



GIS 支持下基于 CF 和 CF-LR 模型的恩施州滑坡灾害易发性评价

于小曼¹, 简文星¹, 邵 山², 王 浩², 简志华¹, 吴凯锋¹, 张 峰²

1. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省地质环境总站灾害地质调查监测中心, 湖北 武汉 430034

摘 要: 湖北省恩施州内地质条件复杂, 境内地质灾害数量众多, 尤以滑坡为甚。以该州为研究范围, 择取了包括地表坡度、斜坡坡型、坡向、构造、道路、地表水系、地层岩性、植被覆盖率 8 个方面的影响因素, 基于 ArcGIS 平台统计分析空间数据的功能, 分别采用确定系数模型及确定系数和逻辑回归耦合模型的方法进行区域滑坡地质灾害易发性评价, 再通过对验证集灾害点在各个分区内的遍布情况和 AUC 值的比对进行两种模型的精度验证。结果表明两种模型易发性分区结果大体上一致, 耦合模型的精度略高一筹。基于该组合模型计算出的易发值, 将恩施州滑坡灾害易发性等级划为低易发区、中易发区、高易发区和极高易发区, 为该地区地质灾害防治提供支撑。

关键词: 地质灾害; 滑坡; 易发性评价; 确定系数法; 逻辑回归; 湖北省

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT FOR ENSHI, HUBEI PROVINCE: With GIS-based certainty factor and certainty factor-logistic regression coupling model

YU Xiao-man¹, JIAN Wen-xing¹, SHAO Shan², WANG Hao², JIAN Zhi-hua¹, WU Kai-feng¹, ZHANG Feng²

1. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Geological Disaster Survey and Monitoring Center, Hubei Geological Environment Station, Wuhan 430034, China

Abstract: The geological conditions in Enshi Prefecture of Hubei Province are complex, with a high number of geological disasters, especially landslides. Taking the prefecture as the research area, eight influencing factors are selected, including surface slope, slope type, slope aspect, structure, road, water system, formation lithology and vegetation coverage. Based on the statistical analysis of spatial data on ArcGIS platform, the regional landslide susceptibility is evaluated by using the certainty factor (CF) and certainty factor-logistic regression (CF-LR) coupling model. Then the accuracy of both models is verified by comparing the distribution of disaster sites in the validation set in each zoning area and AUC values. The results show that the susceptibility zoning of the two models are generally consistent, although the accuracy of the coupling model is slightly higher. Based on the calculated values of the combined models, Enshi area is classified into low, medium, high and extra-high susceptible zones in terms of landslide susceptibility level, which can provide support for the prevention and control of geological hazards in the area.

Key words: geological disaster; landslide; susceptibility assessment; certainty factor; logistic regression; Hubei Province

收稿日期: 2022-11-24; 修回日期: 2022-12-12. 编辑: 张哲.

基金项目: 湖北省重点研发计划项目“特大暴雨下山区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).

作者简介: 于小曼(1996—), 女, 硕士, 主要研究方向为地质灾害风险评价, 通信地址 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, E-mail/1213399426@qq.com

通信作者: 简文星(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质等方面的教学和科研工作, 通信地址 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, E-mail/wxjian@cug.edu.cn

0 引言

区域地质灾害易发性是指特定区域内发生地质灾害的空间概率,灾害的产生受到自然因素和人为因素两方面的影响,其中自然因素如地质构造、地形地貌等,本质上决定了该区域是否具有发生地质灾害的基本条件,对地灾的发生起着根本性的作用^[1]。

地质灾害易发性评价模型随着GIS技术和人工智能的发展经历了革新和融合的过程,由传统的经验模型(专家打分法、层次分析法等),到统计分析模型(信息量法、证据权法等),再到数据驱动模型中的机器学习模型(人工神经网络、逻辑回归、支持向量机等),逐渐成为地质灾害易发性评价的主流趋势。评价模式也从单一模型发展到组合模型。许冲等^[2]利用GIS栅格数据,结合确定系数法(CF)分析了汶川地域地震滑坡的敏感性。张俊等^[3]分别运用逻辑回归和信息量模型对三峡库区万州区的滑坡进行敏感性评价。吴润泽等^[4]采用集成学习中的随机森林算法对三峡库区湖北段的滑坡进行易发性评价。牛瑞卿等^[5]利用粗糙集理论对初选的所有因子进行清筛,然后建立支持向量机(SVM)模型实现评价。黄发明等^[6]基于聚类分析合理选取非滑坡栅格单元,然后输入值到SVM模型进行评价。罗路广等^[7]采用CF模型、逻辑回归(LR)模型及二者耦合模型进行滑坡易发性研究,结果说明了耦合模型相较于单一模型准确度更高。

恩施州地质灾害数量众多,境内滑坡灾害相比于其他类型的地质灾害发育更为广泛,对恩施地区展开滑坡灾害易发性预测研究对于发现地灾隐患点、区域规划、防灾减灾等有积极意义。前人对恩施地区开展的易发性评价主要使用了层次分析法、人工打分等经验模型,主观成分较多,对评价的合理性有一定影响。本文选用CF和二元LR结合的方法进行恩施州境内的滑坡易发性评价。

