

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0037

LI Zongjie, DUAN Ran, KE Haocheng, et al. Research progress of ecological hydrology based on hydrochemical characteristics in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):288-298. [李宗杰, 段然, 柯造成, 等. 基于水化学特征的长江源区生态水文学研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):288-298.]

基于水化学特征的长江源区生态水文学研究进展

李宗杰¹, 段然¹, 柯造成¹, 刘晓颖¹, 谢庚淼¹, 高文德^{1,2}, 宋玲玲³,
张百娟², 桂娟², 薛健², 南富森², 梁鹏飞², 李玉辰²

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃兰州 730050; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室/甘肃省祁连山生态环境研究中心, 甘肃兰州 730000; 3. 甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 气候变暖背景下, 冰雪、冻土剧烈消融引起的寒区径流成分改变对流域径流演变规律及水循环机制产生了深刻影响。对长江源区各水体水化学特征及其生态水文学研究进行归纳总结, 主要进展包括: 长江源区的大气降水的水汽来源主要受西风环流和季风环流的控制。冰雪融水的水化学特征受到消融强度、消融持续时间和新雪融水的影响, 同时在冰雪融水、积雪以及冰川融水之间可能存在化学离子的交换。冻土层上水受到降水、冰雪融水、地下冰融水等的混合补给, 造成水化学特征变化的随机波动。海拔在4 500 m的地区是冻土层上水水化学特征对研究区离子控制源较为敏感的区域。随着海拔高度的增加, 降雨直接补给对河水中化学离子的稀释作用逐渐减弱, 同时, 海拔从4 500 m到5 000 m的降水对河水中离子浓度的稀释效果最大, 而在海拔5 000 m以上河水主要受冰雪融水的补给, 降水和消融期的变化对河水水化学的影响很小。研究结果为更系统地认知寒区下垫面变化所引起的水文效应提供科学依据, 为流域水资源的合理开发利用提供决策依据。

关键词: 长江源区; 生态水文; 水化学特征

中图分类号: X143; P342 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0288-11

0 引言

水的化学成分是水与周围环境长期相互作用的结果, 在水和溶解物的转化迁移过程中, 化学成分随水量的变化而变化。因此, 水的化学成分记录了水的形成和迁移的历史, 水的离子组成是水化学性质的一个重要方面^[1-4]。水化学离子的研究对了解地表水与地下水的补给关系、离子组成和来源具有重要意义, 同时水化学对环境也具有指示意义, 能反映岩石风化、土地利用变化的影响、流域大气沉积和人类活动的影响等。水的化学特征受各种自然和人为因素的影响, 水中主要离子的组成被广泛用于识别控制水化学组成的基本过程, 如岩石风化和大气降水物质的输入^[5]。

大气降水的化学成分揭示了该地区人类活动

对大气降水的影响, 也反映了气溶胶的长距离传播过程及其对整个生态系统的影响。大气降水化学特征的研究对于分析地壳和人类活动对大气环境的贡献, 准确评价一个地区的大气质量具有重要意义。此外, 大气降水和水汽来源的识别与量化对大气环境模型的解释具有重要意义^[6-7]。近年来, 气候变暖加快了冻土区地下水循环速度, 缩短了冻土区的水文循环周期。多年冻土区地下水的动态变化和生态环境的变化较为复杂, 最终导致多年冻土层上水的多源性和随机性增强。研究冻土层上水的化学特征可以揭示寒冷地区气候变暖对水循环的影响机理。对寒区水文过程的演变趋势进行预测, 是全面认识水收支时空结构的重要依据^[8-9]。一般来说, 冰雪融水的化学成分直接反映了冰雪融水径流的水文地质特征。同时, 冰雪融水径流对气候变

收稿日期: 2021-03-22; 修订日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077187; 42007426); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE202011)资助

作者简介: 李宗杰, 讲师, 主要从事寒旱区生态水文学研究. E-mail: lzjie314@163.com

化最为敏感^[10]。因此,研究加速消融背景下寒区各水体水化学特征指示的生态水文学意义,是我国水资源预测研究的重要依据,对寒冷地区的建设工程和生态保护具有重要的理论和实践意义。

河流不仅是全球和区域水循环的重要组成部分,而且在全球地球化学循环中起着非常重要的作用^[11]。河流水化学成分及分布特征是水资源质量、区域环境化学特征和水体元素迁移转化规律的表征。研究河流水化学特征,对于了解地表水补给与地下水的关系,分析河流水化学成分的控制源具有重要意义^[12-13]。因此,在河流地球化学研究的基础上还可以进行流域化学风化侵蚀过程、地壳化学和同位素组成以及水系化学元素的相关研究^[14]。

长江源是我国淡水资源的重要补给地,是亚洲、北半球乃至全球气候变化的敏感区和重要启动区,是全球生物多样性保护的重要区域,特殊的地理位置、丰富的自然资源、重要的生态功能使其成为我国乃至亚洲重要的生态安全屏障,是“亚洲水塔”的重要组成部分,在全国生态文明建设中具有特殊重要地位。源区径流量占长江总流量的近25%。该区流域面积约 $13.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占长江流域总面积的7.8%。该区是寒区水文、生态学和气象学相互作用研究的典型地区之一。近年来,在全球气候变化的影响下,湖泊和湿地的萎缩、草地退化和永久冻土的融化威胁着整个青藏高原和长江流域^[15-16]。气候变暖背景下高寒区多相态水体转换

明显加速,冰冻圈融水已成为高寒区水资源的关键组成和生态系统的重要水源,高寒区水化学特征的水文学意义亟待深入。

为此,2016年以来,在长江源构建依据海拔梯度的观测采样体系(表1),进一步加密水文与气象观测,定期系统采集河水、冰雪融水以及冻土层上水等各类水体样品,同时在不同海拔按降水事件收集大气降水样品。如表1所示,共布设大气降水连续采样点3个,干流河水采样点2个,冻土层上水定点采样点3个,冰雪融水采样点3个。除了定点采样以外,在消融期(消融期:5—10月,其中消融初期(5—6月)、强消融期(7—8月)和消融末期(9—10月))对河水和冻土层上水也进行区域尺度的样品采集,基本实现了各类水体样品的全流域采集,积累了宝贵的数据。历时3年,共采集大气降水、冰雪融水、冻土层上水、河水样品1 770组,并完成了各水体化学离子测试,所有水体的水化学离子(阳离子为: Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Li^+ ,阴离子为: Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_2^- 、 F^-)都用ICS-2500型离子色谱仪测定,测试精度可达到 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 级,测试误差范围 $< \pm 5\%$ 。通过构建系统的采样网络,综合应用各类观测数据,初步建立了一整套适合在高寒区应用的水化学特征分析方法,分析各水体的水化学组成特征,研究各水体水化学特征的时空变化及转换机制,解析各水体阴阳离子的主要控制因素,剖析各水体水化学特征所指示的环境意义。

表1 长江源区各水体采样点位置

Table 1 Locations of sampling points in various water bodies in the source region of the Yangtze River

