

# 基于全连接神经网络的广西北流市崩塌滑坡风险评价

何娜<sup>1</sup>, 朱习松<sup>2</sup>, 吴福<sup>1</sup>, 刘昶<sup>1</sup>, 吴秋菊<sup>1</sup>,  
黄希明<sup>1</sup>, 蒋力<sup>1</sup>, 肖吉贵<sup>1</sup>, 文海涛<sup>1</sup>, 何添杰<sup>1</sup>, 常鸣<sup>2</sup>

(1.广西壮族自治区地质环境监测站, 广西南宁 530200;

2.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059)

**摘要:** [目的] 建立适用于广西岩溶地区的崩塌滑坡风险评价体系, 为该地区崩塌滑坡的早期预警与防灾减灾提供科学依据。[方法] 以北流市为研究区, 构建崩塌滑坡数据库, 采用斜坡单元为评价基础, 系统收集并分析多源数据, 选取包括地下水类型、径流强度指数在内的关键评价指标, 利用全连接神经网络模型开展崩塌滑坡易发性评价。鉴于岩溶地区易受降雨和岩溶侵蚀的影响, 研究引入土壤侵蚀模数进行危险性评价, 最后结合承灾体易损性, 构建北流市崩塌滑坡风险评价模型。[结果] 风险评价结果表明, 高和极高风险区的面积为 252.22 km<sup>2</sup>, 占北流市总面积的 10.27%。这些高风险区主要分布在隆盛镇、新丰镇、平政镇和六靖镇一带, 属于侵蚀剥蚀丘陵和构造侵蚀低山地区, 岩土体松散, 土壤侵蚀模数较大、人口密度高、建筑物集中, 极易受到崩塌滑坡威胁, 风险等级高。[结论] 经过 ROC 曲线和野外调查验证, 北流市崩塌滑坡易发性评价精度达 0.966 4, 风险评价准确率为 89.3%。验证结果表明, 所构建的模型具有较高的精度和实际适用性, 评价结果与实际情况相符。

**关键词:** 广西岩溶地区; 土壤侵蚀模数; 全连接神经网络; 崩塌滑坡; 风险评价

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)01-0127-07

中图分类号: P694

**文献参数:** 何娜, 朱习松, 吴福, 等. 基于全连接神经网络的广西北流市崩塌滑坡风险评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 127-136. He Na, Zhu Xisong, Wu Fu, et al. Landslide risk assessment of Beiliu City, Guangxi Zhuang Autonomous Region based on a fully connected neural network method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 127-136. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.014; CSTR: 32312.14. stbctb.2025.01.014.

## Landslide risk assessment of Beiliu City, Guangxi Zhuang Autonomous Region based on a fully connected neural network method

He Na<sup>1</sup>, Zhu Xisong<sup>2</sup>, Wu Fu<sup>1</sup>, Liu Chang<sup>1</sup>, Wu Qiuju<sup>1</sup>,  
Huang Ximing<sup>1</sup>, Jiang Li<sup>1</sup>, Xiao Jigui<sup>1</sup>, Wen Haitao<sup>1</sup>, He Tianjie<sup>1</sup>, Chang Ming<sup>2</sup>  
(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environment Monitoring Station, Nanning, Guangxi 530200, China; 2. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** [Objective] A comprehensive risk assessment system for collapses and landslides in the karst regions of the Guangxi Zhuang Autonomous Region was established, in order to offer scientific support for early warning, disaster prevention, and mitigation in the area. [Methods] Beiliu City was selected as the study area, and a database of collapses and landslides was constructed. Slope units were used as the basis for the evaluation, with multisource data systematically collected and analyzed. Key evaluation indicators, including groundwater type and runoff intensity index, were identified, and a fully connected neural network model was employed to assess the susceptibility to collapses and landslides. Given the region's vulnerability to rainfall and karst erosion, the soil erosion modulus was incorporated into the hazard assessment. Finally,

收稿日期: 2024-06-20

修回日期: 2024-10-09

采用日期: 2024-10-09

资助项目: 广西壮族自治区地质环境监测站“广西地质灾害调查成果集成和应用专题研究项目”(AH2022-0617); 国家自然科学基金项目(42477173); 四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0071)

第一作者: 何娜(1987—), 女(汉族), 广西壮族自治区容县人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水文地质工程、地质环境地质和地质灾害防治方面的研究。Email: 280127111@qq.com。

通信作者: 朱习松(2000—), 男(汉族), 云南省宣威市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与地质灾害风险评估。Email: 3182636598@qq.com。

a risk evaluation model for collapses and landslides in Beiliu City was developed by integrating vulnerability assessments of the exposed elements. [Results] The findings revealed that high- and very high-risk zones covered 252.22 km<sup>2</sup>, accounting for 10.27% of Beiliu City's total area. These zones are primarily located in Longsheng Town, Xinfeng Town, Pingzheng Town, and Liujing Town, which are characterized by eroded and denuded hills and tectonic erosion of low mountains. Factors such as loose geotechnical body, high soil erosion modulus, dense population, and concentrated buildings significantly heightened the collapse and landslide risks, resulting in a high-risk classification. [Conclusion] Validation through ROC curves and field investigations showed an accuracy of 0.966 4 for susceptibility evaluation and 89.3% for risk assessment in Beiliu City. These results demonstrate the high precision and practical applicability of the constructed model, which aligns closely with real-world scenarios.

**Keywords: karst areas of Guangxi Zhuang Autonomous Region; soil erosion modulus; fully connected neural network; landslides; risk assessment**

中国是受岩溶影响最严重的国家之一,也是岩溶崩塌滑坡现象广泛发展且风险严重的地区之一<sup>[1]</sup>。岩溶地貌是石灰岩、白云石等可溶性岩石在水的作用下溶解而形成的独特景观,崩塌和滑坡是岩溶地貌中常见的地质灾害<sup>[2]</sup>,特别是岩溶地区地质环境脆弱,岩土体易受岩溶侵蚀,在人类工程活动和降雨等诱发因素下容易引发崩塌滑坡灾害<sup>[3]</sup>,因此做好岩溶地区崩塌滑坡灾害的风险预测,对保障人民生命财产安全具有重要意义。目前,中国区域地质灾害风险评估研究已经形成了一套较为完备的体系,并取得了一系列成果<sup>[4]</sup>,但岩溶地区的风险还需进一步研究,且党的“十四五”以来地质灾害防治聚焦对人民生命财产造成的风险调查和评估<sup>[5]</sup>,岩溶地区地质环境复杂,成灾模式多样,为满足地质灾害防治的需求,风险评价体系精度还有待提升,如何建立一个高精度风险评估模型还需进一步研究<sup>[6-9]</sup>。

