



移动扫码阅读

李海祥,曹志国,王路军,等.台格庙矿区地下水水化学特征与演变规律研究[J].煤炭科学技术,2023,51(9):284-291.

LI Haixiang, CAO Zhiguo, WANG Lujun, *et al.* Study on chemical characteristics and evolution law of groundwater in Taigemiao Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 284-291.

## 台格庙矿区地下水水化学特征与演变规律研究

李海祥<sup>1</sup>,曹志国<sup>2</sup>,王路军<sup>2</sup>,池明波<sup>2</sup>,胡博文<sup>2</sup>,张锁<sup>3</sup>,周爱霞<sup>1</sup>

(1.生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心地下水部,北京 100012;2.北京低碳清洁能源研究院煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,北京 100011;3.神华新街能源有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯 017200)

**摘要:**台格庙矿区煤炭资源丰富,但水资源匮乏、生态环境脆弱,利用水文地球化学方法,开展矿区全流域地下水水化学特征与演变规律研究,能为矿区绿色开采提供科学支撑。利用 Piper 三线图分析白垩系地下水、侏罗系地下水、河水和湖水类型,其水化学特征满足湖水由河水和不断演变的地下水混合后形成的条件;通过 Gibbs 图分析得出,白垩系和侏罗系地下水在循环演变过程中受岩石和蒸发作用控制;离子比值端元法进一步表明,白垩系和侏罗系地下水受硅酸盐岩盐和岩盐控制为主,同时伴随离子交换;最后通过质量平衡模拟得出,白垩系地下水循环演变过程中溶解白云岩、石膏、岩盐矿物质,吸收 CO<sub>2</sub>,析出方解石,伴随离子交换,可与不同比例河水混合形成湖水,但侏罗系地下水只能混合少量河水或不混合河水。河水占红碱淖湖水补给量 83%,侏罗系地下水不能为其主要补给来源,红碱淖湖水主要来源白垩系地下水和河水。结合矿区水文地质条件,将矿区地下水流系统分为南侧白垩系地下水流系统、北侧的白垩系地下水流系统和深部的侏罗系地下水流系统,煤炭开采直接影响侏罗系地下水流系统,在保障两个白垩系地下水流系统不被破坏的前提下,当采煤排水只掠夺侏罗系边界流出水量或少量侏罗系补给红碱淖水量时,采煤对红碱淖及周边河流的影响降至最小。

**关键词:**台格庙矿区;水化学类型;水岩作用;质量平衡;地下水循环

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2023)09-0284-08

### Study on chemical characteristics and evolution law of groundwater in Taigemiao Mining Area

LI Haixiang<sup>1</sup>, CAO Zhiguo<sup>2</sup>, WANG Lujun<sup>2</sup>, CHI Mingbo<sup>2</sup>, HU Bowen<sup>2</sup>, ZHANG Suo<sup>3</sup>, ZHOU Aixia<sup>1</sup>

(1. Technology Center for Soil, Agricultural and Rural Ecological and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Groundwater, Beijing 100012, China; 2. Beijing Low Carbon and Clean Energy Research Institute State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 100011, China; 3. Shenhua Xinjie Energy Co., Ltd., Erdos 017200, China)

**Abstract:** Taigemiao Mining Area is rich in coal resources, but water resources are scarce and the ecological environment is fragile, and the use of hydrogeochemical methods to carry out research on the chemical characteristics and evolution law of groundwater in the whole basin of mining areas can provide scientific support for green mining in mining areas. Piper three-line diagram was used to analyze the types of Cretaceous groundwater, Jurassic groundwater, river water and lake water, and the water chemical characteristics met the characteristics of lake water mixed by river water and evolving groundwater; through Gibbs diagram analysis, it is concluded that the Cretaceous and Jurassic groundwater in the cyclic evolution process It is controlled by rock and evaporation; the ion ratio endmember method further shows that the Cretaceous and Jurassic groundwater is dominated by silicate rock salt and rock salt, accompanied by ion exchange; finally, the mass balance simulation shows that the Cretaceous groundwater circulation During the evolution process, dolomite, gypsum, and rock salt minerals are dissolved, CO<sub>2</sub> is absorbed, and calcite is precipitated. With ion exchange, it can be mixed with different proportions of

收稿日期:2022-09-05 责任编辑:黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2022-1439

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52004011);国家能源集团科技资助项目(GJNY-21-129)

作者简介:李海祥(1991—),男,河北唐山人,工程师,博士。Tel: 010-57337356, E-mail: 1689677534@qq.com

river water to form lake water, but Jurassic groundwater can only be mixed with a small amount of river water or not mixed with river water. The river water accounts for 83% of the water supply of Hongjiannao Lake. Jurassic groundwater cannot be the main source of water supply. The main sources of water in Hongjiannao Lake are Cretaceous groundwater and river water. Combined with the hydrogeological conditions of the mining area, the groundwater flow system of the mining area is divided into the Cretaceous groundwater flow system in the south, the Cretaceous groundwater flow system in the north and the Jurassic groundwater flow system in the deep. Coal mining directly affects the Jurassic groundwater flow system. On the premise of ensuring that the two Cretaceous groundwater flow systems are not damaged, when coal mining drainage only captures the outflow water from the Jurassic boundary or a small amount of Jurassic replenishment to Hongjiannao, coal mining will affect Hongjiannao and surrounding rivers. impact is minimized.