水体类型	采样点位置	采样频率
大气降水	沱沱河站(34. 22° N, 92. 24° E, 4 533 m)	按照降水事件发生次数
	曲麻莱站(34. 13° N, 95. 48° E, 4 175 m)	
	直门达水文站(92. 26° E, 34. 14° N, 3 540 m)	
河水	沱沱河站(34. 22° N, 92. 24° E, 4 533 m)	4—10月每隔7天采集一次,11月—次年3月每隔15天采集一次
	直门达水文站(92. 26° E, 34. 14° N, 3 540 m)	
冻土层上水	各拉丹冬(91. 38° E, 33. 95° N, 5 397 m)	采样间隔约为每10天一次
	唐古拉(91. 96° E, 33. 00° N, 5 056 m)	
	玉珠峰(94. 16° E, 35. 62° N, 4 954 m)	
冰雪融水	姜古迪如冰川(91. 00° E, 33. 45° N, 5 281 m)	采样间隔约为每10天一次
	冬克玛底冰川(92. 00° E, 33. 00° N, 5 423 m)	
	玉珠峰冰川(94. 22° E, 35. 63° N, 5 180 m)	

1 研究方法

1.1 富集因子分析

富集因子分析(EF)被广泛应用于识别各种水

中可能的主要离子来源。根据先前的研究^[17-18],将 Ca^{2+} 作为土壤源的主要参考元素,将 Na^+ 作为海洋源的参考元素。计算如下:

$$EF_{\text{土壤}} = \frac{[\text{X}/\text{Ca}^{2+}]_{\text{水体}}}{[\text{X}/\text{Ca}^{2+}]_{\text{土壤}}} \quad (1)$$

$$EF_{\text{海水}} = [X/Na^+]_{\text{水体}} / [X/Na^+]_{\text{海水}} \quad (2)$$

式中: X 是目标离子的浓度。主要水样有河水、降水、泉水、冰川融水和冻土层上水。 $[X/Ca^{2+}]$ 是各目标离子的土壤比, 由 Okay 等^[18] 得出。而 $[X/Na^+]$ 是基于这些水成分的各目标离子的海相比率。一般情况下, $EF \leq 1$ 表示水中目标离子被海盐稀释, $EF \geq 1$ 表示土壤对目标离子的富集。方程式(1)和(2)中使用的所有浓度单位均为 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。通过先前的研究, 该方法已用于评估降水、河水、地下水和冻土层上水中主要离子的可能来源^[17-18]。

1.2 Gibbs 图

为了解流域水化学类型的特征和组成, 通常采用吉布斯半对数坐标图分析水体的水化学特征, 纵坐标为对数坐标, 代表河水中总溶解流量。横坐标用 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 或 $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 的比率表示。吉布斯图可以直接反映地表水的主导因素, 如“降水控制类型”“岩石风化类型”或“蒸发浓度类型”。为流域地表水的影响提供了定性参考^[19-21]。Gibbs 图用 Origin 19.0 绘制。

1.3 非海洋源计算

本研究通过海洋源和非海洋源两种来源的计算, 定量分析了不同来源对研究区水化学的贡献。除人类活动对降水化学特征的影响外, 影响研究区降水水化学特征的主要来源是远程传输的海洋源和地壳源。为了研究降水中水化学离子的来源, 计算了海洋源(SSF)、地壳源(CF)和人为源(AF)。在本研究中, Ca^{2+} 被用作土壤源的参考元素, 而 Na^+ 被用作海洋源^[20-21]。计算公式如下:

$$\%SSF = 100 [X/Na^+]_{\text{海水}} / [X/Na^+]_{\text{大气降水}} \quad (3)$$

$$\%CF = 100 [X/Ca^{2+}]_{\text{土壤}} / [X/Ca^{2+}]_{\text{大气降水}} \quad (4)$$

$$AF = 100 - SSF - CF \quad (5)$$

式中: X 是目标离子; $[X/Na^+]_{\text{海水}}$ 比和 $[X/Ca^{2+}]_{\text{土壤}}$ 比参考现有文献^[20, 22]。为了量化主要离子的主要来源, 计算了地壳源、海洋源和人为源对离子的贡献。

1.4 后向轨迹模型

HYSPLIT 是美国国家海洋和大气管理局为模拟气流轨迹而开发的扩散模型。HYSPLIT4 模型 (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>) 是一个完整的计算轨迹的系统, 可用于进行复杂的分散和沉积模拟。利用 5 天的日分辨率反向轨迹, 研究北京时间 12:00 (04:00 UTC) 空气气团到达采样点的路径。轨道模型中使用的气象数据是美国国家环境预测中心全球数据同化系统的数据。模拟高度为距地表 500 m, 为了确定水汽来源, 将所有反

向气流轨迹分为四类。

2 主要进展

2.1 大气降水水化学特征的演化机制

长江源区的水汽来源存在明显的地域差异, 不同的站点的水汽路径往往随季节变化, 但研究区的水汽主要受西风环流和季风环流的控制^[24-25]。通过对长江源区直门达站的 184 次降水事件、曲麻莱站的 104 次降水事件和沱沱河站的 201 次降水事件的 HYSPLIT4 模式的分析得出: 不同季节不同采样点的水汽源存在明显差异, 但长江源区的大气降水的水汽来源主要受西风环流和季风环流的控制(图 1)。西风环流是主要来源于西亚的水汽, 而季风环流是指来自印度洋的水汽。春季, 直门达站的水汽来源主要受控于西风环流和局地环流。而在西风环流的基础上, 曲麻莱站的水汽也受到极地环流的影响, 但是沱沱河的春季水汽主要受控于西风环流。当夏季来临时, 季风环流开始影响长江源区的降水水汽。直门达夏季的水汽主要来自西风环流和季风环流, 而曲麻莱和沱沱河夏季的水汽路径基本相同, 主要受控于西风环流和局地环流。因此, 长江源区夏季水汽路径是混合的。秋季, 直门达大气降水的水汽来源主要受季风环流影响, 曲麻莱的水汽来源主要受局地环流影响, 而沱沱河的水汽来源主要受西风环流影响。冬季, 西风环流是长江源区主要的水汽路径, 但季风环流会影响直门达站的水汽来源, 这可能主要是由于直门达的低海拔及其在季风影响区的位置所致。从直门达、曲麻莱和沱沱河不同季节水汽来源的变化可以看出, 随着长江源区海拔的升高, 从下游直门达站到上游沱沱河站的水汽来源越来越单一。沱沱河站是研究区域内最高的观测站, 海拔梯度高, 而本站水汽主要来源为西风环流, 而在下游的直门达站, 水汽主要来源为西风环流和季风环流, 也有大量的局部环流影响, 这些变化也就说明了水汽源的高程效应^[24]。

