計畫編號：SWCB-108-237

崩塌地之雷達迴波訊號與影像紋理特性之分析研究

Analyzing the Characteristics of Back-scattering and Image Texture of Landslides in Synthetic Aperture Radar Imagery

執行　單位：國立中央大學

執行　期間：108 年 02 月 20 日至 108 年 12 月 31 日

計畫主持人：姜壽浩 中央大學太空及遙測研究中心助理教授

研究　人員：姚柏成

行政院農業委員會水土保持局　編印

中華民國 108 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）

崩塌地之雷達迴波訊號與影像紋理特性之分析研究

摘要

在崩塌災害的防治工作上，使用遙測資料，如衛星影像、航空照片等，對於快速擷取災害情資有極大的助益。為快速取得大範圍的崩塌資訊，利用高解析度的遙測影像進行崩塌地判釋為現行的主流的方法，且自動化以及半自動化的快速判釋技術相當有助於進行緊急性的崩塌災情分析。在遙測影像的應用上，光學影像為較為普遍應用之影像資料，但缺點為受天候雲霧影響，有雲霧遮蔽時無法清楚觀測地表，此問題對於強降雨誘發之崩塌(如颱風有雲系覆蓋狀況)的即時判釋工作上有極大的限制。由於合成孔徑雷達感測器波長較長可以穿透雲層，觀測較不受天候影響，而過去利用雷達影像進行崩塌偵測的應用問題對於崩塌地自身的特性，包含規模、面積、崩塌類型等差異如何反應在雷達迴波訊號上有較少的探究；另外，雷達衛星本身觀測模式(升軌及降軌模式)、極化模式以及觀測波長的不同都將影響觀測結果。本研究目的為提出一套分析流程以精進雷達衛星資料對於崩塌地的判釋能力。本研究乃是針對不同面積、規模之崩塌地，分析其與雷達訊號強度以及影像紋理之關聯性。本研究使用 Sentinel-1 C-band 雷達

資料進行試驗，針對不同極化模式(VV 及 VH)以及觀測模式(升軌及降軌)的雷達資料，進行對崩塌偵測適用性的比較分析。研究成果顯示，不論是透過雷達影像的時序分析或紋理分析進行的影像分類方法，都能針對 0.5 公頃以上之崩塌地有良好的判釋成果。本研究認為，應用雷達影像進行崩塌地偵測有其價值及必要，特別在颱風事件及過後期間及過後，在雲霧覆蓋使得可見光影像無法運用在災害監測的狀況下。本計畫期望研究成果能有助於精進現有之山區崩塌災害監測方法，對我國崩塌災害管理與減災措施能有具體貢獻。

關鍵詞：崩塌災害、合成孔徑雷達、極化模式、Sentinel-1、災害監測

Analyzing the Characteristics of Back-scattering and Image Texture of Landslides in Synthetic Aperture Radar Imagery

ABSTRACT

To detect landslide hazards for a wide region, remotely sensed data has been applied due to its efficiency and low cost. However, the cloudy condition during a typhoon may limit the application of optical data. For an emergent monitoring task, Synthetic Aperture Radar (SAR) is, therefore, a suitable tool for detecting landslides in cloudy and rainy weather. Previous studies have been applying change detection methods for landslide mapping, but the mechanisms of backscattering of different landslides (inducing, magnitude, size and type) have not been examined yet. In addition, the effects of different sensing modes (ascending and descending mode) on landslide identification over mountainous areas have not been studied as well. This study, therefore, aims to develop an effective landslide detection method, applying an algorithm that is expected to combine different sensing modes. In addition, the relationship between landslide size and its backscattering was considered in the detection method. In this study data with different polarization models of Sentinel-1 C-band SAR images (VV and VH) from different observing, modes were collected to perform the analysis. The results indicate that by applying the analysis of multi-temporal SAR imagery and image texture analysis can successfully detect landslides greater than 0.5 ha. The effective and useful

landslide detection method proposed in this study is expected to serve as a part of a rapid response system of hazard monitoring when optical data is not available.

Keywords: Landslide hazard, Synthetic Aperture Radar, Polarization mode, Sentinel-1, Hazard monitoring

目次

摘要 ..... **I**

ABSTRACT ..... **III**

目次 ..... **V**

表次 ..... **VII**

圖次 ..... **VIII**

第一章　緒論 **1-1**

第一節　研究背景 1-1

第二節　相關研究 1-2

第三節　研究問題與研究目的 1-5

第二章　工作執行方法與步驟 **2-1**

第一節　雷達影像資料 Sentinel-1 2-1

第二節　災害事件及研究區概述 2-3

第三節　雷達影像資料處理、紋理分析及影像分類 2-9

第三章　研究成果 **3-1**

第一節　建置影像分析資料庫 3-1

第二節　崩塌地雷達迴波特性分析 3-2

第三節　多時序影像變遷分析 3-9

第四節　多時序雷達資料影像分類 3-17

第五節　影像紋理分析與崩塌判釋 3-23

第四章 討論與建議 **4-1**

第五章 結論 **5-1**

參考文獻 **參-1**

附錄 **附-1**

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附-1

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附-4
附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形 附-6
附錄四、SPOT6-7 光學衛星及 Sentinel-1 雷達衛星資料表 .. 附-10
附錄五、影像分類精度檢核表 附-15
附錄六、分類成果與紋理影像圖資 附-35

表次

表 1-1 使用雷達極化資料進行崩塌地偵測方法 1-4
表 2-1 土砂災害事件 2-4
表 2-2 影像紋理說明 2-13
表 2-3 誤差矩陣 2-15
表 2-4 精確度評估說明 2-15
表 3-1 SENTINEL-1 雷達影像收集列表 3-1
表 3-2 蘇迪勒事件崩塌數量統計表 3-4
表 3-3 蘇迪勒事件 VH 崩塌地迴波強度變化 T-TEST 統計表 3-5
表 3-4 蘇迪勒事件 VV 崩塌地迴波強度變化 T-TEST 統計表 3-5
表 3-5 0611 事件崩塌數量統計表 3-6
表 3-7 0611 事件 VV 崩塌地迴波強度變化 T-TEST 統計表 3-8
表 3-8 各類地物在雷達及 SPOT 之影像參考 3-10
表 3-9 蘇迪勒事件多時期分析影像時間表 3-12
表 3-10 0611 事件多時期分析影像時間表 3-14
表 3-11 蘇迪勒事件影像分類成果 3-18
表 3-12 蘇迪勒事件分類崩塌偵測率 3-19
表 3-13 0611 事件影像分類成果 3-21
表 3-14 0611 事件分類崩塌偵測率 3-22
表 3-15 蘇迪勒事件之紋理影像 3-25
表 3-16 蘇迪勒紋理影像分類成果 3-27
表 3-17 蘇迪勒紋理分類崩塌判釋率 3-28
表 3-18 0611 事件之紋理影像 3-30
表 3-17 0611 紋理影像分類成果 3-32
表 3-18 0611 紋理分類崩塌偵測率 3-32

圖次

圖 1-1 四種常見的地表散射情形，包含表面散射(SURFACE SCATTERING)、二次散射(DOUBLE BOUNCE SCATTERING)、體散射(VOLUME SCATTERING)以及螺旋散射(HELIX SCATTERING) 1-3
圖 1-2 雷達極化資料進行崩塌地偵測方法範例，各圖中央為崩塌地位置：左上為色彩組合(COLOR COMPOSITES)法；右上為相關性(CORRELATION)方法；左下為 ENTROPY-ALPHA 分解；右下為 POWER RATIO 方法 1-5
圖 2-1 SENTINEL-1 成像系統 (資料來源：HTTPS://SENTINEL.ESA.INT/) 2-2
圖 2-2 EAS OPEN HUB 影像下載頁面：HTTPS://SCIHUB.COPERNICUS.EU/DHUS 2-3
圖 2-3 行政院農委會水土保持局土砂災害空間資訊系統(HTTP://GIS.SWCB.GOV.TW/) 2-4
圖 2-4 蘇迪勒颱風路徑圖 2-5
圖 2-5 蘇迪勒颱風前後期使用之 SPOT 影像及崩塌判釋成果，(A)為前期影像，拍攝時間為 2014 年 9 月 30 日（B）為後期影像，拍攝時間為 2016 年 2 月 8 日(C)為崩塌判釋成果 2-6
圖 2-6 0611 豪雨事件前後期使用之 SPOT 影像及崩塌判釋成果，(A)為前期影像，拍攝時間為 2015 年 11 月 28 日（B）為後期影像，拍攝時間為 2016 年 11 月 19 日(C)為崩塌判釋成果 2-8
圖 2-7 研究流程圖 2-9
圖 2-8 支持向量機示意圖(來源：DATA SCIENCE MICRO-SERVICE, HTTPS://DIGGDATA.IN/) 2-14
圖 3-1 雷達影像亮面側與暗面側示意圖。圖為蘇迪勒颱風(侵台時間 2015 年 8 月 8 日)後的 SENTINEL-1A C-BAND 位於翡翠水庫上游山區的

雷達影像，其中(A)為 2015 年 9 月 22 日 SENTINEL-1A VH 極化升軌(ASCENDING MODEL)影像，(B)為 2015 年 8 月 21 日 SENTINEL-1A VH 極化降軌(DESCENDING MODE)影像。 3-2
圖 3-2 升軌模式與降軌模式融合影像示意圖。蘇迪勒颱風(侵台時間 2015 年 8 月 8 日)之 SENTINEL-1A C-BAND 位於翡翠水庫上游山區雷達影像，(A)為 2015 年 8 月 18 日 SENTINEL-1A VH 極化升軌(ASCENDING MODE)影像，(B)2015 年 8 月 21 日 SENTINEL-1A VH 極化降軌(DESCENDING MODE)影像，(C)則為升軌及降軌之融合影像。 3-3
圖 3-2 蘇迪勒融合模式影像崩塌迴波強度變化 3-4
圖 3-3 0611 融合影像崩塌迴波強度變化 3-7
圖 3-4 蘇迪勒事件各地物之多時序雷達迴波強度變化 3-13
圖 3-5 0611 事件各地物之多時序雷達迴波強度變化 3-15
圖 3-6 蘇迪勒颱風事件 NDSI 影像，上圖為 VH 極化資料 NDSI 影像，下圖為 VV 極化資料 NDSI 影像 3-24
圖 3-7 蘇迪勒事件崩塌與非崩塌紋理比較，其中(A)為 CONTRAST，(B)為 ENERGY，(C)為 ENTROPY，(D)為 HOMOGENEITY，(E)為 MEAN，(F)為 STD 3-26
圖 3-8 0611 豪雨事件 NDSI 影像，上圖為 VH 極化資料 NDSI 影像，下圖為 VV 極化資料 NDSI 影像 3-29

第一章 緒論

第一節 研究背景

颱風、地震事件頻繁，加上部分山林因人為不當開發、濫墾，導致台灣山區坡地災害事件頻傳，尤其在氣候變遷的影響下，未來極端降雨事件的發生可能更加頻繁，崩塌災害的頻率與規模亦可能加劇(Chiang and Chang, 2011)。在崩塌災害的防治工作上，使用遙測資料，如衛星影像、航空照片等，對於快速擷取災害情資有極大的助益(Guzzetti et al., 2012)。為快速取得大範圍的崩塌資訊，利用高解析度的遙測影像進行崩塌地判釋為現行的主流的方法，且自動化以及半自動化的快速判釋技術相當有助於進行緊急性的崩塌災情分析(Mondini et al., 2017)。在遙測影像的應用上，光學影像(optical imagery)為較為普遍應用之影像資料。就台灣地區而言，SPOT以及福衛二號(Formorsat-2)影像為過去最常使用之光學衛星影像資源。光學影像之優點為具有多光譜資訊可供區判不同的地物特徵，且能清楚界定出崩塌的輪廓，但缺點為受天候雲霧影響，有雲霧遮蔽時無法清楚觀測地表，此問題對於強降雨誘發之崩塌(如颱風有雲系覆蓋狀況)的即時判釋工作上有極大的限制。

近年來合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像(後簡稱雷達影像)已經開始應用於山區崩塌之監測與預判工作，如使用ERS-2、ENVISAT、RADARSAT-2、TerraSAR以及ALOS PALSAR等雷達影像來偵測地表的變異之訊號(Colesanti and Wasowski, 2006; Bovenga et al., 2012; Raspini et al., 2015)，如DInSAR(合成孔徑雷達差分干涉，Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar)可用以界定具有明

顯地表變形的區域，或是進行變形量的估計，PS-InSAR(永久散射體差分干涉技術，Persistent Scatterers InSAR)可針對永久散射體，計算對衛星軌道方向之相對位移速率(Hopper et al., 2004)。由於合成孔徑雷達感測器屬於主動式微波感測器，相較於光學感測器，其波長較長可以穿透雲層，觀測較不受天候影響(Raspini et al., 2014)，然而其缺點為雷達訊號之資訊處理、校正、判讀不易，一般僅能掌握訊號變異的大致範圍。目前國內之研究主要為運用雷達影像於崩塌潛在地區的變形偵測上(王國隆、林俊廷，2014; 陳柔妃等，2015)，尚未有針對事件型(如颱風強降雨、地震)誘發崩塌判釋的相關研究。由於雷達訊號對地表狀態改變的反應敏感，本研究相信雷達資料具有極高潛力進行崩塌位置的直接判釋，當前之問題為需發展一套合宜的量化分析方法來關聯崩塌地以及雷達訊號的特徵。

第二節 相關研究

就雷達訊號的散射特性而言，大致可區分為表面散射(surface scattering)、二次散射(double bounce scattering)、體散射(volume scattering)以及螺旋散射(helix scattering)(Yamaguchi et al., 2005; Shibayama et al., 2015，參考圖1-1)。其中表面散射多發生在裸露地表面；二次散射多發生在人工結構物上，如房屋、高塔等；體散射則多產生在相對粗糙的表面上，如植生的樹冠；而螺旋散射則多發生在複雜的都市結構內，雷達電磁波能量經過多次散射而佚失，造成無迴波訊號可以被雷達衛星接收，此種散射較不見於自然環境的散射情形。目前針對崩塌地的雷達訊號特性的相關研究多認為崩塌地多為表面散射(Shibayama et al., 2015)，迴波訊號較低，在山區林地則包含表面

散射及體散射(Correa-Muñozl and Murillo-Feo, 2018)。

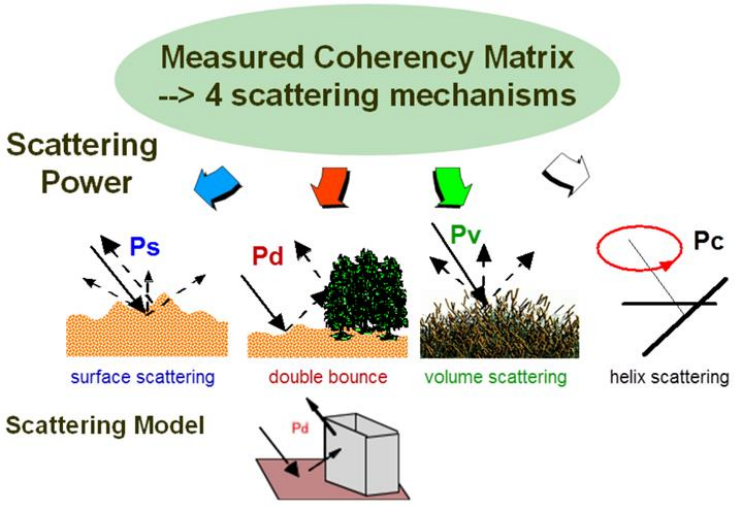


圖 1-1 四種常見的地表散射情形，包含表面散射(surface scattering)、二次散射(double bounce scattering)、體散射(volume scattering)以及螺旋散射(helix scattering) (Shibayama et al., 2015)。

目前運用雷達影像進行崩塌偵測的方法主要是基於不同的雷達極化資料進行分析(如Polarimetric SAR, PolSAR)，主要的偵測方法為分析其色彩組合(color composites)、相關性(correlation)、散射分解(scattering decomposition)、Entropy-Alpha分解、Power ratio(Shimuda et al., 2014，見表1-1及圖1-2)。在不同雷達波長的試驗中，Shimuda et al. (2014)檢視了X-band (~3.2 cm)以及L-band (~23.5 cm)對林地崩塌地的偵測效果，發現波長較長的L-band資料，在山區森林覆蓋的裝況下可以較有效的穿越樹冠層，對崩塌地的偵測效果較好，而X-band資料容易被植生散射，對崩塌地的偵測效果較差。而處於X-band及L-band之間的C-band (~5.5 cm)雷達資料，在Mondini (2017)及Correa-Muñozl and Murillo-Feo (2018)的研究中則顯示對大規模的崩塌地有不錯的偵測

效果。

表 1-1 使用雷達極化資料進行崩塌地偵測方法

極化方法	說明	參考文獻
色彩組合 (color composites)	在R-G-B頻道上設置HH-HV-VV資料，以視覺方式判是崩塌地 。	Shimuda et al. (2014) Shibayama et al., 2015)。
相關性 (correlation)	針對HH-VV、HH-HV、HV-VH等極化組合計算其相關性，以檢視崩塌地在不同極化資料的相似及相異特徵。	Shimuda et al. (2014) Shibayama et al., (2015)
散射分解 (scattering decomposition)	將各種極化訊號分解成表面散射、二次散射以及體散射，藉以檢視崩塌地的散射組成。	Shimuda et al. (2014) Shibayama et al. (2015)
Entropy-Alpha 分解	利用Entropy-Alpha分解檢視崩塌地散射訊號的隨機程度以及相位特徵。	Plank et al. (2016) Correa-Muñozl and Murillo-Feo (2018)
Power ratio	以及各類極化資料組成如HH/HV、HH/VV、VV/HV等比值影像來檢視崩塌地特性。	Shimuda et al. (2014)

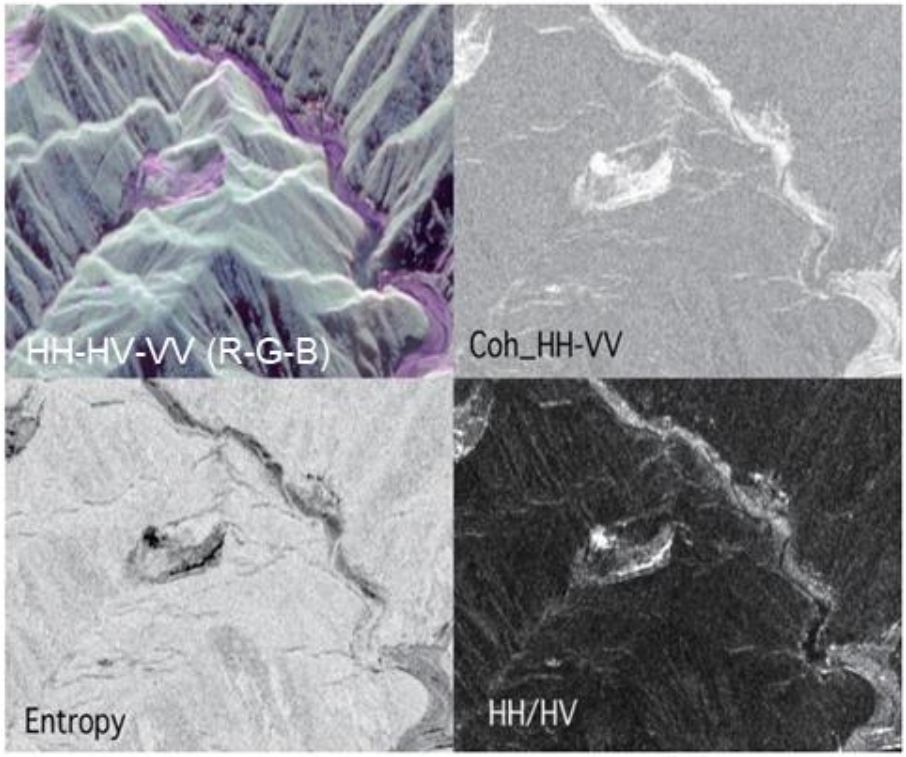


圖 1-2 雷達極化資料進行崩塌地偵測方法範例，各圖中央為崩塌地位置：左上為色彩組合(color composites)法；右上為相關性(correlation)方法；左下為 Entropy-Alpha 分解；右下為 Power ratio 方法(Shimuda et al., 2014)。

第三節 研究問題與研究目的

過去研究主要為分析影像中的崩塌地特性，意即主要為使用事件後影像進行分析。然而近年則有研究開始利用崩塌事件前後的影像進行變遷分析。Konishi and Suga (2017)使用 COSMO-SkyMed 的 X-band 影像來偵測崩塌地，將事件前與事件後的影像，以移動式窗的方法計算前後期影像的相關性(correlation)，在新增崩塌地區因為有地表變異，使得事件前後期的影像有較低的相關性。儘管在 Shimuda et al. (2014)

使用事件後影像的分析中認為 X-band 影像難以應用至崩塌判釋，但 Konishi and Suga (2017)的研究則顯示若進行事件前後的訊號變遷分析，對崩塌地偵測則有相當不錯的成果。另外，Mondini (2017)運用多時期的 Sentinel-1 C-band 資料，將崩塌事件前後期以 power ratio 的方法，進行影像變遷分析，研究發現分析影像的空間自相關(spatial autocorrelation)情形可用於界定崩塌地的位置；其主要原理為：邊坡在無崩塌發生的狀況、坡面主要為林地、植生時，影像訊號在時間序列上的變化小，且分布較為隨機，在空間上無特定的分布趨勢，空間自相關程度小；反之，在崩塌發生的情形下，崩塌位置的雷達訊號相較於植生覆蓋的坡面有較大的差異，且呈現集中的狀況，因此在訊號上將顯示較高程度的空間自相關。

透過前述的研究，針對崩塌地的判釋問題大致認為有兩類影像分析方法：(1)首先為分析雷達影像訊號的時間分布特性，利用多時序的雷達影像以及變遷偵測的方法來進行崩塌地偵測應較為有利，主要的原理在於利用不同地物之雷達迴波特性在時間序列的差異進行地物判釋；(2)其次為分析雷達影像訊號的空間分布特性—意即影像紋理來關聯崩塌地的可行性，尤其是分析不同面積之崩塌地時，崩塌規模的大小是否影像分析結果。上述問題目前尚未有相關研究提及，因此本研究將嘗試針對崩塌地的紋理特性進行分析。

基於上述說明，應用多時期影像進行變遷分析與紋理可為一有效的崩塌地偵測方式，然而過去對於雷達影像進行多時期變遷分析的限制的原因之一為影像費用較高(以TerraSAR-X為例，單幅影像收費約2950 EUR；緊急拍攝收費約為3650 EUR)，因此使用多時序多張影像進行崩塌監測及判釋工作時，成本將相當高。為了銜接ERS-2及

ENVISAT任務，歐洲太空總署已分別於2014年四月發射Sentinel-1A已及2016年4月發射Sentinel-1B。目前Sentinel-1之雷達觀測產品包含兩個觀測衛星，兩者以同一軌道差180度運行，並且均已開始執行拍攝任務，歐洲太空總署也已提供全球免費的Sentinel-1合成孔徑雷達影像。Sentinel-1A影像的空間解析度於臺灣地區約為10公尺，時間解析度為12天，已有研究說明此C-band雷達影像適合於山區林地之進行崩塌偵測(Mondini, 2017; Correa-Muñozl and Murillo-Feo, 2018)，且由於此為免費資料，因此對於本研究進行雷達影像訊號分析以及進行崩塌偵測，在成本上將有相當的助益。

綜上所述，本研究的目的為運用Sentinel-1 C-band的雷達影像資料，分析台灣山區崩塌之多時序雷達迴波訊號與影像紋理特性，並嘗試據此分析成果建立一套以雷達資料為基礎的崩塌地判釋方法。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 雷達影像資料 Sentinel-1

Sentinel-1 是歐洲太空總署 (European Space Agency, ESA) 哥白尼計畫 (GMES) 中的地球觀測衛星。此計畫由兩顆衛星組成(1A 及 1B)，主要目的是用於土地與海洋的監測，Sentinel-1 的目標是為了在 ERS-2 及 ENVISAT 退役後，持續提供 C-band 合成孔徑雷達資料。台灣地區可取得之資料為 Sentinel-1A。此雷達資料搭載四個不同的感測器，分別為 Stripmap Mode, Interferometric Wide Swath Mode, Extra Wide Swath Mode, Wave Mode (圖 2-1)說明如下(姜壽浩，2017)：

(1) Stripmap Mode：延續 ERS 及 ENVISAT 提供的成像模式，其提供高空間解析度的影像，空間解析度為 5 公尺。

(2) Interferometric Wide (IW) Swath Mode：Sentinel-1 預設陸地的影像皆為 IW mode，其解析度從 5 公尺至 20 公尺。

(3) Extra Wide (EW) Swath Mode：EW mode 提供寬幅及再返週期高的影像，此模式通常提供海洋及兩極地區的影像。

(4) Wave Mode：此模式的影像結合全球海浪模式，可以協助了解開放海域波浪的方向，波長及波浪高度。

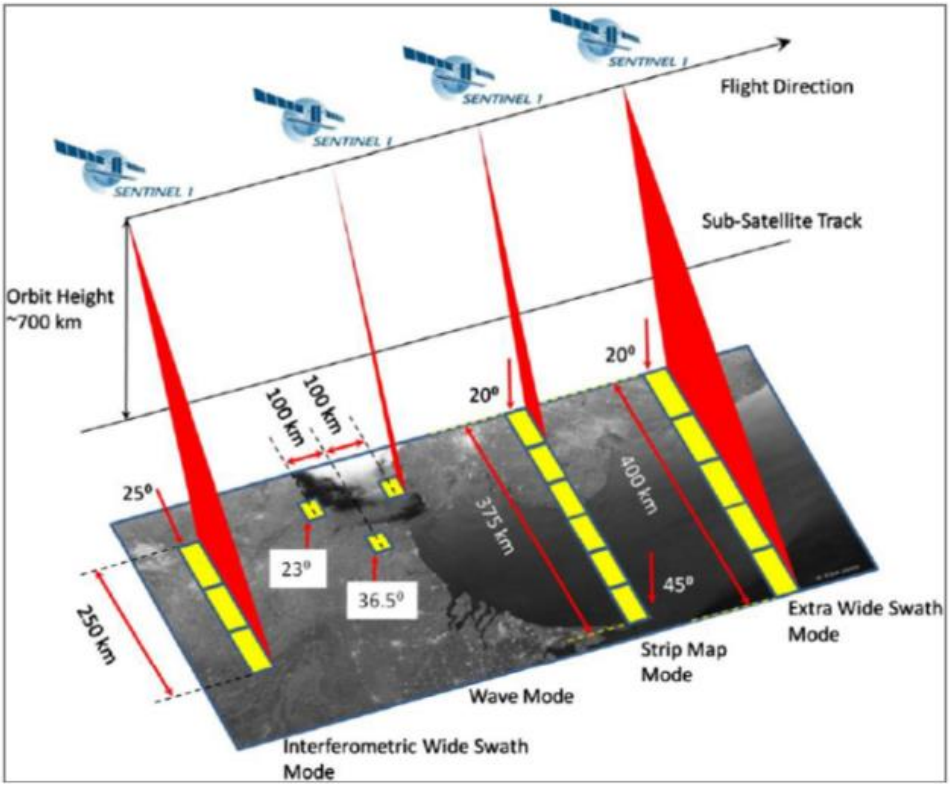


圖 2-1 Sentinel-1 成像系統 (資料來源：https://sentinel.esa.int/)

臺灣地區的 Sentinel-1A 影像空間解析度於約為 10 公尺，再返週期為 12 天。Sentinel-1 影像並不是每一個地區皆提供全極化的資料，台灣地區可取得資料為 Sentinel-1A 的 IW Model，包含 VV 和 VH 兩種極化的影像資料，包含升軌模式(ascending)以及降軌模式(descending)兩種拍攝模式。Sentinel-1 於 2014 年升空後，便開始對地球陸地及海洋進行監測，並釋放資料供使用者下載(Open Hu https://scihub.copernicus.eu/dhus)。

就台灣地區涵蓋範圍來說，Sentinel-1A 的升軌模式需三幅影像，降軌模式則需二幅影像來涵蓋台灣全島範圍(圖 2-2)。國立中央大學太空及遙測研究中心(後簡稱本中心)已完成影像成像、校正以及鑲嵌作業建置，可以快速取得全台全幅之雷達衛星影像。

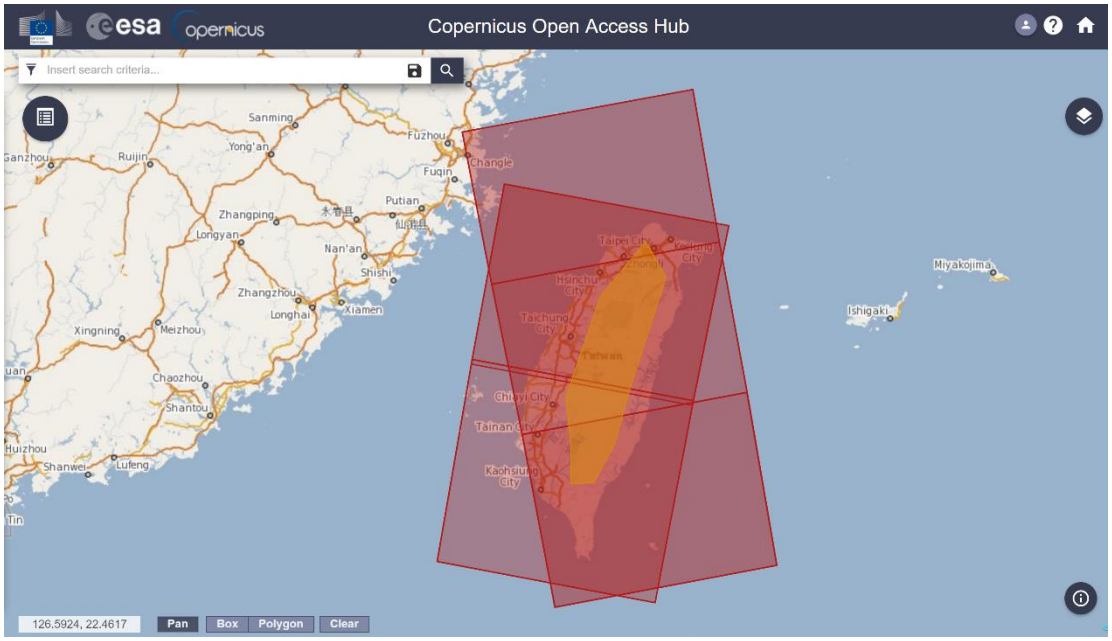


圖 2-2 EAS Open Hub 影像下載頁面：https://scihub.copernicus.eu/dhus

第二節 災害事件及研究區概述

一、研究區與重大崩塌災例資料收集

配合 Sentinel-1 資料可取得時間，本研究計畫以全台灣範圍，收集 2015 年後至今的崩塌災例與圖資，以作為在雷達影像中找尋崩塌地位置及範圍的依據。這些歷史災例資訊，可從行政院農委會水土保持局維護的土砂災害空間資訊系統(http://gis.swcb.gov.tw/)進行收集，主要為過去發生土砂災害的崩塌位置，以及數值化的向量資料(圖 2-3)。最後本研究針對 2015 年蘇迪勒颱風以及 2016 年 611 豪雨事件兩場崩塌事件進行資料收集與影像分析(表 2-1)。主要收集的資料為主要崩塌災害區域事件前後的光學影像(SPOT-6/7)以及 Sentinel-1A 影像，並利用光學影像與雷達影像進行比對，界定崩塌地的在雷達影像中的位置及範圍。

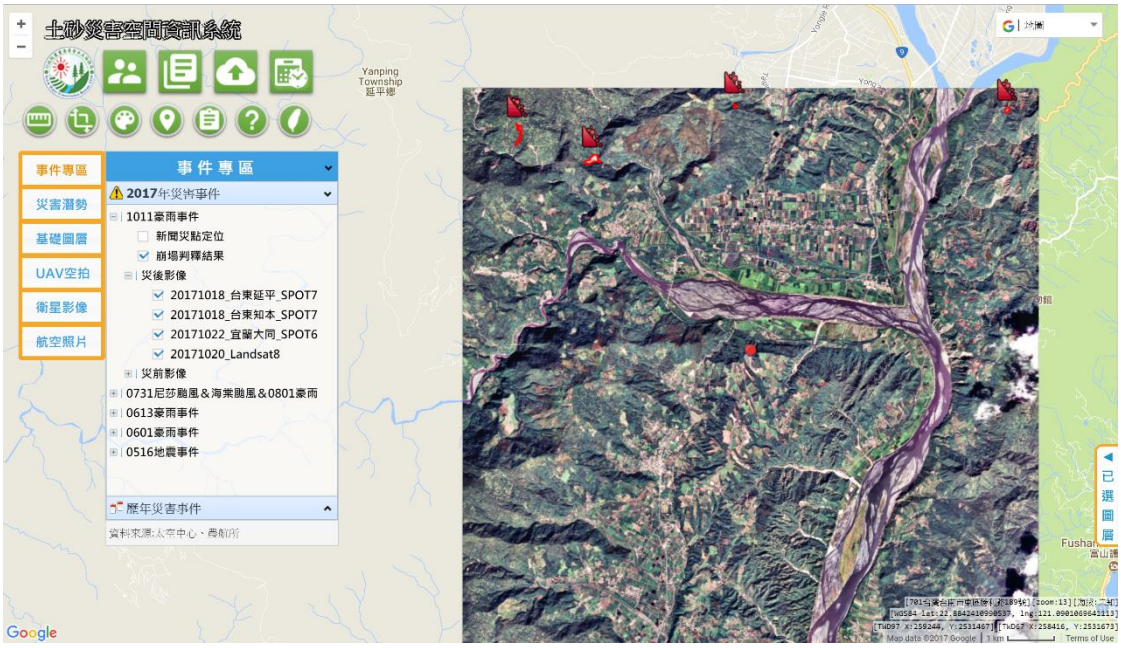


圖 2-3 行政院農委會水土保持局土砂災害空間資訊系統

(http://gis.swcb.gov.tw/)

表 2-1 土砂災害事件

事件名稱	事件類型	日期
611 豪雨	豪雨	2016/06/11
蘇迪勒颱風	颱風	2015/08/08

二、蘇迪勒颱風事件

根據中央氣象局資料，蘇迪勒颱風（Soudelor）於 2015 年 7 月 30 日生成於關島東方海面，於 2015 年 8 月 8 日侵台，近中心之最大風速達 48.0m/s。3 日一度升為強烈颱風，4 日午後雖有減弱，但仍以中度颱風上限逼近台灣，8 日 4 時 40 分左右於花蓮縣秀林鄉登陸，11 時在雲林縣台西鄉出海，同日 22 時左右進入福建。其生命週期內兩度發生雙重眼壁，對近年西北太平洋的熱帶氣旋而言甚為罕見。颱風路徑圖如圖 1-3

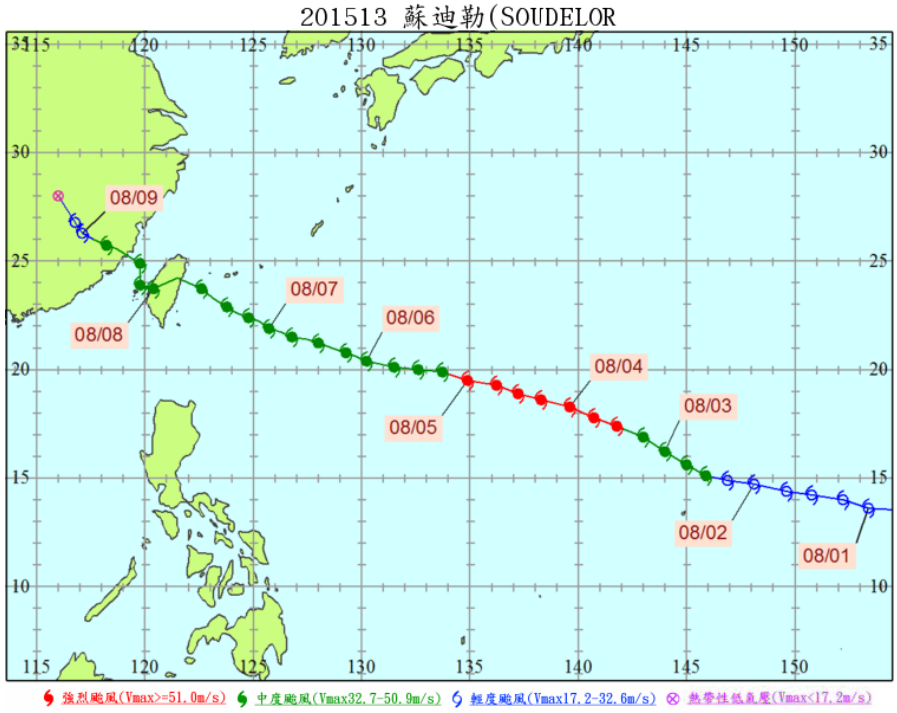


圖 2-4 蘇迪勒颱風路徑圖

災情部分，主要降雨集中在台灣北部地區，強降雨造成大台北地區多條河川河水暴漲造成多處淹水，宜蘭縣太平山雨量站累積雨量達 900 毫米，新北市福山雨量站累積超過 680 毫米，隨著颱風出海後，西南部山區出現降雨，有部分淹水的情形，全台逾 450 萬戶停電，為近年停電戶數最多之記錄。計有 8 人死亡、4 人失蹤、437 人受傷、道路中斷 47 處、水利設施受損 17 處及農業損失逾 23 億元。

本計畫選定台灣北部山區新店溪水系上游的桶後溪做為研究區(圖 2-5)，桶後溪源頭為烘爐地山，研究區內地形高度落差大，河道蜿蜒，大致由東流向西。研究區面積大約為 5,050 公頃，處於中、低海拔，高程分布於 160~1,244 公尺，平均高度為 700 公尺，約有 77%之面積位於 1,000 公尺以下。坡度分布於 0~63.7 度，平均坡度 31.5 度，地勢相當陡峭。研究區屬熱帶季風氣候，一月均溫約 13°C，七月均溫約 28°C。年雨量大約在 3,000 至 4,000 公厘之間，全年有雨，但 6-10

