

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院

硕士学位论文

天山东部典型冰川积雪中不溶粉尘的特征

董志文

指 导 教 师 李忠勤 研究员， 博士生导师

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所

申请学位级别 理学硕士 学科专业名称 自然地理学

论文提交日期 2009 年 4 月 论文答辩日期 2009 年 5 月

培 养 单 位 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席_____

Characteristics of Aerosol Dust Deposition in Snow on the Glaciers of the Eastern Tianshan, China

A dissertation submitted to
Cold and Arid Regions Environmental and
Engineering Research Institute (CAREERI)
Chinese Academy of Sciences (CAS)

For the Degree of
Master of Science

Presented by
Dong Zhiwen

Accepted on the recommendation of
Prof. Li Zhongqin supervisor

Tianshan Glaciological Station
April, 2009

原创性声明

本人声明所呈交的学位论文，是在导师的指导下独立进行研究所取得的成果。学位论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

研究生签名：_____

日期：_____

关于学位论文使用授权的说明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。本人完全了解中国科学院寒区旱区环境与工程研究所有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权中国科学院寒区旱区环境与工程研究所可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用任何复制手段保存和汇编本学位论文。本人离所后发表、使用论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所。

保密论文在解密后应遵守此规定。

研究生签名：_____

日期：_____

导师签名：_____

日期：_____

天山东部典型冰川积雪中不溶粉尘的特征

董志文

(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)

摘要

来自于地壳表面的气溶胶矿物粉尘是重要的大气组成部分,影响着地球表面的辐射平衡。雪冰是大气中各种物质的储存器,沉积在高海拔雪冰中的大气粉尘信息能够被很好地记录和保存。对雪冰中微粒研究有着重要意义,如冰芯微粒研究对于冰芯定年、气候环境变化的纪录恢复方面起了重要作用;而冰川积雪中的不溶微粒则用来研究近期气候环境变化。在全球许多地区,包括极地地区和青藏高原都进行过广泛的雪冰微粒特征研究,并且取得了很多研究成果和进展。然而,对于中亚内陆尤其是天山山区雪冰中微粒特征的研究则比较缺乏。大气粉尘的浓度和粒径分布等特征的变化由于受到风力、搬运距离、沉积过程等因素影响,从亚洲粉尘源区开始搬运,经过距离远近不同的地区表现出不同特征。因此,在亚洲粉尘源区研究雪冰中微粒沉积特征,并与北半球其他地区已有的相关研究结果进行比较,对于完善大气粉尘循环和沉积机制的认识显得尤为重要。主要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 51 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川积雪中大气粉尘沉积进行了分析研究。微粒特征分析表明,自西向东随着研究点地理环境的变化,积雪中不溶微粒的质量浓度、沉积通量和体积粒径分布众数都表现出增高趋势:奎屯哈希勒根 51 号冰川最小,乌鲁木齐河源 1 号冰川次之,哈密庙尔沟平顶冰川最大;三个研究点粒径 $0.57 < d < 26 \mu\text{m}$ 微粒的平均质量浓度分别是 $969 \mu\text{g/kg}$ 、 $1442 \mu\text{g/kg}$ 、 $3690 \mu\text{g/kg}$, 年均沉积通量分别是 $58.2 \mu\text{g/cm}^2$ 、 $72.1 \mu\text{g/cm}^2$ 、 $73.8 \mu\text{g/cm}^2$ 。表明,哈密冰川受粉尘源影响较大,而乌鲁木齐河源与奎屯河源区受影响则相对较小。雪坑微粒浓度剖面 and 离子相关性分析表明,天山东部冰川积雪中污化层富含亚洲粉尘的富 Ca^{2+} 、 Na^+ 矿物;微粒体积-粒径分布众数介于 $3\sim 22 \mu\text{m}$, 粒径分布显示了单结构模式。研究区最近 4 年积雪的污化层剖面揭示了春季零星的粉尘浓度峰值以及沉积数量上较大的年际变化,意味着天山东部雪冰中粉尘沉积对大气环境变化的敏感性。

同时,通过 2005 年春夏 (4~8 月)期间冰川表层雪样的采集,对位于中亚粉

尘活动源区的天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪中沉积的大气粉尘微粒的数量浓度及其季节粒径分布特征等进行了观测研究。结果表明,表层雪中不溶粉尘数量浓度在沙尘活动的 4~6 月份非常高 (最大 439×10^3 个/mL),可能是由于亚洲春季发生的沙尘暴事件影响造成的;将 4~8 月积雪表面不溶粉尘粒径分布进行了比较,粉尘微粒质量粒径分布表现出分布模式由沙尘活动前的单一模式 (3~21 μm),到沙尘活动期间的双峰分布模式 (3~21 μm 和 20~80 μm 组成),再到非沙尘季节的单一模式 (3~21 μm)的变化规律;粉尘化学离子组成,尤其是主要代表矿物颗粒的 Ca^{2+} ,在 4~6 月份浓度很高 (最大 7095 $\mu\text{g/L}$),另一方面, NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为可溶部分浓度变化存在差异。同时,用后向气团轨迹分析法验证了该区大气粉尘的传输路径,发现沙尘与非沙尘季节大气粉尘来源不同:分别来源于西北和西南方向,这对大气粉尘的传输和沉降造成很大影响。

关键词: 冰川; 积雪; 大气粉尘; 季节变化; 空间变化

Characteristics of aerosol dust deposition in snow on the glaciers of the Eastern Tianshan, China

Dong Zhiwen (Glacier chemistry)

Directed by Li Zhongqin

(Tianshan Glacier Station, Cold and Arid Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract

Windblown mineral aerosol dust derived from the crustal surface is an important atmospheric component affecting the Earth's radiation budget. Mineral aerosol dust is an important indicator of changes in the atmosphere associated with changes in temperature, precipitation, and atmospheric circulation. Ice core records show that high dust concentration corresponds with cold and dry climate conditions, while low dust concentration corresponds with warm and wet conditions. Aerosol dust information can be recorded and stored in the snow and ice of high mountains and of the polar regions. Much research has been carried out concerning dust records in ice cores, to understand climate change in ancient times. Other research has measured dust deposition in recent snow to understand recent climate and environment conditions. Atmospheric transport processes and transformation processes of the dust particles have also been studied to characterize the geochemical role of aeolian dust events in the Asia region. These dust events have been observed frequently in spring over the Asia-Pacific region because of the strengthened wind speed in springtime. Deposition of atmospheric dust was measured in snow deposited on Glacier No.1 at the headwater of Urumqi River, Haxilegen glacier No.51 in Kuitun and Miaoergou Glacier in Hami in Eastern Tianshan Mountain, western China. An analysis of horizontal distribution of dust layers, snow height and concentration of dust in the snow cover suggests that deposition of dust in Eastern Tianshan is different from each other. The characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow is different between three research points in Eastern Tianshan, as the environment

changes from west to east. Mean mass concentration of microparticles with $0.57 < d < 26 \mu\text{m}$ in the snowpack is 969 $\mu\text{g/kg}$, 1442 $\mu\text{g/kg}$, 3690 $\mu\text{g/kg}$, in three point respectively. Dust flux to Eastern Tianshan has a range of 58.2~73.8 $\mu\text{gcm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ for particles with $0.57 < d < 26 \mu\text{m}$. Dust layers in the snow cover contain Ca-rich materials typically found in Asian dust particles. Vertical profile of Na^+ concentration in the snowpack is also very similar with dust's. Volume size distributions of dust particles in the snow showed single-modal structures having volume median diameters from 3~22 μm . Dust profiles in snow cover over the last 4 yr reveal frequent sporadic high dust concentrations and large year-to-year variations in the amount deposited, implying that dust deposition in Eastern Tianshan is very sensitive to atmospheric environment change. Deposition of atmospheric dust was measured in the snow on Glacier No.1 at the headwater of Urumqi River in eastern Tian Shan, central Asia. An analysis of seasonal change of concentration of dust particles in the snow cover suggests that number concentration of dust particle is significantly high from April to June ($439 \times 10^3 / \text{ml}$), which may be caused by Asian dust storm in spring. The comparison of mass-size distribution of dust particles between April to August shows an obvious change trend. The distribution of particles changes from single model (3~21 μm) in non-dust period before April, to bio-model (3~21 μm and 20~80 μm) during Asian dust period, and to single model (3~21 μm) after June in non-dust period again. Ca^{2+} concentration in the snow is also very high from April to June, while NH_4^+ and SO_4^{2-} , as water-soluble constituents the concentration change is different from each other. Backward trajectory was also employed to examine the transport process of air mass in this region.

目 录

摘要	I
Abstract.....	IV
第一章 引言	1
1.1 雪冰中大气粉尘信号形成过程	1
1.2 影响雪冰不溶粉尘粒径分布的因素	4
1.3 雪冰中不溶粉尘记录的气候意义.....	5
第二章 研究区域概况.....	12
2.1 天山东部地区的地理环境.....	12
2.2 研究区三条典型冰川概况.....	13
第三章 野外样品的采集及实验室分析.....	16
3.1 样品的采集.....	16
3.2 实验室分析和数据处理.....	16
第四章 天山东部典型冰川积雪不溶粉尘空间变化特征	18
4.1 雪深和微粒浓度及通量的空间分布.....	19
4.2 积雪中不溶微粒的离子组成与粒径分布	22
4.3 不溶微粒沉积量的年际变化.....	27
4.4 本章小结.....	28
第五章 乌源1号冰川积雪不溶粉尘的季节变化特征.....	29
5.1 不溶微粒数量浓度季节变化.....	30
5.2 不溶微粒粒径分布季节变化.....	32
5.3 粉尘化学离子组成季节变化特征.....	35
5.4 本章小结.....	38
第六章 结论与展望	40
参考文献	42
致谢.....	49
个人简历.....	50

第一章 引言

1. 雪冰中大气粉尘信号及形成过程

沉积在冰雪中的大气粉尘是大气矿物气溶胶的良好记录，它的高分辨率以及对气候环境变化的敏感性具有独特的优势。雪冰中的微粒在沉积到冰雪前经历了起跳、传输和沉降等一系列复杂过程，了解这些过程对开展冰芯微粒研究非常有帮助。矿物气溶胶是指浮在空气中的矿物物质。它可以存在雨滴或冰晶里而沉降在地面，细颗粒可以直接悬浮在空气中。一般认为，北半球的沙漠是北半球沙尘、尘暴、浮尘等的源区（图 1.1）。在北半球，大的源区有两个。撒哈拉沙漠及其周围地区是当今地球上最强的沙尘源区。阿拉伯-中亚沙漠是仅次于撒哈拉的源区。另外北美有一小的源区，但比之前两源区，其影响比较小。撒哈拉尘埃的搬运受到 2 月份大气环流的强烈影响，对在地中海东部上空的强高压十分敏感。在冰期时，由于次强高压的发展，撒哈拉沙尘向其西南和南欧输送，而不是向东和向北大西洋输送。阿拉伯-中亚沙漠虽然规模小于撒哈拉沙漠，但无论是现代还是在冰期，由于源区物质供应强度大，还有西风带的影响，另外加之有利的气旋环流的引导，其尘埃输送量都是巨大的（姚檀栋等 1995）。Biscaye et al (1997)证明了中亚是格陵兰最可能的源区，而不是离其较近的北美沙漠和撒哈拉沙漠。

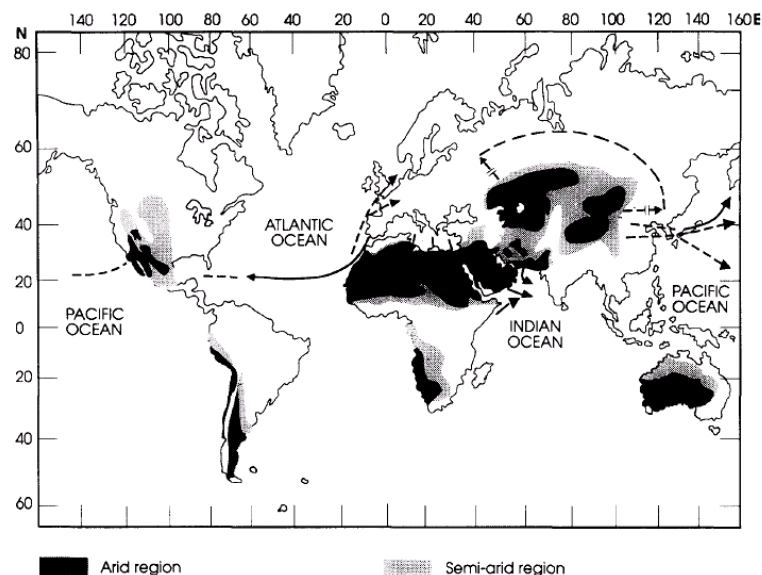


图 1.1 全球干旱与半干旱地区分布 (Sequeira, 1993)

Fig 1.1 Arid and semiarid region all over the world

风成粉尘的可溶部分很大程度上是有 CaCO_3 和 CaSO_4 组成的。因此在冰芯研究中 Ca^{2+} 经常可以作为粉尘的指示物。然而不同区域元素钙(Ca)的比率有很大不同,如黄土中Ca的比例范围是10%~30%(Pye, 1987),必须考虑源区对其的影响。而岩石中的Al成份的比例是非常相似的(8%, Bowen, 1979),因此Al能作为不溶微粒的非常好的指标,甚至可以作为整个粉尘浓度的指示物,但是Al的测量并不像 Ca^{2+} 那样方便。粉尘的源可以通过微粒矿物学和同位素组成进行研究。岩石中的矿物同位素比率如 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 或 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,由于不同岩石和古地磁年龄而不同。由于这些比率不会随天气或本身的转移而改变能完整的保存下来,因此它可以用做鉴定微粒的源区。Biscaye et al.(1997)和Grousset et al.(1992)通过此方法分别鉴定了东亚沙源和Patagonian沙源分别作为格陵兰和南极大陆粉尘源区的可能性。天山周边地区和青藏高原及周围黄土高原,是中亚沙漠源区的一个组成部分(图 1.1),其作为源已得到很多学者的认同(姚檀栋等 1995; 方小敏等 2004)。但在其内部,源的传输和沉降还不是很清楚。天山山区冬夏季分别受冬季风和夏季风的影响,同时西风急流也是一个重要的影响因子。Wake et al(1993)认为天山上空的沙尘主要是起源于塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地沙漠,并在持续的地面西北风作用下带到高原各地; Zhang et al (1996)研究表明在青藏高原中部4800m的地方沙尘源包括局地源(75%)和西风携带的沙尘(25%);最近研究表明高原沙尘天气的活动与西风急流有密切联系,高原沙尘天气发生的中心随西风急流的季节性转移而向北移动(方小敏等, 2004)。鉴于青藏高原的重要性和其上天气过程的复杂性,有必要展开充分的讨论和研究。

扬尘 粉尘自裸露地表由于风吹而扬起并输送到远处的过程是很有意义的,它不仅对了解大气中悬浮粒子的来源,而且对沙漠的迁徙,海床沉积和表土的风蚀等都是很重要的。风吹扬沙经常发生在植被覆盖比较少且地面干燥的干旱和沙漠地区,如图 1.2。在一次扬沙过程中,沙粒通常有三种运动形式:蠕动、跃迁、悬浮。沙尘的空间分布状况与沙尘粒径大小及风速的垂直分量密切相关。地面以上100 m内,垂直风速为7 m/s时,大于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的沙尘主要分布在近地面几米的高度范围内,小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的沙尘分布在100 m高度范围内,且几乎是均匀分布的。悬浮沙尘的平均粒径具有随高度以指数形式的递减规律。空间中沙尘数量与沙尘粒径大小、密度和风速有关。风速越大,空气中的沙尘数量越多,大粒径

粒子的数量也越多。空气中沙尘的数量,还与距离沙尘源地的距离及地表状态有关。距离沙尘源地较近的地区,沙尘数量较多,较远地区,沙尘数量显著减少。此外,地表的植被及土质特点也影响空气中沙尘的数量。

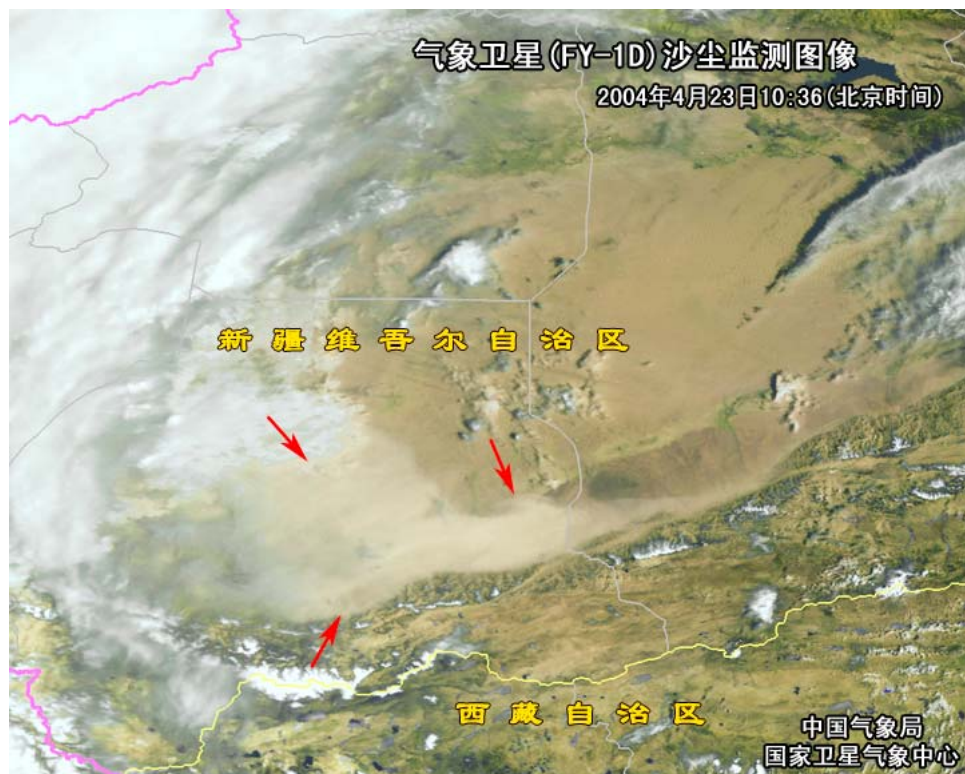


图 1.2 新疆地区沙尘发生卫星照片

Fig 1.2 Dust storm in Xinjiang

沉降 吹向空中的沙尘可以通过多种方式沉积到地面上,比较常见的是干沉降和湿沉降。通过重力和湍流输送作用将沙尘直接送到地表面使之从大气中消失的过程称为干沉降;通过降落的水汽凝结体(雨滴、雪片、霰粒等)把沙尘带到地面使之从大气中消失的过程称为湿沉降。许多情况下,干沉降和湿沉降是同时起作用的。气溶胶粒子的干沉降速率与粒子大小和密度有关。干沉降对粒径大于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒是非常有效的。粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒受摩擦速度和地面粗糙度影响而不同 (George A. S, 1980)。雪表面粗糙度通常为 $Z_0=0.1\text{cm}$ 。湿沉降通常分为雨冲刷和水冲刷,把最终形成降水的云的云中清除过程叫做雨冲刷,而把云底以下降落雨滴清除过程叫做水冲刷。云一旦形成降水,它对气溶胶的清除是雨冲刷和水冲刷共同作用的结果。湿沉降过程能有效的清除所有尺度的可溶性离子、极小的和极大的不溶性粒子,如图 1.3。通常云中吸收的气溶胶物质的浓度可以写成:

$$C_{1a} = \frac{E_a M_a}{W}$$

其中 E_a 为粒子的清除效率, M_a 是云所在位置气溶胶粒子在云形成之前的质量浓度, W 是云中的液态水含量。大量实验测量的结果表明 $E_a > 0.9$ 时, 也就是说, 在有云形成时, 云区的气溶胶粒子绝大部分被云吸收。

