

# 基于 FAHP - GRA 评价模型的离子型 稀土矿边坡稳定性研究

廖健龙<sup>1</sup>, 孙洪军<sup>1</sup>, 安建超<sup>2</sup>

(1. 辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 锦州水务(集团)有限公司, 辽宁 锦州 121002)

**摘要:** 稀土矿是我国战略资源的瑰宝, 确保其安全、环保和高效的开采已然成为各界长期关注且亟待解决的关键议题。文章针对离子型稀土矿开采中的边坡稳定性问题, 创新性地构建基于模糊层次分析法 (FAHP) 与灰色关联分析 (GRA) 的综合评价模型。通过对赣南某矿山的实证研究, 选取岩土力学参数、地形地貌、浸矿工艺、水文气象及地震作用五大影响因素, 并细分九项子指标。模型利用 FAHP 构建模糊互补判断矩阵, 实现了定性与定量分析的深度融合, 并在此基础上, 借助 GRA 优化权重分配, 提高了权重确定的准确性。结果表明: 该模型在边坡稳定性评估中具有较高的有效性和可靠性, 能精确预测边坡演变趋势, 为失稳风险的预警与防范提供科学支撑。FAHP-GRA 模型的应用, 不仅可提升离子型稀土矿边坡评价的科学性与精度, 也可为我国稀土资源可持续开发及同类矿山的研究实践提供参考。

**关键词:** 离子型稀土矿; 边坡稳定性; FAHP; 灰色关联理论; 原地浸矿

**中图分类号:** TD865; TD854.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673 - 8993(2025)10 - 0062 - 07

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2025.10.126

## Study on slope stability of ionic rare earth mine based on FAHP-GRA evaluation model

LIAO Jianlong<sup>1</sup>, SUN Hongjun<sup>1</sup>, AN Jianchao<sup>2</sup>

(1. Liaoning University of Technology, School of Civil and Architectural Engineering, Jinzhou 121001, Liaoning, China;

2. Jinzhou Water (Group) Co., Ltd., Jinzhou 121002, Liaoning, China)

**Abstract:** Rare earth mine is the treasure of China's strategic resources, and ensuring its safe, environmentally friendly and efficient mining has become a key issue of long-term concern and urgent solution for all walks of life. A comprehensive evaluation model based on grey correlation theory (GRA) and fuzzy hierarchical analysis method (FAHP) is innovatively proposed to address the slope stability of ionic rare earth mines in the mining process. Through an in-depth analysis of an ionic rare earth mine in Gannan, five key factors affecting slope stability are identified, including slope geotechnical parameters, slope topographic and geomorphological conditions, leaching process, hydrometeorological characteristics and seismic effects, and further subdivided into nine fine-molecular factors. The fuzzy complementary judgement matrix constructed by FAHP is used to achieve the deep integration of qualitative and quantitative analysis. On this basis, GRA is used to optimise the weight calculation, which greatly improves the accuracy of determining the weights of each factor, and makes the weights of each factor in the evaluation system more in line with the actual situation. After rigorous verification of

**收稿日期:** 2025 - 04 - 11

**基金项目:** 2024 年辽宁省科技计划联合计划项目 (2024011314 - JH2/1026); 2023 年辽宁省教育厅高等学校基本科研项目 (JYMS20230865); 2022 年辽宁省研究生联合培养示范基地项目 (YJD202204)

**作者简介:** 廖健龙 (1997 -), 男, 硕士研究生, 从事边坡稳定性相关研究工作。

**通信作者:** 孙洪军 (1973 -), 男, 博士, 教授, 从事岩土工程相关教学与科研工作。

actual cases, this model shows good effectiveness and reliability in assessing the stability of slopes, and can accurately predict the evolution trend of the slope state, which provides a strong scientific support for preventing the risk of slope instability in advance. In summary, the FAHP-GRA comprehensive evaluation model not only greatly improves the scientific and accuracy of the slope stability evaluation of ionic rare earth mines, but also has far-reaching significance for the sustainable and stable development of China's rare earth resources as well as the healthy development of the related strategic industries, and also provides valuable reference examples for the slope stability research and practice of the similar mines in the future.

