

# 中亚天山托木尔峰地区青冰滩72号冰川雪坑 化学特征及其环境指示意义

张晓宇<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1,2</sup>, 王飞腾<sup>1</sup>, 王圣杰<sup>2</sup>

(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/天山冰川观测试验站,  
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)

**摘要:**基于2008年7月天山托木尔峰地区青冰滩72号冰川雪坑实测资料,探讨其冰川雪坑离子化学特征及环境指示意义。研究发现,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 是青冰滩72号冰川雪坑中主要阳离子;雪坑中阳离子浓度顺序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ ,其中,  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 和  $\text{Ca}^{2+}$ 主要反映长距离沙尘源物质传输情况;  $\text{Cl}^-$ 和  $\text{Na}^+$ 则一半以上来源于海盐;青冰滩72号冰川  $\text{NO}_3^-$ 浓度高于天山地区含量平均值。

**关键词:**雪化学;托木尔峰地区;天山;离子来源

**中图分类号:** P343.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2012)05-0641-08

中亚天山地区冰川雪冰芯记录为气候和环境变化提供了极有价值的参考<sup>[1-4]</sup>。20世纪以来,人类活动对周边环境污染不断增加,全球气温持续升高,由此引发的冰川退缩及环境问题,已成为全球所广泛关注<sup>[5-8]</sup>。冰雪中的化学离子是反映气候环境演化的重要指标。天山地区冰川是中国西部干旱与半干旱地区的重要水资源,制约该区人类的生存和社会经济的发展。因此,对该区域冰川冰雪化学特征、阴阳离子来源以及传输机制等问题的研究,不仅可以恢复气候与环境的演变,而且对于探究区域气候变化和生态建设与保护有极其重要的参考价值。

托木尔峰地区是天山地区冰川数量最多,规模最大的冰川分布区。近年来,气温的升高导致托木尔峰地区的冰川发生强烈消融,许多大冰川退缩并减薄<sup>[9]</sup>,对气候的变化十分敏感,加强对该地区冰川环境的研究具有十分重要的现实意义。

天山托木尔峰青冰滩72号冰川(41°45'N, 79°54'E)地处中国境内西天山,阿克苏昆马力克河源区(以下简称青冰滩72号冰川)(图1)。地理位置使该冰川冰芯对古气候的恢复和现代环境监测有

重要的研究价值。但这需要建立在大量野外工作的基础上。目前为止,除 Aizen 等人于1998~1999年对附近地区 Inichek 冰川进行过雪冰化学研究外,尚无对青冰滩72号冰川雪坑化学离子特征的研究报道。

2008年7~9月,在青冰滩72号冰川开展大量野外数据采集工作,目前已完整采集并分析青冰滩72号冰川的雪坑样品数据,对了解该地区雪层离子的来源及其环境指示等方面有重要意义,对更好解释中亚冰芯记录有很好的推动作用。

## 1 研究区介绍及数据采集

### 1.1 研究区概况

托木尔峰地区位于中国天山最西端,天山南麓,塔里木盆地北缘,是天山最大的现代冰川作用区,该区冰川以山谷冰川和悬冰川为主。降水主要来自大西洋和北冰洋的潮湿气流补给,6~8月降水占全年降水量50%左右<sup>[10]</sup>。虽然冷季(10~4月)降水量只占全年30%左右,为冰川上的净积累<sup>[10]</sup>。

**收稿日期:** 2011-06-02; **修订日期:** 2011-08-11

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-311)、冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目(SKLCSS-ZZ-2010-04)、国家自然科学基金项目(41171057,41161012,40930526)和冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCSS-ZZ-2010-04)资助。

