

doi: 10.3799/dqkx.2011.068

天山乌鲁木齐河源冰川积雪化学特征及其季节变化

李忠勤^{1,2}, 董志文², 张明军¹, 王飞腾²

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/天山冰川站, 甘肃兰州 730000

摘要: 高海拔雪冰可以记录源自于地球表面的各种化学物质信号. 从2002年9月到2005年10月3年的时段内, 在天山乌鲁木齐河源1号冰川积累区采集积雪样品, 运用比较法、相关分析法等方法, 对其中主要离子、不溶粉尘、痕量金属和 $\delta^{18}\text{O}$ 等特征及其季节变化进行了分析研究. 分析结果表明, 积雪离子浓度大小顺序依次为: $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 其中 Ca^{2+} 是主要的阳离子, SO_4^{2-} 是主要的阴离子. 离子相关性分析表明, 除 NO_3^- 之外, 其他离子浓度之间均存在较好的正相关. 积雪中 $\delta^{18}\text{O}$ 值随时间变化表现出与大气温度变化相反的规律. 积雪中不溶粉尘和主要化学离子浓度具有明显的季节变化特征, 春季期间浓度明显高于其他季节, 表明沙尘活动对冰川区化学物质输入有较大贡献; 此外, 痕量金属(Cd、Pb、Zn、Al、Fe)季节变化特征表明, 人类活动的污染物对于研究区雪冰中的化学特征亦有重要影响.

关键词: 冰川地质; 环境效应; 化学特征; 季节变化; 物质来源.

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2011)04-0670-09

收稿日期: 2010-09-20

Chemical Characteristics and Seasonal Variation of Snow on Urumqi Glacier No. 1 of the Eastern Tianshan, China

LI Zhong-qin^{1,2}, DONG Zhi-wen², ZHANG Ming-jun¹, WANG Fei-teng²

1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2. The State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China

Abstract Alpine glacier and snow can record signals of surface earth. From September 2002 to October 2005, Surface snow samples were collected on Urumqi glacier No. 1 and chemical characteristics and seasonal variations of major ions, dust, and metal were measured. Results show that the concentration of major ions is $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, Ca^{2+} is the dominant cation, SO_4^{2-} is the dominant anion. All ions have good correlation except NO_3^- . $\delta^{18}\text{O}$ shows minus correlation with air temperature change. Dust and major ionic concentrations in the snow show obvious seasonal change trend with higher concentrations in spring but lower ones in summer, which indicates the chemical input of dust activities to snow. Temporal changes of heavy metal (Cd, Pb, Zn, Al, Fe) indicate that human activities also have effect on the snow chemistry.

Key words: glacial geology; environmental effects; chemical features; seasonal change; material sources.

冰冻圈(包括冰川、冻土、积雪等)是地球表面的重要圈层之一, 是地球化学循环的重要组成部分, 在地表物质迁移转化方面具有重要的作用. 其中高海拔地区雪冰是大气中各种化学物质的存储器, 具有重要的地球化学研究意义(Fuhrer *et al.*, 1996; Olivier *et al.*, 2006), 其中保存的各种要素如化学

离子、稳定氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 、不溶粉尘、重金属、有机物以及黑炭等是气候环境变化的指示器, 是全球气候环境变化的重要信息源, 因此雪冰化学研究成为全球变化研究的重要手段(Gao *et al.*, 1992; Andersen *et al.*, 1999; Karl and Edward, 2000; Aizen *et al.*, 2001; Aizen *et al.*, 2004; Dong *et*

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB951003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KZCX2-EW-311); 教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-10-0019); 冰冻圈国家重点实验室自主基金项目(No. SKLCS-ZZ-2010-04).

作者简介: 李忠勤(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事冰川与环境方面的研究. E-mail: Lizq@lzb.ac.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

al., 2009). 冰雪中化学物质是反映气候环境演化的重要指标, 因此搞清其中不溶粉尘和阴阳离子、稳定氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 、重金属等化学物质传输机制及其在冰雪中的次生变化机制等问题, 不仅可以恢复气候与环境的演变, 更重要的是能够提供对地球圈层之间相互作用的新认识, 尤其对物质在大气圈、岩石圈、水圈和冰冻圈之间的迁移转化研究有着重要意义. 在我国天山山脉所处广大区域的高海拔地区, 分布有众多的山岳冰川, 是我国西部干旱与半干旱地区的重要水资源, 对于该区雪冰化学特征进行研究有着十分重要的意义(王德辉和张丕远, 1985; Aizen *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2003; Schotterer *et al.*, 2004; Stichler *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2006). 同时, 中亚内陆的高海拔冰心记录了历史时期的气候环境和一定程度的地壳地质演化信息, 对于这些冰心信息的解释需要对积雪化学特征及其演化过程进行充分的认识(Li *et al.*, 1995; 李忠勤等, 1995; Wolff *et al.*, 1998; 侯书贵等, 1999; Eichler *et al.*, 2001; Ginot *et al.*, 2001; Mori *et al.*, 2003; 董志文等, 2009; 杨赛红等, 2009; 张振国等, 2009). 然而, 对于乌鲁木齐河源冰川积雪中主要化学组成如离子、稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 、痕量金属等化学的特征及其季节变化, 以及与周边气候环境的深入关系、以及物质来源目前仍然不清楚, 亟需进行相关研究(Yao *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2006, 2007; Zhao *et al.*, 2006). 因此, 为了弄清天山雪冰中化学记录的特征和气候环境意义, 2002—2005 年连续 3 年, 在乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区海拔 4 130 m 采样点以每周一次的频率采集冰川表层雪样品. 本文的核心是分析讨论冰川表层积雪中主要离子、不溶粉尘和稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 等的化学特征及其季节变化规律, 对于雪冰化学特征季节变化及其物质来源进行探讨, 从而对该区雪冰地球化学循环作用有所认识.

