

應用合成孔徑雷達干涉技術評估 集水區災害規模及治理成效

陳俊愷* 林伯勳** 蕭震洋* 洪寶發*** 鐘啟榮****

摘要

本文旨在針對雷達系統發展沿革及產製影像處理技術進行一般性介紹，再藉由既有雷達影像配合多時期歷史遙測資料進行實際案例評析，評估災害發生後引致災害規模，以及量化工程投入後所衍生治理成效之優劣，經案例分析成果顯示，卡拉溪集水區經治理後崩塌地面積大幅縮減，崩塌地緣覆率達 94.8%，另追蹤發現河幅與沖淤變動情形均無明顯變動，且整體土砂淤積與沖刷量體皆較治理前縮減；顯見已投入之工程現階段可助於野溪河道穩定。文中，亦歸納雷達影像應用於坡地災害評估適用性及未來應用範疇，以供工程界應用參考。

關鍵字：雷達系統、影像處理、災害規模、治理成效

一、前言

根據我國氣候變遷調適策略政策綱領研析聯合國政府間氣候變遷委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）指出在 20 世紀期間，地球大氣中二氧化碳濃度已經升高 30%，造成地球表面的溫度升高約 0.7℃。全球氣候變遷現象已經明顯發生，在氣溫方面，地球升溫造成熱浪發生機會升高，部分地區將變得更乾旱，且颱風與熱帶氣旋發生的機會升高（中央災害防救委員會，2013）。臺灣由於本身地理特性特殊，氣候變遷脆弱度與災害風險遠高於世界其他地區，未來氣候變遷帶來的最大衝擊與挑戰，就是過去數年或數十年發生之災害轉變成常態性。

民國 98 年 8 月 8 日莫拉克颱風造成我國中南部及東南部河川流域嚴重之颱風災情，包括嚴重的土砂與崩塌災害、堰塞湖、河道淤砂、水庫淤積等複合性災害，尤以山區坡地崩塌情況更為嚴重，並直接衝擊道路設施。通常於災害發生後，在第一時間各級單位以及民眾自發性救災，且後續各式補助與復原的行動中，常由於無法掌握災害確切的發源地、範圍、發展趨勢以及受災程度而造成前述各項行動的成效不佳。藉由掌握災害準確資訊，可提出適當災害預測與警告（顏君毅等人，2007），傳統災害調查方法多以動員進行現地勘查、測量為主，其優點為資訊較為精確（徐百輝等人，2009；葉家承等人，2010），但囿於人力有限、無法及時組織派遣、災害位置偏

* 中興工程顧問社防災科技研究中心正研究員

** 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源組組長

*** 行政院農業委員會水土保持局監測管理組副工程師

**** 行政院農業委員會水土保持局土石流防災中心簡任技正

遠、交通阻斷、地形起伏等限制因素造成資訊不足，甚至造成資訊錯誤（顏君毅等人，2007；葉家承等人，2010）；另在災害發生時派遣人力至受災地區，其生命安全影響甚鉅，而 3S — 地理資訊系統（GIS）、全球定位系統（GPS）、遙測影像（RS）技術則扮演相當關鍵重要的角色。一般因應國內外重大災害發生時災中應變與防救之需求，考量無生命安全疑慮境況下，利用災後取得之遙測影像，快速進行大範圍災害規模及影響範圍之研判，據以提供給相關單位作為應變決策參考（Eguchi *et al.*, 2001；Skidmore *et al.*, 2007）；或是經災害治理後集水區，持續透過衛星影像辦理即時廣域環境監測工作，追蹤集水區坡面及河道土砂環境變遷，除可避免大規模土砂災害發生，且利於評估治理成效及滾動檢討水土保持需求（陳俊愷等人，2015）。

近期遙測技術隨著電腦硬體之快速發展而大幅進步，應用範疇更加廣泛，遙測資料價格及產製成本日益降低，尤其是應用遙測技術於廣域資料蒐集及處理之效率及價格，相較傳統現地調查方式，更具優勢。此外，大規模天然災害事件後之即時資料蒐集，囿於救災而有時間上的急迫性，目前國際皆以遙測技術進行災後大範圍資料調查。遙測影像依蒐集資料方式可大致分為光學及雷達兩大類，光學遙測影像易於集水區環境相關資訊判讀及科學量化分析，然光學系統僅能於白天進行觀測且易受雲、霧遮蔽影響。根據國家太空中心近十年福衛二號拍攝任務經驗，以臺灣地區每年湊整低雲覆之衛星影像甚難；反之，雷達影像幾乎完全不受到雲霧影響，能夠災後第一時間取得數據，與災害依時性關係較佳。

以民國 100 年 8 月 8 日侵台之莫拉克颱風為例，常用光學衛星影像均無法於第一時間拍攝中南部災情現況，圖 1 為民國 100 年 8 月 11 日臺灣地區星載雷達與光學系統拍攝的比較圖（a）為 RADARSAT-2 C 波段雷達衛星，（b）為

