

祁连山七一冰川融水化学组成及演化特征

武小波, 李全莲, 宋高举, 贺建桥, 蒋熹

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 2006-06 ~ 2006-07 在祁连山七一冰川采集冰川冰、冰面融水、侧碛河及冰川融水径流样, 分析了样品中主要可溶离子浓度、pH 及电导率. 结果表明, 所有样品的 pH 介于 8.05 ~ 8.79 之间, 电导率分布在 32.4 ~ 134.4 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间. 不同水体中主要可溶离子浓度顺序为: 冰面融水 < 侧碛河 < 七一冰川水文总汇点, 水化学类型也由 HCO_3^- - Ca^{2+} 型演化为 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ -($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 型. 几乎所有样品中主要可溶阴、阳离子浓度序列为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 以碳酸盐风化产物为主, 也有部分硫酸盐贡献. 由于受到各种物理化学因素影响, 在水岩作用过程中 Mg^{2+} 和 K^+ 浓度增加速率大于 Ca^{2+} 和 Na^+ , 不同于其在地壳中的丰度. 七一冰川区融水中离子浓度空间变化主要受水岩作用时间控制, 气温影响下的冰川消融量的大小是水化学时间变化的主要控制因素.

关键词: 水化学; 冰川融水; 七一冰川; 祁连山

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0613-06

Hydrochemical Characteristics and Evolution of Runoff at Qiyi Glacier, Qilian Mts.

WU Xiao-bo, LI Quan-lian, SONG Gao-ju, HE Jian-qiao, JIANG Xi

(State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Glacier ice, supraglacier stream water, ice-marginal stream water, proglacier stream water samples were collected at Qiyi glacier located in central part of Qilian Mountain 2006-06 ~ 2006-07. Major ions concentration, pH and EC were analyzed. The results indicate that pH varies from 8.05 to 8.79, and EC 32.4 ~ 134.4 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. The order of major ions concentration in differed water is: supraglacier stream water < ice-marginal stream water < proglacier stream water. Meanwhile, hydrochemical characteristics vary from HCO_3^- - Ca^{2+} to $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ -($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$). Major ions, almost in all samples: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ mainly comes from carbonate weathering, and some is from sulfate dissolution. Concentrations of Mg^{2+} and K^+ increase quicker than Na^+ and Ca^{2+} in proglacier stream and ice-margin stream that is inverse to their abundance in crust. The spatial characteristic of ions concentration is controlled by the process of water-rock and temporal change is hydrological factors.

Key words: hydrochemistry; melt-water; Qiyi glacier; Qilian Mts.

冰川融水径流约占地表总径流的 1%^[1], 是地球上储量最大的淡水资源储库, 因此在过去几十年中倍受研究人员关注^[2~4]. 冰川位于偏远地区, 远离人类活动影响, 径流中主要可溶无机离子组成特征是融水与自然环境作用的结果, 区域不同, 融水化学组成特征不同^[5~7]. 即使区域相同, 由于受水文条件季节变化的影响, 不同时期水化学特征不同^[8]. 野外观测和实验室模拟研究均表明: 冰川融水中无机离子浓度与水岩作用时间密切相关, 时间越长离子含量越高, 反之则相反^[3,9].

七一冰川是我国研究较早的冰川, 先后进行了冰川物理、水文气候等多方面的观测研究^[10~13], 发现七一冰川对环境的变化非常敏感, 在最近数十年, 受全球变暖大环境影响, 处于严重的物质亏损阶段^[10], 研究这个时期的水化学组成具有重要的现实意义. 本研究主要分析了七一冰川冰面融水、侧碛河

以及冰川融水径流中主要可溶离子组成及演化特征; 讨论了各种离子对水岩作用过程的响应及控制这些过程的因素, 以期为今后河流水化学研究提供参考.

