

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018101603

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.

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.

昆仑山玉珠峰冰川冰雪融水水化学特征分析*

宋玲玲¹ 田青^{1**} 李宗杰² 何靖¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州, 730070; 2. 兰州大学资源环境学院, 兰州, 730000)

摘 要 为了探讨玉珠峰冰川冰雪融水水化学的变化特征和环境意义, 本文主要对 2016 年和 2017 年 6—9 月的冰川融水进行采集 (共采集了 42 个样品), 并对样品的 pH、电导率及主要可溶离子进行了测定分析. 结果表明, Na^+ 和 Ca^{2+} 是玉珠峰冰川冰雪融水中的主要阳离子, 而 SO_4^{2-} 和 Cl^- 是主要的阴离子, 同时玉珠峰冰川融水的主要离子类型为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$; 从时空变化来看, 玉珠峰冰川融水的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 离子月变化非常明显, 并且除 NH_4^+ 以外其余离子随着海拔的逐渐增加均呈降低的趋势; 通过一系列的分析发现研究区融水中的阴离子和阳离子主要受硅酸盐和碳酸盐等地壳来源的控制.

关键词 水化学特征, 融水, 玉珠峰冰川.

Hydrochemical characteristics of melt-water in the Yuzhu Peak Glacier, Kunlun Mountains

SONG Lingling¹ TIAN Qing^{1**} LI Zongjie² HE Jing¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, China;

2. College of Earth Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: In order to study the hydrochemical characteristics and environmental significance of melt-water in Yuzhu Peak Glacier, a total of 42 melt-water samples were collected from June to September in 2016 and 2017. The pH, EC and major cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ and NH_4^+) and anions (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NO_2^- and F^-) of all samples were determined and analyzed. The results showed that Na^+ and Ca^{2+} were the main cations, and the main anions were SO_4^{2-} and Cl^- . The hydrochemical types of melt-water was $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$. The monthly variation of Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} were obvious, and all the ions decreased with the increase of altitude except NH_4^+ . A series of analyses showed that the anions and cations of melt-water in the study area were mainly controlled by the crustal sources included in silicate and carbonate.

Keywords: hydrochemical characteristics, melt-water, Yuzhu Peak Glacier.

2018 年 10 月 16 日收稿 (Received: October 16, 2018).

* 甘肃农业大学林学一级学科建设开放基金 (GAU-XKJS-2018—109), 甘肃农业大学青年导师基金 (GAU-QNDS-201602), 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目 (2013274), 甘肃省陇原创新创业人才项目和城市与区域生态国家重点实验室开放基金 (SKLURE2018-2-6) 资助.

Supported by Discipline Construction Fund Project of Gansu Agricultural University (GAU-XKJS-2018-109), the Youth Tutor Fund of Gansu Agricultural University (GAU-QNDS-201602), CAS (2013274), Longyuan Innovation and Entrepreneurship Project in Gansu Province and the Open Funding from State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology (SKLURE2018-2-6).

* * 通讯联系人, E-mail: tqing@gsau.edu.cn

Corresponding author, E-mail: tqing@gsau.edu.cn

冰川融水径流占地表径流总量的 1% 左右,是世界上最大的淡水储量水库.因此,在过去的几十年中,它已经引起了研究者的极大关注^[1-3].冰川位于高寒地带区,受人类活动的影响较小,其径流中主要可溶性无机离子的组成特征源于融水和自然环境因素.不同区域的融水具有不同的化学成分特征.即使在同一地区,由于水文条件的季节性变化,不同时期的水化学特征也不同.现场观测和室内模拟研究表明,融水中无机离子浓度与水岩作用的时间密切相关.时间越长,离子含量越高,反之亦然^[4-6].受冰川运动和融水高速冲刷的影响,冰川区地表岩石的物理化学风化速率高于大陆平均值.这对冰川周围地区的环境和生物地球化学循环有重要影响^[7-11].在消融阶段,受径流来源和径流量时空变化的影响,融水径流化学组成的日变化非常显著^[12-13].

