

降雨對南橫公路 50 至 110K 沿線山崩潛勢之影響

詹勳全 卓佳駿 張嘉琪* 洪雨柔

摘要 本研究蒐集中央地質調查所製作之 2004 年敏督利颱風、2009 年莫拉克颱風及 2011 年 7 月 19 日豪雨三場事件的事件型山崩目錄作為分析山崩組樣本，運用統計方法中的羅吉斯迴歸法建立潛在因子之山崩潛勢分析模式，首先初選高程類因子、坡度類因子、坡向、全坡高、岩性、地形粗糙度、坡度粗糙度、平面曲率、剖面曲率、總曲率、道路距、水系距等潛在因子，投入因子複選流程，篩選出不同事件下對於山崩鑑別能力較好的潛在因子。再加入各事件不同延時下的平均降雨強度作為誘發因子，將道路沿線之山崩潛勢值分為穩定、低、中及高崩塌潛勢區四個等級，探討降雨對於山崩潛勢分析的影響。整體結果顯示，於本研究山崩潛勢分析流程下，誘發因子的加入可增進模式對長延時高強度降雨型態（如：莫拉克颱風事件）的預測能力，針對中延時高強度與短延時中強度降雨型態模式，模式以潛在因子便足以維持一定的預測水準，誘發因子的加入對預測能力的提生並無顯著影響。

關鍵詞：羅吉斯迴歸、南橫公路、降雨強度。

Influence of Rainfall on Landslide Susceptibility along the 50 to 110K Section of the Southern Cross Island Highway, Taiwan

Hsun-Chuan Chan Chia-Chun Cho Chia-Chi Chang* Yu-Jou Hung

ABSTRACT This study uses the inventories of landslides during typhoon Mindulle, Morakot, and the 07/19 rainfall event established by Central Geological Survey as landslide data. The elevation, slope, slope aspect, slope high, lithology, terrain roughness, slope roughness, plan curvature, profile curvature, total curvature, distance from the road, and distance from the river are first chosen as the landslide causative factors, based on previous studies. Secondly, calibration and selection procedures are performed to efficiently select the factors. Logistic regression method is used to establish the landslide susceptibility model. Furthermore, the rainfall intensities of different rainfall durations are used as a landslide triggering factor in different rainfall events. The maps of potential landslides are delineated to discuss the influence of rainfall on landslide susceptibility analysis. The landslide susceptibilities are separated into four levels, including high, medium, low, and steady. According to the results, the model adopting the proposed rainfall factor increased the landslide predictive capability for long-duration and high-intensity rainfall events, such as the Morakot event. For the other two events, similar landslide predictive capabilities are obtained with and without applying the landslide causative factor in the model.

Key Words : Logistic regression, the Southern Cross Island Highway, rainfall intensity.

一、前言

南橫公路貫穿中央山脈南脊，橫跨丘陵、縱谷與高山等地形，沿線豐富的景觀乃國家重要自然資產，亦為南部地區東西往來之重要通道。近年來南部地區飽受颱風豪雨侵襲，造成南橫公路多次道路邊坡坍塌而阻絕交通，甚至危及用路人的安全，因此本研究以南橫公路 50 至 110K 之路段沿線上下邊坡 1400 公尺為研究對象，探討不同降雨事件對於山崩潛勢分析的影響。

以往研究山崩潛勢分析的方法可分為定性法及定量法兩

大類。早期山崩潛勢分析常用定性法，即藉由專家學者之經驗及專業知識，以直接或間接方法進行山崩潛勢之預測 (Kienholz, 1978; Ives and Bovis, 1978; 陳振華, 1985)，然而，此類方法容易有過於人為主觀的問題，目前已鮮少被使用；近年來以類神經網路法 (林彥享, 2003; 陳志豪, 2002) 與統計分析法 (張超超, 2005; 楊明德等人, 2012) 為主要方法；類神經網路藉由大量簡單的相連人工神經元來模仿生物神經網路的能力，學習後之成果相較其他方法準確，待訓練完成後可藉由回想獲致較準確之分析成果，擬合結果較一般線性方程式佳，但學習試誤過程費時將不利於廣域分析；統計分析法分為

二變量分析及多變量分析,其目的在蒐集既有的崩塌地資料,分析其地形、地質、區位等山崩潛勢因子特性,篩選出一套適用於該區域且能夠有效區別山崩與非山崩的因子組合,以有效預測尚未發生山崩地區或是地質條件相似地區之崩塌潛勢;此外,尚有以力學原理為理論基礎的定值分析法,其分析過程較為嚴謹,但礙於廣域的土工參數均不易取得,因此對於大區域的預測能力有限。因此,本研究選擇應用範圍較廣的統計分析方法,然而,二變量分析在兩因子間具有高度相依性時,將造成模式預測結果偏差的問題,加上本研究考慮加入不可量化的類別因子,因此選擇多變量分析法中的羅吉斯迴歸法作為研究方法。

過去研究降雨與邊坡破壞之關係,多以降雨強度和累積降雨量作為分析的數據(張弼超, 2005; 許惠瑛, 2007);然而,雨量資料因具時間相關性,在擷取的困難度和不確定因素也較大,楊介碩(1989)以台灣1965年—1987年的崩塌案例探討降雨與崩塌時刻的關係,表示多數崩塌發生在最大降雨強度,而非累積降雨量最大的時刻,因此本研究嘗試以不同降雨延時之平均降雨強度為誘發因子,挑選出適用於本研究區域雨量因子的時間尺度,探討模式因降雨條件不同而導致的變異性,期提升山崩潛勢分析之準確率。

二、研究區域概述

研究區域位於台灣南部並橫跨台南及高雄地區,如圖1所示,選定路段長60公里,環域總面積約為147平方公里,海拔範圍自102公尺至1670公尺;根據水土保持規範將坡度分級,六級坡(55%~100%)達38.53%,顯示出該地區地勢較險要,且大部分位於山區,地形崎嶇加上坡度陡峭,當遭遇颱風豪雨、強震侵襲後,極易發生重大坡地災害;研究區域內坡向分布情形大致平均,除東南方(15.78%)及南方(14.41%)稍高以外,其餘差異不大;在降雨情形方面,受到季風及地形之影響,統計近11年來平均年雨量均在3,000公釐以上,遠超過台灣平均年降雨量的2,510公釐,可說降雨量相當豐沛,且雨量集中在每年5月至9月間,均佔全年總降雨量之80%以上甚至超過90%,降雨明顯分布不均,小部份來自於梅雨期間,絕大部分是颱風事件影響所造成的降雨。

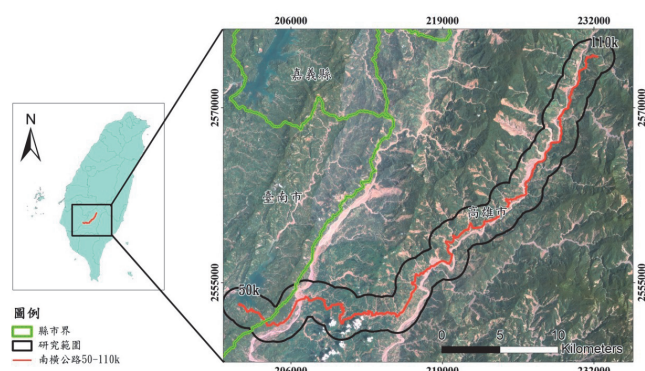


圖 1 研究區域圖

Fig.1 The study area

三、研究方法

1. 斜坡單元

本研究以斜坡單元為分析單元,參考「集水區重疊法」(Xie et al., 2004) 產製斜坡單元以供後續分析使用。

2. 羅吉斯迴歸

線性迴歸模型為最常使用的統計定量分析方法,然其並不適用於應變數為分類變數的情形。為了能夠投入類別變數進行分析,本研究採羅吉斯迴歸模型為分析方法,羅吉斯分佈函數擁有S型分布曲線,值域在0到1之間,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):

