

# 天山乌鲁木齐河源1号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析

岳晓英<sup>1</sup> 李忠勤<sup>1,2</sup> 张明军<sup>1</sup> 周平<sup>2</sup> 樊晋<sup>3</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 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, 兰州 730000; 3. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

**摘要:** 基于2007年4、8和10月这3个时段不同季节的野外考察取样和实验室分析测试, 探讨了天山乌鲁木齐河源1号冰川区气溶胶样品中水溶性离子成分的浓度组成、变化特征及其可能来源。结果表明, 气溶胶水溶性离子平均浓度为 $2.76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 化学组成以 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 在春、夏、秋这3个季节的变化趋势与总离子浓度的变化趋势一致, 均为夏季最高、秋季次之、春季最低, 而 $\text{K}^+$ 与 $\text{NO}_3^-$ 却呈现出秋季最高、夏季和春季浓度次之的季节变化特征。分析认为, 气溶胶中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 主要可能来自陆源矿物; 而 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 则很大程度上以人为源为主。并且发现 $\text{SO}_4^{2-}$ 可能同时受陆地源与人类活动来源的影响。

**关键词:** 1号冰川; 气溶胶; 水溶性离子; 特征; 来源

中图分类号: X131; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3764-08

## Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China

YUE Xiao-ying<sup>1</sup>, LI Zhong-qin<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming-jun<sup>1</sup>, ZHOU Ping<sup>2</sup>, FAN Jin<sup>3</sup>

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Major soluble ions were measured in 26 aerosol samples collected at Glacier NO. 1 at the headwater of Urumqi River in Tianshan Mountains in April, August and October 2007. The concentration, seasonal change and source of aerosol were analyzed. The results showed that the mean concentration of total soluble major ions of aerosol was  $2.76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  were the major soluble inorganic ion components. In spring, summer and autumn, the seasonal change of the mean concentration of total soluble inorganic ions was consistent with  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Cl}^-$ , the highest concentration was in summer, followed by autumn and spring. While the maximum concentration of  $\text{K}^+$  and  $\text{NO}_3^-$  was observed in autumn, the minimum was in spring. Soluble inorganic ion source characteristics were that:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Cl}^-$  were mostly the land source;  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  were mainly from the anthropogenic source.  $\text{SO}_4^{2-}$  was mainly originated from both crustal surface and anthropogenic sources.

**Key words:** Urumqi Glacier No. 1; aerosols chemistry; soluble ions; characteristics; sources

大气气溶胶是大气化学成分的重要组成部分, 对地表的辐射平衡、降水的形成、局地空气质量以及人体健康均有影响, 在全球气候变化过程中有着重要作用<sup>[1~3]</sup>。因人类活动及自然环境等因素的影响, 不同区域大气气溶胶的浓度及组成均有明显的地域差异性。高海拔地区的大气气溶胶在反映全球大气环境质量和大气污染对气候的影响方面有着重要的意义<sup>[4]</sup>。因此, 自20世纪80年代以来, 在世界很多的高海拔地区都进行了气溶胶本底值的观测研究工作, 引起了广泛关注<sup>[5~8]</sup>。

天山地区位于中亚干旱半干旱区, 亚洲沙尘活动源区范围内, 四周被广袤的沙漠、戈壁所包围。

在此处开展大气气溶胶的研究, 有助于人们认识亚洲沙尘源区大气的本底状况以及沙尘气溶胶的高空及远距离传输机制。近年来该区也开展了一些大气气溶胶的研究<sup>[9~16]</sup>, 但大都集中在对某一短期时段的变化特征, 或者对单一离子及气雪关系的研究上。对较长时段气溶胶组成特征的研究还很少, 对气溶

收稿日期: 2012-12-20; 修订日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(41121001); 国家自然科学基金项目(41001040, 41161012); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才基金项目(51Y251B51); 国家自然科学基金青年基金项目(41201065)

作者简介: 岳晓英(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区气溶胶, E-mail: yuexiaoying2011@126.com

胶组成成分及其变化特征的季节性差异研究还很有有限,对区域内气溶胶的来源分析也较少开展.因此本文在观测取样和广泛检索分析前人研究的基础上,通过对乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称乌源 1 号冰川)2007 年分季节、分昼夜采集的 26 个气溶胶样品中水溶性离子变化的分析,旨在探讨该区气溶胶中水溶性离子的组成及变化特征、反映的大气环境及其可能的来源.

## 1 研究区概况

乌鲁木齐河源 1 号冰川(86°49'E 43°06'N)位于中亚内陆的天山山脉东段乌鲁木齐河源区,是一条山谷冰川,由东、西两支构成.冰川面积为 1.73 km<sup>2</sup>,长 2.41 km,雪线平均海拔 4 075 m,冰舌末端海拔 3 777 m.冰川周围分布有大片裸露的山体及冰碛沉积物,富含钠、钙、镁、铁等元素<sup>[17]</sup>;其四周分布有广袤的沙漠和戈壁,东临东新疆和西甘肃沙地,以及内蒙古戈壁高原,西接哈萨克斯坦的穆云库姆沙漠,北与古尔班通古特沙漠相通,南与塔克拉玛干沙漠相邻(图 1).该区属典型的大陆性气候,西风带在天山上空起主导作用,3~9 月盛行山谷风<sup>[18]</sup>.观测研究发现,采样点的年平均气温为 -9.1℃,年平均降水量为 440 mm.乌鲁木齐河流域的下游分布有工业活动区,如采石场、煤电厂和水泥厂等.

