基于组合赋权的矿山应急救援体系灰色VIKOR评估模型研究*

朱敏[1,2]，王亚军[3,4]，杨春[1]，龚永超[3,4]，王旭[3]

（1.中南大学 资源与安全工程学院， 湖南 长沙 410083；
2.湖南宝山有色金属矿业有限责任公司， 湖南 郴州市 424400；
3.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
4.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：为科学合理地评价应急救援体系建设水平，从事前应急预防、事前应急预备、事中应急救援和事后恢复重建4个维度，选取26个指标因素构建指标评价体系，运用区间层次分析法-改进CRITIC法计算各指标因素权重，并采用灰色关联法改进传统VIKOR法，提出建立了基于组合赋权-灰色VIKOR的金属矿山应急救援体系多准则折衷决策模型。以5座地下金属矿山为研究背景，应用所建立的模型开展应急救援体系评价，将评估结果与加权灰色关联法、加权TOPSIS法相比较，并基于雷达图法进行应急救援体系建设差异化分析。结果显示，该模型评估结果合理可靠，适用性更强，辨识性更高，验证了组合赋权-灰色VIKOR模型在金属矿山应急救援体系评估方面具有可行性。

关键词：应急救援体系；组合赋权；灰色关联法；VIKOR法；金属矿山

中图分类号：TD77 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)02-0260-11

Research on Grey VIKOR Model for Evaluating Emergency Rescue System of Metal Mines Based on Combination Weighting

ZHU Min[1,2], *WANG Yajun*[3,4], *YANG Chun*[1], *GONG Yongchao*[3,4], *WANG Xu*[3]

(1.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2.Hunan Baoshan Nonferrous Metals Mining Co., Ltd., Chenzhou, Hunan 424400, China;
3.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
4.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: To scientifically and reasonably evaluate the level of emergency rescue system construction, 26 indicator factors were selected from four dimensions: pre-emergency prevention, pre-emergency preparation, in-process emergency rescue, and post-recovery and reconstruction. The interval analytic hierarchy process-improved CRITIC method was used to calculate the weight of each indicator factor, and the grey correlation method was used to improve the traditional VIKOR method. A multi-criteria compromise decision-making model for the emergency rescue system of metal mines based on combination weighting-grey VIKOR was proposed. Taking five underground metal mines as the research background, the established model was applied to evaluate the emergency rescue system. The evaluation results were compared with the weighted grey correlation method and weighted TOPSIS method, and the differentiation analysis of emergency rescue system construction was carried out based on the radar chart method. The results show that the evaluation results of the model are reasonable and reliable, with stronger applicability and higher identification, verifying the feasibility of the combination weighting-grey VIKOR model in the evaluation of emergency rescue systems in metal mines.

Key words: Emergency rescue system, Combination weighting, Grey correlation method, VIKOR method, Metal mine

0 引言

随着金属矿山资源开采规模的持续扩大和开采深度的不断增加，在复杂的地质环境影响下，矿山安全问题日益突出[1]。构建科学、高效的应急救援体系是控制安全事故蔓延、降低经济损失和减少人员

* **收稿日期**：2025-03-12
基金项目：西藏自治区科技计划项目(XZ202502ZY0018-02)；深地国家科技重大专项项目(2024ZD1003804)
作者简介：朱敏(1992—)，男，云南宣威人，工程师，主要从事矿山生产技术与安全管理工作。E-mail:834033520@qq.com
通信作者：王亚军(1991—)，男，湖南岳阳人，硕士，高级工程师，主要从事采矿技术研究与开发工作。E-mail:648324460@qq.com

伤亡的关键措施[2]。科学合理地开展金属矿山应急救援体系评估,持续改进救援体系中存在的问题,是完善矿山应急救援体系建设的重要内容,对保障深井金属矿山安全开采具有重要现实意义。

在应急救援评价方面,谢振华等[3]考虑了金属矿山应急能力评估指标体系结构复杂的特点,利用ISM 法构建了评价指标多级递阶结构模型,建立了基于 RS-可拓学的应急能力评估模型;祁云等[4]在构建应急救援能力评估体系基础上,建立了 SSA-SVM 模型,并应用于煤与瓦斯突出事故应急救援能力评价中,通过与传统 SVM、PSO-SVM、WOA-SVM 模型评估结果对比,验证了改进模型的优越性;陈光波等[5]针对煤矿突水应急救援能力评估模糊性和不确定性特点,将模糊综合模型引入到应急救援能力等级评估中;邓俊平[6]基于矿山应急救援管理体系与安全标准化体系的关联性分析,提出了具体改进要求;梁文凯[7]通过对煤矿应急救援体系建设现状进行分析研究,指出了当前应急救援体系在救援配置、应急预案、科技支撑 3 个方面存在短板,并提出了相应的改善措施。通过分析发现,已有的研究成果主要集中在应急救援能力等级评价,在应急救援体系评估方面研究相对较少,难以有效指导应急救援体系建设。矿山应急救援体系评估是一个复杂的系统性评价过程,涉及的内容多,且影响因素关联性较强,具有模糊性和随机性特点,属于典型的多属性综合决策问题。

在多指标综合分析方面,VIKOR 法是一种折中型多准则决策模型。该方法在确定指标因素正、负理想解基础上,通过计算群体效益值、个别遗憾值,并基于决策机制系数,折中确定研究对象综合评估值,可以实现研究对象的优劣性排序[8]。赵梦洁等[9]建立了煤矿隐患排查治理能力的 VIKOR 评价模型,通过实例验证了评价模型区分度高、评估结果准确客观;伍小沙等[10]将 VIKOR 法应用于煤矿智能化评价中,研究结果显示模型评估结果符合实际,适用性较强;安景文等[11]基于 VIKOR 法开展了煤矿安全生产管理水平评价,取得了满意的应用效果。

鉴于此,本文提出建立基于组合赋权法的矿山应急救援体系评价灰色 VIKOR 模型。以 5 座地下金属矿山为研究对象,进行应急救援体系综合分析,验证模型的适用性,以期为评估工作提供一种实用可靠的评价方法。

1 评估体系

矿山应急救援体系评价需要统筹考虑救援能力、应急管理、救援组织协调等多个方面,因此,评价指标体系相对复杂。在参考相关文献[12-14]、行业技术规范和征求相关领域专家意见的基础上,结合金属矿山重大事故特点、应急救援技术特点,按照重大事故应急救援的一般过程和阶段,从“事前应急预防、事前应急预备、事中应急救援和事后恢复重建等 4 个方面,构建如图 1 所示的金属矿山应急救援体系综合评价指标体系。将金属矿山应急救援体系等级划分为 5 个等级,指标分级量化取值见表 1。

