

---

**以多時序 Sentinel-1 雷達影像精進災後快速崩塌判釋可行性評估**

**The Feasibility Assessment of Quick Landslide Identification Methods After Hazards with Sentinel-1 SAR Imagery**

**成 果 報 告 書**

---

執行單位：國立暨南國際大學

執行期間：111 年 1 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：王國隆 副教授

共同主持人：林俊廷 博士

研究人員：李苡宣

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 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)



# 以多時序 Sentinel-1 雷達影像精進災後快速崩塌判釋 可行性評估

## 摘要

崩塌調查的遙測技術中，光學影像的判釋是目前的主流方法，然而災害發生時，要取得無雲霧覆蓋的圖資是相當困難的，如 2021 年 8 月時受原為盧碧颱風、2022 年的尼莎颱風皆造成多處坍方及道路中斷，但也因受到雲霧遮蔽，無法及時取得衛星影像進行災害規模判釋，無人載具同樣受到天候因素影響，使飛行風險大幅增加，因此極需開發不受天候影響的災害辨識方法

在本研究中運用合成孔徑雷達(SAR)的長電磁波不受雲霧遮蔽影響的特性，開發雷達影像的崩塌探測模式，將可於天候不佳的狀態下獲取崩塌位置及規模的參考範圍，以彌補光學影像評估災害範圍時的天候限制。

本研究以 NDSI&RVID 法作為崩塌範圍判釋指標，並結合多時序及不同軌道資料進行崩塌範圍的分析與探討，以單時序判釋堆疊、多時序指標堆疊、多時序影像堆疊三種方式提升崩塌判釋效果，其中以多時序影像堆疊可達到較佳的判釋結果，建議以災前 4 幅影像、災後 1 幅影像的數量進行資料判釋，雖然影像像元分類效果仍須改善，但對於 10 公頃以上的崩塌的判釋率可達到 90%以上，在缺乏光學影像的情況下，具有相當的參考價值。

**關鍵字：**SAR 強度判釋、崩塌範圍、快速災害分析



# 目次

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 摘要 .....                     | I    |
| 目次 .....                     | III  |
| 表次 .....                     | V    |
| 圖次 .....                     | VI   |
| 第一章 緒論.....                  | 1-1  |
| 第一節 計畫動機 .....               | 1-1  |
| 第二節 計畫目的 .....               | 1-1  |
| 第三節 計畫研究區域 .....             | 1-2  |
| 第四節 計畫重點項目 .....             | 1-5  |
| 第二章 工作執行方法與步驟 .....          | 2-1  |
| 第一節 多時序合成孔徑雷達影像資料蒐集及建置 ..... | 2-5  |
| 第二節 影像誤差來源 .....             | 2-6  |
| 第三節 雷達影像前處理 .....            | 2-6  |
| 第四節 地表變異資訊分析 .....           | 2-13 |
| 第五節 多時序判釋堆疊分析 .....          | 2-16 |
| 第三章 工作進度與研究成果 .....          | 3-1  |
| 第一節 災害事件及影像蒐集 .....          | 3-1  |
| 第二節 地形遮罩影響範圍 .....           | 3-3  |
| 第三節 影像像元分析 .....             | 3-6  |
| 第四節 單時序判釋堆疊 .....            | 3-8  |
| 第五節 多時序指標堆疊 .....            | 3-9  |
| 第六節 多時序影像堆疊 .....            | 3-11 |

|                           |               |      |
|---------------------------|---------------|------|
| 第四章                       | 計畫進度甘特圖 ..... | 4-1  |
| 第五章                       | 結論與建議 .....   | 5-1  |
| 第一節                       | 結論 .....      | 5-1  |
| 第二節                       | 建議 .....      | 5-1  |
| 參考文獻                      | .....         | 參-1  |
| 附錄                        | .....         | 附錄-1 |
| 附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形 ..... |               | 附錄-1 |
| 附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 ..... |               | 附錄-3 |
| 附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 ..... |               | 附錄-5 |

## 表次

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 表 3-1 | 0806 豪雨事件使用之多時序 SAR 影像 ..... | 3-2 |
| 表 4-1 | 計畫甘特圖 .....                  | 4-1 |
| 表 4-2 | 重要期程一覽 .....                 | 4-2 |

## 圖次

|        |                                    |      |
|--------|------------------------------------|------|
| 圖 1-1  | 本計畫蒐集 Sentinel-1 SAR 影像之衛星軌道.....  | 1-3  |
| 圖 1-2  | 高屏溪流域地質圖 .....                     | 1-4  |
| 圖 2-1  | 受地形效應影響情形(Ouarzeddine, 2002) ..... | 2-2  |
| 圖 2-2  | 崩塌探測模式研究流程圖 .....                  | 2-4  |
| 圖 2-3  | 雷達影像強度分析前處理流程 .....                | 2-7  |
| 圖 2-4  | 崩坪坑溪 0806 豪雨事件崩塌判釋情形(水保局，2021) .   | 2-16 |
| 圖 2-5  | 多時序判釋堆疊分析流程圖 .....                 | 2-18 |
| 圖 3-1  | 0806 降雨事件分布情形 .....                | 3-1  |
| 圖 3-2  | 受地形效應影響情形 .....                    | 3-4  |
| 圖 3-3  | Sentinel-1 105 下降軌道地形效應影響範圍 .....  | 3-5  |
| 圖 3-4  | Sentinel-1 69 下降軌道地形效應影響範圍 .....   | 3-5  |
| 圖 3-5  | Sentinel-1 VV 同向極化崩塌前後散射值變化 .....  | 3-6  |
| 圖 3-6  | Sentinel-1 VH 交叉極化崩塌前後散射值變化 .....  | 3-7  |
| 圖 3-7  | 單時序判釋堆疊示意 .....                    | 3-8  |
| 圖 3-8  | 單時序判釋次數堆疊圖 .....                   | 3-9  |
| 圖 3-9  | 6/23 至 8/12 多時序指標判釋成果 .....        | 3-10 |
| 圖 3-10 | 6/23 至 9/27 多時序指標判釋成果 .....        | 3-11 |
| 圖 3-11 | 多時序影像堆疊計算流程 .....                  | 3-12 |
| 圖 3-12 | 研究區影像精度評估計算範圍 .....                | 3-13 |

|        |                                 |      |
|--------|---------------------------------|------|
| 圖 3-13 | 災害前後 SPOT7 衛星影像.....            | 3-14 |
| 圖 3-14 | 2021/03/21~2021/07/19 判釋成果..... | 3-15 |
| 圖 3-15 | 2021/03/07~2021/07/29 判釋成果..... | 3-16 |
| 圖 3-16 | 69 上升軌災前 1 災後 1 判釋結果 .....      | 3-19 |
| 圖 3-17 | 69 上升軌災前 4 災後 1 判釋結果 .....      | 3-19 |
| 圖 3-18 | 69 上升軌災前 4 災後 4 判釋結果 .....      | 3-20 |
| 圖 3-19 | 69 上升軌災前 12 災後 4 判釋結果 .....     | 3-20 |
| 圖 3-20 | 105 下降軌災前 1 災後 1 判釋結果 .....     | 3-21 |
| 圖 3-21 | 105 下降軌災前 4 災後 1 判釋結果 .....     | 3-21 |
| 圖 3-22 | 105 下降軌災前 4 災後 5 判釋結果 .....     | 3-22 |
| 圖 3-23 | 105 下降軌災前 11 災後 5 判釋結果 .....    | 3-22 |



## 第一章 緒論

### 第一節 計畫動機

臺灣的地理條件造就了高災害潛勢的環境，而坡地災害是臺灣面臨的主要災害之一，如何調查及評估災害潛勢一直是倍受關注的課題，政府的災害管理須有更深層的認識及有效的防範，而近年來因遙測技術的迅速發展，帶來研究坡地災害的另一契機，有別於傳統監測技術在預算及使用範圍的受限，遙測技術提供更全面性且低廉的觀測方式，產出更巨觀的地表資訊，提升災害的探查效率。

崩塌調查的遙測技術中，光學影像的判釋是目前的主流方法，然而災害發生時，要取得無雲霧覆蓋的圖資是相當困難的，如 2021 年 8 月時受原為盧碧颱風的熱帶性低氣壓影響，南橫公路台 20 線上的明霸克露橋遭暴漲的玉穗溪破壞而中斷，此後數日間的降雨仍不斷帶出中上游的殘留土砂，然而上游崩塌區域被雲層遮蔽，未能取得衛星影像進行災害規模的判斷，無人載具同樣受到天候因素影響，使飛行風險大幅增加，因此極需開發不受天候影響的災害辨識方法。

### 第二節 計畫目的

在本研究中將運用合成孔徑雷達的長電磁波不受雲霧遮蔽影響的特性，開發雷達影像的崩塌探測模式，將可於天候不佳的狀態下

獲取崩塌位置及規模的參考範圍，以彌補光學影像評估災害範圍時的天候限制。合成孔徑雷達(SAR)有不受天候干擾、廣域監測、固定再訪周期等優勢，能紀錄包含強度、極化、相位等物理訊息，現階段因 Sentinel-1 SAR 的衛星資料開放，可以取得周期短且大範圍的 C 波段影像，可提供另一種崩塌判釋指標，然而雷達影像受限於解析度

與資料特性，不如光學影像容易判讀，此外 C 波段影像在山區易受到植生影響，致使判釋成果有較高的誤判率。

本研究擬解決問題條列如下：

- 一、建立災時崩塌範圍快速崩塌方法。
- 二、建立崩塌判釋指標。
- 三、運用多時序堆疊技術提升崩塌判釋效果。

### 第三節 計畫研究區域

合成孔徑雷達影響圖資拍攝的區域廣泛，臺灣全島的範圍皆在 Sentinel-1 的拍攝範圍中，可用 2 組升降軌軌道獲取全島的雷達影像資料(如圖 1-1)，而近年災害事件發生的區域較為分散，為增加可驗證的災害事件，因此本研究分析範圍將包含臺灣全島，而主要分析區域將以臺灣南部的高屏溪流域(如圖 1-2)為代表，高屏溪流域由荖濃溪、旗山溪及隘寮溪三大支流構成，荖濃溪集水區主要座落於高雄市桃源區、六龜區及茂林區，水系發源自玉山主峰東北坡，先往東北流至八通關後轉往東南，再與源自秀姑巒山西南坡及大水窟山西坡的支流匯集後，轉向往南南西進入高雄市境內，流經梅山、桃源、寶來、六龜後，轉向南至大津與東側之濁口溪交匯後轉向西南，至里港與東南方的隘寮溪交匯，至嶺口與來自北方的旗山溪(又名楠梓仙溪)合流(摘自陳志豪等，2011)，旗山溪流域發展自玉山主峰，由西南向經那瑪夏、甲仙、杉林、旗山等區後，與荖濃溪匯流。

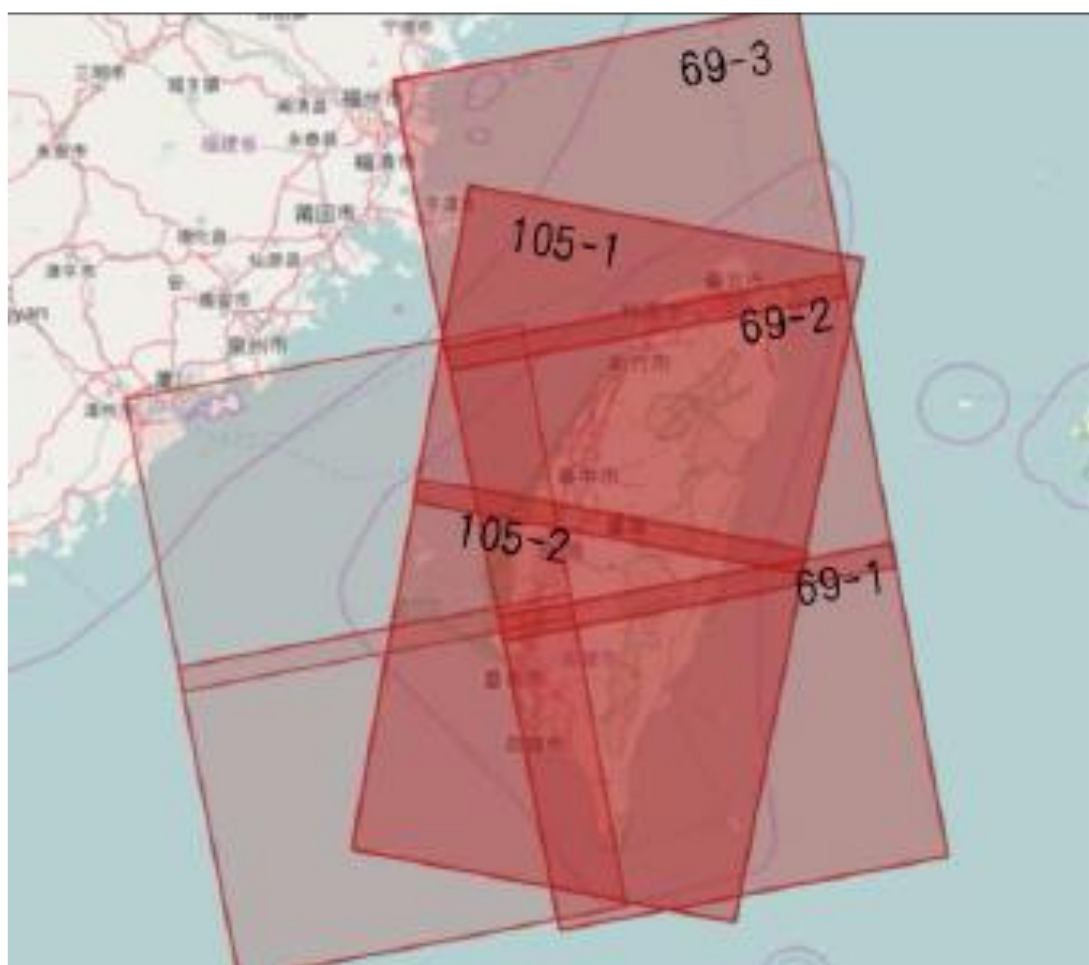


圖1-1 本計畫蒐集 Sentinel-1 SAR 影像之衛星軌道

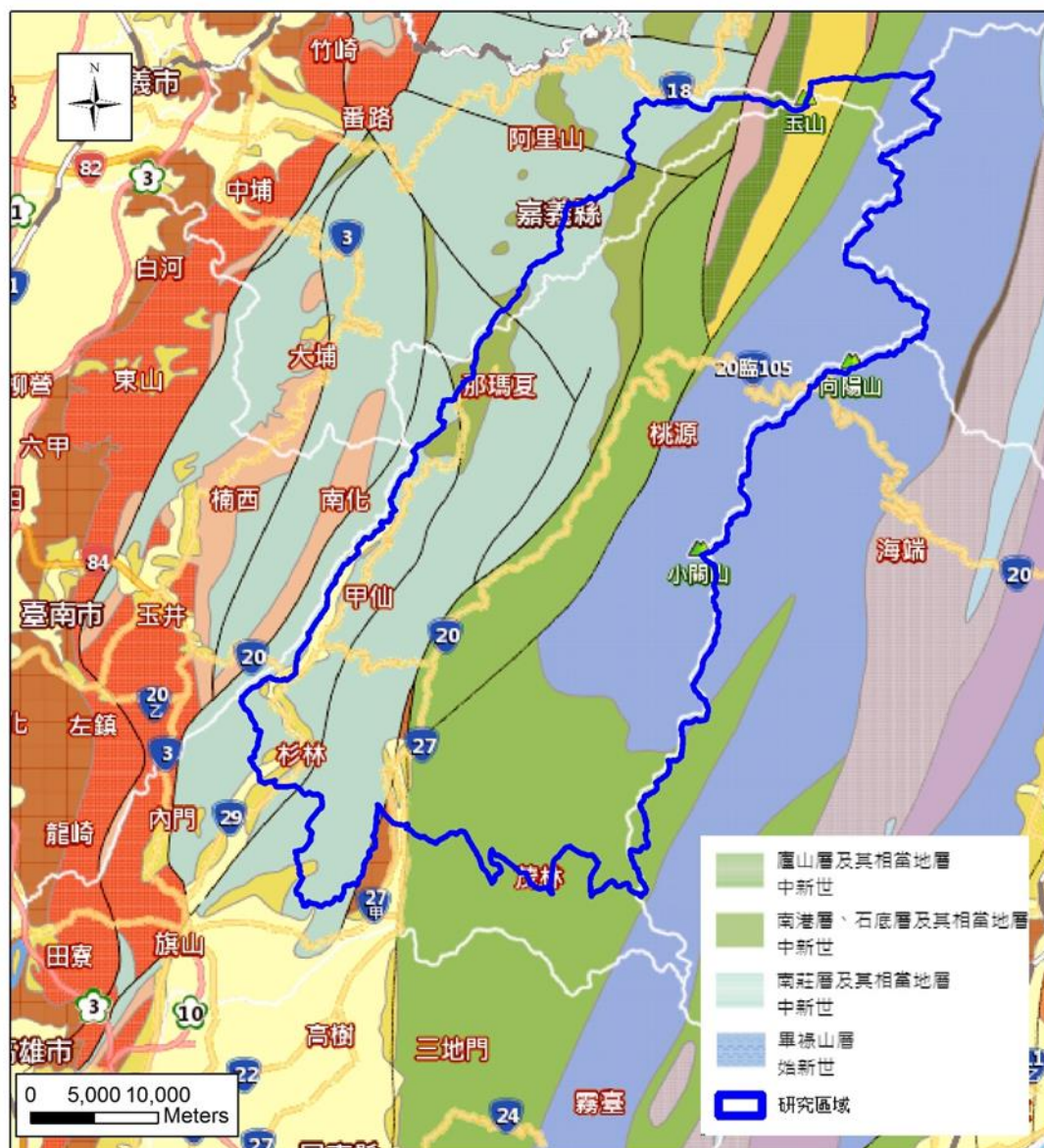


圖1-2 高屏溪流域地質圖

資料來源：改繪自經濟部中央地質調查所五十萬分之一地質圖(2020)

依據中央地質調查所出版之二十五萬分之一臺灣數值地質圖，本流域中所出露之岩層大部分為黑色板岩(包括西村層、佳陽層、十八重溪層、畢祿山層、廬山層)及砂頁岩(唐恩山層、南港層、南莊層、長枝坑層)，依岩層的時代劃分的話可分為古第三紀及新第三紀部份，古第三紀地層主要分布在荖濃溪東岸，而新第三紀地層主要分布在荖濃溪西岸。古第三紀部份主要以變質岩為主，新第三紀部份主要為沈積岩，這些地層分布於雪山山脈、中央山脈西翼及西部麓山帶三大地質區內(何春蓀，1986)。

