

以 SBAS-InSAR 技術量測水庫集水區邊坡沖蝕變化

謝渝棋^[1] 蕭宇伸^{[1]*} 卓宥瑄^{[1][2]}

摘 要 本研究採用合成孔徑雷達干涉 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技術中的短基線差分干涉法 (Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)，推估石門水庫集水區範圍於 2015 年之土壤年沖蝕速率，進而估計本集水區沖蝕量體。研究資料選用 Sentinel-1 衛星影像共 20 幅。SBAS-InSAR 計算得之年沖蝕速率將與沖蝕針監測成果驗證，而 SBAS-InSAR 計算得之沖蝕量體則與土壤流失公式計算結果相互比較。本研究結果如下：(1) 採用上升軌道與至少 12 幅 Sentinel-1 衛星影像計算能有較好的成果；(2) 未考慮濾波時，在資料處理階段張力係數值選用 0.25 且不使用區塊平均法，有較佳之 SBAS-InSAR 成果，與沖蝕針監測成果相比，兩者相關係數值在自然邊坡達到 0.56，整治邊坡則達 0.51；(3) 考慮濾波處理時，8 公里之高斯濾波半徑能有較佳 SBAS-InSAR 成果，與沖蝕針監測成果相比，兩者相關係數值在自然邊坡達到 0.67，整治邊坡則達到 0.57；(4) SBAS-InSAR 與土壤流失公式計算得之沖蝕量體，兩者有趨勢大致相同。

關鍵詞：SBAS-InSAR，石門水庫，土壤沖蝕。

Monitoring Soil Erosion Changes on Slopes Through SBAS-InSAR Technology

Yu-Chi Hsieh ^[1] Yu-Shen Hsiao^{[1]*} Yu-Hsuan Cho ^{[1][2]}

ABSTRACT We use small baseline subset interferometric synthetic aperture radar InSAR (SBAS-InSAR) to estimate the annual soil erosion rate in the catchment area of Shihmen Reservoir in 2015 and then estimate the soil erosion volume of this catchment area. The study data are 20 Sentinel-1 satellite images. The annual soil erosion rates derived from the SBAS-InSAR are validated using those derived from erosion pins. The soil erosion volumes estimated using SBAS-InSAR are compared with those estimated using the universal soil loss equation (USLE). The results reveal that more accurate estimations of the annual soil erosion rate are achieved when at least 12 satellite images of the ascending orbits are employed. When filtering is not considered, the tension coefficient is 0.25 and block averaging is not used during data processing; this achieves better SBAS-InSAR results. Compared with erosion pin monitoring results, the correlation coefficient is 0.56 for natural slopes and 0.51 for remedial slopes. When considering filtering processing, an approximately 8-km Gaussian filter radius achieves the optimal SBAS-InSAR results; compared with erosion pin monitoring results, the correlation coefficient is 0.67 for natural slopes and 0.57 for remedial slopes. Finally, soil erosion volumes estimated using SBAS-InSAR and USLE display similar trends.

Key Words: SBAS-InSAR, Shihmen Reservoir, soil erosion

一、前 言

水庫為收集水資源重要之設施，而水庫可利用位置大致分為在槽水庫與離槽水庫，在槽水庫因建設於河道主流，一般而言土砂淤積的狀況比離槽水庫嚴重，台灣主要水庫均為在槽水庫，包括曾文水庫、翡翠水庫、石門水庫等。石門水庫位於臺灣北部，主要提供新北市及桃園市的用水，其水庫淤積狀況一直為嚴重狀態，而水庫淤積的情形與水庫壽命及人民水需求有直接關聯，故如何精確監測水庫集水區土壤沖蝕一直是政府部門非常重視的課題。近年來監測方法常使用

沖蝕針進行分析，如行政院農業委員會水土保持局於 2013 年應用沖蝕針對南化水庫及曾文水庫集水區進行土壤沖蝕量調查 (行政院農業委員會水土保持局，2015；李鎮洋等，2015)。2014 年與 2015 年則針對德基水庫及石門水庫不同子集水區進行土壤沖蝕量調查 (行政院農業委員會水土保持局，2015)。沖蝕針為利用精度 0.05 mm 之游標測微尺進行量測，雖然量測精度頗高，但量測值皆以點狀呈現，無法反映整體水庫集水區之沖蝕狀況。

現今合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) (Rogers and Ingalls, 1969) 為利用衛

[1] 國立中興大學水土保持學系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

[2] 行政院農業委員會水土保持局台中分局

Taichung Branch, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture Bureau, Executive Yuan

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

星運行時重複軌道方式，取得相同地區不同時間的 SAR 影像，將影像之複數資料中之相位值計算後可得到該地表的變化資訊。InSAR 目前已被廣泛運用於監測地表變化。與常見的全球定位系統 (Global Positioning System, GPS)、水準測量點狀的呈現不同，InSAR 可量測大面積地表變化。InSAR 因技術不同而發展出了許多量測方式，可分為三大項：(1) 以單一主影像處理干涉對之技術，如永久散射體差分干涉技術 (Persistent Scatterers InSAR, PSInSAR)(Ferretti et al., 2000)；(2) 以多主影像組成干涉對之技術，如短基線差分干涉技術 (Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)(Berardino et al., 2002)、時域相關點雷達干涉 (Temporarily Coherence Point InSAR, TCPInSAR)(Zhang et al., 2011) 等；(3) 結合單一主影像及多主影像之干涉對，進行分析解算之技術，如 StaMPS/MTI (Hooper et al., 2007)。