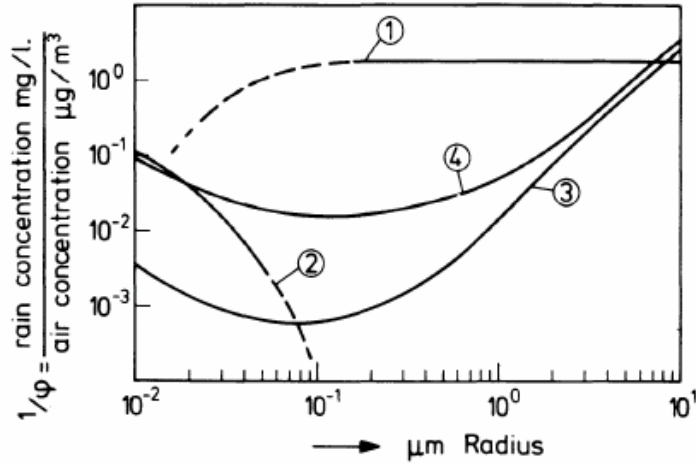


图 1.3 湿沉降过程 (1) 结晶过程 (2) 附带作用 (3) 水冲刷 (4) 干沉降 (Ruth, 2002)

Fig 1.3 Wet deposition of dust particles in four ways.

1. 2 影响雪冰中不溶粉尘颗粒粒径分布的因素

对粒径而言, 沙尘源的强度及冰盖离源的距离是非常重要的因素。格陵兰冰芯研究发现(Hansson M.E., 1994), 冰期特别是末次盛冰期的冰芯中不溶微粒是比较温暖时期全新世冰芯中不溶微粒浓度的 10~100 倍, 且大颗粒较多。很重要的原因就是中亚沙尘源区在冰期时面积扩大和干旱程度增加, 使得沙尘更多的进入大气环流中, 又由于降水的减少, 在空中停留的时间增长, 更容易传输到较远的地方。Thompson (1982) 分析了离海岸不同的距离处冰雪中不溶微粒的分布, 结果发现随着离海岸的距离增大, 微粒浓度逐渐减小, 海岸附近, 微粒数浓度高且粒径大, 积累量大。

搬运过程中的分选和大气环流也是影响粒径分布的一个因素。对长距离搬运的颗粒, 其分选程度较高, 粒径更接近正态分布, 粉尘也更接近均衡颗粒 (Equilibrium Grain)(Rea et al., 1995)。正如前面所述, 沙尘在空间的分布状况与沙

尘粒径大小及风速的垂直分量密切相关。例如，末次冰期时海冰的扩展和极锋的北移形成了阻止气团进入南极洲腹地的有效障碍，使得起源于南美的粉尘搬运到该钻孔时经历了更长的距离和时间；而在全新世时，情况相反，大气环流更为经向，气团更容易进入南极腹地（Andersen et al., 1998; Tegen et al., 2000）。

沉积高度也是影响冰芯微粒粒径分布的因素。粉尘粒径随高度的增加而变细，粗颗粒的组分急剧减少。格陵兰的 GRIP 冰芯海拔高度为 3238m，GISP2 为 3200 m，EPICA Dome C 为 3233 m，它们的体积众数粒径基本在 2 μm 左右。而慕士塔格的海拔为 6350 m，粉尘的数量众数粒径小于 1 μm ，日本中部 Tateyama 山脉的粉尘粒径众数在 10 μm 左右，因为其积雪样品取自海拔在 2800 m 左右的山脉。这表明高空大气搬运的粉尘中，细颗粒和超细颗粒在数量上占绝对优势。

1. 3 雪冰中不溶粉尘记录的气候意义

1. 3. 1 微粒定年

在上个世纪前期，人们在世界的不同的地方就发现在积雪中存在有层状的有颜色的雪层，并且认识到这是由于风成粉尘沉积到冰雪里的结果。Marshall(1959)首先发现格陵兰冰盖中微粒的存在，并且存在年层变化的规律。Marshall(1962)从Byrd冰芯的微粒研究中发现，微粒含量存在规律的变化，并且认为这些规律性的变化可能是由冰芯中的年层变化引起的，同时认识到这可能对年积累量的计算、特殊事件的时间和大气环流的认识都有很大帮助；Marshall还首次使用了微粒测量仪器——Coulter Counter，为开展冰芯微粒提供了良好的测试方法。Thompson和其他研究者在对Byrd冰芯研究时，进一步发现微粒含量的季节性循环变化（Thompson, 1977a）；Thompson（1977b）在对Byrd冰芯和Camp Century冰芯进行对比研究时，进一步阐明了微粒含量不但具有季节性循环变化，而且与 $\delta^{18}\text{O}$ 具有很好的对应关系（秦大河, 2001）。由于所处气候环境的不同，微粒含量高值出现的季节也不同，在一定范围内，南极春季降雪微粒含量较高；格陵兰Camp Century冰芯中晚冬和早春雪中微粒含量较高（刘纯平, 1999）；青藏高原冰雪中的微粒则主要发生在每年的2-6月（Wake et. al., 1993）。

微粒受气候周期性的变化而周期性的变化，为冰川学家进行冰芯定年提供了很大的帮助。很多冰芯都直接采用或参考微粒进行了定年（Thompson E. M et al.,

1980; Thompson et al., 1989, 1998; Knusel S et. al., 2003)。根据高分辨率的微粒记录进行冰芯定年的方法有两种,一种是从上至下直接数出整个冰芯中不溶微粒含量的峰数;另一种是根据冰芯某段中不溶微粒含量的峰数计算出该段的年积累量 a_i , 然后把 a_i 应用到该冰芯的其它未知段来计算出冰芯的年龄。作为一种地层学的测年方法,不溶微粒测年的优点是明显的,因为这种方法可以用于现场测量,而且这种方法的分辨率可进一步提高。但对于大部分冰芯仅实用于上部,敦德(DunDe)冰芯(Thompson et al., 1989)仅上部 70 米利用了微粒定年,这一结果同流动模型定年的结果非常吻合。

有时微粒特别是火山灰微粒可以作为定年的参考层(Thompson E. M, 1983; Thompson et al., 1985, 1995),微粒含量与已知火山事件在时间上有很好的相关性。但火山活动作为参考层更多的是根据火山喷发时所放出的酸性气体(如 SO_2) 在空气中被氧化生成硫酸,最后通过干湿沉降到雪层里,通过测试雪冰样品的电导率(Knusel S et. al., 2003)和硫酸盐的浓度进而计算出火山排放通量(Volcanic Flux)(Jihong Cole-Dai et. al., 2000)来恢复火山活动的记录。

1.3.2 微粒记录的气候环境变化

作为大气粉尘的一部分,微粒是气候变化的产物,气候的任何变动必将引起大气中微粒的变化。冰芯中微粒含量是恢复古气候的一个良好的指标,通常可以通过微粒浓度含量和微粒粒径的分布去进行研究。冰芯微粒已在不同地区进行了研究,格陵兰冰芯和南极冰芯记录都显示微粒与气候变化(以 $\delta^{18}\text{O}$ 为指标)有很好的相关性,微粒含量的长期变化趋势是暖期($\delta^{18}\text{O}$ 值大)浓度低,冷期($\delta^{18}\text{O}$ 值小)浓度高,尤其冰期和间冰期气候变化对微粒含量的影响是非常明显的。众多的冰芯微粒研究表明,晚冰期(约 24-12 kya B. P.)冰芯中微粒含量达到全新世时期平均微粒含量的 2~30 倍,整个末次冰期微粒含量明显高于现代微粒含量(姚檀栋等, 1997; Steffensen, 1997; Delmonte, 2004)。Dome C、Byrd、Camp Century 末次冰期微粒含量分别是全新世的 6 倍、3 倍、12 倍(Thompson et al., 1981)(图 2-2)。Vostok 冰芯微粒间冰期含量从 50ng g^{-1} 上升到冰期的 $1000\text{-}2000\text{ng g}^{-1}$ (Peit et. al., 1999)。末次冰期冰芯微粒突变的原因是当时气候多种条件变化的结果,首先,冰川风的增强,有可能使得沙尘活动更频繁且更可能发生远距离的输送;其次,大气水循环的减弱,能使粉尘在大气中停留更长的时间;最后,粉

尘源的扩大使得更多的粉尘可能进入了大气中 (Mahowald et al., 1999)。但在青藏高原, 古里雅冰芯微粒记录显示青藏高原末次冰期的浓度变化并没有象极地冰芯中那么强烈, 千年尺度的平均值从 $(500\sim600) \times 10^3$ 个/ml 迅速增加到了近 800×10^3 个/ml (郭光剑等, 2004), 反映出末次冰期时青藏高原存在某种局地气候变化。

粒径分布是恢复古气候和古环境强有力的参数 (Delmonte et. al., 2004)。短期或长期的微粒粒径分布的不同可以反映源的强度、源的远近、源地表植物覆盖的情况、大气环流的状况、气候条件、水汽的循环和积累量等的情况。Steffensen (1997) 分析 GRIP 冰芯时发现, 粒径处于 $0.4\sim2.0\mu\text{m}$ 的微粒体积分布呈正态分布, 而且在整个冰芯中是分布非常一致的, $2.0\sim6.0\mu\text{m}$ 粒径间的微粒体积冷期时要高于其它时期, 可以看出冷期微粒的贡献以大颗粒为主。Zdanowicz (2000) 认为加拿大 Penny 冰盖由于晚更新世时期的粒径众数 ($d_v \approx 1\mu\text{m}$) 小于现代降雪中的粒径众数 ($d_v \approx 2\mu\text{m}$), 推断晚更新世时期微粒的源要远于现在的源。NGRIP 冰芯也有类似的结果 (Ruth, 2003)。东南极 EPICA Dome C 冰芯微粒质量-粒径分布的众数值约为: $2\mu\text{m}$, 小于 $0.7\mu\text{m}$ 的微粒占全部微粒质量的不到 10%。且发现, 末次冰期和全新世微粒体积浓度比变化主要依靠 $2\sim5\mu\text{m}$ 微粒浓度的比 (Delmonte et. al., 2002)。Delmonte (2004) 还根据南极 Dome B 和 EPICA Dome C 冰芯中细、粗颗粒的百分比 FPP (fine particle percent) 和 CPP (coarse particle percent), 得到了两个区域末次冰期时微粒传输机制的差异。

冰芯微粒的矿物成份研究也是微粒研究的重要方面。研究冰芯粉尘的矿物成份, 其主要目的是获取能够指示冰芯中的粉尘特征和源区在地区性的独特特征之间联系的物质, 一般把冰芯粉尘中这种具有某个源区特征指示意义的物质称为来源示踪剂 (provenance tracer)。对冰芯矿物质粉尘成份分析所采用的主要仪器是: 扫描电镜和 X 射线粉末衍射仪 (XRD)。扫描电镜的方法通称扫描电镜-能量色散系统的方法, 简称 SEM-EDS, 有时也称为 SEM-EDAX。粘土性矿物质在陆地上分布与风蚀作用呈一级函数关系, 主要随气候而变, 因此, 粘土性矿物质在空间尺度上有的广泛变化, 这就使得粘土性矿物质成份成为粉尘来源良好的示踪剂, 例如, 部分粘土和一些痕量矿物质分布是依纬度而定的。对纬度相关最敏感的矿物质指示因子是粘土矿物质高岭石 (Kaolinite) 和绿泥石 (Chlorite) 相对丰

度的比值, 即 K/C 。通过 XRD 测试, 全球主要的三个粉尘源 (东亚、北美、北非) 中, 东亚源区, K/C 比值范围是 0.1~1; 而北美和北非粉尘源区 K/C 比值变化范围是 1~10 (Eonarummo, 2003)。Eonarummo(2003)据此还判定北美有可能是格陵兰冰雪粉尘的源区。

对于冰芯粉尘的源区来说, 自然界产生的稳定和放射性同位素, 同样可以作为有用的示踪剂。由于具有不同的岩性和不同的地质时代的岩石, 岩石中一些同位素组成是清楚的, 如: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 。这三个同位素体系, 无论从它们在母体岩石中的矿物质分配上, 还是到风蚀作用方面, 亦或是颗粒物尺度的粒度级方面, 其地球化学性质彼此之间均不相同。Biscaye et al.(1997)和Grousset et al.(1992)通过 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分别鉴定了东亚沙源和 Patagonian 沙源作为格陵兰和南极大陆粉尘源区的可能性。

冰芯微粒数据还经常被用于大气环流模式 (general climate models, GCM) 研究, 大气环流模式是研究大气粉尘和气候变化之间关系的很好的工具。通过模式可以模拟粉尘源区古气候变化、水汽循环和源区植被覆盖情况等。由于末次冰期粉尘变化比较强烈 (2~30 倍于现在) 以及末次冰期期间边界层条件 (冰盖的扩张, 大气的组成等) 比较清楚, 所以众多的粉尘循环模式应用于末次冰期 (Joussaume, 1993; Andersen et al., 1998; Mahowald et al., 1999; Reader et al., 1999; Tegen I, 2000)。各种模式的侧重点不同, Joussaume (1993) 更多的考虑的是大气条件的变化引起的微粒增加; Andersen et al (1998) 认为陆地面积的增加是粉尘变化的主要原因; Tegen I (2000) 主要考虑了纬度温度梯度的增大导致粉尘的变化。大多模式模拟的结果也得出了一些非常有意义的结果, 如末次冰期时各种条件的变化对冰芯中微粒的影响及各自的贡献等。但有的结果不是很理想, 模拟的结果经常是高纬度的值比冰芯记录的值低。而且模拟的粉尘粒径范围比较小 (Joussaume, 1993; Andersen et al., 1998; Reader et al., 1999; Tegen I, 2000)。

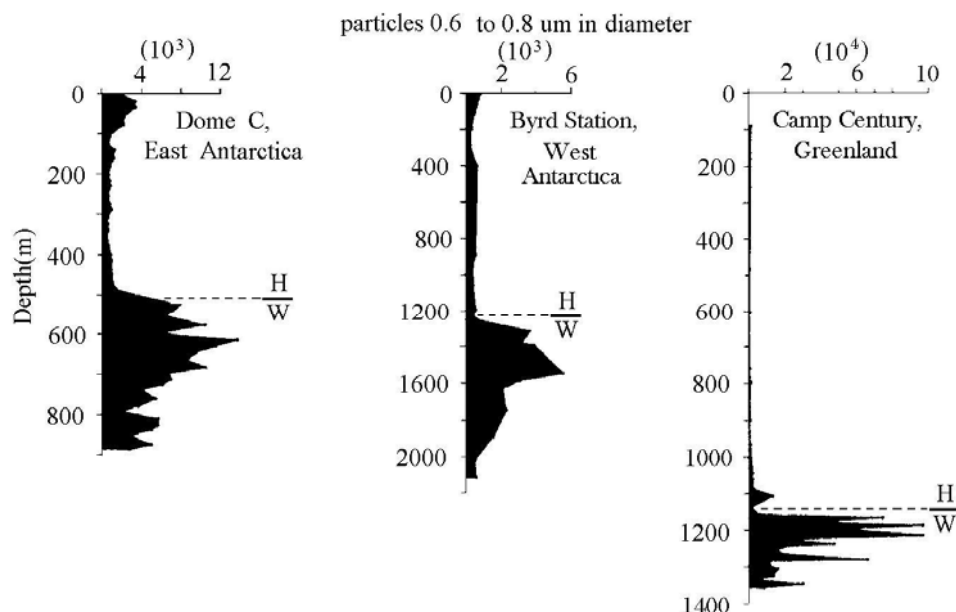


图 1.4 极地冰芯中微粒变化，H/W 是末次冰期进入全新世的界限（Thompson et al., 1981）

Fig 1.4 Variation of dust particles in the ice core of polar regions

1.3.3 微粒与可溶性离子的关系及其季节性变化

大气粉尘通常分为可溶部分和不溶部分，可溶部分大都是由碳酸钙和硫酸钙组成，不溶部分则是所说的微粒。要完整的恢复冰芯中记录的大气粉尘，需要同时知道冰芯所记录的大气粉尘的可溶部分和微粒的分析结果。

Ca^{2+} 或非海盐 Ca^{2+} (nssCa^{2+}) 作为粉尘可溶部分的主要离子经常被用作反映大气粉尘的指标（Mayewski et al., 1993; Fuhrer et al., 1999; Rothlisberger et al., 2002; Ruth et al., 2002）。Rothlisberger (2002) 以 nssCa^{2+} 为大气粉尘的指标，发现Dome C冰芯中末次冰期 (LGM) 时 nssCa^{2+} 的浓度是全新世时期的 50 倍；NGIP 冰芯中LGM时期的 Ca^{2+} 浓度是全新世时期 Ca^{2+} 浓度的 4 倍（Ruth et al., 2002）。

