

九份二山震災崩塌地復育之長期監測與評估

林文賜⁽¹⁾ 黃碧慧⁽²⁾ 呂雯惠⁽³⁾

摘要

集集大地震(1999/9/21)發生至今超過二十年，震災造成台灣中部山區崩塌裸露嚴重，因此崩塌地變遷及植生復育情形，實有探討之必要性。本研究以南投縣中寮鄉與國姓鄉交界之九份二山為樣區，藉由多時期 SPOT 衛星影像結合自組特徵映射分類法判釋崩塌區位變遷、及評估崩塌地植生恢復情形，作為該區後續災害治理之參考及大自然對崩塌地復育能力之探討。分析結果顯示，在地震初期(1999/9/27)萃取之崩塌地面積為214.53公頃，震災二十年後(2020/2/23)崩塌地面積為28.39公頃，復原的面積為186.14公頃，崩塌地植生恢復率為86.77%。崩塌復原區位主要為崩塌面之堆積區位，因土壤鬆軟有利於植生入侵或殘存植生恢復生長，而未復原區位為崩塌面之崩落區位，因岩盤裸露較不利於植生入侵。九份二山崩塌地在長達二十餘年之復育，即使遭受十多場颱風豪雨之侵襲，裸露地表隨著植生入侵或殘存植生恢復而逐年復原，顯示大自然本身有極佳的环境復育能力。

關鍵詞：震災崩塌地、自組特徵映射分類法、崩塌地植生恢復

Long-term Monitoring and Assessment of Restoration for the Earthquake-induced Landslide at the Chiufanershan Area

Wen-Tzu Lin ⁽¹⁾ *Pei-Hui Huang* ⁽²⁾ *Wen-Hui Lu* ⁽³⁾

ABSTRACT

It has been more than 20 years since the Chi-Chi Earthquake (September 21, 1999), which caused serious landslides in the mountainous areas of central Taiwan. Therefore, it is necessary to investigate the changes of the landslides and the restoration of the vegetation. This study used multi-period SPOT satellite imagery combined with the Self-Organizing Map to evaluate the changes of the landslide area and the vegetation recovery at the Chiufanershan area. The results of the assessment can be used as a reference for the subsequent disaster management in the area and as an environmental sustainability issue for nature ability to restore the vegetation of the landslides. The analysis results showed that the area of the landslide extracted at the beginning of the earthquake (1999/9/27) was 214.53 hectares, and the area of the landslide twenty years after the earthquake (2020/2/23) was 28.39 hectares, a decrease

⁽¹⁾南華大學永續綠色科技碩士學位學程教授(通訊作者 e-mail: skytree59@nhu.edu.tw)

⁽²⁾逢甲大學地理資訊系統研究中心助理教授

⁽³⁾南華大學永續綠色科技碩士學位學程碩士生

of 186.14 hectares. The calculated vegetation recovery rate at landslides was 86.77%. The recovered landslide was located in the area of the collapse surface of the pile because of the soft soil which was favorable for the invasion of vegetation or the regeneration of residual vegetation for a long time. The unrecovered areas were located at the fallout areas of the landslide face, where the exposed rocks were less favorable for vegetation invasion. During the more than 20 years of vegetation recovery in the area, even attacked by typhoons and heavy rains, the exposed surface recovered year by year with the vegetation invasion or residual vegetation recovering from the collapse surface, indicating that nature itself has excellent vegetation recovery ability.

Keywords : Earthquake-induced landslide, Self-Organizing Map, Landslide vegetation recovery

一、前言

台灣位處於歐亞大陸與菲律賓板塊擠壓區及環太平洋地震帶上，因此地震極為頻繁。1999年9月21日之集集大地震，為芮氏規模7.3及震源深度8公里之淺層地震，對台灣中部山區造成嚴重之崩塌災害。農村水保署（原名為水土保持局自2023/8/1起更名）及林務局在震災初期以衛星影像分析南投縣境內崩塌地，崩塌區位約有1401處，崩塌地總面積高達4274 ha，並以草屯到埔里間烏溪沿岸的九九峰地區及南港溪上游支流韭菜湖溪之九份二山地區破壞規模最為嚴重（鄭旭涵，2000，Chang, 2000; Lin et al., 2004）。農村水保署在震災後依據行政院921震災災後重建推動委員會指示，辦理「九份二山國家地震紀念園區」整體規劃及建設，自921震災後至今，在該區投入大量的整治復建工作，包括崩塌源頭治理、土石流監控、植生復育調查監測及治理等。

