

兰州大学

博士学位论文

黄土高原地区沙尘气溶胶的综合观测研究

姓名：王鑫

申请学位级别：博士

专业：大气科学、气象学

指导教师：黄建平

20090601

摘 要

沙尘暴天气是我国西北地区频发的一种强灾害性天气，沙尘天气的发生对社会发展和经济发展都造成了严重的危害，虽然近年来国内外很多科学家对当前发生的沙尘天气有较深入的研究，但是多集中在局地沙尘天气和单个站点的研究，对于我国黄土高原半干旱地区发生的沙尘天气研究较少。而我国黄土高原半干旱地区由于降水量较少，生态环境脆弱，容易导致大范围的沙尘天气过程，此外，由于人类社会对大气造成的污染，使大气中的黑碳气溶胶也急剧增加，黑碳气溶胶能强烈吸收太阳辐射，是影响全球气候变化的一个重要因子，基于以上分析，本文主要对黄土高原半干旱地区的沙尘气溶胶与黑碳气溶胶的物理化学特征及其光学属性进行了深入分析，论文研究内容主要包括以下几个方面：

(1)首先利用中国气象局提供的我国1960年-2000年701个气象站点的沙尘天气发生频次资料，重点分析了近年来我国沙尘天气空间分布的背景特征，通过研究发现，我国存在新疆塔克拉玛干沙漠与内蒙古戈壁沙漠两大主要沙尘源区。利用两个沙尘源区不同类型沙尘天气的发生次数，建立了一个新的沙尘气溶胶指数，通过相关统计方法以及利用TOMS卫星气溶胶吸收指数对比发现，新的沙尘气溶胶指数能够较好的反映我国北方地区沙尘天气的变化特征。

(2)通过对黄土高原地区 2007 年 5 月 2 日一次大范围的沙尘天气过程分析，对沙尘天气发生过程前后沙尘气溶胶的物理及其光学属性进行了深入的讨论，结果显示，这次沙尘天气的源地主要是南疆地区和内蒙古的戈壁沙漠地区，当沙尘天气发生时，大气中粗模态的气溶胶明显增加，气溶胶质量浓度达到 2484.72 ug/m^3 ，是沙尘暴天气发生前气溶胶质量浓度的 13 倍，同时沙尘天气还伴随着大风降温天气的发生，气象资料显示这次沙尘气溶胶主要来源于南疆与内蒙古戈壁沙漠两个地区，同时通过对比污染气溶胶与矿物气溶胶的光学特征可以发现，污染气溶胶能更好的反映气溶胶散射和吸收属性，背景大气气溶胶的散射和吸收系数平均为 $150\text{-}200 \text{ Mm}^{-1}$ 和 $5\text{-}15 \text{ Mm}^{-1}$ ，而沙尘气溶胶的散射系数和吸收系数平均值低于 150 Mm^{-1} 和 3 Mm^{-1} 。

(3)利用 SACOL 气候站上黑碳仪、RP1400、积分浊度仪以及太阳光度计等仪器，分析黄土高原地区气溶胶的物理特征及其光学属性，通过研究发现，黄土高原地区的大气气溶胶来源比较复杂，造成的大气污染较为严重。分析粒径小于 $1\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的气溶胶的数浓度可以发现，冬季粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的气溶胶数浓度最高，夏季最低，其中，在背景天气条

件下，大气中主要以细颗粒的人为污染气溶胶为主，气溶胶粒子半径主要小于 $1\mu\text{m}$ ，根据太阳光度计观测的结果分析表明，气溶胶的平均光学厚度冬季最高，春季次之，夏季最低。说明，兰州市冬季由于燃煤取暖等原因导致冬季大气污染最严重。

(4) 最后，本文对 2002 年春季兰州市、武威市和皋兰县三个地区的大气 TSP 进行采样分析，通过分析表明，2002 年春季是近 20 年以来沙尘天气最为严重的一年，2002 年沙尘天气对我国整个北方地区的影响较为严重。当发生沙尘天气时，沙尘气溶胶从沙漠地区起沙开始，不断地向下游地区传输，在这个过程中不断吸附城市地区的污染物，导致矿物气溶胶中 Hf、Ta、Ag、Cr、Hb 等微量元素浓度明显增加，沙尘气溶胶自身的物理化学特征也发生了明显的改变。通过相关分析以及因子分析等方法对兰州市春季大气气溶胶质量浓度进行了统计，对采集的沙尘气溶胶进行化学微量元素分析。结果表明，兰州市沙尘天气发生时，气溶胶除来源于沙尘源地的外来矿物气溶胶以外，还包括了大量的本地扬尘，以及本地燃煤造成的污染尘和大量的水泥石灰尘。