**Key words:** Taigemiao Mining Area; hydrochemical type; hydrolytic interaction; mass balance; groundwater circulation

## 0 引 言

地下水在循环过程中受蒸发、混合、水岩相互作用、离子交换、人类活动等影响,其化学组分也会随之发生改变。在不同的循环阶段,地下水会演变出独特的水化学特征,其空间分布规律蕴含了地下水在循环过程中的赋存环境、径流途径,能量质量交换等重要信息<sup>[1-4]</sup>。通过分析水化学特征,探明地下水演变规律,可揭示地下水与环境的相互影响机制。

西部五省区(晋、陕、蒙、宁、新)煤炭产量和储量占全国70%以上,随着东部煤炭资源枯竭,鄂尔多斯盆地侏罗系煤田持续开发,中深部煤层开采成为今后的重点<sup>[5]</sup>。但在西部五省(区),生态极其脆弱,水资源量仅占全国的3.9%,地下水是主要的供水源。针对“富煤、贫水、弱生态”的特点,如何突破水资源制约煤炭工业发展的“瓶颈”,实现“保水采煤”,对煤炭资源绿色发展和地下水环境保护极其重要。作为国家重点开发项目的新街台格庙矿区,把煤炭开采对地下水环境的影响降到最低,对保障国家供煤稳定和生态绿色发展具有重要引领意义<sup>[6]</sup>。鄂尔多斯地区,李嘉璐<sup>[7]</sup>利用水化学方法,分析盆地西南部地下水化学演化机制,并通过饱和指数计算和水岩相互作用反向模拟,证实地下水与周围岩石的水化学作用与地下水中离子的数目变化有着紧密的联系。WANG等<sup>[8]</sup>基于对都思兔河流域不同深度的水井取样测试数据,证实了来自于不同水流系统的地下水样点,其水化学类型有着显著差异。LYU等<sup>[9]</sup>通过对鄂尔多斯高原乌审召盆地地下水取样研究发现,补给、排泄区地下水水化学类型有着显著差异,存在着水化学演化过程。煤炭领域,康占忠等<sup>[10]</sup>利用榆神矿区工作面回采前顶板预疏放钻孔施工过程中分层水化学特征分析,补充了修正地质勘探和水文补勘期间未能对煤层顶板“两带”范围内进行精细刻画的不足,实现煤层顶板直接充水含水层水化学特征的精细分层。桂和荣<sup>[11]</sup>利用皖北矿含水层地下

水水化学组分,分析水循环特征,建立了矿区主要突水含水层的常规水化学判别模式;刘基等<sup>[12]</sup>利用水化学特征,分析第四系地下水的循环规律,确定了第四系污染主要来自地表人类活动。综上,由于钻探工作的推进,台格庙矿区具备开展地下水演变规律研究的基础和必要性。

笔者通过研究台格庙矿区地下水化学特征,分析地下水的运移规律,为科学采煤提供设计依据,在提高资源利用率的同时,减少采动对地下水资源、红碱淖等地表水体的影响,降低深部煤炭资源大规模开发利用给生态环境带来的负面压力,提升矿区生态环境修复效果。

## 1 研究区概况

### 1.1 矿区概况

台格庙矿区位于鄂尔多斯市境内,地处毛乌素沙漠的东北边缘,总面积766 km<sup>2</sup>,如图1所示。年均气温6.0~8.5℃,年降水量250~440 mm,多集中于7—9月,占全年降水的60%~75%<sup>[13]</sup>。矿区周边为侵蚀性丘陵及风积沙漠区,地势中部高,鄂尔多斯北部湖泊流域和红碱淖流域地下水分水岭从中贯穿,海拔最高点+1 501.6 m。海拔最低点位于矿区南侧,标高+1 259.0 m<sup>[14]</sup>。矿区煤层赋存于侏罗系延安组,全区隐伏,煤系地层构造形态为向西倾斜的单斜构造,发育宽缓的波状起伏,构造复杂程度属简单类。煤层自上而下共15层,大部分为可采较稳定煤层,煤层埋藏深度519~909 m,煤炭资源量14 365.49 Mt<sup>[15]</sup>。

### 1.2 水文地质条件

台格庙矿区含水层可分为第四系含水层、白垩系含水层、侏罗系中统和下统含水层,如图2所示。第四系含水层水位埋深0.5~4 m,单位涌水量0.2~1 L/(s·m),富水性中等;白垩系含水层岩性为中粗砂岩,厚度在1.15~420 m,富水性弱~中等<sup>[16-17]</sup>。第四系与白垩系含水层地下水联系密切,属于同一径流系统,主要由降雨和河流入渗补给,径流方向受局部地形控制,排泄方式以蒸发和向地表水体排泄为

