

**應用雷達衛星影像進行河道裸露面侵  
淤監測之可行性研究**

**Evaluating the capability of applying  
radar satellite data to monitor river  
morphological changes**

---

執行 單位：國立中央大學

執行 期間：110 年 01 月 27 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：姜壽浩 中央大學太空及遙測研究中心 副教授

研究 人員：姚柏成

**行政院農業委員會水土保持局 編印**

**中華民國 110 年 12 月**

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)



## 摘要

在崩塌災害的防治工作上，使用遙測資料，如衛星影像、航空照片等，對於快速擷取災害情資有極大的助益。且不同於光學影像，合成孔徑雷達影像可適用在多雲霧的氣候條件下，更突顯了雷達遙測資料的應用價值。台灣山區崩塌、土石流以及河岸侵蝕等造成之輸砂往往成為集水區管理之重大問題，山區野溪因不易到達且河道土砂變化快，本計畫提出一基於雷達衛星影像之方法，產製不同時期之數值地形資料，能即時、快速進行河川裸露面侵淤之監測。本研究利用多時期之雷達資料針對研究區之河道裸露地區利用 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技術進行高程測量，並選用 Sentinel-1 C-band 雷達影像進行分析，並且於本研究區，高雄山區寶來、復興河段汛期前後分別針對研究區選定河道區段進行無人機拍攝並產製高階析度數值地形模型作為成果驗證之用。透過此研究可知，利用 Sentinel-1 C-band 雷達資料解算之高程資料誤差 RMSE 約為 2.37 公尺-6.47 公尺之間，因此本研究建議此技術較適合應用在河道侵淤較明顯、高程變化達 10 公尺以上之大型土砂運移之事件，如颱風豪雨肇生之土石流、堰塞湖之形成或潰堤此等劇烈地形變化事件。雖然使用光學影像對亦可產製高精度之數值地形，然而本研究使用之雷達資料其覆蓋面積廣大，相較於光學資料，可以有效率地進行大範圍的河道劇烈地形變動之監測，對於集水區管理及土砂災害之防治能有相當的助益。

**關鍵詞：**河川裸露面、合成孔徑雷達、數值地形模型、InSAR、侵淤監測

## ABSTRACT

To detect landslide hazards for a wide region, remotely sensed data has been applied due to its efficiency and low cost. However, the cloudy condition during a typhoon may limit the application of optical data. For an emergent monitoring task, Synthetic Aperture Radar (SAR) is, therefore, a suitable tool for detecting disasters, such as landslides and debris flows in cloudy and rainy weather. This study aims to evaluate the capability of applying radar imagery to monitor river morphological changes, for a long-term, continuous hillslope monitoring task. Elevation measurements before and after typhoon seasons will be generated by using InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) technique to detect the changes of bare areas of a selected river section. Besides, other independent DEMs generated using Unmanned Aerial Vehicle (UAV), with better accuracy and precision, will be used to check the quality of radar-derived DEMs. The result shows that the measurement error is between 2.37 m and -6.47 m so that it is suggested to be suitable for monitoring significant morphological changes ( $>10$  m), such as debris flows and dam break events. The applied Sentinel-1 SAR data is considered a suitable product to perform InSAR analysis because it has higher temporal resolution and a shorter perpendicular baseline distance. Overall, this study is expected to serve as a part of a rapid response system of hazard monitoring when optical data is not available.

**Keywords: River morphological change, Synthetic Aperture Radar, DEM, InSAR, River monitoring**

# 目次

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目次.....	III
表次.....	IV
圖次.....	V
第一章 緒論.....	1-1
第一節 研究背景與目的 .....	1-1
第二章 研究區與研究方法 .....	2-1
第一節 研究區與汛期降雨事件 .....	2-1
第二節 研究方法 .....	2-3
第三章 研究成果 .....	3-1
第一節 衛星影像篩選 .....	3-1
第二節 現地測量與無人機拍攝 .....	3-5
第三節 應用 BEI 檢視河道變化 .....	3-9
第四節 InSAR 河道裸露面高程測量成果 .....	3-11
第五節 其他試驗 .....	3-15
第四章 結論 .....	4-1
參考文獻 .....	參-1
附錄 .....	附-1
附錄一、地面控制點量測成果 .....	附-1
附錄二、InSAR 技術之河道裸露面高程量測成果 .....	附-4
附錄三、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....	附-10
附錄四、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....	附-13
附錄五、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 .....	附-19

## 表次

表 2-1 無人飛機資料表- PHANTOM 4 PRO.....	2-9
表 3-1 2014 年-2021 年無雲無雨統計天數表.....	3-4
表 3-2 符合條件之 SENTINL-1 影像.....	3-5
表 3-3 無人機空拍資料說明 .....	3-7
表 3-4 各期高程測量成果與地面控制點之誤差統計 .....	3-13
表 3-5 空拍 DSM 與 INSAR 高程變化測量比對.....	3-15
表 3-6 SENTINEL-1 影像收集列表 .....	3-15
表 3-7 不良天候取得影像之 INSAR 高程測量結果 .....	3-17

## 圖次

圖 2-1、研究區 SPOT 衛星影像(A)寶來河段(B)復興河段.....	2-2
圖 2-3、應用 BEI 進行崩塌面上土壤、出露母岩進行區判.....	2-7
圖 2-4 本研究團隊於 106 年創研計畫利用空拍資料建構寶來地區河 道與鄰近邊坡之三維立體模型 .....	2-9
圖 3-1 復興站 2014-2021 雨量統計(統計至 2021/10/31).....	3-1
圖 3-2 利用 MODIS 及 SENTINEL-2 篩選無雲影像示意圖 .....	3-3
圖 3-3 無人機空拍調查位置 .....	3-6
圖 3-4 空拍正射影像(A)汛期前寶來地區，(B)汛期前復興地區，(C) 汛 期後寶來地區，(D)汛期後復興地區(水保局提供) .....	3-8
圖 3-5 空拍建置 DSM (A)汛期前寶來地區，(B)汛期前復興地區，(C) 汛期後寶來地區，(D)汛期後復興地區 .....	3-9
圖 3-6 寶來河段汛期後 BEI 圖(A)為汛期前，(B)為汛期後。.....	3-10
圖 3-7 復興河段汛期後 BEI 圖(A)為汛期前，(B)為汛期後。.....	3-11
圖 3-8 INSAR 雷達影像對同調性 COHERENCE 分布情形圖，(A)VH 極 化資料，(B)VV 極化資料。.....	3-12
圖 3-9 寶來以及復興河段同調性分布情形。(A)為寶來河段 VH 極化 資料，(B) 寶來河段 VV 極化資料，(C) 復興河段 VH 極化資 料，(D) 復興河段 VV 極化資料。.....	3-12
圖 3-10 2021 年汛期前後 INSAR 所得之(A)寶來以及(B)復興河段之 高程變化分布，以及空拍建置之 DSM(C)寶來以及(B)復興河 段之高程變化分布。.....	3-14
圖 3-11 寶來河段 PS 點分布情形，(A)同調性 $>0.7$ ，(B)ASI $>0.7$ ...	3-16
圖 3-12 寶來河段同調性與 ASI 皆 $>0.7$ 的 PS 點分布情形 .....	3-17





## 第一章 緒論

### 第一節 研究背景與目的

近年來，合成孔徑雷達影像已經開始應用於山區崩塌之監測與預判工作，如使用ERS-2、ENVISAT、RADARSAT-2、TerraSAR以及ALOS PALSAR等雷達影像資料等(Colesanti and Wasowski, 2006; Bovenga et al., 2012; Raspini et al., 2015)，主要為偵測潛在崩塌地區或崩塌事件前後地表的變異之訊號。此外因為合成孔徑雷達感測器屬於主動式微波感測器，相較於光學感測器，其波長較長可以穿透雲層，觀測較不受天候影響。運用雷達影像崩塌地的變形偵測上，主要概念為求算不同時期之雷達觀測回波之相位差，如DInSAR(合成孔徑雷達差分干涉，Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar)可用以界定具有明顯地表變形的位址，或是進行變形量的估計，如PS-InSAR(永久散射體差分干涉技術，Persistent Scatterers InSAR)計算對衛星軌道方向之相對位移速率(Hopper et al., 2004)。目前國內已有研究運用雷達影像於崩塌判釋或潛在崩塌地區的變形偵測上(王國隆、林俊廷，2014; 陳柔妃等，2015)。另外則是利用差分干涉結果中所含的地形干涉相位 (Topographic Interferometric Phase) 資訊來計算地表高程，並建置數值高程模型。使用 InSAR 技術進行高程測量有許多先天性的優勢，相較於光學衛星，雷達影像的取得不受日及天氣的影響；相較於地測或光達，較無人力需求的考量且不耗費時間與金錢來取得，可在較短時間取得大面積的影像(吳彥誼等，2020)。

台灣山區崩塌、土石流以及河岸侵蝕等造成之輸砂往往成為集水區管理之重大問題，山區野溪因不易到達且河道土砂變化快，本計畫

提出一基於雷達衛星影像之方法，進行不同時期之高程測量工作，能即時、快速進行河川裸露面侵淤之監測。本研究收集了2015至2021多時期之雷達資料針對研究區之河道裸露地區，進行高程量測。此研究選用C-band Sentinel-1 雷達影像進行分析，其原因為此雷達資料具有較高的時間解析度以及較短的基線長度等特性，適合於應用DInSAR技術。為了銜接ERS-2及ENVISAT任務，歐洲太空總署已分別於2014年四月發射Sentinel-1A已及2016年四月發射Sentinel-1B。目前Sentinel-1之雷達觀測產品包含兩個觀測衛星，兩者以同一軌道差180度運行，並且均已開始執行拍攝任務，歐洲太空總署也已提供全球免費的Sentinel-1合成孔徑雷達影像。Sentinel-1影像的空間解析度於臺灣地區約為10公尺，時間解析度為6-12天，此免費的雷達影像資源對於本研究進行多時序之雷達影像分析將有相當助益。

本計畫同時計畫於汛期前後分別針對研究區選定河道區段進行無人機拍攝並產製高解析度數值地形模型作為成果驗證之用，以評估雷達衛星影像進行河道裸露面侵淤監測之可行性，對我國崩塌災害管理與減災措施能有具體貢獻。

## 第二章 研究區與研究方法

### 第一節 研究區與汛期降雨事件

#### 一、研究區概況

本計畫選定台灣南部荖濃溪上游南橫公路復興至寶來一帶河岸沿線作為研究區(圖 2-1)，該區內兩岸多處崩塌、河道蜿蜒，地形高度落差大，大致由東北向西南遞減。研究區高程分布於 250~2,500 公尺之間，平均高度為 716 公尺，約有 82%之面積位於 1,000 公尺以下。坡度分布於 0~71.8 度，平均坡度為 26.9 度，地勢相當陡峭。研究區地屬熱帶海洋季風氣候，氣溫約在 19°C~21°C 間，以一月最低，七月最高。年降雨量約為 3,400 公厘，雨量集中於 5~10 月間，佔全年 90%，季節性豐枯明顯。研究區除部分河階台地分布有聚落建地外，其餘多為林地，佔研究區超過 85%。在 2009 年莫拉克颱風期間，本研究區內發生多處崩塌，傳出許多嚴重之土石流災情，並於河道內造成大量砂石堆積，寶來一帶河道有堆高情形，且復興一帶由於大型崩塌持續堆積形成堰塞湖，河段由堆積造成之高程變動情形明顯，適合作為本研究之試驗區，以檢視雷達技術進行高程測量之可行性。



圖 2-1、研究區 SPOT 衛星影像(A)寶來河段(B)復興河段

## 二、8 月 7 日降雨事件

盧碧颱風 2021 年 8 月 3 日 8 時於南海北部海面生成後向東移動，於 8 月 5 日侵台，5 日午間於廣東沿海登陸後減弱為熱帶性低氣壓，隨後受西南氣流影響，台灣本島中南部發生超大豪雨，8 月 7 日至 9 日連續三日中南部的降雨量高達 800 至 1,200 mm，農業損失約 4.3 億 (中央氣象局，2021)。研究區內復興地區河段，明霸克露橋遭到暴雨引發的土石流沖毀(圖 2-2a)，玉穗溪有大量土石堆積(圖 2-2b)。本研究利用雷達影像分析技術監測該區域河道侵淤狀況，並以空拍機建置之數值地形資料檢視雷達監測成果之正確性。





圖 2-2、研究區復興河段 8 月 7 日降雨事件後現況。a)明霸克露橋毀壞後施工狀況 b)玉穗溪河床大量土石堆積情形(照片於 2021 年 10 月 24 日拍攝)

## 第二節 研究方法

### 一、雷達影像收集

本研究選用之雷達影像 Sentinel-1 是歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 哥白尼計畫 (GMES) 中的地球觀測衛星。此計畫由兩顆衛星組成(Sentinel-1A 及 Sentinel-1B)，主要目的是用於土地與海洋的監測，Sentinel-1 的目標是為了在 ERS-2 及 ENVISAT 退役

後，持續提供 C-band 合成孔徑雷達資料。Sentinel-1 搭載四個不同的感測器：Stripmap Mode, Interferometric Wide Swath Mode, Extra Wide Swath Mode, Wave Mode。

- (1) Stripmap Mode：延續 ERS 及 ENVISAT 提供的成像模式，其提供高空間解析度的影像，空間解析度為 5 公尺。
- (2) Interferometric Wide (IW) Swath Mode：Sentinel-1 預設陸地的影像皆為 IW mode，其解析度從 5 公尺至 20 公尺。
- (3) Extra Wide (EW) Swath Mode：EW mode 提供寬幅及再返週期高的影像，此模式通常提供海洋及兩極地區的影像。
- (4) Wave Mode：此模式的影像結合全球海浪模式，可以協助了解開放海域波浪的方向，波長及波浪高度。

