

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.194

引用格式: 周一文, 单强, 赵德刚, 等. 基于层次分析法-熵权法耦合模型的地质灾害易发性评价——以河北省迁西县为例[J]. 中国地质调查, 2024, 12(4): 103-112. (Zhou Y W, Shan Q, Zhao D G, et al. Susceptibility assessment of geological hazard based on analytic hierarchy process-entropy evaluation method coupling model: A case study of Qianxi County in Hebei Province[J]. Geological Survey of China, 2024, 12(4): 103-112.)

基于层次分析法-熵权法耦合模型的地质灾害 易发性评价 ——以河北省迁西县为例

周一文^{1,2}, 单强^{1,2}, 赵德刚^{1,2*}, 马丙太^{1,2}, 梁爽^{1,2}, 汪洋^{1,2}

(1. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北 石家庄 050021; 2. 河北省地质环境监测院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 迁西县地质条件复杂, 人类改造自然活动频繁, 地质灾害较发育, 严重威胁群众生命财产安全。在分析迁西县地质灾害孕灾地质条件发育特征基础上, 选取高程、坡度、坡向、起伏度、工程地质岩组、距构造距离、距道路距离、距河流距离 8 个评价指标构建地质灾害易发性评价指标体系, 依据共线性诊断和相关性分析对指标间的独立性进行验证。运用信息量 (information value, IV) 法求得各评价指标信息量值, 依托层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 和熵权法 (entropy evaluation method, EEM) 分别确定各指标主、客观权重后, 采用最小信息熵确定指标综合权重, 进而建立 IV 模型、加权信息量 (weighted information value, WIV) 模型与 AHP-EEM 耦合模型, 评价结果依据自然断点法将地质灾害易发性划分为非、低、中、高 4 个易发等级, 并采取受试者操作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线开展精度验证。结果表明: AHP-EEM 耦合模型精度最高, 研究区高易发区、中易发区、低易发区和非易发区面积分别为 270.85 km²、462.09 km²、486.13 km²、241.93 km², 占比分别为 18.54%、31.63%、33.27%、16.56%; AHP-EEW 耦合模型 AUC 为 0.875 6, 评价结果与隐患点实际分布情况贴合度最高, 符合本区域地质条件特征的易发性评价。评价结果可为本区域后期防灾减灾工作提供参考。

关键词: 地质灾害; 易发性评价; 层次分析法; 熵权法; 最小相对信息熵; 迁西县

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)04-0103-10

0 引言

地质灾害易发性评价对防灾减灾工作具有重要意义。近年来, 许多专家学者选用 GIS 软件结合数学模型方法, 对地质灾害做出评价, 并取得显著成果, 常用地质灾害评价模型包括层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)、信息量 (information value, IV) 模型、逻辑回归 (logistic regression, LR) 模型、确定系数 (certainty factor,

CF) 法、熵权法 (entropy evaluation method, EEM) 等, 但单一评价模型评价精度较低, 难以准确评估研究区灾害发育特征, 故评价模型的相互耦合方法被大批学者采用。孙剑锋等^[1]通过构建灰色关联度与 AHP 耦合评价模型对云和县崇头镇开展了地质灾害易发性评价; 王璇等^[2]选取 CF 模型和改进后的 CF-LR 耦合模型对城固县进行地质灾害易发性评价, 比较而言, CF-LR 模型精度更高; 毕结昂等^[3]探索了 IV-LR 耦合模型在地质灾害易发性评价中的科学性与

收稿日期: 2024-04-23; 修订日期: 2024-11-07。

基金项目: 河北省地质环境监测院“河北省地质资源环境监测与保护重点实验室项目 (编号: JCYKT202406)”资助。

第一作者简介: 周一文 (1991—), 男, 工程师, 主要从事地质灾害防治研究工作。Email: 977957345@qq.com。

通信作者简介: 赵德刚 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究工作。Email: 68477960@qq.com。

优势,获得了较高评价精度;翟文华等^[4]以浙江省长兴县李家巷镇为研究对象,证实了频率比(frequency ratio, FR)模型和随机森林(random forest, RF)模型耦合地质灾害易发性评价精度较RF模型精度更高。

在众多研究方法中,信息量法被广泛使用,已有研究表明基于信息量法耦合评价模型的地质灾害易发性评价结果精度更高^[5-12]。且在信息量法基础上,运用计算模型,将主、客观权值进行综合,将综合权值与信息量法耦合,能为地质灾害易发性评价提供更客观全面的评价方法。目前应用较多的权重确定方法为EEM和AHP,因此本文基于前人研究经验,采用AHP-EEM耦合模型下的地质灾害易发性评价方法。以迁西县为研究对象,结合野外调查成果及地质灾害发育规律,选取高程、坡度、坡向、起伏度、工程地质岩组、距构造距离、距道路距离、距河流距离8个评价因子,运用IV模型、加权信息量(weighted information value, WIV)模型、AHP-EEM耦合模型建立易发性评价模型开展对比分析,并采用ROC曲线对3种评价结果开展精度验证,以期对地质灾害易发性评价提供新的模型方法,实现易发区空间划分,为地质灾害防治决策提供科学依据。

