

應用地景指標與空間統計方法於崩塌復育之研究

王韻皓^[1,2] 謝漢欽^[1] 王培蓉^[1] 廖學誠^{[2]*}

摘要 本研究利用多時序崩塌地圖層，結合地景指標、空間分析及羅吉斯迴歸等方法，監測六龜試驗林在莫拉克颱風後崩塌地在時間與空間尺度上自然復育之變化，並分析崩塌地自然復育重要的驅動因素，研究發現莫拉克颱風造成的崩塌地總面積在最初兩年急劇下降，之後呈緩慢減少趨勢。自然復育面積在 2012 年達到高峰，之後面積維持大致相同。羅吉斯迴歸分析顯示，地景指標 CONTIG、距崩塌邊界的距離 DS、地景指標 AREA、海拔高度與坡度是自然復育的重要影響因素，這些結果顯示，種子來源的可獲得性是崩塌地自然復育的關鍵，此外，分散且較大面積的地景、較低高度和較緩坡度的地形，有利於崩塌地的自然復育。本研究成果可提供未來森林經營規劃重要的科學依據。

關鍵詞：崩塌地、自然復育、空間自相關、地景指標、羅吉斯迴歸。

Landscape Metrics and Spatial Statistics for Monitoring Natural Restoration After Landslides

Uen-Hao Wang^[1, 2] Han-Ching Hsieh^[1] Pei-Jung Wang^[1] Shyue -Cherng Liaw^{[2]*}

ABSTRACT In this study, multitemporal landslide layers combined with landscape metrics, spatial analysis, and logistic regression were used to monitor spatiotemporal changes in forest restoration and identify key factors promoting natural restoration. The total area of landslides caused by Typhoon Morakot markedly decreased within the first 2 years, followed by a gradual decline. Ecological regeneration peaked in 2012 and then stabilized. Logistic regression indicated landscape indicators such as CONTIG (a patch metric), distance from the landslide boundary, AREA (a patch metric), elevation, and slope gradient as key factors influencing natural restoration. These findings highlight the importance of seed source availability in the natural restoration of landslide areas. Landslide areas with more dispersed landscapes, larger areas, lower elevations, and gentler slopes appear to be more conducive to natural restoration. The results may guide future forest management.

Key Words: landslide, natural restoration, spatial autocorrelation, landscape metric, logistic regression

一、前言

臺灣森林覆蓋約佔 60%面積，但因地理環境特殊，受地形陡峭、坡度大及地質脆弱等影響，一遇颱風、豪雨等天然災害，往往造成了森林生態系嚴重的損害。隨著極端氣候、全球暖化的問題加劇，強降雨的頻率增加，臺灣森林生態系的服務功能面臨嚴峻的挑戰。2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風重創南臺灣，強降雨造成山區很嚴重的崩塌及土石流，六龜試驗林鳳崗觀測站在颱風期間觀測到該區歷史最大降雨紀錄，單日降雨量高達 1,290 mm (陸象豫, 2018)，因大豪雨所引發的崩塌處約 204 處，總面積約 804.49 ha (陸象豫等, 2011)，如此大規模的崩塌使森林生態系遭受到破壞，造成林地崩落、地貌改變 (鍾安晴等, 2022)。

森林在經歷崩塌後，通常會通過自然演替過程進行復育，過去的研究顯示，健康森林生態系統往往具備自我恢復

能力 (陳建帆等, 2021)。根據 Zhang et al. (2014) 的研究，森林通過演替過程展現了其自然復原的能力。然而，這一過程與干擾的強度成正比，即干擾越強，森林復原所需的時間越長，大部分遭受破壞的森林生態系統需要超過 40 年的時間自然恢復 (Qiu and Xu, 2015)，在單座山的區域尺度上，樹木生物量的恢復大約需要 80 年，而要使崩塌後的森林結構與成熟林相似，則至少需要 200 年 (Dislich and Huth, 2012)，這突顯了時間是森林復育的一個關鍵因素。

空間的異質性對森林復育過程也有顯著影響，在崩塌干擾後的森林復育過程中，多個因素相互作用，這些因素與特定的空間位置緊密相關，例如，Zhang et al. (2014) 在研究汶川地震後的森林復育，發現復育主要發生在坡度和海拔適宜的區域；Qiu and Xu (2015) 強調了林木種子的可獲得性對植被恢復的重要性；宋承恩等 (2022) 研究指出坡向、海拔和種源距離是影響崩塌復育的重要因素，這些因素導致崩塌復

[1] 農業部林業試驗所

Taiwan Forestry Research Institute, Ministry of Agriculture, Taipei, Taiwan, R.O.C.

[2] 國立臺灣師範大學地理學系

Department of Geography, National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail: liaw@ntnu.edu.tw

育遵循不同的演替途徑，並且這些途徑會因時空異質性而有所不同 (Dislich and Huth, 2012)。因此，要深入理解森林在崩塌干擾後的復育過程和驅動機制，長期的森林干擾與復育動態監測至關重要。

自 1970 年代 Landsat 資源衛星首次升空以來，多光譜衛星影像已成為監測地表覆蓋變化的重要工具，這些衛星影像的主要優勢在於能夠提供多時序和不同空間尺度的資訊，而且面積覆蓋廣泛且包含許多人工難以到達的區域，因此在崩塌地監測方面發揮了關鍵作用 (Zhou et al., 2021)。這些技術也被廣泛應用於評估和追蹤自然災害後的復育進程 (宋承恩等, 2022)，航遙測技術提供了清晰和準確的空間資訊，可以同時觀察小尺度空間 (如單一崩塌區域) 和大尺度地景的動態變化 (Dislich and Huth, 2012)，並且提供自然災害規劃、評估和應用的整合 (Marlier et al., 2022)。隨著這些技術的不斷發展，我們對於森林擾動後演替動態的理解與分析能力也日益增強 (Cillis et al., 2021)。

在空間分析技術中空間自相關是常被使用的一種重要方法，主要用來檢測資料是否呈現出空間群聚現象，國內外都有許多相關研究，Ping et al. (2004) 利用全域空間自相關分析棉花產量的空間相依性，發現產量受到氣候條件的顯著影響，在干旱年份呈現顯著自相關，即棉花的產量在空間上呈現聚集性，高產量的地區周圍往往也是高產量，而在濕潤年則無顯著的自相關；同樣，Fu et al. (2014) 發現中國東南部亞熱帶森林中枯落物碳具有顯著的正空間自相關；Sun and Fan (2020) 利用空間自相關方法探索天然和人工針葉林生物量碳密度的空間格局，研究發現天然林針葉林的生物量碳密度有較高的空間相依性；Yeh and Liaw (2021) 利用空間自相關分析臺灣東部受自然干擾後崩塌的空間自相關，發現崩塌區域有較高的正相關，而本研究主要使用全域空間自相關方法，分析六龜試驗林莫拉克颱風後崩塌復育整體空間的分布情況，。

此外，本研究也運用景觀生態學概念來分析崩塌及復育景觀動態變化情形，景觀生態學著重於分析地景中不同生物群落間的錯綜複雜因果反饋關係 (鄔建國, 2003)，強調空間異質性和生態過程之間的相互作用 (Ekwealor et al., 2019)，此學科已發展出量化地景型態的地景指標 (Griffith, 2002)，來描述一個區域的空間特徵，FRAGSTATS 等軟體可用於量化土地覆蓋的空間模式，包括坵塊指標、類別指標和地景層級指標 (Ojoi et al., 2016)，這些指標結合遙感數據和實地測量資訊，進行地理空間分析，有助於分析生態系統的組成和配置變化 (Narmada et al., 2021)，過往的研究已經利用地景指標來監測地景結構的變化，鄭祈全 (1999) 應用 GIS 及地景結構指標探討砍伐和林道開闢對地景結構的影響，王素芬 (1999) 利用碎片維度指標分析不同經營作業對地景的影響，Fynn and Campbell (2018) 通過地景指標監測維吉尼亞州森林變化，發現城市擴張對自然森林生態系統和生物多樣性有長期重大影響，Talukdar et al. (2021) 使用地景指標監測地景結構變化，發現多樣性地景指標呈現下降趨勢，近年來，越來越多研究結合地景指標進行預測模型的建模，Dezhkam et

al. (2017) 描述了地景的不同特徵，並利用地景指標評估土地變化模擬模型的性能，Cushman et al. (2017) 將地景指標變數加入森林損失率的預測中，提高了預測效能，Arora et al. (2021) 結合地景指標和監督式支持向量機分類技術，從 Landsat 衛星分類出土地覆蓋圖，並預測地景變遷。

綜合上述，本研究提出一種結合長期監測、地景結構變動、空間自相關及迴歸分析等綜合方法，以更全面地理解和預測天然災害後森林生態系統的復育過程，深入分析莫拉克颱風對臺灣六龜試驗林所造成的長期影響，並探究自然復育過程中的關鍵因素。研究的主要目標可分為三大點：(1) 瞭解莫拉克颱風後六龜試驗林崩塌地長期變化情形；(2) 六龜試驗林崩塌地地景結構變遷特性研究；(3) 六龜試驗林崩塌地自然復育驅動機制及預測模型評估。