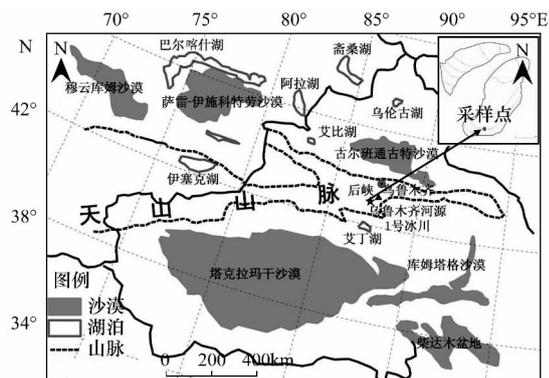


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川地理位置及周边环境

Fig. 1 Map of the location of Glacier No. 1 at the headwater of Urumqi River

## 2 样品采集与分析

气溶胶采样点位于乌源 1 号冰川东支粒雪盆的海拔 4 100 m 处.采样工作分别于 2007 年 4 月 16~25 日,8 月 5~14 日,10 月 20~24 日这 3 个时段分昼夜进行,共采集样品 26 个.其中 4 月 9 个样品(白天 6 个样品,夜间 3 个样品),8 月 10 个样品(白天 7 个样品,夜间 3 个样品),10 月 7 个样品(白天 4

个样品,夜间 3 个样品).根据张坤等<sup>[12]</sup>对该地区气溶胶中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 季节特征研究显示,4、8 和 10 月样品季节代表性明显,故本研究用 4、8 和 10 月分别代表春、夏、秋这 3 个季节.采样一般于早晨 10:00 和晚上 22:00 开始.抽气量介于 2.98~8.35 m<sup>3</sup> 不等,主要取决于天气状况,在有降水和浓雾天气下不进行采样工作.样品使用美国 New Hampshire 大学研发生产的小流量滤器采集,滤膜为 Pall 公司生产的背景浓度较低的 Zeflour Teflon 滤膜.采样时平均流速为 1.58 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,线流速为 25.3 cm·s<sup>-1</sup>.采样体积用在线体积流量计测量,并记录采样开始和结束时的气温及大气压,用于计算流经滤膜的空气标准体积(标准状态,1 个大气压,0℃).所采集到的气溶胶样品放置于 4℃ 恒温避光保存,直至分析.

样品分析在兰州的冰冻圈科学国家重点实验室内 100 级超净环境中完成.样品预处理过程为:首先将滤膜用 200 μL 色谱纯甲醇完全润湿,然后用 25 mL 去离子水提取,最后超声波振荡 30 min,用所得溶液进行分析.分析所得结果即所测离子浓度值除以采样时标准状态下的空气体积,得到大气气溶胶中的离子浓度值.分析仪器使用 Dionex-320 型离子色谱仪,具体测定过程参见文献<sup>[19]</sup>.采样及分析过程中所有操作都采取严格措施,防止可能的污染.所测气溶胶离子的检测限分别为 (ng·m<sup>-3</sup>): Ca<sup>2+</sup> (0.380), NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (0.972), Na<sup>+</sup> (0.322), Mg<sup>2+</sup> (0.036), K<sup>+</sup> (1.248), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (1.674), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (1.728), Cl<sup>-</sup> (1.740).

## 3 结果与讨论

### 3.1 气溶胶离子浓度组成特征

表 1 给出了采样期间乌源 1 号冰川大气气溶胶中主要水溶性离子浓度的统计.所测气溶胶中水溶性离子平均浓度为 2.76 μg·m<sup>-3</sup>,最大值为 14.00 μg·m<sup>-3</sup>,最小值为 0.69 μg·m<sup>-3</sup>.所有阴离子中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的浓度最高,为 0.96 μg·m<sup>-3</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 次之,为 0.65 μg·m<sup>-3</sup>,Cl<sup>-</sup> 浓度最低,仅为 0.10 μg·m<sup>-3</sup>.而所有阳离子中, Ca<sup>2+</sup> 浓度最高,为 0.71 μg·m<sup>-3</sup>,其次是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,为 0.12 μg·m<sup>-3</sup>.所测阳离子浓度大小依次为: Ca<sup>2+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup>,与元素地壳中的丰度顺序 Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> 相同,这意味着该区大气气溶胶中水溶性阳离子组成以陆源物质为主,与气溶胶微观形貌特征研究的结果一

致<sup>[14]</sup>,一定程度的反映了冰川区大气环境受陆地源影响很大。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 质量浓度占总水溶

