

計畫編號：SWCB-109-267

雷達影像時間序列分析於
崩塌地監測之探討
**Applying radar intensity time series
analysis for landslide monitoring**
(期末報告)

執行單位：國立臺灣大學

執行期間：109 年 02 月 06 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：莊昀叡 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 109 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)

雷達影像時間序列分析於崩塌地監測之探討

摘要

山崩為台灣常見的自然災害之一，若能快速辨識山崩事件位置，以及實施坡地監測，便能提供重要資訊用於救災與防災。在台灣偵測山崩與地滑，卻因為山區交通不易以及光學影像易被雲霧遮蔽有實際上的困難。除此之外，即便在已知山崩區域，現地崩移速率的監測亦有實際的困難。因此本研究目標將利用雷達影像不受雲層覆蓋影響之特性，針對台灣山區的山崩地進行監測。本研究的目的是在於建立合成孔徑雷達強度影像之時間序列，進而透過空間上的統計分析系統地分類出強度影像與環境因子之間的關係，探討多時序強度影像監測崩塌地的可行性以及崩塌地本身的活動特性。因此本研究將使用多時段的雷達強度分析技術，分析歐洲太空總署的 Sentinel-1 雷達衛星影像，針對鹿湖崩塌事件進行監測，透過時序資料建立出環境因子強度指標，並且透過環境因子強度指標彼此之間的差異，探究可能的崩塌地變異行為，最後，利用 SPOT 光學衛星影像進行檢核。

關鍵詞：雷達影像、崩塌地、時間序列分析

Applying radar intensity time series analysis for landslide monitoring

Abstract

Landslides are common natural hazards in Taiwan, and it is crucial to provide useful information for hazard mitigation by rapidly identifying landslide location and monitoring landslide process. In Taiwan, inaccessibility in mountainous areas and cloud shadow for optical images cause landslide detection difficult. In addition, in-situ monitoring at landslides is also somewhat difficult to conduct. Therefore, this study aims to use synthetic aperture radar (SAR) images, which are able to see through clouds, . The purpose of this study is to establish time series of SAR intensity images and to systematically analyze the relationship between environmental factors and intensity through spatial statistics. We will then discuss possibility of monitoring landslides by using intensity time series and discuss their moving characteristics. This research will use multi-temporal intensity analysis technique for monitoring the Luhu landslide event by using ESA Sentinel-1 images and verify the detected results by using SPOT optical images.

Keywords: SAR image, landslide, time-series analysis

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	V
圖次.....	VI
第一章 緒論	1-1
第一節 前言	1-1
第二節 文獻回顧	1-2
第三節 研究目的	1-7
第四節 研究區域介紹	1-8
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
第二節 工作執行步驟	2-3
第三節 影像資料來源	2-7
第四節 操作軟體	2-13
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫甘特圖	3-1
第二節 計畫交付項目	3-2
第四章 研究成果與討論	4-1
第一節 研究區域的強度資訊時序分析	4-1
第二節 崩塌事件的強度資訊分析	4-21
第三節 環境因子強度指標分析	4-32
第四節 驗證結果	4-33
結論.....	結論-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、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 ...附錄-4

表 次

表 2-1 預計使用之光學影像比較表	2-7
表 2-2 升冪和降冪雷達影像選取資料明細	2-10
表 2-3 目前收集的 SPOT 影像（紅色字體為本研究所使用之影像）。	2-12
表 3-1 計畫甘特圖	3-1
表 3-2 計畫交付項目表	3-2
表 4-1 各個角度的坡度強度資訊平均值和標準差。	4-6
表 4-2 各個角度的坡向強度資訊平均值和標準差。	4-7
表 4-3 各個地表特徵物的強度資訊平均值和標準差。	4-10
表 4-4 坡度因子的影響總結	4-20
表 4-5 坡向因子的影響總結	4-20
表 4-6 地表特徵物的影響總結	4-21
表 4-7 誤差矩陣結果	4-35

圖 次

圖 1-1 強度變化圖 (A)事件前 2009/01/28 之強度影像 (B)事件後 2009/06/15 之強度影像 (C)強度改變圖 (D)事件後的航空照 (ZHAO ET AL. 2013).....	1-4
圖 1-2：VAL MASO 崩塌地振幅變異 (TESSARI ET AL. 2017).....	1-5
圖 1-3：多時序合成孔徑雷達強度變異圖。從左自右代表在崩塌事件前、跨過崩塌事件與崩塌事件之後的強度數值對之數比率 (LR)結果。(MONDINI 2017).....	1-6
圖 1-4：研究區域圖。.....	1-10
圖 1-5：山崩與地滑的地質敏感區。(資料來源：國土測繪中心)	1-11
圖 1-6：鹿湖崩塌地現場照片資料。(資料來源：國立交通大學土木系 楊哲銘博士提供)	1-12
圖 2-2：研究流程圖.....	2-3
圖 2-3：崩塌地和雷達衛星視角之間的幾何關係示意圖。(WASOWSKI AND BOVENGA, 2014)	2-4
圖 2-4：強度影像前處理流程圖.....	2-5
圖 2-5：GRD-HR 升冪雷達影像範圍.....	2-11
圖 2-6：GRD-HR 降冪雷達影像範圍.....	2-11
圖 4-1：雷達衛星視角與地形的幾何關係圖。(HANSEN, 2001).....	4-2
圖 4-2：研究區域內的坡度統計分佈狀態。.....	4-3
圖 4-3：研究區域的坡度圖	4-4
圖 4-4：研究區域的坡向統計分佈狀態。.....	4-5
圖 4-5：研究區域的坡向圖。.....	4-5
圖 4-6：測試建物的空間位置與分佈狀況。.....	4-8
圖 4-7：測試建物的空間位置與分佈狀況。.....	4-11

圖 4-8：測試建物的強度資訊時序分佈圖。.....	4-11
圖 4-9：測試植被的空間分佈位置。.....	4-12
圖 4-10：測試植被的強度資訊時序分佈圖。.....	4-13
圖 4-11：測試植被位於向西坡面的強度資訊時序分佈圖。.....	4-14
圖 4-12：測試植被位於向東坡面的強度資訊時序分佈圖。.....	4-14
圖 4-13：常年崩塌地的空間分佈位置。.....	4-15
圖 4-14：常年崩塌地的強度資訊時序分佈圖。.....	4-16
圖 4-15：植被轉變成崩塌地的空間分佈位置。.....	4-16
圖 4-16：植被轉變成崩塌地的強度資訊時序分佈圖。.....	4-17
圖 4-17：河谷崩塌地的空間分佈位置。.....	4-18
圖 4-18：測試河谷的強度資訊時序分佈圖(1)。.....	4-18
圖 4-19：河谷崩塌地的強度資訊時序分佈圖(2)。.....	4-19
圖 4-20：崩塌事件前後雷達強度影像。(A) 2018 年 4 月 10 日崩塌前 拍攝。(B) 2018 年 4 月 16 日崩塌後拍攝。.....	4-22
圖 4-21：崩塌事件前後雷達強度影像 NDSI 分析成果。(崩塌前影像： 2018 年 4 月 10 日拍攝；崩塌後影像：2018 年 4 月 16 日拍 攝.....	4-23
圖 4-22：時序分析的剖面位置。(A)東西方向的剖面，西側為起點。(B) 南北方向的剖面，北側為起點。.....	4-24
圖 4-23：東西方向剖面的時頻結果。黑線代表 4 月 13 日崩塌事件。	4-26
圖 4-24：南北方向剖面的時頻結果。黑線代表 4 月 13 日崩塌事件。	4-27
圖 4-25：時序分析的測試點位之空間分佈。藍色線段為跨過河谷的剖 面分析。橘色線段圈選的位置為常年崩塌的區域。綠色線段 圈選的位置為植被轉變為崩塌地的區域。.....	4-28

圖 4-26：河谷剖面的時頻圖。紅線代表 4 月 13 日崩塌事件。.....	4-29
圖 4-27：常年崩塌地的時頻圖。黑線表示圈選範圍內的像素排列換行的位置。紅線代表 4 月 13 日崩塌事件。.....	4-30
圖 4-28：植被轉變為崩塌地的時頻圖。黑線表示圈選範圍內的像素排列換行的位置。紅線代表 4 月 13 日崩塌事件。.....	4-31
圖 4-29：強度差異指標所挑選出的崩塌地位置。.....	4-33
圖 4-30：2018 年 4 月 11 日 SPOT 衛星影像所圈繪的崩塌地範圍。	4-34
圖 4-31：2018 年 5 月 27 日 SPOT 衛星影像所圈繪的崩塌地範圍。	4-34

第一章 緒論

第一節 前言

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，每年菲律賓海板塊以 8 公分的移動速度向歐亞板塊擠壓與聚合，形成台灣高聳山脈林立的特殊地形，並伴隨著頻繁的地震活動。隨著近年來氣候變遷的影響，大量且集中的強降雨事件易造成邊坡不穩定，進而引發山崩、土石流及邊坡潛移等事件。這些因素使得台灣坡地災害發生的頻率不但提高，其造成的生命、財產損失也相當嚴重。

除了因為莫拉克風災造成的小林村山崩以外，過去亦有許多山崩事件發生，而坡地變遷時，若能快速辨識事件地點及位置，便能提供重要資訊用於救災與防災。除外，若能在事件發生前有效監測坡地潛移及其崩塌可能性的評估，對於山區聚落居住安全及作物經濟價值更顯重要。

雖然崩塌地相關研究已經如火如荼的展開，但是要能有效監測台灣山區的崩塌地卻有實際上的困難，其中主要原因在於台灣崎嶇的地形與多變的氣候。一般來說，除非山崩發生在聚落區域附近或是交通要道上，不然較不容易被察覺到，此外，即使確知山崩發生的位置，但往往礙於山區交通的困難，也不易到達現地觀測，就算現地觀測能有效運作，所耗費的人力和物力也極大。

為了解決這樣的監測限制，許多學者採用遙測光學影像方式來進行辨認，此方式雖然快速有效，但是台灣山區由於地形起伏快速以及許多地方雲霧幾乎常年覆蓋，因此很難持續性的確認地表變化情形，此外，即便在已知崩塌區域，崩移速率的監測亦有實際的困難。因此本研究將利用雷達影像能夠穿透雲霧覆蓋影響之特性，對其相位和強度影像資訊進行時序性的分析，監測台灣山區崩塌地的地表變化，並且探討其活動特性。

第二節 文獻回顧

過去合成孔徑雷達應用在崩塌地的研究中，除了運用合成孔徑雷達差分干涉技術(differential SAR interferometry, DInSAR)分析崩塌事件前後的相位(Phase)差異，量測崩塌地的位移資訊外，主要是透過多時序的相位分析技術，如：永久散射性差分干涉技術(Persistent Scatterer InSAR, PSI)和短基線長差分干涉技術(small baseline subset, SBAS)，偵測緩慢滑移的崩塌地地表變形資訊(Brugioni et al., 2011; Colesanti et al., 2003; Farina et al., 2003; Hilley et al., 2004; Perski et al., 2010)。雖然，多時序的雷達干涉技術在擁有好的散射體地區，如：都市地區，都能獲得很好的成果，但在水域或是植被茂密的區域則因為穩定散射體少，依舊有限制。此外，大氣的效應也會對資料造成影響(Hanssen, 2001; Gomba et al., 2016)，地表和雷達衛星之間的幾何關係，

也會影響雷達影像的監測能力(Wasowski and Bovenga, 2014)。因此面對擁有茂密山林資源、豐沛水氣、高聳地形和複雜水系流域的台灣山區，多時序的雷達干涉技術也會遭遇到強大的雜訊干擾，進而限制使用相位資訊監測崩塌地地表變形的能力與精確度。

雷達的強度影像(Intensity)表示地表物反射雷達回波的能力，透過雷達回波的數值可對地表特徵進行分類(Singhroy et al. 2002)，像是崩塌地的表面性質與坡體特性。近幾年，強度影像的強度差異分析已廣泛應用於崩塌事件上，透過崩塌前後的強度資訊變化，監測崩塌地的崩落行為和分佈位置(Zhao et al., 2013; Manconi et al., 2014; Raspini et al., 2015)。然而從崩塌地災害防治的觀點來說，如何了解崩塌地與其周遭環境之間的關係，進而能提前整治防範災害發生，才是最重要的目標。由於雷達的強度回波值受到許多複雜的環境因子影響，例如：崩塌地的面向、崩塌地的坡度、土壤濕度以及植被覆，所以詳盡的時間序列強度影像資訊分析是非常必要的。

應用前後期雷達影像的強度資訊改變進行變遷偵測，已經有許多成功的案例，主要的概念是將崩塌事件前後的強度影像之比值(ration)進行分析。Zhao 等人(2013)使用 ALOS 影像觀測中國吉維山山頂發生滑坡泥石流之前，期間和之後的滑坡過程，該研究採用三種不同的 SAR 方法全面性地研究，其中用了合成孔徑雷達的反向散射係數推

斷事件發生時岩石滑坡的影響區域以及表面的變化。該研究藉由光學影像的圈繪在強度影像上，拿來跟強度前後期的比值作比較，推論來源區和滑動區在滑動過後反射變低，堆積區則是在事件後較高的反射(圖 1-1)。

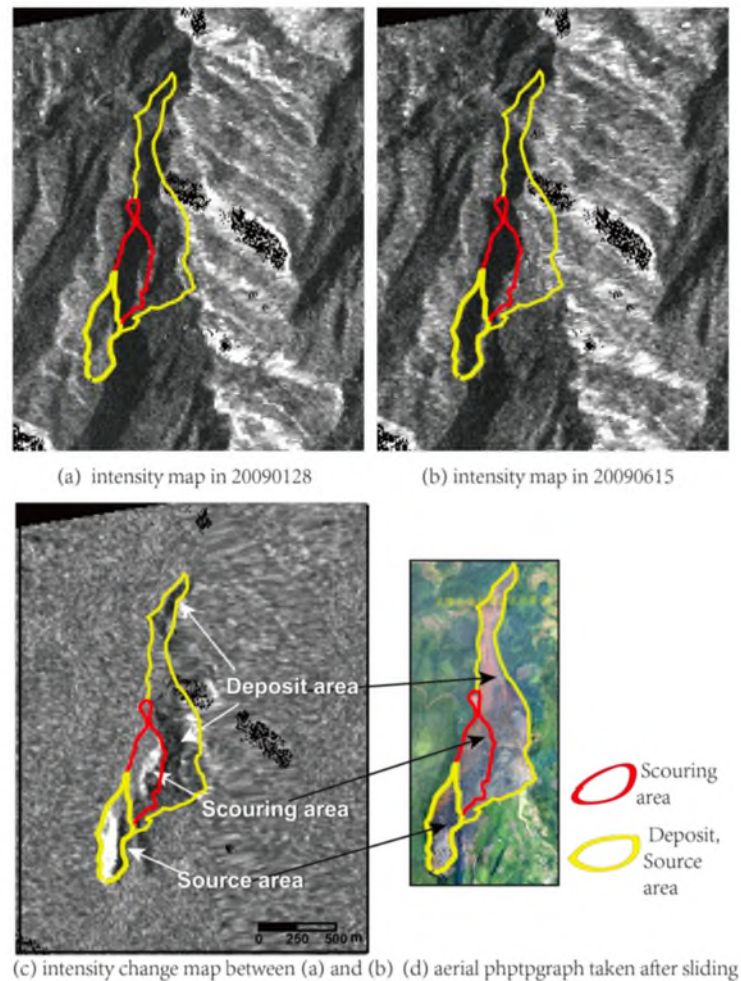


圖 1-1 強度變化圖 (a)事件前 2009/01/28 之強度影像 (b)事件後 2009/06/15 之強度影像 (c)強度改變圖 (d)事件後的航空照 (Zhao et al. 2013)

Tessari et al. (2017)選定兩個位於非都市區域且都會受到山坡影響的崩塌地：Cischele 為緩慢平移滑坡，Val Maso 為快速滑動土石流，

此處我們針對後者使用之振幅分析方法作討論。2010 年，滑坡事件之前七張影像，事件後兩張影像，共九張高解析度 COSMO-SkyMed 影像。該方法透過計算事件前振幅的平均除以事件後振幅的平均，如下：

$$r = \frac{A_{before}}{A_{after}}$$

計算每個像素的 r 值，如下圖 1-2，若介於 0.5~1.5(綠色部分)則為強度資訊沒特別變動，而小於 0.5(紅色部分)則代表強度資訊增加較為劇烈，大於 1.5(藍色部分)則代表強度資訊減少較明顯之處。由此結果去討論此崩塌地的兩側的不同行為，在強度資訊提高之處，是因為與樹根之間形成二次反射，在強度資訊減少之處，則是因為其特徵受到遮蔽或是植物的影響，此研究考慮到坡度的形態變化所導致的反射狀況，而不只是表面的不同反射率變化。

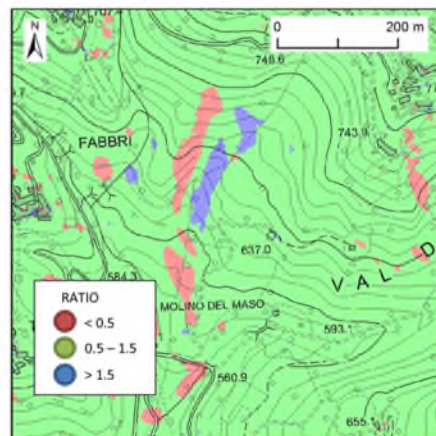


圖 1-2：Val Maso 崩塌地振幅變異 (Tessari et al. 2017)

Mondini (2017) 提出了一種測量多時序合成孔徑雷達強度的流程方法。首先使用對數比率(log-ratio, LR)測量在事件前、跨過事件與事件之後的強度像素變化(圖 1-3)，其公式如下， i 是影像編號：

$$LR = \ln \left(\frac{\sigma_{0,i}}{\sigma_{0,i-1}} \right)$$

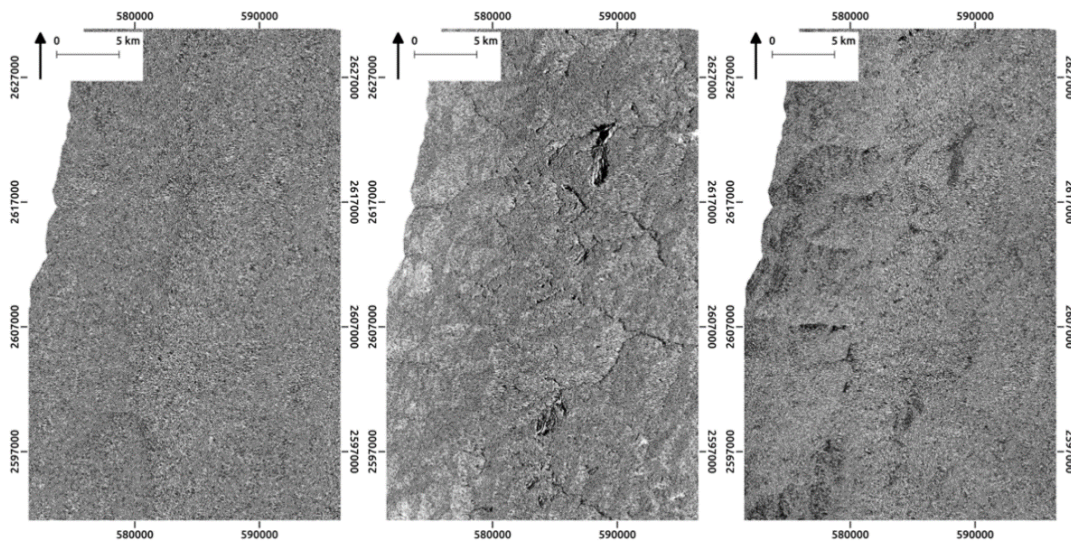


圖 1-3：多時序合成孔徑雷達強度變異圖。從左自右代表在崩塌事件前、跨過崩塌事件與崩塌事件之後的強度數值對之數比率(LR)結果。(Mondini 2017)

爾後，Mondini et al. (2019) 延續使用了上述提出之方法，分析世界上 33 個不同大小規模的崩塌事件，進行全面性地探討崩塌事件前後期影像的振幅差異，顯示了強度應用在崩塌地的重要性正逐漸上升。然而，單看崩塌事件前後的差異不足以滿足長期崩塌地監測之期待，因此需要發展強度時序性之分析且可因應於山區之方法。

整體來看合成孔徑雷達分析方法和其應用在崩塌地的相關文獻

中，不論是相位或是振幅影像皆有其發展性和應用的層面，然而相位的方法中，受限於波長能記錄的相位變化在公分級左右，僅能抓到緩慢移動之崩塌。然而在現實中，快速的崩塌行為量體變化太大，通常在數公尺以上，因此若要獲取快速移動變動之相關文獻在振幅影像有許多成功證實之研究，不過大部分都是做前後期比值或是比較，再加上山區較多需要考量的回波因素和限制。因此藉由合成孔徑雷達對於微尺度結構變化的敏感特性，將可利用雷達回波值的變化探知斜坡坡度之改變(Oliver and Quegan, 2004)，以提升崩塌地監測上的應用程度。

第三節 研究目的

本研究的目的是在於企圖透過時空上的統計分析，探討長時序中地表物表面介質的反向散射回波值。藉由時間序列的雷達強度影像資訊，系統性的分類出研究區域內環境因子的強度回波值，以建立強度差異指標來快速地判釋崩塌地位置，並且使用光學影像來檢驗判釋的準確度，進而修正與探討強度差異指標的可行性。以下就各階段性的目標進行初步說明：

一、藉由精細的地質高程模型資料建立研究區域內的坡向和坡面資訊，分析雷達影像在研究區域所受到的地形幾何限制，如：疊置和陰影，同時探討研究區域的地形幾何與雷達回波強度值之間的相互關係。

