

基于不同模型的赣南地区小型削方滑坡易发性评价对比分析

郭 飞, 王秀娟, 陈 玺, 王 力, 谢明娟, 李 玉, 谭建民

Comparative analyses on susceptibility of cutting slope landslides in southern Jiangxi using different models

GUO Fei, WANG Xiujuan, CHEN Xi, WANG Li, XIE Mingjuan, LI Yu, and TAN Jianmin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

地理探测器在判别滑坡稳定性影响因素中的应用

Application of geographic detector in identifying influencing factors of landslide stability: A case study of the Jiangda County, Tibet
支泽民, 陈琼, 张强, 周强, 刘峰贵, 赵富昌, 陈永萍 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 19–26

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27–35

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

应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究

石鹏远, 余洁, 朱琳, 王彦兵 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 101–112

基于不同因子分级法的滑坡易发性评价——以湖北远安县为例

闫举生, 谭建民 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(1): 52–60



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205027

郭飞, 王秀娟, 陈玺, 等. 基于不同模型的赣南地区小型削方滑坡易发性评价对比分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 125-133.

GUO Fei, WANG Xiujuan, CHEN Xi, *et al.* Comparative analyses on susceptibility of cutting slope landslides in southern Jiangxi using different models[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 125-133.

基于不同模型的赣南地区小型削方滑坡 易发性评价对比分析

郭 飞^{1,2}, 王秀娟^{1,2}, 陈 玺³, 王 力^{1,2}, 谢明娟⁴, 李 玉^{1,2}, 谭建民⁵

(1. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 宜昌 443002; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 中国地质调查局武汉地质调查中心 (中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205)

摘要: 赣南地区滑坡灾害点多、面广、规模小, 具有群发性和突发性的特点, 90% 以上的滑坡是因人工切坡导致的。为研究赣南地区小型削方滑坡对易发性评价模型的适用性, 以赣州市于都县银坑镇为例, 基于野外地质调查成果, 并利用地理探测器, 选取坡度、坡体结构、岩组、断层、道路、植被等 6 个评价指标, 分别选用信息量模型、人工神经网络模型、决策树模型和逻辑回归模型开展易发性评价。结果表明: 信息量、人工神经网络、决策树和逻辑回归等模型得到的 AUC 值分别为 0.800、0.708、0.672 和 0.586, 信息量模型所得的易发性结果与研究区滑坡实际分布情况较吻合, 高易发区和中易发区滑坡占比近 80%。信息量模型较其他三个模型, 更适合于赣南地区小型削方滑坡易发性评价, 评价结果对该地区地质灾害易发性评价模型选取提供了参考与借鉴。

关键词: 人工切坡; 地理探测器; 信息量; 人工神经网络; 决策树; 逻辑回归

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)06-0125-09

Comparative analyses on susceptibility of cutting slope landslides in southern Jiangxi using different models

GUO Fei^{1,2}, WANG Xiujuan^{1,2}, CHEN Xi³, WANG Li^{1,2}, XIE Mingjuan⁴, LI Yu^{1,2}, TAN Jianmin⁵

(1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 5. Wuhan Geological Survey Center of China Geological Survey (Central South Geological Science and Technology Innovation Center), Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract: There are many landslide disasters in southern Jiangxi, with a wide area and a small scale, and are characterized by

收稿日期: 2022-05-19; 修订日期: 2022-09-07

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190716; 202018000000180602); 土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地(2021EJD026); 宜昌市自然科学研究项目(A21-3-006)

第一作者: 郭 飞(1987-), 男, 湖北枣阳人, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害风险评估的研究。E-mail: ybbnui.2008@163.com

通讯作者: 王 力(1988-), 男, 湖北孝感人, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害防灾减灾的研究。E-mail: wangli_ctgu@126.com

mass and suddenness. More than 90% of landslides are caused by artificial slope cutting. In order to study the applicability of the susceptibility evaluation model for cutting slope landslides caused by cutting slopes in southern Jiangxi, taking Yinkeng Town, Yudu County, Ganzhou City as an example, based on the results of field geological surveys, and using GeoDetectors, the slope, the slope structure, rock formation, fault, road, and vegetation, were selected to carry out landslide susceptibility assessment by using the information value model (I), artificial neural network model (ANN), decision tree model (DT) and Logic regression model respectively. The results show that the AUC values obtained from information value model, artificial neural network model, decision tree model and logistic regression model are 0.800, 0.708, 0.672 and 0.586, respectively. The susceptibility results obtained by the information value model are in good agreement with the actual distribution of landslides in the study area. The specific value of the proportion of landslides in high-prone areas and medium-prone areas exceeds 80%. The information model is more suitable for the landslide susceptibility assessment under cutting slope in southern Jiangxi than the other three models. The assessment results provide a reference for the selection of the assessment model for the geohazard susceptibility in this region.

