

羊卓雍错水体 pH 偏高的成因

保宏运^{1,2}, 郭建阳^{1*}, 杨海全¹, 张红梅³, 马 丽³

1.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 550002

2.中国科学院大学,北京 100049

3.西藏自治区山南市生态环境局,西藏 山南 856100

摘要: 羊卓雍错(简称“羊湖”)流域是我国生态环境保护的重点区域,但羊湖水体 pH 往往超标,令当地管理部门倍感压力。针对羊湖 pH 偏高的问题,利用地球化学方法,从水化学和流域风化的角度寻找相关线索,以揭示羊湖水体 pH 偏高的成因。结果表明:①羊湖水体 pH 在 8.5~9.3 之间,超标率为 49%,同时具有季节性变化特征;而羊湖流域水源(包括地表水、地下水和冰川融水等) pH 中间值为 8.52,基本代表该流域水源 pH 的背景值。②羊湖流域水源水化学类型为 Ca-HCO₃ 或 Ca-SO₄,汇入羊湖经历长期蒸发浓缩和复杂地球化学过程后,水化学类型转化为 Mg-SO₄。③羊湖流域不但存在碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化,还有硫化物矿物风化特征。羊湖水体 pH 超标与羊湖流域水源无关,而是流域风化和其自身长期自然演化的结果。流域风化为羊湖水体提供的大量 HCO₃⁻ 是羊湖 pH 在特定条件下自然演化的物质基础。羊湖封闭型水动力学特征使 HCO₃⁻ 滞留并累积在水体中,这为羊湖 pH 自然演化提供了一个必要条件。在长期蒸发浓缩过程中,水体中一部分 HCO₃⁻ 转化为 CO₃²⁻,导致水体 pH 逐渐上升,这是羊湖水体 pH 偏高的充分条件。简言之,羊湖 pH 偏高是流域风化、封闭型的水动力学和水体长期蒸发浓缩共同作用的结果。鉴于羊湖水体 pH 偏高是长期自然演化的结果,建议将 pH 从羊湖水水质管理的考核指标中排除,以免造成不必要的管理成本和压力。

关键词: 羊卓雍错; pH; 水化学; 流域风化

中图分类号: X82

文章编号: 1001-6929(2021)03-0567-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.06.20

Reasons for High pH Value in Yamzhog Yumco, South Tibet

BAO Hongyun^{1,2}, GUO Jianyang^{1*}, YANG Haiquan¹, ZHANG Hongmei³, MA Li³

1.State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3.Ecological Environment Bureau of Shannan City, Tibet Autonomous Region, Shannan 856100, China

Abstract: The Yamzhog Yumco watershed is the key region of ecological environment protection in China, but pH value in Yamzhog Yumco is often too high, which puts the local government under tremendous pressure. In order to understand the reasons for the high pH in Yamzhog Yumco, geochemical methods were used to find the clues to its formation mechanism based on the hydrochemistry and weathering in the watershed. The results show that: (1) pH value of Yamzhog Yumco is between 8.5 and 9.3, with the exceeding probability of 49% and seasonal variation, while median value of pH in water sources from the catchment (including surface water, groundwater and glacier melt water, etc) is 8.52, representing the background level of pH in the watershed. (2) Hydrochemical type of water source in the Yamzhog Yumco Basin was Ca-HCO₃ or Ca-SO₄, but it was changed to Mg-SO₄ type after a long period of evaporation and complicated geochemical processes. (3) The weathering in the Yamzhog Yumco Basin is not only characterized by the weathering of carbonate and silicate rocks, but also by the weathering of sulfide minerals. The high pH value in Yamzhog Yumco is the result of watershed weathering and long-term natural evolution of Yamzhog Yumco, and it is not affected by with the water sources. The abundant HCO₃⁻ provided by the watershed weathering is the basis for pH evolution in Yamzhog Yumco under specific conditions. Retention and accumulation of HCO₃⁻ in Yamzhog Yumco caused by the closed hydrodynamics is the prerequisite for pH evolution in Yamzhog Yumco. The partial conversion of HCO₃⁻ to CO₃²⁻ caused by long-term evaporation leads to an increase in the water pH in Yamzhog Yumco. In short, the high pH of Yamzhog Yumco is the result of the watershed weathering, the closed hydrodynamics and the long-term evaporation

收稿日期: 2020-02-25 修订日期: 2020-06-04

作者简介: 保宏运(1993-)男,贵州威宁人,baohongyun19@mailsucas.ac.cn.

* 责任作者: 郭建阳(1972-)男,江西丰城人,研究员,博士,博导,主要从事环境地球化学研究,guojianyang@vip.gyg.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.91647205,41877406); 国家自然科学基金-贵州省喀斯特科学研究中心联合项目(No.U1612441)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.91647205,41877406); Joint Project of National Natural Science Foundation of China and Guizhou Karst Scientific Research Center, China (No.U1612441)

of the water body. Since the high pH value of Yamzhog Yumco is the result of long-term natural evolution, it is recommended to remove pH from the water quality management list to avoid unnecessary management costs and pressure.

