基于PCA-熵值法模型的深部巷道顶板涌水评价及动态防控*

耿铭[1],王欢[2],徐青云[3]

(1.大同煤炭职业技术学院, 山西 大同市 037024;
2.中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州市 221116;
3.山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同市 037009)

摘要:为精准评价深部巷道顶板涌水风险,弥补传统评价方法因指标冗余和主观赋权导致的可信度低的缺陷,提出一种耦合主成分分析(PCA)与熵值法的综合计算方法,利用PCA对多源指标降维以消除信息重叠,提取关键主成分后量化各主成分权重,引入熵值法实现综合评价指数的客观化计算,结合各项指标的样本输入数据集,以"主成分提取-综合指数计算-模型对比验证-动态防控"为逻辑框架,构建煤层顶板涌水评价模型。结果表明:断层导水系数是影响工作面顶板涌水的主控因素,渗透系数次之。基于PCA-熵值法计算的综合指数与现场淋水数据的高拟合特性,划分5种富水性危险等级。判定距1315工作面切眼518~678 m区域处于极高危险性区域,0~425 m处于较高危险性区域。针对不同区域顶板涌水特征,提出"分区防控-立体堵截-排水优化"的技术路径。研究结果完善了顶板涌水危险的划分与判别体系,为深部资源安全开采提供了新方法。

关键词:顶板涌水;指标降维;PCA-熵值法;综合评价;动态防控

中图分类号:TD742 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0147-11

Evaluation and Dynamic Prevention and Control of Roof Water Inrush in Deep Roadway Based on PCA-Entropy Method Model

GENG Ming[1], *WANG Huan*[2], *XU Qingyun*[3]

(1.Datong Vocational and Technical College of Coal, Datong, Shanxi 037024, China;
2.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
3.School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract: To accurately evaluate the roof water inrush risk of deep roadways and make up for the low credibility of traditional evaluation methods caused by index redundancy and subjective weighting, a comprehensive calculation method coupling with principal component analysis (PCA) and entropy method was proposed. PCA was used to reduce the dimension of multi-source indexes to eliminate information overlap. After key principal components were extracted, the weight of each principal component was quantified. The entropy method was introduced to achieve the objective calculation of comprehensive evaluation indexes. Combined with the sample input datasets of each index, the evaluation model of coal seam roof water inrush was constructed with the logical framework of "principal component extraction-comprehensive index calculation-model comparison and verification-dynamic prevention and control". The results show that the fault water conductivity coefficient is the main controlling factor affecting the roof water inrush of the working face, and the permeability coefficient is the second most important. Based on the high fitting characteristics of the comprehensive index calculated by the PCA-entropy method and the on-site water seepage data, five categories of water-rich risk levels have been divided. It is determined that the area 518-678 m away from the open-off cut of the 1315 working face is in the extremely high-risk area, and the area 0-425 m away is in the high-risk area. According to the characteristics of roof water inrush in different areas, the technical path of "partition-based prevention and control-three-dimensional interception-drainage optimization" was proposed. The research results improve the classification and identification system of roof water inrush risk levels, and provide a new method for the safe exploitation of deep resources.

* **收稿日期**:2025-05-02
基金项目:国家自然科学基金项目(52104144)
作者简介:耿铭(1981—),男,辽宁锦州人,硕士,副教授,主要从事矿山安全方面的研究。E-mail:gengming20092009@163.com
通信作者:王欢(2000—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事近距离煤层开采方面的研究。E-mail:wanghuan9829@163.com

Key words: Roof water inrush, Index dimension reduction, PCA-entropy method, Comprehensive evaluation, Dynamic prevention and control

0 引言

随着我国煤炭资源开采深度不断增加,矿井水文地质条件日趋复杂。在井工开采过程中,采动作用破坏了原本平衡的水文地质环境,形成了新的地下水运移通道[1-3]。这种扰动不仅沟通了不同含水层之间的水力联系,还可能引发地表水与地下水的相互作用。而顶板涌水灾害是煤矿或其他地下矿山开采过程中常见的灾害之一,通常由顶板裂隙导通含水层、老空积水、断层突水等引发[4-6]。因此,需综合地质条件、开采扰动、监测数据等多源信息,通过定量化、动态化的方法评估风险等级,而构建科学的矿井顶板涌水灾害评价体系是实现灾害精准预测和主动防控的关键。

诸多学者对煤炭涌水的风险分级、动态预警及评价指标体系设计等方面作了大量研究[7-9]。风险分级作为评价体系的核心内容,旨在量化涌水可能性和危害程度。黄欢等[10]提出了"富水性指数法",通过建立顶板含水层富水性评价指标体系,实现了涌水危险性的三级划分。李超峰等[11]在煤层顶板含水层涌水危险性评价中,综合考虑了水文地质条件和开采因素,建立了开采强度与顶板破坏程度的定量关系模型,构建了更为精细的五级分类标准。宫厚健等[12]采用改进模糊层次分析法,对含水层富水性进行了评价,有效解决了评价过程中的不确定性问题,为风险分级提供了新的思路。动态预警系统的建立依赖于实时监测数据的采集与分析。樊敏等[13]通过对下石节矿井离层涌水特征的研究,确立了以淋水量和离层位移为核心的预警指标体系。孙鹏等[14]在滨海金矿涌水风险评估中,引入了改进的物元可拓法,实现了动态监测数据的智能化处理。庞凯等[15]在烧变岩含水层条件下,采用层次分析法(AHP)-熵权法计算指标权重,建立了基于多参数融合的预警模型,显著提高了预警准确性。在评价指标体系设计方面,汪子涛等[16]采用熵权-逼近理想解排序(TOPSIS)法优化了柴达木盆地地下水富水性评价的权重分配,实现了评价指标的客观赋权,强调了含水层厚度和渗透系数的重要性。伍小沙等[17]在煤矿智能化评价研究中,采用主客观赋权VIKOR法,系统分析了采动破坏深度与涌水风险的关系。向韫等[18]将矩估计理论与GRA-VIKOR模型相结合,构建了兼顾数据离散性与冲突性的风险评价框架,提高了评价结果的稳定性。

综上所述,现有研究已取得显著进展,但仍存在权重指标选取片面和数据处理单一等问题,多侧重于单一类型指标的独立分析,缺乏系统性整合,与实际涌水风险的吻合度仅为65%~75%,难以全面反映顶板涌水的复杂成因机制[19]。主成分分析(PCA)-熵值法用于矿床潜力评估、资源量预测和尾矿库稳定性分析,通过PCA降维提取地质特征的主成分(如钻孔、渗透压力、降雨量等),再结合熵值法构建综合评价模型[20-23],但该模型在深部顶板涌水危险性评价方面研究较少。因此本文基于PCA-熵值法耦合模型,通过PCA提取关键指标,结合熵值法优化权重计算,构建"主成分提取-综合指数计算-模型对比验证-动态防控"的评价体系,以提高模型的客观性和适用性,从而为深部矿山的生产安全提供科学的决策依据。