**作者简介:** 张晓宇(1981-),女,河北省唐山市人,博士,主要从事冰川化学环境研究。E-mail: zhangxiaoyu@lzb.ac.cn

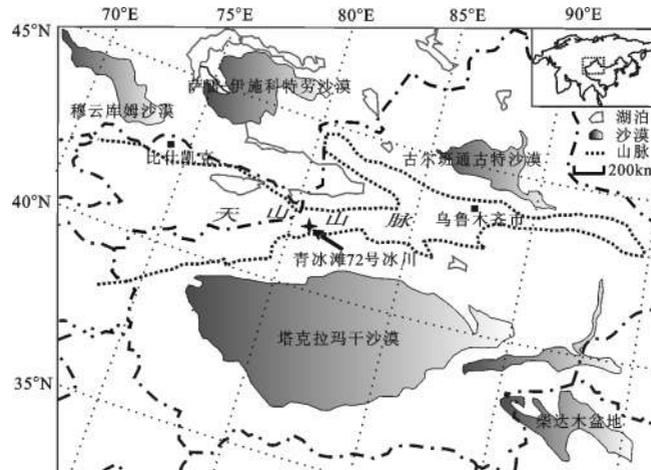


图1 青冰滩72号冰川的地理位置

Fig.1 The location of the study site of Qingbingtan Glacier No.72

## 1.2 样品采集和分析

样品采集于天山托木尔峰地区青冰滩72号冰川积累区,海拔4 600 m处的雪坑中。采样点表面较为平整,处于背阴面,日照少,对雪层记录的保存十分有利。沿雪坑剖面向下采集雪坑样品,每10 cm间距连续取样,直至粒雪冰面。样品的采集严格按照净化防污染要求进行:采样前,所有样品瓶、取样工具、处理设备、工作服等均已用去离子水清洗干净,采样时使用聚乙烯手套和面罩等以避免污染。化学样品采样的同时进行雪坑物理特征的观测,内容包括:雪层剖面厚度、雪层的密度、雪的类型描述和各种特征层位(如轻污化层、重污化层、冰片等)的辨别。雪冰样品在冷冻状态下装入聚乙烯塑料瓶中,装完样品后立即封闭,以避免蒸发和扩散。样品保持在冷冻状态下运输到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所天山冰川观测试验站实验室进行化学离子、pH值、电导率等分析。

使用光学粒径监测仪(AccuSizer 780A)对微粒的大小和浓度进行分析,详细分析过程及原理见参考文献<sup>[1]</sup>,不再赘述;采用Dionex-600型离子色谱仪测定所有样品的 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCOO}^-$ 和 $\text{CH}_3\text{COO}^-$ 离子浓度,具体测量过程前人已有详述<sup>[12]</sup>;pH值和电导率使用PHJS-4A和DDSJ-308A仪器进行测量。本文着重对分析测定结果中8种阴阳离子特征进行专项研究。

## 2 结果和讨论

### 2.1 青冰滩72号冰川雪坑整体化学特征

南北极地区化学离子含量最低。南极地区是

西南极海汽通道上气团传输终极点,陆源物质和北半球污染物传输最远点,这一地区雪冰化学基本代表对流层顶,平流层底部传输全球本底<sup>[17]</sup>。天山地区冰川化学离子浓度远高于极地和东亚地区。乌鲁木齐河源1号冰川和庙尔沟平顶冰川相对于奎屯哈希勒根51号<sup>[14]</sup>冰川来讲,更接近戈壁沙尘源区,且哈密庙尔沟平顶冰川恰好位于古尔班通古特沙漠、塔克拉玛干沙漠和鄯善沙漠的下风向位置,受局部地区沙尘暴影响更严重<sup>[13]</sup>,因此二者化学离子荷载量相对奎屯哈希勒根51号冰川较高。但在整个天山地区中,青冰滩72号冰川与其邻近Inilchek冰川(两冰川距离仅55 km)化学离子浓度非常高,总离子含量至少是其他冰川的2~3倍以上(图2),且以陆源尘埃物质 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等离子输入为主(表2),基本反映亚洲粉尘对区域大气环境的极大影响。

青冰滩72号冰川雪坑阳离子 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 比重最高,分别为39.3%和24.5%;阴离子中 $\text{Cl}^-$ 所占的比重最大(9.5%)。 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 所占比重基本相当。雪坑中阳离子浓度的顺序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ ,既不同于元素地壳中的丰度顺序 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ,也不同于海水中的元素浓度顺序 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ ,这意味着青冰滩72号冰川离子来源非常复杂,不能简单的解释为陆源物质或是海盐来源以及人类污染。

### 2.2 青冰滩72号冰川雪坑中典型离子来源分析及其环境指示意义

空气后向轨迹近年来广泛应用于大气科学<sup>[19]</sup>。天山托木尔峰地区主要水汽来源有两个方面:一

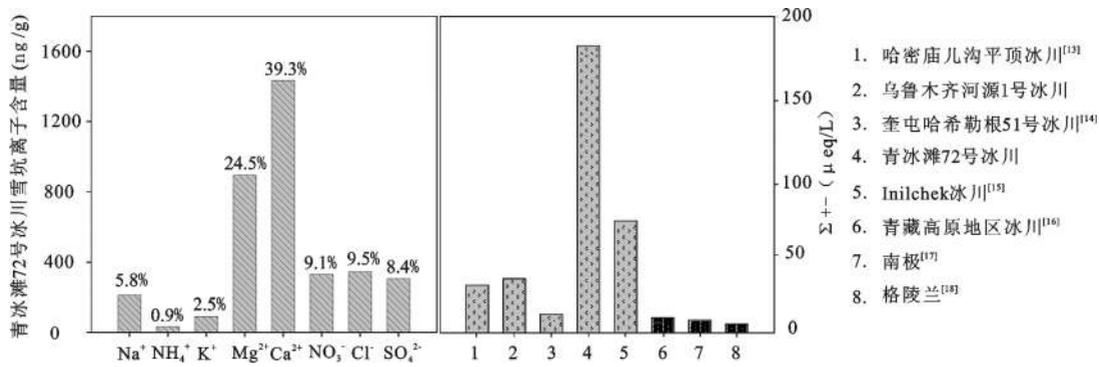


图2 青冰滩72号冰川各种离子含量百分比和极地、高亚洲地区雪/冰内主要阴阳离子平均浓度比较

Fig. 2 The sharing percentage of ions in snow pit of Qingbingtan Glacier No.72, and the comparison of the concentrations of the total ions in snow/ice in Polar Regions and High Asia