高屏溪流域歷年經歷多次災害事件，前期有 2008 年辛樂克颱風、2009 年莫拉克颱風的小林村崩塌，近期有 2021 年 8 月的盧碧颱風沖毀位於玉穗溪的明霸克露橋，多次的災害事件在流域內發生多處坍方，影響沿岸聚落的生計及生活安全，也導致南橫公路道路柔腸寸斷，至今未能完全恢復通行。

在本計畫中將以高屏溪流域進行崩塌探測模式開發，並以臺灣島其他災害事件的發生區域做為模式驗證，以探討此模式在不同區域的可行性與適用性，做為後續應用的參考指標。

#### 第四節 計畫重點項目

##### 一、蒐集災害前後之 SAR 分析地距影像

建立研究區內 L 波段的 ALOS 衛星、ALOS-2 衛星、C 波段的 Sentinel-1 的 GRD(地距影像)格式影像資料庫。

##### 二、建立雷達影像強度分析流程

以本研究中主要運用的 Sentinel-1 衛星，設定雷達影像前處理的各項參數及工作流程。

### 三、建立崩塌判釋指標

根據地貌變異時，雷達影像的強度與極化發生變化的物理性質，建立適合用於崩塌判釋的參考指標，並進行成果驗證。

### 四、運用多時序堆疊技術提升崩塌判釋效果

使用多幅影像間交叉匹配，以不同時間基線的匹配成果計算地表變異，從疊加後的多時序判釋結果中，分離並擷取出崩塌區域，以提升判釋可靠性。

## 第二章 工作執行方法與步驟

本研究運用合成孔徑雷達回波強度快速分析崩塌範圍，並用林務局的衛星判釋崩塌目錄，完成分析結果驗證，在本研究中使用的雷達影像包含事件前同向極化、事件後同向極化、事件前交叉極化、事件後交叉極化等四幅影像，需先經前處理流程產出後向散射係數，以及地形效應遮罩。

雷達影像的強度變化來自於事件發生前後的散射條件改變，因此如平原區的農業使用、建物興建與拆遷、含水量條件變化、河道泥砂堆積等情形都會在雷達影像分析的過程中被判釋出，干擾到崩塌地的判釋成果，降低判釋精度，

在第一階段的研究流程中，先進行本研究所需案例的合成孔徑雷達影像蒐集，並完成雷達影像的前處理步驟，計算 SAR 影像的強度資訊後，排除地形效應干擾的影響，，由於雷達影像是側視拍攝的特性，因地形產生的疊掩(Layover)、前坡縮短(Fore Shortening)、陰影(Shadow)等地形效應區域(如圖 2-1)造成雷達回波的解算錯誤(Ouarzeddin, 2002)，並產生極端值影響後續影像的平均值及標準差等參數，因此在研究分析中使用 2002 年以航空影像產製的解析度 5 公尺的數值高程地形(DEM)，對雷達影像進行幾何校正後，產出地形效應遮罩，並將地形效應區從幾何校正後的雷達影像移除，同時地形效應範圍也用於排除衛星影像的崩塌目錄中，以進行精度檢核。

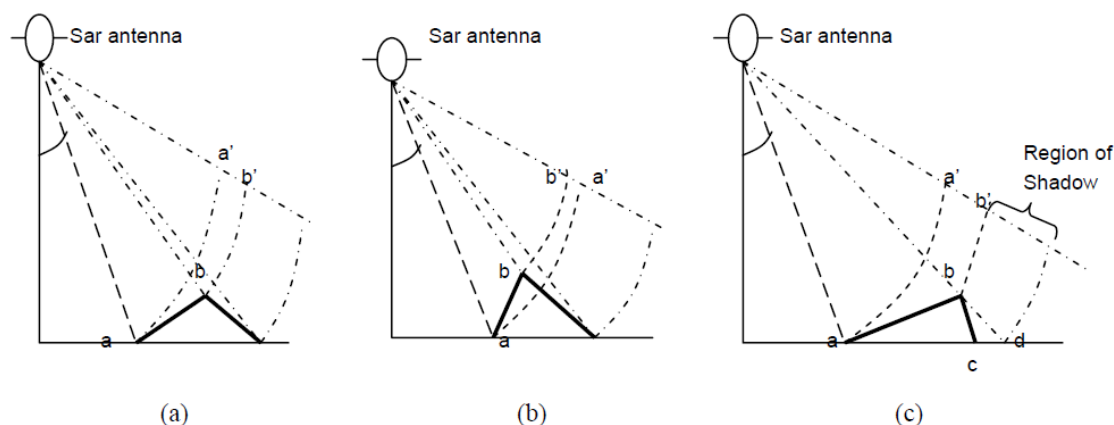


圖2-1 受地形效應影響情形(Ouarzeddine, 2002)

第二階段中將上述已處理影像分別計算歸一化指標(NDSI)(Furuta, 2011)、雷達植生指標(RVID)，藉由事件前後的後向散射係數可計算出新生的崩塌範圍，由於雷達影像具有極化特性，在此針對同向極化及交叉極化影像分別計算其 NDSI 值用於後續比對。

本研究中以平均值及標準差建構崩塌的判釋指標如式(1)、式(2)，由於不同時序的 SAR 影像強度會因掃描時的環境變化而產生些微差異，例如大氣含水量、土壤介電質影響等因素，使同一像素即使沒發生崩塌也會存在強弱差異，因此無法以固定門檻值建立判釋指標，需計算影像平均值做為判釋基準，而像素強弱的分布一般難以發生劇烈變化，但即使出現大型災害，影像中發生崩塌改變的區域仍屬少數像素的變化，對標準差的影響不明顯，因此本研究以平均值扣除標準差建立崩塌的判釋指標，而以不同的門檻值  $c$  辨識出符合崩塌地的判釋成果(王國隆等，2019)，如式(1)。

$$\text{NDSI} < \mu - c\sigma \quad (\text{式 } 1)$$

$\mu$  為影像平均值， $\sigma$  為影像之標準差， $c$  為設定門檻值。

RVID 為雷達地表植升差異化指標，其計算方式為前期 RVib 扣除後期 RVia 而得，而 RVID 指標以過去的研究中(林務局, 2018)建議的崩塌判釋範圍，如式(2)。

$$RVID < \mu - c\sigma \quad (\text{式 2})$$

$\mu$  為影像平均值， $\sigma$  為影像之標準差， $c$  為設定門檻值。

分析後的影像將相鄰的區塊合併為一區塊，較小的分類區域可能為殘留的影像雜訊，初步先以 4 x 4 個 pixel 為最低的判釋濾除標準，在此階段中將分析不同的門檻值  $c$  對分類影像精度各項指標的提升有何影響，並於最後提出建議門檻值範圍。

第三階段將以上分析結果加以處理以達到提升判釋指標的目的，過去的研究中，組合 NDSI 法及 RVID 法兩者的指標以提高崩塌地的判釋成果(林俊廷，2021)，因此本研究嘗試以兩種指標的判釋結果組合成 NDSI&RVID，並堆疊多時序的判釋結果，統計重複獲取的判釋範圍，用以提高崩塌判釋的分類精度，並根據其所判釋的範圍成果提出進行討論，選擇適用的指標範圍，本階段研究流程如圖 2-2 所示。

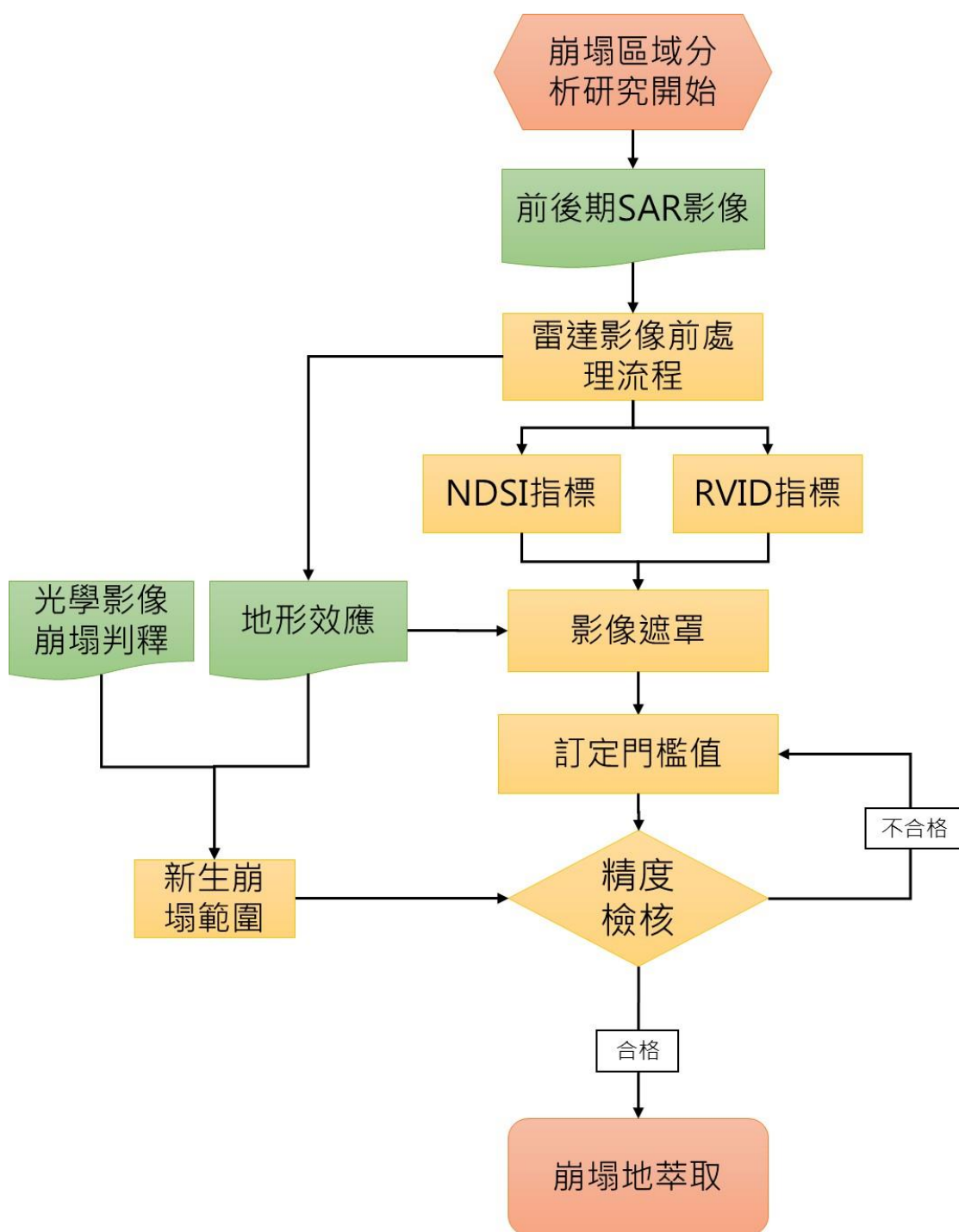


圖2-2 崩塌探測模式研究流程圖

## 第一節 多時序合成孔徑雷達影像資料蒐集及建置

合成孔徑雷達影像(SAR)是一種主動微波觀測技術，運用衛星運行時連續發出電磁波，經由地上物散射後返回衛星由天線接收，用以量測反射強度及相位資訊，由於其波長較長，可以有優越的繞射性質，因此能穿透雲霧及植生，具有主動觀測的特性，不受到天候及夜晚的限制，且能大面積、固定週期的量測振幅、極化、相位等地上物理性質，是近年來運用廣泛的遙測技術之一。

SAR 的觀測能力及適用範圍受到其波長的長度有顯著的差異，本研究中使用之合成孔徑雷達資料主要為日本 JAXA 的 ALOS、ALOS-2 及歐洲太空總署(European Space Agency,ESA)的 Sentinel-1 衛星，ALOS 系列衛星波長為 L-band，在山區穿透植生的效果良好，然而在 JAXA 現行策略中，ALOS-2 在臺灣的拍攝密度較低，資料取得週期過長，對於長期監測而言資料相對匱乏，且因資料需付費購置而增加了運用成本。

Sentinel-1 衛星的 SAR 影像波長為 C-band，為歐洲太空總署哥白尼計畫中的觀測衛星之一，其合成孔徑雷達觀測系統由兩顆衛星組成(Sentinel-1A、Sentinel-1B)，單一軌道回歸週期為 6~12 天，資料目前為免費開放使用，因為穩定且高頻率的資料產出使持續監測變得可能，在此條件下使近年來 Sentinel 衛星有大量的研究及應用成果。

Sentinel-1 的 SAR 資料包含 Stripmap、Interferometric Wide Swath Mode、Extra Wide Swath Mode 與 Wave 四種拍攝模式，其不同處理等級的產品主由 GRD、SLC 兩種格式組成，地距影像 GRD(Ground Range Detected)格式由聚焦的 SAR 數據組成，其使用橢球體模型校正經多視投影到地面範圍，且失去了相位訊息，該格式經過多視圖處理及熱噪訊校正，以降低解析度的代價減少斑剝雜訊的影響。

單觀點複數影像 SLC (Single Look Complex)格式為使用衛星的軌道和姿態數據進行地理參考的聚焦 SAR 數據，其影像每一個像素由一個複數值(I&Q)表示，SLC 影像由零多普勒幾何形狀產生，並對天線方向及距離損耗進行校正，影像生成時保留了振幅與相位信息。

本研究中將運用雷達強度、極化等條件，組合出崩塌判釋的參考指標，並以 ALOS、ALOS-2、Sentinel-1 等衛載雷達影像資料做為技術開發使用，其中 ALOS 衛星僅有 2006~2011 年、ALOS-2 從 2014 年迄今，但供應臺灣區域的影像資料較少，所以本計畫中以蒐集 Sentinel-1 衛星為主，並以適合進行地貌判釋的 GRD 格式為優先蒐集的目標。

## 第二節 影像誤差來源

導致 SAR 影像的強度變化的原因包含地表粗糙度、地表目標物的散射型態改變、介電質或含水量變化、地形效應影響區域等等因素，因此若以強度變化指數做為崩塌裸露地的判釋指標，就需要去除這些誤差干擾因子，此外 SAR 強度訊號分析時會因地上物特性產生斑剝雜訊，雖然在雷達影像前處理流程中，經過多視平均及濾波處理後可以消除部分雜訊，但仍有部分訊號會被保留，進而影響判釋品質。

## 第三節 雷達影像前處理

SAR 影像為側視拍攝的地距影像，且拍攝的過程中受到地面散射條件的影響，容易產生斑剝雜訊，因此再運用之前必須經過影像前處理步驟，以提升影像的判釋結果，本計畫使用 ENVI SARscape 軟體進影像處理，其處理流程中首先會進行多視平均，將初始影像以方位向及距離向的像元平均處理，可以改善兩個方向的解析度及將雜訊

平滑化，其主要做法是將其中一向的像元以摺積(Convolution)的方式計算平均值取代原影像，此方法在減少噪點的同時會犧牲部分空間解析度，第二步驟為影像套合，將不同時間拍攝的影像投影在相同斜距上，此舉可降低拍攝的衛星視角的微小差異所導致的影像變化，第三步為濾波降噪，降低接收的散射回波中，因不同的訊號源發生的相位干涉疊加，所形成的斑駁的雜訊(De Grandi, 1997)，第四步為幾何校正及幅射校正，減少 SAR 影像在距離向及方位向上因地形的幾何條件，造成的影像變形以及影像強度的變化(Meier et al., 1993; Holecz et al., 1993, 1994; Ulaby and Dobson, 1989)，完整的前處理流程如圖 2-3 所示。

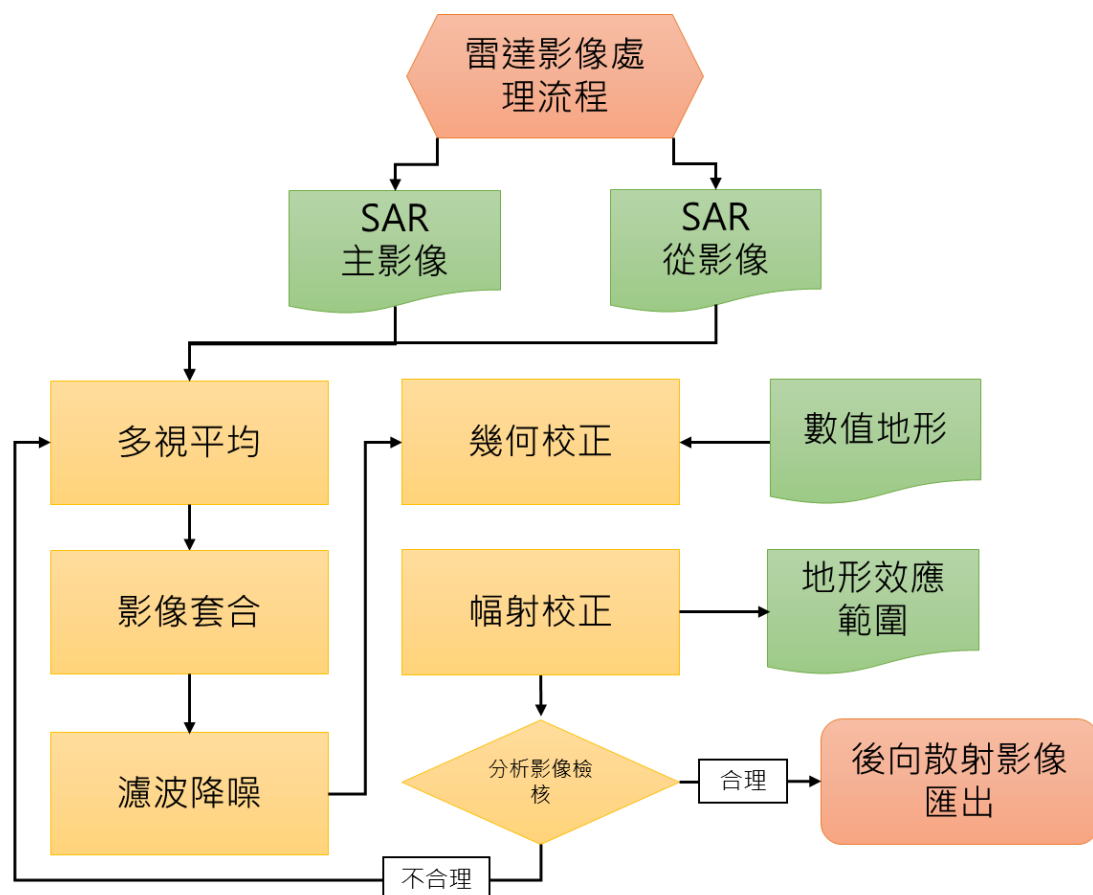


圖2-3 雷達影像強度分析前處理流程

## 一、多視平均(Multilooking)

雷達影像的成像過程中，接收到的影像是來自多個反向的散射點疊加而形成的單觀點複數影像(Single Look Complex, SLC)，此過程中由於接收到的訊號強度不同，可能會產生隨機的噪點，且由於方位向與距離向的解析度不同，導致影像出現多餘的雜訊不易判讀，且距離向(range)及方位向(azimuth)的地面解析度也有所差異，初始的影像中，方位向的地面解析度是固定值，距離向的地面解析度與雷達入射角的相關式如(3-1)：

$$\text{ground resolution} = \frac{\text{pixel spacing slant rang}}{\sin \theta} \quad (0-1)$$

