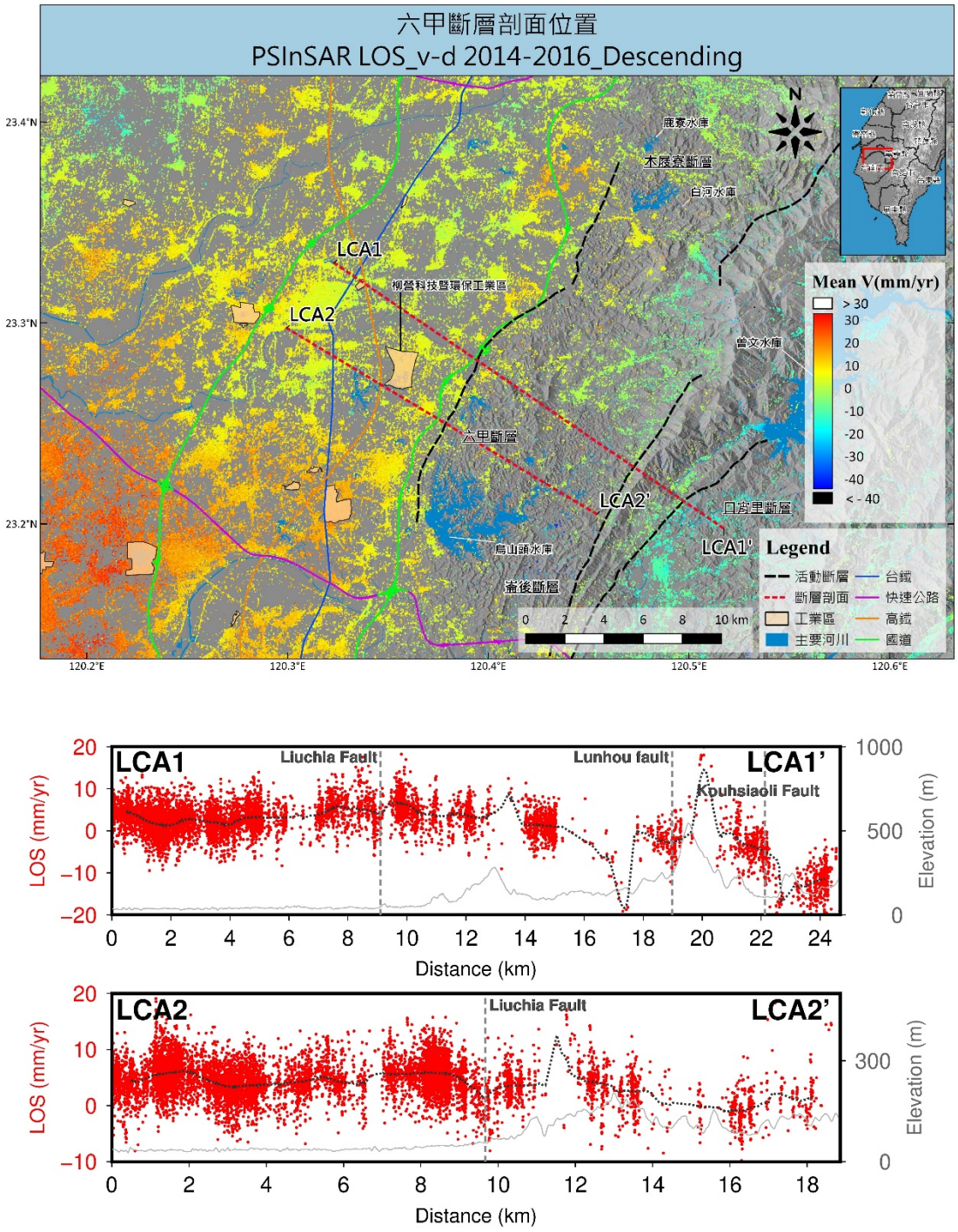


圖 C-31：2014-2016 六甲斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

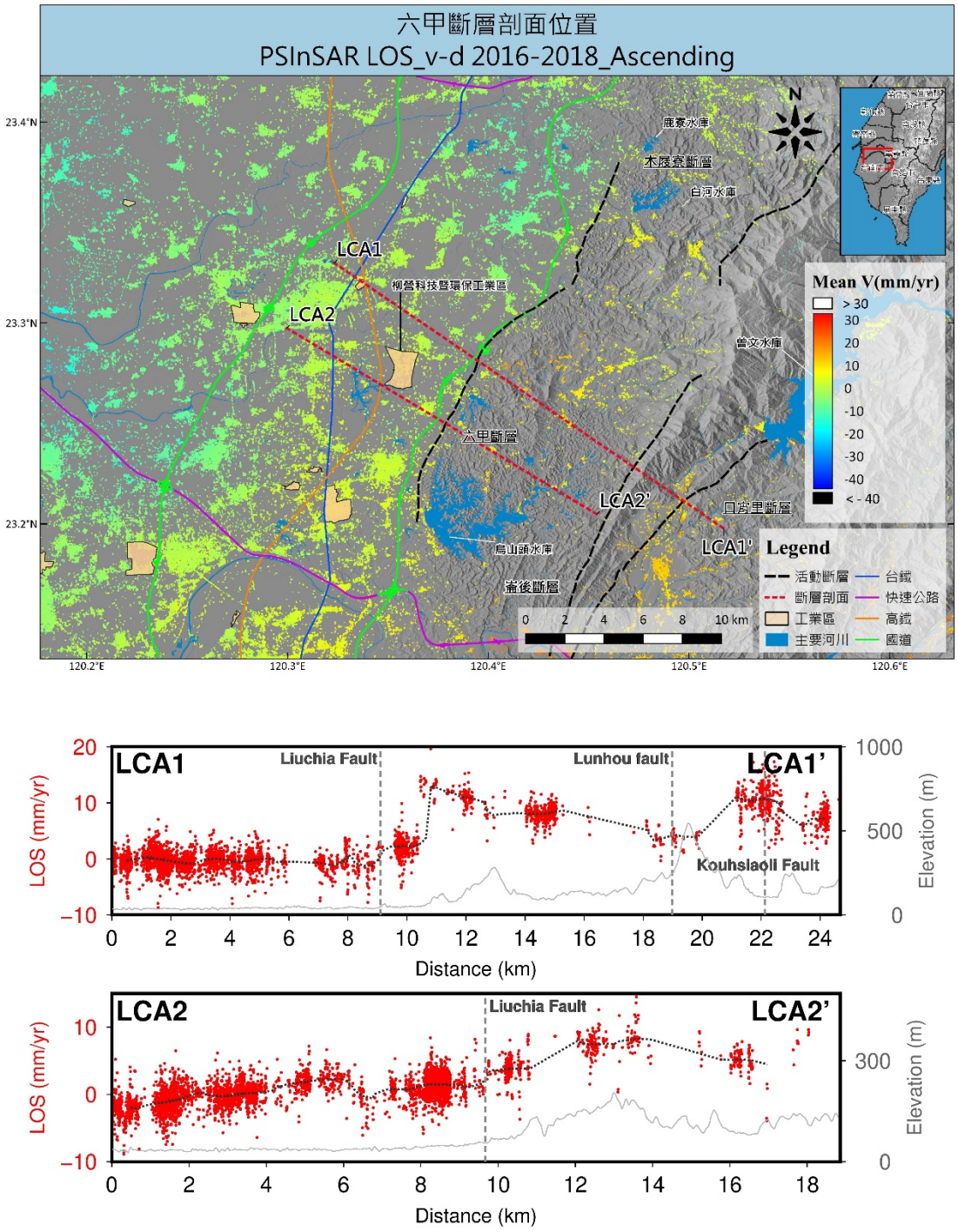


圖 C-32：2016-2018 六甲斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

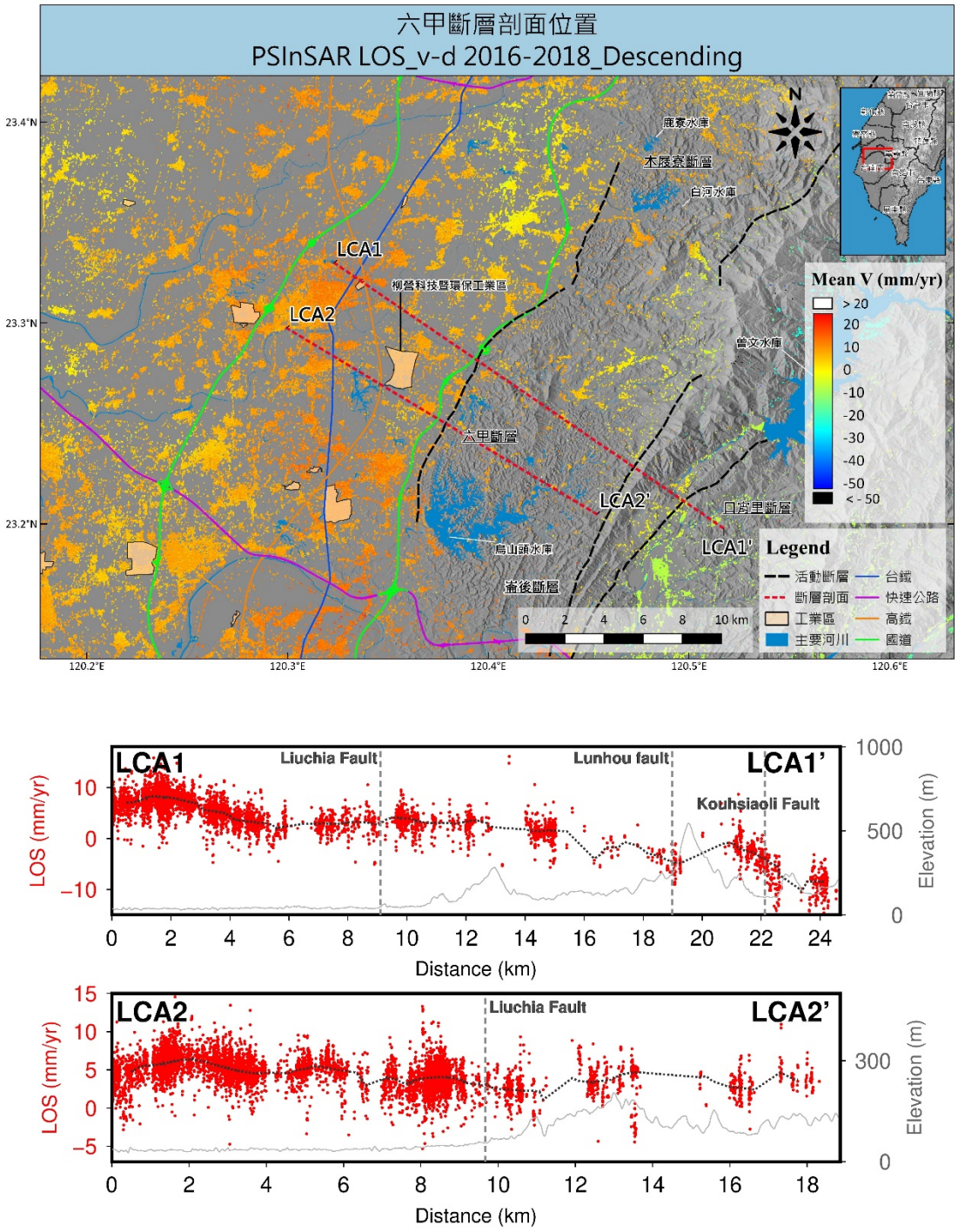


圖 C-33：2016-2018 六甲斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

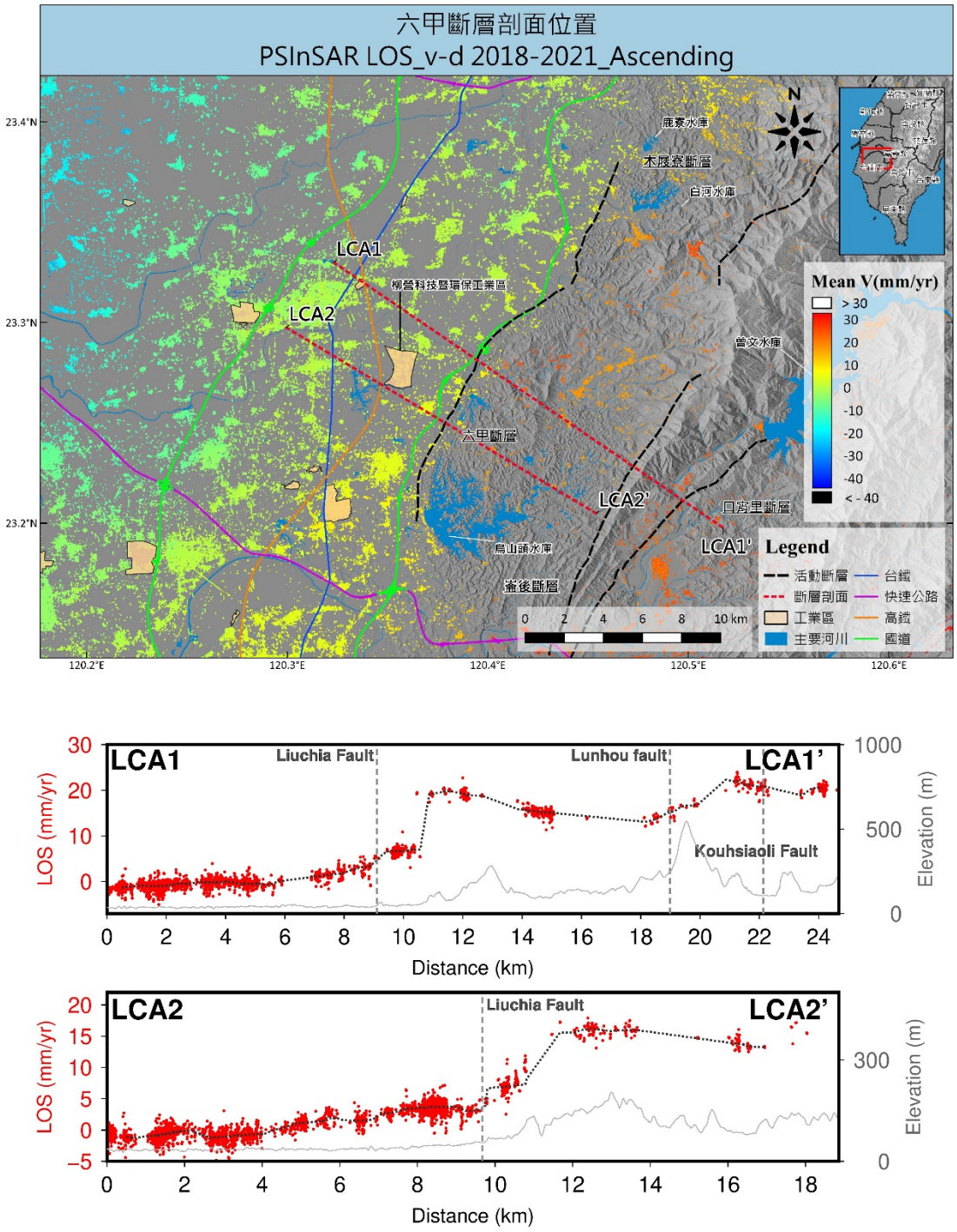


圖 C-34：2018-2021 六甲斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

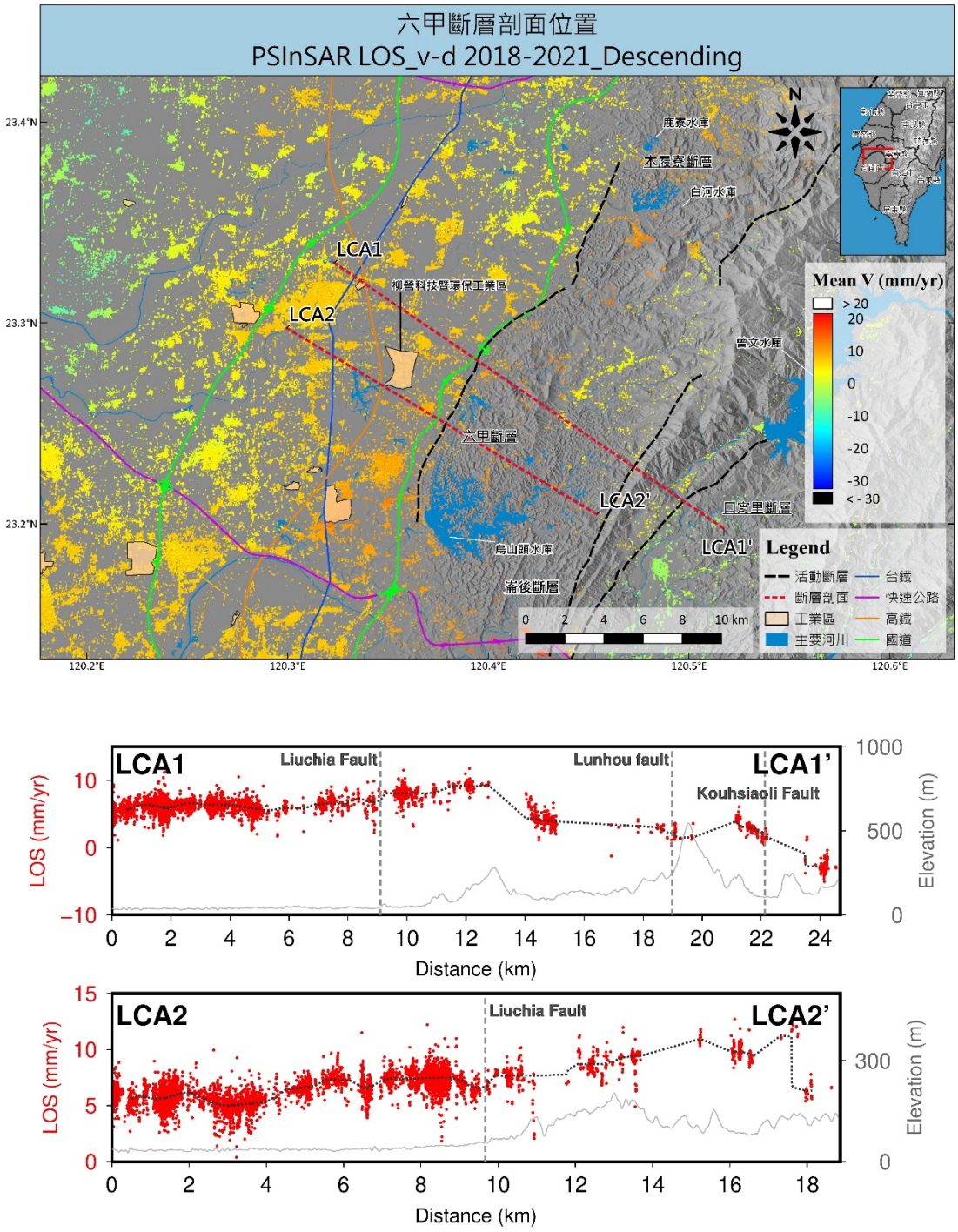


圖 C-35：2018-2021 六甲斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-7 新化斷層(HHA)

