集中降雨影响下辽南仙人洞国家级自然保护区滑坡灾害多因子风险评价

郑德凤[1a,1b]，潘美伊[1a]，高敏[1a]，闫成林[1a]，李媛媛[1a]，年廷凯[2*]

1. 辽宁师范大学 a. 地理科学学院；b. 大连市农业气象灾害风险防控重点实验室，辽宁 大连 116029；
2. 大连理工大学建设工程学院，辽宁 大连 116024

第一作者，E-mail：defengzheng@lnnu.edu.cn

* 通信作者，E-mail：tknian@dlut.edu.cn

2024-09-06 收稿；2024-11-02 修回；2024-11-06 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42077272)；辽宁师范大学高端科研成果培育资助计划项目(23GDL007)

中图分类号：P642.22　　文章编号：2096-8523(2025)02-0048-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240509

摘　要：位于辽宁省南部的仙人洞国家级自然保护区及毗邻区域，近年来在集中降雨期间多次发生滑坡等地质灾害；然而，针对集中降雨影响下该区域滑坡灾害易发性与风险评价还很少探究，因此亟待开展深入研究，这对有效减轻保护区地质灾害危害、提升地质灾害应急和风险防控能力具有重要意义。首先利用 SMOTE-Tomek 综合采样法、耦合 XGBoost 模型，对地形地貌、地质岩性、水文气象和人类工程活动因子等 12 个指标进行深入分析，以获取滑坡灾害易发性评价结果；其次，着重考虑短时间集中降雨和连续性降雨影响，利用研究区周围 4 个气象站的日降雨数据，计算 2018−2023 年平均暴雨强度和 3 d 累计降雨量，作为危险性评价指标，实现对滑坡灾害危险性的量化评估。在此基础上，考虑承灾体的易损性特点和区域防灾减灾能力，构建适用于研究区的多因子滑坡灾害风险评价模型，进而得到滑坡灾害风险评价分区图。结果表明：较高及以上等级风险区约占研究区总面积的 10%，主要分布在仙人洞镇东北部、步云山乡北部、长岭镇北部和荷花山镇西南部。未来应重点关注滑坡地质灾害风险较高的仙人洞镇和步云山乡，加强监测和预警工作，为整个研究区的地质灾害防控提供决策支持。

关键词：滑坡灾害；易发性评价；风险评价；SMOTE-Tomek 算法；XGBoost 模型；防灾减灾能力；自然保护区；集中降雨

滑坡是世界范围内发生最频繁、危害性极大的地质灾害之一[1-4]。据《全国地质灾害公报》数据显示，2019−2023 年滑坡灾害数量占我国地质灾害总量的 68.2%。《2023 年中国自然资源公报》指出，2023 年成功预报地质灾害 427 起，涉及可能伤亡人数 5 249 人，避免直接经济损失 5 亿元。可见，科学合理地进行滑坡地质灾害预测预报，是减少灾害损失的重要工作。位于辽南的仙人洞国家级自然保护区，具有独特的自然资源优势，但近年来在集中降雨期间多次发生滑坡等地质灾害，造成重大人员伤亡和财产损失。因此，亟需调查滑坡地质灾害的空间分布，聚焦集中降雨影响，开展滑坡地质灾害易发性和风险评估，这对于该区域的地质灾害防治具有重要意义。

国内外学者对区域滑坡灾害风险评价的各环节进行了大量探索性研究。现有滑坡灾害风险评价研究中，通常依据联合国 1992 年发布的灾难危险定义“风险度=危险度×易损度”[5]，该理论主要考虑区域滑坡灾害的危险性和承灾体易损性，对研究区进行二因子滑坡灾害风险评价。在易发性评价方面，经历了从理论分析到定性研究再到定量分析的发展阶段，目前已聚焦于机器学习等人工智能模型方法相结合。如黄发明等[6]基于支持向量机和随机森林

著录信息：郑德凤，潘美伊，高敏，等. 集中降雨影响下辽南仙人洞国家级自然保护区滑坡灾害多因子风险评价［J］. 地质科技通报，2025，44(2)：48-58.
ZHENG Defeng, PAN Meiyi, GAO Min, et al. Multi-factor risk assessment of landslide disasters under concentrated rainfall in Xianrendong national nature reserve in southern Liaoning Province［J］. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 48-58.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

方法，探讨了基于机器学习的滑坡灾害易发性预测及其不确定性；ZHANG 等[7] 基于确定性系数模型和参数优化的随机森林模型，绘制出会泽县地质灾害易发性区划图。在危险性评价方面，刘帅等[8] 以年平均最大日降雨量为诱发因素，分别对不同降雨条件下的研究区进行了崩塌、滑坡地质灾害危险性评价；张迎宾等[9] 分析了九寨沟地区地震滑坡空间分布特征及规律，利用 PB 神经网络模型得到了九寨沟的滑坡危险性预测图。在危险性评价的基础上，DIKSHIT 等[10]、NOVELLINO 等[11]、RAM 等[12] 通过叠加承灾体易损性指标，分别对喜马拉雅山脉南部的普捷索林地区、意大利亚平宁南部地区和印度小喜马拉雅山脉下部的马苏里小镇开展了整体风险评价。

现有区域滑坡灾害风险评价中，针对县域或乡镇尺度下的集中降雨诱发滑坡灾害风险评价研究尚显不足，且特定区域（如小尺度自然保护区）滑坡灾害风险评价应考虑滑坡灾害发生的全过程，包括灾前预防风险评价、灾中应急风险评价以及灾后重建过程的风险评价。因此，特定区域防灾减灾能力也应作为一个重要的风险评价指标。本研究在二因子风险评价理论基础上，以辽南仙人洞国家级自然保护区为例，聚焦集中降雨影响（集中暴雨强度和 3 d 累计降雨量）开展危险性评价，考虑承灾体的易损性特点和区域防灾减灾能力，构建了研究区多因子风险评价模型，开展了滑坡地质灾害风险评估与区划，以期为研究区防灾减灾提供决策支持。

1　研究区概况

研究区位于辽宁省南部的庄河市北部山区（图 1），东经 122°29′ ~ 123°4′，北纬 39°45′ ~ 40°12′，以仙人洞国家级自然保护区为中心，毗临冰峪沟国家 4A 级风景名胜区、碧流河水库风景区、天门山国家森林公园和银石滩国家森林公园，具有独特的地貌条件和气候条件。地表水系发育，多年平均降雨量约为 691 mm，降雨集中于 7-8 月份，时有暴雨发生。地势北部相对较高，西北、西南、东北角较低。研究区地处欧亚板块与太平洋板块的俯冲–挤压地带，构造运动较为活跃，区域内分布碧流河断裂、皮口断裂及其次级断裂。受地质构造条件和极端降雨的影响，研究区突发性地质灾害较多，根据实地调查和历史编录数据可知：研究区共有 30 处滑坡，其中 4 处滑坡规模较大。滑坡的坡面形态以凸形坡为主，结构特征多为土岩组合的二元介质边坡，易产生土–岩界面滑动或沿岩体内部软弱结构面滑动；从滑坡类型看，区内多为牵引式滑坡，滑坡前缘受人工削坡或风化侵蚀的影响，大多呈现舌形和半圆形，滑坡灾害点在研究区各乡镇均有分布。这些滑坡造成了基础设施损毁、水土流失、环境破坏，严重危及当地居民的生命和财产安全。

