

李冬丽, 贺海波, 张雪程, 等. 柴达木盆地东北部巴音河小流域水化学特征及来源[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(3): 749-759.
LI Dong-li, HE Hai-bo, ZHANG Xue-cheng, et al. Hydrochemical Characteristics and Sources of Small Bayin River Watershed in the
Northeast of Qaidam Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(3): 749-759.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.12047

·《地球科学与环境学报》更名二十周年纪念专辑·

柴达木盆地东北部巴音河小流域水化学特征及来源

李冬丽¹, 贺海波^{2,3}, 张雪程¹, 关天昊¹, 杨梦迪¹, 代文静¹,
邵航¹, 丁士元¹, 李晓东^{1*}

(1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室,
贵州 贵阳 550081; 3. 云南大学 云南省地球系统科学重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要:水化学特征是流域气候特征与环境的重要指示器, 可用于揭示流域内河流、湖泊的补给方式及物质来源。以青藏高原柴达木盆地东北部巴音河小流域为研究对象, 分析了巴音河—可鲁克湖—托素湖小流域生态系统的水化学组成, 探讨了其主要的离子来源及控制因素。结果表明: 水体 pH、电导率(EC)及溶解性总固体(TDS)沿流向均呈升高的趋势, 巴音河、可鲁克湖及托素湖水化学类型分别为 HCO₃-Cl-Na-Ca-Mg 型/HCO₃-Cl-Na-Mg 型、HCO₃-Cl-Na-Mg 型及 SO₄-Cl-Na-Mg 型; 托素湖作为封闭的咸水湖, 主要受到蒸发浓缩作用的控制, 而巴音河、可鲁克湖则受到岩石风化作用、蒸发浓缩作用以及钠盐淋溶作用等的共同控制; 受蒸发作用的影响, 水体碳酸盐矿物达到饱和状态并发生沉淀, 从而导致 Ca²⁺ 质量浓度沿流向下降低; 巴音河、可鲁克湖 Mg²⁺/Ca²⁺ 摩尔浓度比值较低, 推测形成文石、方解石等碳酸盐沉淀, 而托素湖 Mg²⁺/Ca²⁺ 摩尔浓度比值较高, 则可能形成高镁方解石、原白云石等碳酸盐沉淀; 研究区水体中 Na⁺、K⁺、Cl⁻ 主要来源于石盐(NaCl)和钾盐(KCl)等蒸发岩的溶解; 而 Mg²⁺、SO₄²⁻ 主要来源于蒸发岩(MgSO₄)风化; Ca²⁺ 及高质量浓度的 HCO₃⁻ 可能来源于碳酸盐矿物的快速溶解, 此过程也是水体 Mg²⁺ 来源之一。

关键词:水化学; 离子组成; 来源; 空间分布; 控制因素; 柴达木盆地; 青藏高原

中图分类号: P592; X143 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2023)03-0749-11

Hydrochemical Characteristics and Sources of Small Bayin River Watershed in the Northeast of Qaidam Basin, China

LI Dong-li¹, HE Hai-bo^{2,3}, ZHANG Xue-cheng¹, GUAN Tian-hao¹, YANG Meng-di¹,
DAI Wen-jing¹, SHAO Hang¹, DING Shi-yuan¹, LI Xiao-dong^{1*}

(1. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of
Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081,
Guizhou, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Earth System Science, Yunnan University,
Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: Hydrochemistry characteristics, which are indicators of the regional climate and environment, can reveal recharge mode and material sources of lakes and rivers in the basin. To investigate the hydrochemical characteristics and the sources of major ions of the small Bayin river

收稿日期: 2022-12-17; 修回日期: 2023-02-08 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52000136, 42007296)

作者简介: 李冬丽(1994-), 女, 苗族, 贵州雷山人, 理学博士研究生, E-mail: lidongli2050@163.com.

* 通讯作者: 李晓东(1973-), 男, 四川遂宁人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: xiaodong.li@tju.edu.cn.

watersheds in the northeast of Qaidam Basin, Qinghai-Tibet Plateau, the water samples from Bayin river, Hurleg lake, and Tosen lake were collected during May 2021. The results show that pH, EC, and TDS increase along the flow direction; according to the Sukalev classification, the hydrochemical types of Bayin river, Hurleg lake, and Tosen lake are $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca-Mg}/\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$, and $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Mg}$, respectively; as a typical closed inland brackish lake, water chemistry of Tosen lake is primarily dominated by evaporation-crystallization processes; while Bayin river and Hurleg lake are jointly influenced by weathering, evaporation-crystallization processes, and sodium salt leaching; owing to the enhanced evaporation, carbonate minerals are always the first phase to precipitate, resulting in the decrease of Ca^{2+} mass concentration along the flow direction; the $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ molar concentration ratios of Bayin river and Hurleg lake are low, indicating that aragonite or calcite is probably formed; while the $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ molar concentration ratio of Tosen lake is high, indicating that high magnesium calcite or protodolomite might be formed; the main sources of Na^+ , K^+ and Cl^- in the water body are the evaporate dissolution such as halite (NaCl) and potash (KCl); moreover, Mg^{2+} and SO_4^{2-} are mainly derived from the evaporate (MgSO_4) weathering; HCO_3^- with high mass concentration and Ca^{2+} may result from rapid dissolution of carbonate minerals, which is also one of the sources of Mg^{2+} .

Key words: hydrochemistry; ion composition; source; spatial distribution; controlling factor; Qaidam Basin; Qinghai-Tibet Plateau

0 引言

青藏高原分布着世界上数量最多、海拔最高(4 500 m)、面积最大($2 \times 10^6 \text{ km}^2$)及以盐碱湖为特色的高原湖泊群^[1-2]。柴达木盆地是青藏高原东北部大型封闭的内陆盆地,处于干旱、半干旱区,是全球气候变化下的敏感区^[3-4]。同时,高海拔、强太阳辐射的极端环境条件和单一的湖泊营养结构,使得高原湖泊生态系统对环境的变化较传统的湖泊生态系统更加敏感^[5]。水化学特征是河流、湖泊的一个重要特征,其不仅是流域水-岩作用的反映,同时也是流域环境变迁研究的重要理论依据^[6-10]。近年来,许多学者对青藏高原柴达木盆地的河流、湖泊进行了研究,如巴音河^[11]、可鲁克湖^[12]、托素湖^[13-14]、青海湖^[15-16]、尕斯库勒盐湖^[17-18]、大柴旦湖^[19]、尕海^[20]等,探讨了湖泊及其支流水体的水化学组成、控制机制及离子来源。其中,巴音河作为可鲁克湖的主要入湖河流,两者的水化学类型不同,巴音河为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,而可鲁克湖为 $\text{Cl-SO}_4\text{-Na-Ca}$ 型,造成两者差异的原因在于湖水发生强烈的蒸发浓缩作用,使得湖水中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 以碳酸盐矿物的形式析出^[12];青海湖水体离子组成主要受蒸发结晶作用影响,沉积岩的溶解是河水离子的主要来源^[15];尕斯库勒盐湖成盐元素主要来源于蚀源区岩

