植生復育區位配置對旗山溪集水區山崩潛勢之影響

詹勳全[1]　蔡培珊[1]　張嘉琪[1]*　黃文政[1][2]　吳菁菁[2]

摘　要　本研究以旗山溪集水區作為研究樣區，進行崩塌因子萃取與篩選後，以高程、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、常態化差異植生指標 (NDVI)、濕度指數、總曲率與總雨量等因子，利用多變量統計分析法中的羅吉斯迴歸法進行山崩潛感分析，並對照莫拉克颱風實際崩塌地分布圖，發現崩塌地多位於本模式預測的集水區上游之中高、高崩塌潛勢區，顯示本研究所選用之分析模式與山崩因子對莫拉克颱風崩塌發生處之模擬結果良好；另外，藉由莫拉克颱風侵襲前後共四期衛星影像萃取樣區內 NDVI 值，由 NDVI 分布變化可發現集水區河道附近於災後經兩年多已有逐漸恢復的趨勢，惟上游區位植生復育情況仍差，可見該區難以藉由植生自然復育的方式恢復至颱風侵襲前，仍需採用人工的方式幫助該區植物生長。因此，本研究復育策略之研擬，乃規劃集水區上游河岸周圍且地形適宜植生生長之地區，透過不同環域範圍的 NDVI 情境，期經由模式的分析模擬，探討研究植生復育對集水區山崩潛感值變化的影響。

關鍵詞：山崩潛感、羅吉斯迴歸、植生復育。

Vegetation Recovery on Landslide Susceptibility in the Chi-Sun Watershed

Hsun-Chuan Chan[1]　Pei-Shan Tsai [1]　Chia-Chi Chang[1]*　Wen-Jeng Huang[1,2]　Jing-Jing Wu[2]

ABSTRACT　In this study, logistic regression, a multivariate analysis method, was used for landslide susceptibility analysis of the Chi-Sun watershed. After extracting and selecting environmental factors, elevation, slope, terrain roughness, slope roughness, normalized difference vegetation index (NDVI), wetness index, and accumulated rainfall were selected as causal factors of landslides. An inspection of the distribution of the landslides caused by Typhoon Morakot revealed that the landslides were located in medium-high and high susceptibility areas of the upstream watershed. The predicted susceptibility values show a good agreement with the observed landslides, indicating that both the model and the factors used in the model are valid and that the simulation results match the Typhoon Morakot event. In addition, past NDVI values obtained by analyzing SPOT-5 satellite images suggest favorable vegetation recovery in the watershed landslide areas, except in the upstream areas. This study focused on providing suitable recovery and planning strategies around the riparian areas of the upstream watershed. The effects of vegetation recovery on landslide susceptibility values were evaluated using the developed model. Landslide hazard areas were analyzed and mapped on the basis of vegetation recovery for various buffer ranges.

Key Words : Landslide susceptibility, logistic regression, vegetation recovery

一、前　　言

台灣位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處，因板塊互相擠壓作用，造山運動頻仍，使得台灣地形陡峻、地質破碎，再加上 921 集集地震後，地層受到擾動，誘發山崩之累積降雨門檻值逐漸降低 (Lin et al.,2004；陳樹群等，2012；鍾育櫻，2005)，且近年來受極端氣候之影響，颱風豪雨來襲容易造成山崩、土石流災害，尤以 2009 年莫拉克颱風造成的破壞，令人印象深刻，除了高雄市內多處橋樑毀損及道路中斷，整個小林村更是慘遭滅村，導致嚴重損失。

經濟部中央地質調查所為有效評估廣域地區地質災害發生的潛能，除了進行地質調查及建立完整的坡地環境地質資料庫，更積極進行山崩潛感分析以供災害評估與防災規劃之用 (張弼超，2005)。過去研究山崩潛感分析的方法大致為專業評分法、統計學分析法、類神經網路法及定值分析法等。早期常用於山崩潛感分析的專業評分法，其權重值容易給定，且可考

〔1〕國立中興大學水土保持學系
Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C.
〔2〕行政院農業委員會水土保持局
Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Nantou, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail : d100042004@mail.nchu.edu.tw

量不易量化的因子 (Kienholz, 1978;Ives and Bovis, 1978;陳振華，1985)，但是分析結果過於主觀，近期較少被採用；而較常採用的山崩潛感分析方法為類神經網路法和統計分析法，類神經網路法具有高度非線性之學習能力，其擬合結果較一般線性方程式準確 (Lee et al, 2003；黃春銘，2005)，但其試誤過程相當耗時，運算過程屬黑盒分析，每次分析成果不盡相同，較難統整分析成果；相較之下，統計分析法之分析方法較為客觀且具理論基礎，能考慮多項因子之相關性，得到一組線性方程式，其分析結果具穩定性且唯一 (鄭元振，1992；莊緯璉，2005；張弼超，2005)；此外，還有利用無限邊坡理論及 Newmark 位移理論法的定值法，其常被用於模擬地震或豪雨誘發的山崩分布 (Jibson and Keefer, 1993; Montgomery and Dietrich, 1994; Jibson et al., 2000; Claessens et al., 2007)，雖然定值法用於大比例尺下的分析結果較為準確 (Luzi and Pergalani, 1996；陳嬡璇，2002)，但廣域的地工參數取得不易，難以獲得區域的整體趨勢，以至於較少被採用於山崩潛感分析。

綜合以上各山崩潛感分析法之優缺點及適用性比較，可知統計分析法最常被用於廣域分析上，且不同時期之成果也易於整合，而統計分析法又以二變量分析與多變量分析法為主，倘若因子間具有相依性，將對二變量分析法之分析結果造成難以預期之影響，故又以多變量分析法最適合應用於山崩潛感分析上。多變量分析法中的羅吉斯迴歸法在分析過程中可考慮加入不可量化之類別因子，以往多用於社會學等研究，直到最近才廣泛用於山崩之研究。Atkinson and Massari (1998) 最早運用羅吉斯迴歸法於義大利中部亞平寧區進行山崩潛感分析，並建立山崩與各因子間之關係；詹勳全等人 (2012) 利用羅吉斯迴歸法對阿里山森林鐵路進行山崩潛感分析，建立山崩潛感模式，且繪製山崩潛感圖。

現今台灣常以植生導入與工程並用進行崩塌地整治，藉由植生覆蓋減緩降雨對土壤的衝擊，減少土壤流失，陳俊愷等 (2013) 指出，透過人為加速植生方式，除了可降低崩塌潛勢，亦可確實改善集水區內植生復育情形，逐漸恢復至災前之植生樣貌，亦即，為使邊坡更加穩定，可針對崩塌潛勢較高區域進行植生復育，以降低該區域發生崩塌之機率。本研究結合前人使用過之山崩因子，並加入莫拉克颱風事件之總雨量作為促崩因子，利用羅吉斯迴歸法對旗山溪集水區進行分析，建立山崩潛感模式與繪製山崩潛感圖。另外，針對植生復育前崩塌潛勢較高之旗山溪集水區上游，剔除坡度過陡導致難以植生之區域，規劃進行大範圍植生復育，藉由比較植生復育前後山崩潛勢之變化，提供未來研究集水區治理規劃之參考。

二、研究樣區

2009 年 8 月莫拉克颱風來襲，為高雄市山區帶來高達兩千多公厘的雨量，加上山區地質較脆弱且地形較陡峭，使地勢較低之地區遭受嚴重損傷，進而引發山崩、土石流等災害，尤以旗山溪集水區更被列為莫拉克颱風重災區，因此本研究選定旗山溪集水區為研究樣區。旗山溪又稱楠梓仙溪，發源於玉山山脈西南，向西南方流，並流經那瑪夏區、甲仙區、杉林區與旗山溪等地，至嶺口以北與荖濃溪匯流成高屏溪，主流長度約為 117 公里，流域面積約為 842 平方公里 (水利署第七河川局，2007)。集水區呈現南北狹長形，地勢東北高於西南，故坡面多為西南走向，其坡向分析結果如表 1，坡度以 15°~30° 居多如表 2，高程介於海拔 31.1 至 3,947.4 公尺之間如圖 1，而地層主要為三峽群及其相當岩層、瑞芳群及其相當岩層、沖積層等 (如表 3)，其分布情形如圖 2，其中以三峽群及其相當地層所佔的面積為 66.07%最廣，多為頁岩、砂岩所組成，屬於地質較脆弱之岩性。此外，由莫拉克颱風造成之崩塌地分布 (如圖 3) 可知，有 58.76%崩塌地分布於天然林，而有 41.24%

表 1 研究區坡向分析結果表

Table 1 Classification of aspect distribution in the study area

坡向方位	方位角範圍 (°)	面積百分比 (%)
北	337.5~360；0~22.5	10.47
東北	22.5~67.5	9.13
東	67.5~112.5	10.43
東南	112.5~157.5	12.63
南	157.5~202.5	13.57
西南	202.5~247.5	14.69
西	247.5~292.5	15.3
西北	292.5~337.5	13.78

