

天山东部雪冰中硝酸根浓度对中亚生物质燃烧的响应研究

王圣杰¹, 张明军^{1,2*}, 王飞腾², 李忠勤^{1,2}

(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)

摘要:研究了天山东部雪冰中 NO_3^- 浓度对中亚哈萨克斯坦生物质燃烧的响应情况. 在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川持续采集了 52 组表层雪与雪坑样本, 分析了雪样中 NO_3^- 等成分的浓度, 运用 HYSPLIT 模型模拟了空气轨迹, 目的是考察雪冰中 NO_3^- 与 2002 年哈萨克斯坦草原大火的关系, 探讨由生物质燃烧产生的 NO_3^- 在高海拔山岳冰川雪层中的沉降效应. 1 号冰川表层雪中的 NO_3^- 可以作为某些典型生物质燃烧的辅助表征物, 2002 年 9 月中旬 ~ 10 月下旬, NO_3^- 浓度与传统燃烧指示剂 K^+ 浓度的相关系数高达 0.74, 明显高于常年平均值. 从哈萨克斯坦的火点传送到 1 号冰川附近, 一般需要 2 ~ 6 d. 携带生物质燃烧产物的气团, 能否于 1 号冰川表层雪中保留信息在很大程度上取决于当地的气温与降水条件. 1 号冰川在湿季受淋溶作用影响显著, 运用冰芯恢复古气候时应充分考虑到后沉积过程的影响.

关键词:硝酸根; 表层雪; 生物质燃烧; 中亚; 天山

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0338-07

Influence of Biomass Burning in Central Asia on Nitrate Concentrations in Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tianshan Mountains, China

WANG Sheng-jie¹, ZHANG Ming-jun^{1,2}, WANG Fei-teng², LI Zhong-qin^{1,2}

(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)

Abstract: Influence of biomass burning in Kazakhstan on nitrate concentrations in eastern Tianshan Mountains was studied. 52 samples of surface snow and snow pits were collected from Glacier No. 1 at the headwater of Urumqi River in eastern Tianshan Mountains, China. Nitrate concentrations in these samples were measured and atmospheric transmission was reconstructed with HYSPLIT air trajectory model. The objectives of this study were to identify the relationship between steppes fire and nitrate concentration in snow, and develop deposition process of nitrate caused by biomass burning in alpine glacier at high altitude. Results indicated that nitrate in surface snow could be regarded as a subsidiary indicator of biomass burning for long distance. Correlations for NO_3^- and K^+ were 0.74 from mid September to late October 2002, which was obviously higher than mean concentration. It took 2-6 days from fire spots in Kazakhstan to sampling site. Whether the information in air mass with biomass burning products can be recorded or not, was mostly depend on local temperature and precipitation. Eluviation process was prominent at Glacier No. 1 in wet season, so postdepositional effect should be considered in paleoclimate reconstruction by ice core.

Key words: nitrate; surface snow; biomass burning; central Asia; Tianshan Mountains

燃烧产生的高温烟气在适当的条件下, 可以进入对流层上部作长距离输送^[1-3]. 尽管自然生物质燃烧产物对大气中 NO_x 总体贡献比例较小^[4-6], 但生物质燃烧是事件性影响, 发生与否对局部环境造成的差异比较明显. 冰川记录含有丰富的环境信息, 20 世纪 90 年代以来, Legrand^[7]、Whitlow^[8]、Dibb^[9]等在北极的研究表明典型生物质燃烧活动可以使含氮化合物在冰川记录中得以保存.

亚洲季节性生物质燃烧广泛存在, 而且山岳冰川众多, 但是由于淋溶作用显著, 积雪或冰芯中含氮化合物的生物质燃烧贡献很少有案例报道. Zhao

等^[10]注意到了天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 (43°06' N, 86°49' E) 表层雪中的 NO_3^- 浓度峰值可能与草原大火有关, 但缺乏进一步的定量分析. 本研

收稿日期: 2010-03-12; 修订日期: 2010-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40701035, 40631001, 40571033, 40701034, J0630966); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-10-0019); 陇原青年创新人才扶持计划项目; 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB951003, 2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-127); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目; 西北师范大学知识与科技创新工程创新团队项目 (NWNU-KJCXGC-03-66)

作者简介: 王圣杰 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化与冰川化学, E-mail: geowang@126.com

* 通讯联系人, E-mail: mjzhang2004@163.com

究选取 1 号冰川作为对象,试图通过中亚典型生物质燃烧事件,考察燃烧产生的含氮化合物在大气层中的传输过程,探究由此产生的 NO_3^- 在高海拔山岳冰川雪层中的沉降效应。

