基于组合赋权-二元语义的岩爆应急管理能力综合评价模型研究*

贺兵红

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:考虑到深井矿山巷道岩爆应急管理能力评估的模糊性和不确定性,建立了基于组合赋权-二元语义的综合决策分析模型。首先,以全过程危机管理(PPRR)理论为基础,遴选18个重要影响因素,构建岩爆应急管理能力的多层次评估体系;然后,利用区间层次分析法、二元语义熵权法相结合的方式确定指标综合权重,基于二元语义原理,合理处理决策者语言信息,通过计算综合评估值,综合判定应急管理能力等级;最后,应用所建立的综合决策模型,以某铜铁矿为例,进行岩爆应急管理能力水平综合分析。结果表明,该矿山岩爆应急管理能力综合加权平均评估值为0.169 4,属于"一般"等级,特别是对于应急预防和应急准备两个一级指标,其加权平均评估值分别为0.049 3和0.131 8,需进一步通过健全完善组织体系、加强隐患点排查、定期检查支护设施状态、加大生产措施费用投入等措施进行提升。研究结果为岩爆应急管理能力评价提供了新思路。

关键词:岩爆应急管理;二元语义;区间层次分析法;熵权法

中图分类号:TD32 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)11-0175-09

Research on Comprehensive Evaluation Model of Rockburst Emergency Management Capability Based on Combination Weighting and Two-Tuple Linguistic

HE Binghong

(MCC Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China)

Abstract: Considering the fuzziness and uncertainty of the evaluation of rockburst emergency management capability in deep mine roadway, a comprehensive decision analysis model based on combination weighting and two-tuple linguistic was established. Firstly, based on the PPRR theory, 18 important influencing factors were selected to construct a multi-level evaluation system for rockburst emergency management capability. Then, the comprehensive weight of the index was determined by the combination of interval analytic hierarchy process and two-tuple linguistic entropy weight method. Based on the principle of two-tuple linguistic, the language information of decision makers was reasonably processed, and the emergency management capability level was comprehensively determined by calculating the comprehensive evaluation value. Finally, using the established comprehensive decision-making model, taking a copper-iron mine as an example, the comprehensive analysis of the level of rockburst emergency management capability was carried out. The results show that the comprehensive weighted average evaluation value of the mine's rockburst emergency management capability is 0.169 4, which belongs to the "general" level. Especially for the two first-level indicators of emergency prevention and emergency preparedness, the weighted average evaluation values are 0.049 3 and 0.131 8, respectively. It is necessary to further improve them by improving the organizational system, strengthening the investigation of hidden danger points, regularly checking the status of supporting facilities, and increasing the input of production measures. The research results provide a new idea for the evaluation of rockburst emergency management capability.

Key words: Rockburst emergency management, Two-tuple linguistic, Interval analytic hierarchy process, Entropy weight method

0 引言

随着深部矿产资源开发向更复杂的地质条件推进,矿山巷道所处环境的复杂性显著加剧,在此背景下,由硬脆岩体内积聚的弹性应变能突发释放所引发的岩爆事故逐渐增多,并具有突发性、随机性,破坏程度大等显著特点[1-2],已成为当前巷道掘进中需要重点加强预防的灾害之一。面对这一现状,主动适应复杂环境变化的新常态、不断提升岩爆应急处置与管理能力,及时采取有效预防措施以降低岩爆

* **收稿日期**:2024-12-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFB2908800)

作者简介:贺兵红(1980—),男,湖北钟祥人,硕士,高级工程师,主要从事矿业设计与管理工作。E-mail:42950094@qq.com

事故损失,对保障矿山企业安全生产至关重要。因此,迫切需要科学开展深井矿山巷道岩爆应急管理能力评估,指导矿山安全、连续、高效开采。

在应急管理能力评估方面,姜昀岐等[3]利用AHP与DEMATEL相耦合的模型计算指标综合权重,引入云模型理论进行应急能力综合评估。向韫[4]基于岩爆应急管理能力评估所具有的模糊性、复杂性特点,建立了基于G1-EWM-CW法的岩爆应急管理可拓云模型,并引入了盲数理论处理定性指标数据,为应急管理能力的量化评估提供了新方法。谢振华等[5]考虑了应急管理能力评估指标因素之间的复杂性,基于ISM理论对应急管理评价体系进行去冗简化,并利用RS法获取指标权重,建立了简便实用的RS-可拓应急管理能力综合评价模型。高康雅等[6]以某煤矿为例,应用多级可拓评价法,综合评判矿山应急管理能力等级。SHI等[7]在构建煤矿企业应急管理能力评价体系的基础上,采用EWM法计算指标权重,基于样本数据训练,提升CNN神经模型预测精度,并获得了满意的应用效果,可为矿山应急管理提供理论指导。LIU等[8]基于神经网络算法,建立了高拟合度的煤矿安全应急管理动态评价模型。SUN等[9]基于熵权-可拓模型对煤矿应急管理协同能力进行定量评估,研究结果可为应急管理建设提供决策支持。岩爆应急处置与管理能力评估属于典型的具有模糊性特征的定性分析综合决策过程,分析发现现有的理论模型仍然存在一些问题,比如,在分析过程中,指标的客观数据难以获取,数据赋值具有一定的灰性和不确定性,无法真实、全面地反映工程实际情况。