上述幾種方法皆可處理多時段衛星影像資料，計算處理後及可獲得地表變化情形。以近年來國內外相關研究而言，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 技術進行觀測，成果顯示下陷量達每年 7 cm；Francesco Casu et al. (2009) 應用 SBAS 方法針對夏威夷活耀的 Kilauea 和 Mauna Loa 火山進行監測，評估其危險性及震動情形，成果顯示除了某些地區因局部過度快速的變化外，其餘地區地表抬升情形皆與 GPS 數據一致；Hung et al. (2011) 以 PSInSAR 技術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 7 cm，而水準測量檢核之誤差均方根值僅 0.6 cm，可說明 InSAR 量測相

當準確；黃大任 (2013) 使用 ALOS 衛星資料配合 TCPInSAR 技術，針對彰化、雲林、嘉義等地進行地層下陷監測，整體下陷量大致符合水準測量成果，若以水準測量檢核 InSAR 成果，兩者差值之均方根值約為 0.8 cm，顯示 InSAR 成果良好；林書涵 (2014) 使用 PSInSAR、StaMPS/MTI 與 TCPInSAR 技術，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最小 (約 0.68 cm)；楊苡潔 (2018) 以 Sentinel-1 衛星影像結合 SBAS-InSAR 方法對雲林縣濁水溪沿海地區進行監測，並將 SBAS-InSAR 成果與 GPS 成果比較後，兩者差值均方根為 0.76 cm(使用升軌影像) 與 0.33 cm(使用降軌影像)，成果大致良好；Yalvac (2020) 在 2014-2018 年間，選取 Mexico City 和 Aguascalientes 作為研究區域，利用 SBAS 法進行計算並將成果與 GPS 連續站進行比對，成果顯示 SBAS 成果與 GPS 平均差值約為 0.7-0.8 cm 間，成果亦相當良好。

綜合上述研究，可知 InSAR 技術已被廣泛運用於監測地表變化，本研究以 GMTSAR 軟體 (Sandwell et al., 2011) 之 SBAS 方法，配合開源 Sentinel-1 衛星影像，用以求定石門水庫集水區於 2015 年之衛星視線方向 (Line of Sight, LOS) 的年沖蝕速率，再將 LOS 向轉換為垂直向之年沖蝕速率。InSAR 計算出之年沖蝕速率與沖蝕量體，將以沖蝕針量測值 (以行政院農業委員會水土保持局，2015) 和通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 計算之成果進行比較。圖 1 為本研究流程圖。

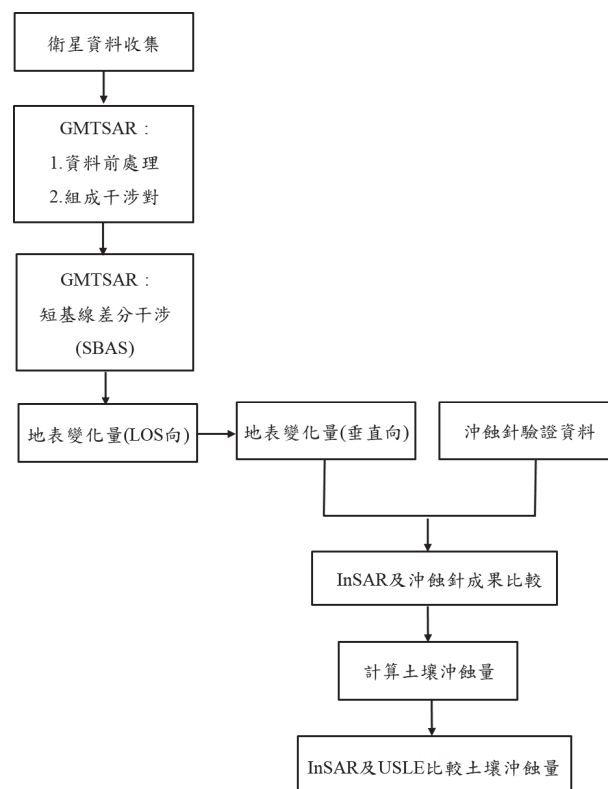


圖 1 研究流程圖。

Fig.1 The study flowchart

二、InSAR 與 SBAS 原理

1. InSAR

InSAR 為利用不同時間或不同位置的衛星雷達獲取影像資料，使用兩幅或多幅複數資料進行干涉處理，藉由相位差達到該地表之三維變化資訊。InSAR 成像幾何如圖 2 所示，其中 S_1 、 S_2 為取得該地表資訊時天線的空間位置、 B 為兩天線之基線長、 H 為衛星載具航高、 θ 為視角、 α 為基線與水平線之夾角、 R 為 S_1 天線至目標物之目標物之長度、 $R+\delta$ 為 S_2 天線至目標物之長度。

