

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.005

抽水蓄能电站库区水化学特征影响因素及其示踪作用

茅昌平¹, 杨张阳¹, 李广凯², 张立², 饶文波¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098; 2. 山东泰山抽水蓄能电站有限责任公司, 山东泰安 271000)

摘要: 通过对泰山抽水蓄能电站2009—2020年各类水体水化学特征影响因素的分析, 论述了水化学特征变化对库水渗漏的示踪作用。结果显示: 泰山抽水蓄能电站库水和地下水均呈弱碱性, 水化学类型主要为HCO₃-Ca型, 部分为HCO₃-SO₄-Ca、HCO₃-SO₄-Ca-Mg、SO₄-Ca-Mg型, 巴山沟地表水水化学类型为SO₄-Ca、SO₄-Ca-Mg型。离子比值分析表明, 硅酸盐风化是库水、地下水以及巴山沟地表水水化学离子的主要来源; 巴山沟地表水受岩石风化和大气降水的同时控制作用, 有未经充分水岩反应的大气降水混入。水化学聚类分析表明, 右岸排水廊道和坝后量水堰水样来自库水的渗漏补给, 库底廊道量水堰、B2高压支管廊道、6号和1号施工支洞水来源为区域地下水补给。水化学分析结果与水体氢氧同位素分析结果有较高的一致性。

关键词: 水化学; 库水渗漏; 渗漏示踪; 泰山抽水蓄能电站;

中图分类号: TL99 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)01-0034-09

Influencing factors of hydrochemical characteristics in reservoir area of pumped storage power station and their tracing function

MAO Changping¹, YANG Zhangyang¹, LI Guangkai², ZHANG Li², RAO Wenbo¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Taishan Pumped Storage Station Co., Ltd., Taian 271000, China)

Abstract: Through the analysis of factors affecting the hydrochemical characteristics of various water bodies in the reservoir area of Taishan Pumped Storage Power Station in Shandong Province from 2009 to 2020, this study discussed the tracing function of hydrochemical characteristics variation in detecting the water leakage. The results showed that the reservoir water and groundwater of Taishan Pumped Storage Power Station are weakly alkaline, the hydrochemical types are mainly HCO₃-Ca, and some are HCO₃-SO₄-Ca, HCO₃-SO₄-Ca-Mg and SO₄-Ca-Mg, while the chemical types of surface water in Bashangou are SO₄-Ca and SO₄-Ca-Mg. The ion ratio analysis shows that the weathering of silicate rock is the main source of chemical ions in the reservoir water, the groundwater and the surface water of Bashangou. The surface water of Bashangou is controlled by the rock weathering and atmospheric precipitation at the same time, and the atmospheric precipitation without sufficient water-rock reaction is mixed in. The hydrochemical cluster analysis shows that the water samples of the drainage gallery on the right bank and the measuring weir behind the dam come from the leakage supply of the reservoir water, and the water sources of the measuring weir in the gallery at the bottom of the reservoir, the B2 high-pressure branch gallery, the NO. 6 and No. 1 construction adits are from the regional groundwater. The results of hydrochemical analysis are consistent with the results of hydrogen and oxygen isotope analysis of water body.

Key words: hydrochemistry; leakage water; leakage tracing; Taishan Pumped Storage Power Station

随着我国风电、光伏和核电等清洁能源的快速发展, 电网组成发生了较大变化, 抽水蓄能电站作为理想的电力系统调峰电源, 是我国当前及今后一段时期调节电网及保障电网安全的重要依靠之一^[14]。由于施工技术与地质条件的限制, 水库通常在运行一定时期后会出现不同程度的渗漏现象。渗漏不仅会影响水库效

基金项目: 国网新源控股有限公司科技项目(SGXYKJ-2019-012)

作者简介: 茅昌平(1981—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事地质环境及水文地球化学研究。E-mail: maochangping@hhu.edu.cn

引用本文: 茅昌平, 杨张阳, 李广凯, 等. 抽水蓄能电站库区水化学特征影响因素及其示踪作用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 34-42.

MAO Changping, YANG Zhangyang, LI Guangkai, et al. Influencing factors of hydrochemical characteristics in reservoir area of pumped storage power station and their tracing function[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 34-42.

益的正常发挥,而且长期渗流还会带走垫层料中的颗粒物质,对堤坝的安全运行造成极为不利的影响^[5-8]。因此,开展水库渗漏的探测研究对保障水库大坝安全和抽水蓄能电站的高效运行均具有重要的现实意义。

由于水文地球化学示踪方法能有效确定水体的补给来源与排泄关系,已成为水库渗漏探测的重要技术手段之一,得到了广泛的应用^[9-12]。宋汉周等^[13]探讨了陈村水电站坝基地下水水质演变过程,提出蓄水条件下坝址渗流场内存在十分复杂的水-岩-坝间的水文地球化学作用,定期开展坝基地下水化学特征分析有助于监测大坝的运行状态。董海洲等^[14]利用水化学示踪方法对小浪底左坝肩渗漏状况进行了研究,查明了库水通过断层深部的破碎带向坝后补给的渗漏通道。Reddy 等^[15]对科亚纳-沃纳 15 口深井的地下水和库水进行了为期 7 a 的水文地球化学监测,发现地下水与库水之间存在直接的水力连通性。张世殊等^[16]使用数理统计分析、Gibbs 图等方法研究了开茂水库岩溶水的来源,结果显示开茂水库地下岩溶裂隙的发育造成了水库一定程度的渗漏。通常抽水蓄能电站的库盆防渗措施都较为完善,但其库水渗漏现象也时有发生。如王培杰等^[17]利用水化学方法对蒲石河抽水蓄能电站的渗漏水来源进行了分析,发现地下厂房渗水主要来自于地表水渗漏,而不是地下水补给。随着我国抽水蓄能电站建设数量和规模的不断上升,库盆渗漏问题成为抽水蓄能电站长期安全稳定运行所面临的一个主要工程问题,而目前通过系统的水文地球化学方法来分析其库水渗漏过程的研究还鲜有报道。

