

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0052

LI Mingyue, SUN Xuejun, LI Shengnan, et al. Advances on inorganic hydrochemistry of glacial meltwater runoff in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):562–574. [李明月, 孙学军, 李胜楠, 等. 青藏高原及其周边地区冰川融水径流无机水化学特征研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):562–574.]

青藏高原及其周边地区冰川融水径流 无机水化学特征研究进展

李明月^{1,2}, 孙学军^{1,2}, 李胜楠^{1,2}, 张强弓^{1,3}

(1. 中国科学院 青藏高原研究所 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要: 冰川融水径流是冰川流域物质运移的重要通道, 对其水化学特征和变化的研究有助于揭示冰川作用区物质的生物地球化学循环过程, 并为认识和评价冰川消融对自然环境和人类生活的影响提供基础。青藏高原及其周边地区分布着除两极以外最大储量的冰川, 近年来在气候变暖背景下冰川加速退缩消融。该地区冰川融水径流中各类化学组分的变化及其气候环境效应研究逐渐成为热点。因此, 通过概述青藏高原冰川融水径流中无机化学组分的含量和时空变化特征, 并总结离子和元素的主要来源及常用的物源追踪手段, 进一步综合分析得到: 冰川融水径流中离子和微量元素的含量及变化特征受冰川消融、基岩性质、径流水文特征和其他水体物理化学过程等因子和过程的共同影响。在总结该研究领域现存问题的基础上进行了展望, 认为应加强观测和基础数据积累, 厘清无机水化学组分的输移规律, 深入揭示影响水化学组分变化的多因素的协同拮抗作用机制, 评价冰川融水径流水化学的气候环境效应, 为应对青藏高原冰川消融带来的环境变化提供科学指导。

关键词: 青藏高原; 冰川融水径流; 无机水化学; 时空特征; 来源

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0562-13

0 引言

近几十年来, 气候变暖下全球冰川消融速率的加快^[1-3], 极大影响了物质的输送过程及通量, 进而对全球尺度的生物地球化学循环产生重要影响^[4]。冰川融水径流水化学特征能够有效反映冰川作用区的风化速率和生物地球化学循环等变化^[5-6], 因此对冰川融水径流水化学的研究显得尤为重要。

联合国气候变化专门委员会(IPCC)于2019年发布的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》指出^[7], 过去几十年全球山地冰冻圈发生了大范围显著退缩, 改变了下游可用水量 and 水质, 对山区和周边自然环境和人类社会产生了广泛而深远的影响^[8]。冰川融水径流的水化学特征变化及其生态环

境效应, 是高山冰冻圈变化影响的重要体现和研究范畴。早在20世纪70年代, 国际上已经有冰川水化学的研究, 以定性及半定量描述为主^[9-11]。Hasnain等^[12]发现, Chhota Shigri冰川融水的离子浓度从冰川表面到径流的明显升高, 且浓度与径流量相关。20世纪90年代, 水化学研究逐渐向定量研究转变, 各种数学方法和统计模型的应用, 使得冰川融水径流无机水化学的研究技术发展迅速。Brown等^[5]系统综述了冰川融水化学研究, 从地球化学角度重点归纳了冰下融水侵蚀和冰川流域化学风化等方面研究取得的认识。近年来, 冰川流域水化学研究在阐明径流溶解物质的组分和来源等方面已经取得较大进展^[13-14], 同时, 冰川融水释放

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2020-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671074); 第二次青藏高原综合科学考察研究专项项目(2019QZKK0605)资助

作者简介: 李明月(1996-), 女, 河南洛阳人, 2018年在东北大学获学士学位, 现为中国科学院青藏高原研究所读硕士研究生, 从事冰冻圈环境地球化学研究. E-mail: limingyue@itpcas.ac.cn

通信作者: 张强弓, 研究员, 从事青藏高原冰冻圈化学与环境研究. E-mail: qianggong.zhang@itpcas.ac.cn.

有毒物质和营养盐类的生态环境效应逐渐受到关注^[15-17]。青藏高原及周边地区冰川融水径流水化学的相关研究开展较早,如20世纪80年代,我国学者就有对长江源区和横断山脉等地冰川融水化学的系统考察^[18-19],为评价该地区水资源和气候环境提供了依据。水体无机化学组分的采样和测试分析技术已较为成熟,广泛应用于探究冰川水文过程和水质变化,也可为研究冰川融水的其他化学组分如有毒污染物的环境效应等研究提供参考^[20-21]。

青藏高原及其周边地区,即第三极地区,被誉为“亚洲水塔”,分布着除南北极以外最大储量的冰川,向周边及下游地区提供了重要的水资源以及大量化学物质^[22]。青藏高原及周边冰川根据其物理性质被分为海洋型冰川、亚大陆型冰川和大陆型冰川,分别位于青藏高原东南部、青藏高原东北部、南部及天山地区和高原西部,各占中国冰川面积的22%、46%和32%^[23]。不同类型冰川的地质特征和自然地理条件差异巨大,其融水径流的水化学特征有很大差异。受气温和降水等的影响,近年来,青藏高原及其周边冰川整体退缩并呈加速态势^[20],促进了径流量的增加,进而影响水化学和元素生物地球化学循环^[24]。冰川融水径流水化学研究能为揭示冰川作用下物质的生物化学循环过程,评估冰川补给下游生态环境风险提供依据^[5,25],是理解和应对青藏高原冰川变化环境影响的基础。因此本文总结了青藏高原地区现有数据报道的不同类型冰川如海螺沟冰川(海洋型冰川)、枪勇冰川(亚大陆型冰川)和老虎沟12号冰川(极大陆型冰川)融水径流的研究结果,概括了融水径流中无机化学成分、典型组分的时空变化特征和

来源以及影响无机水化学特征变化的主要因素,最后探讨了冰川消融加剧的背景下冰川融水径流无机水化学的研究发展趋势,为在青藏高原地区深入研究冰川融水径流中无机水化学变化及其气候环境意义提供参考信息。

1 冰川融水径流中的无机化学成分及其含量特征

青藏高原及其周边地区冰川融水径流的无机水化学特征已有较为系统的研究,其中水体的基本理化参数pH值是影响元素迁移和沉积的重要环境影响因子之一,电导率(EC)和总溶解固体物质(TDS)反映了水体的离子浓度;氢氧同位素分馏特征是研究区域水循环过程、圈定水源地的重要方法和探究冰川消融速率的有力指标^[26-28];可溶性离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 等能够反映冰川消融对流域物质风化类型和循环过程的影响,有助于探究冰川消融对全球碳循环的贡献^[29];微量元素如Al、Ti、Cu、Pb、Zn、Hg及部分元素同位素等则主要用于水体环境评价及物源解析等^[30]。

1.1 水体基本理化参数特征

青藏高原及周边地区冰川融水径流的pH均值为7.39~9.10(表1),整体呈弱碱性,且一般高于雪冰和冰面河的pH值^[31-32]。这是由于融水与基岩中的碳酸盐岩相互作用,消耗了 H^+ 离子^[33]。EC的变化范围为16.02~153.83 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,远低于青藏高原自然水体均值(450.34 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)。这种现象在冰川作用区较为普遍,主要与径流的流量和流速有关,流量大而流速快时水岩作用时间短,导致径流中溶解性物质较少^[21,34-35]。