- 二、合成孔徑雷達強度影像之時間序列分析。主要分析回波值在時序性的變化，並且針對各種環境因子做初步討論，再利用統計分析各像素的變化差異，快速分類出崩塌地位置，並且探討不同崩塌表面介質和型態對雷達回波強度訊號之影響。
- 三、藉由高解析度光學影像將崩塌事件前後期影像的地表做分類，驗證合成孔徑雷達所區別的變動是否符合光學影像中的真實變遷資訊。
- 四、合成孔徑雷達相位影像之時間序列分析。在大型崩塌事件前後，崩塌地內部與周遭的崩崖可能有持續崩落的可能性，透過本研究時序分析的技術建立強度差異指標，協助判釋崩塌地內部的活動行為。

第四節 研究區域介紹

一、2018 年崩塌事件

選定**鹿場地區**作為應用崩塌地時序分析之監測有其特殊性，首先該地區持續有在崩落，在**2018 年 4 月 13 日**發生重大崩塌事件，當日自由時報的報導指出：「苗栗縣南庄鄉苗 21 支線的鹿湖、鹿山及 301 農路，近一個月來因山崩落石導致道路中斷，且崩塌問題持續惡化，道路搶通工程也難進駐施作，日前行政院科技部國家災害防救科技中心到場會勘，也發現山底基座也有鬆動」。再者，鹿場地區崩塌成因不同於一般地震型或降雨型的崩塌模式，此地的變動是來自於不穩定的地層，且地形稜線上有許多裂隙，在尚未發生此次事件前，該地區

是持續變動、持續地向源侵蝕，更需要長期監測。

2018 年三月因持續地有民眾通報，除了林務局和新竹林區管理處率先通知啟動災害緊急調查分析，其他單位，包含：行政院原住民委員會、水土保持局、公共工程委員會與南庄鄉公所等皆有專家前往拍攝和研商對策。可見崩塌地監測之重要且影響深遠，對於此 301 道路阻斷、崩塌下緣直接影響河道和崩塌擴大的不穩定。

二、地理、地形位置

鹿場地區位於苗栗縣南庄鄉的山區，此地區包含鹿場台地、陸家、鹿湖、鹿山等地，海拔高度大約落在 800 公尺至 1300 公尺，此處可由省道臺三線向東轉縣道苗 124 進入南庄鄉，再由南庄橋東轉進苗 21 線，延大東河到達鹿場地區。

發生崩塌之所在位置約為鹿湖溪與鹿場溪匯流處附近(圖 1-4)，崩塌通報發生時在鹿湖部落週邊崩塌地影響範圍包含：鹿湖溪側、匯流處、鹿場溪側，整體崩塌坡向主要朝向西北，全坡高約 500 公尺，崩塌區全寬約 900 公尺。各種測試的地表物特徵之區域已標示在圖 1-4，主要可分為建物、植被、崩塌地三大類。

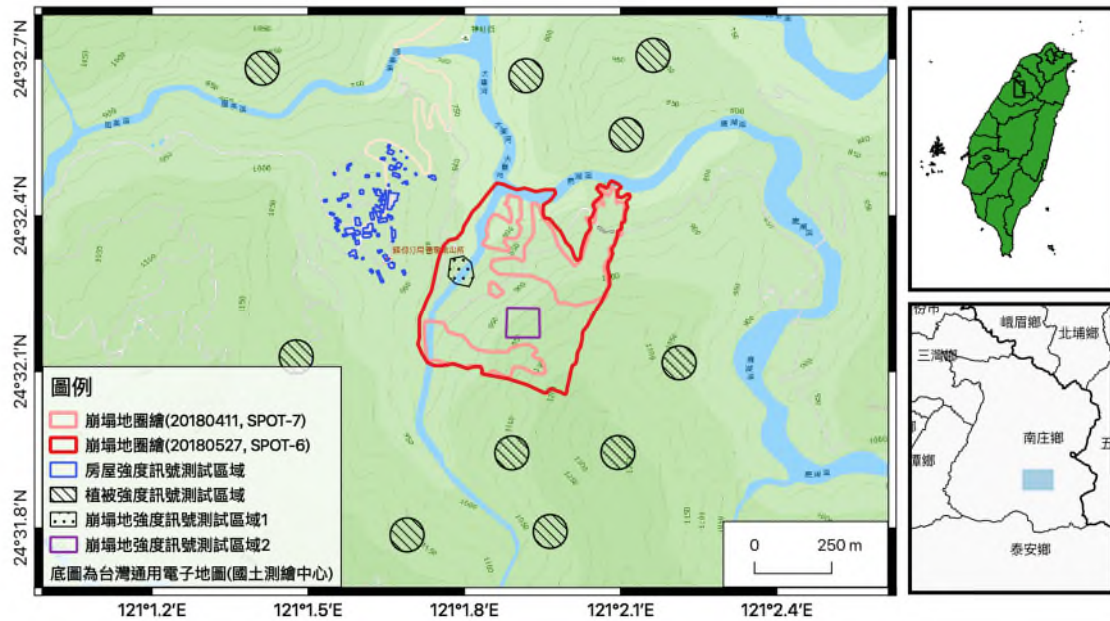


圖 1-4：研究區域圖。

三、地質

鹿場地區的斷層結構具有東北-西南走向的鹿場斷層和鵝公髻斷層，以及東西走向陸家斷層，地層走向位態也是東北-西南。其交會之處與鹿湖溪與鹿場溪匯流處的走向相似，構造複雜且破碎交會於本崩塌地。關於地層部分，根據中央地質調查所五萬分之一流域地質圖顯示，此區主要出露地層為石底層，其主要岩層為淺灰色至白色砂岩、灰色砂岩、灰黑色頁岩互層，含煤，易形成脆弱面。脆弱之處除了地層之外還有崩崖附近許多裂隙和風化層，都是發生崩塌之徵兆，也因此國土測繪中心列此區為地質敏感區，圖 1-5 粉紅區塊為山崩地滑之高潛勢區，也是在 2018 年之前有發生過崩塌之區域。



圖 1-5：山崩與地滑的地質敏感區。（資料來源：國土測繪中心）

圖 1-6 為現地調查之照片，黃色線處為崩積層或風化層，可見崩基層與岩盤的界線處，接著藍色直條處為高角度解理，此處有利於發育蝕溝與側向侵蝕邊界。綠色區塊則是解壓節理的部分，崩滑體脫離。底下紅色圈起的堆積體仍保持岩體結構，但層面位態明顯擾動不同於基盤逆向坡。



圖 1-6：鹿湖崩塌地現場照片資料。（資料來源：國立交通大學土木工程系楊哲銘博士提供）

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

本研究主要使用強度的時序性分析方法對崩塌地做變遷偵測，探討不同的回波值在時間上、空間上的變化，反映不同變動狀況所代表之意義，並且用高解析度光學驗證合成孔徑雷達資料與地表真實狀況相近程度。首先對於雷達強度影像進行校正與律定，確認資料在前處理的部分能將所有資料套合在同一標準的相同網格下，接者透過時序分析的統計方法，針對研究區域內不同的地表特徵物進行測試，建立植被轉變成崩塌地的雷達強度差異指標門檻，並以鹿湖崩塌地作為測試樣區，最後挑選出的崩塌位置將使用高解析度光學影像所圈繪的崩塌地進行誤差矩陣分析，藉以驗證強度差異指標所挑選出的崩塌地之準確性，同時整合研究區域內的環境因子資訊，探討崩塌地的活動特性，並嘗試歸納出一門檻值，協助雷達影像判釋崩塌地及建立崩塌地目錄。

一、多時序的合成孔徑雷達強度資訊

合成孔徑雷達強度資訊包含了很多複雜的參數資訊和地物的影響下所獲得的資料，不只有地形的坡度、坡向和衛星的視角大小、方向以及感測器衛星的拍攝方向有極大的關聯性，若要進行山區的相關研究需要進一步探討和考量。還會受到土壤濕度和地表特徵物反射狀

況不同的影響，因此需要將每一幅影像進行率定和斑點濾波(speckle filtering)。

先分別將每個時間段的強度影像進行兩種率定，輻射率定(radiometric calibration)和熱雜訊率定(thermal noise calibration)，在此處可以求得反向散射係數值。接著進行做幾何校正(geometric calibration or Geocoding)此步驟是要將影像的像素與地面上的固定網格精確地套疊，因為合成孔徑雷達影像的座標系統需要轉換至跟光學影像同樣的平面座標系統，才能進行後續比對。此外，由於雷達是側視的觀測系統，因此地面的起伏容易造成成像時的幾何畸變，需要透過另一個立體成像或是數值高程模型(DEM)協助校正。校正之後，經由時間序列的分析，分析研究區域內幾種地表物特徵的強度訊號，再藉由時頻分析 (Time-Frequency Analysis) 進一步探討 dB 值隨時間的變化特性，並搭配其他環境影響因子，例如降雨量、地質、地形等，進行後續討論。最後建立研究區域內的強度指標，並嘗試藉由強度指標之間的差異挑選出崩塌地的位置，然後以光學影像的結果作為驗證數據，透過誤差矩陣分析確認該強度差異指標所挑選出的崩塌地之準確性。

第二節 工作執行步驟

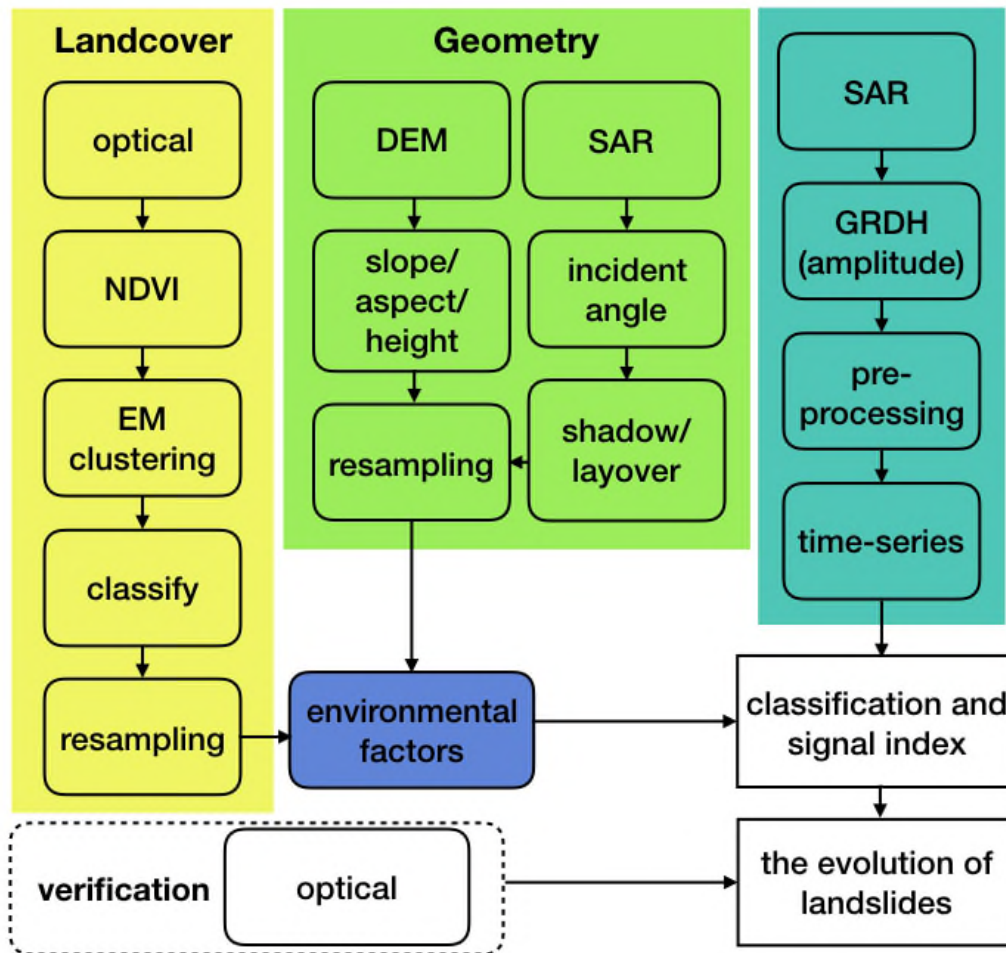


圖 2-1：研究流程圖

一、可視度分析

由於雷達影像在山區容易受到將合成孔徑雷達中陰影和疊置狀況排除掉，預計使用內政部地政司衛星測量中心之 5 米數值高程模型 (DEM) 建立研究地區的坡向和坡度圖，再搭配雷達衛星系統的軌道資訊和入射角資料，利用 GIS 軟體中「視域」分析找出對於升軌和降軌兩種不同方向可視之崩塌地位置，若無法看到之崩塌地位置便不在此研究討論之內。使用高精度數值高程模型用於計算研究區域內崩塌地

的坡面向與坡度，之後綜合探討崩塌地與雷達衛星之間的幾何關係與觀測限制，包含陰影、疊置和等狀況的排除。（圖 2-3）

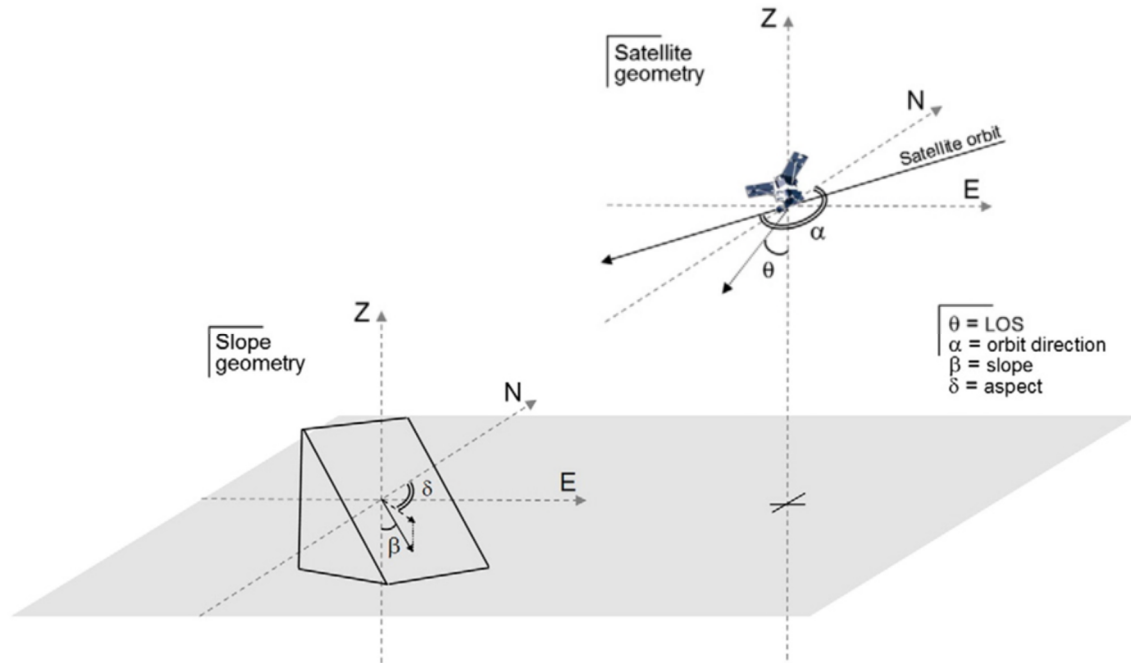


圖 2-2：崩塌地和雷達衛星視角之間的幾何關係示意圖。(Wasowski and Bovenga, 2014)

二、雷達資料處理

(一)多時序的合成孔徑雷達強度資訊

1.Pre：將每一幅 GRDH 影像做同樣的流程，包含軌道、律定、多視角（此步驟可忽略，因為 GRDH 檔本身就有經過多視角成近正方形網格），最後仍要進行轉換成經緯度座標，此處使用內政部 5 米數值高程模型，最後將範圍切成適切大小，可加快下一步中每一幅套合的速度。

2.Post：確保每一個時期的合成孔徑雷達影像網格都一樣，因此都將第一幅影像作為主影像，依照時間順序進行精密的套合套疊和重分配(resampling)，最後進行斑點濾波，有

助於去掉雜訊。而我們要得到的回波值取為 dB 更易於分析變化值。

流程如圖 2-4 所示：

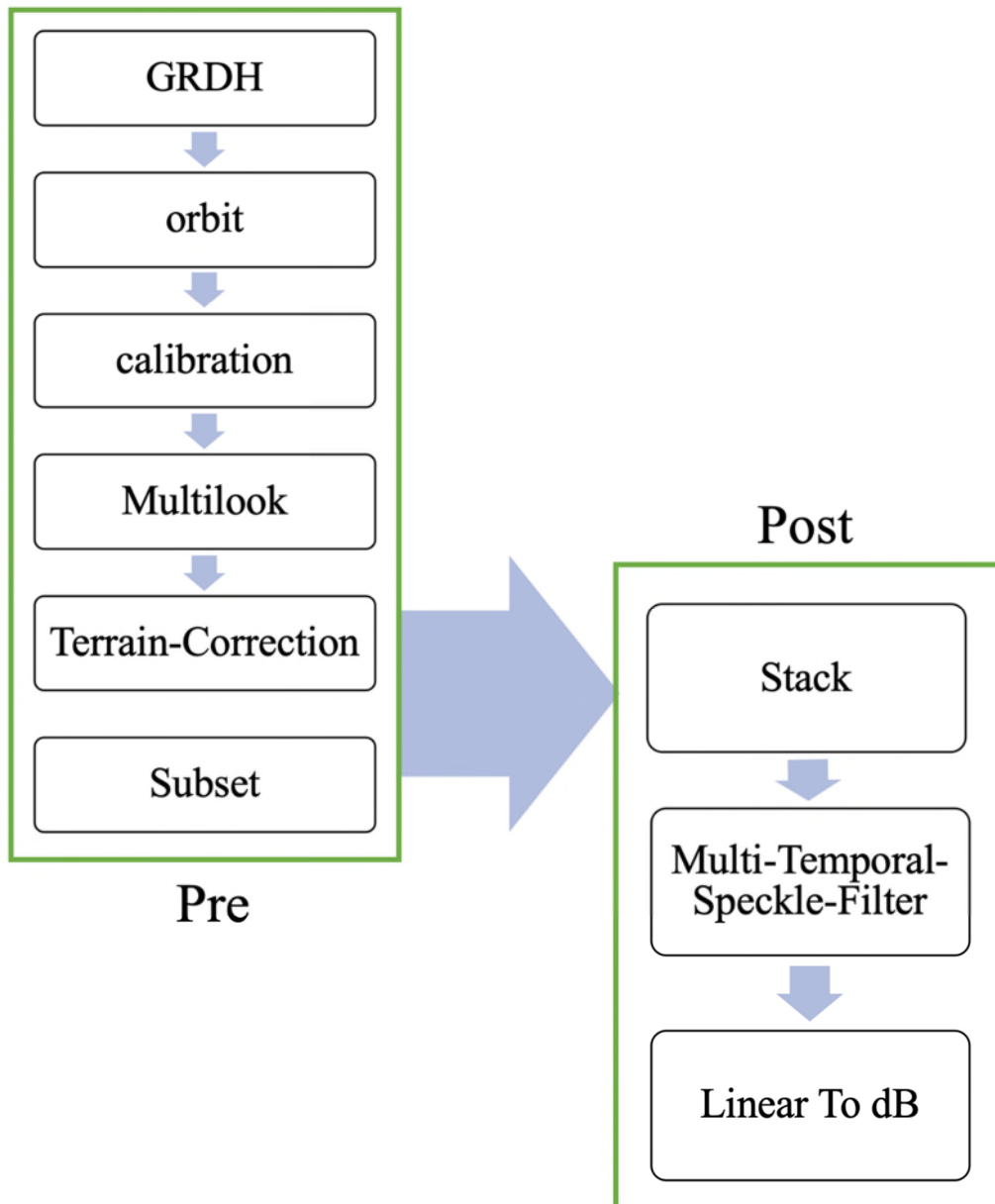


圖 2-3：強度影像前處理流程圖

三、統計分析

(一) NDVI 分析 (Normalized Difference Vegetation Index)：

藉由光學影像的多光譜資訊，針對植物本身對於某些波段

的反應特性，分析崩塌事件前後，植被和崩塌地在空間上的分佈變異情形，以利後續作為雷達影像結果的驗證資料。

(二) NDSI 分析 (Normalized Difference Sigma-naught Index)：

標準化崩塌事件前後兩幅雷達影像，透過類似 NDVI 的概念，分析雷達影像強度 dB 值的變化，圈繪出崩塌地的範圍與活動狀態。

(三) 時頻分析 (Time-Frequency Analysis)：

繪製各像素的 dB 值在時間上的變化曲線圖(pixel-based analysis)，接著假設 dB 值為一頻率訊號，其包含了很多環境因子，藉由時頻分析進一步探討 dB 值隨時間的變化特性，最後再搭配其他環境影響因子進行討論，例如降雨量、地質、地形等等。爾後將嘗試 Schlaffer et al. (2015)所使用之諧波分析，或是 Lin et al. (2019)所使用的貝氏機率分佈方法，進行後續的測試。

(四) 誤差矩陣 (Confusion Matrix)分析：

藉由誤差矩陣的統計方法驗證透過強度差異指標所挑選出的崩塌地，其與光學影像圈繪的崩塌地之間的差異為何，之後再整合 Sentinel-1 的兩個偏極影像資訊 (VV 和 VH)，建立完整且可信的強度差異指標。

四、 驗證資料：光學衛星影像

同樣為監測崩塌地常用工具之一，其優勢在於高解析度或是多光譜皆有助於崩塌地辨識和分類，但由於其系統為被動地接收可見光，僅能在白天日觀測，且遇到雲雨就會馬上反射回到感測器，在影像中只會有雲層而非地表資訊，因此在降雨期間光學影像無法被使用，僅能取得降雨引發之崩塌事件前後影像。然而本計畫所選取之研究區域的崩塌地，並非由於降雨事件所引發，因此光學影像是非常適合作為本計畫之驗證資料。

