

## 集水區崩場地環境指標分析與崩塌潛感推估

穆婧<sup>[1]</sup> 林昭遠<sup>[2]\*</sup>

**摘 要** 崩塌發生受多種環境因素影響，若能選用合適之環境指標探討其成因，將有助於日後相關單位於管理、防災參考之用。本研究以莫拉克風災受創甚為嚴重之高雄旗山溪四德大橋上游集水區為研究樣區，藉由災害發生前後之衛星影像，萃取集水區崩塌區位。利用 DEM、衛星影像等資料萃取環境指標，透過主成份分析篩選重要指標，構建判別分析 (DA) 模型，探究集水區環境指標與崩塌發生的關係，並繪製崩塌潛感推估圖。結果顯示，萃取出來的三個主成份軸分別以植生、坡度和距平均高差指標為主；判別函數由海拔、坡度、NDVI、地形濕度指數、坡度粗糙度和距離平均高度離差構成，模型對崩場地判識精度達 70% 以上。由崩塌潛感圖得知，研究區地形濕度指數越高且坡度粗糙度越低之區位崩塌潛勢越高。

**關鍵詞：**崩場地、環境指標、潛感分級、遙感探測。

## Analysis of Environmental Factors and Landslide Susceptibility Prediction for the Watershed Landslides

Mu Jing<sup>[1]</sup> Chao-Yuan Lin<sup>[2]\*</sup>

**ABSTRACT** Landslide disasters are affected by different kinds of factors. Choosing appropriate environmental indicators to investigate landslide causes and predicting potential locations would contribute to disaster management and prevention in the future. In this study, Si-de Bridge, which is located at the Qi-Shan Creek of Kaohsiung County, was used as the outlet of a watershed which suffered heavy damage during Typhoon Morakot. The landslide area was extracted from two-date SPOT-5 images with the image subtraction method. DEM satellite images were applied to calculate some environmental factors. Then, through principal component analysis (PCA), we analyzed the important factors and built a discriminant analysis (DA) model to explore the relationship between environmental indices and landslides and generated a potential landslide map. The results showed that the extracted three principal component axes were mainly vegetation index, slope and difference from mean elevation; elevation, slope, NDVI, slope roughness, topographic wetness index and deviation from mean elevation were used to build the DA model, with classification accuracy up to 70%. According to the landslide susceptibility map, the areas with higher topographic wetness index and lower slope roughness had higher landslide susceptibility.

**Key Words :** Landslide, environmental indices, susceptibility classification, remote sensing.

---

[ 1 ] 北京林業大學林學院

The Academy of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China.

[ 2 ] 國立中興大學水土保持學系

Dept. of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan.

\* Corresponding Author. E-mail : cylin@water.nchu.edu.tw

## 一、前言

台灣地區地質結構脆弱，每逢颱風豪雨，常發生崩塌災害，威脅周圍生態環境和人民生命財產安全，造成巨大損失。若能探討環境指標與崩塌發生之間的關係，通過選取較少數目、且較易獲取之指標用於崩塌潛感推估，則能有效鎖定崩塌發生區位，為相關部門防災提供參考，起到事半功倍的作用。

影響崩塌之指標眾多且錯綜複雜，Cruden and Varnes (1996) 將影響因子主要分為地質因子、地形因子、環境因子及人為因子等四大類；李錦育 (2001) 歸納崩塌發生之五大因素分別為地質構造、岩性、地形過陡、雨水的因素和人為因素。眾多學者探討了崩塌與環境指標之間的關係，如莊智璋 (2010) 選取地形、植生和地景等指標，進行指標評估與篩選，用於崩塌地環境復育；He (2012) 利用地質、地形、植生和景觀等指標推估崩塌發生區位，並繪製崩塌潛感圖。本研究結合前人經驗，並考慮指標的易獲取性，選取地形和植生兩大類指標進行崩塌潛感推估。

由於各項指標間往往存在一定相關性，直接納入崩塌潛感分析不僅指標數目眾多、複雜，而且可能因為多元共線性而無法得出正確結論。主成份分析 (principal component analysis, PCA) 是於 1901 年由 Pearson 提出，再由 Hotelling 於 1933 加以發展的一種統計方法，利用線性變換，將原本的多個指標組合成相互獨立的少數幾個能充分反映總體資訊的指標，從而在不丟棄主要資訊的前提下避開變量間共線性問題 (張文彤, 2002)。本研究透過主成份分析篩選環境指標，以尋找在前幾個主成份中解釋較大變異數之指標，以代表眾多崩塌潛感因子之資訊，用較少的因子探究崩塌發生機制。