表1 青藏高原地区冰川融水径流一般理化性质

Table 1 A summary of pH, electric conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) of some glacial meltwater runoffs on the Qinghai-Tibet Plateau

| 冰川名称 | pH | EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | TDS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | 采样日期 | 文献来源 |
|------------|------|---|---------------------------------------|-------------|------|
| 乌鲁木齐河源1号冰川 | 8.11 | 81.40 | 48.30 | 5月31日-9月30日 | [36] |
| 海螺沟冰川 | 8.15 | 95.40 | 48.30 | 4月8日-11月24日 | [37] |
| 卡尔塔马克冰川 | 9.10 | 64.00 | 32.00 | 7-8月 | [38] |
| 科其喀尔冰川 | 8.53 | 138.90 | 69.00 | 6-9月 | [39] |
| 七一冰川 | 8.10 | 61.60 | 45.33 | 6-9月 | [40] |
| 枪勇冰川 | 8.71 | 153.83 | 121.00 | 7-8月 | [41] |
| 冬克玛底冰川 | 8.15 | 62.67 | | 5-11月 | [42] |
| 老虎沟12号冰川 | 7.39 | 135.00 | 61.40 | 6-9月 | [34] |
| 白水1号冰川 | 8.21 | 16.02 | | 8月29日-9月3日 | [33] |
| 青藏高原自然水体 | 7.54 | 450.34 | 225.54 | 8月 | [43] |

1.2 可溶性离子

目前,关于青藏高原及周边地区冰川融水径流中离子的研究较为广泛^[4,37]。冰川融水径流化学类型以 HCO_3^- - Ca^{2+} - SO_4^{2-} 型为主(图1), HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 为优势离子,均值分别为 42.89、14.85 和 14.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,占离子总量的 73%~97%。阳离子浓度排序多表现为 $\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^+$ 。 Ca^{2+} 含量最高主要是由于青藏高原冰川作用区以碳酸盐岩风化为主^[4],冰川作用区化学风化作用较弱且硅酸岩相对较难风化,因此即使以硅酸岩为主要岩石基底的冰川区,碳酸盐岩的风化仍然占优势作用^[37]。阴离子含量顺序一般为 $\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}>\text{Cl}^->\text{NO}_3^-$,大部分地区冰川融水径流中 HCO_3^- 含量高于 SO_4^{2-} ,这是由于 HCO_3^- 主要来自方解石等的风化,相比以黄铁矿为主要来源的 SO_4^{2-} 更为普遍^[37],枪勇冰川中 SO_4^{2-} 浓度较高除了来自黄铁矿等硫化物的氧化外还可能与该区域广泛分布的蒸发岩有关^[36,41]。

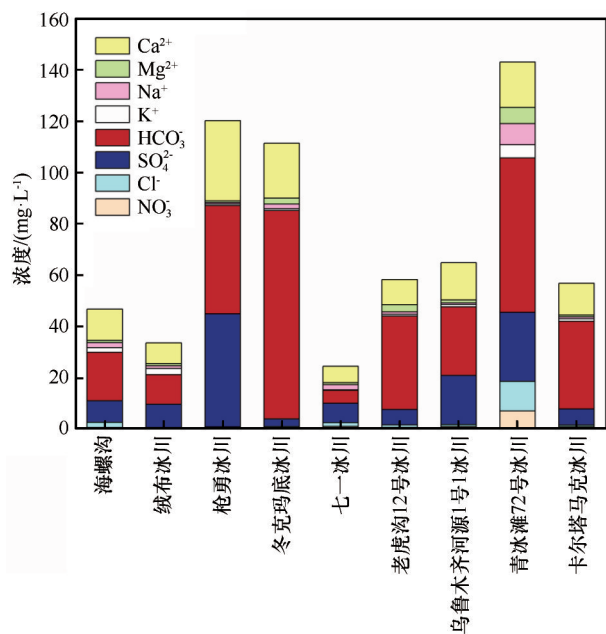


图1 青藏高原地区冰川融水径流可溶性离子浓度(数据分别引自:海螺沟冰川^[37]、绒布冰川^[44]、枪勇冰川^[41]、冬克玛底冰川^[42]、七一冰川^[45]、老虎沟12号冰川^[34]、乌鲁木齐河源1号冰川^[46]、青冰滩72号冰川^[47]、卡尔塔马克冰川^[38])

Fig. 1 Some soluble ion concentrations in glacial meltwater in the Qinghai-Tibet Plateau, quoted from: Hailuoguo Glacier^[37], Rongbuk Glacier^[44], Qiangyong Glacier^[41], Dongkemadi Glacier^[42], Qiyi Glacier^[45], Laohugou Glacier No. 12^[34], Urumqi Glacier No. 1^[46], Qingbingtan Glacier No. 72^[47], Karmatake Glacier^[38], respectively

1.3 微量元素

青藏高原地区冰川及其补给湖泊水体的微量元素已有相关报道^[30-31,48],而冰川融水径流相关研究仍较为匮乏^[49-50]。冰川融水径流中浓度较高的微量元素有 Fe、Sr、Al、Ba 等(图2),在 3.78~84.70 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,均值分别为 28.75、54.52、9.87、17.02 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。大部分微量元素容易吸附在悬浮物表面,或者通过共沉淀的方式被清除^[51-52],溶解态的含量极低($<1\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。除 Sr、Ba、Rb 和 Pb 外,微量元素均低于其他高山地区,如瑞士的 Hant 冰川融水径流^[51]和加拿大 Sutri Dhaka 冰川冰面河^[53]。需要指出的是,虽然冰川融水径流中微量元素含量很低,但是一些元素如 Al、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 等主要是以配体形式吸附在黏土颗粒表面,这些元素会随水体物理化学条件的改变被解吸附而重新进入水体,造成溶解态元素含量的升高^[42]。

2 无机化学成分时空分布特征

2.1 空间分布特征

青藏高原地区冰川分布范围广阔,根据其物理性质,大致分为海洋型冰川,大陆型冰川和极大大陆型冰川。不同类型冰川所处区域的气候和地质特征差异很大,因此融水径流中离子和元素特征存在一定差异。如 Li 等^[36]发现,大陆型冰川乌鲁木齐河源一号冰川中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 及 SO_4^{2-} 的含量明显高于海螺沟冰川、喜马拉雅山的 Gangotri 冰川、Chhota Shigri 冰川以及瑞士的 Haut 冰川等海洋型冰川,这是受海洋型冰川降雨量充足且年平均径流量高导致的稀释作用的影响。本文综合前人研究数据,比较了不同地区冰川融水径流离子浓度(图3),发现青冰滩72号冰川、枪勇冰川、冬克玛底冰川、乌鲁木齐河源1号冰川、老虎沟12号冰川、卡尔塔马克冰川等融水径流离子总浓度分别为 143.25、120.28、111.46、64.90、58.24 和 56.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于海洋型冰川海螺沟冰川(46.73 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),与 Li 等^[36]的研究相符,但大陆型冰川绒布冰川离子总浓度为 22.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,低于海洋型冰川海螺沟冰川,且海螺沟冰川融水径流中 Ca^{2+} 及 HCO_3^- 离子高于大陆型冰川如祁连山的七一冰川、老虎沟12号冰川。这表明由于地理气候的差异,冰川融水径流离子浓度表现为大陆型冰川高于海洋型冰川,但还可能与岩性特征、冰川规模和径流量、采样位置和时间以及采样方式等多方面因素有关^[19]。

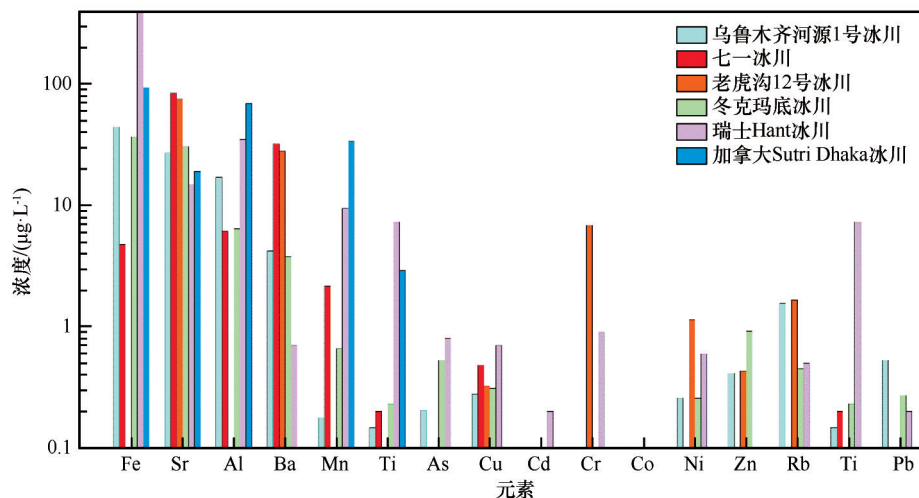


图2 冰川融水径流中微量元素浓度(数据分别引自:乌鲁木齐河源1号冰川^[36]、七一冰川^[54]、老虎沟12号冰川^[55]、冬克玛底冰川^[42]、瑞士Hant冰川^[51]、加拿大Sutri Dhaka冰川^[52])