其中，ground resolution 為地面解析度

pixel spacing slant rang 為雷達的地距像元

$\theta$  為雷達入射角

將初始影像以方位向及距離向的像元平均處理，此步驟被稱作多視平均，可以改善兩個方向的解析度及將雜訊平滑化，其主要做法是將其中一向的像元以摺積(Convolution)的方式計算平均值取代原影像，此方法在減少噪點的同時會犧牲部分空間解析度，一般而言會根據影像距離向與方位向的解析度比例調整視數，使其最終解析度比例接近。

## 二、影像套合(Coregistration)

SAR 影像是從衛星視角拍攝而來，因而不同時間拍攝的影像，拍攝成果會有些微差異，須將不同的衛星視角影像投影在相同斜距上，此步驟稱做影像套合，可直接使用單觀點複數影像(Single Look Complex, SLC)進行影像套合，或使用經聚焦處理的多視複數影像

(Multi-looked Complex, MLC)。

不論進行強度變化監測、多時相濾波處理、差分干涉分析，皆需先完成影像套合，其處理方式會根據軌道數據或數值高程地形計算兩影像的偏差估計，如果是在軌道數據不精確的情況下，則會改用更大的影像幾何中心匹配，在兩影像的相關網格中建立多項式函數，以進行偏移校正，處理過程中會校正兩斜距影像的平移、旋轉及比例差異，

如果輸入的影像為包含相位資訊的 SLC 數據，則會利用相位資訊與影像相干性進一步優化影像匹配結果，兩幅影像的匹配的精度可達到 1/100 的輸入像素精度，若輸入的影像本身僅有強度數據，則匹配精度只能達到約 1/10 的輸入像素精度，ALOS、ALOS-2 衛星資料皆含有相位資訊，Sentinel-1 衛星的強度處理數據 GRD 格式中則僅有強度數據。

### 三、濾波處理(Filtering)

合成孔徑雷達影像中的回波在受到同一解析像元中，若有其他物體的散射回波，不同的訊號源會發生干涉疊加，回波訊號若與同相位疊加，會形成反射強的明亮斑點，若遇到反相位則會使回波抵銷，而成為反射弱的陰暗斑點，以上情形皆會產生斑駁的雜訊，此情形由其在雷達波長與地表粗糙度相近時更為嚴重，此雜訊造成雷達反射率的波動，在只有單幅影像時一般會藉由降低空間解析度，以多視處理降低雜訊影響，當獲有兩個時序以上的影像時，多時序的濾波處理則可以有效降低系統產生的雜訊。

本研究中的強度影像處理，採用 De Grandi Mt 濾波(De Grandi, 1997)處理，該濾波方式是假設地面上相同大小的像素被相同的雷達波照射時，會對應到同位置的不同時序圖像中，在該假設中 SAR 影

像的反射強度雖然會受到散射物的介電質及幾何特徵發生變化，但不會因雷達位置而改變地面解析度，因此在執行該濾波處理之前，必須先完成影像套合。

De Grandi Mt 濾波方式在處理多時序影像時，會從評估窗口計算多時域中，均值區域影像的平均值及標準差，並以等效視數 ENL(Equivalent Number of Looks)評估雜訊標準，並將雜訊的像元進行平均達到降噪的目的，其 ENL 值如(3-2)：

$$ENL = \frac{\text{mean}^2}{\text{STD}^2} \quad (0-2)$$

其中，mean 是評估窗口的平均值

STD 是評估窗口的標準差

ENL 的初始建議值為-1，當 ENL 高時，可以降低雜訊過濾效果，以保留細部紋理，相反當 ENL 低時則會加強濾波效果，進而犧牲影像細節。

#### 四、幾何校正(Geocoding)

SAR 影像在距離向及方位向上有不同的幾何特性，校正時需分別考慮兩方向的幾何形狀的處理，由於合成孔徑雷達是側視觀測目標物，在距離向會因位地形變化而造成影像變形，而方位向的變形則相對較小。

要解決地形造成的失真問題，可以透過輸入數值高程模型 DEM，以及已知的雷達位置與速度資訊，經過多普勒方程進行轉換，將原本二維行列的斜距影像，轉換為地面上真實距離的地距影像，雷達位置可透過衛星追蹤數據計算出多普勒質心，並以距離多普勒方程(Meier et al., 1993)計算傾斜範圍及多普勒頻率，在本研究中使用 5m 數值地

形進行幾何校正，其多普勒轉換式如(3 3)、(3 4)：

$$R = S - P \quad (0-3)$$

$$f_d = \frac{2f_0(v_p - v_s)R_s}{c|R_s|} \quad (0-4)$$

R：距離

S：載具位置

P：後向散射物體位置

$R_s$ ：影像斜距範圍

$v_s$ ：載具速度

$v_p$ ：的後向散射物體速度

$f_0$ ：載波頻率

$f_d$ ：處理後的多普勒頻率

c：光速

## 五、幅射校正(Radiometric Calibration)

雷達影像是以發射脈衝與接收回波訊號的比值所組成，這種比值被稱為後向散射值(Backscattering)，也是雷達影像的強度值，影響後向散射值的原因大致可區分為系統性因素跟非系統性因素兩種，系統性的原因包含：散射時受地形起伏及雷達波入射角度影響的斜距面積、天線增益變化、距離損耗等因素，非系統性的則是如地面粗糙度、介電值大小、地上物散射型態等因素，其中系統性的因素可以藉由幅射校正的過程修正，而非系統性的問題則會被保留於影像中，校正後的後向散射係數(Backscattering coefficient,  $\sigma$ )能更接近真實的地上真實的散射特性，其校正公式如式(0-5)(Holecz et al., 1993, 1994)：

$$P_d = \frac{P_t \cdot G_t^A(\theta_{el}, \theta_{az}) \cdot G_r^A(\theta_{el}, \theta_{az}) \lambda^3 G_r^E G_p}{(4\pi)^3 \cdot R^3 \cdot L_s \cdot L_a} \cdot A \cdot \sigma^0 + P_n \quad (0-5)$$

其中：

$P_d$ ：散射體的接收功率

$P_t$ ：發射功率

$P_n$ ：附加功率

$G_t^A$ 、 $G_r^A$ ：發射和接收天線增益

$G_r^E$ ：雷達接收機的電子增益

$G_p$ ：處理器常數

$R$ ：範圍傳播損耗

$\theta_{el}$ ：天線仰角

$\theta_{az}$ ：天線方位角

$L_a$ ：大氣壓

$L_s$ ：大氣系統損耗

$A$ ：散射面積

即使經過嚴格的幅射校正，在距離向及地形起伏的因素都經過補償，影像實際上仍會存在強度差異，這時可採用餘弦校正(Cosine correction)(Ulaby and Dobson, 1989)，藉由餘弦模型的校正因子，將後向散射係數歸一化以平衡差異，其校正公式如式(3-6)：

$$\sigma_{norm}^0 = \sigma_{cal}^0 (\cos \vartheta_{norm} / \cos \vartheta_{inc})^n \quad (0-6)$$

其中， $n$  是根據入射角的遠近差異設置的加權因子

$\sigma_{norm}^0$ ：歸一化後後向散射係數

$\sigma_{cal}^0$ ：歸一化前後向散射係數

$\theta_{\text{norm}}$ ：影像中心入射角

$\theta_{\text{inc}}$ ：橢球的局部入射角

#### 第四節 地表變異資訊分析

##### 一、後向散射係數歸一化指標 (Normalized Difference Sigma naught Index, NDSI)

SAR 影像為電磁波的回波強度值，由於電磁波具有電場向量的特性，可根據發射與接收方式記錄不同的極化模式，依地上物的類型會有不同的極化分布，據分析顯示 HV 極化對於植生狀況有明顯的變化，因此可運用災害前後 HV 極化的 SAR 影像，尋找發生崩塌的位置，計算崩塌事件前後的後向散射係數的歸一化指標 (NDSI)，過去研究中 Furuta(2011)則提出以單極化影像進行 NDSI 分析後，發現 NDSI 趨近於 1 或-1 時，則代表地表發生急劇的變化，在山坡地上多為崩塌地的發生區，加入 NDSI 分析則可排除 DinSAR 分析所無法檢測到的變形區；Shibayama(2014)運用 ALOS-2 影像進行分析，發現發生崩塌的區域，其體散射減少，而表面散射增加，因此隔年(2015)進一步研究後，發現崩塌區域的散射特性與雷達波局部入射角(Local Incidence Angle)的關聯性，崩塌區域的表面散射率與體散射率會隨著入射角度而有明顯的改變，但是樹林茂盛的區卻不會有此現象，因此可運用此差異劃分出滑坡所在的位置。

計算崩塌事件前後期的後向散射係數，歸一化的後向散射係數值介於 0~1，假設災後後向散射係數為  $\sigma_{\text{master}}$ ，災前後向散射係數為  $\sigma_{\text{slave}}$  代入式 3：

$$\text{NDSI} = \frac{\sigma_{\text{master}} - \sigma_{\text{slave}}}{\sigma_{\text{master}} + \sigma_{\text{slave}}} \quad (\text{式 3})$$

由於  $\sigma_{\text{master}}$  值與  $\sigma_{\text{slave}}$  值的值域介於 0~1 之間，因而帶入此式後 V 值的值域變為-1~1 之間，因此可確保不同時序的 SAR 影像代入計算後，可以得到相同的值域，不會因時序不同而產生差異，若兩時序的 NDSI 值趨近於 0 則表示此時段中地表沒有太大變化，若 NDSI 值趨近於 -1 或+1，則表示地表發生較劇烈的差異(Furuta and Tomiyama, 2011)，此差異一般來自於地上物發生改變，如崩塌、植生、構造物、水體、農作成長等情形，皆會造成 NDSI 值發生變化。

## 二、雷達植生差異化指數(Radar Vegetation Index Difference, RVID)

雷達植生指數(RVI)為利用極化對於散射反應的差異性，表現地表植生的方式，當衛星具有接收雙偏極訊號的能力時，可經由不同極化組合計算雷達植生指數，經計算後可表現地表植生的方式，在前人研究中 RVI 指標包含多種組合，考慮到臺灣的拍攝的影像多為雙極化的影像組合，因此採用雙極化影像可運用的計算方式，由於理論上同向極化(HH、VV)對於二次散射，如建築物等有較強的反應，而異相極化(HV、VH)對於體散射有更好的反射效果，經計算後可偵測地表的植生狀況，因此當衛星具有接收雙偏極訊號的能力時，可經由 HH、HV 極化或是 VV、VH 極化兩種極化組合簡易計算雷達植生指數，本研究中以 Kao et al.(2010)所提出之計算方式、原式由 HV、HH 極化所組成，亦可以 VH、VV 極化所取代，其公式如式 4 所示，藉由前後兩期雷達植生指數相減，即為雷達植生差異化指數(Radar Vegetation Index Difference , RVID)，如式 5 所示：

$$\text{Kao RVI} = 20 \times \log \left( \frac{\text{HV}}{\text{HH}} \right) \text{ or } \text{Kao RVI} = 20 \times \log \left( \frac{\text{VH}}{\text{VV}} \right) \quad (\text{式 } 4)$$

$$\text{RVID} = \text{RVI}_1 - \text{RVI}_2 \quad (\text{式 } 5)$$

陳錕山等(2011)以小林村為例，運用 TerraSAR-X 兩幅不同極化(HH、HV)的影像，依其比值計算雷達植被指數(Radar Vegetation Index, RVI)，藉由 RVID 訂定門檻值後，可用於追蹤邊坡及地上物的變異點偵測。

## 第五節 多時序判釋堆疊分析

本研究採用 Sentinel-1 雷達衛星資料主要因為其使用之雷達波為 C-band(波長 5.5cm)，相較於 ALOS 系列衛星的 L-band(波長 22~23cm)雷達波訊號，C-band 穿透植生獲得真實地表之反射的能力較差，對於植生密集的区域略為不利，然其資料蒐集頻率高，可利用此特點進行多重判釋以彌補波長不足增加的誤判情形。

在前期研究中使用數幅影像提高崩塌判釋成果的方式已得到初步驗證(水保局，2021)，在 2021 年 8 月豪雨事件中，可判釋出崩坪坑溪上游的崩塌情形(如圖 2-4)，

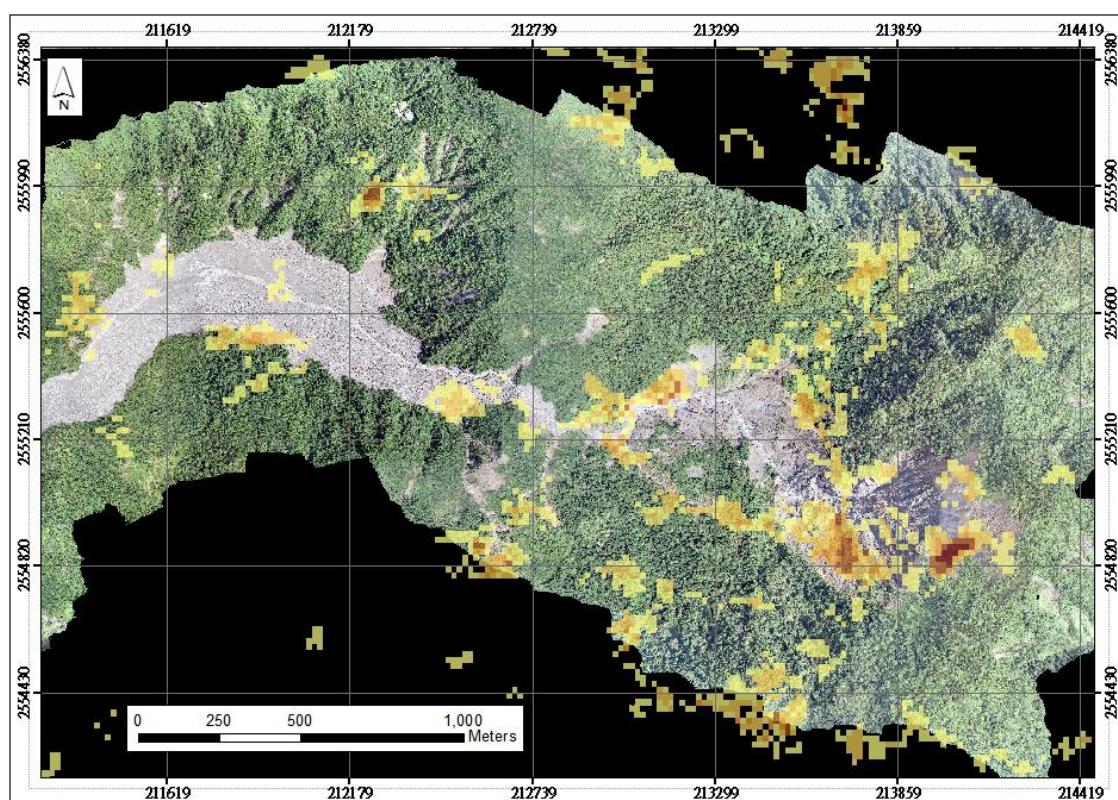


圖2-4 崩坪坑溪0806豪雨事件崩塌判釋情形(水保局，2021)

在本研究中將進一步完善分析模式，由於雷達影像的強弱會因地面反射體性質改變而發生變化，但構成此一變化的因素相當複雜，除了地貌變化之外，也受到地上的散射形式、水氣、介電質、以及熱效應等因素影響，單一影像像對的分析中上述情況會同時發生，導致分析結果中充斥大量雜點，L-band 影像因繞射能力強，地上物的散射形式影響較小，但 C-band 影像卻會嚴重干擾判釋結果，為解決此問題須反覆進行雷達影像的重複觀測，以消除隨機雜訊的影響，因此在本研究中將延伸觀測的時間基線，藉由災害事件前後影像的交叉分析，建立適合用於災害事件的多時序判釋堆疊分析模式，在本研究中將以前一節建立的 RVID&NDSI 指標為基準，產出橫跨災害事件前後的多幅 RVID&NDSI 影像，假設災害事件前影像為 B1、B2、B3，災後影像為 A1、A2，則分別計算不同時序組合的 RVID&NDSI 影像，並以兩種模式進行比較分析，第一種為單時序影像判釋堆疊法，將各時序組合影像以建議門檻值進行崩塌範圍分析，並將多時序結果套疊後，以崩塌判釋次數作為崩塌參考指標，第二種為多時序指標疊加法，將多時序的 RVID&NDSI 影像經加權疊加後，評估建議門檻值範圍，其中加權方式則為本計畫研究之另一重要目標，最後分析結果再與真實崩塌的地真影像進行大型災害事件的驗證，用於評估真實崩塌地的地真資料，則採用林務局的衛星影像、航拍影像以及無人載具影像等光學影像進行崩塌範圍的比對，此研究項目流程圖如圖 2-5 所示。

