

應用地文脆弱度建立集水區不安定土砂潛勢分級

莊承穎^{[1][2]*} 陳振宇^[1] 詹婉妤^[1]

摘要 莫拉克風災後，大量不安定土砂分布在集水區的邊坡和河道上，可能在豪雨來臨時，威脅下游保全住戶和重要設施。儘管臺灣已建立土石流及大規模崩塌防災及警戒發布機制，但對不安定土砂的調查及研究仍有限，難以掌握大多數殘坡和河道的土砂情況。本研究應用 2006 年至 2022 年的事件型崩塌目錄，建立地文脆弱度指標，並透過劃定不安定土砂集水區及計算不安定土砂潛勢值，評估出 312 個宜優先關注的集水區。最後，篩選出 38 個位於高潛勢不安定土砂集水區附近的橋梁，提供各防災單位於防減災規劃時參考。
關鍵詞：事件型崩塌目錄、不安定土砂、地文脆弱度、QPE

System for Risk Classification in Terms of Physiographic Fragility for Unstable Sediment in Watersheds

Cheng-Ying Chuang^{[1][2]*} Chen-Yu Chen^[1] Wan-Yu Chan^[1]

ABSTRACT After Typhoon Morakot, a considerable amount of unstable sediment was distributed on mountain slopes and river channels comprising the watershed in Taiwan. During heavy rainfall, such sediment can turn into debris flows, posing a risk to downstream residents and critical public infrastructure. Taiwan has a disaster prevention and warning mechanism for debris flow. Although this system has been in place for many years, investigations of unstable sediment in watersheds remain limited. Unstable sediment is primarily distributed in the watersheds of mountainous areas, making studies time-consuming and labor-intensive. In this study, we compiled data from the event-based landslide inventory regarding the area and frequency of newly formed landslides in 2006 to 2022 and established a physiographic fragility index for Taiwan. Furthermore, we identified unstable sediment watersheds by using the tributaries of rivers managed by governments. This study considered both the sediment production potential and the degree of hazard within these watersheds to calculate the propensity for unstable sedimentation (P), and 312 watersheds were found to be highly susceptible to unstable sedimentation. This study also identified 38 bridges located in or adjacent to these high-priority watersheds as a reference for disaster prevention authorities.

Keywords: Event-based landslide inventory, Unstable sediment, Physiographic fragility, QPE

一、前言

臺灣因為地形條件、地理環境及氣候影響，使得自然土砂災害頻仍，根據世界銀行的研究指出，臺灣 73% 的人口及土地面積均暴露於 3 個以上的自然災害風險，排名列於世界第一，顯示臺灣位於地震、洪澇及土砂災害等複合型災害之好發熱點區域 (Dilley et al., 2005)。為降低受災風險，許多研究開始著手於繪製自然災害風險潛勢圖，如美國聯邦緊急事務管理局 (Federal Emergency Management Agency, FEMA) 制定了國家風險指數 (National Risk Index)，該指數利用全國自然災害數據集、暴露風險、頻率和歷史損失率，並結合社會脆弱性及社區復原力，得出 18 種災害類型的預期年度損失估計值，提供美國各州對於風險的統一衡量標準 (Zuzak et al., 2022)。在臺灣方面，戴義欽、詹錢登 (2016) 的研究報

告則透過歷史影像收集、數值高程模型 (DEM)，並結合流域水文環境變異分析成果，已對研究區域之致災特性、時間及空間分布，進行土砂災害潛勢及災害耐受力的探討。

然臺灣對於土砂災害的防範與治理，及強化災害防救功能的政策與相關應變規劃正持續推動，並依據災害防救法，針對各種天然災害進行詳細的任務分工；其中，於災害預防的相關條文中，也明列要求須針對災害潛勢、危險度與風險評估進行調查分析，並須適時公布調查結果。農業部農村發展及水土保持署 (以下簡稱農村水保署) 為國內土石流及大規模崩塌之主政機關，近年來已公開土石流潛勢溪流、大規模崩塌潛勢區等相關資料，並持續完善各項土砂災害防災預警作為 (陳振宇，2013；詹錢登及王志賢，2017；尹孝元等，2019)。

儘管農村水保署針對土石流及大規模崩塌之防減災機

[1] 農業部農村發展及水土保持署 減災監測組
Disaster Mitigation and Monitoring Division, Agency of Rural Development and Soil and Water Conservation, MOA, R.O.C

[2] 財團法人農業科技研究院
Agricultural Technology Research Institute, R.O.C

* Corresponding Author. E-mail: chengyingchuang@gmail.com

制已逐漸完善，然 2021 年 8 月盧碧颱風期間，高雄市桃源區玉穗溪出流口的明霸克露橋遭其上游之殘坡崩塌形成的土石流沖毀，使不安定土砂議題首次成為關注焦點，如 Shiu et al. (2023) 於研究中即針對該地區災後情形進行詳細分析及模擬。藉由多元多期遙測影像顯示，玉穗溪上游林班地坡面之殘坡於 2009 年莫拉克颱風後即形成，並殘留於坡面上 10 餘年，形成集水區內的不安定土砂 (圖 1)。目前國內外對於不安定土砂尚無明確定義 (水山高久, 2015)，以現象來說，不安定土砂係指集水區內坡面或河道上，屬暫態或不穩定平衡狀態下之殘坡或河道堆積之大量土砂，在降雨或地震等條件誘發下，其土砂運移行為將造成中下游之土砂災害。

依據 IPCC AR5 (Pachauri et al., 2014) 對於風險的定義，風險為暴露度 (exposure)、脆弱度 (vulnerability) 和危害度

(hazard) 的函數。惟由於國內重要鐵公路橋梁之跨距資料尚非屬公開資訊，故本研究僅評估集水區內之不安定土砂可能對出流口之道路或橋梁可能造成的危害，並未考慮道路或橋梁之暴露度及脆弱度 (橋長、最小跨距、通洪斷面及橋梁形式)，故定義不安定土砂潛勢值 (P) 為危害度進行後續計算及潛勢分級。

綜上所述，本研究為能先評估不安定土砂可能引致之災害潛勢，乃以集水區為單元，應用事件型崩塌目錄作為地文統計資料，建立全台範圍的地文脆弱度指標，並以集水區之地理資訊，發展各集水區不安定土砂災害潛勢的分級方法，並篩選出較高風險的集水區及鄰近或位於集水區內之橋梁，供各防災單位應用及參考。

