

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2021.05.009

文章编号:1672-3767(2021)05-0077-10

基于博弈论与 TOPSIS 法煤与瓦斯突出危险性评价研究

唐 猛, 康向涛, 高 璐, 郑禄林, 江明泉, 王子一

(贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:为准确判断煤与瓦斯的突出危险性,根据煤与瓦斯突出影响因素建立煤与瓦斯突出危险性评价指标体系,引入博弈论思想优化组合主客观权重,构建 TOPSIS 法煤与瓦斯突出危险性评价模型,并对贵州某矿 5[#]、9[#]、16[#]煤层进行评价分析。结果表明:基于博弈论优化组合主客观权重的赋权方法,避免了权重确定中的主观性和不确定性;综合考虑煤层与地质条件、瓦斯条件和煤体物理性质的评价模型考虑因素较为全面,避免了单一指标的片面性;在选定因素的分析范围内,16[#]煤层具有最大的突出危险性,模型的评价结果与其他评价方法结果一致,验证了模型的可靠性,可为该方法在其他方面的应用提供有效借鉴。

关键词:煤与瓦斯突出;层次分析法;熵权;博弈论;理想逼近排序法

中图分类号:TD71

文献标志码:A

Study on risk assessment of coal and gas outburst based on game theory and TOPSIS

TANG Meng, KANG Xiangtao, GAO Lu, ZHENG Lulin, JIANG Mingquan, WANG Ziyi

(College of Mining, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: In order to accurately judge the hazard of coal and gas outburst, this study first established the gas outburst risk evaluation index system according to the influencing factors of coal and gas outburst. Game theory was introduced to optimize the combination of subjective and objective weights. The technique for order preference by similarity to an ideal solution method(TOPSIS) of coal and gas outburst risk evaluation model was then constructed. Finally, this model was used to evaluate and analyze 5[#], 9[#] and 16[#] coal seam in a mine in Guizhou. The results show that the weighting method of optimal combination of subjective and objective weights based on the game theory can avoid the subjectivity and uncertainty in weight determination. The evaluation model which comprehensively considers the coal seam and geological conditions, gas conditions and physical properties of coal body is more comprehensive and can avoid the one-sidedness of a single index. Within the analysis range of selected factors, 16[#] coal seam has the greatest outburst risk. The evaluation results of the proposed model are consistent with those of other evaluation methods, which verifies the reliability of the model and provides effective reference for the application of this method in other aspects.

Key words: coal and gas outburst; analytic hierarchy process; entropy weight; game theory; TOPSIS

在我国的一次能源组成中,煤炭消费量占能源消费总量的 56.8%^[1]。随着国内浅部煤炭资源的枯竭,大

收稿日期:2021-04-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52064009,52004073);贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2020]1Y216)

作者简介:唐 猛(1997—),男,贵州六盘水人,硕士研究生,主要研究方向为矿山灾害防治、安全信息,山东科技大学安全工程专业 2016 级校友。

康向涛(1980—),男,河南汝州人,副教授,博士,主要从事采矿工程、水力压裂、矿山安全与灾害防治等方面的教学与科研工作,本文通信作者。E-mail: xiaokangedu@163.com

部分矿井开始向深部延伸开采,煤层开采条件愈发复杂,煤与瓦斯突出事故的发生频率、区域强度均显著增加^[2]。煤与瓦斯突出是威胁煤矿安全生产的灾害之一,严重威胁煤矿井下工人生命安全^[3-4]。因此,研究并建立煤与瓦斯突出危险性评价模型,对保证煤矿安全生产具有重要意义。

国内外学者利用各种理论、数学方法从不同角度对煤与瓦斯突出危险性评价和预测做了大量的研究^[5-7],目前运用较多的有层次分析法、灰色关联法、模糊数学、突变理论及BP神经网络等^[8-9],但由于煤与瓦斯突出的不确定性,单靠某一方法或指标的预测准确性不高,故对煤与瓦斯突出进行预测、评价时,通常综合多种方法。郭德勇等^[10]首次将层次分析法和模糊综合评判方法相结合,在典型工作面进行运用,验证了层次分析-模糊综合评判方法的可行性;谢雄刚等^[11]结合熵权和可拓理论构建了矿井煤与瓦斯突出评价模型对煤层突出危险性进行评价;Xu等^[12]为评价煤与瓦斯突出危险性,提出一种基于事故树基本事件重要度、灰色关联分析和领结模型的安全评估方法;王云刚等^[13]基于熵权法和灰色关联法建立模型,对平顶山东部矿区现场进行煤与瓦斯突出评价,验证了建立模型的合理性。突出危险性评价的准确性很大程度上取决于指标权重的合理性,通过专家评判来确定指标权重具有一定的主观性^[14],故引入客观指标权重,基于博弈论对主客观权重进行组合赋权,避免单一赋权带来的偏向性,使评价结果更加准确。

