

以 GNSS 觀測站驗證 SBAS-InSAR 在雲林地區垂直位移監測成果

蕭宇伸[1]* 張榮傑[1] 沈鈺旻[1] 卓宥瑄[1] 賴柏霖[1]

摘要

本研究利用短基線差分干涉合成孔徑雷達技術(Small Baseline Subset-Interferometric Synthetic Aperture Radar, SBAS-InSAR)監測2017~2019年雲林地區之垂直地表位移,並和23個全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)觀測站之成果互相比較。SBAS-InSAR 採用的衛星影像為2017/03/28至2019/09/26間 Sentinel-1衛星升軌影像共31幅,組成465組干涉影像並以 GMTSAR 軟體進行解算。研究結果顯示,SBAS-InSAR 與23個 GNSS 測站解算成果在年垂直位移量差值平均為2.8mm/yr,標準偏差為10.3 mm/ yr,若僅比較平地地區,兩者差值介於 ± 10 mm/yr,特別是在近年地層下陷較嚴重的地區,SBAS-InSAR 均呈現良好的觀測精度。在靠近山區 SBAS-InSAR 的成果較差,部分地區與 GNSS 測站相比的年位移量差值超過20 mm/yr,這與山區有大面積植被覆蓋有關。

(關鍵詞: SBAS-InSAR、GNSS、垂直地表位移、雲林)

Verification of Vertical Displacement Monitoring Results Derived from SBAS-InSAR in Yunlin Area with GNSS Observation Stations

Yu-Shen Hsiao[1] Jung-Chieh Chang[1] Yu-Min Shen[1]
Yu-Hsuan Cho [1] Bo-Lin Lai [1]*

ABSTRACT

In this study, the Small Baseline Subset-Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) was used to monitor the vertical surface displacement in Yunlin area from 2017 to 2019. The results from SBAS-InSAR were compared with those from 23 Global Navigation Satellite System (GNSS) observation stations. The satellite images of SBAS-InSAR used a total of 31 Sentinel-1 satellite images with ascending orbit from 2017/03/28 to 2019/09/26, forming 465 sets of interference image pairs for GMTSAR software process. The research results show that the average of annual vertical displacement difference between the SBAS-InSAR and the 23 GNSS observation stations is -2.8 mm/yr, and the standard deviation is 10.3 mm/yr. If only the flat areas are compared, the difference between the two is between ± 10 mm/yr, especially in areas with obvious land subsidence in recent years. Therefore, the SBAS-InSAR in this study showed good observation accuracy. However, the results of SBAS-InSAR near the mountainous area are relatively poor, and the annual vertical displacement difference in some areas is more than 20 mm/yr compare to the GNSS observation stations, which is related to the large area of

水土保持學報 53 (1)3067-3088(2023)

Journal of Soil and Water Conservation, 53 (1) 3067-3088(2023)

vegetation coverage.

(Key word : SBAS-InSAR, GNSS, Vertical Displacement, Yulin)

〔 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

一、前言

雲林為台灣中部農業大縣，為了灌溉需求，長期有超抽地下水之情勢，導致地層下陷情形十分嚴重，根據經濟部水利署地層下陷監測資訊整合服務系統 (https://landsubsidence.wra.gov.tw/water_new/) 所觀測到的結果，雲林地區於 2011~2020 年所累積下陷量最嚴重的區域甚至超過 50 cm (行政院經濟部水利署，2020)。在 2021 年，適逢缺乏降雨，農用急需用水時期全台水庫卻嚴重缺水，甚至使部分區域必須限縮用水，然而雲林地區為農用需求而大量抽取地下水，使地層下陷之情形變得更為嚴重，再由經濟部水利署地層下陷資訊整合服務系統得知，雲林縣 2021 年顯著地層下陷面積比起 2020 年增加近 400 平方公里。故雲林地區地層下陷的監測，特別是如何有效率且準確的掌握此區域地表變動情形，一直是政府非常重視的課題。

傳統上，針對地表垂直位移的觀測方法有地層下陷監測井、水準測量以及全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)等三種方法，雖然這些方法成果大致準確，但皆有其限制，例如地層下陷監測井雖然觀測精度高且可以長時間監測，然而設置成本相當昂貴，故點位不多；水準測量觀測精度亦高，但十分耗費人力以及時間成本，更無法長時間監測；GNSS 雖然可長時間觀測且精度亦高，但設站成本也不低。此外，三種方法皆為點狀測量，若要觀測大面積地表垂直位移成果則需要增加點位密度，執行難易度也隨之增加。近年來隨著遙測技術的進步，干涉合成孔徑雷達 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技術已大量運用在地

表變化監測上，InSAR 具有快速量測大範圍區域地形地貌變化、花費較少人力及較低成本等優點，因此相當適合做為監測大面積地表位移的技術。InSAR 原理為使用兩幅或多幅不同時間的合成孔徑雷達 (Synthetic Aperture Radar, SAR)影像，根據衛星或飛機接收到的回波進行差分干涉進而得到兩幅影像之相位變化，並經由相位回復後取得沿雷達視距方向(Line of Sight, LOS)地表位移量。

在 InSAR 早期研究中，主要用來產製數值地形模型(Digital Elevation Model, DEM)，例如 Graham (1974)首次應用空載 SAR 系統進行地球觀測，並透過 InSAR 技術得到 DEM；Zebker and Goldstein(1986)利用 SAR 影像成功製作出精度 10 m 的 DEM；Gabriel et al. (1989)使用 Seasat 衛星影像和合成孔徑雷達差分干涉 (Differential Synthetic Radar Interferometry, DInSAR)技術得到地表變形量，也證實了 DInSAR 技術能有公分級之精度，這是 InSAR 技術用於量測地表位移的開端。在 DInSAR 之後，InSAR 因技術不同而發展出了許多地表位移量測方式，主要分為(1)永久散射體差分干涉技術(Persistent Scatterers InSAR, PSInSAR)(Ferretti et al., 2000 和 Ferretti et al., 2001)；(2)短基線差分干涉技術 (Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)(Berardino et al., 2002)；(3)史丹佛永久散射體/多時域差分干涉技術 (Stanford Method for Persistent Scatterers/Multi-Temporal Interferometry, StaMPS/MTI)(Hooper et al., 2004)；(4)時域相關點雷達干涉 (Temporarily Coherence Point InSAR, TCPInSAR)(Zhang et al., 2011)等方法。