二元语义理论在处理贫信息、模糊信息方面具有突出优势,该方法利用一组二元数组形式,实现定性评估与定量计算的相互转化,避免了专家主观定性决策语言信息的失真,使评价结果更加客观、合理[10-11]。程国柱等[12]提出了模糊理论、DEMATEL、二元语义相结合的高速公路应急演练评估模型。唐力等[13]将二元语义模型应用于高铁运输服务质量综合评价,通过实证分析检验了模型的实用性。成连华等[14]构建了装配式建筑施工应急管理二元语义模型,结果显示,评价结果能够有效反映客观情况。HU等[15]建立了高校火灾应急救援BWM-VIKOR-二元语义评估模型,为高校火灾应急救援提供了决策思路。因此,二元语义模型在准确处理语言信息、提高评估决策水平等方面取得了满意的应用效果。

鉴于此,本文将二元语义法应用到巷道岩爆应急管理能力评估中,在构建应急管理能力评价指标体系的基础上,应用区间层次分析法、二元语义熵权法计算指标综合权重,依托二元语义方法科学处理决策者语言信息,实现对巷道岩爆应急管理水平的综合评价与分析。

1 构建指标体系

深井矿山巷道岩爆灾害受到多方面因素的综合影响,具有突发性、复杂性、随机性和破坏性等显著特征。为构建较为系统、科学、完善的岩爆应急管理能力评估体系,首先,在中国知网中检索“矿山应急管理”等关键词,对已有的研究成果进行总结归纳,确定初步评估体系;然后,通过专家访谈方式征求应急管理专家的意见,反复分析和完善评估体系;最后,结合岩爆发生机理、国家相关法律法规规定,基于全过程危机管理(PPRR)理论,遴选了18个重要影响因素,构建指标体系,如图1所示。

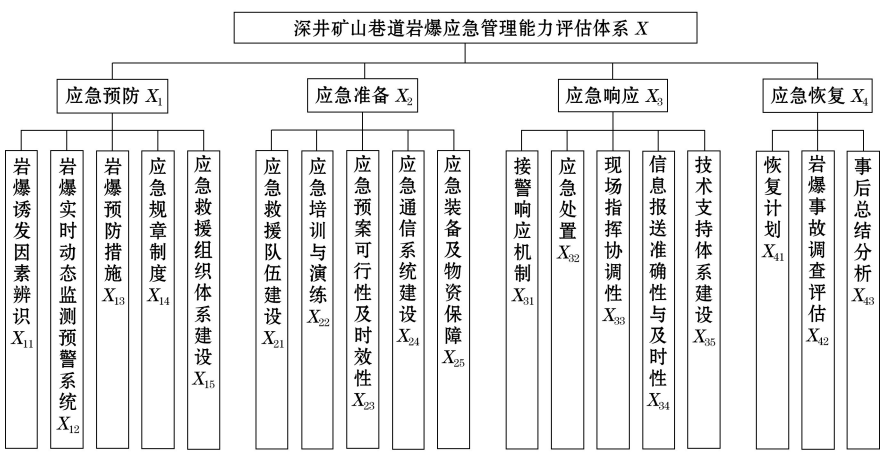


图1 指标体系

Fig.1 Indicator system

2 理论模型

2.1 二元语义基本原理

传统的评价模型主要由专家结合自身经验,根据工程实际和指标分级标准来确定指标决策数据。这种指标赋值模式无法客观、全面、准确地反映工程实际,可能导致定性评估结果失效。为此,应用二元语义模型,科学、全面地开展岩爆应急管理等级评价。

二元语义采用一个二元数组 $L=(s_k,\sigma_k)$,以语言短语和数值相结合的形式,分析和处理定性概念模糊评估信息数据,实现语言评价信息的量化与映射[16]。其中,评价语言短语集 $S=(s_0,s_1,\cdots,s_k)$ 表示由奇数个粒度评价语言组成的有序集合,σ_k 表示评价等级与语言信息集合 S 的偏差值,σ_k 取值范围为$[-0.5,0.5)$。具体定义如下[17]。

定义 1:评价语言短语集 S 可以用函数 θ 实现二元语义表达:

$$\begin{cases}\theta:S\to S\times[-0.5,0.5)\\ \theta(s_k)=(s_k,0),s_k\in S\end{cases}\tag{1}$$

定义 2:设实数 $\beta\in[0,g]$ 为评价语言短语集 S 经集成后的计算结果,其二元语义转化计算公式为:

$$\begin{cases}\Delta:[1-a^{\frac{n}{2}},a^{\frac{n}{2}}-1]\to S\times[-0.5,0.5)\\ \Delta(\beta)=(s_k,\sigma_k)=\begin{cases}s_k,k=\begin{cases}\dfrac{n}{2}+\mathrm{round}[\log_a(\beta+1)],\beta\geqslant 0\\ \dfrac{n}{2}-\mathrm{round}[\log_a(|\beta|+1)],\beta<0\end{cases}\\ \sigma_k=\begin{cases}\log_a(\beta+1)+\dfrac{n}{2}-k,\beta\geqslant 0\\ -\log_a(1-\beta)+\dfrac{n}{2}-k,\beta<0\end{cases}\\ \sigma_k\in[-0.5,0.5)\end{cases}\end{cases}\tag{2}$$

式中:round 表示四舍五入取整计算符号;a 为等级比充参数,取 $a=1.4$。

定义 3:设一组语义信息为(s_j,α_j),存在逆函数 Δ^{-1},可以将语义信息(s_k,σ_k) 转化为相应的实数 $\beta\in[0,g]$。

$$\begin{cases}\Delta^{-1}:S\times[-0.5,0.5)\to[1-a^{\frac{n}{2}},a^{\frac{n}{2}}-1]\\ \Delta^{-1}(s_k,\sigma_k)=\beta=\begin{cases}a^{(k+\sigma_k-\frac{n}{2})}-1,k+\sigma_k\geqslant\dfrac{n}{2}\\ -a^{(\frac{n}{2}-k-\sigma_k)}+1,k+\sigma_k<\dfrac{n}{2}\end{cases}\end{cases}\tag{3}$$

