

基于水化学与氢氧稳定同位素的平禹矿区沉降区地下水循环变化解析

苏绘梦, 张发旺, 侯予, 赵宝印, 杨博, 王誉龙, 左伟, 卢桂海, 李洪刚

An analysis of groundwater circulation in the Pingyu mining area based on hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater

SU Huimeng, ZHANG Fawang, HOU Suyu, ZHAO Baoyin, YANG Bo, WANG Yulong, ZUO Wei, LU Guihai, and LI Honggang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究

Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 154-162

涑源北盆地地下水氢氧同位素特征及北海泉形成模式

Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater and formation mode of the Beihai springs in the northern Laiyuan Basin

王忠亮, 郭春艳, 张彦鹏 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 27-35

吉木萨尔超排液氢氧同位素特征及地下水含量计算

Investigation of the characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of the excess fracturing flowback fluid and calculation of groundwater content in the Jimsar Sag

贾俊, 王亮, 孟云涛 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 10-18

招远金矿区水体中硫同位素特征及其对污染来源的指示

Characteristics of sulfur isotope in water bodies near the Zhaoyuan gold mine area and its indicative function of pollution sources

贾晓岑, 周建伟, 朱恒华, 余露, 张秋霞, 朱越 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 179-188

玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau

王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 18-26

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306010

苏绘梦, 张发旺, 侯甦予, 等. 基于水化学与氢氧稳定同位素的平禹矿区沉降区地下水循环变化解析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 53-67.

SU Huimeng, ZHANG Fawang, HOU Suyu, *et al.* An analysis of groundwater circulation in the Pingyu mining area based on hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 53-67.

基于水化学与氢氧稳定同位素的平禹矿区沉降区 地下水循环变化解析

苏绘梦¹, 张发旺^{1,2}, 侯甦予³, 赵宝印⁴, 杨博^{5,6}, 王誉龙^{5,6}, 左伟^{5,6}, 卢桂海⁴, 李洪刚⁴

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051; 3. 中核大地勘察设计有限公司, 北京 100013; 4. 中国南水北调集团中线有限公司河南分公司, 河南郑州 450016; 5. 河南省地质矿产勘查开发局第五地质勘查院, 河南郑州 450001; 6. 河南省自然资源科技创新中心(生态环境评价与修复技术研究), 河南郑州 450001)

摘要: 矿区地下水对周边居民生活及煤炭工业建设起到重要的支撑作用, 但煤矿开采过程中的矿井排水会改变原有的矿区地下水循环过程, 进而改变地下水环境, 因此, 明晰“地下水、地表水、大气水”间的相互转化关系, 是科学利用矿区水资源的关键。本研究通过分析平禹矿区地下水常规水化学及氢氧同位素, 识别矿区地下水中主要组分来源及控制性因素, 以明晰矿区在大规模矿井排水后的地下水循环特征。结果显示: 研究区地下水水化学类型主要为 HCO₃-Ca·Mg, 水化学组分受硅酸盐岩的风化溶解作用控制, 地下水中离子主要来源于水-岩相互作用和人类活动所产生的废弃物, 存在 NO₃⁻ 超标现象。氢氧同位素分析表明, 矿区地下水以大气降水补给为主, 孔隙水和岩溶水存在紧密的水力联系; 矿井排水后, 矿区地下水循环过程发生改变, 岩溶水由原先顶托补给上层孔隙水转变为接受上层孔隙水的越流补给, 再由矿井排水排放至地表水体当中, 矿井排水成为矿区主要地下水排泄方式。研究结果可为矿区地下水开发与管理和地面沉降防治工作提供科学有效的依据。

关键词: 矿井排水; 水化学特征; 氢氧同位素; 地下水循环; 平禹矿区沉降区

中图分类号: P641.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0053-15

An analysis of groundwater circulation in the Pingyu mining area based on hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater

SU Huimeng¹, ZHANG Fawang^{1,2}, HOU Suyu³, ZHAO Baoyin⁴, YANG Bo^{5,6}, WANG Yulong^{5,6},
ZUO Wei^{5,6}, LU Guihai⁴, LI Honggang⁴

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding, Hebei 071051, China; 3. China Nuclear Dadi Exploration and Technical Design Co. Ltd., Beijing 100013, China; 4. Henan Branch, China South-to-North Water Diversion Middle Route Co. Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China;

收稿日期: 2023-06-02; 修订日期: 2023-07-28

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 南水北调中线干线工程建设管理局地质研究项目(ZXJ/HN/YW/GC-2020037)

第一作者: 苏绘梦(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事水文地质环境地质相关研究。E-mail: SUHM90@cug.edu.cn

通讯作者: 张发旺(1965-), 男, 博士, 二级研究员, 主要从事水文地质环境地质相关研究。E-mail: zhangfawang@karst.ac.cn

5. *The Fifth Geological Survey Institute, Henan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Zhengzhou, Henan 450001, China*; 6. *Natural Resources Science and Technology Innovation Center of Henan Province (Research on Eco-Environmental Assessment and Restoration Technology), Zhengzhou, Henan 450001, China*)

Abstract: Groundwater in mining areas play an important supporting role in the surrounding residents' living and the construction of coal industries. Mine drainage during coal mining will change the original groundwater circulation process in mining areas, leading to changes in the groundwater environment. Therefore, clarifying the mutual transformation relationship between the “three waters” is the key to the scientific utilization of water resources in mining areas. Chemical components and hydrogen and oxygen isotopes of the groundwater in the Pingyu mining area are combined to determine the characteristics of groundwater circulation after large-scale drainage of the mine, identify the origin and controlling factors of the major components in the groundwater. Hydrochemical analyses show that most of the groundwater are of $\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$ type, The hydrochemical components are controlled by the weathering and dissolution of silicate, and the ions in the groundwater mainly come from water-rock interactions and the waste generated by human activities, with concentration of NO_3^- exceeding the standard. The hydrogen and oxygen isotopic data demonstrates that the groundwater in the study area receives recharge from modern precipitation, and there is a close hydraulic relationship between the groundwater in the unconsolidated aquifers and the groundwater in the karst aquifer. After the mine drainage, the groundwater circulation process in the mining area changes, the karst groundwater changes from supporting the upper pore groundwater to accepting the leakage recharge of the upper pore groundwater, and then discharges to the surface water by the mine drainage. The mine drainage becomes the main groundwater drainage way in the mine area. The research results can provide scientific and effective basis for groundwater development management and land subsidence prevention in mining areas.

Keywords: mine drainage; hydrochemical characteristics; hydrogen and oxygen isotopes; groundwater circulation; settlement area of Pingyu mining area

地下水、地表水、大气水称作“三水”，“三水”间的相互转换是水体循环的重要组成部分，在水体相互转换的过程中，不仅存在水量的交换，其水化学组分也在不断地发生变化^[1-2]，因此，明晰水循环过程中的“三水”转换过程，是合理规划利用水资源的基础^[3]。运用水化学及数理统计等方法，可以有效地划分地下水水化学类型，分析地下水的赋存环境、水文地球化学过程以及不同水体之间的物质交换信息^[4-7]。

D 和 ^{18}O 是水分子的重要组成部分，直接参与水体的循环演变过程。不同来源的水具有不同的同位素组成特征，水在不断循环演化过程中会引起水中同位素分馏，为追踪不同水体之间的相互转化关系提供行之有效的技术手段^[8-10]。如张清华等^[3]通过运用环境同位素及水化学分析等方法，解译了张家口市地下水循环过程，并对不同水体之间的补给比例进行了计算；易冰等^[11]运用多元统计分析及同位素技术，揭示了大通河流域不同断面上地表水与地下水的水体水化学特征及演化过程，并依据二端元法对不同水体之

间的转化比例进行了分析；王诗语等^[12]基于研究区水化学特征及 ^{18}O 和 D 之间的相互关系，研究了西北典型山地—绿洲系统不同水体的水化学特征及其相互转化关系，并对不同季节地表水与地下水之间的补给比例进行了分析；刘景明等^[13]采用线性回归、二端元混合模型以及 GIS 空间分析等方法，分析了艾比湖流域不同区域地下水的补给来源及水化学演变规律。近年来，国内外不少研究者采用水化学和同位素技术研究分析流域水循环及水源混合比例等问题，但对于运用水化学和同位素手段研究煤矿开采前后矿区内部的水循环变化过程及水化学演变机制却鲜有报道^[14-15]。

平禹一矿位于河南省许昌市，始建于 1969 年。自 1972 年以来，平禹一矿已发生 49 次突水事故，最大突水量达 $38\ 052\ \text{m}^3/\text{h}$ ，矿井水危害已严重威胁平禹一矿的生产安全^[16]。矿区自 2010 年 5 月，开始大规模疏排岩溶水，岩溶水水位从 2010 年 5 月的 $125.9\ \text{m}$ 下降至 2021 年 6 月的 $-104.77\ \text{m}$ ，年均水位下降 $20.93\ \text{m}$ 。在

大规模矿坑排水的作用下,矿区地下水场特征发生了巨大改变^[7],原有的岩溶水自然排放点如幸福湖泉群相继干涸,上层孔隙水水位也受到影响,水质逐渐恶化。地下水是周边人民群众生产生活的重要水源,地下水水位急剧下降以及水质不断恶化已经严重威胁周边人民群众的用水安全。前人在原有矿区水文资料的基础上,对研究区地下水的径流过程进行了大量研究,唐辉^[8]采用数值模拟,对平禹一矿持续疏排岩溶水作用下的岩溶水流场信息进行了研究,结果表明:矿区在排水量为 4 880 m³/h 的情况下,研究区降水漏斗中心水位可下降 50 m;潘国营等^[9]、张坤^[6]采用研究区 2009 年采集的同位素数据进行了分析,总结了研究区岩溶水及矿井水的主要补给来源。张富有^[20]在水文地质调查的基础上,对许昌市主要含水层进行了划分,并采用同位素技术,对孔隙水内部的水力联系进行了研究。

