

DOI: 10.12401/j.nwg.2023010

神府矿区不同含水层水力联系的水化学证据

吴亚坤^{1,2}, 谢臣臣^{1,2}, 孙魁³, 范靓慧^{1,2}, 孙亚乔^{1,2}, 马雄德^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
3. 矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 神府矿区是陕北能源化工基地重要组成部分, 煤矿开采过程中矿水害防治是亟待破解的科学问题与生产实践问题。其间, 厘定不同含水层水力联系, 可直接为水害防治提供科学依据, 基于此, 笔者综合利用水化学、多元统计学和²H、¹⁸O、³H 同位素方法分析神府矿区萨拉乌苏组、直罗组风化基岩和直罗组基岩含水层间的水力联系。结果表明, 研究区各含水层 pH 值均为 7~11, 为碱性水。萨拉乌苏组与直罗组风化基岩地下水 TDS 均值分别为 294.55 mg/L 和 267.72 mg/L, 属于低矿化度淡水; 直罗组基岩地下水 TDS 均值为 867.35 mg/L, 矿化度较高。萨拉乌苏组与直罗组风化基岩含水层主要水化学类型为 HCO₃-Ca 型水, 直罗组基岩含水层主要水化学类型为 HCO₃-Na 型水和 HCO₃·SO₄-Na 型水。水化学成分聚类分析结果表明萨拉乌苏组与直罗组风化基岩含水层有一定关联度。氢氧同位素特征显示萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水补给来源相同, 直罗组基岩地下水补给来源与两者不同; 萨拉乌苏组地下水年龄较小, 直罗组基岩地下水年龄相对较老。综合水化学和环境同位素信息, 萨拉乌苏组与直罗组风化基岩含水层间水力联系较密切, 两者与直罗组基岩含水层间水力联系较差。研究成果将为研究区煤炭开采、地下水合理利用及水害防治提供科学依据。

关键词: 水力联系; 水化学特征; 环境同位素; 地下水; 神府矿区

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0198-11

Hydrochemical Evidence for Hydraulic Connection of Different Aquifers in Shenfu Mining Area

WU Yakun^{1,2}, XIE Chenchen^{1,2}, SUN Kui³, FAN Jinghui^{1,2}, SUN Yaqiao^{1,2}, MA Xiongde^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory of Mine Geological Hazard Mechanism and Control, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to further provide a theoretical basis for groundwater utilization and safe mining in the Shenfu mining area. In this paper, based on the analysis of hydrogeological structure, the hydraulic connection between the Salawusu Formation aquifer, the weathered bedrock aquifer of the Zhiluo Formation and the bedrock aquifer of the Zhiluo Formation in the Shenfu mining area is analyzed using a combination of hydrochemistry, multivariate statistics and ²H, ¹⁸O and ³H isotope methods. The results show that the pH of all aquifers in the study area is between 7 and 11, which is alkaline water. The average TDS values of groundwater from the Salawusu Formation and the weathered bedrock of the Zhiluo Formation are 294.55 mg/L and 267.72 mg/L, re-

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-10-08; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 陕西省重点研发项目“渭河陕西段综合治理的水环境效应及应对关键技术(2020ZDLSF06-04)”“黄河流域(陕西段)土壤-地下水污染管控与修复关键技术研究(2021ZDLSF05-05)联合资助。

作者简介: 吴亚坤(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤地下水污染与修复方面研究。E-mail: 330711176@qq.com。

spectively, which are freshwater with low mineralization. The average value of TDS in bedrock groundwater of the Zhiluo Formation is 867.35 mg/L, with a high degree of mineralization. The main hydrochemical types of the Salawusu Formation aquifer and the weathered bedrock aquifer of the Zhiluo Formation are both $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type water, and the main hydrochemical types of the bedrock aquifer of the Zhiluo Formation are $\text{HCO}_3\text{-Na}$ type water and $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ type water. The results of the clustering analysis of water chemistry indicate that the Salawusu Formation aquifer has a certain degree of correlation with the weathered bedrock aquifer of the Zhiluo Formation. The hydrogen and oxygen isotope signatures show that the groundwater recharge sources of the weathered bedrock of the Salawusu Formation and the Zhiluo Formation are the same, and the groundwater recharge sources of the bedrock of the Zhiluo Formation are different from both. The age of groundwater was calculated based on the tritium content in groundwater of each aquifer, and it was concluded that the age of groundwater of the Salawusu Formation is small and the age of groundwater of the bedrock of the Zhiluo Formation is relatively old. Comprehensive water chemistry and environmental isotope information show that the hydraulic connection between the Salawusu Formation aquifer and the weathered bedrock aquifer of the Zhiluo Formation is close, and the hydraulic connection between the two aquifers mentioned above and the bedrock aquifer of the Zhiluo Formation is poor. The research results will provide scientific basis for coal mining, rational use of groundwater and water damage prevention and control in the study area.

Keywords: hydraulic connection; hydrochemical characteristics; environmental isotopes; groundwater; Shenfu mining area

中国煤田水文地质条件复杂,地下水系统由多组含水层构成,含水层间普遍存在不同程度的水力联系(陈陆望等, 2017)。煤田的开采,会使区域地下水系统发生改变,水文地质条件趋向复杂化,在开采过程中会受到含水层高承压水的威胁,导致突水事故发生,进而造成极大的经济损失并会威胁人员安全(翟晓荣等, 2015)。因此对于水文地质条件复杂的煤矿,在开采过程中需要查明各含水层间水力联系。准确判定不同含水层间的水力联系不仅能有助于分析判断补给水源,还有助于后期制定针对性的水害防治措施(薛建坤, 2019; 蔚波等, 2021; 辛会翠等, 2023)。为了查明各含水层间的水力联系,许多学者采用了不同方法进行研究。比较常用的是通过地下水化学识别、环境同位素判别、抽水试验、放水试验和水位响应时间等方法研究各含水层的水力联系(Lehr et al., 2015; 许蓬等, 2018; 彭涛等, 2019; 赵宝峰等, 2020)。例如, Li等(2018)通过分析西北红墩子煤矿各含水层的地下水水化学特征,判断出煤矿中部承压含水层与下部含煤含水层水力联系密切,为地区水害防治提供了科学依据; Wei等(2020)通过分析降水试验中排水量和水压的变化及水样中常规离子浓度的变化,确定含水层间水力联系; 刘兵等(2020)通过分析不同水体的水化学和同位素特征,查明了地下水、泉水、河水间的水力联系。目前也有学者通过其他较为新颖的方法来

研究含水层间水力联系。例如,李超峰(2021)首次提出水力联系系数的概念,通过比值大小定量评价含水层间水力联系, Qu等(2020)利用水化学方法和时间序列数据分析曹家滩煤田上覆含水层之间水力联系。水化学研究开展于19世纪末,后逐渐成为水文地质学研究重点,在不同含水层水力联系的判别中成效显著; 环境同位素技术在水文地质学上的应用可追溯于20世纪30年代,该方法能快速、准确地判断含水层间水力联系,并具备成本低的优点。与水化学和同位素方法相比,抽水试验、放水试验等方法较为耗时、昂贵,水力联系系数等新颖概念,准确性还有待检验,因此将水化学方法与同位素示踪技术相结合判断含水层间水力联系,会更快速、更准确。