1 研究区概况

研究区地处燕山南麓山地丘陵区,南北纵距约51 km,东西横距约39 km,相对高差774 m,总面积为1 461 km²。地形以丘陵、山地为主,地貌特征为典型低山丘陵景观,域内山水交错,形成了以中低山、高丘为主的侵蚀地貌^[13]。研究区出露地层由老到新主要为:太古宇片麻岩、角闪岩、石英岩、变粒岩等变质岩;中元古界长城系长石石英砂岩、灰黑色页岩、白云岩等;中生界侏罗系安山岩、砾岩、粉砂岩及灰岩等;新生界岩性复杂,大致可分为5类,分别为冲积砂砾(Q_4^{al})、冲洪积砂砾、粉土、粉质黏土(Q_4^{al+pl})、残坡积细砂砾石、粉土、粉质黏土(Q_3^{al+dl})、风积黄土(Q_3^{eol})和古河床砾石层(Q_1^{al})。研究区地质构造复杂,褶皱、断裂

发育。整个区域位于马兰峪—山海关复背斜中轴偏南,次一级的背斜和向斜发育,主要为近EW向断裂、NE向和NW向构造及弧形构造^[14]。

随着城市化进程不断加快,人类对环境改造程度不断加深,诱发的各类灾害呈显著增加态势。研究区现有隐患点共144处,其中崩塌27处、滑坡24处、泥石流93处(图1)。

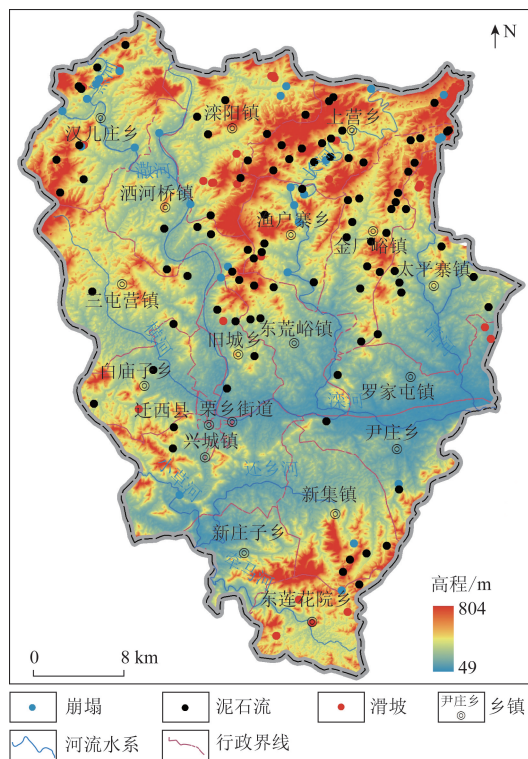


图1 研究区地质灾害分布

Fig.1 Distribution of geologic hazards in the study area

2 评价因子选取与分级

2.1 评价因子选取分级

地质灾害的易发性受多种因素控制,本文在野外详细调查及成果资料收集的基础上,选择岩土体特性(工程地质岩组)、地形地貌(坡度、高程、坡向、起伏度)、地质构造(距构造距离)、水文条件(距河流距离)、人类工程活动(距道路距离)8个评价因子(图2)构成地质灾害易发性评价指标体系,工程地质岩组与坡向为离散型变量,按其固有属性分类,其余6个指标结合研究区地质灾害分布情况及专家经验分级处理。

