doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 01. 010
罗先伟, 赵元元, 刘彦花, 等. 基于熵权-TOPSIS的硫化矿石自燃倾向性评价研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(1): 85-91.
LUO Xianwei, ZHAO Yuanyuan, LIU Yanhua, et al. Evaluation on spontaneous combustion tendency of sulfide ores based on entropy weight-TOPSIS method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(1): 85-91.

基于熵权-TOPSIS的硫化矿石自燃倾向性评价研究

罗先伟[1], 赵元元[2], 刘彦花[1], 全柏飞[2], 黄世顶[2]
(1. 南宁师范大学 自然资源与测绘学院, 南宁 530001;
2. 广西高峰矿业有限责任公司, 广西 河池 547205)

摘　要: 高硫矿床开采中的矿石自燃火灾是许多金属矿山重大灾害之一, 矿山硫化矿石自燃在造成矿产资源浪费的同时, 会导致一系列安全隐患与环境污染问题, 造成巨大的生命威胁与经济损失。为了实现含硫金属矿山安全、高效开采, 开展金属矿山硫化矿石自燃倾向性定量评价具有十分重要的意义。结合已有研究成果, 选取氧化增重率、自热点和自燃点三个指标建立硫化矿石自燃倾向性评价指标体系, 采用熵权法计算各评价指标的客观权重, 进一步运用TOPSIS逼近理想解排序法建立硫化矿石自燃倾向性评价模型, 计算各矿样的相对接近度, 最终对某矿山14组硫化矿石矿样的自燃危险性进行排序。结果表明: 14组硫化矿石矿样中, 三个评价指标的权重由大到小依次为自热点、自燃点和氧化增重率, 其中自热点的权重最大, 为0. 642, 远超其它两个指标的权重, 说明自热点指标对硫化矿的自燃倾向性影响最大; 基于熵权-TOPSIS方法对硫化矿矿样进行自燃倾向性接近度定量计算与排序, 进一步突出不同矿样之间的自燃倾向性差异, 矿样自燃倾向性排序与实际情况基本一致, 说明熵权-TOPSIS法在评价硫化矿石自燃倾向性中是可行的。研究结果有助于预警并有针对性开展实验矿山硫化矿石自燃防治, 可为类似金属矿山硫化矿石自燃防治提供理论参考。

关键词: 硫化矿石; 自燃倾向性; 熵权法; TOPSIS模型
中图分类号: TD752. 2　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)01-0085-07

Evaluation on spontaneous combustion tendency of sulfide ores based on entropy weight-TOPSIS method

LUO Xianwei[1], ZHAO Yuanyuan[2], LIU Yanhua[1], QUAN Baifei[2], HUANG Shiding[2]
(1. School of Natural Resources and Surveying, Nanning Normal University, Nanning 530001, China;
2. Guangxi Gaofeng Mining Co., Ltd., Hechi 547205, Guangxi, China)

Abstract: Spontaneous combustion of ores during the mining of high-sulfur deposits is one of the major disasters in many metal mines. The spontaneous combustion of sulfide ores in mines not only causes waste of mineral resources but also leads to a series of safety hazards and environmental pollution problems, posing a huge threat to life and economic losses to the mines. To achieve safe and efficient mining of sulfur-containing metal mines, it is of great significance to carry out a quantitative evaluation of the self-ignition tendency of sulfide ores in metal mines. Combined with the existing research results, three indicators, namely the oxidation weight gain rate, the self-heating point temperature, and the autoignition point temperature, are selected to establish the evaluation index system of the autoignition tendency of sulfide ores. The entropy weight method is used to calculate the objective weights of each evaluation index. Further, the TOPSIS approximation ideal solution ranking method is used to establish the evaluation model of the autoignition tendency of sulfide ores and calculate

