

基于组合赋权与物元分析法的滑坡危险性评价^{*}

崔成涛 李丽敏 王莲霞 符振涛 任瑞斌
(西安工程大学电子信息学院 西安 710600)

摘要:滑坡危险性评价能够为防灾减灾和区域规划提供有效的理论依据,为使滑坡危险性区域评价结果更为客观、准确,首次引入物元分析理论,结合组合赋权,构建基于物元分析法与组合赋权的滑坡危险性评价模型。首先结合前人研究选取高程、坡度、坡向、土地类型、道路距离、水文条件、降雨量、断裂距离和地层岩性等9个滑坡影响因子,利用改进层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定各指标的主观权重,确保了判断矩阵的一致性检验更易满足。其次根据熵权法计算各指标的客观权重。基于博弈论原理组合赋权,将组合权重作为物元分析法的输入权重,建立滑坡危险性评价模型。最后,为了验证上述所提模型的有效性,以陕西省商洛市山阳县为研究区,对其进行滑坡危险性评价,所得评价结果准确率为96%,相较于AHP-FCE模型和改进AHP-物元分析模型分别提高了0.22、0.07,为其他同类型的研究区域的滑坡危险性评价提供了借鉴。

关键词:滑坡危险性评价;组合赋权;物元分析法;博弈论

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 620.1030

Landslide risk assessment based on combinatorial empowerment and material element analysis

Cui Chengtao Li Limin Wang Lianxia Fu Zhentao Ren Ruibin
(School of Electronic Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract: Landslide risk assessment can provide an effective theoretical basis for disaster prevention and mitigation and regional planning, in order to make the evaluation results of landslide risk areas more objective and accurate, the theory of matter-element analysis is introduced for the first time, combined with combination of combination empowerment, and a landslide risk evaluation model based on material-element analysis method and combinatorial empowerment is constructed. Firstly, based on previous studies, 9 factors such as elevation, slope, aspect, land type, road distance, hydrological condition, rainfall, fault distance and stratum lithology are selected, the subjective weight of each index is determined by improved analytic hierarchy process (AHP), which ensures that the consistency test of judgment matrix is easier to satisfy, and the objective weight of each index is calculated by entropy weight method. Based on the combination weight of game theory, the combination weight is taken as the input weight of matter-element analysis, and the landslide risk assessment model is established. Finally, in order to verify the validity of the proposed model, in the research area in Shanyang County, Shangluo City, Shaanxi Province, the evaluation rate was 96%, which improved 0.22 compared with the AHP-FCE model and the AHP and 0.07 respectively, providing a reference for the landslide risk assessment of other research areas of the same type.

Keywords: landslide risk assessment; portfolio empowerment; meta-analysis; game theory

收稿日期:2022-10-12

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62203344)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JM-322)、陕西省教育厅服务地方专项(22JC036)资助

0 引言

我国国土面积体量大,地形地貌种类繁多,所以相应的滑坡灾害影响范围广,其一年的发生量在所有的地质灾害中占比高达60%,严重威胁人类的生命财产安全。滑坡危险性评价是通过探究某一区中各影响因子对滑坡危险性的影响程度,在综合考虑各因子的权重后,对区域滑坡危险性进行评价,进而划分轻重缓急区别对待。

针对滑坡危险性评价,该领域专家学者展开了许多研究,提出了诸多评价模型。Panchal等^[1]采用传统层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定各因子权重,对印度5号公路进行滑坡危险性评价,但由于评价因子过多导致判断矩阵一致性检验难以满足。因此,孙强等^[2]将传统的九标度法改为三标度法,使得判断矩阵的一致性检验更易满足,但仅对滑坡致灾因子做了定性分析,缺乏对致灾因子的定量分析,评价结果不够客观。薛晓辉等^[3]利用模糊理论,结合定量与定性分析,但指标的权重仅由专家打分确定,具有主观性,影响评价结果的准确性,基于此丁文萍等^[4]提出利用熵权法^[5]确定权重,避免了主观性的影响,提高了评价的准确性。

