

# 基于 AHP-EWM-TOPSIS 的矿井火灾危险性评价

姚瑞<sup>1</sup>, 詹辛慧<sup>1</sup>, 祁云<sup>2</sup>, 薛凯隆<sup>3</sup>, 董心悦<sup>1</sup>, 齐庆杰<sup>4</sup>

(1. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037003; 2. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010;  
3. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 西安 710054; 4. 煤炭科学研究总院有限公司应急科学研究院, 北京 100013)

**摘要:** 为有效评价矿井火灾的危险性等级、预防矿井火灾的发生, 提出一种基于层次分析法(AHP)-熵权法(EWM)-逼近理想解排序法(TOPSIS)的矿井火灾危险性评价模型。首先, 通过分析矿井火灾危险性影响因素, 建立包含20个指标的矿井火灾危险性评价指标体系, 并确定各评价指标的分级准则; 然后, 通过AHP和EWM分别确定各评价指标的主观权重和客观权重, 并引入矩阵思想进行组合赋权, 减小评价过程中主、客观因素对评价结果的影响, 得到最优综合权重; 最后, 采用TOPSIS确定矿井火灾危险性等级。应用所建模型对正佳煤矿矿井火灾危险性进行实例分析, 结果表明, 正佳煤矿矿井火灾危险性等级为“IV”, 较为安全, 评价结果与实际情况一致, 验证了模型的合理性。本文模型能够有效评价矿井火灾危险性, 可为其等级划分提供理论支撑。

**关键词:** 矿井火灾; 危险性评价; 层次分析法; 熵权法; 组合赋权; 逼近理想解排序法

**中图分类号:** X936 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2026.01.013

## Mine Fire Risk Assessment Based on AHP-EWM-TOPSIS

YAO Rui<sup>1</sup>, ZHAN Xinhui<sup>1</sup>, QI Yun<sup>2</sup>, XUE Kailong<sup>3</sup>, DONG Xinyue<sup>1</sup>, QI Qingjie<sup>4</sup>

(1. Shanxi Datong University, Datong 037003, China; 2. Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;  
3. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. Emergency Science Research Institute, CCTEG Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China)

**Abstract:** To effectively evaluate the risk level of mine fire and prevent mine fires, a mine fire risk assessment model based on analytic hierarchy process (AHP), entropy weight method (EWM) and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method is proposed. Firstly, through analyzing the influencing factors of mine fire risk, a mine fire risk evaluation system containing 20 indexes is established, and the grading criteria of each evaluation index is determined. Secondly, the subjective and objective weights of each evaluation index are determined by AHP and EWM, and the matrix idea is introduced to combine weights to reduce the influence of subjective and objective factors on the evaluation results in the evaluation process to obtain the optimal comprehensive weights. Finally, using TOPSIS to determine the risk level of mine fires. The model is used to analyze the fire risk of Zhengjia Coal Mine. The results show that the mine fire risk level of Zhengjia Coal Mine is 'IV', which is safe. The evaluation results are consistent with the actual situation, and the rationality of the model is verified. The model can effectively assess the mine fire risk and provide theoretical support for its classification.

收稿日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174188); 山西大同大学研究生实践创新项目(23CX49, 2024SJCX52)

作者简介: 姚瑞(1998—), 男, 硕士研究生; 祁云(1988—), 通信作者, 男, 副教授, 博士。

**Key words:** mine fire; risk assessment; analytic hierarchy process; entropy weight method; combinatorial weighting; technique for order preference by similarity to ideal solution

矿井火灾事故具有破坏力强、蔓延迅速等特点,属于重大灾害类型之一,不仅直接危及井下作业人员的安全,还可能引发设施损毁、生产中断等问题,使资源和经济遭受重大损失<sup>[1-2]</sup>。矿井火灾具有复杂的动态特性,涉及因素较多,其危险性评价是保障矿井安全生产、减少灾害发生的重要手段<sup>[3]</sup>。

矿井火灾危险性分析主要包括危险性评价方法、火灾危险性评价模型、火灾预防和应急响应措施等内容<sup>[4]</sup>,许多学者对此进行了深入研究。杨光银等<sup>[5]</sup>采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)耦合模糊综合评价法,对矿井火灾危险性展开系统分析,建立了包含通风系统、作业环境、设施安全性、应急救援能力和人员安全意识管理等指标的多维度层次化分析模型,为矿井安全等级划分提供了理论依据。秦忠诚等<sup>[6]</sup>开发了 AHP-熵权法(entropy weight method, EWM)双源权重集成体系,通过引入拉格朗日乘数优化器构建动态决策模型,同时采用欧几里得测度校准主客观参数,提升了模型与实际工程应用的适配性。田焱等<sup>[7]</sup>构建了 AHP-逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)混合决策模型,对煤层客观条件进行了量化分析,在矿井火灾危险性评价方面具有独特优势。