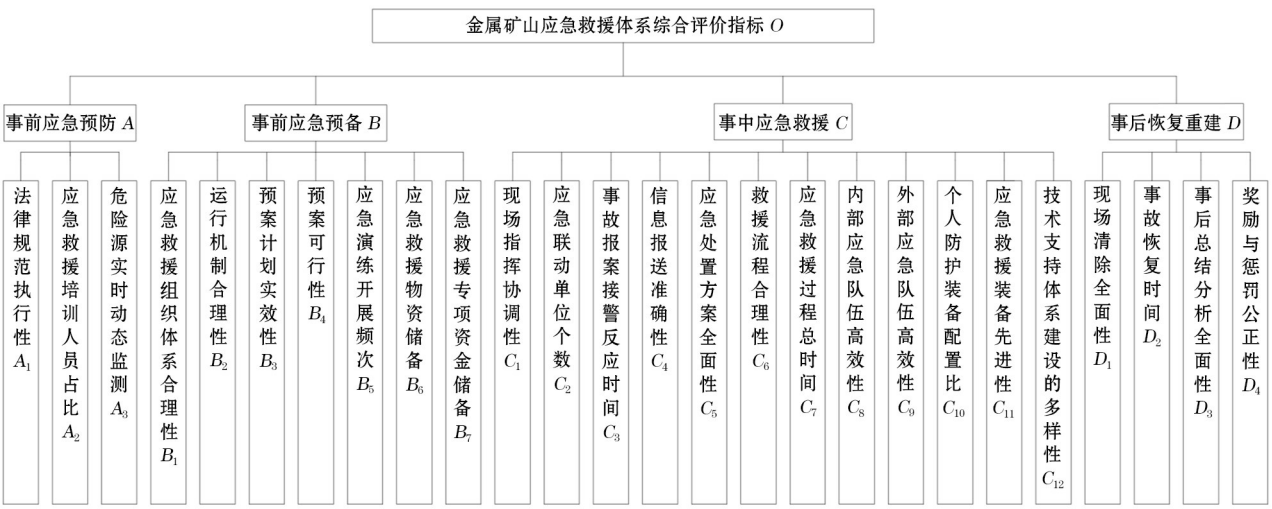


图 1 金属矿山应急救援体系综合评价指标

Fig.1 Comprehensive evaluation indicators for the emergency rescue system in metal mines

表 1 定性指标量化值

Table 1 Quantitative values of qualitative indicators

等级	等级描述	等级评分值
Ⅰ级	极好	[8,10]
Ⅱ级	较好	[6,8)
Ⅲ级	一般	[4,6)
Ⅳ级	较差	[2,4)
Ⅴ级	极差	[0,2)

2 基于组合赋权的灰色 VIKOR 模型

2.1 指标权重

2.1.1 主观权重

考虑到金属矿山应急救援体系构建复杂,因素之间具有较强关联性,应用常规 AHP 法确定指标主观权重时,受决策者主观经验影响,可能无法准确给定相对重要性比值,导致权重结果具有一定盲目性和主观性。因此,本文基于区间层次分析法获取指标主观权重,以解决指标相对重要性判定模糊性的问题,进一步降低指标权重的主观性[15]。具体计算步骤见图 2。在图 2 中,a_{ij}^{+}、a_{ij}^{-} 分别表示第 i 个指标因素相对于第 j 个指标因素的相对重要性比值区间的上限值与下限值;$\boldsymbol{w}^{+}$、$\boldsymbol{w}^{-}$ 分别表示正、负判断矩阵的基础权重向量;$\boldsymbol{w}^{1}$ 表示最终指标主观权重向量;k、β 为正、负判断矩阵的一致性检验系数;n 为选取指标因素数。

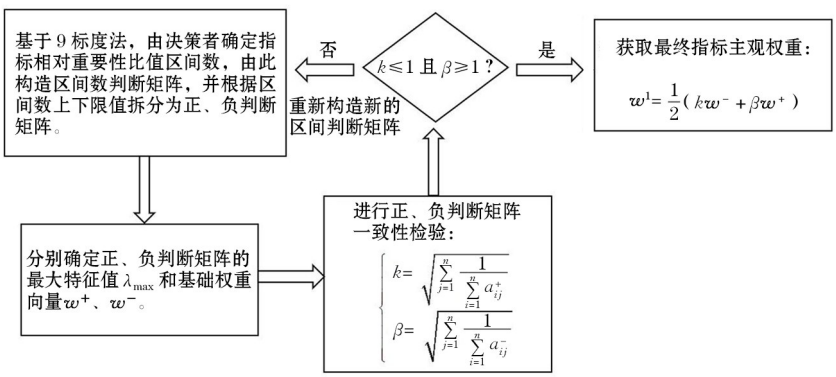


图 2 主观权重计算步骤

Fig.2 Calculation steps for subjective weights

2.1.2 客观权重

CRITIC 法是一种依据指标数据的对比强度(标准差)和冲突性(相关系数)确定指标权重的完全客观赋权法。在计算过程中,传统 CRITIC 法采用标准差形式体现指标数据波动性特征,忽略了指标因素量纲、量级的差异性,导致权重计算结果并不完全科学。引入变异系数,对传统 CRITIC 法进行改进,可以提高权重结果的合理性。具体计算过程见文献[16]。

2.1.3 组合权重

根据组合赋权思想,确定指标组合权重 w_i,计算公式如下:

$$w_i=\frac{\sqrt{\alpha_i\times\beta_i}}{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\alpha_i\times\beta_i}} \tag{1}$$

式中:α_i 为主观权重集;β_i 为客观权重集;w_i 为组合权重集;n 为指标个数。

2.2 灰色 VIKOR 模型

VIKOR 模型是由 OPRICOVIC 等提出的一种多准则综合寻优决策方法,通过引入决策机制系数,实现在多个目标或多个准则之间找到最优解决方案,在复杂系统的多准则决策方面具有显著优越性[17]。但是,VIKOR 法无法体现因素之间的关联性,易造成信息失真,从而影响决策精度。灰色关联分析法可以客观全面地反映指标因素之间的交互性,充分挖掘指标数据内在逻辑和规律,因此,可以利用灰色关联改进传统 VIKOR 法,实现两大模型的优势互补,进一步提高模型结果的准确性。具体计算过程如下[18]:

(1) 指标数据的无量纲化处理。

$$f_{ij}=\frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}y_{ij}^{2}}} \tag{2}$$

