基于 CRITIC 法-可拓云模型的露天矿高陡边坡稳定性动态评价①

任赢[1,2], 沈国卓[1,2], 张良喜[3], 任光明[1,2], 韩刚[3], 代鑫龙[3]
(1.成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3.四川省第四地质大队, 四川 成都 611100)

摘 要: 露天矿边坡稳定性评价指标具有差异性、随机性、模糊性,为克服传统方法在露天矿边坡稳定性评价中指标权重静态、相关性处理不足及指标差异的缺陷,通过改进可拓云模型,运用差异系数替代传统 CRITIC 法标准差,修正评价指标独立性系数,引入关联度矩阵计算动态权重,建立了多层次多变量的露天矿边坡稳定性动态评价模型,并依据该评价模型对某露天矿 3 个高陡边坡区域进行稳定性评价。结果表明,该露天矿 3 个边坡区域的安全等级界限值分别为 3.38、3.23、3.37,置信度因子均小于 0.05,安全等级均为 III 级,均属于基本稳定边坡。3 个边坡区域的评价结果与刚体极限平衡法、可拓学理论及未确知测度理论结果基本吻合,验证了该模型的适用性与可靠性。

关键词: 露天矿; 边坡稳定性; 关联度矩阵; 差异系数; 可拓云; CRITIC 法; 动态评价; 安全等级; 可拓学; 云模型; 高陡边坡
中图分类号: TD854 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.004
文章编号: 0253-6099(2026)01-0023-07

Dynamic Stability Evaluation for High and Steep Slope of Open-Pit Mines Based on CRITIC - Extension Cloud Model

REN Ying[1,2], SHEN Guozhuo[1,2], ZHANG Liangxi[3], REN Guangming[1,2], HAN Gang[3], DAI Xinlong[3]
(1.*School of Environment and Civil Engineering*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*; 2.*State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*; 3.*The 4th Geologic Brigade of Sichuan*, *Chengdu* 611100, *Sichuan*, *China*)

Abstract: The evaluation indices for open-pit mine slope stability are characterized by variability, randomness and fuzziness. To overcome the defects of traditional methods in open-pit mine slope stability evaluation, such as static index weights, insufficient correlation processing and poor handling of index differences, a multi-level and multi-variable dynamic evaluation model was constructed for open-pit slope stability by improving extension cloud model, replacing the standard deviation in the traditional CRITIC method with the coefficient of variation, revising the independence coefficient of evaluation indices, and introducing correlation matrix into dynamic weight calculation. Then, three high and steep slopes in an open-pit mine were evaluated using this model. The results show that the safety grade limit values of those three slope areas are 3.38, 3.23 and 3.37 respectively, with confidence factors all less than 0.05, thus being graded as Class III and considered to be basically stable. It is found that the evaluation results are basically consistent with those obtained by using rigid body limit equilibrium method, extenics theory and unascertained measure theory, which verifies the applicability and reliability of the proposed model.

Key words: open-pit mine; slope stability; correlation matrix; coefficient of variation; extension cloud; CRITIC; dynamic evaluation; safety class; extenics; cloud model; high and steep slope

露天矿边坡不同于一般边坡,随着露天开采的进行,边坡受到不同程度的扰动,使边坡稳定性成为一个动态工程问题[1-2]。近年来,我国露天矿工程持续向深部、大规模方向发展,边坡高度不断提高,边坡稳定性

① **收稿日期**: 2025-09-15
基金项目: 国家青年科学基金项目(41907246)
作者简介: 任赢(2001—),女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程与地质灾害等。E-mail:2781279996@qq.com
通信作者: 任光明(1964—),男,四川成都人,硕士,教授,主要从事地质工程与岩土工程方面的研究。E-mail:rengmgcr@163.com

问题越来越突出。开展露天矿边坡稳定性研究对保障矿山的安全生产以及人员的生命财产安全具有重要的意义。

露天矿边坡稳定性受多因素动态耦合影响,开采过程中,各影响因素动态变化,其不确定性特征促使学者广泛采用不确定性评价方法。文献[3-6]采用机器学习与预测模型方法分析预测边坡稳定性,通过数据驱动提升风险量化能力,然而计算复杂度高、样本依赖性强,难以有效解决多变量量纲差异问题。文献[7-9]采用模糊数学与传统可拓理论方法分析、预测边坡稳定性,通过隶属函数或物元关联实现定性向定量转化,但对主观赋权较为依赖,易导致关键约束条件误判。文献[10-12]采用云模型相关方法分析、预测边坡稳定性,虽通过云参数刻画指标随机性与模糊性,但因露天矿边坡岩体的特殊性,多个变量对边坡稳定性影响显著,受限于露天矿岩体多变量量纲差异,且赋权方法与物元模型耦合精度不足。

