

西天山科其喀尔冰川消融径流的水化学分析

王建, 丁永建, 许君利, 韩海东

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 为了研究西天山科其喀尔冰川融水径流的基本化学特征, 2003-06 ~ 2003-09 在研究区取样(冰面径流、冰面湖水、河水及大气降水), 结果表明: 本区各类水体都呈碱性, pH 值大小顺序为: 河水 > 冰面径流 > 冰面湖水 > 大气降水 > 7. 各类样品总离子浓度的顺序为: 河水 > 大气降水 > 冰面湖水 > 冰面径流. 冰面径流中的各项离子浓度均低于其它 3 类样品的相应值, 平均仅是河水的 24%; 阴、阳离子分别以 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 为最大. 由于降水过程中有物理变化和化学反应的作用, 不同降水形式中降雨的各项离子浓度(NO_3^- 除外) 均比冰雹和雪中的相应离子浓度大; 对不同海拔高度水样分析表明, 各项离子浓度“高程效应”十分明显, 3 900m 以上区域, 冰面径流中各阳离子浓度逐渐向冰川冰中各相应离子浓度逼近.

关键词: 水化学; 阴阳离子; 电导率; pH 值; 科其喀尔冰川

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2006)07-1305-07

Hydrochemical Characteristic Analysis of Melting Water Flow in Keqikaer Glacier, Tianshan(West) Mountains

WANG Jian, DING Yong-jian, XU Jun-li, HAN Hai-dong

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

Abstract: In order to study the melting water chemical characteristics in the Keqikaer Glacier, Tianshan(west) Mountains, the samples were collected from June to September in 2003. The result is found that: The pH value is between 7.35 ~ 8.52, the order of which is: river water > glacier melting water > lake water on glacier > precipitation. The various ionic concentrations of melting water are lower than other three kinds of samples, and average is 24% of river water. Comparing and analyzing hydrochemical difference among various precipitation forms, the author found that inhomogeneous ionic concentration of rainwater is higher than the others. Next, the water samples at different altitude have been analyzed, which shows that inhomogeneous ionic concentration of altitude effect is very remarkable. It is expected that if altitude is lower, the eluviation is led by glacier melting can influence the environmental information record of ice layer.

Key words: hydrochemical; anion and cation; conductivity mobility; pH; Keqikaer glacier

气候变化对径流过程的影响是全球变化研究的重要部分, 在径流对气候变化的响应过程中冰雪径流对气候变化的响应最为敏感^[1]. 冰川区是研究水圈和岩石圈交互作用的理想环境系统, 这是因为化学的侵蚀率较高和人类活动影响非常小. 详细研究冰雪融水性质的变化表明在评估化学侵蚀和全球生物地球化学循环中具有重大环境意义^[2,3]. 我国西部及中亚高山地区山地冰川分布广泛, 仅塔里木盆地内陆河流域共有现代冰川 14 285 条, 面积 23 628.98km², 冰储量 2 669.435km³, 冰川融水的年径流量达 $150 \times 10^8 \text{m}^3$, 约占流域地表总径流量的 40%^[4]. 因此, 冰川融水在我国西北地区的水资源组成中占据重要的地位, 对科其喀尔冰川开展水文化学作用研究意义重大. 这一研究帮助人们了解未来气候情景条件下, 山区河流水质变化, 可以为山区生态环境变化研究提供参考依据. 本文着重分析科其喀尔冰川融水与径流中各离子成分特征及控制因素, 并分析了发生在冰川表面融水和大气降水中的

一些水文化学现象.

1 研究区概况与取样

1.1 研究区概况

科其喀尔冰川(又名科其喀尔巴契冰川)位于西天山托木尔峰山汇南部, 新疆阿克苏地区温宿县境内, 属于亚大陆型冰川. 冰川上限为科其喀尔峰, 海拔 6 342m; 下限冰舌末端海拔高度为 3 020m, 冰川作用正差达 3 000 多 m; 冰川总长 25.1km, 面积 82.8km², 冰舌伸出山谷约 2.0km, 冰舌区表碛物覆盖较厚. 是阿特奥依纳克河源头之一, 阿特奥依纳克河由科其喀尔等 3 条冰川融水汇流形成, 全长约 40 多 km, 由北向南流至温宿县城北部消失.