1 研究区概况

恩施土家族苗族自治州处于鄂西南,属亚热带季风性山地湿润气候,降雨充沛,极端暴雨、洪水、高温频发。州内主要地表水系为清江,支流众多。境内平均海拔高度1 000 m,地貌以山地为主,地势整体上呈现为中部低,东北和西北部较高的形势。境内出露地层较齐全,除少数地层缺失外,中元古界至第四系均有分

布。境内构造断裂和褶皱较为发育。

受自然条件因素影响,全州境内地质灾害发育,根据恩施州8个县市地质灾害详细调查统计,共有各类地质灾害点3 943处。主要灾种有滑坡(2 633处)、崩塌(463处)、不稳定斜坡(796处)、泥石流(51处),其中滑坡灾害为恩施州的主要灾害类型,灾害点分布情况如图1所示。

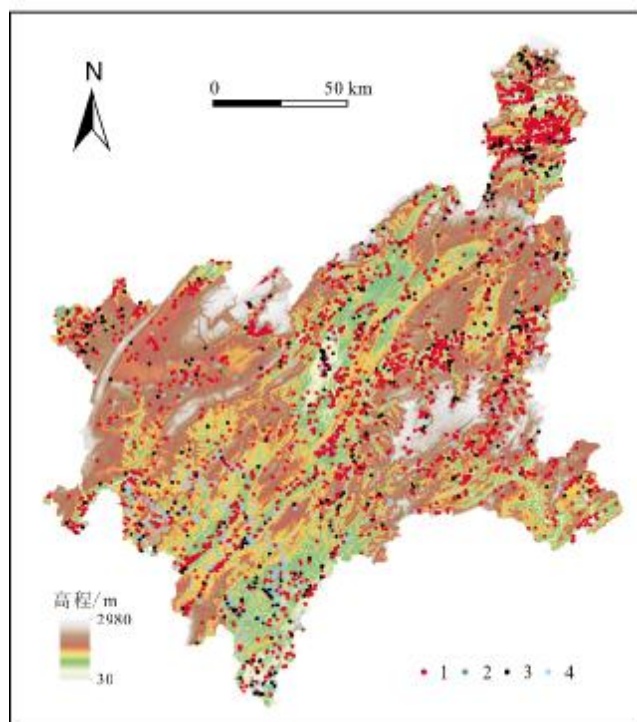


图1 恩施州地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution of geological disasters in Enshi area

1—滑坡(landslide); 2—泥石流(debris flow); 3—崩塌(collapse); 4—不稳定斜坡(unstable slope)

2 评价方法

2.1 确定系数模型

确定性系数(Certainty Factor, CF)模型是一个概率函数^[8],其具有统计意义的基本前提是运用工程类比的思想,假定了一定区域内未来引发地质灾害的条件与过去发生灾害的条件相同。模型计算公式如下:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & PP_a < PP_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: PP_a 表示地质灾害在某个因子分类 a 中的发生可能性,通常使用因子分类 a 中统计的历史灾害点密

度表示; PP_s 表示整个研究区范围内的历史灾害点密度。

CF 值的范围是 $-1 \sim +1$, 正值表示相较于该地区历史灾害点发生时的地质环境条件, 某因子分类 a 下地质条件差, 灾害发生的可能性大; 负值表示分类 a 下地质条件良好, 灾害发生的可能性小。值越大说明该自然因素下地质灾害发生的确定性越高。

2.2 二元逻辑回归模型

二元逻辑回归(Logistic Regression, LR)模型是适用于因变量为二分类数据的回归模型。在地质灾害易发性评价过程中, 可以用来表示二分类因变量即地质灾害发生与否(发生计为 1, 不发生计为 0)和系列自变量($x_1, x_2, \dots, x_n$)即影响地质灾害易发性的各因子之间的关系^[9]。逻辑回归方程如下:

$$P(y=1) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}} \quad (2)$$

式中: P 表示地质灾害发生的概率; α 为截距; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为回归系数; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为评价因子的指标值。 P 的范围是 $0 \sim 1$, 此数值越大表示对应空间位置上发生地灾的概率越大。

3 评价指标的选取和分级

评价指标选取的合理与准确与否直接影响地质灾害易发性的评价结果。在选择时应考虑以下几个方面: 指标可以反映研究区实地调查的地质环境; 指标具有可获得性, 便于收集、整理; 指标具有可操作性, 可以完成成果的可视化^[10]。

基于确定系数法的评价需要对因子进行分级, 离散数据如斜坡坡型、地层岩性可以直接分类, 连续数据如坡度等则采用自然断点的方式划分区间。自然断点法的工作原理是统计各种分类的方差和, 其值最小的判定为最优的分类结果, 具有一定的科学性^[11]。

在研究恩施州地质灾害发生的地质环境条件、历史灾害点分布等基础上, 确定以下 9 个指标作为初步的评价因子。

1) 高差: 斜坡的相对高差越大坡体愈陡峭, 内在剪应力增加^[12], 使斜坡失稳的概率增大。恩施州整体海拔较高, 山地众多, 相对高差大。大部分滑坡发生在高差为 $20 \sim 200$ m 的地形中。根据自然断点将高差分为 5 个等级: ≤ 20 m, $20 \sim 50$ m, $50 \sim 100$ m, $100 \sim 200$ m,

