

應用時域相關點雷達干涉技術觀測地表變形：以嘉南平原為

例

季強昇[1] 蕭宇伸[1]* 洪偉嘉[2]

摘 要

本研究利用合成孔徑雷達干涉技術，監測嘉南平原部分地區 2007 年至 2011 年間的地層下陷速度。嘉南平原地區過去因過度抽取地下水，導致地層下陷情形嚴重，如何快速與精確監測下陷範圍與下陷速率為重要議題。時域相關點雷達干涉技術為合成孔徑雷達差分干涉技術方法之一，不僅可獲得大範圍地表變形資訊，同時可獲得高量測精度。本文採用時域相關點雷達干涉技術搭配 2007 年 3 月至 2011 年 3 月共 15 幅 ALOS PALASR 影像，綜合分析嘉南平原地區之地表變形速率成果，並與水準資料進行比對。經本研究分析成果顯示，在嘉義與台南地區獲得之時域相關點點位密度達每平方公里 217.6 點，時域相關點雷達干涉技成果與水準測量成果比對之均方根誤差約 0.8 公分/年，顯示此方法具有高準確性，並且能有效應用於大面積地層下陷監測。

關鍵詞：地層下陷、時域相關點雷達干涉技術、嘉南平原

Detection of Ground Surface Deformation from Temporarily Coherent Point SAR Interferometry: A Case Study in Chianan Plain

Chiang-Sheng Chi[1] Yu-Shen Hsiao[1] Wei-Chia Hung[2]*

ABSTRACT

This study is aimed at monitoring the land subsidence velocity by Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique over parts of Chianan Plain. Chianan Plain area suffered from serious land subsidence due to heavy groundwater withdrawal. Thus how to effective monitor land subsidence becomes a major issue in Taiwan. Temporarily Coherent Point InSAR (TCPIInSAR) is one of InSAR methods and it can be used to obtain large-area ground displacement information with high accuracy. In this study, we adopt TCPIInSAR with 16 ALOS PALSAR images from 2007 to 2011 to derive land deformation over parts of Chianan Plain area. The results from TCPIInSAR are validated by those from leveling data. This research shows that the density of TCPs derived from TCPIInSAR is about 171.54 pixel/km². The vertical displacements resulted from TCPIInSAR yields a root-mean-square (RMS) error of 0.8

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichng 402, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail: yshsiao@nchu.edu.tw

[2] 國立交通大學土木工程學系

cm/year by comparing those from leveling data. We conclude that the TCPIInSAR can be effectively used for monitoring large-scale land subsidence with high accuracy.

Key word : Land Subsidence, TCPIInSAR, Chianan Plain

前言

台灣地區地狹人稠，人口及產業多集中於西部平原地區，隨著近年來台灣產業的發展，用水量大量的增加，加上台灣河川陡且短急，水資源不易儲存，因此許多地區會利用抽取地下水以減少用水成本，因為地下水大量被抽取使得西部不少地區產生地層下陷的問題，進而引起淹水及建物破壞等災害，尤其當下陷區附近有重要交通建設通過時(如高鐵等)，更會對國家經濟與人民安全產生威脅，因此一種能快速觀測大範圍地表變形的測量方式就顯得更為重要。

傳統上對地表變形的監測方法主要為水準測量及全球定位系統(Global Positioning System, GPS)，然而這些測量方法為點狀測量，若要呈現面狀資料，需大量增加點位密度，然此將耗費大量人力及經費。近年來隨著遙測技術的發展，合成孔徑雷達干涉技術(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)大量被應用在觀測地表變形上。若利用不同時間之雷達影像進行干涉處理，由相位差計算出地表三維資訊，此技術稱為合成孔徑雷達差分干涉技術(Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry, DInSAR)，DInSAR可在短時間內取得大面積且高精度資訊，因此近年來大量應用在觀測地表變化方面，如火山活動、斷層、地震後的變動及地層下陷等。

DInSAR技術最初是利用2幅影像作差分干涉後，計算其相位差以取得地表的變形資訊，如此雖然可以快速取得大範圍地面資訊，但容易受到因影像拍攝時間之間之地表物(如植生等)之變化影響而無法產生干涉條紋，因此多

應用於都市平原地區。Ferretti et al. (2001)所提出之永久散射體(Persistent Scatterers)概念，即利用地表上對訊號反射較為穩定的點位，如岩石，人工建物等，選為PS點作為代表地表變形的點位(永久散射體)。Hooper et al. (2004)利用此概念，提出永久散射體差分干涉技術(Persistent Scatterers InSAR, PSInSAR)，由於永久散射體擁有相當高的訊雜比(圖1)，使用該點位之相位差解算地表變形量，較不會隨時間而改變的地面物。PSInSAR雖可改善傳統DInSAR容易產生干涉條紋之問題，然而PSInSAR在解算相位時，仍會存在因相關點之間有著較大的相位雜訊而產生相位模糊的情形。Zhang et al.(2011)提出的時域相關點雷達干涉技術(Temporarily Coherent Point InSAR, TCPIInSAR)，利用最小二乘法計算相關點間的相位差之殘差以判斷有無相位模糊的情形，以改善PSInSAR於相位解算時產生的誤差，此方法可使DInSAR監測地表變形精度進一步提升，目前已可達公分等級的觀測精度(黃大任，2013；林書涵，2014)。

台灣現有許多地區有地層下陷的現象，如彰化、雲林、嘉義、台南及屏東等地，因此地層下陷的防治以及監測已成為政府相當重視的問題，本研究選擇雲嘉南平原部分地區作為研究區域，以最新之TCPIInSAR技術計算2007之2011年間之地表變形量，並利用水準觀測觀測資料作檢核，以了解此區域地層下陷的情形及相關DInSAR技術的可行性。

文獻回顧

DInSAR 與 TCPIInSAR 原理

DInSAR為利用不同時間相同地區的兩幅SAR影像進行差分干涉，得到兩幅影像之相位變化後，再經由相位回復取得地表的變化量。

DInSAR 進行差分干涉時需要用到兩組像對，其中一組為地形對，為地表高程，另一組做為變形對，包括地表變形及地形誤差，將這兩組像對做差分干涉以移除地形誤差，得到由純地表變形的成果(謝嘉聲，2006)，而 TCPInSAR 為將 DInSAR 結果，開一單窗將影像對中像素做偏移量計算，各像素之偏移量標準差可表示為：

$$\sigma(\delta_{r,a}) = \sqrt{\frac{3}{2N} \cdot \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\pi\gamma} \chi^2} \quad (1)$$

σ 為像素中偏移量之標準差， N 為單窗尺寸， χ 為過取樣參數， γ 為影像與單窗的相關係數。得出偏移量標準差後，即可計算一幅影像(行列數分別為 l 和 m)中每個像素的偏移量 $O_{l \times m}$ ：

$$O_{l \times m} = \begin{bmatrix} O_{1,1} & O_{1,2} & \cdots & O_{1,m} \\ O_{2,1} & O_{2,2} & \cdots & O_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O_{l,1} & O_{l,2} & \cdots & O_{l,m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

將該影像偏移量之峰值後設定一門檻值 A ，去除偏移量標準差過大的像素，剩下的像素則選為 TCP 候選點。在找出點位後利用最小二乘法判斷點位有無相位模糊的情形，並剔除這些候選點，最後所留下的點位則為 TCP 點。

研究方法與材料

研究區域

本次研究區域選擇在嘉南平原中嘉義以及台南沿海地帶(圖 2)，研究區域總面積約 1104.4 平方公里，地區主要下陷之區域為嘉義縣東石鄉、布袋鎮、義竹鄉及台南市北門區、學甲區等地，這些區域位於八掌溪下游兩側沖積平原，屬於現代沖積層，主要由沖積砂土、黏土等細顆粒土壤組成。此區域為台灣地層下陷較嚴重地區之一，平均下陷量平均每年約有

3 至 4 公分，較嚴重區域可達每年 4 公分以上。

影像資料

本研究使用 ALOS (Advanced Land Observing Satellite)衛星 2007/03 至 2011/03 間 15 幅影像(表 1)，每幅影像之軌道編號均為 track : 447, frame : 450。ALOS 衛星為一太陽同步衛星，由日本宇宙航空研究開發機構(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)於 2006 年 1 月發射，已於 2011 年 5 月除役，ALOS 衛星週期為 46 天，平均航高約 691 公里，傾斜角約 98.16°。本研究使用 ALOS 衛星所搭載的 PALSAR 探測器所拍攝之影像，此為 L 波段(波長 23.5cm)的雷達影像，L 波段為一波長較長的波段，其優點為有較高的穿透性，不容易受到天候的影響，並且較容易穿透地表的植被覆蓋，而研究區域內包含許多農業用地，因此使用 L 波段可以降低植生變化對研究結果的影響。

表 1. 本研究採用之 ALOS 影像編號與時間。

Table 1. The numbers and dates of ALOS images used in this study.

