

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.009

贝叶斯突水水源判别与反向 水文地球化学模拟的含水层水力分析

郑 剑, 陈陆望, 张 杰, 张 苗, 郑 忻, 胡永胜

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:为探究杨柳煤矿主要突水含水层之间的水力联系,文章根据杨柳煤矿松散层第 4 含水层(简称“四含”或“Ⅰ”含水层)、二叠系煤系砂岩裂隙含水层(简称“煤系”或“Ⅱ”含水层)和石炭系太原组灰岩岩溶裂隙含水层(简称“太灰”或“Ⅲ”含水层)的地下水化学数据建立贝叶斯突水水源判别模型,并结合地质与构造条件,对 3 个突水含水层之间的补给关系、径流路径以及径流路径中的水-岩作用进行研究。结果表明:杨柳煤矿大部分区域不同含水层之间的水力联系较弱,在矿井西北部四含与煤系、煤系与太灰之间存在一定程度的水力联系;四含水通过西风井附近煤系砂岩露头向煤系补给,煤系水通过 DF25、DF10 断层向太灰补给,太灰水通过 GF383 断层向煤系补给。误判水样的反向水文地球化学模拟结果定量验证了离子比例分析揭示的径流路径中的水-岩作用,进一步证明了含水层之间的补给关系。该研究成果为快速判断矿区不同含水层之间的补给关系提供了技术参考。

关键词:贝叶斯判别;反向水文地球化学模拟;水力联系;水-岩作用;杨柳煤矿

中图分类号:P641.4

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)02-0203-09

Study on hydraulic connections between water-inrush aquifers based on Bayesian discriminant analysis and inverse hydrogeochemical simulation

ZHENG Jian, CHEN Luwang, ZHANG Jie, ZHANG Miao, ZHENG Xin, HU Yongsheng

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to identify the hydraulic connection between the main water-inrush aquifers in Yangliu coal mine, a Bayesian discriminant model of water inrush source was established based on the hydrochemical data of Quaternary loose aquifer (Quaternary aquifer or aquifer I), Permian coal measure sandstone fissure aquifer (Permian sandstone aquifer or aquifer II) and Carboniferous Taiyuan Formation limestone fissure aquifer (Carboniferous limestone aquifer or aquifer III). Meanwhile, combined with the condition of geologic structure, the supply relationship, the flow path and the water-rock interaction in the flow path of the three water-inrush aquifers were studied. Results show that the hydraulic connections between the main water-inrush aquifers in Yangliu coal mine are weak. There were hydraulic connections between Quaternary aquifer and Permian sandstone aquifer, Permian sandstone aquifer and Carboniferous limestone aquifer in the northwest of study area. The Quaternary water recharged to Permian sandstone aquifer through exposed sandstone near the Xifeng well. The Permian water recharged to Carboniferous limestone aquifer through the DF25 and DF10 faults, and the Carboniferous water recharged to Permian sandstone aquifer through GF383 fault. The inverse hydrogeochemical simulation for the misjudged groundwater samples verifies the water-rock interaction in the flow path revealed by the ion ratio analysis, and proves the supply relationship between the water-inrush aquifers. The research results can provide a technical reference to rapidly identify the supply relationship between differ-

收稿日期:2023-02-17;修回日期:2023-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41972256)

作者简介:郑 剑(1996—),男,湖北英山人,合肥工业大学硕士生;

陈陆望(1973—),男,湖北蕲春人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: luwangchen8888@163.com.

ent aquifers in the mining area.

Key words: Bayesian discriminant analysis; inverse hydrogeochemical simulation; hydraulic connection; water-rock interaction; Yangliu coal mine

矿井突水严重影响煤矿的正常生产,威胁到井下设备运行安全与工作人员的生命安全。明确煤矿突水水源、查明各突水含水层之间的水力联系,可以有效预防和治理矿井突水。由于不同含水层含水介质岩性及其水文地球化学环境不同,各含水层水化学组分的质量浓度及分布特征有所不同,因此可以利用离子组合比、数理统计以及人工神经网络等分析方法捕捉含水层水化学信息,构建突水水源判别模型^[1-7],从而快速识别突水水源。近年来,一些学者通过改进已有突水水源判别模型或应用新的判别方法,可以更准确地判别突水水源^[8-11]。但是,即使判别模型再精确,地下水样也仍存在误判现象,因此,在提高突水判别模型精确度的同时,还应结合采动情况以及具体的地质构造条件分析水样被误判的原因。水样被误判是否为煤矿各突水含水层水力联系特征所改变以致不同含水层地下水被混合,以此来判断煤矿突水含水层水力联系的较少。

随着煤矿开采向深部延伸以及开采规模扩大,突水含水层地下水的天然循环状态进一步被破坏^[12-14],各含水层之间的水力联系更加密切。为保障矿井安全生产,需要长期监测各突水含水层地下水循环状态,分析各含水层之间可能存在的水力联系,进一步揭示矿井突水原因,从而有针对性地开展煤矿防治水工作。目前,含水层水力联系分析方法有现场抽水试验,根据水位降落漏斗的形状及其波及范围分析突水含水层之间的水力联系^[15-16]。或根据各含水层水位动态特征分析含水层之间的补给关系^[17]。利用突水含水层地下水氢氧同位素含量分布特征与差异,分析地下水形成、运移和补给规律^[18-19]。然而,抽水试验耗时较长、成本较高,无法长期、广泛使用。部分煤矿地下水位长观孔和同位素数据较少,也无法实现对矿区各含水层水力联系进行长期、全面监测。而各煤矿水化学数据相对齐全、分布相对均匀,且煤矿地下水样取样、检测方便,基于煤矿常规水化学数据建立突水水源判别模型,不仅可以快速判别突水水源、长期监测含水层之间的水力联系,还可以根据误判水样点受开采影响程度及其附近的地质构造条件,探寻水样产生误判原因,确定误判水样点处地质构造条件及突水危险