是西风气流携带大西洋水汽由西而东输入;二是来自北冰洋的水汽,由准格尔西部的山地缺口进入天山<sup>[10]</sup>。图3为2007年2月至2008年2月到达青冰滩72号冰川采样点的空气后向轨迹情况。Bugaev和Subbotina等人根据中亚的天气图数据分析得出中亚地区14种类型天气过程<sup>[15]</sup>,托木尔峰冰川区天气过程也包含其中。

2007年5月11日和2008年2月26日到达雪坑采样点的气团发源于里海南部,途经土库曼斯坦的卡拉库姆沙漠,乌兹别克斯坦,最后经过塔克拉玛干大沙漠到达青冰滩72号冰川。该气团为高海拔西风气流,冷锋过境,途经各大沙漠,携带大量沙尘,并带来一系列沙尘暴天气,同时伴随降水事件的发生<sup>[15]</sup>。而每年10月至次年5月发源于伊朗和穆尔加布河流域的气团<sup>[15]</sup>,通常途经土库曼斯坦东南部、塔吉克斯坦及费尔干纳盆地等干旱多沙地区,并且也会在冰川区形成降水。这两种类型的气团都十分有利于沙尘中的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{K}^{+}$ 等在冰川上的沉积。

2007年12月5日到达雪坑采样点的气团发源于西哈萨克斯坦的西伯利亚高压,途经哈萨克斯坦和乌斯秋尔特高原,为典型的降温大风天气过程,并且以北风、西北风为主要风向,同时也伴随着降水事件的发生<sup>[15]</sup>,这种气团也将有利于冬季雪层内陆源离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{K}^{+}$ )的沉积。

2007年5月28日和2007年12月27日到达雪坑采样点的气团发源于西伯利亚中西部和哈萨克斯坦中部,途经中亚地区,造成大风降温天气,同时带来少量降水。这种气团在中亚地区全年盛行,特别是冬春季节,发生频率较高<sup>[15]</sup>。值得注意的是,这种类型的气团可将人类活动污染物携

带至托木尔峰冰川区,包括青冰滩72号冰川。如2007年5月28日和2007年12月27日的空气轨迹均经过位于哈萨克斯坦境内的前苏联核试验基地的南部城市——卡拉干达州。经过该区上空的气团极易携带大量工业污染物向东传输至冰川区,造成雪冰中高浓度的含氮物质的沉积,如 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 。

而2007年12月27日和2008年2月2日的空气轨迹甚至经过世界著名的前苏联建航天器发射场和导弹试验基地——拜科努尔航天发射场( $63^\circ\text{E}$ ,  $46^\circ\text{N}$ )。拜科努尔航天中心是前苏联,也是目前俄罗斯最大的航天器和导弹发射试验基地,位于哈萨克境内的丘拉塔姆地区。Olivier et al<sup>[20]</sup>近期的研究就表明该地区放射性微尘已经对附近的Belukha冰川 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 的沉积产生重要影响。因此,上述经过该地区的气团可能携带人类活动污染物,特别是导弹爆炸试验及燃煤活动等产生的氮氧化物,经过大气化学反应后由气团传输至托木尔峰地区的冰川<sup>[20]</sup>,成为冬春季雪层中 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 沉积的重要来源之一。

此外,发源于东欧地区、俄罗斯、伏尔加河口、里海北部、咸海及中亚北部地区的高压气团,途经中亚干旱地区,不仅会带来强劲的北风,造成大风降温天气,且伴随短时降水事件发生<sup>[15]</sup>。这些经过里海、黑海和咸海的气团则为冰川带来大量的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 。2007年2月7日的空气轨迹即属于此种类型。每年10月至次年2月发源于中亚,高加索地区的西伯利亚西南高压,会带来多云天气以及少量降水;而发源于东欧,俄罗斯,地中海东部,黑海的西风气团,途经中亚南部地区,则形成飓风槽,属低海拔水分传输过程,容易造成大规模