神府矿区是中国重要的能源化工基地组成部分,对国家能源安全与国民经济发展意义重大。然而,由于矿区煤层在古河道分布区,一些地区煤层顶板直接与古河道含水层接触,以致煤矿突水危险性较大,且随着矿区的开采,顶板水害威胁愈加严重。煤炭开采区萨拉乌苏组分布广泛,含水丰富,是基地建设的重要水源,该地层为古河道分布区矿井充水水源之一。直罗组上部裸露风化形成风化基岩层,该含水层会通过风化裂隙与上覆含水层存在联系,而未风化的基岩层是煤层开采后的直接充水层,对矿井涌水有较大影响,且直罗组底部砂体的河道化作用明显,故研究三

者间水力联系,将为有效确定突水水源、地下水利用及煤矿安全开采提供科学依据。因此,笔者在分析前期水文地质资料的基础上,补勘水文数据,利用水化学、多元统计学方法阐明地下水水化学特征,运用 ^2H 、 ^{18}O 、 ^3H 同位素示踪方法判断不同含水层地下水稳定同位素特征、地下水来源及地下水年龄,从而综合研究上述含水层间水力联系,以期为后期水害防治工作提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理环境

神府矿区位于鄂尔多斯盆地东北边缘,是陕北能源化工基地的核心区域(Su et al., 2018)。位于毛乌素沙地与黄土丘陵沟壑两大地貌类型交错过渡地带(肖武等, 2020),地理坐标为: E $109^{\circ}50' \sim 110^{\circ}46'$, N $38^{\circ}28' \sim 39^{\circ}26'$ 。研究区位于陕西省榆林市神木县西北部,在神府矿区西南部(图 1),地处中国西部内陆,为典型的中温带半干旱大陆性气候,四季冷热多变,昼夜温差悬殊。该区干旱少雨,蒸发量大,降雨主要集中在 7~9 月,占全年降水量的 69%,多年平均降雨量 375 mm,蒸发量达 1 700 mm 以上(刘基等, 2020)。年际降水量变化较大,每 2~3 年为一个丰水年。

1.2 水文地质条件

研究区处于黄河支流窟野河和秃尾河流域,区内水系由北向南主要为庙沟、考考乌素沟及其支沟,河流流量与季节相关;红碱淖处于研究区西北部。

研究区内主要地层自下而上为侏罗系中统延安组(J_2y)、侏罗系中统直罗组(J_2z)、上更新统萨拉乌苏组(Q_3s)和全新统风积层(Q_4^{col}),其中直罗组上部被风化地层为直罗组风化基岩层,其空间位置见图 2, J_2z 和 J_2y 假整合接触,其余地层为不整合接触。主要含煤地层为侏罗系中统延安组。萨拉乌苏组地层一般为潜水含水层,水位埋深在 10 m 以内,不同地区富水性差异较大,岩性主要以黄褐色亚沙土、细沙和粉沙为主,是矿井充水水源之一。直罗组是主要含水层,该地层零星出露于考考乌素沟、肯铁令沟和小侯家母河沟的梁峁边缘,形成风化基岩层,未风化的为直罗组基岩地层。直罗组风化基岩含水层是影响区内矿井涌(突)水的一个重要因素(侯恩科等, 2019),其富水程度主要受岩性和风化程度影响,厚度一般约为 20 m,岩性主要以粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩为主,风化程度受当时的古地形影响,在研究区内富水性较好。直罗组基岩为研究区煤系地层上覆地层,广泛分布,岩性主要为紫色泥岩、砂质泥岩和砂岩,为富水性弱的含水层段。