石风化,其中碳酸盐岩风化、蒸发岩风化、硅酸盐岩风化及冰川融水占比分别为63.89%、35.92%、0.15%及0.04%^[18]。综上所述,柴达木盆地不同流域/同一流域不同水体水化学特征及控制机制存在空间差异。然而,目前这些研究多以某个单独的湖泊或者某个流域为主,小流域的水化学特性了解相对较少^[21],尤其是对区域内河流-淡水湖-咸水湖体系水化学的系统性认识不够。基于此,本文以青藏高原柴达木盆地东北部巴音河—可鲁克湖—托素湖小流域生态系统为研究对象,通过实地野外考察及采样,分析了区域内水体主要离子浓度变化、水化学性质组成特征,并对主要离子的来源及控制机制进行解析,旨在厘清青藏高原柴达木盆地小流域河-湖体系无机水化学变化特征及离子来源,以期充实青藏高原湖泊的水化学资料,为更全面地了解青藏高原湖泊的演化过程提供参考。

1 研究区概况

巴音河小流域位于青藏高原柴达木盆地东北部,区域内干旱少雨,风沙大,气候变化剧烈,日照长,属于典型的高寒大陆性气候^[12,20]。研究区位于现今活动构造强烈的祁连山南坡西段,南接柴达木盆地,受NW向断裂带分割形成了隆-坳、凹-凸相间的构造格局,主要受北缘压扭性断裂体系控制,沉积

形成巨厚的新近系和第四系。流域地处德令哈冲积扇盆地,多为桌状山和环形山,其间沟谷发育。盆地内沉积了大量河湖相碎屑岩系和膏岩、黏土及黄土层建造,岩性复杂。区域内全年平均日照时数为2 879 h,日照率达70%~77%,年平均气温仅为1℃~5℃。平均降水量为176.3 mm,夏季降水量占全年的56%~84%,年蒸发量为2 000~2 500 mm,是年平均降水量的12~17倍^[22]。区域内主要地貌类型有河流、湖泊、沼泽湿地、草甸和荒漠,主要分布有可鲁克湖和托素湖。其中,可鲁克湖位于德令哈市南部的戈壁乡与怀头他拉乡交界处,是柴达木盆地最大的淡水湖,湖水面积5 504.37 hm²;托素湖位于德令哈市西南部,是德令哈盆地最低点,湖水面积15 420 hm²,为咸水湖。巴音河是流域内最大的河流,发源于祁连山的哈尔科山南坡,流经泽令沟、德令哈、戈壁水文站,最后汇入可鲁克湖;巴音河流进可鲁克湖后,经过湖泊的调节,经可鲁克湖中间的连通河排泄至托素湖,流出量达 $1.26 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{年}^{-1}$ 。研究区土壤包括灰棕漠土、棕钙土、草甸土、沼泽土、风沙土和盐土。其中,青新公路两侧和巴音河阶地为棕钙土,可鲁克湖、托素湖周围残丘带主要为灰棕钙土,沿河两岸和山前洪积扇外缘地带主要为盐土^[23]。

2 样品采集与分析方法

2021年5月,课题组对青藏高原柴达木盆地东北部巴音河小流域的巴音河、可鲁克湖及托素湖0~5 cm表层水进行系统的野外考察及采样(图1),共收集8件河水样品,33件湖水样品(可鲁克湖15件,托素湖18件)。取样前先用水润洗样品瓶2、3次,水样于室内用赛多利斯不锈钢过滤器配合孔径为0.45 μm的混合纤维膜进行过滤;用于测试阴离子的样品保存于100 mL的HDPE塑料瓶(Nalgene)中,用于测定阳离子的样品加入硝酸酸化至pH<2;将水样运回实验室进行测定。

现场使用多水质参数检测仪(YSI-EXO1,美国)原位测定采样点pH、电导率(EC)等基本物理化学参数,并使用0.01 mol·L⁻¹的HCl溶液在采集现场滴定测量HCO₃⁻浓度。水体主要阳离子(Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺)浓度使用ICP-OES(仪器型号为5110,Agilent,美国)测定,主要阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻)浓度使用离子色谱(仪器型号为ICS-5000+,Thermo Scientific Dionex,美国)测定,平均测试精度优于0.001 mg·L⁻¹。所有水体阴、阳离

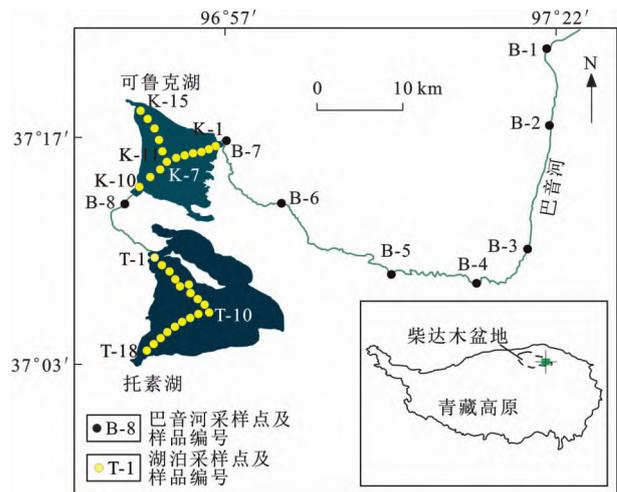


图1 青藏高原柴达木盆地东北部巴音河小流域地理位置及采样点分布

Fig. 1 Map Showing Location of Small Baying River Watersheds in the Northeast of Qaidam Basin, Qinghai-Tibet Plateau and Distribution of Sampling Sites

子电荷平衡之差(NICB)的平均值为4.58%,说明测试分析的误差很小。

3 结果分析与讨论

3.1 水体物理化学特性

青藏高原柴达木盆地东北部巴音河小流域湖泊和河流主要水质参数和离子质量浓度见表1。研究区水体整体偏碱性,从巴音河到可鲁克湖再到托素湖,水体pH值呈逐渐升高的趋势,其平均值分别为8.3、8.5和8.9。基于pH值的波动范围,得到水体溶解无机碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)(溶解CO₂、HCO₃⁻、CO₃²⁻)主要由HCO₃⁻控制,占比超过95%,因此,本文使用HCO₃⁻作为溶解无机碳的近似值。巴音河电导率略高于可鲁克湖,其平均值分别为878.2、984.7 μS·cm⁻¹;托素湖电导率为17 298.4~21 715.3 μS·cm⁻¹,平均值为20 341.6 μS·cm⁻¹,远高于可鲁克湖及巴音河。水体溶解性总固体(Total Dissolved Solids, TDS)的变化趋势与电导率一致。托素湖水体溶解性总固体远高于可鲁克湖及巴音河,为17 704.3~22 266.6 mg·L⁻¹(平均值为20 576.7 mg·L⁻¹),属于微咸水;巴音河及可鲁克湖溶解性总固体平均值分别为968.3、759.4 mg·L⁻¹,属于淡水。