托木尔峰地区的降水主要来自大西洋和北冰

收稿日期: 2005-06-07; 修订日期: 2005-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371026); 国家自然科学基金重点项目(90202013)

作者简介: 王建(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为寒旱区水文与水资源, E-mail: wjshuigong@lzb.ac.cn

洋的潮湿气流补给^[5],降水量主要集中在夏季和冬季,春秋两季降水量相对较少,其中5~9月份占70%左右,冷季降水量约占30%;降水量随海拔高度呈明显递增趋势,据推算托木尔峰南坡冰川区的降水梯度为30mm/100m^[6].科其喀尔冰川区雪线以上冰川物质积累区气候严寒,降水丰沛,多年平均降水估计可达1000mm以上.受区域地形地貌的影响,科其喀尔冰川区降水主要以冰雹霰等固态降水为主,考察期间(2003-07-06~09-11)在大本营实测降水量为196.2mm,日最大降水量为29.3mm;观测到总蒸发量为269.0mm,最大日蒸发量为10.0mm,最小日蒸发量为0.7mm.流域年径流量估计在 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,主要补给是冰川融水,达85%以上.考察期间,在冰川末端200m处设立人工水文断面,通过自动记录仪器对水位、水温、pH值、盐度等进行连续性观测.

1.2 采样点布设及样品处理

2003-07-07~2003-09-10在科其喀尔冰川末端200m处水文断面流量观测站设立采样点,采集逐日河水径流水样,时间均为08:00~20:00,特殊天气情况下,进行24h连续取样.研究不同降水形式的水化学差异,在水文断面流量观测站处进行雪、雨、冰雹等取样.研究冰川区冰面径流水化学过程及化学成分之间的空间相互关系,08-09、08-18和09-12~09-13从冰川末端到海拔4200m高山自动气象站处,每隔海拔约100m进行取样.研究由于给水面积增大而造成的冰川径流水地球化学过程的差异和进一步弄清冰川径流化学成分的来源,于08-09和09-12~09-13在冰川的不同海拔高度上的冰湖内采集了水样,样点沿冰川主流线按由低到高的海拔高度布设(图1).