关键词: 沙尘气溶胶、黑碳气溶胶、沙尘暴、质量浓度、光学厚度、体积谱分布、化学微量元素、痕量气体

Abstract

Local and global responses of climate change to the aerosol depend strongly on its optical and physical properties. Aerosol is very effective in modifying the radiation field by absorbing and scattering solar and thermal radiation strongly modify the radiation budget at the surface of the earth as well as the cloud microphysical properties, precipitation rate and hydrological cycle. In recent years, black carbon (BC) became more and more important because of its direct impact on radiation and its heating effect on climate. Additionally, BC can affect the climate by its indirect effects due to its action on cloud droplet and change the cloud properties. China loess Plateau and the deserts in the arid and semi-arid regions of Northwest China are considered as the largest and most persistent dust sources and air pollution in the Northern Hemisphere. However, due to the shortage of in situ observations in those regions, the detailed information on their physical and optical properties of dust and non-dust aerosol from those regions have not been well understood yet. Understandings on physical processes and its optical properties of aerosols are important because atmospheric aerosols play key roles to affect the earth-atmosphere radiative system. The main objective of this paper is to identify detailed information of aerosol measurements conducted over China loess Plateau. The conclusions can be summarized as follows:

(1) In order to examine the decadal variations of the dust events over East Asia, we analyze surface observations from 701 meteorological stations for the period 1960–2004 to obtain spatial and temporal distributions of dust events. Since the Taklamakan Desert in western China and the Gobi Desert in Inner Mongolia are the two major sources of dust storms, we have defined two dust indices, one for the Taklamakan Desert Index (TDI) and one for the Gobi Desert Index (GDI), to characterize the statistical nature of the dust events over these two regions. Both of these indices are well correlated with the Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Absorbing Aerosol Index (AAI).

(2) The objective of this section is to understand the detailed characteristics and underlying mechanisms of dust aerosol at SACOL during dust plume. During dust plume, the mass concentration of PM_{10} can rise to $\sim 2484.72 \mu g/m^3$, ~ 13 times as high as that in non-dust plume

period. The meteorological analysis indicates that these polluted layers are not from local sources during dust plume and this large-scale transport of dust and pollutants remains a major uncertainty in quantifying the global effect of emissions from Northern China. Local air pollution can reflect the absorbing and scattering properties more effective than dust aerosol.

(3) The objective of this section is to understand the detailed characteristics and underlying mechanisms of aerosol physical and optical parameters over China Loess Plateau and its potential impacts on the regional/global climate. To meet this goal, several ground instruments were performed from May 1 2007 to May 31, 2008 at an integrated observational site of China (35.57N,104.08E). Results indicate that The type of aerosol is more complicated over China loess Plateau. The seasonal and diurnal variations of the larger accumulation mode and the coarse mode particle number concentrations ($N_{0.5-1}$ and N_{1-20} , respectively) exhibited a seasonal cycle with the highest values in winter-spring and the lowest value in summer-autumn. a two-year data set of aerosol optical properties obtained from the AERONET is analyzed focusing on the western part of China. The aerosol optical depth standard product (AOD at 500 nm) is employed to evaluate the inter-annual and seasonal variability of the aerosol properties over SACOL. The AOD shows that the high value during winter period and low value in winter period. This result shows that the air pollution in winter is heavy by the biomass burning(clearing of agricultural land).

(4) Based on the available data from surface synoptic reports(8 times every day), the temporal and spatial distribution characteristics of sand / dust storms in China in the spring of 2002 are analyzed. The results show that there were mainly twelve dust storm weather processes including five severe dust storm events in China, among which the event on March 18—22 had the largest area and highest intensity. It has been found that most dust storm weather processes concentrated in early spring (from March to mid April)of 2002. The chemical composition of dust aerosol was analysed during spring, 2002 in Lanzhou、Wuwei and Gaolan, which is the key region for major dust plume frequently influenced during its transportation from the dust original regions. Results shows that the mass concentration of trace elements include Hf、Ta、Ag、Cr、Hb increase quickly during dust plume.

Keywords: dust aerosol、black carbon、dust storm、mass concentration、aerosol optical depth、volume distribution of dust aerosol、trace elements、trace gas

原创性声明

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

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 王鑫 日期： 2009.6.1

关于学位论文使用授权的声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属兰州大学。本人完全了解兰州大学有关保存、使用学位论文的规定，同意学校保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权兰州大学可以将本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。本人离校后发表、使用学位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兰州大学。

保密论文在解密后应遵守此规定。

论文作者签名： 王鑫 导师签名： 李伟 日期： 2009.6.1

第一章 绪 论

1.1 大气气溶胶的定义

大气气溶胶是一种重要的大气微量成分，气溶胶在大气中相对寿命短，是由不同成分组成、质量和数浓度都有很大空间变异性，并且对人类健康与社会经济发展都有很大的影响(钱正安，2002)。大气气溶胶的定义是指大量液态或固态微粒在大气中的悬浮胶性体。粒子浓度由于自然过程和人类活动，造成不断地有微粒进入大气，大气中通过物理、化学过程亦会产生一些质粒。在实际大气中，目前关于研究大气气溶胶的尺度范围大概从几十埃到几百微米，一般定义可观测到的气溶胶直径下限为 $0.02\mu\text{m}$ ，这主要是根据目前主要观测仪器可以测量的最小粒子，而直径大于 $100\mu\text{m}$ 或者几百微米的粒子，由于重力沉降很快，因而在大气中存在的寿命极短，或者传输较短的距离即沉降到地面，因此在我国有关大气气溶胶的研究中将 $100\mu\text{m}$ 作为气溶胶直径的上限，目前对于大气气溶胶的分类有很多种，主要包括以下几种分类方法：