已有的研究主要以矿区大规模排水前的资料为主,无法真实反映研究区地下水现状,因此,亟需对研究区大规模疏排岩溶水后的地下水水化学特征及相互转化关系进行研究,合理规划研究区地下水资源,保障周边人民群众的用水安全。本研究是在前人的基础上,基于水文地质调查、水化学取样测试、氢氧同位素等资料,采用数理统计、离子比、二端元等方法,系统地分析研究区矿井排水后的地下水场特征及水化学特征,并对研究区“三水”之间的相互转换关系进行研究,揭示研究区岩溶水水位急剧下降后矿区“三水”之间的循环转化过程,为研究区合理利用地下水资源提供科学有效的支持。

1 研究区概况

1.1 自然地理条件

平禹一矿位于禹州矿区内,总面积为 13.5 km²。研究区西部为青龙山山区北部,最高标高为 779.00 m,东部为石梁河流域平原区,最低标高为 84.00 m,中间为平原地区,整体呈现西北向东南倾斜,西北、西南地势高,中部、东部地势低的形态。研究区属大陆性季风气候,年平均气温为 13.0~16.0℃,降雨主要集中在 7—9 月,年平均降水量为 665 mm。

研究区主要自然河流为颍河和石梁河,属淮河流域颍河水系。颍河发源于河南登封县嵩山,经禹州市从矿区西南部流经研究区,石梁河发源于禹州市老山坪,自东北、东南部穿过研究区,受研究区地形限制,研究区自然河流流向均自北西向南东。研究区东北

部分布有佛耳岗水库、五虎赵水库、杨庄水库和唐寨水库等抗旱救灾水库。区内主要水利设施为南水北调中线工程长葛段,受采矿抽水影响,区内部分渠道已经出现地面沉降。除此之外,由于长期的采煤行为,导致矿区出现较多的采煤塌陷区。矿区周边地表水及矿坑排水经自然流动,在塌陷区形成诸多沉降湖。区内人口密集,矿石加工厂及各种机械加工厂林立,主要供水水源为地下水和南水北调渠水,污水通过地下管网排放至附近河流中,矿井排水经过矿区沉淀处理后,排放至周边自然河道中。

1.2 水文地质条件

研究区构造单元属于中朝准地台南部嵩箕台隆,属白沙向斜北翼东北部,总体为一单斜构造(图 1)。北部为太室山脉(具茨山脉),南部为箕山山脉(大鸿寨山脉),中部为横贯西北—东南的颍河平原。区内出露地层有下元古界嵩山群、上元古界震旦系、下古生界寒武系和奥陶系、上古生界石炭系和二叠系、新生界古近系、新近系和第四系,其中石炭—二叠系为主要含煤地层,二叠系下统山西组的二₁煤层为本区可采煤层。

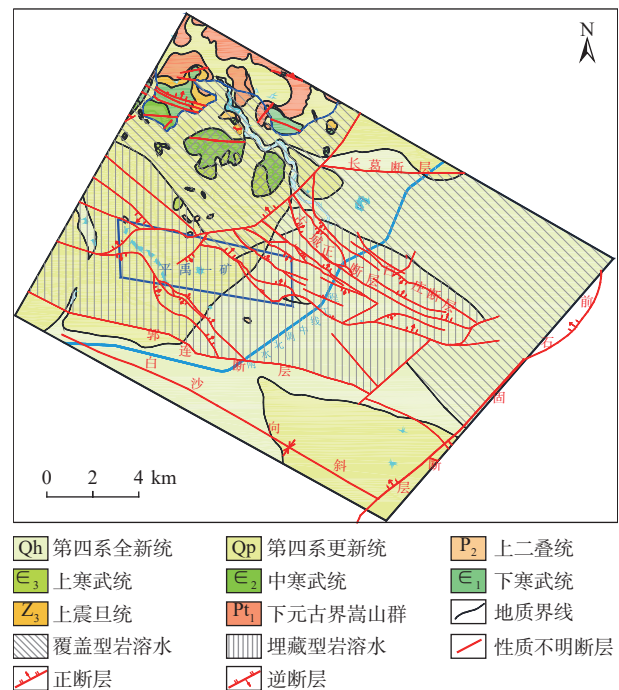


图 1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

研究区内遍布着近东西方向褶皱和相伴而生的同向断裂及 1 组扭裂隙等,沿断裂发育着挤压片理化带、破碎影响带和裂隙密集带,控制着岩溶裂隙水、

基岩裂隙水及裂隙孔隙水的形成和分布^[12]。研究区孔隙水主要分布在中东部平原地区倾斜平原及东南部的双洎河、清漯河、颍河下游等冲积平原。西部以白沙水库为补给边界,北部边界西段为松散层与基岩分界线,北部边界东段接受北部径流补给,南部至颍河为排泄边界,东部和东南部为排泄边界。含水层为新近系河湖相沉积层及下更新统冲湖积层组成,岩性为新近系细砂、中细砂及粗中砂或砂岩,呈半胶结状。孔隙水接受地表水、大气降水及西部的径流补给,下界面在山前地带与砂岩、页岩接触带为隔水边界。

研究区西北部和北部有基岩和灰岩出露(图 1),属于岩溶裸露区,由元古代变质岩、侵入岩和古生代碳酸盐岩、碎屑岩组成,向东及东南方向,逐渐没入松散层以下,埋深由西部的十余米逐渐增大,在水磨河幸福湖灰岩埋深为 136 m,至坡胡镇灰岩埋深约 400 m。岩溶水西部以白沙水库上游为界;北部为荃萃山背斜;南部为白沙向斜轴部,为隔水边界;东部边界以石固镇以北的前石固断层为界;在埋藏区与上部砂岩存在隔水层;灰岩底部界面为寒武系砂页岩,为隔水边界。研究区岩溶水主要来源于西部山区大气降水^[4]。平禹矿区大规模疏排岩溶水前,矿区北部和西北部山区煤层底板石炭系薄层灰岩和寒武系厚层灰岩中的岩溶承压水为平禹矿区矿井水的主要充水水源,岩溶水通过岩溶裂隙、断层、采动裂隙和封闭不良钻孔进入煤矿开采面,威胁矿井安全生产。除此之外,岩溶水还通过水磨河一带的构造断裂处顶托越流补给松散层,并形成岩溶泉群进行自然排泄。

目前,平禹矿区矿井排水已彻底改变了研究区的地下水流场特征,原有的岩溶水自然排泄点相继干涸。矿区范围内的古城镇岗王村、连堂村、张堂村附近相继出现地面沉降,沉降区总面积约为 19 hm²,距离矿区较近的南水北调中线长葛段部分渠道也出现了地面沉降,累计沉降量在 60.63~155.29 mm 之间,并以 10~20 mm/a 的速度持续沉降,严重威胁渠道长期安全稳定运行。

2 样品采集与测试

2.1 样品采集

本研究于 2021 年 7 月—2022 年 8 月共采集了不同含水层地下水及地表水水样 32 组。采样点布置原则:在兼顾研究区内含水层类型及岩性的基础上,沿地下水流向,在地面沉降影响相对明显的区域(人类聚集区、重要水利设施)进行钻井施工采样,精确采集不同含水层水样。近年来,由于平禹一矿大量疏排岩溶水,研究区地下水水位不断下降,单纯依靠上层孔隙水已无法满足当地人民群众的生产生活需求。因此,为保障人民群众的用水安全,研究区近年来施工的一些农村安全饮水井,在开采岩溶水的同时未对上层孔隙水进行止水封孔,在保障水质水量的前提下对研究区地下水进行混合开采,本次研究对混合开采地下水(混合水)的水井也做了取样研究。

本次研究共采集地表水水样 11 组(采样点位置见图 2),基本覆盖了研究区内主要河流、水库、沉降湖等。地下水水样共 21 组(采样点位置见图 2),其中,

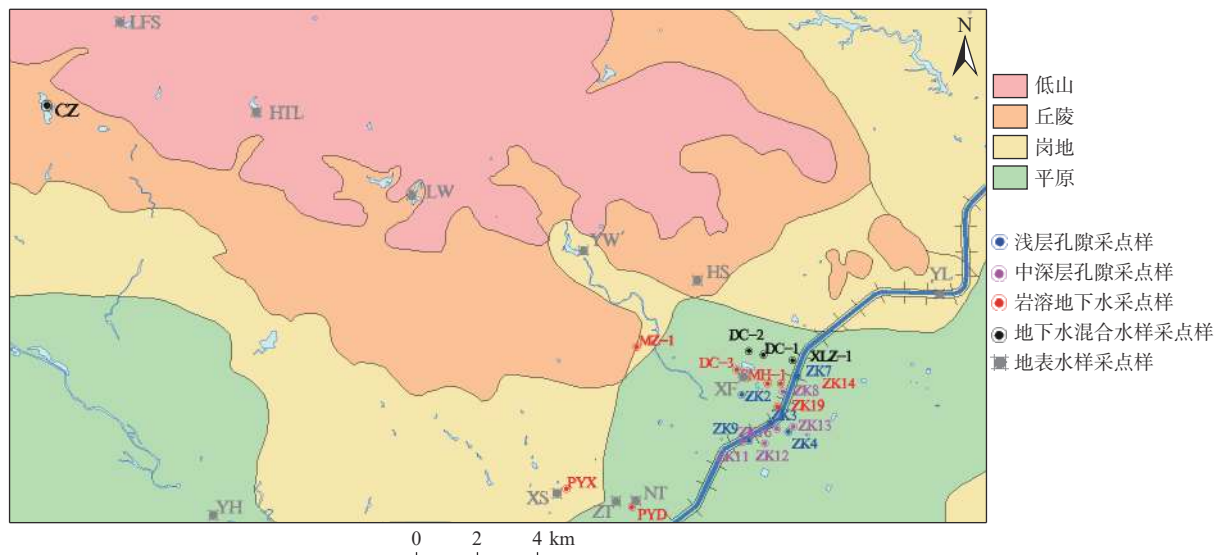


图 2 研究区取样点分布图

Fig. 2 Distribution of the sampling points in the study area

孔隙水水样 10 组,岩溶水水样 7 组,混合开采水样 4 组,基本覆盖研究区沉降区域、人类集聚区及重要水利设施。除此之外,本次研究收集研究区岩溶水同位素数据 6 组,大气降水同位素数据 4 组。