**Key words:** ionic rare earth ores; slope stability; fAHP; grey correlation theory; in situ leaching

离子型稀土矿是我国重要的战略资源,其主要分布在赣南等南方地区。在工程实践中,多数离子型稀土矿采用原地浸出工艺进行稀土元素回收,尽管这种方法环保且经济,但会对矿体强度造成影响,从而引发滑坡事故,导致资源损失和环境污染<sup>[1]</sup>。因此,对稀土矿边坡的稳定性进行分析具有重要意义。

随着城市化进程和基础设施建设的快速发展,边坡工程的重要性愈加突出。在过去的百年中,边坡稳定性研究经历了显著的演变,从最初依赖经验法则和直观判断,逐渐过渡到用理论分析进行定量研究。随着力学和数学理论的发展,研究者们开始建立更加严谨的数学模型,对边坡的力学行为进行深入分析,并引入安全系数等评估指标。然而,面对自然条件的复杂性以及边坡材料的多样性,传统的分析方法在处理非连续性、非线性和不确定性方面显现出一定的局限性。因此,研究者们开始探索新型的不确定性分析方法。这些新兴的分析方法包括可靠度分析法、灰色系统分析法、模糊数学分析法和神经网络分析法,为边坡工程的风险管理提供了强有力的工具。

在众多边坡稳定性评价方法中,层次分析法(AHP)因其能够综合定量与定性分析解决指标间的矛盾而受到国内外研究者的广泛关注<sup>[2]</sup>。在国内,张亚平等<sup>[3]</sup>针对露天矿山边坡稳定性评价中存在的随机性与模糊性问题,提出一种基于AHP-Critic法和正态云模型的综合评价方法,并在云南矿山案例中验证其与传统方法结果一致,为复杂边坡分析提供新途径。

谭玲等<sup>[4]</sup>针对传统边坡监测技术存在的不足,提出基于层次分析法的危险性分级模型。经重庆万州高速土质边坡案例验证可得该方法显著提升监测效率和结果可靠性,为边坡安全监测提供了

更具针对性的技术路径。在国外,LIU等<sup>[5]</sup>通过层次分析法(AHP)与GIS技术,综合高程、坡度等8类地理因子及历史滑坡数据,建立滑坡易发性评价模型,为黄土边坡风险评估提供方法论参考。WU等<sup>[6]</sup>通过层次分析法与云模型结合的量化评价体系,并利用MATLAB生成数值特征构建稳定性标准,对软岩高陡边坡进行安全评估。结合某露天矿案例,验证了模型可靠性,为复杂边坡安全分析及绿色开采提供了高效技术支撑。

随着对层次分析法(AHP)研究的深入,其固有的局限性开始逐渐显现,主要表现在:在评分时高度依赖专家意见和个人判断,主观性强,易受个体偏见影响,导致结果偏差;专家意见不一致会降低评价结果的可靠性;面对众多因素,决策者难以准确评估其相对重要性,尤其因素关系不明时,不确定性易使评估结果出现偏差,影响边坡风险评估准确性;处理因素间相互作用存在局限,常忽视协同或抵消效应,单独比较无法全面反映复杂关系。

为克服这些局限,研究者引入模糊理论和灰色关联理论来改进AHP。模糊理论<sup>[7]</sup>通过模糊数和模糊集,有效处理决策中的不确定性和主观性,提高了判断矩阵的一致性,并在多专家或多层次评价中实现更精确的综合分析,增强了决策的灵活性和可靠性。灰色关联理论<sup>[8]</sup>则通过处理不完整和不确定信息,提升了AHP在多指标决策中对因素关联度的分析能力,从而提高了权重分配的准确性和决策的可靠性。这些改进为边坡稳定性评价提供了更科学的依据,使得评价结果更加精确和可靠。

尽管如此,目前将AHP、模糊理论和灰色关联理论结合起来用于离子型稀土矿边坡稳定性评价的研究并不多。本研究深入剖析了其中的关键影响因素,进而构建了FAHP-GRA评价模型,并

