

半山区滑坡灾害危险性评价

——GIS支持下基于Kuenm包优化Maxent模型

解晋航¹, 石文君¹, 张杰², 张小亮², 李章杰¹, 王宇栋^{1*}

(1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 昆明 650093;

2. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 昆明 650051)

摘要: 根据会泽县地处云贵高原半山区的地理环境特点, 以滑坡灾害为研究对象, 选取地貌、坡度、坡向、曲率、地形起伏度、降雨量、距道路距离、斜坡结构、高程 9 个评价因子, 基于相关性分析和共线性诊断对其进行独立性检验。采用优化 Maxent 模型与加权信息量模型计算滑坡发生概率。基于 GIS 的自然间断法评价结果等级, 通过合理性检验、敏感性检验及现场实地检验比较两种模型的合理性及准确性。结果表明: 两种评价模型均能通过合理性检验, AUC 值分别为 0.902 和 0.769, 优化 Maxent 模型精度更高, 通过刀切法得出距道路距离因子贡献百分比最高, 与野外调查的典型灾害点主要影响因子相吻合, 其稳定、低、中和高的面积分别为 1 585.74 km² (26.70%)、2 138.42 km² (36.90%)、1 594.48 km² (26.85%) 和 567.37 km² (9.55%)。

关键词: 半山区; 滑坡; 优化 Maxent 模型; 加权信息量模型

中图分类号: P642.22; P694; P56 **文献标识码:** A

LANDSLIDE HAZARD ASSESSMENT IN SEMI-MOUNTAINOUS AREAS: OPTIMIZATION OF MAXENT MODEL BASED ON KUENM PACKAGE SUPPORTED BY GIS

XIE Jin-hang¹, SHI Wen-jun¹, ZHANG Jie², ZHANG Xiao-liang², LI Zhang-jie¹, WANG Yu-dong^{1*}

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Key Laboratory of Plateau and Mountain Geological Hazard Prediction and Early Warning and Ecological Protection and Restoration, Ministry of Natural Resources, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to explore the evaluation model suitable for the semi-mountainous areas, the landslide disaster in was selected as the research object, and 9 evaluation factors including landform, slope, slope direction, curvature, relief, rainfall, distance from road, slope structure and elevation were selected to test their independence based on correlation analysis and collinearity diagnosis. The optimal Maxent model and weighted information model were used to calculate the probability of landslide occurrence. The natural discontinuity method based on GIS evaluates the result grade, and compares the rationality and accuracy of the two models through rationality test, sensitivity test and field test. The results show that: Both two models can pass the rationality test, and the AUC values are 0.902 and 0.769, respectively. The optimized Maxent model has higher accuracy, and the main impact factors of typical disaster points are consistent with the optimized Maxent

model. Its stable, low, medium and high areas are 1 585.74 km² (26.70%), 2 138.42 km² (36.90%), 1 594.48 km² (26.85%) and 567.37 km² (9.55%), respectively.

Key words: Semi-mountainous areas; landslip; optimization maxent model; weighted information value model

中国是全球地区复杂程度最高的国家之一,包含多种气候和地形特征,特定的地质条件决定了我国地质灾害频发的态势。就灾害数量而言,2022 年全国共发生地质灾害 5 659 起,其中滑坡 3 919 起。地质灾害发生数量及滑坡灾害占比同比增长 18.69% 和 20.32%,滑坡灾害防治工作需引起人们的高度重视。

滑坡危险性评价是指在研究区域内,利用评价模型对多种影响因子的组合导致滑坡发生的可能性进行评估。目前,危险性评价主要分为启发式推断法、数理统计分析法和机器学习法 3 种^[1]。启发式推断法如层次分析模型(AHP)^[2]主要依靠主观经验确定因子权重,缺乏客观性;数理统计分析法如信息量模型(IV)^[3]、逻辑回归模型(LR)^[4]和频率比法(FR)^[5]等需依赖大量已有数据,并且在量化评价因子及确定权重时需进行前期数学处理,导致数据的获取难度及处理难度增加。

机器学习法如人工神经网络模型(ANNM)^[6]、支持向量机模型(SVM)^[7]和随机森林模型(RFM)^[8]等是当前危险性评价的研究重点。但机器学习法需要大量的训练集数据,特殊的局部地区的数据不能满足训练要求。

为探索适合云南省半山区地理环境特点的评价模型,本文根据地区特点选取评价因子,通过 R 语言调整 Maxent 模型参数,形成优化模型,完成会泽县滑坡危险性评价。Maxent 模型是以最大熵理论为基础,依托 Java 平台建立的生态位模型,其评价过程与滑坡危险性评价极为类似,都是通过分析已有数据预测未来的发展趋势^[9]。与上述模型相比,Maxent 模型具有突出优势:对数据种类要求较低,仅需要灾害点经纬度和环境因子;在样本数量较少的情况下评价准确率较高;无需对权重及评价因子进行前期数学处理;可使用连续或分类变量作为环境因子。

近年来,随着地质灾害研究范围的不断扩大,不少国外学者已将 Maxent 模型应用于滑坡危险性研究中,但国内学者应用该模型进行滑坡危险性评价较少,且大多在默认参数下构建模型,因此评价结果可能与实际情况不符,且精度较低。

本文以滑坡灾害发育强烈的会泽县为研究对象,利用 R 语言的 Kuenm 包对 Maxent 模型的主要参数调控倍频(RM)和特征组合(FCs)进行调整,以优化 Maxent 模型对会泽县滑坡灾害危险性进行评估和预测,并与加权信息量模型进行对比,针对合理性及精度,探讨 Maxent 模型在云贵高原半山区的可靠性。

