

张云,资锋,罗伟奇,等. 基于 ArcGIS 与加权信息量模型的通道侗族自治县地质灾害危险性评价[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(4):29-39. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.04.004

ZHANG Y, ZI F, LUO W Q, et al. Geological Hazard Assessment of the Tongdao County Based on ArcGIS and the Improved Weighted Information Value Model[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(4):29-39. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.04.004

基于 ArcGIS 与加权信息量模型的通道侗族自治县地质灾害危险性评价

张云^{1,2,3}, 资锋^{1,2}, 罗伟奇^{2*}, 高俊华², 韩用顺¹, 周小飞⁴, 唐龙¹

(1.湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南省自然资源事务中心 洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室,湖南 长沙 410007;

3.四川省地质工程勘察院集团有限公司,四川 成都 610072;

4.湖南省核地质调查所,湖南 长沙 410114)

摘要:以通道侗族自治县为研究区,对地质灾害发育和分布特征进行定量化的分析.选取高程、坡度、坡向、工程地质岩组、与断层、道路、河流三者的距离以及年平均降雨量等8个因素作为地质灾害的环境变量,利用信息量模型(I)和层次分析模型(AHP)改进后的加权信息量模型(WIV)对研究区地质灾害进行危险性评价;利用改进后的灾害分区方法将研究区划分为极高、高、中、低、极低5个风险等级;引入灾积比和受试者操作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线对评价结果进行检验.研究表明:(1)改进后的灾害分区方法相较于自然断点法、分位法、几何间隔法等分区效果更优秀,标准误差更小;(2)改进后的加权信息量模型、层次分析模型、信息量模型的 AUC 值分别为 0.903, 0.848, 0.842, 表明改进后的加权信息量模型预测效果达到优秀,相比单一的评价模型精度更高;(3)研究区内高危险区、极高危险区占研究区总面积的 15.58%, 灾害点占比为 83.77%, 灾积比为 14.32, 说明分区合理, 研究结果适用于县域尺度地质灾害危险性评价, 将为该地区地质灾害的预测与防治提供更加有效的方法.

关键词:怀化通道;地质灾害;危险性评价;信息量模型;层次分析模型;加权信息量模型

中图分类号:P694; X43

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)01-0029-11

Geological Hazard Assessment of the Tongdao County Based on ArcGIS and the Improved Weighted Information Value Model

ZHANG Yun^{1,2,3}, ZI Feng^{1,2}, LUO Weiqi², GAO Junhua², HAN Yongshun¹, ZHOU Xiaofei⁴, TANG Long¹

(1.School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Ecological Environment in Dongting Lake Area,

Hunan Center of Natural Resources Affairs, Changsha 410007, China;

3. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd, Chengdu 610072, China;

4. Nuclear Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: The development and distribution characteristics of geological hazards are quantified and analyzed using the channel county as the study area. The eight factors, such as elevation, slope, aspect, engineering

收稿日期:2023-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41002022);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4295);湖南省自然资源厅科研项目资助(HBZZ20240108);大学生创新训练项目资助(S2024105340108)

* 通信作者, E-mail: WQLUOSWZX@163.com

geological rock group, distance to faults, roads and rivers, and average annual rainfall are selected as environmental variables of geological hazards, and the hazard assessment of geological hazards in the study area is carried out by using the weighted information value model (WIV) improved by the information value model (I) and analysis hierarchy process (AHP) model. The improved hazard zoning method is used to classify the study area into five risk classes, i.e. very high, high, medium, low and very low. The disaster product ratio and ROC curve are introduced to test the evaluation results. The results show that firstly, the improved disaster zoning method has better zoning effect and smaller standard error compared with natural breakpoint method, partition method and geometric interval method; secondly, the AUC values of the improved weighted information value model, analysis hierarchical process model and information value model are 0.903, 0.848, 0.842, respectively, indicating that the improved weighted information value model achieves excellent prediction effect and Compared with the single evaluation model, the accuracy is higher, and thirdly the high hazard area and very high hazard area in the study area account for 15.58% of the total area of the study area, the disaster point ratio is 83.77%, and the disaster product ratio is 14.32, indicating that the zoning is reasonable, and the results are applicable to the county-scale geological hazard assessment. The research results has provided a more effective method for the prediction and prevention of geological hazards in the area.

Keywords: Tongdao County of Huaihua City; geological hazards; hazard assessment; information value model; analytic hierarchy process model; weighted information value model

地质灾害危险性是一定时间段内地质灾害发生的可能性,是一个综合性概念^[1].地质灾害危险性评价主要是对地质灾害破坏程度进行分析研究^[2],是地质灾害风险评价的基础.基于建模的地质灾害评价是查明与地质灾害有关危险区域的有效途径之一^[3].对于地质灾害危险性评价,国内外学者对小比例尺、大范围的区域已进行了大量的研究并取得了丰硕的成果^[4-5].然而,针对大比例尺的地质灾害调查研究较少,因此,对于县域地质灾害日趋严重的情况,亟须开展相应的地质灾害危险性评价研究^[6].

目前,危险性评价的方法有很多,常采用的评价模型包括:信息量模型^[7]、层次分析法^[8]、随机森林模型^[9]、逻辑回归模型^[10]、频率比模型^[11]、人工神经网络模型^[12]等.近年来,由于各种评价模型自身局限性以及影响地质灾害危险性评价的因素众多难以精准量化,国内外学者已经对多种模型进行组合探讨,以选取适合研究区的最优评价模型,其中信息量模型因其易于操作、客观性较高等优点,被广泛应用于地质灾害危险性评价中.如易靖松等^[13]基于信息量模型和层次分析法对高山峡谷地区进行了地质灾害危险性评价研究;熊俊楠等^[14]以溪洛渡库区为研究区域,采用信息模型和层次分析法对研究区进行滑坡危险性评价;缪信等^[15]以黄登水电站库区为研究对象,基于信息量模型和逻辑回归模型对研究区进行了地质灾害危险性评价模型的比较分析与应用研究;齐识等^[16]将 GIS 技术分别与信息量模型和贡献权模型结合,以甘肃武都区为研究区进行地质灾害危险性评价研究.以往研究表明,使用信息量模型和层次分析法进行地质灾害危险性评价较理想,应用较普遍.但是这 2 种模型也有一定的局限性,信息量模型可诠释评价因子对危险性评价影响的敏感程度,但容易忽略各评价因子对危险性评价的差异性,而层次分析法能够确定不同因子对危险性评价的权重大小,但不能准确解决不同因子对危险性评价影响的敏感程度问题^[17].因此,将信息量模型与层次分析法相结合,可以较好地解决评价模型指标权重分配的主观性问题,减少对专家主观经验的过分依赖.

