李艳娜,黄 磊,甘俊礼,等.准格尔煤田北部矿区含水层水文地球化学特征及水力联系辨识 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4538-4550.
Li Y N, Huang L,Gan J L, et al. Hydrogeochemical characteristics and hydraulic connection identification of aquifer in the northern mining area of Zhungeer Coalfield [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4538-4550.

准格尔煤田北部矿区含水层水文地球化学特征及水力联系辨识

李艳娜[1,2],黄 磊[1,2*],甘俊礼[3],韩 萱[1,2],许 江[1,2],杨梦凡[1,2],朱广岩[1,2] (1.内蒙古农业大学,旱区水工程生态环境全国重点实验室,黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理自治区协同创新中心,内蒙古 呼和浩特 010018；2.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古自治区生态水文与水资源高效利用重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018；3.准格尔旗水利事业发展中心,内蒙古 鄂尔多斯 010321)

摘要：为探究准格尔煤田北部矿区不同含水层的水化学特征及水力联系,揭示采煤活动下区域水循环规律,采集了矿区不同含水层的水样品共39组,利用Piper三线图、Gibbs图、离子比例分析、氯碱指数、因子分析以及连通性指数等方法分析了水化学特征、控制因素以及水力联系程度.结果表明,矿区的水体整体呈现弱碱性;第四系、石千峰组含水层主要水化学类型是HCO_3-Ca型水,主要受硅酸盐风化和矿业活动影响,存在正向的阳离子交换作用;志丹群含水层主要水化学类型是HCO_3-Ca型水,其次是HCO_3-Na、Cl-Ca型,其来源主要受硅酸盐岩矿物的风化溶解以及矿业和农业生活作用的影响,存在正向的阳离子交换作用;矿井水主要水化学类型是Cl-Ca型水,受硅酸盐和蒸发岩矿物的风化溶解以及矿业活动影响,存在反向阳离子交换作用.第四系含水层与志丹群、志丹群含水层与石千峰组的水力连通性指数为27%和20%,存在水力联系;石千峰组含水层与矿井水的水力连通性指数为39%,存在微弱的水力联系.

关键词：含水层；水化学特征；水岩作用；氢氧稳定同位素；水力联系
中图分类号：X523 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4538-13

Hydrogeochemical characteristics and hydraulic connection identification of aquifer in the northern mining area of Zhungeer Coalfield. LI Yan-na[1,2], HUANG Lei[1,2*],GAN Jun-li[3], HAN Xuan[1,2], XU Jiang[1,2], YANG Meng-fan[1,2], ZHU Guang-yan[1,2] (1.State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot 010018, China；2.Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Key Laboratory of Ecohydrology and High Efficient Utilization of Water Resources, Hohhot 010018, China；3.Zhungeer Banner Water Conservancy Development Center, Ordos 010321, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4538~4550

Abstract：To explore the hydrochemical characteristics and hydraulic connections of different aquifers in the northern mining area of the Zhungeer Coalfield, and to reveal the regional water circulation patterns under coal mining activities, a total of 39water samples were collected from different aquifers in the mining area. The hydrochemical characteristics, controlling factors, and hydraulic connection degrees were analyzed using methods such as Piper trilinear diagrams, Gibbs diagrams, ion ratio analysis, chloride-alkalinity index, factor analysis, and connectivity index. The results show that the water in the mining area is generally weakly alkaline. The main hydrochemical type of the Quaternary and Shiqianfeng Formation aquifers is HCO^--Ca type water, which is mainly influenced by silicate weathering and mining activities, with positive cation exchange occurring. The main hydrochemical type of the Zhidan Group aquifer is HCO_3-Ca type water, followed by HCO_3-Na and Cl-Ca types. Its sources are mainly influenced by the weathering dissolution of silicate rock minerals and the impacts of mining and agricultural activities, with positive cation exchange occurring. The main hydrochemical type of mine water is Cl-Ca type water, which is influenced by the weathering dissolution of silicate and evaporite minerals and mining activities, with reverse cation exchange occurring. The hydraulic connectivity indices between the Quaternary aquifer and the Zhidan Formation, and between the Zhidan Formation aquifer and the

收稿日期：2025-01-02
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3709900);国家自然科学基金资助项目(52369003);准格尔旗科技计划项目(2023YY-18,2023YY-19,2024YF-11);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2023LHMS04011);内蒙古自治区教育厅一流学科科研专项(YLXKZX-NND-010);内蒙古自治区科技领军人才团队项目(2022LJRC0007);内蒙古农业大学基本科研业务费专项资金资助项目(BR22-12-04)
* 责任作者, 副教授, lei_huang@yeah.net

Shiqianfeng Formation are 27% and 20%, respectively, indicating the presence of hydraulic connections. The hydraulic connectivity index between the Shiqianfeng Formation aquifer and the mine water is 39%, indicating a weak hydraulic connection.
Key words：aquifer；hydrochemical characteristics；hydroaction；hydrogen and oxygen stable isotopes；hydraulic connection

中国煤炭资源在国家能源结构中占据重要地位,其储量丰富,主要集中在北方和西部地区[1].然而,煤矿地质条件复杂,开采强度大,且煤层上部含隔水层组合类型复杂多样,煤矿水害一直是威胁矿井安全生产的主要灾害[2].水文地球化学在研究地下水系统和水源识别中起着非常重要的作用[3].因此开展水文地球化学和含水层水力联系研究[4-5],以实现对矿井突水灾害的快速、精确辨识,可以有效地防治突水事故[6-7].

地下水化学特性[8]与其周边环境息息相关,在一定程度上反映了含水层水资源的赋存条件.数理统计[9]、Piper 图[9]、离子比例关系[10]和水文地球化学模拟[11]等是判断水化学成因常用的研究方法.宗伟琴、向伟等人利用数理统计、同位素分析等方法,揭示了地下水水化学特征及补给的来源和方式[10,12].通过对水化学分析进而判断含水层水力联系,国内外研究学者大多使用 Stiff 图[13]、因子分析[14]、同位素[15]技术来判断含水层水力联系.肖乐乐、孙魁等人研究了矿区水文地球化学特征,阐释了含水层之间的水力联系[16-17].李双慧等[18]分析了准格尔煤田不同水体水化学特征、大气降水主要来源、地表水及地下水转化关系.但系统研究准格尔煤田水体水力联系的研究相对较少.

准格尔煤田位于华北板块之鄂尔多斯盆地东北边缘,是我国西部特大型综合性能源基地.本文以准格尔北部矿区为研究对象,对第四系、志丹群、石千峰组和矿井水不同含水层进行系统取样测试分析,结合多元统计分析、Piper 三线图、Gibbs 图和同位素等方法,深入研究了水化学特征对不同含水层之间的水力联系及水岩作用演化过程,对矿区水资源的开发利用和保护具有重要的意义.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

准格尔煤田 (109°10′00″~111°26′44″E, 39°14′19″~40°12′46″N)地处鄂尔多斯高原东北部,包括唐家会、不连沟、龙王沟等多个井田,覆盖面积约 1365km^2,平均海拔 1202.3m,地貌以高原侵蚀性丘陵为主,广布黄土,沟谷众多,各沟谷发育方向多斜交或垂直地层走向.黄河流经煤田东部,由北向南穿越,区域内的沟谷水流最终汇入黄河(图 1).该区域地处中温带大陆性季风区,冬季寒冷、夏季炎热,年均降水量约为 400mm,主要集中于 7~9 月.该地区的地下水补给主要来自大气降水和地表水下渗,排泄途径主要为以沿沟谷方向的径流排泄及泉水形式排出地表为主,次要排泄途径为蒸发和向深层地下水的渗透.

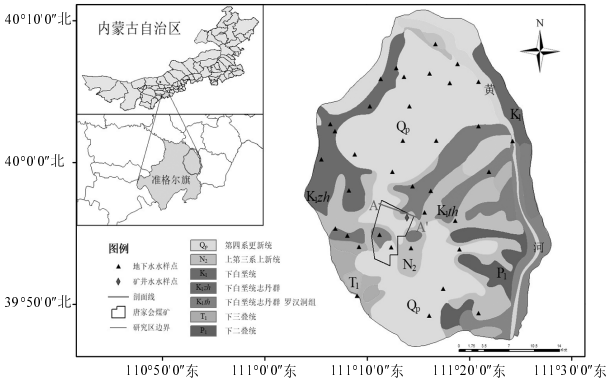


图 1　研究区地质及采样点分布示意

Fig.1　Distribution diagram of geology and sampling points in the study area

煤田地区地下水的水文特征受到大地构造、地貌、岩性和气候等多种因素的制约,承压水的分布受大地构造控制,潜水的水文地质特征则主要受地貌的影响,潜水和承压水的富集性直接受到岩石类型的控制.水文地质特征较为复杂:第四系(Q)松散层潜水含水层广泛分布,岩性以砂砾石、砂土等为主,并且砂砾石层是构成沟谷中松散层潜水的主要矿物;白垩系下统志丹群(K_1zh)孔隙、裂隙承压水含水层在井田内地表零星出露,主要分布在陡峭沟谷两侧与冲沟之中,主要由砂岩、砂砾岩及砂质泥岩构成,该层地下水的径流条件差.石炭系(C)~二叠系(P)碎屑岩类承压水含水层主要由砂质泥岩、砂岩、含砾砂岩构成,该层包括石千峰组、石盒子组等,这都是煤层的充水含水层(图 2).

