基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型*

向韫，曹明

（长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对滨海金矿涌水风险具有随机性和模糊性的特点以及评价指标之间复杂的关联性问题，为使滨海金矿涌水风险评估更科学，建立了基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型。首先，从工程地质和水文地质2个方面，选取10个典型影响因素，构建了评价指标体系；其次，采用区间层次分析法（IAHP）、序关系分析法（G1）、熵权法（EM）和改进相关性法（ICRITIC）4种单一赋权法计算指标主、客观权重，基于矩估计理论，改进主、客观权重集成优化方法；根据 GRA-VIKOR 原理，通过计算综合评价值，分析判定涌水风险状态；最后，将该模型应用到山东省某金矿9个中段涌水风险评估中，确定各中段涌水风险等级和排序。结果表明，该模型评价结果准确合理，符合实际，可为滨海金矿涌水风险评估工作提供参考。

关键词：滨海金矿；涌水风险；矩估计理论；灰色关联法；多准则妥协解排序法

中图分类号：TD742 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)02-0146-09

GRA-VIKOR Evaluation Model of Water Inrush Risk in Coastal Gold Mines Based on Moment Estimation Theory

XIANG Yun, *CAO Ming*

(Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In response to the randomness and fuzziness of water inrush risk in coastal gold mines, as well as the complex correlation among evaluation indicators, a GRA-VIKOR evaluation model of water inrush risk in coastal gold mines based on moment estimation theory was established to make the risk assessment more scientific. Firstly, 10 typical influencing factors were selected from two aspects of engineering geology and hydrogeology, and an evaluation indicator system was constructed. Secondly, four single weighting methods, namely IAHP method, G1 method, EM method, and I-CRITIC method, were used to calculate the subjective and objective weights of the indicators. Based on moment estimation theory, the integrated optimization method of subjective and objective weights was improved. According to the GRA-VIKOR principle, the risk status of water inrush was analyzed and determined by calculating the comprehensive evaluation values. Finally, the model was applied to the risk assessment of water inrush in 9 middle sections of a gold mine in Shandong Province, the risk level and ranking of water inrush in each middle section were determined. The results indicate that the evaluation results of the model are accurate and reasonable, in line with reality, and can provide reliable ideas for the risk evaluation of water inrush in coastal gold mines

Key words: Coastal gold mine, Water inrush risk, Moment estimation theory, GRA, VIKOR

0 引言

随着地表浅部矿产资源逐渐开采殆尽，海洋矿产资源特别是滨海海域基岩矿床蕴藏的稀有贵重金属已经是矿业领域重要的开采新方向[1-3]。在地压与海水侵蚀的共同作用下，矿井突涌水已经成为滨海矿山矿产资源开采的主要水文地质灾害，严重影响矿区安全生产。因此，有必要建立滨海金矿风险评价模型，科学有效地进行涌水风险等级评估，为涌水防治提供理论支撑。

在滨海矿山涌水风险评价理论研究方面，刘国伟等[4]基于因子分析法和系统聚类分析法建立了滨海矿区水源识别 Bayes 线性模型，可为突水可能性快速预测提供理论基础；SHI Longqing 等[5]基于 GMS 系统建立了焦家金矿地下水数值模拟模型，用于研究地下水径流流向和预测矿井涌水量，可为矿井防治水提供理论依据；李科明等[6]针对滨海金矿涌水风险评估的不确定性问题，将云模型引入到涌水风险评估中，为滨海金矿涌水风险评估提供了量化分析计算模型；孙鹏等[7]考虑到滨海金矿涌水风险评估的随机性特点，建立了基于博弈论组合赋权-物元可拓综合评价模型。当前，滨海金矿涌水风险评价理论体系建设还不完善，且现有的理论研究成果没有充分考虑指标之间的关联性，可能产生

* **收稿日期**：2024-02-22

作者简介：向韫（1984—），女，湖南长沙人，硕士，工程师，主要从事矿山安全技术研究。E-mail：14912827@qq.com

评估结果失效等问题,难以真正有效指导工程实践。滨海金矿涌水风险评估需要考虑水文与地质等多个方面,属于典型的多属性综合定性决策过程,且涌水风险具有随机性和不确定性特点。多准则妥协解排序法(VIKOR)能够考虑决策者的主观偏好,在多属性定性评估和综合决策方面稳定性和可信度更高,计算过程更简便高效[8-9]。目前,以 VIKOR 法为理论基础的综合评价模型在尾矿库风险识别[10]、煤矿智能化建设评价[11]、煤矿安全生产管理水平评估[12]、深井巷道支护方案优选[13]等方面获得了满意的应用效果。但是传统的 VIKOR 法大多采取单一赋权法计算指标权重,难以兼顾工程客观实际和专家主观经验;另外,传统 VIKOR 法没有充分考虑指标因素的关联性,容易忽略待评对象的部分重要数据,从而影响评估结果的客观性、全面性。

鉴于此,本文将 VIKOR 法引入到滨海金矿涌水风险评价中,从工程地质和水文地质两个方面构建滨海金矿涌水风险评价指标体系。基于矩估计理论,优化指标综合赋权方法,解决指标主、客观权重失衡问题;考虑到灰色关联分析法在体现指标关联性和充分挖掘数据内在规律方面的突出优势,基于灰色关联分析法(GRA)改进 VIKOR 法,可以弥补传统 VIKOR 法的缺陷,解决传统 VIKOR 法的信息丢失问题,最终建立基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型。最后,以山东省某滨海金矿为研究背景,验证该模型在涌水风险评估方面的适用性和可行性。

1 指标体系

滨海金矿突涌水具有模糊性和未确定性的特点,在参考相关文献的基础上[6-7],结合矿山工程实际和突涌水成因机理,从工程地质和水文地质两个方面构建滨海金矿涌水风险评价指标体系(见图 1)。按照涌水风险从极高到极低排序,划分为Ⅰ级至Ⅳ级共 4 个等级。指标分级标准见表 1。

