

# 乌鲁木齐河源1号冰川雪-冰界面化学离子的迁移研究

王莉霞<sup>1</sup>, 尤晓妮<sup>1,2</sup>, 李忠勤<sup>2</sup>

(1. 天水师范学院 资源与环境工程学院, 甘肃 天水 741001;

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:** 为讨论主要化学离子在雪-冰界面的迁移, 对采自乌鲁木齐河源1号冰川海拔4130m处的73组连续雪冰样品中8种主要化学离子的浓度变化进行了分析。结果表明: 尽管不同离子浓度变化存在一定差异, 但总体而言, 雪层底部干季(11月至次年3月)8种主要化学离子浓度平均值高于湿季(4月~10月), 而冰层顶部8种主要化学离子浓度平均值干季低于湿季; 干季主要离子浓度的雪冰比平均值大于湿季, 湿季恰好相反, 雪层底部各离子的浓度均低于冰层顶部的浓度; 雪-冰两种界面上主要化学离子的迁移反映了冰芯记录被保存的过程, 受到离子活性、物源、融水、气温变化等多因素的综合影响。

**关键词:** 乌鲁木齐河源1号冰川; 8种化学离子浓度; 雪-冰界面

**中图分类号:** P931.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-1351(2017)02-0032-06

冰芯记录在恢复气候、环境和人类活动的历史变化方面意义深刻。<sup>[1-3]</sup>大气中的化学成分在经历了气-雪界面的化学过程, 到达冰川表面后, 会通过蒸发、扩散、消融、渗浸等作用, 改变了保存在冰芯中的环境信息。已有研究表明,<sup>[4-10]</sup>冰芯记录不同程度地受到融水渗浸等沉积后过程的干扰, 经过干扰后的记录将成为冰芯记录的最终形式,<sup>[11-12]</sup>为了深入探讨沉积后过程雪冰离子保存和冰芯记录的形成, 有必要基于长时间序列的雪坑离子数据, 对各种化学离子在雪坑中的迁移特征进行系统研究。本文基于乌鲁木齐河源1号冰川2005年3月至2006年11月的连续取样分析, 探讨雪坑中雪-冰两种不同界面间离子的迁移特征和影响因素, 其结果不仅有助于正确评估已有的冰芯记录, 还可以对冰芯中的气候环境信息进行修正, 为冰芯记录更好地解释全球或区域尺度气候环境变化服务。

## 1 样品采集与分析

本项研究中观测取样定位场位于1号冰川东支海拔4130m处的粒雪盆后壁, 处在冰川渗浸冻结带内。采样期间, 该处年平均气温为-9.1℃, 年降水量为700 mm。最大降水量发生在夏季, 并伴随有最

大消融现象。具体采样过程详见参考文献。<sup>[13-14]</sup>本研究分析的样品采集于2005年3月至2006年11月, 经历了湿季-干季-湿季的连续变化过程, 取样频率为一周一次, 共取得73组连续的雪坑剖面。

本研究分析的化学成分主要为常规化学离子。离子分析使用Dionex-320离子色谱仪进行分析。阳离子分析时, 采用15mmol/L MSA淋洗液, Dionex IonPac CS12A(4×250mm)分离柱, CG12A(4×50mm)保护柱, CAES阳离子抑制器; 阴离子分析时采用15mmol/L NaOH淋洗液, AS11-HC(4×250mm)分离柱, AG11-HC(4×50mm)保护柱, ASRS-4mm抑制器。

## 2 分析与讨论

### 2.1 雪-冰界面化学离子迁移的季节变化

根据1号冰川采样区降水的年内变化特征, 将全年分为干季(11月1日至次年3月31日)与湿季(4月1日~10月31日)。本研究选取每组雪坑中雪层最底部和冰层最顶部相邻的2个样品作为雪-冰界面离子迁移的介质, 利用Origin软件绘制出8种主要化学粒子浓度的波动变化曲线(图1, 图2)。参照5点滑动距平值可以发现, 雪-冰界面不同化

