

利用MIA-HSU方法划分斜坡单元的奉节县滑坡易发性评价

王秀英, 杨红娟, 贾一凡, 张少杰, 宋建洋, 田 华

Landslide susceptibility evaluation in Fengjie County based on slope units extracted using the MIA-HSU method

WANG Xiuying, YANG Hongjuan, JIA Yifan, ZHANG Shaojie, SONG Jianyang, and TIAN Hua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于斜坡单元与随机森林模型的元阳县崩滑地质灾害易发性评价

Evaluation of geological hazard susceptibility of collapse and landslide in Yuanyang County using slope units and random forest modeling

刘帅, 朱杰勇, 杨得虎, 马博 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 144-150

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

基于自组织特征映射网络-随机森林模型的滑坡易发性评价

Evaluation on landslide susceptibility based on self-organizing feature map network and random forest model: A case study of Dayu County of Jiangxi Province

何书, 鲜木斯艳·阿布迪克依木, 胡萌, 陈康 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 132-140

基于信息量、加权信息量与逻辑回归耦合模型的云南罗平县崩滑灾害易发性评价对比分析

Comparative analyses of susceptibility assessment for landslide disasters based on information value, weighted information value and logistic regression coupled model in Luoping County, Yunnan Province

杨得虎, 朱杰勇, 刘帅, 马博, 代旭升 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 43-53

基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

基于斜坡单元灾害强度的滑坡灾害易损性评价

Vulnerability assessment of landslide hazards based on hazard intensity at slope level: A case study in Xiangxiang County of Hunan

陈宾, 魏娜, 张联志, 李颖懿, 刘宁, 屈添强 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 137-145



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403016

王秀英, 杨红娟, 贾一凡, 等. 利用 MIA-HSU 方法划分斜坡单元的奉节县滑坡易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 152-161.

WANG Xiuying, YANG Hongjuan, JIA Yifan, et al. Landslide susceptibility evaluation in Fengjie County based on slope units extracted using the MIA-HSU method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 152-161.

利用 MIA-HSU 方法划分斜坡单元的奉节县滑坡 易发性评价

王秀英^{1,2}, 杨红娟², 贾一凡^{2,3}, 张少杰², 宋建洋⁴, 田 华⁴

(1. 成都信息工程大学软件工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与
环境研究所, 四川 成都 610213; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 栅格单元难以表征斜坡的形态与边界, 以其为制图单元的滑坡易发性评价结果无法精细化描述自然斜坡的滑坡易发程度。而形态图像分析-均匀坡度单元 (morphological image analysis-homogeneous slope unit, MIA-HSU) 方法提取的斜坡单元可以表征斜坡的形态与边界, 并能克服传统方法提取的斜坡单元存在坡度突变的缺陷。文章使用 MIA-HSU 为滑坡易发性评价提供制图单元。以重庆市奉节县为研究区, 选取高程、坡度、坡向、归一化植被指数、归一化建筑指数、起伏度、距河流距离、距道路距离、岩性、剖面曲率、土地利用、地形湿度指数、水流功率指数、泥沙输移指数、地形位置指数等 15 个指标, 采用信息量法评价奉节县的滑坡易发性程度。评价结果表明, 滑坡易发性越高的区域灾害点密度越大, 1950—2015 年参加训练的滑坡点落在极高易发区和高易发区中的比例为 94.13%, 成功率曲线法对滑坡易发性评价结果的测试精度为 0.764, 表明评价结果与实际滑坡分布情况基本吻合; 2018 年以后发生的未参与模型训练的滑坡点中超过 90% 落在高易发区和极高易发区, 说明易发性评价结果具有较高的泛化性。研究结果可为研究区滑坡隐患点识别和灾害防治提供科学参考。

关键词: 滑坡; 斜坡单元; 信息量法; 易发性评价; MIA-HSU 方法

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)02-0152-10

Landslide susceptibility evaluation in Fengjie County based on slope units extracted using the MIA-HSU method

WANG Xiuying^{1,2}, YANG Hongjuan², JIA Yifan^{2,3}, ZHANG Shaojie², SONG Jianyang⁴, TIAN Hua⁴

(1. College of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610213, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China Meteorological

Administration Public Meteorological Service Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Grid units have limitations in accurately delineating the morphology and boundaries of slopes, and when used as

收稿日期: 2024-03-12; 修订日期: 2024-06-04

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3007202); 中国气象局气象能力提升联合研究专项项目(23NLTSZ009)

第一作者: 王秀英(1999—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事滑坡识别方向的研究。E-mail: 19983475010@163.com

通讯作者: 杨红娟(1982—), 女, 河南许昌人, 博士, 副研究员, 主要从事泥石流灾害的形成机理、预测预报和动力学过程研究。

E-mail: yanghj@imde.ac.cn

mapping units in landslide susceptibility evaluation, they cannot accurately describe the landslide susceptibility of natural slopes. Investigations have shown that the morphological image analysis-homogeneous slope unit(MIA-HSU) method provides slope units that are more homogenous in slope angle and aspect, addressing the deficiencies of traditional methods. In this study, MIA-HSU was applied to provide mapping units for landslide susceptibility evaluation. Taking Fengjie County, Chongqing as the study area, 15 factors including elevation, slope angle, slope aspect, normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference built-up index(NDBI), topographic relief, distance from rivers, distance from roads, lithology, profile curvature, land use, topographic wetness index (TWI), stream power index (SPI), sediment transport index (STI), and topographic position index(TPI) were selected to evaluate landslide susceptibility using the information value method. The evaluation results indicated that areas with higher landslide susceptibility exhibited a greater density of disaster points. During the 1950 to 2015 period, 94.13% of the landslide points used for training fell within the extremely high and high susceptibility zones. The accuracy of landslide susceptibility evaluation was further verified using the success rate curve method. The accuracy of the verification set was 0.764, indicating that the evaluation results were generally consistent with the actual landslide distribution. Over 90% of the landslide points occurring after 2018 (which were not used in training) were located in the high and extremely high susceptibility zones, demonstrating the model's high generalization ability. The findings provide a scientific basis for identifying potential landslide hazards and for landslide prevention and mitigation in the study area.