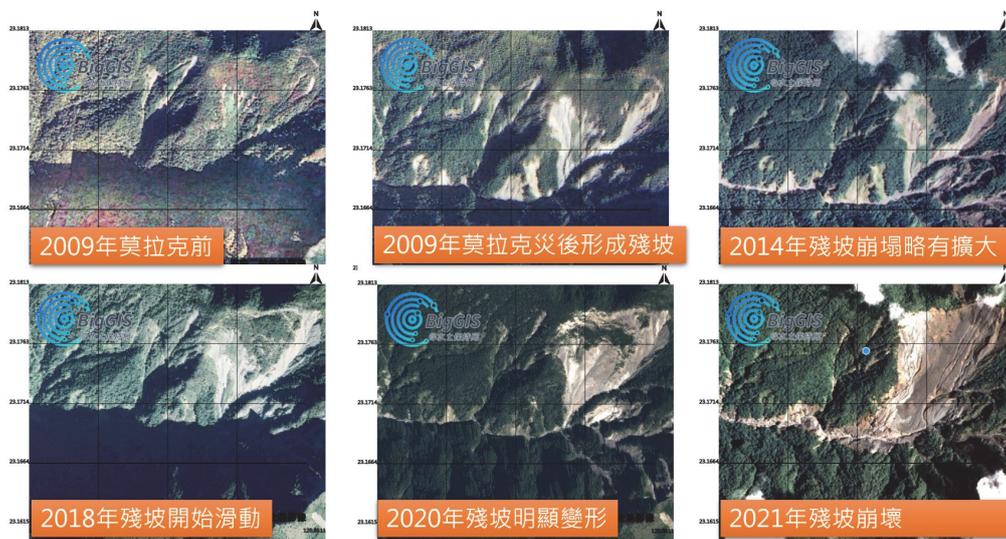


圖 1 玉穗溪上游林班地殘坡變化情形

Fig.1 Changes of the remaining-slope in the upper stream of Yusui River

二、材料及方法

1. 分析範圍及資料蒐集

本研究採用涵蓋台灣本島範圍的 21,000 格 QPESUMS 網格式雷達降雨估計資料 (Quantitative precipitation estimation, QPE) 做為後續計算之網格式單元，該 QPE 網格式為氣象署自 2005 年 7 月起為強化災害性天氣的監測與極短期預報能力，所建立之空間解析度 1.3 km x 1.3 km 的網格式雷達資料

表 1 本研究使用資料

Table 1 Different regions of Taiwan.

項目	使用材料與方法
分析範圍	2021年山坡地範圍圖 (含林班地)
數值地形	內政部2015版 20m DEM
參考街道地圖	ArcGIS Pro街道圖 (Esri)
橋梁資料	全省省道及台鐵橋梁
DEM流路圖(匯流面積至少400 ha水系)	利用數值地形 (DEM) 生成(ArcGIS/Hydrology/Flow Accumulation)
地文脆弱度指標(QPE網格式1.3 km×1.3 km)	歷年事件型崩塌目錄 (2006-2022年)
不安定土砂出流點	以DEM流路圖與中央及縣市管河川主流處，標定不安定土砂出流點及其集水區 (1,218處)

(中央氣象局, 2015; 唐玉霜等人, 2016)。

此外，本研究亦蒐集農水保署 2006-2022 年事件型崩塌目錄藉以建立地文脆弱度指標網格式、2021 年山坡地範圍圖 (含林班地)、2022 年交通部全省省道及台鐵橋梁資料、水利署中央及縣市管河川圖、內政部 2015 年版 20 m 數值高程模型 (DEM)，並將 DEM 加值為 DEM 流路圖 (流路需匯流 400 ha 集水面積，定義為水系源頭) 等。研究流程如圖 2，使用材料如表 1：

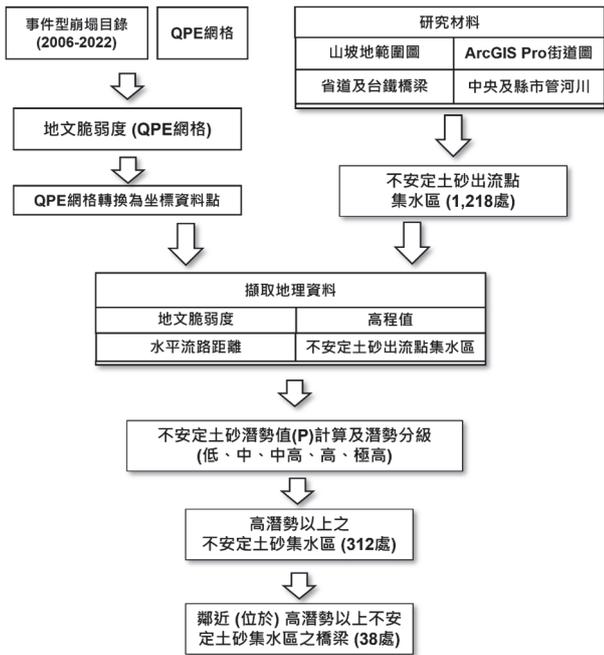


圖 2 研究流程圖
Fig.2 Flow chart of the study process

2. 地文脆弱度指標

由於地質、地形、地表植生等地文因子 (內因)，以及地震、人為開發利用等外力因素 (誘因)，均會直接、間接或交互影響該地區在降雨期間是否產生崩塌或沖蝕等現象，此部份較不易直接由前揭各項因子單獨進行評估。為此，Corominas et al. (2014) 提出了在不同空間尺度下對崩塌危害、脆弱性和風險定量分析以及驗證結果的建議方法；亦即利用歷史山崩目錄來評估可能發生崩塌的概率以及發生類型，用以評估崩塌規模、強度、潛在損害程度及脆弱度，並進而量化其風險。

本研究參考陳振宇等人 (2019) 所提出之地文脆弱度 (Physiographic fragility, F_p) 計算方法，將其研究中使用時間跨度較短的林業保育署衛星判釋全島崩塌地圖(2004~2017年)，改由農村水保署產製之跨度較長，目前仍持續更新的年度事件型崩塌目錄圖層 (2006~2022年)，作為歷年是否發生新生崩塌之評估基準。且事件型崩塌目錄圖層建立時，為利於後續災例分析或相關應用，係以多期衛星影像逐步確認新生崩塌係由那一個颱風或豪雨事件造成並標示於圖資，以此能更精確掌握各年度中的每個新生崩塌之成因。

