

王明明,李忠勤,魏静,等. 祁连山典型冰川雪冰主要化学离子特征及其环境意义[J]. 环境科学研究,2016,29(10):1459-1470.

WANG Mingming, LI Zhongqin, WEI Jing, et al. Major ion characteristics and environmental significance of snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(10): 1459-1470.

祁连山典型冰川雪冰主要化学离子特征及其环境意义

王明明¹, 李忠勤^{1,2}, 魏 静¹, 王圣杰^{1*}, 瞿德业¹, 应 雪¹

1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070

2. 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天山冰川观测试验站, 甘肃 兰州 730000

摘要: 基于2011年在祁连山七一冰川和十一冰川采集的雪坑样品和2014年在八一冰川采集的表层雪样品,并结合2006年老虎沟12号冰川的研究成果,通过Pearson相关分析、主成分分析以及HYSPLIT(Hybrid Single Practical Lagrangian Integrated Trajectory)后向气团轨迹分析各冰川雪冰中主要化学离子特征,并探讨其反映的环境意义。研究表明:①祁连山各冰川雪冰中化学离子总质量浓度序列为七一冰川(31 014.2 $\mu\text{g/L}$) > 十一冰川(17 157.1 $\mu\text{g/L}$) > 老虎沟12号冰川(7 729.6 $\mu\text{g/L}$) > 八一冰川(2 248.1 $\mu\text{g/L}$),整体上呈中段雪冰化学离子质量浓度大于西段的空间分布特征;各冰川雪冰中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 均为主要的阴、阳离子, Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 载量在阴、阳离子中均居首位($\rho(\text{SO}_4^{2-})/\rho(\text{阴离子})$ 为52.7%, $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{阳离子})$ 为68.5%),除八一冰川之外的其他三条冰川间化学离子载量变化不大。祁连山冰川雪冰中主要化学离子分布存在显著的区域特征,其含量整体上高于高亚洲的大多数冰川区域,但与青藏高原东北部一些冰川相似,都有含量极高的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等阳离子。②Pearson相关性和主成分分析结果显示,地表矿物粉尘输入是该区域雪冰中化学离子最主要的来源, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量的多寡可以指示地表矿物的输入状况;此外,柴达木盆地盐湖在夏季对 Cl^- 和 Na^+ 的贡献较大,但在湖水蒸发较弱的其他季节对雪冰中化学离子的贡献并不显著,夏季 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 在一定程度上可以反映盐湖离子输入的程度, NH_4^+ 和部分 NO_3^- 主要来源于人类活动排放。③HYSPLIT后向气团轨迹反演结果表明,到达祁连山区的大多数气团主要发源于西部,途径沙漠地区,是冰川化学离子输入的主要动力,也有部分季风气团来自印度洋等海域,为冰川区带来大量降水。

关键词: 祁连山; 雪冰; 离子; 化学特征; 环境意义

中图分类号: X132

文章编号: 1001-6929(2016)10-1459-12

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.10.09

Major Ion Characteristics and Environmental Significance of Snow and Ice on Typical Glaciers in Qilian Mountains

WANG Mingming¹, LI Zhongqin^{1,2}, WEI Jing¹, WANG Shengjie^{1*}, QU Deyue¹, YING Xue¹

1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2. Tianshan Glaciological Station, State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China

Abstract: Based on snow pit samples taken from Qiyi Glacier and Shiyi Glacier in 2011 and surface snow samples taken from Bayi Glacier in 2014, combined with samples collected from Laohugou Glacier No. 12 in Qilian Mountains, analysis was undertaken to determine the chemical characteristics and environmental significance of ions with correlation analysis, principal component analysis and backward trajectory of air mass. The concentration of ions followed the order: Qiyi Glacier (31,014.2 $\mu\text{g/L}$) > Shiyi Glacier (17,157.1 $\mu\text{g/L}$) >

Laohugou Glacier No. 12 (7,729.6 $\mu\text{g/L}$) > Bayi Glacier (2,248.1 $\mu\text{g/L}$), which revealed the spatial characteristic that the concentration of ions in snow and ice of middle Qilian Mountains was higher than that of the western region in Qilian Mountains. Ca^{2+} accounted for 68.5% of all cations and SO_4^{2-} for 52.7% of all anions, and the relative trend of ion percentage changed little apart from Bayi Glacier. Compared with various glaciers in other regions of High Asia and Polar Regions, dramatic regional differences existed in characteristics of ions that

收稿日期: 2016-03-27 修订日期: 2016-05-29

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-G03-01); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CBA01801); 西北师范大学2016年本科生创新能力提升计划项目(nwnucx20160133)

作者简介: 王明明(1994-),男,甘肃和政人,wmn863@163.com.

* 责任作者,王圣杰(1987-),男,陕西汉中,讲师,博士,主要从事全球变化与水循环过程研究,geowang@126.com

concentrations were higher than most of other regions. However, it was similar to the glaciers in the northeastern Tibetan Plateau, which had plenty of cations such as Mg^{2+} and Ca^{2+} . Further study showed the desert nearby was the most important source and the quantity of Ca^{2+} and Mg^{2+} could reflect the dust transport level into snow. Besides, Cl^- and Na^+ were heavily affected by the lake salinity evaporating at Qaidam Basin in summer, but the contribution was not very prominent for other seasons with little evaporation of lake water. Therefore, the value of $\rho(Cl^-)/\rho(Na^+)$ was an index, in a way, which reflected the effect of lake salinity in summer. NH_4^+ and part of NO_3^- were influenced by human activities. HYSPLIT backward trajectory of air mass demonstrated that air mass, originating from the western area and passing through a lot of desert, was the primary power to transmit ions into glaciers. In addition, some air mass, originating in the Indian Ocean, brought about plentiful rain.

Keywords: Qilian Mountains; snow and ice; ions; chemical characteristics; environmental significance

冰川是大气过程的产物,记录源自于地球的各种化学物质信号,是大气中各种化学物质的存储器^[1-2]. 雪冰中沉积的化学物质记录着大气环境变化的信息,其中阴、阳离子是反映气候环境演化的重要指标之一,明晰化学离子的来源、传输及其在雪冰中的次生演化等问题,不仅可以揭示气候与自然环境的演变规律,而且对物质在地球各圈层之间的迁移转化研究具有重要意义,因而雪冰的化学分析成为全球变化研究的重要手段^[3].

冰川所处的大气环境是决定冰川雪冰中化学离子来源及其特征的主要因素^[4]. 作为世界“第三极”的青藏高原,受亚洲季风气候和中亚干旱半干旱气候影响,区内气候环境差异极大,效存德等^[5-6]研究表明,青藏高原雪冰中化学离子的分布存在较为明显的空间变化特征, Na^+ 有从青藏高原中部向南部逐渐增加的趋势,而 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 有从青藏高原中心向北部和南部逐渐增加的趋势;耿志新等^[7]对喜马拉雅山南北坡的雪坑和浅雪芯化学离子的研究发现,北坡 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 的浓度远高于南坡,南坡 NH_4^+ 浓度远高于北坡. 祁连山位于青藏高原东北边缘,受青藏高原和亚洲粉尘活动区的共同作用^[8],因而其雪冰中沉积的阴、阳离子等化学物质承载着丰富的环境信息. 崔晓庆等^[9]对祁连山老虎沟12号冰川浅冰芯的研究表明,冰芯中的可溶性离子主要来源于我国西北干旱半干旱区的陆源粉尘和冰川周边的盐湖矿物风化;董志文等^[10]对祁连山老虎沟12号冰川雪坑的进一步研究发现,雪坑中化学离子(尤其是 Cl^- 和 Na^+)除了来源于陆地矿物粉尘之外,还来源于海洋.

