

基于改进的 BP-TOPSIS 法的 煤炭资源安全综合评价

周浪,王子一,马振乾*,郑行行

(贵州大学 矿业学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:为更合理地综合评价煤炭资源安全,采用最小鉴别信息方法,从长期煤炭资源和短期煤炭资源两个维度,研究煤炭储量、煤炭产业发展水平、环境可持续性、煤炭供应、煤炭需求和煤炭进出口这 6 个方面对煤炭资源安全的影响,建立基于改进的 BP-TOPSIS 法的煤炭资源安全综合评价模型,并用实际工程案例验证该模型的合理性与可行性.结果表明:2004 年—2008 年,煤炭需求量总体呈上升趋势,煤炭供应链得到改善;2009 年—2012 年,煤炭行业的快速发展和煤炭供应关系的改善导致煤炭库存过剩;2013 年—2014 年,我国经济状况不良,煤炭经济呈现小幅度下降趋势;2015 年—2019 年,煤炭进口和煤炭行业投资下降,进而缩小了煤炭供需量的差距,煤炭经营利润得到提升.同时,环境保护对煤炭资源安全有积极稳定的作用,应不断加大对环境保护的投入,推动环境保护政策的出台,该研究可为煤炭资源安全生产提供决策参考.

关键词:煤炭资源安全;综合评价;TOPSIS;BP 神经网络

中图分类号:TD984

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)01-0048-06

Comprehensive Evaluation of Coal Resource Safety Based on Improved BP-TOPSIS Method

ZHOU Lang, WANG Ziyi, MA Zhenqian, ZHENG Hanghang

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

Abstract: To comprehensively evaluate coal resource security in a more reasonable way, the minimum identification information method is adopted to study the impact of coal reserves, coal industry development level, environmental sustainability, coal supply, coal demand and coal import and export on coal resource security from two long-term coal resources and short-term coal resources. A comprehensive evaluation model of coal resource safety based on the improved BP-TOPSIS method is established, and the rationality and feasibility of the model are verified by practical engineering cases. Results show that from 2004 to 2008, the demand for coal was on the rise, and the supply chain of coal was improved. From 2009 to 2012, the rapid development of the coal industry and the improvement of coal supply relations resulted in excess coal inventory. From 2013 to 2014, China's economic conditions were poor, and the coal economy showed a small downward trend. From 2015 to 2019, coal imports and investment in the coal industry declined, narrowing the gap between coal supply and demand, and improving coal operating profits. At the same time, environmental protection plays a positive and stable role in the safety of coal resources. It is necessary to continuously increase the investment in environmental protection and promote the introduction of environmental protection policies. This study can provide reference for the decision-making of coal resource safety production.

Keywords: coal resource security; comprehensive evaluation; TOPSIS; BP neural network

收稿日期:2021-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904080)