玉珠峰冰川位于青藏高原北部的东昆仑山地区,环境恶劣,人行道路少,数据缺乏,尤其是有关冰川冰雪融水的相关研究更是较少.为了对玉珠峰冰川冰雪融水的水化学特征有一个初步了解,本文主要从水化学的角度,分析了融水中主要离子的时空分布特征.本研究的主要目的是:了解融水的水化学特征;讨论融水的离子来源和时空分布.这将为该区域水化学、地球化学的研究积累丰富的资料和数据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

玉珠峰冰川 (35°39′37″N, 94°14′28″E) 位于青藏高原北部的东昆仑山地区,是昆仑山东段的最高峰,南北坡均有现代冰川发育,北坡属于昆仑河流域,南坡属于长江流域.南缓北陡,海拔 6178 m,南坡冰川末端海拔约 5100 m,北坡冰川延伸至 4400 m.山峰顶部常年被冰雪所覆盖,无岩石表露,冰雪坡较平缓.粒雪盆以下冰川,由于每年气温高,融化快,降水少,消融大于累积,属消退型大陆冰川.年平均气温 -5 ℃,极端最低气温可达 -30 ℃,全年降雨量仅 200 mm,冰川表面较平缓,面积为 6.75 km²,长 5.7 km.

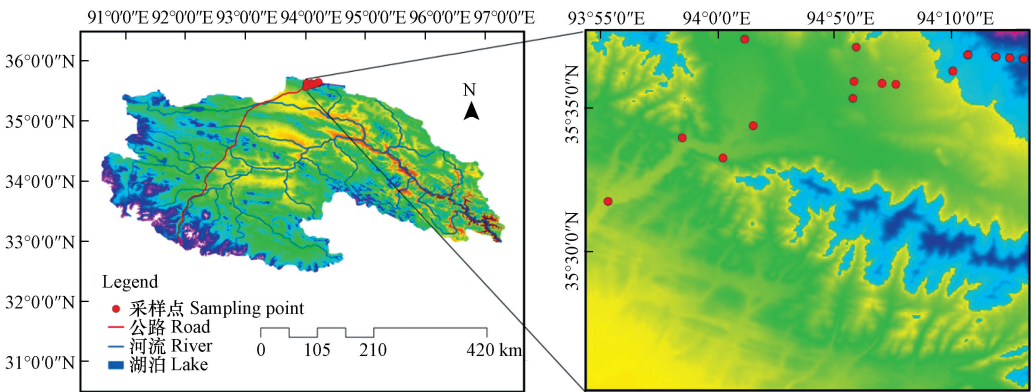


图 1 研究区图
Fig.1 The sketch map in the study areas

1.2 样品采集和分析

为了分析玉珠峰冰川融水的水化学特征,本文主要在玉珠峰冰川南坡的末端和融水径流处采集水样,采样周期为 2016 年的 6 月—9 月和 2017 年的 6 月—9 月,共采集冰川融水样品 42 个,各采样点如图 1 所示.采样过程均为手动操作,具体为先用 0.45 μm 的微孔过滤膜对融水立即过滤,然后将过滤后的融水样品倒入事先用去离子水清洗干净的聚乙烯瓶.待融水样品收集完后,所有样品立即用塑料袋密封,采样过程中均采取防污染措施.所有采集到的样品立即密封冷冻,并保存在冷藏室内.样品以冷冻状态运抵中国科学院西北生态环境与资源研究所后立即存放于 -18 ℃ 的低温实验室.

分析前取出样品,待其在室温下 (约 15 ℃) 自然融化后分析.样品的分析工作在中国科学院西北生态环境与资源研究所冰冻圈科学国家重点实验室内完成.pH 和电导率的测定分别用上海精密科学仪器有限公司生产的雷磁 PSH-3B pH 计和雷磁 DDSJ-308A 电导率仪测量,并用 pH 9.18 的标准缓冲溶液对仪器电极进行校正.Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、Li⁺ 及 NH₄⁺ 用 DX-320 (戴安公司) 进行分析,SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、NO₂⁻

及 F⁻用 ICS1500 进行分析.

1.3 富集因子

根据吉布斯图陆地水中的溶质有降雨和岩石风化两个主要来源^[14],而富集因子可以用来判断冰川融水中离子的来源.富集因子(EF)的计算使用 Ca²⁺作为土壤源的参考元素,Na⁺作为海洋源的参考元素^[15],计算公式如下:

$$EF_{土壤} = [X/Ca^{2+}]_{融水} / [X/Ca^{2+}]_{土壤} \tag{1}$$

$$EF_{海洋} = [X/Na^{+}]_{融水} / [X/Na^{+}]_{海洋} \tag{2}$$

式中,X 是离子浓度,水样可以是融水、降水、河水、地下水等.[X/Ca²⁺]土壤中 Ca²⁺的浓度参照了前人的研究^[16],[X/Na⁺]海洋中 Na⁺的浓度参照了标准海水的研究^[17].一般来说,EF≤1 表明离子是由海盐稀释所致,而 EF≥1 表明大量离子来自于土壤或风化源^[15].