式中:y_{ij} 表示第 i 个研究对象第 j 个指标取值;f_{ij} 表示无量纲化处理值。

(2) 确定指标正、负理想解。按照式(3),确定各指标正、负理想解。

$$\begin{cases} f_j^+ = [(\max\limits_i f_{ij} \mid j \in X),(\min\limits_i f_{ij} \mid j \in Y)], \\ \quad X \in \text{效益型指标}, Y \in \text{成本型指标} \\ f_j^- = [(\min\limits_i f_{ij} \mid j \in X),(\max\limits_i f_{ij} \mid j \in Y)], \\ \quad X \in \text{效益型指标}, Y \in \text{成本型指标} \end{cases} \tag{3}$$

式中,f_j^+、f_j^- 分别表示第 j 个指标因素的正、负理想解。

(3) 计算基于 VIKOR 法的群体效益值和个体遗憾值。按照式(4)和式(5),计算研究对象的群体效益值和个体遗憾值。

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} (w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_{ij}^-}) \tag{4}$$

$$R_i = \max_j (w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_{ij}^-}) \tag{5}$$

式中:S_i 表示第 i 个研究对象群体效益值;R_i 表示第 i 个研究对象的个体遗憾值。

(4) 计算灰色关联系数。按照式(6),计算研究对象各指标因素评价值与正、负理想解的灰色关联系数 ε_{ij}。

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij}^+ = \dfrac{\min\limits_i \min\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^+) \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^+) \mid}{w_j \mid f_{ij} - f_{ij}^+ \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^+) \mid} \\ \varepsilon_{ij}^- = \dfrac{\min\limits_i \min\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^-) \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^-) \mid}{w_j \mid f_{ij} - f_{ij}^- \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^-) \mid} \end{cases} \tag{6}$$

式中:ε_{ij}^+、ε_{ij}^- 分别表示第 i 个研究对象第 j 个指标因素的正、负灰色关联系数;ρ 为分辨系数,一般取 0.5。

(5) 确定关联度。按照式(7),计算基于灰色 VIKOR 法的研究对象正、负关联度。

$$\begin{cases} \varepsilon_i^+ = \dfrac{1}{m} \sum\limits_{j=1}^{m} \varepsilon_{ij}^+ \\ \varepsilon_i^- = \dfrac{1}{m} \sum\limits_{j=1}^{m} \varepsilon_{ij}^- \end{cases} \tag{7}$$

式中,ε_i^+、ε_i^- 分别为第 i 个研究对象的正、负关联度。

(6) 计算基于 GRA 下的群体效益值 ζ_i 和个体遗憾值 ξ_i。

$$\begin{cases} \zeta_i = \dfrac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_i^+} \\ \xi_i = \max\limits_j (\dfrac{\varepsilon_i^-}{\varepsilon_{ij}^+}) \end{cases} \tag{8}$$

(7) 确定综合指标值 Q_i。基于灰色 VIKOR 法的研究对象综合指标值 Q_i 计算公式为:

$$Q_i = \upsilon (\frac{\delta_i - \delta^+}{\delta_i^- - \delta^+}) + (1 - \upsilon)(\frac{\theta_i - \theta^+}{\theta_i^- - \theta^+}) \tag{9}$$

$$\begin{cases} \delta_i = S_i \cdot \zeta_i \\ \delta^+ = \min S_i \cdot \min \zeta_i \\ \delta^- = \max S_i \cdot \max \zeta_i \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} \theta_i = Q_i \cdot \xi_i \\ \theta^+ = \min Q_i \cdot \min \xi_i \\ \theta^- = \max Q_i \cdot \max \xi_i \end{cases} \tag{11}$$

式中:υ 为决策机制系数,取值区间为[0,1],本文取 0.8;δ_i 表示第 i 个研究对象群体效益值;δ^+、δ^- 分别表示研究对象最大和最小群体效益值;θ_i 表示第 i 个研究对象个体遗憾值;θ^+、θ^- 分别表示研究对象最大和最小个体遗憾值。

最后,根据综合指标值 Q_i 确定研究对象的优劣性排序。

3 模型应用

为验证组合赋权-灰色 VIKOR 法在矿山应急救援体系评估方面的适用性,以 3 座铜铁矿和 2 座铅锌矿(编号 $K_1 \sim K_5$)作为研究对象,通过相关计算确定应急救援体系建设水平。为确保评估科学、全面,成立由 5 位长期应急救援体系评估领域的专家组建的专项评估小组,专家组成员均具有较为丰富的理论学识和扎实的工程经验,能够保证指标评估值的客观性和合理性。各专家的基本情况见表 2。

表 2 各专家基本情况

Table 2 Basic information of the experts

专家编号	职称	工龄/a	学历
Z_1	教授	13	博士
Z_2	教授	18	博士
Z_3	高级工程师	21	博士
Z_4	高级工程师	16	硕士
Z_5	高级工程师	20	硕士

专家组成员结合 5 座矿山应急救援体系建设实际,在现场调研基础上,经过充分讨论形成统一意见,并确定各指标具体打分。专家指标打分结果见表 3。

表 3 研究对象专家打分情况

Table 3 Expert ratings for the research subjects

矿山编号	各评价指标打分情况													
	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	C_1	C_2	C_3	C_4
K_1	7.47	6.73	7.68	7.89	7.75	7.91	7.64	6.98	8.92	8.24	7.92	7.63	8.32	7.94
K_2	8.98	7.26	6.92	8.45	7.93	7.18	7.89	7.27	8.18	7.38	8.49	7.39	8.62	7.71
K_3	7.56	6.98	7.15	8.37	8.34	8.78	8.13	8.39	7.35	9.32	9.32	8.36	8.94	8.39
K_4	8.34	7.56	7.33	7.92	7.71	8.34	8.27	7.65	8.29	8.89	8.35	8.74	9.34	8.14
K_5	7.17	6.54	7.24	8.38	8.89	8.62	8.56	9.32	7.38	8.12	8.62	9.37	7.98	7.73

矿山编号	各评价指标打分情况											
	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	D_1	D_2	D_3	D_4
K_1	7.78	7.43	8.47	7.34	7.65	8.55	7.49	7.35	7.25	7.94	7.39	8.14
K_2	8.35	7.95	8.93	7.52	7.42	8.22	7.26	7.98	6.93	7.32	8.32	8.39
K_3	8.59	8.73	8.14	8.58	8.38	8.43	7.65	7.28	7.54	7.84	6.48	8.34
K_4	8.83	8.44	7.53	8.67	8.62	8.98	7.29	7.24	7.98	8.93	7.23	8.56
K_5	8.56	6.93	8.12	8.93	7.48	9.47	6.53	6.59	7.83	9.32	7.93	7.71