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

$$Z = \alpha + \beta x_i \quad (2)$$

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:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_k x_{ki} \quad (3)$$

其中, $P_i = P(y_i = 1|x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$ 為在給定一系列自變數 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$ 值時的事件發生機率。

3. 模式能力評估方法

為瞭解分析結果的優劣,本研究以分類誤差矩陣表及ROC曲線為驗證方法。

(1) 分類誤差矩陣表 (classification error matrix table)

分類誤差矩陣表為一種量化工具,用於比較模式預測和實際樣本之結果。透過羅吉斯迴歸所設定的機率界限(cut-value=0.5),將預測樣本分為事件發生與事件不發生,與實際樣本比對以檢驗羅吉斯迴歸模型的預測準確率。依照山崩與非山崩分析單元數所佔總分析單元數的比例,分別計算出總體正確率(overall accuracy)和生產者正確率(producer's accuracy),其計算方式如公式(4)-(6)。

$$\text{山崩組生產者正確率} = \frac{N_1}{(N_1 + N_3)} \quad (4)$$

$$\text{非山崩組生產者正確率} = \frac{N_4}{(N_2 + N_4)} \quad (5)$$

$$\text{總體正確率} = \frac{N_1 + N_4}{(N_1 + N_2 + N_3 + N_4)} \quad (6)$$

其中, N_1 為實際山崩發生且正確預測為山崩次數, N_2 為實際山崩發生但錯誤預測為非山崩次數, N_3 為實際非山崩發生但錯誤預測為山崩次數, N_4 代表實際非山崩發

生且正確預測為非山崩次數；而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，正確率越高模式預測能力越優良。本文後以山崩組正確率與非山崩組正確率二詞簡稱山崩組與非山崩組的生產者正確率。

(2) ROC 曲線 (Receiver Operating Characteristic)

由分類誤差矩陣表延伸繪製 ROC 曲線，其橫座標為 FPR，代表將非山崩樣本錯分為山崩比例，縱座標為 TPR 代表能將山崩樣本正確分類的比例，即山崩組正確率，計算公式如公式 (7)、(8)。

$$TPR(\text{true positive rate}) = \frac{N_1}{(N_1 + N_3)} \quad (7)$$

$$FPR(\text{false positive rate}) = \frac{N_2}{(N_2 + N_4)} \quad (8)$$

本研究以曲線下的面積 AUC (Area Under The Curve) 來量化 ROC 曲線繪製的結果，藉以判定模式分類的優劣，一般而言，此值介於 0.5 到 1.0 之間，AUC 越接近 1 代表此模式預測的能力越好 (Swets, 1988)，以 AUC 數值檢視模式時，AUC=0.5 時表示該模式對於山崩幾乎沒有判別能力； $0.7 \leq AUC < 0.8$ 為可接受的判別能力； $0.8 \leq AUC < 0.9$ 為好的判別能力； $AUC \geq 0.9$ 則代表該模式擁有非常好的判別能力。

四、山崩潛勢模式建立

1. 基本資料蒐集

- (1) 5×5 公尺高精度數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)。
- (2) 由中央地質調查所製作之二十五萬分之一地質圖。
- (3) 交通部運輸研究所出版之 100 年版路網數值圖，包含全台灣公路及河川網。
- (4) 2004 年敏督利颱風、2009 年莫拉克颱風與 2011 年 7 月 19 日豪雨三場事件期間的時雨量資料。
- (5) 由中央大學產製之敏督利事件型山崩目錄資料，及中央地質調查所產製之莫拉克、20110719 豪雨事件型山崩目錄。

2. 分析樣本選取

本文採用「事件型山崩目錄」進行樣本歸類，進而將斜坡單元定義為山崩組與非山崩組，再參酌吳俊毅 (2012) 以單一網格面積 100 平方公尺為分類標準，即斜坡單元內須有面積達 100 平方公尺以上之崩塌地面積方歸類為山崩組斜坡單元；餘則為非山崩組斜坡單元，獲取敏督利、莫拉克及 0719 豪雨事件之崩塌斜坡單元個數分別為 206、1223 及 1400 個，非崩塌之斜坡單元則為 2892、1875 及 1698 個。

3. 山崩因子挑選

- (1) 潛在因子

參考陳樹群、馮智偉 (2005) 之研究，根據因子的

作用性、完整性、非均一性、可量度性和非重複性等特性，再針對文獻中曾被使用過的眾多山崩潛勢因子 (Atkinson and Massari (1998)；Lee and Min (2001)；Dai et al. (2003~2004)；Ayalew and Yamagishi (2005)；Chang et al. (2007)；Lee and Pradhan (2007)；Chauhan et al. (2010)；Yang et al. (2011)) 進行初選，初步選取出較常被使用於山崩潛勢分析且可量化之因子，包含高程、坡度、坡向、全坡高、地形粗糙度、坡度粗糙度、岩性、剖面曲率、平面曲率、總曲率、道路距、及水系距等。

進行因子複選流程時，採用山崩與非山崩次數分布圖、崩壞比、判別子、成功率曲線、P-P plot 機率圖以及相關係數等六種方法檢視因子辨別山崩之能力，各方法說明如下：

① 山崩與非山崩次數分布圖

將因子分為山崩及非山崩組後，以因子值分成幾個區間並且統計兩組因子分布的情形，當山崩與非山崩組資料差異越大，代表此因子越能有效區分出山崩組與非山崩組。

② 崩壞比

將各因子值與其崩壞比區間繪製成圖，利用曲線趨勢判定因子鑑別山崩之能力，它具有發生山崩的空間機率 (spatial probability) 的意義，以符合實際狀況者為佳，如一般認為坡度越陡峭，越容易發生山崩，若非如此，則需進一步探究原因。崩壞比計算方式為：

$$\text{崩壞比} = \frac{\text{該等級山崩組的面積}}{\text{該等級山崩與非山崩組的總面積}}$$

③ 判別子

將各因子之山崩與非山崩組平均值差除以該因子之混和標準差，最後得到該因子的標準化差異值，即為該因子判別子 D_j ，假使 D_j 取絕對值後，數值越大，表示該因子越能夠區分出山崩與非山崩組的差異。判別子計算方式如下：

$$D_j = \frac{\bar{X}_j - \bar{Y}_j}{S_{pj}}$$

其中， X_j 為山崩組之平均值， Y_j 為非山崩組之平均值， S_{pj} 為混和標準差。

④ 成功率曲線

將各因子值分成幾個區間，並且統計該區面積占總面積以及山崩面積佔該區面積比，由大到小採用累加的方式計算，最後可繪製一圓弧形曲線，當成功率曲線下的面積 (AUC) 越接近 1.0 時，代表該因子對於辨別山崩與非山崩的能力越好。

⑤ P-P plot 機率圖

P-P plot 機率圖是表示某變數累積比與指定分配的累積比之間的關係，可以利用 P-P 機率圖來檢定資料是否符合常態分配，資料分布是否有偏離常態分布

過多的情形。P-P 機率圖中會有一條參考直線，當資料型態越符合常態分布時，各資料點的分布會越靠近此參考線。

◎ 相關係數

計算各因子間之相關係數，並比較兩兩因子間是否相關性過高，若為如此，擇其中一因子予以剔除。

一般篩選過程以 P-P 機率圖來檢視因子資料是否為常態分布，當資料點越接近趨勢線時，表示樣本越接近常態分布，而雖然羅吉斯迴歸毋須假設因子資料為常態分布，但是若存在這樣的關係，將能夠增加模型的功效 (power)，各因子 P-P 機率圖整理如表 2；山崩非山崩次數分布圖、崩壞比與成功率曲線下之面積 AUC 亦為挑選依據，以莫拉克颱風事件為例所繪製之圖表如表 3；判別子 D_j 來檢驗樣本間的差異性，絕對值大於 0.1 為可採納的因子，此值越大越佳，計算結果如表 4；最後比對兩兩因子間之相關係數，如表 5，將有高相關的因子擇一剔除，以免影響後續之分析。