3.2 主要离子组成

图2为各采样点主要离子质量浓度沿流向变化情况。从图2可以看出,各主要离子沿流向呈现明显的空间变化。根据各组水样统计分析,研究区水

表1 水体主要水质参数及离子质量浓度

Table 1 Main Quality Parameters and Ion Mass Concentrations of Water Body

观测位置	统计项目	pH	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	TDS 值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$m(\text{Ca}^{2+})$	$m(\text{K}^+)$	$m(\text{Mg}^{2+})$	$m(\text{Na}^+)$	$m(\text{Cl}^-)$	$m(\text{SO}_4^{2-})$	$m(\text{HCO}_3^-)$	$m(\text{NO}_3^-)$
巴音河	最大值	8.47	1 176.80	960.50	72.55	7.35	67.23	207.47	292.65	192.35	318.19	6.28
	平均值	8.33	878.20	743.59	64.88	4.98	47.03	128.78	183.27	124.42	271.28	4.22
	最小值	8.13	494.39	436.00	54.10	2.38	26.64	43.96	67.38	67.15	219.66	1.80
可鲁克湖	最大值	8.67	1 132.08	864.00	59.41	5.80	47.72	124.43	195.07	149.95	277.14	2.19
	平均值	8.48	984.68	759.35	53.46	5.37	45.16	115.13	179.20	138.40	254.04	1.13
	最小值	8.07	923.20	728.98	48.05	5.05	42.67	106.80	162.33	125.02	197.59	0.74
托素湖	最大值	9.01	21 715.31	22 266.62	36.77	161.38	1 441.95	6 236.09	9 321.17	4 701.13	1 180.39	1.36
	平均值	8.91	20 341.58	20 576.72	31.44	147.27	1 311.30	5 677.75	8 419.78	4 413.31	1 151.74	0.84
	最小值	8.81	17 298.41	17 704.28	29.25	122.20	1 141.34	4 501.45	7 341.99	3 807.34	1 058.93	0.13

注： $m(\cdot)$ 为离子质量浓度，单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

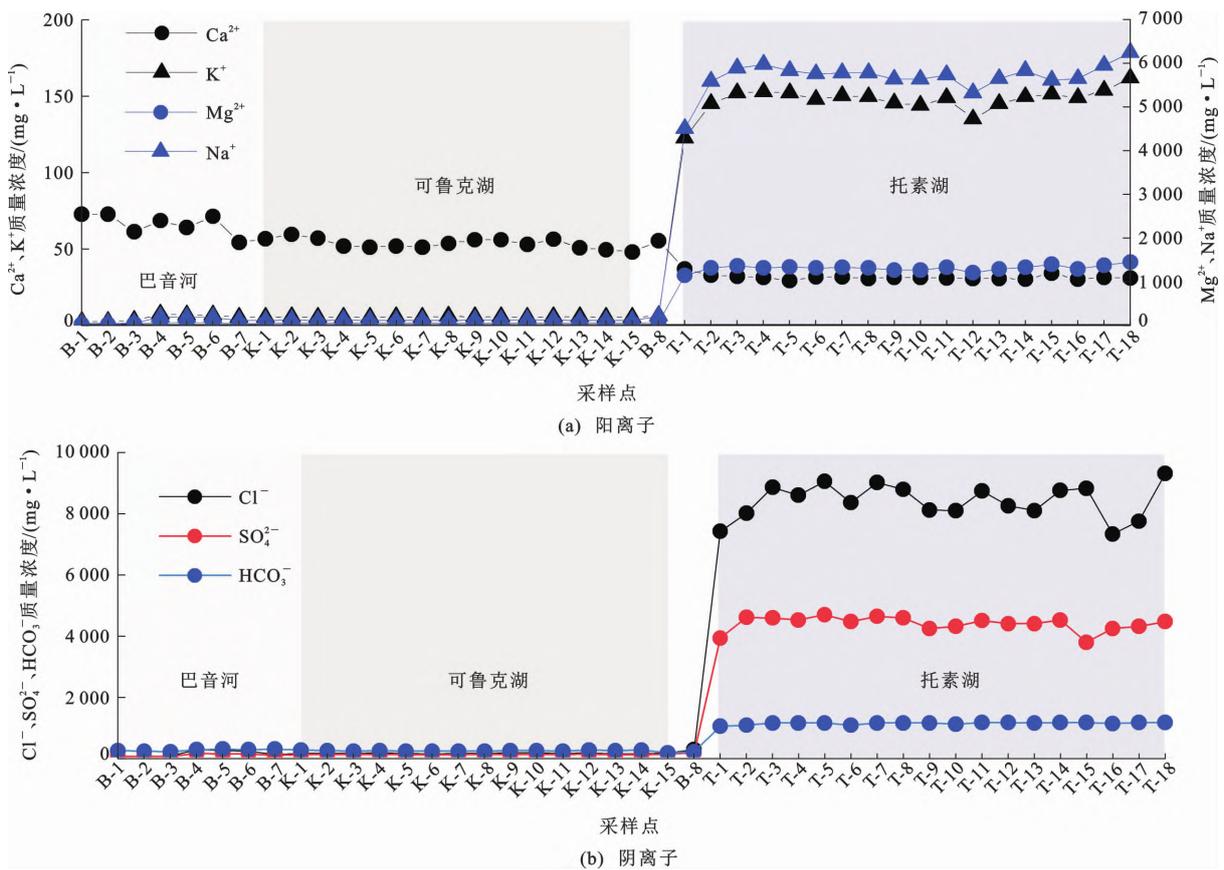


图2 水体主要离子质量浓度沿流向变化

Fig. 2 Mass Concentration Trends of Main Ions of Water Body Along the Flow Direction

体主要阳离子为 Na^+ 、 Mg^{2+} 及 Ca^{2+} ，主要阴离子为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 。除 Ca^{2+} 及 NO_3^- 外，巴音河至可鲁克湖及其出水口(B-8)段各离子质量浓度波动不大，而在托素湖湖区各离子质量浓度急剧增加。其中，阳离子以 Na^+ 、 Mg^{2+} 质量浓度变化尤为明显，可鲁克湖 Na^+ 经河段汇入托素湖后的平均质量浓度由 $115.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 迅速增加至 $5 677.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ， Mg^{2+} 平均质量浓度由 $45.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至

$1 311.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。阴离子也呈现相同的变化趋势，尤其是 Cl^- 及 SO_4^{2-} ，其在托素湖的平均质量浓度分别是可鲁克湖的46.9倍和9.5倍(表1)。 HCO_3^- 质量浓度也呈现明显的增加趋势，但增势不如 Cl^- 及 SO_4^{2-} 。因此，从Piper图(图3)可以看出，可鲁克湖的阴离子主要为 HCO_3^- 和 Cl^- ，而托素湖的主要阴离子为 Cl^- 及 SO_4^{2-} ，水化学类型从 HCO_3^- - Cl - Na - Mg 型转变为 SO_4 - Cl - Na - Mg 型。巴音河的

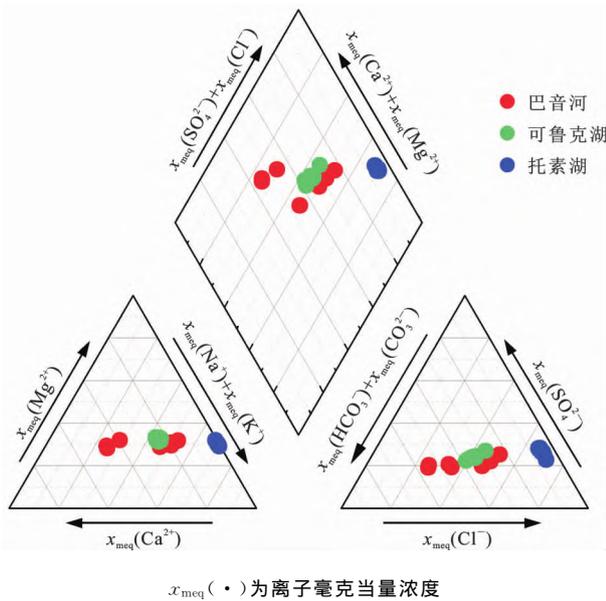


图 3 水体主要离子组成 Piper 图

Fig. 3 Piper Diagram for Main Ion Composition of Water Body

各采样点则受到沿途沼泽湿地的影响,上游河流采样点(样品编号为B-1~B-3)水化学类型为 HCO_3^- -Cl-Na-Ca-Mg 型,流经沼泽湿地段的河流采样点水化学类型转变为 HCO_3^- -Cl-Na-Mg 型。

