

基于博弈—改良云模型的排土场危险等级评价

秦晓涛¹, 张雄天^{1*}, 李杰林²

1. 兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000;
2. 中南大学资源与安全学院, 湖南 长沙 410083



摘要:排土场边坡稳定性受多因素耦合作用, 危险等级评价需兼顾评价指标的随机性与模糊性。基于博弈论思维和改良云模型, 提出了一种精确量化排土场危险等级的评价方法。首先, 选取坡角 α 、坡高 H 、容重 γ 、内聚力 c 、内摩擦角 φ 和含水率 MC 构建评价指标体系, 并选取50组边坡样本数据, 运用熵权法和G1法分别计算主客观权重, 利用博弈论重组优化, 减少单一赋权方法的片面性。其次, 针对传统云模型在处理模糊边缘区间数据时的局限性, 采用半升、半降云模型来描述边缘区间的不确定性, 构建改良云模型; 融合主客观权重与云模型不确定性处理能力, 通过隶属度精准量化排土场危险等级, 并对比验证, 再对该模型的危险性分类能力进行分析。最后, 利用该模型对10组测试集样本进行分析。结果表明: 基于博弈—改良云模型的评价结果与实际情况高度吻合, 说明模型具有较好的可靠性和实用性。

关键词:排土场; 边坡; 改良云模型; 博弈论; 危险等级评价; 不确定性分析

中图分类号: TD31 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2026)01-0208-12 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2026.01.205
引用格式: 秦晓涛, 张雄天, 李杰林. 基于博弈—改良云模型的排土场危险等级评价[J]. 黄金科学技术, 2026, 34(1): 208-219.
QIN Xiaotao, ZHANG Xiongtian, LI Jielin. Evaluation of Risk Level of Waste Dumps Based on Game-Improved Cloud Model[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(1): 208-219.

排土场作为矿山开采过程中堆积废石和渣土的重要场所, 其边坡稳定性直接关系到矿山安全生产与生态环境保护(刘伟等, 2024; 赵志强等, 2024)。受复杂地质条件、外部荷载及气候因素等多源不确定性影响, 排土场边坡失稳风险具有显著的模糊性和随机性特征(陈徽, 2023)。如何科学量化这些不确定性因素, 构建兼顾客观数据与专家经验的动态评价模型, 成为当前边坡风险管控领域的难点问题。

近年来, 国内众多学者针对排土场危险等级评价开展了多维度研究。刘献真等(2023)选取9个主要评价指标构建排土场稳定性评价体系, 利用灰色关联系数对逼近理想解排序法进行改良, 对边坡

稳定性进行预测评价。高峰等(2021)构建了一种深度剖析样本数据深层信息的PCA-PSO-ELM模型, 利用训练时间、均方根误差和 R^2 等指标综合预测排土场边坡稳定性。江松等(2024)采用迁移学习思想, 对样本数据权重进行迭代计算, 建立了可弥补小样本数据信息量不足的判别模型。秦驰越等(2021)通过数值模拟收集样本数据集, 构建了2种机器学习模型用于评价排土场边坡稳定性, 结果表明人工神经网络模型预测精度更高。由于传统的边坡危险等级评价方法多依赖静态权重进行评价指标分配, 难以解决评价指标间的冲突性及数据不兼容问题(王占平等, 2020; 苗静, 2024)。与此同时, 现有云模型虽然能够通过正向云发生器刻画

收稿日期: 2025-07-01; 修订日期: 2025-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目“露天矿大坡度连续运输与采剥作业链高效协同智能管控技术”(编号: 2023YFC29073059)资助

作者简介: 秦晓涛(1984—), 男, 陕西岐山人, 高级工程师, 从事有色金属矿山总图运输与排土场设计工作。E-mail: 454350993@qq.com

*通信作者: 张雄天(1987—), 男, 甘肃白银人, 高级工程师, 从事充填采矿及固废综合利用方面的研究工作。E-mail: 624375704@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

模糊性与随机性的关联性,但其参数优化过程常忽略主观偏好与客观数据间的博弈关系,导致评价结果易出现偏差(王伦平等,2025)。

鉴于此,本文提出了一种融合博弈论与改进云模型的综合评价方法。通过引入组合赋权策略协调主客观权重的博弈均衡,并利用半云模型修正传统云模型在模糊边缘区间的不足,从而增强模型对排土场多维度影响因素的适应性。通过对排土场测试集样本进行分析,验证了该模型的可靠性,为排土场边坡稳定性预测提供了新方法。

1 理论基础

1.1 云模型定义

云模型是在随机理论和模糊集理论的基础上,解决了定性判断与定量分析相互转换时存在的不确定性的一种数学模型,用隶属度来解决随机性和模糊性的相关性。该模型已在数据深层次挖掘和决策辅助分析等诸多领域展现出良好的应用效果(周科平等,2020;王全伟等,2025)。云模型作为一种独特的数学模型,体现了在定性判断和定量分析之间不确定性的双向转换。设 X 为一个由众多具体数值形式呈现的定量集合,即 $X=\{x\}$,则 X 定义为论域, A 是 X 的模糊集合。在 X 中的元素 x ,均存在其 $x \in A$ 的映射 $\mu, \mu(x) \in [0, 1]$,随机数 $\mu(x)$ 为 x 对 A 的隶属度,其计算公式(刘兆君,2022)为

$$\mu(x) = \exp\left[\frac{-(x-E_x)^2}{2E_n'^2}\right] \quad x \in (0, +\infty) \quad (1)$$

式中: E_x 为分级区间的期望值; E_n' 为分级区间的熵值。

1.2 云模型数字特征

云模型的数字特征映射出其定性概念中所蕴含的定量特性,通常用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 来描述(张东辉等,2024)。根据云模型的基本原理,排土场边坡危险性分级标准云模型数字特征表示为

$$\begin{cases} E_x = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2\sqrt{2\ln 2}} \\ H_e = K \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_{\max} 和 C_{\min} 为不同分级标准范围的上下限临界值;参数 K 仅对可视云图的厚度产生影响,不会影

响任何计算结果,为方便计算和展现出云图的美观性,本文统一取0.1。

1.3 云发生器

云发生器作为云模型的主要核心算法,承担着将定性概念与定量数据进行双向转换的任务,是推动云模型从理论走向实际应用的关键环节。云发生器体系包含正向和逆向两类模式,鉴于排土场边坡危险等级评价本质上是定性判断转化为定量分析的过程,本文采用正向云发生器,如图1所示。