据最新风险普查资料显示,研究区内地质灾害频发,共发育地质灾害 228 处,因地质灾害死亡 3 人,毁坏房屋 163 间,直接经济损失 551.5 万元,威胁居民 2 004 人,威胁房屋 1 624 间,威胁公路 12 440 m,潜在经济损失 9 115 万元,对人民的生命财产和赖以生存的环境造成了巨大的威胁.而前人对通道侗族自治县地质灾害风险评价方面的研究很少,通道侗族自治县作为湖南省地质灾害中高发区之一,有必要根据其孕灾条件进行危险性评价.以通道侗族自治县为研究区域,基于 ArcGIS 平台,在信息量模型的基础上采用层次分析模型得到加权信息量值,以加权信息量变化曲线的突变点为阈值进行风险分区,引入灾积比和 ROC 曲线对评价结果进行检验,探索适合研究区最有效、最精准的评价模型,为县域地质灾害危险性评价提供理论依据和技术支持.

1 研究区概况

通道侗族自治县隶属于湖南省怀化市(图1),地貌以中山、低山、丘陵为主,总面积约 2 224.11 km².总体呈现向中、向西北倾斜的地势.气候属于亚热带季风湿润气候.1998—2020 年通道侗族自治县平均年降水量 1 479.6 mm,年最大降水量 2 122.2 mm(2002 年),年最小降水量 1 029.4 mm(2011 年).通道侗族自治县境内出露地层,除缺失奥陶系、志留系、石炭系、二叠系、古近系和新近系外,自板溪群至第四系皆有出露,震旦系分布出露最广,板溪群、寒武系次之.县域内土体均属第四系.研究区内断裂构造主要为 NE 向断裂,其次是 NEE 向断裂.依其力学性质及组合关系,褶皱构造期次主要分为加里东期褶皱和燕山期褶皱.

2 数据与方法

2.1 评价模型

2.1.1 信息量模型

信息量模型是一种由信息论演变而来的统计预测方法,现多运用在滑坡、崩塌等地质灾害评价中,其理论基础是贝叶斯法则,该模型认为地质灾害的发生与预测过程中得到的各种信息的有效性密切相关^[18].它主要通过统计分析选取的各项评价指标的实际值,来得到总的信息量值^[19].所得到的信息量值越大,说明地质灾害越容易发生,反之亦然.计算公式如式(1)所示.

$$I_{x_i} = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S}. \quad (1)$$

式中: I_{x_i} 为总的信息量; n 为所选环境变量的个数; N 为区域内地质灾害总数; S 为区域内评价单元总面积; N_i 为分布在指标 x_i 中特定类别的地质灾害单元个数; S_i 为含有地质灾害的单元面积之和.

2.1.2 层次分析模型

层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 是由美国学者萨蒂在 20 世纪提出,它是一种半定性、多目标、多准则的决策方法,该方法基于矩阵对不同的因素进行成对比较,这为地质灾害危险性评价提供了一种易于理解的方法^[20].AHP 通过对因素进行层次顺序排列,比较 2 个因素的相对重要性,形成一个具有分数的相对比较矩阵,计算该矩阵的最大特征根和特征向量,对一致性指标进行检验后,得到各评价因子的权重^[21-22].

2.1.3 加权信息量模型

信息量模型是一种概率统计模型,考虑到实际情况下各评价因子影响的作用不同,因此通过信息量模型得到各评价因子的信息量值,在此基础上,考虑不同因素对地质灾害的影响,采用层次分析法对信息量值进行赋权^[23],其表达式如式(2)所示.

$$I = \sum_{i=1}^n W_i I_i = \sum_{i=1}^n W_i \ln \frac{N_i/S_i}{N/S}. \quad (2)$$

式中: I 为区域内所选单元的加权信息量值; W_i 为第 i 个因子的权重; I_i 为第 i 个评价因子的信息量值.

2.2 评价因子选取与处理

通道侗族自治县地质灾害数量发育较多的主要为滑坡、崩塌,其影响因素主要是人类工程活动和降雨,人类工程活动因素主要包括修路切坡、建房切坡、矿山开发等,通过综合前人的有关资料、专家的相关意见、资料收集的难易程度以及对研究区实地调查等方面,选用高程,坡向,坡度,工程地质岩组,与断层、水系、道路三者的距离,以及年平均降雨量这 8 个影响因素作为评价因子,创建通道侗族自治县地质灾害