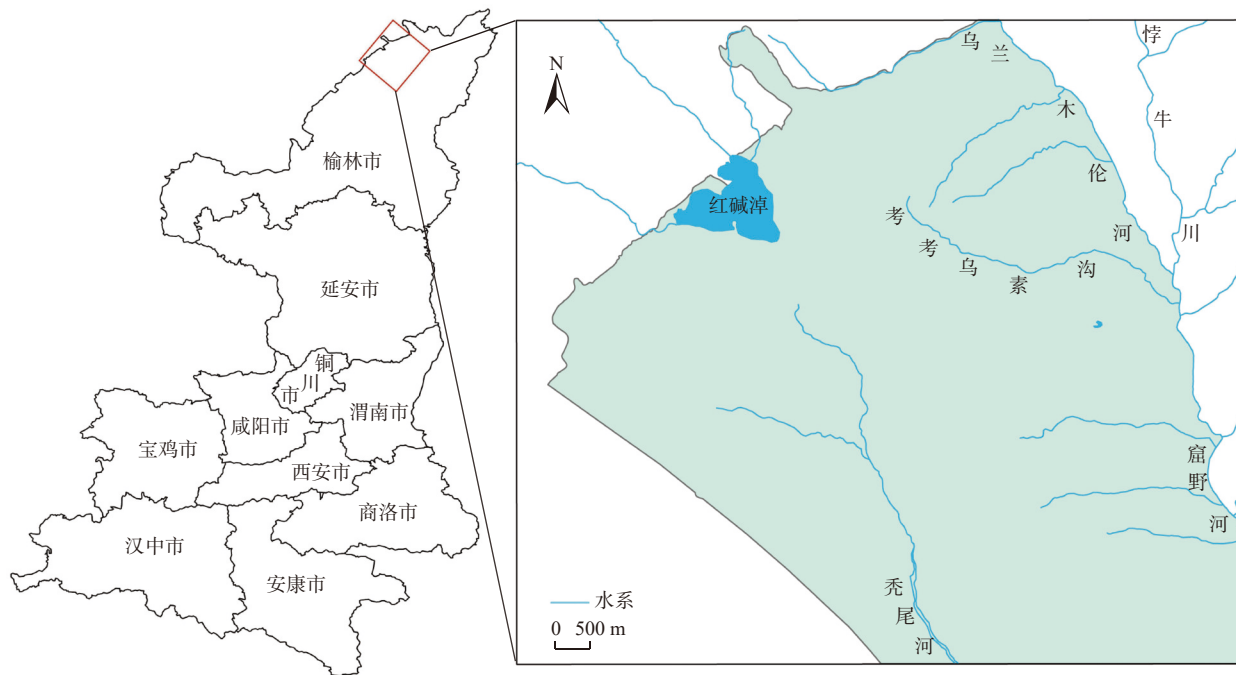


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

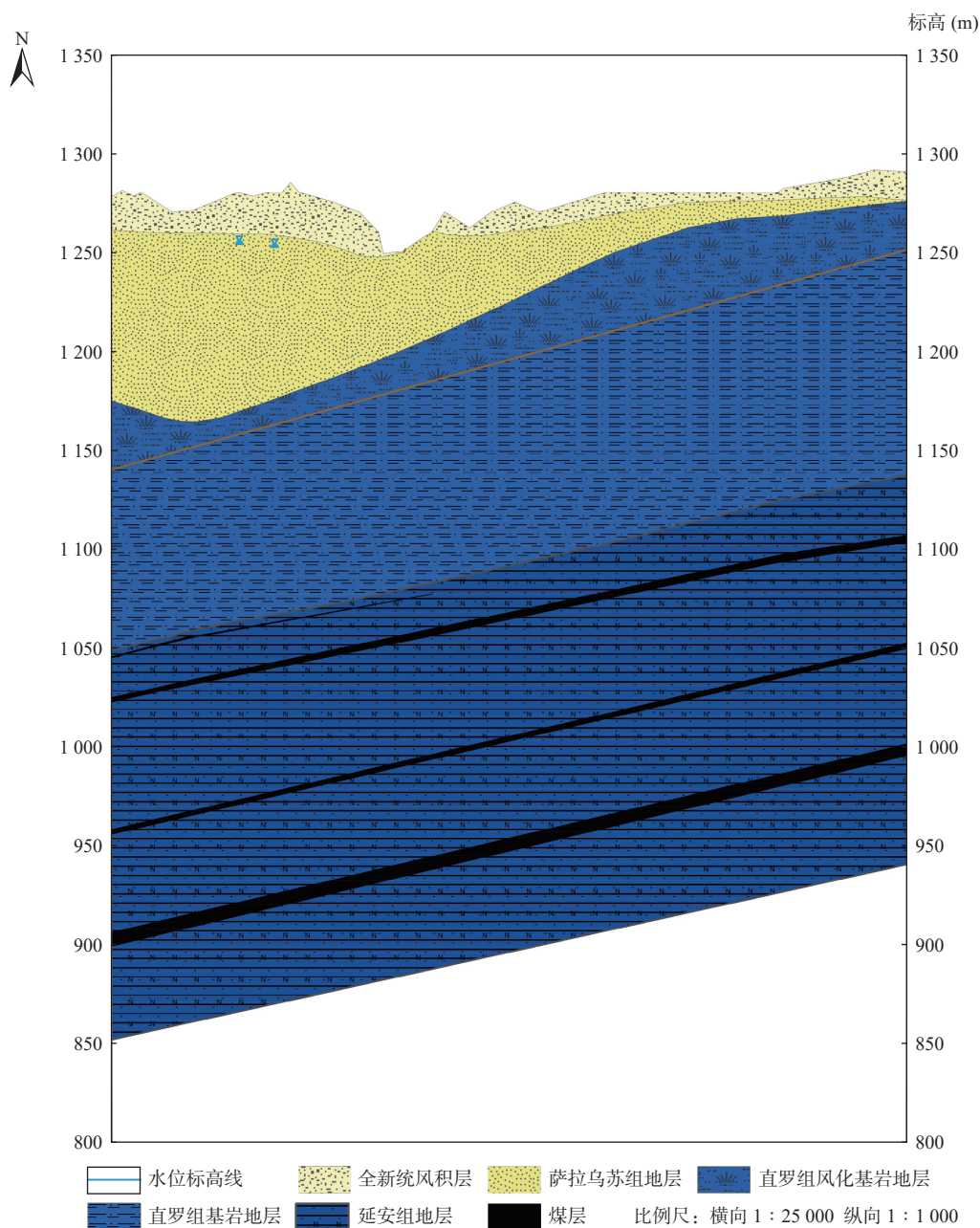


图2 研究区地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

研究区地下水的补给主要以大气降水、地表水(河流、湖泊)下渗为主,以泉水和潜流、蒸发及开采3种方式排泄。萨拉乌苏组地下水总的径流方向为从北西方向向秃尾河、窟野河最低基准点排泄(红碱淖周围地下水向红碱淖径流),并形成了相应的水流系统。直罗组承压水因受不稳定隔水层影响而形成局部性承压水,没有统一的补给区,具多层性,它的径流方向主要受地形地貌控制,总趋势由区域中部向周围径流,排泄于河谷。

2 数据来源及处理方法

笔者在收集资料的基础上补勘采样,获取30组萨拉乌苏组和88组直罗组钻孔数据资料,其中萨拉乌苏组、直罗组风化基岩和直罗组基岩地层水化学数据各28组、48组和39组,同位素数据各7组、1组和11组,采样点分布如图3。水化学指标主要为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、pH值和TDS;同位

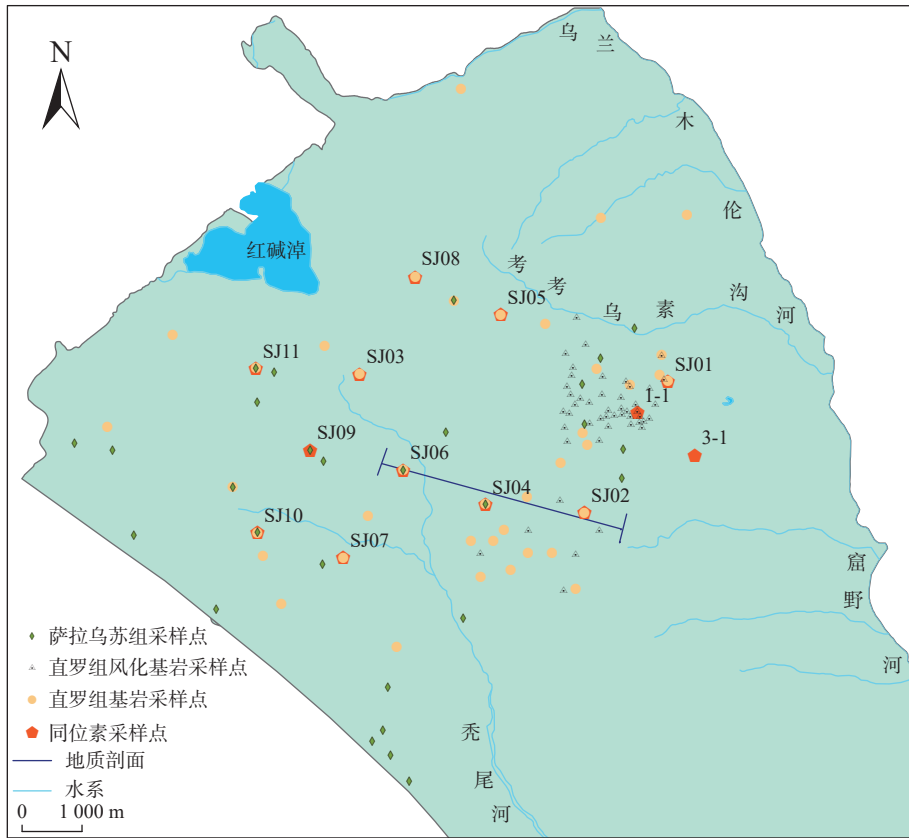


图3 地下水采样点分布图

Fig. 3 Distribution of groundwater sampling points

素指标为 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 δT 。补勘样品水样及岩矿鉴定分别由陕西省煤层气开发利用有限公司和陕西省地质调查实验中心检测, 主要检测仪器为: 水同位素分析仪(L2130i)、超低本底液体闪烁谱仪(Quantulus1220)、偏光显微镜 LECIA DM750P(23142036)。