常规的易发性评价模型有证据权重<sup>[10]</sup>、信息量<sup>[11]</sup>、逻辑回归<sup>[11-12]</sup>和确定系数等<sup>[13-14]</sup>,如周超等<sup>[10]</sup>采用证据权重模型构建了适用于矿山地质灾害的风险评价模型,张茂省等<sup>[14]</sup>根据常规模型对山区城镇风险评估方法进行研究。这些易发性评价模型计算量较大,不能进行非线性分析且具有一定的主观性。随着人工智能的快速发展,地质灾害易发性有了更高精度的评估方法,如全连接神经网络<sup>[15-16]</sup>、随机森林<sup>[17]</sup>、支持向量机<sup>[18]</sup>、卷积神经网络等<sup>[19]</sup>。全连接神经网络具有以下优势:通过多个隐藏层实现精确处理复杂的非线性关系,较快的收敛速度,能够自动从数据中提取和学习特征,具有较高的模型预测精度<sup>[16]</sup>。这使全连接神经网络适用于处理复杂地质环境数据的崩塌滑坡易发性评价,因此研究选取全连接神经网络模型作为易发性评价模型。常规的危险性评价为通过降雨量和地震动峰值加速度确定其危险性<sup>[20]</sup>,但是对于岩溶地区,土壤侵蚀也是一个重要的

崩塌滑坡诱发因子,因此在岩溶地区进行危险评价时还需考虑侵蚀因素的影响。通过降雨侵蚀力、坡度、土壤类型和耕作活动等方面计算得到的土壤侵蚀模数可用于岩溶地区泥石流的危险性评价<sup>[21]</sup>,其结果能够更加完整地考虑到降雨和侵蚀对崩塌滑坡的影响,进一步完善岩溶地区危险性评价体系。

广西壮族自治区北流市是典型的岩溶地区,地质环境较为复杂。受降雨侵蚀作用影响,近年来北流市多次发生崩塌滑坡,对人民生命财产安全构成严重威胁<sup>[22]</sup>。该地区地形切割破碎,在降雨、地表径流和地下水的侵蚀作用下,土壤侵蚀严重,此类地区表层岩土体在侵蚀作用下会导致稳定性降低,容易引发崩塌和滑坡等地质灾害<sup>[23]</sup>,因此选择北流市为研究区,选用全连接神经网络模型进行易发性评价,针对岩溶地貌易受降雨侵蚀的特点,引入土壤侵蚀模数评估崩塌滑坡危险性,结合区内承灾体易损性构建适用于北流市的崩塌滑坡风险评估模型,为岩溶地区崩塌滑坡早期预警与工程防治提供科学依据。

## 1 研究区概况及地质背景

### 1.1 自然地理与数据来源

北流市位于广西壮族自治区玉林市东部,总面积达 2 457 km<sup>2</sup>。该区气候温暖湿润,年均气温约为 21.7 ℃,降雨量丰富,主要集中在 5—8 月,年均降雨量为 1 689.8 mm。北流市的地势总体呈南北高,中部低的态势。地貌类型多样,主要包括北部中山地区的构造侵蚀地貌、中北部峰林盆地的构造溶蚀地貌,以及南部地区的侵蚀剥蚀地貌。北部中山地区以构造侵蚀地貌为主,地势起伏较大,岩层多有褶皱和断裂。中北部的峰林盆地则以构造溶蚀地貌为主,表现出典型的喀斯特地形特征,溶洞、地下河及溶蚀洼地广泛分布。南部地区主要为侵蚀剥蚀地貌,地势相对平缓,土壤和岩石受到长期侵蚀作用,地形破碎。北

流市位于华南褶皱系西南缘,地质构造复杂。加里东期构造运动对该地区影响显著,形成了发育良好的丘陵低山地貌。在地层褶皱与断裂处,有大量岩浆活动,导致岩层进一步位移和断裂,形成北东向的区域性大断裂带。这些断裂带对北流市的地貌形成及地质灾害的发育有重要影响。北流市地下水类型丰富,尤其是岩溶水在喀斯特地区广泛分布,形成了复杂的地下水系统。地下水在降雨丰富的季节表现出较强的径流能力,对地表和地下的地质稳定性产生重要影响。北流市的地质条件复杂多样,由多种地貌类型和地质构造共同构成。丰富的降雨量和复杂的地质条件使得该地区容易发生崩塌、滑坡等地质灾害。本文主要数据来源于广西地质环境监测站,断层和工程地质岩组采用中国地质调查局 1:20 万地质图,数据来源不同,为减少误差,利用 ArcGIS 对数据进行重采样处理,统一精度为 12.5 m(表 1)。

表 1 研究区基础数据来源

Table 1 Basic data sources of study area

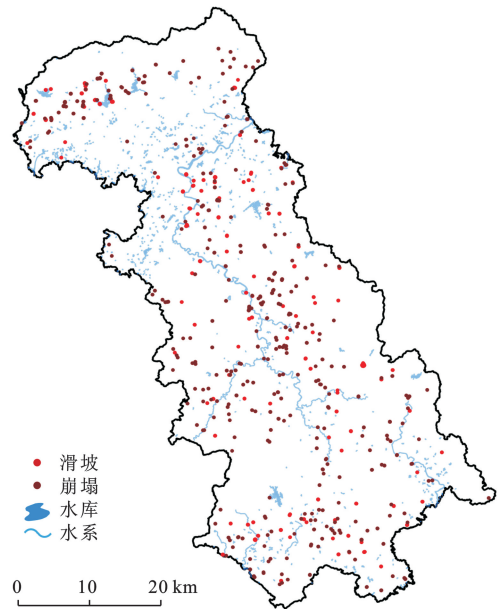
分类	数据源	获取时间	分辨率/m
数字高程模型	地理空间云	20230405	12.5
人口数据	广西地质环境监测站提供	20230307	
水系数据			
道路数据			
降雨数据			
断层数据	1:20 万地质图	20230405	
工程地质岩组			
夜间灯光数据	DMSP-OLS	20230405	1 000
归一化植被指数	Landsat8	20230405	30

## 1.2 崩塌滑坡隐患识别和分布特征

利用遥感影像,参考崩塌和滑坡遥感解译特征及方法<sup>[24]</sup>,遵循应绘制滑坡边界和滑坡源区的位置、滑坡的空间分布应连续、复杂滑坡应分为单个滑坡的原则,北流市共解译出 122 处滑坡和 357 处崩塌(图 1—2)。

