

利用羅吉斯迴歸建立阿里山森林鐵路山崩潛感預測模式

詹勳全⁽¹⁾ 張嘉琪⁽²⁾ 洪雨柔⁽³⁾

摘 要

本研究以羅吉斯迴歸法建立阿里山森林鐵路附近邊坡之山崩潛感預測模式，為有效挑選模式內之山崩潛感因子，利用山崩與非山崩次數分佈圖、崩壞比圖及檢測資料是否符合常態分配後進行因子篩選，針對各山崩潛感因子的山崩組與非山崩組資料進行取樣後，以羅吉斯迴歸法計算出各因子的羅吉斯迴歸係數，並建立山崩潛感模式。並為了解所建立模式之優劣，利用分類誤差矩陣表對建置完成之山崩潛感模式進行結果驗證，最後將全區篩選過後之因子資料套用至此羅吉斯迴歸模式，計算得到各網格之潛感值並且繪製出山崩潛感圖，相關成果可提供日後阿里山森林鐵路附近邊坡管理及山崩預警之參考。

(**關鍵詞**：山崩、羅吉斯迴歸、潛感)

Establishment of Predicting Landslide susceptibility for Alisan Forestry Railway by Logistic Regression Model

Chan Hsun-Chuan⁽¹⁾ *Chang Chia-Chi*⁽²⁾ *Hung Yu-Jou*⁽³⁾

Professor⁽¹⁾, Ph. D. Student⁽²⁾, Master student⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, 402, R.O.C.

ABSTRACT

This study aimed to predict landslide susceptibility by using Logistic regression, a multivariate analysis method, and examined the performance of this approach. In order to select the factors efficiently, the calibration and selection procedure were performed. As a result, a suitable combination of the factors for establishing landslide susceptibility model was presented. The evaluation procedure of the susceptibility value of the factors was also presented. The classification error matrix was used to evaluate the accuracy of landslide predicted by the present model.

(1)國立中興大學水土保持學系 助理教授

(2)國立中興大學水土保持學系 博士生 (通訊作者 e-mail:chiag@ms52.hinet.net)

(3)國立中興大學水土保持學系 碩士生

Furthermore, the map of potential landslide was delineated. A landslide susceptibility map with susceptibility index was proposed for engineering and disaster prevention consideration.

(**Keywords** : landslide, logistic regression, susceptibility)

前言

以往研究山崩潛感分析的方法包括：專家評分法、統計學分析法、人工智慧的類神經網路法及定值分析法等四種。早期山崩潛感分析常用專家評分法，因為權重值容易給定，且評分項目中可納入不可量化之因子 (Kienholz, 1978; Ives and Bovis, 1978; 陳振華, 1985)，但是專家評分法容易有過於人為主觀的問題，目前已鮮少被使用；而近年來常用的山崩潛感分析方法為類神經網路法與統計分析法，類神經網路法之優點為可由訓練獲得最佳的網路結構，待訓練完成後可藉由回想獲致較準確之分析成果，並具有高度非線性之學習能力，擬合結果較一般線性方程式佳 (Lee et al., 2003; 黃春銘, 2005)；統計分析法在於分析時較客觀且具理論基礎，能綜合評斷各項因子之影響，獲得一組線性方程式，且分析結果穩定與唯一 (鄭元振, 1992; 莊緯璉, 2005; 張弼超, 2005)；另外，還有以力學原理為理論基礎的定值分析法，將現地地工參數引入模式中，並計算安全係數描述邊坡之穩定性，於大比例尺下的分析結果較精確 (Luzi and Pergalani, 1996; 陳憶璇, 2002)，但廣域的地工參數不易取得，因此定值分析法較其他方法少被使用於山崩潛感分析。整理各山崩潛感分析方法之優缺點及適用性如表 1，其中，統計分析法最常應用於廣域分析上，且不同時期之成果也易於歸納整合，因此常

用於事件型山崩潛感分析。而統計分析法中又以二變量分析和多變量分析法為主，若因子間具有相依性時，二變量分析法對評估結果會造成不可預期之影響，故又以多變量分析法最適合應用在山崩潛感分析上。多變量分析法中的羅吉斯迴歸法分析過程可考慮加入不可量化之類別因子，很早即被用於社會學等研究，但是直到最近幾年才廣泛用於山崩研究的領域。Atkinson and Massari (1998) 最早運用羅吉斯迴歸法於義大利中部亞平寧 (Apennine) 地區進行山崩研究，建立山崩和各山崩因子間的關係，並計算潛感值，繪製山崩潛感圖；Chang et al. (2007) 於陳有蘭溪流域選用賀伯颱風與集集地震事件，以羅吉斯迴歸法分別建立地震和颱風誘發的山崩模式，繪製山崩潛感圖；Yang et al. (2011) 利用羅吉斯迴歸法於台灣國姓鄉進行山崩潛感分析，建立山崩潛感模式以繪製山崩潛感圖，並訂定崩塌潛勢門檻值 0.7 為道路封閉之臨界值，來預測道路封閉路段。李嶸泰等 (2012) 以阿里山地區為例，應用羅吉斯迴歸方法進行山崩潛勢評估研究，並繪製以 10、25、50 及 100 年不同重現期距之降雨量計算降雨誘發山崩潛感值。

台灣中南部之阿里山地區因地質與地形之因素，長年受地震與豪雨事件影響，邊坡災害時有所聞，阿里山地區之交通主要仰賴公路與鐵路，乃民眾賴以維生之重要通路，然而因鐵路周遭多為經過人為挖填整地所形