Fig. 2 Trace element concentrations in glacier meltwater, quoted from: Urumqi Glacier No. 1^[36], Qiye Glacier^[54], Laohugou Glacier No. 12^[55], Dongkemadi Glacier^[42], Hant Glacier^[51], Sutri Dhaka Glacier^[52], respectively

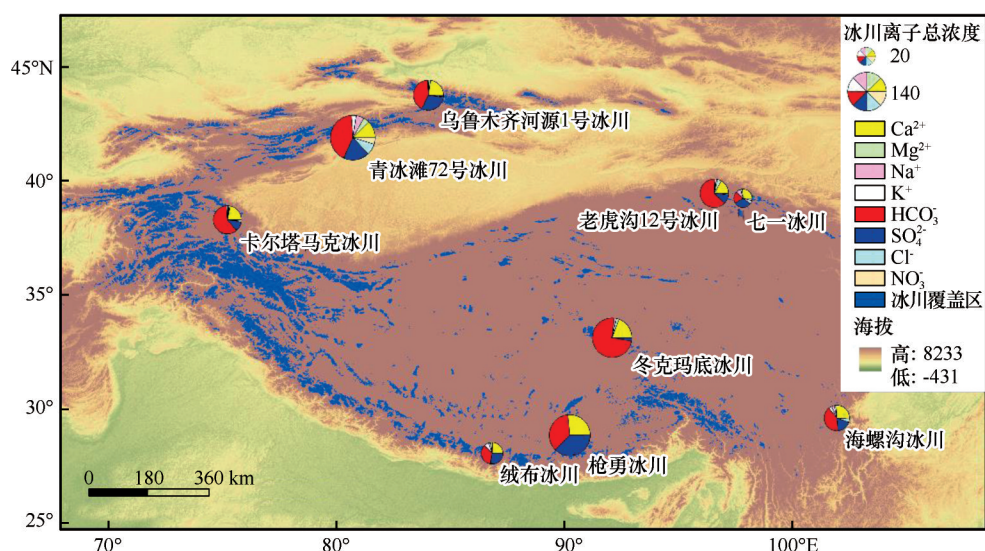


图3 青藏高原不同地区冰川融水径流中阴阳离子浓度分布

Fig. 3 Map showing the spatial distribution of ion concentration in glacier meltwater in various areas on the Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原冰川融水径流中微量元素的研究数据较少, 仅在乌鲁木齐河源1号冰川、老虎沟12号冰川、七一冰川和冬克玛底冰川等有数据报道, 还难以对融水径流微量元素的空间特征给出综合分析的空间分布图。对雪冰的研究显示, 青藏高原北部大陆型冰川的雪冰中微量元素含量一般高于南部的海洋型冰川^[56-57]。大部分地区雪冰融化对径流有很高的补给量, 如对白水1号冰川、玉珠峰冰川、青冰滩72号冰川的径流分割研究指出冰川融水对径流的补给量分别为53.4%、74.8%和56.64%^[58-60]。因此雪冰中储存的大气沉降物质的释放可能对融水径流中的微量元素浓度产生影响。

有研究表明, 雪冰融化初期所释放的物质占消融期总释放量的50%~80%^[10], 因此融水径流中微量元素浓度可能在春季消融初期有一定规律, 之后是否与雪冰中微量元素类似, 大陆型冰川高于海洋型冰川, 则需要充足的数据进行探讨。

2.2 时间变化特征

气候季节性变化导致的冰川消融速率的改变、高山区降雨形态转变等因素的共同作用使得冰川径流中无机化学物质呈现明显的季节变化和日变化特征^[35]。

2.2.1 季节变化特征

青藏高原冰川融水径流中离子和微量元素浓

度随冰川消融强度变化,离子及元素浓度一般消融末期高于消融期,而物质的运输通量与径流量成正比,消融期最高。雪冰融化初期,存在“离子脉冲”现象^[61],部分地区观测到融水径流中的无机化学物质会出现浓度的极高值。如乌鲁木齐河源1号冰川融水径流于5月1日出现阳离子浓度的最高值^[35, 62]。消融期无机化学物质随径流的稀释作用浓度逐渐降低,消融末期水流速度变缓,而径流量相比消融初期大,因此更多的可溶性物质融入水中使得离子及微量元素的浓度逐渐升高。如研究表明玉珠峰冰川、乌鲁木齐河源一号冰川融水中离子在6、7、8月消融期的浓度均值逐渐减少,而在9月份消融末期达到最大值^[35, 63]。需要注意的是,一些微量元素如Al、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb等不随径流量的变化而变化。如天山乌鲁木齐河源一号冰川径流的离子和Li、B、Ti和Sr等微量元素浓度在6-8月呈下降趋势,之后逐渐上升,与径流量呈反比关系。但Al、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb等元素没有明显的变化特征,可能受微量元素与悬浮颗粒物的吸附解吸等物理化学过程控制^[36]。

2.2.2 日变化特征

青藏高原气温日变化显著,冰川消融强度和径流水文特征也随之变化,导致融水径流无机水化学特征也呈现明显日变化规律。一般在15:00-17:00(北京时间,下同)径流量最大时浓度最低,与季节变化特征的控制机理类似,径流量变大、流速加快时水岩作用时间变短,融水稀释作用加剧,导致径流无机水化学的变化。冬克玛底冰川融水径流的观测表明,可溶性离子及Li、Sr、Ba等主要以离子形态传输的元素,从12:00-19:00呈减小趋势,随后逐渐增加,与径流量呈相反关系。李向应等^[50]对七一冰川融水径流分析显示,离子和大部分元素浓度与径流量呈负相关关系。白水1号冰川消融期径流pH值和融水中无机离子的总含量随气温变化导致的消融速率变化有明显的周期性,但不同可溶性离子对消融速率变化的响应幅度不一致,Ca²⁺、Mg²⁺和HCO₃⁻的响应最为显著^[33]。

总的来说,青藏高原冰川融水径流中无机化学物质浓度有着一定的时空差异。空间分布上来看,不同气候区降雨量和径流量等不同,导致大陆型冰川的离子浓度高于海洋型冰川海螺沟冰川,但受区域岩性、冰川规模、采样位置和时间以及采样方式等多方面因素的影响,分布规律可能不同。融水径

流微量元素研究较少,在雪冰融化初期,受冰川消融补给的影响,微量元素可能与雪冰类似,呈现大陆型冰川高于海洋型冰川的特点,但整体上由于数据的缺乏并不能得出完善的空间分布概况。季节变化特征显示青藏高原地区冰川融水中HCO₃⁻、Ca²⁺和SO₄²⁻等主要离子和Li、B、Ti和Sr等以离子态传输的微量元素与径流量的季节变化呈正比,主要与气温变化导致的消融强度的差异有关。离子和微量元素的日变化与季节变化特征的控制机理类似,受日气温变化导致的径流量变化影响。

