

天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川雪坑 化学特征及环境意义

董志文^{1,3}, 李忠勤^{1,2}, 张明军^{2,1}, 王文彬¹, 王飞腾¹

(1. 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/天山冰川站, 甘肃 兰州 730000;
2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2004~2007 年在天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川采集 3 个雪坑样品。运用相关分析、海盐示踪法等方法, 对化学要素的季节变化特征及主要阴阳离子来源进行分析研究。结果表明, 雪坑中不溶粉尘和主要化学离子具有明显的季节变化特征; 春季期间降雪中粉尘浓度明显高于其他季节。主要离子的浓度在沙尘季节也明显高于非沙尘季节。雪坑中 Ca^{2+} 是主要阳离子, SO_4^{2-} 是主要阴离子。除 NO_3^- 外, 雪坑中其他离子浓度之间均存在较好正相关。表明冰川区主要受中亚地区沙尘活动影响; 同时雪坑中的离子 (尤其是 Na^+) 除陆源矿物粉尘之外, 一定程度源于海洋源。

关键词: 天山山脉; 奎屯哈希勒根 51 号冰川; 积雪化学; 沙尘活动; 离子来源

中图分类号: X142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2010)01-0149-08

高海拔雪冰是大气中各种物质的储存库, 其中保存的各种要素是气候环境变化的指示器, 是全球气候环境变化的重要信息源, 因此雪冰化学研究成为全球变化研究的重要手段^[1~10]。冰雪中的不溶粉尘、离子是反映气候环境演化的重要指标, 因此搞清不溶粉尘和阴阳离子等化学物质的来源、传输机制及其在冰雪中的次生变化机制等问题, 不仅可以恢复气候与环境的演变, 更重要的是能够提供地理圈层之间相互作用的新认识, 尤其对物质在大气圈、岩石圈、水圈和冰冻圈之间的迁移转化研究有着重要意义。地理环境及大气环流系统等在地域分布上的特殊性和差异性, 决定了冰雪中主要离子来源及其特征的地域性和差异性^[11,12]。在中国天山山脉分布有众多的山岳冰川, 是中国西部干旱与半干旱地区的重要水资源, 制约着该区人类的生存和社会经济的发展, 对于该区雪冰化学特征进行研究有着十分重要的意义。已有许多研究对于天山东部的乌鲁木齐河源等区域的冰川化学特征等进行了分析研究^[13~22]。然而, 到目前为止, 对天山中段奎屯河源哈希勒根冰川区冰雪化学的研究还极为有限, 因此研究该区域冰雪化学特征, 对探究区域气候变化、水资源环境演化及生态建设将有

着极为重要的价值。已有研究探讨了中国不同地区的沙尘颗粒和化学环境记录^[23~28]。中国西部的天山奎屯哈希勒根河源(图1), 位于中亚粉尘的源区范围内, 大气环境受到了中亚沙尘活动的重大影响^[14]。化学分析和气象相关性表明^[22], 冰川积雪中发现的厚污化层主要通过春季发生的大气沙尘暴颗粒沉积形成。然而, 对于积雪中离子、不溶粉尘的季节变化特征及其与大气传输、沙尘活动之间的深入关系仍然不清楚, 亟需进行相关研究。本文通过 2004~2007 年夏季在天山奎屯哈希勒根 51 号冰川积累区不同海拔采集的 3 个雪坑样品, 对该地区冰川雪坑记录的环境化学季节变化特征及主要阴、阳离子来源进行了分析研究。

1 样品采集与实验室分析

天山东部地区位于中国西北干旱与半干旱区中心位置、中亚粉尘活动的源区范围内, 周边被许多大沙漠、戈壁以及荒漠所包围(图1), 而天山山颠发育了众多的高海拔山岳冰川。奎屯河哈希勒根 51 号冰川(84°24'E, 43°43'N)位于新疆奎屯市以南的天山依连哈比尔尕山北坡, 奎屯河上游支沟哈希勒根河源区; 冰川朝向东北, 最高海拔 4 200

收稿日期: 2009-03-08; 修订日期: 2009-07-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB411501)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127)、国家自然科学基金项目(40631001, 40571033, 40701034, 40371028, J0630966)、国家基金委创新群体项目(40121101)资助。