1 材料与方法

1.1 冰川位置及特征

如图 1 所示, 七一冰川位于祁连山中段, 托赖山北坡, 地理坐标为北纬 39°15', 东经 97°45', 是我国距城市最近的冰川. 其属于冰斗-山谷冰川, 背南朝北,

收稿日期: 2007-04-30; 修订日期: 2007-07-23

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目 (CXTD-Z2005-2); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2005CB422003); 国家杰出青年科学基金项目 (40525001); 中国科学院优秀人才项目 (2005406)

作者简介: 武小波 (1980 ~), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为雪冰化学、水化学与环境, E-mail: xiaobowu@lzb.ac.cn

长约 3.8 km, 融水流入北大河支流柳沟泉河^[14]. 冰温观测显示, 8 月份七一冰川冰下 6 m 处的冰温在 -6℃ 以下, 而表层气温在 0℃ 以上, 因此融化再凝

结作用显著, 化学物质在不同介质中的再分配非常活跃. 受季风气候影响, 降水一般在集中在 5~8 月间, 年降水量在 300 mm 左右^[12].

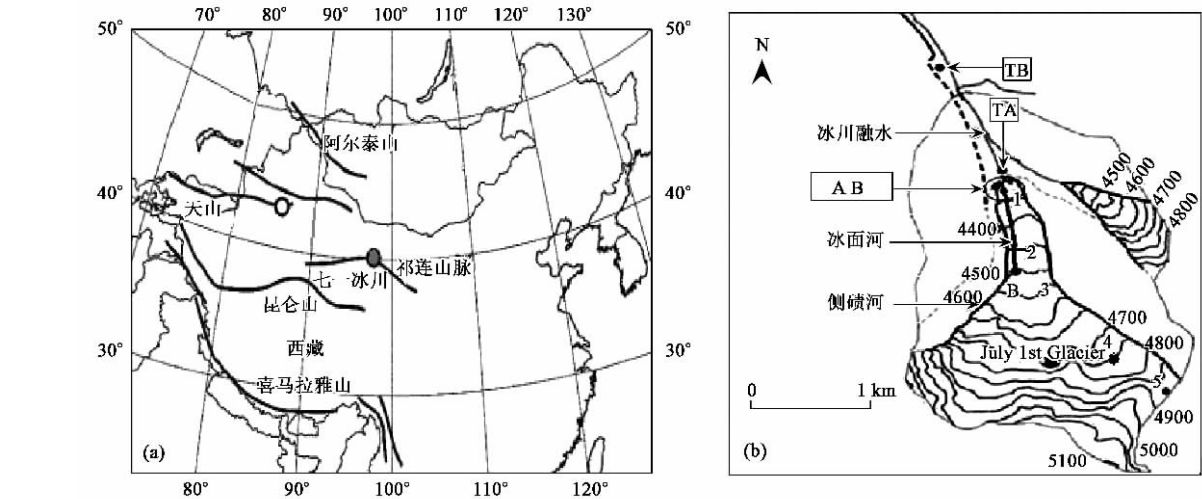


图 1 七一冰川采样点示意
Fig.1 Sketch map of sites location in Qiyi glacier region

1.2 样品采集

图 1(b)是本研究在七一冰川采样点示意. 随海拔变化采集冰川冰样品 5 个, A 为侧碛河取样点, B、B' 分别是同一条冰面河, 不同海拔高度的 2 个取样点. 冰面河与侧碛河在 TA 点交汇, 形成冰川融水径流, 控制冰川面积 2.46 km², 非冰川面积 1.29 km², 总控面积 3.75 km². TB 为 TA 下游 2 km 处的水文总控点, 控制冰川面积 2.85 km², 非冰川面积 3.36 km², 总控面积^[12] 6.21 km². 6 月 28 日开始在 A、B、B'、TA 和 TB 5 个点同一时段内采集冰川融水样品, 7 月 28 日结束, 历时 1 个月, 由于特殊天气缘故采样中间有所间断. 采样瓶为聚乙烯瓶, 预先在实验室用去离子水浸泡冲洗, 采样过程中, 先用河水清洗聚乙烯瓶 3 次, 再取水样, 然后密封保存, 带回实验室分析.

