融合多源信息的岩体质量分级可信度评估方法①

徐晶[1]，江成玉[1]，赵梓安[2]，陈胜伦[3]，张黎明[1]，王沉[1]，吉建华[4]
(1.贵州大学 矿业学院，贵州 贵阳 550025；2.贵州省政立矿业有限公司，贵州 贵阳 550300；3.瓮福(集团)有限责任公司，贵州 贵阳 550002；4.贵阳信息科技学院，贵州 贵阳 550025)

摘 要：针对 RMR 法、Q 系统法与 BQ 法等岩体质量分级方法的分级结果存在差异、可信度难确定的问题，提出一种基于层次分析法(AHP)、模糊综合评价(FCE)与 D-S 证据理论的岩体质量分级可信度评估方法。首先通过 AHP-FCE 模型得到岩体质量等级的评估向量，将 3 种分级方法的评估向量作为独立证据体，引入 D-S 证据理论与可信度加权模型融合修正多源证据，从而获得一个综合多源信息的最优岩体质量分级结果。在此基础上，利用 MATLAB GUIDE 创建岩体质量分级可信度计算平台。以平安磷矿二矿 16 组实测数据进行验证，结果表明，该方法所得评估结果较任一单一分级方法更符合工程实际；经可信度加权模型修正后，16 组原始证据的冲突系数由 0.60~0.82 降至 0.01 以下，有效解决了多源证据冲突问题，提升了岩体质量分级结果的可信度。

关键词：岩体质量分级；层次分析法(AHP)；模糊综合评价(FCE)；D-S 证据理论；可信度评估；AHP-FCE 模型；多源信息；冲突系数；可信度加权模型
中图分类号：TD313　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.005
文章编号：0253-6099(2026)04-0036-010

A Credibility Evaluation Method for Rock Mass Quality Classification Integrating Multi-source Information

XU Jing[1], JIANG Chengyu[1], ZHAO Zi'an[2], CHEN Shenglun[3], ZHANG Liming[1], WANG Chen[1], JI Jianhua[4]
(1.*School of Mining Engineering, Guizhou University, Guiyang* 550025, *Guizhou, China*; 2.*Guizhou Zhengli Mining Co., Ltd., Guiyang* 550300, *Guizhou, China*; 3.*Wengfu (Group) Co., Ltd., Guiyang* 550002, *Guizhou, China*; 4.*Guiyang Institute of Information Science and Technology, Guiyang* 550025, *Guizhou, China*)

Abstract: Aiming at the inconsistency of grading results and difficulty in determining credibility for rock mass quality classification methods such as the RMR method, Q-system method and BQ method, a credibility evaluation method for rock mass quality classification based on analytic hierarchy process (AHP), fuzzy comprehensive evaluation (FCE) and D-S evidence theory is proposed. Firstly, the evaluation vector of rock mass quality grade is obtained via the AHP-FCE model. The evaluation vectors obtained by the three classification methods are taken as independent bodies of evidence. The D-S evidence theory and credibility weighting model are introduced to fuse and revise multi-source evidence, so as to obtain an optimal rock mass quality classification result integrating multi-source information. On this basis, a calculation platform for the credibility of rock mass quality classification is established with MATLAB GUIDE. Verification with 16 groups of measured data from No.2 Ping'an Phosphate Mine shows that the evaluation results obtained by the proposed method are more consistent with engineering practice than those from any single classification method. After revision by the credibility weighting model, the conflict coefficients of 16 groups of original evidence decrease from 0.60−0.82 to less than 0.01. The conflict problem of multi-source evidence is effectively solved, and the credibility of rock mass quality classification results is improved.

Key words: rock mass quality classification; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy comprehensive evaluation (FCE); D-S evidence theory; credibility evaluation; AHP-FCE model; multi-source information; conflict coefficient; credibility weighting model

① **收稿日期**：2026-04-15
基金项目：国家自然科学基金(52364010)；贵州省科技厅创新人才团队建设项目(黔科合人才 CXTD〔2025〕011)；贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑〔2025〕一般 069)
作者简介：徐晶(2001—)，女，贵州福泉人，硕士研究生，主要从事顶板岩体质量分级管理方面的研究。E-mail:xujing687123@163.com
通信作者：江成玉(1980—)，男，贵州贵阳人，硕士，副教授，硕士研究生导师，主要从事巷道围岩控制方面的研究。E-mail:328341597@qq.com

工程岩体质量分级作为复杂岩体多维度特征的综合表征,是评价工程岩体性质、指导支护设计与施工决策的重要依据[1-2]。目前各类岩体质量分级方法在工程实践中仍存在一定局限性:部分评价指标为定性指标,难以量化表征;参数等级划分边界模糊,导致分级结果存在不确定性;且部分方法在复杂工程条件下的适用性不足。上述因素会导致各岩体质量分级方法分级结果存在差异,进而影响地下工程设计的科学决策[3-4]。

为了提高岩体质量分级方法评价的准确性,学者们主要从参数优化、工程适用性与可信度评估等方面进行了改进。在参数优化方面,通过引入新的特征参数、调整关键指标等方法提升了分级方法的适用性与准确性。例如,在岩体地质力学分级(RMR)法中引入地应力参数,得到 IRMR 法,显著提升了金属矿岩体稳定性评价的准确性[5];采用岩体完整性系数(K_v)替代传统 RMR 法中的 RQD 与节理间距指标,构建简化参数的 RMR_{K_v} 法,大幅减少了现场数据采集的工作量[6];文献[7]将 Mamdani 模糊推理模型引入 RMR 法,解决了岩体质量分级指标评判的阶梯性问题。在多方法协同与特殊工程场景适用性方面,文献[8]针对破碎岩体质量分级提出了基于 RMR 法、Q 系统法与 BQ 法的多元数据归一化处理方法,降低了单一方法参数误差带来的影响。在可信度评估方面,文献[9]首次提出不确定性推理方法,构建可信度评估体系,为岩体质量分级可信度评估提供了理论基础;围绕岩体质量分级可信度评估提出了包括确定性因子(C-F)[10]、D-S 证据理论[11]、多源信息融合可信评估、层次分析法(AHP)[12]、模糊综合评判法(FCE)[13]、加权平均法[14]、贝叶斯估计[15]以及神经网络[16]等在内的多种评估理论框架。例如,基于指标关联性构建云算法评价体系,为破碎岩体分级提供了新的研究路径[17];模糊综合评价法结合熵权法修正权重,并基于有效度原则优化隶属度决策,减少了围岩分级中信息丢失[18];其中,D-S 证据理论是处理不确定性问题与多源信息融合的一种有效数学工具,文献[19]提出了基于组合赋权 - D-S 证据理论的风险评估方法,实现了多指标复杂系统的可信度分析。