性离子浓度的85%,为乌源1号冰川大气气溶胶水溶性离子的主要组成成分。

表1 乌源1号冰川大气气溶胶中水溶性离子浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\sum^- + \sum^+$
平均值	0.71	0.09	0.12	0.09	0.04	0.65	0.96	0.10	2.76
最小值	0.20	0.01	0.00	0.03	0.01	0.14	0.07	0.02	0.69
最大值	2.85	0.34	0.71	0.31	0.21	5.70	3.38	0.61	14.00
标准差	0.58	0.09	0.14	0.07	0.05	1.08	0.95	0.14	2.67

### 3.2 气溶胶离子浓度的变化特征

在较早的研究中,对气溶胶水溶性离子的昼夜变化特征和可能的影响因素进行了分析讨论,结果发现<sup>[16]</sup>,1号冰川气溶胶夜间平均离子浓度高于白天浓度,主要的化学离子中,除 $\text{NO}_3^-$ 在全年中的平均离子浓度表现为白天高于晚上外,其余离子的平均浓度均是夜间高于白天。区域风向的日变化是控制气溶胶浓度昼夜变化的主要影响因素,相比之下大气环流的影响则相对较弱。所有的气溶胶昼夜变化事件中, $\text{Ca}^{2+}$ 的昼夜变化最为明显,离子浓度的高值事件多出现在晚上,而其余离子在采样时段内的昼夜变化事件表现则不尽一致,无明显规律<sup>[16]</sup>。这些结果也反映了冰川区昼夜受山风和谷风影响下大气状况的明显差异。

表2列出了春、夏、秋这3个季节所测主要化学离子的平均浓度。本研究中不同季节的样品均具有较好的季节代表性。总体上,水溶性离子浓度夏季最高,秋季次之,春季最低。夏季总水溶性离子平均浓度为 $3.64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,约为春季的2.5倍。从单一离子浓度的季节变化特征看,各离子表现出了不同

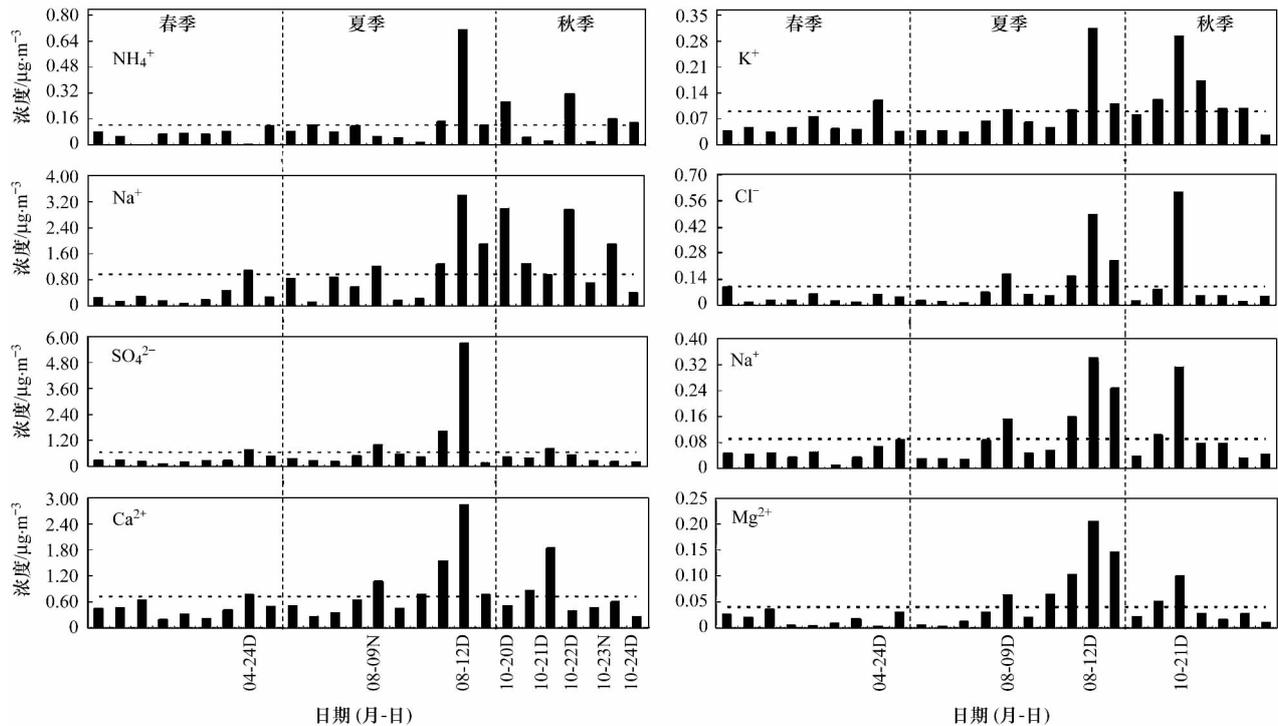
的季节变化特征。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 均不同程度地呈现出夏季、秋季、春季浓度依次降低的趋势。其中, $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 季节变化明显; $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 夏季与秋季浓度相差不大,春季较低; $\text{SO}_4^{2-}$ 则为春、秋季接近,夏季浓度较高。 $\text{K}^+$ 与 $\text{NO}_3^-$ 呈现出秋季>夏季>春季的变化特征。同时,为了进一步探究各离子季节变化的原因,本研究采用离子的峰值浓度,结合离子的季节变化趋势进行分析(图2)。峰值浓度的确定原则为:首先假定峰值必须大于离子的平均值;其次如果有连续的值大于平均值,则假定峰值取最高值;再次两个相邻假定峰值的差大于或接近相应离子的标准差<sup>[7]</sup>。分析得出: $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{K}^+$ 有4个峰值,分别出现在4月24日、8月9日、8月12日和10月21日; $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Cl}^-$ 有3个峰值,出现在8月9日、8月12日和10月21日; $\text{NO}_3^-$ 有5个峰值,分别是4月24日、8月9日、8月12日、10月22日和10月24日; $\text{NH}_4^+$ 的峰值主要集中在秋季,10月20日、10月22日和10月23日,春夏季除了8月12日外,峰值不明显。

