

王若帆, 赵良杰, 李强, 等. 黔中洋水背斜分散排泄系统地下水化学特征[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 733-741.

DOI: 10.11932/karst20230409

黔中洋水背斜分散排泄系统地下水化学特征

王若帆¹, 赵良杰², 李强¹, 吉勤克补子¹, 焦恒¹, 江峰¹, 陈刚¹

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队, 贵州 遵义 563000; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: 黔中洋水背斜分散排泄系统位于贵州磷矿的主要产地, 区域内磷矿山、磷化工、磷石膏堆场集中分布。研究该地区地下水化学特征, 对于合理开发利用地下水资源具有重要意义。文章以岩溶地下水系统为研究对象, 采集了主要地下水露头样品, 运用离子对比法、主要离子比值法等水文地球化学研究方法, 对地下水化学组分和离子来源进行深入分析。研究结果显示, 研究区的碳酸盐岩岩溶水、基岩裂隙水、矿井水三者的水化学组分存在显著差异。碳酸盐岩岩溶水的主要化学组分来源于白云岩和白云质灰岩的溶滤作用; 基岩裂隙水的主要化学组分含量是钙质泥岩溶滤与大气降水共同作用的结果; 矿井水的主要化学组分则来源于白云岩、白云质灰岩的溶滤作用和人为工程活动的影响。本研究为该地区地下水资源的合理开发利用提供了科学依据, 同时也有助于保护地下水资源和维护区域生态环境。

关键词: 黔中地区; 地下水化学特征; 洋水背斜分散排泄系统; 水岩作用; 地下水开发利用

中图分类号: P641.3 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0733-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

贵州省是全国岩溶发育广泛、岩溶地下水资源丰富的地区^[1-4]。黔中片区大面积出露下寒武统白云岩地层, 岩溶地下水资源丰富且水质良好, 成为当地居民生活饮用水的主要来源。然而, 随着社会发展, 自上世纪六十年代以来, 研究区磷石膏、磷化工、磷矿山“三磷”集中分布, 人类工程活动的影响使得研究区岩溶地下水环境发生了巨大的改变。导致区内居民生活饮用水受到严重影响。

近年来, 许多学者针对贵州洋水河流域的地下水质量问题开展了广泛研究, 例如, 江峰等^[5]采用单因子水质标识指数法评价了洋水河流域地下水水质;

丁航航等^[6]采用一维解析方法及统计方法求取水动力弥散参数预测了龙井湾磷石膏堆场渗漏; 陶小郎等^[7]结合地表水与地下水环境化学分析成果研究了开阳县明泥湾磷矿矿区水文地质特征及治理前景。此外, 还有一些研究着眼于地下水系统的水化学成份、溶解度、迁移规律以及地下水污染风险评估等方面^[8-10]。然而, 尽管前人的研究取得了一定的成果, 但遗憾的是这些研究在很大程度上相对独立, 尚未从岩溶地下水系统的整体角度出发, 深入研究黔中“三磷”集中分布区的地下水化学特征, 为了更全面地了解该地区地下水质量的变化趋势, 揭示地下水化学特征及其演变规律和成因显得尤为重要。因此, 有必要进行一项综合性的研究, 从多个角度、多个尺

基金项目: 贵州省地质矿产勘查开发局地质科研项目(黔地矿科合[2020]23号、黔地矿科合[2022]2号); 贵州省地质勘查基金项目(DKJJ2021-01号); 地质调查项目(DD20221758)

第一作者简介: 王若帆(1987—), 男, 高级工程师, 研究方向: 水文地质、地下水污染防治。E-mail: 530135791@qq.com。

通信作者: 李强(1982—), 男, 正高级工程师, 研究方向: 水文地质、环境地质、地热地质。E-mail: 109616117@qq.com。

收稿日期: 2023-01-20

度探讨地下水系统的水化学特征,以期为地下水资源的保护、管理和合理开发利用提供更为有力的支撑。

本文基于贵州省划分的四级、五级流域,以更详细的岩溶地下水系统^[11]——洋水背斜分散排泄系统为研究对象,通过对主要离子组成、水化学类型、水岩作用、TDS特征等方面的综合分析,结合水文地质条件探讨地下水化学特征,旨在揭示岩溶地下水系统水化学特征的形成机制,为岩溶地下水资源的保护及合理开发利用提供科学依据。