軌道(track/frame)	影像時間 (yaer/month)
	2007/03
	2007/07
	2007/10
	2008/01
	2008/04
	2008/06
. 447/450	2008/07
	2009/07
	2009/09
	2009/10
	2010/01
	2010/03
	2010/10

2011/01
2011/03

(7)計算 TCP 點座標

(8)解算 TCP 點變形量

資料處理流程

本研究 TCPInSAR 之處理流程，可分為下列步驟(圖 3)：

(1)計算影像對基線：

將所使用的影像配對並計算每一組影像對之垂直基線及時間基線(圖 4)。

(2)設定基線門檻值：

在處理影像前需先設定門檻以篩選不適合之影像對，分別需設定垂直基線及時間基線兩項，垂直基線為兩幅影像拍攝時衛星之距離，時間基線為兩幅影像時間間隔，垂直基線越短理論上地形誤差會降低，但若設定過短可能會產生影像對數過少的情形，因此在設定上應兩者兼顧，本研究使用垂直基線 800m 內，時間基線 45 至 1200 天為門檻，此組門檻為使用多組不同門檻試驗後較優成果。相關基線及影像資訊如表 2 所示。

(3)影像格式轉換：

為方便處理將影像格式統一由 FBD 轉為 FBS 格式。

(4)影像套合：

將初步篩選後的影像對中出現最多次之影像選為主影像，並將其於影像和主影像作套合，使每幅影像空間位置一致。

(5)DInSAR 解算：

將影像對進行干涉解算，產生每副影像對的干涉圖，並檢查所有成果，將有問題的圖像剔除，以避免影響後續步驟成果品質。

(6)產生 TCP 點：

依照 TCPInSAR 選點方式從干涉圖中計算各像素偏移量，留下偏移量小的像素選為 TCP 候選點。

依照 TCPInSAR 原理作相位模糊估計、參數估計、離群檢測等解算，取得最終之 TCP 點及其變形速率。

(9)資料後處理：

將成果與水準測量資料比較，進行成果精度的分析。

表 2 基線及影像資訊。

Table 2. Information of baselines and images.

垂基基線(m)	800
時間基線(day)	45~1200
影像數(幅)	15
影像對數	40

水準點資料

水準點使用 2007/09 至 2011/08 間工業技術研究院「100 年度多重感應器應用於嘉義、台南、高雄及屏東地區水準檢測調查與分析」中所施測嘉義台南一等水準測量之成果，其水準點分布如圖 5 所示。根據此文獻，其各水準點高程之平均誤差為 2.5 公厘(mm)，故水準點之精度頗高，足以用來檢核本研究 TCPInSAR 成果之精度。由圖 5 顯示嘉義東石鄉及布袋鎮等地約有每年 4 至 5 公分的下陷速率，最大下陷速率點位於東石鄉東石南橋水準點有 4.9 公分/年的下陷速率，其他如義竹鄉也有每年 3 公分左右的速率，台南市下陷較嚴重區域如北門區、學甲區則也有約每年 2 至 3 公分的下陷速率，最大下陷速率點位於北門區新圍，具有 3.5 公分/年的下陷速率。

結果與討論

圖 6 為研究區域中所有的 TCP 點位圖，共產生 240,311 個 TCP 點，其所涵蓋面積約 1104.4 平方公里，故點位密度約 217.6 點/平方公里，遠高於水準測量 0.15 個/平方公里(表 3)。此外，由圖 6 也可發現，TCP 點密集的区域，土地利用情形應為市區及鐵路，而較稀疏之區域則為魚塢或農田，除此之外，水準網以外的區域也可以找到許多 TCP 點位，顯示出該技術具有可以觀測已知水準測量點位之外區域的優勢，即可以應用於觀測未知區域或是一般水準測量方式難以到達的區域。

表 3 水準測量及 TCPInSAR 點密度資訊。

Table 3. The densities of leveling and TCPInSAR points

	leveling	TCPInSAR
研究範圍面積	1104.4 km ²	
點數	166	240, 311
點密度	0.15 point/km ²	217.6 pixel/km ²

將成果所有 TCP 點成果，利用 kriging 法內插成 250X250 公尺的網格，其成果如圖 7 所示。由圖 7 可發現看到沿海地區有明顯的下陷，下陷速率由沿海向內陸漸為趨緩，主要下陷區位於嘉義縣東石鄉和布袋鎮，約有 3 至 4 公分/年的下陷速率，義竹鄉則有約 3 公分/年的下陷速率，另外六腳鄉也有小範圍的下陷區，約有 2 公分/年。在台南部分，北門區及學甲區，約有 2 至 3 公分/年的下陷速率。圖 7 亦可發現，水準點下陷速率和 TCPInSAR 成果套疊後，下陷區域兩者呈現相似的結果。除此之外，由於 ALOS 衛星軌道方向大至為南北向(圖 7)，故誤差較大之點位多位於沿衛星軌道方向之兩側，推測可能原因為在將從衛星視線方向轉為垂直向時是使用衛星平均視角，因此在影

像兩側部分可能會產生較大誤差。

為進一步驗證 TCPInSAR 成果之精度，本研究將 166 個水準點線性內插至 TCPInSAR 成果之網格中，獲取水準點位置之 TCPInSAR 成果內插之地表變形量後，再與該水準點真正變形量做差值計算，並製作成直方圖來呈現 TCPInSAR 精度成果，其結果分別如圖 8 與圖 9 所示。由圖 8 可發現，大部分點位的差值均在 1 公分/年之內，較大者也皆未超過 2 公分/年，166 個水準點中約有 80% 的點位差值在 1 公分之內，所有差值之均方根約為 0.8cm/year，顯示 TCPInSAR 所測得之地表變形誤差並不大，是一種具有高精度的地表變形測量技術。整體而言，本團隊認為若 TCPInSAR 監測出 2 公分以上之地表變形量，應可歸類為可靠數據。

時間序列分析

本研究中使用之水準測量成果施測時間分別為 2006/10、2007/09、2009/01、2010/08 及 2011/08，本研究將 TCPInSAR 時間序列成果取其與水準施測時間相近時間段，共分為 4 個時間段(表 4)，用以比較水準測量和 TCPInSAR 所得變形速率隨時間變化情形。

表 4 水準測量及 TCPInSAR 時間分段資訊

Table 4. Time series information of leveling and TCPISAR

	水準測量	TCPInSAR
時間段	2006/10~2007/09	2007/03~2007/10
	2007/09~2009/01	2007/07~2008/07
	2009/01~2010/08	2009/07~2010/07
	2010/08~2011/08	2010/07~2011/03

因水準點數過多，故選取下陷區中 4 個水準點為代表，分別位於東石鄉、布袋鎮、義竹鄉及北門區，如圖 10 所示，研究中並使用臨近的地下水井之水位資料，用以比較下陷速率以及地下水位的關係。除此之外，為方便觀察 TCPIInSAR 及水準資料的趨勢變化，將時間段開頭速率平移至同一基準。由圖 11,12,13,14 等圖中可以看到發現 4 個水準點位及 TCPIInSAR 皆呈現相似變化趨勢，2010 年前下陷速率呈現增大的趨勢，例如 2007 年間約 2 公分/年，2008 年間增加至約 4 公分/年，而在 2010 年間下陷最為嚴重達到約 5 至 6 公分/年，在 2010 年後下陷速率則減緩至約 3 公分/年。另外由圖 11 之地下水水位可發現，2007 至 2010 間地下水水位呈現逐漸下降的趨勢，且在 2010 年左右有較嚴重的乾旱情形，地下水的補注也因此缺乏，由圖 11~14 中看到在 2009 後半年至 2010 年間地下水水位有較低的現象，因此在 2010 年之下陷速率有較大的趨勢，而在 2010 年後地下水水位變化趨於平緩，因此在 2010 年後下陷速率也有降低的跡象。由圖 11~14 可發現，整體而言，地層下陷速率與地下水水位升降呈現高相關性。

