

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 博士学位论文

新疆天山雪冰中粉尘的时空变化特征研究

董志文

指导教师 李忠勤 研究员，理学博士，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 理学博士 学科专业名称 自然地理学

论文提交日期 2011年10月 论文答辩日期 2011年11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_____

**Temporal and Spatial Change of Atmospheric Dust
Deposition in Snow and Ice on Glaciers in Tianshan
Mountains, central Asia**

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

For the Degree of
Doctor of Philosophy

Presented by
Dong Zhiwen

Accepted on the recommendation of
Prof. Li Zhongqin, Supervisor

Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute
Chinese Academy of Sciences

November, 2011

原创性声明

本人声明所提交的学位论文，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，同意我所保存或向国家有关部门及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：_____

摘要

全球和区域气候变化是当前众所关注的重大问题之一。作为影响气候变化的一个重要因子，大气粉尘及其对气候环境的影响亟待深入研究。源自于地壳表面的气溶胶矿物粉尘是重要的大气组成部分，能够影响地球表面的辐射平衡，中和降水中的酸性物质，作为地球气候系统的辐射强迫因子，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。高寒地区的冰川雪冰中沉降的大气粉尘微粒研究有着更为重要的意义，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粉尘微粒则用来研究近期气候环境变化。粉尘气溶胶可以改变冰川反照率进而影响能量平衡、加速冰川消融，因而对冰川区粉尘沉降的特征及其时空变化观测研究已是目前亟待解决的科学问题。天山地区位于中亚干旱区的核心区域，周边被广袤的大沙漠所包围，气候环境极端干旱，而天山之巅发育的冰川是重要的水资源，对该区冰川区粉尘沉降的研究很有科学和现实意义。大气粉尘浓度和粒径分布等特征的变化由于受到风力、搬运距离、沉降过程等因素影响，从中亚粉尘源区开始搬运、传输，经过距离远近不同地区时表现出不同特征。因此，在亚洲粉尘源区研究雪冰中微粒沉积的特征，并与北半球其他地区已有的相关研究结果进行比较，对于完善全球大气粉尘循环和沉降机制的认识也显得尤为重要。基于此，对天山地区冰川上的粉尘特征进行研究显得十分必要，是对全球大气粉尘循环研究的重要补充和完善。

本研究主要对我国境内天山不同区域的典型冰川积雪中粉尘沉降的特征进行研究。雪冰中粉尘微粒特征分析表明，自西向东随着研究点地理环境的变化，除了青冰滩 72 号冰川外，积雪中不溶微粒的质量浓度、沉积通量和体积粒径分布的众数都表现增加的趋势：奎屯哈希勒根 51 号冰川和 48 号冰川最小，乌鲁木齐河源 1 号冰川、博格达峰四工河 4 号冰川次之，托木尔峰青冰滩 72 号冰川其次，哈密庙尔沟平顶冰川最大。研究表明，哈密庙儿沟和托木尔峰冰川区受粉尘源影响较大，而乌鲁木齐河源区、博格达峰地区与奎屯河源冰川区受影响则相对较小，说明了天山冰川中粉尘沉降存在很大的空间差异性。雪坑微粒浓度剖面 and 离子相关性分析表明，天山冰川积雪中的污化层富含亚洲粉尘的富 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 矿物；微粒体积—粒径分布众数介于 3~22 μm ，粒径分布显示了单结构模式。冰川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。与全球其他区域相比,天山冰川区粉尘特征反映了中亚粉尘源区沙尘活动的明显影响。

同时,通过冰川表层雪样的采集和连续密集的观测,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,推测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,另一方面, NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为可溶部分其浓度变化存在差异。同时,用后向气团轨迹分析模型 (HYSPLIT) 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。

此外,以天山乌鲁木齐河流域为例,对高山冰川区和郊区降水中粉尘沉降随时间变化特征及其差异进行研究。结果表明,降水中粉尘颗粒物的浓度、粒径分布及化学要素组成在两个取样点都具有明显的季节变化。粉尘颗粒浓度表现为冬-春季节升高而夏-秋季节降低,与降水量成反向变化,反映了降水受中亚沙尘活动的影响明显。粉尘颗粒在冬-春季节的粒径分布众数较大,而在夏-秋季节相对较小;且这种变化在高山区和郊区存在差异,可能是局地环境影响造成。粉尘颗粒的化学特征的季节差异反映了区域自然环境和人为活动对降水的共同影响。与其它区域降雪中粉尘和化学特征进行了比较。并结合 HYSPLIT 模型对大气降水和粉尘颗粒的来源进行验证。天山高山冰川区和低山区的明显差异也反映了冰川区的粉尘沉降的特殊性。总体上,新疆天山冰川区雪冰中沉降的粉尘表现强烈的季节性、空间性和以及较为明显的区域和局地差异性,反映了中亚干旱区粉尘源区对天山高海拔冰川区的不同程度的强烈影响,对区域大气环境的演化产生了重要的作用,并有可能加速山岳冰川的快速消融。尽管如此,对于其影响机制需要进行更深入研究。

关键词: 中亚天山; 气溶胶粉尘; 山岳冰川; 区域差异; 季节变化; 沙尘活动

Abstract

Windblown mineral 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, Sigonghe Glacier No.4 in Mt Bogeda, Haxilegen Glacier No.51 and Glacier No.48 in Kuitun, Qingbintan Glacier No.72 in Mt Tuomuer, and Miaoergou Glacier in Hami in Tianshan Mountains, 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 Tianshan is different from each other. The characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow are different between six research sites in Tianshan Mountains, as the environment changes from west to east. 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 Tianshan Mountains 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 Tianshan Mountains, 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 (439×10^3 /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.

Chemistry and environmental significance of insoluble dust particles in precipitation at alpine and rural sites were determined in the Urumqi river valley in Tianshan Mountains. Results showed that the concentration, size distribution and chemical constitutes of dust particles in precipitation varied seasonally in both two sites. Dust concentration increased during winter and springtime but decreased during summer and autumn period, which is negative correlation with the seasonal change of precipitation, which reflect the significant influence of Asian dust storm. Volume-size distribution of particles showed larger size in winter-spring, but relatively smaller in summer-autumn period. Chemical constitutes of precipitation indicated that precipitation is affected by both regional atmospheric environment and human activity in central Asia. HYSPLIT Model is also employed to examine the transport process of air mass and insoluble dust particles in this region.

Dust deposition shows obvious spatial and seasonal variation on the glaciers in Tianshan Mountains, China, also showing obvious regional and local differences.

Dust may originate from different source of dust basins in central Asia. The transport of dust particles need to be understood. The use of Sr and Nd isotopes would be a fruitful method to apply in future studies to test the interpretations made in this study, as these methods have been used to identify source regions of dust particles in ice cores of the Tibetan Plateau and the East Antarctica. Moreover, the process of aerosol dust deposition in the snow on the glaciers of the Tianshan Mountains is still unclear and further research is needed.

Keywords: Tianshan Mountains; Alpine glaciers; Aerosol dust; Chemical constituents; Seasonal and spatial variation; Dust activity

目 录

摘要	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 气溶胶粉尘的气候意义.....	2
1.3 国内外研究进展.....	3
1.4 本研究内容和意义.....	10
第二章 研究区概况	12
2.1 天山地区概况.....	12
2.2 乌鲁木齐河源 1 号冰川概况.....	13
2.3 哈密庙儿沟平顶冰川概况.....	17
2.4 奎屯哈希勒根 48 号、51 号冰川概况.....	20
2.5 托木尔峰青冰滩 72 号冰川概况.....	22
2.6 博格达峰四工河 4 号冰川概况.....	25
第三章 样品采集与实验分析	28
3.1 样品野外采集.....	28
3.2 实验分析和数据处理.....	30
第四章 天山不同区域雪冰中粉尘的空间变化特征	36
4.1 粉尘浓度的空间变化特征.....	36
4.2 粉尘化学组成特征.....	40
4.3 粉尘粒径分布特征.....	55
第五章 冰川新降雪中粉尘特征的季节变化及其环境意义	61
5.1 粉尘浓度季节变化.....	62
5.2 粉尘粒径分布季节变化.....	64
5.3 粉尘化学组成特征的季节变化.....	68
第六章 高海拔冰川区与低山郊区降水中粉尘特征比较	73
6.1 粉尘浓度及其季节变化的比较.....	74
6.2 粉尘粒径分布及其季节变化.....	77

6.3 粉尘化学离子组成及其环境影响.....	80
6.4 气团后向轨迹分析.....	83
第七章 结论与展望	88
7.1 结论.....	88
7.2 问题与展望.....	90
参考文献	91
附录	106
致 谢	111

第一章 绪论

1.1 引言

全球和区域气候变化是当今众所关注的焦点问题之一。气候变化问题已成为事关国家经济和社会发展、生态与环境保护、能源与水资源管理、食物安全和人类健康以及社会可持续发展的重大问题^[1]。因此,研究气候异常发生的原因和规律已成为当今社会发展的需求。要了解和认识当今气候变化、以及预测将来气候变化,对过去气候变化的研究十分必要^[2-4]。在众多气候变化研究代用资料中,高海拔冰川中保存的雪冰记录以其高分辨率著称。气候环境变化的信息会很好的保存在雪冰中,使得冰川成为气候环境变化信息的良好载体。

除极地地区之外,中亚是冰川发育最广的地区,其中又以新疆地区和青藏高原为主。根据《中国冰川目录》资料,新疆共发育冰川 18311 条,面积 24721.93km²,冰储量 2623.4711km³,约占全国冰川总储量的 46.8%,位居第一。冰川主要分布在天山、阿尔泰山、帕米尔、喀喇昆仑山和昆仑山,包含在额尔齐斯河、准格尔内流河、中亚西亚内流河和塔里木内流河等水系中^[5],是我国冰冻圈和水圈的重要组成部分。其中,中亚的天山山地冰川所处的周边环境十分干旱,冰川是中亚地区人类赖以生存的“固体水库”。本区气候环境具有空间上的复杂性、时间上的易变性、对全球变化的响应非常敏感等特点。冰川雪冰(包括积雪和冰芯)记录的资料成为研究新疆乃至中亚地区高海拔对流层气候环境变化的重要资料。

中亚属于干旱与半干旱地区,有全球第二大沙漠的塔克拉玛干沙漠,全球沙尘暴发生频率最高的地区——锡斯坦盆地,是全球重要粉尘源区^[6-10]。而中亚的新疆地区是中亚粉尘源区最大的地区,分布着诸多大沙漠和戈壁。粉尘通过吸收、散射或反射作用,从而对气候产生直接或间接辐射效应。其直接辐射效应是吸收或反射太阳的辐射,使地球的热平衡受到影响;其间接效应是主要表现在对云层成核的作用,使云的凝结核增多,增强云的反射效应。近几十年来,粉尘的生物地球化学效应也得到了广泛的关注^[11]。粉尘通过风对地面颗粒物的夹带作用进入大气,并被远距离传输,部分沉降到冰川上,并被保存下来,于是冰川雪冰中的粉尘成为重要的一个研究气候环境的代用指标。

本文通过在新疆天山山脉不同区域具有代表性的典型冰川,包括乌鲁木齐河

源 1 号冰川、奎屯哈希勒根 51 号冰川和 48 号冰川、托木尔峰青冰滩 72 号冰川、博格达峰四工河 4 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川等,野外考察采集的冰川积雪样品、浅冰芯样品和其中保存的不溶粉尘微粒为研究对象,研究了我国境内的中亚天山冰川中粉尘微粒沉降的特征及其时空变化规律,分析其变化产生的气候环境背景。研究了天山不同区域冰川积雪中沉降的粉尘浓度、通量、化学组成、粒径分布等特征及其空间变化特征;通过密集连续观测取样,探讨冰川表面的新雪和表层雪中粉尘沉降的随时间和季节变化的特征;通过在乌鲁木齐河流域不同海拔带的采样,对天山高山冰川区和低山郊区的降水中粉尘沉降的特征进行对比研究,以探究冰川区粉尘沉降的特殊性。

1.2 气溶胶粉尘的气候意义

气溶胶粉尘是指悬浮在空中的矿物性固体颗粒,主要源于地球表面,是对流层气溶胶的主要组成部分。亚洲粉尘是指来源于中亚干旱半干旱地区的矿物粉尘,其中又以沙尘为主。中亚干旱半干旱地区每年冬春季在强冷空气的作用下,会形成频繁的尘暴天气,并通过大气传输,沉降到其下游地区,甚至到遥远的北太平洋地区^[12-14]。中亚地区每年输入大气的粉尘达 800 Mt^[15],约占全球总量的 1/3。

粉尘气溶胶通过影响地球辐射收支平衡影响气候变化。粉尘气溶胶可以吸收和散射太阳辐射及地面和云层长波辐射,即所谓的直接辐射效应。直接辐射强迫取决于粉尘气溶胶的光学特性、时空分布、大气状况及地表反照率等。另外,粉尘气溶胶的源汇为非均匀分布,存在时间较短,以及可见光与红外辐射强迫作用相反等原因,使得其直接辐射强迫的全球或区域估计成为气候变化预测中的一个重要而复杂的问题。粉尘气溶胶对地表大气短波辐射的强迫远大于对大气顶的辐射强迫,其对太阳辐射的衰减作用能导致地表降温。粉尘气溶胶对长波辐射的吸收导致粉尘层及以下大气增温,而粉尘层以上大气冷却,大气温度垂直分布的改变将影响大气动力结构、大气环流和降水分布。

除了直接辐射强迫,粉尘气溶胶可作为云凝结核(CCN)或冰核,通过改变云的微物理结构和特征,从而影响云的辐射性质,即粉尘气溶胶对气候的间接效应^[16-17]。Rosenfied et al.通过卫星和航空观测分析发现在含有沙尘气溶胶的云滴

中很少发生碰并而产生降水^[18]； Sassen 发现来自于中亚的沙尘与高积云中冰粒的形成相关关系很高^[19]。最近 Huang et al.通过卫星资料研究了中国西北 2001-2004 年沙尘对云的性质及辐射强迫的影响^[20]，结果发现沙尘天气发生时，卷云的云滴有效粒径、光学厚度和云水通量平均都减小，最终减小了云的辐射强迫，云的冷却效应收到了抑制，相当于大气顶层沙尘气溶胶的增温作用。受到沙尘加热作用的影响下，云滴的蒸发作用增强，很大程度上抑制了中国西北降水的发生^[21]。

粉尘气溶胶对地球生物化学循环也起到很重要的作用。粉尘及其运载的许多微量物质对水圈、生物圈等产生重要影响。试验发现：海洋中的许多元素，如 Pb、Al、V、Mn、Zn 以及某些碳氢化合物和某些有机合成化合物，经由大气远距离的输送是比河流入海更为重要的来源。这些尘埃携带了来自工业获得和土壤风化的风成铁、铝等微量元素，直接影响海洋生物的营养盐供应，影响浮游植物的生长施肥，控制海洋的初级生产力。它不但影响渔业生产，而且增加海洋上空大气的二甲基硫和云量，影响海洋对人为 CO₂ 的吸收，从而间接地对气候产生显著影响。

1.3 国内外研究进展

国内外关于冰川区粉尘气溶胶的相关研究开展的较多，除中亚地区冰川、欧洲阿尔卑斯山、日本 Tateyama 山、加拿大落基山等地区开展了部分研究^[22-23]外，主要集中在南极和北极格陵兰地区。在上个世纪前期，人们在世界的不同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 F M 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^[24]。Marshall 在 1962 年从 Byrd 冰芯的微粒研究中发现，微粒含量存在规律的变化^[25]，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，为开展冰芯微粒研究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^[26-27]；Thompson 于 1977 年对 Byrd 冰芯和 Camp Century 冰芯进行对比研究时^[27]，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。

粉尘浓度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, 是雪冰中粉尘微粒研究的一个重要方面, 取得很多的成果。很多冰芯都直接采用或参考微粒进行了定年^[26-33]。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) 冰芯仅上部 70 m 利用了微粒定年^[31], 这一结果与流动模型定年的结果非常吻合。

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^[34, 35, 36, 37]。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^[32]。Vostok 冰芯微粒间冰期含量从 50ng g^{-1} 上升到冰期的 $1000\text{-}2000\text{ ng/g}$ ^[38]。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^[39]。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 $(500\text{-}600) \times 10^3$ 个/ml 迅速增加到了近 800×10^3 个/mL^[40-41], 反映出末次冰期时青藏高原存在某种局地气候变化。

很多研究探讨了雪冰中微粒的粒径分布特征。粒径分布是恢复古气候和古环境强有力的参数^[36]。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 分析 GRIP 冰芯时发现^[35], 粒径处于 $0.4\text{-}2.0\mu\text{m}$ 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, $2.0\text{-}6.0\mu\text{m}$ 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' et al.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^[42]。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 $2\sim 5\mu\text{m}$ 微粒浓度的比^[36]。Delmonte 还根据南极 Dome B 和 EPICA Dome C 冰芯中细、粗颗粒的百分比^[36]，得到了两个区域末次冰期时微粒传输机制的差异。邬光剑等研究了慕士塔格峰冰芯中微粒的粒度记录^[43-44]；徐建中等研究了珠穆朗玛峰东绒布冰芯中微粒的粒度记录及其反映的远距离粉尘传输的气候环境意义^[45-46]。Osada et al.研究了日本中部山脉积雪中粉尘的粒径分布特征及其季节变化^[22]。

冰芯中粉尘微粒的矿物成份研究也是微粒研究的重要方面，取得了很大进展。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 $0.1\sim 1$ ；而北美和北非粉尘源区 K/C 比值变化范围是 $1\sim 10$ ，据此还判定北美有可能是格陵兰冰雪粉尘的源区，如 Wu Guangjian et al. 研究了乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪和敦德冰芯中粉尘的矿物要素组成^[47-48]。颗粒的扫描电镜分析从最早借助光学显微镜对粗颗粒进行分析逐渐发展为应用核物理技术等高分辨率的分析研究。目前，用于研究颗粒成分和微观形貌的手段有扫描电子显微镜、投射电子显微镜、原子力显微镜等，用于研究颗粒微区元素成分分析的仪器有能谱仪、

波谱仪、电子微探针、激光显微质谱等。而扫描电镜结合 X 射线能谱仪法 (SEM-EDX) 是使用电子显微镜和能谱仪联合进行粉尘颗粒分析的手段之一,也是上述方法中较为快捷的单颗粒表征技术。通过这种方法可以获得气溶胶粉尘和雪冰粉尘的颗粒尺寸、形貌特征、元素组成、表面覆盖以及聚集状态等^[49],并通过粉尘颗粒的这些形态学参数可以定性的鉴别气溶胶的来源(自然源或人为源),甚至还可以分辨出单个源。相对于透射电镜,扫描电镜还具有可以给出颗粒物表面形貌等具体特征的优点。近年来,SEM-EDX 已成为国际上进行大气气溶胶研究的一种重要手段,被广泛应用于研究气溶胶粉尘颗粒特征,并通过颗粒物大量统计得出颗粒物的来源分析。欧洲地区意大利不仅使用 SEM-EDX 对罗马市区的大气气溶胶颗粒特征分析,研究了其季节效应^[50],还在 SEM-EDX 分析基础上结合 (XRD) (X 射线衍射分析) 对不同天气状况下的可吸入颗粒物 PM10 样品中二氧化硅的特征进行了详细研究,人为罗马市区的二氧化硅主要以晶体形式存在,该地区盛行的南风携带的源自于撒哈拉大沙漠的石英颗粒是地中海周边大气二氧化硅的主要来源^[51]。丛志远等使用 SEM-EDX 技术对青藏高原珠峰北坡的东绒布冰川采集的大气气溶胶粉尘和雪坑中颗粒的形貌特征、元素组成及来源等研究。有些研究用 SEM-EDAX 方法研究了乌鲁木齐河源 1 号冰川和博格达峰地区的大气中气溶胶单颗粒的形态和化学组成^[52-54]。

微粒来源示踪研究也是近期粉尘相关研究的热点问题。Gillette et al.研究了美国风蚀形成的粉尘的来源、时间和空间的变化特征,及对人类社会的影响^[55-56]。张小曳等研究了青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积的关系,认为远距离传输来源的粉尘影响范围很大^[57],对青藏高原的黄土沉积有着重要贡献。由于放射性同位素 Sr、Nd 和 Pb 由于其比值分布具有地带性,且在随大气传输或沉积的过程中不易被改变,因此通常可作为粉尘来源的示踪物。对于冰川冰芯和积雪中沉降粉尘的源区来说,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.和 Grousset et al.通过 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 方法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^[58]。徐建中等研究了青藏高原珠穆朗玛峰东绒布冰川 40 m 冰芯中微粒的同位素组成以确定其来源^[45]，结果表明冰芯污化层样品同位素的比值和局地粉尘同位素的比值一致，可以判断出微粒来源于局地的环境，如河谷、冰碛物和裸露的基岩等；而冰芯非污化层样品的同位素比值与污化层有很大不同，和印度西北部的结果较为接近，表明东绒布冰芯中微粒可能来源于印度西北部。邬光剑等研究了青藏高原北部敦德（Dunde）冰芯中粉尘微粒的 Sr 和 Nd 同位素组成，以追踪其来源和证实亚洲粉尘的远距离传输机制^[47]，冰芯样品中显示了与塔克拉玛干沙漠和柴达木盆地的沙漠相似的 Sr 和 Nd 同位素组成。Delmonte 等对比研究了 EPICA-Dome C 和 Vostok 冰芯中过去 22 万年的粉尘记录^[36]，发现了两个点较为一致的示踪同位素组成，其值范围为 $0.708 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0.711$ 以及 $-5 < \epsilon\text{Nd}(0) < +5$ 。

此外，很多研究讨论了粉尘微粒季节性变化及其与可溶性离子的关系，例如 Osada et al. 研究了日本中部馆山的积雪粉尘的浓度、粒径、化学组成特征等季节变化^[22]；张玉兰等研究了长江源区各拉丹东峰雪冰中微粒季节变化及环境意义^[59]。 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^[60-67]。Rothlisberger 以 nssCa^{2+} 为大气粉尘的指标^[62]，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^[63]。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+} 和粉尘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^[63]；而在 GRIP 冰芯中两者的相关系数高达 0.978^[35]；Renland 冰芯上部分 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^[68]。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+} ，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^[69]。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^[34]，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^[70]，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）^[35]，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-} 和粉尘微粒也有类似的关系。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^[40-41]；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；古里雅的 8m 浅冰芯中二者相关系数为 0.55。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+} 和微粒在很多冰芯中存在有比较好的相关性，然而，某些地区冰芯 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^[28]；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^[71]。这些研究发现，影响大气粉尘不溶部分和可溶部分原因可能有：（1）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^[22]，而来源于西南亚的沙尘 Ca^{2+} 含量则相对较低^[9-10]。（2）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^[63,72]。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。

气溶胶粉尘受大气环流的季节性变化而表现为季节性差异。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 et al.在青藏高原多个点进行了雪坑采样^[10],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气候系统控制造成的——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^[42]。日本的 Tateyama 山微粒分布呈单峰型和双峰呈季节交替^[22]。以上研究都表明了粉尘特征与区域和全球气候环境变化之间的密切关系。

冰芯中的粉尘微粒资料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^[39, 73-78]。各种模式的侧重点不同, Joussaume 更多的是考虑的是大气条件的变化引起的微粒增加^[73]; Andersen et al.认为陆地面积的增加是粉尘变化的主要原因^[74]; Tegen 主要考虑了纬度温度梯度的增大导致粉尘的变化^[77]。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。

从地域上看,除了极地地区外,青藏高原雪冰粉尘研究近期开展较多。邬光剑等研究了慕士塔格浅冰芯中的微粒记录^[41],冰芯定年也是根据微粒和氧同位素相结合进行的,微粒粒径测试的范围是 1-30 μm , 在 1-10 μm 间微粒分布表现出 Junge 分布,大多数低浓度样品不能进行对数正态分布拟合。从 Junge 分布特征来看,慕士塔格冰芯中的微粒分布范围广、直径小于 1 μm 的细颗粒最多,而且数量而且数量众数远小于 1 μm ,可见微粒分选比较差。微粒记录和 Ca^{2+} 存在一定的对应关系,浓度和粒径都表现出了明显的季节性变化,与氧同位素的变化特征相似。王宁练等研究了青藏高原中部马兰冰芯中粉尘微粒的变化^[79-80],使用参

数为污化层厚度比率(即冰芯中某一时段内所有污化层的累积厚度与该时段冰芯长度的比值),主要是因为马兰冰芯粉尘污化程度严重,用传统的方法难以测试。这也是一种很好的研究方法。污化层厚度比率很好的反映了过去 50 年沙尘天气的发生频率^[79],在过去 1000 年里污化层参数与气温变化呈显著的负相关关系^[80]。总体上,与上述这些区域相比,中亚腹地的天山冰川粉尘研究显得比较缺乏。

1.4 本研究的内容及意义

本论文选择在毗邻中亚粉尘源区的、天山不同区域典型冰川区开展气溶胶粉尘和雪冰样品的采集、以进行粉尘在雪冰中的沉积特征及其空间变化研究。源于中亚地区的粉尘气溶胶不但是全球大气中沙尘的重要来源^[12, 81],而且沙尘还可以从中亚地区传输到东亚、北太平洋甚至北极格陵兰等地区,对北半球乃至全球的大气环境及气候都有重要的影响^[15, 58, 82-86]。全球和区域气候变化是当前众所关注的重大问题之一。作为影响气候变化的一个重要因子,大气粉尘及其对气候环境的影响亟待深入研究。尽管国际上目前对亚洲粉尘开展了广泛的研究,但在中亚源区的研究十分有限,对于接近成云高度的大气层、高海拔地区的观测和研究基本处于空白。

高海拔冰雪中化学物质是反映气候环境演化的重要指标^[6, 13, 74, 87-88],弄清其中不溶粉尘和阴阳离子、稳定氧同位素、重金属等化学物质传输机制及其在冰雪中的次生变化机制等问题,不仅可以恢复气候与环境的演变^[89-93],而且能够提供对地理圈层之间相互作用的新认识,尤其对物质的迁移转化研究有重要意义。沉降在雪冰中的粉尘是重要的大气组成部分,影响着地球表面的辐射平衡。大气中的粉尘含量是气候环境变化的重要指示器,与全球气温变化有着密切的关系。冰芯记录研究显示,当粉尘微粒含量高时对应的气候条件为冷干,而含量低时的气候条件多为暖湿^[13, 28-32, 66-67]。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^[10, 22, 94]。

此外,近年来随着全球变暖,冰川的强烈消融已是国内外广泛关注的问题之一。在全球很多山岳冰川都观测到冰川表面的大量粉尘沉降,粉尘气溶胶可以改变冰川反照率进而影响能量平衡、加速冰川消融,因而对冰川区粉尘沉降的特征

及其时空变化观测研究已是目前亟待解决的科学问题。因此,在毗邻中亚粉尘源区的高海拔天山冰川区开展雪冰中大气粉尘及其沉降特征的研究,不仅可以研究中亚粉尘源区的气候环境变化和对流层大气本底状况,还可以研究高空远距离传输的粉尘颗粒特征,对进一步理解并研究中亚地区沙尘传输机制及其对全球气候变化的响应和影响,以及理解粉尘对冰川加速消融的影响研究具有重要意义。

总体上,对于中亚地区尤其是天山雪冰中粉尘沉积的特征及其时空变化研究显得很少,天山地区位于中亚干旱区的核心区域,周边被广袤的大沙漠所包围,气候环境极端干旱,而天山之巅发育的冰川是重要的水资源,对该区冰川区粉尘沉降的研究很有科学和现实意义。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、沉降过程等因素影响,从中亚粉尘源区开始搬运、传输,经过距离远近不同的地区时表现出不同特征。因此,在亚洲粉尘源区研究雪冰中微粒沉积的特征,并与北半球其他地区已有的相关研究结果进行比较,对于完善全球大气粉尘循环和沉降机制的认识也显得十分重要。基于此,对天山冰川粉尘特征进行研究显得十分必要,是对全球大气粉尘循环研究的重要补充和完善。

本研究的主要内容包括三个方面:天山不同区域高海拔地区雪冰中粉尘沉降的空间变化特征;天山典型冰川区新降雪中粉尘随时间和季节变化的特征;天山山区不同海拔带降水中粉尘沉降特征的比较研究。通过这些研究,以弄清中亚地区冰川中粉尘微粒的浓度、沉积通量、化学离子组成和粒径分布状况等特征,及其对气候环境变化的敏感性进行分析;综合分析获得天山山区不同区域粉尘沉降的时空变化规律,山区雪冰和降水中粉尘沉降受区域和局地环境的影响机制;为中亚粉尘源区对区域气候环境的影响进行进一步的评估提供参考依据。

第二章 研究区概况

2.1 天山地区概况

天山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，西与中亚穆云库姆沙漠相邻。

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^[95]。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”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^[95]。

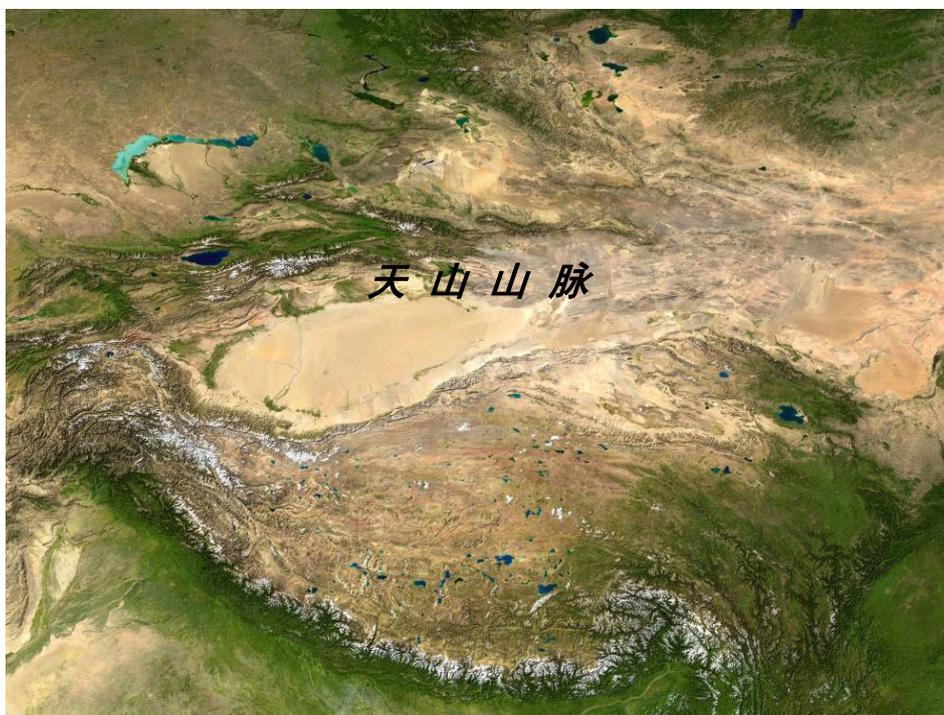


图 2.1 中亚天山山脉所处位置图

Figure 2.1 Location of research sites of Glaciers in the Tianshan, central Asia

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。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（3-5 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；夏季（6-8 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 附近为天山北麓所阻，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。