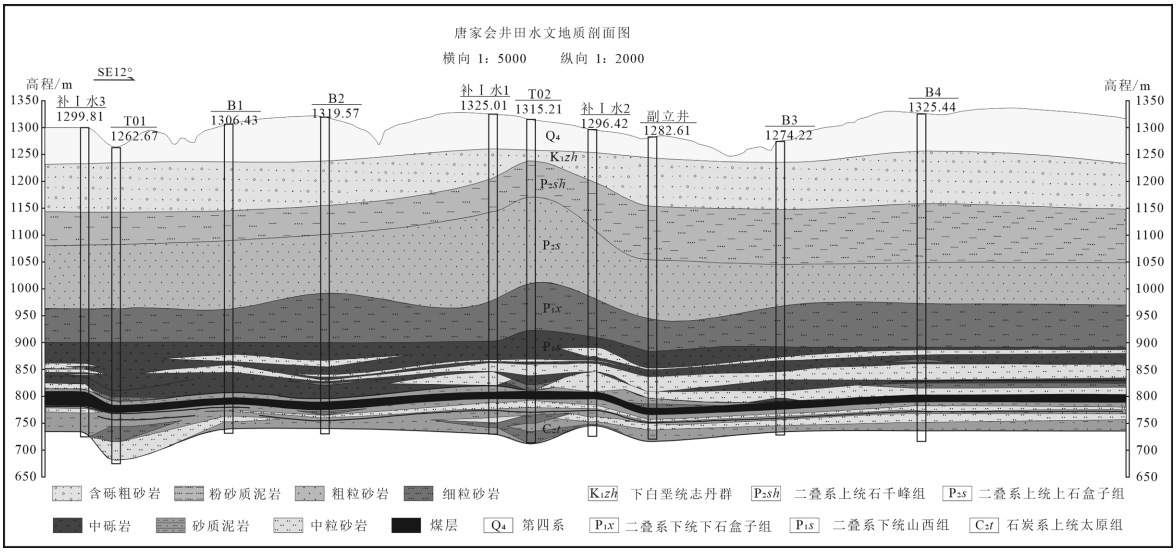


图 2 研究区 A−A'水文地质剖面

Fig.2 Hydrogeological profile of area A−A' in the study area

1.2 水样采集与测试方法

2024 年 4 月与 8 月在研究区采集地下水样 36 组(第四系潜水样点 12 个、志丹群裂隙承压水样点 20 个、石千峰组碎屑岩类承压水样点 4 个)以及矿井水.地下水水样均取自民用井和机井,采样点分布详见图 1.在采样前对经过预先灭菌的聚乙烯瓶,用水样进行 4~5 次的润洗处理.采样过程中,使用 0.45μm 滤膜过滤水样.最终将样本送至实验室,密封保存在 0~4°C 的环境中开展分析工作.

测试项目共有 15 项,包括一般水化学指标(pH 值、EC、TDS、K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、HCO_3^-、CO_3^{2-}、Cl^-、SO_4^{2-}、NO_3^-、F^-)和氢氧同位素(δD 和 $\delta^{18}O$).水样的 pH 值及 EC 使用便携式仪器现场测量;TDS 利用重量法测定;水样中 HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 含量使用酸碱指示剂滴定法测量;水样中其他阴离子采用离子色谱法测定;水样的一般阳离子采用火焰原子吸收分光光度法测定.所有水样数据均需通过电荷平衡检验,其误差在 5%以内.应用液态同位素分析仪(USA,LWIA−45−EP)测定 δD 和 $\delta^{18}O$,精度分别为±0.1‰和±0.3‰,测试结果以维也纳标准海洋水(V−SMOW)的千分偏差来表示[19].

1.3 数据处理

对水样测试数据进行数理统计分析;使用 ArcGis 绘制研究区概况图;使用 AutoCAD 绘制水文地质剖面图及柱状图;利用 Origin 软件绘制 Piper 三线图应用于分析地下水水化学类型,Gibbs 图和离子比值图以及氯碱指数分析地下水的化学组分来源,因子分析概化地下水化学成分的影响因素,绘制 δD−$\delta^{18}O$ 关系图识别地下水补给来源.

2 结果与分析

2.1 常规离子分析

2.1.1 常规离子浓度分布特征 对水样的各项指标的统计分析结果表明(图 3),丰水期地下水 pH 值在 7.35~8.94 之间,枯水期 pH 值在 7.49~8.98 之间,属弱碱性水.丰水期第四系潜水水样 pH 值为 7.50~8.94,TDS 含量处于 196~1484mg/L 之间;枯水期 pH 值为 7.71~8.83,TDS 含量处于 94.8~1130mg/L 之间.丰水期志丹群裂隙承压水样 pH 值为 7.35~8.19,TDS 含量处于 63.0~791mg/L 之间;枯水期 pH 值为 7.90~8.98,TDS 含量处于 91.7~532mg/L 之间.丰水期石千峰组碎屑岩承压水样 pH 值为 7.63~7.99,TDS 含量处于 181~462mg/L 之间;枯水期 pH 值为 7.49~8.80,TDS 含量处于 150~487mg/L 之间.离子质量浓度排序为:阳离子 $Ca^{2+}>Na^+>Mg^{2+}>K^+$,阴离子 $HCO_3^->Cl^->SO_4^{2-}>NO_3^->F^-$.矿井水水样 pH 值为 8.34~8.57,TDS 含量处于 1082~1173mg/L 之间;离子质量浓度排序为:阳离子 $Na^+>Ca^{2+}>K^+>Mg^{2+}$,阴离子 $Cl^->HCO_3^->SO_4^{2-}>NO_3^->F^-$.

分析结果表明,矿区不同含水层之间水化学组分含量较为稳定.水体中主要阳离子为 Ca^{2+},主要阴离子为 HCO_3^- 和 Cl^-.矿井水中由于溶解性固体物质

的存在导致 TDS 较高,说明矿井水可能受水文地质条件、人工开采等因素综合影响[20].各个指标的变异系数中,阳离子中变异系数 Na^+最大,其空间分布差异性大;地下水中阴离子变异系数最大的是 Cl^-,说明其在空间上浓度变化幅度最大,受到环境因素影响明显[21],可能是岩盐溶解或者地质构造中的断层和裂隙分布导致的,该地区岩石类型多样,包括蒸发岩和硅酸盐岩等,这些岩石显著影响 Na^+和 Cl^-的分布,蒸发岩可能释放较高浓度的 Na^+和 Cl^-,而硅酸盐岩则可能释放较少.

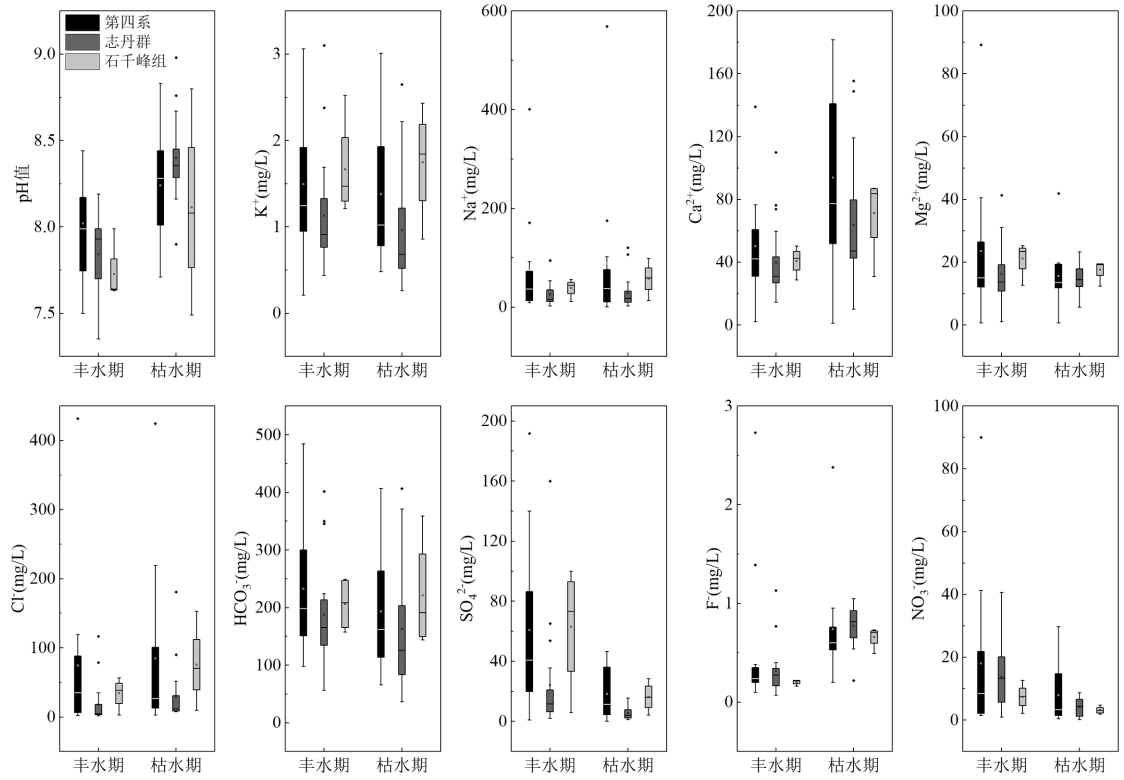


图 3　矿区不同含水层各指标统计结果

Fig.3　Statistical results of each index of different aquifers in the mining area

表 1　矿井水的各指标统计结果

Table 1　Statistical results of various indicators of mine water

项目	pH 值	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	F^-	NO_3^-
平均值	8.45	1114.67	16.02	169.46	164.33	15.18	449.03	58.73	27.45	141.53	0.81	7.56
最大值	8.57	1173.00	16.56	171.87	190.58	15.29	451.63	65.20	41.17	161.46	1.22	8.07
最小值	8.34	1082.00	15.47	166.37	142.15	15.12	444.19	53.10	17.65	113.62	0.02	6.54
标准差	0.09	41.35	0.44	2.29	19.98	0.08	3.43	4.97	10.00	20.33	0.56	0.72
变异系数	0.01	0.04	0.03	0.01	0.12	0.00	0.01	0.08	0.36	0.14	0.69	0.10

注: 除pH值和变异系数无量纲,其他变量单位均为mg/L.