祁连山地域范围广阔,跨越干旱区和半干旱区,周边有广阔的荒漠和戈壁. 该区域分布的众多山岳冰川是河西走廊重要的水资源,揭示其雪冰的化学特征及其环境意义对研究该区域气候变化、水资源演化以及生态建设都有重要价值. 该区域受亚洲粉尘的影响,因此输入雪冰中的化学物质存在显著的区域特

征. 鉴于此,该研究基于2011年在祁连山七一冰川和十一冰川采集的雪坑样品和2014年在八一冰川采集的夏季表层雪样品,并结合2006年在老虎沟12号冰川钻取的浅冰芯研究成果,对祁连山典型冰川雪冰化学特征及其环境意义进行分析,以期进一步丰富对高亚洲地区雪冰中化学离子的认识,为该区域冰川化学的后续研究提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山由一系列西北走向的平行山脉与谷地组成,东起乌鞘岭,西至当金山口,南靠柴达木盆地,北临河西走廊,东西长800 km,南北宽200~400 km^[11]. 以青海湖和哈拉湖为界,祁连山被划分为东段(武威—拉脊山)、中段(酒泉—德令哈)和西段(鹰咀山—大柴旦),地势由东北向西南逐渐升高^[12]. 祁连山区气候属高山高原气候类型,区内气候寒冷,年均气温低于4℃,年均降水量在100~600 mm之间;气候受海拔影响较大,高海拔处气温较低,降水较多;气候水平分布表现为祁连山东段湿度大、降水多,中段和西段气候干燥、降水少. 在季风影响下,夏半年(4—10月)东坡或南坡的雨水较多,冬半年(11月—翌年3月)则相反,但整体上降水主要集中在夏季^[13-14]. 祁连山周边沙漠戈壁广布,可能为冰川区提供了大量的地表矿物粉尘.

该研究选取位于祁连山西段的老虎沟12号冰川和中段的七一冰川、八一冰川、十一冰川作为研究对象(见图1),分析雪冰中化学离子的分布特征,揭示其反映的环境意义. 各冰川的基本信息如表1所示.

1.2 样品采集与主要化学离子质量浓度测定方法

七一冰川和十一冰川雪坑样品采集于2011年5月,采样点分别位于海拔为4 800和4 650 m的冰川积累区,表面整洁,处于背阴面,雪坑深度均为60 cm,间隔10 cm取样;八一冰川表层雪样品采集于2014年7月,采样点位于海拔4 770 m以上的冰川积

累区, 采样时冰川表面没有明显的新雪, 均匀选取 6 个点, 取表层 10 cm 积雪; 老虎沟 12 号冰川浅冰芯^[8] 钻取于 2006 年 6 月, 位于海拔 5 040 m 的粒雪盆。样品的采集、运输和保存严格按照规范^[15-16] 进行, 样品采集后运至中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 保持在 -18 ℃ 的冷冻状态, 直至完成样品分析。

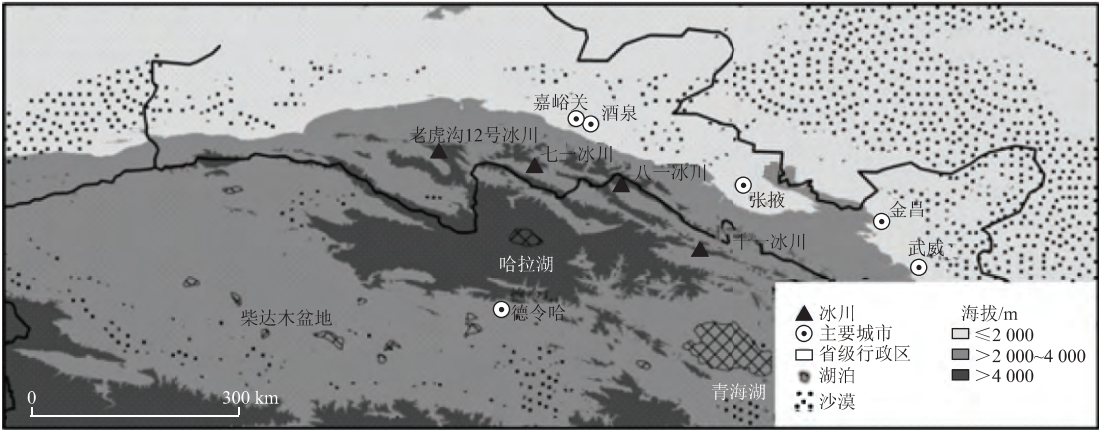


图 1 祁连山典型冰川采样点及周边环境

Fig. 1 Locations of sampling sites on typical glaciers and surrounding environment in Qilian Mountains

表 1 祁连山典型冰川的基本信息

Table 1 Basic information of typical glaciers in Qilian Mountains

分布区域	冰川名称	地理位置	面积/km ²	类型	海拔/m
祁连山西段	老虎沟 12 号冰川	39°26'N, 96°33' E	20.42	山谷型	4 300 ~ 5 300
	七一冰川	39°15'N, 97°45' E	2.53	冰斗-山谷型	4 300 ~ 5 100
祁连山中段	八一冰川	39°01'N, 98°53' E	4.08	冰帽	4 520 ~ 4 828
	十一冰川	38°12'N, 99°52' E	0.33	山谷型	4 300 ~ 4 700

主要化学离子 (K^+ 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-) 的质量浓度用 Dionex-300 型离子色谱仪(美国戴安公司)测定, 其精度可达 ng/L 级, 测试数据误差小于 5%; 使用 Accusizer780A 光学粒径检测仪(美国 PSS 粒度仪公司)对不溶微粒进行分析, 分析和测量的精度在 5% 以内, 再根据需要进行统计各粒径范围内微粒的精确数量。试验从融化、取样、注样等整个分析过程都在洁净等级设计标准为 100 级的超净工作台内完成。

运用 IBM SPSS Statistics 21 统计软件对主要化学离子的质量浓度进行 Pearson 相关系数和主成分分析, 讨论雪冰中化学离子之间的相关关系及其主要来源, 同时基于 HYSPLIT4(Hybrid Single Practical Lagrangian Integrated Trajectory) 模型分析到达冰川采样点上空 7 d 内的大气后向气团的传输轨迹(其中包括大气垂直运动模式), 进一步说明雪冰化学离子来源。

2 结果与分析

2.1 祁连山各冰川雪冰中主要化学离子的质量浓度特征

由表 2 可见, 祁连山各冰川雪冰中主要化学离子总质量浓度表现为七一冰川(31 014. 2 μg/L) > 十一冰川(17 157. 1 μg/L) > 老虎沟 12 号冰川(7 729. 6 μg/L) > 八一冰川(2 248. 1 μg/L), 整体上呈中段雪冰化学离子质量浓度大于西段的空间分布特征, 这可能与积雪中粉尘的输入量密切相关。根据甘肃省环境监测中心站(<http://www.gsemc.cn/Web/Default.asp>) 公布的监测数据, 采样年份嘉峪关市、酒泉市空气中可吸入颗粒物年均质量浓度(133. 5、127. 8 μg/L) 均高于张掖市(80. 0 μg/L)、金昌市(90. 3 μg/L), 而距离嘉峪关市和酒泉市较近的七一冰川的离子总质量浓度最高, 距离张掖市和金昌市较近的十一冰川的离子总质量浓度次之, 可见冰川雪冰中化学离子质量浓度和空气中颗粒物质量浓度存在很好的一致性; 八一冰川雪冰样品为 7 月表层雪样, 该季节降水相对于其他季节较为丰富, 降水对大气的淋洗作用使空气中的粉尘含量大幅降低, 并且地表起尘减弱, 所以输送到冰川区的粉尘含量整体上有所下降, 故而八一冰川离子总质量浓度最低。

雪冰中阴、阳离子质量浓度的差值可以表示雪冰

中阴、阳离子的化学平衡状况. 由表2可见, 祁连山4条冰川都表现出阳离子质量浓度远大于阴离子质量浓度的特征, 七一冰川、八一冰川、老虎沟12号冰川、十一冰川雪冰中阴阳离子质量浓度差值分别为13 778.7、1 325.9、991.4、4 141.9 $\mu\text{g/L}$, 反映出在空间上祁连山中段冰川阴、阳离子的不平衡程度大于西段. 一般认为^[6,17], 这种离子不平衡是由雪冰中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的浓度以及二者之间的相互转化而造成的, 另一方面是由于冰川积雪中输入了过多的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子所致. 有研究^[6,18]认为, 积雪中高含量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子来源于地表矿物, 所以祁连山冰川雪冰中阴、阳离子不平衡的空间特征反映

出中段冰川受地表矿物粉尘的影响较大.