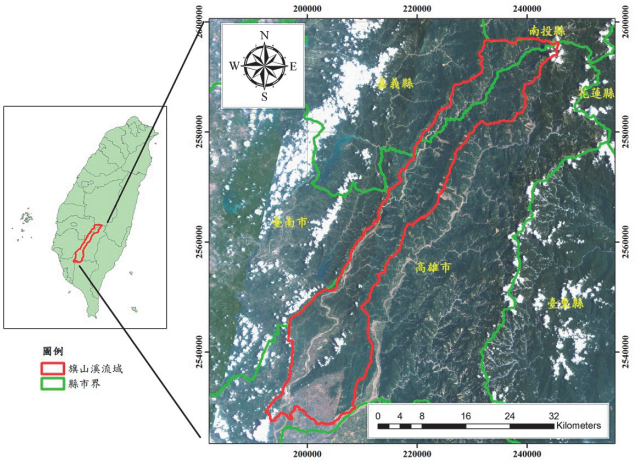

圖 1 研究樣區

Fig.1 The study area

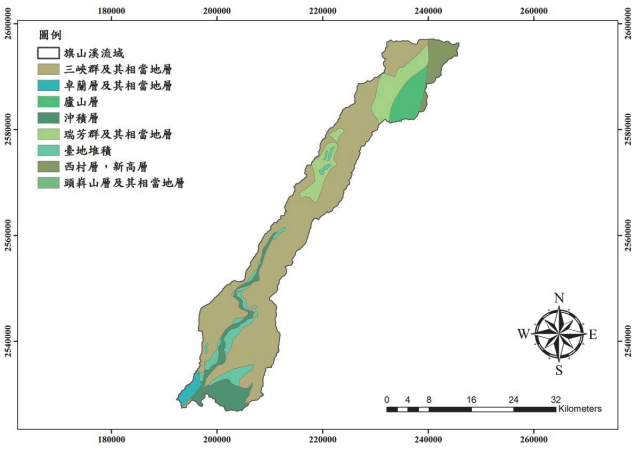

圖 2 研究樣區地質分布圖

Fig.2 The distribution of geological in the study area

崩塌地分布於人工林，崩塌多發生於國有林班地之誘發原因可能為河道切割與河岸沖蝕造成河岸邊坡基腳淘刷或岩壁解壓現象，以致河岸邊坡崩塌 (國家災害防救科技中心，2005；黃宏斌，2006；黃裕星，2013)。

旗山溪集水區位於北回歸線南邊，屬於亞熱帶海洋季風氣候，氣候變化較大，氣溫由地勢較低的西南方向地勢較高的東北方遞減，冬季歷年月均溫約為 17.2~23.1℃，夏季歷年月均溫約為 25.1~27.8℃，歷年平均溫約為 24℃。全年各月相對濕度變化較小，冬季氣候較乾燥，濕度較低，夏季雨季時相對濕度較高，全年平均相對濕度約為 79%。平均年雨量約為 2200~3000 公釐，雨量集中於 5~10 月之豐水期，約佔全年 90% ，季節性豐枯相當明顯，降雨之時空分布不均，年雨量以靠近山區較大，而以靠近平地及沿海區較小，且由於降雨集中之特性，每年汛期颱風豪雨對旗山溪集水區容易造成嚴重損傷。

表 2 研究區坡度分析結果表

Table 2 Classification of slope distribution in the study area

坡度級別	坡度 (S) 範圍	面積百分比 (%)
一級坡	S≦5%	17.53
二級坡	5%<S≦15%	11.26
三級坡	15%<S≦30%	31.86
四級坡	30%<S≦40%	24.67
五級坡	40%<S≦55%	13.55
六級坡	55%<S≦100%	1.13

表 3 研究區岩性分析結果表

Table 3 Classification of geology distribution in the study area

地層名稱	相對應岩性	面積百分比 (%)
三峽群及其相當地層	砂岩，頁岩	66.07
瑞芳群及其相當地層	砂岩，頁岩	10.33
沖積層	礫石，黏土，砂	7.74
臺地堆積	礫石，土，砂	5.39
廬山層	硬頁岩，板岩，千枚岩	5.09
西村層，新高層	千枚岩，板岩，夾砂岩	3.93
卓蘭層及其相當地層	砂岩，泥岩，頁岩	1.44
頭嵙山層及其相當地層	礫岩	0.01

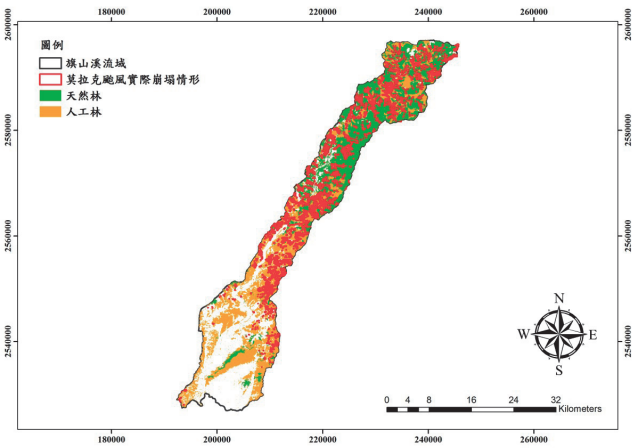

圖 3 研究樣區天然林與人工林空間分布圖

Fig.3 The distribution of natural forests and plantation forests in the study area

三、材料與研究方法

本研究根據前人研究先初步決定所使用之山崩潛感因子，接著進行研究樣區基本資料之蒐集，再進行山崩潛感因子之篩選，並針對篩選過的山崩因子及雨量資料作分析處理，以下針對相關之方法與流程進行說明：

1. 資料蒐集

(1) 由內政部「高精度及高解析度數值地形模型建置計畫」所建立之 5m×5m 高精度數值地形 (Digital Terrain Model, DTM) 進行分析，經內插後繪製成 20m×20m 之網格，藉此與蒐集的衛星影像進行比對。

(2) 由地調所提供的 1/250,000 地質圖。

(3) 由中央氣象局所提供的莫拉克颱風事件之降雨量資料。

(4) 本研究所使用之 SPOT-4 衛星影像為中央大學太空及遙測研究中心之影像，採用四期衛星影像分別為 2009 年 07 月 (莫拉克颱風事件前)、2009 年 10 月 (莫拉克颱風事件後)、2010 年 12 月及 2011 年 10 月，其空間解析度皆為 20m×20m 。

2. 因子篩選

目前曾被用於山崩潛感分析的因子眾多 (Koukis, 1991)，但並非每個因子皆適用於各樣區，然而至今尚無通用的因子選取標準，因此本研究挑選出較常用於台灣的山崩因子 (林彥享，2003；蔡雨澄，2012；張郁嘉，2012；洪雨柔，2013)，分別為坡度、高程、地形粗糙度、坡度粗糙度、地形曲率 (含平面曲率、剖面曲率及總曲率)、濕度指數、常態化差異植生指標 (NDVI)，由於研究樣區地質大多為砂岩、頁岩所組成，分布差異性較小，故岩性未納入分析。另外，因研究樣區近期受莫拉克颱風影響嚴重，故選擇莫拉克颱風總雨量進行分析。

3. 資料處理

(1) 地形指標萃取

① 坡度

使用 20 公尺數值地形資料，參考溫仁宏 (2007) 進行斑駁濾除的研究，採用 3×3 區域平均值作為平均值，能使影像呈現較平滑的特性，故本研究以 3×3 網格計算網格中心之平均坡度值，網格式資料如圖 4 所示，網格中心點 z_5 依 Wilson and Gallant (2000) 之坡度及坡向定義進行計算，公式如下：

$$\begin{cases} Z_{x_1} = \dfrac{\partial z}{\partial x} \approx \dfrac{z_3 - z_1}{2h_1} \\ Z_{x_2} = \dfrac{\partial z}{\partial x} \approx \dfrac{z_6 - z_4}{2h_1} \\ Z_{x_3} = \dfrac{\partial z}{\partial x} \approx \dfrac{z_9 - z_7}{2h_1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_{y_1} = \dfrac{\partial z}{\partial y} \approx \dfrac{z_1 - z_7}{2h_2} \\ Z_{y_2} = \dfrac{\partial z}{\partial y} \approx \dfrac{z_2 - z_8}{2h_2} \\ Z_{y_3} = \dfrac{\partial z}{\partial y} \approx \dfrac{z_3 - z_9}{2h_2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{\left(Z_{x_1} + Z_{x_2} + Z_{x_3}\right)}{3} \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{\left(Z_{y_1} + Z_{y_2} + Z_{y_3}\right)}{3} \quad (4)$$

其中，h_1 和 h_2 分別代表 x 軸和 y 軸網格點間距，因此可得到中心點 z_5 之坡度 θ 為：

$$\theta = \tan^{-1}\sqrt{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \quad (5)$$

完成的坡度因子圖如圖 5 所示。

② 高程

高程資料由 20m×20m 的數值地形模型求得，其資料格式為網格式資料，完成的高程因子圖如圖 6 所示。

③ 地形粗糙度

地形粗糙度為描述一區域內的地形變化程度，Wilson and Gallant (2000) 利用圓形的視窗內的高度標準差，做為量測區域內高度變化的方式。本研究為了更確實的呈現地形局部起伏的狀況，故採用空間域濾波平滑化的方式，將數值地形以半徑 13×13 進行平滑化 (鐘意晴，2009)，剔除地表起伏較為劇烈的部份，僅保留大範圍的地勢起伏，再將原始地形面扣除已平滑化的地形，則可得到地表起伏較為劇烈的高頻特徵，然後計算半徑 13×13 之某一圓形區域範圍內的標準值來代表此區域地形之粗糙度。標準差 S 之計算公式如下：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i (z_i - Z)^2}{n_c - 1}} \quad (6)$$

