

考虑负样本取样策略的滑坡易发性评价与区划

龚学强, 席传杰, 胡卸文, 胡亚运, 周永豪, 张瑜

Landslide susceptibility assessment and zonation using negative sampling strategy: A case study of Bazhong area, Sichuan Province

GONG Xueqiang, XI Chuanjie, HU Xiewen, HU Yayun, ZHOU Yonghao, and ZHANG Yu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Logistic回归和随机森林的清江流域长阳库岸段堆积层滑坡易发性评价

Susceptibility assessment of colluvium landslides along the Changyang section of Qingjiang River using Logistic regression and random forest methods

曾斌, 吕权儒, 寇磊, 艾东, 许汇源, 袁晶晶 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 105-113

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

地质灾害易发性评价因子分级的AIFFC算法优化

Classification optimization of geological hazard susceptibility evaluation factors based on AIFFC algorithm

陈宾, 李颖懿, 张联志, 屈添强, 魏娜, 刘宁, 黄春林 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 72-81

基于SMOTE-Tomek和CNN耦合的滑坡易发性评价模型及其应用

Landslide susceptibility mapping model based on a coupled model of SMOTE-Tomek and CNN and its application: A case study in the Zigui-Badong section of the Three Gorges Reservoir area

于宪煜, 汤礼 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 141-151



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309028

龚学强, 席传杰, 胡卸文, 等. 考虑负样本取样策略的滑坡易发性评价与区划——以四川省巴中地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 146-155.

GONG Xueqiang, XI Chuanjie, HU Xiewen, et al. Landslide susceptibility assessment and zonation using negative sampling strategy: A case study of Bazhong area, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 146-155.

考虑负样本取样策略的滑坡易发性评价与区划 ——以四川省巴中地区为例

龚学强¹, 席传杰¹, 胡卸文^{1,2}, 胡亚运³, 周永豪¹, 张 瑜¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程试验室, 四川 成都 610031; 3. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 滑坡易发性评价是滑坡风险管理的重要环节, 能够有效指导防灾减灾工作, 但滑坡易发性评价精度受到多种因素制约。当前针对斜坡单元的负样本采样优化策略研究相对较少。文章以四川省巴中地区为研究对象, 选取高程、相对高差、历年平均降雨等 11 个影响因子, 以优化斜坡单元负样本采样策略建立地理加权回归-随机森林(GWR-RF)耦合模型, 并将评估结果与多次全域随机采样策略进行对比。结果表明: (1) 全域随机采样会导致易发性评价结果存在较大差异, 且评估结果准确率较差, 全域随机采样不适用于以斜坡单元为基础的滑坡易发性评价; (2) GWR-RF 耦合模型的滑坡易发性评价结果存在空间差异, 主要分布于研究区的恩阳区、巴州区、平昌县, 以及南江县中—南部, 文章提出的 GWR-RF 耦合模型通过优化负样本取样策略, 提升了滑坡易发性评价的精度, 可为巴中地区滑坡灾害防治提供科学依据。

关键词: 易发性评价; 地理加权回归; 随机森林; 滑坡

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)01-0146-10

Landslide susceptibility assessment and zonation using negative sampling strategy: A case study of Bazhong area, Sichuan Province

GONG Xueqiang¹, XI Chuanjie¹, HU Xiewen^{1,2}, HU Yayun³, ZHOU Yonghao¹, ZHANG Yu¹

(1. Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co. Ltd, Ningbo, Zhejiang 315012, China)

Abstract: Landslide susceptibility assessment is a crucial component of landslide risk management, effectively guiding disaster prevention and mitigation efforts. However, the accuracy of landslide susceptibility assessments is constrained by various factors, and current research on optimizing negative sample sampling strategies based on slope units remains relatively limited.

收稿日期: 2023-09-21; 修订日期: 2023-11-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42377170)

第一作者: 龚学强(2000—), 男, 四川简阳人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害成因与防治方面的研究。

E-mail: xueqiangong.swjtu.edu.cn@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 胡卸文(1963—), 男, 浙江金华人, 教授, 主要从事工程地质、环境地质方面的教学与研究。E-mail: huxiewen@163.com

This study, focuses on Bazhong City as the research area, incorporates eleven conditioning factors including elevation, relief, and annual average rainfall to develop a geographically weighted regression - random forest (GWR-RF) coupling model. This model optimize the negative sampling strategy by comparing it against traditional random sampling across the entire area. The results indicate the following: (1) Random sampling from the entire area leads to significant disparities in susceptibility assessments, accompanied by a relatively diminished accuracy, rendering it unsuitable for slope unit-based assessments. (2) The coupled GWR-RF model demonstrates spatial variations in landslide susceptibility, predominantly distributing in the Enyang, Bazhou, Pingchang Counties, and the central - southern region of Nanjiang County. The proposed GWR-RF coupled model improves the accuracy of landslide susceptibility assessments by optimizing the negative sample sampling strategy, providing a scientific basis for landslide disaster prevention and mitigation in the Bazhong region.