Keywords: Yamzhog Yumco; pH; hydrochemistry; watershed weathering

羊卓雍错(28°46′N~29°11′N, 90°21′E~91°03′E, 简称“羊湖”)流域位于西藏自治区山南市浪卡子县境内,是国家生态环境保护的重点区域,2014年就被纳入国家100个良好湖泊生态环境保护试点工程项目。2019年的《山南市羊卓雍错保护条例》要求羊湖水水质不低于GB 3838—2002《地表水环境质量标准》II类标准。据山南市生态环境局的监测数据,羊湖大部分水质指标能达到I~II类的标准,但水体pH经常超标(>9.0)。2018年《中国生态环境状况公报》仍把羊湖纳入劣V类水体,这给当地环境管理部门带来了很大的压力。

引起水体pH偏高的因素很多,通常是工业排污造成的。许多工业部门(如造纸、印染、纺织和化工等)都会产生高浓度碱性废水^[1-3],这些污水的排放很可能造成受污染水体pH偏高。其次,水体富营养化也可能造成水体pH季节性偏高^[4-5]。然而,羊湖地处高寒地区,流域内人口稀少,也没有大规模工业活动。因此,羊湖水环境受人活动的活动影响很小^[6-7],也不存在富营养化现象^[8]。羊湖水体pH偏高令当地环境管理部门非常困惑,同时也引起了生态环境部的高度重视。

鉴于羊湖水体pH偏高不太可能是人为因素造成的,而国内外类似湖泊也存在类似的问题^[9-11],很可能是自然因素造成的。因此,笔者拟采用地球化学

方法,从水化学和流域风化的角度寻找相关线索,揭示羊湖水体pH偏高的成因,以为羊湖的水质管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

水样采集以羊湖为重点,同步采集了入湖河流、地下水和冰川融水等的样品,采样点布设如图1所示。采样分别于2018年6月、9月、12月和2019年3月进行,另于2018年7月进行了一次补充采样。样品采集后用0.45 μm醋酸纤维膜过滤。过滤的水样一部分密封于棕色玻璃瓶用于阴离子分析;另一部分装入聚乙烯瓶后加少量浓HNO₃酸化至pH<2,用于阳离子及微量元素分析。常规水质参数(包括溶解氧、温度、盐度、电导、pH和TDS等)采用多参数水质检测仪(YSI6600-V2,美国)于现场测定。

1.2 化学分析

阳离子(Na⁺、K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺等)和溶解性硅浓度使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Varian, 美国)测定,阴离子(F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻等)浓度使用离子色谱仪(ICS-90, Dionex, 美国)测定,微量元素浓度使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, PerkinElmer, 美国)测定,测试精度均优于5%。HCO₃⁻浓度用0.02 mol/L HCl滴定获得。测试工作均在中国科学院地球化学研究所环境地球化学

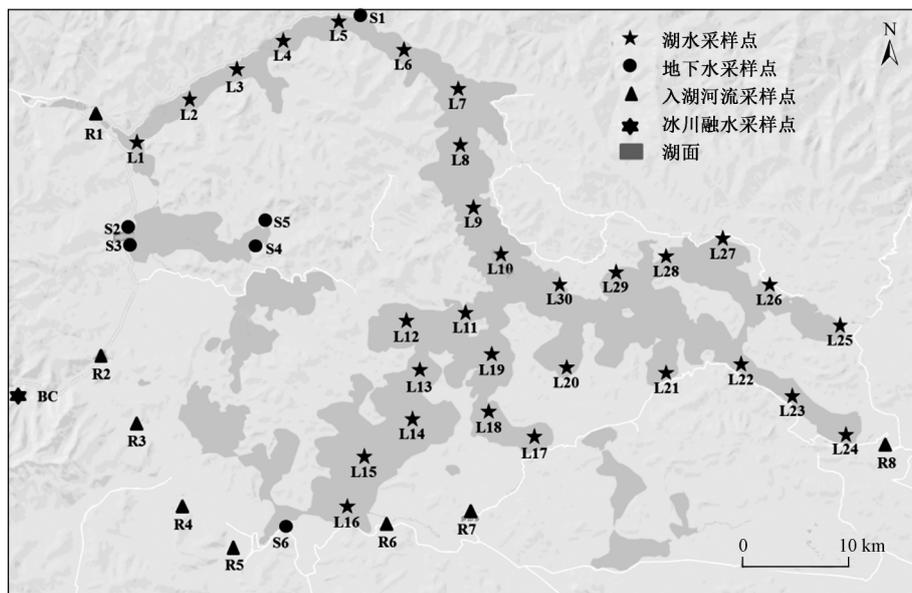


图1 羊湖及其流域的采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Yamzhog Yumco and its catchment

国家重点实验室完成.

1.3 数据处理

由于数据量较大,数据的时空差异也较大,为完

整地呈现数据,笔者采用统计学方法,先将数据按累积分布进行整理,然后用 Sigmoid 函数进行拟合,最后以拟合曲线的方式呈现数据,具体处理如图 2 所示.

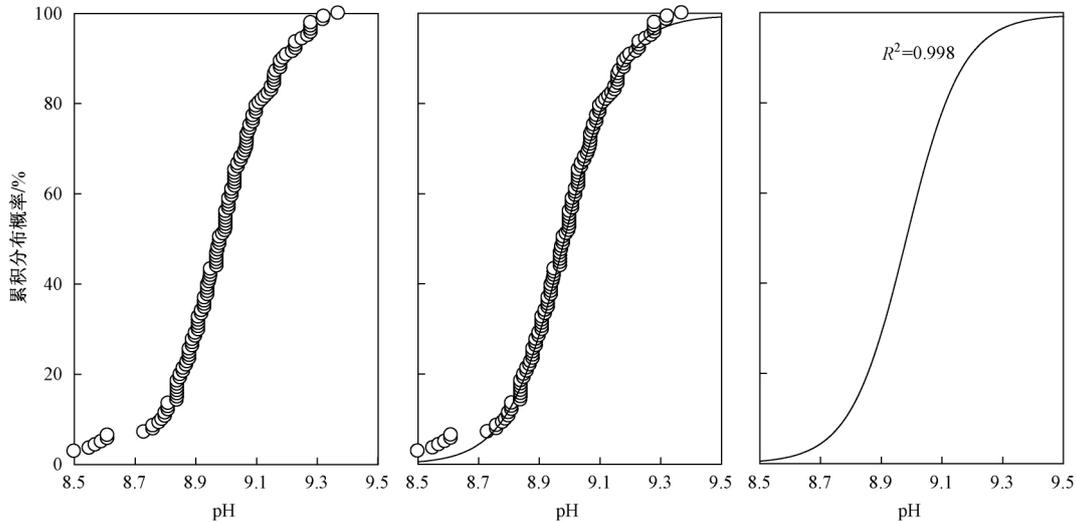


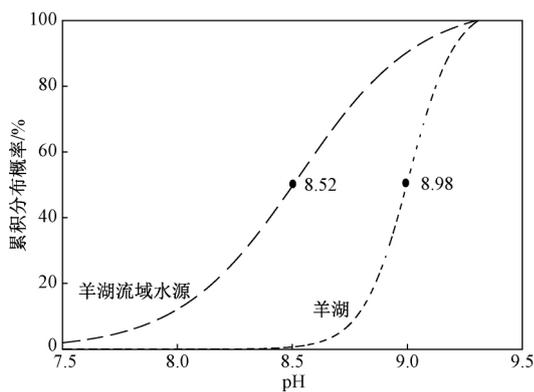
图 2 数据的整理步骤(以羊湖 pH 数据为例)