表 2-1 預計使用之光學影像比較表

	Sentinel-2	SPOT-6,7	Landsat-8
發射年代	2015 (2A) 2017 (2B)	2012 (SPOT-6) 2014 (SPOT-7)	2013
空間解析度	10 m, 20 m and 60 m	PAN: 1.5 m MS: 6 m	PAN: 15m MS\NIR\SWIR: 30m Thermal: 100m
時間週期	5 天 (搭配 2A, 2B)	1 天 (搭配 SPOT-6, 7)	1~3 天
波段	配載多光譜影像儀 (Multi-spectral instrument, MSI) 共 13 個波段	R, G, B, NIR	Operational Land Imager (OLI) and the Thermal Infrared Sensor (TIRS) 共 11 波段
取得方式	免費	中央太遙中心申請	免費

第三節 影像資料來源

自 1991 年 7 月歐洲太空總署(European Space Agency，簡稱 ESA)發射 ERS-1 雷達衛星後，各個國家與機構陸續發設許多雷達衛星：

Envisat、ALOS、ALOS2、Radarsat、Sentinel-1、TerraSAR-X 及 COSMO-SkyMed 等。我們使用 Sentinel-1 衛星資料對台灣山區坡地進行監測，並以 ALOS 及 ALOS2 衛星資料為輔分析 2007 年後地形變遷及坡地崩塌與潛移的潛勢評估。

一、 Sentinel-1 衛星

Sentinel-1 衛星為 ESA 於 2014 年 4 月發射，用以接替 ERS1/2 及 Envisat 觀測任務的雷達衛星，平均航高為 693 公里，視角(與地表垂直夾角)約為 37°，Sentinel-1 衛星酬載 4 個感測器，研究使用 TOPS Mode，以 C 波段進行觀測，波長為 5.6 公分。Sentinel-1 衛星提供兩個觀測方向資料，分別為由東南往西北飛行的升軌資料(Ascending)與由西北往東南飛行的降軌資料(Descending)。目前 Sentinel 衛星資料由 ESA 提供免費使用，其優點是影像圖幅範圍廣且觀測頻率密集，僅需 2-3 幅影像即完整涵蓋台灣全區，自 2017 年四月後觀測任務趨於穩定，無論 Ascending、Descending 方向皆穩定每 12 天有一次觀測，如此密集的擷取頻率可提供更好的觀測結果。

影像下載自歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)哥白尼計畫的 Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>)。系統衛星有兩顆，S1A 於 2014 年發射，週期為 12 天，在 2016 年發射同性能之 S1B，與 S1A 共用同軌道但差 180 度的相對位置進行拍攝，因此同一

地區最快可以每 6 天獲得一張一樣視角的雷達影像，若再涵蓋不同視角之影像，對同一地區來講可構成兩種視角，因此同一地區最快可以每 3 天獲得一張不同視角的雷達影像。

Sentinel-1 提供四種模式(mode)的資料，此處應用 Interferometric Wide (IW)，入射角度在 30 至 42 度。以台灣地區來講為偏極化配載雙極(VV+VH)。在處理相位和強度上選用不同的資料格式，關於相位的永久散射體差分干涉方法，選用 Level-1 單觀點影像(single look complex, SLC)之資料格式，解析度 5(測距方向)與 20(方位方向)米，總幅寬為 250 公里，每個像素用複數形式紀錄相位和振幅資訊，尚未經過軌道修正和幾何修正。而強度的時序分析方法則是選用 Level-1 Ground range detected (GRD)產品，該數據不包含相位資訊，但使用視角(multilooking)投影到地面範圍，也有進行地球橢球模型校正，所得到的產品具有近似正方形的空間解析度，此產品有三種空間解析度，本研究選用高解析度(High Resolution, HR)，約為 10 米。

(一)升畧雷達影像

配合本研究區 2018 年四月之崩塌事件選取 3~6 月之影像，SLC 有 20 幅，GRD-HR 也有同時段之 20 幅，影像取用時間如下表 2-2 所示，圖 2-5 顯示影像範圍，但由於每幅影像的軌道資訊和拍攝狀況不同，因此有些微落差，但都仍涵蓋鹿場地區崩塌地。

(二)降幕雷達影像

同上述升幕雷達影像之所言，降幕影像的 S1A 和 S1B 恰好也有 20 幅 SLC，GRD-HR 同時段之 20 幅，影像取用時間如下表 2-2 所示。圖 2-6 顯示影像範圍，但由於每幅影像的軌道資訊和拍攝狀況不同，因此有些微落差，但都仍涵蓋鹿場地區崩塌地。

表 2-2 升幕和降幕雷達影像選取資料明細

升幕影像時間	降幕影像時間	偏極
20180305	20180301	VV / VH
20180311	20180307	VV / VH
20180317	20180313	VV / VH
20180323	20180319	VV / VH
20180329	20180325	VV / VH
20180404	20180331	VV / VH
20180410	20180406	VV / VH
20180416	20180412	VV / VH
20180422	20180418	VV / VH
20180428	20180424	VV / VH
20180504	20180430	VV / VH
20180510	20180506	VV / VH
20180516	20180512	VV / VH
20180522	20180518	VV / VH
20180528	20180524	VV / VH
20180603	20180530	VV / VH

20180609	20180605	VV / VH
20180615	20180611	VV / VH
20180621	20180617	VV / VH
20180627	20180629	VV / VH



圖 2-4：GRD-HR 升幕雷達影像範圍



圖 2-5：GRD-HR 降幕雷達影像範圍

二、 SPOT 衛星

SPOT6-7 光學衛星在 2018 年整年度的拍攝影像為 58 張，包含多光譜和全色態，若排除同時、同地、同角度的影像，在一年一中僅能得到 29 天的 SPOT 影像。再更細部確認影像品質，彼此之間也有些微差異，例如：部分被雲霧遮蔽、光線不足或是影像過曝等問題，都是造成光學影像時序分析限制的問題來源。

表 2-3 詳列 2018 年三月至六月的 SPOT 影像收集狀況，理想狀況時，一天可以獲取一張影像，然而此四個月內僅有 13 張影像可用，當中仍有部分影像因雲霧遮蔽而影響到研究區的監測。目前崩塌前後所選取的影像為 2018 年 3 月 29 日、2018 年 4 月 11 日和 2018 年 5 月 27 日這三幅（表 2-3 中紅色字體所示），並藉由 NDVI 分析取得崩塌地分佈的範圍。

表 2-3 目前收集的 SPOT 影像（紅色字體為本研究所使用之影像）。

影像名稱(衛星_多光譜 P/全色態 M)	獲取日期	入射角度
CSR_A000_2146_SP7H1M_20180316 / CSR_A000_2147_SP7H1P_20180316	20180316	26.924222
CSR_A000_2226_SP7H1M_20180326 / CSR_A000_2227_SP7H1P_20180326	20180326	28.941811
CSR_A000_2238_SP6H1M_20180327 / CSR_A000_2239_SP6H1P_20180327	20180327	28.87214
CSR_A000_2265_SP6H1P_20180329 / CSR_A000_2254_SP6H1M_20180329	20180329	21.889628
CSR_A000_2278_SP6H1M_20180403 / CSR_A000_2279_SP6H1P_20180403	20180403	21.399602

CSR_A000_2316_SP7H1M_20180411 / CSR_A000_2317_SP7H1P_20180411	20180411	20.375874
CSR_A000_2360_SP7H1M_20180418 / CSR_A000_2361_SP7H1P_20180418	20180418	27.839102
CSR_A000_2395_SP7H1M_20180423 / CSR_A000_2399_SP7H1P_20180423	20180423	24.709341
CSR_A000_2554_SP7H1M_20180524 / CSR_A000_2555_SP7H1P_20180524	20180524	26.015336
CSR_A000_2595_SP6H1P_20180527 / CSR_A000_2594_SP6H1M_20180527	20180527	25.592355
CSR_A000_2643_SP6H1P_20180606 / CSR_A000_2642_SP6H1M_20180606	20180606	30.66383
CSR_A000_2651_SP7H1P_20180609 / CSR_A000_2650_SP7H1M_20180609	20180609	27.249216
CSR_A000_2704_SP7H1M_20180626 / CSR_A000_2705_SP7H1P_20180626	20180626	23.511827

第四節 操作軟體

本計畫主要使用由歐洲太空總署 (ESA) 開發的 SNAP (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>) 軟體處理雷達影像的相位資訊和強度資訊。SNAP 內部配載許多處理衛星影像之套件，可以相容很多不同的資料型態和影像檔案。擁有圖形化介面，讓處理框架更加直覺，另外也可以加入向量資料、地面控制點、自動下載全球數值高程模型等，不論是基礎處理或是高階的應用皆有提供服務。

相位資訊透過 SNAP 軟體進行完差分干涉處理之後，再以 Hooper 等人(2007)所開發的 StaMPS(版本:3.3b1)軟體，處理永久散射體差分干涉之分析，並透過解相位軟體 SNAPHU 進行時間與空間上的三維

相位解算，求得衛星斜距方向的位移資訊。強度影像則是先經過 SNAP 軟體的輻射校正與熱雜訊修正之後，將透過 ENVI 軟體進行多時序的雷達強度對數比率分析。其他有助於協助處理之軟體包含地理資訊的 ArcGIS、和協助計畫和統計分析之程式語言：Python 以及 Matlab。

第三章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本計畫在 2020 年二月起至 2020 年底為期近一年時間進行該計畫的執行，階段性目標和進度如下表。文獻回顧部份包含追蹤雷達應用在崩塌地之時間序列的最新研究趨勢，搜集資料部分則是預計在八月底前搜集完所需的雷達影像、光學影像、崩塌地等相關資料。前處理和方法上的測試與收集資料持續地進行，新的統計方法與光學影像相互驗證也正在進行，本次報告已呈列目前的研究成果。未來將持續地嘗試和修正方法以獲取理想之研究成果，並持續透過統計方法和光學影像驗證成果。最後對整個研究案進行全面的討論與建議。

表 3-1 計畫甘特圖

月份 事項	2020										
	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
文獻回顧											
資料搜集											
前處理和測試方法											
方法修正											
驗證和統計法											
結果討論建議											

第二節 計畫交付項目

原報告交付之工作項目包含雷達影像收集、雷達影像處理、文獻回顧、雷達影像時間序列分析與驗證、參與相關會議以及撰寫報告，以下將此大項再細分成幾小項，如下表 3-2：

表 3-2 計畫交付項目表

重要工作項目	細項	內容	完成百分比	備註
雷達影像處理	收集資料	Ascending & Descending	100	
	前處理	Ascending	100	
雷達影像時序分析與驗證	強度影像事件分析	NDSI	100	
	強度影像時序分析	時頻分析	100	
	強度差異指標建立	數值統計	100	
	驗證	NDVI 誤差矩陣分析	100	
參與相關會議	6 人參與	地質年會	80	由於疫情關係，會議延

				至 11 月 17 日。目前已 完成註冊。
撰寫報告	期初報告	5 份	100	
	期中報告	5 份	100	
	期末報告	5 份	100	

第四章 研究成果與討論

第一節 研究區域的強度資訊時序分析

本節主要工作為，研究區域內地形效應和地表特徵物對雷達回波強度訊號之影響分析，探討雷達回波強度訊號與環境因子之間的關係，並建立環境因子的強度指標(Amplitude index of environmental factors)。以下分為三個部分，前兩個部分將詳細描述地形效應和地表物特徵的分析結果，最後一個部分總結環境因子對雷達回波強度訊號的影響。

一、 坡度與坡向分析

雷達衛星的斜視視角(side-looking)和微波的入射角度(incidence angle)，與目標物地形之間的幾何關係，對於合成孔徑雷達影像的成像結果有著密切關係。主要影響合成孔徑雷達影像成像的限制來源可分為以下三者：

(一)前坡縮短(foreshortening)：

當雷達波照射小於視角的山坡坡面時，其前坡所反射的回波資訊強度雖然很強，但是在影像裡所紀錄到的空間距離會比實際距離短，如圖 4-1 的 A 區。

(二)疊置(layover)：

山坡頂部的訊號反射得比底部還快，導致頂部跟底部的資

訊在影像中產生重疊，這樣的狀況發生在山坡坡度大於衛星視角的地方，如圖 4-1 的 B 區。

(三)陰影(shadow)：

當山坡坡面位於背對雷達衛星感測器的位置時，雷達波會因為無法照射獲得回波資訊而產生陰影，如圖 4-1 的 C 區。此外，近距側(near range)的視角小，地形所造成的陰影面積會較少，而遠距側(far range)的視角大，地形造成的陰影面積則較多。

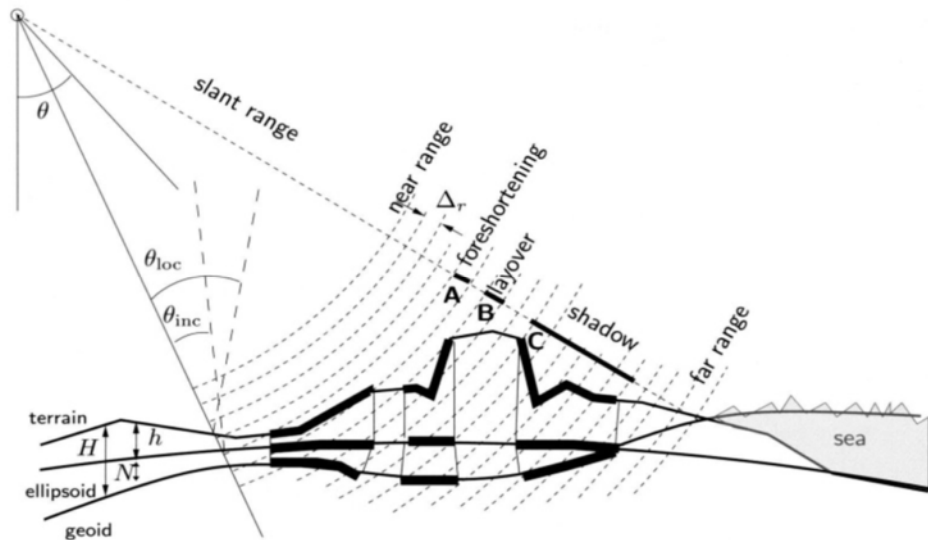


圖 4-1：雷達衛星視角與地形的幾何關係圖。(Hanssen, 2001)

本研究使用 5 米數值高程模型(digital elevation model, DEM)計算研究區域內的坡度和坡面，並且整合本次計畫預計分析的環境因子空間位置，其成果如圖 4-2 至圖 4-5。研究區域整體的坡度統計分佈如圖 4-2 所示，主要的坡度分佈在 15 度至 45 度之間。表 4-1 為各個角度的坡度在不同時間的強度資訊平均值和標準差。在空間上坡度的分

佈結果如圖 4-3 所示，坡度在 0-20 度之間的地形大多座落在河道兩側與河階台地上，坡度在 20-45 度之間的地形主要分布在山坡地的主體與部分崖階位置上。檢測的環境因子其所在坡度位置如下：測試的建物位於河階地上，其坡度在 0-20 度之間；測試的植被平均分散在坡度 10-40 度之間；崩塌地測試區 1 的坡度在 0-20 度之間；崩塌地測試區 2 的坡度在 30-45 度之間。此外，主要崩塌事件的平均坡度大約在 30-45 度之間（圖 4-3 紅線圈繪區域）。

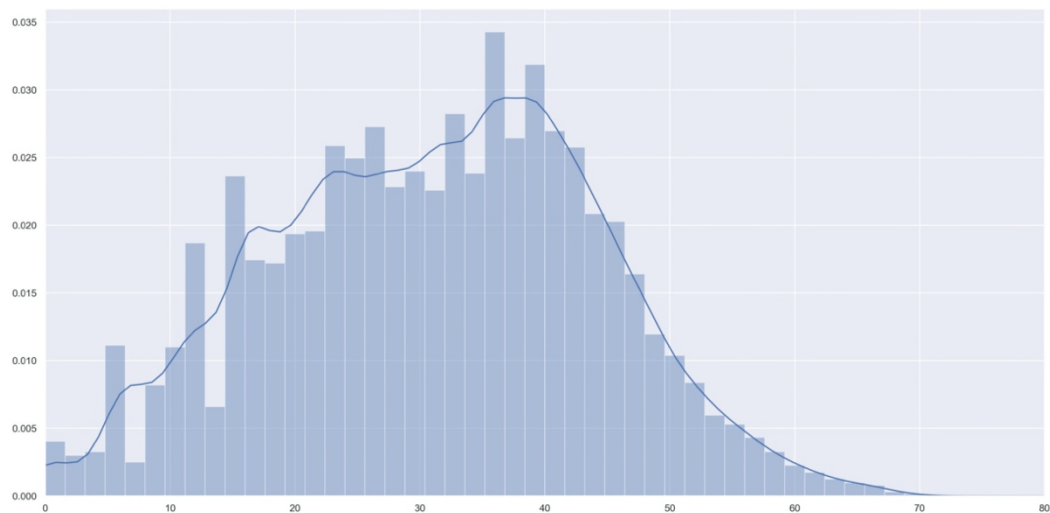


圖 4-2：研究區域內的坡度統計分佈狀態。

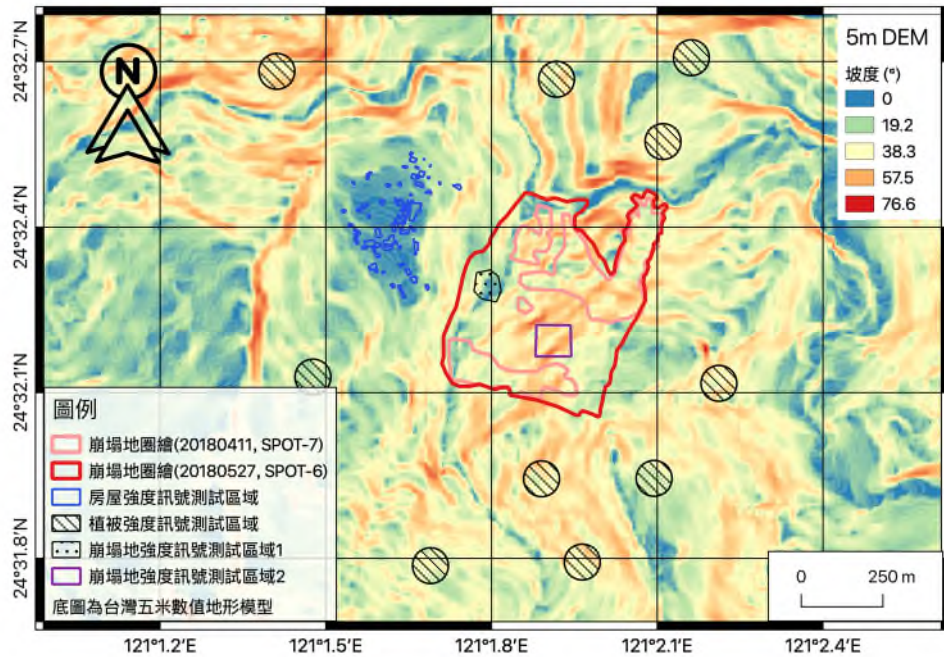


圖 4-3：研究區域的坡度圖

研究區域整體的坡向統計分佈如圖 4-4 所示，主要坡向分佈在 250 度至 90 度之間，其主因為山勢呈現南北走向，故坡面的面向以東西兩個方向為主。表 4-2 為各個角度的坡向在不同時間的強度資訊平均值和標準差。在空間上坡向的分佈結果如圖 4-5 所示，面東的坡向主要分布在 45 度至 135 度之間，面西的坡向主要分佈在 180 度至 315 度之間。檢測的環境因子其所在的坡向位置如下：測試的建物位於面北的河階地上，其坡向集中在 350-10 度之間；測試的植被平均分散各類型的山坡坡向上；崩塌地測試區 1 的坡向在 90-135 度之間；崩塌地測試區 2 的坡向集中在 315 度。此外，主要崩塌事件的崩塌主體坡向分佈在 270-315 度之間（圖 4-4 紅線圈繪區域）。