2 结果与讨论(Results and Discussion)

2.1 水化学特征

由表 1 可知,玉珠峰冰川融水 pH 值介于 6.84—9.32 之间,所有融水样品中仅 1 个 pH 值小于 7,冰川融水呈碱性,其平均值为 8.20.EC 的变化范围为 39.50—1740.00 μS·cm⁻¹,平均值为 314.90 μS·cm⁻¹.与乌鲁木齐河源 1 号冰川融水^[9]、七一冰川融水^[17]和青冰滩 72 号冰川^[18]的 pH 和 EC 相比,玉珠峰冰川与乌鲁木齐河源 1 号冰川融水的 pH 值变化范围基本一致,而七一冰川的 pH 值变化范围基本处在玉珠峰冰川与乌鲁木齐河源 1 号冰川融水的 pH 值的区间内.但玉珠峰冰川的 pH 值的均值高于青冰滩 72 号冰川的 pH 值.乌鲁木齐河源 1 号冰川融水和七一冰川融水的 EC 都明显小于玉珠峰冰川融水中的 EC,而青冰滩 72 号冰川融水的 EC 却远大于玉珠峰冰川融水的 EC.这就说明研究区所处的地理位置以及融水所受控的因子不同,其酸碱性和电导率存在明显的空间差异.玉珠峰冰川融水的阴阳离子浓度的大小顺序为 SO₄²⁻> Cl⁻> Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺> NO₃⁻> K⁺> NO₂⁻> NH₄⁺> F⁻> Li⁺.其中阳离子浓度以 Na⁺和 Ca²⁺占优势,分别占阳离子总浓度的 38.61%、32.60%,相比而言 Mg²⁺、K⁺、NH₄⁺、Li⁺含量较低,所占阳离子总浓度的比例分别为 27.17%、1.65%、0.26%和 0.01%.阴离子中以 SO₄²⁻和 Cl⁻为主,其离子浓度分别占阴离子总浓度的 50.50%、47.40%,而 NO₃⁻、NO₂⁻、F⁻三者仅占阴离子总浓度的 2.10%.因此,玉珠峰冰川融水的主要离子类型为 Na⁺-Ca²⁺-SO₄²⁻-Cl⁻.青冰滩 72 号冰川融水中阳离子浓度也以 Na⁺和 Ca²⁺占优势,但乌鲁木齐河源 1 号冰川融水和七一冰川融水中的阳离子以 Mg²⁺和 Ca²⁺占优势.就阴离子而言,七一冰川融水和青冰滩 72 号冰川融水中的阴离子与研究区一致(阴离子中以 SO₄²⁻和 Cl⁻占优势),而乌鲁木齐河源 1 号冰川融水中的阴离子以 SO₄²⁻和 NO₃⁻占优势.

表 1 玉珠峰冰川融水水化学离子浓度(离子浓度:mg·L⁻¹;EC: μS·cm⁻¹)

Table 1 Ion concentration of melt water in study area (ion concentration: mg·L ⁻¹ ; EC: μS·cm ⁻¹)													
	电导率 EC	pH	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
最大值	1740.00	9.32	0.19	470.86	1.90	7.03	387.74	0.050	204.32	1.38	4.86	80.47	105.08
最小值	39.50	6.84	0.00	1.14	0.003	0.12	0.81	0.001	1.11	0.00	0.08	0.88	6.71
平均值	314.90	8.20	0.04	46.89	0.24	1.80	49.95	0.010	28.14	0.19	1.20	19.81	23.55

2.2 水化学的时空变化

时间变化是高寒区融水最重要的水化学特征之一.如图 2 所示,玉珠峰冰川融水中各离子的月际变化非常明显.Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、Mg²⁺和 Ca²⁺的离子浓度在 6—9 月份有明显的变化,且它们离子浓度的最大值均出现在 9 月份,表明随着消融期的结束,融水流量减小,从而使得融水中的离子浓度增大.F⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、Li⁺、NH₄⁺及 K⁺的离子浓度在 6—9 月份基本没有变化,这可能是因为这些离子的控制源相对比较稳定,不受季节变化的影响.融水中各离子的月际变化表明,季节变化对融水水化学特性的影响是通过影响融水和控制源之间的相互作用来实现的.