2. SBAS

SBAS 為 Berardino et al.(2002) 所提出了干涉方法，原理為利用多組影像所組成的短基線影像對求得時間列，進而計算出地表變化量，因時間基線與空間基線皆會在干涉時造成影響，若影像相干性低，干涉成果之精度會降低也有可能產生影像無法干涉地狀況發生，故此方法為利用距離較近之軌道影像進行干涉，能降低空間及地形所產生之誤差，獲得較佳的成果。原理為先假設有 $N+1$ 幅影像，各影像之拍攝時間分別為 $t_0, t_1 \dots t_N$ ，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

$$\begin{aligned} \Delta\phi(x, r) &\approx \phi(t_a, x, r) - \phi(t_b, x, r) \\ &\approx \Delta d(x, r) + \Delta\phi_t(x, r) + \Delta\phi_a(x, r) + \Delta\phi_n(x, r) \end{aligned} \quad (1)$$

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。再結合各組相對之干涉值變化，可利用平差方式推估出影像中大量點位的位移量。

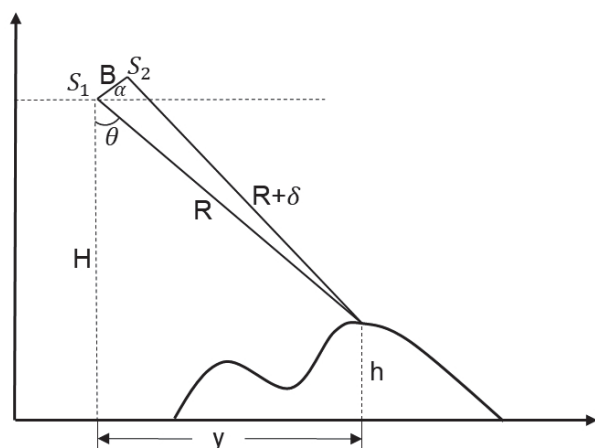


圖 2 InSAR 成像幾何示意圖

Fig.2 Schematic diagram of InSAR geometry

三、研究區域、資料蒐集與使用軟體

1. 研究區域

本文實驗區域為石門水庫，為北台灣主要水庫，有灌溉

溉、給水、發電、防洪、觀光等功用，每日分別提供桃園市、新北市、新竹縣 32 鄉鎮區約 800000 m³ 用水。水庫集水區範圍以桃園市淡水河最大支流大漢溪以上，包含了新北市、桃園市、新竹縣、宜蘭縣、苗栗縣等五縣市，水庫高程為 3500 m 至水庫壩址 150 m 處，呈現南高北低的地勢。水庫集水區中又可分為四個子集水區，分別為石門集水區 (255.74 km²)、三光集水區 (107.21 km²)、玉峰集水區 (80.26 km²) 及白石集水區 (119.63 km²)，圖 3 為石門水庫地理位置與高程分布圖。

2. 衛星資料與驗證資料

衛星資料使用歐洲太空署所發射用於監測土地與海洋之 Sentinel-1 衛星影像，其波段為 C 波段 (波長約 5 cm)，衛星高度為 693 km，傾角為 98.1°，再訪週期為 12 天，搭配干涉寬幅模式，解析度為 5 m 至 20 m 間，本研究所使用的影像詳細訊整理於表 1，影像總共 20 幅，包含了 12 幅上升軌道與 8 幅下降軌道，時間涵蓋 2015 年 3 月到 9 月份。

驗證資料使用由行政院農業委員會水土保持局 (2015) 對石門水庫集水區地區土壤沖蝕調查時於 2015 年 4 月~8 月間之沖蝕針監測資料，總共 43 個監測點，分布於庫區集水區、玉峰集水區、白石集水區與三光集水區等，每一個監測點位有 2015 年 4 月~8 月間的沖蝕深度量測值，除此之外，亦有註明該監測點位所在地之坡度等級與坡面狀況，坡面狀況分為自然邊坡與整治邊坡，自然邊坡為坡面植生經內、外營力影響，致使植被崩落或抑制生長而呈現裸露之坡面；整治邊坡則為邊坡植生經人為或工程手段所栽植或治理之坡面。統整後得知沖蝕針點位在自然邊坡上共有 25 處，整治邊坡有 18 處，如圖 4 所示。

以 SBAS-InSAR 得到初始量測結果為 LOS 方向年沖蝕速率，本研究依據衛星飛行方位角與側視角改正為垂直向之年沖蝕速率後，再與沖蝕針成果進行比較。由於沖蝕針成果為 2015 年 4 月至 8 月之垂直沖蝕深度變化，故與 SBAS-InSAR 量測值時間基準不同。為了消除此時間基準造成的誤差，後續比較時是以兩者的相關係數 (Correlation Coefficient, CC) 呈現結果。

3. GMTSAR

GMTSAR 為美國聖地牙哥大學海洋工程系所開發之開源軟體，支援感測器影像處理，此軟體可在 GMT(Generic Mapping Tools, GMT) (Wessel and Smith, 1998) 系統上執行處理，故使用上亦採用 GMT 語法指令來進行影像干涉相關之計算處理。GMTSAR 有三個重要步驟：1.將每個衛星之影像資訊經由預處理器轉換為通用格式；2.將影像堆疊相對後繪製成一幅具有地形之干涉圖；3.後處理器則過濾干涉圖，計算圖中各坐標中的位移變化量 (LOS 方向)。本研究之 InSAR 量測成果即採用 GMTSAR 進行計算。