InSAR 應用於地表位移監測，在國外已

有數十年歷史，例如火山活動監測(Massonnet and Feigl, 1995), Lu et al. (1998), Berardino et al. (2002)和 Casu et al. (2009)等)、冰川活動監測(Joughin et al. (1995) 和 Rignot et al. (1995))、地震後的地形變化監測(Zebker et al. (1994)和 Massonnet et al. (1995))及地層下陷(Massonnet et al. (1997), Galloway et al.(1998), Amelung et al.(1999), Hoffmann et al.(2001)和 Yalvac (2020))等。在國內方面，近 15 年來才開始蓬勃發展，例如謝嘉聲(2006)以 DInSAR 技術搭配 ERS 衛星雷達影像監測屏東地區的地表變形量，並以 GNSS 及水準測量資料做檢核，證明 DInSAR 計算的下陷量平均值與 GNSS 及水準測量計算的下陷量平均值差值平均小於 1 cm，且變化的趨勢一致；盧玉芳(2007)探討雲林縣高鐵沿線土庫及元長兩村鎮之地層下陷情形，以 PSInSAR 技術結合 ALOS 衛星雷達影像進行觀測，成果顯示下陷量達每年 7cm；Hung et al. (2011)以 PSInSAR 技術結合 ALOS 影像對濁水溪沖積扇地表變化量進行監測，成果顯示最大下陷量達到每年 7cm，而水準測量檢核之誤差均方根值僅 0.6 cm/yr；黃大任(2013)使用 TCPIInSAR 技術結合 ALOS 影像，針對彰化、雲林、嘉義等地進行地層下陷監測，若以水準測量檢核成果，兩者差值之均方根值約為 0.8 cm/yr；林書涵(2014)使用 PSInSAR、StaMPS/MTI 與 TCPIInSAR 技術結合 ALOS 影像，對彰化縣溪州鄉之沉陷狀況進行測試，結果顯示 StaMPS/MTI 與水準測量檢核之均方根值約 0.68 cm/yr；季強昇(2015)使用 TCPIInSAR 技術和 ALOS 影像監測嘉義與台南沿海地區 2007 年至 2011 年間的地層下陷速度，相關成果與水準測量成果比對之均方根誤差約 0.8 cm/yr，顯示 TCPIInSAR 具有高準確性，能有

效應用於地層下陷監測；楊苡絜(2018)使用 2016/04 至 2017/04 共 35 幅 Sentinel-1A 衛星影像(22 幅升軌影像及 13 幅降軌影像)，結合 SBAS-InSAR 技術針對雲林縣濁水溪沿海地區進行觀測，並與 GPS 成果比較，均方根誤差在升軌與降軌成果中分別為 7.6 mm/yr 及 33.6 mm/yr，在考慮軌道誤差後可降低至 6.2 mm/yr 及 8.0 mm/yr；洪偉嘉等(2018)使用精密水準測量、多層壓實監測井和 TCP-InSAR 結合 Sentinel-1A 衛星影像來研究嘉義與地下水抽取和變化相關的地面沉降的原因和影響，三項技術所得之下陷率結果一致；謝渝棋(2020)選用 12 幅 Sentinel-1 衛星影像，以 SBAS-InSAR 結合 Sentinel-1A 影像推估石門水庫集水區範圍於 2015 年之土壤年沖蝕速率與沖蝕量體，推估土壤年沖蝕速率成果並以沖蝕針監測成果進行驗證，SBAS-InSAR 推估出的土壤沖蝕量也與通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)計算結果相互比較，成果顯示 SBAS-InSAR 計算成果與沖蝕針量測成果在自然邊坡相關係數達 0.7、整治邊坡則達 0.6，另外 USLE 所計算之土壤沖蝕體積與 SBAS-InSAR 所得成果趨勢一致；李恩誠(2020)利用 2016/07 至 2020/03 之 Sentinel-1A 衛星影像及 SBAS-InSAR 技術監測屏東沿海地區的地層下陷，InSAR 觀測量趨勢與 GNSS 觀測量大部分相符。

綜合上述研究可發現，國內近年來地層下陷相關研究，InSAR 衛星影像來源已由 ALOS 衛星影像逐漸轉變為 Sentinel-1 衛星影像，且 SBAS 方法被廣泛使用，這是由於 SBAS-InSAR 技術與 Sentinel-1 衛星影像均有免費軟體與影像資源，可大幅降低相關計算成本。另外從上述各研究成果來看，以水準測

量或 GNSS 觀測量來檢核 InSAR 成果，顯示誤差不大，代表 InSAR 應用於台灣地層下陷的監測具高度可行性。然而上述之文獻中，用於檢核 InSAR 成果的 GNSS 觀測站通常不多，而且都僅有平地的觀測站，在山坡地上 GNSS 與 InSAR 成果的比較過去研究極少。本研究以 GMTSAR 軟體(Sandwell et al., 2016)之 SBAS-InSAR 方法，配合下載免費 Sentinel-1A 衛星影像共 31 幅，針對雲林地區 2017~2019 共三年進行地層下陷分析，最後與雲林地區內 23 個 GNSS 測站(位置從平地到山區都有)解算成果進行比對，除了分析雲林各地區之地層下陷位移情形，還針對 InSAR 適合的監測環境進行探討。

二、SBAS-InSAR 原理

InSAR 原理為對兩幅或多幅不同時間與不同位置之雷達影像進行干涉處理，藉由計算相位差推估地表之三維變化，其成像幾何如圖 1 所示，圖中 S_1 、 S_2 為拍攝雷達影像時天線的位置、 B 為兩天線之基線長、 H 為衛星高度、 θ 為視角、 α 為基線與水平線之夾角、 R 為 S_1 至待測點之長度， $R+\delta$ 為 S_2 至待測點之長度。由於不同位置之影像會在干涉時造成影響，若影像相干性低，干涉成果之精度亦會降低，也有可能產生無法干涉之狀況，故 SBAS-InSAR 原理為僅採用多組不同時間序列所組成的短基線影像對進行干涉(各影像位置幾乎相同)，以計算出地表變化，此方法能降低空間及地形所產生之誤差，以獲得較佳的成果。

SBAS-InSAR 計算原理為，假設有 $N+1$ 幅影像，各影像之拍攝時間分別為 $t_0, t_1 \cdots t_N$ ，

共組成 M 個影像對，則某一組影像對之相位干涉值變化量 $\Delta\phi$ 為(Berardino et al., 2002)

$$\Delta\phi(x, r) \approx \phi(t_a, x, r) - \phi(t_b, x, r) \approx \Delta d(x, r) + \Delta\phi_t(x, r) + \Delta\phi_a(x, r) + \Delta\phi_n(x, r) \quad (1)$$

其中 $\phi(t_a, x, r)$ 和 $\phi(t_b, x, r)$ 分別為 t_a 與 t_b 時間的干涉相位值； x 為影像方位角； r 為斜距像點坐標； $\Delta\phi_t$ 、 $\Delta\phi_a$ 和 $\Delta\phi_n$ 分別為地形、大氣與雜訊等誤差； Δd 為衛星視角方向之位移量(即為本研究所需計算的量)。再結合總共 M 組像對之干涉值變化，以平差方式推估出影像中大量點位的位移量。

由於 InSAR 所解算出的原始資料為 LOS 地表位移量，因此必須利用公式將 LOS 方向位移量換算為垂直方向位移量，公式如下(Hung et al., 2018)

$$V_{LOS} = \sin \theta \cos \phi E + \sin \theta \sin \phi N + \cos \theta U \quad (2)$$