虽然现有矿井火灾危险性评价方法在实际应用中取得了一定效果,但仍存在一些不足,如权重的赋值和评分过程可能存在较强的主观性,导致评价结果偏差较大,影响决策的准确性和公正性。鉴于此,本文利用 AHP、EWM 和矩阵思想确定各评价指标的最优综合权重,同时引入 TOPSIS 法,构建基于 AHP-EWM-TOPSIS 组合赋权的矿井火灾危险性评价模型,通过计算样本相对贴进度确定火灾危险性等级,并以正佳煤矿为例,验证所建模型的合理性,以期类似条件的矿井火灾危险性评价提供理论支撑。

## 1 矿井火灾危险性综合评价模型

### 1.1 AHP 确定主客观权重

采用 AHP 确定主客观权重的步骤如下。

1)邀请行业专家对各指标进行赋值。采用 1~9 标度法比较同一层次两指标之间的相对重要

程度<sup>[8]</sup>,并赋予一定数值进行量化,赋值及含义如表 1 所示。

表 1 赋值及含义

Table 1 Assignment and meaning

赋值	含义
1	两因素同等重要
3	一个因素相比另一个因素稍重要
5	一个因素相比另一个因素明显重要
7	一个因素相比另一个因素非常重要
9	一个因素相比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	重要性程度介于其前后两数值之间

2)计算最大特征值。对每一对因素进行判断后赋值,量化后的数值组成层次判断矩阵  $Q$ , 矩阵的对角线元素为 1。

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $q_{ij}$  为层次判断矩阵中第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 行第  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 列元素,其中  $n$  为层次判断矩阵的阶数。层次判断矩阵  $Q$  为正互反矩阵,存在唯一最大特征根  $\lambda_{\max}$ ,采用改进特征向量法计算各指标权重,进而计算最大特征根,其计算过程如式(2)~(4)所示。

$$\bar{w}_{ij} = q_{ij} / \sum_{i=1}^n q_{ij} \quad (2)$$

$$w_i^{\text{AHP}} = \sum_{j=1}^n \bar{w}_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{w}_{ij} \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(QW^{\text{AHP}})_i / w_i^{\text{AHP}}] \quad (4)$$

式中:  $\bar{w}_{ij}$  为归一化判断矩阵(用  $Q'$  表示)中第  $i$  行第  $j$  列元素;  $w_i^{\text{AHP}}$  为层次判断矩阵进行按行求和并归一化后得到的指标  $i$  的权重;  $W^{\text{AHP}}$  表示权重向量,  $W^{\text{AHP}} = [w_1^{\text{AHP}}, w_2^{\text{AHP}}, \dots, w_n^{\text{AHP}}]^T$ ;  $(QW^{\text{AHP}})_i$  表示  $Q$  与  $W^{\text{AHP}}$  相乘后得到向量的第  $i$  个元素,  $(QW^{\text{AHP}})_i / w_i^{\text{AHP}}$  用于衡量一致性程度。

3)判断矩阵的一致性检验。通过最大特征值  $\lambda_{\max}$  和矩阵阶数  $n$  计算一致性检验指标,即一致性比率(用  $C_R$  表示)。如果  $C_R < 0.1$ ,表示一致性通过;如果  $C_R \geq 0.1$ ,则需要重新构造判断矩阵,直至一致性比率满足要求。一致性比率计算式为

$$C_R = C_1/R_1 \quad (5) \quad \text{式为}$$

式中:  $R_1$  是随机一致性指标, 取决于矩阵的阶数, 其数值如表 2 所示;  $C_1$  为一致性指标。  $C_1$  计算

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

表 2  $R_1$  数值对照表Table 2 Comparison table of  $R_1$  values

阶数 $n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$R_1$	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

## 1.2 EWM 确定客观权重

通过 EWM 对 AHP 得到的权重进行调整, 以更加客观地反映各危险因素的重要程度, 避免因主观判断带来偏差。EWM 基于信息熵的原理, 用于衡量不同指标的信息量, 从而确定其权重, 信息量大的指标权重较高, 信息量小的指标权重较低<sup>[9]</sup>。具体步骤如下。

1) 确定评价指标体系。根据矿井火灾具体情况选择对火灾危险性影响较大的评价指标, 构建决策矩阵  $X$ , 如式(7)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $x_{il}$  为决策矩阵中第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 行第  $l$  ( $l=1, 2, \dots, m$ ) 列元素, 其中  $m$  为方案数量。

2) 标准化处理。由于各指标量纲不同, 需对原始数据组进行标准化处理, 消除各指标的量纲差异, 并将各指标数值压缩在  $[0, 1]$  区间内。本文采用极差标准化方法配置指标属性, 正向指标和负向指标标准化表达式分别如式(8)和式(9)所示。

$$x'_{il} = \frac{x_{il} - \min(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})}{\max(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) - \min(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})} \quad (8)$$

$$x'_{il} = \frac{\max(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) - x_{il}}{\max(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) - \min(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})} \quad (9)$$

