

天山乌鲁木齐河源冰川积雪内不溶粉尘特征 : 沙尘与非沙尘活动季节的比较

董志文^{1 3} 李忠勤^{1 2} 王飞腾^{1 3} 张明军²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站,兰州 730000; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070; 3. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要 2005 年春夏(4~8 月)期间,对位于中亚粉尘活动源区的天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪中沉积的大气粉尘微粒的数量浓度及其季节粒径分布特征等进行了观测研究.结果表明,表层雪中不溶粉尘数量浓度在沙尘活动的 4~6 月份非常高(最大 439×10^3 个/mL),可能是由于亚洲春季发生的沙尘暴事件影响造成的.将 4~8 月积雪表面不溶粉尘粒径分布进行了比较,粉尘微粒质量粒径分布表现出分布模式由沙尘活动前的单一模式(3~21 μm)到沙尘活动期间的双峰分布模式(3~21 μm 和 20~80 μm 组成)再到非沙尘季节的单一模式(3~21 μm)的变化规律.粉尘化学离子组成,尤其是主要代表矿物颗粒的 Ca^{2+} ,在 4~6 月份浓度很高(最大 7 095 $\mu\text{g/L}$),另一方面, NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为可溶部分浓度变化存在差异.同时,用后向气团轨迹分析法验证了该区大气粉尘的传输路径,发现沙尘与非沙尘季节大气粉尘来源不同:分别来源于西北和西南方向,这对大气粉尘的传输和沉降造成很大影响.

关键词 乌鲁木齐河源;冰川积雪;不溶粉尘;季节变化

中图分类号:X13 文献标识码:A 文章编号:0250-330X(2009)06-

Characteristics of Atmospheric Dust Deposited in Snow on Urumqi Glacier No.1 of Eastern Tian Shan, China :A Comparison of Measurements During Asian Dust Period with Non-dust Period

DONG Zhi-wen^{1 3} ,LI Zhong-qin^{1 2} ,WANG Fei-teng^{1 3} ,ZHANG Ming-jun²

(1.State Key Laboratory of Cryospheric Sciences ,Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Lanzhou 730000 ,China ; 2.College of Geography and Environment Sciences ,Northwest Normal University ,Lanzhou 730070 ,China ; 3.Graduate University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

Abstract Deposition of atmospheric dust was measured in the snow on Glacier No.1 at the headwater of Urumqi River in eastern Tian Shan , central Asia . An analysis of seasonal change of concentration of dust particles in the snow cover suggests that number concentration of dust particle is significantly high from April to June($439 \times 10^3/\text{mL}$), which may be caused by Asian dust storm in spring . The comparison of mass-size distribution of dust particles between April to August shows an obvious change trend . The distribution of particles changes from single model(3-21 μm) in non-dust period before April to bio-model(3-21 μm and 20-80 μm) during Asian dust period and to single model(3-21 μm) after June in non-dust period again . Ca^{2+} concentration in the snow is also very high from April to June , while NH_4^+ and SO_4^{2-} , as water-soluble constituents the concentration change is different from each other . Backward trajectory was also employed to examine the transport process of air mass in this region .

Key words Urumqi Glacier No.1 ; glacier snow ; atmospheric dust ; seasonal change

源自于地球表面的气溶胶矿物粉尘在大气环境中起着十分重要的作用.大气粉尘能够影响太阳辐射强度,中和降水酸性物质,作为地球气候系统辐射强迫因子,同温室气体一道扮演着改变地球系统能量收支平衡的重要角色^[1].雪冰是大气中各种物质的存储器,沉积在高海拔雪冰中的大气粉尘信息能够被很好地记录和保存.因此,对于雪冰不溶粉尘的研究有着重要意义.在全球许多地区,包括南极、北极格陵兰地区以及青藏高原都进行过广泛的雪冰粉尘研究,并取得了重要成果和进展,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^[2~10].中国西部天山乌鲁木齐河源(图 1),位于中亚粉尘的源区范围内,大气环境受到了沙尘活动的重大影响^[11].化学分析和气象相关性