2　研究方法

2.1　研究区滑坡灾害易发性评价方法

2.1.1　基于 SMOTE-Tomek 综合采样的滑坡灾害数据集生成

机器学习模型需要大量样本数据训练模型，正负样本不均衡会显著影响模型预测效果[13-14]，目前主要采用重采样方法来解决样本不均衡问题。重采样方法主要包括过采样方法、欠采样方法和二者结合的综合采样方法[15]。本研究采用 SMOTE-Tomek 综合采样法，在 SMOTE 方法基础上改进了过采样算

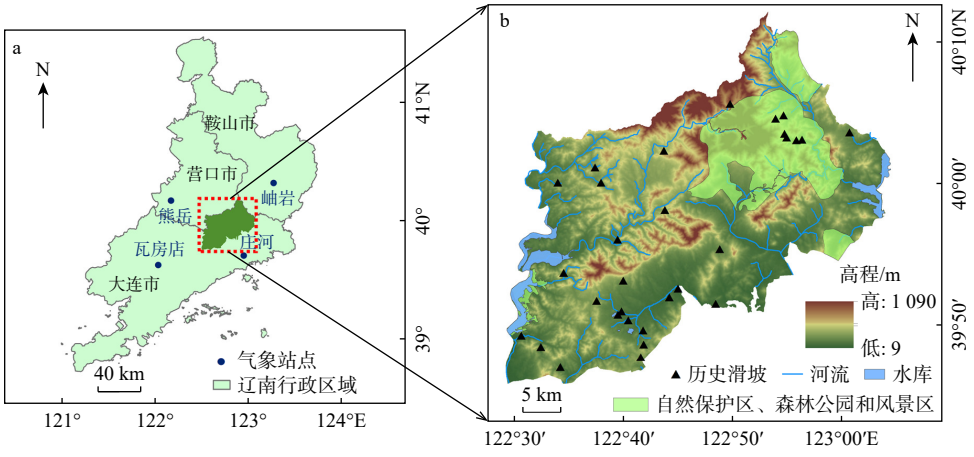


图 1　研究区位置 (a) 和概况图 (b)

Fig. 1　Location (a) and overview map (b) of the study area

法，避免 SMOTE 方法容易出现的过泛化和高方差问题，影响模型分类[16]。

SMOTE-Tomek 综合采样法首先利用 SMOTE 算法，生成合成样本来增加少数类的样本数量，从而平衡数据集。然后使用 Tomek Links 算法，删除噪声或边界点样本来对多数类的样本进行欠采样，使数据更加清晰[17]。具体算法原理如图 2 所示。本研究区初始滑坡灾害点 30 个，在滑坡点 500 m 缓冲区外提取非滑坡点 900 个，通过 SMOTE-Tomek 综合采样法，以少数类样本比多数类样本为 1∶3 的比例，对研究区少数类样本滑坡灾害点进行过采样，剔除噪声样本后剩余滑坡灾害点 298 个，总体样本点为 1 198 个。

2.1.2　研究区滑坡灾害易发性评价指标体系构建

滑坡灾害易发性评价是区域滑坡灾害风险预警与稳定性分析的基础[18-19]。滑坡灾害的形成是内外因素共同作用的结果[20]，本研究基于滑坡灾害易发性评价相关文献 [21-23] 和区域环境条件，以地形地貌、地质岩性、水文气象和人类工程活动为评价准则，选取 12 项二级指标，构建滑坡灾害易发性评价指标体系。具体的指标因子、分类区间和依据如表 1 所示。

2.1.3　基于 XGBoost 模型的滑坡灾害易发性评价

XGBoost(eXtreme gradient boosting)是集成学习算法 Boosting 的一种，是梯度提升树的一种改进。它采用决策树作为基本学习器，构建一个强大的集成模型。在生成每一颗子树时，会根据前面生成树的错误情况来调整样本权重，并确定最优分割点。该算法可自动对缺失值进行处理，在确定分裂点时会根据缺失值情况进行分裂。具有出众的效率与较高的预测准确度[24-25]。本研究利用该模型算法的优点，根据研究区滑坡灾害点样本数据的分布特征，对整体研究区的滑坡灾害易发性空间分布进行评价。

XGBoost 的目标函数定义为损失函数和正则化

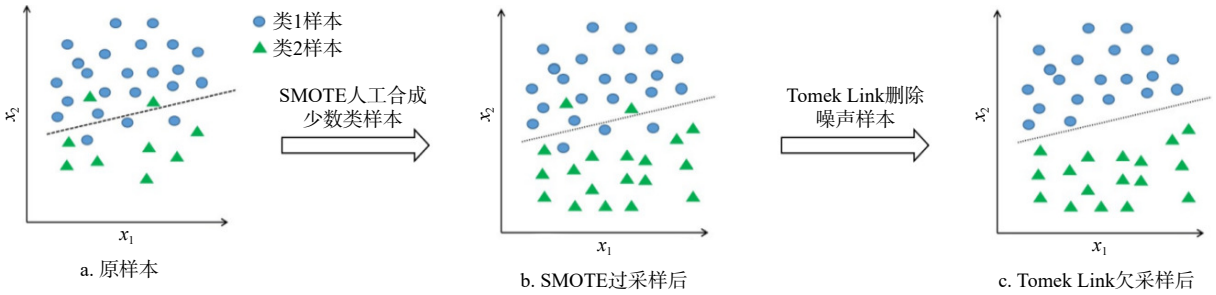


图 2　SMOTE-Tomek 算法原理（图中 x_1，x_2 为 2 个不同样本的特征值）

Fig. 2　SMOTE-Tomek algorithm principle

表 1　研究区滑坡灾害易发性评价因子及其分类区间和分类标准

Table 1　Evaluation factors, classification intervals and standards of landslide disaster susceptibility in the study area