1 研究区概况

天山地区位于西北干旱与半干旱区中心位置、中亚粉尘活动的源区范围内, 周边被许多大沙漠、戈壁以及荒漠所包围(图 1), 而天山山颠发育了众多的高海拔山岳冰川. 乌鲁木齐河源 1 号冰川($43^{\circ}05'\text{N}$, $86^{\circ}48'\text{E}$)是河源区面积最大的一条冰川, 为冰斗—山谷冰川, 由已经分离的东、西两支组成. 据观测资料, 该冰川长 2.41 km, 面积 1.68 km^2 , 雪线平均海拔 4 075 m, 冰舌末端海拔 3 777 m. 该区气

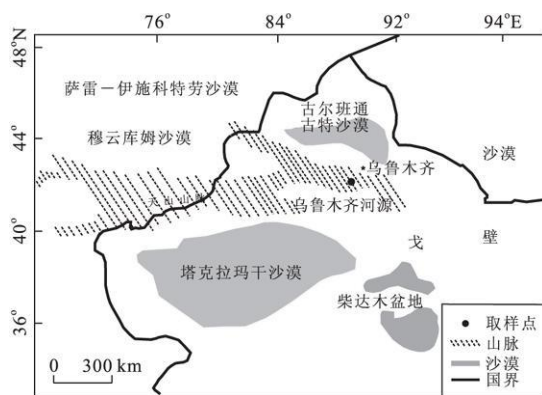


图 1 乌鲁木齐河源冰川位置示意

Fig. 1 Location of Urumqi glacier No. 1 in eastern Tianshan

候特征是典型的大陆型气候(李江风, 1991), 位于西风带, 冬季大气环流主要受西伯利亚反气旋控制, 降水十分稀少. 据大西沟气象站和天山冰川站 1959—2000 年的气象资料计算, 流域上游冰舌末端区年平均气温 -5.2°C , 年均降水量 441.1 mm, 冰川积累区的取样点 4 130 m 处年平均气温 -9.1°C , 年均降水量 632 mm, 4~10 月降水量占全年降水量 95% 以上, 而最大降水量常在 7~8 月份观测到, 与积雪的最大消融量同期.

2 样品采集和实验分析

从 2002 年 11 月 1 日到 2005 年 10 月 31 日连续 3 年的时段内, 在乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区 4 130 m 取样点采集积雪样品, 主要为表层雪样品. 表层雪取样时采集了积雪表层 5 cm 的雪, 新雪样品亦是如此, 主要用来研究降雪中化学特征的季节变化及沉降过程作用. 在本研究中, 每周一次取样, 共取得 156 个表层雪样品. 样品的采集、运输和保存严格按照规范进行, 前人已有详述(Lee *et al.*, 2003; 赵中平和李忠勤, 2004; Li *et al.*, 2006, 2007). 采样时穿洁净的工作服、戴面罩、聚乙烯手套, 使用预先清洁的不锈钢铁铲和聚乙烯手套等. 样品的储存保持在一 18°C 冷冻状态, 直至在中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室分析. 同时分析了雪样化学离子组成, 主要化学离子 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等离子浓度是用 Dionex-320 型离子色谱仪测定的, 其精度可达 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 级, 测试数据误差小于 5%. $\delta^{18}\text{O}$ 用 Mat-252 气体稳定同位素质谱仪进行测定, 其检测误差为 $\pm 0.5\text{‰}$. 重金属元素(Cd、Pb、Zn、Al、Fe)浓度的测试是在高分辨双聚焦

电感耦合等离子体质谱仪 (Finnigan MAT element ICP-MS) 上进行, 具体方法前人已有详述 (Li *et al.*, 2007)。

3 结果与讨论

3.1 积雪中化学要素浓度的比较及其年际差异

表 1 是乌鲁木齐河源 1 号冰川表层积雪中主要化学离子、不溶粉尘浓度、 $\delta^{18}\text{O}$ 以及 pH 和电导率的比较。随着取样时间的不同, 雪坑中离子浓度也有较大差异。从 2003 年至 2005 年, 离子浓度表现出先升高后下降的趋势。其中 2002—2003 年度积雪离子浓度最低 (平均为 $2\,308.3\,\mu\text{g/L}$), 主要要素如电导率 ECM 和矿物粉尘浓度也最低; 2003—2004 年度积雪离子浓度最高 (平均为 $3\,679.2\,\mu\text{g/L}$), ECM 和矿物粉尘浓度也最高; 而积雪中各要素的浓度在 2005 年又有所下降。这种浓度的年际变化明显地与气温、降水年际变化相关。分析表 1 发现, 各种离子浓度大小关系是 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 其中 Ca^{2+} 是主要的阳离子, SO_4^{2-} 是主要的阴离子, 其浓度远大于其他离子浓度, 而且年际上, 离子浓度状况与粉尘表现出较好的一致性变化。分析认为, 来源于地球表面的粉尘颗粒