成之人工邊坡，且近年來因邊坡自然災害導致阿里山森林鐵路中斷之事件時有所聞，因此建立阿里山森林鐵路邊坡崩塌災害預警機制為刻不容緩之課題。本研究選擇阿里山鐵

路環域 1200 公尺為研究區域，利用多變量分析法中的羅吉斯迴歸法分析分析，藉由崩塌因子之萃取與篩選，建立阿里山地區之山崩潛感分析模式，再依據 2009 年 8 月的莫拉克

表 1 山崩潛感分析方法表
Table 1 The method of Landslide susceptibility analysis

分析方法	優點	缺點	適用性
專家評分法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 權重值易給定 2. 操作簡易方便 3. 可考量不易量化的因子 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 過於人為主觀 2. 結果因人而異 3. 成果不易整合 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用於小範圍區域 2. 成果不易整合 3. 適用性差
統計學分析法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 客觀且具理論基礎 2. 可獲得一組綜合評斷各項因子的線性方程式 3. 分析結果穩定且唯一 4. 成果易歸納 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 僅能找出一組山崩因子的線型組合方程式 2. 統計法較專家評分法更為複雜 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用於大範圍區域 2. 成果易整合 3. 適用性佳
類神經網路法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 分析結果較準確 2. 具有高度非線性的學習能力 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 試誤過程耗費時間多 2. 每次分析成果不盡相同 3. 運算過程屬黑盒分析 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 近年來偶有適用於大範圍區域的案例 2. 無法統整分析成果 3. 適用性尚可
定值分析法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 以力學分析較具理論基礎 2. 可加入現地地工參數 3. 以安全係數評估邊坡之穩定 4. 於大比例尺下分析成果較精確 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 廣域的地工參數不易取得 2. 無法獲得區域的整體趨勢 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 適用於局部的工程區域

颱風崩塌資料，完成模式驗證工作，並繪製研究區之山崩潛感圖，以供未來鐵路沿線周遭區域規劃、工程選址及防災預警的參考。

研究區域概述

本研究對象阿里山森林鐵路總長達 71.4 公里且海拔高度介於 260 至 2,657 公尺之間，不同路段水文、地質及植生等相關因子存在明顯差異，若針對鐵路全部沿線建立分析模式，其計算量將相當龐大，且因子變異性可能導致分析效果不彰。因此針對研究區域，先依據歷年對鐵路造成重大崩塌災害的颱風，包括：桃芝、敏督利及莫拉克等三場颱風的崩塌地分佈圖與阿里山森林鐵路進行套疊，如圖 1，套疊結果顯示獨立山火車站前三場颱風幾乎沒有造成崩塌地產生，因此以獨立山火車站(鐵路里程 25k+852.5)為分析之起點，並根據陳凱榮 (2000) 研究中橫公路東勢-德基段的山崩潛感分析之建議，以道路作環域 (Buffer)崩塌面積增加最多的距離作為研究範圍。本研究利用莫拉克颱風的崩塌地分佈圖與鐵路套疊，每隔 100 公尺作一環域，計算每一間距內崩塌地面積的增加率，如表 2，以 1200 公尺時的面積增加率為最大，最後依照此距離作環域，訂定阿里山森林鐵路之研究範圍，如圖 2 所示。

研究區域位於台灣中南部地區，隸屬於南投縣信義鄉、嘉義縣阿里山鄉、竹崎鄉及梅山鄉等四鄉鎮，如圖 2 所示，面積約 96.38 平方公里，區域位屬東亞之亞熱帶氣候區，颱風季節阿里山山脈常為暴雨迎風面，冬季

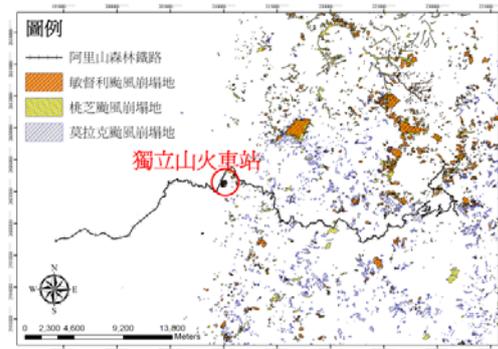


圖 1 歷年崩塌地分佈圖

Figure 1 The distribution of Landslide inventory in the study area

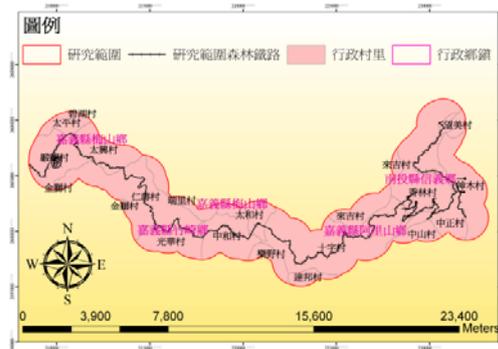


圖 2 研究區域鄉鎮村里圖

Figure 2 The study area

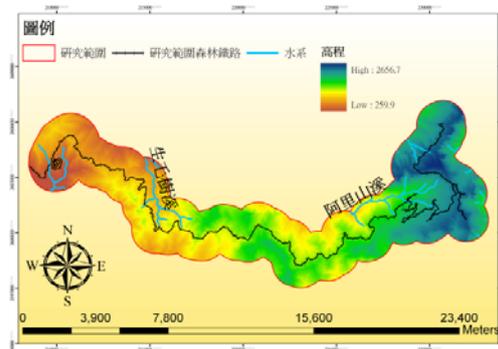


圖 3 研究區域高程水系圖

Figure 3 The distribution of elevation and stream in the study area

東北季風盛行，挾帶大量水氣受阻於山脈，夏季則因雷雨及颱風侵襲雨量較多，故形成夏季炎熱而冬季陰濕的氣候現象；地勢起伏大，大致呈東高西低之走向，高程介於海拔 260 至 2,657 公尺之間，主要有由東向西流之阿里山溪上游，以及由東南向西北流之生毛樹溪上游(如圖 3)。