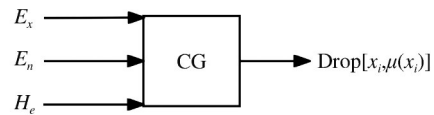


图1 正向云发生器

Fig. 1 Forward cloud generator

基于云模型的 E_x, E_n, H_e ,在模糊集合 A 中生成1 000个云滴,绘制出云图,以直观展示其分布特性。由于传统云模型服从正态分布[图2(a)],存在具体的区间边界,只能计算所属区间内数据的隶属度,如隶属度公式[式(1)]未考虑到排土场边坡危险分级标准中存在如 $(0, C_{\min})$ 和 $(C_{\max}, +\infty)$ 的模糊边界区间,在这些区间内,通常采用半升云模型和半降云模型来描述,如图2(b)所示。其中,红色曲线和绿色曲线分别代表半降云模型和半升云模型,2条曲线在 $(0, C_{\min})$ 区间和 $(C_{\max}, +\infty)$ 区间不再服从正态分布,而是转变为隶属度为1的均匀分布,计算区间能够有效地覆盖样本数据的所有变量,相比之下,图2(b)更符合现实的分布规律。

为了准确地描述这种分布变化,对传统云模型进行改良,隶属度 $\mu(x)$ 计算公式为

$$\begin{cases} \mu(x) = 1, & x \in (0, E_{x(\min)}) \cup (E_{x(\max)}, +\infty) \\ \mu(x) = \exp\left[\frac{-(x-E_x)^2}{2E_n'^2}\right], & x \in \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{x(\max)}$ 和 $E_{x(\min)}$ 分别为排土场边坡危险分级区间的最大和最小期望值。

基于云模型理论框架,将排土场边坡危险分级标准界定为具有模糊性与随机性的定性概念体系,并通过正向云发生器将其转化为云模型。结合博弈组合赋权法,求出各样本隶属于某危险等级的隶属度,通过对比各样本在不同危险等级的隶属度,

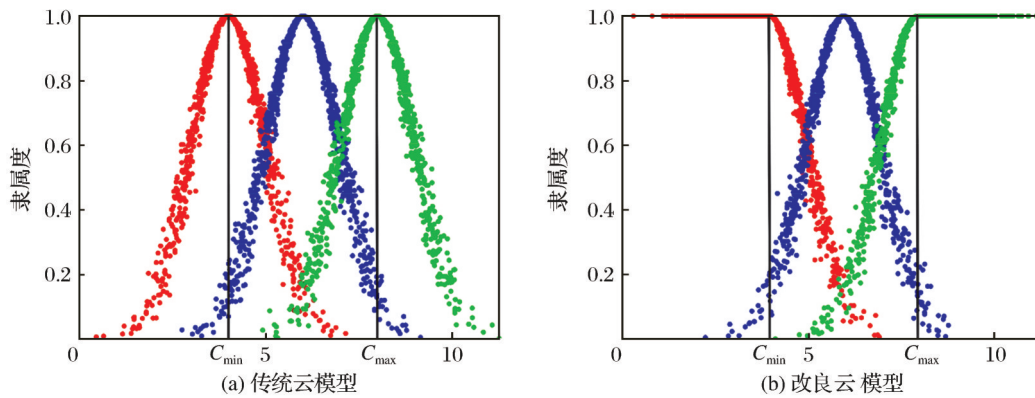


图2 传统云模型与改良云模型对比

Fig. 2 Comparison of traditional cloud model and improved cloud model

根据最大隶属度所在等级辨识样本边坡的危险性等级。博弈—改良云模型排土场边坡危险等级评价流程如图3所示。

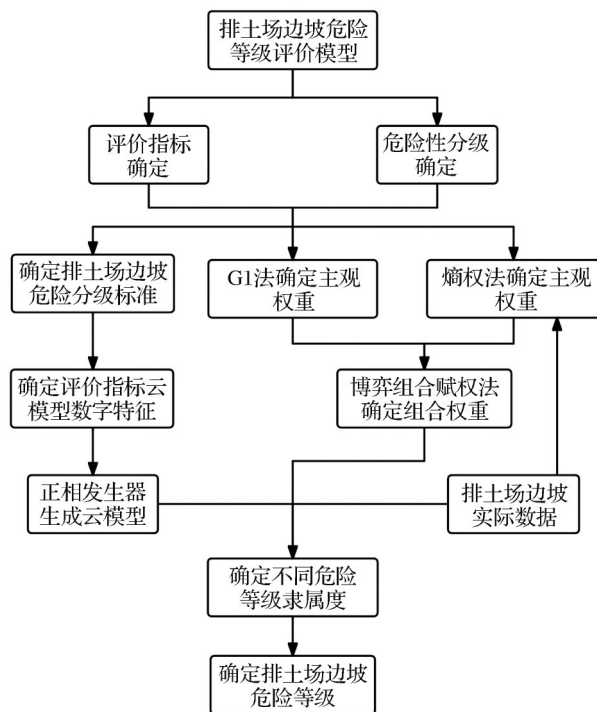


图3 评价模型流程

Fig. 3 Flow chart of the evaluation model

2 构建博弈—改良云模型

2.1 评价指标选择

排土场边坡的危险程度受诸多复杂因素的共同作用,在进行危险等级预测时,科学合理地选取

评价指标成为至关重要的环节。若选取的指标数量过多,部分指标数据的获取可能面临极大困难,进而导致整个预测流程变得繁琐复杂;若指标数量过少,可能因涵盖的信息不全面,使得预测结果偏离实际情况。因此,所挑选的评价指标需具备独立性和代表性等特性。排土场边坡稳定性的影响因素可归为内在因素和外在因素两大类。处于复杂地质环境中的排土场,受降雨含水量和坡度等外部作用的影响,其边坡土体的物理力学性质会发生改变,进而影响边坡稳定性,此为外在因素。排土场边坡土体自身的颗粒组成、密实程度以及内摩擦角等内在特性,对边坡稳定性起着根本性作用,属于内在因素。本文根据排土场边坡失稳的特点与形成机理,综合考量影响其稳定性的内外部因素,选取坡角 α 、坡高 H 、容重 γ 、内聚力 c 、内摩擦角 φ 和含水率 MC 作为排土场边坡危险等级预测的评价指标(祝经中等,2024;付宪吕等,2024;赵黎等,2024)。