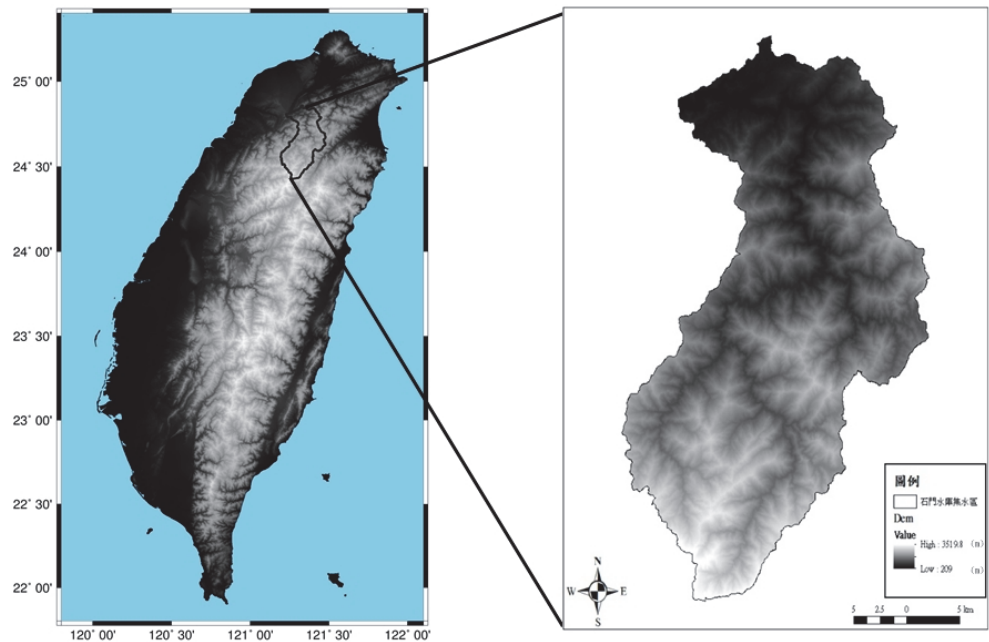


圖 3 石門水庫地理位置與高程分布圖。
Fig.3 The location and elevation distribution of the Shihmen Reservoir

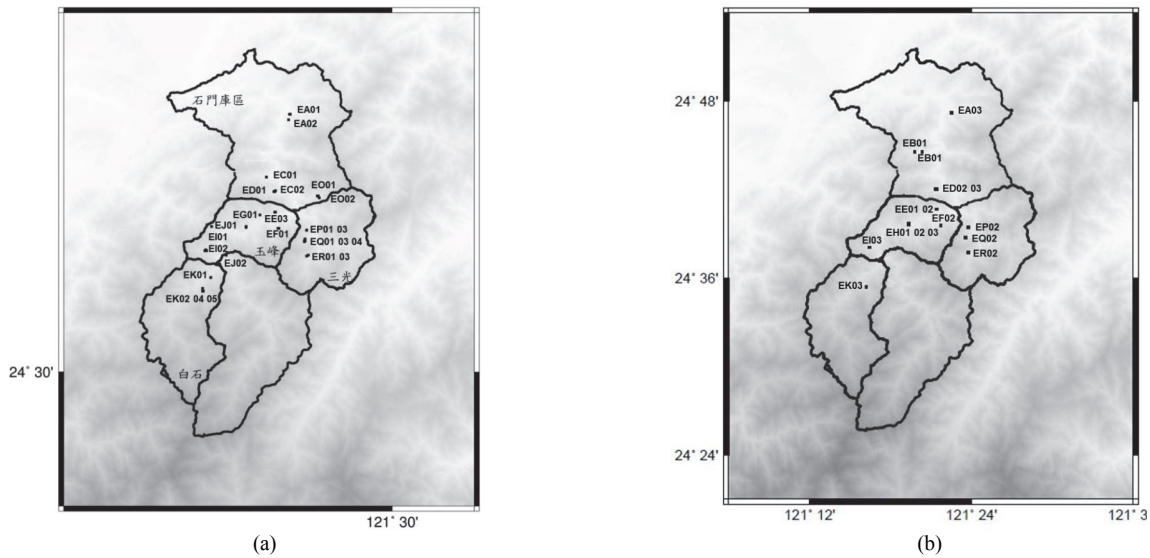


圖 4 沖蝕針之分布圖。(a) 在自然邊坡；(b) 在整治邊坡
Fig.4 The distribution of the erosion pins on natural slopes (a), and remedial slopes (b)

表 1 衛星影像資料

Table 1 A Summarize of the Satellite image data

幅數編號	升降軌道	時間	幅數編號	升降軌道	時間
1	升軌	20150315	7	升軌	20150713
2		20150408	8		20150725
3		20150502	9		20150806
4		20150526	10		20150818
5		20150619	11		20150830
6		20150701	12		20150906
13	降軌	20150329	17	降軌	20150703
14		20150422	18		20150727
15		20150516	19		20150820
16		20150609	20		20150913