物元分析方法是研究物元及其变化规律,常应用于生态环境、水资源承载力、农用地分级和土地生态水平等综合评价研究中^[6-7]。张博等^[8]采用层次分析法和物元分析法相结合对延川县森林资源质量进行评价,该方法可以提高指标与经典域、节域的关联性,使评价结果更为客观,但此方法并未用于滑坡地质灾害危险性评价领域。

因此,本文建立基于组合赋权和物元分析法的滑坡危险性评价模型。首先,采用改进层次分析法进行主观权重的确定,将一层指标分为两层,有效解决了判断矩阵的一致性检验的问题;其次利用熵权法确定指标的客观权重,之后基于博弈论原理将二者进行优化组合得到组合权重,并将组合权重作为物元分析法计算危险等级隶属度值的权重输入,使得评价结果更为准确、客观。

1 组合赋权

1.1 主观权重确定

AHP法^[9-10]是可以反映指标间的重要程度的一种主观赋权法,根据判断矩阵计算指标权重,通过一致性检验判断判断矩阵的一致性。

根据专家主观评价,将滑坡影响因子进行两两比对,根据9标度法对因子打分赋值,构建判断矩阵依据如表1所示,结果如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

一致性检验的步骤如下。

表1 重要性比较

标度	含义
1	因子A与B相比,A与B同样重要
3	因子A与B相比,A比B稍微重要
5	因子A与B相比,A比B明显重要
7	因子A与B相比,A比B强烈重要
9	因子A与B相比,A比B极端重要
2、4、6、8	上述两相邻判断的中值
倒数	如果A与B相比标度是a,那B与A相比就是1/a

1) 计算一致性指标 CI:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

式中: λ_{max} 为构建的判断矩阵最大特征值; n 为矩阵维数,即滑坡致灾因子的个数。

2) 根据判断矩阵的维数查找对应的平均随机一致性指标 RI,如表2所示。

表2 随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

3) 计算一致性比例 CR:

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

如果 $CR < 0.1$, 则认为判断矩阵的一致性可以接受,此时最大特征值对应的特征向量即为滑坡各影响因子的权重向量 w_i ; 否则需要对判断矩阵进行修正。

1.2 客观权重确定

熵可以反映评价指标的离散程度。当数据越分散时,熵值越小,该数据包含信息越多,因此权重越大^[11]。在进行计算之前需要对指标数据进行标准化处理:

$$f_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}\}}, & \text{正向指标} \\ \frac{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}\}}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (4)$$

式中:正向指标指的是指标值与结果正相关,负向指标反之; f_{ij} 为第*i*个样本的第*j*个指标标准化处理之后的值, x_{ij} 为第*i*个样本的第*j*个指标的原始值。

熵权计算公式如下:

$$H_j = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln n} \quad (5)$$

式中: n 为样本个数; H_j 为样本第*j*个指标的熵值。

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (6)$$

式中: w_j 为样本第 j 个指标的熵权。

1.3 博弈论组合赋权

主客观权值计算之后,根据博弈论^[12]的思想进行组合权重的计算。

记 w_i 和 w_j 的组合权重为:

$$W = aw_i + bw_j \quad (7)$$

式中: a, b 为权重系数, $a + b = 1$ 。

根据博弈论思想,使主客观权重之间的离差和最小,建立目标函数如下所示:

$$\min \| aw_i^T + bw_j^T - w_i - w_j \|_2 \quad (8)$$

根据微分原理,要使目标函数取得最小值,需满足一阶导数为:

$$\begin{bmatrix} w_i w_i^T & w_i w_j^T \\ w_j w_i^T & w_j w_j^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_i w_i^T \\ w_j w_j^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