Keywords: landslide; slope unit; information value method; susceptibility evaluation; MIA-HSU method

0 引言

滑坡是一种非常严重、频繁发生的自然灾害,常常严重威胁道路、建筑、农田,给人民生命财产安全造成巨大损失^[1-2]。对区域滑坡易发性进行评价,并预测一定区域内滑坡发生概率^[3],可为滑坡灾害的防灾减灾提供重要依据^[4-7]。

目前,国内外易发性评价方法主要分为定性评价与定量评价两类。定性评价方法一般基于专家经验,结合下垫面数据(如各影响因子分区图)进行判断,如层次分析法、专家打分法等,该类方法具有一定的主观性^[8]。定量评价方法主要分为基于物理过程的方法和基于统计分析的方法。基于物理过程的方法通过分析滑坡诱发条件对边坡稳定性的影响机理,使用物理模型评价滑坡发生的可能性,如无限边坡稳定性模型^[9]。该类方法精度较低,并且由于所需物理参数较多难以在大范围内推广^[10]。基于统计分析的方法是根据历史滑坡失稳影响因素的特征来分析未来发生滑坡的概率,如信息量法、证据权法、频率比法、深度神经网络法、逻辑回归法等^[11-12]。基于统计分析的方法建立在大量数据基础上,评价结果比较客观,计算精度高,是当前滑坡易发性评价采用的主要方法^[13-14]。其中信息量法可解释性强,操作简单,实用性强^[15],并且结果可靠性高,因此广泛应用于滑坡易发性评价中^[16-17]。

选择评价单元是滑坡易发性评价的基础环节^[18],评价单元需要满足内部均一性。目前区域滑坡易发性评

价的评价单元主要有五种:栅格单元、地域单元、均一条件单元、斜坡单元、地貌单元^[19],其中栅格单元与斜坡单元使用最为广泛。栅格单元形状规则,计算简单,并且能满足评价单元内部均一、评价单元之间差异最大,但是栅格单元可读性差,难以表达真实地形地貌,无法锚定自然界中的真实斜坡^[20]。斜坡单元可通过分析真实地形地貌获取^[21],能很好地反映实际地形特征,并体现区域斜坡的整体性和滑坡的实际发育状况^[22],定位灾害位置^[23],相较于栅格单元能更有效地应用于区域防灾减灾工程与风险管理实践^[24],但是传统方法提取的斜坡单元无法解决斜坡单元内部出现坡度突变的问题。因此本文选择使用形态图像分析-均匀坡度单元(morphological image analysis-homogeneous slope unit, MIA-HSU)方法提取斜坡单元,该方法提取的斜坡单元克服了传统方法提取的斜坡单元存在的坡度突变缺陷,所提取的斜坡单元具有更为均一的坡度和坡向^[25]。

本文以 MIA-HSU 方法划分的斜坡单元作为评价单元,使用信息量法,选取高程、坡度、坡向、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、归一化建筑指数(normalized difference built-up index, NDBI)、起伏度、距河流距离、距道路距离、岩性、降雨量、平面曲率、剖面曲率、土地利用、地形粗糙度指数(terrain ruggedness index, TRI)、地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)、水流功率指数(stream power index, SPI)、泥沙输移指数(sediment transport

index, STI)、地形位置指数(topographic position index, TPI)等 18 个因子作为评价因子,选取 80% 的数据进行训练,20% 数据进行验证,对重庆市奉节县进行滑坡易发性研究,并使用 2018 年以后发生的滑坡点(未参与训练)进行验证,为研究区滑坡隐患点识别与灾害防治提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

奉节县位于重庆市东北部,地处长江三峡中部,东邻巫山县,南接湖北省恩施市、建始县、利川市,西连云阳县,北接巫溪县,区境内以山地为主,最高海拔为 2 123 m(图 1)。研究区总面积 4 098 km²,属于中亚热带暖湿气候,气候温和,雨量充沛,年平均降雨量 1 148 mm,降雨多集中在 5—9 月,占全年降雨量的 70%。区内地层岩性主要为侏罗系和三叠系沉积岩,以石英砂岩、岩屑长石砂岩为主,白云岩、石灰岩次之。境内河流属长江水系,其中长江干流长 41.5 km,流域面积大于 50 km² 的河流共 17 条。研究区复杂的地形、气候、水文等因素,为区域内滑坡等地质灾害的发育提供了充分条件。故而选择奉节县为研究区,选取研究

区内 1 055 处滑坡灾害点,开展研究区内滑坡易发性研究。

1.2 研究方法

1.2.1 MIA-HSU 方法划分斜坡单元

斜坡单元的提取方法较多,本文采用王凯^[26]提出的 MIA-HSU 方法。该方法将斜坡单元定义为三维空间中一个连续、均质、闭合的小区域,小区域具有均一的坡度和坡向,使提取出的斜坡单元可以满足斜坡单元内部坡度均一性的要求。

MIA-HSU 首先将数字高程模型(digital elevation model, DEM)离散成栅格中心点集,计算每个栅格点的平均曲率,根据平均曲率的物理意义判断栅格单元的凹凸形态(栅格中心点平均曲率 ≥ 0 ,说明该栅格单元为凸形,栅格中心点平均曲率 < 0 ,说明该栅格单元为凹形)。之后使用形态影像学提取出山脊山谷形态骨架线,作为小区域的边界线,然后采用迭代搜索方式将山脊山谷形态骨架线连接成闭合网络,网络中每个小区域涵盖的实际地形具有均一的坡度和坡向,最后运用主元分析法提取闭合小区域的拟合平面,利用向量相似度理论合并法向量相似度满足设定阈值的相邻小区域以形成斜坡单元^[27]。使用 MIA-HSU 方法,输入奉节县精度为 30 m 的 DEM,设置最大面积阈值为 400 000 m²,法向量相似度为 0.1,最终将研究区划分为 15 474 个斜坡单元(图 2)。