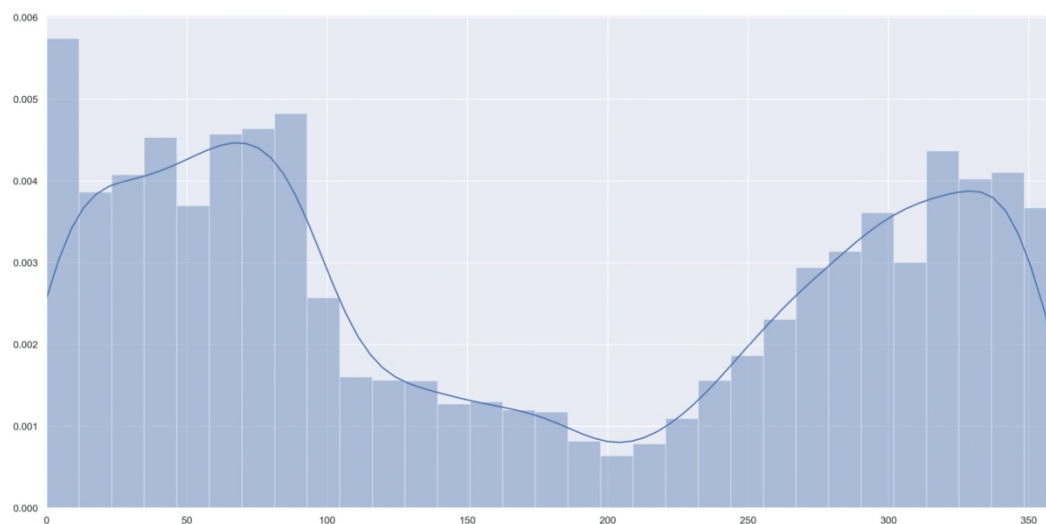


圖 4-4：研究區域的坡向統計分佈狀態。

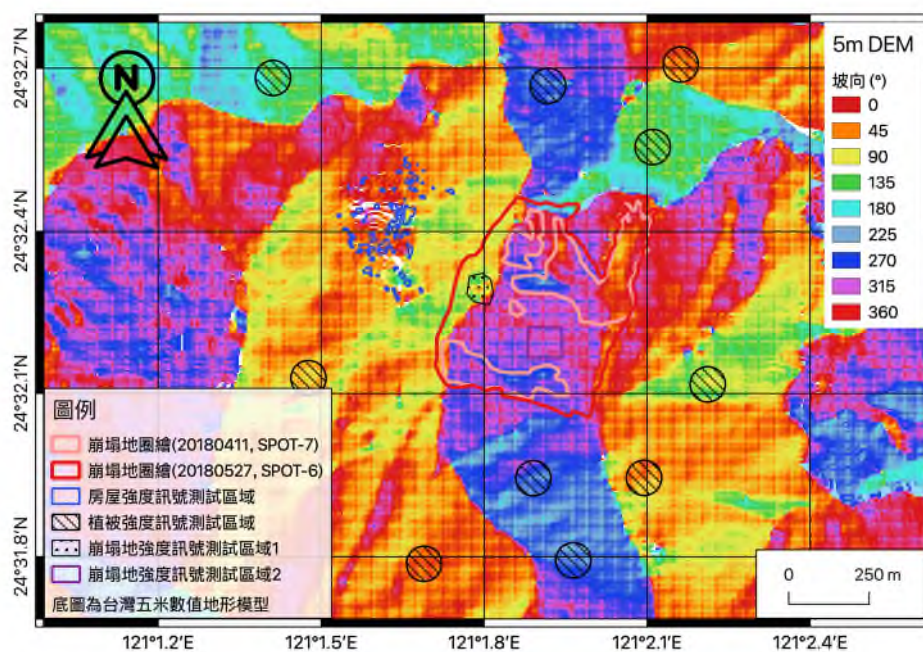


圖 4-5：研究區域的坡向圖。

表 4-1 各個角度的坡度強度資訊平均值和標準差。

坡度	0~1		1~10		11~20		21~30		31~40		41~50		51~60		61~90	
日期	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
2018/03/05	-7.33	3.41	-7.55	4.01	-7.78	3.77	-8.33	4.87	-9.56	5.79	-7.61	7.20	-7.22	7.45	-10.41	6.75
2018/03/11	-7.99	3.52	-8.33	3.96	-8.60	3.73	-9.09	4.59	-10.12	5.56	-8.13	7.05	-7.56	7.36	-10.93	6.19
2018/03/17	-7.55	3.38	-7.99	4.04	-8.09	3.70	-8.53	4.87	-9.78	5.72	-7.85	7.30	-7.45	7.55	-10.52	7.03
2018/03/23	-7.66	3.18	-8.15	3.78	-8.46	3.59	-8.89	4.62	-9.97	5.64	-7.97	7.06	-7.42	7.27	-10.70	6.18
2018/03/29	-7.52	3.25	-8.08	3.77	-8.26	3.62	-8.64	4.87	-9.83	5.81	-7.86	7.21	-7.14	7.79	-10.65	7.08
2018/04/04	-7.60	3.35	-7.97	3.86	-8.27	3.53	-8.60	4.74	-9.61	5.72	-7.83	7.11	-7.12	7.70	-10.57	6.49
2018/04/10	-7.70	3.32	-8.10	3.87	-8.25	3.73	-8.63	4.78	-9.96	5.75	-8.14	7.14	-7.63	7.53	-10.80	6.94
2018/04/16	-7.49	3.36	-7.79	3.87	-7.89	3.80	-8.25	4.67	-9.48	5.48	-7.66	6.95	-7.30	7.09	-10.39	6.47
2018/04/22	-7.38	3.58	-7.77	3.93	-7.94	3.80	-8.41	4.71	-9.69	5.51	-7.93	7.13	-7.31	7.50	-10.64	6.93
2018/04/28	-7.05	3.30	-7.44	3.92	-7.52	3.76	-7.92	4.77	-9.26	5.42	-7.45	7.09	-7.05	7.15	-10.08	6.45
2018/05/04	-6.95	3.58	-7.51	4.02	-7.71	3.92	-8.25	4.59	-9.46	5.54	-7.60	7.13	-7.23	7.41	-10.62	6.76
2018/05/10	-7.55	3.45	-7.90	3.92	-7.96	3.86	-8.54	4.63	-9.73	5.50	-7.90	7.03	-7.45	7.04	-10.48	6.55
2018/05/16	-7.52	3.66	-7.69	4.09	-7.97	3.93	-8.30	4.85	-9.64	5.72	-7.86	7.22	-7.23	7.55	-10.67	6.58
2018/05/22	-7.35	3.40	-7.73	4.04	-8.05	3.84	-8.49	4.61	-9.69	5.63	-7.77	7.08	-7.33	7.24	-10.51	6.33
2018/05/28	-6.54	3.75	-7.03	4.28	-7.14	3.98	-7.73	4.93	-9.00	5.76	-7.30	7.22	-6.63	7.64	-9.93	6.83
2018/06/03	-7.14	3.49	-7.73	4.11	-7.96	3.95	-8.42	4.82	-9.56	5.74	-7.65	7.35	-7.17	7.48	-10.40	6.21
2018/06/09	-7.19	3.52	-7.51	4.12	-7.84	4.02	-8.44	5.04	-9.61	6.01	-7.74	7.40	-7.12	7.57	-10.18	6.79
2018/06/15	-7.48	3.47	-7.68	3.95	-7.83	3.83	-8.57	4.69	-9.63	5.54	-7.93	6.92	-7.38	7.08	-10.55	6.33
2018/06/21	-7.10	3.55	-7.51	3.96	-7.71	3.90	-8.24	4.99	-9.67	5.75	-7.66	7.22	-7.30	7.57	-10.45	6.62
2018/06/27	-7.54	3.59	-7.86	4.09	-7.93	3.97	-8.31	5.03	-9.78	5.69	-7.89	7.18	-7.34	7.39	-10.28	6.57
Mean	-7.38	3.46	-7.77	3.98	-7.96	3.81	-8.43	4.78	-9.65	5.66	-7.79	7.15	-7.27	7.42	-10.49	6.60

表 4-2 各個角度的坡向強度資訊平均值和標準差。

坡向	N (337.5-22.5)		NE (22.5-67.5)		E (67.5-112.5)		SE (112.5-157.5)		S (157.5-202.5)		SW (202.5-247.5)		W (247.5-292.5)		NW (292.5-337.5)	
日期	mean	std	mean	Std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
2018/03/05	-8.85	2.98	-11.91	4.22	-13.71	3.97	-11.25	3.33	-6.65	3.14	-1.03	3.41	-0.62	3.76	-4.29	3.94
2018/03/11	-9.50	2.91	-12.36	4.00	-14.09	3.81	-12.01	3.31	-7.30	3.12	-1.48	3.40	-1.26	3.89	-5.13	3.98
2018/03/17	-9.04	3.04	-12.06	4.27	-13.92	4.05	-11.77	3.31	-6.84	3.24	-0.88	3.55	-0.89	3.72	-4.65	3.84
2018/03/23	-9.36	2.93	-12.21	3.98	-13.89	3.70	-11.83	3.17	-7.26	3.25	-1.54	3.37	-1.27	3.72	-4.85	3.92
2018/03/29	-9.06	3.01	-12.09	4.10	-13.93	4.04	-11.81	3.36	-7.01	3.29	-1.11	3.44	-1.13	3.73	-4.61	4.11
2018/04/04	-8.99	2.94	-11.93	4.02	-13.75	3.99	-11.67	3.21	-7.08	3.25	-1.25	3.23	-1.12	4.04	-4.77	4.32
2018/04/10	-9.30	2.86	-12.19	4.13	-14.14	4.11	-11.99	3.39	-7.12	3.23	-1.53	3.23	-1.20	3.66	-4.83	4.07
2018/04/16	-8.84	2.97	-11.70	3.90	-13.18	4.05	-11.44	3.13	-7.18	2.91	-1.40	3.40	-1.41	3.58	-4.69	3.75
2018/04/22	-9.04	3.00	-11.85	4.14	-13.62	4.20	-11.54	3.40	-6.92	3.03	-1.19	3.41	-1.42	3.61	-4.85	3.80
2018/04/28	-8.57	2.99	-11.42	4.09	-13.10	4.09	-11.21	3.23	-6.60	3.18	-0.63	3.84	-0.81	3.92	-4.52	3.71
2018/05/04	-8.75	2.99	-11.57	4.21	-13.28	4.20	-11.40	3.37	-6.83	3.10	-0.97	3.36	-1.14	3.84	-4.72	3.66
2018/05/10	-8.99	2.96	-11.84	4.17	-13.66	4.06	-11.64	3.33	-7.04	3.06	-1.14	3.61	-1.60	3.56	-5.04	3.50
2018/05/16	-8.96	3.18	-11.95	4.25	-13.76	4.40	-11.56	3.61	-6.75	3.08	-0.81	3.69	-1.21	4.04	-4.84	3.88
2018/05/22	-9.06	3.01	-11.91	4.24	-13.57	3.98	-11.51	3.41	-6.88	3.15	-1.02	3.51	-1.56	3.64	-4.90	3.74
2018/05/28	-8.22	3.12	-11.40	4.44	-13.18	4.35	-10.85	3.68	-5.92	3.29	0.06	3.56	-0.67	3.82	-4.04	3.62
2018/06/03	-9.02	3.13	-12.03	4.31	-13.79	4.10	-11.45	3.33	-6.88	3.24	-0.62	3.79	-1.21	3.95	-4.79	3.69
2018/06/09	-8.93	3.29	-12.00	4.46	-13.89	4.36	-11.54	3.57	-6.62	3.30	-0.65	3.61	-1.19	3.65	-4.56	3.77
2018/06/15	-8.89	3.10	-11.87	4.16	-13.71	4.06	-11.34	3.31	-7.03	3.05	-1.27	3.17	-1.41	3.56	-4.86	3.63
2018/06/21	-8.67	3.09	-11.80	4.41	-13.80	4.27	-11.37	3.49	-6.78	3.10	-1.02	3.55	-0.89	3.87	-4.46	3.61
2018/06/27	-8.91	3.06	-12.05	4.34	-13.96	4.26	-11.51	3.50	-6.87	3.26	-1.00	3.47	-1.20	3.66	-4.67	3.78
Mean	-8.95	3.03	-11.91	4.19	-13.70	4.10	-11.53	3.37	-6.88	3.16	-1.02	3.48	-1.16	3.76	-4.70	3.82

二、 地表物的特性分析

本節針對研究區域內的地表特徵物進行時序性的雷達強度回波分析。本研究使用 NDVI 的方法分析 SPOT 光學影像，分類出五種地表特徵物：建物、植被、崩塌地、河谷和其他（如圖 4-6），並針對前四項的特徵物進行統計與時間序列之分析。表 4-3 顯示各種地表特徵物，在不同時間影像的強度資訊平均值和標準差。建物的回波強度總平均值(dB)為-7.14，標準差為 3.7；植被的回波強度總平均值為-7.91，標準差為 7.01；崩塌地的回波強度總平均值為-5.43，標準差為 2.38；河谷的回波強度總平均值為-8.26，標準差為 2.68。

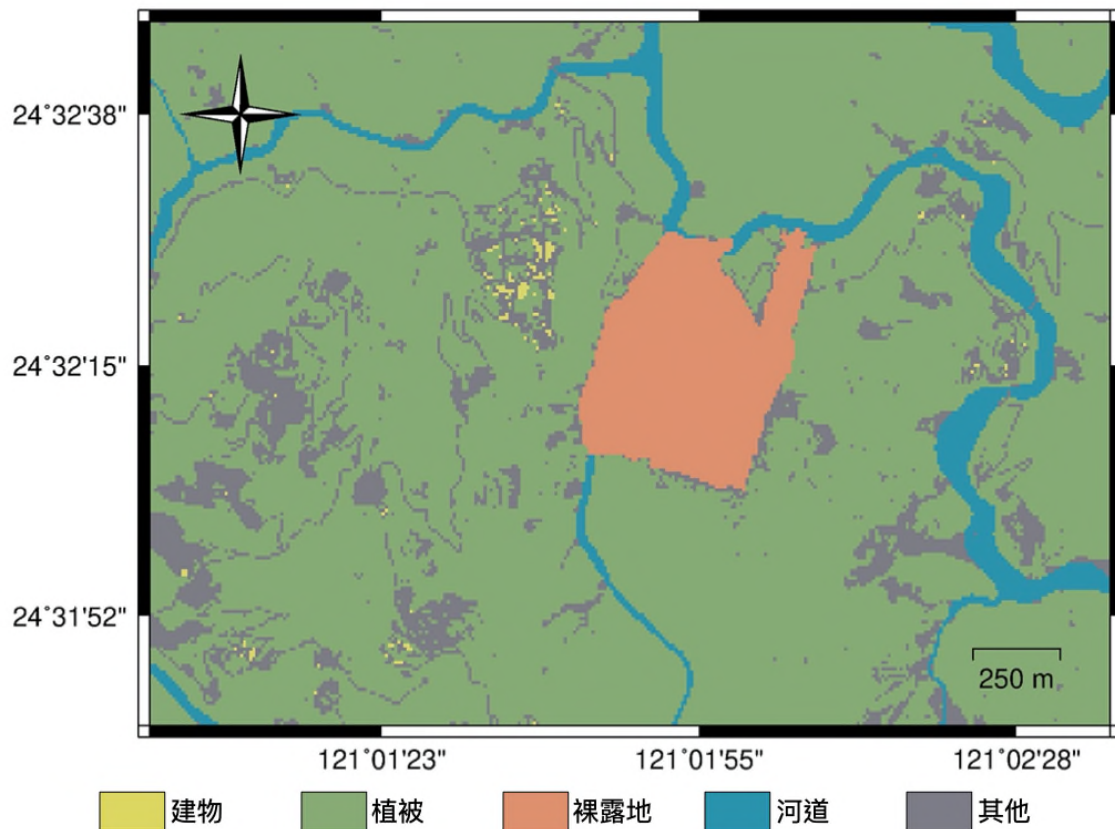


圖 4-6：測試建物的空間位置與分佈狀況。

針對以上四類的地表特徵物，本研究將進行雷達強度回波的時序分析，探討環境因子對於雷達衛星的強度回波訊號之影響。

(一)建物：

首先使用 SPOT 衛星影像挑選出位於崩塌地西側的『鹿場部落』內之人造建物範圍，再根據此圈選的檔案萃取該位置上的雷達強度影像資訊進行時間序列分析。圖 4-7 顯示本研究所選取的測試建物之位置，以及各棟房屋在空間上的分佈情形。

表 4-3 各個地表特徵物的強度資訊平均值和標準差。

地表特徵物	建物 (123)		植被 (1135)		裸露地 (71)		河道 (69)	
日期	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
2018/03/05	-7.04	3.86	-7.79	6.96	-4.71	2.77	-8.11	2.23
2018/03/11	-7.46	3.54	-8.47	6.63	-6.49	3.30	-8.70	2.52
2018/03/17	-6.79	3.77	-7.93	7.15	-5.94	2.88	-8.08	2.56
2018/03/23	-7.48	3.76	-8.36	6.91	-6.25	3.97	-8.84	2.34
2018/03/29	-7.26	3.55	-8.16	6.97	-4.65	3.08	-8.29	2.80
2018/04/04	-7.20	3.64	-8.08	6.69	-5.26	3.13	-8.59	2.77
2018/04/10	-7.34	3.62	-8.24	6.81	-5.12	4.19	-8.31	2.59
2018/04/16	-7.18	3.54	-8.17	6.59	-4.31	2.69	-7.93	2.55
2018/04/22	-7.20	3.78	-8.05	7.13	-4.97	1.94	-8.47	3.28
2018/04/28	-6.63	3.53	-7.54	6.70	-5.43	2.00	-8.23	2.61
2018/05/04	-7.27	3.76	-7.82	6.98	-6.02	1.80	-7.97	3.16
2018/05/10	-7.54	3.71	-8.18	6.59	-5.78	1.62	-8.84	2.41
2018/05/16	-7.29	3.80	-7.35	7.46	-5.73	1.52	-8.41	2.70
2018/05/22	-7.24	3.68	-7.79	7.10	-6.34	1.62	-8.41	2.67
2018/05/28	-6.57	3.78	-7.03	7.42	-4.41	1.62	-7.45	2.96
2018/06/03	-7.44	3.72	-7.74	7.37	-5.96	2.08	-7.90	3.15
2018/06/09	-6.94	3.70	-7.86	7.23	-5.12	1.80	-7.95	2.37
2018/06/15	-7.00	3.73	-7.73	7.11	-5.20	2.11	-8.12	2.46
2018/06/21	-6.79	3.70	-7.66	7.33	-5.61	1.93	-8.00	2.94
2018/06/27	-7.08	3.82	-8.20	7.11	-5.22	1.61	-8.59	2.62
Mean	-7.14	3.70	-7.91	7.01	-5.43	2.38	-8.26	2.68

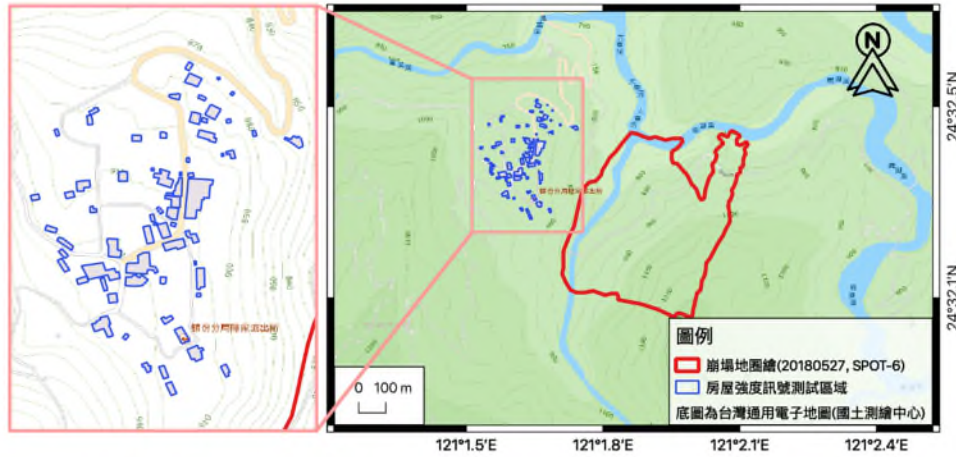


圖 4-7：測試建物的空間位置與分佈狀況。

圖 4-8 為測試建物在時間序列上的強度資訊分佈狀況。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸是強度訊號的數值。挑選過後的雷達影像像素總共有 123 個，也就是每一個時間點所選取的像素總數。各個時間點的平均 dB 數值以紅色線段表示，主要分佈在-5 至-10 之間，藍色虛線代表各個時間點的標準差，其值大多在 4 左右。藉由各個時間點的平均 dB 數值再進行統計分析，可以求得總體平均 dB 值為-7.19 和總體平均標準差為 3.64。透過上述的分析與計算，本研究將研究區域內的建物強度指標門檻設定為 -7.19 ± 3.64 。

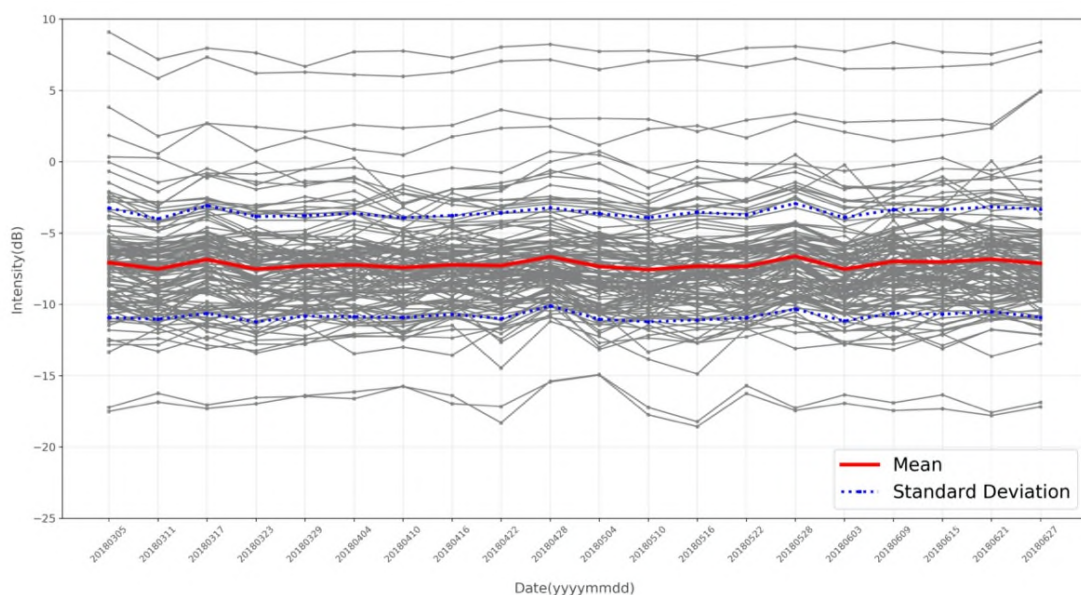


圖 4-8：測試建物的強度資訊時序分佈圖。

(二)植被：

本研究首先透過 SPOT 影像確認同一種類的植被分佈，再隨機選取 10 組植被進行測試，並萃取這 10 組測試區內的雷達強度影像資訊進行時間序列分析。圖 4-9 顯示本研究所選取的測試植物之位置，以及其在空間上的分佈情形。