会携带大量的化学离子和其他物质如烟灰、黑炭等, 在冰川区随着海拔升高, 随水汽输送遇到山体阻挡, 以干沉降或湿沉降的方式沉降在冰川表面的积雪中; 另一方面, 离子、粉尘等浓度的年际差异可能与大气气溶胶粉尘输送受大气环流和气温等的影响有关, 因为许多研究表明, 在暖湿气候环境期间, 粉尘浓度由于降水的作用会降低, 而冷干的气候环境会造成大气粉尘的频繁活动 (Wolff *et al.*, 1998)。而雪冰中碱性的 Ca^{2+} 是亚洲粉尘的指示物质, 其浓度大小与粉尘浓度有很好的相关性。同时, 从表 1 中发现, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 等阳离子的浓度远大于阴离子的浓度之和 (平均差值 $\Delta c = 748.2\,\mu\text{g/L}$), 阴阳离子之间的这种不平衡是由于积雪中的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 影响造成的。已有研究表明, 积雪中的阴阳离子浓度差可以反映 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的值 (Wake *et al.*, 1992; Li *et al.*, 2006)。过多的阳离子可能来源于周边的粉尘, 以及 CO_2 与 CO_3^{2-} 之间的转换造成的。

表 2 为积雪中各种要素 (包括主要化学离子、粉尘、pH 和电导率等) 的相关性分析。结果表明, 除 NO_3^- 之外, 积雪中主要离子如 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 以及不溶粉尘 (Dust) 相互之间存在很好的相关关系。表层雪 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度及不溶粉尘

表 1 表层积雪中主要化学要素浓度的比较

Table 1 $\delta^{18}\text{O}$ and major ion concentrations, ECM, pH in surface snow samples

年	Dust ($10^3\,\#\text{/mL}$)	pH	ECM ($\mu\text{S/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	离子浓度($\mu\text{g/L}$)								离子总浓度 ($\mu\text{g/L}$)
					Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	
2002—2003	408	5.6	3.1	-12.8	108.5	842.9	71.4	31.3	208.6	556.7	355.3	146.4	2 308.3
2003—2004	1094	5.5	3.6	-18.3	189.8	1829.3	64.5	46.4	354.5	619.3	404.2	189.5	3 679.2
2004—2005	327	5.5	2.09	-24.9	102.5	1793.2	86.9	48.6	209.4	468.6	316.4	186.4	3 187.1
平均	609	5.5	2.93	-18.6	133.6	1488.4	74.3	42.1	257.5	548.2	358.6	174.1	3 058.2

表 2 研究区粉尘、pH、电导率以及主要阴阳离子相关性对比

Table 2 Correlation coefficient of major ions, pH, ECM and dust in the snow pits

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	pH	ECM
NO_3^-	0.78	—								
SO_4^{2-}	0.64	0.82	—							
Na^+	0.90	0.53	0.69	—						
NH_4^+	0.73	0.83	0.96	0.56	—					
K^+	0.70	0.20	0.41	0.54	0.60	—				
Mg^{2+}	0.79	0.28	0.67	0.79	0.83	0.88	—			
Ca^{2+}	0.51	0.27	0.74	0.84	0.82	0.78	0.94	—		
pH	0.42	0.16	0.89	0.42	0.26	0.16	0.66	0.23	—	
ECM	0.52	0.18	0.83	0.72	0.46	0.62	0.75	0.94	0.87	—
Dust	0.78	0.39	0.75	0.58	0.36	0.41	0.79	0.96	0.70	0.90

之间表现出明显的随时间变化的相关性, 说明积雪化学组成可能受沙尘活动的影响很大. 在本研究中, 乌鲁木齐河源冰川积雪的结果显示 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度很高, 这可能受到中亚地区沙尘源区的地壳粉尘矿物的影响; Ca^{2+} 浓度与微粒浓度的明显相关性 ($R=0.96$) 说明, 尽管不排除其他源区影响, 积雪污化层中微粒主要来自于周边的中亚内陆粉尘源区, 因为强碱性的 Ca^{2+} 是来自于亚洲大陆沙漠和黄土地区矿物微粒的一种示踪剂, 是亚洲源区粉尘的指示物质. Mg^{2+} 、 Na^{+} 浓度与电导率的值也与粉尘浓度有很好的相关关系. 电导率 (ECM) 反映了阴阳离子总体浓度的大小, 与 pH 值有很好的相关性. 同时, 雪坑中的 NH_4^{+} 浓度也很高 (平均为 $174.1 \mu\text{g/L}$). 研究表明, 硫酸盐产生于云滴的逐步成云过程中, 通过各种相同或不同种类的化学过程产生硫酸 (如二氧化硫的氧化过程), 然后通过与氨气 (NH_3) 的化学反应形成硫酸铵 [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$]. 在此过程中便形成了大气粉尘中的细颗粒. 在这种累加态中 $\text{SO}_4^{2-} / \text{NH}_4^{+}$ 的等电量比率为 1. 从而使得大气粉尘细颗粒可溶部分的化学组成含有大量的硫酸铵, 并可能附着在粗颗粒表面. 离子浓度组成关系很好地反映了中亚粉尘源区的环境状况, 不溶微粒浓度与 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 浓度和电导率具有较好的相关性证明, 积雪中粉尘可能主要来自于中亚内陆的粉尘源区, 而这些离子随着微粒的沉降而沉积在雪层中.