粉尘中可溶部分只是粉尘的一小部分，究竟 Ca^{2+} 能多大程度上反映粉尘的变化呢？微粒作为大气粉尘记录最直接的指标，应该是最准确的。因此首先用 Ca^{2+} 和同一冰芯的微粒记录进行比较。如果粉尘中可溶部分和微粒的含量是固定的或冰芯粉尘的来源是单一的，则微粒和代表可溶部分的 Ca^{2+} 应该有很好的 consistency。这在格陵兰冰芯中得到了很好的验证。在NGRIP冰芯中， Ca^{2+} 和微粒记录一直保持着较高的相关性，全新世和LGM部分样品的相关系数分别是：0.92 和 0.89 (Ruth et al., 2002)；而在GRIP冰芯中两者的相关系数高达 0.978（图 2-3）（Steffensen,

1997); Renland冰芯 (Hansson et al., 1994) 上部分 Ca^{2+} 和微粒记录有很好的对应, 底部 25m左右, 由于基岩的影响相关性较差。青藏高原古里雅冰芯中 Ca^{2+} 浓度变化超前于微粒的变化, 相位对应比较差, 这可能是由于古里雅冰芯中 Ca^{2+} 来源的多样性所造成的, 高原上众多的盐湖也含有较多的 Ca^{2+} (于升松等, 1981), 但来自干旱区的粉尘所占的比例十分重要, 二者趋势上存在一定的相似性, 整体的相关性还是存在的, 因此古里雅冰芯中的 Ca^{2+} 可以作为大气粉尘的指标 (姚檀栋等, 2004)。南极冰芯中由于陆源物质比较少, Ca^{2+} 等离子主要反映陆源物质成份变化的环境指标的重要性相对低 (姚檀栋, 1997) 没有发现 Ca^{2+} 和微粒有比较好的相关性。

Ca^{2+} /粉尘的比值也是反映古气候的一个指标。在NGRIP冰芯中 (Ruth et al., 2002), 全新世和LGM时期的比值是不同的, 全新世的值为: 0.29, LGM时期的值为: 0.11; 这和GRIP中 Ca^{2+} /微粒的比值相似 (全新世: 0.23; LGM: 0.08) (Steffensen, 1997), 且两根冰芯中 Ca^{2+} /粉尘的比值随氧同位素 (温度) 的升高而升高, 表明暖期可溶性钙盐成份相对增加, 其原因可能是高温时有利于盐类的溶解。

冰芯中可溶性离子除了 Ca^{2+} 和微粒有一定的相关性外, Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和微粒也有类似的结果。如慕士塔格冰芯中 SO_4^{2-} 和微粒数量浓度和质量浓度之间有明显正相关 (邬光剑, 2004); 而不论在格陵兰冰芯还是青藏高原冰芯, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的都有很好的一致性, 如: Taylor Dome冰芯中, 二者的相关系数是 0.926; GISP2 中二者的相关系数为 0.963; 达索普浅芯中, 二者的相关系数为 0.95 (康世昌等, 2000); 古里雅的 8m浅冰芯中二者相关系数为 0.55 (李月芳等, 1997)。有时在某些冰芯中 SO_4^{2-} 和微粒的一致性要比 Ca^{2+} 和微粒的相关性要好。如Sajama冰芯中, 微粒和 Ca^{2+} 没有微粒和 SO_4^{2-} 的匹配程度高。

尽管 Ca^{2+} 和微粒在一些冰芯中存在有比较好的相关性, 但也必须看到某些地区如南极和中纬度地区中的冰芯 Ca^{2+} 和微粒的相关性并不太满意。在非洲的乞力马扎罗的KNF2、KNF3 冰芯中, 微粒与 Ca^{2+} (或 SO_4^{2-}) 含量并没有显著的相关性, 即使去掉异常高值的微粒或离子数据后仍没显著的相关性 (Thompson et al., 2002); Devon岛冰芯中 Ca^{2+} 和微粒的相关性也不太令人满意, 其原因可能是冰芯中粉尘有多个来源造成的 (Fischer et al., 1979)。

可以看出,影响大气粉尘不溶部分和可溶部分一致性的原因可能有:一、来源不同。不同区域元素钙(Ca)的比率有很大不同,如黄土中Ca的比例范围是10%~30%(Pye, 1987),日本Mount Tateyama雪坑研究发现富含 Ca^{2+} 的污化层仅仅发生在亚洲沙尘暴期间(Osada et al., 2004),而来源于西南亚的沙尘 Ca^{2+} 含量则相对较低(Wake et al., 1994),因此高微粒含量有可能对应低的 Ca^{2+} 含量,而低微粒含量有可能对应高的 Ca^{2+} 含量;二、气候的转变。气候转变过程中,温度、湿度等气象因子都会发生变化,这对可溶部分的溶解,微粒的沉降都会产生影响;另外,特殊事件(火山喷发等)也都会影响到 Ca^{2+} 和微粒的相关性(Ruth et al., 2002)。如火山喷发事件中,由于火山喷发产生大量的 SO_2 气体,使得更多的 CaCO_3 被反应产生更多的 Ca^{2+} ,造成 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度的峰值。

大气粉尘受大气环流的季节性变化而表现为季节性差异。本文根据其形状分布,把冰雪中微粒浓度分布分为:单峰型、双峰型和多峰型。单峰型指在一年内冰雪中微粒浓度只有一个高值,而双峰型是微粒浓度有两个高值点,多峰型是多个高值点。在青藏高原和北极地区等都发现雪坑中微粒含量呈季节性变化。Wake (1994)在青藏高原多个点进行了雪坑采样,发现达索普冰川、格拉丹东和慕士塔格雪坑中微粒数量和质量都有季节变化。达索普雪坑微粒呈双峰型分布,这是因为不同季节受不同系统控制造成的一夏季受南压季风影响,冬季受西风环流影响;格拉丹东和慕士塔格雪坑微粒都是单峰型变化,最大值出现在春季的沙尘暴期间;喀喇昆仑山希斯帕尔(Hisper)雪坑则是多峰型变化。北极的Baffin岛的雪坑记录微粒呈双峰型分布,峰值分别对应冬末-春和夏末-秋,且第二个峰值由于源区距离比较近,浓度和众数粒径都比第一个峰值大(Zdanowicz et al., 1998)。日本的Tateyama山微粒分布呈单峰型(Osada, 2004)。

第二章 研究区域概况

3.1 天山东部地区的地理环境

天山东部地区位于我国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2.1），而天山山颠发育了众多的高海拔山岳冰川。南面是位于塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地沙漠；东临位属东新疆和西甘肃的沙地，以及内蒙古戈壁高原；北面与位于准葛尔盆地的古尔班通古特沙漠呼应，西与巴基斯坦的木云库姆沙漠相临。

大面积的沙漠和戈壁环境、极低的植被覆盖率以及复杂的低层大气环流为周边地区沙尘暴的产生提供了有利条件，从而使沙尘暴成为该地区的一大环境特点，历史上多有记载。强沙尘暴主要发生在每年的3-5月份。尤其是4月份（李江风，1991）。最新统计分析表明，地域上沙尘暴的高发地区是南疆的和田、新疆东部、甘肃的河西走廊和宁夏的黄河灌区等地。新疆地区的低层大气环流以及河西走廊和新疆东部地区特有的“东灌天气”（李江风，1991）为沙尘暴所扬起的尘埃物质向周边大气环境的扩散提供了条件。

由于天山位于欧亚大陆腹地，南有青藏高原，西有帕米尔高原，北有阿尔泰山，东有准格尔界山，这种复杂的横亘地形，对环流具有一定的特殊性。其高空受北半球西风带控制。大致在4000 m以下，由于受青藏高原和帕米尔高原的影响，西风气流在接近高原时会被高原分成南北两支。而影响天山地区的主要是北支气流。冬季（1月），在1500 m高度上，北支气流由于地形影响，在天山南北产生两支反气旋性的环流，成为该地区冬季主要天气气候形成的一个环流特征，是形成天山两侧地区冬季偏北风、东北风和干冷气候的主因（图2.5）。造成北疆干冷的偏东风和罗布泊地区及南疆的干燥天气。春季（4月），天山南北的两支反气旋仍然存在，但从北疆东部东南下的一支气流在天山尾闾处转向东南进入罗布泊地区形成反气旋环流，与沿天山南麓东进的另一支气流相遇，而后转向东南。该气流在南疆西南部地区与翻越帕米尔高原沿昆仑山北麓东进的气流相遇，加强了这支气流的反气旋作用，由此天山东部尾闾地区干旱化。致使南疆春季在昆仑山，阿尔金山一带，降水很少，多强浮沉天气（图2.2）；夏季（7月），由于天山地区地处中国西北内陆地区和青藏高原的阻隔，在中国大部分地区盛行的东南

季风和西南季风难以影响该区域，天山地区仍以西北气流为主。一支西北气流东南下时，在 75°E 为天山北麓所阻，转向东行，至天山中部由乌鲁木齐谷地西南下，形成一支反气旋式的气流，造成高温干旱的天气气候。但这支气流由西北带来冷湿空气，受天山之阻，产生抬升降水，在天山北麓和天山山区形成较大的降水。

3.2 研究区三条典型冰川概况

乌鲁木齐河流域内山势高，坡降陡，植被覆盖面积积极小，垂直地带性明显。3600 m 以上为高山寒冻带，日平均气温在 0°C 以下，大部分为积雪和冰川覆盖；2600-3600 m 为亚高山区，暖季短促，植被为高山荒原及垫状植被，融冻风化强烈；1600-2600 m 为中山带，生长有稠密的云杉林；1600 m 以下的低山丘陵为荒漠草原，用作春秋牧场。该地区代表性植物为雪岭云杉针叶林和草原植物（张寅生，1994）。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 1.73 km^2 ，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。



图 2.1 乌鲁木齐河源 1 号冰川

Fig 2.1 Urumqi glacier No.1 in Tianshan, China.

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川所处的周边地理环境对该地区人类活动有所限制。工业生产主要集中于周边规模较大的城市中。乌鲁木齐市位于天山 1 号冰川东北方向直线距离约 105 公里处,密集的人类活动对大气造成污染,尤其是秋-冬季节,煤、石油等化石燃料的燃烧排放出大量污染物质。顺乌鲁木齐河河谷而下约 50 公里的后峡镇自 1958 年以来先后建有钢铁厂和水泥厂等。这些近距离城镇的工业生产和居民生活所排放的大气污染物在适宜的条件下可被地方性的环流系统和谷风携带到乌鲁木齐河源 1 号冰川。

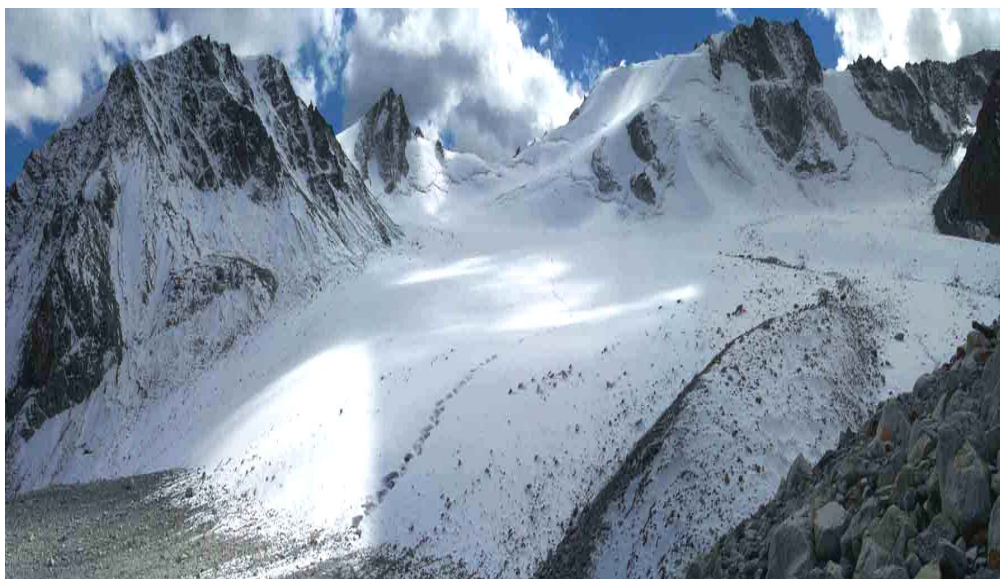


图 2.2 奎屯哈希勒根 51 号冰川

Fig 2.1 Kuitn Haxilegen Glacier No.51 in Tianshan,China.

奎屯河哈希勒根 48 号冰川 ($43^{\circ}43'N$, $84^{\circ}24'E$) 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。哈希勒根 51 号冰川不仅冰川形态较为规则,冰面比较平坦和洁净(无表碛覆盖),而且冰面裂隙不甚发育(只有在冰川左侧边缘和后壁出现裂隙)。尤其是交通条件便利,汽车从奎屯市出发,沿独—库公路(独山子—库车)行驶至 130km 处停车,而后人工步行大约 2 小时即可到达冰舌末端,再花大约 2 小时即可到达粒雪盆。鉴于上述,该冰川是较为理想的进行长期监测研究的冰川

哈密庙尔沟平顶冰川 ($43^{\circ}03'N$, $94^{\circ}19'E$),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 km²。哈密庙尔沟冰川区是哈密人民生活和经济发展的固体水源地, 处于天山山脉的最东端, 是一个很独特的冰川区。



图 2.3 哈密庙尔沟平顶冰川
Fig 2.1 Miaoergou Glacier in Tianshan, China.

第三章 样品的采集与实验室分析

4. 1 样品的采集

2004 和 2005 年 7 至 9 月,在天山东部的三个采样点 (图 1),奎屯哈希勒根 51 号冰川 (海拔 3900 m)、乌鲁木齐河源 1 号冰川 (海拔 4130 m) 及哈密庙尔沟平顶冰川 (海拔 4510 m) 积累区共挖了 8 个雪坑,其中乌鲁木齐河源 1 号冰川为 4 个雪坑,其余两条冰川各 2 个雪坑,深度范围 0.53 m 至 2.76 m。所挖雪坑底部到达冰面,采样密度为每 10 cm 一个样品,每个雪样 100 g,共取得 200 多个样品。此外,2005 年 4~8 月,在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区 (海拔 4130m) 采集积雪样品,表层雪为积雪上层 5 cm 深的雪样,每个雪样 100 g,共取得 5 个月 22 个样品。采样过程严格按照冰雪采样程序进行,前人已有详述^[1,4]。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-18℃冷冻状态,直至在中国科学院冰冻圈科学实验室分析。

4. 2 实验室分析和数据处理

微粒的粒度分析使用 Accusizer 780A 光学粒径检测仪。详细原理前人已有论述^[20]。该仪器可测量微粒的粒径范围是 0.57~400 μm 。采用单离子光学传感技术,通过比较检测的脉冲高度和由一组均质的已知粒径的标准粒子获得的一条标准校正曲线,建立粒子在一个时间段的粒度分布。分析前使样品在室温下自动融化。实验从融化、取样、注样到分析整个过程都在洁净等级设计标准为 100 级的超净工作台内完成,尽可能减少实验误差。微粒分析和测量的精度在 5% 以内^[20-21]。同时分析了雪样化学离子组成, Na^+ 、 Ca^{2+} 等离子浓度是用 Dionex-600 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 %。

仪器分析得到各个粒径范围内的微粒的精确数量,可以根据需要进行统计。本研究计算了微粒浓度,包括质量浓度和数量浓度,质量的计算通过体积粒径分布得到,而雪冰不溶微粒的平均密度一般认为是 2.6 g/cm^3 ; 同时计算了粉尘的沉积通量,年积累率用了比较可靠的估计值;分析了微粒的体积粒径分布,依照 Wake

和 Steffensen等人的方法^[4,12]，算出了体积随粒径变化的对数分布，并用反映微粒正态分布的多项式曲线进行拟合，其拟合公式：

$$\frac{dV}{d \log r} = \frac{V_0}{\sqrt{2\pi} \log \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log r - \log \mu}{\log \sigma} \right)^2 \right]$$

式中， V 表示微粒的体积； r 是微粒半径，是微粒粒径 d 的一半； V_0 是该粒径范围内微粒对数分布的总体积； σ 是正态分布的标准偏差； μ 是粒径的数学期望值，它是正态分布曲线最高点所对应的粒径众数值。体积随粒径的对数分布可以很好地反映微粒的粒径分布状况。在季节变化研究中，运用后向气团轨迹分析法检验到达乌鲁木齐河源大气气溶胶粉尘的传输路径和过程。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海拔 4130 m 高度 3d 内的大气粉尘后向传输轨迹。

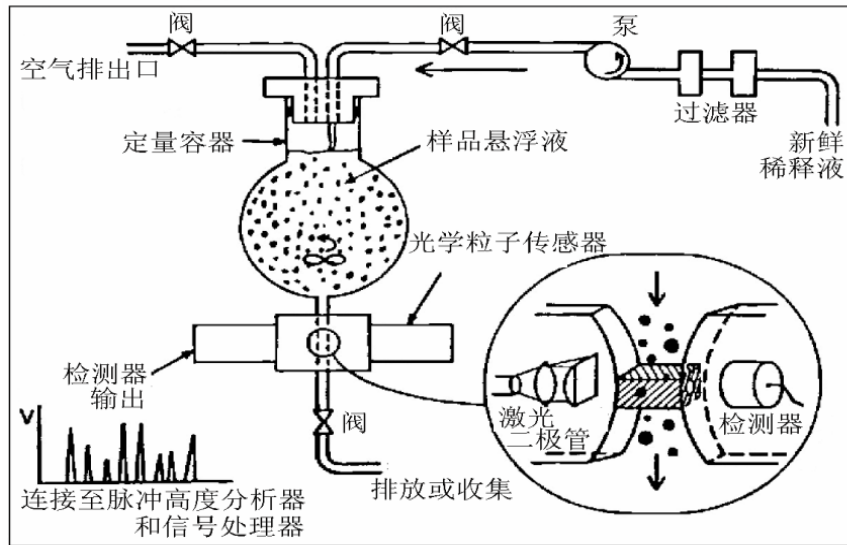


图 3.1 微粒分析仪器原理

Fig 3.1 Accusizer 780A particle sizer.