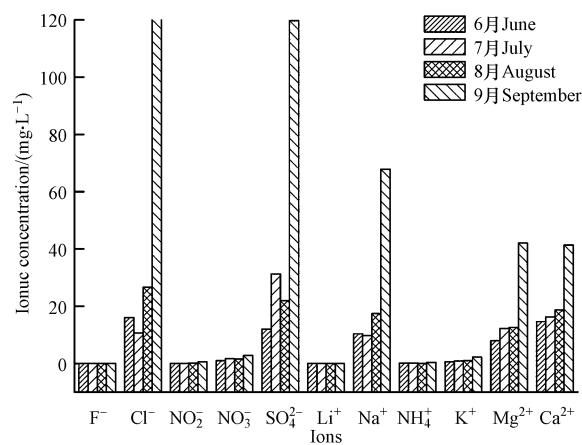


图2 玉珠峰冰川融水离子浓度的时间变化

Fig.2 Temporal variation of ion concentration in melt water in study area

玉珠峰冰川融水中离子浓度随海拔从4599—5280 m的变化如图3所示,除NH₄⁺随海拔的升高其变化趋势不明显外,其余离子F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Li⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺及K⁺的浓度随着海拔的逐渐增加均呈降低的趋势。

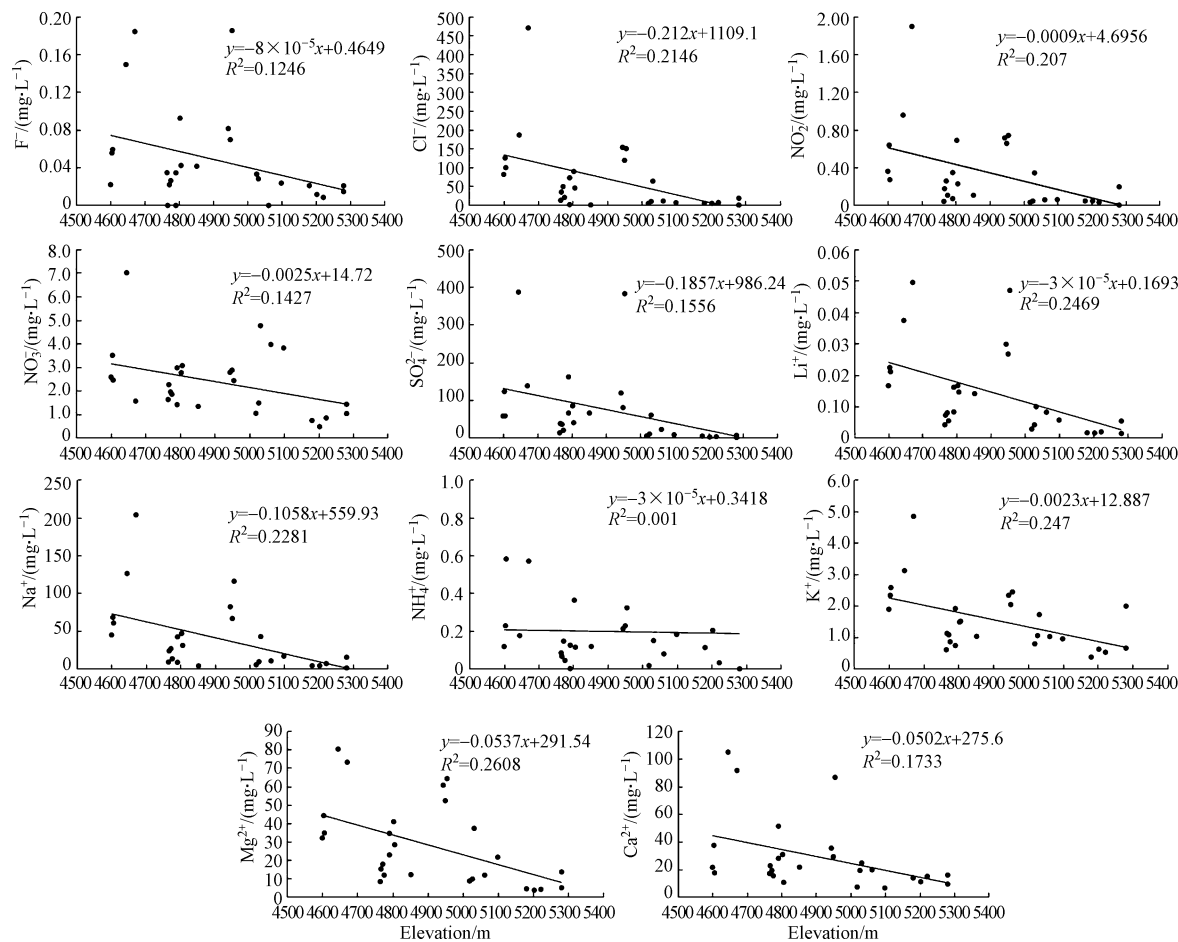


图3 玉珠峰冰川融水中离子浓度随海拔梯度的变化

Fig.3 The variation of ion concentration with altitude change in study area

研究区融水中F⁻浓度的最大值(0.19 mg·L⁻¹)出现在海拔4954 m处,而其最小值(0.00 mg·L⁻¹)出现在海拔4766 m处.Cl⁻、NO₂⁻、Li⁺及Na⁺的最小值不仅均出现在海拔5280 m处,其值分别为1.14、0.003、

