

赵建青,顾福计,钱龙,等.邢台市西部山区滑坡易发性的多模型对比分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2): 146-156.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240074
ZHAO Jianqing, GU Fuji, QIAN Long, et al. Multi-model comparative analysis of landslide susceptibility in the western mountainous area of Xingtai City[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 146-156. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240074

邢台市西部山区滑坡易发性的多模型对比分析

赵建青^{1,2}, 顾福计^{1,2}, 钱龙^{1,2}, 马百衡^{1,2}, 朱小龙^{1,2}, 姜俊杰^{3,4*}, 王奇智^{3,4}, 梁小勇^{3,4}, 尹超⁵

(1. 河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050021; 2. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北 石家庄 050021; 3. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 050018; 4. 河北省房屋建筑工程更新技术创新中心, 河北 石家庄 050018; 5. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对邢台市西部山区滑坡灾害频发问题, 采用信息量模型, 分别耦合层次分析法、熵权法、组合赋权法、随机森林模型对滑坡易发性进行分析。选取12个评价指标, 分别进行主观权重、客观权重、综合权重以及信息量值计算, 并训练随机森林模型; 对4个模型的评价结果进行可靠性分析。研究表明, 降雨量、地层岩性和坡度对研究区滑坡灾害的影响较大, 信息量耦合随机森林模型精度最高, 且具有较好的适用性。研究结论为复杂地质环境下的滑坡易发性评估提供参考。

关键词: 滑坡; 层次分析法; 熵权法; 组合赋权法; 随机森林模型; 易发性评价

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0146-11

Multi-model comparative analysis of landslide susceptibility in the western mountainous area of Xingtai City

ZHAO Jianqing^{1,2}, GU Fuji^{1,2}, QIAN Long^{1,2}, MA Baiheng^{1,2}, ZHU Xiaolong^{1,2}, JIANG Junjie^{3,4*}, WANG Qizhi^{3,4}, LIANG Xiaoyong^{3,4}, YIN Chao⁵

(1. Hebei Provincial Institute of Geological Environment Monitoring, Shijiazhuang 050021, China; 2. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang 050021, China; 3. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 4. Hebei Province Housing Construction Projects Regeneration Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050018, China; 5. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming at the frequent occurrence of landslide disasters in the western mountainous areas of Xingtai City, the information model is used to analyze the landslide susceptibility by coupling the analytic hierarchy process, entropy weight method, combination weighting method and random forest model. Twelve evaluation indexes were selected to calculate the subjective weight, objective weight, comprehensive weight and information value, and the random forest model was trained. The reliability of the evaluation results of the four models was analyzed. The results show that rainfall, stratum lithology and slope have great influence on landslide disasters in the study area. The information-coupled random forest model has the highest accuracy and good applicability. The research conclusions provide a reference for landslide susceptibility assessment in complex geological environment.

Keywords: landslides; analytic hierarchy process; entropy weight method; combination weighting method; random forest model; susceptibility evaluation

0 引言

滑坡是常见的地质灾害之一, 具有较强的破坏力, 频繁发生且分布广泛^[1]。滑坡易发性评价是对特定地区滑坡发生可能性进行的分析和评估,

涉及地形、地质、气候等多方面因素, 旨在为潜在滑坡风险提供科学依据, 以指导预防措施的实施^[2]。随着计算机技术与地理信息系统(GIS)的迅猛发展, 滑坡易发性评价逐渐成为研究的焦点^[3]。

收稿日期: 2024-03-30 修回日期: 2024-06-18 接受日期: 2024-06-30 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家自然科学基金项目(52308511); 河北省高等学校科学研究项目青年拔尖人才项目(BJK2022010)

作者简介: 赵建青(1978-), 男, 河北三河人, 正高级工程师, 主要从事地质环境监测与演化方面的研究。E-mail: 26786977@qq.com

通信作者: 姜俊杰(1998-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害风险识别及防控技术方面的研究。

E-mail: 2724564764@qq.com

近年来,研究者采用了多种评价模型对滑坡易发性进行评价,主要包括层次分析法、逻辑回归模型^[4]、信息量模型^[5]、支持向量机模型^[6]及随机森林模型^[7]等。信息量模型因其明确的物理意义和简便的操作流程,被广泛应用于地质灾害易发性评价研究。陈立华等^[8]基于GIS与信息量模型对北流市的滑坡易发性进行了评价,得出了研究区的滑坡易发性分区图。田春阳等^[9]应用信息量模型对西丰县的地质灾害易发性进行了评价,结果与实际情况较为一致。已有研究表明,组合方法通常能显著提高评价精度。孟晓捷等^[10]结合层次分析法和加权信息量模型,在ArcGIS平台上对滑坡易发性进行了评价,结果显示该组合方法具有较高的精度,优于单一方法的评价效果。杨锐等^[11]采用加权信息量模型,对榆社县地质灾害的易发性进行了评价,证明了加权信息量模型的预测效果较好。随着机器学习技术的发展,随机森林等机器学习模型因具有强大的数据处理能力和较高的准确度,被广泛应用于滑坡易发性评价^[12-13]。CHEN等^[14]在对中国龙海地区的滑坡易发性评估中,比较了最佳优先决策树、随机森林与朴素贝叶斯树等模型,发现随机森林模型表现最优。RAI等^[15]在滑坡易发性评价研究中,对7种机器学习方法进行了比较,包括提升回归树、Fisher判别分析及广义线性模型等,结果表明随机森林模型优于其他方法。CHOWDHURY等^[16]基于GIS,对逻辑回归、随机森林与决策回归树模型进行了对比分析,结果表明随机森林模型对滑坡易发性评价的准确度优于其他模型。

单一评价方法在处理复杂数据时存在精度低和适用性差的问题。组合方法虽然能提高精度,但计算复杂度较高。而随机森林模型具有强大的数据处理能力和较高的准确度,在多个研究中展现出良好的性能。基于此,本文选取邢台市西部山区的217处滑坡灾害隐患点作为研究样本,将信息量模型,分别耦合层次分析法、熵权法、组合赋权法、随机森林模型,对该区域的滑坡地质灾害易发性进行评价,对比分析4个模型的评价结果,探索适合该研究区的滑坡易发性评价模型,旨在提高滑坡易发性评价的准确性和可靠性。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