为了定量分析研究区水汽来源对大气降水水化学过程的贡献, 本文分析了直门达、曲麻莱和沱沱河三个观测站同时发生的 32 次降水事件的水汽来源。某一环流对大气降水的贡献依据某一环流主导的降水事件占总降水事件的百分比确定, 而某一环流对大气降水离子的贡献也是依据某一环流主导的降水中离子浓度占总离子浓度的百分比确定。通过对长江源区水汽来源对大气降水水化学

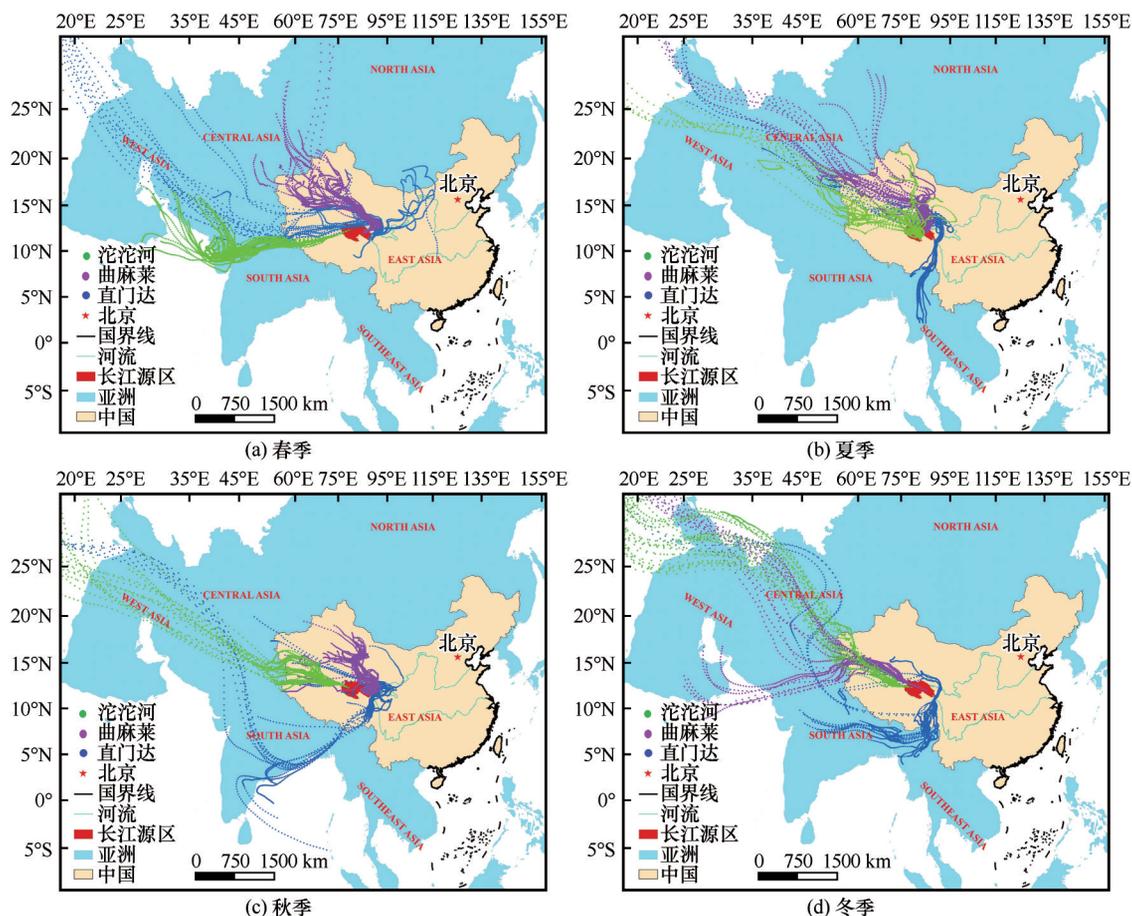


图1 基于后向轨迹的长江源区水汽源的时空变化

Fig. 1 Temporal and spatial variation of water vapor source based on back trajectories in the source region of Yangtze River

过程的贡献的定量分析表明,研究区的水汽来源可分为四类^[24]:西风环流(28.13%)、季风环流(18.75%)、西风环流-季风环流(33.33%)和西风环流-局地环流(21.88%)。水汽对降水事件的贡献率分别为12.97%、41.56%、19.95%和25.53%(图2)。西风环流对 Cl^- 和 K^+ 贡献最大,贡献率分别为50.19%和52.99%。季风环流主要对 NH_4^+ 浓度发挥贡献作用,但是西风环流-季风环流对离子浓度的贡献最大,对 F^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 Li^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的贡献率分别为51.20%、41.60%、42.30%、53.68%、40.36%、40.22%和34.20%。同时, NO_3^- 主要由西风环流-局地环流贡献。总体来看,西风环流和季风环流的混合影响主要控制着长江源区降水的水化学特征。由于西风环流主要来自西亚,而西亚气候干旱,水资源稀缺,大气降水中的主要地壳源离子可能主要来源于西亚干旱地区。季风环流主要为西南季风环流,西南季风环流主要来自印度洋,研究区降水量的41.56%来自季风环流。然而,由于局地环流的影响,局地源对研究区降水

水化学也有一定的影响。但西风环流和季风环流在研究区的降水化学中起着决定性的作用^[24]。

2.2 冰雪融水水化学特征指示的水文过程

运用相关分析、富集因子法、Gibbs图法,对长江源区定点采集的(玉珠峰冰川、各拉丹冬冰川及冬克玛底冰川)冰雪融水常量离子的化学特征分析表明:研究区无机酸、碱、盐含量较高,冰雪融水pH的平均值为8.34,电导率的平均值为 $171.51 \text{ us} \cdot \text{cm}^{-1}$;离子浓度顺序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_2^- > \text{F}^- > \text{Li}^+$,其中 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 离子浓度较大,占总量的87.03%^[10]。通过对研究区冰雪融水常量离子的化学特征分析得出,高寒区冰雪融水的水化学主要受蒸发岩和碳酸盐岩等地壳源的影响(图3)。玉珠峰冰川冰雪融水的水化学主要受蒸发结晶作用控制,冬克玛底冰川主要受岩石风化作用控制,而由于各拉丹冬冰川所采集到的样品较少,所以其分布不是很明显。通过 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 的比值区分溶质来源发现,长江源区的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 的比值均较低,表明研究区