月雨量較多。

研究區內岩層主要為漸新紀至中新紀之砂岩與頁岩，上游主要為大桶山層與木山層，下游主要為粗窟層與乾溝層。研究區內為林地及河道，本研究區內於 2015 年蘇迪勒颱風事件前並無崩塌，風災期間產生大量新生崩塌。

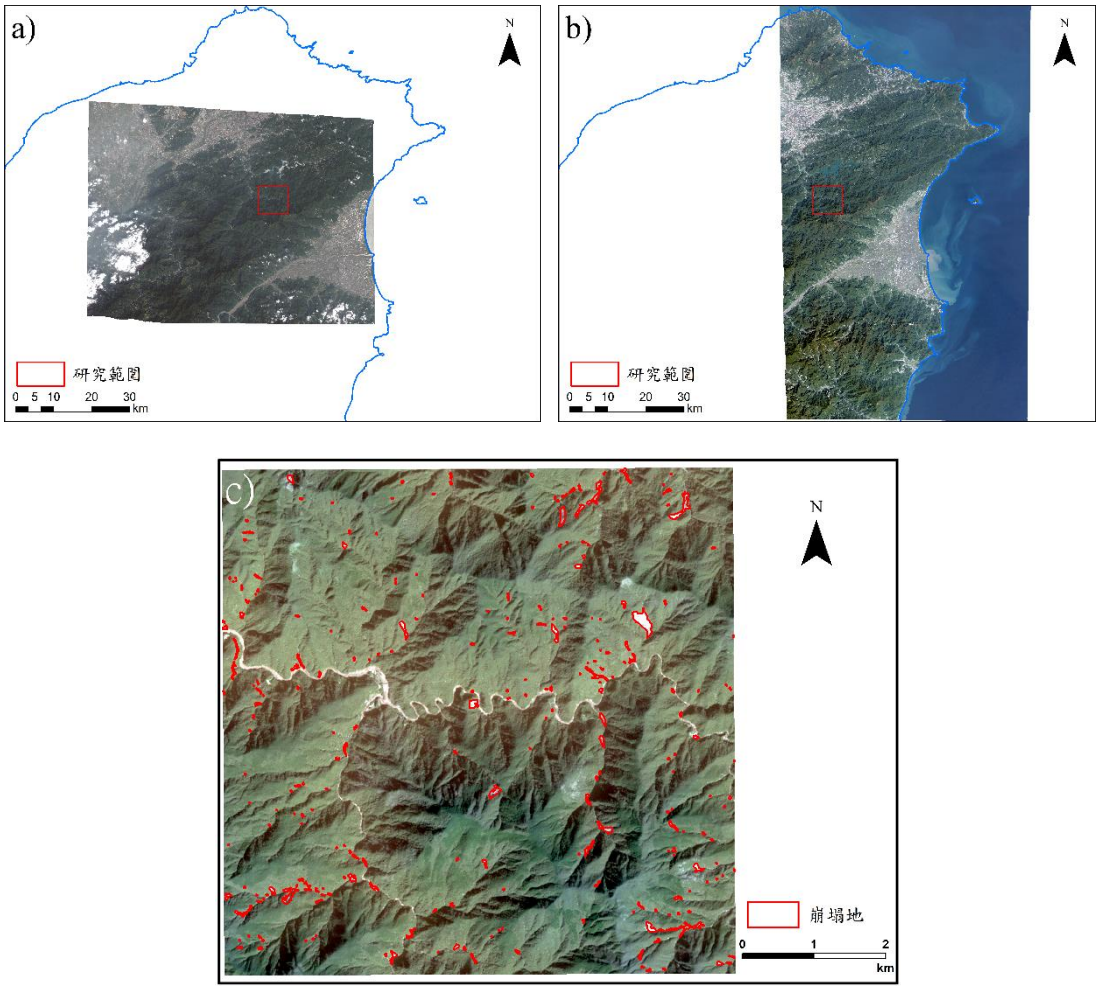


圖 2-5 蘇迪勒颱風前後期使用之 SPOT 影像及崩塌判釋成果，(a)為前期影像，拍攝時間為 2014 年 9 月 30 日（b）為後期影像，拍攝時間為 2016 年 2 月 8 日(c)為崩塌判釋成果

三、611 豪雨事件

根據中央氣象局指出，因受旺盛西南氣流所帶來的豪雨影響，此波梅雨鋒面水氣非常旺盛，短時強降雨的機會也會增多。0611 豪雨於 2016 年 6 月 11 日上午 10 時在台灣南部帶來大量降雨，其中最大雨量 10 分鐘可達到 23 毫米，12 小時累積雨量達 200-250mm，已接近大豪雨（350mm/24hr）等級。台南市政府於 6 月 11 日上午 11 時成立緊急災害應變中心，而這場降雨持續至 13 號。

災情部分，根據土石流防災資訊網與 611 豪雨應變中心資料顯示，主要降雨集中在台灣南部地區，強降雨造成台南、高雄與屏東地區多條河川河水暴漲造成台南市南化區 11 條土石流潛勢溪流為黃色警戒。本次豪雨造成大武野溪於上午 7 時爆發土石流，沖毀霧大二橋並造成大武村聯外道路中斷，道路毀損部分合計約 40 公尺。

本計畫選定台灣南部山區高屏溪流域上游及曾文溪流域上游山區做為研究區(圖 2-6)，高屏溪發源於中央山脈西南麓，曾文溪則發源於阿里山，集水區內高山聳立、河道蜿蜒，地形高度落差大，大致由東北向西南遞減。研究區面積約為 6,700 公頃，處於中、低海拔，高程分布於 223~1,185 公尺，平均高度為 702 公尺，約有 81%之面積位於 1,000 公尺以下。坡度分布於 0~67.9 度，平均坡度為 26.5 度，地勢相當陡峭。研究區地屬熱帶海洋季風氣後，氣溫約在 19°C~21°C 間，以一月最低，七月最高。年降雨量約為 3,400 公厘，雨量集中於五到十月間，佔全年 90%，季節豐枯明顯。

研究區內岩層分布主要為中新紀至上新紀之砂岩與頁岩，高屏溪流域主要為長枝坑層，曾文溪流域主要為北寮頁岩。河流兩岸可見台地分布，主要為更新世之古河流沖積層，屬第四紀之階地堆積。研究區內除部分河階台地有聚落建地外，其餘多為林地，佔研究區超過

85%。本研究區曾於 2009 年莫拉克颱風期間發生多處崩塌，傳出許多嚴重災情，在 611 豪雨事件中，除了新生崩塌之外，也有舊有崩塌擴大的情形。

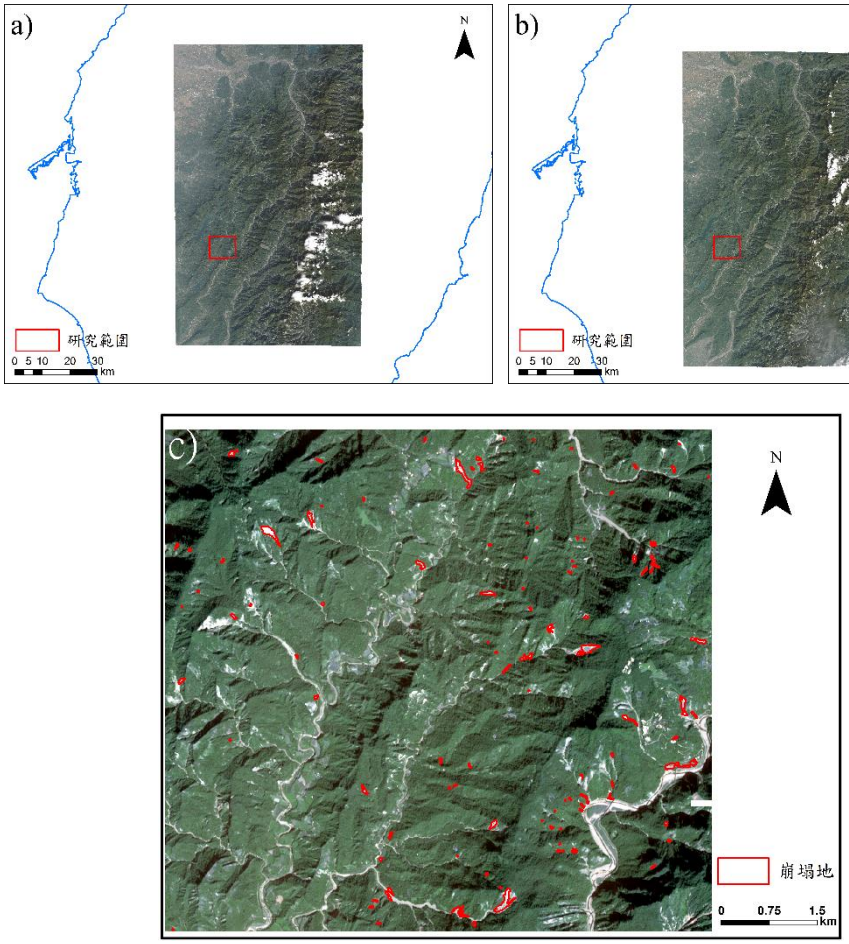


圖 2-6 0611 豪雨事件前後期使用之 SPOT 影像及崩塌判釋成果，(a)為前期影像，拍攝時間為 2015 年 11 月 28 日（b）為後期影像，拍攝時間為 2016 年 11 月 19 日(c)為崩塌判釋成果

第三節 雷達影像資料處理、紋理分析及影像分類

本研究流程圖請參考圖 2-7，後續將就各項研究步驟進行詳細說明。

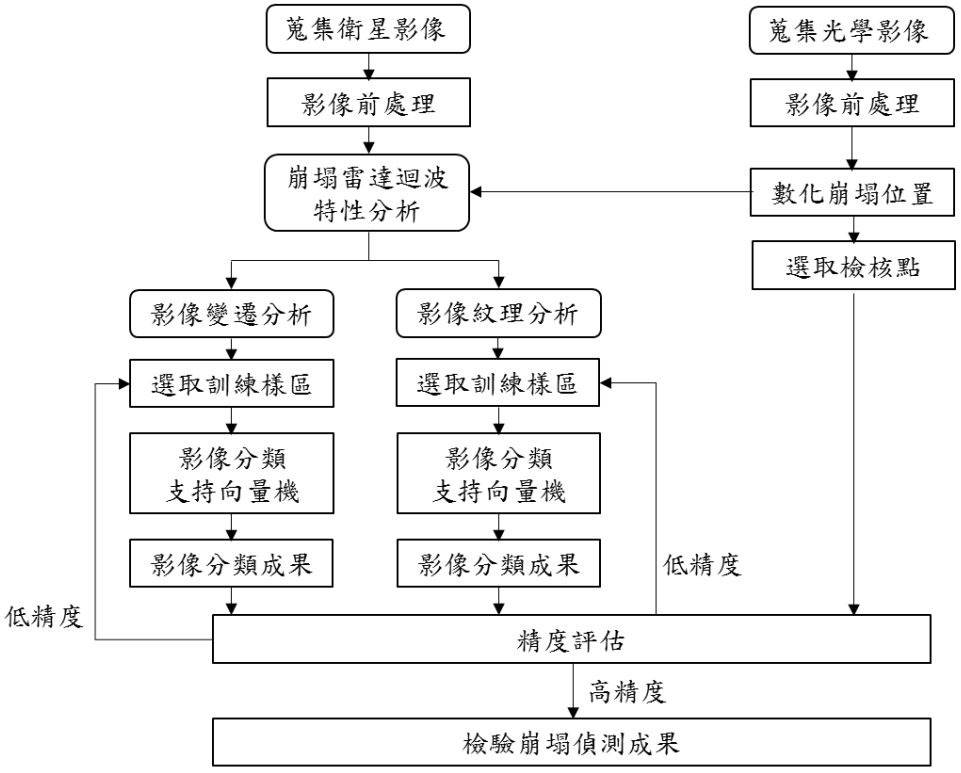


圖 2-7 研究流程圖

一、雷達影像前處理

合成孔徑雷達影像前處理包含三個部分(姜壽浩，2017)，包括輻射校正 (Radiometric correction)、幾何校正 (Geometric correction) 及影像斑駁雜訊濾除 (Speckle noise removal)等工作。針對 Sentinel-1 影像，利用歐洲太空總署所開發之 SNAP (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes) 進行處理，其方法分述如下。第一個部分為輻射校正 (Radiometric correction)，雷達影像訊

號強度改變的原因有雷達波波長、入射角度、地表坡度、地表粗糙度、極化現象 (Polarization) 及地物的複介電常數等的影響。而輻射校正是將影像中訊號強度去除攝像系統上斜距展度效應、天線圖形效應以及入射角效應，使得輻射校正過的影像，在訊號強度上較能真實反應出地表的反射特性，此外，也將原始影像的 Digital Number (DN)值轉換為後向散射係數 (Backscattering coefficient, σ)，轉換公式如下：

$$\sigma_j = \beta_j + 10 \times \log(\sin I_j) \quad (1)$$

式(1)中的σ_j表示 j像元 (Pixel)的後向散射係數，β_j表示 j像元的亮度(brightness)，計算公式如 (2)式：

$$\beta_j = 10 \times \log\left[\left(DN_j^2 + A3\right)/A2_j\right] \quad (2)$$

式(2)中DN_j^2為 j像元的灰度值(gray value)平方，A3 表示偏移量(offset)，$A2_j$表示 j像元的增益值(gain value)。而式(1)中的I_j表示 j像元的入射角(Incidence angle)，計算公式如下(3)式，

$$I_j = arcsin\left[(R_t + H)sin\left(\Phi_j\right)/R_j\right] \quad (3)$$

式(3)中R_t表示地球半徑，H表示軌道高度(Track height)，Φ_j表示 j像元的球面角(spherical angle)，R_j則為j像元的斜距。

第二個部分為幾何校正(geometric correction)。由於合成孔徑雷達是以側視(side looking)的方式觀測目標物，成像原理為距離投影，其發出的脈衝以距離感測器漸行漸遠的方式和地面目標物產生交互作用，因為地形的影響，影像會有明顯的變形，所以必須糾正幾何變形，需要將影像從斜距(雷達到地面目標物的距離)轉換為地距(地面上的實際距離)。接續，則為利用數值高程模型進行校正，並將影像轉換坐標至 TWD97 以利後續進行分析，此地形校正則利用 SNAP 軟體進行

處理，而地形資料則使用內政部公布之 20 公尺全台數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)於地形校正。

第三個部分為斑駁雜訊濾除 (speckle noise removal)，在合成孔徑雷達影像中，當波長與地表粗糙度相近時，易造成干涉現象而產生斑駁雜訊，也就是回波相位在一個波長內的延遲，造成同一解析像元內很多物體回波的干涉現象。雷達回波訊號可能因為同相位(in-phase)加強像元的回波強度 (contractive interference)，形成明亮的像元；反之，可能因為反相位(out-of-phase)造成回波強度相互抵消而減弱(Destructive Interference)，形成暗色的像元。所以雷達影像因為斑駁雜訊的緣故，使得影像會充滿許多顆粒 (granule)，難以分辨地物的特徵。本研究為了進行較精確的地物判釋，每一張影像皆進行斑駁雜訊的濾除。

本研究使用李氏濾波器(Lee filter)進行斑駁雜訊的濾除，李氏濾波器是常見的雷達雜訊濾波器，其特點在於利用八個方向的移動視窗(moving window) 進行雜訊濾除以保持邊界的銳利度。李氏濾波器可以使影像更為平滑且保有影像邊緣的特徵(Lee, 1981)。雷達的斑駁雜訊是一種散射的現象，所以在影像處理的觀點上視為相乘性的班駁雜訊。李氏濾波器假設相乘性誤差近似線性，並以最小平方誤差應用於線性模型，計算公式如下：

$$R = I_c \times W + I_m \times (1 - W) \quad (4)$$

式(4)中的I_c為移動視窗的中心像元；W為權重係數，計算如(5)式。I_m為移動視窗內的平均值。

$$W = 1 - \frac{C_u^2}{C_i^2} \quad (5)$$

式(5)中的C_u為估計雜訊的變異係數；C_i為影像的變異係數。C_u與

C_i可由(6)式與(7)式表示：

$$C_u = \sqrt{\frac{1}{NLook}} \tag{6}$$

式(6)中的$NLook$為合成孔徑雷達影像對同一個點位的觀測數。

$$C_i = \frac{S}{I_m} \tag{7}$$

式(7)中的S為移動視窗中的標準差。

二、影像變遷分析

本研究針對雷達影像進行變遷分析，採用一標準化的差異指標—Normalized Difference Sigma-naught Index (NDSI)，其原理是利用兩時期的後向散射係數影像進行計算，其值介於-1～+1，若 NDSI 的值趨近於 0 表示地表在兩時期的變化小，反之，若 NDSI 的值趨近於-1 或+1 時，表示兩時期的地表變化大(Furuta and Tomiyama, 2011)，固可藉此指標來偵測崩塌，指標計算公式如(8)式：

$$\text{NDSI} = \frac{\sigma_{master} - \sigma_{slave}}{\sigma_{master} + \sigma_{slave}} \tag{8}$$

式(8)中的σ_{master}表示崩塌事件後期影像的後向散射係數，σ_{slave}表示崩塌事件前期影像的後向散射係數。在崩塌偵測的應用上，由於崩塌多具有幾何結構，與周圍植生地有明顯的不連續情形，因此 NDSI 理論上將產生的較高或較低的極端值，與衛星觀測方向有關，相較於林地或草地等粗糙度較高的表面，崩塌表面其結構易產生極強或極弱的反射訊號。

三、影像紋理分析

在影像紋理分析乃是透過光譜紋理特性(如 contrast, entropy, homogeneity 等)，使得進行地物判釋時有更多的線索。然而這樣的分析方法較適用於光學影像，原因為光學影像本質就較容易用於辨識邊

界、物件等幾何資訊，但由於雷達影像反應在不同地物上的特徵僅為雷達反射訊號，因此應用上較為不易(Mondini, 2017)。此外，雷達訊號於山區坡面上的影像像元在空間對位上不甚精準，根據不同的觀測方向與地形的幾何關係常有前波縮短(Foreshortening)、疊置(layover)、陰影(Shadow)等問題，使得影像在幾何校正時，有時有外差取樣(extrapolation)的情形，這些使得自動化的影像分割應用在山區的雷達訊號上不甚有利。

針對上述問題，本研究使用多個觀測方向的雷達資料進行分析，如 Sentinel-1A，可提供升軌以及降軌兩種觀測資料，考慮不同極化模式(VV、VH)，並配合不同的視窗大小來計算其內的影像紋理(texture)特徵(詳見表 2-2)。

表 2-2 影像紋理說明

影像紋理	說明	計算公式
Contrast	量化單元內訊號對比程度	$\sum_i \sum_j (i-j)^2 P[i,j]$
Homogeneity	量化單元內訊號的均質程度	$\sum_i \sum_j \frac{P[i,j]}{1+\lvert i-j\rvert}$
Entropy	量化單元內訊號的隨機程度	$-\sum_i \sum_j P[i,j] \log P[i,j]$
Energy	量化單元內訊號能量變化強度	$\sum_i \sum_j P^2[i,j]$

*$P[i,j]$由灰度共生矩陣(gray-level co-occurrence matrices, glcm)決定

四、影像分類

不同地物類別間所產生之反射訊號區間應為不同，本研究嘗試以雷達影像選用監督式分類方法進行土地分類以界定不同地物於雷達反射訊號之區間。監督式分類法是運用已知的地表覆蓋類型，使用其

影像之特性，對於未知土地覆蓋類型，進行每一類特徵之評估。

本研究使用的監督式分類方法是支持向量機(Support Vector Machine, SVM)，其分類方式透過選取訓練樣區，找出不同類別特性的最佳超平面(optimal hyperplane)，進而區分不同種類的地物，以得到地物分類結果。

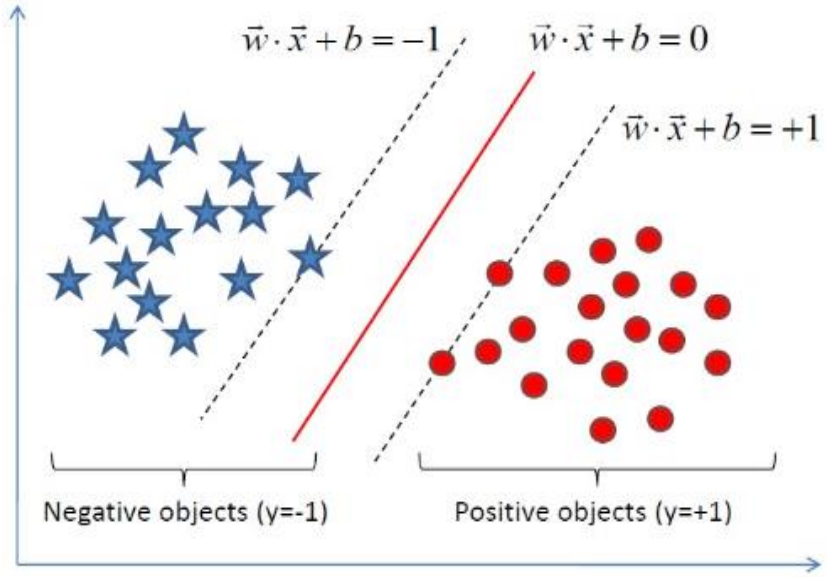


圖 2-8 支持向量機示意圖(來源：Data Science Micro-Service, https://diggdata.in/)

影像完成分類後，使用地真資料去評估土地分類結果的準確性，由地真資料中選取檢核點，檢核分類結果的好壞，以確認土地分類的品質。因研究區域地物類別較單純，僅林地、崩塌及水體，故地真資料使用 SPOT6-7 光學影像，由地真資料中選取檢核點，進行準確度評估。評估方式為逐一比較檢核點與分類圖，統計為誤差矩陣(Confusion matrix)，如表 2-3，由此表中能計算整體精度、生產者精度、使用者精度和 Kappa 係數做為影像分類的精準度評估，各項評估說明於表 2-4。

表 2-3 誤差矩陣

類別		地真資料			
		類別 1	類別 2	類別 3	列總計
分類結果	類別 1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	$\sum_{j=1}^{n} X_{1j}$
	類別 2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	$\sum_{j=1}^{n} X_{2j}$
	類別 3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	$\sum_{j=1}^{n} X_{3j}$
	行總計	$\sum_{i=1}^{n} X_{i1}$	$\sum_{i=1}^{n} X_{i2}$	$\sum_{i=1}^{n} X_{i3}$	$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ij}$

n:表示類別數

X_{ij}:表示在誤差矩陣中第 i 列第 j 行的檢核點數目

X_{ij}:表示在誤差矩陣中之對角線檢核點數目

表 2-4 精確度評估說明

名稱	公式	意義
整體精度 (Overall Accuracy)	$\frac{\sum_{i=1}^{n} X_{ii}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ij}} \times 100\%$	為檢核點中被正確分類的檢和點數百分比，亦即誤差矩陣中的對角線總和除以檢核點總數，所產生的百分比。
生產者精度 (Producer's Accuracy)	$\frac{X_{ii}}{\sum_{i=1}^{n} X_{in}} \times 100\%$	表示該類別的地真資料被正確分類的百分比。
漏授誤差 (Omission Error)	$1- \left(\frac{X_{ii}}{\sum_{i=1}^{n} X_{in}} \times 100\%\right)$	表示該類別的地真資料被錯誤分類的百分比
使用者精度 (User's Accuracy)	$\frac{X_{ii}}{\sum_{j=1}^{n} X_{nj}} \times 100\%$	表式落在該分類成果的檢核點被正確分類的百分比。

誤授誤差 (Commission Error)	$1-\left(\frac{X_{ii}}{\sum_{j=1}^{n} X_{nj}} \times 100\%\right)$	表式落在該分類成果的檢核點被錯誤分類的百分比。
Kappa 係數	$\text{Kappa} = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c}$ $= \frac{N\sum_{i=1}^{n} X_{ii} - \sum_{i=1}^{n}(X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{n}(X_{i+} \times X_{+i})}$ P_0:觀測一致性 P_1:期望一致性 N:檢核點總數	能表現整體影像分類的誤差性，可藉由考慮誤差矩陣中的漏授與誤授誤差，經過統計而得 Kappa 統計量，能表式地真資料與分類結果的一致性。Kappa 值介於 0~1 之間，越大表式分類精度越高。

第三章研究成果

第一節　建置影像分析資料庫

本研究分析使用影像包含SPOT-6/7光學影像以及Sentinel-1雷達影像。SPOT-6/7影像之使用目的為針對蘇迪勒颱風事件(2015年8月8日)與2016年6月11日豪雨事件所產生的崩塌地進行監測，因此本研究收集兩場事件前後期之SPOT-6/7無雲影像，以人工判釋之方法將本研究區之新增崩塌進行判釋。

蘇迪勒颱風事件判釋崩塌地所使用之前後期影像及崩塌地判釋成果可見圖2-5，2016年611豪雨事件所使用之前後期影像及崩塌地判釋成果可見上節圖2-6。依據此判釋結果，界定崩塌地在雷達影像中的位置及範圍。

本研究使用之雷達影像為 Sentinel-1 衛星資料，影像進行前處理後可得地面解析度為 10 公尺的影像資料，影像包含升軌模式及降軌模式資料(參考附錄二)，各事件收集影像整理於表 3-1。

表 3-1 Sentinel-1 雷達影像收集列表

Sentinel-1 影像數目		
事件	Ascending	Descending
蘇迪勒颱風	14	10
611 豪雨	14	9
合計	28	19

第二節 崩塌地雷達迴波特性分析

為瞭解崩塌地的雷達迴波特性，本研究嘗試就崩塌範圍以崩塌地為單位的方式進行迴波強度分析。Sentinel-1 影像有升軌和降軌兩種模式，每種模式又各別有 VH、VV 兩種極化資料，本研究將崩塌地內的影像強度值取平均，檢測不同模式之下，災害發生前後的雷達迴波強度變化情形。由於崩塌地規模大小不盡相同，故將崩塌依面積大小分為四類，分別是 1 公頃以上、0.5 公頃到 1 公頃、0.1 公頃到 0.5 公頃以及 0.1 公頃以下。因為不同模式的拍攝角度不同，故將崩塌再細分亮面側與暗面側(示意如圖 3-1)，方法為計算整幅影像之迴波強度平均值後，大於平均值者為亮面側，否則為暗面側。

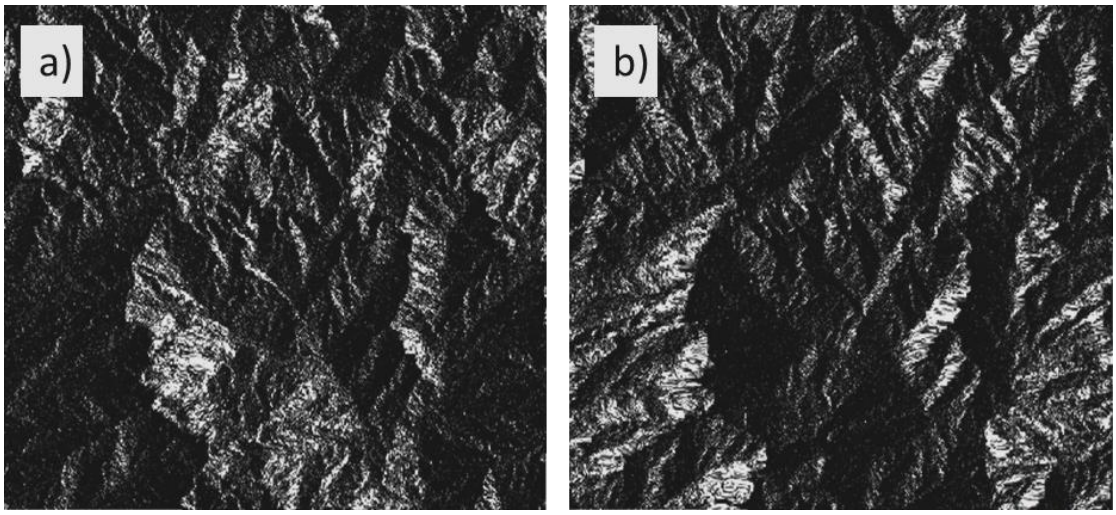


圖 3-1 雷達影像亮面側與暗面側示意圖。圖為蘇迪勒颱風(侵台時間 2015 年 8 月 8 日)後的 Sentinel-1A C-band 位於翡翠水庫上游山區的雷達影像，其中(a)為 2015 年 9 月 22 日 Sentinel-1A VH 極化升軌(ascending model)影像，(b)為 2015 年 8 月 21 日 Sentinel-1A VH 極化降軌(descending mode)影像。

由於 Sentinel-1 影像升軌及降軌模式拍攝角度不同，本研究另外嘗試將升軌及降軌模式影像進行融合並觀察其迴波強度之變化。若相近日期的兩幅影像之間若沒有其他事件造成地表的變化，則其迴波強度之應為相近。本研究將日期相近之不同模式(升軌及降軌模式)的迴波強度進行整合，消除亮面側及暗面側的問題。方法為將影像像元取升軌及降軌模式的迴波強度平均值，成果如圖 3-2，明顯消除了山區地形造成的迴波訊號不均的問題。

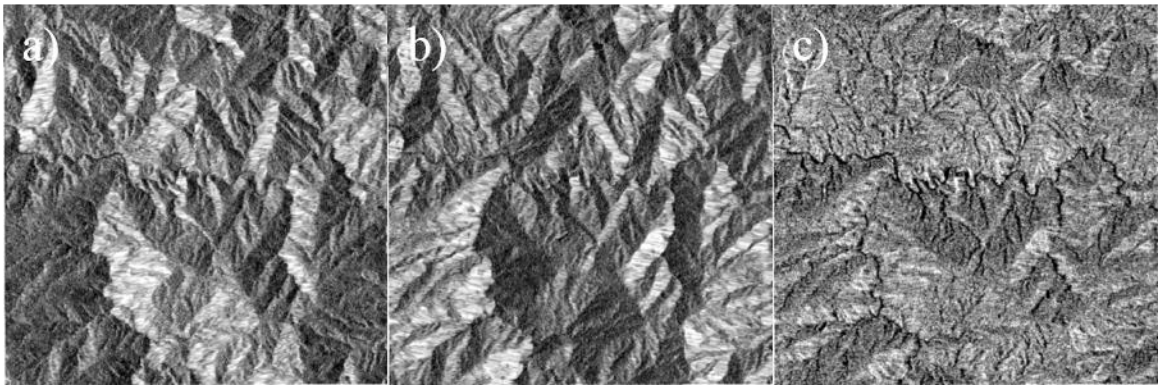


圖 3-2 升軌模式與降軌模式融合影像示意圖。蘇迪勒颱風(侵台時間 2015 年 8 月 8 日)之 Sentinel-1A C-band 位於翡翠水庫上游山區雷達影像，(a)為 2015 年 8 月 18 日 Sentinel-1A VH 極化升軌(ascending mode)影像，(b)2015 年 8 月 21 日 Sentinel-1A VH 極化降軌(descending mode)影像，(c)則為升軌及降軌之融合影像。

一、蘇迪勒颱風事件前後崩塌迴波強度變化

本研究於升軌模式使用 2015 年 8 月 6 日以及 2015 年 8 月 18 日的影像，降軌模式則使用 2015 年 7 月 28 日以及 2015 年 8 月 21 日的影像，圖 3-2 為升軌和降軌模式分別搭配不同極化模式之災害前後崩塌地雷達迴波強度變化情形，相關數據整理於表 3-2。

表 3-2 蘇迪勒事件崩塌數量統計表

類型 / 崩塌面積	升軌模式 (Ascending)		降軌模式 (Descending)		小計
	亮面側	暗面側	亮面側	暗面側	
1 公頃以上	0	8	8	0	8
0.5-1 公頃	0	16	16	0	16
0.1-0.5 公頃	6	60	60	6	66
0.1 公頃以下	12	172	172	12	184
總計	18	256	256	18	274

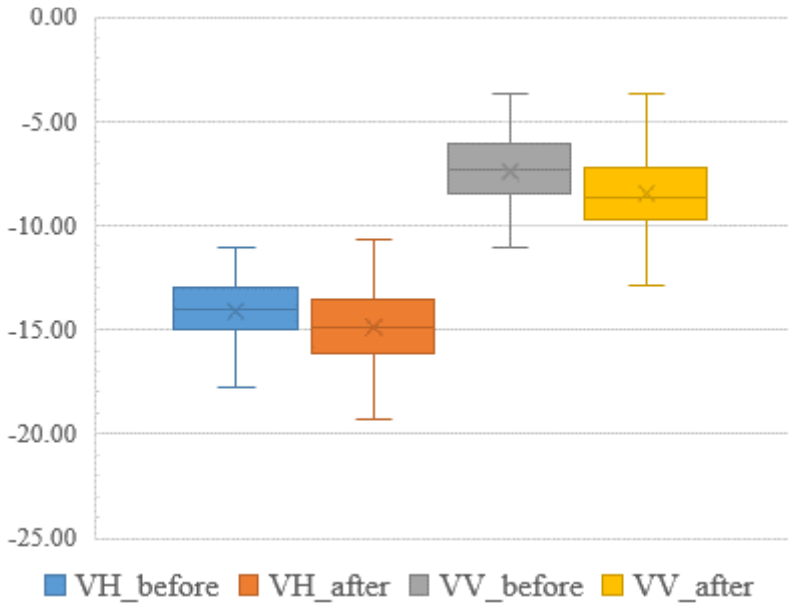


圖 3-2 蘇迪勒融合模式影像崩塌迴波強度變化

由上述結果可以看出崩塌之雷達迴波強度於事件發生之後會降低，本研究使用災前及災後兩組迴波強度數據進行樣本比較，採用成對 T 檢定(T-test)以驗證崩塌之迴波強度是否於事件後會降低，虛無假設(null hypothesis)為兩者平均值相等，若 P-value 小於 0.05 視為棄卻此假設，檢定結果之 P-value 數據整理於表 3-3 及表 3-4。

表 3-3 蘇迪勒事件 VH 崩塌地迴波強度變化 T-test 統計表

類型 / 崩塌面積	P-value						
	升軌模式 (Ascending)			降軌模式 (Descending)			融合影像
	不分側	亮面側	暗面側	不分側	亮面側	暗面側	
全部	0.079	0.187	0.118	<0.05	<0.05	0.152	<0.01
1 公頃以上	<0.05	-	<0.05	<0.05	<0.05	-	<0.01
0.5-1 公頃	0.159	-	0.159	<0.01	<0.01	-	<0.01
0.1-0.5 公頃	0.147	0.267	<0.05	0.123	<0.05	0.263	<0.01
0.1 公頃以下	0.187	0.267	0.406	0.271	0.448	0.056	0.07

註：”-“值為無資料

表 3-4 蘇迪勒事件 VV 崩塌地迴波強度變化 T-test 統計表

類型 / 崩塌面積	P-value						
	升軌模式 (Ascending)			降軌模式 (Descending)			融合影像
	不分側	亮面側	暗面側	不分側	亮面側	暗面側	
全部	<0.01	0.126	<0.01	<0.01	<0.01	0.298	<0.01
1 公頃以上	<0.05	-	<0.05	<0.01	<0.01	-	<0.01
0.5-1 公頃	<0.01	-	<0.01	<0.01	<0.01	-	<0.01
0.1-0.5 公頃	<0.01	0.379	<0.01	<0.01	<0.01	0.051	<0.01
0.1 公頃以下	0.102	0.139	0.091	0.07	0.082	0.429	0.102

註：”-“值為無資料

結果顯示 VH 及 VV 極化資料中，降軌模式的亮面側較能區判出崩塌前後的差異，暗面側則否；而升軌模式僅在 VV 極化資料中的暗面側有較好的區判效果，而所有資料中，對於 0.1 公頃以下之崩塌地的區判效果均不佳。另外觀察融合影像可以發現其迴波強度於崩塌前後變化情形，不論是 VH 或 VV 極化資料都較單一模式影像更為顯著。

二、0611 豪雨事件事件前後崩塌迴波強度變化

本研究於升軌模式使用 2016 年 6 月 1 日以及 2016 年 6 月 13 日的影像，降軌模式則使用 2016 年 6 月 4 日以及 2016 年 6 月 28 日的影像，圖 3-3 為升軌和降軌模式分別搭配不同極化模式之災害前後崩塌地雷達迴波強度變化情形，崩塌數量與面積相關數據整理於表 3-5，成對 T 檢定之 P-value 則整理於表 3-6 (VH 極化影像)及表 3-7(VV 極化影像)。

表 3-5 0611 事件崩塌數量統計表

類型 / 崩塌面積	升軌模式 (Ascending)		降軌模式 (Descending)		小計
	亮面側	暗面側	亮面側	暗面側	
1 公頃以上	4	2	2	4	6
0.5-1 公頃	3	10	10	3	13
0.1-0.5 公頃	8	41	41	8	49
0.1 公頃以下	6	33	33	6	39
總計	21	86	86	21	107

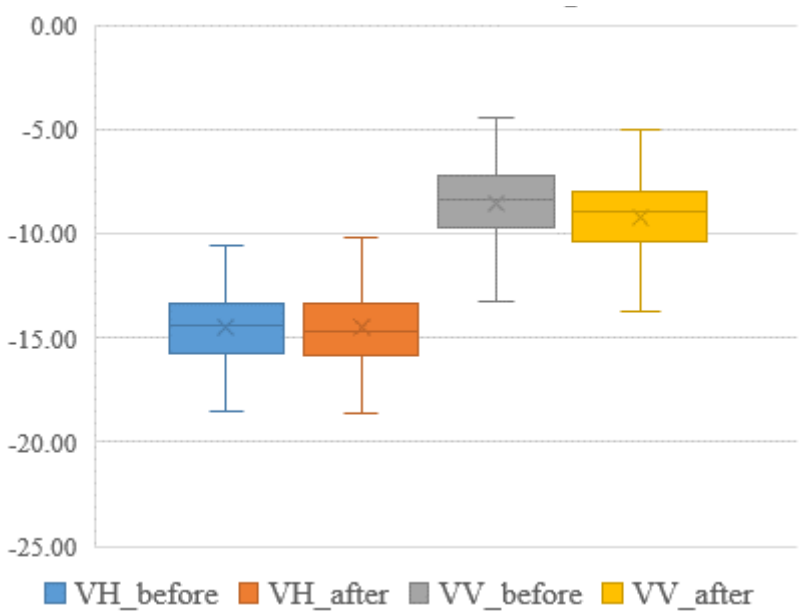


圖 3-3 0611 融合影像崩塌迴波強度變化

表 3-6 0611 事件 VH 崩塌地迴波強度變化 T-test 統計表

類型 / 崩塌面積	P-value						
	升軌模式 (Ascending)			降軌模式 (Descending)			融合影像
	不分側	亮面側	暗面側	不分側	亮面側	暗面側	
全部	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.466	0.197
1 公頃以上	<0.05	0.068	0.186	0.167	0.190	0.450	0.059
0.5-1 公頃	<0.05	0.268	<0.05	<0.01	<0.01	<0.05	0.481
0.1-0.5 公頃	<0.01	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	0.093	0.280
0.1 公頃以下	0.325	0.345	0.390	0.246	0.474	0.100	0.113