3 无机成分来源及判别方法

3.1 离子

通常而言,可通过Gibbs图、Piper三线图和端元图等定性分析及质量平衡法和同位素示踪等定量分析方法的综合运用分析探讨冰川融水径流中可溶性离子的来源。

3.1.1 定性分析

常用的定性分析方法有Gibbs图、Piper三线图和端元图等。Gibbs依据水体的矿化度和特征离子的比例关系将全球地表自然水体中可溶性离子分为蒸发结晶、岩石风化和大气降水三类来源^[9];Piper三线图根据溶质中阴阳离子的相对关系来反映不同风化源区的物质特征^[64];端元图则是通过碳酸盐岩、硅酸岩和蒸发岩风化产物浓度之间的关系探究径流中溶质的主要风化来源^[65]。这些定性分析方法在我国冰川融水径流水化学的研究中应用普遍^[46, 66]。如对海螺沟12号冰川、达古冰川融水径流中可溶性离子进行Gibbs投图,发现岩石风化对融水径流中离子起主控作用^[31, 37]。卡尔塔马克冰川^[38]和科其喀尔冰川^[32]融水径流中可溶性离子的Piper三元图显示,HCO₃⁻和碱土金属占优势,说明离子主要为碳酸盐岩风化源;海螺沟冰川、玉珠峰冰川融水径流研究发现,离子主要落在Ca²⁺/Na⁺-Mg²⁺/Na⁺端元图的碳酸盐端^[37],说明融水径流中离子主要来源于碳酸盐岩的风化。

综合青藏高原地区冰川融水径流的现有研究报道数据分析发现,几乎所有可溶性离子数据都落在阳离子Gibbs图(图4)顶角处,从图4中点的分布可以看出,不同冰川点的分布较为集中,TDS变化范围较大,为32~112 mg·L⁻¹,Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)为0.01~0.70 mg·L⁻¹。融水径流的离子主要受岩石风化的控制,与印度喜马拉雅、欧洲阿尔卑斯等其

他山地冰川的研究结果相似^[67-68]。Piper图(图5)显示大部分径流的阳离子在 Ca^{2+} 端元, 阴离子主要在 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 端元, 水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 型; $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 端元图(图6)中, 青藏高原大部分冰川可溶性离子数据靠近碳酸盐端, 也有少部分靠近硅酸盐端, 这表明碳酸盐岩风化对冰川融水径流中离子组分及分布起主导作用, 硅酸盐也有一定的影响。总的来说, 自然风化产物是青藏高原冰川融水径流可溶性离子的主要来源, 其中碳酸盐岩的风化占主导地位。

3.1.2 定量分析

离子来源的定量分析方法主要有质量平衡法和同位素追踪法。质量平衡法依据径流中的溶解物质与循环源、蒸发岩源、碳酸岩源、硅酸岩源和人类活动源的总溶质量平衡的原理进行计算^[69]; 同位素追踪则主要利用氢氧同位素、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值等计算径流中离子各种来源的比例。质量平衡和同位素追踪等定量分析方法在河流化学的研究中应用广泛^[65]。如赵继昌等^[70]利用Sr同位素及质量平衡方程对长江源头河流的研究表明, 蒸发岩源为长江源区楚马尔河、北麓河和勒玛曲中离子主要来源, 贡献了 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等阳离子及阴离子 Cl^-

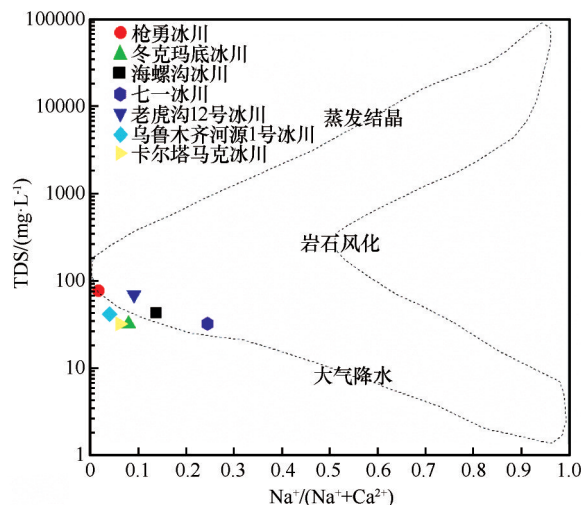


图4 青藏高原冰川融水径流主要可溶离子Gibbs图

Fig. 4 Gibbs diagram of meltwater from glaciers on the Qinghai-Tibet Plateau

含量的70%~98%。目前, 对青藏高原冰川融水径流中可溶性离子来源的定量分析研究仍较为匮乏。

3.2 微量元素

冰川融水径流中微量元素的来源主要通过各种定性统计分析方法结合研究区的地质地理背景和环境特征开展探讨, 定量统计分析方法的应用较为少见。

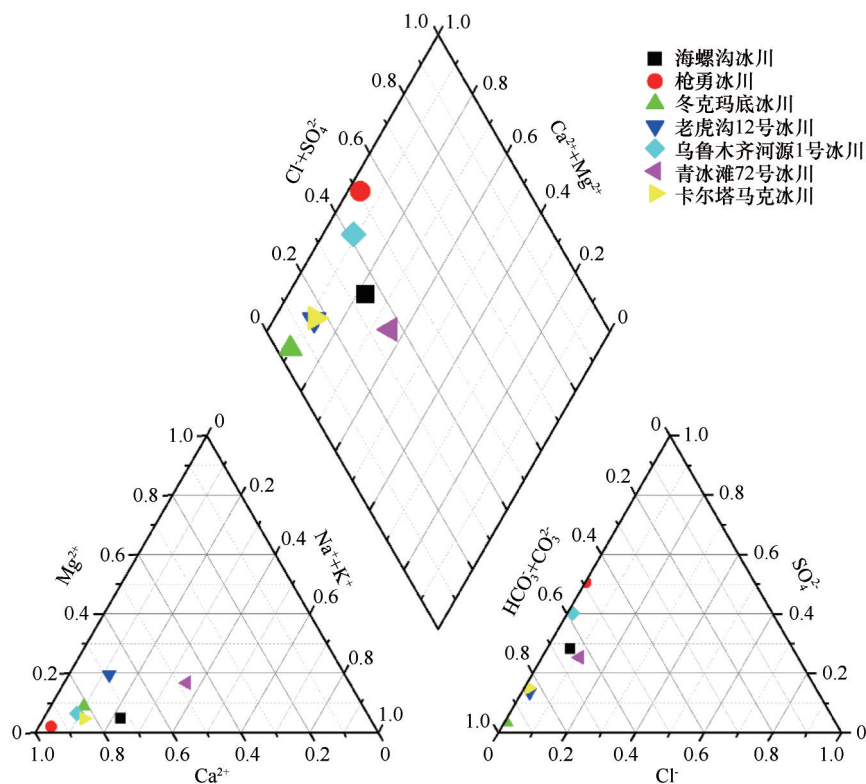


图5 青藏高原冰川融水径流主要可溶离子Piper图

Fig. 5 Piper diagrams of meltwater from glaciers on the Qinghai-Tibet Plateau

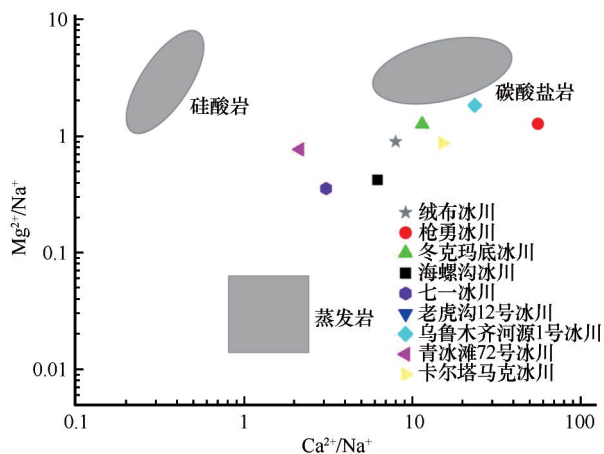


图6 青藏高原冰川融水径流 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ - $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 端元图

Fig. 6 Variation in $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ versus $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ in glacial meltwater on the Qinghai-Tibet Plateau