综上所述,岩体质量分级评价方法已形成了较多研究成果,但对融合多源信息的岩体质量分级可信度评估方法的探讨仍缺乏较为系统、全面的研究。针对 RMR 法、Q 系统法及 BQ 法三种分级方法存在分级结果不一致的问题,本文提出了一种基于层次分析法(AHP)、模糊综合评价(FCE)与 D-S 证据理论的岩体质量分级可信度评估方法。本文以贵州政立矿业有限公司平安磷矿二矿(简称平安磷矿二矿)785 ~ 844 m 中段为例,开展了岩体质量分级可信度评估,得到了基于多源信息融合的量化分级结果,有效提升了分级准确性和工程适用性,可为复杂地质条件下的岩体质量分级提供依据。

1　岩体质量分级评价指标体系

根据《岩石力学》[20]中描述的岩体质量分级方法,选择 RMR 法、Q 系统法及 BQ 法三种分级方法为本文研究对象,运用区间分段法划分参数等级临界值。

RMR 法是一种定量、定性相结合的综合分类法,岩体质量评分值 RMR 计算式为:

$$\mathrm{RMR} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \tag{1}$$

式中:R_1 为单轴抗压强度,MPa;R_2 为 RQD 值,%;R_3 为结构面间距,m;R_4 为结构面状态;R_5 为地下水状况,L/min;R_6 为不连续结构面走向修正系数。

RMR 法参数等级临界值如表 1 所示,R_6 参数等级评价标准如表 2 所示。

表 1　RMR 法参数等级临界值

Table 1　Grading thresholds for RMR parameters

等级	分级参数				
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Ⅰ	500	100	4.00	1	0
Ⅱ	250	90	2.00	3	10
Ⅲ	100	75	0.60	10	25
Ⅳ	50	50	0.20	20	125
Ⅴ	25	25	0.06	40	250

表 2　R_6 参数等级评价标准

Table 2　Grading evaluation criteria for R_6

走向与巷道倾向	评分值
非常有利	0
有利	−2
一般	−5
不利	−10
非常不利	−12

Q 系统法通过量化岩体结构和环境特征的六大参数综合评价岩体质量,Q 值计算式为:

$$Q = \frac{\mathrm{RQD}}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{\mathrm{SRF}} \tag{2}$$

式中:RQD 为岩石质量指标,%;J_n 为节理组数;J_r 为最脆弱的节理粗糙度系数;J_a 为最脆弱的节理面蚀变或充填状况;J_w 为裂隙水折减系数;SRF 为地应力折减系数。

Q 系统法参数等级临界值如表 3 所示。

BQ 法是《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)[21]中定义的岩体质量分级指标,[BQ]值的计算式为:

$$[BQ] = 100 + 3R_c + 250K_v - 100(K_1 + K_2 + K_3) \quad (3)$$

式中:R_c 为单轴抗压强度,MPa;K_v 为岩体完整性系数,由岩体体积节理数 J_v 计算,$K_v = 1-0.003J_v$;K_1、K_2、K_3 分别为地下水、软弱结构面及地应力状态对岩体基本质量的影响系数,若不考虑上述因素影响,则 K_1、K_2、K_3 为 0。

表 3 Q 系统法参数等级临界值

Table 3 Grading thresholds for Q-system parameters

等级	分级参数					
	RQD/%	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF
Ⅰ	100	1	4.0	0.75	1.00	1.0
Ⅱ	90	2	3.0	1.00	0.66	2.5
Ⅲ	75	4	2.0	3.00	0.50	5.0
Ⅳ	50	9	1.5	8.00	0.33	10.0
Ⅴ	25	20	0.5	20.00	0.20	20.0

BQ 法参数等级临界值如表 4 所示。

表 4 BQ 法参数等级临界值

Table 4 Grading thresholds for BQ parameters

等级	分级参数		
	J_v	K_v	R_c
Ⅰ	3	1.00	500
Ⅱ	10	0.75	250
Ⅲ	20	0.55	100
Ⅳ	35	0.35	50
Ⅴ	55	0.15	25

根据参数评分标准进行岩体质量判定,其中,岩体质量共分为 5 个等级,岩体分级标准如表 5 所示。

表 5 岩体分级标准

Table 5 Rock mass classification standards

等级	RMR 值	Q 值	BQ 值	评价
Ⅰ	100~81	>40	>550	很好
Ⅱ	80~61	10~40	550~450	好
Ⅲ	60~41	1~10	450~351	一般
Ⅳ	40~21	0.1~1	350~251	较差
Ⅴ	≤20	<0.1	<250	非常差

2 岩体质量分级可信度评估框架

在复杂岩体质量分级过程中,RMR 法、Q 系统法、BQ 法因参数侧重点、评价体系及工程适用性存在差异,其分级结果的可信度也会受到影响。本文提出了一种岩体质量分级可信度评估框架,如图 1 所示。该框架通过多源信息融合的方式,提升岩体质量分级结果的准确性和可信度,能够有效解决信息不完整的问题,为后续的岩体质量分级与工程决策提供依据。

该可信度评估框架主要包括 AHP-FCE 模型评估、基于 D-S 证据理论的可信度加权模型评估两个阶段。各阶段均按照图 1 所示框架开展岩体质量分级结果的可信度评估,具体包括计算参数权重向量、确定参数隶属度、建立独立证据源、多源信息融合等核心环节。此外,本文引入了可信度加权模型修正原始证据,提高岩体质量分级结果可信度,并经 Pignistic 概率转换为可支持决策的概率分布,根据评估准则进行岩体质量分级,便于地下工程设计的岩体质量识别与工程方案判断。

