

# 應用羅吉斯迴歸崩塌公式於水文模式輸砂模擬 -以秀姑巒溪流域為例

Integration of the landslide logistics regression in a hydrologic model for  
sediment simulation - A case study in the Xiuguluan River basin

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
博士班研究生

盧至美  
Chih-Mei Lu

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
副教授

江莉琦\*  
Li-Chi Chiang

國立台灣大學  
生物環境系統工程學系  
教授

廖國偉  
Kuo-Wei Liao

## 摘要

崩塌為台灣主要天然災害之一，經常發生於強烈自然擾動如地震、颱風、強降雨等，在颱風及強降雨所造成的崩塌事件中，崩塌所帶來的土砂會隨著地表逕流流入河川，影響河川輸砂量及水質。然而，現今多數水文模式模擬之輸砂量大多透過通用土壤流失公式 (USLE)、修正通用土壤流失公式 (MUSLE、RUSLE) 計算地表沖蝕量，作為河川之入砂量，而未考慮崩塌事件對輸砂模擬之影響。本研究使用 SWAT 半分佈型水文模式模擬集水區流量及輸砂量，為使土壤沖蝕量之計算更能反映台灣狀況，本研究使用 TUSLE 公式 (陳樹群等，2009) 計算土壤沖蝕量，並參考 SWAT-Twn (Lu and Chiang, 2019) 建置之 SWAT 崩塌模組。測試之崩塌模組包含 SWAT-Twn、SWAT-複合門檻 (雨量及土壤含水比門檻)、SWAT-Logistic (多因子羅吉斯迴歸崩塌預測公式)，其中，SWAT-複合門檻及 SWAT-Logistic 應用 SWAT 水文模擬結果作為預測門檻及迴歸因子。崩塌預測羅吉斯迴歸建置因子包含：土地利用、土壤類別、模擬單元面積、坡度、日降雨量、兩日累積降雨量、土壤含水比、含水量變化量、滲透量等 9 個因子，其中土壤含水相關因子及滲透量由 SWAT 模式模擬產出。本研究羅吉斯迴歸之訓練資料使用農委會提供之 2006 ~ 2021 事件型崩塌目錄，透過比對崩塌事件發生日期及雨量變化，確認其為降雨型崩塌及事件發生時間，並根據降雨分布之峰度 (kurtosis) 將降雨事件分為長時間降雨 (Type I)、典型降雨 (Type II)、單日強降雨 (Type III)。結果顯示，應用羅吉斯迴歸之崩塌預測表現顯著優於傳統之雨量門檻，除 Type II 外，其他兩種雨型真陽性率、真陰性率皆大於 70%，且羅吉斯迴歸公式之 ROC-AUC 為 0.712 ~ 0.735，可有效的評估流域中之崩塌區域，反之雨量門檻、複合門檻預測效能較差 (ROC-AUC = 0.547、0.584)。SWAT-Logistic 對上、中游兩個測站之月輸砂量模擬表現為滿意至良好的 ( $R^2 = 0.505 - 0.779$ ,  $NSE = 0.473 - 0.725$ ,  $PBIAS = -57.05 - 11.51\%$ ) 顯示 SWAT-Logistic 可良好的模擬秀姑巒溪在崩塌事件影響下之月輸砂量。然而 SWAT-Logistic 及 SWAT-複合門檻之模擬結果顯示模式中、上游之高輸砂量無法傳輸至下游，建議未來可針對模式輸砂公式、崩塌事件泥砂運移狀態進行修改，使模式可完整反映集水區之輸砂特性。

關鍵詞：崩塌、羅吉斯迴歸、輸砂模擬、SWAT 模式。

\*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系副教授  
10617 臺北市大安區羅斯福路四段 1 號 · lchiang@ntu.edu.tw

# Integration of the landslide logistics regression in a hydrologic model for sediment simulation - A case study in the Xiuguluan River basin

## **Chih-Mei Lu**

National Taiwan University  
Department of  
Bioenvironmental Systems  
Engineering  
PhD student

## **Li-Chi Chiang\***

National Taiwan University  
Department of  
Bioenvironmental Systems  
Engineering  
Associate Professor

## **Kuo-Wei Liao**

National Taiwan University  
Department of  
Bioenvironmental Systems  
Engineering  
Professor

## **ABSTRACT**

Landslide is one of the major natural disasters in Taiwan, often occurring due to strong natural disturbances such as earthquakes, typhoons, and heavy rainfall. In cases of landslide caused by typhoons and heavy rainfall, the soil and sediment brought about by the landslide flow into rivers along with surface runoff, impacting both sediment transport and water quality in rivers. However, most current hydrological models simulate sediment transport generally use the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE, RUSLE) to calculate soil erosion as the sediment load. These models do not account for the effects of landslide on sediment transport simulation. In this study, the semi-distributed hydrological model SWAT is employed to simulate watershed runoff and sediment transport. To better reflect Taiwan's conditions, we employ the TUSLE formula (Chen *et al.*, 2009) to calculate soil erosion and integrate the landslide module developed by SWAT-Twn (Lu and Chiang, 2019). The tested landslide modules include SWAT-Twn, SWAT-composite threshold (rainfall and fraction of soil water content), and SWAT-Logistic (landslide prediction of multi-factor logistic regression). Among them, SWAT-composite threshold and SWAT-Logistic utilize SWAT simulation results as predictive thresholds and regression factors. The factors for the logistic regression are: land use (LUC), soil type (LSOL), area (AREA), slope (SLP), daily rainfall (PCP), two-day cumulative rainfall (PCP2D), fraction of soil water content (FSW), difference of soil water content (SWD), and percolation (PERC). Among of them, soil moisture-related factors and percolation are simulated by the SWAT model. The training data for the logistic regression are derived from the 2006 ~ 2021 event-based landslide catalog provided by the Council of Agriculture. By matching landslide event dates and rainfall variations, events categorized as rainfall-induced landslide with their occurrence times are identified. Based on the kurtosis of rainfall distribution, events are further classified into prolonged rainfall (Type I), typical rainfall (Type II), and intense single-day rainfall (Type III). The results indicate that the performance of landslide prediction using logistic regression is significantly superior to traditional rainfall thresholds. Except for Type II, the true positive rate (TPR) and true negative rate (TNR) for the other two rainfall types both exceed 70 %. The ROC-AUC of the logistic regression ranges from 0.712 to

0.735. Conversely, rainfall thresholds and composite thresholds exhibit poorer predictive performance (ROC-AUC = 0.547 and 0.584, respectively). The simulation performance of SWAT-Logistic for monthly sediment transport at upper and middle reaches of two monitoring stations ranges from satisfactory to good ( $R^2 = 0.505 - 0.779$ , NSE = 0.473 – 0.725, PBIAS = -57.05 – 11.51%), demonstrating its capability to simulate monthly sediment transport in the Xiuguluan River under the influence of landslides. However, results from SWAT-Logistic and SWAT-composite threshold show that high sediment transport in the upper and middle reaches cannot be transported to the downstream, indicating the need for further clarification of sediment transport processes in rivers. Future improvements could involve modifying sediment transport equations and sediment transport states of landslide to better represent the sediment transport characteristics of the watershed.

**Keywords:** Landslide, Logistic regression, Sediment simulation, SWAT.

Lu, C.M., Chiang, L.C.\*, & Liao, K.W. (2023). "Integration of the Landslide Logistics Regression in a Hydrologic Model for Sediment Simulation - A Case Study in the Xiuguluan River basin" *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 69 (4), 20-38. [https://doi.org/10.29974/JTAE.202312\\_69\(4\).0002](https://doi.org/10.29974/JTAE.202312_69(4).0002)

## 一、緒論

### 1.1 研究動機

水資源利用與水質控管為全球重大議題之一，在聯合國公布之永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 中，乾淨水源與水資源永續利用為其中主要發展項目之一 (SDG6) (Ait-Kadi, 2016)。台灣氣候與河川條件特殊，河川平均坡降大 (1/500—1/8)，降雨集中於濕季，且時有強降雨發生，造成水位暴漲、河川泥沙濃度上升，使水資源利用不易。台灣山區之地層較多節理發達之沉積岩與變質岩，解壓之地層容易受到自然擾動影響 (如地震、颱風等)，使山區發生土石崩落或土石流，水中懸浮固體會影響水中營養鹽輸送、總碳、重金屬濃度等 (Wijesiri *et al.*, 2019)。若需整體評估水資源利用與水質，崩塌事件為水資源規劃中之重要角色。

土壤流失、河道沖蝕與崩場地為河川主要的土砂來源。通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 常用來估算年土壤流失量 (Wischmeier and Smith, 1958)，配合泥沙遞移率計算進入河道的泥沙比例，可計算流入河川之入砂量。修正通用土壤流失公式 (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE) 為基於 USLE 公式計算單次降雨土壤流失量，該公式藉由地表逕流量、尖峰逕流量、面積等因子取代原有 USLE 之降雨因子，使公式可針對單一降雨事件計算土壤流失量，可計算更小時間尺度的輸砂量 (Wischmeier, 1975)。水文模式常使用 USLE 或 MUSLE 公式作為模式非點源泥沙輸出量，如 WEPP (Watershed Erosion Prediction Project)、BASINS (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、EUROSEM (The European Soil Erosion Model) 等 (Borrelli *et al.*, 2021)。而水理模式也常以 MUSLE 計算之入砂量模擬河道沖蝕及淤積狀況 (Kiesel *et al.*, 2013; Mohammad *et al.*, 2016; Tadesse and Dai, 2019; Loi *et al.*, 2019)。而在集水區整體規劃中，MUSLE 相關之水文模式通常對非點源泥沙輸入量有良好的預測結果，水文模式模擬之輸砂量亦可提供水理模式之邊界條件。

崩塌為重要的土砂來源之一，在輸砂模擬中所扮演的腳色尤為重要。近年來，崩塌相關研究主要研究較集中於崩塌事件預測、崩塌潛勢分析。崩塌因子分析為崩塌預測及潛勢分析的主要手段，崩塌因子主要分為地形因子及氣候因子。地形因子包含坡度、高程、坡向、排水密度、平面曲率及岩性等 (Dou *et al.*, 2014; Zêzere *et al.*, 2017)；氣候因子則以降雨量為主，包含累積降雨量、降雨強度、降雨延時等 (Posner and Georgakakos, 2015; Chen *et al.*, 2017; Abraham *et al.*, 2021)。此外，易崩塌坡面的土壤含水量變化，會直接影響土壤黏滯力，進而影響坡面穩定 (Chow, 1964; Gusman *et al.*, 2018; Dai *et al.*, 2022)。崩塌預測及潛勢分析通常會使用線性迴歸、羅吉斯迴歸、機器學習與類神經網路等分析崩塌因子與事件發生之關係，並使用接收者特徵曲線 (Receiver Operating Characteristic curve, ROC) 來檢視模式的預測表現 (Dou *et al.*, 2014; Hong *et al.*, 2016; Chae *et al.*, 2017; Zêzere *et al.*, 2017; Nsengiyumva *et al.*, 2019)。過去亦有部分研究使用水文模式模擬土壤-水之傳輸過程預測崩塌事件，Posner and Georgakakos (2015) 利用水文模式模擬土壤含水量，配合降雨量預測崩塌事件發生；Ran *et al.* (2018) 使用 Integrated Hydrology Model (InHM) 模擬逕流及入滲量，藉此分析崩塌事件發生門檻值。

