

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0407
MA Shan, XIA Dunsheng, LI Zhongqin, et al. Impact of sandstorm events on the environment of the Qingbingtan Glacier No. 72 in the Mt. Tumor, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 685–694. [马珊, 夏敦胜, 李忠勤, 等. 沙尘暴对天山托木尔峰青冰滩72号冰川环境的影响[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 685–694.]

沙尘暴对天山托木尔峰青冰滩72号冰川环境的影响

马珊¹, 夏敦胜¹, 李忠勤^{2,3}, 周平², 张昕³, 周茜¹, 王家鑫⁴
(1. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 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; 3. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 西北师范大学知行学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 基于沙尘暴发生前后在天山托木尔峰青冰滩72号冰川末端采集的7个大气气溶胶样品和在水文断面采集的9个融水径流样品, 探讨了沙尘暴事件对天山冰川区大气环境和水环境的影响。结果表明, Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 是青冰滩72号冰川大气和融水径流的主要离子, 当沙尘暴发生时, 这两种介质中的离子浓度显著升高, 而且升高存在同时性。由于影响因素不同, 浓度随时间变化的趋势不同, 大气环境对沙尘事件的响应能力强, 水环境则对温度变化的响应能力更强。通过相关性分析和主成分分析认为, 青冰滩72号冰川大气中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 主要以自然源为主; NO_3^- 和 NH_4^+ 则以人为源为主。轨迹分析发现, 由源于东欧、西伯利亚经中亚南下的冷气团引发的大风降温天气以及区域沙尘暴对冰川区环境有显著影响。

关键词: 青冰滩72号冰川; 沙尘暴; 大气气溶胶; 径流; 来源

中图分类号: X831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0685-10

0 引言

沙尘暴是干旱半干旱地区常出现的灾害性天气之一, 它的频繁发生直接导致了生态环境的恶化, 加剧了全球荒漠化的进程, 同时还可以引发气候学效应, 对大气能见度、大气光学特性、地气辐射平衡等产生影响。新疆位于欧亚大陆腹地, 远离海洋, 山脉、沙漠广布, 是中亚沙尘暴源区之一, 水资源是制约社会经济发展的主要因素。在水资源构成中, 冰川和积雪形成的冰川水资源和积雪水资源占有重要地位^[1]。冰冻圈作为对气候变化高度敏感的一个圈层, 多发的沙尘暴事件会导致冰川区环境的一系列变化, 首当其冲的就是大气环境和水环境。二者之间的化学成分因为干、湿沉降的存在具有一定的相关性。

天山地区位于中亚干旱半干旱区, 四周被广袤的沙漠、戈壁所包围, 当沙尘暴发生时, 冰川区环

境会受到影响并作出响应。但是众多冰川区沙尘暴的相关研究多集中于沙尘对雪冰消融的影响^[2-5]以及沙尘期和非沙尘期的对比研究^[6-7], 对于沙尘暴与冰川区大气环境和河流化学环境之间的耦合关系研究较少, 有待深入。本文选取天山托木尔峰青冰滩72号冰川为研究对象, 在沙尘暴发生前和发生后分别收集气溶胶样品和河流水样, 将其进行离子的组成分析, 旨在研究沙尘暴事件对冰川区大气环境和河流化学环境的影响, 同时填补了该区域由于路途遥远、工作环境恶劣、采样困难所导致的气溶胶研究的空白。

1 采样与分析

1.1 研究区概况

青冰滩72号冰川是一条复合型山谷冰川, 位于天山南麓、塔里木盆地北缘的托木尔峰地区。该地区是天山地区冰川数量最多, 规模最大的冰川分

收稿日期: 2017-09-04; 修订日期: 2018-01-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(41471058)资助
作者简介: 马珊(1993-), 女, 山西吕梁人, 2016年在山西师范大学获学士学位, 现为兰州大学在读硕士研究生, 从事大气污染物研究。
E-mail: mash2016@lzu.edu.cn
通信作者: 李忠勤, E-mail: lizq@lzb.ac.cn.

布区,海拔较高。根据第二次冰川编目,青冰滩 72 号冰川面积为 6.59 km²,海拔介于 3 792 ~ 5 708 m,平均海拔为 4 575 m,中上部冰裂隙发育较多,冰舌海拔高度较低,消融季曝露于强烈消融之中,减薄明显^[8],降水主要受西风环流的影响^[9]。冰川周围分布有广袤的沙漠和戈壁,北有古尔班通古特沙漠,南与我国最大的沙漠塔克拉玛干沙漠相邻,西有哈萨克斯坦的两大沙漠:穆云库姆沙漠和萨雷-伊施科特劳沙漠(图 1)。该区域属于典型的大陆性气候,常年受高空西风带的影响,降水主要来自北大西洋和北冰洋的水汽以及部分沿塔里木盆地中南部南上的水汽形成。

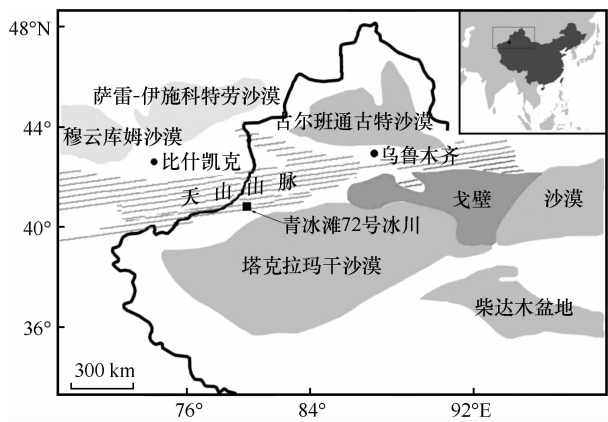


图 1 青冰滩 72 号冰川地理位置
Fig. 1 Map showing the location of the Qingbingtan Glacier No. 72

通常认为多沙、强风及不稳定的空气层结是产生沙尘暴的三个主要因素^[10]。青冰滩 72 号冰川所属区域很好地满足了这三个条件:干旱少雨的塔克拉玛干沙漠提供了丰富的沙源;西风带在天山上空起着主导作用,处于冷空气东南风向下的西北通道上,当气团从东欧、西伯利亚南下而来时,途径中亚地区,会带来强劲的北风,造成大风降温天气;由于地面受热增温快,当强冷空气过境时,可形成上冷下暖的不稳定温度层结,造成区域性强沙尘暴的发生^[11]。所以,青冰滩 72 号冰川所处的环境导致该冰川区极易受到沙尘暴的影响。