表 2 莫拉克颱風崩塌地面積增加比例表
Table 2 The percentage increase of Landslide area

環域分析距離	崩塌地面積增加百分比
100m	0.79
200m	0.87
300m	0.86
400m	0.78
500m	0.76
600m	0.77
700m	0.85
800m	0.89
900m	0.84
1000m	0.86
1100m	0.95
1200m	1.01
1300m	0.81
1400m	0.76
1500m	0.79

研究方法

1. 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。羅吉斯分佈 (logistic distribution) 為二元應變數分析中最常使用的分佈函數，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佈曲線。羅吉斯迴歸模式可表示成以下形式 (Gregory and John, 2003)：

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

上式中， $P(y_i = 1)$ 表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 $P(y_i = 1 | x_i)$ 則上式可改寫成：

$$\ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_k x_{ki} \quad (2)$$

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

$$y_i = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_k x_{ki} \quad (3)$$

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(1)式中計算出潛感值，本研究將潛感值分為五個等級：潛感值 0~0.2 屬於低潛感區、0.2~0.4 屬於中低潛感區、0.4~0.6 屬於中潛感區、0.6~0.8 為中高潛感區及 0.8~0.9999 為高潛感區，依研究區內各網格之不同山崩潛感等級繪製山崩潛感圖。

2. 分類誤差矩陣

山崩潛感分析的結果須加以驗證，進而了解該分析成果之品質。張弼超(2005)指出可採用分類誤差矩陣(classification error matrix)驗證羅吉斯迴歸模式預測之準確性，此方法為一種表現真實情況與不同地表類型於分類結果之間的關係，所常用的表示方法。研究中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(overall accuracy)、生產者正確率(producer's accuracy)和使用著正確率(user's accuracy)，羅吉斯迴歸的預測準確性則可藉由計算出之分類誤差矩陣表檢驗。建置迴歸模式的優劣則以訓練資料的分類誤差矩陣表示，而迴歸模式的穩定性則以驗證資料的分類誤差矩陣來表示，分類誤差矩陣表使用者正確率計算方式如下：

$$\text{山崩組使用者正確率} = N1 / (N1 + N2) \quad (4)$$

$$\text{非山崩組使用者正確率} = N4 / (N3 + N4) \quad (5)$$

$$\text{總體正確率} = (N1 + N4) / (N1 + N2 + N3 + N4) \quad (6)$$

其中，N1:山崩組判釋正確之網格數

N2:非山崩組判釋錯誤之網格數

N3:山崩組判釋錯誤之網格數

N4:非山崩組判釋正確之網格數

山崩組與非山崩組的生產者正確率，其值域介於 0% 至 100% 之間，值愈大代表模式預測準確率愈高；反之亦然。後述為了簡易稱呼，本文以山崩組正確率與非山崩組正確率二詞代表山崩組與非山崩組的生產者正確率。

3. 與雨量建立關係之方法

本研究沿用吳秉晃(2002)、曾志豪(2004)所研究雨場切割之定義，一場連續降雨過程，以前 12 小時累積雨量達 10mm 之時為有效降雨時間開始，而以後 12 小時累積雨量不足 10mm 之時為有效降雨時間結束。由於該雨場切割方式之研究成效良好，且研究區域為阿里山公路與本研究區域地域相近，因此採此種雨場切割方法進行雨量資料處理，利用切割完後各雨量站之雨場資料，統計其總雨量及最大時雨量，配合克利金法推估莫拉克颱風之總雨量及最大時雨量空間上之分佈。

山崩潛感模式之建置

1. 基本資料蒐集

(1)20m × 20m 網格數值地形模型 (digital terrain model, DTM)。

(2)1/250,000 及 1/50,000 地質圖 (地調所)。

(3)2009 年 1 月 15 日所拍攝之莫拉克颱風前 SPOT4 衛星影像。

(4)莫拉克颱風事件之降雨量資料。

(5)莫拉克颱風事件之山崩目錄。

2. 山崩潛感因子處理

本研究選用岩性、坡度、坡向、常態化差異植生指標(NDVI)、常態化差異水體指標(NDWI)、地形粗糙度、坡度粗糙度、平面曲率、剖面曲率、總曲率、濕度指數、道路距、斷層距、水系距、鐵路距、最大時雨量、總雨量及高程等 18 個因子為山崩潛感因子，先以某變數累積比與指定分配的累積比之間的關係(P-P 機率圖)檢驗資料分佈，找出較符合常態分佈之因子；配合因子次數分佈圖與崩壞比圖瞭解各因子對山崩與非山崩資料的鑑別性及與山崩間之相關性。各因子統計的 P-P 機率圖中，以坡度、坡向、事件前 NDVI、水系距、鐵路距、總雨量及高程較符合常態分佈；而以濕度指數較不符合常態分佈。由次數分佈圖結果，以平面曲率、剖面曲率、總