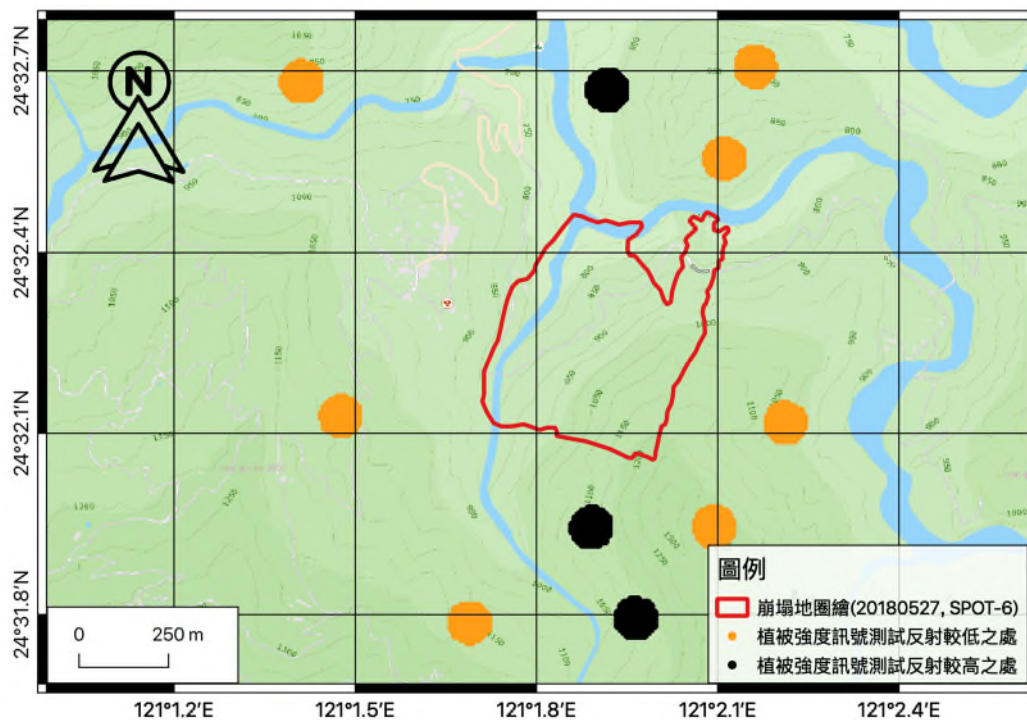


圖 4-9：測試植被的空間分佈位置。

圖 4-10 為測試植被在時間序列上的強度資訊分佈狀況。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸是強度訊號的數值。挑選過後的雷達影像像素總共有 1135 個。由圖 4-X 明顯發現測試植被的 dB 數值可以被分為兩群，一群的 dB 值較高，約落在 0 至 5 之間，另一群的 dB 值較低，約落在 -5 至 -15 之間。

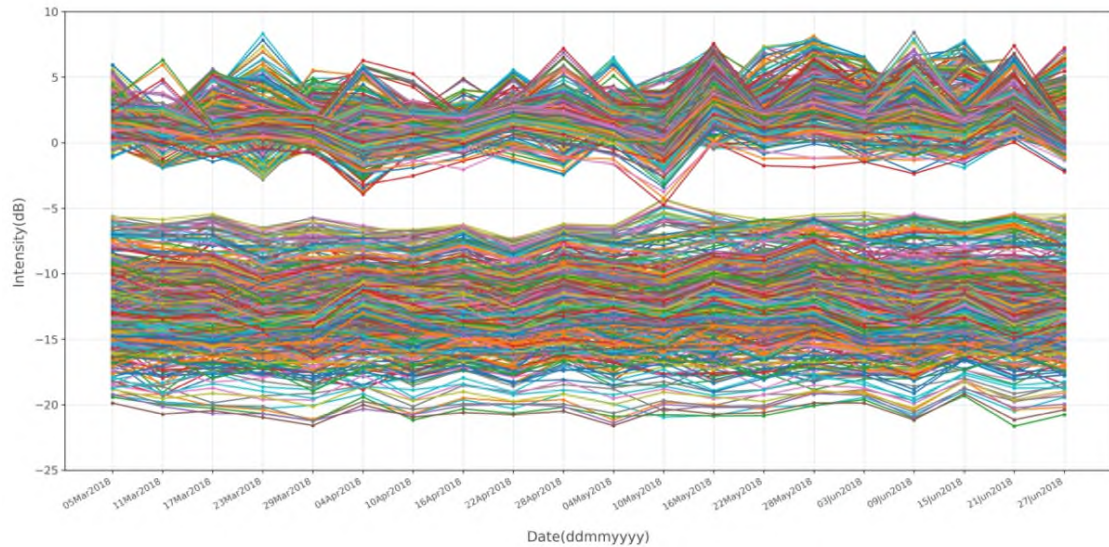


圖 4-10：測試植被的強度資訊時序分佈圖。

為了釐清這兩群植被的差異來源是否與空間上分佈有關，因此使用黃黑兩組顏色分別代表高 dB 數值和低 dB 數值的群組，各群組在空間上的分佈如圖 4-11。搭配坡向分析的結果（圖 4-5）進行比對，發現高 dB 數值的群組都分佈在坡面向西的坡向上（270 度至 315 度），而低 dB 數值的群組都分佈在坡面向東的坡向上（45 度至 135 度）。因此將測試植被的區域拆成兩組分別進行統計分析。

圖 4-11 為測試植被位於向西坡面的時間序列強度分佈狀況。各個時間點的平均 dB 數值以紅色線段表示，主要分佈在 1 至 3 之間，藍色虛線代表各個時間點的標準差，其值大約在 2 左右。藉由各個時間點的平均 dB 數值再進行統計分析，可以求得總體平均 dB 值為 2.19 和總體平均標準差為 1.6。圖 4-12 為測試植被位於向東坡面的時間序列強度分佈狀況。各個時間點的平均 dB 數值以紅色線段表示，主要分佈在 -13 至 -12 之間，藍色虛線代表各個時間點的標準差，其值大約在 2.5 左右。藉由各個時間點的平均 dB 數值再進行統計分析，可以

求得總體平均 dB 值為-12.29 和總體平均標準差為 2.39。透過上述的分析與計算，本研究將研究區域內的植被強度指標分為兩個群組，位於坡面向西的植被強度指標設定為 2.19 ± 1.6 ，位於坡面向東的植被強度指標設定為 -12.29 ± 2.39 。

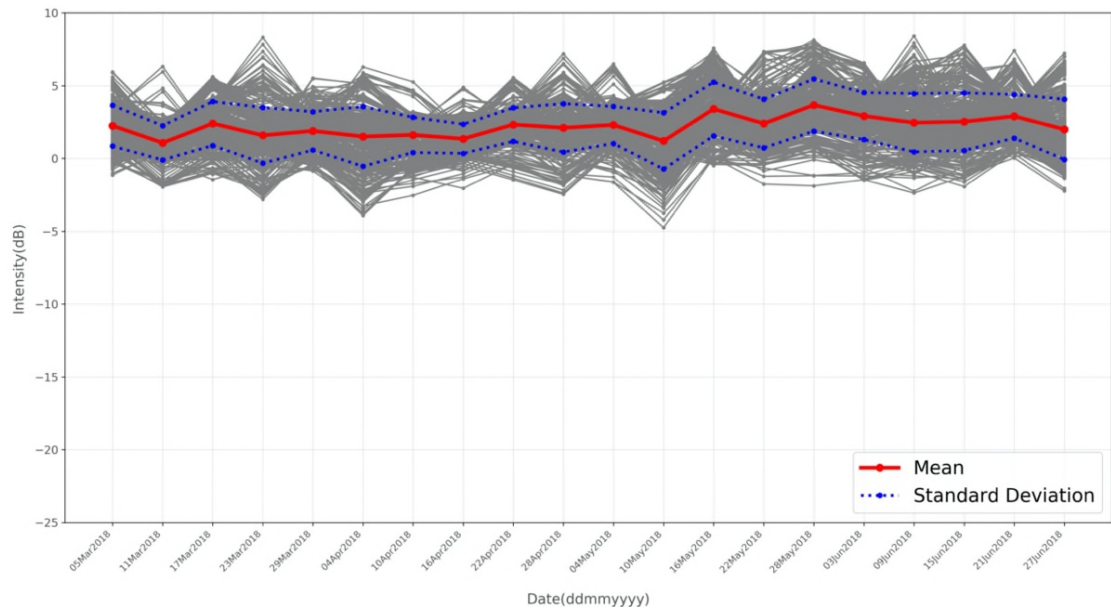


圖 4-11：測試植被位於向西坡面的強度資訊時序分佈圖。

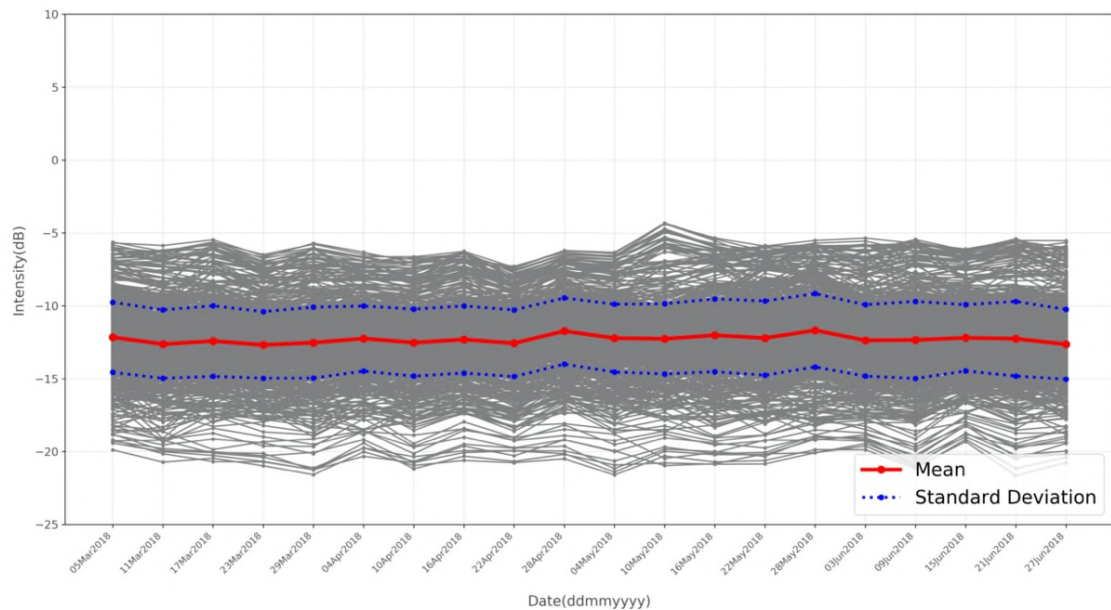


圖 4-12：測試植被位於向東坡面的強度資訊時序分佈圖。

(三)崩塌地：

1. 常年崩塌地

本研究透過崩塌前後的 SPOT 影像確認常年崩塌地的位置，再選取該範圍內的雷達強度影像資訊進行時間序列分析。圖 4-13 顯示所選取的常年崩塌地之位置，以及雷達像素在空間上之編號。

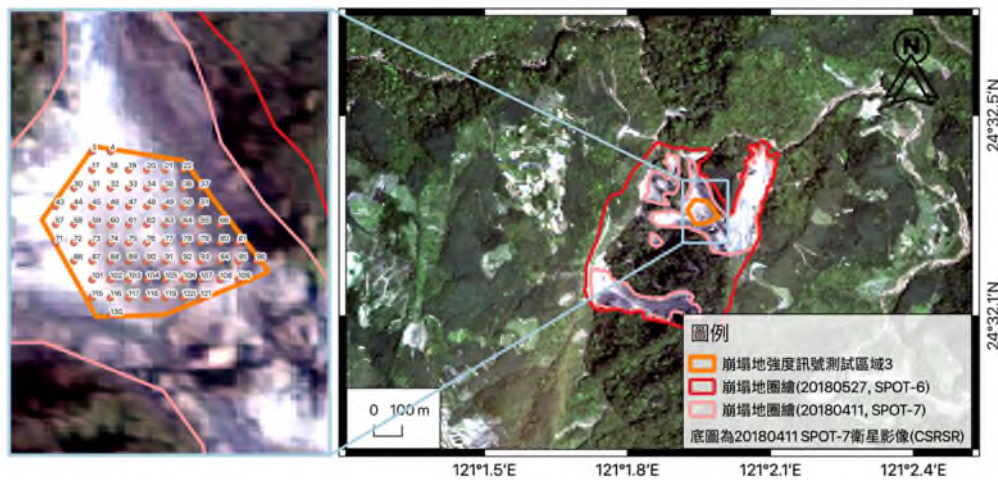


圖 4-13：常年崩塌地的空間分佈位置。

圖 4-14 為常年崩塌地在時間序列上的強度資訊分佈狀況。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸是強度訊號的數值。挑選過後的雷達影像像素總共有 74 個。各個時間點的平均 dB 數值以紅色線段表示，主要分佈在-6 至-3 之間，藍色虛線代表各個時間點的標準差，其值分佈在 1 至 4 左右。藉由各個時間點的平均 dB 數值再進行統計分析，可以求得總體平均 dB 值為-4.88 和總體平均標準差為 2.22。透過上述的分析與計算，本研究將研究區域內的建物強度指標門檻設定為 -4.88 ± 2.22 。

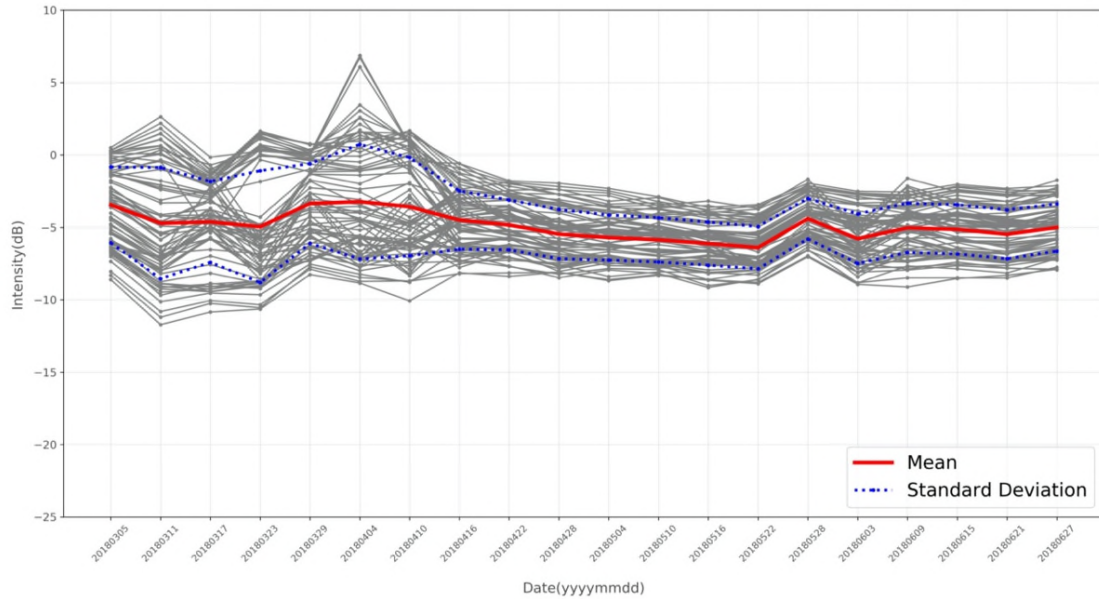


圖 4-14：常年崩塌地的強度資訊時序分佈圖。

2. 植被轉變成崩塌地

本研究透過崩塌前後的 SPOT 影像確認從植被轉變成崩塌地的位置，再選取該範圍內的雷達強度影像資訊進行時間序列分析。圖 4-15 顯示所選取的植被轉變成崩塌地之位置，以及雷達像素在空間上之編號。

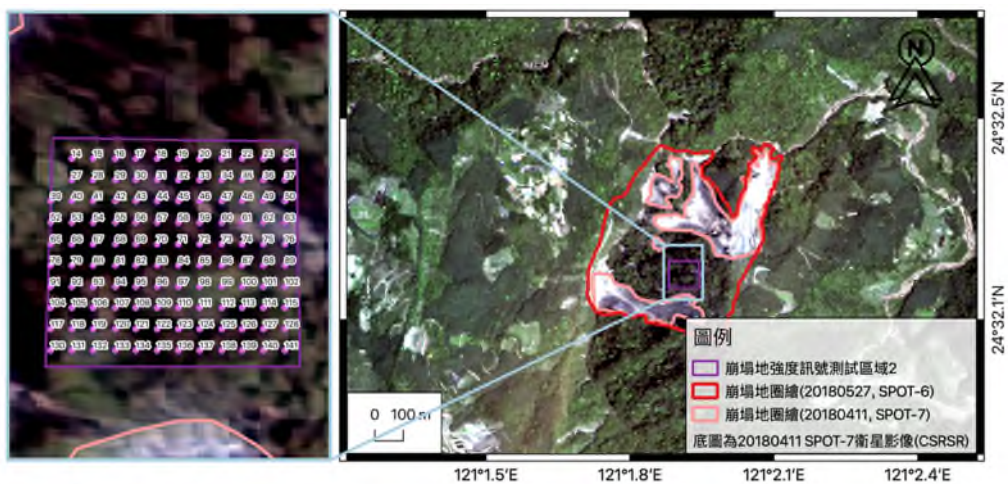


圖 4-15：植被轉變成崩塌地的空間分佈位置。

圖 4-16 為植被轉變成崩塌地在時間序列上的強度資訊分佈狀況。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸是強度訊號的數值。挑選過後的雷達影像像素總共有 118 個。各個時間點的平均 dB 數值以紅色線段表示，主要分佈在 1 至 -3 之間，當經過 4 月 13 日的崩塌事件之後，平均 dB 數值呈現下降之趨勢。藍色虛線代表各個時間點的標準差，其值分佈在 2 至 5 左右，同樣的，在經過 4 月 13 日的崩塌事件之後，整體的標準差數值呈現較為擾動之趨勢。藉由各個時間點的平均 dB 數值再進行統計分析，可以求得總體平均 dB 值為 -1.18 和總體平均標準差為 2.65。透過上述的分析與計算，本研究將研究區域內的植被轉變成崩塌地強度指標門檻設定為 -1.18 ± 2.65 。

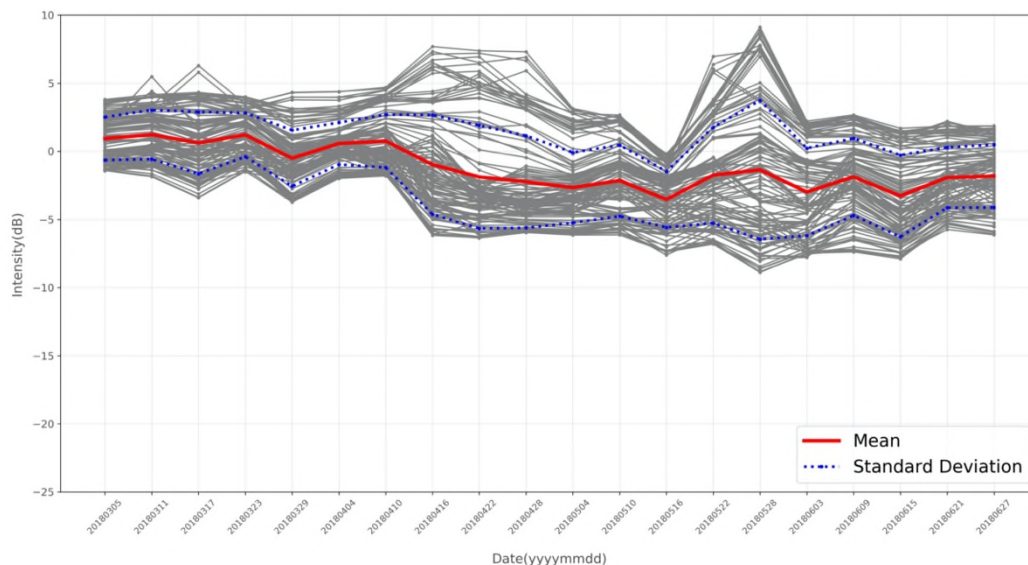


圖 4-16：植被轉變成崩塌地的強度資訊時序分佈圖。

(四)河谷崩塌地：

本研究透過崩塌前後的 SPOT 影像和 DEM 資訊，確認崩塌前河谷的位置，再選取該範圍內的雷達強度影像資訊進行時間序列分析。圖 4-17 顯示所選取的河谷崩塌地之位置，以及雷達像素在空間上的分佈。

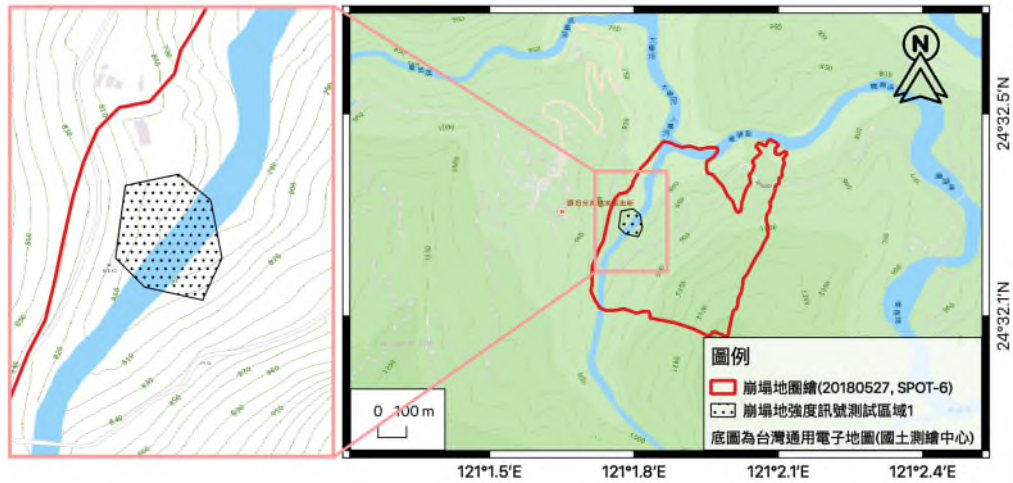


圖 4-17：河谷崩塌地的空間分佈位置。

圖 4-18 為河谷崩塌地在時間序列上的強度資訊分佈狀況。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸是強度訊號的數值。挑選過後的雷達影像像素總共有 75 個。在 4 月 13 日崩塌事件的前，所選取的雷達像素可根據其 dB 數值大致分成兩個群組，一組大約分佈在-8 至-5 之間，另一組在-16 至-13 之間，但是在崩塌事件之後，原本數值較高的那一組，其 dB 數值並未有明顯的變化，而另一組數值較低的那一組，其 dB 值卻明顯升高至-12 至-8。