Sentinel-1 可於歐洲太空總署網站免費下載，臺灣地區可取得 VV 和 VH 極化影像。Sentinel-1 於 2014 年升空後，便開始對地球的陸地及海洋進行監測，並釋放資料供使用者下載，臺灣地區的第一張影像是 2014 年的 10 月底，本研究在 DEM 的產製作業上乃是使用 IW mode 產品。

## 二、雷達干涉方法進行高程測量與影像篩選

本研究使用合成孔徑雷達干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技術可以利用雷達資料的相位資訊來產製數值高程模型(DEM, Digital Elevation Model)，其原理為解算兩不同時期之干涉相位(interferometric phase) $\psi$ ，並解析各項因素造成的干涉相位貢獻，包含數值高程(DEM)、大地基準(flat)、地形位移變形(displacement)、大氣效應(atmosphere)以及其他雜訊干擾(noise)，可以下式表之：

$$\phi = \phi_{\text{DEM}} + \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}}$$

$$\left[ -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta} \right] \left[ -\frac{\Delta q}{\sin \theta} \cdot \frac{B_n}{R_0} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \right] \left[ +\frac{4\pi}{\lambda} d \right] \quad (1)$$

其中 DEM 與 flat 的部分即為因地形表面起伏造成之干涉相位貢獻，因此，在假設地形位移變形(displacement)、大氣效應(atmosphere)以及其他雜訊干擾可以忽略的前提下，由地形高程貢獻之相位差可由下式表之：

$$\phi_{\text{DEM}} = \phi - \phi_{\text{flat}} - \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (2)$$

在操作上，使用雷達資料需要兩時期之影像有較高的同調性(coherence)，但由於 Sentinel-1 C band 資料由於其訊號容易於植生地發生較強的散射，導致同調性不佳，使得產製之 DEM 資料之精度較差，而 EAS 針對此問題有下列建議可作為本研究進行雷達資料選取時的參考(DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges, EAS, 2020)：

- (1) 選取時間較為相近影像資料，可降低時間去相關性(temporal decorrelation)問題，並較能確保由地形位移變形造成之相位差為可

忽略的部分。

- (2) 選取較適合之衛星觀測垂直基線(perpendicular baseline)：150m 到 300m 之間，其理由為若兩期影像之基線過短，則解算之相位差分干涉可能不足以表現出由地形造成之貢獻；反之，若基線過長則可能導致較大的去相關性(decorrelation)，同樣不利於 DEM 產製。
- (3) 選取合適的大氣條件所取得之影像，其理由為大氣中的水氣有可能對訊號的相位產生影響，導致干涉相位的解算偏誤，因此建議選取天氣較晴朗、無雨、乾燥的天氣狀況取下得之影像。

本研究使用 ESA-Snap 以及 Snaphu 軟體進行合成孔徑雷達干涉(InSAR)分析、以及相位解纏(unwrapping)來產製 DEM，其步驟包含影像對位(corrigistration)、干涉圖解算(interferogram)、去訊號重合高值(deburst)、取子集(subset)、影像濾波(filtering)、相位解纏(unwrapping)、相位轉高程(phase to elevation)與距離-都卜勒校正(range-doppler correction)等步驟。而產制 DEM 後將同時配合同調性影像(coherence image)，僅擷取同調性較高之點位(例如 coherence>0.7)作為可信賴之高程測量點，盡可能確保高程測量成果的正確性。

### 三、應用裸露地指標進行河道變遷判釋

前述說明了使用 C-band 資料進行合成孔徑雷達干涉技術產製數值地形高程模型的主要限制為在林地、植生地區有較高的去相關性問題，相對而言，在建地、裸露地區容易有較高的同調性。本研究針對河道裸露的部分進行監測便是基於此理由。因此本研究將利用本研究團隊開發之裸露地指標(Bedrock Exposure Index, BEI)，來擷取影像中河道裸露地的區域，BEI 計算方法如下式：



$$BEI = \left( \frac{R_{\lambda}(1648nm) - R_{\lambda}(518nm)}{R_{\lambda}(1648nm) + R_{\lambda}(518nm)} \right) + NDVI * 0.5 \quad (3)$$

BEI 之值域為介於-1 到 1 之間，式中  $R_{\lambda}(518nm)$  以及  $R_{\lambda}(1648nm)$  可使用 Sentinel-2 光學衛星之藍光段(Blue, Band 2)以及短波紅外光(SWIR, Band 11)來進行計算，此指標前段為基於藍光以及短波紅外光之差異可以將水體、土壤(及岩屑)以及出露的母岩加以區分；另外，此公式包含了標準化差異植生指數( Normalized Difference Vegetation index, NDVI)，因此可強化植生與裸露地之差異。下圖 2-3 為使用 BEI 進行崩塌面上土壤、出露母岩進行區判之成果與配合航照與野外調查比對之範例，本研究認為使用 BEI 隨無法直接對河道侵淤的量體進行量測，但可以有助於判釋河道的土砂堆積分布變化。

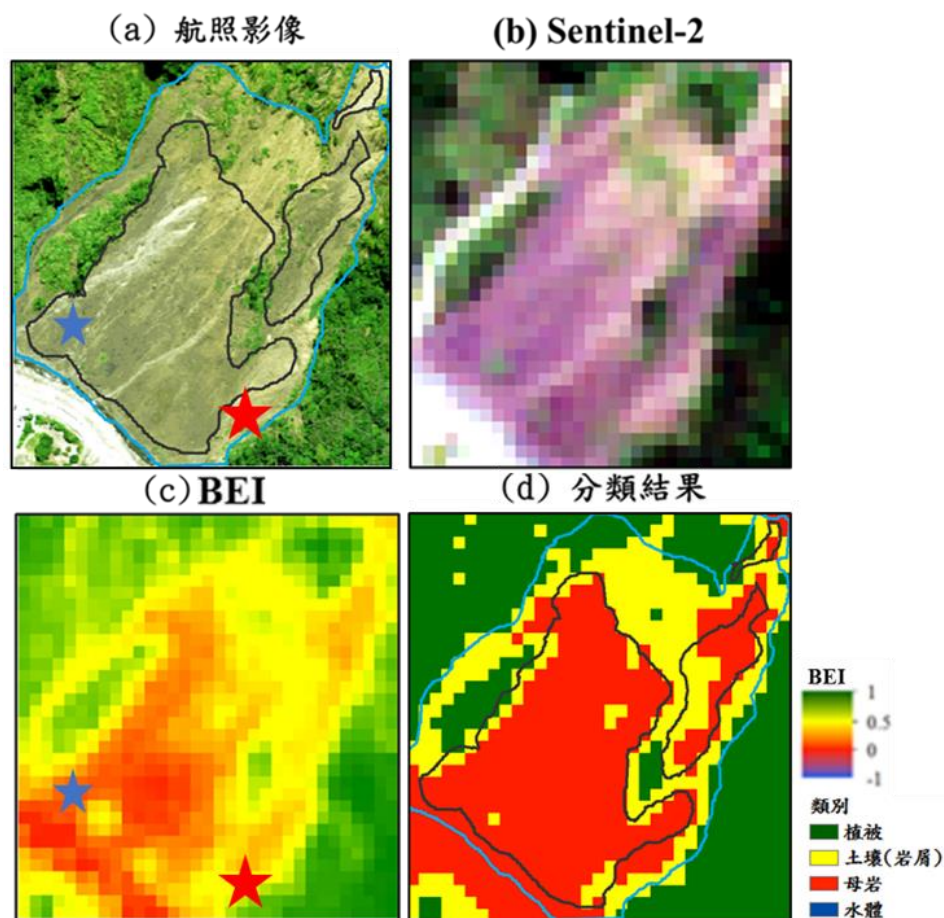


圖 2-3、應用 BEI 進行崩塌面上土壤、出露母岩進行區判

#### **四、成果驗證—無人機拍攝與數值地形產制**

本計畫將採用電腦視覺技術 SFM(structure from motion)，使用無人機拍攝之影像來建構地表三維資料，再以三維資料為基礎產生地表數值表面模型(Digital Surface Model, DSM)，本研究使用之無人機為 DJI Phantom 4 Pro(說明如表 2-1)，預計其拍攝資料所建立之 DSM 其空間解析度可達 0.5 米，高程誤差 2 米，並與其套疊正射影像建立三維立體模型(圖 2-4)，有助於河道侵淤之計算與現況的研判。

具體來說，本研究計畫於汛期前後分別針對研究區選定之河道區段：寶來河段以及復興河段(圖 2-1)進行無人機拍攝，並產製高階析度數值地形模型作為成果驗證之用，其目的乃是藉由比較雷達與無人機產製之數值地形模型，以評估雷達衛星影像進行河道裸露面侵淤監測之可行性。

表 2-1 無人飛機資料表- Phantom 4 Pro

Phantom 4 Pro	
	
<p>適用：即時性拍攝/正射影像拍攝/2000 萬畫素照片拍攝/4K 錄影</p> <p>單趟飛行可拍攝 &lt; 0.5 平方公里面積 (GSD &lt; 10cm)</p> <p>單趟最遠距拍攝錄影偵查可達 5km</p>	



圖 2-4 本研究團隊於 106 年創研計畫利用空拍資料建構寶來地區河道與鄰近邊坡之三維立體模型



## 第三章 研究成果

### 第一節 衛星影像篩選

如前章所述，本研究使用雷達資料需要兩時期之影像有較高的同調性(coherence)，本研究將選取時間較為相近影像資料、選取較適合之衛星觀測垂直基線(perpendicular baseline)，約為 150m 到 300m 之間，以及選取天氣較晴朗、無雨、乾燥的天氣狀況取下得之影像。

首先，本研究透過大氣水文研究資料庫收集研究區內自 2014 年 1 月 1 日至 2021 年 10 月 31 日之每日雨量紀錄(復興測站)，用以篩選出期間內無雨的日期。下圖 3-1 至圖 3-8 為復興站 2014 年至 2021 年之雨量紀錄，藉以選定少雨之日期。總體而言，本研究區於 11 月份至次年的 3 月份為較佳的取像季節，有較少的強降雨情形。

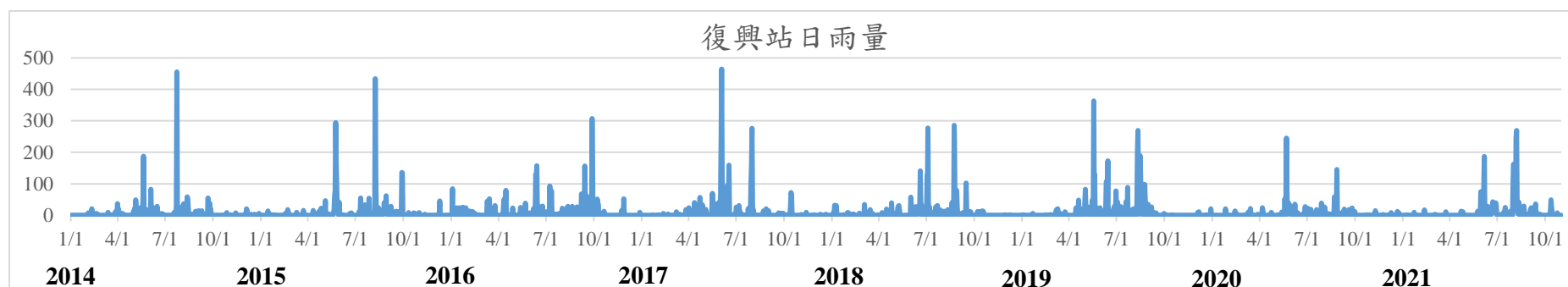


圖 3-1 復興站 2014-2021 雨量統計(統計至 2021/10/31)

初步篩選出少雨日期後，再輔以 NASA 提供之中尺度影像光譜儀(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)以及 EAS 之 Sentinel-2 光學影像，針對無雨日期的影像進行第二次篩選，挑出無雲遮蔽的日期。由於 MODIS 影像之時間解析度為一日，有助於本研究去確定雲影於研究區之遮蔽情形，下圖 3-2 為利用 MODIS 影像及 Sentinel-2 光學影像選取無雲影像以及篩除有雲影像的示意圖，其中紅框為研究範圍。

結合 MODIS、Sentinel-2 以及研究區當地雨量站(復興站)之資料，本研究統計研究區內於研究期間 2014 年—2021 年之間各月份無雲無雨之天數如表 3-1。表中可見，全年無雲雨天數約為 111.9 天，一般來說十月(12.7 天)至隔年三月(11.5 天)有較多的無雲雨天數。