近年来,山东泰山抽水蓄能电站上水库右岸因防渗面板不同程度的开裂造成库水渗漏的问题^[18]。本文以山东泰山抽水蓄能电站为研究区域,采用数理统计分析、Piper 图、主要离子摩尔比值等水文地球化学方法系统地研究了其建成后多年的库水、基岩裂隙水的水化学特征及控制因素,探讨了地表水和地下水间的水力联系,研究结果可为抽水蓄能电站的渗漏监测及防治提供有益的参考。

1 研究区及工程概况

泰山抽水蓄能电站位于山东省泰安市西郊的泰山西南麓,属低山丘陵区,距泰安市 5 km,距济南市约 70 km(图 1)。电站工程区属黄河流域,东亚温带季风气候区,四季分明,降水受泰山地形影响明显,年平均气温为 12.8℃,多年平均降水量为 708.0 mm,降水集中于 6—9 月,夏季常有暴雨发生,多年平均蒸发量为 1 693.7 mm。电站为日调节纯抽水蓄能电站,由上水库、下水库、输水系统、地下厂房洞室群及地面开关站等组成,装有 4 台单机容量为 250 MW 的单级混流可逆式水泵水轮发电机组,总装机容量 1 000 MW。上水库位于横岭北侧樱桃园沟内,沟底开阔,三面环山,山体呈北西—东南向展布,高程 310~380 m,另一面为混凝土面板堆石坝,正常蓄水位为 410 m,总库容为 1 168.1 万 m³。上水库右岸横岭山体布置有排水观测洞和上水库进/出水口,库盆防渗型式采用钢筋混凝土面板与库底高密度聚乙烯土工膜及垂直防渗帷幕相结合的综合防渗方案。

除下水库为斜长片麻岩、上水库左岸局部有交代式花岗岩和斑纹状混合岩外,泰山抽水蓄能电站工程上、下水库,输水和地下厂房系统建筑物基础均为混合花岗岩,岩体内穿插有闪长、辉绿和石英岩脉,岩脉具有一定的隔水作用。上水库区以弱风化岩石为主,垂直风化埋深为 25~60 m,两岸边坡稳定,左岸及库尾向邻谷渗漏的可能性不大,右岸横岭则相对比较单薄,局部节理密集,有渗漏可能,已做防渗处理(防渗面板)。研究区内地下水类型主要为基岩裂隙水和孔隙性潜水,补给源为大气降水。孔隙性潜水主要分布于樱桃园沟及下水库两岸的冲洪积层、坡洪积层中;上、下水库输水以基岩裂隙水为主,基岩裂隙水主要赋存于裂隙、裂隙密集带及断层破碎带中,并呈带状、束状分布,带内地下水较为活跃,带间水力联系较弱,局部脉状或条带状裂隙水具有一定的承压性。

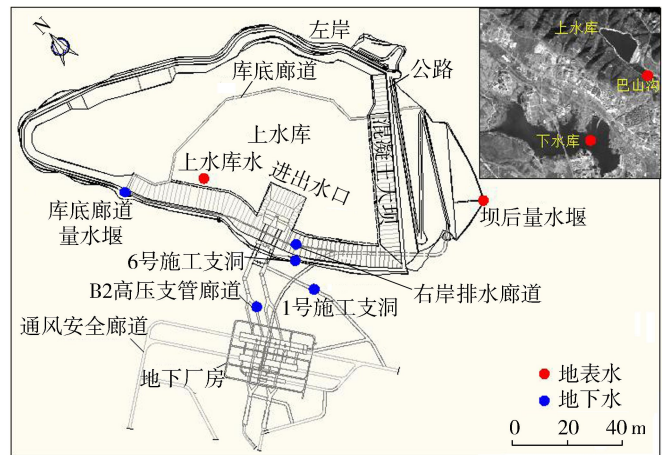


图 1 泰山抽水蓄能电站位置和采样点

Fig. 1 Location of Taishan Pumped Storage Power Station and sampling points

2 样品采集与测试

2009—2020年间对泰山抽水蓄能电站9个点位进行了地下水和地表水的采样工作(图1),其中右岸排水廊道、库底廊道量水堰、B2高压支管廊道、1号及6号施工支洞水样为地下水样品,共69件;上水库、下水库、坝后量水堰及巴山沟水样为地表水样品,共56件,水样pH值、电导率为采样现场测量。2009—2014年和2016年的样品由山东省水环境监测中心进行水化学测试,2017年由黄河流域水环境监测中心进行水化学测试,2018—2020年由山东省济南市环境监测中心站进行水化学测试。1996年大河水库(下水库)库水、右岸平洞裂隙水、樱桃园沟(上水库坝址区)地表水的水化学数据来自山东省泰山抽水蓄能电站工程竣工安全鉴定设计单位自检报告。水样的检测项目包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 。其中 Ca^{2+} 采用EDTA滴定法(GB/T 7476—1987《水质 钙的测定 EDTA 滴定法》), Mg^{2+} 采用原子吸收分光光度法(GB/T 11905—1989《水质 钙和镁的测定 原子吸收分光光度法》)测定; K^+ 、 Na^+ 用原子吸收分光光度法(GB/T 11904—1989《水质 钾和钠的测定 火焰原子吸收分光光度法》)测定; Cl^- 、 SO_4^{2-} 采用离子色谱法(HJ/T 84—2001《水质 无机阴离子的测定 离子色谱法》)测定; HCO_3^- 用酸碱滴定法(SL 83—1994《碱度(总碱度、重碳酸盐和碳酸盐)的测定(酸滴定法)》)测定;TDS(溶解性总固体)用称量法(GB/T 5750.4—2006《生活饮用水标准检验方法感官性状和物理指标》)测定。样品分析误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,测试数据见表1。

表1 研究区水体样品水化学数据统计分析

Table 1 Statistical analysis of hydrochemical data of water body sample in studying area