表 3-7 0611 事件 VV 崩塌地迴波強度變化 T-test 統計表

類型 / 崩塌面積	P-value						
	升軌模式 (Ascending)			降軌模式 (Descending)			融合影像
	不分側	亮面側	暗面側	不分側	亮面側	暗面側	
全部	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	0.083	0.156	<0.01
1 公頃以上	<0.01	<0.01	<0.01	0.134	<0.05	0.097	<0.05
0.5-1 公頃	<0.01	0.14	0.14	0.090	<0.05	0.164	<0.05
0.1-0.5 公頃	<0.01	0.14	0.14	<0.05	0.055	0.208	<0.01
0.1 公頃以下	0.090	<0.05	<0.05	0.368	0.442	0.317	<0.01

由圖 3-3 可以看到 VH 極化資料迴波強度變化幅度不明顯，而 VV 極化資料於事件發生後相對有較明顯之下降。表 3-6 及表 3-7 之成對 T 檢定結果顯示，VH 極化資料中，降軌模式的亮面側較能區判崩塌前後的差異，暗面側則否；而升軌模式在 VV 極化的雷達迴波差異較顯著，且暗面側比亮面側明顯，而所有資料中對於 0.1 公頃以下的崩塌地雷達迴波差異效果均不顯著。而融合影像中，VV 極化資料的崩塌地雷達迴波差異較為顯著，而 VH 極化則否。

三、小結

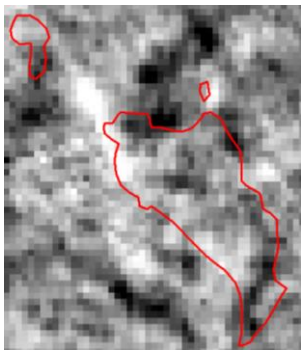
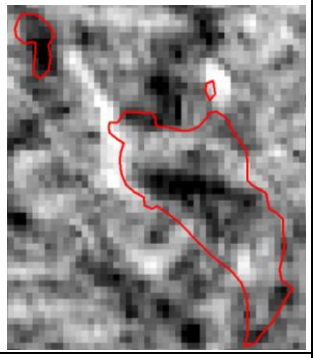
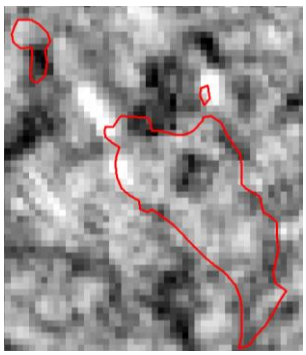
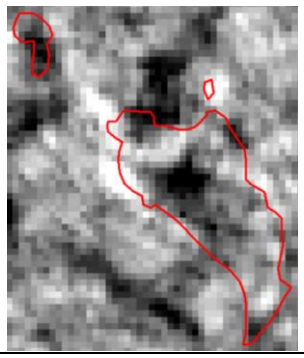
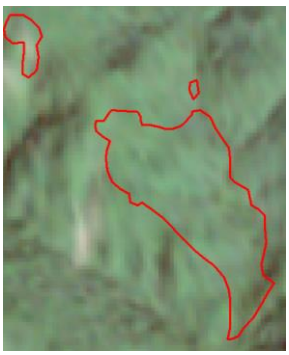
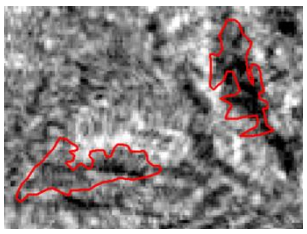
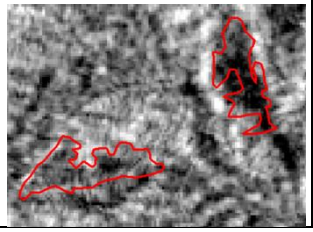
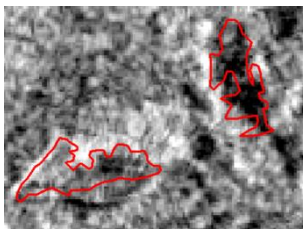
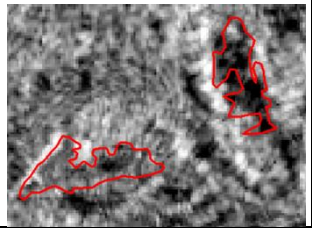
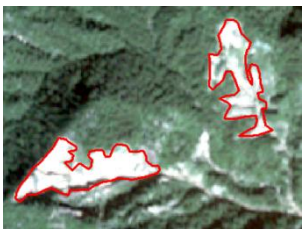
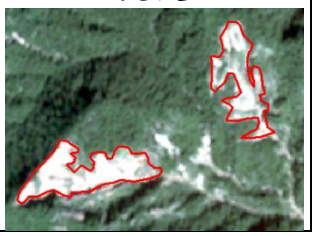
在崩塌地的雷達迴波分析上，北部蘇迪勒颱風試驗區與南部 0611 暴雨事件上均顯示：不同的觀測模式、崩塌地坡面方向與衛星觀測的相對幾何位置均會影響崩塌地迴波的強度，但若使用升軌及降軌的融合影像時，蘇迪勒事件中的崩塌地雷達迴波不論是 VH 或是 VV 極化

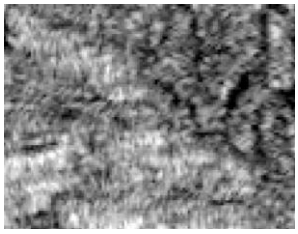
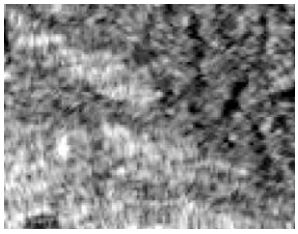
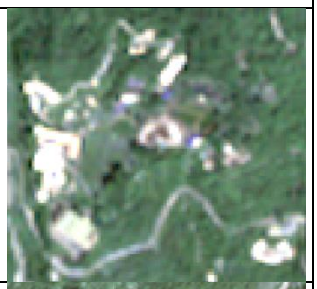
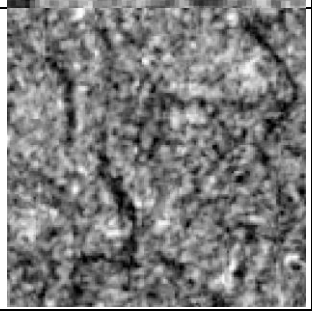
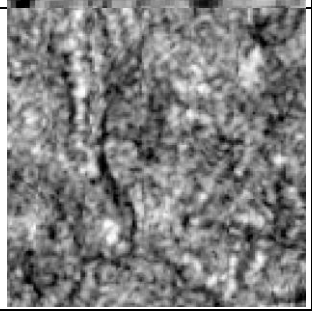
模式都有顯著的差異(事件後雷達迴波變低)，而 0611 事件則僅有 VV 極化模式有較顯著的差異。另外，崩塌地面積小於 0.01 公頃時，崩塌地雷達迴波的變化則難以偵測出來，顯示出使用 Sentinel-1 C-band 雷達資料在崩塌地偵測上的可能限制。

第三節 多時序影像變遷分析

從上節得知升軌及降軌之融合影像有利於檢視崩塌前後之迴波強度變化，本研究則進一步分析多時序雷達影像在北部蘇迪勒以及南部 0611 豪雨事件研究區中不同地物之雷達迴波變遷情形。本研究參照 SPOT 光學影像進行人工地物判釋，區別出新崩塌、舊崩塌、植被(林地)、水體、建地及農地共六種不同地物類別，並分別選取 50 點來觀察其多時期之迴波強度變化，各類地物在 VH 極化、VV 極化以及 SPOT 光學影像(真實色)的影像特徵見表 3-8。

表 3-8 各類地物在雷達及 SPOT 之影像參考

特徵類別 / 土地類別	影像特徵		
	VH 極化 (融合影像)	VV 極化 (融合影像)	光學影像
新崩塌	災前  災後 	災前  災後 	災前  災後 
舊崩塌	災前  災後 	災前  災後 	災前  災後 

植被 (林地)			
水體			
建地			
農地			

一、蘇迪勒颱風事件

蘇迪勒事件中，樣區地物較為單純，僅有崩塌、植被及水體三類。本事件選取災害時間(2015 年 8 月 8 日)前三期以及後三期之融合影像(稱 T1 至 T6)進行分析，影像取像日期可見表 3-9。

表 3-9 蘇迪勒事件多時期分析影像時間表

軌道模式 / 期別日期	升軌模式 (Ascending)	降軌模式 (Descending)
T1	2015-06-19	2015-06-10
T2	2015-07-01	2015-07-04
T3	2015-07-25	2015-07-28
T4	2015-08-18	2015-08-21
T5	2015-09-11	2015-09-14
T6	2015-10-05	2015-10-08

分析結果可見圖 3-4，蘇迪勒事件中崩塌發生於 T3 與 T4 之間，圖中顯示不論是何種極化資料，植被與水體的迴波強度變化雖有波動，但起伏變化較崩塌為小，崩塌位置在 T3 與 T4 之期迴波強度則有明顯的下降，VH 極化資料中各地物的迴波強度均比 VV 來得低，且崩塌的迴波強度於災前 T1 至 T3 較類似植被的迴波強度，災後 T4 至 T6 則漸趨近於水體。

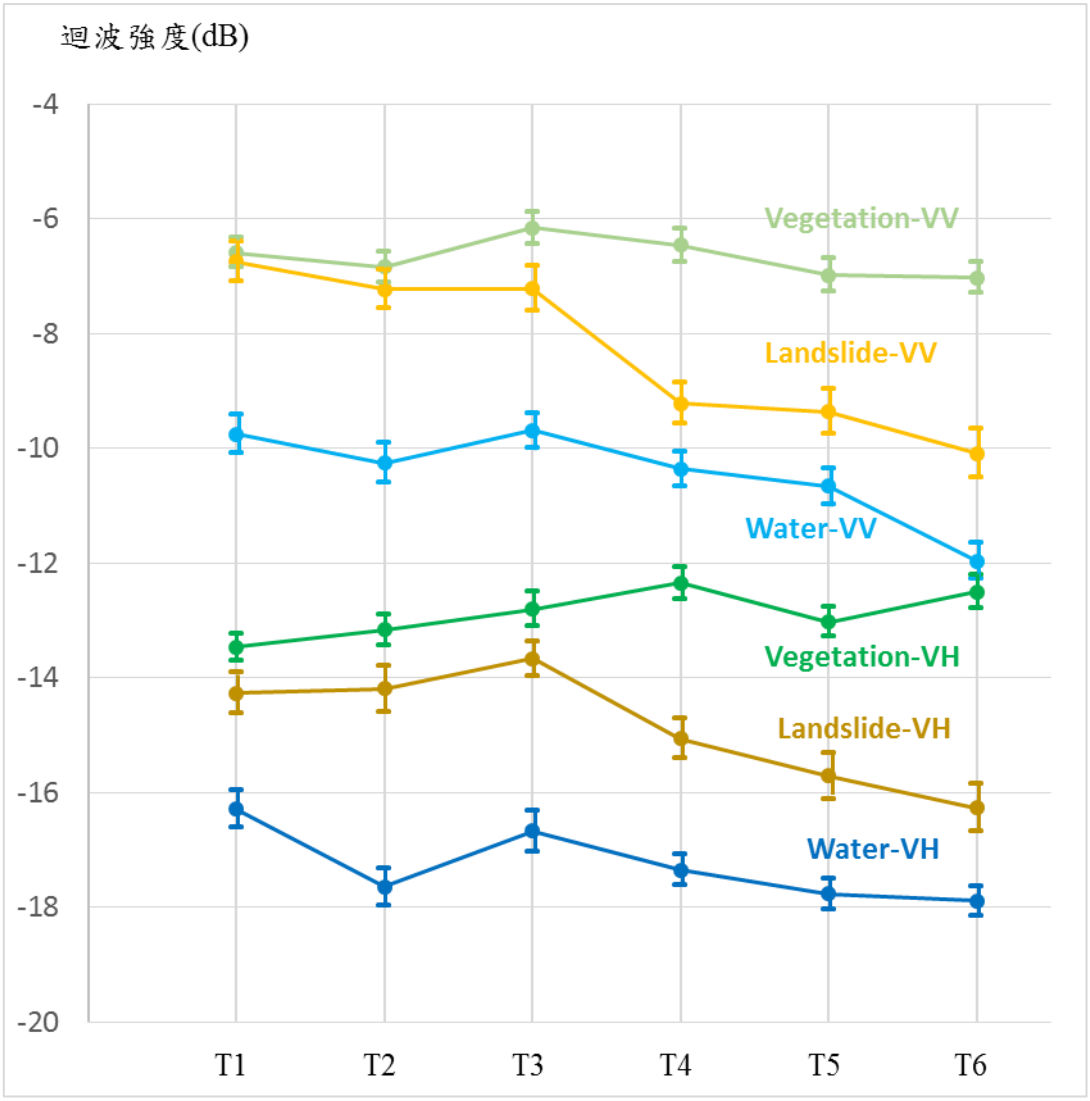


圖 3-4 蘇迪勒事件各地物之多時序雷達迴波強度變化

二、0611 豪雨事件

0611 事件中，樣區地物較為複雜，共有新崩塌、舊崩塌、植被(林地)、水體、建地及農地六類。本事件選取災害時間(2016 年 6 月 11 日)前三期以及後三期之融合影像(稱 T1 至 T6)進行分析，影像取像日期可見表 3-10。

表 3-10 0611 事件多時期分析影像時間表

軌道模式 / 期別日期	升軌模式 (Ascending)	降軌模式 (Descending)
T1	2016-03-21	2016-03-24
T2	2016-05-08	2016-05-11
T3	2016-06-01	2016-06-04
T4	2016-07-07	2015-06-28
T5	2016-07-19	2016-07-22
T6	2016-08-12	2015-08-15

分析結果可見圖 3-5，0611 事件中崩塌發生於 T3 與 T4 之間，圖中顯示，不論是何種極化資料，舊崩塌的迴波強度與水體類似，且變化起伏不大，植被與建地雖有波動，但起伏不大，農地於 T5 時期均有上升現象，而崩塌位置在 T3 與 T4 之間迴波強度均有小幅度的下降，(儘管 VH 極化資料同樣在 T5 有上升的現象)。我們亦可以看出 VH 極化資料中各地物的迴波強度均比 VV 來得低，且不論何種極化模式，新生崩塌的迴波強度均較舊有崩塌的迴波強度還高。另外，於 VV 極化資料中，新生崩塌的雷達迴波強度大致處在植被以及水體之間；而 VH 極化資料則在植被及舊有崩塌之間(舊有崩塌與水體相當接近)。

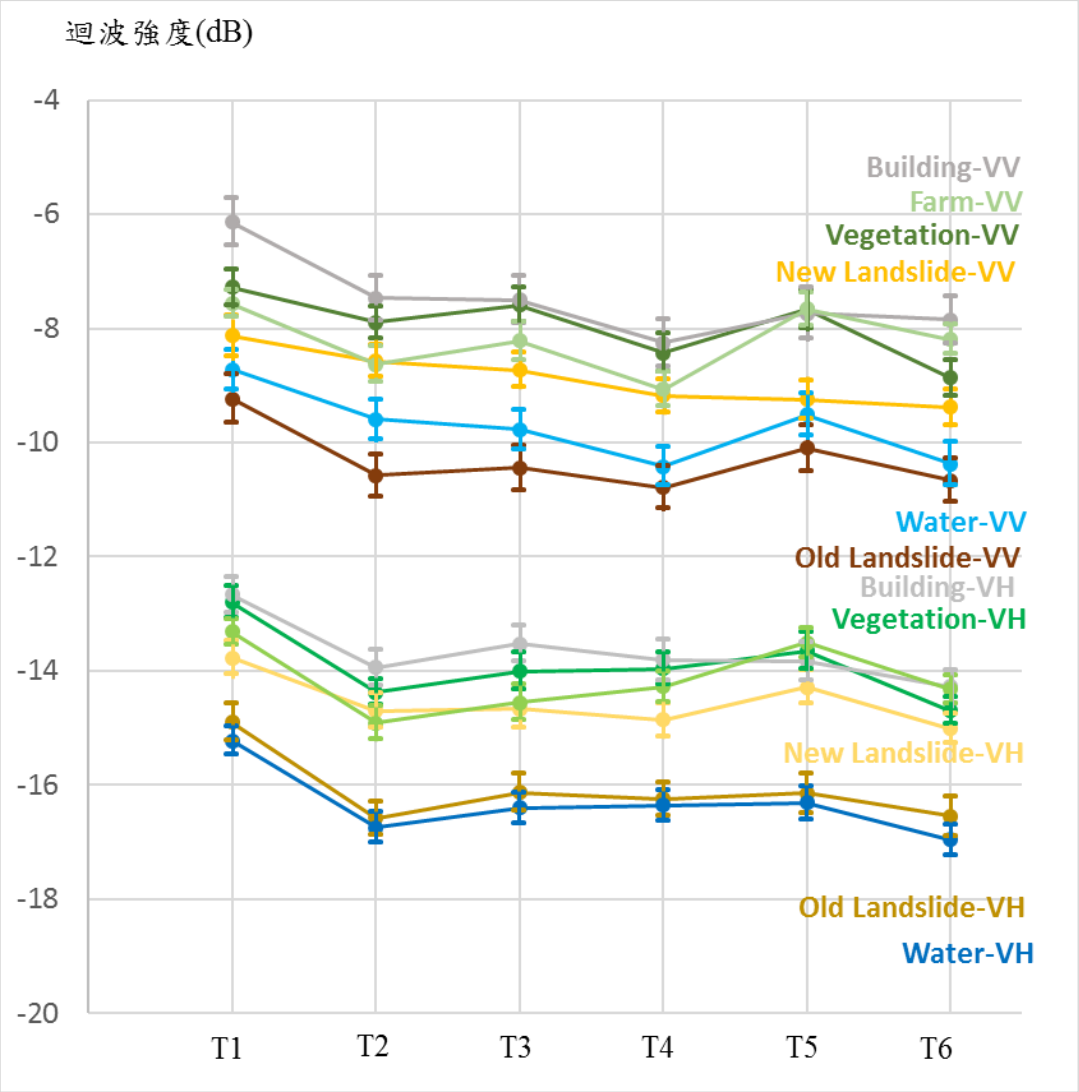


圖 3-5 0611 事件各地物之多時序雷達迴波強度變化

三、小結

本研究應用之 Sentinel-1 C-band 資料在建地上有較強的迴波強度，森林植生地區則因發生體散射(volume scattering)，相較於裸露地的表面散射(surface scattering)有較強的迴波強度，而水體之迴波強度則最低，此分析成果與過去相關研究一致。而在多時期序列中，可以發現觀測資料可能存在系統性的變化，如 0611 事件的 T1 及 T5 中的多類地物都有偏高的迴波強度。因此，本研究建議未來基於雷達資料時序影像匹配技術為值得探討的研究方向，這將有利於將多時序資進行標

準化的過程。

綜上所述，儘管多時序資料在資料一致性上可能有缺陷，但各類地物在不同的雷達時序資料中明確表現出個別特徵，各類地物之迴波強度時序特性並不相同，因此本研究認為此雷達迴波之多時序特性可類同光學資料中的多光譜特性，用作為利用雷達影像為基礎的影像分類工作，詳述見後節。

第四節 多時序雷達資料影像分類

根據前述之多時序雷達迴波特性之分析，並分別嘗試以多時序 VH 極化、多時序 VV 極化以及多時序 VH+VV 極化三種方式，配合 SVM 監督式分類器進行影像的地物分類。另外，配合前三種極化模式搭配，本研究設計了四種模式，共產製 12 種分類結果：

(1) 模式一：全序列影像模式，使用 T1 至 T6 共六期影像進行影像分類。

(2) 模式二：即時監測模式，使用 T1 至 T4 共四期影像分類，即使用事件前全部資料(T1 至 T3)與一幅事件後最近期資料(T4)進行影像分類。

(3) 模式三：變遷分析模式，使用一幅事件前(T3)及一幅事件後(T4)兩期影像，此為常見之變遷分析方法。

(4) 模式四：最後一種模式則為事後迴波，僅使用 T4 一期影像進行分類。

一、蘇迪勒颱風事件分類成果

本事件將土地覆蓋類別分成崩塌、植生及水體共三類，訓練樣區參考 SPOT 光學影像的地物位置並依據其影像特徵做為選擇依據(參考表 3-8)，並於分類結果隨機灑 500 點進行精度驗證，蘇迪勒事件之分類成果整理於下表 3-11，所有分類結果驗證得到的雷達影像分類之誤差矩陣以及其整體精度表整理於附錄五(表 3-11 之圖資請參考附錄六)。

首先，所有模式試驗之影像分類總體精度約在六成上，其中以融合影像全時期影像分類(模式一)的成果精度最高為 66.6%，VH 極化影像事後迴波(模式四)的分類精度最差為 53.2%，我們也可以看出融合影像的成果均較 VH 或 VV 單一極化影像的精度要高。

表 3-11 蘇迪勒事件影像分類成果

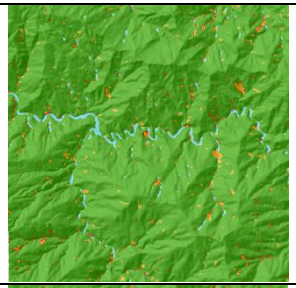
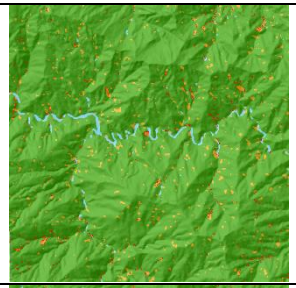
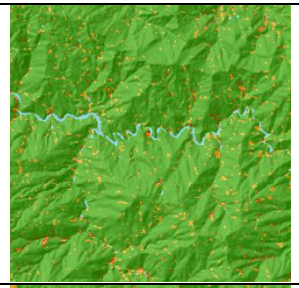
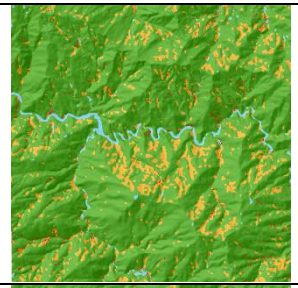
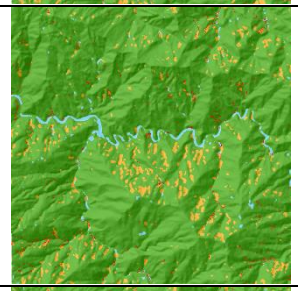
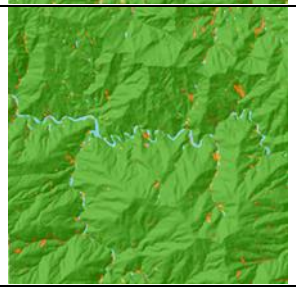
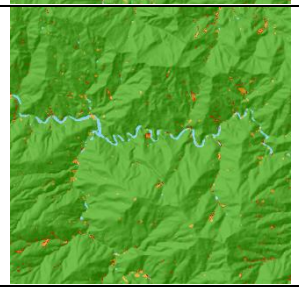
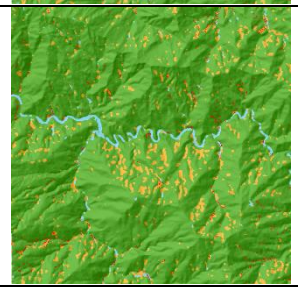
分類模式 / 極化模式	模式一 T1-T6	模式二 T1-T4	模式三 T3-T4	模式四 T4	
VH 極化					
VV 極化					
VH+VV 極化					

表 3-12 蘇迪勒事件分類崩塌偵測率

崩塌面積		1-5 公頃		0.5-1 公頃		0.1-0.5 公頃		總計	
崩塌數量		8		16		66		90	
模式與極化		判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率
T1	VH	7	87.5%	10	62.5%	27	40.9%	44	48.9%
|	VV	7	87.5%	14	87.5%	32	48.5%	53	58.9%
T6	VH+VV	7	87.5%	14	87.5%	31	47%	52	57.8%
T1	VH	7	87.5%	10	62.5%	28	42.4%	45	50%
|	VV	7	87.5%	9	56.3%	21	31.8%	37	41.1%
T4	VH+VV	7	87.5%	12	75%	28	42.4%	47	52.2%
T3	VH	7	87.5%	13	81.3%	31	47%	51	56.7%
|	VV	8	100%	10	62.5%	24	36.4%	42	46.7%
T4	VH+VV	7	87.5%	11	68.8%	21	31.8%	40	44.4%
	VH	6	75%	10	62.5%	29	43.9%	45	50%
T4	VV	6	75%	8	50%	22	33.3%	36	40%
	VH+VV	6	75%	10	62.5%	31	47%	47	52.2%

影像分類的總體精度不佳主要問題在於許多小的面積的崩塌地的漏判造成，因此本研究也另外分析了不同面積崩塌地的判釋率，但由於 0.1 公頃以下崩塌的迴波變化極不顯著，故本節分析僅考慮 0.1 公頃以上之崩塌之崩塌偵測率，如表 3-12。分類影像中，模式三及模式四有較明顯的過度分類的情形(表 3-11)，模式一及模式二則有較好的判釋成果，表 3-12 可以看出 VH+VV 合併資料的崩塌偵測率都優於單一極化影像，以不同模式來看，模式一的全序列影像分類，崩塌

的偵測率為最高，1 公頃以上的大面積崩塌幾乎都能準確判釋達(87.5%)，1-0.5 公頃的崩塌偵測率也能達(62.5~87.5%)；模式二的即時監測分類對大面積崩塌也大多能準確判釋(87.5%)，0.5-1 公頃之崩塌準確率則約 56.3%~75%，0.5 公頃以下崩塌偵測率則低於 50%；模式三之變遷分析分類則僅有 1-5 公頃之大面積崩塌判釋準確較高(87.5%~100%)；若模式四只考慮事件後迴波之分類則判釋效果較為不佳，雖然 0.1-0.5 公頃偵測率較優(75%)，但此乃是由於崩塌地有過度分類所造成。

二、0611 豪雨事件

本事件地物較為複雜，故將土地覆蓋類別分成新生崩塌、舊有崩塌、植生、水體、建地和農地共六類，訓練樣區參考 SPOT 光學影像的地物位置並依據其影像特徵做為選擇依據(參考表 3-8)，並於分類結果隨機灑 500 點進行精度驗證，0611 事件之分類成果整理於下表 3-13。所有分類結果驗證得到的雷達影像分類之誤差矩陣以及其整體精度表整理於附錄五(表 3-13 之圖資請參考附錄六)。

0611 事件在各模式的分類精度在單一極化模式在 57%以上，而模式一 VH+VV 合併資料之分類成果精度最高，達 70.2%。可以看出在地物相對複雜的地區中，VH+VV 合併資料的成果較 VH、VV 單一極化影像的精度要高。

表 3-13 0611 事件影像分類成果

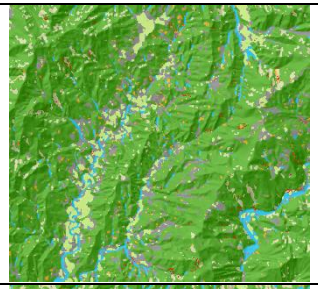
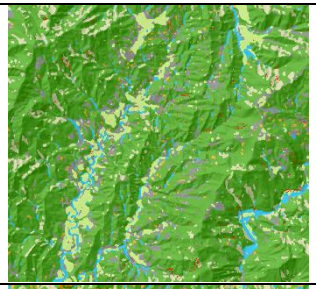
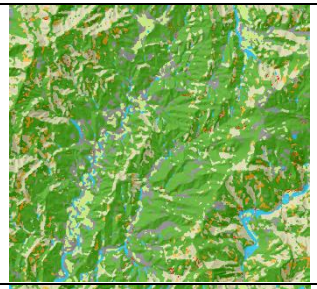
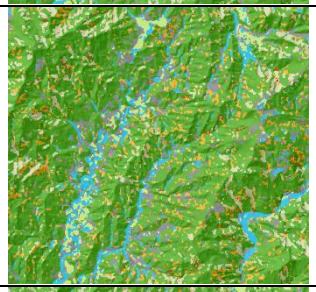
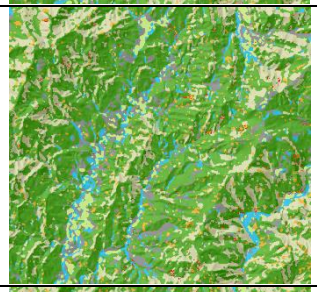
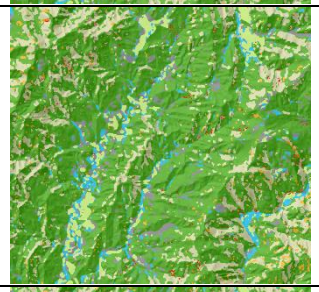
分類模式 / 極化模式	模式一 T1-T6	模式二 T1-T4	模式三 T3-T4	模式四 T4	
VH 極化					
VV 極化					
VH+VV 極化					

表 3-14 0611 事件分類崩塌偵測率

崩塌面積		1-5 公頃		0.5-1 公頃		0.1-0.5 公頃		總計	
崩塌數量		6		13		49		68	
模式與極化		判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率
T1	VH	5	83.3%	8	61.5%	8	16.3%	21	30.9%
|	VV	5	83.3%	9	76.9%	17	34.7%	31	45.6%
T6	VH+VV	6	100%	11	84.6%	18	36.7%	35	51.5%
T1	VH	3	50%	6	46.2%	6	12.2%	15	22.1%
|	VV	6	100%	8	61.5%	19	38.8%	33	48.5%
T4	VH+VV	6	100%	9	76.9%	9	18.4%	24	35.3%
T3	VH	4	66.7%	5	38.5%	8	16.3%	17	25%
|	VV	4	66.7%	8	61.5%	8	16.3%	20	29.4%
T4	VH+VV	6	100%	10	76.9%	16	32.7%	32	47.1%
	VH	3	50%	2	15.4%	3	6.1%	8	11.8%
T4	VV	4	66.7%	4	15.4%	7	14.3%	15	22.1%
	VH+VV	5	83.3%	4	30.8%	8	16.3%	17	25%

進一步來看不同崩塌面積的崩塌偵測率(表 3-14)，可以看出，不論是何種模式，VH+VV 合併的偵測效果最好，若僅觀察 VH+VV 合併資料判式成果在不同模式上的表現，可以發現在大面積 1-5 公頃的崩塌偵測上都有不錯的成果，而 1-0.5 公頃的崩塌地，除模式四以外，都有 75%以上的偵測率，而 0.5-0.1 公頃則降至 30%以下。模式一(T1-T6)的崩塌偵測率大致都比其他模式表現較好；而模式二即時監測分類在 0.5 公頃以上之崩塌偵測率也能達到 70%以上；在模式三變遷分

析分類還是可以看到在 1 公頃以上之崩塌有不錯的偵測率，但 0.1-0.5 公頃的崩塌偵測率僅約 30%左右，但從分類成果來看，模式三及模式四有較明顯的崩塌過度分類現象。

三、小結

不論從蘇迪勒事件還是 0611 事件的分類成果來看，模式一(T1-T6)及模式二(T1-T4)的分類成果都有不錯的成果，特別是合併 VH+VV 資料，在 0.5 公頃以上大小的崩塌的偵測率均有 75%，究其原因，乃是因為納入了更多幅像資料，豐富了判釋所需的影像特徵。

然而在操作上模式一未必合適於崩塌的緊急監測工作，由於其需要收集相當時距的災後影像。據此，模式二(T1-T4)、模式三(T3-T4)以及模式四(T4)，在判釋上只需要使用災害事件後最近一期可取得之雷達影像資料，而試驗結果顯示模式二優於模式三以及模式四，模式二在使用合併 VH+VV 資料時，不論是蘇迪勒事件還是 0611 事件，都有 75%以上的崩塌偵測率，這說明了模式二相當適用於即時的崩塌判釋，同時也反映了持續收集、整合災前影像的重要性。

第五節 影像紋理分析與崩塌判釋

本研究針對災後事件前後的影像計算 NDSI 影像後，並萃取影像中的光譜紋理特徵，如 Contrast、 Energy、Entropy、Homogeneity 及影像灰階標準差(STD)。紋理的計算是基於 7x7 移動視窗之灰度共生矩陣(glcm)進行計算。VH 及 VV 二組極化影像搭配五種紋理值可以得到 10 個紋理影像，並據此紋理特性，利用 SVM 進行監督式分類，分別以 VH 極化、VV 極化與 VH+VV 極化資料產製影像分類結果，並分析不同面積崩塌地之判釋正確率。

一、蘇迪勒颱風事件

圖 3-6 為利用蘇迪勒颱風事件前後雷達迴波影像計算之 NDSI 影像，表 3-15 列出各個紋理影像(圖資請參考附錄六)。

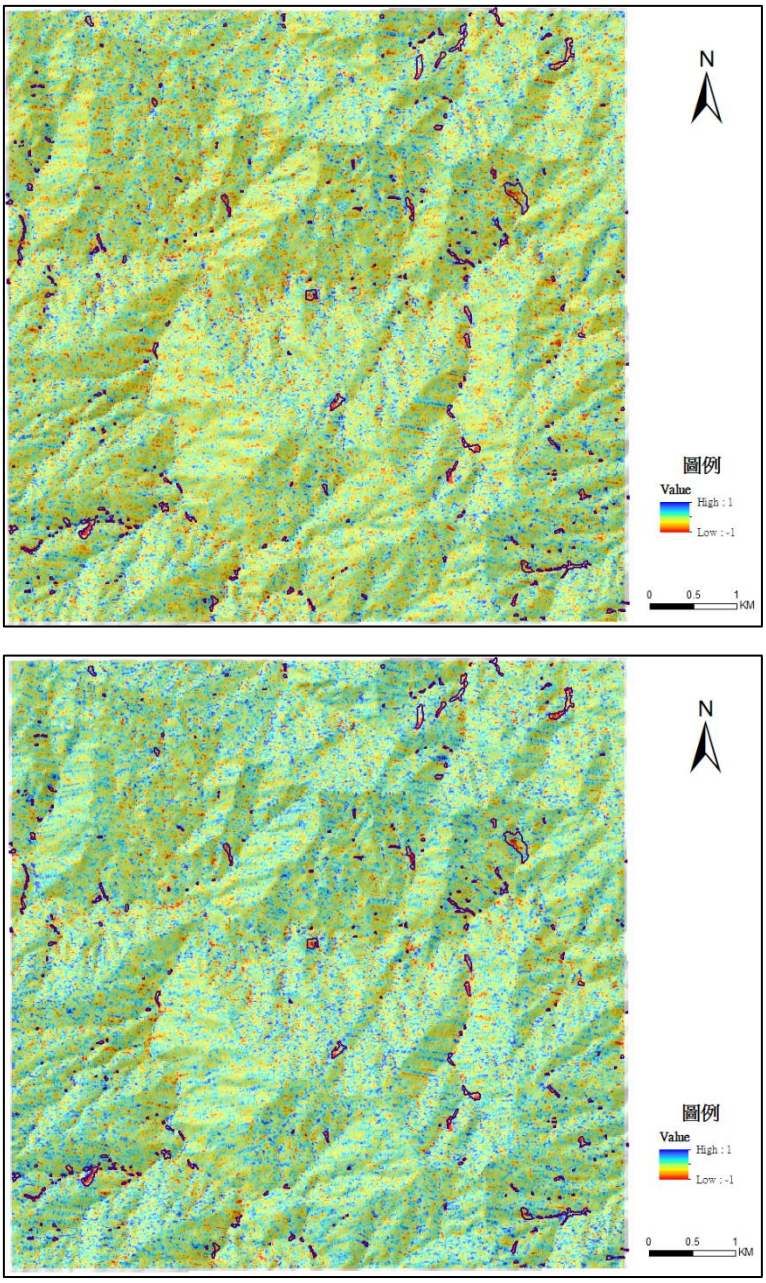
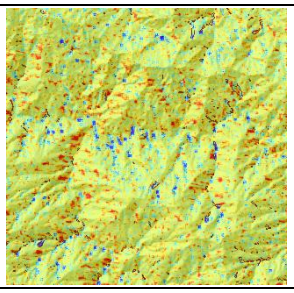
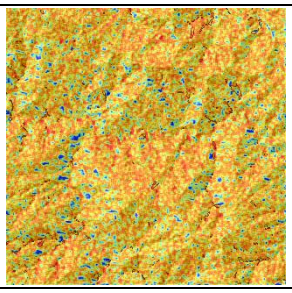
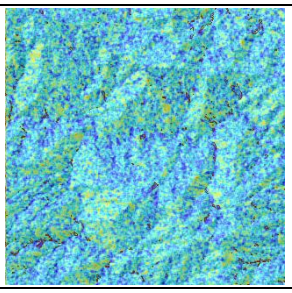
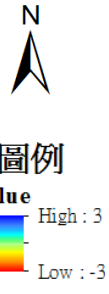
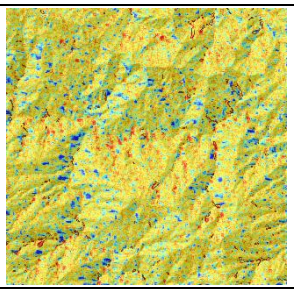
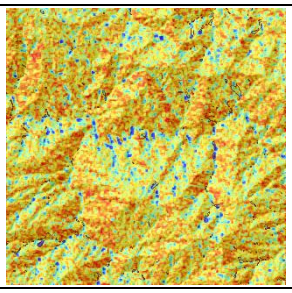
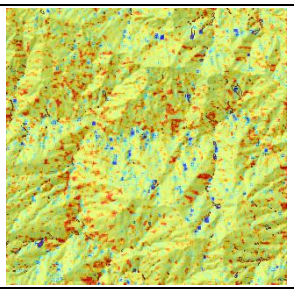
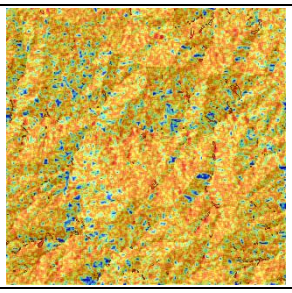
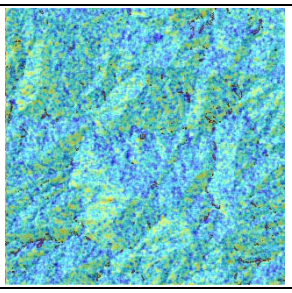
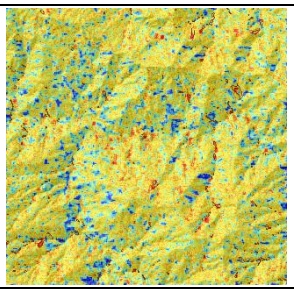
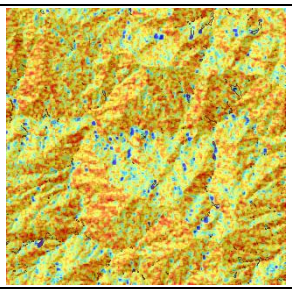