1 研究区概况

黔中洋水背斜分散排泄系统位于贵州省开阳县金钟镇洋水河周边一带,总体地势南高北低、东西两侧高中间低,为一典型的背斜呈谷地貌,地貌组合类型为侵蚀低中山沟谷、峰丛沟谷,地形起伏大,相对高差200~500 m,沟谷多呈近南北向展布。系统东侧、南侧、北侧均以地表分水岭为界,西侧主要以地表分水岭为界、局部以寒武系第二统金顶山组(C_j)顶部及南北向三潮水断层(F_{19})为界,构成了以洋水背斜核部为主的独立的分散排泄系统,系统面积83.08 km²。系统内地质构造十分复杂,多以NNE向、NE向构造为主,主要构造有:朝阳断层(F_4)、岩脚断层(F_6)、苦草坪断层(F_{17})、玄天洞断层(F_{18})、三潮水断层(F_{19})、古牛背断层(F_{20})、风岩断层(F_{21})、鬼门关断层(F_{22})以及NNE轴向洋水背斜^[12]。

系统内出露的碳酸盐岩含水岩组包括: $Pt_3^{3b}C_1dy$ 、 C_2q 、 C_3sh 。其中: $Pt_3^{3b}C_1dy$ 、 C_3sh 地层岩性以白云岩为主,含水介质以溶孔、溶隙为主,含水较均匀,富水性中等; C_2q 岩性以石灰岩为主,含水介质以裂隙、溶洞为主,含水极不均匀,富水性中等—强。主要接南、南西侧一带大气降水沿节理、裂隙入渗补给地下水,地下水多赋存于溶孔、溶隙中,受地形展布方向、近NS向、SW向、NE向断层、NE向洋水背斜及其横张、纵张节理控制,地下水总体由南向北、由背斜两翼向核部径流,受洋水沟及其支沟切割及泥岩阻隔,地下水以岩溶下降泉的形式分散排泄于洋水河两岸及斜坡一带(图1,图2),泉流量0.01~20 L·s⁻¹。

2 样品采集与测试分析

系统内各类调查水点共计43处,其中岩溶泉

8处,地下水开采井3处,矿井排水口11处,基岩裂隙泉21处。在调查过程中采用手持便携式水质检测仪,现场对泉点的TDS、pH、电导率、溶解氧进行测定。为了全面分析系统内的水质特征,分别在2019年8月的丰水期、2020年1月的枯水期,对具有代表性的水点进行了采样,采集的样品包括12件碳酸盐岩含水岩组天然露头样品、6件基岩裂隙含水岩组样品,以及20件矿井排水样品,所有样品采集前采用纯净水清洗采样瓶2~3次,采用2.5 L聚乙烯采样瓶装满,随后送至实验室进行检测。在室内检测前,对检测阳离子的样品加入纯硝酸将样品酸化至pH<2,采用原子吸收分光光度计分析检测Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺等浓度;HCO₃⁻、CO₃²⁻采用滴定法检测浓度;采用Dionex Aquion IC离子色谱系统检测Cl⁻、SO₄²⁻等浓度。在样品的保存、运输和检测过程中,我们严格遵循了现行的《地下水环境监测技术规范》(HJ164-2020)要求,以确保结果的准确性和可靠性。

3 结果与讨论

3.1 地下水主要离子含量及分布特征

根据检测结果(表1),研究区pH、主要阳离子、主要阴离子、TDS按样品类型存在一定的规律性,同时也存在一定的差异,主要表现为pH:碳酸盐岩岩溶水>矿井水>基岩裂隙水;K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺主要阳离子:矿井水>碳酸盐岩岩溶水>基岩裂隙水;主要阴离子中HCO₃⁻、SO₄²⁻为:矿井水>碳酸盐岩岩溶水>基岩裂隙水;Cl⁻离子为:矿井水>基岩裂隙水>碳酸盐岩岩溶水;TDS:矿井水>碳酸盐岩岩溶水>基岩裂隙水。矿井水中主要阴阳离子含量高,可能与磷矿萃取工艺及磷石膏堆场渗漏有关。

不同含水岩组中地下水主要阴阳离子含量均不同,但同一个水文地质单元中不同含水岩组中的阴阳离子含量又是密切相关的^[11,13]。

从图3A可知,洋水背斜分散排泄系统Ca²⁺+Mg²⁺与HCO₃⁻+SO₄²⁻毫克当量比值基本收敛于y=x理论趋势线两侧,但仍有异常点,JC03监测井Ca²⁺+Mg²⁺与HCO₃⁻+SO₄²⁻毫克当量枯季比值0.564、丰季比值0.616,较远离1:1理论趋势线,结合研究区环境水文地质条件和水质结果分析,是受南侧补给区H79龙井湾磷石膏堆场渗漏造成的;矿井水中Ca²⁺+Mg²⁺与



图 1 洋水背斜分散排泄系统水文地质略图

Fig. 1 Hydrogeological sketch of the dispersed drainage system of Yangshui anticline