收稿日期:2008-07-21;修订日期:2008-09-22
基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411501);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127);国家自然科学基金项目(40631001,40571033,40371028,J0630966,J0701035)
作者简介:董志文(1984~),男,硕士研究生,主要研究方向为冰川与全球环境变化.E-mail:happyabear@163.com

表明,乌鲁木齐河源冰川积雪中发现的厚污化层主要通过春季发生的大气沙尘暴颗粒沉积形成.然而,对于积雪中不溶粉尘的季节变化特征及其与沙尘活动之间的深入关系仍然不清楚,亟需进行相关研究.东亚地区如日本和韩国已有许多报道关于大气气溶胶粉尘季节变化的研究^[12].弄清楚不同地区大气粉尘以及高海拔积雪中粉尘特征的季节变化,对于完善大气气溶胶粉尘的认识及其与高海拔冰川积雪间气雪转换关系的研究有着重要意义.天山山区春季为沙尘活动季节,而夏秋季为降水较多的非沙尘活动季节.冰川表层积雪是大气成分在气-雪间转化的界面,本文的核心是讨论乌鲁木齐河源冰川积雪表层雪中的粉尘信息在沙尘活动季节(4~6月)与非沙尘活动季节的变化规律,以便弄清中亚沙尘活动与高海拔冰川积雪保存的粉尘信息之间的关系.

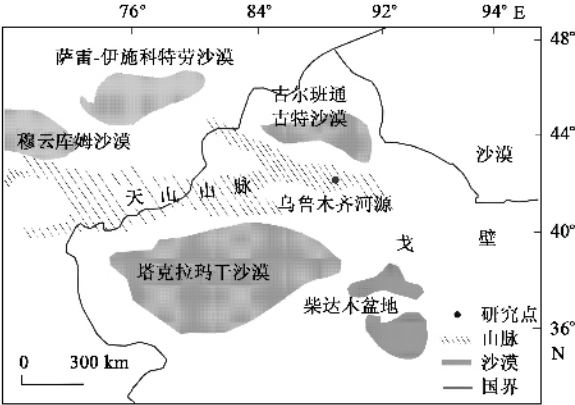


图1 天山乌鲁木齐河源位置
Fig.1 Location of study site in Tian Shan

1 材料与方法

2005年4~8月,在天山乌鲁木齐河源1号冰川积累区(海拔4130m)采集积雪样品.表层雪为积雪上层5cm深的雪样.采样过程严格按照冰雪采样程序进行,前人已有详述^[2~5].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.每个雪样100g,共取得5个月22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.

微粒的粒度分析使用Accusizer 780A光学粒径检测仪.详细原理参见文献[13].该仪器可测量微粒的粒径范围是0.57~400μm.该仪器采用单离子光学传感技术,通过比较检测的脉冲高度和由一组均质的已知粒径的标准粒子获得的一条标准校正曲线,建立粒子在一个时间段的粒度分布.分析前使样

品在室温下自动融化.实验从融化、取样、注样到分析整个过程都在洁净等级设计标准为100级的超净工作台内完成,尽可能减少实验误差.微粒分析和测量的精度在5%以内^[13,14].同时分析了雪样化学离子组成,Ca²⁺等离子浓度是用Dionex-600型离子色谱仪测定的,其精度可达ng·g⁻¹级,测试数据误差<5%.

仪器分析得到各个粒径范围内的微粒的精确数量,可以根据需要进行统计.本研究计算了微粒数量浓度,分析了微粒的质量粒径分布,质量粒径分布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2.6g/cm³;依照文献[2,10]的方法,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:

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

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;V₀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.

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.