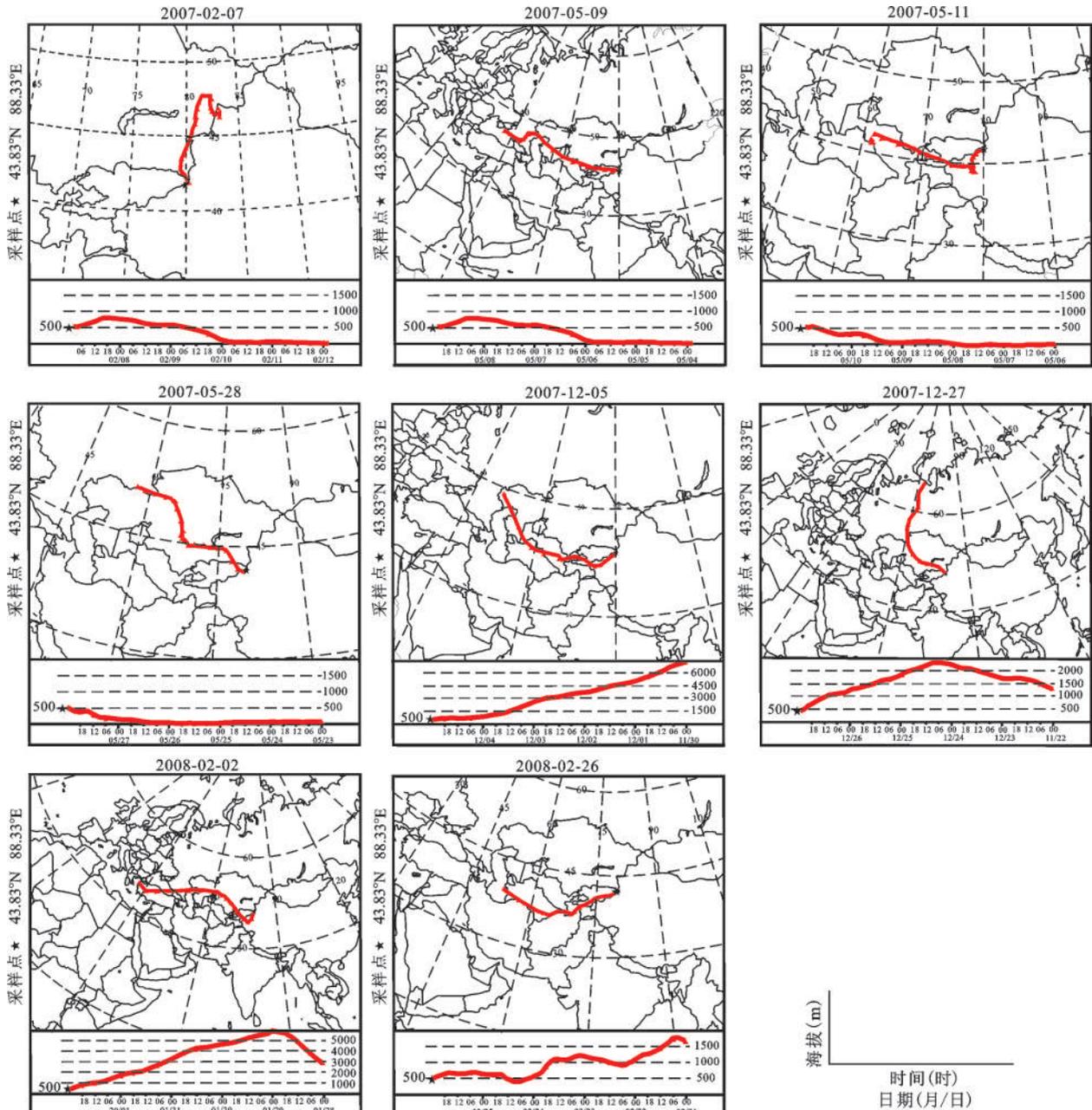


图3 青冰滩72号冰川采样点后向空气轨迹

Fig.3 Backward trajectories arriving at the sampling site on Qingbingtan Glacier No.72

集中降水<sup>[15]</sup>。如2007年5月9日的气团则由黑海出发,经里海及中亚干旱地区到达托木尔峰冰川区,造成冰川物质来源复杂,既有海盐成份也有陆源沙尘成份。

进一步运用主成分分析的方法对雪坑中不同化学离子间相互关系进行详细研究。分析结果(表1)表明,青冰滩72号冰川化学成分大致可分为3组。第一主成分包括 $Mg^{2+}$ 、 $K^{+}$ 和 $Ca^{2+}$ ,第二主成分包括 $Na^{+}$ 和 $Cl^{-}$ ,第三主成分包括 $NO_3^{-}$ 和 $NH_4^{+}$ 。

大气气溶胶中的可溶离子和不可溶微粒,沉降

到雪层之后受到沉积后作用影响程度不同。青冰滩72号冰川雪层中的污化层、 $Mg^{2+}$ 、 $K^{+}$ 、 $Ca^{2+}$ 和微粒的平均粒径对应关系非常好(图4),且浓度剖面季节变化特征明显。

由实地观察和实验室初步得出的雪坑样品 $\delta^{18}O$ 数据可知,青冰滩72冰川雪坑164 cm水当量范围内,包含2007年和2008年春季两个污化层。雪坑20~30 cm水当量和90~120 cm水当量深度范围内分别为2006和2007年冬季至次年春季形成的积雪。 $Mg^{2+}$ 、 $K^{+}$ 、 $Ca^{2+}$ 和微粒的平均粒径浓度剖