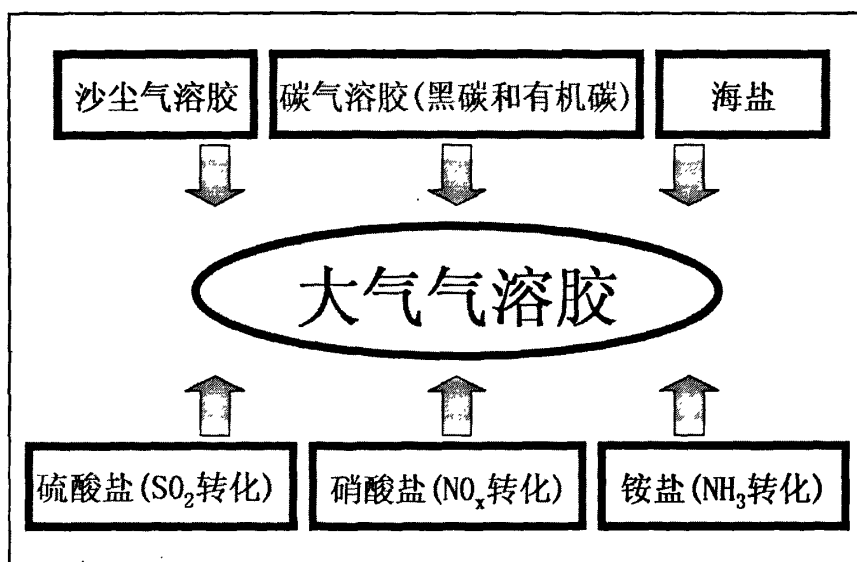


图 1.1 大气气溶胶的分类

第一种分类方法是根据大气气溶胶的类型来分类, 具体分类见图 1.1, 主要包括以下 6 大类 7 种气溶胶粒子: 沙尘气溶胶、碳气溶胶(黑碳和有机碳气溶胶)、硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶和海盐气溶胶。

沙尘气溶胶, 或称为矿物气溶胶, 是对流层气溶胶的主要成分。沙尘气溶胶是大气气溶胶的其中一种, 主要是由于我国北方地区沙尘天气多发造成的一种灾害性天气, 每年春季大量沙尘气溶胶随沙尘暴天气进入到大气中, 并且在一定的大气环流背景下输送到上千公里以外的人口密集地区, 从而危及和影响人类赖以生存的自然环境。我国沙尘气溶胶主要来源于新疆、甘肃、内蒙的沙漠以及黄土高原等干旱和半干旱地区。每年春季大量沙尘通过大风天气过程输送到下游地区, 对当地的环境与气候产生重要影响。微米尺度的气溶胶粒子对人的呼吸系统也可产生重要影响, 并危害人类健康。

沙尘气溶胶是由于沙尘天气造成的一种大气气溶胶, 地面气象观测规范(中央气象局, 2003)中将沙尘天气分为浮尘、扬沙和沙尘暴。浮尘是指尘土、细沙均匀地悬浮在空中, 使水平能见度小于 10km; 浮尘多为远处尘沙经上层气流传播而来, 或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的细粒悬浮空中而成, 太阳呈现白色, 远距离的景物呈现黄褐色; 扬沙是指由于风大将地面沙尘吹到空中, 使空气相当混浊, 水平能见度在 1~10km 以内; 沙尘暴是指由于强风将地面大量尘沙吹起, 使空气很混浊, 水平能见度小于 1 km, 天空呈现沙褐色, 甚至红褐色。

黑碳气溶胶主要来自化石燃料和生物质的不完全燃烧, 人为源是大气中黑碳气溶胶的主要来源。黑碳气溶胶可以强烈吸收太阳辐射进而影响地—气系统的能量收支而影响气候。

此外还有硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶、海盐气溶胶等类型气溶胶。因为本论文主要讨论沙尘气溶胶与黑碳气溶胶的物理化学特征, 因此其他几种相关类型气溶胶不做重点分析。

第二种是按照气溶胶粒径大小来分类, 如图 1.2, 粒径小于 100 μm 的粒子称为总悬浮微粒(TSP); 粒径小于 10 μm 的粒子称为飘尘(又称为可吸入尘(IP)), 飘尘可分为粗粒子(粒径 $>2\mu\text{m}$)和细粒子(粒径 $<2\mu\text{m}$)。