作者简介: 董志文(1984-), 男, 甘肃甘谷人, 博士研究生, 主要研究方向为冰川与全球环境变化。E-mail: happyabear@163.com

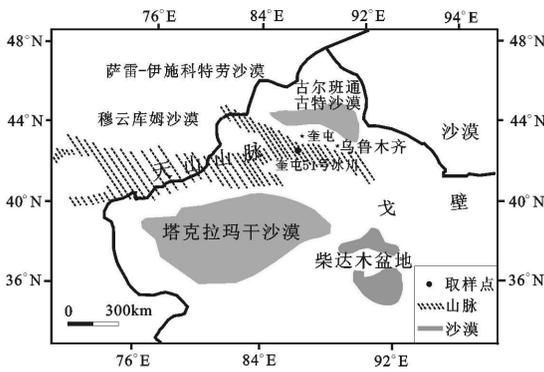


图 1 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川位置图

Fig. 1 Location of Haxilegen Glacier No. 51 in Tianshan Mountains

m, 冰舌末端海拔 3 400 m, 雪线海拔 3 610 m。2004 年 7 月 (编号 Snowpit - 1), 和 2005 年 9 月 (Snowpit - 2), 2007 年 9 月 (Snowpit - 3), 在奎屯哈希勒根 51 号冰川积累区不同海拔 3 个雪坑, 采样过程严格按照冰雪采样程序进行, 前人已有详述^[1-14]。采样时穿洁净的工作服、戴面罩、聚乙烯手套, 使用预先清洁的不锈钢铲和聚乙烯手套等。所挖雪坑底部到达冰面, 采样密度为每 10 cm 一个样品, 每个雪样 100 g, 共取得 66 个样品。样品的储存保持在 -18°C 冷冻状态, 直至在中国科学院冰冻圈科学实验室分析。微粒的粒度分析使用 Accusizer 780A 光学粒径检测仪。详细原理前人已有论述^[20]。微粒分析和测量的精度在 5% 以内^[13-15]。同时分析了雪样化学离子组成, Na^+ 、 Ca^{2+} 等离子浓度是用 Dionex - 600 型离子色谱仪测定的, 实验分析误差小于 5%。在测试分析前数天将样品取出让其常温下自然融化, 以备分析。分别使用 pH 计 (PHJS - 4A) 和电导率仪 (DDSJ - 308A) 对雪冰中的 pH 值和电导率 (ECM) 进行分析, 在仪器使用前, 均应用 pH 值为 6.86 和 9.18 的标准缓冲溶液对仪器的电极进行校正; 在样品测量前, 首先用部分样品对电极进行清洗, 每个样品测量完后再用去离子水清洗, 后浸入新鲜和静止的样品中, 5 分钟后得到经温度补偿后的 pH 值。

2 研究方法

本文探索性地分析了奎屯哈希勒根 51 号冰川积雪中离子的来源。相关分析法和趋势分析法是冰雪离子来源研究的重要方法^[16]。尽管研究区位于中亚沙尘源区, 水汽以西风带来的海洋源和中亚

地区的湖泊水汽为主, 夏季降水占年总降水量的 90% 以上^[12], 并且西风带来的海洋水汽降水是冰川的主要补给来源, 因此本研究还选择了海盐示踪法作为离子来源研究方法之一, 该方法的核心是海盐源示踪离子的选择^[11, 12, 16], 主要判定依据如下: ① 若 Cl^-/Na^+ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的当量比值都大于或等于海水的相应值 ($\text{Cl}^-/\text{Na}^+=1.165$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+=0.227$) 时, 则选用 Na^+ 作为海盐源示踪离子; ② 若 Na^+/Cl^- 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$ 的当量比值都大于或等于海水相应值 ($\text{Na}^+/\text{Cl}^-=0.859$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-=0.195$) 时, 则选用 Cl^- 作为海盐源示踪离子; ③ 若 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}$ 的当量比值都大于或等于海水的相应值 ($\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}=4.403$, $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}=5.126$) 时, 则选用 Mg^{2+} 作为海盐源示踪离子。

利用上述原则判定出海盐源示踪离子后, 然后利用求算离子非海洋来源的含量公式: $NNA = A - R \times M$ (其中 A 是离子实测浓度值, NNA 是 A 离子非海洋来源部分, M 是示踪离子浓度值, R 为标准海盐中 A 离子跟 M 离子的比值), 分别计算各离子的非海洋来源。经判断, 冰川区海盐源示踪离子为 Na^+ , 并据此计算出了哈希勒根 51 号冰川区离子来源的非海洋源部分 (表 1)。同时运用后向气团轨迹分析法检验到达天山奎屯哈希勒根 51 号冰川区三个取样点海拔高度的大气气团的传输路径和过程。这项分析基于 HYSPLIT4 (hybird single - particle lagrangian integrated trajectory) 模型, 其中包括大气垂直运动模式。基于此模型分析计算了冰川取样点海拔高度 3 d 内的大气气团后向传输轨迹。

3 结果与讨论

3.1 雪坑主要离子及粉尘浓度的比较

表 1 中, 由于三个雪坑的海拔高度不同, 雪坑中离子浓度也有较大差异。随着雪坑海拔的升高, 离子浓度表现出下降趋势。其中雪坑 Snowpit - 2 海拔最低 (海拔 3 800 m), 主要离子和矿物粉尘浓度最高; Snowpit - 3 海拔最高 (4 000 m), 主要离子和矿物粉尘浓度最低; 雪坑 Snowpit - 2 海拔居中, 各种要素浓度也居中。这种浓度分布表现出明显的随海拔高度变化效应。表 1 可知, 各种离子浓度大小关系是 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 其中 Ca^{2+} 是主要的阳离子, SO_4^{2-} 是主要的阴离子, 其浓度明显远大于其他离子浓