1 材料与方法

1.1 表层雪与雪坑数据

1 号冰川是我国定位观测时间最长的冰川,被世界冰川监测服务处(WGMS)列为全球 10 条重点监测冰川之一,是亚洲中部的代表性山岳冰川(图 1)。该地区属于典型的大陆性气候,全年受西风带控制。夏秋季节中亚地区(特别是哈萨克斯坦)森林与草原大火影响下的气团可以随西风带输送至新疆天山地区。2002 年起中国科学院天山冰川观测试验站开展了雪冰过程研究项目(program for glacier processes investigation, PGPI),对雪冰现代物理化学过程进行连续观测。采样点位于 1 号冰川东支海拔 4 130 m 处,雪坑剖面保存条件良好。表层雪样品取自雪坑表层 3~5 cm 处,雪坑样品自表层雪以下每隔 10 cm 依次采样,直至底层附加冰为止,采样频率为 1 周 1 次。本研究使用的数据采集时段为 2002-09-14~2003-09-13。具体采样程序见文献[11]。雪样在采集和运输过程中均采取严格的操作规范,在冰冻状态下从野外运回实验室后低温保存。化学分析前将雪样置于用超纯水(电阻率为 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)洗净的容器中,在室温下待其自然融化后立即进行分析。化学离子采用 Dionex-320 型离子色谱仪测定,测量精度可达到 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 量级。其中,阳离子使用 Dionex IonPac CS12A (4 mm × 250 mm) 分离柱,CG12A (4 mm × 50 mm) 保护柱,CAES 阳离子抑制器,15 mmol·L⁻¹ MSA 淋洗液;阴离子使用 AS11-HC (4 mm × 250 mm) 分离柱,AG11-HC (4 mm × 50 mm) 保护柱,ASRS-4 mm 抑制器,15 mmol·L⁻¹ NaOH 淋洗液。不溶微粒分析使用 Accusizer780A 光学粒径检测仪,重复性误差在 5% 以内。

1.2 卫星火点数据

生物质燃烧火点资料来自欧洲空间局(ESA)的世界火点图集(World Fire Atlas)。世界火点图集是根据欧洲遥感卫星和环境卫星搭载的跟踪扫描辐射计(ATSR-2 和 AATSR)数据制作完成的[12]。该图集通过地面 3.7 μm 波段热辐射监测确定火点位置,空间分辨率为 1 km × 1 km,自 1995 年 11 月更新至今。该数据已广泛用于国内外的生物质燃烧研究[13~15]。

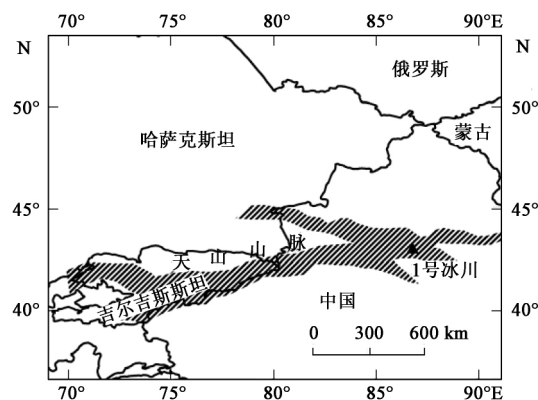


图 1 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的地理位置

Fig. 1 Sketch map showing the sampling site and its surrounding areas

1.3 空气轨迹模型及其气象数据

空气轨迹模型采用美国海洋大气研究中心(NOAA)空气资源实验室开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模式 HYSPLIT 4.9^[16]。该模式常用于气团运动的模拟分析^[17, 18]。模式使用的气象资料为美国国家环境预报中心(NCEP)的全球再分析资料(Global Reanalysis)。不同燃烧物起始计算高度是不同的,理想条件下森林大火产生的气流可以达到 2 000~3 000 m^[19],而农业秸秆燃烧可能仅为 100 m^[20]。哈萨克斯坦火点出现区域多为稀疏的草本植物与灌木覆盖,因此将 120 h 前向轨迹起算高度设为 100~500 m,在这一范围内每隔 100 m 设置一个起算点,并将计算结果导入 ArcGIS 9.2 软件进一步分析。

