

旗山溪上游近岸崩塌潛勢模式之建立與應用

詹勳全⁽¹⁾ 陳柏安⁽²⁾ 黃憶雯⁽³⁾

摘 要

本研究將崩塌後產生之土砂可能直接匯入河道者視為近岸崩塌，並以旗山溪上游集水區之近岸崩塌為例，利用羅吉斯迴歸分析，以地形、地質及水力等三類因子，建立包含水力因子與否及不同水力因子組合下的崩塌潛勢模式，並比較其在近岸崩塌預測上的差異。此外，本研究亦將近岸崩塌依其可能發生原因及不同樣貌分為四類型於模式中進行探討，Type I 為受降雨沖蝕邊坡造成上寬型崩塌；Type II 為逕流匯集於坑溝所產生長條型崩塌；Type III 為受溪流淘刷而導致下寬型崩塌；Type IV 則為支流源頭連續型崩塌。結果顯示，僅使用地形及地質因子而無加入水力因子所建立之模式，AUC 值為 0.754；在有加入不同水力因子之組合中，加入河岸型態及河床坡降兩水力因子的模式，AUC 值提高至 0.774，尤其是對溪流淘刷所引致之 Type III 崩塌，有顯著提升之預測效果。最後依據本研究分析所得的崩塌潛勢圖結合保全對象分布資料，進行風險分析，找出高風險區分布，以提供政府機關對於河岸維護、相關災害防治政策或治理順序評估之參考。

(**關鍵字**: 近岸崩塌、水力因子、風險評估)

Establishment and Application of the Near-bank Landslide Susceptibility Model in Upstream of Qishan River

Hsun-Chuan Chan⁽¹⁾ *Po-An Chen*⁽²⁾ *Yi-Wen Huang*⁽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

The sediment from landslides directly fell into the river was considered as near-bank landslides in the study. The near-bank landslides on the upper catchment area of

(1)國立中興大學水土保持學系 教授 (通訊作者 e-mail: hcchan@nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系 博士生

(3)國立中興大學水土保持學系 碩士生

Qishan River was selected as a study case, using Logistic regression method with factors, including topography, geological and hydraulic conditions, to establish the landslide susceptibility models of different combinations. The combinations were whether hydraulic factors included and different hydraulic factors, and then we compare their differences in near-bank landslides prediction. In addition, the near-bank landslides in the study were classified into four types according to possible causes and different appearances, and were discussed in the model. Type I is caused by the rainfall erosion and presents a wide-upper appearance. Type II is caused by the runoff collecting in the trench and presents a slender appearance. Type III is caused by bank scour and presents a wide-lower appearance. Type IV is caused at the source of the tributary and presents a continuous appearance. The results showed that the AUC for the model established with the topography and geological factors was 0.754. In the combinations with different hydraulic factors, the AUC for the model added hydraulic factors of riverbank type and riverbed slope increased to 0.774. Especially for the wide-lower appearance landslides caused by the river scouring, the prediction is significant improved in the model. Finally, based on the landslide susceptibility map obtained by this study, we combined the results with the protected targets data for risk assessment. Then we identified the distribution of high-risk areas to provide government reference for riverbank maintenance, or regulations order.

(**Keywords** : Near-bank landslides, Hydraulic factors, Risk assessment.)

前言

集水區的土砂來源為坡面崩塌及土壤沖蝕，而坡面崩塌包含近岸崩塌與離岸崩塌，近岸崩塌的土砂直接匯入河道，為河道中土砂主要來源(Prosser et al., 2001)。過多土石進入河道，除造成河中含砂量改變，影響下游地區的用水品質外 (Wang and Kalin, 2018)，也會覆蓋魚蝦蟹貝等水中生物棲息的深潭淺瀨，衍生出許多生態問題(Geertsema et al., 2009)，除此之外，河道中的大量土砂也容易導致河床淤積及阻礙水流的情形出現，在洪水來臨時，可能因此引發下游地區水患、土砂災害及道路橋樑護岸等結構物之損壞(如圖 1)，影響人民生命財產之安全(Islam, 2018)。



圖 1 水流淘刷造成近岸崩塌及道路坍方
Fig. 1. The near-bank landslides and road damage caused by flow scour.

Glasser(2017)指出崩塌在世界各地皆會發生，且特別容易發生於地形陡峭、土壤脆弱、雨量大及地震頻繁區域，如亞洲大部分地區，以及美國中部、南部和西北部，這一項全球性

議題每年造成經濟及生命的大量損失。有鑒於此，不少專家學者投入崩塌相關研究，以期能了解崩塌的發生原因、觸發機制、地質條件及可能發生區位，在以往的崩塌研究中，分析尺度由大至小可分為：流域尺度(basin-scale)或集水區尺度(watershed-scale)分析(Conoscenti et al., 2015; Khan et al., 2019)、河段尺度(reach-scale)之河道沿線分析(Lévy et al., 2012; Chen et al., 2015; Liang et al., 2015)，以及邊坡尺度(slope-scale)之小範圍分析(Vassallo et al., 2015; Conte et al., 2019)。在流域尺度或集水區尺度之分析中，分析對象涵蓋近岸及離岸的所有坡面崩塌，而在河段尺度之分析中，則針對河流沿線邊坡，以近岸崩塌為主要對象進行探討，Lévy et al.(2012)對加拿大魁北克河流附近崩塌進行研究，發現河岸型態、河寬及河岸邊坡植生覆蓋情形會影響河流侵蝕機制及河岸崩塌地的形成；Chen et al.(2015)研究指出以河道蜿蜒度、河流寬度、河床坡降、單位水力指標及不同河岸型態進行河流侵蝕與崩塌間之研究，可增進崩塌預測準確率；Liang et al.(2015)透過對澳洲墨累河沿岸崩塌地進行現場調查，統整出影響崩塌地的地質、地形、河流水位等因子特性，分析墨累河沿岸高崩塌潛勢區位分布，其研究結果反映水流對邊坡的侵蝕作用為引發河岸崩塌之重要因素之一。

崩塌地泥砂生成至運移到下游的過程中，離岸崩塌的土砂可能堆積於坡面，或需經過一段時間的運移才會對河道造成影響，而近岸崩塌的土砂則直接匯入河道，成為河道中之泥砂來源，因此，本研究由河段尺度針對河流沿線之近岸崩塌為研究主軸，參考相關文獻並根據對研究區域的特性觀察，選出地質、

地形及水力因子，再經複選後建立不同因子組合的分析模型，由崩塌潛勢分析歸納出近岸崩塌之易發生區位，並結合各單元受災之可能損失金額進行風險評估，依據風險分析結果找出近岸崩塌可能造成周遭人民生命或財產損害的區域，以期能供政府機關近岸崩塌防治或相關改善作業的決策參考。

研究樣區概述

1. 區域概述

旗山溪位於台灣南部地區，為高屏溪重要支流之一，由於其河道蜿蜒曲折，坡陡流急且流路不穩定，加上近年來地震及颱風的作用，造成多處崩塌地生成，增加集水區的土砂產量，當大量土砂運移至河道中則會嚴重影響河川輸砂特性、水流及生態的穩定性，經套疊集水區 101 年至 105 年崩塌圖層，如圖 2 所示，發現因地形起伏大且坡度較陡緣故，崩塌多集中在旗山溪與角埔溪交會之上游區段，由崩塌地與水系之距離的分布可知：此上游區域內有 50% 以上的崩塌位於距離河道 200 公尺以內之範圍，這些鄰近河流的崩塌可能直接進入河道影響水流穩定，因此本研究選定旗山溪上游進行近岸崩塌預測研究。