基于前人研究成果,本研究选取层次分析法和熵权法来确定权重,结合理想逼近排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)建立煤与瓦斯突出危险性评价模型,通过计算评价对象与正理想解的贴近度进行排序^[15],定量评价煤矿煤与瓦斯突出的危险性。并以贵州桐梓某煤矿为例,验证模型的合理性。

1 评价指标权重计算

1.1 AHP法确定主观权重

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是将决策目标逐层分解为多个目标或准则,通过定性指标模糊量化计算求解的分析方法^[16]。将各因素归一化处理后,自上而下构建由目标层、准则层和指标层组成的评价体系,利用下层对上层的相对重要性来评价因子的权重。AHP法确定主观权重的步骤如下:

1) 建立层次分析模型。根据各因素不同属性将决策目标分解成若干层次,最上层为目标层,中间层为准则层,最下层为方案或对象层。

2) 构造判断矩阵。从结构模型的第二层开始,对同一层因素成对比较,用1~9标度法^[17]构造比较判断矩阵 A^* 。

3) 计算权向量并做一致性检验。计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} ,通过判断矩阵的一致性检验公式 $CR = \frac{CI}{RI}$ 进行检验,其中: CI 为一致性检验指标, $CI = \frac{\lambda_{\max} - x}{x - 1}$, n 为矩阵维数; RI 为平均一致性指标。当 $CR < 0.1$ 时,判定矩阵具有满意的一致性,否则要重新构造判断矩阵,直到满意为止。

1.2 熵权法确定客观权重

熵权法是一种常用的客观赋权方法,根据各指标的变异程度,利用信息熵计算出各指标的熵权,再通过熵权对各指标的权重进行修正,从而得到客观的指标权重^[18]。熵权法的步骤如下:

1) 根据样本数据建立原始矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$,并进行无量纲、标准化处理^[19]。

对于效益性指标,有

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_j)}{\max(a_j) - \min(a_j)}; \quad (1)$$

对于成本性指标,有

$$r_{ij} = \frac{\max(a_j) - a_{ij}}{\max(a_j) - \min(a_j)}。 \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为原始矩阵中第*i*行第*j*列元素, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$; m 为方案个数; n 为指标个数; $\max(a_j)$ 、 $\min(a_j)$ 分别为第*j*列的最大值、最小值;

2) 确定各指标熵值。

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (3)$$

式中: e_j 为各指标的熵值; $p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$, $p_{ij} \in [0, 1]$ 。

特别的, 当 $p_{ij} = 0$ 时, 令 $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。其权重为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (4)$$

式中 w_j 为第 j 个指标的权重。

1.3 博弈论组合赋权

AHP 法确定权重依赖于专家经验, 具有主观性, 使得评判标准有所不同, 熵权法确定的客观权重受人为因素影响较小, 但容易忽视样本数据随机性的影响和自身的差异, 两种方法对于同一指标的权重系数存在一定差异^[20]。博弈论组合赋权能够寻找主客观权重的一致性 or 妥协性, 使主客观权重离差极小化, 优化组合赋权, 增加权重值的准确性^[21]。

假设用 L 种方法计算各指标权重, 基本权重集 $w_k = \{w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}\}$, ($k = 1, 2, \dots, L$), 设 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ 为线性组合系数, 则 L 个向量的任意组合为:

$$w = \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T, \quad \alpha_k > 0 \quad (5)$$

式中: w 为基本权重集的一种可能向量; w_k 为第 k 种方法得到的指标权重向量。以 w 与 w_k 的离差极小化为目标, 对式(5)中的线性组合系数 α_k 进行优化, 可得到最满意的权重向量 $w^* = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_k^*\}$ 。优化的对策模型为:

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k w_k^T - w_k \right\|_2 \quad (6)$$

计算得到 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L)$, 进行归一化处理

$$\alpha_k^* = \frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^L \alpha_k} \quad (7)$$

则博弈论组合赋权的权重向量为:

$$w^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* w_k^T \quad (8)$$

2 构建博弈论综合赋权 TOPSIS 模型

TOPSIS 法广泛应用于多目标决策分析中, 根据评判对象与理想化目标的接近程度进行排序, 然后进行相对优劣评价^[22-23]。理想贴进度的取值在 0~1 之间, 该值越接近 1 表示相应的评价目标越接近最优水平; 反之, 表示评价目标越接近最劣水平。