Keywords: cutting slope; GeoDetectors; information value; artificial neural network; decision tree; logistic regression

0 引言

易发性评价作为滑坡风险评估的基础工作,是近些年来国内外的研究热点,其评价结果也为防灾减灾工作提供了参考。目前我国滑坡易发性评价主要集中于发育规模较大的水库型滑坡^[1-3]、黄土滑坡^[4-5]、地震诱发滑坡^[6-7]以及降雨型滑坡^[8-9],在易发性评价指标、评价模型等方面积累了较多经验。但由于赣南地区滑坡灾害点多、面广、规模小,且 90% 以上的滑坡是因人工切坡导致的,这些滑坡与前述滑坡在规模、成因机制等方面存在显著差异,上述滑坡易发性评价所积累的经验并不能完全适用赣南地区滑坡易发性评价,仍需在指标体系、评价模型等方面进一步探索。

彭珂等^[10]指出赣州市地质灾害的发生与该区地形地貌、地层岩性、岩土体类型及人类工程活动呈正相关关系。通过现场调查,人工切坡和降雨是赣南地区滑坡灾害最主要的诱发因素,赣南于都县银坑镇多以修路切坡为主^[11]。目前开展的易发性评价对小型削方滑坡的指标多以距道路距离^[12]表征,部分学者尝试采用道路空间密度^[13]表征,对于小型削方滑坡的表征指标仍需进一步探索。

目前,滑坡易发性评价模型主要分为知识驱动、数据驱动和机制驱动模型三大类。在目前易发性评价中数据驱动模型应用最为广泛,常见的数据驱动模型包括随机森林^[13]、信息量(I)^[14]、支持向量机(SVM)^[4]、逻辑回归(LR)^[15]、人工神经网络(ANN)^[16]、决策树(DT)^[5]、确定性系数法(CF)^[17]等。这些模型在水库型、地震型和降雨型滑坡易发性评价中应用较为成熟,而对于赣南地区小型削方滑坡易发性的适用性,仍需进一步探索。

文中以赣州市于都县银坑镇为例,根据野外地质调查成果,利用地理探测器构建易发性评价指标体系,选取信息量、人工神经网络、决策树和逻辑回归模型开展易发性评价,并对模型精度进行验证以分析赣南地区小型削方滑坡易发性评价模型的适用性。

1 研究区概况

银坑镇位于江西省赣州市于都县北部,属典型的亚热带季风湿润气候,雨量充沛、四季分明。降雨量多集中于 3—6 月,约占全年降水的 55.4%。区内多为山地与丘陵,岗地与平原较少,强风化岩浆岩、变质岩广泛分布,复杂的地质环境条件极易产生地质灾害。常见地质灾害类型主要为崩塌、滑坡、泥石流等,主要发生在 5—8 月,尤其是 6 月,与当地雨季吻合,并存在滞后性。

根据现场调查,区内共有 164 处滑坡灾害点(图 1),滑坡点体积分布为 38.5 ~ 3 045.0 m³,小于 1 000 m³ 的滑坡占 80% 以上,多数为土质滑坡,极少数为岩质滑坡。滑坡主要集中于研究区南部,多发生在屋后和道路旁,这主要是由建房和修路切坡导致的,其中修路切坡诱发的滑坡占比较大,人工切坡一般会形成 3 ~ 5 m 的陡坡,且鲜有护面或排水措施,在降雨作用下极易形成滑坡。

2 滑坡易发性评价方法

2.1 信息量模型(I)

信息量模型是基于信息论的一种统计方法,通过熵的变化来体现易发性程度^[18]。信息量模型考虑了各评价因子之间的相关性,适用于不同比例尺的易发性评价中。该模型是以信息论为理论基础,其基本观点为将已有地质灾害影响指标分类并转化为影响大小的信息量

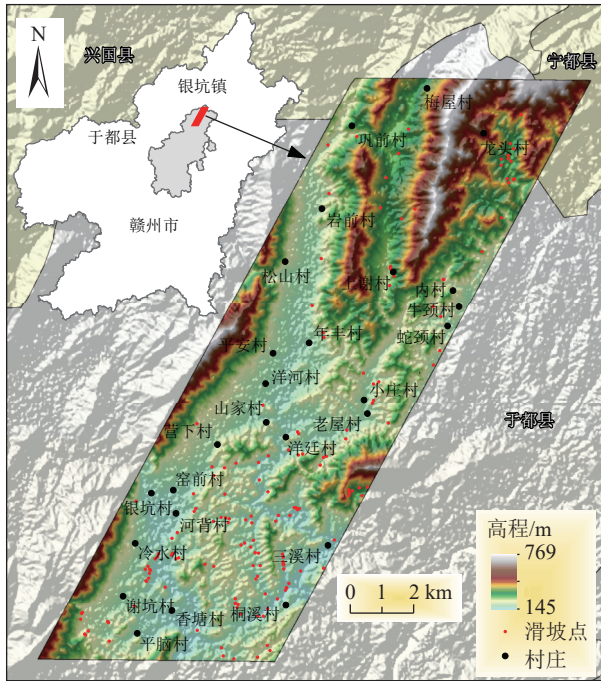


图1 银坑镇地理位置以及滑坡点分布图

Fig. 1 The distribution of landslides and location of Yinkeng Town, Yudu County

值,进而利用信息量的值来评价各指标与研究对象的相关程度,信息量值越大,则代表越有可能引发滑坡等地质灾害,其计算公式为:

$$I(Y, x_1, x_2, \dots, x_n) = \ln \frac{P(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)}{P(Y)} \quad (1)$$

式中: $I(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ ——各影响指标的信息量值;

$P(Y, x_1, x_2, \dots, x_n)$ ——各影响指标组合条件下滑坡等地质灾害发生的概率;

$P(Y)$ ——滑坡灾害发生概率。

通常情况下,影响滑坡等地质灾害的指标种类较多,相对应各指标的组合状态也比较多,而通常样本统计的数量会受到限制,故一般情况下可先对每个单因素指标信息量模型进行分步计算,再进行综合叠加分析,其对应的信息量模型为:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \ln \frac{S_0^i / S_i^i}{A_0 / A} \quad (2)$$

式中: I ——研究区域某指标 x 信息量值;

I_i ——研究区域某指标 x_i 信息量值;

S^i ——指标 x_i 所占单元总面积;

S_0^i ——因素 x_i 单元中发生滑坡灾害的单元面积之和;

A ——区域内单元总面积;

A_0 ——已经发生滑坡灾害的单元面积之和。

2.2 人工神经网络模型(ANN)

人工神经网络模型是进行分布并行信息处理的一种算法数学模型。通过其自学习和训练,建立输入因子与输出结果的关系,该模型通常用于非线性回归和分类问题^[19]。而其中的BP神经网络最具有普遍性和代表性,其结构分为输入层、隐藏层和输出层,其中输入层为影响因子,隐藏层为问题复杂性程度,输出层为结果^[20]。

2.3 决策树模型(DT)

决策树是在已知情况发生概率的基础上,通过求取净现值的期望值大于等于零的概率,来评价项目可行性的一种分析方法。文中采用ID3算法,该算法通过熵来度量信息的不确定度^[21]。在信息论中,熵叫做信息量,是来衡量变量的不确定性的,其表达式为:

$$Entropy(S) = - \sum_{i=1}^c p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

式中: c ——划分的类别总数;

p_i ——各个分类的概率。

2.4 逻辑回归模型(LR)

逻辑回归是一种概率与统计模型,在易发性研究中,将影响灾害发生的因子作为自变量,灾害是否发生(0为不发生,1为发生)作为二值因变量^[15, 22]。逻辑回归的表达式为:

$$\text{Logit}(P) = \ln \left(\frac{P}{1-P} \right) = \omega_0 + \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n \quad (4)$$

式中: $\text{Logit}(P)$ ——指 $\ln \left(\frac{P}{1-P} \right)$ 为 P 做的 Logit 变化;

P ——滑坡发生的概率;

$1-P$ ——滑坡不发生的概率;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——各影响因子的值;

$\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_n$ ——回归系数。

3 数据分析

3.1 评价单元

评价单元是易发性评价的最小单元,其选取的依据很大程度上受滑坡的空间尺度、评价范围和资料详细程度的影响,文中采用栅格单元来进行易发性评价,与其他评价单元相比在处理大量空间数据叠加显示上显得更加便捷。另外,考虑到研究区内滑坡规模较小,栅格分辨率选用 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,研究区共分为 5 518 864 个栅格单元。

3.2 评价指标的选取

指标体系的构建对滑坡易发性评价结果的合理性起着决定作用^[23]。通过野外地质调查及滑坡灾害与各评价指标的相关性统计分析,从地形地貌、地层岩性、地质构造、植被条件等方面初步筛选评价指标,再利用

地理探测器对上述指标进行贡献排序,从而构建滑坡易发性指标体系。

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[24]。其核心思想是若某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性。地理探测器具有两大独特优势,一是可以探测数值型数据和定性数据,二是探测两因子交互作用于因变量。地理探测器通过分别计算和比较各单因子 q 值及两因子叠加后的 q 值,可以判断两因子是否存在交互作用,以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性等。文中利用地理探测器的因子探测器探测定量(如坡度)和定性(如岩组)数据,并根据分异探测器判断两因子的交互作用,从而构建易发性评价指标体系。

指标 X 对于其属性 Y 的空间分异表达式 q 如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^n N_h \sigma_h^2 = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^n N_h \sigma_h^2, SST = N\sigma^2 \quad (6)$$