1.2.2 信息量模型

信息量法是从信息理论中引出的一种统计预测方法,广泛应用于环境地质研究中,如滑坡、崩塌的空间预测^[28]。通过分析已发生灾害点与滑坡各影响因子之间的关系,定量计算各因子对滑坡发生的贡献度,即用信息量大小来评价地质因素及其状态与滑坡发生的关系(即危险性),信息量值越大,说明发生灾害的可能性越大^[29]。

各影响因子信息量模型计算公式为:

$$I(x_i, H) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中: $I(x_i, H)$ ——影响因子 x_i 对滑坡发生(H)所贡献的信息量值;

N_i ——分布于评价因子 i 内滑坡灾害点的单元数;

N ——研究区内含有滑坡灾害的单元总数;

S_i ——研究区内包含评价因子 i 的单元数;

S ——研究区单元总数。

使用斜坡单元内各影响因子的平均值计算信息量,会导致斜坡单元内各影响因子信息被简化,并且会忽略

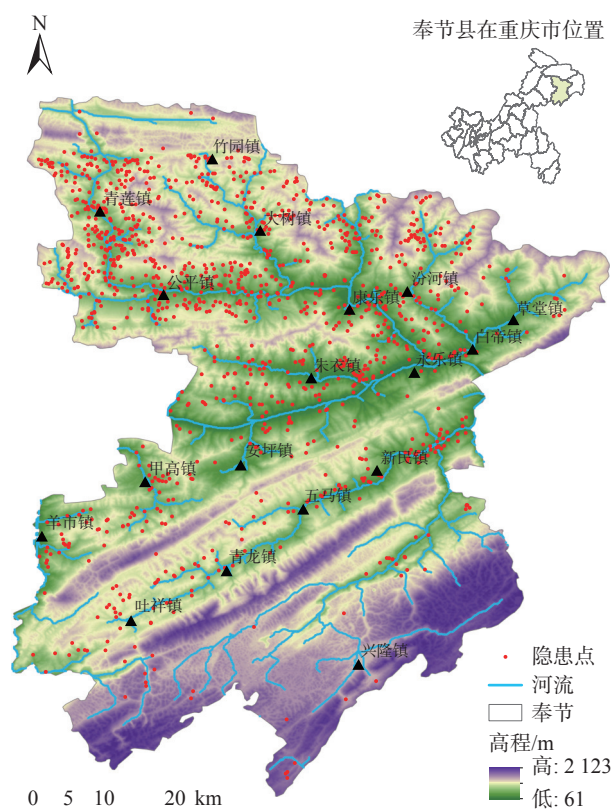


图 1 奉节县位置与地形特征

Fig. 1 Location and terrain features of Fengjie County

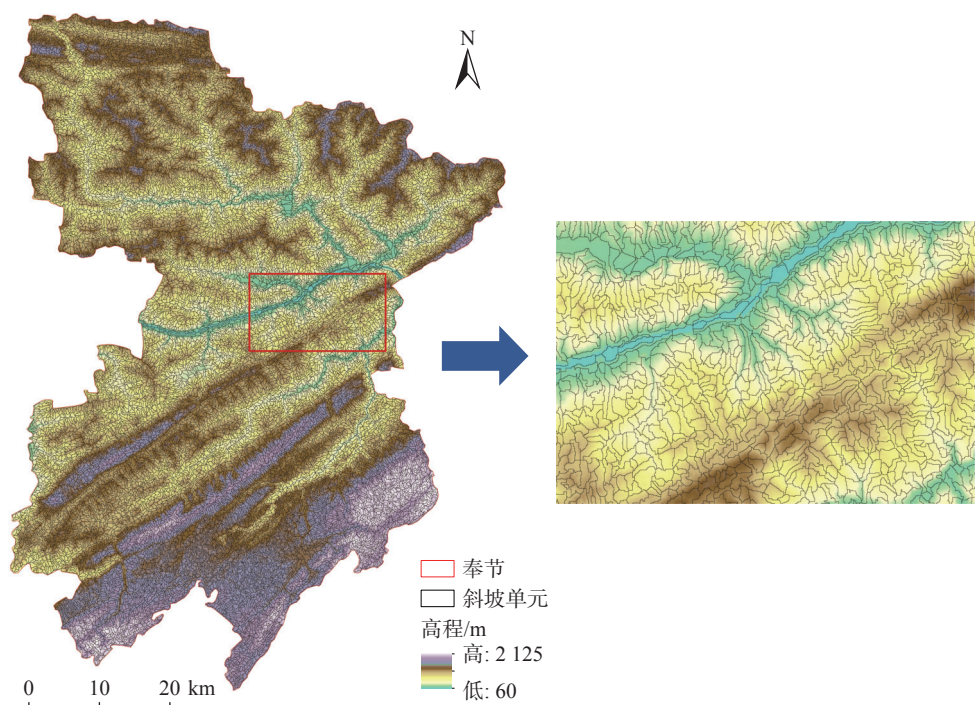


图 2 奉节县斜坡单元划分结果

Fig. 2 Division of slope units in Fengjie County

斜坡单元内部各影响因子的变化特征,直接影响滑坡易发性结果的准确性^[30]。因此,本文认为滑坡隐患点所在斜坡单元内所有栅格单元均为不稳定栅格单元,非滑坡隐患点所在的斜坡单元内所有栅格单元均为稳定栅格单元,使用栅格单元统计各影响因子的信息量。

单个评价单元内总的信息量计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^n I(x_i, H) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{2}$$

最终将单个评价单元内总信息量的平均值作为该斜坡单元的信息量,通过自然断点法进行分级,将研究区域分成若干易发性不同的区域。

1.2.3 确定评价因子权重

使用信息增益来确定各评价因子的权重,信息增益使用条件熵减去熵来衡量评价因子对于分类结果的贡献程度,其中熵表示数据的不确定性的度量,条件熵表示在给定某个特征情况下,数据的不确定性。信息增益越大,表示评价因子对分类结果的贡献越大,即评价因子的权重越大。