北流市的崩塌滑坡发育受多种因素的综合影响,地形地貌方面,侵蚀剥蚀丘陵和构造侵蚀低山地貌的崩塌滑坡密度最高,这些区域陡坎和平台等微地貌发育,岩层稳定性较差;同时该区块状花岗岩、混合岩及坚硬灰岩和白云岩岩组易受岩溶侵蚀,使这些区域更易发生崩塌滑坡。水文地质条件方面,花岗岩混合岩风化带网状裂隙水区域及地形湿度指数在 4.5~6.0 的区域,崩塌滑坡密度较高,此区域由于地下水活动频繁,岩体内部裂隙发育,进一步削弱了岩体的稳定性,增加了崩塌滑坡的风险。人类活动方面,在强烈工程活动区域,崩塌滑坡的灾害密度显著上升。道路

建设、矿山开采和建筑施工等活动会扰动地表和地下结构,增加崩塌滑坡风险。此外,靠近断层、水系和道路的区域滑坡密度也较高。断层带是地壳运动的薄弱环节,容易发生岩体错动和崩塌。水系附近因水流的侵蚀作用,岸坡的稳定性降低。道路建设则改变了原有的地质条件,增加了崩塌滑坡的风险。综上所述,北流市的崩塌滑坡发育是多种因素共同作用的结果。复杂的地形地貌、脆弱的地质结构、活跃的水文地质条件以及频繁的人类活动,均显著增加了崩塌滑坡发生的概率。同时,野外实际调查也证明北流市的崩塌滑坡多分布在山坡的坡脚、山体的凹陷处、冲沟发源地带和平台等地。而这些地区往往是人口集聚地,建房、修路等人类工程活动对原始地形地貌进行人工整平改造,形成了众多人工切坡和高陡斜坡等微地貌,在降雨侵蚀作用下容易引发崩塌滑坡灾害。



注:基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作行政边界,底图无修改。

图 1 北流市崩塌滑坡灾害点分布

Fig.1 Distribution of collapse and landslide hazards in Beiliu City

## 2 研究区风险评估方法

### 2.1 评价单元选取

斜坡单元在大比例尺的精细化评价中具有优越性,因为它们能够充分反映斜坡的整体地貌特征,并在斜坡发生变形破坏时保持其完整性。将斜坡单元与适当的模型结合使用,可以提高风险评估的可靠性。本文选择斜坡单元作为评估单元,进行研究区崩塌滑坡风险评估。通过 r.slopeunits 提取北流市斜坡单元,通过控制参数,最小和最大面积阈值以及斜坡

单元的圆方差进行斜坡单元划分<sup>[25]</sup>。斜坡单元划分标准为：①以人居斜坡为调查评价的基本单元，主要围绕人口聚集居住区划分斜坡单元；②斜坡单元的周界充分利用山脊、沟谷、水系线，上限一般不超过第一斜坡带，下限将可能威胁到的居民区圈划进来；③斜坡单元划分尺度不宜过小也不宜过大，围绕人口

居住区，根据地层岩性、产状、地形切割等孕灾地质条件的差异性、相似性来具体划分；④岩溶区的斜坡单元划分主要依据水文地质补径排条件和岩溶发育强度，岩溶密集区的斜坡应围绕人口居住区将斜坡坡高的 2 倍距离影响范围划分为一个斜坡单元。经过人工修正，最终北流市划分为 31 465 处斜坡单元。

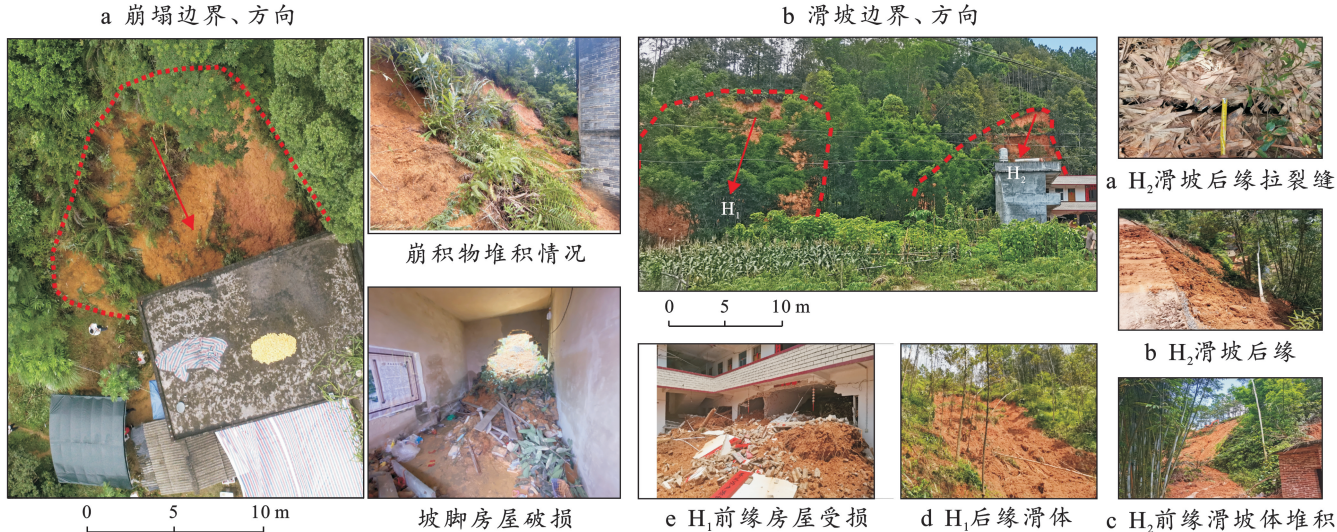


图 2 研究区崩塌滑坡解译标志  
Fig.2 Interpretation signs of collapse and landslide in study area

## 2.2 易发性评价方法

崩塌滑坡易发性评价是一项综合性工作，旨在分析地质环境条件与崩塌滑坡之间的相互关系，以综合评估其发生的可能性。本文在考虑地质环境对崩塌滑坡孕灾影响基础上，初步选取 20 个因子进行分析。为了评估北流市崩塌滑坡的易发性，采用全连接神经网络模型，该模型充分利用了计算机的学习和计算能力，能够有效分析处理选取评价指标间的非线性关系。

全连接神经网络包括输入层、隐藏层与输出层。层结构的设计、每一层神经元节点数决定了所选取的神经网络体系结构、泛化能力。输入层一个神经元代表一个特征，输出层的神经元个数代表所选神经网络的预测结果；隐藏层的可解释性差，无需了解网络内部的执行过程，通常情况下，增加隐藏的层数有利于提高模型精准度、降低误差，但是增加的隐藏层层数使得神经网络模型的训练时间延长且易出现过拟合。但是为了提升模型的精度和应对更复杂的灾害预测，选择将全连接神经网络设计为一个输入层、4 个隐藏层和一个输出层的结构。这种设计旨在通过深度网络结构捕捉更为复杂的崩塌滑坡灾害模式和易发因素，从而提高模型的准确性和稳定性。