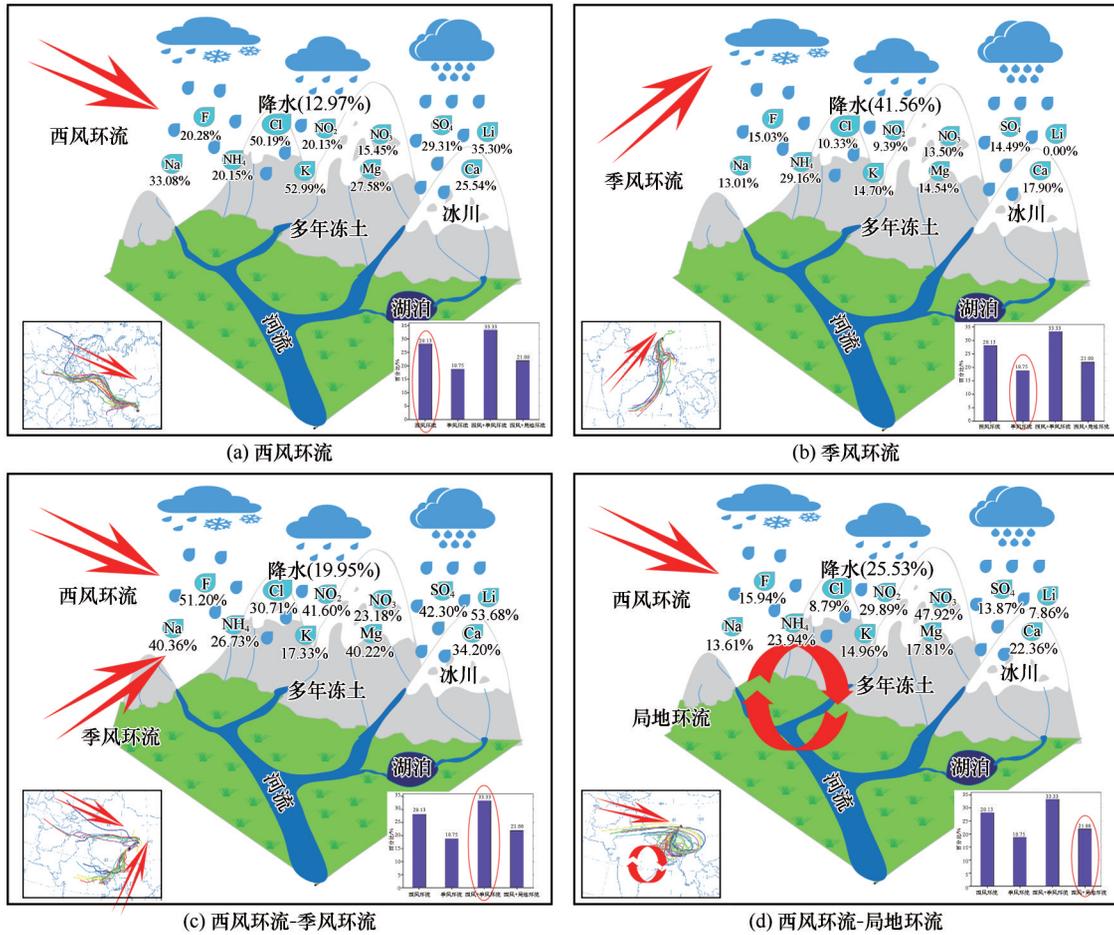


图2 长江源区主要水汽源量化的概念模型

Fig. 2 Conceptual model of preliminary quantification of water vapor sources to the hydrochemistry of atmospheric precipitation in the source region of Yangtze River

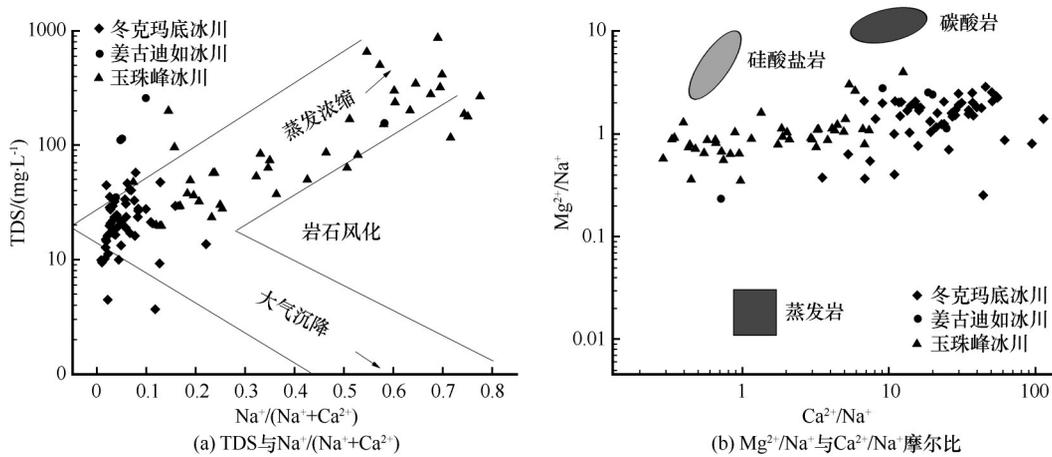


图3 长江源区冰雪融水TDS与Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)的Gibbs图(a)和Mg²⁺/Na⁺与Ca²⁺/Na⁺的摩尔比(b)

Fig. 3 Gibbs-type TDS versus Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺) diagram (a) and molar ratios of Mg²⁺/Na⁺ and Ca²⁺/Na⁺ (b) for glacier snow meltwater in the source region of Yangtze River

冰雪融水中的离子主要是方解石和白云石的溶解^[26-28]。(Na⁺+K⁺)/Cl⁻的比值远大于1,这表明岩盐和硅酸盐矿物溶解对冰雪融水水化学特征的影响^[27]。

为了更进一步探究冰雪融水水化学特征,本文选择了与冰雪融水水化学特征关系最为密切的气候因子(温度、降水、风速、相对湿度和日照时数)进行讨论分析。通过分析水化学特征与气象因子之

间的关系发现,研究区6—9月日照时数的变化趋势为先下降后上升,而冰雪融水中 K^+ 的变化趋势与日照时数相似,说明 K^+ 的控制源与日照时数的影响有很大的关系。由温度与冰雪融水水化学特征的关系可以看出,随着温度的升高,冰雪融水径流流量越大,对离子浓度的稀释作用越明显。6—8月气温呈上升趋势,8—9月呈下降趋势,6—8月各离子浓度呈下降趋势,8—9月各离子浓度呈上升趋势(图

4)。风速的变化特征与除 K^+ 以外的其他所有离子的变化特征均不一致,这可能主要是因为 K^+ 的控制源受到风速的影响较大。更为重要的是,6—9月降水量和相对湿度呈先增后减的变化趋势,但相对湿度和降水量对冰雪融水水化学的影响主要表现为湿沉降,从降水量和相对湿度变化特征与冰雪融水水化学特征的关系发现湿沉降对长江源区冰雪融水水化学特征的影响较小(图4)^[10]。