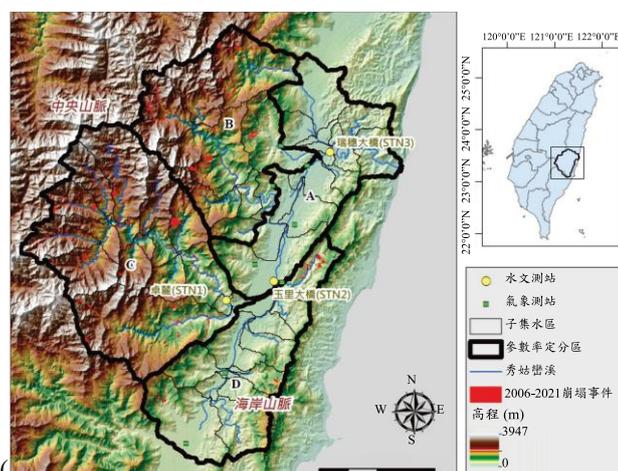
相對崩塌預測及潛勢地圖分析，較少研究分析崩塌事件對輸砂量的影響，近期相關研究指出崩塌為河川輸砂的重要來源，並表示在模擬輸砂量時應考慮崩塌事件帶來之影響 (Chang *et al.*, 2015; Addis *et al.*, 2016; Lu and Chiang, 2019; Chiang *et al.*, 2021; Hou *et al.*, 2021)。Lu and Chiang (2019) 曾使用台灣通用土壤流失公式 (Taiwan Universal Soil Loss Equation, TUSLE) 取代 SWAT 模式中之 MUSLE 模式，並結合以雨量為崩塌門檻之 SWAT-Twn (SWAT-Taiwan) 模式模擬陳有蘭溪崩塌對輸砂的影響，結果顯示 SWAT-Twn 顯著改善 SWAT 之輸砂模擬結果。Hou *et al.* (2021) 結合土石流、崩場地及 SWAT 水文模式之模擬結果進行輸砂量模擬，結果顯示模式可良好的預測流量及輸砂量，顯示崩塌所帶來之土砂會顯著影響輸砂量。

### 1.2 研究目的

水文模式的輸砂量模擬能力仍有改善空間。儘管 SWAT 模式可良好的模擬流量及輸砂量 (Mengistu *et al.*, 2019; Martínez-Salvador and Conesa-Gracia, 2020; Orlińska-Woźniak *et al.*, 2020)，但部分研究指出模式容易低估輸

砂量之峰值，導致模擬表現變差，並指出 SWAT 之土壤流失-輸砂機制仍有修改的空間 (Gassman *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2015; Mittelstet *et al.*, 2017; Lu and Chiang, 2019; Santos *et al.*, 2023)。Mittelstet *et al.* (2017) 修改 SWAT 模式之河道沖淤模組，將河道曲率對沖淤之影響加入模式中，而 Lu and Chiang (2019) 透過耦合 TUSLE 及崩塌模組改善模式輸砂模擬表現。為了進一步改善 SWAT 模式之輸砂模擬，本研究耦合不同崩塌模組於 SWAT 模式中模擬輸砂量，包含使用單一門檻 (雨量) 之崩塌模組 (SWAT-Twn)、使用複合門檻 (雨量及土壤含水比) 之崩塌模組 (SWAT-複合門檻)、及使用羅吉斯迴歸公式建置之崩塌模組 (SWAT-Logistic) 進行模擬。研究目的為：(1) 建置崩塌因子羅吉斯迴歸公式以預測崩塌事件；(2) 基於 SWAT-Twn 架構耦合羅吉斯迴歸公式於模式中 (SWAT-Logistic)；(3) 分析 SWAT-Logistic 之輸砂模擬表現；(4) 比較 SWAT-Logistic、SWAT-Twn、SWAT-複合門檻之模擬表現，並研析各個模式之適用性。

## 二、研究區域



本研究研究區域為位於秀姑巒河流域 (

圖 1)，秀姑巒河流域介於中央山脈與海岸山脈間，流經花東縱谷，於花蓮縣豐濱鄉流入太平洋。秀姑巒溪全長約為 81.15 公里，為全台坡降最陡之河川，平均坡降為 1/34。流域面積約 1,790 平方公里，流域西側為中央山脈，高程較高且坡度大，而流域西側主要為花東縱谷與海岸山脈所組成，海岸山脈相對中央山脈高程較低，坡度較緩，而花東縱谷則為秀姑巒溪之沖積平原，地勢平坦。考量流域東側與西側之地形差異，本研究將秀姑巒河流域分為四個參數檢定區域 (A、B、C、D)，其中 A、D 區為花東縱谷及海岸山脈，地勢相對平緩，B、C 區則涵蓋地勢較高、坡度較陡的中央山脈區域。流域內年平均降雨量約為 2,700 毫米，降雨集中於 5 ~ 11 月。本研究蒐集歷年水利署水文年報，篩選出流域中流量及輸砂量資料較齊全之三個月測站：卓麓 (STN1)、玉里大橋 (STN2) 及瑞穗大橋 (STN3)，以下游瑞穗大橋 1969 ~ 2021 年觀測資料為例，測站年平均流量為 104.18 立方公尺/秒、最大洪峰流量為 10,700 立方公尺/秒、最大含沙量為 33,400 百萬分比，顯示流域內曾發生過高流量及輸砂量之狀況。研究區域內共有 9 個氣象測站，其中有 8 個雨量測站位於花東縱谷及周圍，在檢定區域 C 僅有一個測站記錄其氣象資料，為使子集水區降雨分布差異化，本研究使用徐昇氏多邊形法計算各個子集水區之降雨量，其他氣象資料 (溫度、相對濕度、太陽輻射、風速) 則沿用最靠近子集水區之氣象站資料。

本研究之土地利用、土壤分布及坡度分別參考 2014 年國土利用調查、1972 ~ 1996 年土壤調查報告、2022 年高程數值模型 (DEM) (圖 2、

表 1)。秀姑巒溪主要土地利用為森林，佔流域面積之 77.44%，其次則為農地，佔總面積 10.2%，並主要分佈於河道周圍。根據農委會之 2006 ~ 2021 年事件崩塌目錄，共有 11.21 平方公里曾發生過降雨型崩塌事件，佔流域面積之 0.62%。根據歷年土壤調查報告，本研究繪製流域內土壤分佈地圖，並紀錄其土壤特性，統整共有 159 種土系，最終分類為 7 種土壤類型，其中有三種主要土壤類型：石質土 (34.06%)、崩積土 (22.77%) 及黃壤 (19.59%)，崩積土及石質土主要分佈於東側山區，黃壤則分佈於離河道較近之東側山區，在秀姑巒溪主河道周圍之花東縱谷則分佈沖積土，土壤分佈特性明顯，其中，石質土在土壤調查報告書中約有 89% 面積之土壤被

標記為可能發生崩塌之破碎質地土層，其次則為岩石，共有 46 % 面積被標為易崩塌土層 (

表 2)。而在秀姑巒溪流域中，除河道周圍之平原坡度較緩外，坡度大於 40 % 之區域佔流域面積 70.78 %，地勢陡峭。

### 三、研究方法

#### 3.1 羅吉斯迴歸

羅吉斯迴歸為常用的迴歸分析方法之一，羅吉斯迴歸與線性迴歸之間的差異在於變數尺度的不同，羅吉斯迴歸相對線性迴歸，更偏向於分析事件發生的機率，界定事件發生之機率邊界，而非求解變數。羅吉斯迴歸主要用於二元分類，透過布林值 (0-1 的機率) 來判定事件是否發生，在判定發生門檻之機率時，常使用自然分隔 (Natural break) 作為依據，以認定事件

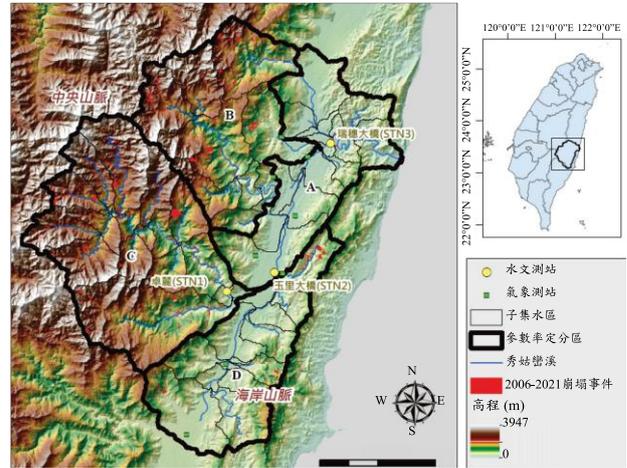


圖 1 研究區域圖

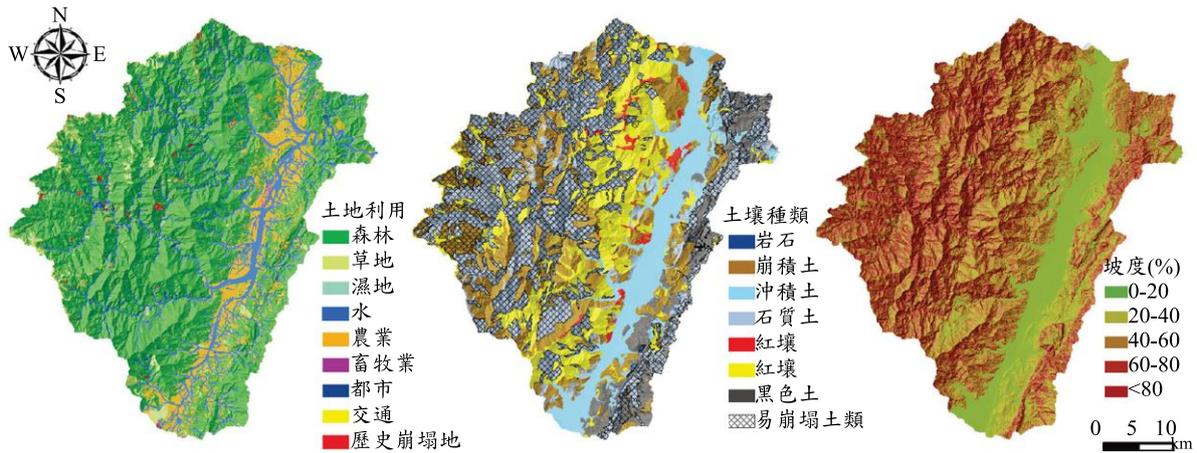


圖 2 秀姑巒溪流域土地利用、土壤類型、坡度分佈圖

表 1 秀姑巒溪流域土地利用、土壤類型、坡度分佈比例

土地利用	面積 (km <sup>2</sup> )	百分比 (%)	土壤種類	面積 (km <sup>2</sup> )	百分比 (%)	坡度分級	面積 (km <sup>2</sup> )	百分比 (%)
森林	1,388.90	77.44	岩石	3.35	0.19	0-20%	294.36	16.48
草地	106.67	5.95	崩積土	408.39	22.77	20-40%	227.60	12.74
濕地	0.04	0.00	沖積土	244.07	13.61	40-60%	364.02	20.38
水	59.61	3.32	石質土	610.75	34.06	60-80%	395.43	22.13
農地	186.51	10.40	紅壤	24.07	1.34	>80%	505.09	28.27
畜牧業	4.33	0.24	黃壤	351.24	19.59			
都市	18.87	1.05	黑色土	151.46	8.45			
交通	17.35	0.97						
歷史崩塌地	11.21	0.62						