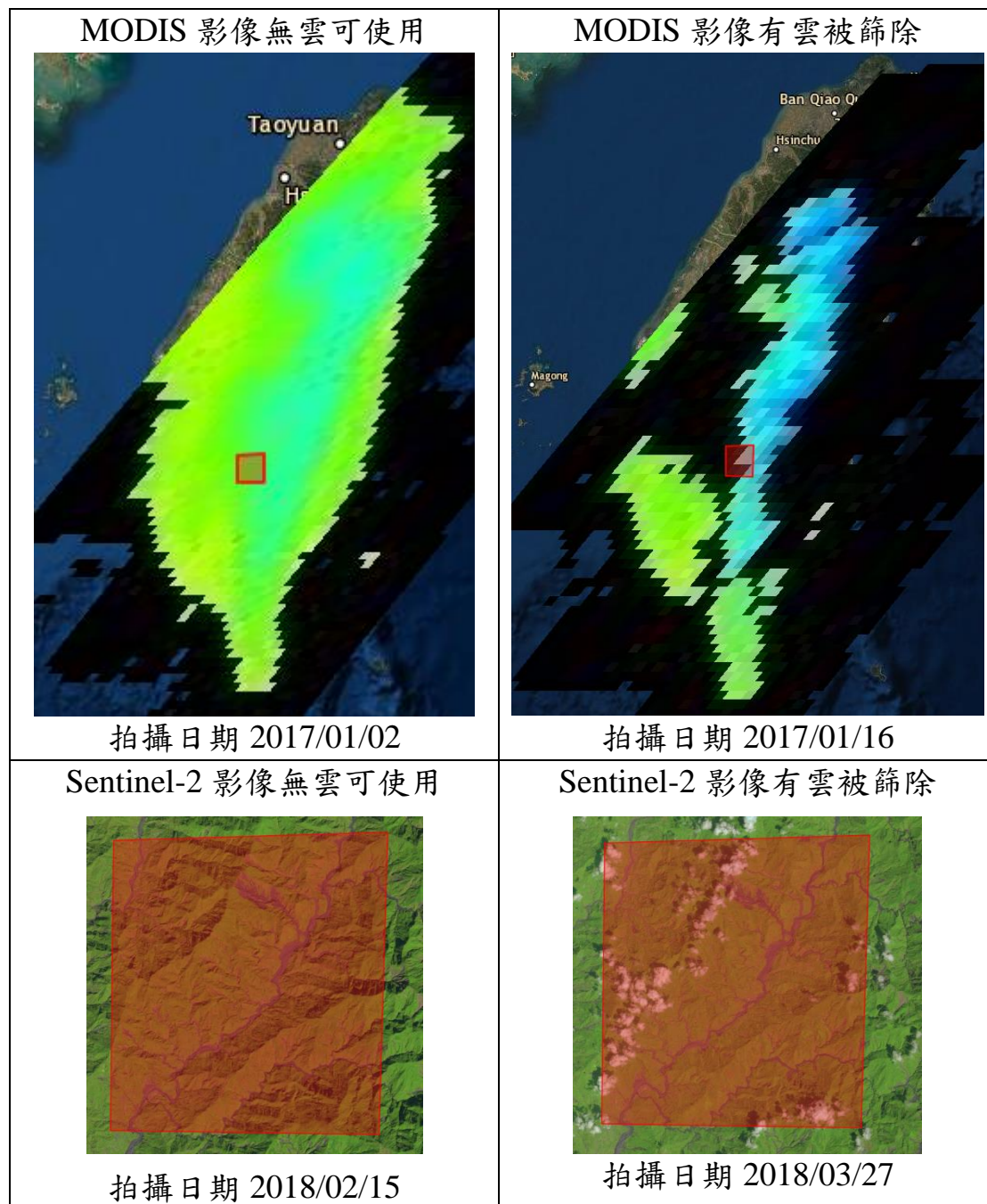


圖 3-2 利用 MODIS 及 Sentinel-2 篩選無雲影像示意圖

表 3-1 2014 年-2021 年無雲無雨統計天數表

年月	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	平均
一月	23	13	4	18	10	16	19	18	15.1
二月	9	13	8	12	7	13	19	20	12.6
三月	7	12	6	10	15	10	11	21	11.5
四月	5	12	8	7	5	12	5	12	8.3
五月	1	7	8	6	13	3	0	14	6.5
六月	2	8	7	5	1	6	10	1	5.0
七月	10	6	10	4	4	5	5	10	6.8
八月	7	5	3	7	1	8	4	5	5.0
九月	6	7	6	9	8	10	4	12	7.8
十月	17	11	12	16	8	19	5	13	12.7
十一月	15	16	10	10	17	21	12		14.4
十二月	5	11	11	13	18	16	5		11.3
總計	107	121	93	117	107	139	99	126	111.9*

\*平均值不含 2021 年

本研究透過前述篩選條件選取符合無雲無雨之日期，再進一步匹配 Sentinel-1 雷達影像於研究區之拍攝日期，並確立進行 DInSAR 分析之影像對之時間間隔為兩個月以內，同時比對兩期影像間之觀測垂直基線是否介於 150-300 公尺之間，若符合上述所有條件即為本次研究選取可使用於 DInSAR 分析之雷達影像，本研究選取出 8 對影像組合，整理如表 3-2，其中 2021 年之影像資料將用於監測 8 月 7 日降雨事件造成河道堆積之高程變化，並配合空拍機建置之數值高程資料檢視其正確性。



表 3-2 符合條件之 Sentinel-1 影像

年份	模式	衛星	影像日期	垂直基線差 (m)
2015	升軌	S1A	10/17	167
		S1A	11/10	
2018	降軌	S1A	02/18	158
		S1A	03/26	
2019	降軌	S1A	09/29	175
		S1A	10/23	
2019	降軌	S1A	10/23	162
		S1A	11/16	
2019	升軌	S1B	10/26	160
		S1B	11/19	
2020	升軌	S1A	06/04	174
		S1B	08/09	
2021	降軌	S1A	01/21	188
		S1A	02/14	
2021	降軌	S1B	09/21	219
		S1B	10/03	

## 第二節 現地測量與無人機拍攝

本計畫於研究區內於較無變動疑慮之人工結構物鄰近區域進行地面控制點測量，完成 50 個點位測量，其水平精度約在 0.71 公分至 1.12 公分之間，高程精度則為 1.16 至 1.87 公分之間，測量成果列於附件一。

本研究計畫於汛期前 5 月 4 日以及汛期後 8 月 24 日分別至研究區內復興至寶來一帶荖濃溪沿岸的崩塌地進行無人機拍攝，選取地點為利於無人機操作進行空拍，因此選擇兩處鄰近河道之大型崩塌地，監測此兩處大型崩塌對河道造成侵淤的情況。本計畫空拍日期整理於表 3-3，無人機拍攝位置如圖 3-3 所示，空拍正射影像如圖 3-4 所示，另外也取得水保局提供之 8 月 11 日無人機建置之數值高程資料。

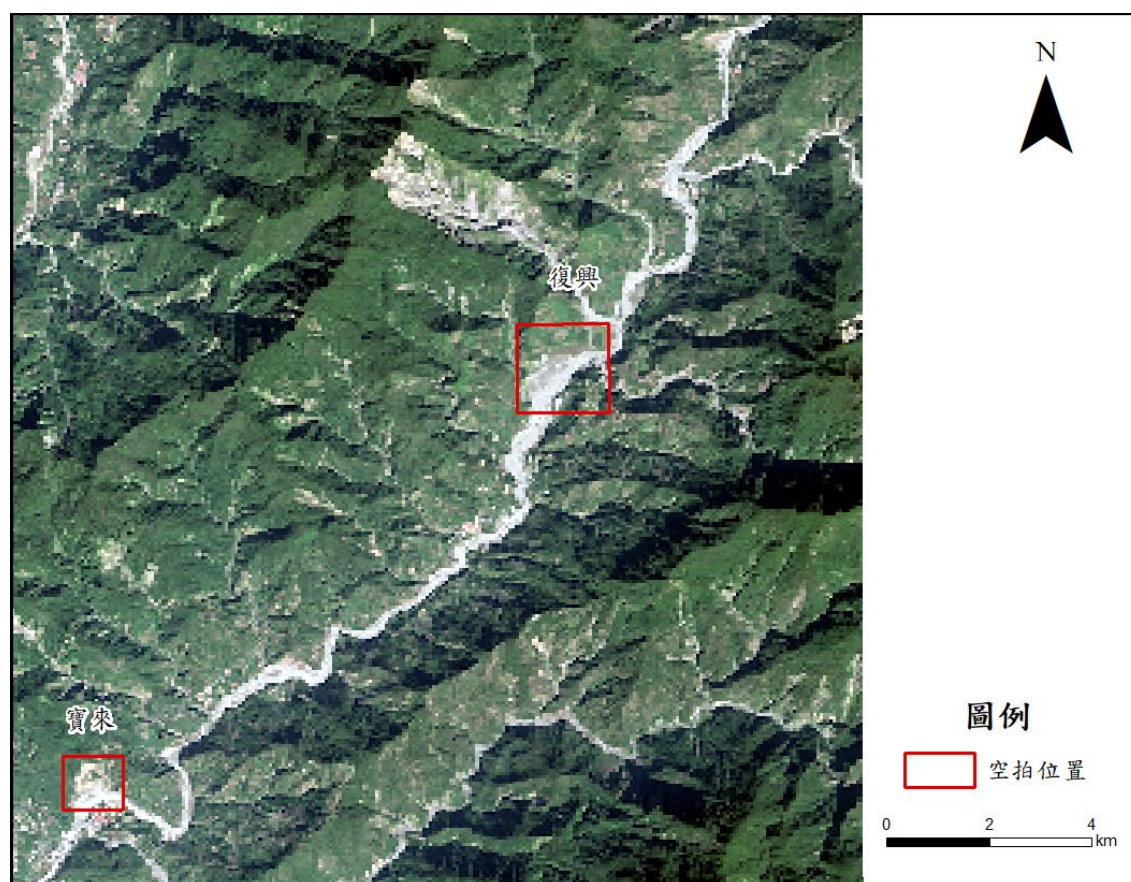


圖 3-3 無人機空拍調查位置

表 3-3 無人機空拍資料說明

日期	編號	空拍位置	備註
2021/05/04	a	寶來	
2021/05/04	b	復興	
2021/08/24	c	寶來	
2021/08/11	d	復興	水保局提供資料

從空拍之正射影像可以發現，在寶來河段部分，其汛期前後(圖 3-4a 及圖 3-4c)變化主要為河道位置有明顯的變化，且汛期後其河道攻擊坡腳有明顯的堆積，顯示為邊坡崩落之土石堆積於此。而復興河段在汛期前後(圖 3-4b、圖 3-4d)則完全不同，汛期後除河道位置改變外、河道加寬外，原本河道已完全被土砂堆積覆蓋。

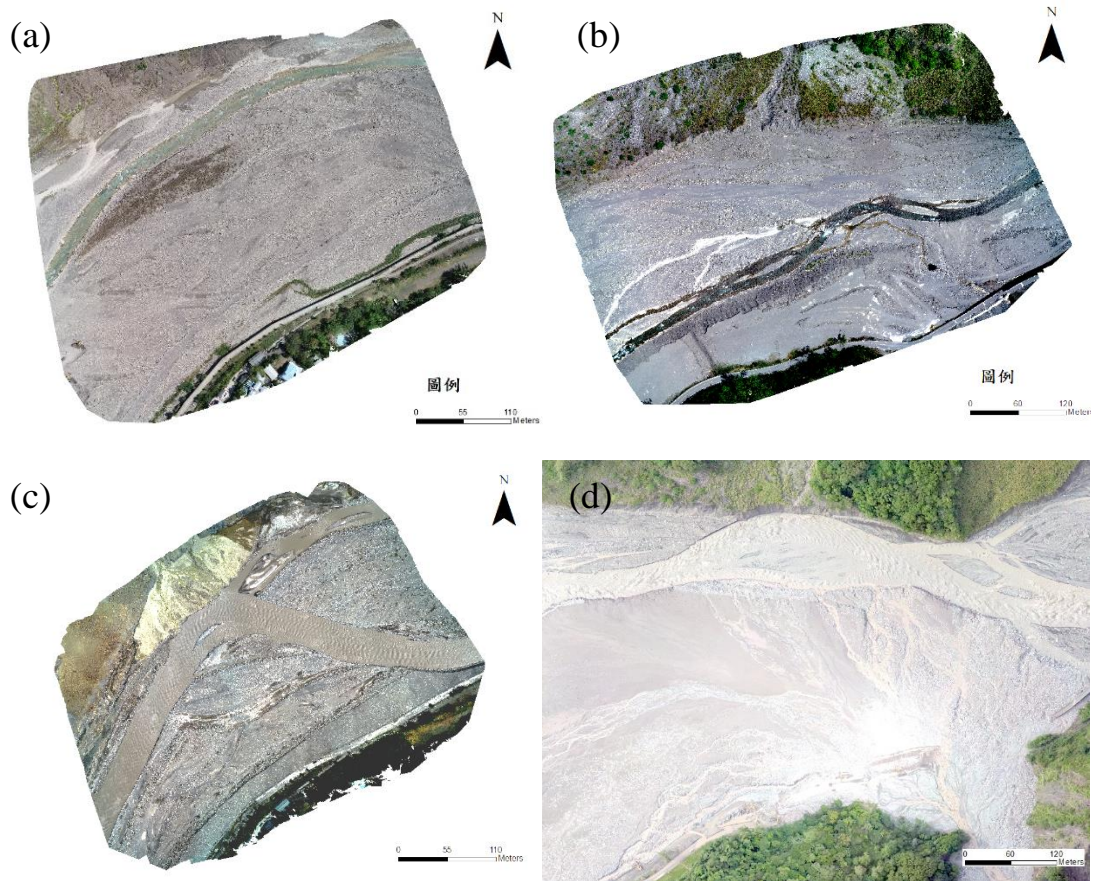


圖 3-4 空拍正射影像(a)汛期前寶來地區，(b)汛期前復興地區，(c)汛期後寶來地區，(d)汛期後復興地區(水保局提供)

本研究利用無人機拍攝之影像資料建立 DSM，其空間解析度均為 0.5 公尺，高程誤差均為 1.2 公尺，圖 3-5 為寶來與復興產製之 DSM。此 DSM 資料將於後續應用於比對 InSAR 之高程測量成果，以評估使用雷達資料監測河道侵淤的可行性。