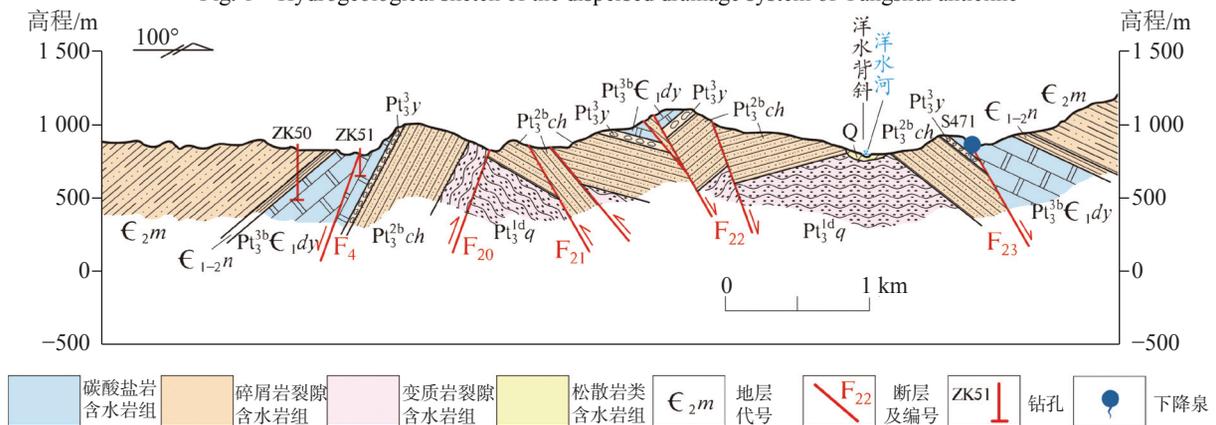


图 2 研究区水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

表1 研究区地下水主要离子统计表

Table 1 Statistics of main ions in groundwater of the study area

样品类型	统计组数	主要阳离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				主要阴离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				pH/ 无量纲	TDS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-		
碳酸盐岩岩溶水	最大	4.00	35.5	43.71	27.52	174.1	9.34	200	5.39	8.37	515.5
	最小	0.3	0.5	20.17	10.70	98.15	0.00	8	0.55	7.23	121.5
	平均	1.52	7.69	33.02	16.86	131.77	1.53	54.18	2.35	7.94	238.3
基岩裂隙水	最大	6.98	11	42.33	2.36	69.16	0.00	28	8.11	7.28	79.3
	最小	4.66	8.12	35.62	1.52	35.92	0.00	12	5.78	6.95	56.4
	平均	5.80	9.52	39.35	1.83	53.87	0.00	17.5	6.88	7.10	72.5
矿井水	最大	35.8	115	239.5	326.19	1294.9	12.61	883	26.48	8.52	2287.5
	最小	1.00	5.6	42.86	16.31	60.90	0.00	100	3.43	6.63	317.0
	平均	11.0	34.26	128.9	73.84	252.99	1.10	416.3	13.79	7.85	827.3

$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 毫克当量比值偏离理论趋势线,且斜率小于理论趋势线,其线性拟合曲线服从公式 $y=0.8003x+2.8088$,相关系数R值=0.8006,该趋势线与理论趋势线斜交。从图3A结合分析结果来看,是由于H74枯丰季 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 毫克当量比值异常造成了矿井水趋势线异常,通过对水质和环境点分布分析认为,H74号采样点毫克当量比值异常,是因为受H79龙井湾磷石膏渗漏,使其他包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要阳离子, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 主要阴离子检测值异常造成

的(表2)。当剔除异常值后,矿井水的趋势线基本与理论趋势线平行(图3B),线性拟合曲线服从公式 $y=1.0102x+0.7915$,相关系数R值=0.9548。表明强烈的人为工程活动对地下水化学中的宏量组分组成影响较大。

3.2 地下水化学类型

地下水化学类型与地下水中主要阴阳离子含量的毫克当量百分数有关^[1],piper三线图可以直观地

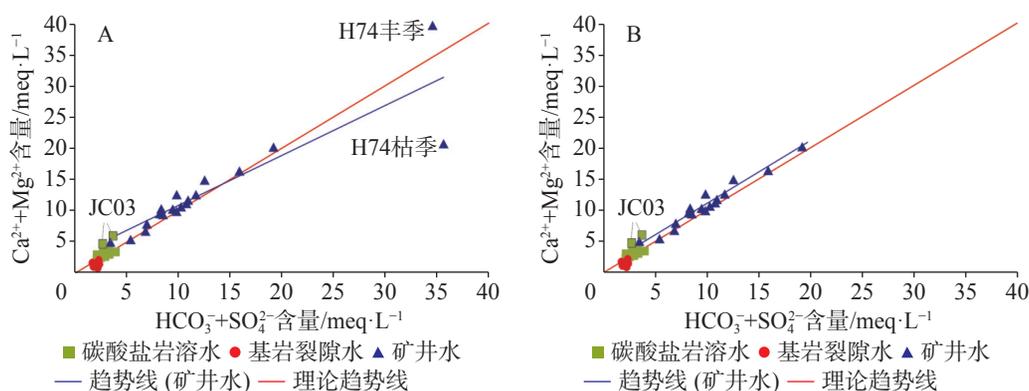
图3 地下水 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 关系图(图A全样品、图B为剔除异常点H74)Fig. 3 Relationship between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ in groundwater