表 2 秀姑巒溪流域土壤類型易崩塌面積比例

土壤種類	面積 (km <sup>2</sup> )	易崩塌面積 (km <sup>2</sup> )	易崩塌百分比 (%)
------	-----------------------	--------------------------	------------

岩石	3.35	1.54	46.06
崩積土	408.39	55.78	13.66
沖積土	244.07	0.00	-
石質土	610.75	544.95	89.23
紅壤	24.07	0.00	-
黃壤	351.24	2.46	0.70
黑色土	151.46	5.57	3.68

是否發生 (Ayalew and Yamagishi, 2003)。羅吉斯迴歸透過計算多個參數將目標變數轉換為事件的羅吉斯勝算比 (Logits odds ratio, Z)，來預測 Z 與 i 個變數 (x) 之間的關係如式 (1)。

$$Z_i = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_i x_i \dots\dots\dots(1)$$

式中  $\beta$  為羅吉斯迴歸係數、 $P$  為事件發生機率。

在完成建置羅吉斯迴歸公式後，可透過各個變數來反推出事件發生率  $P_i$  如式 (2)。

$$P_i = 1 - \left(\frac{1}{1 + e^{Z_i}}\right) \dots\dots\dots(2)$$

本研究使用：土地利用 (LUC)、是否為易崩塌土壤 (LSOL)、坡度 (SLP)、單日降雨量 (PCP)、兩日累積降雨量 (PCP2D)、土壤含水比 (FSW)、土壤含水變化量 (SWD)、滲透量 (PERC)、模擬單元面積 (AREA) 共 9 種因子對崩塌事件進行羅吉斯迴歸。LUC 透過歷年崩塌事件目錄層疊，辨識歷史崩塌區域，研究區域之裸露地/僅發生一次之崩塌地則在模式中設定為雜草地，分別在迴歸公式代表值為 1 及 0；與 LUC 相似，LSOL 在迴歸式中將易崩塌及一般土壤之值給定 1 及 0；S 則根據中央地調所公開之 2022 地理數值模型 (DEM) 計算，為模擬單元之平均坡度；雨量相關變數則參考流域內氣象測站；而 FSW、SWD 及 PERC 則為 SWAT 水文模式計算之模擬值。

因不同降雨型態所造成崩塌分布顯著不同，考量降雨集中、分散對崩塌地的觸發條件不同，本研究以流域內所有測站之平均兩日雨量之峰度 (Kurtosis) 分辨觸發崩塌事件之雨量集中度，將降雨事件依照降雨事件中最大降雨量及次日降雨量，分為三種降雨型態：連續降雨 (Type I, kurtosis < 0)、典型降雨 (Type II, 0 < kurtosis < 3) 及單日強降雨 (Type III, kurtosis > 3)，並根據降雨型態不同分別進行羅吉斯迴歸及資料驗證 (錯誤! 找不到參照來源。)

羅吉斯迴歸之模式預測表現參考 Pearce and Ferrier (2000) 提出之標準，分別使用真陽性率 (True Positive Rate, TPR) 及真陰性率 (True Negative Rate, TNR) 做為羅吉斯迴歸分辨結果是否滿意。TPR 及 TNR 大於 70 % 代表該羅吉斯迴歸式為合理預測的模式，其中 TPR 及 TNR 計算公式如式 (3) 及式 (4)。

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

$$TNR = \frac{TN}{TN + FP} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

式中，TP、TN、FP、FN 分別代表真陽性、真陰性、偽陽性、偽陰性之個數或面積。

此外，本研究也參考接收者特徵曲線 (Receiver Operating Characteristic curve, ROC curve) 及曲線下面積 (Area Under the ROC curve, ROC-AUC) 比較羅吉斯迴歸公式與單崩塌門檻、複合崩塌門檻之預測效率，並根據 Swets (1988) 提出之 ROC-AUC 作為模式模擬標準，分辨預測方法效率 (錯誤! 找不到參照來源。)

### 3.2 SWAT 水文模式

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 為物理型半分佈型水文模式 (Physical-based semi-distributed hydrological model)，研發於美國農業局農業研究中心 (USDA ARS)，可對集水區之水平衡 (降水、逕流、滲漏、蒸發散)、土壤沖蝕、流量、輸砂量、營養鹽、農藥等進行模擬，同時也可透過套用不同農業管理情境及氣候變遷情境來評估集水區規劃方向及因應氣候變遷作為。SWAT 模式建置資料須包含：地形數值高程模型 (DEM)、土地利用、土壤、日 (時) 尺度氣象資料 (雨量、溫度、相對溼度、日照量、風速)，並依使用者需求輸入農業管理情境或氣候變遷情境。SWAT 模式之基本模擬單元由土地利用、土壤種類、坡度組成，稱為水文反應單元 (Hydrologic Response Unit, HRU)。模式中之預設參數值以美國當地水文情況為主，在其他區域使用 SWAT 模式進行模擬時，模式中之水文參數需經過參數不確定性分析 (Uncertainty analysis)、率定 (Calibration) 及驗證 (Validation) 確保調整之參數符合研究區域之水文特性。

模式中地表逕流計算使用 SCS (SCS curve Number Method) 曲線法如式 (5)、(6)：

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S_r} \dots\dots\dots(5)$$

表 3 崩塌降雨事件分類

降雨事件	測站平均最大降雨量 (mm)	測站次日平均雨量 (mm)	峰度 Kurtosis	降雨型態
20171011 豪雨	222.72	211.00	-3.3	連續降雨
2021 圓規颱風	283.44	253.56	-3.2	連續降雨
2016 莫蘭蒂颱風	341.06	247.83	-2.3	連續降雨
2018 山竹颱風	152.06	89.61	-0.88	連續降雨
2008 鳳凰颱風	130.37	74.33	-0.63	連續降雨
2013 天兔颱風	315.67	163.39	0.07	典型降雨
2014 麥德姆颱風	280.00	131.00	0.77	典型降雨
2009 芭瑪颱風	196.56	90.00	0.91	典型降雨
2012 天秤颱風	200.72	81.44	1.66	典型降雨
2010 凡娜比颱風	214.00	55.85	3.55	單日強降雨
2016 艾利颱風	314.89	79.06	3.66	單日強降雨
2014 鳳凰颱風	207.00	30.28	4.55	單日強降雨
2019 白鹿颱風	370.11	50.61	4.61	單日強降雨
2016 尼伯特颱風	322.44	35.00	4.77	單日強降雨

表 4 ROC-AUC 分級 (Swets, 1988)

模擬表現	ROC-AUC
高準確率	> 0.9
中準確率	0.7-0.9
低準確率	0.5-0.7
反預測	< 0.5

式中，Q 為地表逕流 (mm-H<sub>2</sub>O)；P 為日降雨深度 (mm-H<sub>2</sub>O)；I<sub>a</sub> 為包含了之初始損失 (mm-H<sub>2</sub>O)；S<sub>r</sub> 為保留參數 (mm-H<sub>2</sub>O)，保留參數會因土壤種類、土地利用、坡度變化而改變，具空間變異性如式 (6)：

$$S_r = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \dots\dots\dots(6)$$

CN 為逕流曲線值，與土地利用及土壤性質有關，CN 值越大代表容易產生地表逕流 (Neitch *et al.*, 2011)。

模式中土壤含水量則透過水平衡方程式計算，如式(7)：

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw} \dots\dots(7)$$

其中，SW<sub>t</sub> 為土壤含水量 (mm)；SW<sub>0</sub> 為初始土壤含水量 (mm)；t 為時間 (days)；R<sub>day</sub> 為 day<sub>i</sub> 的降水 (mm)；Q<sub>surf</sub> 為 day<sub>i</sub> 的地表逕流 (mm)；E<sub>a</sub> 為 day<sub>i</sub> 的蒸發散 (mm)；w<sub>seep</sub> 為 day<sub>i</sub> 的滲漏 (mm)；Q<sub>gw</sub> 為 day<sub>i</sub> 的基流量 (mm)。

土壤沖蝕量則使用 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE) 公式，如式 (8)，其中，為更準確的模擬台灣土壤沖蝕特性，本研究參考台灣土壤沖蝕公式 (TUSLE) (陳樹群等，2009) 之土地利用覆蓋因子 (C)、坡長因子 (L)、坡度因子 (S)、水土保持因子 (P) 計算方式來評估土壤沖蝕量：

$$Sed = 11.8 \times (Q \times q \times A)^{0.56} \times K \times C \times P \times L \times S \times CFRG \dots\dots\dots(8)$$

式中，Sed 為土壤沖蝕量 (tons)；Q 為地表逕流量 (mm-H<sub>2</sub>O/ha)；q 為尖峰逕流量(m<sup>3</sup>/s)；A 為水文反應單元 (HRU) 面積 (ha)；C 為土地利用覆蓋因子；K 為土壤沖蝕因子；P 為水土保持因子；L 為坡長因子；S 為坡度因子；CFRG 為粗糙因子。

Wischmeier and Smith (1978) 研究發現黏土 (clay) 與砂 (sand) 比例相對增加、粉土 (silt) 比例降低時，土壤可沖蝕性降低，在 SWAT 模式中，土壤沖蝕因子使用 Wischmeier *et al.* (1971) 發展對粉土、細砂所占比例低於 70 % 粒徑分佈之土壤提出之通用公式計算，如式 (9)：

$$K = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100} \dots\dots\dots(9)$$

其中，K 為土壤沖蝕因子、M 為土壤粒徑因子、OM 為土壤有機質百分比、c<sub>soilstr</sub> 為土壤結構係數、c<sub>perm</sub> 為滲透性等級。在 SWAT 模式中，使用者亦可直接在資料庫中輸入土壤沖蝕指數。

土地利用覆蓋因子 (C) 則透過 NDVI 計算式，如式 (10)：

$$NDVI \geq 0, C = \left(\frac{1-NDVI}{2}\right)^{1+NDVI}$$

$$NDVI < 0, \begin{cases} \text{Building or non-exposed ground, } C = 0.01 \\ \text{Barren, } C = 1.0 \end{cases}$$

.....(10)

在 TUSLE 中，坡長因子 (L) 則使用 Wischmeier and Smith (1978) 提出之分類法：當坡度小於 3 % 時，指數係數  $m = 0.2$ 、坡度介於 3 ~ 5 % 時， $m = 0.3$ 、坡度 > 5 % 時， $m = 0.5$ 。坡度因子 L 之計算公式 (11)。

$$L = \left(\frac{D}{22.13}\right)^m \text{ .....(11)}$$

式中 D 為坡長 (m)。

坡度因子 (S) 則參考 McCool *et al.* (1987) 對陡坡所進行修正之計算公式，如式 (12)，坡度因子在坡度 9 % 上下之計算公式不同，相較於 Wischmeier and Smith (1978) 提出之坡度因子，McCool *et al.* (1987) 在坡度越高的狀況下坡度因子值越低 (McCool *et al.*, 1987; 陳樹群等, 2009)。

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \theta < 9\% \\ S = \left(\frac{\sin \theta}{0.0896}\right)^{0.6}, \theta \geq 9\% \end{cases} \text{ .....(12)}$$