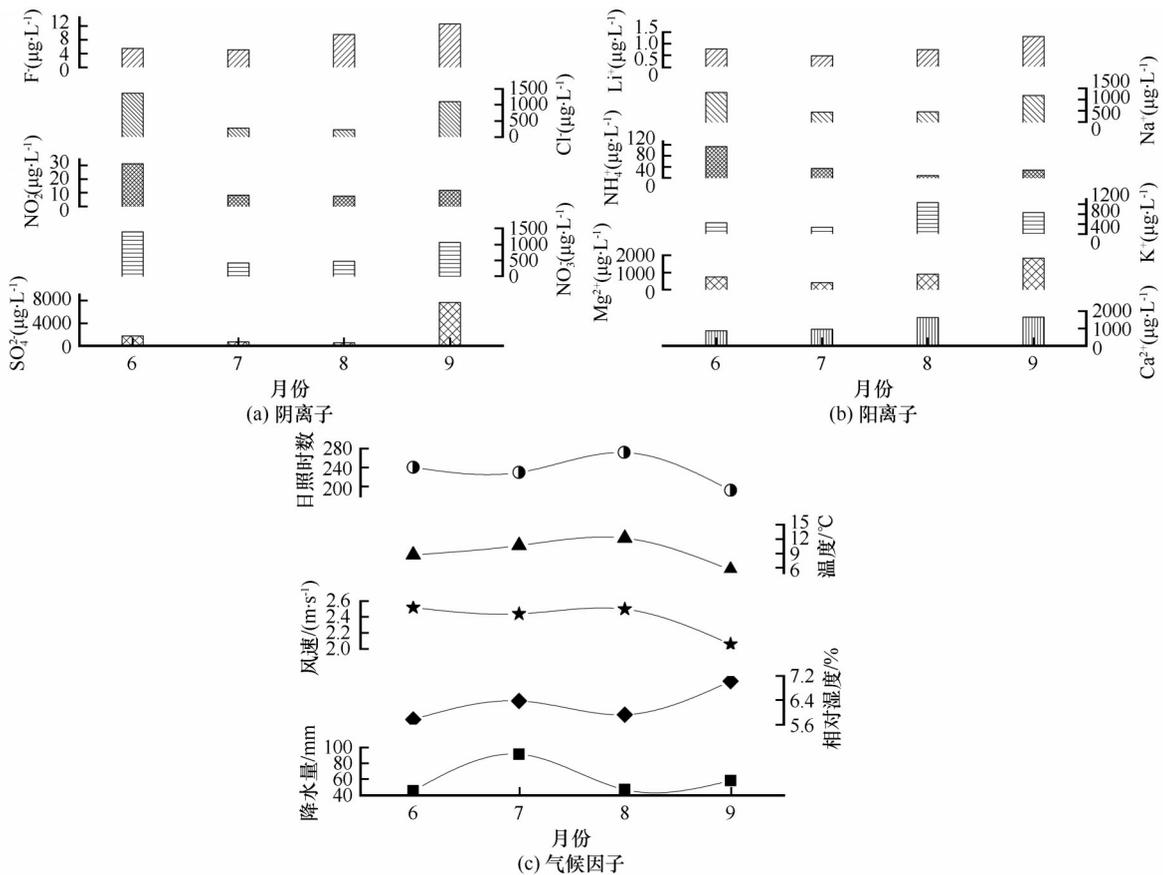


图4 长江源区冰雪融水离子浓度与气候因子的关系

Fig. 4 Relationship between ion concentration in glacier snow meltwater and meteorological factors in the source region of Yangtze River

2.3 冻土层上水水化学特征指示的水文过程

通过对长江源区冻土层上水常量离子的化学特征分析表明(图5):消融初期冻土层上水的离子浓度也存在明显的空间变化,随着消融的不断进行,离子浓度在强消融期和消融末期的空间变化更为稳定^[9]。海拔在4 500 m的地区是研究区冻土层上水水化学特征对研究区离子控制源较为敏感的地区。通过对离子源的分析,研究区冻土层上水的阴离子和阳离子主要受蒸发岩和碳酸盐岩等地壳源的控制。降水和融雪水的补给效应只影响 Cl^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 F^- 、 Li^+ 和 K^+ 的浓度,而不影响氮离子、硫

离子、镁离子和钙离子的浓度。高海拔区(4 800 m以上)的水化学类型为 $Ca^{2+}-SO_4^{2-}$,而中海拔区(4 400~4 700 m)的水化学类型为 Na^+-Cl^- ,但是低海拔区的水化学类型比中海拔区和高海拔区都复杂^[29]。总体而言,长江源区冻土层上水水化学特征时空变化明显,同时水化学类型相对简单。研究区冻土层上水的水化学类型的垂直分布与研究区岩相的垂直分布一致。不管是在消融初期还是强消融期和消融末期 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的最大值都是稳定的,表明这些离子的浓度很少受到降水和融雪水补给的影响。此外,这些稳定离子还进一步证实了它

