



基于证据权法的湖北省兴山县滑坡灾害易发性评价

宋 渊^{1,2}, 江 南^{1,2}, 张恩博^{1,3}, 江鸿彬⁴

1. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430034;
2. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430034;
3. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;
4. 湖北省自然资源厅, 湖北 武汉 430071

摘 要: 以三峡库区湖北省兴山县为例, 综合分析历史滑坡数据及其孕灾因素, 采用证据权法对县域进行滑坡地质灾害易发性评价。首先应用 ArcGIS 软件, 提取高程、坡度、坡向、坡面曲率、断层、工程地质岩组、水系、植被指数评价因子图层, 并按照评价因子各分级频率比划分证据层; 其次, 采用证据权法分别计算各证据层的权重及后验概率; 然后将各证据层后验概率进行叠加, 生成滑坡易发性分区图; 最后, 使用分位数回归法将研究区按滑坡易发程度分为极高、高、中、低易发区 4 类。采用成功率曲线法对证据权法评价精度进行验证, 本次评价的精度为 86.1%, 表明评价效果较好。该评价方法及结果可为地方地质灾害“风险双控”提供技术依据。

关键词: GIS; 滑坡; 易发性评价; 证据权法; 地质灾害; 湖北省

SUSCEPTIBILITY EVALUATION OF LANDSLIDE HAZARD IN XINGSHAN COUNTY OF HUBEI PROVINCE BASED ON WEIGHTS-OF-EVIDENCE METHOD

SONG Yuan^{1,2}, JIANG Nan^{1,2}, ZHANG En-bo^{1,3}, JIANG Hong-bin⁴

1. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-environmental Geology, Wuhan 430034, China;
2. Hubei Provincial Geological Environment Monitoring Station, Wuhan 430034, China;
3. School of Geophysics and Spatial Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
4. Department of Natural Resources of Hubei Province, Wuhan 430071, China

Abstract: Taking Xingshan County of Hubei Province in the Three Gorges reservoir region as an example, the paper comprehensively analyzes the historical landslide data and inducing factors, and evaluates the landslide susceptibility based on the weights-of-evidence method. First, ArcGIS is used to extract the evaluation factor layers including elevation, slope gradient, aspect, curvature, fault, engineering geological rock group, water system and vegetation index, and divide the evidence layer according to the frequency ratio of each evaluation factor. Secondly, the weights-of-evidence method is adopted to calculate the weight and posterior probability of each evidence layer. Then the posterior probability of each evidence layer is superimposed to generate the landslide susceptibility zoning map. Finally, the study area is divided with the quantile regression method into extremely high, high, medium and low risk areas in terms of landslide susceptibility degree. The evaluation accuracy of 86.1% for the method verified by receiver operating characteristic curve indicates that the evaluation effect is good, which can provide technical basis for risk control of local geological disasters.

Key words: GIS; landslide; susceptibility evaluation; weights-of-evidence; geological hazard; Hubei Province

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-04-18. 编辑: 张哲.

基金项目: 湖北省重点研发计划项目“特大暴雨下山重大滑坡致灾机制与风险防范关键技术研究”(2021BCA219); 湖北省地质局科技项目“湖北地质灾害形成机理、早期识别与监测预警研究”(KJ2022-14, KJ2023-18).

作者简介: 宋渊(1983—), 男, 工程师, 从事地质灾害防治工作, 通信地址 湖北省武汉市硚口区古田五路 9 号, E-mail//619512724@qq.com

0 前言

滑坡是我国分布最广、影响最严重的的地质灾害类型,主要分布在我国的西南和东南地区^[1]。据资料统计,2021 年全国发生地质灾害 4772 起,其中滑坡 2335 起,直接经济损失 32 亿元^[2]。因而对区域性滑坡地质灾害易发性进行评价,可为决策管理部门和技术支撑单位进行地质灾害“风险双控”管理、防灾减灾部署及国土空间规划等提供依据。自 20 世纪 60 年代以来,国内外不少学者对滑坡地质灾害易发性评价提出了很多方法,总体来说可以分为定性评价与定量评价。定性评价有基于知识驱动的专家打分法、层次分析法等;定量评价有基于数理统计的分析方法(如信息量法、证据权法)、确定性系数方法和机器学习方法(如支持向量机法、BP 神经网络法)^[3-14]。其中信息量法及其改进的加权信息量法的研究较为广泛,证据权法的研究相对较少。本文选择的证据权法是一种基于统计概率的方法,在地质灾害易发性评价中,通过将历史灾害点与相关地质、地理因素进行空间关联分析,计算各影响因素对地质灾害的权重,在一定程度上避免滑坡易发性分析研究中评价因子权重赋值的主观性,具有较高的评价精度^[14]。

兴山县地处湖北省西部山区,境内山高坡陡,地质环境复杂,人类工程活动强烈,是湖北省及三峡库区地质灾害高易发区,滑坡、崩塌等地质灾害广泛分布,特别是滑坡灾害问题严重制约三峡库区及兴山县城镇发展和乡村振兴,因此对该地区进行滑坡易发性区划研究,具有重要的现实意义^①。国内地灾工作者和学者对兴山县地质灾害进行了大量的研究工作,但研究对象大多为单体滑坡^[15-16]和岸坡^[17-18],区域性质的研究工作多以三峡库区为研究范围^[19-20]。以兴山县为研究范围的易发性评价主要是 1:5 万地质灾害详细调查报告^②,其方法为专家打分法。虽然上述报告在预测结果上取得了较好的精度,但是在评价因素的选取及权重取值存在一定的主观性。本文在前人研究的基础上,利用 GIS 技术,以兴山县为研究区,对历史灾害点与孕灾、致灾因素进行综合分析,应用证据权法,计算各个评价因子对地质灾害的影响权重,并对兴山县的滑坡地质灾害易发性进行分区。