2.2 乌鲁木齐河源 1 号冰川概况

乌鲁木齐河流域位于新疆维吾尔自治区的天山中部，地理坐标为 86°45'-87°56'E，40°00'-44°07'N，西接头屯河流域，东为板房沟流域。该地区距海较远，东距太平洋约 3500 km，西距大西洋约 6900 km，北距北冰洋约 3400 km，南至印度洋约 2500 km^[95]，地处亚洲干旱和半干旱地区的中心。乌鲁木齐河流域发源于天山喀拉乌成山北坡，天格尔第二峰（海拔 4484 m），流向北东北，出山口后，至乌拉泊折向正北，穿过乌鲁木齐市，至米泉县梧桐窝之北蔡家湖处逐渐消失，总长 214.3 km，出山口以上河长 62.6 km；出山口后，河水被引入灌渠；流域面积 4684 km²，其中山区（西白杨沟口以上）流域面积 1070 km²，流域平均海拔 3000 多米，英雄桥以上流域面积 924 km²，平均海拔 2083 m，跃进桥以上

流域面积 310 km²，平均海拔 3483 m^[96, 97]。流域内山高谷深、坡度陡、垂直地带性明显，其中流域景观分为：1) 高寒砾漠带 (海拔 3600 m 以上)；2) 高山草原草甸区 (3500-2600 m)；3) 中低山森林区 (2500-1600 m)；3600 m 以上冰川分布广泛，其中乌鲁木齐河流域共有冰川 150 条，面积 45.99 km²，平均面积 0.31 km²，其中悬冰川数目达 111 条，占到冰川条数比的 74%，但悬冰川总面积仅占到该流域冰川面积的 38.27%，该流域悬冰川平均面积为 0.168 km²^[98]。其中在乌鲁木齐河源区有 7 条冰川，乌鲁木齐河源 1 号冰川 (43°06'N, 86°49'E) 面积最大，由东、西两支冰川组成，该冰川是中国观测时段最长的冰川。



图 2.2 乌鲁木齐河源 1 号冰川照片

Figure 2.2 The photograph of Urumqi Glacier No.1

乌鲁木齐河流域山区的地理特点使其具有独特的气候特征：气温年变幅小，每年 11 月至来年 3 月在海拔 1000-2400 m 处形成逆温层；降水年内分配极不均匀，降水主要集中在夏季，夏季降水随高度上升而增加，年降水量总的趋势是随高度上升而增加，中、小尺度天气对降水影响显著，降水随高度变化规律受到地形作用制约，而使降水随海拔分布呈双峰型，最大降水带在海拔 1900 m 左右，其次是在 3500 m 左右^[99]。乌鲁木齐河流域内气候分区为：1) 高山冰雪区，为现代冰川区，平均雪线高度 4050 m，雪线以上面积 102.2 km²，冰川 150 条 (面积 45.99 km²)，冰川末端海拔高度为 3440-4050 m，平均气温 -6.0 °C，降雪量占年降水量的 75% 以上；2) 亚高山冻土区，多年冻土下限坡为 2900 m，阳坡在 3250 m 以上；平均气温 -2.5-1.2 °C，降雪量占年降水量的 50%；3) 中高山寒温区，年平均气温 0-4.0 °C，降水量占年降水量的 20%-30%，为山区最大降水区，一般年降

水量为 400-500 mm。

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 km², 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, 是中国监测时间最长、监测资料最为系统的冰川。1 号冰川自 1959 年开始观测以来一直处于退缩的状态, 这一退缩在 20 世纪 80 年代, 尤其是 90 年代中期以后出现了明显的加速趋势。从世界范围来看, 1 号冰川在最近 40 年的变化幅度介于许多极大陆型和海洋型山岳冰川之间, 与亚洲尤其是中亚地区的冰川变幅相一致。根据世界上 300 多条冰川观测资料绘制的不同地区最近 40 多年来的冰川累积物质平衡变化 (冰川平均厚度变化量) 曲线, 全球不同地区的冰川厚度变化幅度从几米到 30 m 不等, 1 号冰川的变化幅度在 11 m 左右, 在亚洲尤其是中亚地区具有良好代表性。1 号冰川是中国惟一依托于专门的冰川站来进行观测、试验和研究的冰川。最早的观测始于 1959 年, 主要包括冰川、水文和气象等。乌鲁木齐河源 1 号冰川研究积累了长期的观测资料, 包括冰川区气象、冰川粒雪特征、冰川温度、冰川物质平衡、冰川末端位置、冰川面积和冰川厚度等^[100]。气象观测始于 1958 年, 在河源区 3 个水文站、大西沟气象站及后峡基本站进行。粒雪特征观测包括雪坑剖面物理特征、雪—冰物理化学转化过程、粒雪密度、粒雪颗粒尺寸、含水量及雪层温度等项目。这些观测项目自 1959 年以来阶段性开展, 目前已有 3 个时段的 100 多个连续完整的资料序列, 这 3 个时段为: 1961~1962 年、1980~1986 年和 2002 至今。冰川温度在 1981~1986 年间有系统的观测, 在 10 余个深度为 8~35 m 的测温孔内进行, 每间隔 15 d 观测 1 次。在冰川东支海拔 3840 m 左右, 获取到 1986、2001 和 2006 年的 3 次冰温剖面资料, 前两次的测温达到了冰川底部, 第三次的深度为 20 m。冰川物质平衡观测始于 1959 年, 曾于 1967~1979 年因文革而中止, 期间的资料由计算得出。使用方法为花杆/雪坑法。目前在 1 号冰川上设有由 52 根花杆组成的观测网络。冰川末端的位置以冰川外 6 个基准点为参照而确定。在 1980 年以前, 观测是阶段性进行的, 之后开始了每年 1 次的固定观测。

冰川面积主要依据航测地形图、地面摄影测量或实地测量等资料获得。1962 ~ 2006 年, 共进行了 7 次面积测定。1993 年, 1 号冰川分离为两条独立的冰川, 对其末端及面积的测定也分开进行。冰川厚度分别于 1980、2001 和 2006 年进行过 3 次观测, 其中 2001 年的观测使用的是加拿大产 EKKO 100A 增强型雷达, 其余两次均使用自制 B1 型冰雷达, 通过透底蒸汽钻孔等验证, 误差范围均在数米以内。

乌鲁木齐河源 1 号冰川的粒雪性质、成冰带发生变化。冰川表面粒雪特征和冰川成冰带对气候变化十分敏感。其变化反过来可以对冰川的消融速率起到强烈的加速作用。根据 1961 ~ 2005 年间 1 号冰川海拔 4100 m 以上的 60 个雪坑剖面资料的统计分析, 在这 45 a 里粒雪组成生了显著变化。雪坑中粗粒雪的含量从最初的 40 % 增加到 65 %, 细粒雪的含量从最初的 25 % 减少到 7 %。粗粒雪的增加表明雪层受融水改造作用加强, 粒雪化过程加快^[65,101-103]。与 20 世纪 60 年代和 80 年代相比, 目前雪层剖面的组成和结构已发生了明显变化, 表现在雪层厚度减薄, 结构变简单, 各种粒雪层的边界变模糊; 在强烈融水作用下, 积累区雪层内的冰片数量减少, 污化层迁移叠加作用增强。Paterson 和 Shumskii 根据冰川表面粒雪特性, 温度及融水状况在冰川上划分出不同的成冰带^[104-105]。成冰带特征决定了冰川的基本属性, 其组成和位置的改变表明冰川在上覆粒雪层特性, 成冰机制, 以及水热状况等方面的改变。在 20 世纪 60 年代和 80 年代前人对 1 号冰川的成冰带曾有过深入研究, 谢自楚等将其自下而上分为 4 个带^[106]: 消融带、渗浸—冻结带、渗浸带和冷渗浸—重结晶带。1988 年王晓军等、刘潮海等发现, 由于气候变暖, 冰川上部的冷渗浸—重结晶带特征消失, 被渗浸带所取代。从 2002 年至今, 我们通过对冰川带和各个带内的、粒雪组成变化、新雪转化成为各种粒雪及最终成冰所需的时间、成冰作用机制及成冰带位置变化的观测研究, 发现 1 号冰川的成冰带谱有由“冷”向“暖”转化的趋势^[100, 101, 107]。表现为消融区面积持续扩大, 各带间的界限上移, 雪层剖面特征趋于简化。粒雪特征和成冰带上述变化的一个直接结果, 就是造成冰川表面雪层中的新雪组分减少, 杂质含量升高, 从而引起雪面反射率的减弱, 接收日辐射的能力增强, 导致冰川消融加速。

乌鲁木齐河源 1 号冰川所处的周边地理环境受到人类活动的一定影响。工业

生产主要集中于周边规模较大的城市中。乌鲁木齐市位于冰川东北方向直线距离约 105 km 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 km 的远郊区后峡镇自 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。

2.3 哈密庙儿沟平顶冰川概况

哈密庙尔沟流域由五道沟和庙尔沟两条河流组成, 流域内共发育冰川 94 条, 冰川面积 88.7 km², 冰川覆盖度为 6.6 %^[108]。五道沟河流的冰川发源于巴里坤山南坡, 流域面积 387 km², 发育 21 条冰川, 庙尔沟河流的冰川发源于哈尔里克山南坡, 流域面积 964 km², 发育 73 条冰川。与天山其它地区的冰川相比, 本区冰川具有如下 3 个特征: (1) 冰川数量少, 规模小, 冰舌末端高; (2) 南坡冰川大于北坡; (3) 冰川消融较弱。哈密盆地位于欧亚大陆的腹地, 降水稀少且分布不均^[109-110]。哈密市区 (海拔 737 m) 年平均温度为 9.8 °C, 年平均降水量仅 36.4 mm, 年平均蒸发量为 1700 mm; 高山区年降水量可达 500 mm 左右^[111]。根据哈密地区气象站的观测, 该区海拔较低的地方 (如哈密市), 20 世纪 90 年代的平均气温与 60 ~ 70 年代相比变化不大, 升温幅度在 0.1 ~ 0.3 °C; 海拔较高的地方 (如伊吾县城, 海拔 1729 m) 增温明显, 90 年代的平均气温比 60 ~ 70 年代升高了 0.6 ~ 0.8 °C; 还有一个特别显著的现象是冬季气温增温比夏季较明显。哈密地区的降水增加也比较显著。20 世纪 90 年代哈密市的降水比 70 年代增加了 13.2 %, 山区的降水增加更为显著, 伊吾县城同期降水增加了 27.4 %。

通过遥感和地面验证的方法, 在庙尔沟—伊吾河流域共研究了 75 条冰川, 分属于哈尔里克山南坡和北坡, 其中南坡 50 条冰川, 北坡 25 条冰川, 南坡冰川平均面积较北坡略大。75 条冰川在 1972~2005 年间面积由 98.252 km² 缩小到 87.964 km², 损失了 10.5 %, 平均每条冰川缩小 0.137 km², 末端退缩速率 5.0 m/a。有 4 条冰川在这一时期消失。庙尔沟地区冰川变化在新疆各区域当中相对来讲比较小, 原因是该区目前能够保存下来的冰川一般海拔都比较高, 平均面积比较大。但是, 该区水资源体系脆弱。对冰川融水的依赖性很强。最近 20 多年的快速变

化,表明冰川处在消融急剧增强的阶段。根据哈密水文局的观测资料,在近年气温升高、降水稍有增加的背景下,该地区无冰川融水补给的河流,如头道沟河等,出现了径流量减少的趋势,表明降水的增加未能补偿蒸发的加剧;对于冰川融水补给较少的河流,如故乡河等,径流量在2000年以前是增加的,之后出现了减少或增加减缓的趋势,而且径流的变幅加大,洪枯季节水量悬殊,枯水季节延长,这些很可能缘于冰川调节作用的减弱;对于冰川融水补给较大的河流,如榆树沟河等,径流量虽仍然维持着增加趋势,但增幅已开始减小。这些径流变化过程反映了该区冰川变化对水文、水资源的影响及这种影响的不同阶段,且以冰川水资源的减少为主要特征。



图 2.3 哈密庙儿沟冰川分布及平顶冰川位置
Figure 2.3 location of Hami Miaoergou glacier

庙尔沟位于哈密盆地北缘内陆小河,其河源区为天山最东段哈尔里克山的南坡^[110]。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;在天山山区,哈尔里克山的山势也较低^[110]。由于处在影响本区主要的冷湿气流的通道山,因而得以发育冰川,并成为本区生态环境、人民生活和经济建设的水源地。哈密庙尔沟平顶冰川朝向西南,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^[5, 112]。根据研究,影响本区的气流主要是西风气流、

西北气流、北方气流和蒙古—西伯利亚气流。西风气流是主要的水汽携带者，运行于海拔 5000 m 的高空，夏半年能给本区带来较多的降水。蒙古—西伯利亚气流多在冬季侵入本区，带来更低的气温。由于没有全年度直接的气象观测，我们尚不能清楚地得知这一冰川区的气温状况。但根据哈密气象站（42°48′ N, 93°30′ E）资料，600 mb 高度上的年均气温为 -11.8 °C，6~8 月份为 -3 °C。2005 年考察期间（8 月 10 日~25 日）我们测得该处夜间平均气温为 -4 °C。根据冰芯钻孔测量得到的冰川活动层下界（10 m）附近的温度为 -7 °C，为大陆型冰川温度，并由此断定该处年平均气温接近这一数值。冰川区降水量的确定较为困难。哈密盆地的平均海拔高度为 800 m，多年平均降水量为 34.6 mm^[109]。根据 1961~1963 年高山半定位站资料，得知与庙尔沟平顶冰川相邻的藏塔布迪冰川 7 月份在海拔 3300 m 处的降水量为 157 mm。

利用冰雷达重复测量冰川厚度也是一个比较可靠的方法。庙尔沟平顶冰川已有两次测厚历史。第一次测量使用的是 B1 型冰雷达，由中国科学院原冰川冻土研究所研制，中心频率为 300 MHz，测量误差在 5 % 以内。其工作原理和误差分析前人已作了详细介绍，并通过蒸汽钻验证了观测的准确性^[113]。测量于 1981 年 8 月 26 日进行，由冰舌末端向上沿主流线方向每 50 m 测厚一次，直到海拔 4380 m 的高度，共计测点 34 个。第二次测量使用了新型单周低频冲击冰雷达，该雷达为 B1 的改进型，与 B1 型相比，具有轻便灵活、精度高的特点。测量于 2005 年 8 月 21 日沿第一次测量的剖面进行，共测得 7 个高度的数据。

观测研究表明，哈密庙儿沟平顶冰川（冰帽）在 1972~2005 年间，面积由 3.64 km² 缩小到 3.28 km²，缩小了 0.36 km² 或 9.9 %。冰帽末端最大退缩速率平均为 2.3 m/a。2005 年以来，冰帽末端最大退缩速率平均增至为 2.7 m/a。物质平衡观测显示顶部的消融微弱。从钻取的冰芯资料来看，冰川在最近 20~30 年消融加快。冰帽的厚度在 1981~2007 年间减薄了 0~20 m，主要发生在冰帽的中下部，顶端减薄不明显。冰川温度比较低，在冰帽底部 60 m 处，冰川温度为 -8 °C。1981 年测得的冰川主流线厚度分布发现，冰川表面比较平坦，受底部局部地形作用较小。冰川平均厚度为 64 m，最大厚度为 75 m，出现在冰川中下部。

根据我们 2004 年和 2005 年的观测，该冰川顶部雪层为 50 cm 左右，有消融痕迹，但不强烈，具有湿雪带上部特征。钻取的冰芯在 17 m 以上为粒雪—

冰层交替的半透明沉积，内含粗大不规则气泡；以下为含有众多细小而不规则气泡的，呈乳白色的渗浸冻结冰，表明成冰深度在 17 m 以下，很可能为冷渗浸带。整个冰芯相当洁净。冰内污化层很微弱，只在上部较为明显，呈微黄色，这一方面表明融水量少，对沙尘物质的搬运力不强，另一方面也可能说明在冰川顶部粉尘物质的来源量有限^[100]。



图 2.4 哈密庙儿沟平顶冰川照片
Figure 2.4 The photograph of Miaogou Glacier

2.4 奎屯哈希勒根 48 号、51 号冰川概况

奎屯河哈希勒根 48 号冰川和 51 号冰川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。奎屯河哈希勒根 51 号冰川（84°24' E, 43°43' N）冰川朝向东北，最高海拔 4 200 m，冰舌末端海拔 3 400 m，雪线海拔 3 610 m，冰川表面较为平整洁白，裂隙不甚发育（图 2.5）。根据 1964 年 9 月的航空摄影像片及其 1972 年绘制出版的 1: 50000 航空摄影测量地形图，按中国冰川编目，研究中获得了该冰川最基本的数据。天山奎屯哈希勒根河源位于中国西北干旱与半干旱区，周边被许多大沙漠、戈壁以及荒漠所包围。



(1) 51 号冰川照片



(2) 48 号冰川

图 2.5 奎屯哈希勒根 51 号冰川和 48 号冰川地形图

Figure 2.5 Kuitn Haxilegen Glacier No.51 and Glacier No.48 in Tianshan, China

奎屯河哈希勒根 51 号冰川自 1998 年开始观测以来, 消融强烈程度尽管没有 1 号冰川那么大, 但消融加速的趋势也十分明显。该冰川面积由 1964 年的 1.558 km^2 缩小到 2004 年的 1.356 km^2 , 缩小了 0.202 km^2 , 即 13.0%, 末端退缩率平均为 3.9 m/a 。冰川末端在 1964 ~ 2006 年间的平均退缩速率为 2 m/a , 而在 1999 ~ 2006 年则达到了 5.1 m/a , 增加了 1.5 倍。冰川表面运动速度也有减缓趋势, 表

明厚度的减薄。考察发现, 与之相邻的奎屯哈希勒根 48 号冰川, 在冰川末端退缩速率方面与 51 号冰川比较接近, 而面积的变化相对较小, 可能是由于 48 号冰川面积相对较大的缘故。该冰川积累区 10 m 以下的粒雪层内, 在 10 月份还存在大量的未冻结冰川融水, 表明冰川冷储量低, 对气候变暖的抵御力弱, 处在迅速消融中。从这两条冰川下游将军庙水文站资料来看, 冰川融水径流自 20 世纪 90 年代以后有显著的增加, 而且奎屯河下游径流观测结果也表现出增加的趋势。

2.5 托木尔峰青冰滩 72 号冰川概况

天山托木尔峰地区位于我国境内天山山脉的西端, 是亚洲内陆最大的冰川发育区, 塔里木河的主要源地, 该区最高峰托木尔峰海拔 7435.3 m 是天山最高峰, 与汗腾格里峰 (海拔 6995 m) 等 40 多座 6000 m 以上的高峰组成天山最高部分。本区东界南、北木扎尔特河谷, 南界天山山麓, 与塔里木盆地为邻, 西界在沙里扎斯河, 北界为特克斯河谷地, 即 $41^{\circ}10'-42^{\circ}40'N$ 及 $79^{\circ}20'-80^{\circ}55'E$ 之间, 山地总面积约 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括外国境内的 6000 km^2 多), 该区不但是天山最大的冰川作用中心, 而且也是世界上有名的山岳冰川区之一, 冰川分布相当集中, 该区主要以具有表碛覆盖的托木尔型冰川为主, 其中发育在我国境内的现代冰川有 509 条, 冰川面积 2746.32 km^2 [5,114]。

根据 1977-1978 年中国科学院登山科学考察队的天山托木尔峰地区的综合考察报告记载, 托木尔峰地区海拔高、气温低, 降水主要靠大西洋和北冰洋的潮湿气流补给, 降水主要集中在夏季和冬季, 春秋两季降水相对较少, 其中 6-8 月的降水占全年降水量的 50% 左右, 而 5-9 月占 70% 左右, 即冰川补给主要在暖季, 其中雪线 (3900-4500 m) 以上年降水量在 750-1000 mm 以上, 雪线附近年平均气温为 -11°C - -7°C , 冰川补给除降水外, 还通过雪崩、吹雪等间接方式补给。

从 19 世纪中期以来, 本区现代冰川均处于退缩状态, 据考察, 这里长 10 km 以上的 20 条冰川中, 有 9 条近年来仍在继续后退, 但退缩速度逐渐减缓, 另 11 条已趋于稳定或开始前进状态, 甚至还出现跃动性冰川 [114]。托木尔峰地区蕴藏着丰富的水利资源, 平均每年山区产生的径流量约为 $63.4 \times 10^8 \text{ km}^3$, 其中 56% 为冰川融水; 冰川融水对河流的补给比重, 南坡河流占 30-70.1%, 北坡一般不到 20%, 并随流域冻结系数的增加而增加, 随降水的增加而减少, 冰川融水径流日

变化相对较小, 6-8 月的径流量约占全年的 71%, 冬季不断, 河道径流的变化基本具有冰川融水径流的变化特点。过去 40 年来托木尔峰地区年冰雪融水量增加了 $8\sim 10\times 10^8 \text{ km}^3$ 左右, 在区域温度持续升高的趋势下, 冰雪融水补给量将会持续增加。阿克苏河是目前向塔里木河输水量最大的一条源流河, 也是一条冰川覆盖率较高的河流, 而青冰滩 72 号冰川位于阿克苏河分支库马里克河上游。

青冰滩 72 号冰川地理坐标为: ($41^\circ 45.51' \text{ N}$, $79^\circ 54.43' \text{ E}$), 位于阿克苏河分支库马里克河上游, 新疆阿克苏地区温宿县境内, 青冰滩 72 号冰川地理位置如图 2.6 所示。根据中国冰川编目和野外考察, 青冰滩 72 号冰川朝向为 S, 冰川末端和最高海拔高度介于 3560~5986 m, 雪线海拔高度为 4400 m, 长度为 7.4 km, 冰川面积为 5.23 km^2 , 冰川冰储量为 0.3975 km^3 , 属于复合型山谷冰川。冰川自海拔 3900 m 以下部分冰面相对平坦, 有零星的表碛物分布, 冰裂隙少, 冰川东、西两侧为表碛所覆盖。其中东侧表碛厚度较小, 颜色为浅黑色; 西侧表碛厚度较大, 颜色呈浅黄色。冰川自海拔 3900 m 以上, 冰川两侧是陡峭的山脊, 冰川表面陡峭、起伏较大, 最大相对高度可达 10 m 左右, 并且冰川表面裂隙交错分布, 口径大且数目众多; 冰川海拔 4200 m 以上由 2 条冰斗冰川组成。冰川补给由降水、冰斗冰川和山脊陡峭部分产生的冰、雪崩组成 (图 2.7)。

经 2008 年野外考察^[115], 青冰滩 72 号冰川 2008 年 8 月份冰川区平均气温达 $5.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 较同期乌鲁木齐河源 1 号冰川的高 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 月降水量 54.3 mm, 较同期乌鲁木齐河源 1 号冰川的少 16.2 mm, 冰川融水径流总量为 $265.2\times 10^4 \text{ m}^3$ 。青冰滩 72 号冰川 2008 年 8 月、2009 年 7 月和 8 月 3 次表面运动速度的观测结果表明^[116], 青冰滩 72 号冰川冰舌区域运动速度存在明显的消融季和非消融季的差异, 消融季速度偏大, 其中实测最大水平运动速度达到 $73.4 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 实测年均水平运动速度为 $47.1 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 全年与消融季速度都表现出冰舌中部大而两头小的趋势, 使得冰舌上部为伸张流区域而下部为压缩流区域。

与乌鲁木齐河源 1 号冰川的观测资料相比, 该冰川的消融和运动补给要强得多, 具有海洋型冰川的某些特征, 对气候的变化的响应十分敏感, 加强对该地区冰川与气候环境的研究具有十分重要的现实意义。

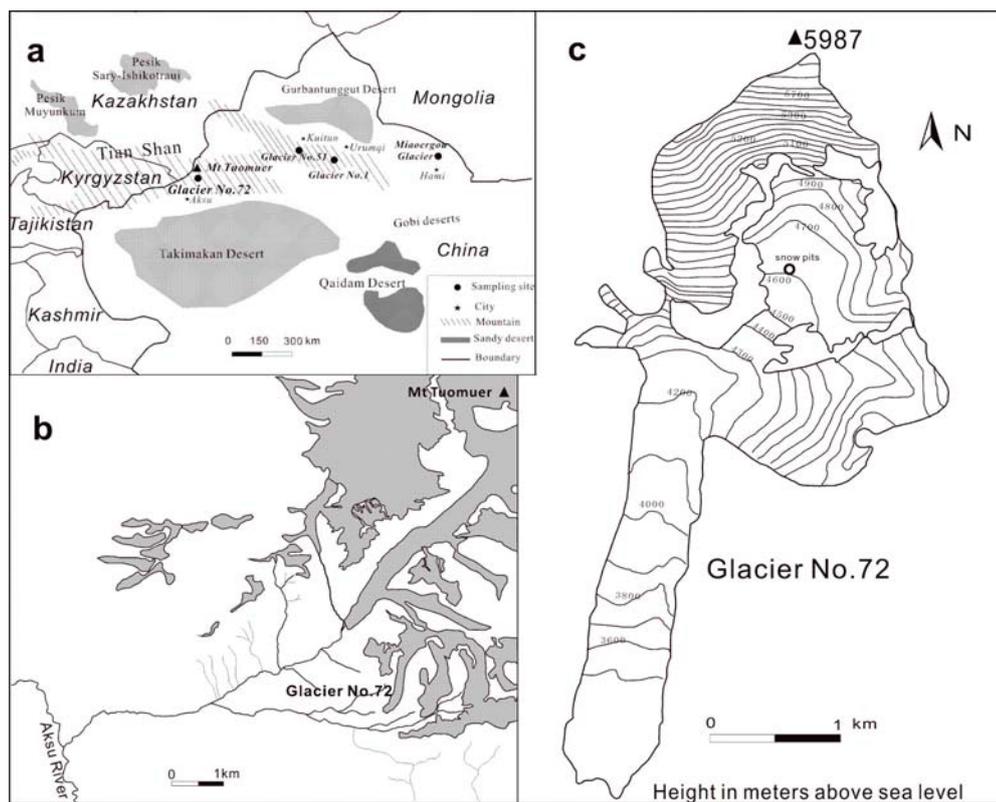


图 2.6 托木尔峰青冰滩 72 号冰川位置图

Figure 2.6 Location of Qingbintan Glacier No.72 in Mt Tuomuer, China



图 2.7 青冰滩 72 号冰川照片

Figure 2.7 The Photograph of glacier No.72

2.6 博格达峰四工河 4 号冰川概况

博格达山脉位于 $87^{\circ}40'-91^{\circ}35'E$ 和 $43^{\circ}10'-44^{\circ}05'N$ 之间, 是中国天山的重要组成部分之一, 其南北两侧分别为吐鲁番盆地和准噶尔盆地, 东西两端分别以一个狭长低陷带与巴尔库山和天格尔山交界, 山脉长 330 km, 宽 40~70 km, 面积约 2 万 km^2 ; 博格达山脉大致成东西走向, 但西部以博格达峰为顶点, 呈一向北突出的小弧形, 中部又以科依提大坂为顶点, 呈向南突出的弧形, 由土耳其帕拉提山和朱万铁列克山组成山脉的西段, 博格达山脉的主峰——博格达峰也位于西段^[117-118]。博格达峰峰体主要由古生代辉长岩、辉绿岩体构成, 三座山峰在 2.5 km 的距离内并列成笔架形, 高耸于周围群峰之上, 海拔分别为 5445 m、5287 m 和 5213 m, 四壁皆极陡峭, 布满雪崩槽, 周围山峰通常在 4500 m 以下, 博格达峰地区雪崩普遍、频繁、规模较大, 不但影响冰川积累消融, 而且明显影响冰川的成冰作用和成冰过程^[117,119]。博格达主峰 (海拔 5445 m) 耸峙群峰之巅, 显得特别高峻, 是东部天山最高峰和最大的冰川作用中心, 东西、南北、东北和西北走向的四组断裂使得山体复杂、地表破碎, 高耸的地势为冰川发育提供了较为优越的空间条件, 南、北坡的年平均气温 0°C 等温线海拔分别为 2800 m 和 2500 m, 低于 0°C 的垂直幅度近 3000 m, 峰顶与雪线 (北坡 3820 m, 南坡 3910 m) 之间高差数百米至千余米的地带, 成为冰川积累区, 博格达峰地区高山带降水量较多, 以固态为主, 加之气温较低, 有利于冰川发育^[120,121]。

博格达山脉南北坡的自然景观垂直带具有不同的带谱结构, 北坡主要有以下各带: 1) 高山冰雪带 (海拔 3500 m 以上地区); 2) 高山亚冰雪带 (海拔 3500-3200 m 之间地区); 3) 高山草甸草原带 (海拔 3200-2700 m 之间地区); 4) 山地森林带 (海拔 2800-1500 m 之间地区); 5) 山地草原带 (海拔 1500-1200 m 之间地区); 6) 荒漠带, 为北坡基带; 博格达山脉南坡高山冰雪带和高山亚冰雪带之下, 有宽广的高山草甸草原带 (3200-2400 m) 和山地草原带 (2400-2000 m), 森林只有零星分布, 山地荒漠可上升至海拔 1800 m; 博格达山脉是一个统一的自然地理区域, 同时又是分隔新疆南北两部分的自然地理界线的组成部分^[117]。博格达山两侧盆地冬季受强大的内蒙古冷高压控制, 寒冷而干燥。夏季高空盛行西风环流, 具有典型的中纬西风带大陆型气候特征, 降水集中分布在夏季, 占全年降水的 77% 左右。

