

# 天山东部冰芯 pH 值和电导率的大气环境空间差异

董志文<sup>1,3</sup>, 李忠勤<sup>1,2</sup>, 王飞腾<sup>1,3</sup>, 张明军<sup>2</sup>

- (1. 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, 兰州 730000;  
2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 冰芯电导率是大气环境变化的替代性指标。对我国天山东部三个研究点奎屯哈希勒根 48 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川以及哈密庙儿沟平顶冰川粒雪芯中 pH 值和电导率的近期环境记录进行了分析研究。结果显示, 三个研究点粒雪芯反映的近期 pH 值和电导率变化趋势不同: 奎屯电导率随冰芯深度增加表现出升高趋势, 哈密庙儿沟平顶冰川和乌鲁木齐河源 1 号冰川随冰芯深度增加表现出一定下降趋势; 冰芯电导率平均值在哈密庙儿沟冰川最大, 而其他两个点相对较小, 这与矿物粉尘浓度和离子浓度的分布一致; 雪冰电导率与粉尘及离子相关性分析表明, 电导率主要受中亚粉尘活动影响, 同时与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等相关性很高。通过比较显示, 天山东部与我国西部其他研究点以及极地雪冰电导率的差异可以很好地反映大气环境的空间差异。

**关键词:** 天山东部; 粒雪芯; pH 值和电导率; 大气环境; 空间差异

## 1 引言

冰芯电导率 (ECM) 是大气环境变化的替代性指标, 可以指示气候变化。研究表明, 气候冷干的沙尘频繁活动时期, 大气中有较高的碱性粉尘浓度, 和气候暖湿时期相比, 雪冰电导率一般会增大<sup>[1,2]</sup>。在全球变化研究中, 冰芯记录以分辨率高, 保真度强, 气候环境信息丰富和时间序列长等独特优势占据了相当重要地位<sup>[3-9]</sup>。根据极地冰芯的 pH 值和电导率 (ECM) 可以恢复末次冰期以来的气候旋回事件<sup>[1-3]</sup>。姚檀栋和盛文坤等对青藏高原雪冰内的 pH 和电导率做了大量研究工作<sup>[9]</sup>。Wolff 等<sup>[7,8]</sup>和效存德等<sup>[10]</sup>对南极、北极以及青藏高原雪冰内的电导率及大气化学载荷等做了相关研究, 南极、北极和青藏高原是现代地球上面积最大、最显著的三个寒区, 雪冰电导率是寒区大气环境的替代性指示器<sup>[10]</sup>。位于中亚内陆的天山山区, 高海拔雪冰 pH 值和电导率的相关研究还比较少, 对于该区较大范围内 pH 值和电导率与大气环境的相关关系亟需进行深入研究。天山东部地区位于亚洲沙尘活动的源区范围内 (图 1), 对该区雪冰 pH 值和电导率研究有重要意义<sup>[10-13]</sup>, 可以对大气环境状况及受周边地理因素的影响提供很好的认识。已有研究, 对于乌鲁木齐河源 1 号冰川雪坑中 pH 值和电导率的季节变化特征进行过探讨, 认为消融率较大、渗透率较强的亚洲内陆地区, pH 值和电导率记录仍可反演沉积时的大气环境状况<sup>[11]</sup>。而对于哈密庙儿沟平顶冰川和奎屯哈希勒根 48 号冰川雪坑及冰芯物理和化学特征的研究还很少, 本文

收稿日期: 2008-07-25; 修订日期: 2008-11-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-127); 国家自然科学基金项目 (40631001; 40571033; 40701034; 40371028; J0630966; 40701035); 国家自然科学基金创新群体项目 (40121101) 资助 [Foundation: National Key Project for Basic Research of China, No.2007CB411501; Knowledge Innovation Project of CAS, No.KZCXZ-YW-127; National Natural Science Foundation of China, No. 40631001; No.40571033; No.40701034; No.40371028; No. J0630966; No.40701035. The Project for Outstanding Young Scientists of National Natural Science Foundation of China, No.40121101]

作者简介: 董志文 (1984-), 男, 甘肃甘谷人, 硕士研究生。主要研究方向为冰川与全球环境变化。

E-mail: happyabear@163.com

依据最近三个点钻取的浅冰芯(粒雪芯)资料,对冰芯 pH 值和电导率的区域特征及其记录的大气环境空间差异进行分析 and 探讨。

## 2 研究区概况

天山东部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),而天山山巅发育了众多的高海拔山岳冰川。奎屯河哈希勒根 48 号冰川(43°43'N, 84°24'E)位于新疆奎屯市以南的天山依连哈比尔尕山北坡,奎屯河上游支沟哈希勒根河源区;冰川朝向东北,最高海拔 4200 m,冰舌末端海拔 3400 m,雪线海拔 3610 m,冰川表面较为平整洁白,裂隙不甚发育。乌鲁木齐河源 1 号冰川(43°05'N, 86°48'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 1.73 km<sup>2</sup>,雪线平均海拔 4075 m,冰舌末端海拔 3777 m;据大西沟气象站和天山冰川站 1959-2000 年气象资料计算,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,5-9 月降水量占全年降水量 80%以上;1 号冰川地处亚洲内陆中部,距亚洲地理中心仅有 100 km 左右,是中国自 1959 年开始观测至今监测时间最长、监测资料最为系统的冰川。哈密庙尔沟平顶冰川(43°03'N, 94°19'E),在中国冰川目录上该冰川为庙儿沟 3 号冰川,位于天山山脉哈尔里克山西连巴里坤山,南、北、东外围为低山荒漠戈壁,降水稀少,气候干燥;冰川朝向西南,最高海拔 4512 m,冰舌末端海拔 3840 m,雪线海拔 4100 m 左右,面积 3.45 km<sup>2</sup>。