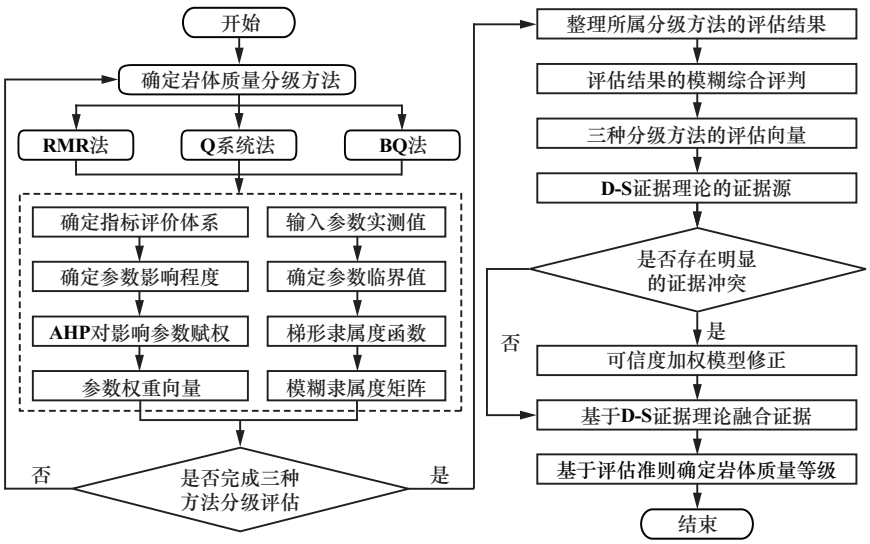


图 1 可信度评估框架

Fig. 1 Framework for credibility assessment

2.1　AHP-FCE 模型的基本框架

1) 在确定指标评价体系的基础上,采用 AHP 对分级方法的所有参数进行两两重要性比较。根据 Saaty 标度法(见表 6)构建判断矩阵,采用几何平均法确定各参数权重向量 $\boldsymbol{W}$,并求解最大特征根 λ_{max}。为保证权重分配的科学性,需对判断矩阵进行一致性检验,要求随机一致性比率 CR<0.1,不满足时需调整判断矩阵直至符合一致性条件,RI 取值见表 7[22]。

表 6　指标之间比较量化值规定

Table 6　Specifications for quantitative comparison values among indicators

量化值	参数 i 比参数 j
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	强烈重要
9	极端重要
2,4,6,8	两相邻判断的中间值

表 7　RI 随机一致性指标

Table 7　RI random consistency indices

n	RI
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36
8	1.41
9	1.46
10	1.49
11	1.52
12	1.54
13	1.56
14	1.58

2) 综合 RMR 法考虑 $R_1 \sim R_5$ 5 个参数,Q 系统法考虑 RQD、J_n、J_r、J_a、J_w、SRF 6 个参数,BQ 法考虑 J_v、K_v、R_c 3 个参数的需求,构建 3 种分级方法的因素集与等级评价集,单个因素评价集为 $\boldsymbol{A}_i=(A_{i1},A_{i2},A_{i3},A_{i4},A_{i5})$,等级评价集为 $\boldsymbol{U}_i=(U_1,U_2,U_3,U_4,U_5)$。而岩体质量分级方法参数具有动态性,参数与岩体级别的对应关系具有模糊性,本文将通过梯形隶属度函数将岩体质量参数进行量化表征。岩体质量分级参数 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 在 5 个岩体质量等级下的隶属度计算公式[23]为:

$$A_{i1}=\begin{cases}1 & x_i>U_1\\ \dfrac{x_i-U_2}{U_1-U_2} & U_1\geqslant x_i>U_2\\ 0 & x_i\leqslant U_2\end{cases} \tag{4}$$

$$A_{i2}=\begin{cases}0 & x_i>U_1 \text{ 或 } x_i\leqslant U_3\\ \dfrac{U_1-x_i}{U_1-U_2} & U_1\geqslant x_i>U_2\\ \dfrac{x_i-U_3}{U_2-U_3} & U_2\geqslant x_i>U_3\end{cases} \tag{5}$$

$$A_{i3}=\begin{cases}0 & x_i>U_2 \text{ 或 } x_i\leqslant U_4\\ \dfrac{U_2-x_i}{U_2-U_3} & U_2\geqslant x_i>U_3\\ \dfrac{x_i-U_4}{U_3-U_4} & U_3\geqslant x_i>U_4\end{cases} \tag{6}$$

$$A_{i4}=\begin{cases}0 & x_i>U_3 \text{ 或 } x_i\leqslant U_5\\ \dfrac{U_3-x_i}{U_3-U_4} & U_3\geqslant x_i>U_4\\ \dfrac{x_i-U_5}{U_4-U_5} & U_4\geqslant x_i>U_5\end{cases} \tag{7}$$

$$A_{i5}=\begin{cases}0 & x_i>U_4\\ \dfrac{U_4-x_i}{U_4-U_5} & U_4\geqslant x_i>U_5\\ 1 & x_i\leqslant U_5\end{cases} \tag{8}$$

式中:x_i为专家评分或现场实测参数值;U_1、U_2、U_3、U_4、U_5 为各分级方法参数在 5 个岩体等级的临界值,见表 1、表 3、表 4。把实际参数测量值代入公式(4)~(8),计算得到由 n 个影响参数组成的隶属度矩阵 $\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & \cdots & A_{1n}\\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & \cdots & A_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots\\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & \cdots & A_{5n}\end{bmatrix}_{5\times n} \tag{9}$$

采用 AHP 得到 3 种分级方法的权重向量 $\boldsymbol{W}$,结合模糊关系矩阵 $\boldsymbol{A}$,运用加权平均型模糊算子进行合成运算,得到综合隶属度的结果向量 $\boldsymbol{B}$[24]:

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}=[W_1\ W_2\cdots W_5]^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & \cdots & A_{1n}\\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & \cdots & A_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots\\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & \cdots & A_{5n}\end{bmatrix}$$
$$=(b_1,b_2,b_3,b_4,b_5) \tag{10}$$

式中 b_i表示分级参数对评价等级 U_i的综合隶属度。

2.2　D-S 证据理论的基本框架

采用 D-S 证据理论处理岩体质量分级中的不确定

性问题,具体过程[25]如下。

1) 首先构建识别框架,明确决策问题所有可能的互斥基本结果。对于岩体质量分级问题,则辨识框架 $\boldsymbol{\Theta}=\{\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5\}$(其中 $\theta_1\sim\theta_5$ 分别对应 5 个待决策的岩体质量等级)。

2) 构建识别框架中的各个子集 $\boldsymbol{B}_i$,作为 D-S 证据理论的证据 $m_i(\boldsymbol{B}_i)$。基于 AHP-FCE 模型构建各分级方法的基本概率分配(BPA)函数,即 3 种岩体质量分级方法得到的评估向量 $\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_2$、$\boldsymbol{B}_3$ 可作为 3 个独立证据 $m_1(\boldsymbol{B}_1)$、$m_2(\boldsymbol{B}_2)$、$m_3(\boldsymbol{B}_3)$。