邢台市地处河北省中南部,太行山脉南段东麓,华北平原中部。邢台市地势高差较大,整体地势西高东低,西部为太行山区,占全市面积的14.21%。研究区位于邢台市西部山区,包含信都区、临城县、内丘县和沙河市,总面积为4 370 km²。研究区内溪河众多,河道蜿蜒,河流主要为大沙

河,源于信都区、内丘县、沙河市的西郊山区,河道多为上宽下窄,源短流急,汛期易暴发洪水,为地质灾害的发生提供了条件。

研究区地处暖温带亚湿润季风气候区,四季分明,冬寒夏热,年内温差大,年平均气温在12℃~14℃,极端最高气温可达41℃,最低气温可达-20℃。西部山区年平均降水量为684.8 mm。年降水特征如下:一是年际变化大,最大年降水量为1 269.0 mm(1963年),最小年降水量为274.7 mm(1972年),相差994.3 mm。二是年内分配不均,春季干旱少雨,多年平均降水量为62.2 mm,占年降水量的11.12%;夏季为盛雨期,多年平均降水量为467.6 mm,占年降水量的68.00%。

根据河北省地质环境监测院的调查结果,研究区内共有217处滑坡地质灾害隐患点。灾害聚集处的人类活动主要为居民在修建住宅时的开挖坡脚行为。削坡造成了陡坎临空面的加剧,场地整平进一步增大了松散堆积体的范围以及新陡坎的形成,一定程度上破坏了原坡体的稳定性。

1.2 数据来源

本次研究使用的数据主要包括数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据、坡度、坡向、曲率、土地利用类型、地层岩性、断层距离、水系距离、道路距离、归一化植被指数(normalized vegetation index, NDVI)、地震烈度、降雨量和滑坡灾害点数据。其中,DEM数据来自地理空间数据云(gscloud.cn),研究区坡度、坡向、曲率均由DEM数据在ArcGIS10.8中生成。土地利用类型在中国科学院资源环境科学与数据中心(resdc.cn)下载获得。在国家地质资料数据中心(ngac.org.cn)下载1:250万的地质图,提取地层岩性和断层。行政区划图、水系及道路由全国地理信息资源目录服务系统(webmap.cn)下载获取。归一化植被指数通过下载Landsat8卫星图影像,再由ENVI软件进行预处理并进行NDVI计算得到。地震烈度由中国地震烈度区划图提取获得。降雨量数据从国家气象信息中心-中国气象数据网(cma.cn)下载获取。滑坡灾害点数据由河北省地质环境监测院提供。

2 评价单元与评价指标

2.1 评价单元划分

评价单元划分是影响评价精度及结果可靠度的关键因素^[17]。本文采用栅格单元对研究区进行滑坡易发性评价,结合研究区范围、已发生滑坡灾害的规模,选取30 m×30 m栅格单元作为评价单元,将研究区划分为4 856 207个栅格单元。

2.2 评价指标选取与分级

根据研究区的基本灾害孕育条件,包括基本地形条件、工程地质条件和水文地质条件,以及其他外部诱发因素,包括降雨、地震和人类工程活动等,同时考虑评价指标数据的可获取性,选取高程、坡度、坡向、曲率、水系距离、断层距离、地层岩性、归一化植被指数、降雨量、地震烈度、道路距离、土地利用类型,共12个评价指标构建研究区滑坡灾害易发性评价指标体系。利用ArcGIS平台,采用自然断点法对评价指标进行分级处理,见图1,分级情况如下。

(1) 高程。通过ArcGIS软件从DEM数据获得研究区内高程,高程范围为 $-7\sim 1\,786\text{ m}$ 。将高程分为以下5个级别: $-7\sim <200\text{ m}$ 、 $200\sim <420\text{ m}$ 、 $420\sim <670\text{ m}$ 、 $670\sim <960\text{ m}$ 和 $960\sim <1\,786\text{ m}$,见图1(a)。

(2) 坡度。坡度是影响滑坡发生的重要因素,坡度增大会增加滑坡风险。对研究区DEM数据做坡度计算,将坡度分为以下5个级别: $0^\circ\sim <5^\circ$ 、 $5^\circ\sim <12^\circ$ 、 $12^\circ\sim <20^\circ$ 、 $20^\circ\sim <30^\circ$ 和 $30^\circ\sim <72^\circ$,见图1(b)。

(3) 坡向。坡向对于降水、土壤侵蚀和植被生长等都有影响,进而影响滑坡的发生。对研究区DEM数据做坡向计算,将坡向分为9个级别:平面、北、东北、东、东南、南、西南、西、西北,见图1(c)。

(4) 曲率。曲率是地形曲线在某一点的弯曲程度,分为凸曲率和凹曲率,在凸起的部分,由于地势较高,受到风化和侵蚀的影响较小,较为稳定。而在凹陷的部分,容易积聚水分,增加土壤湿度,进而影响土壤的稳定性,增加滑坡的风险。根据研究区DEM数据计算曲率,将曲率分为5个级别: $-21.89\sim <-1.00$ 、 $-1.00\sim <-0.30$ 、 $-0.30\sim <0.30$ 、 $0.30\sim <1.00$ 和 $1.00\sim <20.78$,见图1(d)。

(5) 水系距离。水流侵蚀是滑坡灾害的重要诱发条件,主要体现在对沿岸边坡坡体稳定性的影响。通过ArcGIS软件中的多环缓冲区工具,构建研究区水系图层的多环缓冲区,分别以距水系 $0\sim <100\text{ m}$ 、 $100\sim <200\text{ m}$ 、 $200\sim <300\text{ m}$ 、 $300\sim <500\text{ m}$ 和 $\geq 500\text{ m}$ 建立缓冲区,见图1(e)。

(6) 断层距离。断层对滑坡的影响主要表现在地壳变形、次生断裂和节理裂隙的形成,以及对地下水位的影响。这些因素易导致土壤失稳,增加滑坡的风险。与水系距离划分同理,分别以距断层 $0\sim <200\text{ m}$ 、 $200\sim <500\text{ m}$ 、 $500\sim <1\,000\text{ m}$ 、 $1\,000\sim <1\,500\text{ m}$ 和 $\geq 1\,500\text{ m}$ 建立缓冲区,见图1(f)。