3.2.1 定性分析

冰川无机水化学研究中微量元素物源追踪的定性分析方法主要有污染评价法和多元统计分析法(如相关性分析、聚类分析和主成分分析等),二者被广泛应用于青藏高原地区河流微量元素的物源分析^[51,71]。前者主要通过计算微量元素的富集系数(EF),探究人为源对径流中微量元素的影响。例如,Dong等^[55]研究发现老虎沟12号冰川融水径流中Ni、Zn、Mo、Cd、Sb和Pb等具有较高的EF值,可能与冰川消融释放降水带来的大气污染物有关;后者的研究案例如Wei等^[72]结合因子分析、相关性分析等方法,发现黑河流域河源区的微量元素主要来自于岩石风化,然而人类活动已经对其造成了一定的影响;Li等^[42]发现冬克玛底冰川融水径流中大部分微量元素与Al在一个主成分上,表明基岩风化产物是这些微量元素的主要来源。

3.2.2 定量分析

Al、Ti等元素在自然作用过程中很难与其他物质发生物理化学反应,基本不受人为活动的影响,能够作为地壳来源的代表,因此可利用这些元素作为自然源的指标来估算自然风化产物和人类排放物质对融水中元素含量的相对贡献比例^[73-74]。计算公式为:

$$M_N = I_S + (M/I)_B \quad (1)$$

$$M_A = M_S - M_N \quad (2)$$

$$M_A(\%) = 100\% \times M_A / M_S \quad (3)$$

式中: M_S 、 M_N 、 M_A 分别为元素M在样品中的浓度、自然风化和人为排放贡献的浓度, I_S 为样品中地质指标元素I的浓度, $(M/I)_B$ 为元素M与I的自然背景

值之比。Al和Ti作为地质指标元素的地球化学指标法在青藏高原冰川作用区应用广泛^[73,75]。如Li等^[73]利用地球化学指标法对青藏高原东部贡嘎山的土壤中微量元素研究显示,有机层和母质层分别有63.7%和44.9%的Pb来自人为排放。地球化学指标法应用于青藏高原湖泊沉积物的研究也有报道,如Bing等^[74]用该模型对青藏高原草海子湖沉积物中重金属的研究发现,自20世纪90年代中期,沉积物中80%的重金属来自于人类活动的排放。然而由于区域背景值的不确定性,在水体微量元素的研究中计算结果的精度可能会受到影响^[76],因此微量元素的定量物源分析方法尚未在径流水化学分析中得到广泛应用。

追踪冰川融水径流中离子和微量元素的来源,能够了解该地区的风化类型和强度、地球化学循环过程,并能通过监测径流中化学物质来源的变化来探究气候变化的重要信息。对青藏高原冰川融水径流无机水化学特征的研究发现,碳酸盐岩的风化产物是该地区冰川融水径流可溶性离子的主要来源,径流中微量元素主要来自基岩的风化产物,但一些冰川融水径流可能受到人类活动和冰川消融释放的影响。离子和元素来源的定量分析方法如同位素追踪和地球化学指标法等目前主要运用在探究青藏高原地区的河流和湖泊水体中不同物质来源的占比,但并未被广泛应用于冰川融水径流的水化学分析。

4 冰川融水径流无机水化学变化的影响因素

在前文对青藏高原冰川融水径流中无机化学物质的含量、空间分布和时空变化特征综述分析的基础上,总结了影响冰川融水径流无机水化学变化的主要因素,包括冰川消融,流域基岩特征,径流水文特征,水体物理化学过程等。各因素对冰川融水径流无机水化学特征的影响机制如图7归纳所示。

冰川消融可通过冰下基岩侵蚀和直接释放影响径流中化学物质的组成和含量^[77-78]。如王建等^[39]发现科其喀尔冰川融水径流对冰下基岩和冰碛物的侵蚀作用使得控制断面径流中离子浓度远高于大气降水。李翠林等^[62]指出消融初期积雪储存物质的瞬时释放导致乌鲁木齐河源径流于5月1日出现离子浓度的峰值。

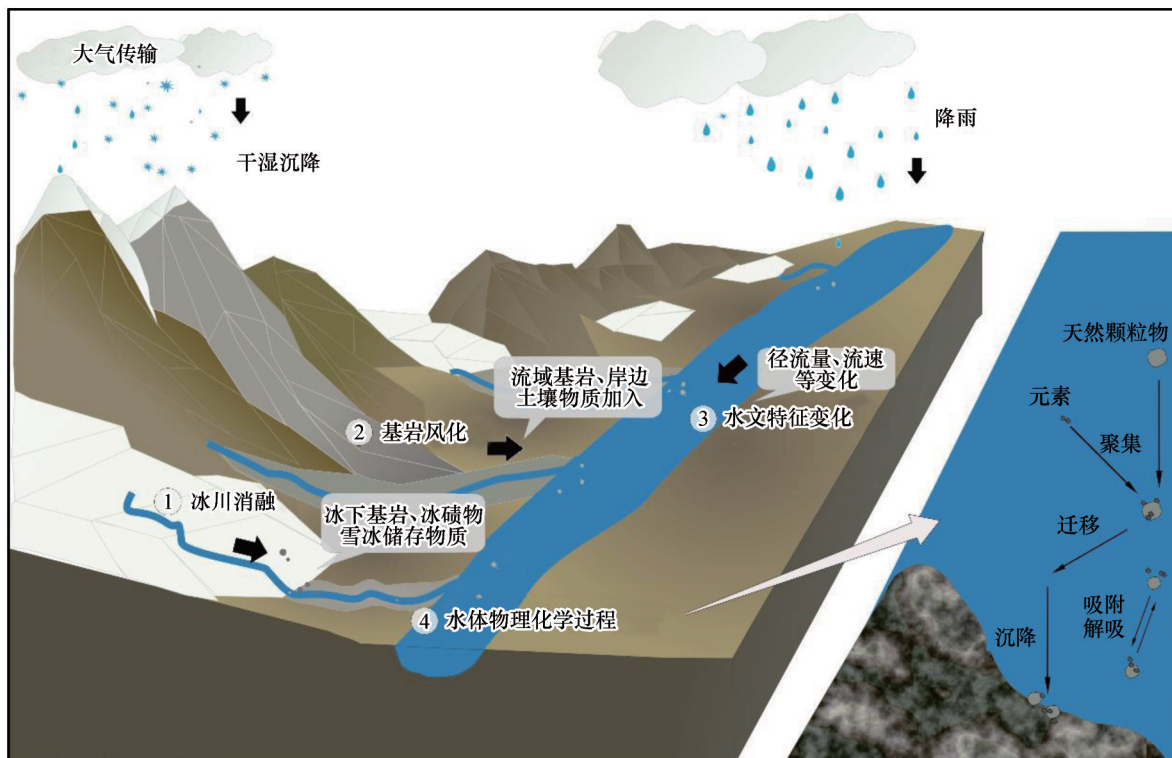


图7 冰川融水径流中无机化学物质变化的主要影响因素和机制示意图

Fig. 7 Schematic diagram of main influencing factors and mechanism of inorganic chemical changes in glacial meltwater

流域基岩成分是决定径流中无机化学组分组成和分布的主控因素。冰川融水径流对冰下沉积环境和河床的冲刷剥蚀贡献了主要的化学物质^[71,79]。如 Carling 等^[80]在喜马拉雅中部冰川沿径流向下游采样,发现大部分离子和微量元素随海拔降低而浓度逐渐升高,且与 Sc(纯粹地质来源)之间有明显的相关性,显示了河床物质的加入对径流中物质浓度的重要影响。Sun 等^[81]发现枪勇冰川融水径流中汞与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等主要来源于地壳中的离子有很强相关性,表明地壳物质的输入是径流中 Hg 的主要来源。

径流水文特征是影响径流中无机化学组分含量和变化的重要调控因子。例如径流量大小影响稀释作用,流速差异影响水岩作用时间,这些水文特征的变化对径流中无机化学物质的含量和时空变化产生重要影响^[54]。如闫崇宇等^[38]研究发现,卡尔塔马克冰川补给径流与周边非冰川补给径流相比,离子浓度前者明显偏低,这是由于非冰川补给径流流速慢,水岩作用时间更长,可溶盐能够充分溶解。在科其喀尔冰川开展的研究则发现受稀释作用的影响,消融初期及消融末期径流中可溶性离子及其他元素的浓度明显高于消融盛期^[32,39-40]。