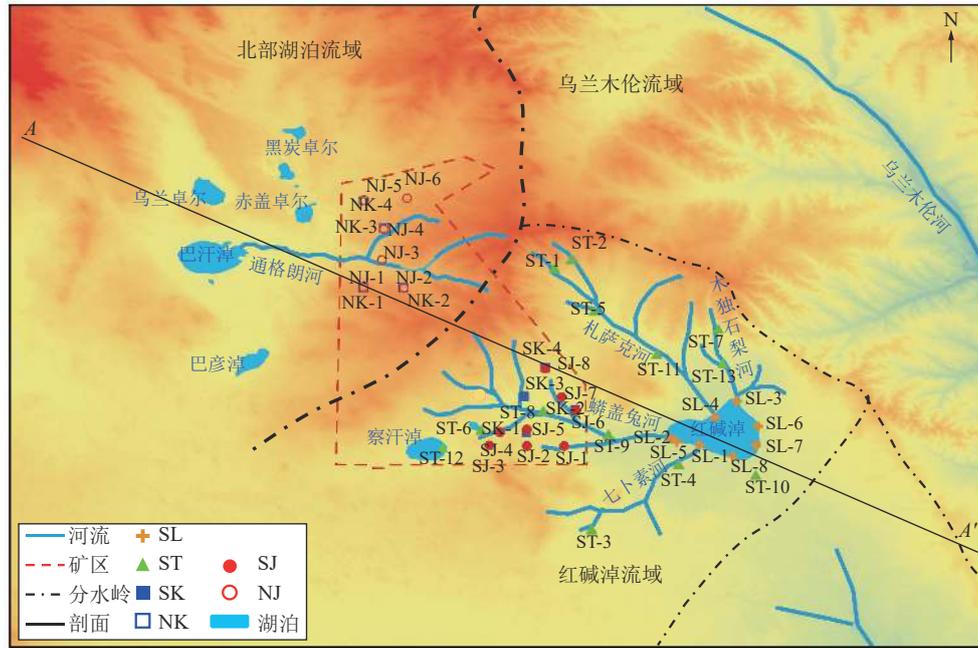


图 1 矿区及采样位置

Fig.1 Mine area and sampling points

主。受盆地高岭的影响,地下水被分成 2 部分,一部分属于红碱淖流域,红碱淖作为流域内海拔最低点,周边河流和白垩系地下水向红碱淖汇聚,另一部分属于北部湖泊流域,河流与地下水由分水岭向巴汗淖等湖泊径流。侏罗系中统水位埋深在 14 ~ 126 m,

单位涌水量 0.01 ~ 0.08 L/(s·m),富水性弱,下统含水层岩性以中粒砂岩为主,透水性与导水性能差。侏罗系地下水属独立径流系统,补给主要来自侧向径流,径流方向受区域地形控制,不受分水岭影响,由南侧边界流出<sup>[18-19]</sup>。

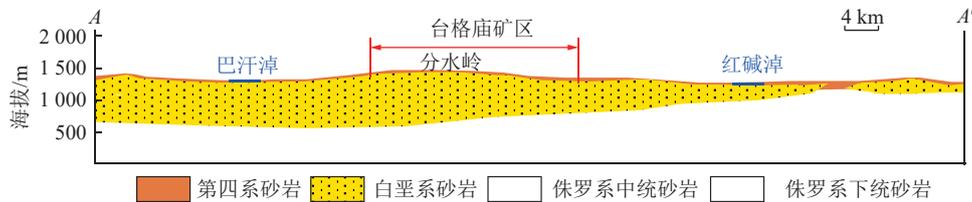


图 2 水文地质剖面图

Fig.2 Hydrogeological profile

## 2 样品采集与测试

为揭示台格庙矿区地下水循环特征,在矿区水文地质勘察期间选取南区 9 口北区 6 口水文钻孔,对白垩系含水层和侏罗系含水层进行取样,取样点分布如图 1 所示。此次研究对水样测试项包括地下水常规离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )和 pH 值、矿化度,其中 pH 值、矿化度、 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  为野外现场测试; $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  测试方法为电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP AES-6000); $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  测试方法为离子色谱法(ICS-900)。除此之外,地表水和红碱淖湖水数据来源于《红碱淖流域地下水循环机理及湖水位动态预测研

究》<sup>[20]</sup>,取样点位置如图 1 所示,详细信息见表 1。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水化学类型与演化分析

Piper 三线图能够表示地下水中主要离子的比例<sup>[21]</sup>,此次研究根据 43 组水化学参数绘制了 Piper 三线图,如图 3 所示。根据采样位置和类型将样品分为南侧白垩系 SK、北侧白垩系 NK、南侧侏罗系 SJ、北侧侏罗系 NJ、湖水 SL 和河水 ST 六类。其中河水中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  含量较高,湖水中  $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  含量最高,且河水具有向湖泊水演变的趋势。白垩系和侏罗系地下水中  $\text{Na}^+$  和  $\text{HCO}_3^-$  含量高,但相比白垩系,侏罗系地下水中  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  占比更大,同时矿化