圖 3-6 蘇迪勒颱風事件 NDSI 影像，上圖為 VH 極化資料 NDSI 影像，下圖為 VV 極化資料 NDSI 影像

表 3-15 蘇迪勒事件之紋理影像

紋理	Contrast	Energy	Entropy
VH極化			
紋理	Homogeneity	STD	
VH極化			
紋理	Contrast	Energy	Entropy
VV極化			
紋理	Homogeneity	STD	
VV極化			

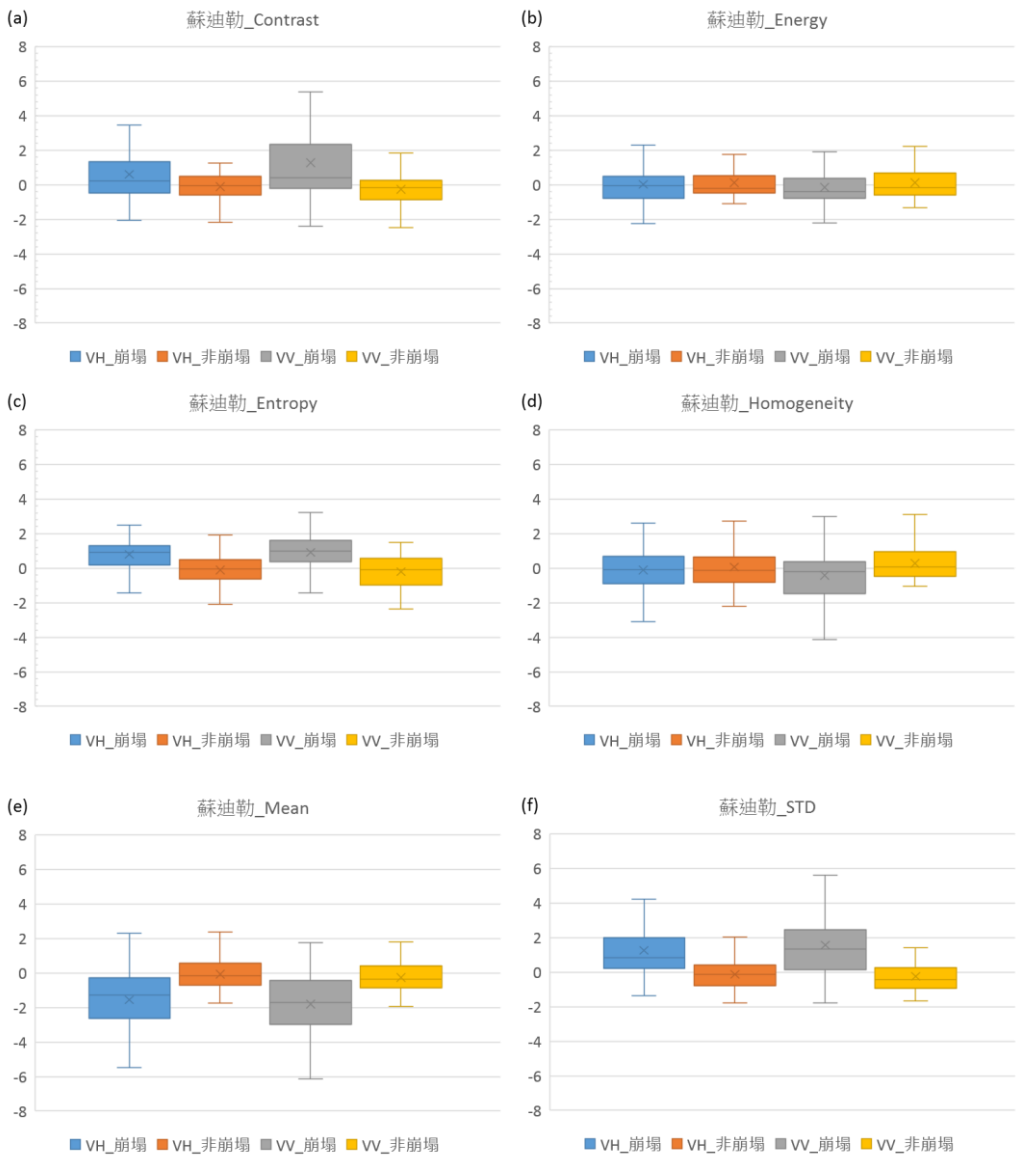


圖 3-7 蘇迪勒事件崩塌與非崩塌紋理比較，其中(A)為 Contrast，(B)為 Energy，(C)為 Entropy，(D)為 Homogeneity，(E)為 Mean，(F)為 STD

圖 3-7 為蘇迪勒事件中崩塌及非崩塌的紋理值之比較，我們可以看出在 Contrast、Entropy 以及 STD 紋理影像中，VH 及 VV 影像之崩塌紋理之平均值略高於非崩塌的紋理值，且崩塌紋理值分布較為離散，非崩塌的紋理值分布較為集中；從 Mean 紋理來看，崩塌紋理之平均值則低於非崩塌的紋理值，崩塌的分布也較為離散，這四組紋理都能明顯看出崩塌地與非崩塌地之間的紋理差異。而從 Energy 跟 Homogeneity 紋理中，雖然崩塌分布還是較為離散，但多數的紋理值與非崩塌的紋理值相近，沒有明顯的差異。

表 3-16 為蘇迪勒事件利用紋理指標分類的成果(圖資可參考附錄六)，所有分類結果驗證得到的雷達影像分類之誤差矩陣以及其整體精度表整理於附錄五。VH、VV 以及 VH+VV 的極化資料在整體分類精度上僅為止 53.0%~55.4%，原因乃是小面積崩塌地偵測失敗，而表 3-17 整理三組極化資料之不同面積的崩塌偵測率。

表 3-16 蘇迪勒紋理影像分類成果

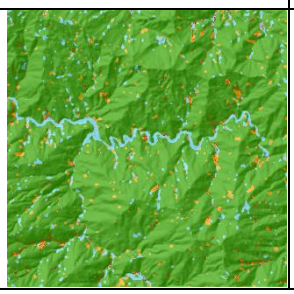
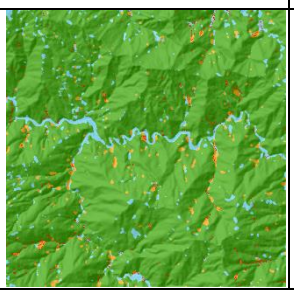
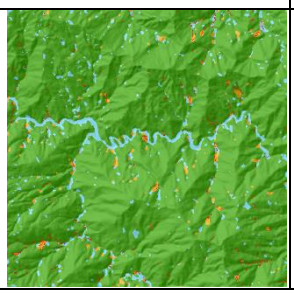
極化模式 / 分類模式	VH 極化	VV 極化	VH+VV 極化	N
紋理特徵				圖例 崩塌 植被 水體

表 3-17 蘇迪勒紋理分類崩塌判釋率

崩塌面積	1-5 公頃		0.5-1 公頃		0.1-0.5 公頃		總計	
崩塌數量	8		16		66		90	
	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率
VH	7	87.5%	9	56.3%	25	37.9%	41	45.6%
VV	7	87.5%	8	50%	18	27.3%	33	36.7%
VH+VV	7	87.5%	9	56.3%	18	27.3%	34	37.8%

由表 3-17 可以看出利用紋理指標在 1 公頃以上可達 87.5%，0.5 公頃以上之崩塌偵測率則約為 50%，而 0.5 公頃以下之崩塌偵測效果則不佳。其中 VH 影像的紋理指標偵測效果稍佳，VV 以及 VH+VV 合併資料稍差。

二、0611 豪雨事件

圖 3-8 為利用 0611 豪雨事件前後雷達迴波影像計算之 NDSI 影像，表 3-18 列出各個紋理影像(圖資請參考附錄六)。

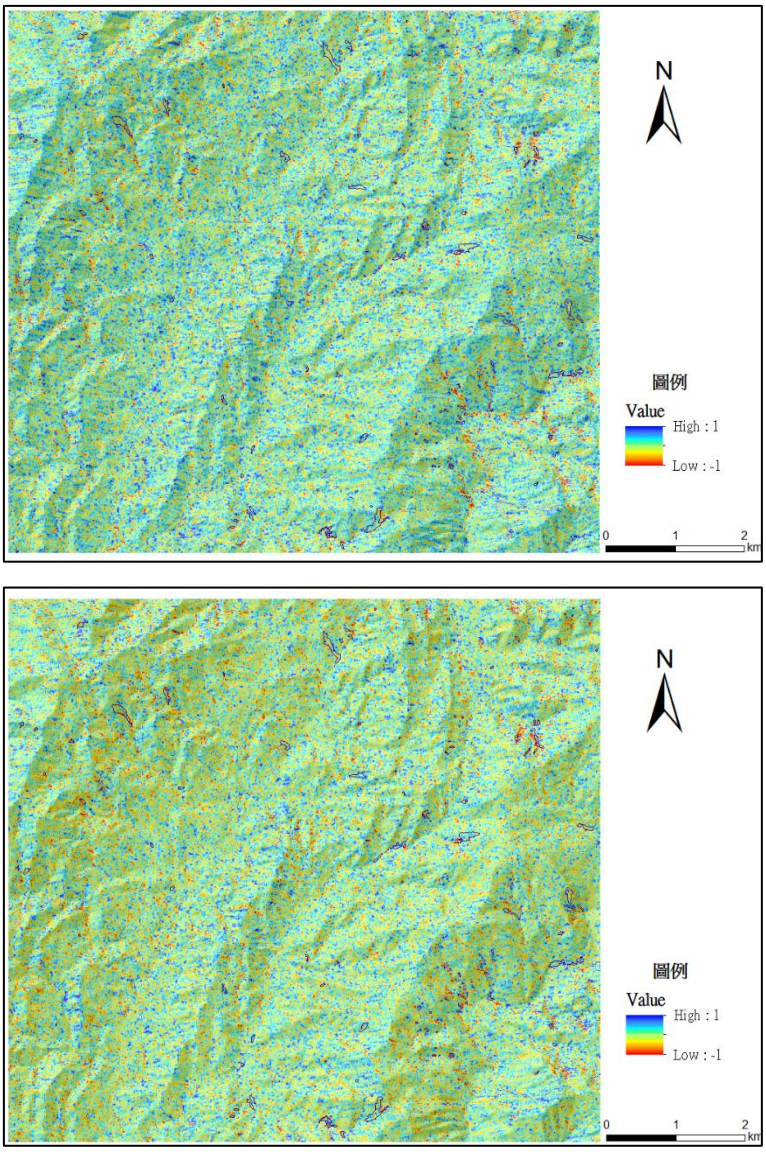
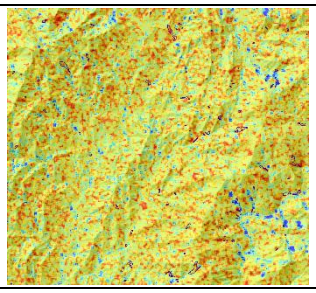
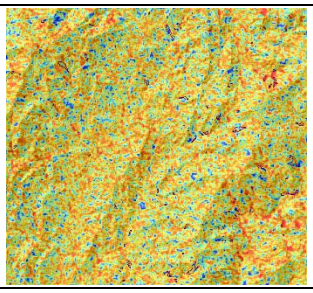
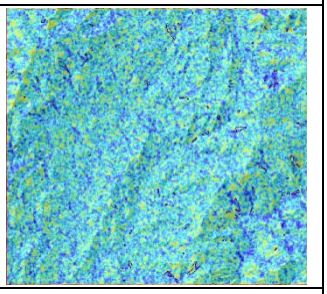
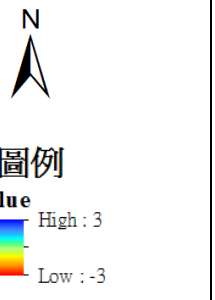
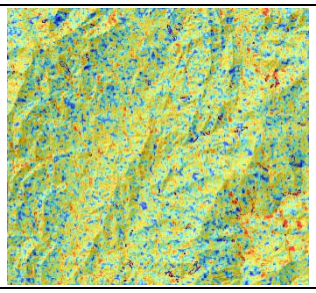
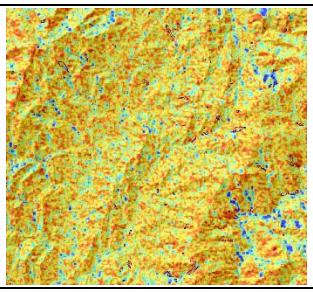
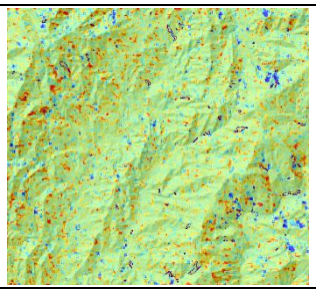
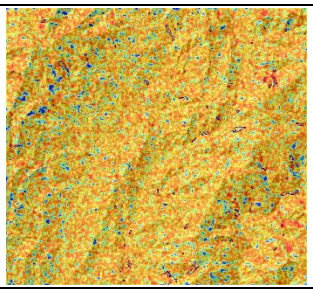
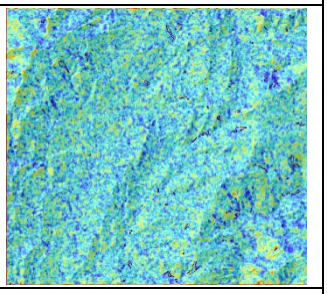
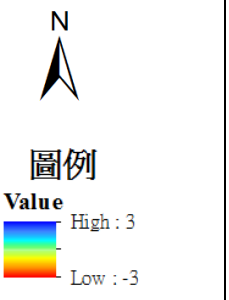
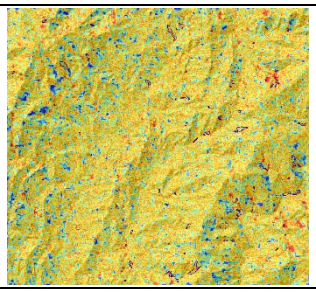
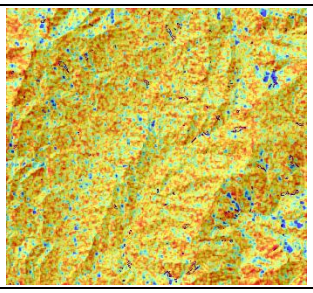


圖 3-8 0611 豪雨事件 NDSI 影像，上圖為 VH 極化資料 NDSI 影像，下圖為 VV 極化資料 NDSI 影像

表 3-18 0611 事件之紋理影像

紋理	Contrast	Energy	Entropy
VH 極化			
紋理	Homogeneity	STD	
VH 極化			
紋理	Contrast	Energy	Entropy
VV 極化			
紋理	Homogeneity	STD	
VV 極化			

在南部 0611 事件的研究區中，與北部研究區不同之處為有較多的舊有崩塌，圖 3-9 顯示 0611 事件中新生崩塌、舊崩塌及非崩塌的紋理值分布的比較，圖中前三組為 VH 極化資料依序為新增崩塌、舊有崩塌與非崩塌，後三組則為 VV 極化資料之新增崩塌、舊有崩塌與

非崩塌。圖中可以看出在 Contrast 和 Entropy 以及 STD 紋理的 VH 極化資料中，舊崩塌的平均紋理值最高，而新崩塌的紋理值與非崩塌差異不大，VV 極化資料也呈現大致之趨勢；而 Energy 和 Homogeneity 紋理值中，VH 極化資料則顯示舊崩塌紋理分布低於新增崩塌與非崩塌地，新崩塌與非崩塌之差異不明顯，但是新崩塌紋理分布相較於舊崩塌之分布較為離散，而在 VV 極化資料中，差異均不明顯。

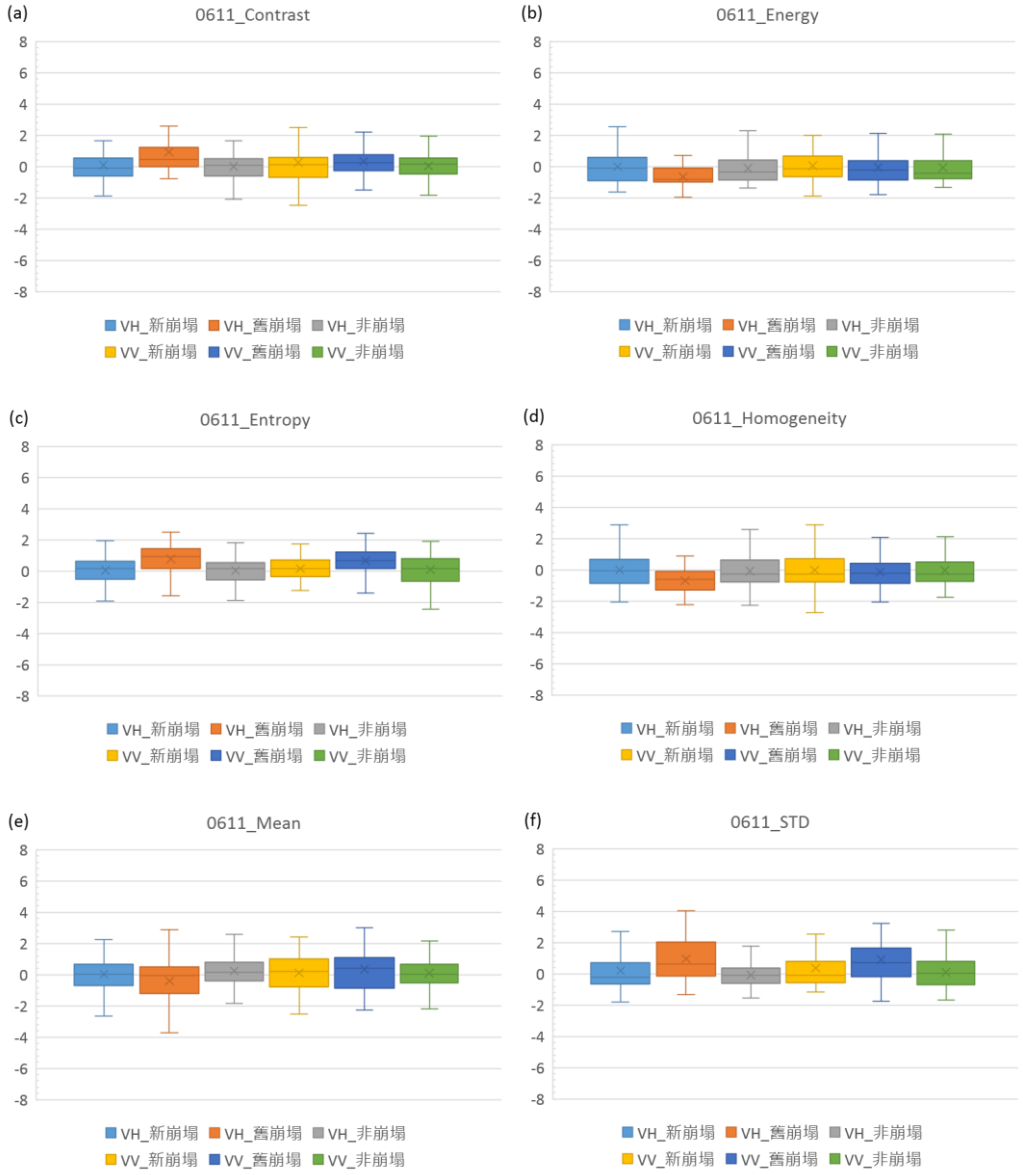


圖 3-9 0611 事件崩塌與非崩塌紋理比較，其中(A)為 Contrast，(B)為 Energy，(C)為 Entropy，(D)為 Homogeneity，(E)為 Mean，(F)為 STD

表 3-17 0611 紋理影像分類成果

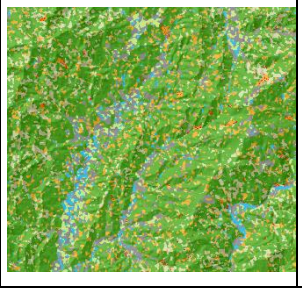
極化模式 / 分類模式	VH 極化	VV 極化	VH+VV 極化	N / 圖例
紋理特徵				圖例：新崩塌、舊崩塌、植被、水體、建地、農地

表 3-18 0611 紋理分類崩塌偵測率

崩塌面積	1-5 公頃		0.5-1 公頃		0.1-0.5 公頃		總計	
崩塌數量	6		13		49		68	
	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率	判釋數	偵測率
VH	6	100%	11	84.6%	27	55.1%	44	64.7%
VV	6	100%	11	84.6%	28	57.1%	45	66.2%
VH+VV	6	100%	10	76.9%	26	53.1%	42	61.8%

表 3-17 為 0611 事件利用紋理指標分類的成果，所有分類結果驗證得到的雷達影像分類之誤差矩陣以及其整體精度表整理於附錄五(圖資可參考附錄六)。由表 3-18 可以看出紋理指標在 0611 事件中的崩塌偵測率為 55.0%~64.4%之間，其中 0.5 公頃以下之崩塌偵測率亦能達 50%以上，而 VV 影像的紋理指標偵測效果較好，但配合分類成果來看，可以看出是還是有許多崩塌過判的問題，且就分類上，有部分新增崩塌被誤分為舊有崩塌。

三、小結

在本研究試驗了基於 NDSI 影像的紋理分析以及影像分類，不論是在蘇迪勒颱風事件或者是 0611 豪雨事件，可以發現崩塌地區的 NDSI 值較非崩塌地低，而 Contrast 和 Entropy 以及 STD 則有崩塌地高於非崩塌地的趨勢，說明崩塌地的雷達影像訊號之對比、差異、變異程度較非崩塌地大，此可歸因於崩塌地與鄰近地物(如林地)的訊號差異較大；而 Energy 和 Homogeneity 紋理與崩塌之關聯較不顯著，但大致上為崩塌地低於非崩塌地的趨勢，顯示崩塌的雷達影像訊號中能量強度低、不平均的特性。

比對蘇迪勒颱風事件以及 0611 暴雨事件之紋理分析以及分類成果後可以發現蘇迪勒颱風事件有較好的崩塌-紋理對應關係，儘管 0611 有較好的崩塌判釋率，但乃是由於其過度分類造成。本研究認為此問題主要來自於影像中新舊崩塌地混雜的問題。蘇迪勒事件之研究區內主要為新增崩塌，反之 0611 事件中，研究區有較多的舊有崩塌。本研究利用事件前後的 SPOT 影像來確立新增崩塌的區域，並擷取新增崩塌之分析樣本，並未考量降雨事件對舊有崩塌地的侵擾以及造成的再生崩塌。本研究認為這些再生崩塌應與新增崩塌有相似的雷達迴波特性，但在分析上卻被歸類為舊有崩塌，也因此進一步造成紋理分析與影像分類的偏誤，從 0611 事件的分類成果中也可以發現部分新增崩塌被誤分為舊有崩塌。因此，本研究認為，針對舊有崩塌的再發性問題的研究將有助於解決此新舊崩塌混雜的問題，進而增進分析樣本的正確性，減低崩塌判釋的誤差。

第四章 討論與建議

一、崩塌地雷達迴波多時序分析

透過本研究的分析可知，不同的觀測模式、崩塌地坡面與衛星觀測的相對幾何位置均會影響崩塌地迴波的強度，本研究透過融合升軌及降軌的影像來減低地形效應的影響，但此影像可特過分析地形坡向、坡度以及衛星姿態等參數來進行量化分析，因此本研究認為此類研究將極有助於山區雷達訊號的校正與後續分析應用。另外，就本研究的試驗案例，結果發現崩塌地面積小於 0.1 公頃時，崩塌地雷達迴波的變化則難以偵測出來，顯示出使用 Sentinel-1 C-band 雷達資料在崩塌地偵測上的限制性。

在分析成果上本研究得到 Sentinel-1 C-band 資料在建地上有較強的迴波強度，森林植被地區則往往會發生體散射(volume scattering)，相較於裸露地的表面散射(surface scattering)有較強的迴波強度，而水體之迴波強度則最低，此分析成果與過去相關研究一致。然而在多時期影像分析時，觀測資料有可能存在系統性的偏差，例如以本研究的案例來看，0611 事件的 T1 及 T5 中有系統性偏高的迴波強度。針對此問題，本研究認為可由基於雷達資料時序影像匹配技術來解決，也就是未來進行多時序的雷達資料分析時，應考慮如何將影像資料在時序上進行標準化。

二、依據多時序資料進行崩塌判釋

比較本研究設計之四種分類模式，不論從蘇迪勒事件還是 0611 事件的分類成果來看，模式一(T1-T6)配合 VH+VV 合併資料時，有最好的分類成果，特別是針對 0.5 公頃以上大小的崩塌，可以有相當好的判釋率。但若考慮即時災害資訊的掌控，此模式由於其需要收集相

當時距的災後影像，未必有利於快速判釋的工作。因此本研究也設計了模式二(T1-T4)、模式三(T3-T4)以及模式四(T4)，也就是試驗了在使用災害事件後最新一期雷達影像資料可取得的情況下的即時判釋情境。就本研究的試驗結果發現模式二在使用合併 VH+VV 資料時，不論是蘇迪勒事件還是 0611 事件，都有相當好的崩塌判釋率，顯示出本研究提出之多時序雷達影像判釋方法的應用價值。

三、依據影像紋理進行崩塌判釋

本研究的 NDSI 影像的紋理分析結果顯示，崩塌地區的 NDSI 值較非崩塌地區低，Contrast 和 Entropy 以及 STD 則在崩塌地高於非崩塌地，Energy 和 Homogeneity 為崩塌地低於非崩塌地的情形，顯示崩塌地的雷達影像訊號之對比、差異、變異程度較非崩塌大，能量強度低、均值性較非崩塌低。這樣的結果可歸因為崩塌地與鄰近地物(如林地)的訊號差異較大所造成。

從本研究得成果可以發現蘇迪勒颱風事件有較好的崩塌-紋理對應關係。本研究認為此差異主要來自於影像中新舊崩塌地混雜的問題。由於 0611 事件之研究區有較多的舊有崩塌，本研究在分析上並未考量降雨事件造成的再生崩塌，因此在分析上可能有樣本混雜的問題，也影響了紋理分析與影像分類的成果。因此本研究認為，如能將舊有崩塌與再生崩塌進行明確的區隔，可增進分析樣本的正確性，進而減低崩塌判釋的誤差。

四、雷達影像在崩塌判釋上的應用

根據本研究成果，不論是基於雷達時序影像或紋理影像的分析，都顯示了 C-band 雷達資料在崩塌判釋有極高的適用性，且不同於光學影像，雷達影像可適用在多雲霧的氣候條件下，更突顯了雷達遙測

資料的應用價值。另外，本研究乃是應用 Sentinel-1 C-band 的免費雷達資料，其他如 L-band 的雷達資料由於其波長較長，對林地有較好的穿透性，因此可能更適用於本研究提出之崩塌地偵測方法。但如同前述，如要精進以雷達影像為基礎的崩塌判釋技術，大氣、地形效應的校正、時序資料的標準化以及混和樣本的問題都是未來值得探索的研究方向。最後，本研究之多時序分析為針對影像時間變化、紋理分析則為針對影像空間變化的兩個獨立的分析方法，未來若能將此兩類方法進行結合，相信則更能提高崩塌判釋的效益與應用性。

第五章 結論

本研究完成了雷達影像資料收集以及影像前處理工作，並以蘇迪勒颱風事件與0611事件兩場災害，分別進行雷達迴波強度分析、多時序影像分析、雷達影像分類等分析，成果顯示崩塌地之雷達迴波強度在事件發生後都呈現降低的趨勢，且不論是升軌或降軌模式，都以VV極化模式可以顯現出事件前後的雷達迴波強度有較明顯的變化，但面積在0.1公頃以下的小型崩塌強度變化較不明顯。由於Sentinel-1影像升軌及降軌模式拍攝角度不同，本研究另外嘗試將升軌及降軌模式影像進行融合並觀察其迴波強度之變化，明顯消除了山區地形造成的迴波訊號不均的問題，不論是VH或VV極化資料，其迴波強度於崩塌前後之變化情形，都較單一軌道資料更為顯著。

在進行地物的多時序雷達迴波分析發現，不論是何種模式與極化資料，植被、水體和建地的迴波強度變化雖有波動，但起伏變化較崩塌為小，舊崩塌的迴波強度與水體相似，新生崩塌的迴波強度在災前都與植被的回波強度範圍接近，災後都有降低的現象；而不論何種軌道模式，VH 極化資料的迴波強度均比 VV 來得低。

在利用多時序雷達資料進行影像分類方面，四種模式中，以模式一(T1-T6)配合 VH+VV 合併資料有最佳分類成果，但若考慮即時、快速判釋的可能性時，則模式二(T1-T4)配合 VH+VV 資料在兩場事件針對 0.5 公頃以上的崩塌地，也有 75%以上的判釋率，而蘇迪勒事件的主要分類誤差為對崩塌地的過度分類，0611 則為崩塌的過度分類及新、舊崩塌的誤判。

NDSI 影像的紋理分析結果顯示，崩塌地的 NDSI 較非崩塌地區低，Contrast 和 Entropy 以及 STD 則在崩塌地高於非崩塌地，Energy 和 Homogeneity 為崩塌地低於非崩塌地的情形，顯示崩塌地的雷達影

像訊號之對比、差異、變異程度較非崩塌大，能量強度低、均值性較非崩塌低。分析成果中顯示蘇迪勒颱風事件在 1 公頃以上的崩塌判釋可達 87.5%，0611 事件則 0.5 公頃以上之崩塌可達 75%以上。

根據本研究成果，不論是基於雷達時序影像或紋理影像的分析，都顯示了C-band雷達資料在崩塌判釋有極高的適用性，但本研究認為未來若能使用時序性之L-band資料，由於其波長較長，對林地有較好的穿透性，因此可能更適用於本研究提出之崩塌地偵測方法。後續若要精進以雷達影像為基礎的崩塌判釋技術，必須考慮地形效應的校正、時序資料的標準化以及混和樣本等問題對資料分析造成之影像。最後，本研究之多時序分析及紋理分析在此研究為兩個獨立應用之分析方法，未來若能將此兩類方法進行結合，相信則更能提高崩塌判釋的效益與應用性。最後，本計畫期望此研究成果能有助於精進現有之山區崩塌災害監測方法，對我國崩塌災害管理與減災措施能有具體貢獻。

參考文獻

1. 王國隆、林俊廷（2014）運用 ALOS PALSAR 雷達影像之差分干涉成果於潛在崩塌地調查–以眉溪流域為例，航測及遙測學刊，19(3)：253-265。
2. 陳柔妃等（2015）運用雷達影像進行莫拉克颱風災區大規模潛勢區位之可行性評估，經濟部農委會水土保持局，計畫編號：SWCB-104-069。
3. Bovenga, F.; Wasowski, J.; Nitti, D.O.; Nutricato, R.; Chiaradia, M.T. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sens. Environ.* 2012, *119*, 272–285.
4. Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Hölbling, D., Füreder, P., Righini, G., Del Conte, S., Friedl, B., Schneiderbauer, S., Iasio, C., Vlcko, J., Greif, V., Proske, H., Granica, K., Falco, S., Lozzi, S., Morak, O., Arnaud, A., Novali, F., Bianchi, M., 2016. Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the EC-FP7 project SAFER, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4: 92-108.
5. Chiang SH., and Chang KT, 2011. The Potential Impact of Climate Change on Typhoon-Triggered Landslides in Taiwan, 2010-2099. *Geomorphology*, 133: 143-151.
6. Colesanti, C., Wasowski, J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.* 2006, *88*, 173–199.
7. Correa-Muñozl, N. A., Murillo-Feo, C. A., 2018. Detection of

Landslides with SAR Polarymetry: Case Study of South-eastern Colombia. *The International Archives of the Photogrammetry*, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W4, GeoInformation for Disaster Management. Istanbul, Turkey.

8. EAS Sentinel 1 web: https://sentinel.esa.int/
9. Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K. T., 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem, *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66
10. Hopper, A., Zebker, H. A., Segall, P., Kampes, B., 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, *31*, L23611.
11. Konishi, T., Suga, Y., 2018. Landslide detection using COSMOSkyMed images: a case study of a landslide event on Kii Peninsula, Japan, European Journal of Remote Sensing, 51:1, 205-221, DOI: 10.1080/22797254.2017.1418185
12. Lee, J.S.,1981. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. Computer Graphics and Image Processing, Vol.17:24-32.
13. Mondini, A. C., 2017. Measures of Spatial Autocorrelation Changes in Multitemporal SAR Images for Event Landslides Detection, *Remote Sensing*, 9(6), 554; doi:10.3390/rs9060554.
14. Mondini, A. C., Chang, K. T., Chiang, S. H., Schlögel, R., Notarnicola, C., Saito, H., 2017. Automatic mapping of event landslides at basin scale in Taiwan using a Montecarlo approach and synthetic land cover fingerprints. *International Journal of Applied*

Earth Observation and Geoinformation, 63: 112-121.

15. Raspini, F.; Moretti, S.; Fumagalli, A.; Rucci, A.; Novali, F.; Ferretti, A.; Prati, C.; Casagli, N. The COSMO-SkyMed constellation monitors the Costa Concordia wreck. *Remote Sens.* 2014, *6*, 3988–4002.
16. Shibayama, T., Yamaguchi, Y., Yamada, H., 2015. Polarimetric Scattering Properties of Landslides in Forested Areas and the Dependence on the Local Incidence Angle. *Remote Sens*. 7, 15424-15442; doi:10.3390/rs71115424.
17. Shimada, M., Watanabe, M., Kawano, N., Ohki, M., Motooaka, T., 2014. Detecting Mountainous Landslides by SAR Polarimetry: A Comparative Study Using Pi-SAR-L2 and X-band SARs. *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* Vol. 12, No. ists29, pp. 9-15.
18. Yamaguchi, Y., Moriyama, T., Ishido, M., Yamada, H. 2005. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 43, 1699–1706.