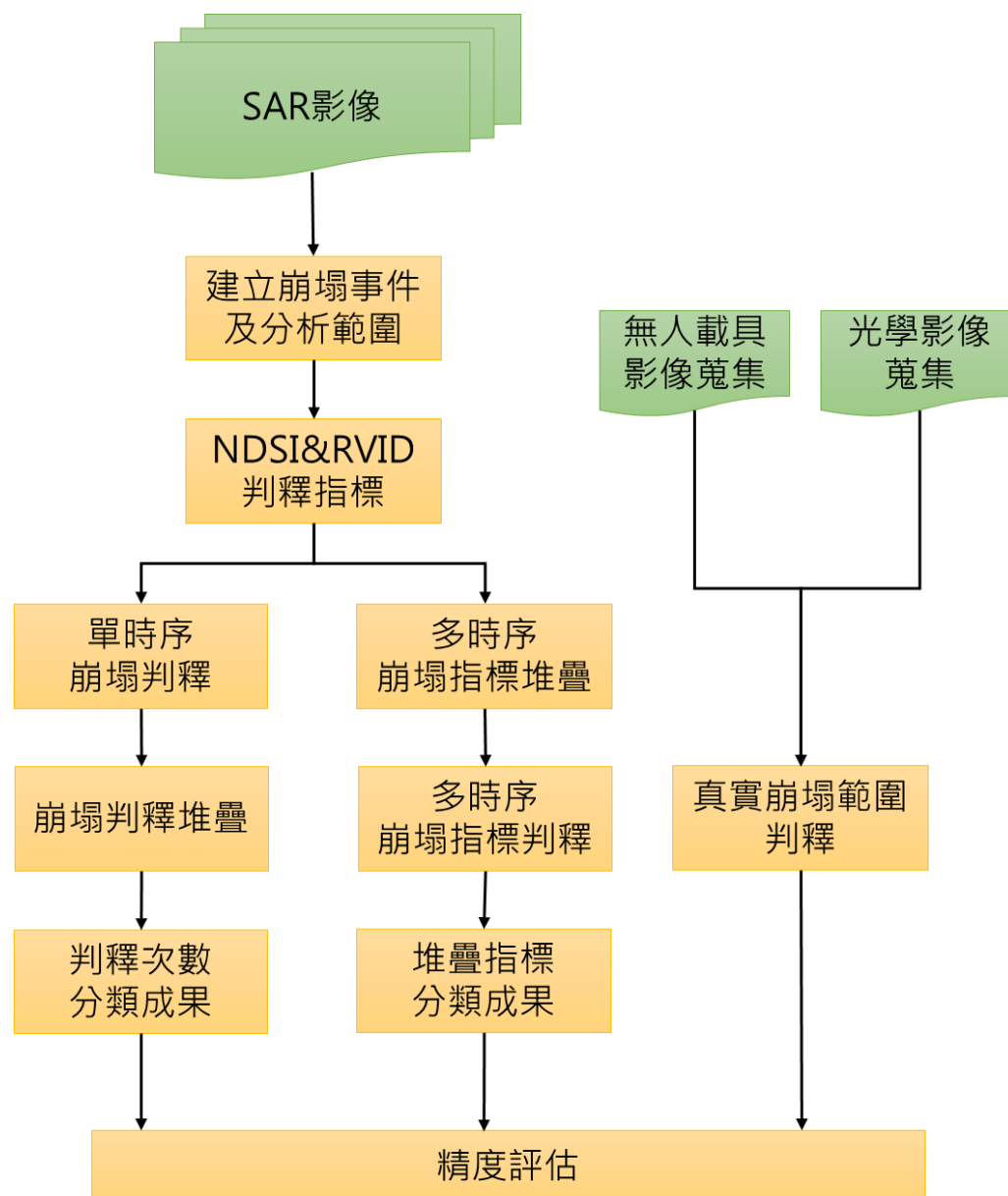


圖2-5多時序判釋堆疊分析流程圖

### 第三章 工作進度與研究成果

Sentinel-1 屬於 C 波段影像，對於地面植生複雜的地區，會有較多的影像雜訊，因此在本研究中針對此一特性進行崩塌判釋方法的改善，並引用前期已建立的分析模式，進一步完善判釋效果。

#### 第一節 災害事件及影像蒐集

2021 年因盧碧颱風引進西南氣流造成後續的 0806 豪雨事件，其降雨影響臺灣 5 天，降雨分布主要在南部臺南、高雄和屏東沿海地區，高雄市茂林區 8 月 5 日的累積雨量 268.5 毫米已達豪雨等級。8 月 6 日的最大日雨量出現在高雄市桃源區(375.5 毫米)，達大豪雨標準；8 月 7 日在屏東縣三地門鄉更出現超大豪雨等級的降雨，日雨量高達 871.5 毫米(NCDR，2021)，造成高屏溪流域內多處山崩地滑的災害事件，其中荖濃溪溪水暴漲，造成位於高雄市桃源區的台 20 線明霸克露橋斷橋事件為較嚴重災情。

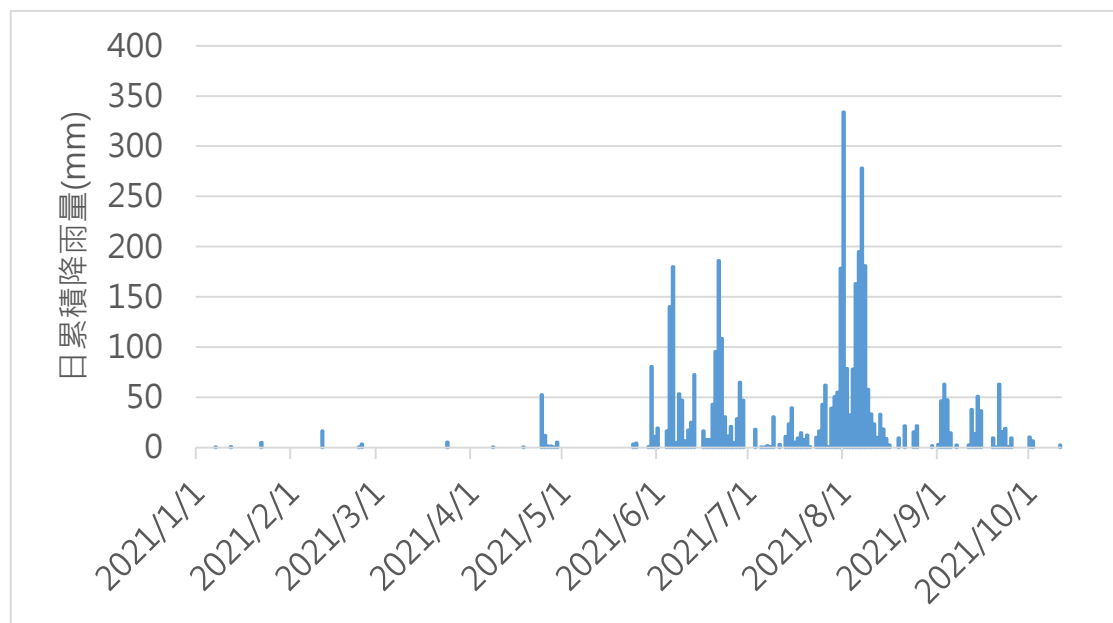


圖3-1 0806 降雨事件分布情形

在本計畫中主要以 0806 事件為例，由於 110 年度的 3 月至 10 月間，主要降雨發生在 6 至 8 月間，其中又以 8 月的災害事件最為集中，且無其他災害事件影響分析結果，因此本計畫蒐集 Sentinel-1 GRD 影像 3 月至 9 月間共計 32 幅作為事件分析(如表 3-1)，並將分析結果運用於今年尼莎颱風與東北季風共伴的 1016 豪雨事件中進行驗證。

**表3-1 0806 豪雨事件使用之多時序 SAR 影像**

| 衛星/軌道              | 資料格式 | 蒐集區間          | 數量(幅) |
|--------------------|------|---------------|-------|
| Sentinel-1 上升軌 69  | GRD  | 2021/3~2021/9 | 16    |
| Sentinel-1 下降軌 105 | GRD  | 2021/3~2021/9 | 16    |

## 第二節 地形遮罩影響範圍

雷達波是以側向視角入射地面，並接收雷達回波，此過程中因地形起伏產生的幾何誤差稱作地形效應，地形的起伏嚴重時會造成雷達回波的解算錯誤，一般而言有三種情形在對山區進行分析時較容易發生(Ouarzeddine,2002)：

### 1.前坡縮短(Fore Shortening)：

雷達入射方向的坡面，在接收雷達波時，因地形起伏而縮短了接收的斜距，在雷達影像上產生壓縮的現象(Zebker and Lu,1998)，如圖 2-3 (a)。

### 2.疊置(Layover)：

此為前坡縮短的極端現象，由於本來地形上屬於不同高度的散射點，卻因方位向與雷達的斜距相同，當雷達波成像時，將本來不同位置的回波，重疊為一像素，甚至發生坡頂與坡址翻轉的現象，因而無法分析出其真實的相位差，以至於相位還原後也無法取得該區域的變形值，如圖 2-3 (b)。

### 3.陰影(Shadow)：

在雷達波發出時，受到地形遮蔽，使雷達波無法抵達地面進行反射，進而使回波中產生一片無法成像的區域，如圖 2-3 (c)。

本研究區因地勢變化急遽，合成孔徑雷達的成像受到地形效應影響較大，前坡縮短的效應在地理編碼時，可進行幾何校正，而針對無法校正的疊置陰影效應區則產生遮罩，在後續分析時排除，以避免將錯誤的地形變化值列入，影響統計結果。

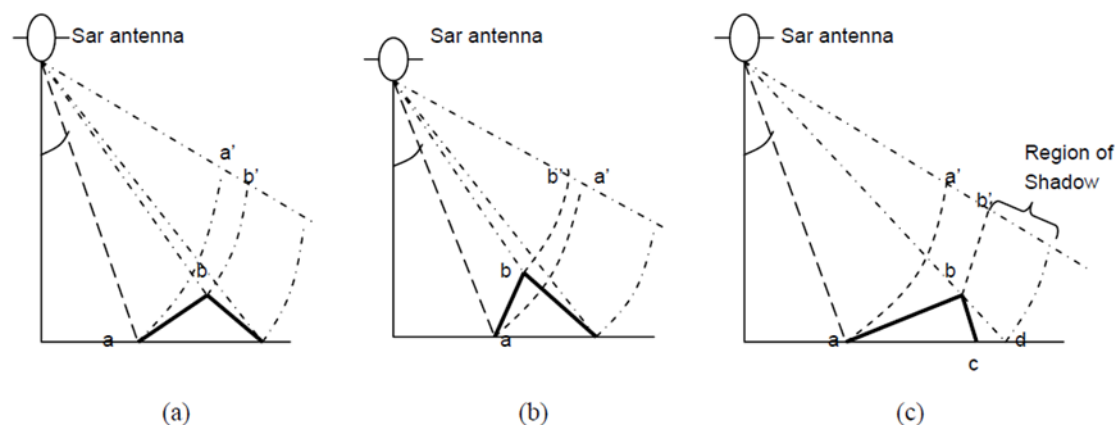


圖3-2 受地形效應影響情形

資料來源：Ouarzeddine(2002)

三種地形效應中，前坡縮短可透過高精度數值地形及輻射校正進行修正，但疊掩跟陰影部分則無法校正，且受到地形效應的區域通常也是產生後向散射係數的極端值，對於計算影像平均值及標準差造成影響，因此本研究將地形效應影響區，分別計算上升軌道 69、下降軌道 105 的地型效影像遮罩(如圖 3-3 、圖 3-4 )，其中紅色的前坡縮短區、藍色的陰影區不列入後續資料計算，並以遮罩外的 NDSI 分析影像計算影像平均值及標準差，減少極端值對計算公式的影響，本研究中僅考慮沒有地形效應影響的判釋區域，因此地形效應遮罩也用於真實崩塌的範圍，以避免遮罩內的真實崩塌地計入導致漏判率上升。

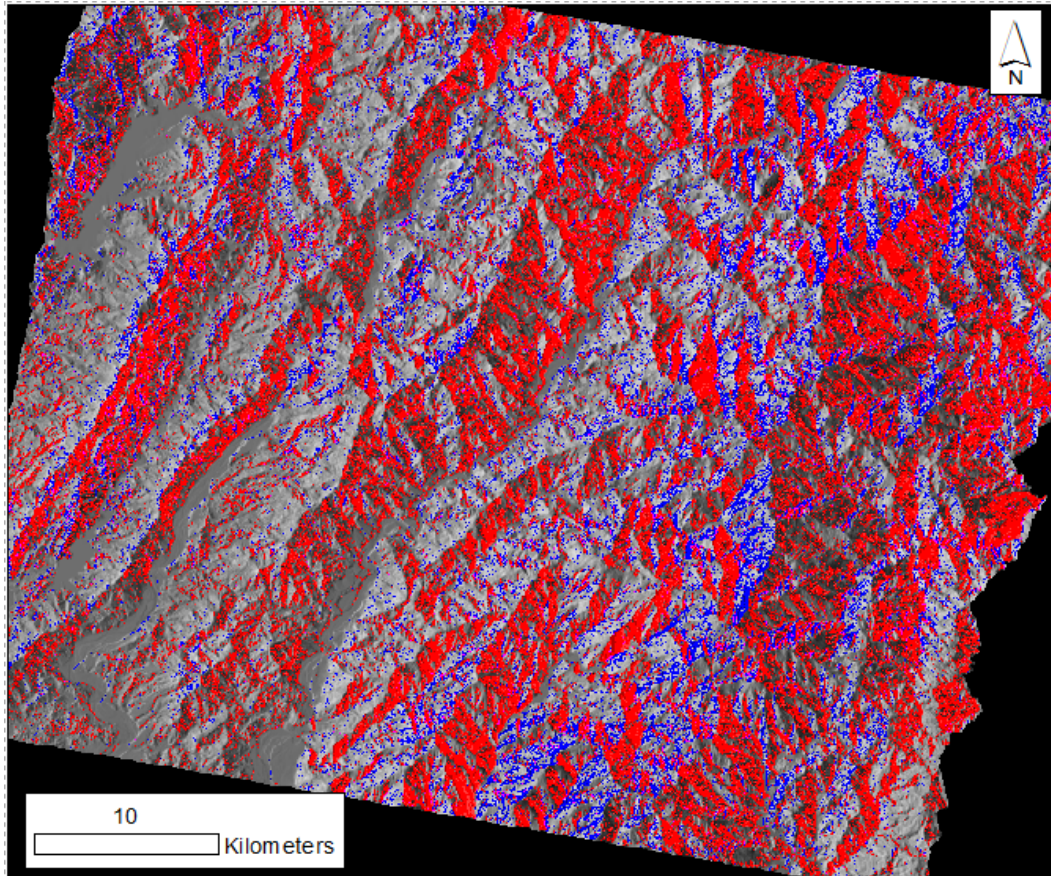


圖3-3 Sentinel-1 105 下降軌道地形效應影響範圍

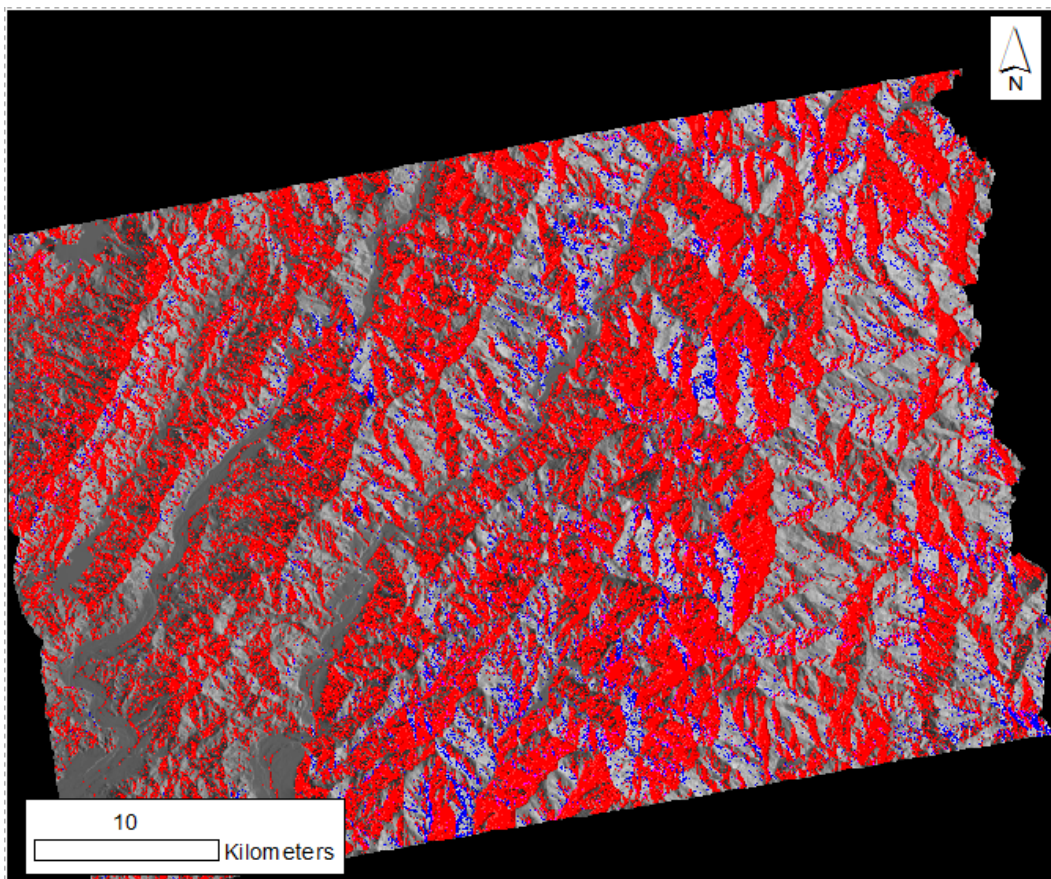


圖3-4 Sentinel-1 69 下降軌道地形效應影響範圍

### 第三節 影像像元分析

後向散射歸一化指標(NDSI)需針對單一極化影像分析，本研究使用的 Sentinel-1 的兩個極化影像中，崩塌事件前後同向極化(VV)與交叉極化(VH)的變化並不相同，VV 極化對表面散射的特性較敏感，然而表面散射的回波方向受入射角度的影響較大，在不同的坡向及坡度強度變化可能截然不同，以一部分崩塌地的像元統計分析如圖 3-5 所示，在崩塌發生的前後，後向散射係數 $\sigma$ 的強度雖有發生改變，但整體平均的變化並不明顯，災後變強及變弱的像元皆有所增加。

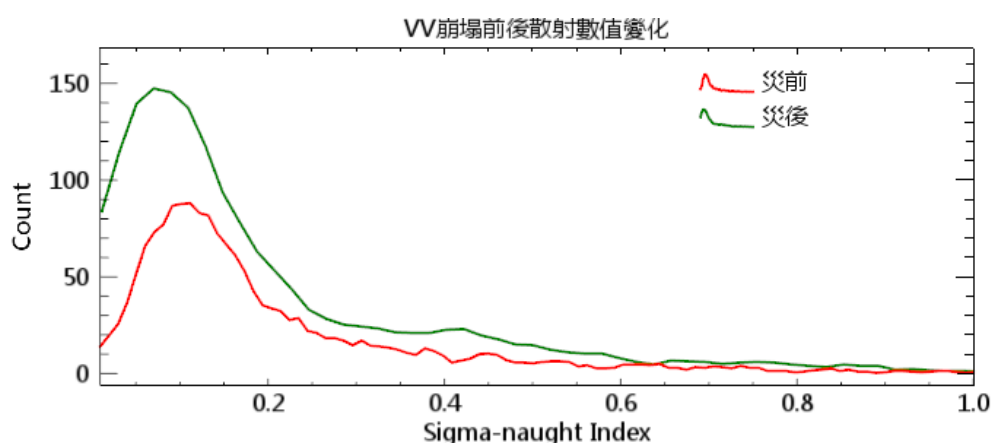


圖3-5 Sentinel-1 VV 同向極化崩塌前後散射值變化

VH 極化則是對體散射的特性敏感，體散射是發生於如植生茂盛區的複雜回波結構，需透過地上物不規則的多次反射，改變的電磁波的偏振方向，因此受地形變化的影響較小，但因反射的情況較多強度也比 VV 極化弱，以像元統計分析如圖 3-6 所示，災後的 VH 極化影像強度明顯的下降，經計算後可以利用此特性提取崩塌地。