将该模型应用于某稀土矿边坡稳定性的评估中,旨在提供更准确的评价结果。

## 1 离子型稀土原地浸矿 FAHP 模型

### 1.1 构建评价指标体系

离子型稀土矿原地浸矿的边坡稳定性受众多因素影响,要全面考虑这些因素存在较大难度。通过对赣南某离子型稀土矿区的实际监测数据的统计分析,发现其具有较好的代表性和统一性,适用于本文的研究。将影响边坡稳定性因素分为 5 类:边坡地形地貌特征、边坡地质特征、浸矿工艺、水文气象特征、地震作用。并将 5 类主要影响因素细分为 9 项子因素,构建离子稀土原地浸矿边坡稳定性评价的层次分析模型,如图 1 所示。

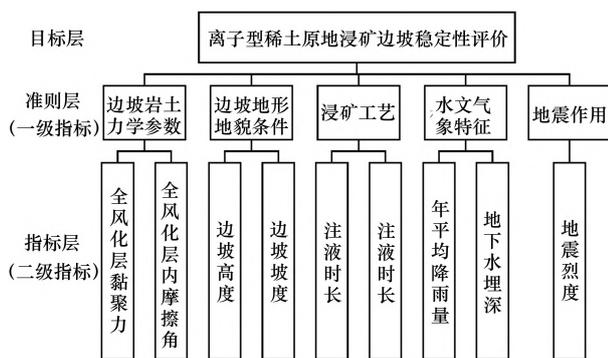


图 1 离子型稀土原地浸矿边坡稳定性评价体系

### 1.2 建立模糊互补判断矩阵

模糊层次分析法 (FAHP) 通过构建模糊互补判断矩阵,评估各指标的相对重要性。相较于传统标度法(如 1~9 标度法),0.1~0.9 标度法通过非线性映射压缩标度范围,既降低矩阵不一致性风险,又弱化专家主观判断中的极端偏好,更适合本文的决策场景。本文采用如表 1 所示的 0.1~0.9 标度法<sup>[9]</sup>来表达指标之间的偏好程度,这些模糊值将被填入判断矩阵中,以反映各指标之间的两两比较结果,从而形成模糊互补判断矩阵:

$$R = (r_{ij})_{n \times n} (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

其中:因为  $r_i$  相对于因素  $r_j$  的模糊值为  $X$ ,则指标  $B$  相对于指标  $A$  的模糊值为  $1 - X$ ,若因素  $r_i$  与因素  $r_j$  相比较得到判断  $r_{ij} = 0.8$ ,则  $r_{ji} = 1 - 0.8 = 0.2$ 。

### 1.3 权重求解

若  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  为模糊互补判断矩阵,而  $W = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n)$  为  $R$  的权重向量,则

利用徐泽水<sup>[10]</sup>提出的通用公式来求解模糊互补判断矩阵的权重,其表达式如下:

$$W_i = \frac{\sum_{i,j=1}^n + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad (1)$$

表 1 0.1~0.9 标度法

标度	定义	说明
0.5	同等重要	$r_i$ 与 $r_j$ 同等重要
0.6	略微重要	$r_i$ 比 $r_j$ 略微重要
0.7	显著重要	$r_i$ 比 $r_j$ 显著重要
0.8	至关重要	$r_i$ 比 $r_j$ 至关重要
0.9	极端重要	$r_i$ 比 $r_j$ 极端重要
0.1~0.4	反比较	若因素 $r_i$ 与 $r_j$ 因素相比较得到判断 $r_{ij} = 0.6$ ,则 $r_{ji} = 1 - 0.6 = 0.4$

### 1.4 一致性检验

为验证由公式(1)计算所得权重值的合理性,需要进行一致性检验。根据陈华友等<sup>[11]</sup>提出的判断矩阵相容性指标  $I(A, W^*)$  及特征矩阵的定义  $W^*$ ,计算二者之间的相容性指标,其公式如下:

$$I(A, W^*) = \frac{1}{n^2} \sum_{i,j=1}^n |a_{ij} + b_{ij} - 1| \quad (2)$$

$$W_{ij} = \frac{w_i}{w_i + w_j} \quad (3)$$

$$A = (a_{ij})_{n \times n} W^* = (b_{ij})_{n \times n} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, n$$