另一方面，圖 11~14 水準及 TCPIInSAR 時間序列在 2009/07~2010/07 間所測得的變形速率有較大的誤差，此現象乃水準資料與 SAR 影像之時間段選取時間不完全一致所造成(見表 4)，因此可能因為重疊時間段中之下陷速率並非線性而產生誤差，若比較兩者資料時能使時間段一致，則兩者所得到之成果將更為接近。

結論與建議

本次研究為利用 TCPIInSAR 及 2007 年至 2011 年間 15 幅 ALOS 影像資料觀測嘉義台南沿海地區地表變形之情形，研究成果顯示出研究區域中下陷區域為嘉義縣東石鄉、布袋鎮及義竹鄉，這些區域約有每年 3 至 4 公分的下陷

速率，台南縣北門區、學甲區等地則有每年 2 至 3 公分下陷速率，最大下陷點位於東石鄉到達每年下陷 3.9 公分，皆與水準測量呈現相同的趨勢。此外 TCPIInSAR 在研究區域內可以產生約 240,311 個 TCP 點，點密度為 217.6 pixel/km²，遠高於水準測量 0.15 point/km² 的成果，因此在呈現面狀的變化趨勢時可以提供更佳的成果。最後為檢核研究成果故將研究區域中 166 個水準點與網格中的 TCPIInSAR 成果做差值計算，166 個水準點中有 134 個點其差值在 1 cm/year 之內，剩餘點位差值也皆未超過 2 cm/year，將所有差值取其均方根後為 0.8 cm/year。

由研究成果中可以歸納出下列幾點結論以及改善之建議：

- (1) TCPIInSAR 技術擁有快速測量大面積範圍、消耗較少人力以及較不受天氣影響等優勢，且由研究成果和水準側量比較後顯示出 TCPIInSAR 為一種精度相當高之技術，可以作為大範圍觀測地表變形一種良好的方法。
- (2) 差異較大之點位多位於沿衛星軌道方向之兩側，可能原因為在將 TCPIInSAR 結果從衛星視線方向 (Line of Sight, LOS) 轉為垂直向時是使用衛星平均視角 38.75°，在影像兩側部分視角會有所增減，因此在影像邊緣可能會產生較大誤差。
- (3) 本研究所得原始成果為 LOS 方向變形量，故研究中假設水平向無明顯位移並利用投影將 LOS 轉為垂直向，因此可能會因水平向之位移而產生誤差，未來可以考慮加入 GPS 資料以修正此類誤差。

參考文獻

1. 謝嘉聲(2006),「以雷達干涉技術偵測地表變形之研究」,國立交通大學土木工程學系博士論文。
2. 工業技術研究院(2010),「99 年度彰化、雲林、嘉義與臺南地區地層下陷之監測、調查及分析」,經濟部水利署。
3. 工業技術研究院(2011),「100 年度多重感應器應用於嘉義、台南、高雄及屏東地區水準檢測調查與分析」,經濟部水利署。
4. 黃大任 (2013),「以時域相關點雷達干涉量測研究彰化、雲林與嘉義地區之地層下陷」,國立交通大學土木工程學系碩士論文。
5. 林書涵 (2014),「應用多時域雷達干涉技術與 C 及 L 波段雷達影像分析彰化地區地表變形」,國立交通大學土木工程學系碩士論文。
6. Huang, D.R. (2013). "Detection of Land Subsidence by Temporarily Coherent Point SAR Interferometry in Changhua, Yunlin, and Chiayi", Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan, ROC. (in Chinese)
7. Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. (2000). "Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5), 2202-2212.
8. Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001). "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8-20.
9. Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. and Kampes, B. (2004). "A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers", Geophysical Research Letters, 31(23), L23611.
10. Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H. (2007), "Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis with Application to Volcán Alcedo, Galápagos", Journal of Geophysical Research, 112(B07407).
11. Zhang, L., Ding, X. and Lu, Z. (2011). "Ground Settlement Monitoring Based on Temporarily Coherent Points between Two SAR Acquisitions", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 146-152.
12. Zhang, L., Lu, Z., Ding, X., Jung, H.S., Feng, G. and Lee, C.W. (2012). "Mapping Ground Surface Deformation Using Temporarily Coherent Point SAR Interferometry: Application to Los Angeles Basin", Remote Sensing of Environment, 117, 429-439.
13. Zhang, L., Ding, X., and Lu, Z. (2011). "Modeling PSInSAR Time Series without Phase Unwrapping" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(1), 547-556.

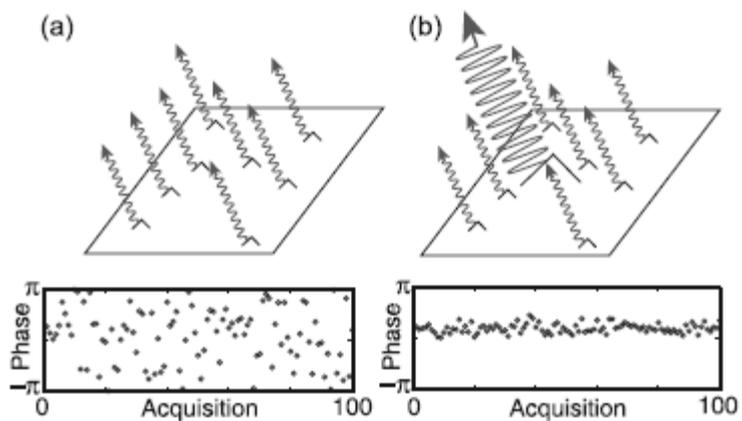


圖 1 永久散射體示意圖，其中(a)代表一般雷達回波分佈情形；(b)代表永久散射體雷達回波分佈，訊號較強且穩定(Hooper et al., 2007)。

Fig1 Phase simulations for (a) a distributed scatterer pixel and (b) a persistent scatterer pixel.