二、研究方法

1. 研究區域

本研究以林業試驗所轄管之六龜試驗林為研究範圍 (圖 1)，林區位於臺灣本島南部，荖濃溪以東，中央山脈西側之狹長地帶，南北長約 19.5 km，東西寬約 13.0 km。林區海拔高度介於 250 ~ 2,600 m 間，位於荖濃河流域，由其支流濁口溪底至林巴拉山，高程相差 2000 m 以上，行政區大部份劃屬在高雄市茂林區。其東面及北角鄰接國有林之荖濃溪事業區，南及西南連接屏東事業區，西南及北隅大部份與保留地及公私有林連接，地形呈南北走向，全區面積約 9,882 ha，其中天然林約佔 83%，人工林約佔 15%，其他約佔 2% (林文智, 2012)。

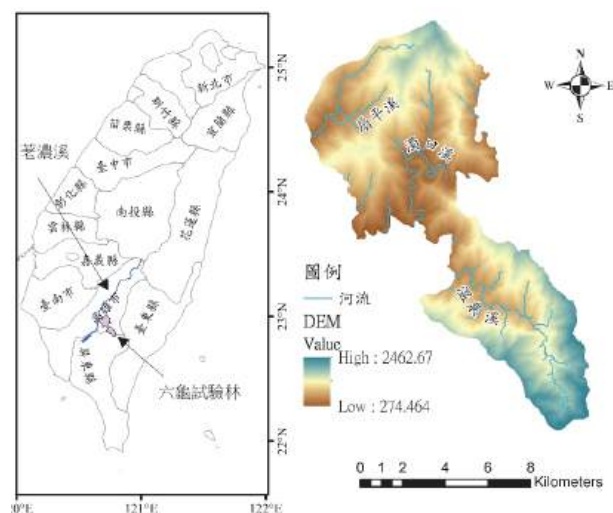


圖 1 六龜試驗林位置圖

Fig.1 Lioukuei experimental forest area

2. 研究材料

(1) 多時序崩塌地圖

本研究使用了林業及自然保育署提供的多時序崩塌地圖層 (圖 2)，時間範圍為 2009 年至 2018 年，製作這些地圖的主要資料來源為當年度 1 至 7 月的全島

鑲嵌衛星影像，其中 2009 年至 2016 年使用了福衛二號衛星影像，而 2017 年至 2018 年則使用了 SPOT 衛星影像，崩塌地圖產製主要是運用自動特徵萃取及人工判釋的方法，判釋最小面積為 0.1 公頃，本研究的主要擷取區域為六龜試驗林的範圍。

(2) 地形資料

使用地政司所提供 2010 年六龜試驗林空載光達資料所產製的 1 m x 1 m 網格解析度的數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，做為本研究主要使用之地形資料。

(3) 氣象資料

資料取自「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」(簡稱 TCCIP) 所產製的氣溫及雨量網格化觀測資料，網格大小為 1 km x 1 km，座標系統為 WGS84，經緯度代表網格中心點，使用之時間範圍為 2010 年至 2018 年，將此區間內之年均溫及年總雨量加總後平均，所得之年平均溫度及年平均總雨量，即做為後續空間分析之氣象因子。

(4) 造林台帳

主要使用六龜試驗林造林台帳，造林年份從 1971 年至 1991 年，造林台帳是一份記錄森林造林的文件，其中包括了每次造林活動的詳細資料，透過分析造林台帳中所記錄的人工林的空間分布 (圖 3)，能有效地

區分六龜試驗林中的人工林和天然林的空間位置，做為後續林地類型分析的重要依據。

3. 研究方法

(1) 崩塌地長期變動分析

本研究主要採用地理資訊系統軟體 ArcGIS Pro 進行相關空間變異分析，首先，建立基線資料，主要利用 2009 年崩塌地圖 (莫拉克颱風發生前) 與 2010 年崩塌地圖 (莫拉克颱風發生後)，透過變異分析萃取出新增崩塌地，作為基線資料，並分析 2011 至 2018 年崩塌地圖，找出基線崩塌地後來自然復育的區位，即為由崩塌轉變為植生的區域，建立 GIS 圖層 (圖 4)，並進行後續的分析，為確保研究的精確性和可靠性，在 2011 至 2018 年的分析中排除了原屬崩塌地，自然復育後又再次崩塌區域，並假設其為受新氣候事件 (例如颱風或豪雨) 所引發的再次崩塌，這些被排除的區域不納入分析範圍，以更專注在研究六龜試驗林莫拉克颱風所引發之崩塌及自然復育的過程。

此外，為了確定林地類型 (天然林或人工林) 對各時期的復育的影響，使用 ArcGIS Pro 將 2011 至 2018 年的自然復育圖層與造林台帳圖層進行套疊，並計算復育區域在天然林和人工林中的面積分布，以評估這兩種林地類型對復育過程的相對影響。

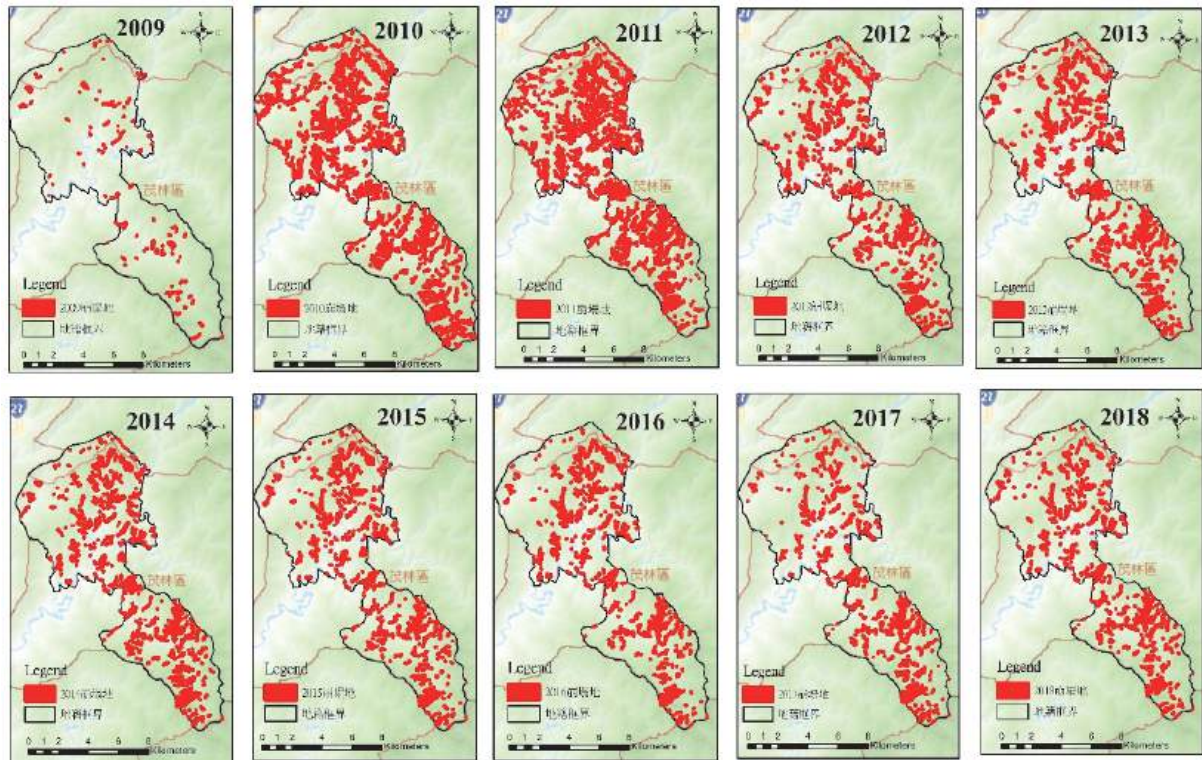


圖 2 六龜試驗林崩塌位置圖 (上左至右：2009-2013 年；下左至右：2014-2018 年)

Fig.2 Landslide sites in Lioukuei experimental forest area (Upper left to right: 2009-2013; lower left to right: 2014-2018)

