文章编号:1001-8166(2011)08-0897-08

# 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪层中 $NO_3^-$ 的演化过程 $^{\bullet}$

王圣杰<sup>1</sup>,张明军<sup>1,2\*</sup>,李忠勤<sup>12</sup>,王飞腾<sup>2</sup>,张晓宇<sup>2</sup>,李亚举<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 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,甘肃 兰州 730000)

摘 要:根据 2004 年 11 月至 2005 年 10 月在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区采集的雪坑样品 研究发现,雪层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 平均浓度存在季节性变化特征,湿季(4~10 月)的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度明显低于干季 (11 月至次年 3 月)。特别是在春季,在雪层上部出现的浓度峰,经过夏季淋溶改造,稀释并合并为 稳定的浓度峰;雪层中各浓度峰普遍处于向下迁移的过程中。在后沉积过程中,距底部附加冰 70 ~80 cm 附近的雪层处存在一个过渡层,上部变化强烈,下部相对稳定;强淋溶期可以使 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 溶质 含量减小 20% ~60%。

关 键 词:乌鲁木齐河源1号冰川;雪层;NO<sub>3</sub> 浓度;淋溶;后沉积过程 中图分类号:P343.6;P512.4 文献标志码:A

# 1 引 言

冰芯记录为全球变化研究提供了重要的依据, 是地球环境信息的载体之一<sup>[1,2]</sup>。氮循环是全球生物地球化学循环的重要环节,冰芯中含氮物质(特别是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)的变化具有丰富的环境意义<sup>[3]</sup>。但是成冰过程蕴含着一系列复杂的物理和化学变化,这在一定程度上会改变雪冰中记载的初始环境信息。因此,要研究冰芯中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的环境意义就需要对其在雪层中的演化过程有深入的了解。

影响雪冰后沉积过程中 NO<sub>3</sub> 浓度变化的因素 包括温度、积累率、近地面气溶胶中离子成分、海拔 以及雪层中的其他成分等<sup>[4]</sup>,主要表现形式是光解 作用、再挥发以及淋溶作用等。其中,光解作用与再 挥发对雪冰中 NO<sub>3</sub> 的影响在极地已经开展过大量 的研究<sup>[4~10]</sup>,近年来在青藏高原也有报道<sup>[11]</sup>;淋溶 作用的影响在中低纬高海拔冰川也有广泛研 究<sup>[12~15]</sup>。

在中国西部冰川区开展的大量研究表明,以淋 溶作用为主的后沉积过程对雪冰记录的影响十分明 显<sup>[14~16]</sup>。由于受到连续取样的技术条件和后勤保 障的限制,我国雪冰中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>演化过程的早期研究十 分有限。侯书贵等<sup>[14]</sup>根据在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融初期(5~6月)的连续雪坑样品采集,发 现原始积雪内包括 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在内的大部分化学成分随 融水向下渗浸,并富集在雪/冰界面处或附加冰内, 当冰川消融进一步加剧,大部分离子成分随融水进 入冰川径流,最终形成离子浓度很低的冰川冰。 Zhao 等<sup>[17]</sup>根据在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川开展 的全年度连续雪坑采样,进一步分析了 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>在雪层 中的后沉积过程,发现 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的浓度峰值在雪层中向 下迁移的速度比 Mg<sup>2+</sup>的要快,且 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的主要信息能

<sup>●</sup> 收稿日期:2011-01-04;修回日期:2011-06-16.

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金项目"天山东部典型地区雪冰中含氮化合物记录过程及其环境意义研究"(编号:40701035);教育部新世纪优秀人才支持计划项目"天山乌鲁木齐河流域水汽、降水及雪冰中氢、氧稳定同位素研究"(编号:NCET-10-0019);国家自然科学基金项目"山岳冰川后沉积过程对冰芯记录影响的机理及评估研究"(编号:40701034)资助.