1.2 样品采集与分析

气溶胶采样点位于青冰滩 72 号冰川末端东边侧碛上,海拔 3 789 m。采样工作于 2008 年 7 月 30 日至 8 月 14 日进行,共采集 7 个气溶胶的样品,其中沙尘暴发生前 4 个样品,发生后 3 个样品。大气气溶胶样品使用美国 New Hampshire 大学研发生产的小流量滤器采集,使用太阳能板驱动 24 V 直流

泵完成采样工作。滤膜使用 Pall 公司生产的背景浓度较低的特氟隆滤膜,滤膜直径 47 mm,孔径 2 μm。采样一般在早晨 11:00(北京时间)开始,样品的采集工作在没有降水和浓雾的情况下完成,气溶胶样品的抽气量从 2.71 m³到 6.25 m³不等,具体操作详见文献[12]。

采样水文断面位于 72 号冰川末端 1.1 km 处。共采集河水样品 9 个,其中沙尘暴前 4 个样品,发生后 5 个样品。采用架设 SWY-20 型月记式自计水位计和水尺测量水位和流量,并在该处设有气象观测点,利用温度、湿度日记钟和标准雨量筒进行温度、湿度及降水量的观测。每日定时在 14:00 采集河水样品。

样品分析工作在中国科学院西北生态环境资源研究院天山冰川观测试验站实验室内 100 级的超净环境中完成,所用仪器为 Dionex-320 型离子色谱仪。气溶胶样品首先需要用 0.2 mL 色谱纯甲醇完全润湿,之后用 25 mL 去离子水提取(18.2 Ω),用超声波振荡 30 min 后溶液直接用于分析,具体实验方法参见文献[13]。此外,使用带有 X 射线能谱仪(EDX/EDS)的扫描电镜及场发射扫描电镜(SEM/FESEM)对气溶胶样品进行形态学特征的分析,具体实验方法参见文献[14]。

2 结果与讨论

2.1 沙尘暴对冰川区大气环境的影响

由表 1 可知 2008 年 7 月 30 日-8 月 3 日沙尘暴事件前,气溶胶中阴阳离子总和在 63.66 ~ 154.99 neq · m⁻³ 的范围内变化,平均值为 115.58 neq · m⁻³,所测离子浓度依次为 Ca²⁺ > NO₃⁻ > SO₄²⁻ > Na⁺ > Mg²⁺ > Cl⁻ > NH₄⁺ > K⁺,这代表了该区域大气环境的本底值。而沙尘暴发生后气溶胶阴阳离子总和在 425.35 ~ 808.29 neq · m⁻³ 的范围内变化,平均值高达 566.91 neq · m⁻³,是沙尘暴事件发生前平均值的 4.9 倍,所测离子浓度依次为 Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > K⁺。由离子浓度排序可知,无论受不受沙尘暴事件的影响,Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 都是该区最重要的阳离子和阴离子,而沙尘暴事件可以带来大量的 Mg²⁺ 和 Na⁺ 使得这两种离子在排序中的相对位置提前。

在采样期间,除 K⁺ 变化不明显外,其余 7 种离子均呈明显升高趋势,特别是在沙尘暴发生后,离子浓度升高特别明显,尤其是 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Na⁺,

表 1 大气气溶胶中各种离子的平均浓度及标准偏差

Table 1 Mean ion concentrations and standard deviations in aerosol samples

neq · m⁻³

| 离子类型 | 全部样品 (n=7) | | | 7 月 30 日 - 8 月 3 日 (n=4) | | | 8 月 6 日 - 8 月 14 日 (n=3) | | |
|-------------------------------|------------|--------|--------|--------------------------|--------|-------|--------------------------|--------|--------|
| | 平均值 | 中值 | 标准偏差 | 平均值 | 中值 | 标准偏差 | 平均值 | 中值 | 标准偏差 |
| Na ⁺ | 23.51 | 14.48 | 23.16 | 8.18 | 8.05 | 5.87 | 43.94 | 47.50 | 21.50 |
| NH ₄ ⁺ | 4.99 | 4.13 | 4.27 | 4.01 | 3.78 | 2.53 | 6.33 | 4.13 | 6.36 |
| K ⁺ | 2.85 | 2.02 | 2.14 | 1.34 | 1.33 | 0.75 | 4.87 | 4.21 | 1.50 |
| Mg ²⁺ | 23.60 | 10.51 | 24.05 | 6.29 | 7.25 | 5.04 | 46.68 | 38.17 | 17.29 |
| Ca ²⁺ | 200.92 | 100.32 | 178.69 | 71.62 | 75.48 | 31.64 | 373.33 | 303.58 | 127.52 |
| Cl ⁻ | 16.26 | 8.41 | 18.72 | 4.23 | 4.01 | 3.82 | 32.31 | 34.45 | 18.81 |
| NO ₃ ⁻ | 14.46 | 11.70 | 9.27 | 10.77 | 9.53 | 4.70 | 19.38 | 20.41 | 12.70 |
| SO ₄ ²⁻ | 22.41 | 12.68 | 19.43 | 9.15 | 9.18 | 3.64 | 40.07 | 36.93 | 17.12 |
| Σ ⁺ | 255.88 | 129.67 | 228.85 | 91.43 | 98.22 | 43.47 | 475.14 | 389.51 | 167.58 |
| Σ ⁻ | 53.13 | 28.45 | 43.94 | 24.15 | 24.68 | 4.02 | 91.77 | 77.57 | 42.99 |
| Σ | 309.01 | 158.12 | 272.79 | 115.58 | 122.90 | 47.79 | 566.91 | 467.08 | 210.57 |
| ΔC | 202.74 | 104.35 | 186.12 | 67.28 | 74.59 | 41.29 | 383.37 | 311.94 | 125.41 |

注：Σ⁺ = [Na⁺] + [NH₄⁺] + [K⁺] + [Mg²⁺] + [Ca²⁺], Σ⁻ = [Cl⁻] + [SO₄²⁻] + [NO₃⁻], ΔC = Σ⁺ - Σ⁻

浓度的绝对增量分别为 301.71、40.39、35.7 neq · m⁻³，沙尘暴事件后的平均离子浓度是沙尘暴事件前的 5.21、5.37 和 7.42 倍（图 2）。通常认为 Ca²⁺、Mg²⁺ 可以作为粉尘的替代指标^[15-16]，青冰滩 72 号冰川周围沙漠广布，处于亚洲粉尘的源区，沙漠中的沙尘含有大量石英、长石、方解石、黄闪石和黑云母等矿物，富含 CaCO₃、CaSO₄、NaCl 等物质^[17]，当沙尘暴发生时，大量沙尘会被带到冰川上空，故 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的浓度大幅升高。同时，托木尔峰南麓碎屑中富含灰石、角闪石等矿物，这些