1 地质灾害概况及数据源

兴山县位于湖北省宜昌市北部,总面积约 2 327 km²,辖 6 镇、2 乡、91 个村、5 个社区,属于鄂西南恩施—兴山地质灾害高易发亚区。地质灾害类型以滑坡为主,共发育滑坡 522 处(图 1),全县 8 个乡(镇)均有分布,其中以峡口镇(132 处)、昭君镇(125 处)、古夫镇(84 处)最为发育(表 1)。研究中使用的数据主要包括基础地理信息数据、地质灾害点数据、高程数据、DEM 数据等,均来源于兴山县地质灾害风险调查评价(1:50 000)数据库。

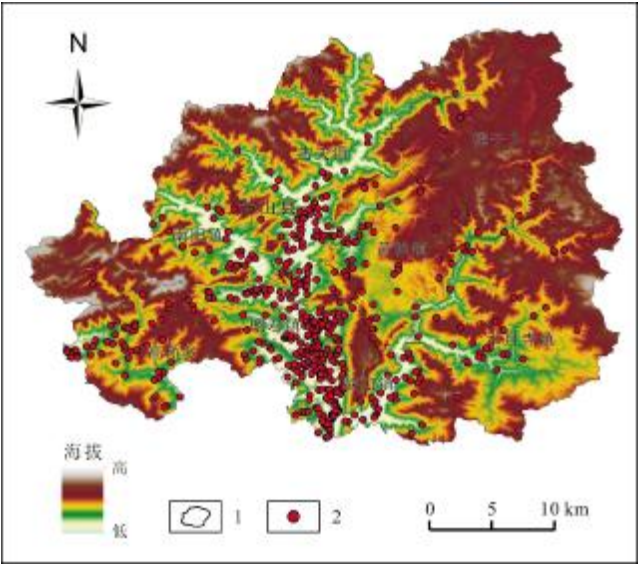


图 1 兴山县滑坡灾害分布图

Fig. 1 Distribution map of landslide hazard in Xingshan County
1—乡镇界线(township boundary); 2—滑坡灾害点(landslide hazard site)

表 1 兴山县各乡镇滑坡统计表

Table 1 Statistics of landslides by towns in Xingshan County

乡镇	面积/km ²	滑坡/处	占比/%
古夫镇	446	84	16.09
昭君镇	145	125	23.95
峡口镇	217	132	25.29
南阳镇	276	33	6.32
黄粮镇	245	49	9.39
水月寺镇	464	31	5.94
高桥乡	173	51	9.77
榛子乡	361	17	3.25
合计	2327	522	100.00

①宋渊,等.兴山县地质灾害风险调查评价成果报告.湖北省地质环境总站,2021.
②熊峰,等.宜昌市兴山县地质灾害详细调查.湖北省水文地质工程地质大队,2018.

2 评价方法简介

证据权法是一种综合各种证据来支持一种假设的定量方法,最初用于医疗诊断支持。后经 Agterberg 和 Bonham-Carter 等数学地质学家对此方法进行修正和改进,被应用于矿产资源远景预测中^[21],近年来也被用于地质灾害危险性评价研究^[22]。该方法以贝叶斯统计模型为基础,通过求取一系列与滑坡发生相关的影响因子的贡献率(即权重),然后叠加复合分析来进行滑坡易发性区划。

证据权法的分析流程如下^[23]。

1) 权重计算

计算每一个证据因子的权重,首先要把整个调查区栅格化,利用条件概率计算证据因子图层所有单元对地质灾害发生的贡献权重。假设调查区被划分成面积相等的 T 个单元,其中 D 为地质灾害单元数, $\bar{D}$ 为非地质灾害单元数。对于该证据因子, B/D 和 $\bar{B}/\bar{D}$ 分别表示证据因子在地质灾害单元和非地质灾害单元内存在的单元数, $\bar{B}/D$ 和 $B/\bar{D}$ 分别表示证据因子在地质灾害单元和非地质灾害单元内不存在的单元数。其权重定义为:

$$W^+ = \ln \frac{P(B/D)}{P(\bar{B}/D)} \quad (1)$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}/D)}{P(B/\bar{D})} \quad (2)$$

式中: W^+ —证据因子存在区的权重值; W^- —证据因子不存在区的权重值。

证据因子权重由落入特定证据因子图层的灾点数和全部灾点数之比与证据因子图层面积和调查区总面积之比的比值决定。证据因子和灾点正相关表示为 $W^+ > 0$, $W^- < 0$; 负相关为 $W^+ < 0$, $W^- > 0$; 不相关时权重为 0。对于原始数据缺失区域,其权重值为 0。相对系数 $C_i = W^+ - W^-$, 用来度量证据图层和地质灾害之间的相关性大小。