作者简介:王圣杰(1987-),男,陕西汉中人,硕士研究生,主要从事全球变化与冰川化学研究. E-mail: geowang@126. com

<sup>(</sup>您通訊作者C涨明军(1)974Ac踢lat肃宁县太r教授) 主要从事冰川与环境方面的研究。E-miniti minhang2004@163.comtp://www.cnki.net

够在雪层中保留下来。张宁宁等<sup>[18]</sup> 根据在玉龙雪山 白水1 号冰川消融期(4~7月) 开展的雪坑连续观 测 发现消融初期包括 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在内的离子主要聚集于 污化层 但随着消融进行 融水带走了污化层中富集 的离子 并在下渗过程中被冻结。尽管存在着上述的 研究 但是对于我国山岳冰川雪冰中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在后沉积 过程中损失的定量评估仍不多见。本文在以往研究 基础上 着重分析天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2004 年 11 月至 2005 年 10 月雪层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的演化过程 ,并 对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 在后沉积过程中的损失量做出定量分析。

2 材料和方法

#### 2.1 研究区概况

中国天山山脉位于新疆维吾尔自治区中部,北 临准噶尔盆地,南临塔里木盆地(图1)。乌鲁木齐 河源于天山山脉天格尔山,全长 50 km,乌拉泊以上 集水面积 2 596 km<sup>2</sup>,英雄桥水文站实测年均径流量 2.35 ×  $10^8$  m<sup>3</sup>,年均径流深 254.6 mm,多年平均含 沙量 0.27 kg/m<sup>3</sup>;流域地势西南高、东北部低,乌鲁 木齐河的水源由上游山地降水与冰雪融化补给<sup>[19]</sup>。

乌鲁木齐河源区属典型大陆性气候,主要受北 半球西风环流控制 3~9月间山谷风盛行<sup>[20]</sup>。根 据大西沟气象站(43°06′N 86°50′E,海拔3 539 m) 1959—2000年间的记录,河源区年平均气温-5.2 ℃,负温月长达7~8个月,最冷月(1月)平均气温 -15.6℃,最热月(7月)为4.9℃,年平均降水量 441.1 mm;每年5~9月的降水量约占年降水量的 90% 降水量最多的时候也是消融最强的时期;5月 和9月为季节更替时期,是决定夏半年消融期长短 的关键月份;自10月至次年4月,月平均气温均在 0℃以下,消融很微弱,降水量仅占年降水量的10% 左右,基本上为纯积累期<sup>[21]</sup>。

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称 1 号冰 川) 是乌鲁木齐河流域发育规模最大的现代冰川, 是一条山谷一冰斗冰川,由东、西 2 支组成。全球气 候变暖导致该冰川明显退缩,冰川总面积由 1962 年 的 1.950 km<sup>2</sup>减小到 2000 年的 1.733 km<sup>2[22]</sup>。

2.2 样品采集与分析

采样点(43°06´N 86°49´E,海拔4130 m,图1) 位于1号冰川东支渗浸积累区 坡向朝北,日照时间 短。采样时间为2004年11月至2005年10月,一 般每周采集1次样本。样品自积雪表层以下每隔 10 cm 依次完成采样,直至底层附加冰附近为



图 1 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川地理位置示意图 Fig. 1 Map of the sampling site on Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains

每次采样后回填雪坑,下次取样时在上次采样 的位置重新挖开并挖进至少50 cm,使其在基本相 同的层位上取样,因此雪层剖面特征具有较好的连 续性<sup>[17,23~25]</sup>。雪样在采集和运输过程中均采取严 格的操作规范,样品装入一次性洁净塑料保鲜袋密 封,在冰冻状态下从野外运回兰州的中国科学院寒 区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验 室后低温保存。

为防止雪样受到空气化学成分的污染,分析前 在称量瓶(用电阻率为 18.2 M $\Omega$ ・cm 的超纯水洗 净)中室温下自然融化后,立即进行分析。样品中 的 NO<sub>3</sub> 浓度采用 Dionex – 320 型离子色谱仪测定, 精度可达到 ng/g 量级。对同一个低浓度标准液重 复测试 20 次,表明 NO<sub>3</sub> 的测试精密度为 2%。测 定过程使用 AS11 – HC(4 mm × 250 mm)分离柱,

