

doi:10.3799/dqkx.2013.021

# 中国天山冰川积雪中 $\text{NO}_3^-$ 与 $\text{NH}_4^+$ 的分布特征及其环境意义

王圣杰<sup>1</sup>, 张明军<sup>1,2\*</sup>, 李忠勤<sup>2,1</sup>, 王飞腾<sup>2</sup>, 张晓宇<sup>2</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:** 基于2004—2009年间在天山托木尔峰青冰滩72号冰川、奎屯河哈希勒根51号冰川、乌鲁木齐河源1号冰川、博格达峰四工河4号冰川与庙尔沟平顶冰川积累区采集的雪坑样品, 分析了中国天山冰川积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  的空间分布特征及其环境意义。结果表明, 积雪中  $\text{NO}_3^-$  平均浓度顺序为哈希勒根51号冰川 < 乌鲁木齐河源1号冰川 < 庙尔沟平顶冰川 < 青冰滩72号冰川 < 四工河4号冰川, 而  $\text{NH}_4^+$  平均浓度顺序为青冰滩72号冰川 < 哈希勒根51号冰川 < 庙尔沟平顶冰川 < 乌鲁木齐河源1号冰川 < 四工河4号冰川。结合 HYSPLIT 空气轨迹模型与局地环境状况资料分析, 这种空间差异受到远源污染与沙漠粉尘传输、近源工农业生产与生活排放、冰川积累区地理环境等因素的综合影响。

**关键词:** 天山; 冰川; 积雪; 硝酸根; 铵根; 空间分布。

中图分类号: P59; P342; P343.6

文章编号: 1000-2383(2013)01-0201-10

收稿日期: 2012-03-28

## Distribution and Its Environmental Significance of Nitrate and Ammonium in Snowpack of Glaciers in Chinese Tianshan Mountains

WANG Sheng-jie<sup>1</sup>, ZHANG Ming-jun<sup>1,2\*</sup>, LI Zhong-qin<sup>2,1</sup>, WANG Fei-teng<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-yu<sup>2</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:** In order to investigate the spatial distribution and its environmental significance of nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) and ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) in snowpack of glaciers in the Chinese Tianshan Mountains, the snow samples were collected at the accumulation zone on five typical glaciers from west to east: Glacier No. 72 at Qingbingtan of Tomur Peak (QG72), Glacier No. 51 at Haxilegen of Kuytun River (HG51), Urumqi Glacier No. 1 (UG1), Glacier No. 4 at Sigong River of Bogda Peak (SG4), and Miaoergou Flat-topped Glacier (MG) during 2004—2009. It is found that the concentration order of  $\text{NO}_3^-$  in snowpack is HG51 < UG1 < MG < QG72 < SG4, and the concentration order of  $\text{NH}_4^+$  is QG72 < HG51 < MG < UG1 < SG4. The NOAA HYSPLIT air trajectory model and local environmental data demonstrate that the spatial distribution of nitrogen-containing ions is influenced by the long-distance pollution and atmospheric dust, the local anthropogenic output including industry and agriculture, as well as the sampling conditions.

**Key words:** Tianshan Mountains; glacier; snowpack; nitrate; ammonium; spatial distribution.

氮元素的生物地球化学循环是全球变化研究的重要领域之一, 雪冰中的含氮离子(主要为  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$ )在一定程度上表征了全球或区域性的自然

环境变迁与人类活动强度变化, 为理解氮循环过程提供了大量的信息 (Wolff *et al.*, 2008; Kepko *et al.*, 2009; Kaufmann *et al.*, 2010; Kellerhals

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos. 41161012, 41240001, 41171057); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (No. NCET-10-0019); 甘肃省高等学校基本科研业务费项目; 中科院寒旱所青年人才成长基金 (No. 51Y251B51).

**作者简介:** 王圣杰 (1987—), 男, 博士研究生, 主要从事全球变化与水循环过程研究. E-mail: geowang@126.com

\* **通讯作者:** 张明军, E-mail: mjzhang2004@163.com

*et al.*, 2010; 王圣杰等, 2010; Laluraj *et al.*, 2011). 对阿尔卑斯山东段与西段(Nickus *et al.*, 1997)、落基山北段与南段(Turk *et al.*, 2001)、格陵兰岛(Burkhart *et al.*, 2009)以及南极洲(Bertler *et al.*, 2005)等地的研究发现, 雪冰中含氮离子浓度的空间分布可以指示物质的来源, 具有丰富的环境意义。

位于中亚内陆的天山是全球山岳冰川分布最为丰富的山系之一。Wake *et al.* (1990)比较了天山乌鲁木齐河源 1 号冰川与博格达峰冰川等处表层雪中的  $\text{NO}_3^-$  浓度, 发现二者平均浓度存在差异, 乌鲁木齐河源 1 号冰川的  $\text{NO}_3^-$  浓度要低于在其东部的博格达峰冰川。Zhao *et al.* (2006)对比了乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪与南伊内里切克冰川(South Inilchek Glacier)雪-冰心中的  $\text{NO}_3^-$  浓度, 发现二者季节变化特征相似, 但乌鲁木齐河源 1 号冰川的  $\text{NO}_3^-$  浓度比在其西部的南伊内里切克冰川略高。李向应等(2008)探讨了哈密庙尔沟平顶冰川与奎屯河哈希勒根 51 号冰川积累区积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  等主要离子的差异, 发现积雪中化学离子特征可能与周边沙漠粉尘的输送、雪层内淋溶作用和沉积通量的高程效应等有关。张晓宇等(2011)发现博格达峰四工河 4 号冰川积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度显著高于天山其他地区, 并认为这与人类活动有重要的关系。然而, 一直以来有关天山冰川雪冰中含氮离子浓度的讨论仍多局限于个别冰川, 对不同区域雪冰中含氮离子的空间差异研究并不系统。本文在前人研究的基础上, 根据近年来采集的雪坑样品, 进一步探讨中国天山冰川积雪中含氮离子浓度的空间分布特征及其环境意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 样品采集与化学分析