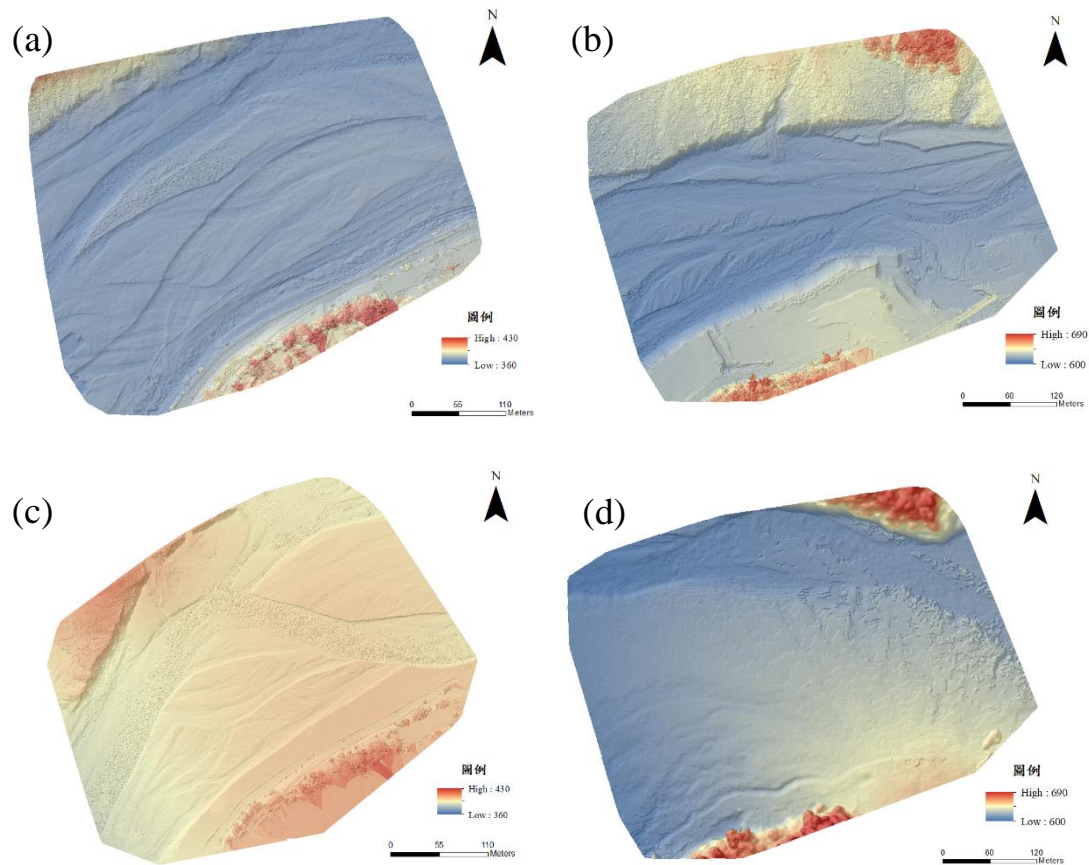


圖 3-5 空拍建置 DSM (a)汛期前寶來地區，(b)汛期前復興地區，(c) 汛期後寶來地區，(d)汛期後復興地區

### 第三節 應用 BEI 檢視河道變化

本研究蒐集了 2021 年 2 月 19 日以及 8 月 23 日汛期前後的 Sentinel-2 光學衛星影像，應用 BEI 指標，檢視 8 月 7 日降雨事件對河道變遷的影響。BEI 指標之利用為標記出河道中裸露地的區域，此裸露區域多為土石堆積造成，可視作河道中砂石堆積區域。本研究區寶來以及復興河段於汛期前後的 BEI 比較成果可圖 3-6 與圖 3-7。

首先，寶來河段部分，從圖 3-6 可以發現汛期後其河道攻擊坡面上有發生岩體裸露(紅色)面積增加情形，也就是坡面崩塌發生，且河道明顯被土砂堆滿，且河道有從靠近攻擊坡的位置移至較中央的區域，

顯示坡腳有從坡面崩落之土石堆積，致使河道偏移，且 BEI 的判釋成果與空拍正射影像有良好的對應關係(黑色圖框內為對應正射影像範圍)。

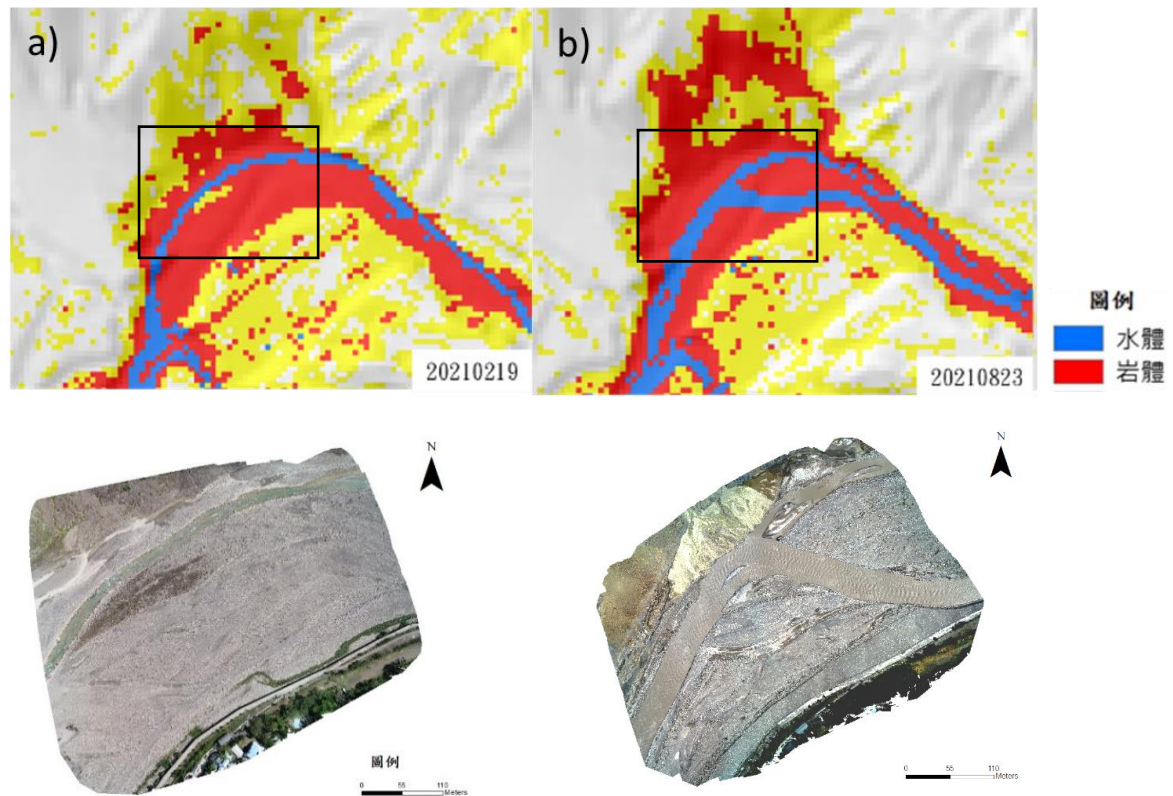


圖 3-6 寶來河段汛期後 BEI 圖(a)為汛期前，(b)為汛期後。

圖 3-7 顯示了復興河段的裸露地變化，從圖中可以發現汛期後其河道明顯被土砂堆滿，包括兩岸支流均有土砂堆積情形，且上游處有少部份河道堰塞的情形，且 BEI 的判釋結果也與空拍正射影像成果相符(黑色圖框)。

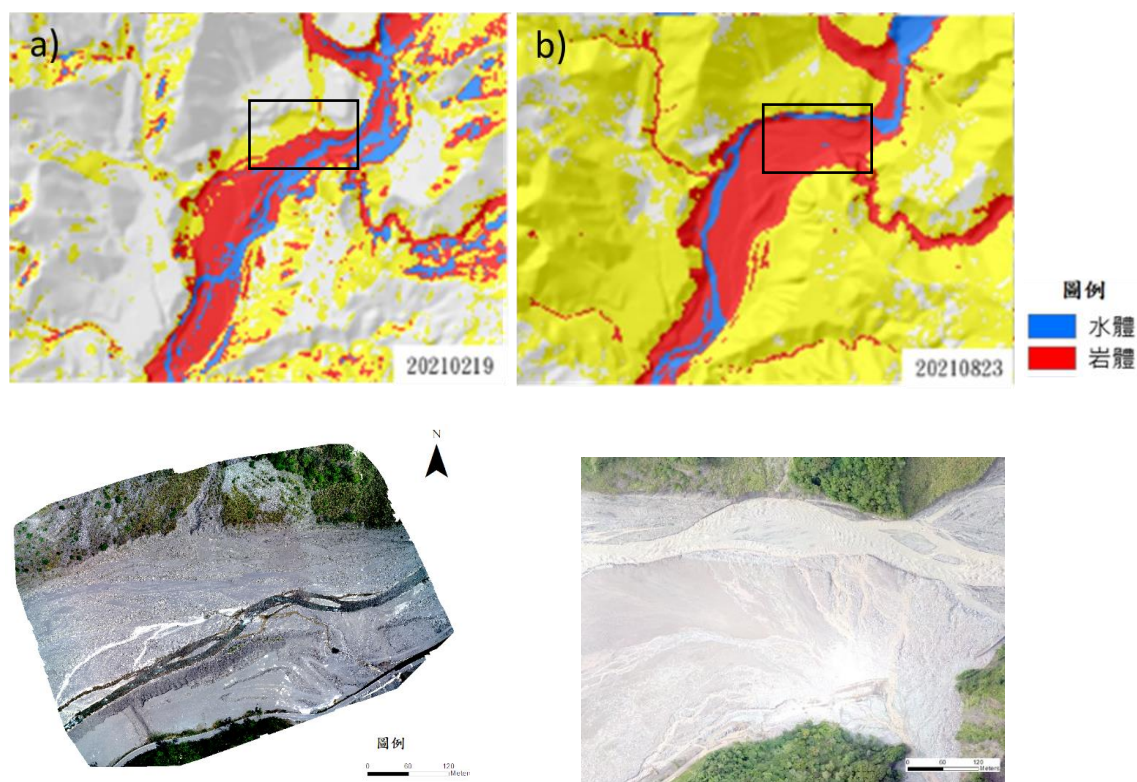


圖 3-7 復興河段汛期後 BEI 圖(a)為汛期前，(b)為汛期後。

#### 第四節 InSAR 河道裸露面高程測量成果

##### 一、雷達極化資料比較

InSAR 分析中，匹配影像的同調性(coherence)為相當關鍵的影響因素，在進行 InSAR 分析前，本計畫先行檢視不同極化觀測資料(VV 極化與 VH 極化資料)的同調性差異。首先，如圖 3-8 所示，高同調性的點位主要出現在地表的裸露面上，如河道、崩塌面、地表人工建物等地，特別是河道上的裸露面有較多的高同調性點位。另外，圖 3-8a 與圖 3-8b 分別顯示了 VH 以及 VV 之極化資料差異，就同調性問題上，VV 極化的雷達影像對有較佳的同調性，具有較多的高同調性匹配點位，較適合進行本研究進行高程量測。

圖 3-9 為高同調性點位(coherence $\geq$ 0.7)於本計畫空拍選址位置(寶



來以及復興河段)上的分布情形，同樣也顯示出了 VV 極化資料有較多高同調性的點位，因此，本研究後續進行 InSAR 分析時，將著重使用 VV 極化資料進行之。

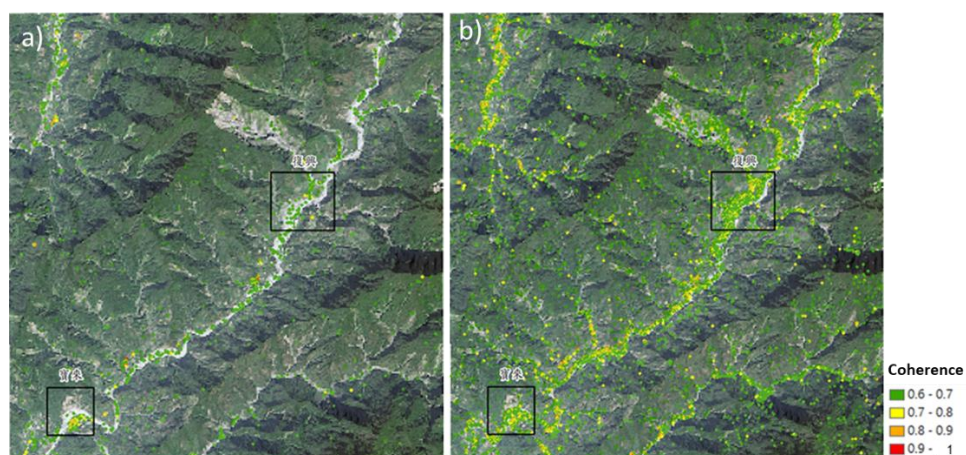


圖 3-8 InSAR 雷達影像對同調性 Coherence 分布情形圖，(a)VH 極化資料，(b)VV 極化資料。

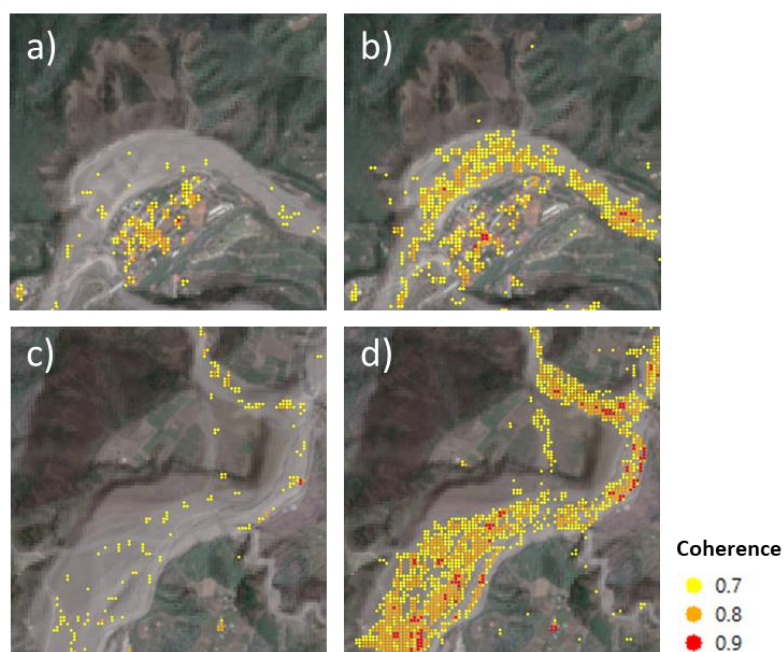


圖 3-9 寶來以及復興河段同調性分布情形。(a)為寶來河段 VH 極化資料，(b) 寶來河段 VV 極化資料，(c) 復興河段 VH 極化資料，(d) 復興河段 VV 極化資料。