收稿日期: 2017-01-03

作者简介: 王莉霞(1980-), 女, 甘肃天水人, 天水师范学院资源与环境工程学院讲师, 硕士。

通讯作者: 尤晓妮(1980-), 女, 甘肃陇南人, 天水师范学院资源与环境工程学院副教授, 博士。

基金项目: 国家自然科学基金项目“冰心钻取地点气象要素与冰芯记录形成过程及其分辨率的关系研究”(20873999)阶段性成果

学粒子浓度均存在明显的季节变化特征。

雪层底部、冰层顶部各化学离子浓度平均值见表1, 表2。从表中可以看出, 雪层底部8种主要化学粒子平均浓度干季大于湿季, 冰层顶部8种主要化学粒子平均浓度湿季大于干季; 雪层底部和冰层顶部两个不同的界面上, 无论干季还是湿季, 离子浓度最大的是 $\text{Ca}^{2+}$ , 最小的是 $\text{K}^+$ , 推测与这两种离子的来源有关。

表1 雪层底部各化学离子浓度平均值(单位: $\mu\text{g L}^{-1}$ )

时间	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{k}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
干季	171	284	254	103	103	41	119	530
湿季	126	177	196	80	83	27	90	400

表2 冰层顶部各化学离子浓度平均值(单位: $\mu\text{g L}^{-1}$ )

时间	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{k}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
干季	124	173	147	51	87	18	47	367
湿季	356	1049	446	254	111	62	122	1187

雪层底部的8种主要化学粒子浓度在干季保持相对较高的浓度, 8种主要离子的极端峰值均出现在干季, 其中 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 的波动变化具有相似性, 但峰值的个数和峰值出现的时间略有差异。从 $\text{Cl}^-$ 浓度的变化图中可以看出, 进入湿季后的7个月中出现明显波动变化, 形成5月中旬(最高值 $150\mu\text{g L}^{-1}$ )、6月中旬(最高值 $131\mu\text{g L}^{-1}$ )和9月上旬(最高值 $161\mu\text{g L}^{-1}$ )3个峰值时段; 10月中旬以来, 离子浓度在波动中迅速上升, 在11月下旬达到了2005年的最大值 $254\mu\text{g L}^{-1}$ 。雪层底部 $\text{NO}_3^-$ 在进入湿季后的3个月中出现明显的波动, 在4月中旬(最高 $155\mu\text{g L}^{-1}$ )和5月下旬形成了2个峰值时段, 5月下旬以后, 雪层中的 $\text{NO}_3^-$ 浓度变化幅度很小, 浓度值处于较低的水平; 10月以来, 浓度值在波动中上升, 10月10日出现峰值 $204\mu\text{g L}^{-1}$ , 随后进入干季, 2006年3月初达到最大值。雪层底部 $\text{NH}_4^+$ 在进入湿季后的4个月中出现明显的波动, 在4月中旬和5月中旬形成了2个峰值时段, 其峰值分别为 $165\mu\text{g L}^{-1}$ 和 $119\mu\text{g L}^{-1}$ ; 5月下旬以后, 雪层中的 $\text{NH}_4^+$ 波动减小, 到7月下旬出现最小值 $17\mu\text{g L}^{-1}$ , 随后又开始波动回升, 到11月下旬达到一年中的最大值 $188\mu\text{g L}^{-1}$ 。雪层底部 $\text{K}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 的浓度波动变化曲线具有相似性。 $\text{K}^+$ 在进入湿季的6个月中峰值出现的频率与强度相对于 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 等则大大增强, 4月下旬出现峰值 $53\mu\text{g L}^{-1}$ , 在随后的5个月中, 频繁波动, 到10月下旬出现峰值 $46\mu\text{g L}^{-1}$ , 进入干季后, 波动中回升, 在11月下旬浓度值为 $79\mu\text{g L}^{-1}$ , 为一年中的最大值。