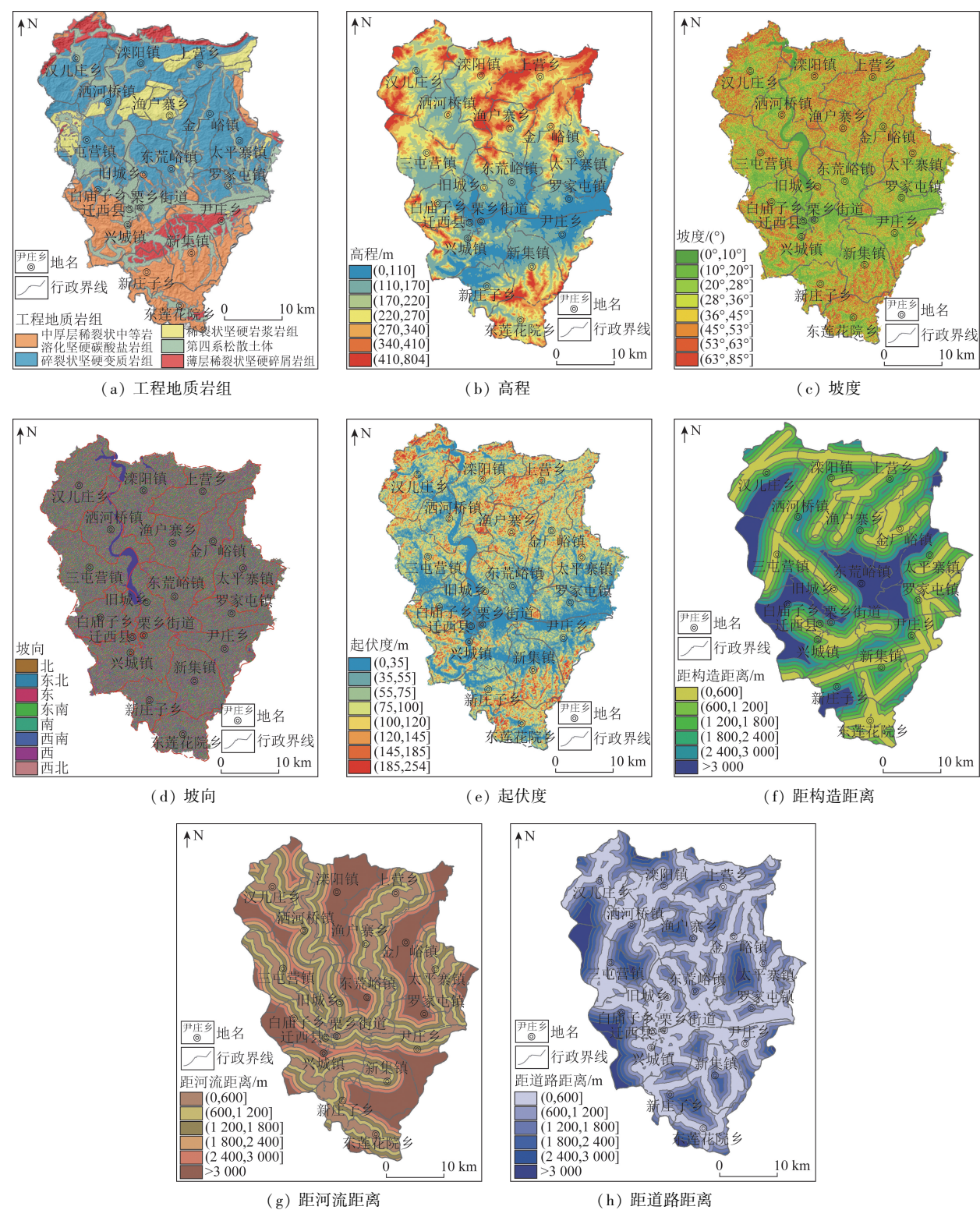


图 2 研究区 8 个评价指标分级结果
Fig. 2 Grading results for the eight assessment indicators in the study area

2.2 共线性诊断和相关性分析

采用多变量构建回归分析模型时,应避免自变量间出现多重共线性,需保障自变量间相互独

立^[15-16]。选取方差膨胀因子(variance inflation factor,VIF)与容忍度(tolerance,TOL)对自变量进行多重共线性诊断分析。其中 TOL 与 VIF 互为倒数,通

常认为当 TOL 值大于 0.1 且 VIF 值小于 10 时,自变量间不存在多重共线性问题。VIF 值的计算公式为

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

式中: R^2 指以某个自变量为因变量时,对其余自变量回归分析的复测定系数。

结合研究区 144 处隐患点,提取样本各分级指标信息量值,运用 SPSS 软件开展多重共线性诊断分析。8 个评价因子的 VIF 值为 1~1.8(表 1),均小于 5,表明指标间不存在多重共线性。

地质灾害易发性与评价因子间具有某种相关性,开展各指标间的相关性检验,对确保评价结果的有效性具有重要意义。运用 SPSS 软件,评价指标相关性分析结果如表 2 所示。结果显示各评价指标之

间相关系数均小于 0.3,表明各因子间相关性较弱,选定的 8 个评价因子均可参与易发性评价分析。

表 1 研究区评价指标共线性统计

Tab.1 Statistical table of collinearity among assessment indicators in the study area

评价指标	容差	VIF 值
坡度	0.611	1.636
高程	0.841	1.190
工程地质岩组	0.866	1.155
起伏度	0.577	1.732
距构造距离	0.865	1.156
距河流距离	0.812	1.231
距道路距离	0.797	1.255
坡向	0.835	1.198

表 2 研究区评价指标相关性统计

Tab.2 Statistical table of correlation among assessment indicators in the study area

评价指标	坡度	高程	工程地质岩组	起伏度	距构造距离	距河流距离	距道路距离	坡向
坡度	1							
高程	-0.138	1						
工程地质岩组	0.035	0.095	1					
起伏度	0.178	-0.239	-0.045	1				
距构造距离	-0.076	-0.007	0.071	-0.154	1			
距河流距离	-0.121	0.079	0.254	-0.045	-0.071	1		
距道路距离	0.03	-0.106	0.235	-0.03	0.285	0.217	1	
坡向	0.183	0.122	0.181	0.061	-0.169	0.232	-0.088	1

3 地质灾害易发性研究方法及过程

3.1 IV 模型

IV 模型基于概率论与逻辑推理理论推导而来,被广泛应用于地质灾害易发性评价分析。基于研究区隐患点分布及评价因子,计算每个单元内各因子的信息量值,然后叠加汇总每个单元内总信息量值作为定性评价依据,来预测灾害发生的可能性,灾害发生概率与信息量值呈正相关^[17]。IV 模型计算公式为

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

式中: I 为某评价单元各因子信息量叠加值; I_i 为评价指标 i 的信息量值; S 为研究区内评价单元总数; S_i 为含评价指标 i 的单元数; N 为研究区包含地质灾害点的单元总数; N_i 为评价指标 i 分项单元内包含地质灾害隐患点的单元数量; n 为评价指

标数。

结合隐患点分布,运用 ArcGIS 多值提取功能,汇总统计隐患点与评价因子中各级因子数量关系,按式(2)求解各级因子信息量值,结果如表 3 所示。

3.2 AHP

AHP 能较好表征各因子间相关性及重要程度,对受多指标影响的地质灾害易发性评价具有较好的适用性^[18]。AHP 通过搭建多层次指标模型,构建一致性判断矩阵,计算求得各评价因子权重。