接著，利用 QPE 網絡分割每個年度的事件型崩塌目錄圖層，再分別加總每個 QPE 網絡內該年度的新生崩塌面積 (圖 3)。以此方式，本研究建立 2006~2022 年間，每一個 QPE 網絡範圍內各年度的新生崩塌面積。此外，由於農村水保署年度事件型崩塌圖層之最小判識面積為 0.1 ha，本研究處理後所得之各年度新生崩塌地面積如小於 0.1 ha 者，均視為無新生崩塌。

本研究採用各 QPE 網絡內每年是否產生新生崩塌 (亦即反映崩塌發生頻率) 以及累計新生崩塌面積二項指標，建立地文脆弱度。首先排除 2006 至 2022 年之 17 年間無新生

崩塌之網絡 (將之定義為低脆弱度)，接著將剩下有崩塌紀錄之網絡以平均值 (μ) 及正負一倍標準差 (σ) 的分類方式 (表 2)，以矩陣方式將其分為四個等級 (中、中高、高、極高脆弱度)(圖 4)，來代表該網絡範圍內之地文脆弱度。其中，為區分統計年間僅發生 1 次及 1 次以上崩塌之網絡，本研究將崩塌次數之門檻 0.89 調整為 1，以建立會重複發生崩塌的網絡與偶發崩塌網絡間之脆弱度的差異。同時，依低至極高脆弱度將脆弱度轉化為 1~5 之數字，亦即 1 (低)、2 (中)、3 (中高)、4 (高) 及 5 (極高)，並分別以不同顏色呈現，據此將全台 21,000 個 QPE 網絡分級，地文脆弱度分布圖如圖 5 所示。

接著，為便於計算地文脆弱度指標所代表之位置及點位，本研究統一以 QPE 網絡的中心點坐標，作為該地文脆弱度所代表之分布位置。

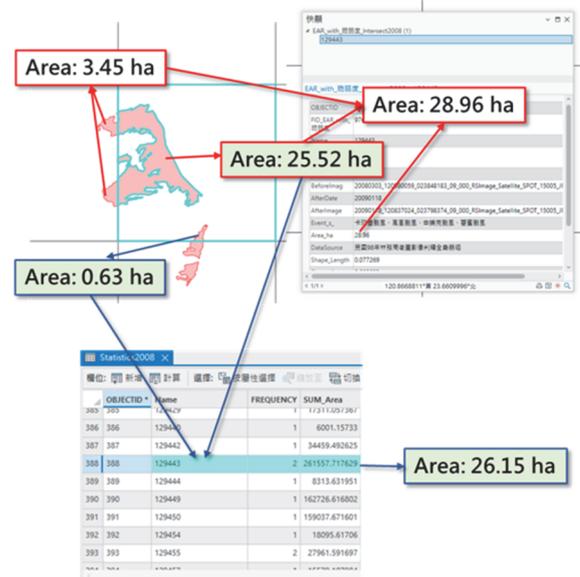


圖 3 QPE 網絡內各年度新生崩塌面積計算方式
Fig.3 Calculation method of new collapse area in each year within the QPE grids

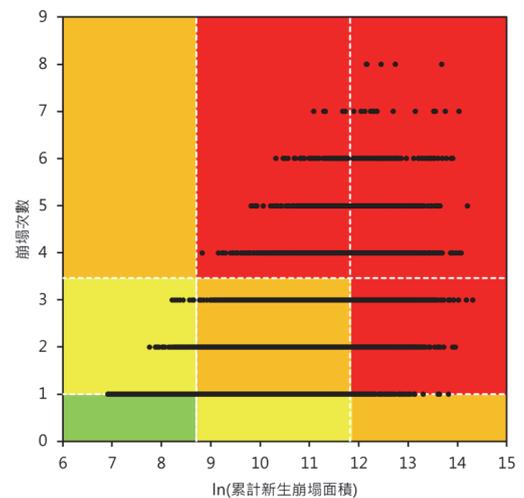


圖 4 地文脆弱度分級矩陣
Fig.4 Physiographic fragility grading matrix

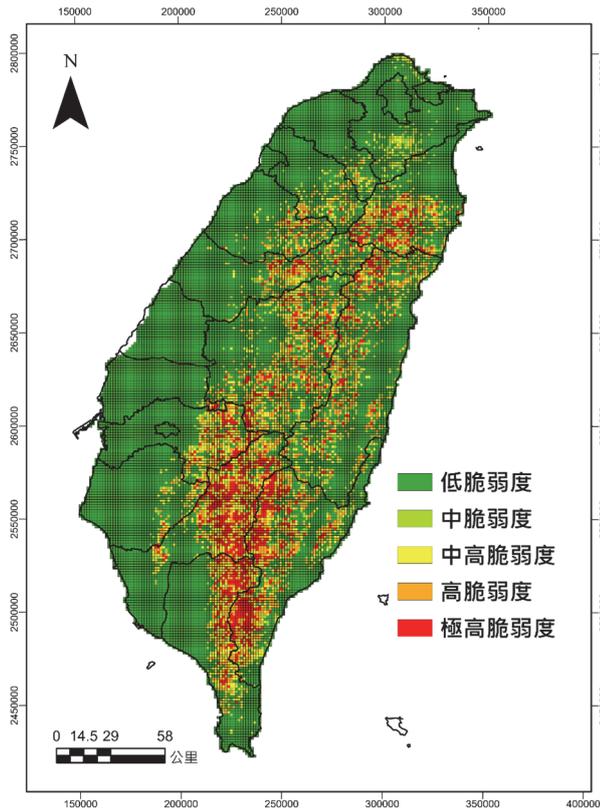


圖 5 全臺地文脆弱度分布圖

Fig.5 Distribution of physiographic fragility

表 2 崩塌事件參數統計表

Table 2 The parameter statistics of landslide event

ln (累計新生崩塌面積)		崩塌次數	
平均值 μ	10.30	平均值 μ	2.18
標準差 σ	1.56	標準差 σ	1.29
$\mu + \sigma$	11.83	$\mu + \sigma$	3.47
$\mu - \sigma$	8.71	$\mu - \sigma$	0.89(調整為1*)

*調整合理分級的參數值(不計未曾發生崩塌之網格)

3. 不安定土砂出流點及集水區劃設

本研究為排除集水區過小之野溪及蝕溝，採用內政部 2015 版 20 m DEM，利用 ArcGIS/Hydrology/Flow Accumulation 繪製本研究使用之累積集水面積大於 400 公頃的 DEM 流路圖。接著，再利用 110 年度山坡地範圍圖(含林班地)、ArcGIS Pro 街道圖(Esri) 及水利署之中央及縣市管河川資料，來選定不安定土砂出流點及其對應之集水區(圖 6)。其中，不安定土砂出流點選定原則為：(1) 挑選連接中央及縣市管河川之支流、(2) 優先選擇道路旁支流(若無道路則選擇一級河序)、(3) 以山坡地範圍調整劃設位置(以山坡地邊界為主)。