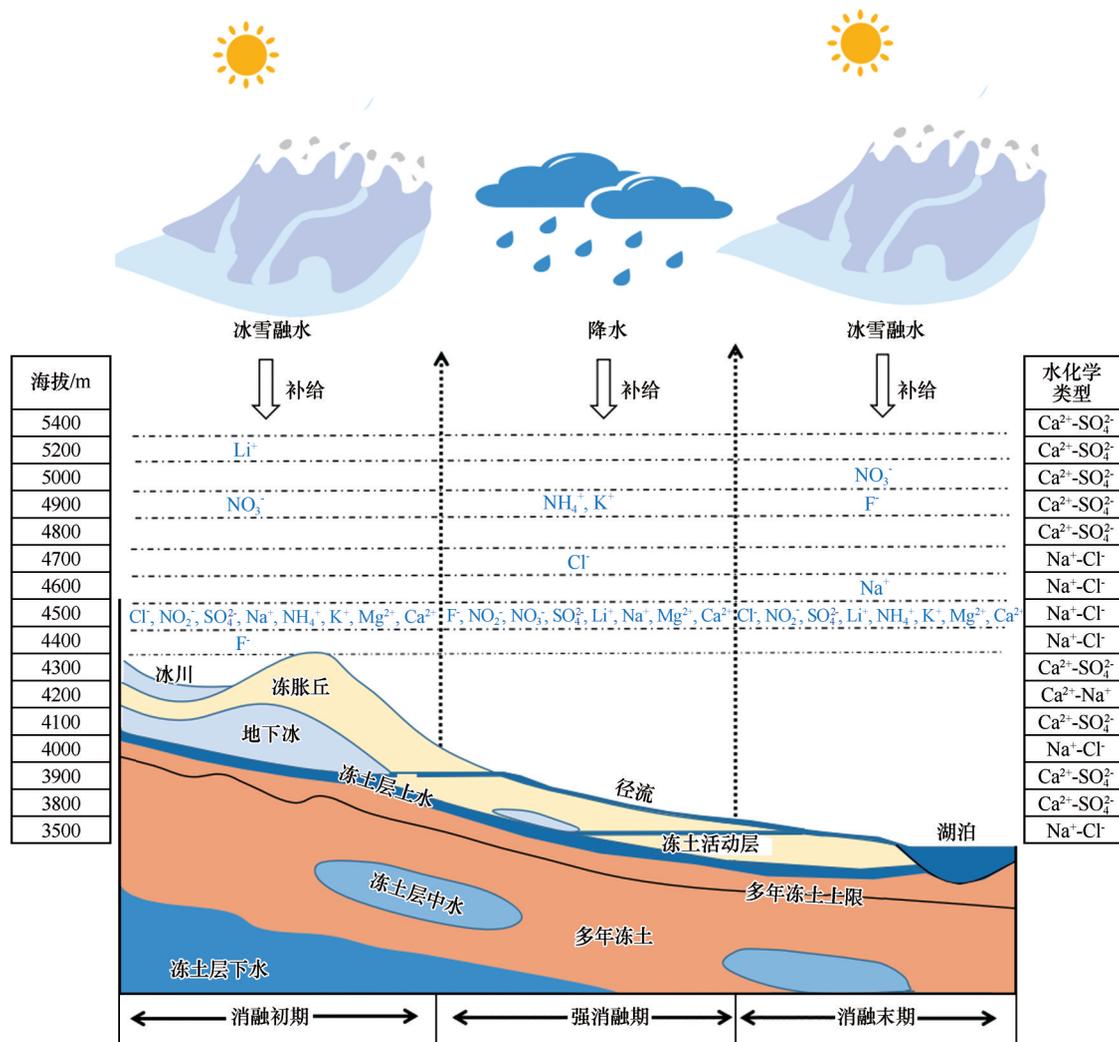


图5 长江源区冻土层上水水化学类型的概念模型图

Fig. 5 The conceptual diagram of temporal and spatial distribution of hydrochemical characteristics on supra-permafrost water in the source region of Yangtze River

们的主要来源(地壳来源)。从消融初期到消融末期, Cl⁻、NH₄⁺和K⁺的最大值呈现先升高后降低的趋势,而NO₃⁻的最大值呈现先降低后升高的趋势。F⁻的最大值从消融初期到消融末期都呈上升趋势。长江源区冻土层上水的化学特征随消融期的不同也就是消融强度的不同而有明显变化,同时不同消融期冻土层上水的主要补给源的变化也严重影响了研究区冻土层上水的水化学特征^[9,29]。

2.4 河水水化学特征指示的水文过程

通过对长江源区河水水化学特征的分析表明^[30-34]:河水离子浓度从海拔4 000 m到5 000 m离子浓度呈上升趋势,而当海拔在5 000 m以上时河水的离子浓度呈下降趋势。这主要因为随着海拔高度的增加,降雨直接补给对河水中化学离子的稀释作用逐渐减弱,同时,海拔4 500 m至5 000 m范

围内河水中离子浓度受降水稀释影响最大,而在海拔5 000 m以上河流主要受冰雪融水的补给,降水和消融期的变化对河水水化学的影响很小^[30]。如图6所示,海拔低于5 000 m的区域内河水在消融初期的水化学类型为SO₄²⁻-Ca²⁺-Mg²⁺,而海拔超过5 000 m的区域,消融初期的水化学类型为Cl⁻-Ca²⁺-SO₄²⁻。而海拔低于5 000 m的区域内河水在消融末期的水化学类型为Cl⁻-SO₄²⁻-Na⁺。海拔在5 000 m以上的地区不同消融时期的水化学类型不同,这就说明不同消融时期冰雪融水的水化学控制源不同^[27-29]。一方面,不同消融期的水化学类型的差异性表明海拔在5 000 m以上的区域水化学类型对消融期极为敏感。另一方面,冰雪融水的离子浓度主要受冰川和积雪中化学成分控制。当然,冰川和积雪的融化速率对离子浓度也有一定的影响^[30]。

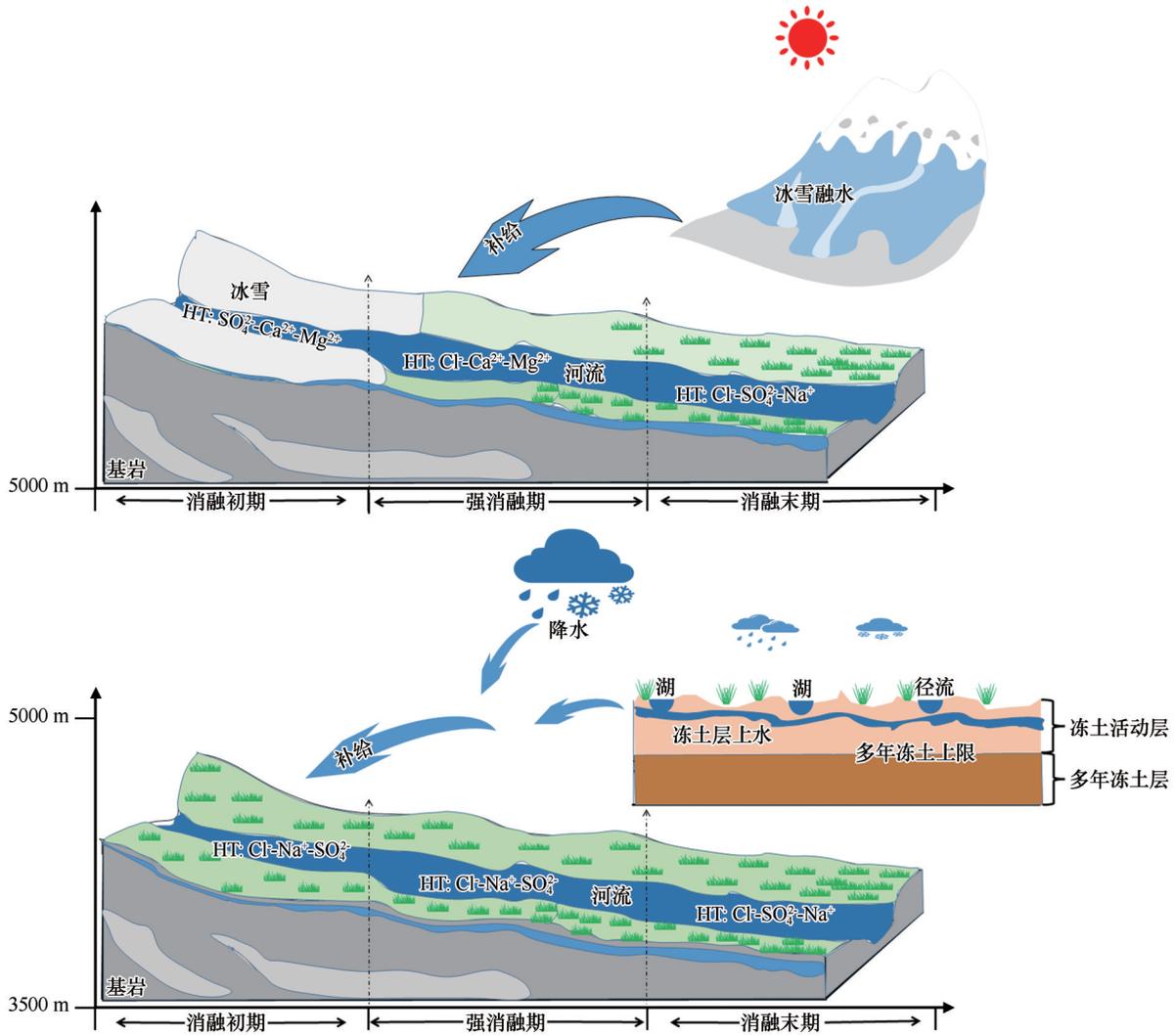


图6 长江源区河水水化学类型与可能补给源的概念模型(HT代表水化学类型)