## 2.3 危险性评价方法

崩塌滑坡危险性是根据易发性结果叠加其诱发因素，研究区为岩溶地区，在降雨、径流的影响下，土

壤易受到侵蚀作用。而土壤侵蚀会对土地产生不利影响，包括降低肥力、劣化理化性质、降低土地利用效率，导致土地荒漠化和生态环境破坏，以至于引发崩塌和滑坡等地质灾害。土壤侵蚀模数表示年度单位面积流失的土壤量，作为崩塌滑坡的诱发因子实现研究区崩塌滑坡危险评价。

根据《中华人民共和国水利行业标准：土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)》中附录 B 中推荐的土壤侵蚀模型 RUSLE<sup>[26]</sup>，对北流市土壤侵蚀量进行计算，计算模型为：

$$M=R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot B \cdot E \cdot T \quad (1)$$

式中： $M$  为土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ ； $R$  为年平均降雨侵蚀力 $(\text{MJ} \cdot \text{mm}/\text{km}^2 \cdot \text{a} \cdot \text{h})$ ； $K$  土壤可蚀性系数 $[(\text{t} \cdot \text{h})/(\text{MJ} \cdot \text{mm})]$ ； $L$  为坡长因子； $S$  为坡度因子； $B$  为生物措施因子； $E$  为工程措施因子； $T$  为耕作措施因子。

根据计算得到的土壤侵蚀模数和易发性结果，计算得出北流市崩塌滑坡的危险性评价结果。

$$H=S \cdot M \quad (2)$$

式中： $H$  为危险崩塌滑坡危险性； $S$  为崩塌滑坡易发性； $M$  为土壤侵蚀模数

## 2.4 承灾体易损性评价方法

易损性是用来评估在地质灾害发生时可能受灾对象的损害程度，这些对象包括人类财产、资源和生

态环境等<sup>[27]</sup>。综合考虑物质易损性、社会易损性和经济易损性进行北流市崩塌滑坡承灾体的易损性评价。在充分分析北流市滑坡崩塌及其承灾体基本特征以及全面考虑研究区易损性评价的数据获取基础上,选择人口密度、建筑密度、建筑物高度、切坡建房坡度、道路密度和夜间灯光分布<sup>[28]</sup>构建北流市滑坡崩塌易损性评价指标体系。根据 AHP 法计算原理构建判别矩阵,计算各因子权重值(表 2),利用 ArcGIS

叠加得出北流市易损性结果。

### 2.5 风险评估方法

考虑到北流市崩塌滑坡的危险性以及危险区内承灾体可能遭受的损失,使用以下公式来评估北流市崩塌滑坡的风险<sup>[29]</sup>:

$$R = H \cdot V \quad (3)$$

式中:R 为地质灾害风险性;H 为地质灾害危险性;V 为承灾体易损性。

表 2 易损性评价因子的 AHP 判断矩阵、权重、一致性比例(CR)及最大特征值( $\lambda_{max}$ )

Table 2 AHP judgment matrix, weights, consistency ratio (CR) and maximum eigenvalue( $\lambda_{max}$ ) of vulnerability assessment factors

评价因子	人口密度	建筑密度	道路等级	建筑高度	夜间灯光	切坡建房	建筑结构	权重	CR	$\lambda_{max}$
人口密度	1	3	4	3	2	1	4	0.41		
建筑密度	1/3	1	2	1	1/2	1/3	2	0.15		
道路等级	1/2	1/2	1	1/2	1/3	1/4	1	0.09		
建筑高度	1/3	1	2	1	1/2	1/3	4	0.17	0.02	7.14
夜间灯光	1/2	2	3	2	1	1/2	3	0.25		
切坡建房	1	3	4	3	2	1	4	0.43		
建筑结构	1/4	1/2	1	1/4	1/3	1/4	1	0.06		

## 3 风险评估结果

### 3.1 易发性评价结果

在北流市地质灾害易发性评价中,初步考虑以下评价因子:高程、地表粗糙度、地表切割深度、地形地貌、地形起伏度、地形湿度指数、径流强度指数、坡度、坡向、曲率、土层厚度、距断层距离、地震动峰值加速度、工程地质岩组、地下水类型、距水系距离、距道路距离、土地利用类型、人类工程活动以及归一化植被指数,为确保评价指标的客观性和彼此独立,运用相关系数来衡量这些指标因子之间的关联性<sup>[30]</sup>。利用 ArcGIS 的空间分析工具对初始指标因子进行相关性分析(图 3)。 $|R| \geq 0.3$  代表因子之间相关性较强。

剔除地表切割深度、地表粗糙度、地形湿度指数、土层厚度和地震动峰值加速度等高相关程度指标,选用剩余 15 个因子作为研究区崩塌滑坡易发性评价指标。利用 ArcGIS 生成训练集和验证集的正负样本各 3 500 个,其中正样本点从解译的灾害面中随机生成,负样本从研究区内的非灾害面中随机生成。模型的性能受训练参数的影响较大,若模型未达到收敛状态或者由于训练轮数过多,导致过拟合等,模型的准确率会极大降低。因此参数的选择对全连接神经网络模型的性能至关重要,需要花费大量时间进行优化,采用试错法在训练过程中不断调整训练参数,并观察模型的准确率,直至训练集的准确率和验证集准确率均达到最高,此时的训练参数即为最佳参数。由

试验结果和混淆矩阵计算的 ROC 和 PR 曲线(图 4)可以知道,训练集和验证集比例为 7 : 3 时 ROC 和 PR 曲线的 AUC 值较高,模型效果较佳。由最佳模型对输入的全区多波段因子特征数据放射矩阵为 15 组向量预测易发值(0~1),通过自然断点法划分得到易发性图(图 5 和表 3)。

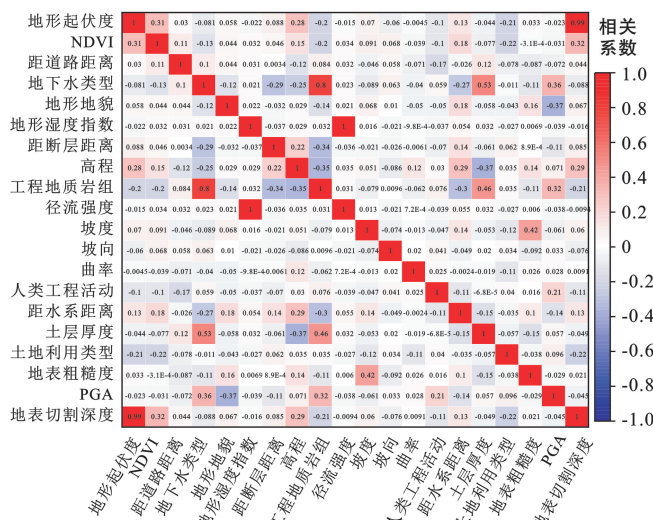


图 3 崩塌滑坡易发性评价因子相关性分析  
Fig.3 Correlation analysis on evaluation factors of collapse and landslide susceptibility