旗山溪上游集水區海拔高度介於 345 公尺至 3950 公尺，邊坡平均坡度約 35.1 度，地層自中新世中期至上新世晚期均有，但多為沉積岩層，屬相對軟弱之岩盤結構，易風化及崩塌。於氣候條件方面，屬於亞熱帶海洋季風氣候，根據水利署之水文資料進行統計(水利署，2017)，其年平均降雨量為 2748.3 mm，每年降雨時間分佈不均，雨季約從每年 5 月至 10 月，旱季則從每年 11 月至隔年 4 月，

造成河川洪枯流量變化大，洪水期間流速湍急且水流侵蝕作用旺盛，成為河岸邊坡穩定之一大威脅。

旗山溪上游主流長度約 63 公里，集水區面積約 369 平方公里，居民主要分布於高雄市那瑪夏區，依據高雄市民政局於民國 107 年統計，此行政區總人口數為 3,148 人，聚落多分布於旗山溪主流兩側之河階地上，居民多從事農業經濟，並以緊臨旗山溪河道兩側的台 29 線為主要聯外道路，近岸崩塌導致台 29 線部分路基遭淘空，影響用路人安全，鄰近河道的建築物及農田也曾有因近岸崩塌而發生建築物倒塌或耕地流失之案例，造成人民生命財產的損失。因此為著重於近岸崩塌探討，本研究以河道兩側向外延伸至嶺線，嶺線邊界內之範圍即為研究區域，如圖 3 所示。

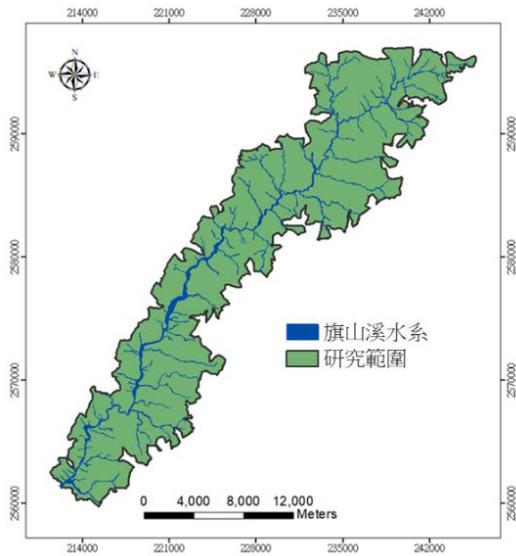


圖 3 研究區域範圍
Fig. 3. The study area.

2. 崩塌類型

Meunier et al.(2008)指出崩塌地所呈現的物理特徵與崩塌地誘發因子有關，如地震導致面積較大型的崩塌產生，降雨使土砂易產生流動現象，形成細長型崩塌，而河岸淘刷則使下邊坡出現較寬型態的崩塌，由崩塌地樣貌可推測其可能發生誘因與過程，是崩塌誘因研究上一個重要的研判參考。

本研究將崩塌發生時土砂崩落可能直接匯入河道中的崩塌視為近岸崩塌，反之則為離岸崩塌，並以近岸崩塌進行探討，經由衛星影像對研究區之近岸崩塌地進行觀察，依其不同樣貌及可能發生原因分為四種類型，如圖 4 所示，並彙整於表 1。Type I 成因為雨水沖蝕造成土體崩落並向下運移或堆積，形成上寬型態崩塌，崩塌發生區多接近上邊坡，其產生之土體向下運移過程中時常伴隨下邊坡崩落而擴大崩塌範圍；Type II 主要為逕流於

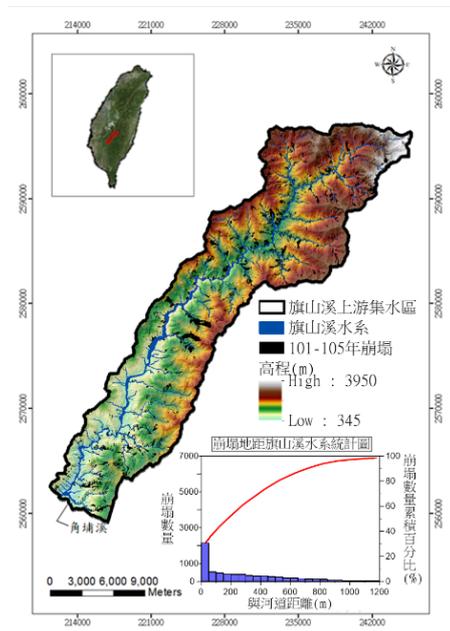


圖 2 研究區域位置圖
Fig. 2. The location of study area.

紋溝或蝕溝匯集並產生侵蝕，形成長條狀崩塌，崩落的土石經沖刷與搬運，在下移過程中產生的動能往往增強侵蝕能力，而增加此崩塌長度、寬度及深度發展；Type III崩塌主要因河水侵蝕坡腳所誘發，且發生位置多分布在受水流淘刷嚴重的凹岸處，其崩落的土石直

接進入河道中，沉積於河床或隨水流向下游移動，為影響河道泥砂含量改變的主要類型；Type IV崩塌主要位在支流處，支流河寬窄且河床坡降大，水流切蝕能力佳，且邊坡坡度通常較為陡峭，連續的崩塌沿支流兩側發生常造成支流有大範圍面積的崩塌情形。



圖 4 研究區不同類型之近岸崩塌與離岸崩塌
Fig. 4. Classification of near-bank and off-bank landslides in the study area.

表 1 崩塌分類表

Table 1. Table of landslides classifications.

	樣貌類型	可能發生原因	易發生區位	數量統計
Type I		雨水及逕流沖蝕，使邊坡產生上寬下窄型崩塌	多位於山腰處或接近上邊坡	26 處
Type II		雨水及逕流匯集產生溝蝕作用，呈現細長型崩塌	蝕溝或坡面下凹處	26 處

Type III		水流對河岸基腳淘刷，造成邊坡土體崩落入河道	緊鄰河道之下邊坡、凹岸處 353 處
Type IV		河流向源及側向侵蝕，使支流源頭及河道兩側土體崩塌	多位於支流中上游、接近源頭區 95 處

3. 河段分割

水流對邊坡的沖刷程度於不同河段會有所差異，此沖刷能力差異受河段流量、流速及河岸型態等特性因素影響。因此，為得知河道特性的分布趨勢則需對河道進行河段分割，本研究依反曲點（Inflection point）位置進行河段分割(Selby, 1985)，使相同河段具相似的水力特性。反曲點為蜿蜒河流地貌學、流體力學及景觀生態學等相關研究上常用之河道樣貌及水力特性探討的河段分割依據(Güneralp, 2012)，定義為一曲線改變凹凸特性的交界點，可由水流行徑的旋轉方向判定其位置，當水流行徑的旋轉方向發生改變時，該點即為反曲點。藉分析各河段所擁有的水力特性，便可再進而由斜坡單元所對應的河段中萃得河床坡降、河岸型態、蜿蜒度、河寬及單位河川水力指標之水力因子值。

4. 分析單元繪製

為使分析單元能符合地形特徵，呈現完

整的連續坡面，本研究選用斜坡單元進行分析作業，此外，斜坡單元直接連接河道邊界，相較於一般常用的網格單元，其有於河道與邊坡空間關係連結上的優勢，利於近岸崩塌分析時水力因子的萃取及探討。

斜坡單元的劃分首先由 ArcGIS 中的水文模組(Hydrology)分析出水系及稜線分布，再利用空間分析中的重疊功能(Union)劃分出初步的斜坡單元，並套疊坡向、水系圖及反曲點進行編修作業，如圖 5 所示，除合併過度分割區域外，也依反曲點位置編修單元，使分析單元能有相對應之河段。

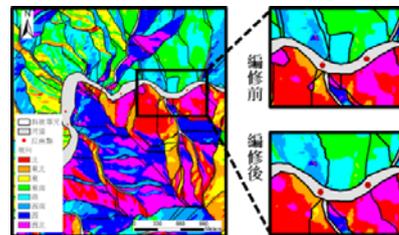


圖 5 斜坡單元編修前後

Fig. 5. Slope units of before and after editing.