1 矿井概况

赵庄煤矿位于山西高平市,主采3#煤层,1315工作面位于一盘区,煤厚4.6~5.0 m,倾角为0°~8°,结构简单。工作面埋深约700 m,倾斜长度为296.9 m,走向长度为1 196.5 m,南侧为1312工作面,已回采完毕,东侧为一盘区大巷,已掘进,北侧为1317工作面,尚未掘进。13151胶带顺槽巷沿煤层顶底板掘进,掘进中存在源自顶板K8砂岩含水层的裂隙水流向工作面,顶底板岩性柱状图见图1。该含水层富水性及导水性不均衡,造成涌水地段不同,淋水通道以锚索(杆)孔、裂隙为主。工作面回采前,顶板中存在砂质泥岩、细粒砂岩等易储能的岩层。为减小高埋深下初次来压强度和来压步距,在13151巷和13153巷施工顶板水力压裂孔和顶板聚能爆破钻孔,但间接破坏了坚硬顶板的完整性,进一步引发导水通道的形成,沟通上部含水层;且3#煤层已形成大面积采空区,该工作面回采作业存在水灾事故风险。因此,亟需对尚未回采的1315工作面顶板富水性开展分区评价,并采取差异化措施预防涌水灾害。

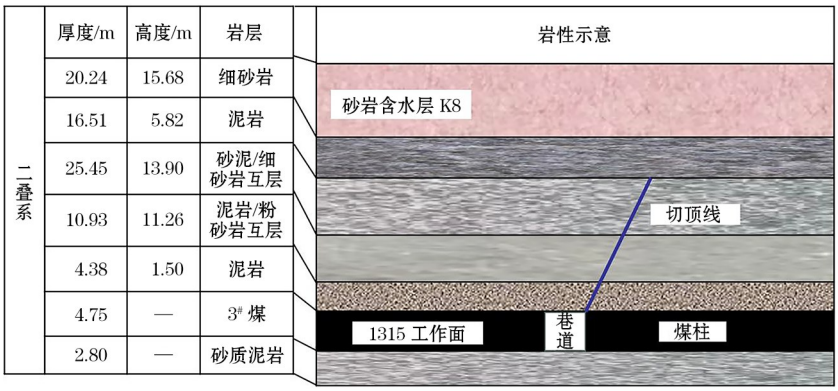


图 1　顶底板岩性柱状图

Fig.1　Lithological histogram of roof and floor

2　PCA-熵值法组合权重计算

矿井顶板涌水灾害作为矿山安全生产的主要威胁,其形成机理复杂,影响因素多元。PCA-熵值法通过多源指标降维融合,提高了评价的全面性和准确性。即利用 PCA 消除指标间多重共线性并浓缩核心信息,提取多源数据指标主成分,结合熵值法进行二次赋权,解决了传统熵值法因数据均匀分布导致权重失效的问题,避免了单一主成分法依赖方差贡献率的局限性。

2.1　多维度指标选取

本文通过对知网数据库中相关“矿井涌水”的 1 532 篇文献的检索与分析,生成高频词汇共现分布图,如图 2 所示。

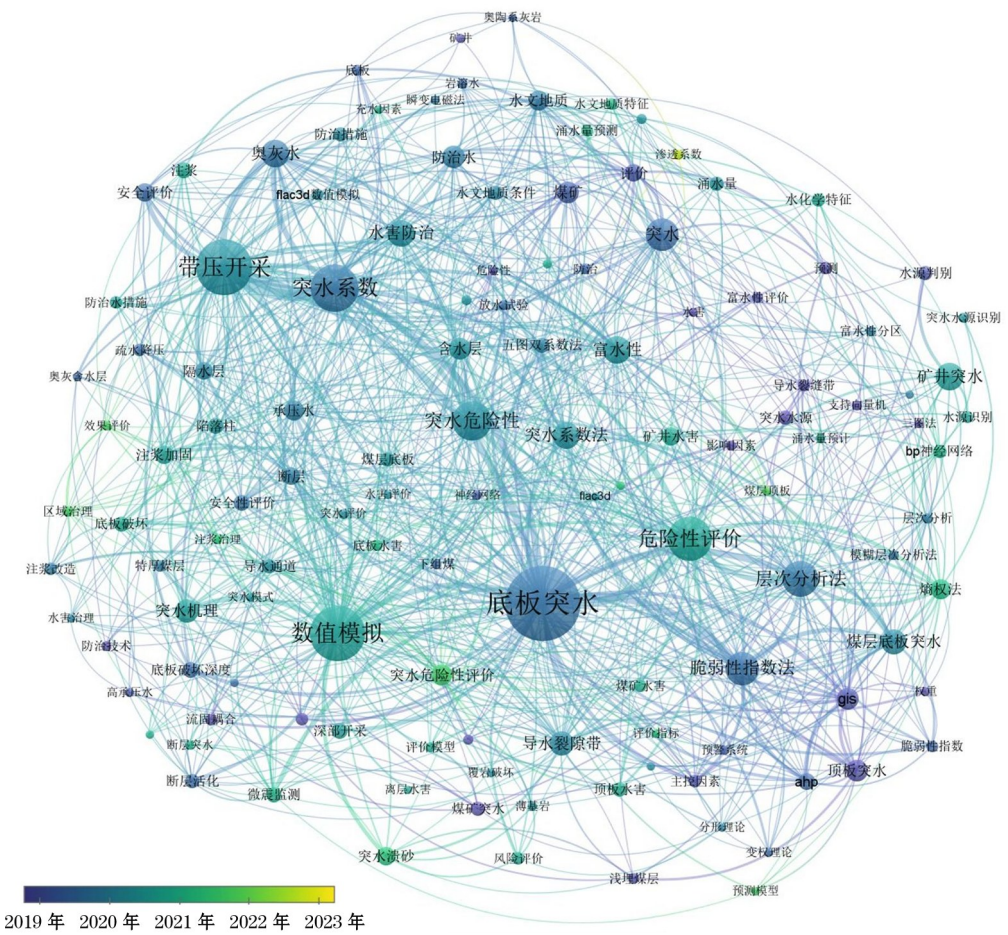


图 2　矿井涌水高频词汇共现分布图

Fig.2　High-frequency vocabulary co-occurrence distribution diagram of mine water inrush