基于此,本文综合分析了多种影响露天矿边坡稳定性的因素,构建了一个动态评价体系。通过改进传统可拓云模型中的计算步骤和权重计算方法,提出了一种基于实时测量数据分析的露天矿边坡稳定性动态评价模型,从而实现了露天矿边坡稳定性的快速动态评估。

1 露天矿边坡多指标稳定性评价体系

从影响边坡稳定性的地质条件、工程作用、外部环境3个方面建立描述层指标。依据勘察数据,矿区大部分钻孔为干孔,富水性弱、排泄条件良好,无地表水补给,故不考虑地下水影响;研究区边坡主要受Ⅳ~Ⅴ级强风化表层岩体控制,唯一Ⅲ级结构面对整体稳定性影响较小,因此聚焦采矿动态过程影响,不考虑优势结构面产状影响。采用分层递推的方式,建立含有岩体变形模量 S_1、岩石结构特征(RQD)S_2、黏聚力 S_3、内摩擦角 S_4、泊松比 S_5、岩石完整性系数 S_6、坡高 S_7、边坡坡度 S_8、日最大降雨量 S_9、地震水平加速度 S_{10}、人类活动 S_{11}的指标层,露天矿边坡稳定性评价体系如图1所示。

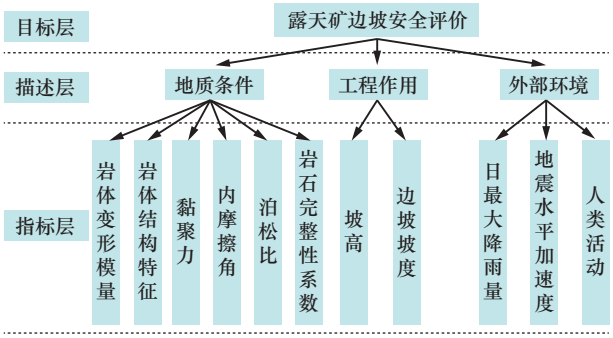


图1 露天矿边坡稳定性评价体系

Fig. 1 Stability evaluation system for open-pit mine slope

为合理评价露天矿边坡稳定性,借鉴相关规范及学者对边坡稳定性或风险性的分类标准[8,13-16],将边坡安全评价标准划分为I(极不稳定)、II(不稳定)、III(基本稳定)、IV(稳定)、V(极稳定)5个等级。露天矿边坡安全等级评估指标取值范围见表1。

表1 露天矿边坡安全等级评价指标取值范围

Table 1 Value ranges of safety grade evaluation indicators for open-pit mine slope

安全等级	S_1/GPa	S_2	S_3/MPa	S_4/(°)	S_5	S_6	S_7/m	S_8/(°)	S_9/mm	S_{10}[1)]	S_{11}
I	0~1.5	0~30	0~0.05	0~13	0.35~0.50	0~0.15	500~850	60~90	200~250	(0.20~0.40)g	80~100
II	1.5~4.0	30~50	0.05~0.08	13~19	0.30~0.35	0.15~0.35	250~500	45~60	150~200	(0.15~0.20)g	60~80
III	4.0~7.0	50~70	0.08~0.12	19~29	0.25~0.30	0.35~0.55	100~250	30~45	100~150	(0.10~0.15)g	40~60
IV	7.0~13.0	70~90	0.12~0.32	29~37	0.20~0.25	0.55~0.75	50~100	15~30	50~100	(0.05~0.10)g	20~40
V	13.0~28.0	90~100	0.32~0.55	37~50	0~0.20	0.75~1.00	0~50	0~15	0~50	(0~0.05)g	0~20

1) g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2。

2 可拓云模型

2.1 可拓云理论

可拓学理论框架由物元理论、可拓数学构成。其中,物元是可拓学的逻辑细胞,表征为事物名称 N、样本特征 c、特征量值 v 组成的有序三元组,记为 $R=(N, c, v)$[17]。尽管可拓学理论能够对事物特征进行定性和定量分析,并将评价指标转化为相容性问题,但在计算过程中,通常将特征量值视为固定值,从而忽视了其内在的模糊性和不确定性[18]。云模型能充分体现事物的随机性和模糊性,直观、简洁地反映事物规律[11]。可拓云理论的本质便是可拓学与云模型的有机耦合。