与 Na^+ 、 Mg^{2+} 等离子的质量浓度变化趋势相反, Ca^{2+} 质量浓度从巴音河(平均值为 $64.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)至可鲁克湖(平均值为 $53.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),再到托素湖(平均值为 $31.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),整体上呈现逐渐下降的趋势,推测可能是受到蒸发浓缩作用的影响。流域 NO_3^- 质量浓度处于较低水平,整体低于西南喀斯特地区及东部地区^[24]。与 Ca^{2+} 质量浓度沿流向变化一致, NO_3^- 质量浓度由流经德令哈城区的巴音河上游(平均值为 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)至流经沼泽湿地的下游(平均值为 $3.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),再到可鲁克湖(平均值为 $1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),最后汇入托素湖(平均值为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其质量浓度沿流向呈现逐渐下降趋势。其中,巴音河上游较高的离子质量浓度可能是受到人类活动带来的污水或粪便的影响,可鲁克湖、托素湖因远离城区而影响较小。

3.3 主要控制机制

水岩作用可以降低水体 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值,而蒸发浓缩作用可以促进碳酸盐矿物沉淀,从而增加 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值。因此,Gibbs 图可以较直观地反映出水体主要组分的类型(包括降水控制型、岩石风化型或蒸发浓缩型),可用于定性判断区域岩石、大气降水、蒸发浓缩作用等对流域水化

学的影响^[25]。Gibbs 图显示研究区所有水体采样点均距离大气降水作用区间较远[图 4(a)],托素湖采样点在蒸发浓缩控制区聚集甚至重叠分布,说明托素湖水体离子质量浓度可能主要受控于蒸发浓缩作用。河流及可鲁克湖水体 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 质量浓度比值为 $0.37 \sim 0.95$,采样点主要分布在蒸发浓缩控制区和岩石风化控制区之间,表明巴音河及可鲁克湖水体离子质量浓度可能受到蒸发浓缩作用及岩石风化作用的共同控制,这与前人对巴音河流域的研究结果^[11,26]一致。

在干旱条件下,土壤钠盐淋溶作用会增加水体 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值,尤其是在土壤盐以钠盐为主的干旱区,钠盐淋溶作用甚至可以掩盖蒸发浓缩作用导致的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值升高趋势。 Mg^{2+} 在土壤盐中的浓度很低,主要由岩石风化而来,且在蒸发早期不发生沉淀。因此, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值可以用于反映土壤盐的淋溶作用, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值可以用于反映蒸发作用^[27]。从图 4(b)可以看出,托素湖具有较高的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值和相对较低的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值,主要位于蒸发控制区(II)。相对于托素湖,巴音河、可鲁克湖具有较低的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值,样品点分布于岩石风化及钠盐淋溶控制区(I),说明蒸发浓缩作用对可鲁克湖、巴音河水体离子组成的控制弱于托素湖。其中,巴音河上游采样点相较于中游及下游采样点具有较高的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值,说明上游采样点受到岩石风化作用的影响较大。巴音河中下游采样点钠盐淋溶作用增强, Na^+ 平均质量浓度由上游的 $46.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至中下游的 $178.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而 Mg^{2+} 质量浓度则变化不大,使得中下游采样点 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值下降。因此,托素湖可能主要受到蒸发浓缩作用的控制,而巴音河及可鲁克湖则可能受到蒸发浓缩作用、岩石风化作用、钠盐淋溶作用等的共同影响。

蒸发的初始阶段会使所有离子发生相同程度的浓缩,当某种离子浓度增加至该对应盐的饱和点时,则会发生沉淀并导致相应离子浓度下降。由于钠盐相对易溶,只在蒸发浓缩的最后阶段结晶析出,所以受到蒸发作用控制的水体会朝 Na-Cl 型水体(如海水)演化。而方解石等碳酸盐通常是最先发生沉淀的盐类,当 $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ 毫克当量浓度比值高于 2 时,在蒸发浓缩作用下,水体会朝低 Ca^{2+} 、高 HCO_3^-

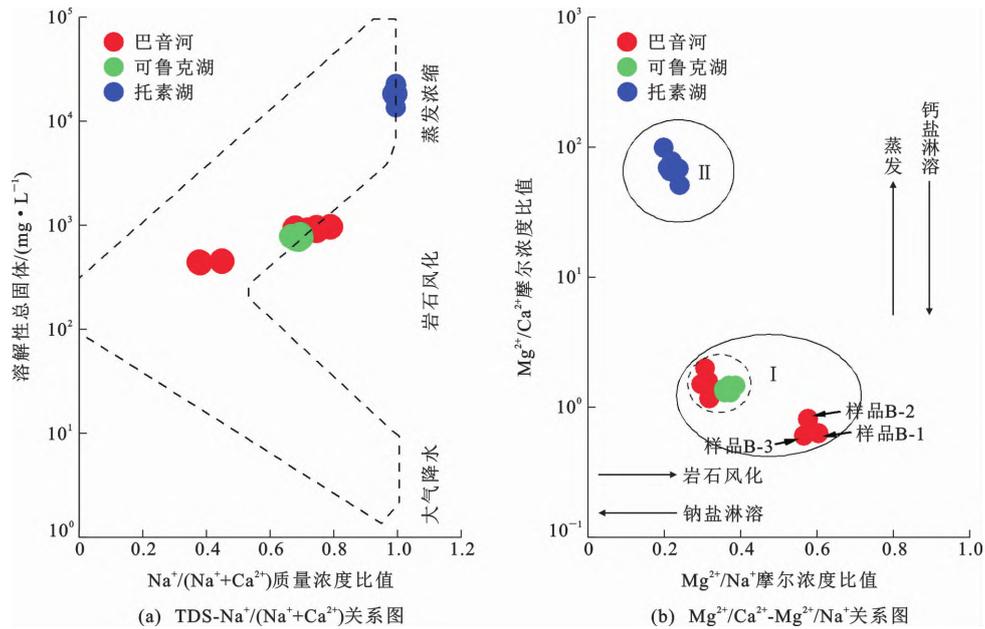


图4 水体 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs Plots of Water Body

的方向演化^[27]。若发生沉淀时,如果 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔浓度比值较低,一般生成文石、方解石或低镁方解石;如果 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔浓度比值较高,则有可能生成高镁方解石、原白云石、碳钙镁石^[28]。而托素湖作为封闭湖泊, HCO_3^-/Ca^{2+} 毫克当量浓度比值远高于淡水湖及河流水体,为 9.4~12.9,平均值为 12.1(远大于 2),且 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔浓度比值较高(平均值为 72.2),说明强烈的蒸发作用可能导致高镁方解石、原白云石等碳酸盐矿物的沉淀,使得湖水 HCO_3^- 质量浓度升高,而 Ca^{2+} 质量浓度下降(图 2)。而巴音河、可鲁克湖 HCO_3^-/Ca^{2+} 毫克当量浓度比值分别为 1.12~1.86(平均值为 1.39)和 1.34~1.81(平均值为 1.06),均小于 2,表明蒸发作用的影响较托素湖小。同时,由于可鲁克湖、巴音河 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔浓度比值较小,沉淀的碳酸盐可能主要以文石、方解石等为主。此外,使用 PHREEQC 程序对水体碳酸盐矿物进行计算,发现所有水体中方解石及白云石都处于过饱和状态(表 2),同时 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔浓度比值与白云石饱和指数成正相关关系(判定系数 R^2 为 0.86, $p < 0.01$),进一步说明水体 Ca^{2+} 主要以碳酸盐沉淀的形式从水体去除。