止(巴)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publish GLI Holl G. 4Ammi 259 mm)、保护柱th SRS、、4.mmi 抑t

制器(抑制电流为 52 mA), 15 mmol/L NaOH 淋洗液 (流速为 1.4 mL/min)<sup>[26]</sup>。

# 3 结果和讨论

#### 3.1 雪层中 NO<sub>3</sub> 平均浓度的季节变化

后沉积过程可以显著地改变雪层中化学物质的 分布状况。从1号冰川2004年11月至2005年10 月雪层中NO<sub>3</sub> 浓度变化趋势图上可以发现(图2), 湿季(4~10月)雪层中NO<sub>3</sub> 平均浓度明显低于干 季(11月至次年3月)浓度,其中8月是平均浓度 最低的时段。



### 图 2 采样期内雪层中 NO<sub>3</sub> 平均浓度以及 大西沟气象站同期气温与降水量变化

Fig. 2 Variation of  $NO_3^-$  concentration in snowpacks , daily air temperature and precipitation at Daxigou Meteorological Station during the sampling period

雪层中 NO3<sup>-</sup> 平均浓度与气温和降水量有着密 切的联系。干季采样点气温极低,雪层中 NO3<sup>-</sup> 平均 浓度基本维持在稳定的状态, NO3<sup>-</sup> 的输入与输出均 不显著。在干湿季交接期(3月中旬~5月下旬)雪 层中 NO5<sup>-</sup> 平均浓度出现大幅波动, 伴有多次明显的 浓度急剧下降。特别是 3 月中下旬的变化最为明 显 3 月7日的平均浓度为 392 ng/g,而之后 3 月 15 日的平均浓度则仅为 175 ng/g。这种急剧的下降在 很大程度上是 3 月气温上升造成的。湿季初期雪层 中  $NO_3^-$  浓度出现的短暂回升(4 月中旬与 5 月中 旬),也是在气温短时下降而降水增加的背景下产 生的。6~8月,气温维持在较高的水平,雪层中的  $NO_3^-$  浓度明显降低,仅留下当年度的本底值。根据 大西沟气象站 2005 年 6~8 月的气象记录,平均气 温达 4.9 ℃,降水量占全年降水量的 64%。之前在 1 号冰川的研究<sup>[16]</sup>表明,如果雪层上部的气温达到 -3.6 ℃,雪层就开始淋溶; 当温度达到 0.3 ℃时, 一年新积累的物质可能全部被融水淋溶掉,仅保留 本底值。9 月以后,随着气温的下降,雪层中  $NO_3^-$ 浓度又逐渐增加。

除淋溶作用以外 湿季较大的降水量可能对雪 层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 平均浓度也存在着一定影响。对乌鲁木 齐河源区降水的研究<sup>[27]</sup> 表明 ,5 月降水中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度平均值在全年之中最大 ,但之后的 6~9 月降水 中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度却处于下降状态。7~8 月正是降水 量最为充沛的时段 相对低浓度的湿沉降输入 加之 强烈的淋溶作用 ,使湿季雪层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度维持在较 低水平。当然 ,淋溶作用的影响是主导 ,对于这一作 用我们将在下文中进一步分析。

对1号冰川融水径流中 NO<sub>3</sub> 浓度的研究表明, 积雪开始消融时少量融水在很短的时间内集中将积 雪中的大多数化学物质排出,并可使径流化学成分 产生一瞬时高峰,这一现象也被称为离子脉冲(ionic pulse)<sup>[28]</sup>;而融水中的离子浓度突然升高与降低必 然意味着有大量离子从雪层中流失 融雪径流离子脉 冲过程直接反映了积雪离子脉冲的过程<sup>[29]</sup>。在雪层 样品中观察到的这种浓度波动现象与之前研究<sup>[28]</sup>中 消融初期融水 NO<sub>3</sub> 浓度变化特征基本相符。