SPOT-4 光學衛星，比較兩圖可知光學衛星拍攝影像中，臺灣本島有超過 80% 地區受到雲層覆蓋而無法觀測，相較於同日拍攝之雷達影像完全不受天候影響。

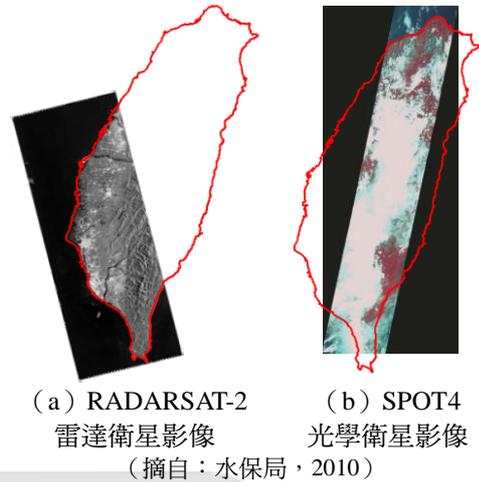


圖 1 莫拉克颱風期間雷達及光學遙測影像比較圖

由於雷達影像尚具光學影像缺乏的相位資訊，可藉由相位差快速且全面的獲取高精度的地表高程資訊（謝嘉聲和史天元，2002），利於地表高差分析。目前常見有雷達、光學系統適用性比較如表 1，表中顯示雷達系統相較於光學系統，具有災後進行全天候觀測之絕對優勢。鑑此，本文首先針對雷達影像發展沿革及相關處理技術進行文獻回顧，接著，透過以一個集水區作為案例說明，藉由既有雷達影像配合多時期歷史遙測資料，評估災害發生後引致災害規模及誘發土砂產量，另再加以量化工程投入後所衍生治理成效之優劣，據以說明雷達影像應用於坡地災害評估之適用特性及分析價值；最後，再據以歸納未來可研究方向及應用範疇。

表 1 雷達及光學系統適用情況比較表

比較項目	雷達系統	光學系統
天候狀況	全天候可觀測	受天候影響
判識特性	判識較難	判識較易
數值地形高程產製精度	0.5m ~ 2.2m	1m ~ 5m

二、文獻回顧

雷達感測系統（RAdio Detecting And Ranging, Radar）原意為「無線電波偵測及測距」，係由主動發射雷達電磁波對目標進行照射，並利用目標對電磁波的反射接收其回波、轉發和自身輻射來發現目標（如圖 2），再從接收信號中獲取目標的位置、速度、形狀和旋轉等參數（Skolnik, 1962、1970；Goldstein *et al.*, 1988；Curlander *et al.*, 1991；Massonnet *et al.*, 1998；Soumekh, 1999）。初期發展雷達偵測技術，需先濾除地表反射回波造成之雜訊，才能釐清受測目標物；之後，因雷達被安裝於飛機及人造衛星等載具上，將地表的反射回波接收並處理成有效資訊，用以偵測遠距離目標，測定目標坐標高效率及全天候使用等特性，亦可監測地表的形貌（Edison *et al.*, 1960；Lin *et al.*, 1997；Rignot *et al.*, 2003；Farr *et al.*, 2007；張中白和陳錕山，2005）。本節首先簡介雷達技術發展及應用，及影像處理技術之關鍵，最後延伸說明如何應用合成孔徑雷達干涉技術評估集水區災害規模及治理成效。

（一）發展與應用

雷達技術起源於美國，自 1950 年代發展至今，經歷由單波段、單偏極（Polarization）、單一工作模式、固定入射角轉向多波段、多偏極、多工作模式、多入射角發展。此外，雷達系統於擷取地表資訊的過程中，記錄的資訊包含衛星與地表的相位資訊，在適當的軌道條件下，以拍攝所獲雷達影像複數訊號進行獲取相位差，進而瞭解地表變動情形。若以不同酬載載體運行軌道或飛航高度，由高至低分別為星載（Space-Borne）、機載（Air-Borne）、無人飛行載具（Uumanned Aerial Vehicle, UAV）、地面型

（Ground-Base）包含車載及固定式等四類（Rott, *et al.*, 1987；Ward, 1998；Kayton, 1990；Keller *et al.*, 1989），如圖 2 所示：現階段以星載所偵測範圍及實務應用最為成熟。目前較著名雷達干涉術研究機構，主要有美國太空總署（NASA）、美國噴射實驗室（JPL）、阿拉斯加合成口徑雷達機構（Alaska SAR Facility, ASF）、歐洲太空總署（ESA）、德國航空研究中心（DLR）、日本宇宙航空研究開發機構（JXAX）等。

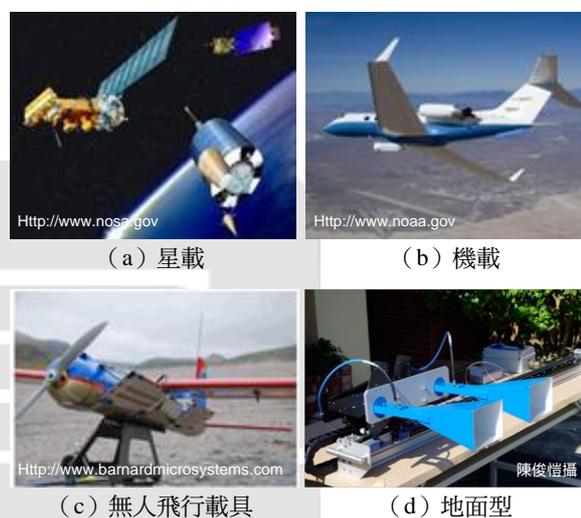


圖 2 各式雷達系統載具示意圖

由於雷達技術具有全時、全天候、多波段、多偏極、可變側視角及高解析度等優點，除可詳細、準確測繪地形、地貌，獲取地球表面的資訊，另可穿透地表和自然植被收集地面淺層資訊，甚至於惡劣的環境下，可提供較高解析度地面測繪資料（Gorokhovich *et al.*, 2006），故最適於進行地形地貌或災害研究及分析評估工作。除災害觀測應用外，另有數值高程資訊萃取、地表變形（斷層及地震）觀測、地表物體與植被觀測、地下水與礦產應用等，綜整相關應用範疇列於表 2。