依照上述篩選結果，挑選出敏督利、莫拉克及 20110719 豪雨三場事件建模的因子，敏督利事件獲選因子為最大高程、平均坡度、地形粗糙度以及剖面曲率；莫拉克事件選取平均高程、平均坡度、地形粗糙度、坡度粗糙度跟剖面曲率；20110719 豪雨事件的建模因子則包含平均高程、平均坡度、全坡高與平面曲率，而坡向及岩性因子的資料乃類別型態，且以往文獻認為此兩因子對於山崩研究具有一定的影響力，因此不參與複選過程即直接投入模式。

(1) 誘發因子

在山崩潛勢分析研究中，誘發因子為一種外力的介入，而雨量在探討降雨誘發山崩的潛勢分析中扮演相當重要的角色，對坡面造成的影響亦會因地形、地質和環境等條件不同而產生差異。

本研究蒐集敏督利事件、莫拉克事件及 20110719 豪雨事件期間之雨量資料，並擇定兩場切割方法以定義降雨事件的起始，有關各事件之雨量整理如表 1，以平均雨量參數代表不同事件下於本研究區域之降雨特

性。就此三場降雨進行比較，在莫拉克事件中，降雨延時與高達 101.39 小時，皆大於另外兩場事件，甚至為 20110719 豪雨的兩倍之多，最大 1 小時降雨強度亦是如此，因此本研究定義莫拉克事件為長延時高強度之降雨條件；敏督利事件的降雨強度雖不及莫拉克事件，但亦有 71.63 小時的降雨延時及降雨強度達 67.00(mm/hr)，定義為中延時高強度降雨型態，20110719 豪雨的降雨延時及降雨強度僅為莫拉克事件的一半，屬於短延時中強度之降雨。

將三場降雨條件相異之 1、3、6、9、12、24 小時最大平均降雨強度以克利金方法進行雨量之空間分布推估，依據結果挑選出適用於本研究區域雨量因子的時間尺度。

五、山崩潛勢分析結果

1. 潛在因子建模結果

三場事件潛在因子建模結果之迴歸係數如表 6，當迴歸係數值為正時，顯示該因子值越大，山崩發生的機率將隨之增加；反之，若是迴歸係數值為負值時，因子值與山崩發生機率將呈現負相關，即此因子越大，將降低山崩發生的可能性，且可以迴歸係數的絕對值來表示因子的權重，值大者對於山崩發生與否的影響力較大，該因子也更具重要性。而在類別變數方面，以坡向為例，在八個坡向類別中，本研究以北向坡為指標性坡向，其餘的則以該指標為基準並進行相對性的比較，因此指標性坡向將無係數值，而其他坡向的係數值便是與指標性坡向比較過後所得的權重；各類岩性因子分類表如表 7 所示。

根據三場事件建模所得到的正確率與 ROC 曲線如表 8，就整體正確率而言，敏督利事件型山崩目錄所建置的模式達 75.00%，ROC 曲線下面積為 0.816，且在山崩組正確率的部分可成功預測約 80%的山崩事件，而莫拉克與 20110719 豪雨事件之整體正確率雖然均未達 70%，但就分類正確率來說，非山崩組正確率仍有一定的水準，主要是在山崩組的預測能力稍嫌不足，探討可能的原因在於各事件之山崩目錄分布的差異，由於敏督利颱風的影響以中部為主，因此本研究區域中僅在道

表 1 各事件雨量站之平均雨量參數

Table 1 Average rainfall factor in different events

各事件影響時間	敏督利事件	莫拉克事件	20110719豪雨事件
	2004年	2009年	2011年
	6月28日至7月3日	8月5日至8月10日	7月19日至7月20日
降雨延時 (hr)	71.63	101.39	52.69
累積降雨量 (mm)	1182.25	1973.83	384.19
平均降雨強度 (mm/hr)	15.71	19.23	7.29
最大1小時降雨強度 (mm/hr)	67.00	87.47	36.47
最大3小時平均降雨強度 (mm/hr)	45.05	73.59	25.71
最大6小時平均降雨強度 (mm/hr)	36.88	63.67	18.90
最大9小時平均降雨強度 (mm/hr)	32.18	60.81	16.80
最大12小時平均降雨強度 (mm/hr)	29.36	56.56	14.97
最大24小時平均降雨強度 (mm/hr)	24.69	43.32	10.64

表 2 各因子 p-p plot 機率圖

Table 2 Probability-probability plots of factors

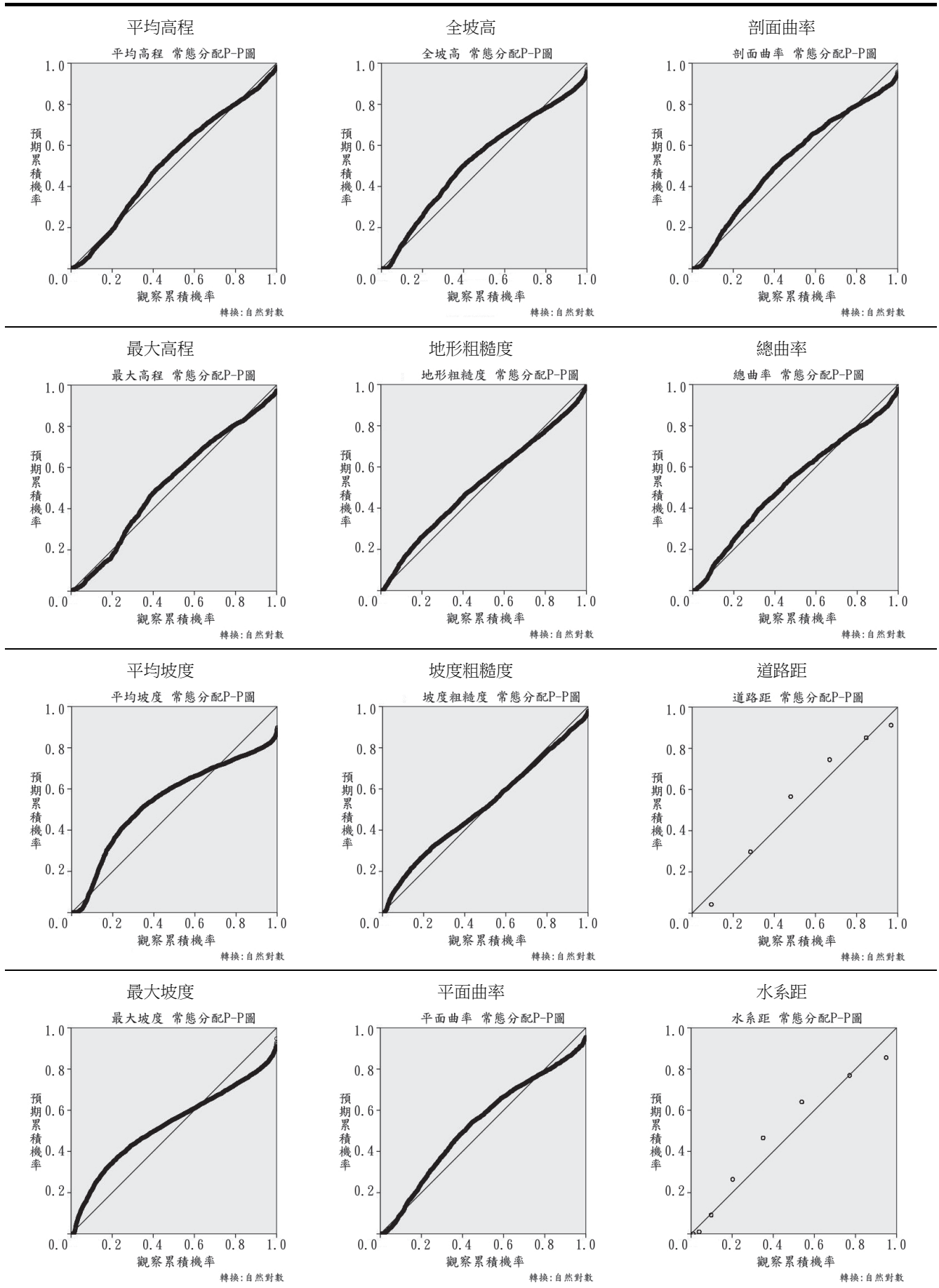


表 3 莫拉克事件山崩目錄之各山崩因子統計圖

Table 3 Success rate curves, landslide ratio distributions, frequency distributions of landslide and non-landslide group in Morakot event