结合 AHP 原理,依据专家打分法,对选取评价因子两两比对,构建判断矩阵,计算求得各因子权重值(表 4),然后对判断矩阵一致性指标(consistency index, CI)及一致性比率(consistency ratio, CR)开展一致性检验^[19],矩阵 CR 值为 0.014 (≤ 0.1),证明其一致性较好。各评价因子利用 AHP 确定权重后的加权信息量值见表 3。

表 3 研究区各评价指标信息量值

Tab.3 Information values of the assessment indicators in the study area

评价指标	评价指标分级	隐患点个数/处	分级栅格面积/ km ²	信息量值	加权信息量值	AHP – EEM 耦合 权重信息量值
距道路距离	[0,600] m	90	690.73	0.272 0	0.073 3	0.071 2
	(600,1 200] m	40	362.92	0.104 6	0.028 2	0.027 4
	(1 200,1 800] m	12	194.61	−0.763 8	−0.205 9	−0.200 0
	(1 800,2 400] m	2	98.76	−1.589 6	−0.428 4	−0.416 3
	(2 400,3 000] m	2	51.31	−0.934 9	−0.252 0	−0.244 8
	> 3 000 m	1	52.28	−1.646 7	−0.443 8	−0.431 3
高程	[0,110] m	3	183.21	−1.805 9	−0.048 2	−0.055 3
	(110,170] m	22	379.84	−0.542 6	−0.014 5	−0.016 6
	(170,220] m	37	260.58	0.354 2	0.009 5	0.010 8
	(220,270] m	47	216.00	0.781 0	0.020 9	0.023 9
	(270,340] m	29	210.24	0.325 2	0.008 7	0.010 0
	(340,410] m	6	109.60	−0.598 9	−0.016 0	−0.018 3
	(410,804] m	0	85.67	0	0	0
工程地质岩组	薄层稀裂状坚硬碎屑岩组	11	120.52	−0.075 0	−0.004 2	−0.004 0
	第四系松散土体	31	366.31	−0.150 6	−0.008 5	−0.008 0
	碎裂状坚硬变质岩组	77	587.30	0.287 2	0.016 1	0.015 3
	稀裂状坚硬岩浆岩组	12	104.29	0.156 7	0.008 8	0.008 3
	中厚层稀裂状中等岩溶化坚硬碳酸盐岩组	13	285.30	−0.769 7	−0.043 3	−0.040 9
坡度	(0°,10°]	5	146.11	−1.062 8	−0.110 7	−0.095 9
	(10°,20°]	8	279.09	−1.239 9	−0.129 2	−0.111 8
	(20°,28°]	8	240.49	−1.091 1	−0.113 7	−0.098 4
	(28°,36°]	28	222.19	0.240 8	0.025 1	0.021 7
	(36°,45°]	40	213.69	0.636 5	0.066 3	0.057 4
	(45°,53°]	41	151.94	1.002 2	0.104 4	0.090 4
	(53°,63°]	8	133.18	−0.500 1	−0.052 1	−0.045 1
	(63°,85°]	6	67.13	−0.102 7	−0.010 7	−0.009 3
距构造距离	(0,600] m	62	356.25	0.560 9	0.097 2	0.092 6
	(600,1 200] m	49	291.19	0.527 3	0.091 3	0.087 0
	(1 200,1 800] m	22	245.28	−0.101 9	−0.017 7	−0.016 8
	(1 800,2 400] m	7	189.82	−0.990 8	−0.171 6	−0.163 6
	(2 400,3 000] m	4	129.66	−1.169 2	−0.202 5	−0.193 0
	> 3 000 m	0	237.67	0	0	0
距河流距离	(0,600] m	58	286.46	0.712 8	0.183 5	0.206 6
	(600,1 200] m	50	241.15	0.736 5	0.189 6	0.213 5
	(1 200,1 800] m	20	212.97	−0.055 5	−0.014 3	−0.016 1
	(1 800,2 400] m	7	187.57	−0.978 3	−0.251 8	−0.283 6
	(2 400,3 000] m	6	164.78	−1.002 9	−0.258 2	−0.290 7
	> 3 000 m	3	357.68	−2.471 1	−0.636 1	−0.716 4
坡向	北	4	164.29	−1.432 9	−0.057 6	−0.061 9
	东北	4	110.51	−1.036 5	−0.041 7	−0.044 8
	东	8	164.51	−0.741 1	−0.029 8	−0.032 0
	东南	8	251.83	−1.166 9	−0.046 9	−0.050 4
	南	10	159.53	−0.487 3	−0.019 6	−0.021 0
	西南	9	109.40	−0.215 4	−0.008 7	−0.009 3
	西	41	178.33	0.812 3	0.032 7	0.035 1
	西北	60	272.81	0.768 0	0.030 9	0.033 2
起伏度	(0,35] m	4	255.67	−1.828 4	−0.132 7	−0.120 7
	(35,55] m	6	302.55	−1.591 3	−0.115 5	−0.105 0
	(55,75] m	45	302.63	0.423 4	0.030 7	0.027 9
	(75,100] m	48	278.43	0.571 3	0.041 5	0.037 7
	(100,120] m	25	144.08	0.577 8	0.041 9	0.038 1
	(120,145] m	8	106.38	−0.258 4	−0.018 8	−0.017 1
	(145,185] m	6	69.58	−0.121 4	−0.008 8	−0.008 0
	(185,254] m	2	19.57	0.048 2	0.003 5	0.003 2