2) 证据综合

在上述权重值计算及分析的基础上,通过证据层的优选,选择权重值较大、与地质灾害关系密切的证据层,剔除权重值较小、与地质灾害关系不密切的证据层;进一步进行证据因子相对灾点的条件独立性检验,剔除地质灾害权重值相对较小而与其他证据因子相关

性大的证据层。对最终筛选出的 n 个关于地质灾害点条件独立的证据因子,根据贝叶斯法则,研究区任一单元 K 为地质灾害的可能性,即对数后验概率可表示如下:

$$F = \ln O(D) + \sum_{i=1}^n W_i^K \quad (3)$$

式中: O —后验概率, $O(D) = D/(T-D)$; D —存在地质灾害的单元网格数; K —在第 i 个证据因子层存在时为+, 不存在时为-; W_i —第 i 个证据因子存在或不存在的权重。

最后根据研究区内每个网格单元后验概率的大小生成易发性区划图。后验概率值的大小指示易发性的高低,其值在 0~1 之间。后验概率值越大,表示易发性越高;后验概率值越小,表示易发性越低。

3 数据处理及评价因子

本研究以兴山县地质灾害风险调查评价(1:50 000)数据库为数据源,选取 30 m × 30 m 栅格单元(单元面积=0.0009 km²,即 1:50 000 底图上 0.6 mm × 0.6 mm 方格为一个基本单元)为分析单元。兴山县全域共划分为 2 574 672 个栅格单元。

地质灾害易发性是指一定区域内由孕灾地质条件控制的地质灾害发生的可能性^[24]。利用证据权法进行滑坡易发性评价之前,对各影响因子进行合理分级即划分证据层。对于离散型数据如工程地质岩组就以出露的工程地质岩组划分数进行分类;对于连续型数据先按一定步长统计各步长占研究区的比例以及各步长内滑坡比例,然后根据统计数据划分证据层。综合前人研究成果,结合研究区的实际情况,初步选取地形地貌、地质构造、工程地质岩组、地表水、植被等因素。

3.1 地形地貌

研究区地形地貌因素主要包括高程、坡度、坡向、坡高和坡面曲率,均为连续型数据。由图 2 各因素各分级所占比例以及滑坡比例曲线,结合曲线突变点位置进行证据层划分。将高程划分为: ≤500, (500, 1 000], (1 000, 1 500], >1 500 m; 坡度分为: ≤10, (10, 40], (40, 50], >50°; 坡向分为: ≤60, (60, 160], (160, 240], (240, 320], (320, 360); 坡面曲率分为: ≤-6, (-6, -2], (-2, 2], (2, 4], >4。

3.2 地质构造

地质构造对斜坡的变形影响明显,地质构造发育强烈地区地质灾害相对发育.各种地质构造作用使原始斜坡岩体产生不同程度破坏,导致岩体裂隙发育,碎屑岩土体中风化程度高,易形成滑坡地质灾害.断层对滑坡发育的影响程度受断层与滑坡的空间位置控制,由图 2 断层突变点对断层的缓冲区分为 6 级:≤100, (100,200], (200,300], (300,400], (400,500], >500 m.

3.3 工程地质岩组

滑坡灾害与岩土体类型、性质、结构具有特别密切的关系.不同岩土体类型的物质组成、力学特征、抗剪强度、抗风化能力等各不相同,地质灾害的发育程度及类型存在明显的差异.根据统计(表 2),滑坡主要发生在层状碎屑岩类中,有 326 处,占滑坡总数量的

62.45%;其次是层状碳酸盐岩类,有 175 处;在变质岩、岩浆岩地层和松散土中分布极少.

工程地质岩组属于离散型数据.根据工程地质岩组分类,将工程地质岩组划分为 8 个证据层(表 2):Ⅰ₁—松散—较松散黏土、砂砾石土;Ⅱ₁—中厚层较坚硬粉砂岩、石英砂岩、泥质灰岩夹软弱泥岩页岩岩组;Ⅱ₂—中厚层较坚硬—较软弱细砂岩、页岩、泥岩夹生物灰岩岩组;Ⅲ₁—中厚层较坚硬白云岩夹薄层砂岩、板岩岩组;Ⅲ₂—薄—中厚层状较坚硬—坚硬中—弱岩溶化白云岩、灰岩夹软弱页岩岩组;Ⅲ₃—中厚—厚层状坚硬岩溶化灰岩、白云岩夹少量页岩岩组;Ⅳ₁—较坚硬混合化角闪岩、石英岩夹较软弱片麻岩组;Ⅴ₁—块状坚硬花岗岩、闪长岩组.