其中，n_c 為視窗範圍內之點，Z_i 為各點之高度值，$\bar{Z}$ 為視窗範圍內各點高度之平均值。完成的地形粗糙度因子圖如圖 7 所示。

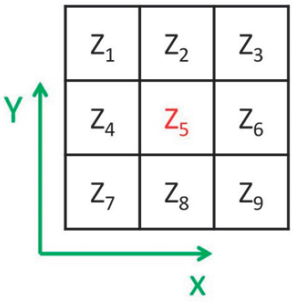

圖 4 網格式資料示意圖

Fig.4 The grid diagram

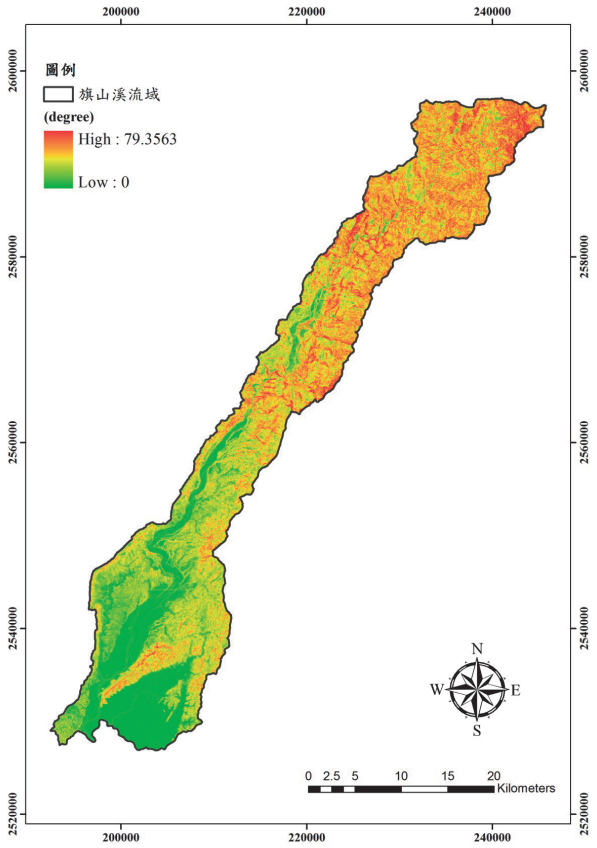

圖 5 研究樣區坡度分布圖

Fig.5 The distribution of slope in the study area

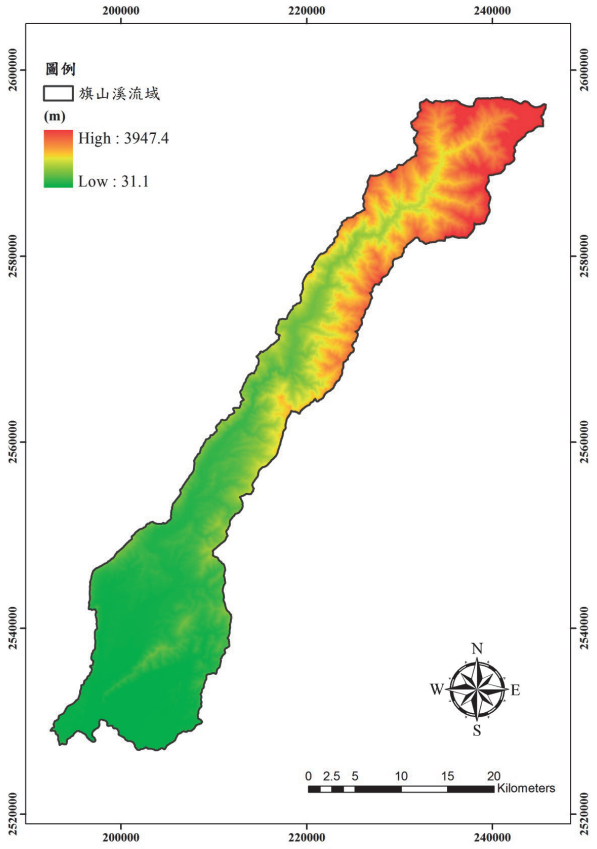

圖 6 研究樣區高程分布圖

Fig.6 The distribution of elevation in the study area

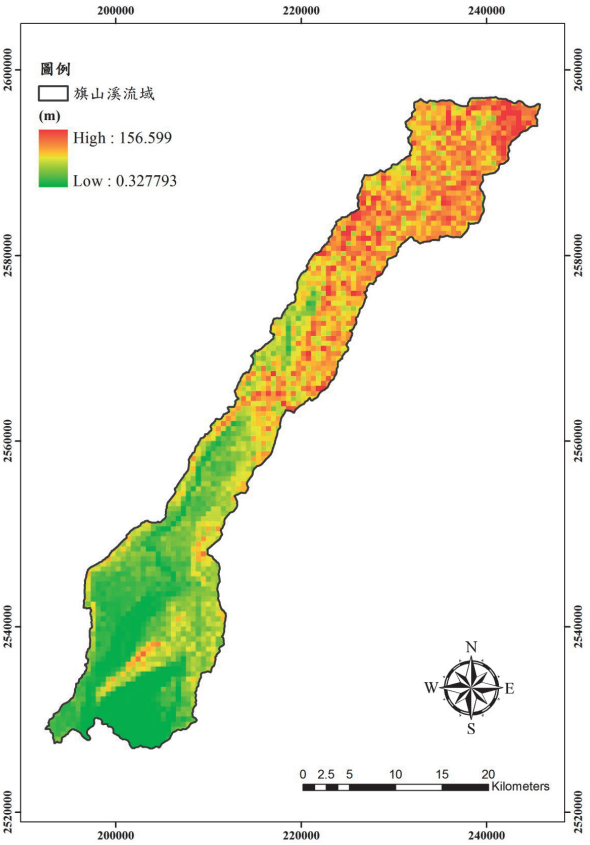

圖 7 研究樣區地形粗糙度分布圖

Fig.7 The distribution of terrain roughness in the study area

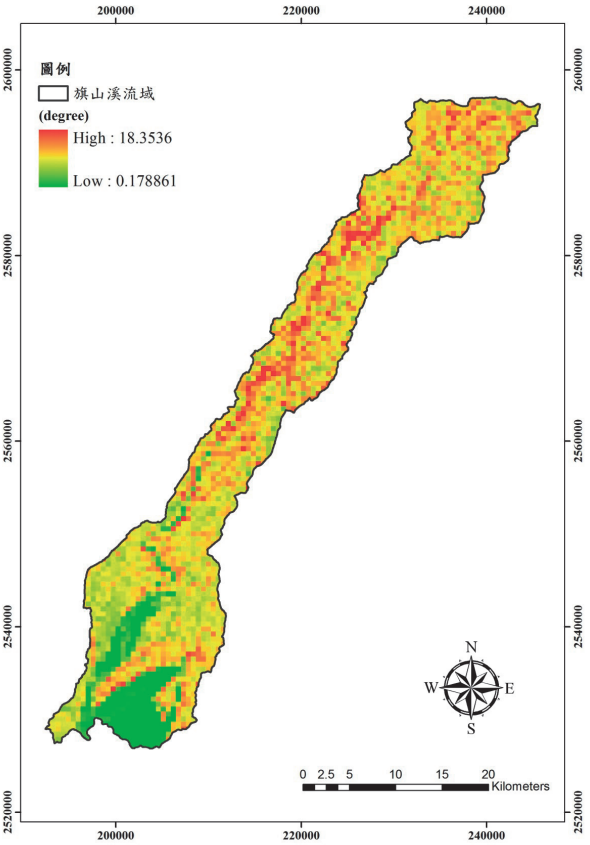

圖 8 研究樣區坡度粗糙度分布圖

Fig.8 The distribution of slope roughness in the study area

④ 坡度粗糙度

坡度粗糙度可反映一區域內坡度變化程度。其計算方式與地形粗糙度的計算方式相同，其差異之處是將原先輸入的濾波後地形資料轉成坡度資料以進行計算。藉由坡度粗糙度的計算，可找出區域範圍內坡度變化較劇烈的地形。完成的坡度粗糙度因子如圖 8 所示。

⑤ 地形曲率

地形曲率 (curvature) 為地形的二次微分，可代表坡度或坡向的變化率，本研究所探討的曲率包含剖面曲率 (profile curvature)、平面曲率 (plane curvature) 及總曲率，本研究以能代表整體的總曲率作為因子，將數值地形以半徑 13×13 進行平滑化後，根據 Wilson and Gallant (2000) 定義以 3×3 網格之相對關係進行運算。完成的總曲率因子圖如圖 9 所示。

⑥ 濕度指數

濕度指數又稱為地形濕度指數、地形指數、複合地形指數 (Wilson and Gallant, 2000)，此指數可表示地形對土壤濕度的控制。此方法必須利用許多假設以達到地形對土壤濕度控制的準確性，但其概念為坡度陡則水迅速向下流動，因此入滲量會較低，土壤中的含水量亦可能較低；而於坡度較平緩的地方，水可較長時間留在地表而逐漸入滲，因此土壤中的含水量可能會較高。Burton and Bathurst (1998) 亦將此概念引入淺層滑動的潛感分析中。濕度指數 ω 的公式如下：

$$\omega = \ln\left(\frac{A_S}{\tan\theta}\right) \tag{7}$$

其中，A_S 為斜坡上任一單位斷面之上游集水面積 (平方公尺)，θ 為坡度 (度)。完成的濕度指數因子圖如圖 10 所示。

(2) 植生指標萃取

在衛星影像之應用上，最常用於評估區域內的植生覆蓋指數的方法為常態化差異植生指標法 (NDVI)，其原理為利用綠色植物具吸收藍光、紅光及強烈反射紅光之特性，且植物對於近紅外光波段的反射比裸露土石強，使被植生覆蓋的地表呈現紅色色調。然而，有無植生覆蓋之區域於衛星影像光譜的資訊上呈現明顯的對比 (林昭遠等人，2001)，因此，以可見光與近紅外光來估計植生反射量之多寡，進而判別該區域是否為崩塌地。其計算公式如下：

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \tag{8}$$

其中，NIR 為近紅外光反射值；R 為紅光輻射值。計算所得的 NDVI 值域分布介於 -1～1 之間，值越大代表植生越茂密，故吸收之紅光愈多，紅外光之反射愈強，其差異愈大。完成的 NDVI 因子圖如圖 11 所示。