Fig. 6 The conceptual diagram of hydrochemical type and recharge source on river water in the area with elevation higher than 5 000 m (a) and from 3 500 to 5 000 m (b) (HT means hydrochemical type)

海拔在 3 500 ~ 5 000 m 区域内在消融初期和强消融期河水的水化学类型都为 $\text{Cl}^- \text{Na}^+ \text{SO}_4^{2-}$, 而消融末期河水的水化学类型为 $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Na}^+$ 。该区段内河水的水化学类型不随消融期的变化而变化, 这就表明该区域内河水水化学类型对消融期不太敏感。同时, 水化学类型的稳定也在一定程度上表明冻土层上水对河水的主要补给, 因为这个区段内河水的水化学类型与冻土层上水的水化学类型基本相同。对比海拔高于 5 000 m 和海拔在 3 500 ~ 5 000 m 之间各消融期河水水化学类型的变化发现, 不管是哪个区域, 消融末期的水化学类型是相同的, 这就表明水化学类型在消融期不存在海拔效应, 也就是说消融末期的河水水化学类型不随海拔梯度的变化而改变^[30-32]。

3 结论与展望

通过对长江源区大气降水、冻土层上水、冰雪融水和河水水化学特征的系统分析, 研究表明:

(1) 对于长江源区的大气降水而言, 影响研究区降水水化学特征的主要是来源于远程传输的海洋源和地壳源。长江源区的水汽来源存在明显的地域差异, 不同的站点的水汽路径往往随季节变化, 但研究区的水汽主要受西风环流和季风环流的控制。

(2) 冰雪融水的水化学主要受蒸发岩和碳酸盐岩等地壳源的影响。玉珠峰冰川融水的水化学主要受蒸发结晶作用控制, 冬克玛底冰川主要受岩石风化作用控制, 而由于各拉丹冬冰川所采集到的样品较少, 所以其分布不是很明显。

(3) 消融初期冻土层上水的离子浓度也存在明显的空间变化,随着消融的不断进行,离子浓度在强消融期和消融末期的空间变化更为稳定。海拔在 4 500 m 的地区是冻土层上水水化学特征对研究区离子控制源较为敏感的区域。与冰雪融水相同的是,冻土层上水的水化学也主要受蒸发岩和碳酸盐岩等地壳源的控制。

(4) 从河水离子浓度随海拔梯度的变化来看,海拔从 4 000 m 到 5 000 m 离子浓度呈上升趋势,而当海拔在 5 000 m 以上时河水的离子浓度呈下降趋势。这主要因为随着海拔高度的增加,降雨直接补给对河水中化学离子的稀释作用逐渐减弱,同时,海拔 4 500 m 至 5 000 m 范围内河水中离子浓度受降水稀释影响最大,而在海拔 5 000 m 以上河流主要受冰雪融水的补给,降水和消融期的变化对河水水化学的影响很小。河水中的阴阳离子可能主要受蒸发岩和碳酸盐岩等地壳源的控制,并且研究区河水的水化学主要受河水及其补给源与岩石之间的水岩交互作用影响。

多年冻土的退化通过改变土壤的水力传导性和水力连通性来影响地表水、土壤水和地下水之间的相互作用。青藏高原内部富冰多年冻土层自身的退化,对地表径流和热溶湖泊的发育有重要贡献^[35]。由于青藏高原多年冻土储水能力的下降,将导致旱季水资源有效性的降低,融水量增多可能导致洪水风险增加,并通过河流流量和地下水丰度的季节性变化降低生态系统的恢复力。所有这些变化都将影响青藏高原的水资源平衡和可持续发展,其中包括了亚洲主要河流的源头区域,包括黄河,长江,萨尔温江(中国怒江)、湄公河(中国澜沧江)、布拉马普特拉河(中国雅鲁藏布江)、恒河、印度河、伊犁河、塔里木河、额尔齐斯河和叶尼塞河,这些河流为约 20 亿人的生存提供淡水。因此,未来的研究应该更多地关注青藏高原多年冻土退化的环境效应,特别是降水-冻土层上水之间的机制,这将全面阐明非平衡和稳定状态的“亚洲水塔”对环境的影响提供依据。

参考文献(References):

- [1] Gu Hongbiao, Chi Baoming, Wang He, et al. Relationship between surface water and groundwater in the Liujiang Basin: hydrochemical constrains[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(8): 789-799. [谷洪彪, 迟宝明, 王贺, 等. 柳江盆地地表水与地下水转化关系的氢氧稳定同位素和水化学证据[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(8): 789-799.]
- [2] Kou Yongchao, Hua Kun, Li Zhou, et al. Major ionic features and their possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3142-3149. [寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2018, 39(7): 3142-3149.]
- [3] Gao Wende, Wang Yu, Li Zongxing, et al. Analysis of the characteristics of climate change of extreme precipitation in the alpine internal flow area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(6): 1693-1703. [高文德, 王昱, 李宗省, 等. 高寒内流区极端降水的气候变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(6): 1693-1703.]
- [4] Hu Didi, Kang Shichang, Xu Min. Climate change and its impact on runoff in Lena River Basin of Arctic from 1936 to 2017[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 216-223. [胡弟弟, 康世昌, 许民. 1936—2017年北极勒拿河流域气候变化及其对径流的影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 216-223.]
- [5] Wang Yuhang. Geochemistry evolution and water cycle patterns of groundwater in Golmud River Basin[D]. Xi'an: Changan University, 2014. [王宇航. 格尔木河流域地下水化学演化规律和水循环模式[D]. 西安: 长安大学, 2014.]
- [6] Jia Wenxiong, Li Zongxing. Hydrochemical characteristics and sources of ions in precipitation at the east Qilian mountains[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3322-3332. [贾文雄, 李宗省. 祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究[J]. *环境科学*, 2016, 37(9): 3322-3332.]
- [7] Li Fulin, Chen Huawei, Wang Kairan, et al. Comprehensive review of groundwater-dependent ecosystems[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(5): 750-758. [李福林, 陈华伟, 王开然, 等. 地下水支撑生态系统研究综述[J]. *水科学进展*, 2018, 29(5): 750-758.]
- [8] Cheng Guodong, Jin Huijun. Groundwater in the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau and it changes[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(1): 1-11. [程国栋, 金会军. 青藏高原多年冻土区地下水及其变化[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(1): 1-11.]
- [9] Li Zongjie, Li Zong-Xing, Song Ling-Ling, et al. Environment significance and hydrochemical characteristics of suprapermafrost water in the source region of the Yangtze River[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 1141-1151.
- [10] Li Zongjie, Ma Jinzhu, Yu Haichao, et al. Geochemical evidence of ions' sources and influences of meteorological factors on hydrochemistry of glacier snow meltwater in the source region of the Yangtze River[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(10): 1-14.
- [11] Mirzaei S, Hashemi H, Hoseini M. Concentration and potential source identification of trace elements in wet atmospheric precipitation of Shiraz, Iran [J]. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2018, 16(2): 229-237.
- [12] Nweze N, Eze E. Physico-chemical water quality characteristics of upper Ebonyi River, Enugu State, Nigeria[J]. *African Journal of Aquatic Science*, 2018, 43(4): 417-421.
- [13] Salaah S M, Khalil M T, Gad N S, et al. Physico-chemical characteristics and physiological changes in oreochromis niloticus from Rosetta branch of the river Nile[J]. *European Chemical Bulletin*, 2018, 7(2): 63.
- [14] Singh C K, Kumar A, Shashtri S, et al. Multivariate statistical analysis and geochemical modeling for geochemical assessment of groundwater of Delhi, India[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 175: 59-71.
- [15] Cao Deyun. Yangtze River source area water environment and