表 2 雷達影像應用範疇彙整表

應用	範疇
災害防治	觀測颱風、豪雨、洪水、風雪、山崩、土石流、堰塞湖等災害事件之發源地、範圍、發展趨勢以及受災程度等。
數值高程資訊萃取	數值地形產製、高差位移量估算、地形圖製作及更新等。
地表變形觀測(斷層及地震)	估算地震、地層下陷、斷層位置、褶皺構造、斷層錯動量、冰河移動速率等。
地表物體與植被觀測	土地利用與地表物體分類、植生辨別、農作物生長監測與產量預估、森林盜採、海洋油污、船隻監測等。
地下水與礦產應用	地下水位監測、礦產偵測等。

(二) 影像處理技術

根據農航所(2013)建立合成孔徑雷達標準影像處理流程,包含影像成像處理、系統輻射值處理、多觀點振幅影像解算處理及影像正射處理等(如圖3),若需應用雷達影像於集水區崩塌地及野溪復育情形評估,則雷達影像必須經系統輻射值處理、影像正射等處理工作。



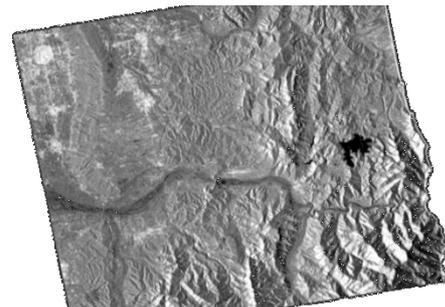
(修改自:農航所,2013)

圖 3 雷達影像處理標準作業流程圖

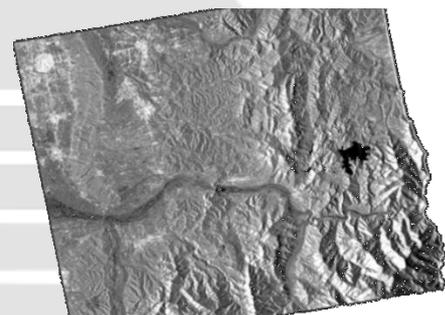
1. 系統輻射值處理

輻射校正的主要目的係修正合成孔徑雷達對於相同地物因分布面積不同,而有不同雷達

截面積值的誤判情況,藉以提供定量遙測的資訊(Moore et al.,1986; Cossu et al., 2007),如圖4(a)為未經輻射校正之雷達影像,圖4(b)為經過輻射校正之雷達影像。經校正之合成孔徑雷達影像資料即可對不同時間、不同雷達、不同感測參數相互比較,利於長期觀測和動態偵測分析之用。



(a) 未經輻射處理雷達影像



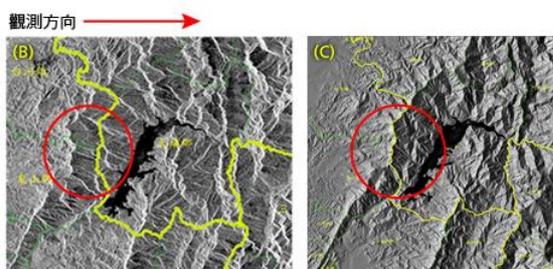
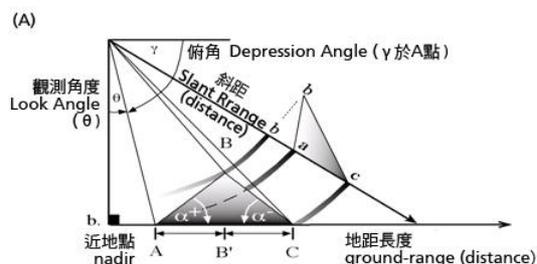
(b) 經輻射處理雷達影像

圖 4 雷達影像輻射校正比較示意圖

2. 影像正射處理

合成孔徑雷達系統因採側拍,加上地形起伏的影響,未經幾何校正影像幾何扭曲不易判讀外且無法與其他具空間坐標之GIS圖資相互套疊。影像正射處理係針對合成孔徑雷達影像受地形起伏所產生的幾何變形進行校正,需搭配載具、雷達紀錄資訊以及地面數值地形模型(DEM)資料,結合參考正射影像圖資與選取控制點的方式,將合成孔徑雷達影像中疊置、陰影以及其他幾何錯位的情況校正回來(Cossu et al., 2007; Adam et al., 2004),使其具較正確空間位置。以圖5為例,圖(A)為疊置效應幾何示意圖,左

下圖 (B) 山區的稜線是往西邊傾倒，表示山頂的回波訊號先於底部回波訊號抵達天線，右下圖 (C) 中看出稜線被拉回到原來的位置。



(摘自：農航所，2013)