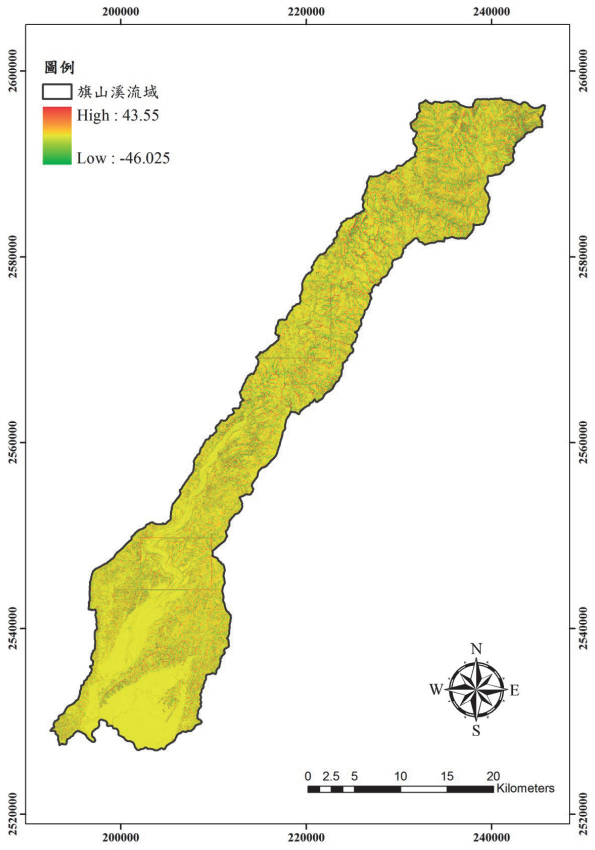

圖 9 研究樣區總曲率分布圖

Fig.9 The distribution of total curvature in the study area

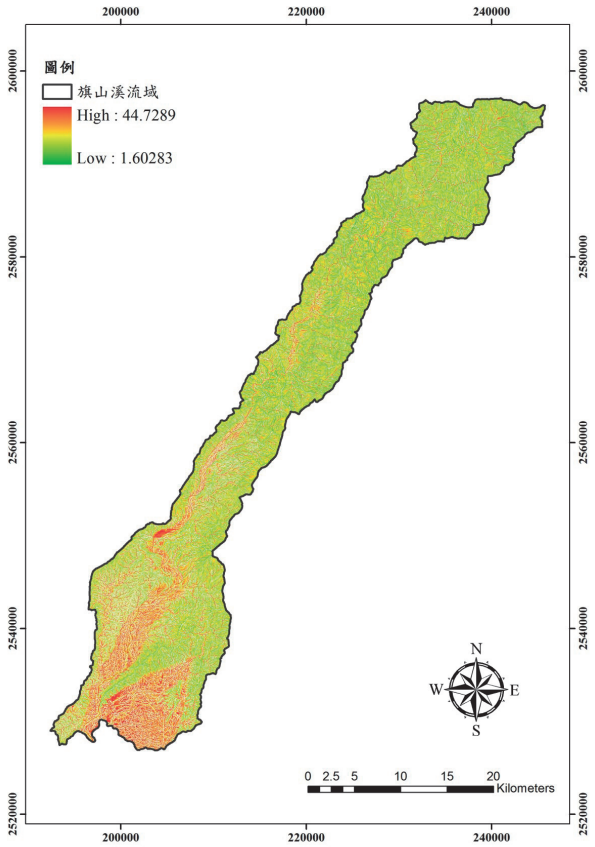

圖 10 研究樣區濕度指數分布圖

Fig.10 The distribution of wetness index in the study area

(3) 降雨資料

本研究採用由中央氣象局所提供的莫拉克颱風之降雨量資料，除了採用研究樣區內之雨量站，由北而南分別為排雲、楠溪、民生、甲仙、月眉、美濃和旗山，另加上鄰近測站，包含東埔、神木村、奮起湖、表湖、關山、玉井、古亭坑、尖山、尾寮山、御油山、小關山、南天池和佳心，使雨量資料更加完善，其空間位置分布如圖 12，由這些雨量站資料萃取莫拉克颱風之總雨量，並以克利金法內插推估樣區內雨量空間分布，所得到的莫拉克颱風期間總雨量的空間分布如圖 13。由圖 13 可知，越往集水區東北方，莫拉克颱風期間總雨量越大，因豪雨而造成的崩塌地數目也相對地多；此外，颱風所帶來之總雨量多寡亦與崩塌地有相關性，單就雨量資料與崩塌目錄比對結果，總雨量越大之地區，其崩塌地數目越多，然若將地形因子納入模式分析中，則雨量對山崩潛感值之影響相對其他因子而言較低。

(4) 崩塌潛勢指標

Ayalew and Yamagishi (2005) 研究日本中部 Kakuda-Yahiko 山區的山崩，將分析得到的潛感值分成五個等級，繪製山崩潛感圖；Lee and Pradhan (2007) 以 Selangor 地區為研究區，將計算出的潛感值分為四個等級，並繪製山崩潛感圖。然而，前者將崩塌潛勢值分為五個等級，難以判釋中間崩塌潛勢值是否容易崩塌；相較之下，後者分類方法較不易混淆，故本研究將分析得

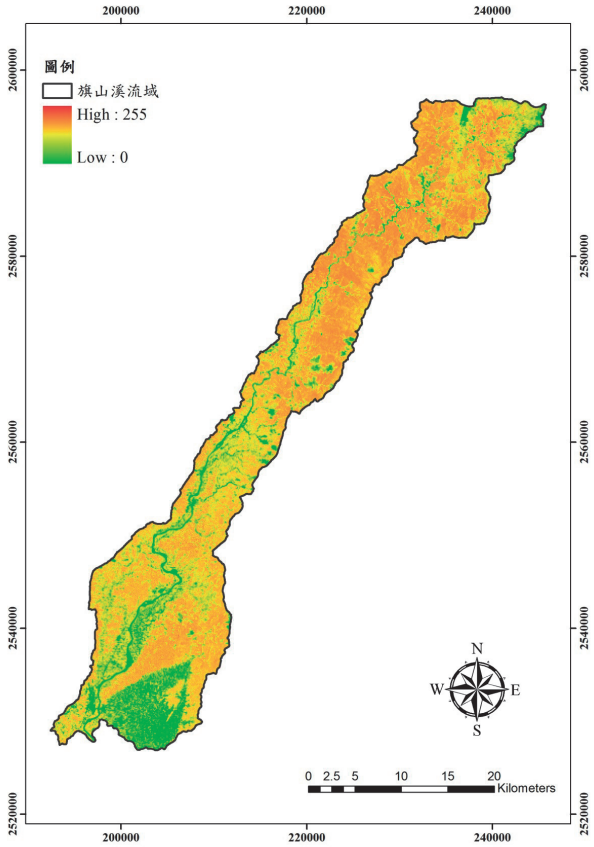

圖 11 研究樣區 NDVI 分布圖

Fig.11 The distribution of NDVI in the study area

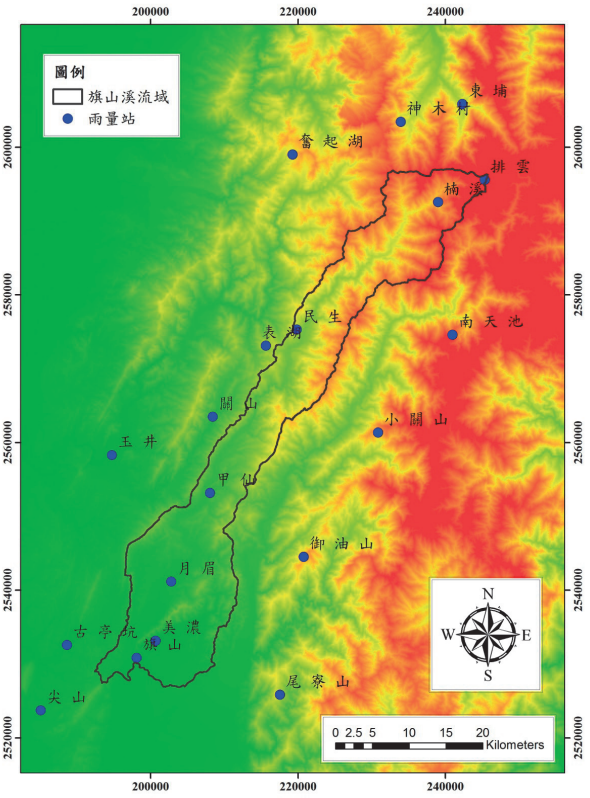

圖 12 研究採用雨量站空間位置分布圖

Fig.12 The distribution of rain-gauge station in the study area

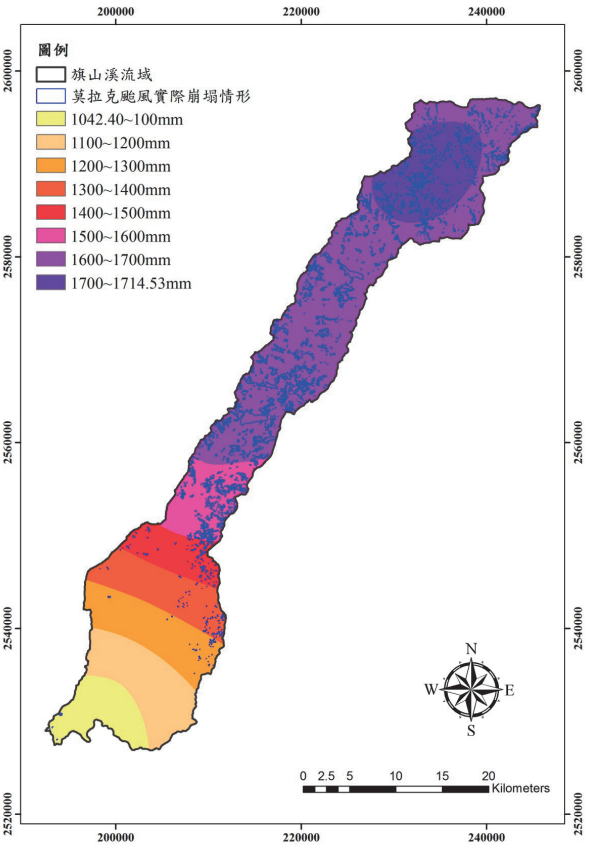

圖 13 莫拉克颱風崩塌區與總雨量空間分布圖

Fig.13 The distribution of landslide and total rainfall of Typhoon Morakot in the study area