博格达峰地区冰川分布比较集中, 共有 113 条冰川, 总面积为 101.42 km^2 ,

其中直接发源于博格达峰的白杨河、四工河、古班博格达河及黑沟流域的冰川 69 条，面积 67.28 km²；博格达峰地区冰川形态类型的条数主要以悬冰川为主，其次为冰斗冰川和冰斗-悬冰川，而冰斗-山谷冰川和山谷冰川居于更次要的地位，但就冰川面积而言，情况刚好相反^[121]。该地区的径流形成中，冰川融水径流起着重要的作用，是山前河流的主要补给水源之一，其中东天山的冰川融水径流量平均每年约为 3.88 亿 km³，这对于天山东段的山前干旱地区来说，是非常重要的水资源，对河道径流起到了一定的多年调节作用。

四工河 4 号冰川 (冰川编号为 5Y725D0004, 43°48.92'N, 88°20.65'E) 位于天山博格达峰地区北坡 (图 2.8)，距离主峰博格达峰约 3 km。博格达峰是天山山脉重要组成部分之一。博格达峰地区北坡高山冰雪带 (海拔 3500 m 以上)，地表多被冰雪覆盖，冰川蚀积作用强烈，雪崩频繁，刀脊、角峰等冰川地貌广泛发育，年平均气温低于 -6 °C，雪线 (海拔 3800 m) 以上低于 -9 °C，年降水量在 600-700 mm 之间。四工河 4 号冰川是博格达峰地区北坡高山冰雪带四工河源头一条较大的冰斗型冰川。据中国冰川编目，四工河 4 号冰川长度为 3.2 km，冰川面积为 2.96 km²，冰储量为 0.1835 km³，朝向 W，冰川最高海拔为 4350 m，冰舌末端海拔为 3600 m，雪线海拔高度为 3880 m。该冰川形态单一，冰面冰碛少且相对较平坦，属于典型的“洁净型”冰川。



图 2.8 博格达峰四工河 4 号冰川照片

Figure 2.8 The Photograph of Sigonghe Glacier No.4

四工河 4 号冰川 1980-1981 年度的季节积累量约在 450 mm 水当量左右, 1981 年 7 月下旬至 8 月中旬的纯冰消融深为 139 mm 水当量, 1980-1981 年度纯积累深为 147.3 mm 水当量^[122]。四工河 4 号冰川在 1959-1962 年间, 冰川平均退缩速度为 $12 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 地面实测得到 1962-1981 年冰舌共退缩 61 m, 平均 $3.2 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 经推断得出该冰川冰舌退缩速度为: 20 世纪 30 年代中至 40 年代末为 $3.7 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 20 世纪 40 年代末至 50 年代末为 $4.3 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, 20 世纪 50 年代末至 1981 年为 $3.7 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[118]。

第三章 样品采集与实验分析

3.1 样品野外采集

2002-2009 年 4~11 月, 天山冰川站研究人员基于雪冰物理化学过程研究 (PGPI) 项目和天山冰川不同区域冰川的监测研究, 在天山山区的不同区域的典型冰川采样点 (图 3.1), 包括托木尔峰青冰滩 72 号冰川 ($41^{\circ}45'N$, $79^{\circ}54'E$, 海拔 4600 m)、奎屯哈希勒根 48 号冰川和 51 号冰川 ($43^{\circ}43'N$, $84^{\circ}24'E$, 海拔 3900 m)、博格达峰四工河 4 号冰川 ($43^{\circ}49'N$, $88^{\circ}21'E$, 海拔 4000 m)、乌鲁木齐河源 1 号冰川 ($43^{\circ}06'N$, $86^{\circ}49'E$, 海拔 4130 m)、及哈密庙尔沟平顶冰川 ($43^{\circ}03'N$, $94^{\circ}19'E$, 海拔 4510 m) 积累区共挖了 100 多个雪坑, 其中乌鲁木齐河源 1 号冰川为 80 个雪坑, 其余两条冰川各 2~3 个雪坑, 深度范围 0.53 m 至 4.25 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 2000 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 4130 m) 密集连续的采集新雪和表层雪样品, 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 120 个样品。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。采样过程严格按照冰雪采样程序进行。此外, 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 m 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。冰芯的钻取选择在冰川上高海拔、地形平坦、距离周边基岩相对较远的位置, 钻取程序严格按冰芯钻取标准采集冰样。本研究选取部分冰芯样品进行雪冰化学特征和环境记录的研究。样品的储存保持在 $-18^{\circ}C$ 冷冻状态, 直至在中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室分析。为研究天山乌鲁木齐河流域高山区和低山近郊区两个站点降水中粉尘颗粒物的浓度、化学离子组成和粒径分布状况等特征及其在两个点之间的差异及其受局地环境的影响。2003 年 4 月~2004 年 6 月, 在天山乌鲁木齐河流域不同海拔高度进行连续的降水样品采集。取样时间是一个完整的降水过程, 高山区、低海拔两站的取样时间同步进行, 包括了降雪和降雨样品, 其中 10 月至次年 5 月份为降雪。高山区降水样品采集在天山冰川站高山站附近的观测场获取, 取样点海拔 3600 m; 共

取得 90 个降水样品, 其中 38 个降雪样品。低海拔的郊区降水样品在位于后峡镇的天山冰川站基本站旁边采集, 海拔 2100 m, 周围有水泥厂、电厂等人类生产活动, 属于乌鲁木齐市的郊区范围内; 共取得降水样品 88 个, 其中 29 个降雪样品。每个降水样品采集量均大于 50 mL, 共计 178 个降水样品。

采样前, 所有的样品瓶、取样工具、处理设备、工作服以及可能接触到样品的东西均用去离子水清洗干净。清洗过程包括三步, 首先冲洗三遍, 之后在去离子水中完全浸泡 1~6 个月, 期间要经常更换去离子水, 最后在使用前再清洗三遍。洗完的器具要用离子色谱检查是否清洗干净。洗干净的器具凉干后用干净的塑料袋密封, 使用时再取出。实验用水均使用电阻率大于 18.0 MQ.cm 的去离子水。根据样品 (雪、粒雪和冰) 的密度, 分别采用不同的采样技术和样品制备方法以防止污染。

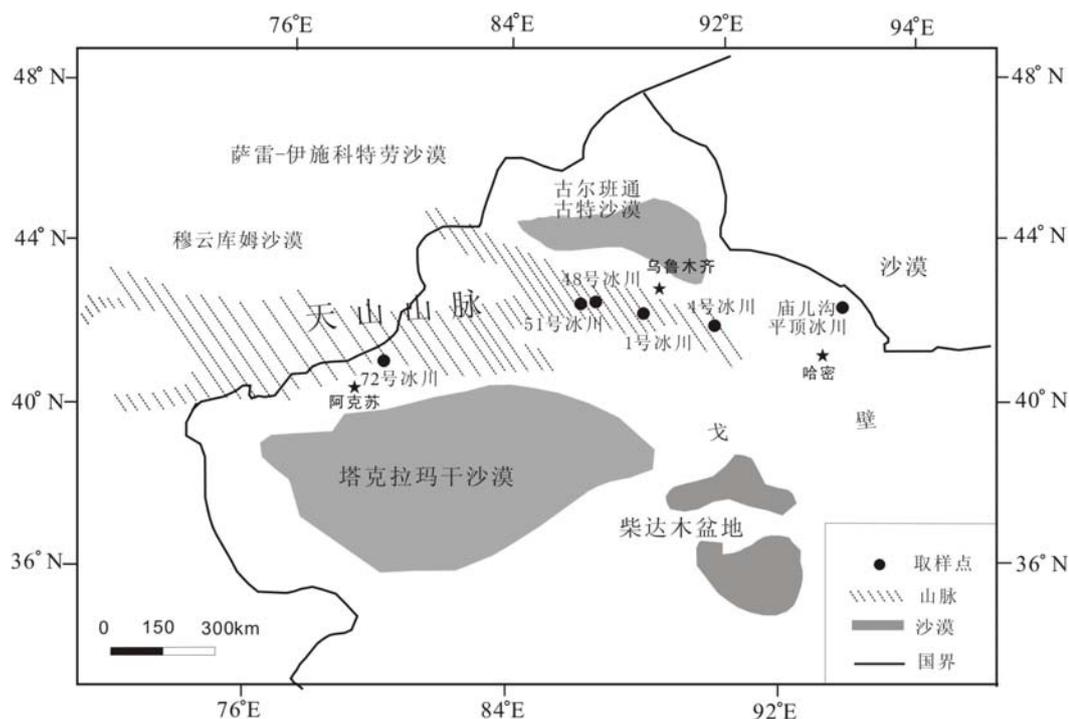


图 3.1 中亚天山不同区域样品采集点分布图

Figure 3.1 Location of research sites in Tian Shan, China

本研究所使用的资料主要为表层雪、雪坑和冰芯和降水样品, 因此, 下面对这几种样品的采集做重点介绍, 其它样品的采集再此不作详细的介绍。降水的样品在基本站和高山站高度为 5 m 的屋顶采集, 收集过程避免人为污染; 表层雪样品取自雪坑顶部表层 5 cm 处 (包括新雪和沉积后作用过的雪)。采样时为了尽量减少人为污染, 操作者应穿上特制的工作服, 戴上面具和聚乙烯手套, 用洁净的

样品瓶直接对雪坑壁顶部表层雪进行采集。雪坑样品的采集,为减少污染,采样时应迎风操作,附近有人为的活动(如观光旅游)时不能取样。冰芯样品的获取有严格要求。首先,冰芯钻取的位置应在冰川的积累区,地势较为平坦的地方。其次,钻取冰芯的时间一般选择在冬季和春季,钻取时的大气温度应低于零摄氏度,如果白天温度高,应选择在夜间钻取。第三,在钻取冰芯的过程中,严格控制污染。

由于冰雪样品都是在偏远地区采集的,各种化学物质的浓度大多都很低,而且从野外带回到实验室需要一定的时间,这就涉及到在这个过程中如何保存和处理样品。要尽可能的减少污染,减缓生物作用,减缓各种化学物质的水解及氧化还原作用,减少组分的挥发。因此,防止污染和保持冷冻是样品运输及储存的两个基本要求。所有样品均装入洁净的塑料袋并在冷冻状态下运抵中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,放入 -18°C 低温的冷库保存。在分析前取出样品,在自然融化后分析。

3.2 实验分析和数据处理

(1) 实验室结构条件

雪冰实验要求在洁净度为 100 级的环境中进行。实验室的设备,如试验台、门窗、座椅、管道等最好采用聚乙烯制品。一些必要的金属制品可采用贴膜的方法避免金属外露。天花板、地面、墙壁采用防静电塑料板装修。另外,为了避免试验人员自身的影响,在进入实验室之前一般必须经过严格的防污处理,并穿戴好洁净服装及手套。化学净化间的空气洁净指标为 1000 级(空气中直径 $>0.5\ \mu\text{m}$ 的尘埃个数不超过 $35000\ \text{个}/\text{m}^3$)。外界空气经过预过滤,通过镶嵌在房间顶部的 1000 级空气层流罩进入化学净化间。

(2) 实验试剂和器具的洁净处理

由于雪冰中化学元素的含量很低,因此在实验过程中使用超纯试剂及超纯水以防止人为污染的影响是十分必要的。超纯试剂主要包括超纯硝酸、超纯盐酸。超纯水是通过 Milli-Q Element 超纯水制备系统获得,其痕量金属元素的含量很低,可以满足实验要求。超纯硝酸为 Merck 公司生产的两种硝酸,一种是 Merck

“Ultrapur” 浓硝酸 (60%) 用于实验器皿的第二次、第三次酸洗，标准溶液的配制和样品的酸化。第二种是 Merck “Suprapur” 浓硝酸 (65%) 用于塑料器皿的第一次酸洗。两种浓硝酸在痕量金属元素的含量方面差异较大。

(3) 样品瓶的空白检验

为检测酸洗洁净处理的效果，我们选择其中 30 mL 的样品瓶进行空白测定。实验步骤与处理其他样品相同，每个样品瓶注入 20 mL 超纯水，按 1: 200 加入 60% 的 Merck Ultrapur HNO₃ 进行酸化，冷冻直至分析。结果表明，微粒检验的空白值为 440 个/mL，重金属元素采用与雪样相同的处理方法获得样品同步的室内测试过程空白分别是 (ng/g): Pb, 0.02; Cd, 0.01; Zn, 0.06; Al, 0.04; Fe, 0.14。而对于其它化学离子的空白值见表 3.1 所示。

表 3.1 实验分析中主要化学离子的空白值

Table 3.1 The blank value for major ions of the whirl pack bags in the lab analysis ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺
空白值	0.5223	1.6984	0.0968	1.5826	0.8436	0.0513	0.0258	1.0823
标准偏差	0.1408	0.4578	0.0261	0.4265	0.1765	0.5498	0.0381	0.3352

(4) 样品实验分析

粉尘不溶微粒的分析。不溶微粒的粒度分析使用美国 PSS 公司的 Accusizer 780A 光学粒径检测仪。该仪器可测量微粒的粒径范围是 0.57~400 μm 。微粒粒径检测仪—AccuSizer 780A 型在国内首次应用于冰川研究。其原理采用单粒子光学传感 (SPOS—Single Particle Optical Sensing) 技术：含有颗粒的悬浮液被充分稀释后（目的是避免粒子集中成一致的流动通路），通过一个小的、窄的、平板状的、由波长 630 μm 的大功率红色激光二极管发光所产生的均匀亮度的一个“成像带”，通过的每个颗粒会引起此感应带通路上一个可测的脉冲，该值取决于粒子的平均粒径和被测的物理量—光散 (LS) 和光消减 (LE) 的关系。在传感器中设计了脉冲高度随粒子直径增加而单调地增加的光亮/检测系统，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。AccuSizer 780A 性能优势具体表现在：1) 模块化设计结构便于故障检修和部件更换；2) 较大的动态粒径检测范围(0.57~400 μm) (高分辨率)，在高灵敏度下，测量结果呈现粒径的连续分布，得到的颗粒数

是一颗一颗数出的、真实的粒径分布图。3) 不需要特殊的电解质溶液，仅用经过过滤的去离子水做稀释剂，节省了分析和维持费用。4) 绝大多数的样品，需经过稀释才能测量，本仪器有自动稀释系统，可大大减少样品的取用量，有 1 mL 样品即可满足分析，这避免了在人工稀释操作过程中因部分污染物的侵入而导致检测误差的产生。5) 操作便捷、高效。测量时间只需 1~2 分钟。8~512 个测量通道便于灵活选取。6) 定期用已知粒径的标准颗粒进行校正，保证结果准确。实验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^[123]。

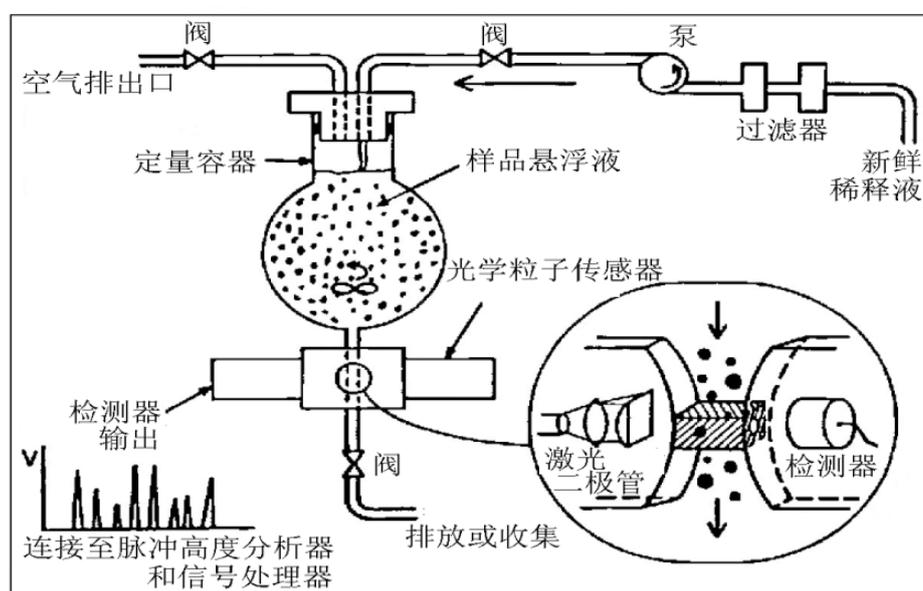


图 3.2 微粒分析仪器原理

Figure 3.2 Accusizer 780A particle sizer

可溶性成分的分析方法。1) 仪器和试剂。Dionex-320 离子色谱仪，配有电导检测器和 PeakNet 5.11 色谱工作站。超声波清洗器，用于样品溶解、流动相脱气和玻璃器皿清洗。各种标准溶液均购自国家标准物质研究中心。分别配制成阴、阳离子混合标准储备液。分析时实行五点校正，即稀释成五个标准溶液，使被测离子的浓度范围在其线性范围之内。标准储备液一周换一次，五个标准使用液则是现配现用。2) 色谱条件。阳离子：Dionex IonPac CS12A (4×250 mm) 分离柱，CG12A (4×50 mm) 保护柱；CAES 阳离子抑制器，抑制电流 65 mA；15 mmol/L MSA 淋洗液，流速为 1.0 mL/min；淋洗瓶内压力用氮气维持在 3 psi；进样量为

200 μL ; 电导检测; 以峰面积定量; 室温条件下操作。阴离子: AS11-HC (4 \times 250 mm) 分离柱, AG11-HC (4 \times 50 mm) 保护柱; ASRS-4 mm 抑制器, 抑制电流 52 mA; 15 mmol/L NaOH 淋洗液, 流速为 1.40 mL/min; 柱温为 30 $^{\circ}\text{C}$ 时操作。3) 分析过程。待仪器平衡后, 首先注入去离子水, 以检查背景或程序上的空白值。正常情况下去离子水不会产生任何峰。每次进样前, 均要打入 2 mL 去离子水进行管路的冲洗, 以确保前一次注入的样品不会滞留在管路中。

pH 值和电导率分析。分别使用 pH 计 (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。实验结果表明, 分析误差控制在 5% 以内。

(5) 微粒的统计方法

一般情况下, 雪冰中不溶微粒的粒径分布研究有三种统计方法: 质量-粒径分布 (Mass-particle size distribution)、体积-粒径分布 (Volume-particle size distribution) 和数目-粒径分布 (Number-particle size distribution)。质量-粒径分布和体积-粒径分布实质是一样的。

1) 体积-粒径分布。冰芯微粒分布通常呈正态分布, 正态分布的数学拟合表达式可以表达为:

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

V_0 是正态分布粒径范围内微粒的总体积; r 是半径; μ 是粒径的数学期望值, 它是最高点所对应的 r 值; σ 是正态分布的标准偏差。有 68% 的对数正态分布体积处于 $\{\exp(\log \mu - \log \sigma), \exp(\log \mu + \log \sigma)\}$ 的范围内。在双对数坐标系中, 正态分布曲线呈抛物线状。这里采用 $dV/d \log r$ 而不是 dV/dr 是为了统计上的方便。在极地冰芯微粒研究中, 体积-粒径分布是常用的表达方法, 大多数粒径分布是以期望值处于 1.5~2.0 间的正态分布^[70], 在不同的尺度里, 拟合曲线经常被调整^[35]。在山地冰川中这种正态分布经常不是很适合^[40, 41], 在青藏高原雪坑微粒的研究

中,有些样品的粒径分布并没有表现出正态分布的特征,有些有两个体积众数粒径,有时甚至呈直线分布^[10]。

2) 数目-粒径分布。对不同的粒径范围,数目-粒径分布要用不同的公式去拟合。对粒径为 0.1~2 μm 的微粒,数目-粒径分布称为 Junge 分布,数学表达为幂函数,在双对数坐标系中,图形呈直线。曲线公式为:

$$\frac{dN}{d \log r} = \alpha * r^{-\beta}$$

N 是粒径大于 r 的颗粒总数, r 是半径。随着粒径的增加,微粒数量减少,因此公式中的指数 β 都是负值。根据观测,海洋气溶胶的峰值出现在 0.1~0.3 μm 间。对数线形关系则出现在 $r > 0.5\mu\text{m}$ 的颗粒中,对陆地气溶胶,峰值出现在 0.01~0.1 μm ,对数线形关系出现在 $r > 0.1\mu\text{m}$ 中,也就是说,数目-粒径分布只有在粒径超过某一粒径,幂函数的关系才存在。 α 和 β 具有确切的数学意义, α 实际是粒径为测量下限时 $dN/d \log r$,相当于截距,值越大,说明数量越多; β 值代表对数坐标系中的斜率,值越大,说明细微粒组分越多,中微粒和粗颗粒组分相对越小,平均粒径也小。

对粒径跨度为 3 量级及以上的微粒,拟合函数通常选用对数正态分布表达式:

$$\frac{dN}{d \log r} = \frac{0.434N_0}{\sqrt{2\pi} \log \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log r - \log \mu}{\log \sigma} \right)^2 \right]$$

N_0 为分布范围内微粒的总数; r 是半径; μ 是粒径的数学期望值,它是正态分布最高点所对应的 r 值; σ 是正态分布的标准偏差。

另外,粒径分布中经常还使用到几个参数。一个是平均数直径 (Mean Number Diameter, 简称 MND), 它是指某个冰芯样品中颗粒物的总直径除以颗粒物总数得到的平均直径; 另一个是平均质量直径 (Mean Mass Diameter, 简称 MMD), 它是指根据某个冰芯样品中颗粒物的平均质量所计算的平均直径, 也就是, 平均质量除以密度可以得到平均体积, 由平均体积再计算出平均质量直径; 第三个是数平均直径 (Number Mean Diameter, 简称 NMD), 表示某一个样品数目尺度分布的加权算术平均值。因为颗粒物的质量随粒径呈指数增加, 所以 MMD 可以反

映样品中大颗粒的含量。而由于典型的粒径分布都是在微米到次微米内有最大颗粒数，则 MND 更多的反映小颗粒物的含量。二者尽管在名称上极为相似，但实质上却要相差很大。NMD 只是在对颗粒粒径方面的相对变化进行量化时比较方便的参数。

在本研究的分析中，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^[10, 35]，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。

第四章 天山不同区域雪冰中粉尘的空间变化特征

如第一章引言部分所述, 沉降在雪冰中的粉尘是重要的大气组成部分, 影响着地球表面的辐射平衡^[8-10, 22]。大气中的粉尘含量是气候环境变化的重要指示器, 与全球气温变化有着密切的关系。在亚洲粉尘源区研究雪冰中微粒沉积特征, 弄清楚不同地区大气粉尘以及高海拔积雪中粉尘特征随不同区域和季节的变化, 并与北半球其他地区已有的相关研究进行对比, 对于完善大气粉尘循环和沉积机制的认识显得尤为重要^[124]。雪冰中粉尘与化学离子、电导率等的关系研究有主要意义。雪冰中pH值和电导率 (ECM) 是大气环境变化的替代性指标, 可以指示气候变化^[125-128]。已有关于南极、北极以及青藏高原雪冰电导率及大气化学载荷等的相关研究, 根据极地冰芯的pH值和电导率可以恢复末次冰期以来的气候旋回事件^[129-130]。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^[131]。对于新疆不同区域的冰川雪冰粉尘和化学特征空间上的对比研究目前仍显得很少, 亟待开展相关研究。因此, 在天山不同区域开展了雪冰粉尘和化学特征的研究 (图3.1)。本研究重点关注新疆不同区域典型冰川雪冰中的不溶粉尘的特征及其在不同区域的空间变化; 还分析探讨了粉尘与化学离子、pH 值和电导率等的关系及其环境指示意义。

4.1 粉尘浓度的空间变化特征

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^[22]。由于雪层沉积的相似性, 在本研究的 6 条典型冰川中, 以天山东部地区的三条典型冰川为例讨论雪层的空间变化, 包括乌鲁木齐河源 1 号冰川、哈希勒根 51 号冰川、哈密庙儿沟平顶冰川, 积累区取样点沉积环境比较理想, 地形相对较为平坦。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 4.1 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 4.1 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^[132, 103],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性关也表明了东部天山大气粉尘沉积事件在区域上的一致性。

表 4.1 说明了天山山区六条冰川取样点雪坑中得到的微粒平均数量和质量浓度。分析发现,自西向东研究点青冰滩 72 号冰川、奎屯哈希勒根 48 号和 51 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川、博格达峰四工河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 $706 \times 10^3 / \text{mL}$ 、 $166 \times 10^3 / \text{mL}$ 、 $154 \times 10^3 / \text{mL}$ 、 $242 \times 10^3 / \text{mL}$ 、 $279 \times 10^3 / \text{mL}$ 、 $222 \times 10^3 / \text{mL}$,其中 72 号冰川数量浓度最大,而其余几个点没有明显差距和变化规律;质量浓度分别为 $3806 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、 $836 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、 $969 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、 $1442 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、 $1480 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、和 $3690 \mu\text{g}/\text{kg}$,表现出除了 72 号冰川之外,随地理位置自西向东变化而明显增加的趋势,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地区冰川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。

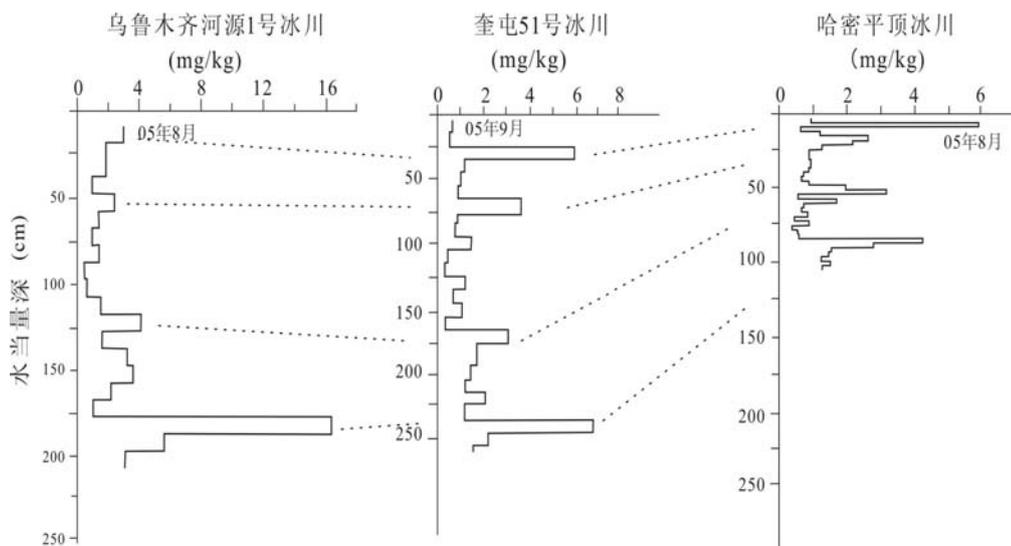


图 4.1 2005 年夏季天山东部采样点微粒浓度的三个典型垂直剖面示例

Figure 4.1 Three vertical profiles of dust concentration in summer 2005, Eastern Tianshan

表 4.1 天山冰川研究点粉尘微粒浓度的比较

Table 4.1 Comparison of dust concentration in six 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 (μg/kg)	数量浓度 (10 ³ 个/mL)	质量浓度 (μg/kg)
奎屯河哈希勒根 51 号冰川	166	969	74	436
奎屯河哈希勒根 48 号冰川	154	836	71	418
博格达峰四工河 4 号冰川	279	1480	138	727
乌鲁木齐河源 1 号冰川	242	1442	100	666
哈密庙儿沟平顶冰川	222	3690	94	1016
托木尔峰青冰滩 72 号冰川	706	3806	-	-

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。例如，奎屯哈希勒根 51 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川和哈密庙儿沟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 μg/cm²、72.1 μg/cm²、73.8 μg/cm²。据此，获得了其余三条冰川托木尔峰青冰滩 72 号冰川、博格达峰四工河 4 号冰川以及哈希勒根 48 号冰川的粉尘年沉积通量分别为 761μg/cm²、72.6μg/cm²、53.2μg/cm²。结果表明，天山冰川研究点粉尘沉积通量与浓度分布的结果一致，也表现出在哈密和青冰滩冰

川高于其他几个点的趋势:托木尔峰青冰滩冰川区最大、哈密庙儿沟冰川区次之,其次为博格达峰地区和乌鲁木齐河源,奎屯河源冰川区最小。

分析认为,造成粉尘浓度和沉积通量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,托木尔峰青冰滩 72 号冰川和哈密庙儿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,尤其是 72 号冰川其粉尘通量远大于其他区域。而乌鲁木齐河源 1 号冰川和奎屯哈希勒根 51 号冰川等距离周边荒漠要相对远些,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,除了青冰滩 72 号冰川,自西向东随着研究点的降水逐渐减少,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。而 72 号冰川的高浓度和高通量也与当地降水量较大有关系。(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,天山的乌鲁木齐河源区、博格达峰冰川区、哈密庙儿沟冰川区、以及托木尔峰青冰滩72号冰川,与位于中亚内陆的慕斯塔格、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^[9-10]。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

Table 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(μm)	数量 ($10^3/\text{mL}$)	质量 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	通量 [$\mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{a})$]	
托木尔峰青冰滩 72 号冰川	4600	2007-2008	0.57~26	706	3806	761	本研究
			1~26	384	1678		
乌鲁木齐河源 1 号冰川	4130	2002~2005	0.57~26	242	1442	72.1	本研究
			1~26	100	666		
奎屯哈希勒根 51 号冰川	3900	2002~2005	0.57~26	166	969	58.2	本研究
			1~26	74	436		
奎屯哈希勒根 48 号冰川	4150	2000~2006	0.57~26	154	836	53.2	本研究
博格达峰四工河 4 号冰川	4000	2009	0.57~26	279	1480	72.6	本研究
哈密庙尔沟平顶冰川	4510	2002~2005	0.57~26	222	3690	73.8	本研究
			1~26	94	1016		
崇则冰帽	6327	1980-87	1~22	616	8220	607	文献[10]
慕士塔格	5910	1990-92	1~22	276.4	6780	247	文献[10]
达索普冰川 (尼泊尔)	5700	1989-90	1~13	18.17	379	27	文献[10]
Tateyama 山 (日本)	2450	1997~2002	0.1~600			770	文献[22]
Penny 冰帽 (北极圈)	1980	1988-94	0.65~12	31.6	143	4.8	文献[42]
			1~12	13.7	129	4.4	
Devon 冰帽 (北极圈)	1800	Last 7000 y	>1	8.3	235	4.2	文献[71]