表1 地下水水化学参数  
Table 1 Groundwater hydrochemical parameters

位置	编号	质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )								矿化度/ (mg·L <sup>-1</sup> )	pH
		K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		
南侧白垩系	SK-1	0.71	219.60	15.76	6.89	24.95	29.30	384.61	43.56	731.73	8.10
	SK-2	2.28	1 371.20	22.22	2.27	126.89	972.12	1 363.61	112.35	3 978.43	8.20
	SK-3	0.34	369.80	4.74	2.38	44.57	75.44	645.68	75.66	1 231.07	8.80
	SK-4	0.49	249.00	15.62	11.87	23.14	34.42	468.52	48.15	861.90	9.00
南侧侏罗系	SJ-1	0.86	690.60	9.33	0.91	83.06	321.34	794.86	96.30	1 998.63	9.10
	SJ-2	2.07	1 560.00	33.52	4.89	106.89	1 146.58	1 330.98	107.76	4 298.12	9.10
	SJ-3	1.65	1 523.60	28.16	4.48	119.23	1 146.70	2 156.14	103.17	5 088.96	8.40
	SJ-4	1.39	1 189.00	22.04	2.94	128.88	836.59	1 139.84	52.73	3 378.31	8.90
	SJ-5	1.44	1 261.80	18.79	2.93	197.96	780.37	1 139.84	103.17	3 506.55	9.10
	SJ-6	1.78	1 453.00	24.48	4.95	157.19	1 081.26	1 079.24	98.59	3 906.87	8.90
	SJ-7	11.62	1 030.80	2.98	0.23	224.92	509.56	1 251.73	71.08	3 126.23	9.00
	SJ-8	1.06	817.40	18.97	2.03	78.49	582.70	1 181.80	75.66	2 758.43	8.80
北侧白垩系	NK-1	0.59	197.30	11.08	8.83	10.85	25.07	347.31	22.93	630.45	8.90
	NK-2	0.85	240.60	26.48	8.73	60.10	53.93	286.71	9.17	704.47	8.50
	NK-3	0.32	394.80	2.26	0.63	59.66	76.68	608.38	50.44	1 196.40	8.40
	NK-4	0.28	338.80	1.62	0.57	74.37	57.16	487.17	50.44	1 013.53	8.60
北侧侏罗系	NJ-1	1.02	1 519.00	6.63	0.82	97.55	914.08	1 748.24	34.39	4 524.57	8.70
	NJ-2	12.06	4 054.00	165.70	5.63	82.26	4 451.06	4 976.61	492.94	14 254.91	9.30
	NJ-3	2.22	1 470.00	194.54	35.94	97.23	1 799.08	1 545.43	188.01	5 342.15	10.20
	NJ-4	0.99	937.40	17.98	3.93	85.58	726.33	1 111.87	52.73	2 945.46	8.80
	NJ-5	0.73	459.40	4.07	0.64	95.25	103.83	622.37	25.22	1 312.39	8.70
	NJ-6	0.66	739.40	19.22	3.39	44.79	678.02	603.72	16.05	2 105.44	8.30
红碱淖	最大值	48.40	2 358.00	7.53	81.20	2 003.00	749.00	1 458.00	563.00	7 209.00	9.50
	最小值	43.80	2 305.00	5.16	78.10	1 929.00	669.00	1 402.00	533.00	6 991.00	9.14
	平均值	44.84	2 328.25	6.35	80.06	1 964.75	685.25	1 425.13	544.88	7 096.38	9.28
地表水	最大值	5.23	248.00	82.80	32.90	82.60	287.00	573.00	0.00	1 030.00	8.09
	最小值	0.40	11.40	28.80	11.00	6.57	8.03	185.00	0.00	322.00	7.68
	平均值	2.30	61.37	51.09	20.05	28.79	49.97	286.46	0.00	523.62	7.88

度也更高,水化学类型更接近湖水。相同含水层 SK 和 NK、SJ 和 NJ 的水化学特征差异不大,主要是运移环境差异不大导致的。河水在径流过程中,随运移时间增大,溶解易溶岩数量和种类越多,水化学特征也发生改变,在混入湖水后,水化学特征与湖水一致;地下水在运移过程中,由于 Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup> 难以结晶析出,其占比不断增大,水化学类型由 Ca-HCO<sub>3</sub> 型转成 Na-HCO<sub>3</sub> 型,最后变成 Na-Cl 型。演变过程与鄂尔多斯地下水小流域演变规律一致<sup>[22]</sup>,因此湖水主要来自河水注入和地下水排泄。

### 3.2 控制因素分析

矿区地下水和地表水源头为大气降水,相比地

表水,地下水在循环过程中,往往受水岩相互作用、蒸发、混合、离子交换等作用的影响。Gibbs 图可以有效反映出蒸发控制、岩石控制、降雨控制的作用过程<sup>[23]</sup>。如图 4 所示,矿区降雨稀少,河水地表径流淋滤岩石,水化学特征主要受岩石控制,部分河段与地下水联系紧密,水化学特征靠近地下水;红碱淖湖为内流湖,主要受蒸发作用控制;白垩系和侏罗系地下水则受岩石和蒸发双重作用,其中侏罗系水受蒸发作用控制更强烈一些,但二者均偏离蒸发-岩石控制线,是由于强烈的离子交换作用导致。