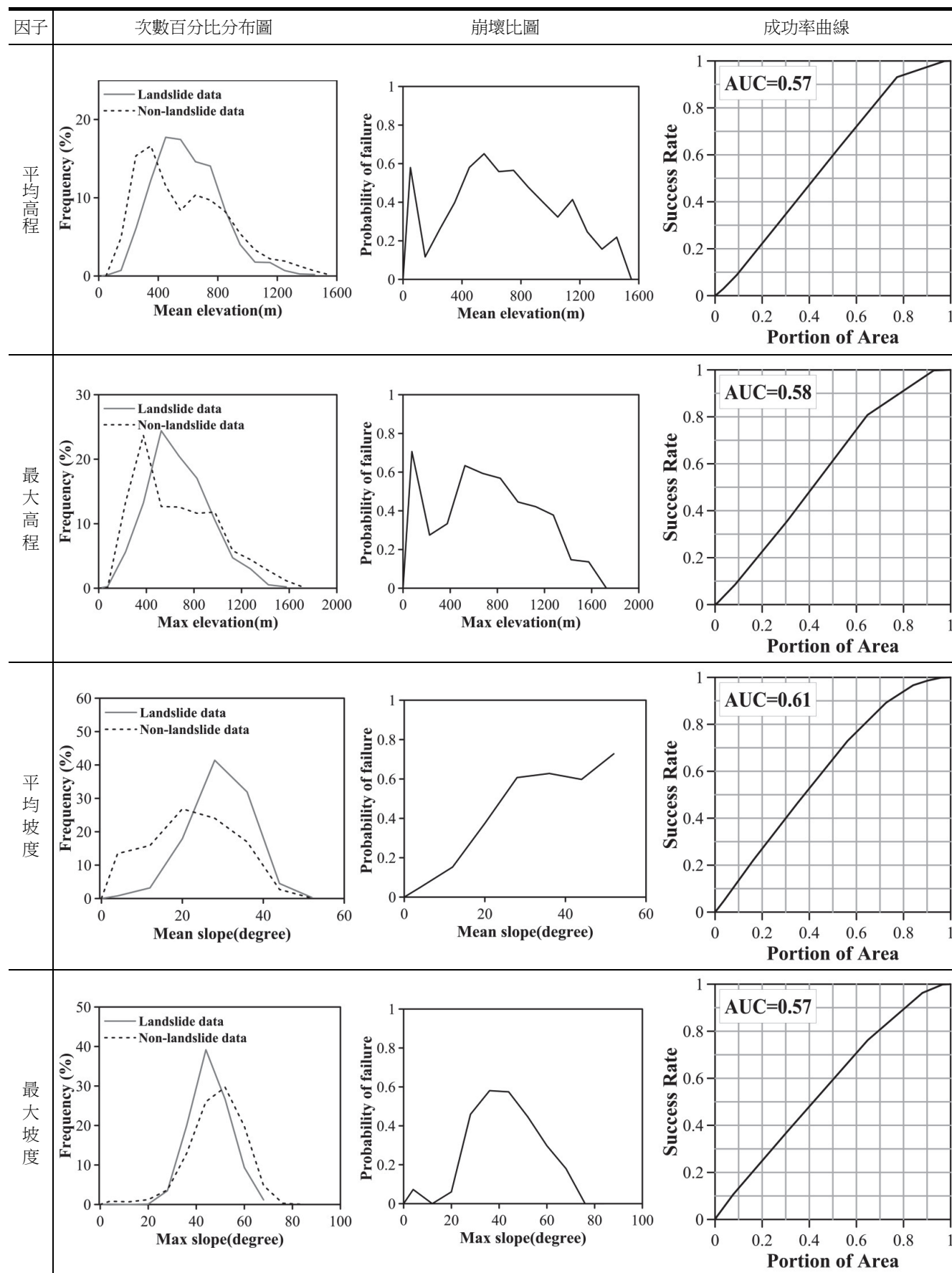


表 3 莫拉克事件山崩目錄之各山崩因子統計圖 (續)

Table 3 Success rate curves, landslide ratio distributions, frequency distributions of landslide and non-landslide group in Morakot event