研究崩塌潛感的方法可以分為定性法和定量法兩種，而分析大面積崩塌特性時，則需採用定量分析中的多變量統計方法 (陳樹群, 2005)。Naria (2003) 利用判別分析 (discriminant analysis, DA) 推估崩塌與地形指標間的關係；Lee (2005) 及 Lulseged (2005) 則運用邏輯斯回歸分析 (logistic regression) 於崩塌潛感分析與製圖。判別分析方法由 Fisher (1936) 首次提出的，在崩塌潛感推估中，利用各項環境因子組成的線性判別方程式，對研究範圍進行崩塌機率分析。邏輯斯回歸分析則是通過建立已知樣點的環境指標與崩塌發生概率之間的邏輯斯回歸方程式，推估未知區域崩塌發

生概率。本研究嘗試利用判別分析方法探究集水區環境指標與崩塌發生間的關係，並繪製崩塌潛感分級圖。

## 二、研究試區

本研究以莫拉克風災受創甚為嚴重之高雄旗山溪四德大橋上游集水區為研究樣區，面積約為 381.2 平方公里，集水區大部分位於高雄市西北部，及包含部分之嘉義縣東北部，其北接南投縣，集水區形狀呈狹長型，地勢走向呈東北向西南，除下游甲仙鄉地勢較為平緩外，其餘多屬陡峭區位，高程主要分布於 1,000~2,000 公尺，約佔 52.76%；坡度 55% 以上佔 55.51%；坡向主要為西，約佔 16.22%，其次西南，約佔 14.29% (圖 2~圖 4 及表 1)；地質以桂竹林層佔居多，其次為石底層；區內有旗山斷層經過，交通主要以台 21 線為人民生活之主要聯外道路 (圖 1)。

## 三、材料與方法

### 1. 資料蒐集

#### (1) 數值地形資料

數值高程模型 (digital elevation model, DEM) 由林務局農林航測所製作，包含平面位置 X、Y 座標以及高程屬性，解析度為 20m×20m。

#### (2) 衛星影像

本研究所使用之衛星影像為中央大學太空及遙測中心之影像，兩期影像分別為 2008 年 8 月及 2009 年 10 月之 SPOT-4，即莫拉克風災發生前後，解像度為 20m×20m。

### 2. 資料分析與處理

#### (1) 崩塌區位萃取

崩塌地在綠光、紅光以及近紅外光波段有高反射率特性，利用崩塌前後兩期影像像元灰度值相減，以瞭解每個像元的灰度值變遷情形，以此作為崩塌區位萃取之依據。未變遷區域之值將趨近於零，而變遷較大之地區，則顯示較大之正值或負值，該區域為崩塌區位。透過崩塌種子點取得崩塌地之初始門檻值，根據現地輔助資料手動調整崩塌地變遷百分比，得到崩塌區位圖資，再逐一檢核萃取結果，得到 kappa 精度值，用以評估崩塌地萃取結果的準確度 (周朝富等, 1991；杜文強等, 2000)。