高和极高易发区位于六麻镇、新丰镇、平政镇和六靖镇等区域,由于道路、房屋建设等人类工程活动引发了斜坡内部应力重分布,同时这些地区的 NDVI 指数相对较低,植被覆盖率较低,岩土体通常呈现出

较松散的风化特征且地形起伏变化较为剧烈,斜坡的稳定性低。这些因素的共同作用导致了该地区易发性高。

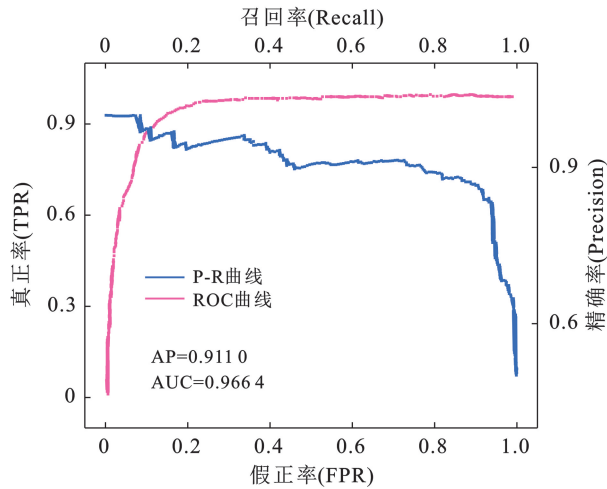


图 4 评价模型计算结果曲线

Fig.4 Calculated result curve of evaluating model

表 3 北流市灾害易发性评价结果统计

Table 3 Statistics of susceptibility assessment results in Beiliu City

易发性等级	分级面积/ km <sup>2</sup>	分级面积 比例/%	灾害 个数/个	灾害密度/ (个·km <sup>-2</sup> )
低易发	1 042.35	42.42	12	0.01
中易发	709.84	28.89	48	0.07
高易发	492.93	20.06	241	0.43
极高易发	211.88	8.63	178	0.94

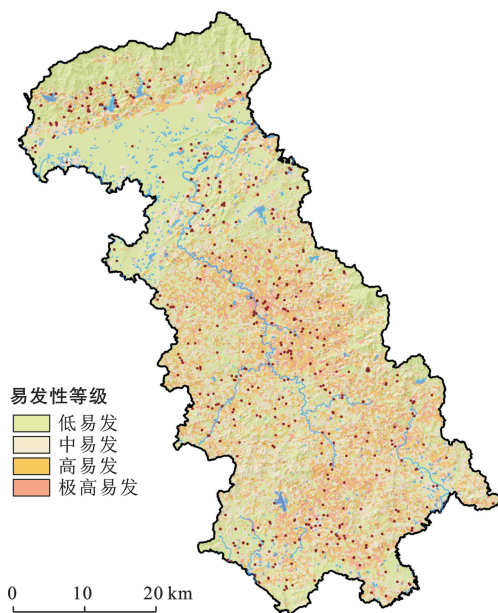


图 5 北流市崩塌滑坡易发性评价

Fig.5 Collapse and landslide susceptibility evaluation in Beiliu City

### 3.2 危险性评价结果

计算得到研究区土壤侵蚀模数(图 6),将崩塌滑坡易发性评价归一化结果和计算得出的土壤侵蚀模数归一化结果相乘,根据自然断点法北流市危险性划分为低、中、高和极高危险 4 个等级,得到危险评价图(图 7)和结果统计(表 4),其中高和极高危险区主要位于大坡外镇、隆盛镇、六麻镇、清水口镇一带;该区属于侵蚀剥蚀低山丘陵及侵蚀剥蚀丘陵盆地地貌,在受到降雨侵蚀和径流冲刷作用下,表层土体容易被雨水冲刷剥离,引发斜坡失稳,因此该区呈现出高和极高危险性的特点。

表 4 北流市灾害危险性评价结果统计

Table 4 Statistics of risk assessment results in Beiliu City

危险性等级	分级面积/ km <sup>2</sup>	分级面积 比例/%	灾害 个数/个	灾害密度/ (个·km <sup>-2</sup> )
低危险	1 025.03	41.72	43	0.04
中危险	684.78	27.87	82	0.12
高危险	557.67	22.7	196	0.4
极高危险	189.52	7.71	158	0.75

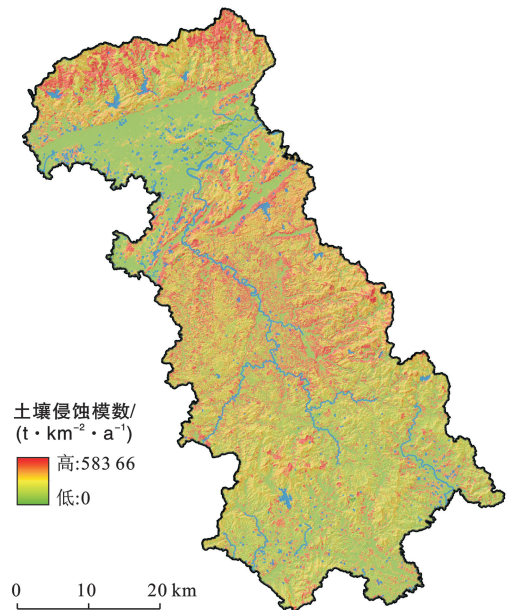


图 6 北流市土壤侵蚀模数分布

Fig.6 Distribution of soil erosion modulus in Beiliu City

### 3.3 承灾体易损性评价结果

通过各易损指标权重利用 ArcGIS 计算可得出北流市的综合易损性值。采用自然断点法对研究区的易损性进行分级划分,最终得到区域易损性评价图(图 8)。从北流市承灾体易损性分区图中可以看出,极高易损区面积 38.62 km<sup>2</sup>,占研究区全域的 1.6%,主要分布在北流镇、新荣镇和塘岸镇周围;高易损性区域面积为 249.86 km<sup>2</sup>,面积比例为 10.2%,主要分布在山围镇、清水口镇、平政镇、沙垌镇和六靖镇。高