其中 V_{LOS} 為 LOS 方向地表位移速度量； E 、 N 、 U 分別為東西方向、南北方向與垂直方向的地表位移速度量； θ 、 ϕ 分別為衛星飛行的人射角與方位角。由於雲林地區的水平位移量很低，若假設 E 和 N 在 2017~2019 這三年之位移為 0，則 InSAR 垂直方向速度場 U 可寫為

$$U = \frac{V_{LOS}}{\cos \theta} \quad (3)$$

上式即為本研究所需計算的垂直地表位移量，若為正值則發生地表抬升，若為負值則代表地層下陷。

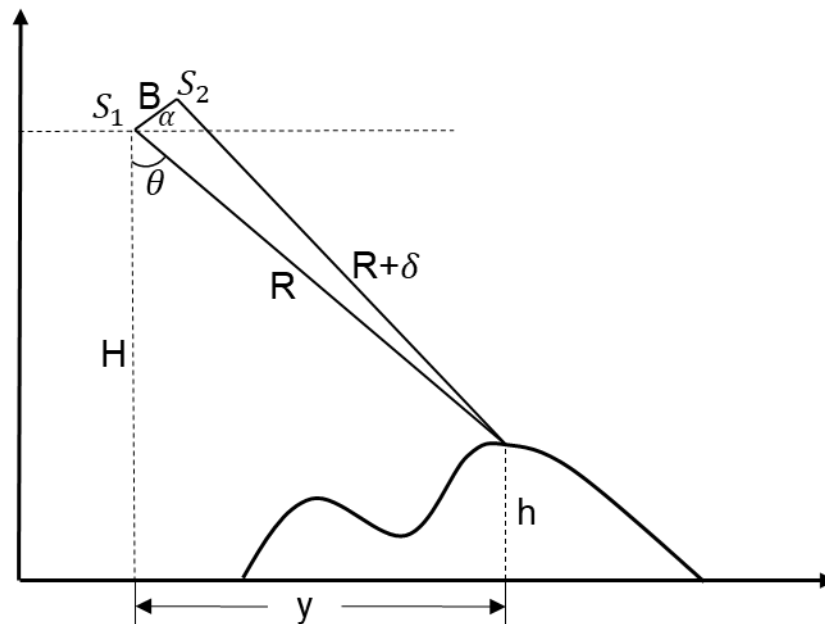


圖 1 InSAR 成像幾何示意圖(謝渝棋等，2022)。其中橫軸與縱軸分別代表水平與高程方向。

Figure 1 The schematic diagram of the InSAR geometry (Hsieh et al., 2022). The X and Y axis represent the horizontal and vertical directions

三、研究區域與研究資料

3.1 研究區域

本研究區域為雲林地區，雲林縣位於台灣中南部，東臨南投縣，西臨臺灣海峽，南邊為嘉義縣，北邊與彰化縣接壤，全縣面積約為 1030 km²，除斗六市、古坑鄉及林內鄉靠近山地，地勢較高外，其餘鄉鎮皆屬平原地區，圖 2 與圖 3 分別為台灣與雲林地區地形、本研究 InSAR 覆蓋區域與 GNSS 測站位置。雲林縣以農漁業為主要產業，農業用水需求大，主要灌溉水源取自濁水溪、清水溪、北港溪以及開鑿地下水井，而漁業主要為養殖魚塢，魚塢須仰賴大量淡水穩定養殖水質，故在地面水源缺乏情況下，也會過量抽用地下水。由上述可知，

由於雲林農漁業的高度發展，因此有長年超抽地下水造成地層下陷的問題。

3.2 Sentinel-1 衛星影像

Sentinel-1 衛星是歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 所發射的地球觀測衛星，於 2014/04/03 發射，主要用於土地與海洋的監測。Sentinel-1 為太陽同步衛星，由 Sentinel-1A、Sentinel-1B 所組成並且共享相同軌道平面，2 顆衛星軌道相位相差 180 度，飛行航高約為 693 公里衛星週期為 12 天，同一地區之重複週期為 6 天。Sentinel-1 提供雷達波段為 C-band 波段，波長 5.4 cm，Sentinel-1 衛星影像可於歐洲太空總署網站免費下載。在 Sentinel-1 衛星發射之前，國內外學者大多

採用 ALOS 衛星所提供的 L-band 影像，進行相關地表位移分析，相較於 ALOS 衛星所提供的 L-band 影像，Sentinel-1 衛星所提供 C-band 雷達影像對於植被的穿透力較差，因此在山坡地或是植被覆蓋較茂密的區域所得到的 InSAR 成果可能誤差較大，然而本研究主要課題為監測垂直地表位移，特別是地層下陷問題，而此災害通常發生在平地(住宅或農業區，無大量植被覆蓋)，故應不受影響。

本研究選用 Sentinel-1A 升軌衛星影像共 31 幅，時間介於 2017/03/28 至 2019/09/26 之間，平均一個月選取一幅影像(如表 1 所示)，共組成 465 組干涉影像對，每一幅影像位置均相同(如圖 2 所示)。Sentinel-1A 升軌衛星飛行入射角為約 34.11° ，方位角為約 -12.37° ，此量會代入公式(2)與(3)中進行相關計算。