Keywords: susceptibility assessment; geographically weighted regression; random forest; landslide

0 引言

滑坡易发性评价通常使用数据驱动模型对一组影响滑坡的环境因子进行概率建模,从而预测潜在滑坡的空间位置,其是滑坡风险管理环节之一,对灾害防治和风险管理有重要意义^[1]。滑坡易发性评价结果的可靠性极大依赖于数据质量及建模方法。以信息量、证据权等为代表的统计模型是最常用的滑坡易发性评价方法,这类方法主要是分析各影响因子与灾害之间的影响权重,根据加权所有影响因子权重表征灾害的地理空间约束特征,从而确定滑坡的易发区^[2]。随着人工智能的发展,建模方法逐渐从传统的启发式和统计学方法向机器学习方法转变,如随机森林、支持向量机、梯度上升树等机器学习模型已在灾害评估领域得到了广泛应用^[3-5]。然而,基于机器学习方法的滑坡易发性评价通常表现为二分类问题,以往研究表明负样本的不确定性会对模型精度造成影响^[3,6]。因此,学者通常将统计模型与机器学习模型相耦合以优化滑坡负样本采样策略,从而提高机器学习模型的建模质量^[7-8]。尽管大量学者意识到优化负样本采样策略可以有效提高易发性评价模型的性能,但以往的研究主要聚焦于以栅格单元为基础的滑坡易发性评价^[9-11]。相较于斜坡单元,栅格单元与地形地貌特征关联性较弱,且受栅格分辨率影响较大。此外,相关研究也表明在滑坡易发性评价时采用斜坡单元更加合理^[12]。然而,针对斜坡单元的负样本采样优化策略的研究目前相对较少。

四川省巴中地区地层岩性以侏罗系和白垩系的红层岩体为主,在地质构造作用下,红层岩体为软硬相间的砂泥岩互层,在降雨作用下该区域易发生滑坡灾害^[13]。故本文以四川省巴中市行政区域作为研究区并划分斜坡单元,选取高程、相对高差、历年平均降雨等 11 个影响因子,将地理加权回归模型能分析空间异质性的优

势^[14]运用于优化负样本取样策略,并与分类预测性能优越的随机森林模型^[3]相耦合,并将建立的地理加权-随机森林耦合(GWR-RF)模型与多次全域随机采样结果进行对比,分析负样本对模型性能的影响。本文所提出的 GWR-RF 模型为斜坡单元负样本采样提供了一种有效的方法,同时可为研究区滑坡预警预报工作提供参考。

1 耦合模型概述

1.1 地理加权回归模型

地理学第一定律指出具有相似空间分布特征的空间对象往往表现出相似属性特征关系,并且随着空间距离的增加,这种关联程度逐渐衰减^[14]。地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型则将地理学第一定律引入回归模型,通过分析空间对象与相关属性对应的回归系数和统计参数值,度量了两者的空间依赖关系。该方法对每个独立样本点建立回归模型,求解了与空间位置对应的回归系数,回归系数随空间位置变化的参数值就表征了空间差异性特征^[15-16]。具体地, GWR 模型函数形式如下:

$$y_i = \lambda_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \lambda_p(u_i, v_i) x_{ip} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; y_i 为 i 处函数响应变量, x_{ip} 为 i 处的第 k 个解释变量, n 和 m 分别为样本和解释变量数量, $\lambda_p(u_i, v_i)$ 为 i 处第 p 个解释变量的局部回归参数, $\lambda_0(u_i, v_i)$ 为 i 处的截距。

1.2 随机森林模型

随机森林模型(random forest, RF)是由多棵决策树组合形成的一种集成学习算法。该方法通过对多棵决策树的结果进行分类预测,来构建预测模型,能有效避免出现过拟合现象^[17-18]。主要建模过程步骤如下:①使用 bootstrap 重采样方法从训练样本中抽取 t 个随机样

本, 每个随机样本具有 z 个特征数; ②对 t 个随机样本分别随机抽取 q ($q < z$) 个特征数建立 t 个决策树; ③对 t 个决策树的分类结果进行投票, 得票最多的结果确定为最终分类结果^[19], 表达式如下^[17]:

$$F(x) = \arg \max_Y \sum_{i=1}^t I(f_i(x) = Y) \quad (2)$$

式中: $F(x)$ ——随机森林分类结果;

$f_i(x)$ ——决策树分类结果;

Y ——模型输出变量;

I ——示性函数。

1.3 地理加权-随机森林耦合模型

为优化负样本采样, 本文提出了 GWR-RF 耦合模型, 流程如下: ①将斜坡单元滑坡数量与 11 个影响因子导入地理加权回归模型; ②建立 11 个因子地理空间加权函数, 然后使用加权回归系数表征 11 个因子的地理加权回归结果; ③在 GIS 平台上对 11 个因子的归一化

后加权回归系数进行空间叠加, 并采用分位数法分区得到加权回归系数空间分类图; ④统计空间分类图各区域滑坡斜坡单元面积, 在滑坡斜坡单元面积占比最少的区域进行随机采样。⑤将地理加权模型优化后的滑坡正负样本集分为 70% 训练集和 30% 测试集, 使用随机森林模型对样本集进行分类预测。

2 研究区基本概况

2.1 研究区地质条件

研究区位于四川省巴中市, 地处四川盆地盆周山区, 大巴山系米仓山南麓, 平均高度 766 m, 地势总体北高南低, 北部为中—深切中山峡谷地貌, 中部和南部为低山丘陵地貌(图 1a)。受地质构造控制, 区内褶皱带发育, 地层岩性复杂, 出露吕梁期岩浆岩, 除志留、泥盆系地层未出露外, 其余地层均有分布, 主要地层为白垩系和侏罗系, 占比 84.28%。研究区气候夏季湿热, 冬季温润, 年降雨量 1 090 mm, 降雨多集中在 5—9 月。