由於集集大地震至今已二十餘年，期間多場颱風侵襲帶來豪雨造成崩塌擴大、河道

沖刷、土石流等二次災害，對下游地區環境生態及保全對象造成甚大危害。依中央氣象局記錄，對九份二山地區影響較大之颱風，包括2001/7/30桃芝颱風、2004/7/1敏督利颱風、2004/8/25 艾利颱風、2005/8/4 瑪莎颱風、2008/7/18卡玫基颱風、2008/9/14辛樂克颱風、及2009/8/8莫拉克颱風等。而震災發生至今對該區崩塌地之相關研究，包括崩塌機制、變遷分析、水土保持、植生復育、景觀生態調查、地質調查或治理監測等（吳洛健，2001；壽克堅等，2001；許銘鋒等，2002；Lin et al., 2006；馮梓璇，2007；王文能，2019；農委會特有生物研究保育中心，2019）。

2015年聯合國提出永續發展目標（Sustainable Development Goals, SDGs），在兼顧經濟發展、社會進步與環境保護，邁向永續發展之路。而台灣於105年5月1日施行之「國土計畫法」，對於長期以來之坡地超限制利用問題，逐漸回歸自然生態之永續利用目標並於2022年9月公布第二部「國家自願檢視報告」，從經濟、社會、環境、政府治理及全球夥伴關係五大面向，回顧台灣永續發展的實

踐方向。由於921地震發生至今已二十餘年，崩塌區位變遷及植生恢復情形，實有分析及探討之必要。本研究以南投縣中寮鄉與國姓鄉交界處之九份二山地區為樣區，以921震災前後不同時期之 SPOT 衛星影像結合自組特徵映射分類法萃取崩塌區位變遷、植生復育評估、以及進行現地調查等，做為該地區崩塌地環境復育及防災治理之參考。

二、研究材料與方法

1. 研究樣區

九份二山位於南投縣國姓鄉與中寮鄉交界處如圖1 (震災後一年之 SPOT-1衛星自然色影像，原始波段為綠光、紅光及近紅外光)。其位於烏溪上游之集水區，以韭菜湖溪及澀仔坑溪為主要溪流，山系以炭斗山系及大岸山系為主，標高為1174公尺。九份二山為921大地震之地震震爆點，崩塌地範圍前山北起太平角海拔650公尺至炭斗山南稜海拔1040公尺，南屆韭菜湖溪堰塞湖海拔530公尺，東起炭斗山南稜，西迄中興橋前。受到地震強大震動加速度影響，整個順向坡岩體沿層理面脫離破裂瀉下，崩落之土石以極高之速度向東南傾瀉而下，並在東南側下方之中興橋受阻而堆積，岩層滑衝距離約1公里，崩積土石形成天然土石壩，並堵塞澀仔坑溪、韭菜湖溪而形成堰塞湖。韭菜湖溪堰塞湖之最大水深為29公尺，最大蓄積容量678,000立方公尺，淹水面積為4.43公頃；而澀仔坑溪堰塞湖之最大水深為37.5公尺，最大蓄積容量1,089,700立方公尺，淹水面積為6.48公頃(鄭旭涵，2000)。