矿物中也富含 Ca、Mg、Na 等物质^[18]；此外，威海、伊塞克湖的存在使得被蒸发到空气中富含 Na、Cl、K 等的盐粒也会随着沙尘暴的发生到达冰川区大气中^[19]。这些因素共同导致沙尘暴事件后冰川区大气环境中水溶性离子浓度增加。

扫描电镜是分析气溶胶单颗粒特性的重要方法，它可以提供颗粒物质大小、形态的具体信息，比如形态、元素组成、表面负载和集聚状态^[20]，用扫描电镜对气溶胶样品进行分析可以更直观地看出沙尘暴对大气环境的影响。天山乌鲁木齐河源 1 号冰川和博格达峰地区气溶胶的单颗粒分析表明^[14,21]，自然源的沙尘和矿物颗粒通常表现为不规则形态，人为污染源产生的颗粒通常表现为表面光滑的球状或絮状集合体。由图 3 可知，在特氟隆采样膜上富集的颗粒多为不规则形态，以矿物和沙尘颗粒为主，可能存在硅铝酸盐、石英、长石、石膏、方解石等，表明该冰川区大气环境受自然源影响为主。将 8 月 6 日、8 月 14 日样品和 8 月 3 日的样品进行比较，可以发现，由于受到 5 日沙尘暴事件的影响膜上附着的颗粒呈现增多的趋势。由此进一步证实，沙尘暴的发生会带来大量矿物颗粒，导致冰川区大气中的水溶性离子浓度急剧增加。当其沉降到冰川表面时，可能会引起冰川短时间内的加速消融。

2.2 沙尘暴对冰川区河水径流的影响

径流作为陆地水圈的重要组成部分，其变化是

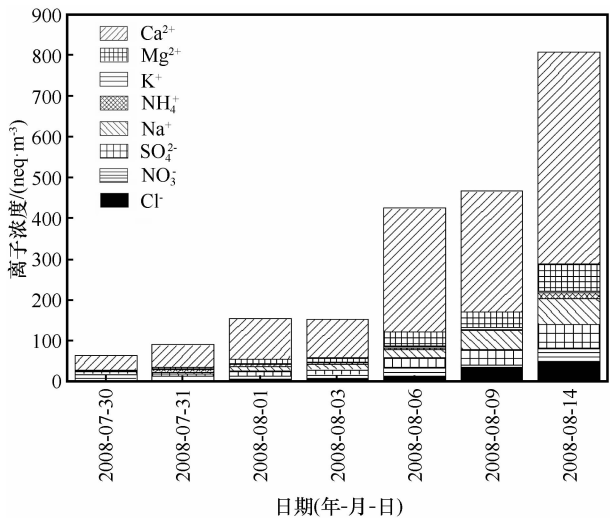


图 2 气溶胶中可溶性离子随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of concentration of soluble ions in aerosol samples

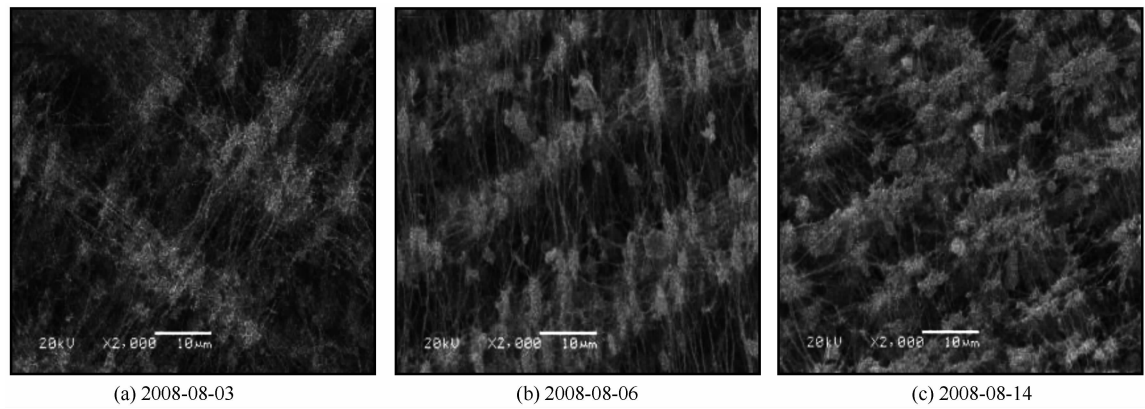


图3 气溶胶的扫描电镜图像

Fig.3 Scanning electron microscope (SEM) images of typical aerosol samples

所在流域水能量平衡的综合结果,能准确地反映流域不同时间尺度的气候变化及人类活动的信息^[22]。青冰滩72号冰川河水样品中离子总和在沙尘暴之前在43.65~78.48 mg·L⁻¹的范围内变化,平均值为60.77 mg·L⁻¹,从表2可以看出SO₄²⁻和Ca²⁺是所测离子中含量最高的,平均浓度分别为20.49、19.26 mg·L⁻¹,而且从标准偏差可以看出,这两种离子的变化也比较大,K⁺和NH₄⁺浓度低且相对稳定。总体上看,河水径流离子是硫-钙型,这与该冰川区大气环境所表现出的特征相一致,离子浓度顺序为SO₄²⁻>Ca²⁺>Cl⁻>NO₃⁻>Na⁺>Mg²⁺>K⁺>NH₄⁺。沙尘暴发生后,离子浓度显著升高,变化范围扩大为31.26~180.98

mg·L⁻¹,平均值为76.40 mg·L⁻¹,离子顺序为Ca²⁺>SO₄²⁻>Cl⁻>Na⁺>Mg²⁺>NO₃⁻>K⁺>NH₄⁺,由离子排序可以看出沙尘暴事件带来较多的Ca、Na、Mg等物质。