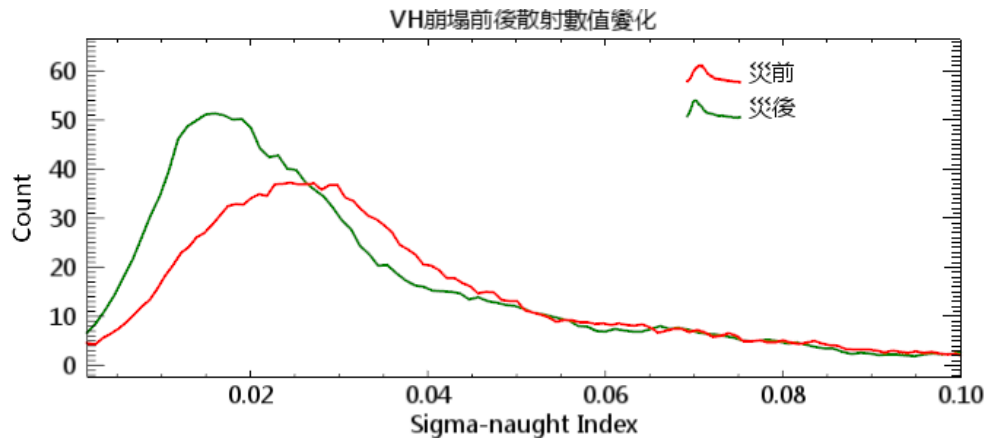


圖3-6 Sentinel-1 VH 交叉極化崩塌前後散射值變化

基於崩塌地的極化分布特性，當原先植生覆蓋的區域發生崩塌後，VH 極化普遍會降低散射強度，所以 NDSI 將會降低，但 VV 極化則會根據坡向而有較大的差異，表面散射的強度隨坡向改變，且災害前後的變化並不如 VH 極化明顯。

## 第四節 單時序判釋堆疊

單時序影像判釋法，以運用災害前後的任意兩個時序影像，組成單一個時間像對後，運用 NDSI&RVID 指標進行崩塌判釋，並將各時間區間的判釋結果堆疊為一幅判釋結果(如圖 3-7 所示)，以重複判釋觀測的方式，提升辨識的準確性，以崩塌判釋次數作為崩塌參考指標。

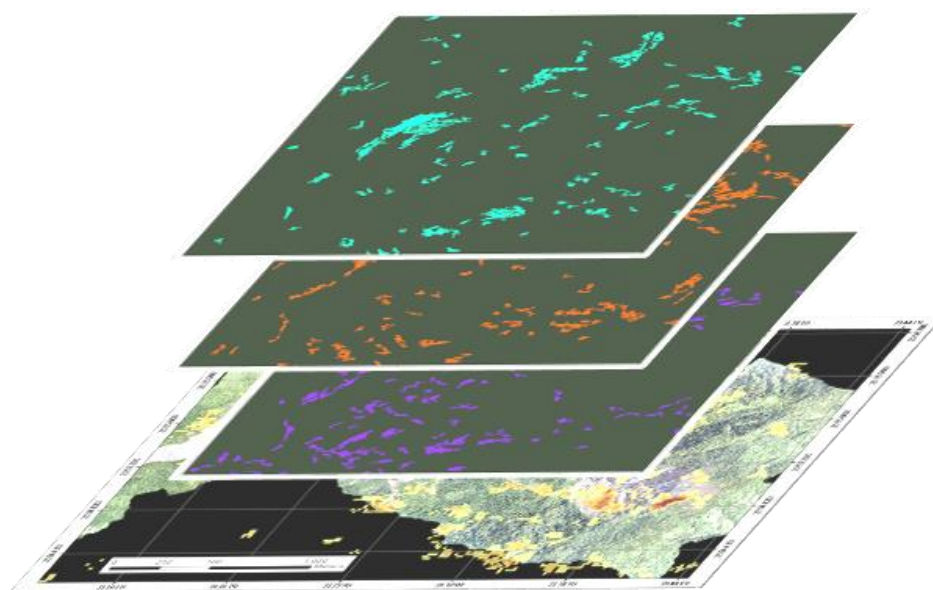


圖3-7 單時序判釋堆疊示意

本計畫中共採用了災前的上升軌影像 3 幅，下降軌影像 3 幅，災後的上升軌影像 1 幅，下降軌影像 1 幅，完成上升軌 3 幅、下降軌 3 幅的判釋結果後，將判釋次數合併如圖 3-8 所示：

初步判釋結果中，已可辨識出崩塌發生範圍，然而受限於影像限制，僅用單一組的時間像對所得到的判釋結果通常包含較多的影像雜訊，因此在多個時間像對堆疊之後，僅得到 1 次的判釋多為誤判區域，而反覆判釋次數，也可表示該範圍發生崩塌的可性度，此一分析方式提供一種快速判釋及分析的參考指標，然而單幅影像的個別誤差會影響判釋結果，實際運用時不易評估採計影像造成的誤差影響，因此僅作為一種參考圖資使用。

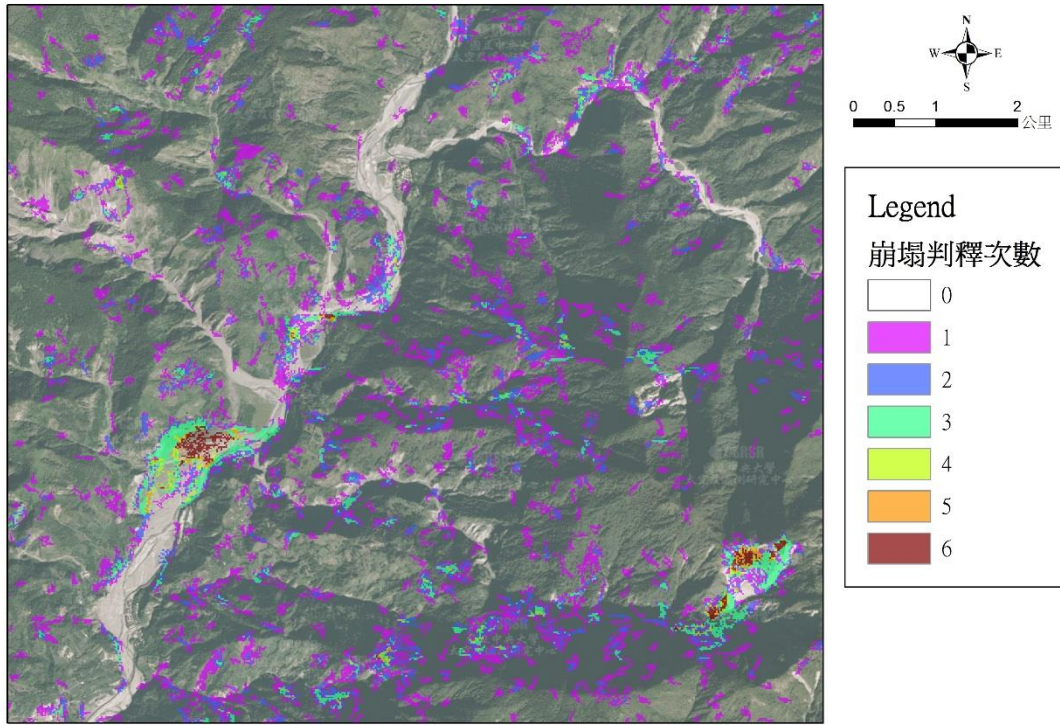


圖3-8 單時序判釋次數堆疊圖

### 第五節 多時序指標堆疊

多時序指標堆疊，係以災害前後的不同時間像對，各別計算 NDSI 及 RVID 指標後不進行判釋，而是將上升軌及下降軌各時間像對的指標影像重新加權疊加平均(如式 6)，最後將上升下降軌的結果融合，以值域範圍  $\mu - 1.5\sigma$  計算崩塌判釋範圍。

$$\bar{N} = \frac{\sum_1^n c(N_i)}{n} \quad \bar{R} = \frac{\sum_1^n c(R_i)}{n} \quad (\text{式 6})$$

其中，

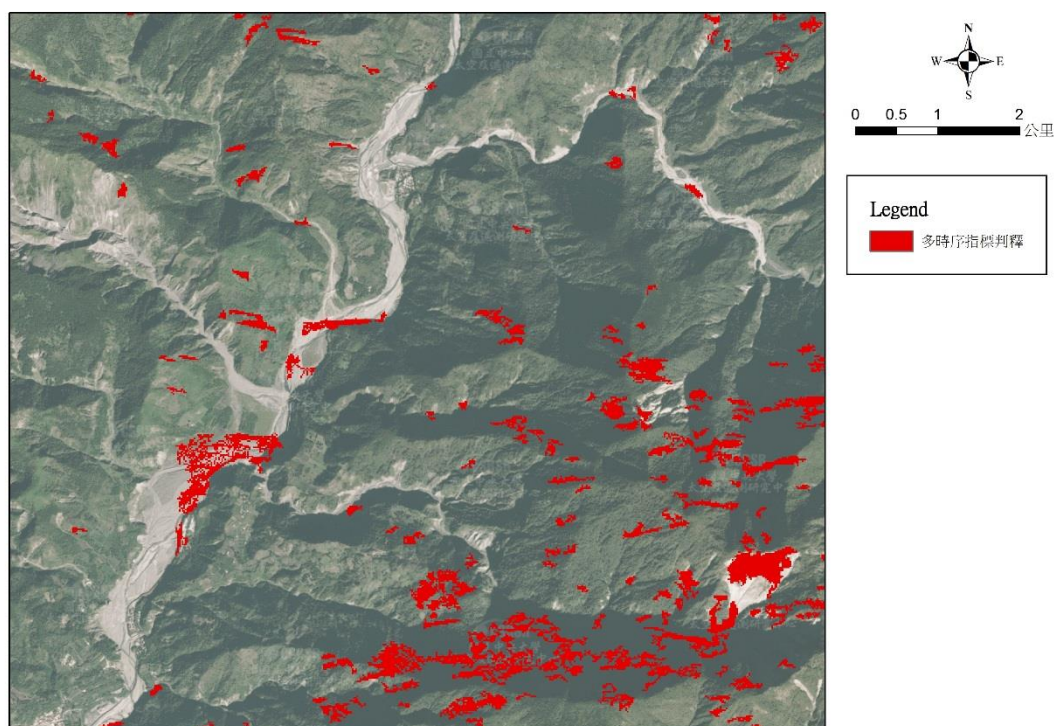
$N_i$  是單一時間像對的 NDSI 指標

$R_i$  是單一時間像對的 RVID 指標

$C$  是加權數

$n$  是使用的時間像對數

本計畫中共採用了災前的上升軌影像 4 幅，下降軌影像 3 幅，災後的上升軌影像 1 幅，下降軌影像 1 幅，完成 NDSI 與 RVID 指標計算後，以計算出的判示範圍如圖 3-9 所示：



**圖3-9 6/23 至 8/12 多時序指標判釋成果**

進一步採用了災前的上升軌影像 4 幅，下降軌影像 3 幅，災後的上升軌影像 4 幅，下降軌影像 4 幅，完成 NDSI 與 RVID 指標計算後，以計算出的判釋範圍如圖 3-10 所示：

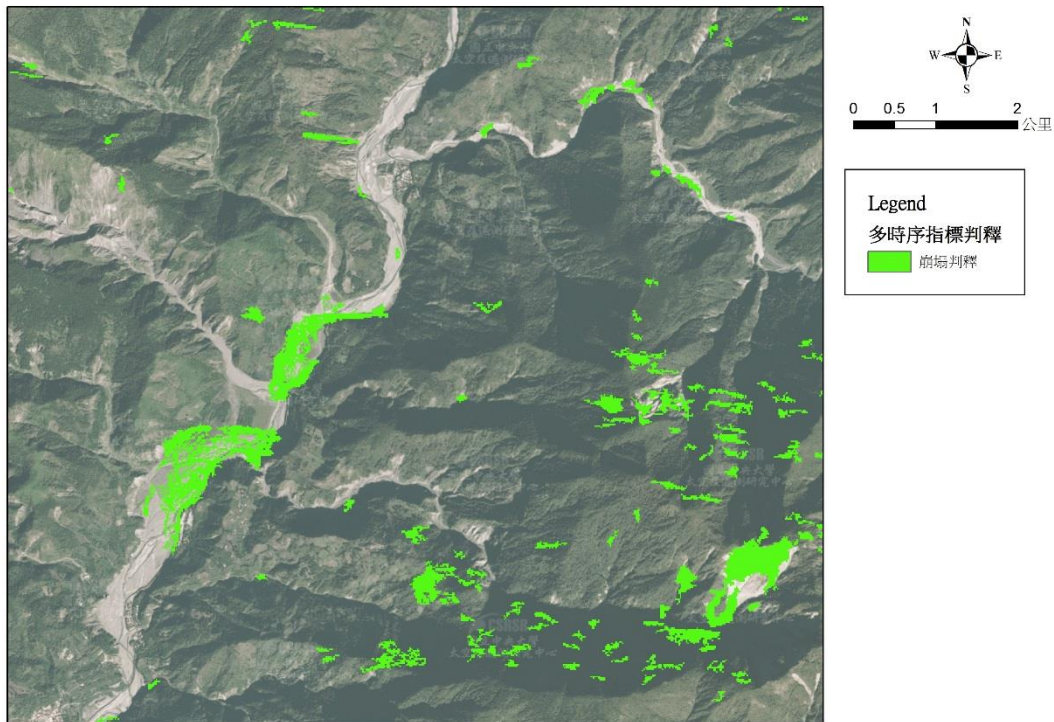


圖3-10 6/23 至 9/27 多時序指標判釋成果

從圖 3-9 、圖 3-10 的初步判釋成果中可發現，隨著災後蒐集的影像增加，可逐步增加崩塌判釋的準確性，但仍保留相當數量的判釋雜訊，仍須進一步改善。

## 第六節 多時序影像堆疊

由前所述將計算後的指標平均後仍無法獲得良好的判釋結果，主要是個別影像中受大氣環境影響的影響因子，經指標計算後被放大其影響，因此降低單一影像中雜訊影像可能更為有效，因此在第三種評估方式中，直接將事件前、事件後的多期影像進行資料平均處理，平均後的影像再計算 NDSI&RVID 指標，由於單一的影像軌道對雷達回波訊號有顯著的影響，因此分別將上升軌、下降軌影像分別計算，最後疊合判釋結果，其計算流程如所圖 3-11 示，

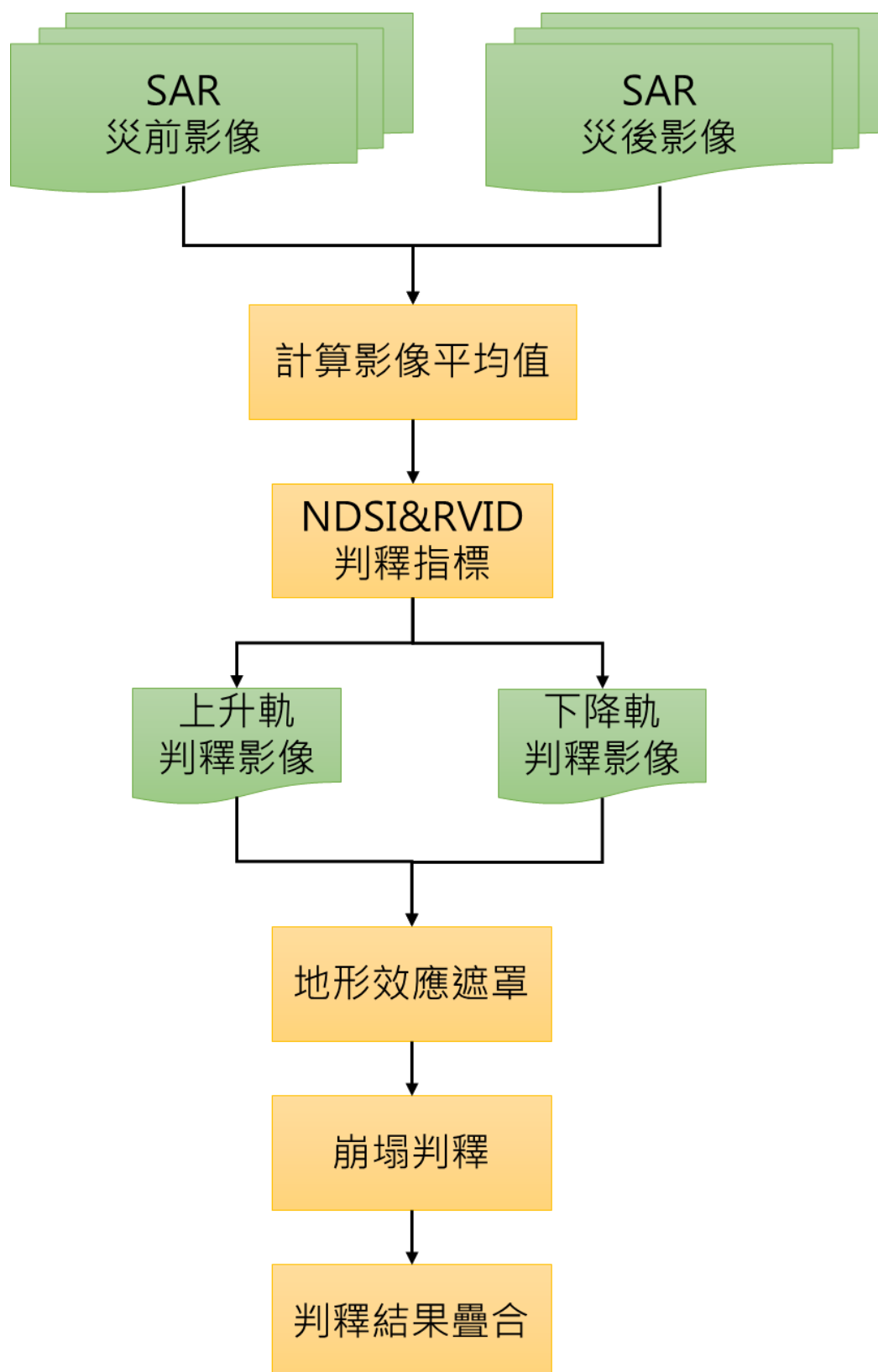


圖3-11 多時序影像堆疊計算流程

### 一、不同軌道對判釋精度的影響

不同軌道受地形因素影響甚大，因此分別探討資料分析的精度差異，本研究區以 2021 年 0806 豪雨事件為例，並以發生斷橋事件的玉穗溪為中心圈繪崩塌區做精度評估參考，真實崩塌資料則參考 SPOT7 衛星影像，以事件前 2021/07/01 及事件後 2021/09/24 兩幅影像的主要崩塌地變化做為崩塌範圍的參考，影像計算範圍如所示，衛星影像變化如圖 3-12 所示。