利用 Origin2021 软件绘制离子箱线图和 Durov 图, 分析不同含水层地下水水化学特征; 同时绘制 δD - $\delta^{18}O$ 关系图、大气降水氡恢复曲线和输出曲线, 分析不同含水层地下水同位素特征; 使用 SPSS 软件对各含水层样点进行 Q 型聚类分析, 进一步判断不同含水层间水力联系。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

3.1.1 地下水矿化度及主要离子浓度分布规律

受地形地貌和水岩作用的影响, 地下水化学组分会不断发生变化, 水化学组分呈现一定分带性, 因此, 分析各含水层的水化学指标可以初步判定含水层间是否有水力联系(牛兆轩等, 2019)。研究区萨拉乌苏

组和直罗组风化基岩地下水样品的 pH 值分别为 7.1~8.46 和 7.4~8.9, 属于弱碱性水, 而直罗组基岩地下水样品的 pH 值为 7.3~10.95, 属于碱性水。由各含水层的水化学数据(图 4)可知: 研究区萨拉乌苏组地下水 TDS 平均含量为 294.55 mg/L, 含量范围为 111.95~435 mg/L, 属于低矿化度淡水; 阳离子中, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的平均含量分别为 2.20 mg/L、22.14 mg/L、45.01 mg/L 和 10.09 mg/L; 阴离子中, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-

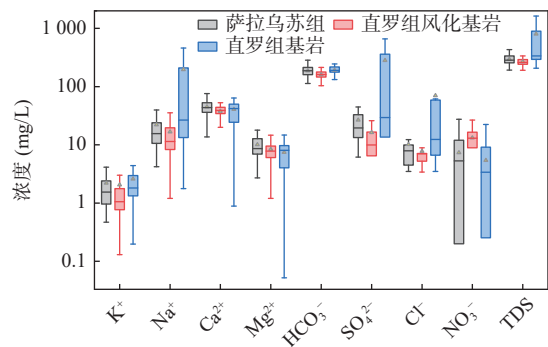


图4 各含水层主要指标箱型图

Fig. 4 Box diagram of main indicators of each aquifer

和 NO_3^- 的平均含量分别为 187.13 mg/L、26.63 mg/L、10.14 mg/L 和 7.32 mg/L。总体来看, 萨拉乌苏组阳离子浓度均值大小为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 阴离子浓度均值大小为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 。直罗组风化基岩层地下水 TDS 含量为 161.8 ~ 423.1 mg/L, 平均含量为 267.72 mg/L, 属于低矿化度淡水; 阳离子中, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的平均含量分别为 2.05 mg/L、16.73 mg/L、37.67 mg/L 和 8.35 mg/L; 阴离子中, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 的平均含量分别为 159.96 mg/L、16.27 mg/L、7.75 mg/L 和 13.16 mg/L。阴阳离子浓度均值大小顺序与萨拉乌苏组地下水阴阳离子平均值大小顺序相似, 且平均值相差不大, 说明直罗组风化基岩层地下水水化学与萨拉乌苏组较为接近, 二者可能具有相同的补给来源。直罗组基岩地下水 TDS 含量为 207 ~ 4 692 mg/L, 平均为 867.35 mg/L, 矿化度变化大, 说明该含水层径流较为缓慢, 水力循环条件较差(翟晓荣等, 2015); 阳离子中, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的平均含量分别为 2.59 mg/L、195.10 mg/L、40.75 mg/L

和 7.44 mg/L; 阴离子中, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 的平均含量分别为 190.51 mg/L、281.45 mg/L、70.11 mg/L 和 5.41 mg/L。综上, 直罗组基岩阳离子浓度均值大小为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 阴离子浓度均值大小为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 。

总之, 直罗组基岩地下水各指标平均浓度普遍高于萨拉乌苏组和直罗组风化基岩层, 这是由于直罗组地层矿物成分中含有黄铁矿、磁黄铁矿等硫化物, 而硫化物氧化和硫酸盐类等溶滤作用会引起直罗组基岩地下水矿化度较高。

3.1.2 地下水化学类型

通过水化学分类可以进一步概括出地下水化学分布特征(俞发康, 2007), 反映区域地下水水化学特征。Durov 图中三角形表示地下水中主要离子的毫克当量百分比, 两个矩形表示地下水中 pH、TDS 含量与主要组分间的关系(张小文等, 2017), 它能更好的反应地下水水化学类型及各组分间关系。根据研究区各含水层水化学组分绘制 Durov 图(图 5)。

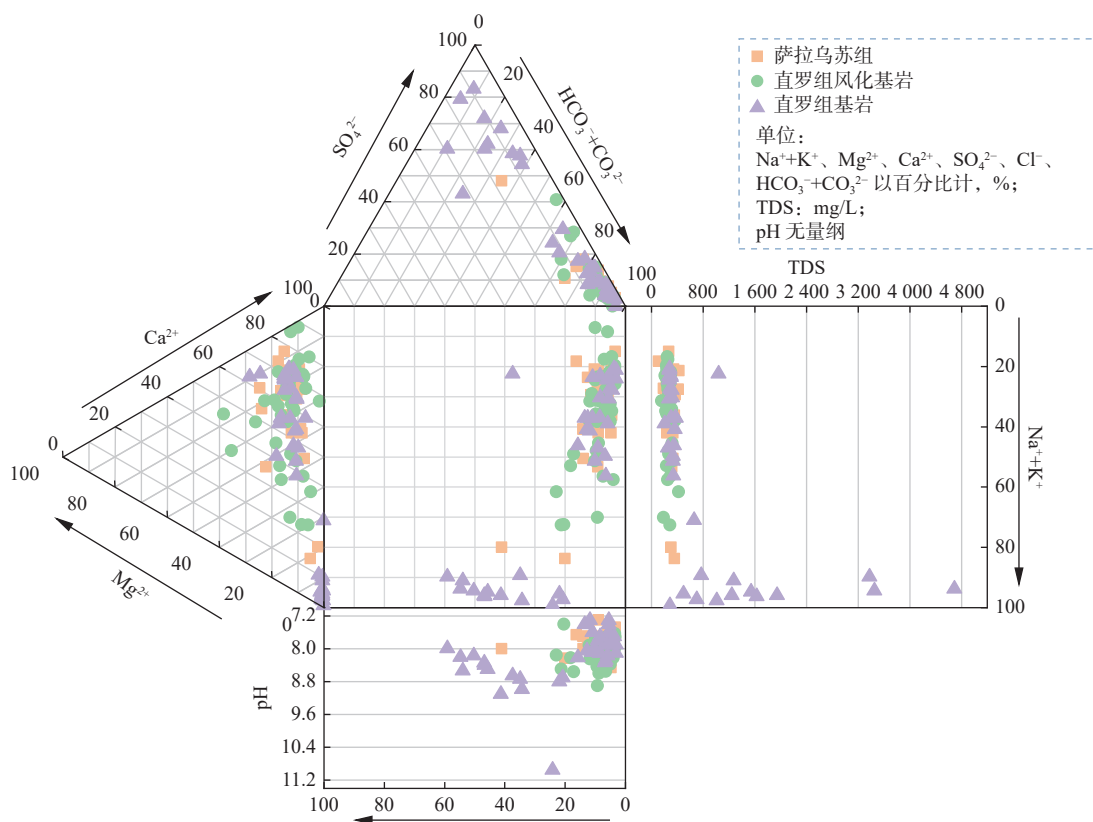


图 5 水化学组分 Durov 图

Fig. 5 Durov diagram of hydrochemical composition

由图 5 可以看出, 在阳离子三角图中, 3 个含水层地下水样品均靠近 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 Ca^{2+} 端, 但萨拉乌苏组