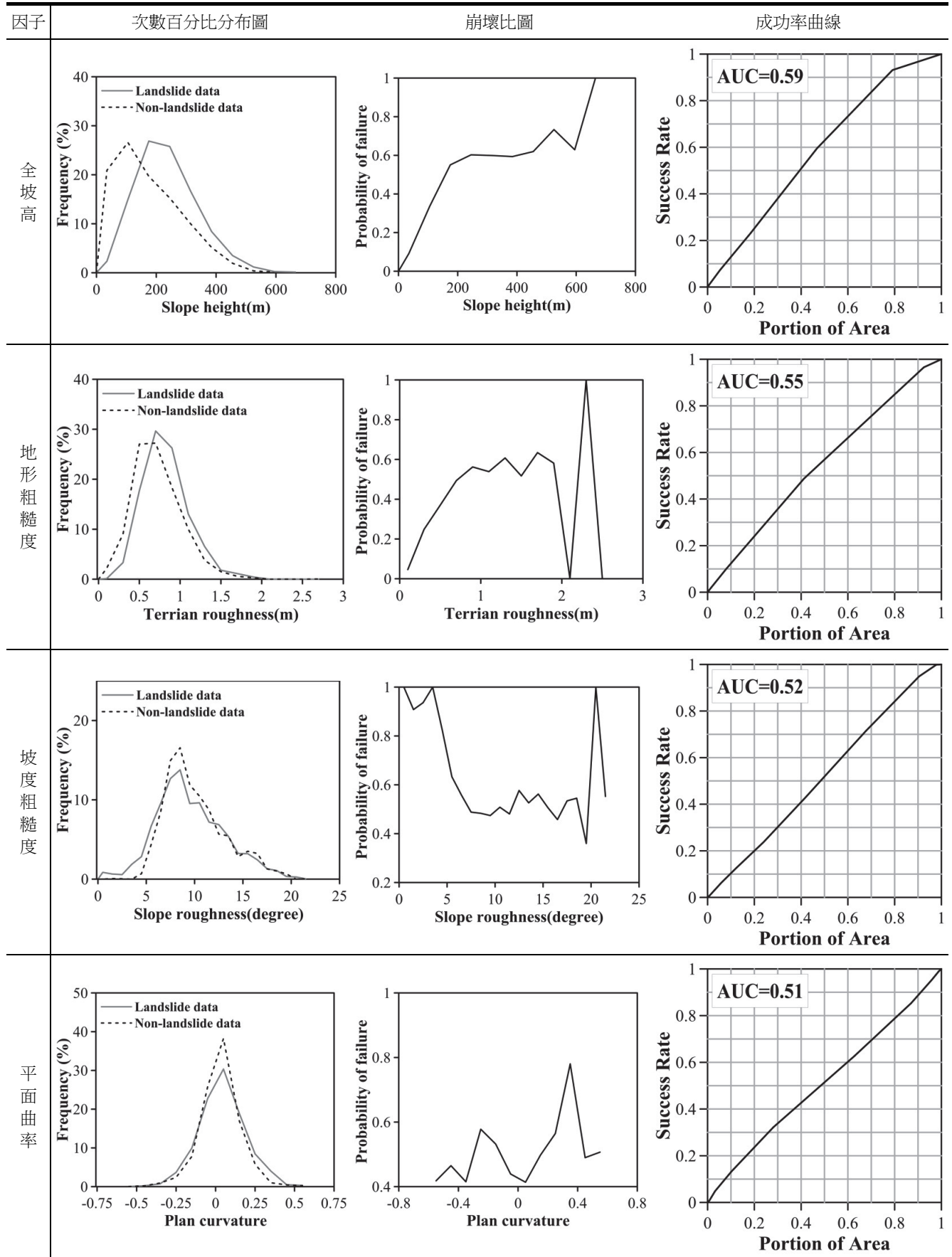
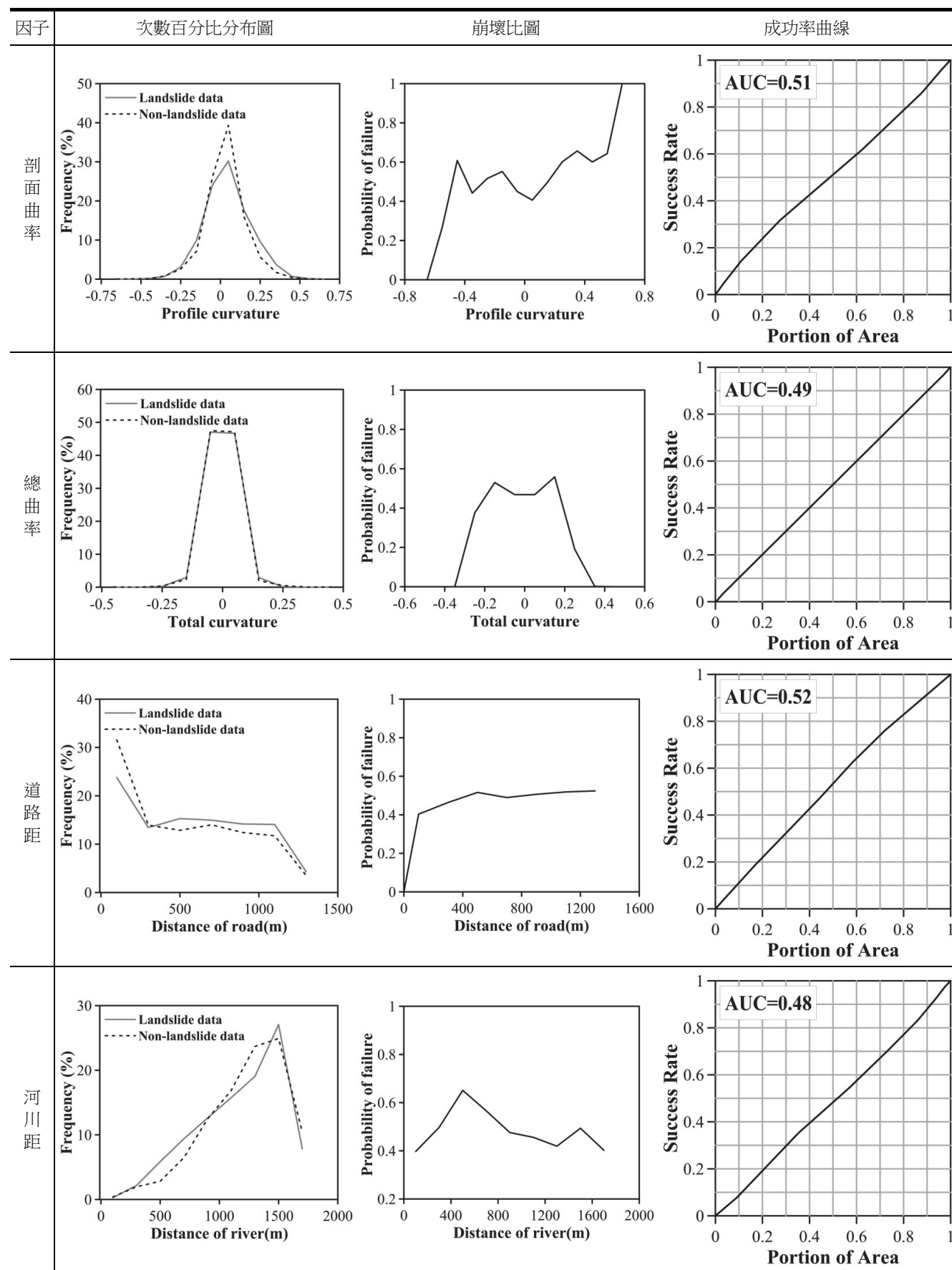


表 3 莫拉克事件山崩目錄之各山崩因子統計圖 (續)

Table 3 Success rate curves, landslide ratio distributions, frequency distributions of landslide and non-landslide group in Morakot event



(2) 加入誘發因子建模之山崩潛勢圖

為了探討在不同事件下足以代表該場降雨之雨量因子及不同雨量因子對於預測山崩的成效，本研究將每場降雨之 1、3、6、9、12、24 小時最大平均降雨強度作為誘發因子投入模式中，結果顯示敏督利事件為 6 小時最大平均降雨強度、莫拉克事件為 9 小時最大平均降雨強度以及 20110719 豪雨事件為 24 小時最大平均降雨強度是預測山崩能力較為良好之雨量因子。敏督利事件

加入誘發因子後如圖 5，預測出的山崩以 80 至 110K 為主，尤其在 110K 的山區；而莫拉克事件在公路沿線的部分則是以 60 至 70K 路段更加密集，如圖 6，相對於敏督利事件在 100 至 110K 明顯預測崩塌面積降低；20110719 豪雨事件如圖 7，好發崩塌路段以 80 至 100K 為最多，70K 處亦有多處預測為山崩斜坡單元，而有別於敏督利事件，110K 沿線則為預測非山崩區為多。

再者，本研究將三場事件之全區山崩潛勢值依照前述方式分成穩定區、低崩塌潛勢區、中崩塌潛勢區以及高崩塌潛勢區，並繪製山崩潛勢圖如圖 11~圖 13，並將潛勢分級面積百分比整理如表 11，敏督利事件之穩定區、低崩塌潛勢區、中崩塌潛勢區及高崩塌潛勢區分別占全區面積的 42.72%、23.06%、22.84%及 11.38%，莫拉克事件為 23.93%、29.29%、35.20%及 11.58%，20110719 豪雨事件則為 31.77%、32.09%、30.08%及 6.06%，以上可知，不同事件的降雨條件下，各等級之山崩潛勢所佔的比例亦會有所不同，且當雨量增加時，

表 6 各事件潛在因子建模結果

Table 6 The results of building model in different events by causative factor

各事件獲選因子及其迴歸係數					
敏督利事件		莫拉克事件		20110719豪雨事件	
最大高程	1.832	平均高程	-1.595	平均高程	-1.405
平均坡度	5.746	平均坡度	3.924	平均坡度	4.825
地形粗糙度	1.645	全坡高	1.317	全坡高	1.334
剖面曲率	-0.077	地形粗糙度	0.234	平面曲率	0.291
		坡度粗糙度	0.858		
		剖面曲率	0.397		
1	-	1	-	1	-
2	-0.241	2	-2.062	2	-1.896
3	-1.106	3	0.249	3	-0.113
岩性		岩性		岩性	
4	-0.232	4	1.156	4	0.327
5	1.682	5	-2.818	5	-20.353
6	-17.666	6	-19.104	6	-18.591
北	-	北	-	北	-
東北	-0.644	東北	-0.015	東北	0.137
東	0.298	東	-0.009	東	0.502
坡向		坡向		坡向	
東南	0.934	東南	0.056	東南	0.470
南	1.231	南	0.142	南	0.372
西南	0.961	西南	0.057	西南	0.199
西	0.418	西	-0.074	西	-0.004
西北	-0.252	西北	-0.571	西北	-0.470
常數項	-4.998	常數項	-2.442	常數項	-2.857

表 7 地質編碼分類表

Table 7 Classification of geology in the study area

地層名稱	編碼	相對應岩性
廬山層	1	頁岩、板岩、千枚岩和深灰色的硬砂岩
瑞芳群及其相當地層	2	砂頁岩互層、泥質或鈣質細粒砂岩
三峽群及其相當地層	3	砂頁岩互層、砂質頁岩
卓蘭、錦水頁岩層	4	砂岩、粉砂岩、泥岩、及頁岩
臺地堆積	5	未膠結的礫石、砂質或粉砂質
現代沖積層	6	礫石、黏土和粉砂