定义 4:一组二元语义集合的平均值 $\bar{\beta}$ 表示为:

$$\bar{\beta}=\frac{\sum_{k=1}^{m}\Delta^{-1}(s_k,\sigma_k)}{n}\tag{4}$$

那么,一组二元语义集合加权算术平均值 $\tilde{\beta}$ 可表示为:

$$\tilde{\beta}=\frac{\sum_{k=1}^{m}[\Delta^{-1}(w_k,\gamma_k)\times\Delta^{-1}(s_k,\sigma_k)]}{\sum_{k=1}^{m}\Delta^{-1}(w_k,\gamma_k)}\tag{5}$$

式中:w_k 表示第 k 个指标权重;γ_k 表示权重偏差值,$\gamma_k\in[-0.5,0.5)$。

定义 5:假设(s_y,σ_y) 和(s_z,σ_z) 分别表示任意两个二元语义信息,具有如下性质。

(1) 有序性。

当 $y>z$ 时,有$(s_y,\sigma_y)>(s_z,\sigma_z)$,即$(s_y,\sigma_y)$ 优于(s_z,σ_z);

当 $y=z$ 时,根据 σ_y 和 σ_z 大小关系,如果 $\sigma_y=\sigma_z$,则$(s_y,\sigma_y)=(s_z,\sigma_z)$,即$(s_y,\sigma_y)$ 与(s_z,σ_z)"旗鼓相当";如果 $\sigma_y>\sigma_z$,则(s_y,σ_y) 优于(s_z,σ_z);如果 $\sigma_y<\sigma_z$,则(s_y,σ_y) 劣于(s_z,σ_z);

当 $y<z$ 时,有$(s_y,\sigma_y)<(s_z,\sigma_z)$。

(2) 极大化、极小化运算。

当$(s_y,\sigma_y)>(s_z,\sigma_z)$ 时,

$$\max\{(s_y,\sigma_y),(s_z,\sigma_z)\}=(s_y,\sigma_y)\tag{6}$$

$$\min\{(s_y,\sigma_y),(s_z,\sigma_z)\}=(s_z,\sigma_z)\tag{7}$$

2.2 指标综合赋权

2.2.1 主观权重

层次分析法(AHP)是目前应用最广、操作性最强的主观赋权法。然而,考虑到深井矿山巷道岩爆应急管理能力评估体系的复杂性,在应用 AHP 法构建比较矩阵时,受专家主观认知局限性的影响,在指标之间的重要性判定方面可能存在犹豫性和盲目性,导致指标权重的主观性较强。区间层次分析法

是用区间数 $a_{ij}=[a_{ij}^{-},a_{ij}^{+}]$来反映指标因素之间的相对重要性程度,相对于传统的 AHP 法而言,其权重结果更加客观,也更符合实际[18-19]。该方法的操作步骤如图 2 所示。

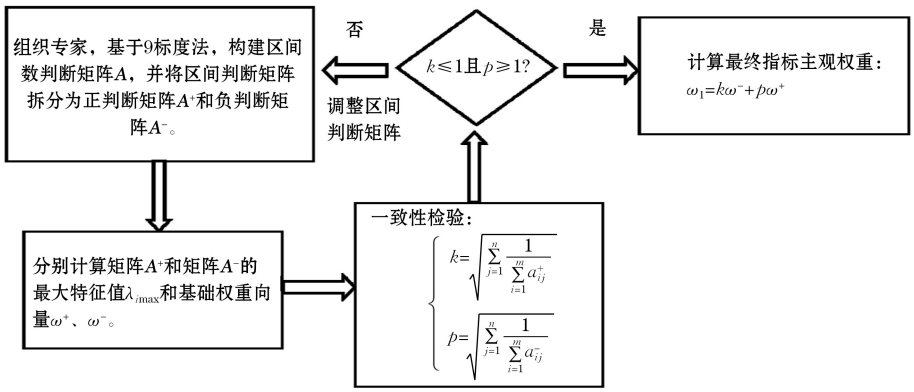


图 2 区间层次分析法计算过程

Fig.2 Calculation process of interval analytic hierarchy process

2.2.2 客观权重

假设选取了 n 个评价指标,组织 m 位专家,根据各位专家二元语义决策信息,构造初始评价矩阵 $\boldsymbol{S}'=(s_{ij},\sigma_{ij})$,对某深井矿山巷道岩爆应急管理能力进行综合分析评价。其中(s_{ij},σ_{ij})表示第 i 个专家对第 j 个指标的二元语义评价信息。熵权法计算步骤如下[20]。

(1) 确定指标正、负理想点。

根据指标属性特征和指标二元语义决策信息,确定各指标正、负理想点。

$$\begin{cases}(s^{+},\sigma^{+})=\max\{(s_{ij},\sigma_{ij})\}\\(s^{-},\sigma^{-})=\min\{(s_{ij},\sigma_{ij})\}\end{cases}\tag{8}$$

(2) 计算正、负理想点长度。

正、负理想点长度计算公式为:

$$\begin{cases}(d^{+},\sigma_{ij})=\Delta(|\Delta^{-1}(s^{+},\sigma^{+})-\Delta^{-1}(s_{ij},\sigma_{ij})|)\\(d^{-},\sigma_{ij})=\Delta(|\Delta^{-1}(s_{ij},\sigma_{ij})-\Delta^{-1}(s^{-},\sigma^{-})|)\end{cases}\tag{9}$$