### 3.2 NO<sub>3</sub> 浓度剖面的演化过程

悬浮在大气气溶胶中的可溶性离子,以各种形 式沉降到雪层表面之后就开始受到后沉积过程的影 响。图 3 是采样期内 1 号冰川 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度在雪层中 的演化过程(0 cm 处即雪层底部的附加冰)。根据 浓度剖面特征,我们选取了 3 个较为稳定的峰值作 为示踪层,即  $P_1 \ P_2$ 和  $P_3$ 。在 2005 年 4 月上述峰值 分别位于附加冰面以上 25 \ 95 和 215 cm 附近,下面 通过追踪  $P_1 \ P_2$ 和  $P_3$ 的位置变化来说明后沉积过程 对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度剖面的影响。

层中)NO34-开抱浓度出现太幅波动。借有多次明显的Publishing开索雪层的上部出现很多相对较小的峰值;这时

一现象是该时期低降水、低温和弱蒸发的结果 影响 这一阶段的后沉积作用主要是升华和干沉降。进入 湿季以后 随着温度的升高 ,上部产生的大量融水不 断淋溶 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,导致其浓度降低 ,峰值减小且位置下 移。强烈的消融现象也造成雪层中上部 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度 峰值 P<sub>3</sub>与表层雪中的小峰值合并。尽管 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度 受到淋溶作用为主的后沉积过程的影响 ,但峰值最 基本的信息仍然能被保存在雪层下部中。

对整个雪层 NO<sub>3</sub> 浓度剖面运用插值的方法可 以得到 NO<sub>3</sub> 浓度演化图(图 4) 从而直观地反映出 NO<sub>3</sub> 浓度的损失情况。图 4 表明,雪层底部附加冰 70~80 cm 以上 NO<sub>3</sub> 浓度普遍较高,一般保持在 500 ng/g 以上。显然,在距离雪层底部附加冰 70~ 80 cm 附近形成了一过渡层。这一过渡层的出现层 位还随着时间呈现下降趋势。这一过渡层上部,浓 度的峰值与谷值变化大多比较明显。冬春季表层雪 的浓度峰值往往会在夏季淋溶初期(5月)就开始与 附近峰值合并了。8 月雪层的厚度达到最薄,各浓 度峰的位置也最不明显,剖面各层位的 NO<sub>3</sub> 浓度均 较低。9 月以后表层雪又出现多处峰值并在低淋溶











Fig. 4 The spatiotemporal distribution of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration in snowpack with interpolation calculation during the sampling period

的作用下较好地保存在雪层上部,特别是在距雪层底部160 ~190 cm 这一层位出现新的浓度峰。10 月以后,最下层的 峰值逐渐在附加冰附近波动,而成冰的过程是一个动态的过 程,可能直到次年才能在冰层中形成完全稳定的峰值记录。

**3.3** 雪层中 NO<sub>3</sub> 淋溶特征分析

雪层中 NO<sub>3</sub> 浓度剖面大幅变化主要发生在夏 季淋溶期,此时雪层上部峰位置变化强烈,下部峰位 置相对稳定。因此,选取 2005 年夏季雪层厚度急剧 下降时期(即 5 月 30 日~8 月 23 日)讨论雪层中的 淋溶特征。

淋溶过程必然会改变各层位浓度峰值的相对距 离 即峰间距。因而 峰间距是浓度剖面最基本的特 征之一 从一定程度上可以反映离子浓度受淋溶作 用的强度。图 5 是强淋溶期浓度峰间距的演化过 程。 $P_{1,-}$ 表示浓度峰值  $P_1$ 与  $P_2$ 之间的距离  $P_{2,-3}$ 表 示浓度峰值  $\mathbf{P}_{2}$ 与  $\mathbf{P}_{3}$ 之间的距离。雪层上部的峰间 距 即 P<sub>2-3</sub> 在 5 月下旬到 6 月下旬由于表层雪浓度 峰值的不稳定并合并,峰间距变化不明显;7月上旬 以后,由于气温继续升高、降水频繁,雪层上层淋溶 作用强烈,峰间距急剧减小。与之对应,下层 $P_1$ 与  $P_2$ 之间的峰间距( $P_{1-2}$ )变化幅度一直较小,特别是 5月30日~8月9日之间的变化幅度仅为10 cm。 可见,上层峰间距的降低幅度比下层峰间距的更大, 这表明雪层上层受淋溶影响远比下层强烈 后沉积 过程对雪层上部的峰间距改造十分显著。8 月下旬 雪层上层峰间距仅为6月上旬的58% 而8月下旬 雪层下层峰间距与6月上旬的则相差不大。