由图 2 可知,2019 年,煤层底板突水评价研究主要聚焦于脆弱性指数法的应用与优化,结合 AHP 和地理信息系统(GIS)技术构建综合评价体系。通过 AHP 确定各影响因素的权重,利用 GIS 的空间分析功能实现突水危险性的可视化分区,脆弱性指数法则为底板突水风险量化提供了新思路。2020—2022 年,研究重点转向突水系数的精细化测定及其在水害防治中的应用。该阶段通过开展系统的放水试验以获取关键水文参数,结合瞬变电磁法等地球物理探测技术,实现了含水层富水性的精准识别。2023 年以来,随着开采深度的增加,离层水害问题日益突出,数值模拟技术成为研究热点。矿井涌水研究热点分布见图 3。由图 3 可知,“底板突水”“危险性评价”“突水系数”“突水危险性”等关键词出现频次较高。因此,本文兼顾数据结构的客观性与信息浓缩性,构建多源数据集输入,实现理论计算、现场监测与防治实践的深度融合,建立涌水风险评估模型,以实现风险分级、动态预警及科学决策支持。

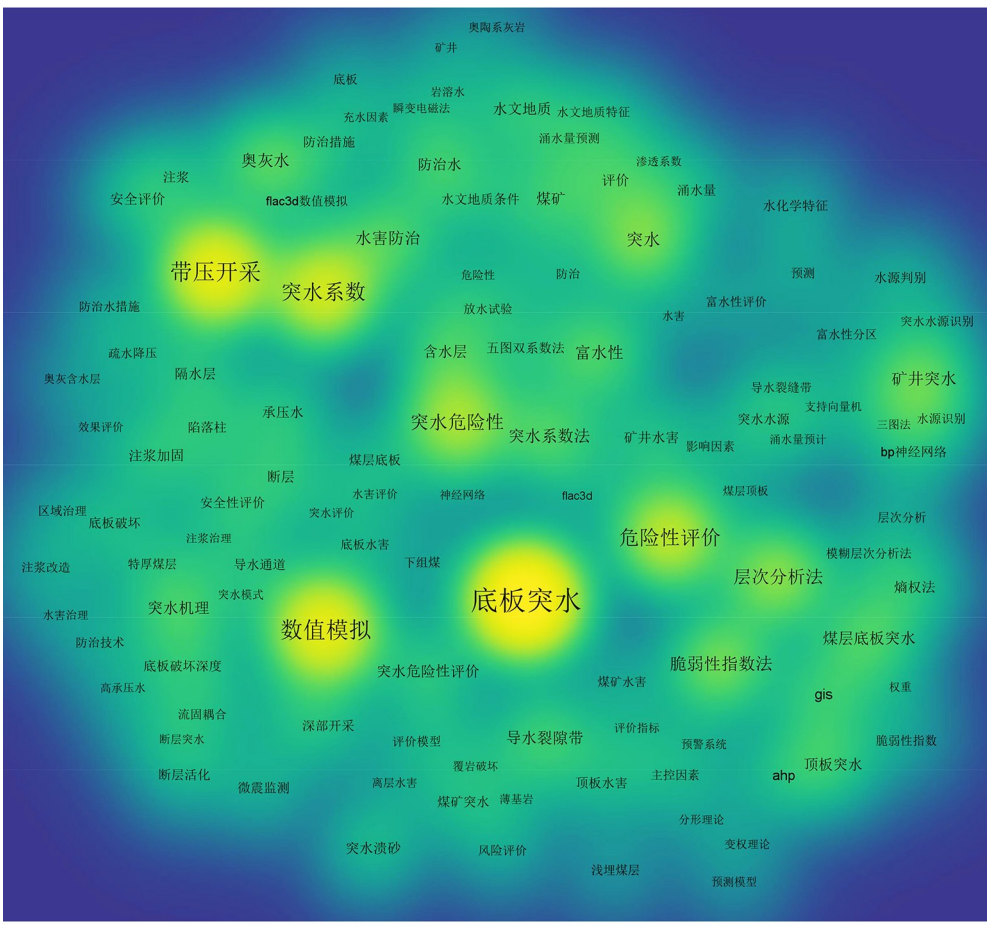


图 3 矿井涌水研究热点分布图

Fig.3 Research hotspot distribution diagram of mine water inrush

巷道顶板涌水受多源因素综合影响,根据各影响因素的相关性:断层导水系数和裂隙密度与涌水量呈正相关;渗透系数与涌水量呈正相关,隔水层厚度则与涌水量呈负相关;水压和降水入渗促进涌水;采掘速度使导水裂隙带高度增加、爆破振动加剧涌水;支护强度、注浆效果和排水能力可有效抑制涌水。各因素通过渗透性、水压和岩体完整性等机制共同控制涌水量,各指标的数据来源可通过现场钻孔实测确定,其中降水入渗可通过查询各地统计年鉴获取,注浆效果和排水能力可通过各矿工作面疏水台账查询,其余指标可从知网和 Web of Science 相关文献中获取。因此,选取断层导水系数、裂隙密度、渗透系数、隔水层厚度、水压、降水入渗、采掘速度、爆破振动、支护强度、注浆效果、排水能力等 11 项指标作为特征值,进行 PCA-熵值法权重计算。

2.2 PCA 原理与运算步骤

主成分分析的目的是用少数几个成分去描述许多指标或因素之间的联系,即将相关性较强的几个变量归在同一类中,每一类变量就成为一个成分,以最少的信息丢失为前提,以较少成分反映原始数据

的大部分信息,其主要运算步骤如下:

(1) 数据标准化。

对原始数据矩阵 $\boldsymbol{X}_{n\times m}$($n$ 为样本数;m 为变量数)进行 Z-score 标准化:

$$x_{ij}^{'}=\frac{x_{ij}-\mu_j}{\sigma_j} \tag{1}$$

式中:$x_{ij}^{'}$ 为标准化后的第 j 个指标数据;x_{ij} 为样本数据;μ_j 为变量 j 的均值;σ_j 为标准差。

(2) KMO 检验与 Bartlett 球形检验。

KMO 检验:衡量变量间相关性,取值范围 0 ~ 1,若 $KMO>0.6$,则满足 PCA 分析要求。

$$KMO=\frac{\sum_{i\neq j}r_{ij}^2}{\sum_{i\neq j}r_{ij}^2+\sum_{i\neq j}p_{ij}^2} \tag{2}$$

式中:r_{ij} 为相关系数;p_{ij} 为偏相关系数。

Bartlett 球形检验:检验变量是否存在相关性,若显著性,$p<0.05$,则可进行 PCA 分析。

(3) 计算相关系数矩阵。

标准化数据的相关系数矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=\frac{1}{n}\boldsymbol{X}'^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}' \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{X}'$ 与 $\boldsymbol{X}'^{\mathrm{T}}$ 分别为标准化数据矩阵及其转置矩阵。