式中,(d^{+},σ_{ij})、(d^{-},σ_{ij})分别表示指标正、负正理想点长度。

(3) 计算指标理想点贴近度。

按照式(10),计算各指标决策信息与正理想点的贴近度 γ_{ij},并对贴近度进行归一化处理。

$$\begin{cases}\gamma_{ij}=\dfrac{\Delta^{-1}(d^{+},\sigma_{ij})}{\Delta^{-1}(d^{+},\sigma_{ij})+\Delta^{-1}(d^{-},\sigma_{ij})}\\\gamma_{ij}^{*}=\gamma_{ij}/\sum\limits_{i=1}^{n}\gamma_{ij}\end{cases}\tag{10}$$

式中,γ_{ij}^{*} 为贴近度归一化值。

(4) 计算指标熵值 e_j 和权重 w_j^2。

熵值 e_j 计算公式为:

$$e_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}(\gamma_{ij}^{*}\ln\gamma_{ij}^{*})\tag{11}$$

根据熵值 e_j 计算结果,确定基于二元语义的指标熵权权重 w_j^2:

$$w_j^2=\frac{1-e_j}{\sum\limits_{j=1}^{n}(1-e_j)}\tag{12}$$

2.2.3 综合权重

用 α_i 表示指标主观权重,θ_i 表示指标客观权重,w_i 表示综合权重,f 表示信息熵,由最小熵原理可得:

$$\begin{cases}\min f=\sum\limits_{i=1}^{n}w_i(\ln w_i-\ln\alpha_i)+\sum\limits_{i=1}^{n}w_i(\ln w_i-\ln\theta_i),\\(i=1,2,3,\cdots,n)\\\text{s.t.}\sum\limits_{i=1}^{n}w_i=1,\quad w_i>0\end{cases}\tag{13}$$

基于 Lagrange 算法,计算综合权重 w_i 为:

$$w_i=\frac{\sqrt{\alpha_i\times\theta_i}}{\sum\limits_{i=1}^{m}\sqrt{\alpha_i\times\theta_i}}\tag{14}$$

2.3 确定岩爆应急管理能力等级

参考岩爆应急管理能力已有的、较为成熟的分级研究成果,结合工程实际,共分为 $s_0\sim s_4$5 个等级。根据公式(3),结合分级标准,确定各等级下二元语义转移数值区间。以某一指标专家决策信息为“一般”等级为例,相应的二元语义信息可以表示为(s_2,σ_k),根据二元语义模型原理,当σ_k 取值为−0.5 时,$\beta_1=-1.4^{(2-2+0.5)}+1=-0.183\ 2$,当 σ_k 取值为 0.5 时,$\beta_1=1.4^{(2+0.5-2)}-1=0.183\ 2$,因此,当深井矿

山巷道岩爆应急管理能力为“一般”等级时,其在二元语义模式下的转移数值区间为[-0.183 2,0.183 2)。同理,可求得其他等级下的转移数值区间。具体计算结果见表 1。

表 1 不同等级下二元语义信息转移数值区间

Table 1 Numerical intervals of two-tupyle linguistic information transfer under different levels

二元语义信息评价集合 S	相应评价等级	二元语义转移数值区间
s_0	VP(极差)	[-1.319 1,-0.656 5)
s_1	P(较差)	[-0.656 5,-0.183 2)
s_2	M(一般)	[-0.183 2,0.183 2)
s_3	G(较好)	[0.183 2,0.656 5)
s_4	VG(极好)	[0.656 5,1.319 1)

2.4 实现过程

(1) 组织岩爆安全管理领域的专家成立专家组,结合工程实际和岩爆应急管理能力等级,确定初始评价集,构造初始决策矩阵;

(2) 根据公式(1),把专家决策信息以二元语义的形式表达、集结;

(3) 根据公式(3),计算二元语义决策信息 β 值;

(4) 组织专家,结合区间层次分析法原理,计算指标主观权重,根据二元语义决策信息 β 值,计算指标客观权重,将主、客观权重耦合,获取指标综合权重;

(5) 根据公式(4)和公式(5),计算二元语义决策信息平均值 $\bar{\beta}$ 和加权算术平均值 $\tilde{\beta}$,并按照公式(2),将加权算术平均值 $\tilde{\beta}$ 转化为二元语义形式;

(6) 重复上述步骤,确定综合二元语义信息,对深井矿山巷道岩爆应急管理能力进行综合评估与分析,具体流程如图 3 所示。

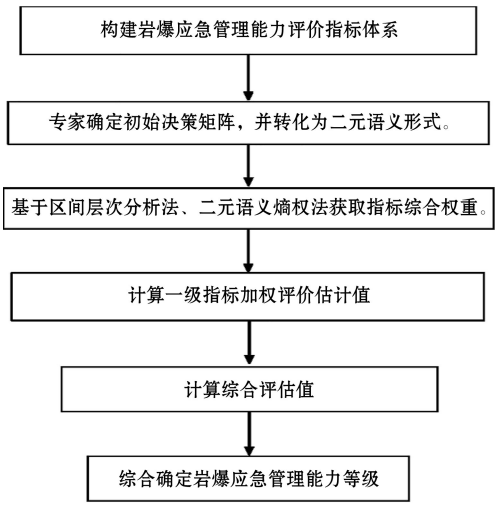


图 3 岩爆应急管理能力等级评价流程

Fig.3 Evaluation process of rock burst emergency management capability level

3 模型应用

为了验证组合赋权-二元语义模型在岩爆应急管理能力综合评价方面的适应性,本文以某铜铁矿为研究对象,通过相关计算,对岩爆应急管理水平进行综合分析。组织 5 位长期从事岩爆应急管理工作的专家(Z_1~Z_5)组成专家组,通过现场调研、收集矿山生产资料等,结合等级分类,确定各指标等级状态。