式中  $x'_{il}$  为  $x_{il}$  标准化后的值。

3) 计算熵值。对于由  $x'_{il}$  组成的标准化后的决策矩阵  $X'$ , 其第  $i$  行第  $l$  列的归一化评分占比  $p_{il}$  为

$$p_{il} = x'_{il} / \sum_{l=1}^m x'_{il} \quad (10)$$

计算指标  $i$  的熵值  $e_i$  和差异度  $d_i$ , 计算式分别为

$$e_i = -k \sum_{l=1}^m [p_{il} \ln(p_{il})] \quad (11)$$

$$d_i = 1 - e_i \quad (12)$$

式中  $k$  为常数, 通常取  $k=1/\ln(n)$ , 用于归一化处理时保证熵值在  $[0, 1]$  之间。熵值大小反映了指标信息的多少及相应的权重大小, 某指标的熵值越大, 则该因素的不确定性越大。第  $i$  个指标的熵权  $w_i^{\text{EWM}}$  计算式为

$$w_i^{\text{EWM}} = d_i / \sum_{i=1}^n d_i \quad (13)$$

## 1.3 AHP-EWM 组合权重的计算

将通过 AHP 得到的初步权重  $w_i^{\text{AHP}}$  和通过熵权法得到的熵权  $w_i^{\text{EWM}}$  进行加权平均得到组合权重  $w_i$ , 计算式为

$$w_i = \alpha w_i^{\text{AHP}} + \beta w_i^{\text{EWM}} \quad (14)$$

式中  $\alpha$  和  $\beta$  分别为 AHP 权重和 EWM 权重的组合权重比例, 满足  $\alpha + \beta = 1$ 。利用矩阵思想对  $\alpha$  和  $\beta$  进行计算, 表达式为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{w_i^{\text{AHP}}}{w_i^{\text{AHP}} + w_i^{\text{EWM}}} \\ \beta = \frac{w_i^{\text{EWM}}}{w_i^{\text{AHP}} + w_i^{\text{EWM}}} \end{cases} \quad (15)$$

## 1.4 TOPSIS 综合评价

采用 TOPSIS 进行综合评价的步骤如下。

1) 构建加权标准化矩阵。利用 AHP-EWM 法得到的组合权重  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  对标准化后的决策矩阵  $X'$  进行加权, 得到加权标准化决策矩阵  $Y$ , 以  $y_{il}$  表示矩阵  $Y$  中第  $i$  行第  $l$  列元素, 则  $y_{il} = w_i x'_{il}$ 。

2) 确定正负理想解。正理想解  $A_i^+$  是对于指标  $i$  取所有方案中该指标的最大值(对最优化指标), 即  $A_i^+ = \max(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ , 或者最小值(对最小化指标), 即  $A_i^+ = \min(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ ; 负理想解  $A_i^-$  是对于指标  $i$  取所有方案中该指标的最小值(对最优化指标), 即  $A_i^- = \min(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ , 或者最大值(对最大化指标), 即  $A_i^- = \max(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ <sup>[10]</sup>。

3) 计算每个方案所对应的加权标准化值  $y_{il}$  与

正理想解和负理想解的欧几里得距离  $D_i^+$  和  $D_i^-$ , 计算式分别为

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{il} - A_i^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{il} - A_i^-)^2} \end{cases} \quad (16)$$

计算方案  $l$  的相对贴近度  $C_l$ , 即方案  $l$  与正理想解的相对接近程度, 公式为

$$C_l = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (17)$$

$C_l$  越大, 表示方案  $l$  与正理想解越接近, 危险性越低, 方案越优<sup>[11]</sup>。

综上, 矿井火灾危险性评价的具体步骤为: 首先对被评价的目标进行分析, 综合选取评价指标; 然后采用 AHP 和 EWM 分别确定各指标的主、客观权重, 再利用矩阵思想通过加权平均将其进行耦合, 得到最优组合权重; 最后通过组合权重与标准化决策矩阵相乘得到加权决策矩阵, 在其中分别选取各指标的最优解和最劣解构成正负理想解, 采用欧氏距离公式计算各方案对应的加权标准化值与正负理想解的距离, 并计算相对贴近度, 相对贴近度越接近 1, 火灾风险越低。评价流程如图 1 所示。