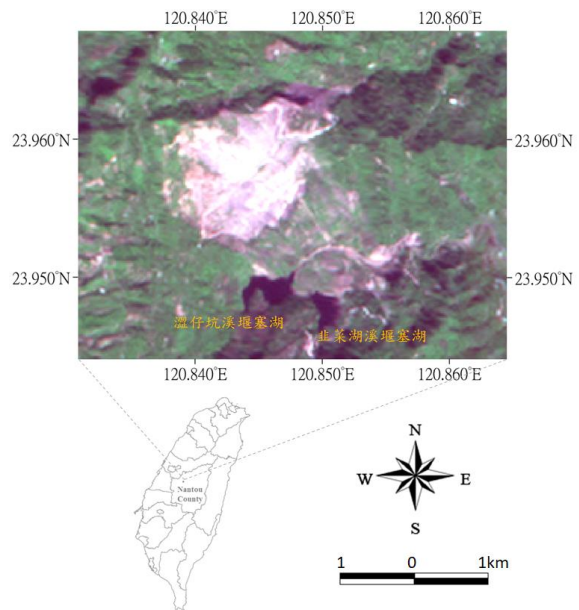


圖1 九份二山位置圖

Figure 1 Location of the Chiufanershan area

2. SPOT 衛星影像

蒐集九份二山震災前後之 SPOT 多期衛星影像資料，分別為1999/4/1(地震前)、1999/9/27(地震初期)及2020/2/23(地震後二十年)之影像(圖2~4)，以供崩塌區位萃取及植生恢復評估之用。而本研究 SPOT 衛星影像資料係購自中央大學太空及遙測研究中心，圖2及3之影像來源為 SPOT-1衛星、圖4為 SPOT-7衛星，使用之波段組合為綠光、紅光及近紅外光三個波段。

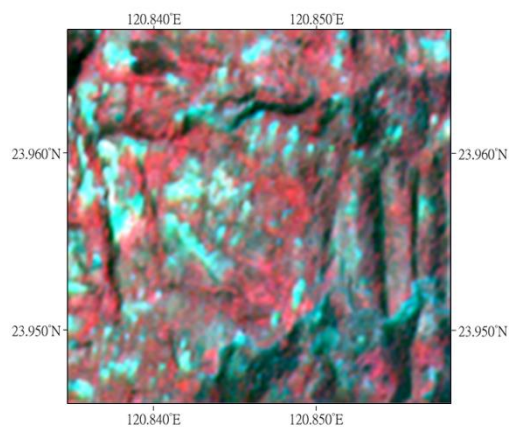


圖2 九份二山衛星影像(1999/4/1)
Figure 2 SPOT image on 1999/4/1

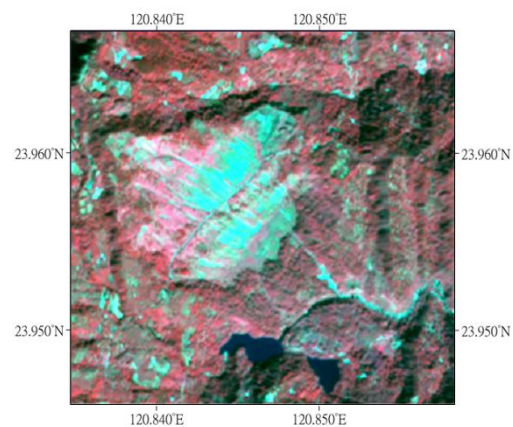


圖4 九份二山衛星影像(2020/2/23)
Figure 4 SPOT image on 2020/2/23

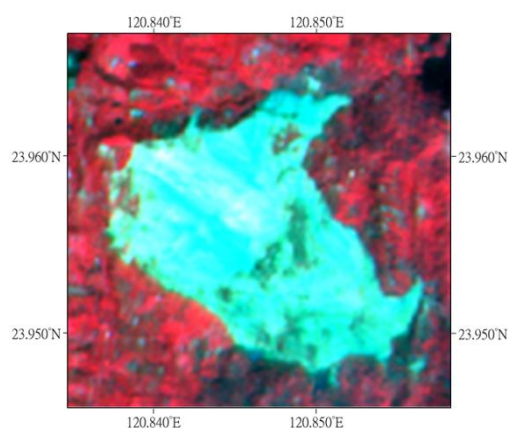


圖3 九份二山衛星影像(1999/9/27)
Figure 3 SPOT image on 1999/9/27

3. 自組特徵映射分類法於崩塌地萃取

本研究之崩塌地萃取步驟主要有二，一為前期處理，係以影像相減法將崩塌後任一時期 SPOT 衛星影像減去崩塌前之 SPOT 衛星影像，獲取震災前後之差值影像；二為自組特徵映射分類法於崩塌地分類，將相減後差值影像做為輸入向量，透過非線性之自組特徵映射分類法分類崩塌地。