4.2 粉尘化学组成特征

本研究所采雪坑中均有明显的污化层发育,例如图 4.2 所示,青冰滩 72 号冰川及其雪坑挖取的照片,雪坑中有两个明显的厚污化层。图 4.3 显示了乌鲁木齐河源 1 号冰川和托木尔峰青冰滩 72 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,它们之间有较好的相关性(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。托木尔峰青冰滩 72 号冰川结果表明, 尽管在雪层上部 (0~200 cm), 微粒浓度与其他要素一致性较差, 可能是由于微粒受到积雪密度较低和融水作用影响造成; 然而在雪层的下部 (200~425 cm), 微粒浓度峰值代表的污化层与 Na^+ 、 Ca^{2+} 等浓度以及 pH 剖面之间有很好的对应性。已有的研究发现^[133], 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来自于周边的中亚内陆粉尘源区, 因为强碱性的 Ca^{2+} 是来自于亚洲大陆沙漠和黄土地区矿物微粒的一种示踪剂, 是亚洲源区粉尘的指示物质。 Na^+ 浓度与电导率的值也与微粒浓度有很好的对应关系, 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。

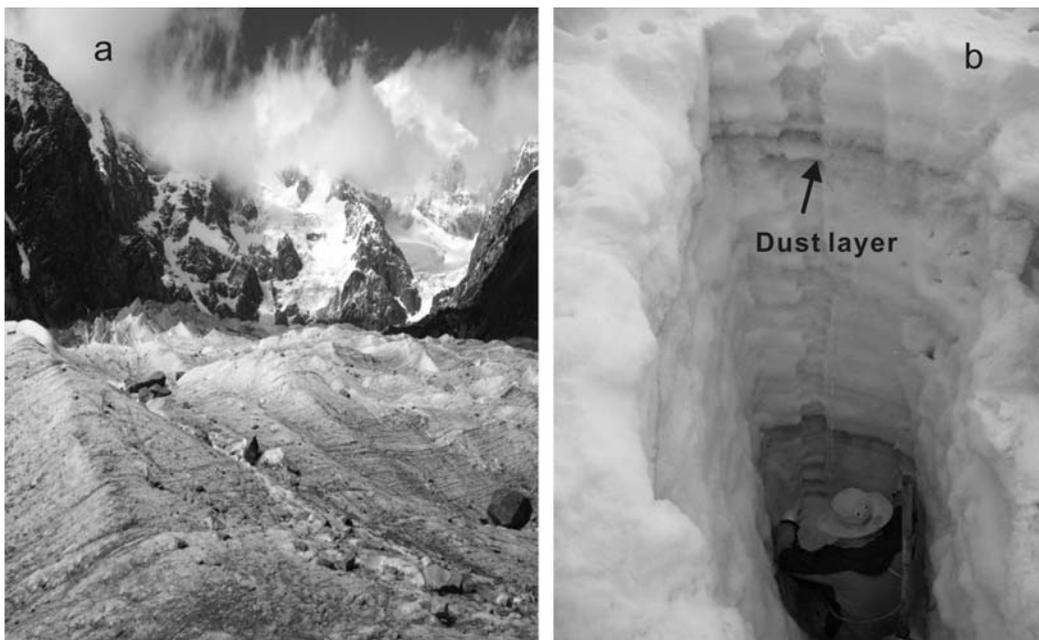
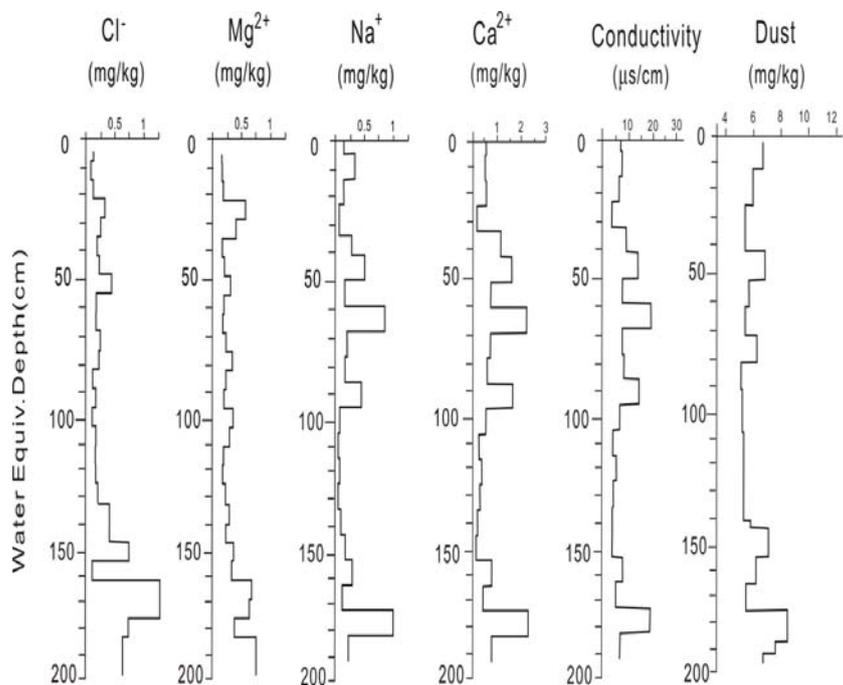


图 4.2 托木尔峰青冰滩 72 号冰川及雪坑挖取照片

Figure 4.2 Photographs showing (a) Glacier No.72; (b) snowpit in the accumulation zone on the glacier



(1)

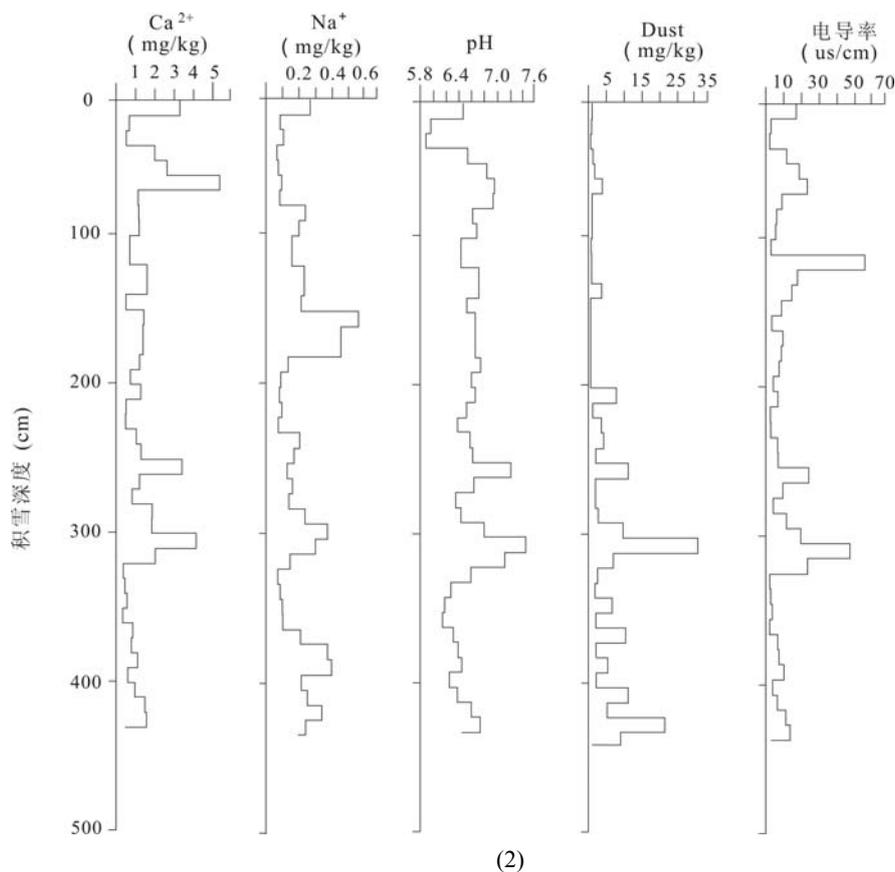


图 4.3 典型雪坑离子浓度、电导率和微粒浓度剖面比较：(1) 2005 年夏季乌鲁木齐河源 1 号冰川；(2) 2008 年夏季青冰滩 72 号冰川

Figure 4.3 Vertical profiles of ionic concentrations, conductivity and dust concentration on (1) Glacier No.1 at the headwater of Urumqi River in summer 2005; (2) Glacier No.72 in Mt Tuomuer

表 4.3 天山研究点离子浓度与微粒浓度的相关系数

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

样品	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[133-135]
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
博格达峰四工河 4 号冰川	0.77	0.63	0.87	本研究
青冰滩 72 号冰川	0.82	0.53	0.58	本研究
奎屯 48 号冰川	0.56	0.69	0.84	本研究

以乌鲁木齐河源 1 号冰川和奎屯哈希勒根 1 号冰川为例来详细分析雪冰中粉尘与化学离子浓度之间的年际变化关系。表 4.4 是乌鲁木齐河源 1 号冰川多年表层积雪中主要化学离子、不溶粉尘浓度、 $\delta^{18}\text{O}$ 以及 pH 和电导率的比较。随着取样时间的不同，雪坑中离子浓度也有较大差异。从 2003 年至 2005 年，离子浓度表现出先升高后下降的趋势。其中 2002-2003 年度积雪离子浓度最低（平均为

2308.3 $\mu\text{g/L}$), 雪冰主要化学要素如 pH、ECM 和矿物粉尘浓度也最低; 2003-2004 年度积雪离子浓度最高 (平均为 3679.2 $\mu\text{g/L}$), ECM 和矿物粉尘浓度也最高; 而积雪中各要素的浓度在 2005 年又有所下降。这种浓度分布的年际变化表现出明显的与随气温、降水年际变化可能相关。分析表 4.4 发现, 各种离子浓度大小关系是 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, 其中 Ca^{2+} 是主要的阳离子, SO_4^{2-} 是主要的阴离子, 其浓度明显远大于其他离子浓度, 而且年际上, 离子浓度状况与粉尘表现出较好的一致性变化。分析认为, 来源于地球表面的粉尘颗粒会携带大量的化学离子和其他物质如烟灰、黑炭等, 在冰川区随着海拔升高, 随水汽输送遇到山体阻挡, 以干沉降或湿沉降的方式而沉降在冰川表面的积雪中; 另一方面, 离子、粉尘等浓度的年际差异可能与大气气溶胶粉尘输送受大气环流和气温等的影响有关, 因为许多研究表明, 在暖湿气候环境期间, 粉尘浓度由于降水的作用会降低, 而冷干的气候环境会造成大气粉尘的频繁活动^[28-32]。而雪冰中碱性的 Ca^{2+} 是亚洲粉尘的指示物质, 其浓度大小与粉尘浓度有着很好的相关性。同时, 从表 4.4 中发现, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 等阳离子的浓度远大于阴离子的浓度之和 (平均差值 $\Delta C=748.2 \mu\text{g/L}$), 阴阳离子之间的这种不平衡是由于积雪中的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 影响造成的。已有研究表明, 积雪中的阴阳离子浓度差可以反映 $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的值^[8, 133]。过多的阳离子可能来源于周边的粉尘, 以及由于 CO_2 与 CO_3^{2-} 之间的转换造成的。

表 4.4 表层积雪中主要化学要素浓度的比较

Table 4.4 $\delta^{18}\text{O}$ and major ion concentrations, ECM, pH in surface snow samples

年份	Dust ($10^3/\text{ml}$)	pH	ECM ($\mu\text{s/cm}$)	$\delta^{18}\text{O}$	离子浓度								离子 总浓度 ($\mu\text{g/L}$)
					Mg^{2+} ($\mu\text{g/L}$)	Ca^{2+} ($\mu\text{g/L}$)	Na^+ ($\mu\text{g/L}$)	K^+ ($\mu\text{g/L}$)	Cl^- ($\mu\text{g/L}$)	SO_4^{2-} ($\mu\text{g/L}$)	NO_3^- ($\mu\text{g/L}$)	NH_4^+ ($\mu\text{g/L}$)	
2002-2003	408	5.6	3.1	-12.8	108.5	842.9	71.4	31.3	208.6	556.7	355.3	146.4	2308.3
2003-2004	1094	5.5	3.6	-18.3	189.8	1829.3	64.5	46.4	354.5	619.3	404.2	189.5	3679.2
2004-2005	327	5.5	2.09	-24.9	102.5	1793.2	86.9	48.6	209.4	468.6	316.4	186.4	3187.1
平均	609	5.5	2.93	-18.6	133.6	1488.4	74.3	42.1	257.5	548.2	358.6	174.1	3058.2

表 4.5 说明了乌鲁木齐河源 1 号冰川 2002-2005 年积雪中各种要素包括主要化学离子、粉尘、pH 和电导率等的相关性分析。结果表明, 除 NO_3^- 之外, 积雪中主要离子如 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 以及不溶粉尘 (Dust) 相互之间存在很好的相关关系。表层雪 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度及不溶粉尘之间表现出明显的随时间变化上的相关性, 说明积雪化学组成可能受沙尘活动的影响很大。在本研究中,

乌鲁木齐河源冰川积雪的结果显示了 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度很高，这可能受到中亚地区沙尘源区的地壳粉尘矿物组成的影响造成的结果；积雪 Ca^{2+} 浓度与微粒浓度的明显相关性说明 ($R=0.96$)，尽管不排除其他源区影响，积雪污化层中微粒可以推断为来自于周边的中亚内陆粉尘源区，因为强碱性的 Ca^{2+} 是来自于亚洲大陆沙漠和黄土地区矿物微粒的一种示踪剂，是亚洲源区粉尘的指示物质。 Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度与电导率的值也与粉尘浓度有很好的相关关系。电导率 ECM 反映了阴阳离子总体浓度的大小，与 pH 值有很好的相关性。同时，雪坑中的 NH_4^+ 浓度也很高（平均为 $174.1\mu\text{g/L}$ ）。研究表明，硫酸盐产生于云滴的逐步成云过程中，通过各种相同或不同种类的化学过程产生硫酸（如二氧化硫的氧化过程），然后通过与氨气 (NH_3) 的化学反应形成硫酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 。而在此过程中便形成了大气粉尘中的细颗粒^[12]。在这种累加态中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NH}_4^+$ 的等电量比率为 1。从而使得大气粉尘细颗粒可溶部分的化学组成含有大量的硫酸铵，并可能附着在粗颗粒表面。离子浓度组成关系很好的反映了中亚粉尘源区的环境状况，不溶微粒浓度与 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度和电导率的较好的相关性证明，积雪中粉尘可能主要来自于中亚内陆的粉尘源区，而这些离子随着微粒的沉降而沉积在雪层中。

表 4.5 研究区粉尘、pH、电导率以及主要阴阳离子相关性对比
Table 4.5 Correlation coefficient of major ions, pH, ECM and dust in the snowpits

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

表 4.6 是奎屯哈希勒根 51 号冰川 2004-2007 年 3 个雪坑中主要化学离子、不溶粉尘浓度以及 pH 和电导率的比较。由于三个雪坑的海拔高度不同，雪坑中离子浓度也有较大差异。随着雪坑海拔的升高，离子浓度表现出下降趋势。其中雪坑 Snowpit-2 海拔最低（海拔 3800 m），主要离子和矿物粉尘浓度最高；Snowpit-3

海拔最高（4000 m），主要离子和矿物粉尘浓度最低；雪坑 Snowpit-2 海拔居中，各种要素浓度也居中。这种浓度分布表现出明显的随海拔高度变化效应。分析表 1 发现，各种离子浓度大小关系是 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ，其中 Ca^{2+} 是主要的阳离子， SO_4^{2-} 是主要的阴离子，其浓度明显远大于其他离子浓度。天山东部的乌鲁木齐河源 1 号冰川的研究结果表明，表层雪 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，沙尘活动季节其浓度很高，说明积雪粉尘化学组成受大气沙尘活动的影响很大。在本研究中，奎屯哈希勒根冰川雪坑的结果显示了 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度很高，这可能受到中亚地区沙尘源区的地壳粉尘矿物组成的影响造成的结果。同时，雪坑中的 NH_4^+ 浓度也很高。上述结果与乌鲁木齐河源 1 号冰川有较好的一致性，哈希勒根冰川区雪坑中离子浓度组成关系很好的反映了中亚粉尘源区的大气环境状况。

表 4.6 冰川区不同雪坑粉尘、pH、电导率以及主要阴阳离子浓度
Table 4.6 Comparison of dust, major ions and pH and ECM in the snowpit of
Haxilegen Glacier No.51 in Kuitun

	海拔 (m)	Ca^{2+} ($\mu\text{g/L}$)	SO_4^{2-} ($\mu\text{g/L}$)	NH_4^+ ($\mu\text{g/L}$)	NO_3^- ($\mu\text{g/L}$)	Cl^- ($\mu\text{g/L}$)	Na^+ ($\mu\text{g/L}$)	Mg^{2+} ($\mu\text{g/L}$)	K^+ ($\mu\text{g/L}$)	Dust ($10^3/\text{ml}$)	pH	ECM ($\mu\text{s/cm}$)
Snowpit-1	3900	133.19	172.69	105.92	99.01	49.35	16.91	16.51	19.52	408	5.6	3.1
Snowpit-2	3800	219.94	188.86	114.8	101.5	62.08	26.95	22.42	22.4	1094	5.5	3.6
Snowpit-3	4000	69.42	31.75	65.37	54.51	39.8	21.07	22.07	15.82	327	5.5	2.09
平均	3900	140.85	124.43	95.36	85.01	50.41	21.64	20.33	19.25	609	5.5	2.9

与雪冰中粉尘相对应，气溶胶粉尘可以很好的反映出雪冰内保存的粉尘在沉降前的特征。气溶胶粉尘颗粒的扫描电镜 (SEM) 图像可以清晰地显示气溶胶颗粒物的微观形貌^[52-54]。研究表明，乌鲁木齐河源 1 号冰川元素组成统计分析结果显示，冰川区气溶胶颗粒主要分：富 Si 颗粒物、富 Ca 颗粒物、富 Fe 颗粒物、富 K 颗粒物和富 S 颗粒物。“富 Ca”颗粒，它的数量是整个分析颗粒物数量的 30.1%，代表的气溶胶颗粒主要组成为 CaCO_3 ，可能以方解石形式存在。之前有关冰川区气溶胶及雪坑化学的研究中也发现， Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 通常为可溶无机离子，在离子贡献比率中占有很大的比例，由此也经常推测认为有 CaCO_3 的存在^[136-139]。颗粒中除了 Ca 含量较高外，还伴有较高含量的 Si 元素，因此认为这些颗粒可能以云母、粘土形式存在，或者是碳酸盐与其他硅酸盐的聚合物。这和 Okada et al. 的研究结果比较类似^[140-141]。此外，有关天山山脉以西地区的研

究也发现,在里海和咸海的中间地带富含大量的方解石,所占比例可能为这个区域乃至全球最高值^[142]。而且天山山脉周边的沙漠及黄土地带采集的气溶胶样品中 Ca 的质量百分比也比较高。因此,这些富含 Ca 的颗粒物可能来自于周边的沙漠或土壤,或来自于较远的西面经过长距离传输输入到此地。“富 Si”颗粒,它的数量是整个分析颗粒物数量的 55%。粉尘颗粒主要由 Si-Al-Ca、Si-Al-Fe-K 和 Si-Al-K 组成,可能以铝硅酸盐的形式存在如长石、高岭石、云母、蒙脱土等。这些颗粒大多具有棱角分明、不规则的形状特征,由此认为,这些颗粒主要来自于陆源地壳土壤中矿物颗粒。此外,另有气溶胶颗粒中主要以 Si、Ca、Ti、K 和 Al 为主要组成元素,其中 Ca 和 Ti 的质量比约为 1:1,因此这类颗粒可能是长石或其他硅铝酸盐与钙钛矿的聚合物。1 号冰川区气溶胶颗粒中明显以富含硅铝酸盐和二氧化硅的富 Si 颗粒为主。这和珠穆朗玛峰的东绒布冰川区采集的气溶胶样品^[143],以及位于天山在哈萨克斯坦境内一个本底站采集的气溶胶样品^[144]中的颗粒元素组成分析一致,表明 1 号冰川区的气溶胶反映的仍为该地区的本底特征。这些颗粒物可能来自于周围的沙尘源区或风蚀土壤而形成的颗粒,其中在塔克拉玛干大沙漠的策勒地区采集的气溶胶样品中主要以富含硅酸盐的矿物颗粒为主为该推测提供了佐证^[141]。此外,将 1 号冰川气溶胶颗粒组成与使用同种方法进行分析的其他各地区采集的气溶胶样品对比可见:1 号冰川气溶胶颗粒的元素组成与策勒及呼和浩特市较为类似^[140-141],气溶胶中富含 Si 的颗粒所占比例最大,这可能与 1 号冰川、策勒和呼和浩特市都位于沙漠边缘或沙尘源区,气溶胶颗粒直接受沙尘影响较大有关。在主要组成相似的同时,1 号冰川大气气溶胶又略不同于策勒和呼和浩特市,如富含 Si 的颗粒明显少于策勒和呼和浩特市,而富含 Ca 的颗粒却高于两地,这可能与三地气溶胶的源区不同有关。策勒和呼和浩特市采样点海拔仅在 1000 m 左右,大气环境主要受附近周围沙漠的影响,如策勒主要受塔克拉玛干沙漠的影响,呼和浩特市则主要受蒙古沙漠和戈壁高原的影响,大气中主要为沙尘气溶胶的输入,因此富含 Si 的硅酸盐等沙尘颗粒较为富集,其中由于受黄土高原的影响,呼和浩特市的气溶胶中富含 Ca 的气溶胶颗粒略多于策勒地区。1 号冰川虽然同样地处沙尘源区,但冰川区海拔较高采样点位于海拔 4130 m 处,直接反映了大气对流层中上部大尺度的大气状况。且天山地处欧亚大陆腹地,高空主要受北半球西风带控制。根据 1 月、4 月、7 月和 11

月 1500 m 的平均大气流场, 天山上空大致 4000 m 以上, 盛行西北风, 因此西面中亚地区对 1 号冰川地区大气环境影响较大。Aizen et al. 的研究同样证实, 在影响整个天山地区的天气过程中来自于西面的气团为主^[6], 在该气团的影响下, 中亚地区如哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦等地的气溶胶可以传输至天山地区。除萨雷—伊施科特劳、莫因库姆等沙漠地区会输入大量富含 Si 的沙生气溶胶外, 里海低地、土库曼斯坦的沙漠及碱性土壤是天山地区含 Ca 质气溶胶的重要源区。Claquin et al. 通过土壤矿物学分布模拟发现, 全球方解石含量最高(质量比为 25~30%) 的土壤位于里海和咸海之间^[142], 因此该源区气溶胶的输入可能是 1 号冰川大气气溶胶中富含 Ca 的气溶胶颗粒较多的原因。此外, 骆鸿珍等通过对乌鲁木齐河源 1 号冰川周围终碛、老侧碛以及各类冰碛物内粘土矿物等成分的研究分析表明^[145]: 附近冰碛物矿物中含有大量 Ca、Mg 成分, 这可能是造成富含 Ca 的气溶胶颗粒较多的另一原因。富含 S 的气溶胶颗粒在 1 号冰川的含量同策勒地区相近而明显低于呼和浩特、北京及沿海地区。富含 S 的气溶胶颗粒除来自于海洋的原生气溶胶以及海洋生物释放的含硫化合物及其氧化外, 主要还来源于人类活动, 因此城市人口密集的地区如北京的含 S 气溶胶颗粒数目高于呼和浩特、策勒和 1 号冰川, 而呼和浩特则高于策勒和 1 号冰川。沿海的青岛以及北太平洋地区的高含量则可能与海洋气溶胶的影响有关。此外受海洋气溶胶及海盐离子的影响, 青岛气溶胶中 Ca、K、Na、Cl 含量较高, 北太平洋上的气溶胶则主要以富含 Na 和 Cl 的气溶胶颗粒为主, 明显不同于 1 号冰川等受陆源影响的地区^[81]。以上对比说明, 天山冰川区气溶胶粉尘反映了受中亚高海拔沙尘源区的大气环境特征, 且冰川区受人类活动影响程度较低, 大气较为清洁, 大气中主要以富含 Si、Ca 等自然来源的气溶胶颗粒为主。

天山雪冰中 pH 值和电导率与粉尘也有着十分密切的关系。天山东部三个研究点冰芯中的 pH 值和电导率 (ECM) 相关性分析结果表明 (图 4.4), 奎屯哈希勒根 48 号冰川、乌鲁木齐河源 1 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川的 pH 值和电导率都有很高的相关性 (图 4.4)。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; 1 号冰川粒雪芯电导率值介于 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 48 号冰川最大, 1 号冰川最小; 电导率为哈密庙尔沟平顶冰川最大, 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。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 4.7)。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。

表 4.7 天山研究点雪冰电导率与化学离子的相关系数及其与其它区域的比较

Table 4.7 Correlation of ECM and ions in the ice core of research points, western China

ECM	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	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[126]
唐古拉冬克玛底冰川	0.92	0.70	0.69	0.58	0.85	文献[146]
珠穆朗玛峰东绒布冰川	-	-	-	-	0.84	文献[147]
玉龙雪山浅冰芯	0.89	0.21	0.71	-	0.34	文献[148]

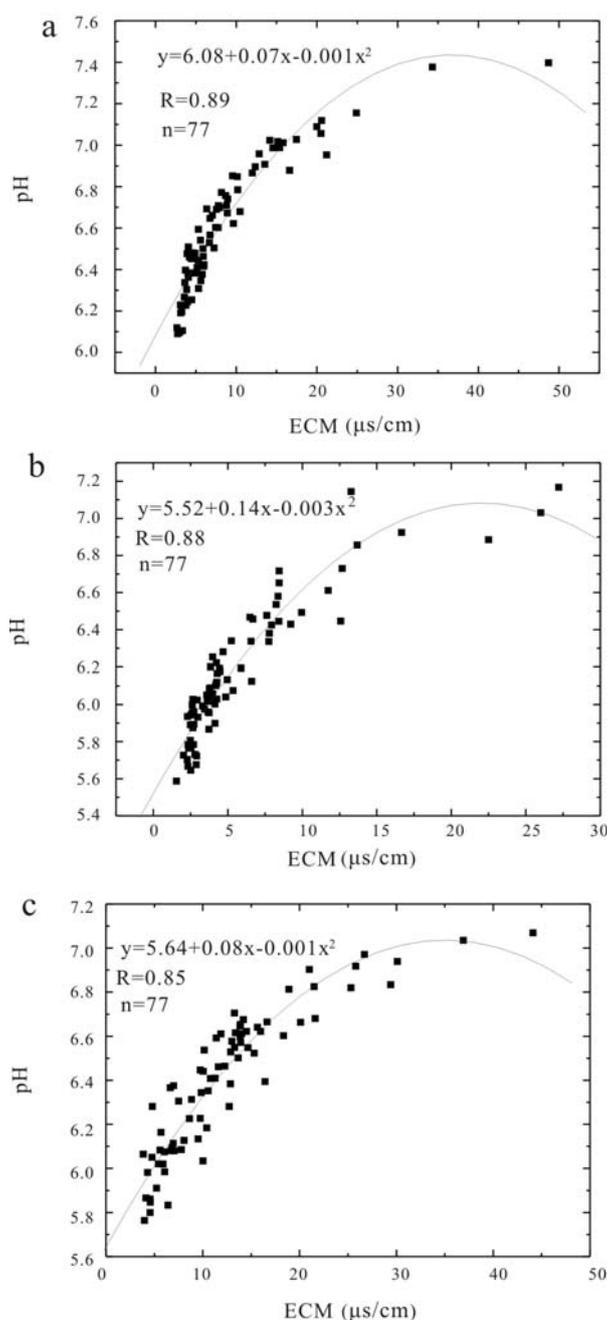


图 4.4 天山东部冰川粒雪芯 pH 值和电导率 ECM ($\mu\text{s/cm}$) 的相关性，其中图 a, b, c 分别代表奎屯哈西勒根 48 号冰川，乌鲁木齐河源 1 号冰川，以及哈密庙尔沟平顶冰川

Figure 4.4 Correlative coefficient between pH and ECM in eastern Tian Shan, a: Kuitun glacier No.48, b: stand Urumqi glacier No.1, c: Hami Miaoergou glacier

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^[129-130]。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 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^[89]。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 4.5)。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 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。

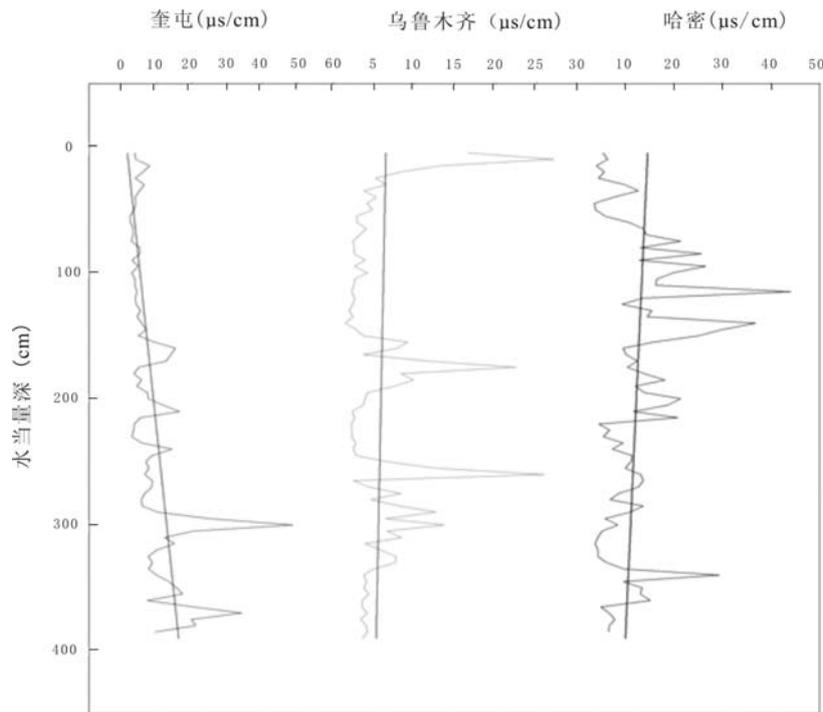


图 4.5 天山东部研究点电导率随冰芯深度变化的比较

Fig. 4.5 ECM variation as the ice core depth changes in eastern Tian Shan research points

图 4.6 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^[132]。而图 4.6 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。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。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。