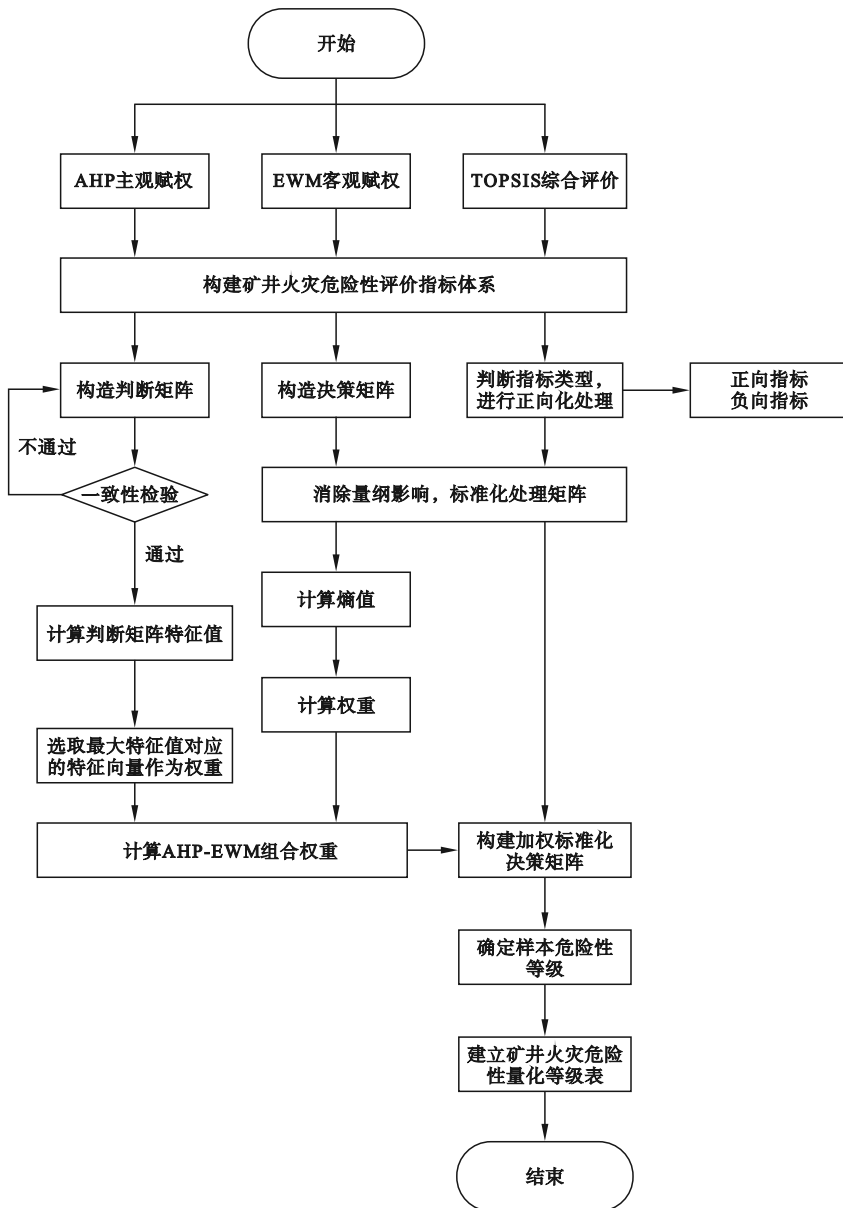


图 1 矿井火灾危险性评价流程图

Fig. 1 Flow chart of mine fire risk assessment

## 2 矿井火灾危险性评价指标体系

矿井火灾事故的发生条件十分复杂,既与煤自身特性相关,也受外部环境因素的影响。以山西正佳煤矿为例,该矿1204工作面是2号煤一采区的备采工作面,总体位于一个单斜构造之上,煤(岩)层倾向为北偏东45°左右,倾角在2°~10°左右,平均6°。工作面倾斜长度为131 m,走向长度为400 m。该煤层为赋煤区稳定可采煤层,结构简单,含0-1层

厚度为0.2~0.4 m的深灰-黑色炭质泥岩、泥岩夹矸层。煤层最薄处厚1.1 m,最厚处厚2.0 m,平均厚度为1.55 m。煤的吸氧量为0.68 cm<sup>3</sup>/g,自燃等级为Ⅱ级,属于自燃煤层,最短自然发火期为65天,具有发生火灾的危险。依据《煤矿安全规程》、《煤矿防灭火细则》等相关安全标准<sup>[12-13]</sup>,基于矿井风系统、煤矿生产作业环境、设备设施安全性、应急救援能力以及人员安全意识管理等五个方面,综合选取20个具有代表性的矿井火灾危险性评价指标,建立矿井火灾危险性评价指标体系,如图2所示。