比较图1、图2可以看出, 冰层顶部主要离子

浓度的变化与雪层中的变化趋势并不同步, 有较大的差异, 这表明离子在雪-冰界面发生着迁移。冰层顶部的8种主要化学粒子浓度进入湿季后一直保持相对较高, 极端峰值均出现在湿季, 其中 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 的波动变化、波动幅度均具有相似性, 但峰值出现的时间略有差异。从 $\text{Cl}^-$ 浓度的变化图中可以看出, 在进入湿季后的7个月中出现明显的波动, 形成了4月中旬( $414\mu\text{g L}^{-1}$ )、5月中旬( $728\mu\text{g L}^{-1}$ )、6月上旬( $672\mu\text{g L}^{-1}$ )、8月上旬( $719\mu\text{g L}^{-1}$ )与10月初( $599\mu\text{g L}^{-1}$ )的5个峰值时段, 10月中旬以后,  $\text{Cl}^-$ 浓度迅速降低, 在整个干季,  $\text{Cl}^-$ 浓度处于相对较低水平且变化幅度很小。冰层顶部 $\text{NO}_3^-$ 在进入湿季初期保持相对较低, 进入5月后迅速增加, 从5月初的 $97\mu\text{g L}^{-1}$ 迅速增加到5月中旬的 $1271\mu\text{g L}^{-1}$ , 之后在6月中旬( $584\mu\text{g L}^{-1}$ )、7月中旬( $344\mu\text{g L}^{-1}$ )、10月初( $524\mu\text{g L}^{-1}$ )出现了3个峰值时段, 10月中旬以后, 浓度变化幅度很小, 处于相对较低水平。进入湿季后冰层顶部 $\text{NH}_4^+$ 在波动上升, 6月初出现峰值 $288\mu\text{g L}^{-1}$ , 6月上旬至8月中旬在波动中下降, 之后依然处于波动变化中但没有出现较高的峰值。陆源离子 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度的波动变化频率和幅度在冰层顶部更剧烈。冰层顶部 $\text{Ca}^{2+}$ 的浓度在进入湿季之前基本稳定, 在进入湿季的前3个月明显波动, 出现5月中旬( $2296\mu\text{g L}^{-1}$ )、6月中旬( $3012\mu\text{g L}^{-1}$ )和7月中旬( $2285\mu\text{g L}^{-1}$ )三个峰值时段, 7月中旬后迅速下降, 8月初到达最低值 $257\mu\text{g L}^{-1}$ , 之后在波动中上升, 与9月30日升至最高 $3024\mu\text{g L}^{-1}$ , 10月中旬到下一个干季, 变化幅度很小, 一直处于较低的水平。总体而言, 冰层顶部的8种主要离子, 在湿季保持较高的水平, 极端峰值均出现在湿季; 在干季离子浓度维持较低水平, 干季的变化幅度除 $\text{NH}_4^+$ 外, 其他离子浓度变化幅度均比雪层底部小。

## 2.2 雪-冰界面间主要化学离子浓度差异的季节变化

雪-冰界面存在两种不同介质, 成为各种离子被保存的重要区间。以暖型成冰过程为主的1号冰川, 其成冰过程以融化-再冻结过程为主, 故而冰-雪界面成为该过程的主要载区, 存在着较为复杂的物质迁移和能量转化。为了判断不同离子在雪-冰界面之间是否存在迁移现象, 引入雪冰比(即雪层底部与冰层顶部离子浓度的比值), 根据同种离子浓度的相对大小, 判断不同离子在雪-冰界面之间的迁移现象。从雪-冰界面间8种主要化学离子浓度雪冰比的季节变化来看(图3), 干季的雪冰比平均值大于湿季的平均值, 也就是说, 干季雪层底

