



申雄,栗继祖,赵德康.基于PCA的Fisher多元统计方法识别矿井充水水源[J].矿业安全与环保,2024,51(3):144-152.
SHEN Xiong,LI Jizu,ZHAO Dekang.Fisher multivariate statistical method based on PCA for identifying water filling source
in mine[J].Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(3):144-152.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230543

扫码阅读下载

地质保障

基于PCA的Fisher多元统计方法识别矿井充水水源

申雄^{1,2},栗继祖^{1,3},赵德康^{1,4}

(1. 矿山岩层控制及灾害防控山西省重点实验室,山西太原 030024; 2. 太原理工大学安全与应急管理工程学院,山西太原 030024;
3. 太原理工大学经济管理学院,山西太原 030024; 4. 太原理工大学矿业工程学院,山西太原 030024)

摘要:采煤工作面回采过程中充水水源的多源不确定性是矿井水害防治的研究重点,采用水化学信息识别充水水源时,常难以明确界定各充水水源的特征型水质阈值,且现有大多数分析判别方法判别精度不高。基于现场采集的马脊梁煤矿8210工作面矿井涌水可能充水水源样本建立样本数据库,采用Piper三线图法和多因子法分析各充水水源的水质类型及训练样本数据库,建立了基于主成分分析的Fisher判别模型,并根据欧氏距离判别原则分析识别采空区涌水的充水水源。结果表明,充水水源主要为侏罗系采空积水,其次为底板灰岩水和顶板砂岩水;该判别模型判别精度可以达到99.9%,对于采煤工作面矿井涌水充水水源的现场识别具有重要指导意义。

关键词:矿井涌水;充水水源;水源识别;主成分分析;Fisher多元统计理论;欧氏距离

中图分类号:TD745 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-4495(2024)03-0144-09

Fisher multivariate statistical method based on PCA for identifying water filling source in mine

SHEN Xiong^{1,2}, LI Jizu^{1,3}, ZHAO Dekang^{1,4}

(1. Shanxi Key Laboratory of Mine Rock Strata Control and Disaster Prevention, Taiyuan 030024, China;

2. College of Security and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. College of Economics and Management, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

4. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The multi-source uncertainty of water filling source in the process of coal winning in working face is the research emphasis of mine water disaster prevention. It is often difficult to define the characteristic water quality threshold of each water filling source when the water chemical information is used to identify the water source, and most of the existing analysis and discrimination methods results in low accuracy of discrimination. Based on the samples of potential water filling source from mine inflow in 8210 working face of Majiliang Coal Mine collected on site, the database of samples was established. The water quality types and the training sample database of each water filling source were analyzed by Piper three-line graph method and multi-factor method. Fisher discriminant water filling source model based on principal component analysis was established, and the types of water filling source in goaf at the sampling stage were analyzed and identified on the basis of Euclidean distance discrimination. The results show that the primary source of water filling is Jurassic goaf water, followed by floor limestone water and roof sandstone water. The discriminant precision of this model based on principal component analysis can reach 99.9%. The model is of great guiding significance for the field identification of water filling source in working face.

Keywords: mine inflow; water filling source; water source identification; principal component analysis; Fisher multivariate statistical theory; Euclidean distance

收稿日期:2023-07-01;2024-05-25 修订

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(51925402);山西省重点实验室建设项目(202104010910021)

作者简介:申雄(1989—),男,山西长治人,博士研究生,主要从事矿井水害防治方面的研究工作。E-mail: shenxiong0802@163.com。

矿井涌水是井工采煤生产中常见的工程问题,采煤过程中伴生地下水资源的排出,造成地下水资源浪费和污染^[1]。当采煤工作面的短时涌水量超过

矿井设计排水能力时即形成突水灾害。矿井突水灾害作为煤矿井下主要灾害之一,一直是制约我国煤炭经济可持续发展的难题^[2-3]。我国煤矿下部煤炭资源开采普遍存在受上部采空区积水威胁的情况,尤其以老空水为突水水源的矿井水害是矿井突水预测与防控难点^[4]。由于采矿活动的人为扰动和天然地质构造作用,加上矿井上覆历史采空区的存在,使得矿井开采的水文地质条件呈现复杂的时空多变性^[5-6]。当前煤田深部煤层开采面临的突水风险主要在于深部煤层工作面的突(涌)水水源的多源性和多水源混合后判别的复杂性。因此,精准识别工作面涌水的水源情况是后续排水工作的安全前提^[7-8],对于矿山抢险至关重要。

目前,针对矿井充水水源的判别方法主要是利用地下水位、温度和水化学组分综合信息等确定矿井充水含水层特征,但是现实中大多利用地下水位和水温信息,基于地下水动力学方法来判别充水水源的类型,此类方法的判别精度不足^[9-10]。因此,还需要综合多种信息元素进行矿井充水的动态监测和分析。一般情况下,不同水文地质单元的水化学样本数据差异较大,因此可以选用其来判别各类充水水源。目前国内外学者所使用的充水水源判别方法大致可分为以下 3 类:①地下水水头和水温综合分析法^[11-12];②以常规水化学组分为基础的水文地球化学分析法,包括水文地球化学分类图、多元统计分析、模糊评价及神经网络等方法^[13-14];③同位素及微量元素的示踪法^[15]。在水文地球化学分析方法方面,学者们提出了大量快速、经济、有效的水源识别方法。马雷等^[16]利用模糊评判建立了突水水源判别方法,但该方法的最大值和最小值操作可能会丢失大量的水文地球化学特征信息,导致分类不清。为了克服这一问题,靳玉琪等^[17]提出了未确知聚类法识别突水水源的方法,但该方法的缺点是设计水源判断集时主观性较强,而可拓识别法^[18]是一种不需要主观设计判断集的方法。此外,基于多元统计理论的判别分析方法也大量被应用于突水水源识别中,如距离判别^[19]、贝叶斯判别^[20-21]、BP 神经网络^[22]等。为进一步提高准确率,建立了基于灰色关联和逐步判别分析的突水水源耦合识别模型^[23]。此外,有学者采用支持向量机^[24]来识别突水水源及其他特征,但这些算法都需要大量具备明显的水化学组分特征的水质数据训练样本。随着煤矿采深增加,混合的水源组分增多,使得工作面充水水源混合度提高,导致地下水水质组分过渡类型愈加混杂,造成训练样本库数据繁杂,各类型充水水源特征水化学组分阈值差异性变小,水化学判别指标间信