4. 集水區不安定土砂潛勢值 (P) 計算

為計算集水區內之不安定土砂可能對出口之道路與橋梁造成危害，本研究將計算集水區之不安定土砂潛勢值(P)，計算方式如下：

首先利用 ArcGIS 套疊前述 QPE 網格中心坐標化的位置後(圖 7)，對其對應之集水區擷取該位置之 4 項地理資料：(1) 該 QPE 網格點之地文脆弱度 (F_p)、(2) 該 QPE 網格點與出流點間之水平流路距離 (D)(圖 8 藍虛線)、(3) 該 QPE 網格點與出流點間之高程差 (ΔH)(圖 8 左雙箭頭)、(4) 該 QPE 網格點所在之不安定土砂集水區 (i)。

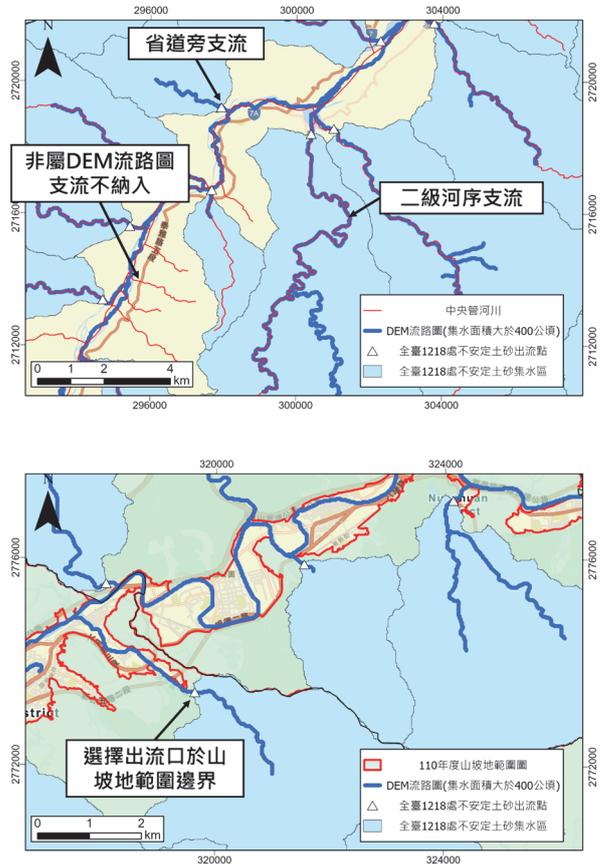


圖 6 不安定土砂出流點選點示意圖

Fig.6 Schematic diagram of point selection for unstable sediment outflow points

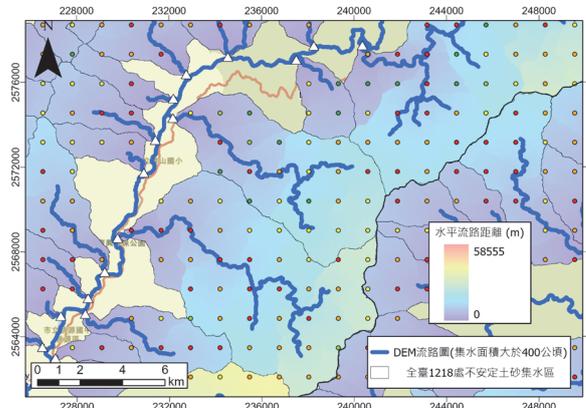


圖 7 地文脆弱度網格套疊地理資訊示意圖

Fig.7 Schematic diagram of extraction of geographic information by physiographic fragility grid

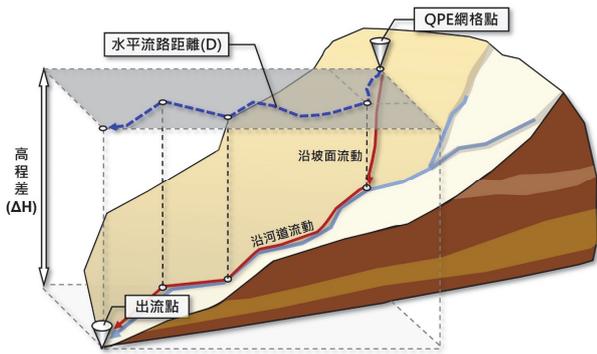


圖 8 各集水區水平流路距離與高程差示意圖
Fig.8 Schematic diagram of horizontal flow distance and elevation difference in each watershed

擷取各 QPE 網格點地理資料後，為計算各 QPE 網格點若有土砂產生時，對於其出流點可能產生的影響程度，故以各網格點與出流點間之高程差及水平流路距離作為土砂運移之地形驅動指標 (H_d) (式 (1))，並將各 QPE 網格點數化為數值 1~5 的地文脆弱度 (F_p) 作為該網格的土砂生產潛能指標。接著，將兩者數值相乘後，定義為該網格點對其所屬集水區出流點的不安定土砂潛勢值，然後加總同一不安定土砂集水區內的所有網格不安定土砂潛勢值，即為該集水區之不安定土砂潛勢值 (P) (式 (2))。

$$H_d = \Delta H / D \quad \text{式 (1)}$$

其中， ΔH 為 QPE 網格點至出流點之高程差 (m)
 D 為 QPE 網格點至出流點之水平流路距離 (m)

$$P_i = (\sum_1^n F_p \times H_d)_i \quad \text{式 (2)}$$

其中， n 為不安定土砂集水區內的 QPE 網格點數
 i 為不安定土砂集水區編號

三、結 果

1. 不安定土砂集水區劃設結果

本研究共劃設 1,218 處不安定土砂出流點及其集水區，屬中央管河川流域有 979 處，而縣市管河川流域有 239 處。前者因機關管理權責，通常河川流域較大，並大多位於西半部，其中涵蓋如阿里山山脈、雪山山脈及中央山脈中段等山區範圍；後者因已排除非山坡地部分，大多分布於中央山脈南北兩段、海岸山脈及台灣北部海岸線，在台灣西半部平地則較少 (圖 9)。