(4) 计算特征值与特征向量。

求解 $\boldsymbol{R}$ 的特征方程:

$$\boldsymbol{R}=\lambda_k\boldsymbol{u}_k \tag{4}$$

式中:λ_k 为第 k 个特征值(特征值按从大到小排序);$\boldsymbol{u}_k$ 为对应的单位特征向量。

(5) 方差贡献率与主成分选择。

第 k 个主成分的方差贡献率 a_k:

$$a_k=\frac{\lambda_k}{\sum_{j=1}^{m}\lambda_j} \tag{5}$$

前 p 个主成分的累积方差贡献率 e:

$$e=\frac{\sum_{k=1}^{p}\lambda_k}{\sum_{j=1}^{m}\lambda_j} \tag{6}$$

通常选择 $e\geqslant 85\%$ 的主成分。可通过碎石图辅助判断。

绘制特征值随主成分的变化曲线,选择拐点前的主成分。

(6) 计算主成分得分。

前 p 个主成分的得分矩阵 $\boldsymbol{Z}_{n\times p}$:

$$\boldsymbol{Z}_{n\times p}=\boldsymbol{X}_{n\times m}\boldsymbol{U}_{m\times p} \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{U}$ 为由前 p 个特征向量组成的矩阵。

(7) 载荷矩阵计算。

主成分与原始变量的载荷矩阵 $\boldsymbol{L}_{m\times p}$:

$$\boldsymbol{L}_{m\times p}=\boldsymbol{U}_{m\times p}\sqrt{\boldsymbol{\Lambda}_{p\times p}} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{\Lambda}$ 为前 p 个特征值的对角矩阵。

(8) 主成分权重 w_j 计算。

将每个变量在各主成分上的载荷,通过各主成分的贡献率加权求和。

$$w_j^1=\sum_{j=1}^{m}(L_j\times a_k) \tag{9}$$

式中,L_j 为第 j 个变量的载荷,取自载荷矩阵。

2.3 熵值法计算

(1) 数据归一化。

对主成分得分矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 进行归一化处理:

$$p_{ij}^{'}=\frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}Z_{ij}} \tag{10}$$

式中:Z_{ij} 为由式(7)计算得出的各指标得分;$p_{ij}^{'}$ 为归一化后的各数据。

(2) 信息熵计算。

信息熵 E_j 的计算公式如下:

$$E_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{11}$$

(3) 权重计算。

权重 w_j 的计算公式如下:

$$w_j^2=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{p}(1-E_j)} \tag{12}$$

2.4 综合权重计算

通过 2.2 小节计算得出主成分权重 w_j^1,通过 2.3 小节计算得出熵权值 w_j^2,将两者结合,得出第 j 个指标的综合权重值 w_j^*(见式(13)),其中,α 为第 j 个主成分的综合得分系数。

$$w_j^*=(w_j^1)^{1-\alpha}\ (w_j^2)^{\alpha} \tag{13}$$

PCA-熵值法兼顾数据结构的客观性与信息浓缩性,通过正交变换和熵权计算来双重保障权重的科学性,尤其适合高维、小样本及变量相关性强的复杂系统。相比单一方法,PCA-熵值法既能消除共线性干扰,又能依据数据实际波动动态调整权重,在综合评价中更具解释力和鲁棒性。

3 基于 PCA-熵值法的涌水评价模型

在进行 PCA 分析之前,由于所选取的指标体系

中每个指标都有自己的量纲和变动差异,需对数据集进行预处理,以消除量纲和变动差异的影响。预处理过程中,对负向指标进行逆向化处理,其余指标保持正向化;同时采用式(1)对数据进行标准化处理。本研究共开展三次分析,第一次分析中“水压”和“降水入渗”两项指标的主成分归属划分错乱,故将这两项指标删除;“注浆效果”指标的共同度小于0.4,需予以删除。最终剩余 8 项指标,其适用性符合要求。

3.1 主成分提取及权重计算

数据预处理完成后,先依据式(2)所示的检验方法开展 KMO 检验与 Bartlett 球形检验,再判断是否适合提取主成分。检验结果显示,$KMO=0.616$(>0.6),Bartlett 球形检验的 $p<0.05$,说明数据集适合提取主成分。

根据式(3),对各指标进行相关性分析,用于数据降维,各指标相关系数如图 4 所示。图中,Ⅰ为断层导水系数,Ⅱ为涌水量,Ⅲ为爆破振动,Ⅳ为裂隙密度,Ⅴ为渗透系数,Ⅵ为隔水层厚度,Ⅶ为采掘速度,Ⅷ为支护强度,Ⅸ为排水能力。

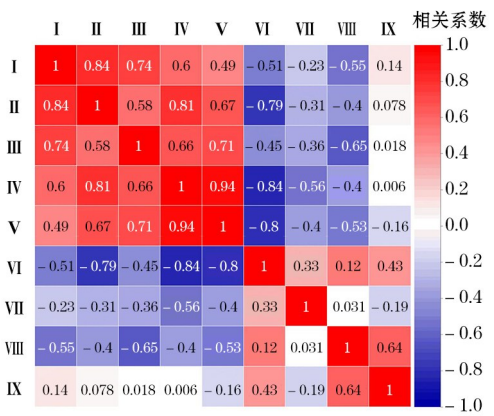
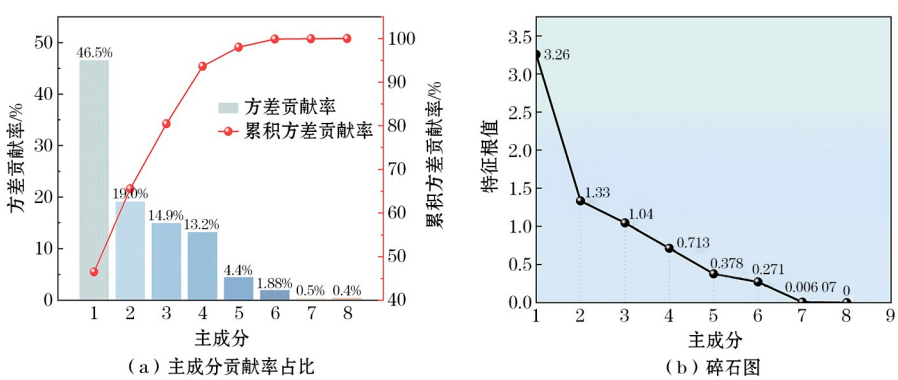