附錄

附錄一、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	本研究之影像紋理之意義與擬研究影像紋理的哪些特性，宜加說明。建議可多加探討觀測雜訊的由來？	謝謝委員建議，雜訊也可能是一種紋理因素，本計畫希望透過找出規律來區別崩塌與林地等不同地貌。相關說明已補充於第二章第二節。
二	關於紋理特性如何和現場狀態結合？本計畫如何在現地加以驗證？（以何種資料為真值？）	本研究希望最後能製作一個模式來應用於崩塌地判釋上。在模式訓練完成後，加入不同的樣本數以完成成果報告，並輔以易到達之現地做比對，檢討判釋結果較差的部分並修正模式。
三	人為開發之裸露地與崩塌能否區隔呢？河岸崩塌及河床變遷是否可納入與研判？	裸露地在事件前後都為裸露地，迴波較不會發生變化；而崩塌則為事件後變為裸露地。 河岸崩塌及河床變遷，後續可以地形為輔助加以分類研判。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	降雨崩塌區分為新崩塌、舊崩塌、舊崩塌地擴大等不同狀況，而本研究係指何者？或是本研究可否研判這些類似的差異？（NDSI分析精度為何？）	本研究中蘇迪勒颱風事件的研究區內大多都為新崩塌，611 豪雨事件的研究區內所研究的為新崩塌及舊崩塌擴大的部分。NDSI 空間解析度為 10 公尺，目前分析發現 0.1 公頃以下之崩塌較難區判。
五	建議判釋仍以0.1 ha以上之崩塌為判釋對象，以利與光學判釋結果做比對。	謝謝委員意見。
六	表3-2(P3-21)成果宜與水保局土砂災害成果相比較。	謝謝委員意見。
七	崩塌地所在位置的坡度坡向是否影響判釋結果？對於地行急遽變化地區是否有誤判的可能？	如委員指出，坡度坡向的確會影像判釋結果，因此本計畫以亮暗面來區分，並整合身軌及降軌模式來克服此問題。
八	影像取得的時間是否有限制？本研究以臺灣地區為範圍，其分析時需要多久呢？	單一模式下取得影像約為 12 天，兩個模式拍攝臺灣的時程有交互間隔，因此大約每 6 天就能取得一幅影像。影像前處理大約半天即能完成。

項次	審查意見	回覆辦理情形
九	P2-3 所提到的 246gis 平台已移至本局 BigGIS 平台(**http://gis.swcb.gov.tw/**)	謝謝委員意見。
十	P2-3 既已引用 246gis 之先後崩塌地治理，為何 P3-1 第一節又要自己判釋？	因為雷達影像拍攝角度的因素，崩塌在雷達影像上可能有變形移位的問題，因此以光學影像上的崩塌位置為基礎，藉定崩塌在雷達影像上的位置。
十一	Sentinel-1 有 A.B，為何只使用 A 衡量？	臺灣地區目前僅有 Sentinel-1A 的影像資料可以取得。
十二	圖 3-10(P3-11)pixel value 與 probability 之定義為何？	Pixel value 應為迴波強度，單位為 dB。Probability 應為 percentage。

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：		
一	第二章第一節與第三節與之前作者執行水土保持局委託研究計畫：SWCB-106-057相同，建議列出參考文獻。	謝謝委員建議。已列參考文獻姜壽浩(2017) 應用 Sentinel-1 合成孔徑雷達影像對舊有崩塌進行再發性評估，農委會水土保持局 106 年新創計畫，SWCB-106-057。
二	李式濾波器(Lee,1981)，未見於參考文獻中。註：Lee, J.S.,1981. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. Computer Graphics and Image Processing, Vol.17:24-32.?	謝謝委員建議，會於參考文獻中補上。
三	P.2-11(4)與(7)式中，移動窗格內(中)的平均值(標準差)，係指什麼的平均值(標準差)？	本研究認為影像中的每個像元與其臨近的像元的值均有關聯，故取任一像元為中心向外取 n*n 的矩陣(n 必為奇數)，計算矩陣內之平均值(標準差)，所得之值即為該中心像元之值，進而重新計算整張影像。

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	表3-3與3-4宜將：(1)前提假設：虛無假說(Null hypothesis)與對立假說(alternative hypothesis)(2)選擇T檢定的原因，以及(3)判斷接受或翻需無假設等，與表中"-"之意義，宜詳加以說明。	謝謝委員意見，相關說明補充於 P.3-4 與 P.3-5。
五	表3-7~3-9中數據如何獲得？生產與使用者精度、整體精度與Kappa係數等專詞之定義及其物理意義為何？宜加說明。	表3-7~3-9已重新整理於附錄五，其為比較分類成果與地真資料之結果。專詞定義及說明補充於第二章第三節。
六	如何建立一套以雷達資料為基礎的崩塌地判釋方法(P.1-7)係本研究主要目的？以之，判釋準則、實施程序與證明其具可行性，宜是期末報告之重點。	謝謝委員意見。已於本期末報告研究成果中加強說明。
七	建議納入分析人為土地利用之地表裸露，俾便與自然崩塌之迴波訊號及影像紋理比較。	謝謝委員意見，因蘇迪勒事件中的崩塌情形較為單純，均為新生崩塌，故沒有做相關比較。本研究之 611 事件研究區中有新生與舊有崩塌，可分析兩者迴波訊號及影像紋理之比較。

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：		
一	建議研究步驟可繪製流程圖俾利了解。	謝謝委員意見。流程圖補充於P.2-9。
二	Sentinel多時序評估是否可提高到降雨歷程的判別(同地點重複比較)？請說明。	若為單場降雨事件則無法進行降雨歷程的判別，由於影像之時間解析度為6-12日。
三	雷達影像於山區定位不易，此計畫如何解決定位誤差問題？請說明	本研究利用歐洲太空總署開發之應用軟體SNAP配合我國內政部20公尺全台數值地形模型，進行影像之幾何校正，並且於山區選取強反射之地物作為地面控制點進行精度評估，定位誤差在10公尺(一個像元)以內。
四	影像融合、移除地形效應是否有誤差產生？有無校正誤差方式？請說明。	此方法之主要誤差的來源為融合二幅不同影像時，則有兩個不同之迴波訊號，本研究採取使用平均值時則有將不良訊號混和的可能性，未來將提出一個依照地形與衛星觀測幾何的校正方式來確保影像訊號的可靠性。

項次	審查意見	回覆辦理情形
五	以雷達迴波訊號取得分析是否較為方便或更有效益？請說明。	以雷達影像進行分析的最大優勢為不受天候、雲霧的限制。光學影像若因雲霧影像造成取像時間與事件時間間隔較長時，有無法做出即時應用的限制。
六	雷達影像判釋是否可與傳統方法比較？另，其判釋精度與可靠性如何？請說明。	光學影像分類是依據影像的多光譜特性，分類精度較高；雷達影像分類則是依據地表粗糙度，分類精度較低，但應用本研究提出之多時序判釋方法，仍然能有不錯的成果。使用光學影像進行分類需使用無雲影像，而雷達影像可於災害發生後取的離事件較近之影像，做出即時應用。
七	事件發生前後資料對照時序間隔是否影響評估結果？請說明。	本研究選取之影像在時間區間內為確立期間沒有發生其他災害事件，因此原則上不會影響評估結果。

項次	審查意見	回覆辦理情形
八	迴波強度門檻值不易準確率定，建議偵測率要定義清楚。	感謝委員建議，本研究並無使用迴波強度作為判釋門檻值，偵測率即為被準確偵測之崩塌所佔全部崩塌之比例。
九	迴波強度是求取平均或以哪個像元素計算？請說明。	崩塌之迴波強度為崩塌所涵蓋之像元平均，其餘地物為隨機點坐落之像元值。
十	融合影像作法，國內外之類似研究，其優缺點及限制性為何？請說明。	影像融合作法目前多為執行光學影像與雷達影像融合，本研究為將日期相近之不同模式(升軌及降軌模式)的迴波強度進行整合，由於不同的模式的觀測角度來互補山區暗面側的訊號，此一方法為一創新做法。優點在於避免使用單一觀測資料常存在的山區陰影問題，而限制性則為兩組觀測資料的時距不宜過長，並且在觀測方向上應為互補為宜，若在同一方向觀測則不具優勢。
十一	圖 3-4，多數折線由 T3→T4 均呈現下降，為何只有	迴波強度下降係指崩塌於事件發生後所觀察到之現象，植

項次	審查意見	回覆辦理情形
	Vegetation-VH 反而上升，似不符合崩塌後迴波強度下降之原則？請說明。	植被的迴波強度於事件發生前後應變化不大，或於一定強度區間內變化，圖 3-4 之 Vegetation-VH 強度上升為正常變化現象。
十二	雷達影像取得較貴，如何限制或有效地推動這方面的工作？請說明。	正基於一般商用雷達影像取得較昂貴，本研究應用目前唯一免費可取得 Sentunel-1 C-band 資料進行試驗。在其資料免費且固定可以獲取時序資料的優勢下，本研究提出多時序雷達資料的判釋方法。但也建議與其他有執行雷達衛星監測的機構進行合作，如本研究團隊所屬單位與日本 RESTEC 的合作研究發展計畫下可取得 ALOS 及 ALOS-2 的 L-band 雷達資料。
十三	研究成果建議利用混淆矩陣分析了解正判、誤判之相對比率。	謝謝委員意見，相關資料整理於附錄五。

附錄四、SPOT6-7 光學衛星及 Sentinel-1 雷達衛星資料表

一、SPOT6-7

編號	拍攝日期	影像編號	影像類別	事件
1	2014/09/30	CSR_P0018108_SP6H1M_20140930	SPOT6	蘇迪勒颱風
2	2015/11/28	CSR_P0021594_SP7H1M_20151128	SPOT7	611 豪雨
3	2016/02/08	CSR_P0021847_SP6H1M_20160208	SPOT6	蘇迪勒颱風
4	2016/11/19	CSR_A0000424_SP7H1M_20161119	SPOT7	611 豪雨

二、Sentinel-1

編號	拍攝日期	影像編號	模式	極化	最近入射角(度)	最遠入射角(度)	方位角	Slant(公尺)
1	2015/04/23	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150422T215147_20150422T215216_005602_0072C2_163A	De	VH/VV	31.009	46.131	-167.616	799338.145
2	2015/05/02	S1A_IW_GRDH_1SSV_20150502T100050_20150502T100118_005741_0075EF_3565	As	VV	30.773	45.952	-12.390	799254.28
3	2015/05/17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150516T215149_20150516T215217_005952_007AB4_EBA0	De	VH/VV	31.006	46.13	-167.616	799339.378
4	2015/05/26	S1A_IW_GRDH_1SSV_20150526T100051_20150526T100119_006091_007E46_8D2D	As	VV	30.773	45.953	-12.391	799255.513
5	2015/06/10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150609T215150_20150609T215219_006302_008459_1191	De	VH/VV	31.011	46.133	-167.616	799339.378
6	2015/06/19	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150619T100052_20150619T100117_006441_008853_7605	As	VH/VV	30.779	45.973	-12.390	799257.688

7	2015/07/01	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150701T100052_20150701T100117_006616_008D2B_0017	As	VH/VV	30.779	46.201	-12.390	799257.688
8	2015/07/04	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150703T215151_20150703T215220_006652_008E1A_877A	De	VH/VV	31.015	46.135	-167.617	799339.378
9	2015/07/13	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150713T100053_20150713T100118_006791_009211_023A	As	VH/VV	30.777	45.972	-12.390	799257.688
10	2015/07/25	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150725T100054_20150725T100119_006966_009711_8A5B	As	VH/VV	30.783	46.204	-12.391	799257.688
11	2015/07/28	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150727T215152_20150727T215221_007002_009815_5987	De	VH/VV	31.012	46.133	-167.616	799339.378
12	2015/08/06	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150725T100054_20150725T100119_006966_009711_8A5B	As	VH/VV	30.785	45.977	-12.391	799257.688
13	2015/08/18	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150818T100055_20150818T100120_007316_00A0AB_68F0	As	VH/VV	30.777	46.199	-12.391	799257.688
14	2015/08/21	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150820T215153_20150820T215222_007352_00A198_7C61	De	VH/VV	31.013	46.134	-167.617	799339.378
15	2015/08/30	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150830T100055_20150830T100120_007491_00A56E_96E0	As	VH/VV	30.78	45.974	-12.390	799257.688
16	2015/09/11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150911T100056_20150911T100121_007666_00AA37_3F36	As	VH/VV	30.779	46.201	-12.390	799257.688
17	2015/09/14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150913T215154_20150913T215223_007702_00AB1B_FDFF	De	VH/VV	31.016	46.136	-167.617	799339.378
18	2015/10/05	S1A_IW_GRDH_1SDV_20151005T100056_20151005T100121_008016_00B389_D355	As	VH/VV	30.781	46.048	-12.392	799257.688

19	2015/10/08	S1A_IW_GRDH_1SDV_20151007T215155_20151007T215224_008052_00B472_88DE	De	VH/VV	31.013	46.134	-167.616	799339.378
20	2015/10/17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20151017T100056_20151017T100121_008191_00B83F_A723	As	VH/VV	30.782	45.975	-12.391	799257.688
21	2015/11/01	S1A_IW_GRDH_1SDV_20151031T215155_20151031T215224_008402_00BDE5_BE10	De	VH/VV	31.009	46.132	-167.617	799339.378
22	2015/11/10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20151110T100056_20151110T100113_008541_00C18F_6C32	As	VH/VV	30.801	45.972	-12.376	799255.513
23	2015/11/22	S1A_IW_GRDH_1SDV_20151122T100050_20151122T100115_008716_00C689_C2EC	As	VH/VV	30.811	46.07	-12.377	799257.688
24	2015/11/25	S1A_IW_GRDH_1SDV_20151124T215149_20151124T215218_008752_00C779_6109	De	VH/VV	30.875	46.027	-167.604	799339.378
25	2016/02/29	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160228T215215_20160228T215249_010152_00EF92_5E06	De	VH/VV	30.91	46.051	-167.668	799339.378
26	2016/03/09	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160309T100019_20160309T100048_010291_00F392_C84D	As	VH/VV	30.883	46.038	-12.318	799255.513
27	2016/03/21	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160321T100019_20160321T100048_010466_00F887_731A	As	VH/VV	30.883	46.141	-12.318	799257.688
28	2016/03/24	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160323T215216_20160323T215250_010502_00F983_40E4	De	VH/VV	30.914	46.053	-167.670	799339.378
29	2016/04/14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160414T100020_20160414T100049_010816_0102D1_93AE	As	VH/VV	30.887	46.129	-12.320	799257.688
30	2016/04/17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160416T215217_20160416T215251_010852_0103DB_C0F4	De	VH/VV	30.911	46.051	-167.669	799339.378

31	2016/05/08	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160508T100021_20160508T100050_011166_010DB9_ADC5	As	VH/VV	30.887	46.277	-12.318	799257.688
32	2015/05/11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160510T215221_20160510T215255_011202_010ED4_13B1	De	VH/VV	30.889	46.034	-167.675	799339.378
33	2016/05/20	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160520T100022_20160520T100051_011341_011360_33E2	As	VH/VV	30.885	46.035	-12.318	799255.513
34	2016/06/01	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160601T100023_20160601T100052_011516_011918_D832	As	VH/VV	30.885	46.276	-12.318	799257.688
35	2016/06/04	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160510T215221_20160510T215255_011202_010ED4_13B1	De	VH/VV	30.889	46.033	-167.676	799339.378
36	2016/06/13	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160613T100023_20160613T100052_011691_011E8E_252F	As	VH/VV	30.884	46.034	-12.319	799255.513
37	2016/06/28	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160627T215223_20160627T215257_011902_012539_52B0	De	VH/VV	30.888	46.032	-167.675	799339.378
38	2016/07/07	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160707T100025_20160707T100054_012041_0129BA_2114	As	VH/VV	30.886	46.035	-12.318	799255.513
39	2016/07/19	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160719T100025_20160719T100054_012216_012F6C_251F	As	VH/VV	30.888	46.278	-12.318	799257.688
40	2016/07/22	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160721T215225_20160721T215259_012252_013091_CE30	De	VH/VV	30.888	46.032	-167.676	799339.378
41	2016/07/31	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160731T100026_20160731T100055_012391_01352B_3AFF	As	VH/VV	30.883	46.033	-12.319	799255.513
42	2016/08/12	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160812T100027_20160812T100056_012566_013AFC_EB5B	As	VH/VV	30.888	46.13	-12.319	799257.688

43	2016/08/15	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160814T215226_20160814T215300_012602_013C26_CB7C	De	VH/VV	30.888	46.032	-167.675	799339.378
44	2016/08/24	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160824T100027_20160824T100056_012741_0140D8_25E2	As	VH/VV	30.888	46.036	-12.320	799255.513
45	2016/09/05	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160905T100028_20160905T100057_012916_0146AF_0B2E	As	VH/VV	30.887	46.056	-12.319	799257.688
46	2016/09/08	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160907T215227_20160907T215301_012952_0147CA_1EF3	De	VH/VV	30.887	46.032	-167.675	799339.378
47	2016/09/17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160917T100044_20160917T100109_013091_014C55_7BF2	As	VH/VV	30.884	46.138	-12.343	799042.037

二、Sentinel-1 影像統計

影像 / 事件	Ascending		Descending		小計
	VH	VV	VH	VV	
蘇迪勒颱風 (2015)	12	14	10	10	46
2016 611 豪雨	14	14	9	9	46
小計	26	28	19	19	**92**

附錄五、影像分類精度檢核表

一、蘇迪勒事件影像分類精度

模式一：全序列影像模式分類精度表

VH 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	76	4	3	83	91.57%
	植生	181	175	3	359	48.75%
	水體	17	2	39	58	67.24%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		27.74%	96.69%	86.67%		
總精度 58.00%			KAPPA：0.342			

VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	93	0	5	98	94.90%
	植生	160	180	4	344	52.33%
	水體	21	1	36	58	62.07%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		33.94%	99.45%	80.00%		
總精度 61.80%			KAPPA：0.397			

VH+VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	121	4	4	129	93.80%
	植生	140	176	5	321	54.83%
	水體	13	1	36	50	72.00%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		44.16%	97.24%	80.00%		
總精度 66.60%			KAPPA：0.459			

模式二：即時監測模式分類精度表

VH 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	80	2	4	86	93.02%
	植生	187	179	4	370	48.38%
	水體	7	0	37	44	84.09%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		29.2%	98.90%	82.22%		
總精度 59.20%			KAPPA：0.352			

VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	81	1	3	85	95.29%
	植生	183	180	5	368	48.91%
	水體	10	0	37	47	78.72%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		29.56%	99.45%	82.22%		
總精度 59.60%			KAPPA：0.361			

VH+VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	117	11	2	130	90.00%
	植生	142	169	1	312	54.17%
	水體	15	1	42	58	72.41%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		42.70%	93.37%	93.33%		
總精度 65.60%			KAPPA：0.459			

模式三：變遷分析模式分類精度表

VH 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	103	5	2	110	93.64%
	植生	164	175	3	342	51.17%
	水體	7	1	40	48	83.33%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		37.59%	96.69%	88.89%		
總精度 63.60%			KAPPA：0.416			

VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	79	3	0	82	96.34%
	植生	187	177	3	367	48.23%
	水體	8	1	42	51	82.35%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		28.83%	97.79%	93.33%		
總精度 59.60%			KAPPA：0.364			

VH+VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	100	10	2	112	89.29%
	植生	166	171	7	344	49.71%
	水體	8	0	36	44	81.82%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		36.50%	94.48%	80.00%		
總精度 61.40%				KAPPA：0.378		

模式四：事件後迴波模式分類精度表

VH 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	49	0	3	52	94.23%
	植生	219	181	6	406	44.58%
	水體	6	0	36	42	85.71%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		17.88%	100.00%	80.00%		
總精度 53.20%			KAPPA：0.270			

VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	69	2	2	73	94.52%
	植生	198	179	6	383	46.74%
	水體	7	0	37	44	84.09%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		25.18%	98.90%	82.22%		
總精度 57.00%			KAPPA：0.323			

VH+VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	90	9	4	103	87.38%
	植生	182	172	3	357	48.18%
	水體	2	0	38	40	95.00%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		32.85%	95.03%	84.44%		
總精度 60.00%			KAPPA：0.356			

二、0611 事件影像分類精度

模式一：全序列影像模式分類精度表

VH 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	21	2	3	0	1	0	27	77.78%
	舊崩塌	12	34	5	0	0	0	51	66.67%
	植被	56	52	141	1	1	2	253	55.73%
	水體	8	2	1	38	2	0	51	74.51%
	建地	5	4	7	3	21	15	55	38.18%
	農地	5	0	1	2	12	43	63	68.25%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		19.63%	36.17%	89.24%	86.36%	56.76%	71.67%		
總精度 59.60%					KAPPA：0.480				

VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	34	4	3	0	0	0	41	82.93%
	舊崩塌	18	42	4	0	0	0	64	65.63%
	植被	43	44	144	1	2	2	236	61.02%
	水體	7	1	2	33	8	13	64	51.56%
	建地	0	0	2	1	16	3	22	72.73%
	農地	5	3	3	9	11	42	73	57.53%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		31.78%	44.68%	91.14%	75.00%	43.24%	70.00%		
總精度 62.20%					KAPPA：0.514				

VH+VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	38	4	6	0	1	1	50	76.00%
	舊崩塌	15	65	8	0	0	0	88	73.86%
	植被	42	21	141	2	1	1	208	67.79%
	水體	6	0	0	38	0	2	46	82.61%
	建地	3	2	1	1	24	11	42	57.14%
	農地	3	2	2	3	11	45	66	68.18%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		35.51%	69.15%	89.24%	86.36%	64.86%	75.00%		
總精度 70.20%					KAPPA：0.620				

模式二：即時監測模式分類精度表

VH 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	15	1	0	0	0	0	16	93.75%
	舊崩塌	20	37	6	0	0	0	63	58.73%
	植被	54	50	142	1	3	2	252	56.35%
	水體	6	2	1	38	3	3	53	71.70%
	建地	6	2	8	1	15	10	42	35.71%
	農地	6	2	1	4	16	45	74	60.81%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		14.02%	39.36%	89.87%	86.36%	40.54%	75.00%		
總精度 58.40%					KAPPA：0.465				

VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	39	10	20	0	2	0	71	54.93%
	舊崩塌	21	44	8	0	0	0	73	60.27%
	植被	33	35	123	2	1	2	196	62.76%
	水體	9	3	1	39	14	24	90	43.33%
	建地	3	2	5	2	16	10	38	42.11%
	農地	2	0	1	1	4	24	52	75.00%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		36.45%	46.81%	77.85%	88.64	43.24%	40.00%		
總精度 57.00%					KAPPA：0.455				

VH+VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	29	0	6	0	1	0	36	80.56%
	舊崩塌	24	62	11	0	0	0	97	63.92%
	植被	43	27	137	2	1	3	213	64.32%
	水體	2	1	0	36	1	1	41	87.80%
	建地	3	2	2	0	19	10	36	52.78%
	農地	6	2	2	6	15	46	77	59.74%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		27.10%	65.96%	86.71%	81.82%	51.35%	76.67%		
總精度 65.80%					KAPPA：0.563				

模式三：變遷分析模式分類精度表

VH 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	23	0	4	0	0	0	27	85.19%
	舊崩塌	38	68	22	0	1	0	129	52.71%
	植被	31	19	127	2	3	2	184	69.02%
	水體	6	3	0	33	2	2	46	71.74%
	建地	6	4	4	3	20	24	61	32.79%
	農地	3	0	1	6	11	32	53	60.38%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		21.50%	72.34%	80.38%	75.00%	54.05%	53.33%		
總精度 60.60%					KAPPA：0.504				

VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	21	3	8	0	0	0	32	65.63%
	舊崩塌	46	68	18	0	1	0	133	51.13%
	植被	24	18	127	2	2	2	175	72.57%
	水體	11	2	2	30	8	19	72	41.67%
	建地	3	3	2	2	18	16	44	40.91%
	農地	2	0	1	10	8	23	44	52.27%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		19.63%	72.34%	80.38%	68.18%	48.65%	38.33%		
總精度 57.40%					KAPPA：0.465				

VH+VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	39	4	8	0	2	2	55	70.91%
	舊崩塌	33	68	17	0	0	0	118	57.63%
	植被	26	17	131	3	1	2	180	72.78%
	水體	3	1	0	32	0	2	38	84.21%
	建地	2	4	1	2	19	14	42	45.24%
	農地	4	0	1	7	15	40	67	59.70%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		36.45%	72.34%	82.91%	72.73%	51.35%	66.67%		
總精度 65.80%					KAPPA：0.567				

模式四：事件後迴波模式分類精度表

VH 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	8	1	2	0	0	0	11	72.73%
	舊崩塌	41	65	19	0	1	0	126	51.59%
	植被	40	23	134	3	4	2	206	65.05%
	水體	4	1	0	31	0	2	38	81.58%
	建地	9	4	2	1	13	13	42	30.95%
	農地	5	0	1	9	19	43	77	55.84%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		7.48%	69.15%	84.81%	70.45%	35.14%	71.67%		
總精度 58.80%					KAPPA：0.476				

VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	17	5	4	0	0	0	26	65.38%
	舊崩塌	43	58	16	0	1	0	118	49.15%
	植被	30	27	135	2	4	3	201	67.16%
	水體	7	2	0	28	6	15	58	48.28%
	建地	7	2	2	3	13	7	34	38.24%
	農地	3	0	1	11	13	35	63	55.56%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		15.89%	61.70%	85.44%	63.64%	35.14%	58.33%		
總精度 57.20%					KAPPA：0.456				

VH+VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	20	5	5	0	0	0	30	66.67%
	舊崩塌	33	66	15	0	0	0	114	57.89%
	植被	37	18	135	1	3	2	196	68.88%
	水體	5	1	0	34	1	2	43	79.07%
	建地	7	4	2	1	15	12	41	36.59%
	農地	5	0	1	8	18	44	76	57.89%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		18.69%	70.21%	85.44%	77.27%	40.54%	73.33%		
總精度 62.80%					KAPPA：0.528				

三、紋理分類精度

蘇迪勒事件影像紋理分類精度

VH 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	64	5	4	73	87.67%
	植生	180	175	3	358	48.88%
	水體	30	1	38	69	55.07%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		23.36%	96.69%	84.44%		
總精度 55.40%			KAPPA：0.312			

VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	53	2	3	58	91.38%
	植生	187	175	3	365	47.95%
	水體	34	4	39	77	50.65%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		19.34%	96.69%	86.67%		
總精度 53.40%			KAPPA：0.292			

VH+VV 極化		地真			加總	使用者精度
		崩塌	植生	水體		
分類	崩塌	51	0	3	54	94.44%
	植生	189	181	5	375	48.27%
	水體	34	0	37	71	52.11%
	加總	274	181	45	500	
生產者精度		18.61%	100.00%	82.22%		
總精度 53.80%			KAPPA：0.296			

0611 事件影像分類精度

VH 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	52	8	23	0	1	2	86	60.47%
	舊崩塌	20	54	24	0	0	0	98	55.10%
	植被	23	26	101	1	0	1	152	66.45%
	水體	3	3	4	29	4	5	48	60.42%
	建地	8	3	5	5	23	36	80	28.75%
	農地	1	0	1	9	9	16	36	44.44%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		48.60%	57.45%	63.92%	65.91%	62.16%	26.67%		
總精度 55.00%					KAPPA：0.438				

VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	49	6	19	1	2	1	78	62.82%
	舊崩塌	22	44	10	0	0	0	76	57.89%
	植被	28	39	126	1	0	1	195	64.62%
	水體	4	2	1	27	3	9	46	58.70%
	建地	4	3	2	8	24	20	61	39.34%
	農地	0	0	0	7	8	29	44	65.91%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		45.79%	46.81%	79.75%	61.36%	64.86%	48.33%		
總精度 59.80%					KAPPA：0.489				

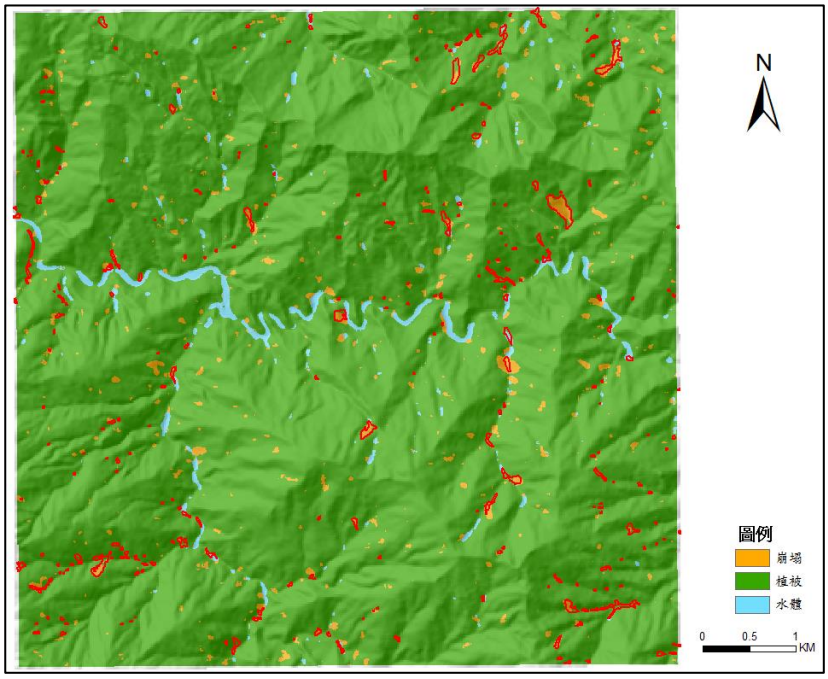
VH+VV 極化		地真						加總	使用者精度
		新崩塌	舊崩塌	植被	水體	建地	農地		
分類	新崩塌	44	5	10	0	1	1	61	72.13%
	舊崩塌	15	40	8	0	0	0	63	63.49%
	植被	38	44	132	1	2	3	220	60.00%
	水體	5	2	4	34	1	3	49	69.39%
	建地	2	2	1	5	29	10	49	59.18%
	農地	3	1	3	4	4	43	58	74.14%
	加總	107	94	158	44	37	60	500	
生產者精度		41.12%	42.55%	83.54%	77.27%	78.38%	71.67%		
總精度 64.40%					KAPPA：0.544				

附錄六、分類成果與紋理影像圖資

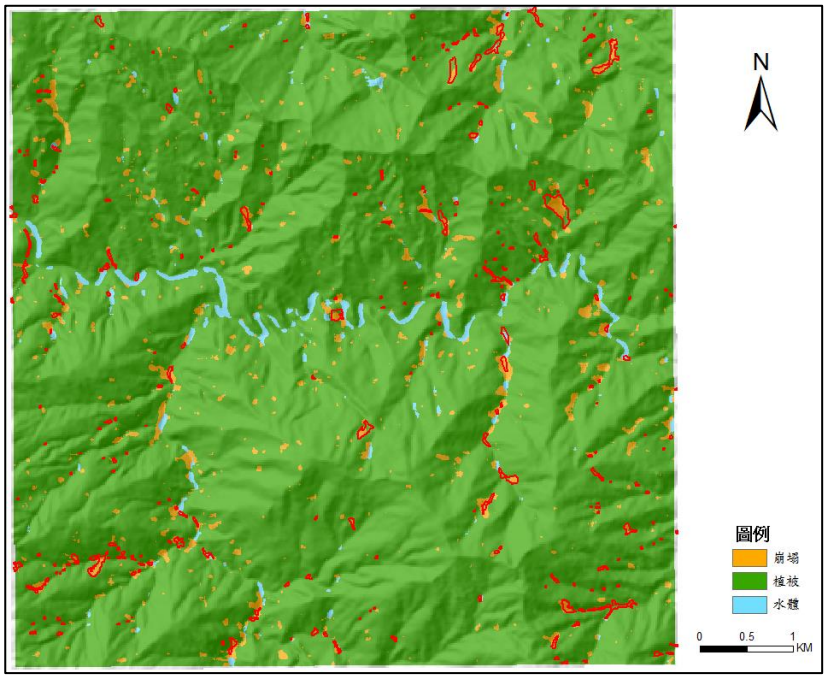
一、蘇迪勒事件多時序影像分類

1. 模式一：全序列分類(T1-T6)

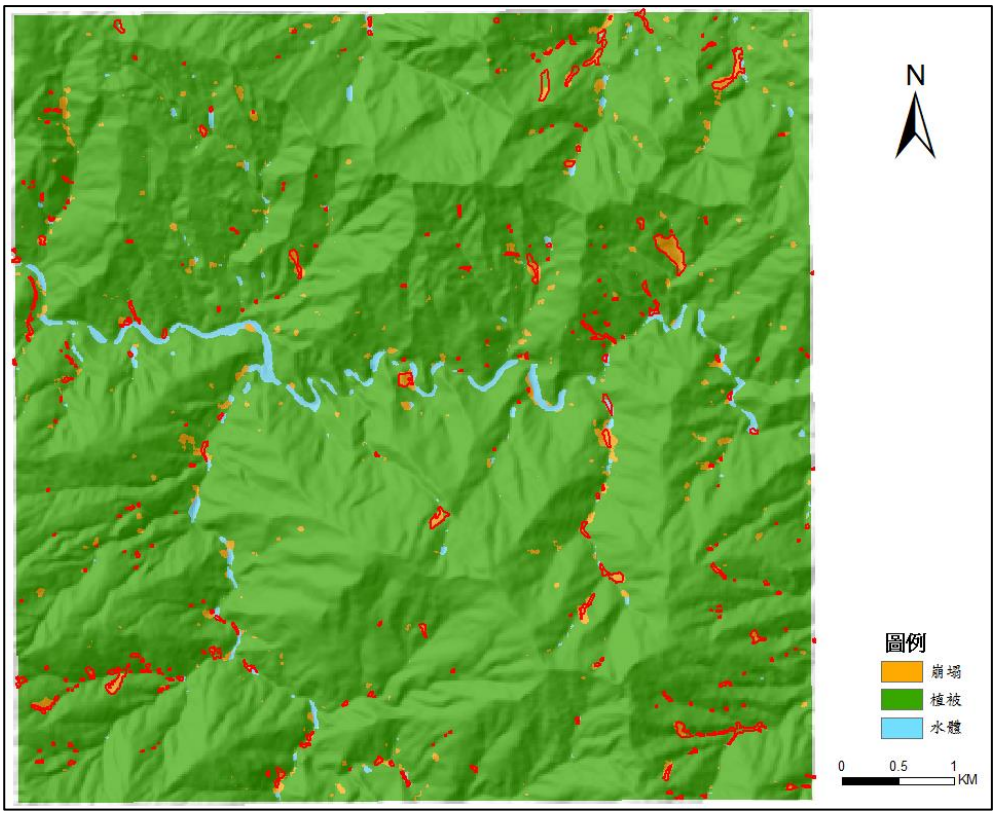
VH 極化



VV 極化

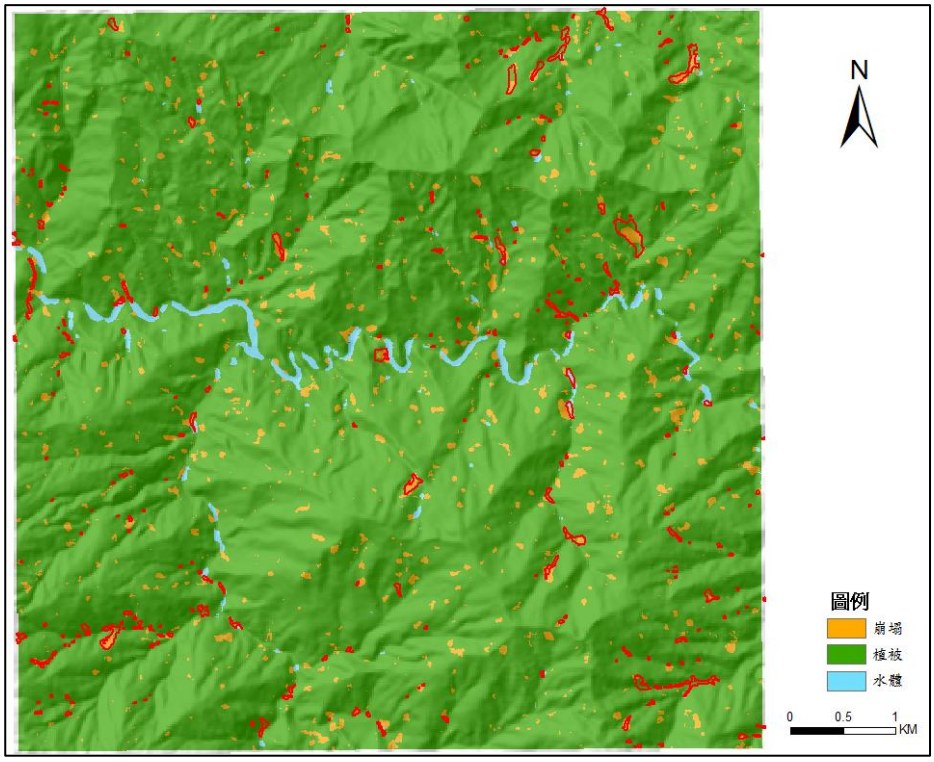


VH+VV

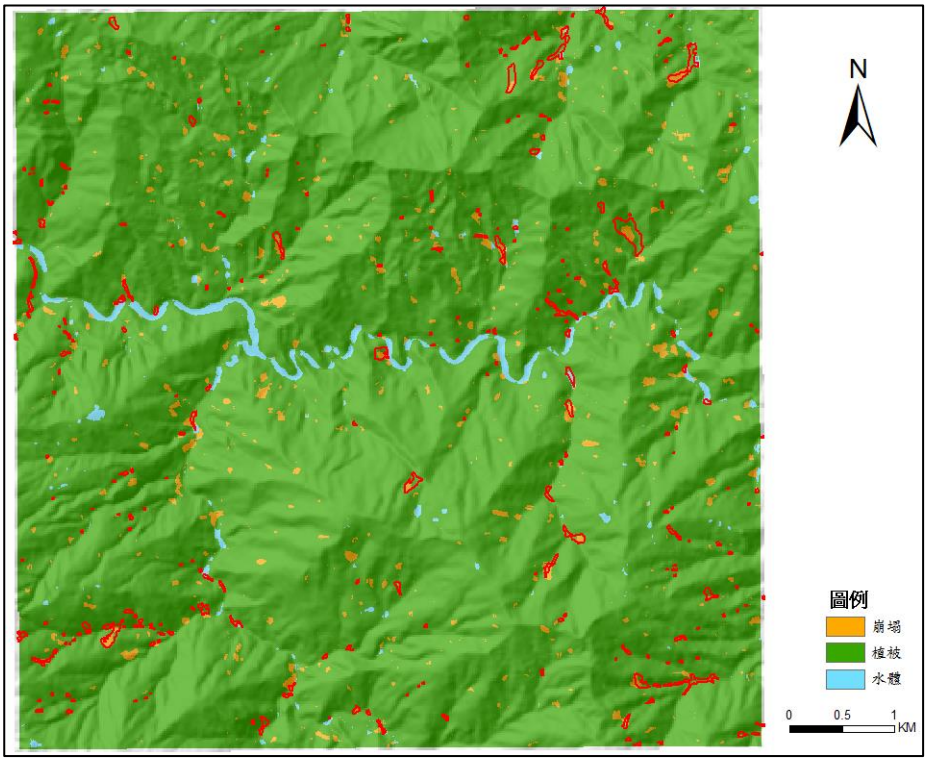


2. 模式二：即時監測分類(T1-T4)