*通信作者,E-mail: zqma@gzu.edu.cn

煤炭是我国重要的能源资源,也是国民经济发展的重要基础。早在 10 a 前,周晓明等^[1]采用改进的 GM 法(Guyon-Massonet method)预测我国煤炭消费需求状况。近年来,煤炭行业蓬勃发展,导致出现了一系列资源与环境问题,如煤炭资源过度开发、煤炭资源利用效率低、有害气体大量排放、矿区环境污染等多种问题。针对矿区的煤炭资源合理利用与安全评价问题,应用 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)法和 BP(Back Propagation)神经网络对煤矿进行评价预测的学者较多。陈刘瑜等^[2]采用指标临界值及分级数方式,建立基于层次分析法(AHP)和 TOPSIS 法的冲击型煤与瓦斯突出倾向性等级评判模型,并用实际工程案例验证模型的合理性;李艳昌等^[3]通过对露天煤矿煤炭自燃风险评估的各个指标进行分析比较,利用层次分析法和逼近理想解排序综合评判模型对露天煤矿煤炭自燃危险性进行评价;李润求等^[4]应用 Elman 神经网络建立煤炭生产百万吨死亡率安全预测模型,结果表明我国煤矿生产百万吨死亡率将保持下降趋势;田时中等^[5]依据能源安全理论并结合 TOPSIS 法测算我国煤炭供需安全度;杨兆青等^[6]构建煤炭资源型城市的生态安全评价指标体系,运用熵权 TOPSIS 法进行城市生态安全综合评价;赵飞等^[7]针对煤矿企业生产过程中安全生产状况的模糊性、多因素性等特点,利用 Levenberg-Mrquardt 优化算法改进 BP 神经网络,并进行训练和仿真,发现经过改进的 BP 神经网络比标准 BP 算法和动量 BP 算法具有更好的效果;施龙青等^[8]通过灰狼优化算法得到 Elman 神经网络优化的最佳权重和阈值,证明神经网络模型准确度更高,可以用于工程实际;桂祥友等^[9]利用采空区已有的自然发火预测指标建立 BP 神经网络的时间序列预测模型,对采空区未来有无发火危险进行预测,确定采空区未来发火可能性大小;李凯风等^[10]运用分位数回归、遗传算法修正的 BP 神经网络系统,通过神经网络算法对煤炭开采和洗选行业金融安全运行状况进行预警分析评价;宋华岭等^[11]结合模糊 C-均值聚类算法(Fuzzy C-Means Algorithm, FCM)和模糊神经网络(Fuzzy Neural Network, FNN)评价方法,提出“FCM-FNN”双模糊综合评价模型,对煤炭资源整合后的效果进行了实证分析和评价研究。综上所述,学者们主要从单因素角度结合数学方法分析煤炭资源安全影响因素,没有考虑多个因素的综合影响,同时所用方法大多数为传统的方法,评价体系大多不完善、不全面,所以建立完善、全面、具体的评价体系具有重要的意义。

鉴于此,为了更加合理地评价煤炭资源安全,本文拟考虑长期煤炭资源和短期煤炭资源两大方面,基于改进 BP-TOPSIS 法,构建我国煤炭资源安全综合指标评价模型,结合实际工程验证其合理性,并分析各因素对指标的影响,以期对煤炭资源安全合理评价提供一定的技术参考。

1 煤炭资源安全评价体系

煤炭资源安全是一个相对复杂的概念,受国际能源署对能源安全定义的启发,将煤炭资源分为长期煤炭资源和短期煤炭资源。长期煤炭资源受煤炭储量、煤炭产业发展水平和环境可持续性这 3 个主要因素的影响,它们反映未来煤炭资源供求关系是否会受到限制。煤炭行业的发展水平反映了煤炭的生产能力,进而影响煤炭资源的供求关系。煤炭的生产和利用对环境造成了一定程度的破坏,从长远角度看,增加了使用煤炭资源的成本,环境压力是减少使用化石燃料和发展清洁能源的驱动因素。短期煤炭资源受煤炭供求关系和煤炭进出口的影响。煤炭供应包括煤炭的生产、出售和售出 3 个环节,它决定了我国煤炭自给自足的程度;煤炭需求是指对煤炭供应的最低需求,煤炭需求的增加可能表明一个国家对于煤炭的依赖更大,替代能源更少。煤炭进出口受煤炭供应短缺、国际市场价格波动、获取外部煤炭资源能力、控制供需平衡能力等方面的影响,煤炭进口对煤炭资源安全产生负面影响,大量煤炭进口对国内煤炭产业发展不利,容易造成对海外煤炭资源的过度依赖及自给率降低的后果。

许多学者从不同角度提出了煤炭资源安全的判断指标,但到目前为止还没有一个能全面评价煤炭资源安全的标准指标。本文在借鉴煤炭资源安全定义和充分考虑相关影响因素的基础上,建立了国家煤炭资源安全指标评价系统,如表 1 所示。表 1 中,煤炭生产弹性系数是指煤炭总产量年均增长率与国民经济年均增长率的百分率;煤炭自给率指煤炭产量与煤炭消费总量的百分率;其余数值均可从中国知网、年鉴等数据库中提取。煤炭储量、煤炭产业发展水平及煤炭供应中各指标对煤炭资源安全均有正影响;煤炭需求中各指标对煤炭资源安全均为负影响。在环境可持续方面,有害气体的排放对环境为负影响,因为大量的有害气体排放不仅污染人类生存环境,还提高了治理环境的成本;对废气处理的投资对煤炭资源安全为正影响,合理的投资不仅可以改善环境,还可以小幅度降低经济成本。煤炭自给比例反映国家有满足煤炭需