2 结果与讨论

2.1 表层雪记录中生物质燃烧的识别

研究表明,影响我国新疆的生物质燃烧气团主要来自中亚地区^[15]。根据世界火点图集,2002 年下半年哈萨克斯坦发生的草原大火是近年来中亚地区火点数量最多、波及范围最广的一次(图 2)。自 1995 年末以来,哈萨克斯坦境内火点出现频率超过 1000 次/月的仅有 2002 年 8~9 月、2004 年 6 月、2005 年 7 月和 2006 年 6 月 4 次。1 号冰川气溶胶与表层雪中的 NO_3^- 浓度在冬季显著相关,而在夏季不相关,这与降水的季节变化有着必然的联系^[10]。6~8 月是 1 号冰川的主要降水期,集中了全年 80% 以上的降水^[21]。考虑到乌鲁木齐河源区的淋溶强度,本研究选取 2002 年 9~10 月的生物质燃烧作为典型事件。

NO_3^- 被认为是气团长距离传输的代表物之

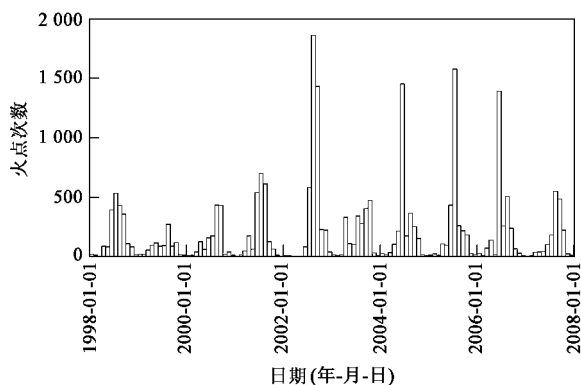


图2 1998~2007年哈萨克斯坦每月火点次数比较图

Fig.2 Monthly frequency of fire spots in Kazakhstan during 1998-2007

—^[22].图3是2002年9月~2003年9月表层雪中 NO_3^- 浓度与其他几种代表性指标的变化情况。 K^+ 、 Na^+ 是局地源物质的代表,可能来自冰川周围裸露的岩石,春季风力较强时,亚洲沙尘暴会携带这些局地源的物质沉降到冰川表面^[11, 23, 24].与 Na^+ 不同的是, K^+ 也是生物质燃烧常见的指示物质之一,可用于大气颗粒物中的生物质燃烧排放贡献的识别和评估^[25~27].将这2种阳离子与 NO_3^- 对比后可以发现,2002年9月 K^+ 与 NO_3^- 的峰值对应关系更加明显.根据世界火点图集数据,结合同期的卫星照片判读,这一时段的浓度峰值与哈萨克斯坦东部大规模的草原大火很可能存在密切的联系.不溶微粒代表了远距离源,主要来自湿沉降,当气团经过沙漠及湖泊时,下垫面的性质会影响到物质的来源^[11, 28].2002年9月不溶微粒浓度峰值与 NO_3^- 对应明显,可见 NO_3^- 在很大程度上与大气环流的输送过程关系密切.这一输送过程经过萨雷-伊施科特劳沙漠、穆云库姆沙漠等中亚沙漠以及巴尔喀什湖等湖泊,直至新疆天山东部,由生物质燃烧产生的含氮化合物与粉尘很可能就是通过这一途径同期输入采样区.

1号冰川靠近乌鲁木齐市,城市污染物中可能含有大量的含氮化合物.图3中还列出了由中国环境保护部发布的全国重点城市空气污染指数(air pollution index, API),其计算指标中包括氮氧化物等,是反映中国城市空气污染的常见指标之一.空气污染指数在100以上表示污染,越高代表污染程度越大.对比 NO_3^- 浓度峰值与同期乌鲁木齐空气污染指数,没有发现明显的对应关系.