表2 乌鲁木齐河源1号冰川区水溶性离子季节平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\sum^- + \sum^+$
春季	0.45	0.05	0.06	0.05	0.02	0.34	0.33	0.04	1.35
夏季	0.93	0.12	0.15	0.09	0.07	1.09	1.06	0.13	3.64
秋季	0.71	0.10	0.14	0.13	0.04	0.41	1.61	0.13	3.27
平均值	0.71	0.09	0.12	0.09	0.04	0.65	0.96	0.10	2.76

$\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 变化趋势相似,峰值对应良好,表明二者有相同的来源。根据乌源1号冰川雪冰记录的研究显示, $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的浓度与粉尘浓度有着很好的相关性<sup>[20]</sup>,而该区位于亚洲粉尘源区,春、夏季为该区沙尘活动的活跃期,秋季次之<sup>[21]</sup>。故推断气溶胶中 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的浓度夏季最高可能与此时粉尘活动频繁有关。 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 浓度均呈现出夏季最高,春季最低的特征,可能是由于夏季温度较高,

山区周围盐矿强烈蒸发所致。而二者峰值浓度与 $\text{Ca}^{2+}$ 的良好对应,表明沙尘活动对其浓度也有一定影响。 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度夏季明显高于春、秋季,且与 $\text{Ca}^{2+}$ 峰值对应良好。这一方面可能是由于春夏季冰川周围沙尘活动频繁,强度大,沙尘中大量 $\text{SO}_4^{2-}$ 的输入所致。另一方面,与温度湿度的季节性差异有关, $\text{SO}_4^{2-}$ 主要来自于 $\text{SO}_2$ 转化,夏季高温高湿的大气环境为 $\text{SO}_2$ 的高效氧化提供了条件。 $\text{K}^+$ 浓度变化呈



“D”“N”分别代表白天和夜晚

图 2 主要离子浓度季节变化趋势

Fig. 2 Seasonal changes of the concentration of major soluble inorganic ions

现出秋季最高,夏季次之,春季最低的特征。鉴于  $K^+$  是生物质燃烧的示踪物<sup>[22]</sup>,且中亚哈萨克斯坦东部的草原大火在 1 号冰川雪层中已有记录<sup>[23]</sup>。推测  $K^+$  在秋季浓度较高可能与此时生物质燃烧频繁有关。但与  $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$  和  $Cl^-$  峰值的良好对应也表明  $K^+$  还受沙尘及周围盐矿的影响。

$NO_3^-$  浓度变化也呈现出秋季最高,夏季次之,春季最低的趋势,分析认为主要与它在各季节来源的变化和气粒转化程度有关。Zhao 等<sup>[11]</sup>和王圣杰等<sup>[24]</sup>通过对乌源 1 号冰川雪冰中  $NO_3^-$  的研究发现,该区人类活动对  $NO_3^-$  浓度贡献很大。夏秋季冰川区周围人类活动和牧民放牧频繁, $NO_3^-$  的来源明显增加,但秋季温度较低,低温有利于气态  $HNO_3$  向颗粒态的  $NH_4NO_3$  转化,且  $NH_4NO_3$  在低温下不易分解<sup>[25]</sup>,导致  $NO_3^-$  浓度秋季最高,夏季较低。春季离子来源的相对减小可能是造成该季  $NO_3^-$  浓度最低的主要原因。此外,春、夏季  $NO_3^-$  与  $Ca^{2+}$  峰值对应明显,推测可能是沙尘颗粒为  $NO_3^-$  的气粒转化提供介质的结果。 $NH_4^+$  夏秋季浓度较高,春季最低。除了受夏秋季来源明显增多的影响外,与  $NO_3^-$  在夏季的高效转化也有关系。而  $NH_4^+$  在秋季峰值明显,与  $Ca^{2+}$  峰值没有明显的对应关系,则表明  $NH_4^+$  与