收稿日期: 2025-06-27
基金项目: 广西河池市重点研发计划项目资助(河科AB231102); 广西华锡集团股份有限公司技术研发项目资助(HXYS040405202308080)
作者简介: 罗先伟, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事金属矿山开采技术方面的研究。
通信作者: 刘彦花, 博士, 教授, 主要从事地理信息技术方面的研究。

the relative proximity of each ore sample. Finally, the self-ignition hazards of 14 groups of sulfide ore samples from a certain mine are ranked. The research results show that among the 14 groups of sulfide ore samples, the weights of the three evaluation indicators from largest to smallest are the self-heating point temperature, the autoignition point temperature, and the oxidation weight gain rate. Among them, the weight of the self-heating point temperature is the largest, which is 0.642, far exceeding the weights of the other two indicators, indicating that the self-heating point temperature indicator has the greatest influence on the autoignition tendency of sulfide ore. Based on the entropy weight-TOPSIS method, the proximity degree of self-ignition tendency of sulfide ore samples is quantitatively calculated and ranked, further highlighting the differences in self-ignition tendency among different ore samples. The ranking of self-ignition tendency of the ore samples is basically consistent with the actual situation, indicating that the entropy weight-TOPSIS method is feasible in evaluating the self-ignition tendency of sulfide ores. The research results are helpful for early warning and targeted prevention and control of spontaneous combustion of sulfide ores in experimental mines, and can provide a theoretical reference for the prevention and control of spontaneous combustion of sulfide ores in similar metal mines.

Key words: sulfide ores; spontaneous combustion tendency; entropy weight method; TOPSIS model

硫化矿石因富含硫元素,在开采和存储过程中易发生氧化放热反应,从而产生大量的热量聚集引发自燃[1]。硫化矿石自燃火灾是矿山开采中的严重灾害之一。在高硫矿床的开采过程中,硫化矿石自燃不仅会造成矿产资源的巨大浪费和经济损失,还会产生有毒气体污染矿区环境,并可能引起严重的矿井火灾事故,威胁矿工的生命安全[2]。据不完全统计,我国约有20%~30%的硫铁矿,5%~10%的有色金属或多金属硫化矿具有内因火灾危害[3]。随着矿产资源开发向深部推进,开采条件不断恶化,矿井环境也日趋复杂,在高温、高湿环境下,硫化矿石的自燃风险将显著增加。因此,开展硫化矿石自燃倾向评价研究对保障矿场高效、安全开采和预防硫化矿石自燃火灾具有重要意义。

自20世纪30年代以来,国内外学者围绕硫化矿石自燃开展了大量研究,主要体现在三个方面:一是关于硫化矿自燃机理方面的研究;二是关于硫化矿自燃的影响因素研究;三是关于硫化矿自燃的评价方法研究。硫化矿石自燃是一个复杂的非稳态的混沌演化现象[4],目前关于硫化矿石自燃机理的解释主要有四种,即物理吸附机理、热化学机理、电化学机理、微生物作用机理[5]。在硫化矿自燃影响因素的选取方面,基于单一影响因素的硫化矿自燃研究不能有效、系统地评价硫化矿石自燃倾向性,需结合多因素综合评价硫化矿石的自燃倾向性。例如,毛亚军等基于WSR(物理-事理-人理)系统分析方法,识别出矿石成分及含量、pH值、蓄热条件、初始铁离子浓度、温度、地质条件和氧气浓度是引起硫化矿石自燃的关键影响因素[6]。目前,硫化矿自燃倾向性评价主要依赖矿样的实验测试和数值模拟,在此基础上结合不同的模型定量计算硫化矿自燃倾向性大小或进行等级划分。例如,罗凯等[7]将Bayes判别分析理论应用于硫化矿石自燃倾向性的等级判别与分类中,建立了误判率仅为5%的高精度判别模型。谢彦蓉等[8]采用CRITIC方法计算指标权重,再结合TOPSIS法对10个矿样的硫化矿自燃倾向性进行大小排序。阳富强等[9]建立GA-BP神经网络模型,用于指导高硫矿山矿石自燃倾向性等级的划分。高峰等[10]引入模糊综合评价法建立硫化矿石自燃因素集,利用变异系数法和层次分析法计算权重系数,最终建立硫化矿石自燃倾向性的综合评价模型并对其进行等级划分。李志超等[11]对云模型进行标准化处理的基础上,采用粗糙集方法计算各指标权重,进而建立金属矿山硫化矿石自燃倾向性综合评价的标准化云模型,实现对硫化矿自燃倾向性的等级划分。张悦等[12]基于熵权法和层次分析法得到主客观权重的基础上,结合博弈论得到最优组合权重,再通过集对分析算法判定各矿样的自燃倾向性等级。