1 研究区概况

会泽县地处云南省东北部,属山地高原地形,山区面积占全县总面积的 95.7%,84% 的乡镇地处山区半山区,仅有的几处平原地区均被大城镇占据,广大农村散布各处(图 1)。会泽县自 1952 年以来人口数量从 37 万人增长到 106 万人,修建县级以上道路 41 条。一方面是人口数量及经济建设的快速发展,另一方面是土地资源的有限性,辟耕农田、毁林开荒、基础设施建设等人类活动对地质环境造成了一定的破坏,为长江上游水土流失严重区,导致地质灾害频发。

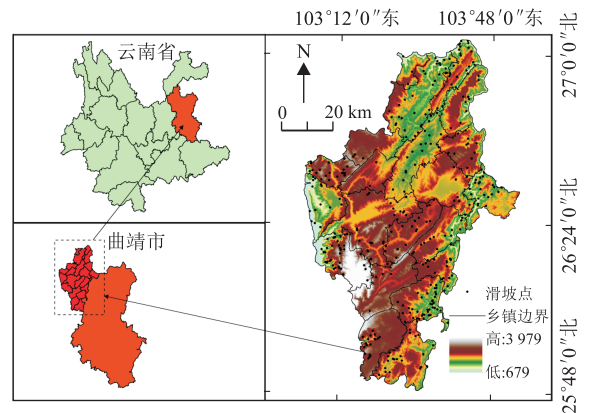


图 1 会泽县地理位置及滑坡点分布图

2 研究方法

2.1 Maxent 模型

Maxent 模型是在满足全部已知约束的基础上对概率事件的合理预测,且在这一过程中对未知部分不做任何假设。在此情况下,预测结果误判风险最小,预测结果越接近自然现实状态,熵值也就越高^[10]。

在滑坡危险性评价中,研究区灾害点与所处位置的环境条件存在联系。以灾害点与环境因子之间的特征函数为全部已知约束,在不做任何假设的前提下,运用最大似然估计法求得最大熵,最终通过模型计算熵最大时的概率分布。该原理在模型内部的具体体现为:提取研究区内滑坡灾害点的位置坐标(经纬度)及与灾害点相关的环境因子两组数据,将其导入 Maxent 模型软件中进行运算,由软件计算出研究区滑坡灾害易发程度概率分布结果^[11]。

其表达式为:

$$H_p = - \sum_{k=0}^n P(E_k) \cdot \ln(E_k) \quad (1)$$

式中, H_p 代表最大熵; E_k 代表第 k 个环境变量; $P(E_k)$ 代表环境变量 E_k 可能出现的概率。

最大熵时的概率分布 k 为:

$$P^* = \arg[\max(H_p)] \quad (2)$$

利用 R 语言的 Kuenm 包对 Maxent 模型的主要参数调控倍频(RM)和特征组合(FCs)进行调整。设置调控倍频(RM)的取值为 0.5~4.0,间隔为 0.5;选取 L(线性)、Q(二次型)、H(片段化)、P(乘积性)和 T(阈值型)5 类特征的 29 种组合进行测试,其组合具体包括: L、Q、H、P、T、LQ、LH、LP、LT、QH、QP、QT、HP、HT、PT、LQH、LQP、LQT、LHP、LHT、LPT、QHP、QHT、HPT、LQHP、LOPT、LQHT、QHPT、LQHPT。

根据 AIC 信息准则,在模型构建过程中需将数据划分为训练集及测试集,而高复杂度模型会导致训练集结果准确率与测试集结果准确率出现较大差异,即模型过拟合现象。最低复杂度模型可有效避免模型过拟合现象,且由已知灾害点分布区域向预测区域的移动性最好。因此,本文以最低复杂度模型(Delta AICc=0)为最优参数模型^[10]。

2.2 信息量模型

信息量模型(IVM)适用于计算多因子影响下发生灾害的概率,计算各影响因子对灾害发生的贡献度,并将贡献度定义为信息量值,信息量值越大,该因子对滑坡灾害的影响越显著,其公式如下:

$$I_i = (y, x_i) = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (3)$$

式中, I_i 为受评价因子 x_i 影响发生的滑坡灾害信息量; y 代表滑坡灾害; x_i 代表不同的评价因子; N_i 为受评价因子 x_i 影响发生的滑坡灾害数量; N 为研究区内发生的滑坡灾害总数; S_i 为评价因子 x_i 的栅格数量; S 为研究区内栅格总数量。

2.3 逻辑回归模型

逻辑回归模型(LRM)描述的是多个自变量与

二分类因变量之间的关系。其中自变量既可以为连续变量也可以为离散变量^[12],因变量只有是与否两种情况,用 1 代表是,0 代表否。在滑坡危险性评价中,以各项影响因子为自变量,是否发生滑坡为因变量。其公式如下:

$$\ln(P/1-P) = \alpha + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n \quad (4)$$

式中, P 为滑坡发生的概率; α 为常量; β_i 为评价因子 x_i 的回归系数。

2.4 加权信息量模型

将逻辑回归法与信息量法结合,通过信息量法计算各影响因子信息量,通过逻辑回归法计算影响因子回归系数并将其作为权重,将二者相乘得到加权信息量,其公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^n \beta_i I_i = \sum_{i=1}^n \beta_i \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (5)$$