## 二、InSAR 高程測量成果

本研究利用 VV 極化資料進行 InSAR 之 DEM 產製，為確保高程量測成果的可性度，本研究僅擷取高同調性( $\text{coherence} \geq 0.7$ )之點位高程值(如圖 3-3、圖 3-4)。2015 年 2018、2019、2020 以及 2021 汛期前、後之高程量測成果列於附錄二，表 3-4 列出各期高程測量成果與地面控制點之高程平均誤差以及其誤差之方均根(Root Mean Square Error, RMSE)，整體來看，各期平均誤差都在 1 公尺上下，但 RMSE 值均在 10 公尺以上。

**表 3-4 各期高程測量成果與地面控制點之誤差統計**

年期	影像對日期		統計值(公尺)	
2015	前期	10/17	平均誤差	1.2
	後期	11/10	RMSE	11.58
2018	前期	02/18	平均誤差	-1.6
	後期	03/26	RMSE	10.90
2019	前期	10/26	平均誤差	1.2
	後期	11/19	RMSE	13.95
2020	前期	06/04	平均誤差	-0.9
	後期	08/09	RMSE	12.33
2021(汛期前)	前期	01/21	平均誤差	1.04
	後期	02/14	RMSE	14.70
2021(汛期後)	前期	09/21	平均誤差	1.3
	後期	10/03	RMSE	11.67

## 三、2021 年汛期前後河道變化監測

本研究比較 2021 年汛期前後之高程變化(如圖 3-10)，其變化為汛期後高程減去汛期前高程之後的高程分布情形。從圖 3-10 可以看

出研究區河道裸露面的高程變化的分布情形，寶來河段下游有部分侵蝕(圖 3-10a)，其餘區域主要為堆積狀態，大致上有 7-10 公尺的堆高。復興河段(圖 3-10b)的上游段堆積則可達 20 公尺以上。

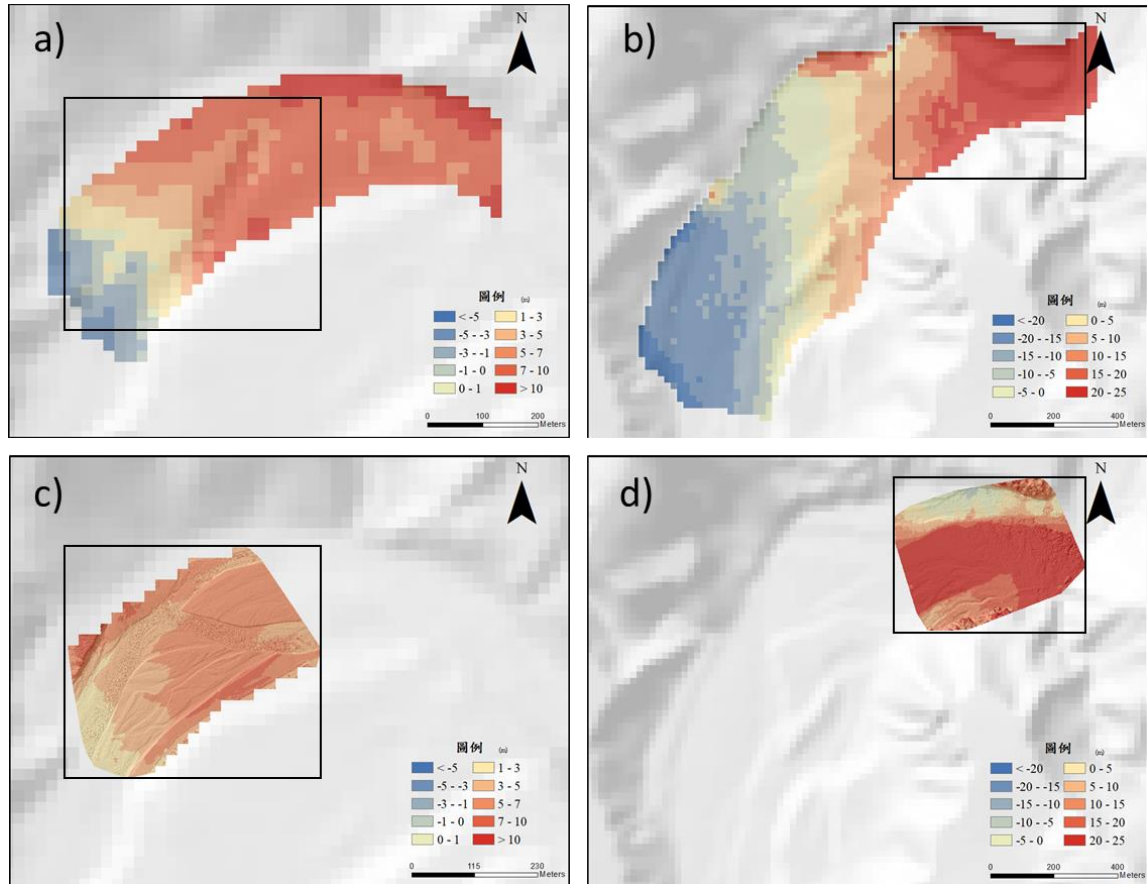


圖 3-10 2021 年汛期前後 InSAR 所得之(a)寶來以及(b)復興河段之高程變化分布，以及空拍建置之 DSM(c)寶來以及(b)復興河段之高程變化分布。

將兩河段之雷達高程測量成果與空拍機建置之 DSM 進行比較後發現，雷達高程測量於寶來河段之堆積處有部分高估情形，而在復興河段上游階地位置有較大的誤差。表 3-5 統計了 InSAR 與空拍建置之 DSM 所得之高程變化(空拍 DSM-InSAR 高程)，可以發現此兩資料在寶來地區最大誤差可達 7.89 公尺，平均-2.32 公尺，標準差達 2.37 公

尺。復興地區則有較大的誤差，最大可達 23.2 公尺，平均為 2.42 公尺，標準差達 6.47 公尺。

**表 3-5 空拍 DSM 與 InSAR 高程變化測量比對**

河段		寶來	復興
統計值 (公尺)	最大值	-7.89	11.0
	最小值	1.36	-23.2
	平均值	-2.32	2.42
	標準差	2.37	6.47

基於以上計算之測量誤差，本研究建議此技術較適合應用在河道侵淤較明顯、高程變化達 10 公尺以上之大型土砂運移之事件，如颱風豪雨肇生之土石流、堰塞湖之形成或潰堤此等劇烈地形變化事件，對於變動較小之河道侵淤量測則較不適用。

## 第五節 其他試驗

### 一、PS-InSAR 試驗

本研究另外也利用 Sentinel-1 影像進行永久散射體雷達干涉測量 (Permanent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR) 的分析，影像資料的時間是由 2015 年 3 月 15 日至 2021 年 7 月 17 日，包含升軌模式(99 幅)及降軌模式(38 幅)資料(見表 3-6)。

**表 3-6 Sentinel-1 影像收集列表**

年份	升軌	降軌
2015	14	3
2016	6	5
2017	10	5
2018	15	4
2019	19	6

2020	20	8
2021	15	7
合計	99	38

本研究以 Descending 影像的 VV 極化模式為例，在寶來河段所得到的圖 3-11a 可見 PS 控制點中同調性 $>0.7$  的點位，圖 3-11b 則為振幅穩定指數(Amplitude Stability Index, ASI) $>0.7$  的 PS 點，而同調性與 ASI 同時 $>0.7$  的 PS 點如圖 3-12。圖中顯示高同調性或高 ASI 的 PS 點都集中在人工建物上面，河道上幾乎沒有 PS 點，因此較不適合本次研究，回應本研究認為 PS-InSAR 技術難以直接應用在變動劇烈地表之高程測量工作。

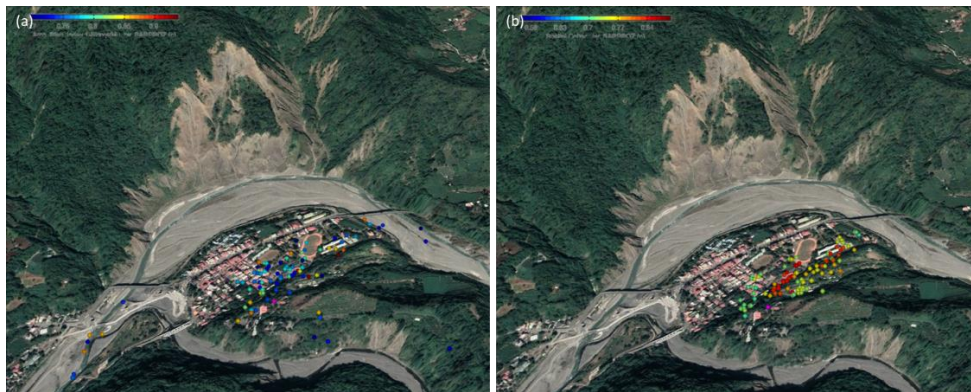


圖 3-11 寶來河段 PS 點分布情形，(a)同調性 $>0.7$ ，(b)ASI $>0.7$



圖 3-12 寶來河段同調性與 ASI 皆 $>0.7$  的 PS 點分布情形

## 二、使用不良天候狀態取像資料進行 InSAR 試驗

為說明於天候狀態良好時取像之重要性，本研究也選取三類不同天候狀態時取得之影像進行 InSAR 高程估計，分別為前期有雲、前期有雲後期有雨以及前後期都有雨的影像對，將計算結果地面控制點資料(附錄一)比對之與分析結果如表 3-7，在天候不良的期況下，平均誤差則超過 3 公尺以上(天候良好時平均誤差為 1 公尺上下)，RMSE 則高達 20 公尺左右(天候良好時 RMSE 約為 10 公尺上下)，相比於天候後良好取像所得之誤差約為 3 倍，顯示天候狀況對 InSAR 分析有明顯的影響，在影像選取時必須考慮之。

表 3-7 不良天候取得影像之 InSAR 高程測量結果

天候狀態	影像對日期		統計值(公尺)	
前期有雲	前期	2015/04/23	平均誤差	3.43
	後期	2015/05/17	RMSE	25.82
前期有雲	前期	2019/06/01	平均誤差	-3.97
後期有雨	後期	2019/06/13	RMSE	30.90

前後期均有 雨	前期	2020/12/15	平均誤差	3.23
	後期	2021/01/09	RMSE	27.95

## 第四章 結論

本研究計畫提出一基於雷達衛星影像之方法，產製不同時期之數值地形資料以進行河川裸露地侵淤之監測。本計畫之工作目標為：

- 1.研究區之雷達影像 Sentinel-1 之資料收集及影像前處理工作。
- 2.地面控制點測量以及無人機空拍產製 DSM。
- 3.應用 InSAR 技術產製河道裸露面之高程資料。
- 4.河道侵淤初步分析成果與可行性評估。

首先，在影像收集的部分，研究區內較佳的雷達影像取像時間為 11 月至隔年 3 月之少雨的乾季，且使用 VV 極化之雷達資料可以有較好的同調性，最後取得 8 組合適之影像對進行 InSAR 分析。

其次，本計畫於寶來地區於較無變動疑慮之人工結構物鄰近區域進行地面控制點測量，完成 50 個點位測量，成果如表 3-3 所示，其水平精度約在 0.71 公分至 1.12 公分之間，高程精度則為 1.16 至 1.87 公分之間，測量成果列於附件一。另外，本研究計畫於汛期前 5 月 4 日以及汛期後 8 月 24 日分別至研究區內復興至寶來一帶荖濃溪沿岸的崩塌地進行無人機拍攝，選取地點為利於無人機操作進行空拍，因此選擇兩處鄰近河道之大型崩塌地，監測此兩處大型崩塌對河道造成侵淤的情況，另外也取得水保局提供之 8 月 24 日無人機建置之數值高程資料。

關於應用 InSAR 技術產製河道裸露面之高程資料的部分，本研究發現高同調性的點位主要出現在地表的裸露面上，如河道、崩塌面、地表人工建物等地，且使用 VV 極化的雷達影像對有較佳的同調性，具有較多的高同調性匹配點位，適合進行 InSAR 試驗，最後本計畫產製 2015 年 2018、2019、2020 以及 2021 汛期前、後等高程量測成果(附錄二)，整體來說，本計畫產製之高程資料平均誤差都在 1 公尺



上下，但 RMSE 值可達 10 公尺。但若是使用天候不佳時取得之影像資料進行分析，期誤差可達 3 倍之多。

最後，本研究比較研究區寶來、復興兩河段 2021 年汛期前後之高程變化，可以發現寶來河段下游有部分侵蝕(圖 3-10a)，其餘區域主要為堆積狀態，大致上有 7-10 公尺的堆高。復興河段(圖 3-10b)的上游段堆積則可達 20 公尺以上。而此兩河段之雷達高程測量成果與空拍機建置之 DSM 進行比較後可知雷達高程測量於寶來河段之堆積處有部分高估情形，最大誤差可達 7.89 公尺，平均-2.32 公尺，RMSE 達 2.37 公尺。在復興河段則是在上游階地位置有較大的誤差，最大可達 23.2 公尺，平均為 2.42 公尺，RMSE 達 6.47 公尺。

透過此研究可知，利用 Sentinel-1 C-band 雷達資料解算之高程資料誤差 RMSE 約為 2.37 公尺-6.47 公尺之間，因此本研究建議此技術較適合應用在河道侵淤較明顯、高程變化達 10 公尺以上之大型土砂運移之事件，如颱風豪雨肇生之土石流、堰塞湖之形成或潰堤此等劇烈地形變化事件。雖然使用光學影像對亦可產製高精度之數值地形，然而本研究使用之雷達資料其覆蓋面積廣大，相較於光學資料，可以有效率地進行大範圍的河道劇烈地形變動之監測，對於集水區管理及土砂災害之防治能有相當的助益。



## 參考文獻

1. 王國隆、林俊廷（2014）運用 ALOS PALSAR 雷達影像之差分干涉成果於潛在崩塌地調查—以眉溪流域為例，航測及遙測學刊，19(3)：253-265。
2. 吳彥誼、林士淵、任玄（2020）合成孔徑雷達干涉產製數值高程模型影響因素評估—以季節像對與多視處理為例，航測及遙測學刊，255(2)：115-128。
2. 陳柔妃等（2015）運用雷達影像進行莫拉克颱風災區大規模潛勢區位之可行性評估，經濟部農委會水土保持局，計畫編號：SWCB-104-069。
3. Bovenga, F.; Wasowski, J.; Nitti, D.O.; Nutricato, R.; Chiaradia, M.T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sens. Environ.* 2012, 119, 272–285.
4. Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini, G., Del Conte, S., Friedl, B., Schneiderbauer, S., Iasio, C., Vlcko, J., Greif, V., Proske, H., Granica, K., Falco, S., Lozzi, S., Morak, O., Arnaud, A., Novali, F., Bianchi, M., 2016. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4: 92-108.
5. Chiang SH., and Chang KT, 2011. The Potential Impact of Climate Change on Typhoon-Triggered Landslides in Taiwan, 2010-2099. *Geomorphology*, 133: 143-151.