表 4 研究区各评价指标判断矩阵及指标权重

Tab.4 Judgment matrix and indicator weight for the assessment indicators in the study area

评价指标	评价指标								权重
	距道路距离	距河流距离	距构造距离	坡度	起伏度	工程地质岩组	坡向	高程	
距道路距离	1	1	2	3	4	5	6	8	26.95
距河流距离	1	1	2	3	4	4	5	8	25.74
距构造距离	0.500	0.500	1	2	3	3	5	7	17.32
坡度	0.333	0.333	0.500	1	2	2	3	4	10.42
起伏度	0.250	0.250	0.333	0.500	1	2	2	3	7.26
工程地质岩组	0.200	0.250	0.333	0.500	0.500	1	2	2	5.621
坡向	0.167	0.200	0.200	0.333	0.500	0.500	1	2	4.023
高程	0.125	0.125	0.143	0.250	0.333	0.500	0.500	1	2.665

3.3 EEM

EEM 为一种客观赋权方法^[20]。利用该方法确定权重计算过程如下。

(1)将原始指标数据标准化处理,公式为

$$y_{ji} = \frac{X_{ji} - \min X_i}{\max X_i - \min X_i} \quad (3)$$

式中: y_{ji} 为第 j 个评价对象第 i 项指标标准化值; X_{ji} 为第 j 个评价对象第 i 项指标下值; $\max(X_i)$ 、 $\min(X_i)$ 分别为第 i 项指标的最大值与最小值。

(2)求解第 i 项指标信息熵值 E_i , 公式为

$$E_i = -1/\ln m \sum_{j=1}^m P_{ji} \cdot \ln P_{ji} \quad (4)$$

$$P_{ji} = y_{ji} / \sum_{j=1}^m y_{ji} \quad (5)$$

式中: m 为样本数; P_{ji} 为第 j 个评价对象第 i 项指标的贡献度; y_{ji} 为第 j 个评价对象第 i 项指标标准化值。

(3)利用 EEM 确定第 i 项指标的权重 W_{2i} , 公式为

$$W_{2i} = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n (1 - E_i)} \quad (6)$$

式中: E_i 为第 i 项指标的熵值; n 为指标总数。

3.4 AHP - EEM 耦合模型

本次采取最小信息熵原理对主、客观权重值组合求解综合权重,求解过程如图 3 所示。

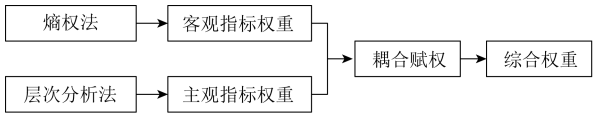


图 3 综合权重耦合计算流程示意图

Fig.3 Schematic diagram of comprehensive weight

coupling calculation process

AHP - EEM 耦合模型可有效解决次要指标受

数据上下浮动导致的权重不确定性,高效地结合了主观权重灵便性与客观权重严格性。

最小信息熵原理^[21]计算过程如下

$$\min F = \sum_{i=1}^8 W_i (\ln W_i - \ln W_{1i}) + \sum_{i=1}^8 W_i (\ln W_i - \ln W_{2i}) \quad (7)$$

$$\text{st} \sum_{i=1}^8 W_i (W_i > 0, i = 1, 2, 3, \dots, 8) \quad (8)$$

运用拉格朗日乘子法求得

$$W_i = \frac{\sqrt{W_{1i} W_{2i}}}{\sum_{i=1}^8 \sqrt{W_{1i} W_{2i}}} (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (9)$$

式中: W_{1i} 为第 i 项指标的 AHP 权重; W_{2i} 为第 i 项指标的 EEM 权重; W_i 为综合第 i 项指标的 AHP 权重和 EEM 权重得出的各指标对应综合权重。

梳理各参数,并按照公式(2) — (9) 计算求解各项评价指标权重值,结果如表 5 所示。

表 5 评价指标权重值

Tab.5 Weights of assessment indicators

评价指标	AHP 权重(W_{1i})	EEM 权重(W_{2i})	综合权重(W_i)
起伏度	0.072 6	0.059 5	0.066 0
坡度	0.104 2	0.077 4	0.090 2
高程	0.026 7	0.034 8	0.030 6
工程地质岩组	0.056 2	0.049 8	0.053 1
距构造距离	0.173 2	0.156 0	0.165 1
距河流距离	0.257 4	0.323 8	0.289 9
距道路距离	0.269 5	0.252 5	0.261 9
坡向	0.040 2	0.046 1	0.043 2

最后将计算出的综合权重与各指标分级信息量值在 ArcGIS 平台下叠加求和,得出地质灾害易发性评价结果。

$$I = \sum_{i=1}^n W_i I_i = \sum_{i=1}^n W_i \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (10)$$