Fortner 等^[53]在冬克玛底冰川的研究发现,由于融水稀释作用、降雨及流速的改变等的影响,离子浓度与径流量之间有着显著的负相关关系。

水体的物理化学过程会影响径流中部分化学组分的形态分布,进而影响化学物质的含量和输送过程^[51]。不同微量元素由于物理化学性质的不同,在水体中的存在状态有很大差异。一些微量元素向下运移过程中,容易被黏土矿物等比表面积大、疏松多孔的物质所吸附,进而沉淀,或者与悬浮物发生物理化学反应,从而影响元素在径流中的含量和分布。如王立伦等^[19]研究了横断山脉多个冰川融水径流,发现吸附和共沉淀等物理化学过程导致径流中微量元素浓度小于冰川冰和大气降水中微量元素浓度。

5 现存问题与展望

基于对青藏高原冰川融水径流无机水化学的组分含量、时空变化和影响因素等研究的系统回顾总结,提出该研究方向现存的问题并对未来研究需求进行展望。

(1) 冰川融水径流无机水化学的基础数据不足。冰川融水径流的无机水化学特征相关研究仅

仅集中在少数冰川,高原中西部和雅鲁藏布江流域中上游等地区仍缺乏观测和数据报道;冰川融水径流中对环境指示意义明确和环境效应突出的微量元素的研究较为缺乏^[42,54]。未来应拓宽研究的空间尺度,并加强水化学多参数测试分析,为全面揭示无机化学组分的时空格局提供数据基础。

(2)无机水化学组分的输移规律不清。一些用于源解析的定量分析方法(如同位素追踪等)未系统广泛应用,对化学组分输送通量估算的准确性有待提高。青藏高原冰川融水径流的采样观测频次和持续性较差,研究结果可能受各种偶然因素影响,导致对其水化学变化规律的揭示和说服力尚显不足^[82]。未来应加强定量分析方法的应用,提高采样频次并开展全年甚至多年长期连续观测,关注冰川消融初始阶段等关键期观测,详细刻画冰川融水径流中化学组分的变化和输移过程。

(3)影响无机水化学变化的作用机制不明。融水径流中化学物质受到多种因素的共同作用,多因素的耦合叠加对冰川融水径流中化学组分变化的影响机制尚不明确。未来可考虑在观测条件和基础较好的典型冰川流域开展综合观测和控制实验,探究影响冰川融水径流无机水化学的多因素的协同拮抗作用机制。

(4)冰川融水径流水化学的气候环境效应未知。目前对青藏高原冰川融水化学风化的碳消耗及其对气候变化的影响与反馈还缺乏系统研究,融水径流中的部分微量元素对下游居民和生态系统的环境健康风险也缺乏认识评价。未来应加强青藏高原冰川融水对区域碳循环影响的研究,开展冰川补给区生态环境风险评价,结合冰川融水径流化学组分输移规律和通量研究结果,评价其气候环境效应,科学指导应对青藏高原冰川变化的影响。

参考文献(References):

- [1] Huss M, Bookhagen B, Huggel C, et al. Toward mountains without permanent snow and ice [J]. *Earth's Future*, 2017, 5(5): 418–435.
- [2] Zemp M, Frey H, Gaertner-Roer I, et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century [J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(228): 745–762.
- [3] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 725–731.
- [4] Zhang Fan, Qaiser F U R, Zeng Chen, et al. Meltwater hydrochemistry at four glacial catchments in the headwater of Indus River [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(23): 23645–23660.
- [5] Brown G H. Glacier meltwater hydrochemistry [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(7): 855–883.
- [6] Anderson S P, Drever J I, Frost C D, et al. Chemical weathering in the foreland of a retreating glacier [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(7): 1173–1189.
- [7] IPCC. Summary for policymakers [M/OL]//IPCC. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. 2019 [2020-02-10]. <https://www.ipcc.ch/srocc>.
- [8] Kang Shichang, Guo Wanqin, Zhong Xinyue, et al. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(2): 143–152. [康世昌, 郭万钦, 钟歆玥, 等. 全球山地冰冻圈变化、影响与适应 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 143–152.]
- [9] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088–1090.
- [10] Johannessen M and Henriksen A. Chemistry of snow meltwater—Changes in concentration during melting [J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(4): 615–619.
- [11] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. *Transactions-American Geophysical Union*, 1944, 25: 914–923.
- [12] Hasnain S I, Subramanian V, Dhanpal K. Chemical characteristics and suspended sediment load of meltwaters from a Himalayan glacier in India [J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 106(1): 99–108.
- [13] Singh V B, Ramanathan A, Pottakkal J G, et al. Seasonal variation of the solute and suspended sediment load in Gangotri glacier meltwater, central Himalaya, India [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 224–234.
- [14] Yde J C, Riger-Kusk M, Christiansen H H, et al. Hydrochemical characteristics of bulk meltwater from an entire ablation season, Longyearbreen, Svalbard [J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 54(185): 259–272.
- [15] Bhatia M P, Kujawinski E B, Das S B, et al. Greenland meltwater as a significant and potentially bioavailable source of iron to the ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(4): 274–278.
- [16] Bogdal C, Schmid P, Zennegg M, et al. Blast from the past: melting glaciers as a relevant source for persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(21): 8173–8177.
- [17] Zhang Qianggong, Sun Xunjun, Sun Shiwei, et al. Understanding Mercury Cycling in Tibetan Glacierized Mountain Environment: Recent Progress and Remaining Gaps [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 102(5): 1–20.
- [18] Pu Jianchen, Wang Ping, Huang Cuilan. Chemical characteristics of glacier ice, snow and water in source area of Yangtze river [J]. *Environmental Science*, 1988, 9(4): 14–19. [蒲健辰, 王平, 皇翠兰. 长江江源地区冰川冰、雪、水的化学特征 [J]. *环境科学*, 1988, 9(4): 14–19.]
- [19] Wang Lilun, Wang Ping, Su Zhen, et al. Geochemical characteristics of glaciers in Hengduan mountain [J]. *Geographical Research*, 1989, 8(3): 66–77. [王立伦, 王平, 苏珍, 等. 横断山冰川地球化学特征 [J]. *地理研究*, 1989, 8(3): 66–77.]
- [20] Yao Tandong, Thompson L, Yang Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663–667.
- [21] Han Tianding, Li Xiangying, Gao Mingjie, et al. Electrical conductivity during the ablation process of the Glacier No. 1 at