Fig.2 Data sorting steps (taking pH of Yamzhog Yumco as an example)

2 结果与分析

2.1 羊湖水体 pH 基本特征

羊湖水体 pH 累积分布函数如图 3 所示. 由图 3 可知,羊湖水体 pH 在 8.5~9.3 之间,存在明显超标现象. 据函数拟合结果,羊湖水体 pH 中间值为 8.98, 全年 pH 超标 (>9.0) 概率为 49%. 而由图 4 可见,羊湖水体 pH 不但有明显超标现象,亦有明显的季节性变化特征,且水体 pH 超标主要发生在上半年.



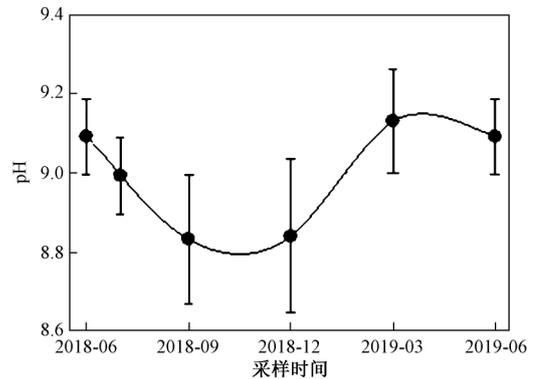
注: 图中数据代表中间值.

图 3 羊湖及其流域水源 pH 的累计分布

Fig.3 Cumulative distribution of pH in Yamzhog Yumco and water sources in the catchment

2.2 羊湖水化学基本特征

羊湖水化学的基本参数如图 5 所示. 羊湖盐度和 TDS 浓度的中间值分别为 1.248 mg/L 和 1.573 g/L, 而矿化度和硬度的中间值分别为 1988 和 845 mg/L. 羊湖

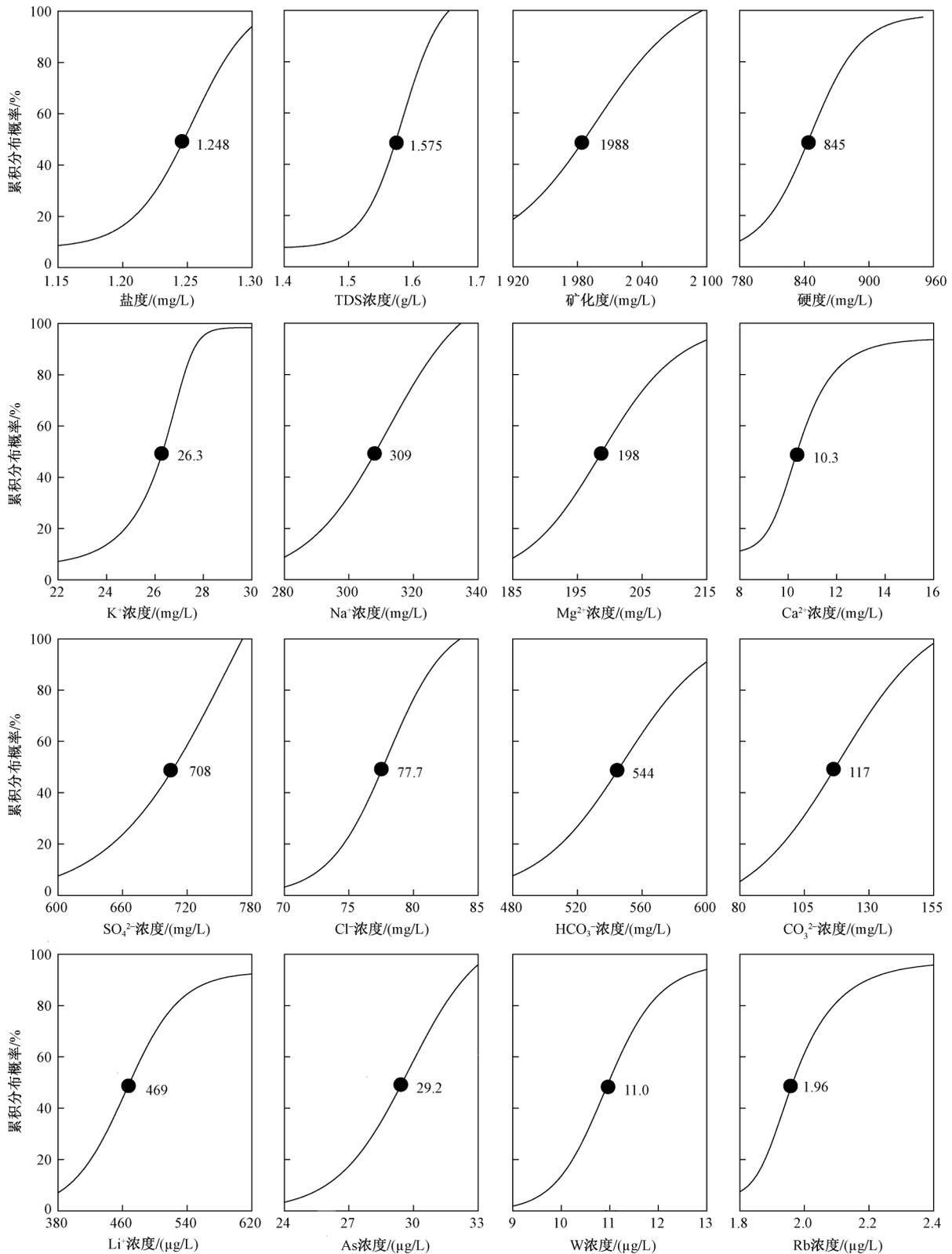


注: 2018 年 6 月与 2018 年 9 月之间的数据为 2018 年 7 月补充采样的数据.