表 1 冰川区不同雪坑粉尘、pH、电导率以及主要阴阳离子浓度及其来源比例

Table 1 Comparison of dust, major ions and pH and ECM in the snowpit of Haxilegen Glacier No. 51

	海拔 (m)	Ca ²⁺ ($\mu\text{g/L}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{g/L}$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{g/L}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g/L}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{g/L}$)	Na ⁺ ($\mu\text{g/L}$)	Mg ²⁺ ($\mu\text{g/L}$)	k ⁺ ($\mu\text{g/L}$)	Dust (10 ³ /ml)	pH	ECM ($\mu\text{s/cm}$)
Snowpit -1	3900	133.19	172.69	105.92	99.01	49.35	16.91	16.51	19.52	408	5.6	3.1
Snowpit -2	3800	219.94	188.86	114.8	101.5	62.08	26.95	22.42	22.4	1094	5.5	3.6
Snowpit -3	4000	69.42	31.75	65.37	54.51	39.8	21.07	22.07	15.82	327	5.5	2.09
平均	3900	140.85	124.43	95.36	85.01	50.41	21.64	20.33	19.25	609	5.5	2.9
非海洋源 比重(%)	-	99	97	100	98	66	42	89	99	-	-	-

度。分析认为,来源于地球表面的粉尘颗粒离子和来源于西方海洋以及中亚湖泊的水汽携带的离子,在冰川区随着海拔升高,其浓度会逐渐降低,这一方面可能与水汽输送遇到山体能够到达的海拔高度有关,因为在山区海拔越高,降水量变化表现出会先增高而后减少的规律;另一方面,可能与大气气溶胶粉尘输送受海拔影响有关,因为许多研究表明,海拔越高,粉尘颗粒的浓度会降低,如珠穆朗玛峰绒布冰川(海拔 6 000 m)的雪坑微粒浓度明显低于天山东部(海拔 4 000 m)地区,而天山冰川积雪粉尘浓度明显低于日本中部 Tateyama 山积雪粉尘浓度^[14, 17];此外,受局地地理环境的影响,也可能造成这种分布的差异。而雪冰中碱性的 Ca²⁺是亚洲粉尘的指示物质,其浓度大小与粉尘浓度有着很好的相关性。天山东部的乌鲁木齐河源 1 号冰川的研究结果表明^[14],表层雪 Ca²⁺和 SO₄²⁻浓度表现出明显季节变化特点,与沙尘活动存在很好的一致性关系,沙尘活动季节其浓度很高,说明积雪粉尘化学组成受大气沙尘活动的影响很大。在本研究中,奎屯哈希勒根冰川雪坑的结果显示了 Ca²⁺和 SO₄²⁻浓度很高,这可能受到中亚地区沙尘源区的地壳粉尘矿物组成的影响造成的结果。同时,雪坑中的 NH₄⁺浓度也很高。研究表明,硫酸盐产生于云滴的逐步成云过程中,通过各种相同或不同种类的化学过程产生硫酸(如二氧化硫的氧化过程),然后通过与氨气(NH₃)的化学反应形成硫酸铵[(NH₄)₂SO₄]。而在此过程中便形成了大气粉尘中的细颗粒^[12]。从而使得大气粉尘细颗粒可溶部分的化学组成含有大量的硫酸铵,并可能附着在粗颗粒表面。雪坑中离子浓度组成关系很好的反映了中亚粉尘源区的大气环境状况。

3.2 化学离子和粉尘浓度的季节变化

由于天山奎屯哈希勒根河源位于中国西北干旱与半干旱区中心位置、中亚粉尘活动的源区范围

内,沙尘暴活动是该区重要的大气环境特征^[14, 21]。受其影响,高海拔雪冰中的离子和粉尘等在沙尘与非活动沙尘季节有着比较明显的差异。在此可以选择雪坑举例进行讨论。图 2 中,发现积雪中的污化层与粉尘的平均粒径的峰值有着较好的对应关系。天山山区的重要大气环境特征是春季为沙尘活动季节,而夏秋季为降水较多的非沙尘活动季节。粉尘平均粒径的高值反应了颗粒的整体粗细程度,与粉尘质量浓度大小有很好的 consistency。平均粒径越大,则粗颗粒所占比重越大,粉尘质量浓度也越大,这种高浓度是受到沙尘活动作用的结果,图 2 反映出明显的季节变化规律,即沙尘与非沙尘季节明显的差异,这种季节变化表明哈希勒根冰川区受到了中亚沙尘活动的重大影响。