表 8 潛在因子建模之模式能評評估結果

Table 8 The results of evaluating the accuracy of landslide predicted by the causative factor model

	各事件之建模正確率 (%)			ROC曲線
	非山崩組	山崩組	整體	
敏督利事件	69.50	80.50	75.00	0.816
莫拉克事件	70.02	62.93	66.82	0.734
20110719豪雨事件	78.83	53.64	68.88	0.756

表 9 加入誘發因子建模結果

Table 9 The results of building model in different events by triggering factor

各事件獲選因子及其迴歸係數					
敏督利事件		莫拉克事件		20110719豪雨事件	
最大高程	1.771	平均高程	-3.676	平均高程	-2.430
平均坡度	5.731	平均坡度	4.108	平均坡度	4.195
地形粗糙度	1.657	全坡高	2.433	全坡高	1.956
剖面曲率	-0.070	地形粗糙度	0.760	平面曲率	0.209
		坡度粗糙度	0.628		
		剖面曲率	0.302		
1	-	1	-	1	-
2	0.095	2	-1.104	2	-0.467
3	-1.001	3	0.648	3	0.608
岩性		岩性		岩性	
4	-0.185	4	1.717	4	0.841
5	2.132	5	-0.433	5	-18.935
6	-17.334	6	-17.348	6	-17.152
北	-	北	-	北	-
東北	-0.655	東北	0.037	東北	0.065
東	0.316	東	0.044	東	0.433
坡向		坡向		坡向	
東南	0.938	東南	0.141	東南	0.401
南	1.251	南	0.243	南	0.333
西南	0.965	西南	0.103	西南	0.165
西	0.450	西	0.006	西	0.038
西北	-0.226	西北	-0.523	西北	-0.413
誘發因子	1.082	誘發因子	26.016	誘發因子	7.099
常數項	-5.921	常數項	-26.964	常數項	-8.365

表 10 加入誘發因子建模之模式能評評估結果

Table 10 The results of evaluating the accuracy of landslide predicted by the triggering factor model

	各事件之建模正確率 (%)			ROC曲線
	非山崩組	山崩組	整體	
敏督利事件	69.50	80.50	75.00	0.817
莫拉克事件	73.14	69.14	71.34	0.778
20110719豪雨事件	78.67	58.54	70.72	0.780

高崩塌潛勢區所佔的比例亦隨之上升，如本研究中的莫拉克事件與 20110719 豪雨事件相比，在高崩塌潛勢區便相差約兩倍之多，顯示雨量對於預測高崩塌潛勢區具有一定的影響力。

表 11 各事件加入誘發因子前後之預測山崩潛勢區百分比
Table 11 The percentage of each landslide susceptibility zone before and after using triggering factor in different events

各事件	面積百分比 (%)	穩定區	低崩塌潛勢區	中崩塌潛勢區	高崩塌潛勢區
敏督利事件	潛在因子	42.78	23.18	22.32	11.72
	加入誘發因子	42.72	23.06	22.84	11.38
莫拉克事件	潛在因子	17.89	36.75	39.89	5.48
	加入誘發因子	23.93	29.29	35.20	11.58
20110719 豪雨	潛在因子	27.03	39.22	30.04	3.70
	加入誘發因子	31.77	32.09	30.08	6.06

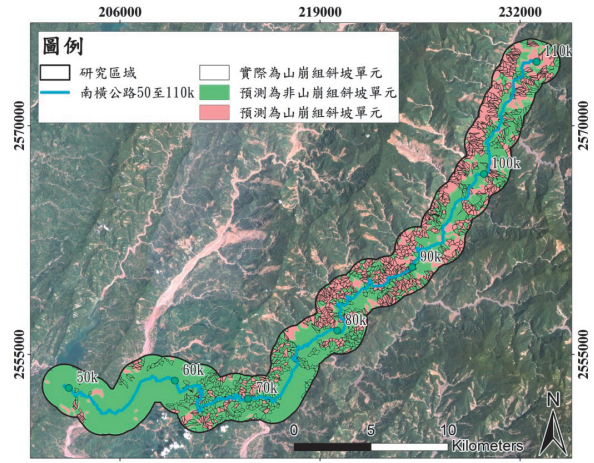


圖 4 20110719 豪雨潛在因子建模之預測山崩與實際山崩斜坡單元比較圖
Fig.4 Compared predicted landslide with actual landslide by the causative factor model in 20110719 rainfall event

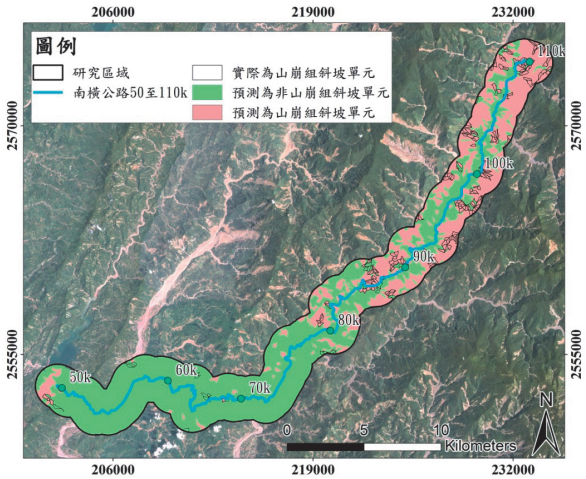


圖 2 敏督利潛在因子建模之預測山崩與實際山崩斜坡單元比較圖
Fig.2 Compared predicted landslide with actual landslide by the causative factor model in Mindulle event

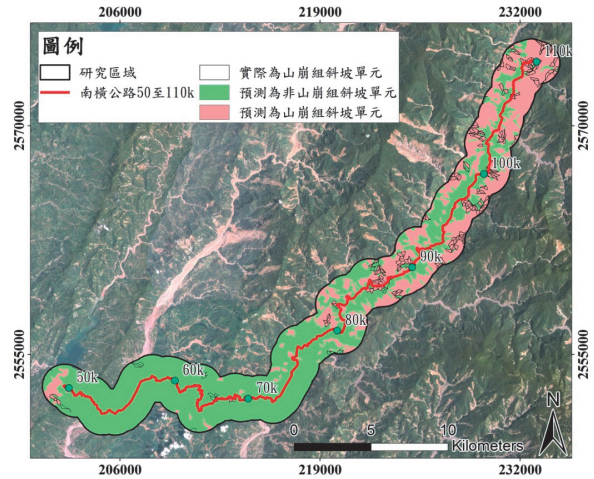


圖 5 敏督利加入誘發因子建模之預測山崩與實際山崩斜坡單元比較圖
Fig.5 Compared predicted landslide with actual landslide by the triggering factor model in Mindulle event

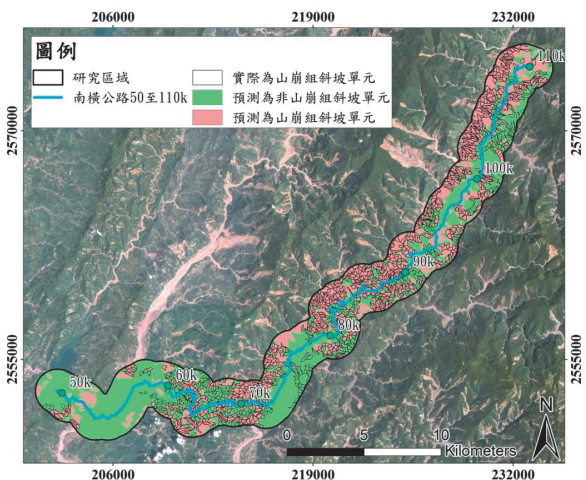


圖 3 莫拉克潛在因子建模之預測山崩與實際山崩斜坡單元比較圖
Fig.3 Compared predicted landslide with actual landslide by the causative factor model in Morakot event