2.1.2　水化学类型　通过水化学分类可以进一步反映区域地下水水化学特征[22].Piper 三线图可以揭示水化学类型[23],了解区域水文地球化学过程;还可以定性判别不同水体间各组分的水力联系.运用 Piper 三线图对研究区水化学特征分析发现(图 4),地下水的主要阳离子为 Ca^{2+},主要阴离子为 HCO_3^-.

研究区不同含水层水样的 Piper 三线图(图 4)说明不同含水层存在水力联系.地下水大都集中在Ⅰ区,这是由于大量的地表水补给地下水,使地下水表现出补给源的水化学特征.仅矿井水有所偏离,集中在Ⅴ区,推断原因为埋深较大,径流时间较长,水化学类型呈现混合型,依循地下水径流特征,因其蒸发浓缩作用加剧,造成 Cl^-成为地下水中优势阴离子[23].所以得出,第四系潜水主要水化学类型是 HCO_3−Ca

型水;志丹群承压水主要水化学类型是 HCO_3−Ca 型水,其次是 HCO_3−Na、Cl−Ca 型;石千峰组承压水主要水化学类型是 HCO_3−Ca 型水;矿井水主要水化学类型是 Cl−Ca 型水.由此可知,志丹群承压含水层与上部潜水含水层和下部承压含水层有一定的水力联系.

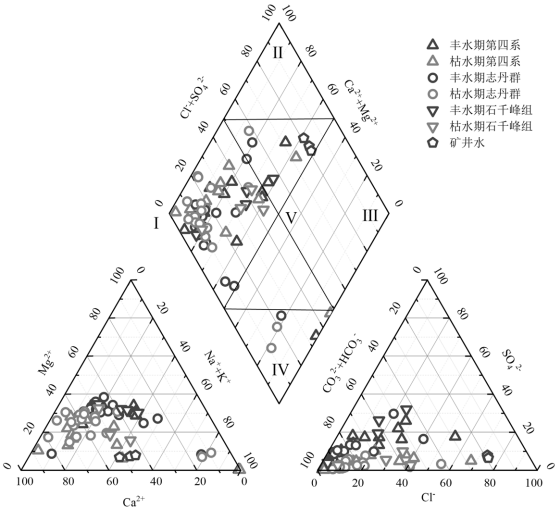


图 4 研究区不同含水层 Piper 三线图

Fig.4 Three−line plot of Piper for different aquifers in the study area

2.2 水化学特征形成机制

2.2.1 水岩相互作用 Gibbs[24]根据地下水中 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$、$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$和 TDS 的比例关系,将地下水化学成分的主要影响作用分为蒸发浓缩、岩石风化以及大气降水[25].在地下水流动过程中,水体经历了蒸发浓缩作用和水−岩相互作用[26],其中水化学成分由蒸发成因的含盐矿物的溶解决定[27].此外,地下水可能与不同地质层次的水体(例如不同层位的潜水和承压水)发生交换或混合,而 Gibbs 图能够有效地分析这些不同水源之间的水力联系,从而揭示地下水的来源及其化学演化历程.研究区地下水主要受岩石风化作用影响(图 5),主要属于地下水补给区,地层岩石颗粒大且地下水流速快,径流条件优越,主要发生溶滤作用.部分水样点分布在三种类型以外,说明还受到其他因素的控制,如阳离子交替吸附作用[17].

2.2.2 矿物溶解作用 地下水与含水岩层之间进行着长期水文地球化学反应,在这过程中离子比例系数法揭示着地下水化学成分的来源及演化过程[28].水体中的 Ca^{2+}和 Mg^{2+}来源为碳酸岩、蒸发岩和硅酸盐矿物的溶解作用,Cl^-和 SO_4^{2-}是蒸发岩盐的溶解作用,碳酸盐溶解是 HCO_3^-的主要来源,Na^+和 K^+来源于蒸发岩和硅酸盐的风化作用[29].

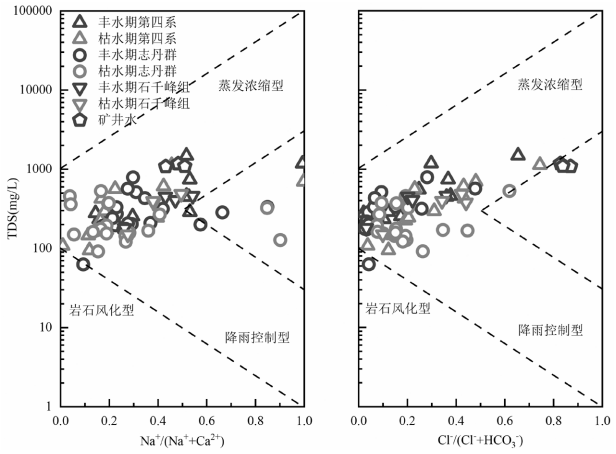


图 5 矿区不同含水层 Gibbs 图

Fig.5 Gibbs diagram of different aquifers in the mining areas

端元图可以定性判别研究区内水体中主要离子来源于何种矿物的溶解[30].从图 6 可知,丰水期第四系水样点集中分布于硅酸盐岩端元附近,枯水期时则分布较分散,但主要在硅酸盐岩端元附近;丰水期志丹群水样点较集中,枯水期较分散,总体志丹群水样点主要落在硅酸盐岩端元附近,只有部分水样点靠近碳酸盐岩和蒸发盐岩端元,表明其水化学成分来源较复杂,主要来源于硅酸盐岩矿物的风化溶解,部分还源于碳酸盐岩和蒸发盐岩矿物的风化溶解;石千峰组水样点主要分布在硅酸盐岩端元附近,表明其主要受硅酸盐岩矿物溶解作用的影响;矿井水受硅酸盐水解和蒸发岩溶解作用控制.丰水期较枯水期水样点分布更集中,因为丰水期地下水的流速较大,水体混合较为充分,不同采样点的水体物理化学性质差异较小,水样点在端元图上相似性高,呈现集中分布[31].

可以利用 $N(Na^+)/N(Cl^-)$离子比例关系来研究 Na^+和 Cl^-来源[32].一般情况下,地下水中若仅进行岩盐的溶解,则 Na^+/Cl^-的值等于 1;若 Na^+/Cl^-的值大于 1,在地下水中 Na^+来源于硅酸盐的风化溶解.从图 5 可知,不同水体的水样点分布于岩盐溶解线的左右两侧区域,说明 Na^+来源复杂,除了岩盐溶解与硅酸盐的溶解外,阳离子交换作用也有一定的贡献[33].

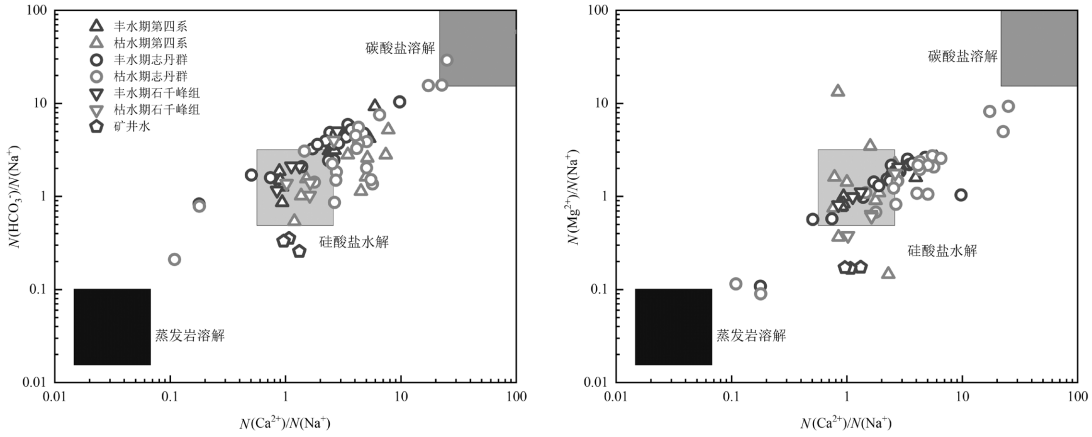


图 6　研究区不同水体 Ca^{2+}/Na^{+}和 HCO_3^{-}/Na^{+}、Ca^{2+}/Na^{+}和 Mg^{2+}/Na^{+}之间关系

Fig.6　Relationship betweenCa^{2+}/Na^{+} and HCO_3^{-}/Na^{+}、Ca^{2+}/Na^{+} and Mg^{2+}/Na^{+} in different waters in the study area