## 3 样品采集和实验室分析

研究采用的样品为奎屯哈希勒根 48 号冰川、天山乌鲁木齐河源 1 号冰川以及哈密庙儿沟平顶冰川 3 个点的冰芯(粒雪芯)资料。2005 年 8 月在哈密庙儿沟平顶冰川积累区海拔 4510 m 钻取了一根 60 m 的透底冰芯,2006 年 10 月在乌鲁木齐河源 1 号冰川粒雪盆 4130 米钻取的 20 m 粒雪芯,2006 年 10 月在奎屯哈希勒根 48 号冰川积累区海拔 4000 m 钻取了 15 m 粒雪芯。选取的打钻点地形比较平坦,一般不会有雪的再分配,因而粒雪芯记录能较好地反映沉积时的环境;而且 3 个冰芯钻取点都位于冰川上离基岩较远的地方,因而受局地环境的影响相对较小。在本研究中考虑到样品分析等因素,采用 3 个研究点冰芯上部各 3.85 m 长度的样品进行近期大气环境化学差异分析。本项研究从采样到分析过程中保持了清洁无污染。冰芯钻取过程严格按照冰雪采样规范进行,详细原理前人已详述<sup>[2-8]</sup>。冰芯分样时使用不锈钢锯人工截取样品,间距为 5 cm,共取得 231 个样品。分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 -18 °C 冷冻状态,直至在中国科学院冰冻圈科学实验室分析。

在测试分析前数天将样品取出让其常温下自然融化,以备分析。分别使用 pH 计

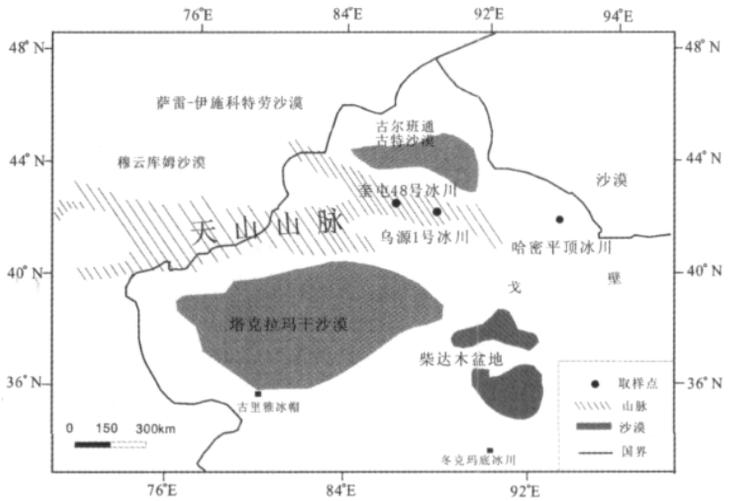


图 1 天山东部冰川粒雪芯钻取点分布

Fig. 1 Locations of the three study sites in the eastern Tianshan Mountains

(PHJS-4A) 和电导率仪 (DDSJ-308A) 对雪冰中的 pH 值和电导率 (ECM) 进行分析, 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, 后侵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。在本研究中, 为了探讨 pH 值和电导率的相关影响机制, 应用美国 Accusizer 780A 光学粒径检测仪对样品中的粉尘微粒颗粒粒径和数量浓度进行测试分析, 使用 DX-320 型离子色谱仪对主要离子如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等的浓度进行测量。实验结果表明, 分析误差控制在 5% 以内<sup>[10, 11]</sup>。

奎屯和哈密站气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>), 奎屯使用临近站点克拉玛依气象站资料; 乌鲁木齐河源气象数据取自天山冰川站冰川区海拔 3700 m 水文气象站常规观测资料。同时运用后向气团轨迹分析法检验到达东天山三个点大气气团的传输路径和过程。这项分析基于 HYSPLIT4 (hybird single-particle lagrangian integrated trajectory) 模型, 其中包括大气垂直运动模式。基于此模型分析计算了研究点取样海拔高度 3 d 内的大气气团后向传输轨迹。

## 4 结果与讨论

### 4.1 粒雪芯 pH 值和电导率相关性及其年际变化

天山东部三个研究点粒雪芯中的 pH 值和电导率 (ECM) 相关性分析 (图 2) 结果表明, 奎屯哈希勒根 48 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川和哈密庙儿沟平顶冰川的 pH 和电导率都有很高的相关性。奎屯哈希勒根 48 号冰川的相关性 ( $R = 0.89$ ) 略高于其他两个点, 空间上表现出自西向东下降的趋势; 但这没有本质的差别。奎屯电导率介于 2.7~48.7  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 平均为 9.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , pH 值介于 6.1~7.4, 平均为 6.6; 乌鲁木齐河源 1 号冰川粒雪芯电导率值 (ECM) 介于 1.546~27.2  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 平均值为 5.9  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ; pH 值介于 5.587~7.168, 平均值为 6.2; 哈密平顶冰川电导率值介于 3.84~44.1  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 平均为 12.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ; pH 值介于 5.764~7.069, 平均为 6.4。比较这些值发现, pH 值为奎屯哈希勒根 48 号冰川最大, 乌鲁木齐河源 1 号冰川最小; 电导率为哈密庙儿沟平顶冰川最大, 乌鲁木齐河源 1 号冰川最小。雪冰电导率的原理是: 由于雪冰中可溶盐离子位于