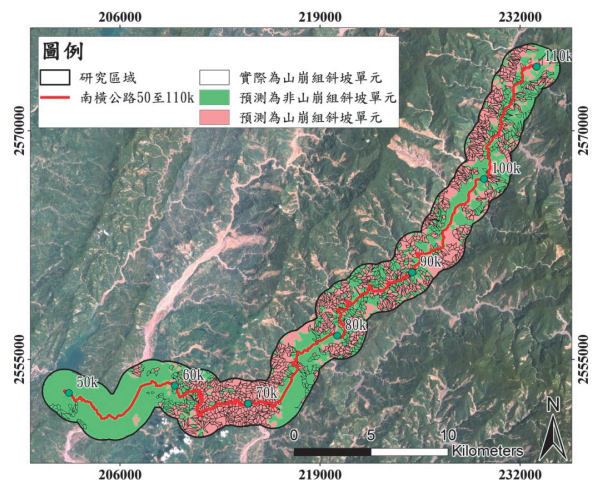


圖 6 莫拉克加入誘發因子建模之預測山崩與實際山崩斜坡單元比較圖
Fig.6 Compared predicted landslide with actual landslide by the triggering factor model in Morakot

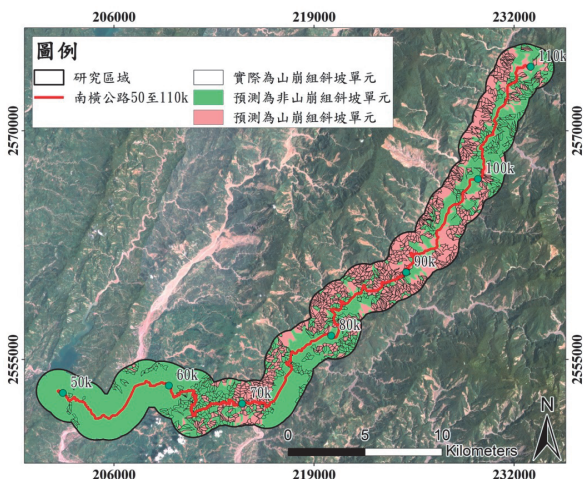


圖7 20110719 豪雨事件誘發因子建模預測山崩與實際山崩斜坡單元比較圖

Fig.7 Compared predicted landslide with actual landslide by the triggering factor model in 20110719 rainfall event

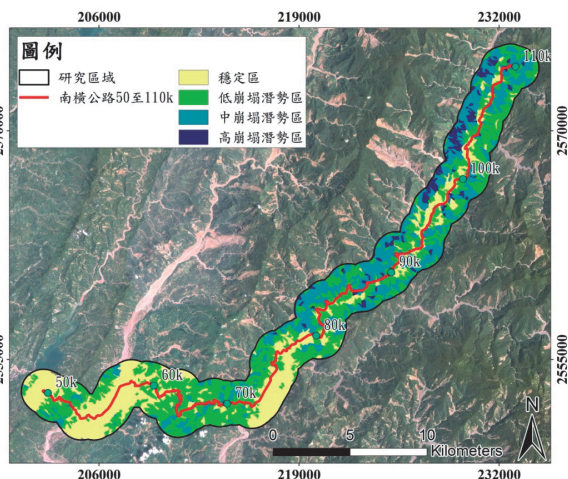


圖10 20110719 豪雨事件以潛在因子建模之山崩潛勢圖

Fig.10 The map of potential landslide by the causative factor in 20110719 rainfall event

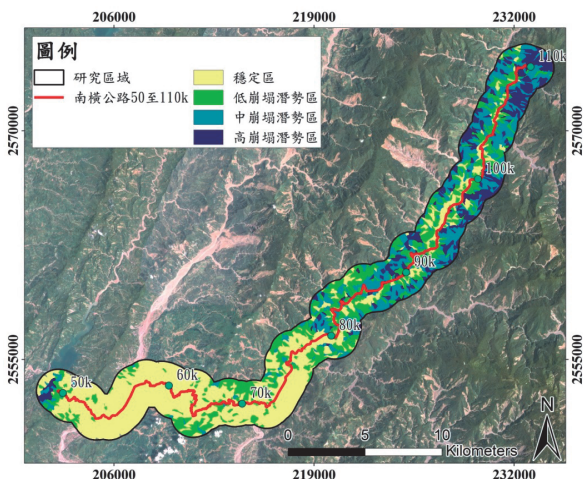


圖8 敏督利事件以潛在因子建模之山崩潛勢圖

Fig.8 The map of potential landslide by the causative factor in Mindulle event

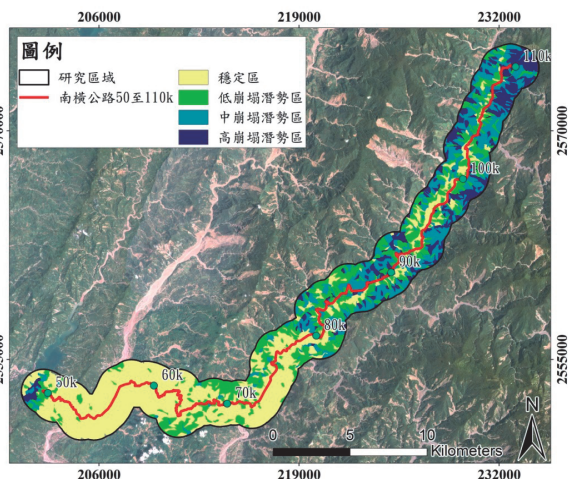


圖11 敏督利事件以誘發因子建模之山崩潛勢圖

Fig.11 The map of potential landslide by the triggering factor in Mindulle event

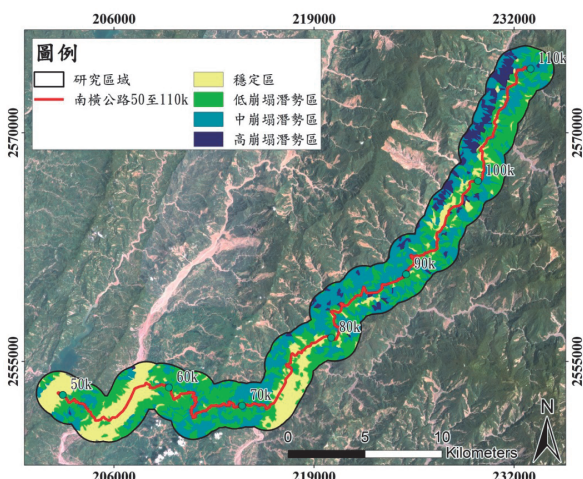


圖9 莫拉克事件以潛在因子建模之山崩潛勢圖

Fig.9 The map of potential landslide by the causative factor in Morakot event

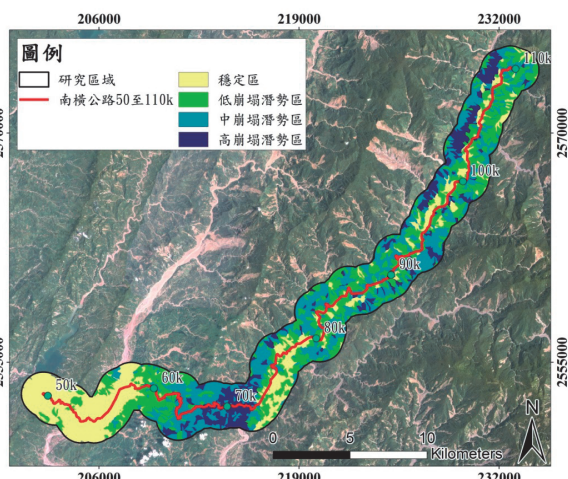


圖12 莫拉克事件以誘發因子建模之山崩潛勢圖

Fig.12 The map of potential landslide by the triggering factor in Morakot event

六、結論與建議

本研究以既有的山崩目錄圖挑選出敏督利、莫拉克以及 0719 豪雨三場降雨事件下適用的潛在因子，建立山崩潛勢分析模式；再者，延續潛在因子篩選的結果，加入不同延時之平均降雨強度，探討各場降雨事件加入誘發因子前後模式預測能力的是否能提升，其結果可歸納以下結論：