的区域。再通过径流路径分析误判水样经历的水岩作用,可以从水文地球化学方面验证上述含水层水力联系分析的可靠性。

本文以安徽省淮北煤田杨柳煤矿为例,收集整理杨柳煤矿历年来主要突水含水层的水化学数据,建立贝叶斯突水水源判别模型。结合模型误判结果、煤矿采动和地质构造条件,分析主要突水含水层可能产生水力联系的径流路径及对应的水-岩作用,并对其进行反向水文地球化学模拟,验证径流路径中的水-岩作用过程,进一步阐明主要突水含水层水力联系机制。研究成果为准确分析煤矿主要突水含水层间的水力联系提供了参考。

1 研究区概况

淮北煤田杨柳煤矿位于安徽省淮北市濉溪县境内,为新近系、第四系巨厚松散层覆盖的全隐蔽井田。根据含水层岩性组合特征和赋存条件,研究区自上而下可划分为新生界松散含水层(组)、二叠系煤系砂岩裂隙含水层(组)(简称“煤系”或“Ⅱ含水层”)、石炭系太原组岩溶裂隙含水层(组)(简称“太灰”或“Ⅲ含水层”)和奥陶系岩溶裂隙含水层(组)(简称“奥灰”)。新生界松散层自上而下划分为4个含水层和3个隔水层。第3隔水层厚度较大、分布稳定、隔水性好,使得第1、2、3含水层及地表水与煤系地层无水力联系。第4含水层(简称“四含”或“Ⅰ含水层”)直接覆盖在煤系和太灰之上,不仅与煤系和太灰之间有水力联系,而且是沟通其他含水层的地下水通道,使各含水层之间不同程度地存在水力联系。受断层和采动影响,太灰局部地区会与四含、煤系产生水力联系。奥灰远离煤系地层,正常情况下奥灰水对矿井充水无影响。

研究区地层走向浅部为近南北向、向东倾斜的单斜构造,地层倾角 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,区内断层较发育,大、小断层共有2 699条。大断层走向多为NE—NEE向,一般落差较大、倾角较陡、延展较长,且富水性弱、导水性差。小断层(落差值小于20 m)数量多、张性好、充填差,是基岩地下水良好的导水通道,相互联结起到汇水网络作用,是造成太灰与四含、太灰与煤系之间产生水力联系的重要原因。研究区地质构造图如图1所示。

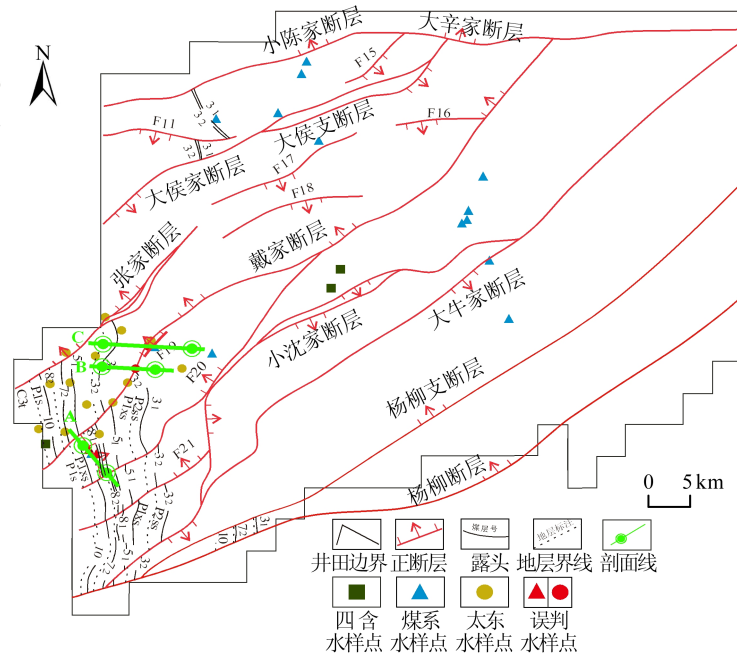


图 1 杨柳煤矿地质构造及水样点分布图

2 含水层水力联系分析

2.1 数据收集与整理

本文收集了研究区四含、煤系、太灰 3 个含水层的常规水化学数据, 包括 6 个常规离子 K^+ +

Na^+ (由于 K^+ 质量浓度较少且其化学性质与 Na^+ 相似, 以 Na^+ 代替)、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 。收集的地下水样共 39 个, 其中: 四含水样 3 个; 煤系水样 22 个; 太灰水样 14 个。各水样常规水化学数据见表 1 所列。