样品位置	采样时间	类别	pH 值	$\rho(\text{Ca}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Mg}^{2+})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{Cl}^-)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{HCO}_3^-)/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TDS})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
樱桃园沟地表水	1996-09		6.97	23.1	3.56	19.2	8.61	53.5	61.9	238
大河水库	1996-09		7.62	33.4	9.58	20.6	16.1	53.7	101	325
右岸平洞裂隙水	1996-09		6.92	47.9	9.35	23.9	5.18	24.8	214	170
上水库	2009—2020年	最大值	8.64	73.6	27.5	38.6	32.7	141	194	404
		最小值	6.90	40.0	4.40	6.28	8.70	78.7	99.6	245
		平均值	7.84	54.2	14.2	24.4	26.5	98.3	136	335
下水库	2009—2020年	最大值	8.57	72.9	23.1	48.5	32.0	152	155	415
		最小值	7.10	41.8	4.70	9.15	22.3	81.1	89.5	286
		平均值	7.67	53.8	14.6	26.1	26.3	106	126	331
巴山沟(地表径流)	2009—2020年	最大值	8.40	53.7	11.9	33.2	22.5	112	58.4	276
		最小值	6.80	25.1	4.22	0.03	7.80	23.1	13.7	131
		平均值	7.39	34.8	7.06	7.94	12.3	77.4	28.1	191
库底廊道量水堰	2009—2020年	最大值	8.35	72.9	15.9	56.7	35.3	130	197	380
		最小值	7.00	40.1	4.30	17.1	7.28	78.8	95.8	266
		平均值	7.66	49.6	10.1	31.3	23.8	94.8	124	312
坝后量水堰	2009—2020年	最大值	8.42	72.1	22.9	46.7	35.1	145	235	438
		最小值	6.90	50.6	3.40	11.6	8.70	87.0	101	248
		平均值	7.55	57.2	13.1	26.5	25.7	100.	139	348
右岸排水廊道	2009—2020年	最大值	8.61	73.4	24.0	41.2	34.5	142	235	422
		最小值	7.00	40.0	5.00	2.83	8.70	76.0	84.3	138
		平均值	7.75	54.9	13.5	23.8	26.1	99.5	137	340
B2高压支管廊道	2009—2020年	最大值	8.63	58.8	16.7	41.8	32.7	104	222	401
		最小值	7.00	22.0	4.86	18.3	19.8	59.6	80.5	184
		平均值	7.89	48.9	10.7	26.1	24.3	89.1	127	304
1号施工支洞	2009—2020年	最大值	8.38	78.0	30.3	66.0	40.6	119	176	414
		最小值	7.00	16.0	4.90	1.18	20.9	38.4	86.9	194
		平均值	7.73	53.0	14.6	24.8	25.1	94.0	142	326
6号施工支洞	2009—2020年	最大值	8.41	56.9	15.7	41.0	31.8	126	136	377
		最小值	7.00	46.6	6.10	22.6	21.1	67.2	85.3	268
		平均值	7.59	51.5	10.1	30.4	26.5	101	110	319

3 结果与讨论

3.1 水文地球化学特征

由表1可见:库水pH值为6.90~8.64,平均为7.77,库底廊道量水堰、右岸排水廊道和B2高压支管廊

道水 pH 平均值为 7.71, 1 号和 6 号施工支洞水 pH 平均值为 7.66, 总体呈弱碱性。样品 TDS 质量浓度平均值为 328 mg/L, 为弱矿化度水; 巴山沟地表水 TDS 质量浓度平均值低于电站区域水体值。由电站区域各类水体样品离子浓度平均值显示, 阳离子 $\rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{K}^+ + \text{Na}^+) > \rho(\text{Mg}^{2+})$, 阴离子 $\rho(\text{HCO}_3^-) > \rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{Cl}^-)$ 。 Ca^{2+} 为优势阳离子, 其含量约占阳离子总量的 58.40%; 样品优势阴离子为 HCO_3^- , 其含量约占阴离子总量的 61.09%。上水库、下水库、右岸排水廊道、库底廊道量水堰、B2 高压支管廊道、1 号和 6 号施工支洞样品 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 质量浓度为 1.18 ~ 66.0 mg/L, Mg^{2+} 质量浓度为 3.40 ~ 30.3 mg/L, Ca^{2+} 质量浓度为 16.0 ~ 78.0 mg/L, SO_4^{2-} 质量浓度为 38.4 ~ 152 mg/L, HCO_3^- 质量浓度为 80.5 ~ 235 mg/L。相比之下, 巴山沟地表水与电站区域内地表水和地下水离子浓度差别较大。

上水库建设前坝址地表水(1996 年樱桃园沟地表水)的 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 质量浓度均低于电站建成后 2009—2020 年间库水化学数据, Mg^{2+} 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 质量浓度差别不大, 右岸平洞裂隙水的 HCO_3^- 质量浓度高于 2009—2020 年右岸排水廊道水化学数据, SO_4^{2-} 和 Cl^- 、 Ca^{2+} 的质量浓度低于 2009—2020 年地下水化学数据。

Piper 三线图可根据离子相对含量直观分析地下水化学的演化特征^[19]。由图 2 可见: 样品阳离子的主控离子为 Ca^{2+} , 阴离子方面, 上水库水和地下水主控阴离子均为 HCO_3^- , 而巴山沟地表水的主控阴离子为 SO_4^{2-} 。1996 年电站建设前地下水和地表水水化学类型为 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca - Na 型, 2009—2020 年间研究区水样多数为 HCO_3^- - Ca 型, 部分为 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca 、 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca - Mg 、 SO_4^{2-} - Ca - Mg 型, 巴山沟地表水水化学类型为 SO_4^{2-} - Ca 、 SO_4^{2-} - Ca - Mg 型。分析结果表明, 上水库建成前后电站区域的水化学特征发生了一定的变化, 水库建成后地表水以及地下水 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 质量浓度

较水库建成前有所增加, Mg^{2+} 、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 的质量浓度差别不大, 水化学类型也由 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca - Na 型转变为 HCO_3^- - Ca 型及 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca 型。水库建坝蓄水后, 由于坝址水流流态的变化, 即由建坝前的流动态转为建坝后的相对静止态, 由河流型转变为水库湖泊型, 加之电站建设采用了大量的水泥等材料, 导致建成后库水特征相比建库前地表溪流的水质特征发生了相应的改变。库水作为坝基渗漏水的主要补给源, 其特征对坝基渗漏水的水质会产生一定的影响^[11-12]。因此, 库水水质特征的变化、与地下水水质的差别也为分析水库的渗漏路径提供了基础。