1.3 样品分析

样品带回实验室后, 放在实验室 -15℃ 冷库中, 测试分析前放在室内让其自然融化. 使用上海雷磁生产的 pHs-3B 测量 pH 值, 误差范围 ±0.01; 电导率用 DDS-308A 电导率仪分析, 误差范围是 ±0.1 μS·cm⁻¹. 采用 DIONEX 公司生产的 DX-100 离子色谱仪, 分析了 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Cl⁻、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 浓度.

2 结果与讨论

2.1 主要离子化学特征

表 1 列出了 A、B、B'、TA 和 TB 5 个点水样及冰川冰中主要阴、阳离子浓度、pH 和电导率分析结果. 鉴于数据量太大, 其中只列出各点样品中各种理化指标的平均值. 由表 1 可见, 从冰面融水到侧碛河再到水文总控点 TB, 融水中的 pH 值由 8.05 提高到 8.79, 电导率由 34.4 μS·cm⁻¹ 增加到 134.4 μS·cm⁻¹. 在径流和冰川冰的大部分样品中, 主要可溶阴、阳离子浓度序列分别是: HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ 和 Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺. 按照前苏联学者舒卡列夫水化学类型划分方法^[15], 冰面融水是 HCO₃⁻-Ca²⁺ 型水, 典型的碳酸盐溶滤水, 而 A 和 TB 点水样属于 (HCO₃⁻ + SO₄²⁻)-(Ca²⁺ + Mg²⁺) 型水.

2.2 离子浓度空间变化特征

冰川融水径流系统中, 存在不同的径流途径. 一种是冰面河, 下垫面为冰川冰; 另一种是冰-岩交界处的侧碛河. 两者在冰川末端汇集, 形成冰川融水径流. 在有些冰川中还存在冰下流^[15] 的情况. 这些格局的出现虽然增加了研究冰川径流的复杂性, 但是为研究径流中主要化学成分来源及水-岩作用机理提供了便利.

2.2.1 冰川冰

图 2 为不同海拔冰川冰中阴、阳离子浓度对比. 从图 2 可以看到, 冰川冰中离子浓度随海拔变化差异显著, 冰舌中离子浓度显著高于冰川上部, 这种现象在我国山地冰川中比较普遍^[17]. 总离子浓度由海

表 1 不同采样点样品中主要可溶无机离子浓度、电导率与 pH 值¹⁾

采样位置	海拔/m	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	pH	离子浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$							
				Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
A	4 352	80.8	8.57	1.09	0.67	4.06	11.81	1.38	1.22	12.05	41.79
B	4 337	32.4	8.05	0.56	0.06	0.47	6.20	0.94	0.31	1.84	18.72
B'	4 502	35.2	8.05	0.73	0.13	0.78	7.32	1.04	0.60	2.0	23.74
TA	4 300	66.7	8.66	0.86	0.45	2.54	11.69	1.26	1.03	9.37	36.60
TB	3 920	134.4	8.79	1.24	0.87	6.81	20.46	2.07	2.18	31.36	56.14
冰川冰 1	4 350	*	*	1.02	0.58	5.06	19.36	1.08	0.37	1.20	84.67
冰川冰 2	4 450	*	*	0.87	0.06	1.30	5.60	1.10	0.29	0.74	22.97
冰川冰 3	4 550	*	*	0.19	0.04	0.89	4.70	0.41	0.27	0.65	17.68
冰川冰 4	4 750	*	*	0.14	0.02	3.00	9.76	0.39	0.27	0.62	43.69
冰川冰 5	4 872	*	*	0.54	0.03	0.10	0.50	1.08	0.26	0.48	0.79