表 1 研究区主要突水含水层常规水化学数据与贝叶斯判别结果

| 编号 | 取样点 | $\rho / (mg/L)$ | | | | | | 实际层位 | 判别层位 | 后验概率 |
|----|-------------------|-----------------|-----------|-----------|--------|-------------|-----------|------|------|-------|
| | | $K^+ + Na^+$ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Cl^- | SO_4^{2-} | HCO_3^- | | | |
| 1 | 10#水源井 | 118.01 | 54.63 | 55.69 | 79.77 | 291.00 | 251.58 | I | I | 0.991 |
| 2 | 09-观 1 孔 | 202.35 | 166.33 | 76.56 | 145.46 | 681.20 | 312.36 | I | I | 0.845 |
| 3 | 2020-观 7 | 132.62 | 77.53 | 33.58 | 56.58 | 107.02 | 519.73 | I | I | 1.000 |
| 4 | 103 回风上山下口定-5# | 332.76 | 61.77 | 48.02 | 207.99 | 477.87 | 312.74 | II | II | 0.774 |
| 5 | 104 边界巷 | 443.16 | 2.82 | 1.95 | 98.67 | 79.03 | 764.70 | II | II | 0.710 |
| 6 | 北轨大巷里段 BG12+12 m | 312.23 | 4.05 | 3.83 | 149.95 | 10.70 | 516.79 | II | II | 0.939 |
| 7 | 10414 机抽巷 19# 钻场 | 229.08 | 3.42 | 6.41 | 160.48 | 7.41 | 321.38 | II | II | 0.935 |
| 8 | 1071 风抽验 15-1 孔 | 630.41 | 8.73 | 7.70 | 220.94 | 178.22 | 1 010.49 | II | II | 0.992 |
| 9 | 1071 风抽验 15-2 孔 | 798.93 | 8.06 | 6.35 | 165.71 | 97.14 | 1 322.91 | II | II | 0.995 |
| 10 | 1071 机抽验 44-1 孔 | 724.82 | 7.25 | 4.40 | 170.94 | 47.75 | 1 244.81 | II | II | 0.996 |
| 11 | 10414 工作面 F42+1 m | 411.79 | 4.11 | 5.98 | 113.49 | 99.61 | 709.70 | II | II | 0.833 |
| 12 | 10414-2# 瓦斯抽放井 | 336.01 | 12.32 | 5.98 | 150.52 | 84.38 | 504.12 | II | II | 0.952 |
| 13 | 1061 机抽巷 5# 钻场 | 338.56 | 7.32 | 4.44 | 160.99 | 54.74 | 515.22 | II | II | 0.976 |
| 14 | 10410 机抽巷 9# 钻场 | 402.11 | 7.14 | 4.81 | 142.15 | 68.74 | 717.60 | II | II | 0.958 |
| 15 | 10414 工作面 | 451.42 | 2.46 | 9.47 | 157.79 | 210.74 | 619.69 | II | II | 0.991 |
| 16 | 107-观 1 孔 | 654.97 | 7.25 | 3.91 | 169.20 | 13.17 | 1 247.25 | II | II | 0.998 |
| 17 | 1071 工作面 | 498.00 | 4.03 | 4.89 | 120.36 | 142.00 | 846.96 | II | II | 0.957 |
| 18 | 西风井井底车场 | 290.23 | 68.48 | 31.26 | 186.64 | 363.85 | 353.92 | II | II | 0.915 |
| 19 | 西风井 2# 孔 | 211.86 | 39.47 | 20.03 | 85.47 | 211.15 | 368.56 | II | I | 0.967 |
| 20 | 西轨探 1# 孔 | 484.87 | 5.64 | 1.95 | 181.41 | 232.55 | 705.39 | II | II | 0.995 |
| 21 | 西风井下口 | 261.90 | 133.68 | 86.28 | 237.54 | 591.47 | 377.93 | II | III | 0.729 |
| 22 | 西轨道 17# 钻场 2# 孔 | 342.42 | 50.25 | 38.21 | 150.68 | 379.91 | 511.88 | II | II | 0.930 |
| 23 | 东风井砂岩 | 616.52 | 10.29 | 5.28 | 65.26 | 749.94 | 574.71 | II | II | 0.948 |
| 24 | 103 回风上山 2# 钻场 | 441.99 | 16.75 | 13.54 | 200.31 | 311.58 | 492.75 | II | II | 0.971 |
| 25 | 西轨大巷 103 回风上山 5 孔 | 554.67 | 15.15 | 7.74 | 210.95 | 436.30 | 617.13 | II | II | 0.974 |

续表

| 编号 | 取样点 | $\rho/(\text{mg/L})$ | | | | | | 实际层位 | 判别层位 | 后验概率 |
|----|----------------|----------------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------|------------------|------|------|-------|
| | | $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Cl^- | SO_4^{2-} | HCO_3^- | | | |
| 26 | 103 回风上山定向 5 孔 | 308.84 | 65.48 | 61.36 | 207.99 | 519.85 | 308.11 | II | II | 0.731 |
| 27 | 西风井探 2 | 164.59 | 188.23 | 118.01 | 235.76 | 698.07 | 309.13 | III | III | 0.932 |
| 28 | 2018-勘 1 | 288.70 | 160.22 | 69.19 | 232.22 | 573.77 | 475.52 | III | III | 0.640 |
| 29 | 2018 勘 2 | 407.86 | 8.60 | 12.32 | 200.31 | 69.56 | 607.47 | III | II | 0.986 |
| 30 | 103 总回定向 1# 孔 | 313.97 | 84.52 | 56.56 | 226.90 | 551.96 | 296.70 | III | II | 0.595 |
| 31 | 2020-观 3 | 286.12 | 373.02 | 154.01 | 241.00 | 1 533.62 | 308.11 | III | III | 1.000 |
| 32 | 2020-观 6 | 271.47 | 406.75 | 162.43 | 266.27 | 1 577.25 | 312.93 | III | III | 1.000 |
| 33 | 2020-观 9 | 86.80 | 275.30 | 252.81 | 229.65 | 1 301.07 | 293.67 | III | III | 1.000 |
| 34 | 2020-水 3 | 349.21 | 238.10 | 132.35 | 223.00 | 1 246.32 | 353.85 | III | III | 0.993 |
| 35 | 2020-水 4 | 375.54 | 188.89 | 138.12 | 226.33 | 1 230.68 | 322.55 | III | III | 0.989 |
| 36 | 2020-水 10 | 35.79 | 317.47 | 288.76 | 236.31 | 1 418.37 | 312.93 | III | III | 1.000 |
| 37 | 2020-水 11 | 96.05 | 246.04 | 283.95 | 226.33 | 1 359.10 | 317.74 | III | III | 1.000 |
| 38 | 2020-水 12 | 323.61 | 197.77 | 172.70 | 213.01 | 1 317.94 | 291.44 | III | III | 0.995 |
| 39 | 2020-水 13 | 426.97 | 153.47 | 122.81 | 176.40 | 1 243.86 | 337.00 | III | III | 0.937 |

考虑到离子质量浓度检测中存在误差,需要对数据进行阴阳离子平衡检验,检验公式^[20]为:

$$E = \frac{\sum m_c - \sum m_a}{\sum m_c + \sum m_a} \times 100\% \quad (1)$$

其中: E 为相对误差; m_a 、 m_c 分别为阴离子与阳离子毫克当量质量浓度。若 E 值在 $\pm 5\%$ 之间,则认为水样数据合格。经式(1)检验,39个水样均满足要求。

2.2 含水层水化学特征及其识别图解

研究区 39 个地下水样的 Piper 三线图如图 2 所示。由图 2 可知:四含水中 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 相对质量浓度较高,水化学类型有 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型;煤系水中 Na^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 相对质量浓度较高,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ 型为主;太灰水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 相对质量浓度较高,水化学类型以 $\text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型为主。