由图4可以看出在8月6日和8月7日河水径流中各种离子浓度显著升高,特别是Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻。通常,河水中离子浓度受大气环境和水-岩作用的共同影响。水-岩作用与地质条件和流速有关,主要通过河流的冲刷将河床周围的岩石及风化物中的各种离子带入河流中。地质条件影响离子种类,流速影响离子浓度,因为地质条件在很长的时间序列中比较稳定,所以对河水中离子种类影响不大^[23]。而在采样期间,没有明显的降水,流速与沙

| Table 2 Mean ion concentrations and standard deviations in stream water samples | | | | | | | | | mg·L ⁻¹ |
|---|-----------|-------|--------|-----------------|-------|-------|----------------|-------|--------------------|
| 离子类型 | 全部样品(n=9) | | | 7月30日-8月3日(n=4) | | | 8月5日-8月9日(n=5) | | |
| | 平均值 | 中值 | 标准偏差 | 平均值 | 中值 | 标准偏差 | 平均值 | 中值 | 标准偏差 |
| Na ⁺ | 7.05 | 5.73 | 4.75 | 8.16 | 6.21 | 5.10 | 7.11 | 3.80 | 6.82 |
| NH ₄ ⁺ | 0.40 | 0.05 | 0.82 | 1.08 | 0.65 | 1.37 | 0.03 | 0.01 | 0.03 |
| K ⁺ | 4.03 | 3.46 | 1.86 | 4.49 | 4.13 | 1.63 | 4.10 | 3.44 | 2.49 |
| Mg ²⁺ | 5.64 | 4.44 | 4.13 | 3.95 | 4.49 | 1.21 | 6.57 | 4.08 | 6.26 |
| Ca ²⁺ | 19.26 | 17.56 | 8.55 | 17.62 | 17.56 | 2.45 | 21.94 | 19.08 | 13.70 |
| Cl ⁻ | 10.40 | 8.26 | 8.04 | 9.51 | 8.89 | 3.69 | 11.57 | 3.69 | 13.48 |
| NO ₃ ⁻ | 8.43 | 5.42 | 9.53 | 6.08 | 6.94 | 4.21 | 6.13 | 5.28 | 3.35 |
| SO ₄ ²⁻ | 20.49 | 14.54 | 15.90 | 9.89 | 9.54 | 4.56 | 18.95 | 9.67 | 18.66 |
| Σ ⁺ | 36.38 | 31.24 | 20.11 | 35.29 | 33.07 | 10.88 | 39.75 | 30.81 | 28.36 |
| Σ ⁻ | 39.33 | 28.21 | 33.48 | 25.49 | 23.87 | 7.73 | 36.65 | 23.14 | 33.39 |
| Σ | 75.71 | 59.46 | 53.59 | 60.77 | 60.48 | 15.05 | 76.40 | 48.07 | 61.21 |
| ΔC | -2.94 | 53.59 | -13.38 | 9.80 | 10.48 | 11.39 | 3.10 | 3.77 | 9.55 |

注: Σ⁺=[Na⁺]+[NH₄⁺]+[K⁺]+[Mg²⁺]+[Ca²⁺], Σ⁻=[Cl⁻]+[SO₄²⁻]+[NO₃⁻], ΔC=Σ⁺-Σ⁻

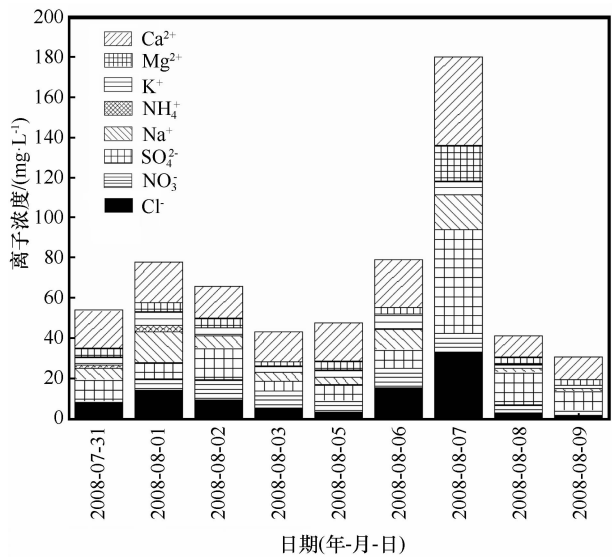


图4 河水中化学离子随时间的变化

Fig. 4 Temporal variations of concentrations of chemical ions in stream water samples

尘暴前相比反而有降低的趋势，也不会引起河水样品中离子浓度的迅速升高。所以排除可以引起河水离子变化的相关因素后，得出这段时间离子浓度的突然升高主要与沙尘暴的发生有关。此后随着河水的不断更新、稀释，河水中离子浓度开始下降。

2.3 气溶胶与河水样品典型沙尘离子浓度的耦合关系

冰川区水环境对沙尘暴事件的响应是基于干、湿沉降完成的。为了观察冰川区大气环境和水环境对沙尘暴事件的响应，选取沙尘中携带的四种主要离子(SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+})为研究对象，并基于共同采样日期做出离子随时间变化图(图5)，可以看出气溶胶样品和河水样品中的四种离子浓度在8月3日-8月6日之间都有显著升高，气溶胶样品中 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 分别升高1.95、1.44、3.42、3.17倍，河水样品中四种离子分别升高1.82、2.35、1.91和1.59倍，大气样品中 Mg^{2+}