同时,对图 2 中雪坑保存的沙尘季节与非沙尘季节的不溶微粒粒径进行分析比较。雪冰中粉尘颗粒的粒径及其分布反映了搬运风力以及粉尘源区的沙尘暴活动,因而粒径分布特征的研究具有重要意义^[21]。图 3 中曲线的峰值对应的不溶微粒粒径表示分布的粒径众数值。雪冰不溶微粒的质量随粒径分布反映了大气粉尘颗粒的粒径组成,可以表现大气基本的浮质状况,与大气环境有密切关系。雪冰粉尘粒径分布由单一模式和多结构模式组成,单一分布模式反映了来源的单一性,而多结构分布模式说明了粉尘颗粒来源的复杂性。粉尘粒径分布不仅与搬运风力有关,而且与物质来源有关,如沙尘源区等^[16]。实验分析结果表明(图 3),奎屯哈希勒根 51 号冰川雪样中粉尘的粒径分布有两部分组成:① 非沙尘季节雪样:来源较远的稳定大气粉尘(气溶胶),属于高空西风搬运的细粒组分,粒径分布集中在 2 ~26 μm 较细的范围内,粒径众数大约 10 μm (图 3a, 15 个样品的平均状况);② 沙尘活动季节雪样:除了较细组成(2 ~26 μm)之外,还受局地沙尘活动带来的粉尘大颗粒或局

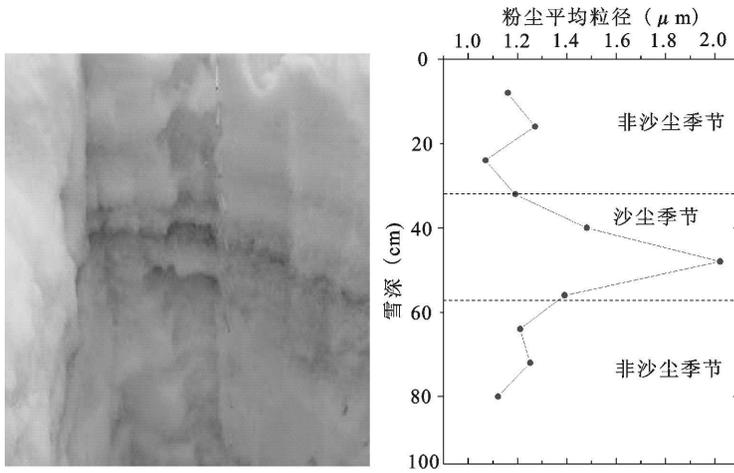


图2 2005年雪坑剖面反映的粉尘微粒浓度季节变化

Fig.2 Seasonal variation of dust profiles in snowpit in 2005

地矿物颗粒影响, 因为研究区沙尘季节有着很大的风速, 可以带来大量的沙尘暴颗粒; 不溶微粒粒径分布集中在 20 ~80 μm 较粗的范围内, 粒径众数大约 40 μm (图 3b, 8 个样品的平均值)。结果表

明, 奎屯哈希勒根 51 号冰川区积雪受到了中亚粉尘活动的影响十分明显, 不溶微粒的粒径分布在沙尘季节与非沙尘季节存在明显的差异。

图4是2007年雪坑 (snowpit - 1) 剖面反映的

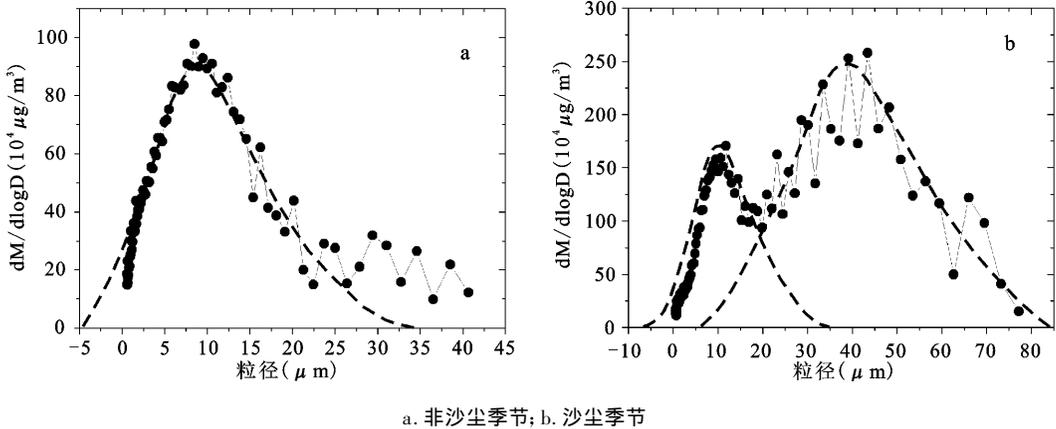


图3 2005年雪坑粉尘粒径分布比较

Fig.3 Comparison of dust particle size distribution between dust period and non-dust period