根据各含水层的地下水化学特征的差异性,将图 2 分成 A、B、C 这 3 个区域,四含水样点集中在 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 三角形的 A 区域,煤系水样点集中在 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 三角形的 B 区域,太灰水样点集中在 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ 三角形的 C 区域。当各含水层之间存在水力联系时,不同含水层地下水化学特征会出现一定程度的共同性。21 号煤系水样的水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na} \cdot \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ 型,与其他煤系水样的水化学类型相差较大,与大部分太灰水样的水化学类型相似,可能是 21 号水样点处受到太灰水补给。29 号太灰水样的水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ 型,与其他太灰

水样的水化学类型相差较大,与大部分煤系水样的水化学类型相似,可能是 29 号水样点处受到煤系水补给。

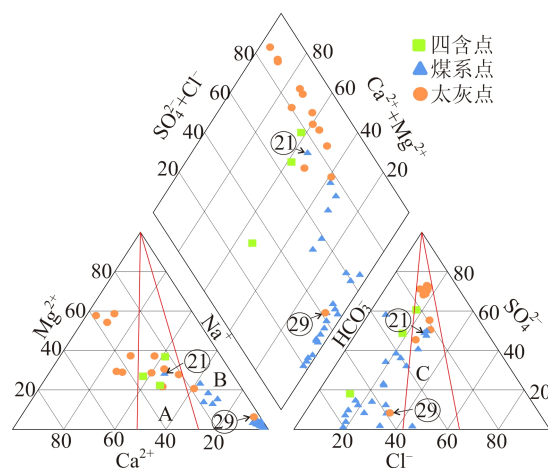


图 2 Piper 三线图识别图解

2.3 贝叶斯判别结果

本文采用贝叶斯判别分析,建立 3 种水样的判别函数模型,进一步分析研究区含水层之间的补给关系,判别公式为:

$$\begin{cases} T_1(x) = -0.134 9x_1 - 0.152 6x_2 - 0.243 8x_3 + \\ \quad 0.144 8x_4 + 0.066 7x_5 + 0.076 1x_6 - 9.132 5; \\ T_2(x) = -0.119 5x_1 - 0.191 6x_2 - 0.225 3x_3 + \\ \quad 0.211 7x_4 + 0.068 9x_5 + 0.073 7x_6 - 19.841 0; \\ T_3(x) = -0.103 6x_1 - 0.159 9x_2 - 0.176 9x_3 + \\ \quad 0.222 9x_4 + 0.064 2x_5 + 0.064 7x_6 - 28.006 6 \end{cases} \quad (2)$$

其中: T_1 、 T_2 、 T_3 分别为四含水、煤系水以及太灰水判别函数; x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 分别为 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 离子的质量浓度。

由式(2)可计算出水样的 T_1 、 T_2 、 T_3 ,从中找出最大值 $T_g(x) = \max_{1 \leq i \leq 3} T_i(x)$,将该水样划归到第 g 类含水层,再计算这一划分的后验概率 $P(g/x)^{[21]}$,计算公式为:

$$P(g/x) = e^{T_g(x)} / \sum_{i=1}^3 e^{T_i(x)} \quad (3)$$

各水样判别层位及后验概率见表 1 所列。从表 1 可以看出,在杨柳煤矿 39 个水样建立的判别模型中,总体回判正确率达到 89.7%,说明杨柳煤矿大部分区域的四含、煤系和太灰之间的水力联系较弱。其中有 4 个误判水样,分别为 19、21、29、30 号。

2.4 地下水补给关系分析

19、21 号水样点地质剖面如图 3 所示(剖面位置见图 1 剖面 A)。19 号煤系水样被误判为四含水,说明此处受到四含水的补给。由图 3 可知,19 号水样点为煤系砂岩露头,四含与煤系间存在角度不整合,地下水循环受采动影响发生改变,四含水可以在水头差驱动下通过砂岩露头向煤系补给,可以推测出 19 号水样的径流路径(图 3 路径 1)。21 号煤系水样被误判为太灰水,说明此处受到太灰水补给。21 号水样点发育有小断层(GF383 断层),研究区的大部分小断层填充较差,是地下水的良好导水通道,且太灰水压较大,太灰水可在水压力作用下通过小断层向煤系补给。可以推测出 21 号水样的径流路径(图 3 路径 2)。

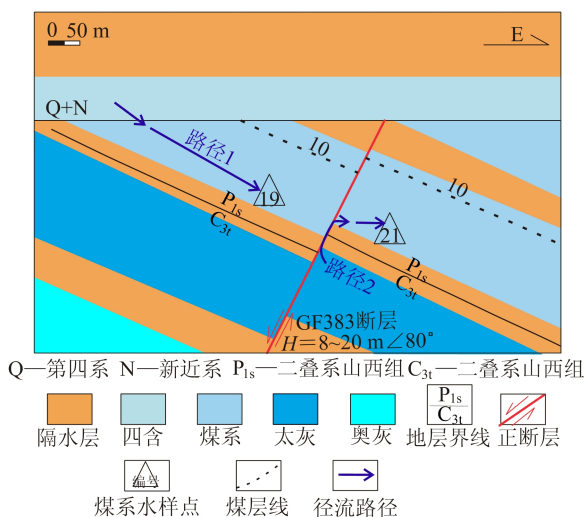


图 3 19、21 号水样点地质剖面图及推测的径流路径

29 号太灰水样被误判为煤系水,说明此处受到煤系水补给。29 号水样点地质剖面图如图 4 所示(剖面位置见图 1 剖面 B)。由图 4 可知,

29 号水样点位于大断层(戴庙断层)与小断层(DF10 断层)之间,而研究区断层两侧派生的次一级小断层含水量丰富、导水性强。正常情况下,太灰水压较大,煤系水不会向太灰水补给,但在取样前,29 号水样点进行过一系列抽水试验以疏水降压,导致此处太灰水压降低,煤系水可在水头差驱动下通过断层向太灰补给。可推测出 29 号水样的径流路径(图 4 路径 3)。