3.1 计算指标权重

(1) 主观权重。以 4 个一级指标为例,专家组讨论后确定各指标区间数判断矩阵,具体情况见表 4。根据区间层次分析法赋权原理,计算正判断矩阵基础权重向量为(0.161 3,0.279 3,0.459 8,0.099 6),负判断矩阵基础权向量为(0.150 0,0.254 5,0.493 9,0.101 7),一致性系数分别为 $k=0.908\ 5<1$,$p=1.080\ 5>1$,满足校验要求。对两组权重向量(0.161 3,0.279 3,0.459 8,0.099 6)、(0.150 0,0.254 5,0.493 9,0.101 6)归一化处理,得到 4 个一级指标主观权重为 $\boldsymbol{w}_1^*=(0.156\ 1,0.267\ 9,0.475\ 4,0.100\ 6)$。同理,计算二级指标局部主观权重。其中,"事前应急预防 A"的 3 个二级指标局部主观权重为 $\boldsymbol{w}_A^1=(0.348\ 7,0.274\ 2,0.377\ 1)$,"事前应急预备 B"的 7 个二级指标局部主观权重为 $\boldsymbol{w}_B^1=(0.253\ 9,0.182\ 7,0.082\ 3,0.156\ 2,0.143\ 9,0.109\ 6,0.071\ 4)$,"事中应急救援 C"的 12 个二级指标局部主观权重为 $\boldsymbol{w}_C^1=(0.119\ 3,0.038\ 9,0.063\ 2,0.070\ 1,0.166\ 1,0.138\ 3,0.062\ 9,0.038\ 7,0.026\ 3,0.082\ 2,0.117\ 1,0.076\ 9)$,"事后恢复重建 D"的 4 个二级指标局部主观权重为 $\boldsymbol{w}_D^1=(0.268\ 7,0.358\ 1,0.223\ 4,0.149\ 8)$。

表 4 一级指标主观权重

Table 4 Subjective weights of the first-level indicators

判断矩阵	评价指标	A	B	C	D	权重信息
判断矩阵 $\boldsymbol{A}$	A	[1,1]	[0.5,1]	[0.25,0.333]	[1,2]	0.156 1
	B	[1,2]	[1,1]	[0.5,1]	[2,3]	0.267 9
	C	[3,4]	[1,2]	[1,1]	[5,6]	0.475 4
	D	[0.5,1]	[0.333,0.5]	[0.167,0.2]	[1,1]	0.100 6
正判断矩阵 $\boldsymbol{A}^+$	A	1	1	0.333	2	0.161 3
	B	2	1	1	3	0.279 3
	C	4	2	1	6	0.459 8
	D	1	0.5	0.2	1	0.099 6
负判断矩阵 $\boldsymbol{A}^-$	A	1	0.5	0.25	1	0.150 0
	B	1	1	0.5	2	0.254 5
	C	3	1	1	5	0.493 9
	D	0.5	0.333	0.167	1	0.101 6

(2) 客观权重。根据改进 CRITIC 法赋权原理,结合专家打分情况,构建初始评估矩阵,经指标数据归一化处理,计算指标差异性系数和综合性系数。其中,指标差异性系数分别为(0.083 8,0.052 0,0.034 2,0.029 8,0.054 6,0.070 4,0.038 9,0.106 5,0.074 1,0.079 6,0.053 3,0.087 2,0.054 7,0.032 2,0.042 2,0.082 9,0.055 8,0.079 0,0.062 4,0.051 0,0.053 0,0.060 5,0.050 8,0.089 4,0.084 2,0.035 4);指标综合性系数分别为(2.178 7,1.147 6,0.969 8,0.763 0,1.343 4,1.437 4,0.795 4,2.361 3,2.277 5,

1.574 2,1.111 2,1.814 1,1.109 9,0.659 9,0.774 0,1.717 2,1.823 8,1.507 0,1.184 6,1.197 3,1.360 2,1.731 3,1.003 9,1.998 1,2.585 9,0.816 3);指标层 26 个指标的客观权重为(0.058 5,0.030 8,0.026 0,0.020 5,0.036 1,0.038 6,0.021 4,0.063 4,0.061 2,0.042 3,0.029 8,0.048 7,0.029 8,0.017 7,0.020 8,0.046 1,0.049 0,0.040 5,0.031 8,0.032 1,0.036 5,0.046 5,0.027 0,0.053 7,0.069 4,0.021 8)。4 个一级指标的客观权重分别为 $\boldsymbol{w}_2^*$ =(0.115 3,0.283 5,0.429 3,0.172 0)。反算可知各二级指标的局部客观权重,其中,"事前应急预防 A"的 3 个二级指标局部客观权重为 $\boldsymbol{w}_A^2$ =(0.508 7,0.267 9,0.226 4),"事前应急预备 B"的 7 个二级指标局部客观权重为 $\boldsymbol{w}_B^2$ =(0.072 4,0.127 5,0.136 4,0.075 5,0.224 0,0.216 1,0.149 4),"事中应急救援 C"的 12 个二级指标局部客观权重为 $\boldsymbol{w}_C^2$ =(0.069 5,0.113 5,0.069 5,0.041 3,0.048 4,0.107 5,0.114 1,0.094 3,0.074 1,0.074 9,0.085 1,0.108 4),"事后恢复重建 D"的 4 个二级指标局部客观权重为 $\boldsymbol{w}_D^2$ =(0.156 8,0.312 1,0.403 9,0.127 5)。

(3) 组合权重。根据式(1),确定各指标综合权重。其中,一级指标综合权重为 $\boldsymbol{w}^*$ =(0.139 3,0.273 1,0.452 0,0.135 6),"事前应急预防 A"的 3 个二级指标局部综合权重为 $\boldsymbol{w}_A$ =(0.427 8,0.275 3,0.296 8),"事前应急预备 B"的 7 个二级指标局部综合权重为 $\boldsymbol{w}_B$ =(0.144 4,0.162 5,0.112 8,0.115 6,0.191 2,0.163 9,0.110 0),"事中应急救援 C"的 12 个二级指标局部综合权重为 $\boldsymbol{w}_C$ =(0.096 1,0.070 1,0.069 9,0.056 8,0.094 6,0.128 6,0.089 4,0.063 7,0.046 6,0.082 8,0.105 3,0.096 3),"事后恢复重建 D"的 4 个二级指标局部主观权重为 $\boldsymbol{w}_D$ =(0.209 8,0.341 8,0.307 1,0.141 3)。权重具体计算结果见表 5。