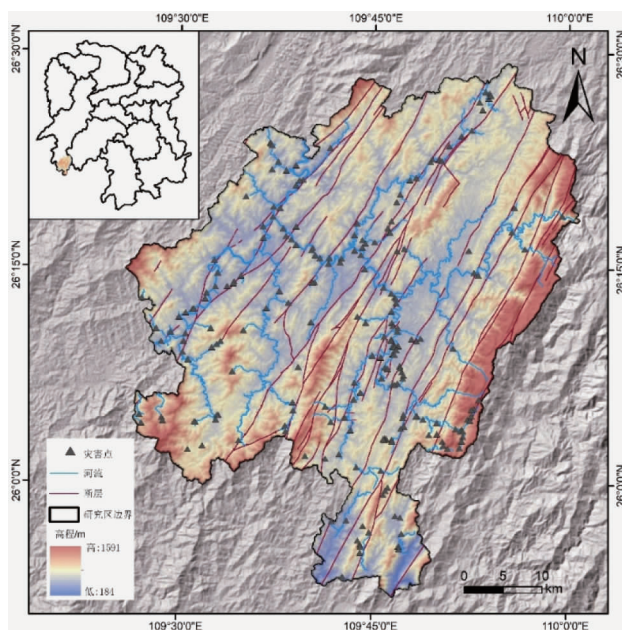


图1 研究区位置

单因子评价图层(如图 2).评价图层以通道侗族自治县 1:50 000 地质灾害详查地质图和 90 m 空间分辨率的 DEM 高程图为起点.在 ArcGIS 中,对选定的 8 个评价因子进行统计分析和地质灾害点的投影.在 ArcGIS 中通过处理 DEM 高程图得到高程、坡向、坡度图层;在地质图中获得工程地质岩组、地质构造、水系、道路图层;在 ArcGIS 中通过克里金法得到降雨量图层.为了统计分析各评价因子对灾害点分布的影响情况,对各单因子评价图层进行区间划分^[24].具体划分如下:对高程大致按每 0.2 km 划分 5 个区间,对坡向按每 45°划分 8 个区间,对坡度大致按每 5°划分 5 个区间,对地层构造大致按每 0.5 km 划分 5 个缓冲区,对道路、水系按每 0.1 km 划分 5 个缓冲区,对岩组大致按照种类不同划分 8 个单元,对降雨量按照自然断点法划分为 5 个区间.在 ArcGIS 中利用空间分析功能,统计各评价因子在不同区间灾害点的分布情况.

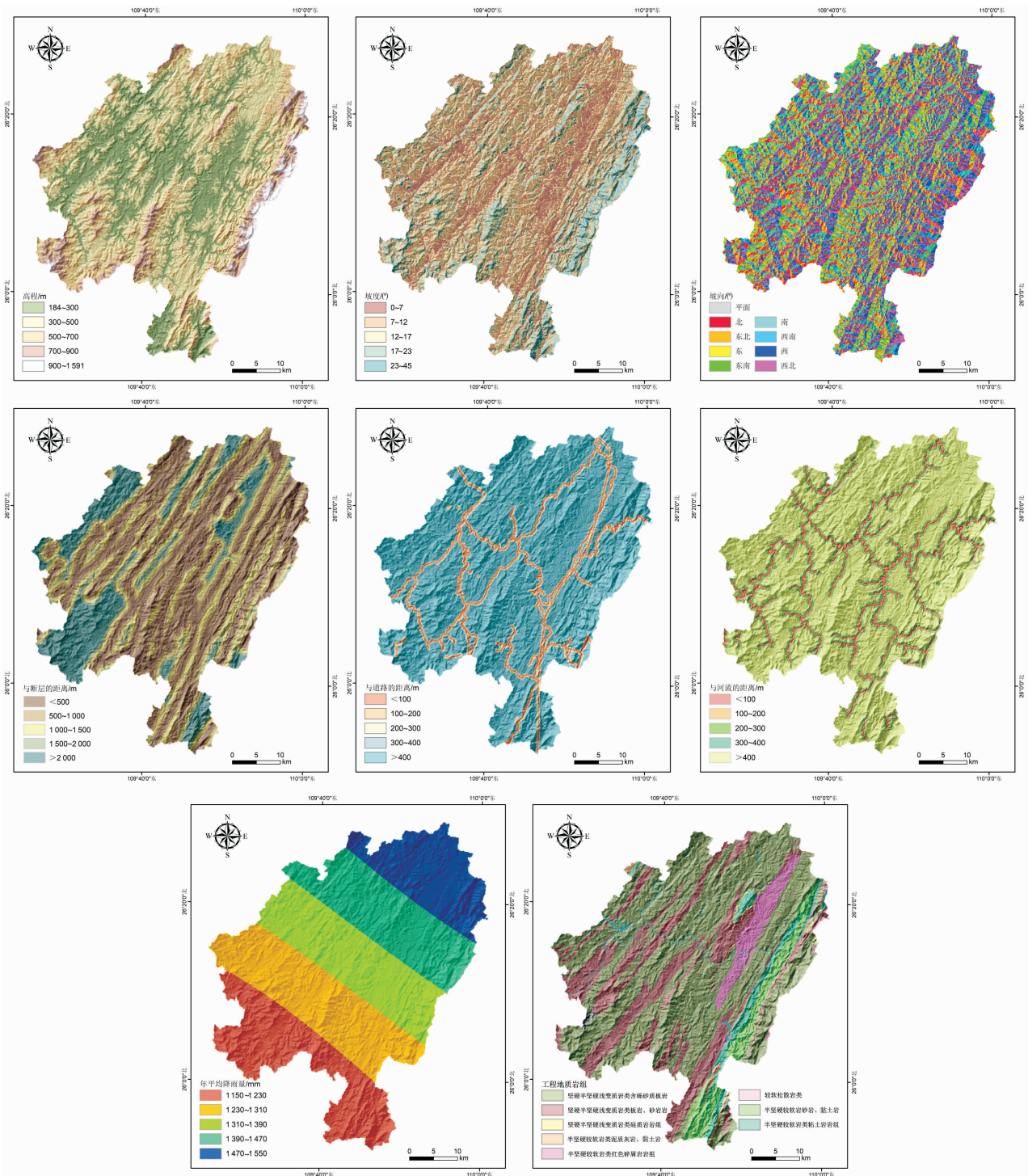


图 2 地质灾害评价因子图层

2.3 评价因子分析

2.3.1 高程

高程对地质灾害的发生有一定控制作用,可通过影响其他因素来间接影响地质灾害的空间分布^[25],从结果可以看出,灾害点大多发育在高程为 300~500 m 处,大于 500 m 以后,随着人类活动的减少,地质灾害数量也越少。

2.3.2 坡度

坡度能直观地表达该地区地表的起伏度,并且能在一定程度上影响坡体的应力分布、松散物质的堆积以及降雨过程中地表径流的形成^[26],从结果上来看,地质灾害主要发生在坡度为 0°~23°处,共发育 216 处,占灾害点总数的 94.74%。