四、成果分析與討論

1. 測試案例成果

為想取得良好之衛星數據進行成果分析，本階段分為 9 個測試案例，各測試案例之內容如表 2 所示，各測試案例的 CC 值(SBAS-InSAR 得到之 2015 年沖蝕速率和沖蝕針得到之 2015 年 4 月至 8 月沖蝕變化比較) 如表 3 所示。案例 1 與 2 均使用 4 幅影像，差別為案例 1 使用降軌影像資料、案例 2 使用升軌影像資料。成果顯示案例 1 在自然邊坡中之沖蝕針與 SBAS-InSAR 成果 CC 值為-0.16，而案例 2 之 CC 值則為-0.54；整治邊坡案例 1 之沖蝕針與 SBAS-InSAR 成果 CC 值為-0.31，案例 2 之 CC 值則為-0.13，以上均呈現負相關。在案例 3 與 4 的比較方面，案例 3 為上升軌道、案例 4 為下降軌道，然而所使用之衛星幅數與案例 1、2 相比增加為 8 幅，成果顯示，案例 3 在自然邊坡中之沖蝕針與 SBAS-

表 2 測試案例基本資料

Table 2 Basic information of the test cases

案例	上升軌道	下降軌道	幅數	幅數編碼	極化模式	張力係數	區塊平均
1		O	4	13、16、18、20	VV	0.25	
2	O		4	1、4、8、12	VV	0.25	
3		O	8	1~8	VV	0.25	
4	O		8	1、2、4~6、8、10、12	VV	0.25	
5	O		12	1~12	VV	0.25	
6	O		12	1~12	VH	0.25	
7	O		12	1~12	VV	0	
8	O		12	1~12	VV	1	
9	O		12	1~12	VV	0.25	O

表 3 案例 1~9 之相關係數成果統整表

Table 3 The correlation coefficients of the test cases 1~9

案例	自然邊坡 相關係數	整治邊坡 相關係數
1	-0.16	-0.31
2	-0.54	-0.13
3	0.04	0.36
4	0.19	0.37
5	0.56	0.51
6	0.56	0.51
7	0.54	0.44
8	0.55	0.41
9	0.55	0.49

案例 7~9 分別以 GMT 程式中之 surface 和 blockmean 之資料處理模組對 SBAS-InSAR 沖蝕量測成果進行資料處理。surface 為 GMT 程式中將離散點資料轉換為規則網格化之模組，主要為使用 $(1-T) * L(L(z)) + T * L(z)=0$ 公式，式中 L 參數為拉普拉斯計算因子，T 參數則是張力係數因子，其範圍為 0~1 間，若選 0 時會呈現用最小曲率解(Minimum Curvature)所計算的成果；若選 1 則是呈現諧和曲面解(Harmonic Surface)；而 GMT 軟體中建議值為 0.25(Wessel and Smith, 1998)。案例 7 之張力係數設為 0(最小曲率解)，而案例 8 設為 1(諧和曲面解)，案例 6 則設為 0.25。由案例 6~8 可發現，

InSAR 成果 CC 值為 0.04，案例 4 之 CC 值則為 0.19；整治邊坡中，案例 3 之沖蝕針與 SBAS-InSAR 成果 CC 值為 0.37，案例 4 則為 0.19。由案例 1~4 的成果可發現，無論干涉影像採用 4 幅或 8 幅，SBAS-InSAR 沖蝕速率監測成果均極差，與沖蝕針量測成果之 CC 值從負相關至低度相關性都有，但依然可發現使用上升軌道之成果較下降軌道略佳，故案例 5 之後均採用上升軌道之衛星影像。案例 5 與 6 均將影像數提升至 12 幅衛星影像，但案例 5 之衛星感測器極化模式採用 VV(垂直發射垂直接收模式)，而案例 6 採用 VH(垂直發射水平接收模式)。結果顯示，案例 5 與 6 在自然邊坡中之沖蝕針與 InSAR 量測成果 CC 值皆為 0.56，整治邊坡兩者 CC 值皆為 0.51，均屬於中度相關。若將案例 5、6 與案例 1~4 相比，可發現採用 12 幅衛星影像進行干涉已經能大幅提升 InSAR 之成果，另外得知不同極化模式對 InSAR 成果並無影響，故以下案例 7~9 皆採用 12 幅影像與 VV 模式。

案例 6 之成果無論在自然邊坡或整治邊坡均有較佳之 CC 值，特別是整治邊坡 CC 值有明顯之提升，由於整治邊坡為植生經人為或工程手段所栽植或治理之坡面，一般而言植被完整，故代表採用 surface 張力係數 0.25 能較有效去除 SBAS-InSAR 成果受植被影響之情況；GMT 程式中之 block-mean 模組是利用歐幾里德距離法，將檔案以區塊平均法計算出每一區塊之平均值，若區塊範圍內出現與平均值相差過大之值則將其刪除，經由此步驟理論上可將 SBAS-InSAR 量測值的大錯去除。案例 6 為無使用區塊平均法，而案例 9 為有使用區塊平均法，兩個測試案例之 CC 值接近，但案例 6 無論在自然邊坡或整治邊坡皆略優於案例 9，代表區塊平均法的使用並不會提升 SBAS-InSAR 之成果，故後續不使用此方法進行資料處理。

2. 濾波處理分析

由上述各測試案例可發現，案例 6 有最佳之 CC 值。為了解 SBAS-InSAR 的成果是否能進一步提升，本研究以 GMT 之模組 filter 對案例 6 之 SBAS-InSAR 量測值進行資料處理，filter 為 GMT 中空間濾波的指令，本研究使用高斯濾波並搭配不同濾波半徑對 SBAS-InSAR 案例 6 之成果進行優化，圖 5 為以不同濾波半徑處理後，SBAS-InSAR 與沖蝕針成果之 CC 值，由圖中可發現無論整治邊坡或自然邊坡，濾波半徑約 8 公里均有最佳的成果，相關係數在自然邊坡約 0.67，整