表1 青冰滩72号冰川雪坑中各元素主成分分析

Table 1 Factor loading matrix for the elements in snow pit of Qingbingtan Glacier No.72

离子	成 份		
	因子 1	因子 2	因子 3
Cl <sup>-</sup>	-0.38	0.53	0.68
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.02	-0.62	0.73
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.05	-0.58	0.73
Na <sup>+</sup>	-0.52	0.50	0.64
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.29	0.05	0.68
K <sup>+</sup>	0.68	0.04	0.57
Mg <sup>2+</sup>	0.77	0.28	0.16
Ca <sup>2+</sup>	0.80	0.25	0.40
总体 (变率%)	36.8	27.5	17.5

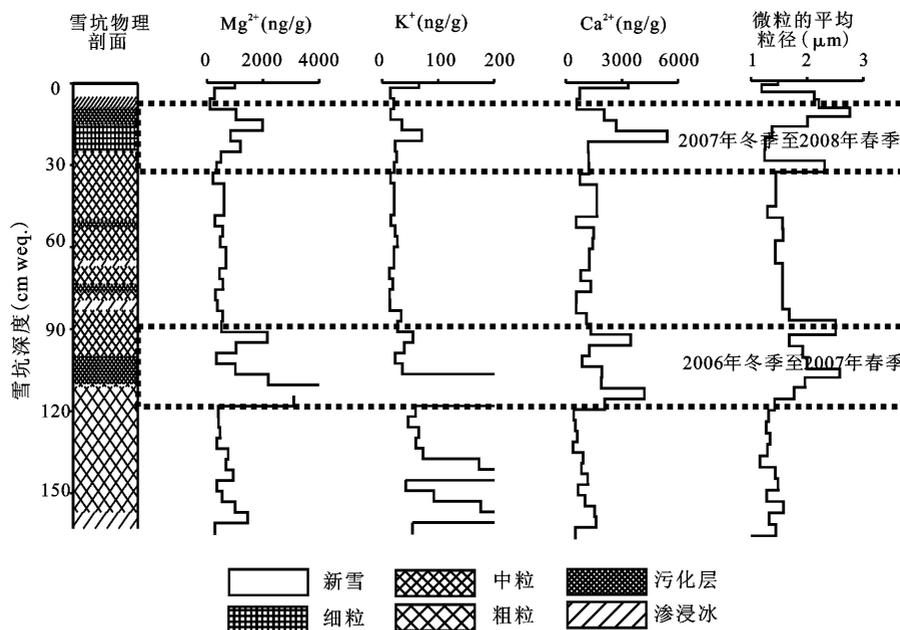
面在这两个层位均呈现出明显的峰值,表明这几种离子主要是随陆尘、不溶微粒等沉降到冰川,附着在雪层中形成的季节特征层位——污化层中的。这一现象与青藏高原北部多数离子峰值季节在冬春季,对应于大风少降水季节类似<sup>[21]</sup>。因此,雪坑中这些附着在污化层中的离子,基本可以解释为远距离沙尘源<sup>[22]</sup>。影响青冰滩地区的气流主要是盛行西风带,天山周围被大范围的戈壁和沙漠所包围,气团方向自西向东,在流经沙漠下界面时,包含Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>成份的沙石微粒被强气流

一并携带到冰川表面。

图3也证实这一点。2007年冬季至2008年春季,多条空气轨迹经过土库曼斯坦的卡拉库姆沙漠,哈萨克斯坦境内的萨雷伊施科特劳沙漠和穆云库姆沙漠以及费尔干纳盆地,最终穿过塔克拉玛干大沙漠,到达青冰滩72号冰川,这些气团无疑携带大量沙尘,并造成一系列沙尘暴天气,导致高浓度的Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>等陆源离子的沉降至冰川。

1998年Aizen等人在距离青冰滩72号冰川仅55 km的Inilchek冰川获取的16 m的雪/冰芯中,Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>也在12月至次年2月期间表现出了最高值。Aizen等还对各季节所受不同气团影响进行了详细分析,结果表明冬春季Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和K<sup>+</sup>的沉积高值与西伯利亚高压气团相关性极高( $r=0.84$ )。强劲的西风和西北风可以将自然源气溶胶从费尔干纳盆地和西部哈萨克斯坦等干旱沙漠地区一直输送到中国境内天山冰川区。因此,青冰滩72号冰川中的Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>主要反映了长距离沙尘源物质传输情况。

第二主成分包括Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>。相关分析表明,Cl<sup>-</sup>与Na<sup>+</sup>离子在青冰滩72号冰川雪坑中相关性系数极高,二者线性回归方程为: $y=0.52x+27.3$  ( $r^2=0.91, n=38$ ) (图5)。

