

文章编号:1001-8166(2006)05-0487-09

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪坑中 pH 值和电导率的季节变化及淋溶过程*

李向应¹, 李忠勤¹, 陈正华², 赵中平¹, 尤晓妮¹, 朱宇漫¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室, 天山冰川站, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:自 2002 年 9 月 14 日至 2004 年 9 月 28 日, 在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区雪坑中连续观测取样, 频率为 1 次/周。对表层雪样品和粒雪坑样品的 pH 值和电导率进行了分析。结果表明, 表层雪的 pH 值和电导率具有明显的季节变化趋势, 与本区域的主导山谷风风向 NE 和 ENE 密切相关。在春季, 由于尘暴发生频率的增加, 表层雪的 pH 值呈现较强碱性, 电导率达到最大值; 在冬季, 由于原生气溶胶向次生气溶胶的转化, pH 值呈现较弱碱性, 电导率达到最小值。在后沉积过程中(2003 年 10 月 4 日至 2004 年 9 月 8 日), 雪坑中不同时期的 pH 值和电导率呈现不同的季节变化特征和淋溶过程。电导率的峰值 P1 进入粒雪冰的时间比与它相对应的大粒径(直径 > 10 μm)微粒的浓度峰值提前 40 天左右; 在有的雪坑中, pH 值和电导率的峰值出现在污化层附近, 与污化层的位置有较好的一致性, 说明污化层对可溶性离子的淋溶作用可能有一定的影响。相关分析表明, Ca^{2+} 是影响表层雪中 pH 值和电导率变化的最主要离子。

关 键 词:1 号冰川; 雪坑; pH 值; 电导率; 季节变化; 淋溶过程

中图分类号:P343.6 **文献标识码:**A

1 引 言

冰川内部含有丰富的古大气化学信息, 在恢复其记录的过程中, 冰芯记录以其分辨率高、保真度强、气候环境信息丰富、时间序列长等独特优点占据了非常重要的地位^[1~3]。格陵兰和南极冰盖钻取的冰芯包含有成百上千年以前的大气化学信息, 这为重建和恢复古大气化学记录提供了手段^[4~7]。极地冰芯 pH 值和电导率的研究满足了重建古大气化学纪录的要求^[8~10]。Wolff 等^[9]和效存德等^[11]对南、北极和青藏高原雪冰内的电导以及大气化学载荷的相关关系做了比较细致的工作。研究指出, 格陵兰

冰芯中的电导记录是大气酸度背景值的反映, 由暖期(冰呈酸性)向冷期(冰呈碱性)有着明显的变化; 冰芯中的酸度主要受有中和能力的碱性粉尘数量的控制。然而, 青藏高原雪冰电导率主要依赖于地壳来源的碱性矿物盐类杂质(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等), 与雪冰酸度(即 H^+)呈反相关; 极地冰盖雪冰电导率依赖于海洋性来源的酸根离子(如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等), 与雪冰酸度成正相关。但在北极地区, 雪冰电导率与各离子的关系存在着复杂的地域分异。姚檀栋等^[12]和盛文坤等^[13,14]对青藏高原雪冰内的 pH 值和电导率也开展了诸多研究工作。指出, 青藏高原原冰雪化学性质多呈碱性, 冰雪的比电导与 pH 值

收稿日期:2005-10-19; 修回日期:2006-03-29.

* 基金项目:国家自然科学基金项目“冰芯记录形成过程中的几个基本问题研究”(编号:40571033); 国家自然科学基金项目“天山乌鲁木齐河源 1 号冰川与奎屯河哈希勒根 51 号冰川冰雪过程观测与研究”(编号:40371028); 国家野外台站基金项目“乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰环境记录形成过程的观测与研究”(编号:052062); 国家自然科学基金创新群体项目“冰芯与寒区环境”(编号:40121101)资助。

作者简介:李向应(1978-), 男, 陕西蒲城人, 硕士研究生, 主要从事寒区水文化学与环境研究. E-mail: shaanxilxy@163.com

呈正相关关系,与 H^+ 浓度呈负相关关系,使比电导增大的因素是碱性尘埃中的可溶盐。古里雅冰芯 pH 值呈碱性的变化主要受 CO_2 气体及尘埃中可溶性碳酸盐的控制。若冰芯中电导率与 pH 值呈平行变化趋势,说明相应时期的气候环境相对较稳定、风暴较小;若电导率和 pH 值呈相反变化趋势,说明气候环境不稳定、风暴强烈。此外,降水多、气候环境相对较湿润,冰芯中的 pH 值较低,电导率也较低;降水少、气候环境相对较干旱,冰芯中的 pH 值较高,电导率也较高。侯书贵等^[15]和李心清等^[16]对天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪冰中的 pH 值和电导率也进行了研究。认为在消融率较大和融水渗浸作用较强的内陆地区, pH 值和电导率记录仍可合理的反演沉积时的大气环境状况;并且指出 1 号冰川冰芯的 pH 值较自然降水的要高,且较世界其它偏远地区的也高是由于矿物性粉尘的强力输入,尤其是碳酸盐。然而,在山地冰川中依据 pH 值和电导率进行雪—冰现代过程的研究还很少,这主要是由于长期观测和连续取样条件的限制。鉴于此,本文依托中国科学院天山冰川观测试验站和乌鲁木齐市大西沟气象站对天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪坑中 pH 值和电导率在后沉积过程中的季节变化和淋溶过程进行了详细研究,并结合大西沟气象站的气象资料(气温、降水、风速风向、相对湿度、大气压等)对影响 pH 值和电导率的因素进行了具体分析。