式中: q ——反映空间分异程度, $q \in [0, 1]$;

h ——变量 Y 或指标 X 的分层, $h = 1, 2, \dots, n$;

N_h 、 N ——层 h 和全区 Y 的单元数;

σ_h^2 、 σ^2 ——层 h 和全区 Y 值的方差;

SSW 、 SST ——层内方差之和和全区总方差。

q 值是指 X 对 Y 发生的贡献值,也可将其视为权重值。 q 值越大,表示指标空间分异性越明显,自变量指标 X 对于属性 Y 的解释能力越强,反之则越弱。

根据《赣州市地质灾害防治规划(2012—2020)研究报告》及野外地质调查分析,地形地貌选择了坡度、坡向、高程变异系数、地表切割深度、曲率等因子;地质条件考虑了岩组、坡体结构、距断层距离等因子;植被条件选择了植被覆盖率这一因子;人类工程活动,主要考虑研究区修路切坡是滑坡灾害最主要的诱发因素,因此根据常规表征方法,选择了距道路距离这一指标进行表征。

采用地理探测器的因子探测器计算出上述 11 个评价指标的 q 值(表 1),从表中可知,坡度、坡体结构、岩组、距道路距离、距断层距离、植被覆盖率等 6 个指标对滑坡的贡献占 95% 以上,所以选其作为易发性评价指标。

表 1 地理探测器得到 11 个指标的 q 值

Table 1 The normalized weight values of 11 indicators

指标	距道路距离	岩组	坡体结构	坡度	距断层距离	植被覆盖率	坡向	高程变异系数	粗糙度	曲率	地表切割深度
q 值	0.289 7	0.276 7	0.120 3	0.110 2	0.080 7	0.072 7	0.015 2	0.012 2	0.012 0	0.009 2	0.001 1
排序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

3.3 评价指标的分析

(1)坡度:文中以 1:1 万等高线为基础生成高程 TIN 模型,然后利用 TIN 转栅格工具以 5 m×5 m 为单位生成最终的 DEM 模型,最后通过自然间断点分级法将坡度分为 5 类:①0°~7°;②7°~17°;③17°~26°;④26°~36°;⑤>36°。通过坡度与灾害点叠加图见图 2(a),可以看出滑坡大多发生在 7°~17°和 17°~26°区间内,这与人们在此切坡建房和修路密切相关。

(2)坡体结构:文中以等高线图和地层产状图绘制坡体结构,将其划分为 4 类:①岩质-斜向坡;②岩质-逆向坡;③岩质-顺向坡;④碎石土质边坡。通过坡体结构与灾害点的叠加图见图 2(b),可以看出滑坡大多处于岩质-顺向坡和岩质-斜向坡这两个分类当中,这与滑坡的发育分布规律较吻合。

(3)岩组:通过研究区域的地质图和结合灾害分布规律,将岩性划分为 8 类:①坚硬花岗岩组;②软硬相间岩组(砾岩、粉砂岩);③坚硬岩组(石英砾岩、砂砾岩

等);④较软-较硬岩组(石英砾岩、泥岩等);⑤较硬-较软岩组(粉砂岩、页岩等);⑥较坚硬岩组(砾岩、安山岩);⑦较硬-坚硬岩组(变质砂岩、变质粉砂岩等);⑧多层含砾黏土、粉质黏土。通过岩组和灾害点的叠加图见图 2(c),分析可知较坚硬-坚硬的变质砂岩、变质粉砂岩等岩组中滑坡点较多。

(4)距道路距离:在研究区内以 50, 100, 200, 500, 大于 500 m 划分缓冲区,得出切坡修路对于研究区域的影响区域。通过道路与滑坡点的叠加图见图 2(d),分析可知灾害点与道路重合度很高。

(5)距断层距离:在研究区域内以 100, 200, 300, 400, 500, 大于 500 m 划分缓冲区,得出断层的影响区域。通过断层与滑坡点的叠加图见图 2(e),分析可知灾害点与断层重合度较高。

(6)植被覆盖率:通过遥感数据,并运用 ENVI 软件获取归一化植被指数(NDVI),最终在 GIS 软件中通过自然断点法将形成的栅格文件划分为 6 类。通过植被