通过 Gibbs 图可知,矿区地下水主要受岩石和蒸发控制,为进一步分析控制岩石的类型可利用  $C(\text{Ca}^{2+})/$

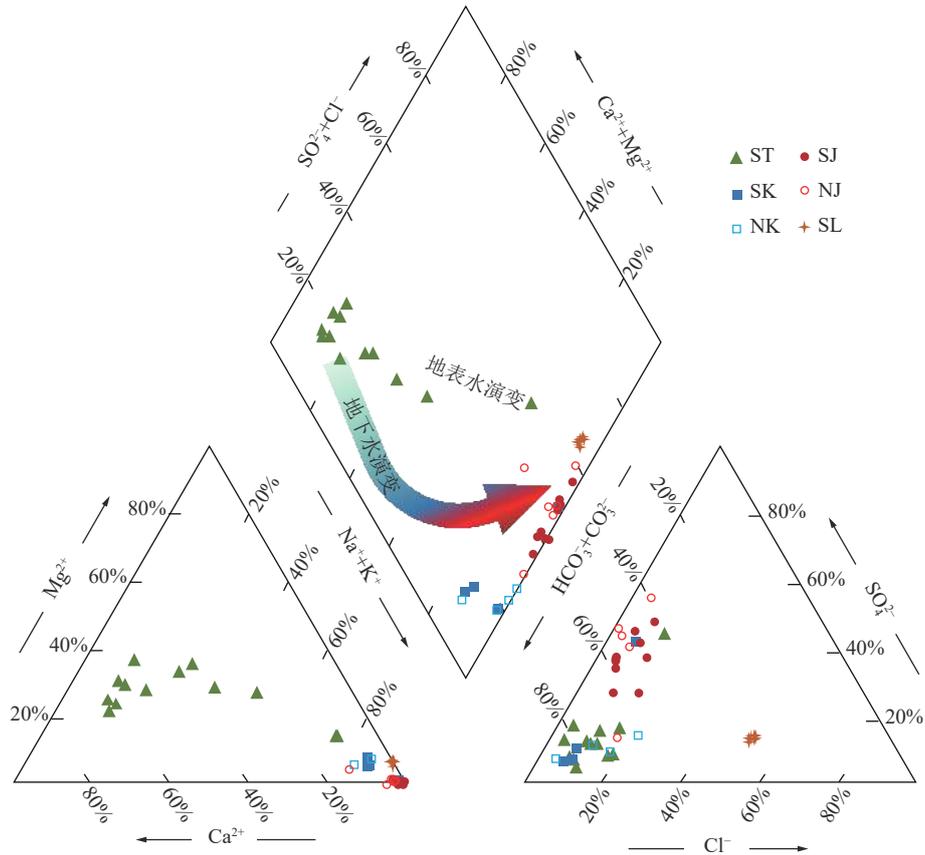


图3 台格庙矿区地下水水化学 Piper 图

Fig.3 Piper of groundwater hydrochemistry in Taigemiao Mining Area

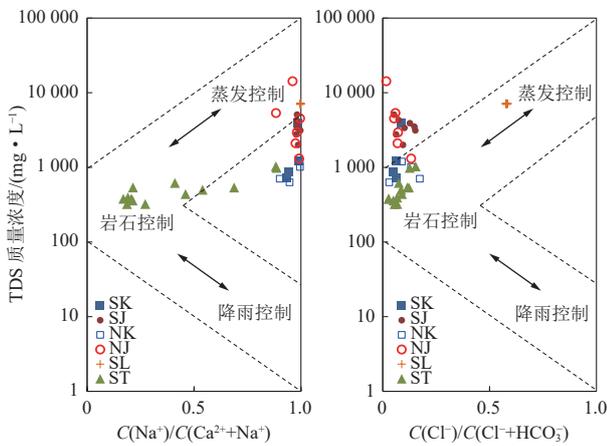


图4 水化学 Gibbs 图

Fig.4 Gibbs diagram of water chemistry

$C(\text{Na}^+)$ 、 $C(\text{Mg}^{2+})/C(\text{Na}^+)$  与  $C(\text{HCO}_3^-)/C(\text{Na}^+)$  离子比值端元图<sup>[24]</sup>。由图5可知,河水水化学成分主要受碳酸盐岩和硅酸盐岩的影响,白垩系和侏罗系地下水主要受硅酸盐岩和蒸发盐岩的影响,而湖水主要受蒸发盐岩控制。湖水中  $C(\text{Mg}^{2+})/C(\text{Na}^+)$  的值要高于地下水,是由于湖水由地表水的注入混合后再蒸发导致。

### 3.3 质量平衡模拟计算

矿区地下水运移到湖水的过程中,其化学类型

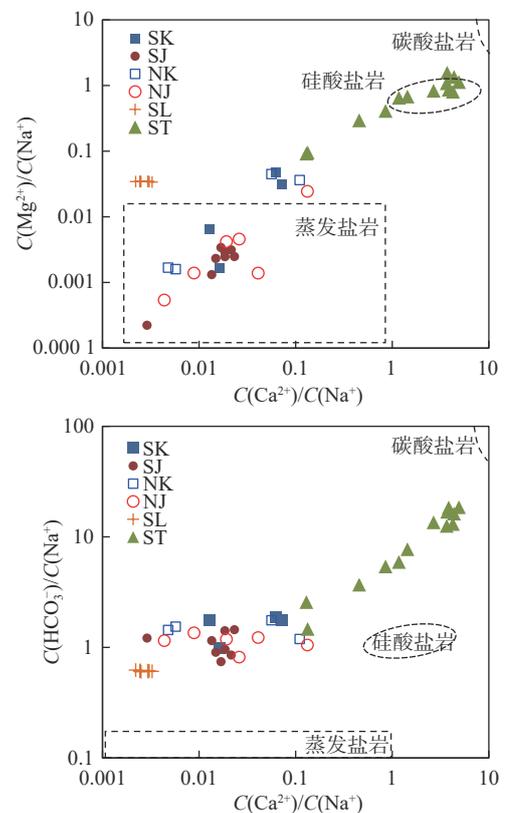


图5 离子比值端元图

Fig.5 Ion ratio endmember diagram

主要受岩石溶解和离子交换控制,该地区主要发生溶解作用的矿物有方解石、白云石、岩盐和石膏。为进一步确定地下水运移到红碱淖湖水过程中溶解特征,以南侧白垩系和侏罗系地下水作为端源,在经过矿物溶解、离子交换作用及混合地表水后形成现有红碱淖湖水化学组分,在此基础上建立质量平衡模型<sup>[25-26]</sup>,定量分析水化学成因,见表2—表4。 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的交换比例与其初始浓度比值一致。反应过程质量平衡方程如下:

$$y(\text{Na}^+) = x_{\text{rs}} + 2x_{\text{Caex}} + 2x_{\text{Mgex}}$$

$$y(\text{Ca}^{2+}) = x_{\text{cal}} + x_{\text{dol}} + x_{\text{pla}} - x_{\text{Caex}}$$

$$y(\text{Mg}^{2+}) = x_{\text{dol}} - x_{\text{Mgex}}$$

$$y(\text{C}) = x_{\text{cal}} + 2x_{\text{dol}} + x(\text{CO}_2)$$

$$y(\text{SO}_4^{2-}) = x_{\text{pla}}$$

$$y(\text{Cl}^-) = x_{\text{rs}}$$

式中: $x_{\text{rs}}$ 为单位体积参与水岩相互作用岩盐的含量; $x_{\text{cal}}$ 为单位体积参与水岩相互作用方解石的含量; $x_{\text{dol}}$ 为单位体积参与水岩相互作用白云石的含量; $x_{\text{pla}}$ 为单位体积参与水岩相互作用石膏的含量; $x_{\text{Caex}}$ 为单位体积参与离子交换钙离子的含量; $x_{\text{Mgex}}$ 为单位体积参与离子交换镁离子的含量。

经地下水循环演变质量平衡模型计算得出,地下水在演变成湖水的过程中,各物质的溶解量见表4。

表2 质量平衡计算

Table 2 Mass balance calculation

组分	SL	ST	SK	SJ
$\text{Na}^+$	101.23	2.67	24.02	51.77
$\text{Ca}^{2+}$	0.16	1.28	0.36	0.49
$\text{Mg}^{2+}$	3.34	0.84	0.24	0.12
$\text{Cl}^-$	55.35	0.81	1.55	3.86
$\text{SO}_4^{2-}$	7.14	0.52	2.89	8.34
$\text{HCO}_3^-$	23.36	4.55	11.73	20.64

表3 反映矿物化学计量数

Table 3 Reflects the number of mineral chemistry measurement

反映性矿物	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	C
方解石	0	1	0	0	0	1
白云岩	0	1	1	0	0	2
$\text{CO}_2$	0	0	0	0	0	1
岩盐	1	0	0	1	0	0
石膏	0	1	0	0	1	0

表4 矿物溶解结果

Table 4 Mineral dissolution results

类型	混入ST占比	$x_{\text{cal}}$	$x_{\text{dol}}$	$x(\text{CO}_2)$	$x_{\text{rs}}$	$x_{\text{pla}}$	$x_{\text{ex}}$	
SK	95%	-5.25	7.96	1.32	53.84	4.36	24.44	
	90%	-5.28	8.14	1.36	53.87	4.48	25.47	
	80%	-5.35	8.49	1.43	53.95	4.72	27.53	
	60%	-5.48	9.2	1.59	54.09	5.19	31.66	
	50%	-5.54	9.55	1.66	54.17	5.43	33.72	
	40%	-5.61	9.91	1.74	54.24	5.67	35.78	
	30%	-5.67	10.26	1.81	54.31	5.91	37.84	
	20%	-5.74	10.61	1.89	54.39	6.14	39.9	
	SJ	95%	-2.66	3.21	-0.23	51.64	-0.81	0.27
		90%	-2.36	3.4	-0.11	51.79	-0.42	2.58
80%		-1.75	3.78	0.13	52.09	0.36	7.18	
60%		-0.54	4.55	0.61	52.7	1.93	16.39	
50%		0.06	4.93	0.85	53.01	2.71	21	
40%		0.67	5.31	1.08	53.31	3.49	25.6	
30%		1.27	5.7	1.32	53.62	4.27	30.21	
20%		1.88	6.08	1.56	53.92	5.05	34.82	

注: $x_{\text{ex}}$ 为单位体积参与离子交换电荷的含量。

白垩系地下水在循环演变成湖水的过程中,白垩系地下水需要溶解一定量的白云石、石膏、岩盐和 $\text{CO}_2$ ,同时还需沉淀出方解石并伴随强烈的离子交换作用。白垩系地下水可以混合不同比例的河水形成湖水,地下水溶解和析出矿物类型不会发生改变,但随着河水占比的增高,溶解和析出矿物程度会减弱,离子交换程度也会降低。侏罗系地下水在循环演变过程中,当混入河水占比较大时,需要溶解一定量的白云石和岩盐,同时要沉淀出方解石、石膏、释放 $\text{CO}_2$ ,离子交换程度弱,但随着混合河水比例的减小,方解石、石膏和 $\text{CO}_2$ 由释放转变成溶解。实际情况中,鄂尔多斯深部含水层地下水在运移过程中会溶解 $\text{CO}_2$ ,所以侏罗系地下水在演变成湖水的过程中,只混合少量河水或不混合河水。红碱淖稳定期每年总补给量为 $7.86 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,其中地下水仅为 $9.81 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,占比12.48%<sup>[27]</sup>。补给的地下水主要来自白垩系含水层,侏罗系含水层贡献的水量很少。

### 3.4 采煤对红碱淖湖水的影响

综上,台格庙矿区地下水系统主要分为分水岭南侧白垩系地下水系统、北侧的白垩系地下水系统和深部的侏罗系水流系统,其中侏罗系地下水系统受煤炭开采的直接影响。如图6所示,红碱淖湖水的变化量 $\Delta Q_L$ ,主要取决于河水补给量 $Q_T$ 、