图 4 各指标相关系数

Fig.4 Correlation coefficient of each index

从图 4 中可知,巷道顶板涌水各影响因素间存在显著的线性耦合关系。其中,断层导水系数(由裂隙密度、陷落柱等因素表征)与涌水量呈现最强的正相关性(Pearson 系数 0.84),这是由于高裂隙密度或陷落柱显著增强了含水层的导水性,而高水压又会进一步扩大裂隙,形成“导水增强-水压升高-裂隙扩展”的正反馈效应。中等相关性的因素组合中,爆破振动与裂隙密度的相关性(Pearson 系数 0.66)较为典型,爆破振动荷载会使软弱夹层(如泥岩)的微裂隙发育程度提高,破碎软弱夹层导致隔水层有效厚度缩减。支护强度与断层导水系数、隔水层厚度的关联性较弱,反映出围岩稳定性与水文地质条件的相对独立性,单纯提高支护强度不能有效阻断导水通道。针对原始 8 项涌水指标间存在的多重共线性问题,进行数据降维处理。

利用 PCA 提取样本数据的主成分特征值,根据式(5)至式(7),得到各主成分贡献率占比如图 5(a)所示,结合图 5(b)碎石图辅助判断,各指标载荷系数及共同度见表 1。碎石图用于辅助判断主成分提取个数,当折线由陡峭突然变得平稳时,折线由陡峭转为平稳的拐点前的主成分个数,即为参考提取的主成分个数。从碎石图中可以看出,当提取至第 4 个成分后,特征根值变化趋于平稳,由此可见,提取 4 个主成分能有效保留原变量的绝大部分信息,对原变量具有显著解释作用。前 4 累积方差贡献率达到 93.6%,对应的加权后方差贡献率即权重依次为:46.5/93.6≈0.496 8(主成分 1),19.0/93.6≈0.203 0(主成分 2),14.9/93.6≈0.159 2(主成分 3),13.2/93.6≈0.141 0(主成分 4)。而后 4 个主成分的方差贡献率分别为 4.4%、1.88%、0.5%和0.4%,累积方差贡献率 6.4%,因此选择前 4 个主成分作为一级指标用于矿井水富水性计算。



(a) 主成分贡献率占比 (b) 碎石图

图 5 主成分判断图

Fig.5 Principal component judgment diagrams

表 1 各指标载荷系数及共同度

Table 1 Load coefficient and common degree of each index

指标名称	载荷系数				共同度(公因子方差)
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	
渗透系数	0.893*	0.302	0.013	−0.276	0.965
隔水层厚度	0.893*	0.343	−0.021	−0.241	0.974
采掘速度	−0.153	0.293	−0.118	0.729*	0.784
爆破振动	0.798	−0.295	0.398	0.617*	0.910
支护强度	−0.387	0.815*	−0.118	0.052	0.874
排水能力	−0.605	0.641*	0.197	0.029	0.817
断层导水系数	−0.191	−0.063	0.962*	−0.099	0.976
裂隙密度	0.647	−0.077	0.715*	0.130	0.953

注:“*”为各主成分下二级指标。

根据表 1 将 8 项输入指标降维为 4 个主成分,主成分 1(自然条件)主要反映“渗透系数”“隔水层厚度”,主成分 2(开采技术)主要反映“支护强度”“排水能力”,主成分 3(地质构造)主要反映“断层导水系数”和“裂隙密度”,主成分 4(防治工程)主要反映“采掘速度”“爆破振动”。

3.2 二级指标权重计算

根据式(10)至式(12),采用熵值法计算 PCA 确定的 8 个二级指标权重。由于 8 项指标分属四个维度,因此按维度分四次开展熵值法分析,得到各二级指标的权重见表 2。

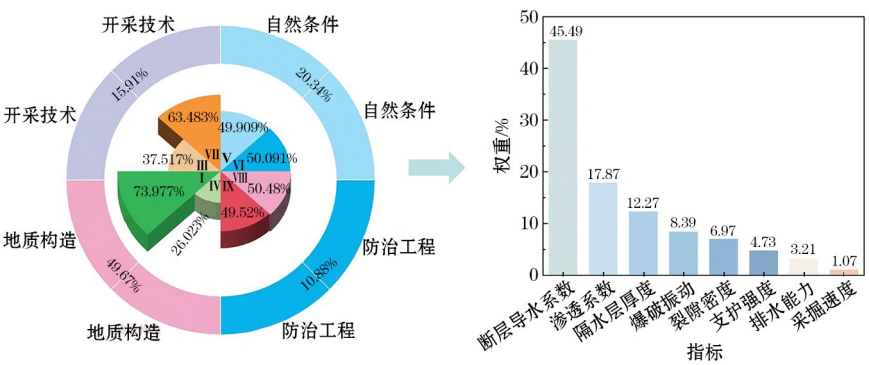
表 2 二级指标权重计算结果

Table 2 Weight calculation results for secondary indexes

指标名称	信息熵值	信息效用值	权重系数/%
断层导水系数	0.955 9	0.044 1	49.908 6
裂隙密度	0.954 6	0.045 4	50.091 4
支护强度	0.949 6	0.050 4	50.480 0
排水能力	0.956 3	0.043 7	49.520 0
渗透系数	0.930 8	0.069 2	26.023 1
隔水层厚度	0.982 7	0.017 3	73.976 9
采掘速度	0.967 7	0.032 3	37.517 3
爆破振动	0.940 1	0.059 9	63.482 7

3.3 PCA-熵值法权重计算

各指标综合权重计算结果如图 6 所示。由图 6 可知,主控因素为断层导水系数、渗透系数、隔水层厚度和爆破振动,综合权重分别为 45.49%、17.87%、12.27%和 8.39%。各因素通过渗透性、水压和岩体完整性等机制共同控制涌水量,其中高渗透层、强水压和工程扰动是主要诱因,而隔水层和防治措施是关键控制因素。



(a) 综合权重维度分布环形图 (b) 综合权重单项分布柱状图

图 6 各指标综合权重计算结果

Fig.6 Calculation results of comprehensive weights of each index

4 1315 工作面富水性分区及防治

4.1 富水性分区

本研究基于综合权重采用加权评分方法对赵庄矿 1315 工作面富水性进行评分,其计算公式如下。

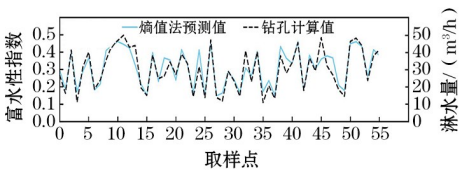
$$F_i = \sum_{j=1}^{n} \omega_j x'_{ij} \tag{14}$$