构造可拓云理论模型,表达式[19]为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} N_j & C_1 & (E_1,S_1,H_1) \\ & C_2 & (E_2,S_2,H_2) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_i & (E_i,S_i,H_i) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{R}$ 为边坡稳定性评价所划分的等级;N_j 为安全等级 j 下的事物名称;C_i 为待评指标;(E_i,S_i,H_i) 为待评指标 C_i 关于稳定性等级的云描述。

2.2　可拓云理论评价步骤

2.2.1　构造安全等级标准云模型

对表 1 中露天矿边坡各等级下的评价指标通过正态云模型的转换公式,得出评价指标等级界限云模型的期望 E、熵 S、超熵 H:

$$E=\frac{C_{\min}+C_{\max}}{2} \tag{2}$$

$$S=\frac{C_{\max}-C_{\min}}{6} \tag{3}$$

$$H=s \tag{4}$$

式中:$C_{\max}$ 和 $C_{\min}$ 分别为某一安全等级下的评价指标的界限值;s 为常数,表达可拓云理论的稳定性,用雾化参数表征,s 值越小,表明可拓云理论越稳定,本文取 0.01。

根据式(2)~(4),得到各评价指标在相应安全等级下的标准云特征参数,见表 2。

表 2　各评价指标安全等级界限云特征参数

Table 2　Cloud characteristic parameters of safety grade boundary for each evaluation index

评价指标	界限云特征参数(E,S,H)				
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
S_1	(0.75,0.25,0.01)	(2.75,0.417,0.01)	(5.5,0.5,0.01)	(10,1,0.01)	(20.5,2.5,0.01)
S_2	(15,5,0.01)	(40,3.33,0.01)	(60,3.33,0.01)	(80,3.33,0.01)	(95,1.67,0.01)
S_3	(0.025,0.008 3,0.01)	(0.065,0.005,0.01)	(0.1,0.006 7,0.01)	(0.22,0.033 3,0.01)	(0.435,0.038 3,0.01)
S_4	(6.5,2.166 7,0.01)	(16,1,0.01)	(24,1.666 7,0.01)	(33,1.333 3,0.01)	(43.5,2.166 7,0.01)
S_5	(0.425,0.025,0.01)	(0.325,0.008 3,0.01)	(0.275,0.008 3,0.01)	(0.225,0.008 3,0.01)	(0.1,0.033,0.01)
S_6	(0.075,0.025,0.01)	(0.25,0.033 3,0.01)	(0.45,0.033 3,0.01)	(0.65,0.033 3,0.01)	(0.875,0.041 6,0.01)
S_7	(675,58.33,0.01)	(375,41.67,0.01)	(175,25,0.01)	(75,8.33,0.01)	(25,8.33,0.01)
S_8	(75,5,0.01)	(52.5,2.5,0.01)	(37.5,2.5,0.01)	(22.5,2.5,0.01)	(7.5,2.5,0.01)
S_9	(225,8.33,0.01)	(175,8.33,0.01)	(125,8.33,0.01)	(75,8.33,0.01)	(25,8.33,0.01)
S_{10}	(0.3,0.033 3,0.01)	(0.175,0.008 3,0.01)	(0.125,0.008 3,0.01)	(0.075,0.008 3,0.01)	(0.025,0.008 3,0.01)
S_{11}	(90,3.33,0.01)	(70,3.33,0.01)	(50,3.33,0.01)	(30,3.33,0.01)	(10,3.33,0.01)

结合表 2 中的指标数据,运用正向云模型发生器,模拟绘制出评价指标的评估云图。受篇幅限制,本文仅展示岩体变形模量云图,如图 2 所示。

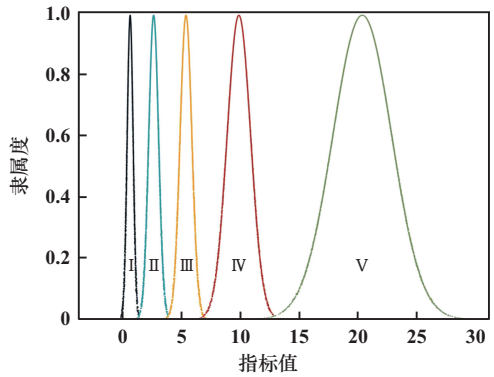


图 2　岩体变形模量云图

Fig. 2　Cloud map of rock mass deformation modulus

2.2.2　评价指标云关联度的计算

根据露天矿边坡安全评价的特点,将待评价指标 x 视为一个云滴。通过生成随机熵 $S'\sim N(S,H^2)$ 来体现熵的不确定性,进而根据式(5)计算待评指标 x 与各等级标准正态云之间的云关联度 k:

$$k=\exp\left[-\frac{(x-E)^2}{2(S')^2}\right] \tag{5}$$

根据式(5),逐一计算待评指标与安全等级标准正态云之间的云关联度,形成云关联度矩阵 $\boldsymbol{K}$:

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1j} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \cdots & k_{ij} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:k_{ij} 为评价指标 C_i 与安全等级 j 标准正态云之间的云关联度;i 为评价指标数目,本文取值 11;j 为安全风险等级序号,取 1~5 的整数。

2.2.3　确定露天矿边坡安全等级

首先确定综合评价向量 $\boldsymbol{B}$:

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{W}K \tag{7}$$

式中 $\boldsymbol{W}$ 为评价指标 C_i 构成的权重向量。

对 $\boldsymbol{B}$ 中的元素 b_j,应用加权平均法计算评价事件的综合评价分数 r:

$$r=\frac{\sum_{j=1}^{n}b_jf_j}{\sum_{j=1}^{n}b_j} \tag{8}$$

式中f_j为安全等级j的赋分值,本文对1~5个安全等级分别赋值1~5分。

联系式(5)和式(6)可知,待评指标的云关联度受随机熵S'的影响,为了减少随机数的影响,采用多次求解并取平均值的方式[20],计算次数n取150次,得到:

$$E_r=\frac{\sum_{i=1}^{l}r_i(x)}{l} \tag{9}$$

$$S_r=\sqrt{\frac{1}{l}\sum_{i=1}^{l}[r_i(x)-E_r]^2} \tag{10}$$

式中:l为运算次数;$r_i(x)$为第i次运算得出的综合评判分数。期望值E_r是能反映露天矿边坡安全评价等级的评判分数,熵S_r用于衡量评价结果的离散程度,并与离散程度呈正相关。因此,本文引入置信度因子β:

$$\beta=\frac{S_r}{E_r} \tag{11}$$

β值越小,评价结果越可靠,通常认为$\beta<0.05$时评价结果可信[21]。

2.3 改进的CRITIC法确定客观权重

CRITIC法[22]是结合评价指标的对比强度和指标间的独立系数来确定指标客观权重,在实际应用中存在3大显著问题。第一,露天矿边坡安全评价指标的量纲和数量级差异较大,标准差并不能有效反映指标间的对比强度[23];第二,安全评价指标间的相关系数有正有负,且具有相同绝对值的相关系数所表示的指标相关性应当一致[24];第三,在可拓云模型使用过程中,权重系数是基于多个实测值对评价指标进行统一计算,导致不同指标的权重具有唯一性。因此,对CRITIC法进行了相应的改进。一是引入熵权法中的差异系数,替代传统的标准差计算;二是修正评价指标独立性系数的计算方式,将$1-r_{ij}$替换为$1-|r_{ij}|$[24];三是引入云关联度矩阵计算指标权重。具体计算步骤如下。

1) 构建决策矩阵。针对各评价指标,使用式(5)和式(6)构建云关联矩阵$\boldsymbol{K}$,设$\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{A}$,决策矩阵$\boldsymbol{A}$为:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&\cdots&a_{1l}\\a_{21}&a_{22}&\cdots&a_{2l}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\a_{k1}&a_{k2}&\cdots&a_{kl}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中a_{kl}表示第l个指标在第k个安全等级下的云关联度。

2) 获得标准化矩阵$\boldsymbol{A}^*$。

正向指标标准化:

$$a_{ij}^*=\frac{a_{kl}-a_l^{\min}}{a_l^{\max}-a_l^{\min}} \tag{13}$$

负向指标标准化:

$$a_{ij}^*=\frac{a_l^{\max}-a_{kl}}{a_l^{\max}-a_l^{\min}} \tag{14}$$

式中:$a_l^{\max}$为第l个指标的最大值;$a_l^{\min}$为第l个指标的最小值。

根据式(13)和式(14),得到标准化矩阵$\boldsymbol{A}^*$。

$$\boldsymbol{A}^*=\begin{bmatrix}a_{11}^*&a_{12}^*&\cdots&a_{1n}^*\\a_{21}^*&a_{22}^*&\cdots&a_{2n}^*\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\a_{n1}^*&a_{2n}^*&\cdots&a_{nn}^*\end{bmatrix} \tag{15}$$