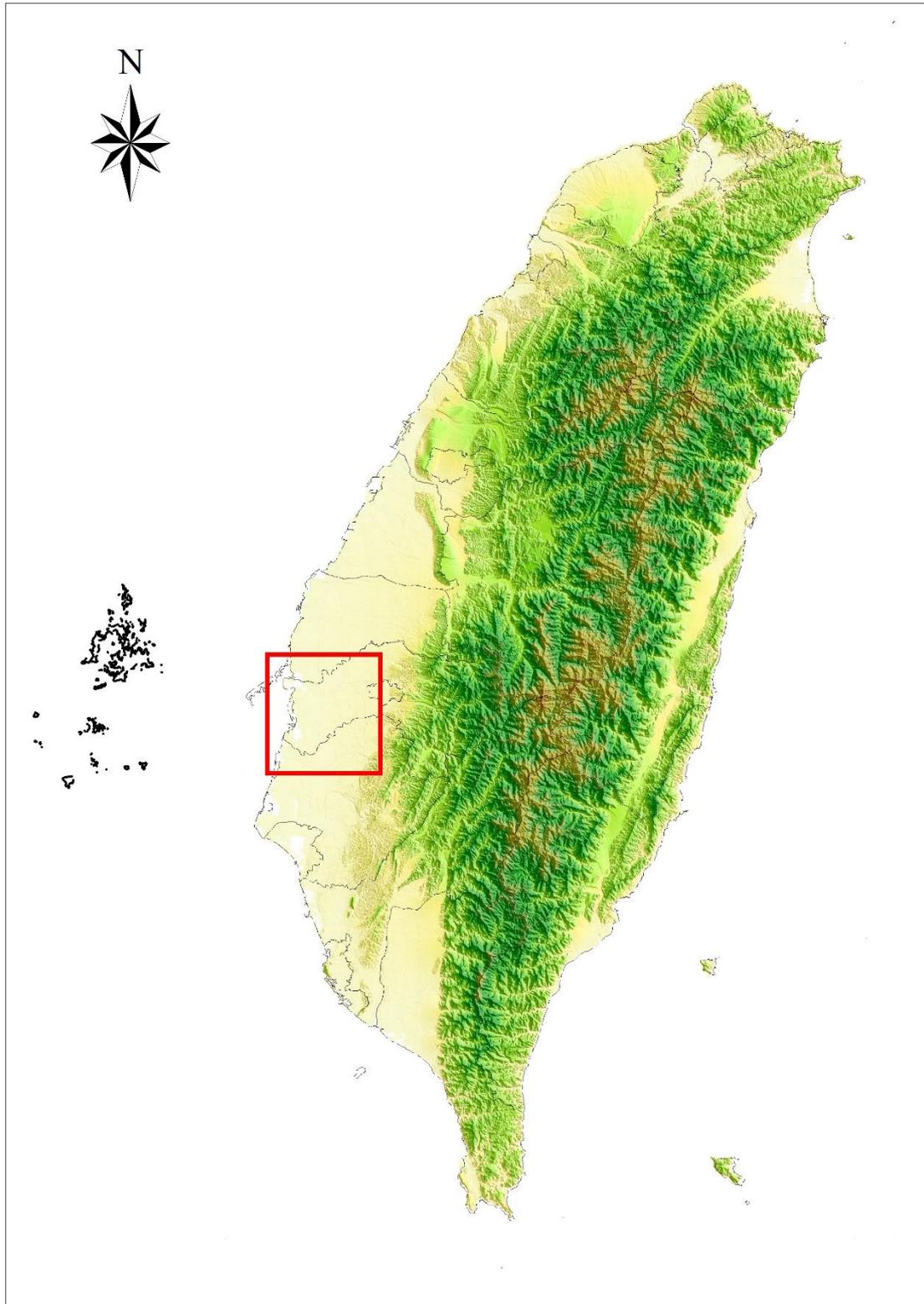


圖 2 台灣地形圖，其中紅色框內為研究範圍。

Fig 2 The terrain of Taiwan. The red rectangle means the study area.

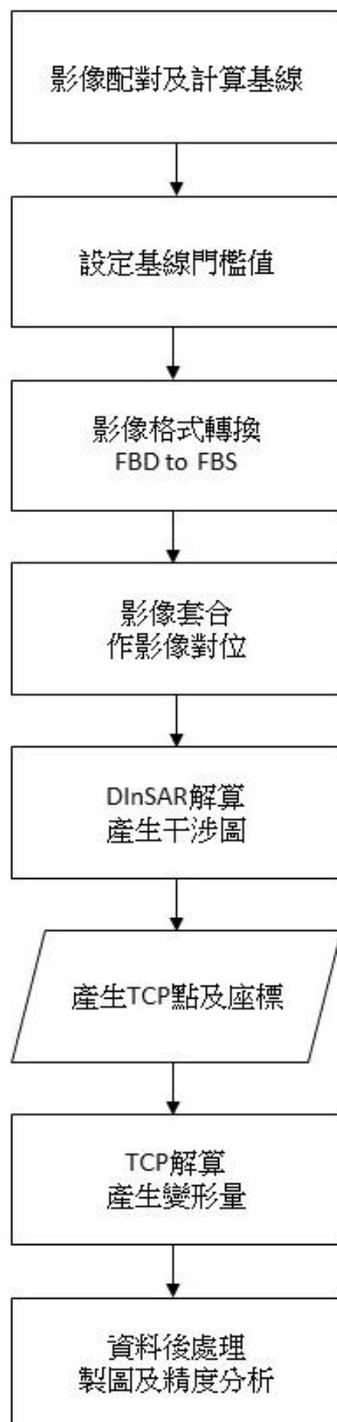


圖 3 TCPInSAR 處理流程圖。

Fig3 The flowchart of TCPInSAR processing.

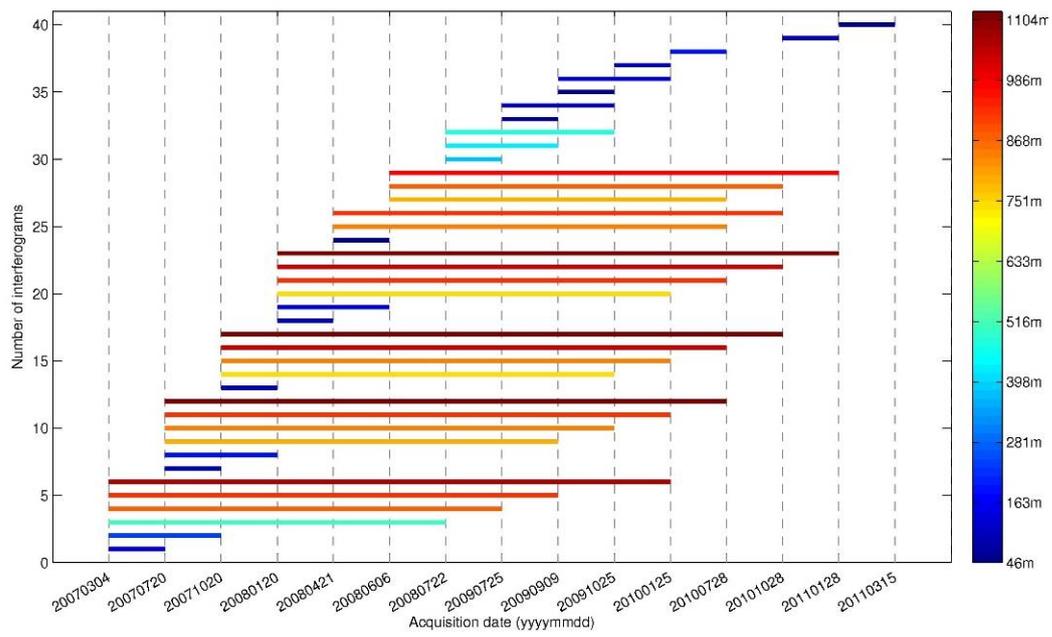


圖 4 影像對垂直基線及時間基線圖，線條長度為時間基線，顏色對應垂直基線。

Fig 4 Baseline-time plots relevant to the ALOS images.