1) * 表示没有测量 pH 和电导率

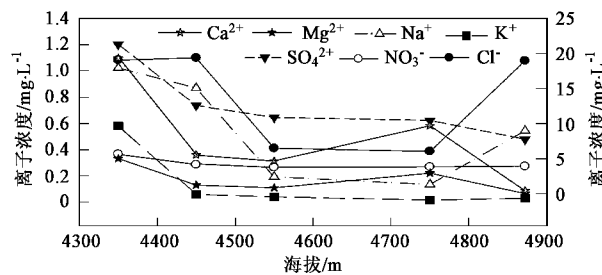


图 2 不同海拔冰川冰中离子浓度对比

Fig.2 Variation of major ions' concentration with altitude

拔 4 872 m 处的 $3.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 增加到冰川末端的 $113.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水化学类型也由 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 型转变为冰川末端 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型, 前者代表了海盐输入特征^[18], 后者则具有典型的碳酸盐溶滤水特征^[16].

2.2.2.2 冰面融水

冰面融水中 Ca^{2+} 是浓度最大阳离子中, 其次是 Mg^{2+} 与 Na^+ , K^+ 浓度最小, 阴离子浓度序列是 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, 与祁连山扎子沟 29 号冰川积雪融水^[6], 青藏高原中部的长江江源区冰川冰融水^[5]以及西天山科其喀尔冰川冰面融水化学组成相同^[7], 大致反映我国西北干旱地区降水化学特征^[19].

B'和 B 是同一条冰面河上的 2 个取样点(见图 1), 海拔高度分别是 4 502 m 和 4 337 m, 如图 3 所示, B'点电导率高于 B 点, 与其在冰川冰中的空间分布相反. 主要是由于冰川最近几年处于物质严重亏损期^[14], 夏季前一年的积雪已经完全融化, 雪冰中的“污化物”遗留于冰面. 而在 B'点以上, 冰面各处融水向冰面河汇集, 流速缓慢, 与“污化物”接触时间长, 溶解了部分污化物中可溶性无机离子, 增加了融水中的离子浓度. 而 B'与 B 之间, 融水汇入冰面河,

流速快, 又受到浓度较低的冰川冰融水稀释, 出现 B 点总离子浓度低于 B'点的现象. 融水反复冲刷“污化物”降低了其可溶性离子含量, 导致 B'点离子浓度在消融期有逐渐降低的趋势.

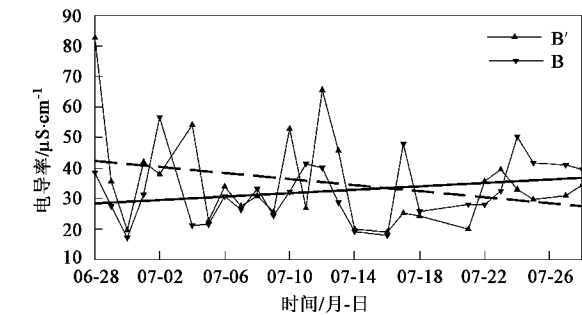


图 3 冰面河 B 和 B'点离子浓度时间变化

Fig.3 Temporal change of main ions in supraglacier stream water

2.2.2.3 非冰面径流

融水流经冰碛物时, 较短时间内 ($< 1\text{h}$), 离子浓度迅速增加. A 点总离子浓度是冰面融水的 2.2 倍以上, TB 点总离子浓度是冰面融水的 3.7 倍, pH 值最高, 这种结果说明融水与岩体接触的时间越长, 离子浓度越大, 与实验室模拟结果一致^[10].

大致相等的时间内, 冰-岩交界处离子浓度增加较快, 这与以前的研究结果一致^[20], 主要是由于冰碛物中大量的碎屑岩增加了水岩作用强度, 离子浓度增加较快. 说明岩体的表面积影响水岩作用过程中离子淋入水体的速率.