> 200 m。

2) 地表坡度: 坡度的陡缓(即坡角大小)明显影响坡体内的应力分布。经统计, 恩施州内的滑坡主要集中在 $10 \sim 30^\circ$, 坡度超过 50° 时滑坡极少发生。所以将坡度分为 6 个等级: $\leq 10^\circ$, $10 \sim 20^\circ$, $20 \sim 30^\circ$, $30 \sim 40^\circ$, $40 \sim 50^\circ$, $> 50^\circ$ 。

3) 斜坡坡型: 坡型指斜坡的剖面形态, 主要有凸型、凹型、直线型和阶梯型几类, 凸型坡的临空条件相较于其他坡型更利于滑坡的产生。恩施州内近半数滑坡坡型表现为凸型。

4) 坡向: 不同坡向致使坡体受到的日照、降水有所差异, 进而影响斜坡稳定性^[13]。恩施州滑坡集中发育在坡向为南、西南、西、西北的阳坡中。

5) 构造: 研究区内断裂带发育, 灾害点沿构造线呈带状分布。对研究区内的大型和小型断裂建立不同范围的缓冲区, 断裂缓冲区分为 6 级: ≤ 200 m, $200 \sim 400$ m, $400 \sim 800$ m, $800 \sim 1\ 200$ m, $1\ 200 \sim 1\ 600$ m, $> 1\ 600$ m。

6) 道路: 道路的修建改变地面形态, 道路切坡易引起边坡失稳。将恩施境内的道路根据铁路高速、国道省道、一般公路 3 个等级建立不同范围缓冲区。综合后道路缓冲区分为 8 级: ≤ 100 m, $100 \sim 200$ m, $200 \sim 400$ m, $400 \sim 600$ m, $600 \sim 800$ m, $800 \sim 1\ 200$ m, $1\ 200 \sim 1\ 600$ m, $> 1\ 600$ m。

7) 地表水系: 地表水系对斜坡坡脚有冲刷掏蚀作用, 研究区内以清江和清江支流构建不同影响范围的缓冲区来研究水系对滑坡的影响作用。水系缓冲区分为 6 级: ≤ 100 m, $100 \sim 200$ m, $200 \sim 400$ m, $400 \sim 600$ m, $600 \sim 800$ m, > 800 m。

8) 地层岩性: 地层岩性是控制滑坡形成的内在因素, 不同岩性的物理、力学性质不同导致滑坡发生的难易程度有异。恩施州第四系松散松软土类以及层状碎屑岩岩类的薄层-中厚层状软弱泥质粉砂岩、页岩岩组中滑坡灾害点占比较高。

9) 植被覆盖率: 植被的根系和土体的耦合一定程度上起到护坡的作用, 恩施地区植被覆盖率极高的地区滑坡鲜有发生。根据自然断点的方式将覆盖率为 5 类: 极高、高、中、低、极低。

考虑到上述因子之间可能存在相关性, 为避免指标间因空间相关性、共线性等而导致影响因子重复叠加, 模型计算产生误差, 需要通过两两比较的方式进行

相关性分析来检验影响因子的独立性^[14], 本研究采用协方差检验计算各变量的相关性(表 1)。

由表 1 可知,大部分因子之间相关性不高,小部分因子像高差和坡度相关性很高(>0.9),考量到坡度是高差和水平坡长的比值,坡度更能反映地表的变化特

征,所以去除高差这个指标,最终择取了地表坡度、坡向、斜坡坡型、构造、道路、地表水系、地层岩性、植被覆盖率这 8 个指标作为恩施州滑坡灾害易发性评价因子。各因子详细分级见表 2,各因子分级在恩施州的分布见图 2。

表 1 易发性评价因子相关性矩阵

Table 1 Correlation matrix of susceptibility evaluation factors

因子图层	高差	坡向	坡度	斜坡坡型	植被覆盖率	地层岩性	断层	道路	水系
高差	1								
坡向	0.01313	1							
坡度	0.92533	0.02329	1						
斜坡坡型	0.01085	0.02547	0.02339	1					
植被覆盖率	0.17952	0.00423	0.17875	0.03787	1				
地层岩性	0.02632	0.01724	0.02218	0.00610	0.01497	1			
断层	0.00560	-0.00196	-0.00225	0.00408	0.00416	-0.05787	1		
道路	0.17085	-0.00548	0.15462	0.00536	0.13018	-0.01968	0.04191	1	
水系	-0.04701	0.07083	-0.03119	0.02910	0.20345	0.09732	0.0.953	0.12175	1