水样采集后,当场装进用去离子水清洗过的水

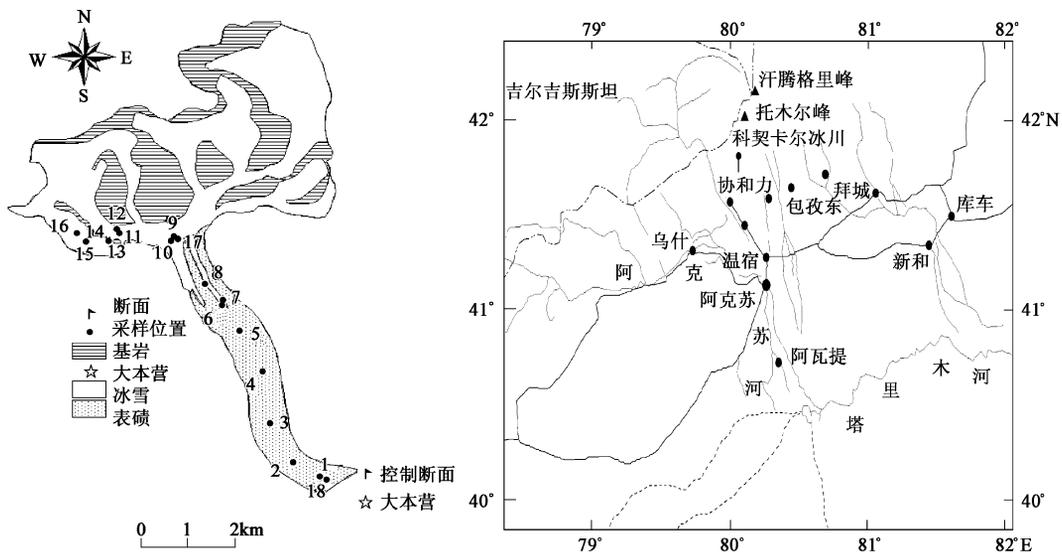


图1 研究区位置及取样点分布示意图

Fig. 1 Distributing of water samples in Keqikaer glacier region

样瓶中带回驻地,立即存放于冰箱中制冷,进行低温保存.样品运回中科院寒旱所冰芯与环境实验室,进行分析的前2d将样品取出,室温下自然融化后,分别用MAT252同位素气质谱仪,原子吸收光谱仪,Dinex-100离子色谱仪,电导率和pH计进行了 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ,电导率和pH值等项目的分析测定.阳离子的测定误差一般低于0.1%,阴离子低于0.3%, ^{18}O 的测量误差低于0.5%.

2 结果与分析

2.1 河水水化学组成

科其喀尔河源区河水的水化学组成见表1.鉴于数据太多,表1中只列出了样品浓度的极值、总体平均值以及各月的平均值.从表1可以看到,阳离子中 Ca^{2+} 是含量最高的离子,其平均值为16.3mg/L, Na^+ 、 Mg^{2+} 次之, K^+ 的含量最低,平均为2.11mg/L.分析的阴离子中, SO_4^{2-} 含量最高,平均为

12.7mg/L; Cl^- 次之,为 2.6mg/L; NO_3^- 最小,为 1.0 mg/L. 河水中各离子含量顺序分别为: $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$. 各月水体 pH 平均值都大于 7,因此科其喀尔河河水均呈现弱碱性. 其中 8 月的平均值最大,为 8.0,所测得极值

也出现在本月,为 9.3. 7 月和 9 月的平均值几乎相同,也呈现弱碱性. 河水的电导率较大,总体平均为 $95.13\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 其中,7 月份电导率的变幅最大,变化于 $17.1\sim 162.0\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间.

2.2 各类样品相应的离子浓度差异

表 1 2003-07-07~09-10 河水水化学特征

Table 1 Hydrochemical characteristics of river water from 07-07 to 09-10 in 2003

离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7月		8月		9月		各月平均值		
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	6月	7月	8月
Na^+	12.3	2.0	7.9	1.3	3.0	1.8	3.7	3.3	2.4
K^+	3.4	1.0	5.7	1.1	2.2	1.4	2.2	2.4	1.8
Mg^{2+}	7.1	1.9	5.3	1.0	2.1	1.7	2.7	2.7	1.9
Ca^{2+}	24.6	7.1	30.2	8.9	15.6	13.1	16.5	18.1	14.3
Cl^-	7.4	1.4	4.3	1.1	2.2	1.4	3.3	2.7	1.8
NO_3^-	4.7	0.0	2.1	0.0	0.9	0.0	1.9	0.5	0.4
SO_4^{2-}	26.3	6.1	25.9	3.7	13.0	5.7	13.1	15.9	9.0
平均值	12.3	2.8	11.6	2.5	5.6	3.6	6.2	6.5	4.5
pH	8.38	7.06	9.3	0.2	8.23	7.71	7.92	8.0	7.91
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	162.0	17.1	149.0	10.1	83.5	53.2	95.7	96.5	73.2

相比之下,冰面径流中的各项离子浓度值均远远低于其它 3 类样品的相应值(表 2). 例如河水中 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度和 pH、电导率分别是冰面径流的 5.34、8.50、2.06、2.50、3.94、4.55、21.09、1.05 和 4.20 倍. 河水中的 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度和 pH、电导率最大;大气降水中的 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 最大,尤其是 NO_3^- 是冰面径流中的 16.93 倍. 冰面湖水各项阳离子浓度均介于冰面径流与河水二者之间. 各点阳离子浓度均以 Ca^{2+} 居主导地位,且远远高出其它离子. 其它阳离子浓度顺序在各点略有差异,其中河水和大气降水相同,分别为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,而冰面湖水为 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$,冰面径流为 $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. 各点阴离子平均浓度以 SO_4^{2-} 浓度最大,浓度顺序均为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. 河水 SO_4^{2-} 平均浓度远远高于冰面湖水和冰面径流,而大气降水中的 Cl^- 和 NO_3^- 平均浓度均比其它类样品高. 各种水体中的离子浓度总和顺序为:河水 > 大气降水 > 冰面湖水 > 冰面径流. pH 值为:河水 > 冰面径流 > 冰面湖水 > 大气降水,且各类水体的 pH 值均大于 7,呈现弱碱性. Galloway 等^[12]报道中国北部地区降水中 NH_4^+ 的浓度一般比其它地区降水中的浓度高. 本地区潜在的 NH_3 来源有碱性土壤释放、动物粪便等,引起降水中 NH_4^+ 的浓度亦较高. 可能是导致研究区各项水体均呈现弱碱性的原因.

