



引文格式: 赵少攀, 杨森, 张东兴, 等. 基于水化学和 D、¹⁸O 同位素的豫西某矿山地下水水源识别[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 313–322. DOI: 10.12401/j.nwg.2024014

Citation: ZHAO Shaopan, YANG Sen, ZHANG Dongxing, et al. Groundwater Source Identification Based on Hydrochemistry and D, ¹⁸O Isotopes in a Mine in Western Henan Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 313–322. DOI: 10.12401/j.nwg.2024014

基于水化学和 D、¹⁸O 同位素的豫西某矿山 地下水水源识别

赵少攀^{1,2,3}, 杨森^{1,2,*}, 张东兴^{1,2}, 常成^{1,2}, 闫佳喆^{1,2}, 刘念^{1,2}, 麻倩倩^{1,2}, 张茜^{1,2}

(1. 河南省第一地质大队有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 河南省自然资源科技创新中心(地质遗迹与地质文化研究), 河南 郑州 450000; 3. 河南省有色金属综合勘查工程技术研究中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 笔者通过对研究区进行水文调查, 发现坑道内地下水均为构造裂隙水, 并分别在丰水期和枯水期对地表水和坑道水进行了针对性的采样分析。水化学特征显示, 地表水中阴阳离子随丰水期和枯水期而发生变化显著, 而地下水阴阳离子含量变化小, 水化学性质较为稳定。通过对 2021 年 420 中段丰水期涌水量和同位素与水库水对比分析, 推测在特殊水文年水库水参与该中段地下水活动。而其余地段地表水与地下水的水化学特征和 D、¹⁸O 同位素含量均有较大区别, 说明地表水参与地下水活动不显著。综上所述, 研究区地下水具有较为独立的含水系统, 主要接受岩层内构造裂隙水补给, 平时基岩裂隙水和溪沟水补给水库水, 当遇到大暴雨, 水库水位上升至大于地下水位时, 才会反补地下水, 推测在水库水位大于 535 m 时, 地表水参与个别中段地下水活动, 但涌水总量不大, 整体可控。

关键词: 地表水; 地下水; 构造裂隙水; 水化学; D、¹⁸O 同位素

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0313-10

Groundwater Source Identification Based on Hydrochemistry and D, ¹⁸O Isotopes in a Mine in Western Henan Province

ZHAO Shaopan^{1,2,3}, YANG Sen^{1,2,*}, ZHANG Dongxing^{1,2}, CHANG Cheng^{1,2}, YAN Jiazhe^{1,2},
LIU Nian^{1,2}, MA Qianqian^{1,2}, ZHANG Xi^{1,2}

(1. Henan First Geological Brigade Co., Ltd, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. Henan Natural Resources Science and Technology Innovation Center (Research on Geological Heritage and Geological Culture), Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. Henan Nonferrous Metals Comprehensive Exploration Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Through the hydrology survey of the study area, the groundwater in the tunnel is found to be structural fissure water, the surface water and tunnel water are sampled and analyzed in the wet season and dry season respectively. The hydrochemical characteristics show that the anions and cations in surface water change

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-10-13; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 河南省 2022 年度自然资源科研项目(2022-10), 河南发恩德矿业有限公司科研项目(FED-HQ23155)联合资助。

作者简介: 赵少攀(1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿产地质、水文地质研究工作。E-mail: zsp621@foxmail.com。

* 通讯作者: 杨森(1985-), 男, 高级工程师, 从事水工环相关研究工作。E-mail: 304918005@qq.com。

significantly with the high and low water periods. However, the changes in the content of anions and cations in groundwater are small, and the chemical properties of the water are relatively stable. By comparing and analyzing the water inflow and isotopes of 420 section and reservoir in wet season of 2021, it is speculated that the reservoir water participates in groundwater activities in this section during special hydrological years. However, there are significant differences in the hydrochemical and D, ^{18}O isotope characteristics between surface water and groundwater in other areas, indicating that the participation of surface water in groundwater activities is not significant. In summary, the groundwater in the study area has a relatively independent aquifer system, mainly supplied by structural fissure water within the rock layers. At ordinary times, bedrock fissure water and brook water supply the reservoir water. When encountering a heavy rainstorm, the reservoir water level will rise above the groundwater level, and then the groundwater will be replenished. It is speculated that when the water level of the reservoir is greater than 535 m, surface water participates in individual groundwater activities in the individual section, but the total amount of water inflow is not large and overall controllable

Keywords: surface water; groundwater; structural fissure water; hydrochemistry; D, ^{18}O isotope

矿山坑道水源识别,是矿山防水治水和安全生产的前提,正确了解矿山充水条件,准确识别坑道充水水源是矿山水文地质工作的重要组成部分,也是水文地质工作的难点所在(高尚,2017)。经长期探索水源识别形成了较为成熟的理论和方法,主要有水化学分析法(宋煜,2016;杨柱等,2018;吴君毅等,2023),示踪法(宋煜,2016;高尚,2017;杨柱等,2018),水温法(孙继平等,2019),GIS理论分析法(张瑞钢,2008;张洋等,2014)等。通过对水化学特性分析,可进行补给路径的粗略判定,在外界无物质加入时,通过阴阳离子的含量也可以进行水体的溯源分析(肖国强等,2014;宋煜等,2018)。氢氧元素是构成水分子的基本元素,D、 ^{18}O 同位素不随水体的排泄路径而发生改变,是水循环过程中的一种良好天然示踪剂,因此可利用D、 ^{18}O 在水体中的分布规律来判定地下水的补给来源(宋煜,2016;宋煜等,2018;杨峰等,2018;杨柱等,2018;王新娟等,2023)。笔者通过矿区2021~2022年D、 ^{18}O 同位素测试数据和水化学特征进行测试分析,以及对地表水和地下水进行同期监测,以期对矿山井下水体补给来源做出判断,为矿山安全生产提供依据。