计算出 a 和 b ,从而计算得到组合权重 W 。

2 物元分析模型

物元分析方法是学者蔡文于 20 世纪 80 年代提出的用于解决矛盾问题的技术方法,主要思想是把事物用事物、特征、量值(M, C, V)3 个要素以有序三元组的形式来描述,这个三元组就叫物元。在滑坡危险性评价中,评价结果即为事物 M ,评价指标即为待评价区域的特征 C_j ,该指标值即为量值 V_j ,由此便可根据选定的 n 个评价指标及其量值来确定 n 维物元模型。

2.1 经典域与节域

在滑坡危险性评价中,将每个等级的特征 C_j 及其量值范围作为该物元模型的一个经典域,包含经典域的标准物元表达式为:

$$R_m = (M_m, C_j, V_{jm}) = \begin{bmatrix} M_m & C_1 & V_{1m} \\ & C_2 & V_{2m} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_m & C_1 & (a_{1m}, b_{1m}) \\ & C_2 & (a_{2m}, b_{2m}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{nm}, b_{nm}) \end{bmatrix} \quad m = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

式中: M_m 是滑坡危险性评价的等级, C_j 为评价等级 M_m 的特征, V_{jm} 是评价等级 M_m 对应特征的取值范围。

节域表达式为:

$$R_s = (M_s, C_j, V_{js}) = \begin{bmatrix} M_s & C_1 & V_{1s} \\ & C_2 & V_{2s} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{ns} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & C_1 & (a_{1s}, b_{1s}) \\ & C_2 & (a_{2s}, b_{2s}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{ns}, b_{ns}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: M_s 是所有划分的等级集合; V_{js} 是评价对象相关特征的取值范围。

2.2 关联函数

关联函数值指的是各评价指标与相对应的评价等级关联程度的大小,计算公式如下:

$$k_{xm}(V_j) = \begin{cases} \frac{-\rho_{jm}(V_{xj}, V_{jm})}{|V_{jm}|}, & V_{xj} \in V_{jm} \\ \frac{\rho_{jm}(V_{xj}, V_{jm})}{\rho_{js}(V_{xj}, V_{js}) - \rho_{jm}(V_{xj}, V_{jm})}, & V_{xj} \notin V_{jm} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k_{xm}(V_j)$ 指的是待评物元 x 中第 j 个指标第 m 个等级的关联度; V_{xj} 指的是待评物元 x 中第 j 个指标的实际值; V_{jm} 指的是第 m 个经典物元中第 j 个指标的区间范围; V_{js} 指的是节域物元中第 j 个指标的范围; ρ_{jm}, ρ_{js} 分别为点 V_{xj} 到经典域和节域区间的距离。

$$|V_{jm}| = |b_{jm} - a_{jm}| \quad (13)$$

$$\rho_{jm}(V_{xj}, V_{jm}) = \begin{cases} a_{jm} - V_{xj} & (V_{xj} \leq \frac{b_{jm} + a_{jm}}{2}) \\ V_{xj} - b_{jm} & (V_{xj} > \frac{b_{jm} + a_{jm}}{2}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\rho_{js}(V_{xj}, V_{js}) = \begin{cases} a_{js} - V_{xj} & (V_{xj} \leq \frac{b_{js} + a_{js}}{2}) \\ V_{xj} - b_{js} & (V_{xj} > \frac{b_{js} + a_{js}}{2}) \end{cases}$$

2.3 计算危险性等级隶属度

隶属度指的是各评价指标与滑坡危险等级的关联大小,计算如下:

$$k_m(N_x) = \sum_{j=1}^n W_j k_{xm}(V_j) \quad (15)$$

式中: N_x 指的是第 x 个待评价物元; W_j 指的是第 j 个指标的权重。

根据隶属度最大原则,评价等级为 $\max(k_m(N_x))$ 所对应的等级。

3 实验验证及结果分析

3.1 研究区概况

山阳县位于陕西省商洛市南部,北与商州市相连,南与湖北省郧西县接壤,西与镇安县、柞水为邻,东靠丹凤县与商南县。地理位置为东经 $109^{\circ}32' \sim 110^{\circ}29'$,北纬 $33^{\circ}9' \sim 33^{\circ}42'$ 。总面积为 $3\,529.18 \text{ km}^2$,东西长约 88.91 km ,南北宽约 62.02 km 。境内最高海拔为 $2\,045 \text{ m}$,最低海拔为 261 m ,平均海拔为 $1\,120 \text{ m}$ 。境内主要水系有银花河、金钱河、谢家河等。山阳县境内有区域性大断裂 2 条,一般性断裂 8 条。境内人类工程活动主要以耕种坡地、修建房屋与道路为主,对地质环境的依赖程度高,同时对环境的影响和破坏也大,研究区地理位置以及滑坡点分布如图 1 所示。