曲率及濕度指數等因子的分佈最差，坡向、地形粗糙度、事件前 NDVI、事件前 NDWI、道路距、斷層距、水系距、鐵路距、最大時雨量、總雨量及高程有最好的分佈表現。崩壞比曲線圖可以供瞭解因子與山崩發生機率的相關性，其中濕度指數此因子與山崩之間的關係呈正相關，其餘因子都為因子值為某一範圍時，有較大的崩壞比，如坡度範圍介於 30% 至 60% 時，崩壞比較大，或事件前 NDVI 範圍介於-0.3~ -0.75 時，崩壞比較大。

總和上述各項因子統計檢驗，篩選出研究區中重要的山崩潛感因子共 14 個，包括：岩性、坡度、坡向、地形粗糙度、坡度粗糙度、事件前 NDVI、事件前 NDWI、水系距、斷層距、道路距、鐵路距、高程、最大時雨量及總雨量，以下針對其特性進行詳述：

表 3 研究區域岩性分類表（資料來源：中央地質調查所）

Table 3 Classification of geology in the study area

代碼	地層分類	所屬地層	地層特性
1	砂岩、泥岩、頁岩	頭料山層、卓蘭層	為砂、頁岩互層，由於砂岩抗侵蝕力高於頁岩，易出現差異侵蝕情形，造成地層結構脆弱、不穩定。
2	砂岩、頁岩	桂竹林層、石底層	岩質堅緻耐蝕，岩質較疏鬆，夾有頁岩、粉砂岩或砂岩頁岩薄互層常形成陡崖或嶺線地形；易沿砂頁岩交界面之層理弱化，若配合節理發育，則易形成岩楔。
3	頁岩、砂質頁岩、泥岩	錦水頁岩層	乾燥破碎之錦水頁岩呈不規則岩片，風化面多呈洋蔥狀構造。厚層頁岩風化後常見球狀或鉛筆狀構造，局部可見頗為發達之頁理及層理，故易剝落形成岩屑堆積於坡腳。

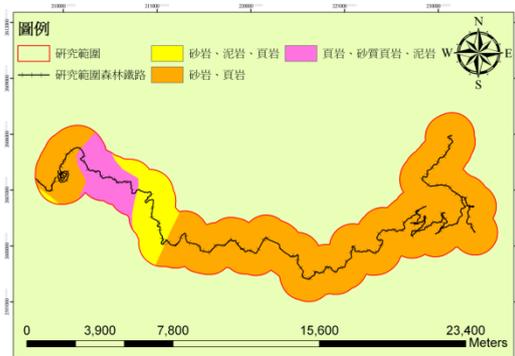


圖 4 岩性因子圖

Figure 4 The distribution of geology in the study area

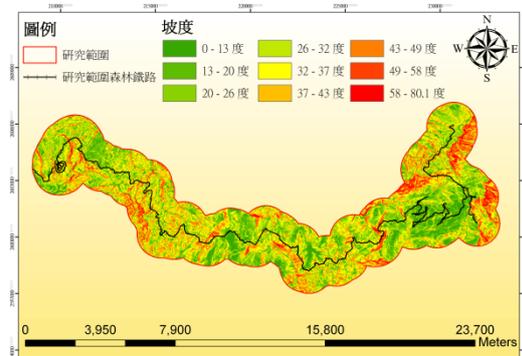


圖 5 坡度因子圖

Figure 5 The distribution of slope in the study area

(1)岩性

岩性的材料決定岩體的強弱程度，而在大範圍的研究區域中若欲蒐集全面性的岩石強度參數資料是很不容易的，故研究中利用可反映岩性差異的地層資料做為岩性強度評估之參考，並盡可能參考大比例尺之地質圖，進行岩性資料萃取。本研究依照不同的地層給予 1~3 之代碼與地層特性如表 3，完成的岩性因子如圖 4 所示。

(2)坡度

坡度為最直接影響邊坡力學的地形條件，坡度愈陡，愈容易發生崩塌，從力學的觀點來看，坡度愈陡造成土層或是岩層往下移動的作用力更大，然而岩層的強度愈高才能存在於陡峻的坡面，因此產生崩塌的機率較低。本研究使用 20m×20m 數值地形資料，以 3×3 網格計算網格中心之平均坡度值，完成的坡度因子圖如圖 5 所示，依水土保持技術規範將坡度分為七級坡，分類標準如表 4 所示。

表 4 研究區坡度分析結果表

Table 4 Classification of slope distribution in the study area

坡度分級	坡度範圍	面積(公頃)
一級坡	$S \leq 5\%$	78.57
二級坡	$5\% < S \leq 15\%$	531.37
三級坡	$15\% < S \leq 30\%$	2189.26
四級坡	$30\% < S \leq 40\%$	7756.33
五級坡	$40\% < S \leq 55\%$	7706.12
六級坡	$55\% < S \leq 100\%$	5994.76
七級坡	$100\% < S$	1117.82

(3)坡向

坡向即坡面的傾向，某些特定之坡向常受到暴雨之侵襲而造成其坡面之邊坡塊體容易有膠結不良或是高度風化的情況，因此容易引致崩塌。坡向的計算方式亦採用 3×3 網格計算，完成的坡向因子圖如圖 6 所示，而本研究將坡向因子視為類別變數，坡向分類標準整理如表 5，將坡向範圍分為 9 類。