息叠加,导致突水源误判时有发生。

考虑到上述存在的问题,基于马脊梁煤矿石炭系 3#煤层 8210 工作面现场采集的积水采空区可能的充水水源样本,通过实验室全化学水质分析得到了水质样本数据库。采用 Piper 三线图^[25]及多因子分析法确定各充水水源的水质类型及训练样本;应用以主要成分分析方法为基础的费希尔(Fisher)多元统计理论,最终基于已知可能充水水源类型水样的水化学数据库,建立了针对 8210 工作面采空区积水水样水源识别的识别模型。分析判别中使用到的软件有:①Aq·QA 图形分析软件;②基本多元统计分析理论采用商业软件包的 SPSS Statistics 25,其使用了包括聚类分析(HCA)、主成分分析(PCA)和 Fisher 判别分析(FDA)等多种判别分析方法。

1 研究区充水水源概述

马脊梁井田位于大同煤田中西部,地处山西省大同市西南,石炭系井田东西长约 9.2 km,南北长约 9.5 km,面积 43.534 8 km²。井田内侏罗系煤层已基本开采完毕,石炭系煤层主采 3#、5^{-1#}、8#等 3 个煤层。目前进行采掘生产活动的 3#煤层 8210 工作面,面临上覆侏罗系煤层采空区的积水水害威胁。研究区域地理位置见图 1。

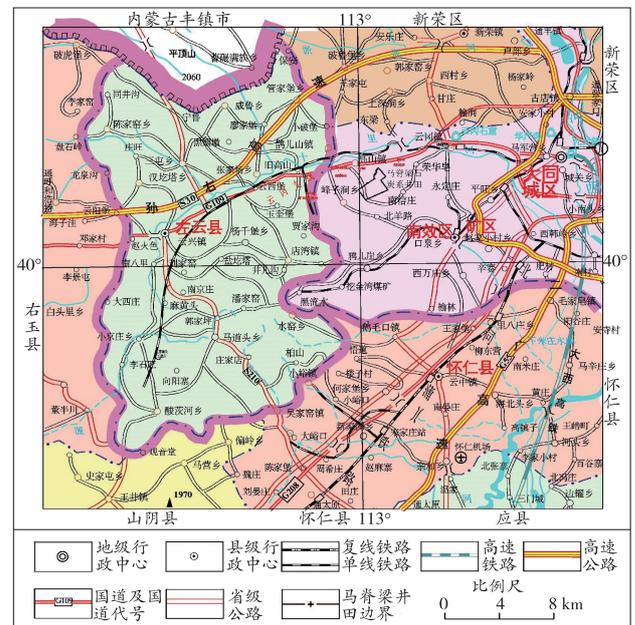


图 1 研究区域地理位置
Fig. 1 Geographical location of the study area

分析研究区现场水文地质调查结果可发现,可能的充水水源主要为区域煤系地下水(包括侏罗系采空积水、煤层顶板石炭-二叠系砂岩裂隙水和煤层底板寒武系岩溶裂隙水),其次为大气降水和地表水。各含水层划分和参数见图 2。

| 组别 | 含隔水层 | | 标志层 | | | 剖面 | 间距/m | 水文地质特征 |
|-----------------------|---------------|--------|------------|--------|----------------|-------------------|---------------|--|
| | 层厚/m | 平均层厚/m | 层厚/m | 平均层厚/m | 代号 | | | |
| 云冈组 J ₂ y | 0~164.38 | 71.00 | | | | 砂质泥岩 砂岩 | | 风化壳含水层, 由风化砂岩、砂质泥岩组成, 节理裂隙发育, 由于大同组煤层多数采空, 其导水裂隙发育至地表, 使风化壳含水层水渗入采空区, 成为导水层 |
| 大同组 J ₂ d | 160.98~233.98 | 206.00 | | | 14 | 细砂岩 细砂岩 细砂岩 | | 井田内侏罗系煤层经多年开采, 地下水位大幅下降, 逐渐被疏干, 局部汇集。含水层内原来均一的含水层变为现在的局部集中的“地下水体”, 对下部煤层开采构成威胁 |
| 永定庄组 J ₁ y | 87.76~246.40 | 147.50 | | | | 粗砂岩 细砂岩 粗砂岩 | | 含水层岩性为灰白色的砂砾岩, 粗、中、细砂岩, 横向上砂岩与泥岩交替变化大, 含水层早透水体, 底部 K ₈ 砂砾岩分布比较稳定。据 M10 钻孔抽水试验成果, 单位涌水量 0.002 3~0.003 9 L/(s·m), 渗透系数 0.002 14~0.003 94 m/d, 水质类型为 SO ₄ -[K+Na] 型 |
| 山西组 P ₁ s | 13.00~52.60 | 42.85 | 0~8.88 | 3.12 | J ₄ | 细砂岩 | 194.32~336.75 | 山西组砂岩裂隙水主要赋存在底部 K ₃ 砂岩中, 据 M10、M27 钻孔抽水试验成果, 单位涌水量 0.002 0~0.002 2 L/(s·m), 渗透系数 0.002 13~0.005 37 m/d, 为一弱富水性含水层, 水质类型为 SO ₄ -HCO ₃ -[K+Na]-Ca 型、HCO ₃ -[K+Na]-Ca 型 |
| | | | 0.85~14.50 | 4.00 | K ₃ | 砂质泥岩 | | |
| | | | 0~3.60 | 1.68 | 2 | 细砂岩、泥岩 | | |
| | | | 0~12.10 | 5.41 | 3 | 粗砂岩 | | |
| 太原组 C ₂ d | 66.23~94.54 | 86.47 | 0.40~15.25 | 7.03 | 5 | 3#煤层 | 24.79~63.52 | 为井田主要含煤地层, 系砂岩裂隙承压水。出于本组地层埋藏深, 补给条件差, 砂岩多为基底式和孔隙式胶结, 节理裂隙不发育, 据 M10、M27 钻孔抽水试验成果, 单位涌水量 0.002 0~0.003 9 L/(s·m), 渗透系数 0.002 13~0.005 37 m/d, 为一弱富水性含水层 |
| | | | 0~2.89 | 1.10 | 6 | 细砂岩、泥岩 | | |
| | | | 1.25~18.77 | 8.38 | 8 | 灰岩 | | |
| | | | 0~7.80 | 4.20 | K ₂ | 砂质泥岩 | | |
| | | | 0.70~7.49 | | | 8#煤层 | | |
| | | | 0~12.10 | 5.41 | 3 | 粗砂岩 | | |
| | | | 0~7.80 | 4.20 | K ₂ | 砂质泥岩 | | |
| 本溪组 C ₂ b | 22.20~31.11 | 27.14 | 2.00~4.94 | 3.25 | K ₁ | 砂岩 | 32.21~57.05 | 由砂质泥岩与铝土岩组成, 含水性弱, 为较好的隔水层 |
| 寒武奥陶系 O+ε | | | | | | 灰岩 | | 为岩溶裂隙含水层, 岩溶发育不均匀, 单位涌水量 0.000 15~0.195 70 L/(s·m), 含水性好, 水质类型为 HCO ₃ -SO ₄ -Ca·Mg 型 |