圖 5 合成孔徑雷達影像疊置效應示意圖

3. 數值地形產製

以雷達影像產製數值地形，可採干涉合成孔徑雷達 (Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR)，其原理係根據兩次雷達天線 (分別為 S1、S2) 拍攝相對位置 (又稱為基線，Baseline；B)，以拍攝所得到的兩次雷達影像複數訊號 (如圖 6)；所接收的同一地面點訊號的相位差值為 δ ， λ 為波長， H 為航高， θ 為視角， r 為第一個天線至地面點的距離， δ 為第二個天線至地面點的距離與 r 的距離差值， α 值為基線與水平線的夾角，因在斜距方向因路徑差所引起的相位差 (Phase Difference) 不同，配合已知的成像幾何關係，即可計算地面高程值 (z)，進而製作數值地形 (如圖 7)，公式如下：

$$z = H - \frac{\left[\frac{\lambda \phi}{4\pi} \right]^2 - B^2}{2 \left[B \times \sin(\theta - \alpha) \right] - \left[\frac{\lambda \phi}{4\pi} \right]} \times \cos \theta \quad (1)$$

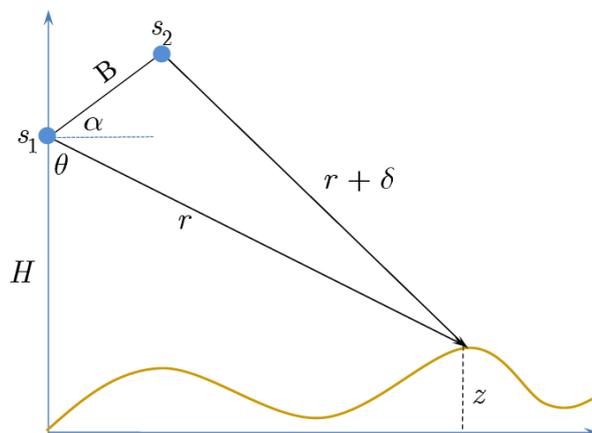


圖 6 雷達干涉產製數值高程示意圖

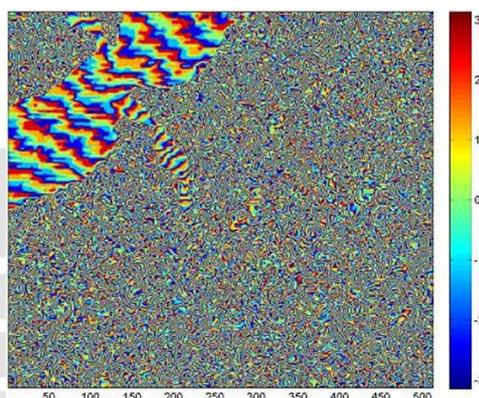


圖 7 雷達干涉產製數值產製成果示意圖

(三) 成效評估方法

一般針對同一區域，依治理時間界點，區分為「治理前」、「治理後」；或針對同一時間點，依治理措施投入有無，區分為「已治理」與「未治理」，進行相對性比較，以評估水土保持工程對於集水區崩塌地及野溪溪床治理成效，評估架構展繪如圖 8，圖中坡面崩塌與野溪溪床評估重點，說明如次：

1. 坡面崩塌：參考航空照片或衛星影像判釋由災害事件或人為治理引致崩塌地變異點，再配合近期數值地形 (如圖 9)，評估坡面崩塌面積、崩塌量體及崩塌復育等量化數據。
2. 野溪溪床：參考航空照片或衛星影像，圈繪野溪主流河道範圍、河道中橫向構造物 (壩)，