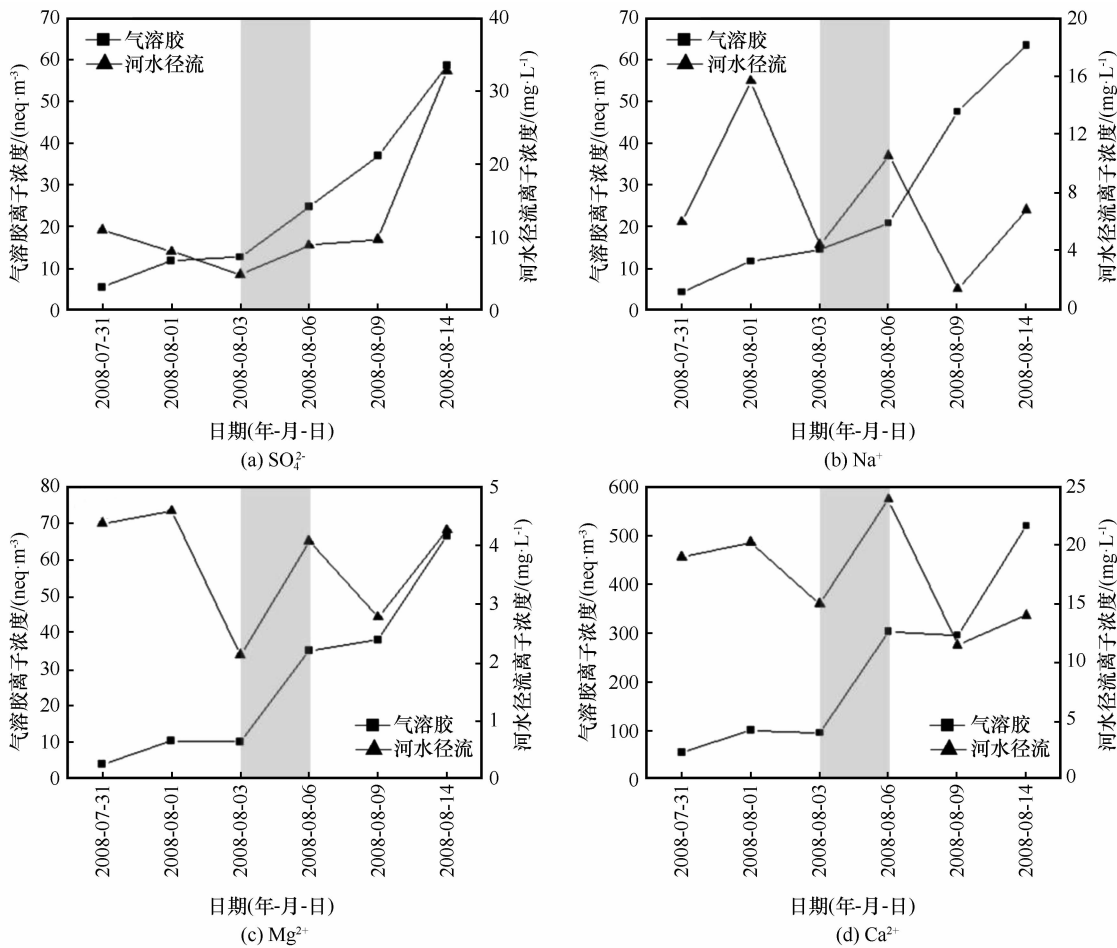


图5 气溶胶与河水样品中典型离子随时间的变化

Fig. 5 Temporal variations of typical ions in aerosol and stream water samples

和 Ca^{2+} 增幅最大,说明沙尘暴能在很大程度上同时影响冰川区大气和水环境的化学组成,对大气环境影响较大。

沙尘暴天气过程中如无降水出现,大量沙尘会滞留在大气中,水平扩散速度极其缓慢,约在沙尘天气结束后一个星期,大气清洁度才能恢复到没有发生沙尘暴天气之前的水平,所以大气中的离子浓度在短时间内不会减少^[24]。而河水中离子浓度变化趋势与大气气溶胶中离子浓度变化不一致,这主要因为两种介质中对离子浓度的影响因素不同。河水的流动使得沙尘暴对水环境的影响逐渐减弱,所以离子浓度逐渐下降,而由于河水采样点周围被大量由岩石及沙土组成的冰碛物包围,河水的冲刷会源源不断地使大量的 SO_4^{2-} 带入河水,所以 SO_4^{2-} 其并没有出现明显的减少。8 月 9 日之后离子浓度的增加则是受到温度升高的影响,上游冰川消融加剧,融水增加,流速增大,河流对河床的侵蚀加强,导致河水中的离子再一次增加, SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 分别升高 3.38、4.68、1.54、1.22 倍, SO_4^{2-} 和 Na^+ 的增幅大于沙尘暴发生的时候。这说明沙尘暴事件发生时,尽管冰川区大气环境和水环境化学成分均有响应,但是大气环境对沙尘事件的响应能力强,水环境则对温度变化的响应能力更强。

2.4 冰川区大气可溶性离子来源分析

沙尘暴对冰川区大气环境的影响最显著,因为随着气团的移动,气团所经过地区的物质会被携带到冰川区,其中包括部分人为污染源,比如 NO_3^- 和 NH_4^+ 。后通过干、湿沉降影响到冰川区水环境化学成分,所以通过对大气中离子的相互关系和初步来源进行了相关分析(表 3)和主成分分析(表 4)。

青冰滩 72 号冰川各可溶性离子浓度的相关性

见表 3。在置信区间为 0.01 时, Ca^{2+} 和其他离子表现出显著相关性,如 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} (0.99)、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} (0.98)。对于 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 来说,由于天山被大量戈壁和沙漠包围,而沙漠中的富钙型矿物通常为 CaCO_3 、 CaSO_4 ,或者是 CaCO_3 、 CaSO_4 和硅酸盐的混合。当气流自西向东经过或自南而上经过沙漠时,会带来大量以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主的沙石颗粒^[25]。除周边的沙漠和土壤外,位于天山山脉以西的里海和咸海中间地带的土壤可能也是该地区 Ca^{2+} 的主要来源之一^[26],而且天山西部咸海与莫因库姆沙漠之间存在大量蒸发盐沉积地带,其中硫酸盐(包括石膏等)含量较为丰富^[27]。这些因素共同导致这些水溶性离子之间较高的相关性。除此之外,高相关性还存在于 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Cl^- 之间,如 Na^+ 和 Cl^- (0.99)、 Ca^{2+} 和 Na^+ (0.94)、 Ca^{2+} 和 Cl^- (0.93)。其中 Na^+ 、 Cl^- 和 Ca^{2+} 的显著相关性表明它们与 Ca^{2+} 可能具有相同的沙漠来源。通过对塔克拉玛干沙漠中采集的气溶胶样品的分析发现岩盐(NaCl)颗粒在沙尘中较为普遍^[28],因此青冰滩 72 号冰川区的 Na^+ 和 Cl^- 也可能来自于塔克拉玛干沙漠中的岩盐。而 NH_4^+ 和 NO_3^- 与其他离子之间表现出较弱的相关性。在冰川区附近 NH_3 的可能来源主要是人类的农业活动,比如动物养殖、肥料以及有机物质的分解^[29],而青冰滩 72 号冰川所在的温宿县以农为主、以牧为副^[30],夏季人类农牧活动比较频繁,动物排泄物和尸体的分解比较强烈,化肥等的使用都会产生 NO_x 和 NH_3 。因此,在本研究中,二者与其他离子较弱的相关性可能表明它们与其它离子相比具有不同的来源,主要与人为污染有关。