和极高易损性区域主要分布在人口、建筑密度大,夜间灯光较强区域。中易损性区域面积为 832.68 km<sup>2</sup>,面积比例为 34%,主要沿道路和城镇周围分布。低易发性区域面积为 1 329.63 km<sup>2</sup>,该类型面积比例最大,达总面积的 54.27%,主要分布在大片无人居住的区域中,距离河道远、道路分布少、人口密度低,总体易损性最低。

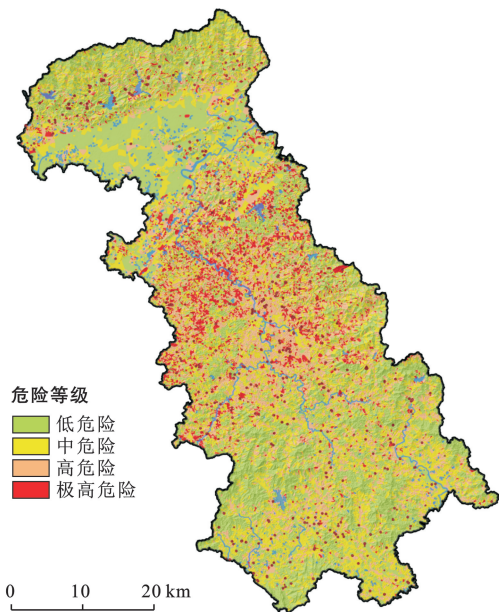


图 7 北流市崩塌滑坡危险性评价结果

Fig.7 Risk assessment results of landslides in Beiliu City

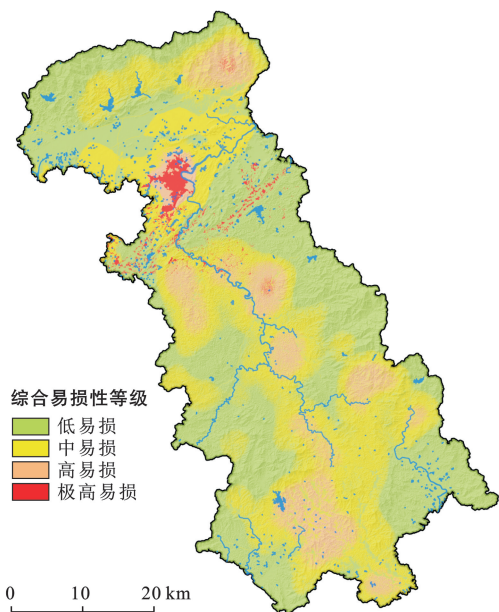


图 8 北流市承灾体易损性评价结果

Fig.8 Vulnerability assessment results of disaster bearing bodies in Beiliu City

### 3.4 风险评估结果

计算得到北流市崩塌滑坡风险结果,按自然断点

法划分得到北流市崩塌滑坡风险评价图(图 9)和结果统计表(表 5)。其中高和极高风险区主要分布在塘岸镇—清水口镇—隆盛镇一带,该区主要位于中部和南部的低山丘陵地区,居民密集,人类工程活动频繁,加上降雨引起的土壤侵蚀,滑坡发育,综合风险指数高。中风险区主要沿河流及丘陵盆地,岸村镇及耕地分布;低风险区主要在中低山区域呈片状分布,该区域林地、旱地面积大,人口密度极低,导致崩塌滑坡风险低。野外共进行 28 处风险评价结果验证(其中 28 处灾害发生于 2022 年和 2023 年,且未参与易发性评价),共有 25 处位于高和极高风险区域,评价准确率达 89.3%。图 9 中显示为新丰镇高塘村 7 组和平政镇平政村 12 队两处崩塌位于高和极高风险区域内,共造成 3 人伤亡,2 处房屋受损。

表 5 北流市风险评价结果统计

Table 5 Statistics of risk assessment results in Beiliu City

风险等级	分级面积/ km <sup>2</sup>	分级面积 比例/%	灾害 个数/个	灾害密度/ (个·km <sup>-2</sup> )
低风险	1 025.03	41.72	82	0.08
中风险	684.78	27.87	95	0.13
高风险	557.67	22.7	182	0.37
极高风险	189.52	7.71	120	0.57

## 4 结论

(1) 根据北流市 122 处滑坡和 357 处崩塌,运用全连接网络模型对崩塌滑坡与孕灾地质环境进行线性拟合,选出最优结果对研究区易发性进行预测,根据混淆矩阵检验,预测精度达 0.966 4,表明模型具有较好的评价能力。北流市崩塌滑坡规模较小,对地形精度要求较高,因此高精度地形数据和大量的崩塌滑坡样本数量集可以提高评价结果的准确性。

(2) 传统危险性评价未考虑岩溶地区土壤侵蚀对崩塌滑坡的影响,而选取土壤侵蚀模型计算得到的土壤侵蚀模数,综合考虑了降雨、地形因素、土地耕作和工程防治等对地表岩土体的影响,根据计算结果表明高和极高风险区主要分布在土壤侵蚀模数较大、侵蚀强烈易诱发崩塌滑坡的大坡外镇、隆盛镇、六麻镇、清水口镇一带。

(3) 选取物质易损、环境易损和经济易损构建承灾体易损性评价模型,结合危险性评价结果,对北流市崩塌滑坡进行风险评估,评估结果中高和极高风险区面积为 252.22 km<sup>2</sup>,占研究区全域的 10.27%,主要分布在隆盛镇—新丰镇—平政镇—六靖镇一带。对于高和极高风险区,可结合气象实时信息,进一步开展崩塌滑坡风险预警研究。