$Ca^{2+}$  有着不同的来源,可能主要源于周围人类活动的输入,例如秸秆薪柴的燃烧,动物尸体及其排泄物的分解等。

此外,本研究还与 1996 年 5~6 月在同一采样点采集的气溶胶水溶性离子的数据进行了比较<sup>[9]</sup>(表 3),旨在发现乌源 1 号冰川大气气溶胶水溶性离子组成的年际变化特征。研究发现,水溶性离子的平均浓度 1996 年大于 2007 年,离子顺序也发生了明显变化。阳离子顺序 1996 年为  $Ca^{2+} > NH_4^+ > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ , 2007 年为  $Ca^{2+} > NH_4^+ > Na^+ > K^+ > Mg^{2+}$  而阴离子顺序 1996 年为  $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$ , 2007 年为  $NO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ 。且从单个离子的浓度看,除  $NO_3^-$  之外其余离子浓度 1996 年均比 2007 年的高。另外,各离子在相应年份水溶性离子中所占质量分数显示(图 3), $NO_3^-$  和  $K^+$  所占质量分数 2007 年较 1996 年有所增加, $NO_3^-$  增加尤为明显;而  $Ca^{2+}$ 、 $NH_4^+$ 、 $Na^+$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Mg^{2+}$  和  $Cl^-$  2007 年较 1996 年均有所下降, $Cl^-$ 、 $Ca^{2+}$  下降突出。分析原因主要有:①采样时间的差异。研究表明,沙尘活动携带的物质输入是乌源 1 号冰川大气气溶胶的主要来源<sup>[20]</sup>。而 1996 年采样工作于春末夏初(5~6 月)进行,正值新疆地区的沙尘活动频发期,2007 年则分别在 4、8 和 10 月

完成,采样后期沙尘活动强度有所减弱。②排放源强度的变化。已有研究显示,该区人类活动造成的物质来源对  $\text{NO}_3^-$  贡献很大<sup>[24]</sup>。自 1996 年以来,该区人类活动越来越频繁,农牧业活动排放的  $\text{NO}_3^-$  也逐年增

加。此外,周边城市随着经济的发展,机动车及工业排放量的增加,也是造成  $\text{NO}_3^-$  浓度 2007 年高于 1996 年的一个重要原因。这也一定程度上反映出近 10 年来周边地区能源结构的改变。

表 3 1996 年和 2007 年冰川区水溶性离子平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Average concentrations of aerosol soluble inorganic ions between 1996 and 2007/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

采样时间	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\sum^+ + \sum^-$
1996 年	0.35	0.61	1.22	0.25	0.27	0.06	0.08	1.36	4.19
2007 年	0.10	0.96	0.65	0.09	0.12	0.09	0.04	1.71	2.76

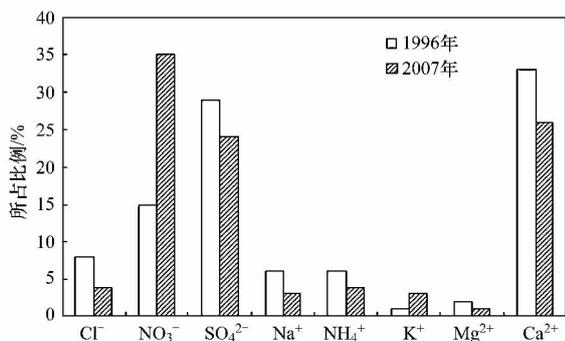


图 3 1996 年和 2007 年乌鲁木齐河源 1 号冰川气溶胶水溶性离子所占质量分数比较

Fig. 3 Comparison of the percentage of soluble inorganic ion concentrations in aerosol between 1996 and 2007

### 3.3 大气气溶胶的来源分析

本研究采用因子分析法分析各离子的主要来源。因子分析是一种多元统计方法。Blifford 等<sup>[26]</sup>最早用该方法研究了美国 30 多个城市的气溶胶来源,此后,国内外多位学者先后采用该方法对各地的气溶胶来源进行分析,并取得了满意的结果<sup>[27, 28]</sup>。目前,因子分析法已经成为气溶胶源解析的一种有效方法。其基本思路为:通过分析各因子(气溶胶来源)对各变量(离子)的载荷,确定主要因子,并依据载荷离子的化学属性判断气溶胶的来源。方法的详细介绍见文献<sup>[29]</sup>。本研究中因子分析法中公因子数的确定原则为特征根大于 1,结果经过方差最大正交旋转。

由表 4 所示的因子分析结果得出:8 种离子可归结为 2 个因子,因子 1 解释方差为 74.20%,在  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  这 5 种离子上有较高载荷;因子 2 解释方差为 13.46%,在  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  这 3 种离子上载荷较大。研究认为,这两个因子分别代表陆地源和人为源。主要来自以下分析。

(1) 多项研究表明, $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的浓度与粉尘浓度有着很好的相关性,可作为粉尘的替代指标<sup>[30, 31]</sup>。而天山四周沙漠戈壁广布,春夏季正是这