2.2 分级标准

根据排土场边坡危险等级相关研究及分类标准,危险等级可划分为4个等级:Ⅰ级(极高危险性)、Ⅱ级(较高危险性)、Ⅲ级(一般危险性)和Ⅳ级(较低危险性)。参照排土场边坡危险判据和分级的相关研究成果(文畅平等,2016;栾婷婷等,2014),建立了具体的边坡危险性分级标准,如表1所示。

2.3 数字特征确定

根据建立的排土场边坡危险分级标准,通过表1和式(2)可以得到不同评价指标下不同危险等级的云模型数字特征值,具体数值如表2所示。

表1 排土场边坡危险性分级标准
Table 1 Risk classification criteria for waste dump slopes

边坡危险等级	评价指标					
	$\alpha/(\circ)$	H/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	$MC/\%$
I	(35, +∞)	(100, +∞)	(22, +∞)	(0, 16)	(0, 15)	(30, +∞)
II	(30, 35)	(60, 100)	(18, 22)	(16, 24)	(15, 25)	(18, 30)
III	(25, 30)	(30, 60)	(14, 18)	(24, 32)	(25, 35)	(8, 18)
IV	(0, 25)	(0, 30)	(0, 14)	(32, +∞)	(35, +∞)	(0, 8)

表2 排土场边坡评价指标云模型数字特征计算结果
Table 2 Calculation results of digital characteristics for cloud model of waste dump slope evaluation indicators

危险等级	数字特征	评价指标					
		$\alpha/(\circ)$	H/m	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	$MC/\%$
I	E_x	40	200	24	8	10	35
	E_n	2.98	59.61	1.19	4.77	2.98	2.98
	H_e	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
II	E_x	32.5	80	20	20	20	24
	E_n	1.49	11.92	1.19	2.38	2.98	3.58
	H_e	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
III	E_x	27.5	45	16	28	30	13
	E_n	1.49	8.94	1.19	2.38	2.98	2.98
	H_e	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
IV	E_x	20	20	12	44	40	4
	E_n	2.98	5.96	1.19	7.15	2.98	2.38
	H_e	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

2.4 生成改良云模型

根据表2中的评价指标云模型数字特征值,利用MATLAB软件,分别通过正向云生成器和式(3),生成各评价指标对应的云图(图4)。

3 评价指标权重确定

3.1 熵权法

熵权法是一种基于信息熵理论的多指标综合评价的客观赋权方法,其核心是通过计算各评价指标的变异性大小来确定指标的熵值,进而分配权重。具体计算方法见文献(郑龙菲等,2023)。

3.2 G1法

G1法作为一种主观赋权法,是在AHP基础上优化发展而来的改进方法,该方法通过简化计算流程,显著降低了传统AHP方法中矩阵运算的复杂度,同时省去了繁琐的一致性检验环节(胡云飞等,2023)。具体计算步骤如下:

(1)将评价指标按照专家评估过程中的重要性进行排序,确定重要性关系:

$$h_1 > h_2 > \dots > h_n \quad (4)$$

(2)对相邻评价指标的重要性程度进行对比分析,将评价指标 h_{k-1} 与 h_k 的重要性程度之比(B_k)量化为特定赋值参数,赋值如表3所示。

(3)确定权重 w_n 。计算公式为

$$w_n = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n B_k \right)^{-1} \quad (5)$$

$$w_{k-1} = B_k w_k \quad (6)$$

3.3 博弈论组合赋权

为有效规避单一赋权方式可能引起的信息失真问题,提升权重分配的准确性,采用博弈论思维对主、客观权重进行整合优化,挖掘不同赋权结果间的内在协同性,得到最优组合权重(楚明辉等,2024)。具体步骤如下:

(1)若采取 L 种不同方式对 n 个指标展开赋权,那么构成的权重矩阵可表示为

$$W = (w_{kp})_{L \times n} \quad (7)$$

式中: w_{kp} 表示第 $k(k=1, 2, \dots, L)$ 个赋权方式的第 $p(p=1, 2, \dots, n)$ 个指标相对应的权重值。

(2)对各权重向量进行线性组合,表示为

$$w_i = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T \quad (8)$$

式中: α_k 表示第 $k(k=1, 2, \dots, L)$ 个赋权方式所对应的组合系数。

(3)由于需要使不同评价指标权重值 $w_k(k=1, 2, \dots, L)$ 之间的离差达到最小,将不同赋权方式所对应的组合系数 α_k 进行重组优化,构建并求解优化后的线性方程组,表示为

$$\begin{bmatrix} w_1 \cdot w_1^T & \cdots & w_1 \cdot w_L^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_L \cdot w_1^T & \cdots & w_L \cdot w_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \cdot w_1^T \\ \vdots \\ w_L \cdot w_L^T \end{bmatrix} \quad (9)$$

(4)根据式(9)计算得到优化后的组合系数 α_k ,针对所得 α_k 进行标准化处理,即 $\alpha_k^* = \alpha_k / \sum_{k=1}^L \alpha_k$ 。