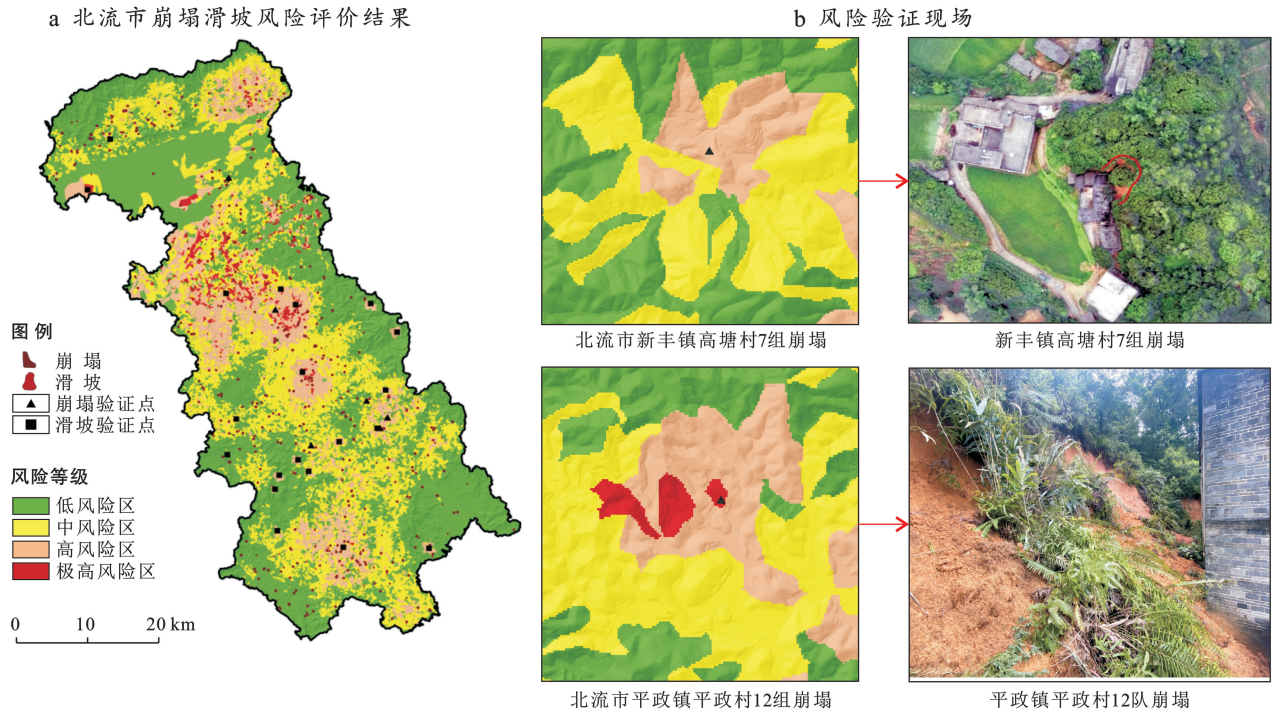


图 9 北流市崩塌滑坡风险评估结果及验证

Fig.9 Risk assessment results and verification of collapse and landslide in Beiliu City

(4) 根据北流市滑坡风险评估结果,建议当地政府采取以下措施以有效应对崩塌滑坡风险:针对高风险和极高风险区域,优先实施搬迁避让措施,以保障居民安全,同时辅以工程治理,如加固坡面和构建防护结构。而对于中风险区域,需综合采取地质灾害管理与工程治理措施,例如安装雨量计和位移计系统、设立明确的疏散路线和紧急避险设施等。除以上针对性措施,还应加强对受威胁居民的地质灾害防治知识宣传与培训,提高公众防灾意识和责任感,以减少北流市崩塌滑坡发生的可能性并降低其潜在的威胁。

#### 参考文献 (References)

- [1] Li Bin, Zhao Chaoying, Li Jun, et al. Mechanism of mining-induced landslides in the karst mountains of Southwestern China: A case study of the Baiyan landslide in Guizhou [J]. *Landslides*, 2023,20(7):1481-1495.
- [2] Fang Haoran, Shao Yun, Xie Chou, et al. A new approach to spatial landslide susceptibility prediction in karst mining areas based on explainable artificial intelligence [J]. *Sustainability*, 2023,15(4):3094.
- [3] 铁永波,孙强,徐勇,等.南方山地丘陵区典型地质灾害成因机制与风险评估[J].*中国地质调查*,2022,9(4):1-9. Tie Yongbo, Sun Qiang, Xu Yong, et al. Genetic mechanism and risk assessment of typical geological hazards in mountainous and hilly areas of South China [J]. *Geological Survey of China*, 2022,9(4):1-9.
- [4] 李滨,殷跃平,高杨,等.西南岩溶山区大型崩滑灾害研究

- 的关键问题[J].*水文地质工程地质*,2020,47(4):5-13.
- Li Bin, Yin Yueping, Gao Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of Southwest China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020,47(4):5-13.
- [5] 殷跃平.地质灾害风险调查评价方法与应用实践[J].*中国地质灾害与防治学报*,2022,33(4):5-6. Yin Yueping. Methods and application practices of geological hazard risk investigation and evaluation [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022,33(4):5-6.
  - [6] 高崇越,赵健赞,王志超,等.青海省湟水流域潜在地质灾害识别与易发性评价[J].*水土保持通报*,2024,44(2):245-257. Gao Chongyue, Zhao Jianyun, Wang Zhichao, et al. Identification and susceptibility evaluation of potential geological hazards in Huangshui River basin of Qinghai Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024,44(2):245-257.
  - [7] 倪章,常鸣,唐亮亮,等.川西高山峡谷地区震后滑坡演化趋势研究[J].*灾害学*,2023,38(2):178-184. Ni Zhang, Chang Ming, Tang Liangliang, et al. Study on the evolution trend of post-earthquake landslide in alpine valley area of Western Sichuan [J]. *Journal of Catastrophology*, 2023,38(2):178-184.
  - [8] 解明礼,巨能攀,刘蕴琨,等.崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究[J].*水文地质工程地质*,2021,48(5):184-192. Xie Mingli, Ju Nengpan, Liu Yunkun, et al. A study of