图 4 羊湖水体 pH 季节性变化特征

Fig.4 Seasonal variation of pH values in Yamzhog Yumco

主要阳离子浓度大小依次为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+}$, 中间值分别为 309、198、26.3 和 10.3 mg/L; 主要阴离子浓度大小依次为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{Cl}^-$, 中间值分别为 708、544、117 和 77.7 mg/L. 因此羊湖水化学组成以 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 为主, 其次为 Na^+ 和 Mg^{2+} . 由图 6 可见, 羊湖绝大部分溶解性物质的浓度均远高于羊湖流域水源(包括地表水、地下水和冰川融水等). 虽然这些离子(或元素)的浓缩从数倍到上百倍不等, 但均显示羊湖水体经历了强烈的蒸发浓缩作用. 因此, 羊湖水化学的基本特征是: 经历强烈的蒸发浓缩作用后, 水体中溶解性物质的浓度均明显增加, 导致水体的电导率、盐度、矿化度和硬度比羊湖流域水源明显



注: 图中圆点为中间值.

图5 羊湖的水化学特征

Fig.5 Hydrochemical characteristics of Yamzhog Yumco

偏高. 值得注意的是, 羊湖水体中 Ca²⁺ 和 Sr²⁺ 的浓度 (中间值分别为 10.3 mg/L 和 52.7 μg/L) 均明显低于

羊湖流域水源中 Ca²⁺ 和 Sr²⁺ 的浓度 (中间值分别为 51.7 mg/L 和 278 μg/L).

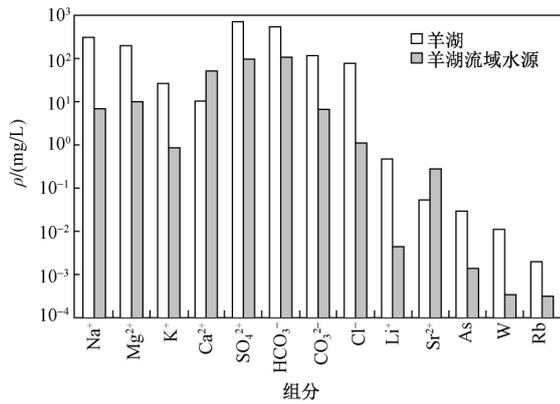


图 6 羊湖与羊湖流域水源水化学特征的比较
Fig.6 Comparison of hydrochemical characteristics between Yamzhog Yumco and the water sources in the catchment

2.3 羊湖流域的风化特征

羊湖流域水源的水化学主要取决于流域的风化^[12-14]. 羊湖流域水源的阳离子以 Ca²⁺ 为主, 其次

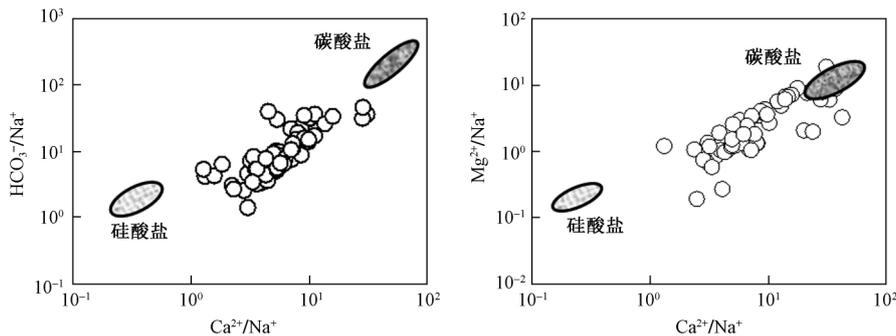
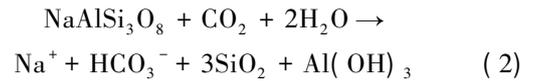
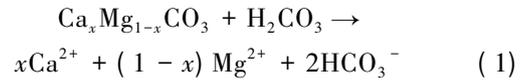


图 7 羊湖流域水源 Na 归一化后的离子组成特征
Fig.7 Characteristics of Na-normalized ions in water sources from the catchment of Yamzhog Yumco

此外, 羊湖流域水源中还含有较高浓度的 SO₄²⁻, 这说明流域还存在硫化物矿物或蒸发岩盐(如石膏)的风化. 通常蒸发岩盐中硫同位素(δ³⁴S)值明显偏正, 而在硫化物矿物中明显偏负^[19]. 据笔者收集的数据, 羊湖流域水源 SO₄²⁻中 δ³⁴S 值均明显偏负(-0.38~-6.43‰), 这与流域硫化物矿物的 δ³⁴S 值(-4.31~-5.77‰)^[20]基本一致. 因此可以判定 SO₄²⁻主要来自硫化物矿物的风化.