根据图 1 滑坡点的分布数据,计算其滑坡点密度,得

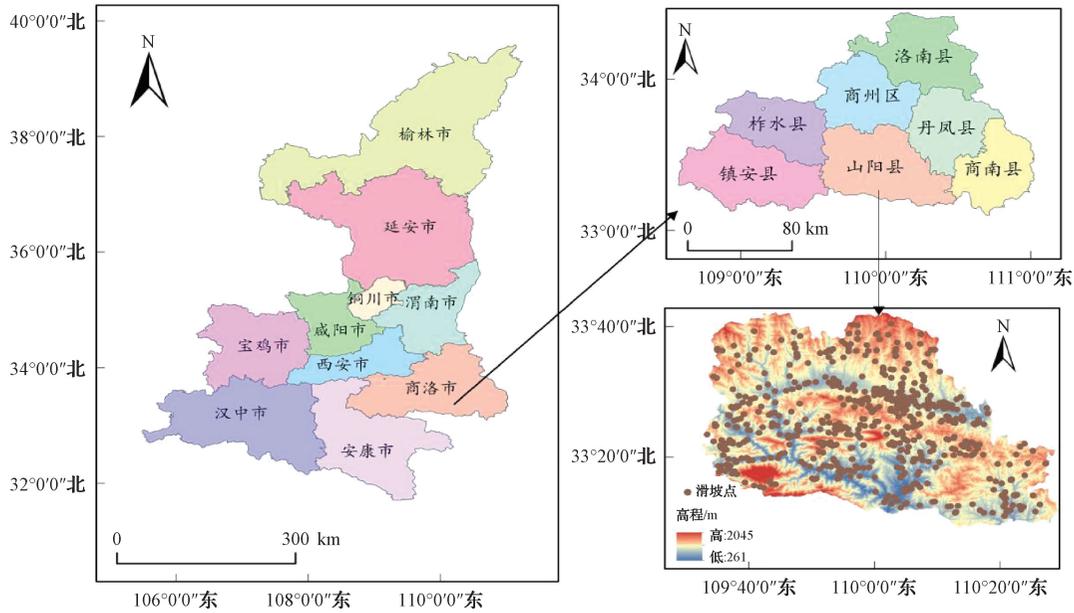


图1 研究区地理位置

到山阳县地形平面分区图如图2所示,可以看出,山阳县滑坡高发区位于高坝店镇境内。本文所使用的研究数据为商洛市山阳县境内滑坡隐患点的野外调研相关数据。

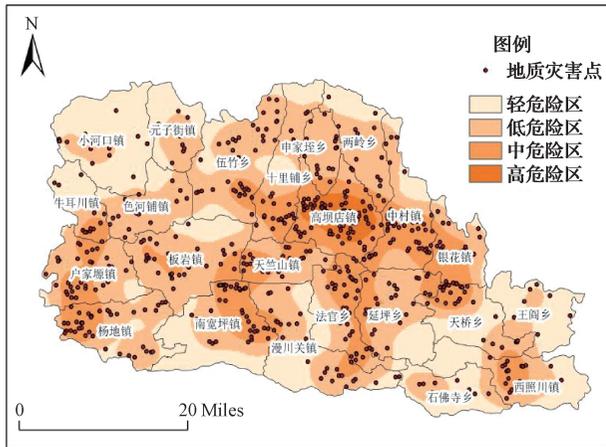


图2 山阳县地形平面分区图

3.2 滑坡危险性评价指标体系

滑坡危险性评价指标体系构建需要秉持科学性、代表性的原则,并参考文献[13-14]的调研,最终选择地形地貌(高程、坡度、坡向)、人类活动(土地类型、道路距离)、其他因子(水文条件、降雨量)、岩性构造(断裂距离和地层岩性),总计4大类,9个指标因子,如表3所示。

本文根据陕西省山阳县地质灾害调查报告,给出滑坡地质灾害危险性评价的分级指标,如表4所示。I~IV级对应的等级分别为轻危险、低危险、中危险、高危险。

3.3 基于博弈论的指标组合赋权

本文采用改进的层次分析法,将选取的9个影响因子

表3 滑坡危险性评价指标

目标层	准则层	指标层	指标属性
滑坡危险性评价 A ₁	地形地貌 B ₁	高程 C ₁	正向
		坡度 C ₂	正向
		坡向 C ₃	正向
	人类活动 B ₂	土地类型 C ₄	正向
		道路距离 C ₅	负向
		水文条件 C ₆	负向
	其他因子 B ₃	降雨量 C ₇	正向
		断裂距离 C ₈	负向
		地质岩性 C ₉	正向

划分为4个准则层和其对应的指标层,以此将一个9×9的矩阵拆分成1个4×4的矩阵、3个2×2的矩阵和1个3×3的矩阵,降低了矩阵运算的复杂程度,使得构建的判断矩阵更易通过一致性检验。根据式(2)、(3)计算主观权重,并进行一致性检验,使CR<0.1。根据式(4)~(6)计算客观权重。最终利用式(7)~(9)计算组合权重结果如表5所示。

从组合权重可以看出,在地质灾害滑坡危险性评价中,坡度C₂、断层距离C₈、地质岩性C₉权重较大,说明这3项指标对评价结果影响比较大。

3.4 物元模型建立

为了消除量纲的影响,需要对表4数据进行标准化处理。建立经典域矩阵和节域矩阵如表6所示。

以山阳县高坝店镇为例,各指标值平均值如表7所示。

3.5 计算结果与分析

根据式(12)~(14)计算高坝店镇的滑坡危险性评价等级的关联度值,结果如表8所示。

表4 评价因子

等级	轻危险	低危险	中危险	高危险
高程/m	<500	500~1 000	1 000~1 500	>1 500
坡度/(°)	<15	15~35	35~50	>50
坡向/(°)	0~45,315~360	45~135	135~225	225~315
土地类型	高植被	中植被	居民地,耕地	裸土
道路距离/m	>2 000	1 200~2 000	500~1 200	<500
水文条件/m	>2 000	1 200~2 000	500~1 200	<500
降雨量/mm	<700	700~850	850~1 000	>1 000
断裂距离/m	>1 500	1 000~1 500	500~1 000	0~500
地层岩性	硬岩	软硬岩组	软岩组	软硬岩组

表5 山阳县滑坡危险性评价指标权重

权重类型	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
主观权重	0.094	0.170	0.052	0.026	0.077	0.015	0.067	0.167	0.334
客观权重	0.053	0.160	0.056	0.037	0.089	0.022	0.043	0.186	0.354
组合权重	0.078	0.166	0.054	0.030	0.082	0.018	0.055	0.175	0.342

表6 经典域与节域矩阵

	轻危险	低危险	中危险	高危险
C ₁	0	0.144	0.145	0.559
C ₂	0	0.30	0.31	0.70
C ₃	0	0.125	0.126	0.375
C ₄	0	0.250	0.251	0.500
C ₅	0	0.238	0.239	0.571
C ₆	0	0.500	0.501	0.750
C ₇	0	0.614	0.615	0.746
C ₈	0	0.144	0.145	0.559
C ₉	0	0.250	0.251	0.500