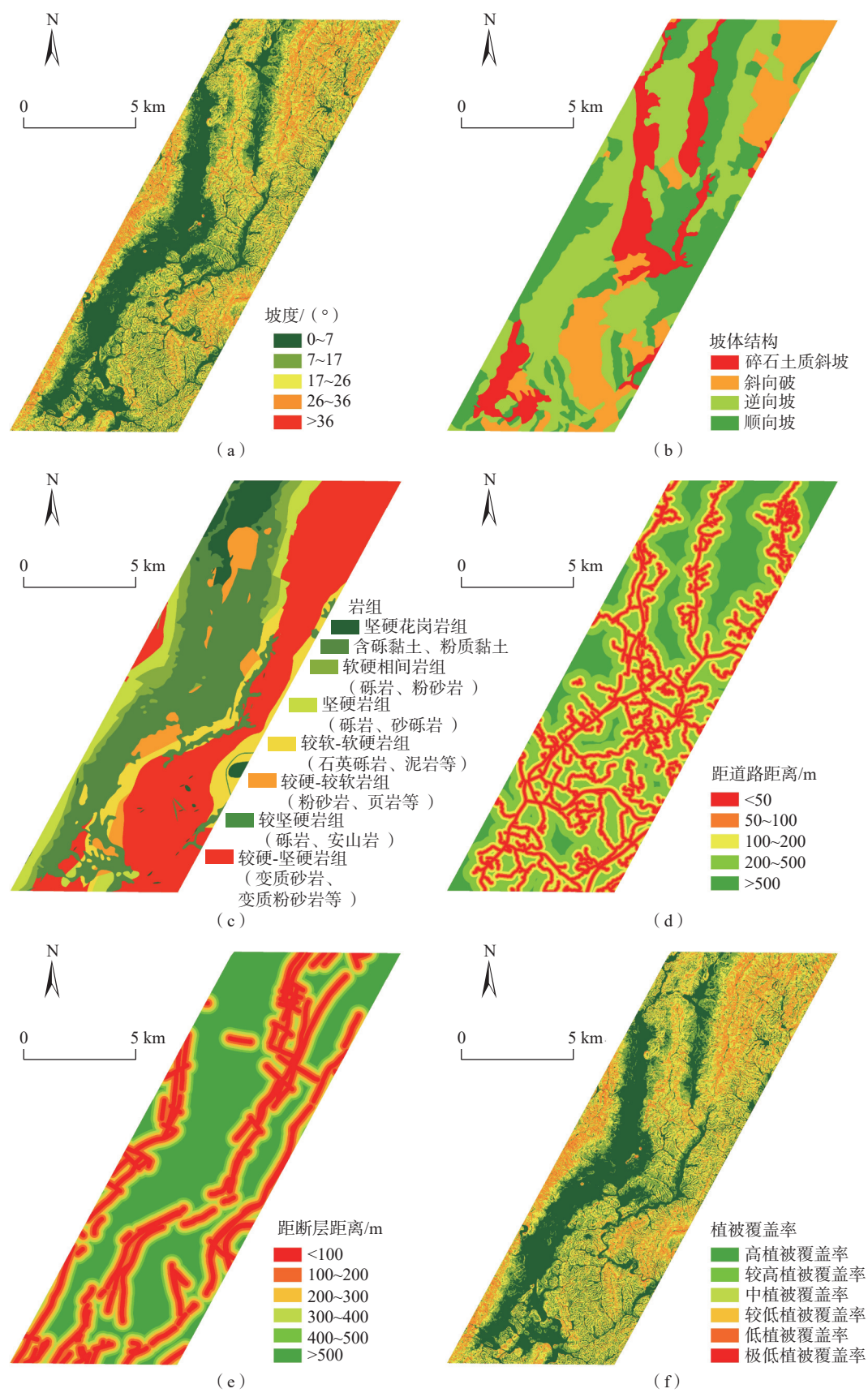


图2 易发性评价指标图

Fig. 2 The susceptibility evaluation index chart

与灾害点的叠加图见图 2(f), 分析可知灾害点大多集中在植被覆盖率较低、低和极低区域。

3.4 结果计算

信息量模型利用信息量法计算式(2), 以银坑镇地质灾害野外调查数据为基础, 对 6 个评价指标的信息量值进行计算, 计算结果如表 2 所示。

表 2 评价指标各自信息量值
Table 2 Each information value of evaluation index

评价指标	评价指标子类	信息量值
坡度/(°)	0 ~ 7	-0.439
	7 ~ 17	0.186
	17 ~ 26	0.304
	26 ~ 36	-0.268
	>36	0
坡体结构	碎石土质边坡	-0.115
	岩质-顺向坡	0.145
	岩质-逆向坡	-0.147
	岩质-斜向破	0.147
工程地质岩组	多层含砾黏土、粉质黏土	-0.458
	较坚硬-坚硬的变质砂岩、变质粉砂岩、千枚岩等组	0.140
	坚硬花岗岩组	0.508
	较坚硬的波状复成份砾岩、安山岩岩组	2.457
	较硬、较软的砾岩、粉砂岩、页岩等组	-0.942
	较软弱-较坚硬石英砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩等组	0.888
	坚硬石英砾岩、砂砾岩、粉砂岩等组	-1.974
	软硬相间的砾岩、粉砂岩夹煤层	-0.060
距断层距离/m	<100	0.395
	100 ~ 200	0.237
	200 ~ 300	0.461
	300 ~ 400	-0.093
	400 ~ 500	-0.078
	>500	-0.058
距道路距离/m	<50	-0.076
	50 ~ 100	0.772
	100 ~ 200	1.076
	200 ~ 500	1.109
	>500	-0.508
植被	高植被覆盖率	-0.412
	较高植被覆盖率	-0.168
	中植被覆盖率	-0.313
	较低植被覆盖率	0.007
	低植被覆盖率	-0.206
	极低植被覆盖率	0.161