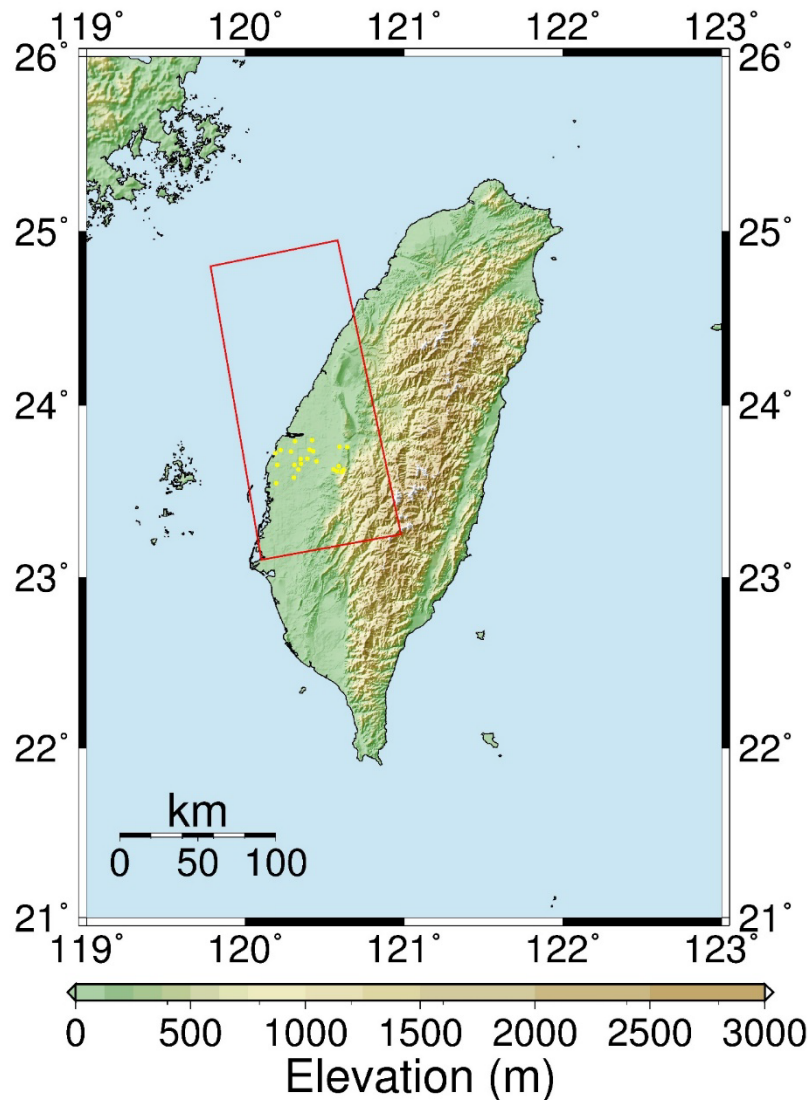


圖 2 台灣地形圖，其中黃點為 GNSS 觀測站，紅框為本研究 SBAS-InSAR 覆蓋範圍。

Figure 2 The terrain of Taiwan. The yellow dots represent the GNSS observation stations. The red frame represents the SBAS-InSAR coverage area in this study.

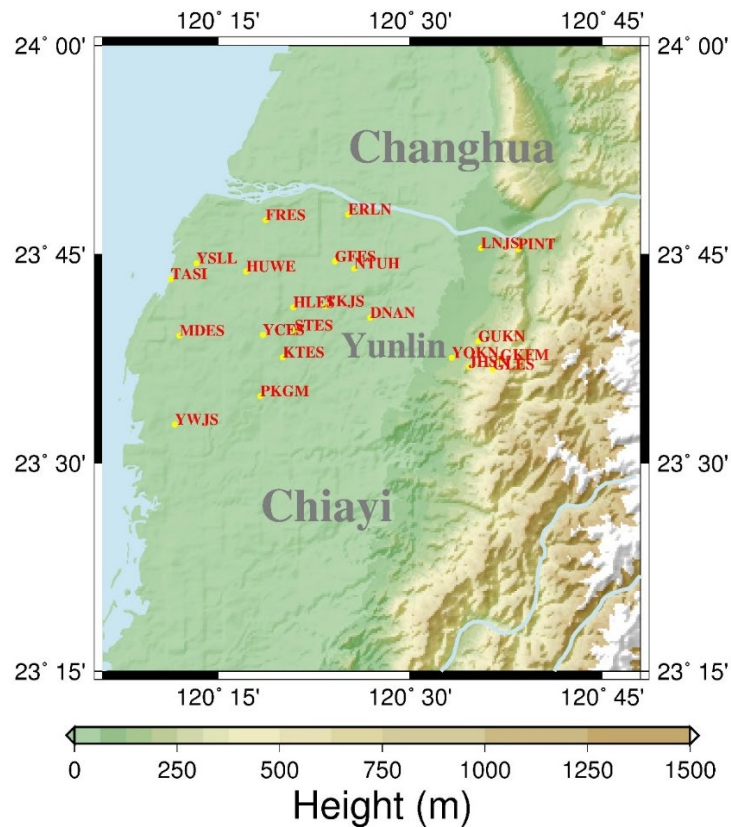


圖 3 雲林地區地形圖，其中黃點為 GNSS 觀測站。

Figure 3 The terrain of Yulin area. The yellow dots represent the GNSS observation stations.

表 1 本研究選取的 Sentinel-1 影像日期。

Table 1 The Sentinel-1 images selected in this study.

年分	日期
2017	03/28、04/21、05/15、06/08、07/26、08/19、09/24、10/18、11/11、12/29
2018	01/22、02/27、03/23、04/16、05/22、06/15、07/21、08/26、09/19、10/13、11/18、12/24

2019	01/29、02/22、03/18、04/23、05/17、06/22、 07/16、08/21、09/26
------	---

3.3 GNSS 測站資料

本研究所使用的 GNSS 測站資料為雲林地區 23 個 GNSS 測站 2017~2019 共 3 年的垂直方向解算資料(一天一筆)，資料由國立台北大學葉大綱教授解算提供。各測站所屬單位包括交通部氣象局、內政部地政司、中央研究院地球科學所、經濟部中央地質調查所、經濟部水利署等。23 個 GNSS 測站資訊如表 2 所

示，各測站位置如圖 2 與圖 3 所示。由表 2、圖 2 和圖 3 可看出，大部分的 GNSS 觀測站位於平地，僅 GLES、GKFM、GUKN、JHSN、YOKN(位於古坑)和 PINT(位於林內)等 6 站位於山坡地(海拔超過 100 公尺)。這 23 個 GNSS 測站均為靜態固定觀測站，故設站位置為 GNSS 訊號接收穩定之處，其坐標解算成果精度頗高，可用來檢核本研究 SBAS-InSAR 成果

表 2 GNSS 測站資訊。

Table 2 The summary of the GNSS observation stations.

測站名稱	測站位置	經度	緯度	高程(m)
DNAN	斗南	120.447992	23.673808	48.68
ERLN	二崙	120.419556	23.797594	44.75
FRES	崙背	120.312227	23.791131	32.37
GLES	古坑	120.607764	23.612148	420.83
GKFM	古坑	120.617505	23.623662	398.93
GFES	虎尾	120.402486	23.741415	44.92
HLES	土庫	120.347771	23.686583	37.00
GUKN	古坑	120.588781	23.645865	192.34
JHSN	劍湖山	120.576722	23.615258	275.92
HUWE	東勢	120.286628	23.729404	28.63
KTES	元長	120.334290	23.626620	36.10
LNJS	林內	120.592157	23.757451	92.46
MDES	四湖	120.199898	23.652599	28.25
NTUH	虎尾台大	120.427644	23.733023	48.19
PINT	林內	120.640567	23.756069	328.14
STES	土庫	120.349786	23.658703	38.71
TASI	台西	120.188820	23.720271	38.48
TKJS	土庫	120.389825	23.687998	40.93
YCES	元長	120.308892	23.653310	31.69

YSLL	台西	120.222336	23.739171	25.38
YOKN	古坑	120.554192	23.626103	144.61
PKG M	北港	120.305498	23.579894	42.81
YWJS	口湖	120.193994	23.546233	25.12