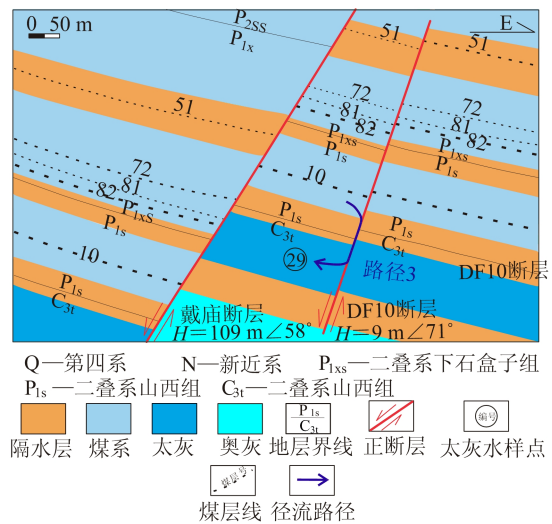


图 4 29 号水样点地质剖面图及推测的径流路径

30 号太灰水样被误判为煤系水,说明此处受到煤系水的补给。30 号水样点地质剖面图如图 5 所示(剖面位置见图 1 剖面 C)。

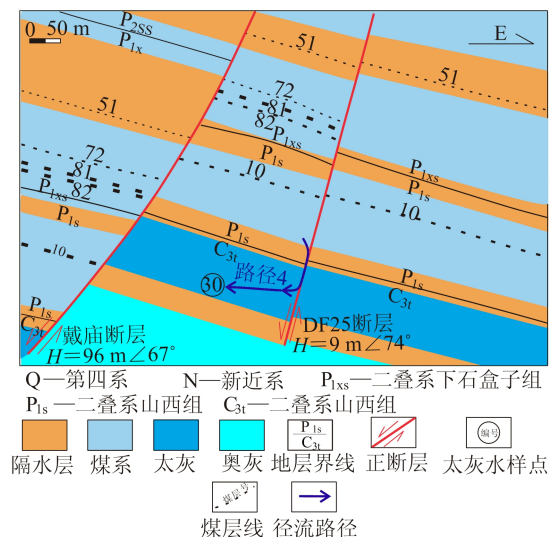


图 5 30 号水样点地质剖面图及推测的径流路径

由图 5 可知,30 号水样点同样位于大断层(戴庙断层)与小断层(DF25 断层)之间。该水样点为井下探查疏放孔,处于未封孔状态,持续放水导致此处太灰水压降低,煤系水可以在水头差驱动

下通过断层向太灰补给。以此可以推测出 30 号水样的径流路径(图 5 路径 4)。

3 地下水水-岩作用分析

3.1 Gibbs 图分析

Gibbs 图是以总溶解固体(total dissolved solids, TDS)的对数为 Y 轴、 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 为 X 轴的关系图,可以被用来分析水化学组分的成因机制,以确定蒸发、水-岩作用和降水对水化学成分的影响^[22]。研究区地下水的 Gibbs 图如图 6 所示。

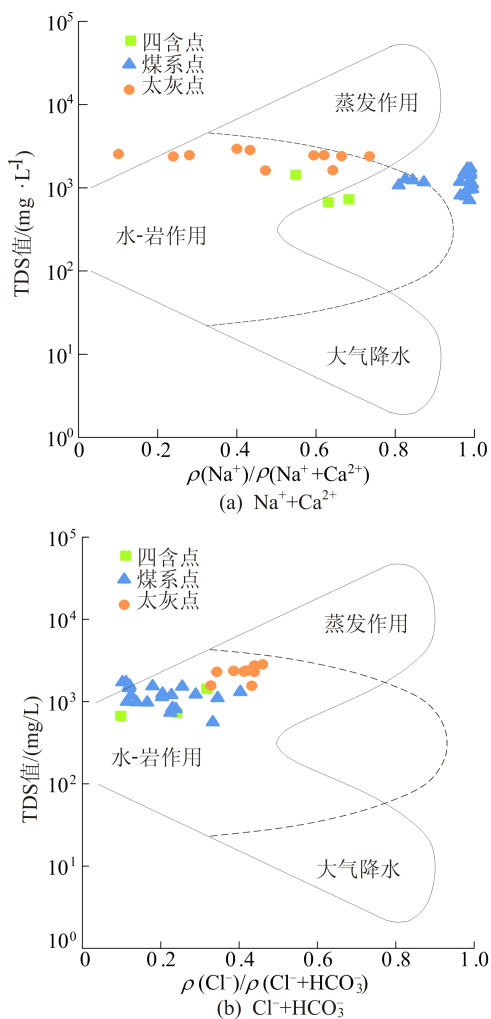


图 6 杨柳煤矿地下水 Gibbs 图

由图 6 可知:研究区地下水 TDS 的取值范围为 567.49~2 841.64 mg/L, $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 范围为 0.101~0.995, 平均值为 0.775, 水中 $\rho(\text{Na}^+)$ 高于 $\rho(\text{Ca}^{2+})$; $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 范围为 0.098~0.460, 平均值为 0.277, 水中 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 高于 $\rho(\text{Cl}^-)$ 。由于第 3 隔水层厚度较大且隔水性良好, 大气降水和蒸发作用对研

究区地下水化学组分几乎没有影响; 大多数水样点分布在 Gibbs 图的水-岩作用区域, 说明研究区地下水化学组分主要受水-岩作用影响。图 6a 中, 部分水样点落在实线外, 可能是水中的 Ca^{2+} 与岩石中的 Na^+ 发生交替吸附, 导致水中 Na^+ 过多。

3.2 离子比例分析

研究区地下水离子比例关系图如图 7 所示。当 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生交替吸附时, $c(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)/c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - 0.5\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ 绝对值应为 2。由图 7a 可知, 在 $c(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ 轴与 $c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - 0.5\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$ 轴组成的坐标系中, 大部分水样位于第四象限, 且分布在 2:1 线及其附近, 说明阳离子交替吸附是影响研究区水文地球化学形成作用的重要因素之一。当地下水中的 Na^+ 仅来自岩盐溶解时, $c(\text{Cl}^-)/c(\text{Na}^+)$ 应为 1。由图 7b 可知, 大部分水样分布在 1:1 线下部, 说明岩盐的溶解不是研究区地下水 Na^+ 的唯一来源, 富余的 Na^+ 还来源于阳离子交替吸附。