当  $I < a$  时,通常取  $a = 0.1$ ,则认为判断矩阵是一致的,且  $a$  越小,对一致性的要求也越高。在汇集众多专家评估意见时,先根据因素集合构建模糊互补判断矩阵,并基于此计算相应的权重集合。若所得模糊判断矩阵与其对应的特征矩阵之间的相容性指标,以及任意两个模糊判断矩阵间的相容性指标均低于设定的阈值  $\alpha$ ,则可将所有权重集合的平均值视为该因素集合的合理权重分配<sup>[9]</sup>。通过这一规范的评估流程,能够有效整合多位专家的评估结果,确保决策过程的科学性和客观性,为最终决策提供可靠的数据支撑。

## 2 模糊层次分析法结合灰色关联理论的权重计算优化

### 2.1 准则层权重

通过对边坡稳定性评价相关文献的调查与统计,提取了相关性较高的文献[12],并通过计算得

出了其平均值, 以确定一级指标的权重。这一方法类似于专家评分法, 相关指标系数如表 2 所示。

表 2 一级指标权重系数平均值

边坡岩土力学参数	边坡地形地貌条件	浸矿工艺	水文气象特征	地震作用
0.253	0.273	0.268	0.149	0.057

根据实际边坡评价目标, 将表 2 中工程类活动的影响数据应用于浸矿工艺。采用表 1 中规定的 0.1 ~ 0.9 标度法进行量化评分, 最终形成一级指标的权重判断矩阵, 如表 3 所示。由式(1)计算可得特征矩阵  $W^*$  如下:

表 3 一级权重判断矩阵

指标	边坡岩土力学参数	边坡地形地貌条件	浸矿工艺	水文气象特征	地震作用
边坡岩土力学参数	0.5	0.5	0.5	0.7	0.8
边坡地形地貌条件	0.5	0.5	0.5	0.7	0.8
浸矿工艺	0.5	0.5	0.5	0.7	0.8
水文气象特征	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7
地震作用	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5

$$W^* = \begin{pmatrix} 0.500 & 0 & 0.500 & 0 & 0.500 & 0 & 0.555 & 6 & 0.608 & 1 \\ 0.500 & 0 & 0.500 & 0 & 0.500 & 0 & 0.555 & 6 & 0.608 & 1 \\ 0.500 & 0 & 0.500 & 0 & 0.500 & 0 & 0.555 & 6 & 0.608 & 1 \\ 0.444 & 4 & 0.444 & 4 & 0.444 & 4 & 0.500 & 0 & 0.553 & 8 \\ 0.391 & 9 & 0.391 & 9 & 0.391 & 9 & 0.446 & 2 & 0.500 & 0 \end{pmatrix}$$

通过式(2) ~ (3) 计算可得: 二者相容性指标  $I(A, W^*) \approx 0.0859 < 0.1$ , 一致性检验通过, 相应一级权重指标如下。

$$\xi(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (6)$$

$k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m$

(4) 关联度计算。采用式(7)计算得到每个指标与相应的安全系数的关联度。

$$r_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi(k) \quad (7)$$

(5) 依据因素间的关联度, 构建权重判断矩阵, 并据此确定相关指标的权重。通过分析相关文献数据<sup>[13-18]</sup>, 提取了其中边坡基本地质条件与安全系数的对应数据, 如图 2 所示。为进一步揭示变量间的量化特征, 采用线性拟合的方式, 形

$$W = (0.225, 0.225, 0.225, 0.175, 0.150)$$

## 2.2 指标层权重

### 2.2.1 边坡岩土力学参数指标层权重

为了克服模糊层次分析法在权重判定的局限, 采用灰色关联理论来优化权重计算, 具体计算步骤如下。

(1) 将相应的指标数据(全风化层内的摩擦角和黏聚力)为比较列  $X'_i$ , 各指标相应的边坡安全系数为参考列  $X'_0$ , 形成初始矩阵见式(4)。

$$(X'_0, X'_1, X'_2, \dots, X'_m) = \begin{bmatrix} x'_0(1) & x'_1(1) & \dots & x'_m(1) \\ x'_0(2) & x'_1(2) & \dots & x'_m(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_0(n) & x'_1(n) & \dots & x'_m(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $m$  为指标数;  $n$  为序列数。