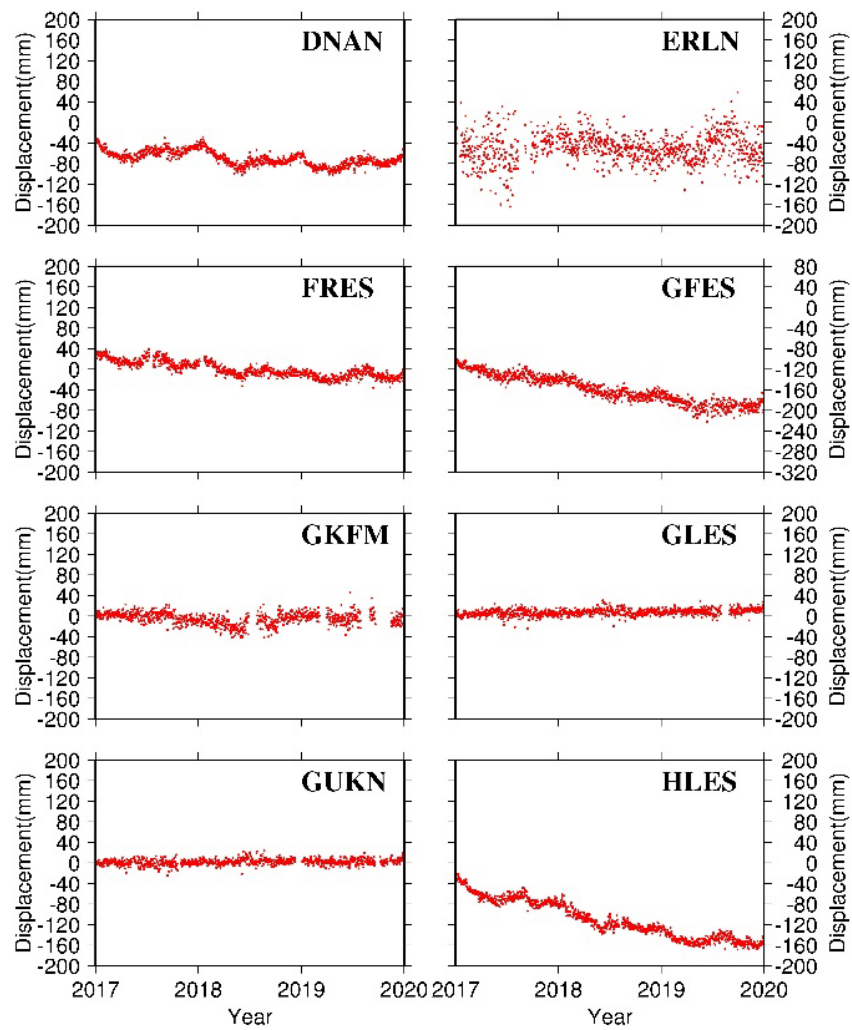
四、研究成果

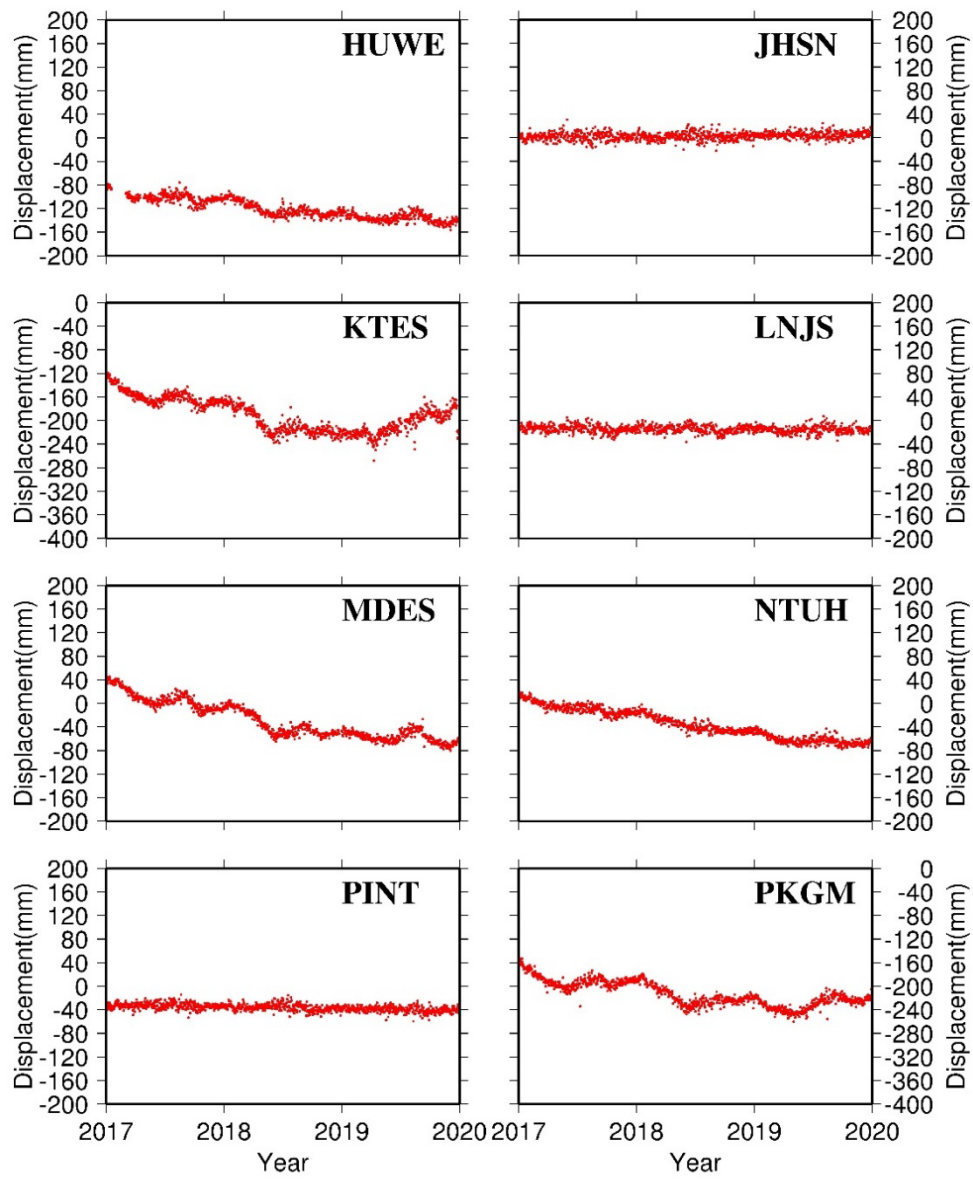
4.1 GNSS 測站解算成果

2017~2019 年間各 GNSS 測站垂直方向位移量結果如圖 4 所示，若將每個測站的位移趨勢以最小二乘線性回歸法計算年平均位移量，成果整理於表 3。整體而言，2017~2019 年間雲林地區的垂直方向地表位移介於-36.1 mm/yr~18.9 mm/yr 之間，主要具有地表抬升現象位於古