图 2 研究区水文地质柱状图
Fig. 2 Hydrogeological histogram of the study area

1) 3#煤层底板寒武系岩溶裂隙含水层水(以下简称“底板灰岩水”)。岩层以浅灰色、灰白色白云质灰岩为主, 夹薄层泥质条带灰岩及数层浅灰色、灰绿色页岩, 埋深 600 m 以下连通性较差。研究区为承压状态, 单位涌水量 0.035 0 L/(s·m), 渗透系数 0.06 m/d, 含水层富水性中等。

2) 3#煤层顶板石炭-二叠系砂岩裂隙水(以下简称“顶板砂岩水”)。主要为山西组下部 K₃ 粗砂岩弱富水性含水层水和永定庄组底部 K₈ 砂砾岩弱富水性含水层水。

3) 有水力联系的侏罗系采空积水。侏罗系煤层采空区积水的水源主要为侏罗系煤层上覆风化壳砂岩裂隙含水层水。采煤结束后原来分布不均的弱富水性含水层水逐渐转变为现在局部集中于侏罗系采空区的积水。

4) 大气降水及地表水。同时也是侏罗系采空积

水的主要充水水源。

2 充水水源水样采集与水化学分析

从上往下施工位于石炭系 3#煤层 8210 工作面内的上覆含水层降压疏水孔及底板灰岩水监测孔, 用于采集研究区各可能充水水源水样, 并进行了室内化验分析。本次检测的水常规离子成分指标主要有 pH 值、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe、F⁻、SO₄²⁻、Cl⁻ 及溶解性总固体(TDS)等。现场采集底板灰岩水 3 份、顶板砂岩水 3 份、侏罗系采空积水 3 份、大气降水 3 份、地表水 3 份, 以及 8210 工作面回采后方采空区混合充水 7 份, 共计 22 份水样。每份水样进行 3 次常规离子成分检测分析, 计算其算术平均值求得水化学组分数据, 以建立水质样本数据库。由这 15 个已知水类型和 7 个未知水类型的水质样本数据库组成了充水水源分析数据库, 见表 1。

表 1 石炭系 3[#]煤层 8210 工作面采空区积水和各可能充水水源水样水化学组分测试结果
Table 1 Water chemical composition test results for water-samples from goaf and possible water-filling sources in 8210 working face of 3[#] coal seam in Carboniferous system

| 水源类型 | 水样编号 | pH 值 | 离子质量浓度 $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | | | | | | | | Fisher 判别分组 | |
|---------------|------|------|---|-----------------|------------------|------------------|--------|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------|-------|
| | | | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Fe | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | F ⁻ | | TDS |
| 大气降水 | P1 | 6.72 | 15.32 | 4.41 | 4.16 | 2.68 | 4.56 | 8.05 | 24.17 | 1.11 | 375.00 | I 类 |
| | P2 | 6.68 | 15.25 | 4.23 | 3.93 | 2.38 | 4.19 | 7.86 | 23.34 | 1.09 | 354.00 | |
| | P3 | 6.73 | 15.73 | 4.92 | 4.56 | 3.05 | 4.93 | 8.38 | 26.18 | 1.35 | 382.00 | |
| 地表水 | SR1 | 7.14 | 49.89 | 200.75 | 23.85 | 40.75 | 0.03 | 173.25 | 1 543.05 | 5.45 | 4 150.00 | II 类 |
| | SR2 | 7.06 | 46.18 | 187.35 | 22.45 | 38.56 | 0.02 | 168.34 | 1 436.95 | 4.89 | 4 062.13 | |
| | SR3 | 7.26 | 50.23 | 213.54 | 24.98 | 42.15 | 0.03 | 179.88 | 1 486.76 | 5.91 | 4 150.00 | |
| 侏罗系采空积水 | J-G2 | 6.72 | 35.79 | 726.86 | 203.99 | 167.69 | 14.00 | 142.38 | 2 172.15 | 2.40 | 3 730.00 | III 类 |
| | J-G3 | 7.00 | 30.61 | 576.50 | 35.35 | 180.50 | 188.00 | 189.50 | 2 446.10 | 4.10 | 5 550.00 | |
| | J-G4 | 6.38 | 33.58 | 646.01 | 158.11 | 466.73 | 270.00 | 89.76 | 4 396.44 | 3.10 | 6 238.00 | |
| 顶板砂岩水 | R1 | 8.42 | 31.23 | 188.70 | 54.97 | 30.00 | 0.52 | 131.57 | 9.16 | 0.52 | 791.00 | IV 类 |
| | R2 | 7.91 | 33.44 | 158.66 | 29.01 | 8.80 | 0.03 | 145.12 | 19.38 | 0.66 | 576.00 | |
| | R3 | 8.12 | 32.43 | 72.25 | 3.01 | 8.33 | 108.00 | 198.36 | 1.80 | 3.83 | 875.00 | |
| 底板灰岩水 | B2 | 7.53 | 55.92 | 187.08 | 47.00 | 20.00 | 0 | 100.00 | 115.00 | 0 | 1 060.00 | V 类 |
| | B3 | 7.54 | 62.99 | 210.75 | 9.49 | 33.38 | 0.35 | 178.90 | 862.60 | 3.95 | 2 775.00 | |
| | B4 | 7.51 | 45.28 | 198.85 | 38.50 | 28.68 | 0 | 123.04 | 135.83 | 0 | 990.00 | |
| 8210 工作面采空区积水 | G1 | 7.12 | 48.68 | 269.38 | 119.67 | 26.39 | 0.24 | 147.86 | 586.00 | 1.50 | 1 399.00 | III 类 |
| | G2 | 8.00 | 59.19 | 440.40 | 176.79 | 63.23 | 0.25 | 157.44 | 1 213.37 | 1.26 | 2 285.00 | |
| | G3 | 8.43 | 64.94 | 399.37 | 197.65 | 51.68 | 0 | 150.33 | 1 239.10 | 1.28 | 2 283.00 | |
| | G4 | 7.96 | 71.79 | 614.71 | 235.72 | 71.47 | 0.12 | 157.44 | 1 722.64 | 1.28 | 3 068.00 | |
| | G5 | 8.00 | 60.00 | 531.64 | 228.47 | 67.08 | 0.06 | 153.34 | 1 486.37 | 0.68 | 2 745.00 | |
| | G6 | 7.65 | 62.26 | 279.75 | 12.36 | 67.50 | 228.00 | 173.40 | 1 066.80 | 5.30 | 3 150.00 | |
| | G7 | 7.37 | 60.08 | 171.00 | 6.61 | 1.00 | 268.00 | 167.65 | 889.60 | 5.20 | 2 950.00 | |