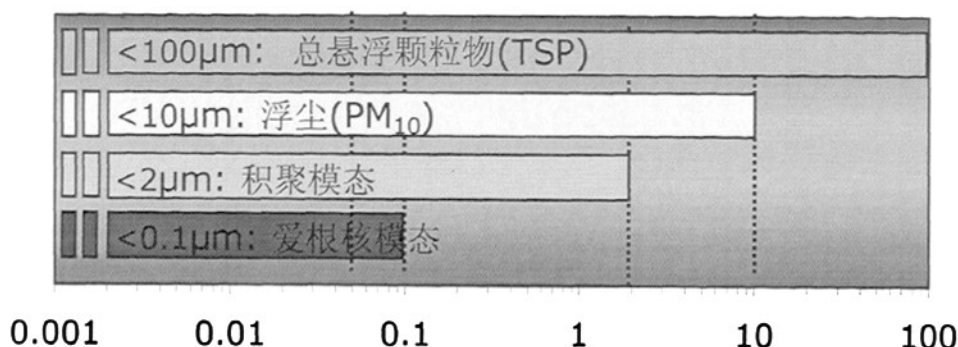


图 1.2 大气气溶胶粒径分布

飘尘中粗细粒子所占的比例受到污染源的排放情况和气象因素的影响。粗粒子的粒径大于 $2.0\mu\text{m}$ ，其主要来源是一次性气溶胶，风尘，火山尘，飞灰，粉尘等都是—次性气溶胶的粗粒子。而细粒子分为爱根核模态(直径小于 $0.1\mu\text{m}$)和积聚模态(直径小于 $2.0\mu\text{m}$ 并大于 $0.01\mu\text{m}$)，细粒子的来源主要是二次性气溶胶，各种燃烧排放出来的烟气，尤其是汽车尾气中含有大量的细粒子。虽然细粒子的质量远小于粗粒子，但是由于细粒子在大气中的生命期从几天甚至几年(平流层)，尤其重要的是，来自于城市地区的大气气溶胶含有大量的硫酸盐、硝酸盐，以及各种有毒物质和致癌物质，可通过呼吸道进入人体，在不同的呼吸部位沉积，被血液和人体组织吸收并对健康造成危害，尤其是小于 $2\mu\text{m}$ 的细颗粒物中富集多种有害有毒物质，它们大部分沉积在支气管和肺泡里，给人体健康构成更大危害(汪安璞，1999)。

当前沙尘气溶胶研究已成为大气化学乃至地球环境科学研究的热点之一，因此，本论文主要以沙尘气溶胶的相关特性为主要研究对象。沙尘气溶胶是东亚地区对流层大气气溶胶的主要成分，它主要来自干旱和半干旱地区，通过沙尘暴强烈天气过程造成广泛影响，由沙尘暴向大气输送的沙尘粒子是春季我国西北、华北直到北太平洋上空气溶胶粒子的主要组成部分，同时沙尘气溶胶对中国北方酸雨的中和作用，对硫酸盐气溶胶的形成及其分布(臧家业等，2003)，对海洋中微量成分循环过程都具有重要的影响，因此已成为科学界广泛关注的问题。沙尘气溶胶对气候变化、云的形成、能见度的改变、大气微量成分的循环及人类健康有

着重要影响(Rosenfeld et al, 2001)。

1.2 研究沙尘气溶胶的重要性

大气中的沙尘气溶胶的浓度变化,对人体和动物的呼吸系统的影响极为显著,尤其是 $PM_{2.5} \sim PM_{10}$ 易于富集大气中的重金属、酸性氧化物、有机污染物、细菌和病菌等,且能较长时间悬浮在大气中,并随着西风环流向下游地区传输,一部分沉降到我国黄土高原地区,还有一部分沉降到我国沿海地区以及沉降到太平洋地区,最远可以传输到北美等地(Jaffe等, 1999),其中沙尘气溶胶沉降到海洋表面,增加了海洋表层的营养物质(如Fe、N、P等),从而促进海洋中浮游生物的生长,而海洋浮游生物又可以通过固碳来控制大气中 CO_2 浓度(Watson等, 2000),因此沙尘气溶胶可以间接地影响 CO_2 浓度的变化,从而影响气候变化。沙尘气溶胶在大气中的直接效应是影响大气水循环和辐射平衡,这两种过程都会引起气候变化。沙尘气溶胶粒子对减弱太阳辐射的影响较大,因而沙尘气溶胶增加对气候的影响主要表现为使地表降温,另一方面沙尘气溶胶可以通过吸收太阳辐射,使得大气增温(沈志宝, 1999)。此外,沙尘气溶胶粒子又可以作为大气中最重要的云凝结核,沙尘气溶胶粒子增加对水循环的影响,一般也表现为使云滴数量增加,其气候效应也是使地表降温(黄梦宇等, 2005)。

气候变化是当前各国政府和科学界关注的重大问题,沙尘气溶胶作为影响气候变化的一个重要因子,引起了全世界科学界的普遍重视。随着人类社会经济活动的迅速发展,滥砍、滥伐再加上全球变暖引起的我国北方地区气候的不断干旱,导致沙尘暴天气的不断发生,沙尘暴可通过沙埋、风蚀沙割、狂风袭击、降温霜冻和污染大气等作用方式,使大片农田受埋、或遭风蚀刮走沃土,或者农作物受霜冻之害;致使有的农作物绝收,有的大幅度减产;它能加剧土地沙漠化,对大气环境造成严重污染,对生态环境造成巨大破坏,对交通线路产生重要影响,给人民生命财产造成严重损失,1993年5月5日发生在西北地区(甘肃、宁夏、内蒙古阿拉善盟)的一次特强沙尘暴持续约5h波及方圆500km以上,袭击了新疆东部、甘肃河西走廊、宁夏大部、内蒙古西部等地,使这些地区共死亡85人,失踪31人,伤265人,造成直接经济损失达515亿元人民币。1998年4月15~20日在中国