2 取样点位置

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 ($43^{\circ}06'N$, $86^{\circ}49'E$)位于中亚的东天山,即天山东部。东天山位于欧洲大陆中部,四周被沙漠和戈壁包围:东面有蒙古的沙漠和戈壁,南面有位于塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠,西面有萨雷—伊施科特劳等中亚地区的沙漠,北面有位于准格尔盆地的古尔班通古特沙漠^[16](图 1)。东天山地处荒漠环境、植被覆盖面积极小;但在天山某一海拔高度带上仍具有不同程度的植被覆盖,在山谷底部海拔 1 500 ~ 2 900 m 的山地环境中存在自然林带,在海拔 2 900 m 以上是高山草垫、贫瘠的岩石和冰川沉积物,海拔 3 000 m 以上是永久冻结带^[17]。在典型大陆性气候条件下,西风带在天山上空起着主导作用,地形的影响使西风带在海拔 4 000 m 以上处于气旋与反气旋的循环之中,近地表局地的山谷风在每年的 3 ~ 9 月盛行^[18,19]。天山乌鲁木齐河源 1 号冰川是一条山谷冰川,由东 (1.1 km^2)、西 (0.61 km^2) 两支组成,总面积 1.73 km^2 ,平均海拔 4 330 m^[20]。1 号冰川东、西支及整个冰川多年平均零平衡线高度分别为:4 016 m、4 095 m 和 4 056 m;西支零平衡线高度平均高于东支,但相对变幅比东支小^[21]。自 1993 年 1 号冰川完全分为 2 支,特别是 1996 年以后,气温持续升高(冬季升温更加明显),零平衡线呈现显著的

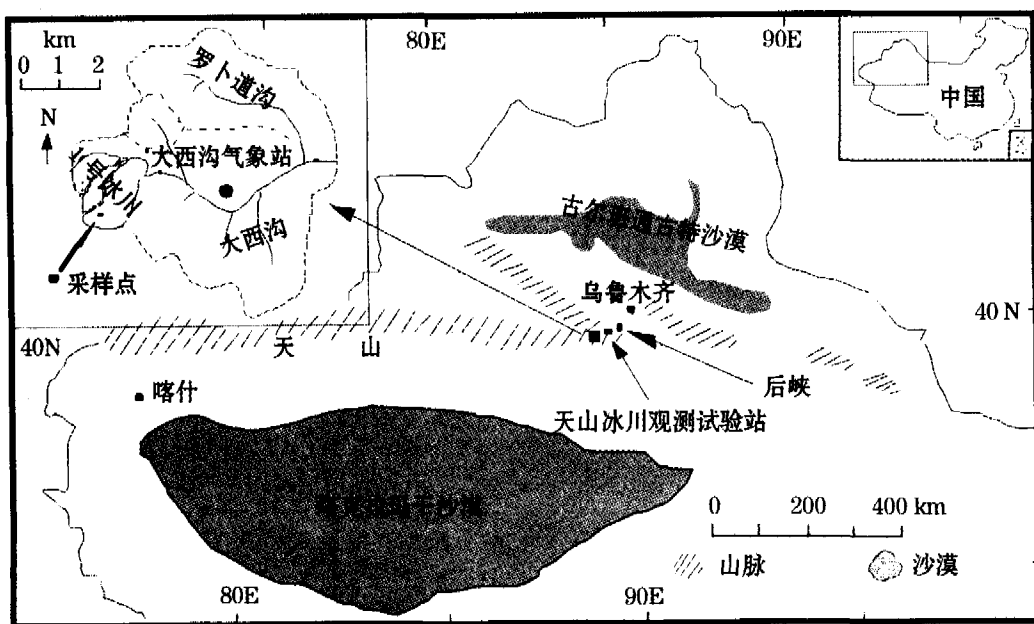


图 1 研究区域的地理位置

Fig.1 The location map of study area

升高趋势^[22];冰川冰舌部分,东支年退缩量、变幅均较小,西支退缩量明显大于东支^[23]。除了气温升高在冰川退缩中的支配作用外^[24],冰川分离后冰舌末端更加陡峭和冰面、冰下河发育等因素也是造成冰川退缩速度显著增大的原因。年平均气温为 -9.1°C ,降水为 700 mm/a ,降水主要发生在 $5\sim 9$ 月,冰川消融在这段时期也达到最大。野外观测表明,采样点所在的渗浸带雪坑的深度在 1.5 (夏末) $\sim 3\text{ m}$ (春末)内波动变化。冬季由于雪的密实化、风吹雪和升华作用的影响,雪坑的深度较为稳定、变化不大。夏初随着气温上升到 0°C ,雪坑上部的雪层开始融化,雪坑深度迅速减小。在夏末至秋初这段时期,由于消融加剧,融水下渗,对下部雪层、甚至上一年的积累产生影响^[25]。

3 样品采集和分析

样品采集于天山乌鲁木齐河源1号冰川东支渗浸带积累区海拔 $4\,130\text{ m}$ 处的雪坑中,大约 100 个表层雪样品(2002年9月14日至2004年9月28日)和 $1\,018$ 个粒雪坑样品(2003年10月4日至2004年9月8日)在本项研究中得以分析和应用,取样频率为 1 次/周。表层雪样品取自雪坑顶部表层 5 cm 处,粒雪坑样品在取完表层雪样品后,沿雪坑剖面继续向下以每 10 cm 间距连续取样直至粒雪冰面。样品在采集和运输的过程中均采取严格的操作规范,包括使用聚乙烯手套和面具等以避免污染。采样后雪坑被重新填埋、直至下次采样时在上次采样位置重新挖开并向前挖进 0.5 m 左右,在与上次