表 4 因子分析结果

Table 4 Loading for the factor analysis of eight ions

离子	因子 1	因子 2	提取率
$\text{Cl}^-$	0.960	0.153	0.945
$\text{Na}^+$	0.943	0.260	0.958
$\text{Mg}^{2+}$	0.822	0.413	0.846
$\text{Ca}^{2+}$	0.863	0.414	0.917
$\text{K}^+$	0.793	0.445	0.826
$\text{SO}_4^{2-}$	0.591	0.676	0.806
$\text{NO}_3^-$	0.245	0.855	0.792
$\text{NH}_4^+$	0.252	0.928	0.924
特征值	5.936	1.077	—
解释方差/%	74.20	13.46	—
累计方差/%	74.20	87.67	—

些地区风沙活动的活跃期,无论从频次还是强度上都达到最大<sup>[21]</sup>,且沙尘中富含  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{NaCl}$  等物质<sup>[32]</sup>。这就为天山地区气溶胶矿质离子的输入提供了动力条件和物质基础。其次,乌源 1 号冰川周围分布的大量裸露山体及冰碛物中以角闪石、绿帘石、石英、长石为主,含有大量 Ca、Mg、Na 等元素<sup>[17]</sup>。在局地扬尘的作用下可将这些物质输入至大气中,成为冰川区矿质离子的局地来源。此外,天山山区周边湖沼分布较多(艾比湖、阿拉湖、伊塞克湖等),盐矿丰富,在降水少,气温高,气候干燥的条件下,富含 Na、Cl、K 等物质的盐粒被蒸发到空气中,也会随着沙尘的传输而到达冰川表面<sup>[33]</sup>。

(2) 一般认为,气溶胶中的  $\text{NO}_3^-$  很大部分是由海盐粒子、高空闪电、机动车尾气、生物及化石燃料的燃烧等过程产生的  $\text{NO}_x$  的二次反应生成,多来源于人类活动<sup>[33]</sup>;而  $\text{NH}_4^+$  通常认为来自于生物体的代谢以及包括化肥的使用,工业、机动车排放在内的人类活动的释放<sup>[34]</sup>。乌源 1 号冰川邻近人类活动区,自河谷而下西南方向约 40 km 处的后峡镇建有水泥厂、火力发电厂等企业;在距冰川东南 2 km 处的 216 国道,是由北疆通向南疆最近的一条通道,运输繁忙。大西沟 3~9 月白天盛行的山谷风<sup>[18]</sup>,

很有可能将河谷中的污染物带至冰川区。且新疆维吾尔自治区的首府乌鲁木齐市距离冰川也仅有 120 km 之遥,在过去的 20 a 间该市的空气污染相当严重,因此在适当的气象条件下,也不排除将污染物传输到冰川区的可能。而且根据 Lee 等<sup>[35]</sup>对乌源 1 号冰川冰芯记录的研究显示,该冰川已经受到人类活动的影响,且乌鲁木齐市对其贡献很大。其次,新疆是我国重要的牧区之一,畜载量高,夏秋季节,人类农牧活动频繁,秸秆燃烧和居民薪柴燃烧等生物质的燃烧,动物排泄物及尸体的分解,化肥的使用等都会产生 NO<sub>x</sub> 和 NH<sub>3</sub>。再次,天山地区属于典型的大陆性气候区,西风带在天山上空起主导作用,西风环流途经中亚及新疆的多个工业区,沿途也不断有 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 以及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 输入。除此之外,由于乌源 1 号冰川海拔较高,高空闪电也可能是 NO<sub>x</sub> 的一个来源,还有待进一步研究。

(3) SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在因子 1 和因子 2 上均有较大载荷,表明它同时受陆地源和人为源的影响,既来自陆源矿物的输入,例如亚洲粉尘中含有大量的矿物盐类 CaSO<sub>4</sub> 等;也来自人为含硫污染物的排

放,例如燃料(煤炭、石油等)燃烧,工业的排放等。

同时,为了进一步验证 1 号冰川区大气气溶胶的可能来源,本研究利用 NOAA 提供的 HYSPLIT 气团后向轨迹传输模型,结合 NCEP 全球再分析数据,以 1 号冰川采样点(86°49'E, 43°06'N)为气团运动的终点,在海拔 4 100 m 处模拟反向计算了采样期间到达 1 号冰川气溶胶采样点的气团传输轨迹(3 d)。图 4 是 4、8 和 10 月气团后向轨迹分析的典型例子。从中可以反映:乌源 1 号冰川主要受来自西方及西北方向气团的控制[图 4(a)、4(e)、4(f)],所经过的地区多为沙漠广布的中西亚干旱区,例如卡拉库姆沙漠,莫因库姆沙漠,萨雷耶西克阿特劳沙漠等地。因此气团携带了大量的陆源沙尘,成为天山地区气溶胶远源输入的主要源地。但也有一部分气团,例如图 4(d),主要经过的地区为人类活动密集区,例如伊宁、克拉玛依、石河子等,这些区域工业化活动较多,故这些地区的人为污染物也可能随着气团的传输而到达高海拔冰川表面,是完全可能存在的。