表 5 指标权重具体计算结果

Table 5 Calculated results of the indicator weights

一级指标权重				二级指标权重				综合排序
一级指标	主观权重	客观权重	综合权重	二级指标	主观权重	客观权重	综合权重	
A	0.156 1	0.115 3	0.139 3	A_1	0.054 4	0.058 5	0.059 6	1
				A_2	0.042 8	0.030 8	0.038 3	15
				A_3	0.058 9	0.026 0	0.041 4	12
B	0.267 9	0.283 5	0.273 1	B_1	0.068 1	0.020 5	0.039 4	14
				B_2	0.048 9	0.036 1	0.044 3	7
				B_3	0.022 1	0.038 6	0.030 8	20
				B_4	0.041 8	0.021 4	0.031 6	18
				B_5	0.038 5	0.063 4	0.052 2	3
				B_6	0.029 4	0.061 2	0.044 8	6
				B_7	0.019 1	0.042 3	0.030 0	21
C	0.475 4	0.429 3	0.452 0	C_1	0.056 7	0.029 8	0.043 4	9
				C_2	0.018 5	0.048 7	0.031 7	17
				C_3	0.030 1	0.029 8	0.031 6	19
				C_4	0.033 3	0.017 7	0.025 6	24
				C_5	0.078 9	0.020 8	0.042 8	10
				C_6	0.065 7	0.046 1	0.058 1	2
				C_7	0.029 9	0.049 0	0.040 4	13
				C_8	0.018 4	0.040 5	0.028 8	22
				C_9	0.012 5	0.031 8	0.021 1	25
				C_{10}	0.039 2	0.032 1	0.037 5	16
				C_{11}	0.055 4	0.036 5	0.047 5	4
				C_{12}	0.036 5	0.046 5	0.043 5	8
D	0.100 6	0.172 0	0.135 6	D_1	0.027 2	0.027 0	0.028 6	23
				D_2	0.036 1	0.053 7	0.046 5	5
				D_3	0.022 5	0.069 4	0.041 4	11
				D_4	0.015 1	0.021 8	0.019 1	26

3.2 模型计算

根据灰色关联 VIKOR 模型计算原理,结合指标数据打分结果,通过计算关联度和综合评估值,开展应急救援体系评估,具体计算过程如下。

(1) 指标数据归一化处理。根据式(2),对指标数据进行归一化处理,具体计算结果见表 6。

表 6 指标数据归一化

Table 6 Normalized indicators data

矿山编号	各评价指标打分情况													
	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	C_1	C_2	C_3	C_4
K_1	0.421	0.429	0.473	0.430	0.426	0.432	0.422	0.392	0.496	0.438	0.414	0.410	0.430	0.445
K_2	0.506	0.462	0.426	0.461	0.436	0.392	0.435	0.408	0.455	0.392	0.444	0.397	0.446	0.432
K_3	0.426	0.444	0.440	0.456	0.458	0.480	0.449	0.471	0.409	0.495	0.487	0.449	0.462	0.470
K_4	0.470	0.481	0.451	0.432	0.424	0.456	0.456	0.429	0.461	0.472	0.437	0.469	0.483	0.456
K_5	0.404	0.416	0.446	0.457	0.489	0.471	0.472	0.523	0.410	0.432	0.451	0.503	0.412	0.433

矿山编号	各评价指标打分情况											
	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	D_1	D_2	D_3	D_4
K_1	0.413	0.419	0.459	0.399	0.432	0.437	0.462	0.450	0.431	0.428	0.441	0.442
K_2	0.443	0.449	0.484	0.409	0.419	0.421	0.448	0.489	0.412	0.394	0.496	0.456
K_3	0.456	0.493	0.441	0.466	0.473	0.431	0.472	0.446	0.449	0.422	0.387	0.453
K_4	0.469	0.476	0.408	0.471	0.486	0.459	0.449	0.444	0.475	0.481	0.431	0.465
K_5	0.454	0.391	0.440	0.485	0.422	0.485	0.403	0.404	0.466	0.502	0.473	0.419

(2) 确定正、负理想解。根据式(3),确定指标因素的正、负理想解集合:

f^+=(0.506 3,0.481 4,0.472 5,0.460 5,0.488 7,0.479 7,0.472 4,0.523 2,0.495 8,0.495 2,0.487 4,0.503 1,0.482 7,0.469 8,0.468 5,0.492 8,0.484 0,0.485 0,0.486 4,0.484 5,0.471 6,0.488 8,0.474 8,0.502 0,0.496 3,0.465 0)

f^-=(0.404 3,0.416 4,0.425 8,0.430 0,0.423 8,0.392 2,0.421 6,0.391 8,0.408 5,0.392 1,0.414 2,0.396 8,0.412 4,0.431 8,0.412 8,0.391 2,0.408 1,0.398 7,0.418 7,0.420 5,0.402 6,0.403 6,0.412 4,0.394 3,0.386 6,0.418 8)

(3) 计算指标正、负关联系数。根据式(6),计算指标正、负灰色关联系数。具体计算结果见表 7。

表 7 指标正、负灰色关联系数

Table 7 Positive and negative grey relational coefficients of the indicators

关联度系数	各评价指标打分情况													
	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	C_1	C_2	C_3	C_4
ε_{ij}^{+}	0.374 8	0.488 4	1.000 0	0.430 3	0.410 1	0.639 8	0.485 6	0.363 5	1.000 0	0.640 7	0.406 8	0.516 8	0.556 7	0.637 0
	1.000 0	0.725 4	0.418 7	1.000 0	0.452 3	0.491 3	0.564 6	0.394 6	0.585 3	0.498 2	0.536 4	0.484 5	0.640 2	0.537 3
	0.389 3	0.577 4	0.508 1	0.840 9	0.590 4	1.000 0	0.668 9	0.589 6	0.399 5	1.000 0	1.000 0	0.648 2	0.762 0	1.000 0
	0.585 8	1.000 0	0.610 0	0.443 8	0.401 8	0.778 4	0.749 7	0.444 5	0.623 8	0.817 5	0.497 5	0.747 1	1.000 0	0.759 6
	0.333 4	0.437 2	0.554 4	0.858 0	1.000 0	0.906 2	1.000 0	1.000 0	0.404 2	0.616 1	0.578 4	1.000 0	0.485 0	0.544 8

关联度系数	各评价指标打分情况											
	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	D_1	D_2	D_3	D_4
ε_{ij}^{+}	0.410 6	0.415 1	0.691 7	0.508 3	0.636 4	0.519 2	0.814 5	0.601 8	0.599 8	0.481 6	0.585 4	0.758 4
	0.603 8	0.541 9	1.000 0	0.538 3	0.585 9	0.442 8	0.643 0	1.000 0	0.510 3	0.390 6	1.000 0	0.885 8
	0.753 0	1.000 0	0.566 5	0.824 5	0.876 1	0.488 5	1.000 0	0.576 3	0.713 2	0.464 2	0.416 5	0.857 0
	1.000 0	0.760 8	0.424 4	0.863 4	1.000 0	0.669 7	0.661 2	0.562 6	1.000 0	0.766 8	0.546 5	1.000 0
	0.730 4	0.338 9	0.560 3	1.000 0	0.598 3	1.000 0	0.385 4	0.406 5	0.879 4	1.000 0	0.771 0	0.607 9