当地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 主要来自硫酸盐的溶解时, $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 应为 1; 当 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 大于 1 时, SO_4^{2-} 有其他来源, 如黄铁矿氧化; 当 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 小于 1 时, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 有其他来源, 如碳酸盐的溶滤溶解。由图 7c 可知: 四含水样分布在坐标系 1:1 线下部, 说明四含水中存在碳酸盐的溶滤溶解; 煤系水样与太灰水样在坐标系 1:1 线上、下均有分布, 说明煤系水与太灰水中既有黄铁矿氧化, 又有碳酸盐的溶滤溶解。

当地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 HCO_3^- 主要来自碳酸盐溶解时, $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 应为 2; 当 $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 大于 2 时, HCO_3^- 有其他来源, 如脱硫酸作用; 当 $c(\text{HCO}_3^-)/c(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 小于 2 时, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 有其他来源, 如硫酸盐的溶解。由图 7d 可知: 四含水样主要分布在坐标系 2:1 线下部, 说明四含水中存在硫酸盐的溶滤溶解; 煤系水样坐标系的 2:1 线上、下均有分布, 说明煤系中既存在硫酸盐的溶滤溶解, 又存在脱硫酸作用; 太灰水样分布在坐标系的 2:1 线下部, 说明太灰水中存在碳酸盐的溶滤溶解。

由离子比例分析可知, 研究区主要突水含水层中发生的水-岩作用类型主要为溶滤溶解和阳离子交替吸附, 煤系部分区域还存在黄铁矿氧化或脱硫酸作用, 太灰部分区域还存在黄铁矿氧化。

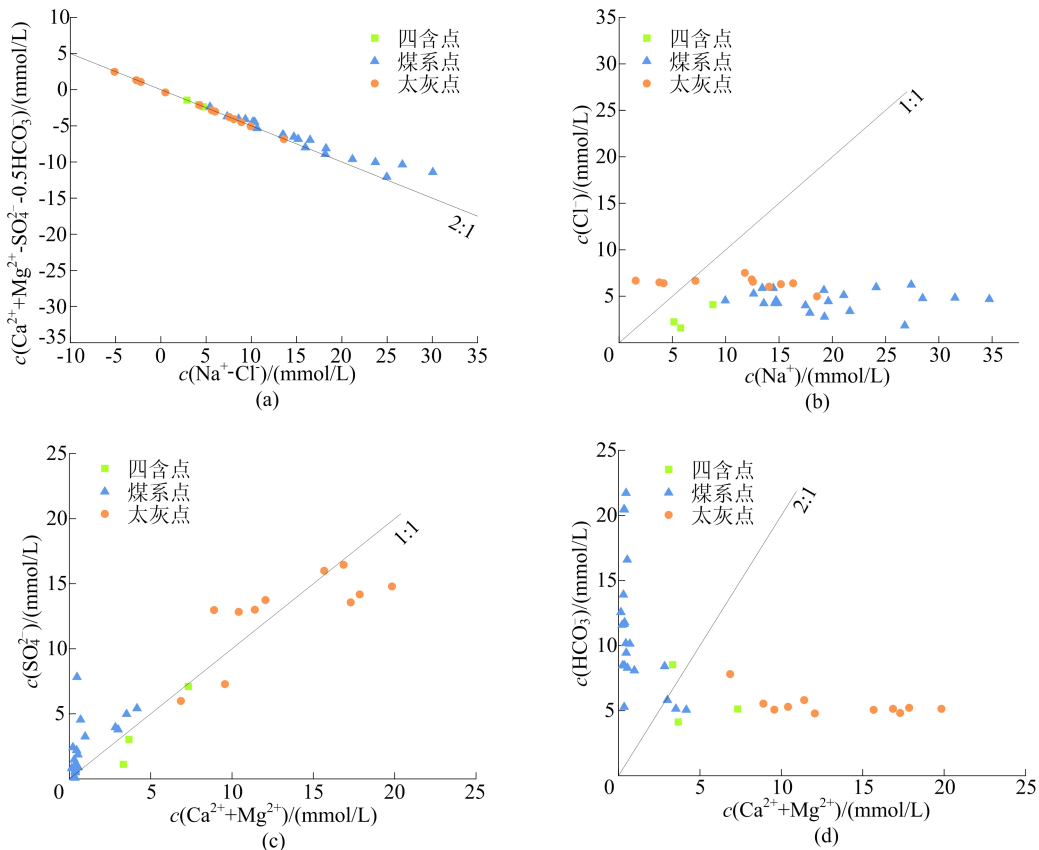


图 7 研究区地下水样离子比例关系

4 反向水文地球化学模拟

4.1 确定径流路径

模拟误判水样经历水-岩作用,径流路径分别为图 3 路径 1、路径 2,图 4 路径 3,图 5 路径 4。最终水样选为误判水样,各模拟路径见表 2 所列。表 2 中均值为判别正确的水样各离子浓度均值,单位为 mmol/L。

表 2 模拟路径

| 路径 | 所在含水层 | 补给水源 | 初始水样 | 最终水样 |
|----|-------|------|--------|------|
| 1 | 煤系 | 四含 | 四含水样均值 | 19 |
| 2 | 煤系 | 太灰 | 太灰水样均值 | 21 |
| 3 | 太灰 | 煤系 | 煤系水样均值 | 29 |
| 4 | 太灰 | 煤系 | 煤系水样均值 | 30 |

4.2 可能矿物相的选取

根据研究区地下水文地球化学环境及离子比例结果可知,研究区主要突水含水层水化学成分的形成作用主要有碳酸盐、硫酸盐溶滤溶解,黄铁矿氧化,阳离子交替吸附和脱硫酸作用等。在模拟过程中,加入 H₂S 与 O₂ 代表黄铁矿氧化,加入碳酸盐、硫酸盐和 CO₂ 代表碳酸盐、硫酸盐的溶滤溶解,加入 NaX、CaX₂ 代表阳离子交替吸附,

加入 CH₂O 代表脱硫酸作用。最终确定矿物相有白云石、石膏、方解石、岩盐、NaX、CaX₂、H₂S(g)、O₂(g)、CO₂(g),煤系中矿物相另外加入 CH₂O。