3.1 二元语义信息转化

根据公式(1),对专家初始决策信息进行二元语义形式转化,具体结果见表 2。

表 2 专家决策信息与二元语义表达形式

Table 2 Expert decision information and two-tuple linguistic expressions

评价指标	初始评价指标信息					决策信息的二元语义形式				
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
X_{11}	M	G	G	M	M	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)	(S_2,0)
X_{12}	G	G	M	G	G	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)
X_{13}	M	P	M	M	M	(S_2,0)	(S_1,0)	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_2,0)
X_{14}	P	M	M	P	M	(S_1,0)	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_1,0)	(S_2,0)
X_{15}	M	M	P	M	M	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_1,0)	(S_2,0)	(S_2,0)
X_{21}	M	M	M	M	G	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_3,0)
X_{22}	G	M	G	M	M	(S_3,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_2,0)	(S_2,0)
X_{23}	M	G	G	G	M	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)
X_{24}	M	G	VG	G	M	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)
X_{25}	M	M	P	P	M	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_1,0)	(S_1,0)	(S_2,0)
X_{31}	G	G	G	VG	G	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)
X_{32}	M	M	G	G	M	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)
X_{33}	M	M	G	G	M	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)
X_{34}	VG	G	M	G	G	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)
X_{35}	M	M	G	G	M	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_2,0)
X_{41}	M	M	G	G	G	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)
X_{42}	M	M	M	G	M	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_2,0)
X_{43}	M	G	G	G	G	(S_2,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)	(S_3,0)

3.2 确定指标组合权重

3.2.1 主观权重

以4个一级指标为例,专家组给定的区间数判断矩阵见表3。根据文献[18]和文献[19],计算正、负判断矩阵基础权重向量分别为(0.280 5,0.216 1,0.393 3,0.110 1)、(0.273 8,0.218 0,0.381 0,0.127 2),一致性系数分别为 $k=0.907\ 26<1$,$p=1.091\ 14>1$,符合一致性检验标准。对两组权重向量进行归一化处理,确定一级指标主观权重为 $w_1^*=(0.277\ 4,0.217\ 1,0.387\ 6,0.117\ 9)$。同理,确定二级指标主观权重,其中,"应急预防($X_1$)"的5个二级指标主观权重为 $w_{X_1}^1=(0.215\ 7,0.267\ 8,0.150\ 7,0.138\ 1,0.227\ 7)$,"应急准备($X_2$)"的5个二级指标主观权重为 $w_{X_2}^1=(0.219\ 3,0.278\ 9,0.182\ 7,0.149\ 6,0.169\ 5)$,"应急响应($X_3$)"的5个二级指标主观权重为 $w_{X_3}^1=(0.293\ 1,0.246\ 5,0.148\ 7,0.129\ 4,0.182\ 3)$,"应急恢复($X_4$)"的3个二级指标主观权重为 $w_{X_4}^1=(0.397\ 4,0.323\ 7,0.278\ 9)$。最终,指标层主观权重为(0.059 8,0.074 3,0.041 8,0.038 3,0.063 2,0.047 6,0.060 6,0.039 7,0.032 5,0.036 8,0.113 6,0.095 5,0.057 6,0.050 2,0.070 7,0.046 9,0.038 2,0.032 9)。

表3 一级指标主观权重

Table 3 Subjective weights of primary indicators

判断矩阵	评价指标	X_1	X_2	X_3	X_4	权重信息
判断矩阵 $\boldsymbol{A}$	X_1	[1,1]	[1,1.5]	[0.5,1]	[2,3]	0.277 4
	X_2	[0.667,1]	[1,1]	[0.4,0.8]	[1.5,2]	0.217 1
	X_3	[1,2]	[1.25,2.5]	[1,1]	[3,3.5]	0.387 6
	X_4	[0.333,0.5]	[0.5,0.667]	[0.287,0.333]	[1,1]	0.117 9
正判断矩阵 $\boldsymbol{A}^+$	X_1	1	1.5	1	3	0.280 5
	X_2	1	1	0.8	2	0.216 1
	X_3	2	2.5	1	3.5	0.393 3
	X_4	0.5	0.667	0.333	1	0.110 1
负判断矩阵 $\boldsymbol{A}^-$	X_1	1	1	0.5	2	0.273 8
	X_2	0.667	1	0.4	1.5	0.218 0
	X_3	1	1.25	1	3	0.381 0
	X_4	0.333	0.5	0.287	1	0.127 2