依據不安定土砂集水區劃設結果，集水區範圍內計包含 8,737 個 QPE 網格點，其中低脆弱度網格為 4,128 個，占整體 47%，顯示不安定土砂集水區內接近一半的 QPE 網格於 2006 至 2022 年之 17 年間皆無新生崩塌發生。

2. 不安定土砂潛勢值 (P) 計算結果

為將本研究 1,218 處不安定土砂集水區的 P 值進行分群，首先以每 0.5 作為分群依據，統計結果顯示，累積百分比分布約成平方根函數，大部分集水區之 P 值集中於 1.5 以下，隨 P 值上升，數量趨於平緩 (圖 10)。而本研究先篩選 P 值前 1% 為極高潛勢集水區門檻，因此設定門檻值為 $P=10$ ，

計有 17 處；接著，分別以不高於累積百分比 25%、50% 及 75% 的 P 值訂定不安定土砂集水區潛勢分級門檻，門檻值分別為 $P=0.5$ 、 $P=1.5$ 及 $P=3.5$ ，依此將不安定土砂集水區切分為五個潛勢分級。

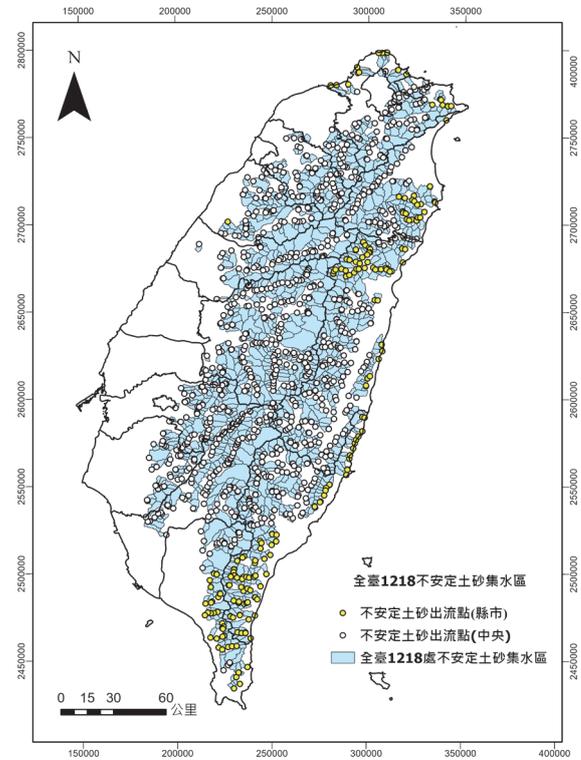


圖 9 不安定土砂集水區圈繪結果
Fig.9 The result of the unstable sediment watershed

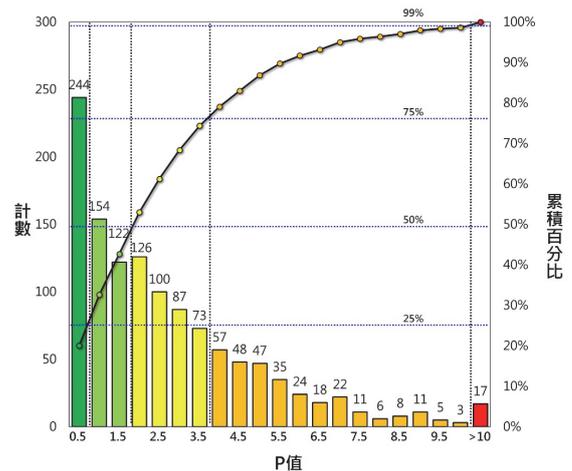


圖 10 1,218 處不安定土砂集水區分群門檻值及累積分群結果
Fig.10 The result of the thresholds and clustering of unstable sediment watershed

此分群方式結果顯示，低潛勢集水區 ($P \leq 0.5$) 有 244 處，占總集水區數量 20%，此區域內多數因地文脆弱度低，或其不安定土砂在生產潛能及危害程度皆對於其出流點影

響較低；而中高潛勢者有 386 處，約 31.7%，屬五個分級中數量較多的分群；而高潛勢以上者 ($P > 3.5$) 共 312 處 (25.6%)。本研究認為此分群門檻值可有效分級不安定土砂集水區之潛勢，以作為快篩優先關注之集水區的篩選條件 (表 3)。

而以地理分布位置結果顯示，17 處極高潛勢值之集水區皆位於中央管河川流域，且大部分高潛勢以上集水區分布

表 3 不安定土砂集水區潛勢分級表

Table 3 Potential classification of unstable sediment watershed

潛勢分級	P值	分級	各分級數量			
			中央管河川	縣市管河川	總計	(%)
低	$0 \leq P \leq 0.5$	1	197	47	244	(20.0%)
中	$0.5 < P \leq 1.5$	2	216	60	276	(22.7%)
中高	$1.5 < P \leq 3.5$	3	309	77	386	(31.7%)
高	$3.5 < P \leq 10$	4	240	55	295	(24.2%)
極高	$10 < P$	5	17	0	17	(1.4%)
合計			979	239	1,218	(100.0%)

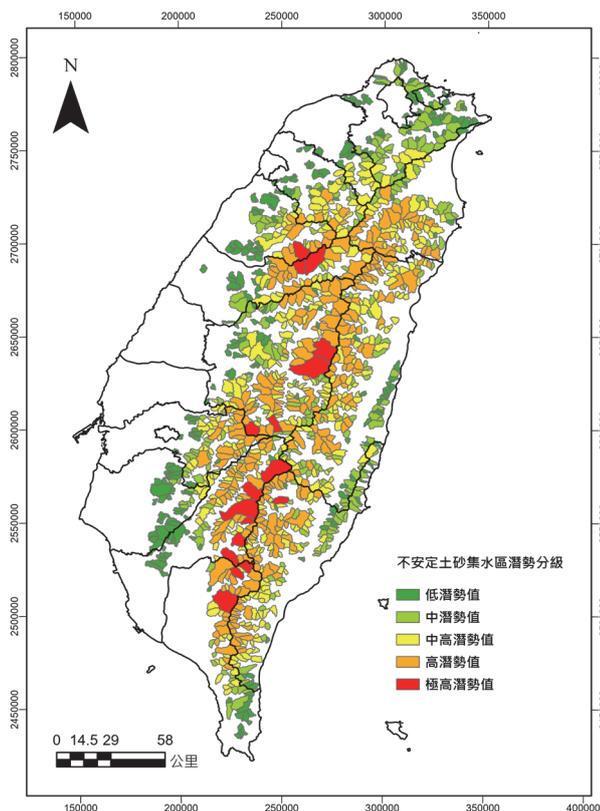


圖 11 1,218 處不安定土砂集水區分布結果

Fig.11 The distribution result of the unstable sediment watershed

3. 衛星影像驗證不安定土砂潛勢值 (P) 分析結果

為驗證本研究所計算之 P 值分級是否具有有效的分級能力，本研究利用農村水保署建置之巨量空間資訊系統 (Big-GIS) 上豐富的衛星圖資，以及線上單期數化模組計算 Sentinel-2 多光譜資訊，分析該影像中的裸露地面積。其原理係利