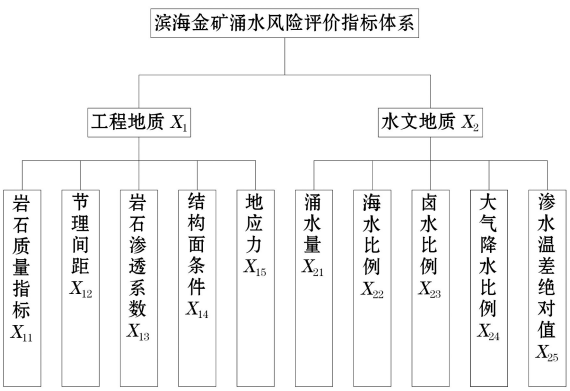


图 1 评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system

表 1 评价指标分级标准

Table 1 Evaluation index grading standards

等级	评价指标									
	X_{11}/%	X_{12}/cm	X_{13}/($\times10^{-7}$m/s)	X_{14}	X_{15}	X_{21}/(m³/h)	X_{22}/%	X_{23}/%	X_{24}/%	X_{25}/℃
Ⅰ级	[50,70)	(0,20]	(2.5,5]	(0,10]	(0,5]	(1200,2000]	(40,60]	(0,25]	(0,10]	(15,20]
Ⅱ级	[70,80)	(20,30]	(1.75,2.5]	(10,15]	(5,10]	(800,1200]	(25,40]	(25,35]	(10,25]	(10,15]
Ⅲ级	[80,90)	(30,40]	(1,1.75]	(15,20]	(10,15]	(400,800]	(10,25]	(55,85]	(25,40]	(5,10]
Ⅳ级	[90,100]	(40,100]	(0,1]	(20,30]	(15,20]	(0,400]	(0,10]	(85,100]	(40,60]	(0,5]

2 理论模型

2.1 指标赋权

单一赋权法或乘法合成组合赋权法在指标赋权方面依然存在局限性[14-15]。因此,本文基于矩估计理论,优化指标综合赋权方式。

假设选取了 q 种单一赋权法计算指标权重,其中主观赋权法有 p 种,客观赋权法有 $q-p$ 种,主观权重集合($\boldsymbol{w}_{sk}$)、客观权重集合($\boldsymbol{w}_{ok}$)、最优组合权重集合($\boldsymbol{w}_k$)分别表示为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{w}_s=\{\boldsymbol{w}_{sk}\mid 1\leqslant s\leqslant p,1\leqslant k\leqslant n\}\\ \forall s\in[1,p],\exists\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{w}_{sk}=1,\boldsymbol{w}_{sk}\geqslant 0\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{w}_o=\{\boldsymbol{w}_{ok}\mid 1\leqslant o\leqslant q-p,1\leqslant k\leqslant n\}\\ \forall o\in[1,q-p],\exists\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{w}_{ok}=1,\boldsymbol{w}_{ok}\geqslant 0\end{cases}\tag{2}$$

$$\boldsymbol{W}=\{\boldsymbol{w}_k\mid 1\leqslant k\leqslant n\}\tag{3}$$

矩估计理论基本数学模型记为:

$$\begin{cases}\min y(k)=\alpha\sum_{s=1}^{p}(\boldsymbol{w}_k-\boldsymbol{w}_{sk})^2+\beta\sum_{o=p+1}^{q}(\boldsymbol{w}_k-\boldsymbol{w}_{ok})^2\\ \text{s.t.}\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{w}_{sk}=1,0\leqslant\boldsymbol{w}_k\leqslant 1,1\leqslant k\leqslant n\end{cases}\tag{4}$$

式中:α 为主观权重相对重要系数;β 为客观权重相对重要系数。

矩估计理论指标权重计算步骤如下。

(1) 计算指标主、客观权重集合期望。基于矩估计理论,按照式(5),分别计算指标 x_k 的 w_{sk}、w_{ok} 期望。

$$\begin{cases} E(w_{sk}) = \sum_{s=1}^{p} \dfrac{w_{sk}}{p} \\ E(w_{ok}) = \sum_{o=p+1}^{q} \dfrac{w_{ok}}{q-p} \end{cases} \tag{5}$$

(2) 计算指标 x_k 的相对重要系数 α_k 和 β_k。根据指标 x_k 的 w_{sk}、w_{ok} 期望计算结果,按照式(6),计算指标主、客观权重相对重要系数 α_k、β_k。

$$\begin{cases} \alpha_k = \dfrac{E(w_{sk})}{E(w_{sk}) + E(w_{ok})} \\ \beta_k = \dfrac{E(w_{ok})}{E(w_{sk}) + E(w_{ok})} \end{cases} \tag{6}$$

(3) 计算总体相对重要系数。按照式(7),计算主、客观权重整体相对重要系数。

$$\begin{cases} \alpha = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} \alpha_k}{\sum_{k=1}^{n} \alpha_k + \sum_{k=1}^{n} \beta_k} = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} \alpha_k}{n} \\ \beta = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} \beta_k}{\sum_{k=1}^{n} \alpha_k + \sum_{k=1}^{n} \beta_k} = \dfrac{\sum_{k=1}^{n} \beta_k}{n} \end{cases} \tag{7}$$

矩估计理论要求权重偏差最小化,因此式(4)可以转化为:

$$\begin{cases} \min y = \{y(1), y(2), \cdots, y(n)\} \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^{n} w_k = 1, 0 \leqslant w_k \leqslant 1, 1 \leqslant k \leqslant n \end{cases} \tag{8}$$