为了进一步说明 K^+ 和 Na^+ 在同 NO_3^- 对应关系上的差异,图4单独列出了1号冰川全年表层雪

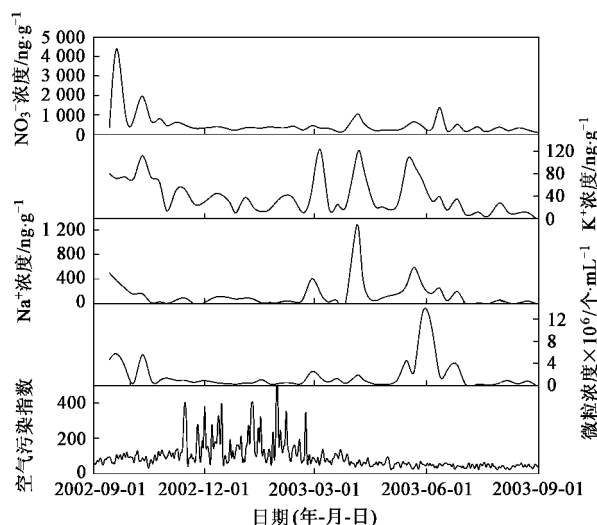
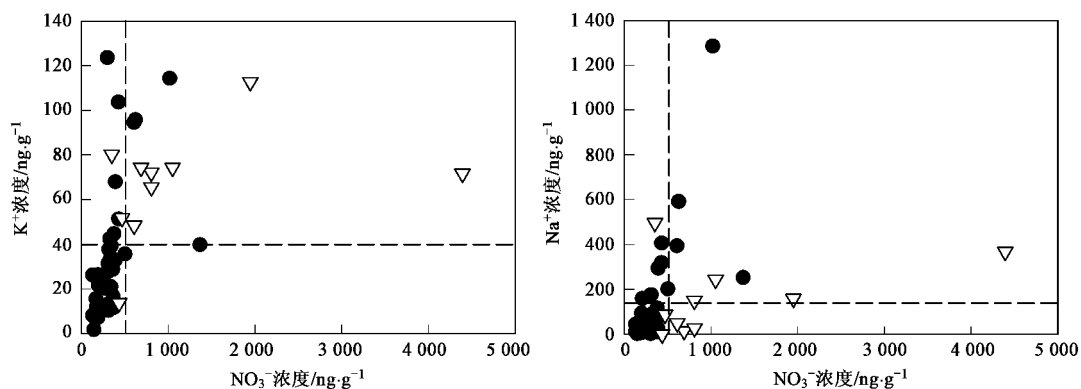


图3 2002年9月~2003年9月表层雪中 NO_3^- 与其他4种代表性指标随时间的变化情况

Fig.3 Variations of NO_3^- , K^+ , Na^+ , insoluble microparticle concentration in surface snow and air pollution index in Urumqi from September 2002 to September 2003

NO_3^- 与这2种离子的浓度关系.对比后可以发现,2002年9月中旬~11月中旬 NO_3^- 与 K^+ 浓度大多高于平均值.受生物质燃烧影响期间, NO_3^- 与 K^+ 浓度峰值出现的对应关系十分明显.而生物质燃烧影响期间表层雪 Na^+ 浓度大多位于平均值附近或低于平均值, NO_3^- 与 Na^+ 的对应关系并不明显.因此,这一时段 NO_3^- 浓度出现峰值的主要原因并非来自于局地.中亚地区的生物质燃烧在大气环流的作用下会对周边地区的氮循环产生影响,1号冰川表层雪 NO_3^- 浓度在2002年9~10月出现的显著峰值(最高达 $4394.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)很可能主要来源于哈萨克斯坦东部的草原大火.

选取燃烧强烈作用期(9月中旬~10月下旬)表层雪与雪坑上部距离表层最近的一个 NO_3^- 浓度峰处的雪样,在SPSS 17.0中分析 NO_3^- 与 K^+ 相关系数为0.74,二者相关性显著.而之前对天山乌鲁木齐河源区降水与表层雪化学成分的研究表明, NO_3^- 与 K^+ 浓度的相关系数一般仅在0.2~0.5之间(表1).这就是说,生物质燃烧事件可以对表层雪中的 NO_3^- 浓度产生显著影响, NO_3^- 可以作为某些典型生物质燃烧的辅助表征物.此外,在长时间序列的研究中,由于 NO_3^- 来源复杂,与其他常见可溶性离子均无显著相关性.在中亚生物质燃烧这一突发环境事件作用下, NO_3^- 与其他离子的关系也出现重大变化.



三角形点表示 2002 年 9 月中旬~11 月中旬采集样本,圆形点表示 2002 年 11 月下旬~2003 年 9 月中旬采集样本,虚线表示平均值

图 4 2002 年 9 月~2003 年 9 月表层雪中 NO_3^- 与 K^+ 和 Na^+ 浓度的关系

Fig.4 Relationships between NO_3^- and K^+ or Na^+ in surface snow from 2002-09 to 2003-09

表 1 乌鲁木齐河源区降水与表层雪中 NO_3^- 与 K^+ 的相关系数

Table 1 Correlations for NO_3^- and K^+ in precipitation and surface snow at headwater of Urumqi River

研究时段	样本材料	采样区海拔/m	样本数量	相关系数	文献
1995 年 6 月~1996 年 6 月	降水	3 545	121	0.39	[29]
2003 年 4 月~2004 年 2 月	降水	3 551	65	0.22	[30]
		2 119	63	0.27	
2002 年 11 月~2005 年 10 月	表层雪	4 130	66(干季)	-0.06	[31]
		4 130	90(湿季) ¹⁾	0.47	
2003 年 9 月~2004 年 9 月	表层雪	4 130	45	0.33	[11]
2002 年 9 月中旬~10 月下旬	表层雪	4 130	9	0.74	本研究
2002 年 9 月~2003 年 10 月	表层雪	4 130	52	0.44	本研究