到的山崩因子組合，建立山崩潛感模型與計算山崩潛感值，並根據前人研究將計算得到的山崩潛感值分成四個等級：潛感值為 0~0.25 屬於低崩塌潛勢區、潛感值為 0.25~0.50 屬於中崩塌潛勢區、潛感值為 0.50~0.75 屬於中高崩塌潛勢區、潛感值為 0.75~0.9999 屬於高崩塌潛勢區。

(5) 復育策略

依林信輝 (2001) 指出，緩衝綠帶有穩定邊坡，防止沖蝕、崩塌，攔阻土石，過濾汙染物等功能，亦能美化環境，因此，本研究復育策略之研擬，針對集水區上游之河道兩旁採植生復育之方法，但考量邊坡之坡度對坡面安定及植物生長皆有很大的影響，如表 4，顯示坡度大於 60 度之坡面表土較易滑動，植物不易栽植，也難以自然繁殖；相較之下，坡度小於 35 度之坡面較適合植物生長，故本研究模擬建置緩衝綠帶時將針對河道兩側且適宜栽植植物 (即坡度低於 35 度) 之區域，進行區域性植生復育。研究中欲植生之範圍，已崩塌區位面積約佔 10%，非崩塌區位面積約佔 90%，主要針對非崩塌區位進行植生復育情境模擬，藉以有效評估研究樣區內，不同範圍之 NDVI 情境對山崩潛勢之影響。

4. 羅吉斯迴歸分析

羅吉斯迴歸模式 (logistic regression model) 為對數線性模式中的一種特殊形式 (Feinberg, 1985; Agresti, 2002)，其多變量模式係透過統計歸納方式獲致具有鑑別山崩與非山崩的經驗式，對於因子迴歸係數之決定亦具有相當程度之鑑別優勢。

當對數線性模式中的一個二元變數被當作應變數並定義為一系列自變數的函數時，對數線性模式就變成羅吉斯迴歸模式。羅吉斯分布 (logistic distribution) 為二元應變數分析中最常使用的分布函數，其值域在 0 與 1 之間擁有 S 形狀的曲線，此種曲線類似於一個隨機變數的累積分布曲線。羅吉斯迴歸模式可表示成以下形式 (Gregory and John, 2003)：

$$P(y_i = 1|x_i) = \frac{1}{1 + e^{(\alpha+\beta x_i)}} \tag{9}$$

表 4 不同坡度時植物生育情形

Table 4 Situation of plant growth with the different slope

坡度	植物生育情形
小於30˚	1. 植物生育良好。 2. 植物自然入侵。 3. 可能復原為喬木為主之植物社會。
30˚~35˚	1. 35˚為自然復原之臨界坡度 (安息角)。 2. 草生覆蓋良好地區，地表沖蝕少。
35˚~45˚	1. 以灌木與草本之植物群落為主。 2. 栽植喬木以小苗、中小苗為主。
45˚~60˚	1. 以灌木與草本之植物群落為主。 2. 45˚~50˚為喬木栽植之限界。 3. 客土厚度不宜超過10公分。 4. 整地或階段處理之地區可配合於小階段面栽植植物。
大於60˚	植物不易栽植或自然繁殖。

(來源：林信輝，2001，水土保持植生工程)

其中，$P(y_i=1|x_i)$ 為崩塌事件發生之條件機率，x_i 為自變數列向量，α 及 β 分別為迴歸截距及迴歸係數之行向量，若 $P(y_i=1|x_i)=P_i$，則上式可改寫成：

$$n\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right)=\alpha+\sum_{i=1}^{k}\beta_k x_{ki} \tag{10}$$

其中，$P_i=P(y_i=1|x_{1i},x_{2i},\cdots,x_{ki})$ 為在給定一系列自變數 $x_{1i},x_{2i},\cdots,x_{ki}$ 值時的事件發生機率。本研究中，羅吉斯迴歸分析式可寫成：

$$y_i=\alpha+\sum_{i=1}^{k}\beta_k x_{ki} \tag{11}$$

其中，y_i 代表著各網格單元羅吉斯函數值，x_{ki} 為各項山崩潛感因子值，β_k 為各因子之迴歸係數。將各網格單元的羅吉斯函數值代入 (9) 式中計算出潛感值，再依研究區內各網格之不同的山崩潛感值，即可繪製出山崩潛感圖。

5. 山崩潛感模式之驗證方法

山崩潛感分析得到的結果須進行驗證，進而了解該分析成果之品質，張弼超 (2005) 指出可利用分類誤差矩陣 (classification error matrix) 驗證羅吉斯迴歸模式預測之準確性，此方法可表現真實情況與不同地表類型於分類結果之間的關係，常用於驗證的表示方法。本研究將總網格劃分成山崩與非山崩的網格，依據山崩與非山崩網格數所佔總網格數的比例，可分別計算出總體正確率、山崩組使用者正確率和非山崩使用者正確率，而利用分類誤差矩陣表所計算出的正確率來檢驗羅吉斯迴歸的預測準確性，分類誤差矩陣表使用者正確率計算方式如下：

$$\text{山崩組使用者正確率}=\frac{N_1}{N_1+N_2} \tag{12}$$

$$\text{非山崩組使用者正確率}=\frac{N_4}{N_2+N_4} \tag{13}$$

$$\text{總體正確率}=\frac{N_1+N_4}{N_1+N_2+N_3+N_4} \tag{14}$$

其中，N_1：山崩組判釋正確之網格數

N_2：非山崩組判釋錯誤之網格數

N_3：山崩組判釋錯誤之網格數

N_4：非山崩組判釋正確之網格數

四、山崩潛感模式分析

1. 樣本之正規化與選取

由於各因子的單位及值域分布不盡相同，不同因子之數值大小會導致模式分析結果產生誤差，一般會對因子進行正規化或標準化，但若因子有異常大或異常小的資料時，正規化後的資料會因異常值的關係過於集中某個區段，而影響分析的結果。為了避免上述情況之發生，本研究在進行分析時所選取的樣本資料，皆為標準化後的因子資料，如此可降低單位與值域對山崩潛感分析的影響。標準化的公式如下：

$$Z=\frac{X_i-\overline{X}}{\sigma} \tag{15}$$

其中，$\overline{X}$ 為平均值，σ 為標準差。

本研究所採用的山崩組資料為比對事件前後期的衛星影像，並配合航照圖進行檢核，挑選因莫拉克颱風事件誘發而新增或擴大的山崩。此外，研究中將研究區域內坡度低於 10% 的地區劃分為穩定區，此區不列入分析；扣除穩定區、山崩區後剩下的區域，即為非山崩組資料。又因非山崩組資料遠多於山崩組資料，為了降低非山崩組資料產生的誤差導致準確性降低，依以下規則，剔除非山崩組資料 (鐘意晴，2009)：

(1) 圍繞莫拉克颱風事件後山崩周圍 20 公尺的部分。

(2) 莫拉克颱風事件前已存在的崩塌地。

(3) 坡度大於 55 度較易發生落石的區域。

利用上述篩選原則所得到的山崩組與非山崩組資料進行山崩潛感分析，來提升所建立之分析模式對於資料預測的準確度。莫拉克颱風造成之山崩組網格數目為 125,232，而非山崩組網格數目為 937,057。由於山崩組與非山崩組的網格數量差異甚大，為了避免分析結果上的誤差，在進行分析時，山崩組與非山崩組選取之樣本數要相近，又考量人為選取時，受主觀印象而產生選取的誤差，因此將非山崩組資料和山崩組資料亂數選取 125,232 個相同網格數，以供後續分析使用。

2. 模式分析之結果

將本研究所選取之高程、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、NDVI、總曲率、總雨量等因子，以羅吉斯迴歸進行山崩潛感分析，可得到以下迴歸式：

$$P=\frac{1}{1+e^{-\lambda}} \tag{16}$$

$$\lambda=\sum_{i=1}^{m}W_i L_i+C \tag{17}$$

其中，P 為山崩潛感值，(17) 式中 L 代表不同之高程、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、NDVI、濕度指數、總曲率、莫拉克颱風總雨量因子，W 代表迴歸式係數，各迴歸式係數值詳見下表 5，當迴歸係數為正值時，代表該因子的值越大越容易引發崩塌，當迴歸係數為負值時，則反之，然而當因子在迴歸式中顯著性較低時，代表此因子不能有效判別山崩與否，在建模過程羅吉斯迴歸將其自動剔除。由迴歸式中的迴歸式係數 W 亦可知道坡度粗糙度、濕度指數、總曲率、坡度、NDVI 佔了較高的權重，說明這些因子在所選的因子中相當重要。

利用各因子之迴歸係數代入式 (17) 計算出 λ 值後，將其帶回式 (16) 可得到潛勢值 P，而本研究將得到的潛感值分成四個等級，分別為低崩塌潛勢區、中崩塌潛勢區、中高崩塌潛勢區、高崩塌潛勢區。由莫拉克颱風崩塌資料進行驗證時，根據羅吉斯迴歸中的羅吉斯指標 (cut off) 之預設值為 0.5 進行分組，當潛感值 P 大於 0.5 者視為山崩組；反之，潛感值 P

小於 0.5 者視為非山崩組 (張弼超，2005；廖珮妤，2012)。本研究對照衛星影像數化莫拉克颱風實際崩塌地，其分布如圖 14，可知旗山溪集水區西南方區域大部分為低崩塌潛勢區及中崩塌潛勢區，而集水區東北方則以中高及高崩塌潛勢區域居多，並進一步比對莫拉克颱風事件引起之新增崩塌地分布，莫拉克颱風新增之崩塌區絕大部分位於集水區上游段，且多位於模式預測的中高潛勢區及高潛勢區，符合模式預測結果，說明旗山溪集水區上游屬於較容易發生崩塌之區域，故針對此區域實施相關復育治理策略使其降低發生崩塌的機率乃實為重要。