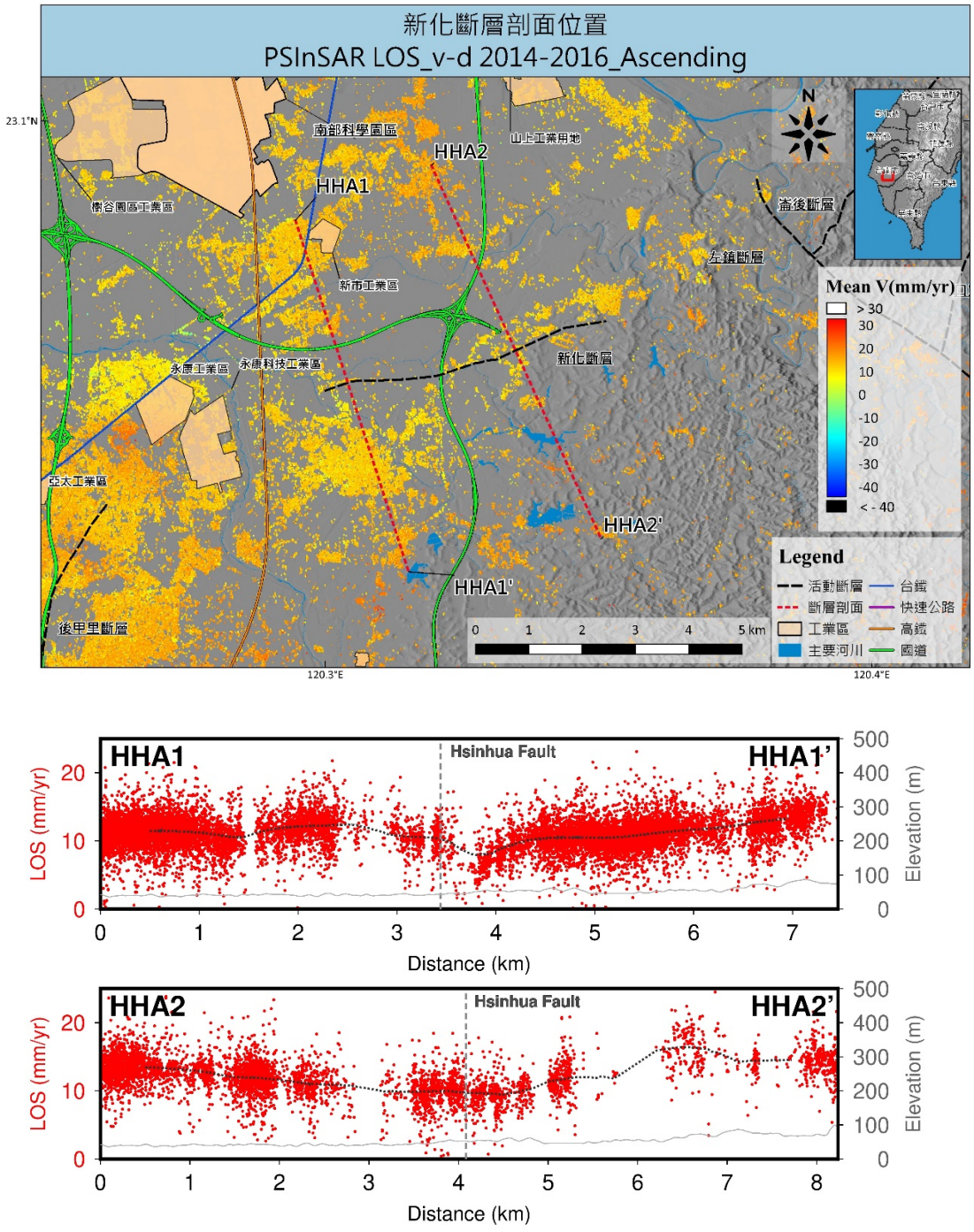


圖 C-36：2014-2016 新化斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

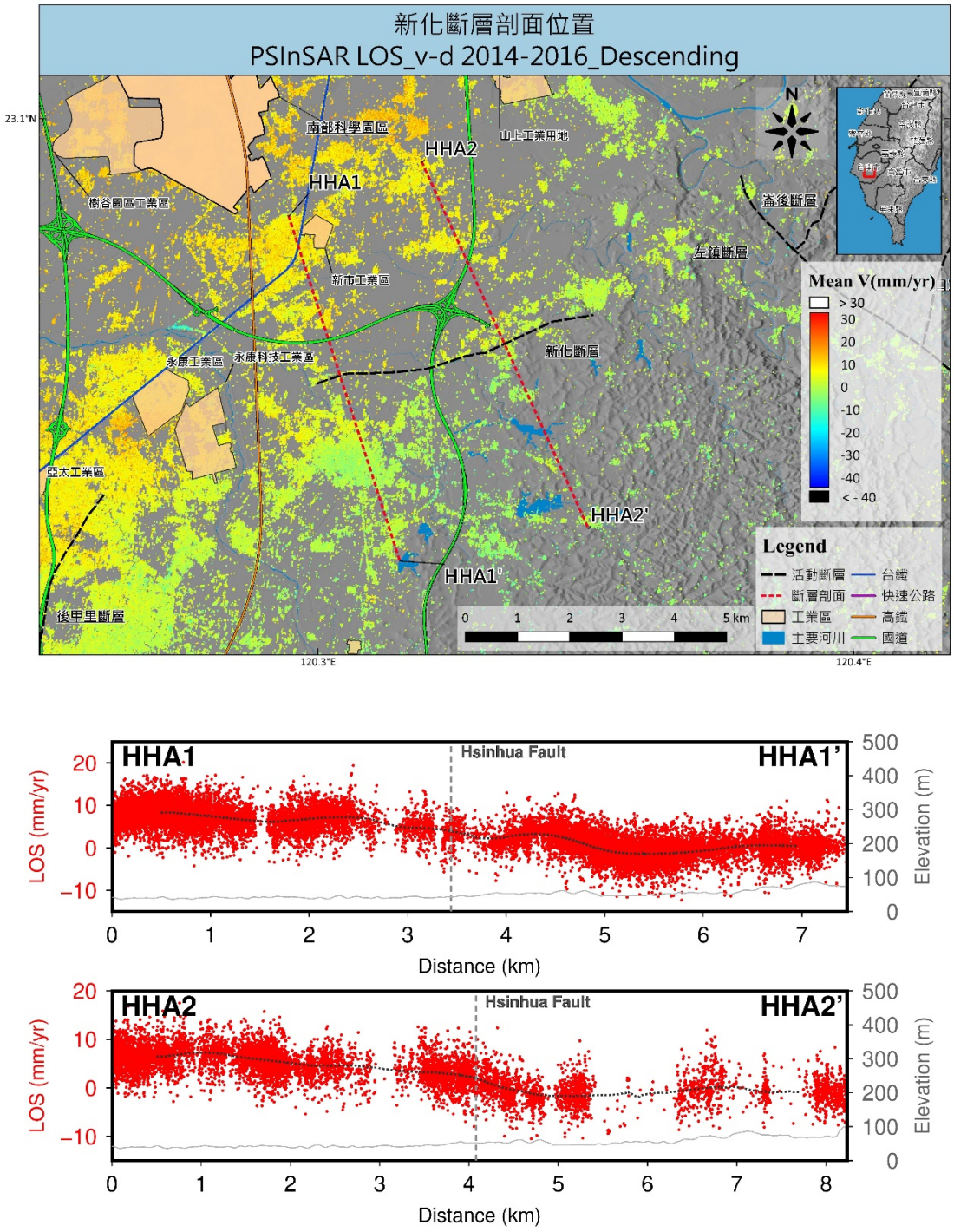


圖 C-37：2014-2016 新化斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

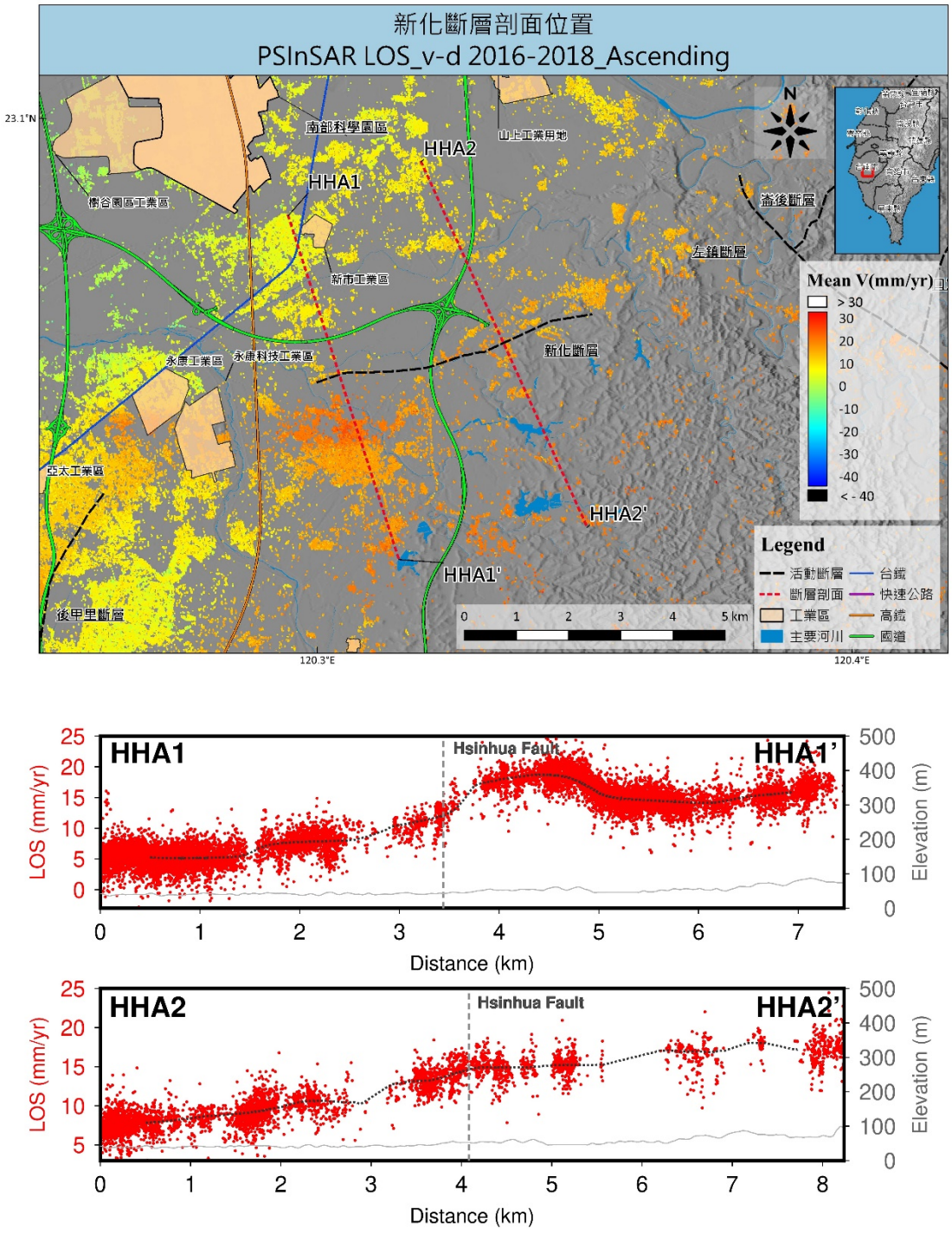


圖 C-38：2016-2018 新化斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

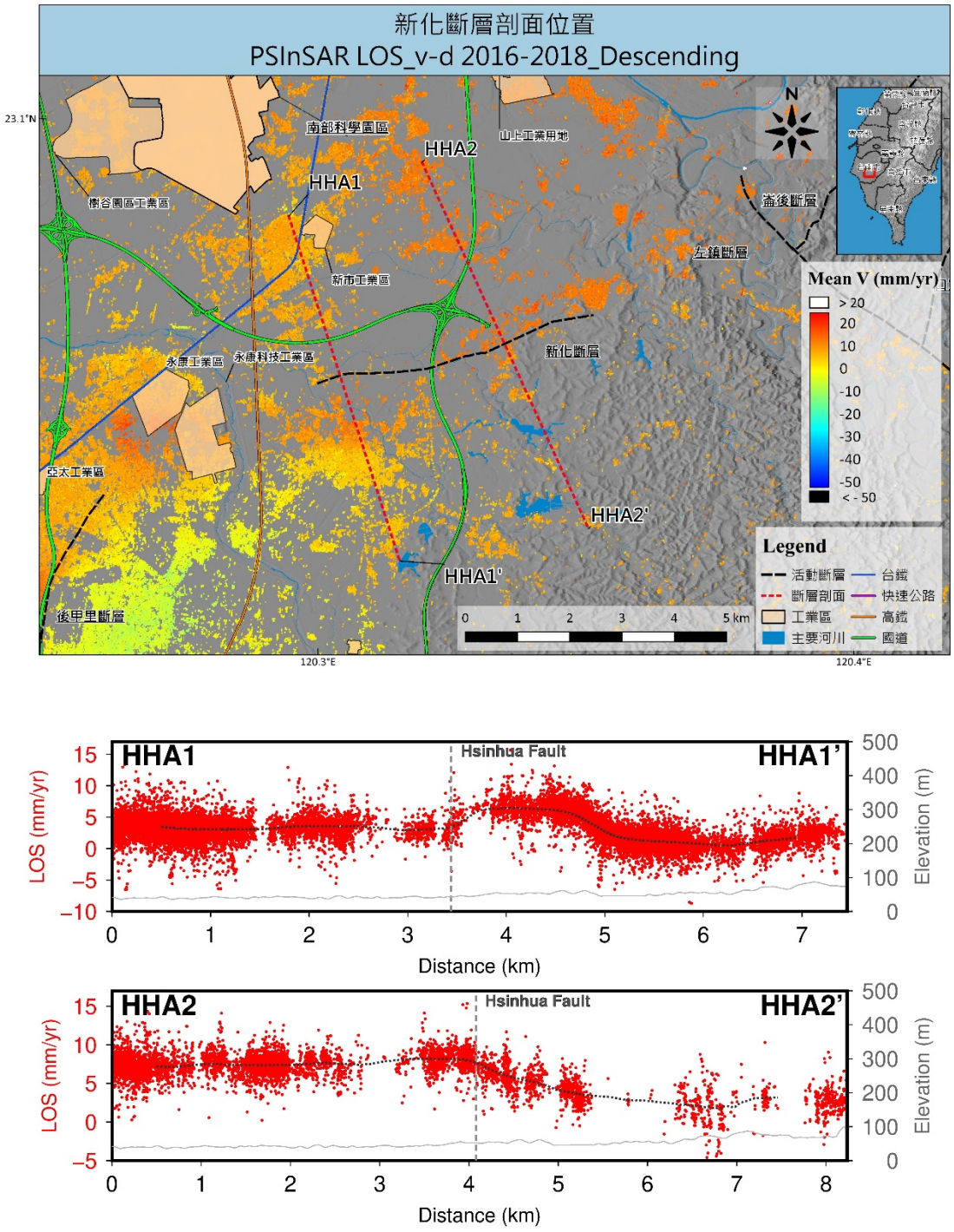


圖 C-39：2016-2018 新化斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

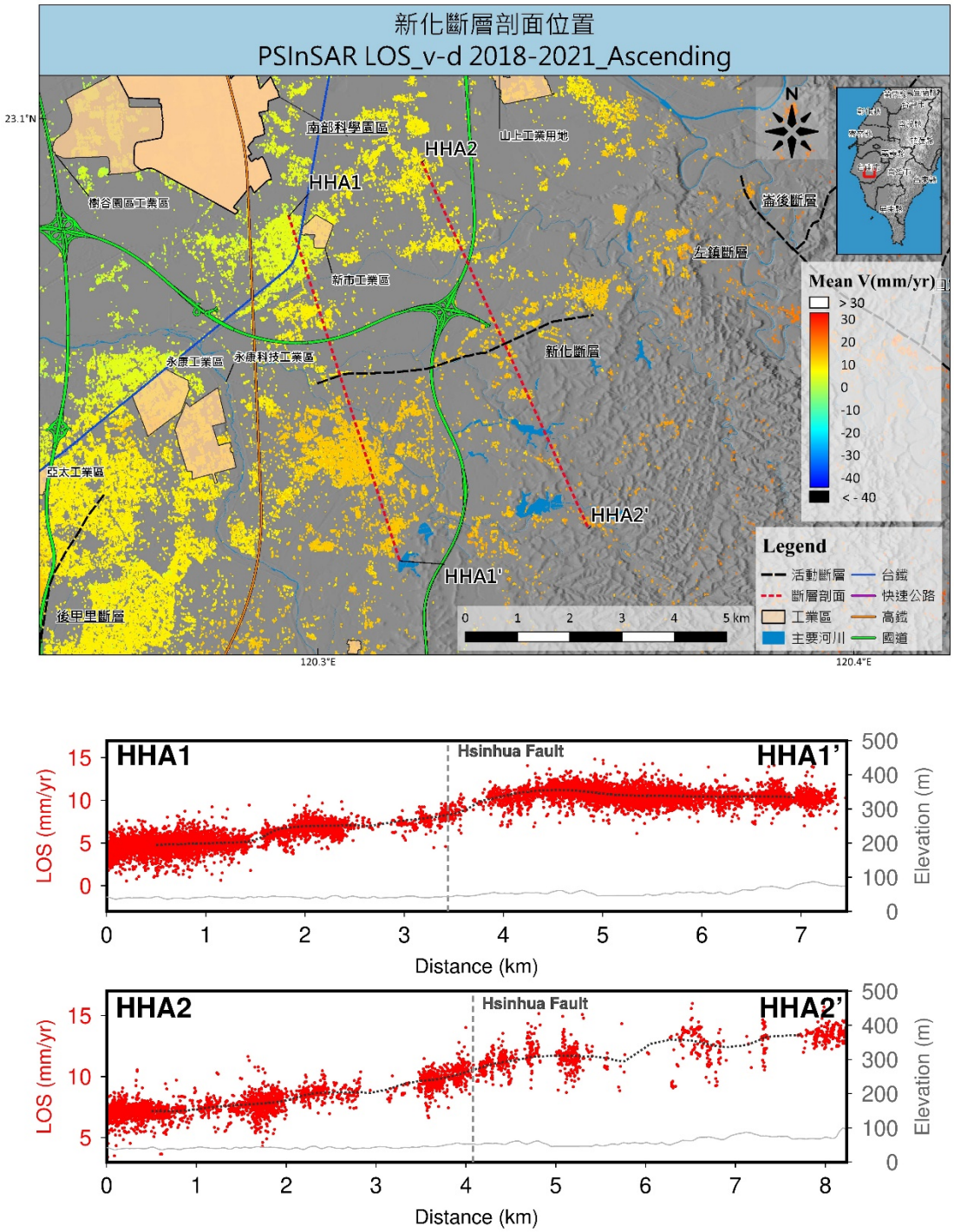


圖 C-40：2018-2021 新化斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

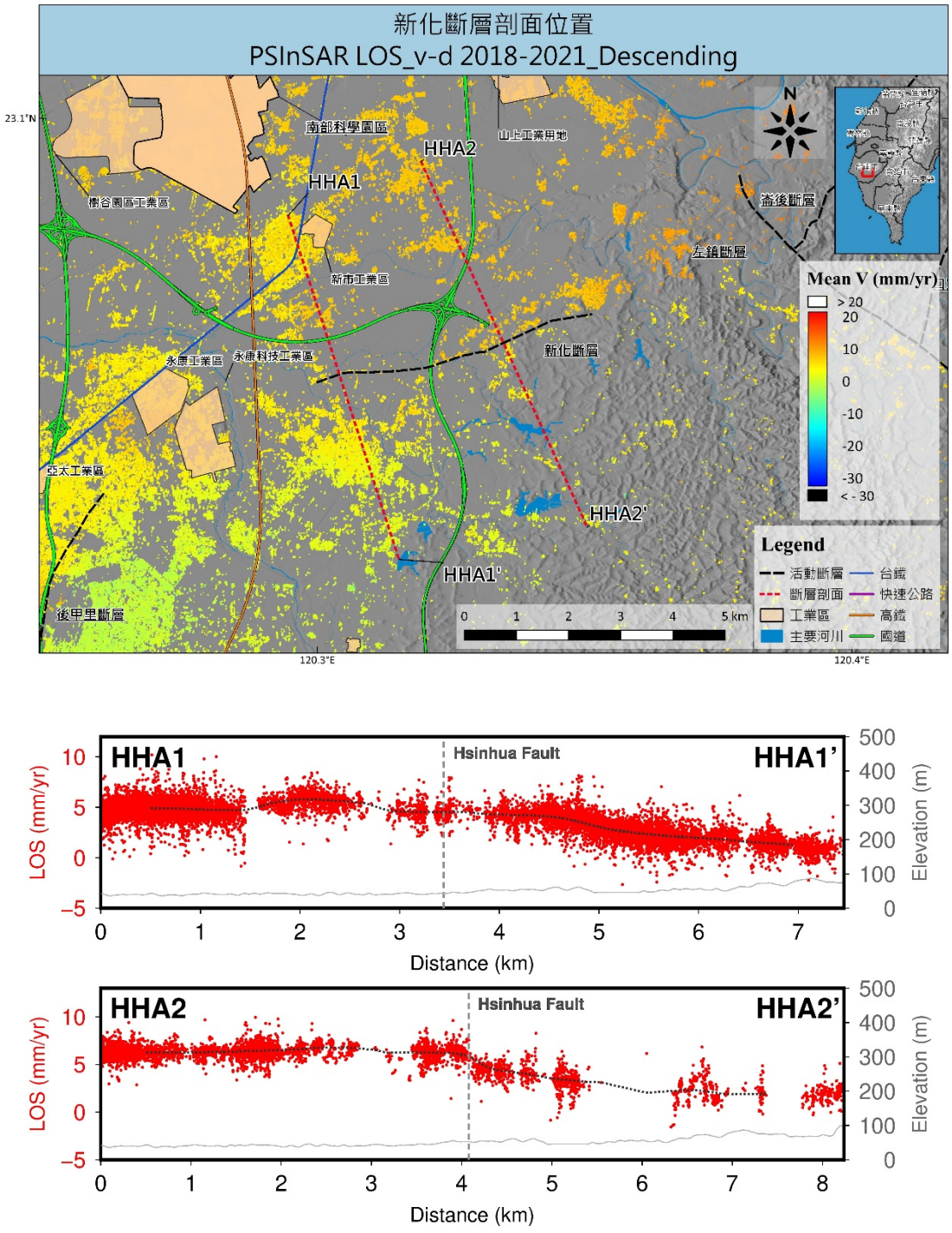


圖 C-41：2018-2021 新化斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-8 後甲里斷層(HCL)