总体上,现有的硫化矿自燃倾向性评价考虑的因子和评价方法均没有统一的标准。在评价因子选取方面,学者们(如文献[7]—[12]作者)大多选取氧化质量增加率、自热点温度和自燃点温度三个指标作为评价因子。在评价方法方面,倾向于采用不同的方法确定指标权重,如熵权法、CRITIC法、粗糙集、博弈论赋权等,再结合不同的模型如TOPSIS模型、神经网络模型、云模型等为硫化矿的自燃倾向性进行定量排序或等级划分。参考已有文献的成熟经验,本文引入熵权-TOPSIS法建立硫化矿石自燃倾向性评价模型,该方法已经在资源环境[13-14]、土地利用[15-16]、医疗卫生[17-18]、工业经济[19-20]、光电技术[21]、灾害评估[22]、食品安全[23]、矿山人身安全[24]等领域得到运用,且取得良好效果。本文选取表征硫化矿石

自燃倾向性的三个关键评价指标，利用熵权法计算各个指标的权重，建立硫化矿石自燃倾向性的TOPSIS评价模型并进行实例应用。

1　熵权-TOPSIS模型构建

1.1　基于熵权法计算指标权重

在整个评价体系中，每个指标对最终评价结果的作用和影响力都不相同，为了保证评价结果的准确性，需要根据指标的重要程度对每个指标赋予相应的权重。权重反映了各指标的相对重要性，指标的权重直接关系到最终的评价结果，所以计算指标权重是综合评价的基础。权重的赋予可以根据数据来源不同分为两大类：主观赋权法与客观赋权法。主观赋权法是根据决策者主观上对各属性的重视程度来确定属性权重的方法，其原始数据由专家根据经验主观判断得到，如专家调查法和层次分析法等。客观赋权法是根据原始数据之间的关系确定权重，其原始数据是由各指标在被测评过程的实验数据中获得，如熵权法和CRITIC法等。

熵权法是一种基于信息熵理论的客观赋权方法，常用于多指标决策分析中确定各指标的权重，可以避免评价过程中人为因素对赋权的影响。熵是指系统的混乱程度，指标的熵值越大，说明数据的混乱程度越高，所提供的信息越少，对应的权重就越低[25]。熵权法计算权重具体步骤为：

Step 1：建立矩阵

假设有m个样本，n个指标，记X_{ij}为第i个样本的第j个指标的数值。评价矩阵$\boldsymbol{X}$为：

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} \end{bmatrix}$$

Step 2：数据标准化

评价指标与评价结果是正相关，则正向指标计算见式(1)。

$$Z_{ij}=\frac{X_{ij}-\min\left(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{mj}\right)}{\max\left(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{mj}\right)-\min\left(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{mj}\right)} \tag{1}$$

评价指标与评价结果是负相关，则负向指标计算见式(2)。

$$Z_{ij}=\frac{\max\left(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{mj}\right)-X_{ij}}{\max\left(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{mj}\right)-\min\left(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{mj}\right)} \tag{2}$$