式中, I 为在影响因子 x_1, x_2, \dots, x_n 组合条件下的加权信息量。

3 数据来源及评价体系建立

3.1 数据来源

会泽县滑坡灾害点分布情况来自于野外考察所得到的地质灾害详查报告。滑坡灾害危险性评价需要 DEM 数据(坡度、坡向、曲率、斜坡结构、地形起伏度、高程)、地质数据(地貌)、气象数据(年均降雨量)及人类工程活动(道路分布)4 种,数据来源如表 1 所示。

表 1 主要数据来源

数据名称	数据来源	数据类型
DEM 数据	地理空间数据云	30×30 栅格
地质数据	全国地质资料馆网	矢量
人类工程活动	Open Street Map	矢量
气象数据	Wheat A	矢量

3.2 评价单元划分

本文采用规则栅格单元作为评价单元。以经验公式计算适宜格网大小^[13],具体如下:

$$G_s = 7.49 + 0.0006 S - 2.0 \times 10^{-9} + 2.9 \times 10^{-15} S^3 \quad (6)$$

式中, G_s 为适宜格网大小; S 为调查精度比例尺的分母。调查精度比例尺为 1:50 000,将 S 为 50 000 带入式中可得适宜格网大小为 30 m。

3.3 评价因子分析及选取

本文在会泽县资料收集和野外调查的基础上,选取地貌、坡度、坡向、曲率、地形起伏度、距道路距离、斜坡结构和高程、降雨 9 个因子建立评价体系(图 2)。

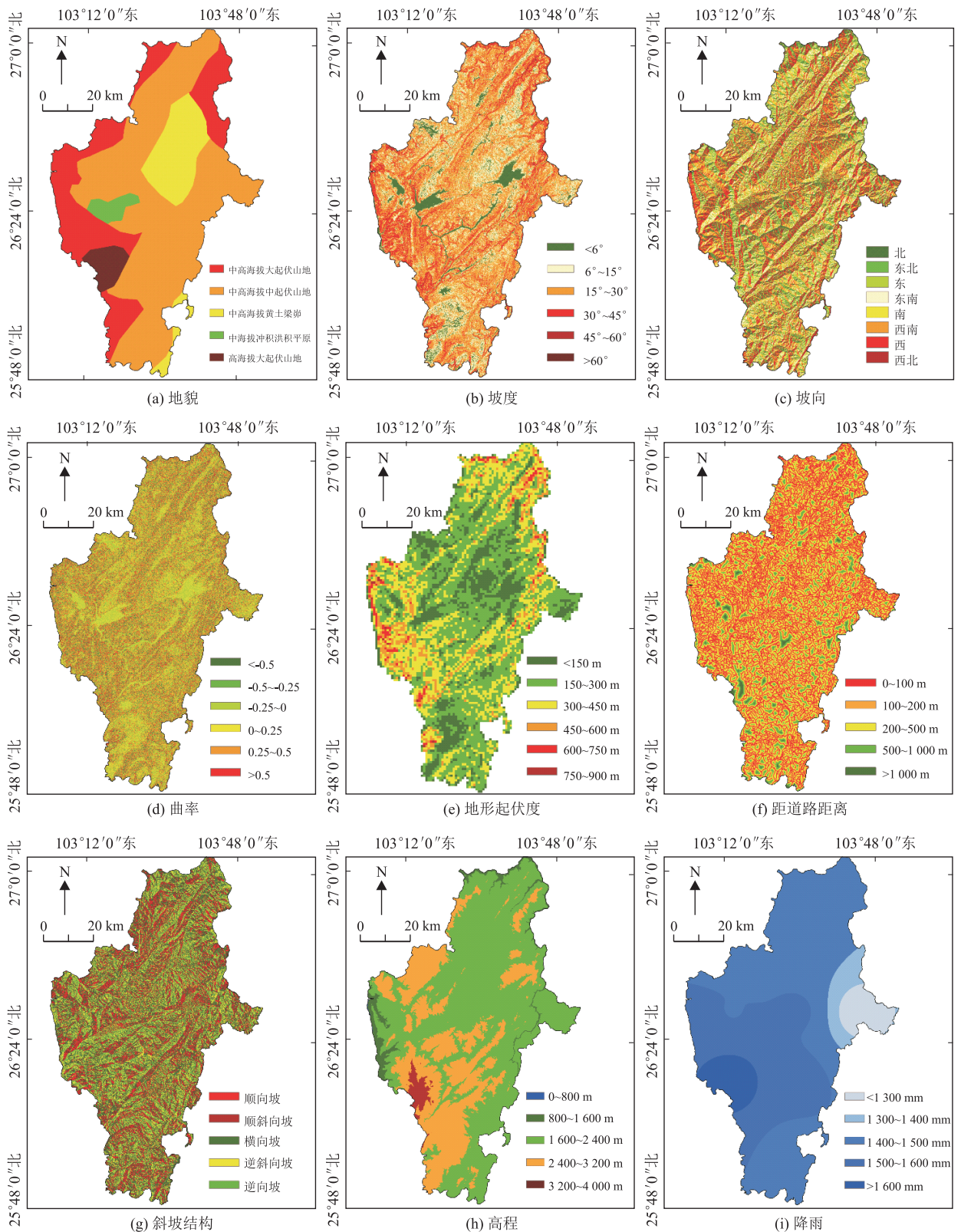


图2 会泽县滑坡灾害评价因子分级图

4 会泽县滑坡灾害危险性评价

4.1 评价因子的相关性分析

选用皮尔逊相关法计算各因子间的相关性,其绝对值越小相关性越弱^[14]。数学表达式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中, x_1 与 y_1 分别为 X_1, Y_1 的变量值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为 x_i 与 y_i 的平均值。皮尔逊系数与各因子相关性