0.001、1.11 mg·L⁻¹,而且这 4 个离子的最大值也出现在同一海拔处即 4670 m 处,其最大值分别为 470.86、1.90、0.05、204.32 mg·L⁻¹.而在自然条件下,水体中的 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 主要源于蒸发岩的溶解;Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 主要源于碳酸盐岩和蒸发岩;Na⁺ 和 K⁺ 主要来源于蒸发岩的风化产物^[19-20].这表明在海拔 4670 m 处蒸发岩的分布比较丰富.与此同时,NO₃⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺ 的离子浓度均在海拔 4644 m 处达到最大值,而在 5202 m 处出现最小值.Ca²⁺ 的最大值(105.08 mg·L⁻¹)也出现在海拔 4644 m 处,但其最小值(6.71 mg·L⁻¹)出现在海拔 5098 m 处.这就表明碳酸岩和蒸发岩在海拔 4644 m 处分布较丰富.K⁺ 的最大值(4.86 mg·L⁻¹)出现在海拔 4670 m 处,最小值出现在 5180 m(0.38 mg·L⁻¹)处.

2.3 控制因素分析

如表 2 所示,融水的 EC 与 F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻、Li⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 均成极显著正相关关系,而与 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 呈显著正相关关系;pH 与所测的 11 种主要离子均呈负相关,这表明融水中离子浓度越高,其 pH 值就越小,融水的酸性就越强,反之亦然.SO₄²⁻ 除与 NH₄⁺ 没有相关性外,与其他离子在 0.01 水平上均呈显著正相关,表明这些离子有共同来源.与此同时,Na⁺ 与 K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₂⁻ 及 Li⁺ 呈极显著正相关, Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 与 F⁻、Cl⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻、Li⁺、Na⁺、K⁺ 均呈极显著正相关关系,这也表明这些离子有相同的来源.NH₄⁺ 与 K⁺ 呈极显著的正相关关系,其相关系数为 0.618,与 Cl⁻、NO₂⁻、Li⁺、Na⁺ 呈显著的正相关关系,这就进一步验证了研究区熔融水中的阴离子和阳离子有共同来源.

表 2 融水中主要离子浓度的相关性
Table 2 Correlation of main ions concentration in melt water

	EC	pH	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
EC	1												
pH	-0.358	1											
F ⁻	0.862 **	-0.183	1										
Cl ⁻	0.943 **	-0.319	0.811 **	1									
NO ₂ ⁻	0.952 **	-0.378	0.846 **	0.979 **	1								
NO ₃ ⁻	0.451 *	-0.199	0.291	0.266	0.332	1							
SO ₄ ²⁻	0.749 **	-0.263	0.810 **	0.529 **	0.597 **	0.525 **	1						
Li ⁺	0.947 **	-0.279	0.913 **	0.874 **	0.896 **	0.415 *	0.801 **	1					
Na ⁺	0.982 **	-0.331	0.887 **	0.970 **	0.968 **	0.399 *	0.697 **	0.948 **	1				
NH ₄ ⁺	0.402 *	-0.127	0.387	0.464 *	0.467 *	-0.042	0.139	0.408 *	0.456 *	1			
K ⁺	0.939 **	-0.332	0.766 **	0.932 **	0.921 **	0.404 *	0.580 **	0.890 **	0.946 **	0.618 **	1		
Mg ²⁺	0.942 **	-0.336	0.845 **	0.830 **	0.881 **	0.612 **	0.800 **	0.941 **	0.918 **	0.361	0.874 **	1	
Ca ²⁺	0.883 **	-0.336	0.876 **	0.758 **	0.793 **	0.431 *	0.911 **	0.851 **	0.846 **	0.205	0.726 **	0.826 **	1

注: **表示在 0.01 水平上相关; *表示在 0.05 水平上相关.significance was tested at P<0.01; * significance was tested at P<0.05.