表2 地下水异常点主要离子统计表

Table 2 Statistics of main ions in abnormal points of groundwater

编号	类型	采样期	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-
H74	矿井水	丰水期	12.7	90	239.54	287.97	1137.75	0.00	100.00	12.13
		枯水期	20.6	115	155.49	326.19	1294.96	0.00	883.00	16.18
JC03	岩溶水	丰水期	3.8	55.5	28.58	27.52	110.70	0.00	200.00	4.41
		枯水期	4	51.1	20.17	20.39	98.15	0.00	151.00	5.39

注: 阴阳离子单位 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

Note: cation and anion unit $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

反映地下水主要离子组成特征^[14]，根据所采样品检测结果，利用 Origin 软件绘制系统内地下水采样点枯、丰季 piper 三线图(图 4)可知，碳酸盐岩岩溶水毫克当量百分数中 $\text{HCO}_3^- > 60\%$ ， $\text{Cl}^- < 10\%$ ， $\text{SO}_4^{2-} < 40\%$ ， $\text{Ca}^{2+} > 90\%$ ， Mg^{2+} 介于 30%~50% 之间， K^+ 、 $\text{Na}^+ < 10\%$ ，表现为白云岩含水层的特征，且枯丰季各离子含量差别极小；基岩裂隙水毫克当量百分数中 $\text{HCO}_3^- > 60\%$ ， Cl^- 介于 10%~20% 之间， SO_4^{2-} 介于 10%~40%， Ca^{2+} 介于 70%~90% 之间， $\text{Mg}^{2+} < 10\%$ ， K^+ 、 Na^+ 在 20% 左右，表现为钙质黏土岩中地下水特征；矿井水毫克当量百分数中 SO_4^{2-} 介于 40%~90% 之间， HCO_3^- 介于 20%~60% 之间， $\text{Cl}^- < 10\%$ ， $\text{Ca}^{2+} > 60\%$ 且

集中分布在 80%~90% 区间， Mg^{2+} 介于 20%~70% 之间，且集中分布在 40%~50% 之间，虽然总体上具有一定的规律性，但与区内含水岩组存在着较大差异，分析认为与系统内强烈且集中人为工程活动影响有关。系统内地下水化学类型较为单一，据舒卡列夫分类法，碳酸盐岩岩溶水化学类型以 HCO_3^- - Ca · Mg 为主、其次为 HCO_3^- - SO_4 - Ca · Mg 、仅 CJ3 监测井水化学类型 SO_4 - HCO_3^- - Na · Mg ，分析认为 H79 龙井湾磷石膏堆场渗漏所致；基岩裂隙水化学类型为 HCO_3^- - Ca ；矿井水化学类型以 SO_4 - Ca · Mg 为主、 SO_4 - HCO_3^- - Ca · Mg 次之、再次为 SO_4 - Ca 型，分析认为矿井水化学类型受“三磷”强烈人为工程活动影响有关。

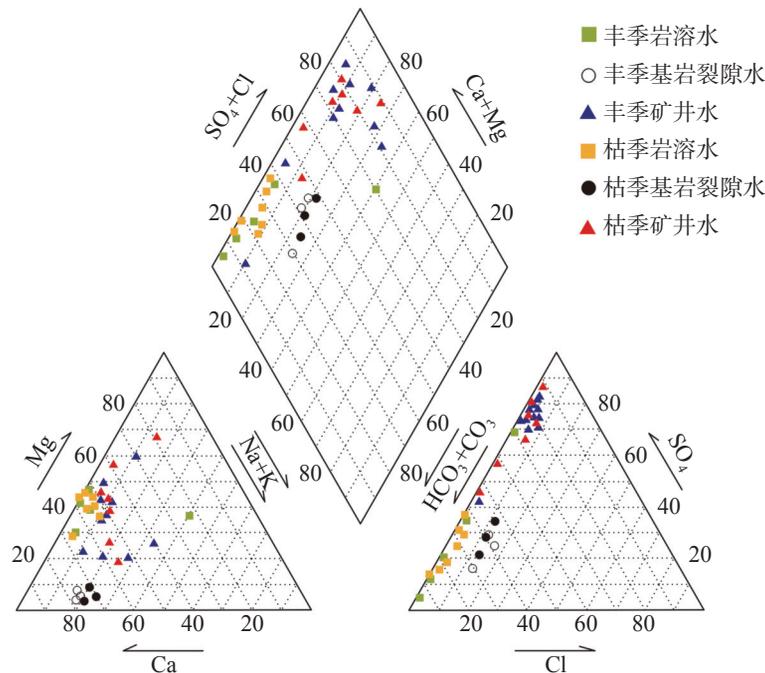


图 4 地下水 piper 三线图

Fig. 4 Piper trigram of groundwater

3.3 主要离子来源

离子组合比例系数分析方法是一种常用的可以用来研究岩溶地下水的组分成因和水化学成分来源的方法，另外 Gibbs 图也可宏观地反映地下水化学组分的主要控制因素^[8, 15]。