1. 以潛在因子建模正確率，在敏督利事件達 75.00%，莫拉克事件為 66.82%，0719 豪雨事件為 68.88%，以上各事件模式預測山崩之正確率均接近 70%，顯示本研究建立之山崩潛勢分析流程，適用於本研究區域且能有效預測山崩的發生。
2. 對於含誘發因子的建模結果而言，在敏督利事件下的整體正確率幾乎無變化，莫拉克事件之正確率提升 4.52%，而 0719 豪雨事件僅提升 1.84%，顯示本研究山崩潛勢分析流程所建置的模式，在加入誘發因子後，以長延時高強度降雨型態的事件，增進模式預測能力的效果最為良好，其餘兩場事件均以潛在因子便足以維持一定的預測水準。
3. 敏督利事件的建模結果顯示，在高崩塌潛勢區以海拔較高的 80 至 110K，尤其在 110K 沿線分布較廣；莫拉克事件在加入誘發因子後，除擴大其高崩塌潛勢區的範圍之外，在 60 至 70K 多處為高崩塌潛勢區；0719 豪雨事件的潛在因子建模結果中，中、高崩塌潛勢區集中於 80 至 110K，其他地區多為低崩塌潛勢區，然而加入誘發因子後，潛勢值明顯從 90K 處開始升高。
4. 本研究目前係以二十五萬分之一地質圖進行分析，未來若有更高解析度之地質圖或完整之岩體工程特性圖，將有助於提高山崩潛勢分析結果之精確度。
5. 本研究目的係為探討所建置之山崩潛勢分析流程適用性，因此於分析時尚未考量潛在因子不穩定之因素，建議未來可針對同一區域不同事件下，皆具影響性之潛在因子進行分析，以完善相關分析成果。

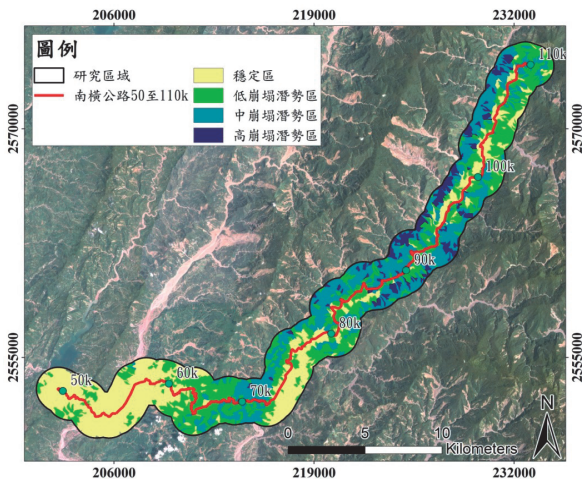


圖 13 20110719 豪雨事件誘發因子建模之山崩潛勢圖
Fig.13 The map of potential landslide by the triggering factor in 20110719 rainfall event

6. 本研究以三場不同型態之降雨事件進行分析，建議未來可加入更多不同降雨型態之降雨事件，以建構不同降雨因子對本研究範圍山崩潛勢之影響程度，並可更客觀的證明分析模式之可用性。

參考文獻

- [1] 吳俊毅 (2012)，「降雨誘發崩塌與土石流災害風險降低措施之效益分析」，國立中興大學水土保持學系博士學位論文。(Wu, C.Y. (2012). *The efficiency of risk reduction programs for rainfall-induced landslide and debris-flow disaster*, Doctoral Dissertation, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [2] 林彥享 (2003)，「以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研究所碩士論文。(Lin, Y.H. (2003). *Application of neural network to landslide susceptibility analysis*, Master Thesis, National Central University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 張弼超 (2005)，「運用羅吉斯迴歸法進行山崩潛感分析-以臺灣中部國姓地區為例」，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。(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))
- [4] 許惠瑛 (2007)，「臺灣中部地區降雨誘發崩塌之影響因子研究」，國立中興大學土木工程學系碩士論文。(Hsu, H.Y. (2007). *Study on the control factors of rainfall induced landslides in central Taiwan*, Master Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [5] 陳志豪 (2002)，「變質岩公路邊坡之破壞潛勢分析-以南橫公路埡口至新武段為例」，國立成功大學資源工程研究所碩士論文。(Chen, C.H. (2002). *Study of slope failure susceptibility along highway in the metamorphic rock region-a case study of southern cross-island highway of Taiwan*, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [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。(Chen, J.H., and Pan, G.L. (1985). *The survey of environment geology in residential area in slope of Taipei*, Industrial Technology Research Institute of Taiwan, ROC. 229, 385. (in Chinese))
- [7] 陳樹群、馮智偉 (2005)，「應用 Logistic 迴歸繪製崩塌潛感圖-以濁水河流域為例」，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." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 36(2), 191-201. (in Chinese))
- [8] 楊介碩 (1989)，「高雄壽山地區岩石力學特性調查及坡面滑動觀測」，國立成功大學土木工程研究所碩士論文。(Yang, J.S. (1989). *Study on mechanical properties of representative rocks at Mt. So-San and In-Situ measurements of*

- slope movements*, Master Thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [9] 楊明德、黃奕達、黃凱翔、張益祥 (2012), 「利用崩塌潛勢圖作風險評估之應用—以陳有蘭溪流域為例」, 中華水土保持學報, 43(1), 1-11。(Yang, M.D., Huang, Y.D., Hung, K.H., and Chang, Y.H. (2012). "Landslide hazard evaluated by a landslide susceptibility map—a case study of chenylan river basin." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 43(1), 1-11. (in Chinese))
- [10] 經濟部中央地質調查所 (2009), 地質敏感區災害潛勢評估與監測 98 年度—都會區周緣坡地山崩潛勢評估 (3/4)。(Central Geological Survey MOEA. (2009). Assessment and monitoring on the geological disaster potential area -The landslide susceptibility on the slope land of the metropolitan area (3/4). (in Chinese)).
- [11] Atkinson, P.M., and Massari, R. (1998). "Generalized linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy." *Comput. Geosci.* 24, 373-385.
- [12] 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.
- [13] Chang, K.T., Chiang, S.H., and Hsu, M.L. (2007). "Modeling typhoon-and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression." *Geomorphology*. 89, 335-347.
- [14] Chauhan, S., Sharma, M., and Arora, M.K. (2010). "Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model." *Landslides*. 7, 411-423.
- [15] Dai, F.C., and Lee, C.F. (2003). "A spatiotemporal probabilistic modeling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression." *Earth Surf. Process. Landf.* 28, 527-545.
- [16] Dai, F.C., Lee, C.F., Tham, L.G., Ng, K.C., and Shum, W.L. (2004). "Logistic regression modeling of storm-induced shallow landsliding in time and space on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong." *Bull. Eng. Geol. Environ.* 63, 315-327.
- [17] Gregory, C., and Davis, J.C. (2003). "Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas." *Journal of Engineering Geology*, 69(8), 331-343.
- [18] 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.
- [19] Kienholz, H. (1978). "Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10,000." *Arct. Antarct. Alp. Res.* 10, 169-184.
- [20] Lee, S., and Pradhan, B. (2007). "Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models." *Landslides*. 4, 31-44.
- [21] Lee, S., and Min, K. (2001). "Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea." *Environmental Geology*. 40, 1095-1113.
- [22] Swets, J.A. (1988). "Measuring the accuracy of diagnostic systems." *Science*, 240(4857), 1285-1293.
- [23] Xie M., Esaki, T., and Zhou, G. (2004). "GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model." *Natural Hazards*, 33, 265-282.

2013 年 10 月 31 日 收稿

2014 年 01 月 03 日 修正

2014 年 05 月 21 日 接受

(本文開放討論至 2015 年 3 月 31 日)