相同的层位上取样。雪冰样品在冷冻状态下装入聚乙烯塑料瓶中,装完样品后立即封闭以避免蒸发和扩散。样品保持在冷冻状态下置于绝缘的铁箱中被运输到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所天山冰川观测试验站实验室进行 pH 值、电导率和化学离子等的分析。空白实验表明,不同季节相邻雪坑间的离子浓度具有较高的相关性,说明在样品的采集、运输和测量过程中样品没有受到污染。pH 值和电导率使用 PHJS-4A(0.001)和 DDSJ-308A(0.001)测量;在仪器使用前,均应用 pH 值为 6.86 和 9.18 的标准缓冲溶液对仪器的电极进行校正;在样品测量前,首先用部分样品对电极进行清洗,每个样品测量完后再用去离子水清洗,后浸入新鲜和静止的样品中, 5 分钟后得到经温度补偿后的 pH 值。应用光学粒径监测仪(AccuSizer 780A)对微粒的大小和浓度进行分析,使用离子色谱仪(DX-320)对雪一粒雪样品中主要化学离子(Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等)的浓度进行测量。本文着重对分析测定结果中的 pH 值和电导率进行专项研究。

4 结果与讨论

4.1 季节变化

图2表示表层雪中 pH 值和电导率随时间的变化规律。如图2所示,表层雪的 pH 值在春、夏、秋、冬季的变化范围分别为: $6.14\sim 8.05$ 、 $5.79\sim 7.61$ 、 $6.08\sim 7.02$ 、 $5.91\sim 6.88$;电导率的变化范围分别为: $4.43\sim 63.1\text{ }\mu\text{s/cm}$ (春季)、 $2.14\sim 95.5\text{ }\mu\text{s/cm}$ (夏季)、 $2.94\sim 17.77\text{ }\mu\text{s/cm}$ (秋季)、 $2.85\sim 20.3\text{ }\mu\text{s/cm}$ (冬季)。

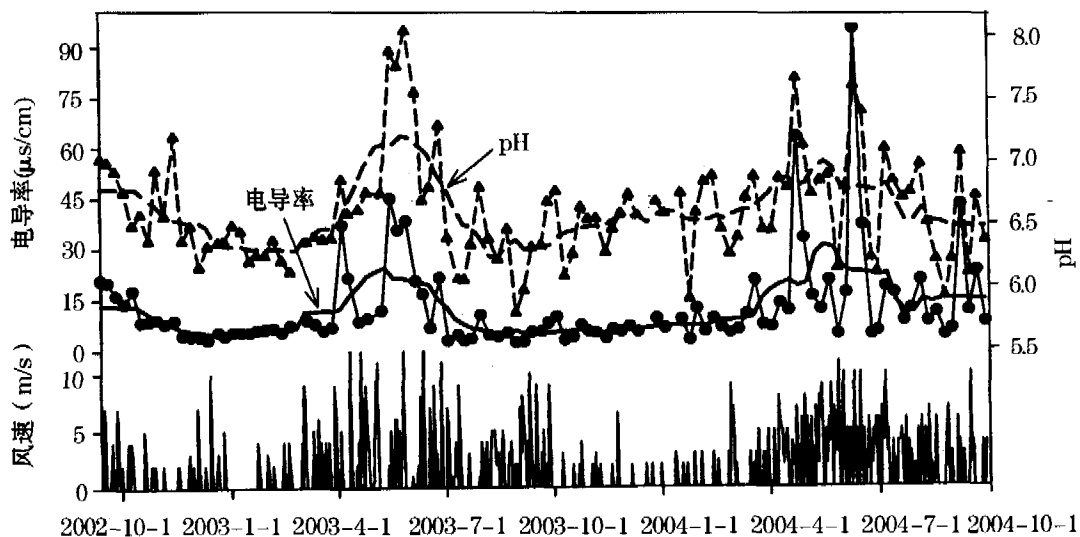


图2 表层雪中的 pH 值和电导率随时间的变化以及与风速风向(NE 和 ENE)的关系

Fig. 2 Variations of pH and electrical conductivity in surface snow in relation to valley wind (in NE and ENE direction)

cm(冬季)。表层雪的 pH 值在春、夏、秋、冬季的平均值分别为:6.99、6.62、6.56、6.45;电导率的平均值分别为:22.73 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (春季)、13.93 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (夏季)、7.41 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (秋季)、6.87 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (冬季)。此外,表层雪中 pH 值和电导率的年平均值分别为 6.66 和 12.74 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

由上述可知,表层雪 pH 值和电导率在不同季节的平均值自春季至冬季逐渐减小,进入冬季达到最小;pH 值在春季和冬季分别呈现出较强和较弱的碱性,电导率在春季和冬季分别达到最大值和最小值。具体来说,pH 值在春季(2003 年 5 月 29 日和 2004 年 4 月 24 日)达到一年中的最大值;电导率在春季(2003 年 5 月 16 日)和夏季(2004 年 6 月 11 日)达到一年中的最大值,分别为 44.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 95.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。一般来说,表层雪的 pH 值和电导率在春季(4 月和 5 月)和夏初(6 月)较高,在夏末(8 月和 9 月)较低。表层雪的 pH 值和电导率从 2003 年夏末到 2004 年夏初逐渐升高、达到一年中的最大,然后在 2004 年夏末迅速减小,随后又逐渐升高。这是由于:在春季和夏初,乌鲁木齐河源区尘暴发生的频率增加,大气中的粉尘载量增大,可溶性化学离子的沉降作用增强;在夏末,由于温度升高并达到一年中的最大,淋溶作用增强,大量融水产生,这时表层雪中大部分可溶性离子随融水径流而流失。在秋季和冬季,尘暴发生的频率较小,大气中的粉尘载量较为稳定,且气溶胶由原生向次生转化,可溶性离子沉降作用减弱,所以表层雪的 pH 值和电导率相对于春季和夏末较小,但比夏末较大^[26]。