发生的沙尘暴灾害,影响面覆盖了几乎中国东部所有地区,给人民的生活和工矿企业、商业造成了极大破坏(刘景涛等, 1996)。此外,沙尘暴的频频发生,是生态环境恶化的重要标志之一,已导致了严重的生态环境问题。受全球气候变化和土地荒漠化的影响,20世纪90年代以来,我国北方地区进入沙尘暴相对活跃的时期,沙尘暴灾害的次数和强度都有增加的趋势。进入本世纪,这种增加的势头仍在继续,沙尘暴出现的时间在提前,次数在增多,影响的范围在扩大,并多次出现影响东亚地区的大范围沙尘暴,以2000年春季为例,中国发生了10多次沙尘天气,其频率之高、范围之广、强度之大为10多年来所少见,引起社会各界的广泛关注(叶笃正等, 2000)。因此,研究沙尘暴对区域生态环境建设和可持续发展有着重要的意义。

1.3 国内外沙尘气溶胶研究的最新进展

1.3.1 沙尘气溶胶的形成及背景分析

国外对沙尘暴的研究始于20世纪20年代,我国国内起步较晚,始于20世纪70年代(徐国昌等, 1979)。近年来,尤其是2000年以来,国内外对于我国沙尘暴开展了广泛的研究。这些研究主要集中在沙尘暴天气动力学特征分析,天气气候特征,天气学诊断分析,卫星云图监测分析,沙尘数值模式研究、沙尘暴路径分析。以及沙尘暴灾害评估等方面。徐启运等(1996)、黄兆华(1997)一致认为我国西北地区强和特强沙尘暴天气空间分布特征是地理纬度高、面积大,多发区集中,分散在西北七大沙漠或其边缘地区,强和特强沙尘暴的出现以新疆最多,塔里木盆地周围地区是西北地区多发区之一。钱正安等(1997)研究发现沙尘暴的形成必须具备三个条件:一是要有大风。风速必须大于或等于起风临界值,才能裹挟沙尘进入大气中;二是要有沙源。沙源主要是沙漠、退化的林草地或没有植被覆盖的干松土地及城乡建筑工地的泥沙;三是要有冷暖空气相互作用。周秀骥等(2002)利用轨迹方法详细分析了2000年3~4月影响北京地区的沙尘暴移动路径,表明主要有3个方向,即西北偏北、西北方向和偏西方向,并认为西北路径为历史上的高频数轨迹路径,是影响北京地区的沙尘暴主体路径。徐建芬等(2002)对1977年

以来西北地区发生的22例区域性强沙尘暴天气过程进行了综合分析,根据沙尘暴的天气形势特点、冷空气来源及云图特征等将沙尘暴移动路径分为西方路径、西北路径、北方路径3大类:(1)西方路径。冷空气从中亚翻越帕米尔高原进入南疆西部,沿塔里木盆地东移影响南疆、河西西部及青海北部而出现大风沙尘暴天气,并随冷空气途经塔克拉玛干和古尔班通特古沙漠东移。此类沙尘暴占14%,主要发生在塔里木盆地、河西走廊西部和青海省。(2)西北路径。冷空气源于北冰洋冷气团,强冷空气自西西伯利亚向东南经我国北疆、内蒙古西部入侵河西走廊,造成大风沙尘暴,穿过巴丹吉林和腾格里沙漠,然后东移至鄂尔多斯高原。此类沙尘暴具有范围广、强度大、灾害严重的特点,易形成黑风,发生次数最多,占68%。(3)北方路径。冷空气来自极地气团或变性气团,经贝加尔湖、蒙古国南下,影响我国西北地区东部和华北等地,从而引发大风沙尘暴。沙尘暴从蒙古国经我国内蒙古中部到达西北的宁夏、陕北以及华北等地区,此类路径的沙尘暴占了18%。韩永翔等(2005)通过近40年(1961~2000年)中国沙尘暴月际时空分布特征表明。中国沙尘暴主要发生在青藏高原和北方干旱半干旱地区。从近40年沙尘暴月平均发生频率看。12~3月份,沙尘暴发生中心集中在青藏高原上。随时间推移。沙尘暴中心向北移动;4~6月份主要集中在北方的干旱半干旱地区。中国大陆尤其是青藏高原沙尘暴的月际时空特征表明,它同高空西风急流的位置密切相关。沙尘暴中心从冬到春随西风急流的摆动而由南向北移动,500hPa西风急流是沙尘远程传输的主要动力。Rea等(1998)对太平洋深海沉积沙尘的研究,认为其沙尘来源于中国西部干旱荒漠化地区包括黄土高原和青藏高原。王式功等(1996)认为我国西北地区大范围沙尘暴天气的发生,总伴随着大尺度环流经纬向的调整;尚可政(1998)等研究表明:春季河西沙尘暴次数与赤道中、东太平洋海温因子负相关最好,利用前期赤道中、东太平洋海温距平和本文给出的预报方程,可以较好地预报出河西春季沙尘暴的发生次数。杨晓玲等(2005)通过2004年3月2日一次区域性大风沙尘暴天气过程研究,发现这次沙尘暴天气的天气学原因主要是由于强冷空气的卷入使西伯利亚冷槽强烈发展,为沙尘暴的发展提供了动力条件,而西伯利亚冷槽的垂直结构为沙尘暴提供了动量下传机制,地面冷锋后部形成的大风,为沙尘暴的形成创造了基本条件。孟雪锋等(2003)对2002年4月6~8日一次强沙尘暴天气过程成因分析也得到:西伯利亚冷槽是造成这次天气过程的