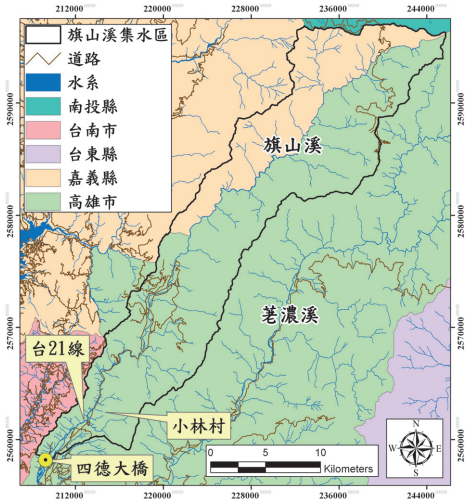


圖 1 研究試區  
Fig.1 Study areas

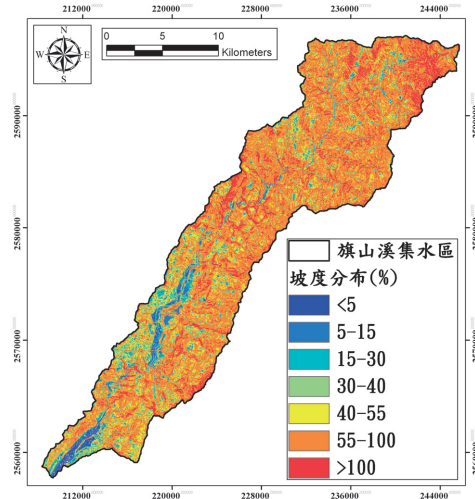


圖 3 旗山溪集水區之坡度分布  
Fig.3 The slope distribution of chi-shan watershed

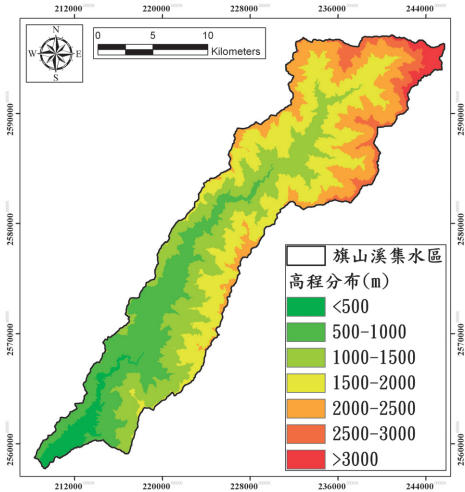


圖 2 旗山溪集水區之高程分布  
Fig.2 The elevation distribution of chi-shan watershed

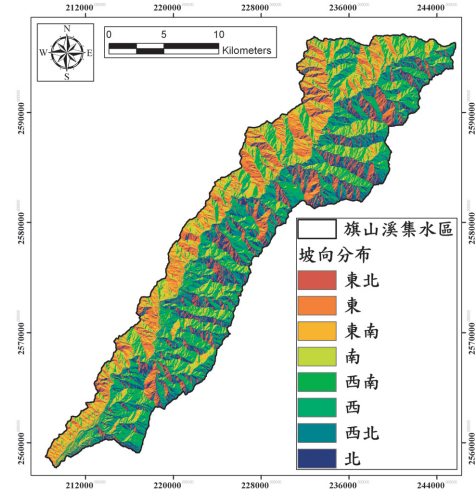


圖 4 旗山溪集水區之坡向分布  
Fig.4 The aspect distribution of chi-shan watershed

表 1 旗山溪集水區之地形分析

Table 1 The analysis of terrain factors in chi-shan watershed

高程分布			坡度分布			坡向分布		
高程 (m)	面積 (ha)	比例 (%)	坡度 (%)	面積 (ha)	比例 (%)	坡向	面積 (ha)	比例 (%)
<500	1,388	3.64	<5	427	1.12	東北	3,745	9.83
500-1,000	7,525	19.74	5-15	876	2.30	東	4,182	10.97
1,000-1,500	9,469	24.84	15-30	2,027	5.33	東南	4,114	10.79
1,500-2,000	10,643	27.92	30-40	2,549	6.70	南	5,092	13.36
2,000-2,500	6,358	16.68	40-55	6,091	16.00	西南	5,448	14.29
2,500-3,000	1,958	5.14	55-100	21,124	55.51	西	6,182	16.22
>3,000	778	2.04	>100	4,965	13.04	西北	4,957	13.00
						北	4,398	11.54

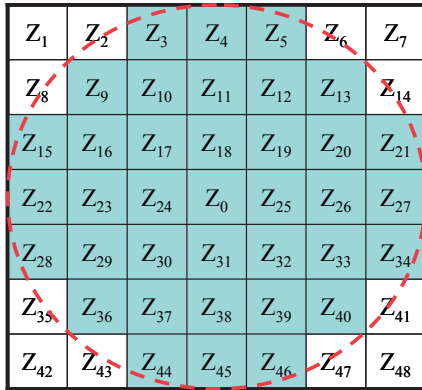


圖 5 圓形視窗之網格示意圖

Fig.5 Round window of the grid diagram

## (2) 地形指標萃取

地形指標參考林淑媛 (2003) 使用之地形計測指標，利用 DEM、坡向和水系圖資，擷取地形粗糙度、地形濕度指數、坡度粗糙度、距平均高度差值、距平均高度離差，作為崩塌潛感分析之用。

## ① 地形粗糙度

Wilson and Gallant (2000) 指出以圓形的視窗內所求得的標高標準差可做為高度變化程度之量測，而它對特定半徑視窗之區域地形起伏的量測具有指標意義。計算落入圓內的各網格中心點之標準差，即為視窗中心點(圓心)之地形粗糙度值(圖 5)。標準差  $S$  之計算如下：

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

其中， $n_c$  為視窗範圍內之點數； $z_i$  為各點之高度值； $\bar{z}$  為視窗範圍內各點高度之平均值。本研究為反映地形局部特性，避免移動視窗過大而稀釋地表特性，故地形指標均以  $3 \times 3$  為網格移動視窗大小進行運算，計算 9 個網格內之標高標準差，以其作為中心點的地形粗糙度值。

## ② 坡度粗糙度

坡度粗糙度定義為可反映一區域內之坡度起伏程度。其演算法與前述地形粗糙度相同，唯計算資料改為坡度。坡度粗糙度值大

者代表坡度變化劇烈之處，如河階崖、懸崖瀑布等。

## ③ 距平均高度差值

距平均高度差值 (difference from mean elevation) 主要計算中心點高度與周圍高度值之差異 (Wilson and Gallant, 2000)。Junko et al. (2001) 曾計算九宮格內中心值與周圍高度值之差異，若中心值較周圍值為低，則定義為凹坡，若中心值較周圍值高，則定義為凸坡。計算方法如下：

$$D_1 = z_0 - \bar{z} \quad (2)$$

其中， $z_0$  為視窗網格之中心點； $\bar{z}$  為視窗範圍內各點之平均值。對於區域性差異較為敏感的營力，如地下水流和閃電擊中的可能性，可提供有效之指標 (Wilson and Gallant, 2000)。