非冰面融水径流中主要可溶无机离子浓度 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. 其中阳离子序列不同于扎子沟 19 号冰川^[6]和西天山科其喀尔冰川^[7]融水中离子浓度序列 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 但是上述冰川冰面融水中阳离

子序列相同,说明在水-岩作用过程中,由于受岩石岩性等因素影响,各种离子融入水中的速度和量不同,也说明河水中化学离子组成的空间变化与地质特征相关,与我国河流水化学研究结果一致^[21].

2.3 水文条件对离子浓度的影响

图 4 是 A、B'以及 TB 点电导率、pH 与消融区冰面 1.4 m 处日平均气温以及降水的时间变化序列. 由图 4 可见,总体上电导率随温度变化而变化,温度升高时电导率降低,温度降低时电导率增大.出现这种现象主要是由于冰川区径流来源于雪冰的融化,受温度影响非常显著.温度最高时也是径流最大时,温度低时则径流量小,径流量随温度的季节变化形成流量波动很大的年变化过程^[22].流量的波动影响水岩作用时间,形成融水中总离子强度的时间变化过程,这种现象在冰川作用区比较普遍^[17].但是受消融过程的影响,融水中离子总强度的极值滞后于温度变化.冰川区以固体降水为主,几乎每次降水过后伴随一次降温过程,同时融水中离子浓度增大.不同于以降水补给为主的河流,每次较大的降水过程,产生河水流量的增加,伴随总离子浓度的降低^[23].

3 控制融水中离子变化的主要因素

天然水中的可溶性无机离子主要来源于岩石和土壤的风化分解,以及大气的干湿沉降^[24],通常采用 Gibbs 图式来确定离子主要来源.图 5 是七一冰

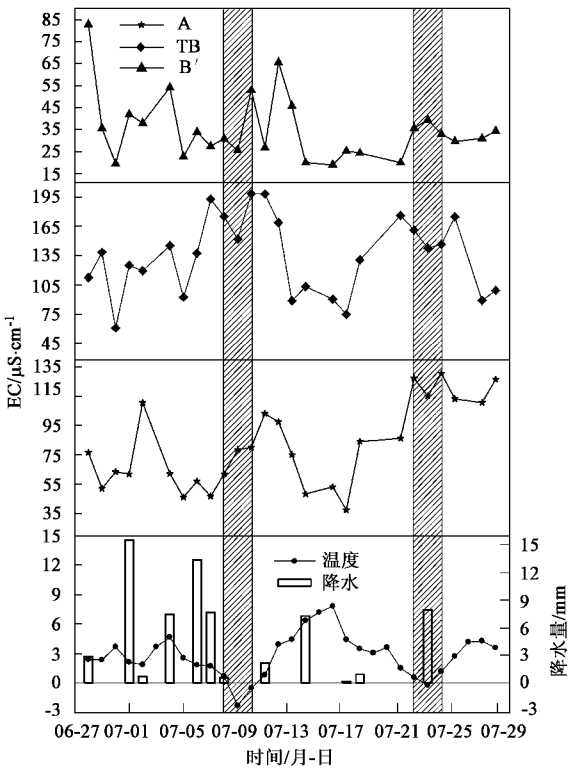


图 4 冰川末端冰面 1.4 m 处气温与 A、B'及 TB 点 EC、pH 逐日变化

Fig.4 Temporal change of EC, pH in site A, B', TB and temperature up glacier 1.4 m