2.3.3 坡向

坡向是影响研究区地质灾害分布的重要因素,坡向的不同导致光照时间、光照强度有所差异,影响着生长的植被类型及其覆盖度,进而决定该地区的侵蚀程度。从结果可以看出,研究区内灾害点在朝东、朝北两个方向上分布最多,各分布了 47 处,均占灾害点总数的 20.61%,朝西方向分布最少,分布了 13 处,占灾害点总数的 5.70%。

2.3.4 断层

境内构造形迹较复杂,地层记录中反映出强烈构造不整合面。通常情况下,距离断层越近,地质灾害发生的可能性越大,从结果上也可以看出,距断层 500 m 内的区域,地质灾害分布最多,分布了 96 处,占灾害点总数的 42.11%,但随着距离的增加,灾害点发育的数量减少。

2.3.5 道路

道路因子主要反映人类工程活动造成的影响,道路工程等的开挖形成的高陡边坡,破坏了斜坡原始稳定性。研究区内地质灾害主要分布在几条主要干线,如 G209 国道、S243 省道、X085 县道。从结果可看出,距道路 200 m 内的区域灾害点分布较密集,共分布了 147 处灾害点,占总数的 64.47%。

2.3.6 河流

河流主要是通过水流的冲刷对河流两岸的斜坡进行侵蚀作用,进而形成临空面,导致地质灾害的发生。通道侗族自治县境内水系发育一般,境内水系主要分属于长江、珠江这 2 大水系。绝大多数的地质灾害分布在距河流 200 m 范围内,共发育 149 处灾害点,占总数 65.35%,而且呈现出离河流越远,地质灾害发育的数量有明显减少的态势。

2.3.7 工程地质岩组

工程地质岩组是地质灾害发生的内在关键因素,在一定的地震级别影响下,地质岩组的不同会导致它的震动幅值各不相同,因此发生地质灾害的难易程度也就不同^[27]。从结果可以看出,浅变质岩类含砾砂质板岩岩组和板岩、砂岩岩组分布的地质灾害点较多,共发育 130 处,占总数的 85.09%,其他种类发育的灾害点相对较少。

2.3.8 年平均降雨量

降雨是所选环境变量中地质灾害发生最关键的诱发因素,与前几个评价因子相比,降雨具有 2 个突出的特点:(1)不确定性,降雨强度具有明显的随机性,每天、每时都有差异,但同一地区的地层岩性、构造等因子都是基本不变的;(2)不同地形、地层结构下,相同降雨强度的影响作用也有所区别。

2.4 评价指标独立性检验

由于各环境变量之间存在一定的相关性,会对模型的建立产生影响。因此采用皮尔逊法对各评价指标进行综合分析,剔除相关性较大的因子,通过 ArcGIS 中波段集统计工具得到相关系数矩阵,由表 1 可知:所选评价因子都处于低度相关和不相关范围,表明评价因子之间相关性较小,均可用于建模。

表 1 评价因子之间的相关系数矩阵

评价因子	工程地质岩组	高程	坡向	坡度	降雨量	河流	断层	道路
工程地质岩组	1.000							
高程	0.035	1.000						
坡向	0.055	0.089	1.000					
坡度	0.038	0.242	0.068	1.000				
降雨量	-0.093	-0.001	-0.065	-0.036	1.000			
河流	0.028	0.302	0.066	0.110	0.059	1.000		
断层	-0.002	0.067	-0.021	0.010	-0.048	0.078	1.000	
道路	0.012	0.205	0.046	0.138	0.075	0.384	0.090	1.000

3 地质灾害危险性评价

3.1 加权信息量值的计算

对所选因子的分级状态,利用 ArcGIS 中提取分析模块,统计评价因子各分区的栅格数量和灾害点数,利用式(1)计算出各评价因子的信息量值;运用层次分析法对选取的 8 个评价因子进行分析,建立判断矩阵对所选因子进行比较,邀请专家按照两者相对重要性进行打分^[28].

根据建立的判断矩阵(表 2),计算出最大特征根 $\lambda_{\max}=8.945$,对应的归一化特征向量 $\mu=(0.298, 0.234, 0.150, 0.127, 0.084, 0.049, 0.035, 0.023)$,处理得到各评价因子的权重(表 3)一致性比例 $CR=0.076<0.100$,符合一致性检验要求;将得到的权重值与对应评价因子的信息量值相乘,便得到研究区各评价单元的加权信息量值.通过对各评价因子不同分级状态的加权信息量值排序可知,信息量值排序越高表明在这些区域地质灾害发育程度越高,如表 4 所示.由表 3 可知:道路、河流、坡度三者的权重较大,通过查阅研究区有关资料可知,为了打通湖南通往西南地区的大通道,通道侗族自治县大力开展道路建设,道路建设边坡的开挖,改变了原有边坡的应力平衡状态,大部分开挖的边坡裸露未得到及时有效的治理,导致水土流失严重,为滑坡、崩塌等地质灾害留下了隐患,据最新风险普查统计,在现有地质灾害隐患点中,有 56.69%的隐患点为公路边坡地质灾害隐患.通道侗族自治县境内水系发育,由于近年来在河道两岸大力开展水电工程及其附属工程建设,蓄水发电引起的水位抬高和急降,造成河道边坡岩土体软化,冲刷侵蚀边坡坡脚影响了河道两岸边坡的稳定性,为滑坡、崩塌等提供了有利的发育条件.据统计,距河流 200 m 范围内,共发育 149 处地质灾害,占灾害点总数的 65.3%.地形坡度是滑坡、崩塌等地质灾害发育的主要微地貌条件,是影响地质灾害形成的重要因素,它决定着地形的应力分布,同时也对斜坡松散物质的堆积厚度、植被覆盖率等具有控制作用.从结果来看,地质灾害主要发生在坡度为 $0^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之间,共发育 216 处,占灾害点总数的 94.74%,其信息量值与权重值具有一致性.