3.2 积雪化学要素的季节变化特征

图 2 显示了积雪中稳定氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 随时间的变化过程. 稳定氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 在冰心研究中能够很好地反映气候变化, 尤其是反映气温变化的一项重要指标. 积雪中的稳定氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}$) 对于

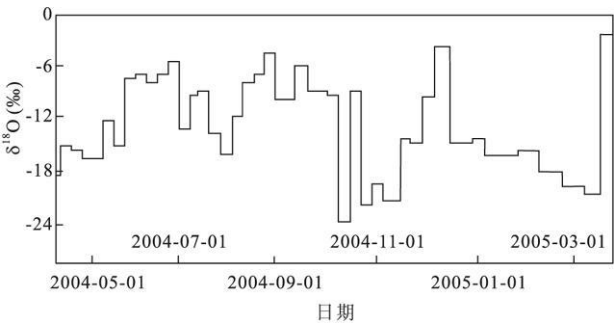


图 2 2004 年 4 月—2005 年 4 月积雪中稳定氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of $\delta^{18}\text{O}$ from 2004 to 2005 in the surface snow

科学地解释冰心记录具有重要指示意义. 在本研究中, 总体来看, 随着气温升高 (2004 年 4—2004 年 9 月), $\delta^{18}\text{O}$ 的值逐渐减小, 而在夏季向秋冬转化 (降低) 的过程中 (2004 年 9 月—2005 年 2 月), $\delta^{18}\text{O}$ 的值表现出升高趋势, 反映出 $\delta^{18}\text{O}$ 与气温之间存在着一定的反向相关规律. 从冰心记录的长时间尺度序列中, 对比其与气温年度变化之间的关系, 研究成果 (Li *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 2003). 而本研究观测到的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随时间的变化, 在一定程度上可以为高海拔雪冰区积雪中的氧同位素季节变化提供参考.

图 3 显示了表层积雪中各种化学离子和粉尘浓度随时间变化表现出的季节性特点. 主要的阴离子 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}) 表现出在春夏季节的高浓度, 即使是降水较多的 8 月份亦是如此, 说明降水可能对阴离子的较大贡献; 而主要阳离子 (Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 等) 则表现为春季的浓度峰值, 这些峰值

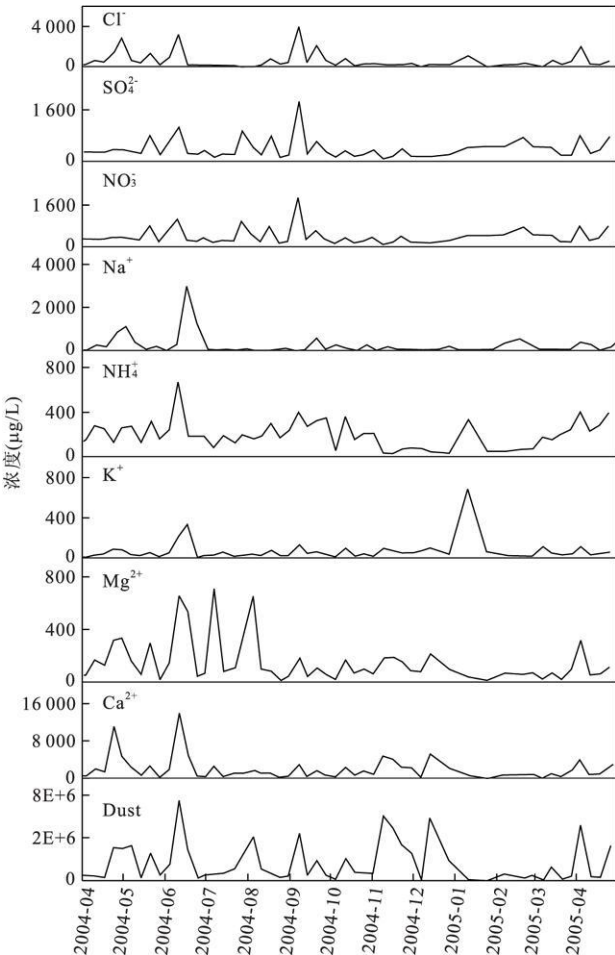


图 3 2004 年 4 月—2005 年 4 月表层积雪离子浓度的季节变化

Fig.3 Temporal variations of $\delta^{18}\text{O}$ and ionic concentrations in surface snow samples and old snow samples

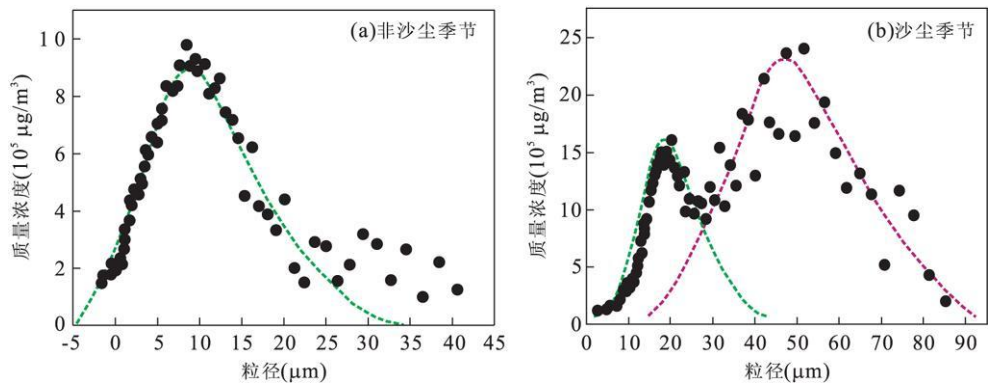


图 4 2004 年表层雪中沉积的不溶粉尘粒径分布比较

Fig. 4 Comparison of dust particle mass-size distribution between dust period and non-dust period