- the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains [J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2015, 47(2): 327 – 334.
- [22] Kehrwald N M, Thompson L G, Yao T D, et al. Mass loss on Himalayan glacier endangers water resources [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(22): 6.
- [23] Wu Guangjian, Yao Tandong, Wang Weicai, et al. Glacial disasters in the Tibetan Plateau and surrounding areas [J]. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*, 2019: 1285 – 1292. [郭光剑, 姚檀栋, 王伟才, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. *中国科学院院刊*, 2019: 1285 – 1292.]
- [24] Sun Xuejun, Wang Kang, Guo Junming, et al. Mercury transport from glacier to runoff in typical glacial area in the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 482 – 489. [孙学军, 王康, 郭军明, 等. 青藏高原内陆典型冰川区“冰川 – 径流”汞传输过程[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 482 – 489.]
- [25] Hodson A J, Mumford P N, Kohler J, et al. The High Arctic glacial ecosystem: new insights from nutrient budgets [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 72(2): 233 – 256.
- [26] Pande K, Padia J T, Ramesh R, et al. Stable isotope systematics of surface water bodies in the Himalayan and Trans-Himalayan (Kashmir) region [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, 2000, 109(1): 109 – 115.
- [27] Zhang Baoxiang, Zhang Chao. Progress on Hydrogeochemical Method Applied in Groundwater Study [J]. *Yellow River*, 2019, 41(10): 135 – 142. [张保祥, 张超. 水文地球化学方法在地下水研究中的应用综述[J]. *人民黄河*, 2019, 41(10): 135 – 142.]
- [28] Yin Guan, Wang Xiaodan, Gao Zhiyou, et al. Study of the hydrology of glacial runoff in Hailuoguo Valley, Gongga Mountain by means of isotopic tracing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 365 – 372. [尹观, 王小丹, 高志友, 等. 贡嘎山海螺沟冰川径流水文规律的同位素示踪研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3): 365 – 372.]
- [29] Kumar N, Ramanathan A L, Tranter M, et al. Switch in chemical weathering caused by the mass balance variability in a Himalayan glacierized basin: a case of Chhota Shigri Glacier [J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2019, 64(2): 179 – 189.
- [30] Wei Ting, Dong Zhiwei, Kang Shichang, et al. Atmospheric deposition and contamination of trace elements in snowpacks of mountain glaciers in the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 754 – 764.
- [31] Zhao Guang, Li Wei, Li Feng, et al. Hydrochemistry of waters in snowpacks, lakes and streams of Mt. Dagu, eastern of Tibet Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 641 – 650.
- [32] Wang Jian, Ding Yongjian, Xu Junli, et al. Hydrochemical characteristic analysis of melting water flow in Keqikaer Glacier, Tianshan (West) Mountains [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7): 1305 – 1311. [王建, 丁永建, 许君利, 等. 西天山科其喀尔冰川消融径流的水化学分析[J]. *环境科学*, 2006, 27(7): 1305 – 1311.]
- [33] Zhu Guofeng, Pu Tao, He Yuanqing, et al. Chemical composition and daily variation of melt water during ablation season in monsoonal temperate glacier region: A case study of Baishui Glacier NO. 1 [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4300 – 4306. [朱国锋, 蒲焱, 何元庆, 等. 典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4300 – 4306.]
- [34] Wang Caixia, Zhang Jie, Dong Zhiwen, et al. Glacier meltwater runoff process analysis based on δD and $\delta^{18}O$ isotope and chemistry in the Laohugou glacier basin of the Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(05): 927 – 935. [王彩霞, 张杰, 董志文, 等. 基于氢氧同位素和水化学的祁连山老虎沟冰川区径流过程分析[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(5): 927 – 935.]
- [35] 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.]
- [36] Li Xiangying, Ding Yongjian, Han Tianding, et al. Seasonal controls of meltwater runoff chemistry and chemical weathering at Urumqi Glacier No. 1 in central Asia [J]. *Hydrological Processes*, 2019: 3258 – 3281.
- [37] Li Xiangying, Ding Yongjian, Liu Qiao, et al. Intense Chemical Weathering at Glacial Meltwater-Dominated Hailuoguo Basin in the Southeastern Tibetan Plateau [J]. *Water*, 2019, 11(6): 22.
- [38] Yan Chongyu, Zeng Chen, Shi Xiaonan, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of the glacierized and non-glacier runoff in the Kaltamac Glacier area of Muzaata Mountain [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(6): 1214 – 1224. [闫崇宇, 曾辰, 史晓楠, 等. 慕士塔格山卡卡塔马克冰川补给径流与非冰川补给径流水化学特征及主控因素研究[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(6): 1214 – 1224.]
- [39] Wang Jian, Ding Yongjian, Xu Min, et al. Observations and study of the CO_2 flux in the debris of the Koxkar glacier, Tianshan Mts., China [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(6): 1160 – 1168. [王建, 丁永建, 许民, 等. 天山南坡科其喀尔冰川作用区 CO_2 通量观测研究[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(6): 1160 – 1168.]
- [40] Wu Xiaobo. Diurnal and seasonal variation of glacier meltwater hydrochemistry in Qiyi glacierized catchment in Qilian Mountains, Northwest China: implication for chemical weathering [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(5): 1035 – 1045.
- [41] Wang Lijie, Zeng Chen, Wang Guanxing, et al. Chemical characteristics and impact factors of the Drem-tso Lake and supplying runoff in the Southern Tibet [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(4): 737 – 745. [王利杰, 曾辰, 王冠星, 等. 西藏山南地区沉错湖泊与径流水化学特征及主控因素初探[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(4): 737 – 745.]
- [42] Li Xiangying, He Xiaobao, Kang Shichang, 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.
- [43] Tian Yuan, Yu Chengqun, Luo Kunli, et al. Hydrochemical characteristics and element contents of natural waters in Tibet, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(6): 669 – 686.
- [44] Liu Lashan, Ren Jiawen, Qin Dahe. Chemical characteristics at the head of Rongbuk River on Mt. Everest [J]. *Environmental Science*, 2002, 21(5): 69 – 73. [刘腊山, 任贾文, 秦大河. 珠穆朗玛峰绒布河源区河水化学特征[J]. *环境科学*, 2000, 21(5): 59 – 63.]
- [45] Wu Xiaobo, Wang Ninglian, Li Quanlian. Diurnal variation of meltwater hydrochemistry in Qiyi glacier [J]. *Journal of Glaciology*