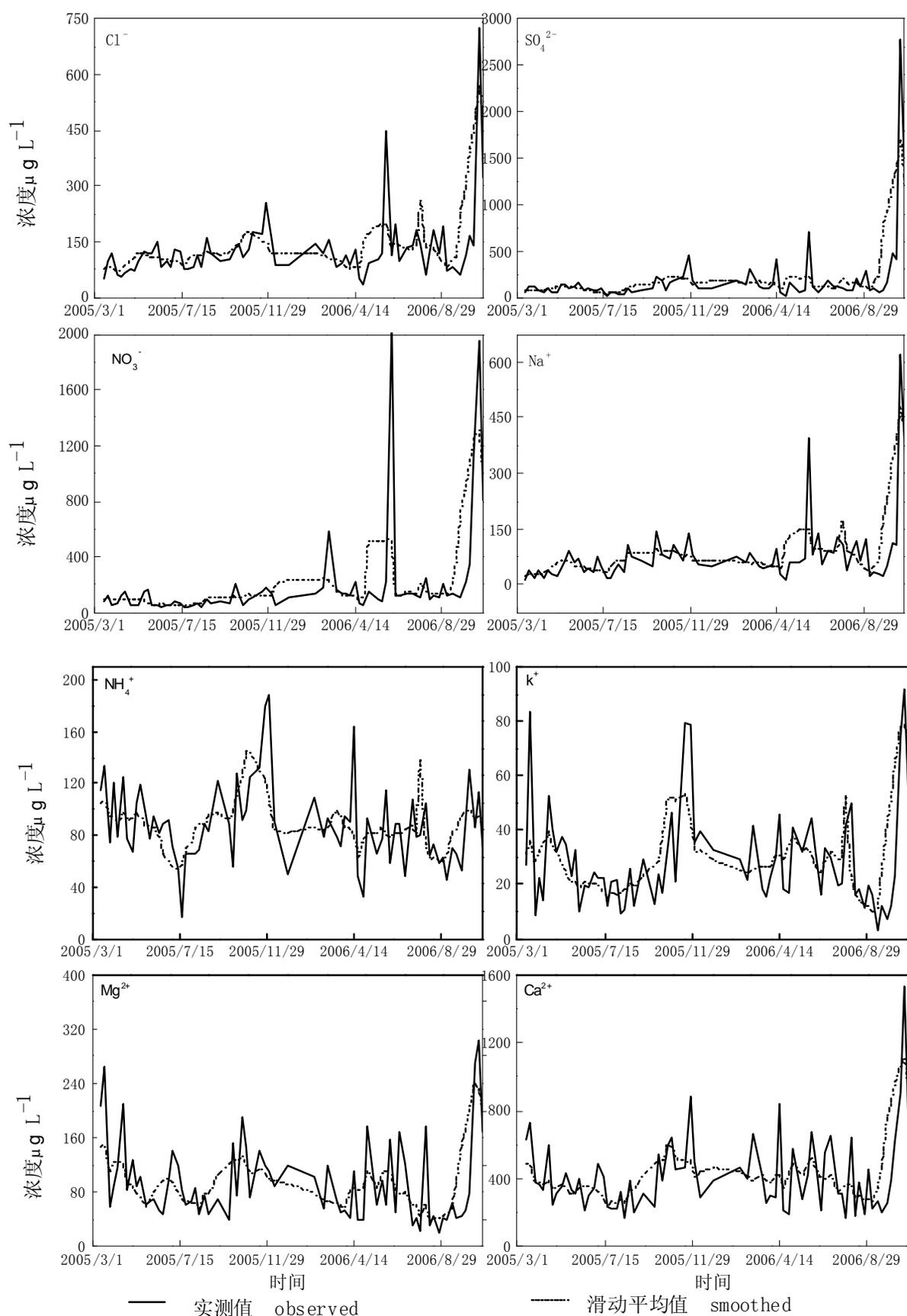


图1 2005年3月~2006年11月雪层底部8种主要离子浓度变化曲线

部各离子的浓度均高于冰层顶部的浓度，湿季恰好相反，雪层底部各离子的浓度均低于冰层顶部的浓度。从8种主要化学粒子浓度的5点滑动平均值可以发现，干季、湿季的界线与冰雪比有较好的对应