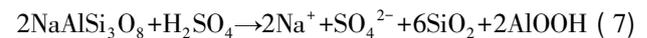
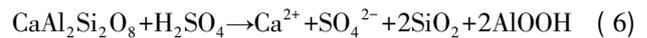
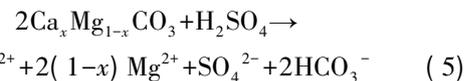
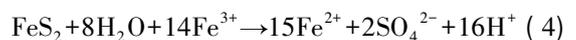
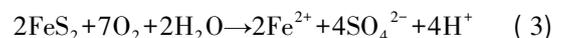
不同方式的硫化物矿物风化均会产生大量的酸^[21](见式(3)(4)), 而产生的酸会进一步促进流域内碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化(见式(5)~(7)). 因此, 羊湖流域不但存在常见的碳酸盐岩和硅酸盐岩风化, 还存在明显的硫化物矿物风化. 由于硫化物矿物风化的存在, 加速了流域内碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化, 导致羊湖流域水源向羊湖输入了大量的 HCO₃⁻

为 Mg²⁺, 同时含有较高浓度的 Na⁺; 而阴离子以 SO₄²⁻和 HCO₃⁻为主. Ca²⁺、Mg²⁺和 HCO₃⁻主要源于碳酸盐岩的风化^[15-16](见式(1)), Na⁺主要源于硅酸盐岩的风化^[17](见式(2)). 因此, 羊湖流域既存在碳酸盐岩的风化, 也有硅酸盐岩的风化.



通常碳酸盐岩风化产物中 Ca²⁺与 Na⁺、Mg²⁺与 Na⁺、HCO₃⁻与 Na⁺摩尔比分别接近于 50、10 和 120, 而硅酸盐岩风化产物中相应的比值分别接近于 0.35±0.15、0.24±0.12 和 2±1^[18]. 因此, Na⁺归一化后的离子组成可以判断羊湖流域水源溶解性离子的来源. 由图 7 可以看出, 羊湖流域水源中的离子主要受碳酸盐岩和硅酸盐岩风化控制, 且更倾向于碳酸盐岩风化端.

和 SO₄²⁻.



3 讨论

3.1 羊湖水体 pH 变化

目前羊湖的工作主要集中于水文水化学^[22-23]、流域风化^[20]和气候变化^[24-26]等方面, 但很少关注水体 pH. 实际上, 20 世纪 80 年代羊湖 pH 就存在超标现象, pH 范围为 8.9~9.1^[27]. 2010 年的数据显示, 羊湖 pH 范围为 9.12~9.52(平均值为 9.27)^[28], 较

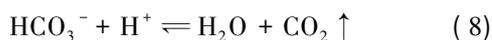
之以前有了明显的增加. 目前, 羊湖水体 pH 的中间值为 8.98, 又回落到 20 世纪 80 年代的水平.

根据统计结果, 羊湖流域水源 pH 中间值为 8.52, 偶有超标现象(见图 3). 与 2010 年数据相比^[28], 羊湖流域水源 pH 没有明显变化, 说明羊湖流域水源 pH 相对稳定. 自 2010 年至今, 羊湖水体 pH 明显回落. 因此, 羊湖流域水源不是导致羊湖水体 pH 偏高的直接原因. 20 世纪 80 年代羊湖水位处于相对高位, 而 2010 年处于相对低位^[29], 水位下降对应于羊湖水体 pH 上升. 而从羊湖水体 pH 季节性变化可知, 枯水期 pH 相对偏高, 而丰水期 pH 相对偏低(见图 4). 不同时间尺度水体 pH 变化均表明, 羊湖水体 pH 受水位变化(或水体蒸发浓缩)影响较大.

3.2 羊湖水化学演化

历史上羊湖是一开放性水体, 与流域内的空姆错、沉错和巴纠错曾是统一的湖体, 湖水在其西北部经曼曲汇入雅鲁藏布江. 后因地质事件, 加上气候干旱、湖面退缩、湖岸堆积和地形发育等因素最终演变成一内陆湖^[28]. 据此可以推断羊湖流域的历史演化过程: 羊湖形成堰塞湖之初, 其湖面面积可能比现在大很多; 后由于气候干旱、水位下降和湖面萎缩等原因, 巴纠错首先从羊湖分离出来; 随着干旱的持续和水位的进一步下降, 沉错和空姆错也逐渐分离出来, 形成现代羊湖流域的雏形.

羊湖成为堰塞湖之初, 因失去输出的物理通道, 其湖面面积可能急剧增大. 因水体没有经历明显蒸发浓缩, 羊湖早期水化学特征应该与羊湖流域水源类似, 水化学类型为 Ca-HCO₃ 或 Ca-SO₄(见图 8). 进入干旱期后, 羊湖水位逐渐下降, 导致巴纠错、沉错、空姆错先后从羊湖分离出来. 在这过程中, 长期蒸发浓缩作用使水体中溶解性物质的浓度逐渐增大. 以对身体 pH 有直接影响的 HCO₃⁻ 为例: 在水体浓缩过程中, 随着 HCO₃⁻ 浓度的增加, 水体中一部分 HCO₃⁻ 会通过水气交换作用以 CO₂ 形式释放到大气中(见式(8)); 另一部分则转化为 CO₃²⁻(见式(9)).



虽然水体中一部分 HCO₃⁻ 会转化为 CO₃²⁻, 但 CO₃²⁻ 浓度不可能持续增大. 因为在浓缩过程中, 其他离子(如 Ca²⁺、Sr²⁺ 等)浓度也会增大. 当水体中 [M²⁺] × [CO₃²⁻] 的表观浓度积超过其浓度积常数时, [M²⁺] 与 [CO₃²⁻] 可能发生沉淀作用从水体中移去(见式(10)), 式中 M 可能是 Ca、Sr 或 Mg). 只有当水

体中 M²⁺ 消耗殆尽时, CO₃²⁻ 浓度才可能进一步上升.