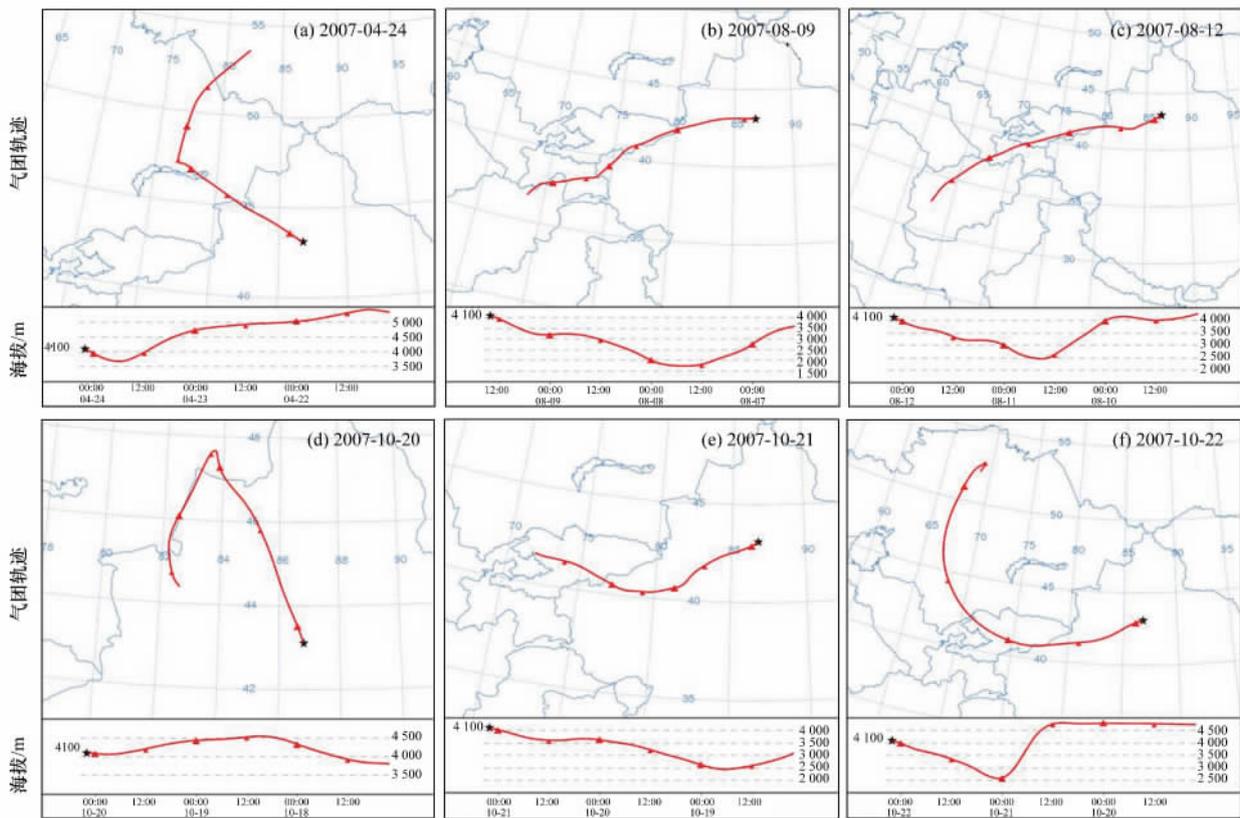


图 4 乌源 1 号冰川气溶胶传输 3 d 后向轨迹分析

Fig. 4 Backward trajectory of aerosol transport process in the Urumqi Glacier No. 1

## 4 结 论

(1) 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶水溶性离子平均浓度为  $2.76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  为主, 其质量分数占总水溶性离子的 85%。

(2) 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶水溶性离子的变化特征为: 春、夏、秋这 3 个季节  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$  的变化趋势与总离子浓度的变化趋势一致, 均为夏季最高、秋季次之、春季最低; 而  $\text{K}^+$  与  $\text{NO}_3^-$  却呈现出秋季最高、夏季和春季浓度次之的季节变化特征。这主要与各离子在不同季节来源的差异以及理化特征的分解转化有关。

(3) 探讨了天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶水溶性离子的来源:  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$  主要可能来自陆源矿物; 而  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  则很大程度上以人为源为主。而且发现  $\text{SO}_4^{2-}$  可能同时受陆地源与人类活动来源的影响。

致谢: 本研究是天山冰川观测试验站开展的雪冰现代过程研究项目的一部分, 是在全体观测和研究集体努力下完成的。谨此对参加本研究的每一位观测人员以及项目组人员表示衷心感谢!