3.2 水化学特征影响因素

3.2.1 主成分分析

为探讨水化学特征形成的控制因素, 采用主成分分析方法探讨水质参数之间的关系。主成分分析是在保证数据信息丢失最少的原则下, 对高维变量进行降维处理的分析方法, 可以实现数据的精简提炼^[20]。通过对研究区 125 个水样组分进行主成分分析, 经过 KMO 和 Bartlett 检验, 得到 KMO 值为 0.54, 说明数据适合进行主成分分析。根据 Kaiser-Harris 准则, 选择特征值大于 1 的主成分^[21], 为更好地揭示水化学数据的内在信息, 以载荷值大于 0.4 的为主(表 2)。由表 2 可知, 主成分 F1、F2 和 F3 方差贡献率分别为 36.22%、20.04% 和 14.06%, 累计方差贡献率达 70.33%, 涵盖了研究区地表水和地下水的基本水化学信息, 可用于解释主要水体水化学成分的形成作用^[22]。主成分 F1 以 Cl^- 、 HCO_3^- 和 TDS 为主, Ca^{2+} 和 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 次之, 其方差贡献率为 36.22%, 反映了水对岩石的溶滤作用。 HCO_3^- 与 TDS 的因子载荷较高(0.929 和 0.902)、相关性

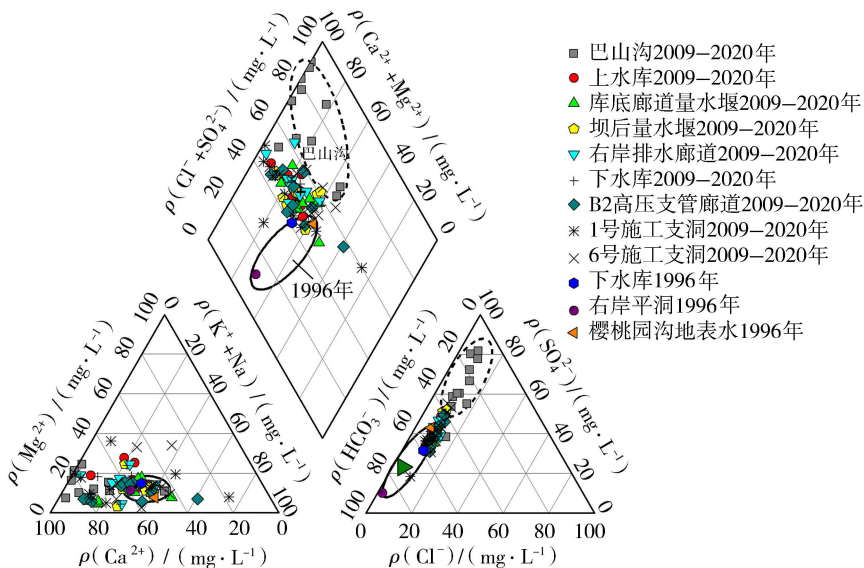


图 2 泰山抽水蓄能电站水化学组成 piper 三线图

Fig. 2 Piper three-line diagram of water chemical composition in Taishan Pumped Storage Power Station

明显,表明 HCO_3^- 对可溶解固体的贡献度较高。同时 F1 还说明库水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 并未达到饱和状态,解释了建库后水化学类型由 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Ca - Na 型转变为 HCO_3^- - Ca 型的成因。采用水文地球化学模拟软件 PHREEQC 进行水溶组分平衡分布计算,结果显示方解石的 SI 值变化范围为 $-1.55 \sim -0.49$,白云石的 SI 值变化范围为 $-3.55 \sim -1.80$,SI 值均小于 0,也说明碳酸盐类矿物在地下水中处于溶解状态、未达到饱和^[23]。主成分 F2 以 pH 值和 SO_4^{2-} 为主,pH 值有较高的负载荷(-0.746),而 SO_4^{2-} 有较高的正载荷(0.834),解释了抽水蓄能电站水体酸碱变化与 SO_4^{2-} 的关系变化,在水体为弱碱性环境时,若地下岩层有硅酸盐存在,存在硫酸溶解硅酸盐岩的影响^[24]。主成分 F3 在 K^+ + Na^+ 有较高的负载荷(-0.838),在 Mg^{2+} 有较高的正载荷(0.555), Ca^{2+} 也存在正载荷,F3 表明存在 K^+ + Na^+ 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的阳离子交换吸附作用^[25]。

表 2 主成分载荷矩阵

Table 2 Principal component load matrix

主成分	pH 值	载荷							特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+ + Na^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	TDS			
F1	0.324	0.541	0.377	0.362	0.756		0.929	0.902	2.97	37.20	37.20
F2	-0.746	0.378				0.834			1.58	19.78	56.98
F3			0.555	-0.838					1.14	14.36	71.34

3.2.2 主要离子组合

通常水中的 K^+ 和 Na^+ 主要来自蒸发盐岩溶解和硅酸盐岩的风化, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要由碳酸盐岩、硅酸盐岩的风化提供, HCO_3^- 的主要来源为各种碳酸盐和沉积岩中碳酸盐的溶解溶滤,地下水中的 SO_4^{2-} 主要来自酸雨、沉积岩中的石膏及其他硫酸盐^[26]。因此,研究不同离子间摩尔比值的差异可阐释研究区地下水在不同补给来源的水文地球化学演化特征^[27]。

Ca^{2+} + Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度比值关系可反映碳酸盐的风化,如果 $c(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}) : c(\text{HCO}_3^-) = 1 : 2$,则说明是碳酸盐的风化占主导地位^[28-29]。如图 3(a) 所示,库水和地下水 $c(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}) : c(\text{HCO}_3^-) \approx 1 : 1$,说明碳酸盐风化不是主导的风化类型,巴山沟地表水化学数据位于 $2 : 1$ 线附近且离子含量较低,说明碳酸盐风化影响较弱。根据 $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$ 浓度的比值关系(图 3(b)) 可以进一步看出,巴山沟地表水化学数据基本落在 $1 : 1$ 线附近,说明有硫酸盐或硫酸参与其水化学组分。在图 3(a) 中巴山沟、库水和地下水 $c(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/c(\text{HCO}_3^-) > 0.5$,也表明有硫酸参与研究区的水文地球化学过程,存在硫酸溶解硅酸盐岩的影响^[24]。综合分析研究区相关的资料,认为硫酸可能来自该地区大气降水中的酸雨^[30],这也与主成分 F2 的分析相一致。图 3(a)(b) 进一步显示巴山沟地表水与库水有较大的差别,主要受大气降水和岩石风化的双重作用,有未经充分水岩作用的大气降水直接混入。