的对应关系如表 2 所示。

表 2 皮尔逊相关性系数判别标准表

$ r_{xy} $	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	≥0.8
相关性	基本不相关	弱相关	中度相关	高度相关

结果如表 3 所示。除降雨量与高程的相关性系数略大于 0.3 以外,其余各评价因子两两间相关性系数绝对值均小于 0.3。因此,9 个评价因子均可保留。

表 3 评价因子相关性系数矩阵

评价因子	斜坡结构	曲率	地形起伏度/m	坡向	坡度/°	降雨量/mm	高程/m	地貌	距道路距离/m
斜坡结构	0.000	0.016	0.009	0.073	0.016	0.028	-0.003	0.016	0.013
曲率		0.000	0.016	0.007	0.035	0.001	0.031	-0.003	0.011
地形起伏度/m			0.000	0.020	0.207	0.120	-0.068	-0.154	0.064
坡向				0.000	0.030	0.006	-0.020	-0.013	-0.007
坡度/°					0.000	0.060	-0.034	-0.078	0.117
降雨量/mm						0.000	0.303	0.129	0.044
高程/m							0.000	0.150	0.112
地貌								0.000	0.048
距道路距离/m									0.000

4.2 评价因子的多重共线性诊断

多重共线性是指多个影响因子之间存在线性关系。方差膨胀因子(VIF)和容忍度(TOL)是衡量各自变量之间是否多重共线的重要指标。其数学表达式为:

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} = \frac{1}{TOL} \quad (8)$$

式中, R^2 为统计指标, R^2 越小代表相关性越小。当 $VIF < 10$ 或 $TOL > 0.1$ 时,表示各影响因子无多重共线性问题。

结果显示评价因子的 VIF 值均小于 10 且 TOL 值均大于 0.1,因此可全部带入评价模型中(表 4)。

表 4 评价因子共线性统计表

评价因子	TOL	VIF
距道路距离	0.989	1.012
地貌	0.988	1.013
高程	0.993	1.007
降雨量	0.984	1.016
曲率	0.993	1.007
坡度	0.984	1.017
坡向	0.95	1.052
起伏度	0.975	1.025
斜坡结构	0.956	1.046

4.3 Maxent 模型运算

经过 Kuenm 数据包的运算,结果显示当调控倍频(RM) = 1.5,特征组合(FCs) = L 时,Delta AICc=0,模型为最优参数模型。将滑坡点经纬度转换为 CSV 格式,将 GIS 中 9 个评价因子栅格数据转化成 ASC 数据,将以上数据导入优化 Maxent 模型。为保证计算结果的精准度,将数据划分成训练集(25%)和测试集(75%),最大迭代次数设置为 10 000 次,计算结果重复 10 次取平均值。Maxent

模型结果显示研究区滑坡灾害危险性数值为 0.000 154~0.931 430。将计算结果通过 GIS 转为栅格图层。利用自然间断法将结果分为 4 个等级:稳定区(0.000 154,0.25)、低危险区(0.25,0.5)、中危险区(0.5,0.75)与危险区(0.75,0.931 430)。各分区面积为分级栅格数量与网格面积的乘积,分别为:1 585.74 km² (26.70%)、2 138.42 km² (36.90%)、1 594.48 km² (26.85%)、567.37 km² (9.55%),详见表 5。中、高危险区主要分布于道路两侧(图 4)。

使用刀切法(jackknife)验证各评价因子的贡献度(表 6、图 3)。结果显示,距道路距离、地形起伏度和高程是 3 个最为重要的影响因子,其次是坡度、曲率、降雨量、坡向和地貌,斜坡结构相对于其他因子对滑坡灾害的影响较小,仅为 0.6%。

表 5 基于 Maxent 模型的危险性分区面积

危险性分区	分级栅格数量/个	网格面积/km ²	分区面积/km ²
稳定区	1 694 249	9×10 ⁻⁴	1 585.74
低危险区	2 343 387	9×10 ⁻⁴	2 138.42
中危险区	1 705 450	9×10 ⁻⁴	1 594.48
高危险区	606 382	9×10 ⁻⁴	567.37

表 6 评价因子贡献度

评价因子	贡献百分比	置换重要性
距道路距离	43.6	29.6
地形起伏度	17.5	16.7
高程	16.5	22.9
坡度	8	9.7
曲率	5.3	6.7
降雨量	4.1	4.9
坡向	2.3	4.4
地貌	2.1	3.6
斜坡结构	0.6	1.4