5. 羅吉斯迴歸

羅吉斯迴歸主要用於依變數為二元資料的時候，為對數線性模型中的一種特殊形式 (Agresti, 2002)，在分析中的自變數可為連續變數或類別變數資料，於二元依變數分析中也相對於其他介於 0~1 平滑函數簡單，因此在目前崩塌相關研究中，常被運用於探討崩塌潛勢與因子間的關係，且具有良好成效 (Guzzetti et al., 1999; Ayalew & Yamagishi, 2004; Das et al., 2010; Wang et al., 2012)。

羅吉斯迴歸模型(logistic regression model) 可以表示成以下形式：

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

$$\lambda = C + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n \quad (2)$$

其中， P 為崩塌事件發生之條件機率， C 和 w_i 分別為迴歸截距和迴歸係數， x_i 為各項崩塌潛勢因子值。為得知崩塌潛勢模型分析結果的優劣，本研究採用過去於崩塌潛勢模型評估準確性時常用的 ROC(Receiver Operating Characteristic)曲線進行評估(Das et al., 2010; Wang et al., 2012; Zêzere et al., 2017)。

6. 近岸崩塌風險分析

「風險」始於 19 世紀末的西方經濟課題探討，至今其基本概念已被廣泛運用在經濟學、社會學、工程科學、環境科學及災害學領域上(Tang & Okimura, 2006)，在崩塌研上，風險分析也常被用估算危害可能造成損失程度與區位分布(Masaba et al., 2011; Nguyen et al., 2018)。本研究採用式 3 為概念

融合近岸崩塌潛勢資料，以危害度及脆弱度交集計算風險值。

$$\text{風險 (Risk)} = \text{危害度 (Hazard)} \times \text{脆弱度 (Vulnerability)} \quad (3)$$

其中，危害度即為本研究中羅吉斯迴歸分析所得的近岸崩塌潛勢，而脆弱度則為區域中可能受近岸崩塌影響的保全對象，包含道路、建築物以及農地。藉保全對象面積分布與其單位造價或成本，量化出受災時可能受損金額，再進行群集分析將脆弱度分為五級。

在進行崩塌風險圖繪製時，考慮風險元素與崩塌之間的空間關係，風險元素除受所在單元內之崩塌衝擊外，也可能受周遭單元崩塌影響，因此本研究在風險分析上以單元內的潛勢值作為主要危害，並將周遭單元的潛勢值作為次要危害納入計算，給予脆弱度、主要危害度及次要危害度的分級評分值(如表 2)，最後將風險分數劃分為五個等級，分別為高風險(16 以上)、中高風險(11-15)、中低風險(6-10)、低風險(1-5)及極低風險(0)，製作風險地圖。

表 2 脆弱度、主要危害度及次要危害度分級評分表

Table 2. Grading score of vulnerability, major hazard and secondary hazard.

分級	高	中高	中低	低	極低
脆弱度	4	3	2	1	0
主要危害度	4	3	2	1	—
次要危害度	3	2	1	0	—

崩塌潛勢模式建構成果與說明

1. 崩塌因子篩選

以往曾被使用過的崩塌因子多達六十幾種(Koukis & Ziourkas, 1991)，為使潛勢因子有效發揮作用，應依不同集水區性質特色擇其適用的因子。Das et al. (2010)指出對於崩塌地的防治，邊坡坡度與植生覆蓋是兩個重要的因素；Ayalew & Yamagishi(2004)在研究中提出崩塌的發生經常受地質及受風化的坡向影響；Berti et al.(2013)整合以往研究得知地形粗糙度與崩塌地之形成機制及特徵有密切相關；Chen et al.(2015)研究則指出使用河道蜿蜒度、河床坡降、河流寬度、單位水力指標及不同河岸型態等因子，有助於提升崩塌預測準確率。本研究區域因位於上游區，坡度陡峭且地形起伏大，考慮植生覆蓋、地質岩性及順向坡為影響崩塌發生之重要因子，且藉對研究區中近岸崩塌觀察，發現其於蜿蜒河段及凹岸處有較多崩塌趨勢，水流對邊坡的侵蝕能力可能受河床坡降、河寬及水流能量大小影響，因此綜合前人研究及研究區條件，初選出之地形因子為：坡度、地形粗糙度、坡向及 NDVI；地質因子為：地質岩性及順向坡；水力因子為：河床坡降、河岸型態、蜿蜒度、河寬及單位河川水力指標。

在複選時，為能挑出對崩塌有鑑別能力的因子，以及剔除重複性高之因子，可使用判別子(discriminator)和相關係數針對因子進行評估(Davis, 2002)。

判別子 D_j 可以用來判斷該因子對崩塌組

及非崩塌組之區分能力。判別子 D_j 之絕對值大於 0.1 為可採納的因子，此值越大越佳(Chan et al., 2014)，若其數值小於 0.1，則代表因子不足以用來反映崩塌的能力。判別子 D_j 計算方式如下：

$$D_j = \frac{\bar{X}_j - \bar{Y}_j}{S_{pj}} \quad (4)$$

其中， \bar{X}_j 為因子山崩組之平均值， \bar{Y}_j 為因子非山崩組之平均值， S_{pj} 為標準差。

相關係數 r 用於計算兩個變數 X 和 Y 之間的線性相關程度，其值介於-1 與 1 之間，可得出正相關與負相關，相關係數絕對值越高者，則越不適合參與潛勢分析，算法如下：

$$r = \frac{n \sum_i (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{n S_x S_y} \quad (5)$$

其中， r 為 x 因子與 y 因子間的相關係數， \bar{X} 為 x 因子之平均， \bar{Y} 為 y 因子之平均， S_x 為 x 因子的標準差 S_y 為 y 因子的標準差， n 為資料個數，並參考 Udovičić 等人(2007) 所提出的相關係數區分，其中：|0.00|~|0.25|為兩者缺乏相關；|0.25|~|0.50|為兩者相關不強；|0.50|~|0.75|為兩者為顯著性相關；|0.75|~|1.00|為兩者為高度線性相關。

其分析結果如表 3 所示，並以相關係數檢視因子間相關性以剔除重複性高之因子(如表 4)，整合兩篩選方法於表 5 之因子複選分析表，最後所擇因子為：地質、坡度、坡向、地形粗糙度、順向坡、NDVI、河道坡降、河岸型態及蜿蜒度等九項因子。

表 3 判別子分析表

Table 3. Analysis of discriminator.

	蜿蜒度	地形粗糙度	坡度	河床坡降	河寬	NDVI	單位河川水力指標
判別子	0.112	0.197	0.273	0.119	-0.066	-0.267	-0.317

表 4 相關係數分析表

Table 4. Analysis of correlation coefficient.

	蜿蜒度	地形粗糙度	坡度	河床坡降	河寬	NDVI	單位河川水力指標
蜿蜒度	1	0.033	0.021	-0.262	0.077	0.039	0.477
地形粗糙度	0.033	1	0.476	0.217	-0.117	0.072	-0.124
坡度	0.021	0.476	1	0.211	-0.197	-0.016	0.502
河床坡降	-0.262	0.217	0.211	1	-0.503	-0.095	0.411
河寬	0.077	-0.117	-0.197	-0.503	1	0.075	-0.317
NDVI	0.039	0.072	-0.016	-0.095	0.075	1	-0.043
單位河川水力指標	0.477	-0.124	0.502	0.411	-0.317	-0.043	1

表 5 因子複選分析表

Table 5. Analysis of factors selection.