表层雪的 pH 值和电导率主要受冰川所在区域大气中的可溶性离子控制。可溶性离子通常在粉尘的吸附作用下,由于尘扬作用,被大气气流携带、输送至冰川上空的大气中,后通过干、湿沉降方式降落至冰川表面。因此,表层雪中的可溶性离子在一定程度上与大气气流的季节性特征密切相关,对表层雪中 pH 值和电导率的大小起着重要作用。乌鲁木齐河源 1 号冰川所在的东天山地区主要受西风带控制,由于地形的影响,西风带在海拔 4 000 m 以上处于气旋与反气旋的循环之中,西风带对远距离及较远距离的大气粉尘输送起着重要作用。但是,由于 1 号冰川区近地表局地的山谷风在每年的 3~9 月盛行^[18,19],远距离及较远距离的大气粉尘在西风带的作用下到达冰川上方,在山谷风盛行季节,沉降过程必然受到山谷风季节性特征的影响。先前的研究^[17,19,25]表明,1 号冰川上方大气粉尘中总的离子

载量主要受局地 and 局域性来源的粉尘影响,而且局地裸露的岩石和冰川沉积物是这些粉尘的主要源地。这些局地来源的粉尘在向大气输送的过程中,局地山谷风起着至关重要的作用。因此,局地山谷风的季节特征必然与 1 号冰川区大气中可溶性离子载量有着密切联系。基于大西沟气象站山谷风的风速风向资料(图 1)可知,SSE、SSW、WSW、ENE 和 NE 是 1 号冰川所在区域的主要风向。通过对表层雪 pH 值、电导率与大西沟气象站主要风向的季节性特征变化进行对比分析,发现风向 NE 和 ENE 的季节变化特征与表层雪中 pH 值和电导率的季节变化特点具有很好的季节一致性。山谷风 NE 和 ENE 在春季(4 月和 5 月)和夏初(6 月)的高峰值与表层雪的 pH 值和电导率在同时期的峰值有较好的对应关系,与秋、冬季节较低的值也保持较好的一致性(图 2)。这说明,山谷风风向 NE 和 ENE 与表层雪的 pH 值和电导率的确有着密切的联系,关于其内部联系的机制将在以后的研究中予以讨论。同时从另一方面也说明,表层雪中的 pH 值和电导率主要受局地和局域源的粉尘控制。

4.2 演变过程

图 3 为 pH 值和电导率(2003 年 10 月 4 日至 2004 年 9 月 8 日)在雪坑中的淋溶过程。据李忠勤等^[25]和王飞腾等^[27]的研究,雪坑中化学离子的淋溶序列为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$; Mg^{2+} 相对于其它化学离子淋溶速度较慢, Mg^{2+} 浓度峰值的变化与大粒径微粒(直径 $> 10 \mu\text{m}$) 浓度峰值的变化具有较好的一致性,而且它们的浓度峰值与雪坑中的污化层也有着较好的对应。因此,在本研究中用 Mg^{2+} 浓度的峰值变化和大粒径微粒浓度的峰值变化作为参考来研究 pH 值和电导率在雪坑中的淋溶过程和淋溶规律。

如图 3 所示,pH 值和电导率的峰值通常出现在雪坑的顶部;在消融季节,pH 值和电导率的峰值向雪坑底部移动的速度较快,在其它季节移动的速度较慢,直至最后进入粒雪冰内。本研究中,我们通过跟踪电导率峰值在雪坑中的变化来研究 pH 值和电导率在雪坑中的淋溶过程和淋溶规律。图 3 中的 3 条实线是我们跟踪的电导率的 3 个较为明显的峰值,分别为 P1、P2 和 P3,它们分别位于雪坑 T1(2003 年 10 月 4 日)的上部、中部和下部。起初,3 个峰值 P1、P2 和 P3 距雪坑 T1 底部粒雪冰面的距离分别为 170 cm、100 cm 和 50 cm。在秋初至夏初这段时期(2003 年 10 月 4 日至 2004 年 5 月 28

日),即雪坑 T1~T9,峰值 P1、P2 和 P3 在雪坑中较为明显,呈现稳定的波动趋势。其中,在 W1 时期(2003 年 10 月 4 日至 2004 年 1 月 25 日),除峰值

P1、P2 和 P3 大于 $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ 外,雪坑中电导率的其它值均小于 $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ 。这是由于,此段时期的气温完全保持在 0°C 以下(平均气温为 -11.9°C),几乎