七一冰川、老虎沟12号冰川、十一冰川中阳离子质量浓度顺序均为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 与地壳中这几种元素含量的顺序($\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$)基本一致; 阴离子质量浓度顺序均为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$, 与国际标准海水中的质量浓度序列($\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$)差异很大, 说明这4条冰川中大多数阴离子来源于陆地, 受海洋的影响甚微. 八一冰川中阳离子质量浓度顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$, 阴离子质量浓度顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$, 与其他3条冰川相比, 只有 $\rho(\text{Na}^+)$ 和 $\rho(\text{Cl}^-)$ 有所降低, 说明整个区域内 Na^+ 和 Cl^- 在夏季的输入较少, 而其他离子都有相同来源.

表2 祁连山典型冰川中主要化学离子质量浓度

Table 2 Concentrations of major ions in snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains

冰川名称	$\rho/(\mu\text{g/L})$									$(\rho^+ - \rho^-) / (\mu\text{g/L})$		
	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	$(\rho^+ + \rho^-) / (\mu\text{g/L})$	$\rho(\text{Cl}^-) / \rho(\text{Na}^+)$	
老虎沟12号冰川	22.7	1 292.8	553.2	1 500.4	870.3	355.5	86.9	169.9	2 877.9	991.4	7 729.6	1.49
七一冰川	19.3	4 298.4	1 240.0	6 929.2	3 658.7	260.9	291.5	1 077.6	13 243.1	13 778.7	31 014.2	1.17
八一冰川	14.0	59.2	164.2	237.8	33.3	329.1	69.8	674.7	680.1	1 325.9	2 248.1	1.80
十一冰川	21.0	2 474.7	662.1	3 369.4	2 119.6	274.7	290.9	555.4	7 410.4	4 141.9	17 157.1	1.17

注: ρ^+ 为阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+)质量浓度之和; ρ^- 为阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^-)质量浓度之和.

各冰川离子载量(各离子质量浓度占有离子总质量浓度的百分比)的变化在一定程度上可以反映冰川间离子来源的差异性. 由图2可见, 除八一冰川外, 其他各冰川雪冰中离子载量整体变化不大, 说明祁连山中、西段冰川雪冰中离子有很大的同源性; Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 载量在阴、阳离子中均居首位($\rho(\text{SO}_4^{2-}) / \rho(\text{阴离子})$ 为52.7%, $\rho(\text{Ca}^{2+}) / \rho(\text{阳离子})$ 为68.5%), 其次为 Na^+ 和 Cl^- 载量, NH_4^+ 和 K^+ 载量最小. 八一冰川表层雪中化学离子的含量在一定程度上可以反映夏季化学离子的输入状况, 其中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 载量相比于其他3条冰川均有所降低, Cl^- 、 Na^+ 的载量及其质量浓度均显著低于其他冰川, 老虎沟12号冰川雪坑中也发现夏季雪层中离子含量低于其他季节雪层的现象^[19], 从而说明祁连山夏季 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 Na^+ 的输入较弱; 而 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 的载量都高于其他冰川, 其中 NH_4^+ 和 Mg^{2+} 的载量变化最为明显, 这可能与夏季活跃的人类活动和局地地表环境过程有关, 王泽斌等^[8]对祁连山大雪山的气溶胶研究也发现, 夏季 NO_3^- 和 NH_4^+ 的浓度明显高于其他季节. 八一冰川位于老虎沟12号冰川和七一冰川的西风带下风向, 但在离子载量上表现出如此大的差异, 反映出祁连山夏季雪冰中化学离子的来

源与其他季节相比有显著差异, 其中高浓度的 NH_4^+ 离子反映出夏季该区域受人类活动的影响较大.

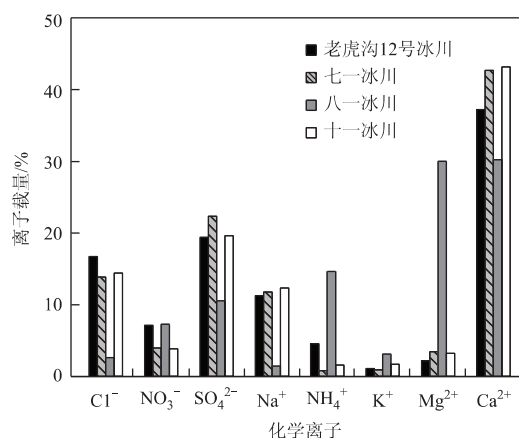


图2 祁连山典型冰川雪冰中主要化学离子载量

Fig. 2 Percentage of major ions in snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains

2.2 各冰川中主要化学离子的空间分布特征

姚檀栋等^[6,17]对亚洲中部不同冰川区积雪化学特征的研究表明, 亚洲干旱区和半干旱粉尘的输入量是影响这些区域雪冰化学空间特征的主要因素. 对比高亚洲和极地典型冰川雪冰中化学离子质量浓度(见表3)可知, 祁连山冰川雪冰中化学离子的分布存

在显著的区域特征,离子平均质量浓度远高于格陵兰冰盖,也普遍高于天山、阿尔泰山、横断山等高亚洲的大多数区域,其中 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 在较大多数区域高出两个数量级, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{Na}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 基本上都高出 1 个数量级,祁连山西段冰川积雪粉尘研究^[28]也表明,该区域粉尘浓度、沉降通量都远高于北半球大多数冰川区域;但与青藏高原东北部的一些冰川(唐古拉山古仁河口冰川、唐古拉山小冬克玛底冰川、昆仑山玉珠峰冰川)较为相似,都有含量极高的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等.青藏高原冰川雪坑离子特征研究^[24]发现,离子受青藏高原干旱区的影响很大,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等几乎全部来自青藏高原的干旱地区.相比于青藏高

原,祁连山区周边的干旱区更加广阔,所以该区域极高含量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等也极有可能来源于周边干旱区,虽然上述区域离子含量存在很大差异,但不同区域雪冰中主要的阴、阳离子均分别为 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} .一般认为, Ca^{2+} 是来自亚欧大陆沙漠和黄土地区矿物微粒的指示物, SO_4^{2-} 主要来源于土壤尘埃,其次为人类活动污染^[18,29].据此可推断,祁连山冰川和高亚洲其他区域冰川雪冰中的化学离子均受到不同程度的地表矿物粉尘的影响,但祁连山所受的影响更大;此外,表征人类活动的 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 也普遍高于天山、阿尔泰山、横断山等区域,说明该区域受到人类活动的影响较大.