求的能力,与煤炭资源安全指标一致,确定为正相关;煤炭净出口越大,对煤炭自给比例越不利,故煤炭净出口为负相关。

表1 煤炭资源安全评价系统及指标性质

目标层	次要目标层	要素层	指标层	指标性质	
煤炭资源安全	长期煤炭资源	煤炭储量	已探明煤储量 D1	+	
			基础煤储量 D2	+	
		煤炭产业发展水平	特殊采矿设备输出 D3	+	
			煤矿产业投资 D4	+	
			能源产业投资 D5	+	
			煤炭采掘作业投资比例 D6	+	
			环境可持续性	有害气体排放量 D7	-
				废弃处理投资 D8	+
		短期煤炭资源	煤炭供应	煤炭生产弹性系数 D9	+
				煤炭生产 D10	+
	煤炭需求		煤炭消耗量 D11	-	
			煤炭发电比例 D12	-	
			煤炭消费总比例 D13	-	
	煤炭进出口	煤炭自给比例 D14	+		
		煤炭净进口 D15	-		

2 改进 BP-TOPSIS 理论分析

2.1 改进 TOPSIS 法

TOPSIS 法是一种根据评价对象与理想目标的逼近程度进行排序的评价方法,广泛应用于多个目标决策分析中.该评价方法基本原理是通过数据归一化后的规范化矩阵找出众多目标中最优目标与最劣目标,由预先设定好的“正、负理想解”来测算各个单元数据与“正、负理想解”的距离,得到单元数据与“理想解”的接近度,并按照“理想解”接近度的大小排序,以此作为评价目标优劣的依据^[12-13].但是,该方法适用范围较窄,测量误差相对较大,单纯采用某一指标对目标进行评价比较片面,达不到较为全面评价目标的效果,而采用基于熵权的 TOPSIS 方法可以全面、客观地进行权重赋值,避开 TOPSIS 法主观的缺点.其求解思路为利用熵权法确定各评价指标的熵权值,使评估对象的正负理想解更加客观,然后构建熵权 TOPSIS 模型进行评价.具体步骤如下:

1) 设有 m 个评价对象, n 个评价指标, x_{ij} 为第 i 个评价对象中第 j 个指标的原始数据,则原始评价指标矩阵 X 为

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

2) 数据标准化处理.由于各指标量纲不同,需对每个数据进行标准化处理,得到标准化矩阵 Y ,如式(2)所示.其中 y_{ij} 是第 i 个评价对象中第 j 个指标的标准化值.

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

3) 计算第 j 项指标下第 i 个评价对象的特征比重 r_{ij} .

$$r_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}. \quad (3)$$

4) 计算每个指标信息熵 e_j .

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij}. \quad (4)$$

5) 计算每个指标权重值 w_j .

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j). \quad (5)$$

6) 通过数据规范化处理,得到规范化矩阵 T .

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ t_{m1} & \cdots & t_{mn} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

式中: $t_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}$.

7) 构造加权矩阵 Z ,如式(7)所示.

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & \cdots & z_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 t_{11} & \cdots & w_n t_{1n} \\ w_1 t_{21} & \cdots & w_n t_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_1 t_{m1} & \cdots & w_n t_{mn} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

8) 确定每个指标的最优理想解和最劣理想解.设 z_j^+ 和 z_j^- 分别为矩阵 Z 中第 j 项指标的最大值和最小值,则最优理想解为

$$Z_j^+ = (\max\{z_{11}, z_{21}, z_{m1}\}, \cdots, \max\{z_{1n}, z_{2n}, z_{mn}\}) = (z_1^+, z_2^+, \cdots, z_n^+); \quad (8)$$

最劣理想解为

$$Z_j^- = (\min\{z_{11}, z_{21}, z_{m1}\}, \cdots, \min\{z_{1n}, z_{2n}, z_{mn}\}) = (z_1^-, z_2^-, \cdots, z_n^-). \quad (9)$$

9) 计算各评价对象与最优理想解、最劣理想解的距离 S_i^+ 和 S_i^- .

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2}, (i = 1, 2, \cdots, m); \quad (10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2}, (i = 1, 2, \cdots, m). \quad (11)$$

10) 计算各评价对象与最优方案的接近程度,即煤炭资源综合评价指数 C_i .