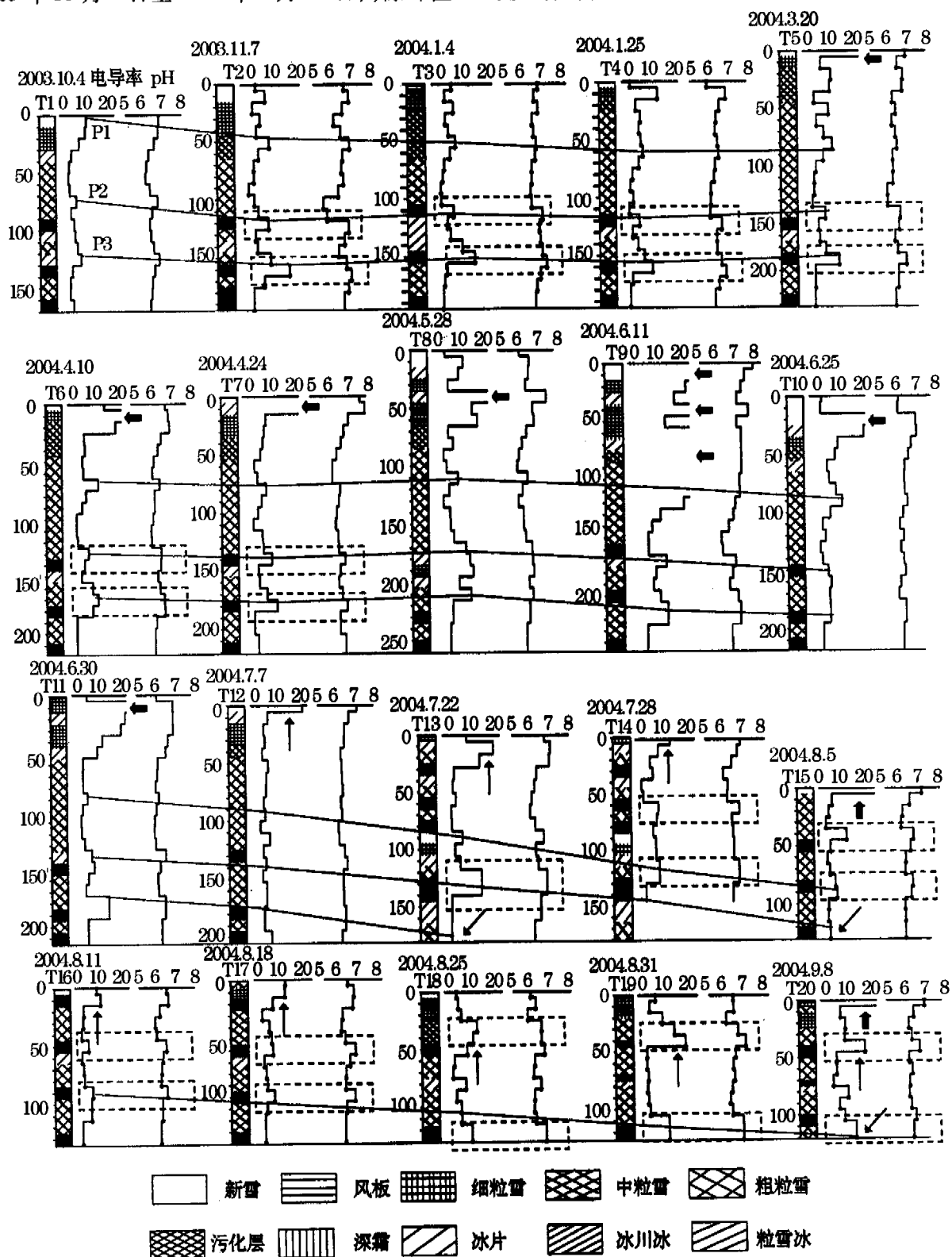


图3 雪坑中 pH 值和电导率的层位剖面

Fig.3 The successive profiles of pH and electrical conductivity in snowpits

没有降水产生(图4)。这说明,W1时期内雪坑中几乎没有融水产生,雪坑中的pH值和电导率在一定程度上可以反映它们在大气中的初始水平。在W2时期(2004年3月20日至2004年5月28日),位于峰值P1、P2和P3之上、电导率其它较高的峰值突然出现在雪坑T5~T8的顶部,而且这些峰值均

大于 $20\ \mu\text{s}/\text{cm}$ (图3,粗箭头所示)。这是由于,W2时期的温度升高(平均温度为 -4.1°C),个别天数的温度达 0°C 以上(图4)。也就是说,随着温度在W2时期的升高,尽管降水也有所增加,但雪坑中仍有少量的融水产生、并引起了部分可溶性离子的迁移。

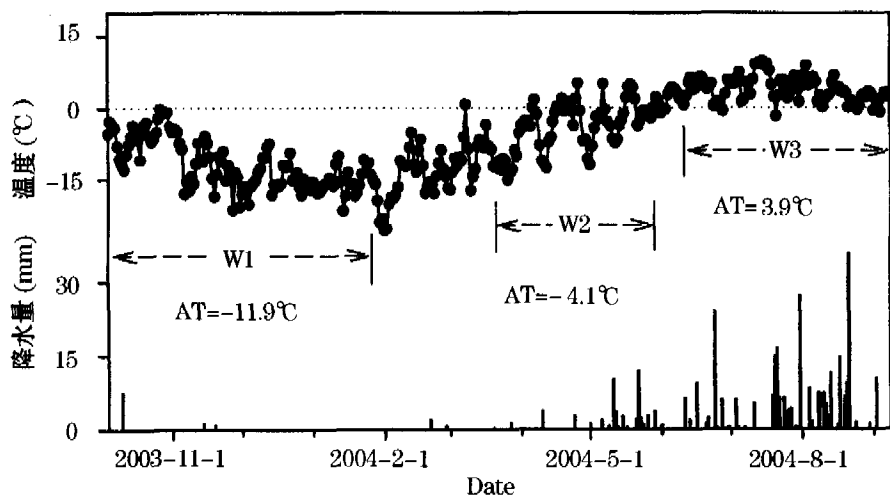


图4 气温和降水随时间的变化(AT分别表示W1、W2、W3时期内的平均气温)

Fig. 4 Variations of temperature and precipitation(AT show the average temperature in the corresponding periods W1、W2 and W3 respectively, the dashed line indicates the 0°C level)