並將主流河道依連續橫向構造物分布，區分為工程區段與非工程區段評估溪床河幅寬度再配合近期數值地形予以量化沖淤變動，如圖 10。

以集水區尺度為單元，綜整以上評估成果說明災害治理前後環境相對惡化或復育情形，據以實質量化呈現集水區治理成效。

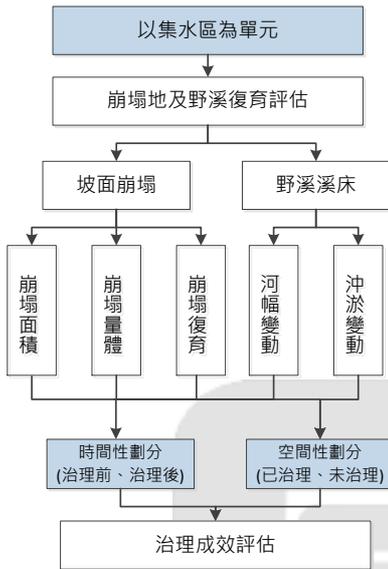


圖 8 本文建議集水區治理成效評估架構圖

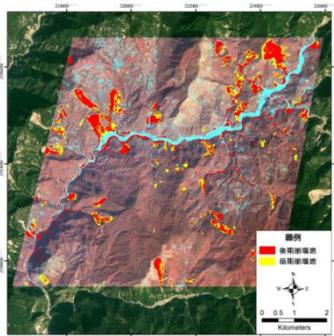


圖 9 崩塌地變異點判釋示意圖（以曾文溪、民國 99 年莫拉克颱風後影像為例）



圖 10 野溪溪床工程區段與非工程區段劃分示意圖

三、案例評析

為瞭解雷達影像應用於坡地災害評估之適用特性及分析價值，選定位於臺灣北部卡拉溪子集水區，作為研究案例；此區曾遭受民國 93 年艾利颱風事件侵襲引致大規模坡地災害，且於災害發生後，皆有治理工程投入進行分期治理，其地理位置如圖 11 所示；本節經蒐集災前、災後以及治理後現存相關遙測資料，並參照前述治理成效評估方法（如圖 8），研提雷達影像於坡地災害評估分析架構，如圖 12；由圖可知，就蒐集資料屬性及存在時間尺度而言，崩塌坡面及野溪溪床可用光學影像資料進行判釋區分；崩塌量體及沖淤變動可利用數值地形進行相減予以量化，其中災前及災後之數值地形來源，以航照及空載光達產製技術為主；治理後之數值地形來源，以民國 102 年 11 月 10 日與 11 月 10 日至 26 日之雷達影像對，採合成孔徑雷達干涉技術產製數值地形為主（如圖 6）。最後，綜整相關分析成果，說明災害發生前後引致災害規模，以實測資料量化工程投入後加速環境復育，進而衍生治理成效之優劣。

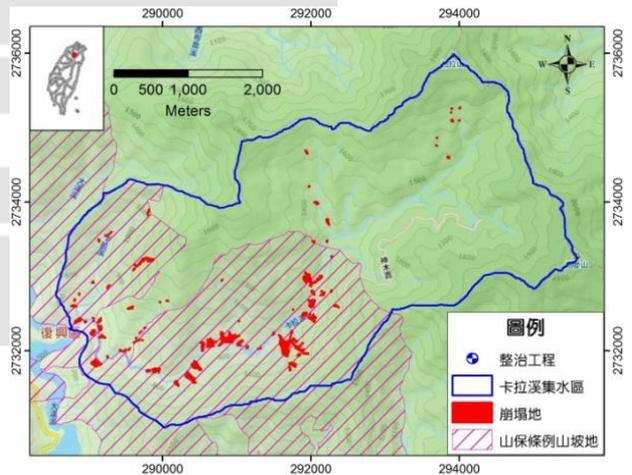


圖 11 卡拉溪地理位置圖

茲就坡面崩塌及野溪溪床各項分析結果，說明如下：

(一) 崩塌面積

民國 93 年艾利颱風造成卡拉溪坡面崩塌為 12.5 公頃（統計如表 4，崩塌地分布如圖 13），於治理工程投入後迄民國 102 年止，崩塌地面積大幅縮減為 1.0 公頃。值得注意為中上游靠近道路及主流旁亦有明顯兩處崩塌產生，故仍須持續監測，有助於後續滾動式檢討水土保持工程投入需求。

表 4 卡拉溪集水區崩塌面積分析成果表

年分	崩塌地面積 (公頃)			新增崩塌地面積 (公頃)	崩塌復育地面積 (公頃)
	近岸	離岸	小計		
92	2.4	1.3	3.7	-	-
93	9.6	2.9	12.5	10.3	1.5
102	0.4	0.6	1.0	0.5	12.0