与粉尘浓度峰值的发生在时间上有着很好的对应性,其浓度在春季很高,夏季迅速下降,变得很低,说明降水对于粉尘活动的抑制作用和阳离子输入的减少.尽管如此,主要阴阳离子在春季都表现出高浓度值,说明处于中亚沙尘活动区的乌鲁木齐河源冰川积雪化学特征受到了大气沙尘活动的重要影响.

同时,对积雪样品中不溶粉尘颗粒粒径分布的季节差异进行分析比较.雪冰中粉尘颗粒的粒径及其分布反映了搬运风力以及粉尘源区的沙尘暴活动(Wake *et al.*, 1994).图 4 显示了积雪中粉尘微粒粒径分布在沙尘季节和非沙尘季节的变化.其中曲线的峰值对应的不溶微粒粒径表示分布的粒径众数值.雪冰不溶微粒的质量随粒径分布反映了大气粉尘颗粒的粒径组成,可以表现大气基本的浮质状况,与大气环境有密切关系.雪冰粉尘粒径分布由单一模式和多结构模式组成,单一分布模式反映来源的单一性,而多结构分布模式说明粉尘颗粒来源的复杂性.粉尘粒径分布不仅与搬运风力有关,而且与物质来源有关,如沙尘源区等.实验分析结果表明(图 4),乌鲁木齐河源 1 号冰川雪样中粉尘的粒径分布由两部分组成(董志文等, 2009): (1)非沙尘季节雪样,来源较远的稳定大气粉尘(气溶胶),属于高空西风搬运的细粒组分,粒径分布集中在 $2 \sim 26 \mu\text{m}$ 范围内,粒径众数大约 $10 \mu\text{m}$ (图 4a, 2004 年 7 月~9 月 15 个样品的平均状况); (2)沙尘活动季节雪样,除了较细组成($2 \sim 26 \mu\text{m}$)之外,还受局地沙尘活动带来的粉尘大颗粒或局地矿物颗粒影响,因为研究区沙尘季节有很大的风速,可以带来大量的沙尘暴颗粒;不溶微粒粒径分布集中在 $20 \sim 80 \mu\text{m}$ 范围内,粒径众数大约 $40 \mu\text{m}$ (图 4b, 2004 年 4 月~5 月 8 个样品的平均值).结果表明,乌鲁木齐河源 1 号冰川区

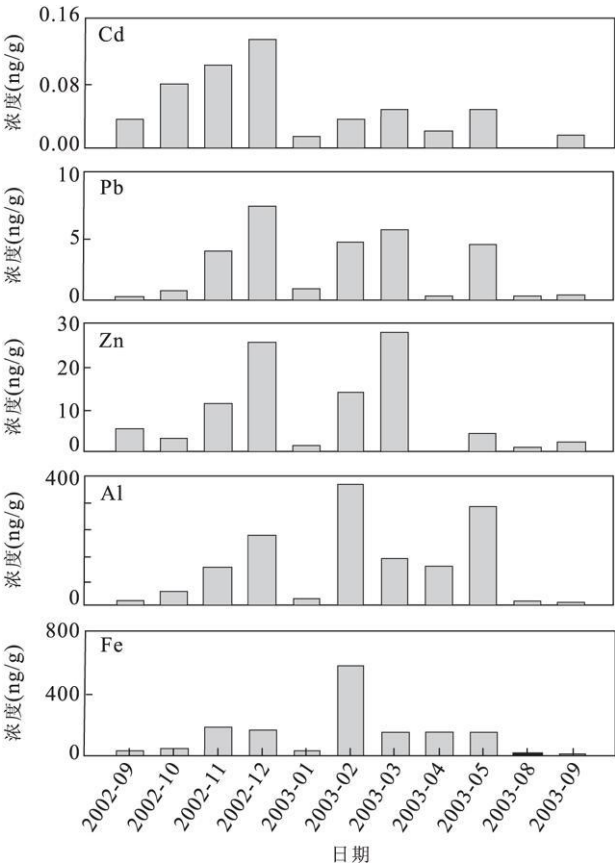


图 5 取样点表层积雪中痕量金属含量的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of heavy metal concentration in surface snow

积雪受中亚粉尘活动的影响十分明显,不溶微粒的粒径在沙尘季节与非沙尘季节的分布存在明显的差异.