3) 按 D-S 证据理论的合成规则融合多源信息,得到 $m(\boldsymbol{B})$。采用 D-S 证据理论中的经典 Dempster 融合规则,对任意 2 个独立的证据 $m_1(\boldsymbol{B}_1)$ 与 $m_2(\boldsymbol{B}_2)$ 进行融合得到 $m_{12}(\boldsymbol{B})$,再对 $m_{12}(\boldsymbol{B})$ 与 $m_3(\boldsymbol{B}_3)$ 进行融合,得到组合后的 BPA 函数 $m_{ij}(\boldsymbol{B})$,其定义为:

$$m_{ij}(\boldsymbol{B})=\begin{cases}\dfrac{\sum_{\boldsymbol{B}_i\cap\boldsymbol{B}_j=\boldsymbol{B}}m_i(\boldsymbol{B}_i)\cdot m_j(\boldsymbol{B}_j)}{1-K} & \boldsymbol{B}\neq\varnothing\\ 0 & \boldsymbol{B}=\varnothing\end{cases} \tag{11}$$

式中:K 为冲突系数,$K=\sum_{\boldsymbol{B}_i\cap\boldsymbol{B}_j=\varnothing}m_i(\boldsymbol{B}_i)m_j(\boldsymbol{B}_j)$,用于量化 m_i 和 m_j 之间的冲突程度,$K\geqslant 0.7$ 时,认为证据之间存在高冲突的情况;$\boldsymbol{B}_i$、$\boldsymbol{B}_j$ 均为辨识框架 $\boldsymbol{\Theta}$ 上的焦元。

2.3 可信度加权模型的基本框架

在多源信息融合过程中,不同证据之间往往存在一定程度的冲突,而高冲突证据易导致融合结果偏离实际,甚至做出错误决策,本文引入可信度加权模型修正原始证据[26]。

采用 Jousselme 距离计算任意 2 个证据 m_i 与 m_j 的冲突系数 K_{ij}:

$$K(m_1,m_2)=1-\frac{c(m_1,m_2)}{\sqrt{c(m_1,m_1)c(m_2,m_2)}} \tag{12}$$

式中 $c(m_1,m_2)$ 表示 m_1 与 m_2 之间的相关程度,$c(m_1,m_2)=\sum_{\boldsymbol{B}_i\in\Theta}\sum_{\boldsymbol{B}_j\in\Theta}m_1(\boldsymbol{B}_i)m_2(\boldsymbol{B}_j)\dfrac{|\boldsymbol{B}_i\cap\boldsymbol{B}_j|}{|\boldsymbol{B}_i\cup\boldsymbol{B}_j|}$,$|\cdot|$ 表示集合的基数。

将冲突系数 K_{ij} 转化为证据间的关联系数 r_{ij};构建关联矩阵 $\boldsymbol{S}$:

$$\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n}\\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn}\end{pmatrix} \tag{13}$$

式中:n 为证据总数;$r_{ij}=1-K_{ij}$,r_{ij} 越大,表明证据 m_i 与 m_j 的关联性越强,冲突越小,证据自身完全关联时 $r_{ii}=1$。

基于关联矩阵 $\boldsymbol{S}$,计算每个证据 m_i 的全局可信度 C_i(即权重):

$$C_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}r_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}r_{ij}} \tag{14}$$

式中:分子为证据 m_i 与所有其他证据的关联系数之和,反映其在证据集中的整体关联程度;分母为关联矩阵所有元素之和,用于权重归一化,确保 $\sum_{i=1}^{n}C_i=1$。

利用可信度权重 C_i 对原始证据 $m_i(\boldsymbol{B}_i)$ 进行修正,得到修正后的 m_i':

$$m_i'(\boldsymbol{B}_i)=\sum_{i=1}^{n}C_i m_i(\boldsymbol{B}_i) \tag{15}$$

将修正后的 m_i' 代入式(11)进行二次融合,可降低证据冲突,增强融合结果的鲁棒性。

3 工程实例验证

以平安磷矿二矿为研究工程背景,该矿山采用分段房柱采矿法,矿岩岩性主要由砂岩、磷矿层、含磷砾岩、白云岩和泥质页岩等构成,矿区岩体节理发育,局部地段岩体较为破碎,矿岩成分相对简单,普氏系数 $f=4\sim7$,属于不稳固至中等稳固岩层。在进路巷道选取 16 个测点,分别采用 RMR 法、Q 系统法和 BQ 法开展分级,再采用本文可信度模型框架进行岩体质量分级。

3.1 现场实测数据及单一方法分级结果

将开挖前现场观测、地球物理勘探、钻孔测井、现场试验和室内试验等实际参数测量值(见表 8~10)代入 RMR 法、Q 系统法和 BQ 法评价指标体系中[见式(1)~(3)],根据参数评分标准对 16 个测点进行岩体质量分级。其中,K_1 取值为 0.1;K_2 按照实际调查结果,取值范围为 0~0.2,取平均值 0.1(倾角普遍较大,且走向与洞轴线夹角大于 60°);K_3 取值为 0.3,得到[BQ]值。

单一岩体质量分级方法的分级结果常存在差异,如 785-1 测点采用 RMR 法、Q 系统法、BQ 法分别得到Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅲ级的不同结果。为实现岩体质量多源信息融合,获得一个综合考虑多种分级方法参数的岩体质量分级结果,需对其分级结果进行两两拟合分析,如图 2 所示。

表 8　RMR 法分级结果

Table 8　Classification results by RMR system

测点编号	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	RMR 值	等级	描述
785-1	67(7)	60(13)	0.13(8)	6.7(20)	21(7)	-5	50	Ⅲ	一般
805-1	73(7)	70(13)	0.16(8)	7.3(20)	23(7)	-2	53	Ⅲ	一般
824-1	42(4)	48(8)	0.02(5)	6.8(20)	38(4)	-5	36	Ⅳ	较差
844-1	64(7)	46(8)	0.15(8)	7.8(20)	18(7)	-5	45	Ⅲ	一般
785-2	38(4)	53(13)	0.04(5)	14.1(10)	35(4)	-2	34	Ⅳ	较差
805-2	57(7)	74(13)	0.11(8)	6.2(20)	28(4)	-5	47	Ⅲ	一般
824-2	53(7)	64(13)	0.02(5)	5.7(20)	27(4)	-5	44	Ⅲ	一般
844-2	57(7)	40(8)	0.03(5)	9.1(20)	29(4)	-2	42	Ⅲ	一般
785-3	79(7)	73(13)	0.17(8)	2.1(25)	24(7)	-2	58	Ⅲ	一般
805-3	68(7)	68(13)	0.12(8)	2.3(25)	27(4)	-5	52	Ⅲ	一般
824-3	57(7)	47(8)	0.04(5)	8.9(20)	37(4)	-2	43	Ⅲ	一般
844-3	48(4)	43(8)	0.02(5)	8.4(20)	21(7)	-5	39	Ⅳ	较差
785-4	52(7)	62(13)	0.04(5)	8.6(20)	31(4)	0	49	Ⅲ	一般
805-4	74(7)	74(13)	0.05(5)	4.8(25)	19(7)	-2	55	Ⅲ	一般
824-4	72(7)	45(8)	0.13(8)	9.5(20)	20(7)	-2	48	Ⅲ	一般
844-4	79(7)	71(13)	0.18(8)	2.1(25)	26(4)	0	57	Ⅲ	一般