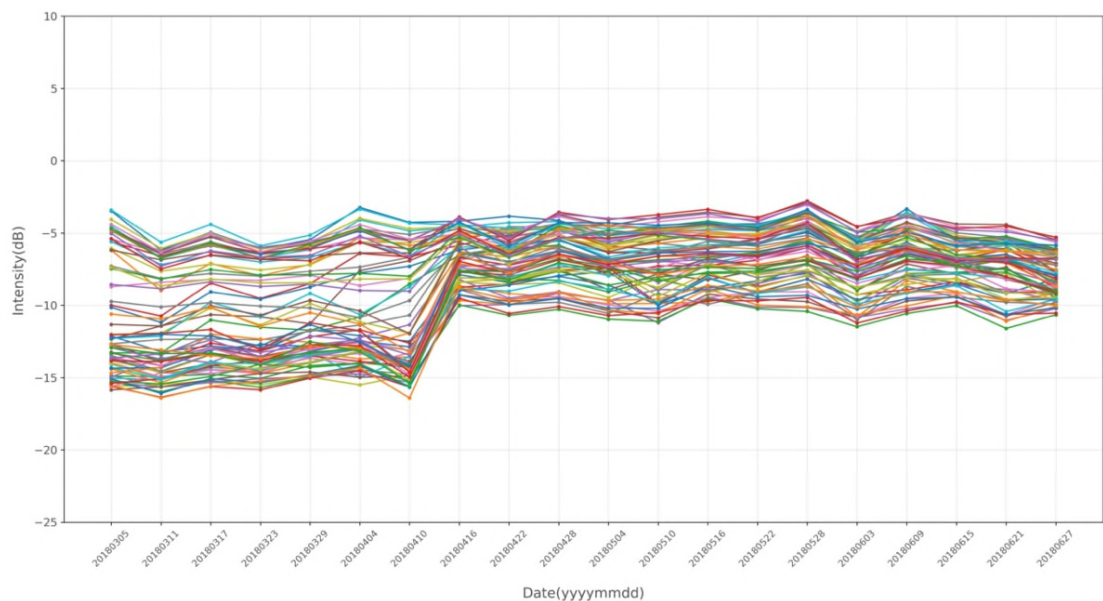


圖 4-18：測試河谷的強度資訊時序分佈圖(1)。

依據崩塌的時間點，將此研究區域的平均 dB 數值分為兩個階段（如圖 4-19）。在崩塌事件前的平均 dB 數值較為紛亂，分佈在-15 至 -5 之間，其標準差值分佈在 5 左右，其總體平均 dB 值為-11.03，總體平均標準差為 3.6。在 4 月 13 日的崩塌事件之後，平均 dB 數值較為穩定，分佈在-10 至-5 之間，標準差大約在 2 左右，其總體平均 dB 值為-6.88，總體平均標準差為 1.76。透過上述的分析與計算，本研究將研究區域內的河谷崩塌地強度指標分為兩類，一類設定為河谷強度指標，其門檻設定為 -11.03 ± 3.6 ，另一類設定為河谷崩塌地強度指標，其門檻設定為 -6.88 ± 1.76 。

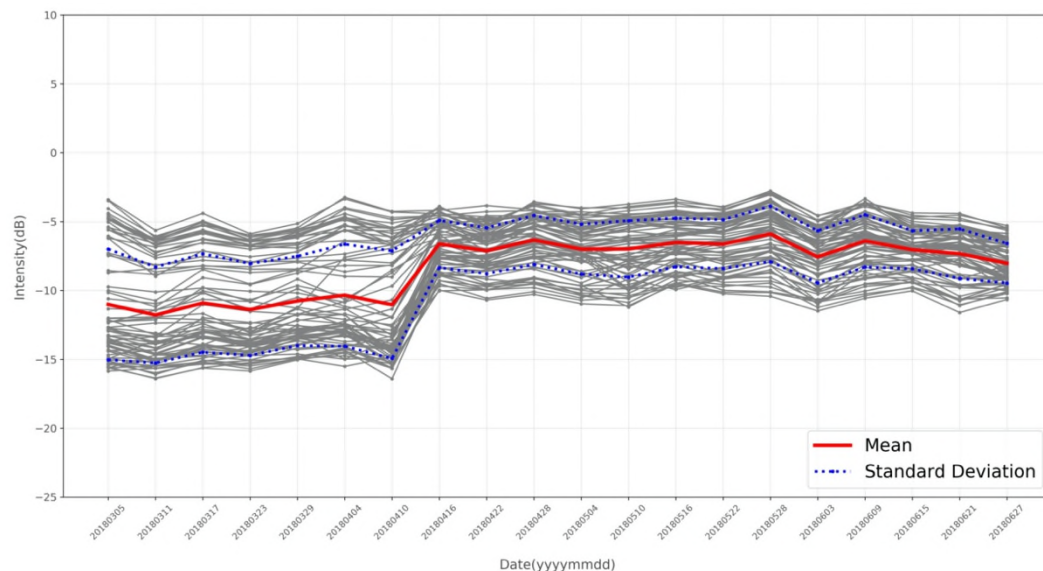


圖 4-19：河谷崩塌地的強度資訊時序分佈圖(2)。

三、環境因子對雷達回波強度的影響總結

統整上述環境因子的資料，可將其對於雷達回波強度之影響分別總結於表 4-4 至表 4-6。在坡度因子部分，本研究的崩塌地坡度位於 20 度至 40 度之間，雖不是最理想的觀測角度（0 度至 20 度），但仍屬於 Sentinel-1 衛星影像可有效獲取資訊的角度。在坡向因子部分，本研究的崩塌地坡向分佈於 270 度至 45 度之間，但主要的坡向以 270

度至 360 度為主，考量 Sentinel-1 衛星的飛行軌道與視角的限制因素，本研究將以 Sentinel-1 衛星的升軌道影像（升軌道飛行角度約為 348 度，往北飛行）作為主要分析之影像。在地表特徵物部分，建物和植被的總平均數值差異雖不大，但是植被的標準差幾乎為建物之兩倍，代表植被的回波訊號擾動較大；裸露地的坡向在事件前後之差異不大，均為向西，同時影像分析的時間段裡降雨事件稀少，因此，裸露地的回波訊號不但穩定，而且變動性也較低。河道的總平均值和標準差值皆很低，主要可能的原因在於水體本身會造成回波完全反射降低回波強度，同時河道的地勢平緩也不易提供可反射之角度。

表 4-4 坡度因子的影響總結

坡度	平均值	標準差	特性
0~1	-7.38	3.46	坡度小於 20 的地區，訊號相對穩定，受到坡度影響的狀況不明顯。
1~10	-7.77	3.98	
11~20	-7.96	3.81	
21~30	-8.43	4.78	坡度越來越高，反射值平均值越來越低，標準差也越拉越大。
31~40	-9.65	5.66	
41~50	-7.79	7.15	
51~60	-7.27	7.42	
60~90	-10.49	6.60	坡度高於 60 度之位置十分難觀測，反射值過低，所獲得之訊號含有疊置和陰影的風險。

表 4-5 坡向因子的影響總結

坡向	平均值	標準差	特性
N (337.5-22.5)	-8.95	3.03	坡向在靠近北邊、東北、東邊、東南之處，對於右視的衛星升軌(Ascending)影像來說，是較不理想的觀測坡向，平均值較低，影像強度資訊的不確定性程度較大。
NE (22.5-67.5)	-11.91	4.20	
E (67.5-112.5)	-13.70	4.11	
SE (112.5-157.5)	-11.54	3.38	
S (157.5-202.5)	-6.88	3.17	坡向在靠近南邊、西南、西邊、西北之處，對於右視的衛星升軌(Ascending)影像來說，
SW (202.5-247.5)	-1.03	3.48	
W (247.5-292.5)	-1.17	3.77	

NW (292.5-337.5)	-4.71	3.82	是較為理想的觀測坡向，平均值較高，影像強度資訊的不確定性程度較小。
NaN	-7.45	3.47	無坡向之處，受到更多其他環境因子影響

表 4-6 地表特徵物的影響總結

地表特徵物	平均值	標準差	特性
建物	-7.14	3.70	房屋的反射訊號雖然不是每個點都高，但是特點在於時間穩定度高，在同一 pixel 內的變化不大，標準差被拉大是受到地形影響，也就是位在不同空間位置會影響反射值高低。
植被	-7.91	7.01	植被本身擾動大，不論是平均值或是標準差皆差異大，甚至同一 pixel 內的變化相對於房屋有較高的擾動，雖然時間穩定度低，但是在空間上也會受到地形影響而有明顯不同
裸露地	-5.43	2.38	土壤平均都穩定在-5 dB 附近，標準差差異小，以單一 pixel 來看內部偶有變動推測是容易受到降水導致擾動。
河道	-8.26	2.68	水體的反射訊號平均值皆很低，以及標準差差異小，代表同樣是水體的反射歧異性低，推測原因在於河道大部分都在地勢較低，無高角度坡度之處，因此不容易受到地形影響大幅改變。

第二節 崩塌事件的強度資訊分析

一、事件型分析

針對 2018 年 4 月 13 日的崩塌事件分析，本研究挑選崩塌前 2018 年 4 月 10 日和崩塌後 2018 年 4 月 16 日的 Sentinel-1 雷達影像（產品規格為 GRDH）進行分析。透過強度影像的前處理之後（如圖 4-20），單從視覺上就能看出崩塌前後的雷達回波強度有顯著的差異，位在崩塌地內變動的 dB 值範圍是由頂部一路分佈到底部，其變動也大於周遭植被的變動量，此外，部分微地形之變化也能從前後影像中

判視。

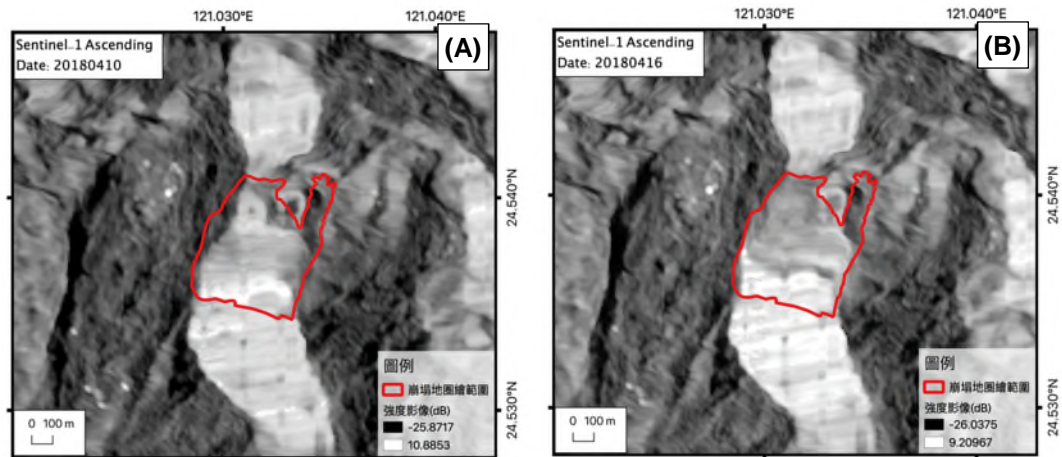


圖 4-20：崩塌事件前後雷達強度影像。(A) 2018 年 4 月 10 日崩塌前拍攝。(B) 2018 年 4 月 16 日崩塌後拍攝。

透過 NDSI 分析之後的結果如圖 4-21 所示。NDSI 數值越接近 1，其顏色越趨近白色，代表影像的 dB 值由高變低；NDSI 數值接近 0 時，代表影像前後的 dB 值差異不大；NDSI 數值越接近 -1，其顏色越趨近黑色，代表影像的 dB 值由低變高。比對 SPOT 影像在兩個時期所圈繪的崩塌地分佈結果，可以發現崩塌地在南北兩端的 dB 值是由高變低，在崩塌地東西兩側的河谷地區和崩塌地頂部的 dB 值是由低變高，而崩塌地中央的崩塌主體的 dB 值則是差異較小。

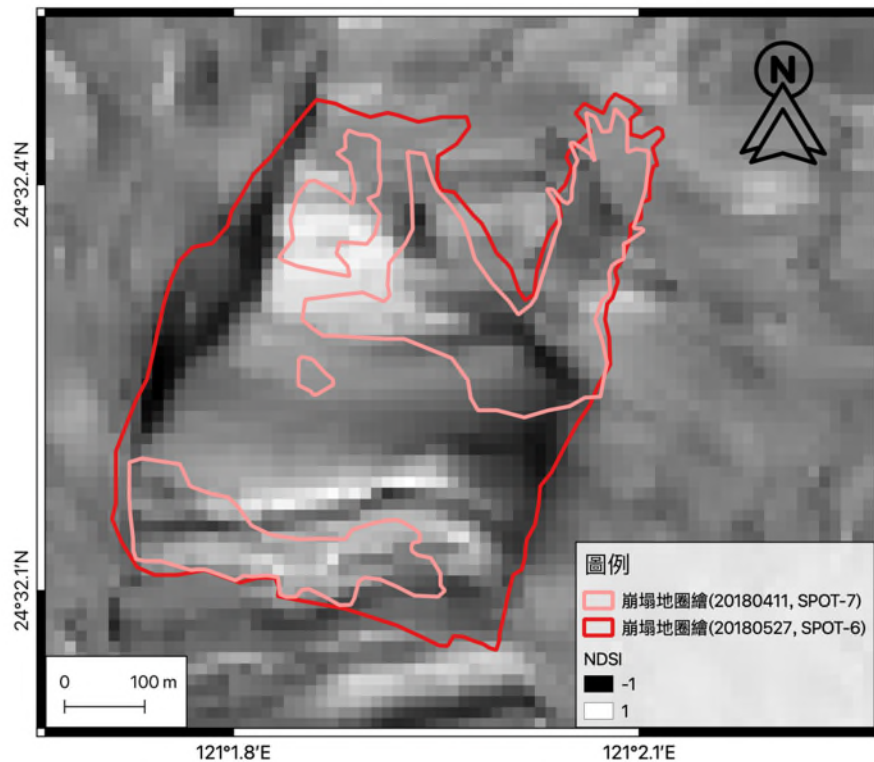


圖 4-21：崩塌事件前後雷達強度影像 NDSI 分析成果。（崩塌前影像：2018 年 4 月 10 日拍攝；崩塌後影像：2018 年 4 月 16 日拍攝

二、 時序型分析

目前使用 Sentinel-1 衛星的升軌道影像，時間段為 2018 年 3 月 7 日到 2018 年 6 月 27 日，總共選取 20 幅偏極為垂直偏極(VV)的影像進行時間序列的分析。研究區域內的影像在透過標準化處理後，繪製西向東、北向南的 12 個剖面（如圖 4-22），進行雷達強度資訊的時頻比對與分析。

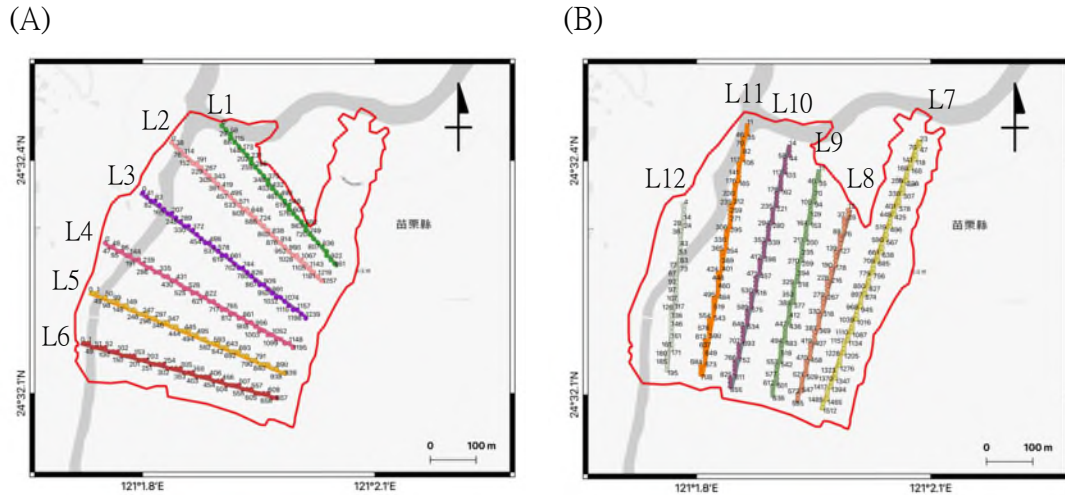


圖 4-22：時序分析的剖面位置。(A)東西方向的剖面，西側為起點。
(B)南北方向的剖面，北側為起點。

(一)東西方向剖面的時頻結果

圖 4-23 為東西方向剖面的時頻分析結果，自北 (L1) 向南 (L6) 共有 6 條剖面。X 軸為時間，由左向右逐漸增加，Y 軸為東西向的剖面，從上至下為西向東延伸。L1 至 L6 剖面的西側主要位在河道與河道左岸；L1 至 L6 剖面的中段主要位在河道右岸與崩塌地坡面上；L1 至 L6 剖面的東側主要位在崩塌地頂部。顏色色階代表回波強度的 dB 數值，數值範圍分布在 -20 至 10 之間。數值越大顏色越接近暖色系，越小顏色越靠近冷色系。時頻分析的結果顯示，除了 L6 剖面外，其餘剖面在 2018 年 4 月 13 日最大崩塌事件前後都有所差異。L1 剖面中段 dB 數值有降低之現象。L2 剖面西側 dB 數值明顯地由低變高，剖面中段 dB 數值也有顯著地由高變低，剖面東側 dB 數值則有些微的前後差異。L3 剖面西側 dB 數值明顯地由低變高。L4 剖面西側 dB 數值明顯地由低變高，剖面中段 dB 數值也顯著地由高變低，剖面東側 dB 數值則有些微的前後差異。L5 剖面西側 dB 數

值有由低變高之現象，剖面中段 dB 數值也有顯著地由高變低。

(二)南北方向剖面的時頻結果

圖 4-24 為東西方向剖面的時頻分析結果，自東 (L7) 向西 (L12) 共有 6 條剖面。X 軸為時間，由左向右逐漸增加，Y 軸為南北向的剖面，從上至下為北向南延伸。L7 至 L11 剖面的北側主要位在舊有崩塌地的位置，L12 剖面的北側主要位在河道與河道左岸；L7 至 L12 剖面的中段主要位在由植被轉成裸露地的崩塌地坡面上；L7 剖面的南側主要位在由植被轉成裸露地的坡面，L8 至 L12 剖面的南側主要位在舊有崩塌地的位置。顏色色階代表回波強度的 dB 數值，數值範圍分布在 -20 至 10 之間。數值越大顏色越接近暖色系，越小顏色越靠近冷色系。時頻分析的結果顯示，L7 剖面中段 dB 數值有顯著地由低轉高，剖面南側有部分地區的 dB 數值由高轉低。L8 和 L9 剖面中段有部分地區的 dB 數值由高轉低。L10 和 L11 剖面中段 dB 數值明顯地由高轉低。L12 剖面西側 dB 數值顯著地由低變高，剖面中段 dB 數值有些微的變動。