2 结果与讨论

2.1 不溶微粒数量浓度

实验测量结果显示,积雪中粉尘细颗粒(粒径d<1μm)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(0.57~400μm),许多较大粒径的通道中(如d>100μm)颗粒出现的计数基本为零.因此,本研究中选择粒径介于0.57~100μm的颗粒进行统计和计算.图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>1μm的粗颗粒和粒径d<1μm的细颗粒,以及所有粒径范围(0.57~100μm)颗粒浓度季节变化,及乌鲁木齐河源区相应时期的盛行风(NE和NNE)风速变化.粉尘粗颗粒和细颗粒在季节变化中表现出相似变化趋势,某些特定季节的样品中二者都表现出高的数量浓度,例如在

4月25日和5月30日的雪样粉尘浓度分别为 439×10^3 个/mL和 420×10^3 个/mL, 远高于整个观测时期(4~8月)的平均值 241×10^3 个/mL(如图2所示). 该季节高海拔积雪中粉尘粗颗粒和细颗粒数量浓度的升高, 通常是由于在春季发生的大气沙尘暴事件造成的. 风速在沙尘活动季节(4~6月)明显高于非沙尘活动季节(7~8月), 尤其是5月27日的风速很高, 与粉尘颗粒的高浓度相对应(图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^[12]. 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.

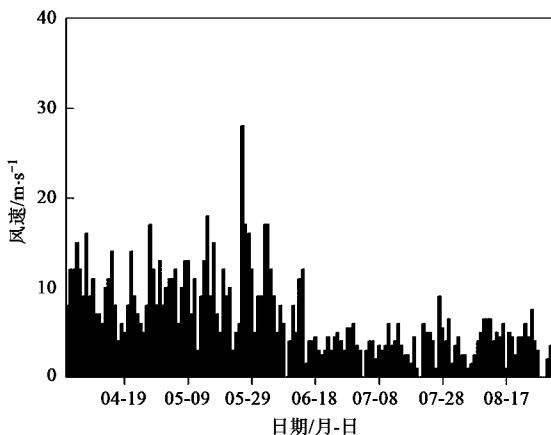
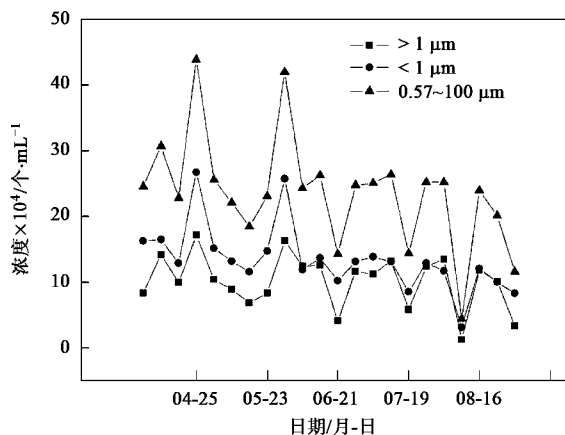


图2 4~8月表层雪中不溶粉尘颗粒的浓度及河源区风速变化

Fig.2 Variation of dust particles concentration in surface snow and wind speed during 2005 April to August

据中国气象局西北许多气象站(如西北哈密站、阿拉善站、乌鲁木齐站等)观测资料显示, 2005年4月18日和5月27~28日沙尘暴事件在我国西部和北方较大范围区域内发生. 图3显示了4月18日[图3(a)]和5月28日[图3(b)]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2所示, 4月18日之前的雪样粉尘颗粒浓度相对较低, 而在之后(4月25日)雪样中粉尘浓度突然变得很高, 说明沙尘暴带来的高浓度颗粒经过一定时间到达4130 m的大气自由对流层, 并维持一定稳定状态, 在积雪表层雪中沉降. 此后, 5月2日雪样中粗颗粒浓度由于降水影响变得较低, 而在5月28日以后的样品由于沙尘活动, 粉尘浓度再次升高并维持一段时间后, 在大气活动和降水作用下又再次不断降低. 本研究中, 积雪粉尘中细颗粒浓度和粗颗粒浓度随时间变化基本一致, 在沙尘暴发生后也同时升高(图2). 然而, 亚