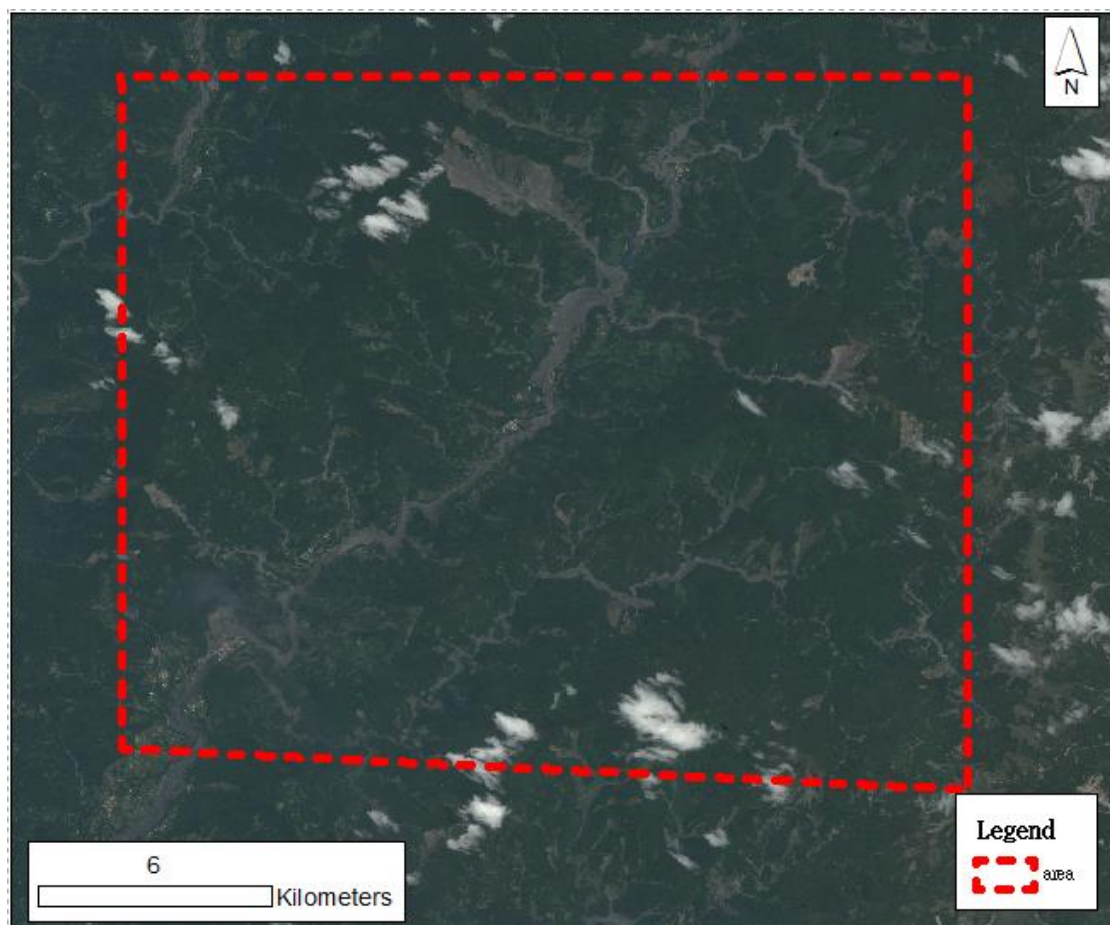


圖3-12 研究區影像精度評估計算範圍

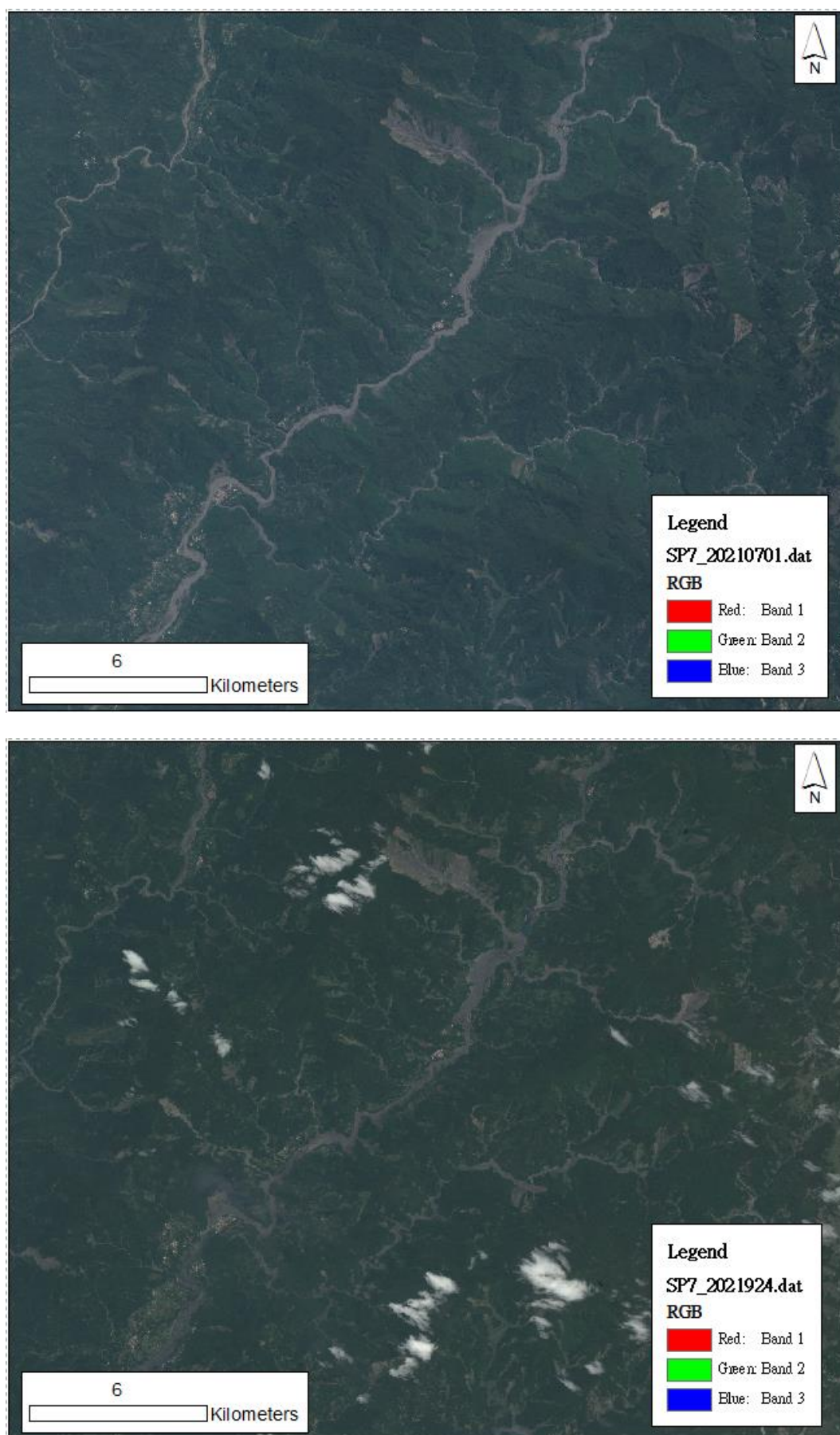


圖3-13 災害前後 SPOT7 衛星影像

以 105 下降軌取災前 2021/03/21~2021/07/19 共計 11 幅影像，災後 2021/08/12~2021/09/17 共計 5 幅影像，分析結果如圖 3-14 所示：

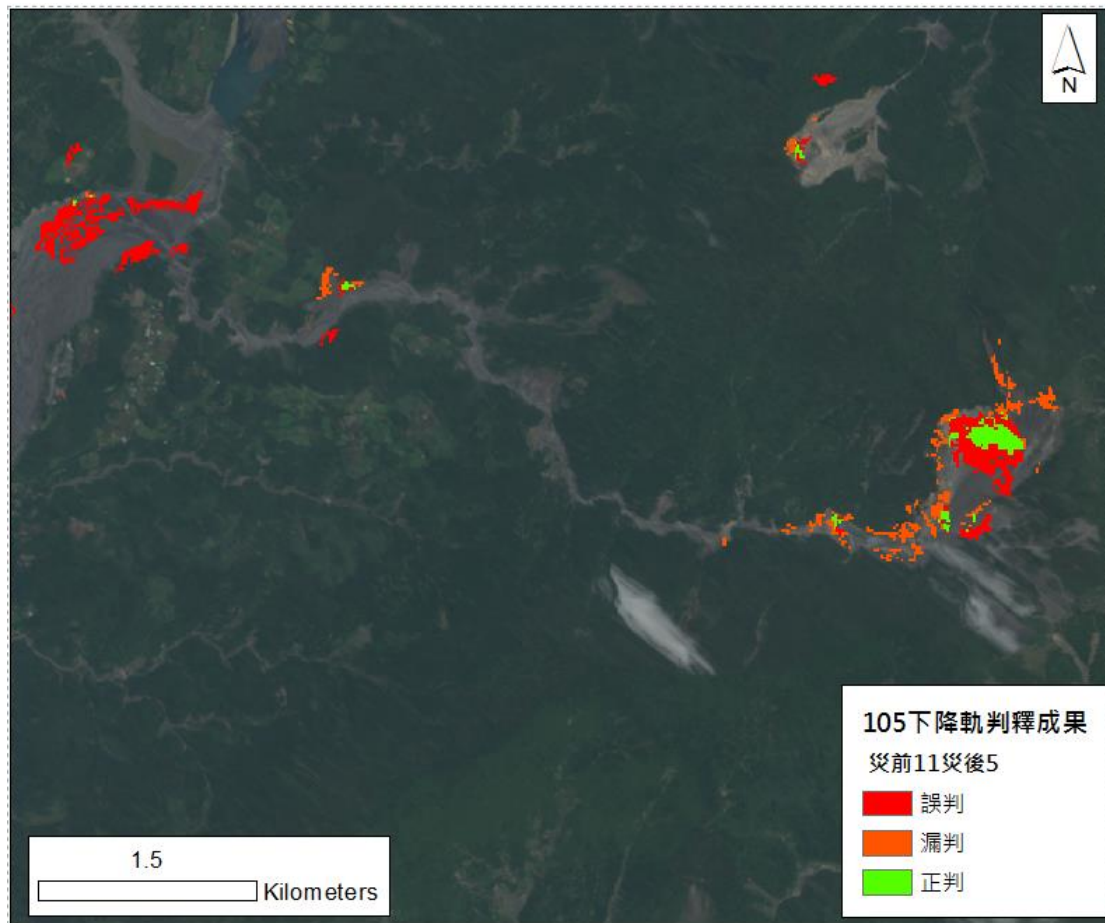


圖3-14 2021/03/21~2021/07/19 判釋成果

以 69 上升軌取災前 2021/03/07~2021/07/29 共計 12 幅影像，災後 2021/08/10~2021/09/27 共計 4 幅影像，分析結果如圖 3-15 所示，

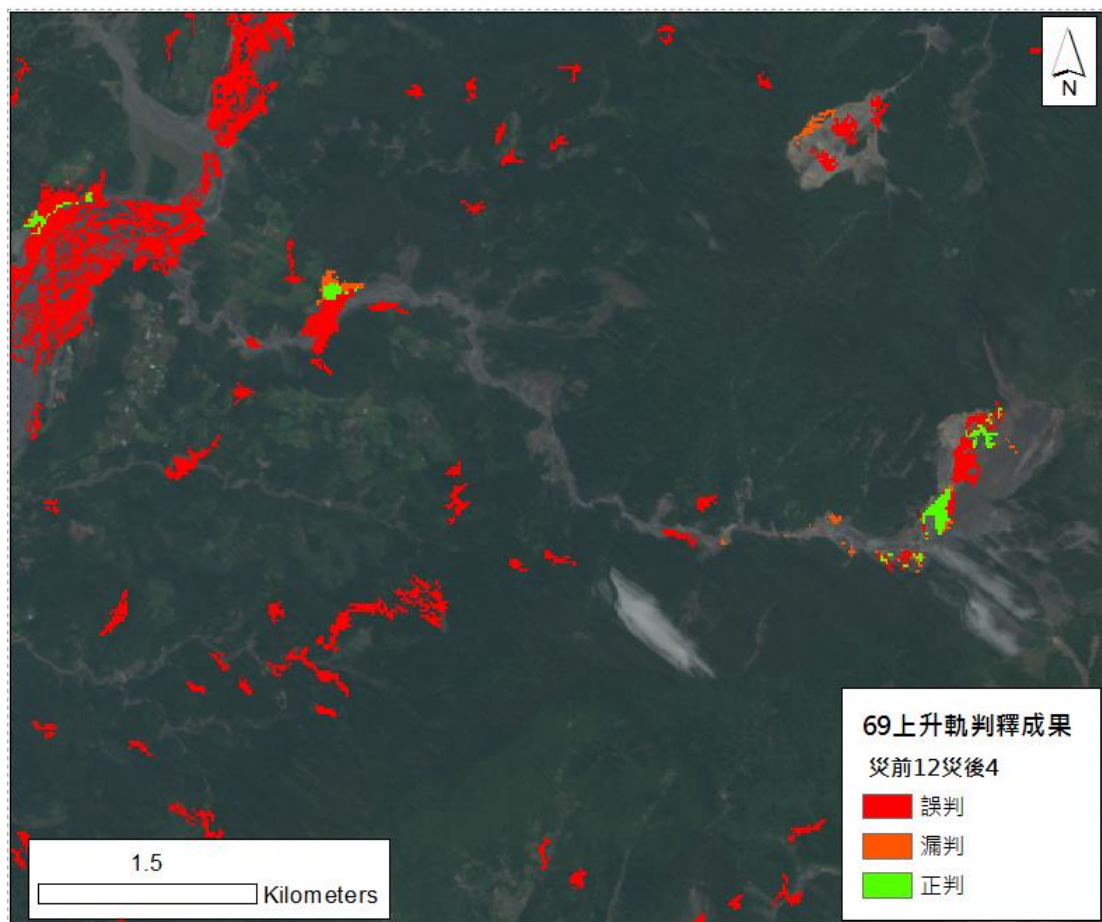


圖3-15 2021/03/07~2021/07/29 判釋成果

將判釋像元進行誤差矩陣計算，評估結果如 0，分析結果顯示，在此次事件中，105 軌道雖有較好的分析結果，但召回率偏低，由於參考的衛星影像與雷達影像的解析度差 4 倍，判釋精度不足仍與影像解析度相關，加上影像本身的誤差也提高了誤判率及漏判率。

SAR 影像的誤判主要有兩個原因，第一為雷達影像對於水體的反應較為明顯，以至於大量河道的沖蝕與堆積也被判釋為地表變異，進而增加了誤判像元，另一方面，參考的 SPOT 衛星影像僅能透過植生的變化來判釋新生崩塌地情形，若是原先裸露地持續刷深，則難以用衛星影像做辨別，而 SAR 影像對裸露地變化則具有相當的辨識能力。

表3-2 不同軌道判釋精度評估

| 軌道  | 召回率    | 準確率    | 精確率    | 誤判率    | 漏判率    | 期望精度   | Kappa |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 105 | 24.82% | 99.58% | 16.20% | 83.80% | 75.18% | 99.47% | 19.4  |
| 69  | 63.1%  | 97.5%  | 4.6%   | 95.4%  | 36.9%  | 97.2%  | 8.3   |

## 二、影像數量與精度提升關係

Sentinel-1 影像受限於影像波長，分析時包含較多的噪訊，因此增加參與分析的影像數量，理論上能提昇分析的資料精度，但過長的分析時間也可能受到其他事件影響，致使降低資料判釋結果，在本計畫中，由於 110 年 3 月至 9 月間，主要發生的災害事件只有 8 月的泥沙颱風及引進西南氣流導致的降雨，其他降雨事件影響並不顯著，可用於分析長時序的雷達影像變化情形。

此階段將影像分為上升軌及下降軌進行分析，上升軌道(69)分為四組資料，分別是 1.災前 12 幅、災後 4 幅；2.災前 4 幅、災後 4 幅；3.災前 4 幅、災後 1 幅；4.災前 1 幅、災後 1 幅。下降軌道(105)分為四組資料，分別是 1.災前 11 幅、災後 5 幅；2.災前 4 幅、災後 5 幅；3.災前 4 幅、災後 1 幅；4.災前 1 幅、災後 1 幅。最後將各組合結果計算誤差矩陣，其計算結果如表 3-3 、表 3-4 所示，各期影像分析結果如圖 3-16 圖 3-23 所示：

分析結果顯示，當使用影像數量增加時整體判釋效果也會提升，但在災後影像不足時，整體精度提升效果有限，此外 69 軌在使用 12 幅災前影像數量判釋時，反而降低了判釋精度，推測是部份使用影像中有包含極端的異常值。

值得注意的是，不論下降軌道影像數量增加與否，崩塌像元的召回率並沒有明顯差異，顯示此一軌道可能已經達到補捉崩塌像元的上限。

另一方面，比對判釋結果的誤判區域，主要落於河道變化，另一部分則是原本的崩塌裸露地，有持續刷深的情形，因受限於衛星解析度，此現象並不易辨別，須於日後取得高精度影像另行分析。

**表3-3 上升軌道 69 精度評估**

| 災前 | 災後 | 召回率   | 精確率  | 誤判率   | 漏判率   | Kappa |
|----|----|-------|------|-------|-------|-------|
| 1  | 1  | 38.2% | 3.5% | 96.5% | 61.8% | 6.1   |
| 4  | 1  | 45.1% | 4.3% | 95.7% | 54.9% | 7.5   |
| 4  | 4  | 58.8% | 6.3% | 93.7% | 41.2% | 11    |
| 12 | 4  | 63.1% | 4.6% | 95.4% | 36.9% | 8.3   |

**表3-4 下降軌道 105 精度評估**

| 災前 | 災後 | 召回率   | 精確率   | 誤判率   | 漏判率   | Kappa |
|----|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 1  | 28.3% | 2.9%  | 97.1% | 71.7% | 4.9   |
| 4  | 1  | 34.3% | 3.6%  | 96.4% | 65.7% | 6.1   |
| 4  | 5  | 26.5% | 11.7% | 88.3% | 73.5% | 16    |
| 11 | 5  | 24.8% | 16.2% | 83.8% | 75.2% | 19.4  |