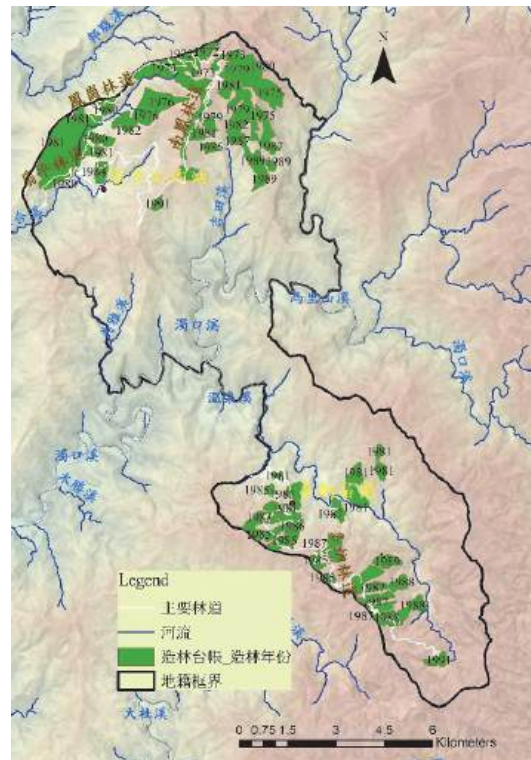


圖 3 六龜試驗林造林台帳圖

Fig.3 Afforestation Register Map in Lioukuei experimental forest area

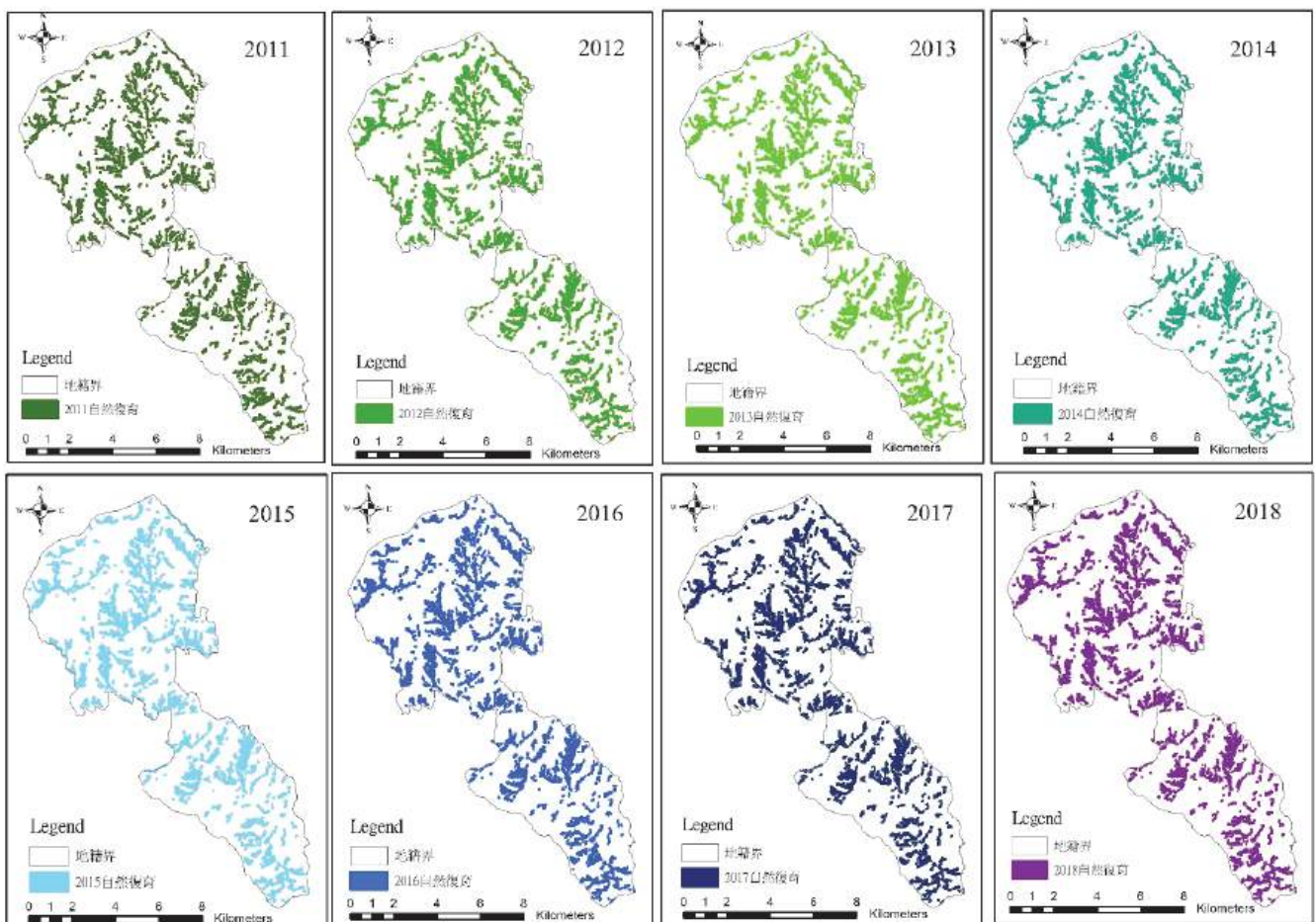


圖 4 六龜試驗林自然復育位置圖

Fig.4 Natural restoration sites in Lioukuei experimental forest area

(2) 空間自相關分析

本研究運用全域空間自相關 (Global Moran's I) 分析法，主在評估 2010 至 2018 年間崩塌地自然復育區域的空間分佈是否呈現集聚特性。全域空間自相關是一種用於測量空間資訊的群聚或分散程度的統計方法，其關鍵統計量是 Moran's I 指標，Moran's I 指標的計算公式如下 (Cliff and Ord, 1970; Ping et al., 2004; Yeh and Liaw, 2021)：

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$j \neq 1$ ，公式中若 i 與 j 相鄰則 $w_{ij}=1$ ，若 i 與 j 不相鄰則 $w_{ij}=0$ ，變數 X 在 i 、 j 的值表示為 X_i 與 X_j ， $\bar{x}$ 為變數平均值， n 為空間單元總數。

為了確定空間自相關的統計顯著性，本研究對 Global Moran's I 值進行顯著性檢定，在 $P < 0.01$ 的顯著水準下，代表空間單元的分布不是隨機的，而是受到特定的空間因素驅動。研究選擇了 2011 至 2018 年期間自然復育圖層，以便比較和分析崩塌復育過程中的空間分布變化，從而了解崩塌復育過程中的空間動態。

(3) 地景指標

本研究主要關注莫拉克颱風對臺灣六龜試驗林森林生態系統的影響，特別是在崩塌災害發生後崩塌地地景結構的變動，為了分析地景結構的變化，參考前人研究，選擇了代表不同空間特徵的地景層級指標，這些指標包括代表密度和邊緣特性的地景指標，如區塊數目 (NP) 和邊緣密度 (ED)；代表形狀特徵的景觀形狀指標 (LSI) 以及碎片維度 (PAFRAC)；代表聚集特性的聚集度指標 (CONTAG) 和分離度指標 (SPLIT) 等，透過對這些地景指標 (表 1) 的計算和分析，來評估崩塌地的地景結構變動情形。

(4) 崩塌復育預測模型

① 影響自然復育的因子。

崩塌復育是一個受多重因素影響的高度複雜過程，本研究主在透過建立崩塌地自然復育預測模型，深入分析影響崩塌復育的關鍵驅動因子。研究選取可能影響崩塌復育的變數納入預測模型評估，所選用的變數包含有地形、氣象、地景與距離等面向變數共 14 個，作為分析影響自然復育的重要驅動變數 (表 2)。選取影響自然復育的因子時，除參考相關前人研究，如 Zhang et al. (2014) 的研究提出森林復育主要發生在坡度和海拔適宜的區域；Qiu and Xu (2015) 強調林木種子的可獲得性對植被恢復具有關鍵作用；宋承恩等 (2022) 的研究指出，坡向、海拔及種源距離是影響崩塌地復育的重要因素。同時，考量研究地區 90% 為森林覆蓋，種子來源相對充足，因此納入崩塌地的坵塊地景指標，以探討崩塌地景與周圍環境的關聯性，並評估地景結構對自然復育的影響。此外，雖然土壤是植生生長的重要因素之一，但由於本研究無法取得全

區完整的土壤資料，因此未納入變數分析。

過去的研究顯示，在崩塌地研究中，航遙測的空間尺度通常設定在 5 m 至 30 m 之間 (Wang et al., 2019; Sevgen et al., 2019; Nhu et al., 2020a; Nhu et al., 2020b; Zhou et al., 2021)，且本研究所使用的崩塌地圖層，衛星影像的解析度為黑白影像 2 m，彩色影像 8 m，因此參考前人研究，並考量本研究所使用影像的解析度，故將分析之空間尺度設定為 10 m (Sevgen et al., 2019; Nhu et al., 2020a; Nhu et al., 2020b)，以下為本研究選取影響崩塌自然復育的相關因子：

A. 地形參數：

主要利用地政司提供 1 m x 1 m 解析度的 DEM 資料，並為配合後續分析空間尺度一致性之需求，利用 ArcGIS Pro 的 resample 再取樣方法，選取立方迴旋法 (cubic)，將網格解析度調整成 10 m x 10 m，並利用 10 m 網格 DEM 資料，計算出地形相關參數，包括坡度、坡向、地形濕度指數、逕流強度指數等，地形濕度指數 (TWI) 的公式如式 (2)：

$$TWI = \ln(A/\tan(\beta)) \quad (2)$$

A 為每單位寬度的上游集水面積， β 是坡度， $\ln$ 是自然對數。

TWI 可以幫助確定崩塌地區的水分條件，TWI 的值越高，代表該地點的水分聚集程度越高，這個指標在 GIS 分析和環境科學中非常有用，是評估植被復育的一個重要資料。

逕流強度指數 (SPI) 的公式如式 (3)，SPI 的值越高，表示該地點的水流侵蝕潛力越大，也意味著強大的水流動力，可能對崩塌地的穩定性構成威脅，在這些地區，植被復育需要考慮增強土壤抗侵蝕能力，以及通過植物根系來穩固土壤。

$$SPI = A \times \tan(\beta) \quad (3)$$

A 為流域累積面積， β 是坡度， $\tan(\beta)$ 表示坡度的正切值。

B. 坵塊地景指標：

坵塊地景指標是指用於描述景觀結構特徵的量化指標，能夠反映景觀的組成和配置，包括景觀碎片化、坵塊大小和形狀、坵塊之間的連接度等，本研究納入崩塌地的坵塊地景指標作為自然復育的考量因子，以深入瞭解不同地景特徵對復育的影響，在本研究中，選取了六個坵塊層級的地景指標 (表 3)，這些指標包括坵塊面積 (AREA)、坵塊周長 (PERIM)、周長面積比 (PARA)、分形維數 (FRAC)、近圓形形狀指標 (CIRCLE) 及鄰近指數分佈 (CONTIG) 等，這些指標的計算是以 2010 年崩塌區塊為主，並利用 Fragstats 軟體，針對每個崩塌區塊計算得出，透過這些坵塊地景指標，能夠更全面地評估崩塌地區的地景結構特徵，並進一步分析其對自然復育的影響。