3.2.2 客观权重

根据二元语义信息 β 值,按照公式(8)至公式(12),确定各指标正、负理想点,计算正、负理想解长度和贴近度,根据公式(11)至公式(12),计算指标熵值 $e_j=(0.744\ 7,0.903\ 8,0.921\ 1,0.826\ 3,0.903\ 8,0.651\ 2,0.737\ 4\ ,0.846\ 7,0.712\ 8,0.801\ 7,0.671\ 6,0.767\ 8,0.767\ 8,0.710\ 9,0.767\ 8,0.849\ 4,0.671\ 6,0.928\ 3)$,由此可得,"应急预防($X_1$)"的5个二级指标客观权重为 $w_{X_1}^2=(0.173\ 2,0.210\ 2,0.214\ 2,0.192\ 2,0.210\ 2)$,"应急准备($X_2$)"的5个二级指标客观权重为 $w_{X_2}^2=(0.173\ 6,0.196\ 6,0.225\ 8,0.190\ 1,0.213\ 8)$,"应急响应($X_3$)"的5个二级指标客观权重为 $w_{X_3}^2=(0.182\ 2,0.208\ 3,0.208\ 3,0.192\ 9,0.208\ 3)$,"应急恢复($X_4$)"的3个二级指标客观权重为 $w_{X_4}^2=(0.346\ 7,0.274\ 2,0.379\ 0)$。相应的指标层客观权重为(0.052 5,0.063 7,0.064 9,0.058 2,0.063 7,0.045 9,0.052 0,0.059 7,0.050 3,0.056 5,0.047 3,0.054 1,0.054 1,0.050 1,0.054 1,0.059 9,0.047 3,0.065 4),一级指标客观权重为 $w_2^*=(0.303\ 1,0.264\ 4,0.259\ 8,0.172\ 7)$。

3.2.3 组合权重

根据公式(13)至公式(14),获取综合权重。其中,一级指标综合权重为 $w^*=(0.293\ 4,0.242\ 4,0.319\ 5,0.144\ 7)$,其他各级指标权重具体计算结果见表4。

表4 指标综合权重

Table 4 Comprehensive weight of indicators

一级指标	一级指标权重			二级指标	二级指标权重			综合排序
	主观权重	客观权重	综合权重		主观权重	客观权重	综合权重	
X_1	0.277 4	0.303 1	0.293 4	X_{11}	0.059 8	0.052 5	0.057 2	6
				X_{12}	0.074 3	0.063 7	0.070 2	3
				X_{13}	0.041 8	0.064 9	0.053 2	9
				X_{14}	0.038 3	0.058 2	0.048 2	13
				X_{15}	0.063 2	0.063 7	0.064 7	4

续表

一级指标	一级指标权重			二级指标	二级指标权重			综合排序
	主观权重	客观权重	综合权重		主观权重	客观权重	综合权重	
X_2	0.217 1	0.264 4	0.242 4	X_{21}	0.047 6	0.045 9	0.047 7	14
				X_{22}	0.060 6	0.052 0	0.057 1	7
				X_{23}	0.039 7	0.059 7	0.049 7	12
				X_{24}	0.032 5	0.050 3	0.041 2	18
				X_{25}	0.036 8	0.056 5	0.046 5	16
X_3	0.387 6	0.259 8	0.319 5	X_{31}	0.113 6	0.047 3	0.074 8	1
				X_{32}	0.095 5	0.054 1	0.073 4	2
				X_{33}	0.057 6	0.054 1	0.057 0	8
				X_{34}	0.050 2	0.050 1	0.051 1	10
				X_{35}	0.070 7	0.054 1	0.063 1	5
X_4	0.117 9	0.172 7	0.144 7	X_{41}	0.046 9	0.059 9	0.054 0	11
				X_{42}	0.038 2	0.047 3	0.043 4	17
				X_{43}	0.032 9	0.065 4	0.047 3	15

3.3 岩爆应急管理能力评估

3.3.1 一级指标二元语义评估结果

以专家 Z_1 对二级指标接警响应机制(X_{31})的评价信息为例,分析二元语义评估过程。根据公式(3),可计算专家 Z_1 对指标接警响应机制(X_{31})的二元语义 β 值为 $\beta=\Delta^{-1}(s_3,0)=1.4^{(3-2)}-1=0.4$,同理,可求得专家 $Z_2\sim Z_5$ 对指标接警响应机制(X_{31})的二元语义 β 值分别为 0.4,0.4,0.96,0.4。

根据公式(4),结合 5 位专家二元语义 β 值,计算指标接警响应机制(X_{31})的二元语义 $\bar{\beta}$ 值为 0.512。同理,可求得应急处置(X_{32})、现场指挥协调性(X_{33})、信息报送准确性与及时性(X_{34})、技术支持体系建设(X_{35})的二元语义 $\bar{\beta}$ 值分别为 0.16,0.16,0.432,0.16。

根据公式(5),结合二级指标接警响应机制(X_{31})、应急处置(X_{32})、现场指挥协调性(X_{33})、信息报送准确性与及时性(X_{34})、技术支持体系建设(X_{35})的二元语义 $\bar{\beta}$ 值,计算出加权算术平均值 $\tilde{\beta}$ 为 0.285 9。

对应急响应(X_3)的加权算术平均值 $\tilde{\beta}$ 进行二元语义信息转换,具体计算结果为:

$$\begin{cases} s_k, k=\dfrac{4}{2}+\text{round}[\log_{1.4}(0.285\ 9+1)]=3 \\ \sigma_k=\log_{1.4}(0.285\ 9+1)+\dfrac{4}{2}-3=-0.252\ 6 \end{cases}$$

由此可知,一级指标应急响应(X_3)的加权算术平均值 $\tilde{\beta}$ 为 0.285 9,其二元语义形式为(s_3,−0.252 6)。同理,可得深井矿山巷道岩爆应急管理能力评价体系中应急预防(X_1)、应急准备(X_2)、应急恢复(X_4)3 个一级指标的加权算术平均值及二元语义信息集结形式,具体计算结果见表 5。