关联度系数	各评价指标打分情况													
	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	C_1	C_2	C_3	C_4
ε_{ij}^{-}	0.758 8	0.814 7	0.532 2	1.000 0	0.960 3	0.571 6	1.000 0	1.000 0	0.378 7	0.537 9	1.000 0	0.805 0	0.751 7	0.805 1
	0.342 7	0.537 1	1.000 0	0.635 4	0.814 8	1.000 0	0.794 1	0.765 7	0.535 6	1.000 0	0.640 9	1.000 0	0.616 6	1.000 0
	0.707 5	0.655 0	0.789 9	0.670 4	0.605 7	0.378 4	0.663 0	0.402 0	1.000 0	0.340 4	0.420 9	0.505 3	0.517 4	0.582 8
	0.446 4	0.450 3	0.678 3	0.970 2	1.000 0	0.456 4	0.604 8	0.585 8	0.504 5	0.398 7	0.702 9	0.423 3	0.430 8	0.688 4
	1.000 0	1.000 0	0.729 9	0.665 8	0.450 6	0.403 4	0.511 7	0.288 3	0.969 6	0.575 0	0.592 4	0.333 5	1.000 0	0.979 4

关联度系数	各评价指标打分情况											
	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	D_1	D_2	D_3	D_4
ε_{ij}^{-}	1.000 0	0.653 4	0.510 8	1.000 0	0.803 9	0.759 1	0.473 4	0.533 3	0.736 4	0.614 4	0.494 9	0.694 9
	0.637 6	0.480 3	0.412 1	0.844 8	1.000 0	1.000 0	0.541 7	0.384 6	1.000 0	1.000 0	0.326 4	0.590 2
	0.553 2	0.343 7	0.616 7	0.441 3	0.495 5	0.832 0	0.435 2	0.557 3	0.594 4	0.655 1	1.000 0	0.608 6
	0.488 5	0.384 3	1.000 0	0.424 1	0.440 0	0.577 7	0.531 7	0.572 0	0.459 9	0.380 2	0.543 2	0.535 4
	0.562 5	1.000 0	0.624 6	0.381 2	0.940 2	0.454 1	1.000 0	1.000 0	0.498 3	0.330 6	0.380 8	1.000 0

根据式(7),计算指标正、负灰色关联度:

ε_i^+=(0.575 9,0.633 5,0.711 9,0.719 8,0.692 1)

ε_i^-=(0.738 1,0.726 9,0.591 2,0.564 5,0.679 7)

(3) 计算灰色 VIKOR 群体效益值和个体遗憾值。根据式(4)和式(5),计算基于灰色关联法的群体效益值和个体遗憾值,具体计算结果见表 8。

表 8 灰色关联法群体效益值和个体遗憾值计算结果

Table 8 Calculation results of group utility and individual regret values using the grey relational analysis method

矿山名称	S_i	R_i	ζ_i	ξ_i
K_1	0.672 8	0.052 2	1.281 6	2.751 3
K_2	0.563 5	0.046 5	1.147 5	2.560 0
K_3	0.418 7	0.046 7	0.830 5	2.503 0
K_4	0.393 1	0.044 3	0.784 3	2.488 7
K_5	0.506 2	0.059 6	0.982 0	2.999 7

(4) 计算综合指标值。根据式(9)至式(11),计算基于灰色 VIKOR 法的群体效益值 δ_i、个体遗憾值 θ_i 以及综合指标值 Q_i,具体计算结果见表 9。

根据综合指标值 Q_i 计算结果可知,5 座矿山应急救援体系水平排序依次为:$K_4>K_3>K_5>K_2>K_1$,即矿山 K_4 应急救援体系水平最高,矿山 K_1 应急救援体系水平最差。

表 9 基于 GRA-VIKOR 的评价结果

Table 9 Evaluation results based on the GRA-VIKOR method

待评对象	δ_i	θ_i	Q_i
K_1	0.862 3	0.143 5	0.897 1
K_2	0.646 6	0.119 0	0.513 6
K_3	0.347 7	0.117 0	0.076 3
K_4	0.308 3	0.110 4	0.000 0
K_5	0.497 1	0.178 7	0.472 7

3.3 模型结果分析比较

为进一步验证灰色 VIKOR 模型在应急救援体系评估方面的可靠性和优越性,与常规的加权灰色关联法和加权 TOPSIS 法评估结果进行对比。为使三种综合评价模型的计算结果具有可比性,在加权灰色关联法和加权 TOPSIS 两种应用计算过程中,对指标数据归一化、标准化处理方式和指标权重计算结果均与灰色 VIKOR 模型完全一致。为便于分析三种综合模型在地下金属矿山应急救援体系评估方面的科学性,同步计算了三种模型评估结果的极值和变异系数。在评价结果一致前提下,极值和变异系数越大,表明模型离散性更好,辨识性更高,有利于分析比较各矿山应急救援体系建设优劣性。具体计算结果见表 10。计算结果对比情况见图 3。

表 10 不同模型评估结果对比

Table 10 Comparison of evaluation results from different models

矿山编号	加权灰色关联法[19]		加权 TOPSIS 法[20]				灰色 VIKOR 法		实际
	灰色关联度	关联度排序	最优距离	最劣距离	贴合度	贴合度排序	综合评估值	评估值排序	
K_1	0.592 0	5	0.013 1	0.007 2	0.354 9	5	0.897 1	5	5
K_2	0.661 6	4	0.011 4	0.010 6	0.481 8	4	0.513 6	4	4
K_3	0.715 3	2	0.010 1	0.011 0	0.520 4	2	0.076 3	2	2
K_4	0.722 0	1	0.008 5	0.011 2	0.567 2	1	0.000 0	1	1
K_5	0.705 4	3	0.011 6	0.011 7	0.502 2	3	0.472 7	3	3
极值	0.123 3				0.212 3		0.897 1		
变异系数	0.060 8				0.092 5		0.415 5		

根据表 10 可知,基于加权灰色关联法的计算结果分别为:0.592 0,0.661 6,0.715 3,0.722 0,0.705 4,对应 5 座矿山应急救援体系建设水平排序为:$K_4>K_3>K_5>K_2>K_1$;基于加权 TOPSIS 的相对贴近度分别为:0.354 9,0.481 8,0.520 4,0.567 2,0.502 2,对应 5 座矿山应急救援体系建设水平性排序为:$K_4>K_3>K_5>K_2>K_1$。表明基于加权灰色关联法和加权 TOPSIS 模型与本文所建立的基于组合赋权-灰色 VIKOR 模型评价结果完全一致,进一下验证了模型的适用性和有效性。