治邊坡約 0.57。與案例 6 相比，自然邊坡 CC 值提升 0.11，而整治邊坡 CC 值亦提升 0.06，由結果可得知高斯濾波配合濾波半徑約 8 公里能顯著提升 SBAS-InSAR 的量測成果，特別是自然邊坡點位。圖 6 為案例 6 在使用高斯濾波半徑 8 公里處理後之成果（垂直向之年沖蝕速率），由圖中可發現水庫集水區年沖蝕速率約 0~300 mm，雖然負值符合向下刷深之型態，但量級明顯偏大。若將沖蝕針坐標內插至 SBAS-InSAR 成果中，即可得到在沖蝕針位置之 SBAS-InSAR 年沖蝕速率。圖 7 即為 SBAS-InSAR 在沖蝕針位置的年沖蝕速率與沖蝕針所量測得的沖蝕量（2015 年 4 月至 8 月）比較，由圖中可發現無論在自然邊坡或整治邊坡，SBAS-InSAR 與沖蝕針成果的量級差距極大，在自然邊坡 SBAS-InSAR 年沖蝕速率在沖蝕針位置約為 -50~-110 mm，雖然與沖蝕針量測值差距大，但整體趨勢與沖蝕針量測值大致相同，CC 值為 0.67(如圖 5(a))；而整治邊坡 SBAS-InSAR 年沖蝕速率在沖蝕針位置約為 -250~-200 mm，變動甚大且正負均有，且與沖蝕針量測值的 CC 值僅 0.57(如圖 5(b))，故整體而言，SBAS-InSAR 在石門水庫集水區之年沖蝕速率計算成果，自然邊坡優於整治邊坡，這是由於位於自然邊坡的沖蝕針位置埋設於植被崩落或抑制生長而呈現裸露之坡面，故 Sentinel 衛星雷達波段較不受植被之阻擋影響所致。

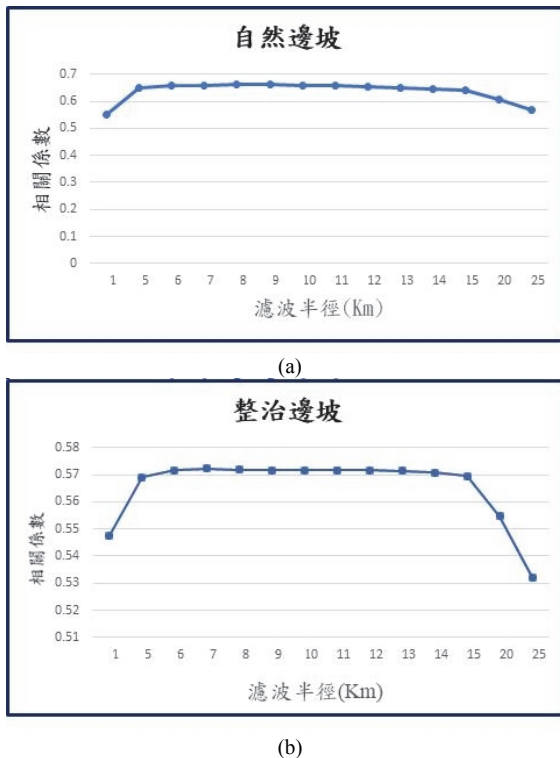


圖 5 SBAS-InSAR 與沖蝕針量測成果相關係數比較，其中 SBAS-InSAR 量測值以不同照窗半徑之高斯濾波處理。(a) 為在自然邊坡成果，(b) 為在整治邊坡成果。

Fig.5 The CC between the results from the SBAS-InSAR and the erosion pins on natural slopes (a), and remedial slopes (b). The InSAR results are processed by the Gaussian filter with different width

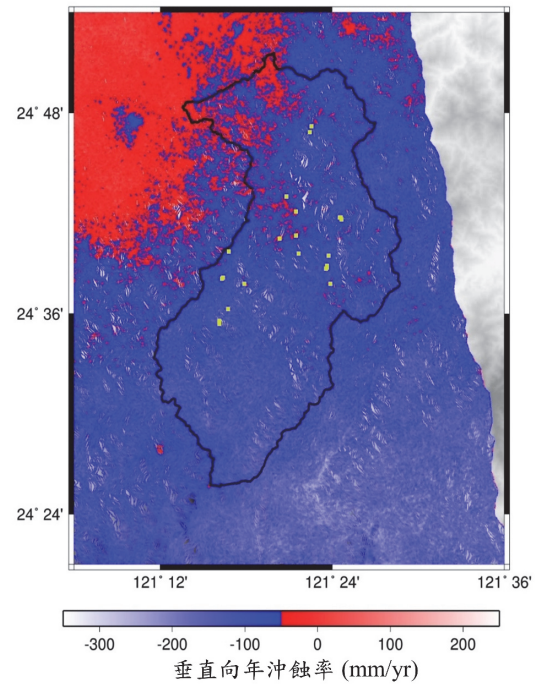


圖 6 SBAS-InSAR 年沖蝕速率 (案例 6 成果再以高斯濾波配合 8 公里濾波半徑處理後)