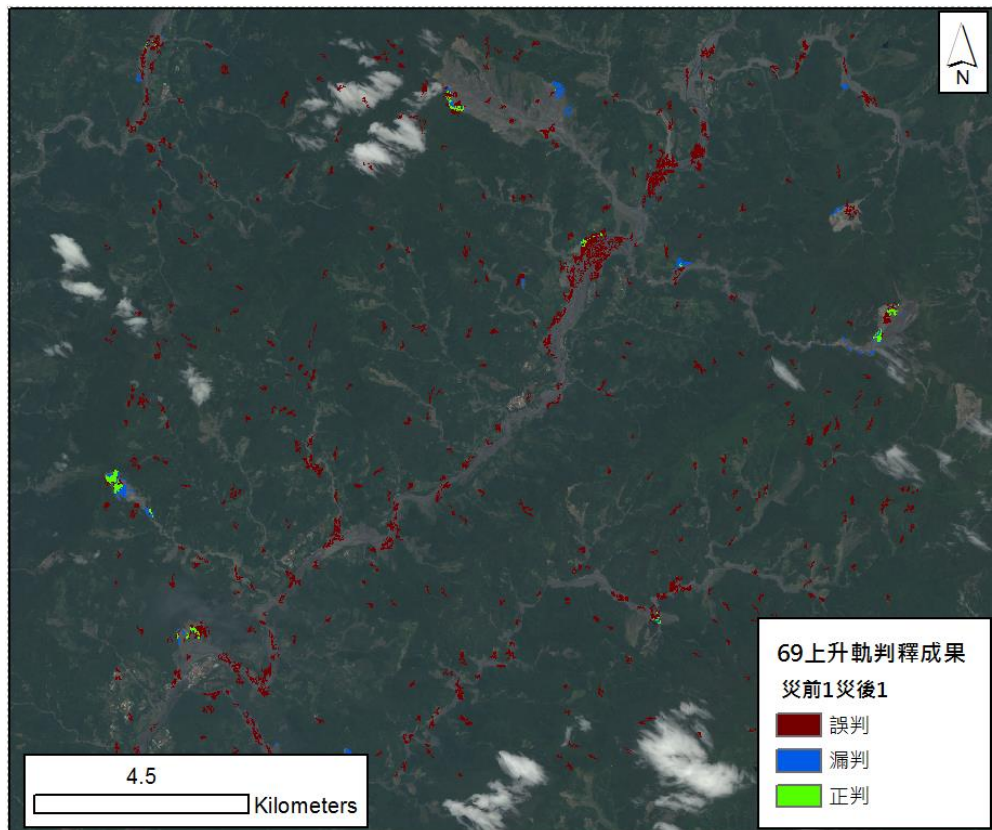


圖3-16 69 上升軌災前 1 災後 1 判釋結果

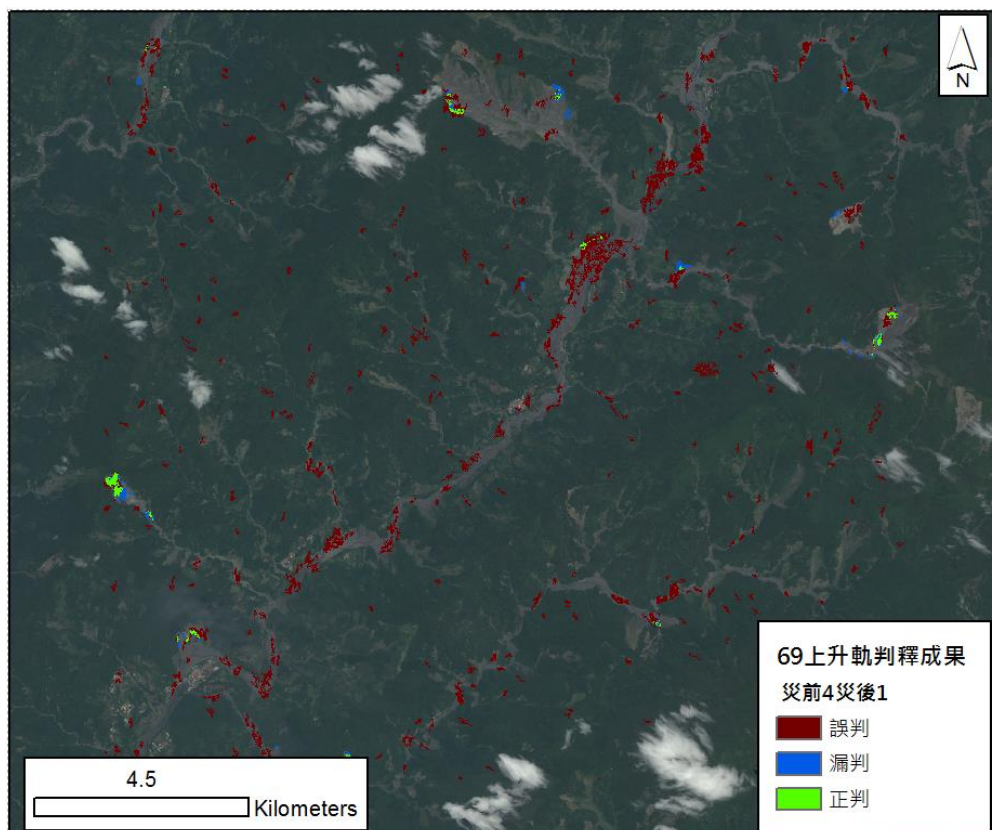


圖3-17 69 上升軌災前 4 災後 1 判釋結果

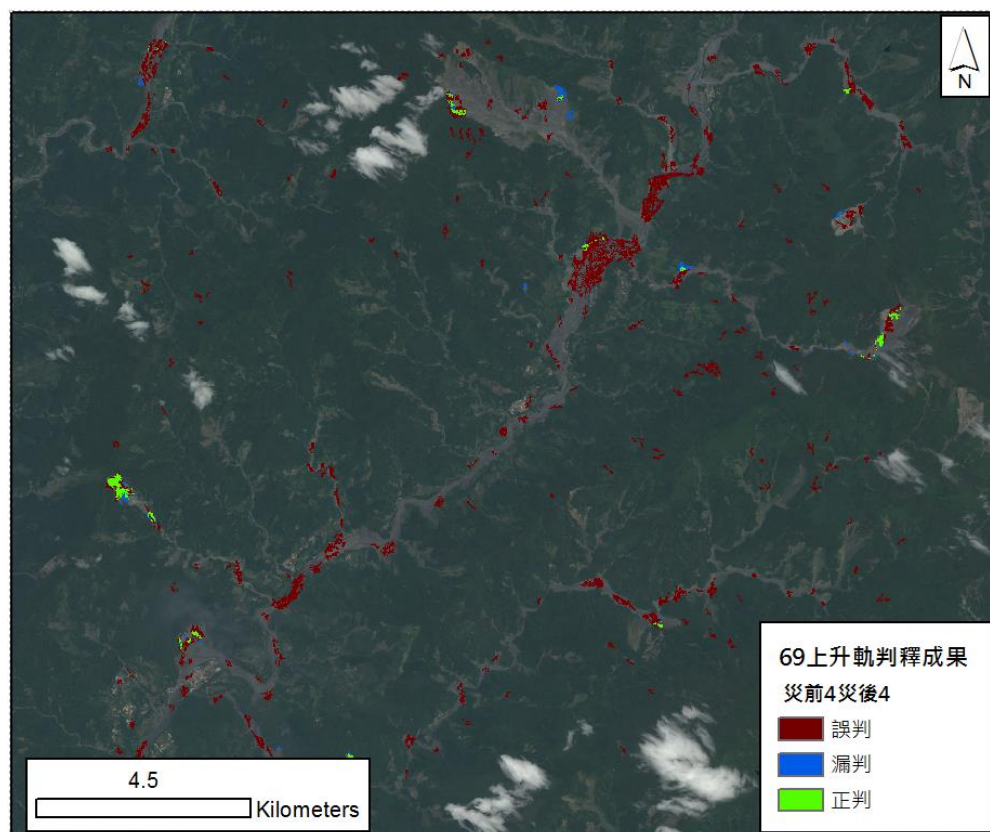


圖3-18 69 上升軌災前 4 災後 4 判釋結果

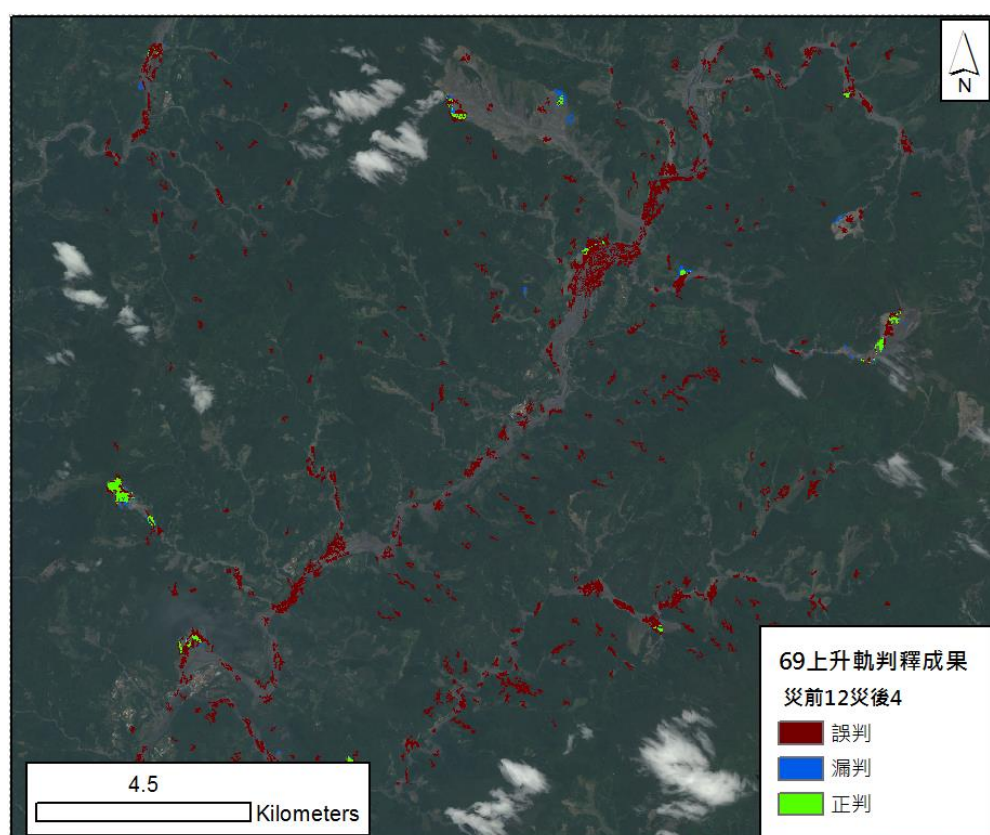


圖3-19 69 上升軌災前 12 災後 4 判釋結果

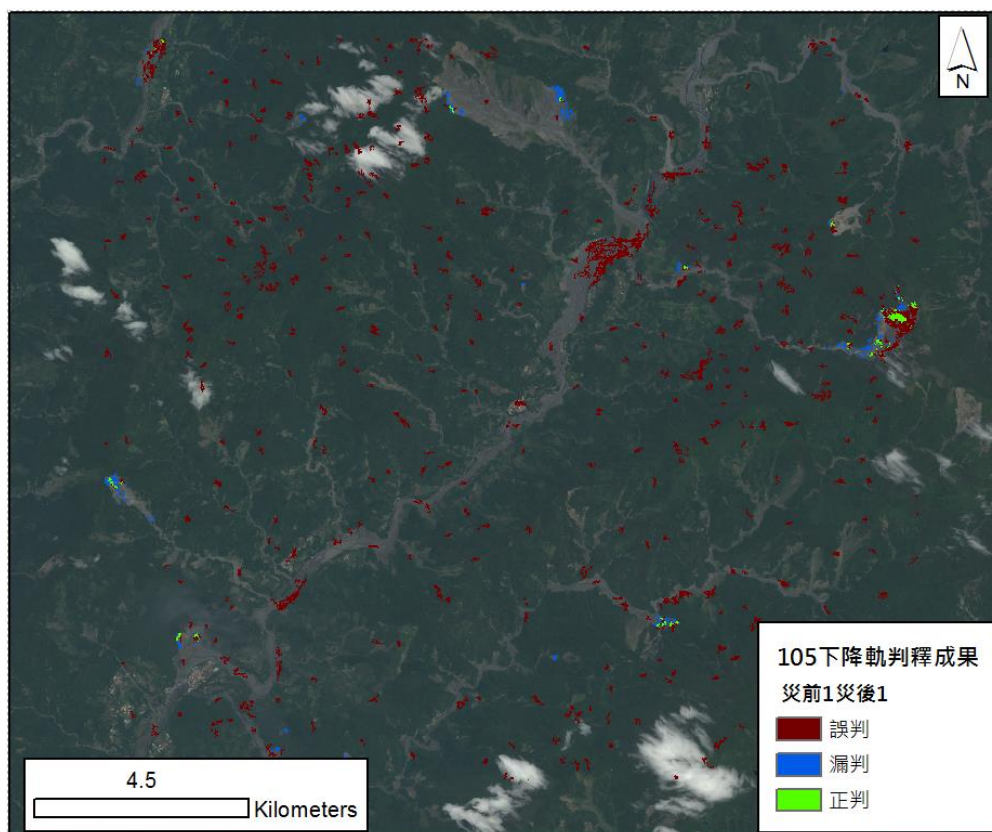


圖3-20 105 下降軌災前 1 災後 1 判釋結果

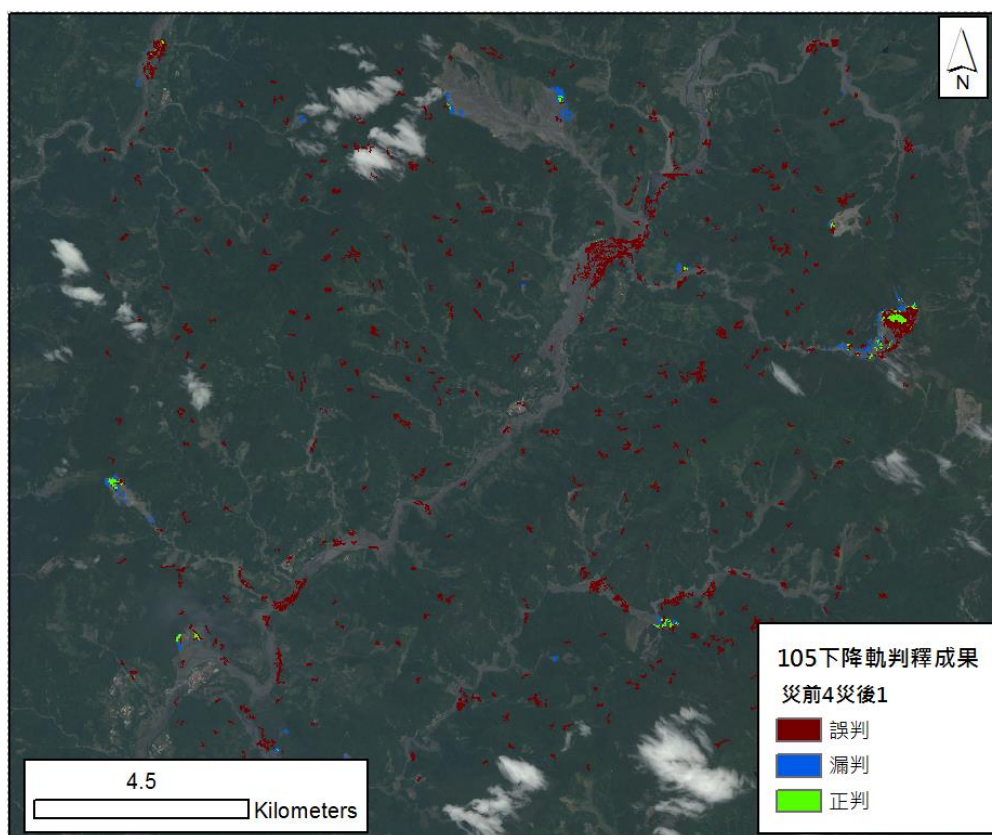


圖3-21 105 下降軌災前 4 災後 1 判釋結果

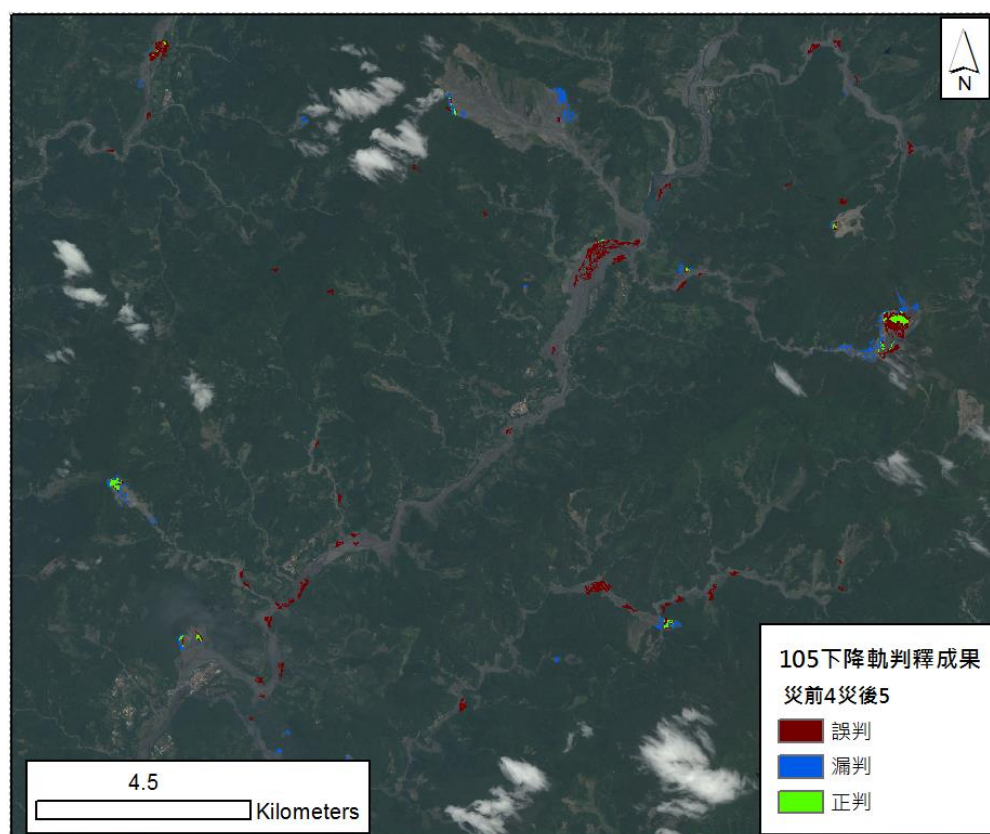


圖3-22 105 下降軌災前 4 災後 5 判釋結果

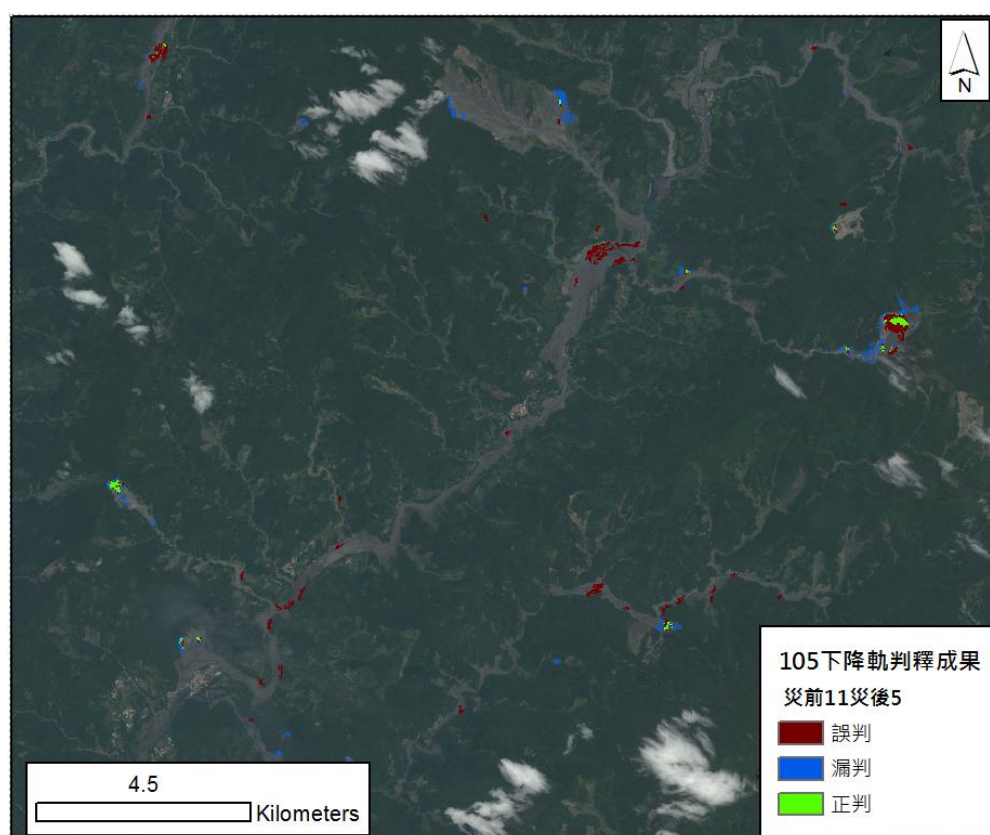


圖3-23 105 下降軌災前 11 災後 5 判釋結果

## 第四章 計畫進度甘特圖

本補助計畫至民國 111 年 12 月 31 日完成，計畫甘特圖如表 4-1。重要期程一覽，如表 4-1。

表4-1 計畫甘特圖

| 重要工作項目                                       | 工作比重<br>(%) | 預定進度  | 1-3 月 | 4-6 月      | 7-9 月 | 10-12 月 |
|----------------------------------------------|-------------|-------|-------|------------|-------|---------|
| 多 時 序 合 成<br>孔 徑 雷 達 影<br>像 資 料 蒐 集<br>及 建 置 | 15          | 工作內容  | 文獻蒐集  | 影像資料庫蒐集及建置 | --    |         |
|                                              |             | 累計百分比 | 20    | 100        | 100   | 100     |
| 雷 達 影 像 前<br>處 理                             | 30          | 工作內容  | -     | 雷達影像前處理    |       |         |
|                                              |             | 累計百分比 | 0     | 80         | 100   | 100     |
| 地 表 變 異 資<br>訊 分 析                           | 30          | 工作內容  | -     | 地表變異資訊分析   |       |         |
|                                              |             | 累計百分比 | 0     | 50         | 70    | 100     |
| 多 時 序 判 釋<br>堆 疊 分 析                         | 25          | 工作內容  | -     | 多時序判釋堆疊分析  |       |         |
|                                              |             | 累計百分比 | 0     | 30         | 70    | 100     |
| 累積總進度(%)                                     |             |       | 3     | 62         | 84    | 100     |

**表4-2 重要期程一覽**

| 工作項目                     | 應完成時間                |
|--------------------------|----------------------|
| 提送工作執行計畫(一式 10 份)        | 於 111 年 3 月 11 日前    |
| 提送期中報告書(一式 5 份)          | 預估於 111 年 7 月 15 日前  |
| 提送期末報告書(一式 5 份)          | 預估於 111 年 11 月 18 日前 |
| 交付成果報告書(一式 5 份)及<br>會計報告 | 於 111 年 12 月 26 日前   |

## 第五章 結論與建議

本計畫中共有下列兩點結論、一點建議：

### 第一節 結論

#### 一、快速崩塌判釋參考指標：

根據地貌變異時，雷達影像的強度與極化發生變化的物理性質，建立單一時序的 NDSI&RVIS 法的崩塌範圍判釋指標，以及建立基礎門檻值，本研究建議以平均值扣除 1.5 個標準差作為初步判釋的參考。

#### 二、提供快速崩塌參考範圍

根據崩塌判釋參考指標，可以單時序判釋堆疊、多時序指標堆疊、多時序影像堆疊三種方式提升崩塌判釋效果，其中以多時序影像堆疊可達到較佳的判釋結果，並至少以災前 4 幅影像、災後 1 幅影像的數量進行資料判釋，雖然影像像元分類效果較差，但對於 10 公頃以上的崩塌的判釋率仍可達到 90% 以上，在缺乏光學影像的情況下，具有相當的參考價值。

### 第二節 建議

#### 一、持續精進雷達影像崩塌判釋方法

由於 SAR 影像計算的地表變異資訊包含甚廣，除了崩塌以外，河道沖蝕堆積、人為活動影響等等都能加以辨識，而崩塌在新生及擴大的區域之外，裸露地刷深變化的情形也能加以判釋，但低解析度的衛星影像作為參考圖資時難以辨別此情形，亦是造成誤判的因素之一，建議未來能以高解析度影像重新進行分類，並進一步優化現有的分析成果。



## 參考文獻

1. 王國隆、林俊廷、張峻瑋、林妍琇、洪志祥、洪政義、邱啓芳、傅桂霖，2019，結合高精度無人載具測量及差分干涉合成孔徑雷達與 NDSI 分析於土砂量體的評估方法，農業工程學報，65(4)。
2. 行政院農業委員會水土保持局，2021，110 應用 Sentinel-1 雷達影像地表變位資訊於坡面土砂生產及運移量變遷分析，研究報告。
3. 行政院農業委員會林務局農林航空量測所，2018，雷達衛星影像輔助林地災害偵測之研究(1/2)，研究報告。
4. 何春蓀，1986，臺灣地質概論-臺灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所
5. 林俊廷，2021，以衛載雷達影像分析進行崩塌潛勢及潛在量體評估，博士論文，國立暨南國際大學土木工程學系。
6. De Grandi, G. F., Leysen, M., Lee, J. S., and Schuler, D., (1997), Radar reflectivity estimation using multiple SAR scenes of the same target: Technique and applications, in Proc. IEEE Int. Remote Sens. Sci. Vis. Sustain. Develop. Geosci. Remote Sens. (IGARSS' 97), Vol. 2, pp.1047-1050.
7. Furuta, R., Tomiyama, N., (2011), A Study of Detection of Landslide Disasters due to the Pakistan Earthquake using ALOS data, 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, Australia, April 10-15.
8. Holecz, F., Meier, E., Piesbergen, J., and Nuesch, D., (1993), Topographic effects on radar cross section, SAR Calibration Workshop, Proceedings of CEOS Calibration Sub-Group, ESTEC, Noordwijk.
9. Meier, E., Frei, U., and Nuesch, D., (1993), Precise Terrain Corrected Geocoded Images, SAR Geocoding, Data and System, Wichmann Verlag.

10. Ouarzeddine, M. S., (2002), Generation of Digital Terrain Models using polarimetric SAR interferometry, Netherlands.
11. Ulaby, F.T., and Dobson, C., (1989), HandBook of Radar Scattering Statistics for Terrain, Artech House.

## 附錄

### 附錄一、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： |                                                                                                                    |                                                                             |
| 1         | 本計畫目標清楚，工作步驟規劃詳細正確。                                                                                                | 感謝委員肯定。                                                                     |
| 2         | 以 Sentinel-ISAR 影像作為災後山崩判釋的方法在國內外的應用不少，請先進行國內外目前研究現況之回顧與比較其判釋解析能力及正確度，並進行不確定性評估，最後針對本計畫書進行同樣之評估與驗證比較以利評估計畫之可行性與優劣。 | 感謝委員意見，由於不同文獻研究方法跟統計方式有所不同，日後針對此部分回顧將進一步補充。                                 |
| 3         | 本研究之崩塌地面積最小限制為何？                                                                                                   | 現今受限於 SAR 影像解析度，初步排除 1600 平方公尺的資料，實際上較適合用於 10000 平方公尺以上的崩塌地。                |
| 4         | 精進雷達影像判釋工作內，除了可以多時序影像處理外，也可以精進影像處理方法。                                                                              | 遵照委員意見辦理，將進一步探討如何改善處理方法。                                                    |
| 5         | P.2-1：將以 2002 年產製 DEM 過濾、地形效應區域，比 20 年前資料是否影響比功能？此類排除區域比例是否太高而影響後續分析工作？                                            | 受限於如今資料取得的方式有限，實際上仍以 2002 年為主，由於本計畫以 SAR 回波強度的分析僅用地形資訊進行校正，地形變化影響較低，目前仍可因應。 |
| 6         | P.2-11：兩種模式比較分析所使用之精度評估標準或方法為何？                                                                                    | 本計畫中以 KAPPA 指標及誤差矩陣進行精度評估。                                                  |
| 7         | 如果能夠在災後排除雲層覆蓋之限制，於天候不佳的情況下，依然可以透過雷達衛星遙測影像偵測崩塌地，對於水土保持局的防救災工作，裨益甚大。                                                 | 感謝委員肯定。                                                                     |
| 8         | 請整理國內外相關研究之參考文獻，釐清此項工作之技術瓶頸為何？目前能做到的程度為何？                                                                          | 感謝委員意見，相關文獻將於後續補充之。                                                         |
| 9         | P.2-1 提到要使用 5M 的 DEM                                                                                               | 感謝委員意見，此步驟將於產                                                               |

|    |                                                                                                                                        |                                                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|    | 對雷達衛星遙測影像進行幾何校正，並產生地形效應遮罩。這項工作和單純考慮太陽入射方位，通過模擬實際地面本影與落彩的方法反映實際地形起伏特徵的暈渲圖完全不同，需要詳細考慮每次取像，雷達波發射與接收的角度，以及地形反射面的特性，請說明將如何進行這項工作？並提供實際範例成果。 | 製地形校正影像時，將同步輸出地形效應影響影像，幾經測試後，遮罩範圍會大致相當。                                                |
| 10 | P. 2-6 提到要使用 ALOS、ALOS-2、Sentinel-I 等雷達衛星，由於不同衛星的儀器，電磁特性不同，請說明要如何整合使用這三種資料來源？會進行何種處理？                                                  | 感謝委員意見，在本計畫中運用的衛星來源不同，目前以 ALOS 衛星進行初期模式的開發，並以個別衛星產製的資料獨立進行判釋及研擬適用性。                    |