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}. \quad (12)$$

C_i 的取值范围为 0~1.煤炭资源安全综合评价与煤炭资源综合评价指数成正比,可通过 C_i 对评价目标的优劣进行排序,其中 C_i 越大,代表其评价得分越高,即煤炭资源安全综合评价越高;反之亦然.

2.2 改进 BP 神经网络

标准 BP 神经网络也称误差反向传播神经网络,是应用最为广泛的人工神经网络之一,对非线性系统具有极强的模拟能力.BP 神经网络预测与传统预测方法相比,具有容错能力强、预测速度快等优点^[14-16].但 BP 算法也存在一定的局限性,所以,需对标准 BP 算法进行一定的改进.本文采用 Levenberg-Marquardt 思想对 BP 神经网络进行改进,其算法是牛顿法和标准 BP 算法的结合.改进 BP 神经网络的优势在于:权值数量较少时,收敛速度较快,且迭代次数少,精度相对较高.

3 结果分析

3.1 改进 TOPSIS 计算结果

对 CNKI 数据库的文献进行检索,并统计 2004 年—2019 年的我国煤炭储量、供应、需求和进出口等数据.在这期间,我国煤炭行业总体形势发生了巨大变化,煤炭基础储量减少了近 1 100 亿 t.近年来,随着我国经济高速发展,对煤炭行业的投资比例逐年增加,进而导致煤炭产能过剩,在推行削减过剩产能的政策后,对煤炭行业的矿业投资出现了大幅下降.2011 年开始,煤炭行业投资占能源行业投资总额的比例也逐年减少.相较于 2011 年以前,有害气体排放量下降了 60%,且火力发电的份额有显著下降趋势,煤炭消费量和煤炭产量随着经济的飞速发展不断增加,但我国煤炭自给率呈持续下降趋势,而煤炭净进口一直在增加.

根据式(1)~式(9)计算我国煤炭资源安全评价指标权重,以及 2004 年—2019 年我国煤炭资源安全

的最优和最劣理想解,结果如表2所示.由表2可知,要素层中煤炭产业发展水平和煤炭进出口的权重较大;指标层中对废气处理的投资权重最大,特殊采矿设备输出权重次之.

表2 煤炭资源安全指标评价系统各指标参数

指标	权重	最优理想解	最劣理想解	指标	权重	最优理想解	最劣理想解
D1	0.032 6	0.988 6	-2.625 9	D9	0.033 1	1.531 1	-2.501 6
D2	0.076 8	0.956 3	-1.556 4	D10	0.058 1	1.176 6	-1.830 1
D3	0.112 3	1.209 7	-1.285 6	D11	0.043 6	2.210 3	0.967 6
D4	0.071 5	1.242 6	-1.600 9	D12	0.066 8	-1.733 6	1.238 0
D5	0.071 5	1.485 1	-1.572 6	D13	0.051 2	-1.991 7	1.065 6
D6	0.079 6	1.717 1	-1.418 1	D14	0.093 2	1.571 5	-1.364 2
D7	0.039 5	-2.345 9	1.045 5	D15	0.098 4	-1.315 2	1.463 7
D8	0.118 7	2.196 8	-1.062 8				

煤炭资源安全等级可根据 C_i 的值进行评价,2004年—2019年煤炭资源综合评价指数结果如图1所示.由图1可知,在2004年—2019年,我国煤炭资源安全经历了黄金期、调整期、衰退期和恢复期.2004年—2008年,国家经济局势好转,并且大力支持基础设施建设,煤炭需求量大幅度增加,从而带动了煤炭行业的发展,该阶段为煤炭行业发展的黄金时期,煤炭需求量总体呈上升趋势,煤炭供应链得到改善.2009年—2012年,在国家政策的支持及2004年—2008年国家政策的干预下,煤炭行业得到高速发展,煤炭供应快速改善,导致煤炭库存过剩,同时煤炭进出口的大幅增长又加剧了国内煤炭供需矛盾,这种不平衡因素给国家带来了前所未有的压力,该阶段为煤炭行业的调整期,国家煤炭资源安全指标略有下降.2013年—2014年,煤炭资源安全综合评价指数急剧下降,此阶段,煤炭市场出现了供过于求的现象,国内经济呈现小幅度下降趋势,进一步加剧了煤炭供需矛盾,同时,煤炭资源过度开采也导致环境破坏及污染严重.2015年—2019年为煤炭行业的复苏期,此阶段在国家干预政策的影响下,设备及安全指标落后或不达标的煤矿在2012年—2014年停业整顿后重新投入煤炭生产,同时煤炭进口量及对煤炭行业的投资量下降,缩小了煤炭供需量的差距,煤炭经营利润也得到提升,使煤炭行业再一次复苏.