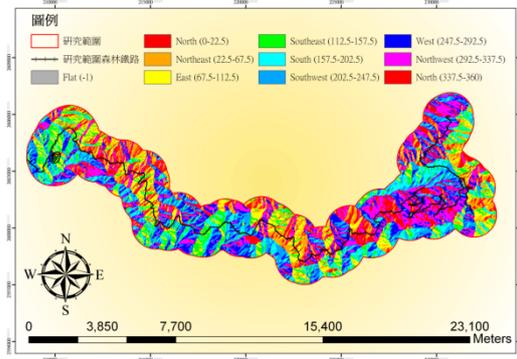


圖 6 坡向因子圖

Figure 6 The distribution of aspect in the study area

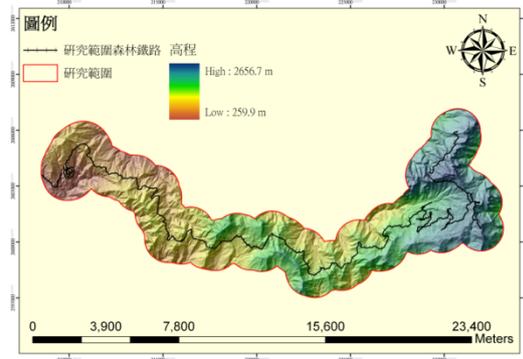


圖 7 高程因子圖

Figure 7 The distribution of elevation in the study area

表 5 坡向分類標準

Table 5 Classification of aspect in the study area

坡向分類	方位	坡向範圍(度)
坡向 1	北	337.5~22.5
坡向 2	東北	22.5~67.5
坡向 3	東	67.5~112.5
坡向 4	東南	112.5~157.5
坡向 5	南	157.5~202.5
坡向 6	西南	202.5~247.5
坡向 7	西	247.5~292.5
坡向 8	西北	292.5~337.5

(4) 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，研究區域內高程分佈由 259.9 至 2656.7 公尺。完成的高程因子圖如圖 7 所示。

(5) 地形粗糙度

地形粗糙度 (terrain roughness) 之定義

為描述一區域內的地形變化程度，Wilson and Gallant (2000) 提出利用圓形的視窗內的高度標準差，做為區域內高度變化程度的計測方式。為了更確切的表現地形局部起伏的狀況，本研究以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，去除地表起伏較為劇烈的部分，僅留下大範圍的地勢的起伏，再將原始地形面扣除平滑化後的地形，即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。

(6) 坡度粗糙度

坡度粗糙度計算方式與地形粗糙度的計算方式相同，其差異之處為將原先輸入的濾波後地形資料轉為坡度資料進行運算。代表單位網格式坡度變化之程度，藉由坡度粗糙度的計算，可找出崩塌地是否會在坡度急遽改變的地形中出現。

(7) 常態化差異植生指標

在衛星影像之應用上，最常以常態化差異植生指標 (NDVI) 評估區域內植生覆蓋，

其原理為利用綠色植物具吸收藍光、紅光及強烈反射紅外光之特性，且植物對於近紅外光波段的反射比裸露土石強，有植生覆蓋的地表呈現紅色色調。而大面積裸露地之坡面在影像光譜上與尚有植物存活地區之光譜資訊成明顯對比（林昭遠等人，2001），以可見光與近紅外光來判別植生反射量之多寡。其計算公式如下：

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (7)$$

其中，NIR 為近紅外光輻射值；RED 為紅光輻射值。計算所得的 NDVI 值域分佈介於-1~1 之間，值越大表示植生越茂密，故吸收之紅光愈多，紅外光之反射愈強，其差異也愈大。

(8)常態化差異水體指標

常態化差異水體指標(NDWI)可用於植物含水率的測定(Gao, 1996)，也稱為葉面積含水量指標(Leaf area water-absent index)，代表植生和植生水分狀態的含水率。由於 NDVI 對於評估植物含水率有限(Ceccato et al., 2002)，因此結合 NDVI 和 NDWI 來描述植生狀況會更為理想。而 Gao (1996)應用遙感探測於 NDWI 指標計算的研究中，提出其運算方式是應用近紅外光與短波紅外光段(SWIR)的比值，運算公式如下：

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (8)$$

其中，NIR 代表近紅外光輻射值，SWIR 代表短波紅外光輻射值。所求得之 NDWI 值為介於-1~1 之間的值，值越大代表所含水分越多。因此若此處為崩塌地，則可判釋土壤

表面之含水量；若為非崩塌地，則可代表植生葉面積的含水量，並可配合 NDVI 來檢視植生狀況。

(9)水系距

水系距 (distance to river) 即任一點與現有水系的距離，本研究利用地理資訊系統空間分析之距離計算功能計算各網格與水系之距離。

(10)斷層距

斷層距 (distance to fault) 即任一點與現有斷層的距離，本研究利用地理資訊系統空間分析之距離計算功能計算各網格與斷層之距離。

(11)道路距

道路距 (distance to road) 即任一點與現有道路的距離，本研究利用地理資訊系統空間分析之距離計算功能計算各網格與道路之距離。

(12)鐵路距

鐵路距 (distance to railroad) 即任一點與現有鐵路的距離，本研究利用地理資訊系統空間分析之距離計算功能計算各網格與鐵路之距離。

(13)最大時雨量及總雨量

由於研究區內雨量站分佈稀疏，僅阿里山、奮起湖、樟腦寮、石碇龍等四站，進行雨量空間分佈推求時易產生較大誤差，為增加雨量空間分佈推估之精度，將鄰近研究區之雨量站納入分析，且同時考量選用雨量站空間高程變異影響，以阿里山、奮起湖、樟