3.4 地表水系

兴山县与地质灾害有关的地表水主要为河流、水

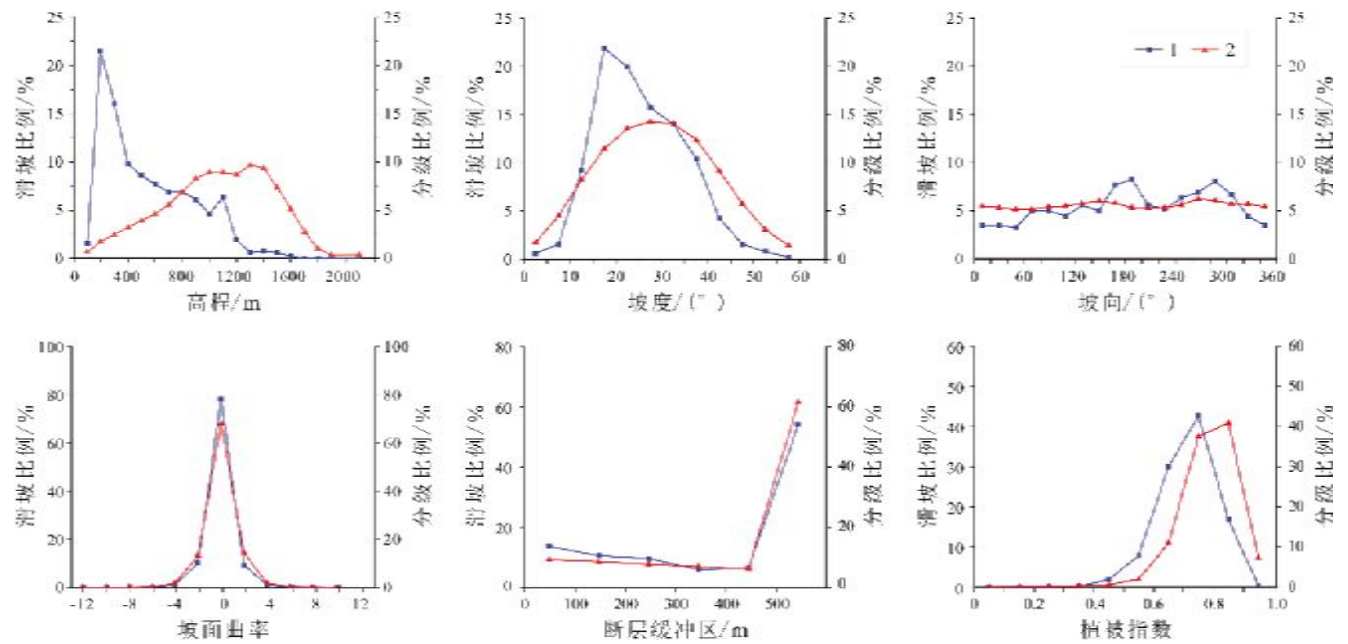


图 2 研究区不同影响因素产生的滑坡及各分级所占比例
Fig. 2 Frequency ratios of landslide and grading in the study area caused by different influencing factors
1—滑坡比例(frequency ratio of landslide); 2—分级比例(frequency ratio of grading)

表 2 不同工程地质岩类中滑坡灾害发育程度统计
Table 2 Statistics of landslide development degree by engineering geological rocks

工程地质岩组	松散土类(Ⅰ)		层状碎屑岩岩类(Ⅱ)		层状碳酸盐岩岩类(Ⅲ)			层状变质岩岩类(Ⅳ)		块状岩浆岩岩类(Ⅴ)	合计
	I ₁		Ⅱ ₁	Ⅱ ₂	Ⅲ ₁	Ⅲ ₂	Ⅲ ₃	Ⅳ ₁		V ₁	
滑坡数	5		265	61	6	34	135	16		0	522

库. 水在滑坡形成过程中的作用是至关重要的, 库水位的升降、地表水的径流冲刷、地下水的渗流以及河流流水的侵蚀等, 都是新生滑坡形成和老滑坡复活的重要破坏动力. 地表水系属于线性因素, 在对这类因素进行处理时, 首先找出地表水系与地质灾害的距离, 统计分析确定影响范围, 然后运用 ArcGIS 软件缓冲区分析功能, 将距离水系缓冲区划分为: ≤ 200 , (200, 400], (400, 600], (600, 800], >800 m 五个证据层.

3.5 植被

植被指数(值越大说明植被生长状况越好)对滑坡发育的影响可以间接反映人类工程活动对滑坡的影响. 在人类工程活动频繁的长江一级支流香溪河两岸地段, 植被覆盖率远小于未被人类破坏的地段. 首先统计各波段植被指数的比例以及滑坡比例, 然后根据图 2 植被指数突变点对植被指数进行重新分级, 可将植被指数分为: ≤ 0.5 , (0.5, 0.6], (0.6, 0.7], (0.7, 0.8], (0.8, 1].

4 影响因素相关性及证据层权重

4.1 影响因素相关性分析

证据权法的前提是各影响因素之间是相互独立的, 若因素之间存在较大的相关性时, 必定使评价结果产生较大误差或错误. 考虑到初步选取的指标具有相关性, 为避免指标间因空间相关性、共线性等而导致模型计算误差, 需通过相关性分析检验各指标的独立性, 从而筛选出相对独立的指标. 由表 3 可知, 上述各评价指标之间的相关性均能满足独立性检验^[25].

4.2 影响因素证据层权重计算

据各指标因子的统计分析, 共划分了 42 个证据层, 利用 ArcGIS 的空间分析功能^[27]分别计算各证据层的 W^+ 、 W^- 以及相对系数 C_i , 滑坡易发性权重计算见表 4. 从表中可以看出: 断层、水系对其两侧岩土体均发生影响, 且有距离越近, 影响越大, 越容易发生滑坡地质灾害; 绝对高程小于 500 m 之处, 较易发生滑坡地质灾害, 而高程大于 1 000 m 的地方, 滑坡灾害相对较少; 坡向为西向易于发生滑坡地质灾害; 滑坡坡度跨度较大, 多在 10~40°之间, 一般来说, 坡度越大就越易发生滑坡; 地势起伏度大的地区, 越容易发生滑坡灾害.