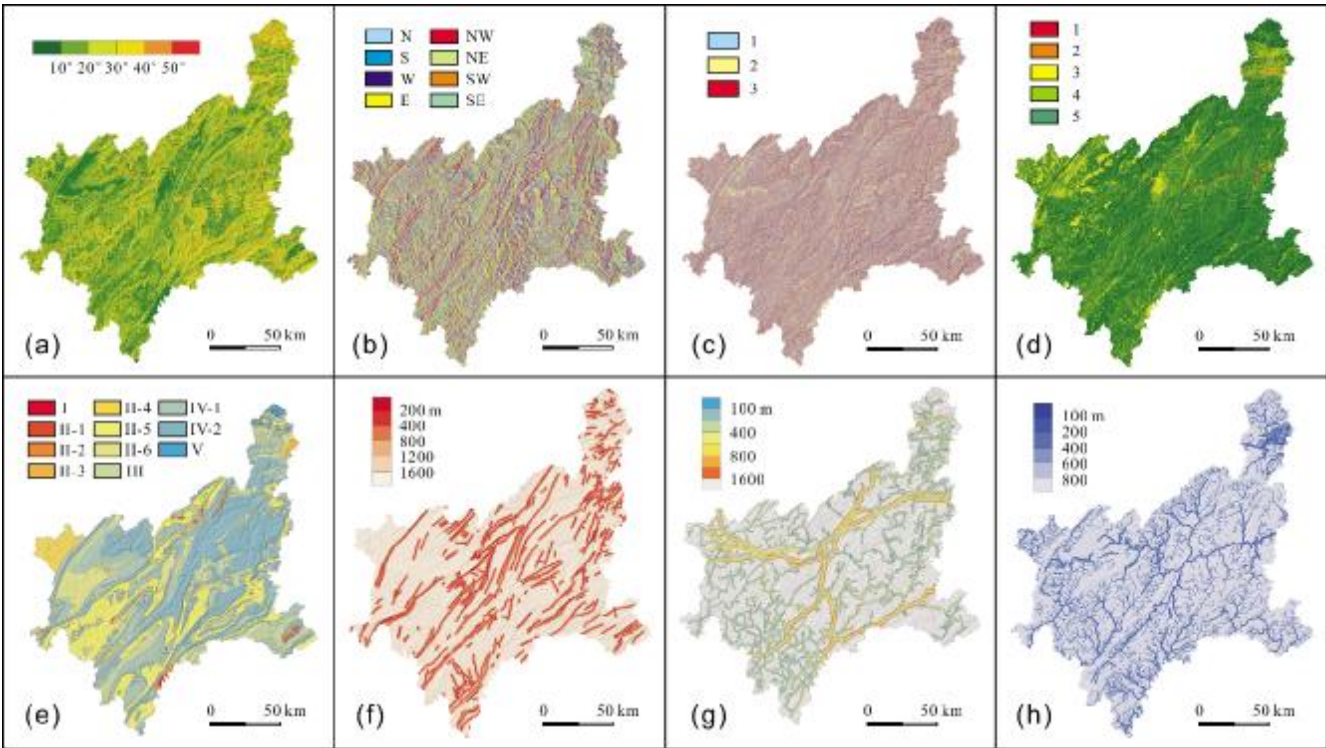


图 2 易发性评价因子分级图

Fig. 2 Grading maps of susceptibility evaluation factors

a—坡度(slope gradient); b—坡向(slope aspect); c—坡型(slope type): c1—凸型(convex slope), c2—凹型(concave slope), c3—直线型和阶梯型(straight and stepped slope); d—植被覆盖率(NDVI): d1—极高(extra-high), d2—高(high), d3—中(medium), d4—低(low), d5—极低(extra-low); e—地层岩性(formation lithology); f—距构造距离(distance from faults); g—距道路距离(distance from roads); h—距水系距离(distance from streams)

表 2 评价因子分级 CF 值

Table 2 CF values for susceptibility evaluation factors of different levels

评价因子	因子分级	分级面积/ km ²	总面积/ km ²	灾害点 数量	CF	评价因子	因子分级	分级面积/ km ²	总面积/ km ²	灾害点 数量	CF
坡度/(°)	0~10	5540.77	24114.61	346	-0.284964	构造缓冲区/m	<200	1130.32	24114.61	109	0.253111
	10~20	8734.40	24114.61	862	0.115080		200~400	1858.81	24114.61	232	0.290977
	20~30	6237.48	24114.61	657	0.170872		400~800	2390.85	24114.61	245	0.116375
	30~40	2759.73	24114.61	200	-0.170179		800~1 200	2665.46	24114.61	254	0.044571
	40~50	716.21	24114.61	40	-0.360499		1 200~1 600	449.68	24114.61	24	-0.320114
	>50	126.02	24114.61	1	-0.909141		>1 600	15619.49	24114.61	1242	-0.092267
坡向	北	2714.20	24114.61	240	0.012337	水系缓冲区/m	<100	2035.76	24114.61	337	0.556090
	北东	2518.64	24114.61	192	-0.127117		100~200	1862.31	24114.61	335	0.501733
	东	3183.82	24114.61	266	-0.043347		200~400	940.35	24114.61	188	0.526812
	南东	2591.82	24114.61	179	-0.209194		400~600	545.75	24114.61	87	0.446493
	南	2879.75	24114.61	271	0.071968		600~800	90.50	24114.61	18	0.651735
	南西	3726.70	24114.61	354	0.080610		>800	18639.94	24114.61	1141	-0.326288
	西	3052.96	24114.61	282	0.054526	地层岩性	I	69.93	24114.61	11	0.444838
	北西	3446.71	24114.61	322	0.065182		Ⅱ -1	385.41	24114.61	29	-0.13843
植被覆盖率	极低	92.34	24114.61	13	0.379641		Ⅱ -2	77.54	24114.61	7	0.032569
	低	197.26	24114.61	42	0.589821		Ⅱ -3	329.75	24114.61	35	0.177189
	中	1275.49	24114.61	258	0.568245		Ⅱ -4	1062.29	24114.61	90	-0.029889
	高	4836.33	24114.61	845	0.500153		Ⅱ -5	4818.06	24114.61	446	0.056558
	极高	17713.18	24114.61	948	-0.387179		Ⅱ -6	1591.50	24114.61	454	0.693853
道路缓冲区/m	<100	873.59	24114.61	185	0.587606		Ⅲ	3538.93	24114.61	380	0.186670
	100~200	1319.42	24114.61	309	0.627091		Ⅳ -1	6411.62	24114.61	340	-0.392798
	200~400	2533.54	24114.61	302	0.267347		Ⅳ -2	5749.23	24114.61	313	-0.376615
	400~600	1746.53	24114.61	165	0.075578		V	80.33	24114.61	1	-0.857466
	600~800	976.43	24114.61	111	0.231764		凸型	10554.51	24114.61	984	0.063255
	800~1 200	431.59	24114.61	27	-0.283672	斜坡坡型	直线和阶梯型	3543.94	24114.61	350	0.115706
	1 200~1 600	402.40	24114.61	13	-0.630077		凹型坡	10016.01	24114.61	772	-0.117440
	>1 600	15831.12	24114.61	994	-0.281053						