和直罗组风化基岩地下水样品相对靠近 Ca^{2+} 端, 大部分地下水 Ca^{2+} 毫克当量百分比大于 40%, 直罗组基岩

地下水样品相对靠近 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 端。在阴离子三角图中, 萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水样品靠近 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 端, 大部分地下水 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 毫克当量百分比大于 70%; 直罗组基岩地下水样品除了靠近 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 端, 还靠近 SO_4^{2-} 端。由上述分析可知, 萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水的主要水化学类型均为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, 直罗组基岩地下水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 型为主, 均为可利用地下水源。

3.1.3 聚类分析

聚类分析是一种根据样本的亲力和稀疏性对样本进行分类的方法(Chen et al., 2019; 杜金龙, 2022), 该方法主要用于从一对相似样本开始聚类至形成最高聚类的情况(Omo-irabor et al., 2008)。笔者以萨拉乌苏组(S层)、直罗组风化基岩(F层)和直罗组基岩(J层)含水层水样的物理、化学指标数据为基础, 利用系统聚类的方法对其进行分类, 并绘制谱系图, 从而判断不同含水层之间是否存在水力联系。

根据含水层水样的物理、化学指标相关性的不同, 将样本主要分为 A1 和 A2 两组, 两组的欧式距离为 15, 分类效果较好(图 6)。从图 6 中可看出, A1 组主

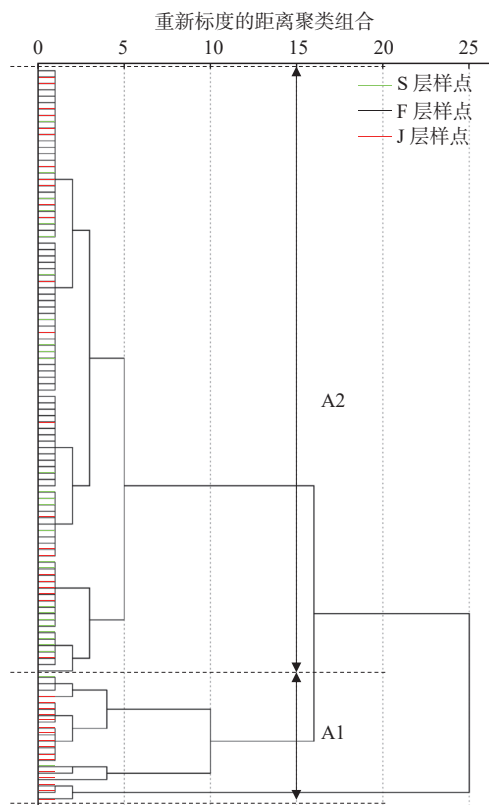


图 6 含水层水样聚类分析谱系图

Fig. 6 Cluster analysis pedigree of aquifer water samples

要包含 J 层样本, 特点为矿化度大, 且 SO_4^{2-} 含量较高, 主要源自地层中含硫矿物的氧化和硫酸盐的溶解; A2 组主要包含 S 层和 F 层样本, 特点为矿化度较小, 径流条件好。综合表明 J 层较为封闭, 与其他含水层水力联系差, 保留了自身的水文地球化学特征, 而 S 层与 F 层水文地球化学特征相似, 两含水层间存在一定水力联系。A1 组与 A2 组有相互聚集交叉现象, 说明 S、F 与 J 层有一定关联性, 但可能关联性不强。

3.2 同位素特征

3.2.1 氢氧同位素特征

采用氢氧同位素作为示踪剂, 能更有效的推断地下水的来源, 揭示地下水循环过程、地下水补给特征和不同含水层间的水力联系(Wang et al., 2014; Bello et al., 2019; 张靖坤等, 2022; 刘春雷等, 2022; 张帆等, 2023)。研究区中, 萨拉乌苏组地下水稳定同位素为: $\delta^{18}\text{O} = -8.9\text{‰} \sim -5\text{‰}$, 平均值为 -8.1‰ , $\delta\text{D} = -69\text{‰} \sim -49\text{‰}$, 平均值为 -62.8‰ ; 直罗组风化基岩地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值分别为 -9.2‰ 、 -64.5‰ ; 直罗组基岩地下水稳定同位素为: $\delta^{18}\text{O} = -11.4\text{‰} \sim -5.7\text{‰}$, 平均值为 -10.1‰ , $\delta\text{D} = -88\text{‰} \sim -52\text{‰}$, 平均值为 -78‰ 。根据不同含水层氢氧稳定同位素测试数据来看, 萨拉乌苏组地下水和直罗组风化基岩地下水的同位素值接近, 二者与直罗组基岩含水层地下水同位素值有一定差异, 且直罗组基岩地下水氢氧稳定同位素值明显偏负, 反映直罗组基岩与另外两含水层间可能无直接水力联系。

通过分析各含水层取样点与全球大气降水线、地区大气降水线的偏离程度, 判断大气降水是否为其补给源(Craig et al., 1961; 王力等, 2010)。不同含水层氢氧关系散点图(图 7)显示, 萨拉乌苏组、直罗组风化基岩和直罗组基岩水样点均分布在全球和榆神府矿区大气降水线下方, 说明大气降水是研究区地下水的主要补给来源, 但在补给过程中发生了蒸发作用。根据 3 个含水层同位素分布规律, 萨拉乌苏组、直罗组风化基岩和直罗组基岩水样点可划分为 A 和 B 两个区域。在区域 A 中, 萨拉乌苏组地下水和直罗组风化基岩地下水氢氧同位素接近, 说明二者具有密切关系; 在区域 B 中, 直罗组基岩地下水氢氧同位素明显偏负, 表明直罗组基岩地下水与萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水补给来源不同。通过对两含水层水样分别进行拟合分析, 发现萨拉乌苏组地下水拟合方程为 $\delta\text{D} = 5.2\delta^{18}\text{O} - 20.42$ ($R^2 = 0.91$), 其斜率明显小于全球和榆神府矿区降水线斜率, 说明萨拉乌苏组地下水在补给过程中受到强烈蒸发作用影响, 造成地下水

氢氧同位素富集,从而雨水线偏离全球和当地雨水线(Tiwari et al., 2017; 刘基, 2021);直罗组基岩地下水拟合方程为 $\delta D = 7.4\delta^{18}O - 1.92$ ($R^2 = 0.91$),斜率略大于当地降水线,进一步表明直罗组基岩地下水与萨拉乌苏组地下水补给来源有所差异。