信息熵的计算公式为:

$$H(T) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \tag{3}$$

式中: T ——总样本数;
 p_i ——评价因子每个类别 i 出现的概率。

条件熵的计算公式为:

$$H(T | X) = \sum_{i=1}^n p_i H(T | X = x_i) \tag{4}$$

式中: $H(T | X = x_i)$ ——评价因子每个类别 i 在给定条件下 T 的条件熵。

信息增益为:

$$Gain(D, X) = H(T) - H(T | X) \tag{5}$$

1.3 数据来源

本文使用到的数据包括 DEM 数据(GDEM V3)、土地利用数据、降雨数据、NDVI、NDBI、1 : 25 万道路数据、岩性数据。选用数据详细参数见表 1,除此之外,还包括 1950—2015 年共 1 055 个滑坡灾害点与 2018—2023 年共 110 个滑坡灾害点。

表 1 数据源

Table 1 Date sources

数据名称	数据类型	数据分辨率	数据来源
GDEM V3	栅格	30 m	地理空间数据云
土地利用	栅格	30 m	全国地理信息资源目录服务系统
1960—2021年平均降雨量	栅格	1 km	资源环境科学与数据中心
1 : 25万道路图	矢量		全国地理信息资源目录服务系统
NDVI/NDBI	栅格	30 m	地理空间数据云, Landsat-8
1 : 25万岩性	矢量		地理空间数据云

2 滑坡易发性评价

研究区内使用 MIA-HSU 方法共提取出 15 474 个斜坡单元,首先使用 ArcGIS 中的分析工具将斜坡单元分为两类:一类是隐患点所在的斜坡单元,称为隐患斜坡单元,共 1 055 个;另一类为非隐患点所在的斜坡单元,称为非隐患斜坡单元,共 14 419 个。再借助 SPSS 软件中的随机取样,分别将隐患斜坡单元与非隐患斜坡单元按照 4:1 的比例随机分为两组:一组为训练样本,共 12 380 个斜坡单元,包含 3 641 801 个栅格单元,其中隐患斜坡单元 844 个,含 281 701 个栅格单元,非隐患斜坡单元 11 536 个,含 3 630 265 个栅格单元;另一组为验证样本,共 3 094 个斜坡单元,包含 913 553 个栅格单元,其中隐患斜坡单元 211 个,含 68 191 个栅格单元,非隐患斜坡单元 2 883 个,含 845 363 个栅格单元。然后选取影响研究区内滑坡发生的因子,包括高程、坡度、坡向、起伏度等 18 个因子,使用 ArcGIS 中的重分类工具,对每个影响因子采用自然断点法重分类为 8 级,获得各个影响因子图层,根据式(1)与式(5)计算各个因子各分级的信息量与信息增益,并使用 ArcGIS 中的波段级统计工具计算各影响因子之间的相关性。根据相关性与信息增益,把影响因子之间相关性较高且信息增益较低的因子删去,根据式(2)计算单个栅格单元内总的信息量,并根据 ArcGIS 中的以表格显示分区统计工具计算出每个斜坡单元内的平均信息量。最终通过自然断点法将平均信息量分为 5 级,即极低易发区、低易发区、中易发区、高易发区与极高易发区。

2.1 评价因子的选取与分析

滑坡灾害的发生受到很多因素的影响,合理选择评价因子是滑坡易发性评价的关键^[31]。根据研究区野外调查,分析滑坡形成条件与影响因素,结合前人相关研究,选取高程、坡度、坡向、NDVI、NDBI、起伏度、距河流距离、距道路距离、岩性、降雨量、平面曲率、剖面曲率、土地利用、TRI、TWI、SPI、STI、TPI 等 18 个因子作为评价因子,各评价因子使用自然断点法重分类为 8 级(表 2)。

2.2 评价因子信息量

基于 2.1 选择的各个评价因子及分区,使用式(1)计算出各评价因子信息量值(表 2)。

2.3 评价因子相关性分析

在易发性评价中,各评价因子之间可能存在相关关系,为避免评价因子间因空间相关性、共线性等导致评价结果错误,通过相关性分析检验各评价因子之间的独

立性。当 $|$ 相关系数 $|>0.5$ 时,认为相关性较大。各评价因子相关系数见图 3,由图可知,高程与年平均降雨相关系数为 0.885 5、平面曲率与剖面曲率相关系数为 -0.509 7、坡度与 TRI 之间相关系数为 0.934 2。根据式(5)计算出各评价因子信息增益(表 2),高程信息增益为 0.031 2,年平均降雨信息增益为 0.032 6,平面曲率信息增益为 0.002 1,剖面曲率信息增益为 0.002 3,坡度信息增益为 0.003 3,TRI 信息增益为 0.002 9。根据相关性较高的评价因子之间留下信息增益大的评价因子的原则,平面曲率与 TRI 去除。由于高程与年平均降雨量信息增益差距不大,年平均降雨量数据分辨率为 1 km,高程数据分辨率为 30 m,决定去除年平均降雨量。最终进行易发性评价的评价因子有高程、坡度、坡向、NDVI、NDBI、起伏度、距河流距离、距道路距离、岩性、剖面曲率、土地利用、TWI、SPI、STI、TPI 等 15 个因子。

3 评价结果与验证

3.1 评价结果

将各信息量赋值到栅格图层,使用 ArcGIS 的栅格计算器叠加所有栅格图层信息量,得到研究区内总信息量。使用 ArcGIS 的区域分析技术得到斜坡单元内信息量的平均值,作为该斜坡单元的信息量,范围为 -9.544 5 ~ 3.427 3。最后对斜坡单元的信息量图层进行重分类,采用自然断点将其分为 5 个区间(图 4),分别为极低易发区(-9.54 ~ -5.34)、低易发区(-5.34 ~ -2.63)、中易发区(-2.63 ~ -0.67)、高易发区(-0.67 ~ 0.95)、极高易发区(0.95 ~ 3.43)。