如表 3 所示,通过主成分分析共提取出 3 个特征值大于 0.60 的因子,其占总方差的 92.453%.其中,第一因子占总方差的 73.389%,荷载了除 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 以外的所有离子,这就表明地壳源物质对研究区融水水化学组成的贡献.Ca²⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Li⁺、SO₄²⁻、F⁻、Cl⁻ 及 NO₂⁻ 之间的相关性也证实了这一点(表 2).第二因子占总方差的 12.622%,只载荷 NO₃⁻.天然水质中 NO₃⁻ 可能受人为活动的影响^[21],这说明 NO₃⁻ 可能是受大量的人为污染物对融水补给的影响.虽然表 2 相关性分析表明 NH₄⁺ 与 K⁺、Cl⁻、NO₂⁻、Li⁺、Na⁺ 呈正相关关系,它与其它离子有相同来源,但 NH₄⁺ 并未在这 3 个因子上载荷,这表明 NH₄⁺ 可能是由雪中的污染物或冰雪中的被困空气引起的.此外,NH₄⁺ 的时空变化不明显,进一步验证了这一点.

如表 4 所示,玉珠峰冰川融水中 Na⁺ 的 EF_(土壤) 值大于 1,其值为 2.10,这表明研究区融水中的 Na⁺ 受地壳源的影响,Mg²⁺ 的 EF_(土壤) 和 EF_(海水) 值均大于 1,其值分别为 1.50、5.59,这就表明 Mg²⁺ 可能受地壳源物质和海洋源的双重影响,但是 Mg²⁺ 与 Na⁺ 间的极显著正相关关系 Mg²⁺ 主要还是受地壳源物质的影响.而 K⁺ 的 EF_(土壤) 为 0.1,EF_(海水) 为 1.15,表明 K⁺ 可能受地壳源物质的影响.Ca²⁺ 的 EF_(海水) 大于 20,这就证实了大部分的 Ca²⁺ 来源于地壳源物质.Cl⁻ 的 EF_(土壤) 远大于 10,其值为 642.28,但其 EF_(海水) 的值小于 1,其值为 0.83,这说明 Cl⁻ 的来源受海洋源的影响较大,但 Cl⁻ 与 Mg²⁺、Ca²⁺ 等离子呈极显著的正相关表

明 Cl^- 可能受海洋源和地壳源物质的双重影响.虽然 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的 $\text{EF}_{(\text{土壤})}$ 和 $\text{EF}_{(\text{海洋})}$ 值均明显大于 1,说明 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 不受地壳源物质和海洋源物质的影响,但前面的相关性分析表明 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 与 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子呈显著正相关关系,结合研究区实际情况,本研究认为 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 可能主要还是受地壳源物质的影响. F^- 的 $\text{EF}_{(\text{海水})}$ 值为 2.03,且 F^- 与 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子呈极显著的正相关关系再次证明了 F^- 主要受地壳源物质的影响.

表 3 融水中主要离子浓度的因子分析
Table 3 Factor analysis of main ions concentration in melt water

离子 Ions	1	2	3
F^-	0.925	0.015	-0.245
Cl^-	0.918	-0.254	-0.019
NO_2^-	0.944	-0.187	-0.004
NO_3^-	0.443	0.638	0.620
SO_4^{2-}	0.788	0.455	-0.213
Li^+	0.969	0.016	-0.072
Na^+	0.981	-0.099	-0.003
NH_4^+	0.440	-0.717	0.280
K^+	0.928	-0.243	0.211
Mg^{2+}	0.954	0.152	0.138
Ca^{2+}	0.893	0.260	-0.266
方差 (%)	73.389	12.622	6.442
累计方差 (%)	73.389	88.011	92.453

注:绝对值大于 0.60 的因子被认为具有较强的载荷.Note: Factor loading having absolute values higher than 0.60 are considered strong.

表 4 玉珠峰冰川融水富集因子值
Table 4 Enrichment factor of melt water in study area

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
EF _(土壤)	2.1	0.1	1.5	642.28	36.4	112.82	
	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
EF _(海水)	1.15	5.59	22.62	2.03	0.83	43.22	7.27