(2) 将初始矩阵  $X'$  进行无量纲化处理, 得到无量纲化后的矩阵  $X$  见式(5)。

$$(X_0, X_1, X_2, \dots, X_m) = \begin{bmatrix} x_0(1) & x_1(1) & \dots & x_m(1) \\ x_0(2) & x_1(2) & \dots & x_m(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_0(n) & x_1(n) & \dots & x_m(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $m$  为指标数;  $n$  为序列数。

(3) 通过式(6)计算因素间的关联系数。其中分辨系数  $\rho$  的大小反应关联系数间的差异程度, 其在 0 到 1 之间取值, 通常  $\rho$  取值为 0.5。

成初始矩阵  $X'$  如下。

$$(X'_0, X'_1, X'_2) = \begin{bmatrix} 1.18 & 8.71 & 23.20 \\ 1.23 & 11.61 & 25.35 \\ 1.28 & 14.51 & 27.49 \\ 1.34 & 17.99 & 30.06 \\ 1.38 & 20.31 & 31.78 \end{bmatrix}$$

将初始矩阵  $X'$  进行无量纲化处理, 得到无量纲化后的矩阵  $X$  如下。

$$(X_0, X_1, X_2) = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.04 & 1.09 & 1.33 \\ 1.08 & 1.18 & 1.67 \\ 1.14 & 1.30 & 2.07 \\ 1.17 & 1.37 & 2.33 \end{bmatrix}$$

根据式(6)~(7)计算得出:全风化黏聚力与安全系数的关联度为 0.860,内摩擦角与安全系数的关联度为 0.577。权重判断矩阵的构建结果如表 4 所示,全风化黏聚力和内摩擦角的二级指标权重系数通过公式(1)~(3)计算得出,具体数值如表 5 所示。

表 4 边坡岩土力学参数权重判断矩阵

指标	全风化黏聚力/kPa	全风化内摩擦角/(°)
全风化黏聚力/kPa	0.5	0.6
全风化内摩擦角/(°)	0.4	0.5

表 5 边坡岩土力学参数权重计算结果

指标	权重	一致性检验
全风化黏聚力/kPa	0.55	$I=0.025 < 0.1$
全风化内摩擦角/(°)	0.45	检验通过

### 2.2.2 边坡地形地貌条件指标层权重

通过分析相关文献数据[15-16],提取了边坡地形地貌条件与安全系数的对应数据。采用灰色关联分析法对这些数据进行分析,得出边坡高度与安全系数的关联度为 0.753,边坡坡度与安全系数的关联度为 0.692。权重判断矩阵的构建结果列于表 6,边坡高度和边坡坡度的二级指标权重系数通过公式(1)~(3)计算得出,具体数值如表 7 所示。

表 6 边坡地形地貌条件权重判断矩阵

指标	边坡高度/m	边坡坡度/(°)
边坡高度/m	0.50	0.55
边坡坡度/(°)	0.45	0.50

表 7 边坡地形地貌条件权重计算结果

指标	权重	一致性检验
边坡高度/m	0.525	$I=0.012 < 0.1$
边坡坡度/(°)	0.475	检验通过

### 2.2.3 浸矿工艺指标层权重

通过分析文献[17-21],提取浸矿工艺与边坡稳定性指标的对应数据,发现安全系数随注液强度增加呈非线性递减趋势,而随注液时长延长呈现先稳定后下降的阶段特征。采用灰色关联分析法进行敏感性分析,得出注液强度与安全系数的关联度为 0.543,注液时长与安全系数的关联度为 0.578,二者均对边坡动态稳定性具有显著影响。由于注液强度和注液时长的关联度较为接近,确定二者的权重系数均为 0.5。

### 2.2.4 水文气象特征指标层权重

通过分析文献[22-23],确定年平均降雨量的二级指标权重系数为 0.4,地下水埋深的二级指标权重系数为 0.6。

### 2.2.5 地震作用指标层权重

因为仅考虑地震烈度这一项因素,所以其二级指标权重为 1.0。

### 2.2.6 综合权重

经过 FAHP-GRG 法的计算,得到各指标的综合权重如表 8 所示。

## 2.3 综合评价

根据上述分析,为了准确评估边坡的安全状态,须计算出边坡的状态值后,依据表 9 中提供的边坡评价等级标准,对边坡的稳定性进行分级。相应计算公式如下。

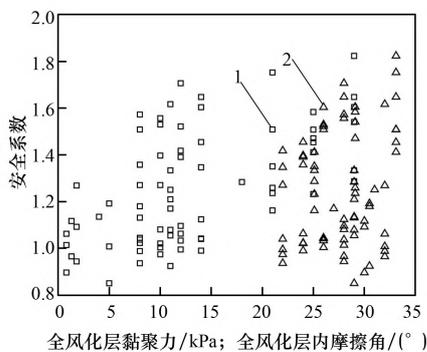
$$U_n = W_n + R_n$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (8)$$