初選因子	判別子	相關係數	複選因子
坡度	O	O	V
地形粗糙度	O	O	V
坡向	-	-	V
岩性	-	-	V
順向坡	-	-	V
河床坡降	O	O	V
河岸型態	-	-	V
蜿蜒度	O	O	V
河寬	X	X	
單位河川水力指標	O	X	
NDVI	O	O	V

備註：O:佳；X:劣；-:類別因子無法計算該值

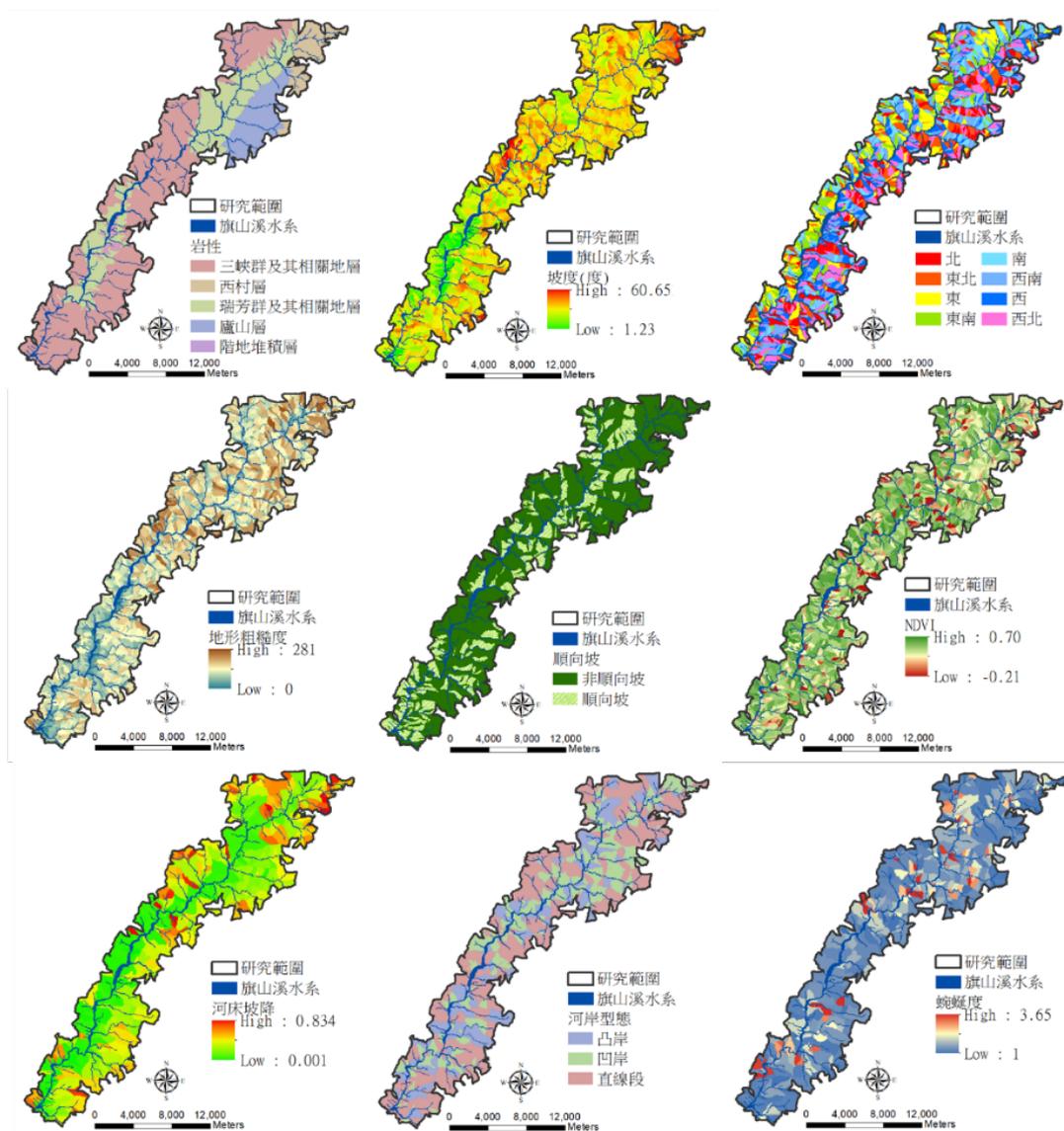


圖 6 斜坡單元萃取之各項因子圖

Fig. 6. Factor maps of slope units.

本研究經複選後採用的 9 項因子分布圖如圖 6，其說明及計算方法如下：

1. 岩性: 岩層性質、穩定度與抗蝕能力的差異，往往影響不同地質災害之形成，故為探討崩

塌破壞時的重要因素(Lee et al., 2002)。本研究採用中央地質調查所於 2009 年出版的五萬分之一地質圖進行資料萃取，區域內共有 5 種地層，區間面積佔總面積比例較高的為三峽群及其相關地層(佔 56.3%)、瑞芳群及其相關

地層(佔 22.9%)，其餘三種地層分別為廬山層(佔 11.2%)、西村層(佔 8.6%)與階地堆積層(1%)。

2.坡度:坡度值顯示地勢的陡峭程度，愈陡的地勢提供土體或岩層愈大的動力向下移動，也較難維持平衡，是影響邊坡穩定的重要條件(Lee, 2014)。將內政部地政司提供之 5mx5m 數值地形模型資料經地理資訊系統空間分析中坡度的計算，求得各單元的平均坡度值，本研究區分析單元坡度區間介於 1.23 度至 60.65 度之間，整體坡度平均為 33 度。

3.坡向:坡向即坡面傾斜方向，分類為八個方位及平面。坡向因子能間接或直接提供水文流向、日照與迎風面等訊息，不同坡向的微氣候也會有所差異，造就不同的崩塌影響條件。將內政部地政司提供之 5mx5m 數值地形模型資料由地理資訊系統空間分析中的坡向計算，得出本研究區中西北方及西方坡向面積佔比較高，分別為 15.27% 及 14.74%。

4.地形粗糙度:地形粗糙度為分析單元內地形變化的程度，反映地表的起伏狀態，一般於受侵蝕坡面、崩積體及滑落崖等處的坡面穩定性較低，地形粗糙度值也呈現較高之情形(Berti et al., 2013)。本研究以 Wilson & Gallant (2000) 所提出利用分析單元內的高程標準差，做為地形粗糙度的計算方式，標準差的計算公式為：

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

其中， n_c 為視窗範圍內之點數； Z_i 為點之高程值； \bar{Z} 為視窗範圍內各點之高程平均值。本研究區分析得之地形粗糙度值域介於 0 至 291.5 之間。

5.順向坡:根據水土保持技術規範第 31 條定義：順向坡為坡面與層面之走向大致平行（或兩面走向之交角在二十度以內），且坡面傾向與層面傾向一致者。在傾斜、互層狀的沉積岩區常見順向坡構造，其易因坡腳遭切除導致失去支撐力，或雨水入滲至地層面中改變岩層間摩擦力，而發生岩屑或岩體滑動現象。本研究以經濟部中央地質調查所提供之解析度為五萬分之一順向坡圖資進行順向坡之萃取。

6.常態化差異植生指標 NDVI:常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 為用來評估綠色植被覆蓋或生長狀況的數值指標，利用一般綠色植物的葉綠素吸收紅光並反射近紅外光的特性，應用光學遙測資訊估算可見光與近紅外光之比值或差值 (Elvidge & Chen, 1995)，即常態化差異植生指標，計算方式為：