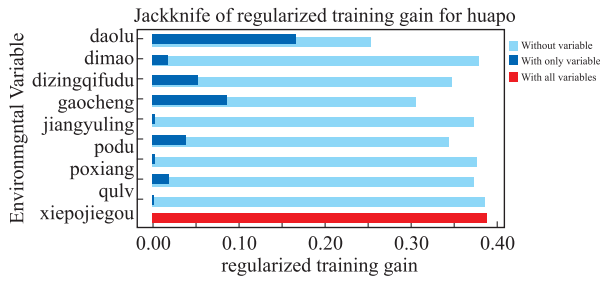


图3 评价因子的贡献度

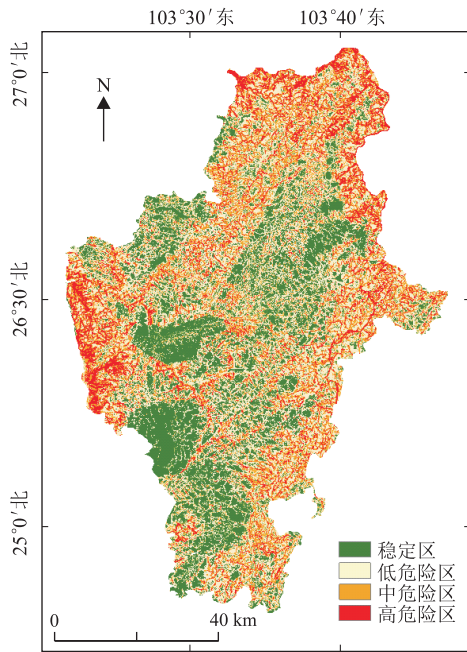


图4 基于 Maxent 的危险性区划图

4.4 加权信息量模型运算

计算会泽县境内 370 个灾害点 9 个评价因子各等级的信息量值(表 9)。

将评价因子各等级信息量值作为自变量,将是否发生滑坡灾害作为因变量,应用 SPSS26.0 进行二元 Logistic 回归。回归结果中的 sig 值小于 0.05 才有统计意义,表 7 中评价因子 sig 值皆小于 0.05,因此都为有效因子。权重值从大到小依次为:地貌、高程、地形起伏度、坡度、距道路距离、曲率、坡向、降雨量和斜坡结构。

将各评价因子逻辑回归的系数 β 与信息量值相乘计算加权信息量值,其数值如表 7 所示。

表 7 评价因子逻辑回归结果

项目	β	sig	项目	β	sig
地貌	1.824	0.000	距道路距离	1.050	0.000
坡度	1.089	0.007	降雨量	-0.003	0.047
坡向	0.370	0.014	斜坡结构	-1.09	0.009
曲率	0.379	0.016	高程	1.244	0.000
地形起伏度	1.111	0.001	常量	-0.103	0.010

根据公式(5)计算得出,危险性数值为 $-5.051812 \sim 3.803516$,通过 GIS 将所得结果通过自然间断法分为 4 个等级:稳定区($-5.051812, -2.838069$)、低危险区($-2.838069, -0.624326$)、中危险区($-0.624326, 1.589417$)与高危险区($1.589417, 3.803516$)。各分区面积为分级栅格数量与网格面积的乘积,分别为 1677.21 km^2 (28.62%)、 2273.61 km^2 (38.79%)、 1217.88 km^2 (20.78%)和 692.43 km^2 (11.81%),详见表 8。从评价结果来看,基于加权信息量模型得到的滑坡危险性分区呈射线状,沿道路向外延伸,危险区主要分布于会泽县东部、北部和西部的边界地区及中部钟屏街道-以礼街道-宝云街道地区(图 5)。

表 8 基于加权信息量模型的危险性分区面积

危险性分区	分级栅格数量/个	网格面积/ km^2	分区面积/ km^2
稳定区	1 863 564	9×10^{-4}	1 677.2
低危险区	2 526 232	9×10^{-4}	2 273.61
中危险区	1 353 200	9×10^{-4}	1 217.88
高危险区	769 369	9×10^{-4}	692.43

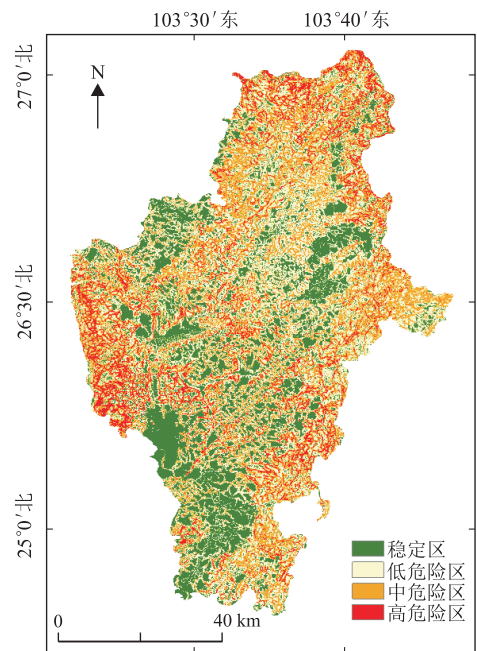


图5 基于加权信息量的危险性区划图

5 评价结果检验

5.1 合理性检验

根据合理性检验公式比较两种评价模型合理性,其公式为:

$$Rei = Gei / Sai \quad (9)$$

式中, Gei 代表各等级灾害点占灾害点总数百分比;