2.2 测试及分析方法

本次研究所有地下水样品均在抽水实验结束前 0.5 h 内取样及现场测试,采样瓶采用 500 mL 棕色瓶,采样前分别用蒸馏水和待采样品各润洗 3 次,再将样品装入采样瓶内,并在水下拧紧瓶盖。采用便携式多参数水质分析仪(HI 9828, HANNA)测定水体的 pH、EC、温度、氧化还原电位等指标;常规化学组分(包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、TDS、偏硅酸)在河南省地质工程勘察院实验室测定。 K^+ 、 Na^+ 采用火焰原子吸收分光光度计法, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 采用滴定法测试, SO_4^{2-} 采用比浊法测试, NO_3^- 采用紫外分光光度法测试,TDS 采用重量法测试,偏硅酸采用硅钼黄分光光度法测试。氢氧同位素在武汉核素科技有限公司采用 DELTA V Advantage 气体同位素比率质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectrometer)测定。测试水样阴阳离子电荷平衡误差均在 $\pm 5\%$ 以内, δD 、 $\delta^{18}O$ 测试误差分别为 $\pm 0.5\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。

本次研究采用 origin2022 软件对地下水各理化指标进行统计分析,并绘制研究区不同水体的 Durov、Gibbs 及端元图;采用 SPSS26 软件对研究区水化学性质进行数理统计分析;采用氢氧同位素及二端元混合模型方法,分析研究区不同水体的主要来源及转化关系。

3 结果

运用数理统计分析不同水体水化学参数,结果可以反映一定时间范围内水体组分的基本情况^[21]。平禹矿区地表水及地下水水化学指标及统计值见表 1。

从表 1 可以看出,平禹矿区地表水 pH 值范围为 7.15 ~ 7.52,平均值为 7.33,孔隙水平均值为 7.28,岩溶水平均值为 7.32,整体呈弱碱性,变化幅度不大,不同水体 pH 值关系为地表水 < 孔隙水 < 岩溶水。地表水 TDS 含量为 175.55 ~ 782.56 mg/L,平均值为 91.4 mg/L,孔隙水平均值为 457.4 mg/L,岩溶水平均值为 436.18 mg/L。地下水补径排过程中,不断与周边岩土介质发生水岩相互作用,因此,地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 H_2SiO_3 含量相对于地表水含量较高,地下水中 TDS 整体高于地表水。

水体中 Cl^- 、 NO_3^- 等变化易受人类活动影响^[22],地下水各离子含量的变异系数(C_v)可反映地下水各指

标的离散程度以及人类生产生活等活动对地下水组分的影响,按照变异系数值,可将影响程度划分为 3 个程度,即:轻度($C_v < 0.16$)、中度($0.16 \leq C_v < 0.36$)、高度($C_v \geq 0.36$)^[23-24]。如表 1 所示,研究区地表水中大部分指标均存在高离散度现象,说明地表水水化学组分更容易受到地表人类生产生活等活动的影响。研究区地下水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 变异系数相对较小,说明研究区 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等含量主要来源于水岩相互作用,受人类活动影响较小。根据平禹矿区水样 Durov 图(图 3)显示,地下水中的主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,主要阴离子为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ,地下水水化学类型主要为 HCO_3^- -Ca-Mg 型,占有地下水样品的 76%(表 2);其次为 HCO_3^- -Ca 型,占 14%;受人类活动污染影响较大的采样点地下水类型为 Cl^- - HCO_3^- -Ca-Mg 型,占 10%。

根据《地下水质量标准》(GB / T 14848—2017),采样点 ZK2 号采样点 NO_3^- -N 含量(21.28 mg/L)超过国家 III 类水质量标准($\rho(NO_3^-$ -N) ≤ 20 mg/L),该采样点为岩溶水自然排泄口的幸福湖泉域,位于水磨河村中间,靠近电厂位置。由于矿坑排水,幸福湖泉水已经枯竭,地表水、人类生产生活所产生的污染物经原先的岩溶水排泄通道进入含水层,导致该点地下水中 NO_3^- 超标。

4 讨论

4.1 水化学特征控制因素

地下水在径流过程当中,水化学成分的变化一般受到含水层水岩相互作用的控制^[25]。Gibbs 图是确定天然水中主要化学成分来源的重要方法,采用世界河流、湖泊及海洋水 $\rho(Na^+)/\rho(Na^++Ca^{2+})$ 、 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^-+HCO_3^-)$ 与 TDS 之间的关系,将天然水化学组分分成大气降水、岩石风化、蒸发结晶三个端元,可用于识别水体水化学成分来源的主要控制机制^[26]。

如图 4(a)(b)所示,研究区地下水水化学组成较为相似,除 ZT 采样点, $\rho(Na^+)/\rho(Na^++Ca^{2+})$ 和 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^-+HCO_3^-)$ 比值均小于 0.5,分布相对集中。地表水 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^-+HCO_3^-)$ 比值范围为 0.08 ~ 0.36,平均值为 0.18,地下水 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^-+HCO_3^-)$ 比值范围为 0.03 ~ 0.41,平均值为 0.13;地表水 $\rho(Na^+)/\rho(Na^++Ca^{2+})$ 比值范围为 0.09 ~ 0.29,平均值为 0.22,地下水 $\rho(Na^+)/\rho(Na^++Ca^{2+})$ 比值范围为 0.09 ~ 0.33,平均值为 0.17。研究区水样处于岩石风化区,表明研究区地下水中水化学成分主

表 1 研究区主要水化学指标及统计值
Table 1 Main hydrochemical indicators and statistics in the study area