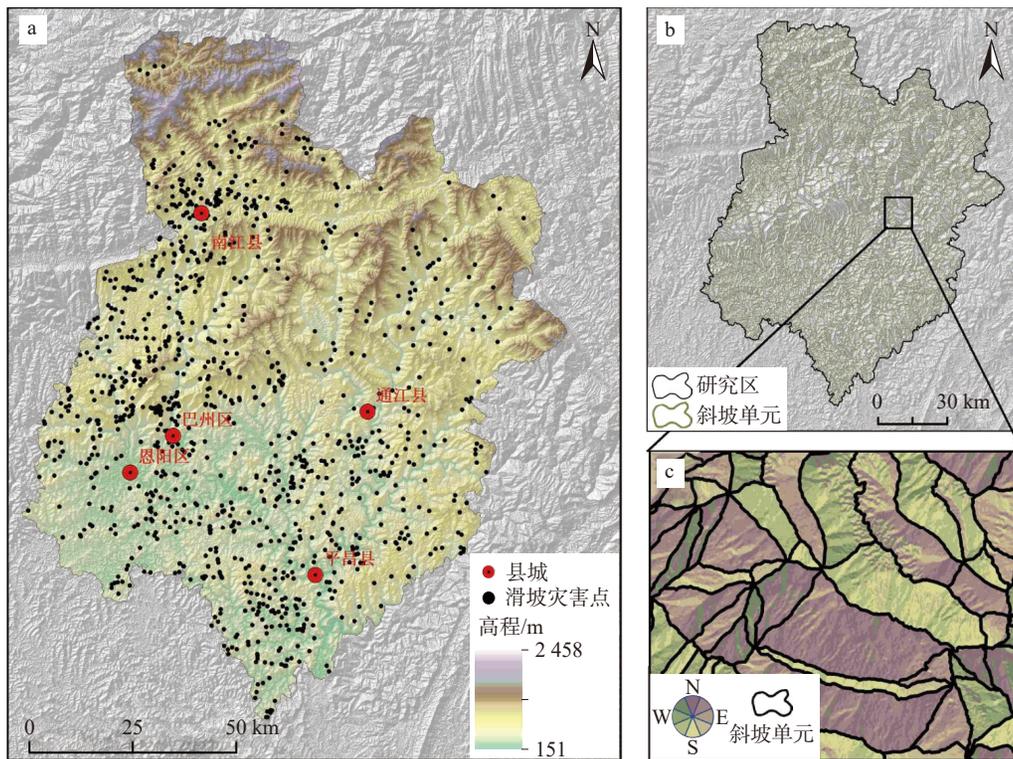


图 1 研究区位置及斜坡单元划分图

Fig. 1 Location and slope unit division of the research area

注: a 为研究区位置; b 为斜坡单元划分; c 为斜坡单元形态示意图。

3 斜坡单元划分及影响因子选取

3.1 斜坡单元划分

斜坡单元能有效反映不同尺度斜坡地形地貌特征,

在大尺度精细化滑坡易发性评价中应用较多^[19-20]。本文采用水文分析法划分斜坡单元, 为减小斜坡单元选取误差, 结合研究区卫星影像使得斜坡单元与实际山体斜坡吻合^[21], 并进行人工处理修正斜坡单元几何拓扑错

误, 最终将研究区划分为 8 643 个斜坡单元(图 1b、c)。

3.2 影响因子选取

滑坡是受内在因素控制, 多种外在因素耦合诱发的一种自然灾害, 选择合适的影响因子进行易发性评价, 能够提高滑坡灾害监测预警的准确性^[22]。然而当前影响因子没有统一的选取标准, 本文根据前人研究, 从地形地貌、地质构造、气象水文和人类工程活动 4 个一级指标中, 选取高程、坡度、坡向、相对高差、平面曲率、

剖面曲率、距道路距离、距河流距离、距断层距离、岩土类型、历年平均降雨共 11 项影响因子^[23-27]。基于 GIS 平台, 使用 DEM 数据以及地质基础资料获取 11 个影响因子图(图 2)。