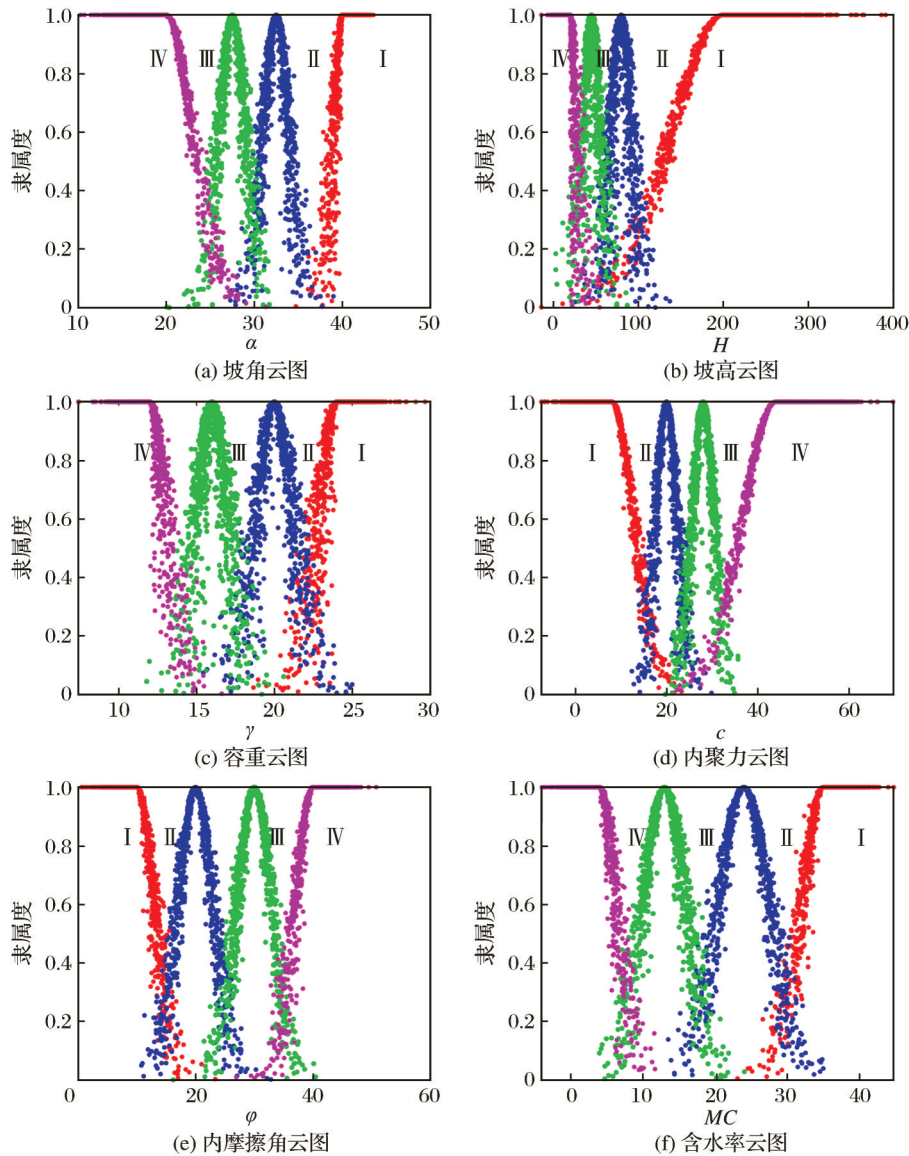


图4 评价指标云图

Fig. 4 Cloud maps of evaluation indicators

表3 指标 h_{k-1}/h_k 重要程度赋值
Table 3 Assignment for importance levels of indicator h_{k-1}/h_k

赋值	赋值说明	赋值	赋值说明
1.0	同样重要	1.6	强烈重要
1.2	稍微重要	1.8	极端重要
1.4	明显重要		

最后确定组合权重 w^* ,其计算公式为

$$w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* w_k^T \quad (10)$$

4 样本边坡危险等级评价分析

4.1 样本数据收集与分析

为验证本文排土场边坡危险等级评价模型的合理性和可行性,结合文献(李予红,2020;邓明月等,2022)中60组排土场边坡实例数据进行边坡危险等级评价,其中50组数据作为试验集,剩余10组数据作为测试集。排土场边坡原始数集的矩阵散点图如图5所示,可以看出各评价指标之间没有明显的相关性。

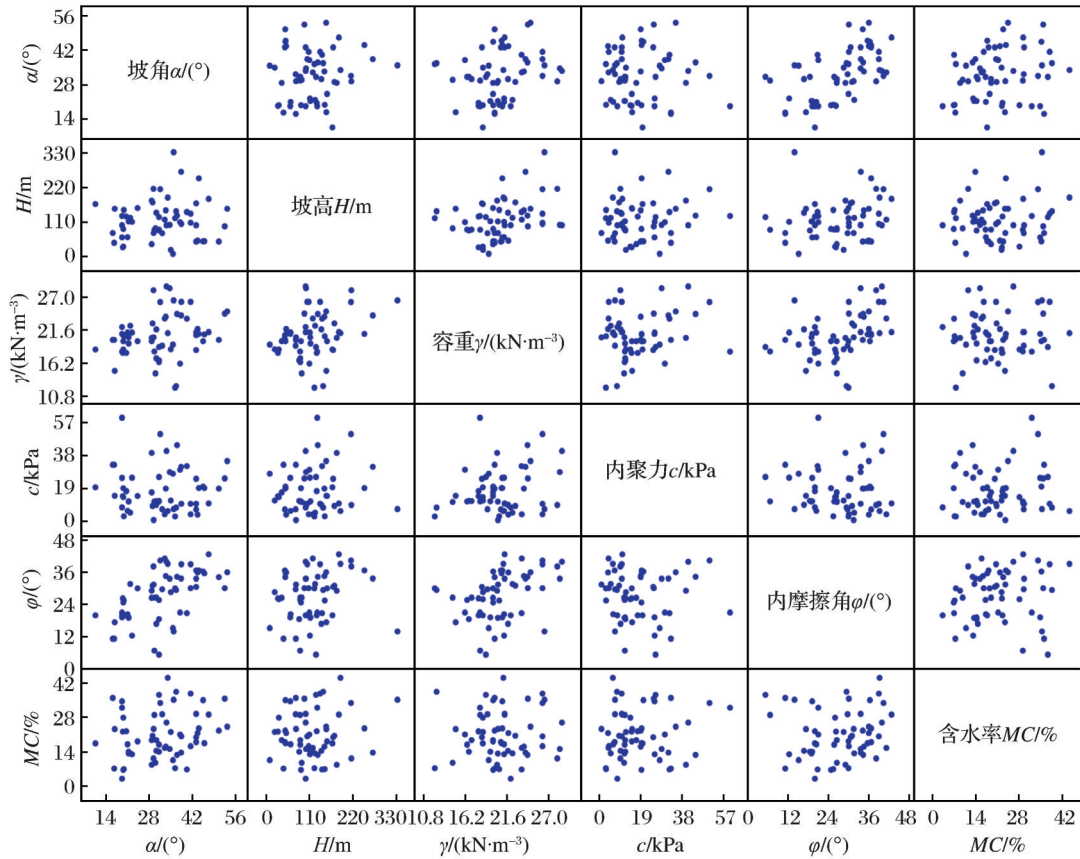


图5 评价指标矩阵散点图

Fig. 5 Scatter plot of evaluation index matrix

排土场边坡实例数据集的箱线图如图6所示,为更好地展示所有评价指标,评价指标 H 除以5。图6显示,大多数评价指标的中位数均不在方框的中心,说明大多数评价指标的数据呈不对称分布,而部分评价指标存在个别异常值,属于正常情况。