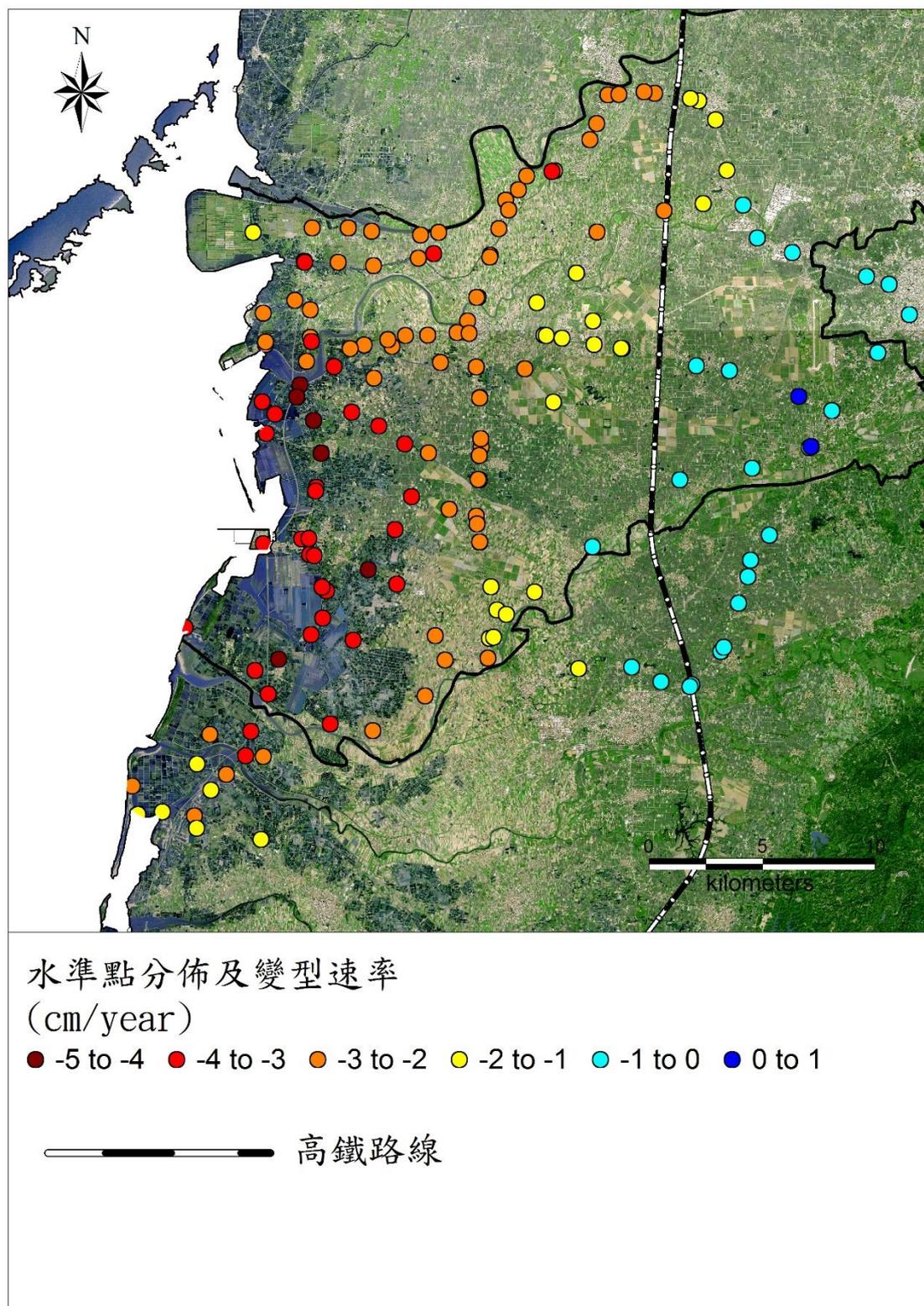


圖 5 凖點分佈及下陷速率圖，越偏向紅色的點位下陷速率越大。

Fig5 The locations of leveling points and subsidence rates in the study area. The values with dark red contain larger subsidence rates.

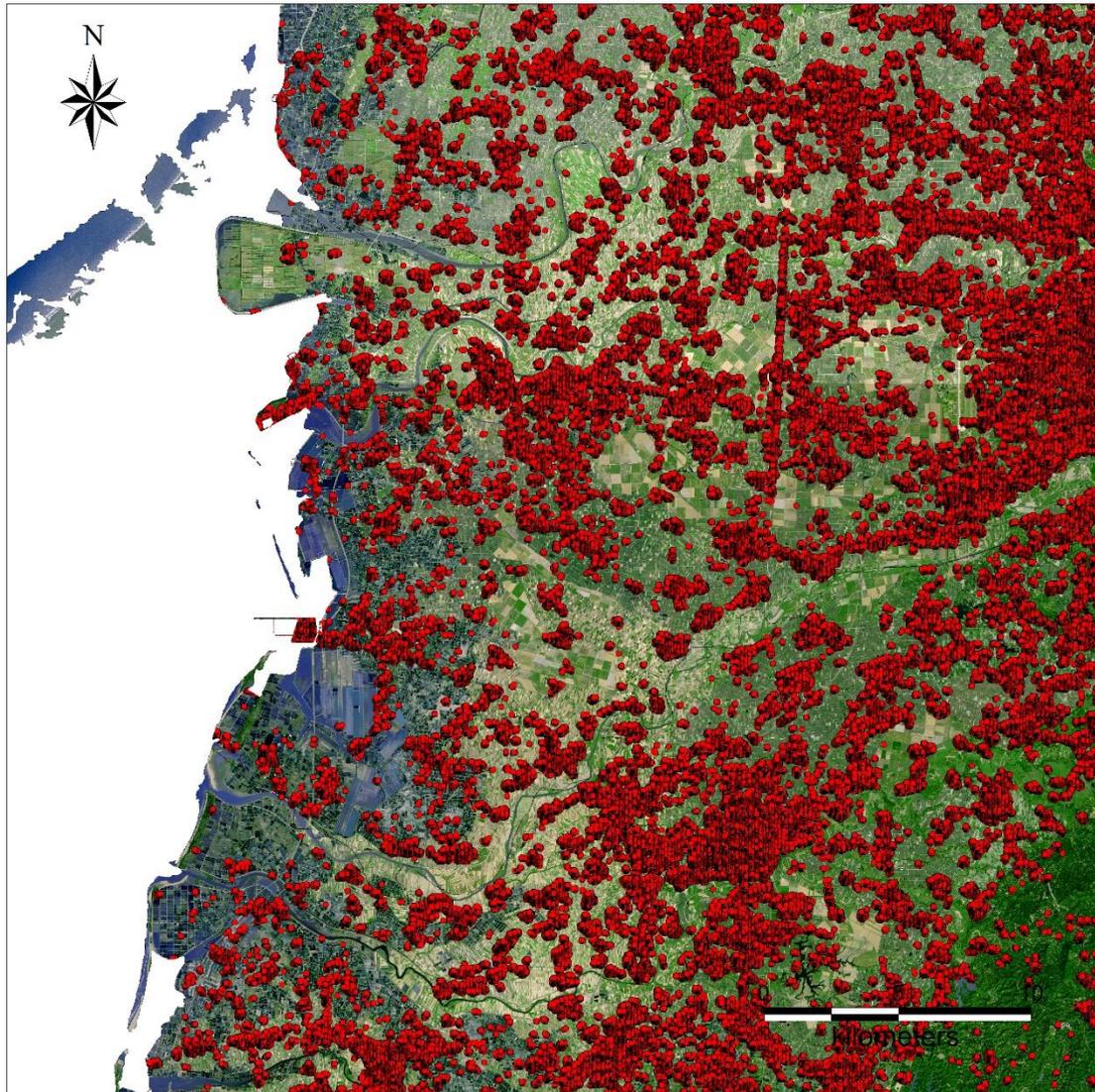


圖 6 TCP 點位分佈圖。

Fig6 The locations of TCPs in the study area.