洲其他地方类似的研究却有不同发现^[15~17], 例如在1998年亚洲沙尘暴活动期间, 韩国首尔采集的大气气溶胶粉尘粗颗粒浓度($> 1 \mu\text{m}$)明显升高, 其结果表明矿物粉尘是其中的主要组分, 而粒径 $< 1 \mu\text{m}$ 的细颗粒数量浓度却表现出下降趋势, 原因是该区细颗粒主要是在人为污染物和大气环流作用下造成的. 研究表明^[18], 气溶胶粉尘的细颗粒粒子主要来源于大气中的燃烧源和二级矿物如硫酸盐、硝酸盐和铵盐等, 这些物质与人类活动的污染有关, 在粉尘发生的当地大气季节环流作用会减弱这些物质浓度, 使气溶胶粉尘细颗粒组成部分浓度下降; 而且, 2002年在韩国的相关研究也有此发现^[19~20]. 这些发现与本研究的结果明显不同. 相比而言, 本研究的乌鲁木齐河源人类活动污染相对很小, 粉尘细颗粒主要来源于中亚粉尘源区, 经过较远距离传输到研究区, 可以反映大气的基本组成状况. 所以粗颗粒和细颗粒在沙尘与非沙尘季节都表现出一致的变化规律和趋势. 这也反映了高海拔雪冰中的粉尘与大气沙尘暴活动之间的敏感关系.