表 5 一级指标二元语义计算结果

Table 5 Two-tuple linguistic calculation results of primary indicators

一级指标	加权算术平均值 $\tilde{\beta}$	二元语义转换结果
应急预防(X_1)	0.049 3	(s_2,0.143 1)
应急准备(X_2)	0.131 8	(s_2,0.368 1)
应急响应(X_3)	0.285 9	(s_3,−0.252 6)
应急恢复(X_4)	0.218 3	(s_3,−0.413 2)

3.3.2 二元语义综合评估

结合表 5 可知,应急预防(X_1)、应急准备(X_2)、应急响应(X_3)、应急恢复(X_4)4 个一级指标加权算术平均值 $\tilde{\beta}$ 分别为 0.049 3,0.131 8,0.285 9,0.218 3,相应的一级指标权重分别为 0.293 4,0.242 4,0.319 5,0.144 7。根据公式(5),可得到该矿山巷道岩爆应急管理能力综合评估值 $\tilde{\beta}$ 为 0.169 4,将综合评估值 $\tilde{\beta}$ 进行二元语义转换,可得:

$$\begin{cases} s_k, k=\dfrac{4}{2}+\text{round}[\log_{1.4}(0.169\ 4+1)]=2 \\ \sigma_k=\log_{1.4}(0.169\ 4+1)+\dfrac{4}{2}-2=0.465\ 1 \end{cases}$$

由此可知,该矿山巷道岩爆应急管理能力整体二元语义形式为(s_2,0.465 1)。

3.3.3 评估结果分析

根据前述计算结果可知,综合加权平均评估值 $\tilde{\beta}$ 为 0.169 4,表明该矿山岩爆应急管理能力属于“一般”等级。

在应急预防(X_1)方面,其加权平均评估值 $\tilde{\beta}$ 为 0.049 3,对应的评价等级为“一般”等级。现场调研发现,该矿山在巷道关键点设置了预警系统,能够综合地质、岩体力学、水文等因素对岩爆风险进行识

别,使用高精仪器对岩体形变、微震等开展实时监测,预警系统智能化水平较高。但是,在日常工作中,还要健全完善组织体系,加强隐患点排查,定期检查支护设施状态,及时发现异常情况,注重优化支护方案设计。

在应急准备(X_2)方面,其加权平均评估值 $\tilde{\beta}$ 为 0.131 8,对应的评价等级为"一般"等级。现场调研发现,该矿山组建了应急救援队伍,制定了切实可行的应急预案,能够定期组织开展应急演练,通过不断总结、分析,进一步提高了作业人员的应急处置能力和自救互救能力。但是,该矿山还需进一步加大生产措施费投入,保障充足的应急物质和应急设备,提高自我防护水平。

在应急响应(X_3)方面,其加权平均评估值 $\tilde{\beta}$ 为 0.285 9,对应的评价等级为"较好"等级。对照表 1 中"较好"等级二元语义转化区间值数据,$\tilde{\beta}$ 接近下端点值 0.183 2,表明该矿山还有较大提升和改进空间,可以依托先进的通信设备和现代信息技术手段,确保岩爆灾害发生时可以迅速应对,提高应急指挥水平。

在应急恢复(X_4)方面,其加权平均评估值 $\tilde{\beta}$ 为 0.218 3,对应的评价等级为"较好"等级。现场调研发现,该矿山还需要成立事故调查小组,不断总结事故经验教训,进一步形成系统化防控体系。

4 结论

(1) 深井矿山巷道岩爆灾害受到多方面因素的综合影响,具有突发性、复杂性、随机性和破坏性。为构建较为系统、科学、完善的岩爆应急管理能力评估体系,将二元语义法应用到巷道岩爆应急管理能力评估中,在构建应急管理能力评价指标体系的基础上,应用区间层次分析法、二元语义熵权法计算指标综合权重,依托二元语义方法,科学处理决策者语言信息,综合分析评价岩爆应急管理水平。

(2) 基于组合赋权-二元语义的岩爆应急管理能力综合评价模型,以某铜铁矿为研究背景,对岩爆应急管理水平进行综合分析。结果表明:该矿山岩爆应急管理能力综合加权平均评估值为 0.169 4,评价等级为"一般"等级,符合专家现场调研情况,验证了模型的有效性;应急预防和应急准备两个一级指标的加权平均评估值分别为 0.049 3 和 0.131 8,评价等级为"一般"等级;应急响应和应急恢复两个一级指标的加权平均评估值分别为 0.285 9 和 0.218 3,评价等级为"较好"等级。

(3) 应急预防和应急准备两个一级指标对应的理论体系还不够完善,后续研究中需不断优化指标体系建设,健全完善组织体系、加强隐患点排查,定期检查支护设施状态,注重优化支护方案设计;进一步加大生产措施费投入,保障充足的应急物质和应急设备,提高自我防护水平。

参考文献(References):

[1] 祁云,汪伟,陈森,等.深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估[J].安全与环境学报,2023,23(5):1407-1414.
QI Yun, WANG Wei, CHEN Miao, et al. Evaluation on emergency management ability of rock burst in deep mine roadway[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(5):1407-1414.

[2] 宋英华,庞昭胜,李墨潇,等.基于反赋权与 MBCT-SR 多维云模型算法岩爆预测研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(3):39-46.
SONG Yinghua, PANG Zhaosheng, LI Moxiao, et al. Research on rockburst prediction based on anti-weighting and MBCT-SR multi-dimensional cloud model algorithm[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(3): 39-46.

[3] 姜昀岐,袁东升,车佳.基于 AHP-DEMATEL 云模型的矿山应急管理能力评估[J].能源与环保,2024,46(10):40-46.
JIANG Yunqi, YUAN Dongsheng, CHE Jia. Mine emergency management capacity assessment based on AHP-DEMATEL cloud model [J]. China Energy and Environmental Protect,2024,46(10):40-46.