(1) 影像相減法

Jensen (1996)指出在多時期影像之地覆變遷偵測，係將兩個不同時期之影像相減，沒有改變地區的值會非常小(趨近於零)，而變遷較大地區的值會出現較大正值或負值。因此，影像相減法是將具有相同座標系統之兩張不同時期影像，相對應位置的像元之灰度值相減，差值影像之灰度值愈小表示地覆改變較小，灰度值愈大則表示地覆有明顯的變化(杜文強，2000)。

(2) 自組特徵映射分類法

自組特徵映射分類法(Self-Organizing Map, SOM)是一種非監督式學習的類神經網路，為 Kohonen 於1973年所提出(Kohonen, 1982)。其透過學習可從輸入向量資料中發掘大數據資料本身之特徵與關連性，並且將學習結果於輸出向量層之權重值，透過參數最佳化調整後進行 SOM 模式之網路學習，在完成後其輸出層神經元之鄰近者，通常則具有相似的功能，亦即具有相似之連結權重值，最後輸出向量層的神經元會依照輸入向量資料的特徵，以有意義之拓撲結構展現(通常為二維結構)如圖5。

(A)輸入層：用以表現網路的輸入變數對於輸入向量 x ，可用公式(1)表示：

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1)$$

其中 n 表示輸入維度。第 i 個神經元的鍵結權重可用公式(2)表示：

$$w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}]^T \quad (2)$$

其中 $i=1, 2, \dots, m$ ， m 代表神經元數目，其初始值為隨機亂數產生。每一筆輸入向量可透過鍵結權重與網路之每個神經元連結，藉此可求得每筆輸入向量所對應出之優勝神經元，其為採用歐幾里德基距離公式中之 $q(x)$ 為神經元 w 與輸入向量 x 之最短距離。而距離公式為計算輸入向量與神經元所連結之權重向量是否近似，其公式如(3)：

$$q(x) = \min_{\forall i} \|x - w_i\|_2 \quad (3)$$

(B) 輸出層：用以表現網路之輸出神經元，即訓練結果之聚類。

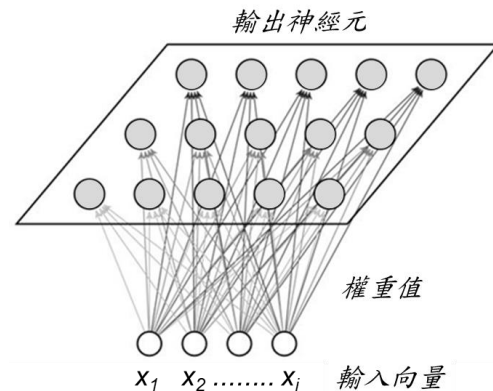


圖5 SOM 模式之拓樸網路

Figure 5 Topology Network of SOM

由於 SOM 模式在聚類分析時，需設定神經元間之鄰近關係，如鄰近半徑、鄰近區域、鄰近中心、鄰近函數等，並隨著優勝神經元進行調整，以建立網路神經元間的拓撲映射關係。

(A)鄰近半徑 R ：控制鄰近區域大小的參數，初始為較大的半徑值，隨著訓練次數或時間的增加，鄰近半徑逐漸縮小（鄰近半徑並無單位，其值係代表拓樸網路之神經元間距）。