4 地质灾害易发性评价与精度验证

4.1 精度验证

为掌握 3 种评价模型评价精度,本文运用受试者操作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线对易发性评价结果进行验证,通过求解曲线下方面积 (area under the curve, AUC) 来检验评价结果准确度^[22]。AUC 取值区间为 [0.5, 1], 其值的大小与评价结果准确度呈正相关。通过数据分析绘制了 IV 模型、WIV 模型、AHP-EEM 耦合模型的 ROC, 其 AUC 分别为 0.712 8、0.768 9、0.875 6, (图 4)。IV 模型精度最低, 分析认为当运用 AHP 求解指标权重时, 依据专家打分法构建的判断矩阵受人为主观性因素影响大, 致使权重确定准确性降低。AHP 与 EEM 耦合后的评价模型结果更准确, 模型构架可降低主观偏差和客观决定性, 使因子权重值的确定更贴合实际情况。

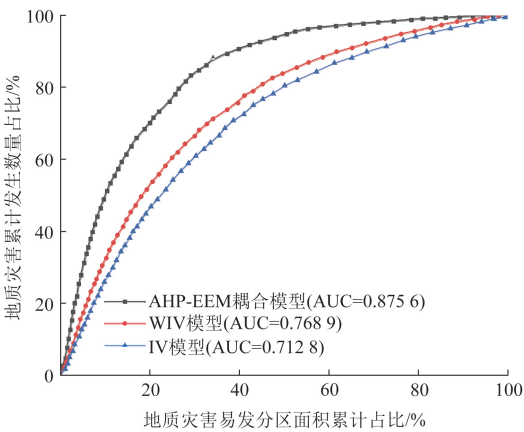


图 4 研究区地质灾害易发性评价结果 3 种模型 ROC 曲线
Fig.4 ROC curve of the three models for the geological hazard susceptibility assessment results in the study area

4.2 评价结果

依据 3 种评价模型评价结果,运用 ArcGIS 自然断点法将研究区划分为高、中、低、非 4 个易发等级,各等级内隐患点数量、面积及占比见表 6,易发分区结果见图 5。结合 3 种评价模型精度验证结果

易发性等级	IV 模型				WIV 模型				AHP-EEM 耦合模型			
	灾害点数 量/处	灾害点密度/ (处·100 km ⁻²)	面积/ km ²	面积占 比/%	灾害点数 量/处	灾害点密度/ (处·100 km ⁻²)	面积/ km ²	面积占 比/%	灾害点数 量/处	灾害点密度/ (处·100 km ⁻²)	面积/ km ²	面积占 比/%
非易发	4	1.78	224.63	15.38	4	1.78	224.56	15.37	2	0.83	241.93	16.56
低易发	25	7.30	342.52	23.44	21	4.59	457.89	31.34	18	3.70	486.13	33.27
中易发	41	8.40	488.38	33.43	40	8.24	485.37	33.22	47	10.17	462.09	31.63
高易发	74	18.25	405.47	27.75	79	26.95	293.18	20.07	77	28.43	270.85	18.54

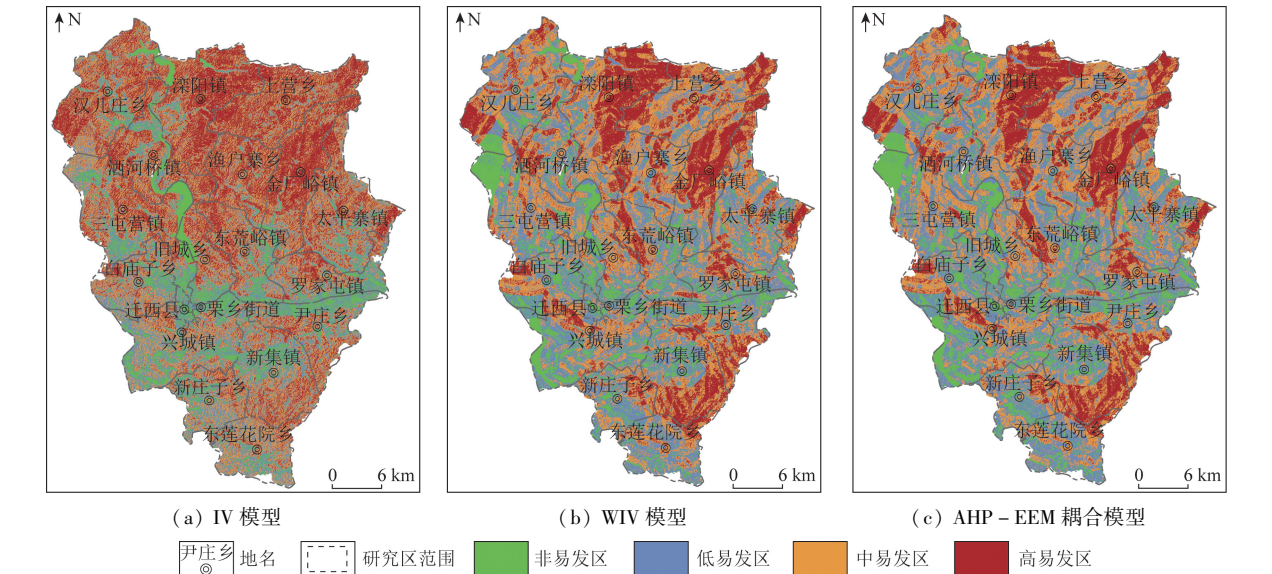


图 5 研究区 3 种模型地质灾害易发性评价结果

Fig.5 Assessment results of the three models for the geological hazard susceptibility in the study area