3.2 评价结果检验

根据滑坡易发性评价结果,对易发区面积、面积占比、灾害点数量、灾害点密度等进行统计(表 3)。由表 3 可知,随着易发性等级的逐步提高,分区内包含的实际滑坡点的数量逐步增加,灾害点密度也逐步增加。极高易发区灾害点密度为 0.58 处/km²,而极低易发区灾害点密度仅为 0.01 处/km²,表明利用信息量模型得出的易发性分区与实际滑坡发育分布特征吻合,评价结果合理。

将研究区滑坡地质灾害易发性评价结果使用受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线进行精度检验,用 ROC 曲线下面积(area under curve, AUC)来反映评价预测精度,AUC 值越大,说明评价效果越好。将信息量模型的训练样本集、验证样本集与全部数据集分别输入 SPSS 软件进行分析,得到信息量模型的 ROC 曲线(图 5),训练集 AUC 为 0.778,验证集

表 2 各因子图层分类情况及其对应的信息量值

Table 2 Classification and corresponding information values of each factor layer

评价因子		各因子图层各类别对应值								信息增益	
高程	分类范围	61 ~ 382	382 ~ 613	613 ~ 816	816 ~ 1 006	1 006 ~ 1 204	1 204 ~ 1 423	1 423 ~ 1 694	1 694 ~ 2 123	0.031 8	
	信息量	0.576 6	0.585 0	0.482 7	0.155 8	-0.319 8	-1.594 4	-2.264 2	-3.910 6		
坡度	分类范围	0 ~ 9	9 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 31	31 ~ 38	38 ~ 46	46 ~ 76	0.003 3	
	信息量	-0.034 4	0.219 1	0.235 2	0.077 6	-0.142 7	-0.347 3	-0.442 4	-0.603 5		
坡向	分类范围	平面	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北	0.001 4
	信息量	-0.136 0	-0.034 0	-0.027 3	-0.088 2	-0.042 9	0.184 0	0.252 7	-0.052 8	-0.233 7	
NDVI	分类范围	<-0.12	-0.12 ~ 0.12	0.12 ~ 0.26	0.26 ~ 0.37	0.37 ~ 0.47	0.47 ~ 0.55	0.55 ~ 0.63	>0.63	0.000 4	
	信息量	0.086 6	-0.489 7	-0.049 1	-0.094 3	0.018 1	0.087 0	0.036 1	-0.068 6		
NDBI	分类范围	<-0.48	-0.48 ~ -0.4	-0.4 ~ -0.32	-0.32 ~ -0.25	-0.25 ~ -0.18	-0.18 ~ -0.11	-0.11 ~ 0	>0	0.002 3	
	信息量	-0.225 4	-0.374 8	-0.198 6	-0.010 8	0.139 9	0.204 3	0.044 9	-0.593 4		
地形起伏度	分类范围	119 ~ 303	303 ~ 403	403 ~ 492	492 ~ 577	577 ~ 665	665 ~ 773	773 ~ 932	932 ~ 1 365	0.008 4	
	信息量	-1.169 4	-0.194 3	0.191 6	0.292 1	0.168 9	-0.105 7	-0.906 1	-1.570 0		
距河流距离	分类范围	0 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 900	900 ~ 1 200	1 200 ~ 1 500	>1 500			0.003 8	
	信息量	0.262 1	0.277 9	0.138 6	0.019 7	-0.092 3	-0.352 5				
距道路距离	分类范围	0 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 900	900 ~ 1 200	1 200 ~ 1 500	>1 500			0.004 1	
	信息量	0.220 6	-0.050 0	-0.198 5	-0.500 6	-0.664 7	-0.839 7				
岩性	分类范围	黏土、砂砾石 多层土体	较软弱岩组	较坚硬岩组	较软弱碳酸 盐岩组	坚硬碳酸 盐岩组				0.166 7	
	信息量	-0.850 7	0.677 9	0.535 6	-2.321 2	-0.519 8					
年平均降雨量	分类范围	1 069 ~ 1 151	1 151 ~ 1 207	1 207 ~ 1 256	1 256 ~ 1 302	1 302 ~ 1 362	1 362 ~ 1 433	1 433 ~ 1 508	1 508 ~ 1 597	0.032 61	
	信息量	0.500 1	0.622 9	0.424 3	0.027 9	-0.633 3	-2.248 0	-2.866 2	-2.684 8		
平面曲率	分类范围	-15.08 ~ -2	-2 ~ -1.01	-1.01 ~ -0.44	-0.44 ~ 0.13	0.13 ~ 0.7	0.7 ~ 1.41	1.41 ~ 3.54	3.54 ~ 21.31	0.002 1	
	信息量	-0.720 6	-0.364 6	-0.061 8	0.153 3	0.056 3	-0.279 7	-0.651 0	-1.235 7		
剖面曲率	分类范围	-19.99 ~ -3.81	-3.81 ~ -1.7	-1.7 ~ -0.79	-0.79 ~ -0.18	-0.18 ~ 0.42	0.42 ~ 1.33	1.33 ~ 3.44	3.44 ~ 18.71	0.002 3	
	信息量	-0.883 0	-0.589 4	-0.264 1	0.072 5	0.168 8	-0.084 6	-0.461 5	-0.763 6		
土地利用	分类范围	耕地	森林	草丛	水体	人造表面				0.016 6	
	信息量	0.573 4	-0.491 3	0.032 4	-0.088 8	1.540 9					
TRI	分类范围	1 ~ 1.05	1.05 ~ 1.11	1.11 ~ 1.18	1.18 ~ 1.28	1.28 ~ 1.42	1.42 ~ 1.64	1.64 ~ 2.09	2.09 ~ 4.14	0.002 9	
	信息量	0.173 1	0.107 1	-0.178 7	-0.367 0	-0.446 5	-0.540 3	-0.831 9	-0.316 2		
TWI	分类范围	1.83 ~ 4.36	4.36 ~ 5.58	5.58 ~ 6.99	6.99 ~ 8.77	8.77 ~ 11.11	11.11 ~ 13.64	13.64 ~ 17.1	17.11 ~ 25.8	0.001 2	
	信息量	-0.179 8	0.042 9	0.118 8	0.183 7	0.114 7	-0.276 4	-0.320 9	0.063 3		
SPI	分类范围	-3.84 ~ 0.39	0.39 ~ 2.16	2.16 ~ 3.31	3.31 ~ 4.54	4.54 ~ 5.96	5.96 ~ 7.81	7.81 ~ 10.73	10.73 ~ 18.76	0.000 6	
	信息量	-0.535 8	0.087 7	-0.063 0	0.004 8	0.015 5	0.098 3	0.148 7	0.285 1		
STI	分类范围	0 ~ 6	6 ~ 26	26 ~ 58	58 ~ 102	102 ~ 163	163 ~ 246	246 ~ 371	371 ~ 818	0.000 1	
	信息量	-0.014 9	0.060 2	0.170 3	0.232 0	0.320 9	0.403 0	0.602 3	0.903 1		
TPI	分类范围	-256 ~ -70	-70 ~ -44	-44 ~ -26	-26 ~ -10	-10 ~ 7	7 ~ 23	23 ~ 45	45 ~ 211	0.002 3	
	信息量	-0.493 3	-0.190 0	-0.093 2	0.043 5	0.200 9	0.039 0	-0.239 5	-0.648 5		