表 9 评价因子各等级信息量值

评价因子	因子分级	S_i/S	N_i/N	信息量	加权信息量
地貌	中高海拔大起伏山地	0.244	0.289	0.169	0.308
	中高海拔中起伏山地	0.567	0.592	0.044	0.080
	中高海拔黄土梁峁	0.127	0.089	-0.351	-0.640
	中海拔冲积洪积平原	0.024	0.008	-1.000	-1.824
	高海拔大起伏山地	0.034	0.022	-0.454	-0.828
坡度	0~6°	0.271	0.297	0.093	0.101
	6°~15°	0.451	0.527	0.155	0.169
	15°~30°	0.158	0.111	-0.357	-0.389
	30°~45°	0.015	0.011	-0.356	-0.388
	45°~60°	0.001	0.000	-1.000	-1.089
	>60°	0.071	0.073	0.028	0.030
坡向	北(0°~22.5°,337.5°~360°)	0.114	0.146	0.247	0.091
	东北(22.5°~67.5°)	0.137	0.138	0.006	0.002
	东(67.5°~112.5°)	0.140	0.157	0.114	0.042
	东南(112.5°~157.5°)	0.118	0.076	-0.443	-0.164
	南(157.5°~202.5°)	0.116	0.097	-0.179	-0.066
	西南(202.5°~247.5°)	0.127	0.143	0.118	0.044
	西(247.5°~292.5°)	0.121	0.111	-0.092	-0.034
	西北(292.5°~337.5°)	0.055	0.059	0.073	0.027
曲率	<-0.5	0.150	0.124	-0.187	-0.071
	-0.5~-0.25	0.121	0.114	-0.060	-0.023
	-0.25~0	0.226	0.238	0.049	0.019
	0~0.25	0.206	0.246	0.179	0.068
	0.25~0.5	0.130	0.141	0.076	0.029
	>0.5	0.162	0.138	-0.164	-0.062
地形起伏度	<150 m	0.185	0.057	-1.000	-1.111
	150~300 m	0.473	0.419	-0.122	-0.136
	300~450 m	0.276	0.392	0.352	0.391
	450~600 m	0.088	0.114	0.260	0.289
	600~750 m	0.020	0.016	-0.216	-0.240
	750~900 m	0.003	0.003	0.038	0.042
降雨量	<1 300 mm	0.049	0.065	0.290	-0.001
	1 300~1 400mm	0.047	0.041	-0.148	0.000
	1 400~1 500mm	0.508	0.497	-0.022	0.000
	1 500~1 600mm	0.334	0.314	-0.064	0.000
	>1 600 mm	0.057	0.084	0.380	-0.001
距道路距离	0~100 m	0.344	0.611	0.575	0.604
	100~200 m	0.245	0.205	-0.176	-0.185
	200~500 m	0.322	0.159	-0.702	-0.737
	500~1 000 m	0.078	0.022	-1.000	-1.050
	>1 000 m	0.007	0.003	-0.896	-0.941
斜坡结构	顺向坡	0.160	0.159	-0.004	0.004
	顺斜向坡	0.163	0.170	0.044	-0.048
	横向坡	0.333	0.324	-0.026	0.028
	逆斜向坡	0.169	0.146	-0.150	0.164
	逆向坡	0.167	0.200	0.178	-0.194
高程	0~800 m	0.001	0.000	-1.000	-1.244
	800~1 600 m	0.034	0.081	0.870	1.082
	1 600~2 400 m	0.642	0.765	0.175	0.218
	2 400~3 200 m	0.302	0.154	-0.672	-0.836
	3 200~4 000 m	0.017	0.000	-1.000	-1.244

Sai 代表各等级面积占研究区总面积百分比,危险性等级与 Rei 具有正相关性,即 $Rei(I) < Rei(II) < Rei(III) < Rei(IV)$ 。其结果如表 10、表 11。

结果显示两种模型的 Rei 值和灾害点密度都随危险性等级的提高逐渐增大,因此优化 Maxent 模型和加权信息量模型的评价结果都具有合理性(图 6)。

表 10 优化 Maxent 模型评价结果合理性检验

分区等级	面积占比 /%	滑坡点占比 /%	滑坡点密度 /个·km ⁻²	$Rei=Gei/Sai$
稳定区	26.70	5.14	0.01	0.19
低危险区	36.90	18.11	0.03	0.49
中危险区	26.85	42.97	0.10	1.60
高危险区	9.5	33.79	0.22	3.56

表 11 加权信息量模型评价结果合理性检验

分区等级	面积占比 /%	滑坡点占比 /%	滑坡点密度 /个·km ⁻²	$Rei=Gei/Sai$
稳定区	28.62	7.03	0.02	0.25
低危险区	38.79	28.92	0.05	0.75
中危险区	20.78	32.16	0.10	1.55
高危险区	11.81	31.89	0.17	2.70

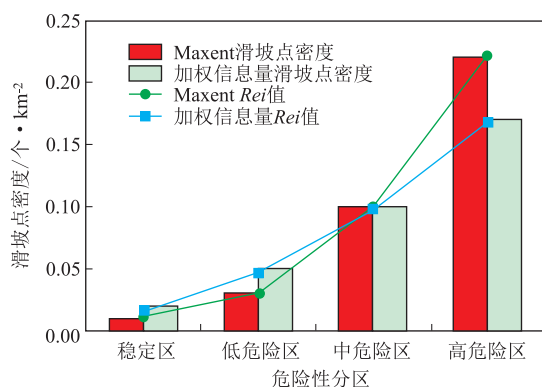


图 6 滑坡危险性结果趋势图

但从危险性区划图来看，两种模型的危险性区划图大体相似，区别在于县境中部（钟屏街道-以礼街道-宝云街道地区）。基于加权信息量模型的危险性分区结果中，县境中部为中高危险区，而该地区为以中海拔冲积洪积平原地貌为主，地势较为平缓，不具备发生滑坡的地形条件；从灾害点分布来看，该地区灾害点分布较少。因此将中部地区划分为中高危险区与滑坡灾害发育情况并不相符。基于优化 Maxent 模型的危险性分区结果中，该地域为稳定区，合理性更高。综上所述，通过计算 Rei 值可以得出两模型均能合理划分危险等级区，但从地质灾害分布规律来看，优化 Maxent 模型的评估结果与实际情况更加符合。