图 3(c) 为 Na^+ + K^+ 和 $c(\text{TZ}^+)/c(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 的浓度变化关系,纵坐标 $c(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 代表研究区硅酸盐类的风化,横坐标 $c(\text{TZ}^+)/c(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 反映出水体中阳离子的相对组成。库水和地下水以及巴山沟地表水化学数据表现出显著的正相关性,说明硅酸盐类风化是研究区地表水和地下水的重要来源。水中 HCO_3^- 的来源与硅酸盐钙长石、钾长石、钠长石等的溶解反应有关,反应过程释放 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ + K^+ ,并存在阳离子交换作用^[31]。巴山沟地表水化学数据的拟合线斜率较上水库区低,表明巴山沟地表水受到的硅酸盐风化作用程度上水库区弱,巴山沟为大气降水短时间补给汇集区,经历的水岩反应时间较短,而上水库水经历了建库以来多年的风化、蒸发过程。硅酸盐岩、碳酸盐岩和蒸发岩是地表水化学组成主要的 3 个风化控制端元,对各端元进行分析可以确定不同岩石风化对水化学成分的贡献^[32-33]。从图 3(d) 可知,碳酸盐岩端元具有高 $c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 和 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 的特征,硅酸盐岩和蒸发岩端元具有低 $c(\text{Ca}^{2+})/c(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 和 $c(\text{Mg}^{2+})/c(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 的特征。研究区地表水和地下水以及巴山沟地表水落在硅酸盐岩和碳酸盐岩端部之间,接近硅酸盐岩端部(图 3(d)),符合研究区以花岗岩风化为主要的岩性特征。同时,巴山沟地表水相比其他水体整体远离硅酸盐岩控制端元,也说明巴山沟地表水具有较弱硅酸盐风化控制的特点。

综合图 3 可以进一步看出,上库水和右岸排水廊道、坝后量水堰水有较为相似的离子组成特征,而库底廊道量水堰及施工支洞等地下水具有较为相似的离子组成,图中的投点基本落在两个不同的阴影区域。上库库水右岸的渗漏水主要通过右岸排水廊道汇集,而坝后量水堰水汇集了上水库整体的渗流补给。

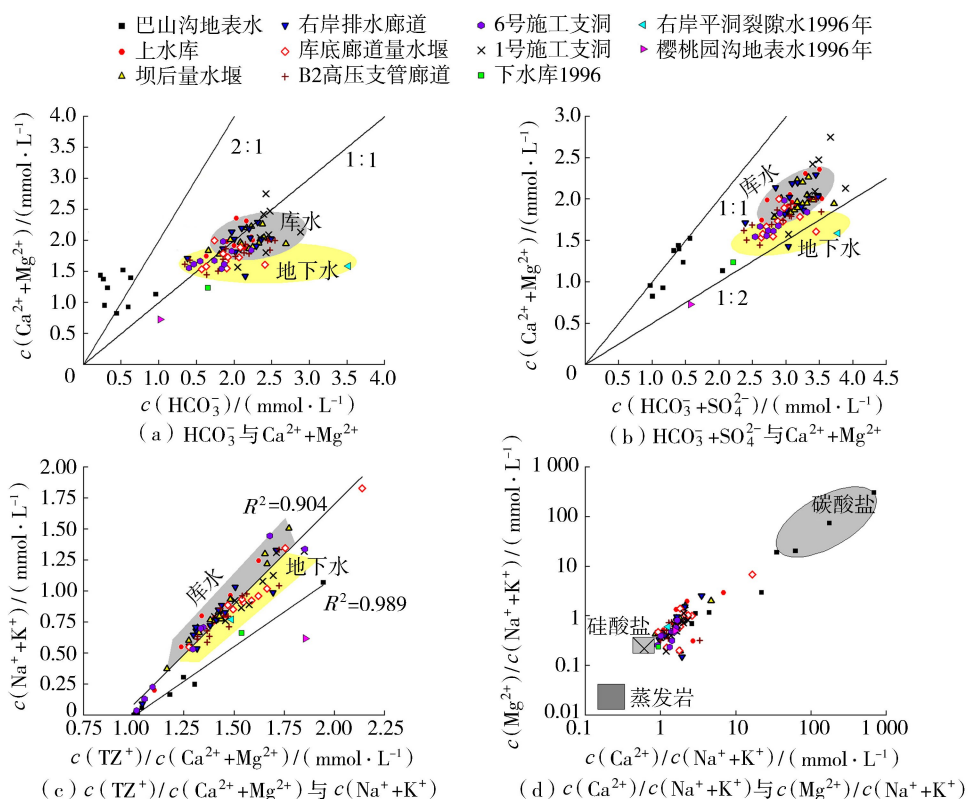


图3 泰山抽水蓄能电站各类水体的离子关系

Fig. 3 Relationship of main ions in various water body of Taishan Pumped Storage Power Station

3.3 水化学聚类分析与示踪意义

系统聚类方法可反映地下水的补、径、排条件及不同地下水类型之间的差异性^[34]。聚类分析按照水质特征的不同对研究区各采样位置进行划分,从而得到若干聚类族,同一聚类族的水样点具有相同的水质特征。对泰山抽水蓄能电站区域 2009—2020 年 125 个水化学数据进行聚类分析,选择 pH 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 以及 TDS 作为变量,采用 Q 型聚类对样品进行分类,选用欧式平方距离计算样品间的距离,水化学数据聚类分析结果用 C1、C2、C3 标注了聚类分组情况(图 4)。