关系，干季8种主要化学粒子浓度的雪冰比均大于1，湿季均小于1。

总的来看，8种主要化学粒子浓度雪冰比的变化趋势基本相近，均表现出明显的波动变化，其差

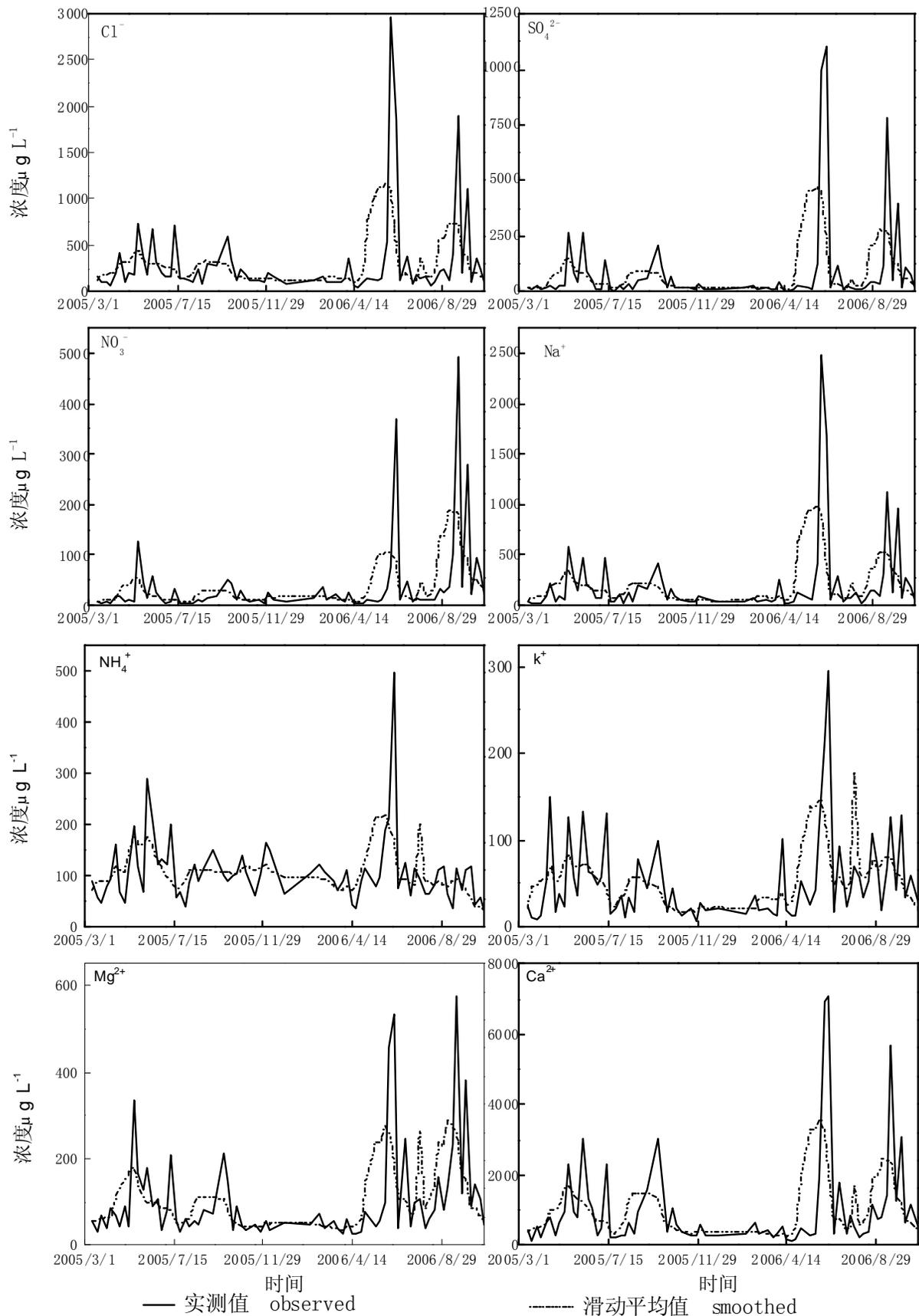


图2 2005年3月~2006年11月冰层顶部8种主要离子浓度变化曲线

异主要表现在：(1) 湿季波动变化的幅度不同。在湿季，呈现出2个较为明显的低谷的离子有  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ，出现的时间均在2005年4~5月和9~10月； $\text{NH}_4^+$ 只有1个低谷，出现

在6~7月； $\text{k}^+$ 在湿季的波动变化幅度很小。(2) 雪冰比的峰值多出现在干季，8种主要化学离子的极大值顺序为  $\text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^-$ 。

### 2.3 主要化学离子在雪-冰界面迁移的影响因素

分析

融水渗浸作用导致雪-冰界面不同离子的迁移。前期的研究结果可得，不同时段形成的离子浓度峰值从粒雪进入附加冰中的时间存在一定的差异。<sup>[12]</sup>乌鲁木齐河源1号冰川，地处中纬度山地，