对式(8)采用等权的线性加权方法求解,可得:

$$\begin{cases} \min y(k) = \sum_{k=1}^{n} \alpha \sum_{s=1}^{p} (w_k - w_{sk})^2 + \\ \quad \sum_{k=1}^{n} \beta \sum_{o=p+1}^{q} (w_k - w_{ok})^2 \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^{n} w_k = 1, 0 \leqslant w_k \leqslant 1, 1 \leqslant k \leqslant n \end{cases} \tag{9}$$

基于矩估计理论优化权重计算公式为:

$$w_k = \frac{\alpha \sum_{s=1}^{p} w_{sk} + \beta \sum_{o=p+1}^{q} w_{ok}}{q} - \frac{\sum_{k=1}^{n} (\alpha \sum_{s=1}^{p} w_{sk} + \beta \sum_{o=p+1}^{q} w_{ok}) - q}{nq} \tag{10}$$

2.2 GRA-VIKOR 模型

传统 VIKOR 法基本思路是首先根据指标属性特征和指标数据,确定各指标正、负理想解,通过计算指标数据与正、负理想解贴近度,折衷实现待评对象多属性综合决策。但是,在实际应用过程中,传统 VIKOR 法没有考虑指标之间的关联性,可能会忽略部分重要信息,从而导致最终决策失效。而灰色关联法(GRA 法)能够充分映射指标内在联系,利用GRA 改进传统 VIKOR 法,能够有效挖掘重要信息,提高评估结果的可靠性。具体计算过程如下[16-18]。

(1) 指标数据归一化处理。由于评价指标体系复杂,指标因素量纲、量级不同,需要按照式(11) 对所有指标进行归一化处理。

$$f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_{ij}^2}} \tag{11}$$

式中:y_{ij} 为第 i 个待评对象第 j 个指标取值;f_{ij} 为归一化值。

(2) 确定指标正、负理想解。结合指标属性,构建各指标正、负理想解集合。

$$\begin{cases} f_j^+ = [(\max_i f_{ij} \mid j \in X), (\min_i f_{ij} \mid j \in Y)], \\ \quad X \in \text{效益型指标}, Y \in \text{成本型指标} \\ f_j^- = [(\min_i f_{ij} \mid j \in X), (\max_i f_{ij} \mid j \in Y)], \\ \quad X \in \text{效益型指标}, Y \in \text{成本型指标} \end{cases} \tag{12}$$

(3) VIKOR 法计算群体效益值和个体遗憾值。根据 VIKOR 法原理,计算待评对象群体效益值 S_i 和个体遗憾值 R_i。

$$s_i = \sum_{j=1}^{m} (w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_{ij}^-}) \tag{13}$$

$$R_i = \max_j (w_j \frac{f_j^+ - f_{ij}}{f_j^+ - f_{ij}^-}) \tag{14}$$

(4) 计算灰色关联系数。按照式(15),计算待评对象各指标与正、负理想解的灰色关联系数 ε_{ij}。

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij}^+ = \dfrac{\min\limits_i \min\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^+) \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^+) \mid}{w_j \mid f_{ij} - f_{ij}^+ \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^+) \mid} \\ \varepsilon_{ij}^- = \dfrac{\min\limits_i \min\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^-) \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^-) \mid}{w_j \mid f_{ij} - f_{ij}^- \mid + \rho \max\limits_i \max\limits_j \mid w_j(f_{ij} - f_{ij}^-) \mid} \end{cases} \tag{15}$$

式中:ε_{ij}^+、ε_{ij}^- 分别表示指标正、负灰色关联系数;ρ

为分辨系数,一般取 0.5。

(5) 计算指标关联度。根据指标正、负灰色关联系数 ε_{ij}^{+}、ε_{ij}^{-} 结果,计算整体 GRA-VIKOR 正、负关联度。

$$\begin{cases}\varepsilon_i^{+}=\dfrac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_{ij}^{+}\\ \varepsilon_i^{-}=\dfrac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m}\varepsilon_{ij}^{-}\end{cases}\tag{16}$$

式中,ε^{+}、ε^{-} 分别表示指标整体 GRA-VIKOR 正、负关联度。

(6) 计算基于 GRA 下的群体效益值和个体遗憾值。按照式(17),计算基于灰色关联法的待评对象群体效益值 δ_i 和个体遗憾值 θ_i。

$$\begin{cases}\delta_i=\dfrac{\varepsilon_i^{-}}{\varepsilon_i^{+}}\\ \theta_i=\max\limits_{j}\left(\dfrac{\varepsilon_i^{-}}{\varepsilon_{ij}^{+}}\right)\end{cases}\tag{17}$$

(7) 计算综合指标值。按照式(18) 至式(20),计算基于 GRA-VIKOR 的待评对象综合指标值 Q_i:

$$Q_i=\upsilon\left(\frac{\delta'_i-\delta_i^{+}}{\delta_i^{-}-\delta_i^{+}}\right)+(1-\upsilon)\left(\frac{\theta'_i-\theta_i^{+}}{\theta_i^{-}-\theta_i^{+}}\right)\tag{18}$$

$$\begin{cases}\delta'_i=Q_i\cdot\delta_i\\ \delta_i^{+}=\min Q_i\cdot\min\delta_i\\ \delta_i^{-}=\max Q_i\cdot\max\delta_i\end{cases}\tag{19}$$

$$\begin{cases}\theta'_i=Q_i\cdot\theta_i\\ \theta_i^{+}=\min Q_i\cdot\min\theta_i\\ \theta_i^{-}=\max Q_i\cdot\max\theta_i\end{cases}\tag{20}$$

式中:υ 为决策机制系数,一般取 0.5;δ'_i 表示第 i 个待评对象的群体效益值;δ_i^{+}、δ_i^{-} 分别表示第 i 个待评对象最小和最大群体效益值;θ'_i 表示第 i 个待评对象的个体遗憾值;θ_i^{+}、θ_i^{-} 分别表示第 i 个待评对象最小和最大个体遗憾值。