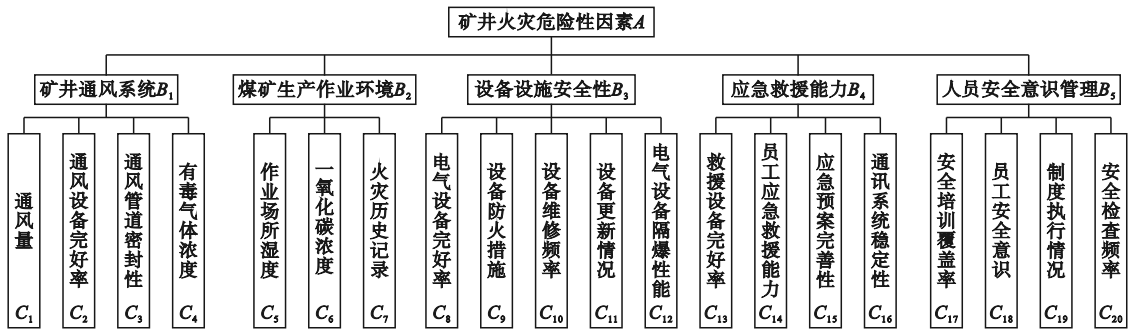


图2 矿井火灾危险性评价指标体系

Fig. 2 Mine fire risk evaluation index system

依据矿井相关资料及行业专家研究结果,将矿井火灾危险性等级划分为5个级别,即极危险、危险、一般、较安全、安全,分别对应Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ

级、Ⅳ级、Ⅴ级。矿井火灾危险性评价指标等级划分标准如表3所示。

表3 评价指标等级划分标准

Table 3 Evaluation index grading standards

一级指标	二级指标	危险性等级					样本
		极危险	危险	一般	较安全	安全	
矿井通风系统	通风量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	2 000	3 000	5 000	7 000	9 000	6 500
	通风设备完好率/%	70	80	90	95	100	85
	通风管道密封性/%	70	80	90	95	100	90
	有毒气体浓度/10 <sup>-6</sup>	50	40	30	10	5	15
煤矿生产作业环境	作业场所湿度/%	30	40	50	60	70	65
	一氧化碳浓度/10 <sup>-6</sup>	50	40	30	10	5	12
	火灾次数历史记录/次	4	3	2	1	0	2
设备设施安全性	电气设备完好率/%	70	80	90	95	100	88
	设备防火措施	0	1	2	3	4	3
	设备维修频率/(次·月 <sup>-1</sup> )	4	3	2	1	0	3
	设备更新周期/年	15	10	5	3	1	8
	电气设备隔爆情况	0	1	2	3	4	3
应急救援能力	救援设备完好率/%	70	80	90	95	100	80
	员工应急救援能力/%	60	70	80	90	100	92
	应急预案完整性	0	1	2	3	4	4
	通讯系统稳定性/%	70	80	90	95	100	90
人员安全意识管理	安全培训覆盖率/%	50	60	75	90	100	75
	员工安全意识	40	60	70	85	100	80
	制度执行情况	70	75	80	90	100	85
	安全检查频率/(次·月 <sup>-1</sup> )	0	1	2	3	4	2

### 3 实例应用

#### 3.1 主观权重解算及一致性检验

邀请 10 名从事矿井火灾研究的专家,在充分进行实地调查研究的基础上,通过比较正佳煤矿矿井火灾危险性各影响因素的相对重要程度,确定其相应的指标权重,如表 4 所示。

表 4 矿井火灾危险性指标权重  
Table 4 Weight of mine fire risk index

一级指标	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$
$B_1$	1	5	4	2	3
$B_2$	1/5	1	1/3	1/2	1/4
$B_3$	1/4	3	1	2	3
$B_4$	1/2	2	1/2	1	1
$B_5$	1/3	4	1/3	1	1

根据表 4 中各指标的打分情况,计算其具体权重值并对其进行按列归一化处理,得到归一化判断矩阵  $Q'$  为

$$Q' = \begin{bmatrix} 0.438 0 & 0.333 3 & 0.648 6 & 0.307 7 & 0.363 6 \\ 0.087 6 & 0.066 7 & 0.054 1 & 0.076 9 & 0.030 3 \\ 0.109 5 & 0.200 0 & 0.162 2 & 0.307 7 & 0.363 6 \\ 0.219 0 & 0.133 3 & 0.081 1 & 0.153 8 & 0.121 2 \\ 0.146 0 & 0.266 7 & 0.054 1 & 0.153 8 & 0.121 2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

进一步计算得到最大特征值  $\lambda_{\max} = 5.345 6$ 。对判断矩阵进行一致性检验:由式(6)计算得到  $C_1 = 0.086 4$ ,查表 2 得到  $R_1$  值为 1.12,由式(5)计算得到  $C_R = 0.077 2$ ,小于 0.1,表明判断矩阵具有满意的一致性。

同理,对二级指标的判断矩阵进行一致性检验。矿井通风系统指标权重如表 5 所示,计算得到  $C_R = 0.047 2$ ,小于 0.1,通过一致性检验。煤矿生产作业环境、设备设施安全性、应急救援能力、人员安全意识管理的指标权重及相关计算结果分别如表 6~9 所示。可见,各二级指标的判断矩阵均满足一致性,各指标的主观权重计算结果具有较高可信度。