注:编号 785-1 表示 785 中段的第 1 个测量点,下同;括号内数字为该参数的评分值。

表 9　Q 系统法分级结果

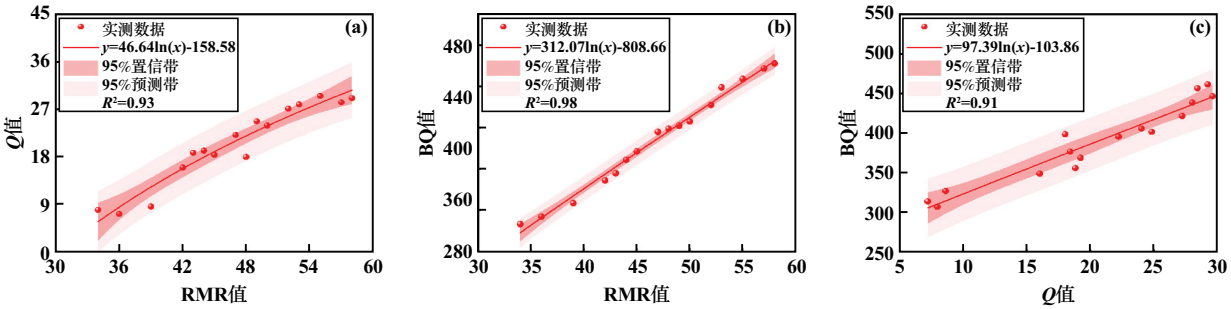
Table 9　Classification results by Q-system

测点编号	RQD/%	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q 值	等级	质量描述
785-1	60	3	3.0	1	1	2.5	24.00	Ⅱ	好
805-1	70	3	3.0	1	1	2.5	28.00	Ⅱ	好
824-1	48	4	1.5	1	1	2.5	7.20	Ⅲ	一般
844-1	46	3	3.0	1	1	2.5	18.40	Ⅱ	好
785-2	53	4	1.5	1	1	2.5	7.95	Ⅲ	一般
805-2	74	4	3.0	1	1	2.5	22.20	Ⅱ	好
824-2	64	4	3.0	1	1	2.5	19.20	Ⅱ	好
844-2	40	3	3.0	1	1	2.5	16.00	Ⅱ	好
785-3	73	3	3.0	1	1	2.5	29.20	Ⅱ	好
805-3	68	3	3.0	1	1	2.5	27.20	Ⅱ	好
824-3	47	3	3.0	1	1	2.5	18.80	Ⅱ	好
844-3	43	3	1.5	1	1	2.5	8.60	Ⅲ	一般
785-4	62	3	3.0	1	1	2.5	24.80	Ⅱ	好
805-4	74	3	3.0	1	1	2.5	29.60	Ⅱ	好
824-4	45	3	3.0	1	1	2.5	18.00	Ⅱ	好
844-4	71	3	3.0	1	1	2.5	28.40	Ⅱ	好

表 10　BQ 法分级结果

Table 10　Classification results by BQ system

测点编号	J_v/(条·m^{-3})	K_v	R_c/MPa	BQ 值	[BQ]值	等级	质量描述
785-1	16.67	0.42	67	406	356	Ⅲ	一般
805-1	13.64	0.48	73	439	389	Ⅲ	一般
824-1	20.30	0.35	42	314	264	Ⅳ	较差
844-1	20.90	0.34	64	377	327	Ⅳ	较差
785-2	18.79	0.37	38	307	257	Ⅳ	较差
805-2	12.42	0.50	57	396	346	Ⅳ	较差
824-2	15.45	0.44	53	369	319	Ⅳ	较差
844-2	22.73	0.31	57	349	299	Ⅳ	较差
785-3	12.73	0.50	79	462	412	Ⅲ	一般
805-3	14.24	0.47	68	422	372	Ⅲ	一般
824-3	20.61	0.34	57	356	306	Ⅳ	较差
844-3	21.82	0.33	48	327	277	Ⅳ	较差
785-4	16.06	0.43	52	402	352	Ⅲ	一般
805-4	12.42	0.50	74	447	397	Ⅲ	一般
824-4	21.21	0.33	72	399	349	Ⅳ	较差
844-4	13.33	0.48	79	457	407	Ⅲ	一般



(a) Q 值与 RMR 值相关关系;(b) BQ 值与 RMR 值相关关系;(c) BQ 值与 Q 值相关关系

图 2　3 种方法两两拟合曲线图

Fig. 2　Pairwise fitting curves of three methods

两两岩体质量评价结果具有对数函数拟合特征，决定系数 R^2 分别为 0.93、0.98 和 0.91，表明 3 种岩体质量分级体系具有同源相关性，其参数数据可作为多源独立证据体，此处独立是指证据来源/评价体系独立，而非统计独立。

3.2 多源证据融合与冲突系数优化

以 785-1 测点为例进行多源证据融合，按 AHP 的权重计算步骤，结合表 1、表 3、表 4 计算各方法评价指标判断矩阵并进行一致性检验，结果见表 11～13。

表 11 RMR 法评价指标判断矩阵及一致性检验

Table 11 Judgment matrix and consistency test for evaluation indicators of RMR system

指标	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	W	一致性检验
R_1	1	1/4	1/2	1/6	2	0.070	
R_2	4	1	3	1/4	5	0.286	
R_3	2	1/3	1	1/5	4	0.157	$\lambda_{max}\approx5.083$; CR≈0.019<0.1
R_4	6	4	5	1	8	0.462	
R_5	1/2	1/5	1/4	1/8	1	0.025	