图4 青冰滩72号冰川雪坑物理剖面、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>浓度及微粒平均粒径连续剖面对应情况Fig. 4 The relationship of the snow stratigraphy, the Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> concentration, and the average size of insoluble micro-particles profiles in snow pit of Qingbingtan Glacier No.72

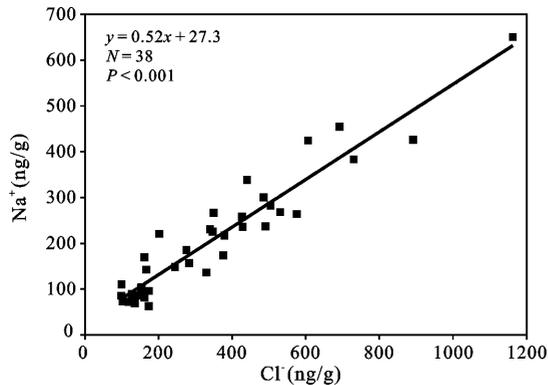


图5 雪坑中Cl<sup>-</sup>与Na<sup>+</sup>浓度的一元线性回归拟合情况

Fig. 5 Relationship between Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup> concentration in the snow pit

人们通常将C(Cl<sup>-</sup>)/C(Na<sup>+</sup>)等于或接近1.16归因于海洋源<sup>[23]</sup>。对天山地区Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>来源的研究一直存在分歧, Oliver和Kreutz等<sup>[20,24]</sup>及Wake等<sup>[25]</sup>认为天山地区和青藏高原东南部地区冰川中沉积的Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>主要来源于土壤粉尘和周围的盐湖蒸发;而董志文等<sup>[14]</sup>近期对天山奎屯河哈希勒根51号冰川Na<sup>+</sup>的空间分布规律研究则表明,该冰川沉积中的Na<sup>+</sup>有58%是海洋源。

对Inilchek冰川1998年雪/冰芯中分析表明,春夏季Cl<sup>-</sup>和Na<sup>+</sup>的高浓度与起源于地中海、黑海甚至更远的大西洋水汽团密切相关,属远距离海盐传输。青冰滩72号冰川雪坑C(Cl<sup>-</sup>)/C(Na<sup>+</sup>)为1.02,极其接近海水中的比值1.16,后向轨迹分析也表明部分到达该冰川的气团确实发源于或途经各大海区(图4),例如2008年2月2日的气团就起源于地中海北部,途经黑海、里海以及咸海北缘,最终到达青冰滩72号冰川。因此,推测海盐也应当是青冰滩72号冰川雪坑中Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>重要的来源之一。

进一步采用海盐示踪法<sup>[26-28]</sup>对青冰滩72号冰川中海盐NaCl的贡献率进行了详细计算。结果表明,青冰滩72号冰川雪层中Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>和Mg<sup>2+</sup>/Cl<sup>-</sup>的当量比值(Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> = 1.02, Mg<sup>2+</sup>/Cl<sup>-</sup> = 9.98)均大于海水中的相应值(0.859和0.195),因此选用Cl<sup>-</sup>作为该冰川的海盐源示踪离子,并根据以下离子非海洋来源含量的求算公式<sup>[26-28]</sup>:

$$N_{\text{NNA}} = A - R \cdot M$$

其中, $N_{\text{NNA}}$ 是A离子非海洋来源部分,A是离子实测浓度值,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。计算得出该冰川区降水中Na<sup>+</sup>海洋源贡献率为53%。

由此得出结论,青冰滩72号冰川中的Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>非单纯来源于陆尘或海盐,但其中至少一半以上的Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>为海盐输入。

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、可能性来源及其环境指示意义。这种离子一般源于人类污染<sup>[29]</sup>,如化石燃料燃烧、生物有机质的燃烧、牲畜的活动及化学肥料的使用等。

由表2极地和高原地区雪冰内主要离子浓度比较发现:天山地区冰川中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度一般高于极地,且已有研究表明,天山地区冰川如乌鲁木齐河源1号冰川中阴离子沉积已受到人类污染活动影响<sup>[29]</sup>。以往的研究也表明<sup>[17,31,32]</sup>,南极地区雪冰中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>受人类污染影响极小,基本反映了全球的本底值,而北极格陵兰地区中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>虽然受到北半球中纬度地区人类活动影响,但其数值仍然远低于天山地区冰川中该离子的含量。

青冰滩72号冰川的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量高达5.3 μeq/L,在全球范围内,甚至天山地区呈现出最高值。根据前面的离子非海洋来源含量的求算公式计算得出,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>非海洋源贡献率高达75%。因此,推测该区大气降水中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>绝大部分来自于沙尘源传输,并且很可能受到人类工业及生产活动影响。

结合前面的空气后向轨迹分析,到达青冰滩72号冰川的高海拔西风气流途经各大沙漠,这些气团(如2007年5月11日、2007年12月5日和2008年2月26日的气团轨迹)携带大量陆源沙尘,对该冰川NO<sub>3</sub><sup>-</sup>沉积具有重要影响;而2007年5月28日和2007年12月27日到达雪坑采样点的气团还经过前苏联工业基地上空,易将工业污染物向东传输至冰川区,这也极有可能增加该冰川雪冰中含氮物质的沉积。