青藏高原气候干燥、降水少,托素湖作为一个封闭湖泊,湖水受到持续蒸发的影响,一方面导致溶解性总固体升高、水体咸化,另一方面碳酸盐矿物(如高镁方解石、白云石等)达到饱和状态并发生沉淀(表 2),导致 Ca^{2+} 质量浓度下降,而易溶盐离子

表 2 不同矿物饱和指数

Table 2 Saturation Indices of Different Minerals

观测位置	统计项目	不同矿物饱和指数					
		文石	方解石	白云石	石膏	石盐	石英
巴音河	最大值	0.87	1.01	2.37	-1.58	-5.83	-0.20
	平均值	0.79	0.93	2.04	-1.71	-6.39	-0.47
	最小值	0.72	0.86	1.65	-1.83	-7.11	-1.60
可鲁克湖	最大值	0.85	1.00	2.27	-1.71	-6.29	-5.00
	平均值	0.85	1.00	2.27	-1.71	-6.29	-5.00
	最小值	0.33	0.48	1.25	-1.78	-6.36	-5.62
托素湖	最大值	0.98	1.12	4.24	-1.40	-3.05	-1.04
	平均值	0.90	1.04	4.08	-1.47	-3.14	-1.11
	最小值	0.82	0.97	3.93	-1.51	-3.28	-1.28

Na^+ 、 K^+ 则会持续发生浓缩,这一现象在青藏高原其他湖泊如纳木错^[29-30]、打加错^[6]等也有发现。而可鲁克湖及巴音河水体 Ca^{2+} 可能主要以方解石、原白云石等碳酸盐矿物形式沉淀,使得 Ca^{2+} 质量浓度呈现下降趋势。

3.4 离子来源

水体中溶解盐的可能来源有大气环流所携带的海盐、流域内岩石风化及人类活动输入^[6]。溶解盐通过补给湖水的降水、地表径流/河流、地下水进入水体。研究区位于大陆内部,远离海洋,长距离的运输使得海盐对于降水中的溶解盐贡献较小。此外,区域内年降水量仅为 176.3 mm^[23],因此可以忽略海盐对水体中溶解盐的贡献。另外,从 3.1 节可以知道,人类活动对巴音河上游存在一定影响,但对可鲁克湖及托素湖的影响可能较弱。

Na^+ 和 K^+ 主要源于蒸发岩或者硅酸盐岩的风化产物,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可能源于蒸发岩、硅酸盐岩及碳酸盐岩, Cl^- 和 SO_4^{2-} 主要源于蒸发岩, HCO_3^- 则主要由碳酸盐岩提供^[31-32]。因此, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值可以用于定性推断水体水化学的受控来源,据此可将其分为碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化或蒸发岩溶解等 3 类。由于 Na^+ 的溶解度较 Ca^{2+} 高,受硅酸盐岩风化控制的河流 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值较低 (0.35 ± 0.15), $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值约为 2 ± 1 , $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值约为 0.24 ± 0.12 ^[33]。而受碳酸盐岩风化控制的河流表现出 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 富集的特征, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值分别为 50、10、20,远高于硅酸盐岩地区^[33-34]。从图 5 采样点的分布情况可以看出,研究区主要处于蒸发岩和硅酸盐岩溶解作用控制区,巴音河上游采样点(样品 B-1、B-2、B-3) $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值较高(0.98),因此可能还受到碳酸盐岩溶解的控制。而受到强烈蒸发浓缩作用的影响,托素湖 Ca^{2+} 质量浓度降低,湖区水体 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值进一步下降,使得托素湖采样点远离 3 个岩性端元。由于硅酸盐岩风化释放出的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 比 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 少,自然水体中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 毫克当量浓度比值可以用于反映流域内不同岩石种类风化程度,比值高说明碳酸盐岩风化程度较大,反之亦然。研究区的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 毫克当量浓度比值整体处于较低水平[图 6(a)],尤其是托素湖水体中平均值仅为 0.4,远低于世界河流平均水平(2.2)^[12]。而相较于其他采样点,巴音河上游采样点(样品 B-1、B-2、B-3)中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 毫克当量浓度比值较高(平均值为 2.8)。另外,根据矿物饱和指数的计算,研究区碳酸盐岩处于饱和或者过饱和状态,可溶解的量较小,而大部分蒸发岩、硅酸盐岩的饱和指数为负数,处于未饱和状态(表 2),进一步说明研究区可能主要以蒸发岩溶解和硅酸盐岩风化为主。

然而与之相悖的是,研究区水体 HCO_3^- 质量浓度非常高,巴音河、可鲁克湖及托素湖 HCO_3^- 平均质量浓度高达 271.3、254.0、1 151.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这显然远高于纯玄武岩或者其他硅酸盐岩风化所能形成的 HCO_3^- 质量浓度。曾庆睿等认为在硅酸盐岩风化区出现高的 HCO_3^- 质量浓度可能是因为来源于硅酸盐岩中的方解石等微量碳酸盐矿物的快速溶解^[35]。也有很多研究也证实了这一观点。例如,巴

基斯坦北部高喜马拉雅结晶岩系的 Raikhot 流域内水体中 82% 的 HCO_3^- 通量是来自于分布在以长英质片麻岩和花岗岩为主导的硅酸盐岩中仅约 1% 的碳酸盐矿物的风化^[36];在以硅酸盐岩占据主导地位的恒河支流 Bhote Kosi 中,微量碳酸盐矿物在高喜马拉雅地区贡献了高于 75% 的溶解态 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,而在小喜马拉雅地区的贡献则更是超过了 92%^[37]。显然,这是基于上述水化学岩性端元分析做出的定性认知(即本区主要受控于硅酸盐岩风化)基础上做出的假设。由于研究区河流-湖泊中碳酸盐矿物均为过饱和(表 2),易产生碳酸钙沉积,造成水中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 的非保存性(Non-conservative)^[26],使得水体 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值降低,所以碳酸盐岩风化的贡献被低估;相反地,硅酸盐岩风化的贡献被夸大。此外,研究区高 HCO_3^- 质量浓度,以及可鲁克湖水体 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 质量浓度成显著正相关关系,相关系数分别为 0.56 和 0.60 ($p < 0.05$),并且 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 质量浓度之间成显著正相关关系(判定系数为 0.79, $p < 0.01$),说明其具有明显的碳酸盐岩风化特征。因此,在研究区硅酸盐岩风化和碳酸盐岩风化的来源判定上,未来仍需借助多指标或非传统同位素手段开展工作,如 $^{44}\text{Ca}/^{42}\text{Ca}$ 值。Tipper 等对世界上大江大河 Ca 同位素的研究结论^[38],有力证实了 $^{44}\text{Ca}/^{42}\text{Ca}$ 值能直接示踪 Ca 的风化来源,是区分硅酸盐岩风化和碳酸盐岩风化的最新和最有力的指标。