1 研究区概况

1.1 气象特征

研究区位于豫西山区腹地,该区属温带大陆性季风型气候,具有雨热同期、降雨少且集中、蒸发作用较强、温差大、冬寒夏炎、四季分明等特点。常年降雨量为600~800 mm,平均约为700 mm,年平均蒸

发量为1492.6 mm,约为年平均降雨量的两倍。2021年降雨量达到1015.9 mm,其中七月、八月、九月和十月降雨量较大,可视为丰水期,分别为209.0 mm、238.1 mm、292.0 mm和46.2 mm。

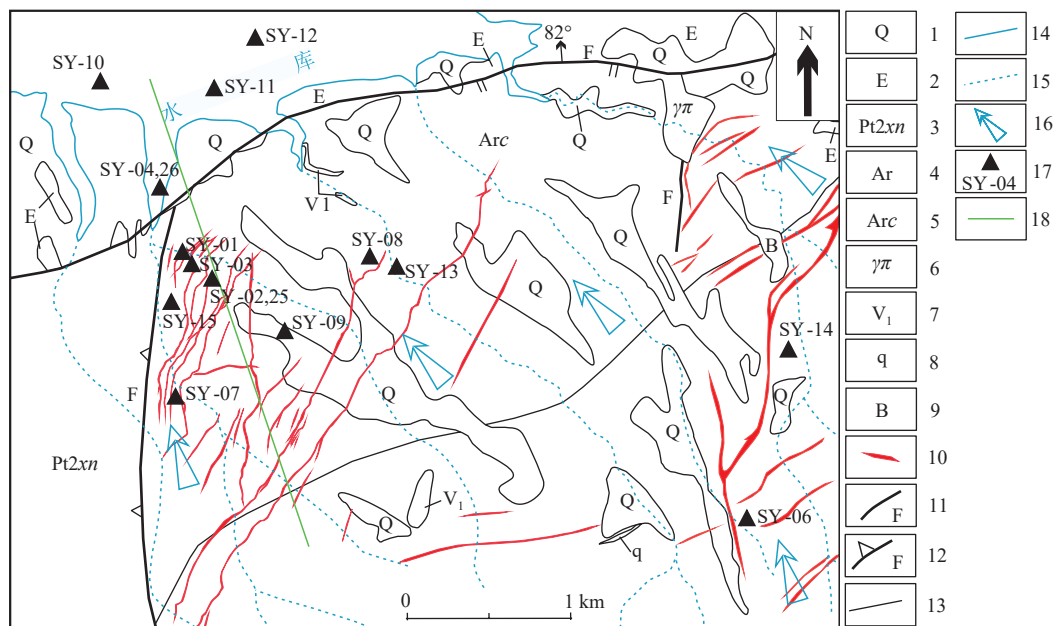
1.2 地形地貌

区域上地貌类型为中低山夹山间谷地。山体走向近NEE,沟谷发育方向呈NNW向,地势东南高西北低,山体坡度 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。山坡植被发育一般,山谷发育季节性溪沟,并且切割深,呈“V”字型,沟底坡降 $6\%\sim 20\%$,丰水期水量较大,枯水期水量减小甚至断流。研究区内所有溪沟内水体最终均汇入北侧水库。

1.3 水文地质条件

研究区地层主要为太古界太华群石板沟组(Arsh)、太华群草沟组(Arc)变质岩;中元古界熊耳群许山组(Pt_2xn)火山岩;以及古近系(E)和第四系(Q)沉积层。以流域划分水文地质单元,研究区所在水文地质单元面积约为 35 km^2 ,其东、南、西皆为地表分水岭,北部为水库及河流,同时研究区北部具有一区域性的断层,上盘底部为古近系地层,岩性主要为砾岩、砂质泥岩、泥质砂岩等,具有一定的隔水性,是一个比较完整的水文地质单元。

断裂构造为NNE、NE、近S-N向和近E-W向,其中NNE和NE向断裂与区内成矿关系密切,是主要的含矿构造(图1)。这一系列断裂破碎带,构成了地下水的储存场所,区内NE-NNE、近SN及近EW向的断裂构造带是地下水的主要控水构造。大气降水通过地表风化裂隙及构造破碎带补给地下水,在地形切



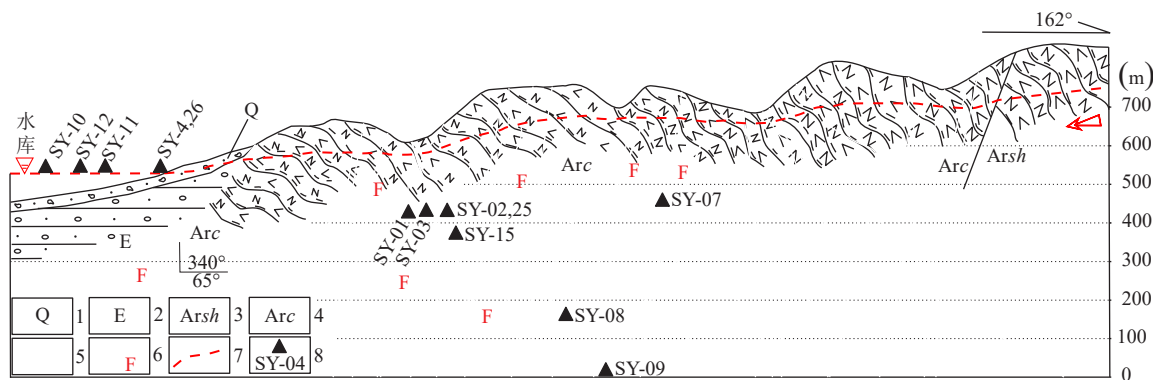
1.松散岩类孔隙水(第四系砾石、砂卵石等); 2.层状孔隙水(古近系砾岩、砂质泥岩等); 3.层状岩类裂隙水(熊耳群许山组火山岩); 4.块状岩类裂隙水(太华群石板沟组片麻岩); 5.块状岩类裂隙水(太华群草沟组片麻岩); 6.块状岩类裂隙水(花岗斑岩); 7.块状岩类裂隙水(变辉长岩); 8.块状岩类裂隙水(石英脉); 9.块状岩类裂隙水(爆破角砾岩); 10.矿脉; 11.断层; 12.拆离断层; 13.地层界线; 14.水库边界; 15.溪沟; 16.地表水流向; 17.采样位置及编号; 18.剖面线