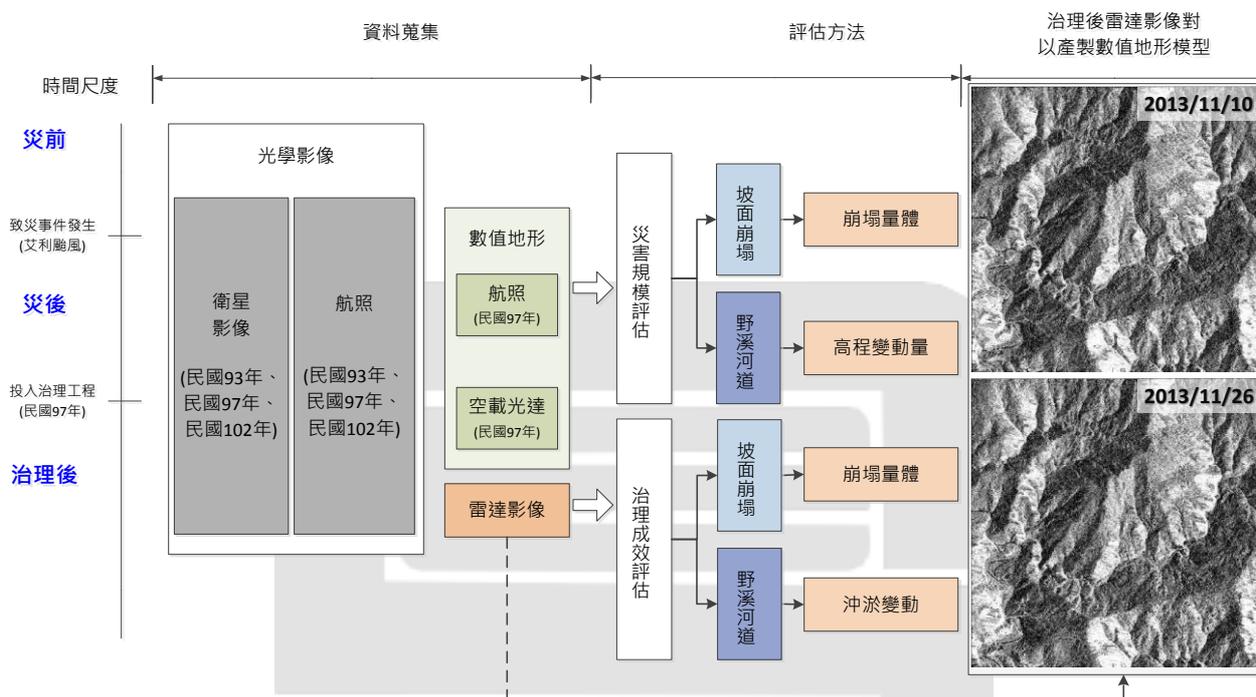


圖 12 雷達影像應用於坡地災害評估分析架構及治理後建置雙幅雷達影像示意圖

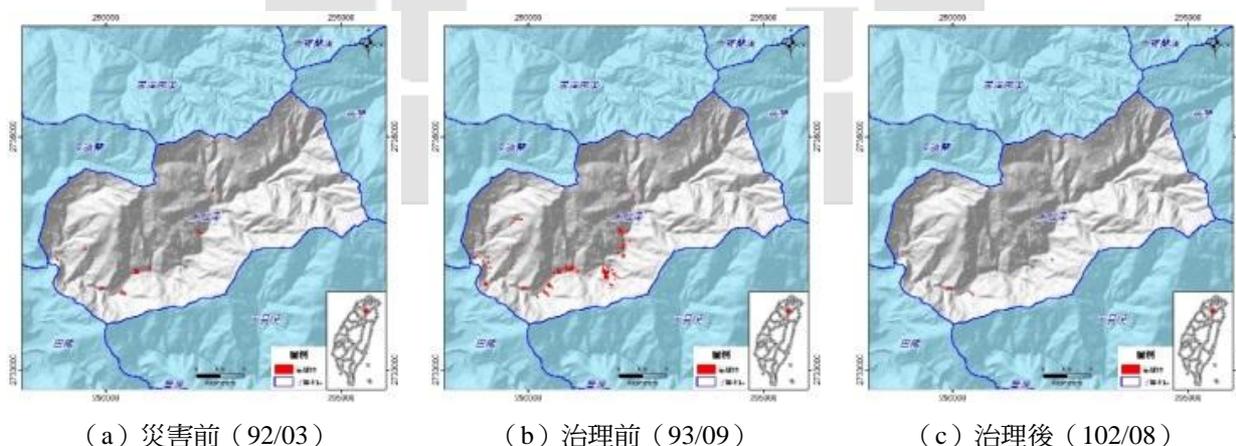


圖 13 卡拉溪各期崩塌地分布圖

(二) 崩塌量體

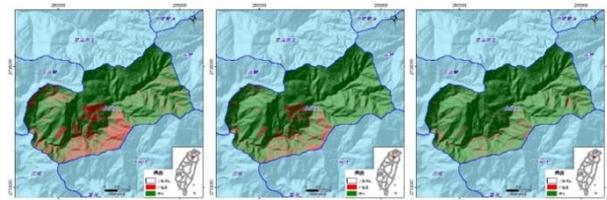
民國 93 年艾利颱風後造成集水區上游引致大量崩塌，以民國 93、94 年內政部地政司航拍產製數值地形與民國 98 年空載 LiDAR 監測成果相比，卡拉溪支流連同坡面崩塌土方沖刷共約 8.3 萬方（如表 5），且造成河床下刷，可能導致鄰近河道坡面失穩（如圖 15）。災害治理後分析結果顯示，卡拉溪主流兩側邊坡陡峭且持續有零星土砂產出，且堆積於溪床，整體土砂淤積與沖刷量體皆較前期縮減，

表 5 卡拉溪集水區崩塌量體分析成果表

時間區間	土砂沖刷 (10 ⁴ m ³)			土砂淤積 (10 ⁴ m ³)		
	主流河道		支流及坡面	主流河道		支流及坡面
	工程區段	非工程區段		工程區段	非工程區段	
災害後至治理前 (民國 93-98)	-2.9	-11.8	-8.3	+1.6	+6.1	+4.9
災害後治理前至治理後 (民國 98-102)	-2.4	-5.7	-0.6	+0.2	+2.2	+0.4

(三) 崩塌復育

民國 93 年艾利颱風造成卡拉溪坡面大量崩塌，致使集水區之崩場地綠覆率由 89.5% 下降至 80.7%。經相關工程投入治理後，至民國 103 年分析成果顯示環境復育良好，崩場地綠覆率達 94.8%，且崩塌復育已優於 65%，但尚有仍有新增崩塌產生，故仍須持續監測，將有助於災害擴大前優先投入治理，如圖 16。

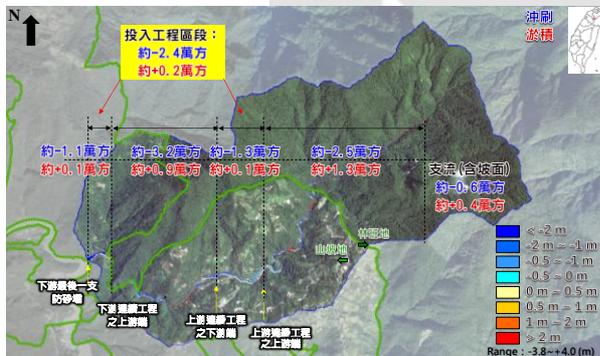


(a) 災害前 (2003/03) (b) 災害後治理前 (2004/09) (c) 治理後 (2013/08)