腦寮、石磐龍、瑞里、神木村、望鄉、和社、新興橋、東埔、新高口、楠溪、豐山、草嶺、山豬湖、馬頭山及大湖等 19 個雨量站資料萃取最大時雨量及總雨量，雨量站位置分佈如圖 8 所示，莫拉克事件各測站之最大時雨量及總雨量資料，配合本研究選用的克利金 (Kriging) 法內插成 20m×20m 網格式資料，推估莫拉克颱風之最大時雨量及總雨量分佈，其雨量分佈推估結果如圖 9 與圖 10 所示。研究區內莫拉克颱風總雨量分佈由 1670 至 2540mm，總雨量最大值高於台灣年平均降雨量 2,500mm，顯示該地區降雨量相當豐沛；圖 9 顯示，研究範圍內之莫拉克颱風最大時雨量度分佈為每小時 76.8 至 101mm，根據雨量分佈圖套疊崩塌地的結果發現，颱風之總雨量及最大時雨量與崩塌地亦具有關聯性，總雨量及最大時雨量增大的情況下，崩塌面積有隨之增大的趨勢，且崩塌地分佈亦較為密集。

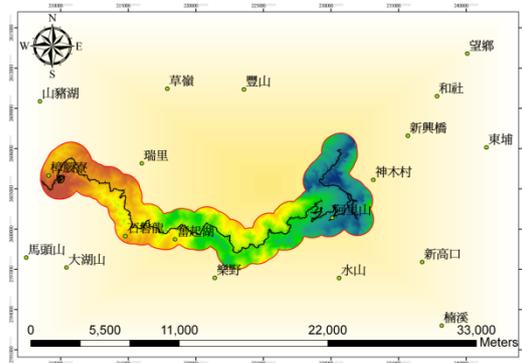


圖 8 各雨量站分佈位置圖

Figure 8 The distribution of rain-gauge station in the study area

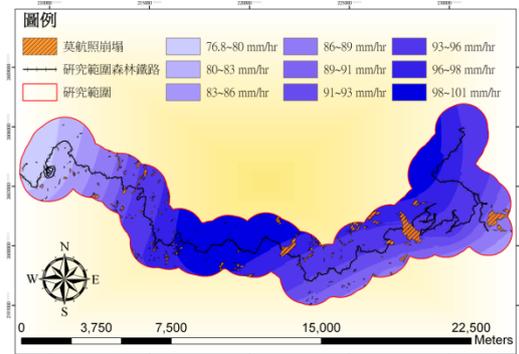


圖 9 莫拉克事件最大時雨量因子圖

Figure 9 Distribution of maximum hourly rainfall of Typhoon Morakot in the study area

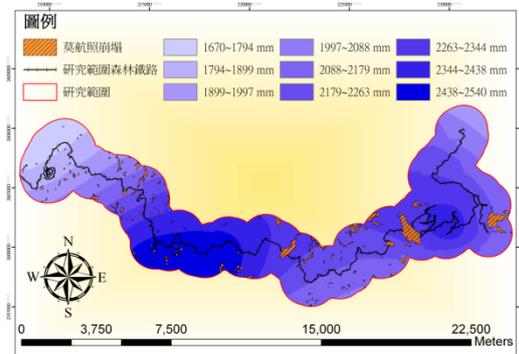


圖 10 莫拉克事件總雨量因子圖

Figure 10 Distribution of Total rainfall of Typhoon Morakot in the study area

山崩潛感模式分析

1. 分析樣本選取

由於各因子的單位及值域分佈不盡相同，不同因子數值大小會使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，而影響分析結果。為避免上述情況，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，雖然標準化後的值域亦不盡相同，但集中於幾個標準差之內，可降低單位與值域對山崩潛感分析的影響。標準化公式如下：

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (9)$$

其中 \bar{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，挑選由該事件所誘發而新增的山崩與或已存在的崩場地經過該事件後發生擴大情形之山崩。另外，研究中將研究區域內坡度小於 10% 的地區劃分為穩定區，穩定區不納入分析；扣除穩定區、山崩區後剩下的區域，即為非山崩組的資料。由於非山崩組資料遠多於山崩組資料，且非山崩組資料仍存有會造成分類錯誤的因素。

為降低由非山崩組資料產生之誤差，剔除以下資料：

- (1) 圍繞莫拉克事件後山崩周圍 20m 的部分
- (2) 歷年崩塌地
- (3) 坡度 55 度以上容易發生落石的區域

利用上述篩選後得到之山崩組與非山崩組資料進行山崩潛感分析，以提升所建立之分析模式對於資料預測的準確度。由於山崩組與非山崩組的網格數量差異很大，為避免分析結果的偏差，在進行分析時，山崩組與非山崩組選取之樣本數要相近，考量人為選取時，易有主觀印象產生選取的誤差，因此

非山崩組資料以亂數選取與山崩組相同之網格數，以供後續分析之用。

2. 模式分析成果

本研究根據上述篩選後之分區資料，將岩性、坡向、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、NDVI、NDWI、水系距、斷層距、道路距、鐵路距、高程、最大時雨量及總雨量等因子，進行羅吉斯迴歸分析，可得到以下迴歸式：

$$P = \frac{1}{1 + e^{-\lambda}} \quad (10)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^m W_i L_i + \sum_{j=1}^n W_{m+j} D_j + \sum_{k=1}^0 W_{m+n+k} F_k + C \quad (11)$$