式中:F_i 为第 i 个监测点的富水性综合得分;ω_j 为第 j 个指标的组合权重;x'_{ij} 为标准化后 i 点的第 j 个指标数据。

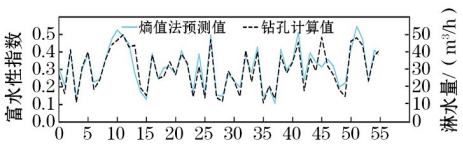
在 13153 巷 1# 横川和 6# 横川进行了顶板取芯工作并标记取样点数据 55 组,根据式(14)计算得出不同方法下富水性综合得分,拟合数据与取样点实测数据的对比如图 7 所示。

由图 7 可知,熵值法、PCA、PCA-熵值法的拟合相关系数 R^2 分别为 0.75、0.81 和 0.91。熵值法的误差根源源于原始数据极值标准化,富水性综合指数在 0.4～0.5 之间显示过低,低估涌水风险,实际淋水 50 m^3/h,预测值为 42 m^3/h,预测值偏低 10%～16%,在 0.2～0.4 之间拟合过高,放大危险性指数,实际淋水 30 m^3/h,预测值为 45 m^3/h,预测值偏高 40%～50%,与实际相差过大,且未考虑各指标相关性及未对输入数据集降维提取主成分,如“采掘速度”与“爆破振动”的共线性使指数计算失真。PCA

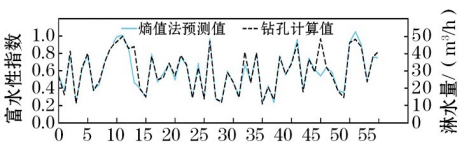
由于主成分截断损失,保留 94%方差时,次要富水因子(如水压、降水入渗)贡献被忽略。富水性综合指数在 0.4～0.5 区间整体过高,实际淋水 45 m^3/h,预测值为 55 m^3/h,预测值偏高 10%～20%,局部拟合过低;而交叉验证时利用碎石图选取主成分数量,存在一定主观性,也会引起误差。PCA-熵值法中,富水性综合指数在 0～1 之间整体拟合与实际相符,消除指标间量纲差异(如隔水层厚度与渗透系数的尺度差异),在主成分空间内重新计算权重,避免了原始数据的噪声干扰,权重分配避免了主观性。因此,根据该拟合曲线,将顶板富水性分为极高危险性(0.9～1)、较高危险性(0.6～0.9)、正常(0.4～0.6)、较低危险性(0.3～0.4)和无危险性(<0.3)。



(a) 熵值法



(b) PCA



(c) PCA-熵值法

图 7 各方法富水性综合得分与钻孔计算值对比

Fig.7 Comparison between comprehensive scores of water abundance by each method and borehole calculated values

基于上述分区结果,结合 1315 工作面实际情况,顶板富水性分布如图 8 所示。

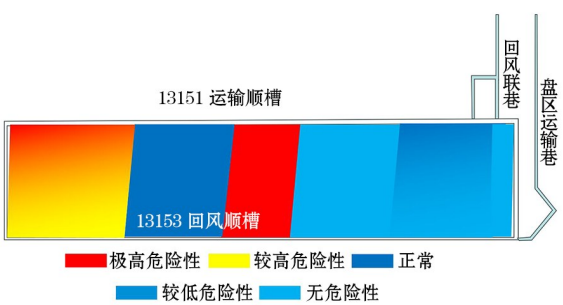


图 8 工作面顶板富水性分布

Fig.8 Distribution of water abundance in the roof of working face

1315 工作面顶板涌水极高危险性区域分布于距切眼 518～678 m 范围,该范围内存在陷落柱 DX17 和断层 DF20;较高危险性区域分布于 0～425 m 范围,该区域顶板存在软弱夹层,由回风顺槽侧较高危险性区域及运输顺槽侧极高危险性区域组成;正常涌水区域分布在 425～518 m 范围,其余区域为较低危险性区域或无危险性区域。

4.2 动态防控措施

针对不同分区提出防治措施。

(1) 极高危险性区域,针对回采时的构造含水,通过“帷幕阻水+超前加固+动态支护”三重防护,确保安全采掘。对 518～678 m 区域内陷落柱 DX17 及断层 DF20 外围施工环形帷幕注浆,降低渗透系数,切断导水通道。同时掘进时布置伞形钻孔,采用超细水泥-CS 双液浆交替灌注;当揭露断层时采用 U 型钢棚+喷射混凝土联合支护,陷落柱段增设注浆锚索;最后实时监测涌水量、围岩变形情况,备足速凝浆材(聚氨酯)和排水设备,突水时立即启动止水垫片封闭。

(2) 针对高危险性区域的软弱夹层顶板水害,采取“注-疏-支”一体化防治措施:采用超细水泥浆对顶板分别实施垂直+径向注浆,形成加固拱壳,同步施工仰角泄水孔疏导顶板积水;支护采用“注浆锚索+钢筋网喷砼+U 型钢棚”组合体系,并安装离层仪实时监测,备妥双液浆应急堵水,实现“堵排结合、可控变形”的安全防治目标。

(3) 针对正常涌水区域的爆破振动诱发裂隙涌水问题,采取“预注浆加固+爆破控制+动态堵水”综合防治措施:在爆破前采用超细水泥浆对预裂区域实施超前注浆,形成 3～5 m 厚加固帷幕,优化爆破参数,以降低振动效应;爆破后立即采用瞬变电磁法检测新生裂隙,对渗水点采用聚氨酯速凝注浆封堵,同步安装自动排水系统,实现“振动控制-裂隙封闭-应急排水”三位一体防控。

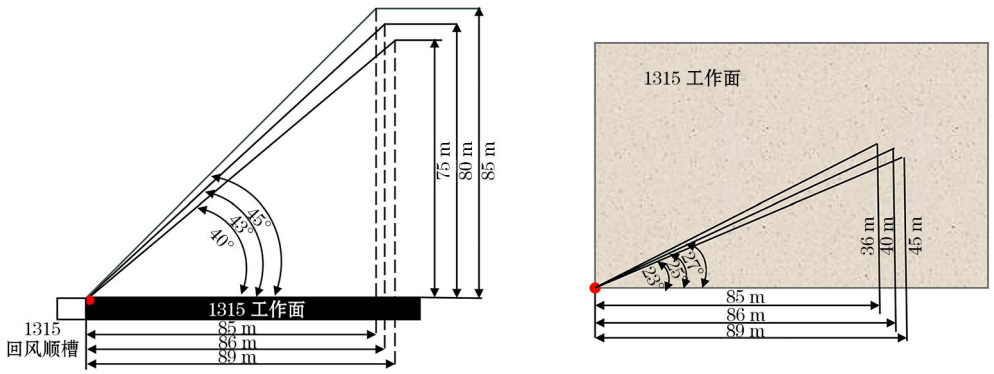
(4) 工作面排水系统优化。在工作面工溜挡煤板上安装两组 Φ108 mm 的软管,分别在巷道低洼处、工溜机头、机尾处安装潜水泵,并与 13151 巷和 13153 巷排水管路贯通;配合底抽巷排水系统,先将工作面积水通过巷道排水管路排至 1# 水仓,再利用安装的两组 Φ108 mm 的专用排水管路将积水排至 13153 巷联络横川移动水仓,最终排至中央水仓。