4.3 模拟结果

反向水文地球化学模拟出研究区主要突水含水层地下水各矿物饱和指数 (saturation index, SI) 见表 3 所列。

表 3 研究区主要突水含水层地下水各矿物饱和指数

| 含水层 | SI _{白云石} | SI _{石膏} | SI _{方解石} | SI _{岩盐} |
|-----|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| 四含 | 2.20 | -1.13 | 1.06 | -6.46 |
| 煤系 | 1.38 | -2.05 | 0.58 | -5.74 |
| 太灰 | 2.62 | -0.50 | 1.23 | -5.90 |

由表 3 可知:研究区各含水层石膏和岩盐的 SI 均小于 0,表明其在地下水中始终处于溶解状态;方解石和白云石的 SI 均大于 0,表明有沉淀析出的趋势。研究区误判水样反向水文地球化学模拟结果见表 4 所列。

表 4 中:正值代表溶解量;负值表示沉淀量(下同)。由表 4 可知,路径 1 和路径 2 均发生了石膏溶滤溶解、白云石沉淀、阳离子交替吸附和脱硫酸作用。出现白云石沉淀是由于四含水层和太灰

水中的白云石处于过饱和状态;出现脱硫酸作用是由于四含水和太灰水中的 SO_4^{2-} 质量浓度较高,四含水或太灰水补给煤系后,在无氧环境下,更易发生脱硫酸作用。

从表 4 可以看出,路径 3 发生了岩盐溶滤溶解、方解石沉淀、阳离子交替吸附。路径 4 发生了

白云石、岩盐溶滤溶解、方解石沉淀、阳离子交替吸附和黄铁矿氧化。路径 3、路径 4 中均出现了方解石沉淀,原因是煤系水中方解石和白云石均处于过饱和状态,但在路径 4 中出现了白云石溶滤溶解,可能是地下水在流动过程中溶解了 CO_2 ,使其继续溶解白云石及受沉淀滞后的影响^[23-24]。

表 4 误判水样反向水文地球化学模拟各矿物相浓度

单位:mmol/L

| 路径 | 含水层 | 白云石 | 石膏 | 方解石 | 岩盐 | NaX | CaX ₂ | H ₂ S(g) | O ₂ (g) | CO ₂ (g) | CH ₂ O |
|----|-------|-------|------|-------|------|-------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| 1 | 四含—煤系 | -1.45 | 1.27 | 0 | 0 | 2.52 | -1.26 | -2.94 | 0 | -2.86 | 5.88 |
| 2 | 太灰—煤系 | -3.55 | 0.87 | 0 | 0.27 | 0.42 | -0.21 | -7.28 | 0 | -6.70 | 14.60 |
| 3 | 煤系—太灰 | 0 | 0 | -1.76 | 1.09 | -3.07 | 1.53 | -1.54 | -3.08 | 0 | 0 |
| 4 | 煤系—太灰 | 1.79 | 0 | -3.60 | 1.74 | -6.69 | 3.48 | 3.49 | 6.89 | -6.22 | 0 |

5 讨 论

5.1 模拟结果验证

由图 3 路径 1 可知,四含水向 19 号水样点补给,经历的水岩作用受风氧化带岩性与煤系含水介质岩性影响。由图 3 路径 2 可知,太灰水向 21 号水样点补给,经历的水岩作用受断层充填物和煤系含水介质岩性影响。路径 1 中风氧化带主要由泥岩组成,路径 2 中断层充填物主要为砂岩和泥岩,均与煤系含水介质岩性相似。基于离子比例分析可知,地下水流经风氧化带或断层后会发​​生溶滤溶解和阳离子交替吸附,可能发生黄铁矿氧化;地下水补给煤系后,会发生溶滤溶解和阳离子交替吸附,可能发生黄铁矿氧化和脱硫酸作用。19、21 号水样的反向水文地球化学模拟结果表明,四含水或太灰水补给煤系主要发生石膏溶滤溶解、白云石的沉淀、阳离子交替吸附和脱硫酸作用,与上述离子比例分析结果基本一致。

由图 4 路径 3、图 5 路径 4 可知,煤系水向 29、30 号水样补给,经历的水-岩作用受断层充填

物和太灰含水介质岩性影响。2 处断层充填物主要为砂岩和泥岩,均与煤系含水介质岩性相似。基于离子比例分析可知,地下水流经断层或补给太灰后,均会发生溶滤溶解和阳离子交替吸附,可能发生黄铁矿氧化。29、30 号水样的反向水文地球化学模拟结果表明,煤系水补给太灰主要发生岩盐溶滤溶解、方解石沉淀和阳离子交替吸附,与上述离子比例分析结果基本一致。

5.2 应用验证

为验证反向水文地球化学模拟结果的可靠性,选取祁东煤矿和任楼煤矿的突水水样进行验证。祁东煤矿突水点为三采区上部车场 7 煤顶板,该处为砂岩露头处,与四含之间存在不整合接触,且裂隙较发育,突水水源为四含水;任楼煤矿突水点为中六运输大巷 F2 断层顶板,该处断层较发育,断层充填物主要为砂岩,突水水源为灰岩水。突水点、突水水源及其水化学数据见表 5 所列,表 5 中均值为已收集数据各离子质量浓度均值。突水点反向水文地球化学模拟路径上的各矿物转化量见表 6 所列。

表 5 突水点及突水水源水化学质量浓度

单位:mg/L

| 突水位置 | 突水水源 | 突水含水层 | 路径 | 水化学数据 | K ⁺ +Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|--------|------|-------|------|-------|---------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 祁东—三采区 | 四含 | 煤系 | 路径 5 | 四含均值 | 310.36 | 120.18 | 73.51 | 244.26 | 530.19 | 422.83 |
| 上部车场 | 四含 | 煤系 | 路径 5 | 突水水样 | 416.30 | 15.31 | 14.17 | 235.48 | 276.60 | 353.92 |
| 任楼—中六 | 太灰 | 煤系 | 路径 6 | 太灰均值 | 600.23 | 230.22 | 64.39 | 901.16 | 595.66 | 305.59 |
| 运输大巷 | 太灰 | 煤系 | 路径 6 | 突水水样 | 716.25 | 35.59 | 19.49 | 841.23 | 85.54 | 514.58 |