2.1 构建初始评判矩阵及加权标准化决策矩阵

设待评价方案有 m 个, 待评方案集为 $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$, 每个方案评判指标集为 $b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, 评判指标 b_{ij} 表示第 i 个方案的第 j 个评判指标, 初始评判矩阵可以表示为:

$$B = (b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于风险指标中的单位和评判标准并不统一,需要将评价指标进行无量纲化、标准化处理,进而消除指标的不可公度性^[24],计算过程可参照公式(1)和(2),最终得到标准化决策矩阵 $C=(c_{ij})_{m \times n}$ 。加权标准化决策矩阵 R 是将矩阵 C 的列向量与上述博弈论确定的指标权重向量 w_n^* 相乘,可表示为:

$$R=(r_{ij})_{m \times n}=\begin{bmatrix} w_1 c_{11} & w_2 c_{12} & \cdots & w_n c_{1n} \\ w_1 c_{21} & w_2 c_{22} & \cdots & w_n c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 c_{m1} & w_1 c_{m2} & \cdots & w_n c_{mn} \end{bmatrix} \circ \quad (10)$$

2.2 贴进度分析

效益性指标集 J_1 的正理想解为行向量的最大值,负理想解为行向量的最小值。对于成本性指标集 J_2 ,正理想解为行向量的最小值,负理想解为行向量的最大值,可表示为:

$$\begin{cases} R^+=\{(\max_n w_n c_{mn} \mid m \in J_1), (\min_n w_n c_{mn} \mid m \in J_2)\}, \\ R^-=\{(\min_n w_n c_{mn} \mid m \in J_1), (\max_n w_n c_{mn} \mid m \in J_2)\}. \end{cases} \quad (11)$$

式中: R^+ 为正理想解; R^- 为负理想解。

评判对象与正负理想解 R^+ , R^- 的欧氏距离 D^+ , D^- 分别为:

$$\begin{cases} D^+=\sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij}-r_j^+)^2}, \\ D^-=\sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij}-r_j^-)^2}. \end{cases} \quad (12)$$

式中: D^+ 越小表明越接近正理想解; D^- 越小表明越接近负理想解;

贴进度分析的计算公式为:

$$E_i=\frac{D_i^-}{(D_i^++D_i^-)}, 0 \leq E_i^+ \leq 1. \quad (13)$$

式中,评判对象贴进度 E_i^+ 的取值范围在 0~1 之间,其值的大小反映了评判指标贴近正理想的程度,可根据指标贴进度的值对方案进行评判。

当评价对象的指标划分成不同层次时,需要在单层次评价的基础上进行多层次评价。多层次评价是利用单层次评价的结果组成评价矩阵,考虑指标层权重,权重向量和评价矩阵相乘得到评价结果向量,可根据加权相对贴进度确定评价对象的优劣情况。设评价对象综合评价结果向量为 F :

$$F=w^* \times E. \quad (14)$$

式中: w^* 为博弈论组合赋权的各指标的综合权重向量; E 为各评判指标与正理想解的贴进度构成的评判矩阵。

3 实例应用

以贵州桐梓县某煤矿标高 1 058 m 以上的 5[#]、1 049 m 以上的 9[#]、1 078 m 以上的 16[#] 煤层为研究对象,进行实例计算,煤与瓦斯突出相关参数的原始测定数据如表 1

表 1 贵州省桐梓县某矿煤与瓦斯突出参数测定结果汇总表^[25]

Tab. 1 Summary of coal and gas outburst parameter measurement results in a mine in Tongzi County, Guizhou Province

煤层	5 [#]	9 [#]	16 [#]
地质构造	2.70	2.10	3.40
埋深	192	176	142
钻屑量 $S/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	5.88	6.32	6.68
瓦斯压力 p/MPa	0.52	0.76	0.68
瓦斯含量	7.72	8.68	8.24
瓦斯放散初速度	22.40	20.40	27.50
煤的坚固性系数 f	0.686	0.336	0.553
煤的破坏类型	4.70	7.20	7.80
软煤层厚度 h/m	0.28	0.20	0.35

注:地质构造和煤的破坏类型指标为专家评分值

所示,基于博弈论综合赋权的 TOPSIS 模型对煤与瓦斯突出危险性评价具体的分析流程如图 1 所示。

3.1 煤与瓦斯突出危险性评价指标体系

煤与瓦斯突出是众多因素综合作用的结果,其影响因素众多,且因地区而异。本节基于文献资料及相关学者的研究,构建了以煤层与地质条件、瓦斯条件、煤体物理性质、煤矿安全管理因素等 4 个因素为准则层,以钻屑量等 22 个因素为指标层的煤与瓦斯突出危险性评价指标体系,如图 2 所示。