根据表 10 和图 3 可知,基于加权灰色关联法、加权 TOPSIS 法、灰色 VIKOR 模型的极值分别为:0.123 3,0.212 3,0.897 1,相应的变异系数分别为:0.060 8,0.092 5,0.415 5。通过对比发现,基于组合赋权-灰色 VIKOR 模型的极值和变异系数在三种评估模型中均为最大值。表明加权灰色关联法和加权 TOPSIS 模型计算结果的差异性较小,矿山之间应急救援体系建设优劣区分不显著,而基于灰色 VIKOR 模型计算结果能够更加客观、准确地区分和比较矿山应急救援体系建设实际。相比于其他模型,灰色 VIKOR 模型能够更加充分挖掘指标数据信息,具有更强抗干扰性,从而可以获取稳健、清晰的评估排序结果。

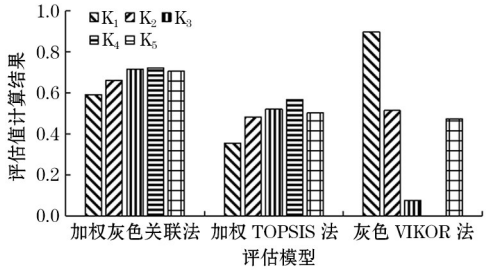


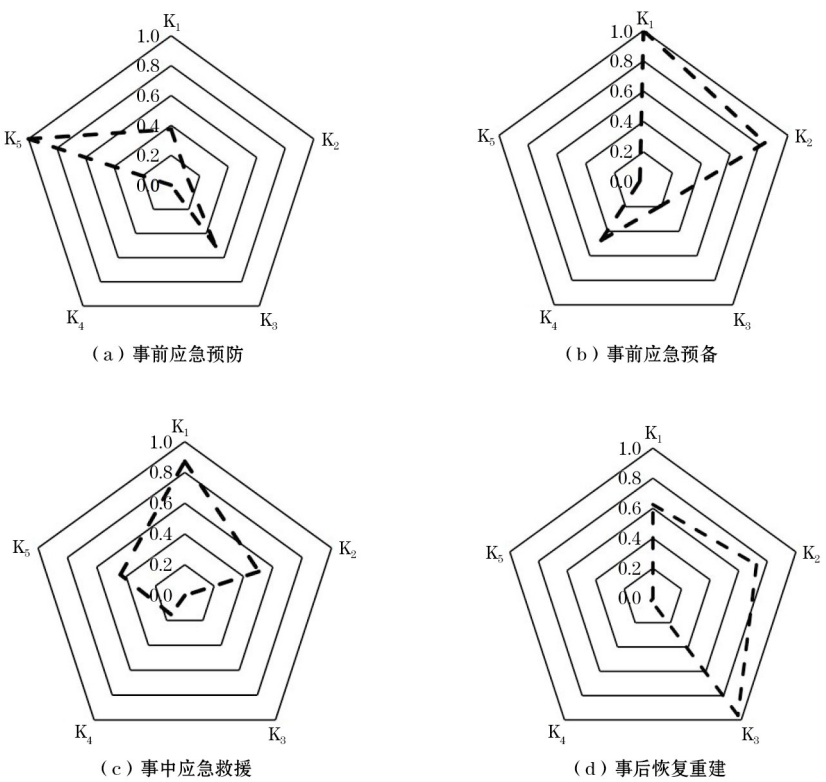
图 3 评估结果对比

Fig.3 Comparison of the evaluation results

综上所述，基于组合赋权-灰色 VIKOR 模型在地下金属矿山应急救援体系评估方面具有实用性和可靠性，体现了研究的必要性。

3.4 基于雷达图的应急救援管理分析

为更加直观、全面地分析比较 5 座地下金属矿山应急救援体系建设方面的差异性，分别测算了 4 个一级指标的综合评估值，绘制了雷达图，见图 4。



(a) 事前应急预防　(b) 事前应急预备

(c) 事中应急救援　(d) 事后恢复重建

图 4 评价结果雷达图

Fig.4 Radar charts of the evaluation results

由图 4 可知，在“事前应急预防”方面，5 座矿山应急救援体系建设水平排序为：$K_4>K_2>K_1>K_3>K_5$；在“事前应急预备”方面，优劣性排序为：$K_5>K_3>K_4>K_2>K_1$；在“事中应急救援”方面，优劣性排序为：$K_3>K_4>K_5>K_2>K_1$；在“事后恢复重建”方面，优劣性排序为：$K_5>K_4>K_1>K_2>K_3$。结合现场调研情况，矿山 K_2 和矿山 K_4 均严格执行矿山安全生产等相关法律、行政法规和救援规程，制定了较为详细、规范、完善的应急救援制度和应急救援预案，应急救援组织联动协调有力，能够实现统一调度和指挥，同时，注重加强应急救援队伍日常培训，制定了常态化应急救援演练制度，重点针对火灾、冒顶片帮、冲击地压、机械事故等开展应急救援演练，救援队伍整体素质较硬，自救和互救能力较强，具备丰富的救援经验，应急处突能力比较突出。但是矿山 K_2 和矿山 K_4 还需要进一步提升实时动态监测能力，依托监测监控系统，综合运用信息化等技术手段，加强危险源实时监测；强化日常监督检查，针对隐患点，做到早发现、早排除，降低重大事故风险，提升矿山整体安全。矿山 K_3 在救援物质和救援装备方面投入较大，拥有一定数量自动化、信息化、成套化的救援装备和通信设备，注重加强对救援设备等日常管理和维护，能够保证救援装备和通信设备的可靠性、稳定性，可以有效提升救援效率。而矿山 K_1、矿山 K_3 和矿山 K_5 需要持续健全完善应急救援培训制度，进一步加大应急救援演练频率和

加强应急救援训练强度,要结合矿山安全生产实际,提升应急救援培训演练的针对性和实效性,使救援演练与实际情况相适应,要保证应急救援培训全覆盖,提升救援队伍整体理论基础和综合素养,强化自救和互救能力。另外,矿山 K_5 还需要进一步更新应急救援技术装备,加大对救援装备投入,购置先进的救援装备,依托技术支撑争取更多有效救援时间。

4 结论

(1) 综合运用区间层次分析法和改进 CRITIC 法获取主、客观权重,基于组合赋权思想确定指标综合权重,遵从决策者主观经验的同时,兼顾了工程客观实际,可以有效提升评估结果的可靠性。

(2) 采用灰色关联法改进传统 VIKOR 法,提出建立了基于组合赋权的金属矿山应急救援体系评估的灰色 VIKOR 决策模型,以 5 座矿山为例进行实证研究,并将评估结果与加权灰色关联法和加权 TOPSIS 法相比较,结果显示所建立的综合评价模型结果合理可靠,具有突出的适用性和辨识度,可为金属矿山应急救援体系评估提供新思路。

(3) 考虑到当前矿山应急救援体系评估相关研究成果相对较少,相关理论研究还不充分,在后续研究中,还要进一步丰富和优化指标体系,以满足工程实践需要。

参考文献(References):

[1] 周子龙,王少锋,蔡鑫,等.深部金属矿异构环境爆破开采诱发岩体动力灾害防控[J].中国有色金属学报,2025,35(1):306-322.
ZHOU Zilong, WANG Shaofeng, CAI Xin, et al. Control for rock dynamic disasters induced by blasting mining disturbance under heterogeneous condition in deep metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2025,35(1):306-322.