在W3时期(2004年6月11日至2004年9月8日),气温几乎全部上升到 0°C 以上(平均温度为 3.9°C)(图4)。其中,在6月11日至6月30日这段时期,较多的融水产生,融水对可溶性离子的影响加强。在融水的作用下,可溶性离子向雪坑下部移动、聚集,相应的电导率峰值(P1、P2和P3除外)不断增加,大多数峰值出现在雪坑的上部和中部,尤其在雪坑T9中表现的最为显著。此时,峰值P1、P2和P3在雪坑中仍较为明显,它们距雪坑T11底部粒雪冰面的距离分别为125 cm、75 cm和40 cm。在7月7日至9月8日这段时期,峰值P1、P2和P3在雪坑中不易辨别,它们距雪坑T12底部粒雪冰面的距离明显减小,分别为111 cm、71 cm和35 cm。此外,尽管有2个大于 $20\ \mu\text{s}/\text{cm}$ 的峰值出现在雪坑T15(8月5日)和T20(9月8日)中(图3,粗箭头所示),电导率的其它峰值总体上仍呈现出稳定的波动趋势,此时峰值P1、P2和P3在雪坑中不显著,其它峰值在 $10\sim 20\ \mu\text{s}/\text{cm}$ 范围内变动(图3,细箭头所示)。这说明,此时融水对可溶性离子的影响较小,因为这段时期的气温完全达到 0°C 以上、且达到了一年中的最大值,大多数可溶性离子已随着融水

的径流而流失,尽管此段时期内的降水也达到了一年中的最大值(图4)。很明显,在气温与降水的共同作用下,降水相对于气温对可溶性离子的影响较弱。

另外,峰值P1、P2和P3分别在2004年7月末(T13)、8月初(T15)和9月初(T20)进入粒雪冰中(图3,斜箭头所示)。峰值P1进入粒雪冰的时间比与它相对应的、距粒雪冰面最近的大粒径微粒浓度的峰值进入粒雪冰的时间提前约40天。这是由于大粒径微粒浓度的峰值与污化层有较好的一致性,在一定程度上反映了不溶性离子的淋溶作用;而电导率峰值的变化反映了总的可溶性离子的淋溶作用,同时可溶性离子的淋溶速度大于不溶性离子。此外发现,大多数雪坑中的pH值和电导率峰值通常出现在污化层附近,并且在某些雪坑中与污化层的位置具有较好的一致性(图3,矩形方框所示)。这意味着污化层对可溶性离子的淋溶过程可能有一定的影响。pH值的淋溶过程与电导率的淋溶过程非常相似(图3),它们在表层雪中的相关系数($r=0.752$)可以说明这一点,所以关于pH值的淋溶过程不再作详细的论述。

4.3 影响因素

冰川融水的电导率为估算总的可溶性离子浓度和它们在雪坑中的深度分布提供了一个简单、方便、有效的方法,尤其是在以碳酸盐为主的地区^[28]。pH是水溶液酸、碱度的一个指标,可表示为: $\text{pH} = -\log a$ (a 为活度)。表层雪中的化学成分来源于干、湿沉降,它们与气溶胶中的化学成分密切相关^[14]。

表1 表层雪中各种化学成分之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of pH and electrical conductivity between different chemical species in surface snow

	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pH
电导率	0.446	0.313	0.885	0.727	0.660	0.960	0.879	0.716	0.752
NH ₄ ⁺		0.490	0.464	0.610	0.161	0.322	0.413	0.483	0.338
NO ₃ ⁻			0.380	0.674	0.191	0.215	0.242	0.323	0.241
Cl ⁻				0.720	0.559	0.792	0.956	0.729	0.520
SO ₄ ²⁻					0.390	0.623	0.662	0.551	0.531
Mg ²⁺						0.631	0.575	0.511	0.624
Ca ²⁺							0.820	0.638	0.779
Na ⁺								0.734	0.524
K ⁺									0.532

在0.01置信度下显著相关($n=107$)

表1给出表层雪的pH值和电导率与化学离子之间的相关系数。与pH值的相关系数大于0.600的离子有Mg²⁺ ($r=0.624$)和Ca²⁺ ($r=0.779$);与电导率的相关系数大于0.700的离子有Cl⁻ ($r=0.885$)、SO₄²⁻ ($r=0.727$)、Ca²⁺ ($r=0.960$)、Na⁺ ($r=0.879$)和K⁺ ($r=0.716$);这说明Mg²⁺、Ca²⁺和Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Na⁺、K⁺分别是控制表层雪中pH值和电导率的主要离子,而Ca²⁺是最主要的离子。Ca²⁺是大气粉尘一个很好的替代指标,也是表层雪中最主要的离子,占离子总载量的56%;其它离子为:SO₄²⁻ (10%)、NH₄⁺ (9%)、Mg²⁺ (8%)、Cl⁻ (6%)、Na⁺ (5%)和NO₃⁻ (5%)。在尘暴、山谷风、原生气溶胶和次生气溶胶的共同作用下,表层雪中总的离子载量在春季达到最大,是冬季的3倍,同时所有离子在冬季达到它们的背景值。因此,Ca²⁺的浓度在春季达到最大值,约是在秋季或冬季的3倍,随后迅速减小并在秋季和冬季达到背景值。表层雪中高浓度的Ca²⁺主要与来源于周围山体的风蚀粉尘有关,由于石灰化过程是干旱半干旱地区土壤形成的主要过程,并且产生大量的CaCO₃^[29]。另外,1号冰川早期的气溶胶研究表明,由于局地亚洲粉尘

的影响,化学成分在春末和夏初呈现出较高的浓度,而且指出Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻主要来源于中亚的沙漠和干涸的湖泊,而K⁺来自于人为源^[26]。