目前羊湖水体中 [Ca²⁺] × [CO₃²⁻] 和 [Sr²⁺] × [CO₃²⁻] 的表观浓度积分别为 4.9 × 10⁻⁷ 和 1.2 × 10⁻⁹ (中间值), 均超过了其相应的浓度积常数 (K_{sp}(CaCO₃) = 2.8 × 10⁻⁹、K_{sp}(SrCO₃) = 5.6 × 10⁻¹⁰). [Mg²⁺] × [CO₃²⁻] 的表观浓度积为 1.6 × 10⁻⁵, 仍低于 MgCO₃ · 3H₂O 的浓度积常数(2.16 × 10⁻⁵). 这说明羊湖水体 CaCO₃ 和 SrCO₃ 已经饱和, MgCO₃ 也接近临界状态. 这也是目前羊湖水体中 Ca²⁺ 和 Sr²⁺ 浓度相对较低, 而 Mg²⁺ 浓度仍相对较高的主要原因.

在长期蒸发浓缩过程中, 水体中 K⁺ 浓度持续增大, 最终超过 Ca²⁺ 成为主要的阳离子, 而 CO₃²⁻ 也成为主要的阴离子, 羊湖水化学类型也从最初的 Ca-HCO₃(或 Ca-SO₄) 转化为 Mg-SO₄(见图 8).

3.3 羊湖 pH 偏高成因

与水体 pH 直接相关的是 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 的浓度, 式(9)实际上是碳酸的二级电离平衡方程, 据此可以给出水体 pH 的表达式(11):

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = \lg \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} - \lg K_{a2} \quad (11)$$

式中: [H⁺]、[CO₃²⁻]、[HCO₃⁻] 分别为水体中 H⁺、CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 的浓度, mg/L; K_{a2} 为碳酸的二级电离常数.

如式(11)所示, 水体 pH 变化主要取决于 [CO₃²⁻]/[HCO₃⁻] 的变化. 早期羊湖是一个过水湖, 水体滞留时间短, 水体 [CO₃²⁻]/[HCO₃⁻] 与羊湖流域水源大致类似, 水体 pH 不会明显变化. 在成为堰塞湖之初, 水体没有经历明显蒸发浓缩, [CO₃²⁻]/[HCO₃⁻] 和 pH 也不会明显改变. 进入干旱期以后, 随着水体持续蒸发浓缩, 流域输入的 HCO₃⁻ 一部分转化为 CO₃²⁻, 使 [CO₃²⁻]/[HCO₃⁻] 逐渐增大, 导致水体 pH 开始上升. 而水体中 Ca²⁺、Sr²⁺ 等浓缩到一定程度会抑制 CO₃²⁻ 浓度的持续增大, 从而抑制水体 pH 持续上升. 随着水体进一步蒸发浓缩, CO₃²⁻ 将 Ca²⁺ 和 Sr²⁺ 消耗殆尽后, [CO₃²⁻]/[HCO₃⁻] 又开始逐渐增大, 导致水体 pH 进一步上升.

综上所述: 流域风化提供的 HCO₃⁻ 是羊湖 pH 在特定条件下自然演化的物质基础; 羊湖成为堰塞湖以后, 流域输入的 HCO₃⁻ 滞留并累积在水体中, 为羊湖 pH 自然演化提供了一个必要条件; 羊湖进入干旱期以后, 水体长期蒸发浓缩作用使水体 [CO₃²⁻]/[HCO₃⁻] 和 pH 逐渐增大, 是羊湖实现 pH 自然演化的充分条

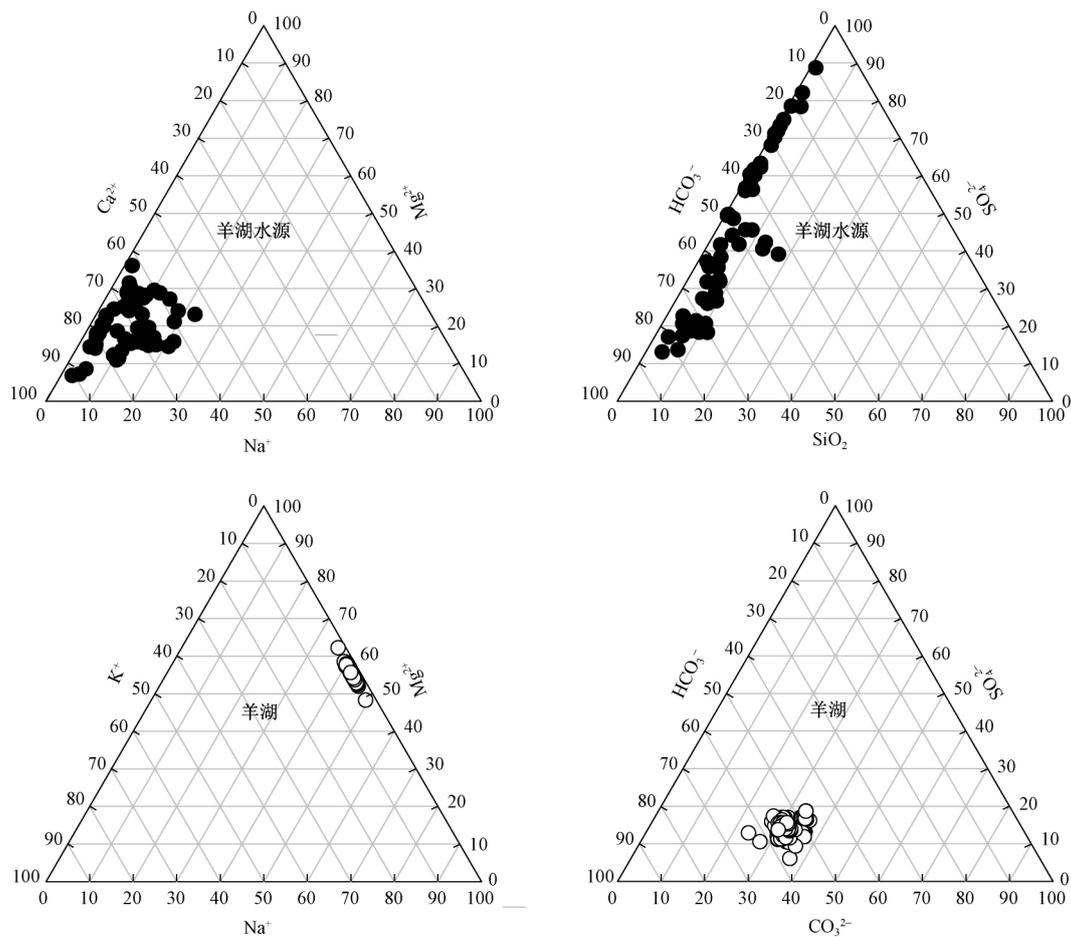


图8 羊湖流域水源到羊湖水化学类型的转变

Fig.8 Change in hydrochemical types from water sources in the catchment to Yamzhog Yumco