3. 模式評估

為瞭解分析結果之品質，本研究以分類誤差矩陣表進行模式成果之驗證，依據上述篩選後的部分莫拉克颱風事件資料，用於比較模式預測和實際樣本之結果，由表 6 可知，預測的山崩組正確率為 79.40%，顯示非山崩組正確率約為 65.50%，而總體正確率亦有 72.40%，其中山崩潛感模式在預測山崩組時準確率將近八成，顯示可預測出大部分容易崩塌之區域，總體正確率為七成左右，惟非山崩組預測結果稍低，但亦有六成五以上之準確率，說明本研究所建立之山崩潛感模型具有良好之預測能力。

五、復育效益評估

2009 年 08 月莫拉克颱風來襲所挾帶的豪雨使坡地上的植被遭到沖刷，為了瞭解旗山溪集水區於莫拉克颱風後整體植生復育情形，本研究採用 2009 年 7 月 (莫拉克颱風侵襲前)、2009 年 10 月 (莫拉克颱風侵襲後)、2010 年 12 月及 2011 年 10 月共四期之衛星影像計算集水區內 NDVI 值之分布情形，如圖 15。由各期 NDVI 值空間分布圖可知，旗山溪集水區於莫拉克侵襲後，崩塌地有明顯地增加，尤以集水區上游較為明顯，平均 NDVI 值由 0.262 驟降至 0.123；在莫拉克颱風事件過後一年多 (2010 年 12 月)，集水區內西南方之河道兩側之崩塌範圍有變小趨勢，平均 NDVI 值由 0.123 略微提升至 0.131；至 2011 年 10 月時可明顯看出集水區內崩塌區域之復育成果，平均 NDVI 值大幅提升為 0.225，由此顯示旗山溪集水區受莫拉克颱風受創後，經由兩年多的整治，集水區內 NDVI 平均值已有逐漸恢復的趨勢。

崩塌情形通常發生於 NDVI 值較小的區域 (侯春帆，2006；王美惠，2008)，一般集水區針對崩塌地之治理方法可分為工程方法與非工程方法，工程方法如邊坡穩定工程、防砂設施等，建設時間較長且僅有一定程度的保護標準，僅能針對特定的點進行小範圍的施作，相較之下，非工程方法如植生方法、生態工法等，能對某一面區域進行大範圍的施作，運用植物播種或是苗植等方式除了可以快速達到植生覆蓋、蘊養土壤及減緩沖蝕等功能，更能以接近自然的方式維持自然生態，降低發生崩塌之機率 (曾聖權，2005)。且因此，本研究復育策略之研擬，針對集水區上游之河道環域範圍 250、500、1000、1500 公尺且坡度小於 35 度適宜植物生長之區域，根據水土保持手冊 (2005) 植物實際覆蓋率最高值為 0.95，故將環域區域

表 5 山崩潛感分析因子係數值

Table 5 The coefficient of factor of landslide susceptibility analysis

代號	因子	係數	係數值
L_1	高程	W_1	-0.001
L_2	坡度	W_2	0.033
L_3	地形粗糙度	W_3	0.013
L_4	坡度粗糙度	W_4	-0.046
L_5	NDVI	W_5	-0.025
L_6	濕度指數	W_6	0.044
L_7	總曲率	W_7	-0.042
L_8	莫拉克颱風總雨量	W_8	0.009
常數		C	-9.359

表 6 莫拉克颱風事件分類誤差矩陣表

Table 6 The classification results based on confusion matrix using logistic regression in the study area

羅吉斯迴歸		預測樣本分類結果		
		非山崩組網格數	山崩組網格數	模式準確率
觀察樣本分類結果	非山崩組網格數	81985	43247	65.5%
	山崩組網格數	25794	99438	79.4%
	整體準確率			72.40%

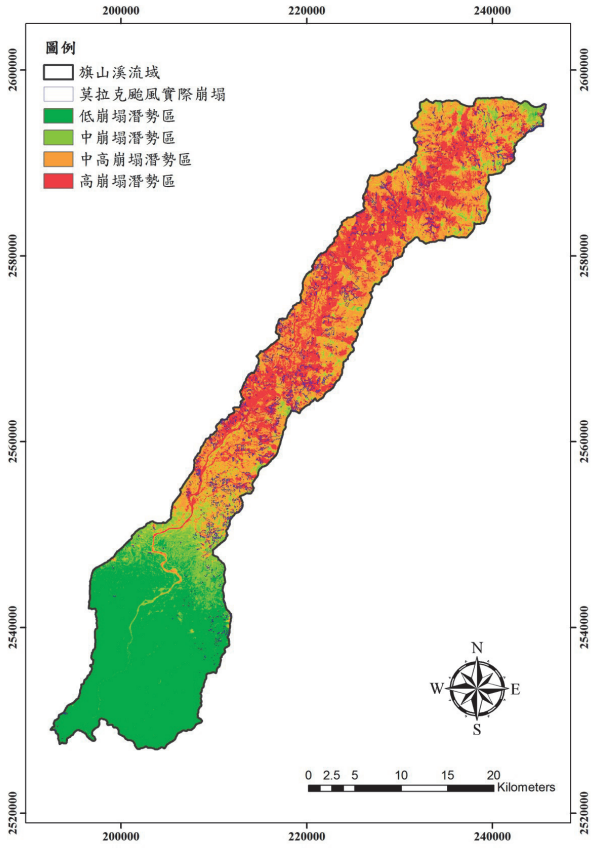

圖 14 莫拉克颱風事件山崩潛感圖

Fig.14 The landslide susceptibility map of Typhoon Morakot

內的 NDVI 值調整為 0.95，期藉由模式之模擬來比較植生復育前後對山崩潛感值的影響。為模擬莫拉克颱風 (2009 年 8 月 8 日至 8 月 10 日) 之降雨型態，本研究以降雨延時 72 小時之累積降雨量視為總雨量，採用重現期距分別為 10 年、25 年、50 年、100 年與 200 年代入模式，將旗山溪集水區內各雨量站不同重現期距之雨量整理如表 7，以克利金方法將雨量站之點資料進行空間推估，並將雨量資料帶回羅吉斯迴歸模式中，比較不同重現期距下其因不同植生復育情境造成的山崩潛感值變化。

本研究分別針對旗山溪集水區，以不同重現期距配合不同環域範圍模擬植生復育，分析結果如表 8 和圖 16，可知在零方案情況下，重現期距為 10 與 25 年時研究區域內多為低崩塌潛感區；當重現期距為 50 年時，低崩塌潛感區所佔的面積降至 78.43%，中崩塌潛感區所佔的面積由 0.46%提升為 18.58%；直到重現期距為 100 年時，由於總雨量大幅提升至 1791.68 毫米，使得研究區域內多為中高崩塌潛感區，約佔研究區域面積的 45.90%；又當重現期距為 200 年時，因總雨量遽增為 2175.47 毫米，集水區內多為高崩塌潛感區。針對河道兩側不同環域範圍進行植生復育後，當重現期距為 10 年時，低崩塌潛感區所佔的面積維持 100%，受植生範圍影響較小；當重現期距為 25 年時，中崩塌潛感區所佔的面積從 0.46%略降為 0.32%，導致低崩塌潛感區所佔的面積隨著植生範圍增加略微提升；但當重現期距為 50 年時，中崩塌潛感區所佔的面積因植生復育範圍增加使面積明顯下降，由零方案之 18.58%降至環域 1500 公尺之 13.63%，低崩塌潛感區所佔的面積因而提升；當重現期距為 100 年時，高崩塌潛感區隨著植生復育範圍增加而有逐漸下降的趨勢，從零方案之 32.81%降至環域 1500 公尺之 23.66%，中崩塌潛感區所佔的面積亦因高崩塌潛

表 7 旗山溪集水區內各雨量站不同重現期距之總雨量資料

Table 7 The total rainfall of different return priods precipitation of rain-gauge station in the study area

雨量站名 (雨量單位：mm)	重現期距 (年)				
	200	**100**	**50**	**25**	**10**
旗山	1649.3	1322.9	1052.6	828.6	678.8
月眉	1750.4	1443.1	1177	946.4	687
排雲	1081.2	1023.1	959.3	887.9	776.4
民生	1922.9	1691.5	1460.5	1229.4	921.4
美濃	1649.3	1322.9	1052.6	828.6	678.8
甲仙	1977.3	1654.2	1365	1106.1	804.3
楠溪	3280.3	2568.4	1971.3	1473.9	946.2
東埔	1016.4	922.5	826.7	728.3	592
神木村	1712.7	1548.2	1380.7	1208.9	971.7
奮起湖	2099.7	1856.8	1614.6	1372.5	1050.4
表湖	1412	1219	1030.2	845.7	608.8
關山	1498.1	1309.4	1125.3	946.1	717.1
玉井	1554	1243.8	991.7	786.2	570.6
古亭坑	1476	1234.5	1020.8	831.3	612.6
尖山	1360	1140.3	944	768.6	564.1
尾寮山	5128	3898.5	2910.8	2122.5	1325.5
御油山	4533.1	3649.7	2877.3	2206.2	1459
小關山	4303.7	3229	2382.2	1718.7	1062
南天池	2873.7	2491.3	2114.3	1742.5	1257.8
佳心	991.4	929.7	864.3	794.2	690.9