(7) 地层岩性。通过研究区1:250万的地质图提取地层岩性,将研究区地层岩性划分为第四系全新统Qh、寒武系中统 ϵ_2 、中太古代Ar₂、下元古界Pt₁、滹沱系中统Ht、太行山区长城系下统Ch、第四系上更新统Qp、古近系始新统-渐新统E_{2,3}、上石炭统一二叠系C₂-P、白垩系下统K₁、侏罗纪J以及中、上奥陶统O_{2,3},共12类,见图1(g)。

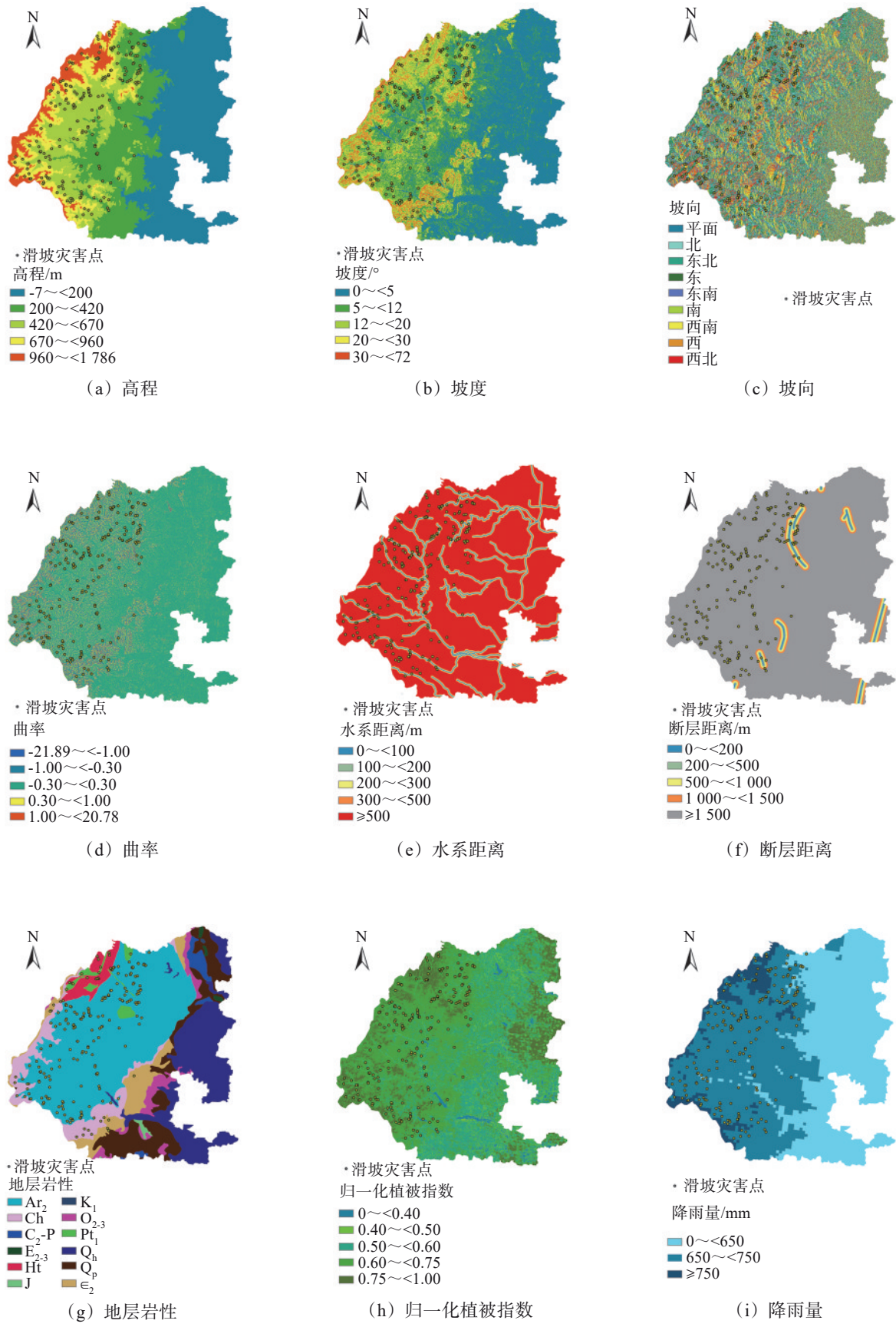
(8) 归一化植被指数。归一化植被指数对滑坡的影响主要体现在植被覆盖稳定性、水分调节作用以及根系强化效应。较大的植被指数通常意味着植被更健康,有助于增加坡面稳定性,调节土壤水分,减少滑坡的风险。通过下载Landsat8卫星图影像,由ENVI软件进行预处理并进行归一化植被指数计算。将NDVI分为5个级别: $0\sim <0.40$ 、 $0.40\sim <0.50$ 、 $0.50\sim <0.60$ 、 $0.60\sim <0.75$ 和 $0.75\sim <1.00$,见图1(h)。

(9) 降雨量。基于研究区2020年平均降雨量数据,将降雨量划分为3个级别: $0\sim <650\text{ mm}$ 、 $650\sim <750\text{ mm}$ 和 $\geq 750\text{ mm}$,见图1(i)。

(10) 地震烈度。地震的强烈作用能够引发斜坡土石内部结构的破坏和变化,导致原有结构面裂开和松弛。根据研究区地震烈度区划图可知,研究区地震烈度为6度和7度,见图1(j)。

(11) 道路距离。该指标体现了人类活动对滑坡的影响,山区道路建设过程中,由于边坡开挖、地基扰动及排水系统改变,靠近道路的区域滑坡易发性显著提高,尤其是陡坡地段更容易出现人为诱发的滑坡。远离道路的区域,由于受工程活动干扰较少,滑坡风险较低。利用ArcGIS软件中的多环缓冲区工具对研究区道路网线图层建立多环缓冲区,分别以距道路 $0\sim <50\text{ m}$ 、 $50\sim <100\text{ m}$ 、 $100\sim <150\text{ m}$ 、 $150\sim <200\text{ m}$ 和 $\geq 200\text{ m}$ 建立缓冲区,见图1(k)。