N 为毫克当量浓度

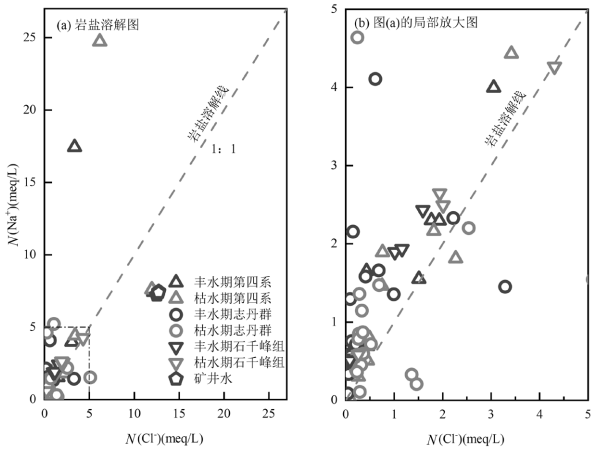


图 7　研究区不同水体 $N(Cl^{-})$与 $N(Na^{+})$的关系

Fig.7　Relationship between $N(Cl^{-})$ and $N(Na^{+})$ in different water bodies in the study area

为进一步确定水文地球化学过程中主要离子的来源,可采用$(Ca^{2+}+Mg^{2+})$和$(SO_4^{2-}+HCO_3^{-})$毫克当量浓度的比值关系来分析[34].图 8(a)可知,大部分水样点分布在 1:1 线以下的位置,且均远离该线,说明研究区水体中的 Ca^{2+}和 Mg^{2+}浓度明显高于 HCO_3^{-}和 SO_4^{2-},表明水化学形成作用主要是以碳酸盐类溶解为主[35],除 HCO_3^{-}和 SO_4^{2-}之外还有其他阴离子,并还会发生正向的阳离子交换作用,水岩作用更为复杂[36].丰水期水样点比枯水期更接近 1:1,表明丰水期地下水的 Ca^{2-}和 Mg^{2-}浓度相对降低,HCO_3^{-}和 SO_4^{2-}浓度相对增加.这可能是因为丰水期降水增加,地表水与地下水的混合加强,导致离子浓度分布更加均匀[37].部分志丹群含水层和石千峰组比值更接近 1:1,说明水化学成因相似,存在碳酸盐和硅酸盐溶解,揭示了该区地下水水文地球化学演化过程的离子来源[35].

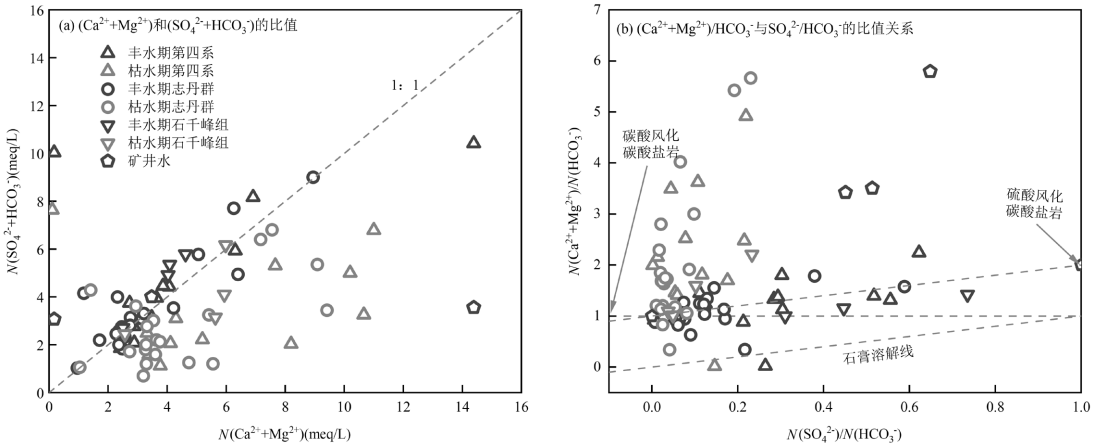


图 8　研究区不同水体离子关系

Fig.8　Ionic relationship diagram of different water bodies in the study area

利用$(Ca^{2+}+Mg^{2+})/HCO_3^{-}$与 SO_4^{2-}/HCO_3^{-}的比值关系可用来判定碳酸盐及蒸发岩溶解对地下水

组成的影响[38].图 8(b)可以看出,丰水期绝大部分样点落在石膏和碳酸溶解碳酸盐岩线的中间区域,推测碳酸对碳酸盐岩的溶解及石膏溶解是地下水中 Ca^{2+}和 Mg^{2+}的主要来源.而枯水期水样点更靠近碳酸盐岩风化端且远离石膏溶解线,说明地下水中的 Ca^{2+}和 Mg^{2+}主要来源于碳酸对碳酸盐岩的溶解[36,39].

第四系含水层主要受硅酸盐风化作用影响;志丹群和石千峰组含水层受碳酸盐和硅酸盐风化影响较大,而蒸发盐岩溶解占次要作用;矿井水主要受硅酸盐和蒸发盐风化作用影响,由此可以看出,碳酸盐和硅酸盐风化对地下水水化学特征的影响最大[40].根据以上分析可知:志丹群与石千峰组具有一定的水力联系,地下水含水层之间可能存在水力联系.

2.2.3 阳离子交换作用 除了矿物溶解沉降和风化作用外,阳离子交换作用对水化学成分也有影响[4].$N(K^++Na^+-Cl^-)$和 $N(Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}-HCO_3^-)$的关系常用来确定 Na^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}之间的交替吸附作用对水化学离子组分影响,即研究区地下水中是否发生阳离子交换作用,如果发生了两者的比值应该是斜率为−1 的直线[30].图 9(a)中部分水样位于−1 比值线附近,说明研究区地下水中存在阳离子交替吸附作用.

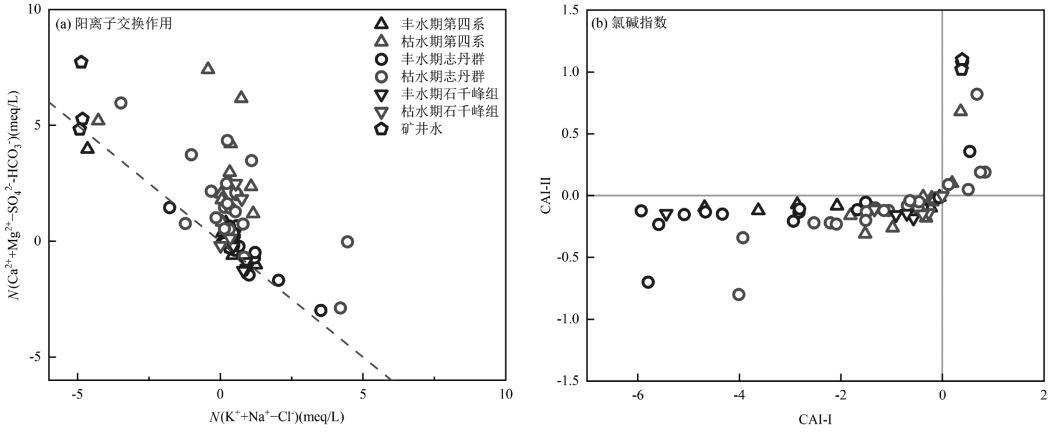


图 9 研究区水化学阳离子交替吸附作用以及氯碱指数

Fig.9 alternating adsorption of hydrochemical cations and chlor−alkali index in the study area

Schoeller 提出了 2 个指标(CAI−Ⅰ和 CAI−Ⅱ)来判断地下水中发生了何种阳离子交换作用[41].在发生正向的阳离子交换作用时,氯碱指数(CAI−Ⅰ与 CAI−Ⅱ)均小于 0[42-43],则表示为地下水中 Ca^{2+}和 Mg^{2+}取代水中的 Na^+和 K^+,反之亦然.而其绝对值越大,表明地下水中发生阳离子交替吸附作用就越强[44-45].以毫克当量为单位绘制氯碱指数图,如图 9(b)所示,大部分的水样点氯碱指数为负值,说明了研究区水体中主要发生了正向的阳离子交换作用,正向的阳离子交换作用使得 Na^+和 K^+置换水体中的 Ca^{2+}和 Mg^{2+}而含量增加[46].其中,第四系、志丹群和石千峰组水样氯碱指数大部分在 0 以下,表明阳离子交换作用中正向阳离子交换作用占主导[40];矿井水样点氯碱指数均在 0 以上,强烈的反向阳离子交换作用使 Ca^{2+}和 Mg^{2+}置换水体中的 Na^+和 K^+而含量增加.

2.2.4 人类活动影响 研究区内矿业活动与农业生产活动频繁,Cl^-、NO_3^-和 SO_4^{2-}通常是农业活动、生活污水和矿业活动过程中的主要特征因子,SO_4^{2-}为矿业活动的特征因子,而农业生产的进行与生活废水的排放导致环境中 Cl^-、Na^+及 NO_3^-等相关离子的富集及活跃[29].因此,采用 $N(NO_3^-)/N(Na^+)$与 $N(Cl^-)/N(Na^+)$的关系可以反映出水环境中硝酸盐组分受人类活动的影响程度[30].如图 10(a),研究区范围内大部分水样点分布在硅酸盐与岩盐风化溶解区域,少部分地下水样点向农业活动端元移动,由此反应了一定程度上研究区水样品主要受硅酸盐作用,与前文端元图得到的结论一致;而受到农业活动的影响很小.此外,矿山开采强度越大,地下水中 $N(SO_4^{2-})/N(Ca^{2+})$比值越高;农田和生活废水越多,地下水中的 $N(NO_3^-)/N(Ca^{2+})$比值就越高[44].由图 10(b)可知,丰水期水样点受矿业活动和农业活动的影响大于枯水期,第四系、石千峰组和矿井水样点显示出较高的

$N(SO_4^{2-})/N(Ca^{2+})$值和极低的 $N(NO_3^-)/N(Ca^{2+})$值,表明受矿业活动影响显著[30],受农业活动和生活污水影响较小.而志丹群同时受采矿、农田和生活废水的影响[45].