第四章 天山东部典型冰川积雪中不溶粉尘的 空间变化特征

IPCC 第四次评估报告指出,近 100 a 来地球表面平均气温上升了 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$, 全球变暖已经是不争的事实。大气中的微粒是气候环境变化的重要指示器,与大气温度变化有着密切的关系。冰芯记录研究显示,当微粒含量高时对应的气候条件为冷干,含量低时气候多为暖湿。雪冰是大气中各种物质的储存器,沉积在高海拔雪冰中的大气粉尘信息能够被很好地记录和保存。对雪冰中微粒研究有着重要意义,如冰芯微粒研究对于冰芯定年、气候环境变化的纪录恢复方面起了重要作用;而冰川积雪中的不溶微粒则用来研究近期气候环境变化。在全球许多地区,包括极地地区和青藏高原都进行过广泛的雪冰微粒特征研究,并且取得了很多研究成果和进展。然而,对于中亚内陆尤其是天山山区雪冰中微粒特征的研究则比较缺乏。大气粉尘的浓度和粒径分布等特征的变化由于受到风力、搬运距离、沉积过程等因素影响,从亚洲粉尘源区开始搬运,经过距离远近不同的地区表现出不同特征。因此,在亚洲粉尘源区研究雪冰中微粒沉积特征,并与北半球其他地区已有的相关研究结果进行比较,对于完善大气粉尘循环和沉积机制的认识显得尤为重要。而且,微粒的大气输送过程和转换过程也可用于研究中亚地区大气沙尘事件在地球化学方面的作用特征,而这些沙尘事件的发生经常在春季观测到。我国境内的东天山,位于亚洲沙尘活动的源区范围内(图 4.1)。沉积在山岳冰川积雪中的不溶微粒可以直接反映大气中的粉尘信息,是气候环境变化的指示器。化学分析和气象相关性表明,天山东部冰川积雪中发现的厚污化层主要通过春季发生的大气沙尘暴微粒沉积形成。然而,对于该区冰川积雪污化层的形成过程和微粒特征仍然不清楚,亟待进行相关研究。而且,通过研究接近于成云高度积雪中沉积的微粒数量和浓度,可以对中亚内陆上空自由对流层粉尘输送提供一个有用的认识。主要研究了近年天山东部的奎屯哈希勒根 51 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川以及哈密庙尔沟平顶冰川积雪中微粒的浓度、沉积通量、化学离子组成和粒径分布状况等特征,并对微粒沉积量的年度变化及其环境敏感性进行了分析。

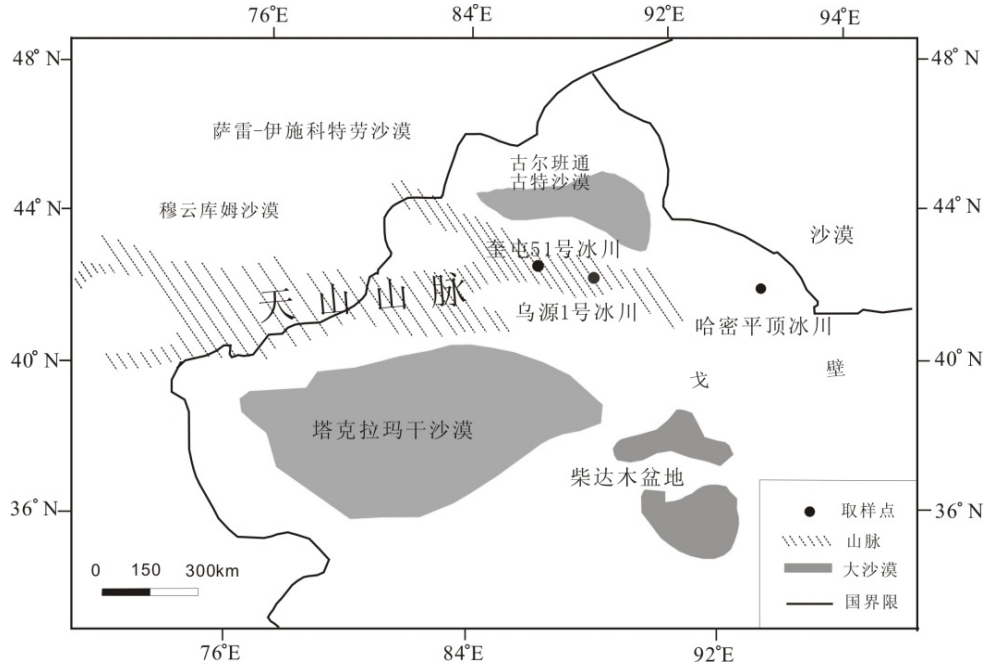


图 4.1 研究区三条冰川采样点分布图

Fig 4.1 The three glaciers in this work in eastern Tianshan, China.

4.1 雪深和微粒浓度及通量的空间分布

如果研究区雪的沉积环境是连续理想的状态，即没有雪的再次分配，大气环境信息如粉尘沉积等就会被很好的保存在雪层中。本研究在三条冰川积累区取样点沉积环境比较理想，地形较为平坦。在自西向东三个取样点，雪坑平均深度分别约是 2500 mm，2000 mm，1000 mm。雪层厚度的不同主要由于受到降水量的影响。天山山区处于西风带影响下，水汽的来源主要是西方的海洋，从海洋带来的水汽在自西向东输送过程中逐渐减少，造成从奎屯到乌鲁木齐河源、到哈密的降水量逐渐减少。因而造成冰川积累区雪层深度在水平空间上的差异。

图 4.2 显示天山东部三个取样点 2005 年夏季雪坑的三个典型微粒浓度垂直剖面。通过研究比较发现，同一采样点不同雪坑的不溶微粒浓度剖面存在较好的相似性和一致性，这里只列举三个点具有代表性的雪坑剖面进行讨论。如图 4.2 中代表峰值的曲线表示的污化层，尽管三个采样点雪层深度不同，然而它们的厚污化层却有很好的空间对应性。在乌鲁木齐河源 1 号冰川的研究表明，积雪内每年形成 1 个厚污化层，也就是说，厚污化层数能够代表雪层沉积的时间；取样点的雪坑和微粒浓度剖面显示了 4 个厚污化层，说明雪坑代表近 4 年的积雪沉积。不溶微粒沉积的这种明显水平空间相关性也表明了东部天山大气粉尘沉积事件

在区域上的一致性。

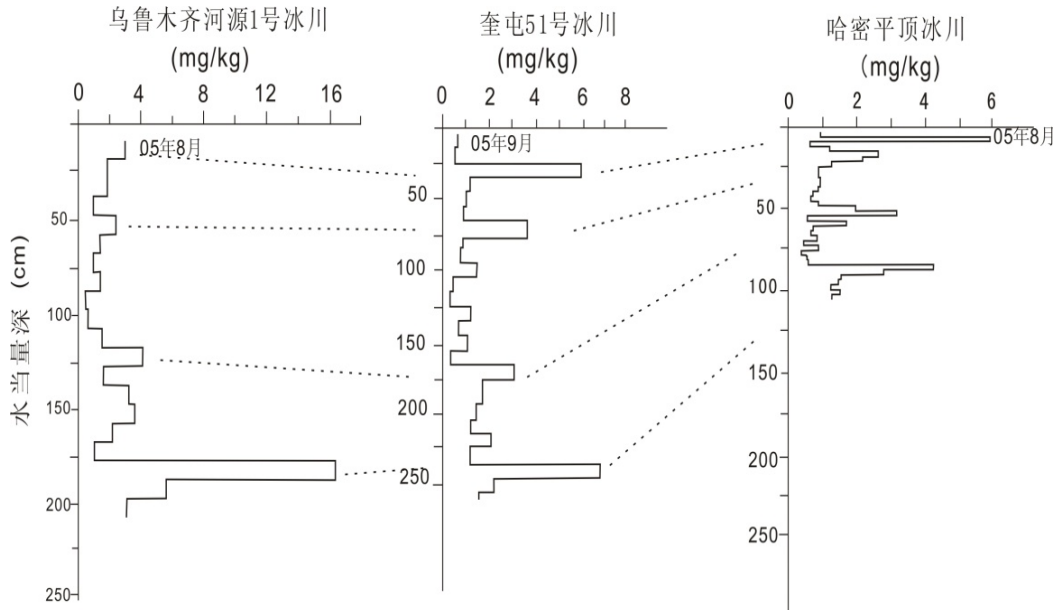


图 4.2 2005 年夏季东部天山采样点微粒浓度的三个典型垂直剖面

Fig 4.2 Three profiles of dust concentration in eastern Tianshan.

表 4.1 说明了天山东部三个取样点 8 个雪坑得到的微粒平均数量浓度和质量浓度。分析发现，自西向东研究点奎屯哈希勒根 51 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川及哈密庙尔沟平顶冰川积雪中粒径 $0.57 < d < 26 \mu\text{m}$ 微粒的数量浓度依次为 $166 \times 10^3 / \text{ml}$ 、 $242 \times 10^3 / \text{ml}$ 、 $222 \times 10^3 / \text{ml}$ ，尽管 1 号冰川数量浓度最大，但三个点没有明显差距和变化规律；质量浓度分别为 $969 \mu\text{g/kg}$ 、 $1442 \mu\text{g/kg}$ 、 $3690 \mu\text{g/kg}$ ，表现出随地理位置自西向东变化的明显增加趋势，粒径 $d > 1 \mu\text{m}$ 的粗颗粒浓度也表现了相似变化特点，可以很好地反映天山东部积雪中粉尘沉积的空间分布特点。数量浓度和质量浓度在三个点的分布并不一致，因为微粒数量浓度反映了微粒数的多少，其中细颗粒 ($d < 1 \mu\text{m}$) 数的比例很大；而质量浓度很好地反映了微粒在雪冰中的含量多少，受粗颗粒 ($d > 1 \mu\text{m}$) 的贡献很大。而且，对于研究区受周边环境的影响方面，质量浓度能够更好地说明受到沙尘源区的影响程度，因为雪冰中微粒的整体粗细程度反映受粉尘源区影响大小状况，质量浓度越大，则粗颗粒贡献越大，表明受周边局地源影响越大。

表 4.1 东天山三个研究点微粒浓度的比较

Tab 4.1 Comparison of dust concentration in three sites of Eastern Tianshan, China

研究点	0.57<d<26 μm		1<d<26 μm	
	数量浓度 (10^3 个/ml)	质量浓度 ($\mu\text{g/kg}$)	数量浓度 (10^3 个/ml)	质量浓度 ($\mu\text{g/kg}$)
奎屯 51 号冰川	166	969	74	436
乌源 1 号冰川	242	1442	100	666
哈密平顶冰川	222	3690	94	1016

雪层中某一层位的粉尘浓度,反映的是粉尘事件,而粉尘的沉积通量,则反映了粉尘的年输入总量,往往表征了研究区的总体沙尘状况,因此,本研究估算了研究点的粉尘沉积通量。根据研究区年降水量和蒸发消融量,以及雪层、冰芯物理化学的季节变化特征,估算出研究点的年净积累率。奎屯 51 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川和哈密平顶冰川积累区取样点的年净积累率分别约是 500 mm、400 mm 和 200 mm 水当量,从而得到三个点年均沉积通量分别是 $58.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $72.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $73.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。结果表明,三个研究点粉尘沉积通量与浓度分布的结果一致,也表现出在哈密冰川高于其他两个点的趋势:哈密冰川最大,乌鲁木齐河源次之,奎屯河源最小。

分析认为,造成粉尘浓度和沉积通量在三个点这种空间差异的主要原因:(1) 研究点受周边粉尘源区影响大小不同。分析表明,哈密庙尔沟平顶冰川距离周边沙漠距离最短,并且被四周沙漠和大戈壁所包围,因而受周边附近沙尘源区影响较大,表现为质量浓度和通量很大;而乌鲁木齐河源 1 号冰川和奎屯哈希勒根 51 号冰川距离周边荒漠比哈密要远些,它们处于广阔的天山山脉和山前绿洲的中心地带,所以沉积在雪冰中的微粒浓度和通量相对较低。这是最主要的原因。(2) 降水对大气粉尘的淋洗强度不同造成影响。因为天山山脉在西风带影响下,降水量自西向东逐渐减少,造成降水对大气粉尘的淋洗强度不同。研究表明,自西向东三个研究点的降水逐渐减少,然而雪冰的微粒浓度升高,说明地区降水量的减少使淋洗作用减弱,越向东部大气中微粒含量越高,在哈密遇到高海拔冰川沉降,因而哈密雪坑微粒表现出高浓度。(3) 局地环境差异。冰川受到岩性、山谷风系以及地质地貌的影响,造成微粒沉积量上的差异。例如,乌鲁木齐河源区虽然主要受西风带影响,还受局地气旋、山谷风等的影响,大西沟气象站观测显示,河源区局地风向以沿山谷方向的 NE 或 NNE 为主等。

为了说明东天山大气粉尘沉积的区域性特点,本研究将冰川粉尘沉积的平均浓度、通量与北半球其他区域类似的研究作了比较 (表 4.2)。结果发现,东天山和位于中亚内陆的慕士塔格、达索普冰川、以及日本的Tateyama山等雪冰中微粒浓度有着相似性,都有比较高的浓度值和通量。然而,与遥远的北极Penny 冰帽和Devon 冰帽等相比,本研究的浓度值显得很高,远远高于极地冰雪中的微粒浓度。有研究证实,粉尘在随大气传输过程中,距离越远,粒度分选就会越好,则雪冰中微粒浓度和沉积通量值越小。例如粉尘从源区到达遥远的北极需要很长时间,远距离的传输使得大气气溶胶微粒浓度降到了很低。天山山区的地理位置决定了大气气溶胶微粒的沉积不会经历很长途径。从沙尘发生到粒度分选,再到沉积,大气中微粒浓度的下降程度要远远低于到极地的值。因而在亚洲内陆高海拔冰川积雪中微粒表现出高浓度。同时反映了雪冰微粒与中亚粉尘源区,如我国塔克拉玛干沙漠、北方的蒙古沙漠、大戈壁等源区密切的关系,即中亚粉尘源区对天山雪冰中微粒沉积决定性的贡献。

表 4.2 北半球不同地区雪冰中不溶微粒浓度和通量

Tab 4.2 Atmospheric dust concentration and flux in snow and ice in various northern hemisphere sites

研究位置 (山脉/冰川)	海拔高度(m)	时间(年)	浓度及通量				资料 来源
			粒径范围	数量	质量	通量	
			(μm)	($10^3/\text{ml}$)	($\mu\text{g}/\text{kg}$)	($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{yr}$)	
天山东部冰川	3900~4510	2002-05	0.57-26 1~26	210 93	1837 706	58.2~73.8	本研究
崇则冰帽	6327	1980-87	1~22	616	8220	607	Wake 等
慕士塔格	5910	1990-92	1~22	276.4	6780	247	Wake 等
达索普冰川 (尼泊尔)	5700	1989-90	1~13	18.17	379	27	Wake 等
Tateyama 山 (日本)	2450	1997~2002	0.1~600			770	Osada 等
Penny 冰帽 (北极圈)	1980	1988-94	0.65-12 1~12	31.6 13.7	143 129	4.8 4.4	Wake 等
Devon 冰帽 (北极圈)	1800	Last 7000 y	>1	8.3	235	4.2	Fisher 等

4.2 积雪中不溶微粒的离子组成与粒径分布

图 4.3 显示了乌鲁木齐河源 1 号冰川典型雪坑剖面离子浓度、电导率和微粒浓度之间的关系,该剖面可以很好地代表该研究点其他雪坑剖面。而冰雪中不溶微粒的质量浓度剖面峰值能够很好地代表厚污化层。结果发现,污化层与 Na^+ 、 Ca^{2+} 等浓度以及电导率剖面之间有很好的对应性。通过相关系数验证,它们之间有很好的相关性 (表 4.3)。对哈密、奎屯的 4 个雪坑微粒剖面与离子和电导率剖

面比较后也发现同样的结果。大多数雪坑剖面要素的明显的相关性表明了其来源的一致性。已有的研究发现^[23]，乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区表层雪中污化层与离子相关性显示，表层雪微粒浓度与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 离子浓度有较好相关性。表层雪和雪坑剖面中 Ca^{2+} 浓度与微粒浓度的明显相关性说明，尽管不排除其他源区影响，积雪中污化层中微粒可以推断为主要来自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。 Na^+ 浓度与电导率的值也与微粒浓度有很好对应关系，分析天山山区的周边环境认为，积雪中大多数的 Na^+ 来自于中亚内陆富含盐矿的沙尘源区，因为位于亚洲内陆的中国新疆等地有世界上最为丰富的盐矿。盐矿中的 Na^+ 与 Cl^- 、 Mg^{2+} 的浓度有很好的相关性。在日本中部Tateyama山有过类似的研究，其结果是日本高山积雪中污化层与 Na^+ 没有相关性，本研究结果与其发现不同，因为日本高山积雪 Na^+ 主要来源于海洋源，与粉尘沉积没有很好的关系，而东部天山的大气粉尘带来了大量粉尘源区的 Na^+ 。电导率反映了阴阳离子浓度的大小，与PH值有很好的相关性。污化层剖面与 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度和电导率的剖面变化一致性及其相关性证明，积雪中粉尘主要来自于中亚内陆的粉尘源区，这些离子随着微粒的沉降而沉积在雪层中。