不溶粉尘和 Ca^{2+} 浓度季节变化的对比, 在所有雪坑中具有代表性, 图中阴影部分表示了沙尘活动季节, 因为粉尘颗粒平均粒径大小 ($<4 \mu m$, 是样品中所有微粒的加权平均粒径, 图 4) 与沙尘活动季节有着很好的对应关系。表 2 显示冰川雪坑中各种离子及粉尘之间的平均的相关关系比较。结果表明沙尘季节的地壳矿物来源的离子浓度都显得很高。主要代表矿物颗粒的 Ca^{2+} , 在沙尘季节浓度表现出很高值 (图 4), 而 Na^+ 、 Cl^- 浓度与 Ca^{2+} 有着很好的一致性 (表 2)。同时, 粉尘与其他离子的浓度也有很好的相关性 (表 2), 如 Mg^{2+} 、 Na^+

Cl^- , 这些离子与粉尘活动关系密切^[14,15]。随着粉尘沉降在积雪中。

3.3 雪坑中主要阴阳离子的来源分析

如表 1 所示, 天山奎屯哈希勒根 51 号冰川非海洋源的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 分别占 66% 和 97%。标准海水中阴离子浓度的大小顺序为: $Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$, 而 51 号冰川阴离子浓度的大小顺序为: $SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^-$ (与标准海水的差异很大), 这也反映出非海洋源物质即陆源矿物对冰川区阴离子来源贡献是很大的。研究表明, 青藏高原冰冻圈 Cl^- 主要源于海盐、土壤粉尘和盐碱湖物质, SO_4^{2-}

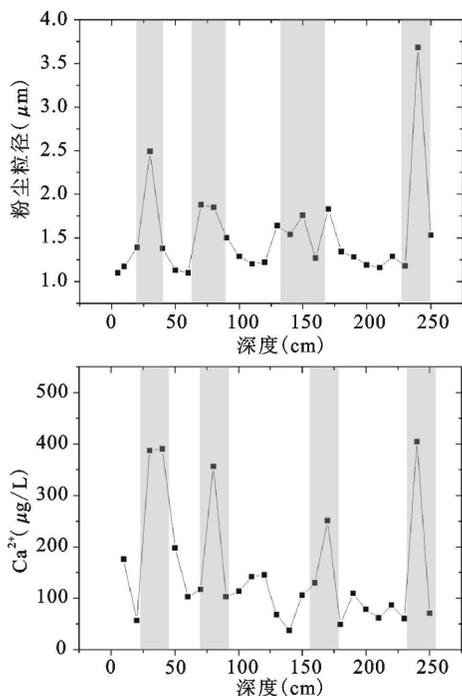
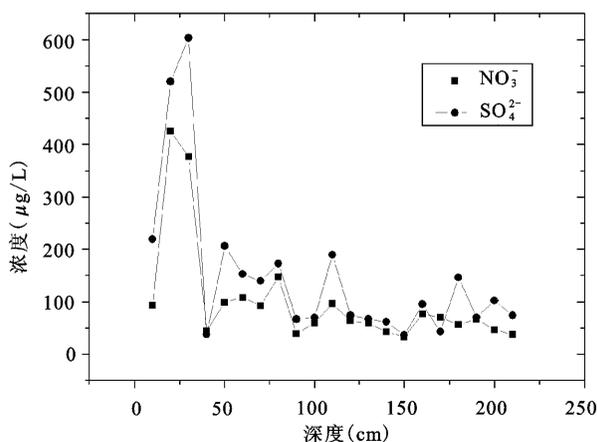
图4 雪坑中不溶粉尘和 Ca^{2+} 浓度季节变化对比Fig. 4 Comparison of dust and Ca^{2+} concentration in snowpit

表2 研究区粉尘、pH、电导率以及主要阴阳离子相关性对比

Table 2 Correlation coefficient of major ions pH ECM and dust in snowpit

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	pH	ECM
NO_3^-	0.76	-								
SO_4^{2-}	0.78	0.91	-							
Na^+	0.93	0.53	0.60	-						
NH_4^+	0.81	0.79	0.93	0.65	-					
K^+	0.73	0.18	0.45	0.74	0.67	-				
Mg^{2+}	0.70	0.39	0.68	0.65	0.81	0.93	-			
Ca^{2+}	0.55	0.32	0.64	0.44	0.81	0.83	0.96	-		
pH	0.44	0.16	0.86	0.45	0.36	0.39	0.72	0.41	-	
ECM	0.57	0.21	0.83	0.68	0.49	0.63	0.73	0.94	0.89	-
Dust	0.78	0.39	0.75	0.58	0.53	0.49	0.77	0.93	0.71	0.88

图5 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度变化对比Fig. 5 Comparison of NO_3^- and SO_4^{2-} concentration in snowpit

的主要来源是土壤尘埃, 其次为人类污染; 而 NO_3^- 的来源相对比较复杂, 主要有闪电、平流层交换、海盐、土壤尘埃和人类污染等^[16]。分析认为, 冰川区阴离子的非海洋源主要是近源物质和西风环流远源物质输入, 主要基于以下认识:

1) 冰雪中离子的来源主要是大气环流系统传输, 而研究区沙尘季节主要受沙尘活动影响, 因为冰川处于中亚粉尘的源区, 非常接近塔克拉玛干等沙漠, 是影响雪坑离子来源的主导因素。离子来源还受较小尺度的局地环流影响(陆地源), 而且研究发现该区山谷风强劲, 发生频率高, 并且表现出在一定范围内随海拔上升而不断加强的特点, 这就为风化物质进入冰雪区提供了强大的动力源^[18,19]。冰川区 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 相关系数为 0.91 (表 2), 而且两冰川区 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度波动趋势也极为相似 (图 5), 这一方面表明 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 来源的共源性是较好的, 另一方面则表明了淋溶作用的影响。除中亚粉尘物质外, 西风环流途

经大陆时沿途所携带的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 也有贡献, 因为西风环流经过中国新疆的许多石油工业区, 沿途不断有 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的输入, 并随降水而沉降到冰川区。 NO_3^- 除上述来源外, 高空闪电一定对其有相当贡献, 因为 51 号冰川处于 4 000 m 高海拔地区, 湿季时(夏秋季 6 ~9 月)降水事件较为频繁, 尽管如此, 对于闪电的作用的与离子来源的深入关系还需要进一步的研究进行验证。

中国青藏高原及周边地区雪冰化学的研究表明^[16], 主要阳离子空间分布呈现出明显的规律性: Na^+ 从高原中部和北部边缘向南缘增加; K^+ 和 Mg^{2+} 从高原中心向北部和南部边缘增加; Ca^{2+} 从高原北部和中心向南缘减少。本研究的天山奎屯

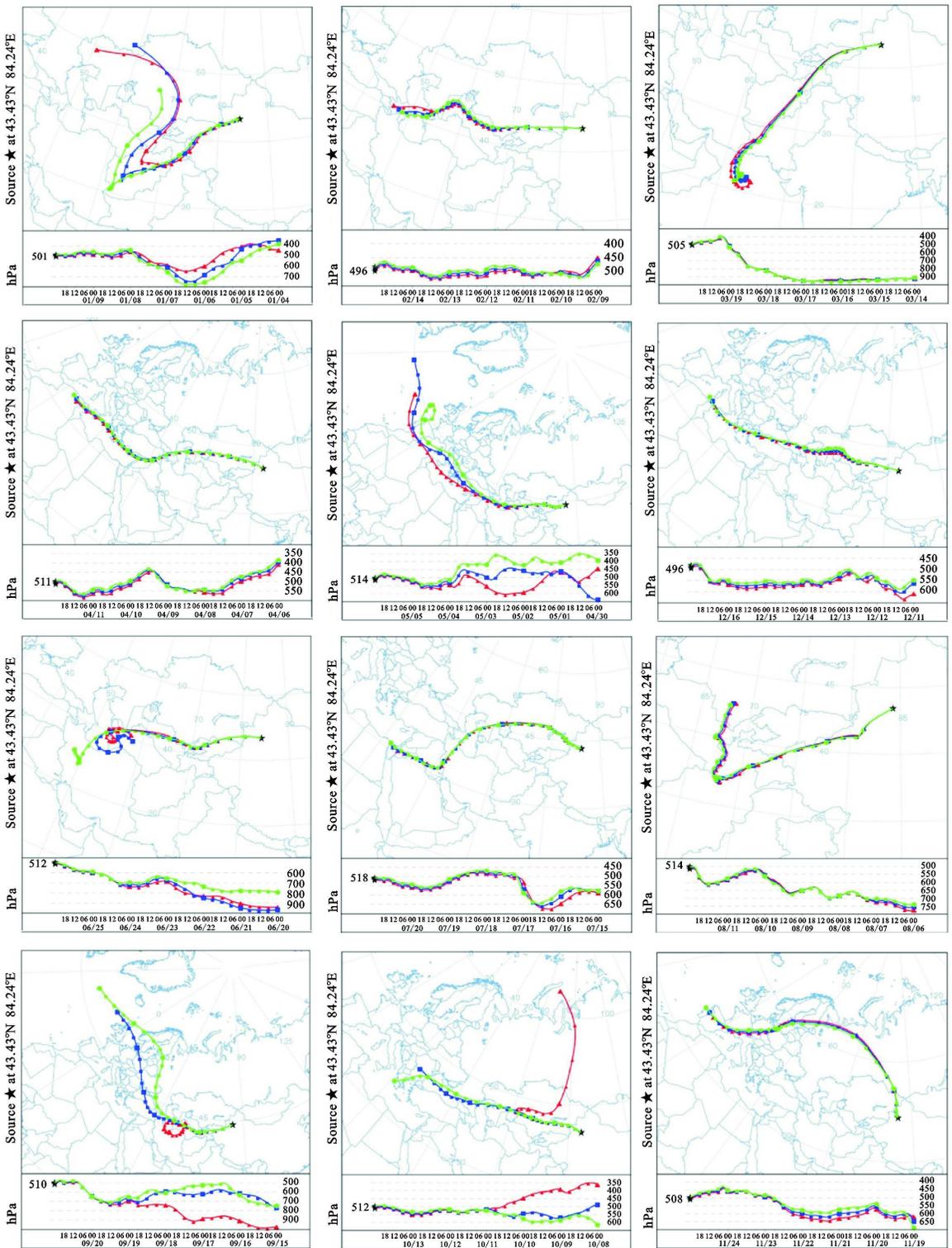


图 6 奎屯哈希勒根 51 号冰川区 (1 ~12 月) 大气气团后向轨迹季节变化分析

Fig.6 Backward trajectory analysis of air mass in Haxilegen Glacier No. 51 of Tianshan Mountains