根据相关研究,煤层与地质条件 P_1 、瓦斯条件 P_2 和煤体的物理性质 P_3 对煤与瓦斯突出起到主导作用^[26],基于表 1 的原始测量数据,简化评价指标体系,选择其中 9 个指标来描述这 3 类因素,其中影响煤层与地质条件的指标包括地质构造的复杂程度 X_1 、软煤层埋深 X_2 、钻屑量 X_3 ,影响瓦斯条件的指标包括瓦斯压力 X_4 、瓦斯含量 X_5 、瓦斯放散初速度 X_6 ,影响煤体物理性质条件的指标包括煤的坚固性系数 X_7 、煤的破坏类型 X_8 、软煤层厚度 X_9 ,由此可构建出煤与瓦斯突出危险性的评价模型。

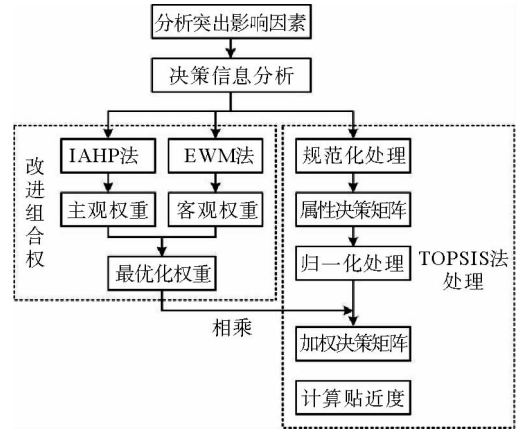


图 1 煤与瓦斯突出危险性评价方法组合过程

Fig. 1 Combination process of coal and gas outburst risk assessment method

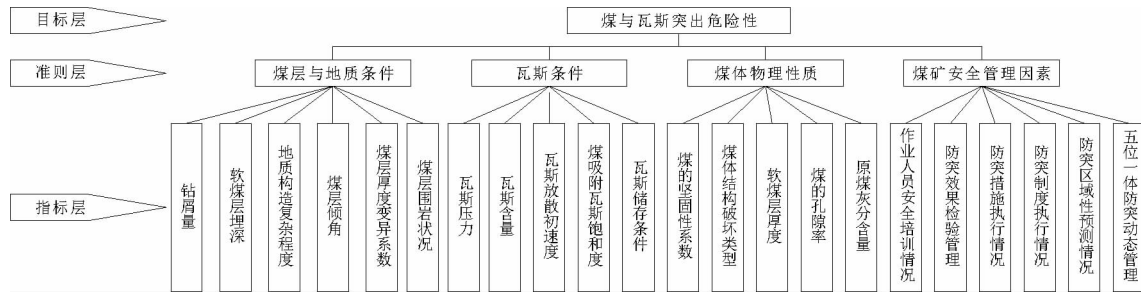


图 2 煤与瓦斯突出危险性评价指标

Fig. 2 Risk assessment index of coal and gas outburst

3.2 确定指标权重系数

3.2.1 AHP 法确定主观权重

根据建立的煤与瓦斯突出危险性评价指标,同一层的指标两两比较,通过咨询相关从业人员,包括煤矿领导、高校教授、现场人员等,进行评分统计得到目标层 A^* 与准则层 P 的判断矩阵(即 A^*-P 判断矩阵),其次,对准则层 P 与指标层 R 分别构建判断矩阵(即 P_1-R 、 P_2-R 、 P_3-R 判断矩阵)。

$$A^*-P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中: P_{12} 表示 P_1 与 P_2 重要性比较的结果。

$$P_1-R = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$P_2-R = \begin{bmatrix} X_{44} & X_{45} & X_{46} \\ X_{54} & X_{55} & X_{56} \\ X_{64} & X_{65} & X_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$P_3 - R = \begin{bmatrix} X_{77} & X_{78} & X_{79} \\ X_{87} & X_{88} & X_{89} \\ X_{97} & X_{98} & X_{99} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}。$$

根据上述的评判矩阵,可得特征值 $\lambda_{\max 0}=3.018\ 3$ 、 $\lambda_{\max 1}=3.009\ 2$ 、 $\lambda_{\max 2}=3.018\ 3$ 、 $\lambda_{\max 3}=3$,利用前文所述公式进行一致性检验,可得 $CR_0=0.015\ 7$ 、 $CR_1=0.007\ 9$ 、 $CR_2=0.015\ 7$ 、 $CR_3=0$,由于 CR_0 、 CR_1 、 CR_2 、 CR_3 均小于0.1,可知判断矩阵满足一致性的要求,按照AHP法对煤与瓦斯突出危险性评价指标进行层次总排序,确定各指标层的主观权重,如表2所示。在对以上指标得主观赋权中,煤层与地质条件对于突出的重要程度最高,权值为0.443 4,其次是瓦斯条件,最后是煤体物理性质,而地质构造的复杂程度在煤层与地质条件中占据了最高的重要程度,权值为0.539 6。在瓦斯条件准则层中,权值为0.558 4的瓦斯压力被认为是最重要的一個指标。煤体物理性质中,重要程度差别不大,煤的坚固性系数和煤的破坏类型占据了较大的重要程度,软煤层厚度对于煤与瓦斯突出重要程度相对较低。