(B)鄰近區域：以鄰近中心為中心點，鄰近半徑的長度為半徑，所圍繞的區範圍則為鄰近區域，所以該區域也會隨著訓練次數或時間的增加而逐漸縮小。

(C)鄰近中心：即為優勝神經元，以其為中心，修正鄰近區域中所有的神經元。

(D)鄰近函數：其公式如(4)：

$$\eta_{qi} = \exp\left(-\frac{\|r_i - r_q\|^2}{R^2}\right) \quad (4)$$

式中之 r_i 為優勝神經元在拓樸圖上的位置； r_q 為鄰近區域中其他神經元在拓樸圖上的位置； R 為鄰近半徑。

而鄰近區域的神經元調整修正如公式(5)：

$$\Delta w = \mu(k)\eta_{qi}(k)[x(k) - w_i(k)] \quad (5)$$

式中 $\mu(k)$ 為學習速率，隨著訓練次數或時間的增加而逐次縮小，一般而言， $0 <$

$\mu(k) < 1$ 。最後權重更新可為公式(6)：

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \Delta w_{ij} \quad (6)$$

4. 崩塌地植生恢復率評估

921大地震災害至今，隨著崩塌區位植生恢復，崩塌面積逐年減少。崩塌地植生恢復率(LR)可計算任一時期之崩塌地植生恢復情形，為任一時期之崩塌地植生恢復面積(LA₁-LA₂)與地震初期之崩塌面積(LA₁)之比值，其計算公式如(7)：

$$LR = \frac{LA_1 - LA_2}{LA_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中之 LA₁ 為地震初期之崩塌面積，LA₂ 為地震後任一時期之崩塌面積。

三、結果與討論

1. 九份二山震災崩塌區位萃取

本研究 SOM 模式參數使用係依 Lin (2008)之建議，鄰近函數之搜尋半徑由5以線性方式減少為1，初始之學習速率為0.9，訓練

長度為5000 epochs，而拓樸網路之數量為10×10 (100)輸出神經元（對應之輸出神經元編碼為1~100），再輔以航照圖或其他現地資料輔助判釋崩塌區位。分析結果顯示，在地震初期(1999/9/27)萃取之崩塌地面積為214.53公頃，在震災二十年後(2020/2/23)崩塌地面積減少為28.39公頃，顯示隨著植生入侵或殘存植生恢復崩塌地逐年減少，其崩塌地之空間分布如圖6及圖7。

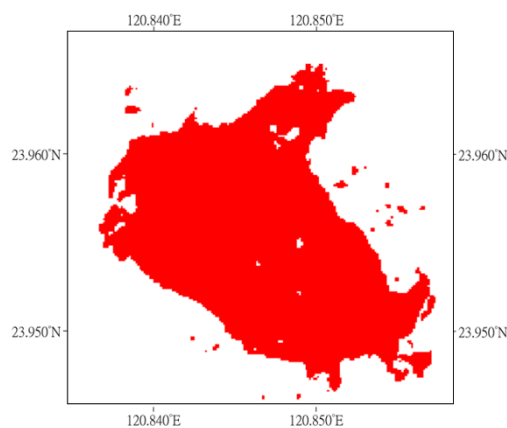


圖6 九份二山震災初期崩塌地

Figure 6 Earthquake-induced landslide sites of the studied area (1999/9/27)

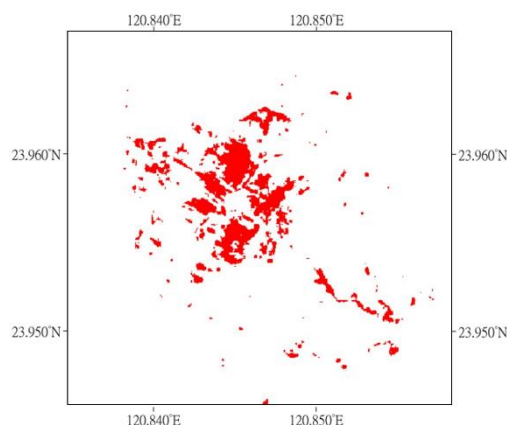


圖7 九份二山震災二十年後崩塌地

Figure 7 Earthquake-induced landslide sites of the studied area (2020/2/23)