一级指标	二级指标	分类区间	分级标准
地形地貌	高程/m	<134，[134，238)，[238，370)，[370，549]，>549	自然断点法
	坡向	平地、北、东北、东、东南、南、西南、西、西北	文献[21]
	坡度/(°)	<5.97，[5.97，11.73)，[11.73，18.14)，[18.14，25.4]，>25.4	自然断点法
	地形起伏度/m	<9，[9，19)，[19，29)，[29，41]，>41	自然断点法
	地形湿度指数	<5.86，[5.86，7.74)，[7.74，10.67)，[10.67，14.75]，>14.75	自然断点法
地质岩性	岩性	极硬、硬、较硬、较软、软	工程岩体分级标准
	距断层距离/m	<500，[500，1 000)，[1 000，1 500)，[1 500，2 000]，>2000	等间距划分
气象水文	汛期年降雨量/（$mm \cdot a^{-1}$）	<502.2，[502.2，520.0)，[520.0，538.2)，[538.2，556.0]，>556.0	自然断点法
	距河流距离/m	<200，[200，400)，[400，600)，[600，800]，>800	等间距划分
人类工程活动	土地利用	水域、未利用地、耕地、建设用地、林地、草地	国家土地利用分类标准
	距道路距离/m	<200，[200，500)，[500，800)，[800，1 200)，[1 200，2 500]，>2 500	文献[22-23]
	归一化植被指数	<0.68，[0.68，0.74)，[0.74，0.80)，[0.80，0.85]，>0.85	自然断点法

注：数据来源①数字高程模型数据：中国地理空间数据云网(http://www.gscloud.cn/)，分辨率为30 m×30 m；②土地利用数据：地理监测云平台(https://www.dsac.cn)；③岩性和断层数据：提取自大连市1∶25万地质图(全国地质资料馆网站http://www.ngac.cn)；④水文气象数据：中国气象数据网(http://data.cma.cn)；⑤水系和道路数据：OpenStreetMap网站(https://www.openstreetmap.org)；⑥归一化植被指数数据：资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)，分辨率为1 km×1 km

项的和[26]：

$$obj^{(t)}=\sum_{i=1}^{m}L(y_i,\hat{y}_i^{(t-1)}+f_t(x_i))+\sum_{r=1}^{t}\Omega(f_r),\quad(1)$$

$$\Omega(f_t)=\gamma T+\frac{1}{2}\lambda\sum_{j=1}^{T}\omega_j^2,\quad(2)$$

式中：$L(y_i,\hat{y}_i^{(t-1)}+f_t(x_i))$ 为训练样本的损失函数；y_i 为训练样本 i 的真实值；$\hat{y}_i^{(t-1)}$ 为第 i 个样本经过(t−1)次迭代后的预测值；$f_t(x_i)$ 为样本 x_i 经过 t 次训练后的决策树函数；$\sum_{r=1}^{t}\Omega(f_r)$ 为正则化项，表示对 t 棵树的复杂度求和；T 为第 t 棵树的节点个数；ω_j 为树第 j 个节点的权重值；γ,λ 均为超参数。

利用二阶泰勒公式对式(1)进行展开，并省略常数项，经简化可得到：

$$obj(x)^{(t)}\approx\sum_{i=1}^{m}[g_if_t(x_i)+\frac{1}{2}h_if_t^2(x_i)+\Omega(f_t)],\quad(3)$$

式中：g_i, h_i 分别为损失函数的一阶导数和二阶导数。

令 $g_i=\sum_{i\in I_j}g_i$，$h_i=\sum_{i\in I_j}h_i$，整理可得最终目标函数：

$$obj(x)=-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{T}\frac{g_i^2}{h_i+\lambda}+\gamma T。\quad(4)$$

2.2 研究区滑坡灾害风险评价方法

2.2.1 滑坡灾害危险性评价指标体系

辽南仙人洞国家级自然保护区发生的滑坡灾害受降雨因素影响较大，其中短时间集中降雨或连续性降雨是导致区域滑坡灾害产生的主要因素。本研究选取 2018−2023 年平均暴雨强度和 3 d 累计降雨量作为滑坡灾害危险性评价的指标。

(1)年平均暴雨强度(I)指标

暴雨是诱发滑坡的主要自然因素之一，它可以显著增加斜坡的水分含量，导致土壤饱和，降低斜坡稳定性，使得滑坡更易于发生。年平均暴雨强度能够指示出在一定周期内，斜坡可能遭受的水力侵蚀和影响的程度，它能反映出一个地区在长时间跨度内遭受暴雨侵袭的平均水平。根据国家气象局发布的降雨强度标准，日降雨量大于 50 mm 即为暴雨，本研究收集研究区周围的熊岳、岫岩、瓦房店、庄河 4 个气象站 2018−2023 年连续 5 a 的降雨数据，气象站点空间分布如图 1a 所示，计算 5 a 内单次暴雨过程中的年均暴雨量和年均暴雨日数的比值，在 ArcGIS 中运用反距离权重法，绘制研究区年平均暴雨强度分布图(图 3)。辽南仙人洞国家级自然保护区年平均暴雨强度为 86.7 ~ 108.1 mm/d，总体呈现

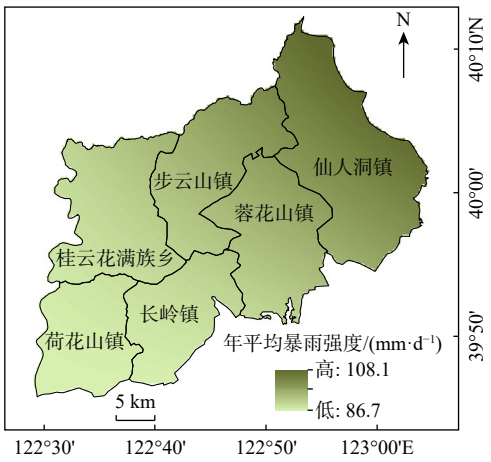


图 3 研究区 2018−2023 年平均降雨强度空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of annual average rainfall intensity from 2018 to 2023 in the study area

从西南向东北逐渐递增趋势，最大值出现在仙人洞镇。东北部暴雨强度较大，在极端天气条件下极易增大滑坡灾害的危险性。

(2)3 d 累计降雨量(T)指标

降雨对坡体变形具有促进作用，持续降雨会增加土壤的渗透压力，从而增大滑坡发生的可能性。3 d 累计降雨量是指在连续 3 d 内，某一地区所记录的降雨总量。这种累积效应更能体现降雨对斜坡稳定性的影响，尤其当 3 d 累计降雨量大于 52 mm 时坡体在地表会产生变形[27]。因此，通过分析 3 d 累计降雨量，以此进一步揭示连续性降雨对滑坡的重要影响。本研究基于熊岳、岫岩、瓦房店、庄河 4 个气象站的日均降雨量数据，记录研究区在连续 72 h 内的所有降雨事件，并计算这些事件的降雨总量，然后通过克里金插值方法对数据进行插值、裁剪后生成辽南仙人洞国家级自然保护区 3 d 累计降雨量分布

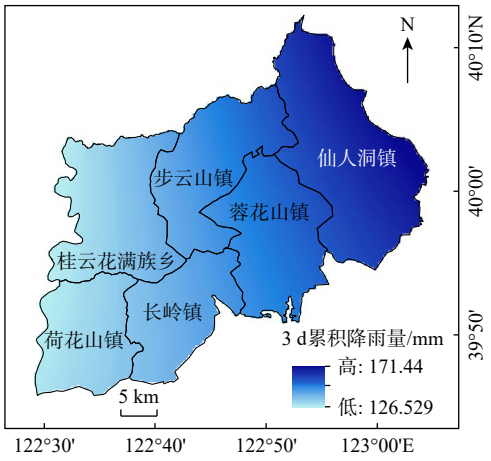


图 4 研究区 3 d 累计降雨量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of three-day cumulative rainfall in the study area