## 参考文献:

- [1] Liu X G, Cheng Y F, Zhang Y H, *et al.* Influences of relative humidity and particle chemical composition on aerosol scattering properties during the 2006 PRD campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(7): 1525-1536.
- [2] Geresdi I, Meszaros E, Molnar A. The effect of chemical composition and size distribution of aerosol particles on droplet formation and albedo of stratocumulus clouds [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(10): 1845-1855.
- [3] Han L H, Zhuang G S, Cheng S Y, *et al.* The mineral aerosol and its impact on urban pollution aerosols over Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(35): 7533-7546.
- [4] 温玉璞, 徐晓斌, 汤洁, 等. 青海瓦里关大气气溶胶元素富集特征及其来源[J]. *应用气象学报*, 2001, **12**(4): 400-408.
- [5] Yalcin K, Wake C P, Dibb J E, *et al.* Relationships between aerosol and snow chemistry at King Col, Mt. Logan Massif, Yukon, Canada [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(37): 7152-7163.
- [6] Mishra V K, Kim K, Hong S M, *et al.* Aerosol composition and its sources at the King Sejong Station, Antarctic peninsula [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(24): 4069-4084.
- [7] Ming J, Zhang D Q, Kang S C, *et al.* Aerosol and fresh snow chemistry in the East Rongbuk Glacier on the northern slope of Mt. Qomolangma (Everest) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D15307, doi: 10.2915/2007JD008618.
- [8] Colin J L, Lim B, Herms E, *et al.* Air-to-snow mineral transfer-crystal elements in aerosols, fresh snow and snowpits on the Greenland ice sheet [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(20): 3395-3406.
- [9] Sun J Y, Qin D H, Mayewski P A, *et al.* Soluble species in aerosol and snow and their relationship at Glacier 1, Tien Shan, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D21): 28022-28027.
- [10] 张明军, 周平, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶和新雪中可溶性离子关系研究 [J]. *地理科学*, 2010, **30**(1): 141-148.
- [11] Zhao Z, Li Z, Edwards R, *et al.* Atmosphere-to-snow-to-firm transfer of  $\text{NO}_3^-$  on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**(1): 239-244.
- [12] 张坤, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区气溶胶和表层雪中可溶性矿物粉尘的变化特征及相互关系——以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  为例 [J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(1): 113-118.
- [13] 张宁宁, 李忠勤, 何元庆, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区气溶胶和表层雪中  $\text{SO}_4^{2-}$  的季节变化及成因分析 [J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(1): 62-67.
- [14] Li Z Q, Zhao S H, Edwards R, *et al.* Characteristics of individual aerosol particles over Ürtümqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **99**(1): 57-66.
- [15] Zhao S, Li Z, Zhou P. Ion chemistry and individual particle analysis of atmospheric aerosols over Mt. Bogda of eastern Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **180**(1-4): 409-426.
- [16] 周平, 张明军, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川气溶胶可溶性离子昼夜变化研究 [J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(3): 474-480.
- [17] 骆鸿珍. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的水化学特征 [J]. *冰川冻土*, 1983, **5**(2): 55-64.
- [18] 张寅生, 康尔泗, 刘潮海. 天山乌鲁木齐河流域山区气候特征分析 [J]. *冰川冻土*, 1994, **16**(4): 333-341.
- [19] 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): 46-49.
- [20] 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪内不溶粉尘特征: 沙尘与非沙尘活动季节的比较 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1818-1825.
- [21] 霍文. 新疆沙尘暴天气演变特征及成因分析 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011.
- [22] Pio C A, Legrand M, Alves C A, *et al.* Chemical composition of atmospheric aerosols during the 2003 summer intense forest fire period [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(32): 7530-7543.
- [23] 王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等. 天山东部雪中硝酸根浓度对中亚生物质燃烧的响应研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 338-344.
- [24] 王圣杰, 张明军, 王飞腾. 天山乌鲁木齐河源区表层雪中含氮离子季节变化特征 [J]. *环境化学*, 2011, **30**(8): 1445-1450.

- [25] 胡敏, 赵云良, 何凌燕, 等. 北京冬、夏季颗粒物及其离子成分质量浓度谱分布 [J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 1-6.
- [26] Blifford I, H Meeker G O. A factor analysis model of large scale pollution [J]. Atmospheric Environment, 1967, **1**(2): 147-158.
- [27] Salvador P, Artíñano B, Alonso D G, *et al.* Identification and characterization of sources of PM<sub>10</sub> in Madrid (Spain) by statistical methods [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(3): 435-447.
- [28] 徐国杰, 陈立奇, 张远辉, 等. 中国第 26 次南极科学考察航线上空水溶性气溶胶化学成分特征研究 [J]. 极地研究, 2011, **23**(2): 98-107.
- [29] 王明星. 用因子分析法研究大气气溶胶的来源 [J]. 大气科学, 1985, **9**(1): 73-81.
- [30] Dong Z W, Li Z Q, Wang F T, *et al.* Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of the eastern Tian Shan, China [J]. Journal of Glaciology, 2009, **55**(193): 797-804.
- [31] 刘臻, 祁建华, 王琳, 等. 青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 [J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2180-2190.
- [32] Okada K, Kai K. Atmospheric mineral particles collected at Qira in the Taklamakan Desert, China [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(40): 6927-6935.
- [33] 侯书贵. 乌鲁木齐河源区大气降水的化学特征 [J]. 冰川冻土, 2001, **23**(1): 80-84.
- [34] 徐昶. 中国特大城市气溶胶的理化特性、来源及其形成机制 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [35] Lee X Q, Qin D H, Jiang G B, *et al.* Atmospheric pollution of a remote area of Tianshan Mountain: Ice core record [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D14): 4406, doi: 10.1029/2002JD0021821.