1) 干季指 11 月~次年 3 月,湿季指 4~10 月

2.2 火点传输与雪冰记录的对应关系

生物质燃烧主要分布在赤道附近的热带地区以及北半球中、高纬度区域^[1]. 此前的研究表明,中亚地区生物质燃烧的影响范围几乎包括整个亚欧大陆北部,气团主要向东运输,在蒙古高原以西阿尔泰山附近大致分为两支,一支经西伯利亚地区继续向东运输,另一支则进入新疆^[15]. 基于 2002 年夏秋季节哈萨克斯坦火点的 HYSPLIT 前向轨迹分析表明,对天山东部产生显著影响的火点主要集中在哈萨克斯坦东南部,而北部的少量火点在起算高度较低(距地面 100 m 以下)的情况下也会对采样区域产生影响(图 5). 图 5 选取了燃烧作用期内火点出现频率较高的 2002-09-12,分析燃烧影响后的气团传输过程. 就传输途径而言,哈萨克斯坦北部气团主要沿蒙古高原北缘自西向东传送,南部气团大多经过天山东部,并自天山北麓向南输送,从而对 1 号冰川附近大气环境产生影响. 如果从表层雪采样前最近一次降水发生日起,计算 120 h 的 HYSPLIT 后向轨迹,亦可发现后向轨迹会经过哈萨克斯坦的火点地区.

燃烧产生的化学物质会随气团在大气层中远距离传输,而降水可以显著地使气团携带的可溶性物质沉降至雪层表面. 乌鲁木齐河源区降水化学成分的研究^[30]也表明, NO_3^- 沉降量几乎全部来自湿沉降. 图 6 反映了气团传输、雪冰记录与当地气象资料之间的时间对应关系. 作用火点次数是指经过 120 h 的 HYSPLIT 前向轨迹判断认为源发于哈萨克斯坦且气团会经过天山东部的火点次数. 黑色部分表示的是作用火点的出现次数,为了更好地表现传输过程带来的滞后性,用阴影部分表示出了当日传输到采样区的作用火点次数,并用箭头对其关系进行了标注. 从哈萨克斯坦的火点传送至 1 号冰川附近,一般需要 2~6 d. 由于火点位置与气象状况不同,传播速度存在很大差异.

下面通过 3 个典型时段分析其对应关系. ① 2002-09-12. 2002-09-12 哈萨克斯坦发生显著性草原大火(世界火点图集记录到 49 次火点),根据前向轨迹分析发现火点影响下的气团传输路径中有 17 次经过天山东部,2002-09-16 气团可到达 1 号冰

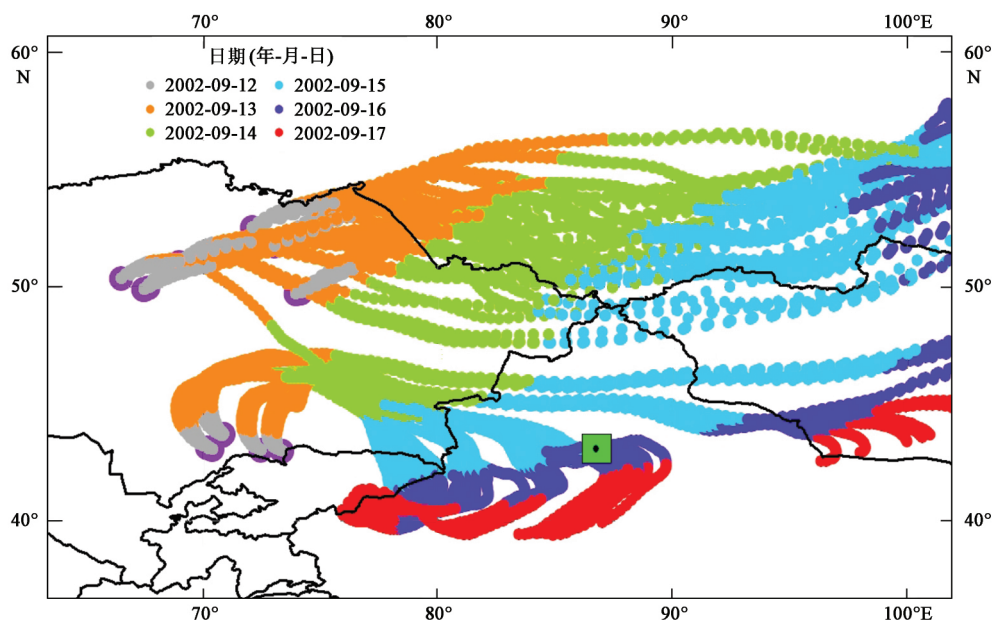
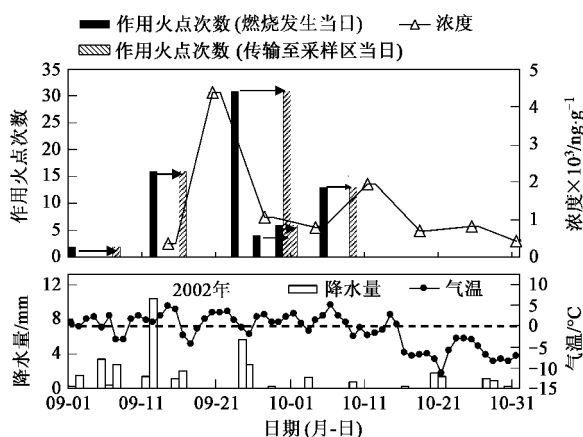