式中: $R$ 为边坡对应指标的评估值; $W$ 为边坡对应指标的权重; $n$ 为边坡对应指标。

## 3 实例应用

赣南某离子型稀土矿区<sup>[12]</sup>,矿体平均埋藏深



1—黏聚力—安全系数对应点;

2—内摩擦角—安全系数对应点。

图 2 边坡基本地质条件与安全系数统计

表8 离子型稀土原地浸矿边坡稳定性评价指标权重

一级指标	二级指标	一级指标权重	二级指标权重	综合权重
边坡岩土力学参数	全风化层黏聚力	0.225	0.550	0.124 0
	全风化层内摩擦力		0.450	0.101 0
边坡地形地貌条件	边坡高度	0.225	0.525	0.118 1
	边坡坡度		0.475	0.106 9
浸矿工艺	注液强度	0.225	0.500	0.112 5
	注液时长		0.500	0.112 5
水文气象特征	年平均降雨量	0.180	0.400	0.072 0
	地下水埋深		0.600	0.108 0
地震作用	地震烈度	0.145	1.000	0.145 0

度约为1 m,注液孔间距约为2 m。经实验数据表明,注液强度为0.3 m/d,整个注液过程需持续120 d,相关岩土力学及几何参数如表10所示。此地区年均降水量达1 645 mm,地下水位较深,地震烈度等级为Ⅵ度。对矿区3个边坡进行稳定性分析显示,浸矿前3个边坡均稳定。浸矿后,1#和2#边坡稳定,3#边坡现裂缝。

采用FAHP- GRA评价方法对上述3个边坡的稳定性进行评估,并将评估结果与极限平衡法所得计算结果,AHP法评价结果以及实际边坡状况进行了对比分析<sup>[12]</sup>,具体内容如表11所示。在运用极限平衡法计算上述3个边坡的安全稳定系数时,全面综合地考虑了自重、地下水、注液和地震力等因素。同时,将所得安全稳定系数与《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)中规定的最小安全系数进行对照,以评估边坡的稳定性。分析结果显示,FAHP- GRA评价结果与实际工况高度吻合,能够综

合考虑多因素的不确定性与非线性关系,避免传统方法(如极限平衡法、AHP法)的单一指标或权重分配问题;而且该方法在安全系数接近临界值时(如3#边坡)能精准预警潜在风险,有力地验证了该评价体系在反映边坡安全状况方面的准确性和可靠性。

#### 4 结 论

(1) 传统的层次分析法(AHP)在边坡稳定性评价中受限于主观性强和难以处理因素间相互作用的问题。通过结合模糊理论和灰色关联理论,可以有效地应对层次分析法的局限,从而提高评价结果的科学性和准确性。

(2) 离子型原地浸矿边坡稳定性受到多种因素的影响,包括地形地貌特征、地质特征、浸矿工艺、水文气象特征和地震作用等。通过FAHP- GRA模型,可以定量评估这些因素对边坡稳定性的影响,并据此进行风险分级,为边坡的维护和

表9 离子型稀土矿原地浸矿边坡评价指标体系及评价等级标准

一级评价指标	序号	二级评价指标	级别			
			极稳定 I 80~60	稳定 II 60~40	较稳定 III 40~20	不稳定 IV 20~0
边坡岩土力学参数	1	全风化层黏聚力	28~21	21~14	14~7	7~0
	2	全风化层内摩擦力	53~41	41~29	29~17	17~5
边坡地形地貌条件	3	边坡高度	0~10	10~20	20~30	30~40
	4	边坡坡度	15~20	20~25	25~30	30~35
浸矿工艺	5	注液强度	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4
	6	注液时长	0~45	45~90	90~135	135~180
水文气象特征	7	年平均降雨量	600~825	825~1 050	1 050~1 275	1 275~1 500
	8	地下水埋深	深层	中层地下	浅层	超浅
地震作用	9	地震烈度	V	VI	VII	VIII