Step 3：正向化处理

经过第2步的处理，处理过的数据中可能会存在0的情况，为了方便计算对整体数据进行正向化平移。

Step 4：计算指标熵值见式(3)。

$$E_j=-\frac{1}{\ln(m)}\sum_{i=1}^{m}P_{ij}\ln P_{ij} \tag{3}$$

式中，P_{ij}表示第i个样本在j指标当中的比值，见式(4)。

$$P_{ij}=\frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}Z_{ij}} \tag{4}$$

Step 5：计算信息冗余度见式(5)。

$$G_j=1-E_j \tag{5}$$

Step 6：计算权重见式(6)。

$$W_j=\frac{G_j}{\sum_{j=1}^{n}G_j} \tag{6}$$

1.2　基于TOPSIS进行综合评价

TOPSIS法是有限方案多目标决策分析中常用的一种科学方法。该方法基于归一化后的原始矩阵，找出所有方案中的最优方案与最劣方案(正理想解与负理想解)，再通过公式计算出每个评价方案与最优方案和最劣方案之间的距离，从而计算出各方案的相对接近度，最后以相对接近度作为评价方案优劣的依据，对各方案进行排序。与最优方案之间的距离越近，与最劣方案之间的距离越远，则该评价方案越优[26]。TOPSIS法评价具体步骤为：

Step 1：指标同趋化处理

在决策问题中同时存在正向指标和负向指标时，为了确保所有的指标方向的一致，需进行同趋化处理。将负向指标转换为正向指标，通常使用倒数法。对原始矩阵$(\boldsymbol{X}_{ij})_{m\times n}$中的负向指标进行倒数处理得到同趋化决策矩阵$(\boldsymbol{Q}_{ij})_{m\times n}$。

Step 2：归一化处理

对决策矩阵进行标准化处理，以消除不同准则之间的量纲差异。标准化公式见式(7)。

$$R_{ij}=\frac{\boldsymbol{Q}_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{Q}_{ij}^2}} \tag{7}$$

式中，R_{ij}表示归一化决策矩阵中的元素；Q_{ij}表示同趋化决策矩阵$(\boldsymbol{Q}_{ij})_{m\times n}$的各项指标值。

Step 3：加权标准化决策矩阵

将标准化后的决策矩阵与各指标的权重相乘，如式(8)，得到加权标准化决策矩阵。

$$H=W_j\times \boldsymbol{R}_{ij} \tag{8}$$

式中，W_j是第j个指标的权重；$\boldsymbol{R}_{ij}$是标准化后决策矩阵。

Step 4：确定正理想解和负理想解

数据已经经过同趋化处理为正向指标，则评价矩阵H中元素数值越大表示评价结果越好。正理想解见式(9)，负理想解见式(10)。

$$H^+=\left\{\max_i H_{ij}\middle| j=1,2,\cdots,m\right\} \tag{9}$$

$$H^-=\left\{\min_i H_{ij}\middle| j=1,2,\cdots,m\right\} \tag{10}$$

Step 5：计算各方案与正理想解和负理想解的距离

各方案到最优方案的距离计算见式(11)，各方案到最劣方案的距离计算见式(12)。

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(H_{ij}-H^+\right)^2} \tag{11}$$

$$D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(H_{ij}-H^-\right)^2} \tag{12}$$