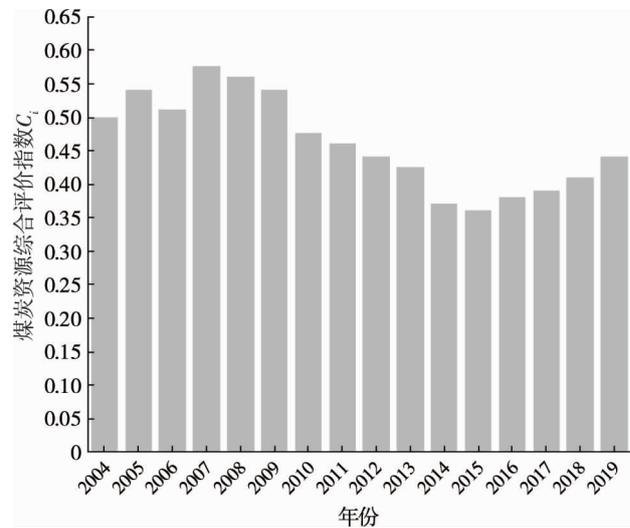


图1 2004年—2019年煤炭资源综合评价指数

3.2 改进 BP-TOPSIS 法的综合评价结果

将改进 BP 神经网络模型应用于我国煤炭资源安全预测当中,把2004年—2019年的煤炭资源安全评价指标样本数据在训练过程中随机分为训练集和测试集,将基于熵权 TOPSIS 法计算得到的煤炭资源综合评价指数 C_i 值作为输出数据.在设置相关参数时,输入层节点数为15,与煤炭资源安全指标数目相对应,并设置网络隐含层数为1,隐含层神经元节点数的计算公式为

$$p_1 = \sqrt{p_2 + s} + \alpha. \quad (13)$$

式中: p_1 为隐含层节点数; p_2 为输出层节点数; s 为输入层节点数; α 为隐含层之间的调节常数, $\alpha \in [1, 10]$.

α 的不同取值对神经网络的训练误差有影响,本文隐含层神经元节点数应在5~12,通过对不同隐含层节点数的测试,最终确定隐含层节点数为10,输出层节点数为1,输出对象为煤炭资源安全综合评价指数.结合 Levenberg-Marquardt 算法对神经网络进行训练,使训练集的均方误差小于 1×10^{-6} ,测试集的均方误差小于 1×10^{-4} .在测试中,训练集均方误差为 $1.286\ 35 \times 10^{-7}$,测试集均方误差为 $4.682\ 63 \times 10^{-5}$,满足精度要求.对神经网络模型下输出参数和输入参数变化的敏感度进行计算和排序处理,选取2018年、2013年—2018年、2004年—2018年这3个时间段作为计算基准,记录2004年—2018年各评价指标的量

值,将各指标最小值与最大值之比作为该评价指标的敏感度,分别计算单期、中期和长期敏感度.将 2018 年评价指标的敏感度作为评价指标的单期敏感度,2013 年—2018 年评价指标敏感度的平均值为中期敏感度,2004 年—2018 年评价指标敏感度的平均值为长期敏感度,各指标敏感度变化如图 3 所示.由图 3 可知,环境可持续性指标(D7, D8)的单期、中期、长期敏感度相对稳定,即无论其他指标参数如何变化,D7, D8 指标参数都不会因此而变化,说明这二者对煤炭资源安全均起到了积极影响.进一步发现大部分指标的长期敏感度均低于其单期敏感度和中期敏感度,这种现象可能是政府政策干预导致的.总体上煤炭储量、煤炭产业发展水平和环境可持续性的敏感度较大,而煤炭供应、煤炭需求和煤炭进出口的敏感度较低.