通过对各评价指标各自的信息量值和权重值进行分析可以得知距道路距离和工程地质岩组两个指标对滑坡发生的影响较大, 坡度和坡体结构次之, 植被和断层影响相对较小。

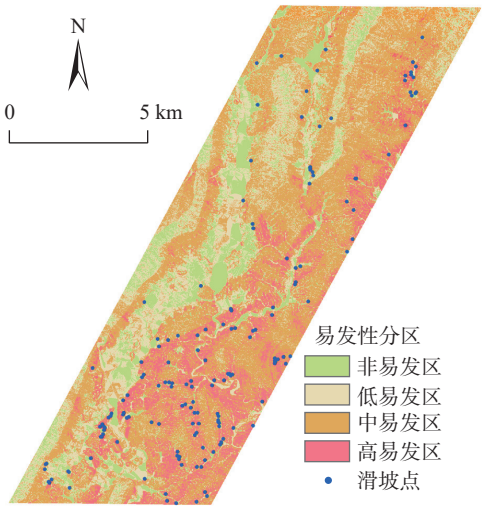
4 滑坡易发性评价

4.1 易发性分区对比

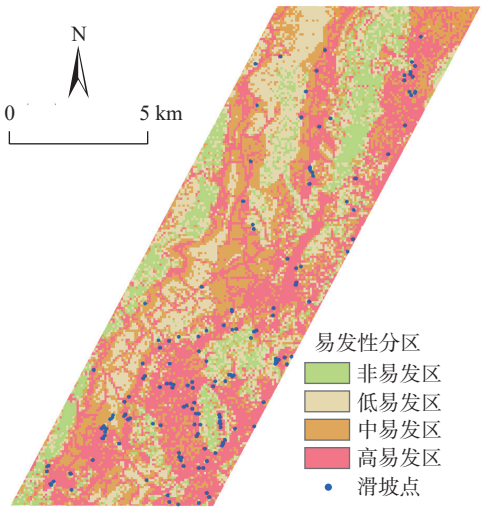
基于 ArcGIS 平台, 利用栅格计算功能, 对于各评价指标按各指标归一化的权重值进行叠加, 得到易发性分布图, 参考自然资源部中国地质调查局编制的《地质灾害风险调查评价编图技术要求(1 : 50 000)(试行)》, 根据自然断点法将易发性分布图划分为高、中、低和非易发区四级(图 3)。

4.2 评价结果对比

根据图 3 可以看出: 高易发区主要分布于河背村、谢坑村、三溪村、小庄村、老屋村和龙头村等地区; 中易发区主要分布于梅屋村、上谢村和年丰村等地区; 低易发区主要分布岩前村、松山村、杨河村和窑前村等地区。人工神经网络模型和逻辑回归模型的高易发区主要集中在道路两侧。滑坡点在各个分区所占比例见表 3。



(a) 信息量 (I)



(b) 人工神经网络 (ANN)