根据中国冰川编目(Shi, 2008), 中国境内的天山山脉分布有冰川 9 035 条, 冰川面积 9 225  $\text{km}^2$ , 冰储量 1 011  $\text{km}^3$ (图 1)。本研究于 2004—2009 年间, 在天山自西向东选取了托木尔峰青冰滩 72 号冰川(41°46'N, 79°54'E)、奎屯河哈希勒根 51 号冰川(43°43'N, 84°24'E)、乌鲁木齐河源 1 号冰川(43°05'N, 86°48'E)、博格达峰四工河 4 号冰川(43°50'N, 88°20'E)与哈密庙尔沟平顶冰川(43°03'N, 94°19'E)作为采样点(李向应等, 2008; Dong *et al.*, 2011; 张晓宇, 2011; 王圣杰等,

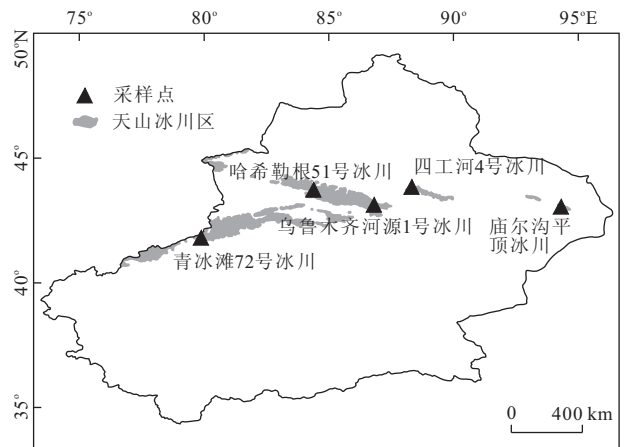


图 1 采样点在中国天山冰川区的位置

Fig. 1 Location of sampling glaciers in the Chinese Tianshan Mountains

2011a)。经实地考察发现, 上述冰川的积累区地势相对平坦, 沉积环境比较理想。自雪坑剖面的顶层以下, 一般每隔 10 cm 采集一个样品, 直至底部冰层附近为止。采集到的雪样在冰冻状态下从野外运回中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈国家重点实验室低温保存。

在化学分析时, 为了防止雪样受到外界空气的污染, 待样品在室温下自然融化后, 立即进行分析。雪样中的  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度采用 Dionex-320 型离子色谱仪测定(赵中平和李忠勤, 2004), 测量精度可达到  $\text{ng/g}$  量级, 数据误差  $< 5\%$ 。其中,  $\text{NO}_3^-$  使用 AS11-HC(4 mm  $\times$  250 mm) 分离柱, AG11-HC(4 mm  $\times$  50 mm) 保护柱, ASRS-4 mm 抑制器(抑制电流 52 mA), 15 mmol/L NaOH 淋洗液(流速 1.4 mL/min);  $\text{NH}_4^+$  使用 Dionex IonPac CS12A(4 mm  $\times$  250 mm) 分离柱, CG12A(4 mm  $\times$  50 mm) 保护柱, CAES 阳离子抑制器(抑制电流 65 mA), 15 mmol/L MSA 淋洗液(流速 1.0 mL/min)。

### 1.2 空气轨迹模型及气象资料

本研究使用的空气轨迹模型为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)空气资源实验室(ARL)开发的混合单粒子拉格朗日积分轨迹模式 HYSPLIT 4.9。该模式常用于模拟冰川区气团的运动状况, 从而指示雪冰中的物质来源(Grigholm *et al.*, 2009; Kaspari *et al.*, 2009; Thevenon *et al.*, 2011)。HYSPLIT模式中使用的气象资料为美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的全球再分析资料。

研究中选取 1 月、4 月、7 月与 10 月作为冬季、

春季、夏季与秋季的代表月。利用 HYSPLIT 模式分别计算了 2004—2009 年间的 1 月、4 月、7 月与 10 月每天不同时段(协调世界时间 0:00、6:00、12:00 和 18:00)到达采样点的气团轨迹(5 d 回溯),并使用轨迹聚类分析工具将不同代表月份的气团轨迹分别进行聚类,从而得到各季节的空气后向轨迹,最后将模拟结果导入 ArcGIS 9.2 软件进一步处理。

### 1.3 城市环境状况资料

采样点邻近城市的空气污染状况资料取自中国环境保护部与新疆维吾尔自治区环境保护厅网站。研究中统计了阿克苏(代表青冰滩 72 号冰川)、奎屯(代表哈希勒根 51 号冰川)、乌鲁木齐(代表乌鲁木齐河源 1 号冰川与四工河 4 号冰川)与哈密(代表庙尔沟平顶冰川)4 座城市的空气质量状况与空气首要污染物等指标,以此反映天山冰川邻近城市的环境状况。考虑到数据的时间连续性,取值时段定为 2005—2009 年。

## 2 结果

### 2.1 含氮离子的浓度剖面特征

冰川区含氮离子的输入形式主要是湿沉降(Zhao *et al.*, 2008)。研究表明,天山山区的水汽一般来自 3 个方向,一是西风气流携带的大西洋水汽由西向东输入;二是来自北冰洋的水汽由准噶尔西部山地缺口进入;三是伊朗和阿富汗气旋的北上(胡汝骥, 2004)。据估计,青冰滩 72 号冰川积累区的年降水量应在 1 000 mm 左右(中国科学院登山科学考察队冰川考察组, 1985;李忠勤和董志文, 2009);哈希勒根 51 号冰川(刘潮海和丁良福, 1986)、乌鲁木齐河源 1 号冰川(Li *et al.*, 2006)、四工河 4 号冰川(Watanabe *et al.*, 1983)积累区的年降水量约 700 mm;庙尔沟平顶冰川区的年降水量约 600 mm(王宗太等, 1986;李忠勤等, 2007);这也符合天山西段降水多于东段的一般规律。从各研究区的积雪深度(图 2)也可以看出,庙尔沟平顶冰川积累区雪层最薄,青冰滩 72 号冰川雪层最厚。