图5 典型哈萨克斯坦火点影响气团的传输路径

Fig. 5 Typical transmission path of fire-affected air mass from eastern Kazakhstan

图6 作用火点数与表层雪 NO_3^- 浓度的关系Fig. 6 Comparison between number of effected firespot and NO_3^- concentration in surface snow

川附近,而在 2002-09-15 ~ 2002-09-16 该地发生降水且 2002-09-16 ~ 2002-09-18 气温低于 0°C , 因此 2002-09-12 发生的大火可以在表层雪中留下明显的记录,即使 2002-09-19 气温开始回升,在 2002-09-20 采集的表层雪样本中依然测得显著高值($4\,394.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。②2002-09-23. 2002-09-23 哈萨克斯坦有 139 次火点记录,其中火点影响下的气团有 31 次经过天山东部,2002-09-30 到达采样区附近,2002-09-26 与 2002-09-29 的火点轨迹也相继于 2002-10-01 前后到达。但 2002-09-29 后首次降水出现在 2002-

10-03,且 2002-10-04 ~ 2002-10-08 气温一直在 0°C 以上(2002-10-06 甚至达到 5°C),淋溶强烈,因此连续 2 周采集的表层雪中 NO_3^- 浓度都明显回落。③ 2002-10-05. 2002-10-05 有 13 次火点轨迹经过天山东部(哈萨克斯坦全境共 24 次火点),于 2002-10-08 ~ 2002-10-09 到达采样区附近。2002-10-09 当地有降水,且 2002-10-09 ~ 2002-10-13 气温均在 0°C 以下,因此 2002-10-11 采集的表层雪记录了另一个峰值($1\,949.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。

研究显示,1 号冰川各年度的湿季表层雪 NO_3^- 平均浓度分别为 $371.0\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (2003 年)、 $420.3\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (2004 年)、 $317.6\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (2005 年)^[31]。而 2002-09-20 与 2002-10-11 这 2 次峰值明显高于上述平均值,甚至达到了 10 倍之高,2002 年 9 ~ 10 月采集的表层雪中 NO_3^- 浓度也普遍高于上述平均值。

2.3 雪冰中 NO_3^- 的演化过程与冰芯记录

为了考察 NO_3^- 的相对运动特征,本研究选取了物理剖面 and K^+ 浓度作为参照(图 7)。选取 K^+ 作为参照系的原因在于: K^+ 被广泛认为与生物质燃烧有关,对于判断 NO_3^- 中生物质燃烧的贡献可以提供依据; NO_3^- 与 K^+ 的相关性高,且 KNO_3 易溶于水, NO_3^- 与 K^+ 的可比性较高; K^+ 淋溶速度较慢,受后沉积过程的影响相对较小。