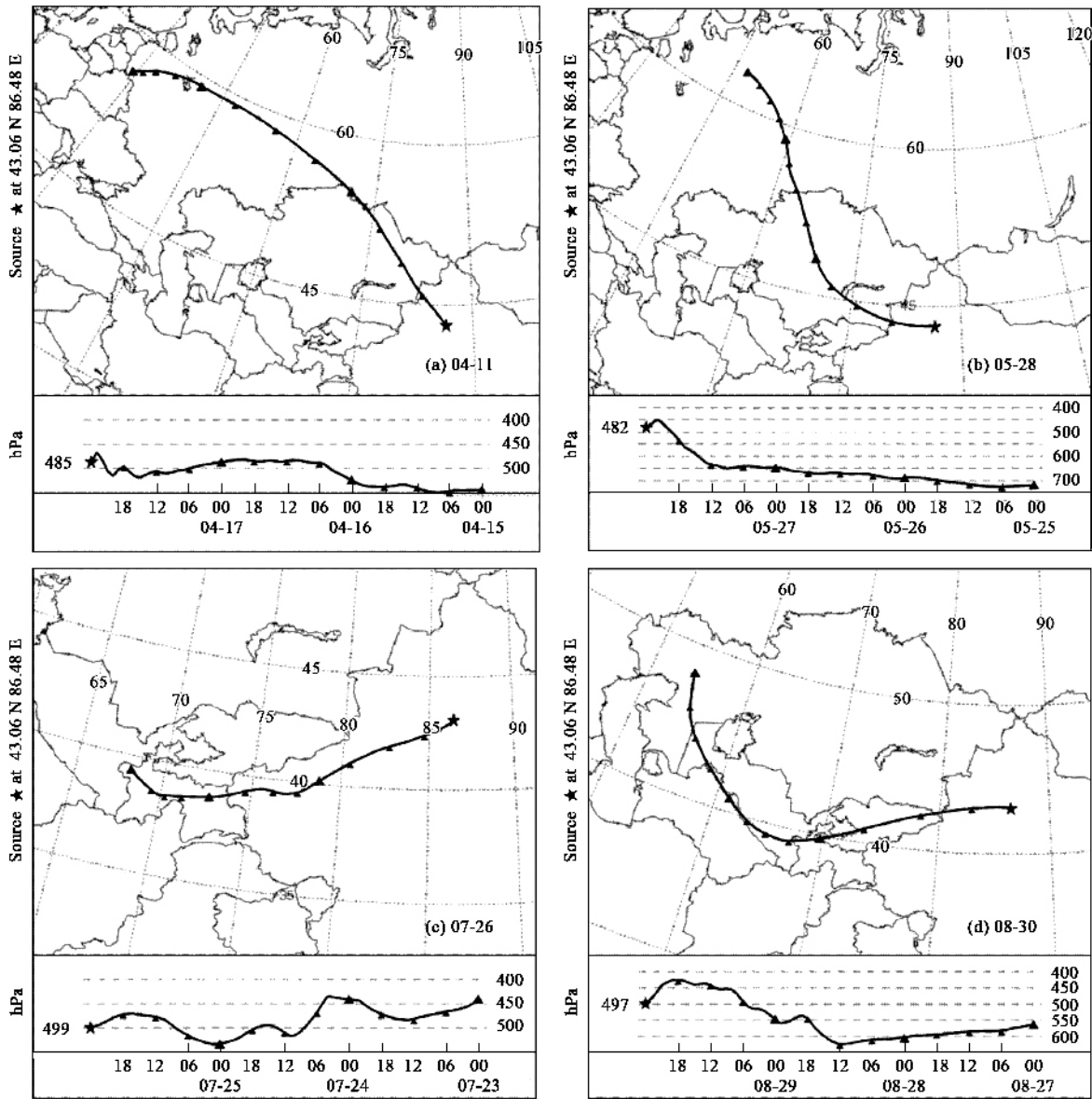


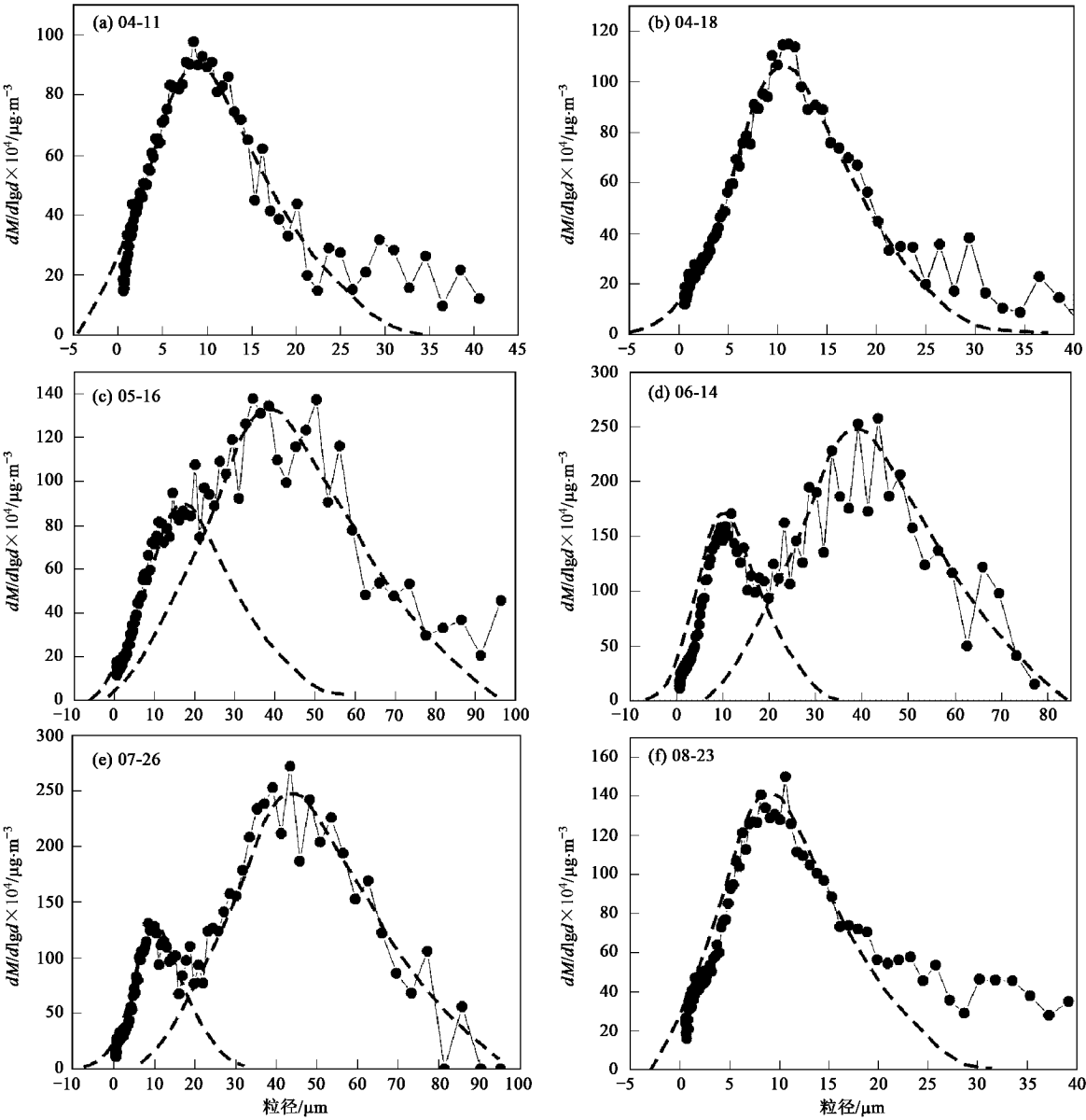
图3 研究区沙尘与非沙尘活动季节的气溶胶粉尘传输3 d后向轨迹分析
Fig.3 Backward trajectory of aerosol transport process in the Urumqi glacier No.1