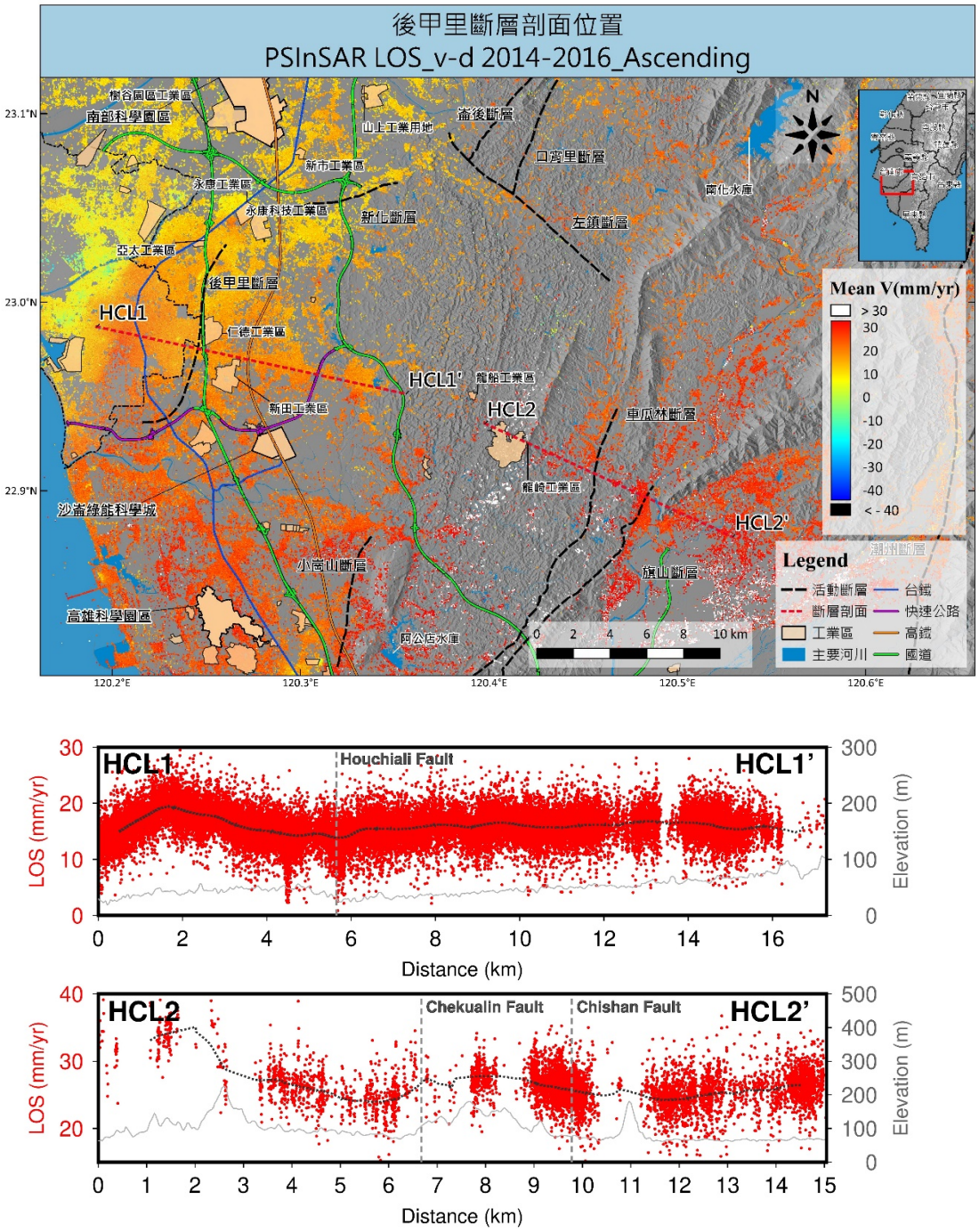


圖 C-42：2014-2016 後甲里斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

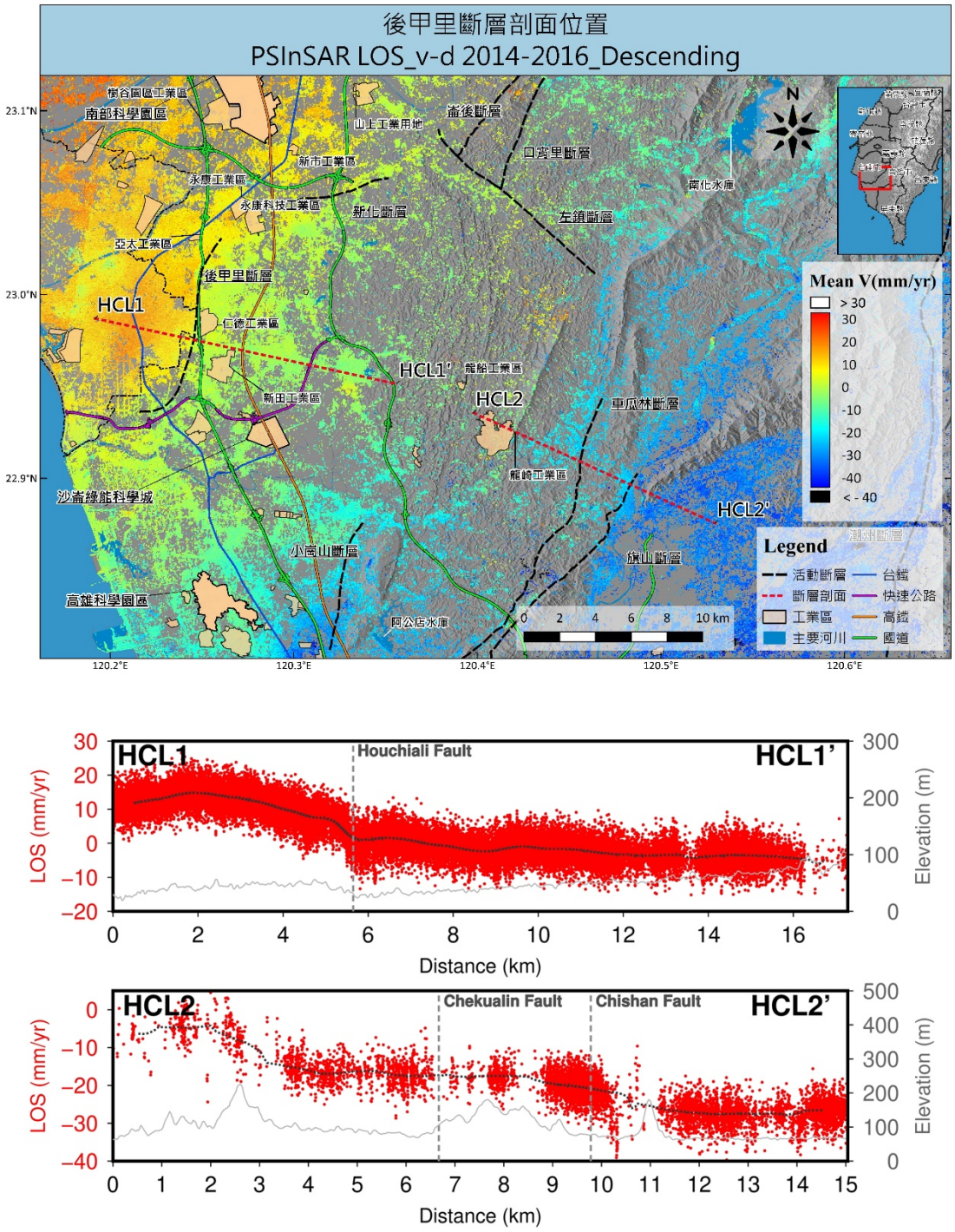


圖 C-43：2014-2016 後甲里斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

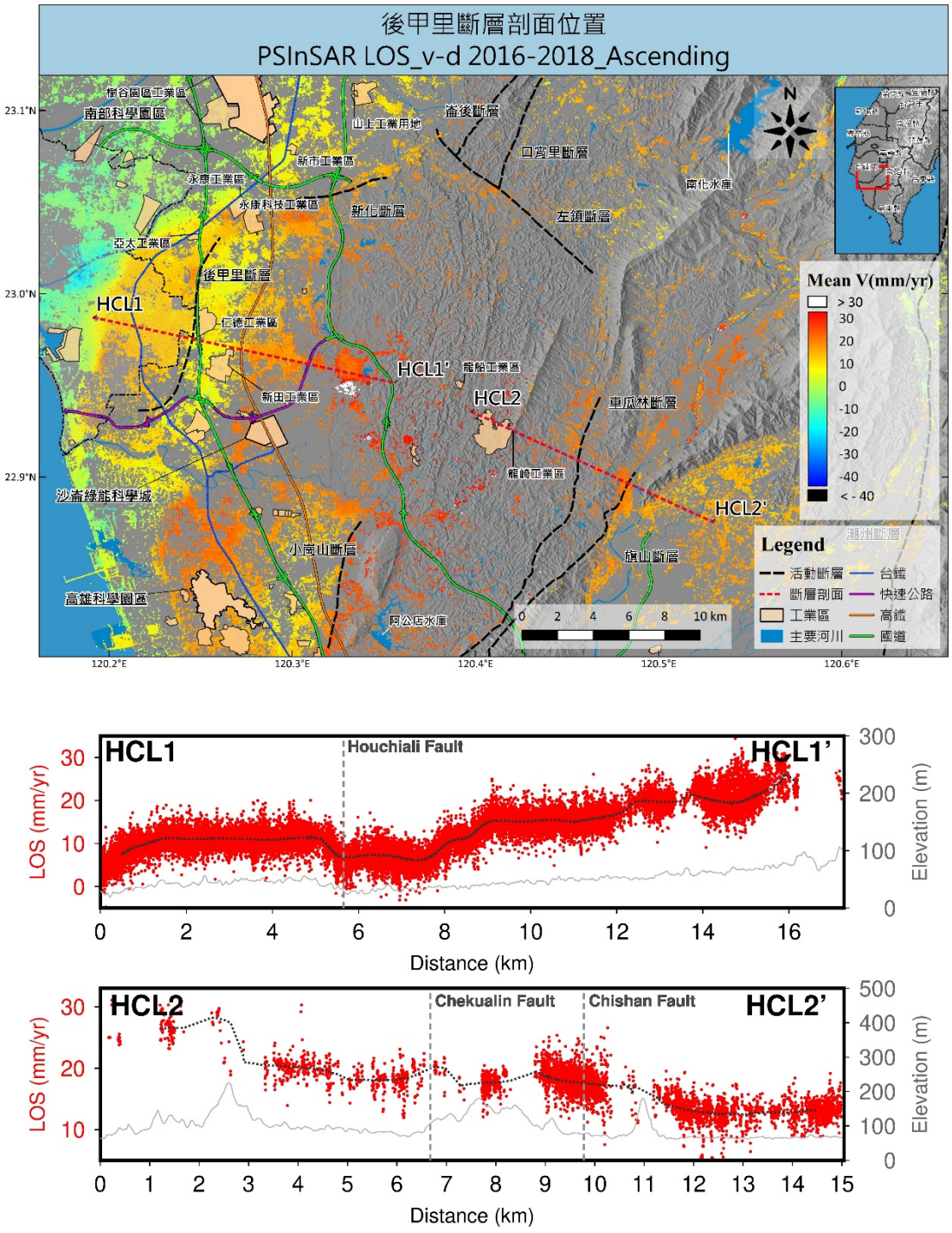


圖 C-44：2016-2018 後甲里斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

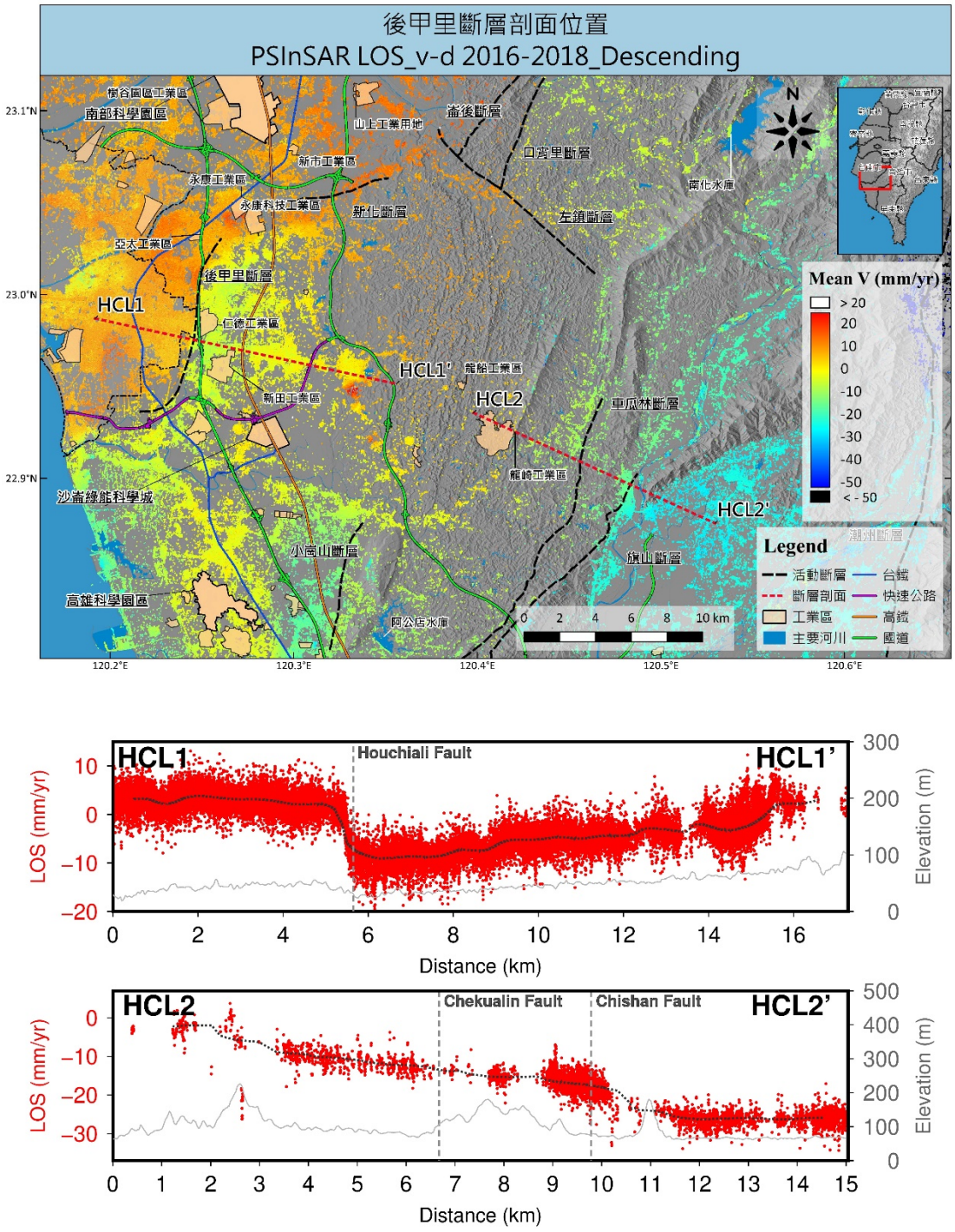


圖 C-45：2016-2018 後甲里斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

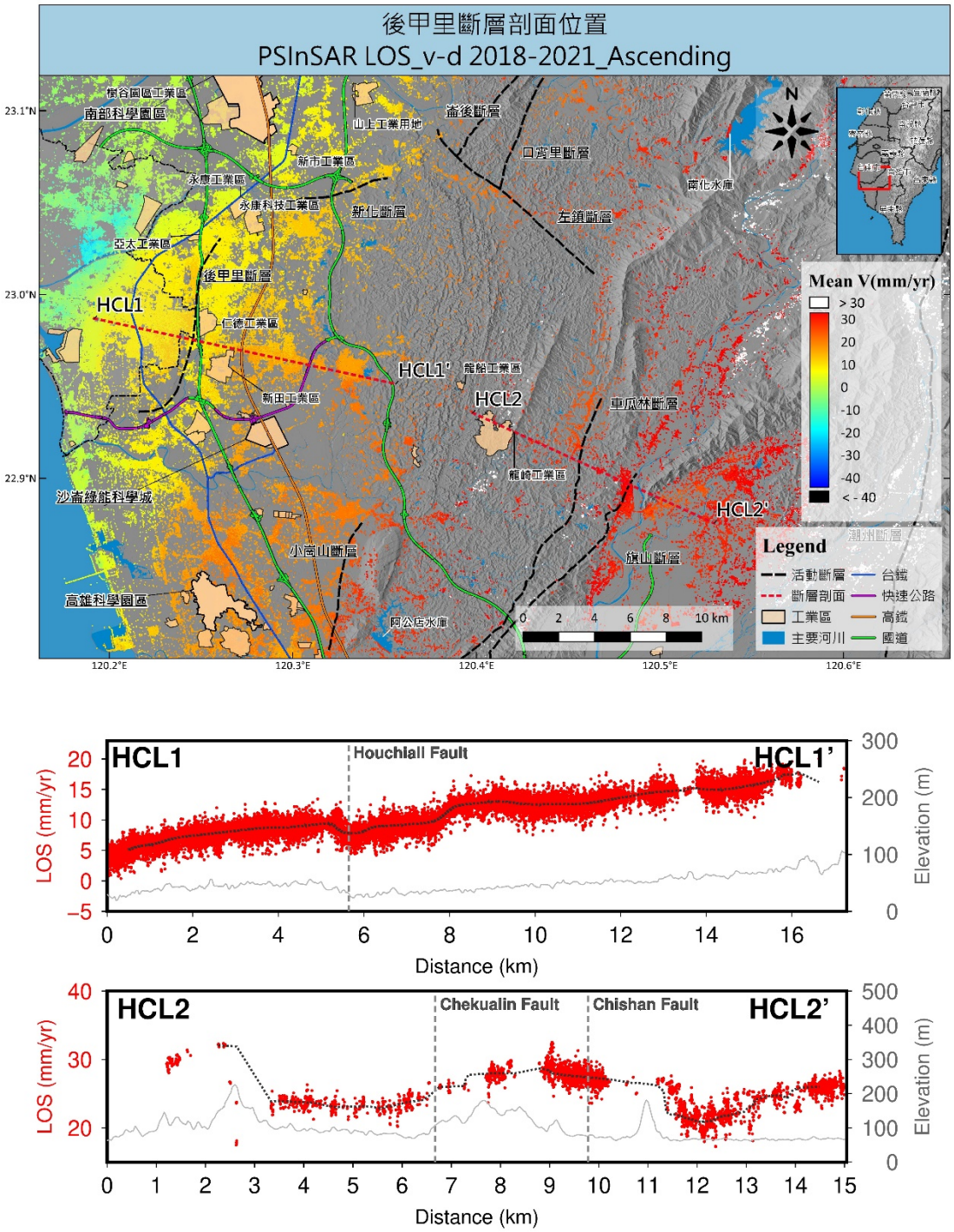


圖 C-46：2018-2021 後甲里斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

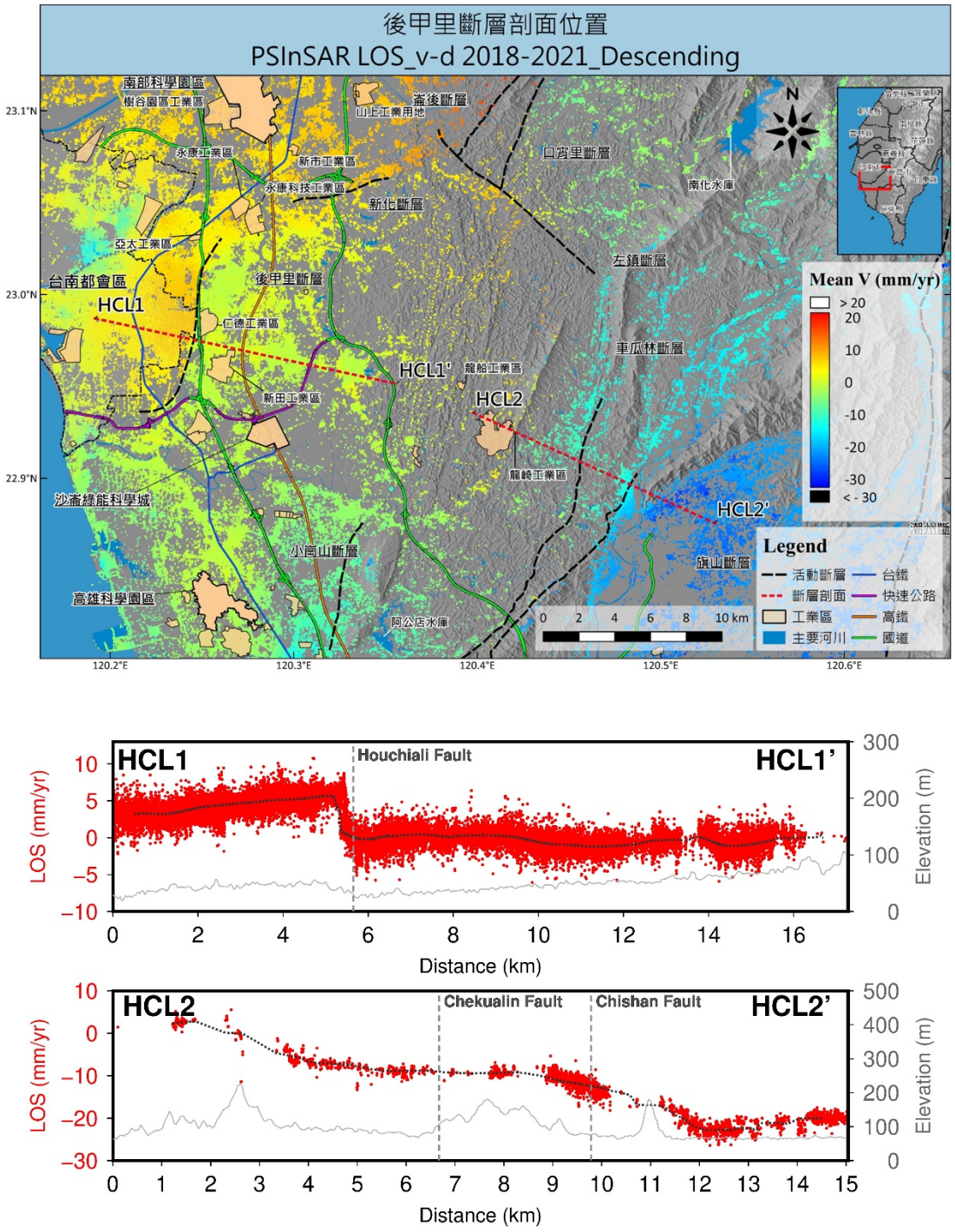


圖 C-47：2018-2021 後甲里斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-9 左鎮斷層(TCN)