冰川积累区积雪内化学离子的浓度可以指示区域大气环流的运动特征、水汽来源乃至后沉积过程的影响。在乌鲁木齐河源 1 号冰川的长期观测(张晓宇, 2011)表明,积雪中的  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  虽然受到后沉积作用的影响,但年层并无缺失。对比天山不同区域冰川积累区的雪层剖面(图 2)也可以发现离子浓度的峰谷特征,且  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度峰值的出

现位置存在着相似性,但又不完全对应。这种剖面特征是由多方面因素造成的,具体说来有以下几点:

(1)物质输入形式相似,但不完全一致。在乌鲁木齐河源区开展的研究表明, $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Cl}^-$  的沉积通量中绝大多数(大于 94%)来自于湿沉降,而  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  则只有 66%~76%来自于湿沉降(Zhao *et al.*, 2008)。根据不同离子的相关性分析与主成分分析,乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰中的  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  均被主要归因于人类污染源(如化石燃料的使用、畜牧业排放及化肥的分解等)(Li *et al.*, 2006),哈希勒根 51 号冰川(Dong *et al.*, 2011)与四工河 4 号冰川(张晓宇等, 2011)的研究也得到了类似的结论。表层雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度季节变化虽有一定相似之处,但二者浓度并非简单的正相关线性关系,在某些时段的相关性并不高(Li *et al.*, 2008b;王圣杰等, 2011c),这与离子化学性质、具体来源差异都有关系(Zhao *et al.*, 2006;Li *et al.*, 2008a)。

(2)淋溶顺序有差异,但都容易随融水迁移。乌鲁木齐河源 1 号冰川淋溶期雪层中主要离子的淋溶顺序为  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$ ,这一淋溶顺序与离子本身的特性(雪层中最初的含量、雪变质过程中的粒径组合位置、离子之间的相互作用及可溶性等)有关(Li *et al.*, 2006)。根据这一序列, $\text{NH}_4^+$  显然要比  $\text{NO}_3^-$  淋溶速度慢,这也就造成了  $\text{NH}_4^+$  的峰值位置大多比  $\text{NO}_3^-$  的峰值位置略浅这一结果。基于上述原因,积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度剖面既有区别,又有联系。

### 2.2 含氮离子的平均浓度

为了定量比较雪层中含氮离子的空间差异,我们计算了不同冰川积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  的平均浓度(图 3)。虽然不同年份含氮离子浓度的绝对量可能存在着一定的差异,但离子平均浓度的空间分布特点仍十分明显。

积雪中  $\text{NO}_3^-$  平均浓度顺序为哈希勒根 51 号冰川 < 乌鲁木齐河源 1 号冰川 < 庙尔沟平顶冰川 < 青冰滩 72 号冰川 < 四工河 4 号冰川,而  $\text{NH}_4^+$  平均浓度的顺序为青冰滩 72 号冰川 < 哈希勒根 51 号冰川 < 庙尔沟平顶冰川 < 乌鲁木齐河源 1 号冰川 < 四工河 4 号冰川。总体来讲,自西向东离子浓度呈逐渐升高的趋势,最大值出现在四工河 4 号冰川。雪坑中含氮离子浓度空间差异的影响因素主要包括远源工业污染与沙漠粉尘传输、近源工农业生产与生活排

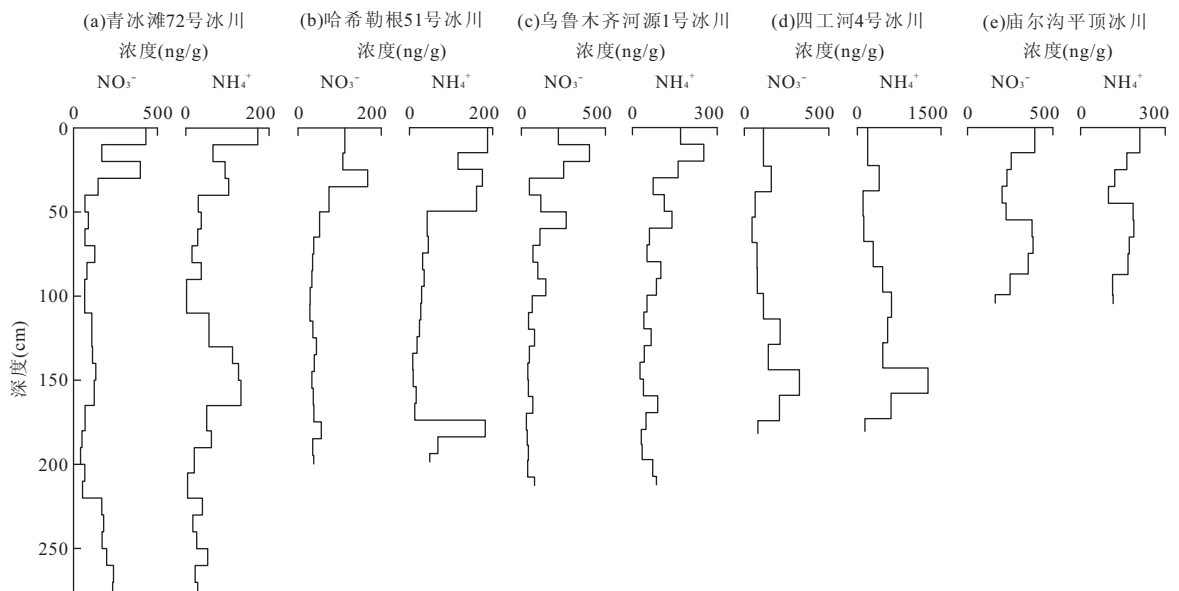


图 2 中国天山典型冰川积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  的浓度剖面

Fig. 2  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  concentration vertical profiles in snowpack of typical glaciers in the Chinese Tianshan Mountain  
青冰滩 72 号冰川雪坑实测深度为 425 cm, 图示为上部 275 cm