4 滑坡易发性评价

4.1 地理加权回归(GWR)结果

本文从研究区共创建 8 463 个斜坡单元, 其中有

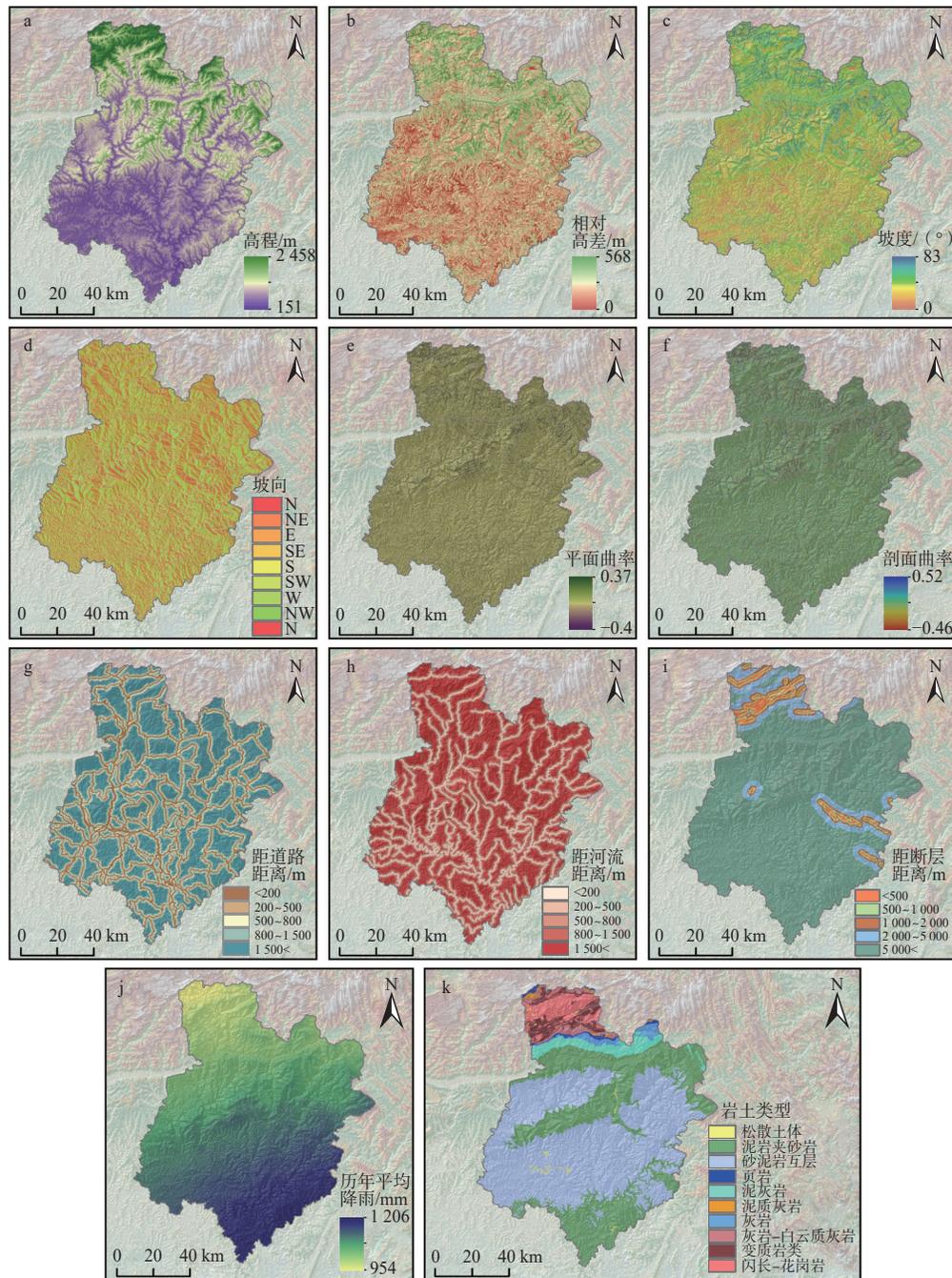


图 2 易发性影响因子图

Fig. 2 Map of susceptibility conditioning factors

853 个斜坡单元包含滑坡。考虑到正负样本数量不等可能造成抽样偏差,故制备了相同数量的非滑坡斜坡单元,避免因样品不一致造成的误差^[28]。本文以斜坡单元滑坡数量为因变量,将 11 个影响因子作为解释变量进行地理加权。如图 3 所示,根据地理加权结果得到 11 幅因子加权回归系数图。回归系数为正表示影响因

素与滑坡分布正相关,反之则为负相关,且回归系数绝对值越大对滑坡分布影响越大^[29-30]。随后将 11 幅因子加权系数图归一化后进行空间叠加,并采用分位数法将叠加结果分割为 4 个区域(根据叠加结果由大到小编为 4 个区域)。