层位	样品编号	pH	质量浓度(ρ)/(mg·L ⁻¹)									TDS/(mg·L ⁻¹)	EC/(μ S·cm ⁻¹)
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	H ₂ SiO ₃		
地表水	XF	7.15	5.45	19.35	46.53	26.13	20.74	73.20	223.62	6.86	20.12	310.64	485
	YL	7.19	3.70	4.07	43.09	10.45	15.95	23.65	139.00	4.86	7.44	175.55	259
	NT	7.22	12.00	17.44	67.21	26.13	25.52	61.28	290.10	12.70	24.49	368.10	505
	XS	7.25	9.12	15.10	86.17	29.26	35.10	83.16	314.27	16.55	5.36	432.17	586
	HS	7.28	9.38	16.10	39.64	15.68	38.29	13.50	181.31	1.30	5.89	225.28	342
	YH	7.33	6.56	42.06	151.66	36.58	118.05	237.70	271.96	53.42	16.48	782.56	1 139
	HTL	7.35	4.36	11.46	44.81	19.86	35.10	68.60	145.05	1.29	6.41	258.43	374
	LFS	7.40	8.74	13.55	44.81	19.86	38.29	48.26	169.22	1.09	1.24	259.60	368
	LW	7.47	4.32	18.02	77.55	17.77	57.43	101.60	169.22	13.60	0.20	375.37	480
	YW	7.49	4.89	24.01	67.21	26.13	82.95	116.20	145.05	<0.88	0.20	394.33	517
	ZT	7.52	13.42	58.90	162.00	22.99	264.81	98.12	193.40	5.38	10.93	723.37	963
	平均值	7.33	7.45	21.82	75.52	22.80	66.57	84.12	203.84	11.71	8.98	391.40	547.09
	标准差	0.13	3.31	15.49	43.13	7.15	72.27	59.94	62.29	15.66	8.19	195.31	268.88
变异系数/%	0.02	0.44	0.71	0.57	0.31	1.09	0.71	0.31	1.34	0.91	0.50	0.49	
孔隙水	ZK3	7.23	3.84	20.71	99.96	34.49	63.81	48.84	338.45	31.15	19.14	472.64	678
	ZK2	7.35	4.97	14.92	133.07	42.78	72.99	82.75	364.34	94.25	30.71	651.66	828
	ZK4	7.32	3.03	35.92	128.26	35.00	149.39	48.20	237.61	64.34	18.17	583.22	1 404
	ZK7	7.22	1.89	11.54	72.14	23.33	8.69	23.68	332.66	22.30	22.48	347.62	597
	ZK9	7.36	0.13	15.44	134.43	31.35	60.62	52.66	350.53	76.20	23.24	546.47	808
	ZK8	7.26	4.88	19.02	48.26	30.31	31.91	30.45	278.01	3.38	10.78	307.72	489
	ZK11	7.22	1.10	20.18	105.13	22.99	33.50	86.68	320.31	31.15	18.19	461.31	707
	ZK13	7.26	4.08	19.57	98.24	31.35	54.24	55.82	350.53	37.00	17.45	475.93	805
	ZK12	7.29	3.48	25.48	84.45	21.95	25.52	50.60	362.62	3.51	21.16	396.74	664
	ZK16	7.32	7.77	13.87	82.73	11.50	31.91	28.83	253.83	26.68	14.59	330.69	580
	平均值	7.28	3.52	19.67	98.66	28.50	53.26	50.85	318.89	39.00	19.59	457.40	756.00
	标准差	0.05	2.18	6.99	28.05	8.76	39.23	21.03	46.02	30.12	5.37	113.67	252.69
	变异系数/%	0.01	0.62	0.36	0.28	0.31	0.74	0.41	0.14	0.77	0.27	0.25	0.33
岩溶水	SMH	7.30	3.94	26.90	98.56	43.56	159.53	63.60	229.66	43.50	21.98	554.76	852
	MZ-1	7.32	0.99	11.93	95.22	26.34	35.10	75.55	296.14	28.71	16.12	422.23	712
	ZK14	7.32	4.46	16.91	87.90	26.13	35.10	22.94	326.36	23.80	18.25	380.86	596
	PYX	7.35	5.81	32.84	79.28	29.26	28.71	61.30	308.23	14.96	25.81	406.79	582
	PYD	7.38	7.77	33.58	67.21	29.26	22.33	61.32	302.18	7.98	27.63	381.23	544
	ZK19	7.30	3.38	12.90	130.30	12.16	45.62	39.76	364.34	31.12	19.45	458.02	466
	DC-3	7.28	2.73	13.84	91.88	35.46	44.67	76.20	332.40	17.96	21.61	449.33	724
	平均值	7.32	4.15	21.27	92.91	28.88	53.01	57.24	308.47	24.00	21.55	436.18	639.43
	标准差	0.03	2.18	9.56	19.61	9.60	47.68	19.37	41.67	11.75	4.08	60.35	130.37
	变异系数/%	0.00	0.53	0.45	0.21	0.33	0.90	0.34	0.14	0.49	0.19	0.14	0.20
混合水	DC-1	7.25	1.01	10.73	82.02	27.35	22.33	28.83	327.57	21.70	19.15	358.14	539
	DC-2	7.26	0.94	10.89	88.54	23.30	31.91	23.73	326.36	24.45	15.93	367.31	567
	XLZ-1	7.33	0.96	9.52	81.86	20.26	19.14	19.52	325.15	14.86	16.32	329.13	515
	CZ	7.42	0.07	9.04	86.17	31.35	22.33	50.94	362.62	15.25	12.36	396.81	532
	平均值	7.32	0.74	10.04	84.65	25.57	23.93	30.76	335.42	19.07	15.94	362.85	485.78
	标准差	0.08	0.45	0.91	3.27	4.83	5.53	13.98	18.16	4.77	2.78	27.88	106.66
	变异系数/%	0.01	0.60	0.09	0.04	0.19	0.23	0.45	0.05	0.25	0.17	0.08	0.22

要受岩石风化作用控制,与含水层沉积物发生了水—岩相互作用。地表水 ZT 采样点 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ 比值为 0.58,该采样点为矿井排水及地下水出露地表

后在沉降区所形成的沉降湖,水体基本处于静止状态,主要排泄通道为蒸发蒸腾,因此该采样点水质逐渐向受蒸发结晶控制转变。

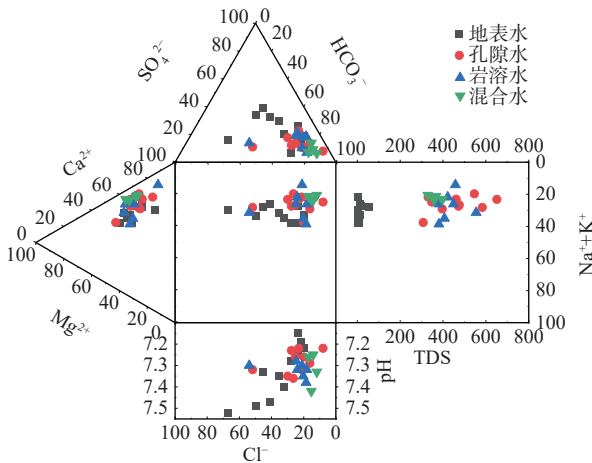


图3 研究区地下水和地表水 Durov 图

Fig. 3 Durov diagram of groundwater and surface water samples in the study area

表2 孔隙水和岩溶水地下水化学成分分类

Table 2 Classification of chemical components of pore water and karst water in groundwater

水样类型	水化学类型	样品数/个	占比/%
孔隙水	HCO ₃ -Ca-Mg	7	70.00
	HCO ₃ -Ca	2	20.00
	Cl-HCO ₃ -Ca-Mg	1	10.00
岩溶水	HCO ₃ -Ca-Mg	5	75.00
	HCO ₃ -Ca	1	12.50
	Cl-HCO ₃ -Ca-Mg	1	12.50
混合水	HCO ₃ -Ca-Mg	4	100.00

地下水中 $n(\text{HCO}_3^-)/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 比值及 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 与 $n(\text{Na}^+)/n(\text{Ca}^{2+})$ 比值不受地下水流速、稀释和蒸发作用的影响,因此可以通过 $n(\text{HCO}_3^-)/n(\text{Na}^+)-n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Na}^+)$ 和 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Na}^+)-n(\text{Na}^+)/n(\text{Ca}^{2+})$ 之间的关系,定性识别水岩相互作用过程^[25]。如图 4(c)(d) 所示,研究区各水体所发生主要水文地球化学过程为硅酸盐岩的溶解,其次为碳酸盐岩(白云岩)、硫酸盐的溶解作用。

4.2 离子来源分析

通过分析水中各离子间的相关性,可以更好地揭示水体水化学特征,分析各成分来源的一致性和差异性^[27-28]。本次研究运用统计软件 SPSS26,对平禹矿区 4 种水样中的主要阴阳离子、H₂SiO₃、TDS 进行 Pearson 相关分析,结果见表 3。

由表 3 可知,地表水中各离子与 TDS 均呈正相关,尤其是 Ca²⁺、Na⁺、SO₄²⁻、Cl⁻,相关性均达到 0.8 以上,说明地表水中,TDS 含量主要与水岩相互作用及人类活动所产生的废弃物有关;K⁺、H₂SiO₃ 与其他离子相关性较弱,说明地表水中的 K⁺、H₂SiO₃ 有相对独

立的来源;HCO₃⁻ 仅与 Mg²⁺ 呈现明显的相关性,相关系数为 0.723,说明 2 种离子主要来源于水岩相互作用;Cl⁻ 与 Na⁺、Ca²⁺ 相互之间存在明显的相关性,而水体中的 Cl⁻ 与 Na⁺ 主要来源于人类生活废水,说明研究区地表水组分受人类生活影响;研究区地表水各离子组分之间存在正相关关系,但各离子之间的相关性不一,说明研究区地表水中各离子在统一来源基础上,还受到其他外界因素(如河流及输水工程下垫面渗漏、矿井排水、人类生产生活等)的影响^[29]。

孔隙水除 K⁺ 外,各离子均与 TDS 呈正相关,尤其是 Ca²⁺ 和 NO₃⁻,相关系数为 0.94、0.906,说明这 2 种离子是孔隙水中 TDS 的主要贡献离子;Ca²⁺ 与 Cl⁻、SO₄²⁻、H₂SiO₃ 及 NO₃⁻ 相关性明显,尤其是 Ca²⁺ 与 NO₃⁻,相关系数为 0.902,而 NO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 主要来源于人类工农业生产所产生的废弃物,研究区位于人类聚集区,且属于覆盖型岩溶与埋藏型岩溶交界处,地下水与地表水交互密切,地下水径流强烈,水-岩相互作用明显,且此处人口密度较大,人类生产生活所产生的废水经地表渗入地下,导致研究区孔隙水中 Ca²⁺ 与 Cl⁻、SO₄²⁻、H₂SiO₃ 及 NO₃⁻ 相关性显著。

岩溶水中,TDS 含量与 Cl⁻、NO₃⁻ 存在明显的相关性,说明人类生产所产生的废水对岩溶水 TDS 贡献最大;K⁺ 和 Na⁺、Cl⁻ 和 NO₃⁻ 之间存在明显的相关性,说明人类生活对岩溶水水化学类型影响较大;Mg²⁺ 与 HCO₃⁻ 呈现负相关性,而 H₂SiO₃ 与 Cl⁻ 与 K⁺ 呈现正相关,这是由于矿井排水导致原有岩溶水水位急剧下降,原有的岩溶排泄通道(如幸福湖泉群)干涸并暴露于人类聚集区,含水层开放程度较高易吸收外界空气中 CO₂,人类生活所产生的污水也极易通过原有的岩溶水排泄通道倒灌补给岩溶水,随着 TDS 含量增大,HCO₃⁻ 受易溶岩溶解/沉淀平衡控制^[30],产生 CaCO₃ 沉淀,HCO₃⁻ 含量降低而 H₂SiO₃ 含量上升。