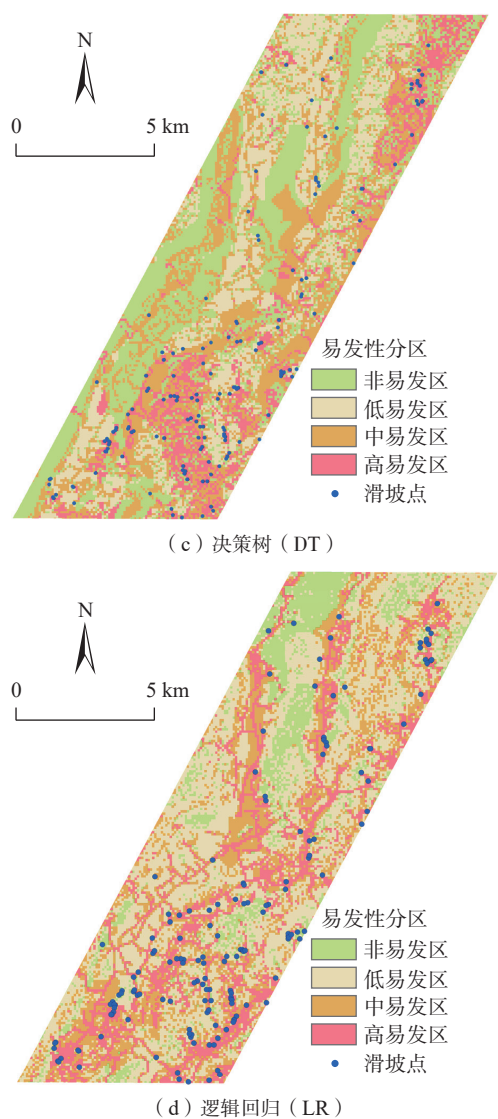


图 3 不同模型下易发性分区图

Fig. 3 Susceptibility partition chart under different models

表 3 滑坡点在各个分区所占比例

易发性分区	灾害点在各个分区所占比例/%			
	I	ANN	DT	LR
非	5.6	6.5	16.5	18.6
低	16.8	16.6	23.4	20.8
中	59.2	48.1	41.1	38.9
高	18.4	28.8	19.0	21.7

从表 3 可以看出,各模型得到高、中易发性面积占比分别为 77.6%、76.9%、60.1% 和 60.6%。其中信息量模型高、中易发性面积占比最高,且从图 3 可以看出,滑坡点基本分布在高、中易发性区。

4.3 精度对比

ROC 曲线在易发性评价精度检测中被广泛应用,

横坐标为假阳性率(1-特异性),纵坐标为真阳性率(即敏感性)。ROC 曲线下的面积即 AUC 值, AUC 评价指标值越大,则代表模型分类结果的准确性越高。银坑镇滑坡易发性评价结果 ROC 曲线见图 4,图中信息量模型的 AUC 值为 0.800,而其他三个模型的 AUC 值分别为 0.708、0.672 和 0.586,说明信息量模型具有较高的精度和可靠性。

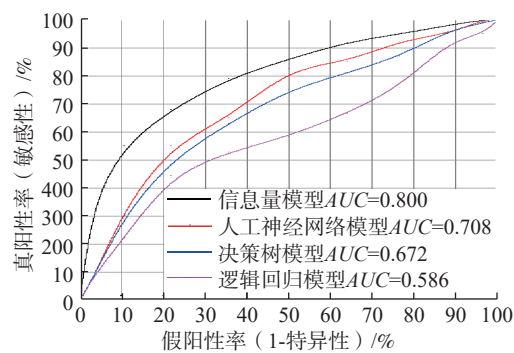


图 4 各个模型准确率曲线图

Fig. 4 The accuracy curve of each model

5 结论

(1)开展赣南地区小型削方滑坡易发性评价时,信息量模型较人工神经网络模型、决策树模型和逻辑回归模型准确率更高,适用性较强。

(2)于都县银坑镇高易发区主要分布于河背村、谢坑村、三溪村、小庄村、老屋村和龙头村等地区;中易发区主要分布于梅屋村、上谢村和年丰村等地区;低易发区和较低易发区主要分布岩前村、松山村、杨河村和窑前村等地区。

参考文献(References):

[1] 郭子正,殷坤龙,黄发明,等.基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2019,38(2):287-300. [GUO Zizheng, YIN Kunlong, HUANG Faming, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on landslide classification and weighted frequency ratio model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 287-300. (in Chinese with English abstract)]

[2] 周超,殷坤龙,曹颖,等.基于集成学习与径向基神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J].地球科学,2020,45(6):1865-1876. [ZHOU Chao, YIN Kunlong, CAO Ying, et al. Landslide susceptibility assessment by applying the coupling method of radial basis neural network and adaboost: A case study from the Three Gorges Reservoir area[J]. Earth