受到夏季消融的影响，融水渗浸作用是携带各种化学成分在雪层中发生移动和传输的主要原因，同时也是重要的成冰作用。融水在下渗的过程中带动离子迁移，使一部分离子在雪层底部堆积，遇冷后冻结作用使雪层底部的冰面抬升。研究表明，湿季是

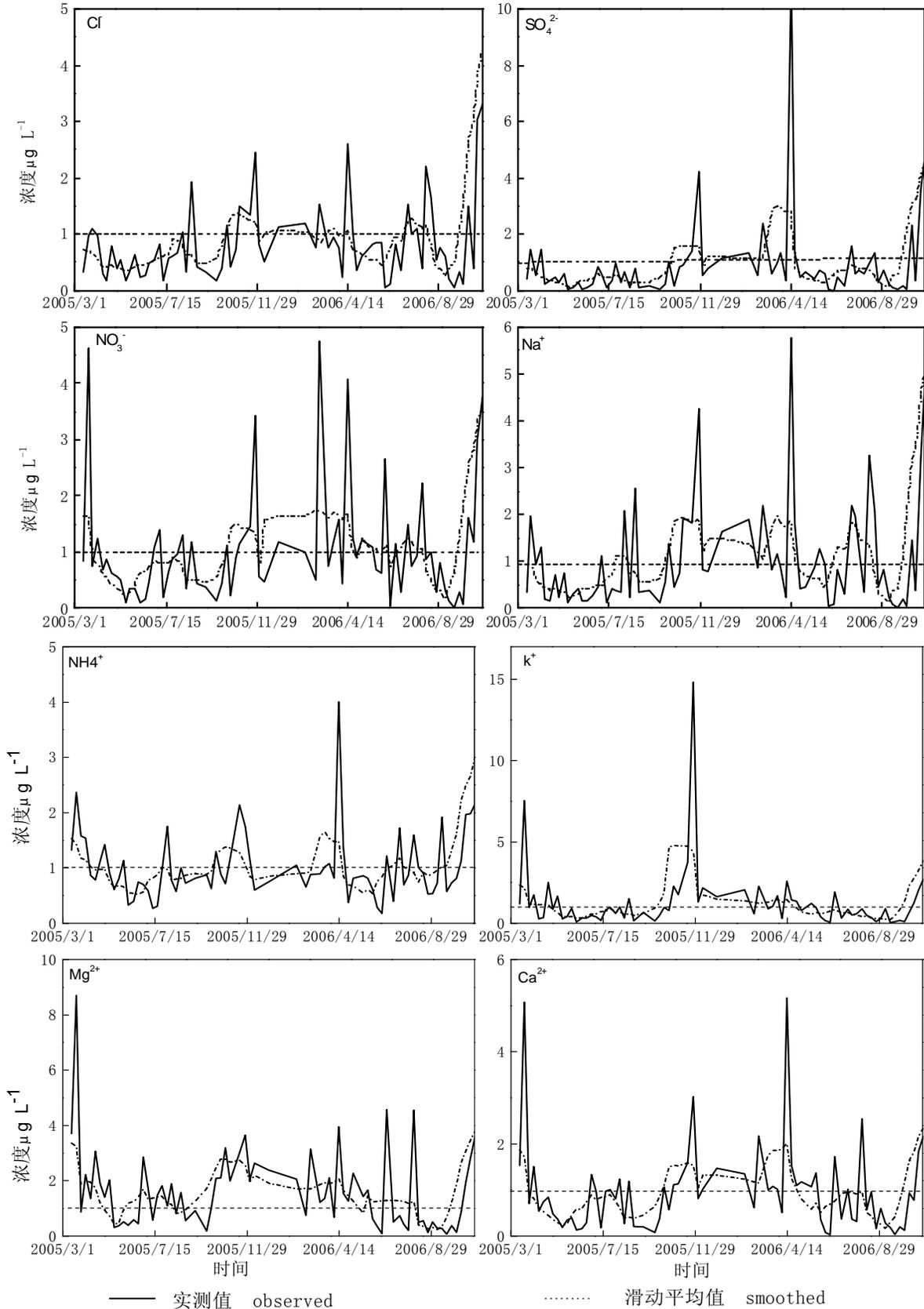


图3 2005年3月~2006年11月雪-冰界面上8种离子浓度雪冰比的变化

冰面离子浓度高值期,这与湿季的融水渗浸作用密切相关。一方面融水本身携带有较丰富的化学离子信息,其次,融水下渗过程容易遇冷发生冻结而产生离子聚集,使得湿季冰层底部的离子浓度高于雪层底部的离子浓度。