排土场边坡实例数据集的直方分布图如图7所示。边坡各评价指标数据都是随机变量,根据相关研究成果(Shukla et al, 2021),自然科学许多随机变量均基本或近似服从正态分布。直方柱表示评价指标数据在不同范围内的数量分布情况,由图7可知,6个评价指标的直方柱都是从最高直方柱向两边依次降低,60组数据中存在个别极端离群值,使得直方图出现虚假偏态,掩盖了真实的集中趋势和离散程度,加之样本数据量较小,个别直方柱并不完全符合此规律,但出现偏差的程度较小,属于正常情况。曲线代表各评价指标数据的正态分布

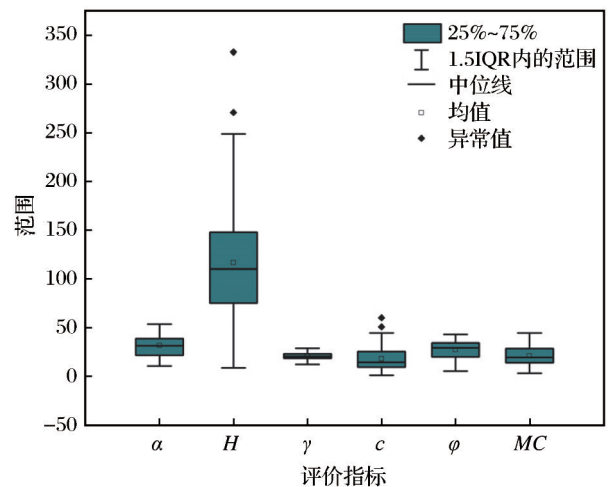


图6 评价指标箱线图

Fig. 6 Boxplot of evaluation indicators

情况,说明所有评价指标均基本或近似服从正态分布。因此,本文采用云模型来确定排土场边坡危险等级具有一定的合理性。

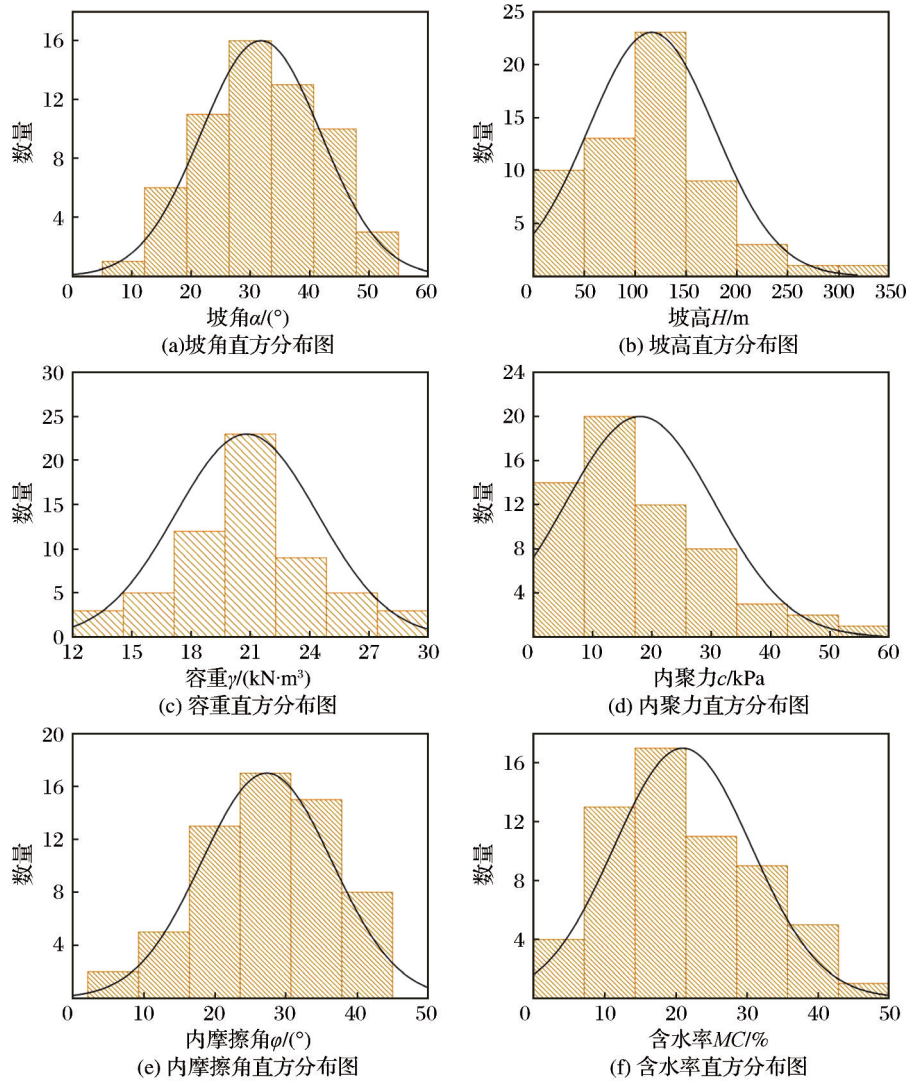


图7 评价指标直方分布图

Fig. 7 Histogram distribution diagrams of evaluation indicators

4.2 权重确定

采用G1法和熵权法求得指标主客观权重,再通过博弈组合赋权法对所得主客观权重进行优化组合,得到最优组合权重。博弈组合权重将熵权法的客观数据特征与G1法的主观经验优势深度融合,通过博弈论的均衡思想调和主客观权重冲突,既能避免熵权法因数据波动或缺失导致的权重失真,又能克服G1法受专家主观偏好影响的偏差。相较于单一方法,博弈组合权重显著提升了评价结果的科学性、客观性和稳定性,为排土场边坡危险性等级预测提供了更加可靠且全面的评价指标权重分配方案。3种赋权法所得权重如图8所示。

4.3 结果预测分析

根据表2和图8得到的云模型数字特征结果、组合权重值和50组试验集样本数据,利用MATLAB软件,分别通过正向云生成器和式(3),计算出样本边坡危险等级的综合隶属度,确定样本边坡危险等级,并与熵权-CM和G1-CM排土场边坡危险等级评价模型评价结果进行对比,结果见表4。由表4可知,博弈一改良CM边坡危险等级评价模型的准确率可达96%,高于熵权-CM和G1-CM赋权评价模型和原始云模型(博弈-CM),如图9所示。