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

其中，NIR 為近紅外光反射值；RED 為紅光反射值。NDVI 指標值域介於 -1 至 +1 之間，小於零的數值，通常屬於非植生之水域、道路、裸露地和建築物，數值越大時，代表綠色植物密度的增加，故吸收之紅光愈多，紅外光之反射愈強，其差異也愈大，本研究以空間解析度為 30 公尺之 Landsat7 ETM+ 衛星影像波段進行分析，所得之 NDVI 值域介於 -0.21 至 0.69。

7.河床坡降:河床坡降為河床縱向坡度的變化，其變化影響河道輸砂能力，改變其沖刷或淤積性質，當坡降變小時，水流的沖刷作用減少甚至產生淤積現象；坡降增加時，則淤積減少甚至產生沖刷現象。河床坡降計算公式為 (Hack, 1973):

$$S = \frac{h}{l} \quad (8)$$

其中， S 為河床坡降， h 為河段起點與終點(即為兩反曲點)高程差， l 為河段總長度。本研究以 DEM 萃取反曲點高程，進而計算出各河段之河床坡降，並依斜坡單元所對應的河段獲取該坡降值，研究區域中之河床坡降值域介於 0.001 至 0.834 之間，整體平均為 0.152。

8. 河岸型態:受地形限制與水流流路影響，河岸型態可分為凹岸、凸岸及直線段，河流兩岸之型態不同，遭受的沖淤程度亦有所差異，一般在河灣處可明顯看見凹岸沖刷而凸岸淤積的狀態。本研究以反曲點分割出河段後，由各河段河流彎曲位置來看，河流向陸地凸出的一岸即是凹岸；反之，則是凸岸，而較為順直的則為直線段。

9. 蜿蜒度:蜿蜒度為河川蜿蜒轉折程度的一種指標，Jansen et al.(2006)指出:蜿蜒度高之河道，其側向侵蝕作用相對於河床的向下侵蝕作用劇烈，蜿蜒程度的增加也會促使下游河道逐漸擴寬。蜿蜒度計算方法為(Mueller, 1968):

$$s = \frac{l}{\lambda} \quad (9)$$

其中， s 為河流蜿蜒度， λ 為河段起點與終點(即為兩反曲點)間的直線距離， l 為河段總長度，蜿蜒度計算示意圖如圖 7，本研究區域中的河段蜿蜒度介於 1 至 3.65 之間。

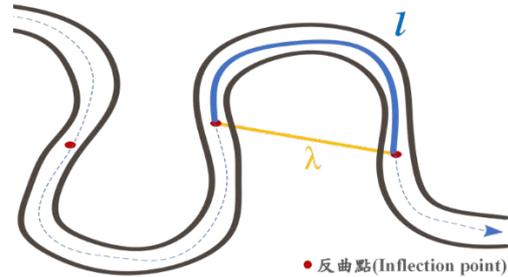


圖 7 蜿蜒度計算示意圖

Fig. 7. Schematic diagram of sinuosity calculation.

2. 崩塌潛勢模式分析

為了解水力因子於本研究區是否會改變近岸崩塌的預測率，以及使用不同水力因子時對預測結果的影響，本研究將複選出的因子建立含有不同因子組合的羅吉斯迴歸模式。其中，模式 A 僅選用地形及地質因子分析，模式 B 至模式 E 則除地形地質外，再以篩選出的三項水力因子(河岸型態、河床坡降及蜿蜒度)進行不同組合建立模式，分別加入: 河岸型態、河床坡降及蜿蜒度(模式 B); 河岸型態及河床坡降(模式 C); 河岸型態及蜿蜒度(模式 D); 河床坡降及蜿蜒度(模式 E)。

各因子於模式中的係數值如表 6 所示，模式 A 僅考慮地形與地質因子時，影響本區近岸崩塌發生與否之最重要因子為岩性，其次為坡向，而後則依序為平均坡度、NDVI、順向坡，以及地形粗糙度；而加入水力因子後，河岸型態的影響力大於坡向，成為僅次於岩性的重要因子。整合各組係數值資料顯示:本區近岸崩塌機率預測結果深受岩性條件、河岸型態及坡向三者影響。

在地質方面，權重最高的為瑞芳群及其

相關地層，係數值為 1.522，其主要組成為含煤層及頁岩與砂岩互層，其中，頁岩岩體較軟且透水性低，而砂岩節理發達透水性佳，因此由砂岩與頁岩組合成的地層易受差異侵蝕與產生滑動。地形方面權重較高的坡向顯示：東北方、東方及南方崩塌機率較高，係數值分別為 1.066、1.049 及 0.711，由於旗山溪主要水流方向為東北向西南流動，水流易對坡向為東北方及東方的坡腳造成直接沖擊，且研究區因位於北半球，南方坡向受日照直射時間較長，岩層長時間受物理風化作用下易產生裂隙而不穩定。NDVI 係數值為-0.504，與崩

塌呈負相關，表示在缺少植生覆蓋處易增加土壤沖蝕速率引發崩塌。除地質與地形外，水力因子也是近岸崩塌之影響因素，本研究分析得之河床坡降及河岸型態凹岸皆與崩塌呈正相關，係數值分別為 0.264 及 1.131，一般而言，河床坡降大的河段流速較快，使水流動能提高而增加侵蝕與搬運能力，河床底部及兩岸較鬆軟或具節理岩石，易受此衝擊成碎塊，由水流挾帶至下游。在凹岸處流速也相較凸岸快，再加上受橫向環流影響，泥砂運動加劇，此處邊坡易因坡腳被河水淘刷而發生崩塌。

表 6 羅吉斯迴歸模型因子係數值
Table 6. Factor coefficient values of logistic regression model.

代號	因子	係數	模式 A 係數值	模式 B 係數值	模式 C 係數值	模式 D 係數值	模式 E 係數值	
x_1	地形粗糙度	w_1	0.216	0.111	0.181	0.127	0.139	
x_2	平均坡度	w_2	0.561	0.511	0.450	0.548	0.585	
x_3	NDVI	w_3	-0.501	-0.447	-0.504	-0.460	-0.439	
x_4	北方	w_4	—	—	—	—	—	
x_5	東北方	w_5	0.996	0.766	1.066	0.758	0.786	
x_6	東方	w_6	0.993	0.768	1.049	0.753	0.743	
x_7	坡向	東南方	w_7	0.504	0.211	0.483	0.220	0.237
x_8		南方	w_8	0.725	0.272	0.711	0.292	0.298
x_9		西南方	w_9	-0.080	-0.071	-0.139	-0.064	-0.051
x_{10}		西方	w_{10}	-0.526	-0.575	-0.613	-0.574	-0.500
x_{11}		西北方	w_{11}	-0.411	-0.434	-0.348	-0.460	-0.459

x_{12}		順向坡	w_{12}	0.489	0.642	0.481	0.618	0.631
x_{13}		三峽群及其相關地層	w_{13}	—	—	—	—	—
x_{14}		西村層	w_{14}	0.824	0.392	0.857	0.456	0.480
x_{15}	岩性	瑞芳群及其相關地層	w_{15}	1.426	1.422	1.522	1.335	1.434
x_{16}		廬山層	w_{16}	1.125	1.001	0.972	1.307	1.168
x_{17}		階地堆積	w_{17}	-0.343	-0.015	-0.045	-0.257	-0.062
x_{18}	河岸型態	直線段	w_{18}	—	—	—	—	—
x_{19}		凸岸	w_{19}	—	-0.231	-0.120	-0.319	—
x_{20}		凹岸	w_{20}	—	0.447	1.131	0.777	—
x_{21}		河床坡降	w_{21}	—	0.208	0.264	—	0.116
x_{22}		蜿蜒度	w_{22}	—	-0.045	—	-0.067	-0.054
		常數項	C	-1.142	-1.152	-1.413	-1.072	-1.023