2.3 不同降水形式中离子浓度变化

表 2 研究区各类样品的离子平均浓度、pH 值和电导率

Table 2 Averages of ionic concentration, pH and conductivity mobility to different samples

离子/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	河水	冰面湖水	冰面径流	大气降水
Na^+	3.2	2.6	0.6	3.9
K^+	2.4	2.0	0.3	0.6
Mg^{2+}	2.6	1.5	1.3	0.8
Ca^{2+}	18.2	13.4	7.3	10.1
Cl^-	2.6	1.6	0.7	5.1
NO_3^-	0.4	0.7	0.1	1.5
SO_4^{2-}	15.0	2.9	0.7	5.8
pH	8.0	7.4	7.6	7.4
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	141.1	56.1	33.6	48.4

科其喀尔冰川区的降水主要以冰雹为主,其次是雨、雪等. 研究不同降水形式的离子浓度差异结果表明(图 2),降雨中 NO_3^- 以外的各项离子浓度均比冰雹和雪的离子浓度大. 尤其是 SO_4^{2-} 是冰雹的 5.16 倍. 冰雹中除了 K^+ 以外的各项离子浓度都比相应的其它 2 种降水形式的离子浓度低,降雪中各项阳离子浓度均介于冰雹和雨水之间. 不同降水形式的各项阳离子浓度顺序不尽相同,其中冰雹中的是 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$,而雪和雨水为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. 各项阴离子的浓度顺序,冰雹为: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$,而雪和雨水为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. 各类降水总的离子浓度顺序为:雨水 > 雪 > 冰雹. 原因主要有物理和化学变化 2 个因素:物理变化主要是大气气溶胶中存在硫酸盐、硝酸盐及卤化物等都易溶于液态水,而固态水(冰雹、雪等)则很

难溶解;化学变化是大气气溶胶中含有 SO_2 、 SO_3 、 NO_x 等氧化物与液态水发生化学反应后,导致降水过程中离子浓度,液态水(雨) > 雪 > 冰雹的现象出现^[13]。