如图 5 显示了积雪中痕量金属的季节变化.所有金属的浓度(包括 Pb、Al、Cd、Zn、Fe 等)都表现出在秋季逐渐升高,冬季出现峰值(Li *et al.*, 2007).这种现象正好与研究区周边的人类活动同时

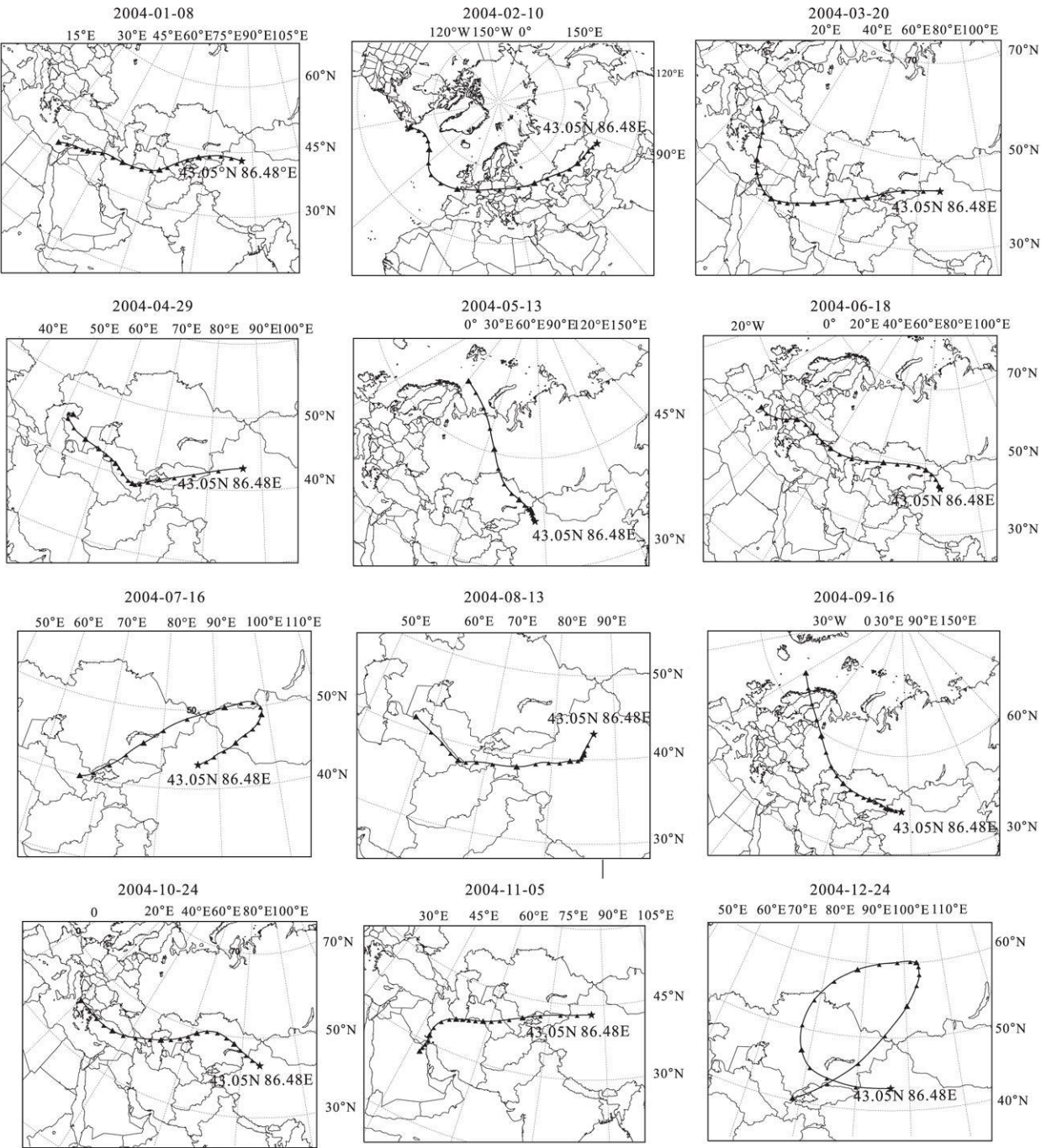


图 6 2004 年 1 月 ~ 12 月冰川取样点海拔高度 5 d 内的大气气团后向传输轨迹分析
Fig. 6 Analysis of 5 d backward trajectory of air mass from Urumqi glacier No. 1 in 2004

期释放的污染物增加是一致的, 盛行的山谷风可以把污染物带到冰川区; 且同时期西风漂流强盛, 可以把中亚地区的污染物质携带到天山山区. 夏季期间降水增加, 人类活动污染物如燃煤取暖等的量减少, 积雪中的重金属含量亦减小. 这表明, 乌鲁木齐河源 1 号冰川化学输入受到了周边的人为污染影响, 尤其是在冬季, 对积雪化学特征有重要的影响. 值得注意的是, 在 1 月份样品中金属浓度都比较低, 这种状

况在中亚其他地区冰川积雪的研究中也有发现, 例如, 帕米尔 Alai 山脉的 Abramov 冰川. 这可能是由于其他因素造成的, 如 1 月份冷空气强盛时期造成的风速增大, 从而影响了区域大气中的污染物浓度. 尽管如此, 对于这种现象具体的原因及其发生过程, 有待于更加深入的研究验证.