Step 6：计算各方案的相对接近度如式(13)。

$$C_i=\frac{D_i^-}{D_+^-+D_i^-} \tag{13}$$

式中，C_i是第i个方案的相对接近度，数值越大越优。

2 实例分析

2.1 指标选取

硫化矿石自燃大致可分为五个阶段[1]，即岩石破碎、氧化、聚热、升温、着火，硫化矿石开采后与空气接触发生氧化反应并放出热量，长时间堆积造成热量积聚可能使矿石的温度不断升高发生自热，最终达到自燃点而导致矿石自燃，整个过程呈现非稳态且复杂的物理化学动力学特征。硫化矿自燃受多种因素的共同影响，如矿物类型、粒度大小、硫含量高低、环境温湿度、氧气浓度、堆放时间等，且各影响因素之间的关系是非线性关系，很难有统一的指标选取标准。考虑本实例中所选矿样所处外界环境条件、矿物类型及粒度大小差别不大，结合硫化矿石自燃过程的五个阶段和前述已有文献研究成果，选取表征硫化矿自燃倾向性本质特性的氧化增重率(X_1)、自热点(X_2)和自燃点(X_3)作为评价指标。氧化增重率是氧化增加的质量与原样品质量的比值，氧化增重率越大，硫化矿石更容易发生氧化反应，即易发生自燃；自热点和自燃点表征硫化矿石自燃难易程度，矿石自热点和自燃点越低越容易发生自燃。以上三项指标可以有效地评价硫化矿石自燃倾向。

2.2 数据收集

本文从国内某高硫矿山取得14个矿样，经过实验得到各个矿样的指标数值，如表1所示。

表1 硫化矿石自燃倾向性测试样本

Table 1 Training samples for spontaneous combustion tendency of sulfide ores

矿样编号	氧化增重率X_1/%	自热点X_2/℃	自燃点X_3/℃
1	6.651 1	137.4	385.0
2	6.614 7	141.8	432.5
3	5.516 1	142.9	414.5
4	4.703 4	400.0	431.6
5	0.852 2	400.0	391.4
6	1.120 3	104.8	426.9
7	6.819 0	110.6	394.5
8	1.266 5	400.0	433.1
9	9.717 0	136.3	438.9
10	10.517 0	101.4	413.6
11	1.252 8	102.5	447.2
12	3.871 5	189.0	408.5
13	4.606 8	156.5	444.7
14	2.001 5	161.2	434.8

2.3 熵权法计算指标权重

通过上文构建的熵权-TOPSIS模型具体公式步骤(1)至(6)，可以计算出硫化矿石自燃倾向性评价指标的各个信息熵和权重(表2)。得到氧化增重率、自热点和自燃点的权重分别为0.173、0.642和0.185，即权重集W_j=(0.173，0.642，0.185)。自热点的权重最大，说明在本矿样中硫化矿石的自热点对自燃倾向性影响最大。

表2 评价指标的信息熵与权重

Table 2 Information entropy and weights of indicators for evaluating spontaneous

评价指标	信息熵	权重
氧化增重率X_1	0.931	0.173
自热点X_2	0.746	0.642
自燃点X_3	0.927	0.185

2.4 TOPSIS综合评价

在评价指标中，氧化增重率是负向指标，即氧化增重率越大，硫化矿石越容易自燃。为了计算方便，需进行同趋化处理，本文采用倒数法，将氧化增重率

数值进行倒数处理。

根据上述公式(7)进行归一化处理，得到结果如表3所示。

表3　归一化处理结果

Table 3　Normalized results

矿样编号	氧化增重率X_1	自热点X_2	自燃点X_3
1	0.013	0.106	0.045
2	0.013	0.110	0.051
3	0.016	0.111	0.049
4	0.018	0.309	0.051
5	0.102	0.309	0.046
6	0.078	0.081	0.050
7	0.013	0.086	0.046
8	0.069	0.309	0.051
9	0.009	0.105	0.052
10	0.008	0.078	0.049
11	0.069	0.079	0.053
12	0.022	0.146	0.048
13	0.019	0.121	0.052
14	0.043	0.125	0.051