圖 16 卡拉溪崩塌復育率分析成果圖



(a) 災害前至災害後治理前期間



(b) 災害後治理前至治理後期間

圖 15 卡拉溪各期地形高程變化量分析成果圖

(四) 河幅變動

民國 93 年艾利颱風造成卡拉溪中上游河幅平均寬度擴張約 64.8%，下游僅較災害前增加約 9.7%；而經治理工程投入後，加上近年較少直接對卡拉溪集水區帶來強降雨或長延時、並引致大量土砂災害之颱風豪雨事件，追蹤至民國 102 年，可以發現河幅無明顯變動，顯見已投入之工程現階段可穩定卡拉溪河幅變化，如圖 17。

(五) 沖淤變動

民國 93 年艾利颱風造成重大災害後，溪床平均變動高程皆呈現沖刷情形，平均沖刷深度為 -4.43~-0.03m；經治理工程投入後並追蹤至民國 103 年時，於工程區段之平均變動高程變動幅度約從 -1.21m~+2.60m 間，相較穩定於非工程區段之變動幅度，約從 -5.68m~+2.79m 間，如圖 17。

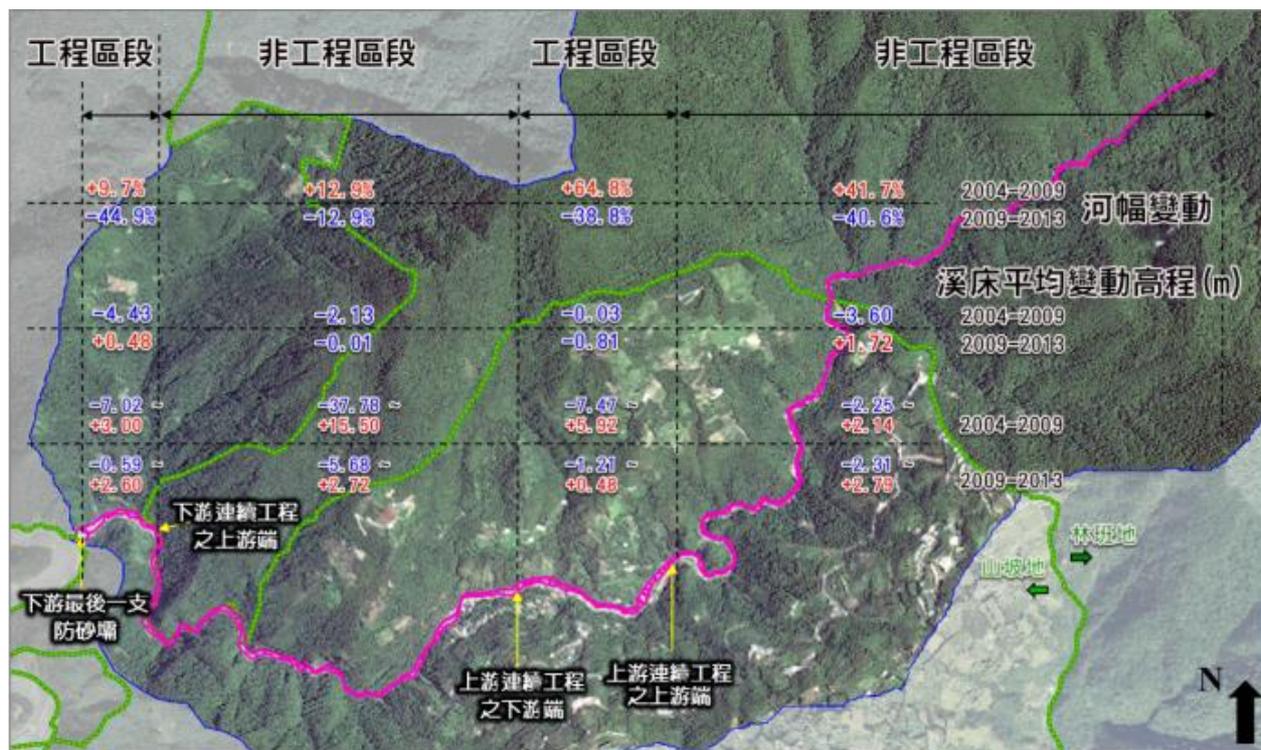


圖 17 卡拉溪河幅及沖淤變動分析成果圖

(六) 綜合評析

卡拉溪集水區經前述各項評估結果顯示，坡面崩塌面積已大幅縮減，崩塌綠覆率已達 94.8%，優於災害前之環境境況，整體集水區之沖淤量體相較於災害後土砂環境已有趨穩之跡象；值得注意的是，於中上游靠近道路及主流旁仍有明顯兩處崩塌產生。另外，追蹤至民國 102 年野溪溪床河幅變動狀況，已無明顯改變；另工程區段相對非工程區域，其沖淤變動相對較小，呈現相對穩定現象；上述皆可說明經治理工程投入後，可發揮穩定溪床之功效。整體集水區環境仍有大量土砂料原產出並堆積於工程區段，建議應投入相關疏濬或治山防災工程，另並建議仍需持續進行集水區環境相關監測工作，將有助於滾動式檢討水土保持需求。