为进一步确定各种离子的可能性来源,利用主成分分析法对离子进行了研究。通过对青冰滩 72

表 3 大气气溶胶离子相关性分析
Table 3 Correlations among the soluble ions in aerosol samples

| | Ca^{2+} | Mg^{2+} | K^+ | NH_4^+ | Na^+ | SO_4^{2-} | NO_3^- |
|--------------------|------------------|------------------|--------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|
| Cl^- | 0.93 ** | 0.95 ** | 0.79 * | 0.56 | 0.99 ** | 0.99 ** | 0.51 |
| NO_3^- | 0.68 | 0.65 | 0.09 | 0.73 | 0.48 | 0.62 | |
| SO_4^{2-} | 0.98 ** | 0.98 ** | 0.78 * | 0.60 | 0.99 ** | | |
| Na^+ | 0.94 ** | 0.95 ** | 0.83 * | 0.53 | | | |
| NH_4^+ | 0.61 | 0.62 | 0.05 | | | | |
| K^+ | 0.76 * | 0.78 * | | | | | |
| Mg^{2+} | 0.99 ** | | | | | | |

注: * 表示达到 0.05 的显著性水平, ** 表示达到 0.01 的显著性水平

表 4 大气气溶胶离子的旋转成分矩阵
Table 4 Rotated component matrix for soluble ions in aerosol samples

| 离子 | 因子 1 | 因子 2 |
|-------------------------------|-------|-------|
| Cl ⁻ | 0.90 | 0.39 |
| NO ₃ ⁻ | 0.22 | 0.90 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.88 | 0.47 |
| Na ⁺ | 0.93 | 0.35 |
| NH ₄ ⁺ | 0.21 | 0.91 |
| K ⁺ | 0.98 | -0.16 |
| Mg ²⁺ | 0.86 | 0.50 |
| Ca ²⁺ | 0.84 | 0.52 |
| 起始特征值 | 6.25 | 1.35 |
| 解释方差 | 78.2% | 16.8% |
| 累积解释方差 | 78.2% | 95.0% |

注：主成分载荷 >0.6 的数据加粗

号冰川的气溶胶样品进行主成分分析得到 2 个因子，累积解释方差达到 95.0% (表 4)。因子 1 的解释方差为 78.2%，在 K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 上有较高载荷，研究表明这些离子可能来自沙漠、黄土等自然源；因子 2 的解释方差为 16.8%，在 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 上有较大载荷，这两种离子可能来自人为源。这与相关性分析结果一致。

2.5 沙尘暴发生后气团轨迹分析

为了解青冰滩 72 号冰川区沙尘暴发生时和沙

尘暴发生后的气团输送路径和进一步了解离子来源，本研究利用 NOAA 提供的 HYSPLIT 气团后向轨迹传输模型，结合 NCEP 提供的对应时间段的全球资料同化系统 (GADS) 数据对采样期间到达该采样点的每日的气团轨迹 (5 天回溯) 进行了模拟计算，如图 6 所示。在沙尘暴发生时，气团起源于东欧平原，为高空远距离传输；而在非沙尘时期，气团多起源于中亚地区的哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦等地。

图 6 所示冷气团在西风的影响下，受到南疆盆地低压的进一步发展，由东欧南下的西路冷空气东侵，这种气象条件导致了此次沙尘暴事件的发生^[31]。除了沙尘暴事件带来的大量可溶性离子，当气团自西北而下时，途径中亚地区，该区域大量沙漠分布，包括穆云库姆和萨雷-伊施科特劳等沙漠，会导致冰川区上空沙尘物质的进一步增多，同时气团所经之处人类活动产生的污染物质可以被该气团携带传输到包括青冰滩 72 号冰川在内的托木尔峰冰川区。图 7 也表明沙尘暴发生时青冰滩 72 号冰川盛行风为西北风，风速较大，进一步验证中亚地区对 72 号冰川的影响。与之相对的非沙尘期气团后向轨迹有两种路径：西北和东南。西北路径源于哈萨克斯坦，途径地区沙漠广布，该气团主要通过低空传输将大量的沙尘颗粒传输到托木尔峰冰川区；东南路径主要受夏季暖气团的影响，虽然在夏季风北进的过程中携带的水汽逐渐减少，但是仍

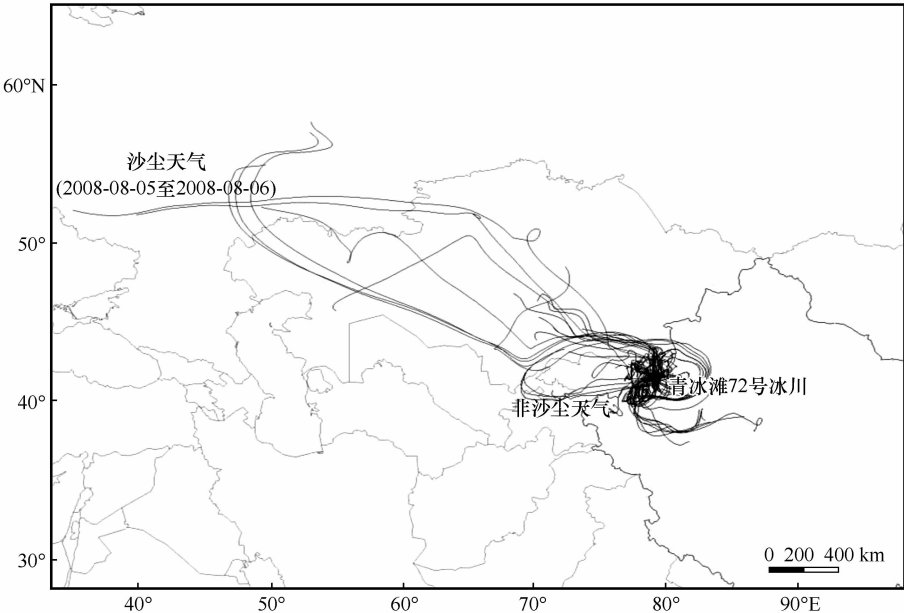


图 6 青冰滩 72 号冰川沙尘天气和非沙尘天气后向轨迹
Fig. 6 Air mass back trajectories upon the Qingbingtan Glacier No. 72, for sandstorms and non-sandstorms