- hydrochemistry background characteristic [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. [曹德云. 长江源区水环境及水化学背景特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.]
- [16] Qian Kaizhu. Hydrological periods and its responses to climate change in the source region of Yangtze River, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. [钱开铸. 长江源区水文周期特征及其对气候变化的响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.]
- [17] Li Zongxing, Feng Qi, Liu Wei, et al. Study on the contribution of cryosphere to runoff in the cold alpine basin: A case study of Hulugou River Basin in the Qilian Mountains [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 122: 345-361.
- [18] Okay C, Akkoyunlu B O, Tayanç M. Composition of wet deposition in Kaynarca, Turkey [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 118(3): 401-410.
- [19] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [20] Keene W C, Pszeny A A P, Galloway J N, et al. Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1986, 91(D6): 6647.
- [21] Li Zongxing, Feng Qi, Liu Wei, et al. The stable isotope evolution in Shiyi glacier system during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China [J]. *Quaternary International*, 2015, 380/381: 262-271.
- [22] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(8): 1273-1285.
- [23] Hooper R P. Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(3): 1055.
- [24] Li Zongjie, Li Zongxing, Song Lingling, et al. Precipitation chemistry in the source region of the Yangtze River [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 245: 105073.
- [25] Wang Shaoyong, He Xiaobo, Wu Jinkui, et al. Chemical characteristics and ionic sources of precipitation in the source region of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4431-4439. [汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 等. 长江源区大气降水化学特征及离子来源[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4431-4439.]
- [26] Xue Wushen, Sun Bing, Liu Peiqing. Analysis of water quality in Changjiang River source area and its comparison with the water quality in Wuhan sector [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2005, 12(1): 17-20. [薛武申, 孙兵, 刘培青. 长江源区水质分析及与长江武汉段水质对比[J]. *安全与环境工程*, 2005, 12(1): 17-20.]
- [27] Li Xiangting, He Xiaobo, Kang Sshichang, et al. Diurnal dynamics of minor and trace elements in stream water draining Dongkemadi Glacier on the Tibetan Plateau and its environmental implications [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541: 1104-1118.
- [28] Song Lingling, Tian Qing, Li Zongjie, et al. Hydrochemical characteristics of melt-water in the Yuzhu Peak Glacier, Kunlun Mountains [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(8): 1864-1871. [宋玲玲, 田青, 李宗杰, 等. 昆仑山玉珠峰冰川冰雪融水水化学特征分析[J]. *环境化学*, 2019, 38(8): 1864-1871.]
- [29] Li Zongjie, Li Zongxing, Fan Xinjian, et al. The sources of supra-permafrost water and its hydrological effect based on stable isotopes in the third pole region [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 136911.
- [30] Li Zongjie, Li Zongxing, Song Lingling, et al. Response mode of hydrochemical types of river water to altitude gradient in alpine regions [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(35): 35767-35778.
- [31] Jiang Liguang, Yao Zhijun, Liu Zhaofei, et al. Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 155: 76-83.
- [32] Qu Bin, Sillanpää M, Zhang Yulan, et al. Water chemistry of the headwaters of the Yangtze River [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(8): 6443-6458.
- [33] Zhuo Haihua, Liu Yunbing, Zheng Hongyan, et al. Investigation and analysis on water environment of sources area of Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2012, 43(12): 23-26. [卓海华, 刘云兵, 郑红艳, 等. 长江源水环境调查分析[J]. *人民长江*, 2012, 43(12): 23-26.]
- [34] Ren Dongxing. Hydrologic cycle on the typical permafrost by using environmental isotope in the headwaters of the Yangtze River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. [任东兴. 基于环境同位素的长江源典型多年冻土小流域水循环规律研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.]
- [35] Li Zongxing, Feng Qi, Li Zongjie, et al. Climate background, fact and hydrological effect of multiphase water transformation in cold regions of the Western China: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 33-57.

Research progress of ecological hydrology based on hydrochemical characteristics in the source region of the Yangtze River

LI Zongjie¹, DUAN Ran¹, KE Haocheng¹, LIU Xiaoying¹, XIE Gengmiao¹,
GAO Wende^{1,2}, SONG Lingling³, ZHANG Baijuan², GUI Juan²,
XUE Jian², NAN Fusen², LIANG Pengfei², LI Yuchen²

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin/Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Under the climate warming, the severe melting of glacier, snow and frozen soil, which have resulted in the evolution of runoff and the generation of water cycle mechanism in the cold watershed. By summarizing the research on the water chemistry characteristics of various water bodies in the source area of the Yangtze River. Research progress of ecological hydrology based on hydrochemical characteristics in the source region of the Yangtze River mainly includes: (1) The water vapor source of precipitation is mainly controlled by westerly circulation and monsoon circulation in the source region of the Yangtze River. (2) The hydrochemical characteristics of glacier snowmelt water is affected by the intensity, duration and fresh snow melt water of melting water. At the same time, there may be hydrochemical exchange among ice snow melt water, snow cover and glacier meltwater. (3) Supra-permafrost water is supplied by precipitation, glacier snowmelt water, and ground ice meltwater, which causes random fluctuation of hydrochemical characteristics. The area with an altitude of 4500 m is sensitive to the ion control source in the study area. (4) With the increase of altitude, the dilution effect of rainfall direct recharge on chemical ions in river water gradually weakens. At the same time, precipitation from 4500 m to 5000 m has the greatest effect on ion concentration in river water, while rivers above 5000 m are mainly supplied by glacier snowmelt water, and the changes of precipitation and ablation period have little impact on hydrochemical characteristics of river water. The research results can provide scientific basis for more systematic understanding of the hydrological effect caused by the change of underlying surface in cold region and provide decision-making basis for rational development and utilization in the cold regions.

Key words: the source region of the Yangtze River; ecohydrology; hydrochemical characteristics

(责任编辑: 张强弓)