由表 6 可知:路径 5 中发生了白云石沉淀、石膏溶解、阳离子交替吸附和脱硫酸作用;路径 6 中发生了白云石沉淀、阳离子交替吸附和脱硫酸作用;路径 5、6 中发生的水-岩作用分别与祁东煤

矿、任楼煤矿煤系中发生的主要水-岩作用相似。突水水样模拟结果与前文误判水样模拟结果一致,进一步验证了贝叶斯判别结果及地下水补给关系分析的准确性。

表6 突水水样反向水文地球化学模拟各矿物相浓度

单位:mmol/L

| 路径 | 含水层 | 白云石 | 石膏 | 方解石 | 岩盐 | NaX | CaX ₂ | H ₂ S(g) | O ₂ (g) | CO ₂ (g) | CH ₂ O |
|----|-------|-------|------|-----|----|------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| 5 | 四含一煤系 | -2.41 | 1.58 | 0 | 0 | 3.36 | -1.68 | -4.06 | 0 | -4.44 | 8.13 |
| 6 | 太灰一煤系 | -1.93 | 0 | 0 | 0 | 5.89 | -2.84 | -5.33 | 0 | -3.37 | 10.70 |

6 结 论

1) 对杨柳煤矿 39 个水样进行贝叶斯水源判别分析,回判正确率达到 89.7%,说明杨柳煤矿四含、煤系和太灰之间的水力联系较弱。煤系、太灰 2 个含水层中的水样均存在误判,主要原因是突水含水层之间部分不整合接触处和断层发育处存在补给通道,受采动影响,地下水在重力或水压力作用下向其他含水层补给。结合贝叶斯判别和地质构造可知,煤系受到四含水和灰水的补给,太灰受到煤系水的补给。

2) 研究区地下水化学组分主要受水-岩作用影响。四含水或太灰水补给煤系主要发生溶滤溶解、阳离子交替吸附和脱硫酸作用。煤系水补给太灰主要发生溶滤溶解和阳离子交替吸附。

3) 基于贝叶斯突水水源判别确定补给关系和径流路径,分别采用离子比例定性分析和反向水文地球化学模拟定量分析,揭示误判水样在径流路径中的水文地球化学作用,两者结果基本一致,从水文地球化学方面验证了地下水补给关系。

【参 考 文 献】

[1] 张乐中,曹海东.利用水化学特征识别桑树坪煤矿突水水源[J].煤田地质与勘探,2013,41(4):42-45.

[2] 石磊,徐楼英.基于水化学特征的聚类分析对矿井突水源判别[J].煤炭科学技术,2010,38(3):97-100,124.

[3] 曲兴玥,施龙青.基于 Matlab 因子分析及距离判别模型的矿井突水水源识别[J].煤炭科学技术,2018,46(8):178-182.

[4] 翟晓荣,田诺成,张红梅,等.基于水化学成分与聚类分析的矿井水补给关系判别[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(4):88-92.

[5] 张好,姚多喜,鲁海峰,等.主成分分析与 Bayes 判别法在突水水源判别中的应用[J].煤田地质与勘探,2017,45(5):87-93.

[6] QIAN J,ZTONG Y,MA L, et al. Hydrochemical Characteristics and groundwater source identification of a multiple aquifer system in a coal mine[J]. Mine Water and the Environment, 2018, 37(3): 528-540.

[7] 董东林,陈昱吟,倪林根,等.基于 WOA-ELM 算法的矿井突水水源快速判别模型[J].煤炭学报,2021,46(3):984-993.

[8] 施龙青,董晨磊,衡培国,等.煤矿突水水源判别的 PCA-PSO-ELM 模型[J].中国科技论文,2021,16(9):919-924.

[9] 纪卓辰,丁湘,侯恩科,等.纳林河二号煤矿涌水水源判别的 PCA-Logistic 方法[J].煤田地质与勘探,2020,48(5):97-105,112.

[10] HUANG P, HYANG Z, YWANG X Y, et al. Research on Piper-PCA-Bayes-LOOCV discrimination model of water inrush source in mines[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(11): 1-14.

[11] ZHANG H, XING H F, YAO D X, et al. The multiple logistic regression recognition model for mine water inrush source based on cluster analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(20): 1-15.

[12] 许冬清.宿县矿区地下水化学演化特征与控制因素研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.

[13] QIAO X, JLI G, MLI M, et al. Influence of coal mining on regional karst groundwater system: a case study in west mountain area of Taiyuan city, northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(6): 1525-1535.

[14] ZHANG J, CHEN L W, CHEN Y F, et al. Discrimination of water-inrush source and evolution analysis of hydrochemical environment under mining in Renlou coal mine Anhui Province China[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(2): 61-72.

[15] 赵宝峰,吕玉广.基于底板砂岩含水层放水试验的多含水层水力联系研究[J].煤矿安全,2020,51(12):34-39.

[16] 方刚,刘柏根.基于巴拉素井田多孔抽水试验的含水层特征及水力联系研究[J].水文,2019,39(3):36-40.

[17] 蔚波,王皓,刘峰,等.孟加拉国巴拉普库利亚煤矿含水层水力联系研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):205-212.

[18] 许蓬,王明.环境同位素技术在判定矿井含水层间水力联系的应用[J].煤炭科学技术,2018,46(增刊1):227-230.

[19] 陈陆望,桂和荣,殷晓曦.深层地下水氢氧稳定同位素组成与水循环示踪[J].煤炭学报,2008,33(10):1107-1111.

[20] 钱会,马致远,李培月.水文地球化学[M].北京:地质出版社,2014:20-24.

[21] 高惠璇.应用多元统计分析[M].北京:北京大学出版社,2005:183-192.

[22] ANDRES M, PAUL S. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram[J]. Applied Geochemistry, 2018, 97: 209-212.

[23] 闫志为,刘辉利,张志卫.温度及 CO₂ 对方解石、白云石溶解度影响特征分析[J].中国岩溶,2018,28(1):7-10.

[24] 郭钰颖,吕智超,王广才,等.峰峰矿区东部地下水水文地球化学模拟[J].煤田地质与勘探,2016,44(6):101-105.

(责任编辑 吴亮)