通过聚类分析可以看出:上水库、下水库、右岸排水廊道、坝后量水堰组间距离小,为 C1 类;库底廊道量水堰、B2 高压支管廊道、1 号施工支洞和 6 号施工支洞为 C2 类;巴山沟地表水为 C3 类。C1 类具有 TDS 较低、各种离子含量相差不大的特点。上水库和下水库由于常年发电,水体混合较为均匀,都与右岸排水廊道水和坝后量水堰水极为相似,显示右岸排水廊道水和坝后量水堰水为上水库库水渗漏补给。C2 类都为地下水样品,聚类也与库水不属于同一类,表明这些位置补给为区域地下水来源,未有上水库库水的渗漏补给。C3 类巴山沟地表水为大气降水汇集,水化学特征与其他采样点不同,单独为一类。

结合离子比值图 3(a)(b)(c)可以进一步看出右岸排水廊道、坝后量水堰水样与上水库水样位于相同区域,说明其有相似的水质特征,表明右岸排水廊道和坝后量水堰接受来自上水库的渗漏补给;而库底廊道量水堰、B2 高压支管廊道、6 号和 1 号施工支洞样品点属于区域地下水补给,都与 1996 年时(建设勘察期)右岸平洞裂隙水(区域地下水)相近,与库水有明显的差别,右岸平洞裂隙水为区域地下水补给来源。综合水化学分析结果表明:右岸排水廊道和坝后量水堰水样来自库水渗漏,库底廊道量水堰、B2 高压支管廊道、1 号和 6 号施工支洞水样来自地下水。

聚类分析虽然可以有效地对水化学样品进行分类分析,但水化学数据由于受到多种自然因素的影响,存在一定的不确定性。结合张立等^[18]对泰山抽水蓄能电站各类水体氢氧同位素分析的结果,发现水化学数据与水体氢氧同位素分析具有较好的一致性:右岸排水廊道和坝后量水堰水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^2\text{H}$ 值和库水样有相似的特征,其氦盈余值也落在水库水样的范围内,表明右岸排水廊道和坝后量水堰水样来自上库水渗漏;6 号施工支洞和库底廊道量水堰水样无论 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 还是氦盈余均与库水差别明显,为区域地下水补给。综合

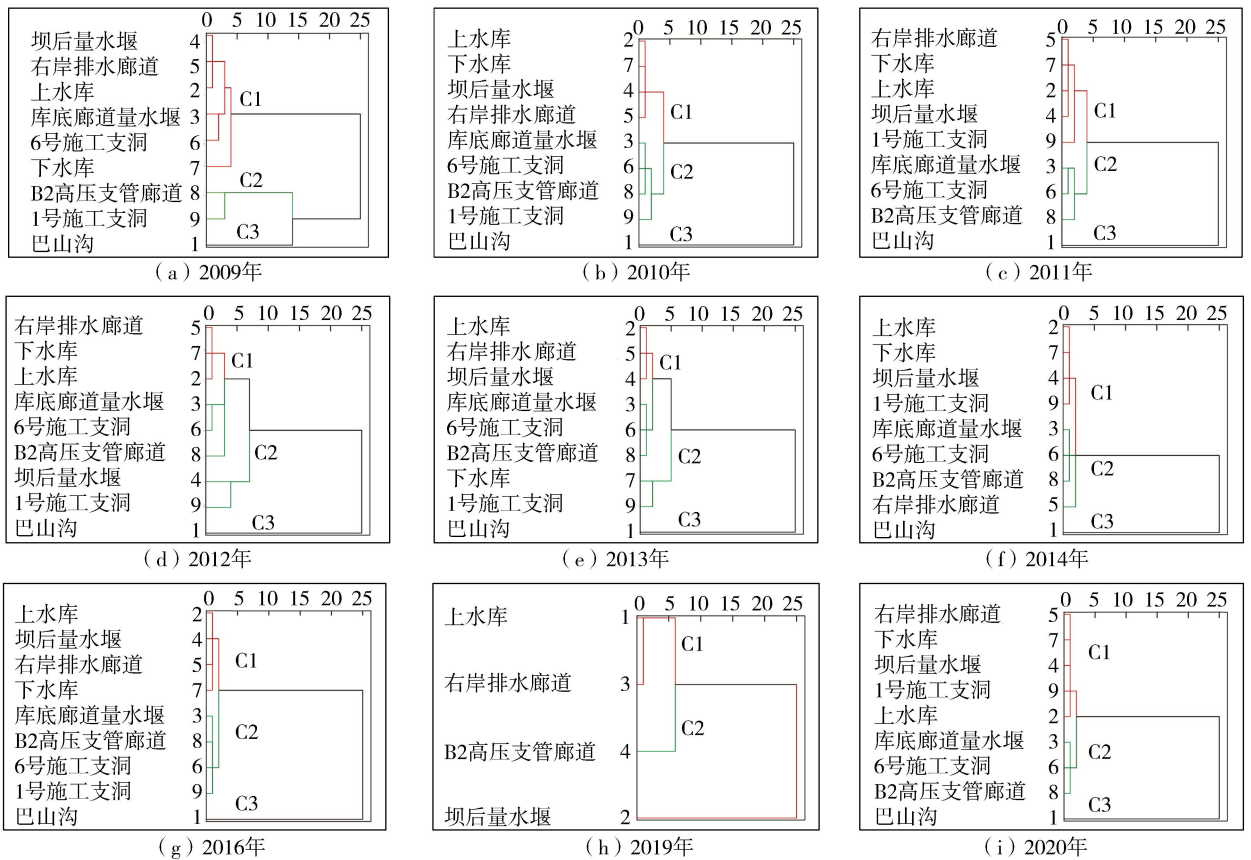


图4 泰山抽水蓄能电站2009—2020年水样水化学的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of water chemistry from 2009 to 2020 in Taishan Pumped Storage Power Station

分析结果表明:右岸排水廊道和坝后量水堰水样来自库水渗漏,右岸防渗面板处存在一定的渗漏情况;库底廊道量水堰等水样多为区域地下水补给,说明库盆整体土工膜防渗较为完好,不存在渗漏的情况。