图(图 4),图 4 显示研究区 3 d 累计降雨量分布呈现从西南向东北递增的特点,数值范围 126.5 ~ 171.4 mm。

2.2.2　研究区滑坡灾害承灾体易损性评价指标体系

滑坡灾害承灾体易损性是滑坡灾害社会属性的具体表现[28-29],本研究参考文献 [30] 从人口、物质和经济 3 方面选取评价指标构建研究区承灾体易损性评价指标体系,并运用层次分析法(Analytic Hierarchy Process,简称 AHP)确定各指标权重。具体的滑坡灾害承灾体易损性评价因子、各指标因子权重和分级标准如表 2 所示。各评价指标因子均按自然断点法分级[30],承灾体易损性指标因子的空间分布如图 5 所示。

2.2.3　研究区防灾减灾能力评价指标体系

防灾减灾能力是灾害发生时人的主观能动性和区域人类社会承载体对自然灾害威胁的抵御能力,以及人从自然灾害中恢复重建的能力[31],防灾减灾能力越高,越可减小灾害发生的可能性或减轻风险损失后果。综合考虑防灾减灾能力定义,参考 HU 等[32]、SHAO[33] 的评价指标,本研究按照防灾、应灾和灾后重建能力选取指标,并利用层次分析法确定各指标权重,具体指标因子及对应权重见表 3。

2.2.4　研究区滑坡灾害风险评价模型构建

联合国开发计划部署(UNDP)“国际减灾战略”项目提出灾害风险评价的量化方法为“风险=危险性×易损性/防灾减灾能力”,该理论将防灾减灾纳入到风险评价过程并在相关领域得到应用[34-37]。本研究依据此方法的量化思路,针对研究区的滑坡灾害

表 2　研究区滑坡灾害承灾体易损性评价因子和分级标准

Table 2　Vulnerability evaluation factors and grading standards of landslide disaster-bearing bodies in the study area

一级指标	二级指标	指标权重	低易损性	较低易损性	中易损性	较高易损性	高易损性
人口易损性	人口密度/(人·km^{-2})	0.3664	<156	[156，179)	[179，212)	[212，250]	>250
物质易损性	农村居民点密度/(10^{4}m^2·km^{-2})	0.1496	<2.45	[2.45，2.94)	[2.94，3.10)	[3.10，3.73]	>3.73
	道路密度/(km·km^{-2})	0.0849	<0.31	[0.31，0.69)	[0.69，1.73)	[1.73，2.66]	>2.66
经济易损性	耕地密度/(km^2·km^{-2})	0.1245	<0.18	[0.18，0.19)	[0.19，0.24)	[0.24，0.34]	>0.34
	国内生产总值/(万元·km^{-2})	0.0522	<660	[660，1064)	[1064，1292)	[1292，1611]	>1611
	林地密度/(km^2·km^{-2})	0.2224	<0.44	[0.44，0.55)	[0.55，0.68)	[0.68，0.72]	>0.72

注:①人口密度和国内生产总值数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统(https://www.resdc.cn);②农村居民点、耕地、林地数据来源于资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)

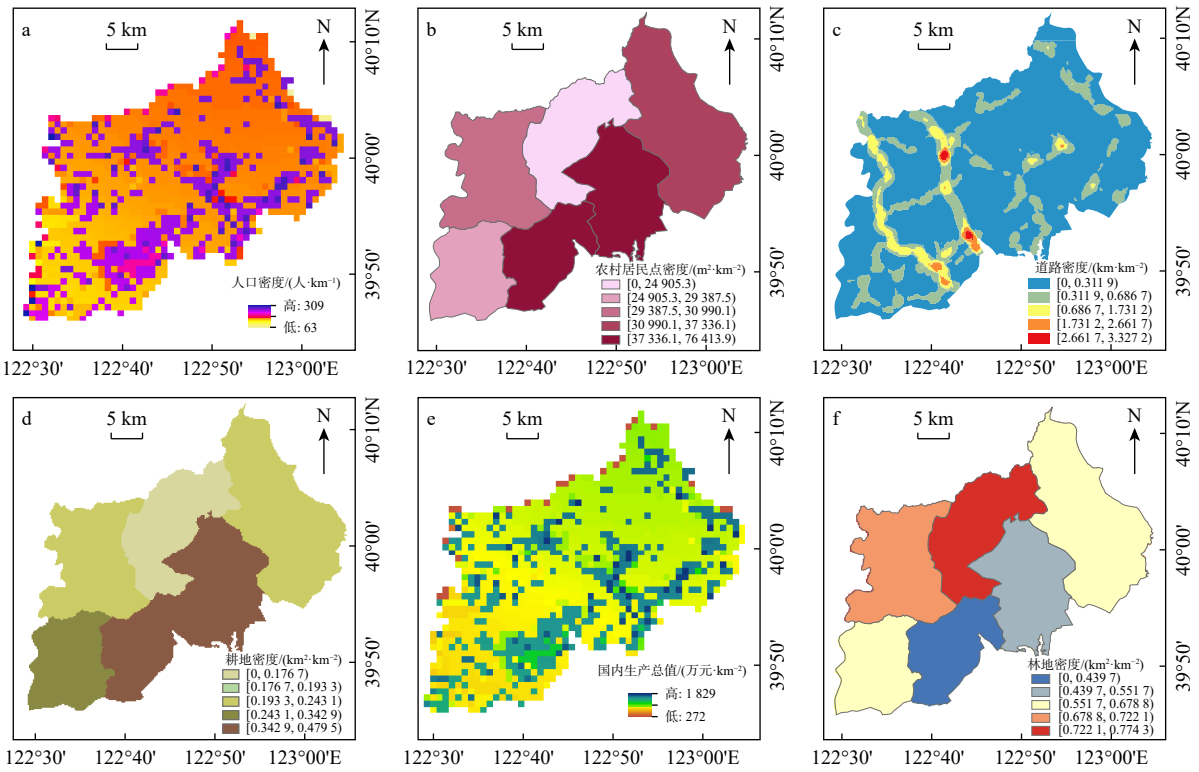


图 5　研究区滑坡灾害承灾体易损性评价因子分布图

Fig. 5　Distribution map of vulnerability evaluation factors of landslide disaster-bearing bodies in the study area

表 3　研究区防灾减灾能力评价指标及对应权重

Table 3　Indicators and corresponding weights of disaster prevention and mitigation capacity in the study area

一级指标	一级指标权重 ω_f	二级指标	二级指标权重 ω_g
防灾能力	0.3091	地质勘探与测绘公司数量/个	0.6667
		地方一般公共预算支出/万元	0.3333
应灾能力	0.5813	义务教育在校学生数/人	0.2298
		居民青壮年人数占长居人数比例	0.6479
		医护人员数/人	0.1223
灾后重建能力	0.1096	住户储蓄存款余额/万元	0.7500
		医疗、社区、卫生院床位/张	0.2500