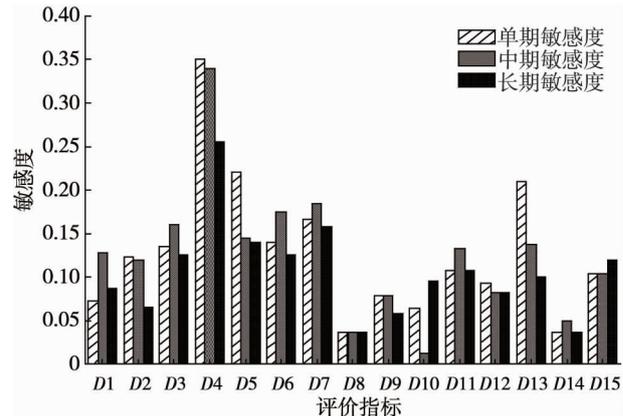


图 2 各评价指标敏感度分布

4 结论

1) 2004 年—2019 年,我国煤炭资源安全经历了黄金期、调整期、衰退期和恢复期.

2) 将改进的 BP-TOPSIS 法应用于我国煤炭资源安全综合评价中,既规避了单一方法确定权重的主观性,也简化了整个评价过程的计算,使评价结果更准确、更客观,其科学性和可操作性较强.

3) 煤炭储量、煤炭产业发展水平、煤炭供应等对煤炭资源安全评价有积极的作用;煤炭需求、有害气体排放、煤炭进口等指标对煤炭资源安全评价的作用是消极的,这些指标单期、中期、长期敏感度较低,是煤炭资源安全评价中较为稳定的比例结构.

参考文献:

- [1] 周晓明,罗文柯,李润球.改进 GM(1,1)预测模型对我国煤炭消费需求的预测分析[J].矿业工程研究,2010,25(2):65-68.
- [2] 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.
- [3] 李艳昌,李飞,郝朝瑜.基于 AHP-TOPSIS 露天煤矿残煤自燃对比分析[J].矿业安全与环保,2019,46(2):111-114.
- [4] 李润求,施式亮,伍爱友.安全预测的 EEMD-PSR-Elman 建模方法及应用[J].中国安全科学学报,2015,25(6):105-110.
- [5] 田时中,赵鹏大,田家华.中国煤炭供需安全度测算:基于 TOPSIS 方法的实证研究[J].国土资源科技管理,2014,31(5):71-78.
- [6] 杨兆青,陆兆华,刘丹,等.煤炭资源型城市生态安全评价:以锡林浩特市为例[J].生态学报,2021,41(1):280-289.
- [7] 赵飞,王则胜.基于改进的新型神经网络在煤矿企业安全管理中的应用[J].煤炭技术,2011,30(4):248-251.
- [8] 施龙青,张荣邀,徐东晶,等.基于 GWO-Elman 神经网络的底板突水预测[J].煤炭学报,2020,45(7):2455-2463.
- [9] 桂祥友,郁钟铭,孟絮屹.基于神经网络的自然发火危险性评价与预测[J].采矿与安全工程学报,2008,25(4):453-457.
- [10] 李凯风,朱贵宇,宋鹏鹏.中国煤炭行业金融安全预警管理实证研究[J].统计与决策,2013(18):92-95.
- [11] 宋华岭,雷放存,谭梅.低碳经济背景下煤炭资源整合效果评价研究[J].中国矿业,2017,26(5):46-52.
- [12] YANG Y X, ZHENG X Y, SUN Z. Coal resource security assessment in China: A study using entropy-weight-based TOPSIS and BP Neural Network[J]. Sustainability, 2020,12(6):2294.
- [13] ZHANG W, ZHANG X X, LIU F, et al. Evaluation of the urban low-carbon sustainable development capability based on the TOPSIS-BP neural network and grey relational analysis[J]. Complexity, 2020, 2020:1-16.
- [14] YANG A M, ZHUANSUN Y X, LIU C S, et al. Design of intrusion detection system for internet of things based on improved BP neural network[J]. IEEE Access, 2019,7:106043-106052.
- [15] FENG F S, LI L L, ZHANG J Q, et al. Strength prediction of coal-based solid waste filler based on BP neural network[J]. Frontiers in Materials, 2021,8:767031.
- [16] TAN T J, YANG Z, CHANG F, et al. Prediction of the first weighting from the working face roof in a coal mine based on a GA-BP neural network[J]. Applied Sciences, 2019,9(19):4159.