5.2 敏感性检验

ROC 曲线以 1-特异性（未发生滑坡单元被正确预测的百分比）为横坐标，以敏感度（发生滑坡单元被正确预测的百分比）为纵坐标绘制曲线^[15]。AUC 值为曲线以下至横坐标面积，取值范围为 $[0.5, 1]$ ，越接近于 1 则评价模型精度越高。结果显示：加权

信息量模型和优化 Maxent 模型的 AUC 值分别为 0.769 和 0.902，因此优化 Maxent 模型的评价精度更高（图 7、图 8）。

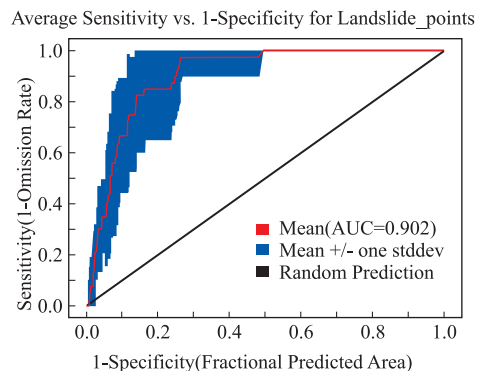


图 7 优化 Maxent 模型的 ROC 曲线

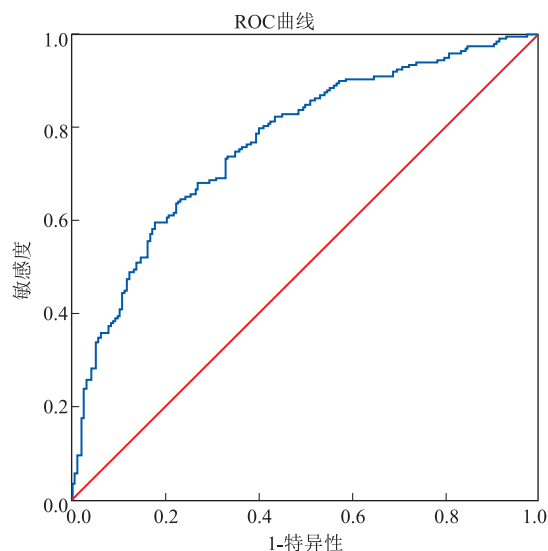


图 8 加权信息量模型的 ROC 曲线

5.3 野外实地检验

以高危险区中灾害点相对密集的大井镇、上村乡及迳车镇为研究对象，选取黄梨树村水凹子滑坡、迳车镇石桥村委会王家田滑坡、大河村大河边滑坡及大井镇芦坪村委会田坝滑坡作为典型灾害点进行分析。如图 9 所示，前 3 个滑坡点所处区域地形起伏度大，高程 1 600~2 400 m，坡度 30°~45°，滑坡前缘紧挨道路，前缘临空面由人工修路形成，后缘位于斜陡坡、缓变化地带，在建房加载、降雨等外力作用下发生下滑。大井镇芦坪村委会田坝滑坡后缘位于村后公路处，切坡修路对地质环境造成影响，在建筑物加载及地下水渗流的影响下发生滑坡。主要影响因子与优化 Maxent 模型相吻合。

通过合理性检验、敏感性检验及野外实地检验对两模型评价结果进行比较，结果表明优化 Maxent

模型具有较高可靠性。

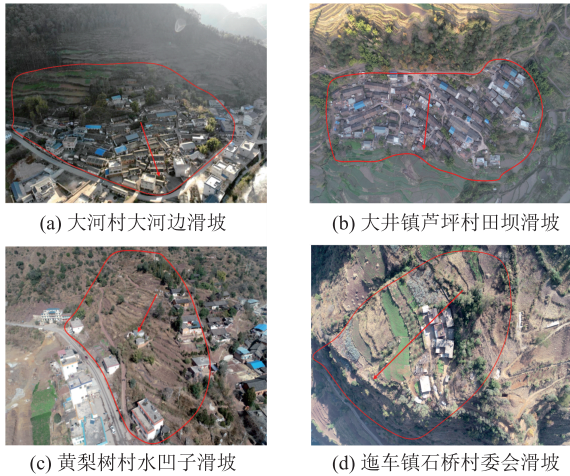


图 9 典型灾害点图

6 滑坡危险性分析

本文基于优化 Maxent 模型进行滑坡危险性分析。在全县面积中,高危险区所占比重最小,仅占全县面积的 9.5%,该区域滑坡数量占总数的 33.79%,为全县滑坡灾害点最密集地区。高危险区主要分布在娜姑镇、以礼街道和大海乡西北部,纸厂乡、迳车镇和马路乡北部,火红乡、矿山镇和大井镇东北部,雨碌乡、鲁娜乡和上村乡东部。该地区以山地地貌为主,地形起伏度较大,地势崎岖不平,因此在人类工程活动中切坡修路和切坡建房大量存在,施工产生的碎岩是滑坡发育的物质基础,切坡、临空面是其发展潜能,加之施工对地质环境的影响,较易引发滑坡。通过危险性区划图可以看出,高危险区表现出了沿道路向外延伸的态势。这一地区居民大多以群居或者群体为单位,人类活动密集频繁,从而具有很高的滑坡危险性。

中危险区及低危险区分布于高危险地区边缘,滑坡危险性随距道路距离的增加而递减。

稳定区主要分布于会泽县中部及西南部。中部(钟屏街道-以礼街道-宝云街道地区、乐业镇-者海镇-新街回族乡-宝云街道地区)以中海拔冲积洪积平原和中海拔黄土梁崩地貌为主,地形起伏度较小,地势较为平坦,不具备发生滑坡的地形条件;西南部(大海乡-待补镇-驾车乡地区)以高海拔大起伏山地和中高海拔大起伏山地地貌为主,平均海拔在 2 400 m 以上,人类活动较少,且远离交通主干道,因此滑坡危险性最低。