## ④ 距平均高度離差

距平均高度離差 (deviation from mean elevation) 主要針對相對地形位置進行計算，而經由當地的地形粗糙度正規化所求得，其正值代表該點地勢高於周圍地區之平均高程，值愈大愈靠近山脊稜線；相對的值愈小則代表地勢愈低，往往位於山溝河谷中。其值亦有可能超出此範圍，而異常值通常代表數值地型模型資料中之錯誤點位。Wilson and Gallant (2000) 提出距平均高度離差  $D_2$  的公式如下：

$$D_2 = \frac{z_0 - \bar{z}}{S} \quad (3)$$

其中， $z_0$  為視窗網格之中心點； $\bar{z}$  為視窗範圍內各點之平均值； $S$  為該視窗內各點之標準差。

## ⑤ 地形濕度指數

地形濕度指數 (topographic wetness index, TWI) 又稱為濕度指數 (wetness index)、地形指數 (topographic index)、複合地形指數 (compound topographic index) (Wilson and Gallant, 2000)。地形濕度指數的公式如下：

$$\omega = \ln\left(\frac{A_s}{\tan\theta}\right) \quad (4)$$

其中,  $A_s$  為特定集水區面積, 本研究以各網格上游匯集面積表示;  $\theta$  為坡度。此指數表示地形對土壤濕度的控制, 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; 而於低平的地方, 由於坡度平緩, 水留在地表面較長時間而逐漸入滲, 因此土壤中的含水量可能會較高。

### (3) 植生指標萃取

植生指標由崩塌發生前 (2008 年 8 月) 之 SPOT 影像導出, 包含 NDVI、SAVI 和 MASVI 三項指標。

#### ① 常態化差異植生指標 (normalized difference vegetation index, NDVI)

Rouse et al. (1973) 第一次提出 NDVI 的概念, 植被分佈的地方具有較高的近紅外光段反射與較低的紅光段反射, NDVI 定義為近紅外光波段與紅光段的差值除以兩者之和 (Elvidge and Chen, 1995), NDVI 之數值分佈於 -1 至 1 之間。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5)$$

式中, NIR, 近紅外光; R, 紅光。

#### ② 土壤調整植生指標 (soil adjusted vegetation index, SAVI)

對於綠度的測量會和土壤亮度與土壤光譜效應類似, 無論是在植被密度高或低的地方。因此, 必須建立一個適當的土壤—植被系統變動模式, 藉由分析近紅外光與紅光段反射散點圖的等值線, Huete (1988) 提出了 SAVI 的概念, 藉以減低土壤對於樹冠光譜的影響。

在 Huete 的公式中, L 為土壤調整因數 (soil adjustment factor), 代表了植被的密度, SAVI 的數值分佈在 -1 與 1 之間, 理論上植被密度很低的地區, L=1, 植被密度介於中間時, L=0.5, 對於植被密度很高的地區, L=0.25, 當 L=0 的時候, SAVI 等於 NDVI。一般情況下, L 通常給定為 0.5。

$$SAVI = \frac{(NIR - R) * (1 + L)}{NIR + R + L} \quad (6)$$

式中, NIR, 近紅外光段, R, 紅光, L 為 0.5。

#### ③ 土壤調整修正植生指標 (modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)

Qi et al. (1994) 提出了 MSAVI 的概念, SAVI 為 MSAVI 前身。MSAVI 可以直接從衛星影像資料或近地面光譜輻射觀測資料得到, 對於從衛星影像直接求解區域中的植被指數較為方便又可以消除土壤的影響。

$$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)}}{2} \quad (7)$$

式中, NIR, 近紅外光; R, 紅光。

## 3. 精度評估方法

參考 Congalton and Story (1986) 進行影像分類精確度評估的三種指數, 根據誤差矩陣計算生產者精確度、使用者精確度及整體精確度, 用於分析影像相減法萃取崩塌地的精確度和判別分析方法進行崩塌潛感分析的精確度。

#### (1) 生產者精確度 (producer's accuracy)

$$PA = (x_{ii} / \sum x_{i+}) \times 100\% \quad (8)$$

#### (2) 使用者精確度 (user's accuracy)

$$UA = (x_{ii} / \sum x_{+i}) \times 100\% \quad (9)$$

#### (3) 整體精確度 (overall accuracy)

$$OA = (x_{ii} / N) \times 100\% \quad (10)$$

式中, N: 為全部樣點數目;  $x_{ii}$ : 誤差矩陣中欄列對角之樣點數目之值;  $x_{i+}$ ,  $x_{+i}$ : 誤差矩陣中各欄及列之樣點數目。