6. Colesanti, C., Wasowski, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.* 2006, 88, 173–199.
7. Correa-Muñozl, N. A., Murillo-Feo, C. A., 2018. Detection of Landslides with SAR Polarymetry: Case Study of South-eastern Colombia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3/W4, GeoInformation for Disaster Management. Istanbul, Turkey.
8. EAS Sentinel 1 web: <https://sentinel.esa.int/>
9. Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K. T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem, *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66
10. Hopper, A., Zebker, H. A., Segall, P., Kampes, B., 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23611.
11. Konishi, T., Suga, Y., 2018. Landslide detection using COSMOSkyMed images: a case study of a landslide event on Kii Peninsula, Japan, *European Journal of Remote Sensing*, 51:1, 205-221, DOI: 10.1080/22797254.2017.1418185
12. Lee, J.S.,1981. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol.17:24-32.
13. Mondini, A. C., 2017. Measures of Spatial Autocorrelation Changes in Multitemporal SAR Images for Event Landslides Detection, *Remote Sensing*, 9(6), 554; doi:10.3390/rs9060554.

14. Mondini, A. C., Chang, K. T., Chiang, S. H., Schlögel, R., Notarnicola, C., Saito, H., 2017. Automatic mapping of event landslides at basin scale in Taiwan using a Montecarlo approach and synthetic land cover fingerprints. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 63: 112-121.
15. Raspini, F.; Moretti, S.; Fumagalli, A.; Rucci, A.; Novali, F.; Ferretti, A.; Prati, C.; Casagli, N. The COSMO-SkyMed constellation monitors the Costa Concordia wreck. *Remote Sens.* 2014, 6, 3988–4002.
16. Shibayama, T., Yamaguchi, Y., Yamada, H., 2015. Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle. *Remote Sens.* 7, 15424-15442; doi:10.3390/rs71115424.
17. Shimada, M., Watanabe, M., Kawano, N., Ohki, M., Motooaka, T., 2014. Detecting Mountainous Landslides by SAR Polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X-band SARs. *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* Vol. 12, No. ists29, pp. 9-15.
18. Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M., Yamada, H. 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43, 1699–1706.



## 附錄

### 附錄一、地面控制點量測成果

Point ID	Y	X	高程	地點備註
107012401	2556486.423	219612.8099	430.3284	寶來國中
107012501	2558538.065	221174.6539	549.4437	興中國小
107012502	2558538.065	221174.6539	629.1122	綜合運動場
107012503	2556487.443	219617.6372	430.8974	寶來國中
107012504	2556278.794	219105.266	425.4903	民宿
107012505	2556279.032	219107.0618	427.1878	民宿
110082401	2556224.546	219302.5904	416.0115	寶來建地
110082402	2556307.217	219319.486	418.0025	寶來建地
110082402	2556428.478	219439.0955	419.9935	寶來建地
110082402	2558668.82	221100.4745	538.458	高中里建地
110082402	2561907.12	225980.1681	616.107	綜合運動場
110082402	2561987.708	226040.7578	624.071	桃源區建地
110082402	2561943.787	225880.9491	621.0845	桃源區公所
110082402	2565506.033	228677.366	647.605103	明霸克露橋道路
110082402	2565521.908	228680.541	647.770203	明霸克露橋道路
110082402	2564526.015	228160.8983	825.065186	復興崩塌附近建物

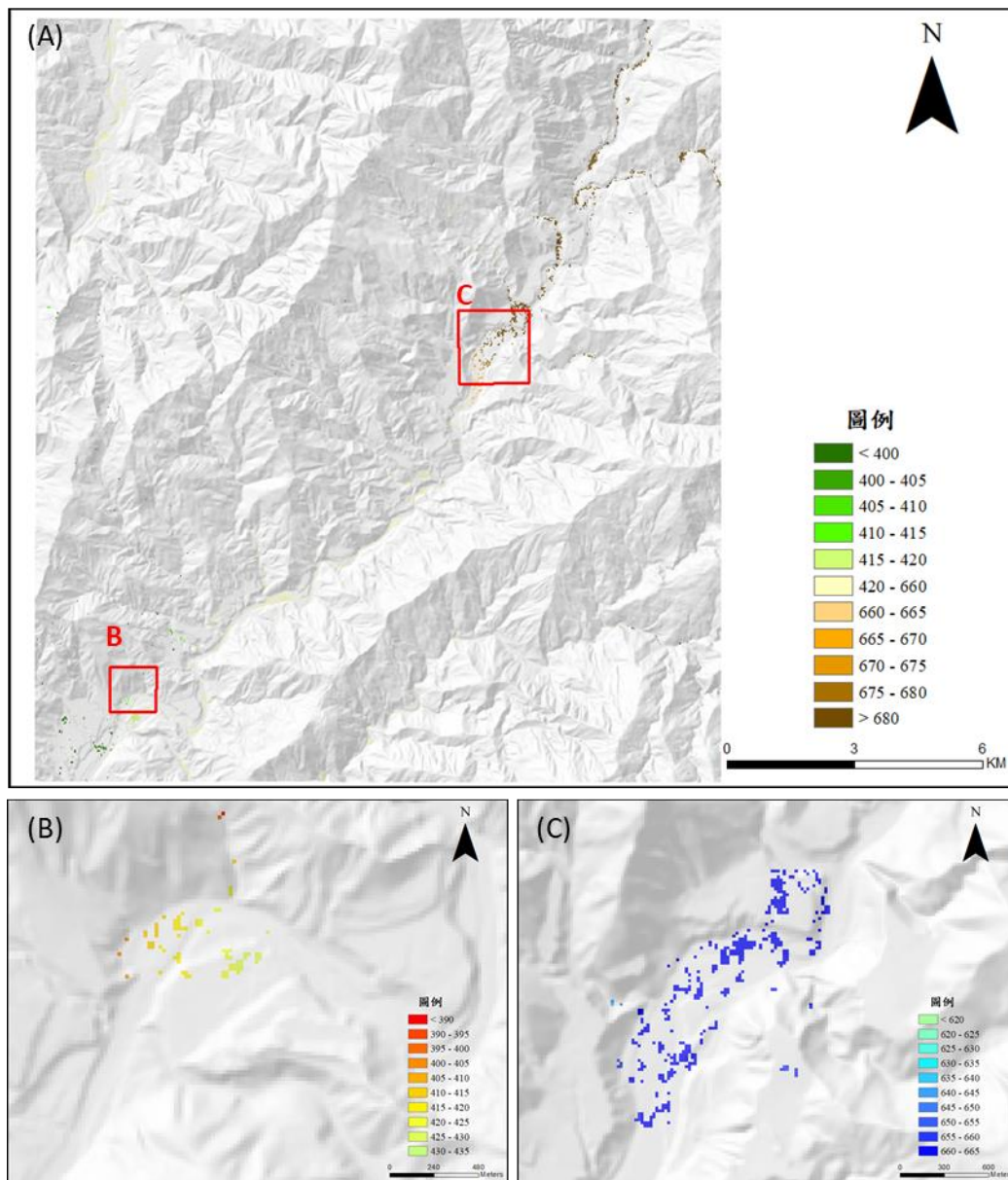
整合多時序雷達影像與紋理資訊進行崩塌地長時距監測

110082402	2564532.528	228187.2004	825.659485	復興崩塌附近 建物
110082402	2568505.52	230101.7292	716.6525	復興里建物
110082402	2568446.013	230059.5694	715.657	復興里建物
110082402	2568545.232	230060.8924	717.648	復興里建物
110082402	2556471.362	219235.0953	407.519318	寶來建地
110082402	2556559.788	219286.9314	391.098602	寶來河岸堤防 道路
110082402	2556524.723	219219.8494	389.798676	寶來河岸堤防 道路
110082402	2556567.411	219520.7017	423.9755	寶來建地
110082402	2556506.936	219540.0132	422.98	寶來建地
110082402	2556265.034	219202.0626	418.0025	寶來建地
110082402	2556164.411	219200.538	416.0115	寶來建地
110082402	2556206.592	219379.4231	417.007	寶來建地
110082402	2556346.854	219438.8821	418.0025	寶來建地
110082402	2556407.256	219640.1172	425.9665	寶來國中
110082402	2558767.239	221240.7702	542.44	高中里道路
110082402	2559205.709	221640.7549	573.3005	高中里道路
110082402	2559183.22	221619.5882	573.3005	高中里道路
110082402	2561984.667	226141.3264	618.098	桃源區道路
110082402	2562027	226001.7584	628.053	桃源區建地
110082402	2563326.68	226960.919	594.206	勤和里建地
110082402	2563089.613	226958.8023	589.2285	勤和里建地

110082402	2563102.313	226982.0857	589.2285	勤和里建地
110082402	2568367.532	230021.3605	712.6705	復興里建物
110082402	2568546.126	230001.5167	717.648	復興里建物
110082402	2568523.901	230161.0608	736.5625	復興里道路
110082402	2564803.751	227784.8186	618.369263	南橫公路近復興崩塌
110082402	2565304.807	228545.2723	642.605347	明霸克露橋道路
110082402	2565258.372	228488.519	643.56604	明霸克露橋道路
110082402	2565325.682	228581.7848	644.587402	明霸克露橋道路
110082402	2563224.886	226940.8357	592.215	勤和里建地
110082402	2564493.39	228186.9375	822.509766	復興崩塌附近建物
110082402	2556405.281	219319.8724	419.9935	寶來建物
110082402	2556484.954	219479.3173	420.989	寶來建物
110082402	2556518.292	219207.0605	390.311768	寶來河岸堤防道路