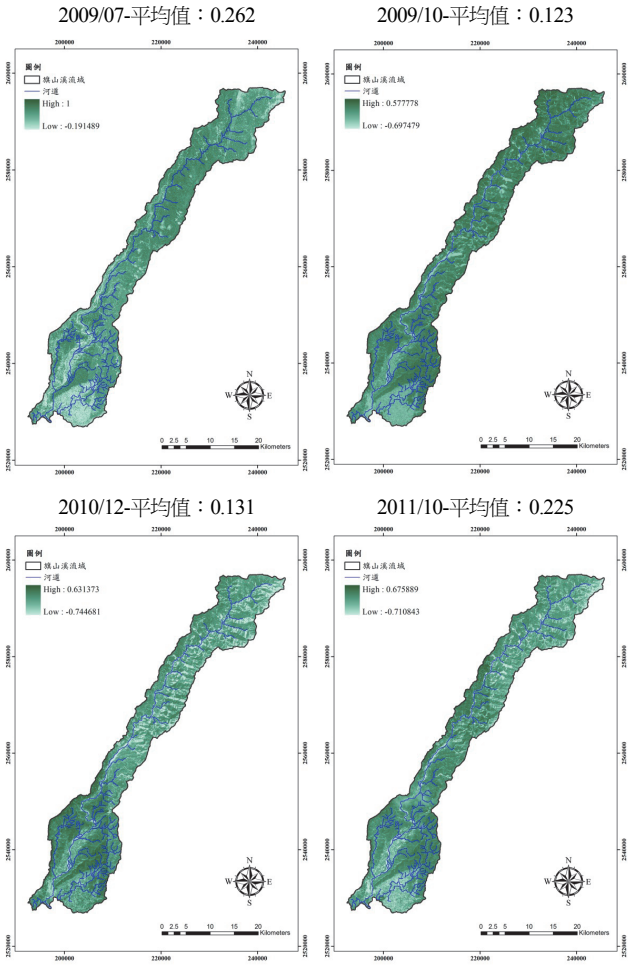

圖 15 旗山溪流域內之 NDVI 值空間分布 (2009/07~2011/10)

Fig.15 The distribution of NDVI in the study area (2009/07~2011/10)

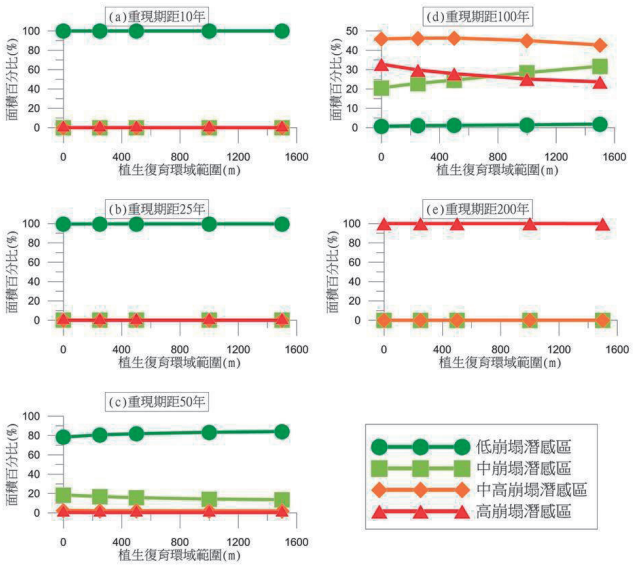

圖 16 旗山溪流域經植生復育前後不同崩塌潛勢區面積變化

Fig.16 The variation of the map of potential landslide in the study area

感區的下降而有先升後降的趨勢；重現期距為 200 年時，集水區內多為高崩塌潛感區，且整體山崩潛勢隨著植生復育的範圍擴大沒有明顯降低的趨勢，顯示進行植生復育對旗山溪集水區極端降雨造成之崩塌改善改善。

六、結果與建議

本研究篩選出高程、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、NDVI、濕度指數、總曲率與總雨量等因子，利用羅吉斯迴歸分析法進行山崩潛感分析模式，並規劃以植生方式進行復育，再以莫拉克颱風不同重現期距之總雨量進行分析，藉以比較不同山崩潛勢區於植生復育前後所佔面積比例之變化，研究結果可歸納以下幾點結論與建議：

1. 由羅吉斯迴歸分析之驗證結果可知，全區山崩組判釋正確率約為 79.40%，非山崩組判釋正確率則有 65.50%，而總體正確率亦有 72.40%，顯示本研究選用的羅吉斯迴歸分析及因子，對旗山溪集水區莫拉克颱風實際崩塌發生處之模擬結果良好。
2. 以莫拉克颱風誘發之山崩情形分析，得出坡度粗糙度、濕度指數、總曲率、坡度、NDVI 佔羅吉斯迴歸分析相當高的權重，顯示相較其他因子，前述因子在所選的研究區域對於山崩潛感分析較為重要。

表 8 旗山溪集水區經植生復育前後崩塌潛感區之面積變化

Table 8 The variation of the map of potential landslide in the study area

(a) 重現期距10年

方案 / 崩塌潛感區 / 面積	零方案		植生復育情境							
			環域250(公尺)		環域500(公尺)		環域1000(公尺)		環域1500(公尺)	
	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)
低崩塌潛感區	75078.79	100.00	75078.87	100.00	75078.87	100.00	75078.87	100.00	75078.87	100.00
中崩塌潛感區	0.32	0.00	0.24	0.00	0.24	0.00	0.24	0.00	0.24	0.00
中高崩塌潛感區	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
高崩塌潛感區	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(b) 重現期距25年

方案 / 崩塌潛感區 / 面積	零方案		植生復育情境							
			環域250(公尺)		環域500(公尺)		環域1000(公尺)		環域1500(公尺)	
	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)
低崩塌潛感區	74700.63	99.50	74797.55	99.62	74801.91	99.63	74807.71	99.64	74809.11	99.65
中崩塌潛感區	344.68	0.46	253.96	0.35	249.76	0.34	244.20	0.33	242.80	0.32
中高崩塌潛感區	32.00	0.04	26.04	0.03	25.88	0.03	25.64	0.03	25.64	0.03
高崩塌潛感區	1.80	0.00	1.56	0.00	1.56	0.00	1.56	0.00	1.56	0.00

(c) 重現期距50年

方案 / 崩塌潛感區 / 面積	零方案		植生復育情境							
			環域250(公尺)		環域500(公尺)		環域1000(公尺)		環域1500(公尺)	
	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)
低崩塌潛感區	58881.54	78.43	60572.31	80.68	61470.43	81.87	62596.40	83.37	63124.56	84.08
中崩塌潛感區	13950.36	18.58	12658.79	16.86	11796.83	15.71	10718.54	14.28	10233.02	13.63
中高崩塌潛感區	1949.21	2.60	1619.57	2.16	1586.33	2.11	1543.05	2.06	1501.09	2.00
高崩塌潛感區	298.00	0.40	228.44	0.30	225.52	0.30	221.12	0.29	220.44	0.29

(d) 重現期距100年

方案 / 崩塌潛感區 / 面積	零方案		植生復育情境							
			環域250(公尺)		環域500(公尺)		環域1000(公尺)		環域1500(公尺)	
	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)
低崩塌潛感區	519.84	0.69	784.12	1.04	885.41	1.18	1066.01	1.42	1367.97	1.82
中崩塌潛感區	15458.13	20.59	17197.50	22.91	18462.15	24.59	21340.48	28.42	23851.66	31.77
中高崩塌潛感區	34464.84	45.90	34714.20	46.24	34784.84	46.33	33809.51	45.03	32093.90	42.75
高崩塌潛感區	24636.30	32.81	22383.29	29.81	20946.72	27.90	18863.11	25.12	17765.58	23.66

(e) 重現期距200年

方案 / 崩塌潛感區 / 面積	零方案		植生復育情境							
			環域250(公尺)		環域500(公尺)		環域1000(公尺)		環域1500(公尺)	
	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)	(公頃)	(%)
低崩塌潛感區	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中崩塌潛感區	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	2.96	0.00
中高崩塌潛感區	2.44	0.00	3.72	0.00	4.92	0.01	13.36	0.02	59.20	0.08
高崩塌潛感區	75076.67	100.00	75075.39	100.00	75074.19	99.99	75065.67	99.98	75016.95	99.92

3. 考量工程方法僅能針對點進行治理，難以進行區域性復育治理，因此本研究規劃以植生方法進行旗山溪集水區復育，範圍為集水區上游之河道周圍且適宜植生生長之區域，分析結果顯示當重現期距為 10 年與 200 年時，植生復育對山崩潛感值較無明顯的影響；當重現期距為 25 年與 50 年時，研究區域內中崩塌潛感區所佔的面積，隨著植生環域範圍擴大而降低；而當重現期距為 100 年時，高崩塌潛感區所佔的面積，因植生範圍擴大有明顯降低的趨勢。
4. 建議後續旗山溪集水區復育治理策略，除了以工程方法的施作，加強現有邊坡工程之維護外，應重視河岸兩邊坡可進行植生復育之區域，藉以降低旗山溪集水區上游的崩塌潛感值。

誌　謝

本研究承蒙行政院農業委員會水土保持局 102 年度「因應氣候變遷重點集水區保育策略之研究 (2/2)」計畫之經費補助，特此誌謝。

參考文獻

[1] 王美惠 (2008)，「應用 SPOT 衛星影像及 GIS 於崩塌地潛感分析之研究-以稍來溪為例」，朝陽科技大學營建工程研究所碩士論文。(Wang, M.H. (2008). *Application of SPOT Satellite Image and GIS for Landslide Potential Analysis – A Case Study of Shao-Lai River*, Master thesis, Chaoyang University of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[2] 行政法人國家災害防救科技中心 (2005)，「石門水庫土砂災害問題分析報告」。(National Science and Technology Center for Disaster Reduction (2005). *The Analysis of Sediment Disaster for Shihmen reservoir watershed*. (in Chinese))

[3] 行政院農業委員會水土保持局 (2005)，「水土保持手冊」。(Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture. (2005). *Soil and Water Conservation Manual.* (in Chinese))

[4] 林信輝 (2001)，水土保持植生工程，高立圖書有限公司。(Lin, S.H. (2001). *Vegetation Engineering of Soil and Water Conservation*, Gau Lih Book Co., Ltd. (in Chinese))