坑與林內等山坡地，包括 GLES、GUKN、JHSN、LNJS、YOKN 等站，抬升量約 10~19 mm/yr。而 HLES、MDES、STES、TKJS、YCES 等站具有較大的地層下陷量，年平均下陷量可達-10~-36 mm/yr，這些測站位於四湖、土庫與元長等地，屬於雲林地區靠海(養殖漁業)或中部(農業)一帶，即抽取地下水較嚴重之區域。這樣的位移結果跟水利署近年評估雲林地層下陷的區位相符(行政院經濟部水利署，2020)。

沈鈺旻、蕭宇伸、卓宥瑄、賴柏霖：
以 GNSS 觀測站驗證 SBAS-InSAR 在雲林地區垂直位移監測成果





沈鈺旻、蕭宇伸、卓宥瑄、賴柏霖：
以 GNSS 觀測站驗證 SBAS-InSAR 在雲林地區垂直位移監測成果

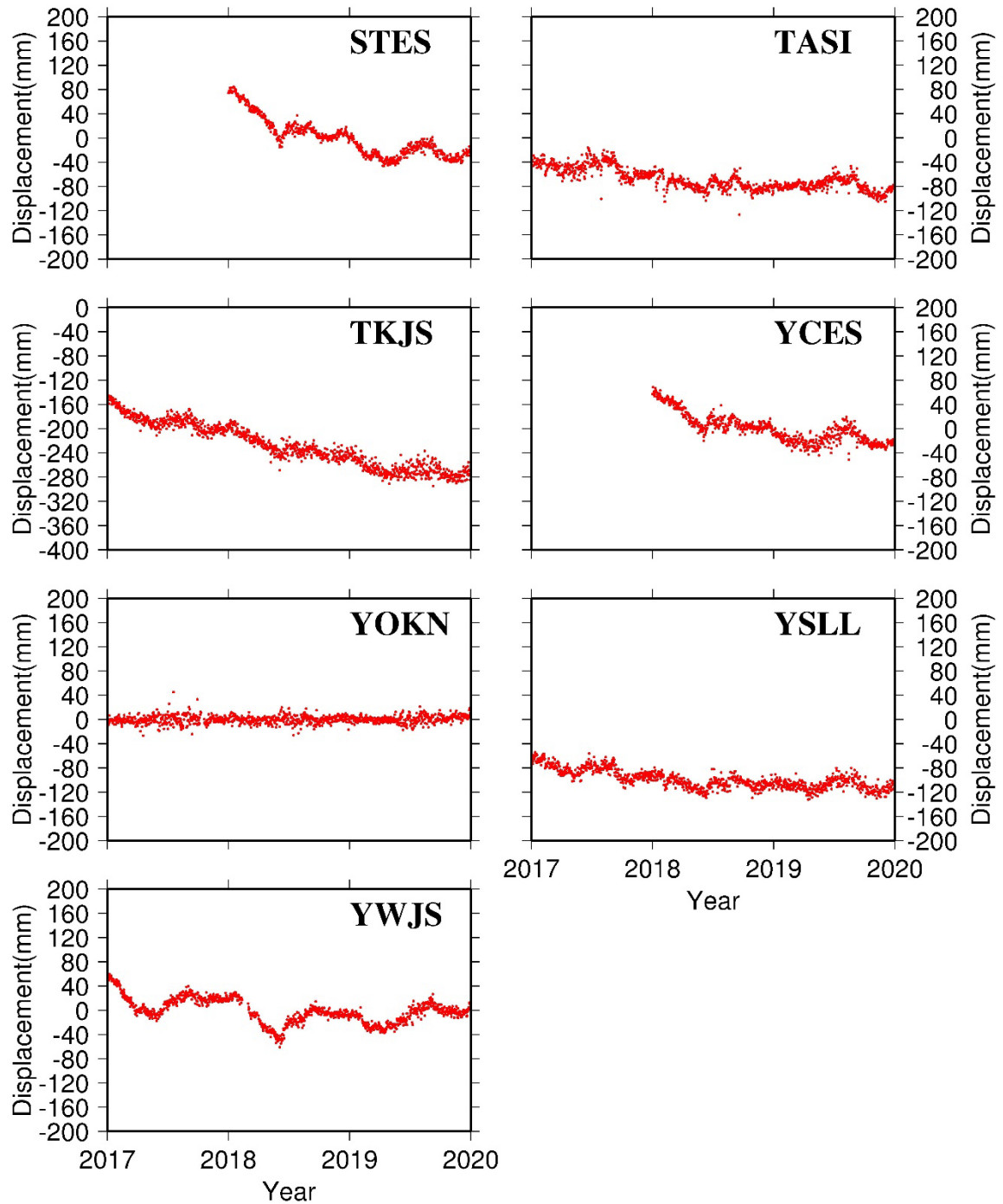


圖 4 各 GNSS 測站 2017~2019 年垂直方向位移圖。

Figure 4 The vertical displacements of the GNSS observation stations during 2017~2019.

4.2 SBAS-InSAR 分析成果

SBAS-InSAR 分析成果如圖 5 所示。由 SBAS-InSAR 成果顯示，大部分地區呈現不動，在土庫、虎尾、元長與少部分沿海地區有比較明顯的地層下陷趨勢，下陷速度大約-30 mm/ yr ~50 mm/ yr 之間，而在山區有較明顯之抬升趨勢，抬升速度大約 20 mm/ yr ~40 mm/ yr 之間。為進一步了解 SBAS-InSAR 之正確性，本研究將 SBAS-InSAR 計算成果組成規則網格，並將 23 個 GNSS 測站位置內插於此網格，以獲得這些 GNSS 測站位置的 SBAS-InSAR 年平均位移量。GNSS 與 SBAS-InSAR 在 23 個 GNSS 測站位置的地表垂直位移速度比較如表 3 所示，由表 3 可發現，在 InSAR 成果中，有 9 個 GNSS 測站位置呈現地層下陷情勢，分別為 GFES、HLES、HUWE、KTES、MDES、NTUH、STES、TKJS 與 YCES，下陷情形最明顯的測站為 HLES，位移量達-

20.4 mm/ yr，而地表抬升最為明顯的測站為 GKFM，位移量達到 33.8 mm/ yr。若將 GNSS 與 SBAS-InSAR 的位移成果相減，兩者差值整理於表 3 與圖 6。由表 3 與圖 6 發現有 17 個 GNSS 測站的差值介於 ± 10 mm/yr 之間，其中 DNAN、GFES、HLES、LNJS、MDES、PINT、YSLI、PKGM、YMJS 測站點位的解算成果差值在 ± 4 mm/yr 之間，僅有少部分的測站差值超過 20 mm/yr，且大多位於古坑山區測站。23 個測站的差值平均約為 2.8mm/yr，標準偏差約為 10.3mm/yr。整體而言，本研究 SBAS-InSAR 在地層下陷的觀測精度與前人文獻一致(謝嘉聲(2006)、盧玉芳(2007)、Hung et al. (2011)、黃大任(2013)、林書涵(2014)、季強昇(2015)與楊苡絮(2018)等)，即 SBAS-InSAR 在觀測地表垂直位移方面具有良好的精度，特別是在近年地層下陷較嚴重的崙背、虎尾、東勢、土庫、元長、四湖等地區。