表 12 Q 系统法评价指标判断矩阵及一致性检验

Table 12 Judgment matrix and consistency test for evaluation indicators of Q-system

指标	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	W	一致性检验
RQD	1	1/2	1/3	1/2	3	2	0.125	
J_n	2	1	1/2	1/3	4	3	0.158	
J_r	3	2	1	1/2	5	4	0.269	$\lambda_{max}\approx6.040$; CR≈0.006<0.1
J_a	2	3	2	1	4	3	0.321	
J_w	1/3	1/4	1/5	1/4	1	1/2	0.050	
SRF	1/2	1/3	1/4	1/3	2	1	0.077	

表 13 BQ 法评价指标判断矩阵及一致性检验

Table 13 Judgment matrix and consistency test for evaluation indicators of BQ system

指标	R_c	J_v	K_v	W	一致性检验
R_c	1	2	1/2	0.297	
J_v	1/2	1	1/3	0.163	$\lambda_{max}\approx3.008$; CR≈0.008<0.1
K_v	2	3	1	0.540	

根据表 1、表 3、表 4 确定岩体质量分级参数的分级临界值，并根据式(4)～(10)，计算得到 RMR 法、Q 系统法、BQ 法的隶属度矩阵 $\boldsymbol{A}_i$：

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0\\0&0&0&0.47&0.27\\0.34&0.4&0&0.53&0.73\\0.66&0.6&0.5&0&0\\0&0&0.5&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}0&0&0&0&1&0\\0&0.5&1&1&0&1\\0.4&0.5&0&0&0&0\\0.6&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_3=\begin{bmatrix}0&0&0\\0.33&0&0\\0.67&0.35&0.34\\0&0.65&0.66\\0&0&0\end{bmatrix}$$

根据模糊综合评判结果进行计算，得到各方法的评估向量分别为：

$$\boldsymbol{B}_1=(0,0.224\,5,0.400\,7,0.296\,3,0.078\,5)$$

$$\boldsymbol{B}_2=(0.05,0.746\,0,0.129\,0,0.075\,0,0)$$

$$\boldsymbol{B}_3=(0,0.098\,9,0.438\,7,0.462\,4,0)$$

通过相应模型计算流程获得其他测点的 3 个评估向量，并运用可信度加权模型进行可信度评估，由于岩体质量等级判定是决策问题，可用 Pignistic 概率函数 BetP 将 BPA 转化为概率值，为岩体质量等级提供定量化决策，BetP 计算公式为：

$$\mathrm{BetP}(\theta_i)=\sum_{\theta_i\in\theta}\frac{m(A)}{|A|}\tag{16}$$

式中 $|A|$ 表示焦元 A 的基数[27]。

采用可信度加权模型对 16 组测点的原始证据进行修正，并比较修正前后的冲突系数，结果如图 3 所示。修正后的所有测点冲突系数降至 0.01 以下，增强了岩体质量分级结果的可信度。根据式(11)～(16)计算 16 个测点的岩体质量分级结果，见表 14。

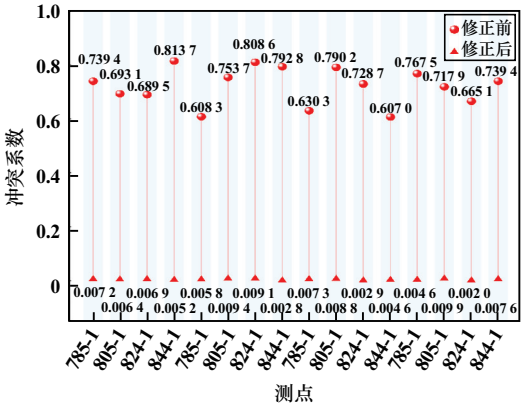


图 3 冲突系数修正前后对比图

Fig. 3 Comparison of conflict coefficient before and after correction

4 MATLAB 可视化计算平台开发及工程应用

利用MATLAB GUIDE设计了岩体质量分级可信

表 14　岩体质量分级结果

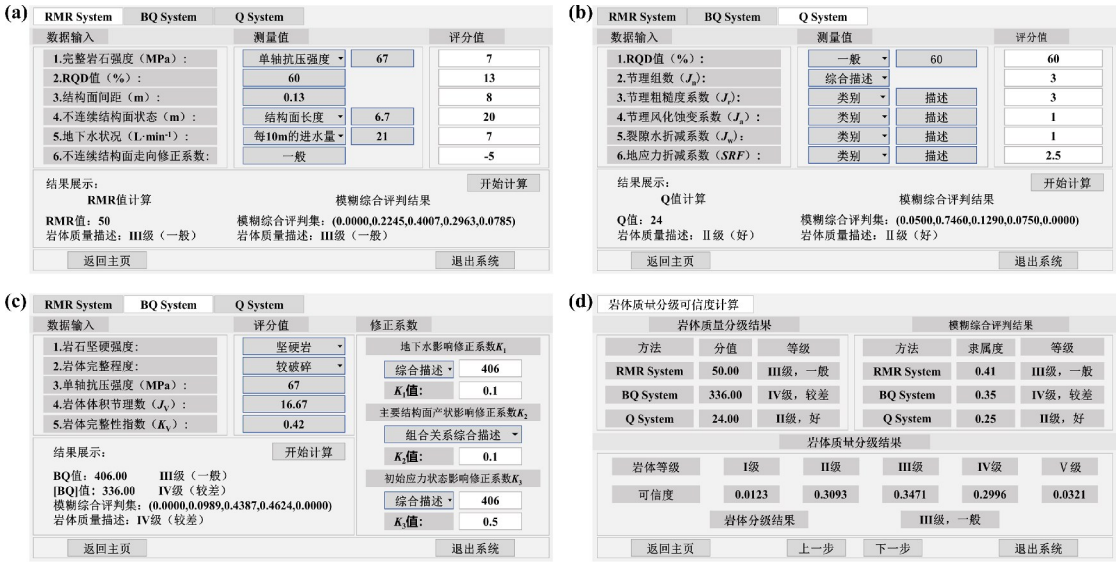
Table 14　Rock mass quality classification results