表 10 边坡参数及稳定性评估

指标	权重	1 <sup>#</sup> 边坡			2 <sup>#</sup> 边坡			3 <sup>#</sup> 边坡		
		边坡参数	评估值	状态值	边坡参数	评估值	状态值	边坡参数	评估值	状态值
全风化层黏聚力/kPa	0.124 0	10.0	25	3.10	24.0	70	8.68	3.0	1	0.12
全风化层内摩擦力/(°)	0.101 0	22.0	34	3.43	20.0	30	3.03	18.0	21	2.12
边坡高度/m	0.118 1	55.0	0	0.00	22.0	38	4.49	39.0	1	0.12
边坡坡度/(°)	0.106 9	20.2	60	6.41	20.9	59	6.31	34.0	1	0.11
注液强度/(m·d <sup>-1</sup> )	0.112 5	0.3	20	2.25	0.3	20	2.25	0.3	20	2.25
注液时长/d	0.112 5	120.0	28	3.15	120.0	28	3.15	120.0	28	3.15
年平均降雨量/mm	0.072 0	1 645.0	0	0.00	1 645.0	0	0.00	1 645	0	0.00
地下水埋深	0.108 0	中层	45	4.86	中层	45	4.86	中层	45	4.86
地震烈度	0.145 0	Ⅵ	50	7.25	Ⅵ	50	7.25	Ⅵ	50	7.25
总分	—	—	—	30.46	—	—	40.01	—	—	19.98
评估稳定性等级	—	—	—	较稳定	—	—	稳定	—	—	不稳定

表 11 评价结果对比

边坡	FAHP - GRA	极限平衡法			实际情况	AHP 法
		计算值	规范要求最小值	边坡状态		
1 <sup>#</sup>	较稳定	1.217	1.10	稳定	稳定	次不稳定
2 <sup>#</sup>	稳定	1.573	1.10	稳定	稳定	较稳定
3 <sup>#</sup>	不稳定	1.091	1.10	不稳定	现裂缝	不稳定

治理提供科学依据。

(3) 结合模糊层次分析法 (FAHP) 和灰色关联理论 (GRA) 构建的评价模型能够全面考虑影响边坡稳定性的多种因素, 并通过将某矿区三个边坡的评估结果与 Spencer 法的分析结果以及边坡的实际状况进行对比, 验证了该模型在实际边坡稳定性评价中的有效性和可靠性。

### 参考文献:

- [1] 饶国柱, 饶运章, 高中泉, 等. 不同降雨强度下离子型稀土矿边坡渗流特性与临界滑移面变化分析[J]. 矿冶工程, 2024, 44(3): 22 - 27.
- [2] 于帅. 基于层次分析 - 模糊综合模型的露天矿山微地形生态修复技术评价研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(11): 39 - 48.
- [3] 张亚平, 李克钢, 李明亮, 等. AHP-Critic 法正态云模型在边坡稳定性评价中的应用[J]. 有色金属工程, 2024, 14(3): 146 - 155.
- [4] 谭玲, 张帮鑫, 黄河, 等. 基于层次分析法的土质边坡风险分区研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(12): 18 - 26.
- [5] LIU X, SHAO S, Landslide susceptibility zonation using the

analytical hierarchy process (AHP) in the Great \* \* ' an Region, China[J]. Scientific reports, 2024, 14(1): 2941.