从 Gibbs 图分析可得(图 5)，研究区基岩裂隙水 TDS 普遍低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值多处于 0.1~0.3 之间，由此认为研究区基岩裂隙水水化学组分主要为水岩作用，同时兼具一部分大气降水作用，从水文地质条件分析基岩裂隙水受风化裂隙、构造裂隙发育深度控制，多近源排泄于

斜坡一带，也佐证了该论点；碳酸盐岩岩溶水 TDS 多介于 $100 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，采样点多收敛于水岩作用区间，表明碳酸盐岩溶水水化学组分来源于水岩作用，多为碳酸盐岩溶滤作用形成；矿井水 TDS 多大于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，采样点 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 、 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 值多分布于 0~0.4 之间，矿井水采样点分布于水岩作用向蒸发浓缩区间，据相关资料^[12]，天然状态下洋水背斜分散排泄系统中碳酸盐岩含水岩组 600 m 以浅的地下水 TDS 含量介于 $121.46 \sim 378.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，分析认为介于水岩作用与蒸发浓缩间的矿井水采样点 TDS 普遍高于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，应有大量外来离子进入矿

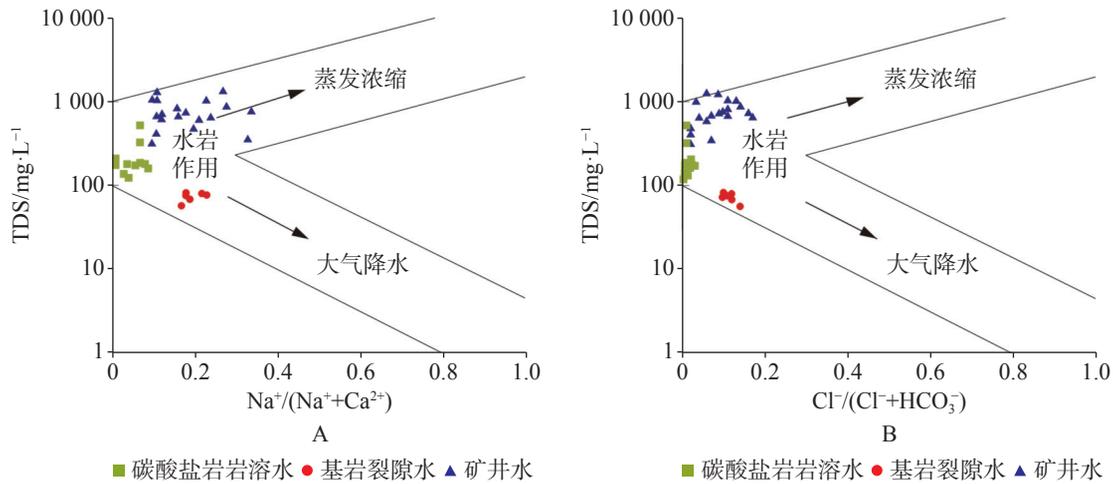


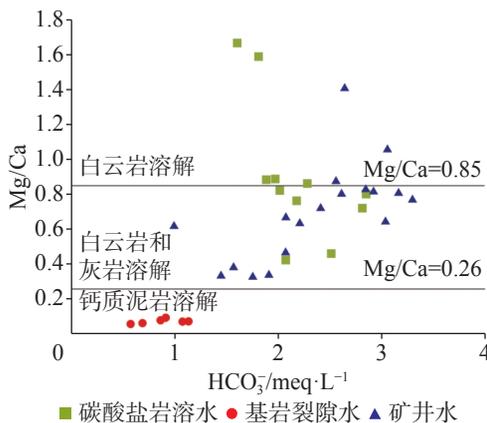
图5 研究区地下水 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs map of groundwater in the study area

井片区地下水中造成的,与系统内磷化工企业、磷石膏堆场、磷矿山开采密切相关。

地下水中 Mg^{2+}/Ca^{2+} 的量比可以用来判别地下水流经地层的岩性^[16],流经钙质泥岩地层的地下水,其 Mg^{2+}/Ca^{2+} 量比在 0.01~0.26 之间,而流经白云岩含水层的地下水, Mg^{2+}/Ca^{2+} 量比则大于 0.85^[17]。