2.2 不溶微粒粒径分布

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^[21].图4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^[21],大气粉尘粒径的完全分

布包括3个体积众数粒径,粒径为1~10 μm颗粒(来源于土壤的气溶胶),粒径为10~100 μm颗粒(土壤母质的粒径分布,只有大气粉尘极高时出现),和粒径为0.02~0.5 μm的颗粒(与土壤无关,为本底气溶胶).粉尘粒径分布不仅与搬运风力有关,而且与物质来源有关,如沙尘源区等^[16].实验分析结果表明(图4),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: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;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



散点表示计算得到的微粒质量粒径分布,虚线表示多项式正态拟合曲线

图 4 研究点积雪微粒质量粒径分布特征的季节变化

Fig.4 Seasonal change of dust particles mass-size distribution in snow

众数大约 40 μm 。图 4 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 4(a)和 4(b)],沙尘暴发生前表层雪的粉尘微粒表现出单一的分布模式,表明是稳定大气粉尘(气溶胶)来源,分布模式为细粒(3 ~ 21 μm)。5 月 16 日的积雪粉尘[图 4(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 2 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 4(d)和 4(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 4(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。

对于大气粉尘的粒径分布,在全球许多地区都进行过研究^[2,46],许多研究指出了大气粉尘沉降物如湖泊沉积物、黄土以及雪冰中粉尘体积粒径分布和质量粒径分布的复杂性^[21],有些样品存在 2 个体

积分分布粒径众数,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^[11]。北极格林兰岛 Penny 冰帽积雪和冰芯中粉尘的粒径众数值是大约1~2 μm;南极洲 EPICA Dome C 粒径众数2 μm。日本中部 Tateyama 山积雪中粉尘的粒径众数值介于6~21 μm^[14]。本研究中的细粒组分与上述地区研究结果之间存在一定可比性,细颗粒(气溶胶)分布粒径3~21 μm,反映了稳定的大气粉尘沉降,而粒径介于20~80 μm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显示了对图4中粒径分布介于3~21 μm的大气粉尘基本组成部分(气溶胶)质量-粒径分布曲线比较。尽管粒径分布众数变化很小,都大约在10 μm左右,然而众数粒径对应的粉尘颗粒质量浓度表现出明显的季节变化规律,反映了质量浓度的变化过程。4月表层积雪中粉尘粒径众数质量浓度还比较小(曲线5a),到了5、6月相应的质量浓度很大(曲线5d),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5e、5f),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。

2.3 粉尘化学离子组成

图6显示了4~8月表层雪内沉降的6种气溶胶典型离子组分的浓度变化。 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度表现出明显季节变化特点,与沙尘活动存在很好的一致性关系,沙尘活动季节浓度很高,7~8月浓度降为很低,并表现出一定时间上的滞后于沙尘发生。明显的变化规律说明积雪粉尘化学组成受大气沙尘活动的影响很大。其中 Ca^{2+} 主要存在于矿物粉尘不溶部分,能够很好的代表亚洲大气粉尘中的颗粒组成,在4~6月份浓度表现很高(最大7 095 μg/L),这与粉尘颗粒数量浓度变化一致(如图2)。而 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 等作为粉尘的可溶部分在4~6月二者浓度变化表现出一些差异, SO_4^{2-} 浓度此时较高,与 Ca^{2+} 离子浓