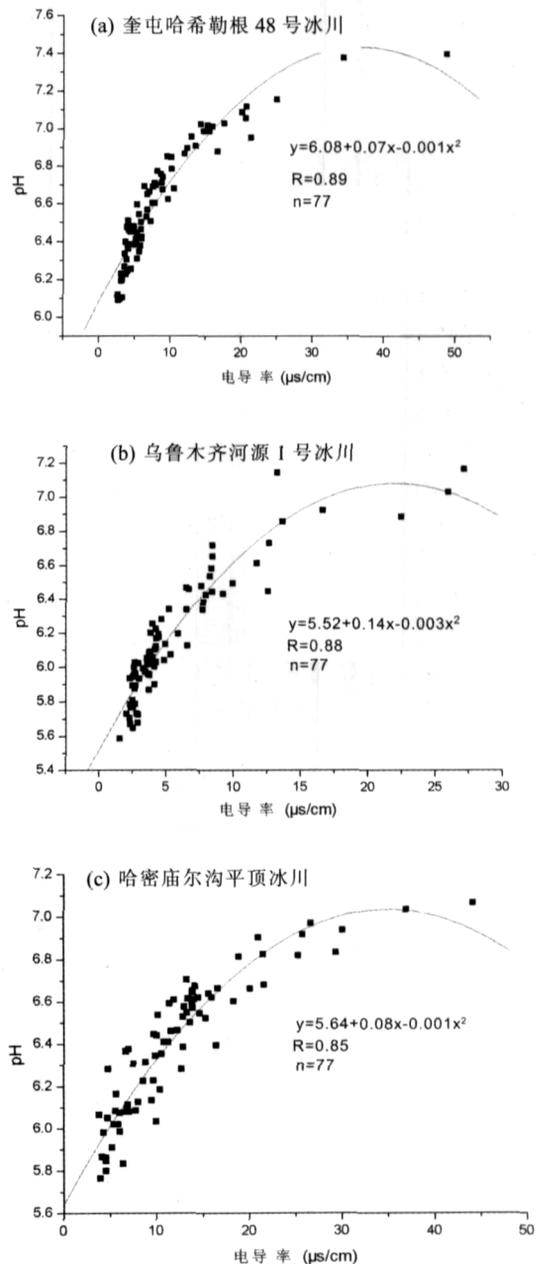


图 2 天山东部冰川粒雪芯 pH 值和电导率的相关性

Fig. 2 The correlative coefficients between pH and ECM in the eastern Tianshan Mountains

表 1 中国西部各研究点雪冰电导率与化学离子的相关系数比较

Tab. 1 Correlation coefficient of ECM and ions in the ice cores of the study sites in western China

ECM	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	pH	资料来源
奎屯哈希勒根 48 号冰川	0.94	0.68	0.73	0.83	0.89	本研究
乌鲁木齐河源 1 号冰川	0.99	0.78	0.54	0.87	0.88	本研究
哈密庙儿沟平顶冰川	0.96	0.82	0.74	0.86	0.85	本研究
古里雅冰芯	-	-	-	-	0.85	文献[9]
唐古拉冬克玛底冰川	0.92	0.70	0.69	0.58	0.85	文献[10]
珠穆朗玛峰东绒布冰川	-	-	-	-	0.84	文献[10]
玉龙雪山浅冰芯	0.89	0.21	0.71	-	0.34	文献[15]

冰晶晶格的边缘, 这些离子一方面决定了雪冰体的 pH 值, 而且当它们在水溶液中离解为带电离子时, 决定了导电能力的强弱, 即电导率<sup>[9]</sup>。天山东部高海拔雪冰 pH 值和电导率的这种分布表明了区域总体大气环境及气溶胶离子浓度的空间差异。

为了说明天山东部雪冰 pH 值和电导率的区域性特点, 本研究与中国西部其他地区类似的研究进行了比较(表 1)。结果显示, 包括青藏高原唐古拉冬克玛底冰川, 古里雅冰芯记录, 云南玉龙雪山等研究点的雪冰 pH 值和电导率相关性存在一定的空间差异: 天山东部的 3 个点和青藏高原的几个点相似, pH 值和电导率的相关性都比较高 ( $R \geq 0.84$ ); 而与海洋性冰川区玉龙雪山的研究结果有着较大的差异, 因为其相关性显得很低 ( $R = 0.34$ )。中亚内陆的天山山区及青藏高原内陆各研究点受到中亚粉尘活动影响比较明显, 这些地区基本位于沙尘源区范围内, 而云南玉龙雪山主要受季风气候影响明显, 例如东亚季风和南亚印度季风的作用, 大气环境的这种差异导致了我国西部地区雪冰 pH 值和电导率及其相关性的空间差异。