3.2.2 熵权法确定客观权重

由表1中煤矿各指标的原始测定数据,根据式(1)和(2)可得到煤层与地质条件、瓦斯条件、煤体物理性质因素的熵值,进而由式(4)计算得到各指标的客观权重,计算结果如表3所示。

表2 层次总排序权值表

Tab. 2 Hierarchical total sort weight table				
R	P_1	P_2	P_3	总排序权重
	0.443 4	0.387 4	0.169 2	w
X_1	0.539 6	—	—	0.239 3
X_2	0.297 0	—	—	0.131 7
X_3	0.163 4	—	—	0.072 5
X_4	—	0.558 4	—	0.216 3
X_5	—	0.319 6	—	0.123 8
X_6	—	0.122 0	—	0.047 2
X_7	—	—	0.400 0	0.067 7
X_8	—	—	0.400 0	0.067 7
X_9	—	—	0.200 0	0.033 8

表3 熵权法客观权重

Tab. 3 objective weight of entropy weight method				
	评价指标	熵值	权重	客观权重
P_1	X_1	0.982 5	0.665 4	0.221 8
	X_2	0.992 4	0.289 0	0.096 3
	X_3	0.998 8	0.045 6	0.015 2
P_2	X_4	0.988 0	0.606 1	0.202 0
	X_5	0.999 0	0.050 5	0.016 8
	X_6	0.993 2	0.343 4	0.114 5
P_3	X_7	0.964 0	0.425 5	0.141 8
	X_8	0.975 9	0.284 9	0.095 0
	X_9	0.975 5	0.289 6	0.096 5

3.2.3 博弈论组合赋权

运用博弈论思想将AHP法所得的主观权重与熵权法所得的客观权重进行优化组合,根据公式(5)~(8)求得组合权重值,各指标的权重值以及第一、二层次的组合权重值如图3、图4所示。

由层次分析法确定的主观权重和熵权法确定的客观权重存在一定的差异,主观赋权中影响煤与瓦斯突出的主次关系排序为:地质构造复杂程度>瓦斯压力>软煤层埋深>瓦斯含量>钻屑量>煤的坚固性系数=煤的破坏类型>瓦斯放散初速度>软煤层厚度。客观赋权中影响煤与瓦斯突出的主次关系排序为:地质构造复杂程度>瓦斯压力>煤的坚固性系数>瓦斯放散初速度>软煤层埋深>软煤层厚度>煤的破坏类型>瓦斯含量>钻屑量。运用博弈论思想组合赋权后得到的组合权重,影响煤与瓦斯突出的主次关系排序为: $X_1>X_4>X_2>X_7>X_8>X_6>X_5>X_9>X_3$,即地质构造复杂程度>瓦斯压力>软煤层埋深>煤的坚固性系数>煤的破坏类型>瓦斯放散初速度>瓦斯含量>软煤层厚度>钻屑量。

煤与瓦斯突出是由于地应力和瓦斯压力作用下,大量煤岩与瓦斯突然涌向采掘空间的动力现象,突出的动力一部分来源于瓦斯压力,其对突出有着显著的影响。地质构造的复杂程度在主客观赋权和综合赋权中都是最重要的影响因素,地质构造与煤与瓦斯突出关系密切。并且煤与瓦斯突出大多集中发生在断层、褶

曲、煤层厚度和倾角及走向变化等强烈变形的构造区域和高破坏类型煤发育的松软煤层区域。复杂的地质条件更容易引起煤层结构整体发生变化,使整个煤层的强度降低,进而引发煤与瓦斯突出事故。