Na^+ 、 K^+ 在水体中的高比例与水体蒸发浓缩作用有关^[39]。 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+ + \text{K}^+$ 关系图[图 6(f)]显示,流域水体采样点均位于等值线上。以托素湖为例,水体中 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 质量浓度与溶解性总固体成显著正相关关系,相关系数分别为 0.90、0.86、0.83 ($p < 0.01$), Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 质量浓度随着溶解性总固体的增加而增加,并且 Na^+ 、 K^+ 质量浓度与 Cl^- 质量浓度之间也表现出良好的正相关关系(判定系数分别为 0.60 和 0.62, $p < 0.01$),表明水体中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 主要来源于石盐(NaCl)和钾盐(KCl)的溶解。此外,通过 PHREEQC 程序计算了托素湖水体石盐的饱和指数(表 2),发现其饱和指数均低于 0,说明水体石盐倾向于溶解,这也证实了以上推测。

当水体 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩风化时, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 毫克当量浓度比值应为 1^[21]。从图 6(b)可以看出:采样点均位于等

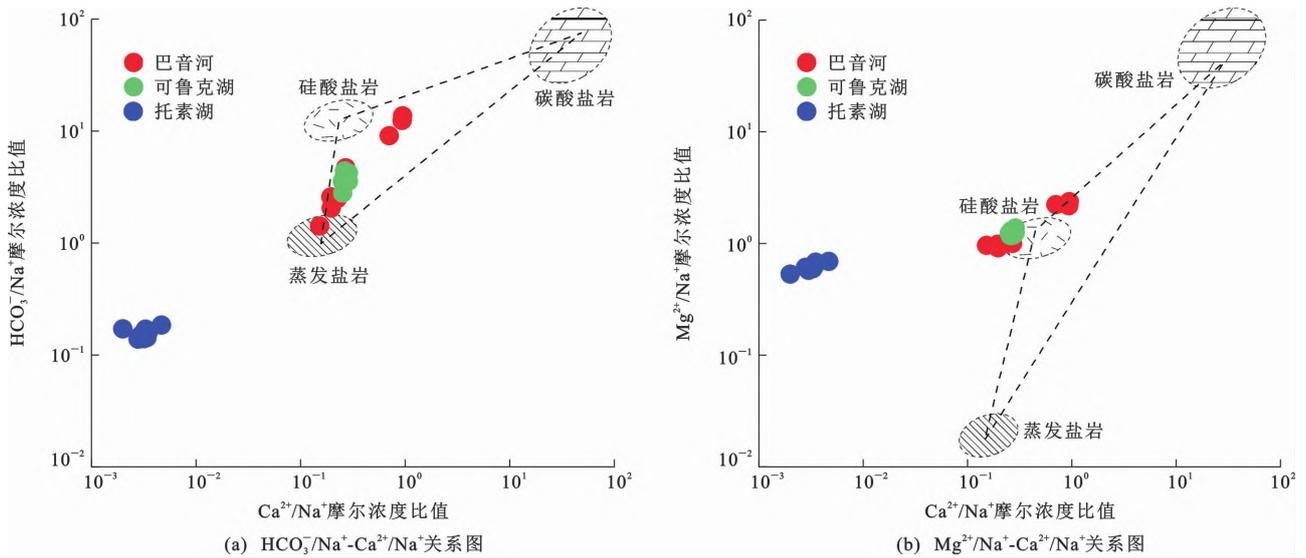


图5 水化学岩性端元图

Fig. 5 Endmember Diagrams of Hydrochemical Lithology

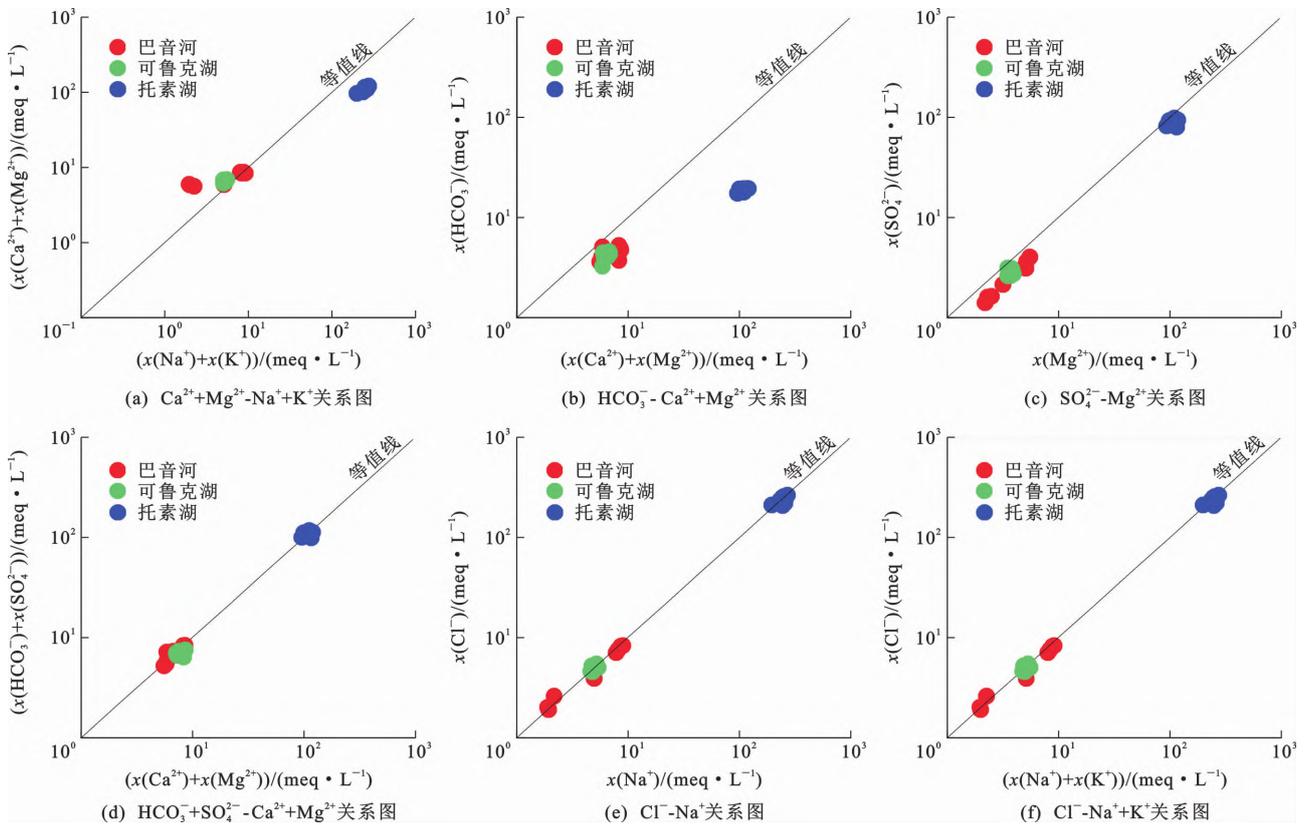


图6 水体主要离子的毫克当量浓度关系图

Fig. 6 Correlations of Milligram Equivalent Concentrations of the Main Ions in Water Body