最后,根据待评对象综合指标值 Q_i 结果进行优劣排序和确定风险等级。

2.3 实现步骤

如前所述,本文建立了基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型,根据 GRA-VIKOR 模型原理,通过计算综合评价值,确定各待评对象涌水风险排序和等级。评价流程如图 2 所示。

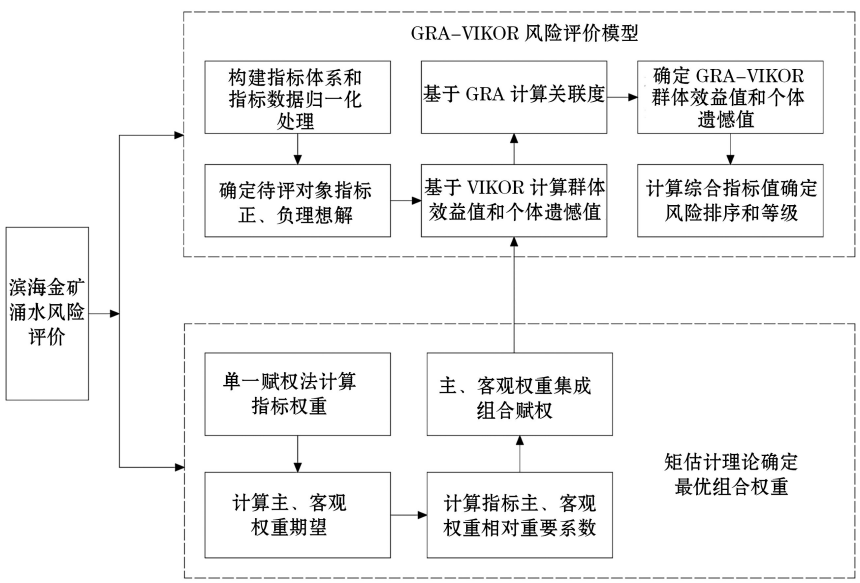


图 2 基于 GRA-VIKOR 的滨海金矿涌水风险评价实现过程

Fig.2 Implementation process of water inrush risk assessment for coastal gold mines based on GRA-VIKOR

3 模型应用

为验证基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型的有效性和适用性,以山东省某滨海金矿为研究背景,通过相关计算,综合评估涌水风险。该金矿矿区东北及西南两侧被海水覆盖,在回采过程中,多个中段巷道已经出现了不同程度的海水涌入情况,局部地段透水问题相对突出。为确保矿产资源开采安全性和连续性,需要对 9 个重点中段水平开展涌水风险性科学研判。结合矿山地质资料,收集整理了 9 个中段评价指标测试值。按照式(11),对指标数据进行归一化处理,结果见表 2。

表 2 待评对象指标数据归一化值

Table 2 Normalized values of indicator data for the objects to be evaluated

待评对象	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}
P_1	0.324 6	0.400 8	0.369 7	0.285 2	0.402 3	0.253 2	0.579 8	0.253 6	0.130 1	0.026 7
P_2	0.350 6	0.276 5	0.305 2	0.190 1	0.377 2	0.030 3	0.226 3	0.397 1	0.070 6	0.083 2
P_3	0.344 8	0.357 6	0.149 2	0.342 3	0.364 6	0.413 2	0.215 0	0.340 1	0.263 4	0.183 2
P_4	0.310 5	0.333 4	0.413 8	0.228 2	0.364 6	0.856 1	0.188 1	0.372 1	0.191 3	0.322 1
P_5	0.289 9	0.326 8	0.318 8	0.380 3	0.352 0	0.034 3	0.223 4	0.253 1	0.526 8	0.357 4
P_6	0.356 5	0.314 5	0.374 8	0.380 3	0.276 6	0.067 8	0.038 2	0.469 1	0.054 9	0.332 1
P_7	0.349 5	0.288 8	0.339 2	0.418 3	0.276 6	0.028 2	0.209 3	0.272 1	0.482 9	0.272 9
P_8	0.319 1	0.335 1	0.351 3	0.380 3	0.276 6	0.072 8	0.656 2	0.094 0	0.545 6	0.432 5
P_9	0.348 3	0.350 4	0.310 3	0.323 2	0.276 6	0.139 9	0.072 1	0.396 1	0.246 2	0.596 3

3.1 指标权重

利用 IAHP 法和 G1 法对滨海金矿涌水风险评价指标进行主观赋权,通过向权威专家发放调查问卷形式,由专家结合自身工程经验,确定指标相对重要性,由此获取指标主观权重,充分尊重专家在滨海金矿涌水风险评估中的主观能动性;应用 EM 法和 ICRITIC 法对滨海金矿涌水风险评价指标进行客观赋权,基于指标实测数据,通过相关计算获取指标客观权重,能够有效兼顾指标因素之间内在关联性和工程客观实际。单一赋权法权重计算结果见表 3。

表 3 不同赋权模式下指标权重结果

Table 3 Weight results of Indicators under different weighting modes

指标	权重结果				主、客观权重方差
	IAHP 法	G1 法	EM 法	ICRITIC 法	
X_{11}	0.103 6	0.036 4	0.068 9	0.016 8	0.038 1
X_{12}	0.063 8	0.125 9	0.095 1	0.022 5	0.044 2
X_{13}	0.126 2	0.104 9	0.117 1	0.050 1	0.034 1
X_{14}	0.102 8	0.058 3	0.078 1	0.052 3	0.022 8
X_{15}	0.047 2	0.019 2	0.230 9	0.037 4	0.098 8
X_{21}	0.185 7	0.274 1	0.051 7	0.273 4	0.104 9
X_{22}	0.089 6	0.084 8	0.076 2	0.178 8	0.048 0
X_{23}	0.182 3	0.161 2	0.062 1	0.084 9	0.058 1
X_{24}	0.042 3	0.064 5	0.147 1	0.154 1	0.056 9
X_{25}	0.056 5	0.070 7	0.072 8	0.129 7	0.032 3