图1 研究区水文地质图

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area

割处多以泉的形式排泄, 据以往调查资料, 泉水流量为 0.03~0.70 L/s 为弱富水性含水带。经调查, 地表第四系和古近系地层厚度薄, 含水量小, 对矿床冲水影

响主要为基岩裂隙水, 故本矿床是裂隙充水矿床, 上述断裂构造也是地下水主要补给的通道(图 2), 构造大都导水性较差, 各含水带间水力联系不大。



1.第四系碎屑沉积物; 2.古近系砂砾岩; 3.太华群石板沟组片麻岩; 4.太华群草沟组片麻岩; 5.矿脉; 6.断层; 7.潜水面; 8.采样位置及编号

图2 研究区水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile map of the study area

2 取样与测试

2021年, 受特大暴雨影响, 研究区雨水充沛,

10~11月各沟谷内仍保持较高的流量, 可视其为丰水期, 为本次研究提供了良好条件, 直至次年4月沟谷内水体逐渐减少, 部分水体甚至干涸。为查明研究区地表水、地下水化学特征及两者之间的关系, 本研究于丰

水期(2021年10~11月)和枯水期(2022年4月)在地表沟谷溪流、水库、水井、钻孔和坑道分别进行了水样采集,样品均采用聚丙烯水壶进行现场采集,共采集水化学样品14件,D、 ^{18}O 同位素样品12件。水化学样品测试分析委托河南省自然资源检测院完成,主要采用的方法为试剂法,测试精度为0.01 mg/L;同位素样品测试分析委托中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成,采用 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 平衡法,通过L2130i型号水同位素分析仪进行测定, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 检测精度分别为1‰和0.1‰。

3 分析讨论

3.1 水化学分析

本次采用舒卡列夫水化学分类法,根据水样中 $\text{Na}^+(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 共6类离子的含量,凡摩尔百分数含量大于25%的阳离子和阴离子进行组合确定水化学类型。按照矿化度又划分为4组:A组矿化度小于1.5 g/L;B组矿化度为1.5~10 g/L;C组为10~40 g/L;D组大于40 g/L。依据本次测试结果,计算得出各样品水化学类型见表1。

3.1.1 丰水期水化学特征分析

(1) 水库及地表溪流

SY-04、SY-11、SY-13样品分别采丰水期水库岸边、水库中央、地表溪流,以高 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} ,低 Na^+ 和 Cl^- 为特征,总硬度183.5~477.5 mg/L,永久硬度57.0~244.0 mg/L, TDS含量为229.05~616.81 mg/L, PH值7.9~8.0,为弱碱性低矿化水,舒卡列夫水化学分类为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}(\text{Mg})\text{-A}$ 型。

(2) 井水(浅层地下水)

SY-06、SY-14采自研究区丰水期周边民用水井,井深2.5~5.0 m,以高 HCO_3^- 、 Ca^{2+} ,低 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为特征。总硬度分别为344.5 mg/L和159.5 mg/L,永久硬度分别119.5 mg/L和46.5 mg/L, TDS含量为455.48 mg/L和208.66 mg/L, PH值为7.6和7.3,为弱碱性低矿化水,舒卡列夫水化学分类为 $\text{HCO}_3\text{-Ca-A}$ 型。

(3) 坑道水

本次采集水样均为坑道内断层裂隙水,其水化学特征如下。

SY-01、SY-02、SY-03分别采自420 m中段天井、420 m中段CM防水闸门、420 m中段采空区,以高 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} ,低 Mg^{2+} 和 Cl^- 为特征。总硬

度269.0~342.5 mg/L,永久硬度18.5~175.5 mg/L, TDS含量为773.2~983.7 mg/L, pH值7.6~8.2,为弱碱性低矿化水,舒卡列夫水化学分类为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca-A}$ 型。

SY-07采自450 m中段采场,以高 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ,低 Na^+ 和 Cl^- 为特征,其中 Mg^{2+} 含量明显高于地表水。总硬度428.5 mg/L,永久硬度226.0 mg/L, TDS为623.0 mg/L, PH值8.25,为弱碱性低矿化水,舒卡列夫水化学分类为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca-Mg-A}$ 型。

SY-08、SY-09分别采自160 m中段延脉掘进面、10 m中段,样品均为巷道裂隙水,两者水化学性质相近,以高 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ ,低 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 为特征。总硬度分别为61.0 mg/L和98.0 mg/L,无永久硬度, TDS分别为650.0 mg/L和916.9 mg/L, PH值分别为8.0和8.1,为弱碱性低矿化水,舒卡列夫水化学分类为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na-A}$ 型。

3.1.2 枯水期水化学特征分析

(1) 水库水

SY-26采自枯水期水库岸边,枯水期水库水以高 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} ,低 Mg^{2+} 和 Cl^- 为特征,舒卡列夫水化学分类为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca-A}$ 型。枯水期水库水中阴阳离子存在不同程度的浓缩,枯水期 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 是丰水期的6.5倍、1.2倍、1.6倍、3.4倍、2.3倍、1.4倍。TDS、总硬度、永久硬度、总碱度受采样位置和季节变化较大,PH值几乎无变化,均为弱碱性。