式中 S 為坡度因子； $\theta$  為坡度 (%)。

粗糙因子 (CFRG) 則由土壤表面岩石重量百分比計算如式 (13)：

$$CFRG = \exp(-0.053 \cdot rock) \text{ .....(13)}$$

式中，*rock* 為表土層岩石重量比例。

SWAT 模式預設之輸砂公式使用 Bagnold 公式，該式以河道中最大水流流速計算最大可容許輸砂量 (maximum sediment capacity)，當集水區中進入河道之土砂濃度大於最大可容許輸砂量，模式會計算河道沉澱量，當進入河道土砂量濃度小於最大可容許輸砂量時，則會計算河道沖刷。Bagnold 公式計算如下：

$$conc_{sed, ch, mx} = c_{sp} \cdot v_{ch, pk}^{spexp} \text{ .....(14)}$$

式中， $conc_{sed, ch, mx}$  為水中最大可容許之含砂量 (ton/m<sup>3</sup> 或 kg/L)； $c_{sp}$  為線性係數 (在模式中定義為 SPCON，可由使用者定義)； $v_{ch, pk}$  為尖峰流速 (m/s)； $spexp$  為指數係數 (在模式中定義為 SPEXP，可由使用者定義)，其初始值為 1.5，範圍通常在 1.0 ~ 2.0 之

間。

SWAT 模式中，輸砂量粒徑參考 Foster *et al.* (1980) 計算，以土壤中砂質、黏質及粉質土壤重量比例推算河道各粒徑之重量百分比，包括：砂質 (0.20 mm)、黏質 (0.002 mm)、粉質 (0.01 mm)、礫石 (2.00 mm)、小粒徑骨材 (0.03 mm)、大粒徑骨材 (0.50 mm)，爾後根據河川日平均流速，使用 Einstein (1965) 及 Perberton and Lara (1971) 發展之沉積公式計算河道日沉積量。

### 3.3 SWAT 崩塌預測模組

SWAT 模式之崩塌模組由 Lu and Chiang (2019) 建置之 SWAT-Twn 提出，崩塌模組透過土地利用判定崩塌模擬單元 (HRU)，並藉由單日雨量門檻來決定崩塌發生時間，當達到崩塌觸發條件時，模式會計算崩塌體積及重量 (錯誤! 找不到參照來源。)，此外，崩塌觸發條件可選擇單一或複合門檻 (雨量、土壤含水量)。而在本研究中，將崩塌觸發條件置換為由羅吉斯迴歸建置之崩塌預測公式，並在觸發條件前增設連續三日降雨之型態分類，以分辨不同降雨型態導致的崩塌事件 (SWAT-

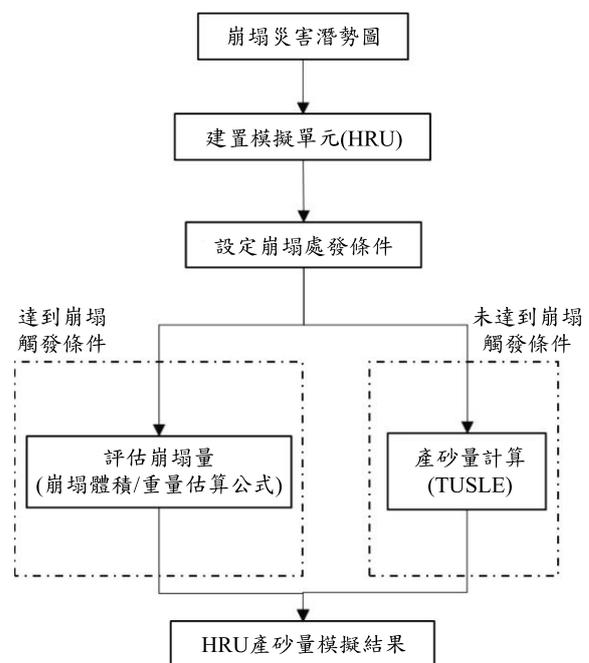


圖 3 SWAT 崩塌機制示意圖

Logistic)。因此，本研究比較 SWAT-Twn 模式搭配單一或複合門檻及使用羅吉斯迴歸預測之 SWAT-Logistic 模式之崩塌事件預測效率及輸砂模擬結果。

崩塌所造成之土砂體積則參考詹勳全等 (2015) 對 1999 年 921 地震後，蒐集全台崩塌地建置之面積-體積公式 (15)，透過崩塌體積估算土砂重量，計算結果將取代原先 SWAT 模式對 HRU 之土壤流失結果，使崩塌造成之土砂量進入河道進行輸砂模擬。

$$V_L = e^{2.326} \cdot A_L^{0.687} \dots\dots\dots(15)$$

式中  $V_L$  為崩塌面積 ( $m^3$ )； $e$  為自然常數； $A_L$  為崩塌面積。

### 3.4 參數率定與模式驗證 (SWAT-CUP)

參數率定過程為針對所選定之參數組設定參數範圍，透過比較模擬結果與觀測資料，調整其參數設定範圍，直到找到一組符合該研究區域條件的參數範圍；而模式驗證則是透過比較與率定期間不同的觀測資料，驗證在使用已率定之參數與參數範圍情況下，判斷模式是否過度擬合 (overfitting) (Refsgaard, 1997)。SWAT 模式內建參數之預設值乃基於美國農業局調查及試驗資料庫，使用 SWAT 模式預設參數在不同區域模擬時會帶有不確定性，因此必須進行模式參數敏感度分析、率定及模式驗證。使用者在完成模式基本建置後，可透過專家判斷或敏感度分析來確定所需率定之參數 (Arnold *et al.*, 2012)，透過參數率定以反映研究區域之特性，進而驗證模式模擬結果。SWAT 模式參數率定可根據該參數所代表之空間尺度 (如：全流域、子集水區、水文反應單元)、土地利用與土壤類型等設定不同參數範圍。驗證旨在確認調整該研究區域之參數範圍是否合理，並藉由驗證結果及模擬表現評級之相關文獻來確認參數調整後仍能合理的模擬流域內水文過程 (Moriassi *et al.*, 2015)。過去已有許多研究在使用 SWAT 模式模擬不同區域之水文特性時，對模式內參數進行敏感度分析、率定與模式驗證 (Gassman *et al.*, 2014; Abbaspour *et al.*, 2015; Chang *et al.*, 2015; Mittelstet *et al.*, 2017; Lu and Chiang, 2019; Santos *et al.*, 2023)。

本研究使用 SWAT-CUP (SWAT Calibration Uncertainty Program) 進行模式流量及輸砂量參數敏感度分析、率定與模式驗證，SWAT-CUP 中共有五種分析方法可供選擇，分別為：序列不確定性擬合第二版 (Sequential Uncertainty Fitting version 2, SUFI2)、概似不確定性估計 (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE)、參數解 (Parameters Solution, ParaSol)、馬可夫鍊蒙地卡羅 (Markov chain Monte Carlo, MCMC)、粒子群最佳化 (Particle Swarm

Optimization, PSO) 等。Abbaspour (2013) 使用 SWAT-CUP 對 5 種方法進行測試，結果指出，SUFI2 可在最少的模擬次數中找到最佳解 (3,000 次)，相較於 GLUE (10,000 次)、ParaSol (7,500 次)、MCMC (45,000 次) 及 PSO (100,000 次) 有明顯優勢，使用 SUFI2 可減少模式不確定性分析時間，因此，本研究使用 SUFI2 進行參數不確定性分析、率定與模式驗證。敏感度分析係透過給定參數之 SWAT 模式建議可調整數值範圍，以上述方法使模式產生多次模擬結果，進而計算各個參數之  $p$ -value 以判斷該參數是否敏感，若參數之  $p$ -value < 0.05 則視為敏感參數，進行後續參數率定。參數調整方式包含：直接取代及相對調整。直接取代為將模式內參數值取代為設定範圍內之隨機值；相對調整為對參數值依比例 (設定範圍內之隨機值) 調整。

模式之模擬表現參考 Moriassi *et al.* (2015) 提出之模擬標準，參考之統計參數包含：決定係數 ( $R^2$ ，式 16)、效率係數 (NSE，式 17) 及百分比偏差 (PBIAS，式 18)。Moriassi *et al.* (2015) 蒐集水文模擬之相關文獻，綜整 2000–2015 年間水文模是模擬表現，對流量與輸砂量提出模擬表現標準表，本研究參考其作為模擬表現標準 (表 5)。

決定係數 (Coefficient of determination,  $R^2$ ) 表實測值與模擬值之線性相關性， $R^2$  值越接近 1 代表兩者相關性越高。 $R^2$  計算公式如式 (16)：

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y^{mean})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \dots\dots\dots(16)$$

式中， $Y_i^{sim}$  為第  $i$  個模擬值、 $Y^{mean}$  為實測值之平均、 $Y_i^{obs}$  為第  $i$  個實測值、 $n$  為實測值總數。

效率係數 (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE) 為標準化之統計量，在 Moriassi *et al.* (2015) 中，根據模擬項目  $NSE > 0.45 - 0.5$  表模式可被接受，而  $< 0$  代表模擬結果精確度甚差。NSE 計算公式如式 (17)：

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \dots\dots\dots(17)$$

式中， $Y_i^{obs}$  為第  $i$  個實測值、 $Y_i^{sim}$  為第  $i$  個模擬值、 $Y^{mean}$  為實測值之平均、 $n$  為實測值總數。

百分比偏差 (Percent bias, PBIAS) 可用以評估模式平均模擬結果為高估或低估 (Gupta *et al.*, 1999)。PBIAS 之計算方式可能會將高估資料與低估資料之差

值相消，導致 PBIAS 值接近於 0 但模擬結果不佳之情況，因此還需配合其他統計參數來評估模式。其計算公式如式 (18)：

$$PBIAS(\%) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \dots\dots\dots(18)$$

式中， $Y_i^{obs}$  為第 i 個實測值、 $Y_i^{sim}$  為第 i 個模擬值、n 為實測值總數。

### 3.5 月輸砂量推估

本研究蒐集經濟部水利署水文年報觀測日輸砂資料推估月輸砂量，受限於輸砂採樣頻率較低（每 1~2 月 1 次），觀測日輸砂量為瞬時流量及瞬時含砂量乘積所推估，然而瞬時流量與水文年報中日平均流量不盡相同，因此，本研究將水文年報紀錄之瞬時流量及日輸砂量取對數進行線性迴歸，建立日輸砂量與流量關係式 (Lee *et al.*, 2022)，再藉由水文年報紀錄之日平均流量，透過關係式計算每日輸砂量，並計算月輸砂量。迴歸結果顯示，瞬時流量與輸砂量有明顯的正相關（決定係數  $R^2 = 0.7035 - 0.7823$ ）(如圖 4)。

表 5 模式模擬表現 (Moriasi *et al.*, 2015)

模擬表現	月流量			月輸砂量		
	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS(%)	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS (%)
優異	R <sup>2</sup> >0.85	NSE>0.80	PBIAS ≤10	R <sup>2</sup> >0.80	NSE>0.80	PBIAS ≤1
良好	0.70≤R <sup>2</sup> ≤0.85	0.70≤NSE≤0.80	10< PBIAS <15	0.65≤R <sup>2</sup> ≤0.80	0.70≤NSE≤0.80	1< PBIAS <10
滿意	0.50<R <sup>2</sup> <0.70	0.50<NSE<0.70	15≤ PBIAS ≤45	0.40<R <sup>2</sup> <0.65	0.45<NSE<0.70	10≤ PBIAS ≤20
不滿意	R <sup>2</sup> ≤0.5	NSE≤0.5	PBIAS ≥45	R <sup>2</sup> ≤0.4	NSE≤0.45	PBIAS ≥20