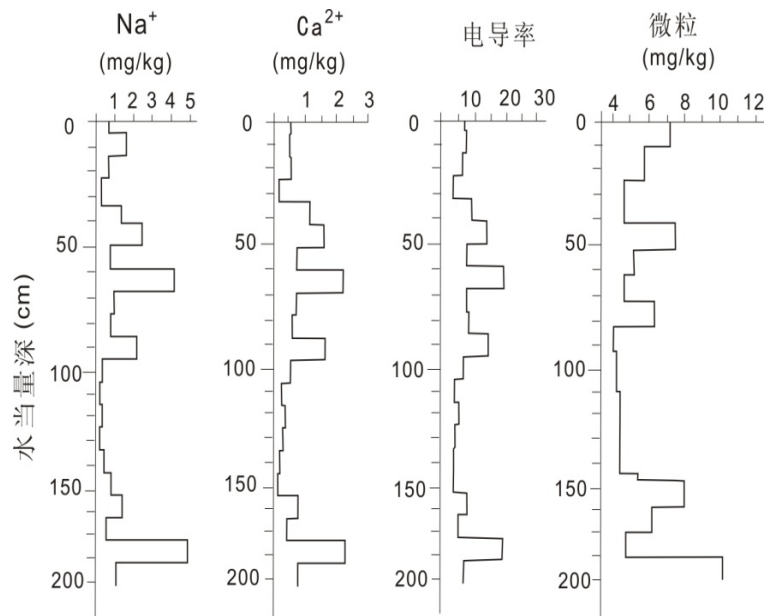


图 4.3 2005 年夏季乌鲁木齐河源 1 号冰川典型雪坑离子浓度、电导率和微粒浓度剖面比较

Fig 4.3 Vertical profiles of ionic concentrations, conductivity and dust concentration on Glacier No.1 at the headwater of Urumqi River in summer 2005

表 4.3 东天山研究点离子浓度与微粒浓度的相关系数

Tab 4.3 Correlation coefficient of ions and dust in the snow of Eastern Tianshan

	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	资料来源
1 号冰川表层雪微粒	0.85	0.63	0.74	文献[23]
1 号冰川雪坑微粒	0.69	0.65	0.82	本研究
奎屯 51 号冰川雪坑微粒	0.60	0.62	0.53	本研究
哈密平顶冰川雪坑微粒	0.51	0.49	0.57	本研究

图 4.4 和图 4.5 显示了雪层中微粒的体积-粒径分布。图 4.4 说明了乌鲁木齐河源 1 号冰川典型雪坑体积-粒径分布的例子，曲线的峰值对应的微粒粒径表示分布的粒径众数值(μ)。图 4.5 是对三个采样点微粒体积-粒径分布的比较，来自于三个点具有代表性的雪坑样品粒径平均分布状况，从中可以发现明显分布差异和规律。研究分析得出的东天山微粒体积分布的粒径众数介于 3~22 μm ，分布结构是一种单一模式。体积粒径分布反映了稳定状态时，大气气溶胶微粒的粒径组成，可以表现大气浮质状况，与大气环境有密切关系。单一的分布模式反映了来源的单一性，说明东天山微粒主要来源于单一的沙尘源地。比较发现，尽管粒径分布趋势极其相似，但是三个点体积-粒径分布的众数值仍有差别 (图 4.5)：哈密平顶冰川值最大，其次是乌鲁木齐河源 1 号冰川，奎屯哈希勒根 51 号冰川最小；粒径众数值 μ 分别为：13 μm ，11.5 μm ，11.0 μm 。分析其差异的主要原因为：(1) 受粉尘源区的影响不同。哈密距离周边沙漠和戈壁最近，受沙尘源区影响较大，表现为体积粒径分布的众数也较大。而乌鲁木齐河源 1 号冰川和奎屯 51 号冰川距离周边沙漠和戈壁比哈密要远些，所以粒径众数相对较小。(2) 局地环境差异。冰川受到局地环境如岩性、局地风以及地质地貌的影响，这些因素可以造成粉尘沉积的小环境，从而影响大气粉尘的沉降过程，使微粒粒径分布表现出差异。

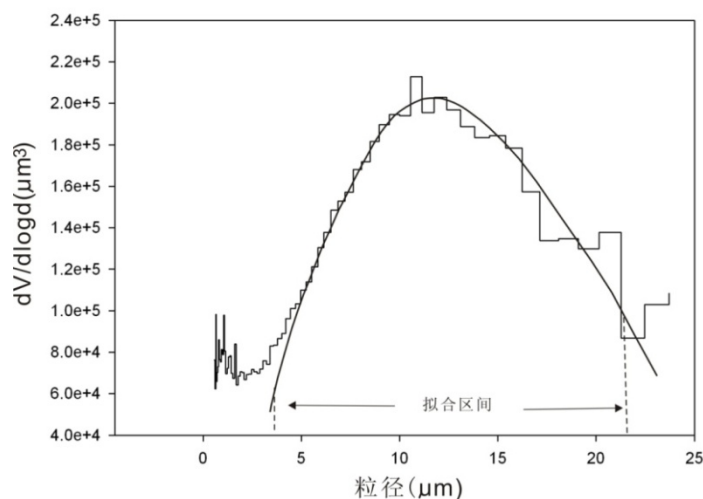


图 4.4 乌鲁木齐河源 1 号冰川典型雪坑微粒的体积-粒径对数分布. 图中折线表示计算得到的体积粒径对数分布, 平滑曲线表示多项式拟合曲线

Fig 4. 4 Characteristics of voume- size distribution obtained from Urumqi Glacier No.1, Fold -line indicates the Volume-size distribution,Flat-line shows normal regression distribution

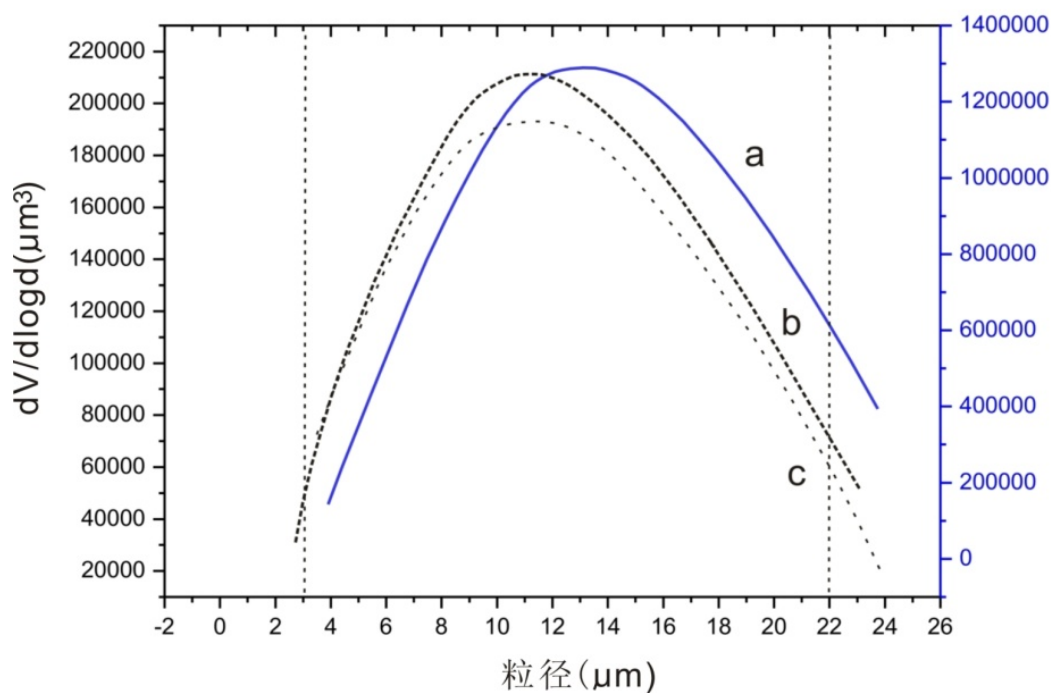


图 4.5 东天山三个研究点雪坑微粒的体积粒径分布特征比较.图中曲线 a 代表哈密庙尔沟平顶冰川, b 代表乌鲁木齐河源 1 号冰川, c 代表奎屯哈希勒根 51 号冰川

Fig4. 5 Characteristics comparison of voume- size distribution at three study sites in Eastern Tianshan Mountain. In the figure a stands Glacier No.1, b stands Miaoergou Glacier in Hami and c stands Glacier No.51 in Kuitun

对于冰雪中微粒的粒径分布特征,在全球许多地区都进行过研究。研究结果有单一模式和多结构模式。在此可以列举作一比较。如在西班牙地中海地区,微粒平均粒径变化范围是 4~30 μm ,是一个多模式结构,由 4~7 μm 和 18~22 μm 组成;平均粒径 14~16 μm 的粒径分布在地中海东部克利特岛被报道;有些研究报道了撒哈拉地区污化层从 2.5~10 μm 的平均体积粒径分布,中亚一些冰川粉尘沉积的体积粒径分布也表现出相似的体积-粒径范围;北极格林兰岛 Penny 冰帽积雪和冰芯中粉尘的粒径众数值是大约 1~2 μm ;日本中部 Tateyama 山积雪中粉尘的粒径众数值介于 6~21 μm 。

本研究的结果与极地雪冰中相比,显示了很大的粒径众数值,远远大于极地的值 (1~2 μm);但是它们与日本中部 Tateyama 山、地中海地区、撒哈拉地区等高海拔积雪中粉尘的研究结果具有可比性。因为更大的体积粒径众数出现在接近源区的地点。根据天山所处的大气环流轨道,冬春季粉尘从可能的主要源区如中亚帕米尔高原、我国塔克拉玛干沙漠、北方的蒙古沙漠、大戈壁到东部天山一般的经过时间是 0.5~1 天。最近关于在粉尘运输穿越大西洋时粒径变化的研究表明,一个主要的粒径变化可以在运输过程的 1~2 天中发生,说明东天山气溶胶微粒在传输过程中粒径变化较小,基本反映源区的状况。体积-粒径分布众数远远比在极地发现的相应值大,可能是由于原始输送过程中,短距离运输中对于粒径分选作用较小 (Osada and others,2004; Wake and others,1998)。而且,观测到的粒径分布的单结构分布模式可能意味着粉尘源区和风力条件的一致性。尽管我们不能确定单结构和多结构粉尘事件之间有没有决定性的不同,但是对于大气粉尘更深远的系统观测和分布模式的研究,应该可以对山岳冰川雪冰中微粒粒径分布变化提供更好地认识。

4.3 不溶微粒沉积量的年际变化

本研究还分析了东天山冰川积雪中微粒沉积量的年度变化特点。图 4.2 显示三个取样点乌鲁木齐河源 1 号冰川、奎屯 51 号冰川和哈密平顶冰川典型雪坑微粒浓度剖面,研究发现,采样点年度之间的微粒沉积量存在着较大差异。例如,通过比较 2004 年和 2005 年 1 号冰川微粒沉积量,发现两年之间差异较大,2005 年雪层微粒浓度值明显高于 2004 年的相应值。1 号冰川 2004 年雪坑中的微粒浓度范围是 551~915 $\mu\text{g}/\text{kg}$,而 2005 年同期相同采样点雪坑的微粒浓度范围是

2439~2658 $\mu\text{g/kg}$ 。这一发现也在奎屯哈希勒根 51 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川得到了验证。奎屯河源哈希勒根 51 号冰川 2004 年雪坑的浓度是 517 $\mu\text{g/kg}$, 2005 年相应浓度值是 1422 $\mu\text{g/kg}$ 。分析相关气象资料, 联系大气环境变化认为, 2004 年与 2005 年降水量和气温变化, 导致大气沙尘活动比 2004 年加剧, 是造成年度沉积量变化的原因。天山冰川站常规观测资料 (河源区三个水文气象站以及大西沟气象站) 显示, 乌鲁木齐河源区 2004 年平均降水量 357 mm, 年均气温 $-5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2005 年降水量 451 mm, 年均气温 $-6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。河源区与北半球和我国近 50 年气象资料显示, 河源区气候的变化是大尺度范围 (北半球和我国) 的气候变化的缩影; 年际温度有所下降, 导致沙尘活动的加剧, 大气粉尘浓度升高^[2]; 春夏季降水的增加, 会使得大气中的微粒被大量的淋洗掉, 沉降在山岳冰川雪冰中。如果分析代表过去 4 年微粒沉积的浓度剖面就会发现 (图 4.2), 剖面代表了过去 4 年的沉积状况, 存在明显的零星浓度峰值, 其主要来自于发生在春季的沙尘暴活动^[21], 峰值代表了一个年层, 发现微粒沉积量存在较大年际变化。尽管如此, 有些问题我们还不清楚, 关于微粒在东天山的干湿沉降过程及其与气候环境变化的关系有待进行更加深入的研究。总之, 最近 4 年积雪的污化层剖面揭示了零星的粉尘浓度峰值以及沉积数量上较大的年际变化, 意味着东部天山冰川积雪中粉尘沉积对大气环境变化的敏感性。

4. 4 本章小结

天山东部乌鲁木齐河源 1 号冰川、奎屯河源哈希勒根 51 号冰川及哈密庙尔沟平顶冰川等 3 条冰川积雪中微粒特征分析表明, 自西向东随着沉积环境的变化, 积雪中微粒质量浓度和通量表现出增高趋势: 哈密庙尔沟平顶冰川最大, 乌鲁木齐河源 1 号冰川次之, 奎屯哈希勒根 51 号冰川最小。三个研究点微粒粒径介于 $0.57 < d < 26\text{ }\mu\text{m}$ 的平均数量浓度分别是 $166 \times 10^3/\text{ml}$ 、 $242 \times 10^3/\text{ml}$ 、 $222 \times 10^3/\text{ml}$, 质量浓度分别是 969 $\mu\text{g/kg}$ 、1442 $\mu\text{g/kg}$ 、3690 $\mu\text{g/kg}$; 年均沉积通量是 58.2 $\mu\text{g/cm}^2$ 、72.1 $\mu\text{g/cm}^2$ 、73.8 $\mu\text{g/cm}^2$ 。三个点这种空间差异的主要原因为: 三条冰川所在区受粉尘源区影响不同、降水的影响、以及局地地理环境差异。雪坑剖面和离子相关性分析表明, 积雪中污化层富含亚洲粉尘的富 Ca^{2+} 、 Na^+ 矿物。积雪中微粒体积-粒径分布众数介于 3~22 μm , 微粒粒径分布显示了单结构模式, 体积-粒径分布众数在哈密平顶冰川最大, 其次是乌鲁木齐河源 1 号冰川, 奎屯哈希勒根 51

号冰川；粒径众数值 μ 分别为：13 μm ，11.5 μm ，11.0 μm 。这些结果表明，在大气环流的控制下，哈密庙尔沟平顶冰川受周边粉尘源区影响最大，乌鲁木齐河源 1 号冰川次之，奎屯哈希勒根 51 号冰川最小；微粒的单结构模式表明粉尘来源的一致性，三个研究点粒径分布的差异主要是受粉尘源区影响大小以及局地环境差异造成的。研究区雪坑微粒浓度年际变化分析表明，雪坑中最近 4 年积雪的污化层剖面揭示了春季零星的粉尘浓度峰值以及沉积量上较大的年际变化，意味着东部天山粉尘沉积对大气环境变化的敏感性。

第五章 乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪内不溶粉尘的季节变化特征

源自于地球表面的气溶胶矿物粉尘在大气环境中起着十分重要的作用。大气粉尘能够影响太阳辐射强度，中和降水酸性物质，作为地球气候系统辐射强迫因子，同温室气体一道扮演着改变地球系统能量收支平衡的重要角色^[1]。中国西部天山乌鲁木齐河源（图 5.1），位于中亚粉尘的源区范围内，大气环境受到了沙尘活动的重大影响。化学分析和气象相关性表明，乌鲁木齐河源冰川积雪中发现的厚污化层主要通过春季发生的大气沙尘暴颗粒沉积形成。然而，对于积雪中不溶粉尘的季节变化特征及其与沙尘活动之间的深入关系仍然不清楚，亟需进行相关研究。东亚地区如日本和韩国已有许多报道关于大气气溶胶粉尘季节变化的研究。弄清楚不同地区大气粉尘以及高海拔积雪中粉尘特征的季节变化，对于完善大气气溶胶粉尘的认识及其与高海拔冰川积雪间气雪转换关系的研究有着重要意义。天山山区春季为沙尘活动季节，而夏秋季为降水较多的非沙尘活动季节。冰川表层积雪是大气成分在气-雪间转化的界面，本文的核心是讨论乌鲁木齐河源冰川积雪表层雪中的粉尘信息在沙尘活动季节（4~6 月）与非沙尘活动季节的变化规律，以便弄清中亚沙尘活动与高海拔冰川积雪保存的粉尘信息之间的关系。