已有研究表明, 冰芯电导率可以指示气候变化, 因为在气候冷干的粉尘活动时期大气中有较高碱性粉尘浓度, 使得电导率比较大, 而相比之下暖湿时期电导率一般会减小<sup>[2]</sup>。本研究中, 根据特征要素的季节变化(如  $\delta^{18}\text{O}$  和粉尘浓度剖面)和特殊事件(如 1998 年沙尘强烈活动)标定的方法, 对乌鲁木齐河源 1 号冰川和奎屯哈希勒根 48 号冰川冰芯定年的结果显示, 3.85 m 深度的冰芯从时间上可以恢复到大约 1996 年以来的大气环境记录, 而哈密庙尔沟平顶冰川由于降水年积累率较小, 同等深度代表年限序列略长, 可以恢复到大约 1994 年。尽管如此, 总体来说, 这三根粒雪芯化学记录可以反映近期大约以 10 年为尺度的大气环境变化状况。尽管可能受到淋融作用的影响, 融水作用可能使得剖面中可溶部分因淋溶而再次分配; 然而本研究中, 冰川打钻孔的测温显示冰川温度都很低 ( $< 0^\circ\text{C}$ ), 因此受淋融作用影响相对较小, 而且粒雪芯剖面显示的电导率明显季节变化特征表明, 粒雪芯化学记录仍然可以反映气候环境的变化, pH 值和电导率记录仍可反演沉积时的大气环境状况<sup>[11]</sup>。因此, 三个点粒雪芯中 pH 值和电导率的年际变化剖面能够较好反映近期的大气环境变化和局地环境差异(图 3)。可以看出研究点之间存在较大差异: 奎屯冰芯电导率随深度增加表现出上升趋势, 而乌鲁木齐河源 1 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川电导率表现出一定下降趋势。

图 4 显示了天山东部哈密庙尔沟平顶冰川粒雪芯中电导率与粉尘微粒平均粒径剖面比较的例子。东天山由于处于中亚粉尘活动的源区范围, 雪冰电导率受粉尘中碱性矿物物质的影响比较严重。不溶微粒平均粒径剖面与粉尘的质量浓度以及冰芯污化层有很好的对应, 平均粒径的峰值可以很好的代表粉尘污化层<sup>[14]</sup>。而图 4 反映出电导率与粉尘剖面存在较好一致性和相似性, 在冰芯中电导率的峰值总是对应于粉尘的峰值, 而谷值也对应于粉尘的谷值(图 4)。对西部奎屯哈希勒根、中部乌鲁木齐河源 1 号冰川以及东部哈密庙尔沟雪坑中研究结果显示, 雪坑电导率与粉尘的浓度剖面也有很好的对应性<sup>[12]</sup>。沙尘暴活动是中亚内陆的重要大气环境特征, 中亚粉尘源区大气粉尘颗粒能够轻易到达天山高

海拔的冰川并沉积在雪层，在雪冰转化过程中逐渐保存在粒雪芯和冰芯中。因此，可以认为，电导率的变化过程在一定程度上反映了大气粉尘活动的变化过程，尽管不排除其他环境过程的影响。不仅如此，电导率可以比较全面地反映大气环境中的各种离子总体的状况，是大气环境变化很好的替代性指标。在中亚内陆地区，气候相对冷干的时期粉尘活动较强，电导率值较大；而暖湿时期的粉尘活动较弱，电导率相对较小。雪冰电导率的变化可以反映大气环境的干湿变化状况。

已有研究，对于乌鲁木齐河源 1 号冰川雪坑中 pH 值和电导率的季节变化特征进行过探讨，认为消融率较大、渗浸率较强的亚洲内陆地区，pH 值和电导率记录仍可反演沉积时的大气环境状况<sup>[11]</sup>。在东天山三个研究点冰芯电导率剖面比较 (图 3) 中，西部点奎屯哈希勒根 48 号冰川电导率随冰芯深度而增加，即随时间变化而减小，说明到达冰川的粉尘源区和传输途径大气干湿变化趋势是在变湿；中部乌鲁木齐河源 1 号冰川和东部哈密庙尔沟平顶冰川电导率随深度减小趋势，即近年随时间变化上的增加趋势，在一定程度上可以说明研究点周边粉尘源区和传输途径的干湿变化趋势是总体有些变干，即乌鲁木齐河源和哈密的粉尘来源区在近期变干，即湿度或降水减少。在此可将本研究的结果与邻近气象站点的气象数据进行比较 (图 5)。奎屯的邻近站点中国气象局克拉玛依气象站等资料显示了西部地区近期降水量的增加趋势 (图 5a)；天山冰川站乌鲁木齐河源水文气象观测点常规观测资料显示，1994 年以来河源区降水量表现出下降趋势 (图 5b)；中国气象局哈密气象站降水量也呈现出一定下降趋势，尽管不是很明显 (图 5c)；结果表明，天山东部气象数据反映的降水变化与三个研究点粒雪芯反映的干湿变化存在较好的一致性，这也反映了大气环境变化的空间差异性。

图 6 是天山东部三个研究点沙尘活动季节后向气团轨迹分析的典型例子。这是运用后向气团轨迹分析法检验到达东天山三个点大气气团的传输路径和过程。图中可以反映

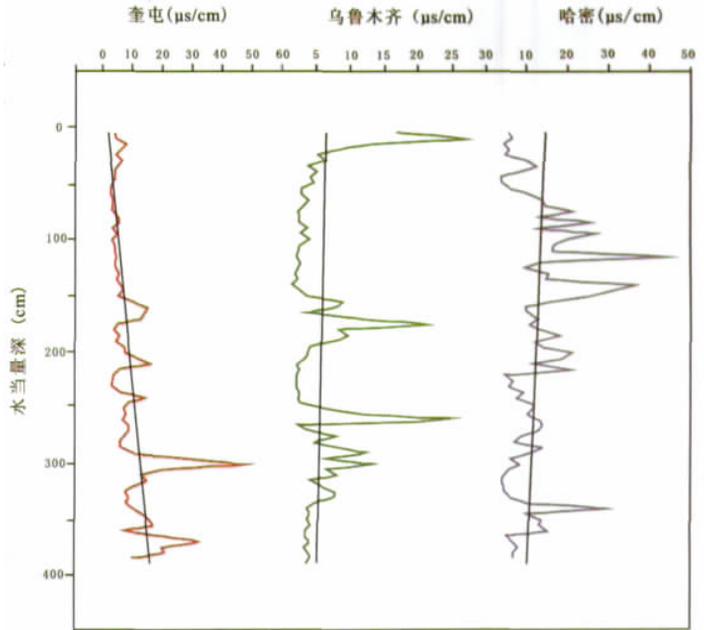


图 3 天山东部研究点电导率随冰芯深度变化的比较  
Fig. 3 ECM variation with the changes of ice core depth in the study sites of the eastern Tianshan Mountains