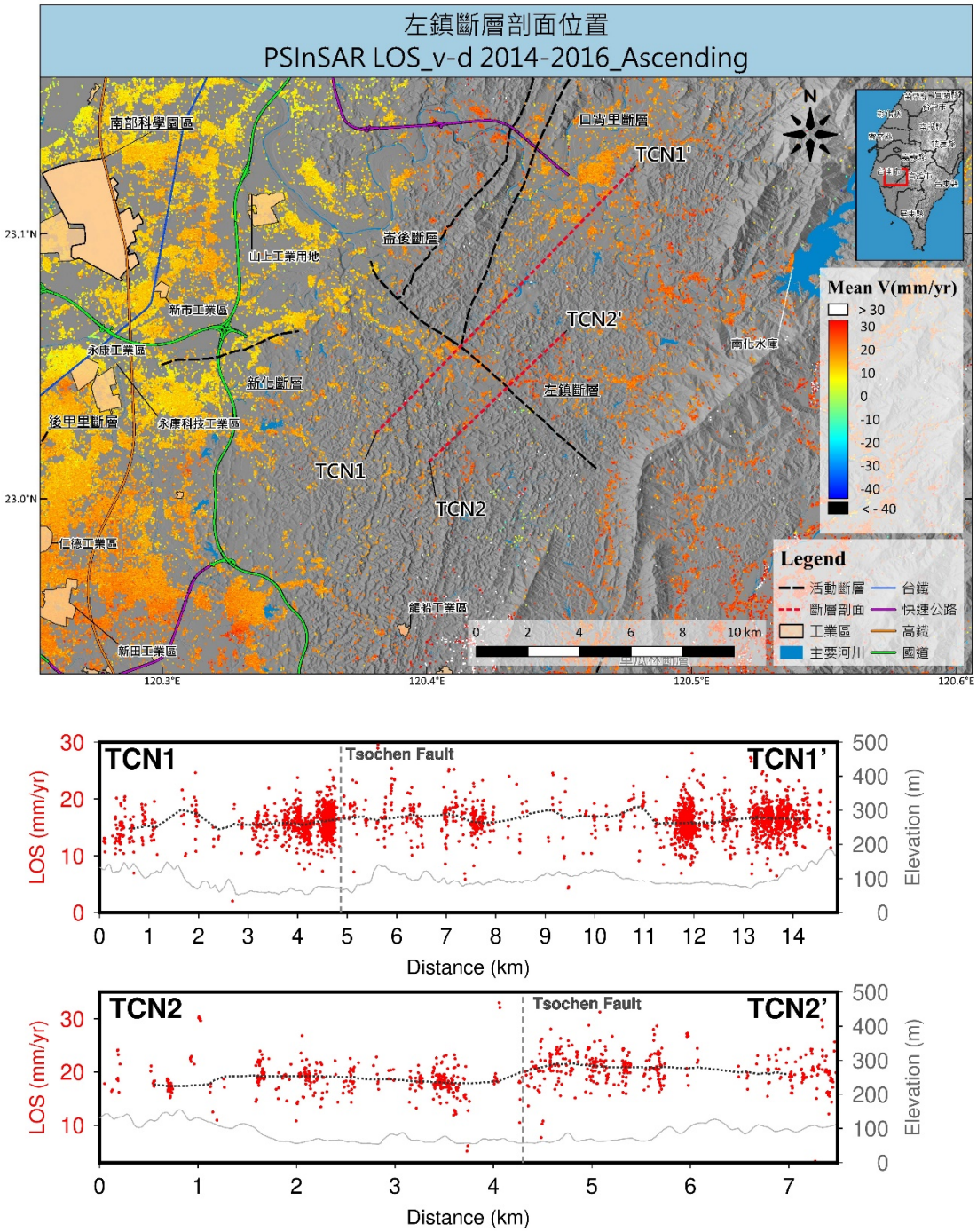


圖 C-48：2014-2016 左鎮斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

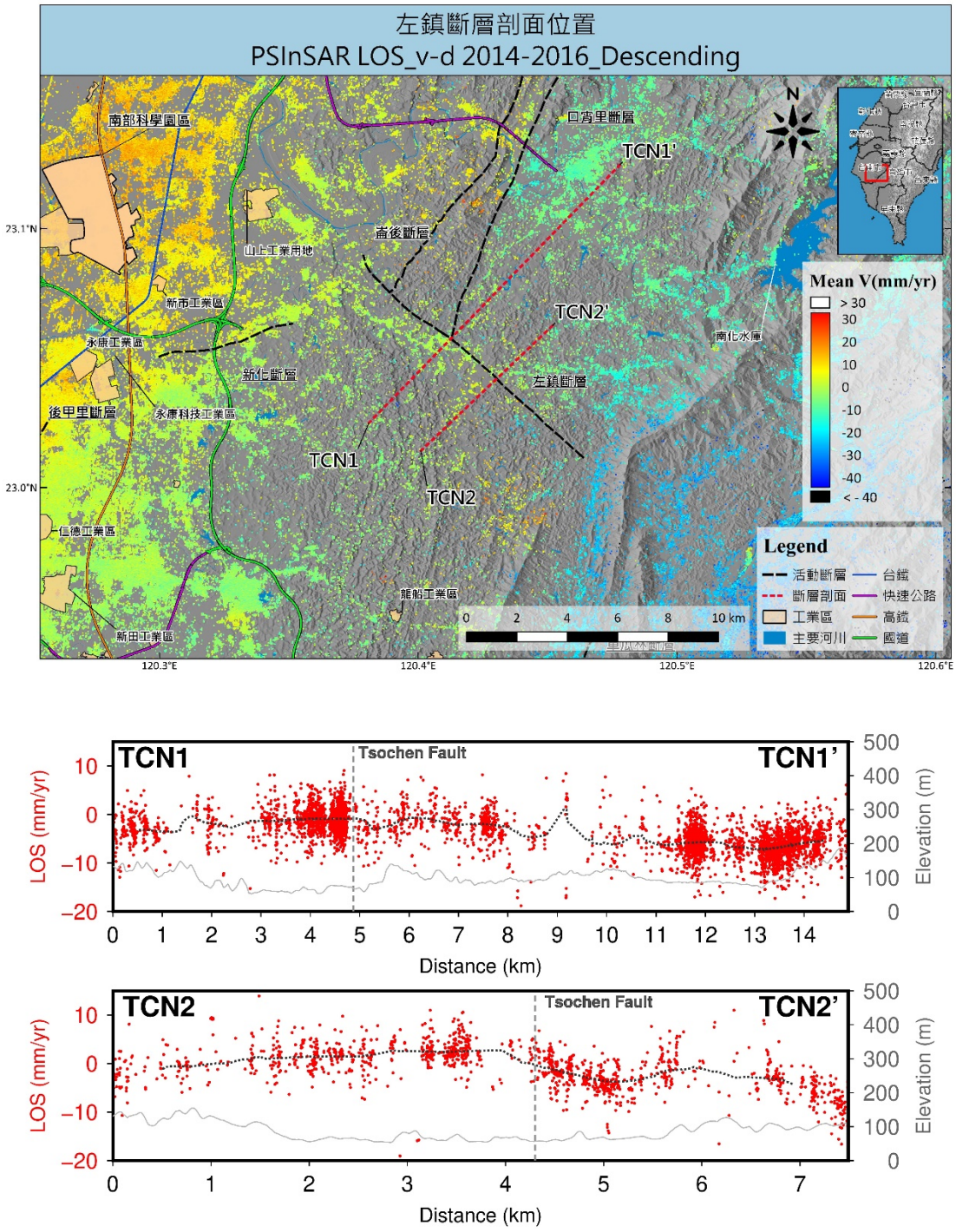


圖 C-49：2014-2016 左鎮斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

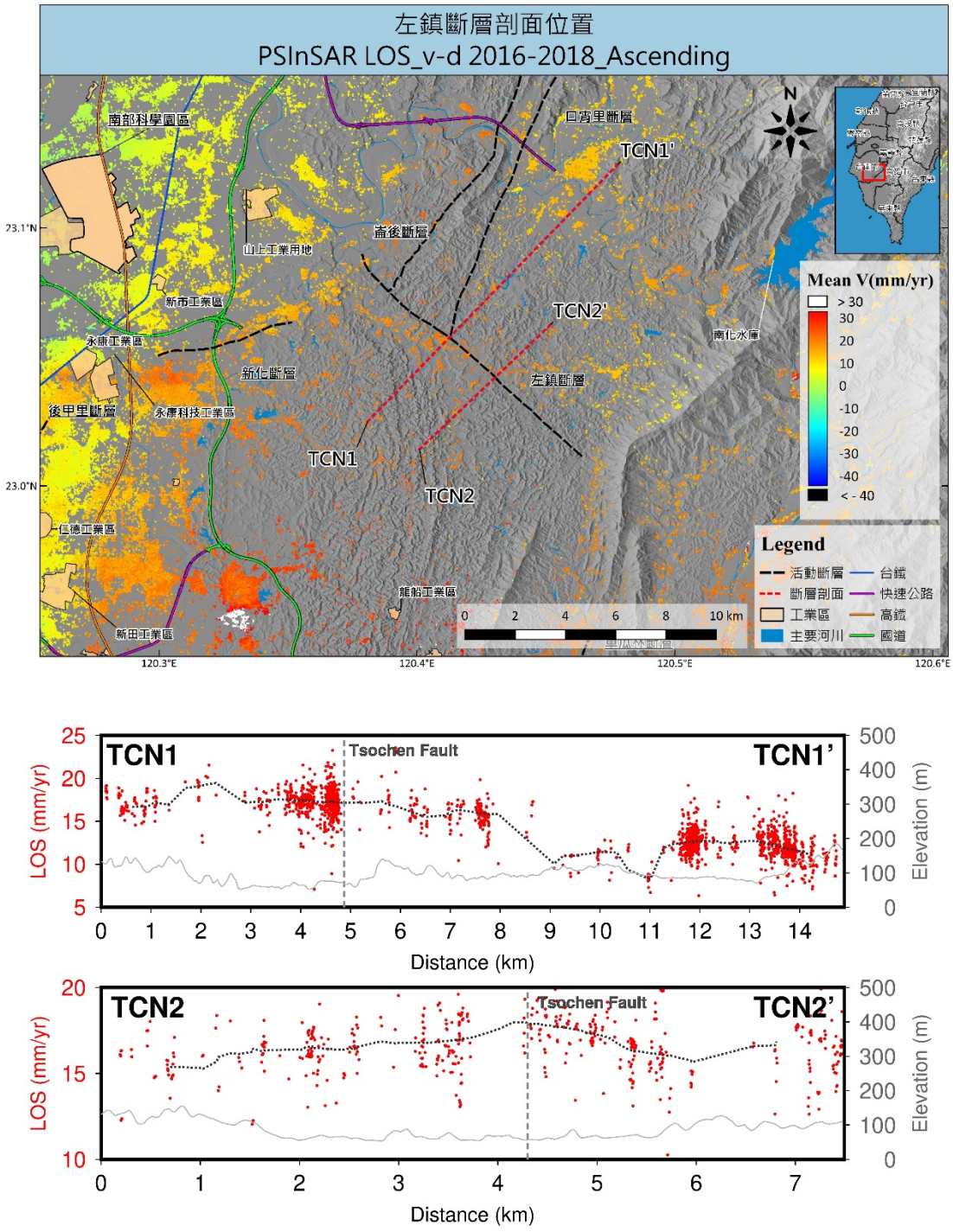


圖 C-50：2016-2018 左鎮斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

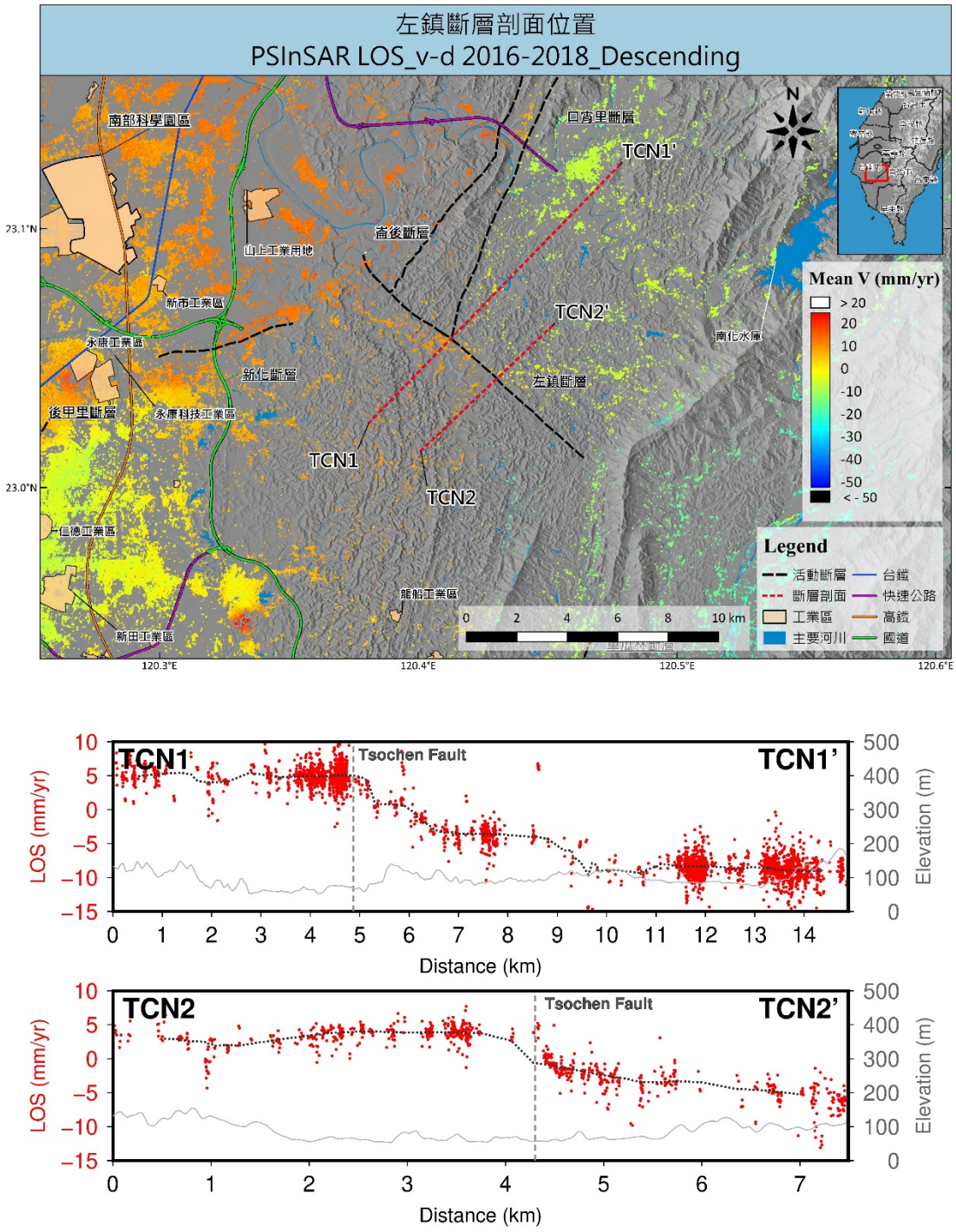


圖 C-51：2016-2018 左鎮斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

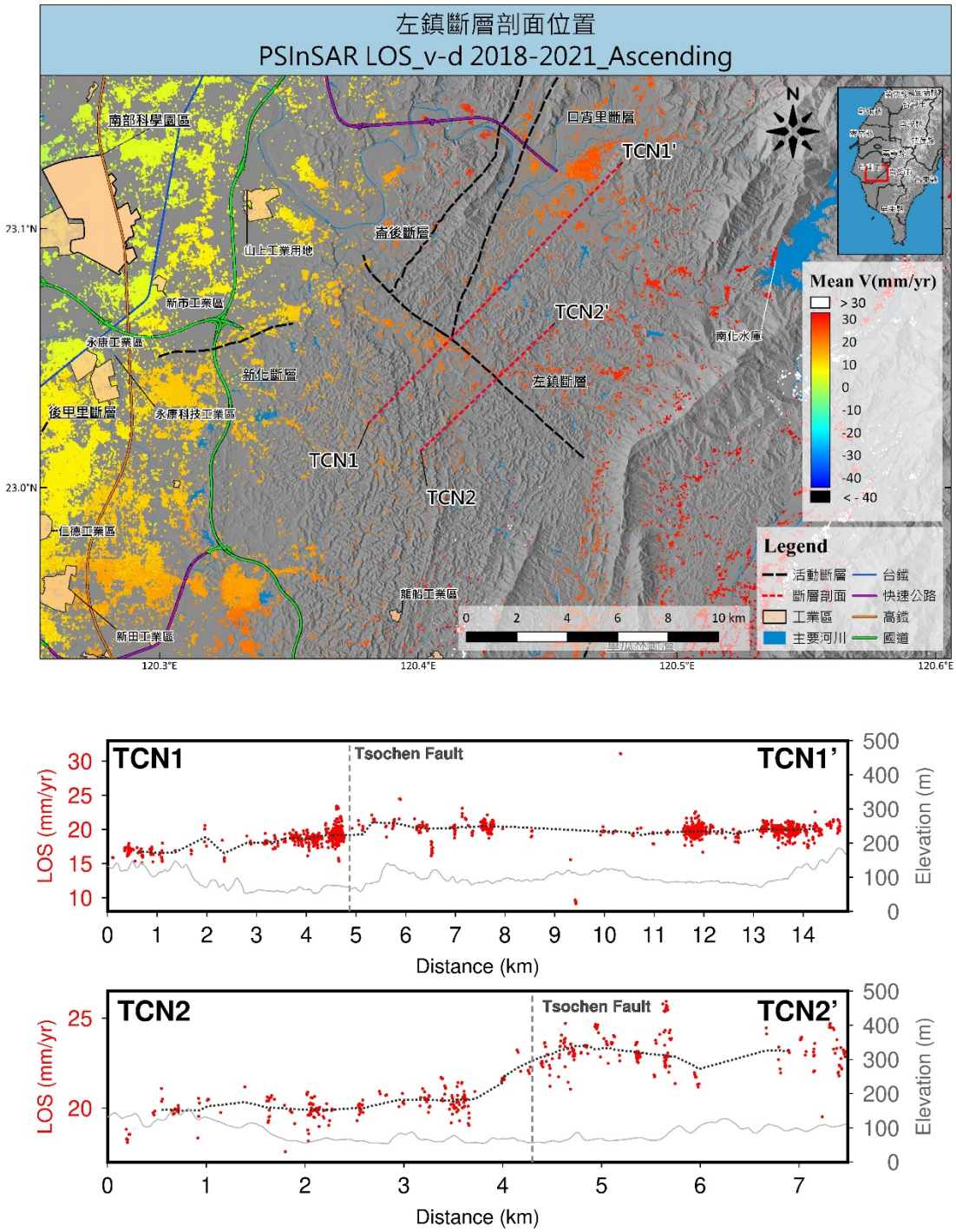


圖 C-52：2018-2021 左鎮斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

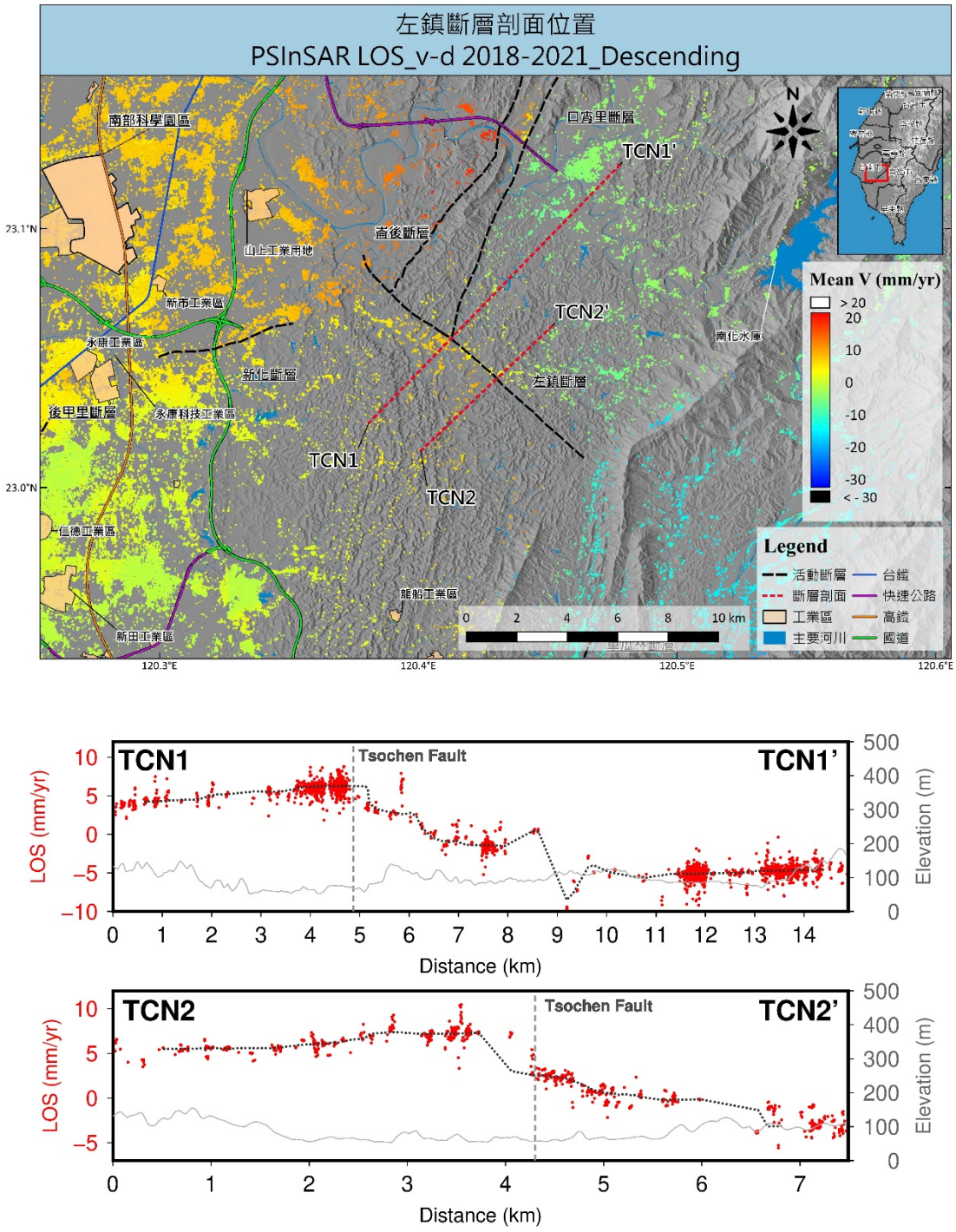


圖 C-53：2018-2021 左鎮斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

C-10 口宵里斷層(KSL)