5 易发性评价结果与检验

5.1 评价结果分析

由上文栅格单元划分结果可知滑坡发生的先验概率为 $P=0.68\%$, 利用 ArcGIS 软件的栅格计算工具^[26], 对上述因子后验概率的叠加复合分析实现易发性分区(图 3). 兴山县滑坡灾害主要沿长江一级支流香溪河流域、公路及江河岸坡地段呈条带状分布, 在城镇及人口密集区, 随着城镇经济建设的发展, 修路建房切坡、水利工程建设等人类工程活动加大了对斜坡的改造力度, 从而造成边坡失稳或诱发地质灾害, 滑坡地质灾害具有相对聚集性的特点.

由表 5 统计可得, 地质灾害极高易发区面积为 135 km²、高易发区 143 km²、中易发区 229 km²、低易发区 1 820 km², 分别占整个区域面积的 5.82%、6.17%、

表 3 各评价指标的相关性
Table 3 Correlation of evaluation indexes

评价指标	高程	坡度	坡向	坡面曲率	断层	工程地质岩组	水系	植被指数
高程	1.0000							
坡度	-0.0112	1.0000						
坡向	-0.0185	-0.0339	1.0000					
坡面曲率	-0.0772	-0.0052	-0.0007	1.0000				
断层	0.1372	0.0327	-0.0240	-0.0066	1.0000			
工程地质岩组	0.2902	0.0194	0.0649	0.0005	-0.1635	1.0000		
水系	0.5208	-0.1232	0.0081	-0.0239	0.0835	0.0120	1.0000	
植被指数	0.5694	0.1511	-0.2397	-0.0118	0.1014	0.1267	0.2791	1.0000

表 4 滑坡易发性权重计算表

Table 4 Weight calculation results of landslide susceptibility

指标	证据层	证据权栅格数	W^+	W^-	C_i
高程/m	≤ 500	10845	2.0814	-0.8842	2.9656
	(500,1000]	4970	-0.0287	0.0116	-0.0403
	(1000,1500]	1582	-1.6188	0.5135	-2.1324
	>1500	128	-3.1455	0.1786	-3.3241
坡度/(°)	≤ 10	1180	0.0940	-0.0065	0.1005
	(10,40]	15569	0.1865	-0.8562	1.0427
	(40,50]	694	-1.3267	0.1212	-1.4479
	>50	82	-2.4129	0.0490	-2.4618
坡向/(°)	≤ 60	2273	-0.1999	0.0335	-0.2334
	(60,160]	4215	-0.1381	0.0480	-0.1862
	(60,240]	4654	0.2132	-0.0671	0.2803
	(240,320]	4913	0.1788	-0.0618	0.2406
	(320,360)	1470	-0.2748	0.0294	-0.3042
坡面曲率	≤ -6	4	2.4038	-0.0183	2.4221
	$(-6,-2]$	348	3.0194	-3.0230	6.0423
	$(-2,2]$	16712	-3.5830	2.2110	-5.7940
	(2,4]	435	-3.5015	0.0490	-3.5505
	>4	26	-1.8361	0.0079	-1.8440
断层缓冲区/m	≤ 100	2100	0.0816	-0.0087	0.0903
	(100,200]	1753	0.0054	-0.0005	0.0059
	(200,300]	1505	-0.2060	0.0154	-0.2214
	(300,400]	1098	-0.2997	0.0190	-0.3188
	(400,500]	897	-0.1199	0.0069	-0.1268
工程地质岩组	>500	10175	-0.0651	0.0977	-0.1628
	I ₁	3	1.7227	-0.0138	1.7365
	II ₁	291	1.4083	-0.6715	2.0798
	II ₂	9798	0.9548	-0.1116	1.0664
	III ₁	2824	-2.1775	0.0573	-2.2348
	III ₂	124	-0.2692	0.0170	-0.2862
	III ₃	905	-1.0507	0.5983	-1.6490
	IV ₁	3417	-1.9259	0.0587	-1.9846
水系缓冲区/m	V ₁	169	-1.5374	0.0362	-1.5736
	≤ 200	4629	0.8198	-0.1253	0.9451
	(200,400]	3376	0.5127	-0.0526	0.5653
	(400,600]	2080	0.1496	-0.0119	0.1615
	(600,800]	1386	1.6854	-0.3577	2.0431
植被指数	>800	6055	-0.7256	0.8270	-1.5526
	≤ 0.5	874	2.2267	-0.1043	2.3311
	(0.5,0.6]	1924	2.9235	-0.3874	3.3108
	(0.6,0.7]	5843	1.2310	-0.3462	1.5772
	(0.7,0.8]	6465	-1.0023	0.3240	-1.3263
	(0.8,1]	2424	-1.2556	0.5155	-1.7711