Fig.6 The SBAS-InSAR annual erosion rate (The result of the case 6 after being processed by the Gaussian filter with 8km filter width)

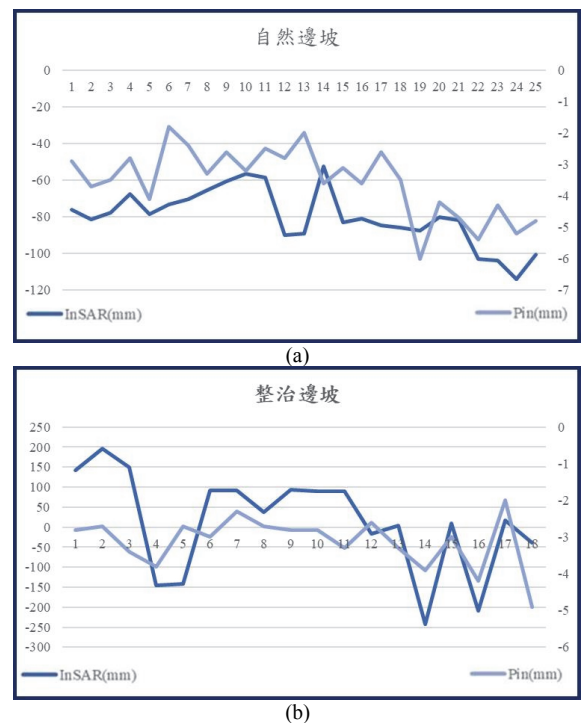


圖 7 2015 年沖蝕深度(以 SBAS-InSAR 量測)與 2015 年 4~8 月沖蝕深度 (沖蝕針量測) 比較圖，其中 (a) 為自然邊坡 25 個沖蝕針位置之成果，(b) 為整治邊坡 18 個沖蝕針位置之成果。

Fig.7 The comparisons of the soil erosion depths in 2015 estimated by the SBAS-InSAR and during April to August in 2015 estimated by erosion pins on natural slopes (a), and remedial slopes (b)

3. 沖蝕量體分析

本研究將圖 6 所計算得到之 SBAS-InSAR 年沖蝕速率，乘上各集水面積後，即可得到各集水區之年沖蝕量體，再以 USLE 公式所計算之沖蝕量體相互比較，USLE 計算參數表如表 5 所示，式中降雨沖蝕指數、土壤沖蝕指數、覆蓋與管理因子及水土保持措施因子為依據最新《水土保持技術規範》中之建議值，石門地區降雨沖蝕指數為 15737，土壤沖蝕指數選取最靠近石門之大溪慈湖 0.0171 作為參數，覆蓋與管理因子因水庫集水區大多為林地故以 0.01 進行計算，水土保持措施因子則設為 1，坡長因子則以計算後求得，SBAS-InSAR 與 USLE 之土壤沖蝕量比較如圖 8 所示，在石門庫區、玉峰集水區、三光集水區與白石集水區兩種方法所估算的土壤沖蝕量差距都甚大，石門庫區 SBAS-InSAR 推估得到將近 17500000 m³ 的沖蝕量，而 USLE 僅推估得到約 3300000 m³ 的沖蝕量；玉峰集水區 SBAS-InSAR 推估得到近 10000000 m³ 的沖蝕量，而 USLE 僅推估得到近 3000000 m³ 的沖蝕量；三光集水區 SBAS-InSAR 推估得到約 13000000 m³ 的沖蝕量，而 USLE 僅推估得到近 4000000 m³ 的沖蝕量；白石集水區 SBAS-InSAR 推估得到近 22000000 m³ 的沖蝕

量，而 USLE 僅推估得到約 5000000 m³ 的沖蝕量。雖然兩種方法在各集水區所估算的量體差異很大，但相關性趨於一致，均為白石集水區沖蝕量最高而玉峰集水區沖蝕量最低。

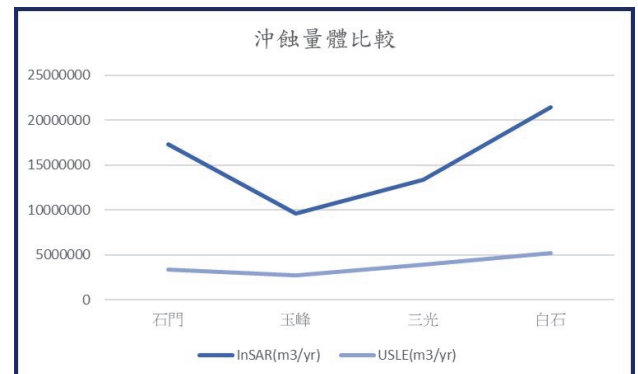


圖 8 在各集水區以 SBAS-InSAR 與 USLE 推估得到的沖蝕量比較，其中 Y 軸之量體單位為 m³

Fig.8 The SBAS-InSAR-estimated and the USLE-estimated erosions in each catchment. The unit of Y-axis is m³

表 5 USLE 計算中各參數數值與分別以 USLE、SBAS-InSAR 推估的土壤沖蝕量

Table 5 The values of the parameters in USLE computation, and the amount of soil erosion estimated by USLE and SBAS-InSAR, respectively