水样的基础水化学分析是根据其主要离子或常规水化学离子指标的质量浓度和毫克当量浓度,对各类型充水水源的特征离子、特征水化学组分及水

化学类型进行分析和区别。对充水水源的各类水质特征离子指标进行了均值化处理,便于同类水源的聚类分析,结果见表 2。

表 2 各类型充水水源常规水化学组分均值统计
Table 2 The mean value of conventional water chemical components of water-filled sources

| 水源类型 | 指标类别 | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Fe | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | F ⁻ | TDS |
|-----------------|---------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|--------|-----------------|-------------------------------|----------------|----------|
| 大气降水 (I 类) | 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | 15.43 | 4.52 | 4.22 | 2.70 | 4.56 | 8.10 | 24.56 | 1.18 | 370.33 |
| | 毫克当量浓度/(meq·L ⁻¹) | 0.40 | 0.20 | 0.21 | 0.23 | 0.20 | 0.23 | 0.51 | 0.06 | — |
| 地表水 (II 类) | 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | 48.77 | 200.55 | 23.76 | 40.49 | 0.02 | 173.82 | 1 488.92 | 5.42 | 4 120.71 |
| | 毫克当量浓度/(meq·L ⁻¹) | 1.25 | 8.72 | 1.19 | 3.37 | 0 | 4.90 | 31.02 | 0.29 | — |
| 侏罗系采空积水 (III 类) | 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | 33.33 | 649.79 | 132.48 | 271.64 | 157.33 | 140.55 | 3 004.90 | 3.20 | 5 172.67 |
| | 毫克当量浓度/(meq·L ⁻¹) | 0.85 | 28.25 | 6.62 | 22.64 | 7.02 | 3.96 | 62.60 | 0.17 | — |
| 顶板砂岩水 (IV 类) | 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | 32.37 | 139.87 | 29.00 | 15.71 | 36.18 | 158.35 | 10.11 | 1.67 | 747.33 |
| | 毫克当量浓度/(meq·L ⁻¹) | 0.83 | 6.08 | 1.45 | 1.31 | 1.62 | 4.46 | 0.21 | 0.09 | — |
| 底板灰岩水 (V 类) | 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | 54.73 | 198.89 | 31.66 | 27.35 | 0.12 | 133.98 | 371.14 | 1.32 | 1 608.33 |
| | 毫克当量浓度/(meq·L ⁻¹) | 1.40 | 8.65 | 1.58 | 2.28 | 0.01 | 3.77 | 7.73 | 0.07 | — |
| 8210 工作面采空区积水 | 高 Na 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | 60.92 | 451.10 | 191.66 | 55.97 | 0.13 | 153.28 | 1 249.50 | 1.20 | 2 356.00 |
| | (G1~G5) 毫克当量浓度/(meq·L ⁻¹) | 1.56 | 19.61 | 9.58 | 4.66 | 0.01 | 4.32 | 26.03 | 0.06 | — |
| | 高 Fe 质量浓度/(mg·L ⁻¹) | 61.17 | 225.38 | 9.48 | 34.25 | 248.00 | 170.53 | 978.20 | 5.25 | 3 050.00 |
| | (G6~G7) 毫克当量浓度/(meq·L ⁻¹) | 1.57 | 9.80 | 0.47 | 2.85 | 11.07 | 4.80 | 20.38 | 0.28 | — |

注:8210 工作面采空区积水根据表 1 内容初步分析划分为高 Na (G1~G5) 和高 Fe (G6~G7) 2 类。

3 特征离子指标分析识别

根据常规水化学离子指标进行分析:①结合水化学主要成分分析和频数分析方法,筛选出各类充水水源的有效指标;②利用 Piper 三线图绘制各水样的水化学类型,实现对 8210 工作面采空区积水充水水源的初步判断。

3.1 综合识别有效指标

从表 1~2 中各类型充水水源主要水化学组分统计情况可知,大气降水、地表水、侏罗系采空积水、顶板砂岩水及底板灰岩水的 TDS 指标均值分别为 0.37、4.12、5.17、0.75、1.61 g/L,除 I 类大气降水主要阳离子为 K^+ 、IV 类顶板砂岩水主要阴离子为 Cl^- 外,其余类型水样的主要阳、阴离子均为 Na^+ 、 SO_4^{2-} 。3# 煤层 8210 工作面采空区积水的 TDS 可分为 2 类:一类 TDS 指标均值为 2.36 g/L,主要离子为 Na^+ 和 SO_4^{2-} ,即“高 Na 采空区水”;另一类均值约为 3.05 g/L,主要离子为 Fe 和 SO_4^{2-} ,即“高 Fe 采空区水”。

3.2 分析各水源水化学类型

根据表 1 中水样的水化学各组分测试和分析结果,应用 Aq·QA 软件绘制了 Piper 三线图,如图 3 所示。水样的阴、阳离子相对百分含量用圆圈等符号在左、右 2 个三角形中表示,圆圈引线在菱形中的交点表示阴、阳离子的综合相对百分含量。