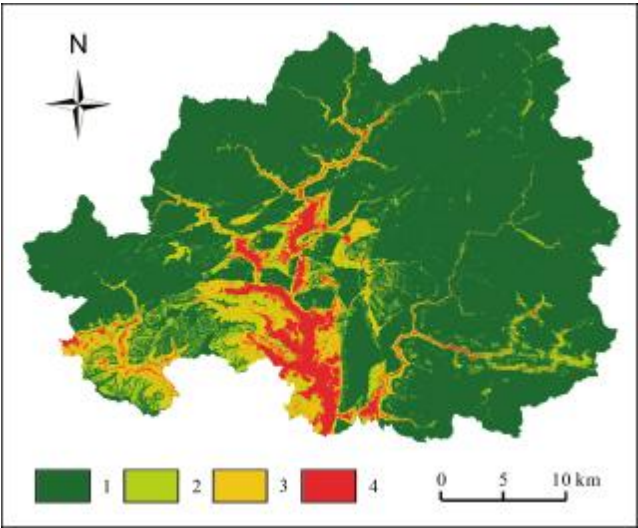


图 3 兴山县滑坡地质灾害易发性分区图

Fig. 3 Zoning map of landslide susceptibility in Xingshan County

1—低易发区(low-risk area); 2—中易发区(middle-risk area); 3—高易发区(high-risk area); 4—极高易发区(extremely high-risk area)

9.89%、78.12%。极高易发区主要分布于昭君镇-峡口镇三峡库区生态屏障区地带和古夫镇、南阳镇集镇区域,主要受修路建房切坡、水利工程建设等人类工程活动的影响,共发育滑坡 219 处,点密度 1.62 个/km²;高易发区主要分布于高桥乡 G209 及高水线沿线、峡口镇双坪村-竹溪村、峡口镇峡口居委会-黄粮镇店子垭村、古夫镇两河口以及县内主要交通干线沿线区域,该区域人类工程活动强度比极高易发区较弱,主要为修路建房切坡,共发育滑坡 156 处,点密度 1.09 个/km²;中易发区主要分布于南阳镇百羊寨村-高桥乡大槽村、高桥乡贺家坪村-高桥乡太阳村、黄粮镇公坪村-黄粮镇户溪村、水月寺镇孔子河-宜兴线周边区域、古夫镇毛家河-榛子乡、昭君镇-白沙河、峡口镇平邑口-普安村等区域,该区域人类工程活动主要是农业耕种活动,共发育滑坡 74 处,点密度 0.32 个/km²;其余地带为低易发区,该区域多为山地,随着社会经济发展和城镇化率不断提高,原有山地居民逐步向城镇迁移,地广人稀,植被茂密,人类工程活动不发育,共发育滑坡 73 处,多为 10 年以前发生的滑坡,点密度 0.04 个/km²。评价的结果与实际调查情况相符。

5.2 可靠性检验

地质灾害易发性评价结果是否准确直接关系到模型的可靠性,并且直接或间接影响经济发展和社会进步,因此对易发性评级结果进行精度检验十分必要。

表 5 滑坡灾害易发性分区栅格与面积比例表
Table 5 Grid numbers and area percentages
of different landslide risk areas

易发性 分区	栅格数/ 个	面积/ km ²	面积比例/ %	发育滑坡/ 处	点密度/ (个/km ²)
极高易发区	149903	135	5.82	219	1.62
高易发区	158833	143	6.17	156	1.09
中易发区	254639	229	9.89	74	0.32
低易发区	2011297	1820	78.12	73	0.04

采用成功率曲线方法对本次评价作精度分析,成功率曲线方法是地质灾害易发区域评价精度验证的常用方法^[29]。横轴表示评价结果中易发性指数从高到低的面积比,纵轴表示相应易发性指数范围内的滑坡数所占比例。成功率曲线的线下面积(area under the curve, AUC)越大,说明预测的效果就越好,该值可以作为预测灾害危险性准确率使用。本研究的预测模型的 AUC 值为 86.1%(图 4),说明证据权模型在兴山县滑坡易发性评价结果的预测正确率较高。

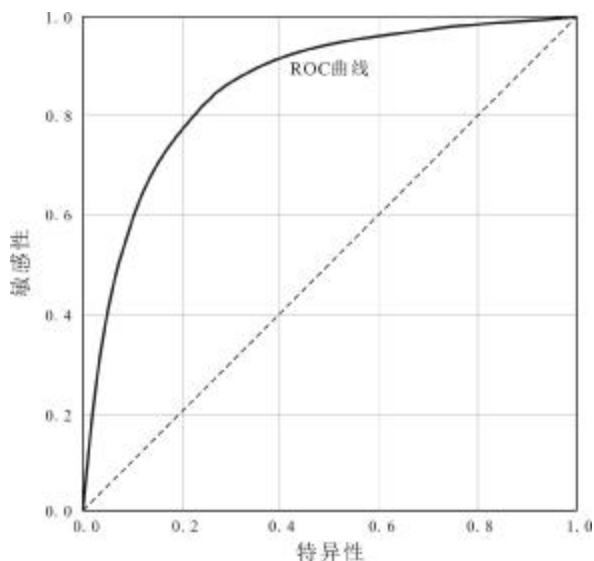


图 4 成功率曲线图

Fig. 4 Receiver operating characteristic curve

6 结论

1)采用证据权法可以客观定量地评价各种影响因子对滑坡发育的影响程度,综合考虑地质灾害的地形地貌、地质构造、工程地质岩组、地表水系、植被等孕灾因素,在对兴山县滑坡易发性评价指标的建立过程