结合上文中熵权法计算得到各个指标的权重，根据公式(8)计算得到加权矩阵，从中找出正理想解与负理想解。通过公式(11)和公式(12)计算出各项指标与正理想解和负理想解的距离，最后通过公式(13)计算得到各个方案的相对接近度，如表4所示。由表4可知，结合TOPSIS综合评价的相对接近度优劣原理，10号矿样的相对接近度C值最低为0.013，其次是7号矿样为0.034，这两种矿样的C值远低于其它矿样，说明上述两种矿样在同等环境条件下危险性更高，最容易发生自燃；相对接近度C值最高的3个矿样依次为5、8、4号矿样，分别为0.974、0.877和0.734，这三种矿样的相对接近度C值远高于其它矿样，说明上述三种矿样在同等环境条件下安全性较高，不容易发生自燃；其余矿样的接近度C值介于0.11～0.276，其自燃倾向性高于5、8、4号矿样，低于10、7号矿样。结合矿山14个矿样所在采场位置矿堆的实际情况，各矿样的自燃倾向性排序与实际比较吻合，说明该方法具有一定的可行性。

表4　硫化矿石自燃倾向性评价结果

Table 4　Evaluation results of spontaneous combustion tendency of sulfide ores

矿样编号	D^-	D^+	C	评价排序
1	0.028	0.222	0.113	11
2	0.032	0.219	0.128	10
3	0.033	0.217	0.133	9
4	0.231	0.084	0.734	3
5	0.249	0.007	0.974	1
6	0.070	0.230	0.233	5
7	0.008	0.241	0.034	13
8	0.239	0.033	0.877	2
9	0.028	0.224	0.110	12
10	0.003	0.249	0.013	14
11	0.062	0.232	0.210	7
12	0.069	0.182	0.276	4
13	0.044	0.206	0.178	8
14	0.058	0.194	0.232	6

3　结论

1)实验结果表明，基于熵权法计算得到14组硫化矿石矿样氧化增重率、自热点和自燃点三个关键指标的权重值分别为0.173、0.642、0.185，自热点对硫化矿自燃倾向性的影响最大。熵权法计算权重既减少人为偏差，避免主观判断的干扰，也突出差异性，保证了数据客观真实性，更符合实际。

2)运用TOPSIS逼近理想解计算各矿样的相对接近度，得到14组硫化矿石矿样的自燃倾向由小到大依次为：5号、8号、4号、12号、6号、14号、11号、13号、3号、2号、1号、9号、7号、10号。该评价结果与实际结果基本一致。

3)将熵权法与TOPSIS方法进行结合，既保证了权重的客观性，又能定量反映不同硫化矿自燃倾向性大小差异。但由于影响硫化矿自燃倾向性的指标体系复杂，且多因素相互作用机制尚不清晰，实验室数据也难以完全反映矿山复杂环境，后续还有待开展更深入的研究。

参　考　文　献

[1] LIU H, PAN K, XIANG C, et al. Mechanochemical effect of spontaneous combustion of sulfide ore[J]. Fuel, 2022, 329: 125391. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125391.

[2] 李孜军. 硫化矿石自燃机理及其预防关键技术研究[D]. 长沙：中南大学，2007.
LI Zijun. Investigation on the mechanism of spontaneous combustion of sulphide ores and the key technologies for preventing fire[D]. Changsha: Central South University, 2007.

[3] 邬长福. 高硫金属矿床内因火灾及其灭火措施[J]. 矿业安全与环保，2002，29(2)：21-22.
WU Changfu. Fire and fire extinguishing measures in high-sulfur metal deposits[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2002, 29(2): 21-22.

[4] 伍智伟，潘伟，吴 超，等. 硫化矿石堆自热的混沌特征[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2019，50(2)：368-374.
WU Zhiwei, PAN Wei, WU Chao, et al. Chaotic characteristics of self-heating of sulfide ore heap[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(2): 368-374.

[5] 高懿伟，郭志国，张俊，等. 我国金属矿山热动力灾害防治技术

研究现状与展望[J]. 金属矿山,2022(12):196-204.
GAO Yiwei, GUO Zhiguo, ZHANG Jun, et al. Present situation and prospect of research on prevention and control of thermal disasters in metal mines in China[J]. Metal Mine, 2022(12):196-204.