根据式(1)至式(5),计算指标主观、客观权重 $\boldsymbol{w}_{sk}$、$\boldsymbol{w}_{ok}$ 集合分量期望值,其中 E_{sk}=(0.070 0,0.094 9,0.115 6,0.080 6,0.033 2,0.229 9,0.087 2,0.171 8,0.053 4,0.063 6),E_{ok}=(0.042 9,0.058 8,0.083 6,0.065 2,0.134 2,0.162 6,0.127 5,0.073 5,0.150 6,0.101 3);根据式(6),结合 E_{sk}、E_{ok} 结果,计算指标因素主观相对重要系数 α_k 为(0.620 3,0.617 3,0.580 2,0.552 7,0.198 4,0.585 8,0.406 1,0.700 3,0.261 8,0.385 8),指标因素客观相对重要系数 β_k 为(0.379 7,0.382 7,0.419 8,0.447 3,0.801 6,0.414 2,0.593 9,0.299 7,0.738 2,0.614 2)。根据式(7),计算评价指标主观权重总体相对重要性系数 α=0.490 9,评价指标客观权重总体相对重要性系数 β=0.509 1。根据式(8)至式(10),计算优化综合权重 $\boldsymbol{w}$=(0.078 1,0.088 2,0.099 6,0.086 4,0.092 3,0.147 8,0.103 9,0.110 9,0.101 4,0.091 4)。赋权结果对比见图 3。

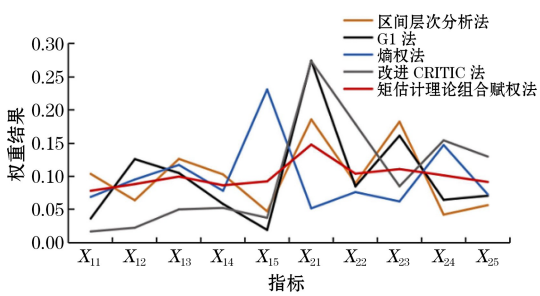


图 3 指标权重结果对比

Fig.3 Comparison of indicator weight results

由表 3 和图 3 分析可知,在单一赋权模式下,4 组权重向量呈现无序性的特点,表明单一赋权法容易受到人为主观经验或客观数据特征的影响,从而出现权重或偏于主观或偏于客观的“失衡”现象。而基于矩估计理论组合赋权法,能够实现主观、客观权重偏差最小化,在保留单一赋权法优点的基础上,使权重结果更加可靠、均衡。综合单一赋权法和矩估计理论组合赋权法可知,涌水量(X_{21})是滨海金矿涌水风险评估的重要影响因素。

3.2 案例计算

根据 GRA-VIKOR 模型原理,结合工程实际,计算 9 个中段综合评估值,并确定涌水风险排序。

(1) 确定指标正负理想解。根据式(12),结合

指标属性特征,确定指标正、负理想解集合:

f^+=(0.356 5,0.400 8,0.149 2,0.418 3,0.402 3,0.028 2,0.038 2,0.469 1,0.545 6,0.026 7)

f^-=(0.289 9,0.276 5,0.413 8,0.190 1,0.276 6,0.856 1,0.656 2,0.094 0,0.054 9,0.596 3)

(2) 计算指标正负关联系数。根据式(15)和表 2 指标数据,计算指标与正、负理想解的指标灰色关联系数,具体计算结果见表 4。

表 4 指标正、负灰色关联系数

Table 4 Positive and negative grey correlation coefficients of indicators

关联度	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}
ε_{ij}^+	0.960 9	1.000 0	0.736 0	0.841 8	1.000 0	0.648 1	0.521 0	0.719 1	0.592 3	1.000 0
	0.992 6	0.848 0	0.797 5	0.756 4	0.963 5	0.995 0	0.758 0	0.884 6	0.559 5	0.922 2
	0.985 3	0.941 4	1.000 0	0.903 0	0.946 2	0.518 2	0.769 2	0.810 5	0.681 4	0.810 5
	0.944 6	0.911 0	0.699 0	0.788 4	0.946 2	0.333 4	0.797 1	0.850 5	0.630 1	0.693 9
	0.921 7	0.903 6	0.783 7	0.949 0	0.929 5	0.986 1	0.760 7	0.718 6	0.969 8	0.669 4
	1.000 0	0.889 4	0.731 5	0.949 0	0.840 6	0.912 8	1.000 0	1.000 0	0.551 5	0.686 9
	0.991 1	0.861 0	0.763 9	1.000 0	0.840 6	1.000 0	0.774 9	0.736 9	0.905 9	0.731 2
	0.954 5	0.913 4	0.752 8	0.949 0	0.840 6	0.902 8	0.488 0	0.595 3	1.000 0	0.622 7
	0.989 7	0.932 3	0.792 3	0.881 7	0.840 6	0.787 6	0.945 5	0.883 1	0.668 4	0.540 4
ε_{ij}^-	0.957 7	0.848 0	0.933 0	0.881 7	0.840 6	0.407 1	0.885 2	0.775 7	0.889 1	0.540 4
	0.928 1	1.000 0	0.849 9	1.000 0	0.868 3	0.334 0	0.578 1	0.645 5	0.974 7	0.566 2
	0.934 6	0.895 2	0.699 0	0.823 2	0.882 8	0.483 2	0.571 7	0.691 6	0.743 2	0.618 5
	0.974 4	0.924 7	1.000 0	0.949 0	0.882 8	1.000 0	0.557 2	0.664 9	0.815 7	0.709 5
	1.000 0	0.932 3	0.866 1	0.788 4	0.897 8	0.335 0	0.576 5	0.776 3	0.561 2	0.737 1
	0.921 7	0.948 0	0.940 3	0.788 4	1.000 0	0.344 4	0.488 0	0.595 3	1.000 0	0.717 0
	0.929 4	0.982 5	0.891 7	0.756 4	1.000 0	0.333 4	0.568 6	0.756 1	0.585 1	0.674 3
	0.964 1	0.922 1	0.907 3	0.788 4	1.000 0	0.345 8	1.000 0	1.000 0	0.551 5	0.803 4
	0.930 7	0.903 6	0.855 9	0.841 8	1.000 0	0.366 3	0.502 1	0.646 2	0.759 3	1.000 0