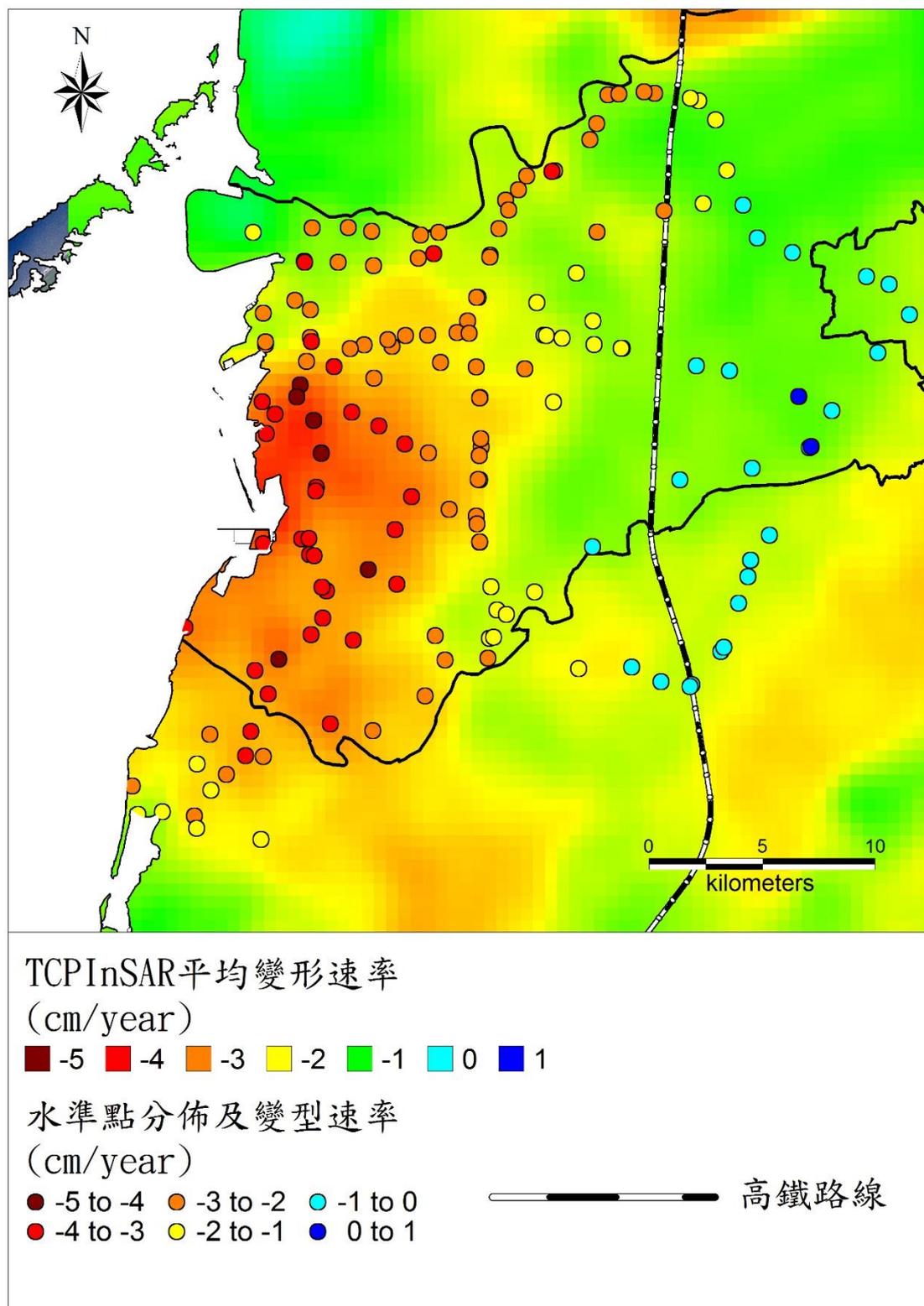


圖 7 TCPIInSAR 地表變形成果圖。

Fig 7 The ground surface deformation derived from TCPIInSAR data.

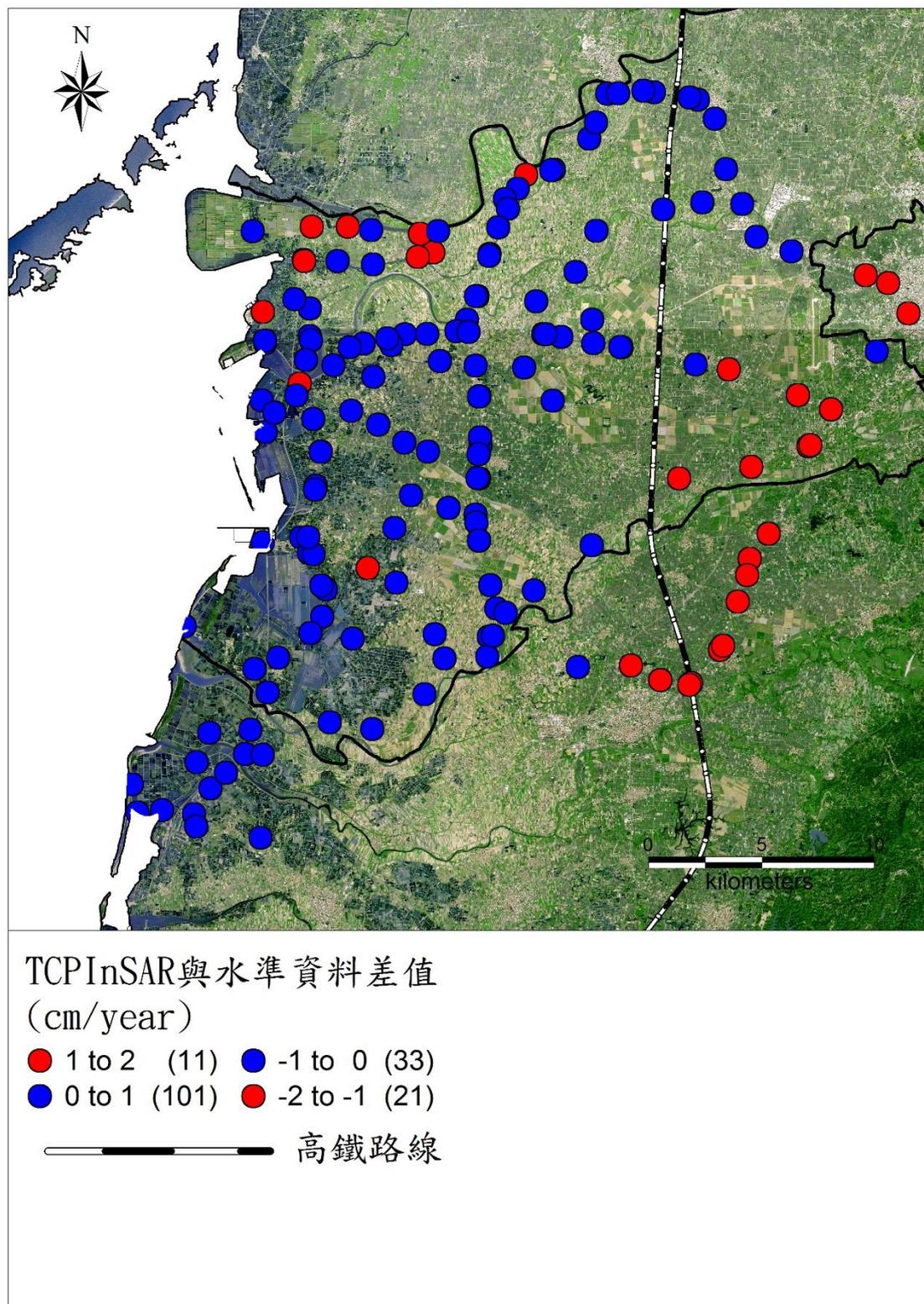


圖 8 TCPIInSAR 與水準點差值及分佈圖，藍點為差值小於 1cm/year 之點位，紅點為大於 1cm/year 之點位

Fig 8 The differences between TCPIInSAR-derived and leveling-derived subsidence rates. The blue points differences are less than 1 cm/year. The red points differences are between 1 ~ 2 cm/year.

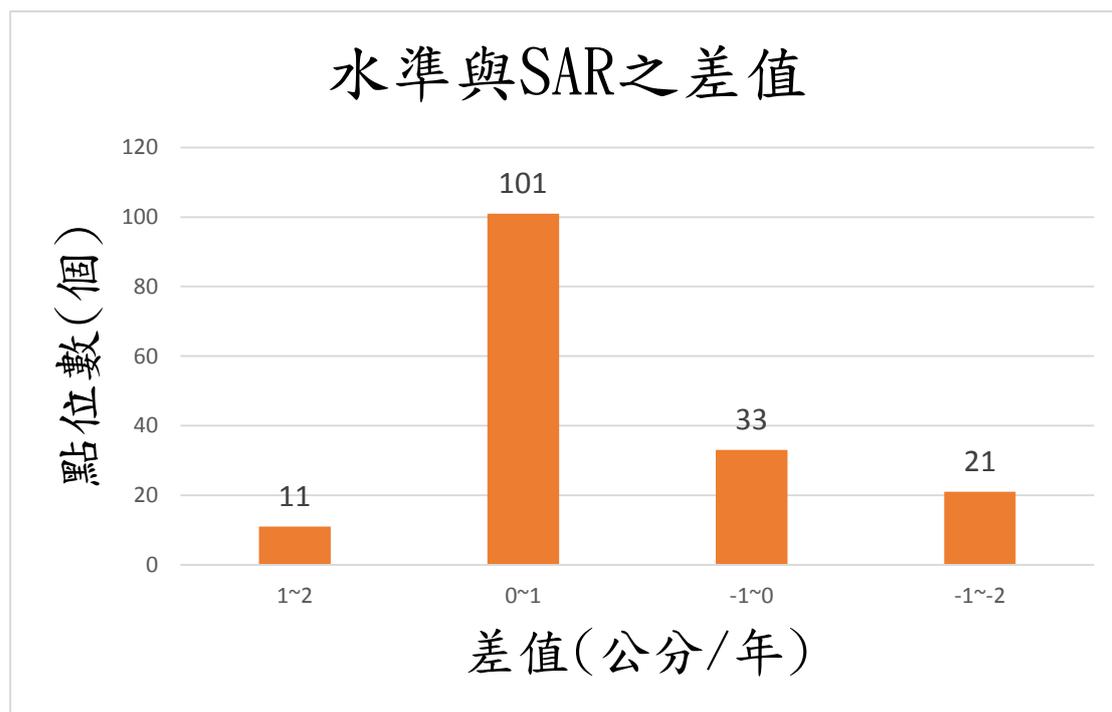


圖 9 TCPInSAR 與水準點差值統計圖，約有 80% 點位在 1cm/year 之內

Fig 9 The statistics of differences between SAR-derived and leveling-derived subsidence rates. 80% of the differences are within 1 cm/year.