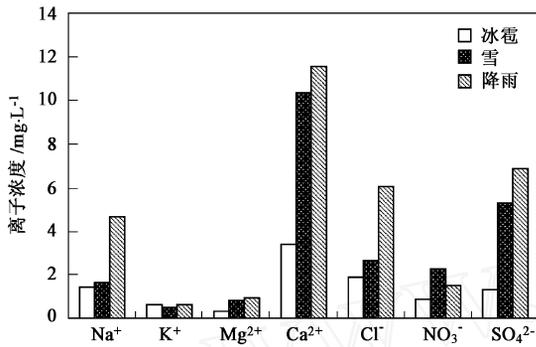


图 2 不同降水形式各离子浓度

Fig. 2 Variations of ionic concentration to different modality precipitation

2.4 径流中各离子浓度的空间变化规律

随海拔高度的变化,径流中各离子浓度也存在不同差异。各阳离子浓度总体上随海拔高度变化趋势是一致的(图 3a、b)。从冰川末端到海拔 3 700m,属于冰碛物覆盖冰川区,各阳离子浓度随海拔的增加而降低。从 3 700m 到 3 900m 区域,各阳离子浓度呈现“振荡性”变化规律。3 900m 以上区域,冰面径流中各阳离子浓度逐渐向冰川中各相应离子浓度逼近。各阴离子浓度变化规律也是一致的(图 3c)。同时,总体变化趋势也和阳离子是相似的,都是随海拔增加离子浓度减小。但也存在一定的差异性。从冰川末端到 3 650m,各阴离子浓度平稳变化。从 3 650m 到 3 900m,各阴离子浓度也呈现“振荡性”变化规律。阴阳离子的这种“振荡性”变化规律的出现是由于此区域内表碛物不连续性,水岩作用不均一,致使采样具有偶然性造成的。因此,各项离子浓度的“高程效应”十分明显,3 900m 以上区域,冰面径流中各阳离子浓度逐渐向冰川冰中各相应离子浓度逼近。相比分析,表明 pH 值和电导率随海拔增高的变化规律具有同步性,与离子浓度变化存在很大的差异(图 3d)。从冰川末端到 3 750m 左右,径流中 pH 值和电导率分别在 7.46 ~ 7.58 和 21.9 ~ 38.8 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 之间变化;海拔 3 750m 以上区域分别在 7.91 ~ 8.38 和 110.8 ~ 162 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 之间变化,这是因为在 3 800m 以上区域是裸露冰川;3 600m 以下区域是富有表碛物覆盖,水岩相互作用较强导致;两者之间属于表碛物富集过渡区域。

3 讨论

3.1 大气降水与河水水化学差异及控制因素

科其喀尔冰川末端河水每日 19:00 左右取样分析,各常规离子(NO_3^- 除外)总浓度变化趋势对日降水量的响应呈现降水量增加,离子浓度升高现象。如图 4 所示,总离子浓度平均值为 34.0 mg/L,最大值为 49.0 mg/L,最小值为 24.8 mg/L。从 08-08 ~ 08-19 日离子浓度出现持续偏低的现象,这与在此期间大气降水减少和持续晴天的出现有关。降水减少,气温相应升高,河水主要补给来源于冰川消融水,降水引起的土壤侵蚀和水岩相互作用变弱,从而导致河水离子浓度降低。而 08-07 出现离子浓度达 49.0 mg/L,这与 07-24 以来研究区出现持续大量降水,总量达 67.0 mm 有关。降水量的增加,河水补给来自大气降水形成径流量增加,导致地表土壤侵蚀和水岩相互作用的增大,从而导致河水离子浓度增大。另外,对降水量与离子浓度进行相关性分析,与总离子为 $r = 0.219$, Na^+ 为 0.326, Ca^{2+} 为 0.374,并且通过 Sig = 0.05 的显著性检验。其它各项离子与日降水量相关性较差,但也都呈现正相关性。这也说明,研究区降水对河水离子浓度的影响,同时也说明影响河水离子浓度变化主要是因来源于冰川表碛物和冰川侧脊区,受降水等引起的土壤侵蚀和水岩相互作用融入径流的离子影响。

大气降水和冰面径流显微碱化(pH 分别为 7.35 和 7.46),而控制断面径流一般呈碱性(pH = 7.99),可见在径流形成过程中发生了 H^+ 损耗,表明水岩相互作用影响了径流的酸碱度。而控制断面径流的离子浓度是冰面径流的离子浓度的几倍到十几倍,说明水岩相互作用在径流离子浓度形成中具有重要作用^[14]。在科其喀尔冰川区内大量存在的冰碛物岩石组分主要为来自山区的花岗岩、片麻岩、砂岩、沙砾岩及页岩等硅质结晶片岩,伴有大规模的黑云母花岗岩的侵入^[6]。上述冰碛物含有大量的 Na、Ca、Mg、Fe、Al、Si、S、C 等元素,这些元素都参与了各种水体的化学组成,经过水岩离子交换过程和化学反应导致控制断面径流中各离子浓度远高于大气降水。

由于冰碛物岩性为火山岩和火成变质岩,不存在硫酸钙和硫酸镁等硫酸盐矿物,因而径流中的 SO_4^{2-} 增强应该与硫化物的氧化密切相关。在冰川区广泛存在 FeS_2 及附近煤矿的发现,为硫化物提供依据。其氧化过程为:

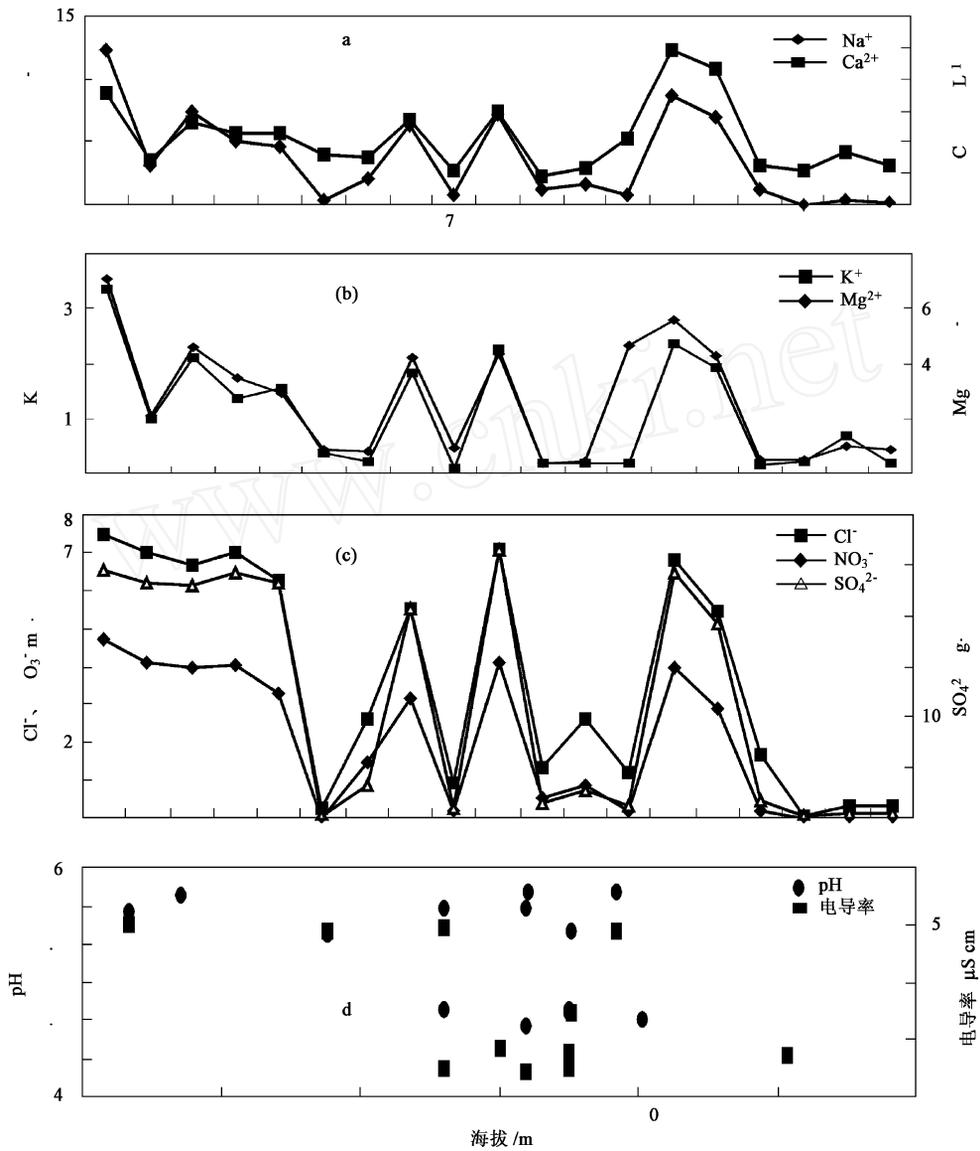


图 3 径流离子浓度、pH值和电导率的空间变化

Fig. 3 Spatial variations of ionic concentration、pH and conductivity mobility in the law of water flow