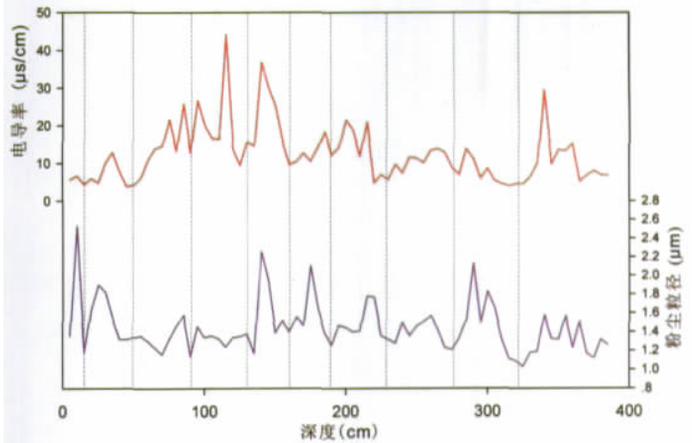


图 4 哈密冰芯中粉尘与电导率剖面的比较  
Fig. 4 Comparison of dust and ECM profiles in Hami glacier ice core

一定时期三个研究点大气气团来源可能不同：奎屯哈希勒根 48 号冰川气团可能来源于南部并经过塔克拉玛干沙漠，而其他两个点则来源于西部的中亚地区，与西风方向一致。类似的这些大气环境差异可能是导致了粒雪芯电导率记录剖面的差异的原因之一。尽管如此，大气环境变化是比较复杂的过程，对于该区大气环境差异及其与雪冰内粉尘及化学物质的来源，还需进行更进一步的深入研究和探讨。

#### 4.2 粒雪芯 pH 值和电导率与化学离子的相关性

东天山研究点冰芯 pH 值和电导率与化学离子的相关性表明(表 1)，哈密庙尔沟平顶冰川受亚洲粉尘影响严重，电导率与亚洲矿物粉尘特征离子如  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  相关性都很高；而乌鲁木齐河源 1 号冰川和奎屯哈希勒根 48 号冰川电导率与  $Ca^{2+}$  相关性也很高，说明也受到中亚粉尘颗粒的很大影响，但这两个点电导率与  $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  相关性明显低于哈密。从表面看，奎屯 48 号冰川可能受大气污染影响，因为电导率与  $SO_4^{2-}$  相关性很高；而  $SO_4^{2-}$  与 pH 值相关性也高，即与  $H^+$  浓度没有很好的相关性，这证实了大气酸性污染物的很少存在。哈密庙尔沟平顶冰川和乌鲁木齐河源的研究结果也显示了类似的情况，雪冰中的电导率大小可以反映自然环境状况如中亚大气粉尘活动等的影 响(表 1)。而且，近期的研究表明，人类的过度开垦、放牧、乱砍乱伐，以及不合理的自然资源开发都加剧了新疆地区天然植被的破坏、水土流失、土地沙化和土壤盐渍化，而这又加剧了大气粉尘活动的范围和频率<sup>[18]</sup>。

将本研究结果与我国西部的其他研究点相比较，发现青藏高原与本研究区雪冰电导率与离子相关性有很大的相似性，并且位于中亚粉尘源区的天山东部其相关性更高；而我国季风海洋性冰川区玉龙雪山白水一号冰川的离子相关性明显要低于这些地区，尤其  $Na^+$  与电导率的相关性很低<sup>[15]</sup>，可能是因为海洋源带来的  $Na^+$  与电导率没有相关性所致，因为雪冰电导率更多受来自地壳的陆源碱性粉尘颗粒的影响。这也说明雪冰电导率可以很好反映我国西部地区大气环境空间的差异。