- Science, 2020, 45(6): 1865–1876. (in Chinese with English abstract)]
- [3] CHEN T, ZHU L, NIU R Q, et al. Mapping landslide susceptibility at the Three Gorges Reservoir, China, using gradient boosting decision tree, random forest and information value models [J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(03): 670–685.
- [4] 郭天颂, 张菊清, 韩煜, 等. 基于粒子群优化支持向量机的延长县滑坡易发性评价 [J]. *地质科技情报*, 2019, 38(3): 236–243. [GUO Tiansong, ZHANG Juqing, HAN Yu, et al. Evaluation of landslide susceptibility in Yanchang County based on particle swarm optimization-based support vector machine [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(3): 236–243. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 邱维蓉, 吴帮玉, 潘学树, 等. 几种聚类优化的机器学习方法在灵台县滑坡易发性评价中的应用 [J]. *西北地质*, 2020, 53(1): 222–233. [QIU Weirong, WU Bangyu, PAN Xueshu, et al. Application of several cluster-optimization-based machine learning methods in evaluation of landslide susceptibility in Lingtai County [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(1): 222–233. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘永垚, 第宝锋, 詹宇, 等. 基于随机森林模型的泥石流易发性评价: 以汶川地震重灾区为例 [J]. *山地学报*, 2018, 36(5): 765–773. [LIU Yongyao, DI Baofeng, ZHAN Yu, et al. Debris flows susceptibility assessment in Wenchuan earthquake areas based on random forest algorithm model [J]. *Mountain Research*, 2018, 36(5): 765–773. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究 [J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4): 1151–1164. [DAI Lanxin, XU Qiang, FAN Xuanmei, et al. A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jiuzhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1151–1164. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 胡凯衡, 陈成, 李秀珍, 等. 地震区降雨作用下泥石流易发性动态评估 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(2): 1–8. [HU Kaiheng, CHEN Cheng, LI Xiuzhen, et al. Dynamic assessment of debris-flow susceptibility under the influence of earthquake and rainfall events [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(2): 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 冯杭建, 周爱国, 俞剑君, 等. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比 [J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 403–415. [FENG Hangjian, ZHOU Aiguo, YU Jianjun, et al. A comparative study on plum-rain-triggered landslide susceptibility assessment models in West Zhejiang Province [J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 403–415. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 彭珂, 彭红霞, 梁峰, 等. 赣州市地质灾害分布特征及孕灾环境分析 [J]. *安全与环境工程*, 2017, 24(1): 33–39. [PENG Ke, PENG Hongxia, LIANG Feng, et al. Distribution characteristics and development environment of geological disasters in Ganzhou City [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, 24(1): 33–39. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王力, 李高, 陈勇, 等. 赣南地区人工切坡降雨致灾机制现场模型试验 [J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 846–854. [WANG Li, LI Gao, CHEN Yong, et al. Field model test on failure mechanism of artificial cut-slope rainfall in Southern Jiangxi [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 846–854. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘婷, 谭建民, 郭飞, 等. 人工切坡下滑坡易发性评价中权重修正方法研究——以赣州市沙地镇为例 [J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(5): 217–225. [LIU Ting, TAN Jianmin, GUO Fei, et al. Research on the method of weight correction for landslide susceptibility with artificial cutting slope: A case study of Shadi Town, Ganzhou City [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(5): 217–225. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 黄发明, 李金凤, 王俊宇, 等. 考虑线状环境因子适宜性和不同机器学习模型的滑坡易发性预测建模规律 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41(2): 44–59. [HUANG Faming, LI Jinfeng, WANG Junyu, et al. Modelling rules of landslide susceptibility prediction considering the suitability of linear environmental factors and different machine learning models [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 44–59. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王雷, 吴君平, 赵冰雪, 等. 基于GIS和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(3): 96–103. [WANG Lei, WU Junping, ZHAO Bingxue, et al. Susceptibility assessment of geohazards in Chizhou City of Anhui Province based on GIS and informative model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 96–103. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 任敬, 范宣梅, 赵程, 等. 贵州省都匀市滑坡易发性评价研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 165–172. [REN Jing, FAN Xuanmei, ZHAO Cheng, et al. Evaluation of the landslide vulnerability in Duyun of Guizhou Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 165–172. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 孙长明, 马润勇, 尚合欣, 等. 基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 173–181. [SUN Changming, MA Runyong, SHANG Hexin, et al.

- Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 173–181. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李姗姗, 谭光超, 柳晓晨, 等. 基于加权信息量法的枣阳市地质灾害易发性分区评价研究 [J]. *资源环境与工程*, 2018, 32(4): 635–641. [LI Shanshan, TAN Guangchao, LIU Xiaochen, et al. Geological hazards susceptibility assessment based on weighted information method [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, 32(4): 635–641. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(2): 340–347. [FAN Zhiyin, GOU Xiaofeng, QIN Mingyue, et al. Information and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 340–347. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 涂婧, 刘长宪, 姜超, 等. 湖北武汉岩溶塌陷易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 94–99. [TU Jing, LIU Changxian, JIANG Chao, et al. Susceptibility assessment of karst collapse in Wuhan City [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 94–99. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 许冲, 徐锡伟. 基于 GIS 与 ANN 模型的地震滑坡易发性区划 [J]. *地质科技情报*, 2012, 31(3): 116–121. [XU Chong, XU Xiwei. GIS and ANN model for earthquake triggered landslides susceptibility zonation [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(3): 116–121. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 唐斌. ID3 算法在地质灾害易发性评价中的应用——以延安市为例 [D]. 西安: 长安大学, 2013. [TANG Bin. ID3 Algorithm in geological disaster susceptibility evaluation: Case of the Yan'an [D]. Xi'an: Changan University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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)]
- [23] YANG J T, SONG C, YANG Y, et al. New method for landslide susceptibility mapping supported by spatial logistic regression and GeoDetector: A case study of Duwen Highway Basin, Sichuan Province, China [J]. *Geomorphology*, 2019, 324: 62–71.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134. [WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134. (in Chinese with English abstract)]