2. 崩塌地植生恢復率評估

將九份二山震災初期及二十年後崩塌區位進行植生恢復率(LR)計算，震災初期崩塌地面積(LA_1)為214.53公頃，2020/2/23崩塌地面積(LA_2)為28.39公頃，兩期減少的崩塌面積(LA_1-LA_2)為186.14公頃，代入公式可得 $LR=86.77\%$ 。並將兩期萃取崩塌地進行 GIS 套疊分析，可得崩塌復原或未復原之空間分布如圖8。綠色為崩塌復原區位，主要位於崩塌區位右下方之堆積區位，因土壤鬆軟有利於植生入侵或殘存植生再生長，而紅色為未復原區位，主要位於為左上方之崩落區位，因岩盤裸露不利於植生入侵。研究結果顯示，震災至今即使遭受多場颱風豪雨之侵襲，九份二山崩塌地仍逐年持續復原中，表示大自然本身有極佳的植生復育能力。

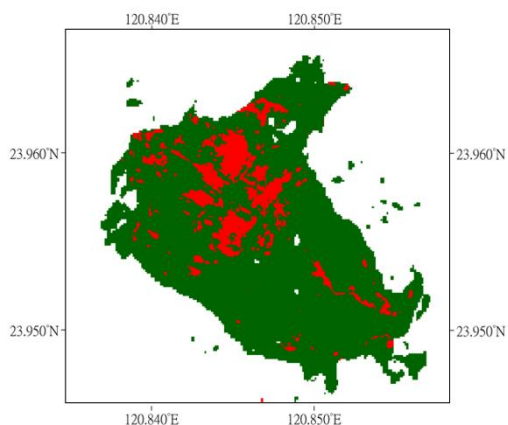


圖8 九份二山崩塌地復育變遷分析

Figure 8 Landslide change analysis of the studied area

3. 九份二山之坡面植生狀況

九份二山地層為樟湖坑頁岩層之厚層頁岩夾薄層砂岩所構成，崩塌地土壤以裸岩及砂頁岩淡色崩積土為主，崩塌面之崩落區多為岩盤不利於植物生長，而堆積區為鬆軟土壤有利於植生入侵。由於農村水保署自921震災後至今，在該區投入大量的整治復建工作，原本滿目瘡痍的一片裸土，至今已嶄露出綠意和生機。震災至今對中部山區影響較大之颱風(累積雨量達250mm 以上)超過10場，該地區即使遭受颱風侵襲，雖颱風帶來的豪雨對崩塌裸露區位造成二次災害，然而豐沛的雨量亦提供足夠水分供植物得以快速生長，隨著逐年的植生自然演替，陽性植物入侵或殘存植物再生長，崩塌區位之復育情況甚佳。

由於921震災初期主管機關在崩塌裸露區位、韭菜湖溪兩側及石門觀景區進行人工草種撒播及植生綠化，提供裸露地迅速被草地與密林覆蓋之基礎。經過二十年植生演替，目前該區上方崩落區之岩盤地表大都被草生之五節芒覆蓋，而較為軟鬆土壤週遭地區則形成鬱閉的次生林，這些植群具有成長快速、有耐旱、喜熱、好光等特性，且散布能力及對生育地適應性皆優越的樹種為主，如山黃麻、野桐、白匏子、羅氏鹽膚木、相思樹等(農委會特有生物研究保育中心，2019)。

圖9為九份二山震災一年內之崩塌裸露坡面，上方為土石崩落區位，表土被移除而岩層裸露、下方為土石堆積區位，因土壤鬆軟，約一年左右植被恢復情形甚佳。圖10為2000年8月遭受桃芝颱風侵襲之景象，颱風造

成中興橋上游河道遭受洪水沖刷而刷深擴床，因其為鬆軟之土石堆積區，河道刷深達數十米。圖11為2023/3/11之九份二山崩塌面全景，上方崩落區位之植生恢復良好以草生五節芒為主，中興橋上游梳子壩附近則已被植生完全覆蓋。



圖9 九份二山震災後之裸露坡面(2000/7/2)
Figure 9 Earthquake-induced landslide site of the studied area on 2000/7/2



圖10 九份二山下游堆積區河道受桃芝颱風沖刷情形 (2000/8/21)
Figure 10 Scouring of the river channel in the downstream piling area by typhoon Toraji.