於台灣中南部山區。五大流域中，淡水河流域內無高潛勢以上的不安定土砂集水區，推測可能因其流域內地文脆弱度指標普遍較低，且近年來較無重大災害事件所致；反之，荖濃溪與濁水溪流流域因其流域內地文脆弱度較高，故流域內涵蓋較多高潛勢以上之集水區，也曾經歷較多土砂災害事件，如明霸克露橋斷橋及神木村土石流災害事件 (圖 11)。

用歐洲太空總署最新一代的光學衛星 Sentinel-2，以每 5 天一次的頻率拍攝台灣，且同時提供 13 個波段的遙測影像的優勢 (解析度 10 m)，透過 Liu et al. (2018, 2019) 所提出之決策樹分類法，依序使用正規化差異植被指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、陰影指標 (Shadow Index, SI) 及綠度指標 (Greenness, Gn)，將衛星影像分層判釋出森林區、陰影區、低植生區和裸露地等 4 種類型。然本研究將選擇南投縣信義鄉神木村附近六處集水區為不安定土砂潛勢值之驗證區域，透過其對集水區面積的計算，統計此六處不安定土砂集水區之崩塌率 (式 (3))，藉以量化集水區的崩塌程度，並個別比對其不安定土砂潛勢值 (P)。

$$\text{崩塌率 (\%)} = (\text{單期數化裸露面積 (ha)}) /$$

$$(\text{不安定土砂集水區面積 (ha)}) \quad \text{式 (3)}$$

本研究利用 2022 年 09 月 27 日的 Sentinel-2 衛星之無雲覆影像數化裸露地，數化結果顯示，此區域內所包含兩處極高潛勢之不安定土砂集水區崩塌率皆大於 1%，除原本即被劃於投縣 DF227 土石流潛勢溪流集水區的鹿林子集水區 ($P=13.06$) 外，也快篩出因無保全住戶而未被劃設為土石流潛勢溪流集水區之陳有蘭溪上游子集水區 ($P=10.53$) (水土保持局, 2022)。而另外四處分別為一處中高潛勢集水區及三處高潛勢集水區，其集水面積皆小於 2,500 ha，數化崩塌率皆約 0.35%，與極高潛勢集水區具明顯差異，顯示此分群方法實具參考價值，可作為快篩全台不安定土砂集水區之依據 (圖 12)。

4. 鄰近 (位於) 高潛勢以上不安定土砂集水區之橋梁篩選結果

本研究為篩選可能受不安定土砂影響之橋梁，選擇高潛勢及極高潛勢的不安定土砂集水區為可能發生不安定土砂災害之集水區。透過套疊位於 2021 年山坡地範圍內 1,178 處的全台省道及台鐵橋梁圖層，篩選出位於集水區範圍內和該集水區下游流路距離 1 km 以內的橋梁。然後，再輔以 Google

街景圖檢視，排除套疊圖層時被誤判位於主河道，實則位於支流且較不具風險之橋梁，並定義為鄰近（位於）高潛勢以上不安定土砂集水區之橋梁。據此，位於高潛勢以上不安定土砂集水區或下游 1 km 內橋梁共計 38 處，如表 4 所示。其中，近年來較為被關注之明霸克露橋及周遭沿線橋梁，如分別跨越拉克斯溪和唯金溪的復興橋及唯金溪橋皆有被列入其中。鄰近（位於）高潛勢以上不安定土砂集水區之橋梁分

布圖（圖 13）顯示，篩選之 38 處橋梁大多分布於陳有蘭溪（台 21 線）、荖濃溪（台 20 線）、蘭陽溪（台 7 甲線）及立霧溪（台 8 線）流域，此些路線皆為橫貫台灣中西兩側的重要交通要道。因此，透過本研究快篩條件的訂定，可快速篩選出集水區內之重要橋梁，並作為後續規劃或防減災整備工作時之參考。

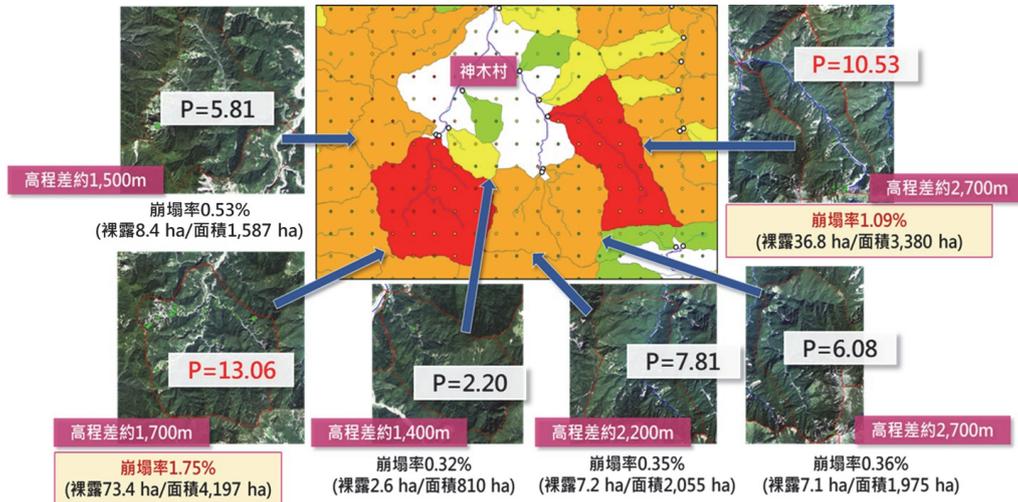


圖 12 衛星影像驗證不安定土砂潛勢值 (P) 分析結果 (以南投信義鄉為例)

Fig.12 The verification result of satellite image of the unstable sediment watershed (Xinyi township, Nantou)