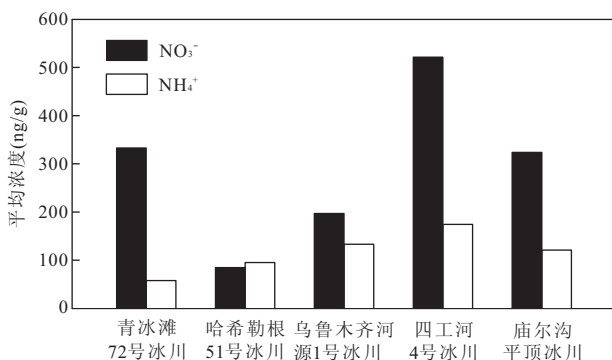


图 3 中国天山典型冰川积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  的平均浓度  
Fig. 3 Mean concentration of  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  in snowpack of typical glaciers in the Chinese Tianshan Mountains

放乃至冰川积雪区地理环境(如气温与降水量、局地山谷风、采样点的积雪保存条件等)。我们将在下文进行详细讨论。

### 3 讨论

#### 3.1 大尺度气团运动对含氮离子浓度空间差异的影响

中亚干旱区是全球重要的粉尘源区,粉尘经过不同大气环流系统的搬运和具体的沉积条件,在其传输路径上沉积于包括冰川在内的不同介质中(邬光剑和姚檀栋,2005),而化学离子可以吸附于粉尘

表面长距离传输(Wake *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2006; 王圣杰等, 2011b)。海盐离子示踪表明,  $\text{NO}_3^-$  几乎完全源于陆地源(非海洋源)(Li *et al.*, 2008c),因此大尺度的气团运动至少对  $\text{NO}_3^-$  浓度的空间分布差异是有贡献的。尽管之前对天山地区的单条冰川进行过一些气团轨迹模拟研究(Dong *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2011),但不同冰川气团轨迹的对比研究仍不多见。因此,本研究运用 HYSPLIT 模型,根据各季节代表月份的多年气象资料计算出气团轨迹并进行聚类分析,从而得到采样点不同时间段的 5 d 空气后向轨迹(图 4)。

总体来说,5 个采样点的气团大多自西向东迁移,通过伊犁河谷或阿拉山口进入我国境内,但在不同时空条件下仍有一定差别。冬季、春季与秋季,后向轨迹主要被聚类为 2 个来源,一支由欧洲向东输送,途径中亚,进入新疆;另一支由西亚进入中亚地区,沿天山北麓输送,后者来源的比例要高于前者。在夏季,采样点的气团轨迹比其他季节复杂,传输距离也小于其他季节。该季节局地源所占比例增大,各采样点均有气团途经天山以南地区,所占比例自西向东依次为 19%(青冰滩 72 号冰川)、27%(哈希勒根 51 号冰川)、40%(乌鲁木齐河源 1 号冰川)、42%(四工河 4 号冰川)与 46%(庙尔沟平顶冰川)。由此可见,夏季天山东段更容易受到新疆局地气团的影响;自西向东,来自南疆塔克拉玛干沙漠的影响越来越