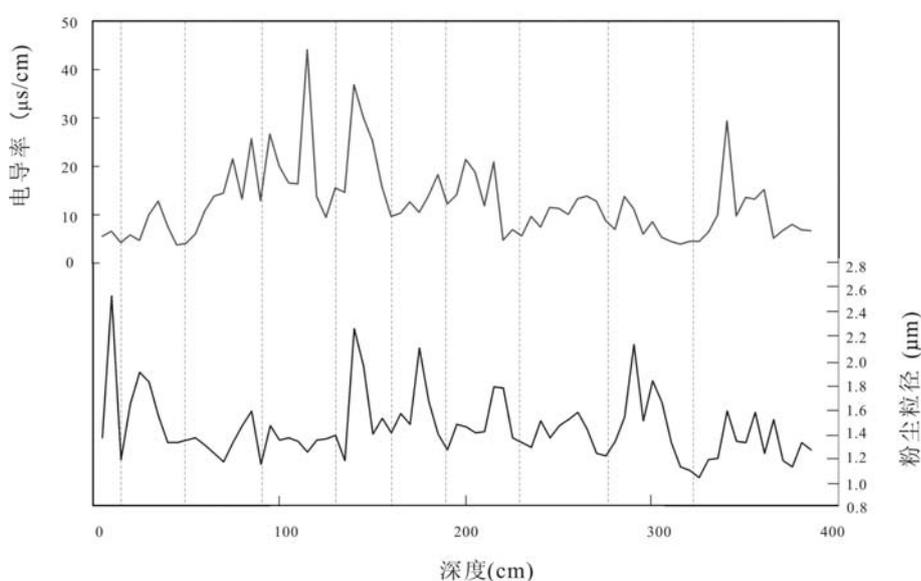


图 4.6 哈密冰芯中粉尘与电导率剖面的比较

Figure 4.6 Comparison of dust and ECM profiles in Hami glacier ice core

表 4.8 显示了东天山研究点冰芯 pH 值和电导率与化学离子的相关性。结果表明，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，奎屯哈希勒根 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。哈密庙儿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 4.7）。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^[149]。

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 1 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^[148]，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。

为了进一步验证天山三条典型冰川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 4.8）。结果显示，各种离子浓度在东部哈密冰芯中要远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容易可能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如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 4.8）。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 4.8）。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，而大气环境存在的 SO_4^{2-} 在哈密的高浓度也可能意味着， 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。

表 4.8 东天山三个研究点冰芯电导率与特征离子和粉尘浓度比较
Table 4.8 Concentration of ECM and ions in the ice core of research sites

研究点	SO ₄ ²⁻ (μg/L)	Na ⁺ (μg/L)	Mg ²⁺ (μg/L)	Ca ²⁺ (μg/L)	粉尘 (#/ml)	电导率 (μs/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

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Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻等）影响，这些物质主要来自于大气沙尘暴活动的粉尘颗粒，而雪冰酸度 pH 也与电导率有着很高的正相关性。雪冰电导率在全球许多地区都有进行研究。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H⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻浓度之间均亦存在很好的线性正相关，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。效存德等研究表明^[147]，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Ca²⁺, Mg²⁺, 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Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻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⁻, SO₄²⁻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Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻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^[147]，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+} 较其它离子更能敏感指示大气过程。

4.3 粉尘粒径分布特征

图 4.7 说明了雪中粉尘数目-粒径分布; 图 4.7a 说明了青冰滩 72 号冰川雪坑数目-粒径分布的平均状况, 是 43 个样品的平均值。可以发现, 微粒的数量随粒径分布主要集中在 $0.57\sim 2\ \mu\text{m}$ 的范围内。图 4.7b 是青冰滩微粒数目-粒径分布与天山东部地区三个点的比较, 包括奎屯哈希勒根 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。比较结果表明, 72 号冰川微粒的数量-粒径分布中, 细颗粒的数量明显小于其他三个点, 而总体数量浓度大于其他点, 正好说明托木尔峰地区主要受到大颗粒的影响, 可能是由于距离塔克拉玛干沙漠已经其他中亚沙漠粉尘源区较近影响造成的。图 4.8 和图 4.9 显示了雪层中粉尘微粒的体积-粒径分布。图 4.8 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 4.9 是天山地区四个点体积粒径分布状况的比较, 包括托木尔峰青冰滩 71 号冰川、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。研究分析得出的青冰滩 72 号冰川微粒体积分布的粒径众数介于 $3\sim 25\ \mu\text{m}$, 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, 说明天山托木尔峰青冰滩地区微粒主要来源于单一的沙尘源地。比较发现, 这几个点尽管粒径分布趋势极其相似, 但是 4 个点体积-粒径分布的众数值仍有差别 (图 4.9): 哈密庙儿沟平顶冰川值最大, 托木尔峰青冰滩 72 号冰川次之, 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、12、11.5、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。青冰滩 72 号冰川区受到中亚的塔克拉玛干大沙漠的影响明显; 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。

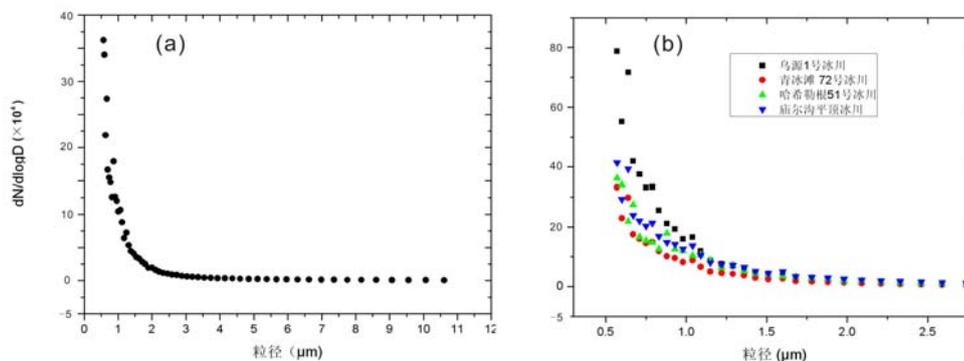


图 4.7 青冰滩 72 号冰川雪坑微粒的数目粒径分布 (a); 数目粒径分布比较 (b)
Figure 4.7 Number-size distribution of dust particles in the snow of glacier No.72 (a); comparison of number-size distribution of dust of glaciers in Tianshan Mountains (b)

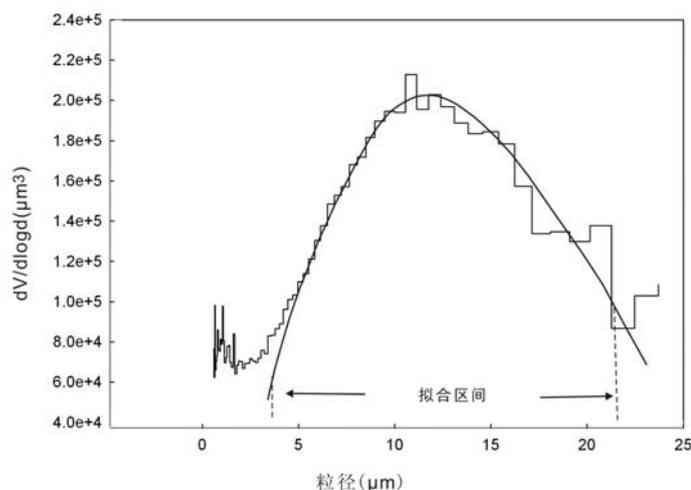


图 4.8 乌鲁木齐河源 1 号冰川典型雪坑微粒的体积-粒径对数分布. 图中折线表示计算得到的体积粒径对数分布，平滑曲线表示多项式拟合曲线

Figure 4.8 Characteristics of volume-size distribution obtained from Urumqi Glacier No.1, Fold-line indicates the Volume-size distribution, Flat-line shows normal regression distribution

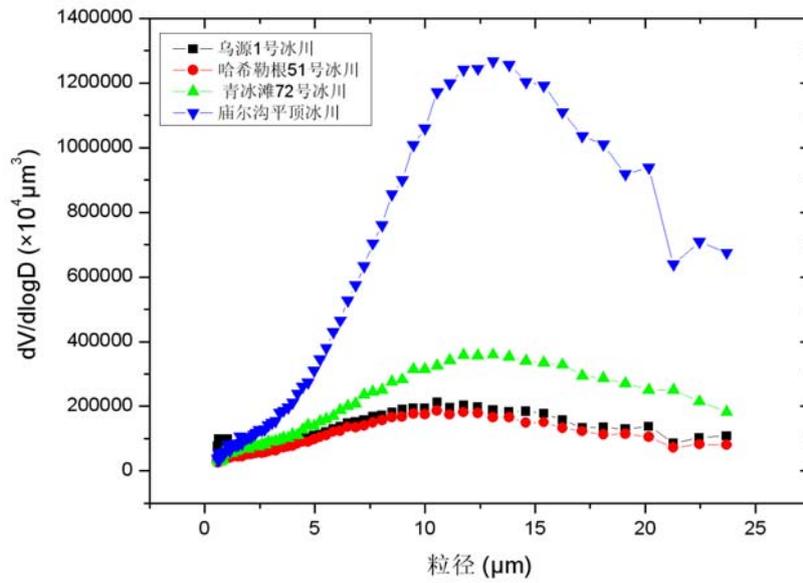


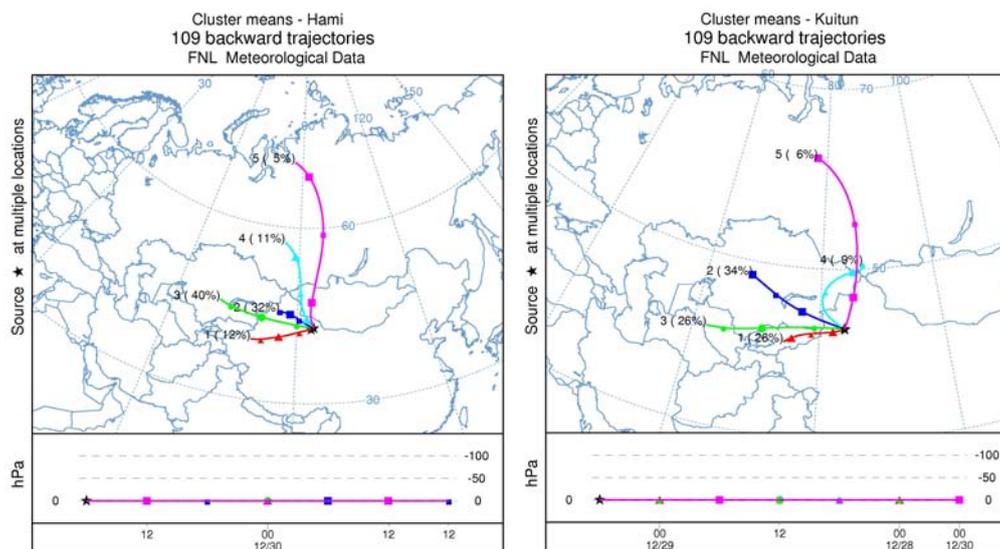
图 4.9 天山冰川雪坑微粒的体积粒径分布特征比较

Figure 4.9 comparison of volume-size distribution of dust particles in the snow in Tianshan Mountains

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（图 4.10）。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。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。



(1) 哈密庙儿沟平顶冰川

(2) 奎屯哈希勒根 51 号冰川

图 4.10 典型冰川区冰川取样点 2005-2006 年气团后向轨迹聚类分析

Figure 4.10 Backward trajectory analyses of cluster of air mass from glaciers in Tianshan Mountains.

同时分析了东天山冰川积雪中微粒沉积量的年度变化特点。图 4.1 显示三个取样点乌鲁木齐河源 1 号冰川、奎屯哈希勒根 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 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。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 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，2005 年相应浓度值是 1422 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。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 °C；2005 年降水量 451 mm, 年均气温-6.4 °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; 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 4.1), 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, 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, 有些问题我们还不太清楚, 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。

综上所述, 天山雪冰中粉尘微粒特征分析表明, 随着研究点区域地理环境的变化, 积雪中不溶微粒的质量浓度、沉积通量和体积粒径分布的众数都表现出空间上的变化和差异: 奎屯哈希勒根 51 号冰川和 48 号冰川最小, 乌鲁木齐河源 1 号冰川、博格达峰四工河 4 号冰川次之, 托木尔峰青冰滩 72 号冰川其次, 哈密庙尔沟平顶冰川最大。研究表明, 哈密庙儿沟和托木尔峰冰川受周边粉尘源区 (例如塔克拉玛干沙漠和戈壁等) 影响较大, 而乌鲁木齐河源区、博格达峰地区与奎屯河源区受影响则相对较小, 说明了天山冰川中粉尘沉降存在很大的空间差异性和区域环境对于雪冰中粉尘沉降的明显影响。雪坑微粒浓度剖面 and 离子相关性分析表明, 天山冰川积雪中的污化层富含亚洲粉尘的富 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 矿物; 微粒体积一粒径分布众数介于 3~22 μm , 粒径分布显示了单结构模式。冰川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。总体上, 天山冰川雪冰中粉尘的特征如浓度、粒径众数等都表现出自西向东的逐渐增加的趋势, 然而, 青冰滩 72 号冰川显得较为特殊, 其浓度和粒径分布的大小仅次于哈密庙儿沟平顶冰川, 而远大于其他几个点, 尤其是该区雪冰中粉尘沉降年通量很大, 这可能是由于其处于主要亚洲粉尘源区—塔克拉玛干沙漠的边缘, 导致大量的粉尘传输到冰川区, 而观测发现的该冰川近几年快速消融也可能与冰川表面粉尘的浓度很高影响有密切关系。而本研究结合 Hysplit 气团后向轨迹分析也验证了塔克拉玛

干沙漠对托木尔峰青冰滩 72 号冰川区的影响。天山山区与全球其他区域研究相比，中亚内陆的慕士塔格、达索普冰川，以及日本中部馆山雪冰中的粉尘浓度和粒径都有较好的可比性和相似性；然而浓度和粒径分布远大于极地地区的 Penny 冰帽、Devon 冰帽等的研究结果。

第五章 冰川新降雪中粉尘特征的季节变化 及其环境意义

如前面章节所述,雪冰中粉尘沉降的季节变化特征是目前的热点研究问题。天山乌鲁木齐河源冰川区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。目前,对位于中亚粉尘源区的天山积雪中粉尘的季节变化特征及其与沙尘活动之间的深入关系研究显得很重要,类似研究在其它地区已有开展,例如,东亚地区如日本和韩国已有许多报道关于大气中的粉尘季节变化的研究^[150-152]。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。

本研究选择了乌鲁木齐河源1号冰川进行连续的观测取样,以研究冰川表面新雪中粉尘随时间的变化。2005年4月~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(采样点见图5.1),表层雪为积雪上层5cm深的雪样,每个雪样100g,共取得5个月120个样品。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。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(hybrid 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4130m高度3d内的大气粉尘后向传输轨迹。



图 5.1 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区 4130m 雪样采集点及气象站
Figure 5.1 Location of sampling site in Urumqi glacier No.1 in Tian Shan

5.1 粉尘浓度季节变化

对乌鲁木齐河源 1 号冰川表层雪粉尘特征的季节变化进行研究。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 5.2 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。

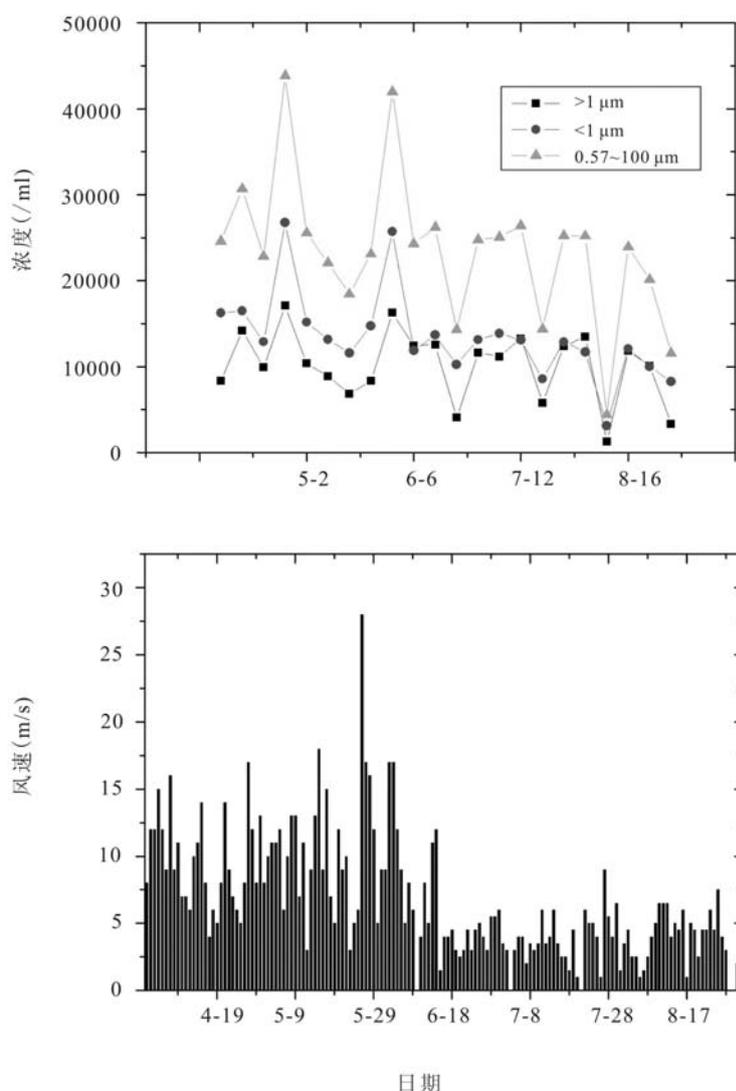


图 5.2 4~8 月表层雪中不溶粉尘颗粒的浓度及河源区风速变化

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

据中国气象局西北地区的许多气象站（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5.7显示了4月18日（图5.7a）和5月28日（图5.7b）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4130m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，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，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。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 粉尘粒径分布季节变化

雪冰中微粒的粒径及其分布反映了搬运风力以及粉尘源区的沙尘暴活动，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。已有许多研究表明，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。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 μm ；（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20~80 μm 较粗的范围内，粒径众数大约40 μm 。图6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（b）]，沙尘暴发生前表层雪的粉尘微粒表现出单一分布模式，表明是稳定大气粉尘（气溶胶）来源，分布模式为细粒（3~21 μm ）；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（3~21 μm 和20~80 μm ）组成，尽管二者分散不太明显；到了6~7月 [图5.3（d）和（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5.3（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（3~21 μm ），而较粗的粒径分布模式（20~80 μm ）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。

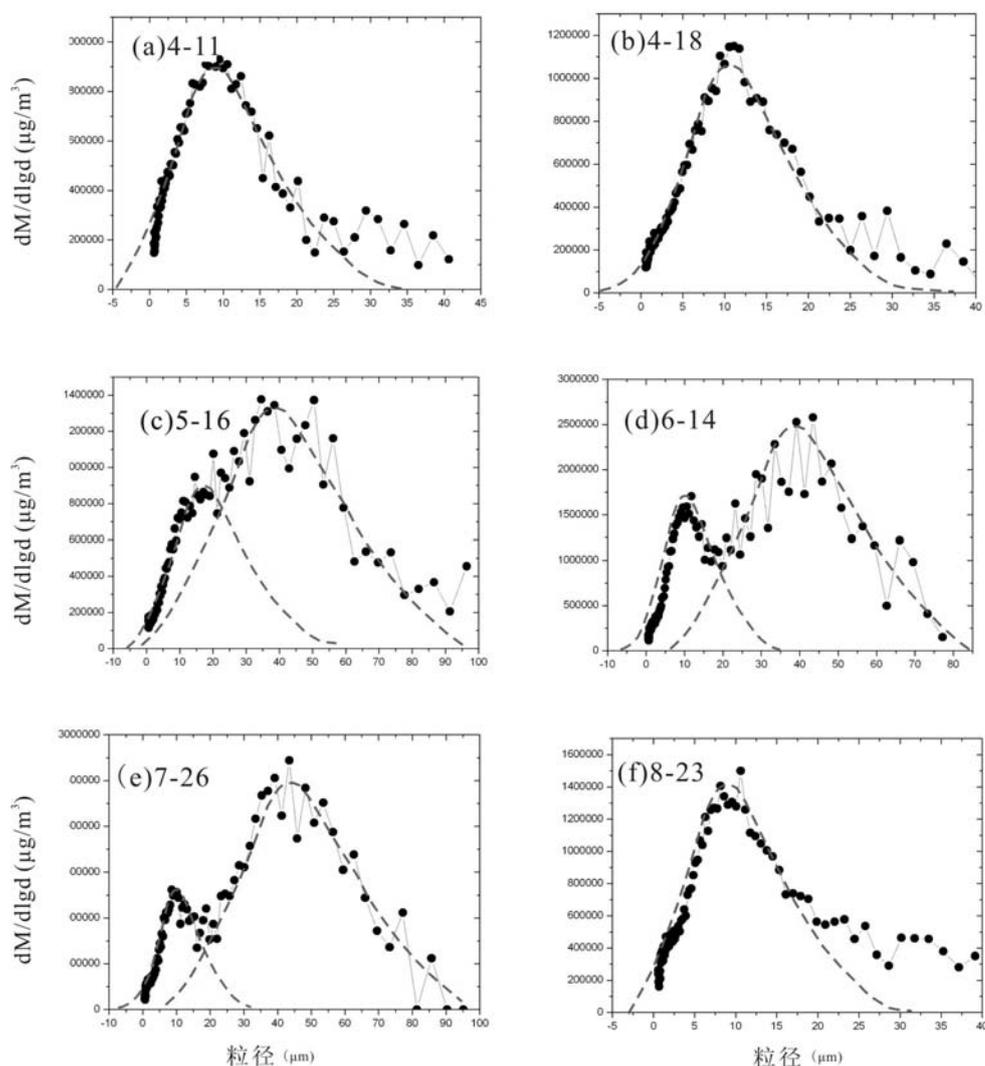


图 5.3 研究点积雪微粒质量粒径分布特征的季节变化, 散点表示计算得到的微粒质量粒径分布, 虚线表示多项式正态拟合曲线

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

对于大气粉尘的粒径分布, 在全球许多地区都进行过研究。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, 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 4~30 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 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ；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 $6\sim 21\ \mu\text{m}$ 。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 $3\sim 21\ \mu\text{m}$ 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 $10\ \mu\text{m}$ 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。

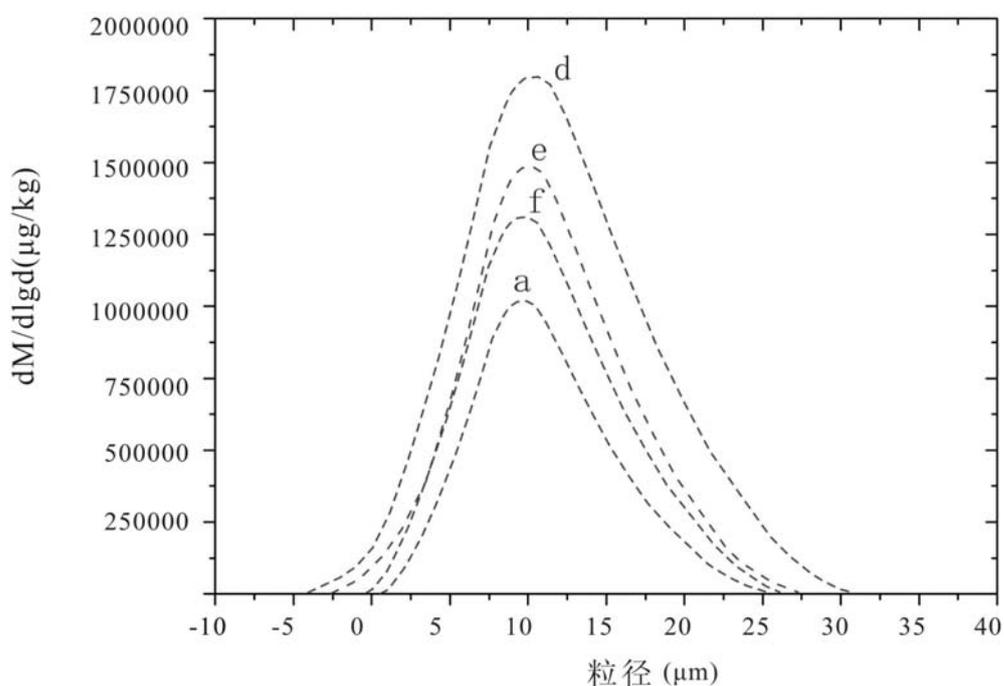


图 5.4 对图 5.3 中曲线 a、d、e、f 的相应图中粉尘细粒组成部分粒径分布比较

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

5.3 粉尘化学组成特征的季节变化

图 5.5 显示了 2005 年 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 5.5）。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。

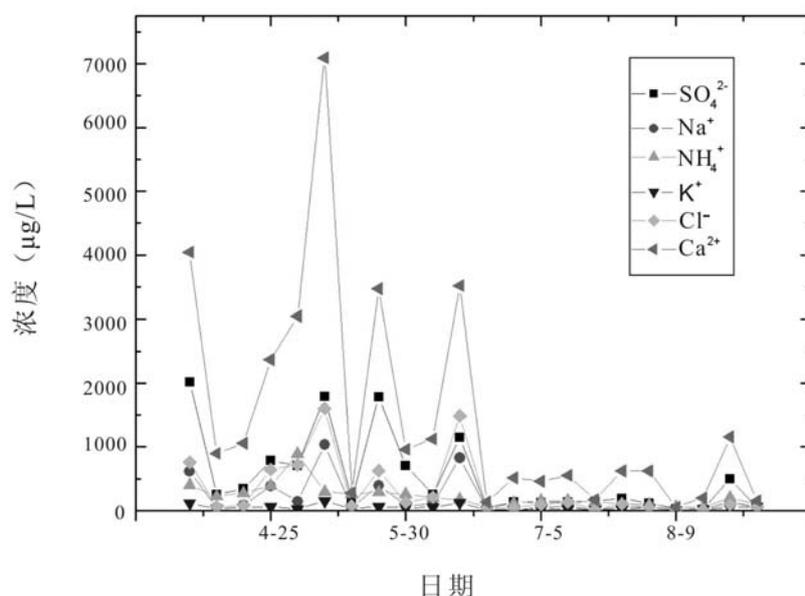


图 5.5 表层雪内粉尘 6 种特征离子的 4~8 月浓度变化

Figure 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 4-10 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, 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

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 2004 年 4 月-2005 年 4 月表层积雪中各种化学离子和粉尘浓度随时间变化表现出的季节性特点。如图, 各种主要化学离子的浓度都表现出明显的季节差异。主要的阴离子(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 表现出在春夏季节的高浓度, 即使是降水较多的 8 月份亦是如此, 说明了可能存在降水对阴离子的较大贡献; 而主要阳离子(Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} 等) 则表现为春季的浓度峰值, 这些峰值与粉尘浓度峰值的发生在时间上有着很好的对应性, 其浓度在春季很高, 而夏季迅速下降, 变得很低, 说明了降水作用对于粉尘活动的抑制和阳离子输入的减少。尽管如此, 主要阴阳离子在春季都表现出的高浓度值, 明显地说明了处于中亚沙尘活动区的乌鲁木齐河源冰川积雪化学特征受到了大气沙尘活动的重要贡献。

积雪中粉尘与重金属元素之间存在密切的关系。积雪中痕量金属的季节变化表明^[134], 所有金属的浓度(包括 Pb , Al , Cd , Zn , Fe 等) 都表现出在秋季逐渐升高, 冬季出现峰值。这种现象正好与研究区周边的人类活动同时期释放的污染物增加是一致的, 盛行的山谷风可以把污染物带到冰川区; 且同时期西风漂流强盛, 可以把中亚地区的污染物质携带到天山山区。夏季期间降水增加, 人类活动污染物如燃煤取暖等的量在减少, 积雪中的重金属含量亦减小。这表明, 乌鲁木齐河源 1 号冰川化学输入受到周边的人为污染影响存在, 尤其是在冬季, 对积

雪化学特征有重要的影响。值得注意的是，在 1 月份样品中金属浓度都比较低，这种状况在中亚其他地区冰川积雪的研究中也有发现，例如，帕米尔 Alai 山脉的 Abramov 冰川。这可能是由于其他因素造成的，如 1 月份冷空气强盛时期造成的风速增大，从而影响了区域大气中的污染物浓度。尽管如此，对于这种现象具体的原因及其发生过程，有待于更加深入的研究验证。

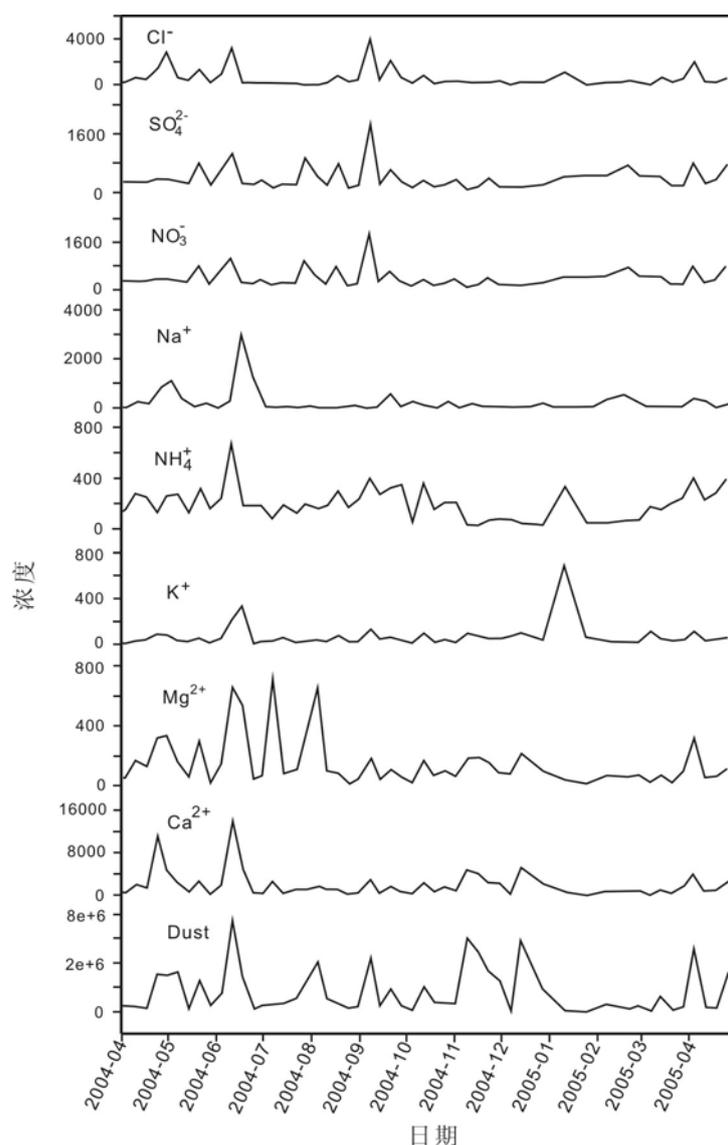


图 5.6 2004 年 4 月-2005 年 4 月表层积雪离子 ($\mu\text{g/L}$) 和粉尘浓度 (个/mL) 季节变化
Figure 5.6 Temporal variations of ionic and dust concentrations in surface snow samples