表 2 评价因子重要性判断矩阵

评价因子	道路(B_1)	河流(B_2)	坡度(B_3)	降雨量(B_4)	高程(B_5)	断层(B_6)	岩组(B_7)	坡向(B_8)
道路(B_1)	1	1/2	1/3	1/4	1/4	1/5	1/5	1/6
河流(B_2)	2	1	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5	1/6
坡度(B_3)	3	3	1	1/3	1/3	1/4	1/3	1/5
降雨量(B_4)	4	3	3	1	1/3	1/5	1/6	1/6
高程(B_5)	4	3	3	3	1	1/3	1/4	1/5
断层(B_6)	5	5	4	5	3	1	1/3	1/4
岩组(B_7)	5	5	3	6	4	3	1	1/3
坡向(B_8)	6	6	5	6	5	4	3	1

表 3 评价因子权重

评价因子	权重	权重排序	评价因子	权重	权重排序
道路(B_1)	0.300	1	高程(B_5)	0.084	5
河流(B_2)	0.229	2	断层(B_6)	0.050	6
坡度(B_3)	0.151	3	岩组(B_7)	0.036	7
降雨量(B_4)	0.127	4	坡向(B_8)	0.023	8

表 4 评价因子的信息量值统计

评价因子	灾害点个数	分级状态	信息量	加权信息量	评价因子	灾害点个数	分级状态	信息量	加权信息量值
高程/m	1	184~300	-0.456	-0.038	坡度/(°)	82	0~7	0.554	0.084
	172	300~500	0.493	0.041		56	7~12	-0.126	-0.019
	44	500~700	-0.731	-0.061		46	12~17	-0.278	-0.042
	8	700~900	-0.879	-0.074		32	17~23	-0.247	-0.037
	3	900~1 592	-1.271	-0.107		12	23~45	-0.266	-0.040
道路/m	90	<100	2.137	0.641	河流/m	94	<100	1.827	0.418
	57	100~200	1.750	0.525		55	100~200	1.519	0.348
	11	200~300	0.191	0.057		24	200~300	0.774	0.177
	7	300~400	-0.184	-0.055		8	300~400	-0.263	-0.060
	63	>400	-1.104	-0.331		47	>400	-1.339	-0.307
断层/m	96	<500	0.243	0.012	降雨量/mm	13	1 150~1 350	-0.981	-0.125
	58	500~1 000	0.028	0.001		43	1 350~1 550	-0.187	-0.024
	27	1 000~1 500	-0.327	-0.016		53	1 550~1 750	0.401	0.051
	15	1 500~2 000	-0.350	-0.018		56	1 750~1 950	0.159	0.020
	32	>2 000	-0.162	-0.008		63	1 950~2 150	0.079	0.010
坡向	47	北	0.030	0.001	工程地质岩组	11	①	-0.136	-0.005
	37	东北	0.530	0.016		3	②	1.096	0.039
	47	东	0.556	0.017		3	③	-1.038	-0.037
	32	东南	0.131	0.004		13	④	-0.091	-0.003
	23	南	0.013	0.000		64	⑤	0.119	0.004
	15	西南	-0.436	-0.013		3	⑥	0.899	0.032
	13	西	-0.701	-0.021		130	⑦	-0.023	-0.001
	14	西北	-0.872	-0.026		1	⑧	0.462	0.017

注:①半坚硬-较软岩类红色碎屑岩岩组;②半坚硬-较软岩类泥质灰岩、黏土岩互层岩组;③半坚硬-较软岩类黏土岩岩组;④半坚硬-较软岩类砂岩、黏土组;⑤坚硬-半坚硬浅变质岩类板岩、砂岩岩组;⑥坚硬-半坚硬浅变质岩类硅质岩岩组;⑦坚硬-半坚硬浅变质岩类含砾砂质板岩岩组;⑧较软松散岩类

3.2 地质灾害危险性分区

以往研究中,关于模型分区方法的选取并未有一致的意见,多数研究者分区常采用自然断点法、相同间隔法、分位法等.由于相同间隔法在进行分区时未考虑数据是如何沿着数轴分布,其呈现的效果不太理想,笔者在相同间隔法基础上进行优化,借助 ArcGIS 平台将得到的数据值等区间均分成若干份,再将其在 Origin 2021 软件中绘制成数据分布曲线,如图 3 所示,并根据软件赋值的颜色对曲线下面积进行填充,由赋值的区间颜色变化界限选取数据突变点作为阈值界限.

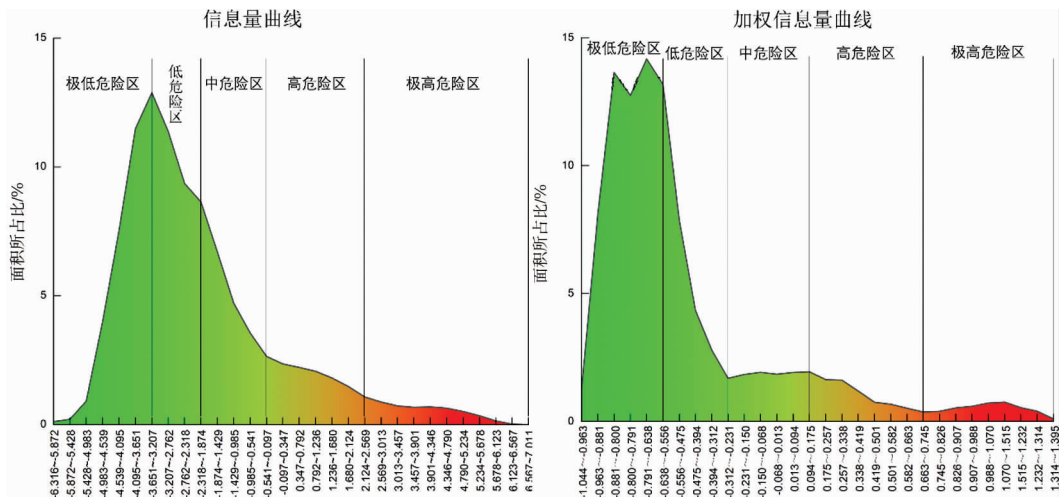


图 3 突变阈值分布曲线

为研究不同分区方法对构建模型准确率的影响,此次研究将优化改进后的分区方法同自然断点法、相同间隔法、几何间隔法、标准差法、分位法等常用方法进行比较.采用灵敏度和特异性之和最大化的方法对这 6 种方法进行精准性检验,从图 4 和图 5 可知:改进后的分区方法 AUC 值最大,标准误差最小,差异度更明显.表明研究区使用改进后的分区方法精准度最稳定.