表 3 祁连山以及高亚洲和极地其他典型冰川雪冰中主要化学离子质量浓度的比较
Table 3 Concentrations of major ions in snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains and other areas of High Asia and Polar Region

冰川名称	研究时段	$\rho/(\mu\text{eq/L})$								数据来源
		Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	
祁连山七一冰川	2014—2015 年	121.0	20.3	144.4	159.1	15.3	4.7	89.8	662.2	该研究
祁连山十一冰川	2014—2015 年	69.7	10.9	70.2	92.2	16.2	2.4	46.3	370.5	该研究
祁连山八一冰川	2014—2015 年	1.7	2.7	5.0	1.4	19.4	3.0	56.2	34.0	该研究
祁连山老虎沟 12 号冰川	2012—2013 年	36.4	8.9	32.3	3.1	19.7	2.2	14.2	143.9	文献 [8]
祁连山冰川平均值	—	57.2	10.7	63.0	64.0	17.7	3.1	51.6	302.7	该研究
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川	2004—2007 年	7.25	5.8	11.4	3.2	9.6	1.1	11.1	74.4	文献 [9]
天山庙尔沟平顶冰川	2004—2005 年	3.7	6.5	9.5	17.5	6.5	0.5	8.1	41.4	文献 [9]
天山奎屯河希特勒根 51 号冰川	2004—2007 年	1.4	1.5	3.7	0.8	6.1	0.5	1.4	6.8	文献 [9]
天山托木尔峰青冰滩 72 号冰川	2007—2008 年	9.7	5.3	6.4	9.8	1.9	2.4	74.7	71.8	文献 [20]
阿尔泰山喀纳斯冰川	2007—2008 年	1.4	3.5	4.0	1.6	4.7	0.9	0.7	3.9	文献 [21]
阿尔泰山 Belukha 冰川	1815—2001 年	0.5	2.7	4.0	0.6	8.2	0.3	0.8	4.4	文献 [22]
念青唐古拉山纳木错地区冰川	2005—2006 年	19.2	10.4	15.5	15.4	18.1	14.5	7.4	65.6	文献 [23]
唐古拉山古仁河口冰川	2007—2008 年	3.2	11.8	8.6	19.3	14.9	7.0	23.1	135.5	文献 [24]
唐古拉山小冬克玛底冰川	2007—2008 年	6.2	8.6	10.7	33.6	18.3	4.3	96.1	704.4	文献 [25]
昆仑山玉珠峰冰川	2007—2008 年	40.2	5.5	16.4	114.0	79.3	3.6	100.1	707.2	文献 [25]
横断山玉龙雪山白水 1 号冰川	2005—2006 年	3.7	11.9	28.9	—	1.14	1.6	7.1	163.7	文献 [26]
格陵兰冰盖	2002 年	0.82	0.31	0.79	0.45	0.48	0.10	0.18	0.57	文献 [27]

注: $\mu\text{eq/L}$ 为微当量每升,与 $\mu\text{g/L}$ 的互换关系为 $\mu\text{eq/L} = (\mu\text{g/L}) \times \text{离子价/化学结构式量}$.

祁连山各冰川雪冰中阴、阳离子的相对组成结果(见图 3)显示,除八一冰川之外,其他 3 条冰川雪冰中阳离子组成和青藏高原、阿尔泰山部分冰川接近,阳离子中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 所占比例均很大;阴离子相对组成与其他区域相比差异较大,其中 SO_4^{2-} 含量相对较高,并表现出明显的区域特

征,这可能与祁连山距离人类活动区较近、周边地理环境复杂多样有关.八一冰川的离子相对组成与其他 3 条冰川相比差异较大,说明夏季表层积雪中化学离子的来源不同于其他季节;其他 3 条冰川的离子相对组成都很相近,说明这些冰川离子有很好的共源性.

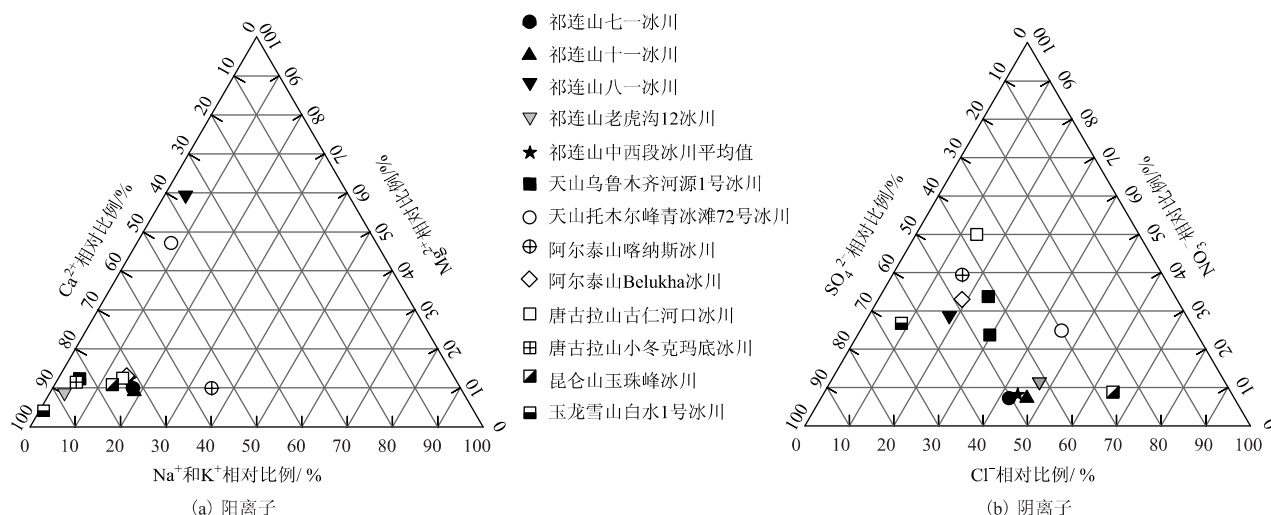


图3 祁连山以及高亚洲和极地其他典型冰川雪冰中主要阴、阳离子的相对比例

Fig. 3 Relative proportions of major anionic and cationic concentrations in snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains and other areas of High Asia and Polar Region

3 讨论

3.1 冰川主要化学离子及不溶微粒间的相关性

在天山乌鲁木齐河源1号冰川积累区表层雪研究^[9]中,根据表层雪中微粒含量与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量有很好的相关性,得出 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 主要来源于陆地的结论.笔者计算了祁连山区各冰川积雪中 $\rho(\text{不溶微粒})$ 与 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Na}^+)$ 的Pearson相关系数(见表4),以及八一冰川积雪中 $\rho(\text{不溶微粒})$ 与各主要化学离子质量浓度之间的Pearson相关系数(见表5).结果显示,七一冰川和十一冰川积雪中 $\rho(\text{不溶微粒})$ 与 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 之间有很好的相关性,与文献^[9]的研究结果有很好的-致性.据此可推断,祁连山区冰川中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要随地表矿物粉尘输入冰川,二者含量的多寡可以反映地表矿物粉尘的输入状况;而八一冰川表层雪中只有 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 与 $\rho(\text{不溶微粒})$ 存在很好的相关性,而 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 却与 $\rho(\text{不溶微粒})$ 相关性不太好,说明夏季 Mg^{2+} 的来源不同于其他季节,但在较长时间内其主要来源仍是地表矿物粉尘; $\rho(\text{Na}^+)$ 与 $\rho(\text{不溶微粒})$ 的相关性却不是很高,在八一冰川中甚至表现出负相关,而由表5可知,八一冰川表层积雪中 $\rho(\text{Na}^+)$ 仅与 $\rho(\text{Cl}^-)$ 表现出正相关($R=0.798, P=0.001$),与其他离子质量浓度都呈负相关,说明在夏季 Na^+ 和 Cl^- 来源相同.