可知,AHP-EEM 耦合模型评价结果与隐患点实际分布情况贴合度最高,评价精度最高。

5 结论

(1)本文采用 IV 模型、WIV 模型、AHP-EEM 耦合模型 3 种方法对研究区开展了易发性评价,经 ROC 验证,3 种模型 AUC 值分别为 0.712 8、0.768 9、0.875 6,结合隐患点分布情况,AHP-EEM 耦合模型评价结果与隐患点实际分布情况贴合度最高,表明 AHP-EEM 耦合模型更适合地质灾害易发性评价。

(2)利用 AHP-EEM 耦合模型评价地质灾害易发性,分区结果表明,研究区内高、中、低、非易发区面积分别为 270.85 km²、462.09 km²、486.13 km²、241.93 km²,占比分别为 18.54%、31.63%、33.27%、16.56%。

(3)耦合 AHP 与 EEM 确定指标权重,可规避主观偏差与客观绝对性,使指标权重计算简单、灵活,同时能有效指导工作实际。

参考文献 (References):

- [1] 孙剑锋,马超,胡金树,等.基于灰色关联度与层次分析法耦合的地质灾害易发性评价——以浙江省云和县崇头镇为例[J].工程地质学报,2023,31(2):538-551.
Sun J F, Ma C, Hu J S, et al. Susceptibility evaluation of geological hazard by coupling grey relational degree and analytic hierarchy process: A case of Chongtou town, Yunhe county, Zhejiang Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 538-551.
- [2] 王璇,师芸,陈浩. CF 耦合 LR 模型的地质灾害易发性评价[J].测绘通报,2022(11):112-117.
Wang X, Shi Y, Chen H. Evaluation of geological hazard susceptibility based on certainty factors coupling logistic regression[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(11): 112-117.
- [3] 毕结昂,徐佩华,宋盛渊,等.基于信息量-逻辑回归耦合模型的玛纳斯河流域地质灾害易发性评价[J].工程地质学报,2022,30(5):1549-1560.
Bi J A, Xu P H, Song S Y, et al. Assessment of the susceptibility to geological hazards in the Manas river basin based on the coupled information value-logistic regression model[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1549-1560.
- [4] 翟文华,王小东,吴明堂,等.基于频率比模型和随机森林模型耦合的地质灾害易发性评价[J].自然灾害学报,2023,32(6):74-82.
Zhai W H, Wang X D, Wu M T, et al. Geological disaster susceptibility evaluation based on coupling of frequency ratio model and random forest model[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(6): 74-82.
- [5] 周天游,刘畅,薛鹏,等.基于不同机器学习的震后滑坡易发性建模研究[J].自然灾害学报,2023,32(5):177-185.
Zhou T Y, Liu C, Xue P, et al. Post-seismic landslide susceptibility modeling based on different machine learning methods[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(5): 177-185.
- [6] 徐灏,宫阿都,包文轩.基于机器学习的不可移动文物暴雨灾害风险评估——以山西省为例[J].自然灾害学报,2023,32(4):25-35.
Xu C, Gong A D, Bao W X. Machine learning-based storm disaster risk assessment of immovable cultural relics: A case study of Shanxi Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(4): 25-35.
- [7] 牛全福,熊超,雷姣姣,等.基于 FFPI 模型的甘肃陇南山区山洪灾害风险评价[J].自然灾害学报,2023,32(4):36-47.
Niu Q F, Xiong C, Lei J J, et al. Risk assessment of flash flood disasters in Longnan mountain area of Gansu Province based on FFPI model[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(4): 36-47.
- [8] 杨得虎,朱杰勇,刘帅,等.罗平县崩滑易发性评价模型对比研究[J].地质灾害与环境保护,2023,34(4):41-49.
Yang D H, Zhu J Y, Liu S, et al. Comparative study on evaluation models of landslide susceptibility in Luoping County, Yunnan Province[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2023, 34(4): 41-49.
- [9] 于喜坤,张紫昭,史光明,等.基于确定性系数与信息量耦合模型的新疆额敏县地质灾害易发性评价[J].工程地质学报,2023,31(4):1333-1349.
Yu X K, Zhang Z Z, Shi G M, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility in Emin county, Xinjiang based on deterministic coefficient and information coupling model[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1333-1349.
- [10] 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.
Hu Y, Zhang Z Z, Lin S H. Evaluation of landslide susceptibility in Ili valley, Xinjiang based on the coupling of WOE model and logistic regression[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(4): 1350-1363.
- [11] 杜国梁,张永双,吕文明,等.基于加权信息量模型的藏东南地区滑坡易发性评价[J].灾害学,2016,31(2):226-234.
Du G L, Zhang Y S, Lv W M, et al. Landslide susceptibility assessment based on weighted information value model in southeast Tibet[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 226-234.
- [12] 茹曼,郑燕,张斌,等.基于 SVM-RF 模型的地质灾害易发性评价——以河南省博爱县青天河景区为例[J].地质与资源,2023,32(5):633-641.
Ru M, Zheng Y, Zhang B, et al. Assessment of geological disaster susceptibility based on SVM-RF model: A case study of Qingtian river scenic area in Boai county, Henan province[J]. Geology and Resources, 2023, 32(5): 633-641.
- [13] 崔金芳.山地丘陵区生态系统服务价值时空演变与驱动机制研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.