五組模式經 ROC 曲線評估結果如圖 8 所示，其曲線下面積(AUC)分別為:0.754、0.773、0.774、0.771 及 0.755。比較此五組模式之分析結果，可得知在有加入水力因子之情況下，模式 B 至模式 E 之 AUC 皆有提升的情形，相較於無加入水力因子之模式 A，可突顯水力因子的加入有助於模式對本研究區近岸崩塌的預測；統整加入不同水力因子組合之模式 B 至模式 E 分析結果，顯示三水力因子於研究區域的近岸崩塌預測效果排序為:河岸型態、河床坡降及蜿蜒度，有加入河岸型態的模式組別，皆能獲得較佳的近岸崩塌預測，因為河岸型態之凹岸類別權重大，使模式提高在凹岸處的預測能力，更貼近實際情況中近

岸崩塌常發生於凹岸處之現象，河床坡降則影響水流流速快慢並間接反映水流侵蝕能力及促崩速度，而蜿蜒度則為三水力因子中較無顯著效果者，因此模式 C 選用坡度、地形粗糙度、坡向、岩性、順向坡、NDVI、河床坡降以及河岸型態等因子對此區域的近岸崩塌模擬呈現較佳結果。

此外，以模式 C 針對本研究所歸納之四種崩塌類型，其 ROC 曲線如圖 9 所示，Type I 至 TypeIV 崩塌的 AUC 分別為:0.644、0.744、0.782 及 0.673，可得知模式 C 對 TypeIII 的崩塌預測效果最佳，此類型崩塌主要受河岸淘刷所造成，其受水力因子影響大，因而相較於其餘三類型崩塌呈現較好的預測能力；而模

式 C 對 Type I 預測能力則為四類型崩塌中最差者，AUC 僅達 0.644，原因為此類型崩塌的發生受水力影響小，導致準確率呈現最低的情況；Type II 崩塌由逕流匯集於蝕溝所造成，其發展除受地質的岩層強度及植生覆蓋情形影響外，也與地形粗糙程度呈正相關，在模式 C 中的預測效果僅次於 Type III，AUC 達 0.744；Type IV 崩塌主要位於支流上游區，邊坡坡度及河床坡降大，雖 AUC 不足 0.7 呈現整體預測稍差的情形，但曲線右下角區域弧線較 Type I 及 Type II 突出，顯示其於高崩塌潛勢上的準確率較上述兩者佳。

本研究將崩塌潛勢值依據等間距法分為四種等級(Ayalew & Yamagishi, 2005)，分別為：高崩塌潛勢區(值域 0.75-1)；中高崩塌潛勢區(值域 0.5-0.75)；中低崩塌潛勢區(值域 0.25-0.5)；低崩塌潛勢區(值域 0-0.25)，模式 A 至模式 E 的崩塌潛勢圖如圖 10 所示。將加入水力因子組合中成果較佳的模式 C 與無加入水力因子的模式 A 相比，在模式 A 的分析下，高、中高、中低及低崩塌潛勢區之比例分別為 12.40%、34.30%、36.12%及 17.18%，而模式 C 的比例則為 14.99%、28.10%、32.50%及 24.41%，如圖 12 所示，相較於模式 A，模式 C 的高崩塌潛勢區與低崩塌潛勢區佔比增加，此現象反映水力因子能增進模式對高崩塌潛勢與低崩塌潛勢的判別能力，做出更明確的區分，於模式 C 之崩塌潛勢圖中，部分河彎處可明顯看到崩塌潛勢值較模式 A 之提升。於模式 C 所得崩塌潛勢圖中套疊 101-105 年的實際崩塌位置圖，如圖 11 所示，大多數的崩塌區域落在中高崩塌潛勢區及高崩塌潛勢區，而有局部高崩塌潛感區並無對應到實際崩塌發生，可能原因為部分近岸崩塌面積較

小或受周遭植生遮蔽，礙於衛星影像解析度限制而無法判釋出來，或是代表這些單元與真實崩塌區的單元因子特性相近，其地形、地質與水力特徵屬近岸崩塌好發條件，為未來可能發生崩塌之處。landslides(model C).

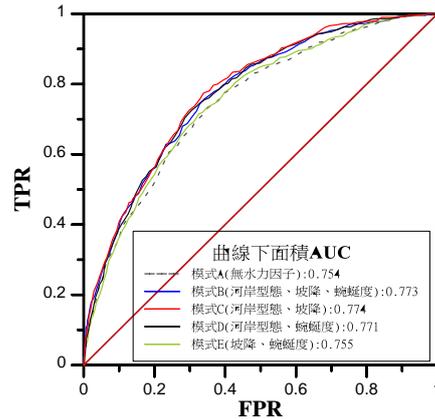


圖 8 五組模式 AUC 分析

Fig. 8. AUC analysis of five-combination models.

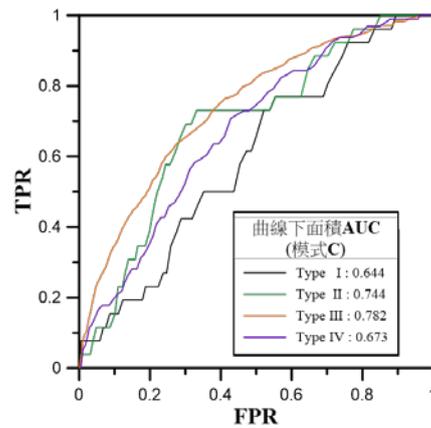


圖 9 四崩塌類型 AUC 分析(模式 C)

Fig. 9. AUC analysis of four-type

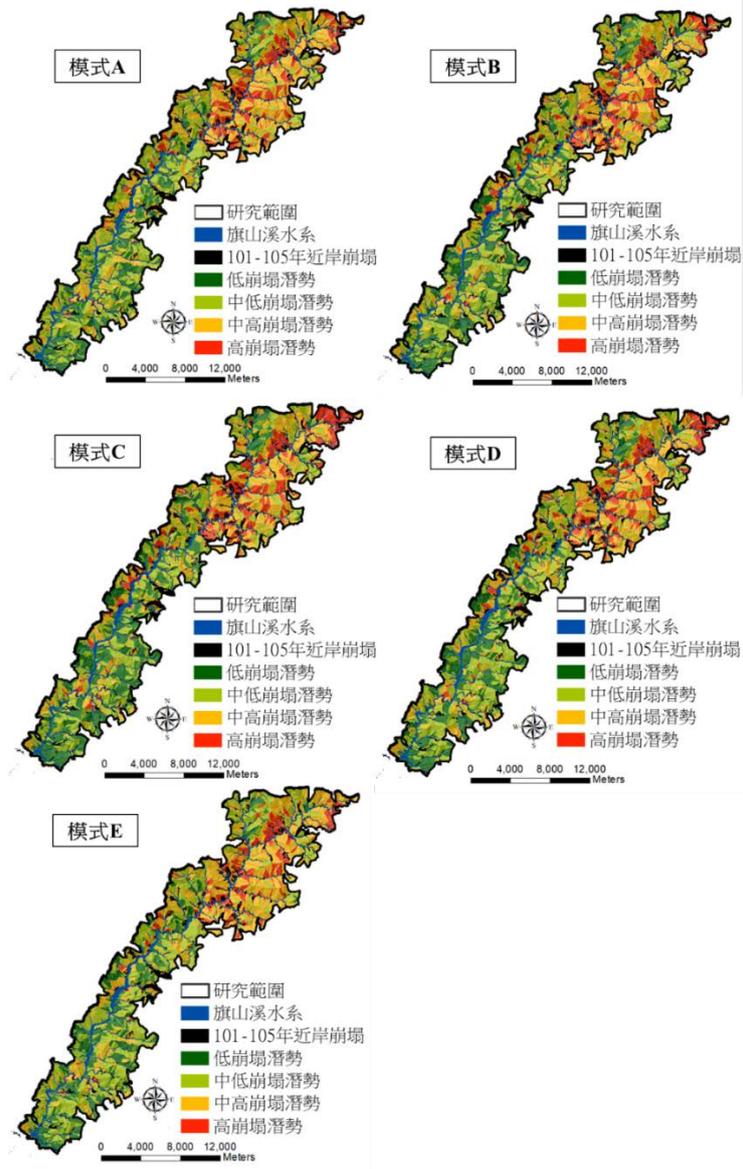


圖 10 五組模式崩塌潛勢圖

Fig. 10. Landslide susceptibility maps of five-combination models.