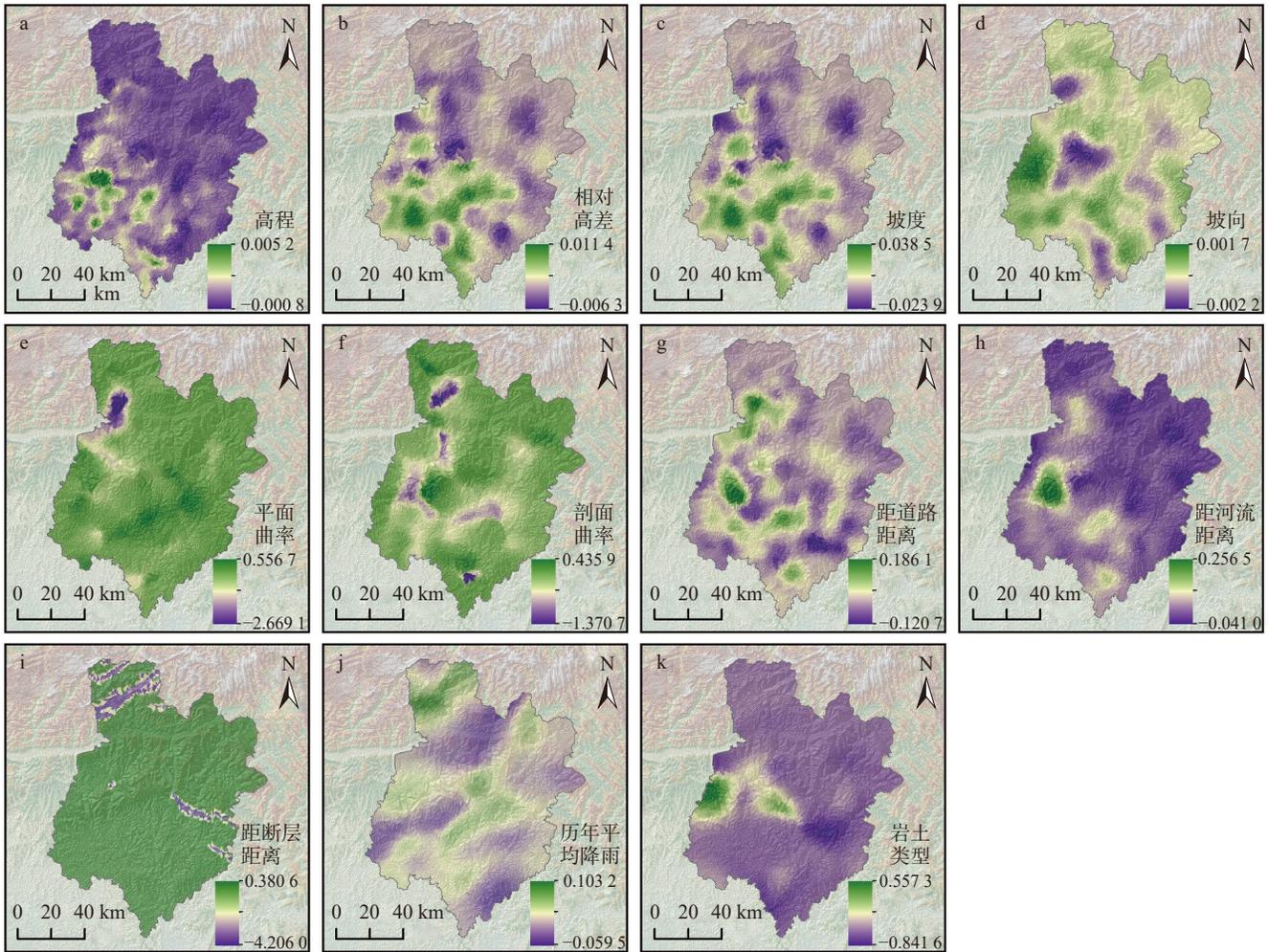


图 3 因子地理加权回归结果

Fig. 3 Geographically weighted regression results for factors

如图 4 结果所示,区域 1 和区域 4 回归系数绝对值大,影响因素与滑坡分布的相关性大,同理可知,区域 2 内影响因素与滑坡分布相关性较小^[30]。而本文为提高滑坡负样本的可靠度,统计了 4 个区域的滑坡斜坡单元面积,选取滑坡斜坡单元面积占比最少的区域进行随机采样。如图 4,区域 2 内滑坡斜坡单元面积占比最少,为 19.0%。故本文从区域 2 中随机采取 853 个非滑坡斜坡单元。同时在滑坡斜坡单元区域外进行了随机采样,共获得 9 组滑坡负样本($RS_i, i=1,2,\dots,9$)。滑坡样本记为“1”,非滑坡样本记为“0”。

依据对模型训练测试集比例合理性的研究,将滑坡清单划分为 70% 训练样本和 30% 测试样本,随后采用随机森林模型进行滑坡易发性预测^[31]。

4.2 GWR-RF 模型与随机采样结果比较

将随机森林得到的易发性指数导入 GIS 平台进行处理,为便于 GWR-RF 模型与随机采样结果比较,以 0.2 为间隔划分易发性指数为极低、低、中、高、极高易发区 5 个等级,滑坡易发性分区结果如表 1、图 5 所示,选取 9 次随机采样中具有代表性的 RS2、RS3 和 RS7 与 GWR-RF 耦合模型进行比较。GWR-RF 耦合模型滑

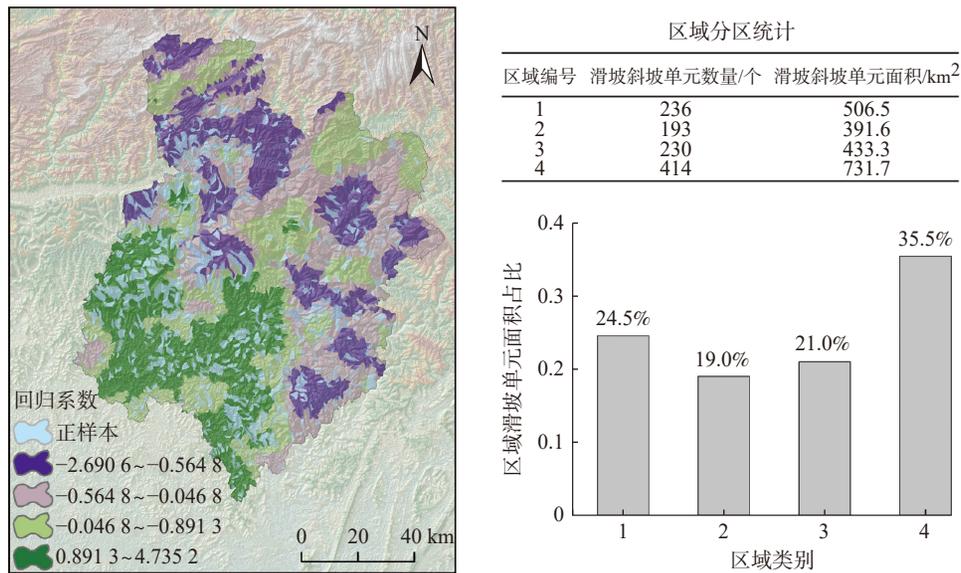


图 4 地理加权空间分类图

Fig. 4 Spatial classification map from geographically weighted results

表 1 滑坡易发性分区结果

Table 1 Results of landslide susceptibility zoning

模型	易发性等级	分区面积/km ²	面积占比/%	分区滑坡数量/个	滑坡数量占比/%	滑坡密度/(个每100 km ²)
GWR-RF	极低易发	1 704.02	13.85	7	0.65	0.41
	低易发	1 339.37	10.89	16	1.49	1.19
	中易发	2 231.27	18.13	66	6.15	2.96
	高易发	3 698.50	30.06	444	41.38	12.00
	极高易发	3 331.41	27.07	540	50.33	16.21
RS2	极低易发	1 380.00	11.22	4	0.37	0.29
	低易发	1 344.82	10.93	17	1.58	1.26
	中易发	2 560.44	20.81	88	8.20	3.44
	高易发	6 959.27	56.56	935	87.14	13.44
	极高易发	60.04	0.49	29	2.70	48.30
RS3	极低易发	1 101.49	8.95	1	0.09	0.09
	低易发	1 219.89	9.91	13	1.21	1.07
	中易发	1 118.98	9.09	23	2.14	2.06
	高易发	5 489.84	44.62	522	48.65	9.51
	极高易发	3 374.37	27.42	514	47.90	15.23
RS7	极低易发	1 987.32	16.15	8	0.75	0.40
	低易发	1 800.17	14.63	17	1.58	0.94
	中易发	4 941.03	40.16	234	21.81	4.74
	高易发	3 430.03	27.88	733	68.31	21.37
	极高易发	146.07	1.19	81	7.55	55.45