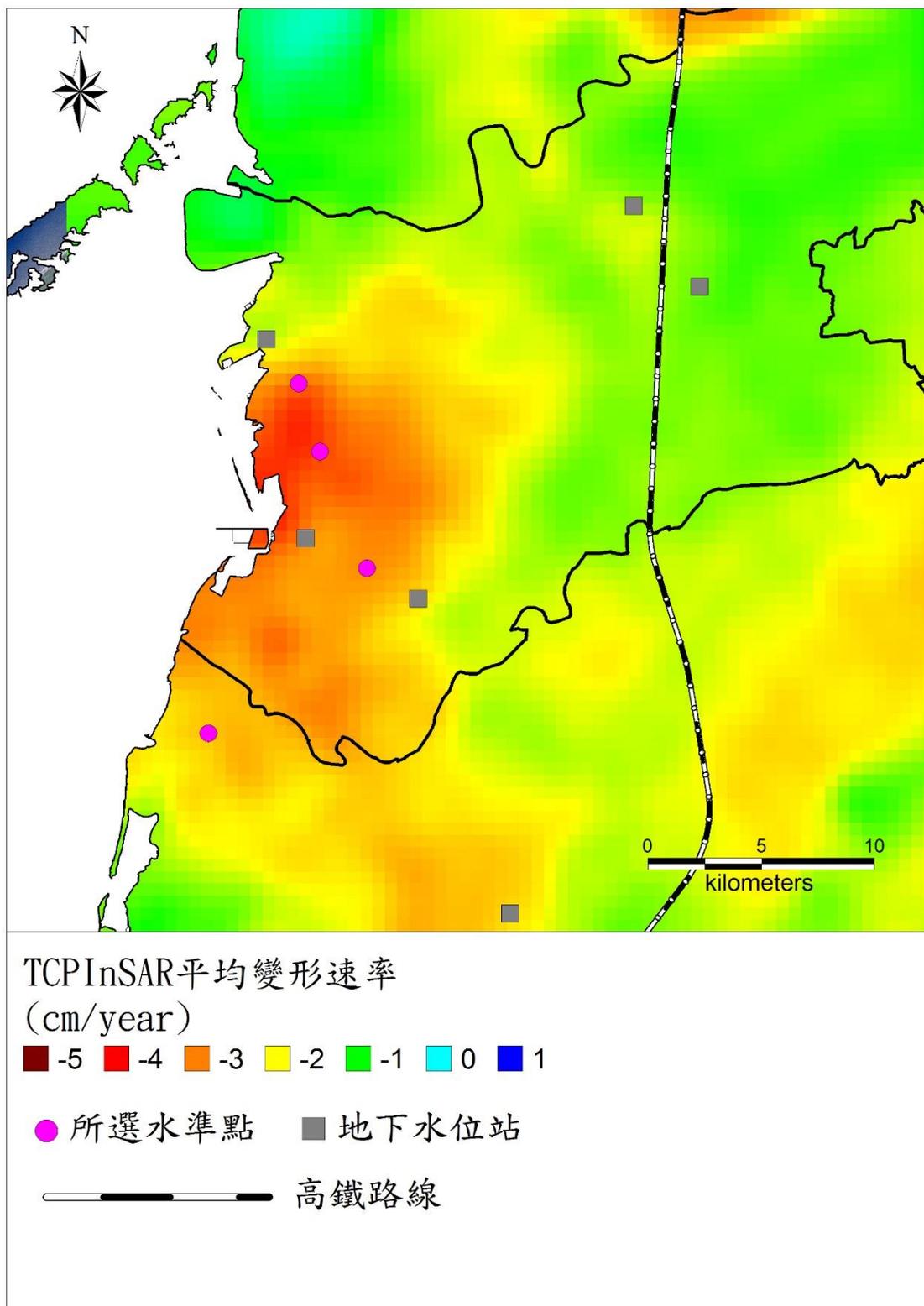


圖 10 時間序列所選取水準點示意圖(分別位於東石鄉、布袋鎮、義竹鄉及北門區)

Fig 10 The selected leveling data for 4 different time series. They are located in Dong Shin, Bu Dai, Yi Jhu and Bei Men.

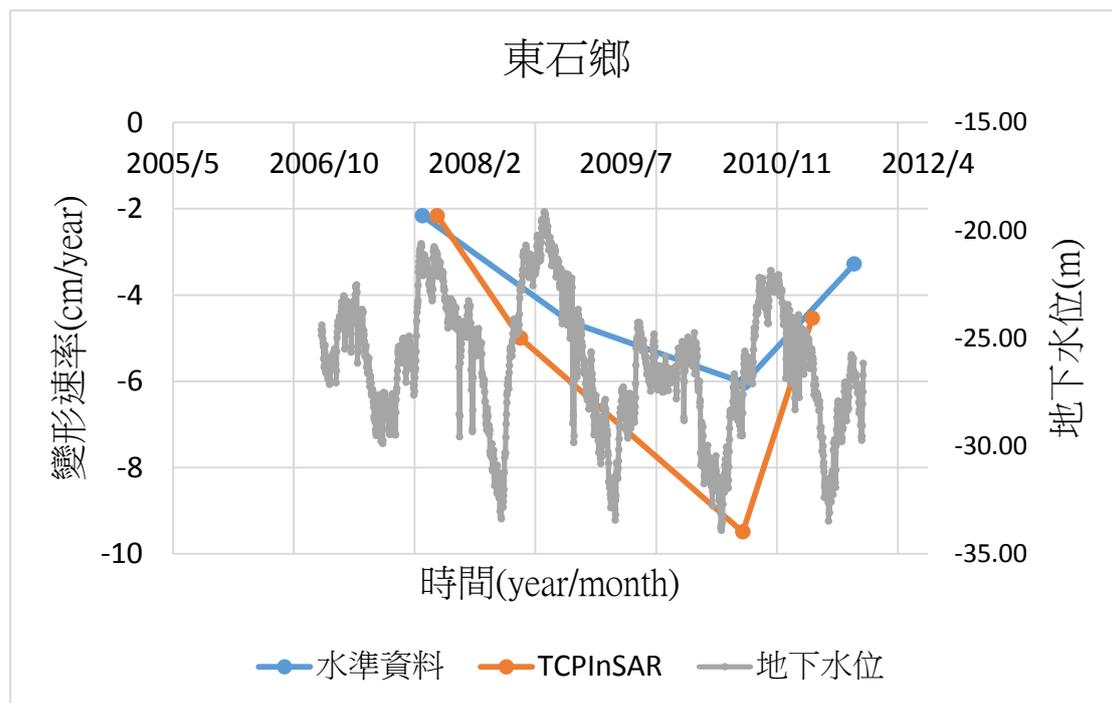


圖 11 水準及 TCPIInSAR 變形速率時間序列與地下水變化比較(東石鄉)

Fig11 Time series of leveling-derived and TCPIInSAR-derived subsidence rates. They are compared with groundwater level changes (Dong Shin).