## 4. 採樣設計

#### (1) 樣本點位選取

利用 idrisi32 軟體在萃取出崩塌地圖層上採樣, 獲取崩塌點位和非崩塌點位元用於後續模式建立和驗證。依據 Brunner (2008) 的研究, 採隨機分散選取樣本, 以避免樣本空間自相關 (spatial autocorrelation), 選取 101 筆崩塌點, 其

中 70 筆建模，31 筆驗模；選取 499 筆非崩塌點位，346 筆建模，153 筆驗模，使得崩塌主體點和非崩塌背景點比值約為 1:5，建模點與驗模點比值約為 2:1，檔案均以向量格式儲存。

## (2) 圖層套疊

將海拔、坡度、坡向、5 項地形指標和 3 項植生指標，共 11 項指標圖層在 ERDAS Imagine 軟體中套疊，生成新的具有 11 個波段的網格圖層，利用樣本點位元的 AOI 圖層切割 11 個波段迭合的圖層，將結果儲存為 ASCII 格式檔，用於接下來的模型推估。

## 四、結果與討論

### 1. 崩塌地萃取精度

利用莫拉克風災發生前後之衛星影像相減，萃取崩塌地誤差矩陣如表 2 所示，總體精度高達 92.8%，kappa 係數為 0.86，生產者精度和使用精度也均達 90% 以上，說明該方法萃取的崩塌地精度較高，可以用於後續分析。

### 2. 主成份分析

根據隨機採樣所得樣本點，統計各項指標最小值、最大值、平均值和變異數，結果如表 3 所示。可以看出，研究範圍平均海拔為 1575.6 米，海拔範圍較高；坡度平均值為 64.32，多數為六級坡（大於 55%）。主成份分析萃取出特徵值大於 1 的三個主成份（表 4），累積解釋變異達 70% 以上，具有較好的解釋能力。

成份矩陣如表 5 所示，將每項主成份中，具有較高因子載荷的指標用“\*”標注。可以看出，第一主成份軸主要影響變數為植生指標（NDVI、SAVI、MSAVI）；第二主成份軸主要由坡度指標（坡度、坡度粗糙度）影響；第三主成份軸主要由高差指標（距平均高度差值、距平均高度離差）影響。考慮到 SAVI、MSAVI 指標與 NDVI 之間具有很高的相關性（相關係數分別為 1 和 0.965），且 NDVI 為較常用指標，因此植生指標僅選取 NDVI。距平均高度差值和距平均高度離差相關係數為 0.626，又距平均高度差值的因子載荷值較大，捨棄距平均高度離差指標。考慮到海拔和地形濕度指數為崩塌地判視重要指標，最終選擇六項指標：海拔、坡度、NDVI、地形濕度指數、坡度粗糙度和距平均高度差值，用於後續判別分析。

### 3. 判別分析

將海拔、坡度、NDVI、地形濕度指數、坡度粗糙度和距離平均高度差值六項指標放入 SPSS 軟體進行判別分析，選擇一次全部進入的方式，判別分析模式的判別函數式如下：

$$F = -0.001X_1 + 0.049X_2 + 0.012X_3 + 0.317X_4 - 0.27X_5 + 0.021X_6 - 2.877 \quad (11)$$

表 2 崩塌地萃取誤差矩陣

Table 2 The error matrix of landslide

推估結果	參考數據		
	崩塌地	非崩塌地	使用者精度
崩塌地	120	5	96%
非崩塌地	13	112	90%
生產者精度	90%	96%	-
總體精度=92.8%，Kappa係數=0.86			

表 3 各項環境指標描述性統計分析

Table 3 The descriptive statistics of environment factors

環境指標	最小值	最大值	平均數	變異數
海拔	302	3588	1575.6	478294.188
坡度	1	216	64.32	807.788
坡向	1	128	34.07	1579.974
NDVI	106	222	198.98	141.218
SAVI	106	221	199.1	142.106
MSAVI	223	251	248.02	5.681
地形粗糙度	0	94	10.98	75.383
地形濕度指數	6	18	8.25	3.531
坡度粗糙度	0	37	11.53	23.705
距平均高度差值	-21	16	-0.07	11.74
距平均高度離差	-1	1	0.01	0.127

表 4 主成份解說變異

Table 4 Total Variance Explained

主成份	初始特徵值			萃取的平方和負荷量		
	總和	變異數的%	累積%	總和	變異數的%	累積%
1	3.042	27.65	27.65	3.042	27.65	27.65
2	2.785	25.315	52.965	2.785	25.315	52.965
3	1.885	17.139	70.104	1.885	17.139	70.104
4	0.992	9.014	79.119			
5	0.841	7.643	86.761			
6	0.662	6.019	92.78			
7	0.413	3.751	96.532			
8	0.328	2.982	99.513			
9	0.045	0.411	99.924			
10	0.008	0.072	99.996			
11	0	0.004	100			