由图 6 可得,研究区基岩裂隙水 Mg/Ca 值均小于 0.26, Mg^{2+} 离子含量极低, Ca^{2+} 离子主要来源于钙质泥岩溶解;部分碳酸盐岩溶水和少量矿井水 Mg/Ca 值大于 0.85,主要为白云岩溶滤作用形成;部分碳酸盐岩溶水及绝大部分矿井水 Mg/Ca 值介于 0.26~0.85 之间,碳酸盐岩溶水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子主要来源于白云岩和白云质灰岩溶解。据相关资料,研究区震旦系下统洋水组是磷矿主要产出层位,矿石以磷块岩为主,矿石矿物成分单一,主要矿石矿物为胶磷矿(碳氟磷灰石)^[13]。矿层位于震旦系上统灯影

图6 Mg/Ca 与 HCO_3^- 关系图Fig. 6 Relationship between Mg/Ca and HCO_3^-

组含水层之下,矿井水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 一方面来源于白云岩溶滤作用,另一方面还与强烈的人为工程活动影响有关。

3.4 TDS 分布特征

TDS 是地下水各组分浓度的总指标,是地下水水化学长期演变的最终结果,也是表征水文地球化学作用过程的重要参数,可以集中反映区域水文地球化学特征^[18-20],也反映出地下水流动的特征^[11]。

由表 3 可得,研究区地下水 TDS 含量特征:①总体上研究区 TDS 含量,矿井水 > 碳酸盐岩溶水 > 基岩裂隙水;②从平均值来看,研究区地下水 TDS 含量枯季 > 丰季;③从变异系数来看,矿井水 > 碳酸盐岩溶水 > 基岩裂隙水。基岩裂隙水丰枯季变异系数基本不变,表明基岩裂隙水中各化学组分来源水岩作用,且丰枯季地下水流速变化较小;碳酸盐岩溶水丰枯季变异系数呈减小趋势,表明枯季较丰季地下水中各化学组分含量较高,地下水流速缓慢,水岩作用时间较长;矿井水变异系数枯季 > 丰季,表明枯季 TDS 离散程度大,分析认为与系统内降雨量有关。

4 结论

(1) 研究区碳酸盐岩溶水、基岩裂隙水、矿井水三者的水化学组分存在显著差异,表明不同类型地下水受到不同岩石类型和环境因素的影响;

(2) 碳酸盐岩溶水的主要化学组分来源于白云岩、白云质灰岩的溶滤作用,该类地下水与碳酸盐岩地层有密切的水岩相互作用;

表 3 地下水 TDS 含量统计表
Table 3 Statistics of TDS content in groundwater

样品类型	TDS/mg·L ⁻¹					
	丰季			枯季		
碳酸盐岩溶水	10	最大值	378.58	10	最大值	322.55
		最小值	121.46		最小值	136.99
		平均	227.32		平均	232.43
		标准差	72.67		标准差	60.53
		变异系数	0.32		变异系数	0.26
矿井水	13	最大值	1352.72	13	最大值	2287.48
		最小值	316.99		最小值	379.80
		平均	760.45		平均	892.71
		标准差	303.51		标准差	475.98
		变异系数	0.40		变异系数	0.53
基岩裂隙水		最大值	112.6		最大值	121.30
		最小值	58.3		最小值	65.80
		平均	76.88		平均	82.00
		标准差	14.31		标准差	15.33
		变异系数	0.19		变异系数	0.19

注: 变异系数为无量纲。

Note: variation coefficient is dimensionless.

(3) 基岩裂隙水的主要化学组分含量是钙质泥岩溶滤与大气降水共同作用的结果, 基岩裂隙水受到地表径流和大气降水的影响, 反映了地表与地下水的相互关联;

(4) 矿井水的主要化学组分来源于白云岩、白云质灰岩的溶滤作用和人为工程活动的影响, 矿山开采和磷化工等工程活动对地下水质的影响不容忽视, 需要加强监测和管理;

(5) 为保护地下水资源及其生态环境, 合理开发利用地下水资源, 建议在研究区加强地下水监测, 严格执行矿山环境保护法规, 限制磷化工污染物的排放, 实施地下水资源的可持续管理策略。

综上所述, 本研究通过对黔中洋水背斜分散排泄系统地下水化学特征的深入分析, 揭示了不同类型地下水的成因及其与岩石和环境因素的关系, 为地下水资源保护、管理和合理开发利用提供有益参考。本研究仅从地下水化学特征的角度探讨了研究区域的地下水质量问题, 未涉及地下水水位、水文地质条件等多个方面的综合分析, 在成因解释上可能还存在不足, 对对策制定应斟酌。未来研究应在现有工作基础上, 结合地下水水位、水文地质条件等多个方面的数据, 进行更为全面的分析, 以揭示区域地