四、結論與建議

透過雷達影像具有良好之穿透雲霧特性，與一般常用之光學遙測影像相互比較，除購置價格外，雷達波能更輕易穿透雲霧煙塵，甚至稀疏植生遮蔽而到達地表，反射後再被載具上之感測器接收；另外，雷達技術亦可在夜間順利施測，而且雷達波掃描能迅速提供整個面狀區域地表資訊，是其他測量方法難以達成。此外，雷達衛星一旦進入固定軌道運行，就能依指定排程拍攝、提供地表雷達影像，可比對不同時間擷取資訊，計算出地表變形速率。針對突發災害事件，可查詢與蒐集發生前後的歷史影像進行比對，計算出該場事件所造成的地表變形量。本文藉由既有雷達影像配合多時期歷史遙測資料進行實際案例評析，評估災害發生後引致災害規模，以及量化工程投入後所衍生治理成效之優劣，亦歸納雷達影像應用於坡地災害評估適用性及未來應用範疇，以供工程界應用參考。

謝 誌

感謝行政院農業委員會水土保持局，提供計畫（編號 SWCB-103-073）經費補助，作者深表謝忱。

參考文獻

- Curlander, J. C., McDonough, R. N. (1991) Synthetic Aperture Radar, Wiley, New York
- Edison, A., Moore, R. K., Warner, B. (1960) Radar Terrain Return Measured at Near-Vertical Incidence, Antennas and Propagation, IRE Transactions, 8 (3), pp.246-254
- Eguchi, R. T. *et al.*, (2001) Resilient Disaster Response: Using Remote Sensing Technologies for Post-Earthquake Damage Detection, Earthquake Engineering to Extreme Events (MCEER), Research Progress and Accomplishments
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Roth, L. (2007) The Shuttle Radar Topography Mission, Reviews of Geophysics, 45 (2)
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A., Werner, C. L. (1988) Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping, Radio Science, 23 (4), pp.713-720
- Gorokhovich, Y., Voustianiouk, A. (2006) Accuracy Assessment of the Processed SRTM-Based Elevation Data by CGIAR Using Field Data from USA and Thailand and Its Relation to the Terrain Characteristics, Remote Sensing of Environment, 104 (4), pp.409-415
- Kayton, M. (1990) Navigation: Land, Sea, Air & Space. IEEE, New York
- Keller, W. C., Wismann, V., Alpers, W. (1989) Tower-Based Measurements of the Ocean C Band Radar Backscattering Cross Section, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 94 (C1), pp. 924-930
- Lin, I. I., Kwoh, L. K., Lin, Y. C., Khoo, V. (1997) Ship and Ship Wake Detection in the ERS SAR Imagery Using Computer-Based Algorithm, Geoscience and Remote Sensing, IGARSS'97, Remote Sensing-A Scientific Vision for Sustainable Development., IEEE International, Vol. 1, pp.151-153
- Massonnet, D., Feigl, K. L. (1998) Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface, Reviews of Geophysics, 36 (4), pp.441-500
- Moore, H. J., Jakosky, B. M. (1989) Viking Landing Sites, Remote-Sensing Observations, and Physical Properties of Martian Surface Materials, Icarus, 81 (1), pp.164-184
- N. Adam, B. M. Kampes, M. Eineder (2004) Development of a Scientific Persistent Scatterer System: Modifications for Mixed ERS/ENVISAT Time Series, ENVISAT & ERS Symposium, Salzburg, Austria, pp.9
- Rignot, E., Rivera, A., Casassa, G. (2003) Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise, Science, 302 (5644), pp.434-437
- Rott, H., Mätzler, C. (1987) Possibilities and Limits of Synthetic Aperture Radar for Snow and Glacier Surveying, Annals of Glaciology, 9, pp.195-199
- Skidmore, A. K., Bijker, W., Schmidt, K., Kumar, L. (1997) Use of Remote Sensing and GIS for Sustainable Land Management, ITC Journal 3, pp.302-315
- Skolnik, Merrill Ivan (1962) Introduction to Radar Systems
- Skolnik, Merrill Ivan (1970) Radar Handbook
- Soumekh, M. (1999) Synthetic Aperture Radar Signal Processing, Wiley, New York
- Ward, J. (1998) Space-Time Adaptive Processing for Airborne Radar
- 行政院農業委員會水土保持局 (2010) 雷達影像觀測技術於坡地災害之應用
- 張中白、陳錕山 (2005) 臺灣板塊邊界觀測計畫－應用雷達差分干涉技術於臺灣西部地殼變形研究 (II)
- 陳俊愷，林伯勳，冀樹勇 (2013) 運用多光譜及多時期衛星影像評估石門水庫集水區植生復育演變，中興工程，第 121 期，第 3-12 頁
- 陳俊愷，林伯勳，冀樹勇，簡以達，蔡明發 (2015) 莫拉克颱風災後引致水庫集水區上游重點崩塌地之土砂安定性評估，中興工程，第 128 期，第 25-36 頁
- 葉家承、張智昌、徐百輝 (2010) 福爾摩沙衛星影像於災害應變之應用－以四川汶川地震為例，國研科技，第 19 卷，第 56-61 頁
- 行政院農業委員會林務局農林航空測量所 (2013) 雷達遙測技術於林地災害判釋之研究－委託研究計畫成果報告
- 謝嘉聲、史天元 (2002) 以 DORIS 進行雷達干涉技術產生數值地形模型，第 21 屆測量學術及應用研討會
- 顏君毅、張中白 (2007) 遙測影像技術與勘災/防災運用：國土資訊系統通訊，第 61 期，第 57 頁