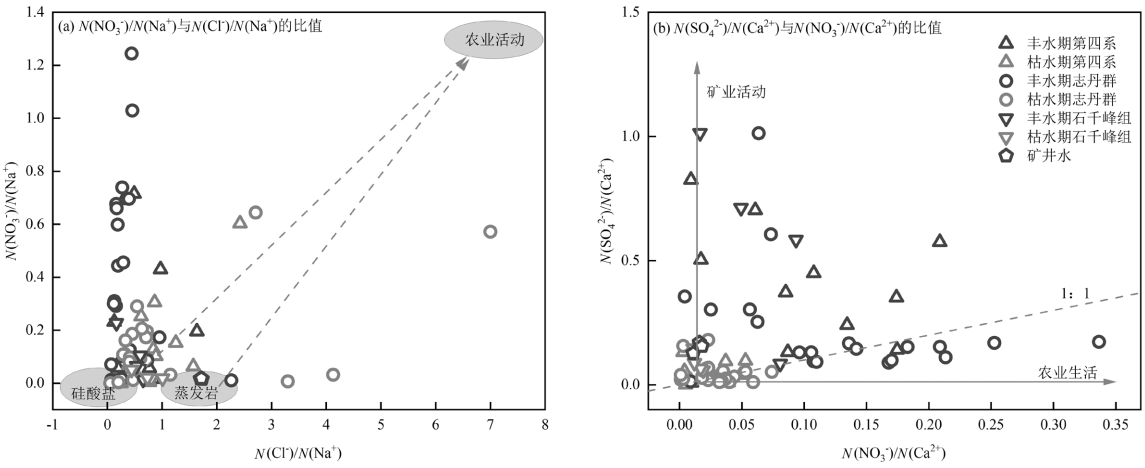


图 10　不同水体 $N(NO_3^-)/N(Na^+)$与 $N(Cl^-)/N(Na^+)$和 $N(SO_4^{2-})/N(Ca^{2+})$与 $N(NO_3^-)/N(Ca^{2+})$关系

Fig.10　Relationship between $N(NO_3^-)/N(Na^+)$ vs $N(Cl^-)/N(Na^+)$ and $N(SO_4^{2-})/N(Ca^{2+})$ vs $N(NO_3^-)/N(Ca^{2+})$ in different water bodies

综合上述得出志丹群和石千峰组含水层受硅酸盐和碳酸盐风化作用以及矿业、农业活动影响,两者含水层存在水力联系.

2.3　因子分析

通过因子分析手段可以用较少的因子概化地下水化学成分的影响因素,进而分析其成因特征.两个无水力联系的含水层,其成因不同.由此可以通过因子分析手段,从区域上分析各含水层之间的水力联系[47].

对地下水中 13 种水化学指标进行因子分析,最终提取 4 个公共因子,累计方差贡献率达 83.27%,KMO 值为 0.656,大于 0.50 可以进行因子分析[48].通过计算,旋转后的载荷矩阵见表 2,其中,第一主成分(PC1)中 EC、TDS、Cl^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}和 Na^+方差贡献率为 42.12%,与端元图结合分析,推测第一主成分与硅酸盐岩和碳酸盐岩矿物风化溶解作用有重要的关系;第二主成分(PC2)中 CO_3^{2-}、pH 值和 F^-方差贡献率为 23.08%,表明与碳酸盐岩矿物的溶解以及氟化物的来源等多种因素有关[49];第三主成分(PC3)中 K^+和 HCO_3^-方差贡献率为 11.95%,第四主成分(PC4)中 NO_3^-方差贡献率为 6.13%,其可能与人类活动的溶解有关.

根据各含水层样品的因子得分分布图可以看出(图 11),矿井水在 PC1 的得分较小在 6 左右,而在 PC2 的得分在 3 左右.第四系在 PC1 与 PC2 的得分分布区间相对较大,分值−3~11 和−5~7;志丹群在 PC1 与 PC2 的得分都较小,且分布区间比较集中,基本在−4~4;石千峰组在 PC1 与 PC2 的得分都较小,且分布区间比较集中,基本在−2~2;可以观察到这 3 个含水层的水样点大多数集中在同一区域,表明这些含水层的水化学成因具有一定的相似性.矿井水水样点得分与绝大多数水样点偏离较大,水化学成因存在较大差异,水力联系较弱.

表 2　因子载荷与方差贡献率

Table 2　Factor load and variance contribution rate

指标	PC1	PC2	PC3	PC4
EC	0.982	0.106	0.006	−0.016
TDS	0.982	0.109	0.007	−0.018
Cl^-	0.874	0.245	−0.328	−0.011
SO_4^{2-}	0.8	−0.25	0.214	0.181
Ca^{2+}	0.628	−0.043	−0.488	−0.25
Mg^{2+}	0.62	−0.607	0.069	0.181
Na^+	0.607	0.59	0.394	0.015
CO_3^{2-}	0.018	0.797	−0.044	0.348
pH 值	−0.233	0.778	−0.102	0.21
F^-	0.157	0.723	0.456	−0.015
K^+	0.58	0.313	−0.627	−0.111
HCO_3^-	0.603	−0.12	0.622	−0.38
NO_3^-	0.465	−0.509	0.047	0.588
特征值	5.48	3.00	1.55	0.80
方差贡献率(%)	42.12	23.08	11.95	6.13
累积方差贡献率(%)	42.12	65.19	77.15	83.27

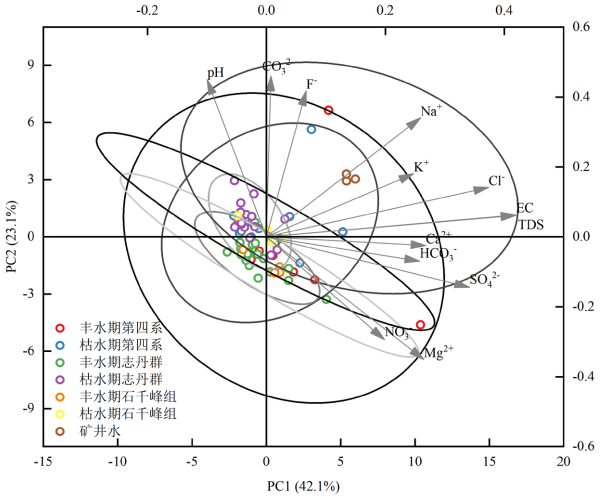


图 11 不同含水层主成分因子得分及变量载荷分布

Fig.11 Principal component factor scores and variable load distribution of different aquifers

2.4 氢氧同位素特征分析

氢氧稳定同位素通常是用来识别地下水补给来源[50],判断水循环转化过程及不同含水层间水力联系[51]的重要参数.地下水不同含水层氢氧稳定同位素分布特征具有一定分区性(图 12).丰水期地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别在−85.03‰~−22.75‰和−13.64‰~−0.06‰之间,枯水期地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 分别在−84.83‰~−51.07‰和−12.10‰~−7.67‰之间;两者的氘盈余(d)值范围分别为−22.26‰~35.82‰和3.46‰~30.93‰,平均值分别为 5.73‰和 13.00‰.利用实测数据建立了研究区大气降水线:(LMWL) $\delta D=6.43\delta^{18}O-1.25$ (R^2=0.99).图 12 显示了不同含水层的同位素数据,并且其中还包含了四条线:全球降水线(GMWL)、当地降水线(LMWL)、平水期与枯水期地下水线(GWL)[52-53].LMWL 的斜率为 6.43,比 GMWL 的斜率小,这表明当地大气降水历经较强的蒸发作用[54].在海拔和纬度较高的地区,由于气压和温度的变化,水汽中的 $\delta^{18}O$ 更容易富集,其含量也会更高[55].另外,可能会发生二次蒸发作用,这种蒸发作用会进一步导致研究区降水中的 $\delta^{18}O$ 含量更富集.综合起来,海拔和纬度相对较高的地区会出现降水线斜率偏低的情况[56].

地下水的氢氧同位素关系在丰水期为 $\delta D=5.12\delta^{18}O-17.28$,枯水期为 $\delta D=4.31\delta^{18}O-23.14$,其斜率和截距均低于当地降水线,说明地下水的变化受到了降水补给的影响,且在不同水期变化较小,说明其补给过程相对稳定.与全球降水线(GMWL)和中国大陆降水线对比表明,研究区地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布在降水线两侧,说明其主要受当地大气降水的直接补给.