表 1 本研究所使用地景層級地景指標

Table 1 Landscape metrics of Landscape level used in current study

地景指標	縮寫	公式	描述
區塊數量	NP	$NP = N$	N=坵塊數量
邊緣密度	ED	$ED = \frac{E}{A} (10000)$	E=坵塊總邊緣長度 (m) A=地景總面積 (m ²)
景觀形狀指標	LSI	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	E=坵塊總邊緣長度 (m) A=地景總面積 (m ²)
碎形維度	PAFRAC	$PAFRAC = \frac{\frac{2}{\left[N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} - \ln a_{ij}) \right]} - \left[\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij}) \right) \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln a_{ij} \right) \right]}{(N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij})^2) - (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln p_{ij})}$	a _{ij} =坵塊ij面積 (m ²) p _{ij} =坵塊ij周長 (m) N=坵塊數量
聚集度指標	CONTAG	$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] * \left[\ln(P_i) \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] (100)$	p _i =坵塊所佔景觀的比例 g _{ik} =i與k類型區塊毗鄰的網絡數，依據double-count方法 m=坵塊類型的數量
分離度指標	SPLIT	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$	a _{ij} =坵塊ij面積 (m ²) A=地景總面積 (m ²)

表 2 崩塌地自然復育驅動因素

Table 2 Driving factors for natural restoration in landslide sites

面向	變數	代碼	資料來源
地形	高程	DEM	地政司2010年空載光達資料取得
	坡度	SP	地政司2010年空載光達資料求得
	坡向	AP	地政司2010年空載光達資料求得
	地形濕度指數	TWI	地政司2010年空載光達資料求得
	逕流強度指數	SPI	地政司2010年空載光達資料求得
氣象	氣溫	TM	TCCIP網站
	雨量	RA	
坵塊地景指標	坵塊面積	AREA	2010年崩塌地圖層求得
	坵塊周長	PERIM	
	周長面積比	PARA	
	分形維數	FRAC	
	近圓形形狀指標	CIRCLE	
	鄰近指數分布	CONTIG	
距離	距崩塌地邊界的距離	DS	2010年崩塌地圖層求得

表 3 本研究所使用之坵塊地景指標

Table 3 Patch metrics used in current study

坵塊地景指標	縮寫	公式	描述
坵塊面積	AREA	$AREA = a_{ij} \left(\frac{1}{10000} \right)$	a _{ij} =坵塊ij面積 (m ²)
坵塊周長	PERIM	$PERIM = p_{ij}$	p _{ij} =坵塊ij周長 (m)
周長面積比	PARA	$PARA = \frac{p_{ij}}{a_{ij}}$	a _{ij} =坵塊ij面積 (m ²) p _{ij} =坵塊ij周長 (m)
分形維數	FRAC	$FRAC = \frac{2 \ln(0.25 p_{ij})}{\ln(a_{ij})}$	a _{ij} =坵塊ij面積 (m ²) p _{ij} =坵塊ij周長 (m)
近圓形形狀指標	CIRCLE	$CIRCLE = 1 - \frac{a_{ij}}{a_{ijs}}$	a _{ij} =坵塊ij面積 (m ²) a _{ijs} =坵塊最小外接圓面積
鄰近指數分佈	CONTIG	$CONTIG = \left[\left(\sum_{r=1}^Z C_{ijr} / a_{ij}^* \right) - 1 \right] / (V - 1)$	C _{-ijr} =坵塊中像元r的接觸值 a _{ij} *=坵塊像元格數的數量 V=3*3像元模板值的總和

C. 氣象因子：

由於六龜試驗林區域地勢變化較大，且存在顯著的微氣候差異，故氣象資料對自然復育過程具有重要影響，因此，將氣象資料納入復育的考量因素中，然而，目前可取得的氣象資料僅限於 TCCIP 提供 1 km 網格資料，鑒於現有可取得資料的限制，以及為了確保氣象資料的空間尺度與分析設定一致，本研究利用 ArcGIS Pro 中克利金內插 (kriging) 的方法，將 1 km 氣象網格資料，降尺度至 10 m。降尺度是將較大面積的網格資料轉為較小面積的網格資料，以利後續進行更細緻的分析，在氣象水文領域中常被使用 (Kim, et al., 2024)。

D. 距離因子：

在六龜試驗林中，森林邊緣通常擁有較多的植物種子源，這些種子可以在崩塌地上發芽生根，促進植被的重新建立，因此，距離種子源的距離被視為影響崩塌地自然復育的重要因素，六龜試驗林的地區幾乎全都被森林所覆蓋，佔據了整個區域的近 98%，因此，本研究選擇崩塌地距離到崩塌地邊界的距離，作為衡量離森林種源距離的指標，用來分析復育的可能性。本研究中，主要利用 ArcGIS Pro 中的 NEAR 工具，來計算每個崩塌地像元，到最近的崩塌地邊界的距離。崩塌像元即包含崩塌地內所有的像元，像元的網格大小為 10 m x 10 m，主要計算像元中心點至崩塌地邊界的距離。這個距離可以提供關於每個像元距離最接近的植物種子源有多遠的資訊，進而影響崩塌地的自然復育能力的評估，並有助於理解森林邊緣和崩塌地之間的空間關係，並為自然復育模型的建立提供了重要的參數。

② 模型建置

A. 共線性：

為避免崩塌復育預測模型中的自變數之間產生多元共線性 (Multicollinearity) 的問題，本研究在模型建立前進行了共線性檢測，主要使用皮爾森積差相關分析和方差膨脹因子 (VIF) 方法，以識別具有顯著共線性的自變數，並將其從模型中排除，自變數的排除標準是當皮爾森積差相關係數達到或超過 0.7，或 VIF 值超過 10 時，則予以剔除 (Guo et al., 2016; Milanović et al., 2020; Sahani et al., 2021)。

B. 羅吉斯迴歸：

本研究選用了羅吉斯迴歸 (Logistic Regression) 方法進行二元變數的迴歸分析，在模

型部份因變數被定義為崩場地 and 崩塌自然復育類型的二元變數，崩場地類別指的是自 2010 年的崩塌範圍一直持續到 2018 年仍然保持崩塌狀態的區域，而崩塌復育類別指的是 2010 年屬於崩塌範圍但到了 2018 年不再屬於崩塌範圍的區域，即被視為已經發生復育的區域，自變數則包括了本研究所選取的 14 個影響崩塌自然復育的變數，這些變數的資料被整合到崩場地和崩塌復育 (因變數) 的相同空間位置上，接著進行進一步的迴歸分析。

在進行迴歸分析之前，首先對自變數進行了資料標準化處理，這一步驟的主要目的是消除變數之間的尺度差異，由於不同變數可能具有不同的尺度和範圍，尺度差異可能對迴歸模型的性能產生不利影響，資料標準化可將所有變數縮放到相同的尺度上，以確保它們具有相似的影響力，並有助於模型有效地比較這些變數的效果。

C. 模型評估

為了評估本研究所使用模型效能，主要採用了兩種效能評估的方法，包括操作特性曲線 (ROC) 分析，以及曲線下面積 (AUC) 的測量，ROC 是一種用於評估分類模型性能的圖形工具，ROC 曲線是通過在不同概率閾值下繪製敏感性與特異性來構建，根據前人研究 (Wang et al., 2019; Ozkan et al., 2022; Nafouanti et al., 2021; Sevgen et al., 2019; Nhu et al. 2020)，ROC 曲線常與其下面的面積 (AUC) 一同用於評估預測模型的判定能力，AUC 值越高，表示模型的擬合性能越好 (Kuradusenge et al., 2020; Nhu et al., 2020a)，當 $AUC = 0.5$ ，表示模型沒有鑑別能力； $AUC = 0.5-0.7$ ，表示模型具有不佳的鑑別力； $AUC = 0.7-0.8$ ，表示模型具有可接受的鑑別力； $AUC = 0.8-0.9$ ，表示模型具有優良的鑑別力， $AUC > 0.9$ ，表示模型具有極佳的鑑別力 (Milanović et al., 2020)，這些效能評估方法有助於評估模型在預測崩塌復育方面的性能和準確性。

三、結果與討論

1. 莫拉克颱風後崩塌變動分析

本研究針對 2010 至 2018 年間每年崩場地及其復育面積的變化進行了統計分析，分析結果如圖 5 所示，圖中三條線分別代表不同年份的崩場地面積、自然復育面積及復育後再次崩塌的面積，在崩場地面積變化部份，從圖中藍色線條可見，崩場地的總面積在最初兩年急劇下降，而自 2013 年起呈現緩慢的減少趨勢，橘色線條則顯示自然復育的面積變