下水质量变化的更多影响因素。

参考文献

- [1] 罗维, 杨秀丽, 犹俊, 杨丽君. 浅谈岩溶地区区域地下水质量评价: 以贵州鸭池河-构皮滩流域为例[J]. 贵州地质, 2014, 31(2): 150-153, 135.
LUO Wei, YANG Xiuli, YOU Jun, YANG Lijun. Assessment of regional groundwater quality in karst area: A case study of Yachihe-Goupitan area in Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2014, 31(2): 150-153, 135.
- [2] 杨荣康, 罗维, 王诗扬, 宁黎元. 玉屏县朱家场地下水集中开采区地下水数值模型建立及相关问题探讨[J]. 贵州地质, 2017, 34(4): 306-312.
YANG Rongkang, LUO Wei, WANG Shiyang, NING Liyuan. Groundwater digital model construction and relevant questions discussion of dolomite basin in Zhujiachang, Yuping county[J]. Guizhou Geology, 2017, 34(4): 306-312.
- [3] 江峰, 李强, 吉勤克补子, 周亚男. 贵州省岩溶地区饮用天然矿泉水化学特征及其宏量组分来源分析[J]. 贵州地质, 2019, 36(2): 173-179.
JIANG Feng, LI Qiang, JI Qinkebu, ZHOU Ya'nan. The chemical characteristics of the potable natural mineral water and its major components source analysis of the karst area in Guizhou Province[J]. Guizhou Geology, 2019, 36(2): 173-179.
- [4] 李雪莲, 朱昱桦, 华兴, 邬晓芳, 姜福. 基于因子分析的岩溶地下水水质影响因素研究: 以毕节市大方县南部为例[J]. 贵州地质, 2021, 38(4): 449-455.

- LI Xuelian, ZHU Yuhua, HUA Xing, WU Xiaofang, JIANG Fu. Study on influencing factors of karst groundwater quality based on factor analysis: Take the southern part of Dafang county, Bijie City as an example[J]. *Guizhou Geology*, 2021, 38(4): 449-455.
- [5] 江峰, 刘汉武, 吉勤克补子, 王若帆, 焦恒. 单因子水质标识指数法在贵州省洋水河流域地下水水质评价中的应用[J]. *四川地质学报*, 2021, 41(1): 151-153, 176.
- JIANG Feng, LIU Hanwu, JI Qinkebuzi, WANG Ruofan, JIAO Heng. The application of single factor water quality identification index method to the evaluation of groundwater quality in the Yangshuihe river basin[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2021, 41(1): 151-153, 176.
- [6] 丁航航, 丁坚平, 董雪研. 贵州龙井湾堆场渗漏污染预测[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(5): 25-28, 57.
- DING Hanghang, DING Jianping, DONG Xueyan. Phosphogypsum yard leakage pollution prediction and seepage prevention of Guizhou Longjingwan[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 2016, 33(5): 25-28, 57.
- [7] 陶小郎, 张旭. 贵州开阳县明泥湾磷矿矿区水文地质特征及治理前景[J]. *西部资源*, 2019(5): 121-122.
- [8] 廖驾, 朱振华, 彭毅, 韦珊瑚, 罗朝晖, 刘状, 徐强强, 谢亘. 湘西北地区岩溶地下水水化学与氧同位素特征分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(3): 1-12.
- LIAO Jia, ZHU Zhenhua, PENG Yi, WEI Shanhu, LUO Zhaohui, LIU Zhuang, XU Qiangqiang, XIE Gen. Analysis on $D^{18}O$ and hydrochemical characteristics of karst groundwater in northwestern Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(3): 1-12.
- [9] 管清花, 李福林, 王爱芹, 冯平, 田婵娟, 陈学群, 刘丹. 济南市岩溶泉域地下水水化学特征与水环境演化[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 653-662.
- GUAN Qinghua, LI Fulin, WANG Aiqin, FENG Ping, TIAN Chanjuan, CHEN Xuequn, LIU Dan. Hydrochemistry characteristics and evolution of karst spring groundwater system in Jinan[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 653-662.
- [10] 刘再华, 袁道先, 何师意. 岩溶动力系统水化学动态变化规律分析[J]. *中国岩溶*, 1999, 18(2): 103-108.
- LUI Zhaihua, YUAN Daoxian, HE Shiyi. Analysis on the variation of hydrochemistry in karst dynamic system[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(2): 103-108.
- [11] 王若帆, 吉勤克补子, 李强, 赵良杰, 焦恒, 易瑞. 贵州六志岩溶大泉系统地下水化学及同位素特征[J]. *西部探矿工程*, 2020, 32(6): 186-192.
- [12] 王若帆, 赵翠, 焦恒, 等. 贵州省1:5万水文地质调查报告养龙司幅(G48E005020)、开阳县幅(G48E006020)[R]. 2020.
- [13] 雷灵芳. 贵州开阳磷矿东翼矿区磷矿石类型及其特征[J]. *化工矿产地质*, 2019, 41(3): 158-162.
- LEI Lingfang. The types and characteristics of phosphate ores in Dongyi mining area of Kaiyang phosphate mine, Guizhou Province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2019, 41(3): 158-162.
- [14] 苏春利, 张雅, 马燕华, 刘文波. 贵阳市岩溶地下水水化学演化机制: 水化学和锶同位素证据[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2829-2838.
- SU Chunli, ZHANG Ya, MA Yanhua, LIU Wenbo. Hydrochemical evolution processes of karst groundwater in Guiyang City: Evidences from hydrochemistry and $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2829-2838.
- [15] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 91(1): 209-212.
- [16] 刘伟江, 袁祥美, 张雅, 马燕华, 苏春利. 贵阳市岩溶地下水水化学特征及演化过程分析[J]. *地质科技通报*, 2018, 37(6): 245-251.
- LIU Weijiang, YUAN Xiangmei, ZHANG Ya, MA Yanhua, SU Chunli. Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Guiyang City[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(6): 245-251.
- [17] 侯俊华, 谢春雷, 张冬. 东滩矿奥陶系灰岩地下水水化学特征与成因[J]. *山东煤炭科技*, 2021, 39(10): 177-180.
- HOU Junhua, XIE Chunlei, ZHANG Dong. Hydrochemical characteristics and genesis of underground water of Ordovician limestone in Dongtan Mine[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2021, 39(10): 177-180.
- [18] 韩行瑞, 鲁荣安, 李庆松, 等. 岩溶水系统: 山西岩溶大泉研究[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 211-229.
- [19] 乔小娟, 李国敏, 都洁, 周金龙, 杜成元, 孙中惠, 巫润建, 周鹏鹏. 太原市西山岩溶水系统水文地球化学特征分析[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(4): 353-358.
- QIAO Xiaojuan, LI Guomin, DU Jie, ZHOU Jinlong, DU Chengyuan, SUN Zhonghui, WU Runjian, ZHOU Pengpeng. Hydrochemical features of Xishan karst groundwater system in Taiyuan[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(4): 353-358.
- [20] 张贵, 胡文君, 李倩, 刘晶晶, 王枫, 邹磊. 金沙江河谷巧家段地下水水化学特征[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 339-345.
- ZHANG Gui, HU Wenjun, LI Qian, LIU Jingjing, WANG Feng, ZOU Lei. Groundwater chemical characteristics of the Qiaojia district in Jinshajiang river valley, Yunnan, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 339-345.