表 5 矿井通风系统指标权重

Table 5 Weight of mine ventilation system index

二级指标	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	权重值	$\lambda_{\max}$	$C_R$
$C_1$	1	2	1	3	0.331 0	4.141 5	0.047 2
$C_2$	1/2	1	1/5	1/4	0.086 2		
$C_3$	1	5	1	3	0.322 6		
$C_4$	1/3	4	1/3	1	0.167 7		

表 6 煤矿生产作业环境指标权重

Table 6 Weight of coal mine production and operation environment index

二级指标	$C_5$	$C_6$	$C_7$	权重值	$\lambda_{\max}$	$C_R$
$C_5$	1	2	5	0.398 5	3.103 8	0.051 9
$C_6$	1/2	1	1/2	0.099 2		
$C_7$	1/5	2	1	0.171 7		

表 7 设备设施安全性指标权重

Table 7 Weight of equipment and facility safety index

二级指标	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	权重值	$\lambda_{\max}$	$C_R$
$C_8$	1	5	5	3	2	0.440 7	5.207 7	0.046 4
$C_9$	1/5	1	3	2	1	0.175 5		
$C_{10}$	1/5	1/3	1	1/3	1/3	0.061 3		
$C_{11}$	1/3	1/2	3	1	1	0.147 4		
$C_{12}$	1/2	1	3	1	1	0.175 1		

表8 人员安全意识管理指标权重

Table 8 Weight of emergency rescue capability index

二级指标	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$	权重值	$\lambda_{max}$	$C_R$
$C_{13}$	1	2	3	4	0.402 8	4.200 4	0.075 0
$C_{14}$	1/2	1	1/3	1	0.110 5		
$C_{15}$	1/3	3	1	2	0.248 0		
$C_{16}$	1/4	1	1/2	1	0.108 0		

表9 应急救援能力指标权重

Table 9 Weight of personnel safety awareness management index

二级指标	$C_{17}$	$C_{18}$	$C_{19}$	$C_{20}$	权重值	$\lambda_{max}$	$C_R$
$C_{17}$	1	3	1	2	0.313 5	4.046	0.017 2
$C_{18}$	1/3	1	1/4	1/3	0.074 9		
$C_{19}$	1	4	1	2	0.260 3		
$C_{20}$	1/2	3	1/2	1	0.139 8		

3.2 客观权重的计算

依据 EWM 赋权原理,首先按照式(8)~(9)对指标赋值进行标准化处理,然后根据式(10)~(12)计算各影响因素的归一化评分占比、熵值和差异度,最后由公式(13)获得指标的客观权重。计算结果如图3所示。

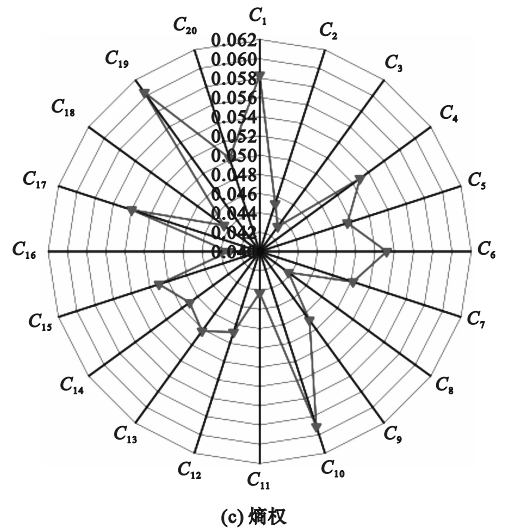
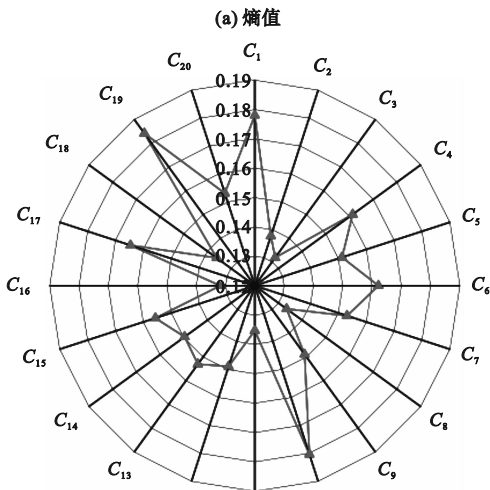
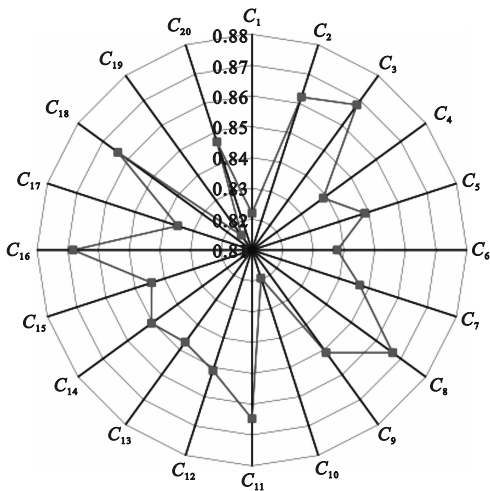
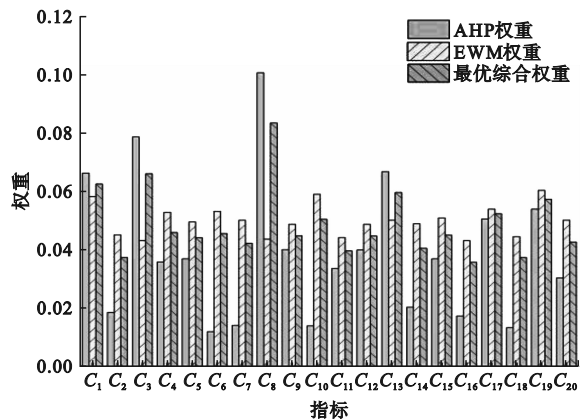