3.3 积雪化学要素的主要来源讨论

天山乌鲁木齐河源冰川积雪化学物质的输入可

能有以下几种不同的来源:(1)远源的大气气团带来的降水和化学物质输入.图6是对研究区运用后向气团轨迹分析法,检验到达天山乌鲁木齐河源1号冰川区取样点海拔高度的大气气团的传输路径和过程,该分析基于HYSPLIT 4模型,其中包括大气垂直运动模式.基于此模型分析计算了冰川取样点海拔高度5 d内的大气气团后向传输轨迹.结果表明,1号冰川积雪中化学离子的主要来源具有季节性变化特点.春季气团(3~5月)来源以研究区的西北方向为主,由于该时期是沙尘频发季节,而西北方向又是干旱的沙漠地区,这可能会给研究区带来大量的粉尘矿物颗粒,沉降在冰川积雪中;夏季和秋季气团则时常来自西北方向,有时候也来自于研究点的西南方向(如8月3日),冬季气团甚至有时候源自于印度洋(如11月5日),这可能带来大量的降水.由于气团运动的长期性,带来的远源物质作为研究区积雪化学特征的本底,是雪冰化学特征的基本组成部分.(2)由于研究区位于中亚粉尘源区,冰川积雪化学特征受到沙尘活动的影响明显(如图3、4所示).积雪中发现的粉尘浓度和粉尘颗粒的粒径分布状况很好地说明了这一点.粉尘浓度在春季的峰值,其组成颗粒粒径分布的双峰模式以及离子浓度与粉尘浓度随时间变化的一致性,都表明积雪化学特征受到局地沙尘活动的较大影响.(3)人类活动污染物对积雪中化学特征亦有贡献.正如积雪中的痕量金属(Pb、Al、Cd、Zn、Fe)浓度的季节变化显示(图5),秋冬季节其浓度升高,尤其是冬季出现的重金属含量峰值.与冬季中亚地区,人类活动使用的燃烧物量增大同期,表明人类活动污染物对于冰川区积雪化学特征的重要影响和贡献.总之,除了本底的大气化学物质来源外,春季频繁发生的沙尘活动和冬季期间增加的人类活动污染物,都对研究区冰川积雪化学特征有重要的影响.

4 结论

冰冻圈尤其是冰川积雪化学组成是地球表面地球化学循环的重要组成部分,在地表物质迁移转化方面具有重要的意义.乌鲁木齐河源1号冰川积累区积雪中的不溶粉尘和主要化学离子、痕量金属等,都具有明显的季节变化特征.冬春季节粉尘、化学离子浓度明显高于非沙尘活动的夏秋季节,表明冰川区化学特征受春季发生的中亚沙尘活动影响明显.痕量金属(Pb、Al、Cd、Zn、Fe)在秋冬季节的高浓

度,说明冬季人类活动污染物对冰川区积雪化学特性的贡献.冰川积雪中的离子平均浓度大小顺序依次为: $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,其中 Ca^{2+} 是主要的阳离子, SO_4^{2-} 是主要的阴离子.离子相关性分析表明,除 NO_3^- 之外,雪坑中离子之间均存在较好的正相关;粉尘与 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 离子以及电导率之间有很好的正相关性,说明该区雪冰化学要素来源的相对一致性,以及陆源矿物输入对研究区的明显影响.对积雪内主要化学要素的来源进行了分析.气团后向轨迹分析表明,1号冰川积雪中离子主要来源具有季节性变化特点,主要为西北和西南方向气团携带的物质输入.然而,除了本底的大气化学物质来源外,春季频发的沙尘活动和冬季的人类活动污染(重金属Pb、Al、Cd、Zn、Fe含量的升高),都对研究区冰川积雪化学特征有重要的影响.

References

- Aizen E. M., Aizen, V. B., Melack J. M., et al., 2001. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia. *International Journal of Climatology*, 21(5): 535—556. doi: 10.1002/joc.626
- Aizen V. B., Aizen, E. M., Melack, J. M., et al., 2004. Association between atmospheric circulation patterns and firn-ice core records from the Inilchek glacierized area, central Tien Shan, Asia. *Journal of Geophysical Research*, 109(D8)D08304. doi: 10.1029/2003JD003894
- Andersen, H. V., Hovmand, M. F., Hummelshøj, P., et al., 1999. Measurements of ammonia concentrations, fluxes and dry deposition velocities to a spruce forest 1991—1995. *Atmospheric Environment*, 33(9): 1367—1383. doi: 10.1016/S1352-2310(98)00363-X
- 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., Wang F. T., et al., 2009. Characteristics of atmospheric dust deposited in snow on Urumqi Glacier No. 1 of eastern Tian Shan, China: a comparison of measurements during Asian dust period with non-dust period. *Environmental Sciences*, 30(6): 240—247 (in Chinese with English abstract).
- Eichler, A., Schwikowski, M., Gäggeler, H. W., 2001. Melt-water induced relocation of chemical species in Alpine firn. *Tellus* 53(2): 192—203. doi: 10.1034/j.1600-0889.2001.d01-15.x