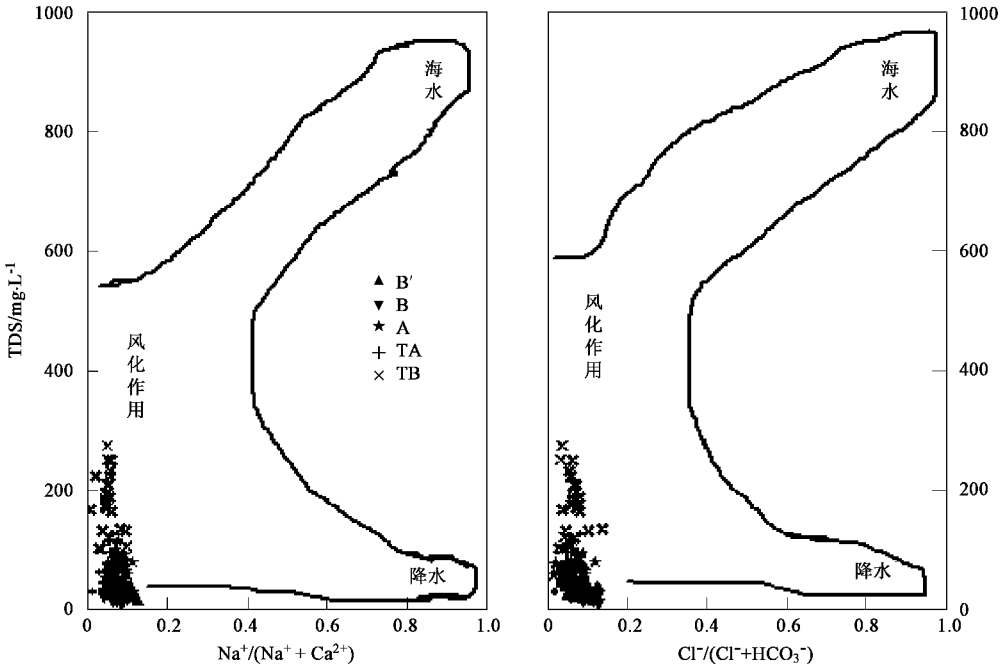


图 5 七一冰川融水 Gibbs 图

Fig.5 Gibbs diagram of Qiyi Glacier meltwater

固体的量(TDS);横坐标代表水体中 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值.在低矿化度水中,若具有较高的 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 或 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值,说明水体中离子主要来源于大气的干湿沉降.若点位于图5的左中部,则主要来源于水-岩作用过程;高矿化度水中,较高 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 或 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值,说明河水化学组成主要受干旱地区蒸发浓缩过程影响^[25].

从图5可以看到 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 或 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值均小于0.2,冰面融水中的TDS介于 $0 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,水文总控点TB的TDS在 $100 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,处在风化作用控制水体中离子变化区,说明七一冰川作用区融水中离子主要来源于水岩作用过程.

4 水化学组成演化及离子来源分析

图6是七一冰川融水化学组成演化三线图.如图6所示,从冰面融水到水文总控点TB,在阳离子总毫摩尔当量数中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 占到约10%,几乎没有变化; Ca^{2+} 所占比例由85%降到约60%, Mg^{2+} 则由10%增加到约38%.阴离子毫摩尔当量数中, Cl^- 占到不足10%,随融水演化变化不大,主要是 HCO_3^- 由85%降低到约60%,而 SO_4^{2-} 由10%上升到40%,主要是钙镁碳酸盐和硫酸盐浓度对比变化.

冰川区以固体降水为主,在降落过程中冲刷大气中的气溶胶粒子,溶解部分可溶性无机离子,增加了降水中的离子浓度.受陆源气溶胶粒子影响,七一冰川雪冰融水中以碳酸盐为主,与西北干旱地区降水化学研究结果一致^[20].冰面融水与冰碛物接触后,溶蚀岩体矿物中的部分化学物质,由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要以碳酸盐的形式存储在矿物中,而 MgCO_3 的溶解度显著高于 CaCO_3 ,因此在干旱半干旱地区低矿化水中,镁盐淋失较钙盐强,但由于风化壳中 Ca^{2+} 含量高于 Mg^{2+} ,因此水中 Ca^{2+} 浓度大于 Mg^{2+} ^[16],因此融水中 Mg^{2+} 与总阳离子比值增加.TA是七一冰川冰面融水和侧碛河交汇点,水化学类型介于两者之间.从TA到TB点 SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} 与总阴、阳离子比值逐渐增加,而 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 减少,与冰面融水到侧碛河的水化学组成演化过程一致.说明在七一冰川作用区水岩作用过程中,随总离子浓度增加,水化学类型由 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 演化为 $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$.但是水化学类型演化历程受冰川区地质岩性影响,不同地区水化学类型演化方

向可能不同.