一般而言,天然水体的水化学主要受到区域岩石风化、大气降水及蒸发结晶的影响^[22].为确定玉珠峰冰川融水水化学控制因素,本研究运用 Gibbs 图法^[23]分析来定性判断研究区融水的水化学控制因素. Gibbs 图的纵坐标为对数坐标,代表融水中溶解性固体总量即矿化度 TDS;横坐标为普通坐标,代表融水中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的比值.在 Gibbs 图中,中间部位表示融水化学特征主要受到岩石风化作用控制;右上角表示主要受到蒸发结晶作用控制;右下角表示主要受大气降水作用控制.从图 4a 中点的分布可以看出 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的变化范围很大,为 0.1—0.9, TDS 位于 20—900 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.研究区融水的水样主要分布在蒸发结晶控制区和岩石风化控制区,而在大气降水控制区没有水样分布,这表明玉珠峰冰川融水不受大气降水的影响. $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 摩尔比可以反映稀释和蒸发的影响,并且经常用于区分水和各种岩石之间的相互作用.由玉珠峰冰川融水 $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 的关系(图 4b)可以看出,研究区融水的水样大部分分布在硅酸盐端元,也有少数分布在碳酸盐端元,这表明玉珠峰冰川融水的水化学主要受硅酸盐的影响,且碳酸盐也有一定的影响.

3 结论(Conclusion)

(1)玉珠峰冰川融水呈碱性,pH 的均值为 8.20,EC 的均值为 314.90 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$.融水阴阳离子浓度的大小顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{K}^+ > \text{NO}_2^- > \text{NH}_4^+ > \text{F}^- > \text{Li}^+$.其中阳离子浓度以 Na^+ 和 Ca^{2+} 占优势,分别占阳离子总浓度的 38.61%、32.60%;而阴离子以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主,其离子浓度分别占阴离

子总浓度的 50.50%、47.40%。玉珠峰冰川融水的主要离子类型为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 。

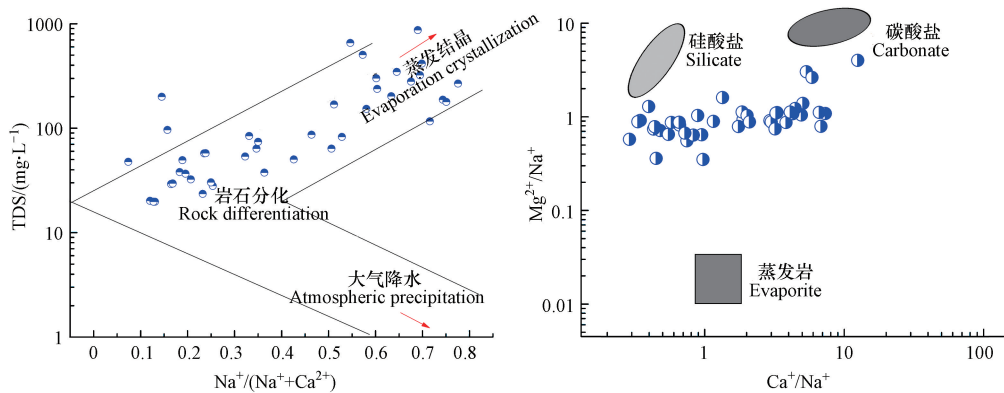


图 4 TDS 与 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ Gibbs 图(a)和 $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 的关系(b)
Fig.4 The relationship between TDS and $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ (a) and $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ and $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ (b)

(2) 玉珠峰冰川融水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的离子浓度呈现出显著的月变化,而 F^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 Li^+ 、 NH_4^+ 及 K^+ 的离子浓度月变化并不明显。同时,冰川融水中 F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Li^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 K^+ 随着海拔的增加呈降低趋势,而 NH_4^+ 离子浓度基本不受海拔的影响。

(3) 相关性分析、富集因子分析表明,玉珠峰冰川融水中的主要离子主要受地壳源物质的影响,而 Gibbs 图示进一步表明,玉珠峰冰川融水化学特征主要受到岩石风化作用和蒸发结晶作用控制,而不受大气降水的影响。结合主要离子浓度比值进一步分析,研究区融水的水化学主要受硅酸盐的影响,且碳酸盐也有一定的影响。

参考文献 (References)

[1] MILLER O, SOLOMON D K, MIÈGE C, et al. Direct evidence of meltwater flow within a firm aquifer in Southeast Greenland [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(1):207-215.

[2] YDE J C, RIGERKUSK M, Christiansen H H, et al. Hydrochemical characteristics of bulk meltwater from an entire ablation season, Longyearbreen, Svalbard [J]. Journal of Glaciology, 2008, 54(185):259-272.

[3] LONG M, WU J, Abuduwaili J. Hydrochemical and isotopic characters of surface water in agricultural oases of the Tianshan Mountains, Northwest China [J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 2016, 30(1):37-48.