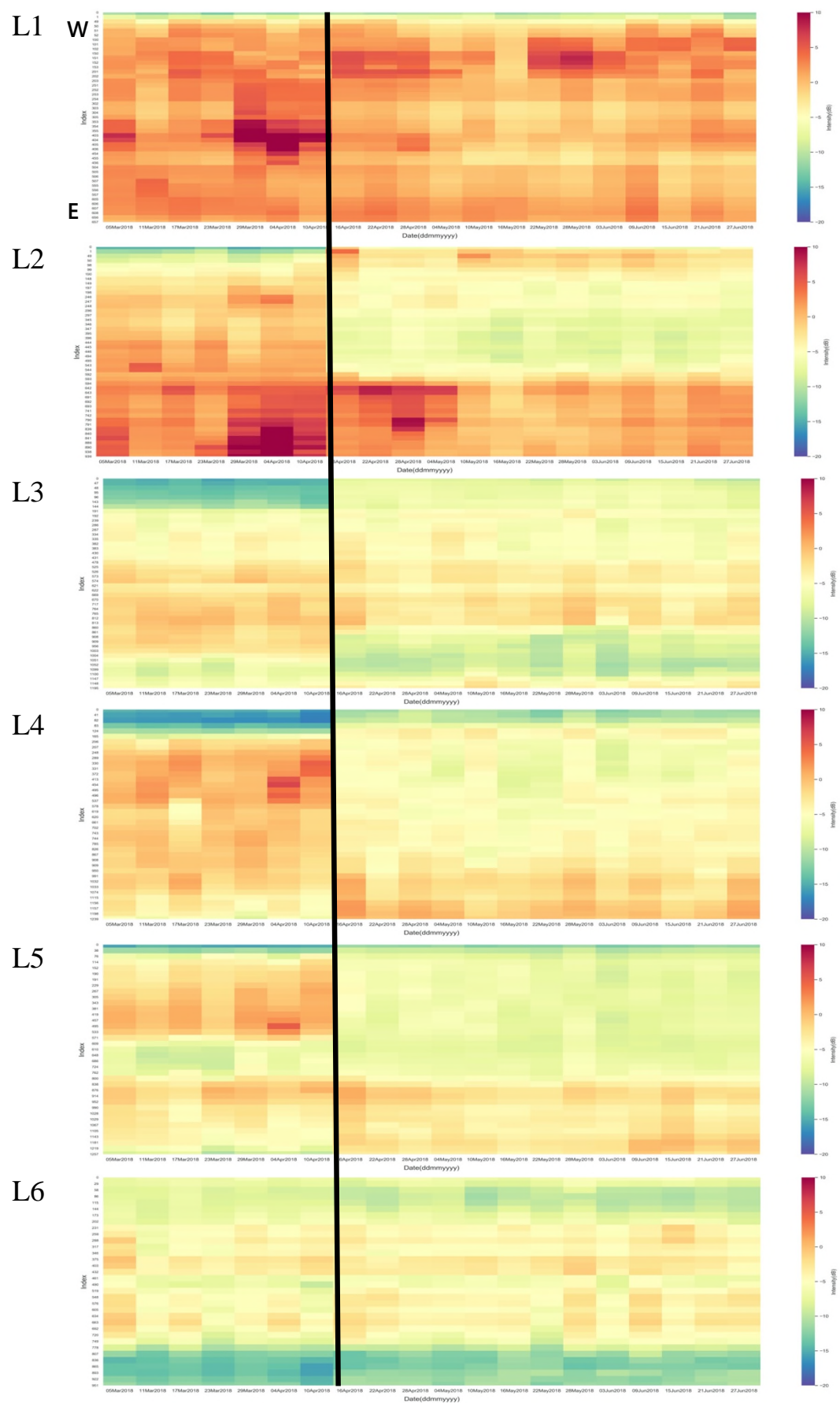


圖 4-23：東西方向剖面的時頻結果。黑線代表 4 月 13 日崩塌事件。

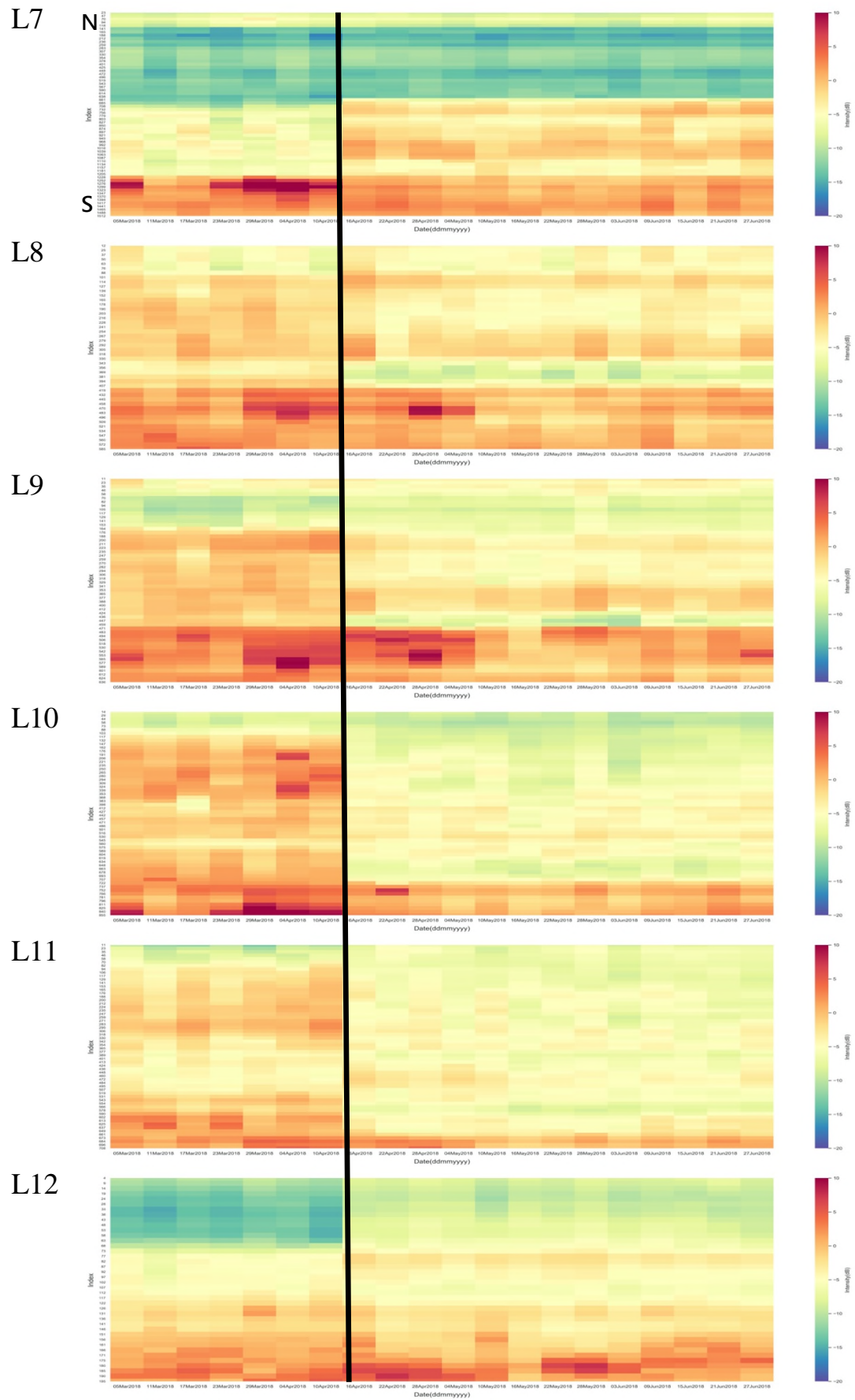


圖 4-24：南北方向剖面的時頻結果。黑線代表 4 月 13 日崩塌事件。

(三)不同地表特徵物的時頻結果

本研究選取研究區域內三種不同的地表特徵物(如圖 4-25)，進行雷達強度資訊的時頻比對與分析。主要分析的區域為河谷位置、長年崩塌位置和植被轉為崩塌地位置，嘗試探討環境因子差異在這些區域所造成之影響。

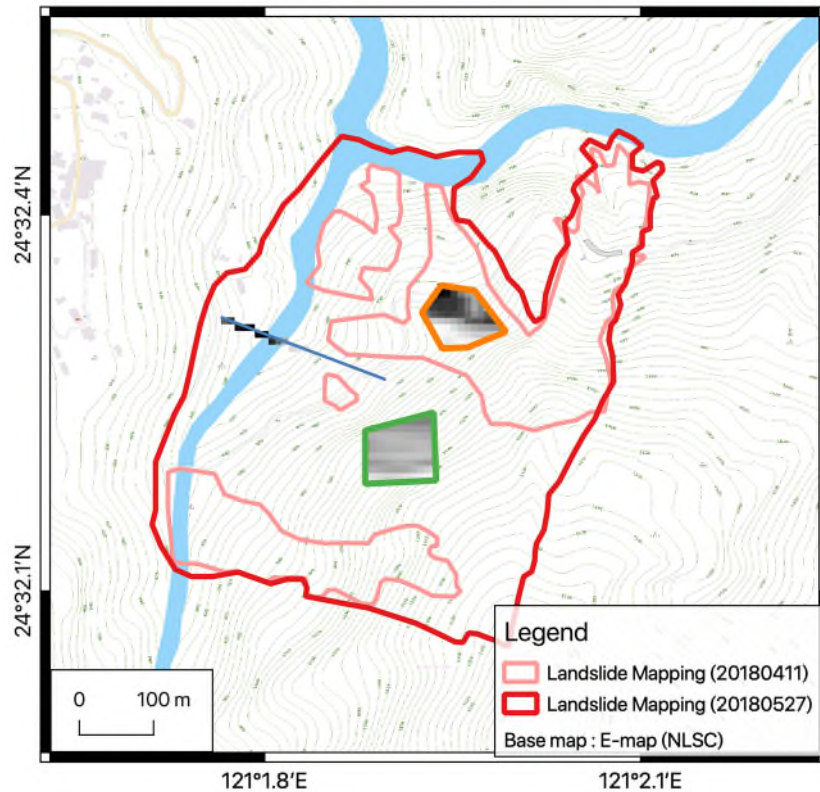


圖 4-25：時序分析的測試點位之空間分佈。藍色線段為跨過河谷的剖面分析。橘色線段圈選的位置為常年崩塌的區域。綠色線段圈選的位置為植被轉變為崩塌地的區域。

1.河谷位置的時頻結果

圖 4-26 為河谷位置的時頻分析結果。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸為剖面沿線，從上至下為西向東延伸。顏色色階代表回波強度的 dB 數值，數值越大顏色越接近暖色系，越小顏色越靠近冷色系。時頻分析的結果顯示，位於

河谷西側的地區在崩塌事件發生之前 dB 數值很低，但是在事件之後顯著提升；河谷東側的地區則是在事件發生之後，dB 數值有微小的降低。主要成因可能為崩塌物填滿河谷後，變更河谷的地貌而成為較容易反射雷達回波的地形，由於河谷兩側的坡向不同，因此即便河谷西側的地形已明顯變更，但仍會受限於坡面的條件限制，而無法達到與東側相似的回波強度。

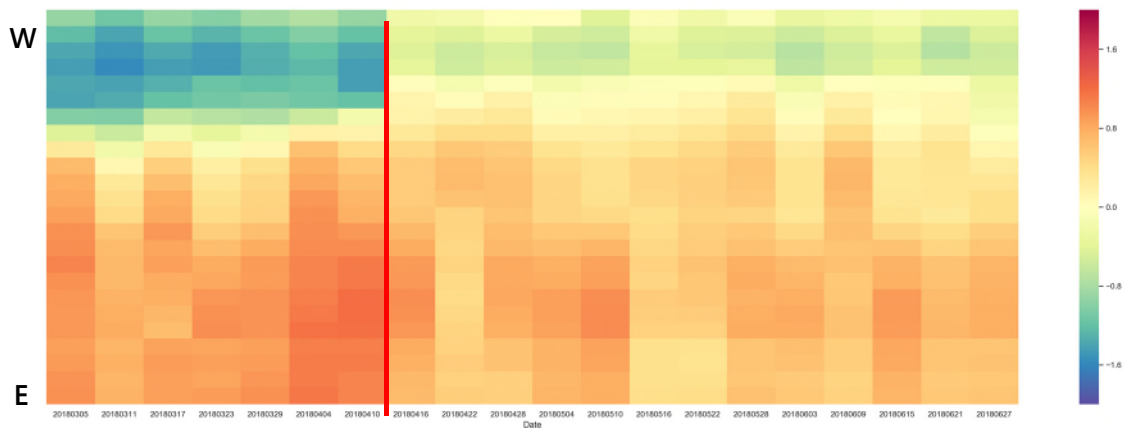


圖 4-26：河谷剖面的時頻圖。紅線代表 4 月 13 日崩塌事件。

2. 常年崩塌地位的時頻結果

圖 4-27 為常年崩塌地位的時頻分析結果。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸為圈選範圍內的像素編號順序，從上至下編號逐漸增大，像素的編號方式是從西向東、由上而下排列，圖 4-27 裡的黑線指示編號換行的位置。顏色色階代表回波強度的 dB 數值，數值越大顏色越接近暖色系，越小顏色越靠近冷色系。時頻分析的結果顯示崩塌前後整個區域的 dB 數值呈現降低的現象，可能與崩塌地的坡度與地表粗糙度改變有關。

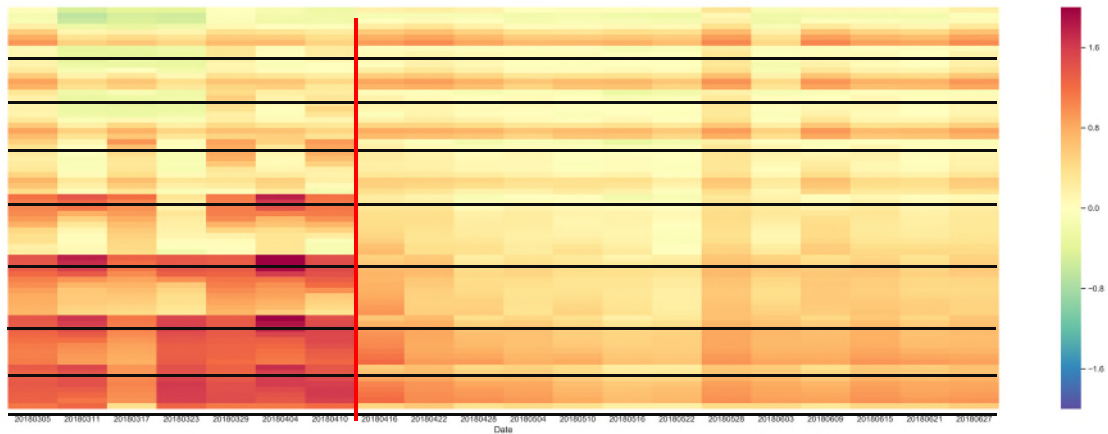


圖 4-27：常年崩塌地的時頻圖。黑線表示圈選範圍內的像素排列換行的位置。紅線代表 4 月 13 日崩塌事件。

3. 植被轉變成崩塌地位置的時頻結果

圖 4-28 植被轉變成崩塌地位置的時頻分析結果。X 軸為時間，由左自右逐漸增加，Y 軸為圈選範圍內的像素編號順序，從上至下編號逐漸增大，像素的編號方式是從西向東、由上而下排列，圖 4-28 的黑線指示編號換行的位置。顏色色階代表回波強度的 dB 數值，數值越大顏色越接近暖色系，越小顏色越靠近冷色系。時頻分析的結果顯示所選取的區域在崩塌之後 dB 數值都有降低，但是南北呈現不均勻降低的狀態，南邊的 dB 數值降低數值遠大於北邊，這反映著南北兩側的地形雖然在崩塌前相當一致，但是在崩塌之後卻有所差異，除了坡度變化的可能性之外，坡面的改變可能也是一個主因。

另外，此區域的地表特徵物是從植被轉變成崩塌地，但是 dB 數值並沒有因為事件之後提高，反而是普遍下降，這可能代表在這個場址裡，主要控制雷達回波強度的因子，可能不是地表特徵物的種類，而是地形和衛星視角之間的幾何關係。

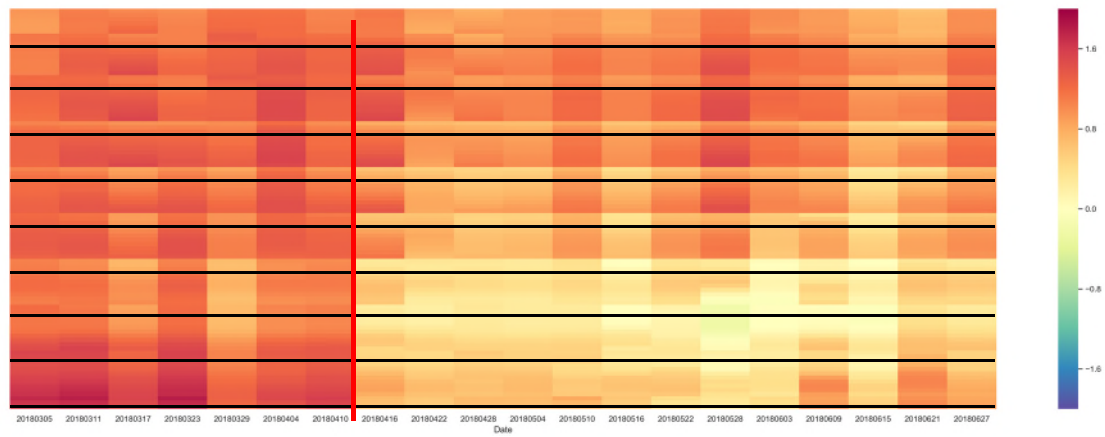


圖 4-28：植被轉變為崩塌地的時頻圖。黑線表示圈選範圍內的像素排列換行的位置。紅線代表 4 月 13 日崩塌事件。

第三節 環境因子強度指標分析

一、植被和崩塌地之強度差異指標建立

透過前面研究分析，位於坡面向西的植被強度指標為 2.19 ± 1.6 ，常年崩塌地的強度指標為 -4.88 ± 2.22 。本研究假設這兩個地表特徵物彼此之間的強度指標之差異，可作為崩塌事件發生時，崩塌地地表從植被覆蓋變成裸露地的挑選門檻，依此概念所建立的強度差異指標門檻區間為 3.25 至 10.89。本研究透過所建立的強度差異指標門檻區間數值，挑選崩塌前後的兩幅雷達影像之 dB 差值，嘗試圈繪出研究區域內崩塌地的位置。

二、強度差異指標挑選結果

圖 4-29 使用強度差異指標挑選出來的崩塌地位置。測試的區域選用 2018 年 5 月 27 日 SPOT 衛星所圈繪出的崩塌地範圍，其對應之雷達影像的總像素為 3606 個。藉由強度差異指標門檻區間數值挑選雷達影像崩塌前後影像對之 dB 差異值，可以獲得 3056 個像素介於此門檻區間內，其餘 550 個像素則為門檻區間外。透過比對崩塌前 2018 年 4 月 11 日 SPOT 衛星所圈繪出的崩塌範圍，可以發現大多數崩塌前後都是崩塌地或裸露地的位置，都能有效的避免圈繪，但是從植被轉變成崩塌地的位置，則有許多區域是無法透過這個門檻區間挑選取出來的。詳盡的驗證結果與誤差探討請參閱下一節的內容。

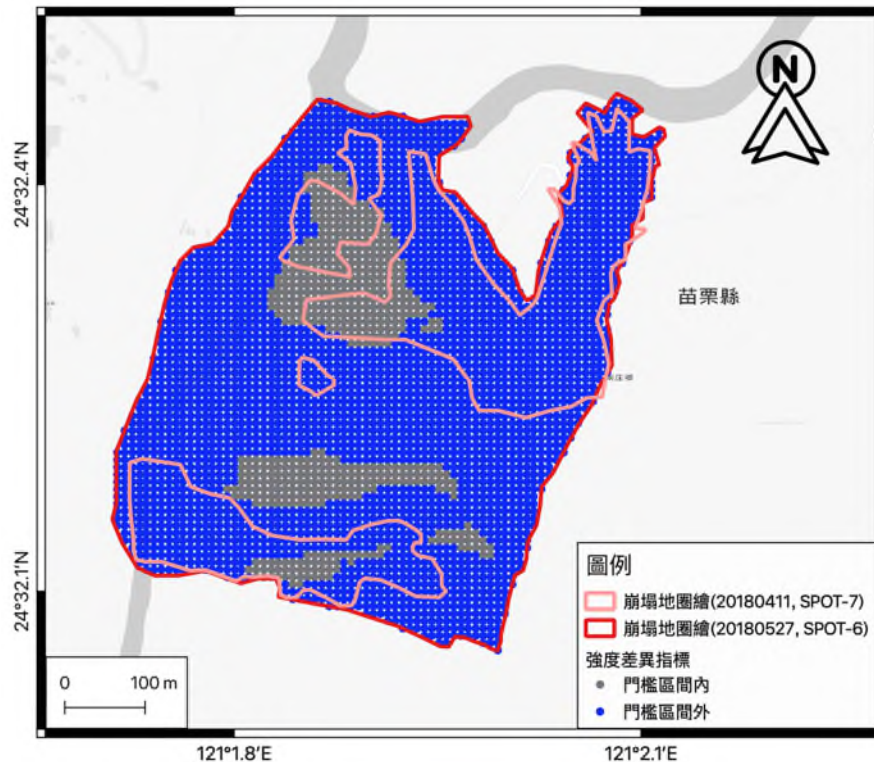


圖 4-29：強度差異指標所挑選出的崩塌地位置。

第四節 驗證結果

一、光學影像的崩塌地圈繪

本計畫透過常態化差異植生指標(normalized difference vegetation index, NDVI)分析，並且搭配人工判視的方法，圈繪研究區域內崩塌地崩塌前後的範圍。圖 4-30 和 4-31 是分別選取 2018 年 4 月 11 日和 2018 年 5 月 27 日兩幅影像進行崩塌地圈繪之結果，明顯可見跨過 2018 年 4 月 13 日崩塌事件前後的崩塌面積差異。在 4 月 11 日的崩塌地主要分佈在南北兩個區塊，總共圈繪了 54320 個崩塌地像素，但在 5 月 27 日的影像裡，可以發現南北兩個崩塌地之間的山體，已經崩落至下方溪谷中，總共圈繪了 145161 個崩塌地像素，粗略估計兩個時期的崩塌面積約從原本的 122 平方公里擴大到 327 平方公里。