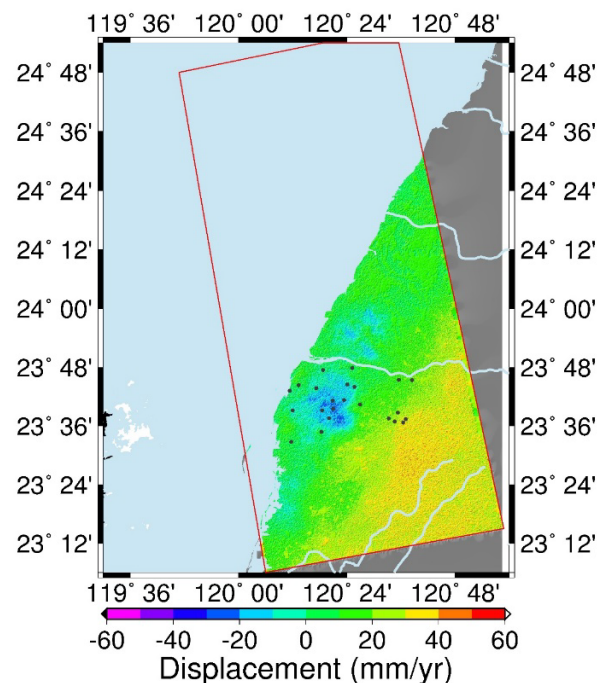


圖 5 SBAS-InSAR 之垂直方向位移成果，其中黑點為 GNSS 觀測站。

沈鈺旻、蕭宇伸、卓宥瑄、賴柏霖：
以 GNSS 觀測站驗證 SBAS-InSAR 在雲林地區垂直位移監測成果

Figure 5 The annual vertical displacements derived from SBAS-InSAR. The black dots represent the GNSS observation stations.

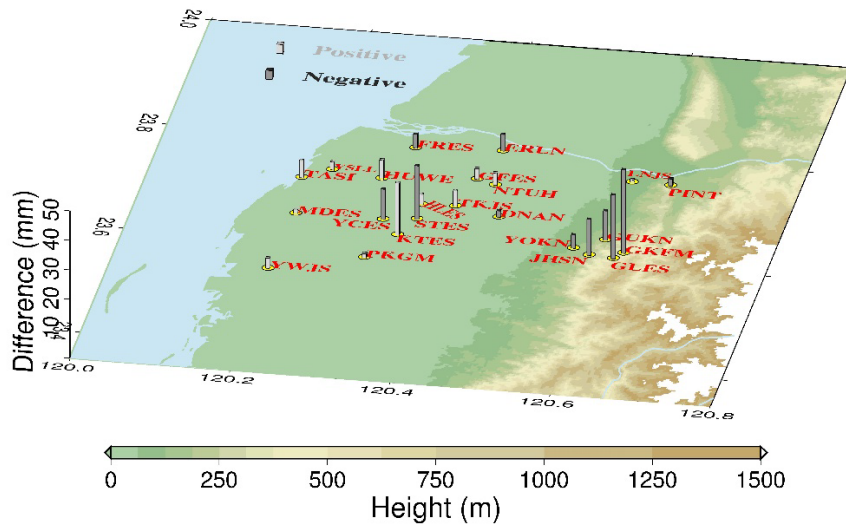


圖 6 GNSS 和 SBAS-InSAR 的位移成果在 23 個 GNSS 測站位置的差值。差值平均約 2.8mm/yr，標準偏差約 10.3mm/yr。

Figure 6 The differences between the annual vertical displacements from GNSS and SBAS-InSAR at 23 GNSS observation stations. The mean and std ev of the differences are 2.8mm/yr and 10.3mm/yr, respectively.

由於 InSAR 量測地表位移精度，通常與所在地形與地貌有關，本研究特別針對此部分進行分析，以 LNJS 測站為例，其 GNSS 與 SBAS-InSAR 的位移差值僅 0.8mm/yr，是所有 23 站之中最少的，LNJS 測站設置於雲林縣立林內國中，附近多為農田及建築物(圖 7)，無高大植生覆蓋情形，因此地表目標物反射雷達波較少受到干擾，可以得到較為理想的干涉成果。在 GKFM 和 GLES 兩個測站方面，其 GNSS 與 SBAS-InSAR 的位移差值達 -28.4mm/yr 與 -21.7mm/yr，這兩個測站高程約

海拔 400m，且位於坡面，附近植被覆蓋較茂盛(圖 8)，因此地表目標物反射雷達波受到干擾較多，此地區以 InSAR 技術量測地表位移的成果較差。在 GUKN、JHSN 和 YOKN 等測站方面，其 GNSS 與 SBAS-InSAR 的位移差值分別為 -10.0 mm/yr、-12.2 mm/yr 與 -4.5 mm/yr，成果大致良好，然而這 3 個測站高程也超過 100m，位於坡地，但植被覆蓋情形與 GKFM、GLES 等測站相比較低(圖 9)，因此以 InSAR 技術量測地表位移也具有較好的成果。

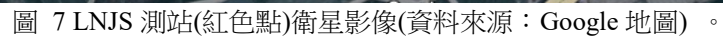


Figure 1 consists of two panels, (a) and (b), showing aerial views of the study area. Panel (a) shows a wide river flowing through a forested area, with a red pin marking the study site. Panel (b) shows a more detailed view of the study site, with various landmarks and buildings labeled in Chinese. The study site is marked with a red pin, and the surrounding area is shown with various landmarks and buildings labeled in Chinese.

Figure 8 The imagery of the GKFM (a) and the GLEs (b) stations (Red dots) (Source : Google map).

以 GNSS 觀測站驗證 SBAS-InSAR 在雲林地區垂直位移監測成果



圖 9 (a) GUKN 測站、(b) JHSN 測站與 (c) YOKN 測站衛星影像 (資料來源：Google 地圖)。

Figure 9 The imagery of the GUKN (a), the JHSN (b) and the YOKN (c) stations (Red dots)
(Source : Google map).

表 3 GNSS 與 SBAS-InSAR 在 GNSS 測站位置之地表垂直位移比較。

Table 3 The comparison of the vertical displacements from GNSS and SBAS-InSAR at the GNSS observation stations.