表7 待评价区指标值

名称	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
实际值	859.03	22.43	189.25	40	1 292	1 162.7	976.01	325.68	90
量化值	0.442	0.468	0.530	0.4	0.242	0.592	0.856	0.98	0.9

表8 高坝店镇滑坡危险性的关联度值

等级	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
轻危险	-0.402 7	0.56	-0.462 8	0.6	-0.016 3	-0.162 5	-0.626 9	-0.976 6	-0.866 7
低危险	0.282 6	-0.405 1	-0.248	-0.401 6	-0.009	-0.634 5	-0.433 1	-0.954 6	-0.8
中危险	-0.210 7	-0.304 8	-0.381 5	-0.401 6	-0.576 9	-0.280 4	-0.838 46	-0.230 7	-0.6
高危险	-0.546 7	-0.485 7	-0.169 6	-0.467 3	-0.746 1	-0.430 9	-0.132 5	-0.2	0.598 4

根据表5、7和式(15),计算山阳县高坝店镇地质灾害滑坡危险性待评价物元各等级的隶属度值,结果如表9所示。

根据隶属度最大原则确定危险性等级,隶属度值^[15]越大,则危险性越高,由表9可得,山阳县高坝店镇地质灾害滑坡危险性评价等级为IV(高危险区)。根据山阳县地

表9 高坝店镇危险性等级隶属度

等级	隶属度值
轻危险	-0.451 5
低危险	-0.547 3
中危险	-0.443 7
高危险	-0.053 0

质灾害调查报告显示,山阳县高坝店镇境内共发生滑坡97起,损坏房屋128,威胁人口4116,滑坡危险性评价的等级与实际情况相符。

根据以上分析过程,对山阳县境内其余22个城镇运用本文模型与其他不同模型进行比较分析得出评价结果如表10所示。

表10 模型评价等级对比

危险性区域	本文模型	AHP-FCE模型	改进AHP-物元分析模型	实际等级
小河口镇	轻危险	轻危险	轻危险	轻危险
南宽坪镇	中危险	低危险	中危险	中危险
高坝店镇	高危险	高危险	高危险	高危险
漫川关镇	低危险	低危险	低危险	低危险
元子街镇	轻危险	轻危险	轻危险	轻危险
延坪乡	低危险	中危险	低危险	低危险
杨地镇	中危险	中危险	中危险	中危险
十里铺乡	低危险	低危险	低危险	低危险
天桥乡	中危险	中危险	中危险	中危险
西照川镇	低危险	低危险	低危险	低危险
石佛寺乡	轻危险	轻危险	轻危险	轻危险
银花镇	中危险	中危险	中危险	中危险
天竺山镇	中危险	低危险	高危险	中危险
色河铺镇	低危险	低危险	低危险	低危险
户家源镇	中危险	中危险	中危险	中危险
两岭乡	低危险	低危险	低危险	低危险
中村镇	中危险	高危险	高危险	中危险
牛耳川镇	低危险	中危险	低危险	低危险
板岩镇	低危险	低危险	低危险	低危险
伍竹乡	低危险	低危险	低危险	低危险
法官乡	中危险	高危险	高危险	中危险
王阎乡	轻危险	轻危险	轻危险	轻危险
申家垵乡	中危险	低危险	低危险	低危险

对比表10可知,以天竺山镇和中村镇为例,本文所提出的模型评价结果的准确度高于AHP-FCE模型和改进AHP-物元分析模型。

本文采用主客观权重相结合的组合权重作为物元分析模型的输入权重,比单一权重更能反映事物的特征,评价结果也更加合理、准确。将不同模型评价结果的准确率进行比较,如表11所示,可以看出本文模型的危险性等级划分能力更加优越。