由图2可知,除八一冰川外,其他3条冰川中 Na^+ 和 Cl^- 载量的变化趋势极为相似,但整体上 Cl^- 载量高于 Na^+ 载量, $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 的平均值为1.21,而在八

一冰川夏季表层积雪中 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 达到1.80.研究^[6]显示,在距海岸线10~25 km范围内的降水中的 Cl^- 含量随着距海岸线距离的增加呈线性减少趋势,在距海岸线距离超过25 km的内地降水中 Cl^- 含量则呈指数下降趋势.祁连山区深处内陆,海洋性气团到达该区域时降水中所携带的 Cl^- 几乎消耗殆尽,所以降水对 Cl^- 的贡献可以忽略不计.位于研究区西南部的柴达木盆地分布有众多盐湖,盆地内夏季高温少雨,年蒸发量在2 000~3 000 mm之间,夏季最高可达到3 700 mm,降水量只有50 mm,而且盐湖含盐度很高(比海水含盐量高出10倍以上),其中 Cl^- 含量高出 Na^+ 含量数十倍^[1],所以夏季冰川中过多的 Cl^- 可能与位于祁连山西南部柴达木盆地夏季旺盛的盐湖蒸发密切相关,所以夏季积雪中 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 在一定程度上可以表示盐湖离子输入强度,其值越大,则盐湖卤水中离子的输入越强,但具体数量关系有待进一步研究.霍文冕等^[32]对祁连山敦德冰芯的研究也发现,冰芯中的 Cl^- 可以反映盐湖贡献的强弱.盐湖卤水中阳离子含量顺序为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$,阴离子含量顺序为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$.相比而言,祁连山区雪冰中阴、阳离子含量顺序与盐湖有很大差异,并且雪冰中 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 的平均值并不太高,说明柴达木盆地盐湖离子在湖水蒸发较弱的其他季节对该区域雪冰中化学离子的贡献不大,但是在盐湖蒸发旺盛的夏季对 Cl^- 、 Na^+ 等有较大贡献.老虎沟12号冰川冰芯的相关研究^[8]也表明,冰芯中过量的 Cl^- 来源于夏季高原上众多盐湖的蒸发和高原季风带来的降水.

表 4 祁连山典型冰川雪冰中 $\rho(\text{不溶微粒})$ 与 $\rho(\text{Na}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients between concentration of insoluble particle and ions (Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+}) in snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains

冰川名称	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$
七一冰川	0.371	0.960*	0.993*
十一冰川	0.411	0.913*	0.700**
八一冰川	-0.483	0.430	0.929**

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关. 下同.

表 5 八一冰川表层雪中 $\rho(\text{不溶微粒})$ 与各主要化学离子质量浓度的 Pearson 相关系数矩阵

Table 5 Pearson correlation coefficient matrix of concentration of insoluble particle and major ions in surface snow on Bayi Glacier

项目	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{NH}_4^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{不溶微粒})$
$\rho(\text{Cl}^-)$	1								
$\rho(\text{NO}_3^-)$	-0.937**	1							
$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	-0.780	0.930**	1						
$\rho(\text{Na}^+)$	0.798**	-0.612	-0.283	1					
$\rho(\text{NH}_4^+)$	-0.631	0.732	0.551	-0.655	1				
$\rho(\text{K}^+)$	0.042	0.177	0.116	-0.093	0.744	1			
$\rho(\text{Mg}^{2+})$	-0.750	0.560	0.219	-0.997*	0.653	0.126	1		
$\rho(\text{Ca}^{2+})$	-0.671	0.867	0.987*	-0.137	0.505	0.163	0.074	1	
$\rho(\text{不溶微粒})$	-0.862	0.985*	0.966*	-0.483	0.73	0.262	0.430	0.929**	1

3.2 冰川主要化学离子主成分分析

进一步对各冰川雪冰中主要化学离子进行主成分分析(见表 6),发现八一冰川雪冰化学离子前 3 个主成分累计方差贡献率达到 99.9%,其中第 1 主成分的方差贡献率达到 59.2%,并以不溶微粒、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 为主. 由表 4 可见,八一冰川夏季表层积雪中 $\rho(\text{不溶微粒})$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、

$\rho(\text{NO}_3^-)$ 彼此之间都有很好的相关性,相关系数都高达 0.85 以上. Williams 等^[33-34]在对天山积雪研究时,基于 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 含量具有良好相关性得出 SO_4^{2-} 主要来源于局地 and 区域硫酸盐的结论;武小波等^[24]对青藏高原雪坑的研究认为, NO_3^- 可形成硝酸盐(如 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)的覆盖层,而后进行长距离传输. 所以祁连山冰川雪冰中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 可能与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}

表 6 祁连山典型冰川雪冰中主要化学离子和不溶微粒质量浓度以及电导率的主成分分析结果

Table 6 Result of principle component analysis of major ions and insoluble particle concentrations and electrical conductivity in snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains

项目	七一冰川		八一冰川			十一冰川	
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分
$\rho(\text{F}^-)$	0.970	-0.245	-0.524	0.800	0.293	0.450	-0.893
$\rho(\text{Cl}^-)$	0.921	0.389	-0.932	-0.036	0.360	0.448	0.894
$\rho(\text{NO}_3^-)$	0.959	-0.284	0.963	0.255	-0.081	-0.964	0.266
$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	0.943	0.333	0.809	0.588	-0.014	0.636	0.772
$\rho(\text{Na}^+)$	0.919	0.395	-0.762	0.574	0.301	0.435	0.900
$\rho(\text{NH}_4^+)$	0.572	0.820	0.860	-0.236	0.452	-0.890	0.456
$\rho(\text{K}^+)$	0.966	-0.259	0.320	-0.221	0.921	-0.892	0.453
$\rho(\text{Mg}^{2+})$	0.949	-0.316	0.726	-0.633	-0.267	0.977	0.212
$\rho(\text{Ca}^{2+})$	0.999	0.053	0.727	0.681	0.087	0.999	0.048
$\rho(\text{不溶微粒})$	0.737	-0.676	0.929	0.366	0.050	0.998	0.070
电导率	—	—	0.928	0.368	0.049	—	—
方差贡献率/%	84.8	15.1	59.2	27.4	13.3	60.8	39.2

等阳离子结合成硫酸盐和硝酸盐的形式,进而传输、沉积在积雪当中。 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 与 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 之间的相关系数仅为0.50,而 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 与 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 的相关系数达到0.75,说明人类活动对 NO_3^- 也有一定贡献。在天山和阿尔泰山冰川雪坑的研究^[21,33]中发现,中亚地区的森林火灾事故产生的物质对冰川雪冰中的 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 有较大贡献。八一冰川采样点气团轨迹(见图4)经过中亚地区,运动过程中可能会携带当地大气中的 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等物质,到达冰川区进而沉降在冰川表面。故而第1主成分中 NH_4^+ 和部分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 来源于人类活动。综上所述,第1主成分代表地表粉尘输入和人类活动排放的复合源,该复合源的形成可能与大气运动过程中携带的各种化学物质交汇反应和雪冰中离子的后沉积作用有关。第2主成分中以 F^- 和 Ca^{2+} 为主,研究^[6]表明,祁连山岩石中黑云母、绢云母及云母石英氟含量很高,局部地带还分布有萤石(CaF_2)、磷灰石($\text{Ca}_2(\text{PO}_4)\text{CaF}_2$)等含氟矿物,冰川区裸露着原生盐渍化土壤、盐土和风沙土等,这些土壤都含有丰富的水溶性氟。所以 F^-

和部分 Ca^{2+} 经过岩石、土壤的淋溶和风化等地表环境过程进入冰川雪冰中。第3主成分中以 K^+ 、 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 为主,相关性分析显示,祁连山各冰川夏季 K^+ 、 Cl^- 、 Na^+ 等离子主要来源于盐湖蒸发, NH_4^+ 主要源于人类活动,此外, K^+ 是生物质燃烧的示踪物质^[6],因此,夏季农作物秸秆焚烧产物也可能是其来源之一。