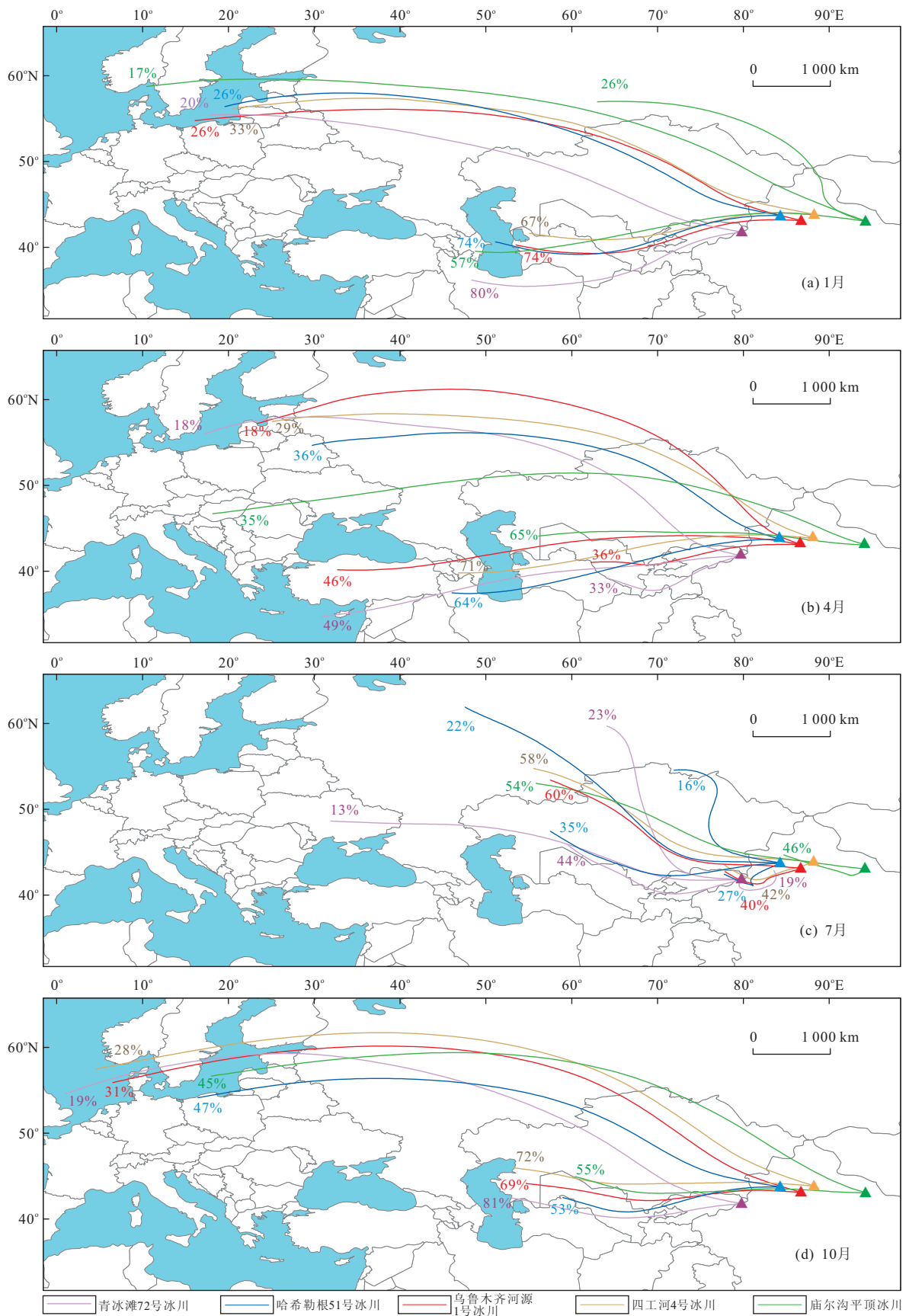


图 4 中国天山典型冰川各季节空气后向轨迹的差异

Fig. 4 Seasonal cluster of backward trajectory from typical glaciers in the Chinese Tianshan Mountains

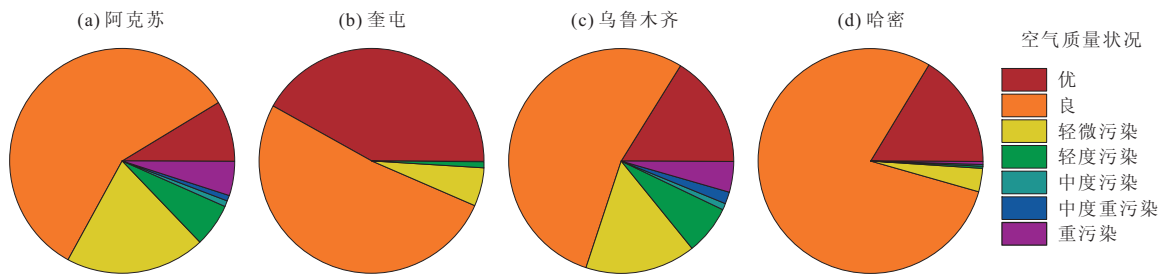


图 5 2005—2009 年阿克苏、奎屯、乌鲁木齐与哈密空气质量状况

Fig. 5 Air quality status of Aksu, Kuytun, Urumqi and Hami during 2005—2009

越大. Dong *et al.* (2009) 的研究也表明,天山不同冰川的微粒浓度与粒径分布差别很大,自西向东粗颗粒( $1\ \mu\text{m} < d < 26\ \mu\text{m}$ )的贡献越来越大,即局地粉尘的影响越来越大.

### 3.2 局地排放对含氮离子浓度空间差异的影响

局地的含氮离子来源十分广泛,常见的人为来源包括工业排放、生活排放与农业排放等.不同城市的大气氮含量存在明显差异,以 2007 年为例,乌鲁木齐空气中  $\text{NO}_2$  年均浓度( $0.067\ \text{mg}/\text{m}^3$ )是奎屯( $0.019\ \text{mg}/\text{m}^3$ )的 3.5 倍之多(奎屯市环境保护局,2008;乌鲁木齐市环境保护局,2010).在局部气象条件的影响下,邻近城市的含氮气体排放可能会对冰川区产生一定程度的影响(Roberts *et al.*, 2010; 张晓宇等,2011).因此,我们统计了环保部门公布的阿克苏、奎屯、乌鲁木齐和哈密空气质量状况(图 5).

4 个城市空气质量状况为优或良在总天数中所占比例自西向东分别为 67%、93%、70%和 96%,其中空气质量状况为优所占比例分别为 9%、42%、16%和 16%.阿克苏、奎屯和哈密的首要污染物均为可吸入颗粒物,而乌鲁木齐除可吸入颗粒物外还包括  $\text{SO}_2$  (占污染天数的 52%,总天数的 16%)与  $\text{NO}_x$  (占污染天数与总天数的比例小于 1%).  $\text{NO}_x$  并不是首要污染物,这可能与不同污染物贡献量的排序有关,并非城市氮排放作用不显著.乌鲁木齐市作为新疆维吾尔自治区的首府乃至中国西北地区的重要城市,人口相对稠密,工农业发达,氮排放量大;而阿克苏位于天山南坡,除人为作用外,受南疆粉尘的影响可能更为直接.

包括种植业与畜牧业在内的农业生产也会对氮循环产生影响,其表现形式包括农作物生长释放(谢迎新等,2009)、农作物秸秆燃烧(Cao *et al.*, 2008; 王书肖和张楚莹,2008)、含氮化肥施用(Cai *et al.*, 2002; 王书伟等,2009)、畜牧业养殖(Li *et al.*, 2008a; 王书伟等,2009)等.采样点所在地多为农业

县(市)或半农半牧县(市),种植作物包括小麦、玉米等粮食作物以及棉花、油料、蔬菜与饲草等经济作物,畜牧品种包括牛、羊、马等.由于影响具体冰川区的农牧业范围不易确定,这里不再分别对积雪采样点附近的农牧业差异进行量化比较.但不少含氮物质,如  $\text{NH}_3$  (董文焯等,2010; 曹国良等,2010)、 $\text{NO}_x$  (王书肖和张楚莹,2008; 曹国良等,2010)与  $\text{N}_2\text{O}$  (王效科和李长生,2000)等排放量研究表明,在农业的影响下天山不同区域的含氮物质排放量有很大差异.