[5] 林彥享 (2003)，「運用類神經網路進行地震誘發山崩之潛感分析」，國立中央大學應用地質學所碩士論文。(Lin, Y.H. (2003). *Application of Neural Network to Landslide Susceptibility Analysis*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[6] 林昭遠、吳瑞鵬、林文賜 (2001)，「921 震災塌地植生復育監測與評估」，中華水土保持學報，32(1)：59-66。(Lin, C.Y., Wu, J.P., and Lin, W.T. (2001). "Monitoring and Assessment of Vegetation Recovery for the Landslide Caused by the 921 Earthquake." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 32(1), 59-66. (in Chinese))

[7] 侯春帆 (2006)，「應用 GIS 及 SPOT 衛星影像於河川流域崩塌地潛勢評估研究-以陳有蘭溪為例」，朝陽科技大學營建工程研究所碩士論文。(Hou, C.F. (2006). *Application of SPOT Remote Sensing Images and GIS on Landslide potential Analysis Using Chen Yu Lan Creek Basin*, Master thesis, Chaoyang University of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[8] 洪雨柔 (2013)，「降雨對山崩潛勢分析之影響-以南橫公路 50 至 110k 沿線為例」，國立中興大學水土保持學所碩士論文。(Hong, Y.J. (2013). *Influence of Rainfall on Landslide Susceptibility Analysis-A Case Study along 50 to 110k Section of the Southern Cross Island Highway*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[9] 國立臺灣大學水工試驗所 (2006)，「白石溪集水區整體治理調查分析與規劃」，行政院農業委員會林務局。(Hydrotech Research Institute, National Taiwan University (2006). *The Intergrated Investgation and Management of Shihmen reservoir watershed*. Forestry Bureau, Council of Agriculture. (in Chinese))

[10] 張郁嘉 (2012)，「山崩潛勢分析-以荖濃溪集水區為例」，逢甲大學都市計畫研究所碩士論文。(Chang, Y.C. (2012). *Landslide Potential Analysis - A Case Study in the Lao-Nong River Watershed*, Master thesis, Feng Chia University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[11] 張弼超 (2005)，「運用羅吉斯迴歸法進行山崩潛感分析-以台灣中部國姓地區為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Chang, P.C. (2005). *Using Logistic Regression to Assess Landslide Susceptibility – A Case Study in Kouhsing Area, Central Taiwan*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[12] 莊緯璉 (2005)，「運用判別分析進行山崩潛感分析之研究-以台灣中部國姓地區為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Chuang, W.L. (2005). *Landslide Susceptibility Analysis by Using Discriminant Analysis – A Case Study in Kouhsing Area, Central Taiwan*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[13] 陳俊愷、林伯勳、冀樹勇 (2013)，「運用多波段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，3-12。(Chen, C.K., Lin, P.H., and Chi, S.Y. (2013). "The assessment of vegetation recovery for Shihmen reservoir watershed by Multispectral and Multi-temporal SPOT Images." *Journal of Sinotech Engineering*, 121, 3-12. (in Chinese))

[14] 陳振華、潘國樑 (1985)，「臺北市山坡地住宅區環境地質調查研究」，工研院能源與礦業研究所報告，第 229 號，共 385 頁。(Chen, J.H., and Pan, K.L. (1985). *Residential area of hillside in Taipei on environmental geology*, Industrial Technology Research Insititute Report, 229, 385.)

[15] 陳嬉璇 (2002)，「溪頭地區山崩潛感圖製作研究」，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文。(Chen, Y.H. (2002). *Application of Neural Network to Landslide Suscep-*

tibility Analysis, Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[16] 陳樹群、陳少謙、吳俊鋐 (2012)，「南投縣神木集水區崩塌特性分析」，中華水土保持學報，43(3)，215-227。(Chen, S.C., Chen, S.C., and Wu, C.H. (2012). "The characteristic of the landslides in Shenmu watershed in Nantou County." J*ournal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43(3), 215-227. (in Chinese))

[17] 曾聖權 (2005)，「SPOT 衛星影像應用於陳有蘭溪流域崩塌調查之研究」，朝陽科技大學營建工程研究所碩士論文。(Tseng, S.C. (2005). *SPOT Images Applied to the Landslide Investigations in the watershed of Chen-Yu-Lan River*, Master thesis, Chaoyang University of Technology, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[18] 黃春銘 (2005)，「運用模糊類神經網路進行山崩潛感分析-以台灣中部國姓地區為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Huang, C.M. (2005). *Using Fuzzy Neural Network to Evaluate Landslide Susceptibility – A Case Study in Kouhsing Area, Central Taiwan.* Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[19] 黃裕星 (2013)，「臺灣森林保育新思維」，板橋扶輪社社刊，47(18)，2-3。(Huang, Y.S. (2013) "Re-thinking of Conservation for Taiwan forestry." *Journal of Panchiao Rotary Club*, 47(18), 2-3. (in Chinese))

[20] 溫仁宏 (2007)，「改進式 Sigma filter 應用於雷達影像斑駁抑制」，國立中央大學太空科學研究所碩士論文。(Wen, J.H. (2007). *Improving sigma filter for speckle reduction of SAR images*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[21] 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2007)，「高屏溪水系旗山溪上游段治理規劃報告 (月眉橋至甲仙攔河堰範圍界)」。(Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs. (2007). *Chi-Sun River upstream of Gaoping River on governance planning report - Yuemei Bridge to Jiasian Weir*. (in Chinese))

[22] 詹勳全、張嘉琪、洪雨柔 (2012)，「利用羅吉斯迴歸建立阿里山森林鐵路山崩潛感預測模式」，水土保持學報，44(4)，421-436。(Chen, H.C., Chang C.C., and Hung Y.J. (2012) "Establishment of Predicting Landslide susceptibility for Alisan Forestry Railway by Logistic Regression Model." *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(4), 421-436. (in Chinese))

[23] 廖珮妤 (2012)，「阿里山森林鐵路事件型山崩潛感分析」，國立中興大學水土保持學所碩士論文。(Laio, P.Y. (2012). *Using Event-based Landslide Susceptibility Analysis to Assess Alishan Forest Railway*, Master thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[24] 蔡雨澄 (2012)，「極端降雨下之山崩潛感分析-以莫拉克颱風誘發山崩為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Tsai, Y.C. (2012). *Landslide Susceptibility Analysis under an extreme rainfall event – A Case Study form typhoon Morakot in the Gaoping catchment area*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[25] 鄭元振 (1992)，「地理資訊系統在區域邊坡穩定分析之應用-中橫公路天祥至太魯閣段」，國立成功大學礦冶及材料科學研究所碩士論文。(Cheng, Y.J. (1992). *Slope Stability Analysis in Geographic Information System – Intertek to Taroko in Central Cross-Island Highway*, Master thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[26] 鍾育櫻 (2005)，「921 集集大地震前後降雨型崩塌地特徵之比較」，國立臺灣大學地理環境資源學研究所碩士論文。(Chung, Y.Y. (2005). *Comparison on the characteristics of rainfall-induced landslides before and after the Chi-Chi earthquake*, Master Thesis, National Taiwan University. (in Chinese))

[27] 鐘意晴 (2009)，「區域性山崩潛感分析方法探討-以石門水庫集水區為例」，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。(Chung, Y.C. (2009). *Probe into the Regional Landslide Susceptibility Analysis-a case study in the Shimen Reservoir Catchment Area*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))

[28] Agresti, A. (2002). "Categorical Data Analysis (2nd ed.)." *New York: John Wiley*, 710p.

[29] Atkinson, P.M., and Massari, R. (1998). "Mapping susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy." *Computers and Geosciences*, 24 (4), 373-385.

[30] Ayalew, L., and Yamagishi, H. (2005). "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains." Central Japan. *Geomorphology*. 65, 15-31.

[31] Burton, A., and Bathurst, J.C. (1998). " Physically based modeling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale." *Environmental Geology*. 35, 89-99.

[32] Claessens, L., Knapen, A., Kitutu, M.G., Poesen, J., and Deckers, J.A. (2007). "Modelling landslide hazard, soil redistribution and sediment yield of landslides on the Ugandan footslopes of Mount Elgon." *Geomorphology*, 90, 23-35.

[33] Feinberg, S. (1985). *The analysis of cross-classified categorical data (2nd ed.)*. Cambridge, MA: MIT Press, 198p.

[34] Ives, J.D., and Bovis, M.J. (1978). "Natural hazards maps for land-use planning, San Juan Mountains, Colorado, U.S.A." *Arct Antarct. Alp. Res.* 10, 185-212.

[35] Jibson, R.W., Harp, E.L., and Michael, J.A. (2000). "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps." *Engineering Geology*, 58, 271-289.

[36] Jibson, R.W., and Keefer, D.K. (1993). "Analysis of the seismic origin of landslides: examples from the New Madrid seismic zone." *Geological Society of America Bulletin*, 105(4), 521-536.

[37] Kienholz, H. (1978). "Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10,000." *Arct Antarct. Alp. Res.* 10, 169-184.

[38] Koukis, G., and Ziourkas, C. (1991). "Slope Instability Phenomena in Greece: A Statistical Analysis Bulletin of the International Association of Engineering." *Geology*, 43, 47-60.

[39] Lee, S., Ryu, J.H., Lee, M.J., and Won, J.S. (2003). "Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea." *Environmental Geology*. 44, 820-833.

[40] Lee, S., and Pradhan, B. (2007). "Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models." *Landslides*, 4, 31-44.

[41] Lin, C.W., Shieh, C.L., Yuan, B.D., Shieh, Y.C., Liu, S.H., and Lee, S.Y. (2004). "Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan." *Engineering Geology,* 71, 49-61.

[42] Luzi, L. (1996). "Applications of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50000) Fabriano Geological Map Sheet)." *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 15, 83-94.

[43] Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E. (1994). "A physical-based model for the topographic control on shallow landsliding." *Water Resour. Res*., 30(4), 1153-1171.

[44] Wilson, J.P., and Gallant, J.C. (2000). "Terrain analysis: Principles and applications." New York, *Wiley*, 87-131.

2014 年 09 月 04 日　收稿
2014 年 10 月 16 日　修正
2014 年 12 月 24 日　接受
(本文開放討論至 2015 年 9 月 30 日)