十一冰川和七一冰川前两个主成分累计方差贡献率都达到99%以上,七一冰川第1主成分的方差贡献率大于十一冰川,并且其第1主成分中除 NH_4^+ 之外的其他离子以及不溶微粒载荷都很高,代表地表粉尘输入、盐湖蒸发、局地岩石风化以及人类活动排放的综合影响;而十一冰川第1主成分中以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以及不溶微粒占据主要地位,其他离子载荷不太显著,所以其第1主成分主要代表陆源。七一冰川第2主成分中以 NH_4^+ 为主,主要反映人类活动源;十一冰川第2主成分中 Na^+ 和 Cl^- 载荷最大, SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 次之,其他离子载荷相对较低,代表盐湖离子以及人类活动排放的综合影响。

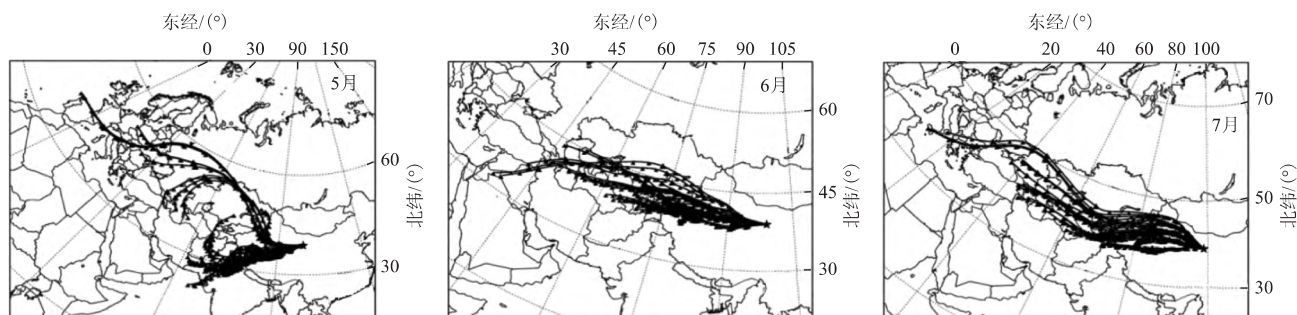


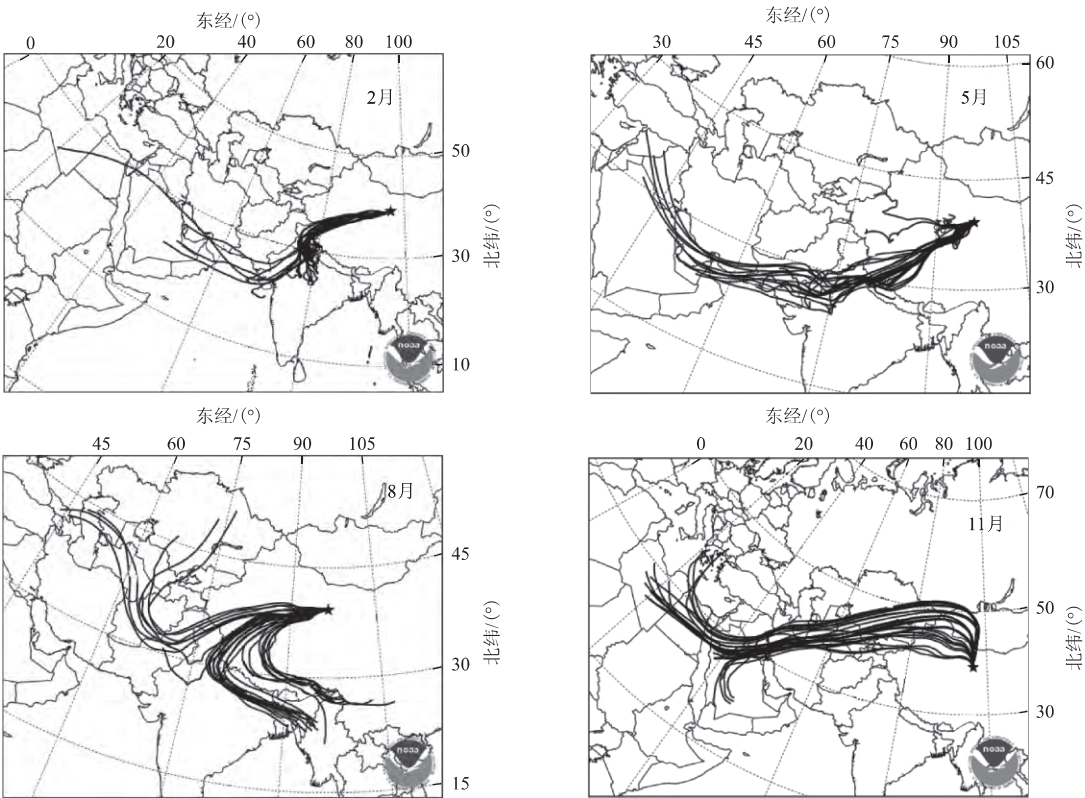
图4 祁连山八一冰川采样点处2014年5—7月7 d的大气气团后向轨迹反演结果

Fig. 4 Results of 7 d backward trajectory of air mass at sampling site on Bayi Glacier in Qilian Mountains during May to July, 2014

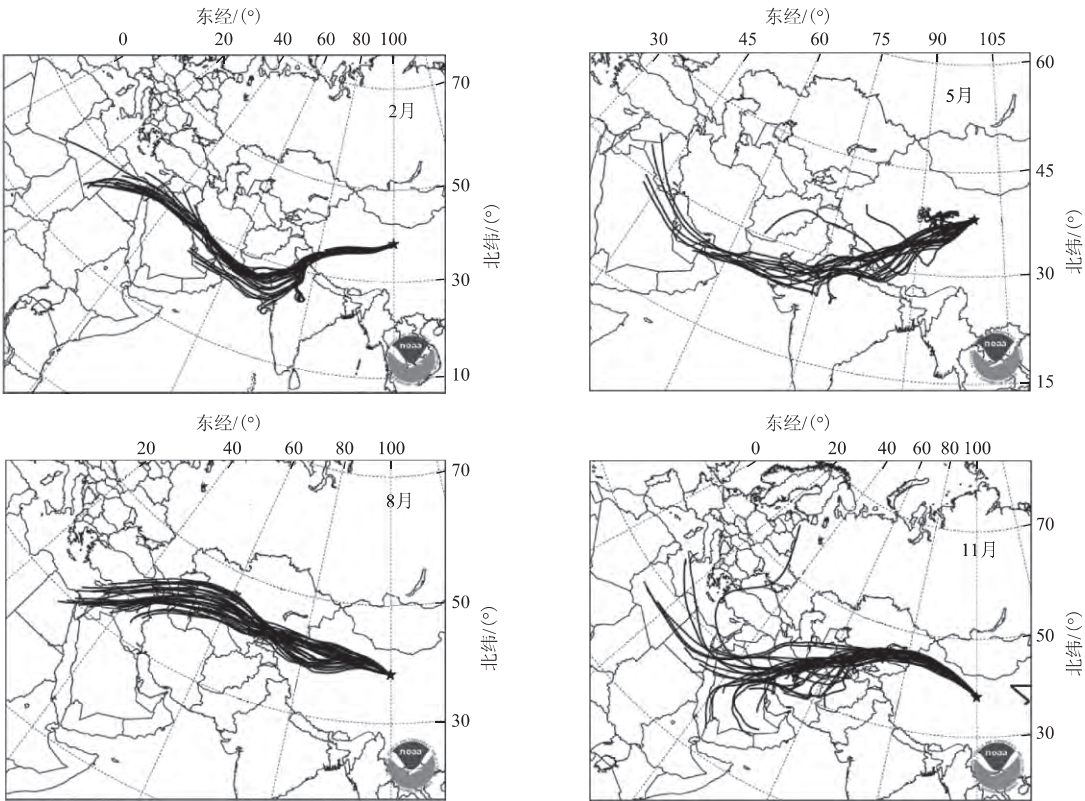
主成分分析结果显示,祁连山各冰川雪冰中化学离子主要来源有地表矿物粉尘输入、柴达木盆地盐湖离子蒸发、人类活动排放以及局地地表环境过程,其中地表矿物粉尘输入对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子以及不溶微粒的输入有很大贡献, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 可能以与阳离子结合成盐类的细颗粒形式输入;柴达木盆地盐湖离子蒸发在夏季对冰川雪冰中化学离子的影响较为显著,尤其是对 Cl^- 和 Na^+ 含量的贡献较大;人类活动排放给冰川带来了 NH_4^+ 、 K^+ 及部分 NO_3^- ,由于该区域与人类活动区较近以及气团运动的缘故,使得 NH_4^+ 含量较高;此外, F^- 主要来源于冰川周围岩石、土壤的风化和淋溶等局地地表环境过程。