中,以统计数据为基础,对离散型数据和连续型数据分别进行分级处理,依据各因素各分级所占比例以及滑坡比例曲线的变化关系,结合曲线突变点位置进行证据层划分,实现了各评价因子的状态分级处理,避免了连续变量二级状态分级时的主观影响,充分体现了评价因子状态分级差异最大化的特点,具有一定的推广价值。

2)通过对各评价因子的权重计算,发现区内对滑坡发育比较重要的影响因素包括高程、工程地质岩组、断层、河流及沟谷起伏度等,但是,每一种影响因素中,只是其中的几种证据层影响较大,滑坡的发生是各种影响因素联合作用的产物。分析结果与现有滑坡的分布特征和野外调查情况比较吻合。

3)通过成功率曲线可知研究区滑坡易发性评价结果的预测精度达到了 86.9%,表明证据权法可以有效避免滑坡易发性区划研究中评价因子权重赋值的主观性,具有较高的评价精度,评价结果能够为地方地质灾害防治工作提供依据。

4)据评价结果,极高易发区和高易发区主要分布于昭君镇-峡口镇三峡库区生态屏障区地带、古夫镇、南阳镇集镇区域以及县内主要交通干线沿线。建议在今后的工程建设和国土空间规划中,做好地质灾害危险性评估工作的监督、备案,加强地质灾害的“风险双控”管理,不断完善灾害治理体系和逐步提升灾害治理能力。

参考文献(References):

- [1]朱耀琪. 中国地质灾害与防治[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 3-15.
Zhu Y Q. Geological disasters and prevention in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 3-15. (in Chinese)
- [2]自然资源部. 2021 年全国地质灾害灾情及 2022 年地质灾害趋势预测[EB/OL]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202201/t20220113_2717375.html, 2022-01-13.
Ministry of Natural Resources. National geological disasters in 2021 and trend forecast for 2022[EB/OL]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202201/t20220113_2717375.html, 2022-01-13. (in Chinese)
- [3]Regmi N R, Giardino J R, Vitek J D. Assessing susceptibility to landslides: Using models to understand observed changes in slopes[J]. Geomorphology, 2010, 122(1/2): 25-38.
- [4]陈燕平. 基于 GIS 的贵州省滑坡地质灾害易发性多模型综合评价[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
Chen Y P. GIS-based landslide susceptibility assessment of Guizhou

- Province using multi-model comprehensive evaluation[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [5] 温金梅, 杨龙, 苟敬, 等. 基于信息量法的地质灾害易发性评价——以重庆市巫山县县城为例[J]. 地质与资源, 2021, 30(2): 193–198, 192.
- Wen J M, Yang L, Gou J, et al. Evaluation of geohazard susceptibility based on information method: A case study of Wushan County in Chongqing Municipality[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(2): 193–198, 192.
- [6] 胡鹏, 杨东强, 王荐霖. 四川省雅江县上游河段滑坡灾害危险性评价[J]. 地质与资源, 2021, 30(6): 722–732.
- Hu P, Yang D Q, Wang J L. Risk assessment of landslide disasters in the upper reaches of Yajiang County, Sichuan Province[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(6): 722–732.
- [7] 李信, 阮明, 杨峰, 等. 基于 GIS 技术和信息量法的地质灾害易发性研究——以海南省昌江县为例[J]. 地质与资源, 2022, 31(1): 98–105.
- Li X, Ruan M, Yang F, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility based on GIS and information method: A case study of Changjiang County, Hainan Province[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(1): 98–105.
- [8] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 15–26.
- Xu C, Dai F C, Yao X, et al. GIS platform and certainty factor analysis method based Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1): 15–26.
- [9] 刘汉湖. RS 与 GIS 支持下的汶川县周边地质灾害危险性评价[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 243–251.
- Liu H H. The assessment of geohazard danger in Wenchuan County based on RS and GIS[J]. *Geology in China*, 2012, 39(1): 243–251.
- [10] 朱进守, 邓辉, 苑泉, 等. 藏东高山峡谷地带地质灾害危险性评价——以西藏贡觉县为例[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 272–278.
- Zhu J S, Deng H, Yuan Q, et al. Risk assessment on the geohazards in alpine and gorge region of eastern Tibet: A case study of Gonjo County[J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(3): 272–278.
- [11] 李明波, 陈平, 陈植华, 等. 湖南雪峰山地区降雨型滑坡灾害敏感性区划[J]. 地质与资源, 2019, 28(1): 78–84.
- Li M B, Chen P, Chen Z H, et al. Sensitivity zoning of rainfall-induced landslide hazard in Xuefeng mountain area[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(1): 78–84.
- [12] 李彩侠, 马煜. 四川都江堰龙溪河流域泥石流成因、特征和危险性评价[J]. 地质与资源, 2019, 28(3): 298–304.
- Li C X, Ma Y. Causes, characteristics and hazard assessment of the debris flows in Longxi River Basin, Sichuan Province[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(3): 298–304.
- [13] 王雪冬, 叶果, 李世宇, 等. 基于熵值法和突变级数法的泥石流流易损度评价[J]. 地质与资源, 2019, 28(5): 493–496, 422.
- Wang X D, Ye G, Li S Y, et al. Vulnerability assessment of debris flow based on entropy value and catastrophe progression methods[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(5): 493–496, 422.
- [14] 张艳玲, 南征兵, 周平根. 利用证据权法实现滑坡易发性区划[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 121–125.
- Zhang Y L, Nan Z B, Zhou P G. Division of landslide susceptibility based on weights of evidence model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2): 121–125.
- [15] 胡新丽, Potts D M, Zdravkovic L, 等. 三峡水库运行条件下金乐滑坡稳定性评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32(3): 403–408.
- Hu X L, Potts D M, Zdravkovic L, et al. Jinle landslide stability under water level fluctuation of Three Gorges reservoir[J]. *Earth Sciences — Journal of China University of Geosciences*, 2007, 32(3): 403–408.
- [16] 孙仁先, 陈江平, 陈钰. 三峡库区金乐滑坡形态、结构特征及其治理[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 18–21.
- Sun R X, Chen J P, Chen Y. Characteristics of shape and structure of Jinle landslide in Three Gorges reservoir area and its treatment[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2008, 30(4): 18–21.
- [17] 刘小红. 香溪河段公路崖坡再造机理试验与应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- Liu X H. Experimental and application research on rebuilding mechanism of highway bank slope in Xiangxi River[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.
- [18] 刘红豪. 三峡库区兴山段典型滑坡稳定趋势预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- Liu H H. Stability trend prediction of the typical landslides in the Xingshan section of the Three Gorges reservoir[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [19] 彭令. 三峡库区滑坡灾害风险评估研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- Peng L. Landslide risk assessment in the Three Gorges reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [20] 李松林. 三峡库区涉水滑坡对库水位变动的变形响应及其自适应性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- Li S L. Study on the reactivation characteristic and deformation self-adaptive of landslides in the Three Gorges reservoir area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.