测点编号	BetP(θ_i)					
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	最终等级
785-1	0.012 3	0.309 3	0.347 0	0.299 2	0.032 1	Ⅲ
805-1	0.012 7	0.328 0	0.429 1	0.213 5	0.016 7	Ⅲ
824-1	0.015 9	0.202 3	0.242 0	0.408 3	0.131 4	Ⅳ
844-1	0.009 9	0.217 4	0.325 0	0.395 6	0.052 1	Ⅳ
785-2	0.014 5	0.127 8	0.265 7	0.432 1	0.159 9	Ⅳ
805-2	0.015 9	0.374 7	0.364 4	0.207 8	0.037 2	Ⅱ
824-2	0.015 4	0.357 9	0.294 8	0.269 8	0.062 1	Ⅱ
844-2	0.008 8	0.156 9	0.328 2	0.365 8	0.140 4	Ⅳ
785-3	0.093 6	0.388 4	0.344 1	0.161 1	0.012 8	Ⅱ
805-3	0.077 9	0.393 9	0.280 2	0.213 2	0.034 9	Ⅱ
824-3	0.008 8	0.163 2	0.337 1	0.402 2	0.088 7	Ⅳ
844-3	0.015 3	0.184 2	0.244 7	0.440 6	0.115 2	Ⅳ
785-4	0.012 1	0.260 1	0.337 9	0.329 6	0.060 2	Ⅲ
805-4	0.014 7	0.426 8	0.374 1	0.163 3	0.021 1	Ⅱ
824-4	0.007 3	0.126 7	0.432 8	0.363 2	0.070 0	Ⅲ
844-4	0.092 4	0.378 0	0.341 5	0.179 6	0.008 4	Ⅱ

度计算程序,为地下工程决策提供了具有实用性与交互性的分析工具。该程序包含两大模块:一是独立分析模块,支持 RMR 法、Q 系统法、BQ 法的独立计算与初步等级判定;二是对比分析模块,运用岩体质量可信度评估方法输出结果。

利用 785-1 测点的地质数据对该程序进行了测试,以验证程序的应用效果。用户可根据实测数据输入参数,单一方法计算结果如图 4(a)~(c)所示,3 种分析方法的综合对比结果如图 4(d)所示。该程序降低了岩体分级对专业经验的依赖,提升了分级过程的透明度与可重复性,适用于现场快速评价与支护方案决策。

该程序的应用能提高支护方案决策的准确性,缩短支护方案决策所占用的掘进循环时间,加快开拓与采准巷道掘进速度,可信度评估方法与单一传统岩体质量分级方法的支护方案决策总用时对比如图 5 所示。



(a) RMR 法计算结果;(b) Q 系统法计算结果;(c) BQ 法计算结果;(d) 综合对比结果

图 4　岩体质量分级可信度计算程序

Fig. 4　Calculation program for credibility of rock mass quality classification

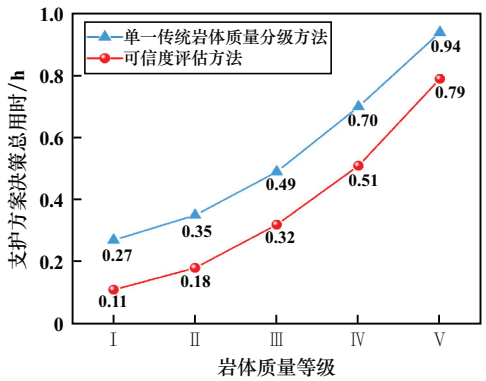


图 5　支护方案决策总用时对比

Fig. 5　Comparison of total decision-making time for support schemes

由图 5 可知,2 种方法的支护方案决策总用时均随岩体等级逐步递增,反映出岩体质量越差,支护方案比选与决策越复杂,施工难度及决策耗时相应增加。岩体质量为Ⅰ级、Ⅱ级时可简化或取消临时支护,直接进入钻孔爆破工序,显著提高掘进循环进尺效率,Ⅳ级岩体在使用单一传统岩体质量分级方法的支护方案决策总用时为0.7 h,使用本文提出的可信度评估方法的总用时为0.51 h,缩短了 0.19 h。可信度评估方法在各岩体质量等级中均能有效缩短支护方案决策总用时,尤其在Ⅳ级岩体中,效率提升最为明显。

现场调研 16 个测点的支护方案,其中,6 个测点顶板采用喷射混凝土支护,4 个测点顶板采用局部金

属网和喷射混凝土混合支护,6个测点顶板和两帮采用锚网和喷射混凝土支护,上述现场支护情况与本文方法所得的分级结果基本一致,验证了该方法的可靠性。本文方法通过融合多源信息,实现了岩体质量分级结果的量化,可降低单一分级方法带来的结果不确定性,具有更科学、全面的特点,现场调研结果见图6。



(a) Ⅱ级岩体支护方案;(b) Ⅲ级岩体支护方案;(c) Ⅳ级岩体支护方案

图6 现场调研结果

Fig.6 Field investigation results

5 结论

1) 通过整合AHP、模糊数学与多源信息融合技术,实现了岩体质量分级中参数模糊性处理、权重科学分配与证据冲突修正,形成了一套完整的岩体质量评价技术框架,有效解决了等级边界模糊性的问题。

2) 利用冲突系数构建可信度加权模型,对各原始证据进行修正,修正后16组数据的冲突系数降至0.01以下;最终岩体质量等级与现场实际支护方案吻合。该模型能有效降低多源证据冲突,提高分级结果的一致性。

3) 本文开发了岩体质量分级可信度计算程序,融合了岩体质量多源信息,提高了岩体质量等级判定的准确性。应用该程序后,岩体质量为Ⅰ级、Ⅱ级时可简化或取消临时支护,Ⅳ级岩体支护方案决策总用时缩短了0.19 h,该程序减少了工程决策对经验判断的依赖,提升了工程决策的科学性与可操作性。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] He P, Li Z K, Jiang F, et al. Quick and reliable approach for rating underground engineering rock mass based on RMR system[J]. Applied Geophysics, 2025,22(2):447-460.

[3] Mohammadi M. Development of an optimal experimental model for predicting rock mass rating based on tunneling quality index[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 140:104602.

[4] 凡奥奇,王万禄,李树建,等. 基于优化组合赋权的可拓学磷矿山岩体质量评价[J]. 黄金科学技术, 2024,32(1):132-143.
Fan Aoqi, Wang Wanlu, Li Shujian, et al. Evaluation of rock mass quality of phosphorite mines by topology based on optimal combination weight[J]. Gold Science and Technology, 2024,32(1):132-143.

[5] 刘震. 基于修正RMR分级法的金属矿山岩体稳定性分析[J]. 科技创新与应用, 2024,14(11):143-146.
Liu Zhen. Stability analysis of metal mine rock mass based on modified RMR classification method[J]. Technology Innovation and Application, 2024,14(11):143-146.