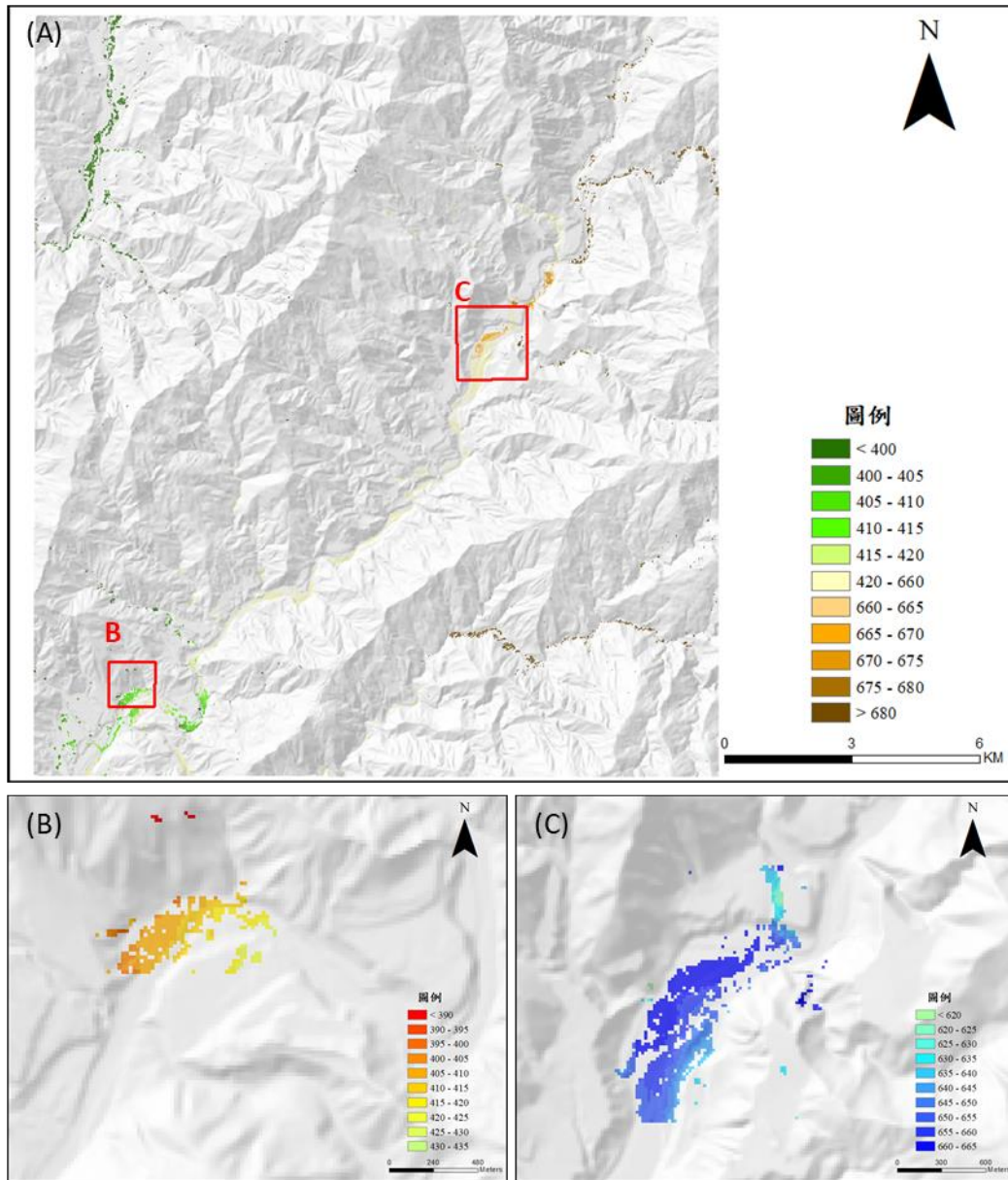
## 附錄二、InSAR 技術之河道裸露面高程量測成果

2015 年研究區河道裸露面(a)寶來以及(b)復興河段之高程分布

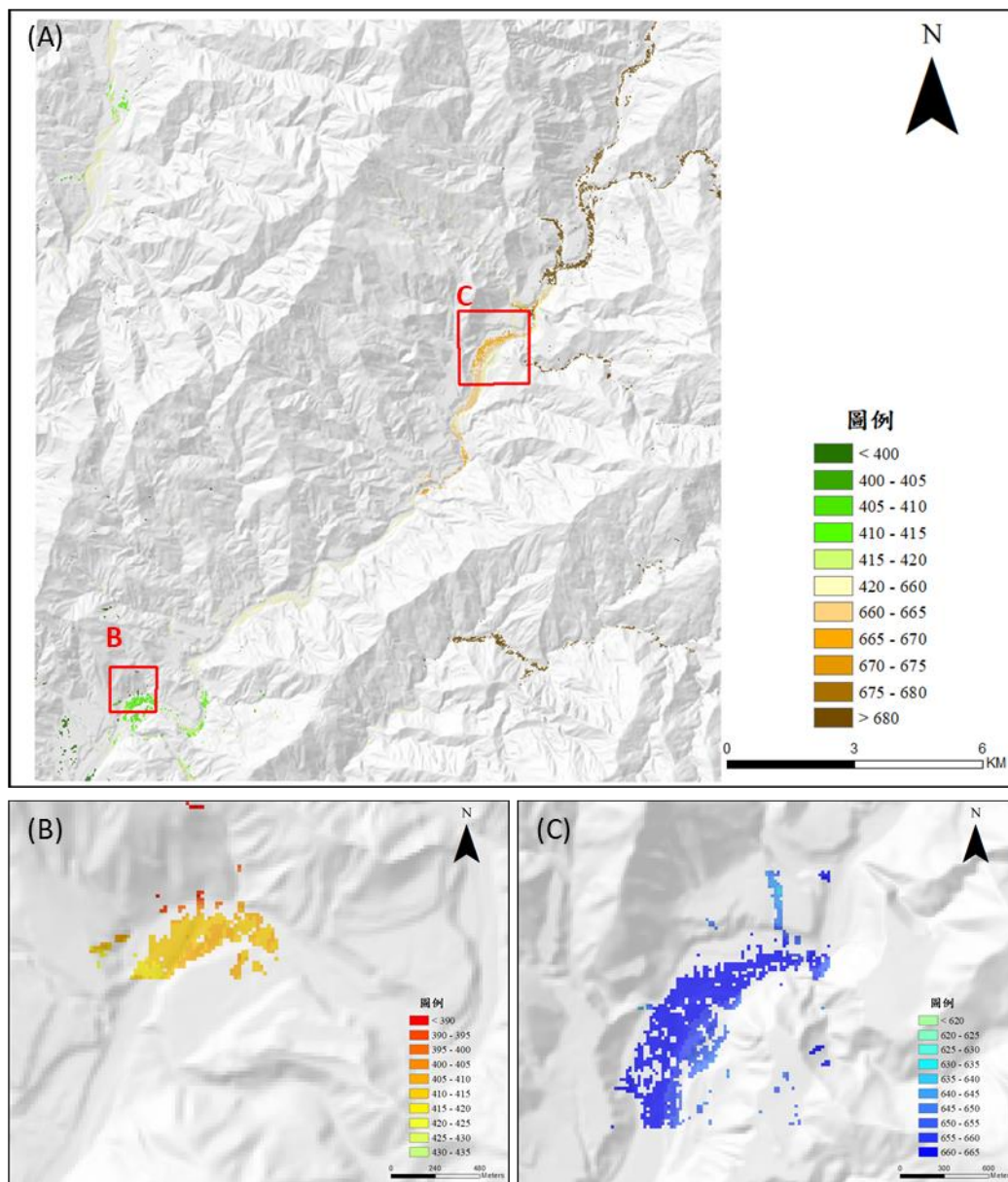




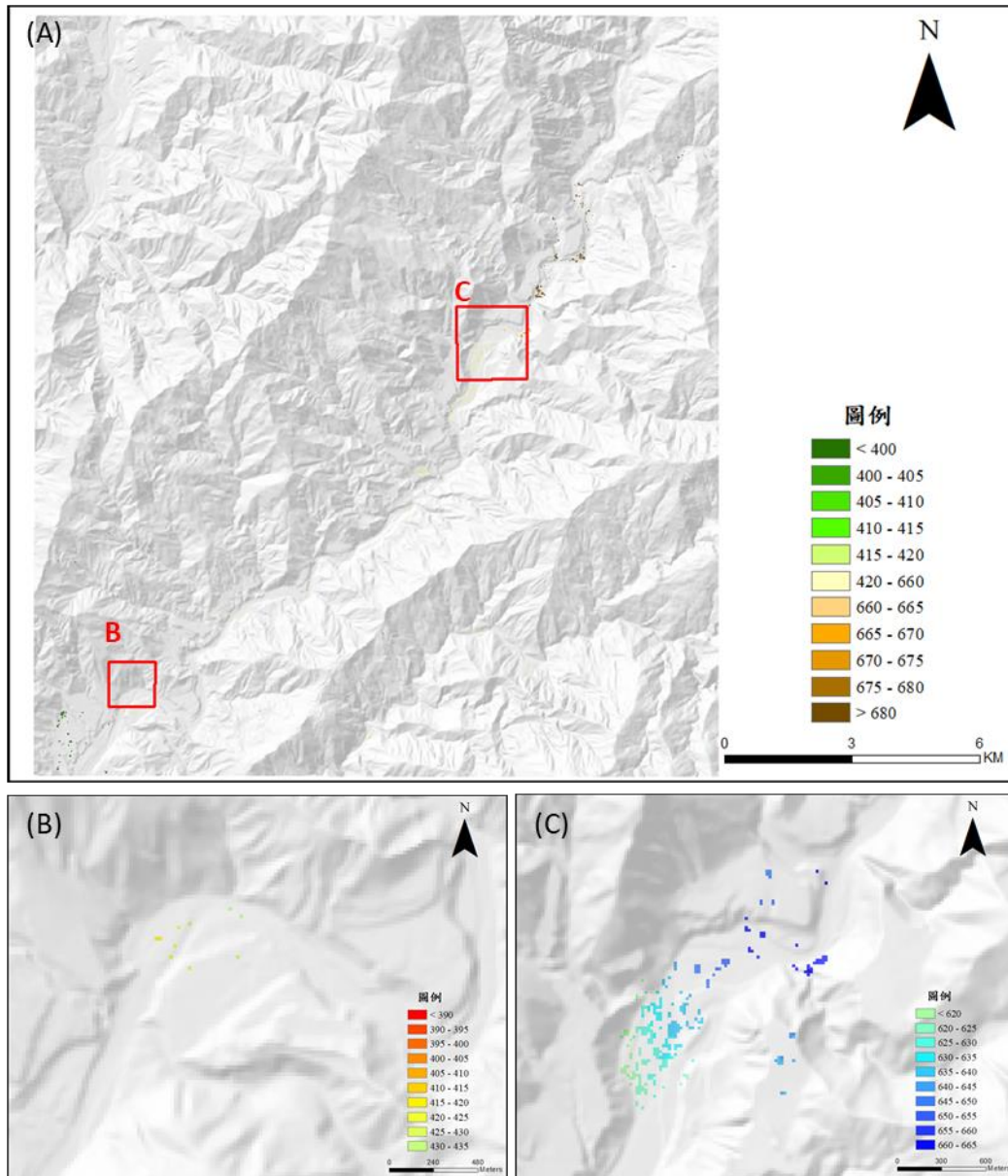
2018 年研究區河道裸露面(a)寶來以及(b)復興河段之高程分布



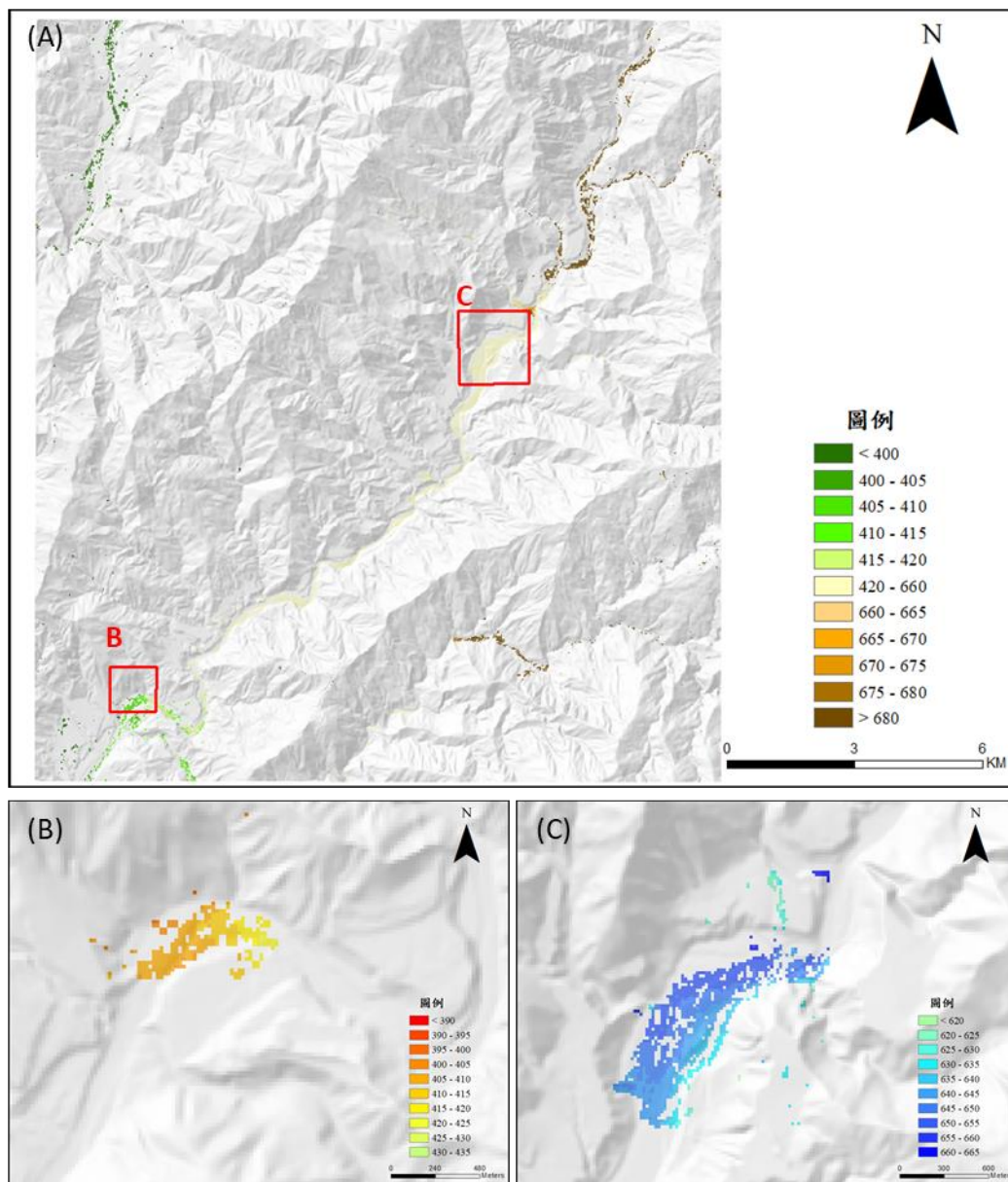
## 2019 年研究區河道裸露面(a)寶來以及(b)復興河段之高程分布



2020 年研究區河道裸露面(a)寶來以及(b)復興河段之高程分布

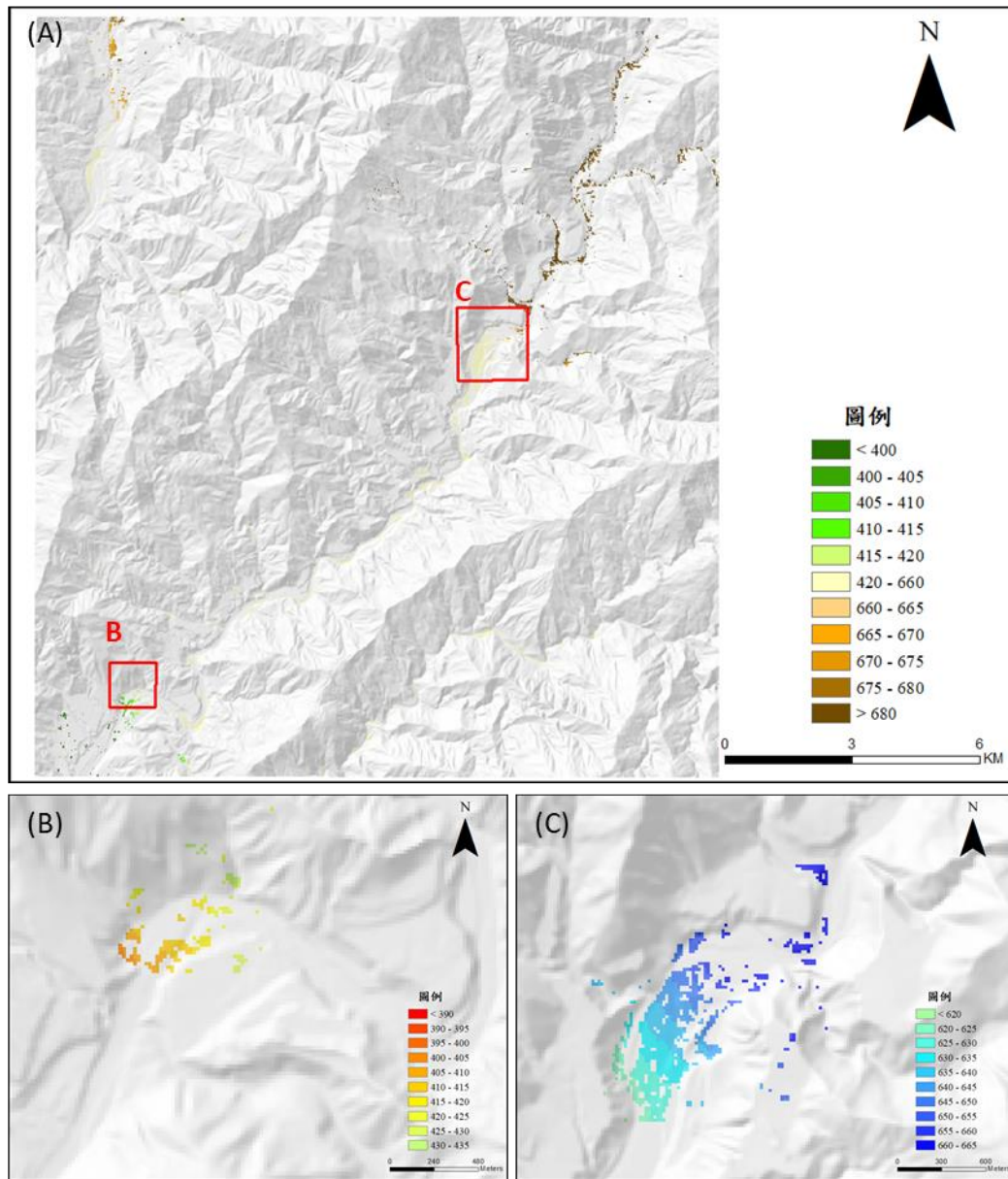


2021 年汛期前研究區河道裸露面(a)寶來以及(b)復興河段之高程分布





2021 年汛期後研究區河道裸露面(a)寶來以及(b)復興河段之高程分布



### 附錄三、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	雖然裸露地不會有植生失去相關性的問題，但河道或崩塌地隨時間也會改變，也失去相關，無法建立相關。	本計畫為提高兩期影像之相關性，使用兩期時間相近之 Sentinel-1 雷達影像所建置之 DEM，取同調性>0.7 的區域來進行分析。
二	以 Sentinel-1 使用兩期 DEM 來討論侵淤，可避開兩期影像失去相關的問題，但仍有相關性不足、匹配資訊不足、DEM 誤差太大，以 10M 解析度的 Sentinel-1 資料來推導 DEM，其高程精度為何？	關於使用 Sentinel-1 資料來產製 DEM，其高程精度將透過比較地面控制點來進行評估，並嘗試確立誤差範圍。
三	請說明一般立體影像對製作 DEM 的解析度範圍，如果地表有變化對 DEM 高程精度又有多少影響？	本計畫使用 Sentinel-1 影像對產製之 DEM，其解析度範圍，以及地表變化對 DEM 高程精度之影響將透過之無人機拍攝之高精度 DEM 進行比較評估。而使用無人機利用立體影像對(所得之 point cloud)所產製之 DEM 的解析度範圍與精度則是利用地面控制點進行

項次	審查意見	回覆辦理情形
		評估。
四	以莫拉克颱風前後NDSI影像之極端分布推估河道侵蝕與堆積區位，合理性宜再探究。	感謝委員建議。本計畫將調整為檢視 NDSI 極端值(累積機率為小於 5% 及大於 95%) 與侵蝕與堆積以位置的對應情形，也同時利用本研究團隊開發之裸露地指標來進行分析。
五	2014 年至 2021 年透過篩選條件，僅可選出 4 對影像組合，分別為 2015、2018、2019 及 2021，是否符合計畫需求宜說明。	感謝委員建議，本研究有考慮放寬篩選標準，針對研究區河道無雲之影像，亦可納入。
六	計畫擬使用 MODIS、Sentinel-2 及 UAV 資訊，但各不同來源資訊之時間、解析力、使用目的皆不同，建議可提早確認資訊時間段，以利後續之計算，甚至對比。	謝謝委員建議。本計畫將嘗試使各類影像資料取得時間均為相同或相近，以利後續比對分析工作。
七	建議須定義完整所謂河道堆積及河道侵淤之不同，及如何能由 SAR 資訊中進行判釋之可行方法。	感謝委員建議，本研究以高程顯著變化之正值與負值變化來分別對應堆積與侵蝕狀況，方法為評估 SAR 資料得到高程之精度來確立此變化之顯

項次	審查意見	回覆辦理情形
		著性，意即高程變化必須大於測量誤差。
八	由 Sentinel-1 產製之 DEM 如何驗證其精確性？其解析度為何？適用範圍為何？另請說明其未來應用之潛力分析。	謝謝委員建議。本計畫將比較 Sentinel-1 產制之 DEM 與量測地面控制點來進精確性的評估，最後將從資料應用面、操作面、產制成果等分析其適用性以及應用潛力。



## 附錄四、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	使用無人機拍攝資料建置之 DSM，高程誤差高達2m，利用其作為成果驗證之合理性宜有說明。	謝謝委員意見，InSAR 之高程資料除使用無人機 DSM 外，也使用地面控制點進行檢核。
二	符合條件之 Sentinel-1 影像，在 8 年當中僅獲得 7 對影像組合，主要集中在 2019 年，缺 2014、2016、2017 等年份，無法滿足每年一組資訊，是否符合實務需求，宜有評估。	本計畫檢核 Sentinel-1 資料發現早期的軌道資料其基線過小(50m-100m)，但近年 2018 年之後有較多較長基線(大於 150m)之資料，因此可預期有較多的影像對可供分析。
三	空拍 DSM 與 InSAR DEM 比對(表 3-4)兩者解析度差異甚大，如何相減及統計分析，宜有更清楚的說明。且 Sample size 僅 20，其成果不符測量精度之定義。	本計畫比較此兩者資料時，為使用點對點之比較，InSAR 之高程資料除使用無人機 DSM 外，也使用地面控制點進行檢核，樣本數也增至 50 點。
四	寶來及復興河段同屬凹岸為何寶來淤積而復興為侵蝕。	本計畫重新比較了 2021 年汛期前後之高程差異，此兩河段均發生堆積。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	圖 3.8~3.10 河段說明標示有誤。	感謝委員提醒，已於文中修正。
六	本研究得到空拍 DSM 與 InSAR DEM 之誤差統計宜有實務上應用建議。	謝謝委員建議，本計畫於結論說明，此 InSAR 技術較適用於河道侵淤較劇烈、地形變化較大之監測工作。
七	本計畫研究區恰位於 8 月初盧碧颱風之重災區，且沖毀明霸克露橋的玉穗溪災前本局曾以 2021/3/11 Pleiades 衛星影像製作 DSM，災後亦於 2021/8/11 以 UAV 空拍製作 DSM，建議可針對此區以 Sentinel-1 製成之 DSM 進行比較，除驗證精度外，亦請測試自取得 Sentinel-1 影像後至完成 DSM 所需時間。	感謝委員建議，取得兩幅符合篩選標準的 Sentinel-1 影像後，約半小時能產製 DSM。此計畫也取得水保局提供之 UAV 資料進行分析。