表 4 鄰近（位於）高潛勢以上不安定土砂集水區之橋梁統整表

Table 4 Potential classification of unstable sediment watershed

序號	縣市	橋梁名稱	路線	序號	縣市	橋梁名稱	路線
1	宜蘭縣	四季一橋	臺7甲線	20	南投縣	信義橋	臺21線
2	宜蘭縣	則前橋	臺7甲線	21	屏東縣	第二號橋	臺24線
3	宜蘭縣	繼光橋	臺7甲線	22	高雄市	小林橋	臺29線 臨11便道
4	宜蘭縣	大濁水橋	臺9丁線	23	高雄市	寶來一橋	臺20線
5	宜蘭縣	英士橋	臺7線	24	高雄市	安哈娜橋	臺29線 臨11便道
6	宜蘭縣	可法橋	臺7甲線	25	高雄市	哈麗奧爾橋	臺29線 臨11便道
7	花蓮縣	白沙一橋	臺8線	26	高雄市	新發大橋	臺27線
8	花蓮縣	白沙二橋	臺8線	27	高雄市	那都魯札橋	臺29線 臨11便道
9	花蓮縣	慈母橋	臺8線	28	高雄市	桃源一橋	臺20線
10	花蓮縣	慈恩橋	臺8線	29	高雄市	民族橋	臺29線
11	花蓮縣	慈雲橋	臺8線	30	高雄市	明霸克露橋	臺20線
12	花蓮縣	東小清水溪橋	北迴線	31	高雄市	復興橋	臺20線
13	南投縣	愛玉橋	臺21線	32	高雄市	唯金溪橋	臺20線
14	南投縣	陳有蘭溪橋	臺21線	33	高雄市	塔拉拉魯茨橋	臺20線
15	南投縣	望鄉橋	臺21線	34	高雄市	邦腹溪橋	臺27線
16	南投縣	筆石橋	臺21線	35	高雄市	三合橋	臺27線
17	南投縣	木蘭橋	臺8線	36	嘉義縣	沙崙橋	臺3線
18	南投縣	大觀橋	臺14線	37	臺中市	東卯橋	臺8線
19	南投縣	仁愛橋	臺14線	38	臺東縣	霧鹿橋	臺20線

※序號僅依所在縣市排列，非代表不安定土砂風險程度

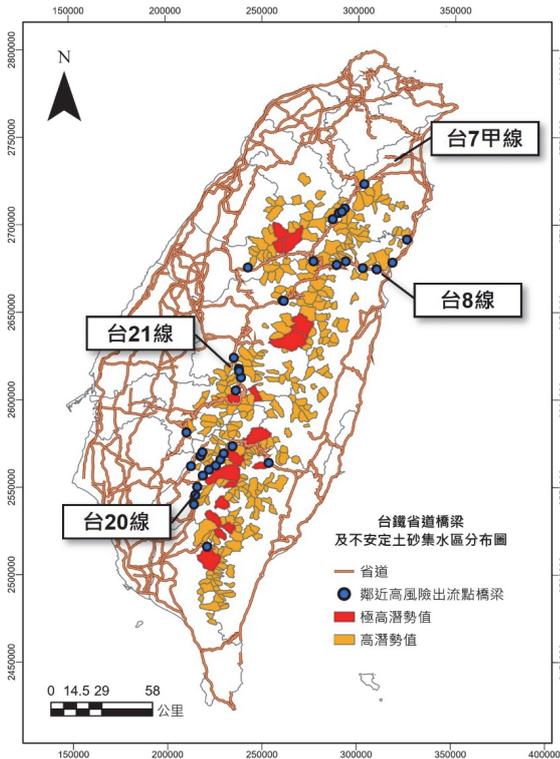


圖 13 鄰近 (位於) 高潛勢以上不安定土砂集水區之橋梁分布圖

Fig.13 The distribution map of bridges adjacent to (in) the high potential unstable sediment watersheds

四、討 論

1. 截至 2023 年止, 農村水保署目前僅建立 2006 至 2022 年共 17 年間的事件型崩塌目錄, 其中 2007 年及 2009 年因受到莫拉克颱風等多個重大災害事件影響, 其年度崩塌面積分別為 11,350 ha 及 37,199 ha, 為統計期間內兩個較有嚴重的重大土砂災害的年度, 而其餘年度則新生崩塌地面積相對較少 (圖 14)。然因地文脆弱度是以全台範圍數據之平均值及標準差來分級, 崩塌面積若在不同年度有大幅度的變異情形, 或單一年度的極端事件, 可能使該指標於數據計算時產生統計的偏差, 讓地文脆弱度指標可能有普遍低估的情形。但隨農村水保署每年定期更新事件型崩塌目錄, 地文脆弱度指標也能持續以更長時間跨度下進行統計, 使此指標更符合實際地文情形, 以有效反映該 QPE 網格位置內的地文脆弱度。

2. 經不安定土砂潛勢值 (P) 評估後, 1,218 處不安定土砂集水區中, 高潛勢以上不安定土砂集水區共計 312 處, 占全部分析單元 25.6%, 為後續優先關注之不安定土砂潛勢集水區。再經 BigGIS 單期數化功能比對 Sentinel-2 衛星影像驗證結果後, 南投縣信義鄉以本研究分級方法篩選出之兩處極高潛勢以上集水區的崩塌率皆大於 1%, 明顯與其他集水區之崩塌率情形不同, 因此認為本研究可有效

篩選出極高潛勢的不安定土砂集水區與其他集水區的差異。另外, 本研究篩選出優先關注之不安定土砂潛勢區, 可作為其他面向的後續分析參考, 如延伸應用於考量 TCCIP 所提供之氣候變遷降雨情境分析, 或土砂災害風險暴露度等跨領域分析。

- 據 1,218 處不安定土砂集水區之地理資訊分布結果顯示, 極高潛勢集水區之 P 可能與其集水區面積較為相關。而其他集水區之不安定土砂災害潛勢易受到其集水區內的地文脆弱度所影響。惟本研究使用之地文脆弱度指標僅能代表該區不安定土砂之生產潛勢, 而非不安定土砂的量體。若要完善全台範圍內不安定土砂的掌握, 尚需其他後續如 LiDAR 監測微地形變異、現地地質地貌調查或 InSAR 等相關技術的補充, 有效的掌握坡面或河道上仍持續變動的不安定土砂量體。
- 本研究篩選位於或鄰近高潛勢以上不安定土砂集水區橋梁共計 38 處, 大多分布於台 21、台 20、台 7 甲及台 8 線, 分布於阿里山公路、南部橫貫公路及新舊中部橫貫公路。這些橋梁皆是台灣中西部的交通要道, 也是重要維生道路, 因此若能蒐集橋梁結構或者通洪斷面的相關資訊, 在發生不安定土砂災害前能先了解其狀況, 並將此資訊隨每年度更新不安定土砂集水區潛勢值時同步更新, 將可提供相關單位因應參考。