注：Ⅰ—第四系松散松软土类；Ⅱ-1—中—厚层状坚硬石英岩、石英砂岩岩组；Ⅱ-2—块状—厚层状较坚硬砂岩、砾岩岩组；Ⅱ-3—厚层状坚硬、较坚硬泥砾岩岩组；Ⅱ-4—薄—厚层状较坚硬至软弱砂岩、泥质粉砂岩夹长石石英砂岩、页岩，煤层与泥岩、页岩互层岩组；Ⅱ-5—薄层—中厚层状软弱页岩、粉砂岩、泥岩岩组；Ⅱ-6—薄层—中厚层状软弱泥质粉砂岩、页岩岩组；Ⅲ—薄—中厚层状坚硬、较坚硬泥灰岩、灰岩、瘤状灰岩、硅质岩、龟裂纹灰岩夹软弱页岩、泥岩、炭质页岩及煤层或瘤状灰岩与页岩互层岩组；Ⅳ-1—薄—厚层状坚硬灰岩、白云岩、白云质灰岩、灰质白云岩、泥质白云岩岩组；Ⅳ-2—中—厚层状坚硬、较坚硬灰岩、燧石结核灰岩岩组；Ⅴ—中—厚层块状坚硬白云岩夹白云质粉砂岩岩组。

4 评价模型

4.1 基于 CF 模型

根据 DEM 数据的栅格大小来确定研究区其他数据的单元大小,在滑坡易发性评价模型当中广为使用^[15]。本研究利用 ArcGIS 平台将各个因子图层栅格化,处理成与 DEM 一样大小的 30 m×30 m 的规则单元。然后将各个图层分别与 2 106 个已发现滑坡灾害点进行空间叠加(其中灾害点为随机抽取的总灾害点的 80%,剩余 20%用于后续的结果验证),统计每个因子每个分级面上的灾害点密度,基于 CF 的统计公式计算各级的 CF 值(表 2)。评价单元为各个栅格单元,其易发值为相同空间位置上 8 个评价因子 CF 值的和,将最终易发值进行归一化处理以便后续易发值分区和模型对比。

4.2 基于 CF-LR 耦合模型

在恩施州范围内随机选取 2 106 个非滑坡灾害点,与 2 106 个滑坡灾害点共同组成逻辑回归模型中的因变量统计样本(灾害点记为 1,非灾害点记为 0)。提取统计样本空间位置上对应的各个评价因子分级指标的 CF 值,将其作为自变量样本。将所得数据进行二元逻辑回归分析,回归结果见表 3,可以看出各个评价因子的显著性都小于 0.05(样本显著有效,具有统计学意义)^[16]。模型拟合完成后所得的各评价因子的回归系数再次代入模型,即得到关于滑坡易发性的逻辑回归方程:

$$P = \frac{\exp^z}{1 + \exp^z}$$
$$z = 1.071 + 1.801x_1 + 2.379x_2 + 2.231x_3 + 1.122x_4 + 2.398x_5 + 2.145x_6 + 0.210x_7 + 1.630x_8 \quad (3)$$

式中: P 是发生滑坡灾害的概率值, $x_1 \cdots x_8$ 为前文选定的 8 个评价指标的 CF 值。

5 易发性评价结果

基于 ArcGIS 平台的栅格计算器工具计算出各个栅格的易发值,将该值以等间距分为 4 个等级: 0~0.25 (低易发区)、0.25~0.5 (中易发区)、0.5~0.75 (高易发区)、0.75~1 (极高易发区)。单一 CF 模型和 CF-LR 耦合模型的易发性分区结果见表 4 和图 3。

恩施州的滑坡灾害高易发区主要分布在巴东县北部、恩施市中部及利川市、咸丰县、来凤县的部分地区。

表 3 基于 CF 模型的逻辑回归分析结果
Table 3 Results of logistic regression analysis based on CF model