注: 防灾减灾能力数据来源于《2023中国县域统计年鉴(乡镇版)》、《2023大连市统计年鉴》

致灾机理和危险后果, 构建适用于研究区滑坡灾害的风险评价模型, 具体计算过程如下:

$$R = H \times V \div F, \tag{5}$$

$$H = S \times (I + T), \tag{6}$$

$$V = \sum_{v=1}^{h} \omega_v \times Z_v, \tag{7}$$

$$F = \sum_{f=1}^{i} \omega_f \times Z_f, \tag{8}$$

式中: R, H, V, F 分别代表滑坡灾害风险、危险性、易损性、防灾减灾能力; S 为滑坡灾害易发性评价结果; I 为年平均暴雨强度值; T 为 3 d 累计降雨量; Z_v, ω_v (v=1, 2, …, h)分别为承灾体易损性评价指标归一化数据与权重; Z_f, ω_f(f=1, 2, …, i)分别为防灾减灾能力评价指标归一化数据与权重。

3　研究区滑坡灾害风险评价结果

3.1　滑坡灾害易发性（S）评价结果及检验

本研究首先利用 SMOTE-Tomek 综合采样法得到总体样本数据, 提取易发性评价的指标特征后, 按照 7∶3 的比例划分为训练集和测试集, 然后将训练集样本数据输入到 XGBoost 模型, 根据测试集评价结果, 不断调整模型参数, 最后利用训练好的 XGBoost 模型对辽南仙人洞国家级自然保护区滑坡灾害易发性进行评价, 并利用反距离权重法对研究区滑坡灾害易发性评价结果进行优化, 参考现有文献 [38-39] 的分级标准, 将研究区划分为高易发区、较高易发区、中易发区、较低易发区、低易发区共 5 个等级, 最终结果如图 6 所示。研究区内等级为高和较高易发区空间呈离散化分布, 东部主要分布在仙人洞镇冰峪沟风景区的北部山区, 该区域地势相对高差较大, 坡度变化显著, 影响了坡体稳定性; 区域内岩石大多是砂岩, 岩性软弱、岩体结构较为松散且风化严重, 滑坡灾害频繁发生。西部的高和较高易发区多分布在碧流河水库沿岸、南部路网密集的区域, 该区由于基础设施建设、建房修路等人类活动, 破坏了岩土体的内部结构, 在汛期降雨或大暴雨浸润作用下, 坡体岩土介质抗剪强度降低, 从而诱发滑坡灾害发生。中易发区基本环绕较高易发区分布, 占研究区总面积的 10.3%, 低和较低易发区整体上呈片状分布, 占研究区总面积的 80%。

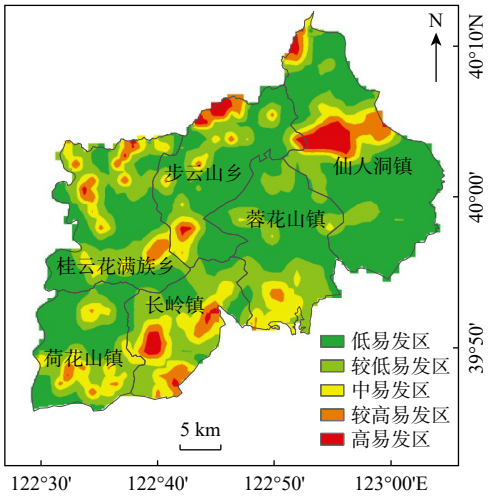


图 6　研究区滑坡灾害易发性分区图

Fig. 6　Zoning diagram of landslide disaster susceptibility

本研究通过 ROC 曲线下面积 AUC 值, 分别对耦合 SMOTE-Tomek 算法的 XGBoost 模型和未耦合 SMOTE-Tomek 算法的 XGBoost 模型性能进行评估, 以对比 2 种模型在易发性评价结果中的准确性, 如图 7 所示。显然, 耦合模型 AUC 值为 94%, 大于单一模型的预测结果, 表明耦合模型具有更好的预测性能, 更有效地反映了研究区滑坡灾害的空间分布特征。

3.2　滑坡区滑坡灾害危险性（H）评价结果分析

利用公式(6), 在 ArcGIS 软件的栅格计算器中, 将年平均暴雨强度、3 d 累计降雨量 2 个图层叠加后与研究区滑坡灾害易发性结果相乘得到研究区滑坡灾害的危险性评价结果, 并根据现有文献 [40] 分级标准, 将研究区分为高危险区、较高危险区、中危险区、较低危险区、低危险区 5 个等级, 如图 8 所示。分析可见, 较高及以上等级的危险区基本分布在研究区东北部, 即仙人洞镇东北部, 约占研究区总面积

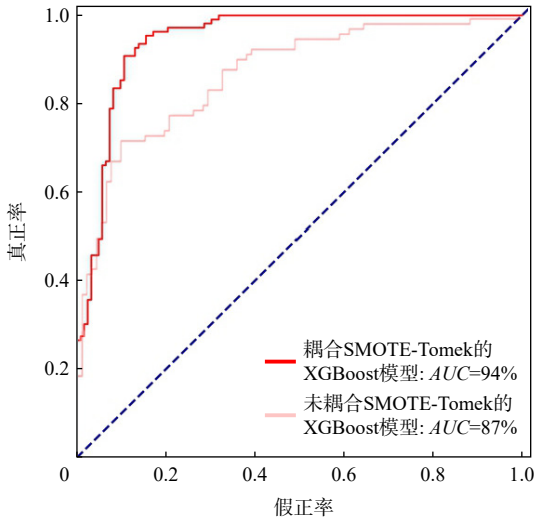


图 7　滑坡灾害易发性评价 ROC 曲线

Fig. 7　ROC curve of landslide disaster susceptibility evaluation

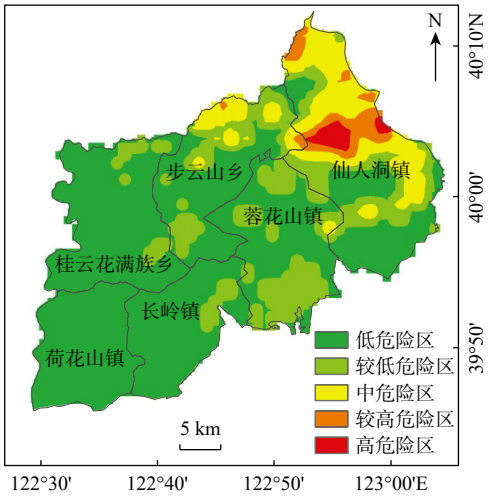


图 8　研究区滑坡灾害危险性分区图

Fig. 8　Landslide risk zoning map of the study area

的 8%，是在东部高易发性分布区基础上的进一步扩大，与年平均暴雨强度和 3 d 累计降雨量的高值区分布几乎一致；中危险区约占研究区总面积的 10%，大部分环绕高和较高危险区分布，还有一小部分分散在步云山乡北部；较低及以下等级危险区分布广泛，约占研究区总面积的 82%。