AUC 为 0.764, 全部数据集 *AUC* 为 0.775, 表明本文所研究方法对奉节县滑坡灾害易发性的评价结果可靠。

使用 2018—2023 年的 110 个滑坡灾害点, 再次检验奉节县滑坡易发性评价结果, 统计各易发性区的灾害点数(表 4)与比例。由表 4 可知, 随着易发性等级的逐步提高, 分区内包含的实际滑坡点的数量逐步增加, 极低易发区灾害点占比为 0, 低易发区与中易发区灾害点占比为 5.46%, 高易发区与极高易发区灾害点占比为 94.54%, 说明使用 MIA-HSU 方法提取的斜坡单元作为

滑坡易发性评价的制图单元, 采用信息量法得出的易发性评价结果具有较高的泛化性。

4 结论

(1) 本文选择重庆市奉节县为研究区, 以 MIA-HSU 方法提取的斜坡单元作为易发性评价基本单元, 最终选取高程、坡度、坡向、NDVI、NDBI、地形起伏度、距河流距离、距道路距离、岩性、剖面曲率、土地利用、TWI、SPI、STI、TPI 等 15 个评价指标, 运用信息量模

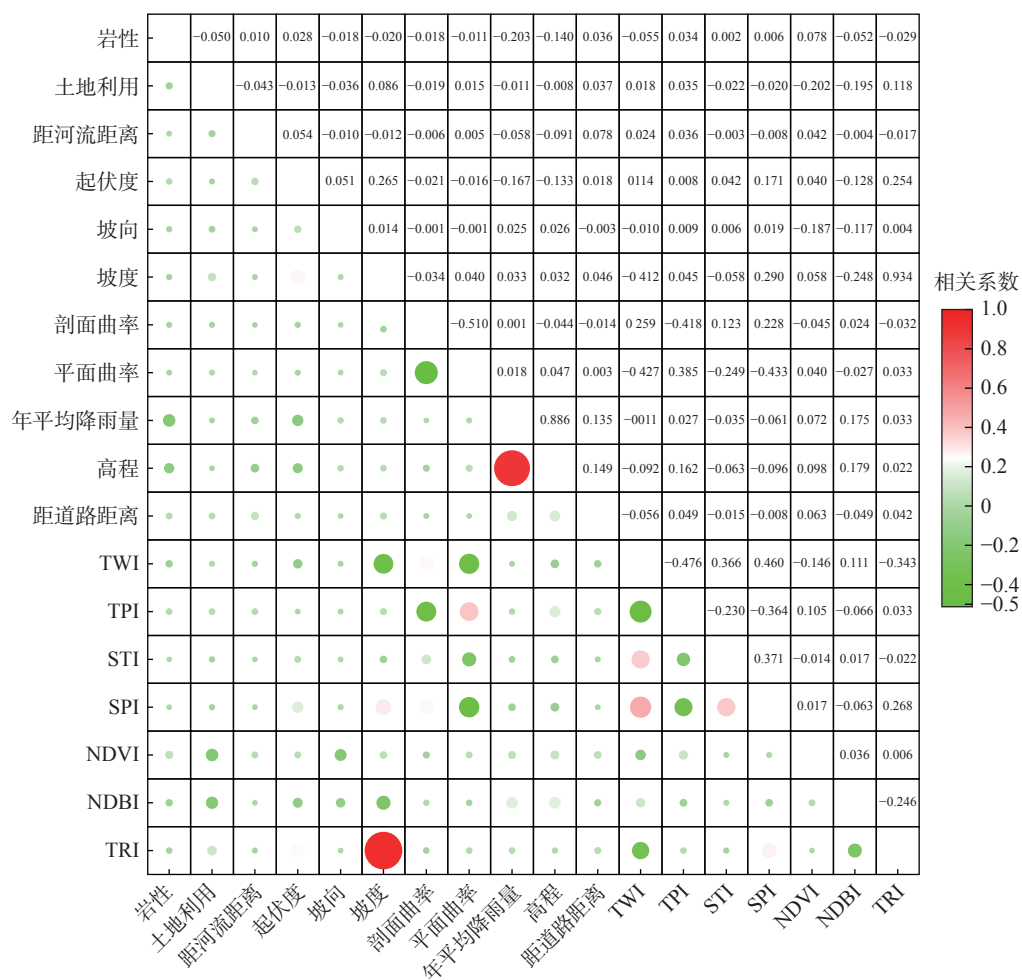


图 3 相关性热图

Fig. 3 Correlation heat map

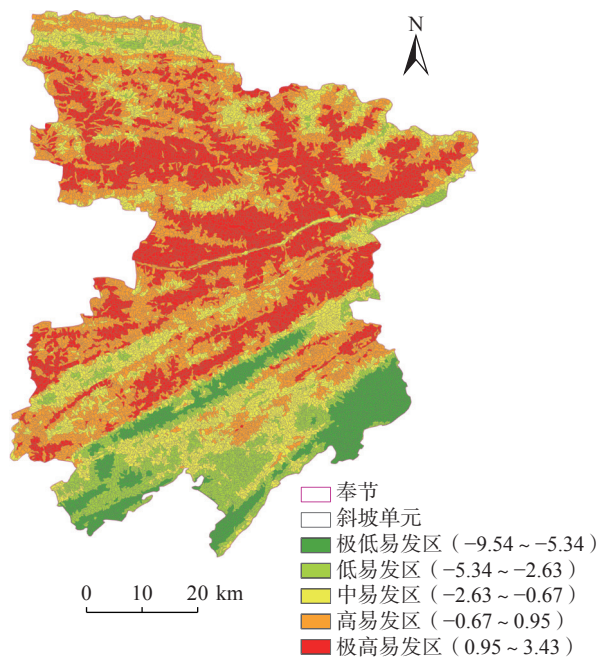


图 4 奉节县滑坡易发性评价结果

Fig. 4 Landslide susceptibility map of Fengjie County

表 3 研究区滑坡易发性区划统计表

Table 3 Landslide susceptibility zoning statistics for the study area

易发性区	面积 /km ²	面积占比 /%	灾害点 个数/处	灾害点占比 /%	灾害点密度 /(处·km ⁻²)
极低易发区	299.05	7.29	4	0.38	0.01
低易发区	391.29	9.54	10	0.95	0.03
中易发区	864.88	21.10	48	4.55	0.06
高易发区	1 376.22	33.57	317	30.05	0.23
极高易发区	1 168.38	28.50	676	64.08	0.58

型,评价研究区滑坡易发性。

(2)奉节县滑坡易发性评价结果显示,滑坡易发性越高的区域灾害点密度越大,验证集 AUC 为 0.764,表明使用 MIA-HSU 方法划分的斜坡单元作为滑坡易发性评价的制图单元,采用信息量法得出的易发性评价结果准确性较高。

(3)2018—2023 年的滑坡灾害点,落在高易发区与较高易发区的比例为 94.54%,表明使用 MIA-HSU 方法

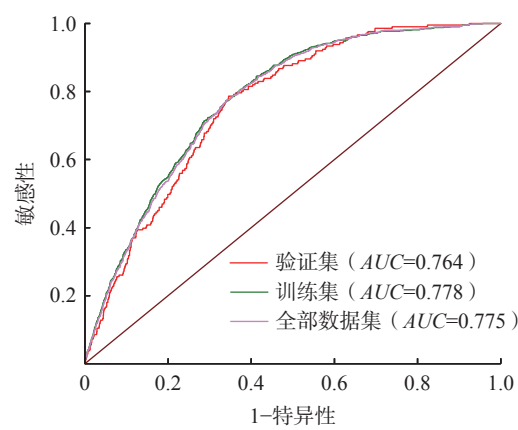


图 5 信息量模型的 ROC 曲线

Fig. 5 ROC curve of the information quantity model

表 4 研究区灾害点统计表

Table 4 Statistical table of disaster sites in the study area

易发性区	灾害点个数/处	灾害占比/%
极低易发区	0	0
低易发区	2	1.82
中易发区	4	3.64
高易发区	32	29.09
极高易发区	72	65.45

划分的斜坡单元作为滑坡易发性评价的制图单元,采用信息量法得出的易发性评价结果具有较高的泛化性。

参考文献(References):

[1] 孙乾征,张华湘,向刚,等.贵州省开阳县田坝寨滑坡形成机理研究[J].人民长江,2021,52(增刊1):96-100. [SUN Qianzheng, ZHANG Huaxiang, XIANG Gang, et al. Study on formation mechanism of Tianbazhai landslide in Kaiyang County, Guizhou Province [J]. Yangtze River, 2021, 52(Sup 1): 96 - 100. (in Chinese)]

[2] 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 Hongyang, ZHOU Chao, LIANG Xin, 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)]