(2) 坑道水

SY-15、SY-25分别采自枯水期380 m中段钻孔、380 m中段漏水天井口(水来自420 m中段),以高 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ ,低 Mg^{2+} 和 Cl^- 为特征。总硬度分别为104.0 mg/L和306.0 mg/L,永久硬度分别0 mg/L和73.5 mg/L, TDS分别为928.5 mg/L和954.9 mg/L, PH值7.7和8.1,为弱碱性低矿化水,舒卡列夫水化学分类分别为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na-A}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca-A}$ 型。

枯水期与丰水期相比,同水源SY-25与SY-02相比,枯水期 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 是丰水期的0.9倍、1.0倍、1.5倍、1.0倍、1.0倍、0.9倍,离子含量变化不大, TDS、总硬度、总碱度变化也不大,但永久硬度变化范围较大,是丰水期的4.0倍,总体来讲地下水水化学特征变化较小,舒卡列夫水化学分类稳定,为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca-A}$ 型。

依据水化学类型和Piper图解(图3),SY-04、SY-

表 1 研究区水化学和 D、¹⁸O 同位素测定表
Tab. 1 Water chemistry and D, ¹⁸O isotope measurements in the study area

样号	日期	采样地点	分析项目 (mg/L)										稳定同位素		类型		
			Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	总硬度	永久硬度	PH	舒卡列夫分类	δD(‰)		δ ¹⁸ O(‰)	
SY-01	202110	420 m中段天井	133.40	88.38	28.31	49.28	370.31	209.91	774.6	337.0	165.0	172.0	8.10	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na·Ca-A	-68	-9.6	地下水
SY-02	202110	420 m中段CM防水门	238.28	83.37	14.82	59.20	435.15	305.71	983.7	269.0	18.5	250.5	7.60	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na·Ca-A	-	-	地下水
SY-03	202110	420 m中段采空区	129.26	93.19	26.73	46.09	376.07	203.81	773.2	342.5	175.5	167.0	8.20	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na·Ca-A	-	-	地下水
SY-04	202110	近研究区侧水库岸边	11.27	53.91	11.91	9.93	64.84	154.38	229.1	183.5	57.0	126.5	8.00	HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca-A	-68	-9.9	地表水
SY-06	202111	矿区周边水井(深2.5 m)	13.81	111.02	16.40	22.33	60.52	274.59	455.5	344.5	119.5	225.0	7.60	HCO ₃ ·Ca-A	-	-	浅层地下水
SY-07	202111	450 m中段采场	48.53	88.38	50.54	18.08	293.94	247.13	623.0	428.5	226.0	202.5	8.25	HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Mg-A	-61	-8.8	地下水
SY-08	202111	160 m中段延脉掘进面	216.20	19.64	2.92	41.12	223.34	293.51	650.0	61.0	0	240.5	8.00	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na-A	-72	-10.0	地下水
SY-09	202111	10 m中段	290.26	29.46	5.95	98.55	363.59	258.11	916.9	98.0	0	211.5	8.10	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na-A	-79	-10.7	地下水
SY-10	202111	水库中央	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-68	-9.8	地表水
SY-11	202111	水库中央	8.65	58.72	16.28	6.74	82.13	165.97	616.8	477.5	244.0	233.5	7.90	HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca·Mg-A	-68	-9.8	地表水
SY-12	202111	水库中央	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-67	-9.8	地表水
SY-13	202111	地表沟谷溪流	1.84	68.54	8.87	6.74	58.60	172.08	230.6	207.5	66.5	141.0	8.00	HCO ₃ ·SO ₄ ·Ca-A	-63	-9.3	地表水
SY-14	202112	矿区周边水井(深5 m)	9.47	49.10	8.99	6.74	35.54	137.91	208.7	159.5	46.5	113.0	7.30	HCO ₃ ·Ca-A	-	-	浅层地下水
SY-15	202204	380 m中段钻孔	293.02	36.87	2.92	73.03	365.51	314.25	928.5	104.0	0	257.5	7.70	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na-A	-74	-10.2	地下水
SY-25	202204	380 m中段泄水孔(水来自420 m中段防水门)	212.52	85.77	22.36	62.04	430.35	283.74	954.9	306.0	73.5	232.5	8.10	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na·Ca-A	-70	-9.7	地下水
SY-26	202204	近研究区侧水库岸边	64.86	66.13	22.36	28.71	168.10	222.72	461.5	257.0	74.5	182.5	7.90	HCO ₃ ·SO ₄ ·Na·Ca-A	-65	-9.1	地表水

06、SY-11、SY-13、SY-14 样品阳离子、阴离子分布特征来看,5 个样品水化学含量值较为聚集,说明丰水期水库水、地表溪流水和井水化学特征十分接近,舒卡列夫类型分为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot(\text{Mg})\text{-A}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Ca-A}$, 枯水期水库水较丰水期各离子含量均有不同程度的浓缩,舒卡列夫类型为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca-A}$ 。而坑道水化学较复杂,离子含量变化较大,Piper 图解数据点分布比较分散,舒卡列夫类型主要分为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-$

$\text{Na}\cdot(\text{Ca})\text{-A}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg-A}$,通过对 420 m 中段丰水期枯水期水化学性质对比,发现坑道内水化学性质较为稳定,水化学类型没发生改变。基于目前水化学数据,坑道水与地表水水化学特征区别明显,特别是坑道中 $\text{Na}^+\text{+K}^+$ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 含量均远大于地表水,单从水化学特征来看坑道水与地表水(水库水和地表溪流)水力联系不大,具有独立含水系统的可能性较大。