化, 2012 年復育面積達到最大, 然而之後受到各種干擾的影響, 復育區域經常遭受再次崩塌的影響, 導致復育面積的變化始終維持在一個相對穩定的水平, 灰色線條代表復育區域再次崩塌的面積, 除 2013 年和 2018 年再次崩塌的面積較多, 其餘年度大致維持一定面積。林文賜等 (2004) 探討 921 震災後崩塌地景變遷及植生復育情形, 發現在自然復育情況下, 地震後二年內之崩塌地面積及其地表植生已恢復為甚佳狀態, 崩塌地由震災初期之 829.50ha 減少為 187.06ha, 約減少 77.45%, 而崩塌區位之植生復育率亦已恢復達 58.93%。此外, 詹勳全等 (2015) 分析旗山溪集水區山崩復育狀況時亦指出, 集水區河道附近於災後經兩年多已有逐漸恢復的趨勢, 惟上游區位植生復育情況仍差。六龜試驗林於莫拉克颱風後, 崩塌地的總面積在最初兩年也急劇下降, 植生復育面積則快速增加, 顯示出台灣崩塌地自然復育能力甚強。

天然林和人工林中的復育面積部份, 分析 2011 年至 2018 年期間資料, 結果如圖 6 所示, 在分析期間內, 復育在天然林的比例介於 83.7%至 86.5%之間, 在人工林的比例介於 13.5%至 16.3%之間, 復育區域分布在天然林與人工林的比例, 在大多數時間裡維持相對一致的水平。

2. 自然復育區空間自相關

本研究對 2010 年至 2018 年期間的崩塌地自然復育過程進行了空間自相關性分析, 使用了 Moran's I 指標並進行了相應的顯著性檢定, 其結果如表 4, 根據所得結果, 在 2011 年崩塌地自然復育區域表現出了顯著的空間自相關性 ($P < 0.01$), 這表示 2011 年的自然復育區域在空間上存在明顯的關聯性, 然而, 從 2012 年至 2018 年, 自然復育區域的空間分佈呈現隨機分散, 顯著性檢定結果的 P 值均大於 0.01, 這代表自然復育區域在這段時間內不再呈現明顯的空間自相關性特徵。



圖 5 2010-2018 年崩塌、自然復育與再次崩塌面積折線圖
Fig.5 Area of landslide and restoration in 2010-2018

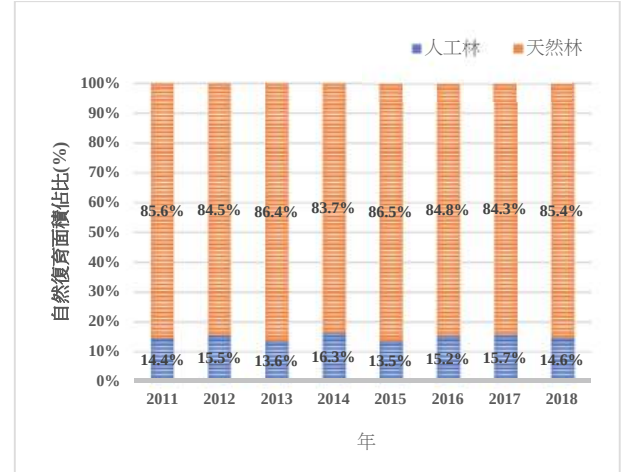


圖 6 2011 至 2018 年人工林與天然林崩塌復育面積佔比圖
Fig.6 Percentage of ecological restoration area in natural and plantation forests from 2010 to 2018

表 4 自然復育區域空間自相關結果

Table 4 The result of Global Moran's I in natural restoration area

Year	Moran's Index	P-Value
2011	0.0636	<0.0001
2012	-0.0011	0.8788
2013	-0.0004	0.8105
2014	-0.0001	0.6717
2015	0.0001	0.5719
2016	0.0002	0.5265
2017	0.0003	0.4866
2018	0.0001	0.6064

3. 崩塌地地景指標

本研究對 2010 年至 2018 年期間的崩塌地地景層級指標進行了全面分析, 結果如圖 7 所示, 圖中顯示, NP、ED、LSI 及 SPLIT 均呈現長期下降的趨勢, 這反映了崩塌地地景結構的演變, 長期來看, 崩塌區塊數量逐漸減少, 也呈現出崩塌地區域的複雜度降低、崩塌區塊形狀簡化, 以及整體景觀的連續性和一致性增強, 此外, CONTAG 指標呈現上升趨勢, 表明崩塌地在整體景觀的聚集程度逐漸增加。

PAFRAC 指標在 2010 至 2013 年呈現大幅下降, 之後在 2013 至 2016 年期間保持平穩狀態, 但在 2017 至 2018 年間出現了顯著的上升, 這反映了崩塌地的地景結構複雜度在研究期間的變化, 初期, 崩塌地的地景結構複雜程度大幅降低, 並且邊緣形狀變得比較簡單, 在中期, 地景結構複雜度及邊緣形狀維持不變, 但到 2016-2018 年, 崩塌地的形狀複雜性又開始增強, 這可能代表在研究的後期, 崩塌地的地景結構再次變得複雜。

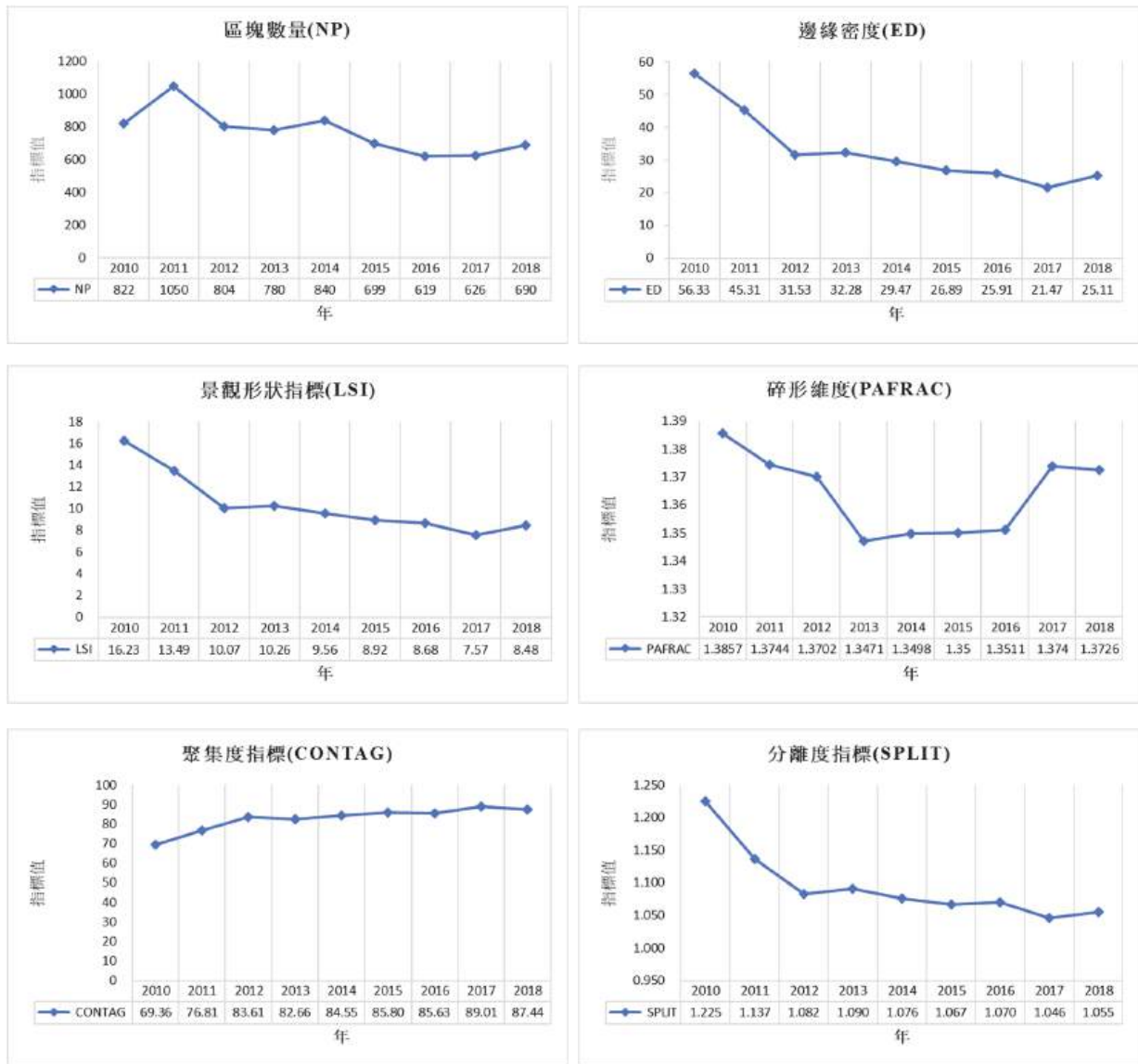


圖 7 2010 至 2018 年崩塌地地景指標折線圖

Fig.7 Landslide landscape metrics from 2010 to 2018

4. 自然復育模擬模型

(1) 自變數共線性分析

主要針對 14 個變數 (AREA、PERIM、PARA、FRAC、CONTIG、CIRCLE、DEM、SP、AP、TWI、SPI、RA、TM、DS) 的共線性進行了皮爾森相關係數分析和方差膨脹因子 (VIF) 分析，以評估它們之間的關聯性和可能的多元共線性問題，分析結果如表 5 及 6，由表中可明顯看出一些變數組合中，存在相對高的相關性，如 AREA 和 PERIM 之間的相關係數為 0.974，PERIM 和 FRAC 之間的相關係數為 0.758，PARA 和 CONTIG 之間的相關係數為 -0.997，DEM 和 TM 之間的相關係數為 -0.985，這些高度相關的變數可能導致多元共線性的問題，影響模型的穩定性和可解釋性。