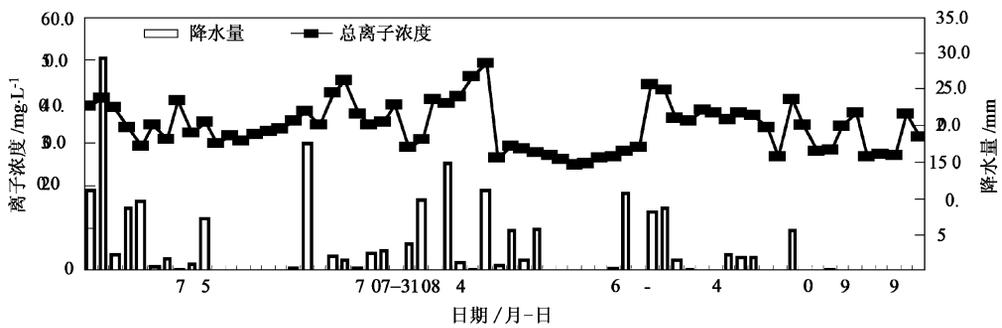
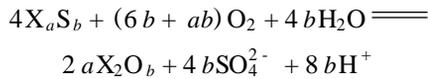
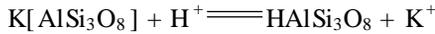


图 4 河水中总离子浓度对降水的响应

Fig. 4 Characteristics of total routine ionic concentration variations with precipitation



产生的 H^+ 会进一步引起长石类矿物的水解, 冰川控制断面径流中 K^+ 增强比 Na^+ 显著, 因此应该主要是钾长石的水解. 反应过程为:



同时, H^+ 还会引起变质岩中方解石的水解:



造成 Ca^{2+} 的增强, H^+ 被消耗. 正是上述反应过程大大消耗了原来冰川融水中的 H^+ 和后来产生的 H^+ 使 pH 值升高, 并造成径流中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 等浓度增高.

3.2 冰面径流与河水水化学差异及控制因素

冰面径流和河水中各离子浓度差别较大. 控制断面径流即河水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度和 pH、电导率分别是冰面径流的 5.34、8.50、2.06、2.50、3.94、4.55、21.09、1.05 和 4.20 倍. 这种现象可能是类似于积雪层中各离子富集 (ion concentration), 长期条件下, 各离子在冰中向下迁移, 造成冰川表面离子浓度较小. 经研究表明, 随积雪存在的时间越长, 积雪中各离子经过富集现象越明显, 积雪表层各离子平均浓度越低^[15,16]. 控制断面径流各离子浓度和 pH、电导率比较大, 可能是因为冰川径流在经过冰川底部溶洞等过程中, 各离子尤其离子量较大的离子重新融入径流, 加上土壤或岩石中溶解的离子等, 促使径流中离子浓度增大造成的. 同时, 冰川作用流域会增强 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 K^+ 的剥蚀率, 但 Na^+ 、 Cl^- 和 NO_3^- 却不会超过同海拔和岩性相当的非冰川流域. 冰川时刻处在缓慢移动之中, 冰体对基岩有磨蚀和拔蚀作用, 一方面增大了矿物颗粒破碎和表面积增大; 另一方面会产生新的磨光面, 增强矿物水解能力. 此外, 冰碛物孔隙发育有利于增加水岩作用的机会^[17]. 由图 3 冰川表面径流各离子浓度、pH 值和电导率随海拔高度变化及随海拔的降低各相应值逐渐增大, 表明这是在径流过程中各离子重新融入径流和水岩作用的结果.

3.3 冰面湖水与冰面径流水化学差异及控制因素

冰面湖水与冰面融水径流中各离子浓度差别较大, 主要表现为冰面湖水各离子浓度均比冰面径流大, 但 pH 值较小. 湖水中各离子浓度较大, 其成因和控制断面径流中离子浓度较大具有相似性. 冰面径流的水量补给主要是冰川融水, 而冰面湖水补给

除了冰川融水外, 还有冰川浅层下深水、积雪消融水和大气降水等. 通过考察, 科其喀尔冰川区降水在 500mm 以上, 由于降水比较丰富, 对冰面湖泊的补给量较大. 表 2 表明, 大气降水的 pH 值最小, 可能是导致冰面湖水 pH 降低的因素之一.