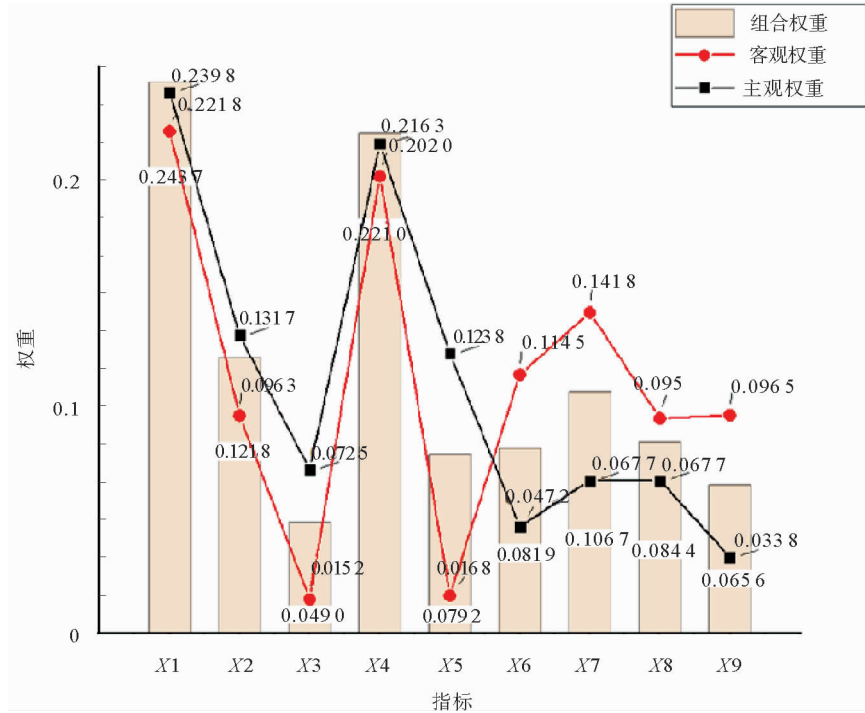


图3 各指标主客观权重及组合权重

Fig. 3 Various subjective and objective weights and the combination weights

3.3 TOPSIS 法指标综合评判

3.3.1 第二层次的评价

1) 煤层与地质条件评价

根据表3的原始数据,按照式(9)将数据标准化,根据图4中所示的煤层与地质条件各指标权重,按照式(10)可得到煤层与地质条件的加权标准化矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.1998 & 0.1102 & 0.0310 \\ 0.1554 & 0.1010 & 0.0333 \\ 0.2516 & 0.0815 & 0.0362 \end{bmatrix}.$$

在煤层与地质条件准则层中,各指标均为成本型指标,按照式(11)可得到理想解的正理想解和负理想解分别为:

$$\begin{cases} R_1^+ = \{0.1554, 0.0815, 0.0310\}, \\ R_1^- = \{0.2516, 0.1102, 0.0362\}. \end{cases}$$

根据确定的煤层与地质条件各指标的正理想解和负理想解后,按照式(12)可求得各指标与正、负理想解的距离为:

$$\begin{cases} D_1^+ = 0.0529, & D_1^- = 0.0521; \\ D_2^+ = 0.0196, & D_2^- = 0.0802; \\ D_3^+ = 0.0963, & D_3^- = 0.0287. \end{cases}$$

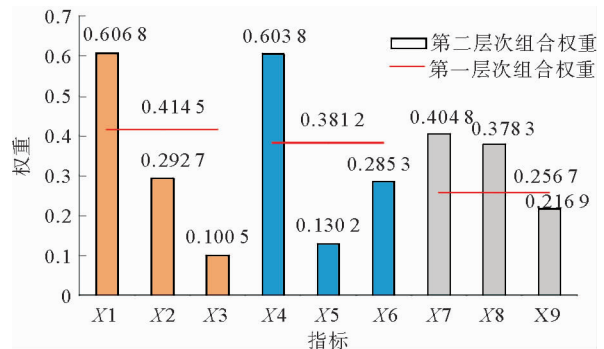


图4 各层次组合权重

Fig. 4 Combination weights at all levels

根据煤层与地质条件各指标与正理想解和负理想解的距离,按照式(13)可计算得到评价对象与理想解的贴进度为:

$$E_{11} = 0.496\ 2, E_{12} = 0.803\ 6, E_{13} = 0.229\ 6。$$

2) 瓦斯条件评价

与煤层与地质条件的计算过程类似,根据式(9)~(13)进行计算,可得到评价对象与理想解的贴进度为:

$$E_{21} = 0.907\ 6, E_{22} = 0.279\ 6, E_{23} = 0.302\ 4。$$

3) 煤体物理性质条件评价

与上述计算过程类似,根据式(9)~(13)进行计算,可得到评价对象与理想解的贴进度为:

$$E_{31} = 0.839\ 6, E_{32} = 0.286\ 2, E_{33} = 0.413\ 9。$$

3.3.2 第一层次的评价

根据第二层次的评价结果组成评价矩阵,根据博弈论确定的各准则层的组合权重,按照式(14)可得到第一层次的综合评价结果向量为:

$$F = w^* \cdot E = [0.414\ 5, 0.539\ 3, 0.735\ 7] \begin{bmatrix} 0.496\ 2 & 0.803\ 6 & 0.229\ 6 \\ 0.907\ 6 & 0.279\ 6 & 0.302\ 4 \\ 0.839\ 6 & 0.286\ 2 & 0.413\ 9 \end{bmatrix} = [0.767\ 2, 0.513\ 1, 0.316\ 7]。$$