(12) 土地利用类型。该指标通过影响植被覆盖率、土壤稳定性和人类活动强度,对滑坡易发性具有重要作用。耕地和裸地因植被稀少和地表扰动较大,滑坡风险较高;林地和草地由于植被固土作用较强,有助于降低滑坡发生概率;建设用地因地基扰动和排水改变,可能引发局部滑坡风险。根据研究区土地利用现状遥感监测数据,将研究区分为耕地、林地、草地、水域、居民用地和未利用土地,见图1(l)。



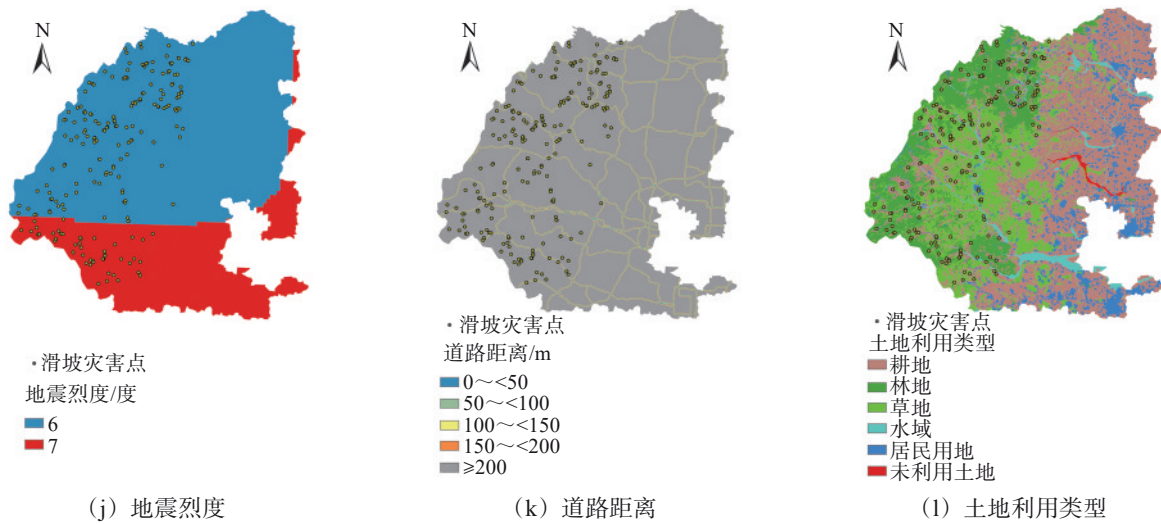


图1 评价指标分级图层

Fig.1 evaluation factor grading layer

3 滑坡地质灾害易发性评价

3.1 评价指标的权重计算

(1) 层次分析法计算主权重

层次分析法(AHP)是一种结合定性与定量分析的多维度决策方法。构建层次结构模型,并计算各层次的权重^[18]。依据滑坡灾害的发育成因,将12个评价指标分为地形地貌、地质条件、诱发条件和其他条件4类,建立滑坡易发性评价指标体系,见表1。

表1 滑坡易发性评价指标体系

Tab.1 landslide susceptibility evaluation index system

目标层	准则层	指标层
滑坡易发性评价	地形地貌	高程
		曲率
		坡度
		坡向
	地质条件	地层岩性
		水系距离
		断层距离
	诱发条件	地震烈度
		降雨量
		道路距离
	其他条件	归一化植被指数
		土地利用类型

结合河北省1:5万地质灾害勘查报告,并邀请专家对评价指标按照两两相对重要性进行打分,判断矩阵标度见表2。若指标 x_k 与指标 x_l 的重要性之比为 a_{kl} ,那么指标 x_l 与指标 x_k 重要性之比为 $1/a_{kl}$ 。

表2 判断矩阵标度

Tab.2 scale of judgment matrix

标度	含义
1	2个指标相比,具有相同重要性
3	2个指标相比,前者比后者略微重要
5	2个指标相比,前者比后者明显重要
7	2个指标相比,前者比后者强烈重要
2,4,6	两相邻标度的中间值

滑坡易发性判断矩阵为

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1/4 & 3 \\ 1 & 4 & 1 & 4 \\ 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1 \end{pmatrix},$$

地形地貌判断矩阵为

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/4 & 2 \\ 5 & 1 & 2 & 5 \\ 4 & 1/2 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/5 & 1/4 & 1 \end{pmatrix},$$

地质条件判断矩阵为

$$A_3 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{pmatrix},$$

诱发条件判断矩阵为

$$A_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/3 \\ 4 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix},$$

其他条件判断矩阵为

$$A_5 = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 \\ 5 & 1 \end{pmatrix}。$$

通过计算各个判断矩阵的最大特征值、一致性指标(CI)和一致性比例(CR),对判断矩阵进

行一致性检验,一致性比例^[18]为

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} = \frac{\lambda_{\max} - e}{(e-1)R_1}, \quad (1)$$

式中: R_1 为平均随机一致性指标(RI); C_1 为一致性指标(CI); $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征值; e 为判断矩阵的阶数。

判断矩阵一致性检验结果见表3。由表3可知,判断矩阵的一致性比例均小于0.1,通过一致性检验,表明评价指标体系权重分配合理。

表3 判断矩阵一致性检验结果

Tab.3 consistency test results of judgment matrix

判断矩阵	$\lambda_{\max}$	C_1	R_1	C_R
滑坡易发性	4.15	0.05	0.89	0.06
地形地貌	4.09	0.03	0.89	0.03
地质条件	3.07	0.04	0.52	0.08
诱发条件	3.07	0.04	0.52	0.08
其他条件	2.00	0	0	0

(2) 熵权法计算客观权重

熵权法是一种客观赋权方法^[19],其计算步骤如下。对每个指标的数据进行标准化处理,标准化后的数据为

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_i)}{\max(y_i) - \min(y_i)}, \quad (2)$$

式中: y_{ij} 是第*i*个指标第*j*个样本的数据; $\min(y_i)$ 和 $\max(y_i)$ 分别为第*i*个指标的最小值和最大值。

各指标的熵值为

$$E_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (3)$$

式中: m 为样本数; $p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij}$,表示第*i*个指标第*j*个样本的标准化值占该指标标准化值之和的比例。

每个指标的权重为

$$\omega_{2i} = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n (1 - E_i)}, \quad (4)$$