值线下方,说明水体中多余的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 需要 SO_4^{2-} 加以平衡;尤其是托素湖的采样点离等值线较远,且在强烈的蒸发浓缩作用下,托素湖 Ca^{2+} 质量浓度下降, Mg^{2+} 质量浓度升高,说明除碳酸盐岩风化外, Mg^{2+} 还有其他来源。而从 SO_4^{2-} - Mg^{2+} 图解 [图 6(c)] 可以发现采样点分布在等值线附近,但

$\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$ 毫克当量浓度比值略小于 1 (平均值为 0.81)。结合 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 关系图 [图 6(d)] 发现,采样点基本都在等值线上, $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 毫克当量浓度比值平均为 1.04。综上所述,研究区水体 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 主要来源于蒸发岩 (MgSO_4) 风化, Ca^{2+} 主要来源于碳酸盐

岩风化,其也是 Mg^{2+} 来源之一。

4 结 语

(1)青藏高原柴达木盆地东北部巴音河小流域水体整体偏碱性,水体 pH 值、电导率及溶解性总固体沿流向均呈升高的趋势,其中巴音河、可鲁克湖属于淡水,托素湖属于咸水。 HCO_3^- 、 Cl^- 是巴音河主要的阴离子,上游水化学类型为 HCO_3^- -Cl-Na-Ca-Mg 型,下游受到沿途沼泽湿地的影响,水化学类型转变为 HCO_3^- -Cl-Na-Mg 型;可鲁克湖、托素湖水化学类型分别为 HCO_3^- -Cl-Na-Mg 型及 SO_4^{2-} -Cl-Na-Mg 型。

(2)青藏高原气候干燥、降水少,而托素湖作为一个封闭湖泊,主要受到蒸发浓缩作用的控制,在持续蒸发作用影响下,一方面溶解性总固体升高、水体咸化,另一方面碳酸盐矿物(如高镁方解石、白云石等)达到饱和状态并发生沉淀,导致 Ca^{2+} 质量浓度下降,而易溶盐离子 Na^+ 、 K^+ 则会持续发生浓缩。而巴音河及可鲁克湖则受到蒸发浓缩作用、岩石风化作用、钠盐淋溶作用等共同控制, Ca^{2+} 质量浓度下降可能是方解石、文石等碳酸盐沉淀所导致的。

(3)研究区水体中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 主要来源于石盐(NaCl)和钾盐(KCl)等蒸发岩的溶解;水体 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 主要来源于蒸发岩($MgSO_4$)风化; Ca^{2+} 可能来源于碳酸盐矿物的快速溶解,此过程也是水体 Mg^{2+} 来源之一。然而,有关来源的量化工作仍需借助诸如非传统同位素($^{44}Ca/^{42}Ca$)等手段。

李晓东:衷心感谢主编彭建兵院士的约稿!《地球科学与环境学报》聚焦地球科学与环境领域的最新研究成果与创新发现,策划出版了一系列非常有特色的专辑,有力推动了学报的整体发展,显著提升了学术影响力!在《地球科学与环境学报》更名二十周年之际,期待编辑部通过加强地球系统科学等前沿领域的报道,不断提高办刊质量,使期刊学术影响力更上一层楼,跻身一流地学科技期刊行列!

参考文献:

References:

- [1] ZHANG G Q, YAO T D, XIE H J, et al. Response of Tibetan Plateau Lakes to Climate Change: Trends, Patterns, and Mechanisms[J]. Earth-science Reviews, 2020, 208: 103269.
- [2] MENG X Q, CHEN X, LIN Q, et al. Spatiotemporal Patterns of Organic Carbon Burial over the Last Century in Lake Qinghai, the Largest Lake on the Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2023, 860: 160449.
- [3] SUN Y Y, LIANG Y, LIU H, et al. Mid-Miocene Sea Level Altitude of the Qaidam Basin, Northern Tibetan Plateau[J]. Communications Earth & Environment, 2023, 4(1): 3.
- [4] 王伟涛,张培震,段磊,等.柴达木盆地新生代地层年代框架与沉积-构造演化[J].科学通报,2022,67(增2):3452-3475.
- WANG Wei-tao, ZHANG Pei-zhen, DUAN Lei, et al. Cenozoic Stratigraphic Chronology and Sedimentary-tectonic Evolution of the Qaidam Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(S2): 3452-3475.
- [5] 刘智琦,潘保柱,韩谓,等.青藏高原湖泊水环境特征及水质评价[J].环境科学,2022,43(11):5073-5083.
- LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, et al. Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau[J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5073-5083.
- [6] 李鹤,李军,刘小龙,等.青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析[J].环境科学,2015,36(2):430-437.
- LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, et al. Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 430-437.
- [7] YANG M D, LI X D, HUANG J, et al. Damming Effects on River Sulfur Cycle in Karst Area: A Case Study of the Wujiang Cascade Reservoirs[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 294: 106857.
- [8] 关天昊,李晓东,王亦尧,等.喀斯特地区深水型水库重金属分布特征、影响因素及来源:以龙滩水库为例[J].上海大学学报(自然科学版),2021,27(2):236-249.
- GUAN Tian-hao, LI Xiao-dong, WANG Yi-yao, et al. Distribution Characteristics, Influencing Factors and Sources of Heavy Metals in Karst Deep-water Reservoirs: A Case Study of Longtan Reservoir[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2021, 27(2): 236-249.
- [9] 关天昊,杨梦迪,崔高仰,等.筑坝拦截对深水型水库硫循环的影响:以龙滩水库为例[J].生态学杂志,2022, https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220922.1143.012.html.
- GUAN Tian-hao, YANG Meng-di, CUI Gao-yang, et al. Influence of Dam Interception on Sulfur Cycle in Deep-water Reservoir: A Case Study of Longtan Re-