### 3 结 论

对青冰滩72号冰川雪坑离子化学特征及其环境指示意义的研究发现:

1) Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>是青冰滩72号冰川雪坑中的主要阳离子。雪坑中阳离子浓度顺序:Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>>K<sup>+</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>。Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和K<sup>+</sup>主要反映了长距离沙尘源物质传输情况,来自费尔干纳盆地、萨雷伊施科特劳沙漠、穆云库姆沙漠以及塔克拉玛干大沙漠气团,携带大量沙尘,对该冰川Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和K<sup>+</sup>含量和季节分布特征产生重大影响。

2) 青冰滩72号冰川雪坑中Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>非单纯来源于陆尘或海盐。C(Cl<sup>-</sup>)/C(Na<sup>+</sup>)比值为1.03,计算

表2 极地和东亚地区雪冰内主要离子的浓度比较

Table 2 Concentration ( $\mu\text{eq/L}$ ) of major ions in snow/ice in Polar Regions and High Asia Regions

地 点	浓度( $\mu\text{eq/L}$ )								研究时期 (年)	数据来源
	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
Belukha冰川(阿尔泰山)	0.6	8.2	0.3	0.8	4.4	2.7	0.5	4.0	1815~2001	[3]
Ngozumpa(喜马拉雅山)	0.3				0.4	0.1	0.3	0.2	1989~1990	[21]
各拉丹冬(青藏高原)	1.4				7.8	1.5	1.3	1.4	1988~1990	[21]
扎当冰川(念青唐古拉山)	0.5	3.6	0.4	0.7	3.8	2.9	0.5	1.5	2006	[16]
奎屯河哈希勒根51号冰川(天山)	0.9	3.6	0.4	1.8	3.5	0.9	1.1	0.7	2004	[14]
哈密庙儿沟平顶冰川(天山)	3.8	4.2	0.5	8.0	23.1	4.7	3.7	4.6	2004	[13]
乌鲁木齐河源1号冰川(天山)	4.2	8.1	0.8	7.8	33.9	4.0	4.5	8.6	2004	TGS Data
青冰滩72号冰川(天山)	9.3	1.9	2.4	74.7	71.8	5.3	9.7	6.4	2008	本研究
Inilchek冰川(天山)	11	7.4	1.6	5.9	46.9	3.3	7.5	5.0	1997~1998	[15]
Eclipse Icefield	0.4	0.3	0.1	0.5	1.6	0.7	0.5	0.9	2002	[30]
格陵兰	0.14	0.4	0.1	0.1	0.2	3.2	0.7	0.6	2002	[18]

\*TGS data: 乌鲁木齐河源1号冰川2004年7月雪坑数据。

表明,其中至少一半以上的Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>为海盐输入。

3) 青冰滩72号冰川NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和浓度高于天山地区含量的平均值,除了长距离沙尘源的传输外,周边国家工业活动及附近居民生产放牧活动也可能对青冰滩72号冰川雪层中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的沉积产生了影响。

致谢: 本项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人员的共同努力下完成的。谨此对参加本项研究的每一个观测人员以及项目组人员表示衷心感谢。