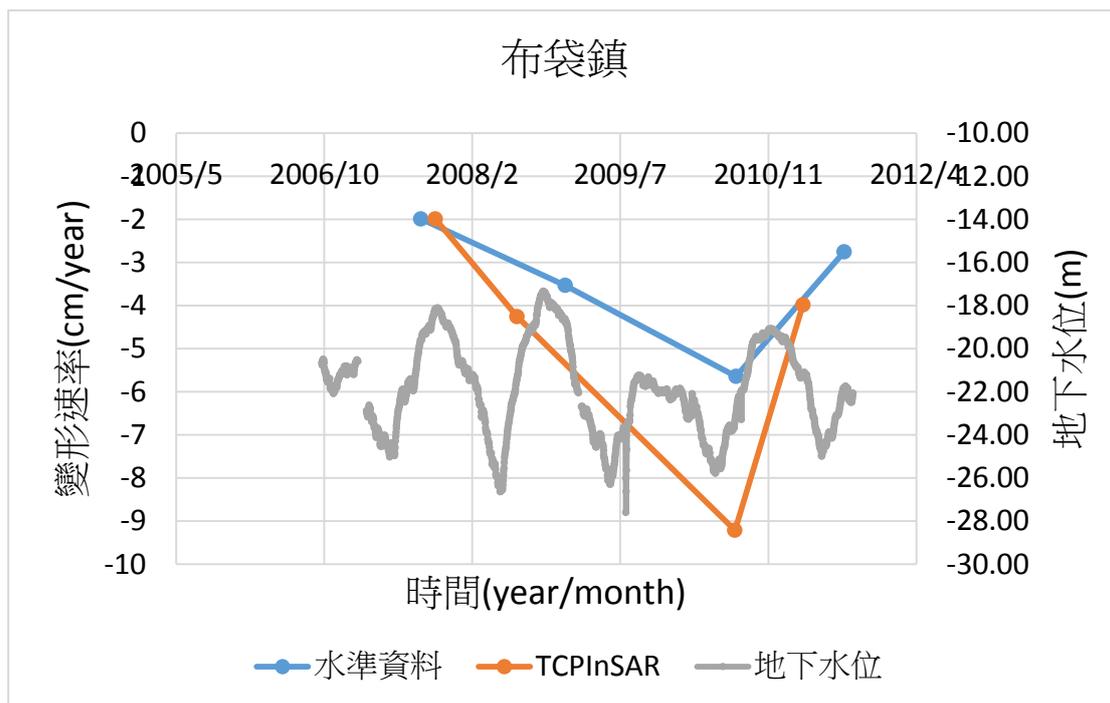


圖 12 水準及 TCPIInSAR 時間序列與地下水變化(布袋鎮)

Fig12 Time series of leveling-derived and TCPIInSAR-derived subsidence rates. They are compared with groundwater level changes (Bu Dai).

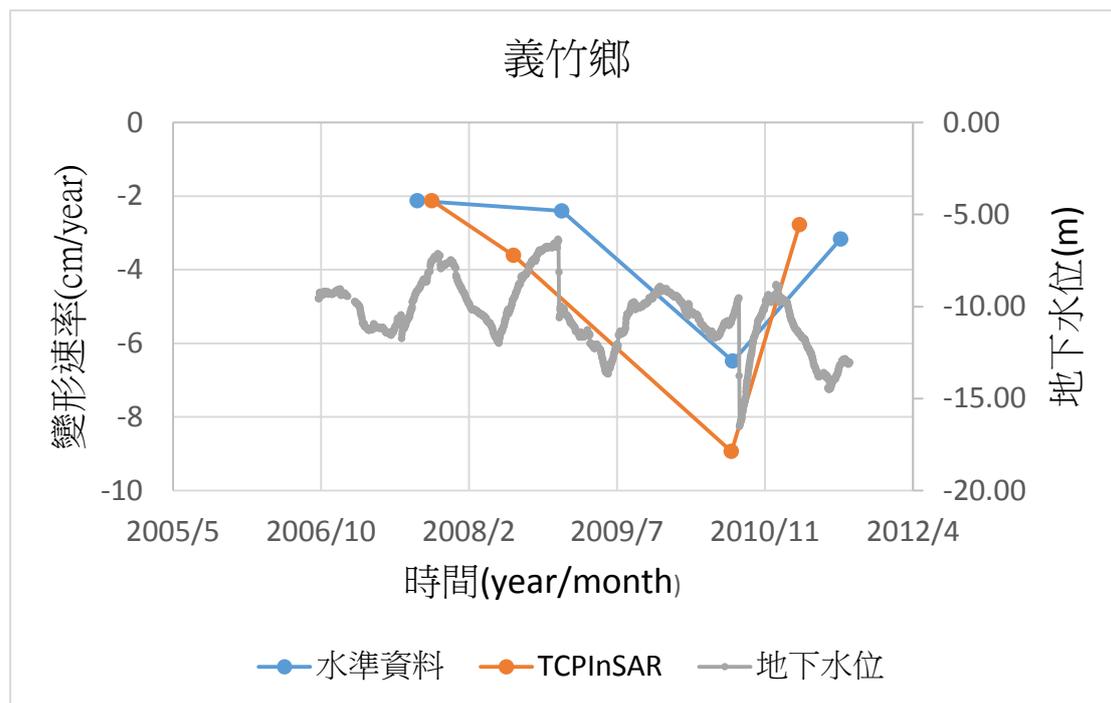


圖 13 水準及 TCPIInSAR 時間序列與地下水變化(義竹鄉)

Fig13 Time series of leveling-derived and TCPIInSAR-derived subsidence rates. They are compared with groundwater level changes (Yi Jhu).

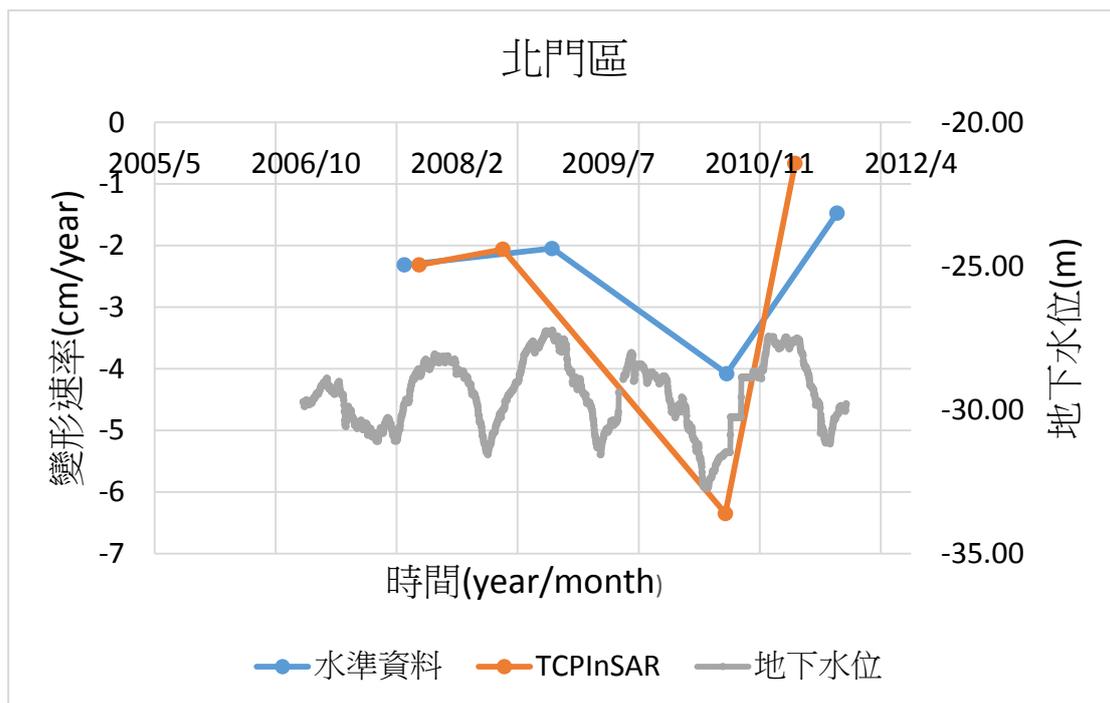


圖 14 水準及 TCPIInSAR 時間序列與地下水變化(北門區)

Fig14 Time series of leveling-derived and TCPIInSAR-derived subsidence rates. They are compared with groundwater level changes (Bei Men).

106 年 02 月 06 日收稿

106 年 02 月 20 日修改

106 年 03 月 14 日接受