3) 计算指标的差异系数。根据熵权法中熵的定义,各评价指标的熵为:

$$S_j=-\frac{1}{\ln n}\left[\sum_{i=1}^{n}(f_{ij}\ln f_{ij})\right] \tag{16}$$

从式(16)可以看出,$f_{ij}=0$时,式(16)无意义,因此需要进行修正[25],修正结果如下:

$$S_j=-\frac{1}{\ln n}\left[\sum_{i=1}^{n}(g_{ij}\ln g_{ij})\right] \tag{17}$$

$$f_{ij}=\frac{a_{ij}^*}{\sum_{i=1}^{n}a_{ij}^*} \tag{18}$$

$$g_{ij}=\frac{1+f_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}(1+f_{ij})} \tag{19}$$

由此,得到指标的差异系数为:

$$G_j=1-S_j \tag{20}$$

4) 计算指标相关系数。利用步骤2)得到的标准化矩阵$\boldsymbol{A}^*$,基于统计学原理计算各评价指标间的相关系数。

5) 计算评价指标的独立性n_j。

$$n_j=\sum_{k=1}^{n}(1-|r_{kj}|) \tag{21}$$

6) 计算指标综合信息量G_j。

$$C_j=G_j\sum_{k=1}^{n}(1-|r_{kj}|) \tag{22}$$

7) 计算各评价指标权重系数$\boldsymbol{\omega}$。

$$\omega=\frac{C_j}{\sum_{j=1}^{n}C_j} \tag{23}$$

3　实例应用

3.1　工程概况

某露天边坡位于川西南山地南部龙帚山脉南端轿顶山北部,属中高山地区,相对高差 300~450 m。山体坡度一般 25°~40°,局部较陡(坡角大于 50°),如图 3 所示。矿区除现状采场和外围基岩出露外,其余部位大部分被第四系覆盖。区内出露岩体主要为海西早期层状钒钛磁铁矿,海西晚期细晶辉长岩及印支期花岗岩;第四系主要为残、坡积物及人工堆积物等。结合现场勘探,区内以Ⅳ~Ⅴ结构面为主,优势产状 N45°E/NW∠78°、N14°E/SE∠59°,仅北帮揭露有 1 条Ⅲ级结构面,产状 N18°W/NE∠65°,与斜坡呈大角度相交,且倾角大于坡角,对边坡稳定性影响较小。根据露天开采区各边帮的工程地质条件及开采条件,露天矿区分为 3 个边帮,如图 3 所示。

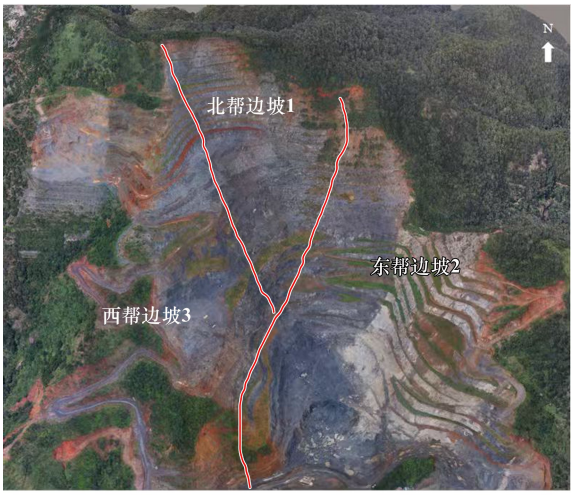


图 3　研究区边坡全貌图及分区图

Fig. 3　Overall view and zoning map of slopes in study area

1) 北帮边坡 1。属高陡采场边坡,现状高度 200~310 m,总体边坡角 30°~40°。台阶坡高约 12 m,坡度 60°~70°,平台宽 3~30 m。岩性上覆第四系及强-中风化辉长岩,下伏微风化辉长岩与辉长玢岩。坡向 NE5°,左侧以 F1 断层为界,主要发育 NE、NW 向结构面。

2) 东帮边坡 2。现状高度 100~150 m,总体边坡角 30°~40°,台阶平台宽 4~35 m。岩性包括第四系覆盖层及强-中风化铁矿石、辉长岩和花岗岩。坡向 NE44°,结构面以 NW、NE 走向为主。