根据式(16),确定指标正、负灰色关联度:

ε_i^+=(0.801 9,0.847 7,0.836 6,0.759 4,0.859 2,0.856 2,0.860 5,0.801 9,0.826 2)

ε_i^-=(0.795 9,0.774 5,0.734 3,0.847 8,0.747 1,0.774 3,0.747 7,0.828 3,0.780 6)

(3) 计算 GRA-VIKOR 群体效益值和个体遗憾值。根据式(13)、式(14)和式(17),计算基于 GRA 下的群体效益值和个体遗憾值,具体计算结果见表 5。

表 5 灰色关联法群体效益值和个体遗憾值计算结果

Table 5 Calculation results of group benefit value and individual regret value using grey correlation method

待评对象	S_i	R_i	δ_i	θ_i
P_1	0.451 6	0.091 1	0.992 5	1.699 3
P_2	0.419 2	0.098 2	0.913 6	1.741 9
P_3	0.320 8	0.068 7	0.877 8	1.090 7
P_4	0.623 6	0.147 8	1.116 4	2.999 5
P_5	0.398 8	0.078 1	0.869 5	1.105 2
P_6	0.410 3	0.101 4	0.904 4	1.813 1
P_7	0.391 0	0.092 3	0.868 9	1.189 6
P_8	0.561 0	0.110 9	1.032 9	2.049 2
P_9	0.434 8	0.091 4	0.944 9	1.850 6

(4) 计算 GRA-VIKOR“三值”。根据式(18)至式(20),计算群体效益值 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 6。

表 6 基于 GRA-VIKOR 的评价结果

Table 6 Evaluation results based on GRA-VIKOR

待评对象	δ'_i	θ'_i	Q_i
P_1	0.451 6	0.091 1	0.311 2
P_2	0.419 2	0.098 2	0.255 1
P_3	0.320 8	0.068 7	0.003 4
P_4	0.623 6	0.147 8	0.983 2
P_5	0.398 8	0.078 1	0.096 8
P_6	0.410 3	0.101 4	0.258 3
P_7	0.391 0	0.092 3	0.120 3
P_8	0.561 0	0.110 9	0.566 9
P_9	0.434 8	0.091 4	0.286 0

根据 GRA-VIKOR 综合指标值 Q_i 计算结果可知,9 个中段巷道涌水风险排序依次为:$P_3<P_5<P_7<P_2<P_6<P_9<P_1<P_8<P_4$,即 P_3 中段涌水风险最小,P_4 中段涌水风险最大。

3.3 模型分析

3.3.1 评估结果可靠性分析

为便于分析和比较,计算传统 VIKOR 综合指标值 Q_i、传统 GRA 灰色关联度、改进 TOPSIS(I-

TOPSIS)贴近度,进行不同中段涌水风险排序,并同步计算各模型评估数据的极差和方差。极差和方差越大,表明该模型在滨海金矿涌水风险排序方面区分度更高,适应性更好。具体计算结果见表 7。

表 7 不同模型评估结果对比

Table 7 Comparison of evaluation results of different models

待评对象	传统 VIKOR		传统 GRA		GRA-VIKOR		I-TOPSIS		实际状态
	Q_i	排序	关联度	排序	Q_i	排序	贴近度	排序	
P_1	0.357 2	7	0.753 9	7	0.311 2	7	0.593 7	7	7
P_2	0.348 5	5	0.790 4	4	0.255 1	4	0.703 9	4	4
P_3	0.000 1	1	0.821 9	1	0.003 4	1	0.745 7	1	1
P_4	0.993 4	9	0.737 4	8	0.983 2	9	0.519 2	9	9
P_5	0.187 9	2	0.818 7	2	0.096 8	2	0.732 1	2	2
P_6	0.354 3	6	0.783 2	5	0.258 3	5	0.673 5	5	5
P_7	0.264 9	3	0.814 3	3	0.120 3	3	0.728 3	3	3
P_8	0.663 4	8	0.732 8	9	0.566 9	8	0.572 3	8	8
P_9	0.337 2	4	0.775 4	6	0.286 1	6	0.631 8	6	6
极差	0.993 3		0.089 1		0.979 8		0.226 5		
方差	0.285 9		0.034 1		0.295 8		0.080 5		

由表 7 可知,基于改进 TOPSIS 模型评估结果与本文评估结果相同,且与专家现场讨论结论相一致,表明本文所建立的综合评价模型在滨海金矿涌水风险评估方面具有可行性,评估结果合理可靠。对比发现:基于传统 GRA 模型,在中段 P_4 和中段 P_8 风险等级排序方面存在一定差异,其他中段排序完全一致,结合巷道工程实际,中段 P_4 涌水量观测值达到 1 962.3 m^3/h,按照指标分级标准,单指标涌水风险等级为Ⅰ级,即风险较高,中段 P_8 涌水量观测值达到 175.9 m^3/h,单指标涌水风险等级为Ⅳ级,即风险极低,而涌水量单指标因素权重占比 14.78%,属于涌水风险等级评估的关键指标因素,因此,中段 P_4 涌水风险性要高于中段 P_8;基于传统 VIKOR 模型,在中段 P_2、中段 P_6 和中段 P_9 涌水风险等级排序方面存在偏差,中段 P_2 涌水量观测值和渗水温差绝对值在 3 个中段中最小,分别为 69.5 m^3/h、1.93 ℃,均属于低风险等级,两指标权重累积占比 23.92%;中段 P_9 涌水量观测值和渗水温差绝对值在 3 个中段中最大,分别为 321.9 m^3/h、13.78 ℃,其涌水风险等级应高于其他两个中段,中段 P_6 介于 P_2 和 P_9 两个中段中间,涌水量观测值和渗水温差绝对值分别为 159.8 m^3/h 和 8.6 ℃。因此,总体上 3 个中段涌水风险等级为 $P_2<P_6<P_9$ 更符合实际。