- reservoir in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.202209-22.1143.012.html>.
- [10] ZHANG C J, ZHANG W Y, CHENG D S, et al. Hydrochemical Characteristics and Paleoclimate Changes Recorded from Sugan Lake on the Northern Boundary of Tibetan Plateau Since Mid-Holocene[J]. Catena, 2022, 217: 106527.
- [11] 翟婧雅, 金彦香, 金鑫. 巴音河流域水化学与氢氧同位素特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(11): 101-106.
ZHAI Jing-ya, JIN Yan-xiang, JIN Xin, et al. Hydrochemical Property and Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Bayin River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(11): 101-106.
- [12] 李皎, 李明慧, 方小敏, 等. 柯鲁克湖水化学特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 43-51.
LI Jiao, LI Ming-hui, FANG Xiao-min, et al. Hydrochemical Characteristics of the Hurleg Lake[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1): 43-51.
- [13] 龙启福, 封希媛, 刘静, 等. 青藏高原克鲁克—托素湖湿地系统微生物多样性[J]. 地球与环境, 2017, 45(4): 399-407.
LONG Qi-fu, FENG Xi-yuan, LIU Jing, et al. Microbial Diversity of Keluke-Tuosu Lake Wetland Reserve in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth and Environment, 2017, 45(4): 399-407.
- [14] 张棣, 马云麒, 李兴意, 等. 托素湖湖水蒸发过程中析盐及其 pH 值的变化规律研究[J]. 盐湖研究, 2022, 30(1): 46-56.
ZHANG Di, MA Yun-qi, LI Xing-yi, et al. Regularity of Salt Separation and the Variation of pH Values in the Process of Evaporation in Tuosu Lake Water[J]. Journal of Salt Lake Research, 2022, 30(1): 46-56.
- [15] CUI B L, LI X Y. Characteristics of Stable Isotope and Hydrochemistry of the Groundwater Around Qinghai Lake, NE Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(3): 1159-1167.
- [16] XIONG X, ZHANG K, CHEN X C, et al. Sources and Distribution of Microplastics in China's Largest Inland Lake-Qinghai Lake[J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 899-906.
- [17] YANG X Y, WEN J, HUANG A N, et al. Short-term Climatic Effect of Gyaring and Ngoring Lakes in the Yellow River Source Area, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 9: 770757.
- [18] 韩积斌, 许建新, 王国强, 等. 柴达木盆地尔斯库勒盐湖区成盐物质的来源与水力迁移作用[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6): 1551-1560.
HAN Ji-bin, XU Jian-xin, WANG Guo-qiang, et al. The Material Sources and It's Hydraulic Migration in the Gas Hure Salt Lake, Qaidam Basin, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(6): 1551-1560.
- [19] 张景涛, 史浙明, 王广才, 等. 柴达木盆地大柴旦地区地下水水化学特征及演化规律[J]. 地质前缘, 2021, 28(4): 194-205.
ZHANG Jing-tao, SHI Zhe-ming, WANG Guang-cai, et al. Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Dachaidan Area, Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 194-205.
- [20] FAN Q S, MA H Z, CAO G C, et al. Geomorphic and Chronometric Evidence for High Lake Level History in Gahai Lake and Toson Lake of Northeastern Qaidam Basin, Northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Quaternary Science, 2012, 27(8): 819-827.
- [21] 闫露霞. 青藏高原湖泊与湿地水化学特征及其物质来源[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
YAN Lu-xia. Hydrochemical Characteristics and Material Sources of Lakes and Wetlands in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2019.
- [22] 闫宝华. 柴达木盆地东北部中新世沉积物元素特征与源区化学风化[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
YAN Bao-hua. Elemental Characteristics of Miocene Sediments in the Northeastern Qaidam Basin and Implications for Chemical Weathering in the Drainage Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [23] 张新新. 柴达木盆地可鲁克湖—托素湖湿地自然保护区生态系统服务价值综合评估[D]. 昆明: 云南大学, 2017.
ZHANG Xin-xin. Comprehensive Evaluation of Ecosystem Service Value of Keluke-Tuosu Lake Wetland Nature Reserve in Qaidam Basin[D]. Kunming: Yunnan University, 2017.
- [24] 李冬丽, 贺海波. 西南喀斯特地区水体硝态氮时空分布特征及其来源解析[J]. 地球化学, 2022, 51(1): 34-45.
LI Dong-li, HE Hai-bo. Spatial-temporal Distribution and Sources of Nitrate-nitrogen in Karst Water, Southwest China[J]. Geochimica, 2022, 51(1): 34-45.
- [25] GIBBS R J. Mechanisms Controlling World Water Chemistry[J]. Science, 1970, 170: 1088-1090.
- [26] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 734-743.

- WEN Guang-chao, WANG Wen-ke, DUAN Lei, et al. Quantitatively Evaluating Exchanging Relationship Between River Water and Groundwater in Bayin River Basin of Northwest China Using Hydrochemistry and Stable Isotope [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41 (4): 734-743.
- [27] WEBSTER J G, BROWN K L, VINCENT W F. Geochemical Processes Affecting Meltwater Chemistry and the Formation of Saline Ponds in the Victoria Valley and Bull Pass Region, Antarctica [J]. *Hydrobiologia*, 1994, 281(3): 171-186.
- [28] 王海雷, 王云生. 青藏高原湖泊 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Mg/Ca 盐度指示意义的初步分析 [J]. *湖泊科学*, 2010, 22 (6): 894-900.
- WANG Hai-lei, WANG Yun-sheng. Preliminary Analysis on Mg^{2+} , Ca^{2+} and Mg/Ca as Salinity Indicators of Lakes in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 894-900.
- [29] 王君波, 朱立平, 鞠建廷, 等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究 [J]. *地理科学*, 2009, 29(2): 288-293.
- WANG Jun-bo, ZHU Li-ping, JU Jian-ting, et al. Water Chemistry of Eastern Nam Lake Area and Inflowing Rivers in Tibet [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 288-293.
- [30] 郭军明, 康世昌, 张强弓, 等. 青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 [J]. *环境科学*, 2012, 33 (7): 2295-2302.
- GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, et al. Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2295-2302.
- [31] CHEN J S, WANG F Y, XIA X H, et al. Major Element Chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(3/4): 231-255.
- [32] 贺海波, 李祥忠. 抚仙湖水生植物 HCO_3^- 利用效率及与之相关的内源有机碳沉积通量研究 [J]. *第四纪研究*, 2021, 41(4): 1140-1146.
- HE Hai-bo, LI Xiang-zhong. Study on the Utilization Efficiency of HCO_3^- by Aquatic Plants and the Buried Flux of Autochthonous Organic Carbon in Fuxian Lake [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41 (4): 1140-1146.
- [33] GAILLARDET J, DUPRÉ B, LOUVAT P, et al. Global Silicate Weathering and CO_2 Consumption Rates Deduced from the Chemistry of Large Rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1/2/3/4): 3-30.
- [34] STALLARD R F, EDMOND J M. Geochemistry of the Amazon: 3. Weathering Chemistry and Limits to Dissolved Inputs [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C8): 8293-8302.
- [35] 曾庆睿, 刘再华. 玄武岩风化是重要的碳汇机制吗? [J]. *科学通报*, 2017, 62(10): 1041-1049.
- ZENG Qing-rui, LIU Zai-hua. Is Basalt Weathering a Major Mechanism for Atmospheric CO_2 Consumption? [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62 (10): 1041-1049.
- [36] BLUM J D, GAZIS C A, JACOBSON A D, et al. Carbonate Versus Silicate Weathering in the Raikhot Watershed Within the High Himalayan Crystalline Series [J]. *Geology*, 1998, 26(5): 411-414.
- [37] HARRIS N, BICKLE M, CHAPMAN H, et al. The Significance of Himalayan Rivers for Silicate Weathering Rates: Evidence from the Bhothe Kosi Tributary [J]. *Chemical Geology*, 1998, 144(3/4): 205-220.
- [38] TIPPER E T, GAILLARDET J, GALY A, et al. Calcium Isotope Ratios in the World's Largest Rivers: A Constraint on the Maximum Imbalance of Oceanic Calcium Fluxes [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(3): 003574.
- [39] 蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素 [J]. *环境科学*, 2012, 33 (1): 48-54.
- PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, et al. Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 48-54.