为了定量分析不同层位 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的迁移过程,这里 引入溶质含量的概念,即单位面积上 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子的质



## 图 5 强淋溶期雪层中 NO<sub>3</sub> 浓度峰间距随时间的变化 Fig. 5 Temporal variation of NO<sub>3</sub> concentration-peak spacings in snowpacks for May 30-August 23, 2005

量。其基本原理如下:  $m = \sum c_i h_i$ ,式中 m 是示踪 层间溶质含量(g/m<sup>2</sup>), $c_i$  是各采样层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的浓度 (g/m<sup>3</sup>), $h_i$ 是对应的水当量深度(m)。

根据 NO<sub>3</sub> 浓度峰出现的层位 ,可以得到各标志 层之间的溶质含量(图6)。从图6可以看出,雪层 上层溶质含量较大且变化幅度较大 ,而靠近底层的 溶质含量及其变幅均较小。就时间序列而言,各层 位溶质含量均表现出逐渐减小的趋势,上层减小的 速度很快 而下层减小的速度要慢得多。这表明 在 夏季强淋溶期,雪层总体呈现出溶质含量下降的趋 势,上层淋溶强度最大,越往底层淋溶作用越小。5 月 30 日~8 月 23 日雪层浓度峰 P<sub>1</sub> 与 P<sub>2</sub>、P<sub>2</sub> 与 P<sub>3</sub>之 间的平均溶质含量分别为 0.017 和 0.073 g/m<sup>2</sup>,雪 层下部( $P_1 \rightarrow P_2$ 间)平均溶质含量仅为上部( $P_2 \rightarrow P_3$ 间) 平均溶质含量的 23%。5 月下旬雪层上部溶质 含量为 0.104 g/m<sup>2</sup>,下部溶质含量为 0.014 g/m<sup>2</sup> & 月下旬雪层上部、下部溶质含量分别为 0.042 和 0.011 g/m<sup>2</sup>。强淋溶期的末期,上部溶质含量仅为 初期的41%,下部溶质含量为初期的78%。显然, 下部溶质含量损失较小 ,而上部溶质含量损失十分 明显。综上所述 强淋溶期内雪层中 NO<sub>3</sub> 溶质含量 损失率为 20%~60%。





**3.4** 不同区域后沉积过程中  $NO_3^-$  损失量的差异

极地雪层中 NO<sub>3</sub> 在后沉积过程中的损失率很 早就有报道 但是不同的研究往往采用不同的方法 进行估计 加之研究区的差异 因而得到的损失率也 有很大的差别(表1)。在极地地区 光解作用与再挥

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publi发可能起击导作用的tan积累率较低的区域由示近表t

雪长期接受太阳辐射,雪层中大部分NO<sub>3</sub><sup>-</sup>可能因光 解作用而不能保存下来<sup>[4,5]</sup>;在高积累率区域,后沉积 过程甚至仅使表层雪中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>损失7%<sup>[30]</sup>。

#### 表1 极地雪冰中 NO3 在后沉积过程中的损失率

Table 1 Loss ratio of  $NO_3^-$  concentration of snow in

post – depositional	process	in	Polar	Regions	

研究区域	损失率	参考文献
东方站( 南极洲)	- 90%	[4,5]
Dome C( 南极洲)	-72%	[8]
Dome C( 南极洲)	- 97%	[7]
毛德皇后地( 南极洲)	$(-30 \pm 15)\%$	[31]
格陵兰岛	-7%	[30]