4 结论

(1) 科其喀尔冰川区各类水体都呈弱碱性. 其中, 河水的 pH 值平均为 7.99, 比我国境内大部分同类山地冰川融水的 pH 值都高. pH 值大小顺序为: 河水 > 冰面径流 > 冰面湖水 > 大气降水. 同时, pH 值和电导率随海拔增高的变化具有同步性, 从冰川末端到 3750m 左右, pH 值和电导率分别在 7.46 ~ 7.58 和 21.9 ~ 38.8 $\mu S \text{ cm}^{-1}$ 之间变化; 海拔 3750m 以上区域分别在介于 7.91 ~ 8.38 和 110.8 ~ 162 $\mu S \text{ cm}^{-1}$ 之间变化, 这是因为在 3800m 以上区域是裸露冰川; 3600m 以下区域是富有表碛物覆盖, 水岩相互作用较强; 而两者之间属于表碛物富集过度区域.

(2) 冰碛物覆盖区域水岩相互作用明显, 冰碛物岩离子组分的化学剥蚀作用以及冰川消融对径流离子成分产生巨大影响, 导致离子 (NO_3^- 除外) 浓度: 河水 > 大气降水 > 冰面湖水 > 冰面径流. 其中硫化物的氧化反应、变质岩中钾长石水解和方解石水解反应等为研究区主要化学作用.

(3) 大气降水过程中, 气溶胶和水之间存在物理变化和化学反应作用, 科其喀尔冰川区降水甚至出现 Na^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 比地表各种径流中相应离子浓度大; 同时, 导致降水过程中离子浓度, 液态水 (雨) > 雪 > 冰雹的现象出现.

参考文献:

- [1] Watson R, Znyowera M. Impacts adaptation and mitigation of climate change scientific technical anal uses [M]. Climate Change Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 248 ~ 249.
- [2] Giles H Brown. Glacier meltwater hydrochemistry[J]. Applied Geochemistry, 2002, 17(7): 855 ~ 883.
- [3] Anderson S P, Anderson J I, Drever C D. *et al.* Chemical weathering in the forefield of a retreating glacier. Geochim. Cosmochim Acta, 2000, 64: 1173 ~ 1189.
- [4] 沈永平, 王顺德. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 819.
- [5] 康尔泗, 朱守森, 黄明敏. 托木尔峰地区的冰川水文特征 [A]. 见: 中国科学院登山科学考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象 [C]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 99 ~ 119.
- [6] 中国科学院登山科学考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 143 ~ 156.

- [7] Johannessen M, Henriksen A. Chemistry of snow melt water: changes in concentration during melting [J]. *Water Resources Research*, 1978, **14**:615 ~ 619.
- [8] 刘风景, Williams M, 杨大庆. 天山乌鲁木齐河融雪径流的“离子脉冲”现象初探[J]. *科学通报*, 1997, **42**(4):417 ~ 419.
- [9] 李翠林, 侯书贵, 秦大河. 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.
- [10] Fairchild I J, Killawee J A, Hubbard B, *et al.* Interactions of calcareous suspended sediment with glacial meltwater: a field test of dissolution behaviour [J]. *Chem. Geol.*, 1999, **155**: 243 ~ 263.
- [11] Fountain A G. Effect of snow and firm hydrology on the physical and chemical characteristics of glacial runoff [J]. *Hydrol. Proc.*, 1996, **10**:509 ~ 521.
- [12] Galloway J N, Zhao D W, Xiong J L, *et al.* Acidrain: China, United states, and a remotesarea[J]. *Science*, 1987, **236**: 1559 ~ 1562.
- [13] 王明星. 大气化学[M]. (第二版). 北京:气象出版社, 1999. 88 ~ 161.
- [14] Liu Fengjing, Mark Williams, Sun Junying, *et al.* Hydrochemical processes and Hydrological separation at the headwaters of the Wulumuqi River, Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of glaciology and Geocryology*, 1999, **21**(4): 362 ~ 370.
- [15] Iida T, Ueki K, Tsukahara H, *et al.* Point physical model of movement of ions through natural snow cover[J]. *Journal of hydrology*, 2000, **235**(3 ~ 4):170 ~ 182.
- [16] Hou Shugui, Qing Dahe. The effect of postdepositional process on the chemical profiles of snow pits in the percolation zone[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, **34**(2), 111 ~ 116.
- [17] 侯书贵. 乌鲁木齐河源冬季积雪淋溶作用的实验结果[J]. *冰川冻土*, 2000, **22**(4):362 ~ 364.