我国河流水化学研究指出,河流中离子组成主要受碳酸盐和蒸发岩溶蚀作用影响,受铝硅酸盐风化作用影响不如前两者显著,也可以采用piper图来解释河流水化学组成及成因.纯碳酸盐的风化物质以 HCO_3^- 为主,因此数据点均落在 HCO_3^- 组分一端;蒸发盐矿物风化产物应落在 Cl^- 一端;一般在阳离子三角图上,蒸发盐矿物风化产物应落在 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 一端,石灰岩风化产物应落在 Ca^{2+} 一端,白云岩风化产物应落在石灰岩 $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$ 线中间($\text{Ca} : \text{Mg} = 1 : 1$).

从图6可以看到,冰面融水中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 占到总阴、阳离子的80%以上,说明离子主要来源于石灰岩风化.水文总控点TB样品中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别占总阳离子的毫摩尔当量的60%和35%, Na^+ 不到5%;阴离子中 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 分别占到约40%和58%,几乎不含 Cl^- ,说明蒸发岩贡献有限.融水中 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 占总离子的63%以上,表明水文总控点样品中离子主要来源于碳酸盐风化,也有部分硫酸盐贡献.

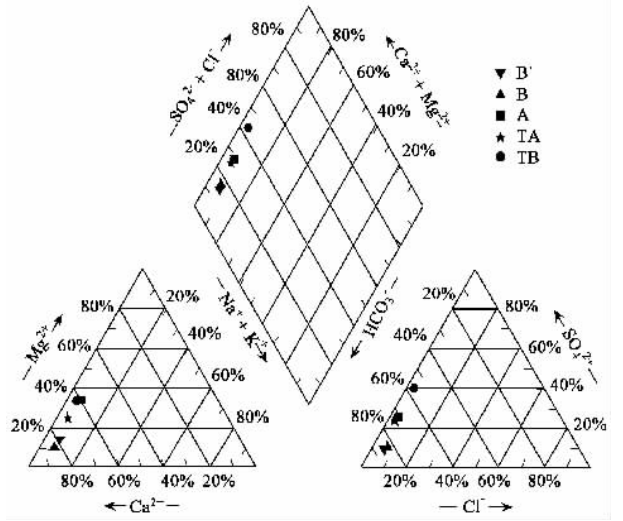


图6 七一冰川融水三线图

Fig. 6 Piper diagram of meltwater

5 结论

(1)所有样品中pH在8.05~8.79之间,呈弱碱性; Ca^{2+} 是主导性阳离子, HCO_3^- 是浓度最大的阴离子.冰面融水中主要可溶无机离子浓度<侧脊河<水文总汇点,主要离子浓度序列是: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$.水化学类型由冰川融水中的 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型演化为水文总控点

TB 的($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$)-($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)型.

(2)融水中可溶离子主要来源于碳酸盐溶解,也有部分硫酸盐贡献,主要受水岩作用过程控制,作用时间越长,离子浓度越高.在冰-岩交界处离子浓度增加的速度最快.主要径流演化过程中总离子浓度逐渐增大,但是各种离子浓度增大速率不同.水岩作用过程中, K^+ 、 Mg^{2+} 比 Na^+ 、 Ca^{2+} 更容易淋出.