3) 西帮边坡 3。属山脊-冲沟地形,局部已开挖形成台阶,现状高 60~70 m,总体边坡角 40°~50°。自然斜坡坡度 25°~40°,局部见陡坎(>50°),台阶平台宽 4~8 m。岩性左侧为第四系及强-中风化辉长岩,右侧上部类似,下部为微风化铁矿石与辉长岩。坡向 NW28°,右侧以 F1 断层为界,主要发育 NW、NEE 向结构面。

3.2　稳定性评价

为验证基于差异系数 CRITIC 法的可拓云模型评价边坡安全等级的可行性,以该露天矿的北帮边坡 1、东帮边坡 2、西帮边坡 3 为例,运用上述模型对其进行安全等级评价,各边坡的评价指标实测值见表 3。

表 3　露天矿各边坡评价指标实测值

Table 3　Measured values of evaluation indices for each slope in open-pit mine

边坡区	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}
北帮边坡 1	9.45	34	0.55	38.00	0.275	0.39	244	30	26	0.15	70
东帮边坡 2	9.43	32	0.53	37.85	0.280	0.37	370	32	26	0.15	70
西帮边坡 3	5.83	30	0.50	36.80	0.283	0.35	204	31	26	0.15	70

基于实测值指标,按照上述可拓云计算方法,编制露天矿山安全等级评价计算程序,计算表 3 中的实测边坡的安全等级。

1) 结合表 2 及表 3 数据,计算出每个实测案例的云关联度矩阵,按照 2.3 节权重计算方法,得到本文方法下的评价指标动态权重。受篇幅限制,仅列出北帮边坡 1 的 S_1、S_2权重计算结果:

$\boldsymbol{W}_1 = [w_1, w_2, \cdots, w_{11}] = [0.118\ 021, 0.103\ 05, 0.091\ 926, 0.091\ 409, 0.082\ 389, 0.088\ 73, 0.082\ 384, 0.077\ 989, 0.085\ 353, 0.095\ 811, 0.082\ 938]$;

$\boldsymbol{W}_2 = [w_1, w_2, \cdots, w_{11}] = [0.113\ 606, 0.102\ 036, 0.090\ 903, 0.090\ 301, 0.084\ 435, 0.091\ 171, 0.084\ 833, 0.074\ 179, 0.084\ 404, 0.103\ 078, 0.081\ 055]$。

2) 按式(7)~(8)计算综合评价向量及综合评判分数,为减小计算过程中随机性的影响程度,重复计算 150 次。

3) 按式(9)~(11)计算本文评价方式下的期望值、熵、置信度因子,确定评价等级。

最终得到本文选取的边坡 1~3 的计算结果,如表 4 所示。这 3 处边坡的安全等级均为 III 级,均处于基本稳定的状态。此外,各边坡的 β 值均小于 0.05,这进一步证明了评价结果的高度可信性。

为进一步验证本文模型计算结果的精准性,采用相关的理论模型及定量计算方法进行交叉验证,选取可拓学理论、未确知测度理论以及刚体极限平衡法作为验证方法。本文模型与刚体极限平衡法计算结果相似度达 100%。与可拓学理论及未确知测度理论的评

价结果相比,本文模型结果相似度66.7%。此外,表4中显示,3个边坡安全等级评价结果绝大多数为Ⅲ级,进一步证明了改进后的模型在露天矿边坡安全等级评价中的高度可靠性。

表4 某露天矿边坡稳定性计算结果

Table 4 Calculation results of an open-pit mine slope stability

边坡区	本文方法		安全等级		
	安全等级	置信度因子	刚体极限平衡法	可拓学理论	未确知测度理论
北帮边坡1	Ⅲ(E_r=3.38)	β=0.022	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ
东帮边坡2	Ⅲ(E_r=3.23)	β=0.019	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ
西帮边坡3	Ⅲ(E_r=3.37)	β=0.026	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

4 结论

1) 本模型通过期望值E划分安全等级,并以熵S刻画评价结果的模糊性,得到某露天矿3个实测边坡的安全等级期望值分别为3.38、3.23、3.37,有效实现了对稳定性等级的量化判定。

2) 评价模型既保留了可拓学理论在解决不同指标相斥问题上的优势,又借助云模型量化了影响因素的随机性与模糊性,3个边坡的置信度因子β均小于0.05,表明评价结果具有较高的可信度。

3) 引入熵权法中的差异系数,替代传统CRITIC法中的标准差,能够更加有效地揭示各评价指标之间的差异性,从而提升指标权重计算的精度。

4) 通过引入可拓云模型中的云关联度矩阵并结合差异系数-CRITIC法,实现了不同案例下指标动态权重的确定,克服了传统方法在指标一致时难以标准化的问题。案例评价结果与刚体极限平衡法、可拓学理论及未确知测度理论结果吻合,验证了本模型的适用性与可靠性。

参考文献(References):

[1] 易红卫,樊陵姣,谌涛. 基于有限元分析的矿山边坡自动数值建模与分析研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(3):30-33.
YI Hongwei, FAN Lingjiao, CHEN Tao. Automatic numerical modeling and analysis of mine slopes based on finite element analysis[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(3):30-33.