3.3 后向气团轨迹反演

七一冰川和十一冰川采样点的大气气团后向轨迹如图5所示。由图5可见,七一冰川和十一冰川采样点上空大气气团后向轨迹相似度很高,大部分气团都发源于中东以及里海南部地区,途经土库曼斯坦的卡拉库姆沙漠和乌兹别克斯坦,最后经过塔克拉玛干大沙漠到达祁连山区。此类气团为高空西风气流,冷锋过境,途经沙漠,携带大量沙尘,同时携带空气中的各种化学物质^[6],所以此类气团是祁连山冰川雪冰中化学离子的主要输入动力。此外,也有印度洋气团经孟加拉湾翻越青藏高原到达祁连山区(如七一冰川8月气团),带来丰富的降水。



(a) 七一冰川



(b) 十一冰川

图 5 祁连山七一冰川和十一冰川采样点上空 7 d 的大气气团后向轨迹反演结果
Fig. 5 Results of 7 d backward trajectory of air mass at sampling sites on Shiyi Glacier and Qiyi Glacier in Qilian Mountains

4 结论

a) 祁连山各冰川中主要化学离子总质量浓度高低表现为七一冰川(31 014.2 $\mu\text{g/L}$) > 十一冰川(17 157.1 $\mu\text{g/L}$) > 老虎沟12号冰川(7 729.6 $\mu\text{g/L}$) > 八一冰川(2 248.1 $\mu\text{g/L}$), 在空间上表现为中段高于西段。除八一冰川外, 其他3条冰川雪冰中离子载量整体变化不大, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 载量最大 ($\rho(\text{SO}_4^{2-})/\rho(\text{阴离子})$ 为 52.7%, $\rho(\text{Ca}^{2+})/\rho(\text{阳离子})$ 为 68.5%), 其次为 Cl^- 和 Na^+ , NH_4^+ 和 K^+ 载量最小。与其他3条冰川相比, 八一冰川中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 载量较低, 而 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 载量都较高, 其中 NH_4^+ 和 Mg^{2+} 载量明显较高, Cl^- 和 Na^+ 载量显著降低。与高亚洲和极地其他区域冰川比较发现, 祁连山冰川雪冰中化学离子特征与青藏高原东北部一些冰川较为相似, $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 和 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 都极高; 但与高亚洲其他区域相比差异较大, 大多数离子含量都较高。在阴、阳离子相对组成方面, 祁连山冰川中阳离子相对组成和青藏高原、阿尔泰山部分冰川接近, 阴离子相对组成则与高亚洲其他区域冰川差异较大; 除八一冰川之外, 其他3条冰川的离子相对组成相近, 说明其离子来源有很好的共源性。

b) 祁连山冰川积雪中 $\rho(\text{不溶微粒})$ 与 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 之间有很高的相关性, 而 $\rho(\text{Na}^+)$ 与 $\rho(\text{不溶微粒})$ 的相关性却不太高, 说明积雪中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 主要来源于周边沙地。祁连山4条冰川中 $\rho(\text{Cl}^-)/\rho(\text{Na}^+)$ 平均值为 1.21, 而八一冰川表层雪中该值高达 1.80, 反映出柴达木盆地盐湖离子在盐湖蒸发旺盛的夏季对 Cl^- 、 Na^+ 等离子的输入有较大贡献。 $\rho(\text{Cl}^-)$ 与 $\rho(\text{Na}^+)$ 之间的相关系数高达 0.798, 但与其他绝大多数化学离子(除 K^+ 外)质量浓度之间均呈负相关, 说明 Cl^- 与 Na^+ 来源相同。

c) 主成分分析发现, 祁连山冰川雪冰中化学离子主要来源有地表矿物粉尘输入、柴达木盆地盐湖离子蒸发、人类活动排放以及局地地表环境过程, 其中地表矿物粉尘输入对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子以及不溶微粒有很大贡献, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量可指示地表矿物粉尘输入的多寡; 柴达木盆地盐湖离子的输入在夏季影响较为显著, 尤其是对 Cl^- 和 Na^+ 的贡献较大; 人类活动排放给冰川带来了 NH_4^+ 、 K^+ 及部分 NO_3^- , 由于该区域与人类活动区较近和气团运动的缘故, 使得 NH_4^+ 含量较高; 此外, F^- 主要来源于冰川周围的岩石、土壤的淋溶和风化过程。

d) 后向气团轨迹分析结果显示, 七一冰川和八

一冰川上空气团主要来自西部, 途径沙漠地区, 是冰川雪冰化学离子输入的主要动力; 此外, 也有季风气团来自印度洋等海域, 为冰川区带来大量降水。

参考文献(References):

- [1] FUHRER K, NEFTTEL A, ANKLIN M, *et al.* High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D2): 4147-4164.
- [2] OLIVIER S, BLASER C, BRÜTSCH S, *et al.* Temporal variations of mineral dust, biogenic tracers, and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006. doi: 10.1029/2005JD005830.
- [3] 李忠勤, 董志文, 张明军, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川积雪化学特征及其季节变化 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2011, 36(4): 671-677.
LI Zhongqin, DONG Zhiwen, ZHANG Mingjun, *et al.* Chemical characteristic and seasonal variation of snow on Urumqi Glacier No. 1 of the Eastern Tianshan, China [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(4): 671-677.
- [4] AIZEN V B, AIZEN E M, MELACK J M, *et al.* Association between atmospheric circulation patterns and firn-ice core records from the Inilchek glacierized area, central Tien Shan, Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004. doi: 10.1029/2003JD003894.
- [5] 效存德, 秦大河, 任贾文, 等. 冰冻圈关键地区雪冰化学的时空分布及环境指示意义 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24(5): 492-499.
XIAO Cunde, QIN Dahe, REN Jiawen, *et al.* Glaciochemistry distribution in the surfer snow and ice in some key regions of the cryosphere: the environmental significance [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(5): 492-499.
- [6] 姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 495-464.
YAO Tandong, ZHU Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 495-464.
- [7] 耿志新, 侯书贵, 张东启, 等. 喜马拉雅山雪冰主要离子的时空变化特征及来源分析 [J]. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 192-199.
GENG Zhixin, HOU Shugui, ZHANG Dongqi, *et al.* Major ions in ice cores and snow pits from the Himalayas: temporal and spatial variations and their sources [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 192-199.
- [8] 王泽斌, 徐建中, 余光明, 等. 祁连山大雪山地区大气细粒子 $\text{PM}_{2.5}$ 中可溶性离子特征 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 336-344.
WANG Zebin, XU Jianzhong, YU Guangming, *et al.* The characteristics of soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ aerosol over the Qilian Shan Station of glaciology and ecologic environment [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 336-344.
- [9] 崔晓庆, 任贾文, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟12号冰川浅冰芯记录的气候环境信息 [J]. *冰川冻土*, 2011, 36(6): 1252-1258.