式中: E_i 为第*i*个指标的熵值; n 为指标的总数。

(3) 组合赋权法计算综合权重

为增强权重的可靠性和合理性,避免主观和客观方法的固有缺陷,进行主客观结合的组合赋权^[20]。采用线性加权法计算综合权重为

$$\omega_i = \alpha \omega_{1i} + \beta \omega_{2i}, \quad (5)$$

式中: α 为主观加权系数; ω_{1i} 为层次分析法计算的主观权重; β 为客观加权系数。

采用距离函数法计算加权系数^[21]为

$$\begin{cases} d(\omega_{1i}, \omega_{2i}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\omega_{1i} - \omega_{2i}) \\ d(\omega_{1i}, \omega_{2i}) = (\alpha - \beta)^2 \\ \alpha + \beta = 1 (\alpha > 0, \beta > 0) \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)进行求解,得到 $\alpha=0.595$, $\beta=0.405$ 。

3.2 信息量耦合随机森林模型

随机森林(RF)通过创建多个决策树,对每棵树使用随机选择的数据子集和特征,通过投票或平均的方式来决定最终的输出^[22-24]。随机森林的核心步骤主要包括决策树构建、自助聚合(bootstrap aggregating)、训练过程、投票或平均机制以及特征重要性评估。对于给定的输入向量 x ,随机森林模型的预测输出为

$$f(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B f_b(x), \quad (7)$$

式中: B 为树的数量; $f_b(x)$ 为第*b*棵树的预测函数,对于分类任务, $f_b(x)$ 是类标签的投票;对于回归任务, $f_b(x)$ 是数值预测的平均值。

使用信息量模型计算评价指标的信息量值,对研究区滑坡进行易发性分区,在滑坡易发性评价结果的低易发区和非易发区选取与滑坡灾害点相同数量的非滑坡样本数据。在Python软件中构建随机森林模型,以7:3的比例将数据集划分为训练集和测试集,使用训练集数据对模型进行训练,得到各评价指标的权重。

3.3 评价指标的加权信息量值计算

利用ArcGIS软件的分区统计功能,统计各评价指标不同级别下的栅格个数和滑坡灾害点个数,采用信息量模型和加权信息量模型,计算不同分级区间各评价指标的信息量值和加权信息量值。采用信息量模型分别结合层次分析法、熵权法、组合赋权法和随机森林模型,得到4个耦合模型。

信息量(information value, IV)模型^[25]可以简明表达最易致灾因素的综合区间。评价单元的总信息量为

$$I = \sum_{i=1}^n I(x_i, Z) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}, \quad (8)$$

式中: $I(x_i, Z)$ 为第*i*个指标 x_i 对地质灾害 Z 的信息量; N_i 为第*i*个指标内发生地质灾害的数量; N 为

研究区内地质灾害的总数量; S_i 为包含第 i 个指标
栅格数; S 为研究区内总栅格数。

$$I_i = \sum_{i=1}^n \omega'_i \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}, \quad (9)$$

加权信息量模型是基于信息量模型基本原理,
并结合各评价指标对地质灾害易发性影响程度的
综合评价方法。第 i 个指标的加权信息量为

式中: ω'_i 为层次分析法、熵权法、组合赋权法计
算出的第 i 个指标的权重。

评价指标权重及加权信息量计算结果见表 4。

表 4 评价指标权重及加权信息量计算结果

Tab.4 evaluation indicator weight and calculation results of weighted information

评价 指标	评价指标 分级	滑坡灾害 点数量	栅格 数量	信息 量值	主观 权重	主观 信息量	客观 权重	客观 信息量	综合 权重	综合权重信 息量	随机森 林权重	随机森林 信息量
高程/m	-7~<200	2	1 975 580	-3.787		-0.133		-0.508		-0.285		-0.186
	200~<420	57	1 161 864	0.093		0.003		0.013		0.007		0.005
	420~<670	111	911 281	1.003	0.035	0.035	0.134	0.135	0.075	0.075	0.049	0.049
	670~<960	41	509 662	0.588		0.021		0.079		0.044		0.029
	960~<1 786	6	297 820	-0.797		-0.028		-0.107		-0.060		-0.039
坡度/(°)	0~<5	26	2 299 022	-1.374		-0.218		-0.092		-0.167		-0.170
	5~<12	111	1 285 680	0.659		0.105		0.044		0.080		0.082
	12~<20	59	702 956	0.630	0.159	0.100	0.067	0.042	0.122	0.077	0.124	0.078
	20~<30	15	394 358	-0.161		-0.026		-0.011		-0.020		-0.020
	30~<72	6	174 191	-0.260		-0.041		-0.017		-0.032		-0.032
坡向	平面	16	543 640	-0.418		-0.045		-0.003		-0.028		-0.019
	北	26	624 738	-0.071		-0.008		-0.001		-0.005		-0.003
	东北	24	627 926	-0.156		-0.017		-0.001		-0.010		-0.007
	东	40	647 374	0.324		0.035		0.002		0.022		0.015
	东南	36	586 896	0.317	0.107	0.034	0.007	0.002	0.067	0.021	0.045	0.014
	南	20	543 717	-0.195		-0.021		-0.001		-0.013		-0.009
	西南	23	458 030	0.117		0.013		0.001		0.008		0.005
	西	16	413 373	-0.144		-0.015		-0.001		-0.010		-0.006
	西北	16	410 513	-0.137		-0.015		-0.001		-0.009		-0.006
曲率	-21.89~<-1.00	4	113 099	-0.234		-0.006		-0.012		-0.008		-0.004
	-1.00~<-0.30	55	749 314	0.496		0.012		0.025		0.017		0.008
	-0.30~<0.30	123	3 159 279	-0.138	0.024	-0.003	0.051	-0.007	0.035	-0.005	0.016	-0.002
	0.30~<1.00	34	731 604	0.039		0.001		0.002		0.001		0.001
	1.00~<20.78	1	102 911	-1.526		-0.036		-0.078		-0.053		-0.024
水系 距离/m	0~<100	151	4 000 305	-0.169		-0.008		-0.005		-0.007		-0.004
	100~<200	9	177 893	0.124		0.006		0.004		0.005		0.003
	200~<300	10	175 196	0.245	0.047	0.011	0.031	0.008	0.041	0.010	0.024	0.006
	300~<500	21	171 708	1.007		0.047		0.031		0.041		0.024
	≥500	26	331 105	0.564		0.026		0.018		0.023		0.014
断层 距离/m	0~<200	199	4 574 905	-0.027		-0.001		-0.003		-0.001		-0.001
	200~<500	4	33 790	0.974		0.020		0.099		0.052		0.031
	500~<1 000	5	53 578	0.736	0.021	0.015	0.101	0.075	0.053	0.039	0.032	0.024
	1 000~<1 500	9	94 001	0.762		0.016		0.077		0.041		0.024
	≥1 500	0	99 933	0		0		0		0		0