## 4 结论

本研究沿东西方向选取中国天山的 5 处典型冰川,通过对不同冰川积雪中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  的分析,得出以下几点结论:

(1)天山冰川的积雪纵剖面普遍保持着  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度的峰谷特征.基于  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  输入形式与后沉积作用的异同,雪层中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度峰值的出现位置存在着一定的相似性,但也存在着差异.

(2)积雪中含氮离子平均浓度的空间分布差异明显.  $\text{NO}_3^-$  平均浓度顺序为哈希勒根 51 号冰川 < 乌鲁木齐河源 1 号冰川 < 庙尔沟平顶冰川 < 青冰滩 72 号冰川 < 四工河 4 号冰川,而  $\text{NH}_4^+$  则为青冰滩 72 号冰川 < 哈希勒根 51 号冰川 < 庙尔沟平顶冰川 < 乌鲁木齐河源 1 号冰川 < 四工河 4 号冰川.

(3)大尺度的气团流向对积雪中含氮离子浓度空间差异存在影响.后向轨迹模拟表明,采样点附近的气团大多自西向东运动,通过伊犁河谷或阿拉山口进入我国境内,但空间性与季节性的差异仍然存在.夏季的气团轨迹与其他季节不一致,显示出新疆局地沙漠粉尘的不同贡献程度.

(4)局地排放对冰川区积雪中含氮物质也有贡献.邻近的城市污染(工业生产与生活排放)与农业生产(农作物生长释放、农作物秸秆燃烧、氮肥的施用、畜牧业养殖等)都会对局地氮循环产生影响.

致谢:衷心感谢中国科学院天山冰川站全体人员多年来对野外采样与实验分析工作的支持与帮助.