集水區	Rm	Km	L	S	C	P	集水區面積(ha)	USLE推估的土壤沖蝕量(m³/yr)	SBAS-InSAR推估的土壤沖蝕量(m³/yr)
石門	15737	0.0171	47.718	1.432	0.01	1	25574	3359265	17483960
玉峰	15737	0.0171	25.571	6.973	0.01	1	8026	2750627	9945816
三光	15737	0.0171	25.562	7.441	0.01	1	10721	3919530	13418242
白石	15737	0.0171	30.376	7.452	0.01	1	11963	5205084	21681785

五、結 論

本研究結論與建議如下：

1. 本研究之驗證資料可得知使用 Sentinel 衛星升軌影像較降軌影像好。此外，至少 12 幅影像進行 SBAS 干涉計算成果才能顯著提升。
2. 在 GMT 相關資料處理方面，張力係數值選用 0.25 且不使用區塊平均法能擁有較佳的成果。另外對 InSAR 成果進行高斯濾波處理，測試後得知約 8 公里之濾波半徑能有較佳成果。
3. 本研究分為自然邊坡極整治邊坡進行分析，在比較最佳 InSAR 成果與沖蝕針成果後，兩者在自然邊坡有 0.67 之相關係數，在整治邊坡上則有 0.57 相關係數。自然邊坡較佳的原因為衛星雷達波段較不受植被之阻擋影響所致。
4. InSAR 成果與 USLE 所計算出土壤沖蝕量體進行比較，雖然兩者量體相差甚多，但在每一個集水區的沖蝕量估算成果趨勢一致。

參考文獻

- [1] 行政院農業委員會水土保持局 (2013)，「水庫集水區環境資料及土砂災害風險評估 (1/3)」。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (2013). *Environmental Data of Reservoir Catchment Area and Risk Assessment of Soil and Sand Disaster (1/3)*. (in Chinese))
- [2] 行政院農業委員會水土保持局 (2015)，「104 年石門水庫集水區執行成效追蹤」。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (2015). *Racking the Implementation Effect of Shimen Reservoir Catchment Area in the 104th Year of the Republic Eras*. (in Chinese))
- [3] 李鎮洋、傅桂霖、蔡明發、簡以達、許振崑、林伯勳 (2015)，「應用沖蝕針量測數據評估曾文水庫集水區土壤沖蝕抑制成效」，中興工程季刊，129，9-18。(Li, C.Y., Fu, K.L., Tsai, M.F., Chien, I.D., Hsu, J.K., and Lin, P.H. (2015). "Evaluating the effect of soil erosion inhibition in the catchment area of Tsengwen Reservoir using erosion

- needle measurement Data.” *Sinotech Engineering*, 129, 9-18. (in Chinese))
- [4] 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表變形」, 國立交通大學土木工程系所碩士論文。(Lin, S.H. (2014). *Surface deformation by multi-temporal InSAR methods with C and L-band SAR images in Changhua Area*, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan. (in Chinese))
- [5] 許振崑、林伯勳、賴承農、簡以達、蔡明發 (2014), 「以沖蝕針量測資料評估曾文水庫集水區整治邊坡土壤沖蝕抑制率」, 2014 年中華水土保持學會年會及學術研討會論文集, 1-12。(Hsu, J.K., Lin, P.H., Lai, C.N., Chien, I.D., and Tsai, M.F. (2014). “Evaluation of soil erosion inhibition rate of renovated slope in catchment area of Tsengwen Reservoir using erosion needle measurement data.” *Proceedings of the 2014 Annual Meeting and Academic Symposium of the Chinese Soil and Water Conservation Society*, 1-12. (in Chinese))
- [6] 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系所碩士論文。(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. (in Chinese))
- [7] 楊苡潔 (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。(Yang, Y.J. (2018). *Monitoring land subsidence in Yunlin County using Sentinel-1A SAR by SBAS*, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan. (in Chinese))
- [8] 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。(Lu, Y.F. (2007). *Monitoring surface subsidence of Yunlin using radar interferometry*, Master Thesis, National Chiao Tung University, Taiwan. (in Chinese))
- [9] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., and Sansosti, E. (2002). “A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms.” *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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: Solid Earth*, 112.
- [13] Hung, W.C., Hwang, C., Chen, Y.A., Chang, C.P., Yen, J.Y., Hooper, A., and Yang, C.Y. (2011). “Surface deformation from persistent scatterers SAR interferometry and fusion with leveling data: A case study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan.” *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 957-967.
- [14] Rogers, A.E.E., and Ingalls, R.P. (1969). “Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry.” *Science*, 165(3895), 797-799.
- [15] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., and P. Wessel (2011). “Open radar interferometry software for mapping surface deformation.” *Eos Trans. AGU*, 92(28), doi:10.1029/2011EO280002.
- [16] Wessel, P., and Smith W.H.F. (1998). “New, improved version of Generic Mapping Tools released.” *EOS Trans. AGU*, 79(47), 579, doi:10.1029/98EO00426.
- [17] Yalvac, S. (2020). “Validating InSAR-SBAS results by means of different GNSS analysis techniques in medium- and high-grade deformation areas.” *Environ Monit Assess*, 192, 120.
- [18] 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.

2020 年 11 月 15 日 收稿

2021 年 05 月 24 日 修正

2021 年 06 月 30 日 接受