八	P2-5 建議取天氣較晴朗、無雨、乾燥的天氣下所取得之 Sentinel-1 影像，產製 DEM 之效果較佳，但在此條件下之光學影像已可取像完成相同工作，甚至更好；那麼使用	本計畫試驗了使用天候不佳時取得之影像資料進行分析，期誤差可達 3 倍之多。雖然使用光學影像對亦可產製高精度之數值地形，然而本研究使用之雷達資料其覆蓋面積廣

項次	審查意見	回覆辦理情形
	Sentinel-1之優勢為何？是否也可測試一下，於天候不佳時，其產製DEM之誤差會有多大，以供評估。	大，相較於光學資料，使用Sentinel-1 影像的優勢在於只需 2 至 3 幅影像即可涵蓋全台灣的範圍，本研究認為可以有效率地進行大範圍的河道劇烈地形變動之監測，對於集水區管理及土砂災害之防治能有相當的助益。
九	P3-5表3-2顯示，自2014~2021年，僅有7對影像符合無雲無雨等條件，這7對又僅分布於2015、2018、2019、2020、2021年這5個年度，對於河道之變化有時會在一場颱風豪雨事件後即有較大的變化，如此可用影像之頻率似乎偏低，實用性不佳，此部份是否有其他可能方案？	感謝委員建議。本研究分析資料發現近年 2018 年之後有較多較長基線(大於 150m)之資料，因此可預期有較多的影像對可供分析。其他可行之方案為使用多元雷達資料來提升空間解析度，以增加觀測的時間頻率。
十	建議以8月初盧碧颱風後之研究區(荖濃溪)崩塌地為例，測試P2-7本研究所提之NDSI偵測崩塌地之效果如何？	感謝委員建議。本研究試驗後 C-band 資料計算之 NDSI 無法確實反映河道上的變化，雖自本團隊往期的研究確認其可用於崩塌的判釋上，但在此計畫不納入 NDSI 的應用。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十一	圖3-10之正值表示為堆積，故P3-12 內 文 「 本 計 畫 將 DEM2018減去DEM2021」，是否應為「將 DEM2021 減去 DEM2018」？	感謝委員提醒，已於內文中修正。
十二	P3-9 以 2021 年 1、2 月之 Sentinel-1 影像產製之DEM與 2021/5/4 UAV 空拍 DSM 資料比較，以測試產製DEM之精度。因二者相差近3個月，可能河道已有變化，是否先已較明顯的固定點來做驗證？	本計畫檢核 InSAR 之高程資料除使用無人機 DSM 外，也使用固定之地面控制點進行檢核，樣本數也增至 50 點。
十三	建議補充現行文獻中，以衛星雷達影像產製DEM之相關資訊，包含精確度、產製過程、產製效能...等供參考。	謝謝委員建議。已補充說明於之第一章。
十四	建議詳細說明本研究以衛星雷達影像產製DEM與UAV空拍產製DEM，其可能的誤差來源為何？如何有效減少上述誤差？	本研究以衛星雷達影像產製DEM 之可能誤差來源以及如何降低此誤差的部分於研究方法加強說明。UAV 除根據前人飛行規劃進行拍攝外，則是以增加地面控制點來減少誤差。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十五	建議本研究能針對衛星雷達影像產製DEM，提出完整的評估分析結果及具體的建議，做為水保局未來工作之參考。	感謝委員建議，本計畫就現行之分析成果於結論加強說明，提出此方法適用之建議。
十六	建議於圖2-1中標示研究場址資訊，後文有圖出現時亦建議標示座標。	謝謝委員建議，本研究的研究區域即為荖濃溪於復興至寶來一帶沿岸。
十七	建議衛星雷達影像資料於文中的使用能以列表方式整理，較易了解此研究使用的影像資訊，並整合研究方法與結果的產出，切勿出現有研究結果但沒方法的部分。	感謝委員提醒，已於本文加強說明，並列表說明影像使用之目的。
十八	請於專有名詞或簡寫第一次出現時標示全名，後續若再出現以簡寫說明即可，利於閱讀。	感謝委員提醒，以於本文修正。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十九	表3-4於兩個研究區僅共取20個點作為統計資料進行比較是否具有足夠代表性。	本計畫地面控制點進行檢核，樣本數以增至 50 點。
二十	第三章節頁眉誤植，與章節名稱不符。	感謝委員提醒，已修正。



## 附錄五、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	測試的使用資料，希望可以彙整對應的情景對應資訊。供水保局後續使用。	感謝評審建議。
二	研究之雷達資料需要高同調性，故選取2個月內之兩時期影像，是否無法對長期變化進行分析，如半年以上。	感謝評審意見，本計畫選取2個月內之兩時期影像之目的為建立數值高程所用，其目的為減低由時間造成之去相關性，非直接用於變化分析；若欲進行長期變化分析則須建立後期之數值高程模型，並與前期所得之數值高程模型比對之。
三	研究成果建議適用於劇烈地形變化事件，資料誤差上頗大，如何應用於河道監測或災害防治。	本研究之目的為檢視使用 Sentinel-1 C-band 雷達資料應用於河道侵淤監測之可行性，結果發現解算之高程資料誤差 RMSE 約為 2.37 公尺至 6.47 公尺之間，因此本研究建議此技術較適合應用在河道侵淤較明顯、高程變化達 10 公尺以上之大型土砂運移之

項次	審查意見	回覆辦理情形
		<p>事件，如颱風豪雨肇生之土石流、堰塞湖之形成或潰堤此等劇烈地形變化事件，此乃使用資料之限制，針對河道監測或災害防治應用問題，本研究認為雷達資料其覆蓋面積廣大，相較於光學資料，可以有效率地進行大範圍的河道劇烈地形變動之監測，且台灣於汛期、颱風期間肇生之土砂侵淤往往有巨大之量體，可利用本研究所提之方法於先期找出有劇烈變動之河道地區，後續再針對河段進行更進一步的調查與災害評估，因此使用雷達資料對於集水區管理及土砂災害之防治能有相當的助益。</p>