- CUI Xiaoping, REN Jiawen, QIN Xiang, *et al.* Climatic and environmental records within ice-core at Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 36(6): 1252–1258.
- [10] 董志文, 任贾文, 秦大河, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积雪化学特征及环境意义 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 327–335.
- DONG Zhiwen, REN Jiawen, QIN Dahe, *et al.* Chemistry characteristics and environmental significance of snow deposited on the Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 327–335.
- [11] 尤联元, 杨景春. 中国地貌 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [12] 王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录 I: 祁连山区 [M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981.
- [13] 汤懋苍, 许曼春. 祁连山区的气候变化 [J]. *高原气象*, 1984, 3(4): 21–33.
- TANG Maocang, XU Manchun. Climatic variations over Qilian Mountain area [J]. *Plateau Meteorology*, 1984, 3(4): 21–33.
- [14] 汤懋苍. 祁连山降水的地理分布特征 [J]. *地理学报*, 1985, 40(4): 323–332.
- TANG Maocang. The distribution of precipitation in Qilian Mountain (Nanshan) [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1985, 40(4): 323–332.
- [15] LEE Xinqing, QIN Dahe, JIANG Guibin, *et al.* Atmospheric pollution of a remote area of Tianshan Mountain: ice core record [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003. doi: 10. 1029/2002JD002181.
- [16] 赵中平, 李忠勤. 离子色谱法测定大气气溶胶中的可溶性离子 [J]. *现代科学仪器*, 2004, 5(3): 46–49.
- ZHAO Zhongping, LI Zhongqin. Determination of soluble ions in atmospheric aerosol by ion chromatograph [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2004, 5(3): 46–49.
- [17] WAKE C P, MAYEWSKI P A, XIE Zichu, *et al.* Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in Asian glaciers [J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(14): 1411–1414.
- [18] OKADA K, KAI K. Atmospheric mineral particles collected at Qira in the Taklamakan Desert, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(40): 6927–6935.
- [19] 李向应, 刘时银, 韩添丁, 等. 天山东部冰川雪坑离子浓度特征的对比研究: 以奎屯哈希勒根 51 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川为例 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 150–156.
- LI Xiangying, LIU Shiyin, HAN Tianding, *et al.* Ion concentration in snow pits on glaciers in eastern Tianshan Mountain: take Haxilegen Glacier No. 51 of Kuitun River and Hami Miaoergou Flat-Topped Glacier as an example [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 30(1): 150–156.
- [20] 张晓宇, 李忠勤, 王飞腾, 等. 中亚天山托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川雪坑化学特征及其环境意义 [J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 343–349.
- ZHANG Xiaoyu, LI Zhongqin, WANG Feiteng, *et al.* Chemistry and environmental significance of snow pit of glacier No. 72, Mt. Tumur Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(5): 343–349.
- [21] WANG Feiteng, WANG Lin, KANG Jian, *et al.* Chemical characteristics of snow-firm pack in Altai Mountains and its environmental significance [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22: 482–489.
- [22] OLIVIER S, BLASER C, BRÜTSCH S, *et al.* Temporal variations of mineral dust, biogenic tracers, and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006. doi: 10. 1029/2005JD005830.
- [23] LI Chaoliu, KANG Shichang, ZHANG Qiangong, *et al.* Major ionic composition of precipitation in the Nam Co region, Central Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2007, 85(3): 351–360.
- [24] 武小波, 李全莲, 王宁练, 等. 青藏高原冰川雪坑中离子浓度的区域特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 972–975.
- WU Xiaobo, LI Quanlian, WANG Ninglian, *et al.* Regional characteristics of ion concentration in glacial snowpits over Tibetan Plateau and source analysis [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 972–975.
- [25] 李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 青藏高原玉珠峰冰川和小冬克玛底冰川雪坑中的环境记录 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 48–52.
- LI Quanlian, WANG Ninglian, WU Xiaobo, *et al.* Environmental records within the snowpits in the Yuzhufeng Glacier and Xiao Dongkemadi Glacier on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 48–52.
- [26] 李宗省, 何元庆, 庞洪喜, 等. 中国典型季风海洋性冰川区雪坑环境记录分析 [J]. *地理科学*, 2009, 29(5): 703–708.
- LI Zongxing, HE Yuanqing, PANG Hongxi, *et al.* Environmental record of snowpack chemistry in typical Chinese monsoonal temperate glacier region [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(5): 703–708.
- [27] DIBB J E, WHITLOW S I, ARSENAULT M. Seasonal variations in the soluble ion content of snow at Summit, Greenland: constraints from three years of daily surface snow samples [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(24): 5007–5019.
- [28] 董志文, 秦大河, 任贾文, 等. 祁连山西段冰川积雪中大气粉尘沉积特征 [J]. *地理学报*, 2013, 68(1): 26–35.
- DONG Zhiwen, QIN Dahe, REN Jiawen, *et al.* Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of western Qilian Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(1): 26–35.
- [29] 李向应, 秦大河, 韩添丁, 等. 中国西部冰冻圈地区大气降水化学的研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 3–16.
- LI Xiangying, QIN Dahe, HAN Tianding, *et al.* Progress in precipitation chemistry in cryosphere regions of western China [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 3–16.
- [30] 王明星. 大气化学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 1999: 140–150, 400–410.
- [31] 张彭熹. 柴达木盆地盐湖 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 13–46.
- [32] 霍文冕, 姚檀栋. 敦德冰芯 19 世纪中叶以来的环境记录 [J], *地球化学*, 2001, 30(3): 204–207.

- HUO Wenmian, YAO Tandong. Environmental record in the Dundee ice core the middle of the 19th century [J]. *Geochimica*, 2001, 30 (3): 204–207.
- [3] WILLIAMS M W, TONNESSEN K A, MELACK J M, *et al.* Sources and spatial variation of the chemical composition of snow in the Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1991, 16: 25–32.
- [4] 侯书贵, 秦大河, 任贾文, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川 pH 和电导率的现代记录过程 [J]. *冰川冻土*, 1999, 24 (4): 226–232.
- HOU Shugui, QIN Dahe, REN Jiawen, *et al.* The present environmental processes of ice core pH and conductivity records: a case study at the headwaters of the Urumqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 24 (4): 226–232.
- [5] 王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 中国天山冰川积雪中 NO_3^- 与 NH_4^+ 的分布特征及其环境意义 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, 38 (1): 202–209.
- WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, LI Zhongqin, *et al.* Distribution and its environmental significance of nitrate and ammonium in snowpack of glacier in Chinese Tianshan Mountains [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38 (1): 202–209.
- [6] 崔晓庆, 任贾文, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟12号冰川冰芯草酸根和氟离子的记录及环境意义 [J]. *环境化学*, 2011, 30 (11): 1920–1924.
- CUI Xiaoqing, REN Jiawen, QIN Xiang, *et al.* Oxalate, fluoride record and their environmental significance in Laohugou Glacier No. 12 Qilian Mountains [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30 (11): 1920–1924.
- [7] 韩月梅, 沈振兴, 曹军骥, 等. 西安市大气颗粒物中水溶性无机离子的季节变化特征 [J]. *环境化学*, 2009, 28 (2): 261–266.
- HAN Yuemei, SHEN Zhenxing, CAO Junji, *et al.* Seasonal variations of water-soluble inorganic ions in atmospheric particulates over Xi'an [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28 (2): 261–266.
- (责任编辑: 周巧富)