图 5.7 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 5.7(a)和(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 5.7(c)和(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。

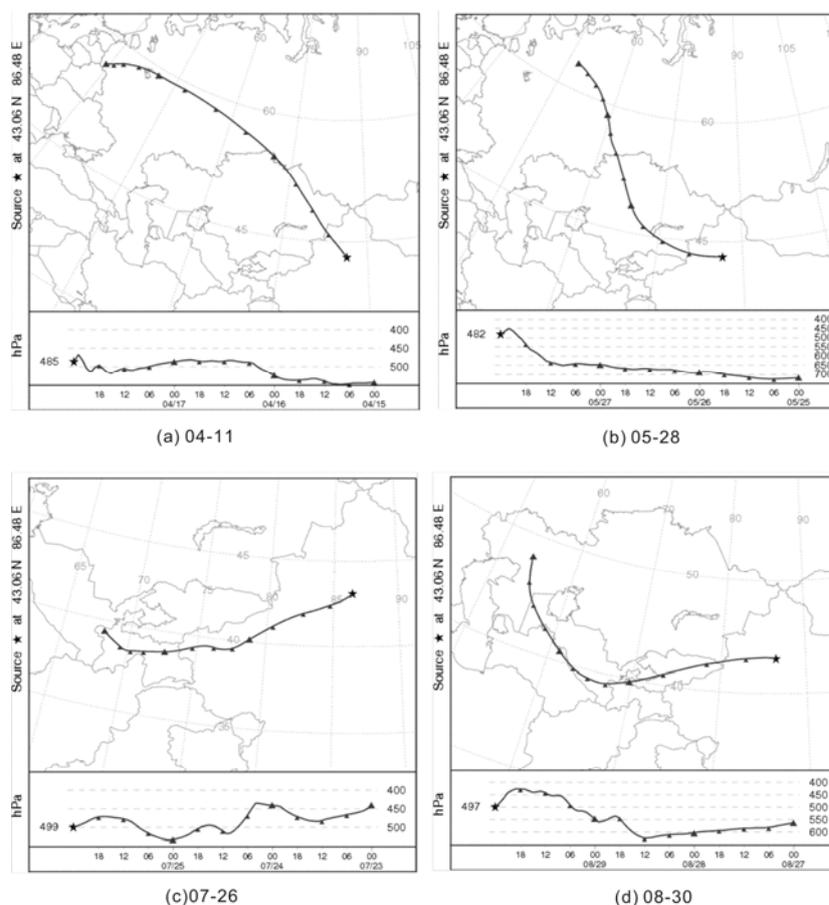


图 5.7 研究区沙尘与非沙尘活动季节的气溶胶粉尘传输 3 d 后向轨迹分析

Figure 5.7 Backward trajectory of aerosol transport process in the Urumqi glacier No.1

总之, 通过本文的研究发现, 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, 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 ($3\sim 21\ \mu\text{m}$), 到沙尘活动期间的复杂模式 ($3\sim 21\ \mu\text{m}$ 和 $20\sim 80\ \mu\text{m}$ 组成), 再到非沙尘季节的单一模式

(3~21 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 高海拔冰川区与低山郊区降水中粉尘特征比较

由第一章的研究进展可知,大气中的粉尘气溶胶研究、尤其是降水中粉尘的研究主要在样品较为容易采集的城市及其周边地区,对于中亚地区山区、尤其是高海拔的冰川区的降水中粉尘的特征及其季节变化特征的研究显得很少。大气中的粉尘颗粒物在大气环境中起着十分重要的作用,而且,成云海拔高度的大气粉尘颗粒能够形成凝结核,对大气降水的形成有着重要的作用。降水中的粉尘信息可以直接反映当时的大气环境状况。已有许多研究探讨了不同地区大气和降水中粉尘颗粒的特征,取得了重要进展^[150,152]。尽管如此,对于天山山区不同海拔带降水中粉尘颗粒物特征的研究则显得比较缺乏。降水的颗粒物浓度和颗粒大小都对降水的水质有着重要的影响。而且,降水中的粉尘物质还会给生物带来营养物质,影响着地球表面的岩石圈、大气圈、生物圈和水圈之间的物质迁移转化。我国境内的天山山脉,位于亚洲粉尘活动的源区范围内,对于天山山区不同海拔降水中粉尘颗粒特性进行研究,可以了解该区的大气降水粉尘颗粒的季节变化特征,以及不同海拔取样点受局地环境影响的差异,进而完善对于山区不同海拔带降水过程机理和内在特性的认识。例如, Veyseyre et al.研究了法国阿尔卑斯山 Chamonix 和 Maurienne 山谷中不同海拔带新雪中重金属的组成及特征,发现了不同海拔带存在明显的差异性^[153],表明了局地环境对新雪中成分具有重要的影响。本文主要研究天山乌鲁木齐河流域高山区和低山近郊区两个站点降水中粉尘颗粒物的浓度、化学离子组成和粒径分布状况等特征及其在两个点之间的差异及其受局地环境的影响。2003年4月~2004年6月,在天山乌鲁木齐河流域不同海拔高度进行连续的降水样品采集。取样时间是一个完整的降水过程,高山区、低海拔两站的取样时间同步进行,包括了降雪和降雨样品,其中10月至次年5月份为降雪。高山区降水样品采集在天山冰川站高山站附近的观测场获取,取样点海拔3600 m;共取得90个降水样品,其中38个降雪样品。低海拔的郊区降水样品在位于后峡镇的天山冰川站基本站旁边采集,海拔2100 m,周围有水泥厂、电厂等人类生产活动,属于乌鲁木齐市的郊区范围内;共取得降水样品88个,其中29个降雪样品。每个降水样品采集量均大于50 mL,共计178个降水样品。同时,本研究运用后向气团轨迹分析法检验到达取样点的水汽及粉尘颗粒物的传

输路径和过程，分析基于 HYSPLIT 4 (hybird single-particle lagrangian integrated trajectory) 模型；同时，使用该模型的后向扩散模型来验证低山郊区取样点降水中粉尘颗粒物受到人类活动污染物的影响和来源。

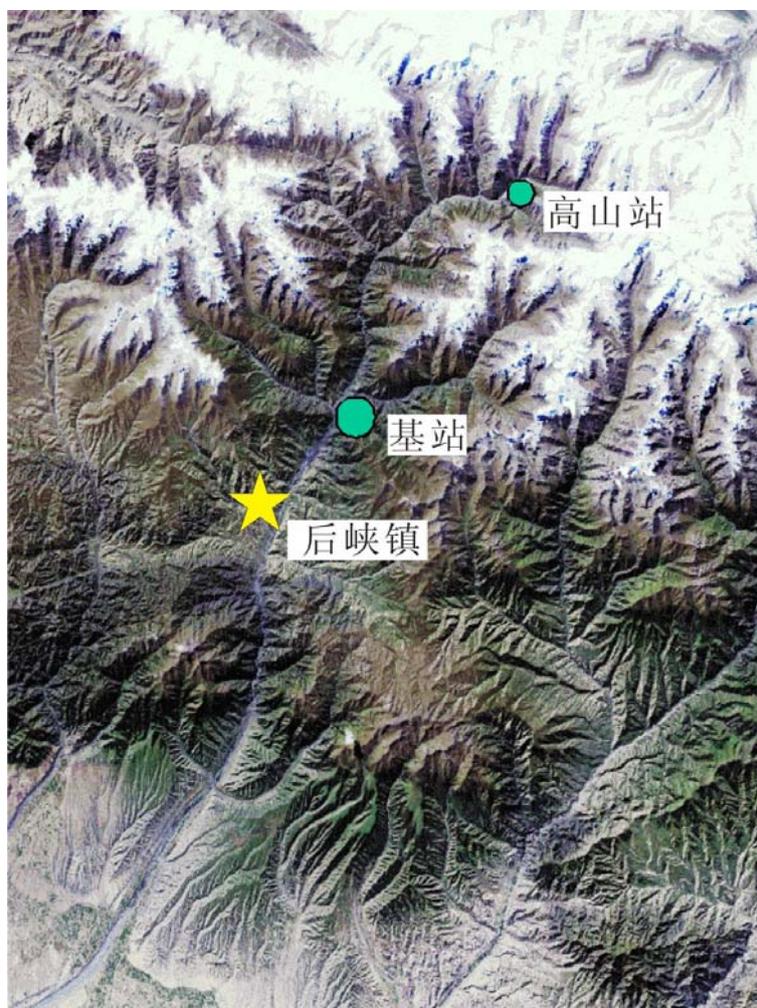


图 6.1 天山乌鲁木齐河流域及采样点位置

Figure 6.1 Location of sampling sites on the Urumqi River in Tianshan Mountains

6.1 粉尘颗粒浓度及其季节变化的比较

图 6.2 显示了 2003 年 4 月~2004 年 6 月沿乌鲁木齐河在天山高山区和郊区两个取样点的降水量随时间的变化。从图 2 中发现，无论是在天山山区的高山区(河源冰川区)，还是在低山郊区，降水量随时间的变化都表现为冬-春季较少，而夏-秋季节较多的特点。降水量主要集中在 6-8 月份，降水事件的发生在这个时期最多。到了 9 月份降水量开始减少，尤其在冬季降水量显得很少，直至次年 5 月降水量再次开始增加。而且在两个取样点，降水量的大小基本一致，而且两个

取样点所在的天山冰川站高山站和基本站,都位于乌鲁木齐河流域的两个降水量较多的垂直带上。同时,由于高山区取样点位于乌鲁木齐河源冰川区,反映了冰川区的降水状况,连续的观测取样资料对于冰川区降水的季节及时间变化提供很好的认识。两个点降水量随时间和季节变化趋势基本一致,最大降水量的出现时间也很一致,后峡基本站(39.0 mm)和高山站(40.2 mm)均为2003年7月14日(图6.2)。

表6.1显示了乌鲁木齐河流域两个取样点降水中(包括降雪和降雨)粉尘数量和质量浓度,及其与天山和北半球其它类似研究的比较。本研究降水中与天山、以及日本馆山等冰川积雪样品中获得的粉尘浓度有着很大的相似性^[22];然而,与遥远的北极加拿大地区的研究结果相比^[42],有着很大的差异性,其值远大于北极地区的浓度。这可能是由于天山山区处于亚洲粉尘源区,粉尘活动对山区降水中的粉尘含量起到了至关重要的影响。

表 6.1 乌鲁木齐河流域采样点降雪和降水中粉尘浓度及其与北半球其它区域的比较
Table 6.1 Dust concentration in snow and rain at AS and BS in the Urumqi River Valley and at various sites in northern hemisphere

研究点	海拔 (m)	样品	时间	浓度			资料来源
				粒径	数量 (10 ³ /mL)	质量 (μg/kg)	
高山区	3600	Snow and rain	2003~2004	0.57~100	377	1563	本研究
郊区	2130	Snow and rain	2003~2004	0.57~100	227	1962	
青冰滩 72 号冰川	4600	snow	2007~!2008	0.57~26 1~26	706 384	3806 1678	本研究
乌鲁木齐河源 1 号冰川	4130	Snow	2002~2005	0.57~26 1~26	242 100	1442 666	本研究
哈希勒根 51 号冰川	3900	Snow-pit	2002~2005	0.57~26 1~26	166 74	969 436	本研究
庙儿沟平顶冰川	4510	Snow-pit	2002~2005	0.57~26 1~26	222 94	3690 1016	本研究
Tateyama (日本)	2450	snow	1997~2002	0.1~600			文献[22]
Penny Ice Cap (北极加拿大)	1980	snow	1988~1994	0.65~12 1~12	31.6 13.7	143 129	文献[42]

图 6.3 说明了高山区和郊区两个取样点降水中粉尘颗粒浓度随时间的变化。其中图 (a) 为高山区的及降水粉尘浓度变化特征, (b) 为郊区降水中粉尘浓度

的季节变化特征。从图中可以看出，粉尘浓度在两个取样点都表现出明显的季节变化特征：冬-春季节浓度高，夏-秋季节浓度低。这可能是由于中亚内陆春季期间频发的大气沙尘活动造成的。在中亚地区春季期间发生的沙尘暴能够将大量的粉尘颗粒物悬浮到大气中，随着大气传输到天山山区，并且在不同海拔的地区进行分选和沉降，当降水事件发生的时候，便随降水淋洗而沉降，因而春季降水中其浓度表现的较高；到了夏-秋季节，随着沙尘活动的减少，以及降水事件的频发及降水量的不断增多，大气中的粉尘颗粒物被淋洗干净了，因而降水中粉尘颗粒物浓度降低。这与图 6.2 所反映的降水量变化有着很好的关系，也反映了大气降水的颗粒物受中亚地区沙尘活动和降水季节变化明显等环境特征的影响十分明显。尽管如此，值得注意的是，在 2003 年 9-10 月份，低海拔郊区取样点的降水中粉尘颗粒浓度显得还是比较高（图 6.3b），结合位于郊区的天山冰川站基本站取样点的位置，位于周围水泥厂和电厂等污染物排放影响的环境下，造成了秋季粉尘颗粒物（尤其是细颗粒）浓度的升高。

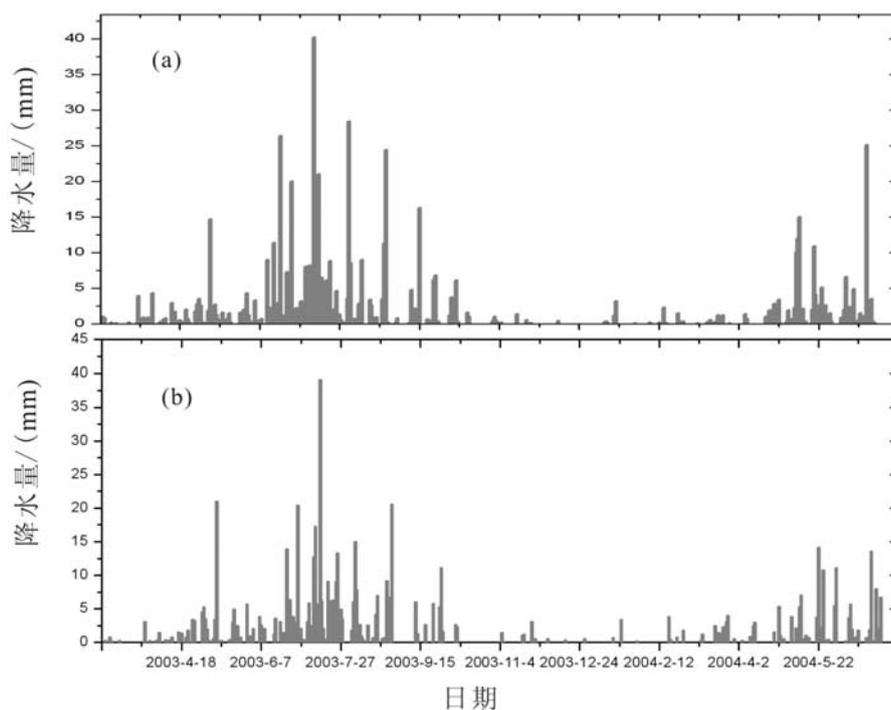


图 6.2 高山和基站降水量比较 (a) 高山 (b) 基站

Figure 6.2 Seasonal variation of precipitation from two sites

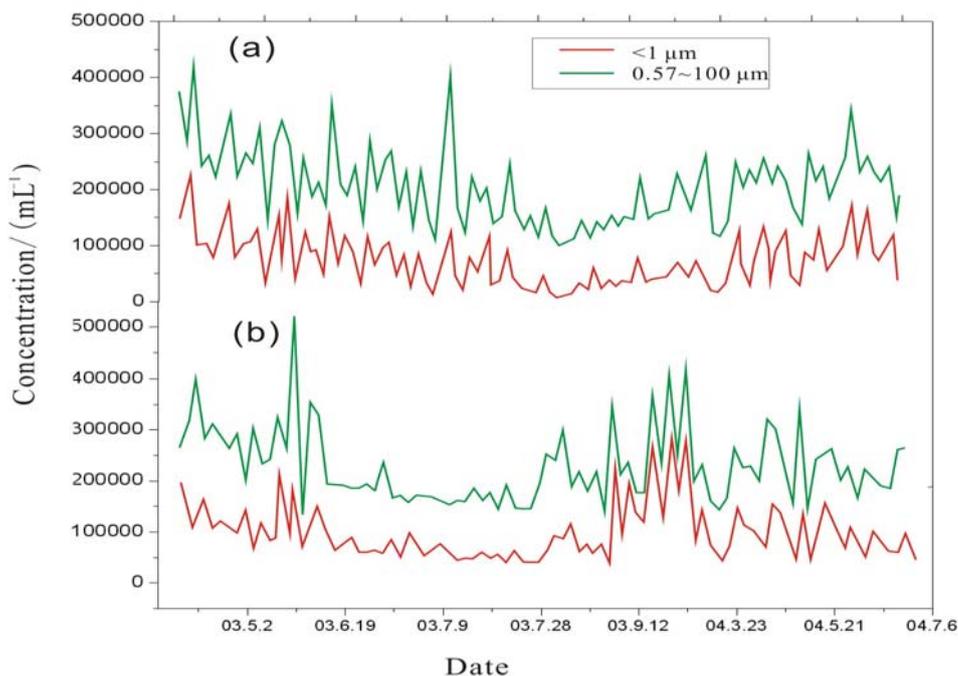


图 6.3 降水中粉尘颗粒浓度季节变化比较：(a) 高山区；(b) 郊区

Figure 6.3 Variation of mineral dust particles concentration: (a) alpine station; (b) rural station

6.2 粉尘粒径分布及季节变化

图 6.4 是乌鲁木齐河流域高山区降水中粉尘颗粒的体积-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。图 6.5 是对不同海拔两个采样点粉尘颗粒的体积-粒径分布的随时间变化的比较，粒径分布来自于所有样品粒径平均分布状况。高山区大气降水中粉尘颗粒体积分布的粒径众数介于 $3\sim 21 \mu\text{m}$ ，低海拔郊区粒径众数为 $3\sim 23 \mu\text{m}$ ，郊区粒径众数略大于山区；粉尘颗粒物的体积-粒径分布结构都表现为一种单一模式。体积粒径分布与降水事件发生时的大气环境状况有密切关系。由图 6.5，高山区和郊区降水中颗粒粒径分布都有明显的季节变化特征，而且两个取样点之间存在一定的差异。高山区和低海拔区粉尘的体积粒径分布众数都表现为冬-春季最大，夏-秋季较小，这种分布的变化也可以用体积粒径分布的参数来进行表示，如表 6.2 所示，高山区的平均粒径分布众数为，冬-春季为 $15.2 \mu\text{m}$ ，夏季为 $12.4 \mu\text{m}$ ，秋季为 $11.5 \mu\text{m}$ ；而低山区的郊区为冬-春季为 $16.5 \mu\text{m}$ ，夏季为 $13.2 \mu\text{m}$ ，秋季为 $10.8 \mu\text{m}$ 。对应的质量浓度为，高山区冬-春季为 $1860 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，夏季为 $1368 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，秋季为 $1206 \mu\text{g}/\text{kg}$ ；低山区的郊区为冬-春季为 $2180 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，夏季为 $1679 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，秋季为 $1724 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，表现出了冬

-春季期间的明显高值；而且，也反映出低山区的降水粉尘颗粒质量浓度在各个季节都要高于高山区的浓度，说明降水颗粒物的海拔影响效应，即随着海拔升高，在大气传输作用中，粉尘颗粒的浓度还是有所降低。粒径众数和粉尘浓度的这种季节差异，说明降水中的粉尘颗粒在春季大颗粒较多，而在夏季颗粒较小，颗粒的大小和质量浓度对于降水的产出过程有着重要的影响，如直接影响降水发生时的凝结核作用，这也反映了春季期间沙尘活动对于大气降水特性的影响明显。

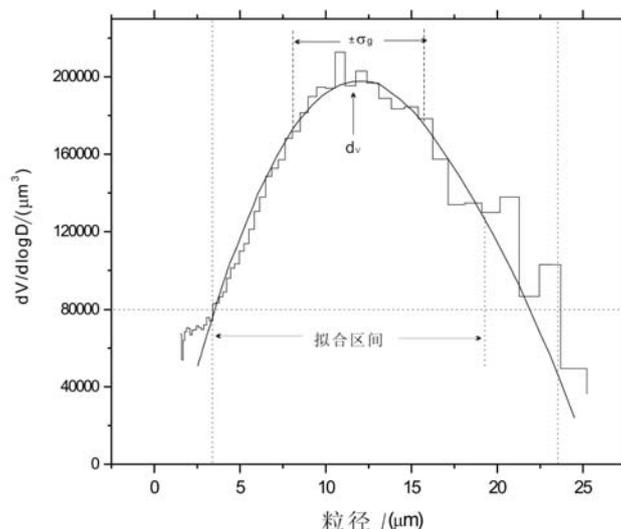


图 6.4 乌鲁木齐河高山区降水中微粒的体积-粒径对数分布例子。图中折线表示计算得到的体积粒径对数分布，平滑曲线表示多项式拟合曲线

Figure 6.4 Characteristics of volume- size distribution of dust particles in precipitation obtained from the alpine site, d_v is the mode of distribution, Fold -line indicates the Volume-size distribution, Flat-line shows normal regression distribution

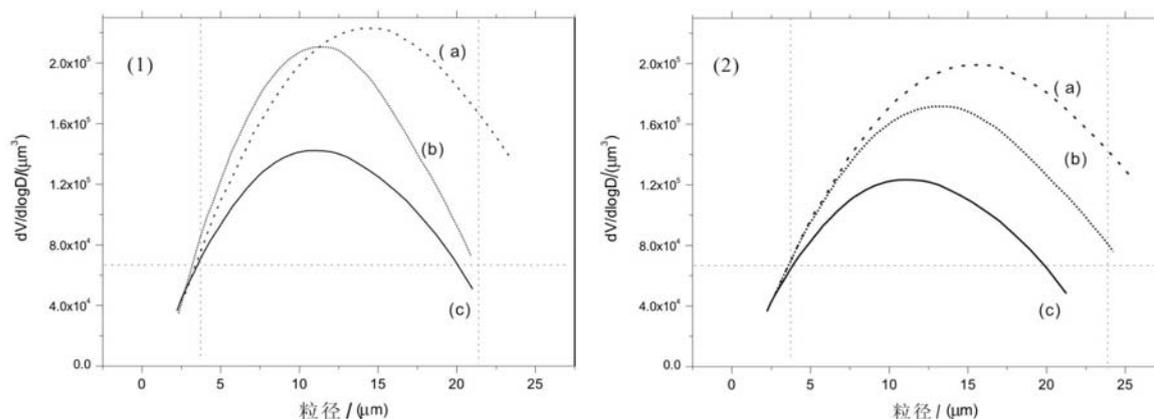


图 6.5 粒径分布的四季变化 (1) 高山 (2) 基站；图中(a)为冬-春季节平均分布；(b)夏季 (c) 秋季

Figure 6.5 Comparison of volume- size distribution and seasonal change at two sites in Urumqi river valley

表 6.2 图 6.5 中降水粉尘颗粒的浓度和体积粒径分布参数的季节变化比较

Table 6.2 Concentration and volume-size distribution of dust in Urumqi river valley of Tianshan Mountains

分布	采样时间	n	M ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	dv(μm)	σ g(μm)
高山区	冬-春季	23	1860	15.2	9.8
	夏季	54	1368	12.4	10.6
	秋季	13	1206	11.5	8.6
郊区	冬-春季	32	2180	16.5	8.9
	夏季	50	1679	13.2	10.1
	秋季	6	1724	10.8	9.2

注：表中 n 为样品数，dv 为粒径分布正太曲线拟合后得到的中值粒径， σ g 为标准偏差。

图 6.6 说明了天山乌鲁木齐河高山取样点 2003-2004 年盛行风速（NE 和 NNE）的变化。反映了研究区在春季期间有着较大的平均风速，由于研究区处于中亚沙尘源区，周边到处是荒漠和戈壁分布，风速的变化与沙尘活动有着密切的关系，随着风速的增大，会带来大量的浮尘扬起，并在周边区域随着气团的移动进行传输，最终在天山山脉的大气降水事件发生时沉降，表现出降水粉尘颗粒物质的粒径分布众数和质量浓度都有着明显的季节变化，降水颗粒物的粒径众数和质量浓度在冬-春季增大，而在夏-秋季减小。从而验证了中亚地区大气环境的影响对于降水特性的明显影响。

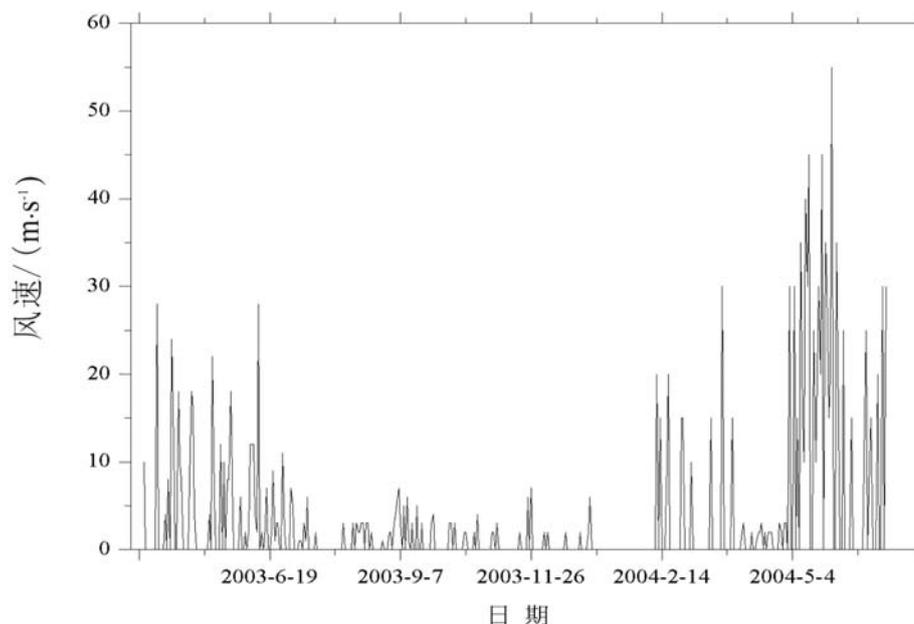


图 6.6 高山区 2003-2004 年降水取样时期的盛行风速随时间变化

Figure 6.6 Wind speeds of high sites in Urumqi river valley in Tianshan Mountains during the year 2003 to 2004

6.3 粉尘化学离子组成及其环境影响

表 6.3 显示了乌鲁木齐河流域高山站和基站降水中主要阴阳离子浓度、pH 值、电导率浓度，及其与全球不同区域类似研究结果比较。乌鲁木齐河流域的降水中 pH 值和离子浓度，与我国大多数酸雨较多的工业化城市地区相比显得相对较高^[154-159]。与全球其他地区相比，如美国东北部、欧洲中部，以及相邻国家如日本、韩国等的城市，本研究的 pH 值和离子浓度也显得相对较高^[160-165]。同时发现，天山降水中 Ca^{2+} 是最主要的离子，其浓度远大于其它阴阳离子的浓度。这可能意味着乌鲁木齐河谷中的降水收到了严重粉尘源区的严重影响，大量的粉尘颗粒物随降水沉降在天山山区。

图 6.7 显示了高山区和郊区取样点降水中的典型粉尘特征离子组分的浓度变化。总体上，两个取样点降水中粉尘颗粒化学组成表现出一定的季节变化，而在低山区这种季节变化显得更加明显，表现出春季期间的高值和夏季的低值。 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度表现出明显季节变化特点，与大气沙尘活动存在很好的一致性关系，3-5 月份的春季沙尘活动季节其浓度很高，而在 7~10 月的夏-秋季节浓度降为很低，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降水中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 3~6 月份春季期间浓度表现很高，这与粉尘颗粒数量浓度随时间的变化一致（如图 6.3）。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^+ 浓度季节变化微弱，与该区大气粉尘活动关系好像较小。

表 6.4 说明了降水中粉尘颗粒化学离子浓度和其他化学要素之间如 pH 和电导率等的相关系数比较，可以发现这大多数离子之间的相关性较好。研究显示，大气降水粉尘颗粒中的 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，与氨气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。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，在降水事件发生时沉降下来。此外，研究表明，中亚粉尘源区粉尘中的 Na^+ 与 Ca^{2+} 有着

表 6.3 天山降水中主要离子浓度和 pH、电导率以及与其他地区研究的比较

Table 6.3 Concentrations of major ions ($\mu\text{g/L}$) and pH, EC in precipitation at various sites in the world