续表 4

评价 指标	评价指标 分级	滑坡灾害 点数量	栅格 数量	信息 量值	主观 权重	主观 信息量	客观 权重	客观 信息量	综合 权重	综合权重信 息量	随机森 林权重	随机森林 信息量
地层岩性	Qh	0	894 426	0		0		0		0		0
	ε ₂	7	326 229	-0.734		-0.076		-0.171		-0.115		-0.095
	Ar ₂	175	2 212 354	0.571		0.060		0.133		0.089		0.074
	Pt ₁	8	81 796	0.783		0.082		0.182		0.122		0.101
	Ht	14	152 915	0.717		0.075		0.167		0.112		0.093
	Ch	12	377 742	-0.341	0.104	-0.036	0.233	-0.079	0.156	-0.053	0.129	-0.044
	O ₂₋₃	0	164 060	0		0		0		0		0
	Qp	1	533 373	-3.171		-0.330		-0.739		-0.496		-0.409
	E ₂₋₃	0	16 306	0		0		0		0		0
	C ₂ -P	0	79 838	0		0		0		0		0
	K ₁	0	2 306	0		0		0		0		0
归一化植 被指数	J	0	14 862	0		0		0		0		0
	0~<0.40	1	216 969	-2.272		-0.034		-0.172		-0.090		-0.129
	0.40~<0.50	14	469 240	-0.404		-0.006		-0.031		-0.016		-0.023
	0.50~<0.60	60	1 406 144	-0.046	0.015	-0.001	0.076	-0.004	0.040	-0.002	0.057	-0.003
	0.60~<0.75	129	2 122 087	0.308		0.005		0.023		0.012		0.018
降雨量/ mm	0.75~<1.00	13	641 767	-0.791		-0.012		-0.060		-0.031		-0.045
	0~<650	14	2 186 730	-1.943		-0.491		-0.321		-0.422		-0.396
	650~<750	191	2 341 776	0.602	0.253	0.152	0.165	0.100	0.217	0.131	0.204	0.123
地震 烈度/度	≥750	12	327 701	-0.199		-0.050		-0.033		-0.043		-0.041
	6	169	3 392 703	0.109	0.050	0.005	0.018	0.002	0.037	0.004	0.107	0.012
道路距 离/m	7	48	1 463 504	-0.309		-0.015		-0.006		-0.011		-0.033
	0~<50	176	4 386 348	-0.108		-0.012		-0.003		-0.008		-0.011
	50~<100	14	120 887	0.952		0.108		0.023		0.073		0.098
	100~<150	11	118 595	0.730	0.113	0.083	0.024	0.018	0.077	0.056	0.103	0.075
	150~<200	10	116 381	0.654		0.074		0.016		0.050		0.067
	≥200	6	113 996	0.164		0.019		0.004		0.013		0.017
土地利用 类型	耕地	60	1 977 079	-0.387		-0.029		-0.035		-0.031		-0.043
	林地	63	901 653	0.447		0.033		0.041		0.036		0.049
	草地	75	1 223 235	0.316	0.074	0.023	0.091	0.029	0.081	0.026	0.110	0.035
	水域	4	154 308	-0.545		-0.040		-0.050		-0.044		-0.060
	居民用地	15	574 358	-0.537		-0.040		-0.049		-0.043		-0.059
	未利用土地	0	25 574	0		0		0		0		0

主观权重计算结果表明,降雨量、坡度、道路距离、坡向和地层岩性对滑坡影响较大。客观权重计算结果表明,地层岩性、降雨量、高程、断层距离和坡度对滑坡影响较大。综合权重计算结果表明,降雨量、地层岩性、坡度、土地利用类型和道路距离对滑坡影响较大。随机森林权重计算结果表明,降雨量、地层岩性、坡度、土地利用类型和地震烈度对滑坡影响较大。综合4个方法的计算结果,降雨量、地层岩性和坡度是对滑坡灾害影响最显著的因素。

3.4 滑坡易发性评价结果

运用ArcGIS软件,建立12个易发性评价指标加权信息量值栅格图层,并通过地图代数中的栅格计算器工具对其进行叠加分析,得到主观赋权信息量模型、客观赋权信息量模型、组合赋权信息量模型、信息量耦合随机森林模型(IV-RF模型)4个评价模型,利用自然间断法进行易发性分级,分为非易发区、低易发区、中易发区、高易发区,得到滑坡易发性评价分区见图2。