[2] 杜岩,张洪达,谢谟文,等. 矿山采空区边坡动态稳定性评价方法[J]. 工程科学学报, 2025,47(2):215-223.
DU Yan, ZHANG Hongda, XIE Mowen, et al. Dynamic stability evaluation method of mine goaf slopes[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025,47(2):215-223.

[3] JIANG S, LI J Y, ZHANG S, et al. Landslide risk prediction by using GBRT algorithm: Application of artificial intelligence in disaster prevention of energy mining[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022,166:384-392.

[4] 周晴晴,穆琳,王雷. 基于FMM-SVR模型的深凹露天矿边坡稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):41-46.
ZHOU Qingqing, MU Lin, WANG Lei. Stability analysis of concave open-pit slope based on FMM-SVR model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):41-46.

[5] 臧焜岩,李梅红. 基于GA-BP模型的露天矿边坡稳定性预测[J]. 中国矿业, 2019,28(6):144-148.
ZANG Kunyan, LI Meihong. Slope stability prediction of open-pit mine based on GA-BP model[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(6):144-148.

[6] 熊朝林,陈俊智. INRBO-SVM模型在边坡安全系数预测中的应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):20-25.
XIONG Chaolin, CHEN Junzhi. Application of INRBO-SVM model in predicting slope safety factors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):20-25.

[7] DENG Z, WANG L, LIU W, et al. Mathematical modeling and fuzzy approach for disaster analysis on geo-spatial rock mass in open-pit mining[J]. Computer Communications. 2020,150:384-392.

[8] 谈小龙,徐卫亚,梁桂兰. 可拓方法在岩石边坡整体安全评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(12):2503-2509.
TAN Xiaolong, XU Weiya, LIANG Guilan. Application of extenics method to comprehensive safety evaluation of rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(12):2503-2509.

[9] 杜岩,白云飞,张晓勇,等. 基于多种风险因素的矸石山边坡风险评价[J]. 工程力学, 2022,39(10):249-256.
DU Yan, BAI Yunfei, ZHANG Xiaoyong, et al. Risk assessment of coal gangue slope considering multiple risk factors[J]. Engineering Mechanics, 2022,39(10):249-256.

[10] 王加闯,黄明健,过江. 基于CRITIC-有限区间云模型的边坡稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019,15(6):113-119.
WANG Jiachuang, HUANG Mingjian, GUO Jiang. Evaluation of slope stability based on CRITIC-finite interval cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019,15(6):113-119.

[11] 杨文东,杨栋,谢全敏. 基于云模型的边坡风险评估方法及其应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018,46(4):30-34.
YANG Wendong, YANG Dong, XIE Quanmin. Study on slope risk assessment method based on cloud model and its application[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018,46(4):30-34.

[12] 和大钊,胡斌,姚文敏,等. 基于块体化程度和云模型的露天矿边坡稳定性分级评价方法[J]. 矿冶工程, 2017,37(4):6-10.
HE Dazhao, HU Bin, YAO Wenmin, et al. Stability grading method for open pit slope based on blockness and cloud model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017,37(4):6-10.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Rock mass classification standard: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Plan Publishing House, 2014.

[14] 方前程,商丽. 基于博弈论-云模型的露天矿岩质边坡稳定性分

析[J]. 安全与环境学报, 2019,19(1):8-13.
FANG Qiancheng, SHANG Li. Analysis of the rock slope stability for the open-pit mine based on the game theory and the cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2019,19(1):8-13.

[15] 侯克鹏,王黎蝶. 基于改进的 FAHP-CRITIC 法与云理论的露天矿边坡危险性评估模型[J]. 安全与环境学报, 2021,21(6):2443-2451.
HOU Kepeng, WANG Lidie. Risk assessment model of open-pit mine slope based on improved FAHP-CRITIC method and cloud theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2021,21(6):2443-2451.