坡的高和极高易发区占区域总面积 57.13%, 且滑坡数量占比 91.71%。其中, 极高易发区面积占比为 27.07%, 滑坡数量占比为 50.33%。区域滑坡空间部分呈现区域南部大面积集中, 北部局部集中的特点, 滑坡主要分布在恩阳区、巴州区和平昌县, 以及南江县中~南部。

RS2 中高和极高易发区面积总占比为 57.05%, 滑坡数量总占比为 90.58%, 该模型结果和 GWR-RF 接近,

但高易发区面积占比达到 56.56%, 极高易发区面积仅占 0.49%, 模型评估结果较差; RS3 分区结果从中部大致沿 NE 向分割, 上部分主要为极高易发区, 下部主要为高易发区, 滑坡数量总占比为 96.55%, 模型评价结果比 GWR-RF 略好, 但高和极高易发区面积总占比为 72.04%, 高处 GWR-RF 模型 14.91%, 该模型产生了过拟合现象; RS7 中高和极高易发区滑坡数量占比为 75.86%,

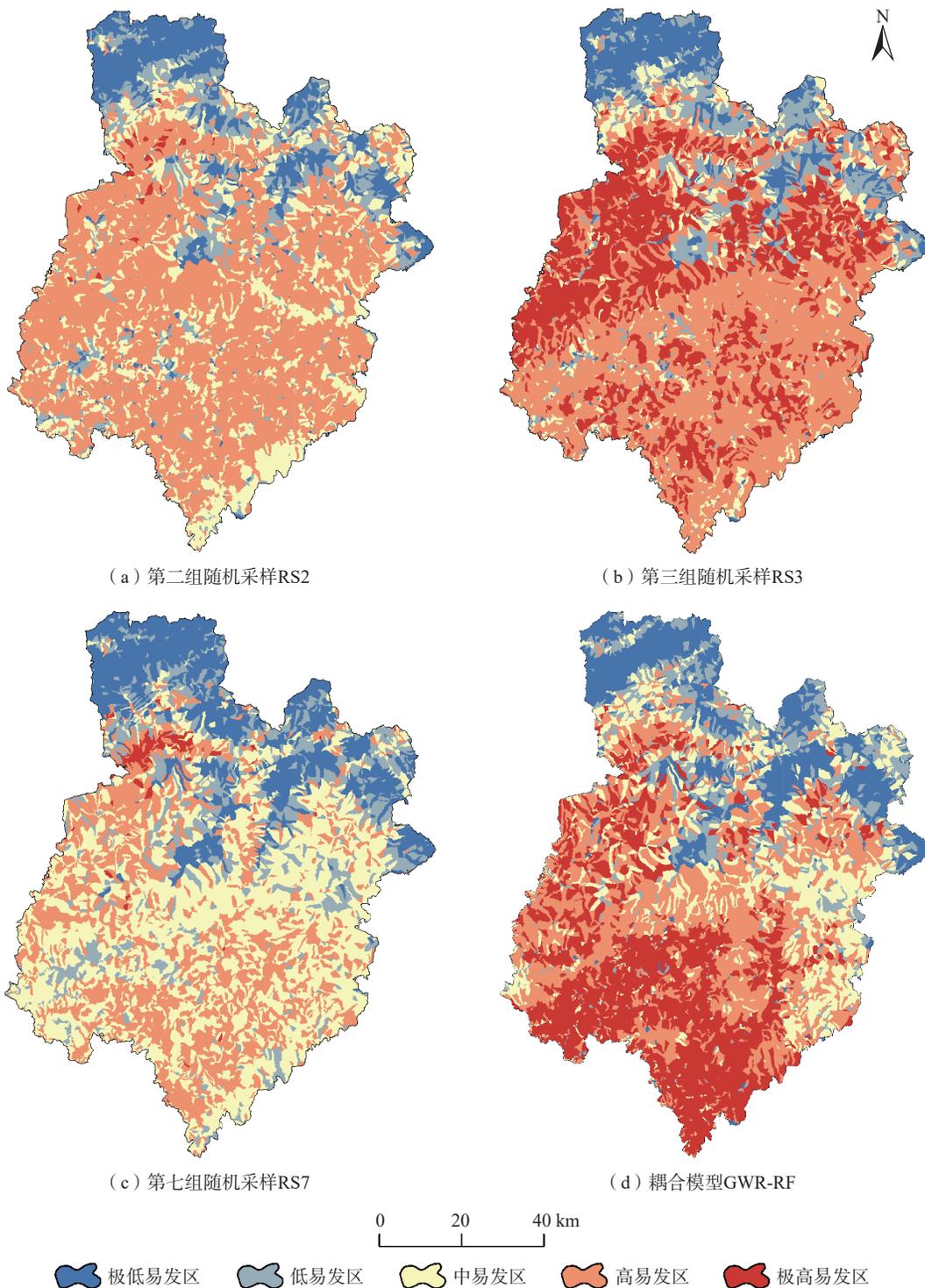


图 5 滑坡易发性分区制图

Fig. 5 Landslide susceptibility zoning map

而区内中易发区达到 40.16%，高和极高易发区总占比仅 29.07%，故该模型评价结果较差。总体上，三次随机采样的极低易发区和低易发区分区结果较一致，都集中在区域北部边界一带，而高和极高易发区分区结果存在极大的波动性，分区结果较差。GWR-RF 模型得到了比随机采样更合理的分区结果。

4.3 模型精度对比

滑坡易发性的模型精度常用混淆矩阵进行评估，包括精准率(PR)、召回率(RE)、准确率(ACC)、F1 分数(F1)和 AUC 等。模型评价结果见表 2。

随机采样的精确率、召回率、F1 分数、准确率和 AUC 分别为 0.644 ± 0.066 、 0.678 ± 0.068 、 0.715 ± 0.070 、 $0.796\pm$