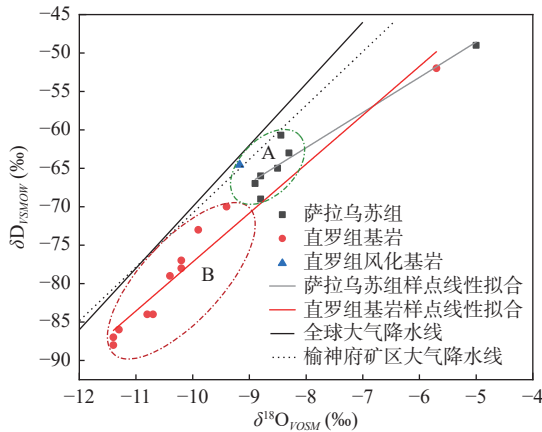
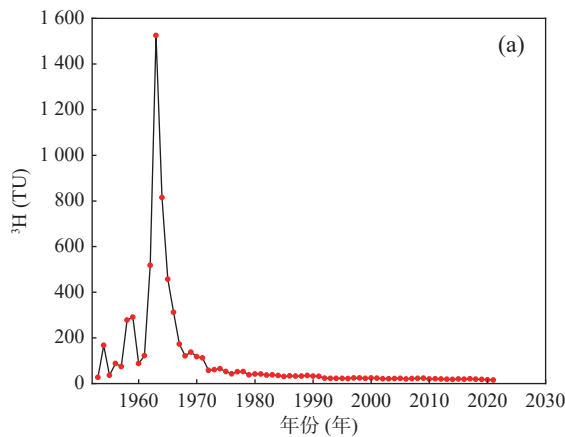


图7 地下水 $\delta^{18}O$ - δD 关系图

Fig. 7 $\delta^{18}O$ - δD diagram of groundwater

根据氢氧稳定同位素的高程效应和温度效应,利用王恒纯(1991)和Dansgaard(1964)研究所得公式计算各含水层补给高程和补给温度,萨拉乌苏组地下水补给高程为1 286.06~1 408.2 m,平均补给高程1 366.1 m;直罗组风化基岩地下水补给高程为1 317.7 m;直罗组基岩地下水补给高程为1 460.7~1 558.5 m,平均补给高程1 506.8 m。萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水平均补给温度分别为7.87℃和6.6℃,而直罗组基岩地下水补给温度为4.33℃。从这里也可以看出,萨拉乌苏组地下水与直罗组风化基岩地下水来自于同一补给源,直罗组基岩地下水来自另一补给源。



3.2.2 氡同位素特征

氡半衰期为 12.43 ± 0.02 a,目前已成为水文研究中重要的示踪剂(Lucas et al., 2000; Liao et al., 2020)。一般认为用它可测定50年以内的地下水年龄,对于矿区地下水的定性或半定量评价效果较好(许蓬等, 2018)。根据北半球降水氡的对数值与所在纬度呈正比关系($\lg T \propto L$),利用1969~1983年苏联伊尔库茨克和香港降水氡值,采用对数插值法获得研究区同期降水氡值(王文科等, 2006)。插值公式为:

$$\lg C_{\text{榆}} = \lg C_{\text{香}} + (\lg C_{\text{伊}} - \lg C_{\text{香}})(X_{\text{榆}} - X_{\text{香}})/(X_{\text{伊}} - X_{\text{香}}) \quad (1)$$

式中: C 为降水氡值; X 为测点纬度。

利用上述公式计算出研究区部分年份降水氡值,并与渥太华相同年份降水氡值进行相关性分析可得:

$$C_{\text{榆}} = 0.5142C_{\text{渥}} + 12.772 \quad (2)$$

根据从IAEA网站获得的1953~2019年渥太华降水氡数据恢复研究区同期降水氡值,由于2010年以后降水氡值变化不大,所以2020年和2021年降水氡值利用外插法推出。最终计算获得恢复曲线见图8a。

由于研究区前期水文地质研究程度较低,获得参数较少。因此,利用对参数需求较少的活塞流模型进行计算地下水年龄(赵振华等, 2017),公式如下:

$$C_i = C_0 e^{-\lambda(t_i - t_0)} \quad (3)$$

式中: t_i 为取样年份,2021年; C_i 为含水层在 t_i 时刻的氡输出值; C_0 为含水层在 t_0 时刻的氡输入值; λ 为氡衰变因子,0.055 764。

将上述所求研究区氡恢复值代入,求得氡输出曲线,见图8b。根据水样氡分析结果对应氡输出曲线,求得地下水年龄。从估算结果中得出,研究区萨拉乌苏组地下水相对年龄为14~38年,平均年龄为22年;

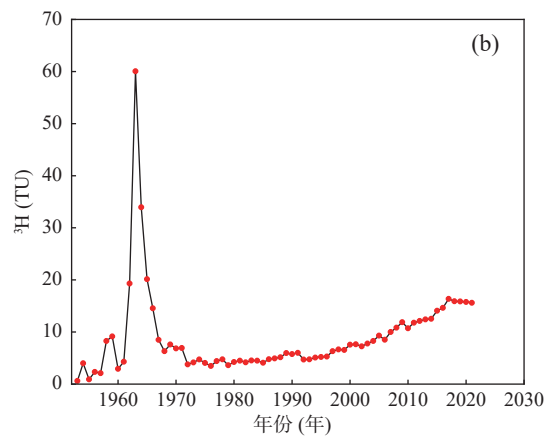


图8 研究区大气降水氡恢复曲线图(a)和活塞流模型氡输出曲线图(b)

Fig. 8 (a) Tritium recovery curve of atmospheric precipitation in the study area (b) tritium output curve of piston flow model

直罗组基岩地下水年龄大于 69 年, 为 1953 年以前地下水补给, 不同含水层地下水年龄有一定差异。SJ09 直罗组基岩地下水年龄为 15 年, 与萨拉乌苏组地下水年龄接近, 说明该点两含水层地下水具有密切的水力联系, 但也需要进一步的证据证实两层含水层之间存在天窗或优先通道。

3.3 不同含水层间水力联系

根据水化学和环境同位素反映的信息, 萨拉乌苏组、直罗组风化基岩和直罗组基岩地下水中水化学和环境同位素特征具有明显的差异, 3 个含水层之间存在着不同的水力联系(图 9)。

3.3.1 萨拉乌苏组与直罗组风化基岩层

萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水平均 TDS < 300.0 mg/L, 主要离子含量接近, 阴阳离子浓度均值大小关系相似, 水化学类型均以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水为主, 且从聚类分析结果来看, 两含水层地下水有相