4 结 论

a. 泰山抽水蓄能电站地下水和地表水均呈弱碱性,2009—2020年各类水体水化学类型大多数为 HCO_3^- -Ca型,部分为 HCO_3^- - SO_4^- -Ca、 HCO_3^- - SO_4^- -Ca-Mg、 SO_4^- -Ca-Mg型,巴山沟地表水为 SO_4^- -Ca、 SO_4^- -Ca-Mg型;1996年时樱桃园沟地表水、下水库(大河水库)水水化学类型为 HCO_3^- - SO_4^- -Ca型,右岸平硐裂隙水为 HCO_3^- - SO_4^- -Ca-Na型;水库建成前后区域的水化学特征发生了明显的变化。

b. 水体离子浓度比值分析表明,硅酸岩风化是库水、地下水以及巴山沟地表水水化学离子的主要来源;巴山沟地表水受岩石风化和大气降雨的双重控制,有未经充分水岩作用的大气降水混入,酸雨是区域水体 SO_4^{2-} 的主要来源。

c. 水文地球化学综合结果表明,右岸排水廊道和坝后量水堰水样来自库水渗漏,库底廊道量水堰、B2高压支管廊道、6号施工支洞和1号施工支洞水为区域地下水补给。水化学分析与电站各类水体氢氧同位素分析对比有很好的一致性,说明水化学方法对示踪水库渗漏诊断有重要的价值。

参考文献:

- [1] 欧阳金惠,耿峻,许亮华,等.某大型抽水蓄能电站厂房强烈振动原因分析与减振措施研究[J].水利学报,2019,50(8):1029-1037. (OUYANG Jinhui, GENG Jun, XU Lianghua, et al. Analysis on strong vibration cause of the powerhouse of a large-scale pumped-storage power station in China and study on its vibration reduction measure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8):1029-1037. (in Chinese))
- [2] 陈青生,马追,董壮,等.抽水蓄能电站同发同抽等流量运行岔管水力特性[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):413-418. (CHEN Qingsheng, MA Zhui, DONG Zhuang, et al. Hydraulic characteristics of bifurcated pipe running at flow

- rates of same discharge and same pumping in pumped storage power station[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(5):413-418. (in Chinese))
- [3] 王柳江,赵志杰,刘斯宏,等. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝重力挡墙位移影响因素分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4):358-365. (WANG Liujiang, ZHAO Zhijie, LIU Sihong, et al. Analysis of influence factors on gravity retaining wall displacement of main dam for the upper reservoir of Yixing Pumped Storage Hydropower Station[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(4):358-365. (in Chinese))
- [4] 陈张华,朱其志,吕超洋,等. 蟠龙抽水蓄能电站洞室围岩三轴试验及本构模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5):105-110. (CHEN Zhanghua, ZHU Qizhi, LYU Chaoyang, et al. Triaxial compression test and constitutive model of surrounding rock of tunnels in Panlong Pumped-Storage Power Station[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(5):105-110. (in Chinese))
- [5] 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(1):52-58. (BAI Guangming, ZHANG Shoujie, LU Jianqi, et al. Numerical modelling and verification of the dam leakage detection using the quasi-flowing field method[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(1):52-58. (in Chinese))
- [6] 蒋中明,肖喆臻,唐栋. 坝基岩体裂隙渗流效应数值模拟方法[J]. *水利学报*, 2020, 529(10):105-114. (JIANG Zhongming, XIAO Zhezhen, TANG Dong. Numerical analysis method of fluid flow in fractured rock mass of dam foundation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 529(10):105-114. (in Chinese))
- [7] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1):1-10. (SU Huaizhi, ZHOU Renlian. Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(1):1-10. (in Chinese))
- [8] 刘晓,彭友文,袁志辉,等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(5):71-75. (LIU Xiao, PENG Youwen, YUAN Zhihui, et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(5):71-75. (in Chinese))
- [9] 位敏,徐轶,陈信任,等. 大坝渗漏多源信息融合诊断技术及其安全评估方法[J]. *水利水电技术*, 2020, 565(11):106-112. (WEI Min, XU Yi, CHEN Xinren, et al. Multi-source information fusion-based diagnosis technique and its safety assessment method for dam leakage[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 565(11):106-112. (in Chinese))
- [10] 霍吉祥,宋汉周,彭鹏,等. 水化学图示法及其在坝基帷幕体防渗性能评价中的应用[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(5):73-79. (HUO Jixiang, SONG Hanzhou, PENG Peng, et al. Hydrochemistry diagrams and their application for assessing anti-seepage behavior of dam foundation curtain[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5):73-79. (in Chinese))
- [11] 陈建生,杨松堂,刘建刚,等. 环境同位素和水化学在堤坝渗漏研究中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(12):2091-2095. (CHEN Jiansheng, YANG Songtang, LIU Jiangan, et al. Application of environmental isotope and hydrochemistry to leakage study[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(12):2091-2095. (in Chinese))
- [12] WANG Tao, CHEN Jiansheng, LI Ping, et al. Natural tracing for concentrated leakage detection in a rockfill dam[J]. *Engineering Geology*, 2019, 249:1-12.
- [13] 宋汉周. 陈村水电站坝基地下水化学特征的研究及其意义. *勘察科学技术*, 1994(5):23-27. (SONG Hanzhou. Study of the geochemical characteristics of groundwater at the Chencun Hydroelectric Power Station dam foundation and its significance[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1994(5):23-27. (in Chinese))
- [14] 董海洲,陈建生. 小浪底水库左坝肩渗漏天然示踪方法研究[J]. *人民黄河*, 2004, 26(4):43-45. (DONG Haizhou, CHEN Jiansheng. Study on natural tracing method of leakage in left abutment of the Xiaolangdi Reservoir[J]. *Yellow River*, 2004, 26(4):43-45. (in Chinese))
- [15] REDDY D V, NAGABHUSHANAM P. Search for hydraulic connectivity between surface reservoirs and surrounding aquifers in the reservoir-triggered seismic environment (Koyna Region, India) using hydrochemical and isotopic signatures[J]. *Journal of Seismology*, 2016, 20:43-62.
- [16] 张世殊,冉从彦,许模,等. 开茂水库岩溶地下水水文地球化学特征研究[J]. *地下水*, 2020, 42(5):17-20. (ZHANG Shishu, RAN Congyan, XU Mo, et al. Hydrochemical characteristics of karst water in Kaimao Reservoir[J]. *Ground Water*, 2020, 42(5):17-20. (in Chinese))
- [17] 王培杰,郭红永,骆欢,等. 基于水化学法的蒲石河抽水蓄能电站渗漏研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1):108-111. (WANG Peijie, GUO Hongyong, LUO Huan, et al. Studying water leakage of Pushihe Pumped Storage Power Station based on water chemical method[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(1):108-111. (in Chinese))