| 11 | P.2-10 提到 0806 崩坪坑溪事件已有初步成果，請以此為例，具體說明未來評估這項研究的量化方式？要如何計算誤授與漏授的指標？                                                                     | 在前期研究中的初步結果及相關方法將於本年度運用並改善之，在本年度的研究中將進一步分析判釋崩塌地的 SAR 影像適用數量，並以光學衛星判釋資料為基礎，分析判釋結果的誤差矩陣。 |
| 12 | 以 SAR 進行崩塌判識之情境是期待災後尚無可用之光學影像時，如需全部使用災後多時序之 SAR 影像方能得到成果，其時效性是否可行。                                                                     | 感謝委員意見，初步分析中，在災後影像不足的情況下，已有一定的判釋效果，此分析模式將在無光學影像時，提供可信的崩塌判釋。                            |
| 13 | 文中以多期影像判釋崩塌地，因受限衛星拍攝週期，建議能量化可產出較好結果之衛星影像張數，以預估比方法於災後判釋之所需時間。                                                                           | 感謝委員意見，目前已進行相關分析，在災前 4 幅、災後 4 幅的範圍內都能取得不錯成效，未來建立全自動分析時，可在 1~3 小時內完成一次判釋。               |

## 附錄二、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： |                                                                                                                                                                               |                                                                                          |
| 劉正千委員     |                                                                                                                                                                               |                                                                                          |
| 1         | 本計畫只有使用 Sentinel-1 雷達衛星，由於不同衛星的儀器，電磁特性不同，請將 ALOS, ALOS-2 相關說明都移除，避免混淆。                                                                                                        | 遵照委員意見辦理，已將相關內容移除。                                                                       |
| 2         | 請詳加說明影像前處理之步驟和結果，關於地形效應，產生遮罩和移除地形效應部分沒有詳細說明，如果是使用標準的 SNAP 工具，也請將各步驟使用的參數列出。建議附上研究區域的地形效應遮罩，可以瞭解無法分析的範圍有多少？位置在哪裡？                                                              | 遵照委員意見辦理，本計畫使用 ENVI SARscape，已將相關步驟說明及地形效應遮罩區域放入報告中。                                     |
| 3         | 本計畫是使用 NDSI 和 RVID 兩種指標來處理雷達影像時間序列資料，以判斷是否發生植被破壞，間接代表發生了崩塌。首先應確保此兩種指標的穩定性和代表性。請將雷達影像時間序列確定沒有發生變化的區域，例如人工建物、水體、固定植生等區域之 NDSI 和 RVID 兩種指標值的時間序列畫出來，可以瞭解其變動範圍，以及其可以分辨植被是否被破壞的能力。 | 在本計畫中兩指標確實是以是否發生植生破壞為判釋指標，有關崩塌前後的雷達波特性已補充，由於 SAR 強度特性差異並不顯著，故人工建物與水體則是以坡度進行初步過濾。         |
| 4         | 升降軌的資料混合使用沒有問題嗎？同樣把雷達影像時間序列各像元的值畫出來，會發現同一種軌道，雷達回波訊號的值範圍較一致，建議應分開考慮。                                                                                                           | 遵照委員意見辦理，已將升降軌分開計算。                                                                      |
| 5         | 目前僅用災前 3-4 幅，災後 3-4 幅雷達影像來組成時間序列，數量太少，代表性不夠。水保局擁有台灣地區所有 Sentinel-1 雷達衛星，升降軌各超過 150 幅。建議向水保局提出申請，用台灣地區所有 Sentinel-1 雷達衛星來分析。                                                   | 由於本計畫目的是假設在災害發生時，能於最短時間內提供崩塌判釋結果，此外時間長度過長，亦可能參雜其他事件的破壞訊號，故最終以 16 幅影像做評估參考，並以不同數量組合做綜合評估。 |

|                  |                                                                                                                                                                            |                                                                                               |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6                | 圖 3-7 所示，目前以 Kappa 指標來看，分類精度只有 22.8%和 35.3%，推論其原因，歸咎於 S-1 影像的空間解析度不足，但細看誤判的比例更高，這並不是提升空間解析度就可以改善的，而是運用同一個門檻值，就會造成某些像元可以成功判為崩塌，但更多像元是被誤判為崩塌。此問題要細思解決方法，否則再怎麼努力，分類精度的提升還是有限。 | 感謝委員意見，此問題確實為技術瓶頸之一，由於目前的評估方式中包含了多種地表變化樣態，仍在尋求解決方案。                                           |
| <b>黃效禹委員</b>     |                                                                                                                                                                            |                                                                                               |
| 1                | 本計畫採用指標分析結果判釋率介於 30%-40%，是否考慮套疊土地使用圖層，先濾除非崩塌之裸露地以提升判釋正率。                                                                                                                   | 感謝委員意見，目前平地的裸露區先使用坡度指標過濾，目前部分的誤判來自於河道或溪谷的變遷，另一部分則是舊有崩塌地刷深，但在現有的衛星影像中難以辨別，日後可配合 UAV 調查成果進一步分析。 |
| <b>陳振宇委員</b>     |                                                                                                                                                                            |                                                                                               |
| 1                | 計畫欲建立災後快速判釋技術，惟 ALOS 影像於臺灣範圍，拍攝數量不多，似不適合用於快速判釋。                                                                                                                            | 感謝委員意見，本計劃將以 Sentinel-1 進行主要判釋的資料來源。                                                          |
| 2                | 第三章第二節請補上 sentinel-1 崩塌判釋成效統計之數據，同 ALOS 部分。                                                                                                                                | 遵照委員意見辦理。                                                                                     |
| 3                | 本研究結果是否能變為自動化流程，使用者只要使用幾個步驟即能獲得結果。                                                                                                                                         | 現已嘗試減少分析步驟，提高資料準確度，並希望能於日後提供更多參考方式。                                                           |
| <b>技研小組(莊承穎)</b> |                                                                                                                                                                            |                                                                                               |
| 1                | SAR 影像判釋部分，此研究同時使用上升及下降軌進行判釋，及判釋結果之雜訊是否是因兩者軌道角度不同而造成？亦或是先前研究已有比較過同為升軌、同為降軌之判釋成效較差，才選擇升降軌資料混合使用？                                                                            | 本研究後期將兩軌道個別分析，產生雜訊的因素可能是個別影像的極端植影響，分開分析再合併確實有助於提高判釋成果，但也會減少災後的可運用影像數量，此仍須進一步探討。               |
| 2                | 圖 3-6 比例尺應有誤植，請再確認或修改。                                                                                                                                                     | 感謝指正，已進行調整。                                                                                   |

## 附錄三、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： |                                                               |                                                                                                                                           |
| 1         | 值得繼續探討、精進，俾導入相關防災業務使用。                                        | 感謝委員肯定，本研究仍將繼續努力精進。                                                                                                                       |
| 2         | 與其他廣泛使用的崩塌判釋方法相比，此法的優點或他法做不到或便利性等可再強化說明。                      | 感謝委員意見，由於 SAR 影像在雲霧覆蓋下仍能成像，因此能在颱風豪雨期間，在未獲取雲覆率低的光學影像時，做為輔助判釋崩塌地之用，即使只有一幅災後影像也能達到初步的判釋效果，且目前 sentinel-1 的影像周期為 12 天，之後將提升為 6 天，將能近一步提升判釋效果。 |
| 3         | 第三章第六節建議調整漏判及誤判圖例顏色，以例判讀。                                     | 感謝委員意見，已進行修改。                                                                                                                             |
| 4         | 多數判釋之崩塌地於河道上，導致誤判率超過 90%，建議以事件型崩塌目錄做為正判誤判之標準，可能崩塌地的範圍位置會較為合理。 | 感謝委員意見，在本研究中已有採用事件型崩塌目錄作為判釋標準，在此法中除了土砂變化之外，也有觀察出舊崩塌裸露地的刷深情形，然而裸露地在衛星影像中受限於解析度不足，難以判斷出崩塌情形，未來將借助 UAV 攝影測量等方式，取得崩塌量體變化範圍後再予之分析比較，進一步畫出適用性。  |