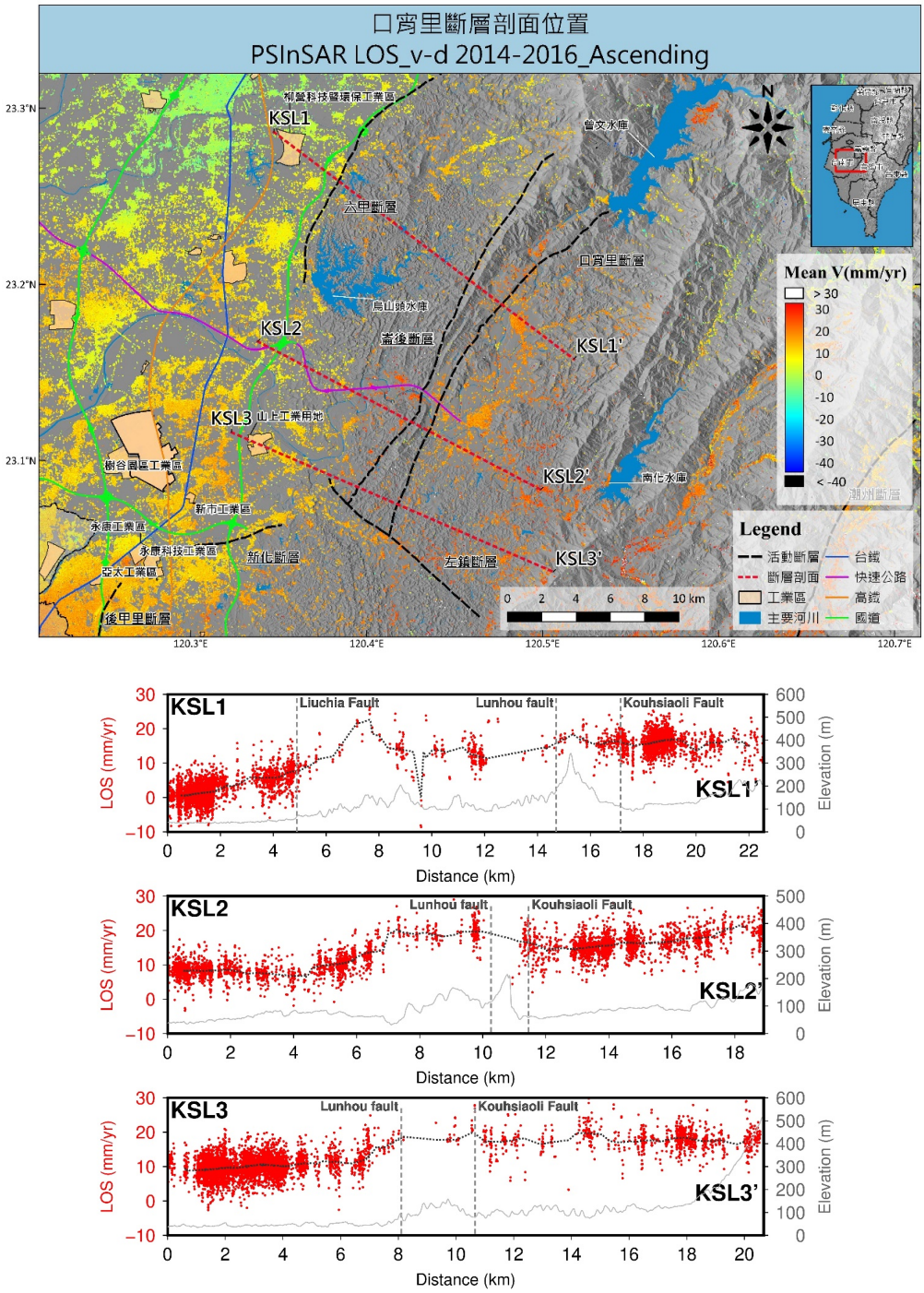


圖 C-54：2014-2016 口宵里斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

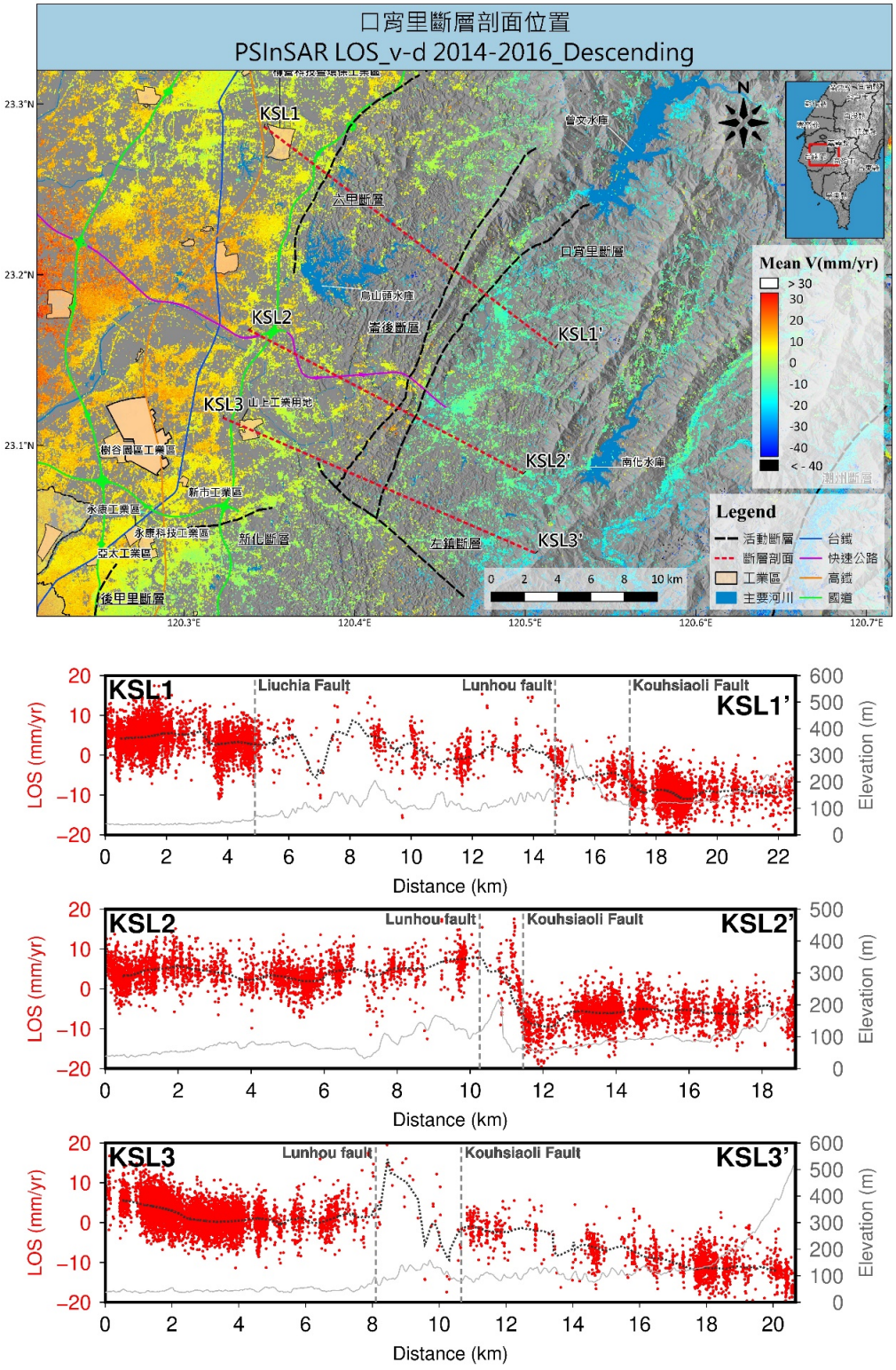


圖 C-55：2014-2016 口宵里斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

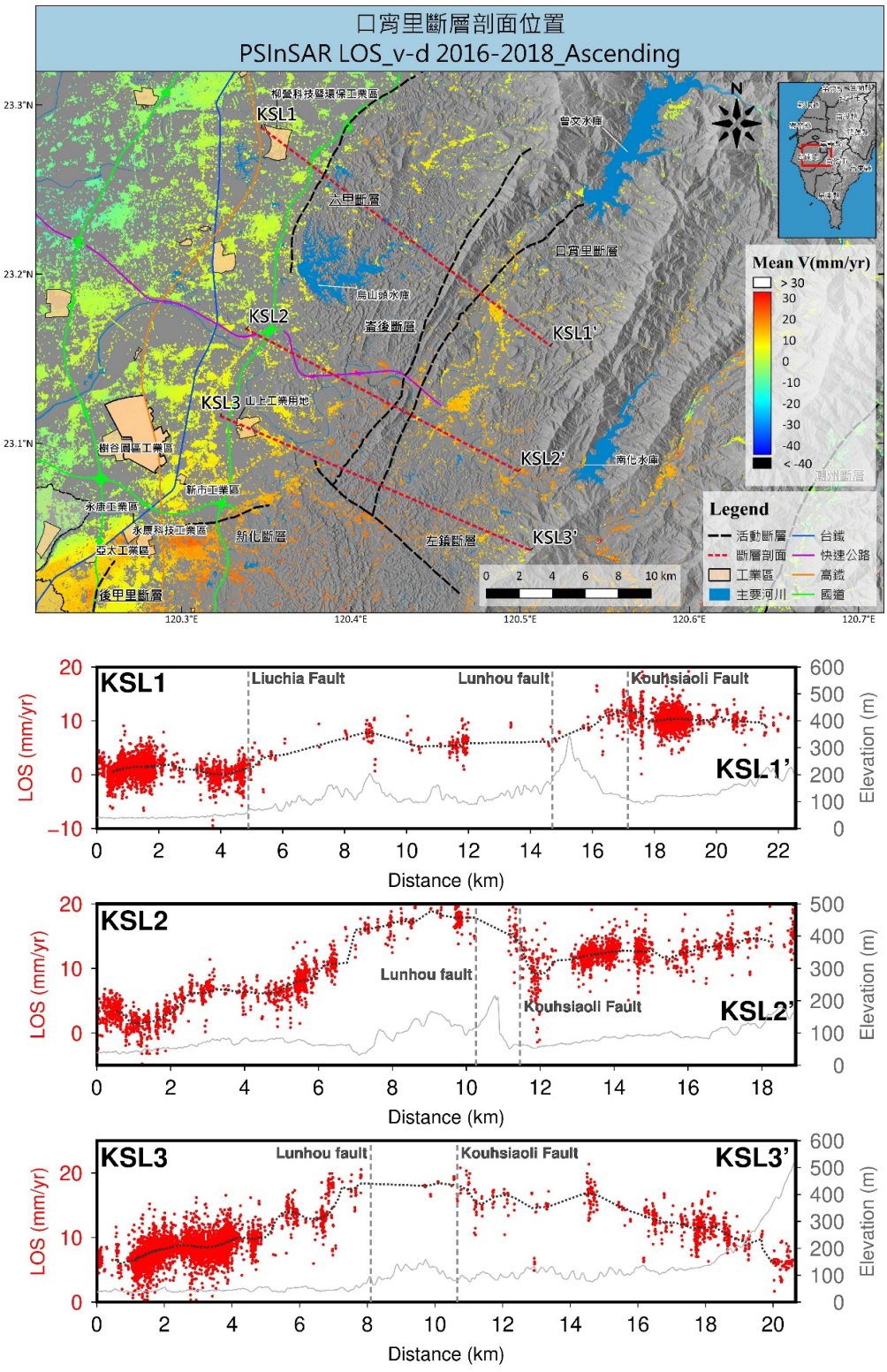


圖 C-56：2016-2018 口宵里斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

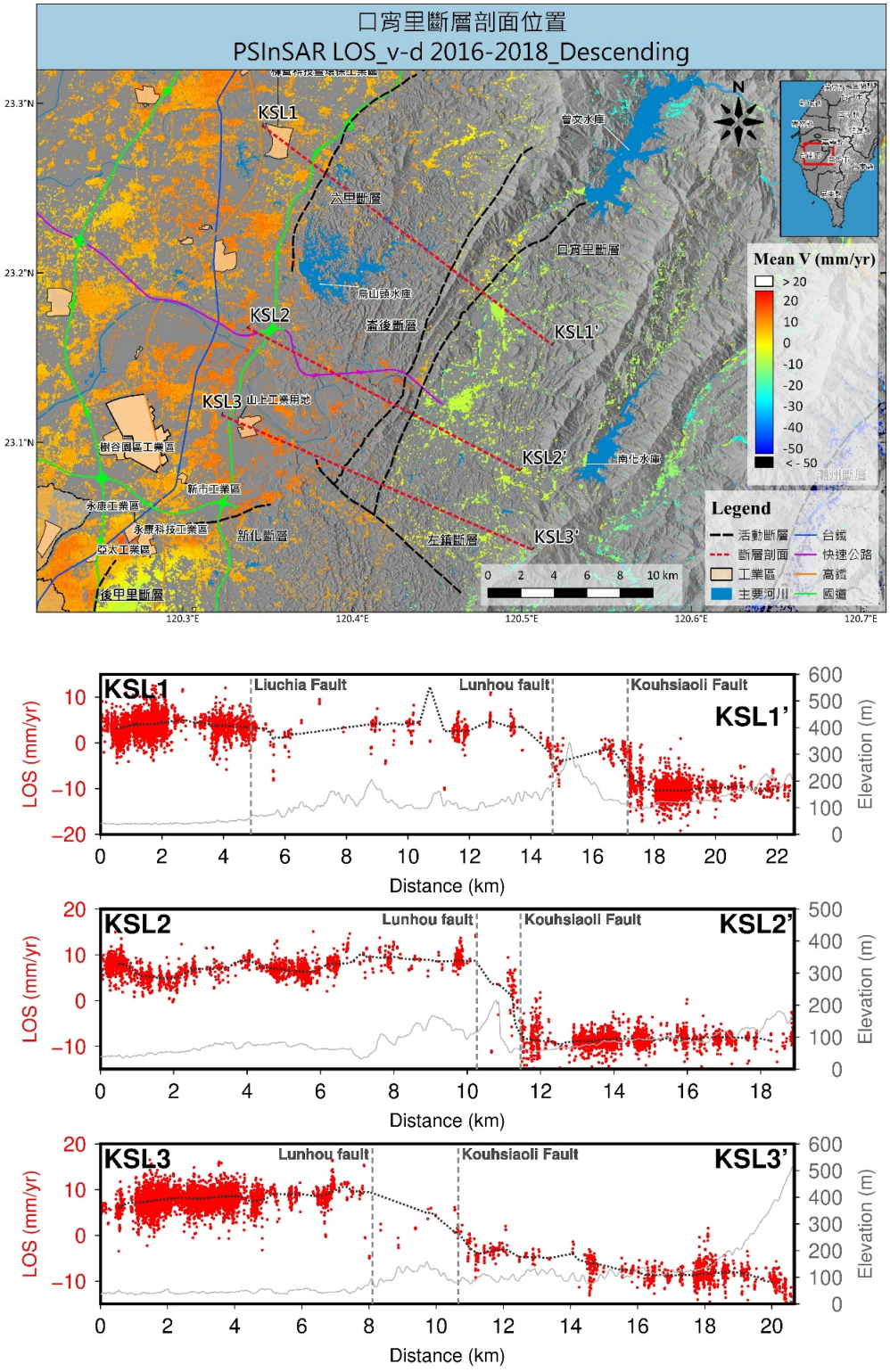


圖 C-57：2016-2018 口宵里斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

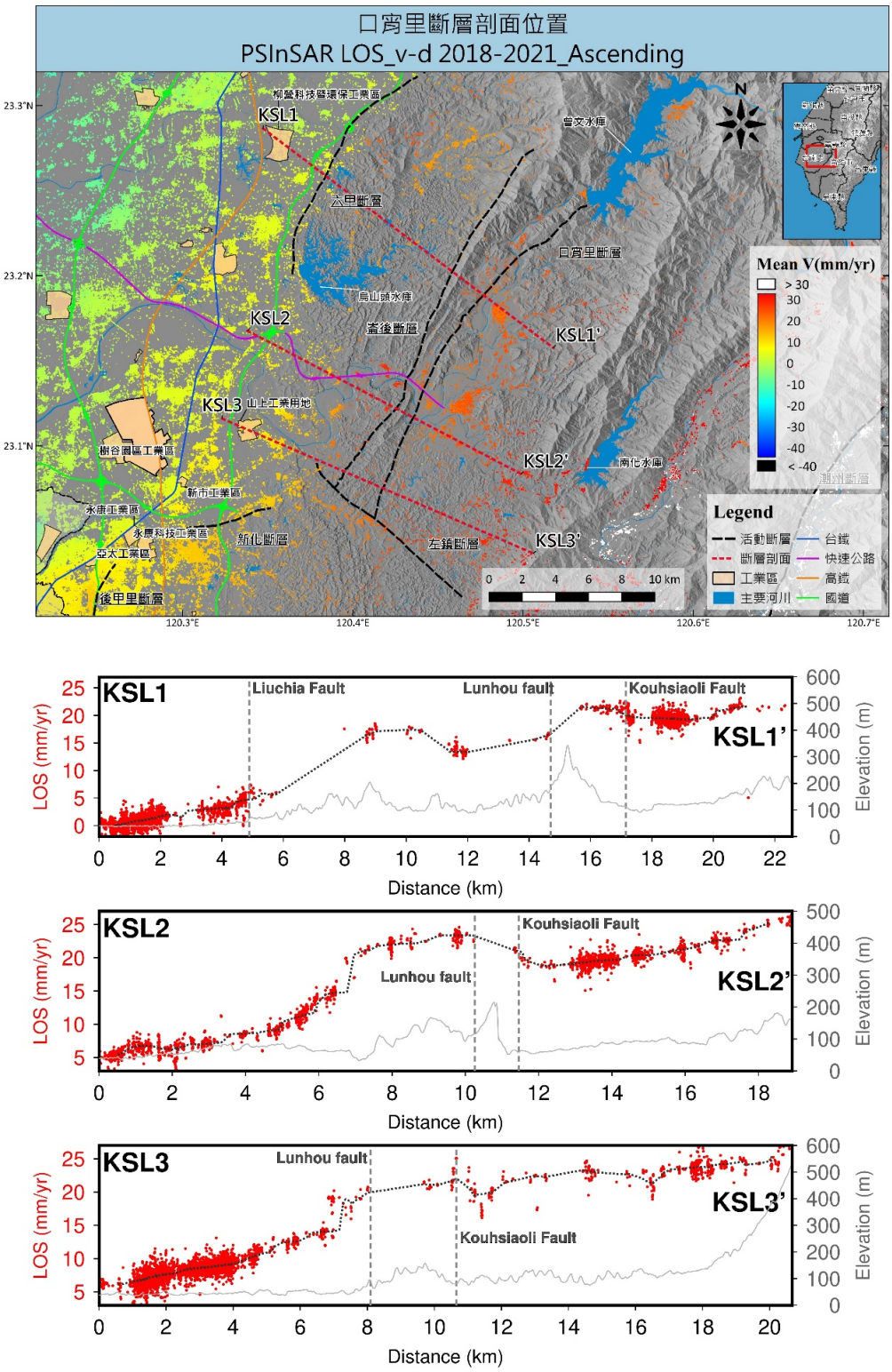


圖 C-58：2018-2021 口宵里斷層升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

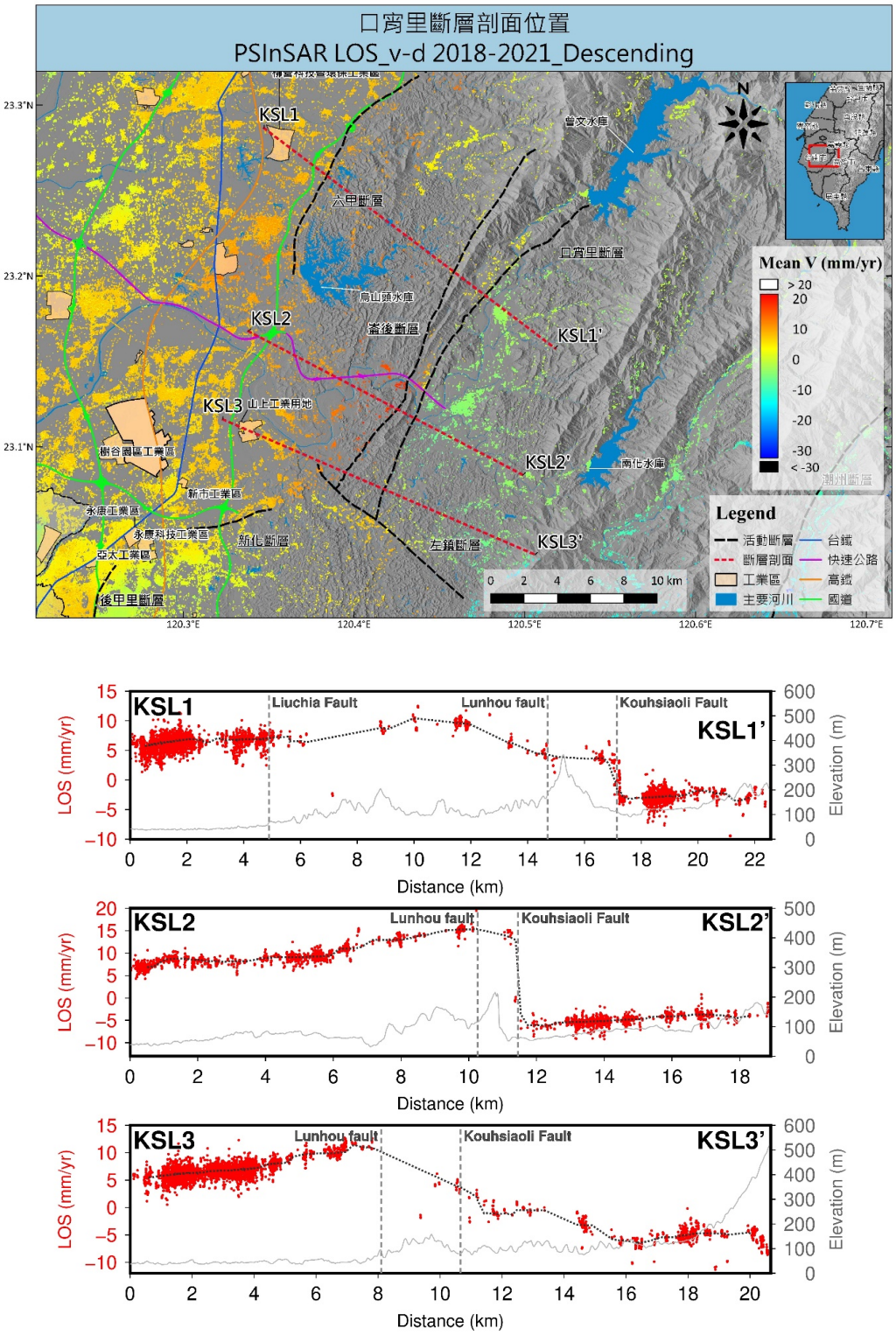


圖 C-59：2018-2021 口宵里斷層降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

附錄 D、各地質剖面與 PS 速度剖面成果

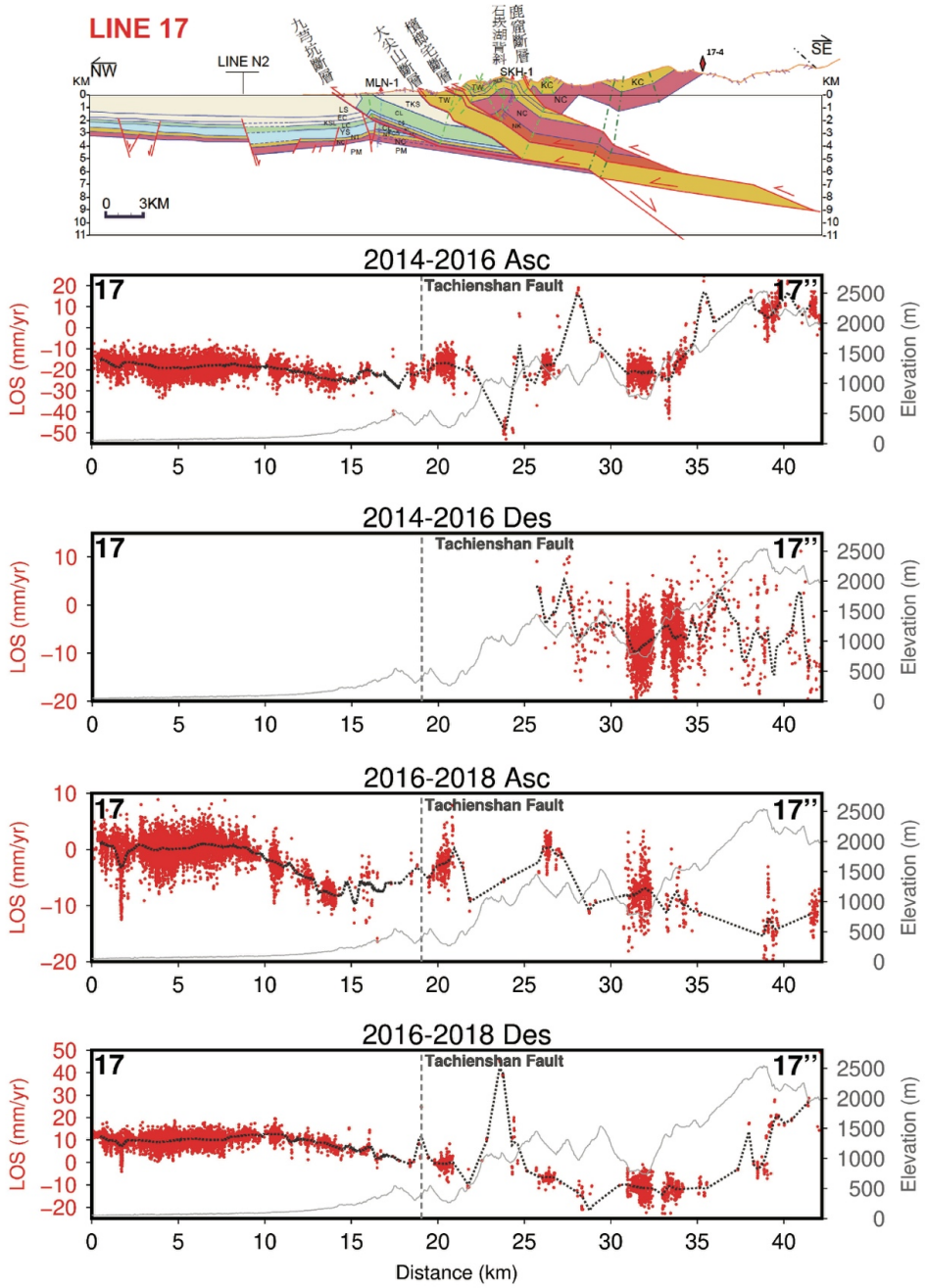


圖 D-1：Line 17 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2018 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