混合水由于受不同水体的混合作用,各离子间的相关性不明显,仅 HCO₃⁻ 与 K⁺(负相关)、SO₄²⁻ 以及 NO₃⁻ 与 Na⁺ 存在明显的相关性。不同水体在混合后,主要离子成分受水-岩相互作用及人类生活及农业生产活动共同影响,其影响因素相对复杂。

综上所述,研究区不同水体均受到岩石风化溶解和人类生产生活活动等影响,但各离子受影响程度不明。为了更好地反映水体中各离子的组成关系,区分不同控制因素对离子浓度变化的影响程度,采用主成分分析的方法对研究区水样主要离子指标进行降维分

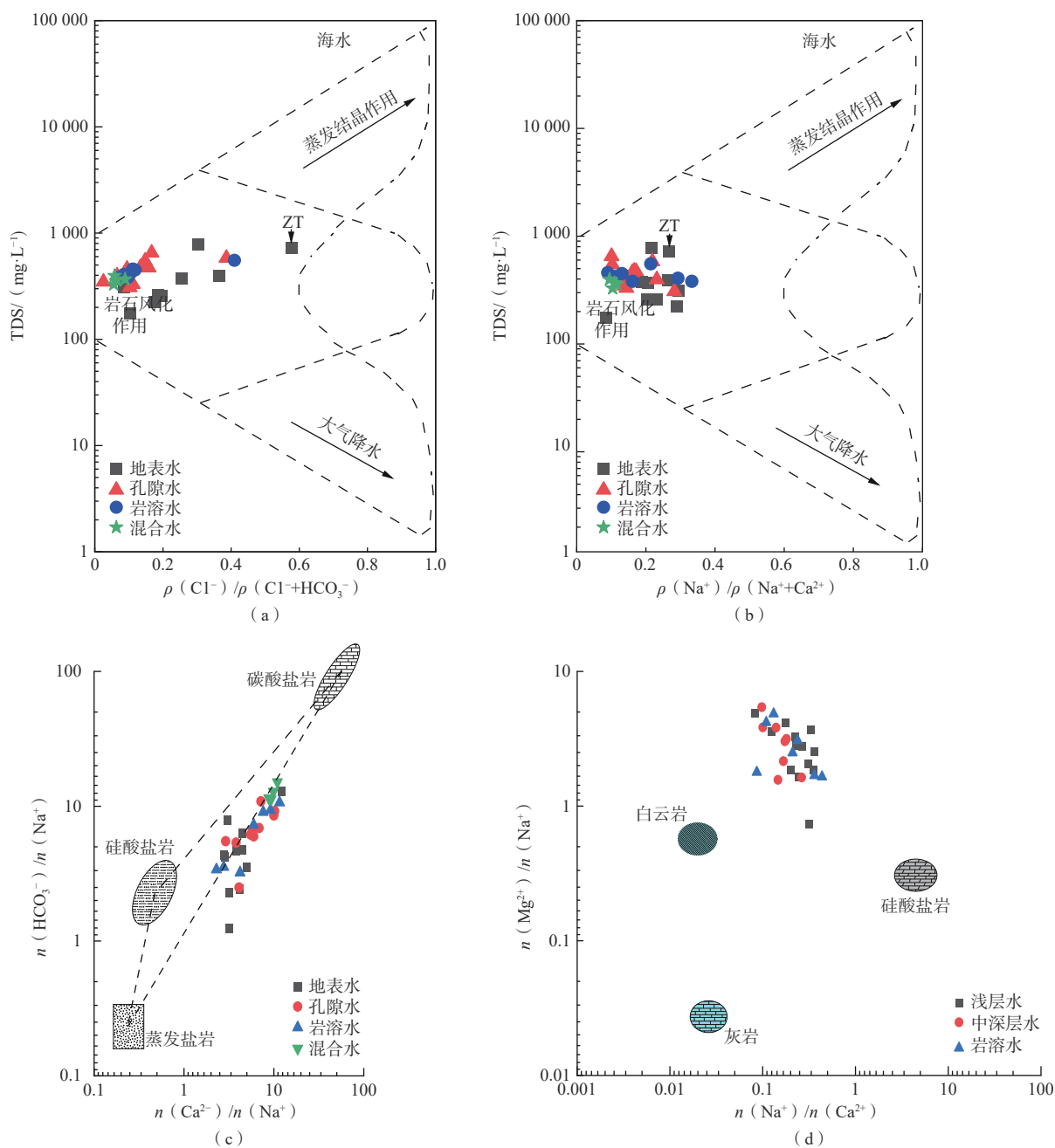


图 4 研究区水样 Gibbs 图和端元图

Fig. 4 Gibbs diagram and end element diagram of water samples in the study area

类, 提取影响地下水中离子变化的主要控制因素^[31-32]。

利用 SPSS 26 软件, 计算每个水样公因子的因子得分, 可以反映单个因子对公共因子的贡献度^[33], 并获得相关系数矩阵的特征值、贡献率和累积贡献率。基于特征值大于 1 的筛选要求, 对研究区不同水体样品的 10 项主要指标进行主成分分析, 见表 4, 识别出不同水体水质演化的 3 个主成分因子, 累计方差贡献率分别为地表水 91.863%、孔隙水 83.205%、岩溶水 90.734%、混合水 100%, 能够反映水化学数据的基本

信息, 可以解释研究区地下水组分来源。

基于因子载荷值 [0, 0.45) 为“极低正”, [0.45, 0.60) 为“低正”, [0.60, 0.75) 为“中等正”, [0.75, 0.90) 为“高正”, [0.9, 1.0] 为“极高正”的评价原则^[34-35], 并结合前文分析可知, 研究区不同水体主成分分析结果如下:

(1) 地表水 S1 主成分主要与 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 相关, 方差贡献率为 37.904, 第一主成分主要与研究区人类生活活动排放的污染物有关; S2 主成分主要与水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 H_2SiO_3 作用, 说明地表水第二主成分

表 3 研究区主要化学组分相关性分析

Table 3 Correlation analysis of the main chemical components in the study area

	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	H ₂ SiO ₃	TDS
地表水	K ⁺	1								
	Na ⁺	0.509	1							
	Ca ²⁺	0.427	0.915**	1						
	Mg ²⁺	0.225	0.507	0.587	1					
	Cl ⁻	0.491	0.946**	0.858**	0.263	1				
	SO ₄ ²⁻	-0.092	0.614*	0.744**	0.798**	0.440	1			
	HCO ₃ ⁻	0.490	0.207	0.386	0.723*	-0.009	0.354	1		
	NO ₃ ⁻	-0.073	0.415	0.635*	0.765**	0.203	0.920**	0.572	1	
	H ₂ SiO ₃	0.351	0.239	0.222	0.436	0.024	0.184	0.599	0.334	1
	TDS	0.392	0.912**	0.979**	0.723*	0.801**	0.833**	0.449	0.715*	0.281
孔隙水	K ⁺	1								
	Na ⁺	-0.102	1							
	Ca ²⁺	-0.353	0.243	1						
	Mg ²⁺	-0.212	0.236	0.527	1					
	Cl ⁻	-0.049	0.720*	0.673*	0.594	1				
	SO ₄ ²⁻	-0.292	0.131	0.643*	0.439	0.241	1			
	HCO ₃ ⁻	-0.375	-0.382	0.208	0.299	-0.372	0.433	1		
	NO ₃ ⁻	-0.195	0.002	0.902**	0.638*	0.623	0.517	0.150	1	
	H ₂ SiO ₃	-0.300	-0.213	0.655*	0.479	0.134	0.508	0.653*	0.691*	1
	TDS	-0.286	0.298	0.940**	0.761*	0.727*	0.700*	0.266	0.906**	0.691*
岩溶水	K ⁺	1								
	Na ⁺	0.860*	1							
	Ca ²⁺	-0.596	-0.664	1						
	Mg ²⁺	0.077	0.397	-0.493	1					
	Cl ⁻	-0.169	0.113	0.268	0.621	1				
	SO ₄ ²⁻	-0.243	0.105	-0.256	0.503	0.128	1			
	HCO ₃ ⁻	-0.072	-0.474	0.340	-0.814*	-0.747	-0.390	1		
	NO ₃ ⁻	-0.578	-0.371	0.672	0.157	0.805*	-0.091	-0.423	1	
	H ₂ SiO ₃	0.872*	0.891**	-0.596	0.292	-0.062	0.203	-0.178	-0.582	1
	TDS	-0.356	-0.074	0.497	0.465	0.927**	0.274	-0.549	0.818*	-0.132
混合水	K ⁺	1								
	Na ⁺	0.742	1							
	Ca ²⁺	-0.353	0.161	1						
	Mg ²⁺	-0.768	-0.282	0.214	1					
	Cl ⁻	0.159	0.650	0.850	-0.060	1				
	SO ₄ ²⁻	-0.947	-0.567	0.290	0.932	-0.135	1			
	HCO ₃ ⁻	-0.994**	-0.707	0.311	0.830	-0.179	0.976*	1		
	NO ₃ ⁻	0.531	0.956*	0.426	-0.105	0.822	-0.363	-0.501	1	
	H ₂ SiO ₃	0.888	0.737	-0.548	-0.420	-0.029	-0.707	-0.833	0.514	1
	TDS	-0.809	-0.208	0.641	0.884	0.325	0.891	0.834	0.060	-0.641

注: *和**分别表示在0.005和0.01水平上相关性显著。

主要受人类农业生产活动污染和水-岩相互作用影响; S3 主成分主要与 HCO₃⁻、H₂SiO₃ 作用, 说明地表水中的第三主成分主要反映水-岩相互作用对地表水的影响;