图3 EWM 计算结果

Fig. 3 Calculated results of EWM

依据式(14)~(15),将主观权重和客观权重耦合,确定指标最优综合权重。最优综合权重结果和组合权重比例  $\alpha, \beta$  的取值如图4所示。



(a) 各指标综合权重

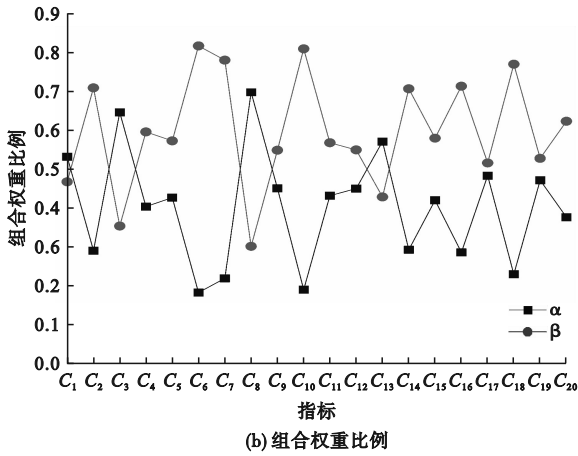


图 4 最优综合权重计算结果

Fig. 4 Results of the optimal comprehensive weight

由图 4 可知,各评价指标中的电气设备完好率  $C_8$ 、通风管道密封性  $C_3$ 、通风量  $C_1$ 、救援设备完好率  $C_{13}$ 、制度执行情况  $C_{19}$  及安全培训覆盖率  $C_{17}$  对矿井火灾危险性影响较大,影响程度按由大到小的顺序为  $C_8 > C_3 > C_1 > C_{13} > C_{19} > C_{17}$ ,电气

设备完好率对该矿井火灾危险性的影响最大。因此,在煤矿作业及采空区管理中,需强化电气设备的检修和维护管理,同时确保工作面推进平稳无异常,以安全高效地实现生产目标。

### 3.3 评价等级的确定

依据 AHP-EWM 组合赋权法得到的权重计算各影响因素的正负理想解,进一步得到如表 10 所示的样本相对贴近度及表 11 所示的矿井火灾危险性评价量化等级。

表 10 样本相对贴近度

Table 10 Relative closeness of samples

危险等级	与正理想解的 欧氏距离	与负理想解的 欧氏距离	相对 贴近度
极危险	1.304 6	0	0
危险	0.967 2	0.351 0	0.266 3
一般	0.611 4	0.720 9	0.541 1
较安全	0.294 0	1.021 8	0.776 6
安全	0	1.304 6	1.000 0
样本	0.531 3	0.874 7	0.822 1

表 11 矿井火灾危险性评价量化等级

Table 11 Quantitative grade of mine fire risk assessment

危险等级	I	II	III	IV	V
取值区间	<0.266 3	0.266 3 ~ 0.541 1	0.541 1 ~ 0.776 6	0.776 6 ~ 1.000	1.000 0

由表 10 和表 11 可知,采用本文提出的基于 AHP-EWM-TOPSIS 的矿井火灾危险性评价模型对正佳煤矿矿井火灾危险性进行评价,样本的相对贴近度为 0.822 1,介于 0.776 6 ~ 1 之间,故该矿井火灾危险性等级为“IV”,即较安全。根据正佳煤矿现场实际生产情况可知,矿井生产过程中仅出现过一次火灾异常事件,且在火灾发生初期就得到扑灭,并未出现火灾事故,评价结果符合矿井现场开采火灾危险性实际情况,表明本文提出的评价模型合理且正确,能够为类似条件的矿井火灾危险性分级提供参考。

## 4 结论

1) 选取矿井通风系统、煤矿生产作业环境、设备设施安全性、应急救援能力以及人员安全管理等 5 个指标作为矿井火灾危险性评价一级指标,并选取了 20 个二级指标,共同组成评价指标体系,进行矿井火灾危险性评价。