化学要素	pH	EC	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	资料来源
平均值	6.99	26.98	20.95	14.11	75.46	28.77	220.31	25.97	4.62	28.89	
最大值	7.55	32.46	266.73	80.75	413.6	120.89	1150.5	131.65	26.94	261.5	本研究
最小值	6.75	15.98	1.52	nd	3.21	nd	6.17	1.12	0.39	1.47	(高山站)
标准偏差	6.24		38.7	13.79	70.51	19.81	235.62	28.54	3.89	43.03	
平均值	7.27	35.53	15.89	31.72	106.86	23.21	432.15	56.07	8.24	16.3	
最大值	8.09	24.43	75.68	405.3	457.76	79.17	1624.74	226.89	40.27	54.5	本研究
最小值	7.15	133.69	75.68	nd	9.0	nd	43.18	4.39	0.9	0.9	(基站)
标准偏差			15.47	58.63	97.22	18.63	380.82	46.86	7.8	14.4	
乌鲁木齐	6.86	91.04	106.5	26.3	297.9	67.7	239.5	49.2	18.97	45.7	文献[154]
瓦里关	6.38	14.58	6.1	8.3	24	45.5	34	12.1	3.8	8.7	文献[158]
拉萨	7.5	25.6	9.7	6.9	5.2	14.3	197.4	10.9	5.14	11.2	文献[156]
格尔木和西宁	6.86	-	48.8	48.1	84.0	160.6	314.31	37.9	69.2	96.6	文献[157]
深圳	5.02	-	37.9	22.1	74.3	35.2	77.7	9.7	7.2	40.3	文献[158]
南京	5.15	-	142.6	39.6	241.8	193.2	295.4	31.7	12.1	23.0	文献[159]
北京	6.01	-	31.5	84.1	248.9	234.0	191.2	33.8	12.0	16.3	文献[158]
香港	4.55	-	37.6	18.9	48.6	-	15.3	7.8	2.2	31.8	文献[155]
东京	4.52	-	55.2	30.5	50.2	40.4	24.9	11.5	2.9	37.0	文献[163]
首尔	4.70	-	18.2	29.9	70.9	66.4	34.9	6.9	3.5	10.5	文献[162]
Tirupati, India	6.80	-	33.9	40.8	128.0	20.4	150.7	55.5	33.9	33.1	文献[164]
Adirondack, NY	4.50	--	2.14	22.6	36.9	10.5	3.59	0.99	0.33	1.61	文献[161]
Ankara, Turkey	6.30	--	20.4	29.2	48.0	86.4	71.4	9.3	9.8	15.6	文献[158]
Sardinia, Italy	5.18	--	322	29	90	25	70	77	17	252	文献[160]

很好的一致性，二者相关系数很高（表 6.4），如图 6.7 所示，降水中的 Na⁺浓度季节变化表现出冬春沙尘频发季节（1~5 月）和夏秋的非沙尘季节（6~9 月）有明显不同，说明粉尘颗粒带来了大量的中亚地区矿物盐类。值得指出的是，在 2003 年-2004 年的随时间变化中，高山区反映出 2003 年春季期间的粉尘化学浓度较高（尤其是 Ca²⁺），而在低山区表现为 2004 年春季期间化学浓度值较高（图 6.7）；由于研究点基本处于同一研究区的不同海拔带，总体环境基本一致，造成这种差异的原因可能是由于海拔高度效应造成的，随着海拔升高，局地环境的差异，造成了降水中粉尘颗粒物浓度和化学组分的季节变化差异。

2003-2004 年取样点 pH 值和电导率随时间的变化特征明显 (图 6.8)。降水的 pH 和电导率反映了降水的酸碱性以及总体化学离子状况, 可以说明降水化学特性及降水发生的大气环境状况。研究结果表明, pH 值和电导率有着明显的季节变化, 而且与粉尘活动有着较好的一致性, 即沙尘频发的春季期间 pH 值和电导率都表现出较高的值 (图 6.8), 而在降水量增加的夏秋季节 (图 6.2), 表现出较低值。从海拔上看, 在高山区和低山区都表现出这种变化特点, 且低山区的这种变化更为明显。已有研究表明, 降水中的 pH 值和电导率与降水化学有着密切的关系。由于春季降水受到沙尘颗粒物影响严重, 而降水 pH 值和电导率与粉尘浓度之间有很好的相关关系 (表 6.4), 因而是粉尘活动造成了降水中 pH 值和电导率的变化。这也说明了周边大气环境对于降水中粉尘颗粒物和化学特征的明显影响。

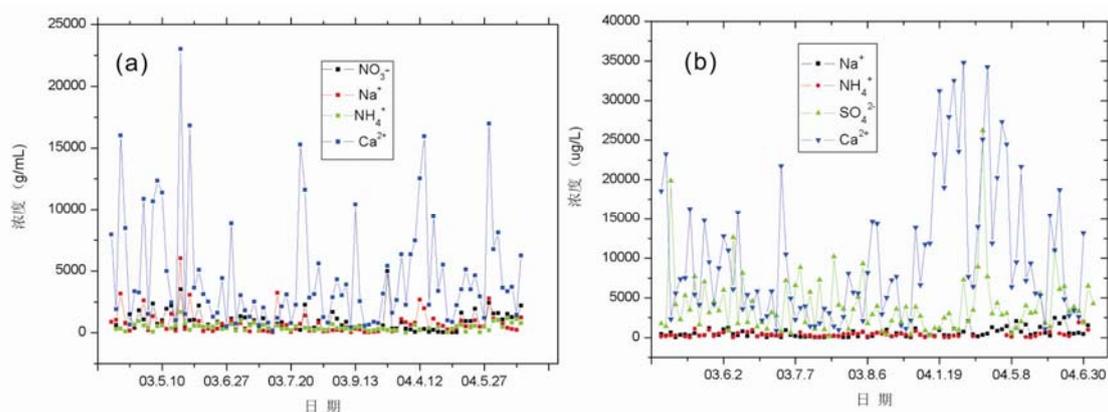


图 6.7 降水中粉尘化学特征随时间的变化. (a) 高山区; (b) 郊区

Figure 6.7 Chemical constituents variation in two sites of Urmqi river valley: a) alpine sites; b) rural sites

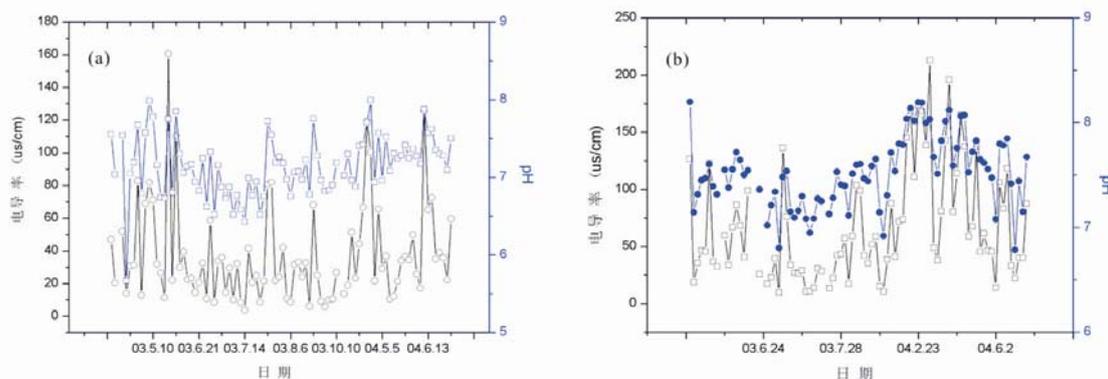


图 6.8 降水 pH 值和电导率的季节变化. (a) 高山区, (b) 郊区

Figure 6.8 Temporal variations of pH and ECM in sampling sites. (a) alpine site; (b) rural site

表 6.4 降水化学离子及粉尘相关系数，下三角黑体表示高山区 (N=65, $p<0.05$);
上三角表示郊区 (N=63, $p<0.05$)

Table 6.4 Coefficient of dust concentration and major ions at alpine site and rural site

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	Dust
Cl ⁻	-	0.388	0.264	0.942	0.266	0.604	0.41	0.319	0.406	0.16
SO ₄ ²⁻	0.643	-	0.477	0.536	0.083	0.579	0.813	0.851	0.709	0.64
NO ₃ ⁻	0.417	0.53	-	0.397	-0.072	0.27	0.281	0.351	0.116	0.23
Na ⁺	0.891	0.775	0.432	-	0.194	0.777	0.542	0.475	0.522	0.78
NH ₄ ⁺	0.519	0.43	0.323	0.51	-	0.302	-0.197	-0.20	-0.108	0.65
K ⁺	0.277	0.462	0.215	0.338	0.329	-	0.469	0.518	0.545	0.43
Mg ²⁺	0.745	0.594	0.451	0.716	0.269	0.329	-	0.892	0.825	0.55
Ca ²⁺	0.738	0.645	0.417	0.697	0.222	0.502	0.883	-	0.893	0.86
pH	0.439	0.445	0.263	0.434	0.26	0.522	0.743	0.803	-	0.52
Dust	0.16	0.64	0.23	0.78	0.65	0.43	0.55	0.86	0.52	-

6.4 气团后向轨迹分析

为进一步验证并探讨乌鲁木齐河流域大气粉尘整体的来源,利用美国国家海洋大气局大气资源实验室 (NOAA Air Resources Laboratory) 提供的 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 气团轨迹模型,结合美国国家环境预报中心 NCEP/NCAR I (CDC-I) 气象数据库提供的全球再分析格点 (2.5°×2.5°) 数据对该区气团后向轨迹进行了模拟。

结合 Hysplit 4 后向轨迹分析法,验证了高山区和郊区水汽和粉尘的来源(图 6.9 和 6.10),其原理基于美国 NOAA 卫星的气象观测资料。尽管两个取样点的海拔差异很大(低山区 2100 m 和高山区 3600 m),然而大气气团来源的后向轨迹显示大气传输过程和路径总体上有着较好的一致性,尤其是在沙尘发生后的降水时期,如图 6.9 所示为代表性示例。尽管如此,由于郊区取样点位于乌鲁木齐市的郊区范围,人类生产活动和污染物存在,对于低山区降水中的粉尘颗粒物来源和特性必然产生影响。图 6.10 是结合 Hysplit 4 的郊区采样点大气颗粒物后向扩散模型,郊区站点 9 月受到的大气降水中局地颗粒物来源进行后向路径分析。结果显示,郊区的基站取样点受到了一个很大的局地源的影响,位于取样点西北方向约 100 km,联系其地理位置和周边人文环境分析,可以推断,应该是乌鲁木齐市、昌吉市等工业生产(石油冶炼等)污染颗粒物排放的影响^[166,167],表明郊区降水中的粉尘颗粒物受到了城市人类生产活动污染物等颗粒物排放的影响十

分明显。

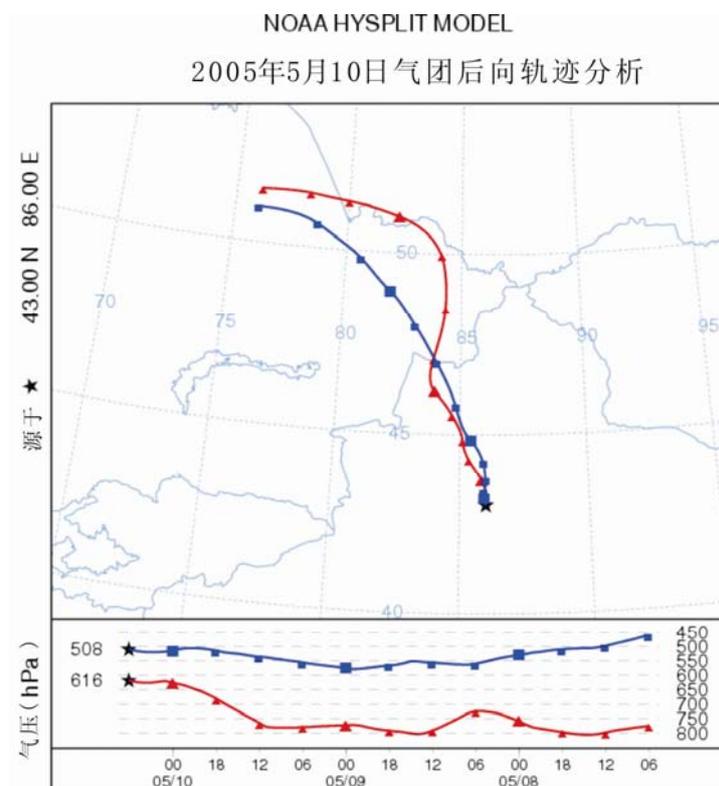


图 6.9 研究区取样点降水发生时期典型后向气团轨迹分析

Figure 6.9 Backward trajectory of air mass to both sites

为进一步验证并探讨研究区降水中大气粉尘整体的来源，对该区高山站冰川区粉尘来源进行聚类分析，因为高山区与郊区不同，海拔高，距离城市污染源较远，应分析气团来源确定受区域环境的影响。以乌鲁木齐河源高山站样品的采集点作为气团运行的终点，使用 HYSPLIT 4.8 模型对 2007 年到达该采样点的气团轨迹进行了模拟，并使用聚类平均法模拟计算了到达该采样点的平均气团轨迹。其中分别以每天 4 个时间，即：00:00、06:00、12:00 和 18:00 (UTC) 作为气团运行的终点；以高于模型地面 2700 m (AGL) 的高度作为轨迹运行终点的高度。NCEP/NCAR I (CDC-I) 气象数据库提供的全球再分析格点 ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) 数据资料来源于 NOAA 网站 (<http://www.arl.noaa.gov/>)。模型中整套聚类工具用于计算聚类轨迹空间方差之和的百分比变化并计算所有轨迹的平均气团轨迹。

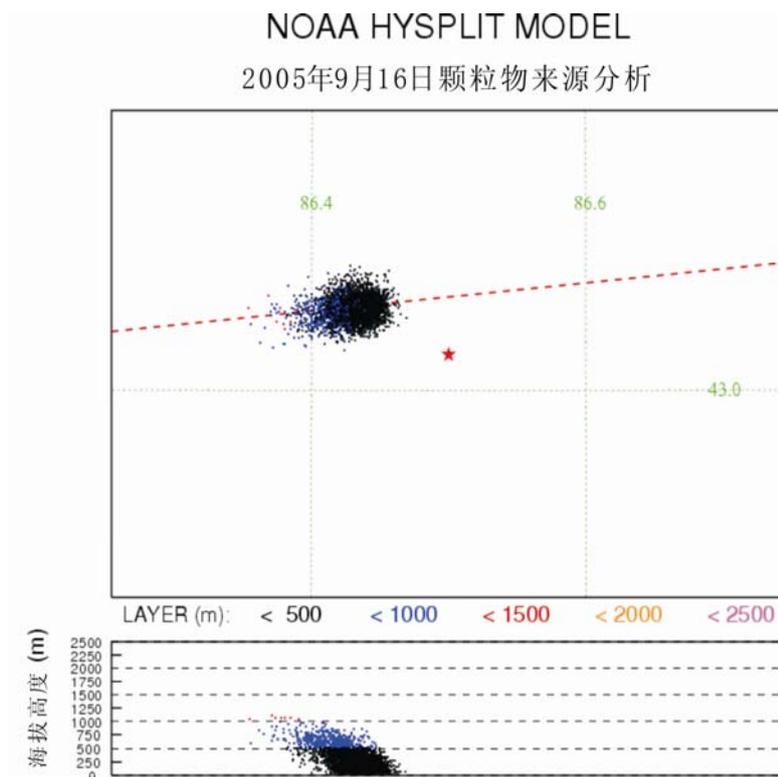


图 6.10 郊区降水中粉尘颗粒物后向扩散来源分析

Figure 6.10 Backward analyses of particles from rural site

全年 1460 条气团轨迹使用 HYSPLIT 进行聚类平均后的结果如图 6.11 所示，2007 年间到达乌鲁木齐河源采样点的气团轨迹主要分为 3 类。第一类气团轨迹 (T₁) 占全年总条数的 33.6%，该气团源自于哈萨克斯坦的干旱地区，经近地面由伊犁河谷进入并影响乌鲁木齐河源上空；第二类气团轨迹 (T₂) 占全年总条数的 25.6%，该气团主要源自于俄罗斯的西伯利亚，经过乌拉尔山南部以及哈萨克斯坦，通过阿拉山口或伊犁河谷等山口进入并影响乌鲁木齐河源上空，这支气流主要在高空平流层内传输，代表的为高空远距离传输的气团；第三类气团轨迹 (T₃) 占全年总条数的 40.8%，其主要受西风带纬向环流的影响，为一些起源于地中海、黑海、里海和中亚地区的远距离传输的气团。由此可以看出，尽管到达乌鲁木齐河源冰川区的气团轨迹有着不同的源区，但是它们主要都来自于西面以及西北方向，与此地盛行的西风环流比较吻合，且所有气团轨迹都经过中亚干旱半干旱地区，乌鲁木齐河源冰川区大气气溶胶中大量的矿物颗粒可能主要归因于经过这些沙尘源区的气团。Aizen et al. 对天山地区气象过程的研究也曾发现^[6]，到达天山山脉的气团主要来自于西面，并认为西面吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、

土库曼斯坦和乌兹别克斯坦等地区的气溶胶颗粒极易在西风环流的影响下传输至天山地区。图 6.11 中还给出了这三类气团轨迹 (T_1、T_2 和 T_3) 在全年 12 个月中的数量分布情况。第三类气团轨迹 (T_3) 较其他两类气团在冬春季都占有明显的优势,这与天山地区冬春季盛行西风环流有着密切的关系。而第一类气团轨迹 (T_1) 则在 6~10 月份之间较为盛行,表明在这之间有大量的沙尘颗粒从哈萨克斯坦的干旱地区输入至 1 号冰川区,这也与气溶胶颗粒数浓度在秋季出现较高值比较吻合。以上结果表明,高山冰川区主要受中亚粉尘源区的自然环境影响,受区域和周边人类活动的污染显得很小。

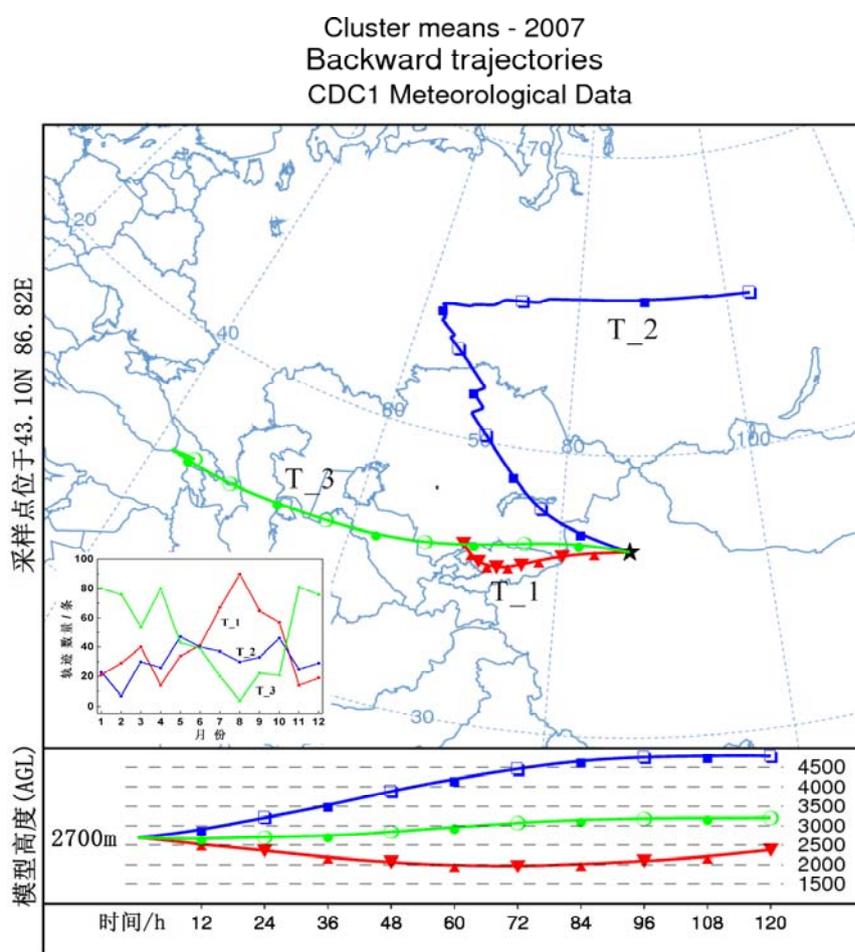


图 6.11 乌鲁木齐河流域高山冰川区气团轨迹聚类分析图

Figure 6.11 Cluster of backward trajectories of air mass in Urumqi River source

总之,本章通过在天山乌鲁木齐河流域高山区和低山郊区两个站点进行降水样品的连续采集和分析,对山区降水中粉尘颗粒物化学特征在高山区和郊区的差异及其季节变化特征进行对比研究。降水中粉尘颗粒物的浓度具有明显的季节变化特征。粉尘浓度变化表现为冬-春季节高,夏-秋季节较低,与降水量随时间变

化成反相关关系，反映了研究区环境特征和降水组分受中亚粉尘的影响明显。降水颗粒物冬-春季的体积-粒径分布众数较大，而在夏-秋季节相对较小；并且变化趋势在高山和郊区存在一定的差异性，可能是由于局地环境影响造成的。粉尘化学特征的季节变化表现出明显的季节变化，同时低山郊区由于所处的环境，反映了自然环境和人为活动对降水粉尘颗粒沉降的影响。结合气团的后向轨迹分析验证了降水和粉尘的来源，尽管两个取样点的海拔差异很大，然而水汽来源的后向轨迹显示传输过程和路径总体上有着较好的一致性，尤其是在沙尘发生后的降水时期；对郊区取样点颗粒物后向扩散分析表明，周边城市人类活动污染物也对大气降水中的颗粒物有重要的贡献。尽管如此，乌鲁木齐河源冰川区后向轨迹分析表明，该区域主要还是受到大环境的自然状况影响，如中亚粉尘等，人类活动污染对乌鲁木齐河流域的影响主要表现在郊区，对高山站冰川区的影响有限。

第七章 结论与展望

7.1 结论

本研究主要对中亚地区位于我国境内的天山山脉不同区域的典型冰川,包括乌鲁木齐河源 1 号冰川、奎屯哈希勒根 51 号冰川和 48 号冰川、托木尔峰青冰滩 72 号冰川、博格达峰四工河 4 号冰川和哈密庙尔沟平顶冰川积雪中粉尘沉降的特征进行研究。雪冰中粉尘微粒特征分析表明,随着研究点区域地理环境的变化,积雪中不溶微粒的质量浓度、沉积通量和体积粒径分布的众数都表现出空间上的变化和差异:奎屯哈希勒根 51 号冰川和 48 号冰川最小,乌鲁木齐河源 1 号冰川、博格达峰四工河 4 号冰川次之,托木尔峰青冰滩 72 号冰川其次(浓度最大,粒径较小),哈密庙尔沟平顶冰川最大。研究表明,哈密庙儿沟和托木尔峰冰川受周边粉尘源区(例如塔克拉玛干沙漠和戈壁等)影响较大,而乌鲁木齐河源区、博格达峰地区与奎屯河源区受影响则相对较小,说明了天山冰川中粉尘沉降存在很大的空间差异性和区域环境对于雪冰中粉尘沉降的明显影响。雪坑微粒浓度剖面 and 离子相关性分析表明,天山冰川积雪中的污化层富含亚洲粉尘的富 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 矿物;微粒体积—粒径分布众数介于 3~22 μm , 粒径分布显示了单结构模式。冰川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。总体上,天山冰川雪冰中粉尘的特征如浓度、粒径众数等都表现出自西向东的逐渐增加的趋势。然而,托木尔峰青冰滩 72 号冰川显得较为特殊,其浓度和粒径分布的大小仅次于哈密庙儿沟平顶冰川,而远大于其他几个点,尤其是该区雪冰中粉尘沉降年通量很大,这可能是由于其处于主要亚洲粉尘源区—塔克拉玛干沙漠的边缘,导致大量的粉尘传输到冰川区,而观测发现的该冰川近几年快速消融也可能与冰川表面粉尘的浓度很高影响有密切关系。而本研究结合 Hysplit 气团后向轨迹分析也验证了塔克拉玛干沙漠对托木尔峰青冰滩 72 号冰川区的影响。天山山区与全球其他区域研究相比,中亚内陆的慕士塔格、达索普冰川,以及日本中部馆山雪冰中的粉尘浓度和粒径都有较好的可比性和相似性;然而浓度和粒径分布远大于极地地区的 Penny 冰帽、Devon 冰帽等的研究结果。

季节变化是粉尘活动的重要特点,在中亚粉尘源区亦是如此,而由于野外条

件的限制和样品的不易获取,对高海拔冰川区雪冰中粉尘的季节变化研究目前尚属空白。本文通过冰川表层雪样的采集和连续密集的观测,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;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,另一方面, NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为可溶部分其浓度变化存在差异。同时,用后向气团轨迹分析模型 (HYSPLIT) 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。

以天山乌鲁木齐河流域为例,对高山冰川区和郊区降水中粉尘沉降随时间变化特征及其差异进行研究。结果表明,降水中粉尘颗粒物的浓度、粒径分布及化学要素组成在两个取样点都具有明显的季节变化。粉尘颗粒浓度表现为冬-春季节升高而夏-秋季节降低,与降水量成反向变化,反映了降水受中亚沙尘活动的影响明显。粉尘颗粒在冬-春季节的粒径分布众数较大,而在夏-秋季节相对较小;且这种变化在高山区和郊区存在差异,可能是局地环境影响造成。粉尘颗粒的化学特征的季节差异反映了区域自然环境和人为活动对降水的共同影响。与其它区域降雪中粉尘和化学特征进行了比较,反映了区域冰川区雪冰和降水中粉尘特征的相似性,降水中粉尘化学特征也表现出区域差异性、局地性,以及冰川区与我国不同地区城市周边特征的很大差异。并结合 HYSPLIT 模型对大气降水和粉尘颗粒的来源进行验证,结果表明粉尘一定程度上来源于中亚沙尘活动、局地粉尘以及人类活动。天山高山冰川区和低山区的明显差异也反映了冰川区的粉尘沉降的特殊性,表明了区域内粉尘沉降受局地环境的影响也较为明显。

总之,新疆天山冰川区雪冰中沉降的粉尘表现强烈的季节性、空间性和以及较为明显的区域和局地差异性,反映了中亚干旱区沙尘源区对天山高海拔冰川区的不同程度的影响,进而加速冰川的快速消融,对于这种影响机制需要进行深入的研究。

7.2 问题与展望

本论文选择在天山不同区域典型冰川开展雪冰中大气粉尘的沉降特征及其随时间和空间的变化特征研究,是在中亚粉尘源区范围内雪冰中粉尘研究相对缺乏的情况下开展的研究,由于大气粉尘的传输和影响范围是全球性的,因而本研究是对全球区域的粉尘研究的重要补充和完善。综合研究获得了天山山区不同区域粉尘沉降的时空变化规律,可以为中亚粉尘源区对区域气候环境的影响进行进一步的评估提供参考依据。然而,本论文对该区雪冰中粉尘对冰川消融影响等更深入的研究工作尚未开展。下一步的研究重点在以下几个方面:

(1) 雪冰中粉尘的来源同位素示踪研究。利用 Sr 和 Nd 同位素对雪冰中粉尘进行来源示踪是目前一个很有效的方法。例如 Wu Guangjian et al. 使用这些方法对青藏高原敦德冰芯中的粉尘颗粒来源进行了确定, Delmonte et al. 使用此方法对东南极地区 Vostok 冰芯中的粉尘来源进行了研究, 徐建中也等利用 Sr 和 Nd 同位素对珠穆朗玛峰东绒布冰川冰芯中的粉尘微粒来源进行了研究。所以, 在下一步工作中, 通过典型冰川区雪冰样品的采集, 对其中的粉尘进行同位素示踪研究, 探明该区冰川中粉尘的主要来源, 讨论中亚地区沙尘传输的过程, 并探讨天山局地气候的差异性。

(2) 冰川中粉尘对反照率和冰川加速消融的影响。如前所述, 冰川加速消融是热点问题, 而雪冰中的粉尘对冰川加速消融有重要影响。因为粉尘能够影响冰川表面的反照率, 改变冰川区能量平衡, 加速冰川消融。然而, 目前对于这种作用的机理和过程仍然不清楚。因此, 很有必要对高海拔冰川区气溶胶粉尘沉降与冰川加速消融之间的关系进行深入的观测研究和探讨。下一步拟开展冰川区雪冰粉尘对反照率的影响研究, 运用度日模型、能量平衡模型等方法探究冰川加速消融受粉尘影响引起反照率变化的具体机理; 深入评估和探究粉尘源区范围内冰川加速消融过程受到粉尘影响的状况和机理。

(3) 天山不同区域冰川气溶胶粉尘的气候强迫效应研究, 以及与其它区域研究对比。通过对雪冰中粉尘和气溶胶粉尘对辐射效应的研究, 弄清冰川区粉尘对区域气候乃至全球气候变化的影响。

参考文献

- [1]秦大河. 我国气候与环境变化及其影响与对策. 理论动态, 2006, 6: 28-38.
- [2]Oerlemans J, Anderson B, Hubbard A, et al. Modeling the response of glaciers to climate warming. *Climate Dynamics*, 1998, 4: 267-274.
- [3]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.
- [4]Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. New York: Wiley inter-science, 1998. 1326pp.
- [5]李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 96-106.
- [6]Aizen V B, Aizen E M, Melack J M, et al. Association between atmospheric circulation patterns and firn-ice core records from the Inilchek glacierized area, central Tien Shan, Asia. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, D08304, doi: 10.1029/2003JD003894.
- [7]Wake C P, Mayewski P A, Spencer M. A review of central Asian glaciochemical data. *Annals of glaciology*, 1990, 14: 301-306.
- [8]Wake C P, Mayewski P A, Wang Ping, et al. Anthropogenic sulfate and Asian dust signals in snow from Tien Shan, northwest China. *Annals of Glaciology*, 1992, 16: 45-52.
- [9]Wake C P, Mayewski X, Zichu M, et al., Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in Asian glaciers. *Geophysical Research Letter*, 1993, 20(14): 1411-1414.
- [10]Wake C P, Mayewski P A, Li Z, et al. Modern eolian dust deposition in central Asia. *Tellus*, 1994, 46B: 220-223.
- [11]Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Sciences*, 2005, 308(5718): 67-71.

- [12]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.
- [13]Gao Y, Arimoto R, Zhou M Y, et al. Relationships between the dust concentrations over Eastern Asia and the remote North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97, D9: 9867-9872.
- [14]Uematsu M, Duce R A, Prospero J M. Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 5343-5352.
- [15]Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmosphere circulation. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 28041-28047.
- [16]Twomey S, Piepgrass M, Wolfe T L. An assesement of the impact of pollution on glaobal cloud albedo. *Tellus, Ser. B*, 1984, 36, 356-366.
- [17]Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. Reduction of tropical cloudiness by soot. *Science*, 2000, 288: 1042-1047.
- [18]Rosenfied D, RRudich Y, Lahav R. Desert dust suppressing precipitation: a possible desertification feedback loop. *PNAS*, 2001, 98(11): 5975-5980.
- [19]Sassen K. Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms, *Geophysical Research Letters*, 2002, 1465, doi: 10.1029/2001GL014051.
- [20]Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. Ayers determination of ice water path in ice-cover-water cloud systems using combined MODIS and AMSR-E measurements. *Geophysical Research Letters*, 2006a, 33, L21801, doi: 10.1029/2006GL027038.
- [21]Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. Ayers possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES. *Geophysical Research Letters*, 2006b, 33, L06824, doi: 10.1029/2005GL02724.
- [22]Osada K, Hajime I, Mizuka K M. Mineral dust layers in snow at Mount Tateyama, Central Japan: formation processes and characteristics. *Tellus*, 2004, 56B: 382-392.