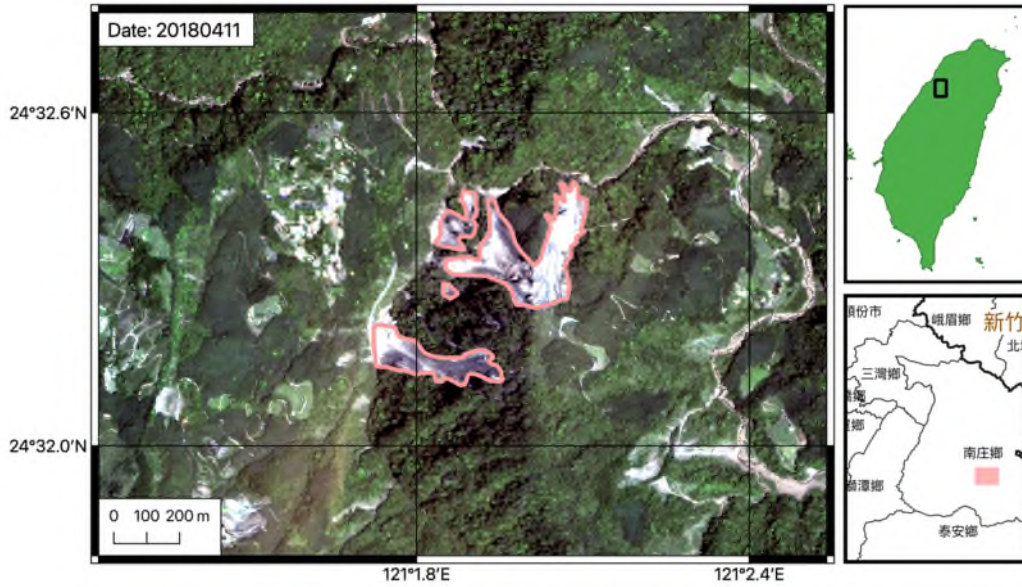


圖 4-30：2018 年 4 月 11 日 SPOT 衛星影像所圈繪的崩塌地範圍。

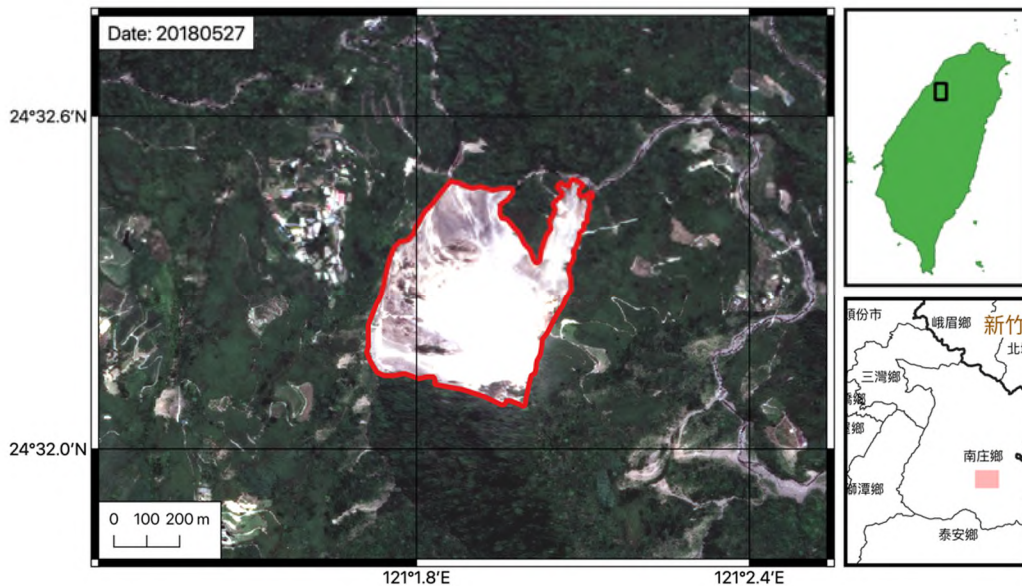


圖 4-31：2018 年 5 月 27 日 SPOT 衛星影像所圈繪的崩塌地範圍。

二、誤差矩陣(confusion matrix)分析

為了確認藉由植被和崩塌地之間的強度差異指標所圈選的崩塌地之可信度，本研究使用 SPOT 光學衛星的影像作為驗證的資料。由於 SPOT 衛星影像的空間解析度為 1.5 米，而 Senitinel-1 衛星影像的空間解析度為 10 米，為了能將兩種結果進行比對分析，本研究降低 SPOT 的空間解析度為 10 米，以利後續的資料驗證工作進行。

本研究選取 2018 年 5 月 27 日 SPOT 影像所圈繪的崩塌地區域內的 3606 個像素位置，作為兩種不同的資料進行比對之範圍依據。透過誤差矩陣的分析，其結果顯示於表 4-7 中。X 軸代表實際正確和實際錯誤的資訊，Y 軸代表挑選正確和挑選錯誤的資訊。左上角的結果稱為「正確的正向預測 (True Positive, TP)」，左下角的結果稱為「錯誤的負向預測 (False Negative, FN)」，右上角的結果稱為「錯誤的正向預測 (False Positive, FP)」，以及右下角的結果稱為「正確的負向預測 (True Negative, TN)」。

表 4-7 誤差矩陣結果

	植被轉變成崩塌地的像素 (20180527 新增的崩塌地區域)	非植被轉變成崩塌地的像素 (20180411 已有的崩塌地區域)
植被轉變成崩塌地的像素 (強度差異指標門檻區間內)	316 (True Positive, TP)	234 (False Positive, FP)
非植被轉變成崩塌地的像素 (強度差異指標門檻區間外)	1949 (False Negative, FN)	1107 (True Negative, TN)

根據上述四種結果，可以計算出強度差異指標所挑選出的植被轉變成崩塌地，相對於光學影像挑選出的崩塌地之準確率(Accuracy)為 39.46%，精確率(Precision)為 57.45%，召回率(Recall)為 13.95% (各個機率的計算公式如下：準確率 = $(TP+TN)/Total\ N$ ；精確率 = $TP/(TP+FP)$ ；召回率 = $TP/(TP+FN)$ 。)

初步分析選取不準確的可能原因有以下幾點：

(一)常年崩塌地的採樣不足：

目前研究只有選取一個常年崩塌地的數據進行分析，疑有採樣不足之疑慮，因此未來將再增加測試區域內的雷達影像像

素資訊。

(二)河谷崩塌地的數值：

位於河谷崩塌地西側的區域，其坡面朝向東方，從時序分析的結果可知，這個區域的 dB 值在崩塌前後是從低數值變成高數值，因此本研究所建立的強度差異指標區間無法辨識出這類地表特徵變化的區域。

(三)常年崩塌地的坡面方向：

位於常年崩塌地東北角區域的坡面方向為 0 度至 45 度，是朝向北方至東北方向，以升軌道雷達衛星觀測的視角與方位來說，並不容易獲得有效資訊的地區，所以在崩塌事件前後，這個區域的雷達回波強度都持續低落，也因此強度差異指標區間可以成功的不挑選這個區域。但是反觀西北角區域的常年崩塌地則無法有效躲避挑選，這可能是崩塌事件發生後，大量推積物讓這個區域的地形地貌改變過大，而落入了強度差異指標區間。因此，如能取得崩塌事件之後的地形數值高程模型，將能更能探討崩塌前後的坡度和坡向變化對強度影像的影響，同時也能提升強度差異指標區間的辨識能力。

(四)兩種影像的時間區段：

目前兩幅光學影像的時間區段為 2018 年 4 月 11 日和 2018 年 5 月 27 日，比目前使用的雷達影像間距還長，因此植被轉變成崩塌地的像素範圍會比較大，未來將找尋較短時間段的光學影像進行驗證，或是加大雷達影像的時間間距，讓兩種資料在時間上的差異縮減到最小。

結論

本研究透過雷達強度影像的時序分析結果，釐清環境因子對於雷達強度資訊的影響，建立出環境因子的強度指標，並透過此強度指標之間的差異，探討崩塌地內部的活動機制。以下條列本研究成果所得之結論：

一、 地形效應：

研究顯示地形效應的影響在研究區域裡是最為顯著的影響因子，其中又以坡向的影響大於坡度。各角度的坡度其平均的 dB 數值皆介於-11 至-7 之間，然而各角度的坡向其平均的 dB 數值則介於-14 至-1 之間，可見坡向影響著雷達強度訊號的反射能力遠大於坡度。

二、 地表物特徵效應：

研究區域內所分類的四種地表特徵物，其平均 dB 數值分布在-9 至-5 之間，彼此之間的差異並不巨大，但是仍能透過平均值與標準差來辨定地表物的特性。以植被來說，其 dB 數值不但很低（-7.91），而且其標準差數值也很高（7.01），這反映著植被擾動的特性。此外，河道的 dB 數值也很低（-8.26），但是標準差的數值卻相當低（2.68），代表河道的回波反射資訊相對於植被來說是更為穩定。因此，在低 dB 數值的區域中，可以藉由這樣的標準差差異協助地表特徵物之判定。

三、 時頻分析：

相對於傳統光學衛星的拍攝頻率與拍攝成果，使用雷達強度影像的時頻分析結果，可以更加了解崩塌地內部的局部變化狀況。雷達強度影像對於地形效應最為敏感，也就是對於地形變化極為敏感，因此，針對大型崩塌事件不但可以快速圈繪，更能透過時頻分析了解崩

塌地內部的時空變異，對於了解崩塌地的崩塌機制和行為，提供更詳細與有效的資訊。

四、 環境因子強度指標：

透過詳盡的時序統計分析，可以建立研究區域內四種不同地表特徵物的各自強度指標。將植被強度指標和裸露地強度指標的差值，作為崩塌地內由植被轉換成裸露地的像素挑選門檻，其挑選結果與光學衛星影像的 NDVI 結果相互驗證，準確率為 39.46%，精確率為 57.45%。

五、 未來可精進之部分：

未來可持續增加雷達影像分析的時間長度與圖幅數量，分析出更精準的強度指標，以求得更詳盡的環境因子測試與分類，同時，也能更深入探討研究區域內的崩塌地監測能力。此外，這些長時間的影像資訊，也可透過時頻分析方法探討 dB 數值在時間域中的頻率變異情形，將有助於雷達強度資訊之本質探討。

參考文獻

1. 張中白、王皓正、陳錕山，地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-地殼變形研究計畫。經濟部中央地質調查所報告第 92-10 號，2003。
2. A. Refice, F. Bovenga, J. Wasowski & L. Guerriero (2000) Use of InSAR Data for Landslide Monitoring: a Case Study from Southern Italy. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.
3. Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari & E. Sansosti (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, 2375-2383.
4. Doin, M.-P., S. Guillaso, R. Jolivet, C. Lasserre, F. Lodge, G. Ducret & R. Grandin. 2011. Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In Proceedings of the Fringe symposium, 3434-3437. ES.
5. Ferretti, A., A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca & A. Rucci (2011) A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49, 3460-3470.
6. Ferretti, A., C. Prati & F. Rocca. 1999. Permanent scatterers in SAR interferometry. In Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International, 1528-1530. IEEE.
7. Goldstein, R. M. & C. L. Werner (1998) Radar interferogram filtering for geophysical applications. Geophysical research letters, 25, 4035-4038.
8. Goldstein, R. M., H. A. Zebker & C. L. Werner (1988) Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. Radio science, 23, 713-720.
9. Hanssen, R. F. 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media.
10. Hilley, G. E., R. Bürgmann, A. Ferretti, F. Novali & F. Rocca (2004) Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. Science, 304, 1952-1955.

11. Hooper, A. (2008) A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35.
12. Hooper, A., D. Bekaert, K. Spaans & M. Arıkan (2012) Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.
13. Hooper, A., H. Zebker, P. Segall & B. Kampes (2004) A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31.
14. Lillesand, T., R. W. Kiefer & J. Chipman. 2015. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
15. Lin, Yun, Bhardwaj & Hill (2019) Urban Flood Detection with Sentinel-1 Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar (SAR) Observations in a Bayesian Framework: A Case Study for Hurricane Matthew. *Remote Sensing*, 11.
16. Manconi, A., F. Casu, F. Ardizzone, M. Bonano, M. Cardinali, C. De Luca, E. Gueguen, I. Marchesini, M. Parise, C. Vennari, R. Lanari & F. Guzzetti (2014) Brief Communication: Rapid mapping of landslide events: the 3 December 2013 Montescaglioso landslide, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1835-1841.
17. Massonnet, D. & K. L. Feigl (1998) Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36, 441-500.
18. Mondini, A. (2017) Measures of Spatial Autocorrelation Changes in Multitemporal SAR Images for Event Landslides Detection. *Remote Sensing*, 9.
19. Mondini, A., M. Santangelo, M. Rocchetti, E. Rossetto, A. Manconi & O. Monserrat (2019) Sentinel-1 SAR Amplitude Imagery for Rapid Landslide Detection. *Remote Sensing*, 11.
20. Oliver, C. & S. Quegan. 2004. *Understanding synthetic aperture radar images*. SciTech Publishing.
21. Paradella, W. R., A. Ferretti, J. C. Mura, D. Colombo, F. F. Gama, A. Tamburini, A. R. Santos, F. Novali, M. Galo & P. O. Camargo (2015) Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, 193, 61-78.
22. Raspini, F., A. Ciampalini, S. Del Conte, L. Lombardi, M.

- Nocentini, G. Gigli, A. Ferretti & N. Casagli (2015) Exploitation of Amplitude and Phase of Satellite SAR Images for Landslide Mapping: The Case of Montescaglioso (South Italy). *Remote Sensing*, 7, 14576-14596.
23. Schlaffer, S., P. Matgen, M. Hollaus & W. Wagner (2015) Flood detection from multi-temporal SAR data using harmonic analysis and change detection. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 15-24.
24. Singhroy, V., K. Molch & M. Bulmer. 2002. Characterization of landslide deposits using SAR images. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 185-187. IEEE.
25. Tessari, G., M. Floris & P. Pasquali (2017) Phase and amplitude analyses of SAR data for landslide detection and monitoring in non-urban areas located in the North-Eastern Italian pre-Alps. *Environmental Earth Sciences*, 76.
26. V. Singhroy, K. E. Mattar & A. L. Gray (1998) LANDSLIDE CHARACTERIZATION IN CANADA USING INTERFEROMETRIC SAR AND COMBINED SAR AND TM IMAGES. *Advances in Space Research*, 21, 465-476.
27. Vietmeier, J., W. Wagner & R. Dikau. 1999. Monitoring moderate slope movements (landslides) in the southern French Alps using differential SAR interferometry. In *Proceedings of Fringe*, 10-12.
28. Wang, J. R. & T. J. Schmugge (1980) An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 288-295.
29. Zebker, H. A. & J. Villasenor (1992) Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30, 950-959.
30. Zhao, C., Q. Zhang, Y. Yin, Z. Lu, C. Yang, W. Zhu & B. Li (2013) Pre-, co-, and post- rockslide analysis with ALOS/PALSAR imagery: a case study of the Jiweishan rockslide, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2851-2861.

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：		
一	雷達影像回波訊號主要是受到地表幾何形狀和介電常數所影響，因此不會完全和光學影像的崩塌範圍一致，圖 4-7 清楚呈現了此問題。且圖 4-7 崩塌位置迴波強度雖稍有變化，但同一組影像的其他位置，也有更強的迴波強度變化，建議說明如何區分那些是崩塌訊號？那些不是？此外，文中提到分類不同崩塌表面介質和型態，依據前人研究，建議表列出那些不同類型的崩塌在影像上之訊號表現差異為何？	已遵照審查委員建議辦理，修正的成果已呈現於期中報告之中。利用光學衛星影像圈選出研究區域內的建物、植被、崩塌地和河谷區域，藉以協助雷達影像區分崩塌地之訊號。另外，期中報告已嘗試探討常年崩塌地和植被轉變成崩塌地，這兩種不同類型的崩塌地變化狀況在雷達影像上的訊號差異。
二	有關整合環境因子、探討活動特性及歸納門檻值乙節，報告中並未提出那些因子，建議補充說明。	已遵照審查委員建議辦理，針對環境因子中的建物、植被、崩塌地和河谷區域進行分析。並探討兩種不同崩塌地變遷的變異狀況，修正的成果已呈現於期中報告之中。
三	建議針對圖 4-2 及圖 4-3 與本計畫關連及相關應用予以說明。	已遵照審查委員建議辦理，新增說明描述研究區域內坡向與坡度資訊和本計畫之間的關聯與應用，修正的成果已新增於期中報告之中。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	崩塌發生前後，地表通常發生劇烈變化，因此必定喪失相關性，要如何透過建立相干來做雷達差分計算位移量？山裡難以找到很多「永久散射體」，除非自己布設，因此要達成 P4-9 所述，探討研究區域裡，具有潛移崩塌變形的位址與速率，必須要謹慎說明，以免誤導使用者	已遵照審查委員建議辦理，修改的說明已列於期中報告之中。利用永久散射體差分干涉技術，主要是嘗試針對劇烈崩塌後，頂部崩崖的潛移崩塌變形量測，期望能提供連續的位移量，以利後續崩塌地整治方案之決策。
五	建議勿僅使用 20m 數值高程模型資訊，內政司已有全國更細緻之高程資料可使用	已遵照審查委員建議辦理，使用 5 米 DEM 於研究之中，新的成果已呈現於期中報告之中
六	建議勿僅以 Moran's I 指標進行統計分析，因其主要目的為群集、熱點及擴散分析，以台灣坡地自然崩塌之地形複雜度，僅以統計學之分析恐較不易有實質成果。	已遵照審查委員建議辦理，使用其他的統計分析方法用於本計劃之中，相關修正的成果已列於期中報告之中。
七	呈現研究成果時，建議要使用各種分類精度，除討論崩塌地是否正確判釋外，亦需討論多少被誤判，才有代表性。	已遵照審查委員建議辦理，新增的誤差矩陣分析結果已列於期中報告之中。
八	本計劃提到要使用多時序雷達影像，但沒有詳細說明要如何使用？僅有 P4-9 所述要透過統計分析量化，建議補充相關說明。	已遵照審查委員建議辦理，補充的相關說明已列於期中報告之中。

項次	審查意見	回覆辦理情形
九	P4-9 也提到將規劃進行現地調查和無人飛機施測，作為一組驗證資料。考量其工作時間與經費極高，建議評估採用政府開放資料平台上，林務局所提供的多年期全台崩塌目錄，以大量代表性的資料進行雙重驗證。	已遵照審查委員建議辦理，目前正在嘗試使用開放平台的光學衛星影像資料進行驗證，新的成果已列於期中報告之中。
十	依據實務應用需求，請評估可得到最小可判釋之崩塌面積為何？並註明此為垂直崩塌面積亦或斜坡崩塌面積。	目前透過崩塌事件前後的雷達強度影像，可以繪製出崩塌時所造成的地表物特徵變化的崩塌地位置，但仍無法確認為垂直崩塌或是斜坡崩塌。根據目前的分析方法，最小可判釋的崩塌面積約在 500 至 2200 平方公尺之間。
十一	請評估取得影像至崩塌判釋成果出來，所需之作業時程	假設雷達影像的資料是常駐下載備份，且崩塌事件發生時，可立即下載崩塌前光學影像挑選測試的地表物特徵位置，並且同時建立雷達強度指標數值，以上工作時程約需 2-3 小時。完成上述的事前工作，當取得崩塌事件發生之後的影像至崩塌判釋成果出來的作業時間，約可在 1 小時之內完成。
十二	P4-8 未來工作，建議加強說明與前言及研究目之連結性。	已遵照審查委員建議辦理，新增的說明已增加在期中報告之中。

附錄二、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	時間序列現行仍有困難度及未來如何精進？	目前時序分析的困難度在於雷達波為單一波段，裡頭卻包含著地表特徵物訊號、土壤濕度、大氣效應以及地形效應等，如何將每一個像素內的雷達回波訊號拆解，並對應至所形成的環境因子，目前仍舊面臨挑戰。未來可以藉由主成份分析法 (Principal Component Analysis) 萃取出每一個像素裡可能包含的資訊，並且利用不同偏極的回波資訊進行交互驗證，最後搭配土地利用的資訊，建立出不同環境因子的雷達回波時序。
二	以 SAR 偵測崩塌事件如只有一個案例，此方法是否具有代表性？有無其他驗證案例？	大多數的崩塌地案例都伴隨著強降雨的事件，因此，雷達回波會容易受到許多外在因素的影響，而不容易分析環境因子各自的影響範圍。本次研究案例的特殊性在於崩塌的發生並未受到強降雨事件所影響，因此時序分析的成果可以忽略雷達回波受到大氣濕延遲與土壤濕度所造成的干擾，提供更利於分析不同坡向、坡度、和地表特徵物的環境條件，藉以獲得更為精準之雷達回波分析成果。目前尚未有其他案例可驗證，未來將持續尋找類似的案例，並以此方法建立出環境因子的影響範圍，提高此方法所能應用的廣泛性。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	目前的流程只是針對已知崩塌處地去探討其 SAR 訊號變化，後續要如何應用於颱風豪雨期間提早去偵測出何處已發生新生崩塌地？	目前在颱風豪雨期間的崩塌地分析技術，主要為利用跨越事件前後的強度影像差異分析，或是前後期影像對的同調性差異分析，這些方法都能快速且有效的在災後圈繪與判釋出災害發生的位置，然而並無法提早偵測出何處已經發生新生崩塌地。未來因強降雨所導致的崩塌事件，可能會遇到雷達衛星尚未飛抵災區進行拍攝的狀況，此時，如能利用本研究的環境因子指標進行快速分析，並搭配原有的崩塌地敏感區域圖資，將可在雷達衛星抵達之前，先提供緊急資訊以利後續救災與防災之應用。
四	建議嘗試不同尺度的判釋精準度，未來可將此方法用於不同地區，說明的應用的廣泛性及通用性。	謝謝委員的建議。未來本研究將持續針對不同地區的崩塌事件進行分析，以確認此技術可分析的廣泛性和通用性。
五	在本計畫結論提及地形效應為最顯著的影像因子，建議加強說明未來能如何改善地形效應的影響。	謝謝委員的建議。地形效應問題主要分為兩類，一類是受到遮蔽的地區，另一個是未受到遮蔽的地區。如果是受到地形效應所遮蔽的地區，目前沒有改善的機會，因為受到雷達衛星視角與地形之間的幾何關係。另一類未遮蔽的地區，主要有前波縮短與回波倒置的問題，未來可以透過角反射器的建置，提升在前波縮短地區的訊號強度，此外，透過精密地形高程模型(DEM)可以將回波倒置的影響降低。