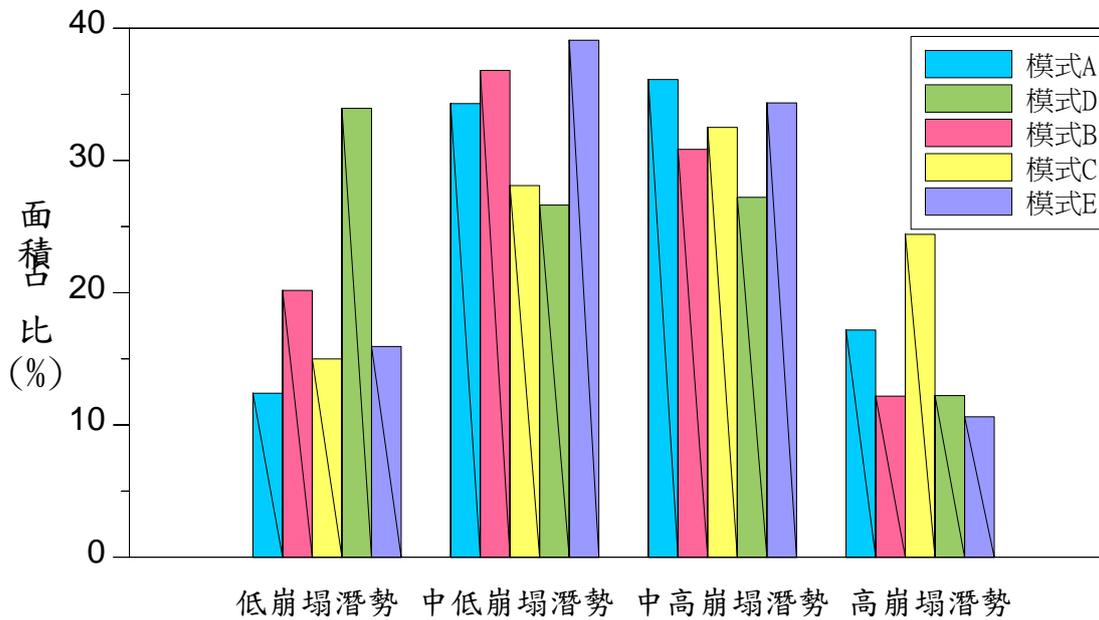


圖 11 五組模式崩塌潛勢等級佔比圖

Fig. 11. proportion of Landslide susceptibility grades in five-combination models.

崩塌風險分析

為探討因近岸水流淘刷誘發崩塌導致的損害風險，本研究經由研究區域中保全對象分布調查，結合近岸崩塌潛勢圖，建立災害風險地圖，如圖 12。本研究區域近岸崩塌高風險地區多位於河道凹岸處以及支流源頭一帶，因受河道沖刷影響，凹岸及源頭附近發生近岸崩塌的機率較高，為方便結果闡述，將風險較高地區分為區域 A 及區域 B。

區域 A 位於旗山溪最上游段，主要保全對象為道路，而該區的地勢高聳，其地質、地形及河道水力等自然環境條件較嚴苛，具較高的崩塌潛勢值，雖因地處偏遠而無人居住或進行耕作情形，但有道路行經該區，於高崩

塌機率影響下，使其成為具高風險的路段；區域 B 由其保全對象分布圖可知其為農地、建築物及道路密集分布之地區，也是整個研究區域中人口聚集處，雖然此區的崩塌潛勢值不比位居上游之 A 區高，但其為人民主要活動範圍，一旦發生災害事件將造成極大損失，因此分析出的風險值也呈現較高情形。

於工程治理上，風險等級即可代表應安排處理的順序，在保全對象多且崩塌發生率高的高風險邊坡應優先進行現場勘查與治理維護，而在保全對象少或崩塌發生率低的邊坡並非能完全排除致災的可能性，但屬致災風險機率低的區域，可由遙測影像定期追蹤該區狀況，節省到現場勘查的人力資源。由風險分布圖可得知目前需特別關注或進行處理

的區域，在預算有限情況下，風險分析為一項極重要工作，關乎如何將資源有效的運用於

較具急迫性且重要的區域，也可提供災害整備階段時之決策參考。

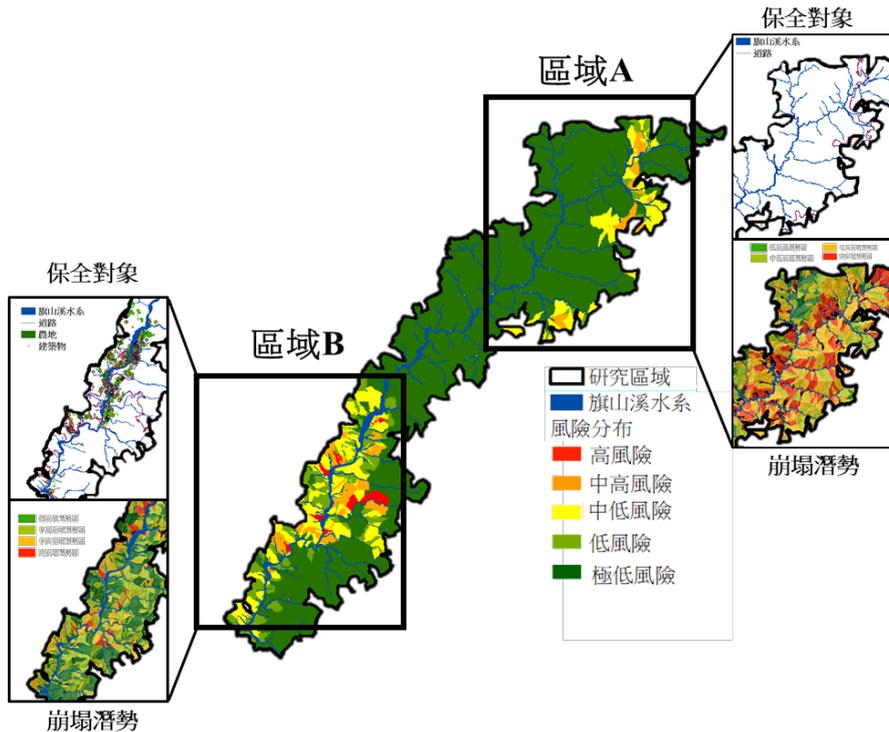


圖 12 崩塌風險分布圖

Fig. 12. Distribution of landslides risk.