表11 模型精度对比

模型方法	准确率/%
本文模型	96
AHP-FCE模型	74
改进AHP-物元分析模型	89

4 结论

本文以滑坡灾害危险性评价为研究对象,为了解决其影响因子过多导致层次分析法的判断矩阵的一致性难以满足及常见模型难以看出滑坡因子变化对危险性变化趋

势影响的问题,提出了组合赋权与物元分析相结合的方法,并采用山阳县研究区域的数据进行验证,得到如下结论,首次将组合赋权与物元分析法用于地质灾害滑坡危险性评价,依据模型评价结果对山阳县23个区域进行危险性等级划分,分别与AHP-FCE模型、改进AHP-物元分析模型和研究区实际危险等级结果进行对比,可知本文模型准确度较高。所采用的物元分析方法,可以通过关联度值的大小,清楚的看出滑坡各影响因子的变化趋势对滑坡危险性变化的影响。所考虑的滑坡诱发因子不够全面,后续应考虑地震、日降雨量等因素的影响。

参考文献

[1] PANCHAL S, SHRIVASTAVA A K. Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of national highway 5 in India[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(3):10162-10163.

[2] 孙强, 张泰丽, 伍剑波, 等. 基于GIS与层次分析法的龙溪流域滑坡风险评价[J]. 华东地质, 2018,

- 39(3):227-233.
- [3] 薛晓辉,周玲,秦爱红.库岸涉水滑坡危险性现状分析与预测评价[J].中国安全生产科学技术,2021,17(5):169-175.
- [4] 丁文萍,刘世琦,杨劲枝,等.基于熵权法的集中供水水源地地下水环境质量评价方法研究[J].国土资源信息化,2021(4):40-46.
- [5] 赵小惠,张梦洋,石杨斌,等.改进CEEMDAN算法的电机轴承振动信号降噪分析[J].电子测量与仪器学报,2020,34(12):159-164.
- [6] TANDA A, MANZI G. Underpricing of venture backed IPOs: A meta-analysis approach [J]. Economics of Innovation and New Technology,2020,29(4):331-348.
- [7] XIA P, YING C. Research on the stability evaluation method of anchored slopes based on group decision making and matter element analysis [J]. Scientific Reports,2021,11(1):16588.
- [8] 张博,王照利,雷方隽.基于层次分析法和物元分析法的森林资源质量评价——以延川县为例[J].西北林学院学报,2022,37(2):208-215.
- [9] SMRITI P, KRITI P G. Prioritisation of factors influencing brand love of Indian young consumers using analytic hierarchy process [J]. International Journal of Indian Culture and Business Management,2020,21(3):279.
- [10] 龚杰,赵起超,娄华超,等.模糊层次分析法在水资源价值评估中的应用——以绵阳市为例[J].长江科学院院报,2022,39(4):34-40.
- [11] 李铜山,王艳蕊.基于熵权TOPSIS模型的区域农业碳中和能力评价研究[J].区域经济评论,2022(3):92-98.
- [12] 王念秦,张帅,刘鹏.基于博弈论组合赋权法的泥石流灾害易发性评价云模型[J].长江科学院院报,2020,37(2):41-47.
- [13] 李丽敏,魏雄伟,温宗周,等.基于改进AHP-FCE的滑坡地质灾害危险性评价[J].国外电子测量技术,2021,40(10):53-59.
- [14] 周洪福,方甜,韦玉婷.国内外地震滑坡研究:现状、问题与展望[J/OL].沉积与特提斯地质:1-12[2023-02-06].DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.11011.
- [15] 邓聪颖,叶波,苗建国,等.基于K-means++聚类与概率神经网络的数控机床变位姿态动态特性模糊评估[J].仪器仪表学报,2020,41(12):227-235.

作者简介

崔成涛,硕士研究生,主要研究方向为智能算法及其在滑坡预报领域的应用。

E-mail:1542688061@qq.com

李丽敏,博士,副教授,主要研究方向为智能算法及其在地质灾害监测领域的应用。

E-mail:2364225096@qq.com