(2) 孔隙水 P1 主要与 NO₃⁻、Ca²⁺、H₂SiO₃、Mg²⁺、SO₄²⁻ 相关, 方差贡献率为 46.944, 说明孔隙水第一主成分与

人类工农业生产活动污染和地下水硅酸盐岩的溶解有关; P2 主成分主要受 Na⁺、Cl⁻ 作用, 说明人类生活污水是影响第二主成分的主要因素; P3 主要与 HCO₃⁻ 有关, 反映碳酸盐岩溶解对孔隙水的影响。

(3) 岩溶水 C1 主成分主要与 Na⁺、K⁺、H₂SiO₃ 的影响, 方差贡献率为 36.195, 说明第一主成分主要与人类

表 4 研究区不同水体水化学参数的旋转因子载荷矩阵

Table 4 Rotation factor loading matrix of hydrochemical parameters of different water bodies in the study area

参数	地表水主成分			孔隙水主成分		
	S1	S2	S3	P1	P2	P3
K ⁺	0.646	-0.416	0.569	-0.128	-0.060	-0.887
Na ⁺	0.933	0.271	0.149	0.111	0.910	0.182
Ca ²⁺	0.839	0.495	0.160	0.903	0.147	0.203
Mg ²⁺	0.246	0.645	0.660	0.740	0.141	0.164
Cl ⁻	0.987	0.096	-0.069	0.652	0.739	-0.112
SO ₄ ²⁻	0.366	0.910	0.156	0.630	-0.065	0.429
HCO ₃ ⁻	0.062	0.331	0.876	0.264	-0.672	0.568
NO ₃ ⁻	0.152	0.910	0.291	0.957	-0.013	-0.047
H ₂ SiO ₃	0.048	0.128	0.783	0.749	-0.458	0.259
TDS	0.775	0.576	0.257	0.967	0.162	0.191
特征值	3.790	3.030	2.366	4.694	2.112	1.514
方差百分比 /%	37.904	30.299	23.660	46.944	21.117	15.144
累积方差 /%	37.904	68.203	91.863	46.944	68.061	83.205
参数	岩溶水主成分			混合水主成分		
	C1	C2	C3	M1	M2	M3
K ⁺	0.960	-0.162	-0.200	-0.763	0.638	-0.104
Na ⁺	0.957	0.113	0.138	-0.257	0.909	0.328
Ca ²⁺	-0.689	0.335	-0.529	0.247	-0.101	0.964
Mg ²⁺	0.320	0.528	0.697	0.999	-0.014	-0.036
Cl ⁻	0.007	0.990	0.103	-0.021	0.375	0.927
SO ₄ ²⁻	-0.076	0.049	0.899	0.929	-0.370	0.024
HCO ₃ ⁻	-0.315	-0.716	-0.508	0.825	-0.563	0.052
NO ₃ ⁻	-0.485	0.844	-0.164	-0.073	0.833	0.548
H ₂ SiO ₃	0.907	-0.088	0.148	-0.422	0.826	-0.374
TDS	-0.207	0.920	0.115	0.898	-0.127	0.422
特征值	3.620	3.492	1.962	4.240	3.231	2.529
方差百分比 /%	36.195	34.915	19.624	42.401	32.307	25.293
累积方差 /%	36.195	71.111	90.734	42.401	74.707	100.000

生产污染和水中硅酸盐岩溶解有关;岩溶水 C2 主要受 Cl⁻、NO₃⁻ 的作用,说明第二主成分主要反映人类生产生活对岩溶水的影响;C3 主要与 Mg²⁺、SO₄²⁻ 相关,说明水-岩相互作用对岩溶水的影响。

(4)混合水 M1 主成分主要与 Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 有关,说明混合水主要受水-岩相互作用影响;混合水 M2 主要与 Na⁺、NO₃⁻、H₂SiO₃、K⁺ 有关,说明第二主成分主要受控于人类农业生产活动和硅酸盐岩的溶解作用;M3 主要受 Ca²⁺ 影响,说明混合水第三主成分主要与地下水中的碳酸钙溶解有关。

从不同水体主成分分析可以看出,研究区不同水体第一主成分和第二主成分都是主要受人类生产生活 and 地下水中的水-岩相互作用影响,说明研究区不同的水体之间,存在明显的水力联系。

4.3 不同水体氢氧同位素特征

氢氧稳定同位素(D 和 ¹⁸O)是水分子的主要组成

部分,且易受水循环过程的影响,是研究水体补给来源及演化规律的理想天然示踪剂^[36-37]。本次研究分别采集了研究区 2022 年不同水体同位素样品 25 组,测试结果如图 5(a)(b)所示。同时,收集研究区 2009 年大气降水同位素数据 4 组,岩溶水数据 6 组,见图 5(c)(d)。

如图 5(a)(b)所示,研究区地表水 δD 和 δ¹⁸O 变化范围为-67‰~-28‰和-9.5‰~-2.4‰,平均值分别为-51.88‰和-6.93‰;孔隙水 δD 和 δ¹⁸O 变化范围为-76.00‰~-59.00‰和-10.70‰~-8.50‰,平均值分别为-65.00‰和-9.30‰;岩溶水变化范围为-68.00‰~-61.00‰和-9.70‰~-8.60‰,平均值分别为-64.14‰和-9.11‰;混合水变化范围为-67.00‰~-61.00‰和-9.30‰~-9.00‰,平均值分别为-64.00‰和-9.18‰。研究区地表水中 δD 和 δ¹⁸O 值分布范围较大且明显高于地下水,孔隙水中 δD 和 δ¹⁸O 值分布范围大于岩溶

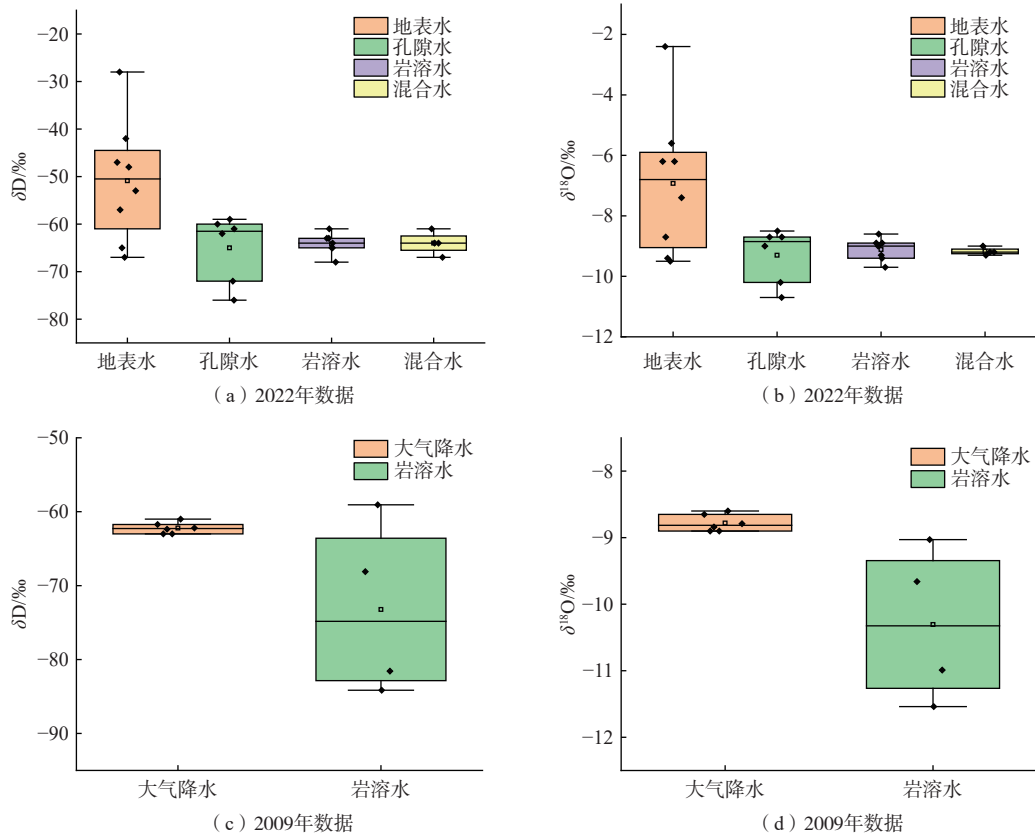


图 5 研究区不同水体氢氧同位素箱式图

Fig. 5 δD and $\delta^{18}O$ box charts in the water bodies in the study area in 2022, δD and $\delta^{18}O$ values box plots in 2009

水, 混合开采井水样的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布范围最小, 包含在孔隙水与岩溶水值域分布范围内, 说明研究区混合开采井补给来源于岩溶水和孔隙水, 混合开采井贯通了岩溶水与孔隙水之间的输水通道, 孔隙水与岩溶水之间存在较为密切的水力联系。如图 5 所示, 研究区 2022 年岩溶水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量相比 2009 年数据略有降低, 说明研究区岩溶水主要补给来源发生了变化。参考研究区 2009 年大气降水同位素资料, 2022 年研究采集的地表水样中 δD ($-67\text{‰} \sim -28\text{‰}$) 和 $\delta^{18}O$ ($-9.5\text{‰} \sim -2.4\text{‰}$) 值分布范围与 2009 年大气降水中 δD ($-84.15\text{‰} \sim -59.06\text{‰}$) 和 $\delta^{18}O$ ($-11.54\text{‰} \sim -9.03\text{‰}$) 相比部分重合且略有升高, 说明研究区地表水主要来源除大气降水外还有其他补给来源。