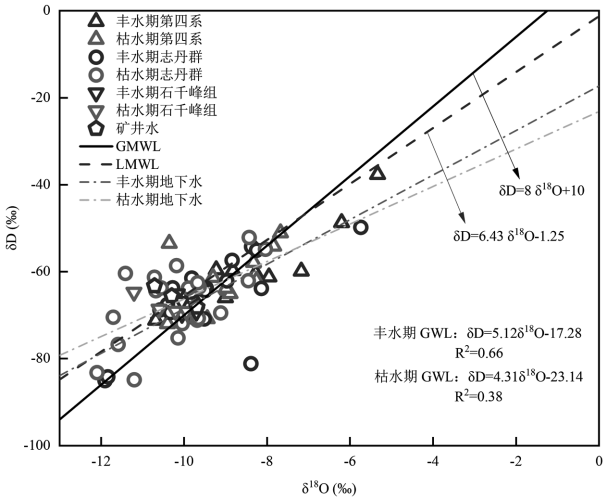


图 12 不同水体 δD−$\delta^{18}O$ 关系

Fig.12 The δD−$\delta^{18}O$ relationship of different water bodies

氘盈余(d-excess)参数是衡量综合环境中大气降水蒸发与凝结平衡程度的指标,蒸发作用越强烈,氘盈余值会向负值偏移[57].对比地下水与地表水 d-excess 均值,二者均显著偏离了全球大气降水平均值(10‰)[58],说明其在降水过程中发生了二次蒸发作用,而地表水的氘盈余值相对更偏负值,表明地表水受蒸发作用影响最大.

地下水含水层水样的 δD、$\delta^{18}O$ 分布范围相互重叠,说明含水层间具有一定的水力联系,部分水样的落点接近重合,说明两者间可能存在垂向补给关系,进一步证明了地下水含水层之间存在水力联系.根据不同含水层氢氧稳定同位素测试数据来看,第四系和志丹群含水层的同位素值接近,石千峰组含水层和矿井水的同位素值接近,说明第四系和志丹群、石千峰组含水层和矿井水存在水力联系.

2.5 多个含水层的连通性

利用 Piper 三线图和 Gibbs 图等方法,对 4 种水体之间的关系进行了定性分析,但其水力联系尚需进一步定量研究.Cl^-在地下水中是一种非常稳定的离子,它的含量仅受控于岩层[59].因此,各水体之间水力联系由下式判断[60]:

$$K = 0.5 \times \frac{W_{Cl^-_1} - W_{Cl^-_2}}{W_{Cl^-_1} + W_{Cl^-_2}} \quad (1)$$

K<20%,表示 2 种水体的水力联系高;20%<K<40%,表示 2 种水体的水力联系中等;K>40%,代表 2 种水体无水力联系.由水样数据计算得到各水体水力联系见表 3.第四系含水层、志丹群和石千峰组之间水力联系程度均为中等;石千峰组与矿井水存在微弱的水力联系.

表 3　研究区不同含水层水力联系程度计算

Table 3　Calculation of the hydraulic connection degree of different aquifers in the study area

项目	平均氯浓度(mg/L)	连通性指数(%)	连通性分类
第四系	79.50		
志丹群	23.22	27	中等
石千峰组	54.83	20	中等
矿井水	449.03	39	微弱

3　讨论

3.1　含水层之间的水力联系

以上研究表明,研究区各个含水层之间具有一定的水力连通性,然而,这种联系的强度需要进一步讨论.

根据调查[61]含水系统:第四系(Q)松散层潜水含水层多为透水不含水层,只有沟谷中的冲洪积砂砾石层构成松散层潜水的主要含水层,富水性弱-中等.该区地下水的补给来源主要是大气降水,其次是区外地下水的侧向径流补给,排泄方式有向深部承压水的越流排泄等[18].表明地表水与第四系含水层之间有转化关系,存在水力联系.

志丹群(K_1zh)孔裂隙承压水含水层富水性较弱,径流条件差,为煤层的间接充水含水层.与第四系含水层夹第三系(N_2)半胶结岩层隔水层,其透水性微弱,且井田内分布不连续,只能起局部隔水作用,隔水性能相对较差.石千峰组(P_2sh)含水层的富水性弱,为裂隙~孔隙承压水,为煤层的间接充水含水层.承压水以侧向径流的形式排出区外;在沟谷和洼地以泉的形式排出地表、形成地表径流;在局部地下水埋藏浅的地区以蒸发形式排泄,但排泄量微乎其微[62].说明志丹群含水层与上部潜水含水层有一定水力联系,与下部承压水含水层的水力联系较小.

矿井水位于太原组(C_2t^2)碎屑岩类孔裂隙含水层[63],该含水层分上下两段,上段全煤田分布,以砂岩为主.地表见有裂隙泉出露,富水性差.与石千峰组之间存在(P_1x)不透水隔水层,岩性以页岩、泥岩为主,包括煤层本身,形成含、隔水层相间的水文地质结构,使得各含水层彼此联系甚微,各具水头.该隔水层厚度大,沉积稳定,为较好隔水层.

因此,地表水、第四系含水层之间有转化关系,存在水力联系;第四系含水层与志丹群含水层存在水力联系;志丹群含水层与石千峰组含水层水力联系较小;石千峰组含水层与矿井水存在微弱的水力联系.与上述定量计算得出结论一致.

3.2　多种方法对比分析

3.2.1　通过分析不同含水层水体的来源及演化过程,对比不同水体样品的化学成分,可以揭示水力联系及水体混合作用等方面的信息　但难以直接反映水的物理联系,无法直接评估地下水与地表水之间的水力传导过程或水力联系的具体路径.并且水化学数据受季节变化、水温、降水量等多种因素影响.

3.2.2　因子分析通过提取水化学的主成分,将多个变量合并为少数几个因子,从而揭示水体间潜在的水力联系　该方法在数据处理上简洁明了,特别适用于大规模水样数据的分析,并在研究水化学特征的综合影响因素时具有重要价值.然而,因子分析是一种统计方法,结果依赖于数据的质量和完整性,若数据采集不充分或存在较大误差,可能会影响分析结果.此外,因子分析主要关注水体化学特征之间的相关性,不能直接揭示水体之间的物理水力联系,因此需要与其他方法结合,以更好地揭示水力联系.

3.2.3　通过分析水体中的氢氧同位素比值,可以准确地判断水源是否存在混合　它具有较高的时间稳定性,在不同水体间的分布规律不同,有助于揭示水体之间的水力联系,尤其在复杂的水文地质环境中.但受蒸发、降水等环境变化的影响较大,可能导致同位素比值的变化.

3.2.4　Cl^-在水中的浓度受地下水和地表水水力联系的影响较大　Cl^-作为一个重要的标志性元素,能够反映地下水与地表水的相互渗透与混合过程,有助于判断水体是否存在受盐水、矿化水等影响,能够识别水源之间的水力联系,并推断水的流动路径.然而,Cl^-分析需要依赖于精确的采样和检测方法,尽管它在各种水体中广泛存在,但仅依赖其浓度变化可

能不足以明确水力联系,尤其是在水体之间氯离子浓度差异较小时.

4 结论

4.1 矿区的水体整体呈现弱碱性;地下水中的优势离子均是 Ca^{2+}、HCO_3^-,第四系、石千峰组含水层主要水化学类型是 HCO_3-Ca 型水;志丹群含水层主要水化学类型是 HCO_3-Ca 型水,其次是 HCO_3-Na、Cl-Ca 型;矿井水主要水化学类型是 Cl-Ca 型水.

4.2 研究区水体中优势阳离子 Ca^{2+}主要来源于碳酸盐岩的溶解,阴离子受硅酸盐水解影响较大.其中第四系和石千峰组含水层主要受硅酸盐风化和矿业活动作用,存在正向的阳离子交换作用;志丹群含水层来源较复杂,主要受硅酸盐岩矿物的风化溶解,还来源于碳酸盐岩和蒸发盐岩,同时受矿业和农业生活作用的影响,存在正向的阳离子交换作用;矿井水受硅酸盐水解和蒸发岩溶解作用以及矿业活动影响,存在反向阳离子交换作用.

4.3 通过常规离子、微量元素与氘氧同位素等多种分析手段分析了复杂地质条件下井田不同含水层之间的水力联系:第四系与志丹群含水层、志丹群含水层与石千峰组之间都存在中等水力联系;石千峰组含水层与矿井水存在微弱的水力联系.

参考文献:

[1] 朱永楠,苏 健,王建华,等.西部地区油气资源开发与水资源协同发展模式探索 [J]. 中国工程科学, 2021,23(3):129-134.
Zhu Y N, Su J, Wang J H, et al. Coordinated de-velopment mode of oil and gas resources and water resources inWestern China [J]. Strategic Study of CAE, 2021,23(3):129-134.

[2] 武 强,赵苏启,孙文洁,等.中国煤矿水文地质类型划分与特征分析 [J]. 煤炭学报, 2013,38(6):901-905.
Wu Q, Zhao S Q, Sun W J, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China [J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(6):901-905.

[3] Huang X J, Wang G C, Liang X Y, et al. Hydro chemical and stable isotope (δD and δ18O) characteristics of groundwater and hydro g e o chemical processes in the Ningtiao ta coalfield, Northwest China [J]. Mine Water and the Environment, 2017,37(1):119-136.

[4] 刘凯旋,刘启蒙,柴辉婵,等.孙疃矿区地下水化学特征及其控制因素研究 [J]. 煤炭工程, 2019,51(4):74-79.
Liu K X, Liu Q M, Chai H C, et al. Chemical characteristics and control factors of groundwater in Suntuan coal mine [J]. Coal Engineering, 2019,51(4):74-79.