- ogy and Geocryology, 2009, 31(6): 1080 – 1085. [武小波, 王宁练, 李全莲. 七一冰川消融末期融水化学日变化特征[J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1080 – 1085.]
- [46] Feng Fang, Feng Qi, Liu Dexian, et al. A study of hydrochemical characteristics of meltwater runoff of the Urumqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 183 – 191. [冯芳, 冯起, 刘贤德, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川融水径流水化学特征研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 183 – 191.]
- [47] Zhao Aifang, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Hydrochemical characteristic in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak [J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1485 – 1490. [赵爱芳, 张明军, 李忠勤, 等. 托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1485 – 1490.]
- [48] Yan Luxia, Sun Meiping, Yao Xiaojun, et al. Lake water in the Tibet Plateau: Quality change and current status evaluation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 900 – 910.
- [49] Dong Zhiwen, Kang Shichang, Qin Dahe, et al. Temporal and diurnal analysis of trace elements in the Cryospheric water at remote Laohugou basin in northeast Tibetan Plateau [J]. Chemosphere, 2017, 171: 386 – 398.
- [50] Li Xiangying, Qin Dahe, Jing Zhefan, et al. Diurnal variation of trace elements in qiyi glacier basin of qilian mountain and its influence on unfiltered after sampling [J]. Science China: Earth Science, 2012, 42(11): 1745 – 1756. [李向应, 秦大河, 井哲帆, 等. 祁连山七一冰川流域微量元素的日变化及采样后未过滤的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(11): 1745 – 1756.]
- [51] Mitchell A C, Brown G H. Diurnal hydrological-physicochemical controls and sampling methods for minor and trace elements in an Alpine glacial hydrological system [J]. Journal of Hydrology, 2007, 332(1-2): 123 – 143.
- [52] Singh A T, Laluraj C M, Sharma P, et al. Export fluxes of geochemical solutes in the meltwater stream of Sutri Dhaka Glacier, Chandra basin, Western Himalaya [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(11): 555.
- [53] Fortner S K, Lyons W B. Dissolved trace and minor elements in cryoconite holes and supraglacial streams, Canada Glacier, Antarctica [J]. Frontiers in Earth Science, 2018, 6: 9.
- [54] Li Xiangying, Qin Dahe, Jing Zhefan, et al. Diurnal hydrological controls and non-filtration effects on minor and trace elements in stream water draining the Qiyi Glacier, Qilian Mountain [J]. Science China-Earth Sciences, 2013, 56(1): 81 – 92.
- [55] Dong Zhiwen, Kang Shichang, Qin Dahe, et al. Temporal and diurnal analysis of trace elements in the Cryospheric water at remote Laohugou basin in northeast Tibetan Plateau [J]. Chemosphere, 2017, 171: 386 – 398.
- [56] Huang Ju, Li Yyuefang, Li Zhen, et al. Spatial variations and sources of trace elements in recent snow from glaciers at the Tibetan Plateau [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(8): 7875 – 7883.
- [57] Li Yuefang, Li Zhen, Cozzi G, et al. Signals of pollution revealed by trace elements in recent snow from mountain glaciers at the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chemosphere, 2018, 200: 523 – 531.
- [58] Pu Tao. Hydrologic process of typical oceanic glacier watershed based on hydrochemistry and isotopes [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. [蒲焱, 基于水化学与同位素的典型海洋型冰川流域水文过程研究[D], 兰州: 兰州大学, 2013.]
- [59] Song Mengyuan, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Characteristics of water isotopes and hydrograph separation in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(3): 156 – 160. [宋梦媛, 李忠勤, 金爽, 等. 托木尔峰青冰滩72号冰川流域同位素特征及径流分割研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 156 – 160.]
- [60] Yang Yuzhong, Wu Qingbai, Jin Huijun. Evolutions of water stable isotopes and the contributions of cryosphere to the alpine river on the Tibetan Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(1): 11.
- [61] Liu Fengjing, Mark Williams, Cheng Guodong, et al. Hydrochemical process of snowmelt and stream water in Urumqi River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(3): 213 – 219. [刘凤景, Mark Williams, 程国栋, 等. 天山乌鲁木齐河融雪和河川径流的水化学过程[J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 213 – 219.]
- [62] Li Cuilin, Hou Shugui, Qin Dahe. Spatial differences of hydrochemical and its control factors of the headwater runoff in the Urumqi River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 72 – 76. [李翠林, 侯书贵, 秦大河. 天山乌鲁木齐河源径流水化学空间差异及其控制因素[J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 72 – 76.]
- [63] Feng Fang, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Hydrochemical characteristics and solute dynamics of meltwater runoff of Urumqi Glacier No. 1, eastern Tianshan, northwest China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(4): 472 – 482.
- [64] Bisht H, Arya P C, Kumar K. Hydro-chemical analysis and ionic flux of meltwater runoff from Khangri Glacier, West Kameng, Arunachal Himalaya, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(16): 16.
- [65] Zhang Qian, Jiao Shulin, Liang Hong, et al. Review and prospect of river hydrochemical researches in karst regions of Southwest China [J]. Geographical and Environmental Sciences, 2017, 35(3): 36 – 43. [张倩, 焦树林, 梁虹, 等. 西南喀斯特地区河流化学研究综述与展望[J]. 贵州科学, 2017, 35(3): 36 – 43.]
- [66] Qu Bin, Zhang Yulan, Kang Shichang, et al. Water quality in the Tibetan Plateau: major ions and trace elements in rivers of the "Water Tower of Asia" [J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 571 – 581.
- [67] Bisht H, Arya P C, Kumar K. Hydro-chemical analysis and ionic flux of meltwater runoff from Khangri Glacier, West Kameng, Arunachal Himalaya, India [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(16): 598.
- [68] Brighenti S, Tolotti M, Bruno M C, et al. After the peak water: the increasing influence of rock glaciers on alpine river systems [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(21): 2804 – 2823.
- [69] Tang Wenkui, Tao Zhen, Gao Quanzhou, et al. Biogeochemical processes of main ions and dissolution of inorganic carbon in Guijiang [J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2099 – 2117. [唐文魁, 陶贞, 高全洲, 等. 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2099 – 2107.]
- [70] Zhao Jichang, Geng Dongqing, Peng Jianhua, et al. Origin of major elements and Sr isotope for river water in Yangtze River source area [J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2003, 30(2): 89 – 93. [赵继昌, 耿冬青, 彭建华, 等. 长江河源区的河水主要元素与Sr同位素来源[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(2): 89 – 93.]
- [71] Mitchell A C, Brown G H, Fuge R. Minor and trace elements

- as indicators of solute provenance and flow routing in a subglacial hydrological system[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(4): 877–897.
- [72] Wei Wenhao, Ma R, Sun Ziyong, et al. Effects of mining activities on the release of heavy metals (HMs) in a typical mountain headwater region, the Qinghai-Tibet Plateau in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(9): 19.
- [73] Li Rui, Wu Yanhong, Bing Haijian, et al. Source identification of lead in soils on the eastern slope of Gongga Mountain, Eastern Tibetan Plateau[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1439–1448.
- [74] Bing Haijian, Wu Yanhong, Zhou Jun, et al. Historical trends of anthropogenic metals in Eastern Tibetan Plateau as reconstructed from alpine lake sediments over the last century[J]. *Chemosphere*, 2016, 148: 211–219.
- [75] Zhang Hua, Yin Runsheng, Feng Xinbin, et al. Atmospheric mercury inputs in montane soils increase with elevation: evidence from mercury isotope signatures[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 8.
- [76] Kumar V, Parihar R D, Sharma A, et al. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses[J]. *Chemosphere*, 2019, 236: 14.
- [77] Tripathi L, Kang Shichang, Huang Jie, et al. Concentrations of trace elements in wet deposition over the central Himalayas, Nepal[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95: 231–238.
- [78] Singh V B, Keshari A K, Ramanathan A L. Major ion chemistry and atmospheric CO₂ consumption deduced from the Batal glacier, Lahaul-Spiti valley, Western Himalaya, India [J]. *Environment Development and Sustainability*, 2019.
- [79] Fortner S K, Tranter M, Fountain A, et al. The geochemistry of supraglacial streams of Canada Glacier, Taylor Valley (Antarctica), and their evolution into proglacial waters[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2005, 11(4): 391–412.
- [80] Carling G T, Rupper S B, Fernandez D P, et al. Effect of atmospheric deposition and weathering on trace element concentrations in glacial meltwater at Grand Teton National Park, Wyoming, USA[J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2017, 49(3): 427–440.
- [81] Sun Shiwei, Kang Shichang, Guo Junming, et al. Insights into mercury in glacier snow and its incorporation into meltwater runoff based on observations in the southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 68: 13.
- [82] Wang Jian, Ding Yongjian, Xu Junli, et al. Hydrochemical characteristic analysis of melting water flow in keqikaer glacier, Tianshan (West) Mountains[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7): 1305–1311. [王建, 丁永建, 许君利, 等. 西天山科其喀尔冰川消融径流的水化学分析[J]. *环境科学*, 2006, 27(7): 1305–1311.]

Advances on inorganic hydrochemistry of glacial meltwater runoff in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas

LI Mingyue^{1,2}, SUN Xuejun^{1,2}, LI Shengnan^{1,2}, ZHANG Qianggong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Glacier meltwater runoff is an important channel in the migration of chemicals. Study on the hydrochemistry of glacier meltwater is helpful to reveal the biogeochemical cycle of the chemicals in the glacierized zones and serve as basis for understanding and evaluating the impact of glacier melting on the environment and human life. The Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas hold the largest amount of glaciers outside the polar regions, and glaciers on the plateau have been retreating at an accelerated rate under the context of warming climate. Studies on the changes of various inorganic chemicals in glacial meltwater runoff and its climatic and environmental effects have been increasingly recognized as a hot topic. In this review, we reviewed studies on the concentrations and spatio-temporal variations of the inorganic chemical species in glacial meltwater runoff in the plateau. In addition, we summarized the main sources of the inorganic chemicals and the quantitative and qualitative methods of provenance determination. It is suggested that the contents and spatio-temporal variation of inorganic chemical species in glacial meltwater were influenced by the melting of glaciers, the properties of bedrocks, the hydrological characteristics of the meltwater runoff and some hydro-physiochemical processes. We summarized the deficiencies of the current research on the inorganic hydrochemistry of meltwater runoff in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas, and proposed the future research needs. It is necessary to strengthen data accumulation and the spatial-time scale of field observation, to clarify the transport mechanism and rule of inorganic chemicals, to reveal the synergistic and antagonistic effects of multiple factors on the hydrochemistry, and to evaluate the effects of glacial meltwater hydrochemistry on the climate and environment. All these research will provide scientific guidance for dealing with the environmental impact of glacier ablation over the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; glacier meltwater runoff; inorganic hydrochemistry; spatial and temporal variation characteristics; provenance

(责任编辑: 王飞腾; 编辑: 庞瑜, 周成林)