F1分数是被广泛用于评价分类模型判别能力的方法,包括精确度和召回率2个评价指标。F1分

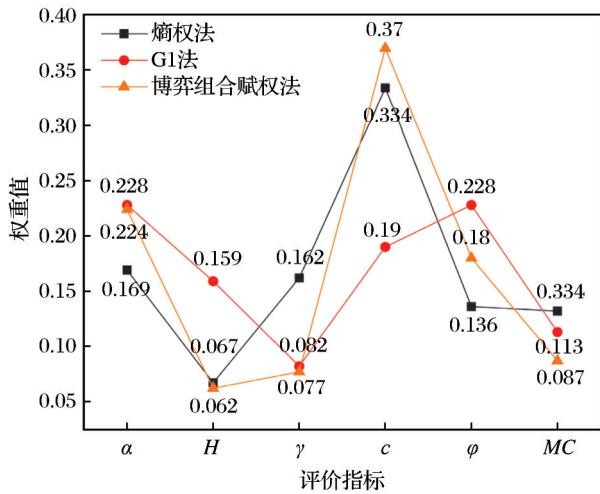


图8 3种赋权法所得权重

Fig. 8 Weight obtained by three empowerment methods

数包含4个基本概念: TP (评价为阳性, 事实为阳性)、 FP (评价为阳性, 事实为阴性)、 TN (评价为阴性, 事实为阴性) 和 FN (评价为阴性, 事实为阳性)。

精确度是评价模型判断为阳性的样本中样本实际也为阳性的比例, 计算公式为

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (11)$$

召回率是评价模型判断正确的阳性样本在总阳性样本中所占比例, 计算公式为

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

F1分数是评价模型精确值和召回率的加权平均, 计算公式为

$$F1 = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (13)$$

表4 排土场边坡危险等级评价结果

Table 4 Evaluation results of hazard level for waste dump slope

样本编号	综合确定度				博弈—改良CM	博弈—CM	熵权—改良CM	G1—改良CM	实际等级
	$\mu(I)$	$\mu(II)$	$\mu(III)$	$\mu(IV)$					
1	0.3533	0.1903	0.0064	0.4181	IV	IV	IV	IV	IV
2	0.413	0.2433	0.093	0.0012	I	I	I	I	I
3	0.3056	0.2346	0.1373	0.0006	I	I	I	I	I
4	0.1505	0.0918	0.417	0.1756	III	III	IV*	III	III
5	0.4249	0.1124	0.032	0.1804	I	I	I	I	I
6	0.2484	0.2749	0.2146	0.0785	II	II	II	II	II
...
49	0.2023	0.0036	0.1932	0.2868	IV	III*	IV	IV	IV
50	0.4643	0.1176	0.1096	0.0228	I	I	I	I	I

注: *表示评价错误

精确值、召回率和F1分数计算结果见表5。从表5可以看出, I、II、III和IV等级评价模型的F1分数均大于0.9, 说明该模型在排土场边坡危险等级评价中具有合理性和可行性。

5 评价模型应用

为了更好地验证本文博弈—改良CM边坡危险等级评价模型的准确性和可行性, 结合10组测试集排土场边坡样本进行危险等级预测, 10组测试集样本数据见表6。测试集样本评价结果见表7。由表7可知, 与传统云模型评价结果和实际危险等级相比, 本文预测结果与实际完全相符, 表明本文所建立的博弈—改良CM边坡危险等级评价模型在排土场边

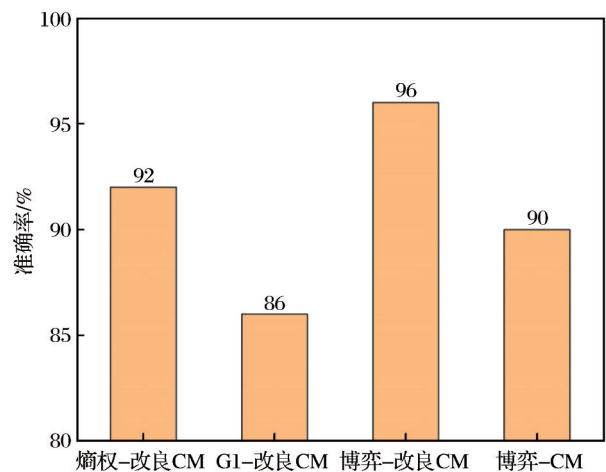


图9 4个模型评价准确率对比

Fig. 9 Comparison of evaluation accuracy rates among four models

坡危险等级预测中具有良好的有效性和可靠性。

表5 分类指标的值

分类等级	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1
I	23	2	0	0.920	1	0.960
II	13	0	2	1	0.867	0.934
III	7	0	0	1	1	1
IV	7	0	0	1	1	1

6 结论

(1)排土场边坡稳定性各指标数据都是随机变量,均近似服从正态分布,采用博弈论思维,将G1法和熵权法分别生成的主客观权重进行协同优化重组,并引入改良云模型,提出博弈—改良CM评价模型,实现了对排土场边坡危险等级的量化分级评价。

表6 测试集样本数据
Table 6 Sample data of test set

序号	评价指标					
	$\alpha/(^\circ)$	H/m	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	MC/%
1	21.34	112.31	19.43	11.73	19.20	14.20
2	29.12	172.80	22.69	9.05	31.04	20.70
3	16.16	74.81	20.00	32.85	11.22	36.10
4	50.55	48.00	20.00	19.00	34.20	22.80
5	24.25	154.24	19.78	14.86	30.00	18.40
6	40.18	141.75	23.48	32.13	20.80	6.90
7	20.60	127.92	17.90	17.60	20.00	22.60
8	21.00	61.61	21.22	6.30	20.40	17.20
9	35.00	21.42	18.49	12.18	28.56	22.30
10	52.50	96.60	24.30	24.96	30.07	35.80

(2)以50组排土场边坡样本数据作为试验集,选取 α 、H、 γ 、c、 φ 和MC建立排土场边坡危险等级评价指标体系,分别利用熵权法、G1和博弈组合赋权计算各指标权重。

表7 测试集样本评价结果

Table 7 Evaluation results of test set samples

序号	综合确定度				博弈—改良CM	博弈—CM	实际等级
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4			
1	0.2951	0.247	0.0820	0.2021	I	I	极高
2	0.4592	0.0812	0.2962	0.0041	I	I	极高
3	0.2599	0.1366	0.0478	0.3333	IV	IV	较低
4	0.2523	0.4995	0.1267	0.0280	II	II	较高
5	0.1783	0.1382	0.2190	0.0815	III	III	一般
6	0.3326	0.1750	0.0950	0.1346	I	II	极高
7	0.0797	0.4993	0.0226	0.2196	II	II	较高
8	0.3796	0.2571	0.0445	0.2114	I	I	极高
9	0.2071	0.1712	0.1717	0.3608	IV	IV	较低
10	0.3024	0.0671	0.3431	0.0114	III	I	一般