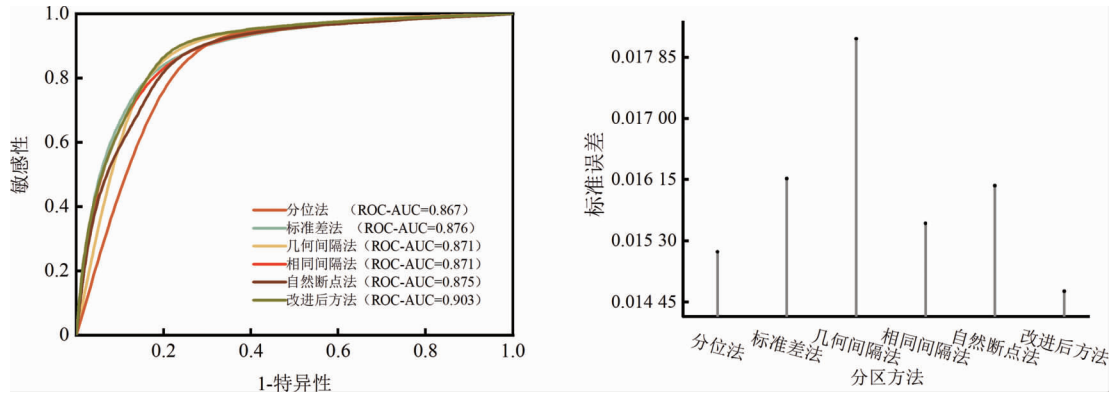


图 4 多方法 ROC 曲线和标准误差

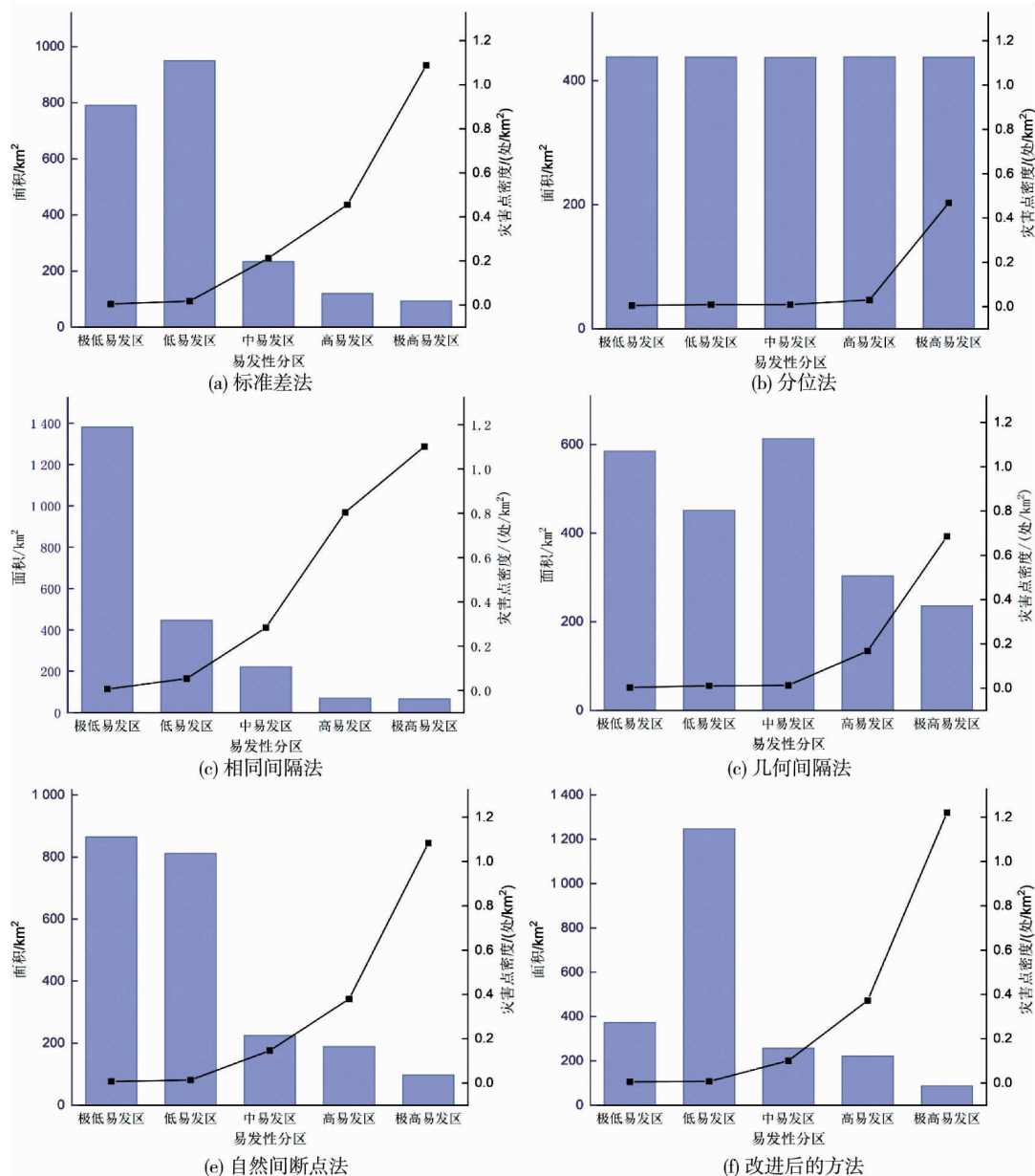


图 5 各分区方法面积与灾害点关系

4 结果分析与精度评价

4.1 精度评价

ROC 曲线具有操作简单、结果明了等特性,是地质灾害危险性评价检验的常用方法,ROC 曲线下面积 AUC 值可检验地质灾害危险性分区结果质量^[29],根据划分标准:AUC>0.9 时表现优秀,AUC 在 0.7~0.9 时具有较高准确性,AUC 在 0.5~0.7 时准确性一般,AUC<0.5 时无判断价值.因此,利用 ROC 曲线对评价结果进行有效性检验^[30-32].考虑每个模型结果中分区面积不同,不宜简单地使用每个分区中滑坡数量比或面积比,因此引入灾积比来衡量模型的准确性,计算如式(3)所示.

$$H_i = \frac{N_i/N}{A_i/A}.$$

(3)

式中: N_i 为该等级发育的灾害点数量; N 为研究区灾害点总数; A_i 为该等级分布面积; A 为研究区总面积.各危险区灾积比的差可用来表示各个等级地质灾害发育的差异度.差值越大,划分越合理.