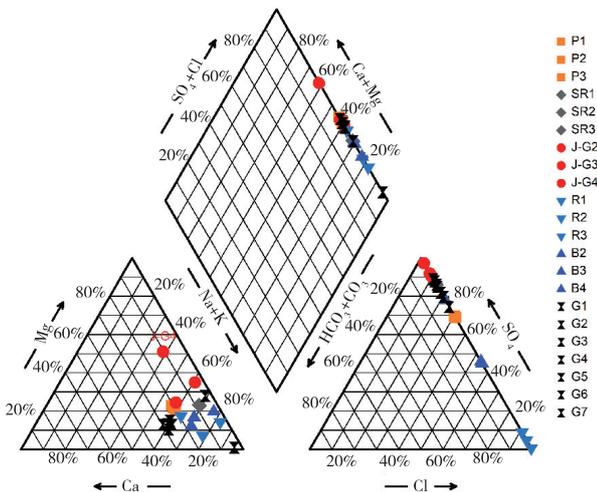


图 3 各类水样水化学组分 Piper 三线图
Fig. 3 Cross plot of chemical composition piper three-line chart of water-samples

由图 3 可读取水化学类型信息并判断各含水层之间的水力联系:大气降水为低矿化度水(<1 g/L),水化学类型中主要阳离子为 K^+ ,主要阴离子为 SO_4^{2-} ,其矿化度明显小于其他充水水源;地表水主要阳离子为 Na^+ ,主要阴离子为 SO_4^{2-} 。考虑矿方实际

排水情况,地表水多为初步处理后的矿井排水和大气降水汇流产生的地表混合水体,故其主要特征离子与侏罗系采空积水和 8210 工作面采空区积水一致,均为 Na^+ 和 SO_4^{2-} ,三者水质指标较近似。

3.3 综合分析各水源特征水质主要差异

同样基于样本水质数据库(表 1),应用 Aq·QA 软件绘制了各类充水水源的水化学组分中 F—TDS 因子交叉分类情况,如图 4 所示。

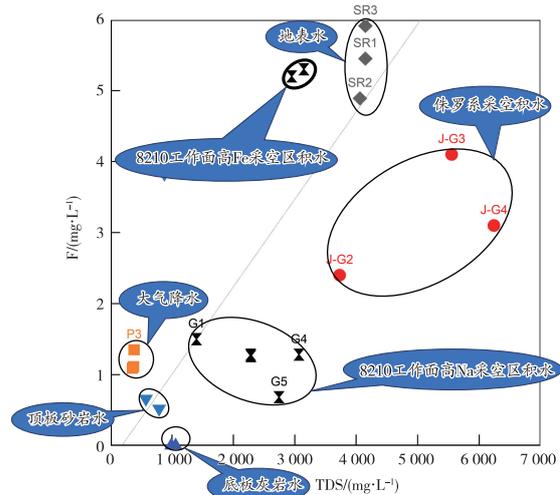


图 4 各类水样水化学组分 F—TDS 交叉图
Fig. 4 Cross plot of chemical composition F—TDS of water-samples

图 4 较清晰地反映出各类充水水源的区别。原始含水地层中顶板砂岩水和底板灰岩水的矿化度小于但基本接近于 1 g/L,二者的 SO_4^{2-} 和 F⁻ 质量浓度最低,其中 F⁻ 质量浓度接近于 0。顶板砂岩水和底板灰岩水水化学类型中主要阳离子均为 Na^+ ;顶板砂岩水主要阴离子为 Cl^- ,而 SO_4^{2-} 质量浓度小于 20 mg/L,这是由于石炭系 3# 煤层顶板砂岩裂隙含水层渗透性弱,径流缓慢,裂隙水充分溶解了含水层中的岩盐。底板灰岩水主要阴离子为 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,其中 SO_4^{2-} 质量浓度大于 110 mg/L,明显比大气降水中为 SO_4^{2-} 质量浓度高,这与岩溶含水岩组中石膏夹层的溶解密切相关。其次,由于底板灰岩水的补给更新条件相对较好,地下水中 Ca^{2+} 和 Na^+ 发生的阳离子交替吸附作用导致灰岩水中 Na^+ 的含量较高,此外 Na^+ 和 K^+ 含量较高,这与岩溶含水岩组中的方解石和白云石的溶解有一定关系。

侏罗系采空积水和 8210 工作面采空区积水中的 Ca^{2+} 质量浓度远高于其他 3 类水样;同时侏罗系采空积水的 SO_4^{2-} 质量浓度是地表水和 8210 工作面采空区积水的 2 倍多,是底板灰岩水的近 10 倍;8210 工作面采空区积水中的 SO_4^{2-} 质量浓度是顶板

砂岩水的 100 倍,是大气降水的 50 倍左右。

充水水源主要水化学组分不同反映了充水含水层中地下水的水文地球化学作用不同。8210 工作面采空区积水水样的水化学类型与侏罗系采空积水的非常相近,与地表水和大气降水部分相似,但与原始含水地层中顶板砂岩水和底板灰岩水明显不同。从充水水源赋存层位及补排条件可以初步确定,8210 工作面采空区积水的充水水源主要为侏罗系采空积水、地表水和顶板砂岩水,可能有少量的大气降水。至此需要进一步利用费希尔(Fisher)判别理论进行详细识别。上述充水水源的水化学特征分析结果表明,各水源之间的水力联系非常微弱,各自形成独立的地下水循环系统,这与水文地质条件分析结果一致。

4 多元统计分析方法识别水源

4.1 主成分分析法

主成分分析法(Principal Components Analysis, PCA)是一种数据压缩与特征信息提取方法。采用该方法处理数据,可以有效消除高维数据组之间的关联性,使数据结构更加简化。数据降维应尽可能减少信息损失,将多个相关变量重新组合成一组互不相关的综合因子代替原有因子。通常的数学处理方法是线性组合原有的 p 个因子,作为新的综合因子。

主成分分析求解的一般步骤如下:①将原变量

数据进行标准化处理,求出各变量间的协方差矩阵 Σ ;②计算出的协方差矩阵 Σ 的特征向量 $\varphi_1 \geq \varphi_2 \geq \dots \geq \varphi_p$,相应的单位特征向量为 T_1, T_2, \dots, T_p ,转换矩阵 $A = T'$,即 A 的 i 行是 Σ 的第 i 大特征根所对应的单位特征向量 T_i ,第 i 个主要成分 Y_i 的方差,即为 Σ 的第 i 大特征根 φ_i ;③第 k 个主成分 Y_k 的方差贡献率,若取 $m (m < p)$ 个主成分,主成分 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 的累计贡献率;④主成分的选取一般由累计方差贡献率决定,通常选取由大到小的几个主要成分,使方差累计贡献率达到 85% 以上,如此可满足所提取的前 m 个主要成分包含原始样本的绝大部分信息的基本要求。