而在极地以外的区域,除了光化学反应[11]以 外 受淋溶作用影响强烈是其重要特点。一些学者 通过模拟的方法,对在雪层中 NO<sub>3</sub> 的淋溶情况进行 了定量讨论。Johannessen 等<sup>[32]</sup> 的实验模拟结果表 明雪层中 58%~68%的 NO3 会随初始的 30% 的融 水流失,而其野外观测则为 51% ~ 52%。Davis 等<sup>[12]</sup>通过实验室模拟,表明雪层中的 NO<sub>3</sub> 有 81% ~86% 会随初始的 20% 的融水流失。由于本研究 的计算依据不同,得到的结论不能与之简单对比。 但是考虑图2雪层中 NO3 平均浓度在5月下旬的 突降情况 加之5月以后冰川径流出现 这与之前实 验室模拟得到的结果应该是类似的。本研究侧重于 考察淋溶作用在多大程度上改造了雪层中 NO<sub>3</sub> 的 浓度剖面 因此基于雪层中不同层位的溶质含量损 失情况 得出强淋溶期内雪层中 NO<sub>3</sub> 损失率为 20% ~60%。如果注意到雪层要受到多年后沉积过程的 影响 更长时间尺度下的损失率可能会有一定增加。

#### 4 结 论

对天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 2004 年 11 月至 2005 年 10 月完整年周期内雪层中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 演化过程的 研究表明:

(1) 雪层中 NO<sub>3</sub> 的平均浓度有明显的季节变 化特征,总体特征表现为干季 NO<sub>3</sub> 浓度高,湿季 NO<sub>3</sub> 浓度较低。雪层中 NO<sub>3</sub> 浓度的变化主要是雪 层内部发生的后沉积过程(特别是夏季的淋溶作 用)造成的。

(2) 雪层中 NO<sub>3</sub> 浓度峰值位置大幅变化主要 发生在夏季淋溶期,雪层上部峰位置变化强烈,下部 峰位置相对稳定。NO<sub>3</sub> 浓度距离附加冰70~80 cm 附近存在一个明显的过渡层,该对于离子浓度与淋 溶强度具有一定的指示意义。

(3) 尽管雪层中 NO<sub>3</sub> 浓度受到以淋溶作用为 主的后沉积过程的影响,但峰值最基本的信息仍然 能够被保存在雪冰记录中。干季雪层上部出现的 NO<sub>3</sub> 浓度峰,经过湿季淋溶作用的强烈改造,稀释 并合并为稳定的浓度峰;雪层底部的 NO<sub>3</sub> 浓度峰值 在湿季末期沉降至底部附加冰附近。强淋溶期内雪 层中 NO<sub>3</sub> 损失率可达 20% ~60%。

致谢:本研究是天山冰川观测试验站雪冰现代 过程项目的一部分,谨此对参与本研究的每一位野 外观测人员与项目组人员表示衷心感谢。

#### 参考文献(References):

- Kreutz K J. Ice core methods: Glaciochemistry [M] // Elias S A ed. Encyclopedia of Quaternary Science. Amsterdam: Elsevier, 2007: 1 192-1 199.
- [2] Tang Xueyuan, Sun Bo, Li Yuansheng, et al. Some recent progress of Antarctic ice sheet research [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(11): 1 210-1 218. [唐学远,孙波,李院生,等. 南极冰盖研究最新进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1 210-1 218.]
- [3] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Wang Feiteng, et al. A review of the concentration records of nitrate in snow and ice [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1 162-4 169. [王圣杰,张明军,王飞腾,等. 雪冰中 NO<sub>3</sub> 浓度记录的研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1 162-4 169.]
- [4] Blunier T, Floch G L, Jacobi H W, et al. Isotopic view on nitrate loss in Antarctic surface snow [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32, L13501, doi: 10.1029/2005GL023011.
- [5] Rothlisberger R , Hutterli M A , Wolff E W , et al. Nitrate in Greenland and Antarctic ice cores: A detailed description of postdepositional processes [J]. Annals of Glaciology , 2002 , 35(1): 209-216.
- [6] Mulvaney R , Wagenbach D , Wolff E. Postdepositional change in snowpack nitrate from observation of year-round near-surface snow in coastal Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research* , 1998 , 103(D9): 11 021-11 031.
- [7] Rothlisberger R , Hutterli M A , Sommer S , et al. Factors controlling nitrate in ice cores: Evidence from the Dome C deep ice core [J]. Journal of Geophysical Research , 2000 , 105( D16) : 20 565– 20 572.
- [8] Mayewski P , Legrand M. Recent increase in nitrate concentration of Antarctic snow [J]. Nature , 1990 , 346: 258-260.
- [9] De Angelis M, Legrand M. Preliminary investigations of postdepositional effects on HCl, HNO<sub>3</sub>, and organic acids in polar firm layers [C] // Delmas R J ed. Ice Core Studies of Global Biogeochemical Cycles, NATO ASI Series, vol. 130. New York: Springer-Ver-