回归项	B	SE	wals	df	sig
坡度	1.801	0.209	7.397	1	0.000
构造	2.379	0.300	6.293	1	0.000
地表水系	2.231	0.120	3.476	1	0.000
道路	1.122	0.084	1.788	1	0.001
地层岩性	2.398	0.131	3.348	1	0.000
植被覆盖率	2.145	0.105	4.180	1	0.003
斜坡坡型	0.210	0.002	0.170	1	0.001
坡向	1.630	0.428	14.511	1	0.000
常量	1.071	0.059	3.387	1	0.000

注: B 为各因子回归系数, SE 为标准误差, $wals$ 为卡方值, df 为自由度, sig 为显著性。

表 4 易发性分区结果
Table 4 Results of susceptibility zoning

易发性分区	CF 模型	CF-LR 模型
低易发区	30.27	40.35
中易发区	34.75	32.57
高易发区	24.84	13.62
极高易发区	10.15	14.35

注:数值为各分区面积占比(%)。

滑坡易发于第四系松散松软土类以及层状碎屑岩岩类中的薄层—中厚层状软弱泥质粉砂岩、页岩岩组中。松软土类结构松散至稍密,透水性好,力学强度低,易沿基岩界面形成滑坡;泥岩岩性脆,易风化,也不利于斜坡稳定性。

高易发区分布于靠近构造线、道路网和水系影响带的地区。沿大青山断裂、猫儿坪断裂带附近形成带状的高易发区;恩施州境内高山深谷遍布,沟谷切割较深,水系丰富,水体冲刷、软化坡脚使坡体前缘临空或抗滑力下降易使斜坡失稳;境内公路大多依山傍水而建,道路切坡、开挖坡脚等行为为灾害的发生创造了条件。低易发区主要分布在建始县东南部等整体地势较为平缓、地质环境条件良好的区域。

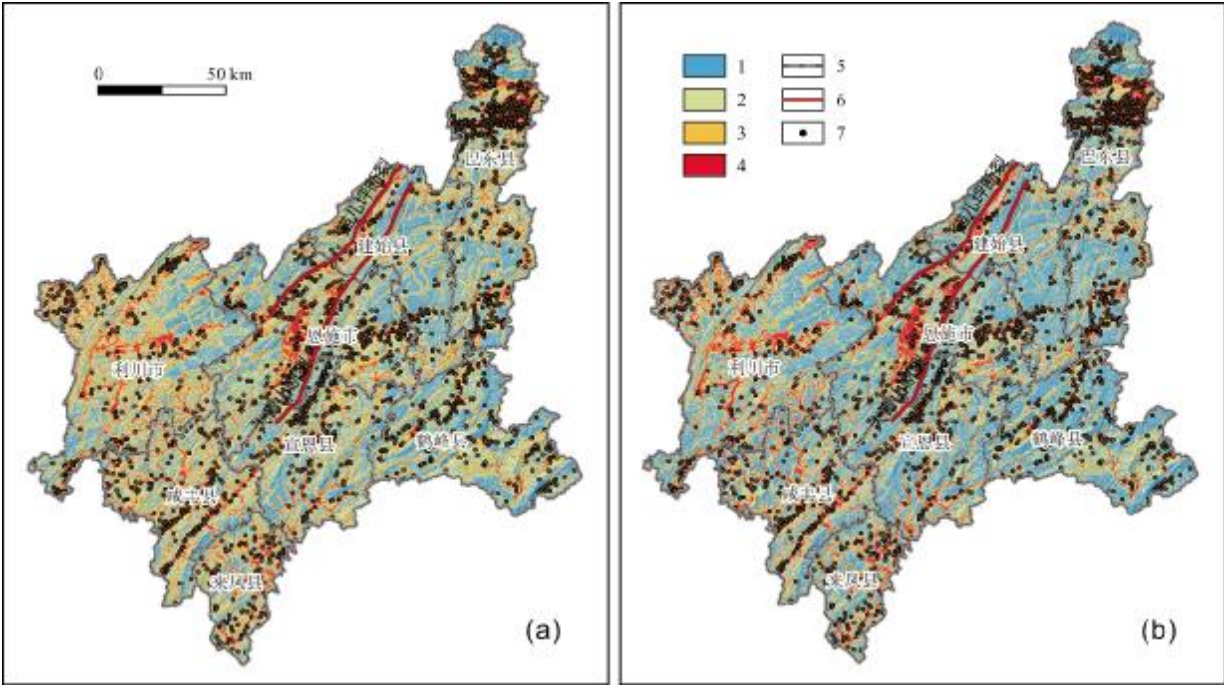


图 3 两种模型下易发性分区图

Fig. 3 Susceptibility zoning maps based on two models

a— CF 模型(CF model); b— CF-LR 模型(CF-LR model); 1—低易发区(low susceptible area); 2—中易发区(medium susceptible area); 3—高易发区(high susceptible area); 4—极高易发区(extra-high susceptible area); 5—县界(county boundary); 6—断裂(fault); 7—滑坡灾害点(landslides site)