Chemical characteristics of groundwater in the dispersed drainage system of Yangshui anticline in central Guizhou

WANG Ruofan¹, ZHAO Liangjie², LI Qiang¹, JI Qinkebuzi¹, JIAO Heng¹, JIANG Feng¹, CHEN Gang¹

(1. 114 Geological Brigade of Guizhou Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Zunyi, Guizhou 563000, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/ International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The dispersed drainage system of Yangshui anticline is located in Jinzhong town, Kaiyang county, Guizhou Province. As one of the main producing areas of phosphate deposits in Guizhou, this area is concentrated with phosphorus mines, phosphorus chemical industry and phosphogypsum storage sites. Therefore, the study on the chemical characteristics of groundwater in this area is of great significance for the rational development, utilization and protection of groundwater resources. This study takes the karst groundwater system, which has relatively independent conditions of groundwater recharge, runoff and discharge, as the research object. The main samples of karst springs, bedrock fissure springs, boreholes and mine drains are collected, and the hydrogeochemical research methods such as ion comparison method and main ion ratio method are used to analyze the chemical components and main ion sources of groundwater. The results show that contents of main cations of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} are listed as: mine drainage>carbonate karst water>bedrock fissure water; contents of HCO_3^- and SO_4^{2-} in main anions, mine drainage>carbonate karst water>bedrock fissure water; Ion content of Cl^- , mine drainage>bedrock fissure water>carbonate karst water; TDS, mine drainage>carbonate karst water>bedrock fissure water. HCO_3 -Ca·Mg is the main chemical type of karst water in carbonate rocks; the hydrochemical type of bedrock fissure is HCO_3 -Ca; the chemical type of mine water is mainly SO_4 -Ca·Mg followed by SO_4 · HCO_3 -Ca·Mg. There are significant differences in hydrochemical composition among carbonate karst water, bedrock fissure water and mine water in the study area. The main chemical components of karst water in carbonate rocks come from the leaching of dolomite and dolomitic limestone. The content of the main chemical components of bedrock fissure water is the result of the joint action of calcareous mudstone leaching and atmospheric precipitation. The main chemical components of mine water come from the leaching of dolomite and dolomitic limestone and the foreign ions brought by intensive human engineering activities. This study not only provides a scientific basis for the rational development and utilization of groundwater resources in this area, but also helps to protect groundwater resources and maintain the regional ecological environment.

Key words central Guizhou, chemical characteristics of groundwater, the dispersed drainage system of Yangshui anticline, water rock interaction, development and utilization of groundwater

(编辑 张玲 杨杨)