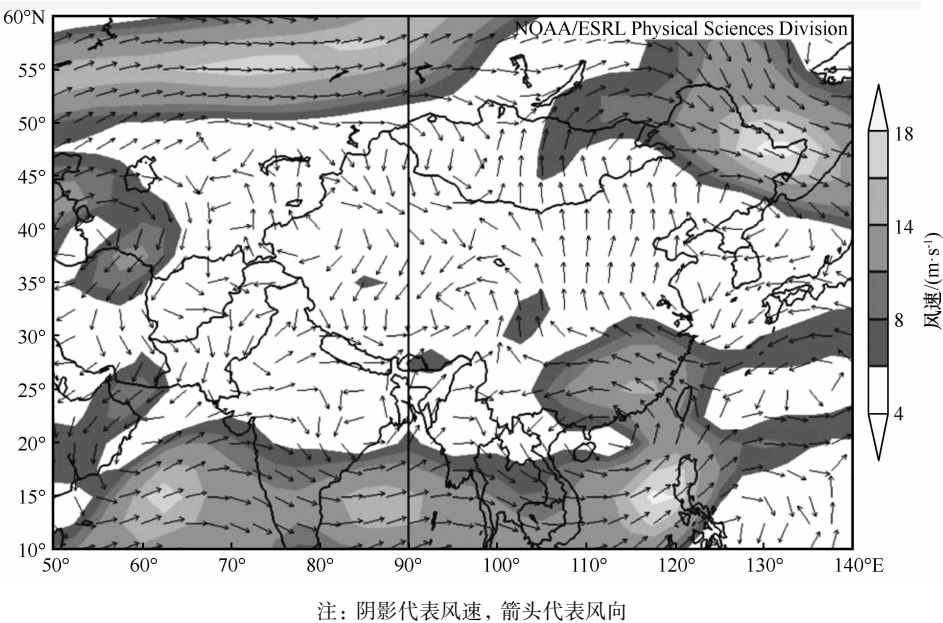


图 7 基于 NCEP/NCAR 再分析的青冰滩 72 号冰川及其周边区域 700 hPa 等压面处风流轨迹(2008 年 8 月 5 - 7 日)
Fig. 7 The wind stream of 700 hPa isobaric surface (August 5 - 7, 2008) over the Qingbingtan Glacier No. 72 and surrounding regions, based on NCEP/NCAR reanalysis (Shadow indicating the wind speed, arrow indicating the wind direction)

可在北进的过程中将塔克拉玛干沙漠的沙尘带到冰川区,而且途径一些人类活动密集区和重工业地区,比如喀什、克拉玛依等地区,故这些地区的人为污染物也可能随着气团的传输到达高海拔的冰川表面,这将导致 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Ca^{2+} 的浓度增加,但是整体来看对冰川区环境的影响程度较小。不管是沙尘期还是非沙尘期,尽管气团轨迹的起源点不同,但主要来自西北和东南两个方向,与此地盛行的西风环流相吻合。

3 结论

(1) Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 是托木尔峰青冰滩 72 号冰川区大气和河水径流中最主要的阳离子和阴离子。沙尘暴发生时气溶胶离子平均值 ($566.91 \text{ neq} \cdot \text{m}^{-3}$) 是正常情况下气溶胶离子平均值 ($115.58 \text{ neq} \cdot \text{m}^{-3}$) 的 4.9 倍;河水径流中离子浓度变化从 $43.65 \sim 78.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高为 $31.26 \sim 180.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。同时沙尘暴可以带来大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 。

(2) 沙尘暴事件使得青冰滩 72 号冰川大气和河水中离子浓度同步升高,但是二者中离子随时间的变化趋势因为影响因素的不同并不一致。沙尘暴事件发生时,冰川区大气环境和水环境化学成分均有响应,但是大气环境对沙尘事件的响应能力强,水环境则对温度变化的响应能力更强。

(3) 通过相关性分析、主成分分析对青冰滩 72 号冰川大气气溶胶中离子的来源进行分析得出, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 主要来自以自然来源为主的沙尘、矿物和湖泊盐粒, NO_3^- 和 NH_4^+ 则可能来源于远距离传输的人为污染源。

(4) 沙尘暴发生时气团起源于东欧、西伯利亚,强劲的大风降温天气不仅会将中亚地区的沙尘和人为污染物质带到冰川区,同时由于南疆境内不稳定温度层结的形成引发区域性沙尘暴,导致冰川区中自然源离子的进一步增多;非沙尘暴时期,气团起源于中亚哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦等地,仍会将部分沙尘物质带到冰川区,但幅度不大,也不会引发程度较强的区域性沙尘暴事件。

参考文献 (References):

[1] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, north western China[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(1): 96 - 106. [李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96 - 106.]

[2] Dong Zhiwen, Qin Dahe, Chen Jizu, et al. Physicochemical impacts of dust particles on alpine glacier meltwater at the Laohugou Glacier basin in western Qilian Mountains, China[J]. Science of the Total Environment, 2004, 493: 930 - 942.

[3] Adhikary S, Seko K, Nakawa M, et al. Effect of surface dust on snow melt[J]. Bulletin of Glacier Research, 1997, 15: 85 - 92.

[4] Wake C P, Mayewski P A, Li Zhongqin, et al. Modern eolian dust deposition in central Asia[J]. Tellus: Series B Chemical and Physical Meteorology, 1994, 46(3): 220 - 223.