表 2 模型效果对比

Table 2 Comparative analysis of model performance

模型	评价指标				
	精确率	召回率	F1分数	准确率	AUC
RS1	0.763	0.798	0.744	0.846	0.873
RS2	0.649	0.693	0.825	0.801	0.730
RS3	0.749	0.785	0.669	0.839	0.847
RS4	0.619	0.643	0.661	0.779	0.698
RS5	0.595	0.626	0.670	0.778	0.663
RS6	0.608	0.637	0.671	0.780	0.684
RS7	0.581	0.623	0.679	0.781	0.624
RS8	0.613	0.644	0.682	0.782	0.679
RS9	0.619	0.649	0.785	0.783	0.695
RS	0.644±0.066	0.678±0.068	0.715±0.070	0.796±0.027	0.721±0.084
GWR-RF	0.700	0.735	0.773	0.814	0.845

0.027 和 0.721±0.084。其中,仅有 RS1 和 RS3 评估指标接近 GWR-RF 模型评估指标,其余 7 次随机采样评估指标均远低于 GWR-RF 模型评估指标,且随机采样各指标标准差较大,该结果表明多次随机采样评估结果存在较大的不确定性,而 GWR-RF 模型通过优化负样本取样,AUC 达到了 0.845,显著提高了模型评估性能(图 6)。

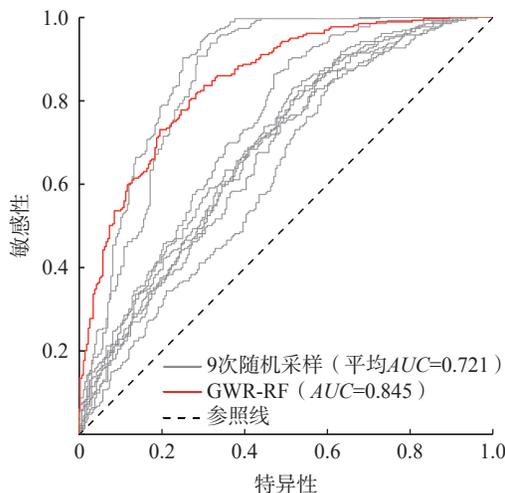


图 6 ROC 曲线

Fig. 6 ROC curve

5 结论

(1)多次全域随机采样 AUC 均值为 0.721±0.084,负样本质量波动性对模型精度影响较大,且全域随机采样的评估结果准确率较差,全域随机采样策略不适用于本研究区的易发性评价。

(2)在 GWR-RF 模型中,影响因子回归系数绝对值小的区域,影响因子与滑坡分布相关性小,相应地滑坡斜坡单元面积占比也越小。GWR-RF 耦合模型 AUC

为 0.845,故该模型有效优化了负样本取样策略,表现出较好的滑坡易发性评价性能。

参考文献(References):

- [1] 牛朝阳,高欧阳,刘伟,等.光学遥感图像滑坡检测研究进展[J].航天返回与遥感,2023,44(3):133-144. [NIU Chaoyang, GAO Ouyang, LIU Wei, et al. Research progress of landslide detection in optical remote sensing images[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023, 44(3): 133-144. (in Chinese with English abstract)]
- [2] YALCIN A, REIS S, AYDINOGLU A C, et al. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey[J]. Catena, 2011, 85(3): 274-287.
- [3] MERGHADI A, YUNUS A P, DOU Jie, et al. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 207: 103225.
- [4] 郭飞,赖鹏,黄发明,等.基于知识图谱的滑坡易发性评价文献综述及研究进展[J].地球科学,2024,49(5):1584-1606. [GUO Fei, LAI Peng, HUANG Faming, et al. Literature review and research progress of landslide susceptibility mapping based on knowledge graph[J]. Earth Science, 2024, 49(5): 1584-1606. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 陈航,刘惠军,王韬,等.基于频率比-深度神经网络耦合模型的滑坡易发性评价——以盐源县为例[J].水文地质工程地质,2024,51(5):161-171. [CHEN Hang, LIU Huijun, WANG Tao, et al. Landslide susceptibility evaluation based on FR-DNN coupling model: A case study on Yanyuan County[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 161-171. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吕蓓茹,彭玲,李樵民.顾及样本敏感性的滑坡易发性评价[J].测绘通报,2022(11):20-25. [LYU Beiru, PENG Ling, LI Qiaomin. Landslide susceptibility evaluation considering sample sensitivity[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(11): 20-25. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 黄发明,陈佳武,唐志鹏,等.不同空间分辨率和训练测试集比例下的滑坡易发性预测不确定性[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):1155-1169. [HUANG Faming, CHEN Jiawu, TANG Zhipeng, et al. Uncertainties of landslide susceptibility prediction due to different spatial resolutions and different proportions of training and testing datasets[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1155-1169. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘纪平,梁恩婕,徐胜华,等.顾及样本优化选择的多核