3.3　滑坡灾害承灾体易损性（V）评价结果分析

研究区滑坡灾害承灾体易损性各评价因子经标准化处理后，应用公式(7)，累计相加承灾体易损性各因子值与对应权重相乘的结果，然后输入到 ArcGIS 软件，根据自然断点法划分为 5 个等级，得到研究区滑坡灾害承灾体易损性评价结果(图 9)。统计分析研究区承灾体易损性评价结果可知：高和较高易损区的分布面积较小，集中分布于人口密度、

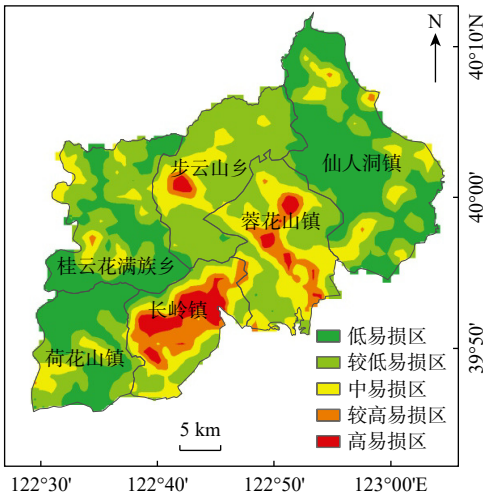


图 9　研究区滑坡灾害承灾体易损性分区图

Fig. 9　Vulnerability zoning map of landslide disaster-bearing bodies in the study area

农村居民点密度和耕地密度比较集中的长岭镇和蓉花山镇，零星分布于步云山乡、仙人洞镇和桂云花满族乡，面积约为 157.6 km^2，占研究区总面积的 12%；中易损区在整个研究区分布较为广泛，占研究区总面积的 21%；较低易损区在研究区各乡镇均有分布，主要分布于步云山乡和蓉花山镇内；低易损区主要分布于荷花山镇和桂云花满族乡的交界地带以及仙人洞镇北部海拔较高的山区和中部地区，约占研究区总面积的 67%。

3.4　防灾减灾能力（F）评价结果分析

利用公式(8)将指标因子值乘以对应的权重，得到防灾减灾能力评价结果(图 10)。分析评价结果可知，研究区防灾减灾能力整体趋势相对较好，其中仙人洞镇、蓉花山镇和长岭镇是高防灾减灾能力区；桂

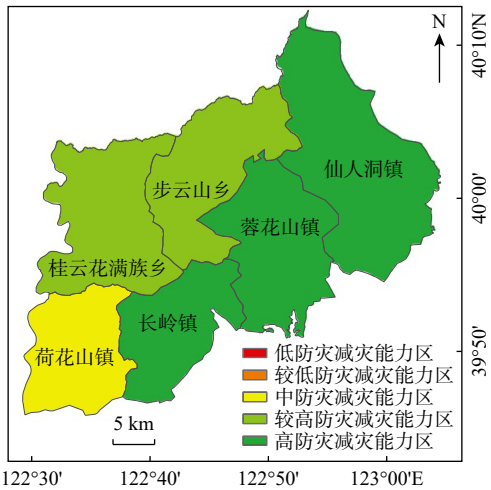


图 10　研究区防灾减灾能力分区图

Fig. 10　Zoning map of disaster prevention and mitigation capacity of the study area

云花满族乡和步云山乡为较高防灾减灾能力区；而区域面积最小、拥有较少医护人员和青壮年的荷花山镇应灾能力较差，致使防灾减灾能力评价结果为中等。

3.5 滑坡灾害风险（R）评价结果分析

根据滑坡灾害风险评价模型，应用公式(5)将研究区滑坡灾害危险性、承灾体易损性和防灾减灾能力评价结果进行叠加运算，得到整个研究区滑坡灾害风险评价结果，并参考现有文献 [40] 分级标准，将风险结果划分为高风险区、较高风险区、中风险区、较低风险区、低风险区 5 个等级，如图 11 所示。分析可知：较高及以上等级风险区面积约占研究区总面积的 10%，主要分布在仙人洞镇东北部、步云山乡北部、长岭镇北部和荷花山镇西南部，其中仙人洞镇和长岭镇的危险性和易损性均较高，但由于其较高的防灾减灾能力，在一定程度上降低了其滑坡灾害风险。而低危险性和承灾体中易损性的荷花山镇，由于其相对较弱的防灾减灾能力，最终风险等级则明显提升。中风险区总面积约占研究区总面积的 17%，主要分布在蓉花山镇和长岭镇中南部，还有少部分环绕荷花山镇、步云山乡和仙人洞镇的高风险区分布。较低及以下等级风险区面积约占研究区总面积的 63%，分布广泛且相对零散，主要分布在研究区西北部和东南部，均为防灾减灾能力高、危险性和承灾体低易损性的区域。

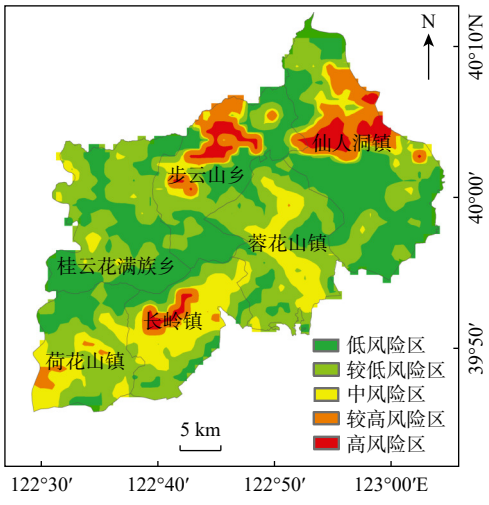


图 11 研究区滑坡灾害风险分区图

Fig. 11 Risk zoning map of landslide disaster in the study area

4 结 论

(1)结合 SMOTE-Tomek 综合采样法和 XGBoost 模型的耦合模型，能够实现研究区滑坡灾害易发性的有效评价。研究表明，较高及以上等级的滑坡易发区，主要分布在东部冰峪沟风景区、北部山区以及人类工程活动影响大、路网密集的西部地区。

(2)以年平均暴雨强度和 3 d 累计降雨量为滑坡灾害危险性评价指标，对研究区滑坡灾害危险性进行了评价。结果表明，较高及以上等级的危险区基本分布在年平均暴雨强度大、3 d 累计降雨量多以及地形地貌条件复杂的仙人洞镇东北部地区，约占研究区总面积的 8%。