- the risk ranking method of landslides and collapses [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 184-192.
- [9] Chang Ming, Cui Peng, Dou Xiangyang, et al. Quantitative risk assessment of landslides over the China-Pakistan economic corridor [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021, 63:102441.
- [10] 周超,常鸣,徐璐,等.贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J].*武汉大学学报(信息科学版)*,2020,45(11):1782-1791.  
Zhou Chao, Chang Ming, Xu Lu, et al. Risk assessment of typical urban mine geological disasters in Guizhou Province [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020,45(11):1782-1791.
- [11] 董张玉,张晋,彭鹏,等.基于GBDT-LR和信息量模型耦合的滑坡易发性评价[J].*水土保持通报*,2023,43(1):149-157.  
Dong Zhangyu, Zhang Jin, Peng Peng, et al. Landslide susceptibility evaluation based on coupling of GBDT-LR model and information model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):149-157.
- [12] 胡杨,张紫昭,林世河.基于证据权与逻辑回归耦合的新疆伊犁河谷地区滑坡易发性评价[J].*工程地质学报*,2023,31(4):1350-1363.  
Hu Yang, Zhang Zizhao, Lin Shihe. Evaluation of landslide susceptibility in Ili valley, Xinjiang based on the coupling of woe model and logistic regression [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2023,31(4):1350-1363.
- [12] 邓日朗,陈凌伟,蔡俊坚,等.基于贡献率模型的崩塌易发性评价:以广州市白云区为例[J].*水土保持通报*,2022,42(4):218-226.  
Deng Rilang, Chen Lingwei, Cai Junjian, et al. Evaluation of collapse susceptibility based on a contribution rate model: A case study at Baiyun district, Guangzhou city [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(4):218-226.
- [13] 陈建国,钟连祥.基于CF-AHP耦合模型的高速公路沿线崩塌地质灾害易发性评价:以蓉遵高速公路土城:旺隆段为例[J].*中国地质灾害与防治学报*,2023,34(6):105-115.  
Chen Jianguo, Zhong Lianxiang. Assessment of rockfall susceptibility along the expressway based on the CF-AHP coupling model: A case study of the Tucheng-Wanglong section of the Rongzun expressway [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023,34(6):105-115.
- [14] 张茂省,薛强,贾俊,等.山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J].*西北地质*,2019,52(2):125-135.  
Zhang Maosheng, Xue Qiang, Jia Jun, et al. Methods and practices for the investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous towns [J]. *Northwestern Geology*, 2019,52(2):125-135.
- [15] 余波,常鸣,倪章,等.优化神经网络下阿富汗东北高原寒旱区滑坡危险性评价[J].*地球科学*,2023,48(5):1825-1835.  
Yu Bo, Chang Ming, Ni Zhang, et al. Landslide hazard assessment in northeast Afghanistan Plateau based on optimized neural network [J]. *Earth Science*, 2023,48(5):1825-1835.
- [16] 吴润泽,胡旭东,梅红波,等.基于随机森林的滑坡空间易发性评价:以三峡库区湖北段为例[J].*地球科学*,2021,46(1):321-330.  
Wu Runze, Hu Xudong, Mei Hongbo, et al. Spatial susceptibility assessment of landslides based on random forest: A case study from Hubei section in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Earth Science*, 2021,46(1):321-330.
- [18] Ma Tianwu, Wang Gang, Guo Rui, et al. Forest fire susceptibility assessment under small sample scenario: A semi-supervised learning approach using transductive support vector machine [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,359:120966.
- [19] 黄武彪,丁明涛,王栋,等.基于层数自适应加权卷积神经网络的川藏交通廊道沿线滑坡易发性评价[J].*地球科学*,2022,47(6):2015-2030.  
Huang Wubiao, Ding Mingtao, Wang Dong, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on layer adaptive weighted convolutional neural network model along Sichuan-Tibet traffic corridor [J]. *Earth Science*, 2022,47(6):2015-2030.
- [20] 常鸣,窦向阳,唐川,等.降雨驱动泥石流危险性评价[J].*地球科学*,2019,44(8):2794-2802.  
Chang Ming, Dou Xiangyang, Tang Chuan, et al. Hazard assessment of typical debris flow induced by rainfall intensity [J]. *Earth Science*, 2019,44(8):2794-2802.
- [21] 杨宇,蔡英桦,钟华介,等.基于集水单元的岩溶山区小流域泥石流敏感性评价:以贵州威宁二塘河流域为例[J].*中国地质灾害与防治学报*,2019,30(5):57-64.  
Yang Yu, Cai Yinghua, Zhong Huajie, et al. Susceptibility assessment of debris flows in small watershed of Karst area based on catchment units: A case study in Ertang River Basin, Weining County, Guizhou Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019,30(5):57-64.
- [22] 吴秋菊,江思义,李春玲,等.基于GIS的北流市地质灾害危险性分区评价研究[J].*贵州地质*,2023,40(1):20-25.  
Wu Qiuju, Jiang Siyi, Li Chunling, et al. Evaluation

- research of geological hazard division based on GIS in Beiliu City [J]. *Guizhou Geology*, 2023, 40(1):20-25.
- [23] 李成芳, 王忠诚, 李振炜, 等. 西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6):962-974.  
Li Chengfang, Wang Zhongcheng, Li Zhenwei, et al. Research progress of soil erosion in karst areas of Southwest China [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6):962-974.
- [24] 闫开云, 李江, 许强, 等. 综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征: 以垮梁子滑坡为例[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 1-13 [2024-12-31]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230118>.  
Yan Kaiyun, Li Jiang, Xu Qiang, et al. Accurate interpretation of four-dimensional characteristics of red-bed rock landslide by comprehensive remote sensing: Taking Kualiangzi landslide as an example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-13 [2024-12-31]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230118>.
- [25] 吴先谭, 邓辉, 张文江, 等. 基于斜坡单元自动划分的滑坡易发性评价[J]. *山地学报*, 2022, 40(4):542-556.  
Wu Xiantan, Deng Hui, Zhang Wenjiang, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on automatic slope unit division [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(4):542-556.
- [26] 杨宇. 岩溶地区小流域土壤侵蚀量计算及泥石流敏感性评价: 以贵州省威宁县二塘河小流域为例[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2018.  
Yang Yu Estimation of soil erosion and assessment of debris flow susceptibility in karst area: A case study of the Ertang watershed in Weining County, Guizhou [D]. Chengdu Sichuan: Chengdu University of Technology, 2018.
- [27] 刘传正. 崩塌滑坡灾害风险识别方法初步研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1):88-97.  
Liu Chuangzheng. Analysis methods on the risk identification of landslide disasters [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1):88-97.
- [28] 旷开金, 郑开焰, 陈锐, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的福建省县域经济发展时空演化研究[J]. *地域研究与开发*, 2023, 42(4):29-35.  
Kuang Kaijin, Zheng Kaiyan, Chen Rui, et al. Spatio-temporal evolution of county economic development in Fujian Province based on NPP-VIIRS nighttime lighting data [J]. *Areal Research and Development*, 2023, 42(4):29-35.
- [29] 田尤, 陈龙, 黄海, 等. 藏东察雅县城地质灾害风险评价及源头管控对策建议[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(2):146-154.  
Tian You, Chen Long, Huang Hai, et al. Geological hazard risk assessment and suggestions for risk control in Chaya County, Eastern Xizang [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(2):146-154.
- [30] Liu Qiang, Tang Aiping, Huang Delong, et al. Impact of orthogonal transformation for factors on model performance in landslide susceptibility [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(5):119.
- 题[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(2):145-152.  
Cui Peng. Progress and prospects in research on mountain hazards in China [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(2):145-152.
- [28] Martinez A, Dejong J, Akin I, et al. Bio-inspired geotechnical engineering: Principles, current work, opportunities and challenges [J]. *Géotechnique*, 2022, 72(8):687-705.
- [29] Lan Huijuan, Wang Daojie, He Songtang, et al. Experimental study on the effects of tree planting on slope stability [J]. *Landslides*, 2020, 17(4):1021-1035.

(上接第 48 页)

- [24] Iverson R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments [J]. *Geomorphology*, 2015, 244:9-20.
- [25] Zhou G G D, Hu H S, Song D, et al. Experimental study on the regulation function of slit dam against debris flows [J]. *Landslides*, 2019, 16(1):75-90.
- [26] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
Fei Xiangjun, Shu Anping. *Movement Mechanism and Disaster Control for Debris Flow* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [27] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问