主要系统之一。

周自江等(2001)利用较详细的站点资料,以点面结合的方式,对中国北方地区沙尘暴和扬沙天气的变化趋势进行了分析,得出近45年来我国大部分地区的沙尘暴和扬沙日数在减少,只有小部分地区呈增长趋势。王涛等(2001)认为,20世纪70年代末期后,冬季东亚大气环流出现突变,高空东亚大槽偏东偏弱,致使沙尘暴源区冬春季风速减小,再加上80年代中期后厄尔尼诺事件盛行,所以80~90年代沙尘暴次数偏少;以后因东亚大槽逐渐恢复到正常偏强状态,使风速加强,同时1999~2000年已转为拉尼娜年,因此2000年我国北方大部分地区沙尘暴急剧增加。朱乾根等(1992)研究发现春季地面平均风速大小与沙尘天气发生频数之间有很好的统计显著相关。在中纬度地区,风压场近似满足地转平衡关系,风速大小与水平气压梯度力成正比。

王式功等(2003)研究发现我国沙尘暴的季节和月份变化特点是:春季最多,约占全年总数的1/2,夏季次之,秋季(新疆地区为冬季)最少;按月份来看,4月份发生频率最高,3月和5月份次之,秋季的9月份(新疆为12月或1月份)最低。方小敏等(2004)研究表明,青藏高原黄土主要来自青藏高原中、西部的广大风蚀地区,中、高空西风 and 高原季风可能是主要的沙尘制造者和搬运载体;并通过2003年3月4日拉萨沙尘天气过程中运移分析和遥感监测,证明青藏高原具备发生沙尘暴的所有条件,是中国和远东—太平洋地区一个重要的沙尘源地。

同时,沙尘气溶胶对气候、海洋生态系统和生物化学循环也有着重要影响。我国学者对沙尘暴的时空分布规律进行了大量的研究,总体而言,我国沙尘天气发生频率大致由西北向东南方向减少。中国沙尘暴天气在亚洲地区出现最早,4月出现频率最大,近年有提前的趋势,9~10月出现频率最低。沙尘暴的变化趋势是人们一直关注的问题,为了探明近50年来我国沙尘暴变化趋势的空间分布特征。秦大河等(2002)认为在冬季海平面气压图上,整个亚洲大陆几乎全为西伯利亚高压(蒙古高压)控制。包括西北和内蒙古在内的我国大部分地区气候都受其显著影响,当高压强时,冷空气活动频繁,强度大。方宗义等(2002)对2002年春季的沙尘暴研究表明,加深的东亚大槽和东北冷涡可以产生偏北路径的大范围沙尘暴。王金艳等(2007)利用我国北方1954~2005年470个站点的春季沙尘暴资料和相应的气候资料,在合理区划沙尘暴易发地区的基础上,采用气象统计分析中的

相关分析方法,对沙尘暴与气温、降水量、相对湿度、地温、风速、风蚀指数等气候因子间的相关性进行了统计分析,研究各个区域沙尘暴发生的气候特征,结果表明:气候要素与我国北方春季沙尘暴的发生有一定的耦合关系,南疆的沙尘暴与气候要素的相关性最好,而北疆的最差。与沙尘暴相关性最好的气候因子是风速,其次是风蚀指数。

1.3.2 沙尘气溶胶的气候学效应

政府间气候变化委员会(IPCC)第一次科学评估报告(1990)中指出:“要测定行星中由气溶胶引起的辐射收支变化的信号是不容易的”;但第二次评估报告(1995)就得出结论,“人为因素形成的气溶胶会产生负辐射作用力(即地表冷却效应)”,“在局部地区,气溶胶的负作用力甚至会比温室气体的正作用力还要大得多”,在全球尺度的辐射平衡中,大气气溶胶中的矿物质颗粒持续的时间和空间、粒子的物理化学性质的变率最大。也是最难确定的部分。此外国际全球大气化学计划(IGAC)在10年前刚开始时就制定了大气海洋化学实验(AE2ROCE)长期计划,其中就包括了有关气溶胶与气候关系的研究。