其中， P 為山崩潛感值，(11)式中 L 代表不同之岩性因子、 D 代表不同之坡向因子、不同之 F 分別代表坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、總雨量及最大時雨量因子， W 為迴歸式係數。羅吉斯迴歸分析得到各因子的權重係數，由結果中可發現岩性 3、坡向 3、坡向 8 及水系距等因子並無迴歸係數值，因此上述因子並無選入模式中；而岩性 1、坡向 4、坡向 5、坡向 6、坡向 7、坡度粗糙度、NDVI、道路距及高程等因子的迴歸係數為負值，這是由於上述因子與山崩之間乃呈負相關，代表因子值越大時會降低山崩發生機率；當迴歸係數越大，代表該因子越具重要性，本研究區域則以斷層距、道路距、高程、岩性 2、地形粗糙度、坡向 6、總雨量及最大時雨量等因子有較高的權重表現並根據上述分析取樣後資料建立山崩潛感分析模式，針對研究區全區山崩組網格及隨機抽出相同筆數的非山崩組資料，一併作分析。得到之羅吉斯迴歸分析多項式如下：

$$\lambda = -0.566 \times L_1 + 0.839 \times L_2 + 0.244 \times D_1 + 0.357 \times D_2 - 0.255 \times D_4 - 0.573 \times D_5 - 0.752 \times D_6 - 0.419 \times D_7 - 0.212 \times F_1 + 0.765 \times F_2 - 0.193 \times F_3 - 0.239 \times F_4 + 0.416 \times F_5 + 1.595 \times F_7 - 1.041 \times F_8 + 0.136 \times F_9 - 1.802 \times F_{10} + 0.591 \times F_{11} + 0.608 \times F_{12} - 1.035 \quad (12)$$

其中 λ 為羅吉斯函數， L_1 為岩性 1， L_2 為岩性 2， D_1 為坡向 1， D_2 為坡向 2， D_4 為坡向 4， D_5 為坡向 5， D_6 為坡向 6， D_7 為坡向 7， F_1 為坡度， F_2 為地形粗糙度， F_3 為坡度粗糙度， F_4 為 NDVI， F_5 為 NDWI， F_7 為斷層距， F_8 為道路距， F_9 為鐵路距， F_{10} 為高程， F_{11} 為莫拉克事件最大時雨量， F_{12} 為莫拉克事件總雨量。

將(12)式羅吉斯函數帶入(10)式中即可求得全區的山崩潛感值 P，此值代表該網格計算出的山崩潛感值，其值域界於 0 到 1 之間，而羅吉斯迴歸一般以 0.5 做為崩與不崩的分界(cut off)，即潛感值若大於 0.5，則表示預估為山崩；反之，則表示預估為非山崩，研究區域完成的山崩潛感圖如圖 11 所示。對照莫拉克颱風實際新增之崩塌區，可發現預測之崩塌區幾乎包含絕大部分的實際崩塌區，僅鐵路下方小部分之較小的實際崩塌區無法預測準確，而造成預測不準確可能之原因為本身山崩崩目錄圖判釋錯誤、資料誤差或者統計學上山崩潛感值不可完全分離者；雖然預測的崩塌區面積大於實際崩塌區，但亦代表未預測準確之崩塌區為山崩潛感值較大的地方，於下次颱風來臨時有造成崩塌之可能。

3. 模式成果驗證

為了解加入促崩因子後所建立之事件型山崩潛感模式品質是否良好，本研究以全區域莫拉克颱風事件資料作模式，以分類誤差矩陣表進行成果驗證。

研究區域莫拉克颱風事件分類誤差矩陣

表，如表 6 所示。顯示預測的山崩組正確率高達 75.31%，非山崩組正確率約有 68.75%，而總體正確率亦有 68.97%，顯示本研究選用之岩性、坡度、坡向、總雨量及最大時雨量等因子，對莫拉克颱風實際崩塌發生處及利用率定模式崩塌模擬結果良好。

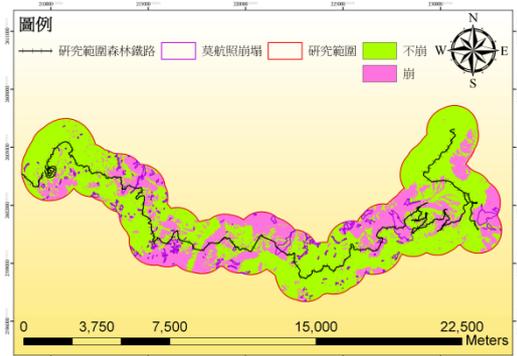


圖 11 羅吉斯迴歸模式於莫拉克颱風預測崩塌區域與實際崩塌區域比較圖

Figure 11 Compared predicted landslide with actual landslide by logistic regression model

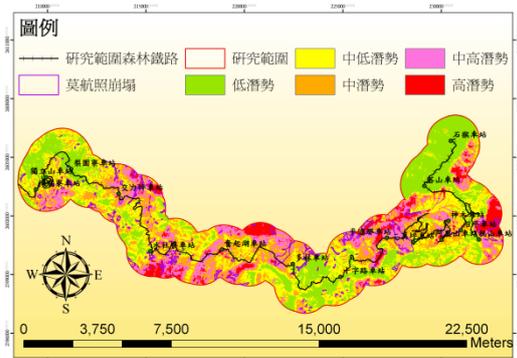


圖 12 莫拉克颱風事件山崩潛感圖

Figure 12 The Landslide susceptibility map of Typhoon Morakot

4. 山崩潛感圖繪製

本研究以羅吉斯迴歸建立莫拉克颱風事

件的山崩潛感模式，山崩組正確率達 75.31%、非山崩組正確率有 68.75%、總體正確率達 69%，整體結果表現良好。用該結果繪製莫拉克颱風事件的山崩潛感圖(如圖 12 所示)，可以發現莫拉克颱風新增山崩地區絕大部分