1961 年, Graig 通过研究来自全球 400 件不同水体样品的同位素资料发现: δD 和 $\delta^{18}O$ 呈线性关系^[38-39], 从而绘制出全球大气降水线 ($\delta D=8\delta^{18}O+10$), 通过判读不同水体的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值与全球大气降水线及当地大气雨水线的位置关系, 分析不同水体的补给来源以及不同水体之间的水力联系^[40]。本次研究选取距离研究区最近的郑州大气降水线 ($\delta D=6.75\delta^{18}O-2.71$)^[41] 作为

研究区当地大气降水线, 绘制研究区 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系图(图 6)。由图可知:

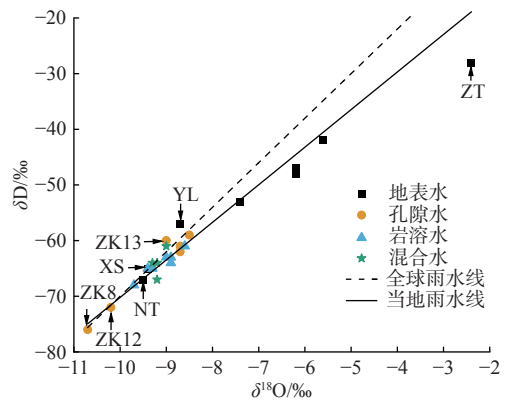


图 6 平禹矿区不同水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 6 Plot of δD and $\delta^{18}O$ of different water bodies in the Pingyu mining area

(1) 研究区地表水水样位于全球雨水线和郑州雨水线下方, 说明研究区地表水都不同程度的受蒸发作用影响, 大气降水是研究区地表水的主要补给来源; 地表水 ZT 点明显偏移当地雨水线, 该采样点位于张堂塌陷区东南侧的沉降湖, 水体靠蒸发排泄, 基本处

于静止状态,所以采样点受蒸发分馏作用强烈,发生氧漂移作用,表现出较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值及较低的 δD 值;地表水 YL 表现出轻微的氘漂移现象,表现出较高的 δD 值及较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,该采样点为南水北调中线渠水,说明渠水在输水过程中,在保持取水源头水化学特征的同时不断接受沿途大气降水的补给。

(2)研究区地下水水样基本都位于全球雨水线和当地雨水线附近,表明平禹一矿矿区地下水的主要补给来源是大气降水。孔隙水除 ZK8、ZK12 点外,其他地下水采样点与地表水 NT 点、XS 点相对聚集,说明研究区地下水与地表水 NT 点、XS 点存在相同的补给来源或紧密的水力联系。孔隙水 ZK13 表现出轻微的氘漂移现象,表现出较高的 δD 值及较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,该采样井孔深为 190 m,取水段为 100~190 m,为中深层孔隙水,采样点附近为村民自挖鱼塘且位于断裂带上方,大气降水、地表水及浅层孔隙水可直接通过导水断裂向深部运移并不断与周围岩土体发生水岩相互作用,导致该采样点出现轻微的氘漂移现象。

4.4 不同水体间的相互转化定量分析

研究区不同水体之间水力联系相对复杂,地表水 NT 点、XS 点采样点 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -9.45‰ ,孔隙水中除 ZK8、ZK12 外其余采样点 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -8.73‰ ,岩溶水采样点 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -9.11‰ ,地下水(孔隙水、岩溶水)采样点 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -8.97‰ ,大气降水采用 2009 年 7 月研究区大气降雨平均值为 -10.3‰ 。不同水体之间 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值相互关系为:孔隙水>岩溶水>地表水>大气降水,表现为大气降水和地下水(孔隙水、岩溶水)混合补给地表水、大气降水与孔隙水混合补给岩溶水的特征。

把不同水体同位素作为水体来源示踪剂,并根据浓度平衡方程和质量守恒定律,运用二端元混合模型计算地表水不同补给源的贡献比率^[42]。其计算公式为:

$$S = G(1 - X) + RX$$

式中: S——地表水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值/ ‰ ;

G——地下水(孔隙水、岩溶水)中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值/ ‰ ;

R——大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值/ ‰ ;

X——大气降水所占比例;

1-X——地下水(孔隙水、岩溶水)所占比例。

通过计算可知,在孔隙水与大气降水补给地表水区域,大气降水占地表水来源的 84.7%,孔隙水占 15.3%;在岩溶水与大气降水补给地表水区域,大气降水占地表水来源的 28.6%,岩溶水占 71.4%;在大气降水与孔

隙水补给岩溶水区域,大气降水占岩溶水补给来源的 24.2%,孔隙水占岩溶水来源的 75.8%。研究区“三水”间的转化关系为地表水有 56.5% 来源于大气降水,43.5% 来源于地下水。

通过本次研究发现,平禹一矿大规模疏排岩溶水,在研究区形成了以平禹一矿为中心的巨大大降深漏斗(图 7)。经调查可知,研究区岩溶水水位从 2010 年 5 月的水位标高 120~130 m 之间,降为 2021 年 7 月的 $-110\sim-100\text{ m}$ 之间,孔隙水水位普遍高出岩溶水水位近百米。研究区岩溶水由原先的顶托补给上层孔隙水转变为接受上层孔隙水的渗漏补给,矿井排水成为研究区主要的地下水排泄方式。

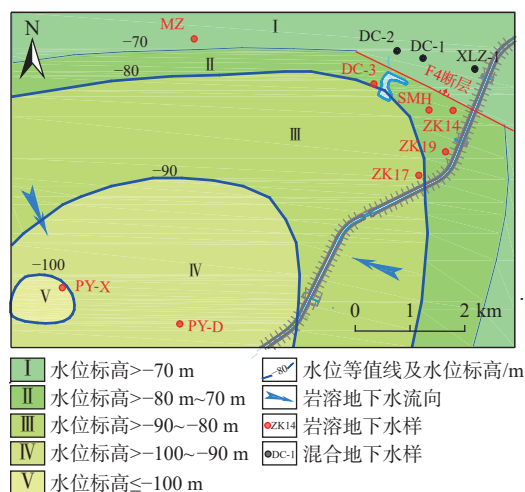


图 7 研究区岩溶地下水等水位线图

Fig. 7 Contour map of karst groundwater level in the study area

5 结论

(1)研究区地下水呈弱碱性,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{—Ca-Mg}$ 型为主,地下水水化学组分受岩石风化作用控制,主要水文地球化学过程为硅酸盐岩风化溶解,蒸发作用对地下水水化学组分的影响较小。

(2)研究区地下水中离子主要来源于水-岩相互作用和人类生产活动所产生的废弃物,受人类活动影响显著,地下水中 $\text{NO}_3\text{—N}$ 含量存在超标现象,主要原因是人类活动产生的污染物等经淋滤作用或通过原先的岩溶水排水通道直接进入地下水。

(3)大气降水为研究区不同水体的主要补给来源,孔隙水和岩溶水通过先存断裂或渗漏等方式相互补给,存在紧密的水力联系。地表水接受地下水和大气降水的双重补给,补给比例分别为 43.5% 和 56.5%。

(4)大规模矿井排水后,平禹矿区岩溶水由原先

顶托补给上层孔隙水转变为接受上层孔隙水的越流补给,矿井排水成为区内地下水的主要排泄方式。

参考文献 (References) :