由图 6 可知:改进后的加权信息量模型、信息量模型、层次分析模型法的 AUC 值分别为 0.903(90.3%),0.842(84.2%),0.848(84.8%),表明改进后的加权信息量模型预测效果优秀,改进后的分区方法提高了模型的精度,多模型耦合的精度高于单一的模型精度,这一改进使模型更适合研究区地质灾害危险性评价.

4.2 危险性评价结果分析

此次通过优化改进后的方法对研究区进行分区,将研究区划分为极低、低、中、高、极高 5 个等级(图 7).这几种模型得到的地质灾害危险性分区结果有一定的差异,改进后的加权信息量模型高、极高危险区面积占比 15.58%,灾害点占比 83.77%,灾积比为 14.32,主要分布在通道侗族自治县境内呼和浩特—北海段公路、双江河与通道河两侧;中危险区面积占比 10.02%,灾害点占比 11.40%,灾积比为 1.14,主要分布在通道侗族自治县中部河流冲蚀地区和断层较发育的地区;低危险区面积占比 56.09%,灾害点占比 3.95%,灾积比为 0.07,主要分布在远离河流和道路的地方;极低危险区面积占比 18.31%,灾害点占比 0.88%,灾积比为 0.05,主要分布在通道侗族自治县南部地形起伏较小的高海拔地区(表 5).

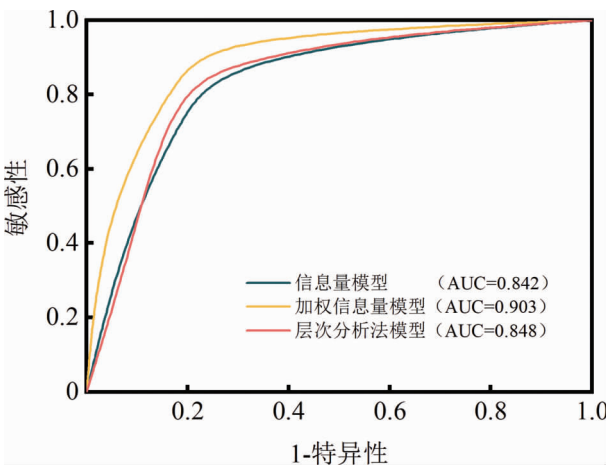


图 6 3 种模型的 ROC 曲线比较

表 5 地质灾害危险性分区结果

评价模型	危险性等级	栅格数量/个	面积/km ²	面积占比/%	灾害点/个	灾害点占比/%	灾积比
I 模型	极低	83 172	693.693	31.19	4	1.75	0.06
	低	87 824	724.507	32.58	4	1.75	0.05
	中	55 518	449.696	20.22	19	8.33	0.41
	高	30 517	247.188	11.11	86	37.72	3.40
	极高	13 460	109.026	4.90	115	50.44	10.29
AHP 模型	极低	106 846	898.586	40.40	6	2.63	0.07
	低	100 288	812.333	36.52	11	4.83	0.13
	中	27 847	225.561	10.14	33	14.47	1.41
	高	23 430	189.783	8.53	73	32.02	3.70
	极高	12 080	97.848	4.40	105	46.05	10.30
WIV 模型	极低	46 201	407.361	18.31	2	0.88	0.05
	低	154 007	1247.457	56.09	9	3.95	0.07
	中	27 520	222.912	10.02	26	11.40	1.14
	高	31 842	257.920	11.60	93	40.79	3.52
	极高	10 921	88.460	3.98	98	42.98	10.80

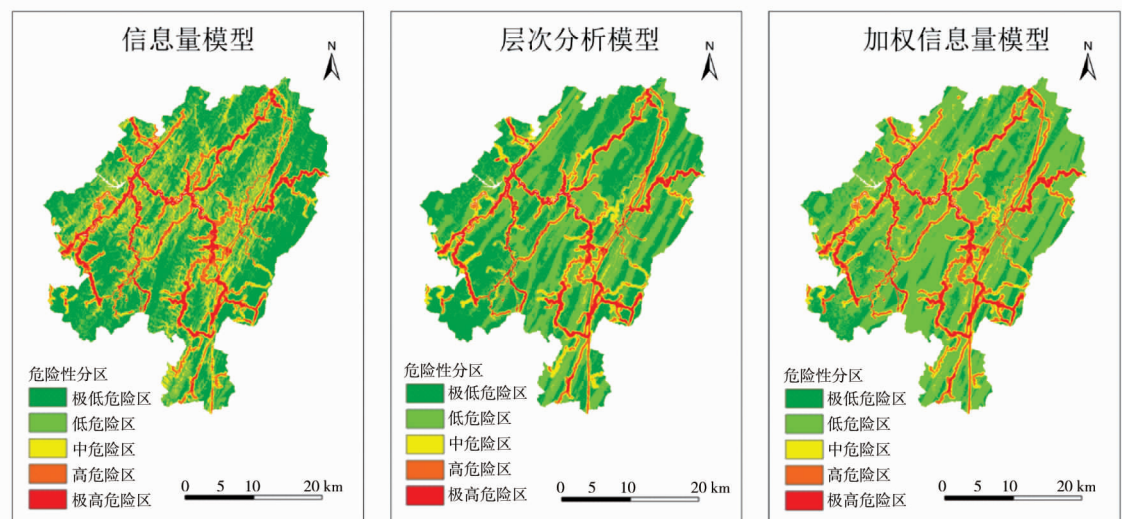


图7 地质灾害危险性评价分区

5 结论

1) 研究区内高危险区、极高危险区占研究区总面积的 15.58%, 灾害点占比为 83.77%, 灾积比为 14.32, 主要分布在县境内呼和浩特—北海段公路、双江河与通道河两侧。地质灾害沿着各条公路呈线状分布, 且南北分布差异较大。