[6] 毛亚军,阳富强. 基于WSR-DEMATEL模型的硫化矿石自燃灾害事故影响因素分析[J]. 安全与环境工程,2023,30(3):1-6,12.
MAO Yajun, YANG Fuqiang. Analysis of influencing factors of spontaneous combustion accidents of sulfide ore based on WSR-DEMATEL model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(3):1-6, 12.

[7] 罗凯,吴超,阳富强,等. 矿山硫化矿自燃倾向性分级的Bayes判别法及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(7):2244-2249.
LUO Kai, WU Chao, YANG Fuqiang, et al. Bayes discriminant analysis of spontaneous combustion tendency classification of sulfide minerals in metal mines[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7):2244-2249.

[8] 谢彦蓉,李孜军,徐志国. 基于CRITIC法与TOPSIS法的硫化矿自燃倾向性评定[J]. 安全与环境学报,2014,14(1):122-125.
XIE Yanrong, LI Zijun, XU Zhiguo. Evaluation on spontaneous combustion trend of sulfide ores based on the method of CRITIC and TOPSIS testing method[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(1):122-125.

[9] 阳富强,刘广宁,郭乐乐. 硫化矿石自燃倾向性等级划分的GA-BP神经网络模型及应用[J]. 自然灾害学报,2015,24(4):227-232.
YANG Fuqiang, LIU Guangning, GUO Lele. GA-BP neural network model and its application to spontaneous combustion tendency classification of sulfide ores[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(4):227-232.

[10] 高峰,肖蓉兰. 基于综合权重的硫化矿石自燃倾向性评价研究[J]. 矿业研究与开发,2016,36(11):28-31.
GAO Feng, XIAO Ronglan. Fuzzy evaluation on spontaneous combustion tendency of sulfide ores based on comprehensive weights[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(11):28-31.

[11] 李志超,周科平,林允. 基于RS-云模型的硫化矿石自燃倾向性综合评价[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(9):126-131.
LI Zhichao, ZHOU Keping, LIN Yun. Comprehensive evaluation on spontaneous combustion tendency of sulfide ore based on RS-cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(9):126-131.

[12] 张悦,刘杰,傅钰,等. 基于博弈论集对分析的硫化矿石自燃倾向预测方法研究[J]. 有色金属(矿山部分),2021,73(3):141-146.
ZHANG Yue, LIU Jie, FU Yu. Research on prediction of spontaneous combustion tendency of sulfide ores based on game theory and set pair analysis[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(3):141-146.

[13] 郭新园,胡文佳,陈彬,等. 基于熵权TOPSIS模型的厦门湾海洋环境质量20年时空变化评估[J]. 应用海洋学学报,2024,43(4):646-658.
GUO Xinyuan, HU Wenjia, CHEN Bin, et al. Spatiotemporal changes assessment in marine environmental quality of Xiamen Bay over the past 20 years based on the Entropy-Weighted TOPSIS model[J]. Journal of Applied Oceanography, 2024, 43(4):646-658.

[14] 俞阳,牟琴,闵雪峰,等. 基于熵权TOPSIS-SD的超大城市水资源承载力研究[J]. 人民长江,2024,55(12):148-156,175.
YU Yang, MOU Qin, MIN Xuefeng, et al. Study on water resource carrying capacity simulation in megacities based on entropy-weighted TOPSIS-SD model[J]. Yangtze Rive, 2024, 55(12):148-156, 175.

[15] 杨志,李才文,任正龑,等. 基于熵权TOPSIS模型的宁夏土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 地球科学与环境学报,2023,45(4):796-805.
YANG Zhi, LI Caiwen, REN Zhengyan, et al. Evaluation of land use performance in Ningxia, China based on entropy-weight TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4):796-805.