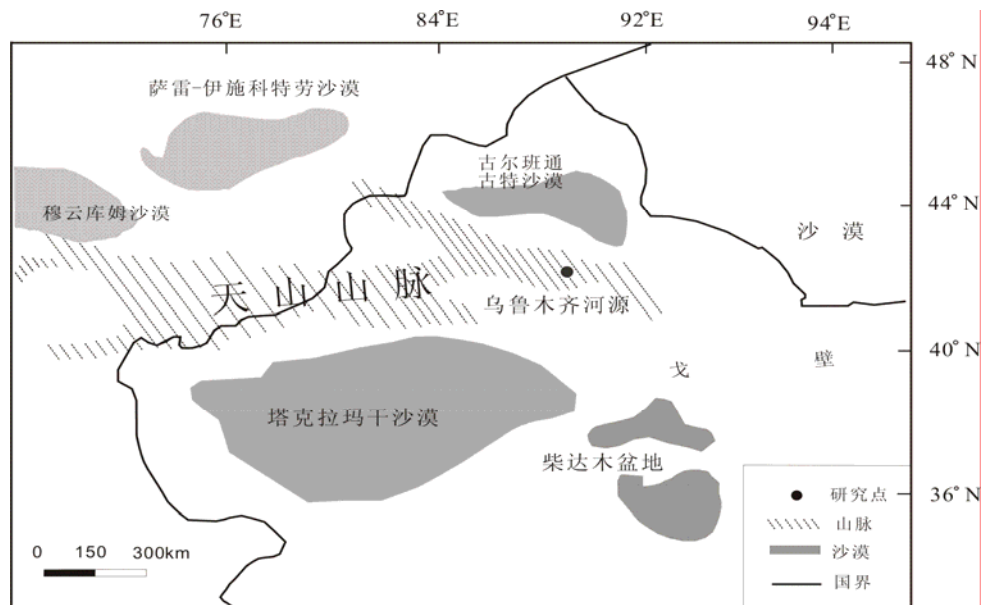


图 5.1 天山乌鲁木齐河源位置

Fig.1 Location of study site in Tian Shan

5.1 不溶微粒数量浓度季节变化

实验测量结果显示, 积雪中粉尘细颗粒(粒径 $d < 1\mu\text{m}$)在数量上占据绝对优势, 在高浓度样品和低浓度样品都是如此, 在仪器测量的通道范围内($0.57\sim 400\mu\text{m}$), 许多较大粒径的通道中(如 $d > 100\mu\text{m}$), 颗粒出现的计数基本为零。因此, 本研究中选择粒径介于 $0.57\sim 100\mu\text{m}$ 的颗粒进行统计和计算。图 5.2 显示 2005 年 4~8 月冰川积累区表层雪中不溶粉尘浓度变化, 包括粒径 $d > 1\mu\text{m}$ 的粗颗粒和粒径 $d < 1\mu\text{m}$ 的细颗粒, 以及所有粒径范围($0.57\sim 100\mu\text{m}$)颗粒浓度季节变化, 及乌鲁木齐河源区相应时期的盛行风(NE和NNE)风速变化。粉尘粗颗粒和细颗粒在季节变化中表现出相似变化趋势, 某些特定季节的样品中二者都表现出高的数量浓度, 例如在 4 月 25 日和 5 月 30 日的雪样粉尘浓度分别为 439×10^3 个/ml 和 420×10^3 个/ml, 远高于整个观测时期(4~8 月)的平均值 241×10^3 个/ml (如图 2 所示)。该季节高海拔积雪中粉尘粗颗粒和细颗粒数量浓度的升高, 通常是由于在春季发生的大气沙尘暴事件造成的。风速在沙尘活动季节(4~6 月)明显高于非沙尘活动季节(7~8 月), 尤其是 5 月 27 日的风速很高, 与粉尘颗粒的高浓度相对应(图 5.2)。类似的春季气溶胶粉尘高浓度现象, 在亚洲东部的日本和韩国以及太平洋西北其他地区已有观测发现和研究。如图, 在夏季(6~8 月)粉尘颗粒的浓度值相对较低, 这与亚太地区其他许多沙尘活动影响地区的观测研究结果一致, 而在这些地区 7~8 月份也经常观测到较低的大气气溶胶粉尘浓度。天山冰川站气象观测和中国气象局大西沟气象站观测资料显示, 2005 年夏季 7~8 月乌鲁木齐河源时常有降水天气发生, 结果是大气中的气溶胶粉尘会被大量清洗, 并且使得粉尘颗粒化学形成过程受到抑制。因而, 在高海拔冰川积雪雪面中, 沉降的粉尘颗粒浓度在 4~5 月的大气沙尘活动季节相对较高, 而 7~8 月非沙尘活动季节在大气环流和降水等影响下降低。

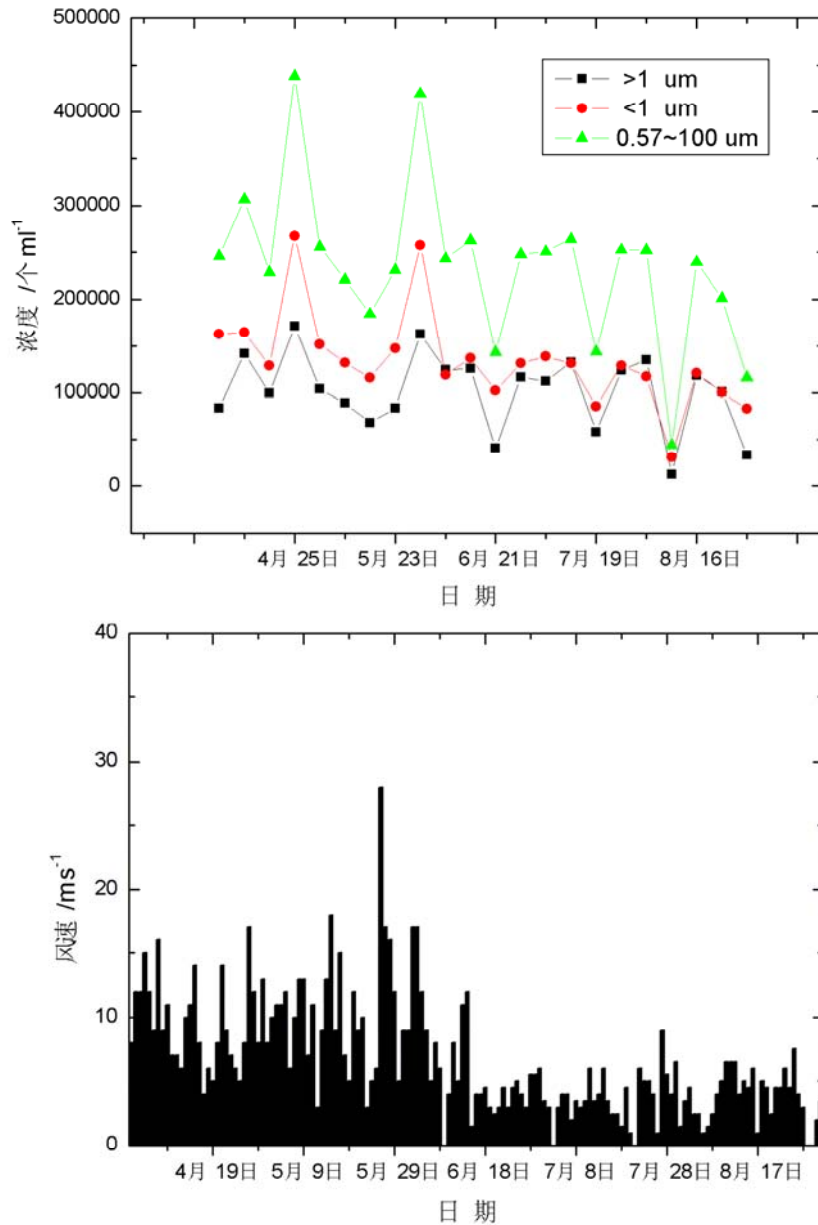


图 5.2 4~8 月表层雪中不溶粉尘颗粒的浓度及河源区风速变化

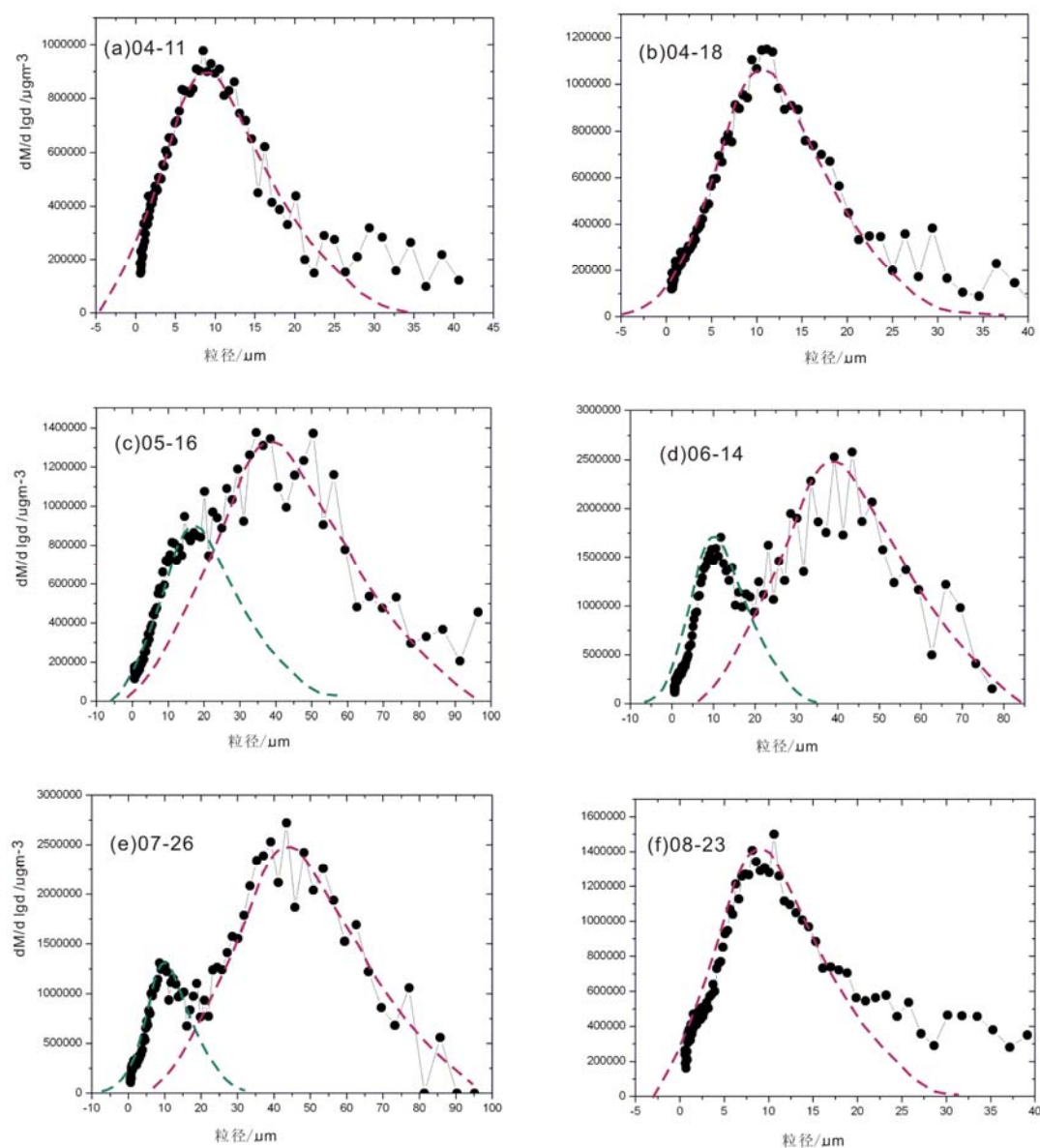
Fig 5.2 Variation of dust particles concentration in surface snow and wind speed during 2005 April to August

据中国气象局西北许多气象站（如西北哈密站、阿拉善站、乌鲁木齐站等）观测资料显示，2005 年 4 月 18 日和 5 月 27~28 日沙尘暴事件在我国西部和北方较大范围区域内发生。图 5.6 显示了 4 月 18 日（图 5.6a）和 5 月 28 日（图 5.6b）乌鲁木齐河源研究点的 3d 后向气团轨迹追踪的例子。后向轨迹分析显示研究区大气气溶胶来源于西北方向中亚内陆的干旱沙漠地区，例如，位于哈萨克斯坦的萨雷—伊施科特劳沙漠和穆云库姆沙漠等。如图 5.2 所示，4 月 18 日之前的雪样

粉尘颗粒浓度相对较低,而在之后(4月25日)雪样中粉尘浓度突然变得很高,说明沙尘暴带来的高浓度颗粒经过一定时间到达 4130 m 的大气自由对流层,并维持一定稳定状态,在积雪表层雪中沉降。此后,5月2日雪样中粗颗粒浓度由于降水影响变得较低;而在5月28日以后的样品由于沙尘活动,粉尘浓度再次升高并维持一段时间后,在大气活动和降水作用下又再次不断降低。本研究中,积雪粉尘中细颗粒浓度和粗颗粒浓度随时间变化基本一致,在沙尘暴发生后也同时升高(图 5.2)。然而,亚洲其他地方类似的研究却有不同发现^[15~17],例如在 1998 年亚洲沙尘暴活动期间,韩国首尔采集的大气气溶胶粉尘粗颗粒浓度($>1\mu\text{m}$)明显升高,其结果表明矿物粉尘是其中的主要组分;而粒径 $<1\mu\text{m}$ 的细颗粒数量浓度却表现出下降趋势,原因是该区细颗粒主要是在人为污染物和大气环流作用下造成的。研究表明^[18],气溶胶粉尘的细颗粒粒子主要来源于大气中的燃烧源和二级矿物如硫酸盐、硝酸盐和铵盐等,这些物质与人类活动的污染有关,在粉尘发生的当地大气季节环流作用会减弱这些物质浓度,使气溶胶粉尘细颗粒组成部分浓度下降;而且,2002 年在韩国的相关研究也有此发现^[19~20]。这些发现与本研究的结果明显不同。相比而言,本研究的乌鲁木齐河源人类活动污染相对很小,粉尘细颗粒主要来源于中亚粉尘源区,经过较远距离传输到研究区,可以反映大气的基本组成状况。所以粗颗粒和细颗粒在沙尘与非沙尘季节都表现出一致的变化规律和趋势。这也反映了高海拔雪冰中的粉尘与大气沙尘暴活动之间的敏感关系。

5.2 不溶微粒粒径分布季节变化

雪冰中微粒的粒径及其分布反映了搬用风力以及粉尘源区的沙尘暴活动,因而粒径分布特征的研究具有重要意义。图 5.3 显示了 4~8 月表层积雪中粉尘微粒粒径分布状况及其随时间变化过程。其中曲线的峰值对应的微粒粒径表示分布的粒径众数值。微粒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,单一分布模式反映了来源的单一性,而多结构分布模式说明了粉尘颗粒来源的复杂性。



散点表示计算得到的微粒质量粒径分布，虚线表示多项式正态拟合曲线

图 5.3 研究点积雪微粒质量粒径分布特征的季节变化

Fig 5.3 Seasonal change of dust particles mass-size distribution in snow

已有许多研究表明^[21]，大气粉尘粒径的完全分布包括 3 个体积众数粒径，粒径为 1~10 μm 颗粒（来源于土壤的气溶胶），粒径为 10~100 μm 颗粒（土壤母质的粒径分布，只有大气粉尘极高时出现），和粒径为 0.02~0.5 μm 的颗粒（与土壤无关，为本底气溶胶）；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^[16]。实验分析结果表明（图 5.3），乌鲁木齐河源冰川表层雪样中粉尘的粒径分布有两部分组成：①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 3~21 μm 较细的范围内，粒径众

数大约 $10\ \mu\text{m}$ ；②局地沙尘活动带来的大颗粒粉尘或局地矿物颗粒，粒径分布集中在 $20\sim 80\ \mu\text{m}$ 较粗的范围内，粒径众数大约 $40\ \mu\text{m}$ 。图 3 所示，粒径分布显示了明显的季节变化规律：4 月 11 日和 4 月 18 日的雪样分析显示 [图 5.3(a)和 5.3(b)]，沙尘暴发生前表层雪的粉尘微粒表现出单一的分布模式，表明是稳定大气粉尘（气溶胶）来源，分布模式为细粒（ $3\sim 21\ \mu\text{m}$ ）；5 月 16 日的积雪粉尘 [图 5.3(c)]，是沙尘暴发生后的一定时期内的分布状况，发现粒径分布开始出现两个分布模式，较细的模式和较粗的双峰分布模式（ $3\sim 21\ \mu\text{m}$ 和 $20\sim 80\ \mu\text{m}$ ）组成，尽管二者分散不太明显；到了 6~7 月 [图 5.3(d)和 5.3 (e)] 形成较为稳定的明显分散的双峰分布模式（有气溶胶部分和局地沙尘颗粒）；而到了夏季 8 月 [图 3(f)] 非沙尘活动季节，降水等因素影响以及沙尘活动消失，积雪中的粉尘粒径分布又只有一种单峰分布模式（ $3\sim 21\ \mu\text{m}$ ），而较粗的粒径分布模式（ $20\sim 80\ \mu\text{m}$ ）消失，分布状况类似于 4 月沙尘暴发生前。明显的季节变化规律，反映了高海拔积雪中不溶粉尘与大气环境变化之间密切的关系，以及沙尘与非沙尘活动季节明显的分布差异。

对于大气粉尘的粒径分布，在全球许多地区都进行过研究 (Wake,1998)。许多研究指出了大气粉尘沉降物如湖泊沉积物、黄土以及雪冰中粉尘体积粒径分布和质量粒径分布的复杂性^[21]，有些样品存在 2 个体积分布粒径众数，而有些几乎成直线分布，例如中国黄土的粒径分布为双峰分布的多结构模式；而在青海苏干湖沉积物记录了有 4 个组分峰值的大气粉尘粒径分布；在西班牙地中海地区，微粒平均粒径变化范围是 $4\sim 30\ \mu\text{m}$ ，是一个多模式结构，由 $4\sim 7\ \mu\text{m}$ 和 $18\sim 22\ \mu\text{m}$ 组成；平均粒径 $14\sim 16\ \mu\text{m}$ 的粒径分布在地中海东部克利特岛被报道；有些研究报道了撒哈拉地区污化层从 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 的平均体积粒径分布，中亚一些冰川粉尘沉积的体积粒径分布也表现出相似的体积-粒径范围^[11]；北极格林兰岛 Penny 冰帽积雪和冰芯中粉尘的粒径众数值是大约 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ；南极洲 EPICA Dome C 粒径众数 $2\ \mu\text{m}$ 。日本中部 Tateyama 山积雪中粉尘的粒径众数值介于 $6\sim 21\ \mu\text{m}$ ^[14]。本研究中的细粒组分与上述地区研究结果之间存在一定可比性，细颗粒（气溶胶）分布粒径 $3\sim 21\ \mu\text{m}$ ，反映了稳定的大气粉尘沉降；而粒径介于 $20\sim 80\ \mu\text{m}$ 分布的粗颗粒部分没有可比性，这些颗粒主要来自于沙尘暴期间的大颗粒，反映出该区积雪粉尘受沙尘活动的影响十分明显。

图 5.4 显示了对图 5.3 中粒径分布介于 3~21 μm 的大气粉尘基本组成部分(气溶胶)质量-粒径分布曲线比较。尽管粒径分布众数变化很小,都在大约 10 μm 左右,然而众数粒径对应的粉尘颗粒质量浓度表现出明显的季节变化规律,反映了质量浓度的变化过程:4 月表层积雪中粉尘粒径众数质量浓度还比较小(曲线 5.4a);到了 5、6 月相应的质量浓度很大(曲线 5.4d),这是因为沙尘活动造成的大气粉尘颗粒浓度升高所致;7~8 月雪样中的粉尘质量浓度逐渐降低(曲线 5.4e, 5.4f),这是由于季节大气环境的变化以及降水的作用,使得大气中悬浮的大量粉尘颗粒不断被清除,浓度不断降低。