- Fuhrer, K., Albrecht, N., Martin, A., et al., 1996. High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle. *Journal of Geophysical Research*, 101 (D2): 4147—4164. doi: 10.1029/95JD02903
- Gao, Y., Arimoto, R., Zhou, M. Y., et al., 1992. Relationships between the dust concentrations over eastern Asia and the remote North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 97 (D9): 9867—9872. doi: 10.1029/92JD00714
- Ginot, P., Kull, C., Schwikowski, M., et al., 2001. Effects of postdepositional processes on snow composition of a subtropical glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes). *Journal of Geophysical Research*, 106(D23): 32375—32386. doi: 10.1029/2000JD000071
- Hou, S. G., Qin, D. H., Ren, J. W., et al., 1999. The present environmental processes of the pH and conductivity records in the glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 21(3): 225—232 (in Chinese with English abstract).
- Karl, J. K., Edward, R. S., 2000. Major element, rare earth element, and sulfur isotopic composition of a high-elevation firn core: sources and transport of mineral dust in central Asia. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 1 (13): 2000GC000082. doi: 10.1029/2000GC000082
- Lee, X., Qin, D., Jiang, G., et al., 2003. Atmospheric pollution of a remote area of Tianshan Mountain: ice core record. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D14): 4406—4416. doi: 10.1029/2002JD002181
- Li, J. F., 1991. The climate of Xinjiang. Meteorology Press, Beijing, 5—73 (in Chinese).
- Li, Z. Q., Edwards, R., Thompson, E. M., et al., 2006. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Ürümqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China. *Annals of Glaciology*, 43(1): 250—256. doi: 10.3189/172756406781812069
- Li, Z. Q., Li, C. J., Li, Y. F., et al., 2007. Preliminary results from measurements of selected trace metals in the snow-firn pack on Ürümqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*, 53(182): 368—373. doi: 10.3189/002214307783258486
- Li, Z. Q., Lu, G. X., Liu, B. Z., et al., 1999. Ice core dust particulate by XPS-SEM/ED AX: impact of dust particulate on SO_4^{2-} record in ice cores. *Chinese Science Bulletin*, 44(15): 1424—1427. doi: 10.1007/BF02885997
- Li, Z. Q., Yao, T. D., Xie, Z. C., 1995. Modern atmospheric environmental records in Guliya Ice Cap of Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 40(10): 874.
- Mori, I., Nishikawa, M., Tanimura, T., et al., 2003. Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport. *Atmospheric Environment*, 37(30): 4253—4263. doi: 10.1016/S1352-2310(03)00535-1
- Olivier, S., Blaser, C., Brutsch, S., et al., 2006. Temporal variations of mineral dust biogenic tracers and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai. *Journal of Geophysical Research*, 111(D5)D0539. doi: 10.1029/2005JD005830
- Schotterer, U., Stiehler, W., Ginot, P., 2004. The influence of post-depositional effects on ice core studies: examples from the Alps, Andes, and Altai. In: De Wayne Cecil, L., Green, J. R., Thompson, L. G., eds., *Earth paleoenvironments: records preserved in mid- and low-latitude glaciers*. Dordrecht, etc., Kluwer, 39—59. doi: 10.1007/1-4020-2146-1-3
- Stiehler, W., Schotterer, U., Föhlich, K., et al., 2001. Influence of sublimation on stable isotope records recovered from high-altitude glaciers in the tropical Andes. *Journal of Geophysical Research*, 106(19): 22613—22620. doi: 10.1029/2001JD900179
- Wake, C. P., Mayewski, P. A., Li, Z., et al., 1994. Modern eolian dust deposition in central Asia. *Tellus* 46(3): 220—233. doi: 10.1034/j.1600-0889.1994.t01-2-00005.x
- Wake, C. P., Mayewski, P. A., Wang, P., et al., 1992. Anthropogenic sulfate and Asian dust signals in snow from Tien Shan, Northwest China. *Annals of Glaciology*, 16: 45—52.
- Wang, D. H., Zhang, P. Y., 1985. On the valley climate of Urumqi river in the Tianshan Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 7(3): 239—248 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Li, Z., You, X., et al., 2006. Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Ürümqi glacier No. 1 percolation zone, eastern Tien Shan, China. *Annals of Glaciology*, 43(1): 245—249. doi: 10.3189/172756406781812041
- Wolff, E. W., Hall, J. S., Mulvaney, R., et al., 1998. Relationship between chemistry of air, fresh snow and firn cores for aerosol species in coastal Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 103(D9): 11 057—11 070. doi: 10.1029/97JD02613
- Yang, S. H., Wu, Y. B., Liu, X. C., et al., 2009. U-Pb Ages of detrital zircon from meta-sedimentary rock from the Huwan shear zone, western Dabie terrain and their geological significance. *Earth Science—Journal of China*

- University of Geosciences*, 34(1): 179—188 (in Chinese with English abstract).
- Yao, T. D., Masson, V., Jouzel, J., et al., 1999. Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River basin, East Tianshan Mountains, China. *Geophysical Research Letter*, 26(23): 3473—3476. doi: 10.1029/1999GL006061
- Zhang, Z. G., Fang, N. Q., Du, Y. S., et al., 2009. Geochemical characteristics and their causative mechanism of polymetallic nodules from the Northwest continental margin of the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 955—962 (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-firn transfer of NO_3^- on Ütümqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China. *Annals of Glaciology*, 43(1): 239—244. doi: 10.3189/172756406781812410
- ### 附中文参考文献
- 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等, 2009. 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. *环境科学*, 30(6): 240—247.
- 侯书贵, 秦大河, 任贾文, 等, 1999. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 pH 和电导率记录的现代环境过程. *冰川冻土*, 21(3): 225—232.
- 李江风, 1991. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 5—73.
- 李忠勤, 姚檀栋, 谢自楚, 1995. 大气气溶胶中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 研究. *地球科学进展*, 10(3): 289—295.
- 王德辉, 张丕远, 1985. 天山乌鲁木齐河谷气候特征. *冰川冻土*, 7(3): 239—248.
- 杨赛红, 吴元保, 刘小驰, 等, 2009. 西大别-淮湾高压变质带变沉积岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(1): 179—188.
- 张振国, 方念乔, 杜远生, 等, 2009. 南海西北陆缘多金属结核地球化学特征及成因. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(6): 955—962.
- 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.