5 结 论

研究表明,表层雪中的pH值和电导率有着明显的季节变化特征。在春季和夏初由于尘暴频率增加,大气粉尘载量增大,可溶性离子的沉降作用增强,表层雪的pH值和电导率值较大;在夏末由于温度上升至最高,融水达到最大,可溶性离子随融水的径流而流失,表层雪的pH值和电导率较小。表层雪的pH值在春季呈现出较强的碱性,在冬季由于原生气溶胶向次生气溶胶的转化,大气中可溶性离子沉降作用的减弱呈现较弱的碱性。此外发现,NE和ENE是控制表层雪中pH值和电导率的主导山谷风风向;Mg²⁺、Ca²⁺和Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Na⁺、K⁺分别是控制表层雪中pH值和电导率的主要离子,Ca²⁺是最主要的离子。

在后沉积过程中,雪坑中的pH值和电导率在不同时期表现出不同的季节变化特征和淋溶过程。在2003年10月4日至2004年1月25日,电导率具有稳定的波动趋势,值均小于10 μs/cm (除P1、P2和P3外);pH值和电导率在一定程度上可以代表它们在大气中的初始水平。在2004年3月20日至2004年5月28日,少量融水产生,部分可溶性离子发生迁移,在某些雪坑顶部出现大于20 μs/cm的电导率峰值(除P1、P2和P3外),融水对可溶性离子的作用较强。在2004年6月11日至2004年6月30日,较多的融水产生,在雪坑上部和中部出现较多较大的峰值;在2004年7月7日至2004年9月8日,大量融水产生,可溶性离子随融水径流而流失,融水对可溶性离子的作用较弱,电导率的峰值(除P1、P2和P3外)呈现稳定的波动趋势,在10~20 μs/cm范围内变动。此外,电导率峰值P1进入粒雪冰的时间比与它相对应的大粒径微粒浓度的峰值提前约40天。大多数雪坑中pH值和电导率的峰值一般出现在污化层附近,而且在有的雪坑中与污化层的位置有较好的一致性,这意为着污化层对可溶性离子的淋溶过程可能有一定的影响。另外,pH值和电导率在雪坑中的淋溶过程受温度的影响较大,受降水的影响较小。

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成员焦克勤、杨惠安、韩添丁、王飞腾、李传金、张坤、李慧林、钱军、张明军等表示衷心感谢。

参考文献 (References):

- 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成员焦克勤、杨惠安、韩添丁、王飞腾、李传金、张坤、李慧林、钱军、张明军等表示衷心感谢。
- ### 参考文献 (References):
- [1] Wolff E W, Peel D A. The record of global pollution in polar snow and ice[J]. *Nature*, 1985, 313: 535-540.
 - [2] Barnola J M, Raynaud D, Korotkevich Y S, et al. Vostok ice core provides 160000 year record of atmospheric CO₂ [J]. *Nature*, 1987, 329: 408-414.
 - [3] Gu Juan, He Yuanqing, Zhang Zhonglin, et al. The response of pH Value in Ice Core to Precipitation in the Mt. Yulong [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 4 (27): 509-514. [顾娟, 何元庆, 张忠林, 等. 玉龙雪山浅冰芯 pH 值对冰川作用区降水量变化的响应[J]. 冰川冻土, 2005, 4 (27): 509-514.]
 - [4] De Angelis M, Barkov N I, Petrov V N. Aerosol concentrations over the last Climate Cycle (160kyr) from an Antarctic Ice Core [J]. *Nature*, 1987, 325: 318-321.
 - [5] Jouzel J, Petit J R, Raynaud D. Palaeoclimatic Information from Ice Cores: The Vostok Records [J]. *Earth Sciences*, 1990, 81: 349-355.
 - [6] Mayewski P A, Meeker L D, Morrison M C, et al. Greenland Ice Core "Signal" Characteristics: An Expand View of Climate Change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 12 839-12 847.
 - [7] Mayewski P A, Twiker M S, Whitlow S L, et al. Climate Change during the Last Deglaciation in Antarctica [J]. *Science*, 1996, 272: 1 636-1 638.
 - [8] Taylor K C, Hammer C U, Alley R B, et al. Electrical conductivity measurements from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores [J]. *Nature*, 1993, 366: 549-552.
 - [9] Wolff E W, Moore J C, Clausen H B, et al. Long-term changes in the acid and salt concentrations of the GRIP Greenland ice core from electrical stratigraphy [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 16 249-16 264.
 - [10] Hammer C U. Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism, and radio-echoes [J]. *Journal of Glaciology*, 1980, 25 (93): 359-372.
 - [11] Xiao Cunde, Qin Dahe, Ren Jiawen, et al. The difference of atmospheric chemical loadings shown by conductivity of and ice between Antarctic, Arctic and Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 1999, 10 (1): 45-50. [效存德, 秦大河, 任贾文, 等. 雪冰电导率反映的南、北极和青藏高原大气环境差异[J]. 极地研究, 1999, 10 (1): 45-50.]
 - [12] Yao Tandong, Sheng Wenkun, Yang Zhihong. A study on ice and snow chemistry in Qing-Zang (Tibet) Plateau [C] // Yao Tandong, Agta Y et al. *Glaciological Climate and Environment on Qing-Zang Plateau*. Beijing: Science Press, 1993: 8-15. [姚檀栋, 盛文坤, 杨志红. 青藏高原的冰雪化学研究[C] // 青藏高原冰川气候与环境. 北京: 科学出版社, 1993: 8-15.]
 - [13] Sheng Wenkun, Yao Tandong, Xie Chao, et al. Analysis of pH and electrical conductivity in Guliya ice cores since Little Ice Age [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17 (4): 360-365. [盛文坤, 姚檀栋, 谢超, 等. 古里雅冰芯小冰期以来的 pH 值和电导率分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17 (4): 360-365.]
 - [14] Sheng Wenkun, Yao Tandong. Acidity variation in the Guliya Ice Cap region approached by pH and electrical conductivity in ice core [C] // *Proceedings of the Fifth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology (Vol. 1)*. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1996: 219-226. [盛文坤, 姚檀栋. 用冰芯的 pH 值及电导率探讨古里雅冰川作用区的干湿变化[C] // 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 219-226.]
 - [15] Hou Shugui, Qin Dahe, Ren Jiawen, et al. The present environmental processes of Ice Core pH and conductivity records: A case study at the Headwaters of the of the Urumqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21 (3): 225-232. [侯书贵, 秦大河, 任贾文, 等. 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[J]. 冰川冻土, 1999, 21 (3): 225-232.]
 - [16] Li Xinqing, Qin Dahe, Jiang Guibin, et al. Atmospheric pollution of a remote area of Tianshan Mountain: Ice core record [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (D14): 4-14-10.
 - [17] Luo Hongzhen. Hydrochemical features of the Glacier No. 1 in the source region of Urumqi River, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5 (2): 55-64. [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.]
 - [18] Zhang Yinsheng, Kang Ersi, Liu Chaozhai. Mountain climate analysis in Urumqi River valley, Tianshan [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.]
 - [19] Williams M W, Tonnessen K A, Melack J M, et al. Sources and spatial variation of the chemical composition of snow in the Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, 16: 25-32.
 - [20] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at the headwaters 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 40a 观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25 (2): 117-123.]
 - [21] Han Tianding, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. A characteristics mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi river, Tianshan mountains [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (3): 298-303. [韩添丁, 刘时银, 丁永建, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡特征研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20 (3): 298-303.]
 - [22] Liu Shiyin, Wang Ninglian, Ding Yongjian, et al. On the characteristics of glacier fluctuations during the last 30 years in Urumqi river basin and the estimation of temperature rise in the high mountain area [J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14 (3): 279-