为了进一步验证东天山三个研究点电导率受自然环境影响的差异，对粒雪芯中各种离子浓度和粉尘浓度进行了比较(表 2)。结果显示，各种离子浓度在东部哈密冰芯中要远

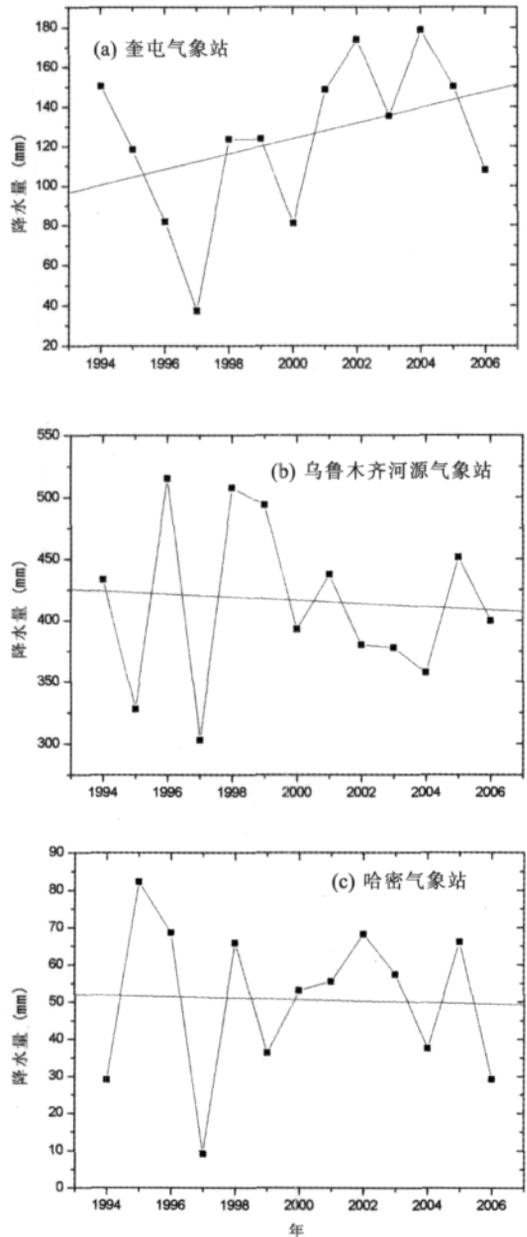


图 5 天山东部研究点近期降水量变化

Fig. 5 Variation of precipitation in the eastern Tianshan Mountains

大于中部乌鲁木齐河源和西部奎屯冰芯。雪冰不溶粉尘颗粒浓度也是哈密远大于乌鲁木齐河源 1 号冰川和奎屯哈希勒根 48 号冰川, 而各种浓度在乌鲁木齐河源最小。考虑到冰川离子沉积可能容易受到局地环境的一些影响, 而在本研究中, 哈密庙儿沟平顶冰川基本不受局地基岩影响, 因为冰川类似冰帽, 是一条平顶冰川, 而不同于山谷冰川, 周边基岩被冰川所覆盖, 受局地环境如基岩等影响要比其他两个点小, 然而雪冰内矿物粉尘和离子浓度都很高, 恰好说明了哈密冰川受较大尺度大气环境中中亚沙尘活动影响较大。如前所述, 电导率值为哈密庙儿沟平顶冰川最大, 乌鲁木齐河源 1 号冰川最小 (表 2)。将这两种结果比较, 发现哈密的离子浓度最大,

而电导率也最大; 乌鲁木齐河源离子浓度最小, 电导率也最小。离子浓度大小与粉尘浓度有很好的一致性, 粉尘浓度越大则离子浓度越大 (表 2)。这些结果表明, 电导率主要受到中亚大气环境中的粉尘活动影响, 粉尘活动是大气环境差异的主要因素, 而大气环境中存在的  $\text{SO}_4^{2-}$  在哈密的高浓度也可能意味着  $\text{SO}_4^{2-}$  可以附着在粉尘颗粒表面, 而沉降在高海拔雪冰中。电导率与不溶粉尘颗粒浓度和矿物离子浓度的空间分布的一致性, 进一步验证了雪冰电导率是大气环境变化的替代性指标。

#### 4.3 与极地地区和青藏高原研究的比较

天山东部粒雪芯中雪冰电导率主要受地壳来源的碱性矿物盐类杂质 (如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等) 影响, 这些物质主要来自于大气沙尘暴活动的粉尘颗粒 (图 4), 而雪冰酸度 pH 也与电导率有着很高的正相关性 (图 2)。雪冰电导率在全球许多地区都有研究。对南极冰盖和格陵兰冰盖雪冰电导率的诸多报道, 揭示了其与雪冰酸度的良好相关性, 并据此恢复了历史时期火山喷发事件。南极冰芯中电导率与  $\text{H}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  浓度之间均亦存在很好的线性正相关<sup>[6]</sup>, 而铝硅酸盐 (主要以地壳来源为主) 与电导率之间呈反相关关系。也就是说南极冰盖物质的最根本来源是海洋, 这与天山东部冰川的研究结果存在较大差异, 反映了大气环境的空间差异。在整个北极地区, 雪冰电导率还很好地反应了大气环

表 2 东天山三个研究点粒雪芯电导率与特征离子和粉尘浓度比较

Tab. 2 Concentration of ECM and ions in the ice cores of the study sites in the eastern Tianshan Mountains

研究点	$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\mu\text{g/L}$ )	$\text{Na}^+$ ( $\mu\text{g/L}$ )	$\text{Mg}^{2+}$ ( $\mu\text{g/L}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\mu\text{g/L}$ )	粉尘 ( $\#/\text{ml}$ )	电导率 ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )
奎屯哈希勒根 48 号冰川	479	143	62	1079	312872	9.0
乌鲁木齐河源 1 号冰川	158	91	46	675	550151	5.9
哈密庙儿沟平顶冰川	682	243	122	1420	777088	12.5