- [23]Yalcin K, Wake C P, Dibb J E, et al. Relationship between aerosol and snow chemistry at King Col, Mt Logan Massif, Yukon, Canada. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 7152-7163.
- [24]Marshall F M. Stratigraphic use of particulate in Polar ice caps. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1959, 70(12): 1043.
- [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]Thompson L G, Wayne L. Climatological implications of microparticle concentrations in the ice core from “Byrd” station, Western Antarctica. *Journal of Glaciology*, 1975, 14 (72): 433-444.
- [27]Thompson L G. Microparticles, ice sheets and climate. Ohio State University. Institute of Polar Studies, Report 64, 1977, p1.
- [28]Thompson L G, Thompson E M, Davis M E, et al. Kilimanjaro Ice Core Records: Evidence of Holocene Climate Change in Tropical Africa. *Science*, 2002, 298: 589-593.
- [29]Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores. *Science*, 2000, 289,1916-1919 .
- [30]Thompson L G, Thompson E M. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores. *Science*, 1998, 282: 1858-1864.
- [31]Thompson L G, Thompson E M, Davis M E, et al. Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau. *Science*, 1989, 246: 474-477.
- [32]Thompson L G, Thompson E M. Microparticle concentration variations linked with climatic change: evidence from polar ice cores. *Science*, 1981, 212: 812-816.
- [33]Thompson E M, Thompson L G. Glaciological interpretation of the microparticle concentration in the 905-meter Dome C core. *Antarctic Journal of the United*

- States, 1980, 11: 71-75.
- [34]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.
- [35]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): 26755-26763.
- [36]Delmonte B, Basile-Doelsch I, Petit J R, et al. Comparing the Epica and Vostok dust records during the last 220,000 years: stratigraphical correlation and provenance in glacial periods. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66: 63-87.
- [37]Delmonte B, Petit J R, Maggi V, 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.
- [38]Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399: 429-436.
- [39]Mahowald N, Kohfeld K E, Hansson M, 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.
- [40]郭光剑, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 末次间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, 2004a, 49(5): 475-479.
- [41]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, 2004b.
- [42]Zdanowicz' C M, Zielinski G A, Wake C P, et al. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the Penny Ice Cap, Baffin Island, Arctic Canada. *Tellus*, 1998, 50B: 506-520.
- [43]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.
- [44]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.

- [45]徐建中, 侯书贵, 陈福坤, 等. 珠穆朗玛峰东绒布冰芯微粒来源示踪, 科学通报, 2009, 54(12): 1756-1760.
- [46]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.
- [47]Wu G, Zhang C, Zhang X, et al. Sr and Nd isotopic composition of dust in Dunde ice core, Northern China: Implications for source tracing and use as an analogue of long-range transported Asian dust. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010a, 299: 409-416.
- [48]Wu G, Zhang X, Zhang C, et al. Concentration and composition of dust particles in surface snow at Urumqi Glacier No. 1, Eastern Tien Shan. *Global and Planetary Change*, 2010b, 74(1), 34-42.
- [49]Paoletti L, De Beradis B, Diociaiuti M. Physico-chemical characterastion of the inhalable particulate matter (PM10) in an urban area: an analysis of the seasonal trend. *Science of the Total Environment*, 2002, 292:26-275.
- [50]Paoletti L, De Beradis B, Arrizza L, et al. Seasonal effects on the physic-chemical characteristics of PM2.1 in Rome: a study by SEM and XPS. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 4869-4879.
- [51]De Berardis B, Incocciati E, Massera S, et al. Airborne silica levels in an urban area. *Sicence of the Total Environment*, 2007, 382:251-258.
- [52]Li Zhongqin, Zhao Shuhui, Ross Edwards, et al. Characteristics of individual aerosol particles over Urumqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia, China. *Atmospheric Research*, 2010, doi:10.1016/j.atmosres.2010.09.001.
- [53]Zhao Shuhui, Li Zhongqin, Zhou Ping. Ion chemistry and individual particle analysis of atmospheric aerosols over Mt. Bogda of eastern Tianshan Mountains, central Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, doi: 10.1007/s10661-010-1796-6.
- [54]赵淑惠, 李忠勤, 周平, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶的微观形貌及元素组成分析. *冰川冻土*, 2010, 32(4): 714-722.
- [55]Gillette D A, Hanson K J. Spatial and temporal variability of dust production

- caused by wind erosion in the United States, *Journal of Geophysical Research*, 1989, v. 94, p. 2197-2206.
- [56] Gillette D A. 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.* 1981, 186, p. 11-26.
- [57] 张小曳, 沈志宝. 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.
- [58] 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, *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102, C12: 26765-26782.
- [59] 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.
- [60] Mayewski P A, Meeker L D, Morrison M C, et al. Greenland Ice Core "Signal" Characteristics: An Expanded View of Climate Change. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D7): 12839-12847.
- [61] Fuhrer K, Wolff E W, Johnsen S J. 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): 31043-31052.
- [62] Rothlisberger R, Mulvaney R, Wolff E W, 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 Letters*, 2002, 29(20): p.1963.
- [63] 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.
- [64] 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): 26641-26648.
- [65] 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.
- [66]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, 1999a, 21(1): 9-14.
- [67]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, 1999b, 19(3): 105-113.
- [68]Hansson M. The Renland ice core, A Northern Hemisphere record of aerosol composition over 12,000 years. *Tellus*, 1994, 46B: 390-418.
- [69]姚檀栋, 邬光剑, 蒲建辰, 等. 古里雅冰芯中钙离子与大气粉尘变化关系, 2004, 49(9): 888-892.
- [70]Ruth U, Wagenbach D, Steffensen J P, 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.
- [71]Fisher D A, Koerner R M. Some aspects of climatic change in the High Arctic during the Holocene as deduced from ice cores. In Mahaney, W.C., ed. *Quaternary palaeoclimate*. Norwich, University of East Anglia Press, 1981, 249-271.
- [72]Jihong Cole-Dai, Thompson E M, Shawn P W, et al. A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D19): 24431-24441.
- [73]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.
- [74]Andersen K K, Armengaud A, Genthon C. Atmospheric dust under glacial and interglacial conditions. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 2281-2284.
- [75]Reader M C, Fung I, McFarlane N. The mineral dust aerosol cycle during the Last Glacial Maximum. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 9381-9398.

- [76]Tegen I, Lacis A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 19237- 19244.
- [77]Tegen I, Rind D. The influence of the latitudinal temperature gradient on soil dust concentration and deposition in Greenland. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 7199-7212.
- [78]Ming Jing, Zhang Dongqi, Kang Shichang, et al. Aerosol and fresh snow chemistry in the East Rongbuk Glacier on the northern slope of Mt. Qomolangma (Everest). *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D15307, doi: 10.1029/2007JD008618.
- [79]王宁练, 青藏高原北部马兰冰芯记录所揭示的近 200 年来沙尘天气发生频率变化趋势. *科学通报*, 2006a, 51(6): 724-729.
- [80]王宁练, 姚檀栋, 蒲建辰, 等. 青藏高原北部马兰冰芯记录的近千年来气候环境变化. *中国科学 D 辑*, 2006b, 36(8): 723-732.
- [81]Gao Y, Andersen J, Hua X. Dust characteristics over the north Pacific observed through shipboard measurement during the ACE-Asia experiment. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 7907-7922.
- [82]Arimoto R, Duce R A, Savoie D L, et al. Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during Pem-West A. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 2011-2023.
- [83]Williams M A, Tonnessen K A, Melack J M, et al. Sources and spatial variation of the chemical composition of snow in the Tien Shan, China. *Annals of glaciology*, 1992, 16: 25-32.
- [84]John T M, Mitsuo U. Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94, D6: 8584-8598.
- [85]Prospero J M, Uematsu M, Savoie D L. Marine aerosol transport to the Pacific Ocean. *Chemical Oceanography*, 1989, 10: 188-218.
- [86]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.

- [87] Yao Tandong, Thompson L G, Thompson E M, et al. Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 101(D23): 29531-29537.
- [88] 李忠勤, 姚檀栋, 皇翠兰, 等. 古里雅冰帽中的化学物质沉积特征和现代大气环境记录. 见: 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究学术论文年刊 (1994). 北京: 科学出版社, 1995: 11-21.
- [89] 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*, 1999a, 21(3): 225-232.
- [90] 侯书贵, 秦大河, 任贾文. 乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录气候环境意义的再探讨. *地球化学*, 1999b, 28(5): 438-442.
- [91] Lee Xinqing, Qin Dahe, Jiang Guibin. Atmospheric pollution of a remote area of Tianshan Mountain: Ice core record. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D14): 4406, doi: 10.1029/2002JD002181.
- [92] Stichler W U, Schotterer K, Frohlich P. Influence of sublimation on stable isotope records recovered from high-altitude glaciers in the tropical Andes. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D19): 22613-22620.
- [93] Wang Feiteng, Li Zhongqin, You Xiaoni, et al. Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Glacier No. 1 percolation zone, eastern Tien Shan, China. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 245-249.
- [94] Olivier S, Schwikowski M, Brüttsch S, et al. Glaciochemical investigation of an ice core from Belukha glacier, Siberian Altai. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): 2019. doi:10.1029/2003GL018290.
- [95] 李江风. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991: 5-73.
- [96] 王德辉, 张怀远. 天山乌鲁木齐河谷气候特征. *冰川冻土*, 1985, 7(3): 239-248.
- [97] 王飞腾. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 PGPI 雪层剖面特征及演化研究. 博士学位论文, 中国科学院研究生院, 2009, 12-18.
- [98] 王文彬. 新疆天山不同区域冰川变化观测事实与对比. 博士学位论文, 中国科学院研究生院, 2009, 1-100.

- [99]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. 冰川冻土, 1994, 16(4): 333-341.
- [100]李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 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.
- [101]王飞腾, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区表面雪层演化成冰过程的观测研究. 冰川冻土, 2006, 28(1) : 45-53.
- [102]李传金, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川不同时期雪层剖面、成冰带特征及成冰年限对比. 冰川冻土, 2007, 29: 169-175.
- [103]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, 2006a.
- [104]Paterson W S B. The Physics of Glaciers, 3rd Edition. Oxford: Pergamon Press, 1994.
- [105]Shumskii P A. Principles of Structural Glaciology (translated from the Russian by David Kraus). New York: Dover Publications, 1964.
- [106]谢自楚, 张金华. 中国冰川的物质平衡. 见: 施雅风, 黄茂桓, 任炳辉. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 1988, 69-87.
- [107]尤晓妮, 李忠勤, 王飞腾. 利用雪层层位跟踪法研究暖型成冰作用的年限问题——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例. 冰川冻土, 2005, 27(6) : 853-860.
- [108]王宗太. 博格达峰黑沟 8 号冰川发育若干问题浅析. 冰川冻土, 1991, 13 (2): 141-158.
- [109]胡汝骥. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社, 2004, 69-153.
- [110]胡汝骥. 天山东部哈尔里克峰区的冰川作用. 中国地质学会. 新疆地质学会编. 新疆第四纪地质及冰川地质论文集. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1983, 204-208.
- [111]骆光晓, 吴力平, 伊进莉, 等. 新疆哈密地区地表水资源量趋势分析. 水文, 2007, 27 (5): 92-95.
- [112]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.
- [113]张祥松, 朱国才, 钱嵩林, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雷达测厚. 冰川

- 冻土, 1985, 7(2): 153-162.
- [114]中国科学院登山考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985, 1-224.
- [115]金爽, 张明军, 李忠勤, 等. 托木尔峰青冰滩 72 号冰川水文气象特征初步分析. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8587-8589.
- [116]曹敏, 李忠勤, 李慧林. 天山托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川表面运动速度特征研究. 冰川冻土, 2011, 33(1): 21-29.
- [117]伍光和, 上田丰, 仇家琪. 天山博格达山脉的自然地理特征及冰川发育的气候条件. 冰川冻土, 1983a, 5(3): 5-16.
- [118]伍光和, 张顺英, 王仲祥. 天山博格达峰现代冰川的进退变化. 冰川冻土, 1983b, 5(3): 143-152.
- [119]仇家琪, 邓养鑫. 天山博格达峰地区的雪崩. 冰川冻土, 1983, 5(3): 227-234.
- [120]邓养鑫, 邓晓峰. 天山博格达峰地区现代冰缘地貌特征. 冰川冻土, 1983, 5(3): 179-190.
- [121]王银生, 仇家琪. 天山博格达峰地区现代冰川分布特征. 冰川冻土, 1983, 5(3): 17-24.
- [122]张文敬, 谢自楚. 天山博格达峰北坡现代冰川积累和消融特征及物质平衡的估算. 冰川冻土, 1983, 5(3): 59-70.
- [123]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.
- [124]Arao K, Ito K, Kojima A. Secular variation of yellow sand dust events over Nagasaki in Japan (in Japanese): 1914-2001. Journal of environmental Studies, Nagasaki University, 2003, 5: 1-10.
- [125]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.
- [126]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.
- [127]Delmas R, Briat M, Legrand M. Chemistry of south polar snow, Journal of Geophysical Research, 1982, 87, C6: 4314-4318.

- [128]Delmas R. Antarctic precipitation chemistry, In: Chemistry of Multiphase Atmospheric System, Ed. by Jaeschke W, NATO ASI Series, 1986, G6: 250-256.
- [129]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.
- [130]Moore J C, Wolff E W, Hammer C U. The chemical basis for the electrical stratigraphy of ice, Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 1887-1896.
- [131]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.
- [132]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, 2006b, 21(11): 1164-1170.
- [133]Li Z, Edwards R, Thompson E M, et al. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China. Annals of Glaciology, 2006, 43: 250-256.
- [134]Li Zhongqin, Li Chuanjin, Li Yuefang, et al. Preliminary results from measurements of selected trace metals in the snow-firn pack on Urumqi glacier No.1, eastern Tien Shan, China. Journal of Glaciology, 2007, 53(182): 368-373.
- [135]Li Zhongqin, Wang Wenbin, Wang Feiteng, et al. Characteristics of ionic concentration and $\delta^{18}\text{O}$ and their variability in dry season and wet season snow on Urumqi glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia. Annals of glaciology, 2008, 49: 217-223.
- [136]Sun J, Qin D, Mayewski P A, et al. Soluble species in aerosol and snow and their relationship at Glacier No.1 Tien Shan, China. Journal of Geophysical Reseach, 1998, 103(D21): 28021-28028.
- [137]张坤, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶和新雪中可溶性离子关系—以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为例. 冰川冻土, 2008, 30(1): 113-118.
- [138]周平, 张明军, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川气溶胶可溶性离子

- 昼夜变化研究. 冰川冻土, 2009, 31(3): 474-482.
- [139]张明军, 周平, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶和新雪中可溶性离子关系研究. 地理科学, 2010, 30(1): 141-148.
- [140]Okada K, Heintzenberg J, Kai K, et al. Shape of atmospheric mineral particles collected in three Chinese arid-regions. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(16): 3123-3126.
- [141]Okada K, Kai K. Atmospheric mineral particles collected at Qira in the Taklimakan Desert, China. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 6927-6935.
- [142]Claquin T, Schulz M, Balkanski Y J. Modeling the mineralogy of atmospheric dust sources. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D18): 22243-22256.
- [143]Cong Z, Kang S, Dong S, et al. Elemental and Individual particle analysis of atmospheric aerosols from high Himalayas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160: 323-335.
- [144]Hoornaert S, Godoi R M, Gerieken R V. Elemental and Single particle aerosol characterisation at a background station in Kazakhstan. *Jornal of atmospheric chemistry*, 2004, 48: 301-315.
- [145]骆鸿珍. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的水化学特征. 冰川冻土, 1983, 5(2): 55-62.
- [146]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.
- [147]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.
- [148]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.
- [149]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.
- [150]Chun Y, Kim J, Choi J C, et al. Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 2715-2721.

- [151]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.
- [152]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. *Atmospheric Research*, 2006, 82: 719-727.
- [153]Veyssiere A, Moutard K. Heavy metals in fresh snow collected at different altitudes in the Chamonix and Maurienne Valleys, French Alps: initial results. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 415-425.
- [154]Xu M, Lu A H, Xu F, Wang B. Seasonal chemical composition variations of wet deposition in Urumchi, Northwestern China. *Atmospheric Environment*, 2007, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.11.008.
- [155]Tanner P A, Wong A Y S. Soluble trace metals and major ionic species in the bulk deposition and atmosphere of Hong Kong. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 122: 261-279.
- [156]Zhang D D, Peart M R, Jim C Y, et al. Precipitation chemistry of Lhasa and other remote towns, Tibet. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 231-240.
- [157] Zhang D D, Peart M R, Jim C Y. Alkaline rains on the Tibetan Plateau and their implication for the original pH of natural rainfall. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D14). doi: 10.1029/2001JD001332.
- [158]Huang Y, Wang Y, Zhang L. Long-term trend of chemical composition of wet atmospheric precipitation during 1986–2006 at Shenzhen city, China. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 3740-3750.
- [159]Tu J, Wang H S, Zhang Z F, et al. Trends in chemical composition of precipitation in Naging, China, during 1992-2003. *Atmospheric Research*, 2005, 73: 283-298.
- [160]Le Bolloch O, Guerzoni S. Acid and alkaline deposition in precipitation on the western coast of Sardinia, Central Mediterranean (40N, 81E). *Water, Air, and Soil*

- Pollution, 1995, 85: 2155-2160.
- [161]Ito M, Mitchell M, Driscoll C T. Spatial patterns of precipitation quantity and chemistry and air temperature in the Adirondack region of New York. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 1051-1062.
- [162]Lee B K, Hong S H, Lee D S. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korean peninsula. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 563-575.
- [163]Okuda T, Iwase T, Ueda H, et al. Long-term trend of chemical constituents in precipitation in Tokyo metropolitan area, Japan, from 1990–2002. *Science of the Total Environment*, 2005, 339: 127-141.
- [164]Mouli P C, Mohan S V, Reddy S J. Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 999-1008.
- [165]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.
- [166]Mamtimin B, Meixner F X. The characteristics of airpollution in the semi-arid city of Urumqi (NW China) and its relation to climatological process. *Geophysical Research Abstracts*, 2007, 9: 06537.
- [167]Li Juan, Zhuang Guoshun, Huang Kan. Characteristics and sources of air-borne particulate in Urumqi, China, the upstream area of Asia dust. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 776-787.

附录

个人简历:

董志文, 男, 汉族, 1984年3月出生于甘肃甘谷。

2002年9月-2006年6月: 西北师范大学地理系攻读学士学位;

2006年9月-2009年6月: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所攻读硕士学位;

2009年9月-2011年11月: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所攻读博士学位。

参加学术交流和野外实践:

1. 2011年8-9月参加新疆天山哈密庙儿沟平顶冰川、榆树沟冰川考察, 以及青冰滩72号冰川野外考察;
2. 2006-2008年6-9月, 参加天山冰川站野外工作培训, 和新疆天山乌鲁木齐河源1号冰川、奎屯哈希勒根51号、以及48号冰川野外科学考察并钻取冰芯;
3. 2009年7-10月, 参加天山哈密庙儿沟平顶冰川科考活动、天山托木尔峰地区青冰滩72号冰川、青冰滩74号冰川和托木尔冰川的科考活动;
4. 2011年7月参加苏州工业园区举办的2011年度奥加洛“水质与水环境”奖学金学术交流报告会并做了英文学术报告;
5. 2010年11月1-5日, 参加了在北京召开的中科院研究生院 GUCAS-BHP Billiton 奖学金学术交流报告会并做了英文学术报告;
6. 2010年7月3-18日, 参加北京大学主办的全国研究生“气候变化-从科学基础到行动对策”气候变化培训;
7. 2010年8月4-11日参加了在云南丽江召开的以“冰川与可持续发展”为主题的国际冰川学会议, 并用英文做学术报告;
8. 2010年6月, 参加了新疆乌鲁木齐召开的“第三届干旱区生态水文过程与环境协调发展国际学术研讨会”;
9. 2008年9月, 参加兰州召开的世界冰川编目 (World Glacier Inventory) 国际研讨会;
10. 2007-2010年11-12月参加中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室学术年会并做相关学术报告。

参加科研项目：

1. 中科院科技创新与社会实践资助专项项目“典型大陆型冰川区雪冰中粉尘对冰川加速消融的影响机理研究”，项目负责人。
2. 国家自然科学基金项目“中亚地区雪冰粉尘记录的时空变化研究”，课题编号：40701034，主要参加人。
3. 国家自然科学基金项目“新疆天山不同区域代表性冰川物质平衡特征及其对气候变化的敏感性研究”，课题编号：41001040；主要参加人。
4. 国家自然科学基金项目“基于冰川动力学模式的黑河流域冰川变化模拟预测研究”，课题编号：91025012；主要参加人。
5. 科技部 973 项目“我国冰冻圈动态过程及其对气候、水文和生态的影响机理与适应对策”，课题编号：2007CB411501；参加者。

获奖情况：

1. 2010 年获中国科学院院长优秀奖；
2. 2011 年获刘东生地球科学奖学金；
3. 2011 年获卢嘉锡优秀研究生奖；
4. 2011 年获中科院朱李月华优秀博士生奖；
5. 2011 年获奥加洛“水质与水环境”奖学金；
6. 2010 年获中国科学院研究生院-澳大利亚 BHP Billiton 奖学金；
7. 2010 年获中科院研究生院“三好学生”荣誉称号；
8. 2010 年获中科院科技创新与社会实践专项资助；
9. 2009 年获奥加洛“水质与水环境”奖学金；
10. 2008 年获中科院冰冻圈科学国家重点实验室研究生学术报告奖。

审稿情况：

现为国际 SCI 期刊《*Atmospheric Environment*》和《*Environmental Earth Sciences*》的审稿人。

攻读博士学位期间发表的学术论文:

1. **Dong Zhiwen**, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al., 2009. Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of eastern Tian Shan, China. *Journal of Glaciology*, 55(193): 797-804. (SCI)
2. **Dong Zhiwen**, Li Zhongqin, Ross Edwards, et al., 2011. Temporal characteristics of mineral dust particles in precipitation of Urumqi River Valley in Tian Shan, China: A comparison of alpine site and rural site, *Atmospheric Research*, 101: 294-306. doi:10.1016/j.atmosres.2011.03.002. (SCI)
3. **Dong Zhiwen**, Li Zhongqin, Xiao Cunde, et al. 2009. Characteristics of aerosol dust in fresh snow in the Asian dust and non-dust periods at Urumqi glacier No.1 of eastern Tianshan, China. *Environmental Earth Sciences*, 60: 1361-1368. doi: 10.1007/s12665-009-0271-6. (SCI)
4. **Dong Zhiwen**, Li Zhongqin. 2011. Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on Glacier No.72, Mt Tuomuer, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 43(4). (SCI)
5. **Dong Zhiwen**, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. 2009. The pH value and electrical conductivity records of atmospheric environment from three shallow ice cores in the eastern Tianshan Mountains. *Journal of Geographical Sciences*, 19: 416-426, DOI: 10.1007/ s11442-009-0416-2. (SCI)
6. **Dong Zhiwen**, Li Zhongqin, Zhang Mingjun. 2011. Physico-chemical characteristics and environmental significance of snow deposition on Haxilegen glacier No.51 in Tian Shan, China. *Journal of Mountain Sciences*, 8: 484-494. DOI: 10.1007/s11629-011-1012-3. (SCI)
7. Li Zhongqin, Li Huilin, **DONG Zhiwen***, et al. 2010. Chemical characteristics and environmental significance of fresh snow deposition on Urumqi Glacier No.1 of Tianshan Mountains, China. *Chinese Geographical Sciences*, 20(5):

- 389-397. DOI: 10.1007/s11769-010-0412-6. (通讯, SCI)
8. You Xiaoni, **Dong Zhiwen**. 2011. Deposition Process of Dust Microparticles from Aerosol to Snow-Firn Pack on Glacier No. 1 in Eastern Tianshan Mountains, China. *Journal of Earth Sciences*, 22(4): 460-469. DOI: 10.1007/s12583-011-0200-y. (SCI)
 9. **董志文**, 李忠勤, 2011. 天山高山区与郊区降水中粉尘颗粒物特征的比较. 水科学进展, 22(1): 7-14. (EI)
 10. **董志文**, 李忠勤, 王飞腾, 等. 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): 107-116.
 11. **董志文**, 李忠勤, 王飞腾, 等. 2008. 天山东部冰川积雪中大气粉尘的沉积特征. 地理学报, 63(5): 544-552.
 12. **董志文**, 李忠勤, 张明军, 等. 2010. 哈密庙儿沟平顶冰川积雪中粉尘微粒沉积特征. 环境化学. 29(3): 352-357.
 13. **董志文**, 李忠勤, 王飞腾, 等. 2009. 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, 30 (6): 240-247.
 14. **董志文**, 李忠勤, 张明军, 等. 2010. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川雪坑化学特征及环境意义. 地理科学, 31 (1): 149~156.
 15. **董志文**, 李忠勤. 2011. 天山托木尔地区青冰滩 72 号冰川积雪中不溶粉尘的沉积特征. 干旱区研究, 待刊。
 16. 李忠勤, **董志文**, 张明军, 等. 2011. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪化学特征及其季节变化. 地球科学. 36 (4): 670-678. (EI)
 17. 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 李慧林, **董志文**, 等. 2007. 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, 29(3), 333-342.
 18. 高文华, 李忠勤, 张明军, 高前兆, **董志文**. 2011. 乌鲁木齐河源冰川径流中总可溶性固体和悬浮颗粒物的特征及影响因素分析. 环境化学, 30(5): 921-927.

19. Li Zhongqin, Shen Yongping, Li Huilin, **Dong Zhiwen**, Wang Liwei. 2008. Response of the melting Urumqi glacier No.1 in eastern Tianshan to climate change. *Advances in climate change research*, 4: 67-72.
20. 王丽伟, 李忠勤, **董志文**, 等. 2011. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯记录形成过程及年代划分. 干旱区地理, 已录用.
21. 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 李慧林, **董志文**, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应. 气候变化研究进展. 2007, 3(3): 132-137.

致 谢

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。博士学位论文完成之时，感激之情难以言表。博士学习期间的点点滴滴，都是我人生的宝贵财富。而师长、亲人、朋友以及同学的帮助和鼓励，使我的博士论文得以顺利完成！

衷心感谢我的导师李忠勤研究员！本论文是在李忠勤研究员的精心指导下完成的。李老师对我严格要求、精心指导和无私关怀。李老师严肃的科学态度，严谨的治学精神，严谨务实而且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，都深深地激励着我，是我今后学习中的楷模。在博士学习期间，不论是做学问、还是做人方面，李老师都给予了严格要求，让我受益匪浅。李老师经常教导我们学生，要夯实基础、努力学习，在科研中要实事求是，业务上不断争取，是对我做人、做事方面的严格要求。而本论文的选题、设计和实施过程中倾注了李老师大量的心血和汗水，论文写作和修改过程中更是得到了李老师悉心的指导。谨向李老师致以诚挚的感谢和崇高的敬意！

在我的博士论文完成期间，还得到了中科院寒旱所和其他院校老师的帮助，感谢任贾文老师、效存德老师、刘时银老师、叶柏生老师、王宁练老师、冯起老师、侯书贵老师、陈拓老师、秦翔老师、段克勤老师、杨梅学老师、赵林老师、何元庆老师、张明军老师、赵军老师、王文华老师、高前兆老师、杨惠安老师、韩添丁老师、谢昌卫老师、井哲帆老师、谢爱红老师等人的无私帮助和指导。各位老师学识渊博而且平易近人，每当我有问题需要请教时，他们总是热情的、毫不吝啬地提供帮助，在此我对他们表示深深的感谢！

本项研究得到了天山冰川站全体观测人员和研究人员的大力支持和帮助。感谢天山站项目组的王飞腾、王文彬、周平、金爽、李开明、吴利华、王彩霞、赵淑惠、王璞玉、尤晓妮、李慧林、王林、冯芳、高文华、王晓艳、折远洋、王圣杰、颜东海、李旭亮、江合理、李云、曹敏、高闻宇、王鹏、王丽伟、雒园、白金中、怀保娟、李珊珊、赵爱芳、于国斌、骆书飞、张昕、岳晓英、许慧、李效收等人给予的帮助和支持！记得一起在站上丰富多彩的学术活动、篮球活动，以及天山不同区域的野外进行冰川考察、钻取冰芯、挖雪坑、搞物质平衡、和雷达测厚等，在野外同甘共苦，很多野外考察任务都是诸位师兄弟们相互帮助、精诚

团结的情况下才得以完成的，期间的艰苦和快乐成为值得珍藏的回忆；还要感谢天山站实验室的朱宇漫老师和包秋芳在样品实验测试中的勤勤恳恳和诸多帮助！

感谢寒早所的同学和朋友对我学习和生活的帮助和鼓励，感谢张坤、明镜、李传金、郭东林、丁明虎、孙维君、李宗省、王世金、张蔚、刘章文、张亚峰、徐国保、崔晓庆、王淑新、左昕昕、牛清河、万国宁、柳景峰、朱国锋、武晓波、李全莲、陈丽娟、段瀚晨、文星、肖瑶、常丽、周兆叶、武震、肖建华等人；“祖逖闻鸡鸣，奋击渡江楫”！多年来，是我的同学和朋友们激励着我不断向前而且相互促进！有许多朋友对我日常生活中给予帮助和快乐，感谢我的那些挚友们，以及感谢我在篮球队的朋友们，虽然在此没有提到姓名，但你们的鼓励使我铭记于心而永生难忘！

同时，感谢研究生处的蔡英老师、刘蔚老师、刘晓东老师、陈辉老师、张明娟老师无私热忱的帮助。每当我遇见问题或需要帮助时，他们总是热心的伸出援助之手，并且一直以来在学习上鼓励和督促着我，使我常怀感激，对他们表示深深的谢意！

最后，感谢我挚爱的家人。感谢我的父母，我的姐姐和妹妹，他们为我付出甚多，是他们这么多年一直以来的关心、理解和支持给我很大的鼓舞，使我在生活和学习中获得无限温暖和前进动力。

董志文

2011年11月23日于兰州