6 模型精度检验与对比

6.1 灾害点分布检验

分区的合理与否可以通过灾害点在不同易发区间内的分布情况来判断、检验^[17]。此处参与检验的是没有参与前文模型训练的 527 个滑坡灾害点(总样本的 20%)。检验的基本原则是: 1)落在极高易发区内的检验样点比例应该是最高的; 2)检验点落在各区比例 G_i 与各易发分区的面积占比 S_i 的比值 R_i 应该是随易发程度递增的^[18]。

$$R_i = G_i / S_i \quad (i = \text{I, II, III, IV}) \quad (4)$$

式中: G_i 为落在某等级分区内的检验点百分比; S_i 为某等级分区面积百分比。

检验结果(表 5)显示,在两个模型中,灾害点比例和 R_i 值都是随着易发等级递增的,结果都较合理。在 CF 模型中,落在高易发和极高易发区的试验检验点比例各自达到了 31.5%和 40.04%;而在耦合模型中,该比例分别达到了 32.07%和 42.88%。同时在 CF 模型中,低易发区中的试验点比例为 7.02%,而在耦合模型中该比例为 6.45%。总体看来,耦合模型在试验点检验中结果更为准确一些。

表 5 研究区滑坡易发分区的检验结果

Table 5 Test results of landslide susceptibility zoning in the study area

易发性分区	CF 模型			CF-LR 模型		
	面积占比 $S_i/\%$	灾害点 比例 $G_i/\%$	R_i	面积占比 $S_i/\%$	灾害点 比例 $G_i/\%$	R_i
低易发区	30.27	7.02	0.23	40.35	6.45	0.16
中易发区	34.75	21.44	0.62	32.57	18.60	0.57
高易发区	24.84	31.50	1.27	13.62	32.07	2.35
极高易发区	10.15	40.04	3.95	14.35	42.88	2.99

6.2 ROC 曲线分析

ROC 曲线是指分析正负样本值后计算出的假阳性率和真阳性率构成的曲线^[19]。AUC 值表示 ROC 曲线与下方坐标轴围成的面积,是度量分类模型好坏的一个标准,其值介于 0.5~1 之间,越接近 1,则表示模型对样本值正负的判断准确性越高^[20]。两种模型的 ROC 曲线如图 4。分析 ROC 曲线结果,单个 CF 模型的 AUC 值为 0.884,耦合模型的 AUC 值为 0.905,说明耦合模型预测的准确率比单一 CF 模型更高。

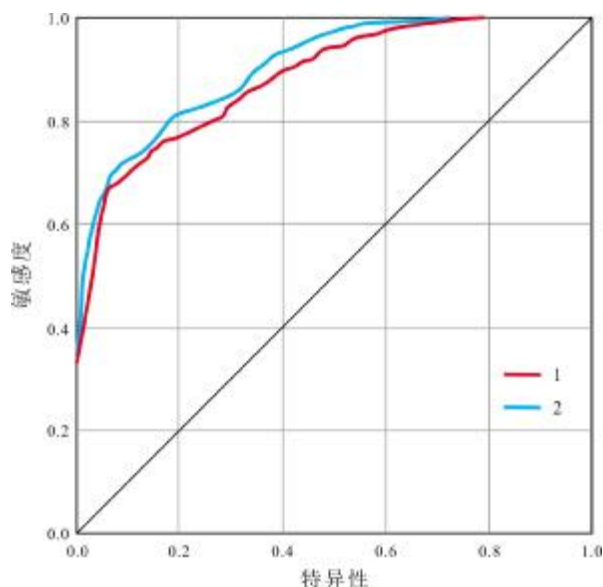


图4 两种模型 ROC 曲线

Fig. 4 ROC curves of two models

1—CF 模型(CF model); 2—耦合模型(coupling model)

7 结论

本研究使用单一 CF 模型和 CF-LR 耦合模型对恩施土家族苗族自治州进行滑坡地质灾害易发性评价,并利用 ROC 曲线和通过验证灾害点分布情况对评价结果进行检验,得出结论如下:

1)分析 8 个评价因子的 CF 值和回归系数,可以看出道路、地表水系、地层岩性对于恩施地区滑坡易发性贡献度较大。恩施州滑坡易发于松散松软土类以及软弱泥质粉砂岩、页岩岩组中,又因境内高山沟谷纵横,道路依山傍水而建,滑坡常发于公路或水系 200 m 影响范围带内。

2)恩施州的滑坡灾害高易发区主要分布在巴东县北部、恩施市中部及利川市、咸丰县、来凤县的部分地区。低易发区主要分布在建始县东南部、鹤峰县等整体地势较为平缓、地质环境条件良好的区域。

3)耦合模型相较于单一 CF 模型,AUC 值更大、高-极高易发区下滑坡灾害点占比更高,评价结果更准确。说明各因子信息量的简单叠加不够合理,而该耦合模型能够解决因子间权重问题进而优化评价结果。

参考文献(References):

[1]王毅,方志策,牛瑞卿,等. 基于深度学习的滑坡灾害易发性分析

[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(12): 2244-2260.

Wang Y, Fang Z C, Niu R Q, et al. Landslide susceptibility analysis based on deep learning[J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(12): 2244-2260.

[2]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.

[3]张俊,殷坤龙,王佳佳,等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 284-296.

Zhang J, Yin K L, Wang J J, et al. Evaluation of landslide susceptibility for Wanzhou district of Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2): 284-296.

[4]吴润泽,胡旭东,梅红波,等. 基于随机森林的滑坡空间易发性评价:以三峡库区湖北段为例[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 321-330.