附近存在4-2个明显的过渡展n这对击离已浓度、同淋ublishing all days: 3611-38 ghts reserved. http://www.cnki.net

- [10] Wagnon P , Delmas R J , Legrand M. Loss of volatile acid species from upper firn layers at Vostok , Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D3): 3 423-3 431.
- [11] Lin Weili, Wang Junxia, Zhu Tong. NOx release from snow and ice covered surface in polar regions and Tibetan Plateau [J]. Advances in Climate Change Research, 2011, 7(1): 1-7. [林伟立, 汪君霞,朱彤. 极地与青藏高原地区 NO<sub>x</sub>的冰雪来源[J]. 气 候变化研究进展, 2011, 7(1): 1-7.]
- [12] Davis R E , Petersen C E , Bales R C. Ion flux through a shallow snowpack: Effects of initial conditions and melt sequences [M] // Tonnessen K A , Williams M W , Tranter M ,eds. Biogeochemistry of Seasonally Snow-Covered Catchments. Boulder: International Association of Aydrdogical Sciences ,1995.
- [13] Eichler A, Schwikowski M, Gaggeler H W. Meltwater-induced relocation of chemical species in Alpine firm [J]. *Tellus*, 2001, 53B(2): 192-203.
- [14] Hou Shugui, Qin Dahe. The ion elution effect on the main ion profiles of the glacier snowpacks [J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(6): 536-542. [侯书贵,秦大河. 积雪淋溶作用 对冰川雪层内主要阴、阳离子记录的影响[J]. 地理科学, 1999, 19(6): 536-542.]
- [15] Huang Cuilan, Li Zhongqin, Hou Shugui, et al. The ion elution effects on the glacier chemical record [J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(23): 2 171-2 173. [皇翠兰,李忠勤,侯书贵,等.离子淋溶作用对冰川化学记录形成的影响[J]. 科学通报, 1996, 41(23): 2 171-2 173.]
- [16] Li Zhongqin , Edwards R , Mosley-Thompson E , et al. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firm packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1 , eastern Tien Shan , China [J]. Annals of Glaciology , 2006 , 43(1): 250-256.
- [17] Zhao Zhongping, Li Zhongqin, Edwards R, et al. Atmosphere-tosnow-to-firm transfer of NO<sub>3</sub> on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. Annals of Glaciology, 2006, 43(1): 239– 244.
- [18] Zhang Ningning, He Yuanqing, Pang Hongxi, et al. Preliminary study of transformation of snow to ice and ion elution during ablation period at a typical temperate glacier region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 505-513. [张宁宁, 何元庆,庞洪喜,等. 典型海洋型冰川区消融期雪坑层位演 变及离子沉积后过程初探[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 505-513.]
- [19] Zhu Daoqing. China Water System Dictionary (Revised Edition)
  [M]. Qingdao: Qingdao Press, 2007: 652-660. [朱道清. 中 国水系辞典(修订版 [M]. 青岛: 青岛出版社, 2007: 652-660.]
- [20] Zhang Yinsheng, Kang Ersi, Liu Chaohai. The climatic features of Tianshan Urumqi River valley [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(4): 333-341. [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.]

Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains during the past 42 years and its trend prediction [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 253-260. [焦克勤,井哲帆,韩添丁,等. 42 a 来天山乌鲁木齐河 源1号冰川变化及趋势预测[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 253-260.]

- [22] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and glacier No. 1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 117-123. [李忠勤, 韩添丁,井哲帆,等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川 40 a 观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123.]
- [23] You Xiaoni, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Seasonal evolution of insoluble microparticles stratigraphy in glacier No. 1 percolation zone, eastern Tianshan, China [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(11): 1 164-1 170. [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): 1 164-1 170.]
- [24] Wang Feiteng , Li Zhongqin , You Xiaoni , et al. Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Urumqi glacier No. 1 percolation zone , eastern Tien Shan , China [J]. Annals of Glaciology , 2006 , 43(1): 245-249.
- [25] Li Xiangying, Li Zhongqin, Ding Yongjian, et al. Seasonal variations of pH and electrical conductivity in a snow-firn pack on glacier No. 1, eastern Tianshan, China [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 55-63.
- [26] 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.]
- [27] Zhao Zhongping, Tian Lide, Fischer E, et al. Study of chemical composition of precipitation at an alpine site and a rural site in the Urumqi River Valley, eastern Tian Shan, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(39): 8 934-8 942.
- [28] Li Cuilin, Hou Shugui, Qin Dahe. Spatial differences of hydrochemical and its control factors of the headwater runoff in the Urumuqi River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(1): 72-76. [李翠林,侯书贵,秦大 河. 天山乌鲁木齐河源径流水文化学空间差异及其控制因素 [J]. 冰川冻土,2003,25(1): 72-76.]
- [29] Liu Fengjing , Williams M , Cheng Guodong , et al. Preliminary studies on the ionic pulse of snowmelt runoff in the Urumqi River , Xinjiang , Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin , 1997 , 42(19): 1 643-1 646.
- [30] Burkhart J F , Hutterli M , Bales R C , et al. Seasonal accumulation timing and preservation of nitrate in firm at Summit , Greenland [J]. Journal of Geophysical Research , 2004 , 109 , D19302 , doi: 10.1029/2004JD004658.
- [31] Weller R , Traufetter F , Fischer H , *et al.* Postdepositional losses of methane sulfonate , nitrate , and chloride at the European Pro-

[21(1)] 100 Kegin | Sing Zhefand, Had Finiding Jerrall Education of the ublishing jets for deed Chring line Automatica deep-drilling/wite/in. Endening to

Maud Land, Antarctica [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, D07301, doi: 10.1029/2003JD004189.

[32] Johannessen M , Henriksen A. Chemistry of snow meltwater:

Changes in concentration during melting [J]. Water Resources Research , 1978 , 14(4): 615-619.

# Evolution Process of Nitrate in Snowpack of Glacier No. 1 at the Headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains

Wang Shengjie<sup>1</sup> , Zhang Mingjun<sup>1 2</sup> , Li Zhongqin<sup>1 2</sup> , Wang Feiteng<sup>2</sup> , Zhang Xiaoyu<sup>2</sup> , Li Yaju<sup>1</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)

**Abstract**: Based on the snowpit samples collected at the accumulation zone of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River in the Tianshan Mountains from November 2004 to October 2005, nitrate ( $NO_3^-$ ) concentration in snowpacks is analyzed. Seasonality is displayed for the mean  $NO_3^-$  concentrations in snowpacks, and the concentrations are higher in the dry season (from November to March) and lower in the wet season (from April to October). At the upper section of snowpacks, the spring-formed  $NO_3^-$  concentration peaks are diluted significantly in the summer, according to the elution effect; for the whole snowpacks, the  $NO_3^-$  concentration peaks relocate downward. In the vertical profile of snowpack, a transition layer appears at a distance of 70 ~ 80 cm to superimposed ice layer; the elution effect above the transition layer is much stronger than that below, and the concentration above the layer is higher than that below. With 20% ~ 60% loss of content during the strong elution period in the post-depositional process, the environmental information is recorded in the ice.

**Key words**: Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River; Snowpack; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> concentration; Elution effect; Post-depositional process.