另一方面，通過 VIF 的評估，初步發現 AREA、PERIM、PARA、FRAC、CONTIG、DEM、TM 等 7 個變數的 VIF 值超過了 10 的閾值，為符合本研究皮

爾森積差相關分析中相關係數達 0.7 以上，VIF 大於 10 之變數篩選設定，本研究排除 PERIM、PARA 和 TM 這 3 個變數，將其餘 4 個變數留下，共計 11 個變數納入羅吉斯迴歸分析，以評估其對崩塌地自然復育的影響並進行相關預測。

(2) 羅吉斯迴歸

為減少變數單位不同對模型的影響，將要納入羅吉斯迴歸分析之 AREA、FRAC、CONTIG、CIRCLE、DEM、SP、AP、TWI、SPI、RA、DM 等 11 個自變數先進行標準化，再利用 SPSS 軟體推算羅吉斯迴歸模型，所得結果如表 7，由表中可看出所有變數的 VIF 值均小於 10，這表明模型中不存在多元共線性的問題，此外，所有變數的 P-value 均小於 0.01，顯示變數可有效解釋崩塌復育發生的機率。

在模型的迴歸係數部分，可看出影響崩塌地自然復育的重要變數，其中以地景指標中鄰近指數分佈 CONTIG 對於崩塌地自然復育的影響最為顯著，其迴

歸係數為-0.907，表示當 CONTIG 值增加時，崩塌地彼此間的鄰近性越高，有更多的崩塌坵塊，其自然復育的可能性則明顯下降；另一重要的變數是距離崩塌邊界的距離 DS，其迴歸係數為-0.757，這意味著崩塌地距離邊界越近越短，則其自然復育的可能性就越高，有更多的種子源進入崩塌地以利自然復育；地景指標 AREA，代表單一崩塌地的坵塊面積，值高時代表的是單一崩塌地範圍面積較大，值小代表屬小範圍小面積的崩塌地，其迴歸係數為 0.501，表示單一崩塌地面積值高時，復育的機率增加，對於復育具有正向影響；DEM 的迴歸係數為-0.418，代表地形高程對復育有負向影響，即地形越高的地區，復育的可能性較低；最後，SP 的迴歸係數為-0.287，顯示坡度對復育也有負

向影響，即坡度較陡的地區，復育的可能性較低。

關於羅吉斯迴歸模型檢定部份，在 Omnibus 檢定，本模型所得之卡方值為 10219.768，顯著性 $P < 0.01$ ，表示本模式所選取的自變項能有效的聯合影響依變項，Hosmer 與 Lemeshow 檢定，所得之卡方值為 260.291，顯著性 $P < 0.01$ ，代表本模型預測值和實際觀測值之間存在一定的差異。另外經 SPSS 計算羅吉斯迴歸預測機率之 ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) 曲線及其曲線下面積 AUC (Area Under the Curve)，所得結果如圖 8，從 ROC 曲線可看出模型預測曲線良好，且 AUC 為 0.801，代表模型預測具有優良的鑑別力。

表 5 皮爾森相關分析結果

Table 5 The result of Pearson correlation analysis

	AREA	PERIM	PARA	FRAC	CONTIG	CIRCLE	DEM	SP	AP	TWI	SPI	RA	TM	DS
坵塊面積 (AREA)	1.000													
坵塊周長 (PERIM)	0.974	1.000												
周長面積比 (PARA)	-0.547	-0.528	1.000											
分形維數 (FRAC)	0.661	0.758	-0.404	1.000										
鄰近指數分布 (CONTIG)	0.558	0.538	-0.997	0.413	1.000									
近圓形形狀指標 (CIRCLE)	0.328	0.397	-0.280	0.689	0.277	1.000								
高程 (DEM)	-0.135	-0.177	0.051	-0.147	-0.055	-0.100	1.000							
坡度 (SP)	-0.111	-0.110	0.065	-0.082	-0.065	-0.023	0.056	1.000						
坡向 (AP)	-0.078	-0.039	-0.003	-0.013	0.003	0.035	-0.158	-0.150	1.000					
地形濕度指數(TWI)	-0.007	-0.003	0.027	0.013	-0.029	0.032	-0.038	-0.400	0.026	1.000				
逕流強度指數(SPI)	-0.002	-0.003	0.010	-0.005	-0.011	-0.001	-0.022	-0.020	-0.008	0.233	1.000			
雨量 (RA)	-0.024	-0.018	-0.075	-0.011	0.079	0.079	0.015	0.100	-0.092	-0.039	-0.025	1.000		
氣溫 TM	0.117	0.157	-0.048	0.125	0.053	0.084	-0.985	-0.050	0.158	0.021	0.010	-0.007	1.000	
距崩塌地邊界的距離 (DS)	0.305	0.261	-0.387	0.139	0.394	0.073	-0.008	-0.070	0.014	0.003	-0.008	0.075	0.010	1.000

表 6 自變數共線性檢測結果

Table 6 The result of Multicollinearity test of variables

Variables	VIF
坵塊面積 (AREA)	31.206
坵塊周長 (PERIM)	39.647
周長面積比 (PARA)	208.910
分形維數 (FRAC)	5.469
鄰近指數分布 (CONTIG)	213.988
近圓形形狀指標 (CIRCLE)	2.200
高程 (DEM)	35.532
坡度 (SP)	1.266
坡向 (AP)	1.118
地形濕度指數 (TWI)	1.288
逕流強度指數 (SPI)	1.068
雨量 (RA)	1.066
氣溫 (TM)	35.238
距崩塌地邊界的距離 (DS)	1.249

表 7 羅吉斯迴歸結果

Table 7 The result of Logistic Regression

	B	S.E.	Wald	P-value	Exp(B)	VIF
坵塊面積 (AREA)	0.501	0.021	574.262	<.001	1.651	2.410
分形維數 (FRAC)	-0.239	0.023	112.52	<.001	0.787	3.244
鄰近指數分布 (CONTIG)	-0.907	0.027	1128.105	<.001	0.404	1.627
近圓形形狀指標 (CIRCLE)	0.211	0.017	158.758	<.001	1.235	2.067
高程 (DEM)	-0.418	0.012	1267.522	<.001	0.659	1.059
坡度 (SP)	-0.287	0.014	406.229	<.001	0.751	1.263
坡向 (AP)	0.075	0.012	36.991	<.001	1.078	1.082
地形濕度指數 (TWI)	-0.105	0.015	50.661	<.001	0.9	1.279
逕流強度指數 (SPI)	0.197	0.053	13.628	<.001	1.218	1.066
雨量 (RA)	0.202	0.012	291.384	<.001	1.224	1.049
距崩塌地邊界的距離 (DS)	-0.757	0.012	3674.223	<.001	0.469	1.223
Constant	1.792	0.015	14224.188	<.001	6.004	

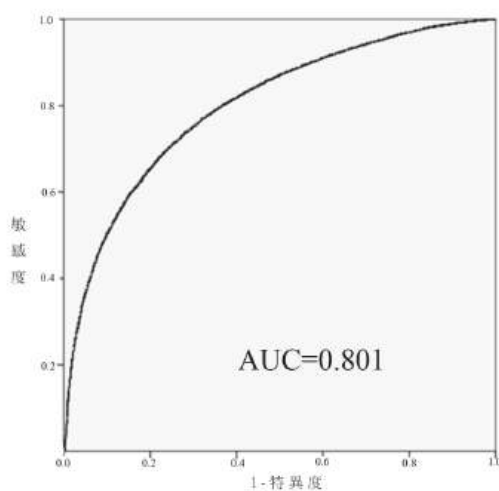


圖 8 ROC 曲線與 AUC 面積

Fig.8 ROC curve and AUC area

5. 綜合討論

本研究聚焦於莫拉克風災後的六龜試驗林區域，探討崩塌地的地景結構變化和自然復育情況，為排除其他干擾事件的影響，以每年的崩塌地圖層為基礎進行分析，排除已復育但再次崩塌的區域，以確保所研究的事件受到單一事件的影響。分析結果指出，2013 年和 2018 年再次崩塌的面積較多，與 2013 年臺灣發生多場重大豪雨事件，包括蘇力颱風、潭美颱風、康芮颱風和天兔颱風等及 2018 年臺灣南部也 823 水災事件有關，推測這些豪雨事件可能導致了大量的再次崩塌，進一步增加了再次崩塌的面積。

這些觀察與自然復育的空間自相關分析一致，根據分析結果，2011 年自然復育區域呈現顯著的空間自相關，表明此年度內自然復育集中在特定地區進行，然而，2012 年至 2018 年的自然復育區域空間自相關則未顯著。參考先前變動分析的結果，顯示部份年份再次崩塌面積增加，可能在這段時間內，受到災害降雨等干擾事件影響，造成了自然復育的過程中因其他干擾因素，影響了自然復育地區的空間分佈和連續性，因此未呈現出明顯的群聚特性。