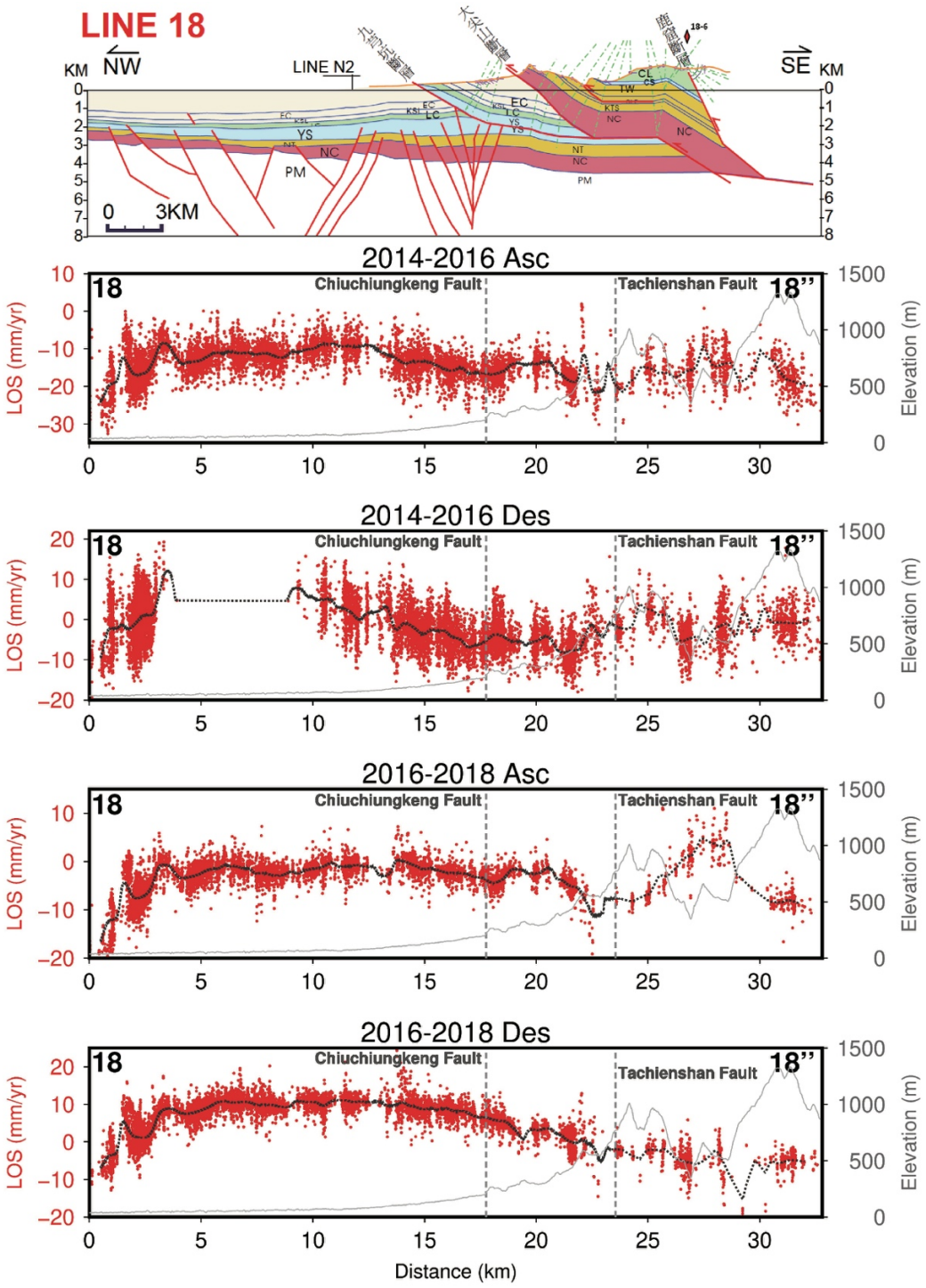


圖 D-2：Line 18 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

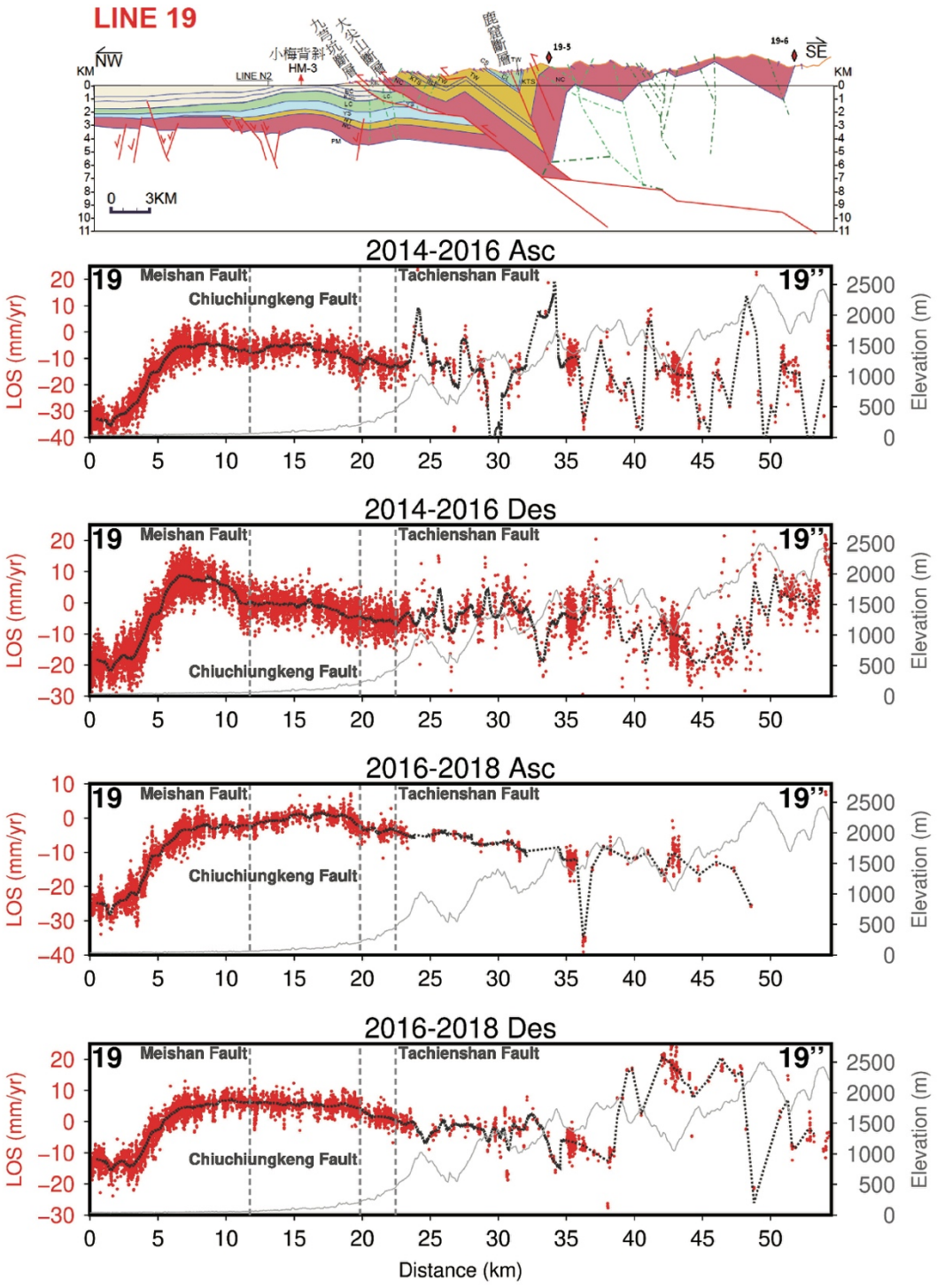


圖 D-3：Line 19 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

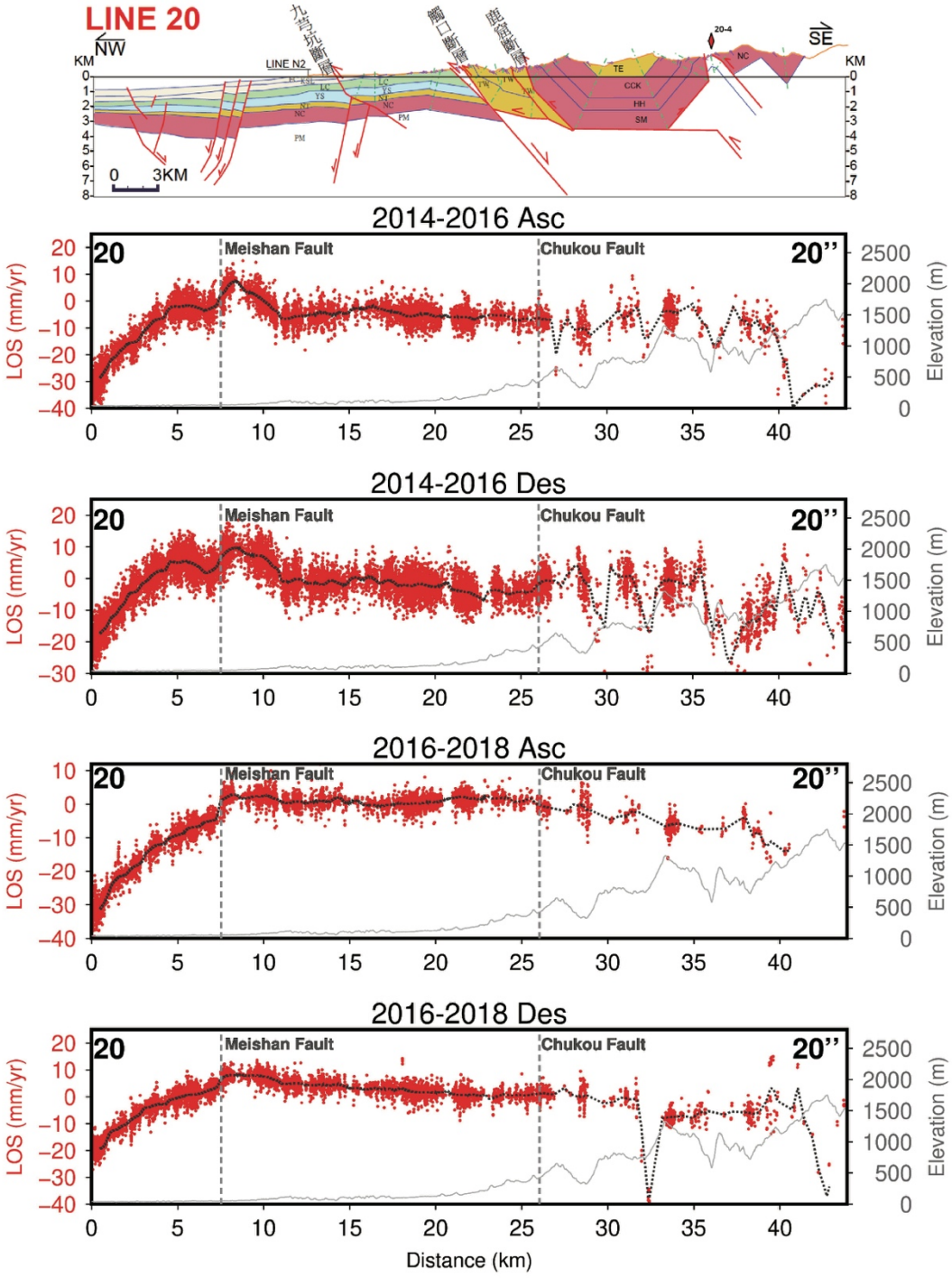


圖 D-4：Line 20 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

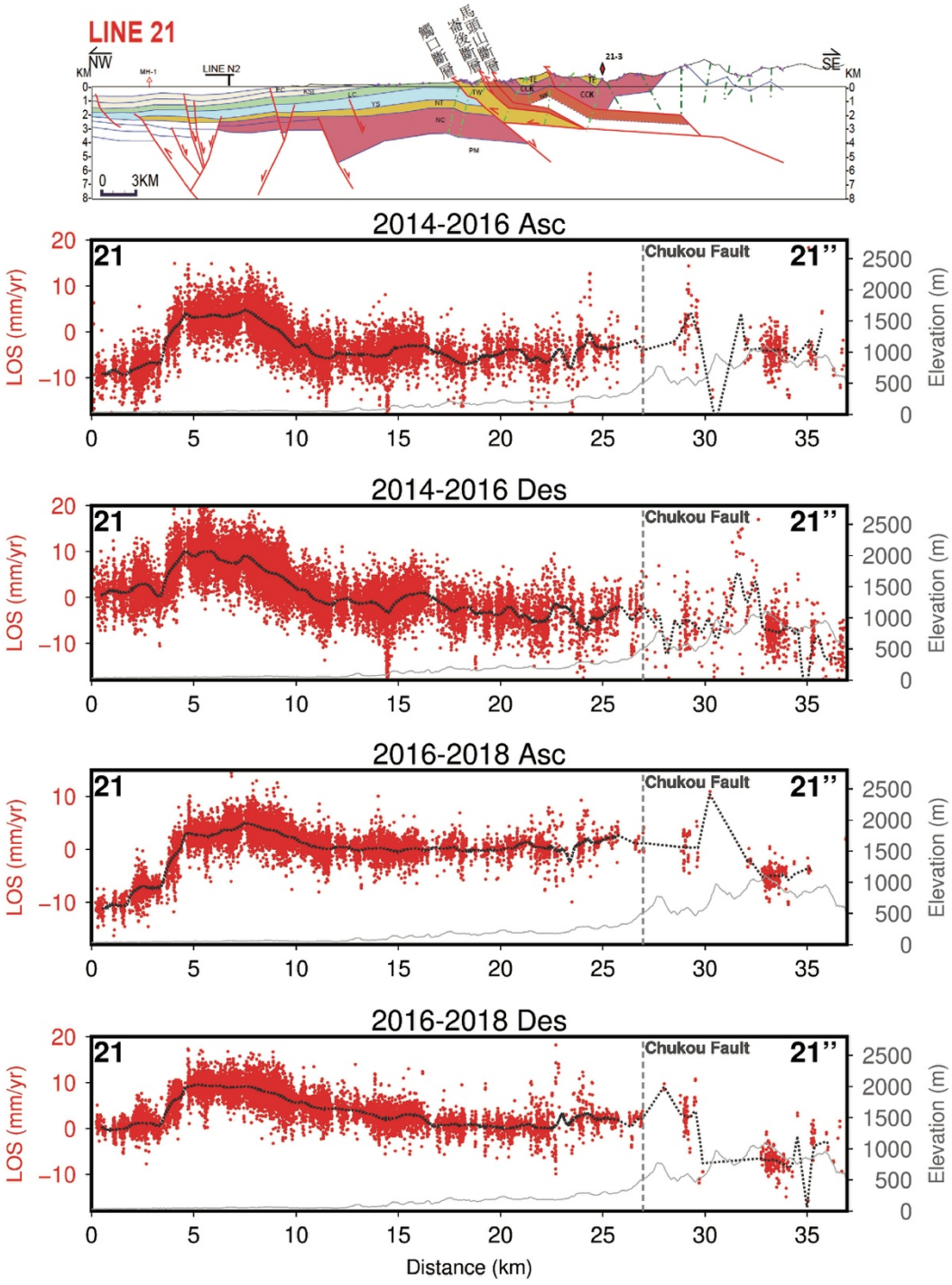


圖 D-5：Line 21 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

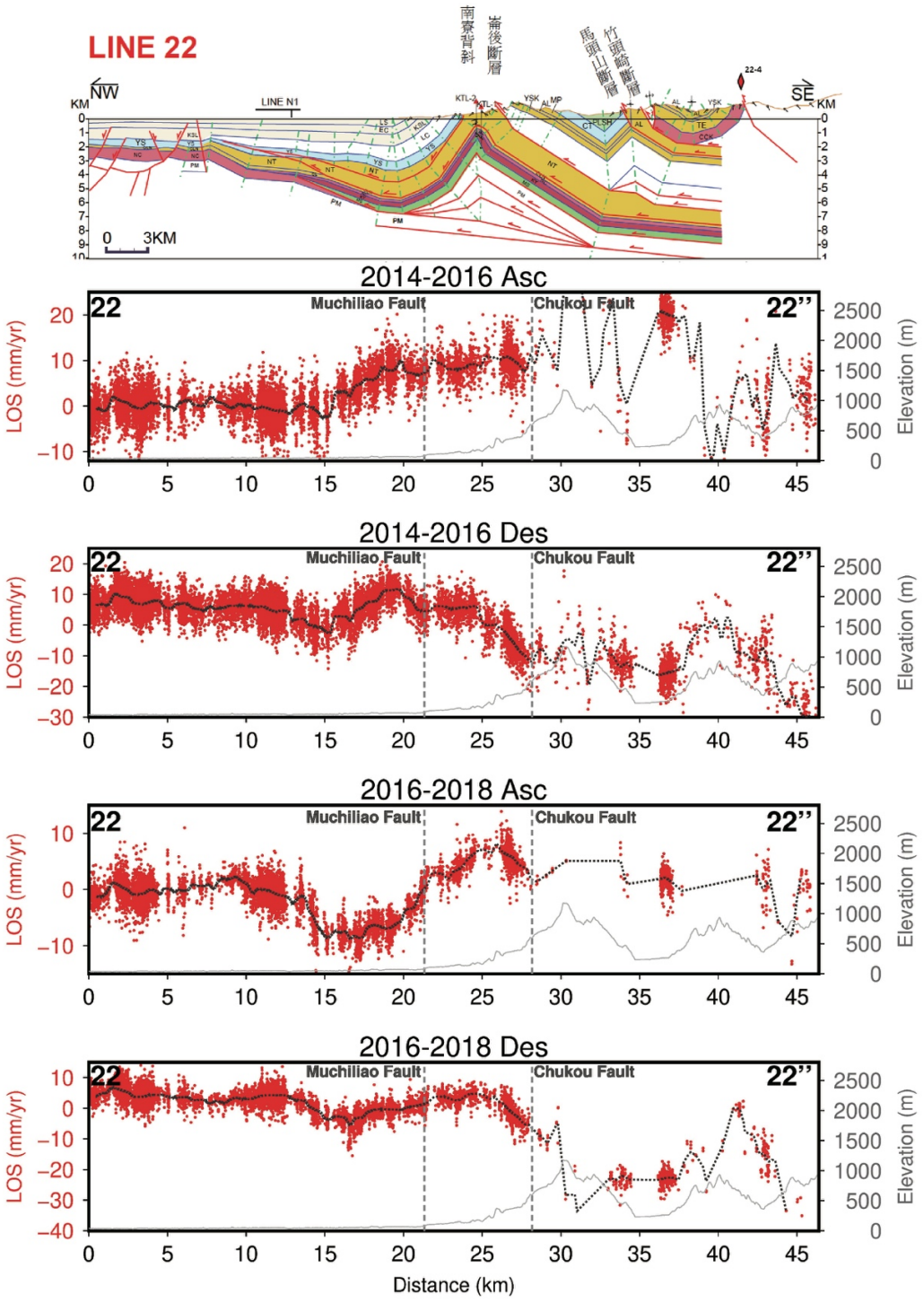


圖 D-6：Line 22 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

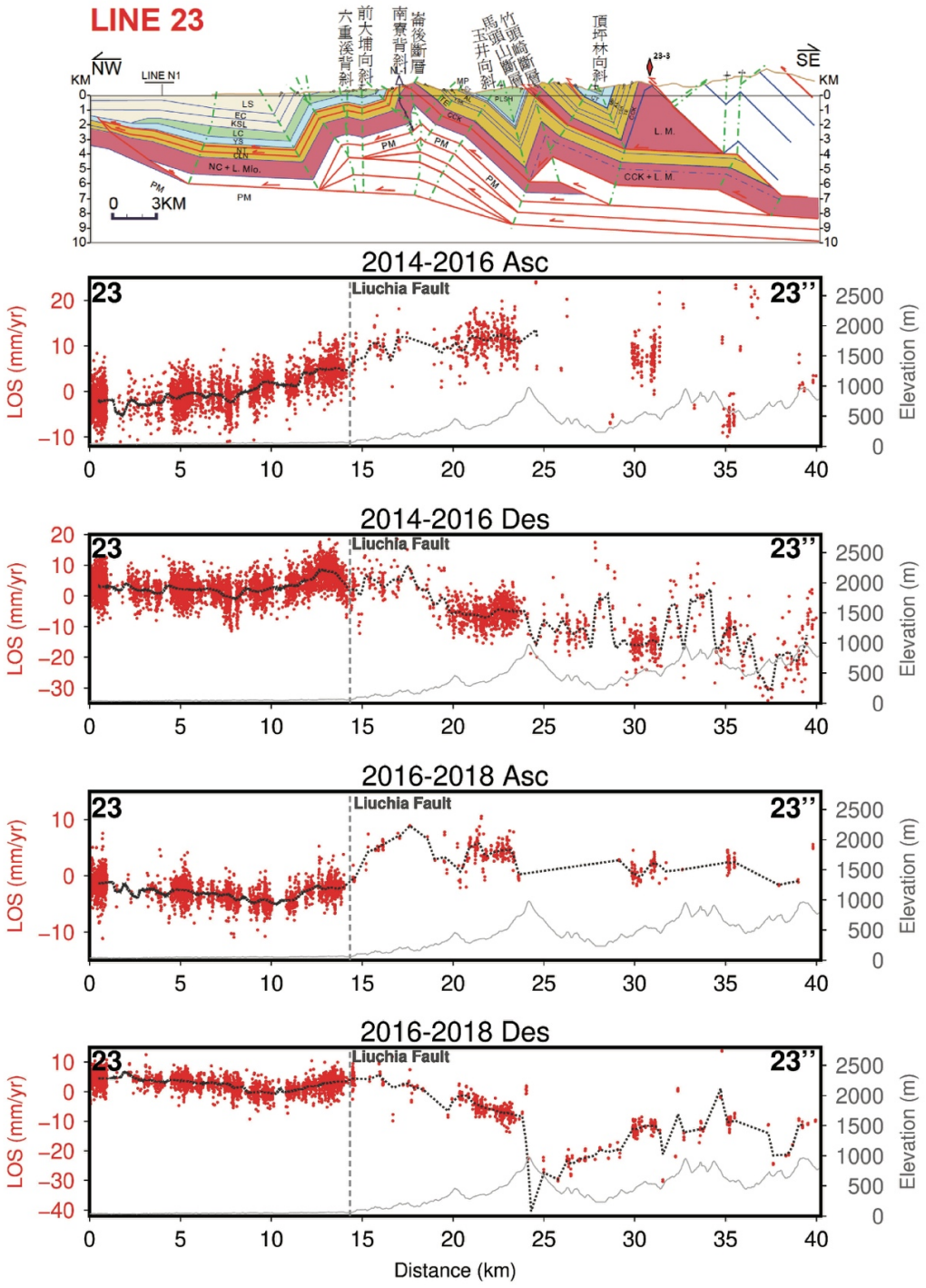


圖 D-7：Line 23 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

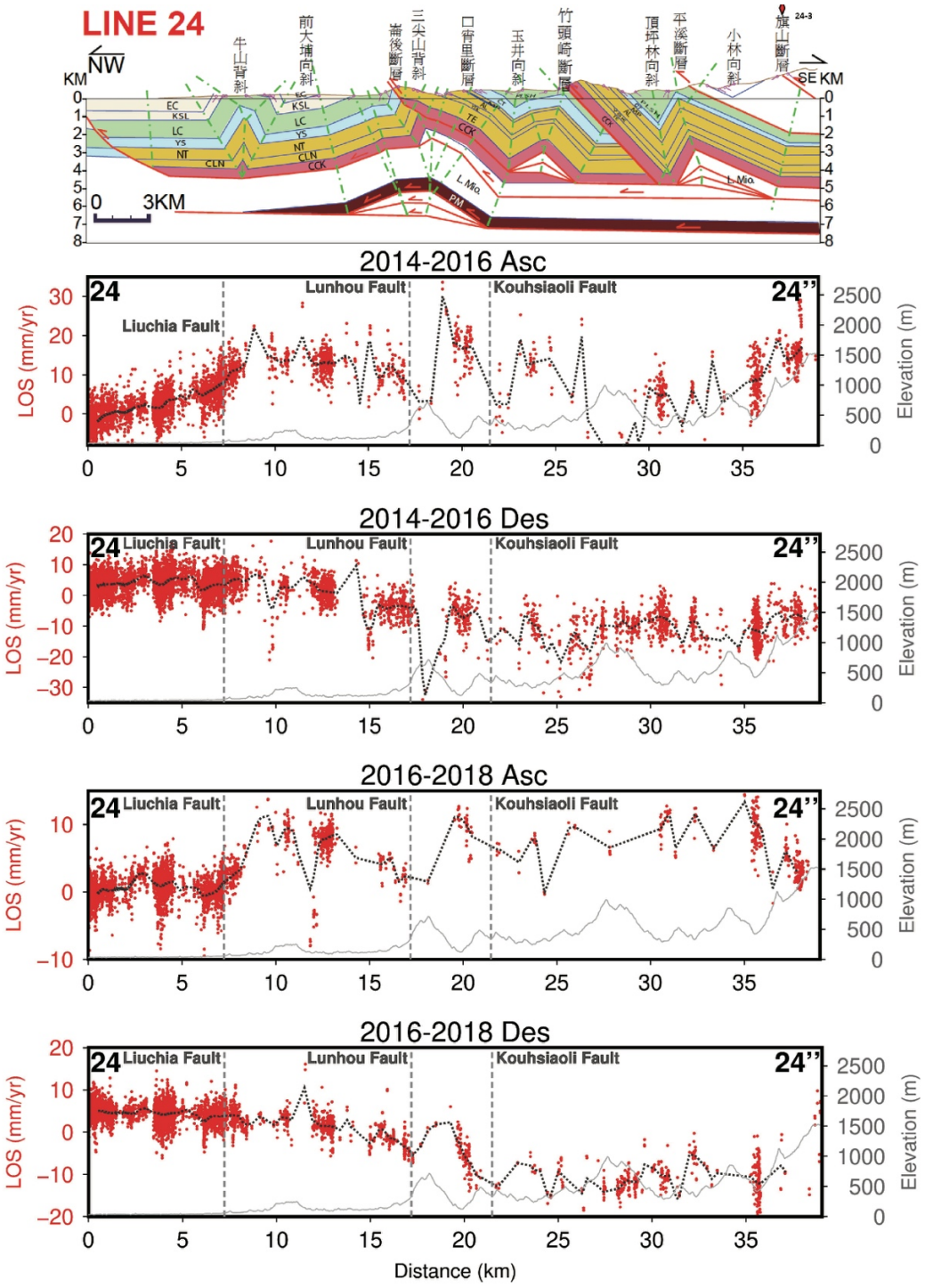


圖 D-8：Line 24 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

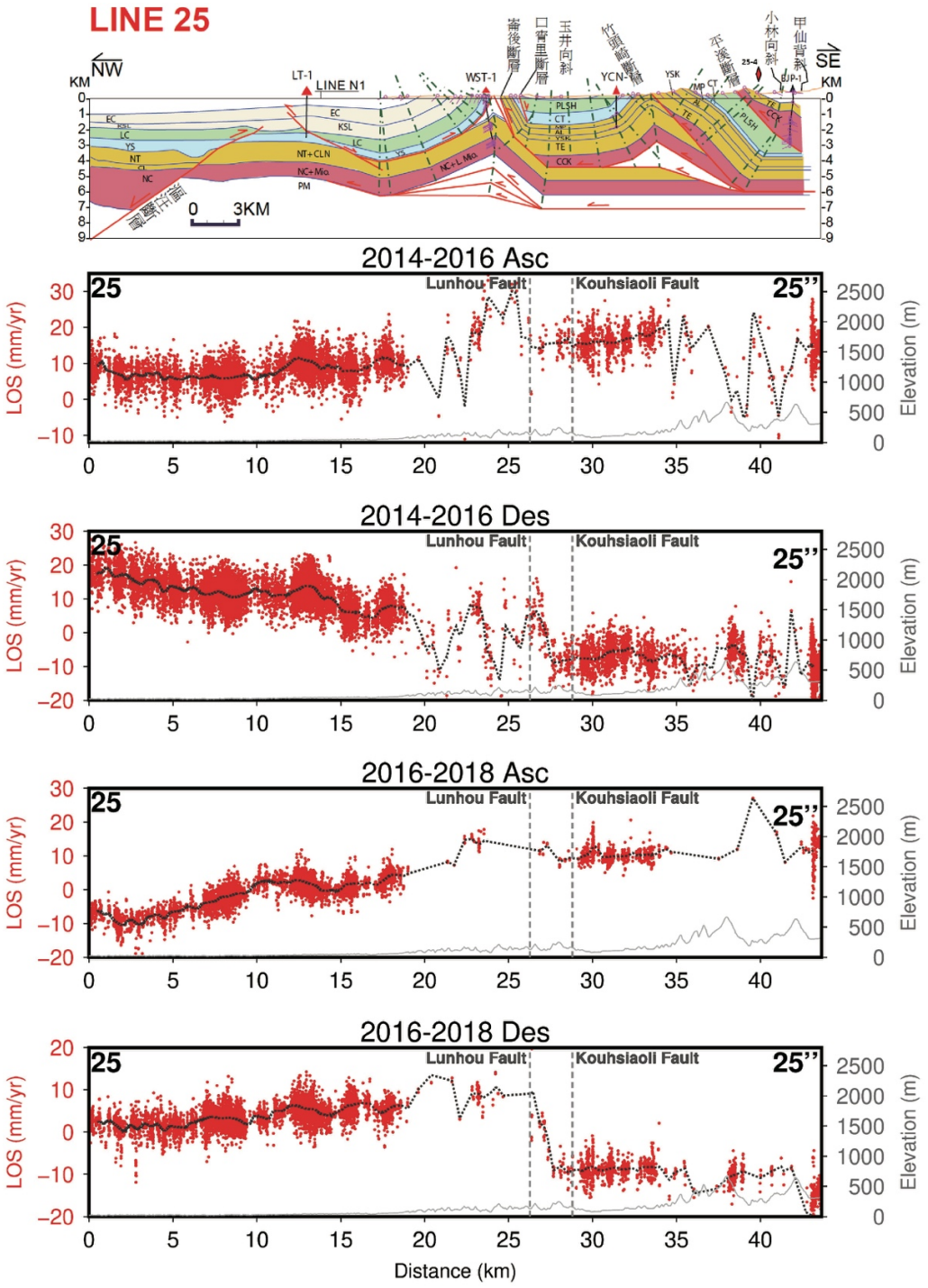


圖 D-9：Line 25 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

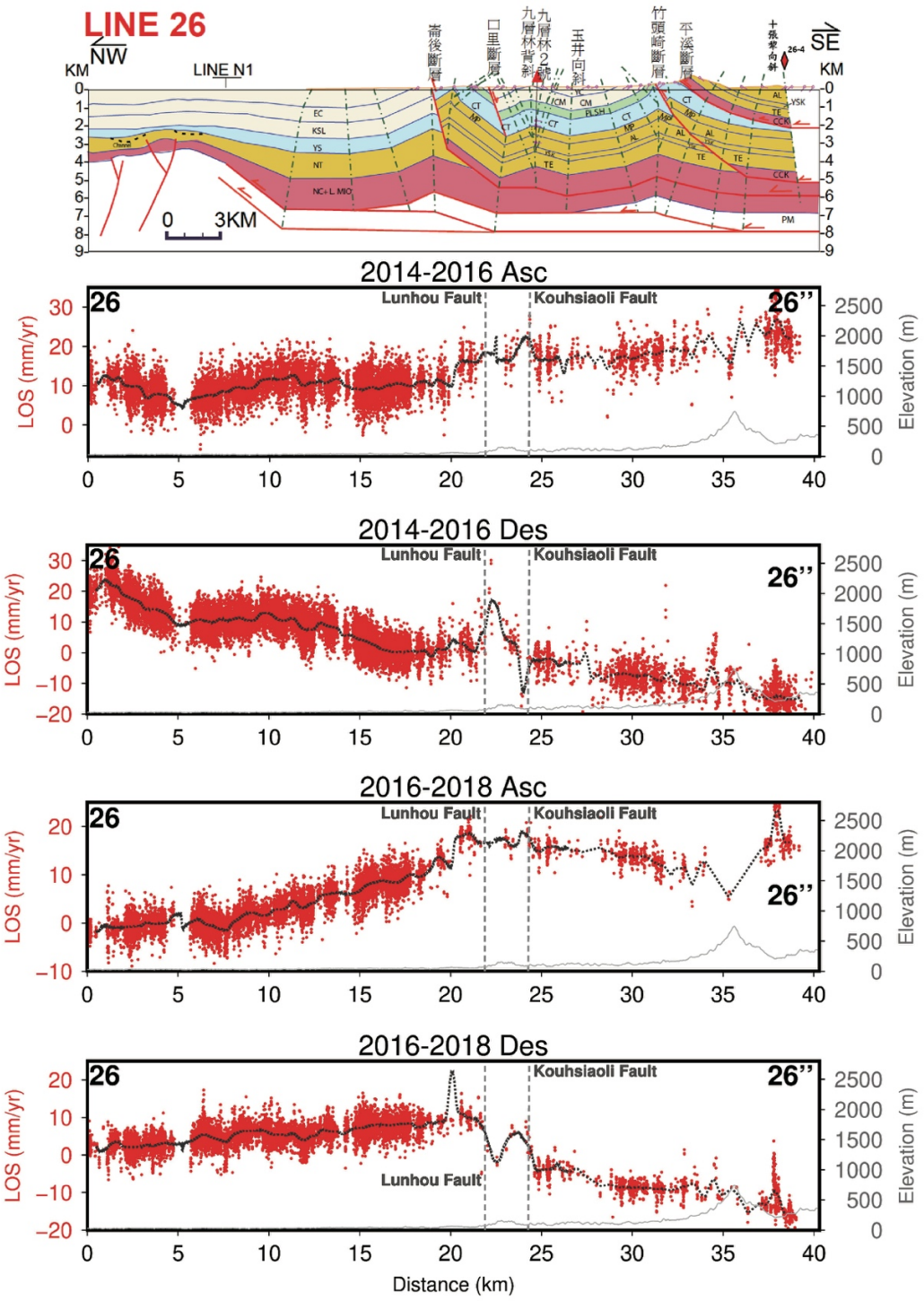


圖 D-10：Line 26 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

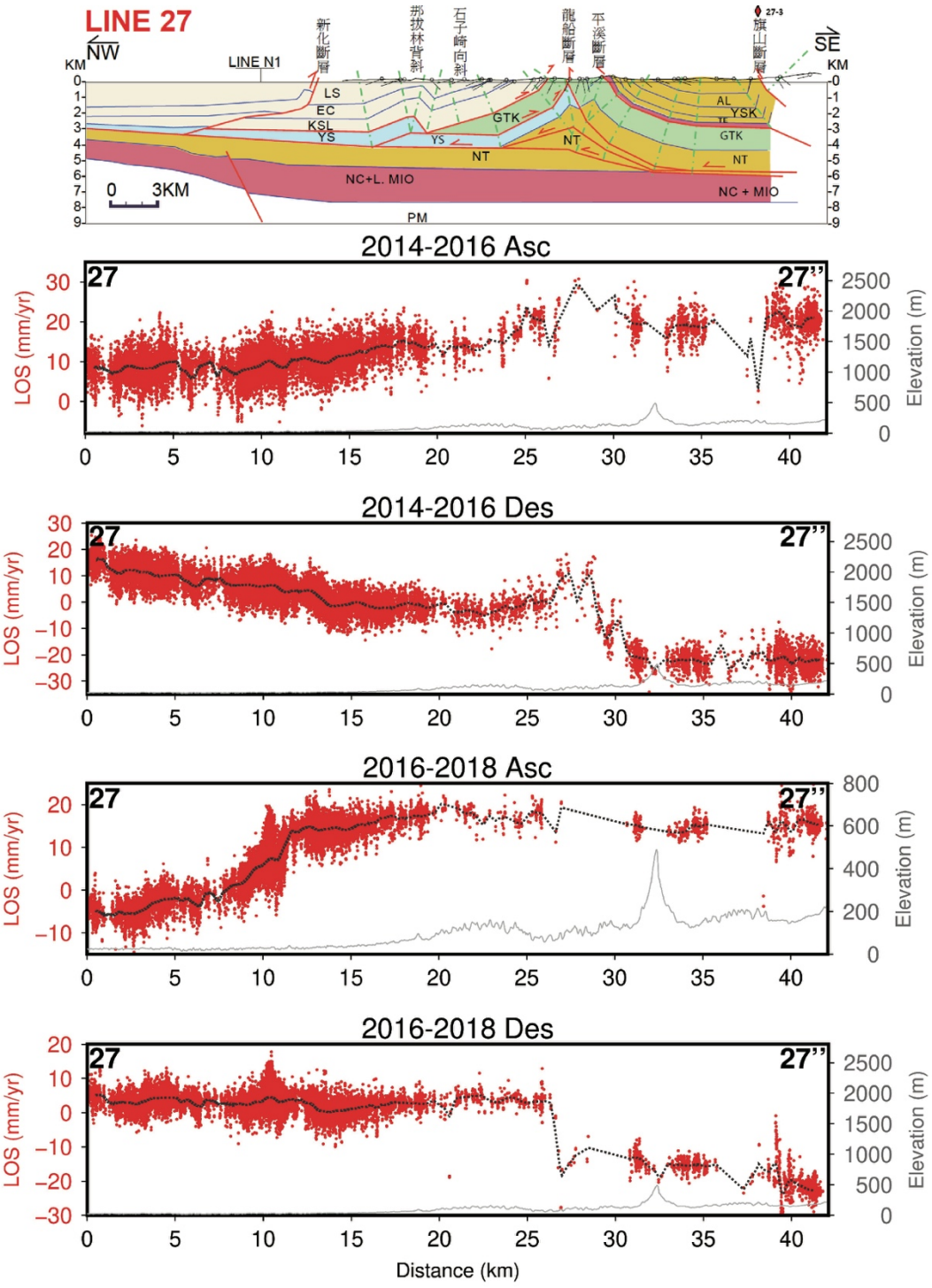


圖 D-11：Line 27 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

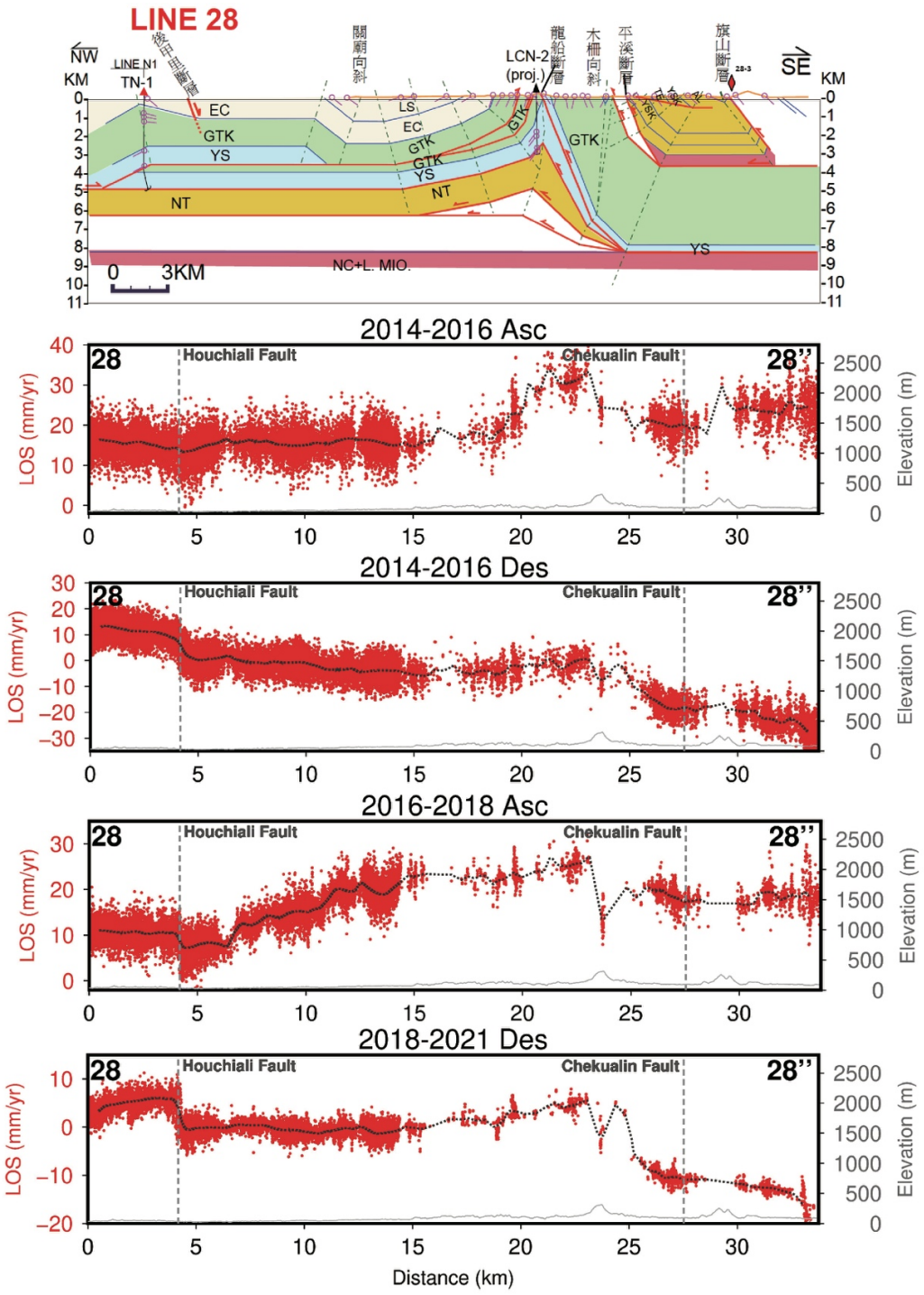


圖 D-12：Line 28 剖面成果。（上）剖面地下構造形貌（黃旭燦等，2004）。其餘分別為 2014 年至 2016 年升軌道與降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖，我們盡量使得地質剖面與 PSInSAR 速度場剖面長度一致。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