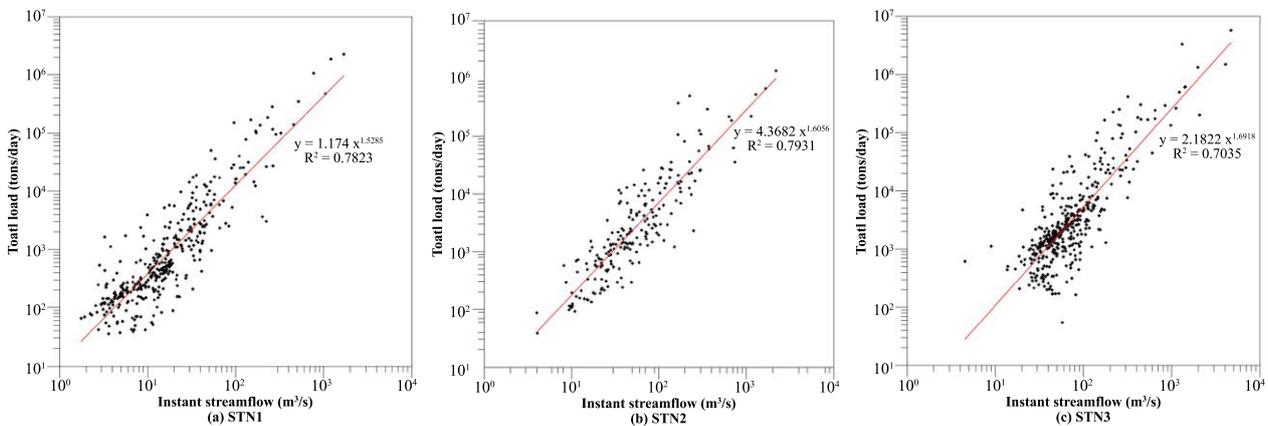


圖 4 日瞬時流量-日輸砂量之相關性分析

## 四、結果與討論

### 4.1 單一與複合崩塌門檻之崩塌預測效率

雨量門檻、土壤含水比門檻及複合門檻之 ROC-AUC 分析結果顯示，當缺乏評估其他因子影響之情況下，模式對崩塌地之預測能力較差 (AUC < 0.7) (圖 5)。在三種情況中，單日雨量崩塌門檻 (PCP) 設定參考

Lu and Chiang (2019) 針對山區小型集水區 (陳有蘭溪流) 之研究成果 (SWAT-Twn)，其對門檻值設定參考流域之崩塌預警雨量 (400 mm)，本研究設定多組雨量資料對門檻值進行測試，ROC 結果顯示，其對崩塌地之預測準確率較低 (AUC = 0.547)。若以土壤含水量做為單一門檻，或同時考慮這兩個參數做為複合門檻，則崩塌預測效率略微提升 (AUC = 0.584 - 0.586)。然而，使用門檻值預測方法缺乏考慮崩塌地之土地利用、土壤種類、坡度、含水量變化、滲透量、模擬單元面積等因子，其模擬效率不如預期。

## 4.2 羅吉斯迴歸結果

本研究將事件崩塌根據對應雨量分佈之峰度分為三種類型：連續降雨 (Type I, kurtosis < 0)、典型降雨 (Type II,  $0 < \text{kurtosis} < 3$ ) 及單日強降雨 (Type III, kurtosis > 3)，分別對各種雨型進行羅吉斯迴歸。各項迴歸因子對預測之影響可由係數之絕對值判斷，三類降雨類型之羅吉斯迴歸係數有顯著差別，在連續降雨為主的 Type I 中，PCP2D 顯著高於其他兩種降雨類型，而 Type III 則顯示崩塌預測中，FSW 扮演重要腳色。根據驗證結果 (圖 6 羅吉斯迴歸公式 ROC

羅吉斯迴歸公式對崩塌區域的 ROC-AUC 預測效率結果顯示 (圖 6)，三種羅吉斯迴歸公式對崩塌預測皆有不錯的預測效率，根據錯誤! 找不到參照來源。之建議分級，三個公式之預測表現皆為中準確率 (AUC > 0.7)，顯示羅吉斯迴歸公式可應用於崩塌預測中，並有不錯的預測準確率。

)，除了 Type II 之 TNR (67.45 %) 未達到檢定標準外 (TPR 及 TNR > 70 % (Pearce and Ferrier, 2000))，Type I 及 Type III 皆達成檢定標準，Type II 在 TNR 的低估會導致模式高估崩塌面積，造成輸砂量過高。

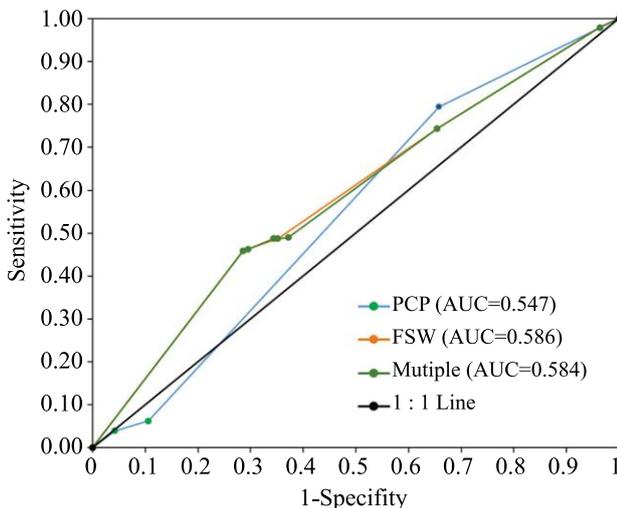


圖 5 雨量、土壤含水比及複合門檻 ROC

表 6 羅吉斯迴歸驗證結果

Factors	Coefficient		
	Type I	Type II	Type III
Constants	0.67289	0.55799	-0.00726
LUC	0.95318	0.96003	-0.82993
LSOL	0.87799	0.87220	0.50776

SLP	0.00832	0.00769	0.00520
PCP	0.00096	0.00207	0.00102
PCP2D	-0.01257	-0.00238	-0.00620
FSW	1.40766	0.91254	-8.30965
SWD	0.09796	0.09272	-0.00455
PERC	0.00779	-0.14843	0.09761
AREA	0.00998	-0.14843	0.08053
TPR (%)	71.06	70.54	70.56
TNR (%)	73.44	67.45	70.64

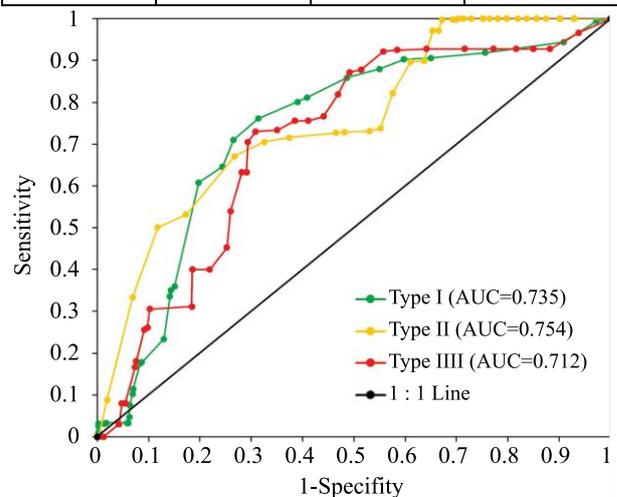


圖 6 羅吉斯迴歸公式 ROC

羅吉斯迴歸公式對崩塌區域的 ROC-AUC 預測效率結果顯示 (圖 6)，三種羅吉斯迴歸公式對崩塌預測皆有不錯的預測效率，根據錯誤! 找不到參照來源。之建議分級，三個公式之預測表現皆為中準確率 (AUC > 0.7)，顯示羅吉斯迴歸公式可應用於崩塌預測中，並有不錯的預測準確率。

## 4.3 水文模式流量參數率定與模式驗證

本研究使用 SWAT-CUP 中 SUFI2 方法對 SWAT 模式中 37 個流量參數，進行敏感度分析，最終取  $p\text{-value} < 0.05$  之 10 個參數進行率定，分別為：SCS 逕流係數 (CN2)、土壤水再蒸發散/滲漏門檻 (REVAPMN)、土壤可利用水 (SOL\_AWC)、樹冠截流 (CANMX)、地下水再蒸發係數 (GW\_REVAP)、地下水補注流量門檻水位 (GWQMN)、地下水延遲時間 (GW\_DELAY)、主河道曼寧係數 (CH\_N2)、蒸發補償係數 (ESCO)、基流衰退係數 (ALPHA\_BF) (流量參數率定與模式驗證結果如式常數係數 (SPCON) 及指數係數 (SPEXP)、支流峰值流量修正係數 (ADJ\_PKR)、主流峰值流量修正係數 (PRF\_BSN) 在模式中僅可對

整個集水區進行調整，河道植被係數 (CH\_COV2) 及河道侵蝕係數 (CH\_ERODMO) 則可進行分區率定。模式在 SPCON、SPEXP、ADJ\_PKR 及 PRF\_BSN 率定結果調整幅度較小，調整範圍約在 20% 左右，而分區率定結果中，在 CH\_COV2 之率定結果可發現，B、C 兩區之值較高 (7.22—8.64)，顯示在山區側之河道有較茂密的植被，及表 8 所示，結果顯示，月平均流量參數之率定與模式驗證結果為滿意的 ( $R^2 > 0.5$ 、 $NSE > 0.5$ 、 $|PBIAS| < 45\%$ )，顯示率定之參數可代表秀姑巒溪流域之水文特性。但根據 PBIAS 之統計結果，流量模擬低估 (表 8)，三個測站均低估雨季時之高流量狀況，導致模擬結果整體低估，而在乾季時則有較好的模擬結果。

#### 4.4 水文模式輸砂參數率定與模式驗證

本研究以對崩塌區域有較好預測效率之 SWAT 配合崩塌羅吉斯迴歸預測 (SWAT-Logistic) 率定與驗證秀姑巒溪流域之月輸砂量。在經過敏感度分析後，模式共有 6 個參數敏感 (表 9)，其中 Bagnold 輸砂公)。其中，CN2、CANMX 分別針對不同土地利用進行調整；土壤及地下水及蒸發散相關參數如 REVAPMN、SOL\_AWC、GW\_REVAP、GW\_DELAY、ESCO、ALPHA\_BF 則根據

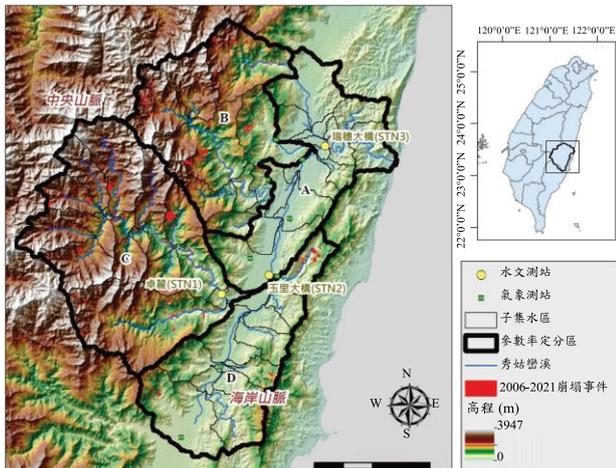


圖 1 之流域分區進行個別率定，其中 REVAPMN 僅在 A、B 兩區敏感、GW\_REVAP 在 A、B 及 C 區敏感、GWQMN 在 B、C、D 敏感；CH\_N2 則參考經濟部水利署秀姑巒溪流況調查、治理計畫報告設定曼寧係數範圍 (經濟部水利署 2006、2015)。CN2 在森林與草地之最佳值明顯較農地小，顯示森林及草地較不易發生逕流，相反，農地則比模式預設值還容易發生地表逕流。分區率定結果則顯示，佔據較多山區之 B、C 率定範圍顯示 B 區可蒸發散深度深