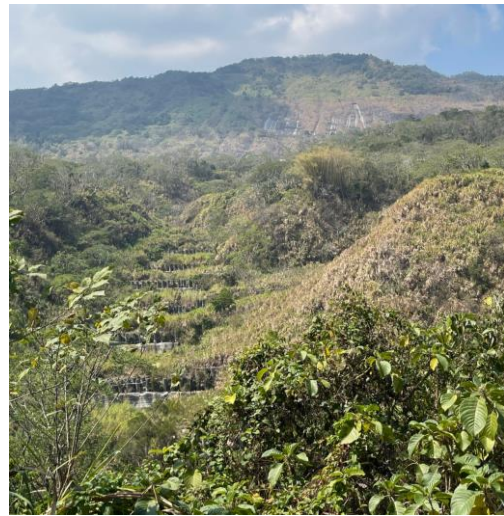


圖11 震災二十年後崩塌地植生恢復情形 (2020/3/11)

Figure 11 Vegetation restoration of the landslide sites 20 years after the earthquake

四、結論

本研究係以南投縣之九份二山為樣區，分析921震災初期及二十年後崩塌地變遷、植生恢復率、及現地植生狀況調查等，以作為崩塌地變遷及治理之參考。分析結果顯示，震災初期崩塌地面積為214.53公頃，在二十年後已縮減為28.39公頃，崩塌地植生恢復率為86.77%。從環境永續面向，該區在初期的人工植生綠化及後續長達二十餘年之自然復育，即使遭受多場颱風豪雨之侵襲，颱風造成的破壞只是暫時性不影響復育的進程，這顯示自然界本身對崩塌裸露區位復育具有極強的再生能力。

參考文獻

1. Chang, S.C. (2000), The survey and designation of potentially landslide hazardous settlements after Chi-Chi earthquake. In: Proceedings of the Second National Conference on Landslide Stabilization and Disaster Prevention Research in Taiwan, Taipei, Taiwan.
2. Jensen, J. R. (1996), Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, Second Edition, Prentice Hall.
3. Kohonen, T. (1982), Self-Organization of Topologically Correct Feature Maps, Biological Cybernetics, 43: 59-69.
4. Lin, C.Y., Lo, H.M., Chou, W.C., Lin, W.T. (2004), Vegetation recovery assessment at the Jou-Jou Mountain landslide area caused by the 921 Earthquake in central Taiwan. Ecological Modelling, 176: 75-81.
5. Lin, W.T., Chou, W.C., Lin, C.Y. (2006), Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by a catastrophic earthquake: a case study in Central Taiwan. Ecological Engineering, 28: 79-89.
6. Lin, W.T., Lin, C.Y., Tsai, J.S., Huang, P.H. (2008), Eco-environmental changes assessment at the Chiufenershan landslide area caused by catastrophic earthquake in Central Taiwan, Ecological Engineering, 33: 220-232.
7. 王文能 (2019), 大規模崩塌的地質特性與九份二山崩塌案例, 技師期刊, 87: 43-51。
8. 吳洛健 (2001), 921集集大地震九份二山整治成果及國家地震紀念地規劃, 行政院農委會水土保持局, pp.1-5。
9. 杜文強、李松釧、陳熙灝、詹志銘 (2000), SPOT 衛星影像應用於環境敏感地區變遷分析之初步探討, 國土資訊系統通訊, 36: 22-29。
10. 許銘峰、周文杰、林昭遠 (2002), 九份二山崩塌地植生復育率與堰塞湖泥砂產量推估之研究, 水土保持學報, 34(1): 23-36。
11. 馮梓璇 (2007), 九份二山崩塌地變遷之研究, 明道管理學院環境規劃暨設計研究所碩士論文。
12. 農委會特有生物研究保育中心 (2019), 走過921地震—九份二山浴火重生, 自然保育季刊, 105: 6-15。
13. 鄭旭涵 (2000), 九份二山地震崩塌坡面泥砂產量及植生恢復之研究, 國立中興大學水土保持學系碩士論文。
14. 壽克堅、蘇苗彬、王建峰 (2001), 九份二山崩塌機制與殘坡問題探討, 地工技術, 87: 25-30。

112年 08月 21日收稿

112年 09月 20日修改

112年 09月 28日接受