[6] 宋彦辉,冯满,巨广宏. 一种改进的岩体质量分级方法RMR_{Kv}[J]. 西北水电, 2022(6):39-44.
Song Yanhui, Feng Man, Ju Guanghong. An improved rock mass rating method RMR_{Kv}[J]. Northwest Hydropower, 2022(6):39-44.

[7] 张钦礼,李晓孟. 基于Mamdani FIS模型及RMR法的岩体质量分级研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):1-4.
Zhang Qinli, Li Xiaomeng. Rock mass quality classification based on Mamdani FIS model and RMR method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):1-4.

[8] 游淳淋,黄明清,丘浩禹. 基于多元数据归一化处理的破碎岩体质量分级[J]. 中国矿业, 2022,31(8):158-164.
You Chunlin, Huang Mingqing, Qiu Haoyu. Quality classification of broken rock mass based on normalization of multivariate data[J]. China Mining Magazine, 2022,31(8):158-164.

[9] Shi J F, Zhou Q, Pan C S. A credibility evaluation method for digital twin based on improved evidence theory[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2025,143:103152.

[10] RahimiZadeh K, Beheshti A, Javadi B, et al. An integrated queuing and certainty factor theory model for efficient edge computing in remote patient monitoring systems[J]. Scientific Reports, 2025,15:44973.

[11] 周恩帆,马俊,周永杰,等. 一种D-S证据理论的多传感器数据融合算法[J]. 小型微型计算机系统, 2022,43(4):795-800.
Zhou Enfan, Ma Jun, Zhou Yongjie, et al. Multi-sensor data fusion algorithm based on D-S evidence theory[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2022,43(4):795-800.

[12] 黄耀龙,林文聪,沈英豪,等. 基于模糊层次分析法的边坡稳定性

分析[J]. 莆田学院学报, 2024,31(5):84-90.
Huang Yaolong, Lin Wencong, Shen Yinghao, et al. Slope stability analysis based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Putian University, 2024,31(5):84-90.

[13] 冯焱玲. 基于多源异构信息融合的数据可信度评估方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022:44-63.
Feng Yanling. Research on data credibility evaluation method based on multi-source heterogeneous information fusion[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022:44-63.

[14] 沙鹏,赵逸文,高书宇,等. 隧道层状岩体质量评价的 BQ 分级改进[J]. 工程地质学报, 2020,28(5):942-950.
Sha Peng, Zhao Yiwen, Gao Shuyu, et al. Improvement of BQ classification for layered rock mass quality index in tunnel engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2020,28(5):942-950.

[15] 胡智文,李宇灏,詹文,等. 基于贝叶斯估计的 FTTR 网络 OBSS/PD 阈值动态优化方法[J]. 通信学报, 2025,46(增刊 1):110-120.
Hu Zhiwen, Li Yuhao, Zhan Wen, et al. Bayesian estimation-based dynamic optimization method of OBSS/PD thresholds for FTTR networks[J]. Journal on Communications, 2025,46(S1):110-120.

[16] 陈英,董思羽. 基于可信度小波神经网络的多传感器数据融合方法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2020,58(4):953-959.
Chen Ying, Dong Siyu. Fusion method based on credible wavelet neural network for multi-sensor data[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2020,58(4):953-959.

[17] 曹建立,韩智勇,任凤玉,等. 基于指标关联性的岩体质量分级集对云算法及其应用[J]. 中国矿业, 2020,29(11):190-197.
Cao Jianli, Han Zhiyong, Ren Fengyu, et al. Set pair cloud algorithm of rock mass quality classification based on index relevance and its application[J]. China Mining Magazine, 2020,29(11):190-197.

[18] 尹会永,赵涵,徐琳,等. 岩体质量分级的改进模糊综合评价法[J]. 金属矿山, 2020(7):53-58.
Yin Huiyong, Zhao Han, Xu Lin, et al. Classification of rock mass in mine based on improved fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Metal Mine, 2020(7):53-58.

[19] 陈宁,谢旺. 基于组合赋权-DS 证据理论的易流态化货物海运风险研究[J]. 安全与环境学报, 2022,22(2):623-633.
Chen Ning, Xie Wang. Research on risk of liquidity cargo shipping based on combined weighting-DS evidence theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2022,22(2):623-633.

[20] 吴顺川. 岩石力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2021.
Wu Shunchuan. Rock mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.

[21] GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S].
GB/T 50218—2014 Standard for engineering rock mass classification[S].

[22] 王游悬,沈伟升,华丽晶,等. 铁路隧道 BQ 法、Q 值法、RMR 法相互关系研究[J]. 铁道工程学报, 2024,41(8):79-85.
Wang Youxuan, Shen Weisheng, Hua Lijing, et al. Study on correlation between BQ method, Q value method and RMR method of railway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024,41(8):79-85.

[23] 李福佳,刘艳章,秦绍兵,等. 基于加权隶属度矩阵的岩体质量优化分级及支护研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024,6(2):52-61.
Li Fujia, Liu Yanzhang, Qin Shaobing, et al. Research on rock mass quality optimization classification and support based on weighted membership matrix[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024,6(2):52-61.

[24] 刘滨,朱兆文,冯连伟,等. 基于岩体可爆性分级的精细化爆破技术研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):37-43.
Liu Bin, Zhu Zhaowen, Feng Lianwei, et al. Precision blasting technology based on classification of rock mass blastability[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):37-43.

[25] 曹有勋,史卫平,刘志钧,等. 基于层次分析-模糊综合评判的煤矿企业风险评估研究[J]. 中国矿业, 2024,33(7):16-25.
Cao Youxun, Shi Weiping, Liu Zhijun, et al. Research on risk assessment of coal mine enterprises based on AHP-FCE method[J]. China Mining Magazine, 2024,33(7):16-25.

[26] Wu S L, Yang S, Du X D. A model for evaluation of surrounding rock stability based on D-S evidence theory and error-eliminating theory[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021,80(3):2237-2248.

[27] 马晓剑,李梦娜,王金凤. 基于 D-S 可信度加权模型的高密度脉冲噪声识别算法[J]. 传感技术学报, 2022,35(6):769-777.
Ma Xiaojian, Li Mengna, Wang Jinfeng. High-density impulse noise recognition algorithm based on D-S credibility weighted model[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022,35(6):769-777.

引用本文:徐晶,江成玉,赵梓安,等. 融合多源信息的岩体质量分级可信度评估方法[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):36-45.
Xu Jing, Jiang Chengyu, Zhao Zi'an, et al. A credibility evaluation method for rock mass quality classification integrating multi-source information[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):36-45.