同来源。在图 7 中, 二者具有相同的氢氧稳定同位素特征和补给来源。综上, 二者之间存在紧密的水力联系, 地下水补给能力相对较强, 地下水可更新能力强。

3.3.2 直罗组风化基岩层与直罗组基岩层

直罗组风化基岩与直罗组基岩地下水尽管形成时代和环境相同, 但直罗组风化基岩受当时古地形的影响, 存在不同的风化程度, 风化裂隙和孔隙也成为了与上覆含水层联系的优势通道。因此, 直罗组风化基岩地下水水化学和环境同位素信息反映出与萨拉乌苏组地下水联系紧密, 但与直罗组基岩地下水形成演化存在明显的差异。直罗组基岩地下水 TDS 及主要离子含量明显高于直罗组风化基岩地下水, 且两者水化学类型也有所不同, 直罗组风化基岩与直罗组基岩地下水氢氧同位素特征也存在差异, 具有不同的补给来源, 综合表明两者间无明显水力联系。

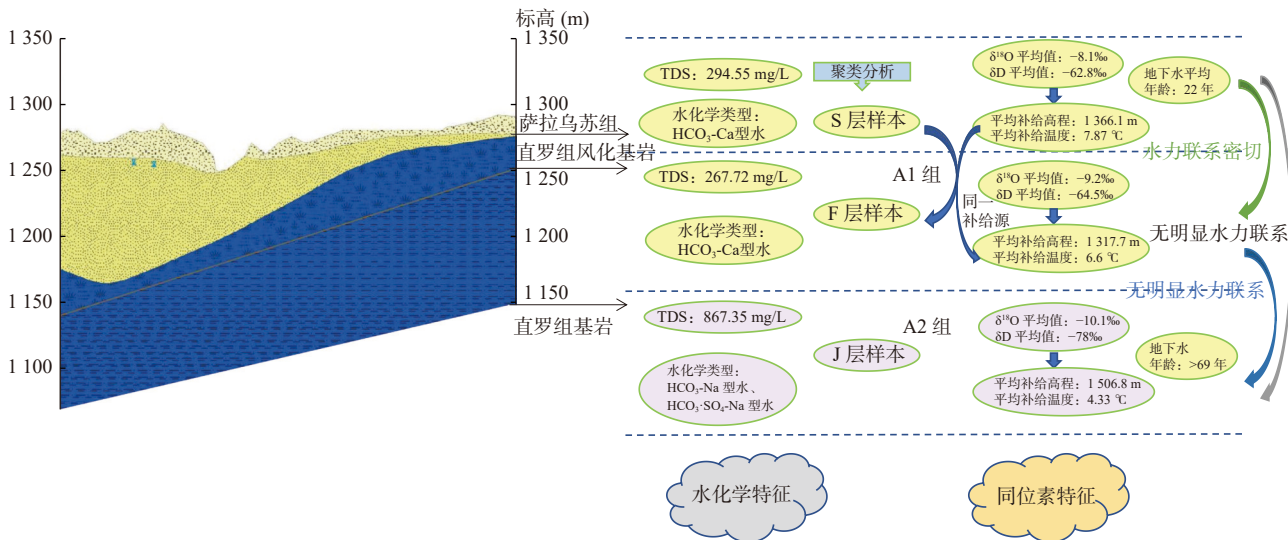


图 9 含水层间水力联系示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the hydraulic connection between different aquifers

3.3.3 萨拉乌苏组与直罗组基岩层

根据上述不同含水层地下水联系可知, 萨拉乌苏组地下水与直罗组风化基岩地下水之间联系紧密, 而直罗组风化基岩地下水与直罗组基岩地下水分属不同的地下水流系统, 且两含水层地下水水化学特征有差异, 地下水年龄也不同, 故萨拉乌苏组含水层与直罗组基岩含水层间无明显水力联系。

4 结论

(1) 研究区各含水层地下水均属于碱性水。萨拉

乌苏组和直罗组风化基岩地下水中矿化度和主要离子浓度低于直罗组基岩含水层。萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水的水化学类型均为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, 直罗组基岩地下水的水化学类型主要为: $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型水。

(2) 环境同位素分馏特征、温度效应和高程效应等信息综合表明, 萨拉乌苏组和直罗组风化基岩地下水来自同一补给来源, 直罗组基岩地下水来自另一补给来源。萨拉乌苏组地下水氟含量高, 地下水平均年龄为 22 年, 循环能力强, 直罗组基岩地下水氟含量低, 地下水年龄 > 69 年, 径流条件差。

(3) 萨拉乌苏组与直罗组风化基岩含水层存在较紧密水力联系, 两者均与直罗组基岩含水层间无明显水力联系。

参考文献(References):