2) 引入矩阵平均思想对 AHP 和 EWM 所得

主、客观权重进行组合赋权,确定评价指标最优综合权重,有效降低了主、客观性对各指标权重的影响。从综合权重可以看出:电气设备完好率  $C_8$ 、通风管道密封性  $C_3$ 、通风量  $C_1$ 、救援设备完好率  $C_{13}$ 、制度执行情况  $C_{19}$  及安全培训覆盖率  $C_{17}$  对矿井火灾危险性影响较大,影响程度按由大到小的顺序为  $C_8 > C_3 > C_1 > C_{13} > C_{19} > C_{17}$ ,说明正佳煤矿矿井电气设备完好率和通风管道密封性两个指标对该矿井火灾危险性的影响较大,应加强电气设备的检修和通风系统的管理。

3) 根据矿井火灾危险性影响因素建立了矿井火灾评价模型,将矿井火灾危险性等级划分为极危险、危险、一般、较安全和安全共 5 个等级,运用 TOPSIS 法计算得到样本的相对贴近度为 0.822 1,评价结果为较安全,与实际情况一致。

### 参考文献 (References):

[1] 薛凯隆,崔欣超,张孟浩,等.基于 BWM-云模型的矿山带式运输装置可靠性评估[J].山西大同大学学报(自然科学版),2024,40(4):106-110.  
XUE K L, CUI X C, ZHANG M H, et al. Reliability evalua-

- tion of mining belt transportation device based on BWM cloud model[J]. Journal of Shanxi Datong University(Natural Science Edition), 2024, 40(4): 106-110. (in Chinese)
- [2] QI Y, XUE K L, WANG W, et al. Prediction model of borehole spontaneous combustion based on machine learning and its application[J]. Fire, 2023, 6(9): 357.
- [3] 祁云, 齐庆杰, 汪伟, 等. 基于集值统计-Entropy的采空区自燃危险性预测模型及应用[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(5): 1526-1531.
- QI Y, QI Q J, WANG W, et al. A forecast model for the spontaneous combustion risk in the goaf based on set valued statistics-Entropy and its application[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(5): 1526-1531. (in Chinese)
- [4] 薛凯隆, 崔欣超, 祁云, 等. 基于DBO-SVM的采空区煤自燃危险性预测[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43(6): 85-90.
- XUE K L, CUI X C, QI Y, et al. Prediction of spontaneous combustion fire in goaf based on DBO-SVM[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2024, 43(6): 85-90. (in Chinese)
- [5] 杨光银, 田隼, 赵焕凯. 基于AHP和模糊综合评价的矿井火灾危险性分析[J]. 采矿技术, 2023, 23(5): 121-125.
- [6] 秦忠诚, 陈光波, 李谭, 等. “AHP+熵权法”的CW-TOPSIS煤矿内因火灾评价模型[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 193-201.
- QIN Z C, CHEN G B, LI T, et al. CW-TOPSIS mine internal caused fire evaluation model of “AHP + entropy weight method”[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 193-201. (in Chinese)
- [7] 田隼, 舒仕海, 任建军, 等. 基于AHP-TOPSIS法的矿井火灾危险性评价[J]. 煤, 2024, 33(2): 18-23.
- TIAN Y, SHU S H, REN J J, et al. Mine fire risk assessment based on AHP-TOPSIS method[J]. Coal, 2024, 33(2): 18-23. (in Chinese)
- [8] QI Y, XUE K L, WANG W, et al. Coal and gas protrusion risk evaluation based on cloud model and improved combination of assignment[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 4551.
- [9] 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 Y, XUE K L, WANG W, et al. Assessment model of emergency response capability for coal and gas outburst accidents in mines[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 225-230. (in Chinese)
- [10] 陈仁朋, 王志腾, 吴怀娜, 等. 基于FAHP法和区间数改进TOPSIS法的盾构隧道下穿建筑物风险评估[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(12): 1710-1719.
- CHEN R P, WANG Z T, WU H N, et al. Risk assessment for shield tunneling beneath buildings based on interval improved TOPSIS method and FAHP method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(12): 1710-1719. (in Chinese)
- [11] TANG F, QIN Y P, GUO M Y, et al. Thermal risk assessment in the mine of TOPSIS based on game theory subjective and objective comprehensive weighting[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 59: 103367.
- [12] QIU X X, CAO Q G, WANG Y N, et al. Risk assessment method of coal spontaneous combustion based on catastrophe theory[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 603(1): 012017.
- [13] 皮子坤, 董子文, 罗陈, 等. 基于IIAHP-Entropy-ssd的采空区遗煤自燃危险性评价模型及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 61-67.
- PI Z K, DONG Z W, LUO C, et al. Risk assessment model for spontaneous combustion of residual coal in goaf based on IIAHP-Entropy-ssd and its application[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(7): 61-67. (in Chinese)

(责任编辑: 宋颖韬)