由表 7 可知,基于 GRA-VIKOR 模型,各综合指标值 Q_i 极差为 0.979 8,方差为 0.295 8;改进 TOPSIS 模型贴近度极差为 0.226 5,方差为 0.080 5。基于 GRA-VIKOR 模型极差和方差均比改进 TOPSIS 模型较大,表明本文所建立的 GRA-VIKOR 模型在涌水风险等级排序方面确定性更大,而改进 TOPSIS 模型在涌水风险状态识别过程中可能具有一定模糊性。

3.3.2 敏感性分析

为了说明基于 GRA-VIKOR 模型在滨海金矿涌水风险评估方面的稳定性,需要对决策机制系数 υ 进行敏感性分析。按照决策机制系数 υ 取值分别为 0.1,0.3,0.5,0.7 和 0.9,观察 9 个中段涌水风险排序变化情况。具体计算结果见表 8。

表 8 不同决策机制系数风险排序结果

Table 8 Risk ranking results of different decision mechanism coefficients

待评对象	$\upsilon=0.1$		$\upsilon=0.3$		$\upsilon=0.5$		$\upsilon=0.7$		$\upsilon=0.9$	
	Q_i	排序	Q_i	排序	Q_i	排序	Q_i	排序	Q_i	排序
P_1	0.235 5	4	0.273 4	6	0.311 2	7	0.349 1	7	0.387 2	7
P_2	0.259 5	5	0.257 3	4	0.255 1	4	0.252 9	5	0.250 6	5
P_3	0.000 7	1	0.002 0	1	0.003 4	1	0.004 8	1	0.006 1	1
P_4	0.893 4	9	0.913 6	9	0.983 2	9	0.989 9	9	0.992 8	9
P_5	0.044 0	2	0.070 4	2	0.096 8	2	0.123 2	2	0.149 6	3
P_6	0.288 1	7	0.273 2	5	0.258 3	5	0.243 4	4	0.228 5	4
P_7	0.099 7	3	0.110 1	3	0.120 3	3	0.130 6	3	0.140 9	2
P_8	0.444 1	8	0.505 5	8	0.566 9	8	0.628 3	8	0.689 7	8
P_9	0.261 7	6	0.273 8	7	0.286 1	6	0.298 1	6	0.310 2	6

由表 8 可知,9 个中段涌水风险排序稍有变化,但总体上保持平稳,即决策机制系数 υ 对评估结果影响相对较小,表明该模型在滨海金矿涌水风险评估方面稳定可靠。

综上所述,基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型兼顾了准确性和科学性,能够为风险评估提供参考。

3.4 涌水风险等级确定

根据指标分级标准临界值,计算 GRA-VIKOR 综合指标值 Q_i,确定涌水风险等级判别标准,具体计算结果如下:

风险极高(Ⅰ级),$Q_i=1$;

风险较高(Ⅱ级),$0.746\ 5\leqslant Q_i<1$;

风险一般(Ⅲ级),$0.267\ 3\leqslant Q_i<0.746\ 5$;

风险较低(Ⅳ级),$0\leqslant Q_i<0.267\ 3$。

根据涌水风险等级判定标准和各中段综合指标值 Q_i 计算结果,确定涌水风险等级。为进一步验证模型评估结果的可靠性,将评估结果与物元可拓和云模型进行比较。对比结果见表 9。

表 9 评估结果

Table 9 Evaluation results

待评对象	综合评价值 Q_i	评估结果			实际情况
		本文	物元可拓[19]	云模型[20]	
P_1	0.311 2	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
P_2	0.255 1	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅳ级
P_3	0.003 4	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级
P_4	0.983 2	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级
P_5	0.096 8	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级
P_6	0.258 3	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级
P_7	0.120 3	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅲ级	Ⅳ级
P_8	0.566 9	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级
P_9	0.286 1	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级

由表 9 可知,本文所建立的综合评价模型评估结果与实际调查情况相符合,3 种评价模型评估结果基本一致,表明该模型在滨海金矿涌水风险评估方面具有适用性。

本文建立了基于矩估计理论的滨海金矿风险 GRA-VIKOR 评价模型,保证了主、客观权重集成融合最优化,基于 GRA 法充分挖掘了待评对象信息,耦合 VIKOR 法,模型理论性更强,在评估结果合理可靠前提下,计算模型更加简便高效、实用性强。与云模型相比,GRA-VIKOR 可以依托 Excel 软件进行数据处理和计算,不需要编写程序和进行复杂运算,且不需要设置过多主观定性参数,因此,GRA-VIKOR 模型客观性、可操作性强;与物元可拓模型相比,VIKOR 法既可以综合分析各待评对象优劣性排序,也可以综合确定风险等级,模型评估结果的稳定性更好,而传统物元可拓模型本质上是通过计算等级隶属度并基于最大隶属度判别风险等级,在面对滨海金矿涌水风险评估等多属性综合决策定性评估问题时,可能出现丢失重要指标信息或数据超过指标节域现象,从而影响评估结果可靠性。

4 结论

(1) 利用 4 种单一赋权法计算指标主、客观权重,基于矩估计理论,改进了权重集成优化方法,兼顾了专家在指标权重计算过程中的主观性,又体现了指标数据本身属性特征,能提高评估结果的可靠性。