[5] 张成行,郑洁铭,徐智敏,等.基于水化学特征的顺和煤矿太灰水动力条件分析 [J]. 煤炭工程, 2020,52(6):126-129.
Zhang C H, Zheng J M, Xu Z M, et al. Hydrodynamic conditions analysis of Taiyuan Formation limestone aquifer in Shunhe Coal Mine based on hydrochemical characteristics [J]. Coal Engineering, 2020, 52(6):126-129.

[6] Lin Y, Ren H X, Wu P C. The evolution of hydrogeochemical characteristics of a typical piedmont karst groundwater system in a coal-mining area, Northern China [J]. Environmental earth sciences, 2019,78(18):557.1-557.17.

[7] 薛建坤.基于同位素方法的矿井突水水源定量分析研究 [J]. 煤炭工程, 2019,51(12):150-153.
Xue J K. Quantitative analysis of mine water inrush using isotope method [J]. Coal Engineering, 2019,51(12):150-153.

[8] 汪子涛,刘启蒙,刘 瑜.淮南煤田地下水水化学空间分布特征及其形成作用[J].煤田地质与勘探, 2019,47(5):40-47.
Wang Z T, Liu Q M, Liu Y. Spatial distribution and formation of groundwater hydrochemistry in Huainan coalfield [J]. Coal Geology&Exploration, 2019,47(5):40-47.

[9] 蒙 琪.石羊河流域中下游浅层地下水水化学特征及其成因 [J]. 干旱区资源与环境, 2021,35(3):80-87.
Meng Q. Hydrochemical characteristics and controlling factors of the shallow groundwater in the midstream and downstream areas of Shiyang river basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(3):80-87.

[10] 宗伟琴,赵宝峰.鸳鸯湖矿区地下水化学特征与成因分析 [J]. 煤矿安全, 2023,54(8):161-167.
Zong W Q, Zhao B F. Groundwater chemical characteristics and forming reasons of Yuanyanghu Mining Area [J]. Safety in Coal Mines, 2023,54(8):161-167.

[11] 马铭言,董少刚,张文琦,等.乌梁素海区域地下水水化学特征及成因分析 [J]. 地球与环境, 2021,49(5):472-479.
Ma M Y, Dong S G, Zhang W Q, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of groundwater in Wuliangsuhai Lake area [J]. Earth and Environment, 2021,49(5):474-479.

[12] 向 伟,刘 鑫,司炳成.黄土高原区域尺度地下水稳定同位素特征及其指示意义[J].环境科学,2024,45(9):5290-5297.
Xiang W, Liu X, Si B C, et al. Characteristics and indicative significance of groundwater stable isotopes in the Loess Plateau at the regional scale [J]. Environmental Science, 2024,45(9):5290-5297.

[13] Hou, Z M, Huang L, Zhang S W, et al. Identification of groundwater hydrogeochemistry and the hydraulic connections of aquifers in a complex coal mine [J]. Journal of Hydrology, 2024,628.

[14] 刘可暄,华正实,刘慧博,等.密云水库流域汛期水化学特征分析评价及其驱动力探析 [J/OL]. 环境科学, 1-16[2024-08-02].
Liu K X, Hua Z S, Liu H B, et al. Analysis and evaluation of hydrochemical characteristics and its driving force in Miyun Reservoir basin [J/OL]. Environmental Science, 1-16 [2024-08-02].

[15] 刘 基.呼吉尔特矿区深埋含水层水文地球化学特征及其指示意义 [J]. 干旱区资源与环境, 2021,35(1):154-159.
Liu J. Hydrogeochemical characteristics of deep buried aquifer in Hujierte mining area and its implications [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35 (1): 154-159.

[16] 肖乐乐,胡嵩岩,牛 超,等.彬长矿区地下水化学特征及突(涌)水源判别 [J]. 西安科技大学学报, 2022,42(4):724-732.
Xiao L L, Hu S Y, Niu C, et al. Chemical characteristics of groundwater and identification of water inrush sources in Binchang mining area [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022,42(4):724-732.

[17] 孙 魁,范立民,马万超,等.鄂尔多斯盆地北部直罗组地下水地球化学特征及其指示意义[J]. 煤炭学报, 2024,49(4):2004-2020.
Sun K, Fan L M, Ma W C, et al. Geochemical characteristics of groundwater about Zhiluo Formation in the northern Ordos Basin and

its indicative significance [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4):2004−2020.

[18] 李双慧,黄选明,朱宏军,等.基于水化学和环境同位素的准格尔煤田地下水循环特征 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021,19(3): 561−571,589.
Li S H, Huang X M, Zhu H J, et al. Characterization of groundwater circulation in the Jungar coalfield based on water chemistry [J]. South−to−North Water Transfers and Water, 2021,19(3):561−571,589.

[19] Wu H, Zhao G, Li X Y, et al. Identifying water sources used by alpine riparian plants in a restoration zone on the Qinghai−Tibet Plateau: Evidence from stable isotopes [J]. ence of The Total Environment, 2019,697:134092.

[20] 姜体胜,杨忠山,黄振芳,等.北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析 [J]. 水文地质工程地质, 2010,37(4):33−37.
Jiang T S, Yang Z S, Huang Z F, et al. Tendency and mechanism analysis of total hardness in shallow groundwater in the suburb of Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010,37(4):33−37.

[21] 苏贵芬,刘桂建,刘　玥,等.阜阳市集中式地下水饮用水源地水化学特征及成因分析 [J]. 环境科学, 2025,46(2):796−808.
Su G F, Liu G J, Liu Y, et al. Hydrochemical Characteristics and Origin of Centralized Groundwater Drinking Water Source in Fuyang City. [J]. Environmental Science, 2025,46(2):796−808.

[22] 李浩乾,孟姝蓉,董生旺,等.内蒙古土默特左旗地下水化学特征及成因 [J]. 地球与环境, 2024,52(4):429−437.
Li H Q, Meng S R, Dong S W, et al. Chemical characteristics and causes of groundwater in Tumutzuo Banner of Inner Mongolia [J]. Earth and Environment, 2024,52(4):429−437.

[23] 王世玉,马召辉,常　淼,等.北京市平原区浅层地下水水化学特征及成因分析 [J]. 环境科学, 2025,46(2):833−842.
Wang S Y, Ma Z H, Chang M, et al. Hydrochemical characteristics and mechanism analysis of shallow groundwater in Beijing plain area [J]. Environmental Science, 2025,46(2):833−842.

[24] Gibbs R J. Mechanisms Controlling World Water Chemistry [J]. Science, 170[2024−07−24].

[25] 韩　萱,黄　磊,刘廷玺,等.西北煤电集聚区不同水体水化学特征及氟成因 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):3810−3822.
Han X, Huang L, Liu T X, et al. Hydrochemical characteristics and fluorine genesis of different water bodies in coal−fired power agglomeration area of Northwest China. [J]. China Environmental Science, 2024,44(7):3810−3822.

[26] Kortatsi B K. Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra basin, Ghana [J]. Aquatic Geochemistry, 2007,13(1):41−74.

[27] 孙一博,王文科,段　磊,等.关中盆地浅层地下水地球化学的形成演化机制 [J]. 水文地质工程地质, 2014,41(3):2935.
Sun Y B, Wang W K, Duan L, et al. Geochemical evolution mechanisms of shallow groundwater in Guanzhong basin, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014,41(3):2935.

[28] 孔晓乐,常玉儒,刘　夏,等.滹沱河流域山区地表水−地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 [J]. 环境科学, 2023,44(8):42924303.
Kong X L, Chang Y R, Liu X, et al. Spatial variation characteristics, influencing factors, and sources of hydrogeochemical of surface water and groundwater in mountainous area of Hutuo River [J]. Environmental Science, 2023,44(8):42924303.

[29] 刘　海,康　博,管政亭,等.淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 [J]. 环境科学, 2023,44(11):6038−6049.
Liu H, Kang B, Guan Z T, et al. Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area [J]. Environmental Science, 2023,44(11):6038−6049.

[30] 刘　海,魏　伟,宋　阳,等.郯庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价 [J]. 环境科学, 2024,45(5):2665−2677.
Liu H, Wei Y, Song Y, et al. Hydrochemical characteristics, controlling factors and water quality evaluation of shallow groundwater in Tan−Lu Fault Zone(Anhui Section) [J]. Environmental Science, 2024,45(5): 2665−2677.

[31] 杨　清,李晓东,杨胜娴,等.雅鲁藏布江中游丰水期原生动物群落多样性及其影响因子 [J]. 生物多样性, 2023,31(4):100−115.
Yang Q, Li X D, Yang S X, et al. Protozoan community diversity and its impact factor in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River in the wet season [J]. Biodiversity Science, 2023,31(4):100−115.

[32] 郑　涛,秦先燕,吴剑雄.店埠河流域地表水−地下水水化学特征及其成因分析 [J]. 环境科学, 2024,45(2):813−825.
Zheng T, Qin X Y, Wu J X. Hydrochemical characteristics and its origin of surface water and groundwater in Dianbu River basin [J]. Environmental Science, 2024,45(2):813−825.

[33] 崔佳琪,李仙岳,史海滨,等.河套灌区地下水化学演变特征及形成机制 [J]. 环境科学, 2020,41(9):4011−4020.
Cui J Q, Li X Y, Shi H B, et al. Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao irrigation area [J]. Environmental Science, 2020,41(9):4011−4020.

[34] 李双慧.准格尔煤田岩溶地下水水化学特征及演化规律研究 [D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2021.
LI S H. Hydrogeochemical characteristics and evolution rules of karst groundwater in the Jungar Coalfield. [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.