7 结论

(1) 本文分别采用优化 Maxent 模型和加权信

息量模型对滑坡灾害危险性进行评价,针对合理性、敏感性及野外实地检验对两模型进行对比。检验结果表明:针对云贵高原半山区坡度、起伏度大,地质环境脆弱且人类工程活动对地质构造影响较大的特点,加权信息量模型的评价结果与实际情况有出入,优化 Maxent 模型的可靠性更高。

(2) 从优化 Maxent 模型评价结果中可以看出距道路距离因子的影响程度最高,与野外实地检验结果相符,其他主要影响因子为地形起伏度、高程、坡度和曲率;降雨量、坡向、地貌和斜坡结构是次要影响因子。

(3) 基于优化 Maxent 模型的评价结果进行危险性分析。结果表明高危险区以山地为主,起伏度较大,沿道路向外延伸;中低危险区位于高危险区边缘;稳定区位于平原地区及大起伏度山地。

参考文献

- [1] 黄煜,谢婉丽,刘琦琦,等. 基于 GIS 与 MaxEnt 模型的滑坡易发性评价——以铜川市中部城区为例[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 266-275.
- [2] 贺鹏,童立强,郭兆成,等. GIS 支持下基于层次分析法的西藏札达地区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(25): 193-200.
- [3] 许英姿,卢玉南,李东阳,等. 基于 GIS 和信息量模型的广西花岗岩分布区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 693-703.
- [4] 胡杨,张紫昭,林世河. 基于证据权与逻辑回归耦合的新疆伊犁河谷地区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1350-1363.
- [5] Akbar M, Bhat M S, Khan A A. Multi-hazard susceptibility mapping for disaster risk reduction in Kargil-Ladakh Region of Trans-Himalayan India [J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(2): 68.
- [6] Aril A, Tetsuya K, Yoshinori S. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia [J]. Geomorphology, 2018, 318(1): 101-111.
- [7] 李远远,梅红波,任晓杰,等. 基于确定性系数和支持向量机的地质灾害易发性评价[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1699-1709.
- [8] He Q, Wang M, Liu K. Rapidly assessing earthquake-induced landslide susceptibility on a global scale using random forest [J]. Geomorphology, 2021 (prepublish), 2021, 391(1): 107889.
- [9] 张伟,周松林,尹仑. 基于优化 MaxEnt 模型的高山峡谷区地质灾害易发性评价——以云南省德钦县为例[J]. 灾害学, 2023, 38(2): 185-190.
- [10] 张孟容,郭敏娜,孙靓,等. 基于优化 MaxEnt 模型的山西省黄精产地适宜性区划研究[J]. 山西中医药大学学报, 2023, 24

- (2):216-220.
- [11] 范亦嵩. 宜君县地质灾害特征及风险评价[D]. 西北大学, 2020.
- [12] 黄立鑫. 岷县滑坡灾害易发性评价与信息管理系统开发[D]. 兰州理工大学, 2021.
- [13] 李军, 周成虎. 基于栅格 GIS 滑坡风险评价方法中网格大小选取分析[J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 86-92+161.
- [14] 田春山, 刘希林, 汪佳. 基于 CF 和 Logistic 回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 154-161+17.
- [15] 李信, 薛桂澄, 夏南, 等. 基于 CF 模型、CF-LR 模型和 CF-AHP 模型的国家热带雨林公园地质灾害易发性研究: 以海南保亭为例[J/OL]. 现代地质, 2023, 37(04): 1033-1043. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.002.

作者简介: 解晋航(1998—), 硕士研究生, 主要从事地质灾害评估研究。E-mail: 1920923029@qq.com

通信作者: 王宇栋(1973—), 硕士生导师, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害评估研究。E-mail: wyd@kust.edu.cn; 584772219@qq.com

《地质灾害与环境保护》征订启事

本刊主管单位: 四川省教育厅; 主办单位: 成都理工大学、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室。学术性期刊, 季刊。1990 年创刊, 国内外公开发行。大 16 开, 每期 112 页, 约 22 万字。欢迎订阅。

定价: 2008~2024 年每期定价 15 元, 全年 4 期, 年定价 60 元; 2005~2007 年每期定价 10 元, 全年 4 期, 年定价 40 元; 1991~2004 年过刊每套定价 154 元(包括: 总第 3 期~总 28, 30~53 期, 计 42 册); 也可分年分期选订: 1991~1993 年, 半年刊, 每册定价 1.00 元; 1994~1997 年, 季刊, 每册定价 2.00 元; 1998~1999 年, 季刊, 每册定价 3.00 元; 2000~2001 年, 季刊, 每册定价 4.00 元; 2002~2004 年, 季刊, 每册定价 5.00 元。

订阅办法

- 2000 年起开始邮发, 邮发代号 62-140, 可在全国各地邮局订阅。
- 本刊已参加“全国非邮发报刊联合征订”, 代号 5314 号。
- 向本刊编辑部订阅: 请用邮局汇款。收款单位: 《地质灾害与环境保护》编辑部。

地址: 成都市成华区二仙桥东三路 1 号 成都理工大学; 邮政编码: 610059。

编辑部联系电话: (028)84078481。

《地质灾害与环境保护》编辑部

2024 年 9 月 25 日