件. 简言之, 羊湖 pH 偏高是特定条件下长期自然演化的结果, 流域风化提供的 HCO_3^- 是物质基础, 封闭型水动力学是 pH 自然演化的必要条件, 长期蒸发浓缩作用是羊湖实现 pH 自然演化的充分条件.

鉴于羊湖 pH 偏高是特定条件下长期自然演化的结果, 建议不把 pH 纳入羊湖的管理目标考核中, 以避免造成不必要的管理成本和压力. 全国范围内 pH 偏高的水体很多, 如西藏自治区的昂仁金错、蓬错和打加错^[30], 内蒙古自治区的达理若尔湖^[31]、查干若尔湖^[32]、呼伦湖、乌梁素海和岱海^[33], 以及松辽平原的许多小型湖泊^[34]. 这些湖泊与羊湖有许多共性, 又各有其自身的特点. 后期有必要针对这些湖泊开展相关研究, 揭示其 pH 偏高的成因和机制, 以便采取针对性的措施进行管理.

4 结论

a) 目前羊湖水体 pH 中间值为 8.98, 存在明显超标现象, 超标率为 49%. 而羊湖流域水源 pH 中间值为 8.52, 基本代表羊湖流域水源 pH 背景值. 羊湖流域水源不是造成羊湖 pH 超标的直接原因.

b) 羊湖流域水源水化学类型为 Ca-HCO_3 或 Ca-SO_4 , 汇入羊湖经历长期蒸发浓缩和复杂地球化学过程后, 水化学类型转化为 Mg-SO_4 . 羊湖水化学类型与羊湖流域水源存在明显差异.

c) 羊湖流域既存在常见的碳酸盐岩和硅酸盐岩风化, 亦有硫化物矿物风化的特征. 硫化物矿物风化过程中释放的酸会促进羊湖流域内碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化.

d) 羊湖 pH 偏高是长期自然演化的结果, 流域风化是羊湖水体 pH 在特定条件下自然演化的物质基础, 封闭型水动力学是羊湖 pH 自然演化的必要条件, 长期蒸发浓缩是羊湖 pH 自然演化的充分条件.

参考文献 (References):

- [1] 刘建明, 吴叔兵. 碱性废水处理及回收利用研究进展 [J]. 中国资源综合利用 2008 26(9): 36-39.
LIU Jianming, WU Shubing. Utilizing membrane technology to recycle the alkaline wastewater [J]. China Resources Comprehensive Utilization 2008 26(9): 36-39.
- [2] XU H, YANG B, LIU Y, et al. Recent advances in anaerobic