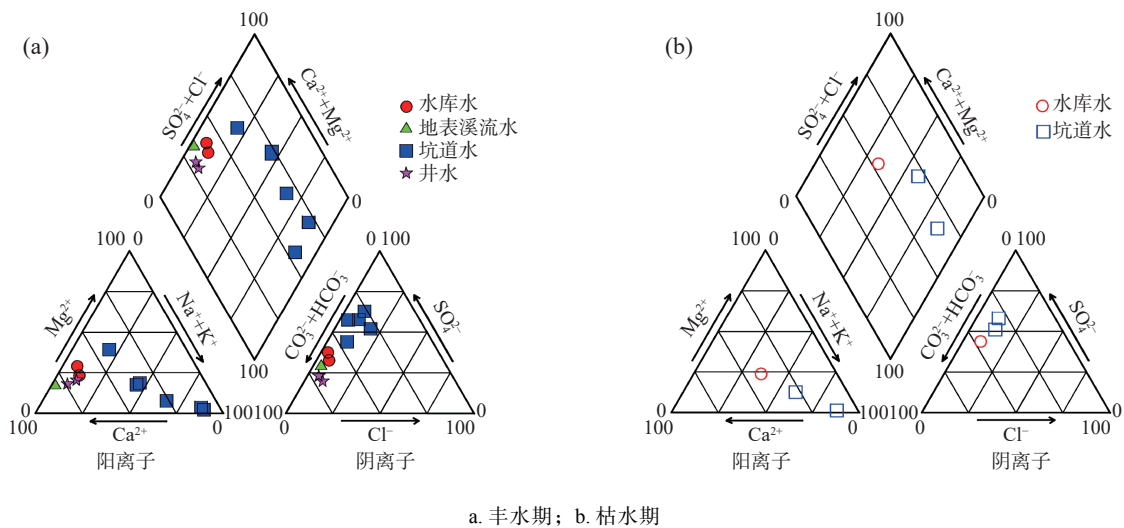


图3 研究区水样 Piper 图解

Fig. 3 Piper diagram of water samples in the study area

依据埋深,可将坑道水分为两类,分别为:埋深在 380 m 标高以上,埋深小于 350 m 的地下水;埋深在 380 m 标高以下,埋深大于 350 m 的地下水。水化学结果来看,第一类坑道水为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca-A}$ 或 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg-A}$ 型裂隙水,共同特征为水体中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} ,部分 Na^+ 含量较高, Cl^- 含量低;第二类坑道水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-A}$ 型裂隙水,水体中 Na^+ 和 SO_4^{2-} 含量较高,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量低。前者的总硬度、永久硬度均大于后者。

3.2 D、 ^{18}O 同位素分析

已公布资料显示研究区降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素曲线没有相关数据,距离研究区较近的郑州地区降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素前人做过相关研究,有郑州地区 $\delta\text{D}=6.75\delta^{18}\text{O}-2.71$ (周慧, 2019);王涛等(2013)实测降水氢氧同位素数据,用最小二乘法拟合得到郑州地区大气降水线方程为: $\delta\text{D}=6.478\delta^{18}\text{O}-2.706$,并获得了郑州地区四季的降水 $\delta^2\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素方程;王锐等(2014)以郑州 1986~1991 年降水数据为基础,获得区域降水同位素曲线方程为: $\delta\text{D}=7.06\delta^{18}\text{O}+0.20$ 。本次采

用最新数据统计研究成果 $\delta\text{D}=6.75\delta^{18}\text{O}-2.71$,与全球大气降水线 $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ 相比,郑州及周边地区大气降水线的斜率偏小,常数为负数。本次数据分析建立在上述方程之上。

3.2.1 丰水期 D、 ^{18}O 分析

丰水期共采集样品 9 件,测试结果见表 1, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 范围分别为 $-79\text{‰}\sim-61\text{‰}$ 和 $-10.7\text{‰}\sim-8.8\text{‰}$,水样平均 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 -68.22‰ 和 -9.74‰ 。

(1) 水库及地表溪流

丰水期水库水样 4 件,分别为 SY-04、SY-10、SY-11、SY-12,其中 SY-04 样品采自近研究区侧水库岸边,其余均采自水库中央位置, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 范围分别为: $-68\text{‰}\sim-67\text{‰}$ 和 $-9.9\text{‰}\sim-9.8\text{‰}$,均值分别为: -67.75‰ 和 -9.83‰ , δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围高度集中,充分说明水库水 D 和 ^{18}O 同位素分布的均一性。

地表溪流流水样 1 件, SY-13, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 -63‰ 和 -9.3‰ ,与同期水库水样相比具有一定的差异。

样品均分布在郑州地区降水同位素曲线两侧(图 4),

说明样品和区域降水关系较为密切, 主要接受大气降水补给。而且, 丰水期水库水与枯水期相比, 重同位素含量明显较低, 说明降雨作用对区域重同位素具有一定的“稀释”作用。

(2) 坑道水

丰水期坑道水样品 4 件, 分别为 SY-01、SY-07、SY-08、SY-09, δD 和 $\delta^{18}O$ 范围分别为: $-79\text{‰} \sim -61\text{‰}$ 和 $-10.7\text{‰} \sim -8.8\text{‰}$, 变化范围较大, 拟合曲线方程为 $\delta D = 9.48\delta^{18}O + 22.70$, 斜率及截距均大于区域降水同位素曲线。

而坑道内采集的 4 件同位素样品 SY-01、SY-07、SY-08、SY-09, 所在坑道内标高分别为 420 m、450 m、160 m、10 m, δD 和 $\delta^{18}O$ 均落在全球降水同位素曲线之下, 除 SY-07 样品外, 其余样品均在郑州地区降水同位素曲线之下(图 4), 说明坑道内水样较地表水样相对贫化重同位素; 随着埋深的增加, 样品偏离区域降水曲线越远, 这表明区域降水对地下水的影响随着埋深增加而减小; 从空间分布上来看, 坑道内水样标高越高, 重同位素含量越大, 标高越低, 重同位素含量越低, 这表明重同位素分布随着埋深增加有逐渐贫化的趋势, 这一结果与前人研究一致(刘丹等, 2002)。