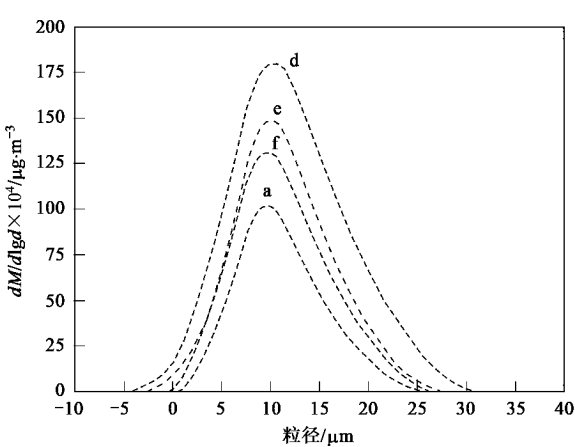


图5 对图4中曲线a、d、e、f的相应图中粉尘细粒组成成分粒径分布比较

Fig.5 Comparison of mass-size distribution of dust particles in Figure 4

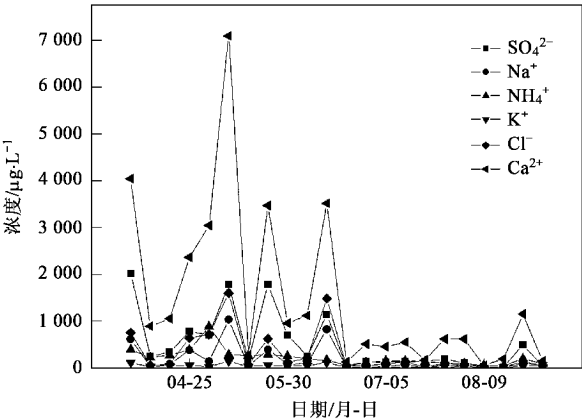


图6 表层雪内粉尘6种特征离子的4~8月浓度变化

Fig.6 Ions concentration change of dust in surface snow during April to August

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。

表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^[11,14],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^[18~25]。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.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 1),如图 6 所示, Na^+ 、 Cl^- 浓度季节变化表现出沙尘活动季节(4~6 月)和非沙尘季节(7~8 月)有明显不同^[17],说明粉尘颗粒带来了大量的中亚地区矿物盐类.大气粉尘颗粒数量浓度和化学组成元素的浓度在 7~8 月份很低,说明可能是该区夏季沙尘活动的消失以及经常发生的降水淋洗造成的(图 6).

表 1 研究点表层雪粉尘化学离子相关系数^[20]

Table 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 3 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 3(a)和 3(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 3(c)和 3(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^[20],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.

3 结论

(1)天山乌鲁木齐河源 1 号冰川表层雪中不溶粉尘颗粒数量浓度在沙尘活动的 4~6 月份非常高(最大 439×10^3 个/mL),可能是由于亚洲春季发生的沙尘暴事件影响造成的.将 4~8 月积雪表面不溶粉尘微粒的粒径分布进行了比较,粉尘微粒质量粒径分布表现出分布模式由沙尘活动前的单一模式(3~21 μm)到沙尘活动期间的复杂模式(3~21 μm 和 20~80 μm 组成),再到非沙尘季节的单一模式

(3~21 μm)的变化规律,这些结果表明该区雪冰微粒季节变化受中亚粉尘活动影响比较明显.

(2)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 7 095 $\mu\text{g/L}$), 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.

(3)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.

参考文献:

[1] IPCC (2001). Climate change 2007 :The Physical Sciences Basis. Contribution of Working Group I to the forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge : Cambridge University Press 2007. 29-30. 131-132. 153-180.

[2] Zdanowicz C M ,Zielinski G A ,Wake C P. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the Penny Ice Cap ,Baffin Island ,Arctic Canada [J]. Tellus ,1998 **50B** :506-520.