(3)运用各评价指标权重和云模型对排土场边坡危险等级进行评价,结果表明,博弈—改良CM排土场边坡危险等级评价模型的准确率最高。该模型巧妙地融合了熵权法的客观度量和G1法的主观判断,提高了组合权重的合理性和精准度。运用F1分数对该评价模型的判别能力进行分析,结果表明,博弈—改良CM排土场边坡危险等级评价模型具有较好的判别能力。

(4)运用博弈—改良CM排土场边坡危险等级评价模型对10组测试集样本边坡进行危险等级预

测。预测结果与实际危险等级一致,验证了该模型的有效性和准确性,说明博弈—改良CM排土场边坡危险等级评价模型具有一定的实际运用价值。

参考文献(References):

Shukla R, Khandelwal M, Kankar P K, 2021. Prediction and assessment of rock burst using various meta-heuristic approaches [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 38(3): 1375-1381.
陈徽, 2023. 露天煤矿排土场边坡稳定性影响因素的灰色关

- 联分析[J]. 内蒙古煤炭经济, (23): 7-9. Chen Zheng, 2023. Grey correlation analysis of influencing factors on slope stability of dump in open-pit coal mine [J]. Inner Mongolia Coal Economy, (23): 7-9.
- 楚明辉, 许开立, 徐晓虎, 等, 2024. 基于博弈论组合赋权云模型的地下黄金矿山安全风险评价[J]. 中国矿业, 33(11): 212-220. Chu Minghui, Xu Kaili, Xu Xiaohu, et al, 2024. Safety risk assessment of underground gold mine based on cloud model with combination weighting of game theory[J]. China Mining Magazine, 33(11): 212-220.
- 邓明月, 栾婷婷, 李运, 等, 2022. 基于 mRBF-ELM 集成模型的排土场滑坡预警模型研究[J]. 北京石油化学工业学院学报, 30(4): 47-52. Deng Mingyue, Luan Tingting, Li Yun, et al, 2022. Research on early warning model of dump landslide based on mRBF-ELM integrated [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 30(4): 47-52.
- 付宪吕, 吴涛, 杨泽, 等, 2024. 基于位移变形监测和 FLAC2D 南大沟排土场边坡稳定性分析[J]. 中国矿业, 33(增刊 1): 137-142. Fu Xianlü, Wu Tao, Yang Ze, et al, 2024. Stability analysis of slope based on displacement deformation monitoring and FLAC2D method in Nandagou dump [J]. China Mining Magazine, 33(Suppl.1): 137-142.
- 高峰, 吴晓东, 周科平, 2021. 基于主成分分析和 PSO-ELM 算法的排土场稳定性预测模型[J]. 黄金科学技术, 29(5): 658-668. Gao Feng, Wu Xiaodong, Zhou Keping, 2021. Prediction model of soil dump stability based on principal component analysis and PSO-ELM algorithm [J]. Gold Science and Technology, 29(5): 658-668.
- 胡云飞, 李重情, 褚恒滨, 2023. 基于改进未知测度的煤矿坚硬断层深孔爆破效果评价[J]. 中国矿业, 32(3): 80-85. Hu Yunfei, Li Zhongqing, Chu Hengbin, 2023. Evaluation of deep hole blasting effect of hard fault in coal mine based on improved unascertained measure [J]. China Mining Magazine, 32(3): 80-85.
- 江松, 李涛, 李锦源, 等, 2024. 基于 TrAdaBoost-GBDT 模型的排土场边坡稳定状态判别[J]. 中国安全科学学报, 34(11): 89-98. Jiang Song, Li Tao, Li Jinyuan, et al, 2024. Discrimination of dump slope stability state based on TrAdaBoost-GBDT model [J]. China Safety Science Journal, 34(11): 89-98.
- 李予红, 2020. 基于在线自适应极限学习机的矿山排土场滑坡预警模型[J]. 中国矿业, 29(7): 76-80. Li Yuhong, 2020. Research on early warning model of mine waste dump landslide based on adaptive limit learning machine [J]. China Mining Magazine, 29(7): 76-80.
- 刘伟, 闫晓宇, 刘庆朋, 等, 2024. 根土复合体增强矿区排土场边坡抗剪强度试验研究[J]. 黄金科学技术, 32(5): 871-881. Liu Wei, Yan Xiaoyu, Liu Qingpeng, et al, 2024. Experimental study on shear strength of dump slope in mining area enhanced by root-soil composite [J]. Gold Science and Technology, 32(5): 871-881.
- 刘献真, 邱丹丹, 李丽, 2023. 基于组合赋权法和改进 TOPSIS 法的排土场边坡稳定性评价[J]. 武汉工程大学学报, 45(6): 687-693. Liu Xianzhen, Qiu Dandan, Li Li, 2023. Stability evaluation of dump slope based on combination weighting method and improved TOPSIS method [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 45(6): 687-693.
- 刘兆君, 2022. 普通变量正态云系数线性回归的优化模型[J]. 统计与决策, 38(8): 43-46. Liu Zhaojun, 2022. Optimization model of normal cloud coefficient linear regression of ordinary variables [J]. Statistics and Decision, 38(8): 43-46.
- 栾婷婷, 谢振华, 吴宗之, 等, 2014. 基于未确知测度理论的排土场滑坡风险评价模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 45(5): 1612-1617. Luan Tingting, Xie Zhenhua, Wu Zongzhi, et al, 2014. Risk evaluation model of waste dump landslide based on uncertainty measurement theory [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 45(5): 1612-1617.
- 苗静, 2024. 基于突变理论与模糊数学的边坡稳定性评价[J]. 江淮水利科技, (6): 31-34. Miao Jing, 2024. Slope stability evaluation based on mutation theory and fuzzy mathematics [J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, (6): 31-34.
- 秦驰越, 张文兴, 2021. 基于机器学习的露天矿排土场边坡稳定性预测[J]. 金属矿山, 50(8): 164-169. Qin Chiyue, Zhang Wenxing, 2021. Prediction of slope stability of open-pit mine dump based on machine learning [J]. Metal Mine, 50(8): 164-169.
- 王伦平, 周德红, 曾旺, 等, 2025. 基于 AHP-CRITIC-云模型的非煤矿山突水安全风险评估[J]. 武汉工程大学学报, 47(1): 105-112. Wang Lunping, Zhou Dehong, Zeng Wang, et al, 2025. Safety risk assessment of water inrush in non-coal mines based on AHP-CRITIC-cloud model [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 47(1): 105-112.
- 王全伟, 徐坤, 陈泽伟, 等, 2025. 改进熵权法—灰云模型在桥机起升机构安全评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 25(6): 2104-2115. Wang Quanwei, Xu Kun, Chen Zewei, et al, 2025. Application of an enhanced entropy weight method combined with the grey cloud model for safety eval-