气温变化引起的淋溶作用强弱是导致雪-冰界面离子迁移和离子浓度差异的重要原因。气温对淋溶过程有良好的指示作用,湿季,伴随着气温的逐渐回升,雪层中的淋溶作用增强,融水增多。可溶性离子随融水流失向下迁移,在遇到雪层底部的冰层时,由于冰面温度更低,在冰面上发生冷凝,使得局部的离子浓度有变化。离子来源的不同、来源物的季节差异及其离子活性导致雪坑中雪-冰界面离子浓度差异变化。

### 3 结论与展望

经过研究发现,尽管不同离子浓度变化存在一定差异,但总体而言,雪层底部干季8种主要化学离子浓度平均值高于湿季,冰层顶部8种主要化学离子浓度平均值干季低于湿季;雪-冰两种界面上主要化学离子的迁移反映了冰芯记录被保存的过程,受到离子活性、物源、融水、气温变化等多因素的综合影响。为保证利用冰芯记录反演古气候提供可靠的信息,今后还将进一步开展相关研究。在对冰川积累区雪-冰界面上离子迁移过程的定性分析的基础上,尝试建立从雪坑到冰层化学离子迁移过程的定量关系模型,探讨离子浓度在形成稳定冰芯记录之前的损失情况,来解释冰芯记录的断层现象,提高冰芯记录的分辨率。

#### 参考文献:

[1] THOMPSON,L.G.,A 1000 year climatic ice-core record from the Guliya ice cap,China:its relationship to global climate variability[J].Annals of Glaciology,1995,(21):175-181.  
[2] GINOTP,KULL C,SCHWIKOWSKIM..Effects of postdepo-

sitional processes on snow composition of a subtropical glacier(Cerro Tapado,Chilean Andes) [J].J.Geophys.Res.,2001,106(23):32375-32386.

[3] 康世昌,秦大河,姚檀栋,Cameron P.Wake.西夏邦马峰冰川粒雪中环境季节变化记录研究,地理学报,2000,55(1):55-65.  
[4] 侯书贵,秦大河.积雪淋融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.  
[5] 侯书贵,秦大河,任贾文,等.东南极内陆地区和乌鲁木齐河源1号冰川表层雪内 $\text{NO}_3^-$ 沉积后过程差异[J].极地研究,1999,11(2):81-87.  
[6] 何元庆,姚檀栋,杨梅学,等.玉龙雪山温冰川浅冰芯记录现代指示意义[J].冰川冻土,2000,22(3):235-242.  
[7] HOU SHUGUI,QIN DAHE,REN JIAWEN.Different post-depositional processes of  $\text{NO}_3^-$  in snow layer in East Antarctica and on the northern Qinghai-Tibetan Plateau[J].Annals of Glaciology,1999,(29):73-76.  
[8] 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号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川为例[J].地球科学进展,2008,23(12):1268-1276.  
[9] 李向应,秦大河,韩添丁,等.中国西部冰冻圈地区大气降水化学的研究进展[J].地球科学进展,2011,30(1):3-16.  
[10] 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].2010,冰川冻土,32(3):505-513.  
[11] 侯书贵,秦大河,皇翠兰.唐古拉山冬克玛底冰川雪层中淋溶作用的初步研究[J].冰川冻土,1996,18(3):227-234.  
[12] 王圣杰,张明军,王飞腾,等.乌鲁木齐河源1号冰川雪-冰界面含氮离子迁移研究[J].地球学报,2011,32(6):699-706.  
[13] 尤晓妮,李忠勤.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):1164-1170.  
[14] 尤晓妮,李忠勤,王飞腾.利用雪层层位跟踪法研究暖型成冰作用的年限问题——以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J].冰川冻土,2005,27(6):853-860.

[责任编辑 王小风]