其中 X1, X2, X3, X4, X5, X6 分別為海拔、坡度、NDVI、地形濕度指數、坡度粗糙度和距平均高度差值。判別函數重心分別為：-0.217(非崩塌地) 和 1.071(崩塌地)。

利用 ERDAS 軟體中的 modler maker 模組, 編寫公式 12 的判別分析函數式, 將由環境指標疊合產生的 11 波段網格圖層代入編寫完成的 modler 中進行運算, 程式自動生成與環境圖層具有相同邊界的網格圖, 屬性值為每一網格點的判別函數值。

根據判別分析模式的幾何原理, 距離崩塌地判別

重心距離越近的點, 被判視為崩塌地的概率越大, 因此判別函數值距離崩塌地重心點 (1.071) 距離越近, 則崩塌潛勢值越高, 據此得到表 6 的判別分析誤差矩陣。建模組總體精度為 72.1%, 崩塌地和非崩塌地的生產者分別為 80%和 71%; 驗模組總體精度為 73.4%, 崩塌地和非崩塌地生產者精度分別為 71%和 74%; 建模組和驗模組的非崩塌地使用者精度都高達 90%以上。建模組與驗模組精度差異很小, 說明模式穩定性較好, 且模式判別精度都達到較好水平, 可以將模式用於崩塌地範圍的推估。