10 m 中段 SY-09 样品 δD 和 $\delta^{18}O$ 值均较小, 也是

本次采集水样最大埋深处, 偏离全球和郑州地区 δD - $\delta^{18}O$ 曲线较远, 受区域降水影响小, 这说明越往深部受到地表水体渗流的影响越小, 具有稳定而独立的含水系统, 接受岩层上部构造裂隙水的渗流补给。而 450 m 中段 SY-07 样品和 420 m 中段 SY-01 样品距离郑州地区和全球降水曲线均较近, 表明在垂直方向上两者受区域降水影响较大, 可能与区域降水通过附近地表浅部断裂构造渗流补给地下储存空间, 越往深部渗流补给作用影响越小。

3.2.2 枯水期 D 和 ¹⁸O 分析

枯水期采集样品共 3 件, 分别为 SY-15、SY-25、SY-26。其中 SY-15、SY-25 坑道内样品, 采样标高分别为 380 m 和 420 m, δD 分别为 -74‰ 和 -70‰ , $\delta^{18}O$ 分别为 -10.2‰ 和 -9.7‰ ; SY-26 为同期水库水样, δD 和 $\delta^{18}O$ 分别为 -65‰ 和 -9.1‰ (表 1)。

(1) 水库水

水库水 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量分别为 -65‰ 和 -9.1‰ , 水库样品较丰水期平均值 δD 增加了 2.75‰ , $\delta^{18}O$ 增加了 0.73‰ , 重同位素的显著增加揭示了枯水期蒸发作用对水库水的重同位素的富集作用。

(2) 坑道水

坑道内采集两个样品几乎落在了丰水期坑道水样 δD - $\delta^{18}O$ 曲线之上(图 4), 且上部 420 m 中段水样较

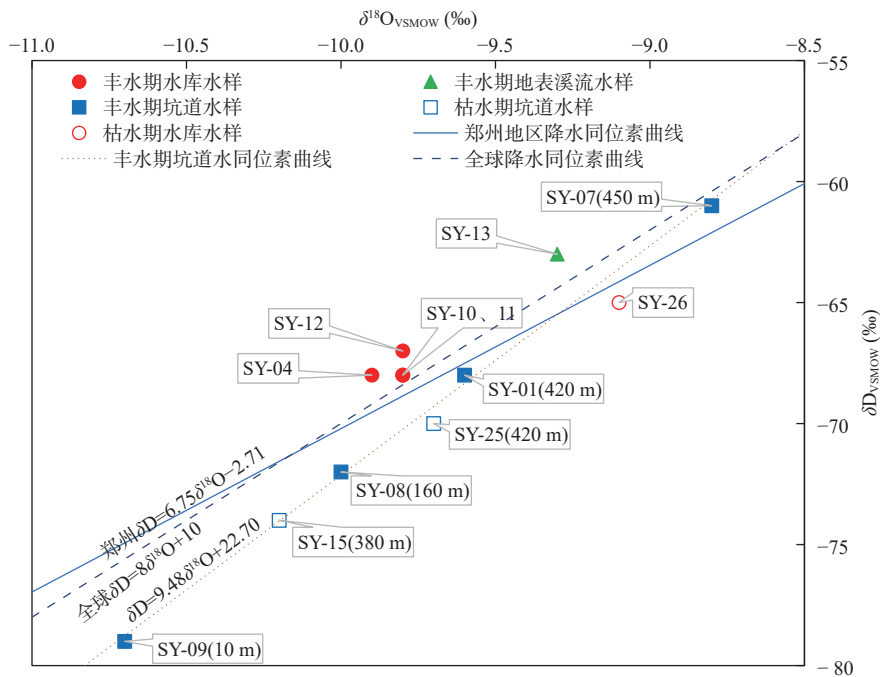


图 4 研究区水样 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 4 Water samples in the study area δD and $\delta^{18}O$ diagram

下部 380 m 中段富集重同位素,与丰水期得出的“随埋深深度增加 D、 ^{18}O 同位素逐渐贫化”结论一致。420 m 中段枯水期和丰水期相比 δD 降低了 2‰, $\delta^{18}\text{O}$ 降低了 0.1‰,重同位素含量变化小,这表明该中段地下水继承了丰水期的同位素特征。由于枯水期水库水重同位素明显富集,而 420 m 中段枯水期重同位素含量却稍有降低,这说明枯水期水库水不参与地下水渗流补给或补给量极小。

枯水期地表水 SY-26 重同位素含量与同时期的坑道内地下水重同位素含量存在明显差异,根据地表水和地下水重同位素变化可知,丰水期地表水参与地下水活动量大于枯水期,但整体参与量很小,这说明地下含水系统处于较稳定状态,水源补给稳定,受外界影响较小。

依据前面地下水的分类,埋深小于 350 m 和大于 350 m 的地下水相比,在同一时间段内,前者相对富集重同位素,后者相对亏损。枯水期与丰水期相比,丰水期重同位素相对富集,枯水期相对亏损。