8210 工作面采空区积水的可能充水水源大致可分为:大气降水、地表水、侏罗系采空积水、顶板砂岩水、底板灰岩水等 5 类。在突水水源观测资料中,选取大气降水 3 份、地表水 3 份、侏罗系采空积水 3 份、顶板砂岩水 3 份、底板灰岩水 3 份,共 15 个已知水类型水样的水化学组分数据作为训练样本。选择 $K^+(X_1)$ 、 $Na^+(X_2)$ 、 $Ca^{2+}(X_3)$ 、 $Mg^{2+}(X_4)$ 、 $Fe(X_5)$ 、 $Cl^-(X_6)$ 、 $SO_4^{2-}(X_7)$ 、 $F^-(X_8)$ 和 TDS(X_9) 等 9 种水质指标质量浓度,作为 8210 工作面采空区充水水源识别模型的水质基本分析指标。应用 SPSS 软件主成分分析模块分析这 9 种水质指标的相关性,其 Pearson 相关系数结果见表 3。

表 3 训练样本各水化学组分指标 Pearson 相关系数矩阵
Table 3 Pearson correlation coefficient matrix of various water chemical composition indicators

| 指标类别 | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | Fe | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | F ⁻ | TDS |
|-------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------|-----------------|-------------------------------|----------------|-----|
| Ca ²⁺ | 1 | | | | | | | | |
| Mg ²⁺ | 0.774 | 1 | | | | | | | |
| K ⁺ | -0.019 | -0.314 | 1 | | | | | | |
| Na ⁺ | 0.688 | 0.564 | 0.279 | 1 | | | | | |
| Fe | 0.135 | 0.517 | -0.149 | 0.081 | 1 | | | | |
| Cl ⁻ | -0.092 | -0.069 | 0.673 | 0.342 | 0.144 | 1 | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0.793 | 0.935 | -0.024 | 0.748 | 0.499 | 0.105 | 1 | | |
| F ⁻ | -0.295 | 0.127 | 0.301 | -0.044 | 0.619 | 0.540 | 0.216 | 1 | |
| TDS | 0.548 | 0.812 | 0.132 | 0.706 | 0.593 | 0.330 | 0.933 | 0.490 | 1 |

由表 3 可知,9 种水质指标之间具有明确的相关性,如 SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、TDS、 Ca^{2+} 的相关系数分别为 0.935、0.933、0.793,同时 Mg^{2+} 与 TDS、 Ca^{2+} 的相关系数分为 0.812、0.774,表明水源样本以上指标间的信息重叠较多,直接利用这 9 种指标数据对水源进行判别时,必定会影响矿井突水水源预测模型的精度,造成误判。因此,有必要对输入样本数据进行 PCA 处

理。利用主成分分析法的优越性,通过少量的指标变量有效表征各可能充水水源的水化学特征,以消除水源判别中变量之间相互信息叠加而产生的影响。

对训练样本数据进行 PCA 处理后,依据表 4 中的各主成分信息量的分布规律,筛选特征根大于 1 的主成分,提取了前 3 个包含 91.26% 信息量的主成分,以有效概括原始样本信息。

表 4 训练样本 PCA 处理后主成分因子总方差解释
Table 4 Explanation of total variance of principal component factors after PCA processing of training samples

| 主成分 序号 | 初始特征值 | | | 提取载荷平方和 | | |
|-----------|-------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | 总计 | 方差百分比/% | 累计/% | 总计 | 方差百分比/% | 累计/% |
| 1 | 5.180 | 51.803 | 51.803 | 5.180 | 51.803 | 51.803 |
| 2 | 2.366 | 23.659 | 75.461 | 2.366 | 23.659 | 75.461 |
| 3 | 1.580 | 15.797 | 91.258 | 1.580 | 15.797 | 91.258 |
| 4 | 0.331 | 3.308 | 94.567 | 0.331 | 3.308 | 94.567 |
| 5 | 0.262 | 2.617 | 97.184 | | | |
| 6 | 0.220 | 2.198 | 99.382 | | | |
| 7 | 0.050 | 0.496 | 99.878 | | | |
| 8 | 0.011 | 0.111 | 99.989 | | | |
| 9 | 0.001 | 0.011 | 100.000 | | | |

根据 PCA 矩阵,提取出新的主成分因子 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 与原始 9 个变量之间的关系式:

$$Y_1 = -0.027X_1 + 0.758X_2 + 0.814X_3 + 0.941X_4 + 0.529X_5 + 0.148X_6 + 0.992X_7 + 0.207X_8 + 0.917X_9 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0.713X_1 + 0.090X_2 + 0.369X_3 - 0.216X_4 + 0.314X_5 + 0.854X_6 - 0.009X_7 + 0.811X_8 + 0.306X_9 \quad (2)$$

$$Y_3 = 0.591X_1 + 0.530X_2 + 0.339X_3 - 0.193X_4 - 0.686X_5 + 0.296X_6 - 0.005X_7 - 0.481X_8 - 0.086X_9 \quad (3)$$

4.2 基于主成分分析的 Fisher 多元统计判别方法

根据各充水水源水化学特征,选取能够有效区分不同类型水源的水质指标集合元素(主成分因子 Y_i),采用多元统计 Fisher 判别理论分析方法,提取判别函数的特征因子(y_i),不同类型水源水样在判别空间中明显区别开来,根据最短欧氏距离判别原则详细识别 8210 工作面采空区积水的充水水源。

根据主成分处理及分析情况,选取 K^+ (X_1)、 Na^+ (X_2)、 Ca^{2+} (X_3)、 Mg^{2+} (X_4)、 Fe (X_5)、 Cl^- (X_6)、 SO_4^{2-} (X_7) 和 F^- (X_8) 8 个主要水化学组分作为突水水源识别的指标,同时依据表 1 中的水化学测试结果,应用 SPSS 25 软件执行 Fisher 判别计算,获得如下判别公式:

$$y_1 = 1.381X_1 + 0.189X_2 + 0.141X_3 - 0.042X_4 + 0.318X_5 + 0.635X_6 - 14.874X_8 - 152.117 \quad (4)$$

$$y_2 = 0.482X_1 - 0.092X_2 + 0.047X_3 + 0.079X_4 - 0.046X_5 + 0.242X_6 - 4.935X_8 - 18.847 \quad (5)$$

$$y_3 = -0.234X_1 - 0.016X_2 + 0.024X_3 + 0.022X_4 - 0.015X_5 + 0.066X_6 - 0.423X_8 + 3.291 \quad (6)$$

$$y_4 = -0.054X_1 - 0.003X_2 - 0.007X_3 + 0.022X_4 - 0.029X_5 + 0.013X_6 + 0.759X_8 - 0.860 \quad (7)$$