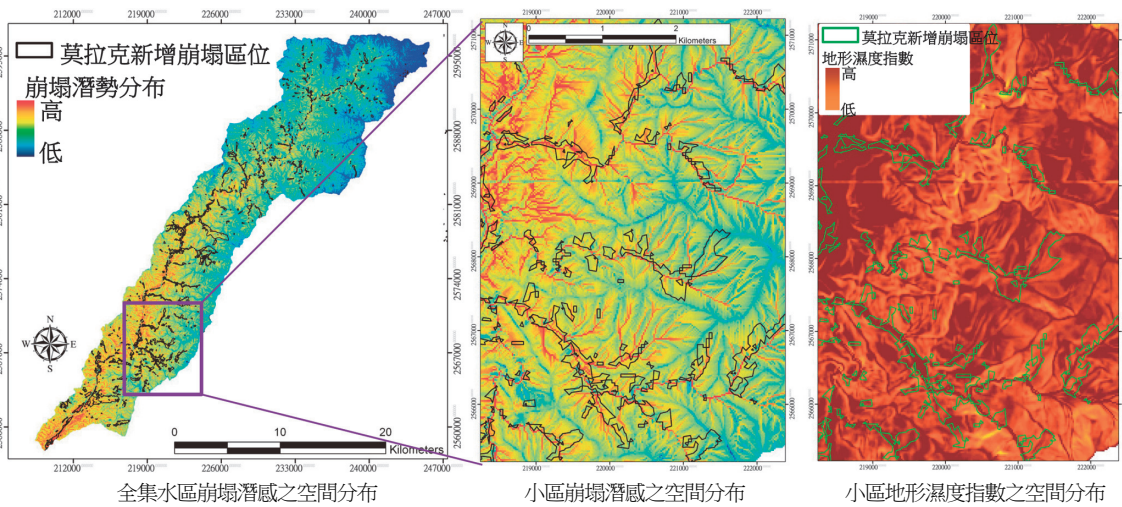


圖 6 崩塌潛感及地形濕度指數之空間分布

Fig.6 The distribution of landslide susceptibility and topographic wetness index

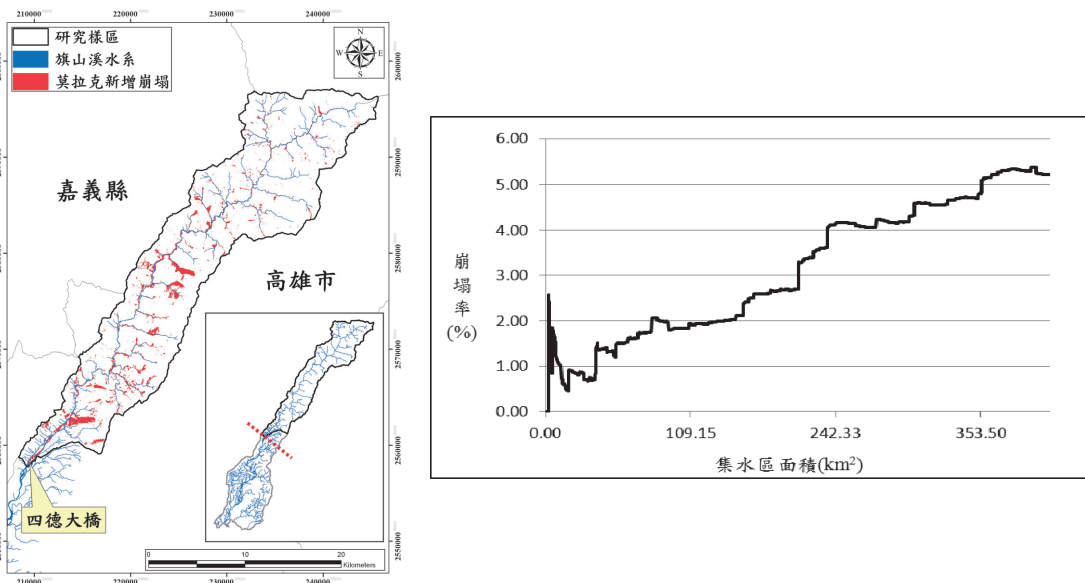


圖 7 莫拉克新增崩塌區位之空間分布

Fig.7 The distribution of incremental landslides after Morakot typhoon

#### 4. 崩塌潛感圖繪製

圖 6 所示為利用上述之判別方程式所得集水區崩塌潛勢空間分布以及透過影像相減法萃取得到的崩塌地範圍。此次莫拉克新增崩塌多發生於集水區下游區位 (圖 7)，當中包含受災嚴重之小林村等地區，上游地區崩塌面積較少，其結果與所分析之崩塌潛感分布大略一致。由判別方程式可知，地形濕度指數及坡度粗糙度所占權重較高，因此空間分布受兩指標影響最大，而地形濕度指數為正相關、坡度粗糙度則為負相關，可見地形濕度指數越高且坡度粗糙度越低之區位崩塌潛勢越高，其與圖 6 所示之小區域結果符合，顯示崩塌多由河道或排水處刷深，其原因在於此區位地形起伏較小，水資源容易儲存之處，也代表逕流多排入此處，一旦暴雨來臨時，過多逕流排入此區，土體含水量達到飽和，並成為坡面之載重，一旦逕流冲刷坡腳，便可能產生向源侵蝕造成崩塌，而此事件符合此分析結果便表示此次崩塌多為此原因所造成。

表 5 成份矩陣

Table 5 Component Matrix

	主成份		
	1	2	3
海拔	0.137	0.599	0.209
坡度	0.156	0.895*	0.267
坡向	-0.023	0.168	0.104
NDVI	0.96*	-0.203	0.167
SAVI	0.96*	-0.203	0.166
MASVI	0.944*	-0.195	0.186
地形粗糙度	-0.069	0.539	0.093
地形濕度指數	-0.304	-0.55	0.527
坡度粗糙度	0.139	0.903*	0.29
距平均高度差值	0.29	0.194	-0.818*
距平均高度離差	0.252	0.177	-0.794*

表 6 判別分析誤差矩陣

Table 6 Error matrix of DA model

推估值	建模組			驗模組		
	崩塌地	非崩塌地	使用者精度	崩塌地	非崩塌地	使用者精度
崩塌地	56	102	35%	22	40	35%
非崩塌地	14	244	95%	9	113	93%
生產者精度	80%	71%	-	71%	74%	-
總體精度	72.1%			73.4%		

## 五、結 論

本研究選用海拔、坡度、坡向，地形濕潤指數、地形粗糙度、坡度粗糙度、平均高程差值、平均高程離差 5 項地形指標和 NDVI、SAVI 和 MSAVI 植生指標，共計 11 項環境指標用於主成份分析，結果顯示，第一主成份軸主要影響變數為植生指標；第二主成份軸主要由坡度指標影響；第三主成份軸主要由高差指標影響，整體而言，主要影響因素以地形起伏為主，意即崩塌前地形過度陡峭，坡面安定性不足，逢外力影響時，易導致崩塌。

透過主成份分析，從 11 項之指標中篩選出海拔、坡度、NDVI、地形濕度指數、坡度粗糙度和距離平均高度離差六項重要指標，用於構建判別分析 (DA) 模式。建模組和驗模組總體精度均達到 70% 以上，精度差異很小，模式穩定性和性能均較好，可有效用於崩塌潛感推估。結合崩塌地判別函數值與判別重心點之間的距離可繪製研究區崩塌潛勢分佈圖。崩塌潛感分佈趨勢與研究區崩塌地萃取範圍一致。分析崩塌潛感圖以及判別方程式可知，地形濕度指數越高且坡度粗糙度越低之區位崩塌潛勢越高，顯示崩塌多由河道向源侵蝕造成。本研究所用崩塌地環境指標分析與崩塌潛感推估方法，將統計分析與水土保持有效結合起來，具有較好的普適性，可供相關機構防災決策參考使用。

## 誌 謝

本文承行政院國家科學委員會「集水區環境復育指標之建置與應用」(編號：NSC98-2313-B-005-007-MY3) 計畫之支持，致使本研究得以順利完成，作者在此表達謝意。