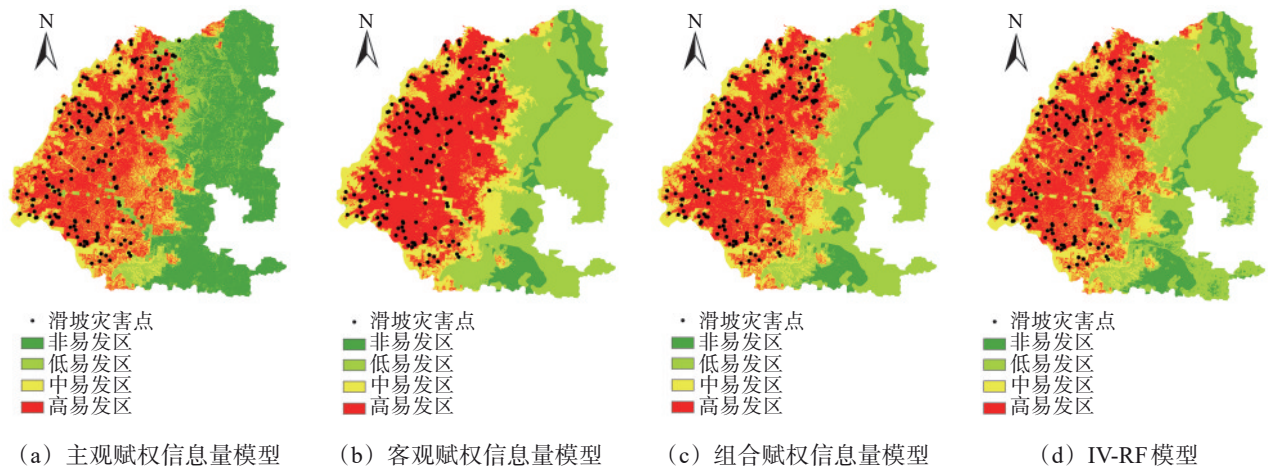


图2 滑坡易发性评价分区

Fig.2 zone of landslide susceptibility assessment

3.5 评价结果可靠性分析

采用ROC曲线(受试者工作特征曲线)对模型评价精度进行检验,以ROC曲线下方面积(AUC)来判断模型评价结果的精度。AUC取值范围为0.5~1,AUC越接近1,表明模型评价结果的精度越高^[26-27]。对4个模型的评价结果进行对比,探究最适合研究区的滑坡易发性评价模型。研究区滑坡易发性评价结果的ROC曲线见图3。由图3得到主观赋权信息量模型、客观赋权信息量模型、组合赋权信息量模型、IV-RF模型的AUC分别为0.731、0.734、0.792、0.847。IV-RF模型的AUC最大,表明IV-RF模型精度最高。

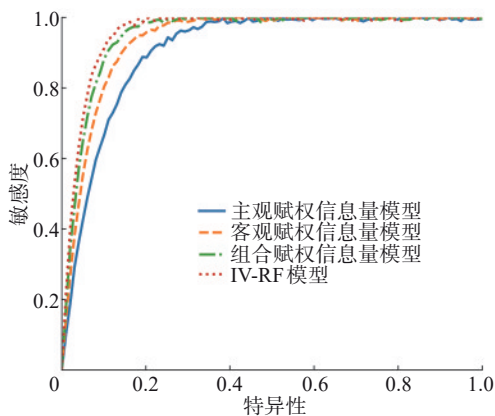


图3 4个模型ROC曲线

Fig.3 ROC plots for the four models

对研究区进行灾害点密度分析,计算单位面积内灾害点数量,用以评估灾害发生频率和风险程度,结果见表5。由表5可知,IV-RF模型在高易发区和中易发区域的灾害点密度最大,表明IV-RF

模型对于研究区域具有较好的适用性。

表5 滑坡灾害点密度分析结果

Tab.5 landslide disaster point density analysis results

模型	易发区	栅格数	面积/km ²	灾害点数	灾害点密度/km ⁻²
主观赋权信息量模型	非	1 751 202	1 576.08	2	0.001 3
	低	519 175	467.26	14	0.030 0
	中	934 336	840.90	31	0.036 9
	高	1 651 494	1 486.34	170	0.114 4
客观赋权信息量模型	非	390 329	351.30	0	0
	低	1 721 130	1 549.02	3	0.001 9
	中	905 505	814.95	27	0.033 1
	高	1 839 243	1 655.32	187	0.113 0
组合赋权信息量模型	非	389 952	350.96	0	0
	低	1 758 269	1 582.44	5	0.003 2
	中	953 916	912.52	31	0.034 0
	高	1 754 070	1 524.66	181	0.118 7
IV-RF模型	非	438 043	394.24	0	0
	低	1 699 824	1 529.84	6	0.003 9
	中	1 019 937	917.94	35	0.038 1
	高	1 698 403	1 528.56	176	0.115 1

4 结论

以邢台市西部山区滑坡灾害隐患点为样本,选取高程、坡度、坡向等12个因素作为评价指标,建立了邢台市西部山区滑坡易发性评价指标体系,基于主观赋权信息量模型、客观赋权信息量模型、组合赋权信息量模型和IV-RF模型,分别对邢台市西部山区进行滑坡地质灾害易发性评价,得出如下结论。

(1) 降雨量、地层岩性和坡度是研究区域最

主要的滑坡影响因素。这些因素在研究区内相互作用,共同决定了滑坡灾害的发生。针对该区域的滑坡防治工作,应优先考虑这些因素,并进行相应的风险评估和防治措施。

(2) 根据4个模型的ROC曲线和灾害点密度分析结果,IV-RF模型精度最高,且适用性较好。按IV-RF模型将研究区划分为高易发区、中易发区、低易发区和非易发区,其中,高、中、低易发区和非易发区面积分别为1 528.56 km²、917.94 km²、1 529.84 km²、394.24 km²,分别发育176、35、6、0个灾害隐患点,高、中易发区主要集中在研究区的西郊山区,与研究区实际情况较为一致。

参考文献(References):