2) 通过 ROC 曲线对比分析, 得出了改进后的加权信息量模型、信息量模型、层次分析模型, 其 AUC 值分别为 0.903 (90.3%), 0.842 (84.2%), 0.848 (84.8%), 说明改进模型更适合研究区地质灾害危险性评价, 耦合模型能够较好解决评价模型权重分配问题和非同种数据合并问题。

3) 通过信息量按区间等分绘制信息量分布曲线, 选取信息量突变点作为分区阈值, 有效提高了评价精度和分区的可靠性, 为灾害评价处理提供更精准的判断依据。

参考文献:

- [1] 薛强, 张茂省, 高波, 等. 陕西省绥德县城区地质灾害风险评估[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 711-719.
- [2] 熊倩莹. 基于 1:5 万地质灾害填图的区域地质灾害易发性及危险性的评价与区划: 以茂汶羌族自治县幅为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [3] 白光顺, 杨雪梅, 朱杰勇, 等. 基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 128-138.
- [4] AIT NACEUR H, IGMOLAN B, NAMOUS M, et al. A comparative study of different machine learning methods coupled with GIS for landslide susceptibility assessment: a case study of N'fis basin, Marrakesh High Atlas (Morocco)[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(11): 1100.
- [5] 张云, 资锋, 郭杰华, 等. 基于生态位模型的地质灾害风险评价: 以邵阳市隆回县为例[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 190-201.
- [6] 张群, 易靖松, 张勇, 等. 西南山区县域单元的地质灾害风险评价: 以怒江流域泸水市为例[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(5): 212-221.
- [7] 张桂荣, 殷坤龙, 刘传正, 等. 基于 GIS 的陕西省旬阳地区滑坡灾害危险性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 39-43.
- [8] 章正高. 采用层次分析法对地质灾害进行危险性评价: 以汉阴县地质灾害为例[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(1): 87-91, 103.
- [9] 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.
- [10] ERENER A, SIVAS A A, SELCUK-KESTEL A S, et al. Analysis of training sample selection strategies for regression-based

- quantitative landslide susceptibility mapping methods[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 104(C): 62–74.
- [11] GHOLAMI M, GHACHKANLU E N, KHOSRAVI K, et al. Landslide prediction capability by comparison of frequency ratio, fuzzy gamma and landslide index method[J]. *Journal of Earth System Science*, 2019, 128(2): 42.
- [12] 陈水满, 赵辉龙, 许震, 等. 基于人工神经网络模型的福建南平市滑坡危险性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 133–140.
- [13] 易靖松, 王峰, 程英建, 等. 高山峡谷区地质灾害危险性评价: 以四川省阿坝县为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 134–142.
- [14] 熊俊楠, 朱吉龙, 苏鹏程, 等. 基于 GIS 与信息量模型的溪洛渡库区滑坡危险性评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 700–711.
- [15] 缪信, 汤明高, 王自高, 等. 地质灾害危险性评价模型的比较分析与应用[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(4): 119–122.
- [16] 齐识, 宁娜, 马金珠. 甘肃南部武都区滑坡危险性评价[J]. *长江科学院院报*, 2015, 32(4): 28–34.
- [17] 覃乙根, 杨根兰, 江兴元, 等. 基于确定性系数模型与逻辑回归模型耦合的地质灾害易发性评价: 以贵州省开阳县为例[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(1): 96–103.
- [18] WEN H, WU X Y, LING S X, et al. Characteristics and susceptibility assessment of the earthquake-triggered landslides in moderate-minor earthquake prone areas at southern margin of Sichuan Basin, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(9): 346.
- [19] 阮沈勇, 黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(1): 89–92.
- [20] MANDAL B, MANDAL S. Analytical hierarchy process (AHP) based landslide susceptibility mapping of Lish river basin of eastern Darjeeling Himalaya, India[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(11): 3114–3132.
- [21] 范林峰, 胡瑞林, 曾逢春, 等. 加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用: 以湖北省恩施市为例[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(4): 508–513.
- [22] SRINIVASAN R, VASU D, SUPUTHRA S A, et al. A GIS-based spatial prediction of landslide hazard zones and mapping in an eastern Himalayan hilly region using large scale soil mapping and analytical hierarchy process[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2022, 50(10): 1915–1930.
- [23] 孙艳萍, 张苏平, 陈文凯, 等. 汶川地震滑坡危险性评价: 以武都区和文县为例[J]. *地震工程学报*, 2018, 40(5): 1084–1091.
- [24] 王天河, 汤明高, 李云杰, 等. 区域地质灾害危险性评价研究: 以宣汉地区为例[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(11): 157–164.
- [25] 于秀珍, 牟瑞芳. 雅康高速公路沿线地质灾害分布特征及影响因素分析[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(2): 876–884.
- [26] 温鑫, 范宣梅, 陈兰, 等. 基于信息量模型的地质灾害易发性评价: 以川东南古蔺县为例[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(2): 290–299.
- [27] 杜军, 杨青华, 严嘉, 等. 基于 GIS 与信息量模型的汶川次生地质灾害危险性评价[J]. *地球科学*, 2010, 35(2): 324–330.
- [28] 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.
- [29] 张云, 资锋, 曹运江, 等. 基于 MaxEnt 模型的沅陵县滑坡易发性评价[J]. *自然灾害学报*, 2025, 34(1): 105–116.
- [30] 陈立华, 李立丰, 吴福, 等. 基于 GIS 与信息量法的北流市地质灾害易发性评价[J]. *地球与环境*, 2020, 48(4): 471–479.
- [31] MERSHA T, METEN M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia[J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2020, 7(1): 20.
- [32] DAS G, LEPCHA K. Application of logistic regression (LR) and frequency ratio (FR) models for landslide susceptibility mapping in Relli Khola river basin of Darjeeling Himalaya, India[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(11): 1453.