$y_1 \sim y_4$ 的显著性水平分别为 0、0、0.001、0.017,

均小于给定显著性水平 0.050,表明上述的判别函数式均有效。同时, $y_1 \sim y_4$ 的识别贡献逐渐降低,分别为 95.90%、4.00%、0.10%、0.04%。因此,选用式(4)~(5)作为 8210 工作面采空区积水水样未知充水水源类型的判别基准函数。

根据标准化处理后的典型判别函数系数,进一步分析各判别因子的识别权重,其结果见表 5。

表 5 Fisher 标准化典型判别函数系数统计
Table 5 The coefficient statistics of the Fisher standardized typical discriminant function

| 识别指标 | 特征因子 | | | |
|-----------|---------|--------|--------|--------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 |
| K^+ | 5.944 | 2.076 | -1.008 | -0.233 |
| Na^+ | 8.310 | -4.055 | -0.698 | -0.147 |
| Ca^{2+} | 5.889 | 1.966 | 1.019 | -0.293 |
| Mg^{2+} | -3.208 | 5.978 | 1.678 | 1.648 |
| Fe | 20.580 | -2.989 | -0.952 | -1.900 |
| Cl^- | 20.906 | 7.980 | 2.185 | 0.438 |
| F^- | -20.735 | -6.880 | -0.590 | 1.058 |

由表 5 可知, y_1 特征因子识别能力由强到弱的顺序依次为 Cl^- 、 F^- 、 Fe 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ;同理,依据 y_2 特征因子的标准化典型判别式函数系数绝对值大小,识别能力由强到弱依次为 Cl^- 、 F^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Fe 、 K^+ 、 Ca^{2+} 。综上所述, Cl^- 、 F^- 、 Fe 、 Na^+ 和 K^+ 的识别能力较其他离子大,选用 y_2 作为本次 Fisher 水源识别模型中的主要特征因子。

根据式(4)~(5),计算得到各类水样的 2 个函数值,如图 5 所示,由此确定了充水水源水样和 8210 工作面采空区积水水样(图 5 中“未分组个案”)在坐标系中的平面位置。

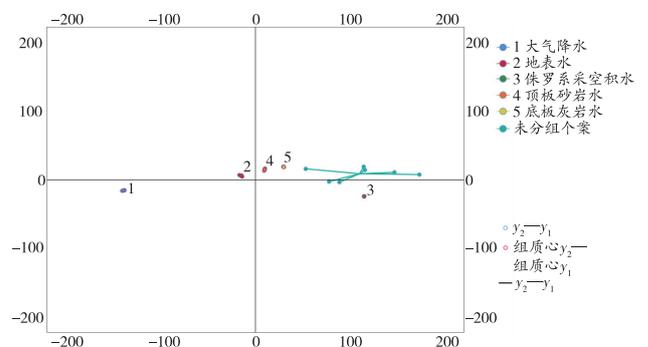


图 5 Fisher 判别函数区域判别图
Fig. 5 Fisher discriminant function region discrimination diagram

通过式(4)~(5)提取不同类型的水样在判别空间中的质心位置,以区分 5 类水源,并标注 8210 工作面采空区积水水样(未分组个案)两函数值的空间位

置。得到的 8210 工作面采空区积水各水样空间位置与大气降水水样、地表水及石炭系 3# 煤层顶板砂岩水 3 类水样的质心的欧氏距离,明显大于其与底板灰岩水和侏罗系采空积水水样质心的欧氏距离。分析 8210 工作面采空区积水水样的未分组个案函数值空间位置与底板灰岩水、侏罗系采空积水水样质心的欧式距离,结果见表 6。

表 6 8210 工作面采空区积水水样位置与底板灰岩水、侏罗系采空积水质心的欧氏距离

Table 6 The Euclidean distance between the location of the water sample in the goaf of the 8210 working face and the mass center of the limestone water in the floor and the Jurassic goaf water

| 水样 编号 | 欧氏距离 | | |
|----------|-------------|----------------|-------------|
| | 底板灰岩 水质心 | 侏罗系采空 积水水质心 | 顶板砂岩 水质心 |
| G1 | 23.70 | 73.66 | 43.69 |
| G2 | 52.76 | 43.25 | 70.55 |
| G3 | 63.32 | 34.03 | 81.81 |
| G4 | 85.38 | 44.13 | 105.61 |
| G5 | 86.84 | 38.60 | 106.80 |
| G6 | 118.28 | 48.31 | 138.25 |
| G7 | 145.17 | 67.20 | 165.00 |
| 平均值 | 82.21 | 49.88 | 101.67 |

注:欧氏距离为判别域质心距离的判别参数,为无量纲量。

由图 5 及表 6 可知,8210 工作面采空区积水水样到底板灰岩水水样质心的平均欧氏距离是其到侏罗系采空积水水样中心的 1.65 倍;到顶板砂岩水样中心的平均欧氏距离是其到侏罗系采空积水水样中心的 2.04 倍。根据最短欧氏距离判别原则可知,积水水样大部分的主要充水水源为侏罗系采空积水,其次可能为底板灰岩水和顶板砂岩水。8210 工作面采空区积水水样的 Fisher 多元统计模型判别充水来源结果详情见表 1。

综上所述,石炭系 3# 煤层 8210 工作面开采形成采空区的矿井涌水水源主要为侏罗系采空积水,其次为底板灰岩水和顶板砂岩水。

5 结束语

基于马脊梁煤矿石炭系 3# 煤层 8210 工作面涌水情况,采集并分析了其充水水源水文地球化学信息,应用基于主成分分析的 Fisher 多元统计分析方法对其工作面充水水源进行了精准识别分析,主要结果如下:

1) Piper 三线图法可用于分析判断水化学类型和分析地下水运动方向。水化学中主要成分分析、

频数分析及关键组分相对含量分析等方法的综合使用,在矿井不同充水水源的水化学组成特征及其演变分析方面有重要的应用前景,可用于判断矿井充涌水的补给来源。

2) 采用主成分分析法对水源水化学的指标数据进行提炼,把多个相关联的指标变量通过线性组合转化为彼此独立的新的样本指标,有效提取原各水源的水化学指标变异信息,消除指标间信息叠加造成的影响,以更加有效地描述不同水源的特征。