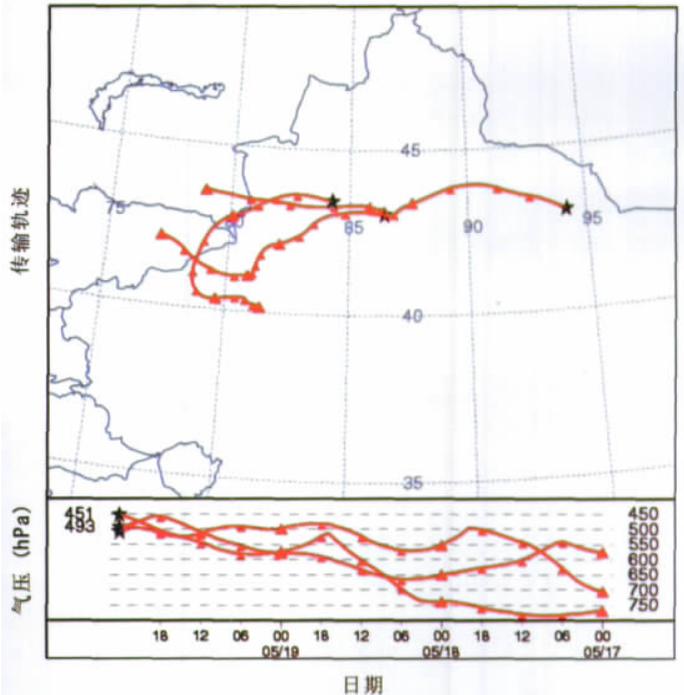


图 6 天山东部三个研究点沙尘活动季节后向气团轨迹分析

Fig. 6 An example of back trajectory of air mass in the eastern Tianshan Mountains

境的地域分异。格陵兰冰盖与加拿大北极大陆雪冰内电导率与  $H^+$  关系与南极地区的关系相同, 反映海洋环境的主导影响作用。研究表明<sup>[10]</sup>, 青藏高原南、北部均与极地冰盖相反, 酸度不是雪冰电导率的主控制因子, 例如冬克玛底冰川浅芯中电导率与多数可溶盐离子, 尤其与含  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  等碱性、中性可溶盐关系密切; 雪冰电导率与雪冰体的酸碱度及雪冰内各类杂质成分的关系明显不同于极地冰盖 (南极冰盖与格陵兰冰盖), 青藏高原雪冰电导率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), 因而与雪冰酸度 (即  $H^+$ ) 呈反相关; 极地冰盖雪冰电导率依赖于海洋来源的酸根离子 (如  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  等), 因而与雪冰酸度呈正相关。而在本研究中, 雪冰电导率与雪冰 pH 呈正相关 (相关系数很高), 与地壳来源的碱性矿物盐类杂质如  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  等, 也有很好的正相关关系; 这与青藏高原和极地地区的研究结果存在相似性。统计表明<sup>[8]</sup>, 现代无污染天然降水中, pH 值近似于 5.6 左右, 当 pH 值小于 5.6 时, 表明受到酸性离子的污染, 当 pH 值大于 5.6 时, 则受到碱性离子的污染。天山东部雪冰中的阳离子是电导率的主要控制因子, 局地陆源碱性气溶胶的沉降占冰川表面气溶胶注入通量的主要部分。这和青藏高原研究结果一致, 而与南极的研究结果不同。值得指出的是,  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  和  $SO_4^{2-}$  中,  $Ca^{2+}$  与电导率的相关性最好。因此可以认为, 天山东部高海拔雪冰内  $Ca^{2+}$  较其他离子更能敏感指示大气过程。

## 5 结论

本文重点对我国天山东部三个研究点乌鲁木齐河源 1 号冰川、奎屯哈希勒根 48 号冰川以及哈密庙儿沟平顶冰川粒雪芯中 pH 值和电导率的大气环境记录进行了分析研究。得出如下结论:

(1) 天山东部自西向东三个研究点近年 pH 值和电导率年际变化趋势不同: 西部奎屯哈希勒根 48 号冰川电导率随冰芯深度增加表现出上升趋势, 而中部乌鲁木齐河源 1 号冰川和东部哈密庙儿沟平顶冰川表现出一定下降趋势。西部奎屯电导率随冰芯深度而增加, 即随时间变化而减小, 表明冰川的粉尘源区和传输途径中大气干湿变化趋势是在变湿; 中部乌鲁木齐河源 1 号冰川和东部哈密庙儿沟平顶冰川电导率随深度减小趋势, 即近年随时间变化上的增加趋势, 在一定程度上可以说明粉尘来源区和传输途径中大气干湿变化总体趋势是有些变干, 即湿度或降水减少。这些结果与相邻气象站观测的结果有较好的一致性, 反映了大气环境变化的空间差异性;

(2) 天山东部三个研究点雪冰电导率与不溶粉尘及离子相关性表明, 电导率主要受中亚地区大气粉尘活动影响, 与  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$  相关性很高; 冰芯电导率平均值在东部哈密庙儿沟冰川最大, 而中部乌鲁木齐河源 1 号冰川和西部奎屯哈希勒根 48 号冰川相对较小; 这与不溶粉尘浓度和矿物离子浓度的空间分布一致, 进一步验证了雪冰电导率是大气环境变化的替代性指标;

(3) 通过比较显示, 天山东部与我国西部其他点的研究, 以及极地地区雪冰电导率存在一定差异, 这种差异可以很好地反映较大范围大气环境的空间差异: 天山东部地区和青藏高原主要受中亚粉尘影响, 陆源矿物离子对雪冰电导率影响起主导作用; 而我国季风海洋性冰川区和极地地区雪冰电导率主要受海洋源离子影响。