本研究也探討不同林地類型對自然復育的潛在影響，結

果顯示，在分析的時間範圍內，天然林與人工林中的自然復育比例保持了相對一致的水平，這一結果似乎表明，在六龜試驗林不同林地類型對自然復育過程並沒有產生顯著的影響，不論是天然林還是人工林，它們在促進自然復育方面發揮了相似的作用。

綜合各地景層級指標的變化，觀察到莫拉克風災後的地景結構，崩塌地的數量逐年減少，且地景的複雜度逐漸減弱，此外，崩塌地的形狀也呈現簡化的趨勢，同時整體景觀呈現更多的連續性和一致性，這些長期趨勢似乎顯示出地景結構具自然復育的潛力。

自然復育模型的迴歸分析結果顯示，地景指標 CONTIG 是前五個對自然復育影響最顯著的變數之一，此指標主要是評估坵塊連結性與鄰近性，值高時表示區塊之間有更多的連接，聚集程度高，而值低時，表示區塊之間分散，連接性差，CONTIG 迴歸係數為-0.907，負值表示當 CONTIG 值增加時，崩塌地自然復育的可能性明顯下降，代表當崩塌地坵塊連接性較高呈現聚集的地景結構時，自然復育機會相對較低，這可能是因為有較多的獨立崩塌地塊，其鄰近性越高，將越不利於生態多樣性的復育和物種的分布。

此外，距離崩塌邊界邊緣的距離也會對自然復育扮演著關鍵角色，迴歸分析顯示其對自然復育的影響係數為-0.757，即崩塌地離崩塌邊界越遠，其自然復育的可能性越低，這可能與崩塌地自然復育時能獲得種子源多寡有關，同時，這一結果也與前人研究結果一致，這些研究指出，靠近崩塌地邊界的區域更容易獲得種源，進而促進崩塌地的復育，離得越遠則越不易進行自然復育（黃雅莉和陳朝圳，2018；Qiu and Xu, 2015）。另外，地景指標 AREA 對於復育具有正向影響，其迴歸係數為 0.501，表示崩塌地面積的增加會增加復育的可能性，大面積的崩塌地可能為植物提供更多的生長空間和生態環境，有利於物種多樣性的回復。

至於地形變數，海拔高和坡度對自然復育有重要影響，先前的研究已指出，植物在特定生育地的存活和繁衍取決於其對當地環境的適應性（陳永寬，1998），顏添明（1999）也提到坡度及高程等地形因子同時也是影響林木生長的因素之一，根據本研究結果，海拔高的迴歸係數為-0.418，顯示

地形高程對自然復育有負向影響，即地形越高的地區，自然復育的可能性較低，可能是由於高山地區的氣候和土壤條件不利於植被生長，而坡度的迴歸係數為-0.287，顯示坡度對自然復育也有負向影響，即坡度較陡的地區，自然復育的可能性較低，可能是因為坡度較陡的地區容易受到水土流失和崩塌的影響，不利於植被的復育。

四、結 論

本研究針對六龜試驗林莫拉克颱風後，2010 至 2018 年期間每年崩塌地及自然復育變動分析，研究結果顯示，崩塌地的總面積在最初兩年急劇下降，之後呈現緩慢減少趨勢，自然復育的面積變化也顯示，2012 年自然復育達到最大，但之後受到各種干擾的影響，自然復育區域經常遭受再次崩塌，導致復育面積變化相對穩定。從崩塌地的地景結構變化看出，崩塌地數量逐年減少，地景複雜度降低，且崩塌地形狀趨於簡化，然而，CONTAG 指標呈現上升趨勢，顯示崩塌地在整體景觀中的聚集程度逐漸增加。在自然復育模型的迴歸分析顯示，地景指標 CONTIG、距崩塌邊界的距離 DS、地景指標 AREA、海拔高 DEM 與坡度 SP 等變數，對自然復育的影響被確定為重要因素，這些結果強調了地景結構對崩塌地自然復育的重要性，分散且大面積的地景結構對自然復育有利，此外，較低的高度和較緩的坡度也有助於崩塌地的自然復育，另外種子來源的取得也很重要，離種子來源近或是與種子來源接觸面廣，都是增加崩塌地自然復育的可能性。本研究提供了六龜試驗林地崩塌地景結構和自然復育長期變化的分析結果，並確定了影響自然復育的主要因素，研究結果可提供六龜試驗林崩塌復育之空間資訊及科學數據，做為森林經營參考之用，然而，由於莫拉克颱風發生時間仍不長，崩塌地自然復育過程仍在進行中，因此，建議未來仍需長時期監測以更全面地了解不同時期的崩塌復育發展，並且在預測自然復育模型建置方面，可運用機器學習方法優化崩塌復育預測模型，並且評估不同模型之間的預測效能。

五、參考文獻

- [1] 王素芬、陳永寬、鄭祈全 (1999)，「地理資訊系統和碎形維度於森林地景空間變化上之應用」，航測及遙測學刊，4(2)，33-53。(Wang, S.F., Chen, Y.K., and Cheng, C.C. (1999). "Application of Geographic Information System and Fractal Dimension in Forest Landscape Spatial Variability." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 4(2), 33-53. (in Chinese))
- [2] 宋承恩、王韻皓、林國聖、王培蓉、詹進發、陳毅青、王素芬 (2022)，「以多時期衛星影像及樹冠高程模型分析崩塌植生復育與影響因素」，農業工程學報，68(4)，44-62。(Song, C.E., Wang, U.H., Lin, G.S., Wang, P.J., Jan, J.F., Chen, Y.C., and Wang SF. (2022). "Analysis of the vegetation recovery and influencing factors for landslide restoration using multi-temporal satellite imagery and canopy height model." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 68(4), 44-62. (in Chinese))
- [3] 林文智 (2012)，「六龜試驗林造林地清查成果及其後續經營」，林業試驗所造林地清查及後續經營研討會論文集，台北，75-92。(Lin, W.Z. (2012). "Inventory results of Experimental forest in the Lioukuei and its follow-up management." *Proceedings of the Seminar on Forest Inventory and Management of the Forestry Research Institute*, Taipei, P75-92. (in Chinese))
- [4] 林文賜、黃碧慧、林昭遠、周文杰 (2004)，「921 震災崩塌地特性分析及變遷監測之研究」，中華水土保持學報，35(2)，141-149。(Lin, W.T., Huang, P.H., Lin, C.H., and Chou, W.C. (2004). "Extracting Topographic Information and Monitoring Landscape Change for the Landslide Caused by the 921 Earthquake." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 35(2), 141-149.
- [5] 陳永寬、鄭祈全、廖錦偉 (1998)，「應用地理資訊系統篩選臺灣杉造林地」，航測及遙測學刊，3(2)，47-70。(Chen, Y.K., Cheng, C.C., and Liaw, J.W. (1998). "Application of GIS on Selection of Taiwania Plantation." *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 4(2), 33-53. (in Chinese))
- [6] 陳建帆、蘇迎晨、林奕宇 (2021)，「向自然演替植群學習-中高海拔崩塌地植群演替與復育芻議」，林業研究專訊，28(6)，13-17。(Chen, J.F., Su, Y.C., and Lin, H.Y. (2021). "Learning from the natural succession of plant populations-a brief discussion on the succession and restoration of plant populations in landslide at middle and high altitudes." *TFRI Extension Series*, 28(6), 13-17. (in Chinese))
- [7] 陸象豫、林昭遠、黃良鑫 (2011)，「莫拉克颱風後六龜試驗林崩塌地空間分佈特性探討」，台灣林業科學，26(4)，399-408。(Lu, S.Y., Lin, C.Y., and Hwang, L.S. (2011). "Spatial Relationships between Landslides and Topographical Factors at the Liukuei Experimental Forest, Southwestern Taiwan after Typhoon Morakot." *Taiwan Journal of Forest Science*, 26(4), 399-408. (in Chinese))
- [8] 陸象豫、黃惠雪、孫銘源 (2018)，「六龜試驗林氣候概況」，林業研究專訊，25(5)，58-62。(Lu, S.Y., Hwang, L.S., and Sun, M.Y. (2018). "Climatic Survey of Liugui Experimental Forest." *TFRI Extension Series*, 25(5), 58-62. (in Chinese))
- [9] 黃雅莉、陳朝圳 (2018)，「以地景指數探討高屏流域崩塌地之時序變遷」，林業研究季刊，40(1)，13-30。(Huang, Y.L., and Chen, C.T. (2018). "Time series change of landslide based on landscape metrics in Kaoping river basin." *Quarterly Journal of Forest Research*, 40(1), 13-30. (in Chinese))
- [10] 鄭祈全 (1999)，「森林地景變遷之監測研究」，台灣林業科學，14(4)，493-507。(Cheng, C.C. (1999). "Monitoring of Forest Landscape Change." *Taiwan Journal of Forest Science*, 14(4), 493-507. (in Chinese))