## References

- Bertler, N., Mayewski, P. A., Aristarain, A., et al., 2005. Snow Chemistry across Antarctica. *Annals of Glaciology*, 41(1): 167–179.
- Burkhart, J. F., Bales, R. C., McConnell, J. R., et al., 2009. Geographic Variability of Nitrate Deposition and Preservation over the Greenland Ice Sheet. *Journal of Geophysical Research*, 114, D06301. doi: 10.1029/2008JD010600
- Cai, G. X., Chen, D. L., Ding, H., et al., 2002. Nitrogen Losses from Fertilizers Applied to Maize, Wheat and Rice in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 63(2–3): 187–195.
- Cao, G. L., An, X. Q., Zhou, C. H., et al., 2010. Emission Inventory of Air Pollutants in China. *China Environmental Science*, 30(7): 900–906 (in Chinese with English abstract).
- Cao, G. L., Zhang, X. Y., Wang, Y. Q., et al., 2008. Estimation of Emissions from Field Burning of Crop Straw in China. *Chinese Science Bulletin*, 53(5): 784–790.
- Dong, W. X., Xing, J., Wang, S. X., 2010. Temporal and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emissions in China: 1994–2006. *Environmental Science*, 31(7): 1457–1463 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Z. W., Li, Z. Q., Wang, F. T., et al., 2009. Characteristics of Atmospheric Dust Deposition in Snow on the Glaciers of the Eastern Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*, 55(193): 797–804.
- Dong, Z. W., Li, Z. Q., Zhang, M. J., et al., 2011. Physicochemical Characteristics and Environmental Significance of Snow Deposition on Haxilegen Glacier No. 51 in Tian Shan, China. *Journal of Mountain Science*, 8(3): 484–494.
- Environmental Protection Bureau of Kuitun City, 2008. Report on the Environment Quality in Kuitun City (2007). <http://www.kuitun.gov.cn/10057/10057/00004/2008/39095.htm> (in Chinese).
- Environmental Protection Bureau of Urumqi City, 2010. State of the Environment Quality in Urumqi City in 2007. <http://www.wlmqhb.gov.cn/NewShow.aspx?id=3327> (in Chinese).
- Glacier Group of Scientific Expedition Team on Mountaineering of the Chinese Academy of Sciences, 1985. Modern Glaciers in Mt. Tuomuer District. In: Scientific Expedition Team on Mountaineering of the Chinese Academy of Sciences, ed., *Glaciers and Hydrology in Mt. Tuomuer Region*. Xinjiang People's Publishing House, Urumqi, 32–98 (in Chinese).
- Grigholm, B., Mayewski, P. A., Kurbatov, A. V., et al., 2009. Chemical Composition of Fresh Snow from Glacier Marinelli, Tierra Del Fuego, Chile. *Journal of Glaciology*, 55(193): 769–776.
- Hu, R. J., 2004. Physical Geography of the Tianshan Mountains in China. China Environmental Science Press, Beijing, 69–204 (in Chinese).
- Kaspari, S., Mayewski, P. A., Handley, M., et al., 2009. A High-Resolution Record of Atmospheric Dust Composition and Variability since A. D. 1650 from a Mount Everest Ice Core. *Journal of Climate*, 22(14): 3910–3925.
- Kaufmann, P., Fundel, F., Fischer, H., et al., 2010. Ammonium and Non-Sea Salt Sulfate in the EPICA Ice Cores as Indicator of Biological Activity in the Southern Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 29(1–2): 313–323.
- Kellerhals, T., Brutsch, S., Sigl, M., et al., 2010. Ammonium Concentration in Ice Cores: A New Proxy for Regional Temperature Reconstruction. *Journal of Geophysical Research*, 115(D16), D16123, doi: 10.1029/2009JD012603
- Kepko, L., Spence, H., Smart, D. F., et al., 2009. Interhemispheric Observations of Impulsive Nitrate Enhancements Associated with the Four Large Ground-Level Solar Cosmic Ray Events (1940–1950). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(17–18): 1840–1845.
- Lalraj, C. M., Thamban, M., Naik, S. S., et al., 2011. Nitrate Records of a Shallow Ice Core from East Antarctica: Atmospheric Processes, Preservation and Climatic Implications. *The Holocene*, 21(2): 351–356.
- Li, H. L., Li, Z. Q., Wang, W. B., et al., 2008a. Depositional Characteristics of  $\text{NH}_4^+$  on Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tian Shan, China. *Annals of Glaciology*, 49(1): 161–165.
- Li, Z. Q., Wang, W. B., Wang, F. T., et al., 2008b. 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 Tian Shan, Central Asia. *Annals of Glaciology*, 49(1): 217—223.
- Li, Z. X., He, Y. Q., Pang, H. X., et al., 2008c. Source of Major Anions and Cations of Snowpacks in Hailuoguo No. 1 Glacier, Mt. Gongga and Baishui No. 1 Glacier, Mt. Yulong. *Journal of Geographical Sciences*, 18(1): 115—125.
- Li, X. Y., Liu, S. Y., Han, T. D., et al., 2008. Ion Concentration in Snow Pits on Glaciers in Eastern Tianshan Mountain: Take Haxilegen Glacier No. 51 of Kuitun River and Hami Miaoergou Flat-Topped Glacier as an Example. *Advances in Earth Science*, 23(12): 1268—1276 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Dong, Z. W., 2009. Qingbingtan Glacier No. 72 of Mt. Tomur in Tianshan Mountains is Ablating at 3 to 5 cm Per Day. *Science Technology Innovations and Brands*, (1): 44—46 (in Chinese).
- Li, Z. Q., Edwards, R., Mosley-Thompson, E., et al., 2006. 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. *Annals of Glaciology*, 43(1): 250—256.
- Li, Z. Q., Wang, F. T., Zhu, G. C., et al., 2007. Basic Features of the Miaoergou Flat-Topped Glacier in East Tianshan Mountains and Its Thickness Change over the Past 24 Years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29(1): 61—65 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Zhao, S. H., Edwards, R., et al., 2011. Characteristics of Individual Aerosol Particles over Urumqi Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, Central Asia, China. *Atmospheric Research*, 99(1): 57—66.
- Liu, C. H., Ding, L. F., 1986. Distributive and Active Features of the Glaciers in Interior Drainage Area of Junggar Basin in Northwest Tianshan Mountains. In: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology of Chinese Academy of Sciences, ed., *Glacier Inventory of China III: Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Junggar Basin in Northwest)*. Science Press, Beijing, 7—22 (in Chinese).
- Nickus, U., Kuhn, M., Baltensperger, U., et al., 1997. SNO-SP: Ion Deposition and Concentration in High Alpine Snow Packs. *Tellus B*, 49(1): 56—71.
- Roberts, T. J., Hodson, A., Evans, C. D., et al., 2010. Modelling the Impacts of a Nitrogen Pollution Event on the Biogeochemistry of an Arctic Glacier. *Annals of Glaciology*, 51(56): 163—170.
- Shi, Y. F., 2008. *Glaciers and Related Environments in China*. Science Press, Beijing, 42—51.
- Thevenon, F., Chiaradia, M., Adatte, T., et al., 2011. Ancient Versus Modern Mineral Dust Transported to High-Altitude Alpine Glaciers Evidences Saharan Sources and Atmospheric Circulation Changes. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11: 859—884.
- Turk, J. T., Taylor, H. E., Ingersoll, G. P., et al., 2001. Major-Ion Chemistry of the Rocky Mountain Snowpack, USA. *Atmospheric Environment*, 35(23): 3957—3966.
- Wake, C. P., Mayewski, P. A., Spencer, M. J., 1990. A Review of Central Asian Glaciochemical Data. *Annals of Glaciology*, 14(1): 301—306.
- Wake, C. P., Mayewski, P. A., Xie, Z. C., et al., 1993. Regional Distribution of Monsoon and Desert Dust Signals Recorded in Asian Glaciers. *Geophysical Research Letters*, 20(14): 1411—1414.
- Wang, S. J., Zhang, M. J., Li, Z. Q., et al., 2011a. Evolution Process of Nitrate in Snowpack of Glacier No. 1 at the Headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains. *Advances in Earth Science*, 26(8): 897—904 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. J., Zhang, M. J., Wang, F. T., et al., 2011b. Influence of Biomass Burning in Central Asia on Nitrate Concentrations in Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tianshan Mountains, China. *Environmental Science*, 32(2): 338—344 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. J., Zhang, M. J., Wang, F. T., et al., 2011c. Seasonal Variations of Nitrogen-Containing Ions Concentration in Surface Snow at the Headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains. *Environmental Chemistry*, 30(8): 1445—1450 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. J., Zhang, M. J., Wang, F. T., et al., 2010. A Review of the Concentration Records of Nitrate in Snow and Ice. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(6): 1162—1169 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. W., Liao Q. J. H., Hu, Y. T., et al., 2009. A Preliminary Inventory of NH<sub>3</sub>-N Emission and Its Temporal and Spatial Distribution of China. *Journal of Agro-Environment Science*, 28(3): 619—626 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. X., Zhang, C. Y., 2008. Spatial and Temporal Distribution of Air Pollutant Emissions from Open Burning of Crop Residues in China. *Sciencepaper Online*, 3(5): 329—333 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. K., Li, C. S., 2000. N<sub>2</sub>O Emission from Agricultural Soil in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 20(4): 483—488 (in Chinese with English abstract).