3.3.3 评价结果

根据判断准则和计算结果可知突出危险性:在煤与瓦斯突出危险性相关的煤层与地质条件方面,9#煤层<5#煤层<16#煤层;瓦斯条件方面,5#煤层<16#煤层<9#煤层;煤体物理性质方面,5#煤层<16#煤层<9#煤层。综合上述3个方面,在选定的因素分析范围内,5#煤层<9#煤层<16#煤层,即16#煤层具有最大的突出危险性,5#煤层突出危险性最小,实际开采过程中应加强对16#煤层的防突措施,以确保矿井的安全生产。最终评价结果与其他评价方法结果^[25]一致,说明该模型对煤与瓦斯突出危险性的评价是可靠的。

4 结论

1) 在指标权重确定中,AHP法确定主观权重,熵权法确定客观权重,利用博弈论优化组合主客观权重,克服单一赋权方法的局限性,得到了更为理想的指标权重值,避免了赋权的主观性和不确定性。

2) 考虑煤层与地质条件、瓦斯条件、煤体物理性质、煤矿安全管理等多方面因素,建立了煤与瓦斯突出危险性评价指标体系,选择钻屑量等9个指标构建评价模型,运用博弈论优化赋权的TOPSIS法对实际工程进行了评价。

3) 煤与瓦斯突出评价指标的综合权重排序中,第一层次煤层与地质条件影响最大,瓦斯条件次之,煤体物理性质最小;第二层次中,地质构造复杂程度及瓦斯压力对突出的影响最大。在选定的因素分析范围内,突出危险性5#煤层<9#煤层<16#煤层,即16#煤层具有最大的突出危险性,实际开采过程中应加强防突措施,以确保矿井的安全生产,所得结果与其他评价方法结果一致。

参考文献:

[1]国家统计局.中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[J].中国统计,2021(3):8-22.

National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of the People's Republic of China in 2020[J]. China Statistics, 2021(3): 8-22.

[2]袁亮,王伟,王汉鹏,等.巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):205-214.

YUAN Liang, WANG Wei, WANG Hanpeng, et al. A simulation system for coal and gas outburst induced by coal uncovering in roadway excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 205-214.

[3]BLACK D J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(6): 815-824.

[4]舒龙勇,朱南南,陈结,等.煤与瓦斯突出危险精准辨识理论方法与技术探索[J].煤炭学报,2020,45(5):1614-1625.

SHU Longyong, ZHU Nannan, CHEN Jie, et al. Theoretical method and technology of precision identification for coal and