4.3 工程验证

针对距切眼 0～425 m 范围内的高危险性区域软弱夹层顶板水害问题,重点疏降距顶板 77 m 的

K8 砂岩含水层。

疏水降压布置如图 9 所示。在 1315 回风顺槽针对 K8 砂岩含水层布置扇形仰角疏水孔,每组 3～5 个孔,方位角呈 23°～27°展开,仰角 40°～45°,斜深 85～89 m(垂深 75～85 m)。钻孔开孔 113 mm,终孔 75 mm,孔内下筛管护壁,孔口安装高压闸阀和流量计,连接排水系统。若单孔涌水量＞5 m^3/h,可加密钻孔或调整注浆堵水。

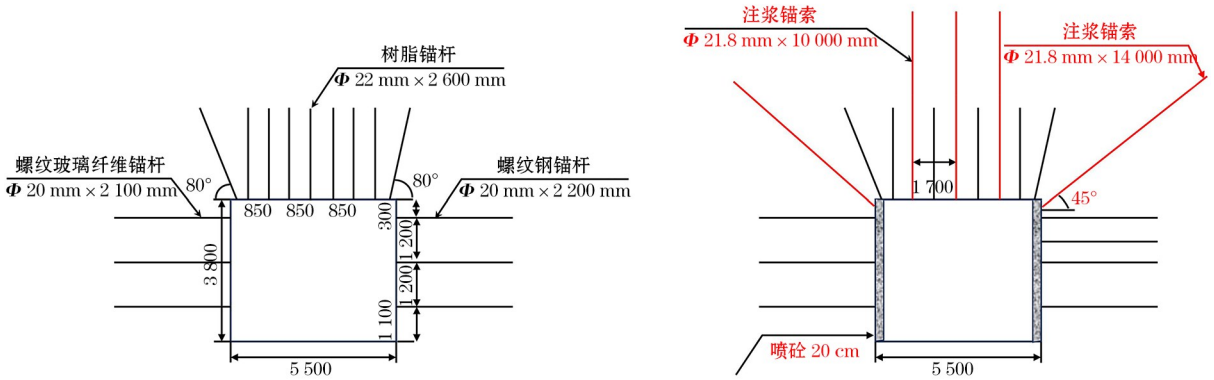


(a) 侧视图　　(b) 俯视图

图 9　疏水孔布置

Fig.9　Layout of drainage holes

原支护方案与注浆加固帷幕支护方案对比如图 10 所示。采用“注浆锚索＋钢筋网喷砼”组合支护。注浆锚索(Φ21.8 mm,长度 10～14 m)间排距 1.7 m×1.0 m,预紧力 150～200 kN,通过注浆至顶板粉砂岩层,采用超细水泥浆(水灰比 0.8∶1～1∶1,添加 3%～5%速凝剂)对顶板软弱层进行垂直＋径向注浆加固。垂直孔孔深 10 m,注浆压力 3～5 MPa;径向孔从巷道两帮以 45°仰角施工,孔深 14 m,注浆压力 2～3 MPa,形成巷道帷幕阻水。钢筋网采用双层 Φ6.5 mm(100 mm×100 mm 网格),喷射 20 cm 厚 C20 砼。每 50 m 布置离层仪进行监测(预警值≥30 mm),并备妥水泥-水玻璃双液浆(1∶1,凝胶时间 30～60 s)应急堵水。



(a) 原支护方案　　(b) 注浆加固帷幕支护方案

图 10　原支护方案与注浆加固帷幕支护方案对比(单位:mm)

Fig.10　Comparison between the original support scheme and the grouting reinforcement curtain support scheme (unit: mm)

分阶段实施如下措施:0～100 m 段采用高强度措施,现场观测显示,疏水孔总排水量达 70 m^3/h,排水 3～5 d 后,水量明显降低至 1 m^3/h,顶板砂岩含水层得到有效排放,巷道淋水大幅减少。因此,100～300 m 段按原支护参数标准执行,300～425 m 段根据离层监测数据动态调整支护参数。实时监测疏水孔水压及顶板离层情况,离层超限时立即补强支护。通过系统控制,确保顶板变形＜50 mm、涌水量＜3 m^3/h,实现深部顶板涌水防控的安全目标。

5　结论

(1) 利用 PCA 将 11 项输入指标降维为 4 个主成分(一级指标),进一步结合熵值法确定 8 个二级指标,最终识别出顶板涌水主控因素为断层导水系数、渗透系数、隔水层厚度和爆破振动,其综合权重分别为 45.49%、17.87%、12.27%和 8.39%。

(2) PCA-熵值法模型消除指标线性冗余,实现了综合指数计算的客观化。基于该模型与现场淋水样点的高度拟合曲线,该研究结果成功适用于深部巷道顶板涌水评价。通过综合指数划分出 5 种富水性危险等级,其中 1315 工作面顶板涌水极高危险性区域分布于距切眼 518～678 m 区域,较高危险性区域分布于 0～425 m 区域,其余区域处于安全生产允许范围。

(3) 针对各类区域顶板涌水特征,提出如下措施:针对极高危险性区域设置“帷幕阻水＋超前加固＋动态支护”三重防护;针对较高危险性区域采取“注-疏-支”一体化防治措施;针对正常涌水区域采取“预注浆加固＋爆破控制＋动态堵水”综合措施;其余区域仅需进行排水系统优化。

参考文献(References):

[1] 吕玉广,齐东合.顶板突(涌)水危险性“双图”评价技术与应用:以鄂尔多斯盆地西缘新上海一号煤矿为例[J].煤田地质与勘探,2016,44(5):108-112.
LYU Yuguang, QI Donghe. Technique based on “double maps”for assessment of water inrush from roof aquifer and its application: with New Shanghai No. 1 coal mine at western edge of Ordos basin as example[J]. Coal Geology & Exploration,2016,44(5):108-112.

[2] 李冲,王科学,高崙飞,等.刚波夫主矿体水文地质条件及矿坑涌水量研究[J].矿业研究与开发,2025,45(4):164-171.
LI Chong, WANG Kexue, GAO Yufei, et al. Study on hydrogeological conditions and mine pit water inflow of the main ore body in kambove mine[J]. Mining Research and Development,2025,45(4):164-171.