結論與建議

本研究以近岸崩塌為主軸，藉羅吉斯迴歸分析建立五組崩塌潛勢模式，包含使用水力因子與否，及不同水力因子組合之模式，並將區域中近岸崩塌歸為四類進行探討，最後以模式所得之崩塌潛勢圖應用於風險分析。本研究分析結果經歸納整理後，可提出以下

結論與建議:

1. 本研究所建之五個模式中，以包含地形、地質因子及水力因子中河岸型態及河床坡降所建立之模式 C 具最佳預測結果，AUC 值為 0.774；模式 C 對於四類型崩塌中為呈現下寬型態之 Type III 崩塌 AUC 值最高，其值為 0.782，原因為 Type III 崩塌主要受河道淘刷所誘發，水力因子的加入有助於模式預測能力

之提高。

2. 模式 C 中羅吉斯迴歸所得的因子係數值，以地質因子的瑞芳群及其相關地層權重最高，其為頁岩及砂岩組成，其次為水力因子的凹岸，近岸崩塌之好發區，而後則為地形因子的坡向，顯示在本研究區地質、水力以及地形因子皆為影響近岸崩塌之重要因素。
3. 水流對坡腳的淘刷能力愈佳則引發近岸崩塌的機率愈大，在本研究中所使用的三個水力因子對近岸崩塌預測效果依序為：河岸型態、河床坡降及蜿蜒度，可由此排序得知三水力因子於研究區中影響水流淘刷程度的重要性。
4. 本研究將崩塌潛勢圖結合保全對象資料，帶入風險分析，所得之高風險區主要位在旗山溪主支流凹岸處與支流源頭處。經風險分析可篩出保全對象多且近岸崩塌發生機率相對較高的邊坡進行現場調查，以節省人力、時間及經費支出。
5. 本研究中使用之水力因子為以地理資訊系統分析所得之河道水力條件為主，若能搭配水理模式計算，將能獲取不同時間及流量下的水力因子，以更符合高流量沖刷當下的現場情況，助於近岸崩塌潛勢之分析與探討。

參考文獻

1. 經濟部水利署 (2017)，「中華民國一〇七年臺灣水文年報」。
2. Agresti, A. (2002). *Categorical data analysis* (2nd ed.), John Wiley, New York.
3. 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(1-2), 15-31.
4. Ayalew, L., Yamagishi, H. and Ugawa, N. (2004) Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1 (1), 73-81.
5. Berti, M., Corsini, A., and Daehne, A. (2013). Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides. *Geomorphology*, 182, 1-18.
6. Chen, C. Y., Chang, K. T., and Ho, Y. J. (2015). Integration of fluvial erosion factors for predicting landslides along meandering rivers. *EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria, Vol. 17, EGU2015-4474-2*
7. Conoscenti, C., Ciaccio, M., Caraballo-Arias, N. A., Gómez-Gutiérrez, Á., Rotigliano, E., and Agnesi, V. (2015). Assessment of susceptibility to earth-flow landslide using logistic regression and multivariate adaptive regression splines: a

- case of the Belice River basin (western Sicily, Italy). *Geomorphology*, 242, 49-64.
8. Conte, E., Pugliese, L., and Troncone, A. (2019). Post-failure stage simulation of a landslide using the material point method. *Engineering Geology*, 253, 149-159.
 9. Das, I., Sahoo, S., Westen, C. Van., Stein, A. and Hack, R. (2010). Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, 114, 627-637.
 10. Davis, J. C. (2002). *Statistic and data analysis in geology*, 3rd ed. Wiley, Hoboken.
 11. 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(1), 38-48.
 12. Geertsema, M., Highland, L., and Vaugeouis, L. (2009). Environmental impact of landslides. In *Landslides–disaster risk reduction*, 589-607. Springer, Berlin, Heidelberg.
 13. Güneralp, İ., and Marston, R. A. (2012). Process–form linkages in meander morphodynamics: Bridging theoretical modeling and real world complexity. *Progress in Physical Geography*, 36(6), 718-746.
 14. Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., and Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
 15. Hack, J. T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the us Geological Survey*, 1(4), 421-429.
 16. Islam, M. N. (2018). Community-based responses to flood and river erosion hazards in the active Ganges floodplain of Bangladesh. In *Science and Technology in Disaster Risk Reduction in Asia*, Academic Press, Tokyo, Japan, 301-325.
 17. Jansen, J. D., Codilean, A. T., Bishop P., Hoey, T. B., and Persano, C. (2006). Channel sinuosity: another angle on steady state and transient response in bedrock rivers draining active mountain belts. *EGU General Assembly 2006*, Vienna, Austria, Vol. 8, No. 02309.
 18. Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., and Calligaris, C. (2019). Landslide susceptibility

- assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 11-24.
19. Koukis, G., and Ziourkas, C. (1991). Slope instability phenomena in Greece: a statistical analysis. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 47-60.
20. Lee, C. T. (2014). Statistical seismic landslide hazard analysis: An example from Taiwan. *Engineering geology*, 182, 201-212.
21. Lee, S., Chwae, U., and Min, K. (2002). Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea. *Geomorphology*, 46(3-4), 149-162.
22. Lévy, S., Jaboyedoff, M., Locat, J., and Demers, D. (2012). Erosion and channel change as factors of landslides and valley formation in Champlain Sea Clays: The Chacoura River, Quebec, Canada. *Geomorphology*, 145, 12-18.
23. Liang, C., Jaksa, M. B., Kuo, Y. L., and Ostendorf, B. (2015). Identifying areas susceptible to high risk of riverbank collapse along the lower River Murray. *Computers and Geotechnics*, 69, 236-246.
24. Masaba, S., Mungai, D. N., Isabirye, M., and Nsubuga, H. (2017). Implementation of landslide disaster risk reduction policy in Uganda. *International journal of disaster risk reduction*, 24, 326-331.
25. Meunier, P., Hovius, N., and Haines, J. A. (2008). Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3-4), 221-232.
26. Mueller, J. E. (1968). An Introduction to the Hydraulic and Topographic Sinuosity Indexes 1. *Annals of the Association of American Geographers*, 58, 371-385.
27. Nguyen, H., Tyler, S., and Tong, T. M. T. (2018). Co-management model on urban riverbank erosion management in Can Tho city, Vietnam. In *Science and Technology in Disaster Risk Reduction in Asia*, Academic Press, Tokyo, Japan., 161-173.
28. Prosser, I. P., Rutherford, I. D., Olley, J. M., Young, W. J., Wallbrink, P. J., and Moran, C. J. (2001). Corrigendum to: Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia. *Marine and Freshwater Research*, 52(5), 817-817.

29. Selby, M. J. (1985). *Earth's changing surface: an introduction to geomorphology*, Oxford University Press, New York.
30. Tang, C., and Okimura, T. (2006). Integrated Assessment of Urban Debris Flow Hazards Using RS/GIS: A Case Study of Dongchuan Urban Area, Kunming City, China. *Journal of Geographical Science*, 44, 1-22.
31. Vassallo, R., Grimaldi, G. M., and Di Maio, C. (2015). Analysis of transient pore pressure distribution and safety factor of a slow clayey deep-seated landslide by 2D and 3D models. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2*, Springer, Cham, Switzerland, 2123-2127.
32. Wang, L. J., Sawada, K. and Moriguchi, S. (2012). Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based on FCM sampling strategy. *Computers & Geosciences*, 57, 81-92.
33. Wang, R., and Kalin, L. (2018). Combined and synergistic effects of climate change and urbanization on water quality in the Wolf Bay watershed, southern Alabama. *Journal of Environmental Sciences*, 64, 107-121.
34. Wilson, J. P., and Gallant, J. C. (2000). *Digital terrain analysis. Terrain analysis: Principles and applications*, 6(12), 1-27.
35. Zêzere, J., Pereira, S., Melo, R., Oliveira, S. and Garcia, R.(2017). Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of the Total Environment*, 589, 250-267.

109 年 5 月 13 日收稿

109 年 6 月 3 日修改

109 年 6 月 30 日接受