Wu R Z, Hu X D, Mei H B, et al. Spatial susceptibility assessment of landslides based on random forest: A case study from Hubei section in the Three Gorges Reservoir area[J]. Earth Science, 2021, 46(1): 321-330.

[5]牛瑞卿,彭令,叶润青,等. 基于粗糙集的支持向量机滑坡易发性评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 430-439.

Niu R Q, Peng L, Ye R Q, et al. Landslide susceptibility assessment based on rough sets and support vector machine[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 430-439.

[6]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 F M, Yin K L, Jiang S H, 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.

[7]罗路广,裴向军,黄润秋,等. GIS 支持下 CF 与 Logistic 回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2021, 29 (2): 526-535.

Luo L G, Pei X J, Huang R Q, et al. Landslide susceptibility assessment in Jiuzhaigou scenic area with GIS based on certainty factor and logistic regression model[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 526-535.

[8]Shortliffe E H, Buchanan B G. A model of inexact reasoning in medicine[J]. Mathematical Biosciences, 1975, 23(3/4): 351-379.

[9]栗泽桐,王涛,周杨,等. 基于信息量、逻辑回归及其耦合模型的滑坡易发性评估研究:以青海沙塘川流域为例[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 235-245.

Li Z T, Wang T, Zhou Y, et al. Landslide susceptibility assessment based on information value model, logistic regression model and their integrated model: A case in Shatang River Basin, Qinghai Province

- [J]. *Geoscience*, 2019, 33(1): 235–245.
- [10] Yin K L, Yan T Z. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks [C]//*Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*. Lausanne, 1988.
- [11] Zhao L R, Wu X L, Niu R Q, et al. Using the rotation and random forest models of ensemble learning to predict landslide susceptibility [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2010, 11(1): 1542–1564.
- [12] 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.
- Jiao W Z, Zhang M, Xie X P, et al. Susceptibility evaluation of urban geological disaster based on GIS and weighted information value model: A case study of Daxin Town[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(4): 119–128.
- [13] 胡涛, 樊鑫, 王硕, 等. 基于逻辑回归模型和 3S 技术的思南县滑坡易发性评价[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(2): 113–121.
- Hu T, Fan X, Wang S, et al. Landslide susceptibility evaluation of Sinan County using logistics regression model and 3S technology[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(2): 113–121.
- [14] Chen L X, van Westen C J, Hussin H, et al. Integrating expert opinion with modeling for quantitative multi-hazard risk assessment in the Eastern Italian Alps[J]. *Geomorphology*, 2016, 273: 150–167.
- [15] 霍艾迪, 张骏, 卢玉东, 等. 地质灾害易发性评价单元划分方法——以陕西省黄陵县为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(2): 523–528, 535.
- Huo A D, Zhang J, Lu Y D, et al. Method of classification for susceptibility evaluation unit for geological hazards: A case study of Huangling County, Shaanxi, China[J]. *Journal of Jilin University* (Earth Science Edition), 2011, 41(2): 523–528, 535.
- [16] 解明礼, 巨能攀, 赵建军, 等. 区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(7): 1003–1014.
- Xie M L, Ju N P, Zhao J J, et al. Comparative analysis on classification methods of geological disaster susceptibility assessment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1003–1014.
- [17] Zhang Y E, Li D Y, Yin K L, et al. The July 1, 2017 Wangjiawan landslide in Ningxiang County, China[J]. *Landslides*, 2018, 15(8): 1657–1662.
- [18] 刘月, 王宁涛, 周超, 等. 基于 ROC 曲线与确定性系数法集成模型的三峡库区奉节县滑坡易发性评价[J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(4): 61–70.
- Liu Y, Wang N T, Zhou C, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on ROC and certainty factor method in Fengjie County, Three Gorges Reservoir[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(4): 61–70.
- [19] 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 Z Y, Gou X F, Qin M Y, 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.
- [20] Chen L X, Guo Z Z, Yin K L, et al. The influence of land use and land cover change on landslide susceptibility: A case study in Zhushan Town, Xuan'en County (Hubei, China) [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(10): 2207–2228.

(上接第 689 页/Continued from Page 689)

- [42] Ye J L, Qin X W, Xie W W, et al. The second natural gas hydrate production test in the South China Sea[J]. *China Geology*, 2020, 3(2): 197–209.
- [43] Sahu C, Kumar R, Sangwai J S. Comprehensive review on exploration and drilling techniques for natural gas hydrate reservoirs[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(10): 11813–11839.
- [44] 朱慧星. 天然气水合物开采储层出砂过程及对产气影响的数值模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Zhu H X. Numerical study on sand production processes during natural gas hydrate recovery and its impact on gas production[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [45] 李彦龙. 南海目标区块天然气水合物开发井控砂介质堵塞模拟与控砂参数优化研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021.
- Li Y L. Study on clogging of sand-control media and sand-control optimization for natural gas hydrate production wells in the South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [46] 宁伏龙, 方翔宇, 李彦龙, 等. 天然气水合物开采储层出砂研究进展与思考[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 137–148.
- Ning F L, Fang X Y, Li Y L, et al. Research status and perspective on wellbore sand production from hydrate reservoirs[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1): 137–148.