- [14]程林, 杨勇, 边敏, 等. 黄陵断穹核部鳞片石墨矿地球化学特征与成因研究[J]. 地质与勘探, 2020, 56(4): 745–758.
- Chen L, Yang Y, Bian M, et al. Geochemical characteristics and genesis of flake graphite ores in the core of the Huangling fault dome, Hubei Province[J]. *Geology and Exploration*, 2020, 56(4): 745–758.
- [15]郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 6–7.
- Zheng Y F, Chen J F. Stable isotopic geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2004: 6–7. (in Chinese)
- [16]杨联涛. 陕西波风岭石墨矿地质特征及成因[J]. 矿产勘查, 2019, 10(2): 257–263.
- Yang L T. Geological characteristics and genesis of Bofengling crystal graphite deposit in Shangzhou County, Shaanxi[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(2): 257–263.
- [17]马志鑫, 罗茂金, 刘喜停, 等. 四川南江坪河石墨矿炭质来源及成矿机制[J]. 地质科技情报, 2018, 37(3): 134–139.
- Ma Z X, Luo M J, Liu X T, et al. Carbon source and Metallogenic mechanism of Pinghe graphite deposit at Nanjiang, Sichuan Province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(3): 134–139.
- [18]胡晗, 张立飞. 俯冲带中石墨质碳的研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(4): 764–777.
- Hu H, Zhang L F. Progress of research on graphitic carbon in subduction zones[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, 40(4): 764–777.
- [19]刘丙祥. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- Liu B X. Magmatism and crustal evolution in the eastern North Qinling Terrain[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [20]边敏, 程林, 姚敬劬. 区域变质型晶质石墨矿石墨生成的热力学分析[J]. 矿产与地质, 2018, 32(1): 97–100.
- Bian M, Cheng L, Yao J Q. Thermodynamics research of graphite forming in regional metamorphic graphite deposits [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, 32(1): 97–100.
- [21]裴先治, 张维吉, 王涛, 等. 北秦岭造山带的地质特征及其构造演化[J]. 西北地质, 1995, 16(4): 8–12.
- Pei X Z, Zhang W J, Wang T, et al. Geological characteristics and tectonic evolution of north Qinling orogenic belt [J]. *Northwestern Geology*, 1995, 16(4): 8–12.

(上接第 359 页/Continued from Page 359)

- [21]肖克炎, 张晓华, 陈郑辉, 等. 成矿预测中证据权重法与信息量法及其比较[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(3): 223–226.
- Xiao K Y, Zhang X H, Chen Z H, et al. Comparison of method of weights of evidence and information[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 21(3): 223–226.
- [22]王志旺, 李端有, 王湘桂. 证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1268–1273.
- Wang Z W, Li D Y, Wang X G. Zonation of landslide hazards based on weights of evidence model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(8): 1268–1273.
- [23]地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)(试行)[S]. 北京: 自然资源部, 2021.
- Technical requirements for geological disaster risk investigation and evaluation (1:50 000) (trial) [S]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2021. (in Chinese)
- [24]潘懋, 李铁锋. 灾害地质学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2012: 32–45.
- Pan M, Li T F. Disaster geology [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2012: 32–45. (in Chinese)
- [25]余建英, 何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 255–257, 379–385.
- Yu J Y, He X H. Statistical analysis and SPSS application [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2003: 255–257, 379–385. (in Chinese)
- [26]汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012: 309–315.
- Tang G A, Yang X. Experimental course on spatial analysis of geographic information systems [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012: 309–315. (in Chinese)
- [27]胡燕, 李德营, 孟颂颂, 等. 基于证据权法的巴东县城滑坡灾害易发性评价[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 187–194.
- Hu Y, Li D Y, Meng S S, et al. Landslide susceptibility evaluation in Badong County based on weights of evidence method [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 187–194.