- biological processes for textile printing and dyeing wastewater treatment: a mini-review [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2018, 34(11): 165.
- [3] MAYES W M, BATTY L C, YONGER P L, *et al.* Wetland treatment at extremes of pH: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 3944-3957.
- [4] 莫美仙, 张世涛, 叶许春, 等. 云南高原湖泊滇池和星云湖 pH 值特征及其影响因素分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(S3): 269-273.
- MO Meixian, ZHANG Shitao, YE Xuchun, *et al.* pH characters and influencing factors in Dianchi and Xingyun Lakes of Yunnan Plateau [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(S3): 269-273.
- [5] 张雪, 周洵, 李琴, 等. 太湖原水 pH 值季节性变化规律及突变成因探索 [J]. *供水技术* 2015, 9(5): 13-17.
- ZHANG Xue, ZHOU Xun, LI Qin, *et al.* Seasonal variation regularity and mutation cause of pH in raw water of Taihu Lake [J]. *Water Technology* 2015, 9(5): 13-17.
- [6] 王坤, 张岚, 姜霞, 等. 高原深水湖泊沉积物重金属背景值研究及潜在生态风险评估 [J]. *环境科学研究* 2018, 31(12): 2124-2132.
- WANG Kun, ZHANG Lan, JIANG Xia, *et al.* Determination of background value and potential ecological risk of heavy metals in sediments of a deep plateau lake [J]. *Research of Environmental Sciences* 2018, 31(12): 2124-2132.
- [7] SUN Y, YUAN G, LI J, *et al.* High-resolution sedimentary records of some organochlorine pesticides in Yamzho Yumco Lake of the Tibetan Plateau: concentration and composition [J]. *Science of the Total Environment* 2018, 615: 469-475.
- [8] 张雪芹, 孙瑞, 朱立平. 藏南羊卓雍错流域主要湖泊水质状况及其评价 [J]. *冰川冻土* 2012, 34(4): 950-958.
- ZHANG Xueqin, SUN Run, ZHU Liping. Lake water in the Yamzhog Yumco Basin in South Tibetan Region: quality and evaluation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 950-958.
- [9] REIMER A, GÜNTHER L, KEMPE S. Lake Van, eastern Anatolia, hydrochemistry and history [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2008, 15(1): 195-222.
- [10] JIN Z, YU J, WANG S, *et al.* Constraints on water chemistry by chemical weathering in the Lake Qinghai catchment, northeastern Tibetan Plateau (China): clues from Sr and its isotopic geochemistry [J]. *Hydrogeology Journal* 2009, 17(8): 2037-2048.
- [11] 郑绵平, 刘喜方. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征 [J]. *地质学报* 2010(11): 65-80.
- ZHENG Mianping, LIU Xifang. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Acta Geologica Sinica* 2010(11): 65-80.
- [12] 禰映雪, 唐常源, 曹英杰, 等. 北江流域水化学时空变化及化学风化特征 [J]. *环境科学研究* 2018, 31(6): 1078-1087.
- XUAN Yingxue, TANG Changyuan, CAO Yingjie, *et al.* Spatial and temporal variation of hydro-chemistry and chemical weathering characteristics in the Bei Jiang River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences* 2018, 31(6): 1078-1087.
- [13] TIAN Y, YU C, ZHA X, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of natural water in the border areas of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences* 2019, 29(11): 1876-1894.
- [14] WU W. Hydrochemistry of inland rivers in the North Tibetan Plateau: constraints and weathering rate estimation [J]. *Science of the Total Environment* 2016, 541: 468-482.
- [15] ZENG S, LIU Z, KAUFMANN G. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes [J]. *Nature Communications* 2020, 10: 5749.
- [16] JIN Z, YU J, WANG S, *et al.* Constraints on water chemistry by chemical weathering in the Lake Qinghai catchment, northeastern Tibetan Plateau (China): clues from Sr and its isotopic geochemistry [J]. *Hydrogeology Journal* 2009, 17(8): 2037-2048.
- [17] CHAO H, YOU C, LIU H, *et al.* Evidence for stable Sr isotope fractionation by silicate weathering in a small sedimentary watershed in southwestern Taiwan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2015, 165: 324-341.
- [18] GAILLARDET J, DUPRÉ B, LOUVAT P, *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology* 1999, 159(1): 3-30.
- [19] BOTTRELL S H, NEWTON R J. Reconstruction of changes in global sulfur cycling from marine sulfate isotopes [J]. *Earth-Science Reviews* 2006, 75(1/2/3/4): 59-83.
- [20] FENG J, CHEN F, HU H. Isotopic study of the source and cycle of sulfur in the Yamdrok Tso Basin, southern Tibet, China [J]. *Applied Geochemistry* 2017, 85: 61-72.
- [21] LI S, CHETELAT B, YUE F, *et al.* Chemical weathering processes in the Yalong River draining the eastern Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 2014, 88: 74-84.
- [22] ZHE M, ZHANG X, WANG B, *et al.* Hydrochemical regime and its mechanism in Yamzhog Yumco Basin, South Tibet [J]. *Journal of Geographical Sciences* 2017, 27(9): 1111-1122.
- [23] YE Q, ZHU L, ZHENG H, *et al.* Glacier and lake variations in the Yamzhog Yumco Basin, southern Tibetan Plateau, from 1980 to 2000 using remote-sensing and GIS technologies [J]. *Journal of Glaciology* 2007, 53(183): 673-676.
- [24] LI L, LI J, YAO X, *et al.* Changes of the three holy lakes in recent years and quantitative analysis of the influencing factors [J]. *Quaternary International* 2014, 349: 339-345.
- [25] 郭超, 马玉贞, 刘杰瑞, 等. 过去 2000 年来西藏羊卓雍错沉积物粒度记录的气候变化 [J]. *第四纪研究* 2016, 36(2): 405-419.
- GUO Chao, MA Yuzhen, LIU Jierui, *et al.* Climatic change recorded

- by grain size in the past about 2000 years from Yamzhog Yumco Lake, Tibet [J]. *Quaternary Science* 2016, 36(2): 405-419.
- [26] ZHANG G, XIE H, YAO T *et al.* Snow cover dynamics of four lake basins over Tibetan Plateau using time series MODIS data (2001–2010) [J]. *Water Resources Research* 2012, 48, 10529.
- [27] 陈西平, 施为光, 谢清成. 西藏羊湖流域水化学背景值及分布模式 [J]. *环境科学研究*, 1987(4): 9–16.
- [28] 孙瑞, 张雪芹, 郑度. 藏南羊卓雍错流域水化学区域差异及其成因 [J]. *地理学报*, 2013, 68(1): 36–44.
SUN Run, ZHANG Xueqin, ZHENG Du. Spatial variation and its causes of water chemical property in Yamzhog Yumco Basin, South Tibet [J]. *Acta Geographica Sinica* 2013, 68(1): 36–44.
- [29] 除多, 旺堆, 普穷, 等. 西藏羊卓雍错湖面遥感监测模型及近期变化 [J]. *冰川冻土* 2012, 34(3): 530–537.
CHU Duo, WANG Dui, PU Qiong *et al.* Remote sensing based lake area monitoring model for Yamzho Yumco in Tibet Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2012, 34(3): 530–537.
- [30] 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 Xiaolong *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.
- [31] 赵胜男, 史小红, 崔英, 等. 内蒙古达里诺尔湖湖泊水体与入湖河水水化学特征及控制因素 [J]. *环境化学* 2016, 35(9): 1865–1875.
ZHAO Shengnan, SHI Xiaohong, CUI Ying *et al.* Hydrochemical properties and controlling factors of the Dali Lake and its inflow river water in Inner Mongolia [J]. *Environmental Chemistry* 2016, 35(9): 1865–1875.
- [32] PAGALING E, WANG H, VENABLES M, *et al.* Microbial biogeography of six salt lakes in Inner Mongolia, China, and a salt lake in Argentina [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(18): 5750–5760.
- [33] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析 [J]. *干旱区研究* 2015, 32(1): 7–14.
WANG Jingzhong, WU Jinglu, ZENG Haiao *et al.* Changes of water resources of the main lakes in Inner Mongolia [J]. *Arid Zone Research* 2015, 32(1): 7–14.
- [34] 姚书春, 薛滨, 吕宪国, 等. 松嫩平原湖泊水化学特征研究 [J]. *湿地科学* 2010, 8(2): 169–175.
YAO Shuchun, XUE Bin, LU Xianguo *et al.* The hydrochemical characteristic of lakes in Songnen Plain [J]. *Wetland Science*, 2010, 8(2): 169–175.

(责任编辑: 张蕊)