- gas outburst hazard[J].Journal of China Coal Society,2020,45(5):1614-1625.
- [5] RONG H,ZHANG H W,LIANG B,et al.Analysis of the occurrence mechanism for coal and gas outburst based on multiple discriminant indices[J/OL].Shock and Vibration,2019.DOI:10.1155/2019/7572910.
- [6] 梁冰,秦冰,孙维吉,等.智能加权灰靶决策模型在煤与瓦斯突出危险评价中的应用[J].煤炭学报,2013,38(9):1611-1615.
LIANG Bing,QIN Bing,SUN Weiji,et al.The application of intelligent weighting grey target decision model in the assessment of coal-gas outburst[J].Journal of China Coal Society,2013,38(9):1611-1615.
- [7] 梁跃强,林辰,宫伟东,等.投影寻踪聚类方法在煤与瓦斯突出危险性预测中的应用[J].中国安全生产科学技术,2017,13(1):46-50.
LIANG Yueqiang,LIN Chen,GONG Weidong,et al.Application of projection pursuit cluster method in risk prediction of coal and gas outburst[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(1):46-50.
- [8] 宋占全.薛湖井田掘进工作面突出预测敏感指标确定研究[D].焦作:河南理工大学,2017.
SONG Zhanquan.Study on the outburst prediction sensitive index in heading face of Xuehu mine field[D].Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2017.
- [9] WU Y Q,GAO R L,YANG J Z.Prediction of coal and gas outburst:A method based on the BP neural network optimized by GASA[J].Process Safety and Environmental Protection,2020,133(C):64-72.
- [10] 郭德勇,范金志,马世志,等.煤与瓦斯突出预测层次分析-模糊综合评判方法[J].北京科技大学学报,2007,29(7):661-664.
GUO Deyong,FAN Jinzhi,MA Shizhi,et al.Prediction method of coal and gas outburst by analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J].Journal of University of Science and Technology Beijing,2007,29(7):661-664.
- [11] 谢雄刚,王潞欧,陈刘瑜,等.基于熵权物源可拓的煤层突出危险性评价[J].安全与环境学报,2019,19(6):1869-1875.
XIE Xiong gang,WANG Luou,CHEN Liuyu,et al.Risk assessment of the coal seam outburst based on entropy weight matter element extension[J].Journal of Safety and Environment,2019,19(6):1869-1875.
- [12] XU Q W,XU K,LI L,et al.Mine safety assessment based on basic event importance:grey relational analysis and bow tie model[J/OL].Royal Society Open Science,2018,5(8).DOI:10.1098/rsos.180397.
- [13] 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.
- [14] 郭隆鑫,李希建,刘柱.基于改进层次分析法—突变理论的煤矿顶板事故风险分析[J].煤炭工程,2020,52(3):172-176.
GUO Longxin,LI Xijian,LIU Zhu.Risk analysis of roof accident in coal mine based on improved analytic hierarchy process and catastrophe theory[J].Coal Engineering,2020,52(3):172-176.
- [15] 陈刘瑜,李希建,毕娟,等.基于 AHP-TOPSIS 的冲击型煤与瓦斯突出倾向性预测[J].中国安全科学学报,2020,30(4):47-52.
CHEN Liuyu,LI Xijian,BI Juan,et al.Prediction of coal-gas outburst induced by rock-burst tendency based on AHP-TOPSIS[J].China Safety Science Journal,2020,30(4):47-52.
- [16] 许树柏.实用决策方法:层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988.
- [17] 史秀志,刘博,赵建平,等.顶底柱回采爆破方案优选的 AHP-TOPSIS 模型[J].采矿与安全工程学报,2015,32(2):343-348.
SHI Xiuzhi,LIU Bo,ZHAO Jianping,et al.Mining blasting scheme optimization of crown-sill pillar based on AHP-TOPSIS evaluation model[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2015,32(2):343-348.
- [18] 赵挺生,任玲玲,周炜,等.基于熵权法-CIM 模型的高速公路施工临近房屋安全风险评价[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):174-179.
ZHAO Tingsheng,REN Lingling,ZHOU Wei,et al.Safety risk assessment on buildings adjacent to construction site of expressway based on entropy-weight method and CIM model[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(3):174-179.
- [19] 李明亮,李克钢,秦庆词,等.基于改进组合赋权-TOPSIS 法的岩爆倾向性评判模型[J].中国安全生产科学技术,2020,16(3):74-80.
LI Mingliang,LI Kegang,QIN Qingci,et al.Judgment model of rock burst tendency based on improved combination weighting-TOPSIS method[J].Journal of Safety Science and Technology,2020,16(3):74-80.

- [20] 魏久传,赵智超,谢道雷,等.基于岩性及结构特征的砂岩含水层富水性评价[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(3):13-23.
WEI Jiuchuan,ZHAO Zhichao,XIE Daolei,et al.Water-abundance evaluation of sandstone aquifer based on lithologic and structural characteristics[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(3):13-23.
- [21] 曾韬.基于博弈论综合权重法与灰色模糊理论相结合的组合评估模型研究[D].兰州:兰州大学,2018.
ZENG Tao.Research on combination evaluation model based on game theory integrated weight method and grey-fuzzy theory[D].Lanzhou:Lanzhou University,2018.
- [22] 李东,张光德,赵宝峰,等.AHP-TOPSIS法在顶板水害危险性评价中的应用[J].煤炭工程,2017,49(12):111-115.
LI Dong,ZHANG Guangde,ZHAO Baofeng,et al.Application of AHP-TOPSIS method in roof water hazard assessment [J].Coal Engineering,2017,49(12):111-115.
- [23] OZCALICI M,BUMIN M.An integrated multi-criteria decision making model with Self-Organizing Maps for the assessment of the performance of publicly traded banks in Borsa Istanbul[J/OL].Applied Soft Computing,2020,90.DOI:10.1016/j.asoc.2020.160166.
- [24] 蒋浩鹏,孙建诚,杨文伟,等.基于 AHP 与改进 TOPSIS 权值算法的高速公路施工方案风险评价[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(8):698-703.
JIANG Haopeng,SUN Jiancheng,YANG Wenwei,et al.Risk evaluation of highway construction plan based on AHP and improved TOPSIS weight algorithm[J].Engineering Journal of Wuhan University,2020,53(8):698-703.
- [25] 胡新成,杨胜武,周秀红.基于熵权的 TOPSIS 法在煤与瓦斯突出综合评价中的应用[J].煤矿安全,2011,42(12):26-29.
HU Xincheng,YANG Shengwu,ZHOU Xiuhong.Application of TOPSIS method based on entropy weight in comprehensive evaluation of coal and gas outburst[J].Safety in Coal Mines,2011,42(12):26-29.
- [26] 李祥林.新义矿瓦斯地质规律及煤与瓦斯突出分级治理研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
LI Xianglin.Study on the gas geological law and classification control of coal and gas outburst in Xinyi coal mine[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2020.

(责任编辑:吕海亮)