表 7 月平均流量參數率定結果

參數名稱	單位	調整方式	率定區域	原始值	最佳值	最小值	最大值
CN2	-	相對比例	森林、草地	36-84	36-53	36	54.6
			農地	67-87	80-98	73.7	98
REVAPMN	mm	取代	A	750	701	600	1000
			B	750	451	100	600
SOL_AWC	mm/mm	相對比例	A	0.020-0.500	0.018-0.459	0.014	0.55
			B	0.020-0.500	0.011-0.283	0.008	0.35
			C	0.080-0.500	0.063-0.394	0.048	0.4
			D	0.080-0.500	0.070-0.441	0.056	0.45
CANMX	mm	取代	森林	0	80.81	20	90
GW_REVAP	-	取代	A	0.02	0.04	0.02	0.04
			B		0.02	0.02	0.05
			C		0.06	0.03	0.07
GWQMN	mm	取代	B	1000	212.71	130	260
			C		12.28	7	70
			D		74.19	50	100
GW_DELAY	Days	取代	A	31	7.79	2	10
			B		5.11	1	10
			C		1.54	1	5
			D		0.53	0.1	1
CH_N2	-	取代	全流域	0.014	0.040	0.040	0.060
ESCO	-	取代	A	0.95	0.78	0.75	0.90
			B		0.12	0.10	0.30
			C		0.33	0.20	0.40
			D		0.72	0.50	0.80
ALPHA_BF	1/days	相對比例	A	0.048	0.055	0.055	0.062
			B		0.060	0.060	0.067
			C		0.065	0.065	0.079
			D		0.053	0.053	0.062

(REVAPMN)，但因坡度較高，土壤可利用水較小 (SOL\_AWC)，且再蒸發補償係數中 (ESCO) 顯示 B、

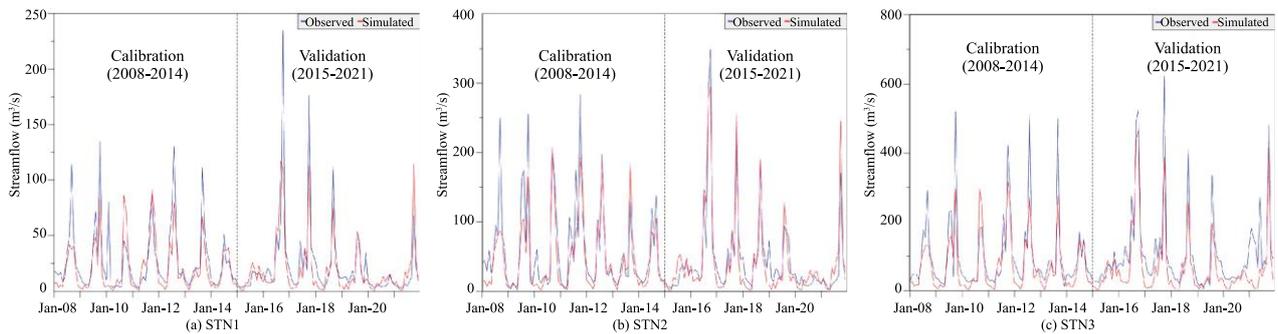


圖 7 流量率定與驗證模擬結果

表 8 月平均流量率定與驗證統計參數

統計參數	率定期 (2008-2014)			驗證期 (2015-2021)		
	STN1	STN2	STN3	STN1	STN2	STN3
R <sup>2</sup>	0.624	0.767	0.776	0.692	0.882	0.848
NSE	0.578	0.723	0.699	0.679	0.869	0.725
PBIAS	22.78	20.96	25.12	14.19	3.20	37.22
模擬平均值 (m <sup>3</sup> /s)	20.81	46.30	73.19	18.78	41.85	67.35
模擬標準差 (m <sup>3</sup> /s)	22.10	50.30	77.57	25.61	61.27	94.54
實測平均值 (m <sup>3</sup> /s)	26.95	58.57	97.74	22.07	43.59	107.84
實測標準差 (m <sup>3</sup> /s)	28.65	62.35	106.36	34.38	58.34	117.88

C 兩區明顯較 A、D 兩區低，顯示該區蒸發散較小 GW\_DELAY 則顯示較靠近下游之 A、B 兩區域延遲時間較長，C、D 兩區則較短，且由 GWQMN 率定結果也可看出 A、B 兩區域之地下水較不易補注進入河川 (A 區參數率定結果與預設值相近)，A、D 兩區較平坦之區域地下水補注門檻則較 B、C 區低，地下水比起 A、D 兩區更容易流入河川，而基流衰退係數在各個區域則未有明顯的區別，在 0.053-0.065 之間。

流量參數率定與模式驗證結果如式常數係數 (SPCON) 及指數係數 (SPEXP)、支流峰值流量修正係數 (ADJ\_PKR)、主流峰值流量修正係數 (PRF\_BSN) 在模式中僅可對整個集水區進行調整，河道植被係數 (CH\_COV2) 及河道侵蝕係數 (CH\_ERODMO) 則可進行分區率定。模式在 SPCON、SPEXP、ADJ\_PKR 及 PRF\_BSN 率定結果調整幅度較小，調整範圍約在 20% 左右，而分區率定結果中，在 CH\_COV2 之率定結果可發現，B、C 兩區之值較高 (7.22–8.64)，顯示在山區側之河道有較茂密的植被，及表 8 所示，結果顯示，月平均流量參數之率定與模式驗證結果為滿意的 (R<sup>2</sup> > 0.5、NSE > 0.5、|PBIAS|

< 45%)，顯示率定之參數可代表秀姑巒溪流域之水文特性。但根據 PBIAS 之統計結果，流量模擬低估 (表 8)，三個測站均低估雨季時之高流量狀況，導致模擬結果整體低估，而在乾季時則有較好的模擬結果。

#### 4.4 水文模式輸砂參數率定與模式驗證

本研究以對崩塌區域有較好預測效率之 SWAT 配合崩塌羅吉斯迴歸預測 (SWAT-Logistic) 率定與驗證秀姑巒溪流域之月輸砂量。在經過敏感度分析後，模式共有 6 個參數敏感 (表 9)，其中 Bagnold 輸砂公式常數係數 (SPCON) 及指數係數 (SPEXP)、支流峰值流量修正係數 (ADJ\_PKR)、主流峰值流量修正係數 (PRF\_BSN) 在模式中僅可對整個集水區進行調整，河道植被係數 (CH\_COV2) 及河道侵蝕係數 (CH\_ERODMO) 則可進行分區率定。模式在 SPCON、SPEXP、ADJ\_PKR 及 PRF\_BSN 率定結果調整幅度較小，調整範圍約在 20% 左右，而分區率定結果中，在 CH\_COV2 之率定結果可發現，B、C 兩區之值較高 (7.22–8.64)，顯示在山區側之河道有較茂密的植被，相對而言，較多平原的 A、D 兩區則明顯較低 (3.89–5.28)，而 CH\_ERODMO 之率定結果則顯示除了 C 區之侵蝕係數較低外 (0.22)，顯示該區之河床較難被侵蝕，而其他三區之侵蝕係數皆差異較小 (0.59–0.63)。

表 9 月輸砂參數率定結果

參數名稱	單位	調整方式	率定區域	原始值	最佳值	最小值	最大值
SPCON	-	相對比例	全流域	0.000100	0.000122	0.000115	0.000125
SPEXP	-	取代	全流域	1	1.21	1	1.5
ADJ_PKR	-	取代	全流域	1	0.83	0.45	1.33
PRF_BSN	-	取代	全流域	1	0.98	0.61	1.03

CH_COV2	-	取代	A	0	5.28	4	8
			B		8.60	5	9
			C		7.22	7	13
			D		3.89	1	5

CH_ERODMO	-	取代	A	0	0.63	0.45	0.67
			B		0.61	0.6	0.95
			C		0.22	0.1	0.4
			D		0.59	0.41	0.67

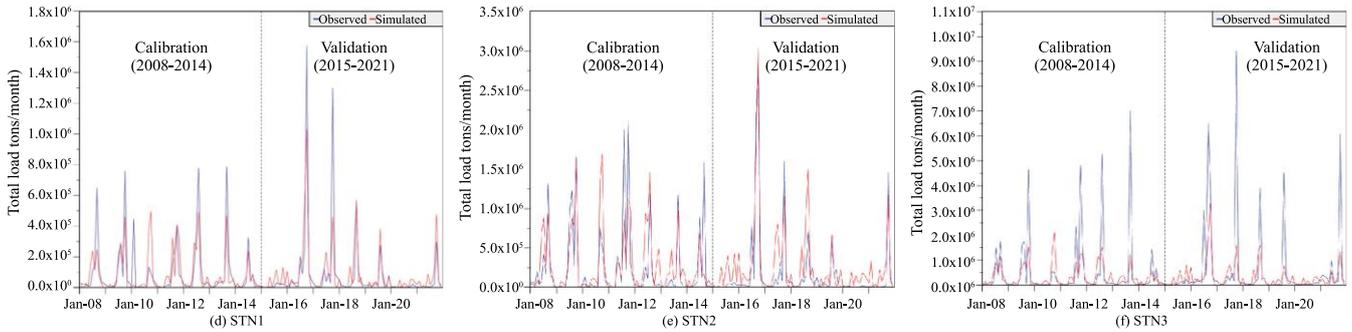


圖 8 月輸砂量率定與驗證模擬結果

表 10 月輸砂量率定與驗證統計參數

統計參數	率定期 (2008-2014)			驗證期 (2015-2021)		
	STN1	STN2	STN3	STN1	STN2	STN3
R <sup>2</sup>	0.557	0.505	0.470	0.720	0.779	0.528
NSE	0.553	0.473	0.351	0.695	0.725	0.339
PBIAS (%)	11.51	-16.12	31.65	-6.82	-57.05	43.85
模擬平均值 (公噸/月)	84,350	287,920	339,346	80,333	247,412	318,239
模擬標準差 (公噸/月)	130,330	404,596	445,108	157,766	452,123	503,244
實測平均值 (公噸/月)	95,327	247,960	496,477	75,204	157,537	566,731
實測標準差 (公噸/月)	172,620	466,716	1,213,979	228,029	450,184	1,563,683