285. [刘时银,王宁练,丁永建,等.近30年来乌鲁木齐河流域冰川波动特征与流域高山带升温幅度地估算[J].地球科学进展,1999,14(3):279-285.]
- [23] Li Xiangying, Li Zhongqin, You Xiaoni, *et al.* Study of the ice formation zones and stratigraphy profiles of snow pits on the Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi river[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1):37-44. [李向应,李忠勤,尤晓妮,等.天山乌鲁木齐河源1号冰川成冰带及雪层剖面特征研究[J].冰川冻土,2006,28(1):37-44.]
- [24] Su Zhen, Liu Zongxiang, Wang Wenti, *et al.* Glacier fluctuations responding to climate change and forecast of its tendency over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(6):607-612. [苏珍,刘宗香,王文梯,等.青藏高原冰川对气候变化地响应及趋势预测[J].地球科学进展,1999,14(6):607-612.]
- [25] Li Zhongqin, Ross Edwards, Mosley-Thompson E, *et al.* Seasonal Variabilities of Ionic Concentration in Surface Snow and Elution Process in Snow-firm Packs at PGPI Site on Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006 (In press).
- [26] Sun Junying, Qin Dahe, Paul A. Mayewski, *et al.* Soluble species in aerosol and snow and their relationship at Glacier 1, Tien Shan, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D21):28 022-28 027.
- [27] Wang Feiteng, Li Zhongqin, You Xiaoni, *et al.* Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Glacier No. 1 percolation zone, eastern Tianshan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006 (In press).
- [28] Smart C C. Temperature compensation of electrical conductivity in glacial meltwaters[J]. *Journal of Glaciology*, 1992, 128(38):9-12.
- [29] He Dixin. Forming and Improving of Pickled soil[M]. Lanzhou: Gansu People Press, 1980. [贺涤新.盐碱土的形成和改良[M].兰州:甘肃人民出版社,1980.]

Seasonal Variations and Elution Processes of pH and Electrical Conductivity in Snowpits on Glacier No. 1 at the Urumqi River Head, Tianshan

LI Xiang-ying¹, LI Zhong-qin¹, CHEN Zheng-hua²,
ZHAO Zhong-ping¹, YOU Xiao-ni¹, ZHU Yu-man¹

(1. Tianshan Glaciological Station/Key Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;
2. College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Analysis of pH and electrical conductivity in surface snow and snowpit samples collected successively in a weekly basis from September 14, 2002 to September 28, 2004 on the east branch of Glacier No. 1 at the Urumqi river head, Tianshan is presented. pH and electrical conductivity in surface snow show obvious seasonal variations, which to some extent are associated with the dominant NE and ENE valley wind. The pH in surface snow is more alkaline and electrical conductivity in surface snow reaches maximum in spring because of the Asian dust storm increases and primary aerosols contribution; pH in surface snow is less alkaline and electrical conductivity in surface snow reaches minimum in winter due to the transformation of primary aerosol to secondary aerosol. During the post-depositional processes (October 4, 2003 September 8, 2004), pH and electrical conductivity in snowpits during different periods show visible seasonal characteristics and elution processes. The date that the peak value P1 of electrical conductivity in snowpit merges into firm ice is about 40 days prior to that of large particles (Diameter > 10 μ m) merging into firm ice. To some extent, the peak values of pH and electrical conductivity in some snowpits occur near dust layers and their peak values also correspond to the dust layers in snowpits, which imply that dust layers probably had an influence on elution processes of soluble ions. Electrical conductivity observations indicate different elution of some of ions in snowpits, the elution of soluble ions is more likely and easier to happen than that of insoluble ions in snowpits. Furthermore, correlation analysis shows that Ca²⁺ is the key ion determining pH and electrical conductivity in surface snow.

Key Words: Glacier No. 1; Snowpits; pH; Electrical conductivity; Seasonal variations; Elution processes.