M 冰川区处在亚洲内陆深处, Na^+ 的空间分布遵循了上述规律, 而 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 则表现出与此规律相反的情形, 这也表明 Na^+ 是海洋源, 遵循海盐离子由海向陆传输的基本规律^[6], 而其它离子

主要为陆地源, 并且陆地源构成是比较复杂的。计算结果表明 (表 1), 研究区内 Na^+ 是很大部分海洋源 (58%), Ca^{2+} 是非海洋源 (主要是沙尘源), 其它阳离子主要为非海洋源。非海洋源的 K^+ 、 Mg^{2+} 分

别占 99% 和 89%。冰川阳离子浓度大小顺序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 与地壳中元素含量的顺序基本一致 ($\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$), 而且阳离子之间的相关性也很显著(表 2), 这也表明除 Na^+ 外, 该区其它阳离子主要以陆源粉尘为主, 而 Na^+ 则主要为海洋源。

图 6 显示了研究区在沙尘季节和非沙尘季节时的大气气团后向轨迹分析比较。在 12 月和 1~5 月的冬、春季的沙尘活动期间, 气团很大一部分时间来源于西风带方向, 这可能带来大量的中亚地区沙尘源区的沙尘颗粒物。而且, 冬春沙尘季节一般风速很大, 沙尘暴活动十分频繁, 这对研究区的雪冰中不溶粉尘和离子的陆地矿物来源贡献很大。然而, 西风带也可能带来很多的西部海洋的水汽, 从而对雪冰中沉降的海洋源离子也有所贡献。在 6~10 月的夏、秋季的非沙尘季节(图 6), 大气气团来源除了西风方向外, 西南方向的气团来源也占了很大比重, 这可能表明, 该区降水来源除了西风带来的海洋水汽以及中亚湖泊水汽之外, 还受到西南印度洋的水汽影响。这对离子来源和粉尘传输造成很大影响。

4 结 论

本研究重点探讨了天山奎屯河源哈希勒根 51 号冰川积累区不同海拔 3 个雪坑的化学要素包括不溶粉尘和可溶性离子等的特征及其环境方面的意义。通过以上分析, 得出如下结论:

1) 哈希勒根 51 号冰川积累区雪坑中的不溶粉尘和主要化学离子具有明显的季节变化特征。沙尘活动季节(冬春季节)降水中粉尘浓度明显高于非沙尘活动季节(夏秋季节), 表明冰川区受春季发生的中亚沙尘活动影响明显; 雪坑中主要离子在沙尘季节的浓度也明显高于非沙尘季节。

2) 冰川 3 个雪坑中平均离子浓度大小顺序依次为: $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 其中 Ca^{2+} 是主要的阳离子, SO_4^{2-} 是主要的阴离子。离子相关性分析表明, 除 NO_3^- 之外, 雪坑中离子之间均存在较好的正相关; 粉尘与 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 离子以及电导率之间已有很好的正相关性, 说明了该区雪冰化学特征主要受大气粉尘影响明显。

3) 用相关分析法和海盐示踪分析验证了主要阴阳离子的来源, 结果表明, 哈希勒根 51 号冰川积

雪中的离子主要来源于陆源矿物粉尘; 同时, 由于降水主要受西风带影响, 雪坑中的离子(尤其是 Na^+)除了陆源矿物之外, 一定程度来源于海洋源。

参考文献:

- [1] IPCC (2007). Climate change 2007: The Physical Sciences Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007; 29 - 30, 131 - 132, 153 - 180.
- [2] Zdanowicz C M, Zielinski G A, Wake C P. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the Penny Ice Cap, Baffin Island, Arctic Canada[J]. *Tellus*, 1998, **50B**: 506 - 520.
- [3] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric solid dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002 **40** (1): 4 - 30.
- [4] Gao Y, Arimoto R M, Zhou Y, et al. Relationships between the dust concentrations over Eastern Asia and the remote North Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97** (D9): 9867 - 9872.
- [5] John T M, Mitsuo U. Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, **94** (D6): 8584 - 8598.
- [6] Thompson L G, Wayne L. Climatological implications of microparticle concentrations in the ice core from "Byrd" station, Western Antarctica [J]. *Journal of Glaciology*, 1975, **14** (72): 433 - 444.
- [7] Thompson L G, Thompson E M. Microparticle concentration variations linked with climatic change: evidence from polar ice cores [J]. *Science*, 1981, **212**: 812 - 816.
- [8] Thompson L G, Thompson E M. A 25, 000 - year tropical climate history from Bolivian ice cores [J]. *Science*, 1998, **282**: 1858 - 1864.
- [9] Uematsu M, Duce R A, Prospero J M, et al. Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, **88**: 5343 - 5352.
- [10] Steffensen J P. The size distributions of microparticle from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102** (C12): 26755 - 26763.
- [11] Church T M, J N Galloway, T D Jickells, et al. The chemistry of western Atlantic precipitation at the mid - Atlantic coast and on Bermuda [J]. *J Geophys Res.*, 1982, **87** (c13): 11013 - 11018.
- [12] Kneene W C, Alexander A P, James N Galloway, et al. Sea - salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation [J]. *J Geophys Res.*, 1986, **91** (c13): 6647 - 6658.
- [13] 朱宇漫, 李忠勤, 尤晓妮. 利用光学粒径检测仪测定雪冰样品中的微粒[J]. *现代科学仪器*, 2006, **3** (1): 81 - 84.
- [14] 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山东部冰川积雪中大气粉尘的沉积特征[J]. *地理学报*, 2008, **63** (5): 544 - 552.

- [15] 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山东部冰芯 pH 值和电导率的大气环境空间差异[J]. 地理学报, 2009, 64(1): 107 ~116.
- [16] 李宗省, 何元庆, 庞洪喜, 等. 我国典型季风海洋性冰川区雪坑中主要阴、阳离子的来源[J]. 地理学报, 2007, 62(9): 992 ~1001.
- [17] 邬光剑, 姚檀栋. 冰芯中不溶微粒的研究进展[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 528 ~538.
- [18] Li Z Q, Edwards R, Thompson E M, et al. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow - firn packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China[J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 250 - 256.
- [19] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics; from air pollution to climate change [M]. New York: Wiley inter - science, 1998; 1326pp.
- [20] 刘纯平, 姚檀栋, Thompson L G 等. 敦德冰芯中微粒含量与沙尘暴及气候的关系[J]. 冰川冻土, 1999, 21(1): 9 ~14.
- [21] 魏文寿, 高卫东, 史玉光, 等. 新疆地区气候与环境变化对沙尘暴的影响研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 137 ~141.
- [22] 尤晓妮, 李忠勤, 王飞腾, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川不溶微粒的季节变化特征[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1164 ~1170.
- [23] 王心源, 吴立, 张广胜, 等. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 548 ~553.
- [24] 贾铁飞, 戴雪荣, 张卫国, 等. 全新世巢湖沉积记录及其环境变化意义[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 706 ~711.
- [25] 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 地理科学, 25(5): 590 ~596.
- [26] 何葵, 谢远云, 张丽娟, 等. 哈尔滨 2002 年 3 月 20 日沙尘暴沉降物的粒度特征及其意义[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 597 ~600.
- [27] 王升堂, 赵延治, 邹学勇, 等. 北京郊区不同土地利用类型起沙起尘的特征研究[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 601 ~605.
- [28] 韩致文, 王涛, 董治宝, 等. 塔克拉玛干沙漠公路沿线风沙活动的时空分布[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 455 ~460.

Chemistry and Environmental Significance of Snow on Haxilegen Glacier No. 51 in Kuytun of Eastern Tianshan Mountains

DONG Zhi-wen^{1,3}, LI Zhong-qin^{1,2}, ZHANG Ming-jun^{2,1}, WANG Wen-bin¹, WANG Fei-teng¹

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000; 2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Snow chemistry on the glaciers of high mountains is good indicator for atmospheric environment change research. During the summer of the years from 2004 to 2007, we measured the characteristics of snow chemistry in three snowpits of different altitudes on the Haxilegen glacier No.51 of Kuytun, the eastern Tianshan Mountains of China. Correlation analysis and sea-salt tracing methods were used in this study to find out the source of major ions and dust particles. Results showed that the insoluble dust micro-particles and major ions in the snow had obvious seasonal variation. During Asian dust period, the concentration was significantly high, but the concentration was relatively low during non-dust period, which may be caused by dust activities of central Asia. The major ionic concentration was $Ca^{2+} > SO_4^{2-} > NH_4^+ > NO_3^- > Cl^- > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$, Ca^{2+} was the dominate cation, and SO_4^{2-} was the dominate anion. The ionic correlation coefficient analysis shows that all the ions have very good correlation coefficient except the NO_3^- . The glacier regions was mainly affected by dust activities. Moreover, the major ions, especially Na^+ , was significantly affected by the Ocean in the west, as the precipitation was mainly from the west, besides those partly originated from the dust sources of central Asian region.

Key words: snow chemistry; dust activity; ion origin; Haxilegen Glacier No.51; Tianshan Mountains