[35] 范立民,马万超,常波峰,等.榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理 [J]. 煤炭科学技术, 2023,51(1):383−394.
Fan L M, Ma W C, Chang B F, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu mining area [J]. Coal Science and Technology, 2023,51(1):383−394.

[36] 郑　涛,焦团理,胡　波,等.涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 [J]. 环境科学, 2021,42(2):766−775.
Zheng T, Jiao T L, Hu B, et al. Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the central Guohe River basin. [J]. Environmental Science, 2021,42(2):766−775.

[37] 金爱芳,殷秀兰,李长青,等.张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析 [J]. 环境科学, 2024,45(2):826−836.
Jin A F, Yin X L, Li C Q, et al. Hydrochemical characteristics and genesis mechanism of groundwater in the dry period in the Zhangjiakou area [J]. 环境科学, 2024,45(2):826−836.

[38] 廖　驾,朱振华,彭　毅,等.湘西北地区岩溶地下水水化学与氘氧同位素特征分析 [J]. 中国岩溶, 2023,42(3):425−435,481.
Liao J, Zhu Z H, Peng Y, et al. Analysis on D/18O and hydrochemical characteristics of karst groundwater in northwestern Hunan Province [J]. Carsologica Sinica, 2023,42(3):425−435,481.

[39] 马秀平,井维鑫,王　茜,等.丹河水系表层沉积物重金属污染及生态风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2010,29(6):1180−1186.
Ma X P, Jing W X, Wang Q, et al. Heavy metal pollution in the surface sediment of Dan River and its ecological risk assessment [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2010.

[40] 许开卿,乔　伟,李文平,等.深部岩溶矿井水化学特征及含水层水力联系研究 [J]. 煤矿安全, 2023,54(8):150−160.
Xu K Q, Qiao W, Li W P, et al. Hydrochemistry characteristics and connection of aquifers in deep karst mine [J]. Safety in Coal Mines, 2023,54(8):150−160.

[41] Li P, Tian R, Liu R. Solute geochemistry and multivariate analysis of water quality in the Guohua Phosphorite Mine, Guizhou Province, China [J]. Exposure and Health, 2019,11(2):81−94.

[42] 陶兰初,寸得欣,涂春霖,等.珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 [J]. 环境科学, 2023,44(11):6025-6037.
Tao L C, Cun D X, Tu C L, et al. Hydrochemical characteristics and control factors of surface water in Kuaize River Basin at the upper Pearl River [J]. Environmental Science, 2023,44(11):6025-6037.

[43] Lin Y, Ren H X, Wu P C. The evolution of hydrogeochemical characteristics of a typical piedmont karst groundwater system in a coal-mining area, Northern China [J]. Environmental earth sciences, 2019,78(18):557.1-557.17.

[44] 涂春霖,尹林虎,和成忠,等.珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 [J]. 环境科学, 2022,43(4):1885-1897.
Tu C L, Yin L H, He C Z, et al. Hydrochemical composition characteristics and control factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River [J]. Environmental Science, 2022,43(4):1885-1897.

[45] 周智强,黄奇波,汪玉松,等.典型岩溶矿区地表水和地下水补给来源及水化学演化机制 [J]. 环境科学, 2024,45(9):5264-5276.
Zhou Z Q, Huang Q B, Wang Y S, et al. Recharge sources and hydrochemical evolution mechanism of surface water and groundwater in typical karst mining area [J]. Environmental Science, 2024,45(9):5264-5276.

[46] 张玉卓,徐智敏,张 莉,等.山东新巨龙煤矿区场地高 TDS 地下水水化学特征及成因机制 [J]. 煤田地质与勘探, 2021,49(5):52-62.
Zhang Y Z, Xu Z M, Zhang L, et al. Hydrochemical characteristics and genetic mechanism of high TDS groundwater in Xinjulong coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2021,49(5):52-62.

[47] 黄 磊,侯泽明,韩 萱,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 L, Hou Z M, Han X, 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.

[48] 孙 英,周金龙,梁 杏,等.塔里木盆地南缘浅层高碘地下水的分布及成因:以新疆民丰县平原区为例 [J]. 地球科学, 2021,46(8):2999-3011.
Sun Y, Zhou J L, Liang X, et al. Distribution and genesis of shallow high-iodine groundwater in southern margin of Tarim Basin: A case study of plain area in Minfeng County, Xinjiang [J]. Earth Science, 46(8):2999-3011.

[49] 张贺玉,杨莉园,卢少勇,等.基于主成分分析的城市河流水质时空分布特征研究:以沧州市为例 [J]. 环境工程技术学报, 2024,14(4):1273-1283.
Zhang H Y, Yang L Y, Lu S Y, et al. Research on spatio-temporal distribution characteristics of urban river water quality based on principal componentanalysis: a case study of Cangzhou City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(4):1273-1283.

[50] Zhu G, Wu X, Ge J, et al. Influence of mining activities on groundwater hydrochemistry and heavy metal migration using a self- organizing map (SOM) [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,257:120664.

[51] 张 帆,王广才,张茂省,等.产出水识别及受污染地下水水化学和氢氧稳定同位素特征 [J]. 西北地质, 2023,56(3):98-108.
Zhang F, Wang G C, Zhang M S, et al. Identification of produced water and characteristics of hydrochemistry and stable hydrogen-oxygen isotopes of contaminated groundwater [J]. Northwestern Geology, 56(3):98-108.

[52] 王雨山,尹德超,祁晓凡,等.白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 [J]. 环境科学, 2022,43(4):1920-1929.
Wang Y S, Yin D C, Qi X F, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and indicative significance in Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 2022,43(4):1920-1929.

[53] 孙从建,周思捷,陈亚宁,等.中亚高山区云下与地表降水氢氧稳定同位素时空分布特征及其水汽来源分析 [J]. 水资源保护, 2022,38(5):111-121,140.
Sun C J, Zhou S J, Chen Y N, et al. Spatiotemporal distribution and water vapor sources of stable isotopes of hydrogen and oxygen in below-cloud and surface precipitation in alpine region in Central Asia [J]. Water Resources Protection, 2022,38(5):111-121,140.

[54] Ge M, Chen B. Characteristics of δD and δ18O of reclaimed mine soil water profile and its source water bodies in a coal mining subsidence area with high groundwater level—A case study from the Longdong Coal Mining subsidence area in Jiangsu Province, China [J]. Water, 2020,12:274.

[55] 孙 龙,刘廷玺,段利民,等.矿区流域不同水体同位素时空特征及水循环指示意义 [J]. 水科学进展, 2022,33(5):805-815.
Sun L, Liu T X, Duan L M, et al.Spatial and temporal characteristics of isotopes of different water sources and implications for water circulation in mining areas [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5):805-815.

[56] 宋献方,唐 瑜,张应华,等.北京连续降水水汽输送差异的同位素示踪 [J]. 水科学进展, 2017,28(4):488-495.
Song X F, Tang Y, Zhang Y H, et al. Using stable isotopes to study vapor transport of continuous precipitation in Beijing [J]. Advances in Water Science, 2017,28(4):488-495.

[57] 刘运涛,张 东,赵志琦.南太行山山前平原地下水水化学以及同位素组成研究 [J]. 地球与环境, 2017,45(2):203-213.
Liu Y T, Zhang D, Zhao Z Q. Study on the hydrochemistry and isotopic composition of groundwater in the piedmont plain of the South Taihang Mountains [J]. Earth and Environment, 2017,45(2):203-213.

[58] 李杰彪,苏 锐,周志超,等.北山地区大气降水中水化学及稳定同位素特征 [J]. 中国环境科学, 2020,40(12):5152-5161.
Li J B, Su R, Zhou Z C, et al. Hydrochemical and stable isotope characteristics of precipitation in Beishan area [J]. China Environmental Science, 2020,40(12):5152-5161.

[59] 刘斌斌,孟凡林,薛建坤,等.榆树泉矿区地下水化学特征及水力联系程度分析 [J]. 能源与环保, 2023,45(8):73-79.
Liu B B, Meng F L, Xue J K, et al. Analysis on chemical characteristics and hydraulic connection degree of groundwater in Yushuquan Mining Area [J]. China Energy and Environmental Protection, 2023,45(8):73-79.

[60] Li P, Wu J, Tian R, et al. Geochemistry, hydraulic connectivity and quality appraisal of multilayered groundwater in the Hongdunzi Coal Mine, Northwest China [J]. Mine Water Environ., 2018,37:222–237.

[61] 王红燕.准格尔煤田唐家会煤矿 6 煤顶板突水危险性评价 [J]. 中国煤炭地质, 2020,32(8):57-61,70.
Wang H Y, Coal No.6 Roof water bursting hazard assessment in Tangjiahui Coalmine, Jungar Coalfield [J]. Coal Geology of China, 2020,32(8):57-61,70.

[62] 刘云生.龙王沟井田水文地质条件分析及防治水措施 [J]. 煤炭科技, 2018,(1):77-82.
Liu Y S. Analysis of hydrogeological condition and water control measures of Longwanggou mine field [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2018,(1):77-82.

[63] 马 良,郭 瑞.准格尔煤田不连沟矿井构造特征及其对煤矿生产的影响 [J]. 煤田地质与勘探, 2020,48(3):35-44,50.
Ma L, Guo R. The structural characteristics and their influence on production of Buliangou coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2020,48(3):35-44,50.

作者简介: 李艳娜(1999-),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为水文学与水资源.发表论文 1 篇,j9uj9adgg@163.com.