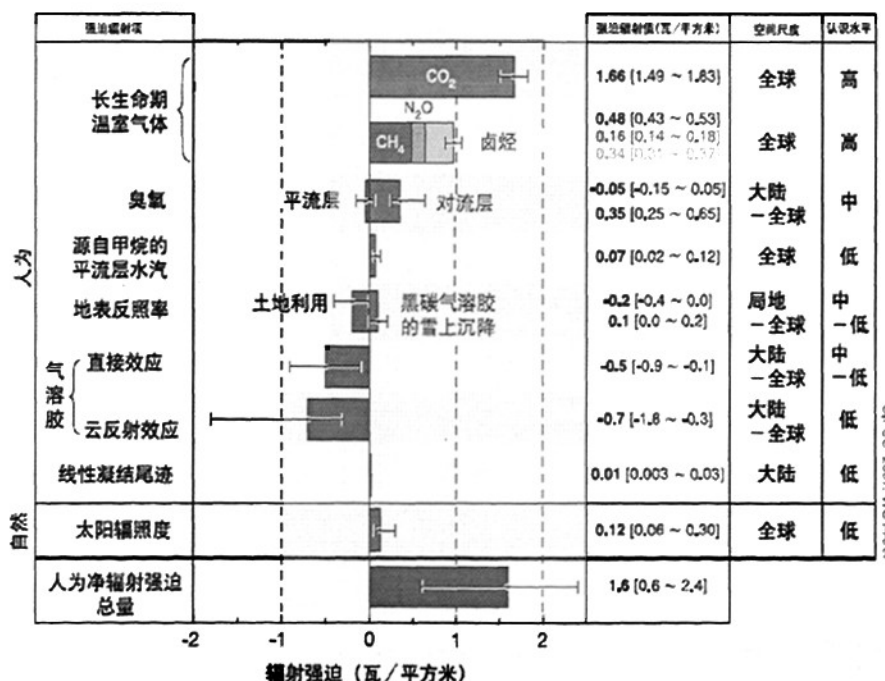


图 1.3 2005 年全球平均辐射强迫(RF)估算值及其范围(引自: IPCC, 2007)

自第三次IPCC评估报告以来,各国科学家通过研究人类活动与气候变暖和冷却作用之间的相互反馈过程认为,从1750年以来,人类活动对地球造成的影响是导致地球变暖的主要因素之一,其辐射强迫的改变量为 $+1.6(+0.6$ 至 $+2.4)$ W/m^2 ,其中主要观点认为,由于黑碳气溶胶具有强烈的光学吸收,因此被认为对全球变暖有显著的影响,但是沙尘气溶胶对全球气候的辐射效应同时起到了增温和降温的作用。而2007年IPCC第四次报告中有关讨论气溶胶的总体效应中认为(图1.3),人为气溶胶(主要包括硫酸盐、有机碳、黑碳、硝酸盐和沙尘)共同产生冷却效应,共产生 $-0.5(-0.9$ 至 $-0.1)$ 瓦/平方米的总直接辐射强迫,和 $-0.7(-1.8$ 至 $-0.3)$ 瓦/平方米的间接云反射强迫。Forster等(2007)给出化石燃料燃烧和生物质燃烧产生的黑碳气溶胶在大气顶造成的辐射强迫分别为 $0.44 \pm 0.13 \text{W/m}^2$ 和 $0.29 \pm 0.15 \text{W/m}^2$,不确定性很大,目前的科学理解水平仍然很低,值得给予进一步的研究。由于现场、卫星和地基观测的改进以及对气溶胶模拟的改进,目前对气溶胶的辐射强迫有了更进一步的认识,但仍存在不确定性。

沙尘气溶胶是大气科学最早研究的大气化学对象之一,其主要研究内容包括:沙尘气溶胶的物理化学特征,沙尘气溶胶的形成和转化机制,非均相化学反应过程、沙尘气溶胶的辐射效应、及其对云雾降水过程中的作用,是气候变化研究中的重要因子,沙尘气溶胶对气候的影响通过以下三种方式来对气候进行反馈:第一种是沙尘气溶胶的直接效应(Jaffe et al, 2003),包括散射和吸收太阳辐射、吸收和发射红外辐射,沙尘气溶胶悬浮在大气中,通过散射和吸收太阳辐射,从而冷却大气,并会使大气的能见度变坏;另一方面却能通过微粒散射、漫射和吸收一部分太阳辐射,减少地面长波辐射的外逸,使大气升温。其对气候系统、环境和人类健康具有重要影响。第二种是沙尘气溶胶的间接效应(Huang et al, 2006a),沙尘气溶胶与水态云相互作用改变其散射特性,对云量和生存周期产生影响,另外,沙尘气溶胶可以作为云的凝结核来改变云的光学特性和云的分布,从而间接影响气候,作为凝结核,在大气中改变云滴的浓度和云滴在大气中存在的时间,改变云形成的微观结构,气溶胶粒子是云形成的前提条件,在当前大气的温湿条件下,如果没有气溶胶粒子的存在,将不会有云,因此,在

某些特定区域,气溶胶粒子增加的一个最直接的影响是使云滴数量增加,同时,在我国西北地区,沙尘气溶胶可能引起云滴粒子的数量增加,云滴粒径变小,从而导致大气中原本可以导致降水的云形成不了降水,云的生命史增加,进而影响地表湿度和植被从而改变地表反照率,并进一步影响气候。

第三种是近年来关于沙尘气溶胶的半直接效应的研究,半直接效应主要是沙尘气溶胶能够吸收太阳辐射,加热沙尘气溶胶本身,因此,大气中低层大气中的水汽可以被沙尘气溶胶蒸发,导致低层大气中的水汽含量降低,即为沙尘气溶胶的半直接效应。沙尘气溶胶对区域气候的影响主要是降低了地面入射太阳辐射通量,例如,在北京地区的一次沙尘天气过程中,观测到地面入射太阳辐射通量减少了近40%。气溶胶的辐射特性对云微物理性质与云中化学过程具有依赖性,云的辐射特性对气溶胶物理化学性质也具有依赖性。