位於中高及高潛感地區，且研究區域之山崩潛感模式亦經過驗證，代表未來若與莫拉克颱風相似之極端降雨型態，則可以利用本研究所建立之山崩潛感模式，作為阿里山森林鐵路山崩預警之參考。

圖 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		全區資料網格數		分類總網格數
		山崩組	非山崩組	
分類結果網格數	山崩組	6203	72660	78863
	非山崩組	2034	159842	161876
全區總網格數		8237	232502	240739
山崩組正確率		75.31%	非山崩組正確率	68.75%
總體正確率		68.97%		

結果與討論

本研究以岩性、坡度、坡向、地形粗糙度、最大時雨量與總雨量等進行崩塌因子萃取與篩選，建立客觀之山崩潛感分析模式，再依據 2009 年 8 月的莫拉克颱風崩塌資料，完成模式驗證工作，並繪製山崩潛感圖，其研究結果可歸納以下結論：

1.莫拉克颱風事件之山崩潛感圖經套疊實際山崩比對，對於含促崩因子的結果而言，山崩組預測正確率高達 75.31%，非山崩組預測正確率約有 68.75%，而總體預測正確率亦有 68.97%。研究所選用因子如岩性、坡向、坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度、NDVI、

NDWI、水系距、斷層距、道路距、

鐵路距、高程、最大時雨量及總雨量等因子，對於莫拉克颱風實際發生崩塌處模擬結果良好。

2.莫拉克颱風事件的山崩潛感圖，顯示莫拉克颱風新增山崩地幾乎均位於中高及高潛感區，且完成研究區域之山崩潛感模式驗證工作，代表未來若遇與莫拉克颱風相似之極端降雨型態，則可以利用本研究所建立之山崩潛感模式，作為阿里山森林鐵路山崩預警之參考。

3.本研究採用研究區內外共 19 個雨量站，但鄰近阿里山森林鐵路之雨量站僅有 4 個(奮起湖、樟腦寮、阿里山、石磐龍)，需藉由

增加研究區外之雨量站，進行克利金法推估空間之雨量分佈，因此可能造成雨量資料產生誤差，進而影響山崩潛感模式之準確性。未來若可於鐵路旁增設雨量站並有詳細之雨量紀錄，將有助於阿里山森林鐵路邊坡崩塌之預警。

參考文獻

1. 吳秉晃(2002)，「集集地震後阿里山地區公路邊坡之崩壞行為與熱紅外線影像特性研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
2. 李嶸泰、張嘉琪、詹勳全、廖珮好、洪雨柔(2012)，「應用羅吉斯迴歸法進行阿里山地區山崩潛勢評估」，中華水土保持學報，第四十三卷，第二期，第167-176頁。
3. 林昭遠、吳瑞鵬、林文賜(2001)，「921震災場地植生復育監測與評估」，中華水土保持學報，第三十二卷，第一期，第59-66頁。
4. 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。
5. 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。
6. 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。
7. 陳凱榮(2000)，「中橫公路山崩潛感分級研究-以東勢—德基為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
8. 陳憶璇 (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。
9. 曾志豪(2004)，「降雨特性對阿里山公路邊坡破壞模式分析之影響研究」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。
10. 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。
11. 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。
12. Agresti, A. (2002), "Categorical Data Analysis (2nd ed.)", New York: John Wiley, 710p.
13. Atkinson, P. M. and R. Massari. (1998), "Generalized linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy", *Comput. Geosci.* 24:373-385.
14. Ceccato, P., S. Flasse, and J. Gregoire (2002), "Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications", *Remote Sensing of*

Environment, Vol.82, pp.198-207.

15. Chang, K. T., S. H. Chiang and M. L. Hsu.(2007),” Modeling typhoon- and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression” , *Geomorphology*. 89:335-347.
16. Feinberg, S. (1985),” The analysis of cross-classified categorical data (2nd ed.)” , Cambridge, MA: MIT Press, 198p.
17. Gao, B.C. (1996). “NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space” , *Remote Sensing of Environment*. 58(3):257-266.
18. Gregory C., Davis John C. (2003) ,” Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas” , *Journal of Engineering Geology*, Volume 69, No. 8, Pages 331-343, 2003.
19. Ives, J. D. and M. J. Bovis.(1978),” Natural hazards maps for land-use planning, San Juan Mountains, Colorado, U.S.A” , *Arct. Antarct. Alp. Res.* 10:185-212.
20. Kienholz, H. (1978),” Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10,000” , *Arct. Antarct. Alp. Res.* 10:169-184.
21. Lee, S., J. H. Ryu, M. J. Lee and J. S. Won. (2003),” Use of an artificial neural network for analysis of the susceptibility to landslides at Boun, Korea” , *Environmental Geology*. 44:820-833.
22. 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.
23. Wilson J.P. and Gallant J.C. (2000),” Terrain analysis: Principles and applications” , New York , Wiley, pp. 87 – 131.
24. Yang, S. R., C. W. Shen, C. M. Huang, C. T. Lee, C. M. Cheng and C. Y. Chen.(2011),” Prediction of mountain road closure due to rainfall-induced landslides” , *J. Perform. Constr. Fac.* 25:197-202.

101 年 09 月 26 日收稿

101 年 10 月 02 日修改

101 年 10 月 05 日接受