輸砂參數率定與模式驗證結果如圖 8 及表 10 所示，在率定期 (2008–2014) 間，模式參考 Moriasi *et al.* (2015) 之率定驗證標準 (表 5)，在 STN1 及 STN2 的模擬為滿意的 ( $R^2 > 0.4$ 、 $NSE > 0.45$ 、 $|PBIAS| < 20\%$ )，但在最下游之 STN3 模擬表現則較差，其中僅有 STN2 高估月輸砂量，月輸砂量在 STN2 中 2010 雨季之月輸砂量明顯高估，導致期 PBIAS  $< 0$ 。而在驗證期 (2015~2021)，STN1、STN2 在  $R^2$  及 NSE 有接近良好的模擬表現 ( $R^2 > 0.65$ 、 $NSE > 0.7$ )，僅有 STN3 之 NSE 略低，但接近良好表現。整體而言，在所有測站中僅有 STN1 模擬結果為滿意的，STN2 仍高估雨季之月輸砂量 (PBIAS = -57.05%)，而 STN3 與率定期相似，模擬表現不滿意，低估模式輸砂量。由圖 8 可發現儘管中上游之 STN1 及 STN2 可有效的預測模式之高輸砂量，崩塌對下游 (STN3) 輸砂量所帶來的影響無法在模式原有的輸砂公式中呈現。

#### 4.5 崩塌模組差異

本研究套用率定完成之流量及輸砂參數，使用 SWAT、SWAT-Twn (Lu and Chiang, 2019) 及 SWAT-複合因子模式評估使用羅吉斯迴歸評估崩塌對比過去文獻及應用複合因子之崩塌模組，分析其輸砂模擬表現 (圖 9、錯誤! 找不到參照來源。)。其中，SWAT-Twn 採用之門檻雨量參考 Lu and Chiang (2019) 使用秀姑巒溪流域之崩塌警戒雨量 (日降雨量 400 mm) 作為門檻值，而 SWAT-複合因子之雨量及土壤含水比因子則透過日雨量為 10~650 mm (間距為 10 mm)、土壤含水比 0~1.0 (間距為 0.001) 的多種組合測試，並針對土壤面積佔比最大三種土壤 (石質土、崩積土及黃壤) 之 ROC-AUC 分析成果，篩選真陽性率與真陰性率總和最高之值作為複合門檻之門檻值。與歷年崩塌事件區域相比，崩塌預測準確率結果顯示，在雨量門檻為 150 mm 的條件下，各種土壤之土壤含水比門檻差異不顯著 (介於 0.030~0.037)，其中以崩積土有較高的準確率 (表 11)。

模擬結果顯示 (圖 9、錯誤! 找不到參照來源。)，SWAT 嚴重低估流域輸砂量，SWAT-Twn 模擬結果則

接近於 SWAT，顯示在秀姑巒溪使用單門檻之崩塌模組對模式輸砂模擬結果成效有限，且相對於複合門檻率定之雨量值 (150 mm)，SWAT-Twn 所設定之高門檻值 (400 mm) 導致崩塌機制鮮少被觸發。SWAT-複合門檻模式之月輸砂量模擬的 NSE 有較明顯改善，雖整體模擬結果仍低估輸砂量，但對比 SWAT 及 SWAT-Twn 有較好的輸砂模擬結果。SWAT-Logistic 模式可更準確的模擬月輸砂量之趨勢 ( $R^2 = 0.501 - 0.653$ )，由實測-模擬之 X-Y 分布圖可發現 SWAT-Logistic 之模擬結果在三個測站中皆更接近實測資料，且高月輸砂量模擬更準確。然而在 STN3，雖然 SWAT-Logistic 明顯提高輸砂量模擬結果，

	石質土	崩積土	黃壤
雨量 (mm)	150	150	150
土壤含水比	0.030	0.037	0.033
真陽性率 (%)	100.00	100.00	100.00
真陰性率 (%)	0.00	0.04	0.00
準確率 (%)	59.19	72.22	52.98

模式仍會低估超過百萬之高月輸砂量。整體而言，SWAT-Logistic 在中、低輸砂量時容易高估輸砂量，但峰值模擬最準確，且模擬表現在四種模式中最好。

根據統計參數結果，SWAT-Logistic 模擬結果最好，在 STN1 的模擬成果為滿意到良好 ( $R^2 = 0.653$ 、 $NSE = 0.643$ 、 $PBIAS = 3.43\%$ )，在中游 STN2 及下游 STN3 則有相反的模擬表現，在 STN2 模式  $R^2$  及 NSE 模擬表現為滿意的 ( $R^2 = 0.636$ 、 $NSE = 0.594$ )，但高估

表 11 SWAT-複合門檻值

門檻值	土壤種類
-----	------

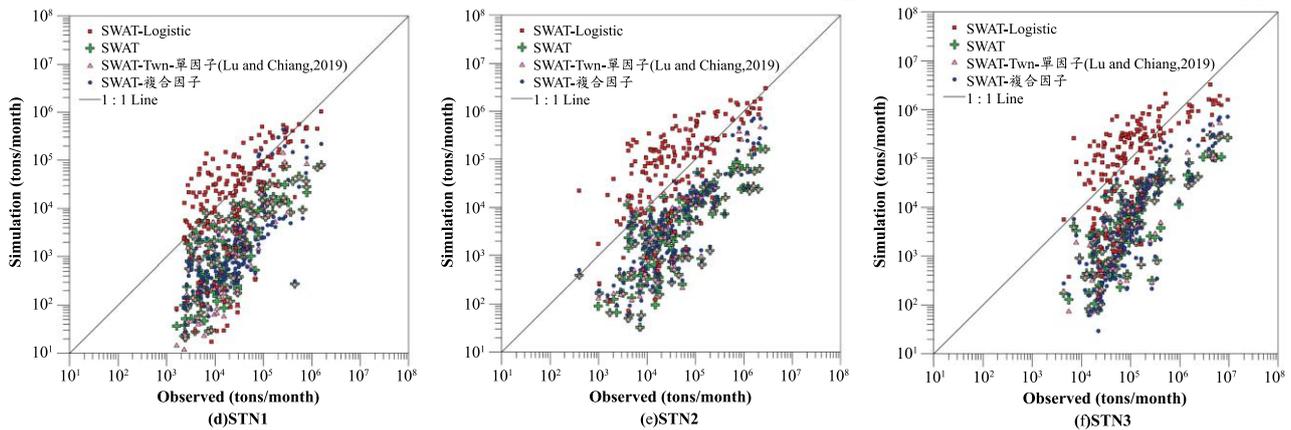


圖 9 崩塌模組 2008 - 2021 月輸砂量模擬比較

表 12 崩塌模組模擬結果 (2008 ~ 2021)

測站	統計參數	SWAT (無崩塌模組)	SWAT-Twn(單雨量門檻)	SWAT-複合門檻	SWAT-Logistic
STN1	$R^2$	0.567	0.427	0.366	0.653
	NSE	-0.054	-0.035	0.197	0.643
	PBIAS (%)	91.67	90.54	75.43	3.43
	模擬平均值 (公噸/月)	7,103	8,064	20,954	82,341
	模擬標準差 (公噸/月)	13,759	18,832	70,495	144,713
	實測平均值 (公噸/月)	85,265			
	實測標準差 (公噸/月)	202,481			
STN2	$R^2$	0.673	0.265	0.612	0.636
	NSE	-0.086	-0.009	0.196	0.594
	PBIAS (%)	93.43	87.89	80.10	-32.02
	模擬平均值 (公噸/月)	13,326	24,563	0.612	267,666
	模擬標準差 (公噸/月)	27,251	81,365	114,916	429,496
	實測平均值 (公噸/月)	202,748			
	實測標準差 (公噸/月)	460,748			
STN3	$R^2$	0.761	0.705	0.817	0.501

	NSE	-0.074	-0.042	0.015	0.344
	PBIAS (%)	95.84	94.57	92.21	38.15
	模擬平均值 (公噸/月)	22,102	28,851	41,422	328,792
	模擬標準差 (公噸/月)	48,177	75,299	112,270	475,183
	實測平均值 (公噸/月)	531,604			
	實測標準差 (公噸/月)	1,400,235			

輸砂量 (PBIAS = -32.02 %)；STN3 則低估輸砂量，模擬結果僅有  $R^2$  為滿意的 ( $R^2 = 0.501$ )，NSE 及 PBIAS 模擬表現則為不滿意的 (NSE = 0.344、PBIAS = 38.15%)。整體而言，SWAT-Logistic 可更準確模擬模式的輸砂量，更接近於實測資料 (錯誤! 找不到參照來源。)

相對而言，SWAT 及 SWAT-Twn 模式之模擬結果不佳 (NSE < 0) 且嚴重低估月輸砂量 (PBIAS = 87.89 – 95.84 %)，SWAT-複合門檻因有較好的峰值模擬結果，可減少模式低估，但該模式無法準確的模擬上游 STN1 之月輸砂量趨勢 ( $R^2 = 0.366$ )，反之，SWAT-複合門檻可良好的模擬中、下游之 STN2 及 STN3 輸砂趨勢 ( $R^2 = 0.612 - 0.817$ )，且 NSE 之模擬表現也相較 SWAT 及 SWAT-Twn 佳 (NSE = 0.015 – 0.197)，然而，即使 SWAT-複合門檻可在 SWAT-Twn 原有崩塌模組之基礎上更準確的模擬月輸砂量，模式仍整體低估月輸砂量 (PBIAS = 75.43 – 92.21 %)。

由 SWAT-Logistic 及 SWAT-複合門檻之模擬結果可發現，在模擬崩塌地時，下游受到的影響明顯較小，中上游因崩塌事件帶來的大量輸砂量並未明顯反映在下游，顯示 SWAT 模式中之輸砂過程無法準確的模擬發生大輸砂量事件時的傳輸過程。

## 五、結論與建議

本研究應用羅吉斯迴歸崩塌公式，耦合 SWAT 水文模式對秀姑巒溪崩塌事件之輸砂量進行模擬。其中透過羅吉斯迴歸進行崩塌因子評估及迴歸分析，並根據其日降雨之峰度 (kurtosis) 將崩塌事件分為三類，分別得出三種降雨類型的崩塌羅吉斯迴歸公式。結果顯示，三種降雨類型之迴歸係數有明顯差異，顯示崩塌事件會因為降雨類型不同導致主要觸發因子相異。在三種降雨類型中，僅有典型降雨 (Type II) TNR 未達到檢定標準 (67.45 %)，Type I 及 Type III 接達到羅吉斯迴歸之檢定標準 (TNR > 70 %、TPR > 70 %)，顯示該羅吉斯迴歸公式可良好的預測崩塌事件的發

生。值得注意的是，在單日強降雨中 (Type III)，土壤含水比因子 (FSW) 係數相較其他兩型高 (-8.30695)，表示相較於其他類型降雨，在單日強降雨事件中 FSW 為觸發崩塌的重要因子。羅吉斯迴歸預測相較於傳統預測門檻 (單門檻、複合門檻) 在 ROC-AUC 測試中有更好的表現，傳統預測門檻之 ROC-AUC 皆接近 0.5，預測效率較差，而羅吉斯迴歸中，所有兩型之 ROC-AUC 有中等準確的模擬表現 ( $0.7 < AUC < 0.9$ )，顯示羅吉斯迴歸考量之因子較全面，可分辨兩型、土地利用、土壤狀態、水文過程等相關因子，能更精確的預測崩塌事件。