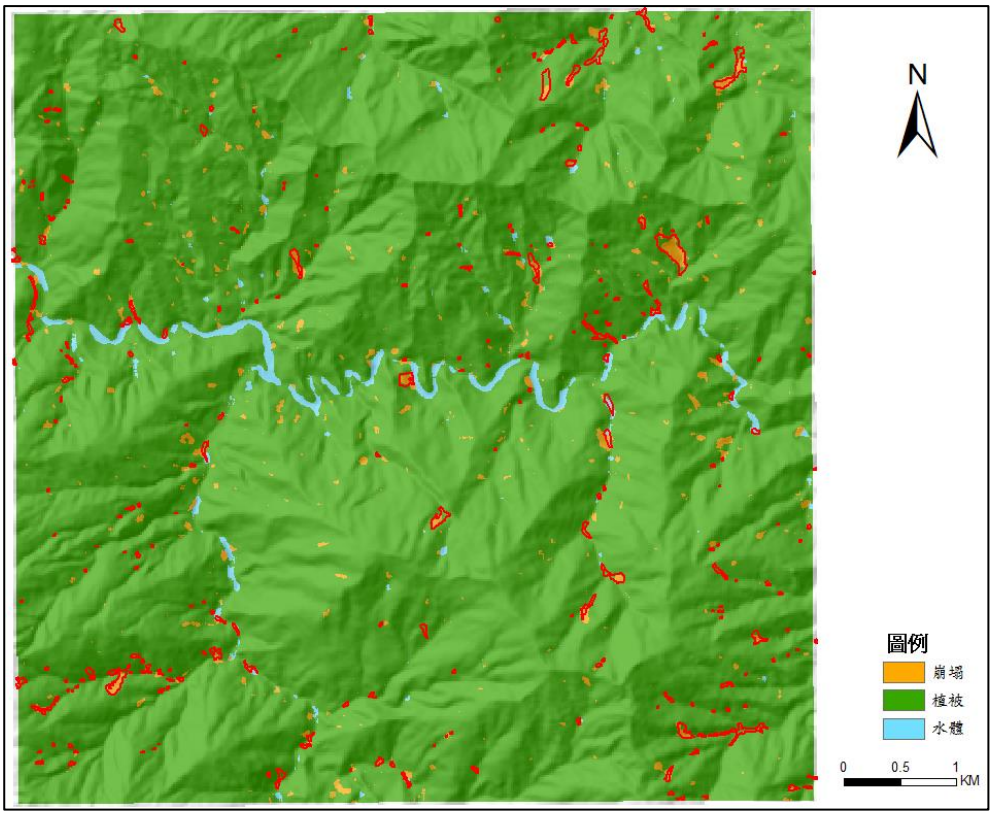
VH 極化



VV 極化

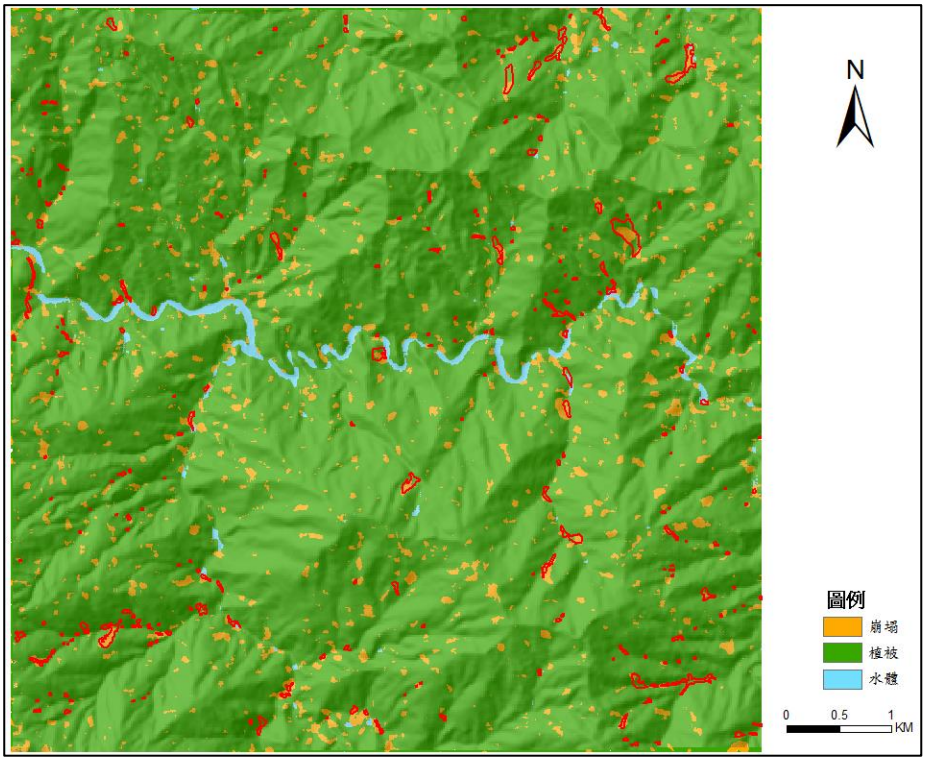


VH+VV

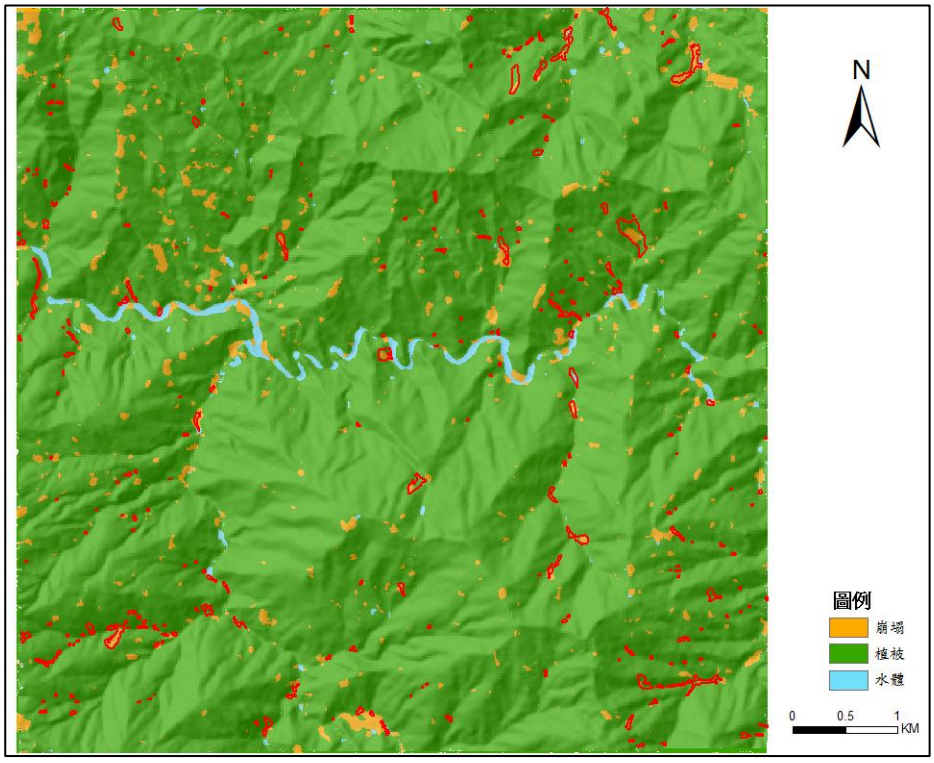


3. 模式三：變遷分析分類(T3-T4)

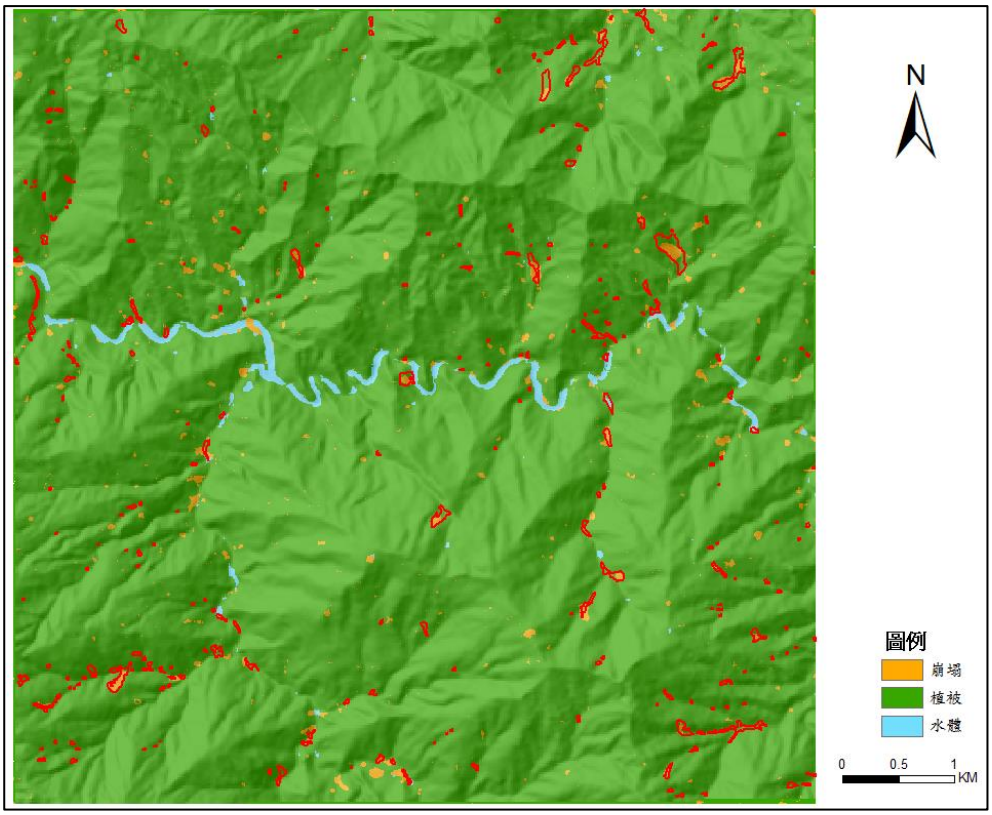
VH 極化



VV 極化

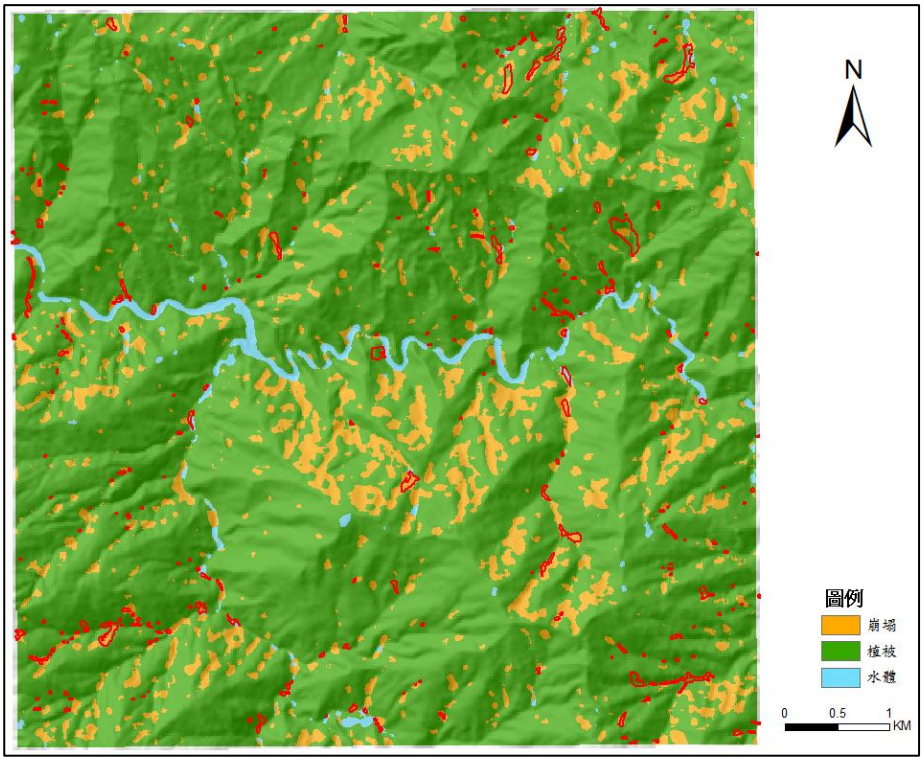


VH+VV

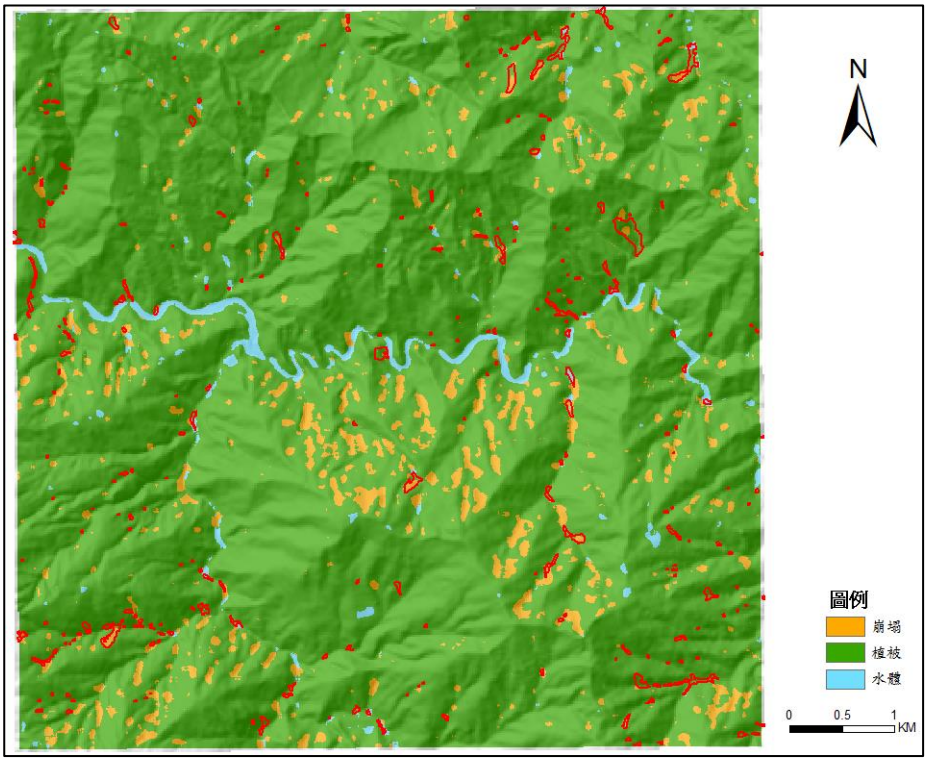


4. 模式四：事件後迴波分析分類(T4)