- [6] WU G, NIE X, ZHANG X, et al. Stability grade evaluation of slope with soft rock formation in open-pit mine based on modified cloud model [J]. Sustainability, 2024, 16(11): 4706.
- [7] SHU S, QIAN J, GONG W, et al. Non-Probabilistic Reliability Analysis of Slopes Based on Fuzzy Set Theory [J]. Applied Sciences, 2023, 13(12): 7024.
- [8] 王平, 程贵海, 邓春海, 等. 基于灰色关联分析法探析隧道中深孔楔形掏槽爆破[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 165 - 171.
- [9] 赖荣燊, 林文广, 吴永明. 面向绿色性能优化的产品族模块再设计优先次序识别[J]. 中国机械工程, 2019, 30(11): 1329 - 1335.
- [10] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001(4): 311 - 314.
- [11] 陈华友, 赵佳宝. 模糊判断矩阵的相容性研究[J]. 运筹与管理, 2004(1): 44 - 47.
- [12] 曾伟, 谢韶宜, 王观石, 等. 基于 AHP 层次分析法的离子型稀土矿原地浸出边坡稳定评价研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(4): 72 - 80.

(下转第 80 页)

纳过程首次超越失效概率求解。最后,将蒙特卡罗模拟法与数学解析法进行了对比分析。结果表明,数值模拟法的计算结果与精确解析解吻合良好,具有很高的精度,并且适用性和应用范围更具优势。本文研究为维纳过程首超失效概率计算提供了可靠的数值解法,有助于推动结构动力可靠性分析在工程实践中的深入应用。

### 参考文献:

- [1] 赵国藩,金伟良,贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 李侃,巨能攀. 基于蒙特卡罗方法的边坡可靠性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):23-27.
- [3] 何鑫,唐友刚,付礼鹏等. 计算单点滑环系统失效概率的蒙特卡罗方法[J]. 船舶工程,2018,40(4):82-88.
- [4] 张龙文,卢朝辉,赵衍刚. 基于平稳非高斯结构响应前四阶矩的首次穿越概率计算[J]. 振动与冲击,2018,37(1):128-135.
- [5] 杨伟军,张振浩. 基于连续 Markov 过程首超时间概率分析的结构动力可靠性分析[J]. 工程力学,2011,28(7):124-129.
- [6] HONG H. Response and first passage probability of linear elastic SDOF systems subjected to nonstationary stochastic excitation modelled through S-transform[J]. Structural Safety,2021,88:102007.
- [7] 陈建华,彭淑燕,王伟等. 基于 MATLAB 的随机过程仿真[J]. 信息系统工程,2011,10:26-28.
- [8] 陈颖,王东升,朱长春. 随机结构在随机荷载下的动力可靠度分析[J]. 工程力学,2006,23(10):82-85.
- [9] 普通混凝土长期性能和耐久性能实验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] 颜肃,刘德峰,张臻悦,等. 非降雨条件下风化壳淋积型稀土矿体稳定性分析及浸取剂筛选[J]. 中国稀土学报,2021,39(6):951-961.
- [14] 汤民波,涂志刚. 赣南某稀土矿边坡稳定性影响因素正交分析[J]. 现代矿业,2017,33(2):196-197;200.
- [15] 韩民,饶运章,王丹,等. 基于 FIFC 的稀土矿水位滑坡预警模型[J]. 稀土,2020,41(1):37-45.
- [16] 邬长福,姚贵佳,陈亮,等. 基于 Geo-Studio 的离子型稀土矿边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):72-77.
- [17] 黄永刚,饶运章. 基于响应面法的边坡稳定性预测[J]. 江西理工大学学报,2016,37(3):68-71.
- [18] 饶运章,张永胜,饶睿,等. 离子型稀土原地浸矿边坡稳定影响因素敏感性分析[J]. 矿业研究与开发,2015,35(9):60-63.
- [19] 何书,陈飞,刘强,等. 稀土矿层厚度对浸矿边坡渗流及稳定性的影响[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(3):528-534.
- [20] 陈荣军,廖伟成,张耀平,等. 某离子型稀土矿边坡稳定性分析[J]. 有色金属科学与工程,2015,6(4):111-115.
- [21] 王旭,潘懿,孙春辉,等. 离子型稀土矿边坡稳定性与注液高度优化研究[J]. 中国矿业,2021,30(增刊1):311-315.
- [22] 蔡欣育,任旭华,张继勋,等. 不同降雨类型对边坡稳定性影响的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2020,42(2):34-39.
- [23] 史振宁,戚双星,付宏渊,等. 降雨入渗条件下土质边坡含水率分布与浅层稳定性研究[J]. 岩土力学,2020,41(3):980-988;1085.

(上接第 68 页)