測站名稱	測站位置	GNSS 成果 (mm/ yr)	SBAS-InSAR 成果 (mm/ yr)	差值 (mm/ yr)
DNAN	斗南	7.0	9.2	-2.2
ERLN	二崙	0.3	5.9	-5.6
FRES	崙背	-4.7	0.0	-4.7
GLES	古坑	9.5	31.2	-21.7
GKFM	古坑	5.4	33.8	-28.4
GFES	虎尾	-5.4	-9.0	3.6
HLES	土庫	-16.9	-20.4	3.5
GUKN	古坑	12.7	22.7	-10.0
JHSN	劍湖山	16.6	28.8	-12.2
HUWE	東勢	-1.2	-7.5	6.3
KTES	元長	1.8	-15.8	17.6
LNJS	林內	17.6	16.8	0.8
MDES	四湖	-8.1	-9.3	1.2
NTUH	虎尾台大	-6.4	-10.5	4.1
PINT	林內	11.9	14.3	-2.4
STES	土庫	-36.1	-18.0	-18.1
TASI	台西	8.0	2.2	5.8
TKJS	土庫	-9.0	-14.2	5.2
YCES	元長	-21.2	-10.9	-10.3
YSLI	台西	9.2	6.5	2.7
YOKN	古坑	18.9	23.4	-4.5
PKGM	北港	9.1	7.7	1.4
YWJS	口湖	11.9	8.4	3.5

五、結論與建議

本研究選取 2017/03/28 至 2019/09/26 間 Sentinel-1 衛星升軌影像共選取 31 幅(平均每個月選取 1 幅)，組成 465 組干涉影像對，利用 SBAS-InSAR 技術針對雲林地區進行地表垂直位移分析，所得到的結果與 23 個 GNSS 測站解算成果互相比較，研究成果顯示 InSAR 與 GNSS 測站解算成果差值平均為 2.8mm/yr，標準偏差為 10.3mm/yr，這

樣的成果與前人研究大致相符。整體而言，InSAR 在平原地區以及靠海區域都取得良好的成果，與 GNSS 測站相比，大部分差值介於 ± 10 mm/yr 之間；在靠近山區的測站成果較差，部分測站的差值超過 20 mm/yr，這與山區有大面積植被覆蓋有關。

由於地形地貌對於 InSAR 的影響甚大，因而過去 InSAR 技術在山坡地區較難得到良好成果，以本次的研究成果來說，部分山區測站的成果確實較差，主因為 Sentinel-1 衛星所

提供的 C 波段雷達波對於大片林地的植被穿透能力較差。然而以雲林地區而言，主要災害為地層下陷，而地層下陷主要分布在超抽地下水的平原地區，土地利用以農地、魚塭或建築區位為主，較少大片林地，故以 InSAR 技術搭配 Sentinel-1 衛星影像監測雲林地區地層下陷區域平均誤差在 10mm/yr 以內，具有高度可行性。除此之外，山坡地若植生覆蓋少(如 GUKN、JHSN 和 YOKN 等位置)，以 SBAS-InSAR 監測地表位移，誤差最大約-12 mm/yr，仍具有可行性。

參考文獻

- [1] 行政院經濟部水利署(2020)，「109 年度臺灣地區地層下陷概況說明摘要報告」，行政院經濟部水利署，台北。
- [2] 李恩誠(2020)，「應用 Sentinel-1A 影像與 SBAS 方法監測屏東沿海地區地層下陷」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，新竹。
- [3] 季強昇(2015)，「應用時域相關點雷達干涉技術觀測地表變形：以嘉義台南為例」，國立中興大學水土保持學系碩士論文，台中。
- [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，新竹。
- [5] 楊苡絜，2018，「以 Sentinel-1A SAR 及 SBAS 方法監測雲林地區地層下陷」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，新竹。
- [6] 盧玉芳，2007，「以雷達干涉技術監測雲林地區地層下陷」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，新竹。
- [7] 謝淪棋，2020，「以 SBAS-InSAR 技術監測土壤沖蝕變化」，國立中興大學水土保持學系碩士論文，台中。
- [8] 謝淪棋、蕭宇伸、卓宥瑄，2022，「以 SBAS-InSAR 技術量測水庫集水區邊坡沖蝕變化」，中華水土保持學報，第 53 卷第 1 期，35-42。
- [9] 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，新竹。
- [10] Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A. and Lacznaiak, R. J. (1999), "Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation", *Geology*, 27(6): 483-486.
- [11] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E. (2002), "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375 – 2383.
- [12] Casu, F., Lanari, R., Sansosti, E., Solaro, G., Tizzani, P., Poland, M. and Miklius, A. (2009), "SBAS-InSAR analysis of surface

- deformation at Mauna Loa and Kilauea volcanoes in Hawaii”, 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: IV-41-IV-44.
- [13] 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.
- [14] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001), “Permanent scatterers in SAR interferometry”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1): 8-20.
- [15] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A. (1989), “Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry”, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7): 9183-9191.
- [16] Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., and Rosen, P. A. (1998), “Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California”, Water Resources Research, 4(10): 2573-2585.
- [17] Graham, L. C. (1974), “Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping”, Proceedings of the IEEE, 62(6): 763-768.
- [18] Hoffmann, J., Zebker, H. A., Galloway, D. L. and Amelung, F. (2001), “Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry”, Water Resources Research, 37(6): 1551-1566.
- [19] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., 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.
- [20] Hung, W. C., Hwang, C., Chen, Y. A., Zhang, L., Chen, K. H., Wei, S. H., and Lin, S. H. (2018), “Land subsidence in Chiayi, Taiwan, from compaction well, leveling and alos/palsar: Aquaculture-induced relative sea level rise”, Remote Sensing, 10(1), 40: 1-22.
- [21] Joughin, I. R., Winebrenner, D. P. and Fahnestock, M. A. (1995), “Observations of ice-sheet motion in Greenland using satellite radar interferometry”, Geophysical Research Letters, 22(5): 571-574.
- [22] Lu, Z., Mann, D. and Freymueller, J. (1998), “Satellite radar interferometry measures deformation at Okmok Volcano”, Eos, Transactions American Geophysical Union, 79(39): 461-468.
- [23] Massonnet, D. and Feigl, K. L. (1995), “Discrimination of geophysical phenomena in satellite radar interferograms”, Geophysical Research Letters, 22(12): 1537-1540.
- [24] Massonnet, D., Holzer, T. and Vadon, H. (1997), “Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry”, Geophysical Research Letters, 24(8): 901-904.
- [25] Rignot, E., Jezek, K. C. and Sohn, H. G. (1995), “Ice flow dynamics of the Greenland ice sheet from SAR interferometry”, Geophysical Research Letters, 22(5): 575-578.
- [26] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Xu, X., Wei, M., Wessel, P. (2016), “GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools”, UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography. Retrieved from: http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR_2ND_TEX.pdf.

- [27] Yalvac, S. (2020), “Validating InSAR-SBAS results by means of different GNSS analysis techniques in medium and high-grade deformation areas”, *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 120.
- [28] Zebker, H. A. and Goldstein, R. M. (1986), “Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B5), 4992-4999.
- [29] Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. and Werner, C. L. (1994), “On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar”, 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium , 1, 286-288.
- [30] 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. *Remote Sensing*, 66, 146-152.

水土保持學報 53 (1)3067-3088(2023)

Journal of Soil and Water Conservation, 53 (1) 3067-3088(2023)

111 年 9 月 27 日收稿

111 年 10 月 12 日修改

111 年 11 月 18 日接受