[4] YANG Y, LI B. Temporal and spatial variations of hydrological processes on the landscape zone scale in an alpine cold region (Mafengou River Basin, China): An Update [J]. Water, 2017, 9(8):1-11.

[5] LI Z X, FENG Q, WANG Q J, et al. Contribution from frozen soil meltwater to runoff in an in-land river basin under water scarcity by isotopic tracing in northwestern China [J]. Global & Planetary Change, 2016, 136:41-51.

[6] LI Z X, FENG Q, WANG Q J, et al. Quantitative evaluation on the influence from cryosphere meltwater on runoff in an inland river basin of China [J]. Global & Planetary Change, 2016, 143:189-195.

[7] BROWN G H. Glacier meltwater hydrochemistry [J]. Applied Geochemistry, 2002, 17(7):855-883.

[8] ANDERSON S P, DREVER J I, HUMPHREY N F. Chemical weathering in glacial environments [J]. Geology, 1997, 25(5):399-402.

[9] 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.

FENG F, FENG Q, LIU X D, et al. A study of hydrochemical characteristics of meltwater runoff of the Ürümqi Glacier No.1, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 183- 191 (in Chinese).

[10] HODSON A, PORTER P, LOWE A, et al. Chemical denudation and silicate weathering in Himalayan glacier basins: Batura Glacier, Pakistan [J]. Journal of Hydrology, 2002, 262(1):193-208.

[11] 史晓宜, 何元庆, 蒲焱, 等. 玉龙雪山周边典型河流的水化学日变化特征 [J]. 环境化学, 2015, 34(10): 1895-1900.

SHI X Y, HE Y Q, PU T, et al. Chemical composition and daily variation characteristics of a typical river catchment in Mt. Yulong region [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(10): 1895-1900 (in Chinese).

[12] WEBB R W, WILLIAMS M W, ERICKSON T A. The spatial and temporal variability of meltwater flow paths: Insights from a grid of over 100 snow lysimeters [J]. Water Resources Research, 2018, 54(2), 1146-1160.

[13] LI Z X, FENG Q, WANG Q J, et al. The influence from the shrinking cryosphere and strengthening evapotranspiration on hydrologic process in a cold basin, Qilian Mountains [J]. Global & Planetary Change, 2016, 144:119-128.

[14] OKAY C, AKKOYUNLU B O, TAYANÇ M. Composition of wet deposition in Kaynarca, Turkey [J]. Environmental Pollution, 2002, 118

(3):401-410.

- [15] 李宗杰,宋玲玲,田青. 河西走廊东段大气降水特征及水汽来源分析[J]. 环境化学, 2016, 35(4): 721-731.
LI Z J, SONG L L, TIAN Q. Analysis of precipitation characteristics and water vapor sources in the East of Hexi Corridor[J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(4): 721-731(in Chinese).
- [16] XU Z F, HAN G L. Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(12):1954-1961.
- [17] LI Z J, SONG L L, MA J Z. Hydrochemical characteristics and environmental significance in different ablation period in Hulugou River Basin in Qilian Mountain[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(17): 1-11.
- [18] 赵爱芳. 天山托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征研究[D]. 兰州:西北师范大学, 2013.
ZHAO A F. Hydrochemical characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013.
- [19] 周嘉欣,丁永建,曾国雄,等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3315-3324.
ZHOU J X, DING Y J, ZENG G X, et al. Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River Basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(9): 3315-3324(in Chinese).
- [20] 朱秉启,杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因[J]. 科学通报, 2007, 52(13): 1561-1566.
ZHU B Q, YANG X P. Chemical characteristics and genesis of natural water in Taklimakan Desert[J]. Science Bulletin, 2007, 52(13): 1561-1566(in Chinese).
- [21] LI Z S, HE Y Q, PANG Z H, et al. Chemistry of snow deposited during the summer monsoon and in the winter season at Baishui Glacier No. 1, Yulong Mountain, China[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(190), 221-228.
- [22] 唐玺雯,吴锦奎,薛丽洋,等. 锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 131-142.
TANG X W, WU J K, XUE L Y, et al. Major ion chemistry of surface water in the Xilin River Basin and the possible controls[J]. Environmental Science, 2014, 35(1): 131-142(in Chinese).
- [23] 王晓艳,李忠勤,周平,等. 天山哈密榆树沟流域春洪期水化学特征及其控制因素研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5):922-930.
WANG X Y, LI Z Q, ZHOU P, et al. River water chemical characteristics and controls during the spring flood period in Yushugou Bbasin, Hami, Eastern Tianshan Mountains, China[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 922-930(in Chinese).