(3)综合考虑研究区的防灾减灾能力，危险性和易损性均较高的仙人洞镇和长岭镇，其滑坡灾害风险等级降低；而低危险性和承灾体中易损性的荷花山镇，其风险等级则明显提升。未来应重点关注滑坡风险较高及以上等级的区域，加强监测和预测工作，为研究区地质灾害风险防控和应急处置提供支持。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 黄发明，汪洋，董志良，等. 基于灰色关联度模型的区域滑坡敏感性评价 [J]. 地球科学，2019，44(2)：664-676.
HUANG F M，WANG Y，DONG Z L，et al. Regional landslide susceptibility mapping based on grey relational degree model[J]. Earth Science，2019，44(2)：664-676.（in Chinese with English abstract）

[2] 裴振伟，年廷凯，吴昊，等. 滑坡地质灾害应急处置技术研究进展 [J]. 防灾减灾工程学报，2021，41(6)：1382-1394.
PEI Z W，NIAN T K，WU H，et al. Research progress on emergency treatment techniques for landslide geological hazards[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering，2021，41(6)：1382-1394.（in Chinese with English abstract）

[3] 闫成林，郑德凤，年廷凯，等. 基于 ANP 的模糊贝叶斯网络模型及其在海岸带地质灾害风险评价中的应用 [J]. 工程地质学报，2021，29(6)：1862-1868.
YAN C L，ZHENG D F，NIAN T K，et al. Fuzzy Bayesian network model based on anp and its application to coastal zone geohazard risk assessment[J]. Journal of Engineering Geology，2021，29(6)：1862-1868.（in Chinese with English abstract）

[4] LI Y Y，ZHENG D F，YAN C L，et al. Spatial distributions and multi-factor driving mechanism of landslide in southern Liaodong Peninsula[J]. Frontiers in Ecology and Evolution，2024，11：1339265.

[5] 国家地震局震害防御司，自然灾害学报编辑部. 国际减轻自然灾害十年计划的实施 [M]. 北京：地震出版社，1992.
Earthquake Disaster Prevention Department of State Seismological Bureau，Editorial Department of Journal of Natural Disasters. Implementation of the international ten-year plan for natural disaster reduction[M]. Beijing：Seismological Press，1992.（in Chinese）

[6] 黄发明, 胡松雁, 闫学涯, 等. 基于机器学习的滑坡易发性预测建模及其主控因子识别 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 79-90.
HUANG F M, HU S Y, YAN X Y, et al. Landslide susceptibility prediction and identification of its main environmental factors based on machine learning models[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 79-90. (in Chinese with English abstract)

[7] ZHANG S H, TAN S C, ZHOU J X, et al. Geological disaster susceptibility evaluation of a random-forest-weighted deterministic coefficient model[J]. Sustainability, 2023, 15(17): 12691.

[8] 刘帅, 朱杰勇, 杨得虎, 等. 不同降雨工况条件下的崩滑地质灾害危险性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 253-267.
LIU S, ZHU J Y, YANG D H, et al. Geological hazard risk assessment of collapse and landslide under different rainfall conditions[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 253-267. (in Chinese with English abstract)

[9] 张迎宾, 徐佩依, 林剑锋, 等. 基于 BP 神经网络的九寨沟地区地震滑坡危险性预测研究 [J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 133-145.
ZHANG Y B, XU P Y, LIN J F, et al. Earthquake-triggered landslide susceptibility prediction in Jiuzhaigou based on BP neural network[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 133-145. (in Chinese with English abstract)

[10] DIKSHIT A, SARKAR R, PRADHAN B, et al. Spatial landslide risk assessment at phuentsholing, Bhutan[J]. Geosciences, 2020, 10(4): 131.

[11] NOVELLINO A, CESARANO M, CAPPELLETTI P, et al. Slow-moving landslide risk assessment combining machine learning and InSAR techniques[J]. CATENA, 2021, 203: 105317.

[12] RAM P, GUPTA V. Landslide hazard, vulnerability, and risk assessment (HVRA), Mussoorie Township, lesser Himalaya, India[J]. Environment, Development and Sustainability, 2022, 24(1): 473-501.

[13] TANIMU J J, HAMADA M, HASSAN M, et al. A machine learning method for classification of cervical cancer[J]. Electronics, 2022, 11(3): 463.

[14] 郑德凤, 高敏, 闫成林, 等. 基于卷积神经网络的滑坡易发性评价: 以辽南仙人洞国家级自然保护区为例 [J]. 地球科学, 2024, 49(5): 1654-1664.
ZHENG D F, GAO M, YAN C L, et al. Susceptibility assessment of landslides based on convolutional neural network model: A case study from Xianrendong National Nature Reserve in southern Liaoning Province[J]. Earth Science, 2024, 49(5): 1654-1664. (in Chinese with English abstract)

[15] CHANDRA W, SUPRIHATIN B, RESTI Y. Median-KNN regressor-SMOTE-tomek links for handling missing and imbalanced data in air quality prediction[J]. Symmetry, 2023, 15(4): 887.

[16] DENG S, PAN H Y, LI C W, et al. A real-time lithological identification method based on SMOTE-tomek and ICSA optimization[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2024, 98(2): 518-530.

[17] TARIQ M A, SARGANO A B, IFTIKHAR M A, et al. Comparing different oversampling methods in predicting multi-class educational datasets using machine learning techniques[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2023, 23(4): 199-212.

[18] SHI N, LI Y L, WEN L F, et al. Rapid prediction of landslide dam stability considering the missing data using XGBoost algorithm[J]. Landslides, 2022, 19(12): 2951-2963.

[19] 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 R Z, HU X D, MEI H B, 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. (in Chinese with English abstract)

[20] 年廷凯, 王国栋, 郑德凤, 等. 南海北部陆坡区典型峡谷陡坡群地震稳定性 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1785-1798.
NIAN T K, WANG G D, ZHENG D F, et al. Seismic stability of steep slope groups in typical canyons of northern South China Sea[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1785-1798. (in Chinese with English abstract)

[21] 李星, 杨赛, 李远耀, 等. 面向区域滑坡易发性精细化评价的改进斜坡单元法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 81-92.
LI X, YANG S, LI Y Y, et al. Improved slope unit method for fine evaluation of regional landslide susceptibility[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 81-92. (in Chinese with English abstract)

[22] 吴宏阳, 周超, 梁鑫, 等. 基于 XGBoost 模型的三峡库区燕山乡滑坡易发性评价与区划 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 141-152.
WU H Y, ZHOU C, LIANG X, et al. Assessment of landslide susceptibility mapping based on XGBoost model: A case study of Yanshan Township[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 141-152. (in Chinese with English abstract)

[23] 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 Y, ZHANG Z Z, LIN S H. Evaluation of landslide susceptibility in Ili valley, Xinjiang based on the coupling of WOE model and logistic re-gression[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1350-1363. (in Chinese with English abstract).

[24] LI W, YIN Y B, QUAN X W, et al. Gene expression value prediction based on XGBoost algorithm[J]. Frontiers in Genetics, 2019, 10: 1077.

[25] QIU Y G, ZHOU J, KHANDELWAL M, et al. Performance evaluation of hybrid WOA-XGBoost, GWO-XGBoost and BO-XGBoost models to predict blast-induced ground vibration[J]. Engineering with Computers, 2022, 38(5): 4145-4162.