- Cui J F. Spatio – temporal Evolution and Driving Mechanism of Ecosystem Service Value in Mountainous and Hilly Region [D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2023.
- [14] 文士茵, 庞国兴. 河北省迁西县地质灾害分析及其防治对策 [J]. 地下水, 2014, 36 (2) : 135 – 137.
- Wen S Y, Pang G X. Analysis of geological hazards in Qiangxi county, Hebei province and countermeasures to prevent and control them [J]. Ground Water, 2014, 36 (2) : 135 – 137.
- [15] 王瑶. 基于多重共线性修正下的多元线性回归——以河南省经济发展影响因素分析为例 [D]. 伊犁: 伊犁师范大学, 2023.
- Wang Y. Multiple Linear Regression Based on Multiple Cointegration Correction; Taking the analysis of Economic Development Impact Factors in Henan Province as an Example [D]. Yili: Yili Normal University, 2023.
- [16] 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 G L, Yang Z H, Yuan Y, 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.
- [17] 王宁涛, 彭轲, 黎清华, 等. 基于 RS 和 GIS 的地质灾害易发性定量评价: 以湖北省五峰县为例 [J]. 地学前缘, 2012, 19 (6) : 221 – 229.
- Wang N T, Peng K, Li Q H, et al. Quantitative evaluation of geological disaster liability based on RS & GIS analysis: A case study of Wufeng County, Hubei Province [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19 (6) : 221 – 229.
- [18] Mondal S, Maiti R. Integrating the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Frequency Ratio (FR) model in landslide susceptibility mapping of Shiv – Khola watershed, Darjeeling Himalaya [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2013, 4 (4) : 200 – 212.
- [19] 李军, 周成虎. 基于栅格 GIS 滑坡风险评价方法中格网大小选取分析 [J]. 遥感学报, 2003, 7 (2) : 86 – 92.
- Li J, Zhou C H. Appropriate grid size for terrain based landslide risk assessment in Lantau Island, Hong Kong [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7 (2) : 86 – 92.
- [20] 张蕊, 郭荣昌, 贺攀, 等. 基于改进突变理论的滑坡危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34 (1) : 121 – 128.
- Zhang R, Guo R C, He P, et al. Landslide hazard assessment based on improved catastrophe theory [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34 (1) : 121 – 128.
- [21] 夏兴生, 朱秀芳, 李月臣, 等. 基于 AHP – PCA 熵组合权重模型的三峡库区 (重庆段) 农业生态环境脆弱性评价 [J]. 南方农业学报, 2016, 47 (4) : 548 – 556.
- Xia X S, Zhu X F, Li Y C, et al. Evaluation for vulnerability of agroecological environment in Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) based on AHP – PCA entropy combination weight mode [J]. Journal of Southern Agriculture, 2016, 47 (4) : 548 – 556.
- [22] 刘瑞, 罗书斌, 徐源, 等. 基于地理信息系统与斜坡单元的峨边县地质灾害易发性评价 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (18) : 7678 – 7685.
- Liu R, Luo S B, Xu Y, et al. Geological hazard vulnerability assessment in Ebian county based on geographic information system and slope unit [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (18) : 7678 – 7685.

Susceptibility assessment of geological hazard based on analytic hierarchy process – entropy evaluation method coupling model: A case study of Qianxi County in Hebei Province

ZHOU Yiwen^{1,2}, SHAN Qiang^{1,2}, ZHAO Degang^{1,2}, MA Bingtai^{1,2}, LIANG Shuang^{1,2}, WANG Yang^{1,2}

(1. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang Hebei 050021, China;

2. Hebei Geo – environment Monitoring, Shijiazhuang Hebei 050021, China)

Abstract: Qianxi County features complex geological conditions and frequent human – induced modifications to the natural environment, resulting in significant development of geological hazards that pose serious threats to people’s life and property. Based on the analysis of the geological conditions contributing to hazard development in Qianxi County, the authors selected eight assessment indicators to construct a susceptibility assessment index system, including elevation, slope gradient, slope aspect, relief amplitude, engineering geological rock groups, distance from structural features, distance from roads, and distance from rivers. The independence of these indicators was validated through correlation analysis and collinearity diagnostics. The information value (IV) method was applied to calculate the information values for each assessment indicator, and subjective and objective weights were determined using the analytic hierarchy process (AHP) and entropy evaluation method (EEM), respective-

ly. The comprehensive weights were then derived using minimum information entropy, and three models were established, that is, IV, WIV and AHP – EEW coupling model. The susceptibility assessment results were classified into four levels (non – susceptible, low, moderate, and high) using the natural breaks method, and then validated by receiver operating characteristic (ROC) curve. The results indicated that the AHP – EEM coupling model achieved the highest accuracy, and the high, moderate, low, and non – susceptible zones covered 270.85 km² (accounting for 18.54%), 462.09 km² (accounting for 31.63%), 486.13 km² (accounting for 33.27%), and 241.93 km² (accounting for 16.56%), respectively. The AUC value of AHP – EEM coupling model was 0.875 6, demonstrating the highest alignment with the distribution of existing hazard sites and accurately reflecting regional geological conditions. The findings could provide valuable references for future disaster prevention and mitigation in this area.

Keywords: geological hazard; susceptibility assessment; analytic hierarchy process; entropy evaluation method; minimum relative information entropy; Qianxi County

(责任编辑: 刘丹)