[3] 倪化勇,王德伟,陈绪钰,等.四川雅江县城地质灾害发育特征与稳定性评价[J].现代地质,2015,29(2):474-480. [NI Huayong, WANG Dewei, CHEN Xuyu, et al. Formation characteristics and stability assessment of geological hazards in Yajiang City, Sichuan Province [J]. Geoscience, 2015, 29(2): 474 - 480. (in Chinese with English abstract)]

[4] 高杨,贺凯,李壮,等.西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析[J].水文地质工程地质,2020,47(4):14-23. [GAO Yang, HE Kai, LI Zhuang, et al. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest Karst mountain areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 14 - 23. (in Chinese with English abstract)]

[5] 宋渊,江南,张恩博,等.基于证据权法的湖北省兴山县滑坡灾害易发性评价[J].地质与资源,2023,32(3):352-359. [SONG Yuan, JIANG Nan, ZHANG Enbo, et al. Susceptibility evaluation of landslide hazard in Xingshan County of Hubei Province based on weights-of-evidence method [J]. Geology and Resources, 2023, 32(3): 352 - 359. (in Chinese with English abstract)]

[6] 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. (in Chinese with English abstract)]

[7] 吴兴贵,王蓝婷,丁梓逸,等.云南横断山区乡镇滑坡灾害易发性评价[J].地质灾害与环境保护,2023,34(4):13-19. [WU Xinggui, WANG Lanting, DING Ziyi, et al. The susceptibility evaluation of township landslide disaster in Hengduan mountainous area of Yunnan [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2023, 34(4): 13 - 19. (in Chinese with English abstract)]

[8] 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].自然灾害学报,2009,18(1):14-23. [WANG Zhe, YI Facheng. AHP-based evaluation of occurrence easiness of geological disasters in Mianyang City [J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(1): 14 - 23. (in Chinese with English abstract)]

[9] DOLOJAN N L J, MORIGUCHI S, HASHIMOTO M, et al. Mapping method of rainfall-induced landslide hazards by infiltration and slope stability analysis [J]. Landslides, 2021, 18(6): 2039 - 2057.