附錄 E、重要區域速度剖面與時間序列成果

E-1 2014 年至 2016 年 Ascending 速度剖面及時間序列

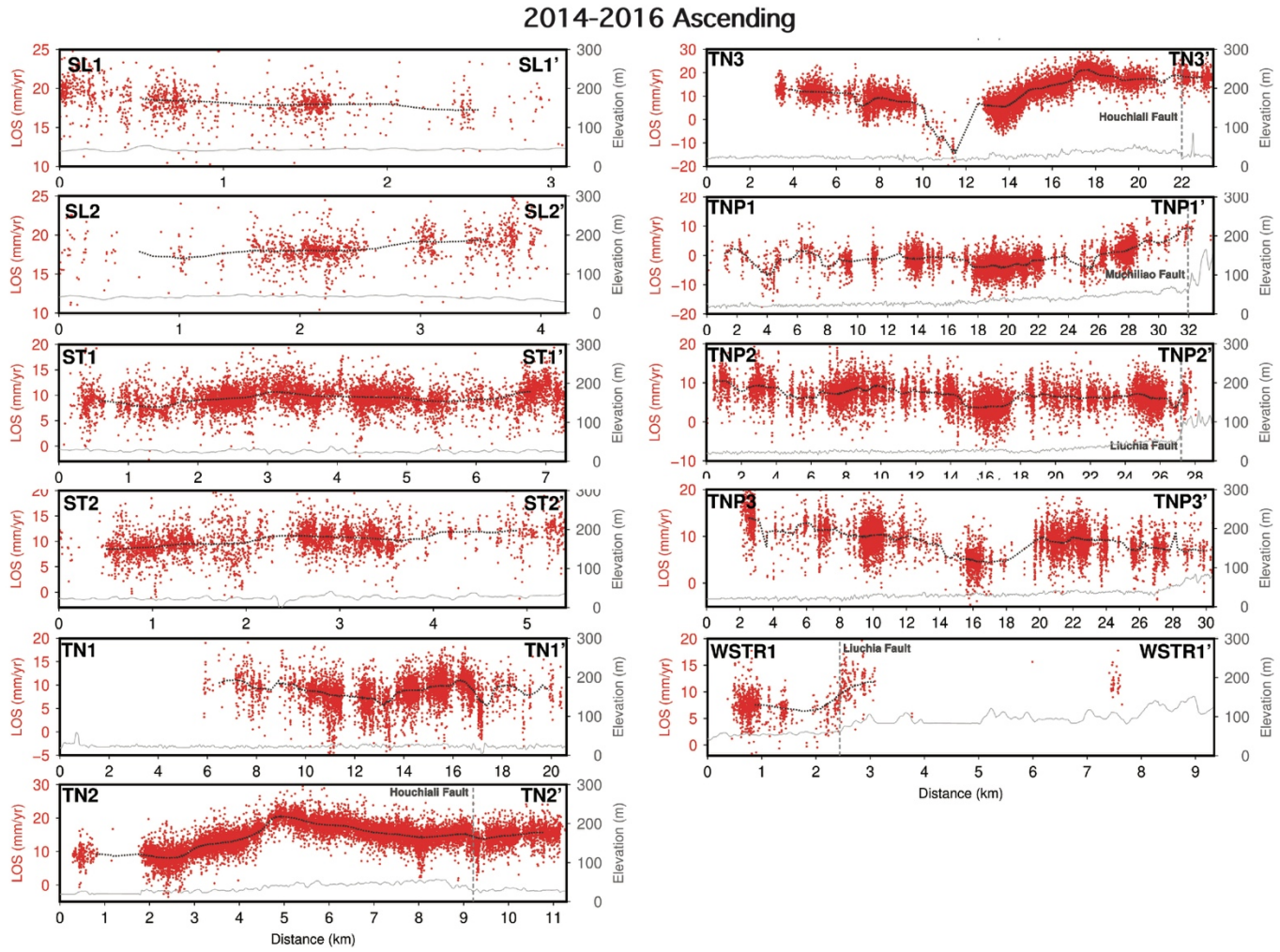
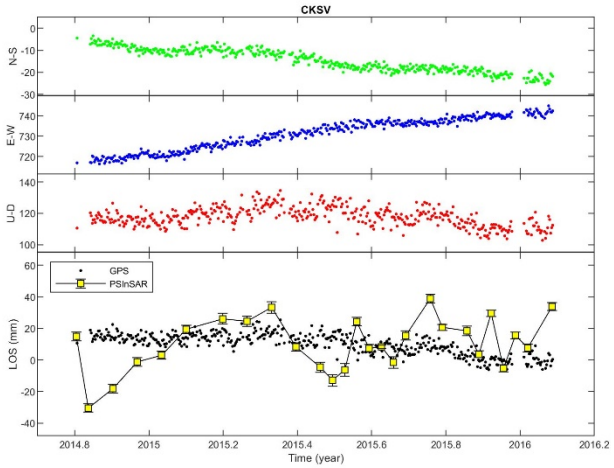
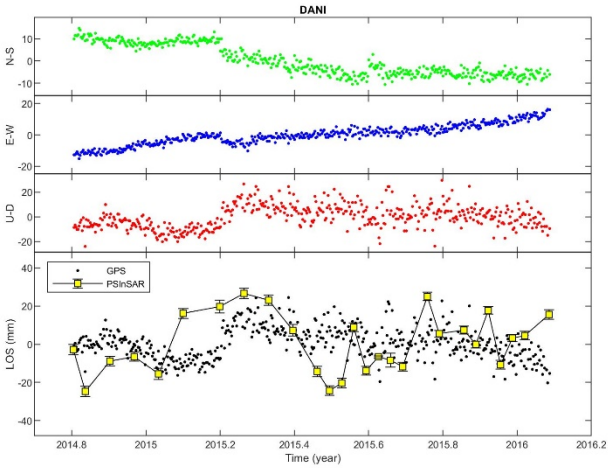
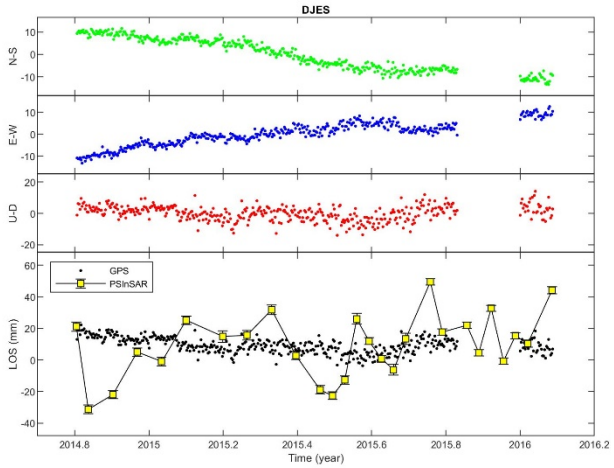
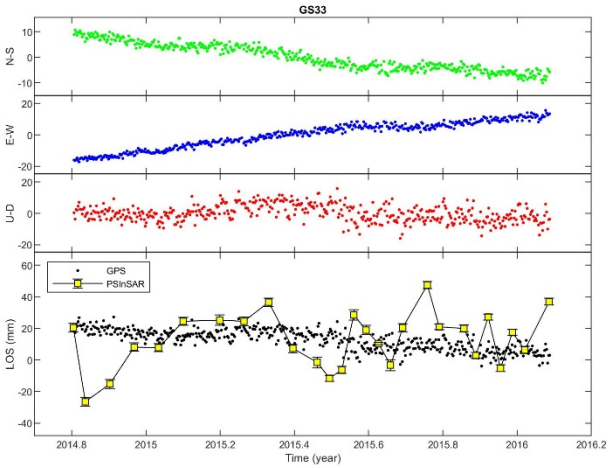


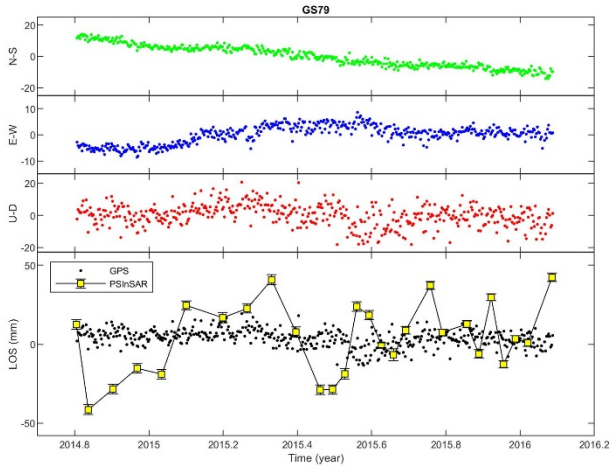
圖 E-1：2014-2016 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

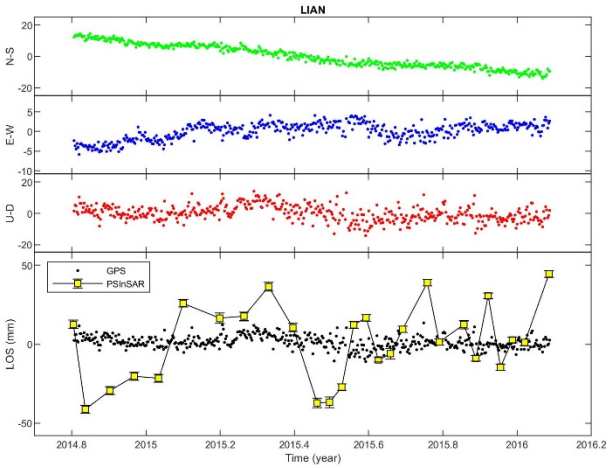

CKSV
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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


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


GS33
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


GS79
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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

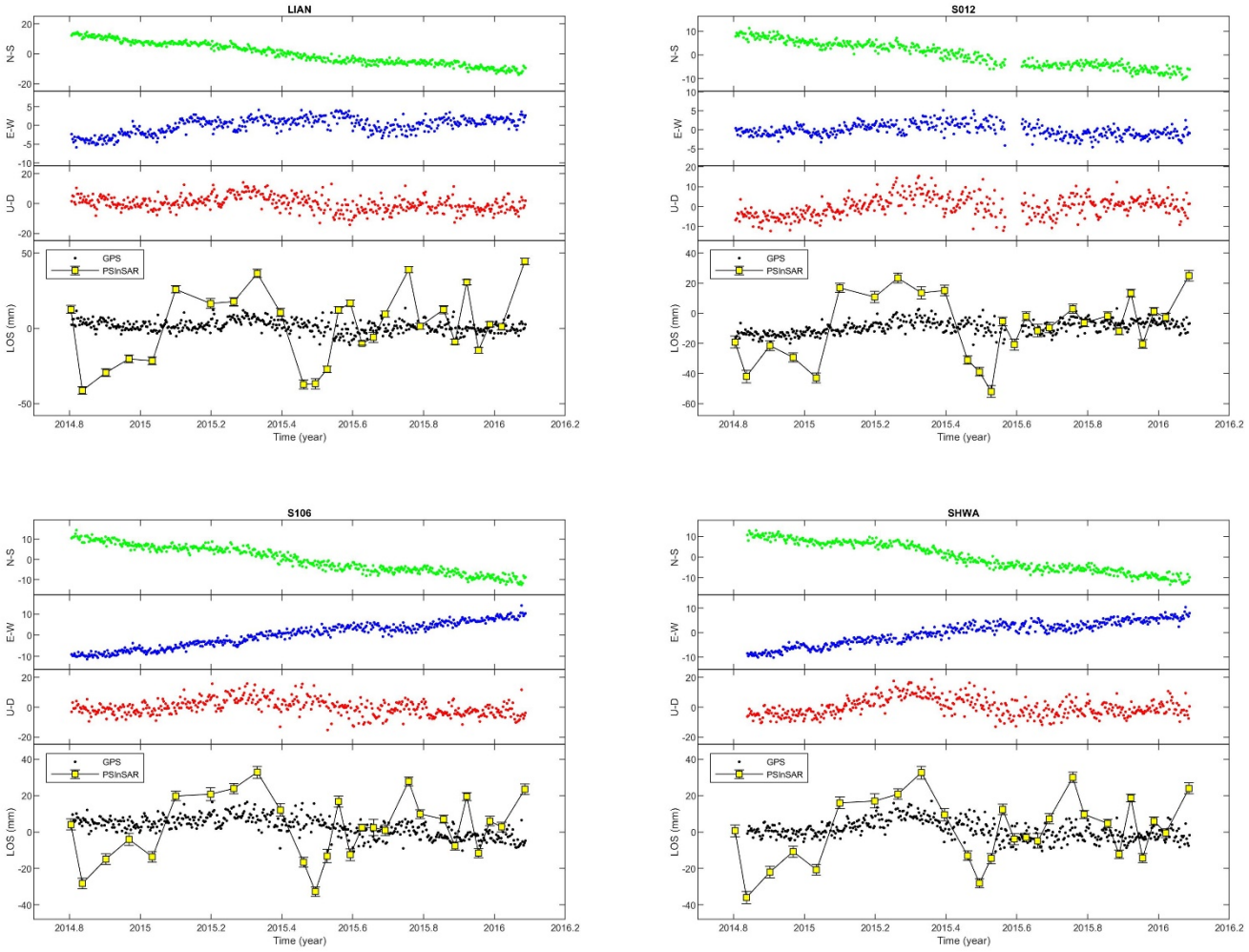


圖 E-2：我們選取了十個 GPS 站位將其 2014-2016 升軌方向時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 黑色點則為 GPS 投影至雷達視衛星方向、亦即是斜距方向（雷達為升軌方向），並且與附近之雷達資料比對（黃色方框）。 CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。

E-2 2014 年至 2016 年 Descending 速度剖面及時間序列

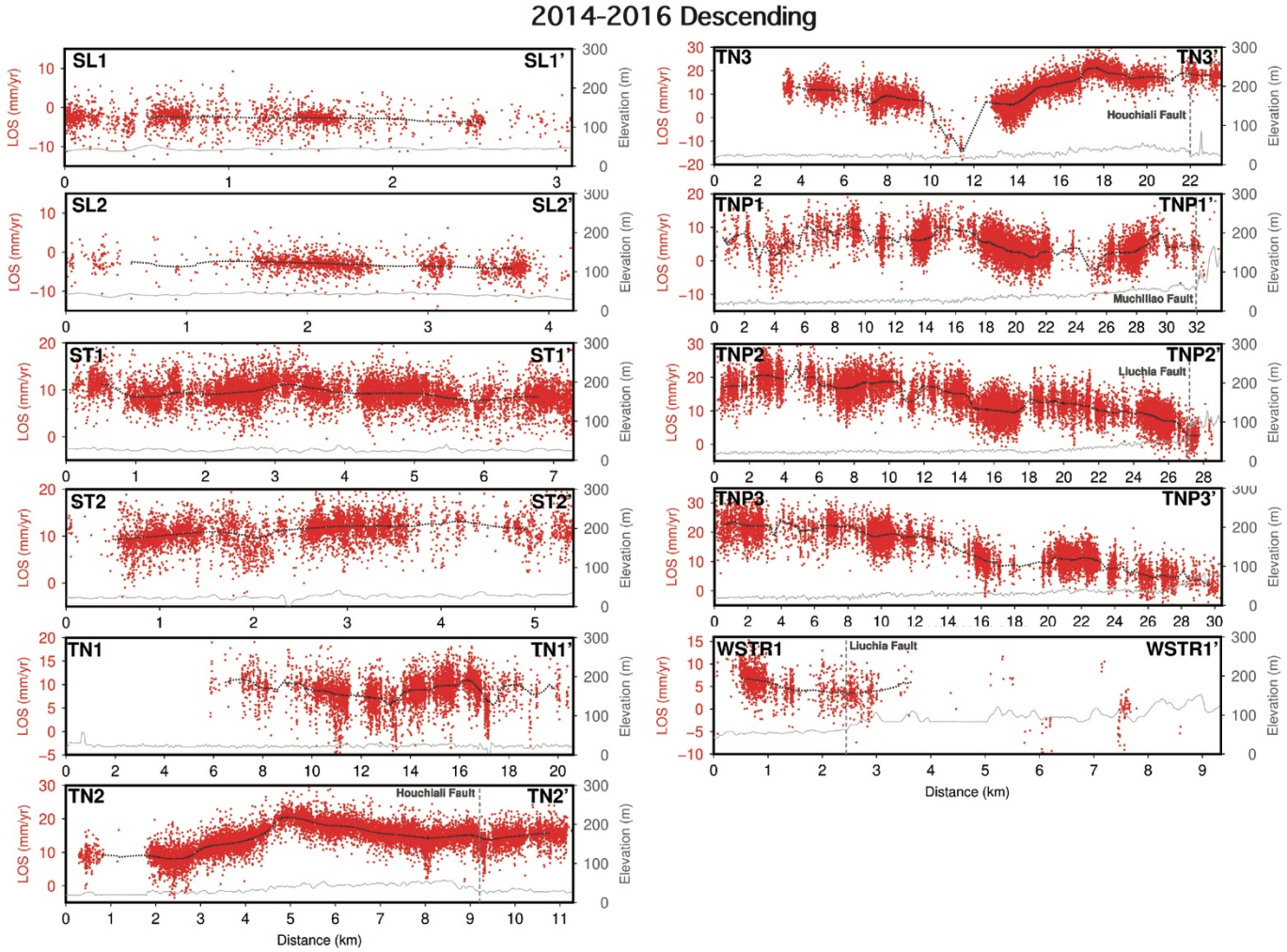
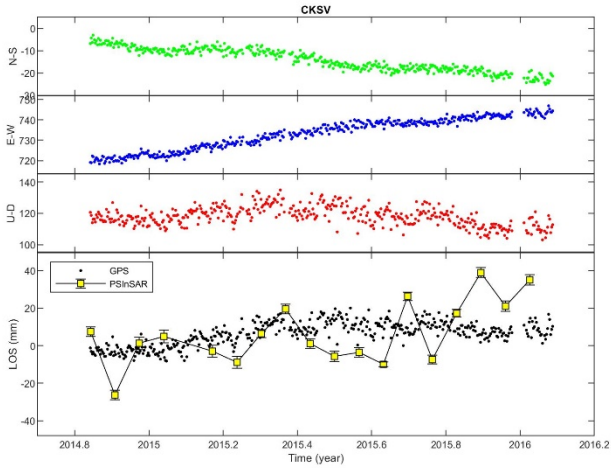
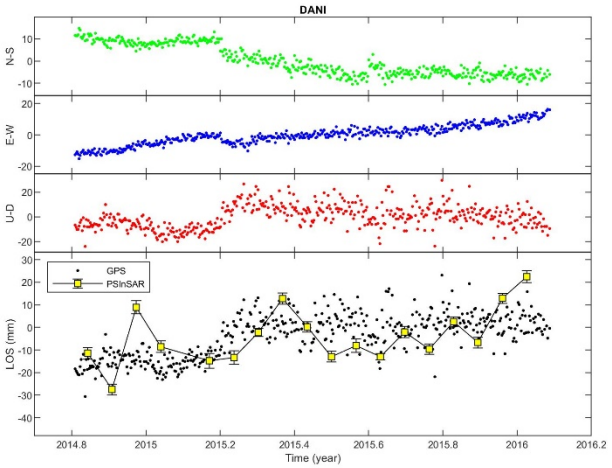
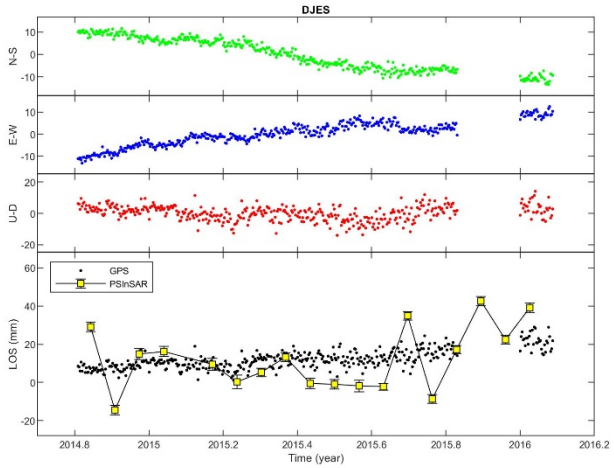
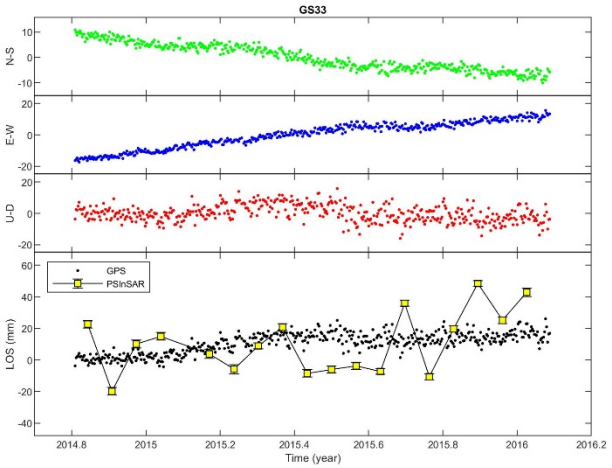


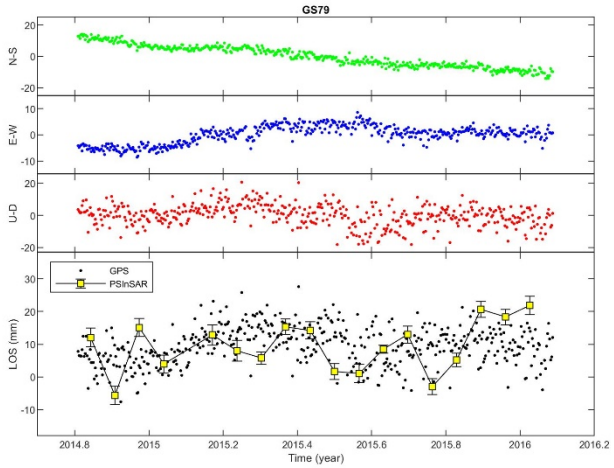
圖 E-3：2014-2016 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

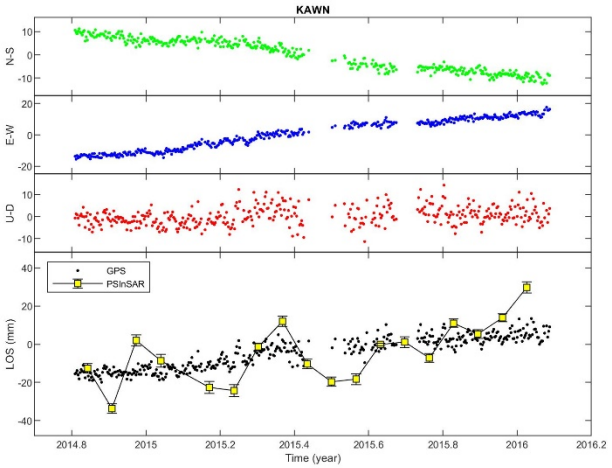

CKSV
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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


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


GS33
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


GS79
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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

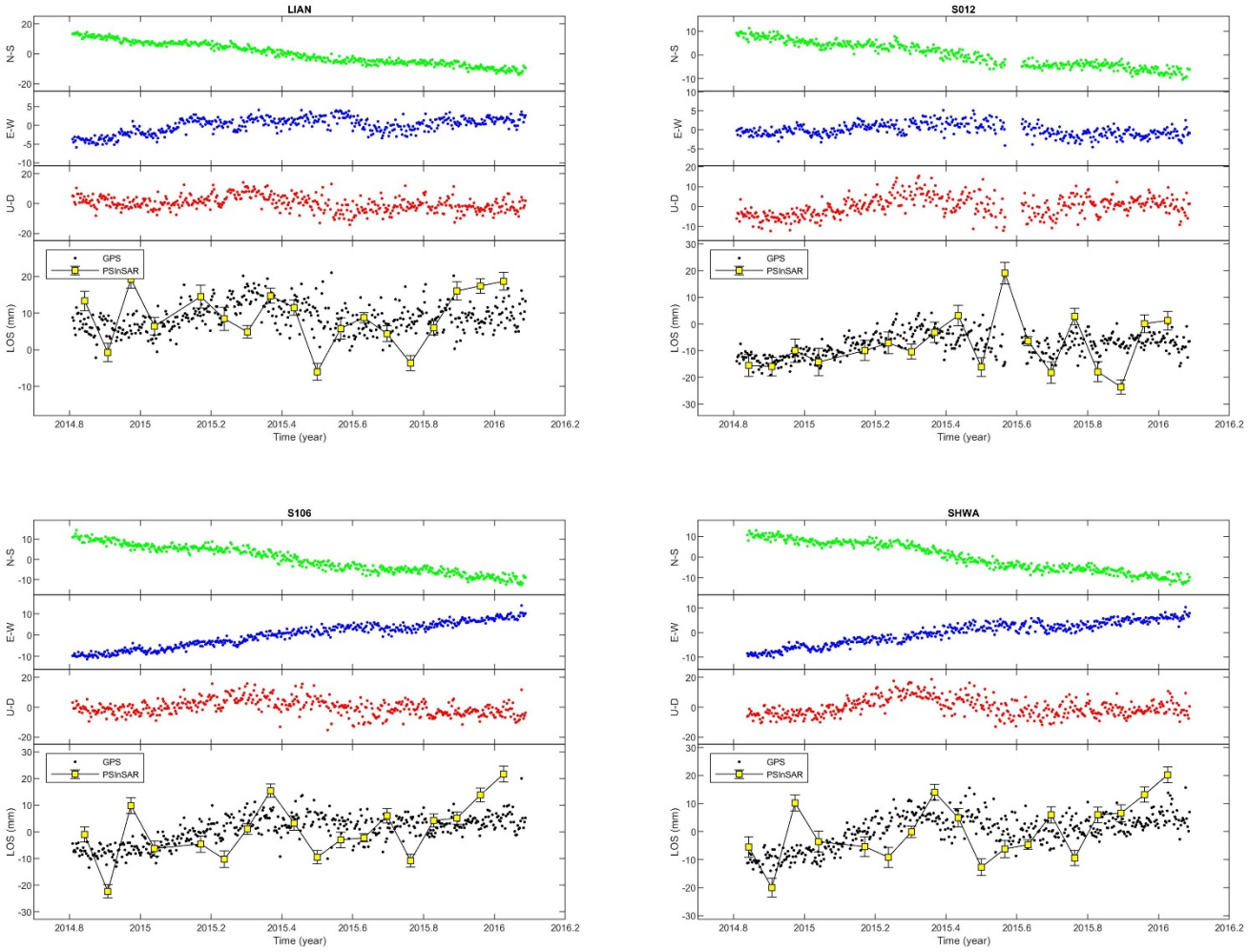


圖 E-4：我們選取了十個 GPS 站位將其 2014-2016 降軌方向時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 黑色點則為 GPS 投影至雷達視衛星方向、亦即是斜距方向（雷達為升軌方向），並且與附近之雷達資料比對（黃色方框）。 CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。