如图 7 所示,在 2002-09-20 与 2002-10-11 采集的样本中,雪坑上部都因外来输入而呈现明显高值,

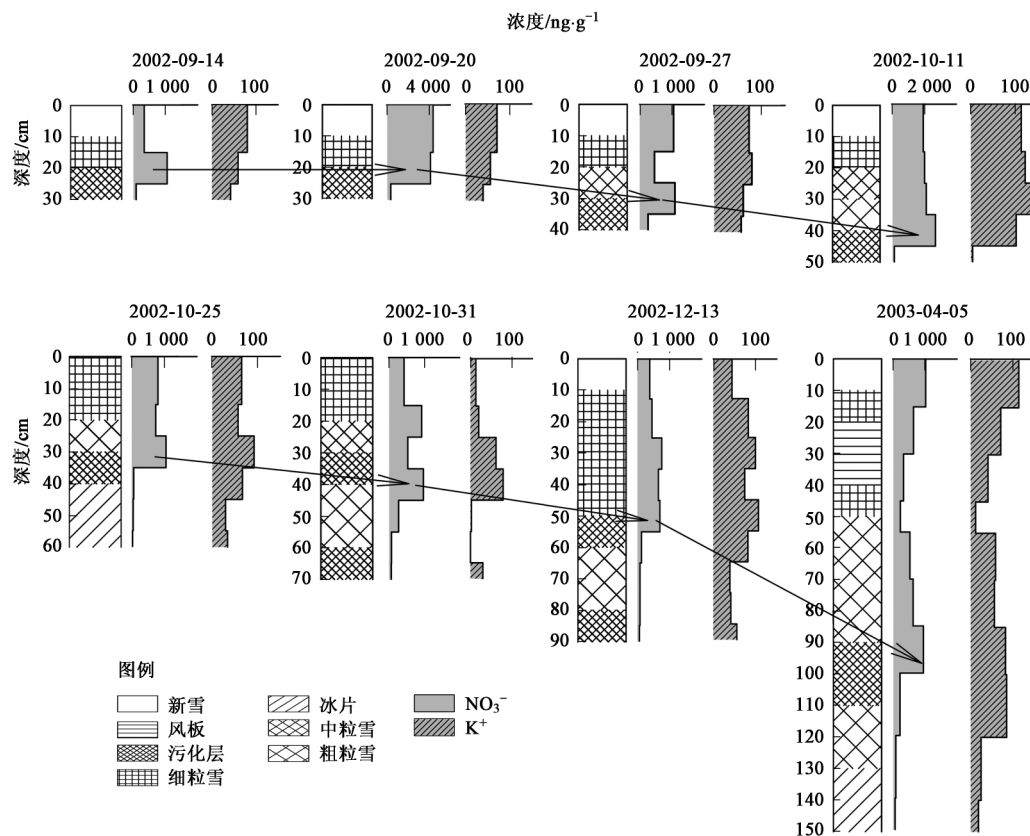


图7 2002年9月~2003年4月雪坑中 NO_3^- 与 K^+ 浓度剖面变化情况

Fig. 7 Evolution process of NO_3^- and K^+ concentration profiles in snow pits from September 2002 to April 2003

但是这种远距离传输而来的成分并没有形成单独的峰值,仅仅起到了强化原有浓度峰的作用.由于2002年采样区气温较高,雪层普遍较薄(最薄时仅为30 cm),2002-09-20雪坑上部的离子浓度峰值,稀释后并入2002-09-14之前形成的峰值之中,直接保存入雪层下部.而2002-09-20之后由于降水等原因表层雪出现了微弱峰值,在2002-10-11前接受离子输入,之后经过后沉积作用的稀释与合并,形成新的浓度峰值.这个峰值在经过2003年夏季淋溶以后,依然保存在雪层中.跟踪这一峰值的演化过程,发现峰值于2006年夏季演化为雪层底部的附加冰.对比雪层中 K^+ 与 NO_3^- 的浓度损失率, NO_3^- 的损失程度明显大于 K^+ ,这也证明了 NO_3^- 的淋溶速率大于 K^+ .

北美洲的生物质燃烧可以在北极雪冰记录里有所体现,但2002年中亚典型生物质燃烧事件仅并入了早先形成的峰值之中,起到了强化浓度峰的作用.根据1号冰川附近生物质燃烧的发生季节,生物质燃烧信息不容易形成单独的记录.在当前全球气候变暖,冰川融水增多的背景下,利用1号冰川,乃至

其他山岳冰川采集到的冰芯来恢复古气候时,应充分考虑到后沉积过程的影响.

3 结论

(1) 1号冰川表层雪中的 NO_3^- 浓度可以作为典型生物质燃烧的辅助表征物.2002年9月中旬~10月下旬, NO_3^- 与 K^+ 浓度的相关性明显高于常年平均值,相关系数为0.74. NO_3^- 的显著峰值(最高达 $4394.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)主要来源于哈萨克斯坦东部的草原大火.

(2) 生物质燃烧产生的含氮化合物从哈萨克斯坦东部传送至1号冰川附近一般需要2~6 d.在气温低于冰点且有明显降水的情况下气团携带离子沉降至雪层表面,从而记录在雪层剖面之中.

(3) 夏秋季节1号冰川受以淋溶作用为主的后沉积过程影响,某些突发性的环境变化可能难以形成独立而稳定的冰芯记录,而仅仅起到增强雪冰原有环境信息的作用.