## 參考文獻

- [1] 杜文強、李松鈞、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。(Du, W.J., Lee, S.C., Chen, X.H., and Chan, C.M. (2000). "Pilot study on the change detection of environmental sensitive area using SPOT satellite images." *National Geographic Information System*, 36, 22-29. (in Chinese))
- [2] 李錦育 (2001)，「台灣崩塌地的分類與防工



- 法」, 山地學報, 19(5), 425-429。(Lee, C.Y. (2001). "The landslide classification and counter measurements in Taiwan." *Journal of Mountain Science*, 19(5), 425-429. (in Chinese))
- [3] 林昭遠、林文賜 (2000), 「集水區地水文因子自動萃取之研究」, 中華水土保持學報, 31(3), 247-256。(Lin, C.Y., and Lin, W.T. (2000). "Automated extracting watershed geomorphologic and hydrologic factors." *Chinese Soil and Water Conservation*, 31(3), 247-256. (in Chinese))
- [4] 林淑媛 (2003), 「地形地質均質區劃分與山崩因子探討」, 國立中央大學應用地質研究所碩士論文。(Lin, S.Y. (2003). *Geomorphologic-Geologic Homogeneous Area Subdivision and Landslide Susceptibility Factor*, Master thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [5] 周朝富、鄭祈全、陳燕章 (1991), 「SPOT 資料應用於林地被覆型之分類研究」, 林業試驗所研究報告季刊, 6(3), 283-297。(Chou, C.F., Cheng C.C., and Chen Y.C. (1991). "Application of SPOT data on forest cover type classification." *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute*, 6(3), 283-297. (in Chinese))
- [6] 莊智瑋 (2010), 「環境指標應用於崩塌地植生復育之研究」, 國立中興大學水土保持學系博士論文。(Chuang, C.W. (2010). *Application of Environmental Indices on the Vegetative Restoration of Landslides*, Doctoral dissertation, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [7] 陳樹群、馮智偉 (2005), 「應用 logistic 回歸繪製崩塌潛感圖」, 中華水土保持學報, 36(2), 191-201。(Chen, S.C., and Ferng, J.W. (2005). "The application of logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Jhuoshuei River Basin." *Chinese Soil and Water Conservation*, 36(2), 191-201. (in Chinese))
- [8] 張文彤 (2002), 「SPSS 統計分析教程(高級篇)」, 北京希望電子出版社, 北京。(Zhang, W.T. (2002). *The SPSS Statistical analysis tutorial (Advanced)*, Beijing Hope Electronic Press, Beijing. (in Chinese))
- [9] Brunner, T.J., Purves, R.S. (2008). "Spatial autocorrelation and homonym ambiguity", *Proceeding of the 2nd international workshop on Geographic information retrieval*, Napa Valley, US, 29 October 2008-30 October 2008, 25-26.
- [10] Congalton, R. G. and Story M. (1986). "Accuracy assessment: a user's perspective", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55 (9), 1303-1309.
- [11] Cruden, D.M., and Varnes, D.J. (1996). "Landslide types and processes, in Turner, A.K., and Schuster R.L. eds." *Landslides-Investigation and Mitigation: Transportation Research Board Special Report 247*, National Research Council, USA, 67-75.
- [12] Elvidge, C.D. and Chen Z. (1995). "Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices", *Remote sensing of environment*, 54, 38-48.
- [13] Fisher R. A. (1936). "The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems," *Annals of Eugenics*, 7, 179-188.10
- [14] He, S.W., Pan, P., Dai, L., Wang, H.J., Liu, J.P. (2012). "Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China", *Geomorphology*, 171-172, 30-41.
- [15] Hotelling, H. (1933). "Analysis of a complex of statistical variables into principal components," *Journal of Educational Psychology*, 24, 417-441.
- [16] Huete, A. (1988). "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)", *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- [17] Junko I., Shiaki W., and Takahiko F. (2001). "Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan." *Computers and Geosciences*, 27 : 851-865.
- [18] LEE S. (2005). "Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data journals", *International Journal of Remote Sensing*, Vol.26, No.7, 1477-1491.
- [19] Lulseged A. and Hiromitsu Y. (2005). "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan", *Geomorphology*, 65,15-31.
- [20] Nuria S., Baeza B., Jordi C., Ana D. and Jordi M.(2003). "A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in LaPobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain)", *Natural Hazards* 30, 281-295.
- [21] Pearson, K. (1901). "On lines and planes of closest fit to systems of points in space," *Philosophical Magazine*, 2, 559-572.

- [22] Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H. (1994). "Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSA-VI)", *Remote Sensing Environment*, 48, 119-126.
- [23] Rouse, J.W., Haas R.H., Schell J.A. and Deering D.W. (1973). "Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS", *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.
- [24] Wilson, J.P. and Gallant, J.C. (2000). *Terrain analysis*, John Wiley and Sons, Inc., 479.
- 

2013年01月15日 收稿

2013年02月19日 修正

2013年03月28日 接受

(本文開放討論至 2013 年 12 月 31 日)