参考文献:

- [1] Oerter H. Combined Environmental Isotope and Electrical Conductivity investigations of runoff of Vernagtferner (Oetzel Alps) [A]. In: International Symposium on the computation and prediction of runoff from glaciers and glacierised Area, 39. institute geografii, Materialy Gliatsiologicheskikh Issledovaniy Khronika [C]. Obsuzhdeniya, 86-91.
- [2] 王平, 刘智. 阿尔泰山友谊峰地区冰、雪及其受冰川融水补给径流中的微量元素含量[J]. 环境科学, 1982, **3**(3):33-35.
- [3] Hods A. The hydrochemistry of Bayelva, a high Arctic proglacial stream in Svalbard[J]. Journal of Hydrology, 2002, **257**: 91-114.
- [4] Singh P, Haritashya U K, Kumar N, *et al.* Hydrological characteristics of the Gangotri Glacier, central Himalayas, India [J]. Journal of Hydrology, 2006, **327**:55-67.
- [5] 蒲建辰,王平,皇翠兰. 长江江源地区冰川冰、雪、水的化学特征[J]. 环境化学, 1988, **9**(4):14-19.
- [6] 任贾文. 祁连山党和南山孔子沟 29 号冰川区雪、降水和地表水化学特征研究[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(2):151-154.
- [7] 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.
- [8] Johannessen M, Henriksen A. Chemistry of snow meltwater: changes in concentration during melting [J]. Water Resources Research, 1978, **14**(4):615-619.
- [9] Brown G H, Tranter M, Sharp M, *et al.* Experimental investigations of the weathering of suspended sediment by Alpine Glacial melt water[J]. Hydrological Processes, 1996, **10**: 579-597.
- [10] 蒲建辰. 七一冰川最新物质平衡观测结果[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(2):199-204.
- [11] Fujita K, Sakai A, Matsuda Y, *et al.* Topographical survey of July 1st Glacier in Qilian Mountains, China[J]. Bulletin of Glaciological Research, 2006, **23**:63-67.
- [12] Sakai A, Matsuda Y, Fujita K, *et al.* Meteo-ological observation at July 1st Glacier in northwest China from 2002 to 2005[J]. Bulletin of Glaciological Research, 2006, **23**:23-32.
- [13] Sakai A, Matsuda Y, Fujita K, *et al.* Hydrological observations at July 1st Glacier in northwest China from 2002 to 2004[J]. Bulletin of Glaciological Research, 2006, **23**:33-39.
- [14] 施雅风. 中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.48-53.
- [15] Brown G H. Glacier mealwater hydrochemistry [J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**:855-883.
- [16] 蒋辉. 环境水化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.67-85.
- [17] 王平. 我国高山冰川的雪冰化学研究[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(3):269-272.
- [18] Evans C D, Monteith D T, Harriman R. Long-term variability in the deposition of marine ions at west coast sites in the UK Acid Waters Monitoring Network: impacts on surface water chemistry and significance for trend determination[J]. Sci Total Environ, 2001, **265**:115-129.
- [19] 章典, 师长兴, 假拉. 青藏高原降水化学研究[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(3):555-557.
- [20] 李翠林, 侯书贵, 秦大河, 等. 天山乌鲁木齐河源径流水文化学空间差异及其控制因素[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(1):72-76.
- [21] 张利田, 陈静生. 我国河水主要离子组成与区域自然条件的关系[J]. 地理科学, 2000, **20**(3):236-240.
- [22] Anderson S P. Glaciers show direct linkage between erosion rate and chemical weathering fluxes[J]. Geomorphology, 2005, **67**:147-157.
- [23] 武小波. 黑河上游夏季径流化学研究[D]. 兰州: 兰州寒区旱区环境与工程研究所, 2007.43-45.
- [24] Gibbs R J. Mechanisms Controlling World Chemistry[J]. Science, 1970, **170**:1088-1090.
- [25] Hu M H, Stallard R F, Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers[J]. Nature, 1982, **298**:550-553.