致谢: 本项研究是天山冰川站开展的雪冰现代过程研究项目的一部分。谨此对参加本项研究的所有观测人员及项目组成员表示衷心感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] IPCC (2007). Climate change 2007: The Physical Sciences Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 29-30; 131-132; 153-180.
- [2] Taylor K C, Hammer C U, Alley R B et al. Electrical conductivity measurements from the GRIP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 1993, 366: 549-552.
- [3] Delmas R, Briat M, Legrand M. Chemistry of south polar snow. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87 (C6): 4314-4318.
- [4] Delmas R J. Antarctic precipitation chemistry. In: Jaeschke W (ed.). *Chemistry of Multiphase Atmospheric System*. NATO ASI Series, 1986(G6): 250-256.
- [5] Lazrus A L, Ferek R J. Acidic sulfate particles in the winter Arctic atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 1984, 11: 417-419.
- [6] Legrand M, Petit J R, Korotkevich Y S et al. Conductivity of Antarctic ice in relation to its chemistry. *Journal of Physique*, 1987, (C1): 605-611.
- [7] Moore J C, Wolff E W, Hammer C U et al. The chemical basis for the electrical stratigraphy of ice. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 1887-1896.
- [8] Moore J C, Wolff E W. Electrical response of the summit Greenland ice core to ammonium, sulphuric acid, and hydrochloric acid. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(7): 565-568.
- [9] Sheng Wenkun, Yao Tandong, Xie Chao et al. Analysis of pH and conductivity in Guliya ice core since little ice age. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(4): 360-365. [盛文坤, 姚檀栋, 谢超等. 古里雅小冰期以来的 pH 值和电导率分析. *冰川冻土*, 1995, 17(4): 360-365.]
- [10] Xiao Cunde, Qin Dahe, Ren Jiawen et al. The difference of atmospheric loadings between Antarctic, Arctic and Qinghai-Tibetan Plateau, shown by electrical conductivity of snow and ice. *Chinese Journal of Polar Research*, 1999, 11(1): 1-7. [效存德, 秦大河, 任贾文等. 雪冰电导率反映的南、北极与青藏高原大气环境差异. *极地研究*, 1999, 11(1): 1-7.]
- [11] Hou Shugui, Qin Dahe, Ren Jiawen et al. The present environmental process of the pH and conductivity records in the glacier No.1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains. *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 号冰川记录的 pH 和电导率记录的现代环境过程. *冰川冻土*, 1999, 21(3): 225-232.]
- [12] Dong Zhiwen, Li Zhongqin, Wang Feiteng et al. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of east Tianshan Mountains, China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(5): 544-552. [董志文, 李忠勤, 王飞腾等. 天山东部冰川积雪中大气粉尘的沉积特征. *地理学报*, 2008, 63(5): 544-552.]
- [13] Li Xiangying, Li Zhongqin, Chen Zhenghua et al. Seasonal variation and elution processes of pH and electrical conductivity in snowpits on Glacier No.1 on Urumqi river head, Tianshan. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 487-495. [李向应, 李忠勤, 陈正华等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪坑中 pH 和电导率的季节变化及淋溶过程. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 487-495.]
- [14] You Xiaoni, Li Zhongqin, Wang Feiteng et al. Seasonal evolution of insoluble micropartical stratigraphy in glacier NO. 1 percolation zone, eastern Tianshan, China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(11): 1164-1170. [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. *地球科学进展*, 2006, 21(11): 1164-1170.]
- [15] Gu Juan, He Yuanqing, Zhang Zhonglin et al. The response of pH value in ice core to precipitation in the Mountain Yulong. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 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. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 509-514.]
- [16] Wang Jian, Aihemaiti Aximu, Ding Yongjian et al. Variations of pH value and electrical conductivity in the Dongkemadi Basin, Tagula Range. *Environmental Science*, 2007, 28(10): 2301-2306. [王建, 艾合麦提·阿希木, 丁永建等. 唐古拉冬克玛底冰川流域 pH 值和电导率分析. *环境科学*, 2007, 28(10): 2301-2306.]
- [17] Sheng Wenkun, Yao Tandong, Li Yuefang et al. Dry and wet changes in Guliya ice cap region approached by pH and electric conductivity in ice core. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(4): 432-437. [盛文坤, 姚檀栋, 李月芳. 用古里雅冰芯的 pH 值和电导率探讨该冰川作用区的干湿变化. *冰川冻土*, 1998, 20(4): 432-437.]
- [18] Wei Wenshou, Gao Weidong, Shi Yuguang et al. Influence of climate and environment change on dust storms in Xinjiang, China. *Arid Land Geography*, 2004, 27(2): 137-141. [魏文寿, 高卫东, 史玉光等. 新疆地区气候与环境变化对沙尘暴的影响研究. *干旱区地理*, 2004, 27(2): 137-141.]

# The pH and Electrical Conductivity of Atmospheric Environment from Three Shallow Ice Cores in the Eastern Tianshan Mountains

DONG Zhiwen<sup>1,3</sup>, LI Zhongqin<sup>1,2</sup>, WANG Feiteng<sup>1,3</sup> ZHANG Mingjun<sup>2</sup>

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

2. *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** The pH values and Electrical Conductivity Measurement (ECM) records in three shallow ice cores from Glacier No.1 at the headwater of the Urumqi River, Kuitun Glacier No.48 and Hami Miaoergou Glacier in the eastern Tianshan Mountains, western China were measured and analyzed for the research on atmospheric environmental change. Ice core records show that the changing trends of pH and ECM at the three sites in recent about 10 years are different: Kuitun ECM increased with the change of the ice depth, but Hami site and Urumqi Glacier No.1 show a decreasing trend. The average ECM value in Hami is greater than the other two sites, just as the case of high dust concentration and ions concentration at this site. ECM records are mainly affected by Asian dust, as the correlative coefficients of ECM and mineral ions such as  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Na}^{+}$  are significantly high. Also, pH and ECM are significantly high correlative coefficients, which coincide with the research on the Tibetan Plateau, but different from that in the polar regions.

**Key words:** pH and electrical conductivity records; ice core; atmospheric environment; spatial difference; eastern Tianshan Mountains