[3] 任君豪,王心义,王麒,等.基于多方法的煤层底板突水危险性评价[J].煤田地质与勘探,2022,50(2):89-97.
REN Junhao, WANG Xinyi, WANG Qi, et al. Risk assessment of water inrush from coal seam floors based on multiple methods[J]. Coal Geology & Exploration,2022,50(2):89-97.

[4] 施龙青,张荣遨,韩进,等.基于熵权法-层次分析法耦合赋权的多源信息融合突水危险性评价[J].河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(3):17-25.
SHI Longqing, ZHANG Rongao, HAN Jin, et al. Water inrush risk assessment with multi-source information type fusion based on EWM-AHP comprehensive weighting[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020,39(3):17-25.

[5] 武强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
WU Qiang. Research progress, progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(5):795-805.

[6] 侯恩科,严迎新,文强,等.巷道掘进顶板突水危险性预测研究[J].煤炭科学技术,2022,50(10):110-120.
HOU Enke, YAN Yingxin, WEN Qiang, et al. Study on prediction of water inrush hazard in roof of roadway driving [J].Coal Science and Technology,2022,50(10):110-120.

[7] 王苏健,冯洁,侯恩科,等.砂岩微观孔隙结构类型及其对含水层富水性的影响:以柠条塔井田为例[J].煤炭学报,2020,45(9):3236-3244.
WANG Sujian, FENG Jie, HOU Enke, et al. Microscopic pore structure types of sandstone and its effects on aquifer water abundance: taking in Ningtiaota coal mine as an example[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3236-3244.

[8] 吕玉广,李宏杰,夏宇君,等.基于多类型四双法的煤层顶板突水预测评价研究[J].煤炭科学技术,2019,47(9):219-228.
LYU Yuguang, LI Hongjie, XIA Yujun, et al. Prediction and evaluation study on coal seam roof water inrush based on multi-type four-double method [J]. Coal Science and Technology,2019,47(9):219-228.

[9] 武强,许珂,张维.再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J].煤炭学报,2016,41(6):1341-1347.
WU Qiang, XU Ke, ZHANG Wei. Further research on “three maps-two predictions”method for prediction on coal seam roof water bursting risk[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(6):1341-1347.

[10] 黄欢,朱宏军.基于“富水性指数法”的煤层顶板含水层涌水危险性评价[J].煤矿安全,2020,51(2):192-196.
HUANG Huan, ZHU Hongjun. Risk assessment of coal roof water inrush based on water-rich index[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(2):192-196.

[11] 李超峰.煤层顶板含水层涌水危险性评价方法[J].煤炭学报,2020,45(增刊 1):384-392.
LI Chaofeng. Method for evaluating the possibility of water inrush from coal seam roof aquifer[J].Journal of China Coal Society,2020,45(Suppl.1):384-392.

[12] 宫厚健,曾一凡,刘守强,等.基于改进模糊层次分析法的含水层富水性评价[J].煤炭技术,2018,37(1):158-159.
GONG Houjian, ZENG Yifan, LIU Shouqiang, et al. Evaluation of water-richness of aquifer based on improved fuzzy analytical hierarchy process [J]. Coal Technology, 2018,37(1):158-159.

[13] 樊敏,刘英锋,杨琛,等.下石节矿井离层涌水特征及危险性分区[J].煤炭技术,2022,41(2):101-104.
FAN Min, LIU Yingfeng, YANG Chen, et al. Characteristics and hazard zoning of separated water gushing in Xiashijie coal mine[J]. Coal Technology,2022,41(2):101-104.

[14] 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.

[15] 庞凯,武强,曾一凡.含水层与多烧变岩含水体互层下煤层顶板突(涌)水风险性预测[J].煤炭工程,2022,54(12):135-141.
PANG Kai, WU Qiang, ZENG Yifan. Prediction of roof water inrush risk under the complex condition of interbedded aquifer and multi burnt rock aquifers[J].Coal Engineering, 2022,54(12):135-141.

[16] 汪子涛,王建萍,韩光.基于熵权-TOPSIS法的柴达木盆地地下水富水性评价[J].盐湖研究,2022,30(2):42-51.
WANG Zitao, WANG Jianping, HAN Guang. The evaluation of groundwater potential based on entropy-TOPSIS models in Qaidam Basin[J]. Journal of Salt Lake Research,2022,30(2):42-51.

[17] 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 subjective and objective weighting VIKOR method[J]. Mining Research and Development,2021,41(4):165-169.

[18] 向韫,曹明.基于矩估计理论的滨海金矿涌水风险 GRA-VIKOR 评价模型[J].矿业研究与开发,2025,45(2):146-154.
XIANG Yun, CAO Ming. GRA-VIKOR evaluation model of water inrush risk in coastal gold mines based on moment estimation theory[J]. Mining Research and Development, 2025,45(2):146-154.

[19] 韩承豪,魏久传,谢道雷,等.基于集对分析-可变模糊集耦合法的砂岩含水层富水性评价:以宁东矿区金家渠井田侏罗系直罗组含水层为例[J].煤炭学报,2020,45(7):2432-2443.
HAN Chenghao, WEI Jiuchuan, XIE Daolei, et al. Water-richness evaluation of sandstone aquifer based on set pair analysis-variable fuzzy set coupling method:a case from Jurassic Zhiluo formation of Jinjiaqu coal mine in Ningdong mining area [J].Journal of China Coal Society,2020,45(7):2432-2443.

[20] 苗作华,张立,徐厚友,等.基于 CLAHE-PCA 的矿井低照度图像增强研究[J].金属矿山,2024(6):165-172.
MIAO Zuohua, ZHANG Li, XU Houyou, et al. Research on mine low illumination image enhancement based on CLAHE-PCA[J].Metal Mine,2024(6):165-172.

[21] 乔威豪,安葳鹏,赵雪菡,等.基于改进极限学习机的煤与瓦斯突出预测研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):98-105.
QIAO Weihao, AN Weipeng, ZHAO Xuehan, et al. Research on coal and gas outburst prediction based on improved extreme learning machine[J].Mining Research & Development,2024,44(5):98-105.

[22] 华国威,娄彦彬,王世杰,等.基于 PCA-BBO-SVM 的尾矿坝变形预测模型与性能验证研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(9):20-26.
HUA Guowei, LOU Yanbin, WANG Shijie, et al. Prediction model of tailings dam deformation based on PCA-BBO-SVM and its performance verification[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(9):20-26.

[23] 和郑翔,卢才武,居培,等.基于 PCA-BP 神经网络的随钻参数岩性智能感知方法研究[J].矿业研究与开发,2022,42(7):155-159.
HE Zhengxiang, LU Caiwu, JU Pei, et al. Research on lithology intelligent sensing method of drilling parameters based on PCA-BP neural network[J].Mining Research and Development,2022,42(7):155-159.