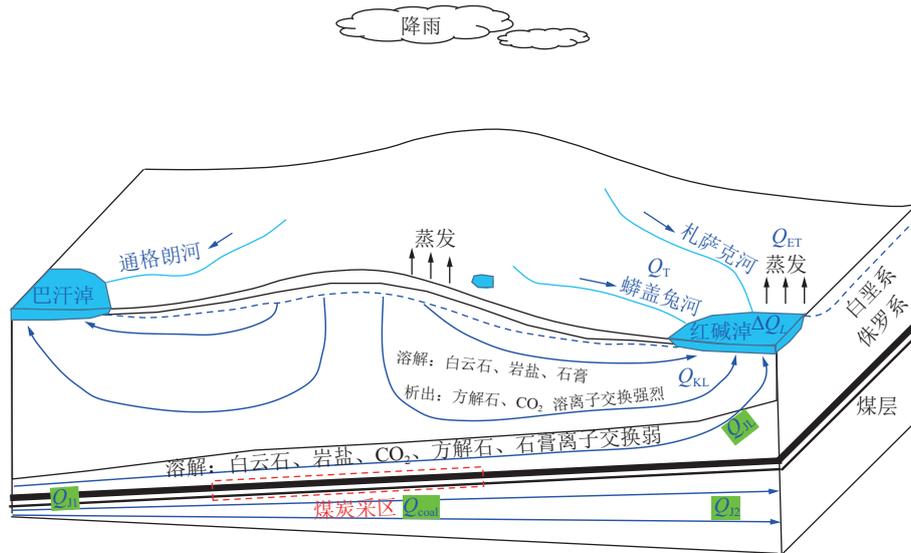


图6 台格庙矿区地下水循环示意

Fig.6 Schematic diagram of groundwater circulation in Taigemiao Mining Area

白垩系补给红碱淖水量  $Q_{KL}$ 、侏罗系补给红碱淖水流  $Q_{JL}$  和湖水蒸发量  $Q_{ET}$ 。水量平衡关系如下式：

$$\Delta Q_L = Q_T + Q_{KL} + Q_{JL} - Q_{ET} \quad (1)$$

侏罗系地下水系统主要补给为侧向边界补给  $Q_{J1}$ ，主要排泄方式为径流排泄  $Q_{J2}$ 、补给红碱淖  $Q_{JL}$  和采煤排水  $Q_{coal}$ ，水量平衡关系如下式：

$$Q_{J1} = Q_{J2} + Q_{JL} + Q_{coal} \quad (2)$$

由地下水质量平衡模拟结果可知，红碱淖水主要来自地表河水  $Q_T$  和白垩系地下水  $Q_{KL}$  演变混合后形成，侏罗系地下水补给量  $Q_{JL}$  在湖水总补给量中占比很小或为零。因此，在保障白垩系水流系统不被破坏的前提下，当采煤排水量  $Q_{coal}$  只袭夺  $Q_{J1}$  的水量或少量  $Q_{JL}$  水量时，才会将采煤对红碱淖和其他河流的影响降到最小。

## 4 结 论

1) 台格庙矿区白垩系地下水多为  $\text{Na-HCO}_3$  型，主要受硅酸盐岩和蒸发岩盐的控制；侏罗系水同样为  $\text{Na-HCO}_3$  型，同样受硅酸盐岩和蒸发岩盐的控制，但  $\text{SO}_4^{2-}$  含量较高；河水为  $\text{Ca-HCO}_3$  型水，主要受碳酸岩盐、硅酸盐岩的控制；湖水为  $\text{Na-Cl}$  型水，主要受蒸发岩盐控制。

2) 白垩系地下水在补给湖水过程中，会溶解一定量的白云石、石膏、岩盐和  $\text{CO}_2$ ，析出方解石，同时受离子交换作用的影响。侏罗系地下水不能与大比例河水混合形成湖水，湖水的主要补给来源为白垩系地下水和河水。

3) 台格庙矿区煤炭开采直接影响侏罗系地下水

流系统，在保障白垩系水流系统不被破坏的前提下，采煤排水量  $Q_{coal}$  只袭夺  $Q_{J2}$  的水量或少量  $Q_{JL}$  水量时，会将红碱淖和其他河流的影响降到最小。

## 参考文献(References):

- [1] 沈照理, 王焰新. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学, 2002, 27(2): 127-133.  
SHEN Zhaoli, WANG Yanxin. Review and prospect of water-rock interaction research[J]. Earth Science, 2002, 27(2): 127-133.
- [2] 文冬光, 沈照理, 钟佐桑, 等. 地球化学模拟及其在水文地质中的应用[J]. 地质科技情报, 1995, 14(1): 99-104.  
WEN Dongguang, SHEN Zhaoli, ZHONG Zuoshen, et al. Geochemical modeling and its application in hydrogeology[J]. Geological Science and Technology Information, 1995, 14(1): 99-104.
- [3] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 当代水文地质学发展趋势与对策[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 51-56.  
ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui, et al. The development trend and countermeasures of contemporary hydrogeology[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(1): 51-56.
- [4] 李学礼, 孙占学, 刘金辉. 水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
- [5] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 辛德林, 方新英, 张逸阳. 基于五大发展理念的新街台格庙矿区总体规划研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(12): 1-6.  
XIN Delin, FANG Xinying, ZHANG Yiyang. Research on the overall planning of Xinjie Taigemiao mining area based on five development concepts[J]. Coal Engineering, 2020, 52(12): 1-6.
- [7] 李嘉璐. 鄂尔多斯盆地西南部地下水化学演化机制及水质评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.  
LI Jialu. Chemical evolution mechanism and water quality evaluation of groundwater in southwest Ordos Basin[D]. Beijing: China