- uation of bridge crane hoisting mechanisms[J]. *Journal of Safety and Environment*, 25(6): 2104-2115.
- 王占平, 舒建峰, 岳志奇, 等, 2020. 基于AHP-模糊综合评价模型与Geostudio模拟的排土场稳定性研究[J]. *化工矿物与加工*, 49(3): 40-44. Wang Zhanping, Shu Jianfeng, Yue Zhiqi, et al, 2020. Study on stability of dump based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation model and Geostudio simulation[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 49(3): 40-44.
- 刘畅平, 白银涌, 孙政, 等, 2016. 基于属性数学理论的排土场滑坡风险预测及分级[J]. *自然灾害学报*, 25(6): 158-166. Wen Changping, Bai Yinyong, Sun Zheng, et al, 2016. Risk prediction and classification of waste dump landslide based on attribute mathematical theory[J]. *Journal of Natural Disasters*, 25(6): 158-166.
- 张东辉, 卢占宾, 曹佳伟, 等, 2024. 基于SEM与云模型的公共建筑施工安全风险评估[J]. *施工技术(中英文)*, 53(21): 128-133. Zhang Donghui, Lu Zhanbin, Cao Jiawei, et al, 2024. Risk assessment of public building construction safety based on SEM and cloud model[J]. *Construction Technology*, 53(21): 128-133.
- 赵黎, 栗登峰, 谭宝会, 等, 2024. 基于CRITIC-GRA-AHP法的敏感性排序理论及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. *矿业研究与开发*, 44(9): 82-93. Zhao Li, Su Dengfeng, Tan Baohui, et al, 2024. Sensitivity ranking theory based on CRITIC-GRA-AHP method and its application in slope stability analysis[J]. *Mining Research and Development*, 44(9): 82-93.
- 赵志强, 王勇, 李晓俊, 等, 2024. 基于AHP-FCE模型的露天煤矿外排土场边坡稳定性评价[J]. *露天采矿技术*, 39(5): 54-58. Zhao Zhiqiang, Wang Yong, Li Xiaojun, et al, 2024. Slope stability evaluation of open-pit coal mine external dump based on AHP-FCE model[J]. *Opencast Mining Technology*, 39(5): 54-58.
- 郑龙菲, 周宗红, 刘剑, 等, 2023. 基于熵权法-LGBM算法的岩爆等级预测模型研究[J]. *化工矿物与加工*, 52(10): 39-45. Zheng Longfei, Zhou Zonghong, Liu Jian, et al, 2023. Study on prediction model of rockburst intensity level based on entropy weight method-LGBM algorithm[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 52(10): 39-45.
- 周科平, 侯霄峰, 林允, 2020. 基于综合决策云模型的围岩稳定性分级方法研究[J]. *黄金科学技术*, 28(3): 372-379. Zhou Keping, Hou Xiaofeng, Lin Yun, 2020. Research on classification method of surrounding rock stability based on comprehensive decision cloud model[J]. *Gold Science and Technology*, 28(3): 372-379.
- 祝经中, 朱飞, 2024. 某露天矿山高边坡稳定性分析研究[J]. *中国矿业*, 33(增刊1): 124-127. Zhu Jingzhong, Zhu Fei, 2024. Analysis and research on high slope stability of an open-pit mine[J]. *China Mining Magazine*, 33(Suppl.1): 124-127.

Evaluation of Risk Level of Waste Dumps Based on Game-Improved Cloud Model

QIN Xiaotao¹, ZHANG Xiongtian¹, LI Jielin²

1. Lanzhou Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

Abstract: As the centralized repository for waste materials produced during mining operations, the stability of waste dump slopes is crucial for ensuring mine safety. These slopes are influenced by the combined effects of various factors. In the assessment process, it is imperative to consider not only the inherent randomness of each evaluation indicator but also the uncertainties stemming from incomplete information or ambiguous judgments. This study introduces an evaluation method, grounded in game theory and an improved cloud model, that accurately quantifies the hazard levels of waste dumps. In constructing the evaluation indicator system, a comprehensive analysis of factors affecting slope instability in waste dumps, is conducted. Key parameters, such as slope angle(α), slope height(H), unit weight(γ), cohesion(c), internal friction angle(φ), and moisture content (MC), are selected to develop a multidimensional and comprehensive evaluation indicator system. Data from 50 sets of slope sample trials are utilized. The entropy weight method and the G1 method are utilized to determine

the objective and subjective weights of each indicator, respectively. Subsequently, game theory is applied to integrate and optimize these subjective and objective weights, thereby mitigating the subjectivity and limitations inherent in single weighting approaches. To overcome the challenges posed by traditional cloud models in managing data within fuzzy boundary intervals, semi-ascending and semi-descending cloud models are employed to represent uncertainties at these intervals, leading to the development of an improved cloud model. By combining the subjective and objective weights with the cloud model's capability to handle uncertainty, an accurate quantification of the hazard levels of waste dump slopes is achieved. The membership degrees of various hazard levels are calculated to ascertain the hazard levels of the sample waste dumps, which are then compared with the evaluation outcomes derived from individual subjective or objective weighting methods, as well as the actual hazard levels. In conclusion, the capability of the Game-Improved CM to classify hazards is thoroughly examined. To enhance the verification of the model's accuracy and reliability, it is employed to evaluate and analyze ten sets of test sample data. The findings of this study reveal that the hazard level assessments of waste dumps conducted using the Game-Improved CM align closely with actual conditions. Furthermore, when compared to existing methodologies, the evaluation approach utilizing the Game-Improved CM exhibits enhanced practicality and reliability.

Key words: waste dump; slope; improved cloud model; game theory; risk level evaluation; uncertainty analysis