[4] 向韫.基于 PPRR 理论的岩爆应急管理能力评估模型研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):185-194.
XIANG Yun. Evaluation model of rock burst emergency management capability based on PPRR theory[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):185-194.

[5] 谢振华,幸贞雄,徐明智.基于 RS-可拓理论的金属矿山应急能力评估[J].金属矿山,2023,(11):234-240.
XIE Zhenhua, XING Zhenxiong, XU Mingzhi. Assessment of emergency capability for metal mine based on RS and extension theory[J].Metal Mine,2023,(11):234-240.

[6] 高康雅,陈绍杰,祁银鸽.基于多级可拓的煤矿应急管理能力评价研究[J].煤矿安全,2021,52(4):250-254.
GAO Kangya, CHEN Shaojie, QI Yin'ge. Research on evaluation of coal mine emergency management capability based on multi-level extension[J]. Safety in Coal Mines, 2021,52(4):250-254.

[7] SHI Longqing, FU Song, HAN Jin, et al. The mine emergency management capability based on EWM-CNN comprehensive evaluation [J]. Engineering Management Journal,2024,36(3):289-299.

[8] LIU Ying, FAN Zhongqi, QI Hongliang. Dynamic statistical evaluation of safety emergency management in coal enterprises based on neural network algorithms[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,2020,39(4):1-14.

[9] SUN Chaolun, HAO Yu, WEI Jianping, et al. Research on the evaluation of emergency management synergy capability of coal mines based on the entropy weight matter-element extension model[J]. Processes,2023,11(8):2492.

[10] 朱雪春,佘雅月."卡脖子"难题下创新联合体知识共创影响因素分析-基于二元语义-决策试验与评价实验室(DEMATEL)方法[J].科技管理研究,2024,44(16):151-161.
ZHU Xuechun, SHE Yayue. Analysis of influencing factors of knowledge co-creation in innovation consortium under the bottleneck problems: based on the two-tuple linguistic-DEMATEL method [J]. Science and Technology Management Research,2024,44(16):151-161.

[11] 李保刚,崔爽,董德鹏.基于灰色-改进二元语义的导弹装备维修保障效能评估[J].现代防御技术,2024,52(5):127-137.
LI Baogang, CUI Shuang, DONG Depeng. Evaluation of missile equipment maintenance support effectiveness based on gray-improved two-tuple linguistic information [J]. Modern Defence Technology,2024,52(5):127-137.

[12] 程国柱,陈永胜,翠玲.基于模糊 DANP 和二元语义的高速公路应急演练综合评价方法[J].中国安全生产科学技术,2024,20(11):146-154.
CHENG Guozhu, CHEN Yongsheng, CUI Ling. Comprehensive evaluation method of highway emergency drills based on fuzzy DANP and two-tuple linguistic information[J]. Journal of Safety Science and Technology,2024,20(11):146-154.

[13] 唐力,周凌云,许植深.基于二元语义灰色关联分析法的高铁快运列车运输服务质量评价研究[J].铁道运输与经济,2024,46(11):188-195.
TANG Li, ZHOU Lingyun, XU Zhishen. Quality evaluation of high speed rail express train transportation service based on two-tuple linguistic grey relational analysis method [J]. Railway Transport and Economy,2024,46(11):188-195.

[14] 成连华,李梓凡,郭慧敏,等.基于区间二元语义信息的高海拔地区建筑施工项目应急能力评价[J].科学技术与工程,2024,24(21):9252-9259.
CHENG Lianhua, LI Zifan, GUO Huimin, et al. Construction projects in high altitude areas based on interval binary semantic information emergency response capacity evaluation[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(21):9252-9259.

[15] HU Nanyan, LI Xuexue, LI Yufei, et al. Decision-making and optimization model for fire emergency replacements in colleges based on BWM and VIKOR under interval 2-tuple linguistic[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,2023,45(2):3123-3136.

[16] 戚凯旋.基于区间二元语义信息的突发事件应急决策方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.
QI Kaixuan. Research on emergency decision making methods based on interval 2-tuple linguistic information[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2021.

[17] 梁天瑞,徐克,顾倩倩,等.基于改进二元语义的配电网工程应急能力评估[J].安全与环境工程,2019,26(4):135-139.
LIANG Tianrui, XU Ke, GU Qianqian, et al. Emergency capacity evaluation of distribution network engineering vased on improved two-tuple linguistic information[J]. Safety and Environmental Engineering,2019,26(4):135-139.

[18] 周晏渔,豆龙,林卫星,等.基于 IAHP-GRA 和多维联系云的岩体质量评价和应用[J].矿业研究与开发,2024,44(8):173-181.
ZHOU Yanyu, DOU Long, LIN Weixing, et al. Rock mass quality evaluation and application based on IAHP-GRA and multi-dimensional connection cloud[J]. Mining Research and Development,2024,44(8):173-181.

[19] 王政,朱彬,康虔.基于多维联系云的巷道围岩稳定性评价模型[J].有色金属工程,2024,14(3):156-167.
WANG Zheng, ZHU Bin, KANG Qian. Stability evaluation model of tunnel surrounding rock based on multidimensional connection cloud[J]. Nonferrous Metals,2024,14(3):156-167.

[20] 刘若凡.基于博弈论组合赋权与灰色二元语义的地铁绿色施工评价[D].石家庄:石家庄铁道大学,2021.
LIU Ruofan. Evaluation of subway green construction based on combination weighting of game theory and grey two-tuple linguistic[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2021.