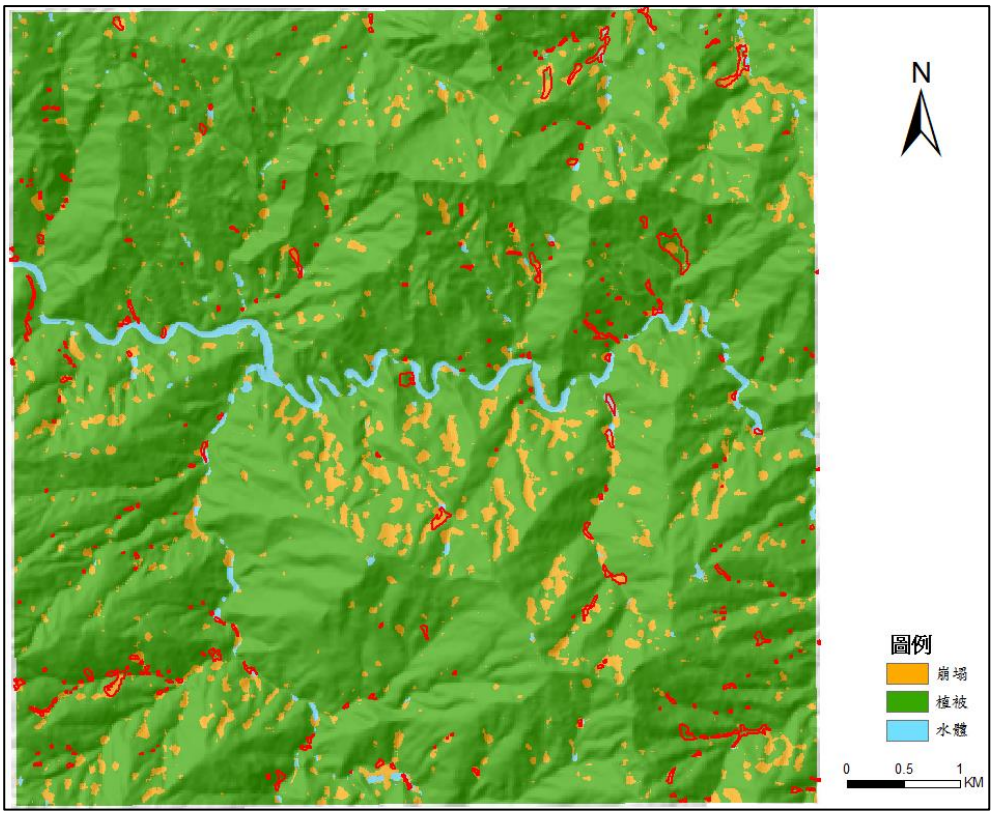
VH 極化



VV 極化

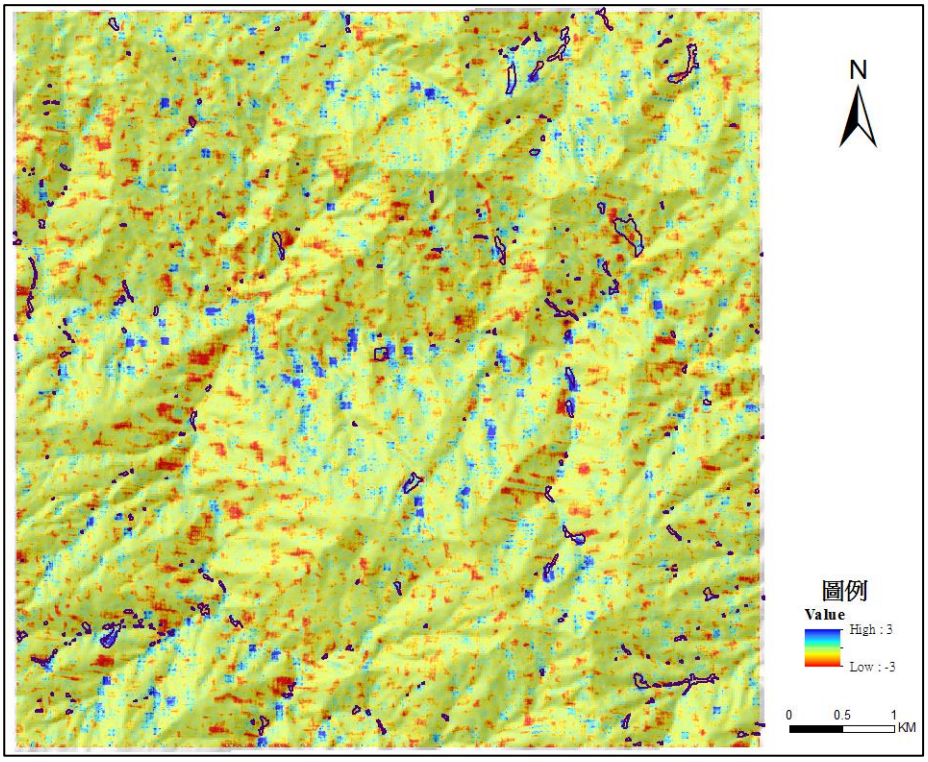


VH+VV 極化

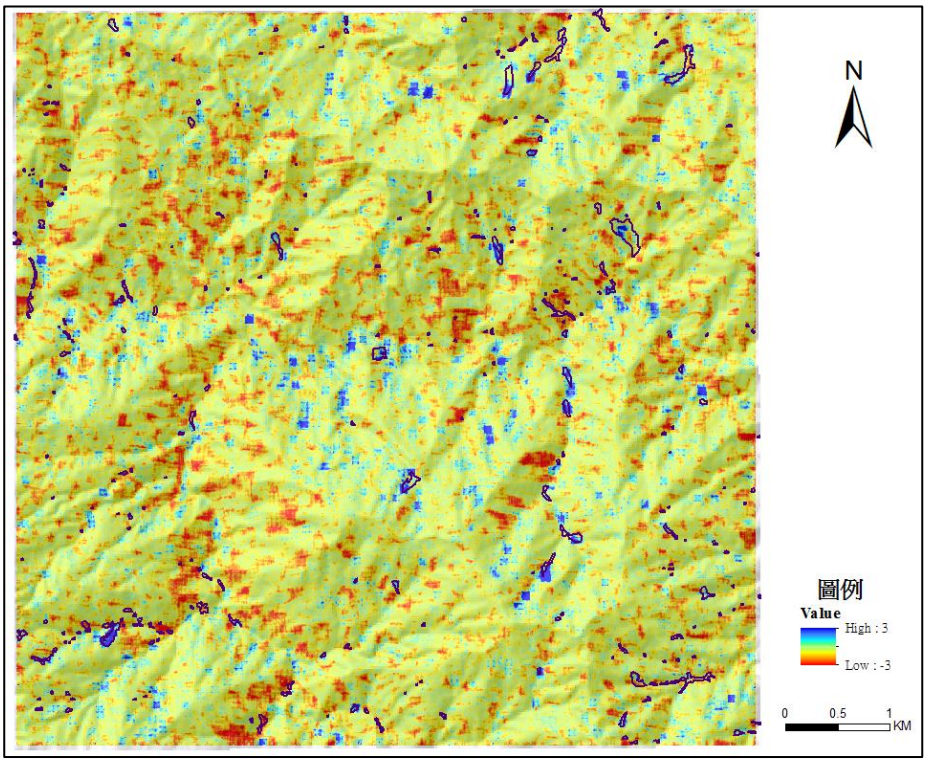


二、蘇迪勒事件紋理影像

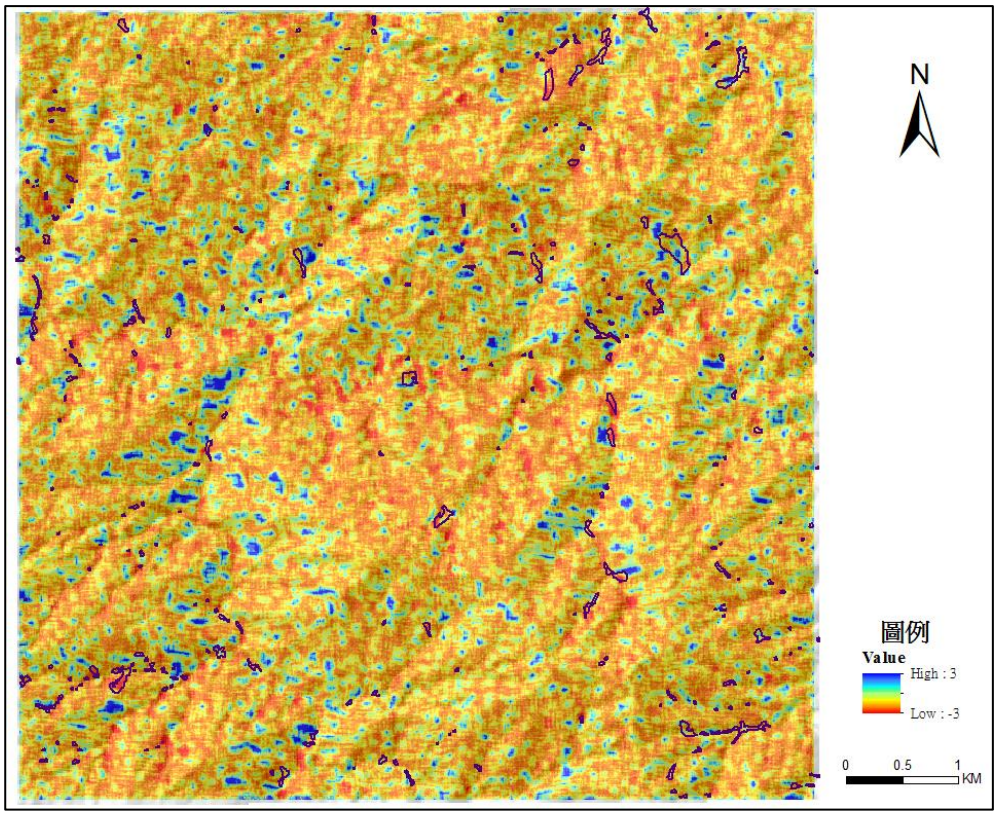
VH 極化 Contrast 紋理



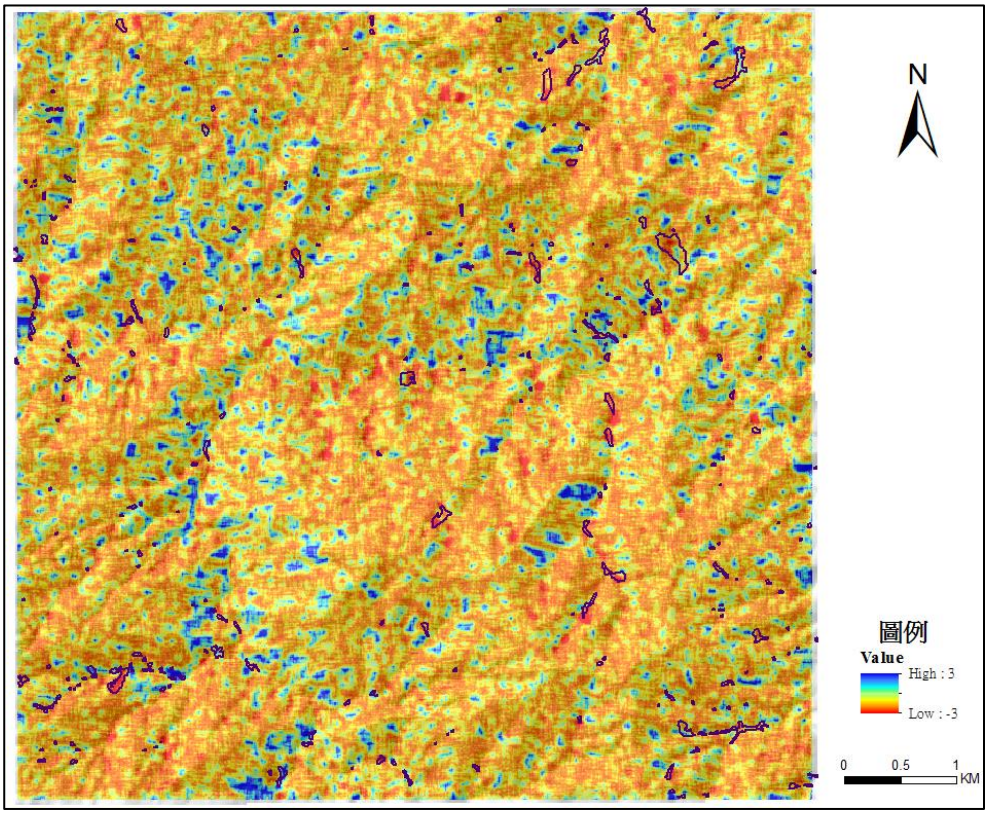
VV 極化 Contrast 紋理



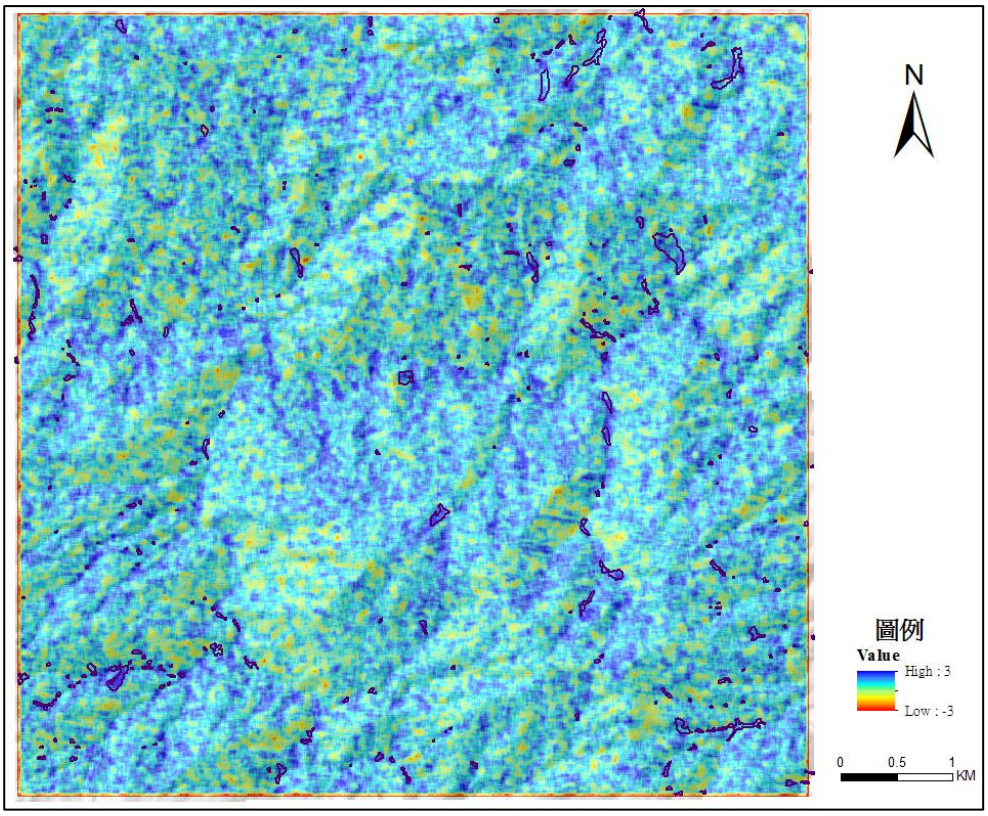
VH 極化 Energy 紋理



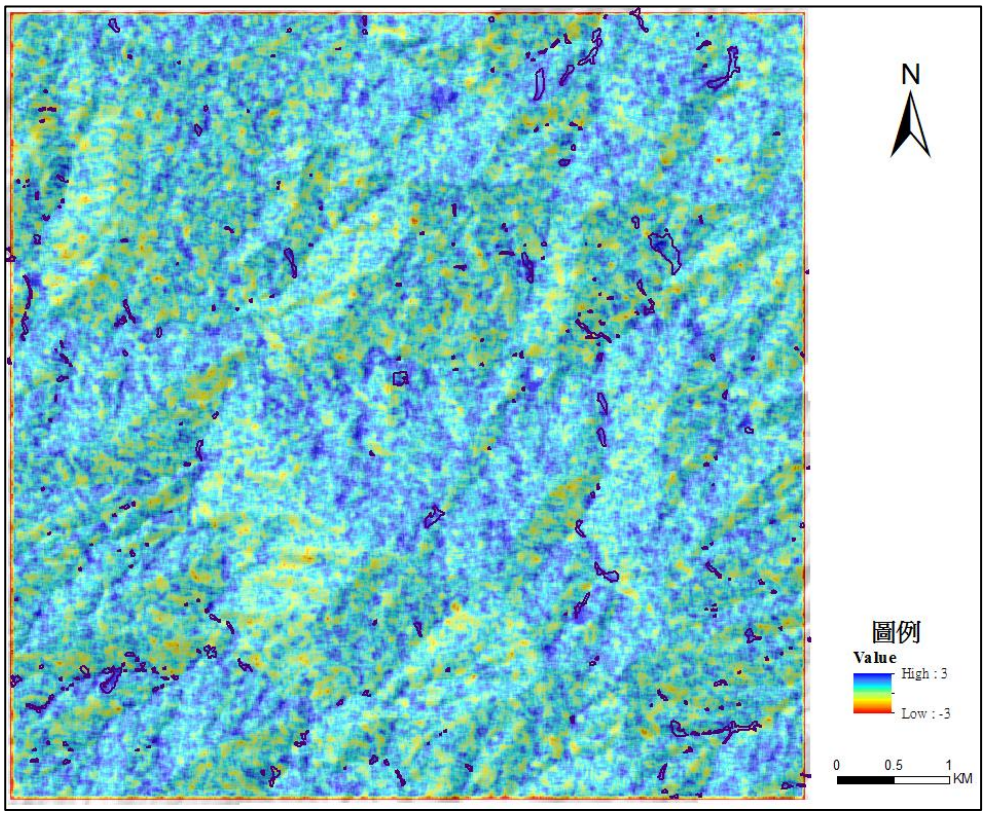
VV 極化 Energy 紋理



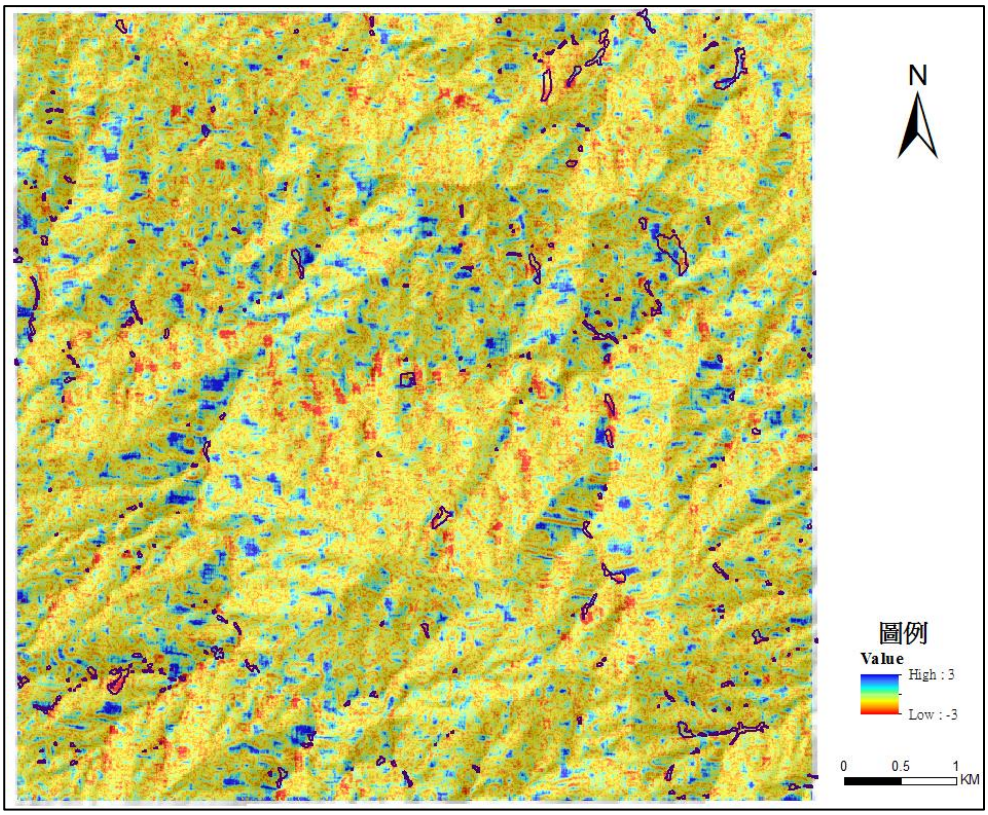
VH 極化 Entropy 紋理



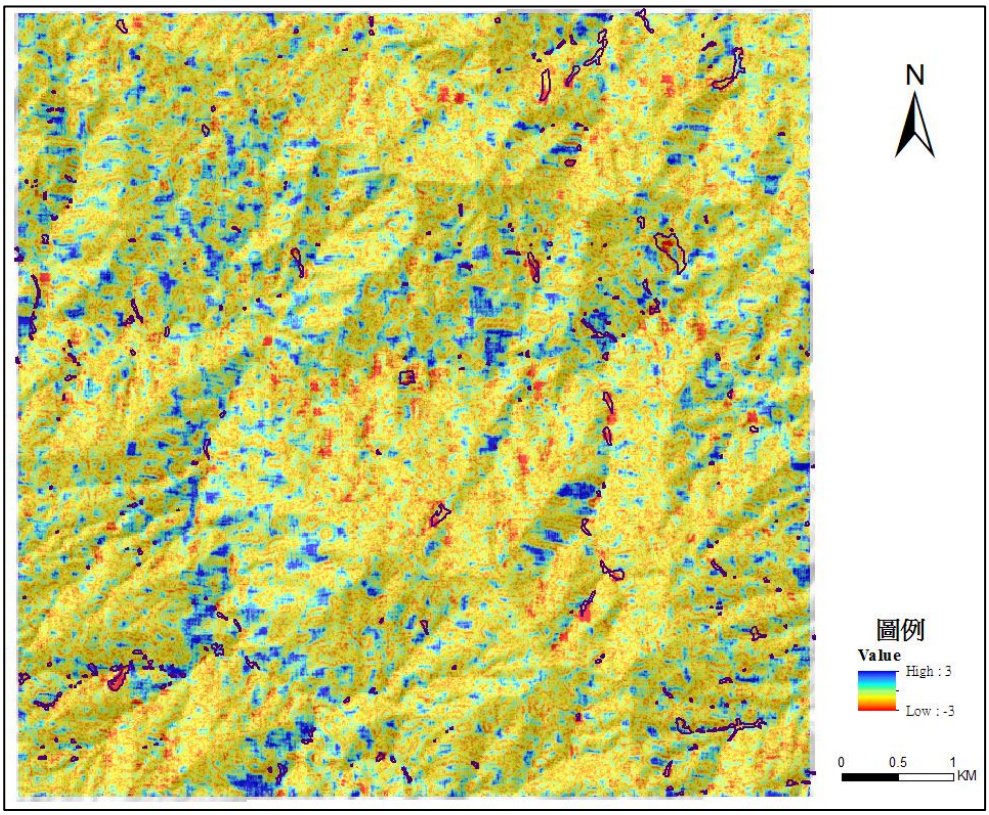
VV 極化 Entropy 紋理



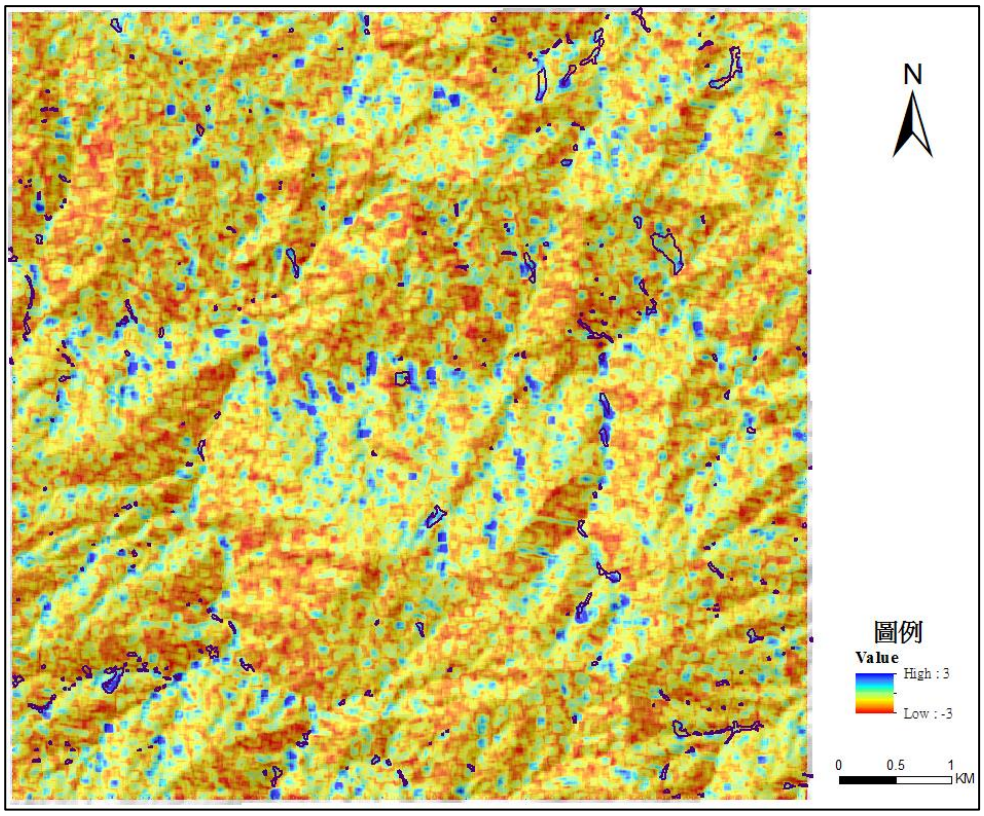
VH 極化 Homogeneity 紋理



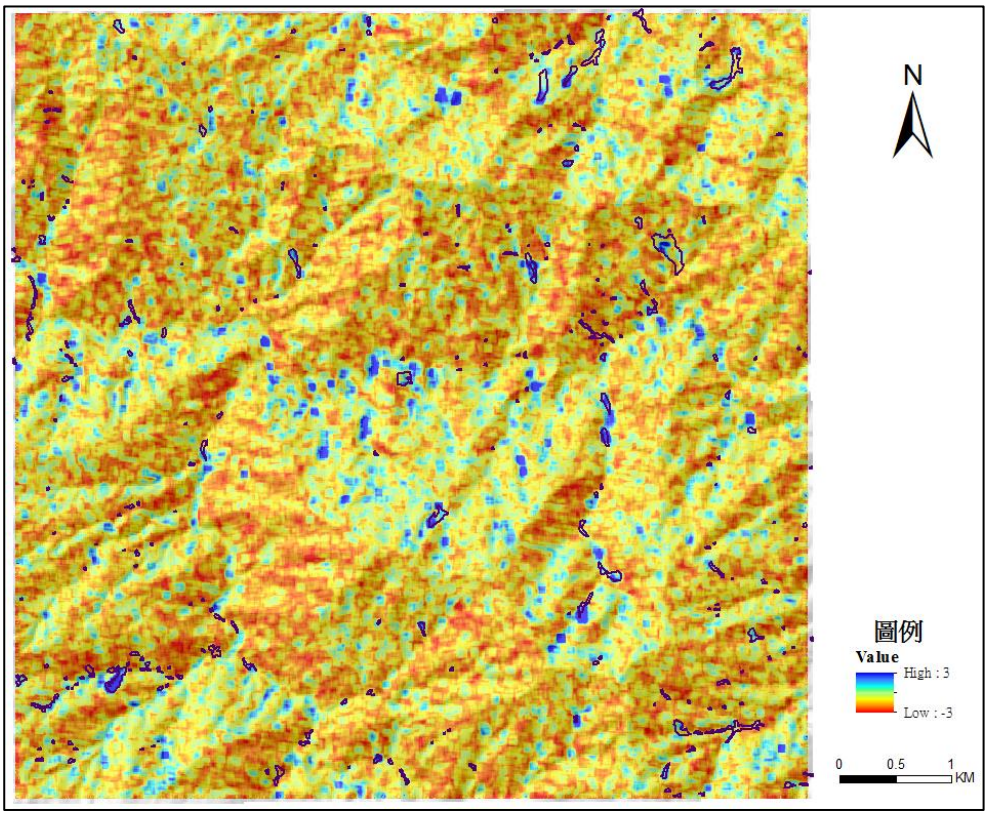
VV 極化 Homogeneity 紋理



VH 極化 STD 紋理

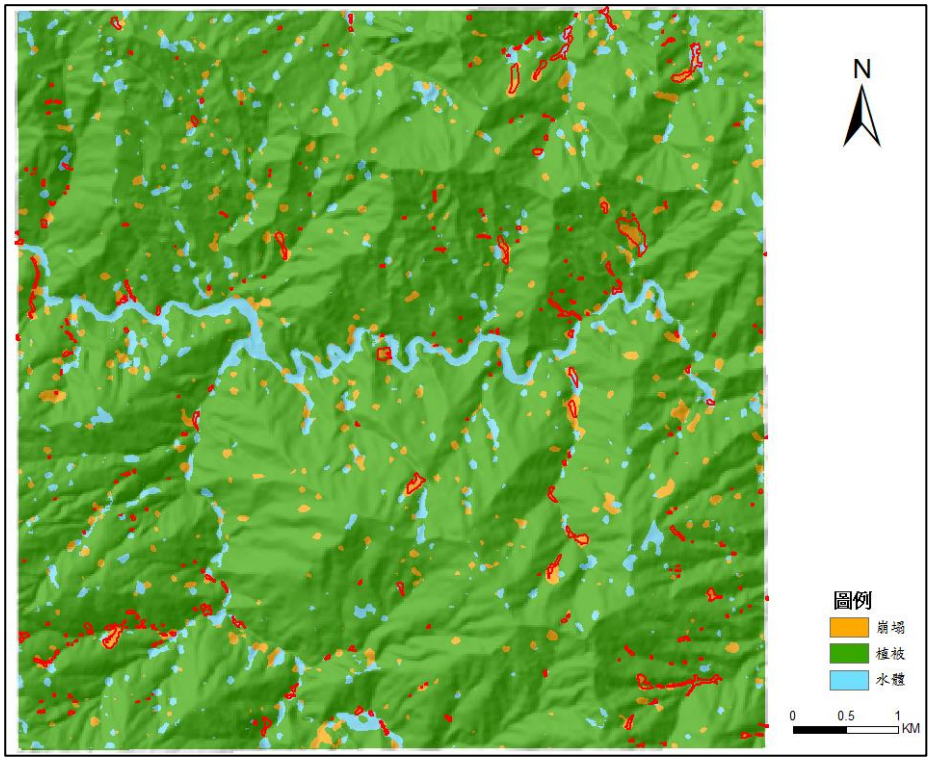


VV 極化 STD 紋理

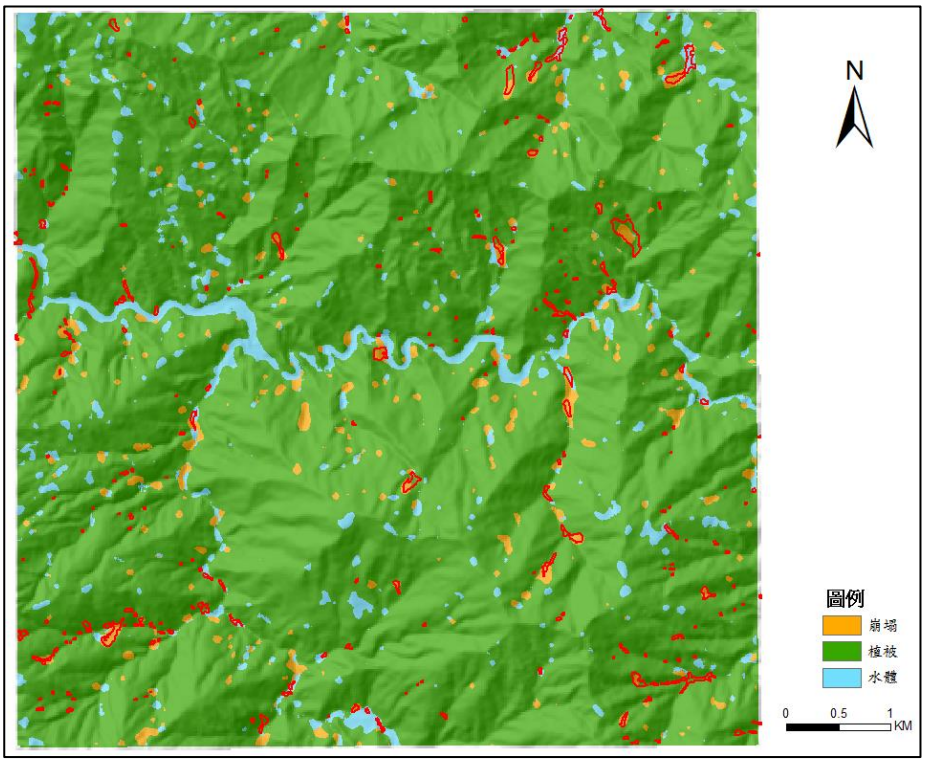


三、蘇迪勒事件紋理影像分類

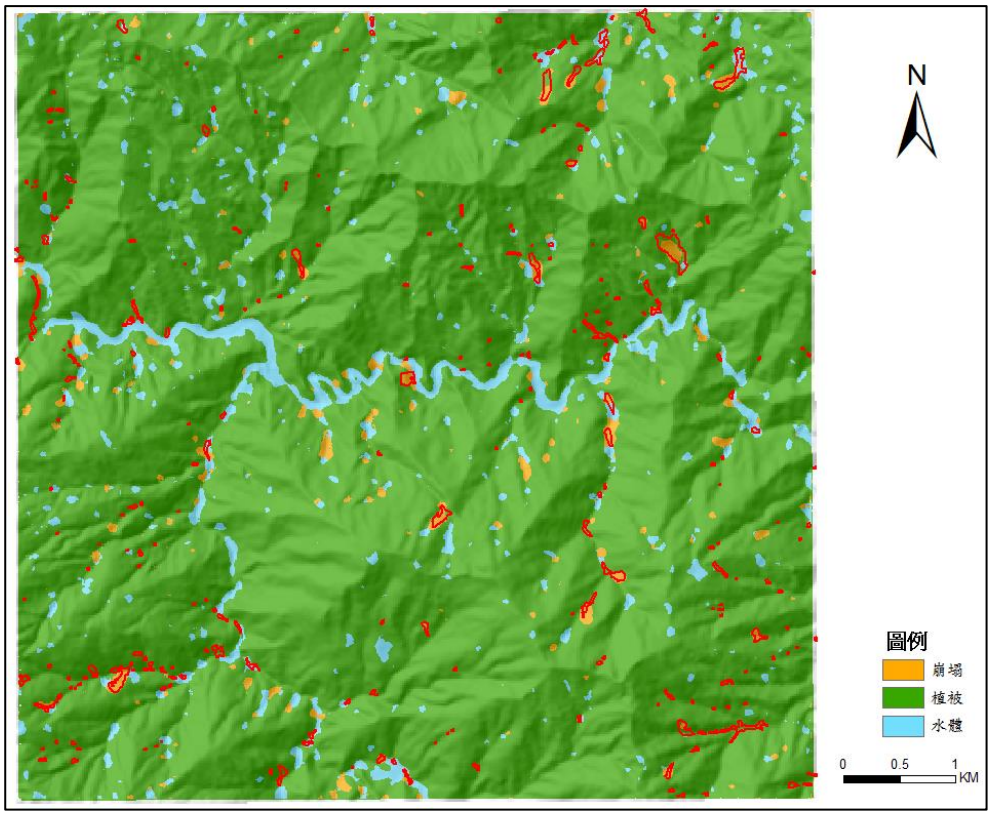
VH 紋理分類



蘇迪勒事件 VV 紋理分類



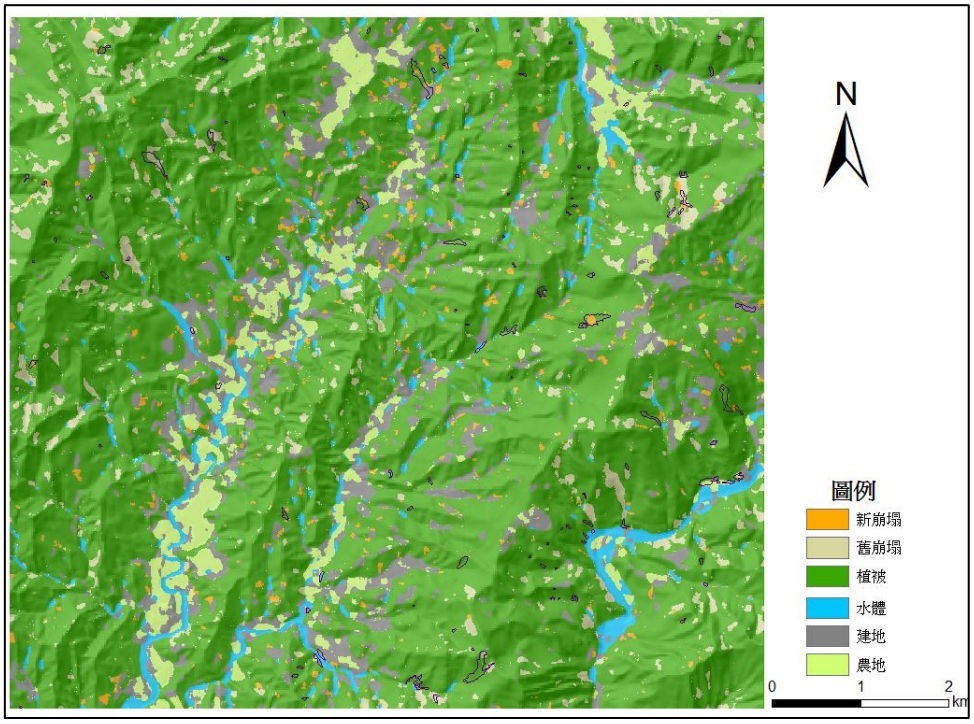
VH+VV 紋理分類



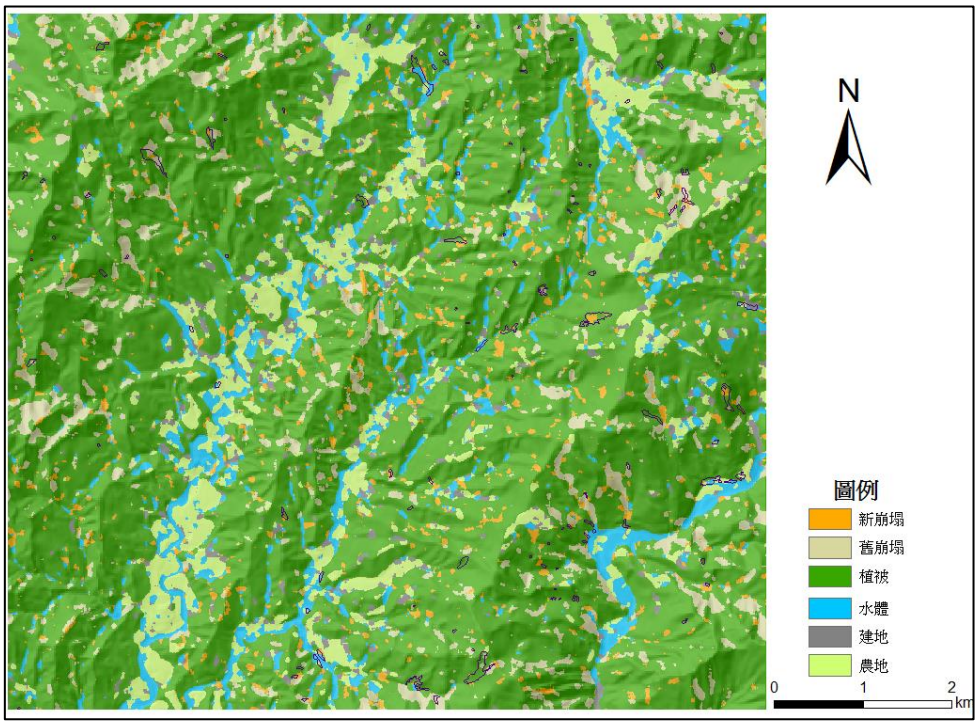
四、0611 事件多時序影像分類

1. 模式一：全序列分類(T1-T6)

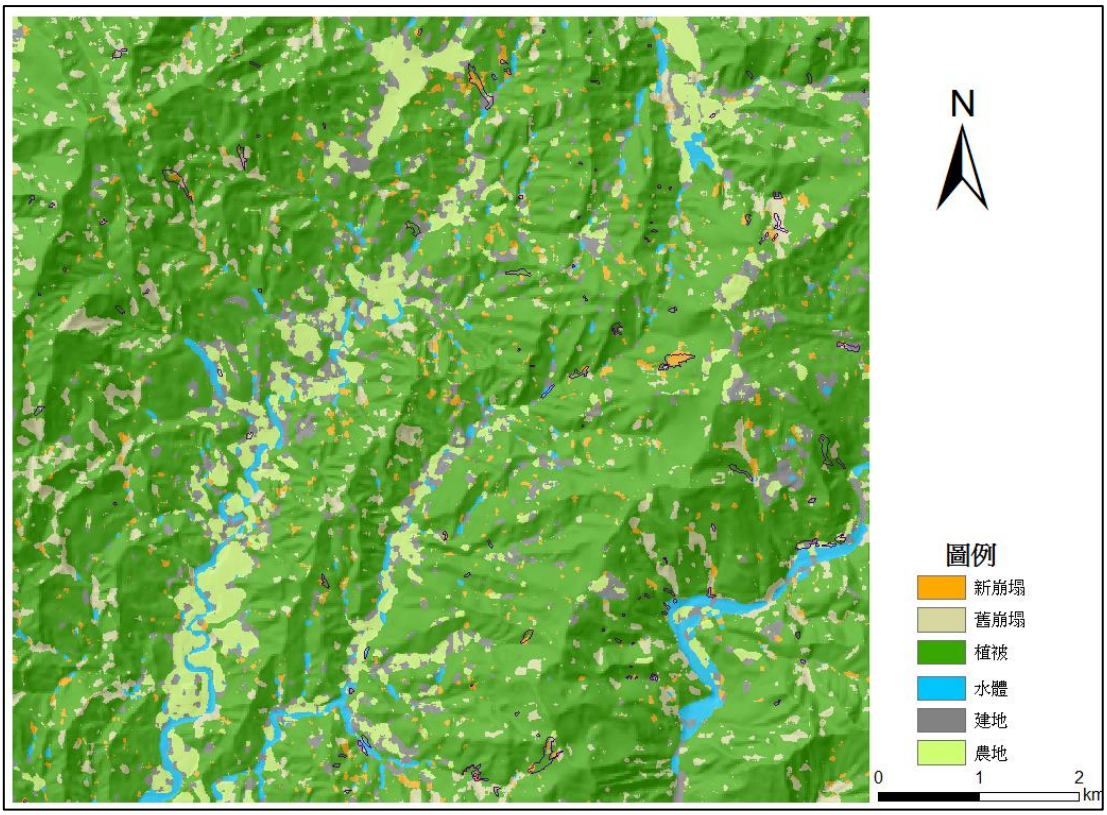
VH 極化



VV 極化

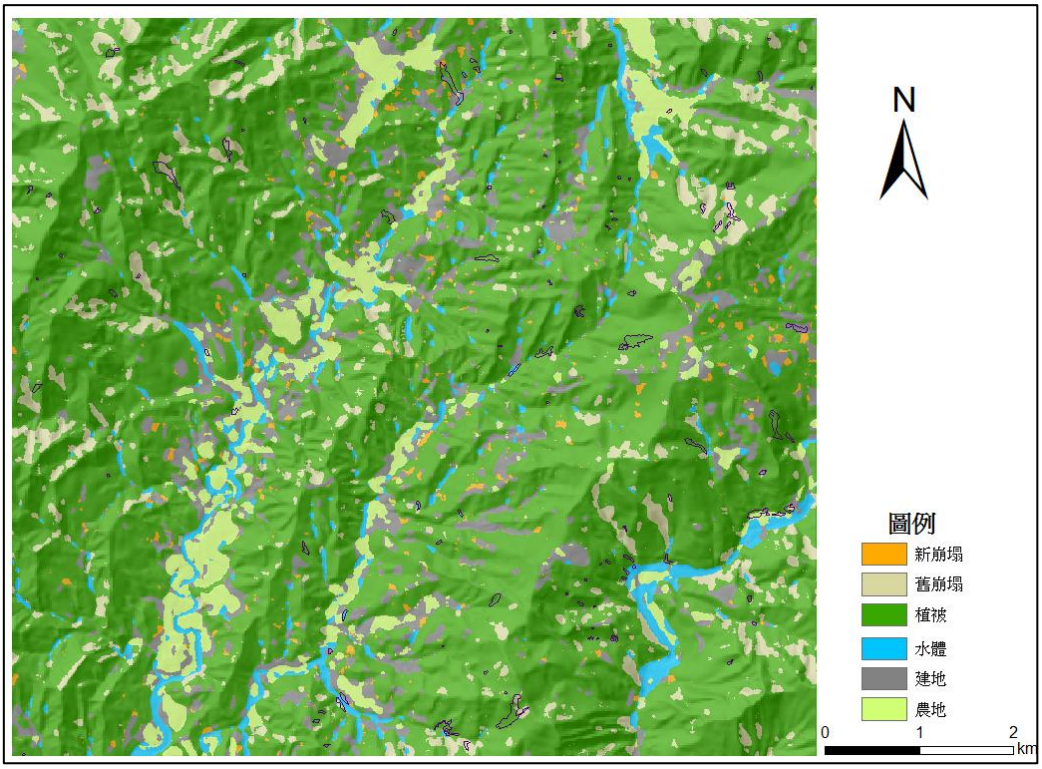


VH+VV

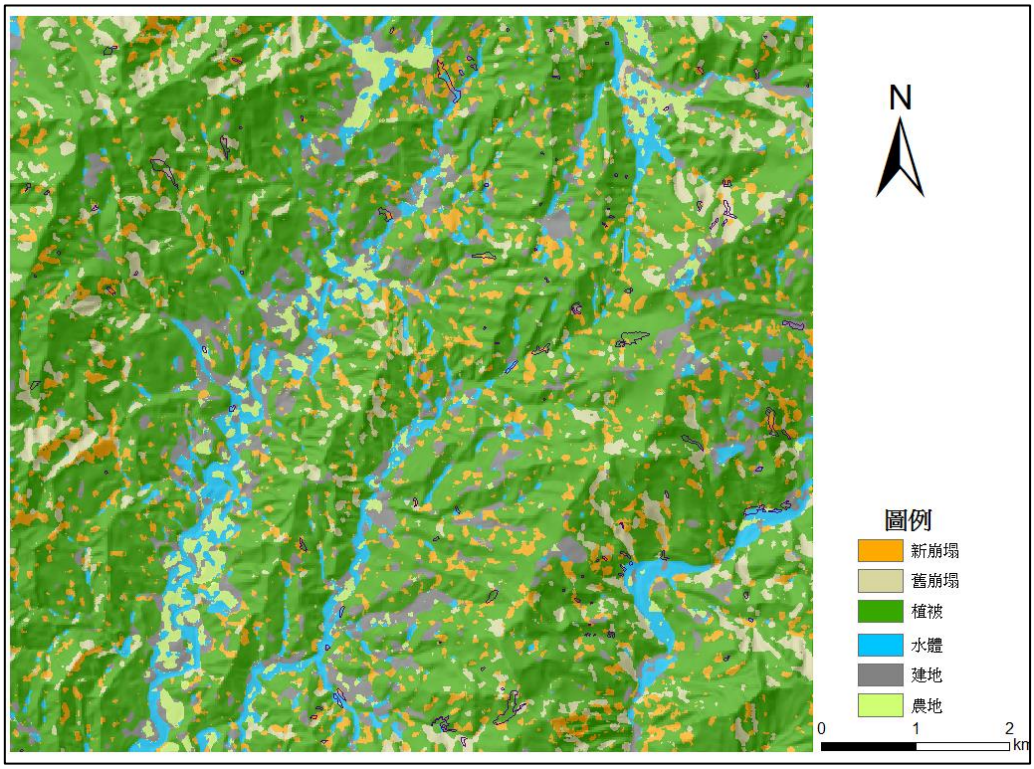


2. 模式二：即時監測分類(T1-T4)

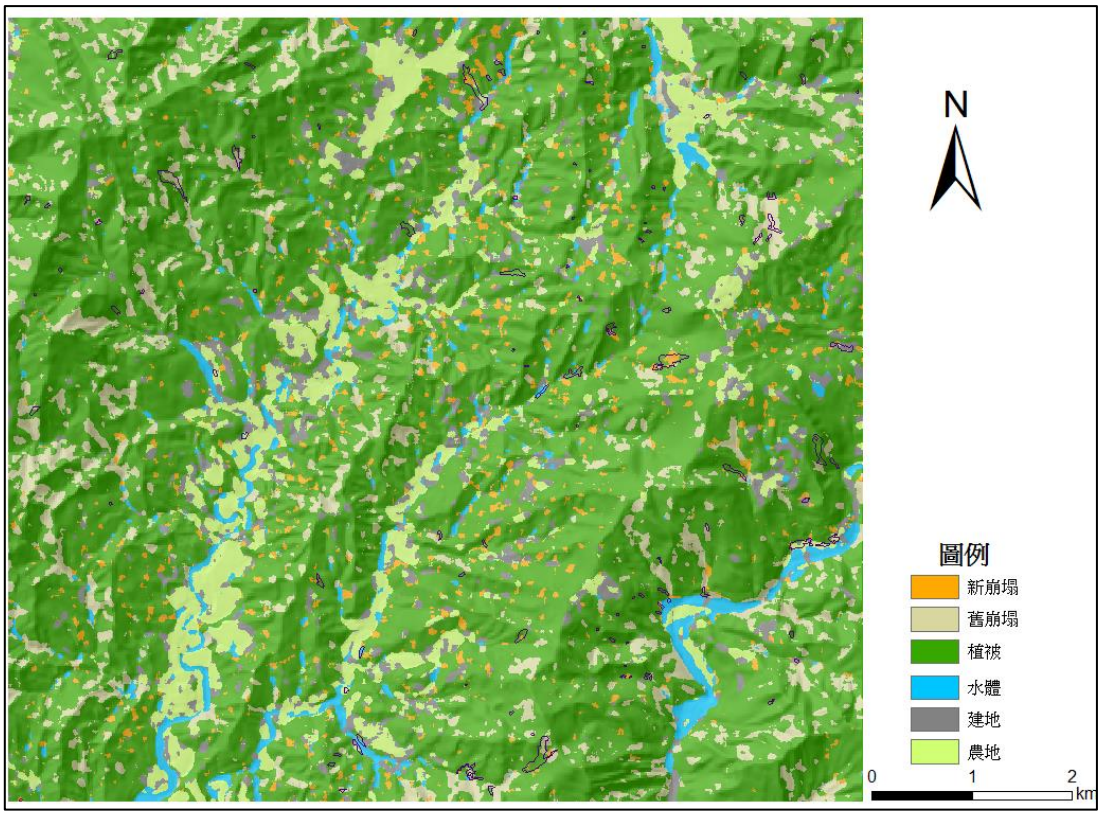
VH 極化



VV 極化

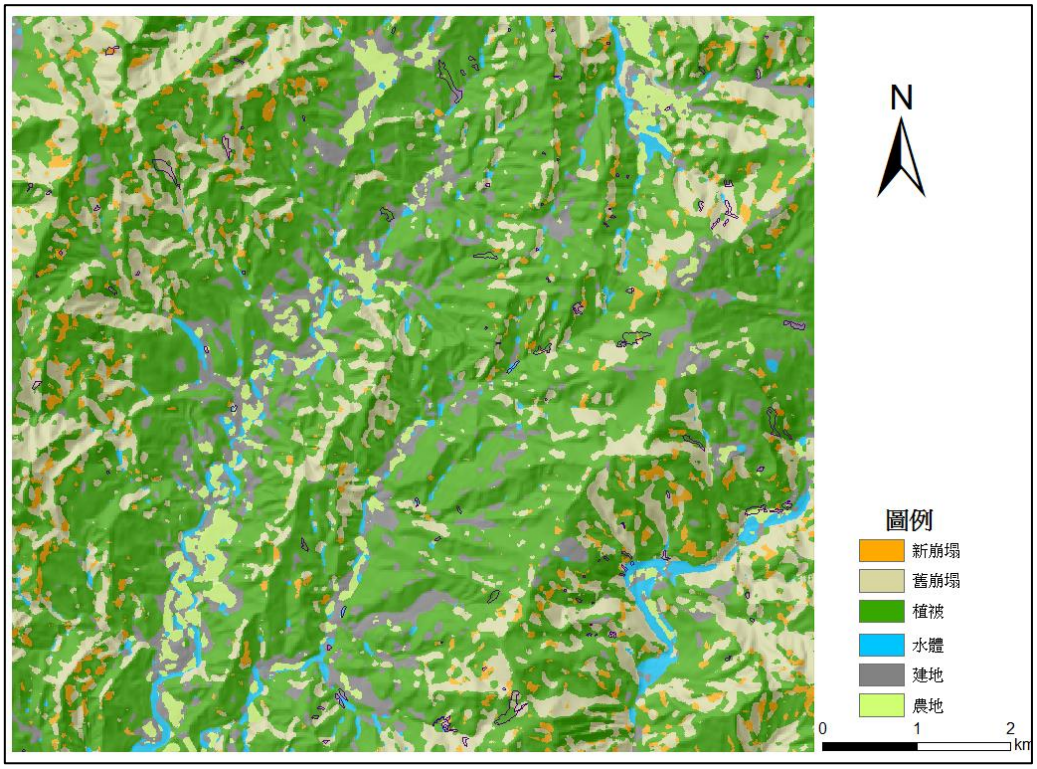


VH+VV 極化

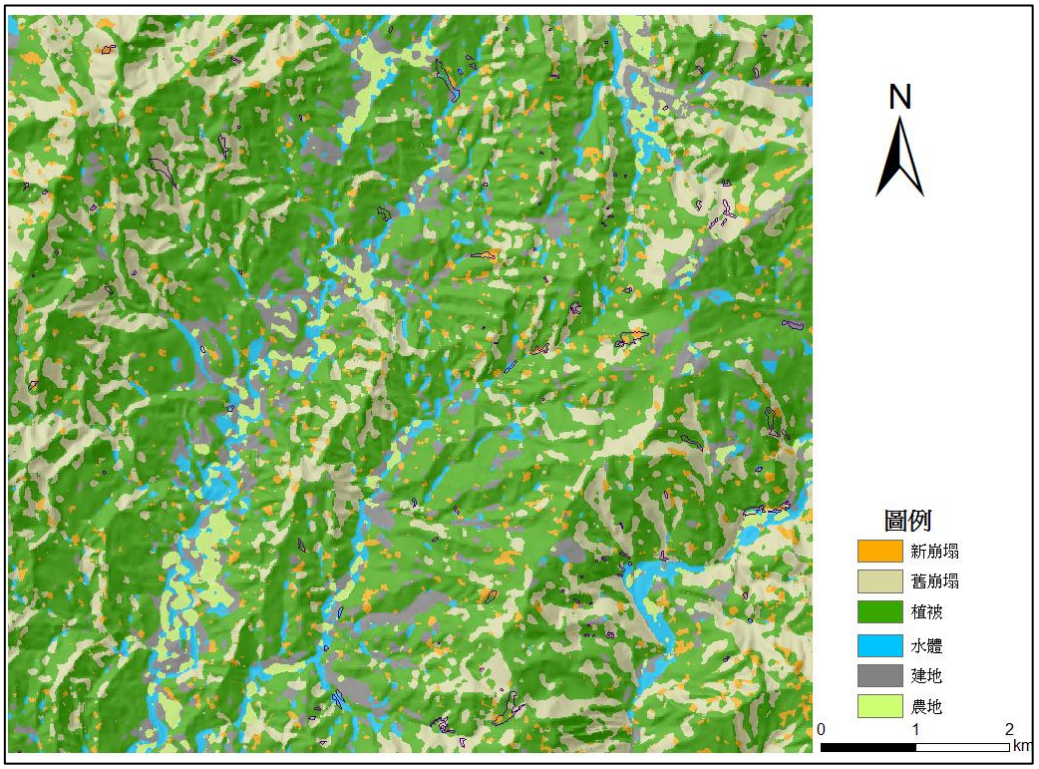


3. 模式三：變遷分析分類(T3-T4)

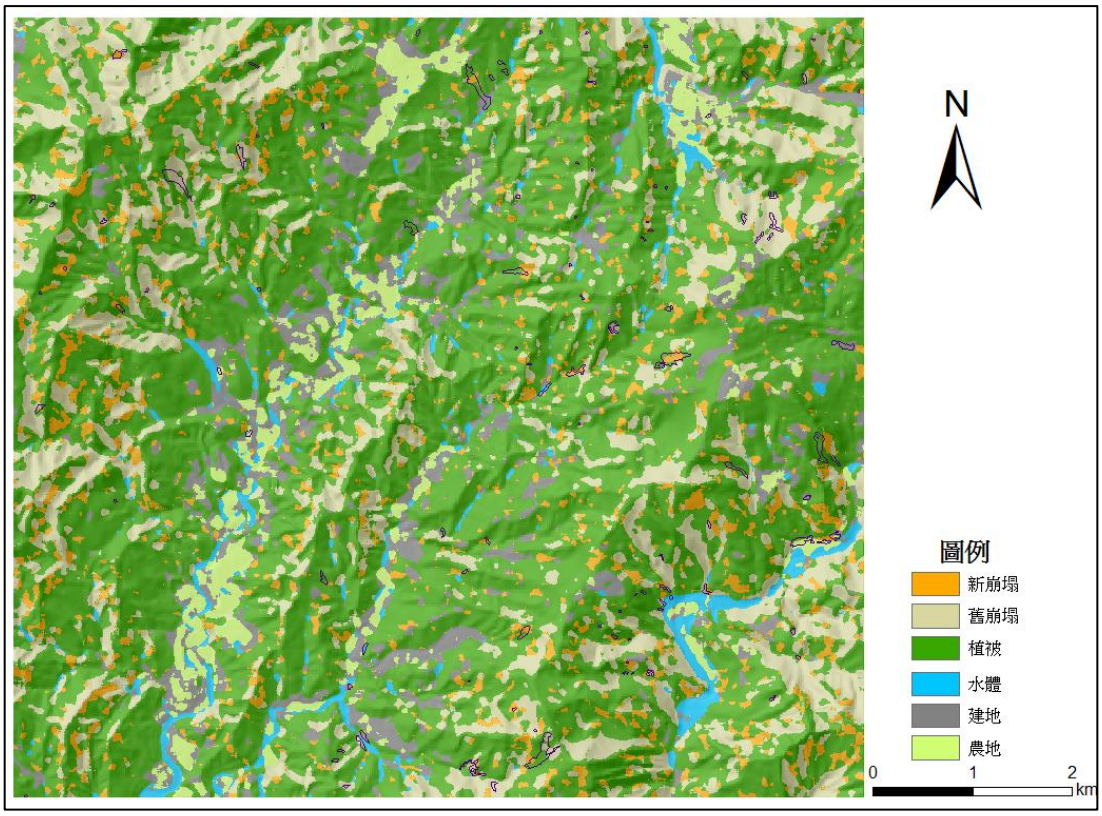
VH 極化



VV 極化

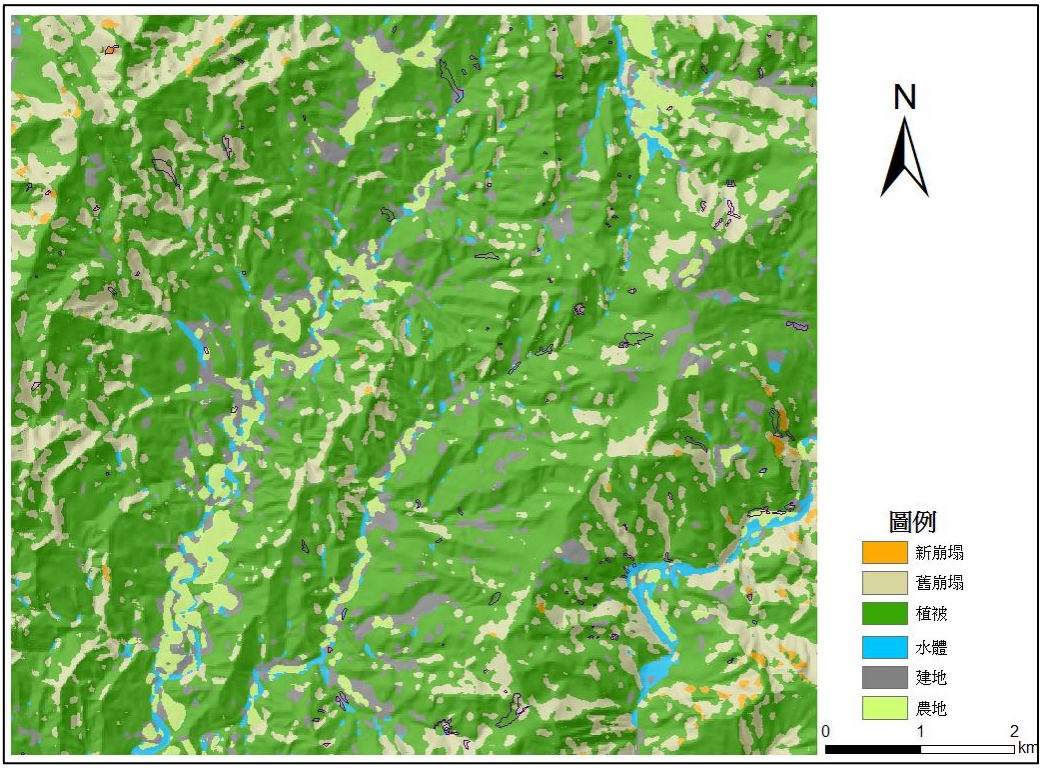


VH+VV 極化

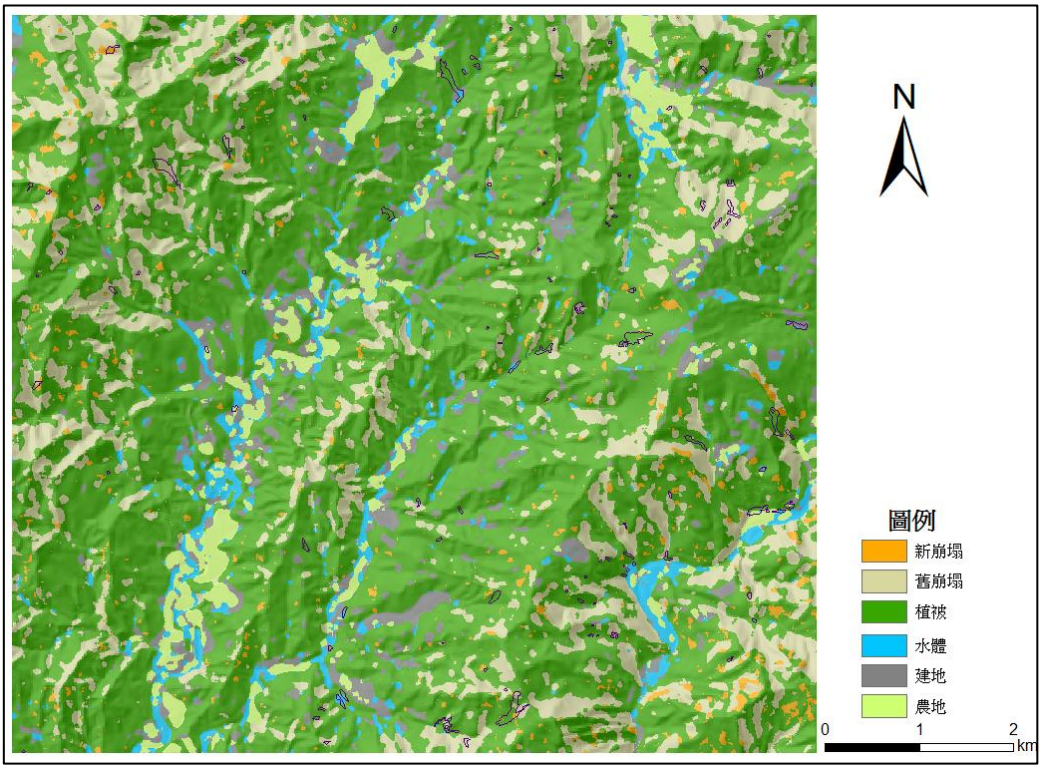


4. 模式四：事件後迴波分析分類(T4)