[10] ZHOU Xinzhi, WEN Haijia, LI Ziwei, et al. An interpretable model for the susceptibility of rainfall-induced shallow landslides based on SHAP and XGBoost [J]. Geocarto International, 2022, 37(26): 13419 - 13450.

[11] 牟家琦,庄建琦,王世宝,等.基于深度神经网络模型的雅安市滑坡易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):157-168. [MU Jiaqi, ZHUANG Jianqi, WANG Shibao, et al. Evaluation of landslide susceptibility in Ya'an City based on depth neural network model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023,

- 34(3): 157–168. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 金朝, 费雯丽, 丁卫, 等. 基于信息量模型和 Logistic 回归模型的地质灾害易发性评价——以十堰市郧阳区为例 [J]. 资源环境与工程, 2021, 35(6): 845–850. [JIN Zhao, FEI Wenli, DING Wei, et al. Evaluation of geological disaster susceptibility based on information model and Logistic regression model [J]. Resources Environment & Engineering, 2021, 35(6): 845–850. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王成楠, 宋勇, 赵影, 等. 基于加权信息量法和逻辑回归信息量法的定南县地质灾害易发性评价 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(6): 569–580. [WANG Chengnan, SONG Yong, ZHAO Ying, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility in Dingnan County based on weighted information method and logistic regression information method [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2022, 45(6): 569–580. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 高佩玺, 刘艺. 基于信息量法及 ArcGIS 的连山县地质灾害易发性评价 [J]. 四川有色金属, 2023(4): 25–29. [GAO Peixi, LIU Yi. Evaluation of geological disaster susceptibility in Lianshan County based on information quantitative method and ArcGIS [J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2023(4): 25–29. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杜国梁, 杨志华, 袁颖, 等. 基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 102–111. [DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression-information value method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 102–111. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 侯峰媛, 吴光, 张书豪. 基于信息量法的金沙江峡谷段滑坡易发性评价 [J]. 四川建筑, 2019, 39(6): 147–150. [HOU Fengyuan, WU Guang, ZHANG Shuhao. Evaluation of landslide susceptibility in Jinsha River canyon based on information method [J]. Sichuan Architecture, 2019, 39(6): 147–150. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王伟中, 曹小红, 汪鑫, 等. 基于信息量法的新疆伊宁县滑坡灾害易发性评价 [J]. 新疆地质, 2022, 40(4): 566–573. [WANG Weizhong, CAO Xiaohong, WANG Xin, et al. Assessment of the susceptibility to landside hazards in Yining County based on information value method [J]. Xinjiang Geology, 2022, 40(4): 566–573. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 崔阳阳. 基于不同评价单元的滑坡易发性评价方法研究——以陕西省洛南县为例 [D]. 西安: 西安科技大学, 2021. [CUI Yangyang. Study on evaluation method of landslide susceptibility based on different evaluation units: A case study of Luonan County, Shaanxi Province [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘帅. 栅格与斜坡单元在元阳县滑坡地质灾害评价体系中的对比研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023, 37(6): 85–93. [LIU Shuai. Comparative study of grid and slope unit in evaluation system of landslide geological disasters in Yuanyang County [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 常志璐. 基于数据驱动和成因机制的区域降雨型滑坡危险性评价方法 [D]. 南昌: 南昌大学, 2023. [CHANG Zhilu. Risk assessment method of regional rainfall landslide based on data-driven and genetic mechanism [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 常志璐, 黄发明, 蒋水华, 等. 基于多尺度分割方法的斜坡单元划分及滑坡易发性预测 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 184–195. [CHANG Zhilu, HUANG Faming, JIANG Shuihua, et al. Slope unit extraction and landslide susceptibility prediction using multi-scale segmentation method [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 184–195. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [23] ZÊZERE J L, PEREIRA S, MELO R, et al. Mapping landslide susceptibility using data-driven methods [J]. Science of the Total Environment, 2017, 589: 250–267.
- [24] 张曦, 陈丽霞, 徐勇, 等. 两种斜坡单元划分方法对滑坡灾害易发性评价的对比研究 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25(1): 12–17. [ZHANG Xi, CHEN Lixia, XU Yong, et al. Comparison of two methods for slope unit division in landslide susceptibility evaluation [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 12–17. (in Chinese with English abstract)]
- [25] WANG Kai, XU Hui, ZHANG Shaojie, et al. Identification and extraction of geomorphological features of landslides using slope units for landslide analysis [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(4): 274.
- [26] 王凯. 基于斜坡单元的区域滑坡分析模型与应用 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [WANG Kai. Regional landslide analysis model based on slope element and its application [D]. Beijing: University of Chinese Academy of

- Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王凯, 张少杰, 韦方强. 斜坡单元提取方法研究进展和展望 [J]. [长江科学院院报](#), 2020, 37(6): 85–93. [WANG Kai, ZHANG Shaojie, WEI Fangqiang. Slope unit extraction methods: Advances and prospects [J]. [Journal of Yangtze River Scientific Research Institute](#), 2020, 37(6): 85–93. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 潘懋, 李铁锋. 环境地质学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003. [PAN Mao, LI Tiefeng. Environmental geology [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)]
- [29] 李宁, 陈永东, 古学超, 等. 基于 GIS 和信息量法的川藏铁路雅江县段滑坡易发性评价 [J]. 资源信息与工程, 2020, 35(2): 113–117. [LI Ning, CHEN Yongdong, GU Xuechao, et al. Landslide susceptibility assessment of Yajiang County segment of Sichuan-Tibet railway based on GIS and information value method [J]. Resource Information and Engineering, 2020, 35(2): 113–117. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 王美华. 基于信息量、信息量-逻辑回归模型综合法的地质灾害易发性研究——以诸暨市马剑镇为例 [J]. 化工矿产地质, 2023, 45(4): 347–358. [WANG Meihua. Geological hazard susceptibility study based on information value and information value-logistic regression model integration method: A case study of Majian Town, Zhuji City [J]. Geology of Chemical Minerals, 2023, 45(4): 347–358. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 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. (in Chinese with English abstract)]