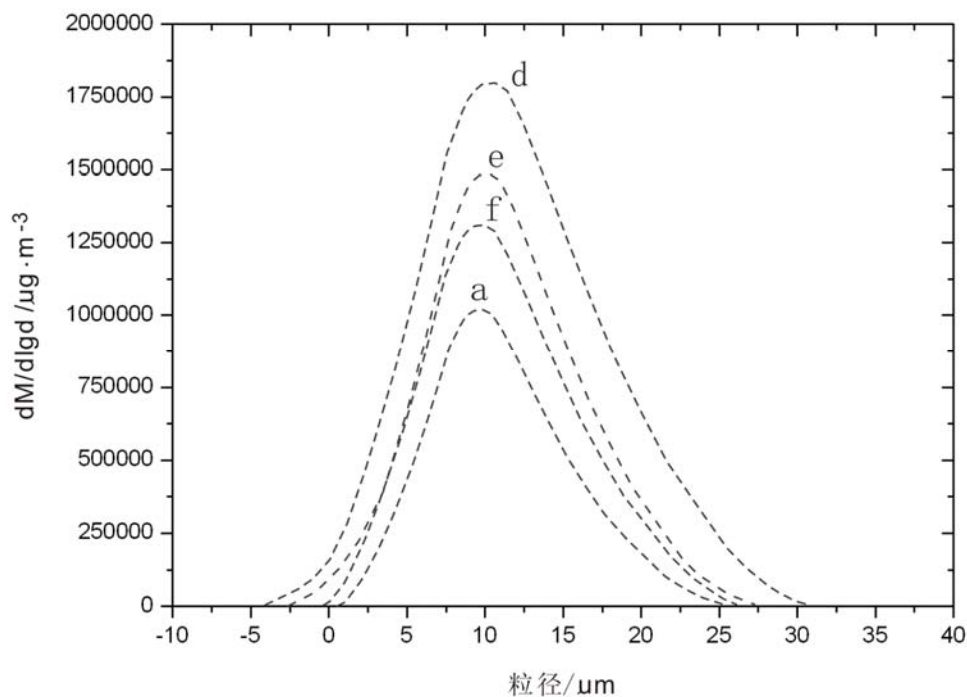


图 5.4 对图 5.3 中曲线 a、d、e、f 的相应图中粉尘细粒组成部分粒径分布比较

Fig 5.4 Comparison of mass-size distribution of dust particles in Figure 5.3

5.3 粉尘化学离子组成季节变化特征

图 5.5 显示了 4~8 月表层雪内沉降的 6 种气溶胶典型离子组分的浓度变化。 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度表现出明显季节变化特点,与沙尘活动存在很好的一致性关系,沙尘活动季节浓度很高,7~8 月浓度降为很低,并表现出一定时间上的滞后于沙尘发生。明显的变化规律说明积雪粉尘化学组成受大气沙尘活动的影响很大。其中 Ca^{2+} 主要存在于矿物粉尘不溶部分,能够很好的代表亚洲大气粉尘中的颗粒组成,在 4~6 月份浓度表现很高(最大 7095 $\mu\text{g/L}$),这与粉尘颗粒数量浓度变化一致(如图 5.2)。而 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为粉尘的可溶部分在 4~6 月二者浓度变化表

现出一些差异, SO_4^{2-} 浓度此时较高, 与 Ca^{2+} 离子浓度季节变化表现出很好的一致性。 NH_4^+ 和 K^+ 浓度季节变化微弱, 与该区大气粉尘活动关系好像较小。

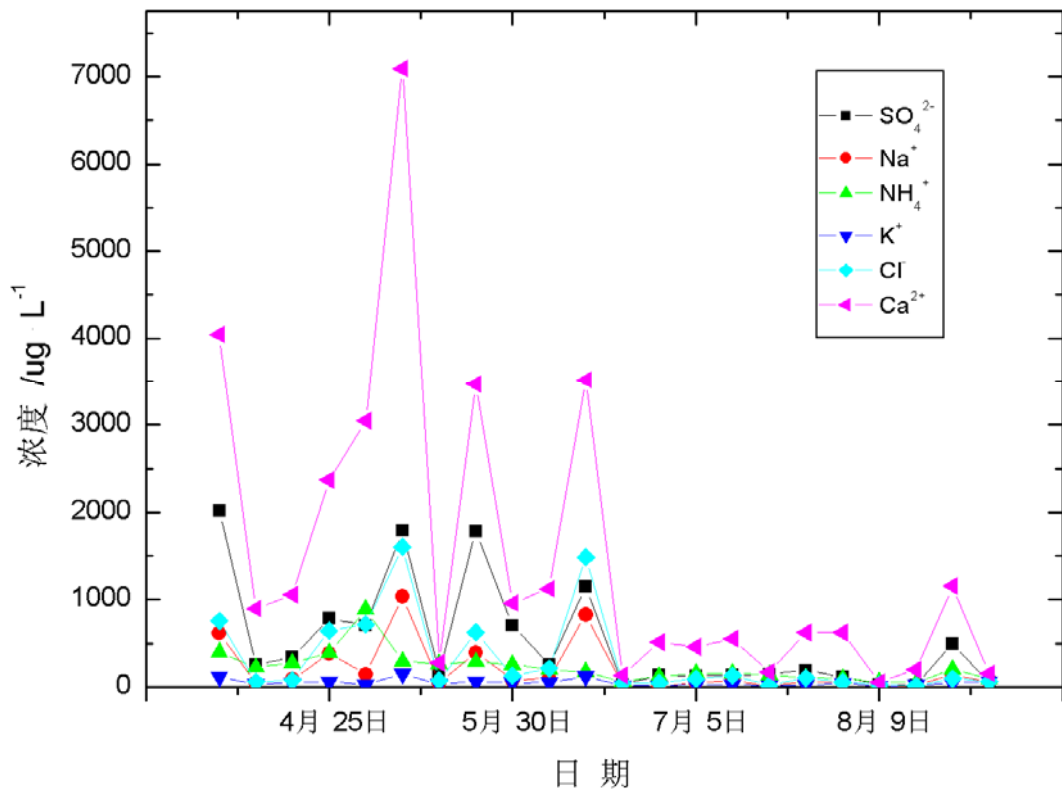


图 5.5 表层雪内粉尘 6 种特征离子的 4~8 月浓度变化

Fig 5.5 Ions concentration change of dust in surface snow during April to August

表 5.1 说明了表层雪粉尘中化学离子相关系数比较, 可以发现这 4 种离子相关性较好。研究显示, 大气粉尘颗粒的 Ca^{2+} 主要来自于亚洲内陆土壤粉尘, 在春季的大气中含量比较高, 往往是由于沙尘暴事件的发生造成的。亚洲许多地区类似的研究结果已有报道。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 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 。而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。此外, 研究表明, 中亚粉尘源区粉尘中的 Na^+ 与 Ca^{2+} 有着很好的一致性, 二者相关系数很高(表 5.1), 如图 5.5 所示, Na^+ 、 Cl^- 浓度季节变化表现出沙尘活动季节(4~6 月)和非沙尘季节(7~8 月)有明显不同^[17], 说明粉尘颗粒带来了大量的中亚地区矿物盐类。大气粉尘颗粒数量浓度和化学组成元素的浓度在 7~8 月份很低, 说明可能是

该区夏季沙尘活动的消失以及经常发生的降水淋洗造成的（图 5.5）。

表 5.1 研究点表层雪粉尘化学离子相关系数(Li and others,2006)

Table 5. 1 Correlation coefficient of ions in the surface snow during dust period

	Ca^{2+}	Na^+	SO_4^{2-}	NH_4^+
Ca^{2+}	—			
Na^+	0.89	—		
SO_4^{2-}	0.65	0.72	—	
NH_4^+	0.54	0.65	0.67	—

图 5.6 显示了乌鲁木齐河源具有季节代表性的典型后向三天的大气轨迹分析曲线，开始海拔高度是 4130 m，并且图中有大气传输过程中垂直方向的运动过程分析。结果显示，乌鲁木齐河源大气气溶胶 4~5 月主要来自于中亚内陆的西北方向 [图 5.6(a)和 5.6(b)]，从干旱沙尘源区带来粉尘；7~8 月来自于西南方向帕米尔高原 [图 5.6(c)和 5.6(d)]，可能带来西南印度洋的水汽，并且下垫面的地质条件，使得在夏季到达研究区粉尘颗粒相对较少。已有研究报道大气粉尘远距离传输过程中化学组分的变化，尤其是单个颗粒性质的变化，结果表明，如果高浓度的污染物附着在矿物粉尘表面并被传输，那么大气粉尘中酸性物质如 SO_4^{2-} 等的浓度就会在沙尘活动期间升高，并且与亚洲粉尘中的高碱性 Ca^{2+} 反映结合，形成稳定的盐类物质，从而达到中和了大气中的酸性物质的效果，这对于大气环境变化有着十分重要的意义。

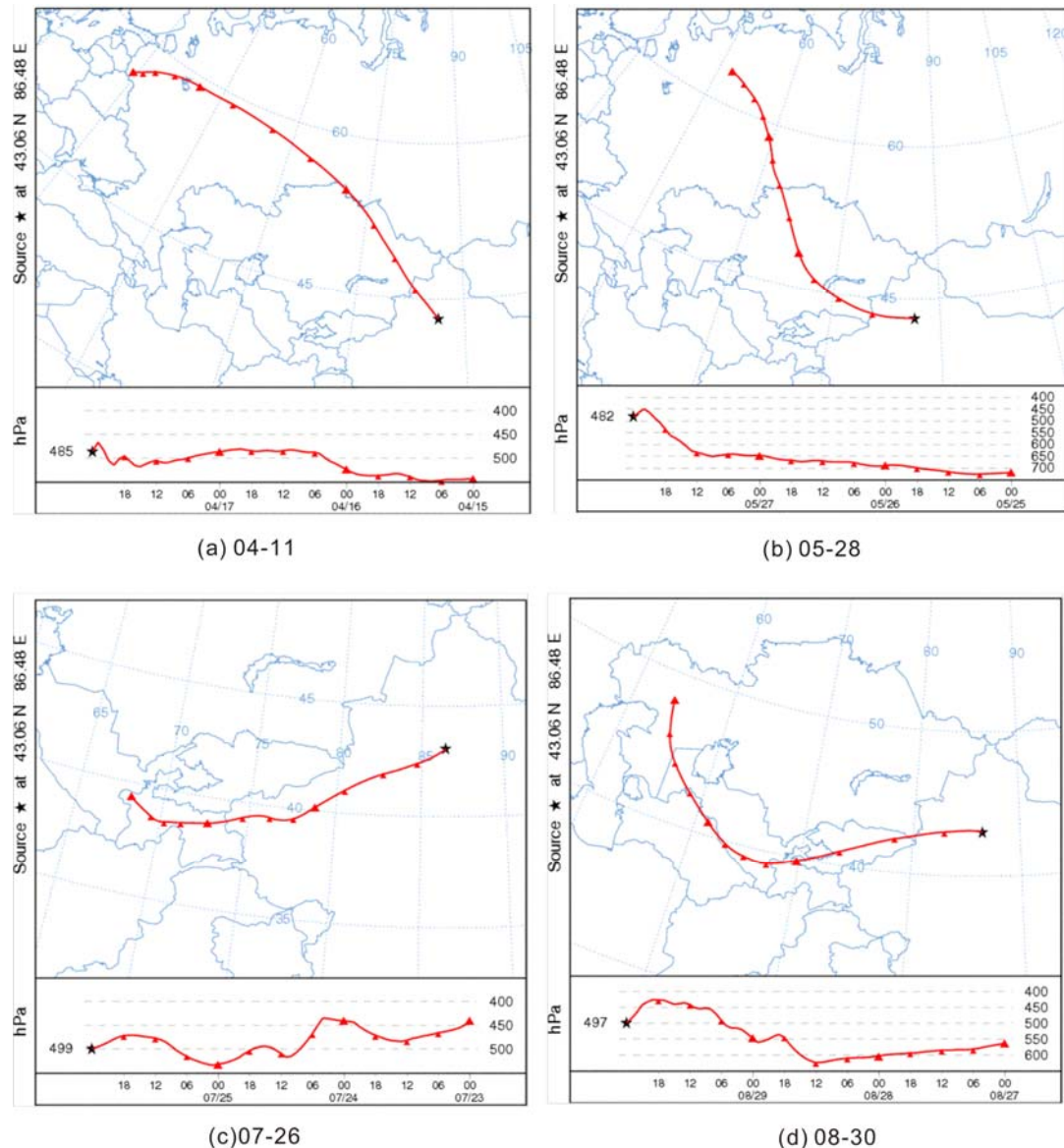


图 5.6 研究区沙尘与非沙尘活动季节的气溶胶粉尘传输 3 d 后向轨迹分析

Fig 5.6 Backward trajectory of aerosol transport process in the Urumqi glacier No.1

5. 4 本章小结

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川表层雪中不溶粉尘颗粒数量浓度在沙尘活动的 4~6 月份非常高 (最大 439×10^3 个/mL), 可能是由于亚洲春季发生的沙尘暴事件影响造成的。将 4~8 月积雪表面不溶粉尘微粒的粒径分布进行了比较, 粉尘微粒质量粒径分布表现出分布模式由沙尘活动前的单一模式 (3~21 μm), 到沙尘活动期间的复杂模式 (3~21 μm 和 20~80 μm 组成), 再到非沙尘季节的单一模式 (3~21 μm) 的变化规律, 这些结果表明该区雪冰微粒季节变化受中亚粉尘活动影响比较明显。表层雪不溶粉尘离子组成, 尤其是主要代表矿物颗粒的 Ca^{2+} , 在

4~6 月份浓度表现出很高值 (最大 7095 $\mu\text{g/L}$), Na^+ 、 Cl^- 浓度与 Ca^{2+} 有着很好的一致性。另一方面, NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为可溶部分浓度变化存在差异。碱性的大气粉尘颗粒 Ca^{2+} 对于大于大气中的 SO_4^{2-} 酸性污染物质有吸附和中和作用, 对于大气环境变化有重要意义。用后向气团轨迹追踪分析法验证了乌鲁木齐河源大气粉尘的传输过程和路径, 结果表明沙尘与非沙尘季节大气气溶胶粉尘来源不同, 分别来源于西北方向和西南方向的亚洲不同环境地区, 这对研究区大气粉尘的传输和沉降造成很大影响。

第六章 结论与展望

本文基于天山东部地区的典型冰川积雪样品,对大气粉尘在高海拔雪冰中的沉积特征进行了研究。天山东部地区位于中亚粉尘的源区范围,而这个地区的雪冰粉尘研究还比较缺乏。本研究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 51 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川积雪微粒特征分析表明,自西向东随着研究点地理环境的变化,积雪中不溶微粒的质量浓度、沉积通量和体积粒径分布众数都表现出增高趋势:奎屯哈希勒根 51 号冰川最小,乌鲁木齐河源 1 号冰川次之,哈密庙尔沟平顶冰川最大,表现出明显的空间分布特征;三个研究点粒径 $0.57 < d < 26 \mu\text{m}$ 微粒的平均质量浓度分别是 $969 \mu\text{g/kg}$ 、 $1442 \mu\text{g/kg}$ 、 $3690 \mu\text{g/kg}$, 年均沉积通量分别是 $58.2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $72.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $73.8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。表明,哈密冰川受粉尘源影响较大,而乌鲁木齐河源与奎屯河源区受影响则相对较小。雪坑微粒浓度剖面和离子相关性分析表明,天山东部冰川积雪中污化层富含亚洲粉尘的富 Ca^{2+} 、 Na^+ 矿物;微粒体积-粒径分布众数介于 $3\sim 22 \mu\text{m}$, 粒径分布显示了单结构模式。研究区最近 4 年积雪的污化层剖面揭示了春季零星的粉尘浓度峰值以及沉积数量上较大的年际变化,意味着天山东部雪冰中粉尘沉积对大气环境变化的敏感性。通过 2005 年春夏 (4~8 月)期间冰川表层雪样的采集,对位于中亚粉尘活动源区的天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪中沉积的大气粉尘微粒的数量浓度及其季节粒径分布特征等进行了观测研究。结果表明,表层雪中不溶粉尘数量浓度在沙尘活动的 4~6 月份非常高 (最大 $439 \times 10^3 \text{个/mL}$),可能是由于亚洲春季发生的沙尘暴事件影响造成的;将 4~8 月积雪表面不溶粉尘粒径分布进行了比较,粉尘微粒质量粒径分布表现出分布模式由沙尘活动前的单一模式 ($3\sim 21 \mu\text{m}$),到沙尘活动期间的双峰分布模式 ($3\sim 21 \mu\text{m}$ 和 $20\sim 80 \mu\text{m}$ 组成),再到非沙尘季节的单一模式 ($3\sim 21 \mu\text{m}$) 的变化规律;粉尘化学离子组成,尤其是主要代表矿物颗粒的 Ca^{2+} ,在 4~6 月份浓度很高 (最大 $7095 \mu\text{g/L}$),另一方面, NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为可溶部分浓度变化存在差异。同时,用后向气团轨迹分析法验证了该区大气粉尘的传输路径,发现沙尘与非沙尘季节大气粉尘来源不同:分别来源于西北和西南方向,这对大气粉尘的传输和沉降造成很大影响。

尽管如此,目前对于该区的粉尘在雪冰中的沉积过程还不清楚,对于大气粉尘的来源也需要进行进一步的深入研究。气溶胶粉尘与大气环境的变化,以及区

域气候的变化, 人类活动都有着必然的关系, 对这些关系进行细致深入的研究, 可以对于沙尘源区的沙尘状况以及雪冰中亚地区雪冰与气候环境的关系有更加深刻的认识。随着研究技术手段的不断更新, 如微粒粒径检测仪和扫描电镜, 以及气溶胶质谱的应用, 对于中亚粉尘源区的雪冰粉尘和大气气溶胶粉尘研究将会取得更多的成果和更加深刻的认识。在下一步研究中, (1) 对该区雪冰微粒与气候环境变化之间的关系进行深入研究; (2) 对大气中粉尘—雪冰的过程探讨, 进行该区粉尘干湿沉积的机理研究; (3) 运用放射性同位素和大气环流相结合的方法, 进行该区大气粉尘来源的分析。

参考文献 (References)

- 1 Andersen K. K., A Armengaud., C Genthon. Atmospheric dust under glacial and interglacial conditions. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25, 2281-2284.
- 2 Bagnold R, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London, 1941
- 3 Biscaye, P. E.; Grousset, F. E.; Revel, M., et al. Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland, *J. Geophys. Res.*, Volume 102, Issue C12, p:26765-26782, 1997
- 4 Bowen H G M., *Environmental Chemistry of the Elements*, Academic press, London, 1979
- 5 Chun Y , Kim J , Choi J C , *et al.* Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 2715-2721.
- 6 Delmonte B., J. R Petie., K. K Andersen et. al., Dust size evidence for opposite regional atmospheric circulation changes over east Antarctica during the last climatic transition. *Climate Dynamics*, 2004, 23; 427-438.
- 7 Delmonte B., J. R Petit., V Maggi et.al., Glacial to Holocene implications of the new 27000-year dust record from the EPICA Dome C (East Antarctica) ice core. *Climate Dynamics*, 2002, 18: 647-660.
- 8 Fuhrer K., E. W Wolff., S. J Johnsen. Timescales for dust variability in the Greenland Ice Core Project (GRIP) ice core in the last 100,000 years. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D24): 31,043-31,052.
- 9 George A. S. 1980 Particle and gas dry deposition a review. *Atmospheric Environment*. V.14:983-1011.
- 10 Gillette D. A., I. H. Blifford and D. W. Fryrear. 1974. The influence of wind velocity on the size distribution of aerosols generated by the wind erosion of soils. *Journal of Geophysical Research*. 79:4068-4075.
- 11 Gillette, D. A., and K. J. Hanson, 1989, Spatial and temporal variability of dust production caused by wind erosion in the United States, *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 2197-2206.
- 12 Gillette, D.A., 1981, Production of dust that may be carried great distances, in Pewe, T.L., ed., *Desert Dust: Origin, Characteristics, and Effect on Man*: Geol. Soc Am. Spec. Pap. 186, p.