[26] ZHANG P, JIA Y Q, SHANG Y L. Research and application of XGBoost in imbalanced data[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2022, 18(6): 155013292211069.

[27] 张富灵. 库水及降雨作用下滑移-弯曲型滑坡形成条件与演化机制研究: 以木鱼包滑坡为例 [D]. 湖北宜昌: 三峡大学, 2021.
ZHANG F L. Study on formation conditions and evolution mechanism of slip-bend landslide under the action of reservoir water and

rainfall: Taking Muyubao landslide as an example[D]. Yichang Hubei: China Three Gorges University, 2021.（in Chinese with English abstract）

[28] LIN J H, CHEN W H, QI X H, et al. Risk assessment and its influencing factors analysis of geological hazards in typical mountain environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309: 127077.

[29] LIN J H, LIN M S, CHEN W H, et al. Ecological risks of geological disasters and the patterns of the urban agglomeration in the Fujian delta region[J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107475.

[30] 丁明涛, 庙成. 基于 GIS 的芦山地震灾区滑坡灾害风险评价 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 81-90.
DING M T, MIAO C. GIS-based risk assessment of landslide hazards in Lushan earthquake-stricken areas[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 81-90.（in Chinese with English abstract）

[31] 刘海洋, 王录仓, 常跟应. 郑州“7·20”特大暴雨灾害对中国铁路运网的冲击过程和机制 [J]. 地理学报, 2024, 79(3): 617-634.
LIU H Y, WANG L C, CHANG G Y. The impact process and mechanism of the superheavy rainfall event in Zhengzhou on July 20, 2021 on the China's railway transport network[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(3): 617-634.（in Chinese with English abstract）

[32] HU S Y, YU M, QUE T, et al. Individual willingness to prepare for disasters in a geological hazard risk area: An empirical study based on the protection motivation theory[J]. Natural Hazards, 2022, 110(3): 2087-2111.

[33] SHAO L F. Geological disaster prevention and control and resource protection in mineral resource exploitation region[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2019, 14(2): 142-146.

[34] CHEN L, HUANG Y C, BAI R Z, et al. Regional disaster risk evaluation of China based on the universal risk model[J]. Natural Hazards, 2017, 89(2): 647-660.

[35] YE J Y, ZHANG R Y, LIN G F, et al. Comprehensive risk assessment of non-typhoon rainstorms over the southeastern coastal region of China[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1058054.

[36] 荣广智, 张继权, 李天涛, 等. 极端降水诱发地质灾害链风险评估研究: 以贵州省水城县为例 [J]. 灾害学, 2022, 37(4): 201-210.
RONG G Z, ZHANG J Q, LI T T, et al. Risk assessment of extreme precipitation-induced geological disaster chain: A case study of Shuicheng County, Guizhou Province[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 201-210.（in Chinese with English abstract）

[37] 王婷, 吴绍洪, 高江波, 等. 区域台风–洪涝–地质灾害链减灾能力评估 [J]. 灾害学, 2022, 37(4): 193-200.
WANG T, WU S H, GAO J B, et al. Coping capacity assessment of regional typhoon-flood-geological disaster chain[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 193-200.（in Chinese with English abstract）

[38] 石菊松, 石玲, 吴树仁. 利用 GIS 技术开展滑坡制图的技术方法与流程 [J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1810-1821.
SHI J S, SHI L, WU S R. Techniques and procedures of applications of the GIS technique in landslide map making[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1810-1821.（in Chinese with English abstract）

[39] 郑迎凯, 陈建国, 王成彬, 等. 确定性系数与随机森林模型在云南芒市滑坡易发性评价中的应用 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 131-144.
ZHENG Y K, CHEN J G, WANG C B, et al. Application of certainty factor and random forests model in landslide susceptibility evaluation in Mangshi City, Yunnan Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(6): 131-144.（in Chinese with English abstract）

[40] 王璨, 肖浩, 肖婷, 等. 基于机器学习的长沙市滑坡灾害快速风险评价 [J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 26-31.
WANG C, XIAO H, XIAO T, et al. Efficient risk assessment of landslide disasters in Changsha City based on machine learning[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(5): 26-31.（in Chinese with English abstract）

Summary for “集中降雨影响下辽南仙人洞国家级自然保护区滑坡灾害多因子风险评价”

Multi-factor risk assessment of landslide disasters under concentrated rainfall in Xianrendong national nature reserve in southern Liaoning Province

ZHENG Defeng[1a, 1b], PAN Meiyi[1a], GAO Min[1a], YAN Chenglin[1a], LI Yuanyuan[1a], NIAN Tingkai[2*]

1a. School of Geography; 1b. Dalian Key Laboratory of Agro-Meteorological Disaster Risk Prevention and Control, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning 116029, China;

2. School of Construction Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China

First author, E-mail: defengzheng@lnnu.edu.cn

* Corresponding author, E-mail: tknian@dlut.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Xianrendong National Nature Reserve in southern Liaoning Province and its adjacent areas have experienced numerous geological disasters, such as landslides, during periods of concentrated rainfall in recent years. However, the vulnerability and risk assessment of landslide disasters in this region under the influence of concentrated rainfall have been rarely explored. Therefore, it is urgent to conduct in-depth research, which is of great significance for effectively reducing the harm of geological disasters in the reserve and enhancing the capacity for emergency response and risk prevention and control. [**Method**] Firstly, using the SMOTE-Tomek comprehensive sampling method coupled with an XGBoost model, 12 indices including topography, geology and lithology, hydrometeorology, and human engineering activities are deeply analyzed to obtain the evaluation results of landslide susceptibility. Secondly, focusing on the impact of short-term concentrated rainfall and continuous rainfall, daily rainfall data from four weather stations surrounding the study area are used to calculate annual average rainstorm intensity from 2018 to 2023 and three-day cumulative rainfall as risk assessment indicators, enabling the quantitative assessment of landslide hazards. On this basis, considering the vulnerability characteristics of the disaster-bearing body and regional disaster prevention and mitigation capabilities, a multi-factor landslide disaster risk assessment model suitable for the study area is constructed, resulting in a landslide disaster risk zoning map. [**Result**] The results show that high-risk and above areas account for approximately 10% of the total study area, primarily distributed in the northeast of Xianrendong Town, the north of Buyunshan Town, the north of Changling Town, and the southwest of Hehuashan Town. [**Conclusion**] In the future, efforts should focus on high-risk areas such as Xianrendong Town, strengthening monitoring and early warning systems to provide decision support for the prevention and control of geological disasters across the entire study area.

Key words: landslide disaster; susceptibility evaluation; risk assessment; SMOTE-Tomek algorithm; XGBoost model; disaster prevention and mitigation capacity; nature reserve; concentrated rainfall

Received: 2024-09-06; Revised: 2024-11-02; Accepted: 2024-11-06

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240509