[16] 谢贤健. 基于熵权TOPSIS和耦合协调模型的四川省土地利用效益耦合协调关系及时空演变特征[J]. 水土保持学报,2024,38(1):267-277.
XIE Xianjian. Coupling coordination relationship and spatiotemporal evolution characteristics of land use benefit in Sichuan province based on entropy weight TOPSIS and coupling coordination model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1):267-277.

[17] 李浩鑫,王楠,刘利,等. 基于熵权TOPSIS法的北京市各区医疗卫生服务能力综合评价[J]. 中国公共卫生管理,2025,41(1):87-90.
LI Haoxin, WANG Nan, LIU Li, et al. Comprehensive evaluation of medical service capacity in various districts of Beijing City based on entropy weight TOPSIS method[J]. Chinese Journal of Public Health Management, 2025, 41(1):87-90.

[18] 林锦慧,王冬. 基于熵权-TOPSIS法的市域公共卫生韧性评价研究[J]. 中国卫生事业管理,2025,42(3):356-360.
LIN Jinhui, WANG Dong. Evaluation of public health resilience in municipal areas based on the entropy weight-TOPSIS method[J]. Chinese Journal of Public Health Management, 2025, 42(3):356-360.

[19] 魏玲,李芳琴,李颖. 基于熵权TOPSIS法的铝土矿海外投资优选[J]. 中国矿业,2019,28(8):72-78.
WEI Ling, LI Fangqin, LI Ying. Preferable investment evaluation of overseas bauxite based on entropy-weight TOPSIS model[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(8):72-78.

[20] 冯银虎,王世铎,纪祥勋. 基于熵权-TOPSIS模型的煤炭上市企业技术创新能力评价研究[J]. 中国矿业,2020,29(11):43-49.

FENG Yinhu, WANG Shiduo, JI Xiangxun. Research on evaluation of technical innovation ability of coal listed enterprises based on the entropy weight-TOPSIS mode[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(11): 43-49.

[21] ZHENG Y, ZHAO Y B, ZOU X J, et al. Design and optimization of the RGB beam combiner in micro display using entropy weight-TOPSIS method[J]. Journal of Central South University, 2025, 32: 483-494.

[22] 巴婉茹，宫阿都，张树宇，等. 基于熵权TOPSIS模型的古建筑地震灾害风险评估[J]. 自然灾害学报，2024，33(4)：1-10.
BA Wanru, GONG Adu, ZHANG Shuyu, et al. Earthquake hazard assessment of ancient buildings based on entropy weight TOPSIS model[J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(4): 1-10.

[23] 杨月元，祁春节，董亚妮，等. 大食物观下中国食物安全的综合评价：基于熵权TOPSIS模型[J]. 中国农业大学学报，2025，30(4)：230-243.
YANG Yueyuan, QI Chunjie, DONG Yani, et al. Comprehensive evaluation of China's food security under the greater food approach: based on entropy TOPSIS model[J]. Journal of China Agricultural University, 2025, 30(4): 230-243.

[24] 田水承，白旭腾，李红霞，等. 基于扎根理论－熵权TOPSIS模型的矿工体力疲劳影响因素分析[J]. 煤矿安全，2025，56(1)：244-249.
TIAN Shuicheng, BAI Xuteng, LI Hongxia, et al. Analysis of influencing factors of physical fatigue based on grounded theory-entropy weight TOPSIS model[J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(1): 244-249.

[25] 张倩，王文才，王云. 基于熵权法建立冲击地压综合评价模型与应用[J]. 矿冶，2022，31(1)：1-6.
ZHANG Qian, WANG Wencai, WANG Yun. Establishment and application of comprehensive evaluation model of rock burst based on entropy weight method[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1): 1-6.

[26] 张居正，王沉，朱获天，等. 基于Fuzzy-TOPSIS的金矿床采矿方法优选[J]. 有色金属工程，2023，13(1)：114-120.
ZHANG Juzheng, WANG Chen, ZHU Huotian, et al. Mining method optimization of gold deposit based on fuzzy-TOPSIS[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 114-120.