- 陈陆望, 许冬清, 殷晓曦, 等. 华北隐伏型煤矿区地下水化学及其控制因素分析—以宿县矿区主要突水含水层为例[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 996–1004.
- CHEN Luwang, XU Dongqing, YIN Xiaoxi, et al. Analysis of groundwater chemistry and its control factors in hidden coal mining areas in North China -Taking the main water inrush aquifers in Suxian mining area as an example[J]. Journal of Coal, 2017, 42(4): 996–1004.
- 杜金龙. 潞安矿区中部煤矿充水水源水化学特征及水源识别意义[J]. 西北地质, 2022, 55(1): 208–215.
- DU Jinlong. Hydrochemical characteristics of water filling source in Central Lu'an Mining Area and water source identification significance[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(1): 208–215.
- 侯恩科, 车晓阳, 冯洁, 等. 榆神府矿区含水层富水特征及保水采煤途径[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 812–819.
- HOU Enke, CHE Xiaoyang, FENG Jie, et al. Abundance of aquifers in Yushenfu coal field and the measures for water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 812–819.
- 李超峰. 水力联系系数法定量评价含水层之间水力联系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(06): 1801–1810.
- LI Chaofeng. Quantitative evaluation of hydraulic connection between hydraulic connection coefficient and aquifer[J]. Journal of Jilin University (Geoscience Edition), 2021, 51(06): 1801–1810.
- 刘兵, 王贺, 姜永海, 等. 基于水化学和氢氧同位素的东宫河流域不同水体转化关系研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(9): 1979–1990.
- LIU Bing, WANG He, JIANG Yonghai, et al. Study on the transformation relationship of different water bodies in Donggong River Basin Based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes[J]. Environmental Science Research, 2020, 33(9): 1979–1990.
- 刘春雷, 杨会峰, 曹文庚. 利用环境同位素识别共和盆地地下水补给特征及其环境指示意义[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 227–236.
- LIU Chunlei, YANG Huifeng, CAO Wengeng. Identify Groundwater Recharge Characteristics and Environmental Implications in Gonghe Basin Using Environmental Isotopes in Gonghe Basin[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 227–236.
- 刘基, 高敏, 靳德武, 等. 榆神矿区地表水水化学特征及其影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 354–361.
- LIU Ji, GAO Min, JIN Dewu, et al. Analysis of hydrochemical characteristics and influencing factors of surface water in Yushen mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 354–361.
- 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 Ji. Hydrogeochemical characteristics of deep aquifer in hujite mining area and its indicative significance[J]. Resources and Environment in Arid Area, 2021, 35(1): 154–159.
- 牛兆轩, 蒋小伟, 胡云壮. 滦河三角洲地区深层地下水化学演化规律及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 27–34.
- NIU Zhaoxuan, JIANG Xiaowei, HU Yunzhuang. Chemical evolution law and genetic analysis of deep groundwater in Luanhe River Delta[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 27–34.
- 彭涛, 龙良良, 刘凯祥, 等. 基于煤层顶板抽水试验的含水层水力联系研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(3): 66–69+73.
- PENG Tao, LONG Liangliang, LIU Kaixiang, et al. Study on Aquifer Hydraulic Connection based on Pumping Test of Coal Seam Roof[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(3): 66–69+73.
- 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 156–157.
- WANG Hengchun. Introduction to isotope hydrogeology[M]. Beijing: Geology Press, 1991: 156–157.
- 王力, 卫三平, 张青峰, 等. 榆神府矿区土壤-植被-大气系统中水分的稳定性同位素特征[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1347–1353.
- WANG Li, WEI Sanping, ZHANG Qingfeng, et al. Stable isotopic characteristics of water in soil vegetation atmosphere system in Yushenfu mining area[J]. Journal of Coal, 2010, 35(8): 1347–1353.
- 王文科, 王雁林, 段磊等. 关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 41–46.
- 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.
- WEI Bo, WANG Hao, LIU Feng, et al. Study on hydraulic connection of aquifer in balapukulia coal mine, Bangladesh[J]. Coal Field Geology and Exploration, 2021, 49(4): 205–212.
- 辛会翠, 徐志敏, 肖晓. 基于岩石物性和地下水矿化度约束的三维电性模型地下水分布特征研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 588–600+612.
- XIN Huicui, XU Zhiming, XIAO Xiao. Study on distribution characteristics of groundwater based on three dimensional electrical model constrained by rock physical properties and groundwater salinity [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2023, 50(5): 588–600+612.
- 肖武, 张文凯, 吕雪娇, 等. 西部生态脆弱区矿山不同开采强度下生态系统服务时空变化—以神府矿区为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 68–81.
- XIAO Wu, ZHANG Wenkai, LÜ Xuejiao, et al. Temporal and spatial changes of ecosystem services under different mining intensities in mines in ecologically fragile areas in the West - Taking Shenfu mining area as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 68–81.
- 许莲, 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(S1): 227–230.
- XU Peng, WANG Ming. Application of environmental isotope technology in determining the hydraulic connection between mine aquifers[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(S1): 227–230.
- 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 Jiankun. Quantitative Analysis of Mine Water Inrush Using Isotope Method[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(12): 150–153.
- 俞发康. 鄂尔多斯白垩系盆地北区地下水可更新能力研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- YU Fakang. Study on groundwater Renewability in the north area of Ordos Cretaceous Basin [D]. Jilin: Jilin University, 2007.
- 翟晓荣, 沈书豪, 张海潮, 等. 基于 MODFLOW 的含水层间水力联系分析研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 8–11+43.
- ZHAI Xiaorong, SHEN Shuhao, ZHANG Haichao, et al. An analysis of hydraulic connection between different aquifers based on MODFLOW[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 8–11+43.
- 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 Fan, WANG Guangcai, ZHANG Maosheng, et al. Identification of Produced Water and Characteristics of Hydrochemistry and Stable Hydrogen–Oxygen Isotopes of Contaminated Groundwater[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 98–108.
- 张靖坤, 刘飞, 邹嘉文, 等. 华北平原典型压采区地下水循环的氢氧同位素示踪[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(2): 385–392.
- ZHANG Jingkun, LIU Fei, ZOU Jiawen, et al. Hydrogen and oxygen isotope tracing of groundwater circulation in typical pressure mining areas in North China Plain[J]. *South to North Water Transfer and Water Conservancy Science and Technology (Chinese and English)*, 2022, 20(2): 385–392.
- 张小文, 何江涛, 彭聪, 等. 地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3225–3234.
- ZHANG Xiaowen, HE Jiangtao, PENG Cong, et al. Comparison of identification methods of hydrochemical anomalies of main components of groundwater: Taking Liujiang Basin as an example[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3225–3234.
- 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.
- ZHAO Baofeng, LV Yuguang. Study on Hydraulic Connection of Multiple Aquifers Based on Dewatering Test of Sandstone Aquifer from Floor[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(12): 34–39.
- 赵振华, 吴吉春, 袁革新, 等. 塔里木盆地东北部大气降水氡浓度的恢复及应用[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(1): 16–22.
- ZHAO Zhenhua, WU Jichun, YUAN Gexin, et al. Recovery and application of tritium concentration in atmospheric precipitation in the northeast of Tarim Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1): 16–22.
- Bello M B, Ketchemen-tandia B, Nlend F, et al. Shallow groundwater quality evolution after 20 years of exploitation in the southern Lake Chad: hydrochemistry and stable isotopes survey in the far north of Cameroon[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(15): 474.
- Chen Y, Zhu S Y, Xiao S J. Discussion on controlling factors of hydrogeochemistry and hydraulic connections of groundwater in different mining districts[J]. *Natural Hazards*, 2019, 99: 689–704.
- Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters[J]. *Science (New York, N. Y.)*, 1961, 133(3465): 1702–1703.
- Dansgaard W. Stable Isotopes in Precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16: 436–468.
- Lehr C, Poschke F, Lewandowski J, et al. A novel method to evaluate the effect of a stream restoration on the spatial pattern of hydraulic connection of stream and groundwater[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 23: 394–401.
- Li P Y, Wu J H, Tian R, et al. Geochemistry, Hydraulic Connectivity and Quality Appraisal of Multilayered Groundwater in the Hongdunzi Coal Mine, Northwest China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37(2): 222–237.
- Liao D W, Pang Z H, Xiao W Y, et al. Constraining the Water Cycle Model of an Important Karstic Catchment in Southeast Tibetan Plateau Using Isotopic Tracers (^2H , ^{18}O , ^3H , ^{222}Rn)[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3306.
- Lucas L L, Unterweger M P. Comprehensive review and critical evaluation of the half-time of tritium[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2000, 105(4): 541–549.
- Omo-irabor O O, Olobaniyi S B, Oduyemi K, et al. Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: A case study of the Western Niger Delta, Nigeria[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2008, 33(8-13): 666–673.
- Qu S, Shi Z M, Wang G C, et al. Application of multiple approaches to investigate hydraulic connection in multiple aquifers system in coalfield[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 595(3): 1–13.
- Su H, Kang W D, Xu Y J, et al. Assessing Groundwater Quality and Health Risks of Nitrogen Pollution in the Shenfu Mining Area of Shaanxi Province, Northwest China[J]. *Exposure and Health*, 2018, 10(2): 77–97.
- Tiwari A K, Singh A K, Singh A K, et al. Hydrogeochemical analysis and evaluation of surface water quality of Pratapgarh district, Uttar Pradesh, India[J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(4): 1609–1623.
- Wang S X. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Yanqi Basin of Xinjiang Province, Northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 427–440.
- Wei J C, Yu G Y S, Xie D L, et al. Drainage feasibility of a Carboniferous thin-layer limestone aquifer based on a dewatering test: Luxi coal mine, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2020, 35(3): 80.