[16] 张向东,姜革鑫. 基于可拓学理论的矿山边坡稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2018,18(6):2141-2145.
ZHANG Xiangdong, JIANG Gexin. Analysis of the mining slope stability from the point of view of the theory of extenics[J]. Journal of Safety and Environment, 2018,18(6):2141-2145.

[17] 康志强,周辉,冯夏庭,等. 大型岩质边坡岩体质量的可拓学理论评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007,28(12):1770-1774.
KANG Zhiqiang, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Evaluation of high rock slope quality based on theory of extenics[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007,28(12):1770-1774.

[18] 阮永芬,陈赵慧,吴龙,等. 基于可拓云理论的泥炭质土场地沉降风险评价[J]. 安全与环境学报, 2020,20(1):59-67.
RUAN Yongfen, CHEN Zhaohui, WU Long, et al. Risk assessment of the settlement of peat soil field based on the extension cloud theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(1):59-67.

[19] 王晓玲,戴林瀚,吕鹏,等. 基于 DSR-可拓云的渗流安全综合评价研究[J]. 天津大学学报, 2019,52(1):52-61.
WANG Xiaoling, DAI Linhan, LYU Peng, et al. Study on comprehensive evaluation model of seepage safety based on DSR-extension cloud[J]. Journal of Tianjin University, 2019,52(1):52-61.

[20] 涂圣文,赵振华,邓梦雪,等. 基于云化物元耦合模型的岩质高边坡工程爆破施工安全风险评估[J]. 安全与环境工程, 2021,28(2):102-108.
TU Shengwen, ZHAO Zhenhua, DENG Mengxue, et al. Safety risk assessment of blasting construction in rock high slope engineering based on the cloud matter-element model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021,28(2):102-108.

[21] 高松,滕克难,陈健,等. 基于 MCM-可拓云的装备体系效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2020,41(2):20-24.
GAO Song, TENG Kenan, CHEN Jian, et al. Effectiveness evaluation of equipment system of system based on MCM-extension cloud[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2020,41(2):20-24.

[22] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995,22(7):763-770.

[23] 张立军,张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J].统计与决策, 2015,31(22):65-68.
ZHANG Lijun, ZHANG Xiao. Weighted clustering method based on improved CRITIC method[J]. Statistics & Decision, 2015,31(22):65-68.

[24] 王坚浩,王龙,张亮,等. 灰色群组聚类和改进 CRITIC 赋权的供应商选择 VIKOR 多属性决策[J]. 系统工程与电子技术, 2023,45(1):155-164.
WANG Jianhao, WANG Long, ZHANG Liang, et al. Supplier selection VIKOR multi-attribute decision making of grey group clustering and improved CRITIC weighting[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023,45(1):155-164.

[25] 赵军,宋扬. 改进熵权-正态云模型在边坡稳定性评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2016,34(4):120-122.
ZHAO Jun, SONG Yang. Slope stability evaluation based on improved entropy weight-cloud model[J]. Water Resources and Power, 2016,34(4):120-122.

引用本文:任赢,沈国卓,张良喜,等. 基于 CRITIC 法-可拓云模型的露天矿高陡边坡稳定性动态评价[J]. *矿冶工程*, 2026,46(1):23-29.
REN Ying, SHEN Guozhuo, ZHANG Liangxi, et al. Dynamic stability evaluation for high and steep slope of open-pit mines based on CRITIC - extension cloud model[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):23-29.

(上接第 22 页)

[16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 工业炸药通用技术条件: GB/T 28286—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. General technical specifications for industrial explosives: GB/T 28286—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[17] 王曙光,朱建生,陈栋,等. 炸药爆炸理论基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2020.
WANG Shuguang, ZHU Jiansheng, CHEN Dong, et al. The theoretical basis of explosive detonation[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020.

[18] 徐晓东. 基于通径系数的隧道爆破振动影响因素敏感性分析[J]. 现代矿业, 2023,39(12):223-225.
XU Xiaodong. Sensitivity analysis of influencing factors of tunnel blasting vibration based on path coefficient[J]. Modern Mining, 2023,39(12):223-225.

[19] 杜玉洁. 基于回归的通径及决策分析模型应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
DU Yujie. Research on path and decision analysis model application based on regression analysis[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.

引用本文:张建秋,代周超,李海谦,等. 混装乳化炸药工艺参数对爆炸性能的影响规律研究[J]. *矿冶工程*, 2026,46(1):17-22.
ZHANG Jianqiu, DAI Zhouchao, LI Haiqian, et al. Influence of parameters on performance of site mixed emulsion explosive [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):17-22.