圖 14 歷年事件型崩塌目錄崩塌面積變化
Fig.14 Changes in collapse area of event-type collapse catalog over the years

五、結 論

儘管國內針對有保全住戶的土石流潛勢溪流及大規模崩塌潛勢區已建立完整的防減災體系及定期監測與警戒發布機制, 但對於未有直接保全住戶的不安定土砂區域, 則尚未有專責單位進行定期監控, 且相關研究仍較缺乏, 或尚屬發展研究階段, 故目前尚難以掌握全臺各地之殘坡及河道堆積之不安定土砂。為此, 本研究嘗試建立一快速篩選方式, 協助各級防災單位初步快速有效地掌握防災重點地區, 先綜整全台 2006 年至 2022 年事件型崩塌目錄的新生崩塌面積及頻率, 建立全台範圍的地文脆弱度指標, 再利用 1,218 處不安定土砂集水區之劃設, 以土砂生產潛能及危害程度兩因子計算不安定土砂潛勢值, 並以此潛勢值分級集水區。最後, 以 312 處高潛勢以上的集水區為優先關注集水區, 並篩選位於或鄰近高潛勢以上不安定土砂集水區的 38 處橋梁, 供相

關單位防災策略研擬時參考。本研究提出之方法可作為集水區範圍內不安定土砂之定期健檢機制，如需精確估算不安定土砂量體，尚須導入光達或衛星立體像對等技術。

而本研究分析之地文脆弱度尚未考慮誘發不安定土砂移動之水文等條件，以及土砂移動情境之數值模擬，仍待進一步研究。後續研究將納入新生崩塌在時間上對於不安定土砂量體的折減率，屆時將可藉由新生崩塌對於該出流點的影響重新分級，以達到掌握不安定土砂潛勢之目的。

參考文獻

- [1] 水山高久 (2015), 「不安定土砂」, 砂防学会誌, 67(5), 78。(Takahisa Mizuyama. (2015). "Unstable sediment." *Journal of Sabo*, 67(5), 78. (in Japanese))
- [2] 中央氣象局 (2015), 「氣象遙測觀測-氣象衛星與氣象雷達」。(Central Weather Bureau. (2015). *Meteorological remote sensing- meteorological satellite and meteorological radar*. (in Chinese))
- [3] 尹孝元、王晉倫、簡以達、詹錢登、王志賢 (2019), 「臺灣坡地災害管理策略之演進與發展」, 天氣分析與預報研討會, 中央氣象局編印。(Yin, H.Y., Wang, C.L., Jian, Y.D., Jan, C.D., and Wang, C.H. (2019). "The evolution and development of Taiwan's slopeland disaster management strategy." *Conference on Weather Analysis and Forecasting*, Central Weather Bureau. (in Chinese))
- [4] 唐玉霜、黃葳芃、張保亮、陳嘉榮 (2016), 「劇烈天氣監測系統(QPESUMS)之防災應用」, 中央氣象局氣象衛星中心。(Tang, Y.S., Huang, W.P., Chang, P.L., and Chen, J.R. (2008). "Disaster prevention and application of Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensors (QPESUMS)." Central Weather Administration. (in Chinese))
- [5] 陳振宇 (2013), 「以雨量為基礎之土砂災害警戒系統成效評估—以台灣及日本為例」, 水土保持學報, 44(1), 50-64。(Chen, C.Y. (2013). "Evaluation of rainfall-based sediment disaster warning systems: case studies in Taiwan and Japan." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(1), 50-64. (in Chinese))
- [6] 陳振宇、陳均維、陳國威、林詠喬 (2019), 「坡地降雨致災熱區警戒模式」, 中華水土保持學報, 50(1), 1-10。(Chen, C.Y., Chen, J.W., Chen, K.W., Lin, Y.C. (2019). "Warning Model for Predicting the Risk Zones of Rainfall-Induced Slope Land Disasters." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 50(1), 1-10. (in Chinese))
- [7] 水土保持局 (2022), 「111 年度 1729 條土石流潛勢溪流圖」。(Soil and Water Conservation Bureau. (2022). "Map of 1729 potential debris flow torrent in 2022." (in Chinese))
- [8] 詹錢登、王志賢 (2017), 「降雨誘發土砂災害警戒機制之研究」, 成果報告, 水土保持局。(Jan, C.D., and Wang, C.H. (2017). "Study on warning system of rainfall-induced sediment disaster." *results report*, Soil and Water Conservation Bureau, Nantou, Taiwan. (in Chinese))
- [9] 戴義欽、詹錢登 (2016), 「集水區大規模土砂災害風險辨識與耐受力盤查」, 成果報告 (編號: SWCB-105-085), 水土保持局。(Tai, Y.C., and Jan, C.D. (2016). "Risk identification and tolerability investigation of large-scale sediment-related disasters in watershed." *results report*, no.: SWCB-105-085, Soil and Water Conservation Bureau, Nantou, Taiwan. (in Chinese))
- [10] Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., and Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73, 209-263.
- [11] Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lerner-Lam, A. L., & Arnold, M. (2005). "Natural disaster hotspots: a global risk analysis." *The World Bank*.
- [12] Liu, C.-C., Luo, W., Chung, H.-W., Yin, H.-Y., and Yan, K.-W. (2018). Influences of the Shadow Inventory on a Landslide Susceptibility Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7, 374
- [13] Liu, C.-C., Y.-H. Chen, M.-H. M. Wu, C. Wei and M.-H. Ko. (2019) Assessment of forest restoration with multitemporal remote sensing imagery. *Scientific Reports*, 9, 7279.
- [14] Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., and van Ypserle, J.P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 151
- [15] Shiu, W.J., Lee, C.F., Chiu, C.C., Weng, M.C., Yang, C.M., Chao, W.A., and GeoPORT Working Group. (2023). Analyzing landslide-induced debris flow and flow-bridge interaction by using a hybrid model of depth-averaged model and discrete element method. *Landslides*, 20(2), 331-349.
- [16] Zuzak, C., Mowrer, M., Goodenough, E., Burns, J., Ranalli, N., and Rozelle, J. (2022). The national risk index: establishing a nationwide baseline for natural hazard risk in the US. *Natural Hazards*, 114(2), 2331-2355.

2023 年 11 月 09 日 收稿

2024 年 02 月 22 日 修正

2024 年 05 月 28 日 接受