[2] 崔豫楠,李龙龙,宫成,等.矿山应急救援虚拟现实引擎优选研究[J].金属矿山,2024(10):145-151.
CUI Yu'nan, LI Longlong, GONG Cheng, et al. Research on preferred virtual reality engines for mining emergency rescue[J].Metal Mine,2024(10):145-151.

[3] 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.

[4] 祁云,薛凯隆,汪伟,等.矿井煤与瓦斯突出事故应急救援能力评估模型[J].中国安全科学学报,2024,34(2):225-230.
QI Yun, XUE Kailong, WANG Wei, et al. Assessment model of emergency rescue capability for coal and gas outburst accidents in mines [J]. China Safety Science Journal,2024,34(2):225-230.

[5] 陈光波,李元.基于组合赋权的煤矿透水应急救援能力评价[J].科学技术与工程,2023,23(6):2353-2361.
CHEN Guangbo, LI Yuan. Evaluation of coal mine water permeable emergency rescue capability based on combined weighting[J].Science Technology and Engineering,2023,23(6):2353-2361.

[6] 邓俊平.基于安全标准化的非煤地下矿山应急管理体系研究[J].采矿技术,2023,23(1):55-58.
DENG Junping. Research on emergency management system for non coal underground mines based on safety standardization[J].Mining Technology,2023,23(1):55-58.

[7] 梁文凯.煤矿安全应急救援体系的问题及完善措施[J].能源与节能,2019(8):116-118.
LIANG Wenkai. Analysis on problems and improvement measures of coal mine safety emergency rescue system[J]. Energy and Energy Conservation,2019(8):116-118.

[8] 郝顺,蔡泽山,张海云,等.基于 G1 法-VIKOR 法的深井巷道支护方案优选模型研究[J].采矿技术,2023,23(3):9-12.
HAO Shun, CAI Zeshan, ZHANG Haiyun, et al. Research on the optimal selection model of deep well tunnel support scheme based on G1 method and VIKOR method[J].Mining Technology,2023,23(3):9-12.

[9] 赵梦洁,杨玉中.基于组合赋权-灰色 VIKOR 的煤矿隐患排查治理能力评估研究[J].矿业安全与环保,2023,50(6):141-146.
ZHAO Mengjie, YANG Yuzhong. Study on the evaluation of coal mine hidden danger investigation and management capability based on combination weight-grey VIKOR[J].Mining Safety and Environmental Protection,2023,50(6):141-146.

[10] 伍小沙,田世祥,袁梅,等.基于主客观赋权 VIKOR 法的煤矿智能化评价研究[J].矿业研究与开发,2021,41(4):165-169.
WU Xiaosha, TIAN Shixiang, YUAN Mei, et al. Research on coal mines intelligent evaluation based on subjective and objective weighting VIKOR method[J].Mining Research and Development,2021,41(4):165-169.

[11] 安景文,王金鹤.基于博弈论与 VIKOR 法的煤矿安全生产管理水平评估研究[J].煤矿安全,2019,50(5):289-292.
AN Jingwen, WANG Jinhe. Evaluation of coal mine safety production management level based on game theory and VIKOR method[J].Safety in Coal Mines,2019,50(5):289-292.

[12] 杨三军,荆亚茹,姜润发.矿山救援队应急救援能力评价指标体系构建[J].中国安全科学学报,2021,31(8):180-188.
YANG Sanjun, JING Yaru, JIANG Runfa. Construction of evaluation index system for emergency rescue capabilities of mine rescue teams[J].China Safety Science Journal,2021,31(8):180-188.

[13] LIU Houdong, KANG Qian, ZOU Yi, et al. Research on comprehensive evaluation model of metal mine emergency rescue system based on game theory and regret theory[J]. Sustainability,2023,15(14):10879.

[14] 罗文婷,王艳辉,蔡嗣经,等.SP 多属性评价法在矿山应急体系评价中的应用[J].北京科技大学学报,2009,31(7):809-814.

LUO Wenting, WANG Yanhui, CAI Sijing, et al. Multi-attribute SP evaluation method applied in evaluation of emergency response systems for mines[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2009,31(7):809-814.

[15] 王国强,王亚军,豆龙,等.基于五元联系数的通风系统风险态势分析[J].矿业研究与开发,2024,44(11):204-212.
WANG Guoqiang, WANG Yajun, DOU Long, et al. Risk situation analysis on ventilation system based on five-element connection number[J]. Mining Research and Development,2024,44(11):204-212.

[16] 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 for tunnel surrounding rock based on multidimensional connection cloud[J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(3):156-167.

[17] 王焕,郑欣,于雁武,等.基于 BWM-DEMATEL-VIKOR 模型的尾矿库风险评价[J].金属矿山,2022(12):238-245.
WANG Huan, ZHENG Xin, YU Yanwu, et al. Risk evaluation of tailings pond based on BWM-DEMATEL-VIKOR model[J]. Metal Mine,2022(12):238-245.

[18] 向韫,曹明. 基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型[J].矿业研究与开发,2025,45(2):146-154.
XIANG Yun, CAO Ming. GRA-VIKOR evaluation model of water inrush risk in coastal gold mines based on moment estimation theory[J]. Mining Research and Development,2025,45(2):146-154.

[19] 王云刚,周辰,李辉,等.基于熵权灰色关联法的煤与瓦斯突出主控因素分析[J].安全与环境学报,2016,16(6):5-9.
WANG Yungang, ZHOU Chen, LI Hui, et al. Analysis of the dominant controlling factors leading to the coal and gas outburst based on the entropy weight and grey correlation method[J].Journal of Safety and Environment,2016,16(6):5-9.

[20] 于博,陈光波,陈旭,等.基于博弈论组合赋权的 CW-TOPSIS 煤与瓦斯共采评价模型及应用:以赵官煤矿为例[J].科学技术与工程,2024,24(33):14170-14177.
YU Bo, CHEN Guangbo, CHEN Xu, et al. CW-TOPSIS coal and gas co-mining evaluation model based on game theory and its application: a case study of Zhaoguan coal mine[J].Science Technology and Engineering,2024,24(33):14170-14177.