[3] Prospero J M , Ginoux P , Torres O , *et al.* . Environmental characterization of global sources of atmospheric soli dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product [J]. Reviews of Geophysics ,2002 **40** (1) : 4-1-4-30.

[4] Gao Y ,Arimoto R M ,Zhou Y ,*et al.* . Relationships between the dust concentrations over Eastern Asia and the remote North Pacific [J]. Journal of Geophysical Research ,1992 **97** (D9) :9867-9872.

[5] John T M ,Mitsuo U. Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific [J]. Journal of Geophysical Research ,1989 **94** (D6) :8584-8598.

[6] Thompson L G ,Wayne L. Climatological implications of microparticle concentrations in the ice core from " Byrd " station ,Western Antarctica [J]. Journal of Glaciology ,1975 **14** (72) :433-444.

[7] Thompson L G ,Thompson E M. Microparticle concentration variations linked with climatic change :evidence from polar ice cores [J]. Science ,1981 **212** :812-816.

[8] Thompson L G ,Thompson E M. A 25 ,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores [J]. Science ,1998 **282** :1858-1864.

[9] Uematsu M ,Duce R A ,Prospero J M ,*et al.* . Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean [J]. Journal of Geophysical Research ,1983 **88** :5343-5352.

[10] Steffensen J P. The size distributions of microparticle from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods [J]. Journal of Geophysical Research , 1997 **102** (C12) :26755-26763.

[11] Wake C P ,Mayewski P A ,Li Z Q ,*et al.* . Modern eolian dust

deposition in central Asia[J]. Tellus ,1994 **46B** :220-223.

[12] Watanabe K ,Kasuga H ,Yamada Y ,*et al* . Size distributions of aerosol number concentrations and water-soluble constituents in Toyama , Japan :A comparison of the measurements during Asian dust period with non-dust period[J]. Atmospheric Research 2006 **82** :719-727.

[13] 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[J]. 现代科学仪器 2006 **3** :81-84.

[14] 董志文 ,李忠勤 ,王飞腾 ,等 . 天山东部冰川积雪中大气粉尘的沉积特征[J]. 地理学报 2008 **63** (5) :544-552.

[15] Chun Y ,Kim J ,Choi J C ,*et al* . Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea [J]. Atmospheric Environment 2001 **35** :2715-2721.

[16] 邬光剑 ,姚檀栋 . 冰芯中不溶微粒的研究进展[J]. 冰川冻土 , 2005 **27** (4) :528-538.

[17] Li Z Q ,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[J]. Annals of Glaciology 2006 **43** :250-256.

[18] Seinfeld J H ,Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics :from air pollution to climate change[M]. New York :Wiley inter-science , 1998. 1326.

[19] In H J ,Park S U. The soil particle size dependent emission parameterization for an Asian dust (Yellow Sand) observed in Korea in April 2002[J]. Atmospheric Environment 2003 **37** :4625-4636.

[20] Niimura N ,Okada K ,Fan X B ,*et al* . Formtion of Asian dust storm particles mixed internally with sea salt in the atmosphere [J]. J Meteorol Soc Jpn ,1998 **76** :275-288.

[21] 邬光剑 ,姚檀栋 ,徐柏青 ,等 . 幕士塔格冰芯中微粒的粒度记录[J]. 中国科学 D 辑 2006 **36** (1) :9-16.

[22] 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[J]. 环境科学 2008 **29** (8) :2117-2122.

[23] 郑伟 ,姚檀栋 ,徐柏青 ,等 . 羊卓雍流域雪坑中化学离子记录研究[J]. 环境科学 2008 **29** (6) :1488-1494.

[24] 武小波 ,李全连 ,宋高举 ,等 . 祁连山七一冰川融水化学组成及演化特征[J]. 环境科学 2008 **29** (3) :613-618.

[25] 刘纯平 ,姚檀栋 ,Thompson L G ,*et al* . 敦德冰芯中微粒含量与沙尘暴及气候的关系[J]. 冰川冻土 ,1999 **21** (1) :9-14.