- 11-26.
- 13 Grousset, Francis E.; Biscaye, Pierre E.; Revel, Marie., Antarctic (Dome C) ice-core dust at 18 k.y. B.P. - Isotopic constraints on origins, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 111, no. 1, June 1992, p. 175-182.
- 14 Gao Y , Arimoto R M , Zhou Y , *et al.* Relationships between the dust concentrations over Eastern Asia and the remote North Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D9): 9867-9872.
- 15 Hansson M., The Renland ice core, A Northern Hemisphere record of aerosol composition over 12,000 years. *Tellus*, 1994, 46B: 390-418.
- 16 In H J, Park S U. The soil particle size dependent emission parameterization for an Asian dust (Yellow Sand) observed in Korea in April 2002[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 4625-4636.
- 17 IPCC (2001). *Climate change 2007: The Physical Sciences Basis. Contribution of Working Group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 29-30. 131-132; 153-180.
- 18 Jihong Cole-Dai., E. Mosley-Thompson, P. W. Shawn *et. al.*, A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D19): 24,431-24,441.
- 19 Joussaume S., Paleoclimate tracers: an investigation using an atmospheric general circulation model under ice age conditions. 1. desert dust. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98, 1909-1941.
- 20 John T M , Mitsuo U. Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(D6): 8584-8598.
- 21 Kazuo O, Hajime I, Mizuka K M *et al.* Mineral dust layers in snow at Mount Tateyama, Central Japan: formation processes and characteristics. *Tellus*, 2004, 56B: 382-392.
- 22 Knusel S., P. Ginot., U. Schotterer *et. al.*, Dating of two nearby ice cores from the Illimani, Bolivia. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D6): 4181.
- 23 Li Zhong-qin , Edwards R , Thompson E M , *et al.* Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-ice packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**: 250-256.

-
- 24 Mahowald N., K. E Kohfeld., M Hansson et al. Dust sources and deposition during the Last Glacial Maximum and current climate: a comparison of model results with paleodata from ice cores and marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104, 15895-16436.
- 25 Marshall E. W., The stratigraphic distribution of particulate matter in the firn at Byrd station, Antarctic. In Wexler H., et al.,(eds) *Antarctic research, Geophysical Monographs*, 1962, 7: 185-196.
- 26 Marshall F. M., Stratigraphic use of particulate in Polar ice caps. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1959, 70(12): 1043.
- 27 Mayewski P. A., L. D Meeker., M. C Morrison et al. Greenland Ice Core “Signal” Characteristics: An Expanded View of Climate Change. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D7): 12,839-12,847.
- 28 Niimura N , Okada K , Fan X B , *et al.* Formation of Asian dust storm particles mixed internally with sea salt in the atmosphere [J]. *J. Meteorol. Soc. Jpn*, 1998, **76** : 275-288.
- 29 Osada K., I Hajime., K Mizuka et al. Mineral dust layers in snow at Mount Tateyama, Central Japan: formation processes and characteristics. *Tellus*, 2004, 56(B): 382-392.
- 30 Oerlemans J, Anderson B, Hubbard A et al. Modeling the response of glaciers to climate warming. *Climate Dynamics*, 1998, 4: 267-274.
- 31 Petit J. R., J Jouzel., D Raynaud et. al., Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399: 429-436.
- 32 Petit J R., M Briat, and A. Royer. Ice age aerosol content from East Antarctic ice core samples and past wind strength. *Nature*, 1981, 293: 391-394.
- 33 Pye k, *Aeolian Dust and Dust Deposits*, Academic press, London, 1987
- 34 Prospero J M, Uematsu M, Savoie D L. Marine aerosol transport to the Pacific Ocean. *Chemical Oceanography*, 1989, 10: 188-218.
- 35 Prospero J M, Ginoux P, Torres O et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric solid dust identified with the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40 (1): 4-1~4-30.
- 36 Ram M , Gerson Koenig , Continuous dust concentration profile of pre-Holocene ice from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core: Dust stadials, interstadials, and the Eemian. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C12): 26,641–26,648.

-
- 37 Rea D. K., S. A Hovan. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediment: Lessons from the North Pacific. *Paleoceanography*, 1995, 10(2): 251-258.
- 38 Reader M. C., I Fung., N McFarlane. The mineral dust aerosol cycle during the Last Glacial Maximun. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 9381-9398.
- 39 Richard A V, Asian Aerosols in north America: Frequency and Intensity of Transpacific Transport, Chemical Composition, and Mass Concentrations, Ph.D, Thesis, 2002, University of California.
- 40 Rothlisberger R., R Mulvaney., E. W Wolff et al. Dust and sea salt variability in central East Antarctica (Dome C) over the last 45 kyrs and its implications for southern high-latitude climate. *Geophysical Research Letter*, 2002, 29(20): 1963.
- 41 Ruth U, Concentration and Size Distribution of Microparticles in the NGRIP Ice Core (Central Greenland) during the Last Glacial Period, Ph.D, thesis, 2002, University Bremen
- 42 Ruth U., D Wagenbach., M Bigler et al. High resolution microparticle profiles at NGRIP: Case studies of the calcium-dust relationship. *Annals of Glaciology*, 2002, 35: 237-242.
- 43 Ruth U, D Wagenbach and J.P Steffensen, et al., Continuous record of microparticle concentration and size distribution in the central Greenland NGRIP ice core during the last glacial period. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D3), 4098.
- 44 Sequeira R, On the large-scale impact of arid dust on precipitation chemistry of the continental northern hemisphere. *Atmospheric Environment*, 1993, 27(10): 1553-1565.
- 45 Seinfeld J H , Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. New York: Wiley inter-science, 1998. 1326pp.
- 46 Steffensen J P., The size distributions of microparticle from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C12): 26,755-26,763.
- 47 Tegen I., D Rind. The influence of the latitudinal temperature gradient on soil dust concentration and deposition in Greenland. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105, 7199-7212.
- 48 Thompson E. M., L. G Thompson, Glaciological interpretation of the microparticle concentration in the 905-meter Dome C core. *Antarctic Journal of the Unite States*, 1980, 11:

- 71-75.
- 49 Thompson E. M., South Pole ice core processing and microparticle analysis. *Antarctic Journal of the United States*, 1983, 12: 118-119.
- 50 Thompson L. G., E. Mosley-Thompson, Microparticle concentration variations linked with climatic change: Evidence from polar ice cores. *Science*, 1981, 212: 812-815.
- 51 Thompson L. G., *Microparticles, Ice Sheets and Climate*. Ohio State University. Institute of Polar Studies. Report 64, 1977a, 1pp.
- 52 Thompson L. G., Mosley-Thompson E., M.E. Davis et al. Kilimanjaro Ice Core Records: Evidence of Holocene Climate change in Tropical Africa. *Science*, 2002, 298: 589-593.
- 53 Thompson L.G and E.M Thompson, Spatial distribution of microparticles within Antarctic snow-fall. *Annals of Glaciology*, 1982, 3: 300-306.
- 54 Thompson L.G., E. Mosley-Thompson, B. R. Koci. A 1500-year record of tropical precipitation in ice cores from the Quelccaya Ice Cap, Peru. *Science*, 1985, 229: 971-973.
- 55 Thompson L.G., E. Mosley-Thompson, M. E Davis. Late glacial stage and Holocene tropical ice core record from Huescaran, Peru. *Science*, 1995, 269: 46-50.
- 56 Thompson L.G., E. Mosley-Thompson, M.E. Davis et al., 100,000 year climate record from Qinghai-Tibetan Plateau ice cores. *Science*, 1989, 246(4929): 474-477.
- 57 Thompson L.G., M.E. Davis., E. Mosley-Thompson et al., A 25,000 year tropical climate history from Bolivian ice cores. *Science*, 1998, 282: 1858-1864.
- 58 Uematsu M , Duce R A , Prospero J M , *et al.* Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 5343-5352.
- 59 Wake C. P., P. A Mayewski., Modern eolian dust deposition in central Asia. *Tellus*, 1994, 46B: 220-223.
- 60 Wake, C, P. Mayewski, X. Zichu, et al., Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in Asian glaciers. *Geophys Res. Lett.*, 1993, 20(14): 1411-1414.
- 61 Wang S., Gong D., Zhu J. Twentieth-century climatic warming in China in the context of the Holocene. *The Holocene*, 2001, 11(3):313-321(9).
- 62 Watanabe K , Kasuga H , Yamada Y , *et al.* Size distributions of aerosol number concentrations and water-soluble constituents in Toyama, Japan: A comparison of the measurements during Asian dust period with non-dust period [J]. *Atmospheric Research*, 2006, 82: 719-727.

- 63 Zdanowica C. M., G. A Zielinski., C. P Wake. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the Penny Ice Cap, Baffin Island, Arctic Cannda. *Tellus* 1998, 50B: 506-520.
- 64 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.
- 65 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪内不溶粉尘的特征: 沙尘与非沙尘季节的比较. *环境科学*, 2008.
- 66 李忠勤, 王飞腾, 朱国才 等. 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*, 2006, 29(1): 61-65.
- 67 刘纯平, 姚檀栋, Thompson L G 等. 敦德冰芯中微粒含量与沙尘暴及气候的关系. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 9-14.
- 68 刘纯平, 姚檀栋, 谢树成. 祁连山敦德冰芯微粒变化特征和大气环境记录. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(3): 105-113.
- 69 刘纯平, 祁连山敦德冰芯微粒与气候环境变化研究. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所硕士论文, 1999。
- 70 郭光剑, 姚檀栋, L. G Thompson et. al. 末次冰期以来古里雅冰芯微粒记录与极地冰芯的对比. *科学通报*, 2004, 49(5): 475-479.
- 71 郭光剑. 慕士塔格和古里雅冰芯中微粒记录研究. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士后研究工作报告, 2004. P.26
- 72 郭光剑, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 慕士塔格冰芯中微粒的粒度记录. *中国科学 D 辑*, 2006, **36**(1): 9-16.
- 73 郭光剑, 姚檀栋. 冰芯中不溶微粒的研究进展. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 528-538.
- 74 徐建中, 珠穆朗玛峰东绒布冰芯微粒记录研究. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士论文, 2008。
- 75 夏述训, 杨根生. 中国西北地区沙尘暴灾害及防治. 中国环境科学出版社, 1996
- 76 王明星著, 大气化学, 气象出版社, 1999 P: 184
- 77 姚檀栋 Thom.,LG., 冰芯所记录的环境变化及空间耦合特征. *第四纪研究*.1995(1): 44-50
- 78 姚檀栋, 王宁练., 冰芯研究的过去、现在和未来. *科学通报*, 1997, 42(2): 225-230.
- 79 姚檀栋, 郭光剑, 蒲剑辰等. 古里雅冰芯中钙离子与大气粉尘变化关系, 2004, 49(9): 888-892.

- 80 尤晓妮, 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区雪-粒雪-冰演化时间及雪层内不溶微粒的演化过程. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所硕士论文, 2006。
- 81 朱宇漫, 李忠勤, 尤晓妮. 利用光学粒径检测仪测定雪冰样品中的微粒. 现代科学仪器, 2006, 3: 81-84.
- 82 张玉兰, 康世昌, 张强弓, 等. 长江源区各拉丹东峰雪冰中微粒季节变化及其环境意义. 环境科学, 2008, 29(8): 2117-2122.
- 83 张小曳 沈志宝等, 青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积. 中国科学: D 辑, 1996, 26(2): 147-153
- 84 郑伟, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 羊卓雍流域雪坑中化学离子记录研究. 环境科学, 2008, 29(6): 1488-1494.

致 谢

在硕士论文完成之际，回想起在中科院寒旱所学习的三年时光，期间的刻苦努力，学习生活的点点滴滴，都对我产生了重要的影响，是我人生成长的重要阶段。师长、亲人、朋友以及同学的帮助和鼓励，使我的硕士论文得以顺利完成。

首先衷心感谢的是我的导师李忠勤研究员，在这三年里，李老师对我严格要求、精心指导和无私关怀。李忠勤老师严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，敏锐的洞察力以及诲人不倦的师者风范，都深深地感染和激励着我，是我今后学习中的楷模。在硕士学习期间，不论是做学问，还是在做人方面，李老师都给予了严格要求和悉心指导，让我受益匪浅；在论文的完成过程中，倾注了李老师的辛勤汗水和心血，提出了许多建设性的宝贵意见，在此谨向李老师致以诚挚的谢意，崇高的敬意！

本项研究得到了天山冰川观测试验站开展的雪冰现代过程研究项目的大力支持。感谢项目组和天山站所有人员，他们是张明军老师、杨惠安老师、韩添丁老师、焦克勤老师、井哲帆老师、王飞腾博士、王文彬博士、李慧林博士、赵淑慧博士、李开明博士、吴利华博士、张晓宇博士、周平硕士、周在明硕士、王林硕士、王璞玉硕士、金爽硕士、高文华硕士、王鹏硕士等人的帮助和支持；感谢实验室朱宇曼老师在实验中的帮助和辛勤，感谢天山冰川站的所有野外观测人员对冰川科研事业付出的辛勤和努力。

感谢冰冻圈科学实验室的老师任贾文研究员、王宁练研究员、何元庆研究员、杨梅学研究员、陈拓研究员、秦翔研究员、侯书贵研究员、效存德研究员、康世昌研究员、段克勤研究员，以及冯起研究员、高前兆研究员等在硕士论文完成过程和日常学习上的建议和意见，在此表示衷心感谢。

感谢我的同学和朋友们在学习和生活上的帮助和鼓励，让我的硕士生活愉快地度过，他们是张坤博士、李传金博士、张宁宁博士、杜文涛博士、庞洪喜博士、丁明虎博士、徐建中博士、刘友存博士、武晓波博士、李全连博士、贾文雄博士、赵景东博士、王世金博士、郭东林硕士、左昕昕硕士、屈鹏硕士、孙伟军硕士、张彩霞硕士、谢君硕士、刘广岳硕士、王旭峰硕士、徐国保硕士、张亚峰硕士、李宗省硕士等。

感谢研究生部的蔡英老师，张明娟老师，刘晓东老师和陈辉老师无私热忱的帮助。

最后，感谢我挚爱的家人一直以来默默地鼓励和支持。

董志文

2009年4月 兰州

专业和科研实践简历

1. 个人简历

董志文，男，汉族，1984 年生于甘肃甘谷，2006 年 7 月毕业于西北师范大学地理专业

2002 年 9 月—2006 年 6 月在西北师范大学攻读学士学位；

2006 年 7 月—2009 年 6 月在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所攻读硕士学位。

2006 年 6 月—2006 年 9 月，2007 年 6 月—2007 年 11 月，2008 年 4 月—2008 年 7 月，在天山冰川站进行冰川野外考察及实践活动。

2. 参加课题

(1) 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所《引进国外杰出人才基金》项目“天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雪—冰转化的物理化学观测”；

(2) 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”；

(3) 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”；

(4) 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”；

3. 攻读硕士学位期间发表的学术论文

董志文, 李忠勤, 王飞腾, 张明军. 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.

董志文, 李忠勤, 王飞腾, 张明军. 天山东部冰芯 pH 值和电导率的大气环境空间差异. 地理学报, 2009, 64(1): 544-552.

董志文, 李忠勤, 王飞腾, 张明军. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪内的不溶粉尘特征: 沙尘与非沙尘季节的比较. 环境科学, 2009 (6) . (待刊) (EI)

Dong Zhiwen, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. The pH value and electrical conductivity records of atmospheric environment from three shallow ice cores in the eastern Tianshan Mountains. Journal of Geographical Sciences, 2009. (accepted) (SCI)

Li Zhongqin, Shen Yongping, Li Huilin, Dong Zhiwen, Wang Liwei. Response of the melting Urumqi glacier No.1 in eastern Tianshan to climate change. Advances in climate change research, 2008, 4: 67-72.

李忠勤, 董志文. 冰川与气候相互作用—以天山乌鲁木齐 1 号冰川为例, 中国科技成果, 2007, 23, 8-9.

李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 李慧林, 董志文, 等. 冰川消融对气候变化的响应—以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例. 冰川冻土, 2007, 29(3), 333-342.