## 参考文献:

- Li Z, Ao T, Xie Z. Modern atmospheric environmental records in Guliya Ice Cap of Qing-zang (Tibet) Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 1995, **40** (10): 874-875.
- 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]. Geochimica Geophysica Geosystems, 2000, **1**(11), 1048, doi: 10.1029/2000GC000082.
- Olivier S, Blaser C, Brüttsch 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, 2006, **111**, D05309, doi: 10.1029/2005JD005830.
- Wu G, Zhang C, Gao S, et al. Element composition of dust from a shallow Dunde ice core, Northern China[J]. Global Planet Change, 2009, **67**(3-4): 186-192.
- 李宗省, 何元庆, 贾文雄, 等. 中国典型季风海洋性冰川区“冰川—径流”系统的全球变化敏感性研究[J]. 地理科学, 2008, **28**(2): 229~234.
- 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.
- 董志文, 李忠勤, 张明军, 等. 天山奎屯河哈希勒根51号冰川雪坑化学特征及环境意义[J]. 地理科学, 2010, **31**(1): 149~156.
- 王璞玉, 李忠勤, 曹敏, 等. 近45年来托木尔峰青冰滩72号冰川变化特征[J]. 地理科学, 2010(6): 962~967.
- 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.
- 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.
- 朱宇漫, 李忠勤, 尤晓妮. 利用光学粒径监测仪测定雪冰样品中的微粒[J]. 现代科学仪器, 2006, **3**: 81~84.
- 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.
- 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——以奎屯河哈希勒根51号冰川和哈密庙儿沟平顶冰川为例[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(12): 1269~1276.
- 董志文, 李忠勤, 张明军, 等. 天山奎屯河哈希勒根51号冰川雪坑化学特征及环境意义[J]. 地理科学, 2010, **30**(1): 150~156.
- 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, 2004, **109**, D08304, doi: 10.1029/2003JD003894.
- Kang S, Huang J, Xu Y, et al. Changes in ionic concentrations and  $\delta^{18}\text{O}$  in the snowpack of Zhadang glacier, Nyainqentanglha mountain, southern Tibetan Plateau[J]. Annals of Glaciology, 2008, **49**(1): 127-134.
- 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.
- Jack E D, 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**:5007-5019.
- [19] 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,2007,**112**(D15307),doi:10.1029/2007JD008618.
- [20] Olivier S,Schwikowski M,Brütsch S,et al.Glaciochemical investigation of an ice core from Belukha glacier, Siberian Altai[J]. Geophysical Research Letters,2003,**30**(19),2019,doi:10.1029/2003GL018290.
- [21] Kang S,Mayewskia P A,Qin D,et al.Glaciochemical records from a Mt. Everest ice core:relationship to atmospheric circulation over Asia[J].Atmospheric Environment,2002,**36**:3351-3361.
- [22] Wang F,Li Z,You X,et al.Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Ürümqi glacier No.1 percolation zone,eastern Tien Shan, China[J].Annals of Glaciology,2006,**43**(1): 245-249.
- [23] Keene W C,Galloway J N.Organic acidity in precipitation of North America[J].Atmospheric Environment,1984,**18**(11):2491-2497.
- [24] Kreutz K J,Aizen V B,Cecil L D,et al.Oxygen isotopic and soluble ionic composition of a shallow firn core,Inilchek glacier, central Tien Shan[J].Journal of Glaciology,2001,**47**:548-554.
- [25] Wake C P.The spatial distribution of snow and aerosol chemistry in the mountains of Central Asia[D].Durham: University of New Hampshire,1993.
- [26] Church T M,Galloway J N,Jickells T D,et al.The Chemistry of Western Atlantic Precipitation at the Mid-Atlantic Coast and Bermuda[J].Journal of Geophysical Research,1982,**87**(c13): 11013-11018.
- [27] Keene W C,Alexander A P,Galloway J N,et al.Seasalt Corrections and Interpretation of Constituent Ratios in Marine Precipitation[J].Journal of Geophysical Research,1986,**91**(c13): 6647-6658.
- [28] 李宗省,何元庆,阮玲玲,等.丽江市降水中常量离子的化学特征[J].环境化学,2008,**27**(5):648~652.
- [29] 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,2003,108(D14):4406,doi:10.1029/2002JD002181.
- [30] Kaplan Y,Wake C P,Kang S,et al.Seasonal and spatial variability in snow chemistry at Eclipse Icefield,Yukon,Canada[J].Annals of Glaciology,2006,**43**(1): 320-238.
- [31] 张明军,任贾文,孙俊英,等.南极冰盖 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度记录研究进展[J].地球科学进展,2004,**19**(2):275~282.
- [32] 李忠勤,姚檀栋,谢自楚.大气气溶胶中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 研究[J].地球科学进展,1995,**10**(3):289~295.

## Chemistry and Environmental Significance of Snow in Snow Pit of Glacier No.72, Mt.Tumur, Tianshan Mountains, Central Asia

ZHANG Xiao-yu<sup>1</sup>, LI Zhong-qin<sup>1,2</sup>, WANG Fei-teng<sup>1</sup>, WANG Sheng-jie<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Snow chemistry and their environmental significance were studied by sampling a snow pit on July 2008 on Glacier No.72 in the Mt.Tumur region. Calcium (Ca<sup>2+</sup>) and Magnesium (Mg<sup>2+</sup>) are the dominant cations. The concentration order of the cations is: Ca<sup>2+</sup>>Mg<sup>2+</sup>>Na<sup>+</sup>>K<sup>+</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> reflected the long-distance natural land sources transmission. The concentration and seasonal distribution of Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup> in snow pit of the Glacier No.72 are affected by the input of dust aerosols from Sary Ishikortau desert, Muyunkum desert and Taklimakan desert. The ratio of C(Cl<sup>-</sup>)/C(Na<sup>+</sup>) is 1.02 and the non-marine source percent of Na<sup>+</sup> is nearly 50%, it means half of the Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup> are from sea salts. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> on Glacier No.72 was characterised by significant high concentration when compared with the mean value of glaciers in Tianshan region. Most air masses backward trajectories ending in December 2007 and February 2008 have passed the Taklimakan desert, while some even traveled across the industrial zone of the former Soviet Union, indicating that dust from the vast arid regions of central Asia is the dominant source for NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in Glacier No.72, while anthropogenic emissions are also an important source of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> from surrounding cities.

**Key words:** snow chemistry, Mt.Tumur region, Tianshan Mountains, source of ions