- [18] 张立,郑小贺,李广凯,等.抽水蓄能电站水库各类水体的 H-O 同位素组成特征及其水力联系[J].核技术,2020,43(6):87-94. (ZHANG Li,ZHENG Xiaohe,LI Guangkai,et al. Characteristics of H-O isotopic composition of various water bodies and their hydraulic relations in pumped storage power station reservoir[J]. Nuclear Techniques,2020,43(6):87-94. (in Chinese))
- [19] 王能峰,漆继红,贾疏源,等.大岗山水电站坝区水化学特征及其在地下水系研究中的应用[J].水电站设计,2007,23(1):74-79. (WANG Nengfeng,QI Jihong,JIA Shuyuan,et al. Chemical characteristics of water within Dagangshan Hydropower Station reservoir area and their application in ground water system research[J]. Design of Hydroelectric Power Station,2007,23(1):74-79. (in Chinese))
- [20] 马济国,姜春露,朱赛君,等.基于主成分分析的潘谢矿区突水水源 Fisher 判别模型[J].煤炭技术,2020,321(9):138-140. (MA Jiguo,JIANG Chunlu,ZHU Saijun,et al. Fisher discriminant model of water inrush source in Panxie Mining Area based on principal component analysis[J]. Coal Technology,2020,321(9):138-140. (in Chinese))
- [21] 钱文瀚,高月香,张毅敏,等.基于多元统计分析的漏湖水质时空变化特征及原因解析[J].水利水电技术,2021,52(1):13. (QIAN Wenhan,GAO Yuexiang,ZHANG Yimin,et al. Analysis of characteristics and reasons of temporal and spatial changes of Gehu Lake water quality based on multivariate statistical analysis[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2021,52(1):13. (in Chinese))
- [22] CHANG Juan,WANG Genxu. Major ions chemistry of groundwater in the arid region of Zhangye Basin, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences,2010,61(3):539-547.
- [23] 雷米,周金龙,梁杏,等.新疆天山北麓中段孔隙水水化学特征及苏打水的成因[J].地球科学,2022,47(2):674-688. (LEI Mi,ZHOU Jinlong,LIANG Xing,et al. Hydrochemical characteristics of pore water and genesis of soda water in the middle of the northern piedmont of Tianshan Mountain,Xinjiang[J]. Earth Science,2022,47(2):674-688. (in Chinese))
- [24] 王雅宁,饶文波,郑芳文,等.赣江河水主离子化学特征和径流效应以及控制机制[J].人民长江,2020,51(4):26-34. (WANG Yaning,RAO Wenbo,ZHENG Fangwen,et al. Major ion chemical characteristics, runoff effect and controlling mechanism of Ganjiang River[J]. Yangtze River,2020,51(4):26-34. (in Chinese))
- [25] SHAJI E,VINAYACHANDRAN N,THAMBI D S. Hydrogeochemical characteristics of groundwater in coastal phreatic aquifers of Alleppey District,Kerala[J]. Journal of the Geological Society of India,2009,74(5):585-591.
- [26] KARIM A,VEIZER J. Weathering processes in the Indus River Basin: implications from riverine carbon, sulfur, oxygen, and strontium isotopes[J]. Chemical Geology,2000,170(1):153-177.
- [27] 沈回归,饶文波,谭红兵,等.高寒区典型流域地下水化学特征、影响因素及健康风险[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):9-17. (SHEN Huihui,RAO Wenbo,TAN Hongbing,et al. Chemical characteristics, influencing factors and human health risks of groundwater in an alpine watershed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):9-17. (in Chinese))
- [28] LI Siyue,LU X X,MIN He,et al. Major element chemistry in the upper Yangtze River:a case study of the Longchuanjiang River [J]. Geomorphology,2011,129(1-2):29-42.
- [29] 汪生斌,祁泽学,王万平,等.格尔木河水化学特征及成因[J].水资源保护,2020,36(5):93-98. (WANG Shengbin,QI Zexue,WANG Wanping,et al. Hydrochemical characteristics and causes of formation of the Golmud River[J]. Water Resources Protection,2020,36(5):93-98. (in Chinese))
- [30] 王艳,葛福玲,刘晓环,等.泰山降水化学及大气传输的研究[J].环境科学学报,2006,26(7):1187-1194. (WANG Yan,GE Fuling,LIU Xiaohuan,et al. Study on the precipitation chemistry and atmospheric transport at the Mount Taishan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2006,26(7):1187-1194. (in Chinese))
- [31] WANG Yanxin,GUO Qinghai,SU Chunli,et al. Strontium isotope characterization and major ion geochemistry of karst water flow Shentou,Northern China[J]. Journal of Hydrology,2006,328(3-4):592-603.
- [32] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science,1970,170:1088-1090.
- [33] 许畅畅,温瑶,成思,等.长江口滨岸浅层地下水化学组分时空分布特征及其影响机制[J].水资源保护,2022,38(3):181-188. (XU Changchang,WEN Yao,CHENG Si,et al. The temporal and spatial distribution and mechanism of hydrochemical composition of shallow groundwater in the coast of Yangtze River estuary[J]. Water Resources Protection,2022,38(3):181-188. (in Chinese))
- [34] 石磊,徐楼英.基于水化学特征的聚类分析对矿井突水源判别[J].煤炭科学技术,2010,38(3):97-100. (SHI Lei,XU Louying. Prediction of mine water inrush sources based on cluster analysis of hydrogeochemical features[J]. Coal Science and Technology,2010,38(3):97-100. (in Chinese))