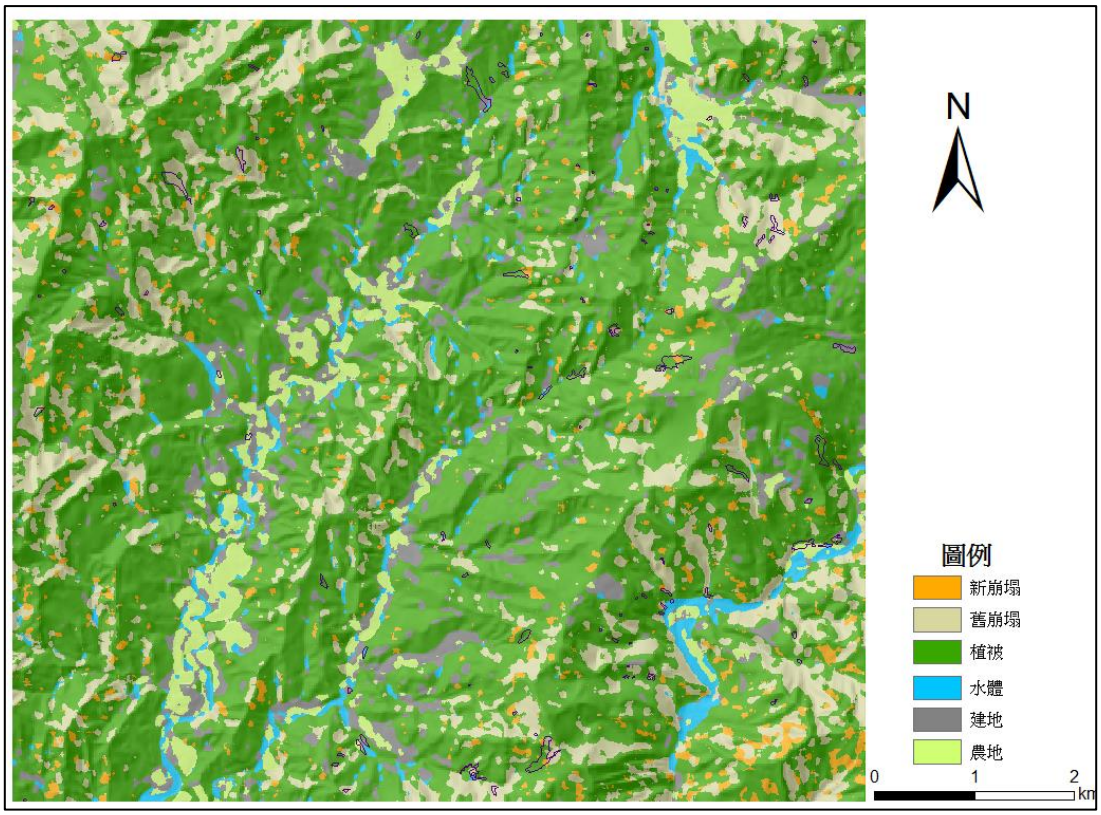
VH 極化



VV 極化

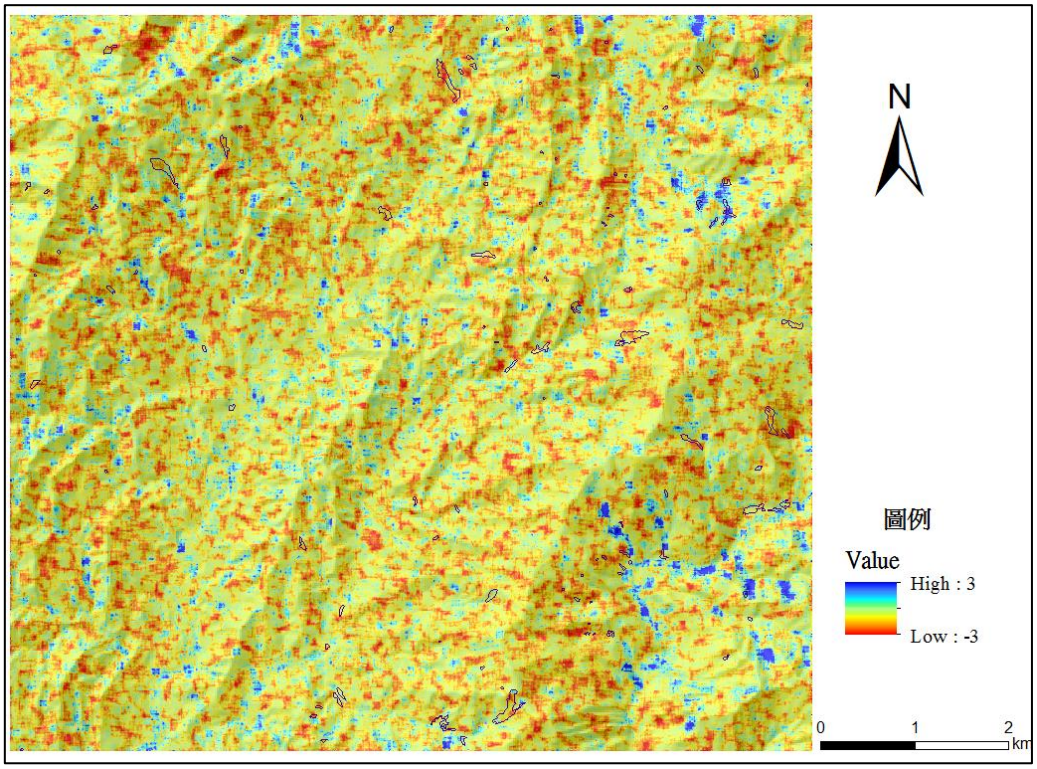


VH+VV

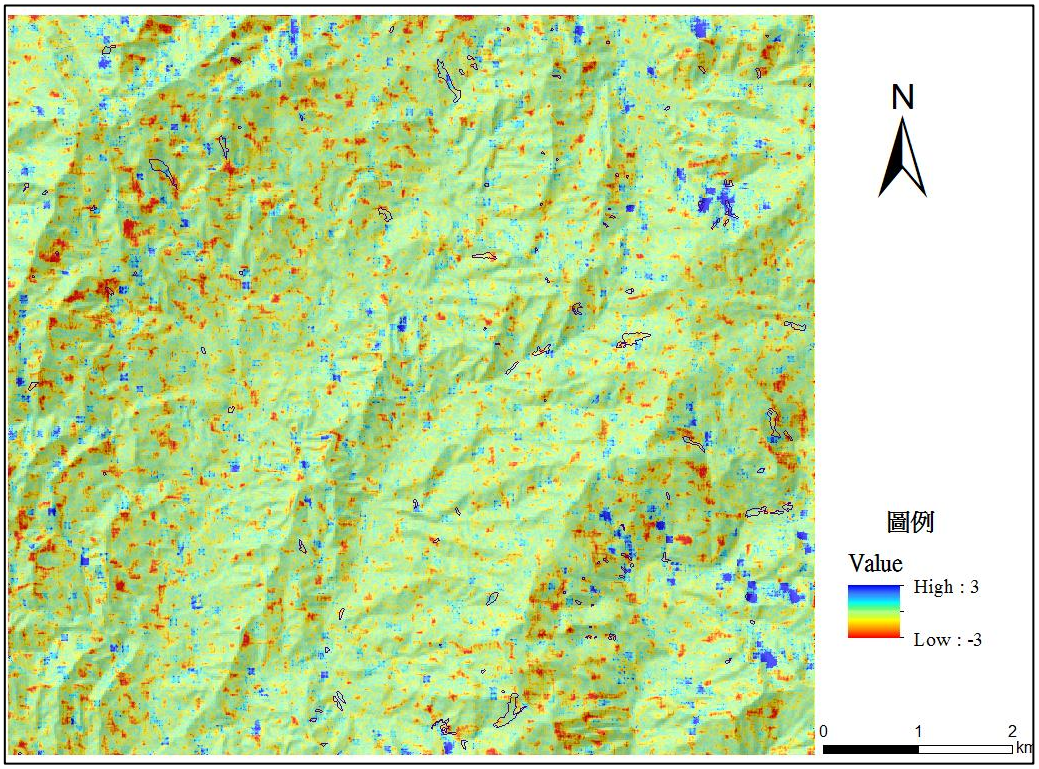


五、0611 事件紋理影像

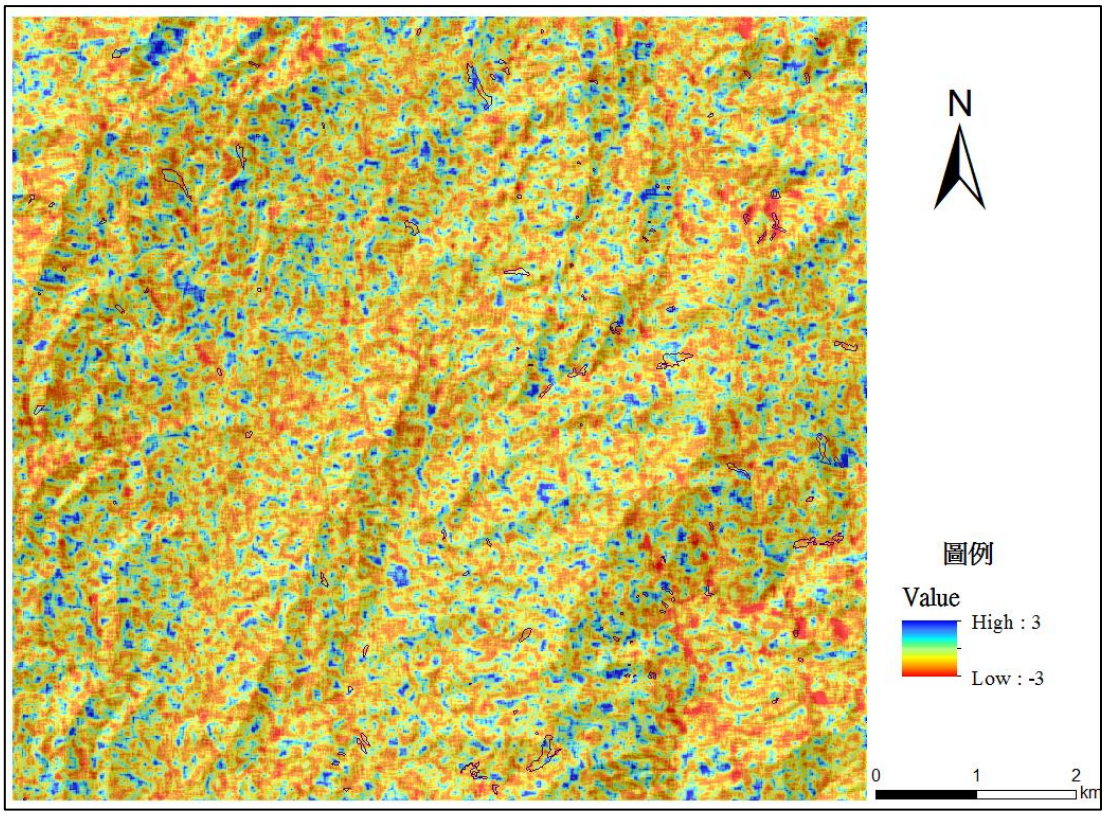
VH 極化 Contrast 紋理



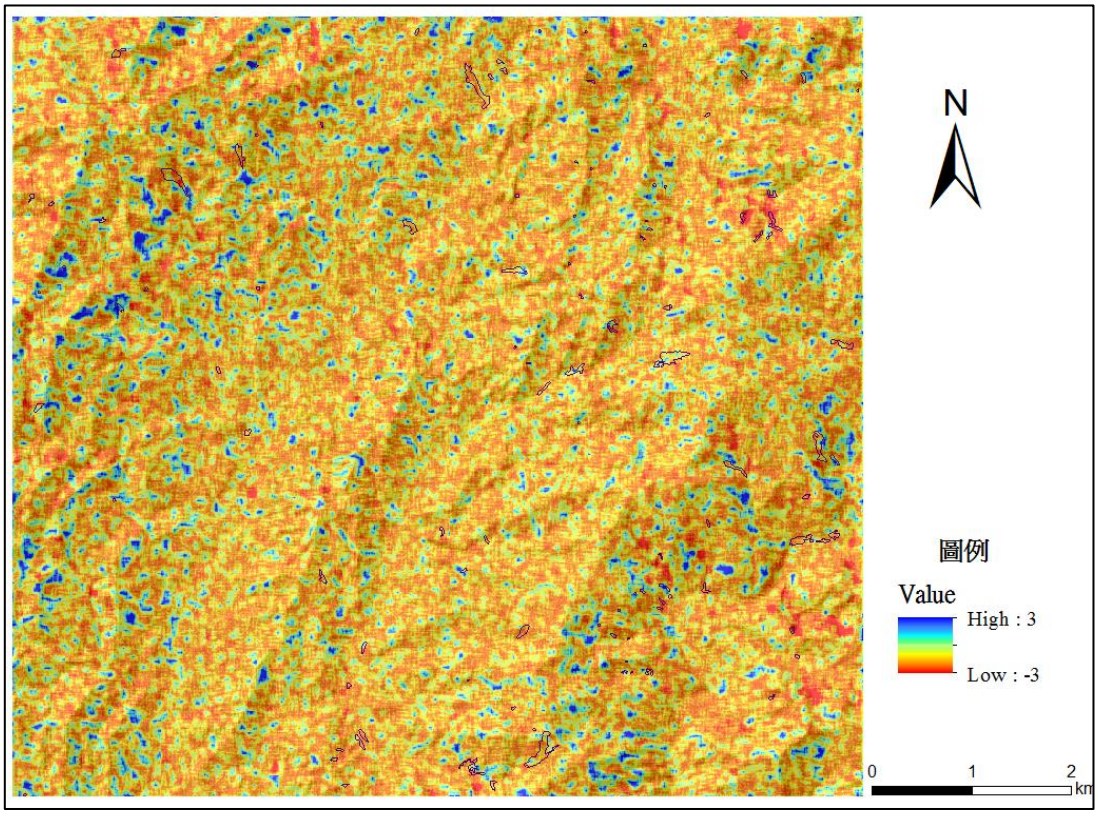
VV 極化 Contrast 紋理



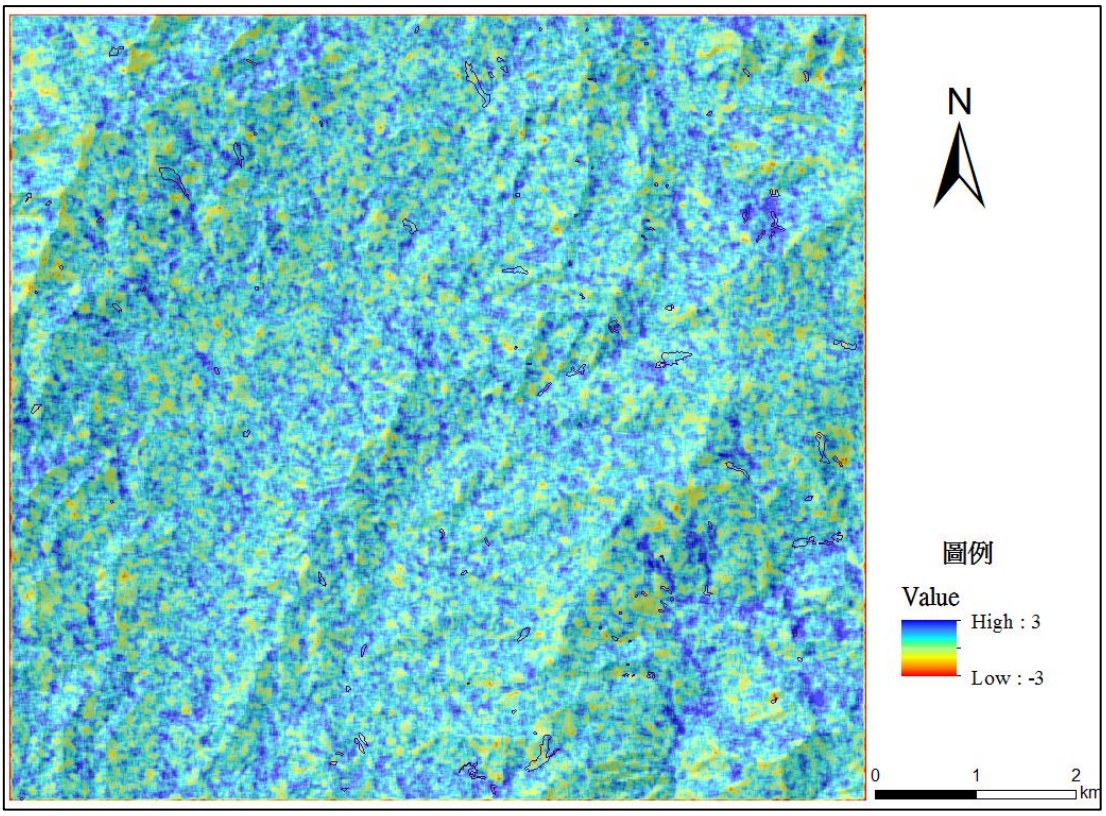
VH 極化 Energy 紋理



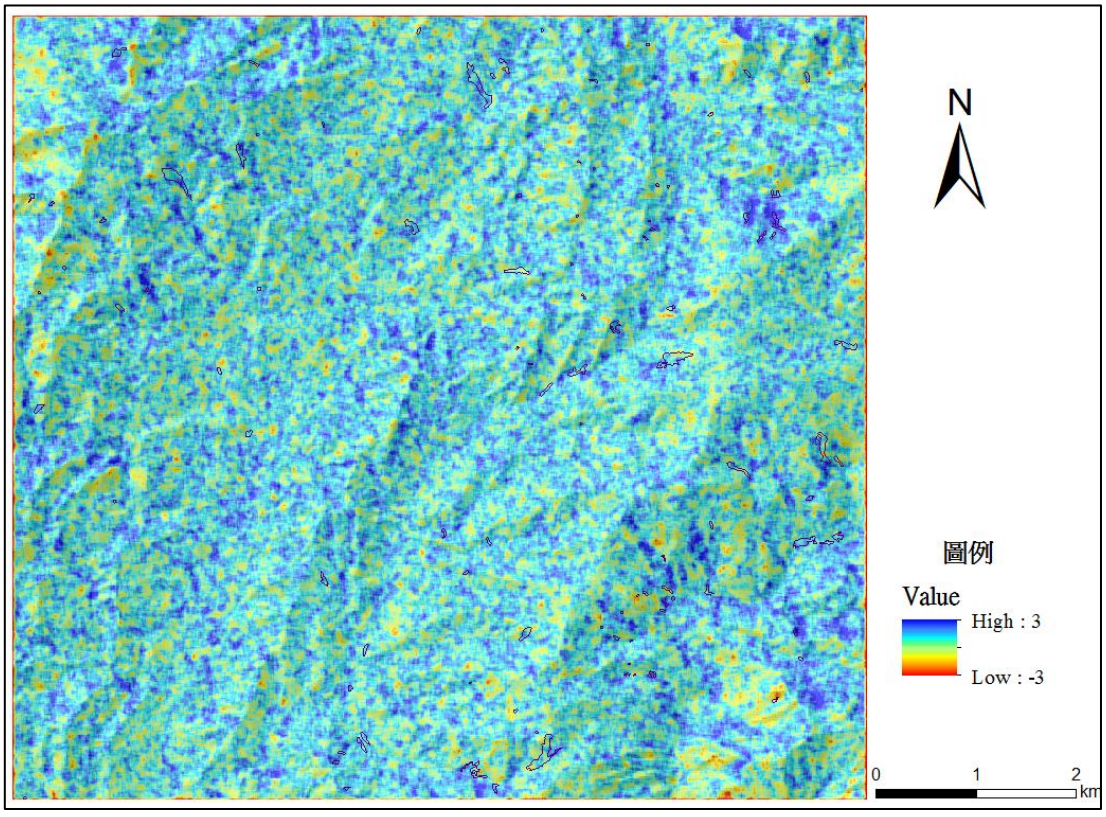
VV 極化 Energy 紋理



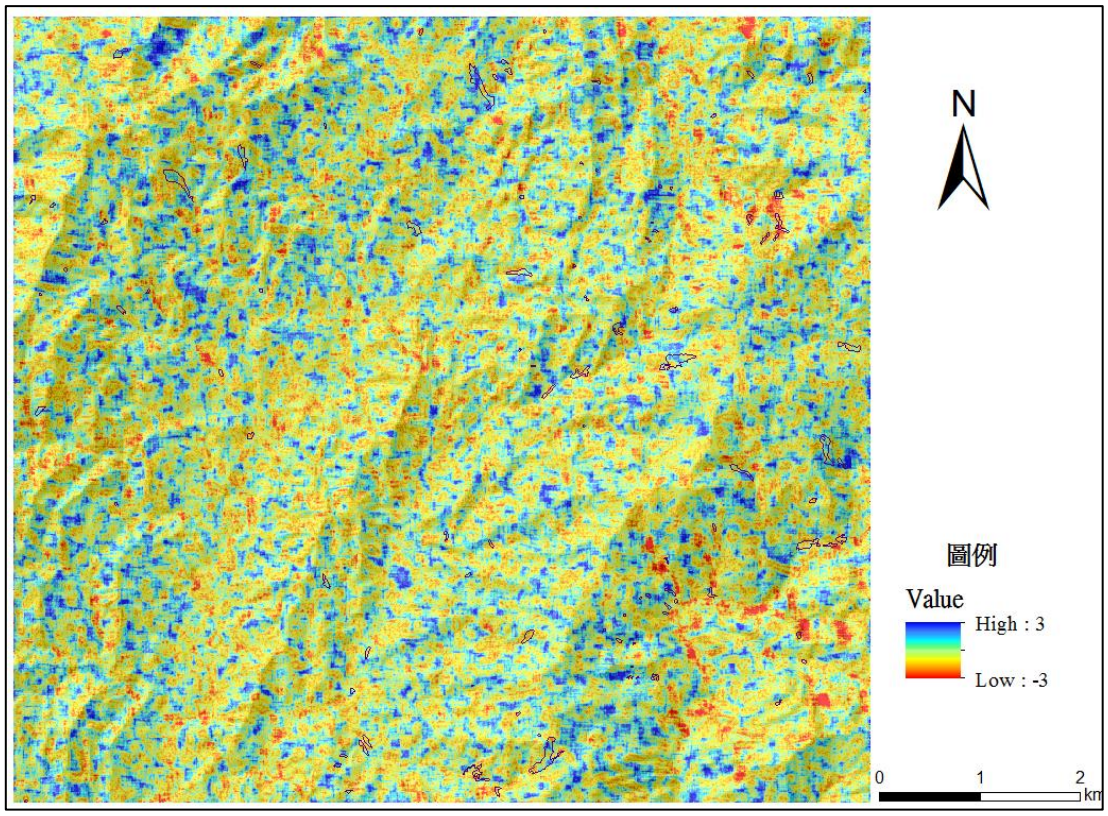
VH 極化 Entropy 紋理



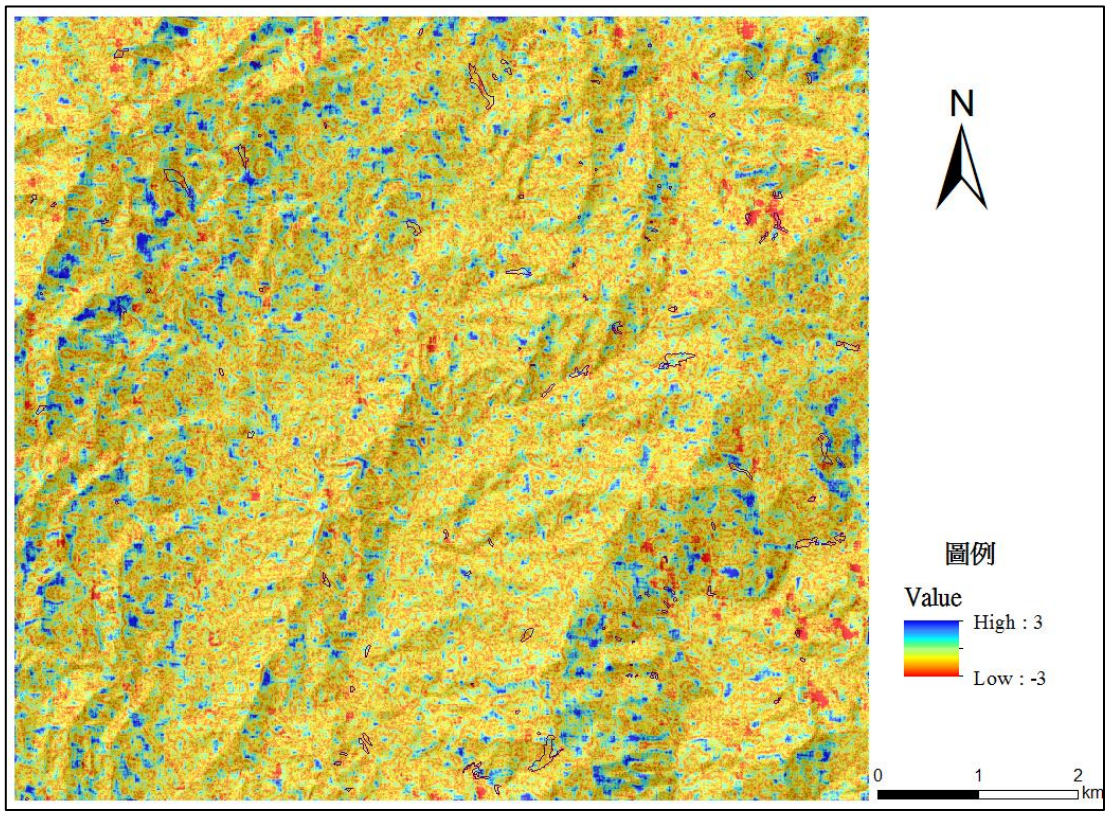
VV 極化 Entropy 紋理



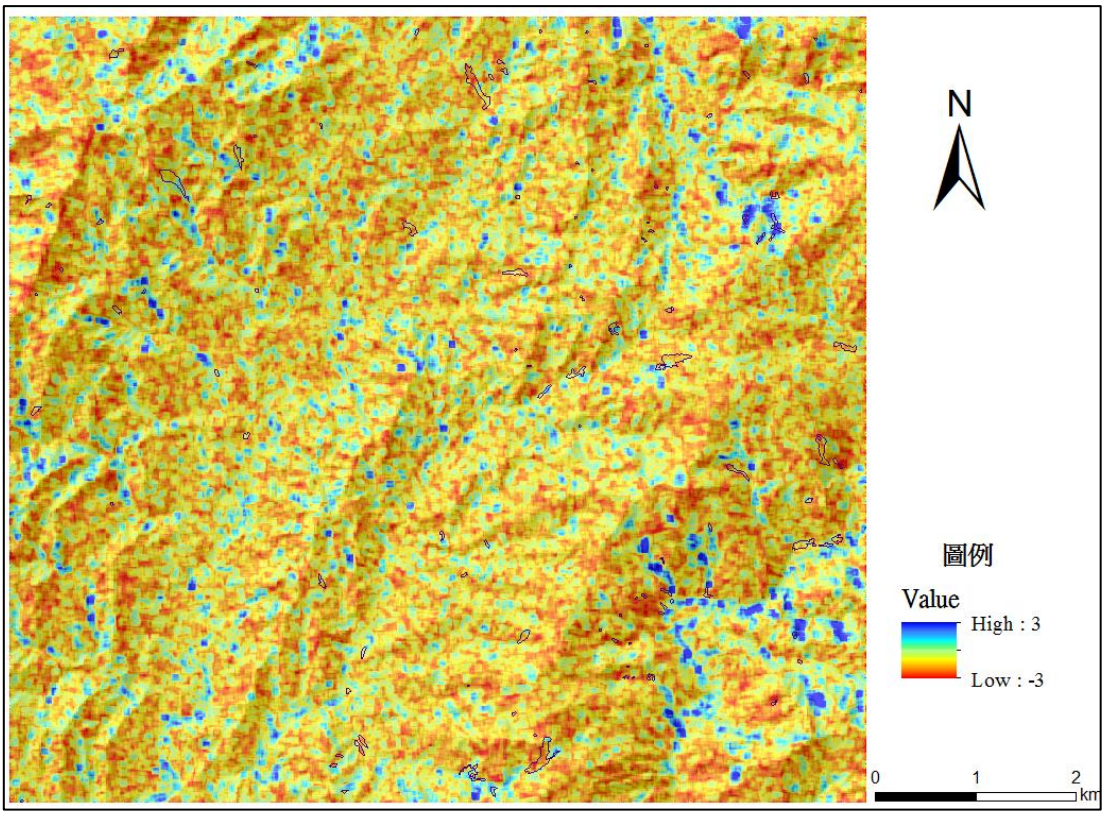
VH 極化 Homogeneity 紋理



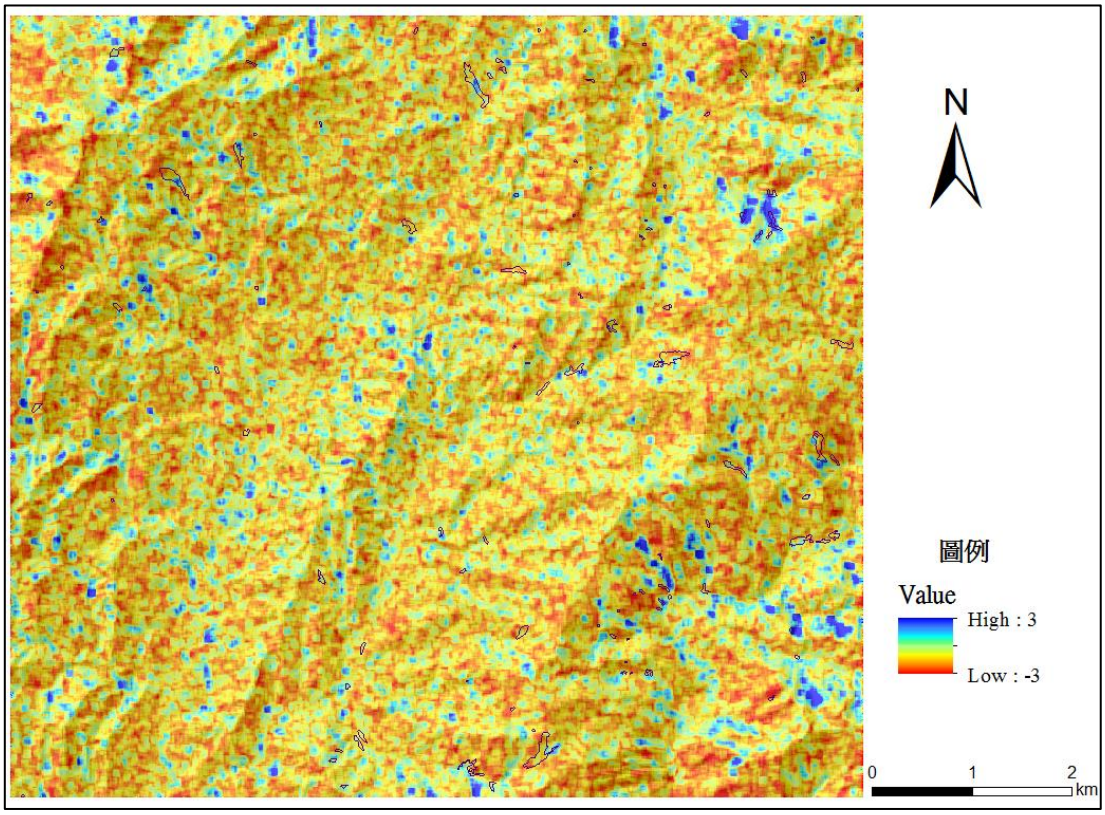
VV 極化 Homogeneity 紋理



VH 極化 STD 紋理

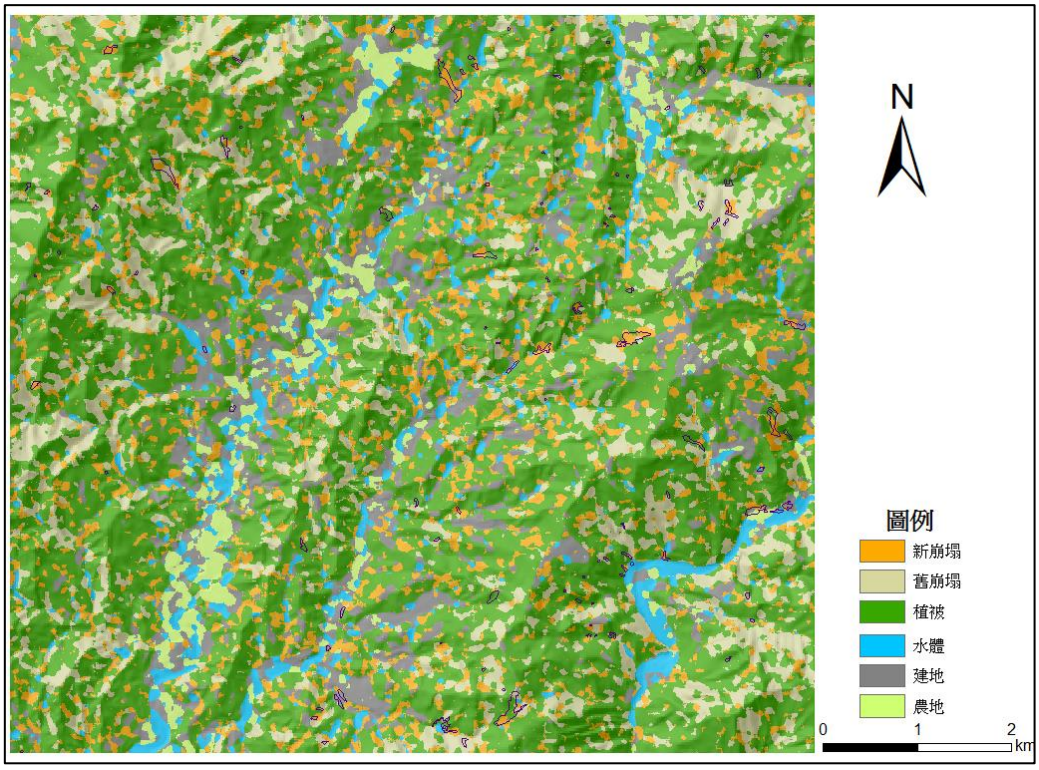


VV 極化 STD 紋理

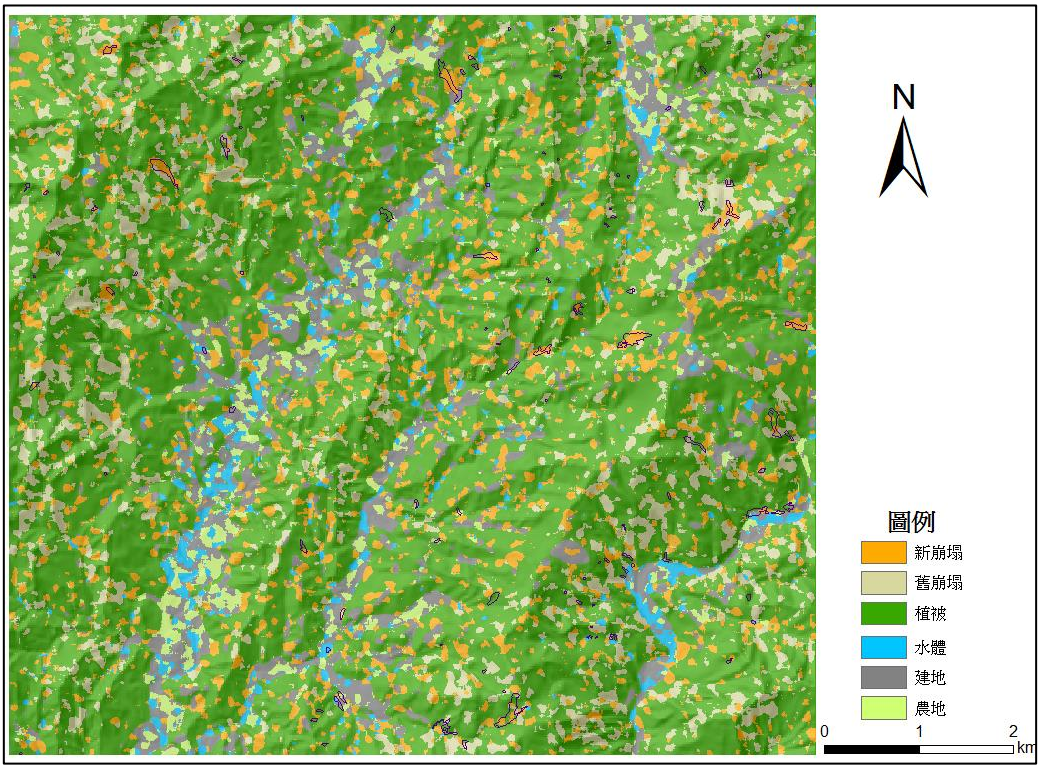


六、0611 事件紋理影像分類

VH 紋理分類



0611 事件 VV 紋理分類



VH+VV 紋理分類