3) 应用基于主成分分析法的 Fisher 多元统计理论,建立了 8210 工作面采空区充水水源的 Fisher 识别模型。该模型的 2 个基础判别函数的判别贡献率分别达到了 95.9%、4.0%,说明其判别精度能达到 99.9%,对于研究区充水水源的现场识别具有重要的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 27-35.
FAN Limin. Scientific connotation of water-preserved mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 27-35.
- [2] ZHANG J C. Investigations of water intrusions from aquifers under coal seams [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(3): 350-360.
- [3] 虎维岳. 新时期煤矿水害防治技术所面临的基本问题[C]//西安: 中国煤炭学会矿井地质专业委员会、中国煤炭工业劳动保护科学技术学会水害防治专业委员会学术交流会论文集, 2005.
- [4] GUI H R, SUN L H, CHEN S. Research on goaf water features and disaster formation mechanism in China coalmines [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 44: 042036.
- [5] SUN W J, ZHOU W F, JIAO J. Hydrogeological classification and water inrush accidents in China's coal mines [J]. Mine Water and the Environment, 2016, 35(2): 214-220.
- [6] GUI H R, LIN M L. Types of water hazards in China coalmines and regional characteristics [J]. Natural Hazards, 2016, 84(2): 1501-1512.
- [7] 靳德武. 我国煤矿水害防治技术新进展及其方法论思考 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 141-147.
JIN Dewu. New development of water disaster prevention and control technology in China coal mine and consideration on methodology [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 141-147.
- [8] GUI H R, LIN M L, SONG X M. Identification and application of roof bed separation (water) in coal mines [J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(2): 376-384.
- [9] 孙魁. 煤矿水害致灾机理研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [10] GUI H R, QIU H L, QIU W Z, et al. Overview of goaf water hazards control in China coalmines [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(3): 49.
- [11] 陈彦美, 陈植华, 於开炳. 地下水水位及水温在查明矿区岩溶水补给条件中的应用: 以福建马坑铁矿为例 [J]. 中国岩溶, 2013, 32(1): 64-72.
CHEN Yanmei, CHEN Zhihua, YU Kaibing. To identify the recharge conditions of Karst groundwater in mining area by means of groundwater table and water temperature data: A case in Makeng

- iron mine, Fujian [J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(1): 64-72.
- [12] LIN Y, WU Y Z, PAN G Y, et al. Determining and plugging the groundwater recharge channel with comprehensive approach in Siwan coal mine, North China coal basin [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(9): 6759-6770.
- [13] WANG X Y, JI H Y, WANG Q, et al. Divisions based on groundwater chemical characteristics and discrimination of water inrush sources in the Pingdingshan Coalfield [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): 872.
- [14] 杨建, 刘基, 靳德武, 等. 有机-无机联合矿井突水水源判别方法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(10): 2886-2894.
YANG Jian, LIU Ji, JIN Dewu, et al. Method of determining mine water inrush source based on combination of organic-inorganic water chemistry [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(10): 2886-2894.
- [15] 黄磊, 侯泽明, 韩莹, 等. 采煤驱动下复杂井田含水层化学特征与水力联系辨识[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2697-2706.
HUANG Lei, HOU Zemeng, HAN Xuan, et al. Identification of chemical characteristics and hydraulic connection of each aquifer in complex mine field driven by coal mining [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2697-2706.
- [16] 马雷, 钱家忠, 赵卫东. 基于GIS和水质水温的矿井突水水源快速判别[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(2): 49-53.
MA Lei, QIAN Jiazhong, ZHAO Weidong. An approach for quickly identifying water-inrush source of mine based on GIS and groundwater chemistry and temperature [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(2): 49-53.
- [17] 靳玉琪, 龙建辉, 任杰, 等. 基于水化学特征的矿区填土地基水害水源分析[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4): 173-180.
JIN Yuqi, LONG Jianhui, REN Jie, et al. Water source analysis of mine filling foundation based on hydrochemical characteristics [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 173-180.
- [18] 刘国伟. 滨海矿山水下动态和水源混合比计算研究: 以三山岛西山矿区为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [19] 董东林, 张健, 林刚, 等. 矿井涌(突)水源混合水识别模型研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(12): 124-127.
DONG Donglin, ZHANG Jian, LIN Gang, et al. Identification model of the source of water-inrush [J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(12): 124-127.
- [20] 颜丙乾, 任奋华, 蔡美峰, 等. 基于PCA和MCMC的贝叶斯方法的海下矿山水害源识别分析[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(11): 1412-1421.
YAN Bingqian, REN Fenhua, CAI Meifeng, et al. Application of PCA and Bayesian MCMC to discriminate between water sources in seabed gold mines [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(11): 1412-1421.
- [21] 朱敬忠, 李凌, 杨森. 基于因子分析的突水水源类型判别的研究[J]. *矿业安全与环保*, 2021, 48(2): 87-91.
ZHU Jingzhong, LI Ling, YANG Sen. Research on discrimination of mine water bursting source based on factor analysis [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2021, 48(2): 87-91.
- [22] 韩忠, 王晓丽, 施龙青. PCA-BP神经网络在矿山岩溶突水水源判别中的应用研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(1): 46-53.
HAN Zhong, WANG Xiaoli, SHI Longqing. Study on application of PCA-BP neural network in discrimination of Karst water inrush source in mine [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2023, 42(1): 46-53.
- [23] 李超. 谢桥煤矿水化学特征与突水水源判别模型研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [24] 毛志勇, 崔鹏杰, 黄春娟, 等. KPCA-CS-SVM下的矿井突水水源判别模型[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(2): 104-111.
MAO Zhiyong, CUI Pengjie, HUANG Chunjuan, et al. KPCA-CS-SVM discrimination model of mine water inrush source [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2021, 40(2): 104-111.
- [25] 张磊, 许光泉. 矿井突水水源的水化学特征分析及其判别模型[J]. *矿业安全与环保*, 2010, 37(2): 7-10.
ZHANG Lei, XU Guangquan. Analysis on hydro-chemical characteristics of mine inrush-water source and its identification model [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2010, 37(2): 7-10.

(责任编辑: 林桂玲)