- [11] 詹勳全、蔡培珊、張嘉琪、黃文政、吳菁菁 (2015), 「植生復育區位配置對旗山溪集水區山崩潛勢之影響」, 中華水土保持學報, 46(1), 47-60。Chan, H.C., Tsai, P.S., Chang, C.C. Huang, W.J., and Wu, J.J. (2015) "Vegetation Recovery on Landslide Susceptibility in the Chi-Sun Watershed." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 46(1), 47-60。
- [12] 鄔建國 (2003), 「景觀生態學-格局、過程、尺度與等級」, 五南出版社, 台灣, 4。(Wu, J.G. (2003). *Landscape Ecology: Patterns, Processes, Scales and Hierarchies*, Wu-Nan Book Inc, Taiwan, 4. (in Chinese))
- [13] 鍾安晴、郭耀綸、周富三、林文智、陳永修 (2022), 「臺灣南部多納崩場地演替初期不同耐陰性樹種組成及優勢度的變化」, 臺灣林業科學, 37(1), 41-60。(Chung, A.C., Kuo, Y.L., Chou, F.S., Lin, W.C., and Chen, Y.H. (2022). "Variations in the Composition and Dominance of Tree Species with Different Shade Tolerances During the Early Phase of Succession at the Duona Landslide Site, Southern Taiwan." *Taiwan Journal of Forest Science*, 37(1), 41-60. (in Chinese))
- [14] 顏添明 (1999), 「林木生長收穫相關問題之探討」, 台灣林業, 25(5), 30-35。(Yen, T.M. (1999). "The Research of Forest Growing and Harvest." *Taiwan Forestry Journal*, 25(5), 30-35. (in Chinese))
- [15] Arora, A., Pandey, M., Mishra, V.N., Kumar, R., Rai, P.K., Costache, R., and Di, L. (2021). "Comparative evaluation of geospatial scenario-based land change simulation models using landscape metrics." *Ecological Indicators*, 128, 107810.
- [16] Cillis, G., Statuto, D., and Picuno, P. (2021). "Historical gis as a tool for monitoring, preserving and planning forest landscape: A case study in a mediterranean region." *Land*, 10(8), 851.
- [17] Cliff, A.D., and Ord, K. (1970). "Spatial autocorrelation: a review of existing and new measures with applications." *Economic Geography*, 46, 269-292.
- [18] Cushman, S.A., Macdonald, E.A., Landguth, E.L., Malhi, Y., and Macdonald, D.W. (2017). "Multiple-scale prediction of forest loss risk across Borneo." *Landscape Ecology*, 32, 1581-1598.
- [19] Dang, V.H., Hoang, N.D., Nguyen, LMD., Bui, D.T., and Samui, P. (2020). "A novel GIS-based random forest machine algorithm for the spatial prediction of shallow landslide susceptibility." *Forests*, 11(1), 118.
- [20] Dezhkam, S., Jabbarian, A.B., Darvishsefat, A.A., and Sakieh, Y. (2017). "Performance evaluation of land change simulation models using landscape metrics." *Geocarto international*, 32(6), 655-677.
- [21] Dislich, C., and Huth, A. (2012). "Modelling the impact of shallow landslides on forest structure in tropical montane forests." *Ecological Modelling*, 239, 40-53.
- [22] Ekwealor, K.U., Echereme, C.B., Ofobeze, T.N., and Okereke, C.N. (2019). "Landscape Ecology: A Helicopter View." *International Journal of Plant & Soil Science*, 31(1), 1-20.
- [23] Fu, W.J., Jiang, P.K., Zhou, G.M., and Zhao, K.L. (2014). "Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China." *Biogeosciences*, 11(8), 2401-2409.
- [24] Fynn, I.E., and Campbell, J. (2018). "Forest fragmentation and connectivity in Virginia between 2001 and 2011." *Journal of Landscape Ecology*, 11(3), 98-119.
- [25] Griffith, J.A. (2002). "Geographic techniques and recent applications of remote sensing to landscape-water quality studies." *Water, Air, and Soil Pollution*, 138, 181-197.
- [26] Guo, F., Zhang, L., Jin, S., Tigabu, M., Su, Z., and Wang, W. (2016). "Modeling anthropogenic fire occurrence in the boreal forest of China using logistic regression and random forests." *Forests*, 7(11), 250.
- [27] Kim, S.H., Hwang, J., and Sankarasubramanian, A. (2024). "Understanding the variability of large-scale statistical downscaling methods under different climate regimes." *Journal of Hydrology*, 641, 131818.
- [28] Kuradusenge, M., Kumaran, S., and Zennaro, M. (2020). "Rainfall-induced landslide prediction using machine learning models: The case of Ngororero District, Rwanda." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 4147.
- [29] Marlier, M.E., Resetar, S.A., Lachman, B.E., Anania, K., and Adams, K. (2022). "Remote sensing for natural disaster recovery: Lessons learned from Hurricanes Irma and Maria in Puerto Rico." *Environmental Science & Policy*, 132, 53-159.
- [30] Milanović, S., Marković, N., Pamučar, D., Gigović, L., Kostić, P., and Milanović, S.D. (2020). "Forest fire probability mapping in eastern Serbia: Logistic regression versus random forest method." *Forests*, 12(1), 5.
- [31] Nafouanti, M.B., Li, J., Mustapha, N.A., Uwamungu, P., and Dalal, A.A. (2021). "Prediction on the fluoride contamination in groundwater at the Datong Basin, Northern China: Comparison of random forest, logistic regression and artificial neural network." *Applied Geochemistry*, 132, 105054.
- [32] Narmada, K., Gogoi, D., and Dhanusree, B.G. (2021). "Landscape metrics to analyze the forest fragmentation of Chitteri Hills in Eastern Ghats, Tamil Nadu." *Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences*, 7(1), 001-007.
- [33] Nhu, V.H., Shirzadi, A., Shahabi, H., Singh, S.K., Al-Ansari, N., Clague, J.J., and Ahmad, B.B. (2020a). "Shallow landslide susceptibility mapping: A comparison between logistic model tree, logistic regression, naïve bayes tree, artificial neural network, and support vector machine algorithms." *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2749.
- [34] Nhu, V.H., Mohammadi, A., Shahabi, H., Ahmad, B.B., Al-Ansari, N., Shirzadi, A., and Nguyen, H. (2020b). "Landslide detection and susceptibility modeling on cameron highlands (Malaysia): A comparison between random forest,

- logistic regression and logistic model tree algorithms.” *For-ests*, 11(8), 830.
- [35] Ojoyi, M.M., Odindi, J., Mutanga, O., and Abdel-Rahman, E.M. (2016). “Analysing fragmentation in vulnerable bio-diversity hotspots in Tanzania from 1975 to 2012 using re-mote sensing and fragstats.” *Nature Conservation*, 16, 19-37.
- [36] Ping, J.L., Green, C.J., Zartman, R.E., and Bronson, K.F. (2004). “Exploring spatial dependence of cotton yield using global and local autocorrelation statistics.” *Field Crops Re-search*, 89(2-3), 219-236.
- [37] Qiu, Q.A., and Xu, X.S. (2015). “An optimal approach to degraded land: passively natural recovery by spontaneous succession vs. actively ecological restoration by human in-tervention.” *Quarterly Journal of Forest Research*, 37(2), 85-98.
- [38] Ozkan, U.Y., Demirel, T., Ozdemir, I., Saglam, S., and Mert, A. (2022). “Predicting forest stand attributes using the inte-gration of airborne laser scanning and Worldview-3 data in a mixed forest in Turkey.” *Advances in Space Research*, 69(2), 1146-1158.
- [39] Sahani, N., and Ghosh, T. (2021). “GIS-based spatial pre-diction of recreational trail susceptibility in protected area of Sikkim Himalaya using logistic regression, decision tree and random forest model.” *Ecological Informatics*, 64, 101352.
- [40] Sevgen, E., Kocaman, S., Nefeslioglu, H.A., and Gokceoglu, C. (2019). “A novel performance assessment approach us-ing photogrammetric techniques for landslide susceptibility mapping with logistic regression, ANN and random forest.” *Sensors*, 19(18), 3940
- [41] Sun, L., Wang, M., and Fan, X. (2020). “Spatial pattern and driving factors of biomass carbon density for natural and planted coniferous forests in mountainous terrain, eastern Loess Plateau of China.” *Forest ecosystems*, 7(1), 1-13.
- [42] Talukdar, S., Eibek, K.U., Akhter, S., Ziaul, S.K., Islam, A.R.M.T., and Mallick, J. (2021). “Modeling fragmentation probability of land-use and land-cover using the bagging, random forest and random subspace in the Teesta River Ba-sin, Bangladesh.” *Ecological indicators*, 126, 107612.
- [43] Wang, Y., Wu, X., Chen, Z., Ren, F., Feng, L., and Du, Q. (2019). “Optimizing the predictive ability of machine learn-ing methods for landslide susceptibility mapping using SMOTE for Lishui City in Zhejiang Province, China.” *In-ternational journal of environmental research and public health*, 16(3), 368.
- [44] Yeh, C.K., and Liaw, S.C. (2021). “Applying spatial auto-correlation and logistic regression to analyze land cover change trajectory in a forested watershed.” *TAO: Terres-trial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 32(1), 3.
- [45] Zhang, J., Hull, V., Huang, J., Yang, W., Zhou, S., Xu, W., and Liu, J. (2014). “Natural recovery and restoration in gi-ant panda habitat after the Wenchuan earthquake.” *Forest Ecology and Management*, 319, 1-9.
- [46] Zhou, X., Wu, W., Lin, Z., Zhang, G., Chen, R., Song, Y., and Liu, W. (2021). “Zonation of landslide susceptibility in Ruijin, Jiangxi, China.” *International journal of environ-mental research and public health*, 18(11), 5906.

2024 年 05 月 31 日 收稿

2024 年 07 月 23 日 修正

2025 年 01 月 21 日 接受