- University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [ 8 ] WANG Heng, JIANG Xiaowei, WAN Li, *et al.* Hydrogeochemical characterization of groundwater flow systems in the discharge area of a river basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 433–441.
- [ 9 ] LYU Min, PANG Zhonghe, YIN Lihe, *et al.* The Control of groundwater flow systems and geochemical processes on groundwater chemistry: a case study in Wushenzhao Basin, NW China[J]. *Water*, 2019, 11(4): 790–813.
- [ 10 ] 康占忠, 刘洋. 榆神矿区水文地球化学特征精细分层研究[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(8): 472–475.  
KANG Zhanzhong, LIU Yang. Study on fine stratification of hydrogeochemical characteristics in Yushen mining area[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(8): 472–475.
- [ 11 ] 桂和荣. 皖北矿区地下水水文地球化学特征及判别模式研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005  
GUI Herong. Study on hydrogeochemical characteristics and discriminant model of groundwater in northern Anhui mining area[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005.
- [ 12 ] 刘基, 杨建, 王强民, 等. 榆林市矿区浅层含水层水质现状及水化学特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(12): 61–66.  
LIU Ji, YANG Jian, WANG Qiangmin, *et al.* Study on water quality status and hydrochemical characteristics of shallow aquifer in mining area of Yulin City[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(12): 61–66.
- [ 13 ] 张东升, 李文平, 来兴平, 等. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 36–43.  
ZHANG Dongsheng, LI Wenping, LAI Xingping, *et al.* Development on basic theory of water protection during coal mining in northwest of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 36–43.
- [ 14 ] 廉泓林, 韩雪莹, 刘雅莉, 等. 基于标准化降水蒸散指数(SPEI)的毛乌素沙地1981—2020年干旱特征研究[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 71–80.  
LIAN Honglin, HAN Xueying, LIU Yali, *et al.* Research on the characteristics of drought in the Mu Us Sandy Land from 1981 to 2020 based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)[J]. *China Desert*, 2022, 42(4): 71–80.
- [ 15 ] 姬文瑞. 新街台格庙矿区井田划分方案研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(2): 6–11.  
JI Wenrui. Research on mine field division plan in Xinjie Taigemiao mining area[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(2): 6–11.
- [ 16 ] 张保健, 高宗军, 张凤禹, 等. 改进的“三图法”在煤矿顶板水害评价中的应用: 以东胜煤田台格庙勘查区为例[J]. *中国矿业*, 2015, 24(2): 100–104.  
ZHANG Baojian, GAO Zongjun, ZHANG Fengyu, *et al.* The improved “three maps and two Predictions method” in mine roof water inrush evaluation application: taking the Dongsheng coalfield platform Tai Ge Miao exploration area as an example[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(2): 100–104.
- [ 17 ] 张保健. 基于Visual Modflow的台格庙勘查区矿井涌水量预测[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(S1): 146–162.  
ZHANG Baojian. Prediction of mine water inflow in Taigemiao exploration area based on visual modflow[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(S1): 146–162.
- [ 18 ] 高跃, 张建华, 赵思宇. 台格庙矿区水文地质分析及煤炭保水开采研究[J]. *中国煤炭*, 2013, 3: 29–32.  
GAO Yue, ZHANG Jianhua, ZHAO Siyu. Hydrogeological analysis of Taigemiao mining area and research on coal water retention mining[J]. *China Coal*, 2013, 3: 29–32.
- [ 19 ] 王靖. 鄂尔多斯盆地北部台格庙矿区煤炭保水开采初探[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2016, 2: 22–23.  
WANG Jing. Preliminary exploration of water-retained coal mining in Taigemiao mining area in the northern Ordos Basin[J]. *Inner Mongolia Coal Economy*, 2016, 2: 22–23.
- [ 20 ] 吴初. 红碱淖流域地下水循环机理及湖水位动态预测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021  
WU Chu. Research on groundwater circulation mechanism and dynamic prediction of lake water level in Hongjiannao Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [ 21 ] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012
- [ 22 ] JI Taotao, JIANG Xiaowei, GUO Longfei, *et al.* Behaviors of lithium and its isotopes in groundwater with different concentrations of dissolved CO<sub>2</sub>[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 170: 313–327.
- [ 23 ] GIBBS Ronald J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, 170: 1088–1090.
- [ 24 ] 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 等. 新疆祁漫塔格地区地下水化学特征及成因分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 85–92.  
LU Han, ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, *et al.* Hydrochemical characteristics and causes of groundwater in Qimantage area, Xinjiang[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2022, 33(2): 85–92.
- [ 25 ] UMAR R, ABSAR A. Chemical characteristics of groundwater in parts of the Gambhir River basin, Bharatpur District, Rajasthan, India[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(5): 535–544.
- [ 26 ] BENNETTS D A, WEBB J A, STONE D J M, *et al.* Understanding the salinisation process for groundwater in an area of south-eastern Australia, using hydrochemical and isotopic evidence[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 323(4): 178–192.
- [ 27 ] 李遥. 红碱淖水体时空动态变化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.  
LI Yao. Study on the temporal and spatial dynamic changes of Hongjiannao water body [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.