(2) 针对滨海金矿涌水风险评估不确定性、模糊性和指标数据之间强关联性的特点,为提高评估结果准确性,应用 GRA 改进传统 VIKOR 法,建立了基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评估模型,并以山东省某滨海金矿 9 个中段为研究背景,综合评估涌水风险态势,并与物元可拓、云模型评估结果和实际状况比较。研究结果显示该模型评估结果与实际相符,验证了在滨海金矿涌水风险评估方面的可行性,该模型既可以对涌水风险程度进行排序,还可以客观合理地判别风险等级,体现了研究价值。

(3) 滨海金矿涌水风险评估具有复杂性,后续研究还需要结合工程实际,进一步优化和完善指标体系,进一步提高评估模型的适用性。

参考文献(References):

[1] 王军,刘景军,王延平.滨海矿山深部开采水压-水温-围岩应力监测与突水机理[J].金属矿山,2022(6):177-183.
WANG Jun, LIU Jingjun, WANG Yanping. Monitoring on the hydraulic pressure-temperature-surrounding rock stress and the mechanism of water inrush for coastal mine in deep mining[J].Metal Mine,2022(6):177-183.

[2] 冀东,徐晨,李腾飞,等.滨海深部开采矿山水文地质环境调查与渗流场特征分析[J].工程地质学报,2016,24(4):674-681.
JI Dong, XU Chen, LI Tengfei, et al. Hydrogeology investigation and characteristics analysisof seepage field for coastal mine in deep exploitation[J].Journal of Engineering Geology,2016,24(4):674-681.

[3] YAN Bingqian, QI Qingjie, LIU Jianzhong, et al. Fracture propagation and permeability evolution mechanism of jointed rock mass in coastal mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 56(4): 2763-2778.

[4] 刘国伟,马凤山,郭捷,等.多元统计分析在滨海矿区水源识别中的应用:以三山岛金矿为例[J].黄金科学技术,2019,27(2):207-215.
LIU Guowei, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Application of multivariate statistical analysis to identify water source in coast mine area: as example of Sanshandao gold mine[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(2): 207-215.

[5] SHI Longqing, WANG Ying, QIU Mei, et al. Assessment of water inrush risk based on the groundwater modeling system: a case study in the Jiaojia Gold Mine Area, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(24): 619-629.

[6] 李科明,刘志祥,兰明.滨海金矿涌水危险评价及涌水量混沌预测研究[J].黄金科学技术,2019,27(4):539-547.
LI Keming, LIU Zhixiang, LAN Ming. Research on water inrush risk assessment and water inflow chaotic predictionof coastal gold mine[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(4): 539-547.

[7] 孙鹏,荣帅.基于改进物元可拓法的滨海金矿涌水风险评估模型研究[J].有色金属工程,2021,11(6):109-117.
SUN Peng, RONG Shuai. Study on risk assessment model of water inrush in coastal gold mine based on improved matter element extension method [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6): 109-117.

[8] WANG Qiwen, SONG Guibao, YANG Xiuxia. Mixed-attitude three-way decision model for aerial targets: Threat assessment based on IF-VIKOR-GRA method [J]. Mathematical biosciences and engineering: MBE, 2023, 20(12): 21514-21536.

[9] 郭进平,周国悦,聂兴信,等.高风险企业组织安全行为重要度评价[J].中国安全科学学报,2022,32(11):23-30.
GUO Jinping, ZHOU Guoyue, NIE Xingxin, et al. Importance evaluation of organizational safety behavior in high-riskenterprises[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32 (11): 23-30.

[10] 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.

[11] 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 mine intelligent evaluation based on subiective and obiective weighting VIKOR method[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4): 165-169.

[12] 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 evaluation of coalminehidden danger investigation and management capabilitybased on combination weight-gray VIKOR [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(6): 141-146.

[13] 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. Study on the optimal model of deep mine tunnel support scheme based on G1-VIKOR method[J]. Mining Technology, 2023, 23(3): 9-12.

[14] 李书浩.基于矩估计组合赋权的烤烟可用性评价及预测[D].昆明:昆明理工大学,2022.
LI Shuhao. Evaluation and prediction of flue-cured tobacco availabilitybased on moment estimation and combination weighting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[15] 江慧敏,叶义成,胡南燕,等.采空区风险评价的改进灰靶模型[J].有色金属工程,2021,11(7):96-106.
JlANG Huimin, YE Yicheng, HU Nanyan, et al. lmproved grey target model for risk evaluation of goaf[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(7): 96-106.

[16] DJAMAL C, DJEDJIGA K. Multi-criteria decision-making based on novel fuzzy generalized divergence and knowledge measures[J]. Granular Computing, 2022, 8(4): 747-769.

[17] 赵辉,李志杰,张晶淇,等.城市轨道交通 PPP 项目运作方式选择研究[J].青岛理工大学学报,2022,43(6):159-168.
ZHAO Hui, LI Zhijie, ZHANG Jingqi, et al. Research on the operation mode selection ofurban rail transit PPP project [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(6): 159-168.

[18] WENG Xiangjian, YANG Shan. Private-sector partner selection for public-private partnership projects based on improved CRITIC-EMW weight and GRA-VIKOR method [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022.

[19] 吴峰,张海云,方前程.基于岩体质量分级的地下矿山巷道支护设计[J].矿业研究与开发,2021,41(6):84-88.
WU Feng, ZHANG Haiyun, FANG Qiancheng. Roadway support design in underground mine based on rock mass quality classification[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6): 84-88.

[20] 李明海,常通,杨一帆.基于云模型的采场冒顶片帮事故预警方法研究[J].采矿技术,2024,24(1):143-149.
LI Minghai, CHANG Tong, YANG Yifan. Research on early warning method for roof fall and collapse accidents in mining areas based on cloud models[J]. Mining Technology, 2024, 24(1): 143-149.