- [1] 周超.集成时间序列InSAR技术的滑坡早期识别与预测研究[D].武汉:中国地质大学,2018:1-7.
- [2] 王涛,刘甲美.全国地震滑坡危险性评价研究[J].地质力学学报,2019,25(3):453.
- WANG Tao, LIU Jiamei. Study on risk assessment of earthquake landslide in China[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(3): 453.
- [3] 吴少元.基于信息量模型的厦门市崩塌和滑坡地质灾害易发性评价[J].安全与环境工程,2019,26(3):22-27.
- WU Shaoyuan. Susceptibility evaluation of geological hazards of collapse and landslides in Xiamen City based on information model [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(3): 22-27.
- [4] 王志旺,廖勇龙,李端有.基于逻辑回归法的滑坡危险度区划研究[J].地下空间与工程学报,2006,2(增刊2):1451-1454.
- WANG Zhiwang, LIAO Yonglong, LI Duanyou. Zonation of landslide hazards based on logistic regression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(Suppl. 2): 1451-1454.
- [5] 吴常润,赵冬梅,刘澄静,等.基于GIS的华宁县滑坡灾害影响因子分析及易发性评价[J].水土保持研究,2019,26(6):212-218, 225.
- WU Changrun, ZHAO Dongmei, LIU Chengjing, et al. GIS-based analysis on impact factors and susceptibility evaluation of landslide hazard in Huaning County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 212-218, 225.
- [6] 黄发明,殷坤龙,蒋水华,等.基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):156-167.
- HUANG Faming, YIN Kunlong, JIANG Shuihua, et al. Landslide susceptibility assessment based on clustering analysis and support vector machine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 156-167.
- [7] 吴孝情,赖成光,陈晓宏,等.基于随机森林权重的滑坡危险性评价:以东江流域为例[J].自然灾害学报,2017,26(5):119-129.
- WU Xiaoping, LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, et al. A landslide hazard assessment based on random forest weight: a case study in the Dongjiang River Basin[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(5): 119-129.
- [8] 陈立华,叶江,魏传健,等.基于ArcGIS与信息量法的滑坡易发性评价[J].广西大学学报(自然科学版),2016,41(1):141-148.
- CHEN Lihua, YE Jiang, WEI Chuanjian, et al. Application of ArcGIS and information method to landslide susceptibility evaluation[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(1): 141-148.
- [9] 田春阳,张威,张戈,等.基于信息量法的西丰县地质灾害易发性评价[J].首都师范大学学报(自然科学版),2020,41(2):32-40.
- TIAN Chunyang, ZHANG Wei, ZHANG Ge, et al. Evaluation of geological disaster vulnerability in Xifeng County based on information content method[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2020, 41(2): 32-40.
- [10] 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易发性评价:以1:5万天水市麦积区为例[J].西北地质,2022,55(2):249-259.
- MENG Xiaojie, ZHANG Xinshe, ZENG Qingming, et al. The susceptibility evaluation of loess landslide based on weighted information value method: taking 1: 50 000 map of Maiji district of Tianshui City as an example[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 249-259.
- [11] 杨锐,于春勇,汪洋.基于加权信息量和GIS方法的地质灾害易发性评价:以榆社县为例[J].矿业研究与开发,2023,43(2):163-170.
- YANG Rui, YU Chunyong, WANG Yang. Susceptibility evaluation of geological disaster based on weighted information and GIS method: a case study of Yushe County[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(2): 163-170.
- [12] AGBOOLA G, BENI L H, ELBAYOUMI T, et al. Optimizing landslide susceptibility mapping using machine learning and geospatial techniques[J]. Ecological Informatics, 2024, 81: 102583.
- [13] HUANG F M, CAO Z S, GUO J F, et al. Comparisons of heuristic, general statistical and machine learning models for landslide susceptibility prediction and mapping[J]. Catena, 2020, 191: 104580.
- [14] CHEN W, ZHANG S, LI R W, et al. Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling[J]. Science of The Total Environment, 2018, 644: 1006-1018.
- [15] RAI S C, PANDEY V K, SHARMA K K, et al. Landslide susceptibility analysis in the Bhilangana Basin (India) using GIS-based machine learning methods[J]. Geosystems and Geoenvironment, 2024, 3(2): 100253.
- [16] CHOWDHURY M S, RAHMAN M N, SHEIKH M S, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in

- Chattogram District,Bangladesh[J].Heliyon,2024,10(1): e23424.
- [17] 田述军,张珊珊,唐青松,等.基于不同评价单元的滑坡易发性评价对比研究[J].自然灾害学报,2019,28(6):137-145.
- TIAN Shujun, ZHANG Shanshan, TANG Qingsong, et al. Comparative study of landslide susceptibility assessment based on different evaluation units[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28 (6):137-145.
- [18] 王哲,易发成.基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J].水文地质工程地质,2007(3):93-98.
- WANG Zhe, YI Facheng. Evaluation of geological hazard probability of occurrence based on analytical hierarchy process in Mianyang City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007 (3):93-98.
- [19] 张蕊,郭荣昌,贺攀,等.基于改进突变理论的滑坡危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(1):121-128.
- ZHANG Rui, GUO Rongchang, HE Pan, et al. Landslide hazard assessment based on improved catastrophe theory[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023,34(1):121-128.
- [20] 张晨,王清,陈剑平,等.金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J].岩土力学,2011,32(3):831-836.
- ZHANG Chen, WANG Qing, CHEN Jianping, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):831-836.
- [21] 赵晓燕,谈树成,李永平.基于斜坡单元与组合赋权法的东川区地质灾害危险性评价[J].云南大学学报(自然科学版),2021,43(2): 299-305.
- ZHAO Xiaoyan, TAN Shucheng, LI Yongping. Risk assessment of geological hazards in Dongchuan District based on the methods of slope unit and combination weighting[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2021, 43(2):299-305.
- [22] JANIZADEH S, BATENI S M, JUN C, et al. Potential impacts of future climate on the spatio-temporal variability of landslide susceptibility in Iran using machine learning algorithms and CMIP6 climate-change scenarios[J]. Gondwana Research, 2023, 124:1-17.
- [23] 张文静,刘云,周波,等.基于随机森林优化RL的电力工程造价预测[J].沈阳工业大学学报,2024,46(6):754-759.
- ZHANG Wenjing, LIU Yun, ZHOU Bo, et al. Power project cost prediction based on random forest optimization RL[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(6):754-759.
- [24] 金磊,杨晓伟,张浩,等.基于HA-RF-SHAP的露天煤矿粉尘浓度预测模型[J].西安科技大学学报,2024,44(1):74-83.
- JIN Lei, YANG Xiaowei, ZHANG Hao, et al. Prediction model for dust concentration in open-pit coal mines based on HA-RF-SHAP[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(1): 74-83.
- [25] 焦伟之,张明,谢鑫鹏,等.基于GIS与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价:以大新镇为例[J].安全与环境工程,2022,29 (4):119-128.
- JIAO Weizhi, ZHANG Ming, XIE Xinpeng, et al. Susceptibility evaluation of urban geological disaster based on GIS and weighted information value model: a case study of Daxin Town[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4):119-128.
- [26] 王家柱,高延超,铁永波,等.基于斜坡单元的山城镇滑坡灾害易发性评价:以康定为例[J].沉积与特提斯地质,2023,43(3): 640-650.
- WANG Jiazhu, GAO Yanchao, TIE Yongbo, et al. Landslide susceptibility assessment based on slope units of mountainous cities and towns: a case study of Kangding city[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(3):640-650.
- [27] 黄达,杨健康,李钊,等.开挖条件对不同基覆界面滑坡堆积体稳定性影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):47-58.
- HUANG Da, YANG Jiankang, LI Zhao, et al. Effect of excavation conditions on the stability of landslide deposits with different deposit-bedrock interfaces[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2024, 40(1):47-58.