E-3 2016 年至 2018 年 Ascending 速度剖面及時間序列

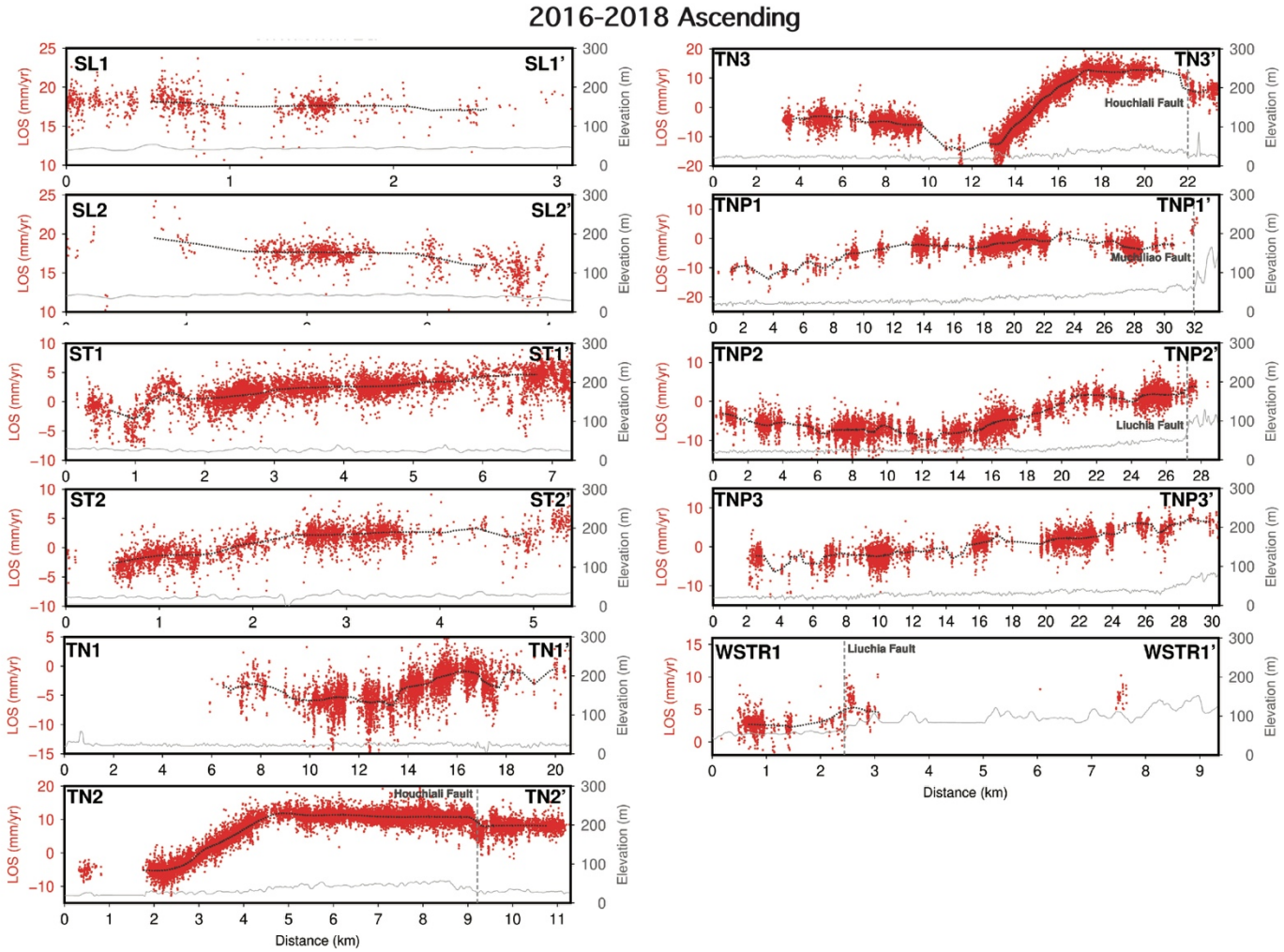
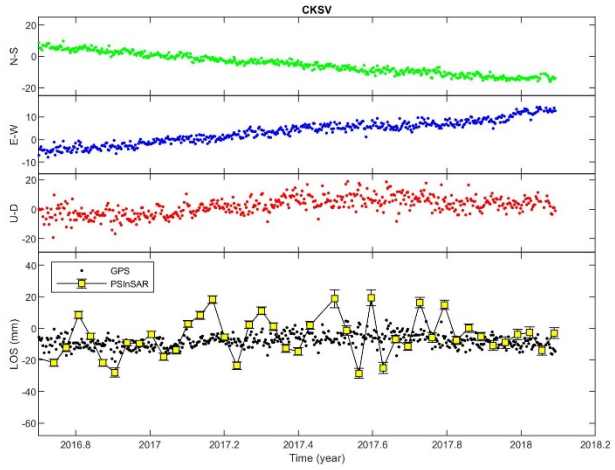
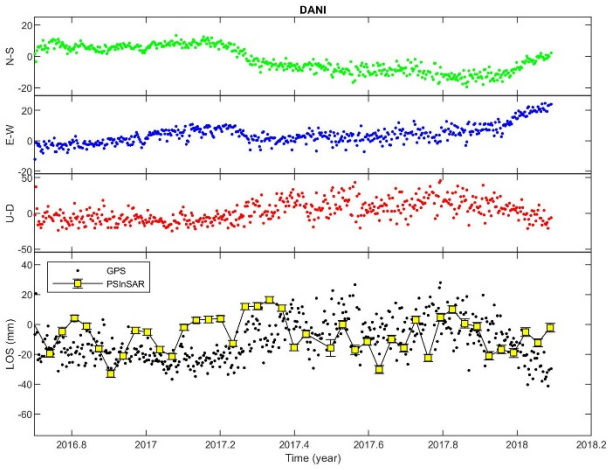
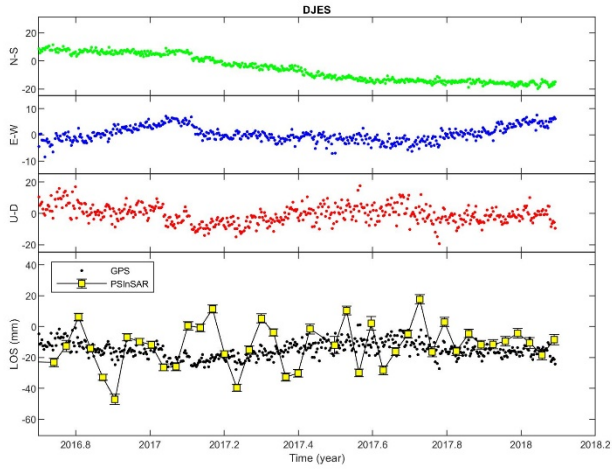
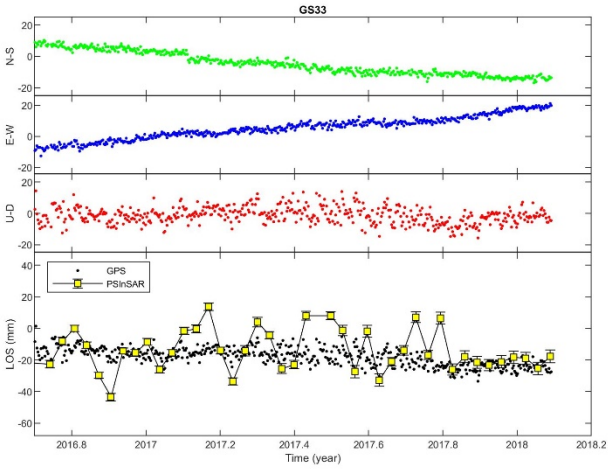


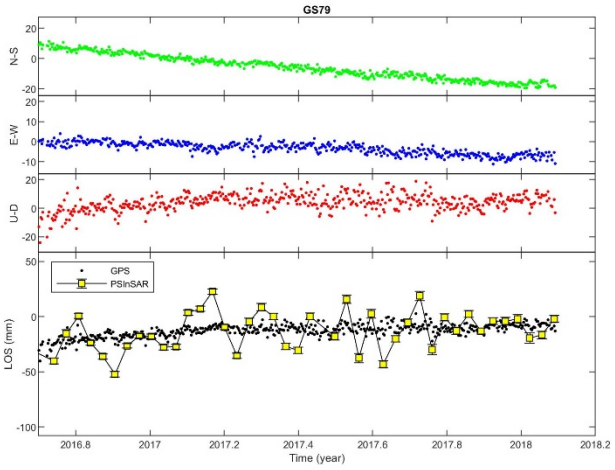
圖 E-5：2016-2018 科學園區與都會區升軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

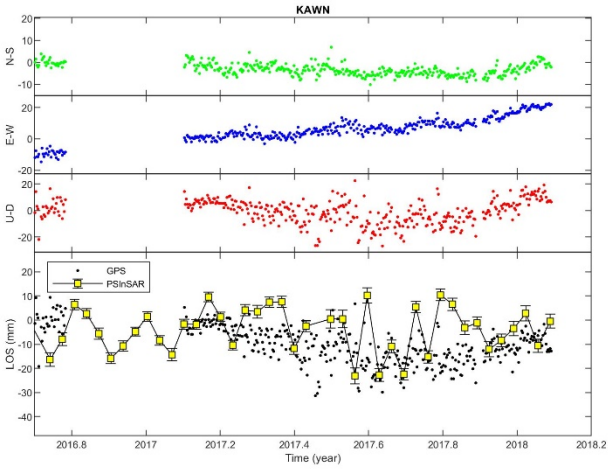

CKSV
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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


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


GS33
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


GS79
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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

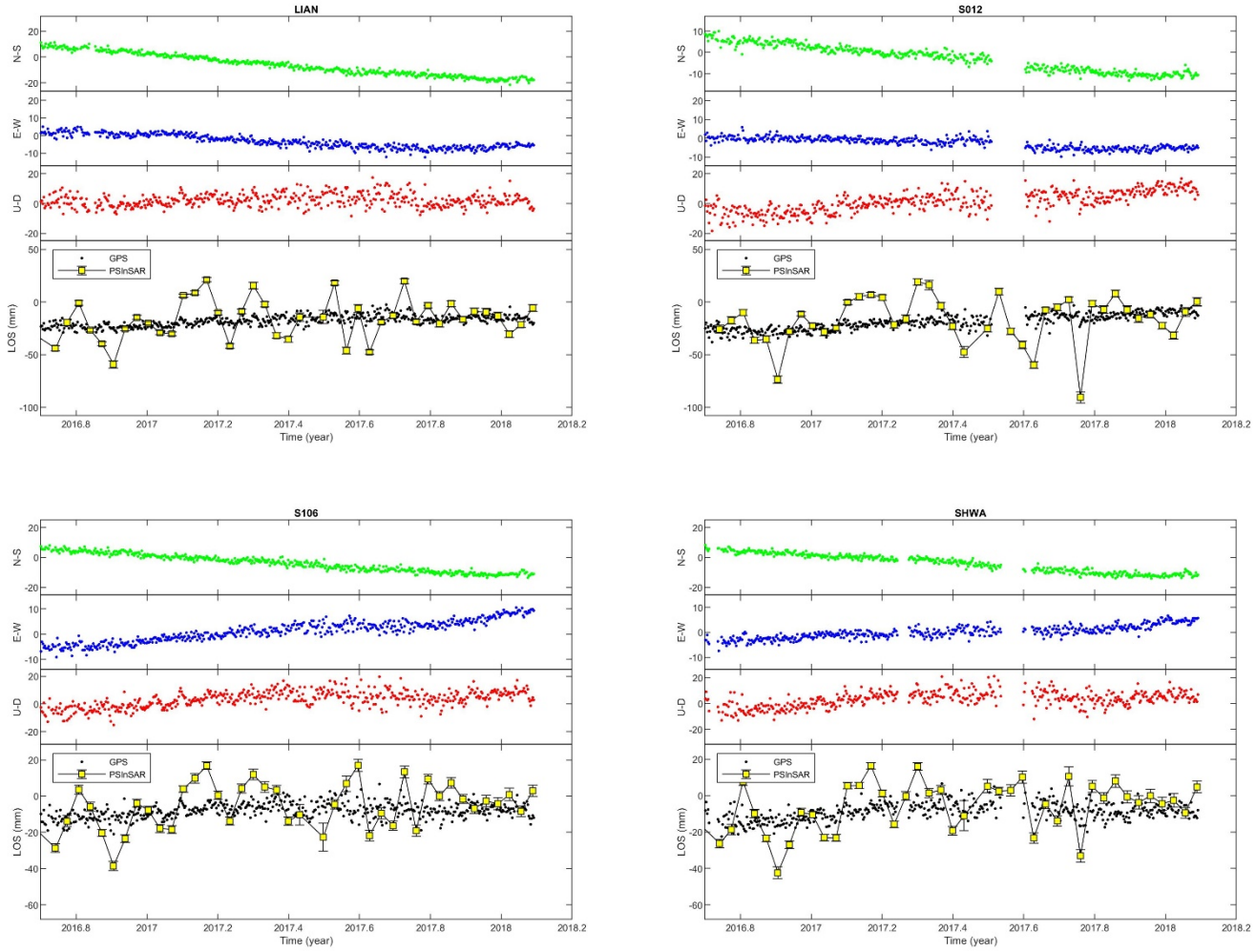


圖 E-6：我們選取了十個 GPS 站位將其 2016-2018 升軌方向時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 黑色點則為 GPS 投影至雷達視衛星方向、亦即是斜距方向（雷達為升軌方向），並且與附近之雷達資料比對（黃色方框）。 CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。

E-4 2016 年至 2018 年 Descending 速度剖面及時間序列

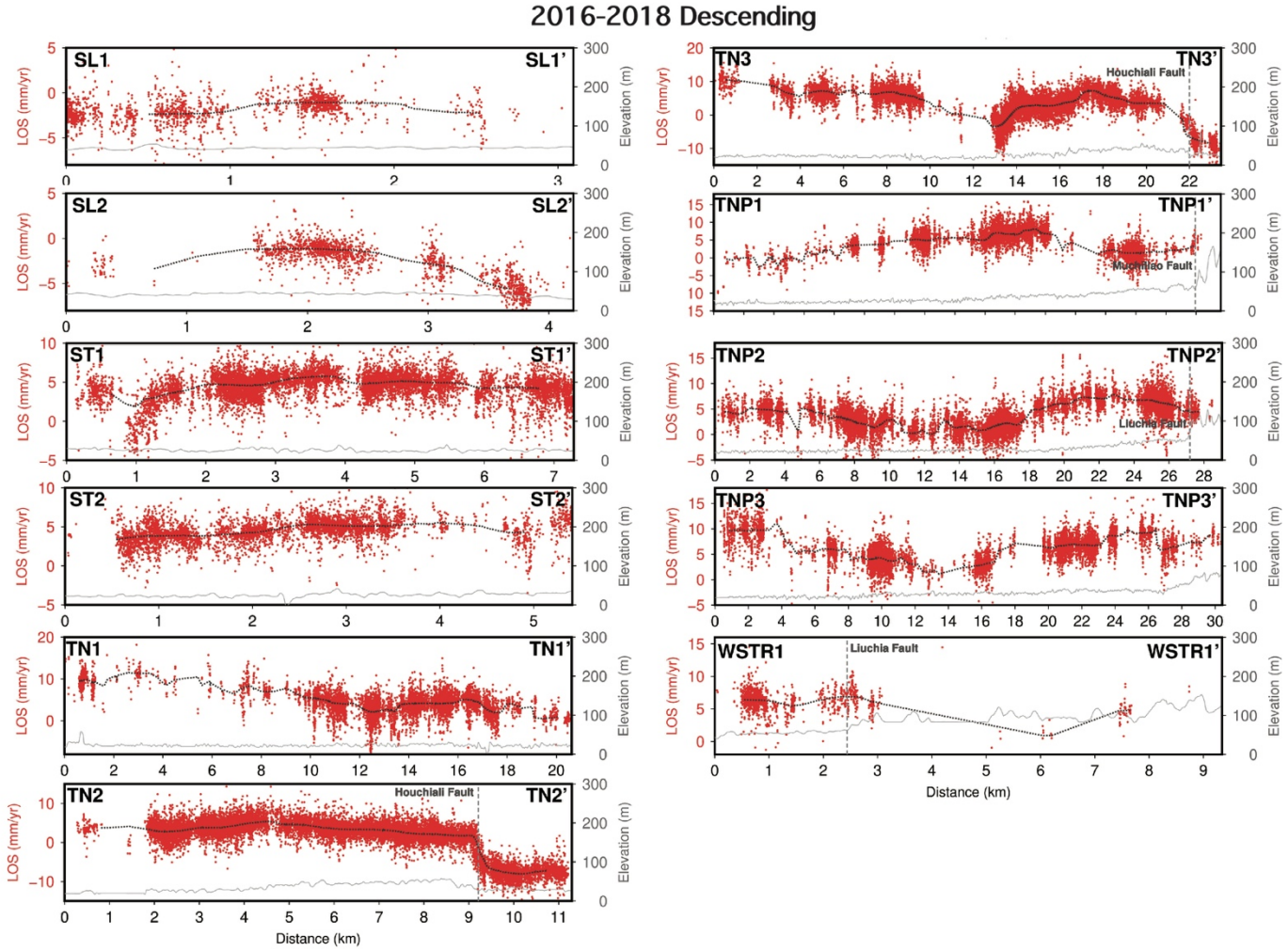
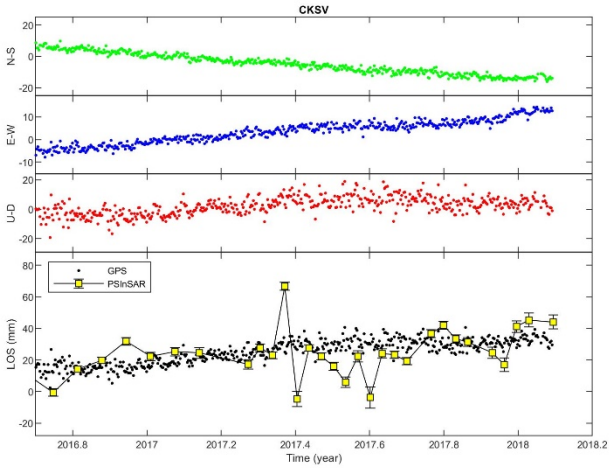
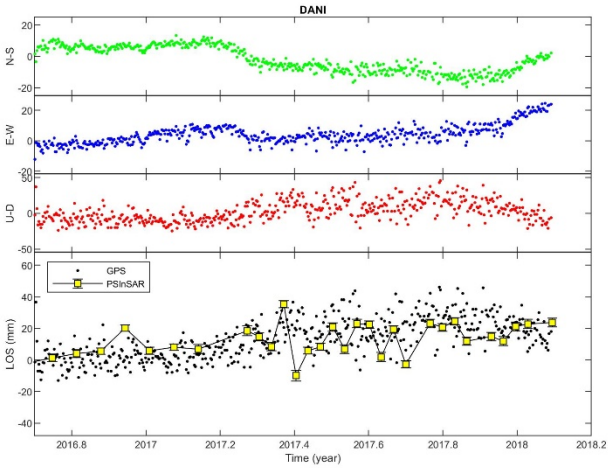
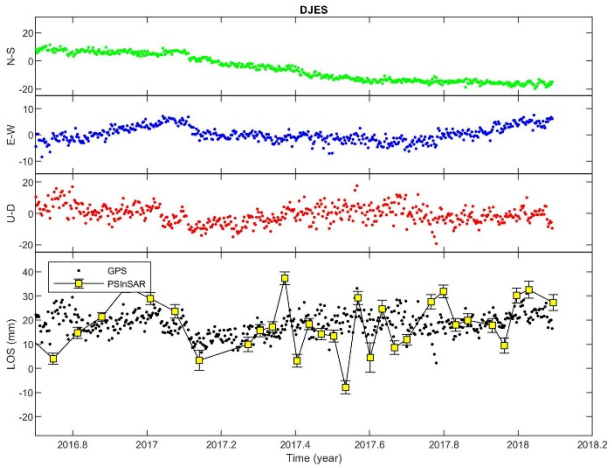
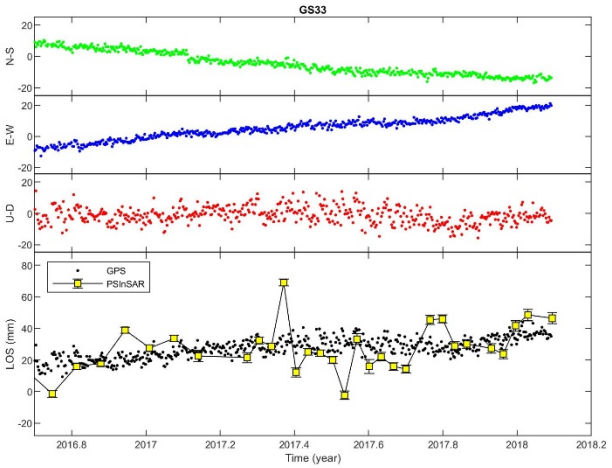


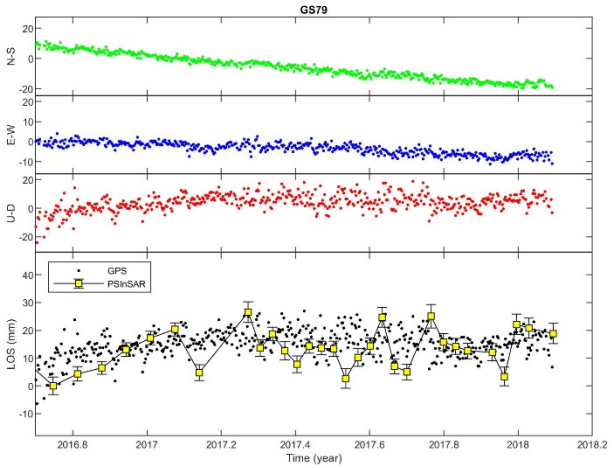
圖 E-7：2016-2018 科學園區與都會區降軌道影像的 LOS 平均速度場與剖面圖。紅點為 PSInSAR 速度，深灰色虛線為平均值線，灰色虛線為斷層位置，灰色實線為地形。

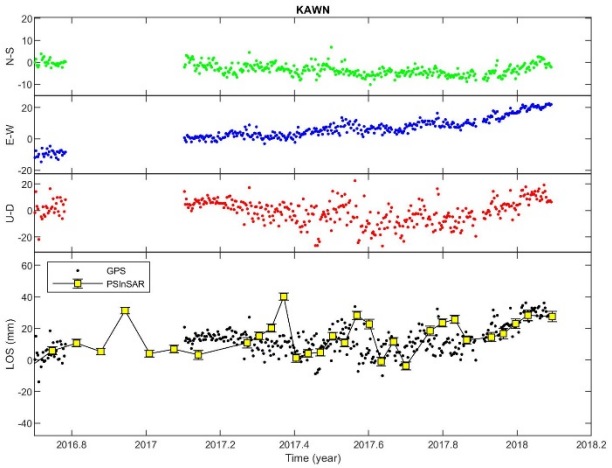

CKSV
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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


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


GS33
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


GS79
N-S
E-W
U-D
LOS (mm)
GPS
PSInSAR
Time (year)


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

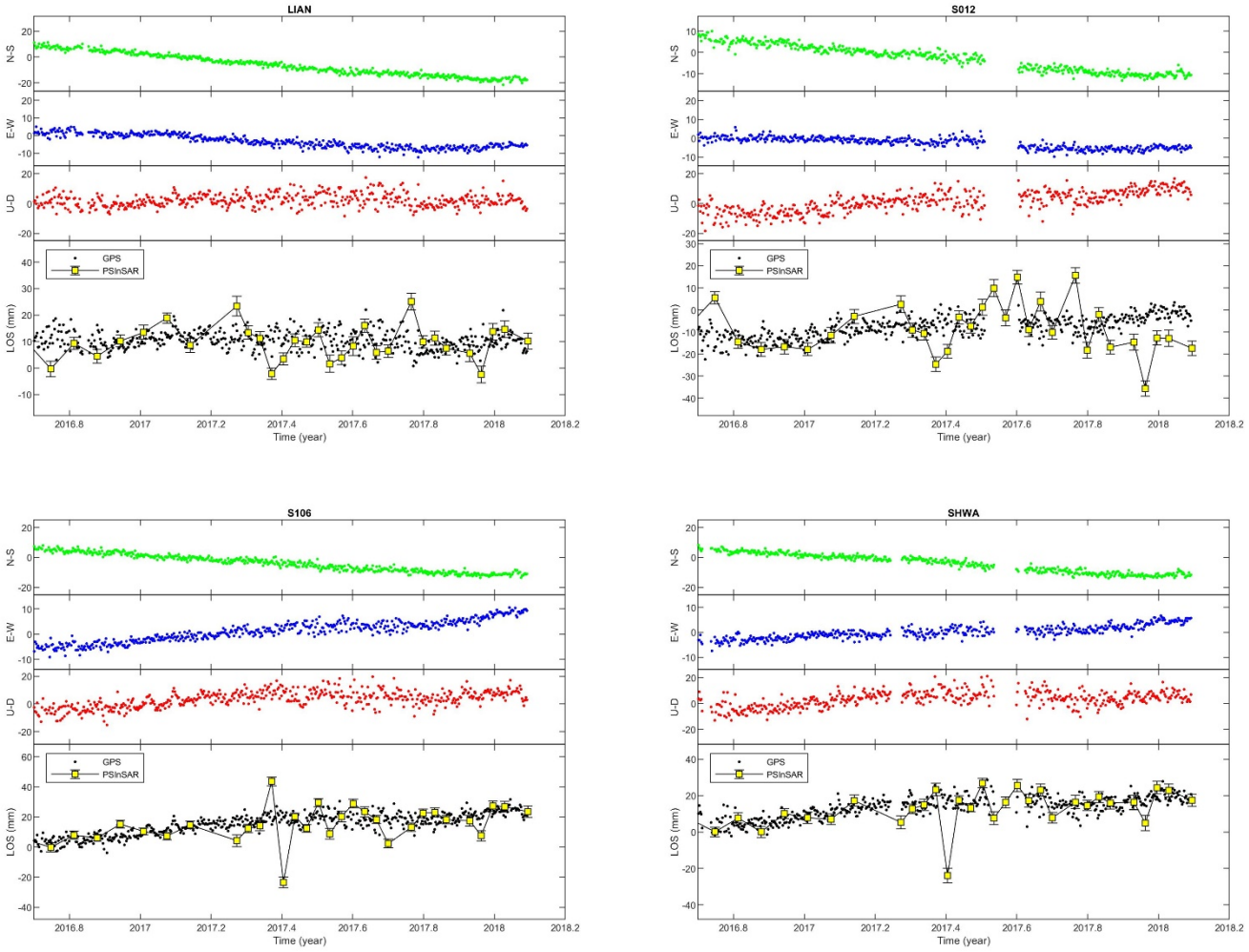


圖 E-8：我們選取了十個 GPS 站位將其 2016-2018 降軌方向時間序列呈現，綠色為南北向、藍色為東西向、紅色為垂直。 黑色點則為 GPS 投影至雷達視衛星方向、亦即是斜距方向（雷達為升軌方向），並且與附近之雷達資料比對（黃色方框）。 CKSV：成功大學、GS33：永華國小、DJES：大甲國小、SHWA：虎頭埤、GS79：中路國小、S106：新化、LIAN：阿蓮國小、DANI：大內、KAWN：渡拔國小、S012：鏡面水庫。