- Wang, Z. T., Liu, C. H., Wang, Y. S., 1986. Distribution and Principal Features of Glaciers in Interior Drainage Area of Scattered Flow in East Tianshan Mountains. In: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology of Chinese Academy of Sciences, ed., *Glacier Inventory of China III: Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Scattered Flow in East)*. Science Press, Beijing, 7–17 (in Chinese).
- Watanabe, O., Ageta, Y., Ren, J. W., 1983. Characteristics of Firm Stratigraphy in a Glacier of Sigong River Headwaters, Mt. Bogda Region, Eastern Tian Shan. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 5(3): 25–36.
- Wolff, E. W., Jones, A. E., Bauguitte, S. J. B., et al., 2008. The Interpretation of Spikes and Trends in Concentration of Nitrate in Polar Ice Cores, Based on Evidence from Snow and Atmospheric Measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(18): 5627–5634.
- Wu, G. J., Yao, T. D., 2005. A Comparison of the Records of Dust Originated from Central Asia Since the Last Interglacial. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(1): 80–87 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, C. D., Kang, S. C., Qin, D. H., et al., 2002. Transportation of Atmospheric Impurities over the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau as Shown by Snow Chemistry. *Journal of Asia Earth Sciences*, 20(3): 231–239.
- Xie, Y. X., Zhang, S. L., Zhao, X., et al., 2009. Ammonia Emission and Uptake of Atmospheric Nitrogen Deposition of Crops. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(5): 1929–1932 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., 2011. The Snow-Infiltration Ice Evolution on Urumqi Glacier No. 1 and Snow Chemistry on Typical Glacial Region. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou (in Chinese).
- Zhang, X. Y., Li, Z. Q., Wang, F. T., et al., 2011. Anthropogenic Sulfate and Nitrate Signals in Snow on the Glacier of Mt. Bogeda, Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 33(2): 283–291 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. P., Li, Z. Q., 2004. Determination of Soluble Ions in Atmospheric Aerosol by Ion Chromatography. *Modern Scientific Instruments*, (5): 46–49 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. P., Li, Z. Q., Edwards, R., et al., 2006. Atmosphere-to-Snow-to-Firm Transfer of  $\text{NO}_3^-$  on Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tien Shan, China. *Annals of Glaciology*, 43(1): 239–244.
- Zhao, Z. P., Tian, L. D., Fischer, E., et al., 2008. Study of Chemical Composition of Precipitation at an Alpine Site and a Rural Site in the Urumqi River Valley, Eastern Tien Shan, China. *Atmospheric Environment*, 42(39): 8934–8942.

### 附中文参考文献

- 曹国良, 安心琴, 周春红, 等, 2010. 中国区域反应性气体排放源清单. *中国环境科学*, 30(7): 900–906.
- 董文焯, 邢佳, 王书肖, 2010. 1994–2006 年中国人为源大气氨排放时空分布. *环境科学*, 31(7): 1457–1463.
- 胡汝骥, 2004. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社, 69–204.
- 奎屯市环境保护局, 2008. 奎屯市环境质量公报 (2007). <http://www.kuitun.gov.cn/10057/10057/00004/2008/39095.htm>
- 李向应, 刘时银, 韩添丁, 等, 2008. 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 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川为例. *地球科学进展*, 23(12): 1268–1276.
- 李忠勤, 董志文, 2009. 天山托木尔峰青冰滩 72 号冰川每天以 3 cm 到 5 cm 速度消融. *科技创新与品牌*, (1): 44–46.
- 李忠勤, 王飞腾, 朱国才, 等, 2007. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去 24 a 间的厚度变化. *冰川冻土*, 29(1): 61–65.
- 刘潮海, 丁良福, 1986. 天山西北部准噶尔内流区冰川分布及其作用特征. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. *中国冰川目录 III: 天山山区 (西北部准噶尔内流区)*. 北京: 科学出版社, 7–22.
- 王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等, 2011a. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪层中  $\text{NO}_3^-$  的演化过程. *地球科学进展*, 26(8): 897–904.
- 王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等, 2011b. 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. *环境科学*, 32(2): 338–344.
- 王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等, 2011c. 天山乌鲁木齐河源区表层雪中含氮离子季节变化特征. *环境化学*, 30(8): 1445–1450.
- 王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等, 2010. 雪冰中  $\text{NO}_3^-$  浓度记录的研究进展. *冰川冻土*, 32(6): 1162–1169.
- 王书伟, 廖千家骅, 胡玉婷, 等, 2009. 我国  $\text{NH}_3\text{-N}$  排放量及空间分布变化初步研究. *农业环境科学学报*, 28(3): 619–626.
- 王书肖, 张楚莹, 2008. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布. *中国科技论文在线*, 3(5): 329–333.
- 王效科, 李长生, 2000. 中国农业土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量估算. *环境科学学报*, 20(4): 483–488.

- 王宗太,刘潮海,王银生,1986. 天山东部散流内流区冰川分布与基本特征. 见:中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 中国冰川目录 III:天山山区(东部散流内流区). 北京:科学出版社,7-17.
- 乌鲁木齐市环境保护局,2010. 乌鲁木齐市 2007 年环境质量现状. <http://www.wlmqhb.gov.cn/NewShow.aspx?id=3327>
- 邬光剑,姚檀栋,2005. 末次间冰期以来源自中亚的粉尘记录的对比. 冰川冻土,27(1):80-87.
- 谢迎新,张淑利,赵旭,等,2009. 作物地上部氨排放及对大气氮沉降的吸收. 生态环境学报,18(5):1929-1932.
- 张晓宇,2011. 天山乌源 1 号冰川雪-冰演化过程和典型冰川区雪冰化学研究. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所.
- 张晓宇,李忠勤,王飞腾,等,2011. 天山博格达峰四工河 4 号冰川雪坑中人类活动的  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  记录. 冰川冻土,33(2):283-291.
- 赵中平,李忠勤,2004. 离子色谱法测定大气气溶胶中的可溶性离子. 现代科学仪器,(5):46-49.
- 中国科学院登山科学考察队冰川考察组,1985. 托木尔峰地区的现代冰川. 见:中国科学院登山科学考察队编. 天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,32-98.