- [5] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101 (D14): 19237–19244.
- [6] Dong Zhiwen, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Characteristics of atmospheric dust deposited in snow on Ürümqi Glacier No.1 of eastern Tianshan: a comparison of measurements during Asian dust period with non-dust period[J]. *Environment Science*, 2009, 30(6): 1818–1825. [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.]
- [7] Yue Xiaoying, Li Zhongqin, Fan Jin, et al. Observation and analysis on soluble ions in aerosols on Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River, Tianshan Mountains, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(9): 2723–2731. [岳晓英, 李忠勤, 樊晋, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川气溶胶可溶性离子观测与分析研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(9): 2723–2731.]
- [8] Cao Min, Li Zhongqin, Li Huilin. Features of the surface flow velocity on the Qingbingtan Glacier No.72, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 21–29. [曹敏, 李忠勤, 李慧林. 天山托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川表面运动速度特征研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 21–29.]
- [9] Zhang Xueting, Li Xuemei, Gao Pei, et al. Separation of precipitation forms based on different methods in Tianshan Mountains area, Northwest China[J]. [张雪婷, 李雪梅, 高培, 等. 基于不同方法的中国天山山区降水形态分离研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 235–244.]
- [10] Qian Zheng'an, Song Minhong, Li Wanyuan. Analyses on distribution variation and forecast of sand-dust storms in recent 50 years in North China[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(2): 106–111. [钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106–111.]
- [11] Li Wenbing, Chen Li, He Qingshan. Analysis of sandstorm frequency variation tendency of Xinjiang in recent 50 years[J]. *Environment Protection of Xinjiang*, 2014, 36(3): 20–24. [李文兵, 陈丽, 贺青山. 近 50 年新疆沙尘暴频率时空变化趋势分析[J]. *新疆环境保护*, 2014, 36(3): 20–24.]
- [12] Zhou Ping, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Day-night variations of the soluble ions in aerosol on the Glacier No. 1 in the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 474–482. [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): 474–482.]
- [13] Zhao Zhongping, Li Zhongqin. Determination of soluble ions in atmospheric aerosol by ion chromatography[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2004(5): 46–49. [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.]
- [14] Li Zhongqin, Zhao Shuhui, Edwards R, et al. Characteristics of individual aerosol particles over Ürümqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia, China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99(1): 57–66.
- [15] Dong Zhiwen, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of the eastern Tien Shan, China[J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(193): 797–804.
- [16] Liu Zhen, Qi Jianhua, Wang Lin, et al. Seasonal distribution of water-soluble inorganic ions in the atmospheric aerosol in Qingdao[J]. *Environment Science*, 2012, 33(7): 2180–2190. [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.]
- [17] Qian Yibing, Wu Zhaoning, Ishii T, et al. The constituent characteristics of sand materials and sand sources of the Taklamakan Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(4): 32–38. [钱亦兵, 吴兆宁, 石井武政, 等. 塔克拉玛干沙漠沙物质成分特征及其来源[J]. *中国沙漠*, 1993, 13(4): 32–38.]
- [18] Qian Yibing, Wu Zhaoning, Ishii T, et al. Evolution feature of the clastic materials on the southern piedmont of Mount Tuomuer[J]. *Arid Land Geography*, 1994(4): 30–37. [钱亦兵, 吴兆宁, 石井武政, 等. 托木尔峰南麓碎屑物的演化特征[J]. *干旱区地理*, 1994(4): 30–37.]
- [19] Hou Shugui. Chemical characteristics of precipitation at the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(1): 80–84. [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.]
- [20] Paoletti L, De Berardis B, Diociaiuti M. Physico-chemical characterisation of the inhalable particulate matter (PM₁₀) in an urban area: an analysis of the seasonal trend[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 292(3): 265–275.
- [21] Zhao Shuhui, Li Zhongqin, Zhou Ping. Ion chemistry and individual particle analysis of atmospheric aerosols over Mt. Bogda of eastern Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 180(1/2/3/4): 409–426.
- [22] Wang Rongjun, Liu Shiyin, Wang Rui, et al. Analysis of a river fed by precipitation in north slopes of the Tianshan Mountains: runoff characteristics and influence factors[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1353–1361. [王荣军, 刘时银, 王睿, 等. 天山北坡降雨补给型河流径流变化特征及其影响因子分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1353–1361.]
- [23] Zhang Litian, Chen Jingsheng. The relationship between the composition of the major ion of river of China and regional natural factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(3): 236–240. [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.]
- [24] Shen Zhibao, Wen Jun. The atmospheric turbidity and the influence of the dust atmosphere on the surface radiation balance in desert in region spring[J]. *Plateau Meteorology*, 1994, 13(3): 330–338. [沈志宝, 文军. 沙漠地区春季的大气浑浊度及沙尘大气对地面辐射平衡的影响[J]. *高原气象*, 1994, 13(3): 330–338.]
- [25] Okada K, Kai K. Atmospheric mineral particles collected at Qira in the Taklamakan Desert, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(40): 6927–6935.
- [26] Claquin T, Schulz M, Balkanski Y J. Modeling the mineralogy of atmospheric dust sources[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D18): 22243–22256.
- [27] Kreutz K J, Sholkovitz E R. Major element, rare earth element, and sulfur isotopic composition of a high-elevation firn core: sources and transport of mineral dust in central Asia[J/OL]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 1(11) [2018-01-20]. http://soap.siteturbine.com/faculty/faculty_files/publications/1082/Kreutz_G3_2000.pdf.

[28] Ming Jing, Zhang Dongqi, Kang Shichang, 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: Atmospheres, 2007, 112(D15): 229–238.

[29] Verma S K, Deb M K, Suzuki Y, et al. Ion chemistry and source identification of coarse and fine aerosols in an urban area of eastern central India[J]. Atmospheric Research, 2010, 95(1): 65–76.

[30] Yuan Guoying. Influences of human activities on the environment in the Tuomul area[J]. Acta Geographica Sinica, 1981, 36(4): 413–422. [袁国映. 托木尔峰地区人类活动对环境的影响[J]. 地理学报, 1981, 36(4): 413–422.]

[31] Yang Lianmei, Zhang Guangxing, Yang Qing. Circulation dynamical structure of sand-storm caused by cold air crossing mountains in southern Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(1): 71–76. [杨莲梅, 张广兴, 杨青. 南疆盆地翻山型沙尘暴环流动力结构分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 71–76.]

Impact of sandstorm events on the environment of the Qingbingtan Glacier No.72 in the Mt. Tumor, Tianshan Mountains

MA Shan¹, XIA Dunsheng¹, LI Zhongqin^{2,3}, ZHOU Ping², ZHANG Xin³,
ZHOU Xi¹, WANG Jiabin⁴

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science / Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Lanzhou 730000, China; 3. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 4. Zhixing College of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to analyze the impacts of sandstorm on atmospheric environment and water environment, 7 aerosol samples and 9 meltwater samples were collected from the terminal of the Qingbingtan Glacier No. 72 in the Mt. Tumor, Tianshan Mountains. Then the major soluble ions in the aerosol samples and meltwater samples were analyzed in laboratory. The analyses indicate that the anion and cation in air and stream water are dominated by Ca^{2+} and SO_4^{2-} . According to the analysis of ion, the ion concentration in the two mediums significantly increases at the same time when a sandstorm occurs, but the trend of concentration change is different due to the influence factors different. The response ability of atmospheric environment to dust events is strong, and the water environment is more responsive to temperature change. Soluble inorganic ions, such as Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- and SO_4^{2-} , are believed coming from nature sources; NO_3^- and NH_4^+ are believed coming mainly from anthropogenic sources. The trajectory analysis has found that the cold air mass originating in Eastern Europe and Siberia can lead to regional sandstorm and have a significant influence on the glacier environment.

Key words: Qingbingtan Glacier No.72; sandstorm; atmospheric aerosol; runoff; sources

(本文编辑: 武俊杰)