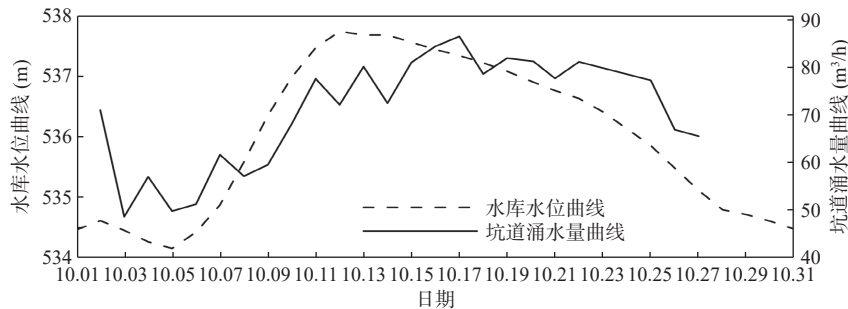


图5 研究区 2021 年 10 月竖井涌水量和水库水位关系曲线图

Fig. 5 Relation curve between shaft water inflow and reservoir water level in October 2021

根据水库水位和竖井涌水量关系来看,当水库水位超过 535 m 后竖井涌水量明显上升,推测水库水位超过 535 m 后,水压力升高,水体可能通过压力传导,经地表松散堆积物渗流或某构造裂隙进入地下进行排泄。值得说明的是,多年观测数据显示水库水位一般维持在 525 m 上下,2021 年受河南特大暴雨影响,水库为避开黄河洪峰,闭闸蓄水,才导致水库水位过高。

3.3.2 同位素证据

420 m 中段 SY-01 样品 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的值分别为 -68‰ 和 -9.6‰,与同期水库水样均值 -67.75‰ 和 -9.83‰ 十分接近,结合上述水库水位与坑道涌水量关系,2021 年 10 月 23 日 420 m 中段天井涌水与库区水体系同一水源可能性较大。而从水化学特征来看,

3.3 坑道充水水源探讨

3.3.1 坑道涌水与水库水位关系

2021 年 8 月中旬水库水位为 519.45 m,之后库区水位持续上升,10 月 12 日水库水位达历史极值 537.75 m,这对矿山安全生产是极大考验,为研究区地表水和地下水水力联系研究提供了良好条件。之后库区开闸泄洪,水位逐渐下降,2022 年 4 月 24 日采样时水位为 527.02 m,经调查 420 m 中段天井平时干燥无水,2021 年 10 月上旬水量增大,后期经连续观测直至 11 月下旬涌水逐渐减小至消失。

竖井 10 月 1 日至 27 日涌水量和水库水位关系曲线见图 5,自 10 月 5 日起,水库水位上升,竖井涌水量上升,由原来约 60 m^3/h 上升至约 80 m^3/h ,并逐步趋向于平稳,后期水库开闸放水,水库水位下降,竖井涌水量逐渐下降,但与 10 月 5 日前后涌水量相比仍维持较高水平,表现出一定的滞后现象。虽然涌水量有所上升,但量不大,整体可控。

SY-01 阳离子和阴离子含量均远大于同时期的水库水样,如果同位素示踪结果成立,那么坑道水化学特征的升高可能与水库水体下渗补给过程中溶解途径介质中的可溶性化学物质有关,但目前缺乏直接证据,需进一步采取水体溯源工作。

450 m 中段采场水样 SY-07,为断层裂隙水, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量分别为 -61‰ 和 -8.8‰,两者均高于同期水库和地表溪流水同位素含量,为目前所采集样品同位素含量最大值,说明该点涌水不受地表水源补给。

160 m 中段水样 SY-08 为矿化带底板裂隙涌水, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 含量分别为 -72‰ 和 -10.0‰,偏离区域降水同位素曲线较大,两者含量与同时期水库和地表溪流水样同位素值相比较为亏损,同时 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量相对较高,说明该点涌水受地表水和大气降水的影响较小,

应为地层内部基岩裂隙水体补给, 该基岩裂隙水特征表现为地下水的远距离输送, 其交替条件相对较差, 补给来源应为大气降水入渗和上游岩层侧向补给。

10 m中段水样SY-09同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量最低, 分别为-79‰和-10.7‰, 经长期观测, 涌水量稳定在0.47 m³/h, 不受地表水渗流影响, 偏离区域降水同位素曲线最远, 说明具有独立的含水系统, 主要接受地层深部含水层稳定补给, 该含水层与160中段水体具有相同特征。

枯水期采集样品共3件, 分别为SY-15、SY-25、SY-26。其中, SY-15、SY-25为坑道内样品, SY-26为同期水库水样。同期水库水样SY-26同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量分别为-65‰和-9.1‰, 坑道SY-25、SY-15同位素 δD 分别为-70‰和-74‰, $\delta^{18}O$ 分别为-9.7‰和-10.2‰, 水库水与坑道水 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量差距较大, 说明枯水期坑道内充水水源与地表水无直接关系。

4 结论

(1)水化学分析结果表明, 丰水期地表水水化学特征较为接近, 富含HCO₃⁻、SO₄²⁻和Ca²⁺, 而相对低Na⁺+K⁺、Mg²⁺和Cl⁻, 舒卡列夫类型为HCO₃·SO₄-Ca·(Mg)-A和HCO₃-Ca-A两种类型, 枯水期水库水阴阳离子发生浓缩, 水化学类型变为HCO₃·SO₄-Na·Ca-A。坑道水化学性质较为复杂, 阳离子和阴离子含量均普遍大于地表水, 特别是以高HCO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺+K⁺、Ca²⁺为特征, 水化学类型分为HCO₃·SO₄-Na·Ca-A、HCO₃·SO₄-Ca·Mg-A、HCO₃·SO₄-Na-A等3种类型, 通过对420 m中段枯水期和丰水期水化学特征进行对比, 发现坑道水化学性质稳定。