- [1] 刘久潭,李颖智,高宗军,等.拉萨河流域中下游地区水化学及地表水-地下水转化关系研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(5):10-20. [LIU Jiutan, LI Yingzhi, GAO Zongjun, et al. Hydrochemistry and relationship between groundwater and surface water in the middle and lower reaches of Lhasa River Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(5): 10 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王现国,狄艳松,李扬,等.洛阳断陷盆地浅层孔隙地下水环境演化特征[J].人民黄河,2020,42(7):77-79. [WANG Xianguo, DI Yansong, LI Yang, et al. Evolutionary characteristics of shallow pore ground water in fault basins[J]. Yellow River, 2020, 42(7): 77 - 79. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张清华,赵玉峰,唐家良,等.京津冀西北典型流域地下水化学特征及补给源分析[J].自然资源学报,2020,35(6):1314-1325. [ZHANG Qinghua, ZHAO Yufeng, TANG Jialiang, et al. Hydrochemistry characteristics and the recharge source of groundwater in typical watersheds of Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1314 - 1325. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 梁杏,张婧玮,蓝坤,等.江汉平原地下水化学特征及水流系统分析[J].地质科技通报,2020,39(1):21-33. [LIANG Xing, ZHANG Jingwei, LAN Kun, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and analysis of groundwater flow systems in Jianghan Plain[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 21 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [5] YANG Qingchun, LI Zijun, MA Hongyun, et al. Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality using classic integrated geochemical methods in the Southeastern part of Ordos Basin, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 879 - 888.
- [6] WANG Ping, YU Jingjie, ZHANG Yichi, et al. Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina Basin, northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 72 - 86.
- [7] ZHANG Han, CHEN Zongyu, TANG Changyuan. Tracing runoff components in the headwater area of Heihe River by isotopes and hydrochemistry[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2022, 10(4): 405 - 412.
- [8] 赵春红,梁永平,卢海平,等.娘子关泉域岩溶水氢氧同位素特征及影响因素浅析[J].地质科技情报,2018,37(5):200-205. [ZHAO Chunhong, LIANG Yongping, LU Haiping, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristics and influencing factors of Karst water in the niangziguan spring area[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(5): 200 - 205. (in Chinese with English abstract)]
- [9] SPRENGER M, HERBSTTRIT B, WEILER M. Established methods and new opportunities for pore water stable isotope analysis[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(25): 5174 - 5192.
- [10] ZHANG Zhuo, GUO Huaming, WANG Zhen. Differences in major ions as well as hydrogen and oxygen isotopes of sediment pore water and lake water[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(2): 147 - 156.
- [11] 易冰,刘景涛,吕晓立,等.高寒干旱区地表水与地下水水化学特征及转换关系:以大通河流域为例[J].环境科学,2023,44(2):752-760. [YI Bing, LIU Jingtiao, LYU Xiaoli, et al. Hydrochemical and isotopic evidence for groundwater conversion of surface water in alpine arid areas: A case study of the Datong River Basin[J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 752 - 760. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王诗语,孙从建,陈伟,等.典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析[J].环境科学,2023,44(3):1416-1428. [WANG Shiyu, SUN Congjian, CHEN Wei, et al. Analysis of water chemistry characteristics and hydraulic relationships of different water bodies in typical mountain-oasis systems in the northwest inland area[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1416 - 1428. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘景明,丁建丽,包青岭,等.基于同位素揭示艾比湖流域地下水特征[J].干旱区地理,2023,46(2):201-210. [LIU Jingming, DING Jianli, BAO Qingling, et al. Study on characteristics of groundwater in Ebinur Lake Basin using isotopes method[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 201 - 210. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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 Long, LIU Tingxi, DUAN Limin, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [15] YANG Zhongyuan, HUANG Pinghua, DING Fengfan. Groundwater hydrogeochemical mechanisms and the connectivity of multilayer aquifers in a coal mining region[J]. Mine Water and the Environment, 2020, 39(4): 808 - 822.
- [16] 张坤. 同位素在河南煤矿水文地质条件研究中的应用 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2012. [ZHANG Kun. The application of isotope at the study of hydrogeological conditions of coal mine in Henan Province[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李倩, 马龙, 刘廷玺, 等. 采煤对海流兔流域大气降水-地表水-地下水-矿井水转化关系的影响 [J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 146 - 157. [LI Qian, MA Long, LIU Tingxi, et al. Conversion of precipitation, surface water, groundwater and mine water affected by coal mining in the Hailiutu River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(5): 146 - 157. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 唐辉. 河南平禹一矿岩溶水疏降流场数值模拟与预测 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2011. [TANG Hui. Numerical simulation and prediction of Karst water dewatering flow in Pingyu 1st coal mine, Henan Province[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 潘国营, 张坤, 王佩璐, 等. 利用稳定同位素判断矿井水补给来源——以平禹一矿为例 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 119 - 122. [PAN Guoying, ZHANG Kun, WANG Peilu, et al. Judgement of mine water recharge source using stable isotope: A case study of 1st mine of Pingyu[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(6): 119 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张富有. 许昌市地下水含水层组划分和同位素对比研究 [J]. 地下水, 2017, 39(4): 40 - 41. [ZHANG Fuyou. Division and isotope correlation study of groundwater aquifer group in Xuchang[J]. Ground Water, 2017, 39(4): 40 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 等. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征 [J]. 地球科学, 2017, 42(5): 685 - 692. [YU Haotian, MA Teng, DENG Yamin, et al. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in eastern Jianghan plain[J]. Earth Science, 2017, 42(5): 685 - 692. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 殷俊. 邯郸市地下水污染修复和防治 [D]. 西安: 长安大学, 2017. [YIN Jun. Remediation and prevention of groundwater pollution in Handan city[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 孔令健, 王振龙, 王兵. 阜阳市集中式深层地下水饮用水源地水化学特征及成因分析 [J]. 中国农村水利水电, 2020(3): 78 - 82. [KONG Lingjian, WANG Zhenlong, WANG Bing. An analysis of the hydrochemical characteristics and causes of drinking water source of concentrated deep groundwater in Fuyang city[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(3): 78 - 82. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 袁宏颖, 杨树青, 丁雪华, 等. 乌拉特灌域地下水水化学离子特征评价及来源分析 [J]. 节水灌溉, 2020(2): 67 - 72. [YUAN Hongying, YANG Shuqing, DING Xuehua, et al. Evaluation and source analysis of chemical ion characteristics of groundwater in wulate irrigation area[J]. Water Saving Irrigation, 2020(2): 67 - 72. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 赵江涛, 周金龙, 梁川, 等. 新疆焉耆盆地平原区地下水演化的主要水文地球化学过程分析 [J]. 环境化学, 2017, 36(6): 1397 - 1406. [ZHAO Jiangtao, ZHOU Jinlong, LIANG Chuan, et al. Hydrogeochemical process of evolution of groundwater in plain area of Yanqi, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(6): 1397 - 1406. (in Chinese with English abstract)]
- [26] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088 - 1090.
- [27] 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 等. 鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水水化学特征及控制因素 [J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1236 - 1244. [HE Jin, ZHANG Youkuan, ZHAO Yuqing, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of groundwater in the xialatuo basin section of the Xianshui River[J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1236 - 1244. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素 [J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4003 - 4010. [ZHANG Tao, WANG Mingguo, ZHANG Zhiyin, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in ranwu lake basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4003 - 4010. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 金阳, 姜月华, 董贤哲, 等. 浙江宁波平原地下水水化学特征及其生态环境效应 [J]. 中国地质, 2022, 49(5): 1527 - 1542. [JIN Yang, JIANG Yuehua, DONG Xianzhe, et al. Chemical characteristics and eco-environmental effect of groundwater in Ningbo Plain, Zhejiang Province[J]. Geology in China, 2022, 49(5):

- 1527 – 1542. (in Chinese with English abstract)]
- [30] RAVIKUMAR P, SOMASHEKAR R K. Principal component analysis and hydrochemical facies characterization to evaluate groundwater quality in Varahi River Basin, Karnataka state, India[J]. *Applied Water Science*, 2017, 7(2): 745 – 755.
- [31] SHEKHA Y A. Evaluation of water quality for Greater Zab River by principal component analysis/ factor analysis[J]. *Iraqi Journal of Science*, 2016, 57(4b): 2650 – 2663.
- [32] YANG Wenjie, ZHAO Yue, WANG Dong, et al. Using principal components analysis and IDW interpolation to determine spatial and temporal changes of surface water quality of xin'anjiang river in Huangshan, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(8): 2942.
- [33] OMOIRABOR 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 and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2008, 33(8/9/10/11/12/13): 666-673.
- [34] MGBENU C N, EGBUERI J C. The hydrogeochemical signatures, quality indices and health risk assessment of water resources in Umunya district, southeast Nigeria[J]. *Applied Water Science*, 2019, 9(1): 1 – 19.
- [35] ARORA S, KESHARI A K. Pattern recognition of water quality variance in Yamuna River (India) using hierarchical agglomerative cluster and principal component analyses[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(8): 1 – 18.
- [36] 马燕华, 苏春利, 刘伟江, 等. 水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 [J]. *环境科学*, 2016, 37(12): 4690 – 4699. [MA Yanhua, SU Chunli, LIU Weijiang, et al. Identification of sulfate sources in the groundwater system of Zaozhuang: Evidences from isotopic and hydrochemical characteristics[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(12): 4690 – 4699. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 崔亚莉, 刘峰, 郝奇琛, 等. 诺木洪冲洪积扇地下水氢氧同位素特征及更新能力研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(6): 1 – 7. [CUI Yali, LIU Feng, HAO Qichen, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes and renewability of groundwater in the Nuomuhong alluvial fan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 于静洁, 宋献方, 刘相超, 等. 基于 δD 和 $\delta^{18}O$ 及水化学的永定河流域地下水循环特征解析 [J]. *自然资源学报*, 2007, 22(3): 415 – 423. [YU Jingjie, SONG Xianfang, LIU Xiangchao, et al. A study of groundwater cycle in Yongding River Basin by using δD , $\delta^{18}O$ and hydrochemical data[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(3): 415 – 423. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 江欣悦, 李静, 郭林, 等. 豫北平原浅层地下水化学特征与成因机制 [J]. *地质科技通报*, 2021, 40(5): 290 – 300. [JIANG Xinyue, LI Jing, GUO Lin, et al. Chemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in the northern Henan Plain[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(5): 290 – 300. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 崔玉环, 王杰, 刘友存, 等. 升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 [J]. *环境科学*, 2021, 42(7): 3223 – 3231. [CUI Yuhuan, WANG Jie, LIU Youcun, et al. Hydro-chemical characteristics and ion origin analysis of surface groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River interface[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(7): 3223 – 3231. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 武茜茜, 陈粉丽, 周鑫, 等. 郑州与福州降水同位素特征及水汽来源对比分析 [J]. *环境化学*, 2022, 41(1): 125 – 134. [WU Xixi, CHEN Fenli, ZHOU Xin, et al. Comparative analysis of precipitation isotopes and water vapor sources in Zhengzhou and Fuzhou[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(1): 125 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 谷洪彪, 迟宝明, 王贺, 等. 柳江盆地地表水与地下水转化关系的氢氧稳定同位素和水化学证据 [J]. *地球科学进展*, 2017, 32(8): 789 – 799. [GU Hongbiao, CHI Baoming, WANG He, et al. Relationship between surface water and groundwater in the Liujiang Basin hydrochemical constrains[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(8): 789 – 799. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