將崩塌預測機制套用於水文模式後，在無崩塌模組與單雨量門檻之 SWAT、SWAT-Twn 模式中，模式模擬表現較差 (NSE < 0)，且嚴重低估流域月輸砂量 (PBIAS = 87.89 – 95.84 %)，顯示崩塌事件為集水區重要的土砂來源，在進行水文模擬時應考慮崩塌所帶來之影響。SWAT-複合門檻相對於 SWAT 及 SWAT-Twn 有明顯改善輸砂量低估的情形 (PBIAS = 75.43 – 92.21 %)，雖然在應用複合門檻後模式之月輸砂量仍整體低估，但模式 NSE 表現較佳 (NSE = 0.015 – 0.197)，顯示模式之模擬結果更接近實測值。而 SWAT-Logistic 模擬表現較好，SWAT-Logistic 在上游之 STN1 有最好的模擬表現 ( $R^2 = 0.653$ 、NSE = 0.643、PBIAS = 3.43 %)，可良好的預測上游的月輸砂量，模式在中游則高估月輸砂量 (PBIAS = -32.02 %)，但此狀況並未在模式下游之 STN3 中發現。整體而言，透過評估崩塌事件發生，SWAT-Logistic 可更準確的模擬秀姑巒溪月輸砂量。

相較於其他模式，SWAT-Logistic 透過參考較多崩塌因子及區分降雨類型有更好的崩塌預測結果，透過羅吉斯迴歸建置之崩塌預測模組可對應不同氣候、土地利用狀況下之崩塌及輸砂模擬，未來可使用 SWAT-Logistic 為工具整體考慮含崩塌事件在內的氣候變遷、土地利用變遷對流域輸砂之影響。然而，羅吉斯迴歸參考之崩塌事件樣本僅包含秀姑巒溪流域，並未考慮秀姑巒溪以外之其他流域特性，因此 SWAT-Logistic 僅建議應用於秀姑巒溪流域之

模擬與評估，其他流域則需重新挑選崩塌事件，進行崩塌因子羅吉斯迴歸，以確定各項崩塌因子係數。此外，SWAT-Logistic 及 SWAT-複合門檻之月輸砂量模擬結果指出模式在輸砂過程無法將上游之輸砂量傳輸至下游，本研究使用模式預設之 Bagnold 作為輸砂模擬公式，建議未來可測試其他 SWAT 模式內建輸砂公式對崩塌之影響，或建置適合台灣河川輸砂特性之輸砂公式於模式中，將可更準確的模擬崩塌事件對河川輸砂之影響。

### 參考資料

1. Abbaspour, K. C., "Swat-cup 2012," SWAT Calibration and Uncertainty Program-A User Manual, 2013.
2. Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., Kløve, B., "A Continental-scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and Uncertainty of a High-resolution Large-scale SWAT Model," *Journal of Hydrology*, 524, 733-752, 2015.
3. Abraham, M. T., Satyam, N., Rosi, A., Pradhan, B., and Segoni, S., "Usage of Antecedent Soil Moisture for Improving the Performance of Rainfall Thresholds for Landslide Early Warning," *Catena*, 200, 105147, 2021.
4. Addis, H. K., Strohmeier, S., Ziadat, F., Melaku, N. D., and Klik, A., "Modeling Streamflow and Sediment Using SWAT in Ethiopian Highlands," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9, 5, 51-66, 2016.
5. Ait-Kadi, M., "Water for Development and Development for Water: Realizing the Sustainable Development Goals (SDGs) Vision," *Aquatic Procedia*, 6, 106-110, 2016.
6. Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K.C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., Jha, M. K., "SWAT: Model Use, Calibration, and Validation," *Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55, 4, 1491-1508, 2012.
7. Ayalew, L. and Yamagishi, H., "The Application of GIS-based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan," *Geomorphology*, 65, 1-2, 15-31, 2005.
8. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. a. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., and Chalise, D., "Soil Erosion Modelling: A Global Review and Statistical Analysis," *Science of the Total Environment*, 780, 146494, 2021.
9. Chae, B.-G., Park, H.-J., Catani, F., Simoni, A., and Berti, M., "Landslide Prediction, Monitoring and Early Warning: A Concise Review of State-of-the-art," *Geosciences Journal*, 21, 6, 1033-1070, 2017.
10. Chang, C. H., Harrison, J. F., and Huang, Y. C., "Modeling Typhoon-Induced Alterations on River Sediment Transport and Turbidity Based on Dynamic Landslide Inventories: Gaoping River Basin, Taiwan," *Water*, 7, 12, 6910-6930, 2015.
11. Chen, C.-W., Saito, H., and Oguchi, T., "Analyzing Rainfall-induced Mass Movements in Taiwan Using the Soil Water Index," *Landslides*, 14, 3, 1031, 2017.
12. Chiang, L.-C., Liao, C.-J., Lu, C.-M., and Wang, Y.-C., "Applicability of Modified SWAT Model (SWAT-Twn) on Simulation of Watershed Sediment Yields Under Different Land Use/Cover Scenarios in Taiwan," *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 8, 1-23, 2021.
13. Chow, V. T., "Bibliography: 1) Handbook of Applied Hydrology," ed: Taylor & Francis, 1965.
14. Dai, K., Deng, J., Xu, Q., Li, Z., Shi, X., Hancock, C., Wen, N., Zhang, L., and Zhuo, G., "Interpretation and Sensitivity Analysis of the InSAR Line of Sight Displacements in Landslide Measurements," *GIScience & Remote Sensing*, 59, 1, 1226-1242, 2022.
15. Dos Santos, F. M., De Souza Pelinson, N., De Oliveira, R. P., and Di Lollo, J. A., "Using the SWAT Model to Identify Erosion Prone Areas and to Estimate Soil Loss and Sediment Transport in Mogi Guaçu River Basin in Sao Paulo State, Brazil," *Catena*, 222, 106872, 2023.
16. Dou, J., Oguchi, T., Hayakawa, Y. S., Uchiyama, S., Saito, H., and Paudel, U., "GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using a Certainty Factor Model and its Validation in the Chuetsu Area, Central Japan," in *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*: Springer, 2014, 419-424.
17. Gassman, P. W., Sadeghi, A. M., and Srinivasan, R., "Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights," *Journal of Environmental Quality*, 43, 1, 1-8, 2014.
18. Gusman, M., Nazki, A., and Putra, R., "The Modelling

- Influence of Water Content to Mechanical Parameter of Soil in Analysis of Slope Stability,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1008, no. 1: IOP Publishing, p. 012022.
19. Hong, H., Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., and Pradhan, B., “GIS-based Landslide Spatial Modeling in Ganzhou City, China,” *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-26, 2016.
  20. Hou, J., Dou, M., Zhang, Y., Wang, J., and Li, G., “An Evaluation Model for Landslide and Debris Flow Prediction Using Multiple Hydrometeorological Variables,” *Environmental Earth Sciences*, 80, 16, 515, 2021.
  21. Kiesel, J., Schmalz, B., Brown, G. L., and Fohrer, N., “Application of a Hydrological-hydraulic Modelling Cascade in Lowlands for Investigating Water and Sediment Fluxes in Catchment, Channel and Reach,” *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61, 4, 334, 2013.
  22. Lee, W., Resdi, T. T., and Asfar, J., “Analysis of Sediment Rating Curve and Sediment Load for Langat river Basin,” *J Sustain Sci Manage*, 17, 3, 145-160, 2022.
  23. Loi, N. K., Liem, N. D., Tu, L. H., Hong, N. T., Truong, C. D., Tram, V. N. Q., Nhat, T. T., Anh, T. N., and Jeong, J., “Automated Procedure of Real-time Flood Forecasting in Vu Gia–Thu Bon River Basin, Vietnam by Integrating SWAT and HEC-RAS models,” *Journal of Water and Climate Change*, 10, 3, 535-545, 2019.
  24. Lu, C.-M. and Chiang, L.-C., “Assessment of Sediment Transport Functions with the Modified SWAT-Twn Model for a Taiwanese Small Mountainous Watershed,” *Water*, 11, 9, 1749, 2019.
  25. Martínez-Salvador, A. and Conesa-García, C., “Suitability of the SWAT Model for Simulating Water Discharge and Sediment Load in a Karst Watershed of the Semiarid Mediterranean Basin,” *Water Resources Management*, 34, 785-802, 2020.
  26. McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G., Mutchler, C., and Meyer, L., “Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation,” *Transactions of the ASAE*, 30, 5, 1387-1396, 1987.
  27. Mittelstet, A., Storm, D., and Fox, G., “Testing of the Modified Streambank Erosion and Instream Phosphorus Routines for the SWAT model,” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53, 1, 101-114, 2017.
  28. Mohammad, M. E., Al-Ansari, N., Issa, I. E., and Knutsson, S., “Sediment in Mosul Dam Reservoir Using the HEC-RAS Model,” *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 21, 3, 235-244, 2016.
  29. Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., and Daggupati, P., “Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria,” *Transactions of the ASABE*, 58, 6, 1763-1785, 2015.
  30. Nsengiyumva, J. B., Luo, G., Amanambu, A. C., Mind'je, R., Habiyaemye, G., Karamage, F., Ochege, F. U., and Mupenzi, C., “Comparing Probabilistic and Statistical Methods in Landslide Susceptibility Modeling in Rwanda/Centre-Eastern Africa,” *Science of the Total Environment*, 659, 1457-1472, 2019.
  31. Orlińska-Woźniak, P., Szalińska, E., and Wilk, P., “Do Land Use Changes Balance out Sediment Yields under Climate Change Predictions on the Sub-Basin Scale? The Carpathian Basin as an Example,” *Water*, 12, 5, 1499, 2020.
  32. Posner, A. J. and Georgakakos, K. P., “Normalized Landslide Index Method for Susceptibility Map Development in El Salvador,” *Natural Hazards*, 79, 1825-1845, 2015.
  33. Refsgaard, J. C., “Parameterisation, Calibration and Validation of Distributed Hydrological Models,” *Journal of Hydrology*, 198, 1(4), 69-97, 1997.
  34. Tadesse, A. and Dai, W., “Prediction of Sedimentation in Reservoirs by Combining Catchment Based Model and Stream Based Model with Limited Data,” *International Journal of Sediment Research*, 34, 1, 27-37, 2019.
  35. Wijesiri, B., Liu, A., Deilami, K., He, B., Hong, N., Yang, B., Zhao, X., Ayoko, G., and Goonetilleke, A., “Nutrients and Metals Interactions Between Water and Sediment Phases: An Urban River Case Study,” *Environmental Pollution*, 251, 354-362, 2019.
  36. Wischmeier, W., “Estimating the Soil Loss Equations Cover and Management Factor for Undisturbed Areas,” *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*, 118-124, 1975.
  37. Wischmeier, W. H., Johnson, C., and Cross, B., “Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites,” 1971.
  38. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning* (no.

- 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
39. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., "Rainfall Energy and its Relationship to Soil Loss," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39, 2, 285-291, 1958.
  40. Zêzere, J., Pereira, S., Melo, R., Oliveira, S., and Garcia, R. A., "Mapping Landslide Susceptibility Using Data-driven Methods," *Science of the Total Environment*, 589, 250-267, 2017.
  41. 台典工程顧問股份有限公司：秀姑巒溪沿岸集水區治理規劃期末報告書，經濟部水利署出版，2006。
  42. 禹安工程顧問股份有限公司：秀姑巒溪水系治理規劃檢討 (2/3)，經濟部水利署出版，2014。
  43. 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、王士豪：「GIS 圖層及修正因子建置台灣通用土壤流失公式 (TUSLE) -以石門水庫集水區為例」，*中華水土保持學報*，第 40 卷第 2 期，pp. 185-197，2009。
  44. 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生：「台灣山區淺層崩塌地特性調查與分析」，*中華水土保持學報*，第 46 卷第 1 期，pp. 19-28，2015。