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

研究人员集体努力下完成的. 在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:

- [1] Matsueda H, Inoue H Y, Ishii M, *et al.* Large injection of carbon monoxide into the upper troposphere due to intense biomass burning in 1997[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D21): 26867-26879.
- [2] De Gouw J A, Cooper O R, Warneke C, *et al.* Chemical composition of air masses transported from Asia to the U. S. West Coast during ITCT 2k2: Fossil fuel combustion versus biomass burning signatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**, D23S20, doi: 10.1029/2003JD004202.
- [3] 吴润, 蒋维楣, 陈新梅, 等. 生物质燃烧对东南亚及中国南方对流层臭氧含量影响的模拟研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 1-6.
- [4] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles[J]. *Science*, 1990, **250**(4988): 1669-1678.
- [5] Lee D S, Kohler I, Grobler E, *et al.* Estimations of global NO_x emissions and their uncertainties[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(12): 1735-1749.
- [6] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(4): 389-393.
- [7] Legrand M, De Angelis M, Staffelbach T, *et al.* Large perturbations of ammonium and organic acids content in the Summit-Greenland ice core: fingerprint from forest fires[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(5): 473-475.
- [8] Whitlow S, Mayewski P, Dibb J, *et al.* An ice-core-based record of biomass burning in the Arctic and Subarctic, 1750-1980[J]. *Tellus*, 1994, **46B**(3): 234-242.
- [9] Dibb J E, Talbot R W, Whitlow S I, *et al.* Biomass Burning Signatures in the Atmosphere and Snow at Summit, Greenland: An Event on 5 August 1994[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(4): 553-561.
- [10] Zhao Z, Li Z, Edwards R, *et al.* Atmosphere-to-snow-to-firn transfer of NO₃⁻ on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**: 239-244.
- [11] Li Z, Edwards R, Mosley-Thompson E, *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.
- [12] Arino O, Rosaz J M. 1997 and 1998 World ATSR fire atlas using ERS-2 ATSR-2 data[A]. In: Neuenschwander L F, Ryan K G, Golberg G E. *Proceedings of Joint Fire Science Conference and Workshop* [C]. Boise, Idaho: University of Idaho and International Association of Wildland Fire, 1999. 177-182.
- [13] Lin Y C, Lin C Y, Hsu W T. Observations of carbon monoxide mixing ratios at a mountain site in central Taiwan during the Asian biomass burning season[J]. *Atmospheric Research*, 2010, **95**: 270-278.
- [14] Kundu S, Kawamura K, Andreae T W, *et al.* Diurnal variation in the water-soluble inorganic ions, organic carbon and isotopic compositions of total carbon and nitrogen in biomass burning aerosols from the LBA-SMOCC campaign in Rondonia, Brazil[J]. *Aerosol Science*, 2010, **41**: 118-133.
- [15] 秦世广, 丁爱军, 王韬. 欧亚大陆生物质燃烧气团的输送特征及对中国的影响[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(6): 641-645.
- [16] Draxler R R, Hess G D. An overview of HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition[J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, **47**: 295-308.
- [17] 王艳, 柴发合, 王永红, 等. 长江三角洲地区大气污染物输送规律研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1430-1435.
- [18] 张玉兰, 康世昌, 张强弓, 等. 长江源区各拉丹冬峰雪中微粒季节变化及其环境意义[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2117-2122.
- [19] Lavoue D, Lioussé C, Cachier H, *et al.* Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(D22): 26871-26890.
- [20] Witham C, Manning A. Impacts of Russian biomass burning on UK air quality[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(37): 8075-8090.
- [21] Li H, Li Z, Wang W, *et al.* Depositional characteristics of NH₄⁺ on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, **49**: 161-165.
- [22] Viana M, Lopez J M, Querol X, *et al.* Tracers and impact of open burning of rice straw residues on PM in Eastern Spain[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**: 1941-1957.
- [23] 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.
- [24] Hou S, Qin D. The effect of postdepositional process on the chemical profiles of snow pits in the percolation zone[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, **34**: 111-116.
- [25] 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.
- [26] 郑晓燕, 刘威德, 赵峰华, 等. 北京市大气颗粒物中生物质燃烧排放贡献的季节特征[J]. *中国科学(B辑)*, 2005, **35**(4): 346-352.
- [27] 刘威德, 李玉武, 董树屏, 等. 生物质燃烧颗粒物的定量分析和化学形态[J]. *环境化学*, 2002, **21**(3): 209-217.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Zhao Z, Tian L, Fischer E, *et al.* Study of chemical composition of precipitation at an alpine site and a rural site in the Urumqi River Valley, Eastern Tien Shan, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**: 8934-8942.
- [31] Li Z, Wang W, Wang F, *et al.* Characteristics of ionic concentration and $\delta^{18}\text{O}$ and their variability in dry-season and wet-season snow on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, central Asia[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, **49**: 217-223.