(2)平时基岩裂隙水和溪沟水补给水库水, 当遇到大暴雨, 水库水位上升至大于地下水位时, 才会反补地下。例如, 特殊水文年丰水期坑道内部分中段(如420 m中段)与同期水库水D、¹⁸O同位素含量较为接近, 且坑道涌水量随着水库水位的升高而增加, 可能揭示水库水在高水位(超535 m)时参与坑道地下水活动, 水体可能通过压力传导, 经地表松散堆积物或构造裂隙薄弱地带进行排泄, 但缺乏直接证据。枯水期420 m中段与同期水库水D、¹⁸O同位素含量相差较大, 两者无明显水力联系。建议矿山后期密切监测水库水位和坑道涌水量变化, 为安全生产提供保障。

(3)丰水期和枯水期水化学和同位素分析结果显示, 除坑道部分中段(如420 m中段)地下水在特殊水文年(水库水位超535 m)与地表水可能有较为明显联系外, 研究区其他坑道地下水与地表水均无明显水力联系, 坑道地下水具有较为独立的含水系统, 主要补给来源为岩层内部的构造裂隙水, 特征表现为地下水的远距离输送, 其交替条件相对较差, 以Na⁺+K⁺含量高和D、¹⁸O贫化为特征, 补给来源为大气降水入渗和上游岩层侧向补给。

参考文献(References):

- 高尚. 萧县旗杆楼铁矿充水水源识别与矿坑涌水量预测[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- GAO Shang. Water Source identification and prediction of mine water inflow for Xiaoxian Qiganlou iron ore[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- 刘丹, 杨立中, 李晓. 秦岭特长隧道地区同位素水文地质研究[J]. 成都理工学院学报, 2022, 29(3): 340-345.
- LIU Dan, YANG Lizhong, LI Xiao. Study of isotopic hydrogeology in the Qinling extra-long tunnel area[J]. Journal of Chengdu University Technology, 2022, 29(3): 340-345.
- 宋煜, 李保珠. 云南会泽铅锌矿区地下水化学和同位素分析[J]. 地质学报, 2018, 92(5): 1081-1089.
- SONG Yu, LI Baozhu. Hydrochemistry and isotopic analysis of groundwater in the Huize lead-zinc mining district, Yunnan[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(5): 1081-1089.
- 宋煜. 云南会泽铅锌矿区深部岩溶水特征及矿井涌水预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- SONG Yu. Lead-zinc mine deep karst water features and the mine water gushing prediction in Huize Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- 孙继平, 靳春海. 矿井水灾感知与水源判定方法研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(4): 1-5.
- SUN Jiping, JIN Chunhai. Research on methods of mine flood perception and water source determination[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(4): 1-5.
- 王锐, 郝成元, 马守臣. 郑州市降水氢氧同位素组成特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 135-137.
- WANG Rui, HAO Chengyuan, MA Shouchen. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopic compositions in precipitation of Zhengzhou city[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(S1): 135-137.
- 王涛, 徐丽娜, 刘笑. 郑州大气降水氧同位素变化及水汽来源分析[A]. 创新驱动发展 提高气象灾害防御能力—第30届中

- 国气象学会年会 [C].2013.
- WANG Tao, XU Lina, LIU Xiao. Oxygen isotope variation and water vapor source analysis of atmospheric precipitation in Zhengzhou[A]. Innovation-driven development and improvement of meteorological disaster prevention capability-the 30th annual meeting of the Chinese Meteorological Society[C]. 2013.
- 王新娟, 许苗娟, 韩旭, 等. 基于同位素和水化学的北京平谷盆地地下水循环研究[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 127-139.
- WANG Xinjuan, XU Miaojuan, HAN Xu, et al. Study on groundwater cycle in Beijing Pinggu basin based on isotopes and hydrochemistry[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 127-139.
- 吴君毅, 刘洪, 欧阳渊, 等. 螺髻山北麓地下水化学特征与水质评价[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 151-164.
- WU Junyi, LIU Hong, OUYANG Yuan, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in northern foothill of Luoji mountains[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 151-164.
- 肖国强, 杨吉龙, 胡云壮, 等. 秦皇岛洋-戴河滨海平原海水入侵过程水文化学识别[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(2): 32-39.
- XIAO Guoqiang, YANG Jilong, HU Yunzhuang, et al. Hydrogeochemical recognition of seawater intrusion processes in Yang river and Dai river coastal plain of Qinhuangdao city[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(2): 32-39.
- 杨峰, 阮明, 张东强, 等. 海南省三亚市海坡地区热矿水同位素地球化学特征研究[J]. 地下水, 2018, 40(4): 15-17.
- YANG Feng, RUAN Ming, ZHANG Dongqiang, et al. Study on the geochemical characteristics of hot mineral water isotope in Haipo district, Sanya city, Hainan province[J]. Ground Water, 2018, 40(4): 15-17.
- 杨柱, 赵恰, 王军. 紫金山金铜矿地下开采矿坑涌水水源识别及防治方案[J]. 现代矿业, 2018, 34(5): 228-232.
- YANG Zhu, ZHAO Qia, WANG Jun. Water source identification of underground mine water inflow and treatment scheme of Zijinshan Au-Cu mine[J]. Modern Mining, 2018, 34(5): 228-232.
- 张瑞钢. 基于 GIS 的潘一矿地下水环境特征分析及突水水源判别模型 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- ZHANG Ruigang. GIS-based groundwater environmental characteristics analysis and discriminating model of water-inrush source — a case study of the Panyi coalfield, Huainan coalmine corporation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- 张洋, 马云东, 吴浩. 矿坑充水水源识别的 EW-UCA 模型及应用[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 32-37.
- ZHANG Yang, MA Yundong, WU Hao. EW-UCA model for identifying mine's water-filled source and its application[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(4): 32-37.
- 周慧. 我国大气降水中稳定同位素的多时空尺度变化及影响因素分析 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019.
- ZHOU Hui. Analysis on the variation characteristics and influencing factors of precipitation stable isotope in China under different spatial and temporal scales[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.