- 支持向量机滑坡灾害易发性分析评价 [J]. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2034 - 2045. [LIU Jiping, LIANG Enjie, XU Shenghua, et al. Multi-kernel support vector machine considering sample optimization selection for analysis and evaluation of landslide disaster susceptibility [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2034 - 2045. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 魏文豪, 贾雨霏, 盛逸凡, 等. 基于 I、SVM、I-SVM 的滑坡灾害易发性评价模型研究 [J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(3): 136 - 144. [WEI Wenhao, JIA Yufei, SHENG Yifan, et al. Research on landslide susceptibility evaluation model based on I, SVM and I-SVM [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(3): 136 - 144. (in Chinese)]
- [10] 何万才, 赵俊三, 林伊琳, 等. 基于证据权和支持向量机模型的威信县滑坡易发性评价 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(15): 6350 - 6360. [HE Wancai, ZHAO Junsan, LIN Yilin, et al. Landslide susceptibility assessment in Weixin County based on evidence weight and support vector machine model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(15): 6350 - 6360. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 黄发明, 曾诗怡, 姚池, 等. 滑坡易发性预测建模的不确定性: 不同“非滑坡样本”选择方式的影响 [J]. *工程科学与技术*, 2023: 1 - 14. [HUANG Faming, ZENG Shiyao, YAO Chi, et al. Uncertainties of landslide susceptibility prediction modeling: Influence of different selection methods of "non-landslide samples [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 23(15): 6350 - 6360. (in Chinese with English abstract)]
- [12] JACOBS L, KERVYN M, REICHENBACH P, et al. Regional susceptibility assessments with heterogeneous landslide information: Slope unit- vs. pixel-based approach [J]. *Geomorphology*, 2020, 356: 107084.
- [13] 张勇, 温智, 程英建. 四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 178 - 182. [ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 178 - 182. (in Chinese with English abstract)]
- [14] COMBER A, BRUNSDON C, CHARLTON M, et al. A route map for successful applications of geographically weighted regression [J]. *Geographical Analysis*, 2023, 55(1): 155 - 178.
- [15] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(9): 1356 - 1366. [LU Binbin, GE Yong, QIN Kun, et al. A review on geographically weighted regression [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1356 - 1366. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 于宪煜, 熊十力. 基于空间多尺度分析的滑坡易发性评价——以三峡库区秭归-巴东段为例 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(2): 187 - 192. [YU Xianyu, XIONG Shili. Landslide susceptibility assessment based on spatial multi-scale analysis: A case study of Zigui to Badong in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(2): 187 - 192. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述 [J]. *统计与信息论坛*, 2011, 26(3): 32 - 38. [FANG Kuangnan, WU Jianbin, ZHU Jianping, et al. A review of technologies on random forests [J]. *Statistics & Information Forum*, 2011, 26(3): 32 - 38. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 于新洋, 赵庚星, 常春艳, 等. 随机森林遥感信息提取研究进展及应用展望 [J]. *遥感信息*, 2019, 34(2): 8 - 14. [YU Xinyang, ZHAO Gengxing, CHANG Chunyan, et al. Random forest classifier in remote sensing information extraction: A review of applications and future development [J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(2): 8 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 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 Xing, YANG Sai, LI Yuanyao, 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)]
- [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. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害成因分析 [J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1334 - 1348. [LIU Chuanzheng, CHEN Chunli. Research on the origins of geological disasters in China [J]. *Geological Review*, 2020, 66(5): 1334 - 1348.

- (in Chinese with English abstract)]
- [23] HONG Haoyuan, POURGHASEMI H R, POURTAGHI Z S. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): A comparison between a random forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models [J] . *Geomorphology*, 2016, 259: 105 – 118.
- [24] 蒋文学, 李益敏, 杨雪, 等. 基于斜坡单元的怒江州滑坡易发性研究 [J] . *水土保持学报*, 2023, 37(5): 160 – 167. [JIANG Wenxue, LI Yimin, YANG Xue, et al. Study on landslide susceptibility in Nujiang prefecture based on slope unit [J] . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 160 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 郭衍昊, 窦杰, 向子林, 等. 基于优化负样本采样策略的梯度提升决策树与随机森林的汶川同震滑坡易发性评价 [J] . *地质科技通报*, 2024, 43(3): 251 – 265. [GUO Yanhao, DOU Jie, XIANG Zilin, et al. Susceptibility evaluation of Wenchuan coseismic landslides by gradient boosting decision tree and random forest based on optimal negative sample sampling strategies [J] . *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(3): 251 – 265. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 阳清青, 余秋兵, 张廷斌, 等. 基于 GDIV 模型的大渡河中游地区滑坡危险性评价与区划 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(5): 130 – 140. [YANG Qingqing, YU Qiubing, ZHANG Tingbin, et al. Landslide hazard assessment in the middle reach area of the Dadu River based on the GDIV model [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(5): 130 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 于宪煜, 汤礼. 基于 SMOTE-Tomek 和 CNN 耦合的滑坡易发性评价模型及其应用——以三峡库区秭归—巴东段为例 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(3): 141 – 151. [YU Xianyu, TANG Li. Landslide susceptibility mapping model based on a coupled model of SMOTE-Tomek and CNN and its application: A case study in the Zigui-Badong section of the Three Gorges Reservoir area [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(3): 141 – 151. (in Chinese with English abstract)]
- [28] PETSCHKO H, BRENNING A, BELL R, et al. Assessing the quality of landslide susceptibility maps: case study Lower Austria [J] . *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(1): 95 – 118.
- [29] 王惠, 许月卿, 刘超, 等. 基于地理加权回归的生境质量对土地利用变化的响应——以河北省张家口市为例 [J] . *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(3): 509 – 518. [WANG Hui, XU Yueqing, LIU Chao, et al. Response of habitat quality to land use change based on geographical weighted regression [J] . *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(3): 509 – 518. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 陈强, 朱慧敏, 何溶, 等. 基于地理加权回归模型评估土地利用对地表水质的影响 [J] . *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1571 – 1580. [CHEN Qiang, ZHU Huimin, HE Rong, et al. Evaluating the impacts of land use on surface water quality using geographically weighted regression [J] . *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5): 1571 – 1580. (in Chinese with English abstract)]
- [31] SHIRZADI A, SOLAIMANI K, ROSHAN M H, et al. Uncertainties of prediction accuracy in shallow landslide modeling: Sample size and raster resolution [J] . *Catena*, 2019, 178: 172 – 188.