此外,气溶胶对人体和其他生物的生理健康也有其特有的影响。由于气溶胶对全球气候变化的影响,气溶胶再次成为国际学术界的研究热点之一,大气气溶胶是当今大气化学研究中前沿的领域。大气气溶胶的研究内容,发展到包括物理和化学的性状、来源和形成、时空分布、对气候变化和环境质量的影响以及对大气化学过程的影响等多方面、多层次的综合研究,也涉及到大气科学的各个领域,具有很强的综合性。

1.3.3 沙尘气溶胶的物理化学特性研究

我国西北地区的沙漠地区是全球大气沙尘输送的重要源区之一,气象资料表明,几乎每年春季,在我国西北部干旱地区都会出现程度不同的扬沙,浮尘及沙尘暴等天气现象。由强冷空气活动引起的沙尘暴会经过北京、黄淮、江淮。有的还影响到太平洋地区(Shaw et al, 1980),甚至北美地区(Husar et al, 1997, 2001; Uno et al, 2001)。研究发现,亚洲沙尘总量估计为800Tg,占对流层气溶胶总量的一半(Zhang et al, 1997)。随着各国科学家对全球沙漠化趋势及全球环境问题的关心,各国科学工作者都非常重视研究起源于我国西北部干旱地区沙尘气溶胶的化学组成、粒度分布以及来源和输送过程。近年来,国内外许多学者对沙尘气溶胶物理化学特性方面做了一系列的研究工作(Huang et al, 2006b; Rosenfeld et

al, 2001; Zhang et al, 2003; Ramanathan et al, 2003; 刘立超等, 2005)。

张仁健等(2000)发现在沙尘暴期间, 20 种元素总质量浓度高达 $1536\mu\text{g}/\text{m}^3$, 是 1999 年春季的 7 倍, 其中来自远方的大粒子占了很大的比例。沙尘暴期间的粗粒子数浓度是沙尘暴后的 20 倍以上, 细粒子的数浓度是沙尘暴后的 7 倍。而庄国顺等(2001)研究发现, 沙尘暴期间气溶胶质量浓度高达约 $6000\mu\text{g}/\text{m}^3$, 比平日高近 30 倍, 主要污染元素 As、Sb、Se 的富集系数比平日更高, 主要污染源不仅来自于北京局部地区, 而且来自于其长距离传输过程中的区域污染, 其中 S 在沙尘暴中含量高达 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, 比平常高出 4 倍。主要来源与长期传输过程中由气体到气溶胶的转化, 沙尘暴包含有大量的细粒子, 粒径小于 2.1 和 $9.0\mu\text{m}$ 的部分分别占总量的 16.1%和 76.9%。沙尘暴高峰时不仅席卷而来比平日高出数十倍的沙尘, 而且也带来了比平日高出数倍的污染气溶胶。特别引起注意的是他们还发现沙尘暴在输送沙尘的同时又输送比平日气溶胶高得多的污染物。在长距离传输过程中沙尘暴入侵气团与沿途污染气团之间的交汇叠加和沙尘暴矿物气溶胶与沿途污染源排放的污染气溶胶混合导致沙尘气溶胶的物理化学特性发生变化。在北京 1995 年春季发生的 5 次沙尘过程中采用试剂薄膜法和 X 射线能谱对单个沙尘粒子的分析结果显示, 几乎没有沙尘粒子含有可溶性硫酸盐, 并且含有硝酸盐的沙尘粒子仅占总沙尘粒子数的 11%, 远远低于无沙尘时硝酸盐粒子所占的比例, 这一结果说明发生于中国北部和西北地区的沙尘在中国大陆内传输过程中, 其成分变化不大, 仍以其源区的组成成分为主(Zhang D.Z. et al, 2003)。Duce 等(1983)早在 20 世纪 80 年代通过太平洋上空的海气交换(the sea-air exchange, SEAREX)和大西洋上空的大气海洋化学实验(the atmosphere-ocean chemistry experiment, AEROCE)等气溶胶大尺度研究, 发现了海洋中的一些元素, 如 Pb、Al、V、Mn、Zn 和某些有机化合物, 主要来源于沙尘气溶胶的远距离输送。孙业乐等(2004)通过 2002 年的一次北京特大沙尘天气个例研究, 发现主要地壳元素 Ca、Al、Fe、Mg、Na 等高达平日的 30~58 倍, 污染元素 Zn、Cu、Pb、As、Cd、S 比平时高出几倍至近十倍, 沙尘暴长距离传输过程中矿物气溶胶与沿途污染源排放的污染气溶胶进行混合, 证明了沙尘暴带来的大量矿物气溶胶有利于污染物的转化和积聚。

刘明哲等(2003)也证实了沙尘源区与沉降区相比, 大气气溶胶粒子的浓度分

布特征及气溶胶粒子中的水溶性粒子的浓度分布特征、组成成分都有明显的不同,这说明两地气溶胶粒子的理化特性发生了变化。颗粒物的表面结构特征以及单颗粒物的物理化学特性,能提供更多关于气溶胶来源、传输和化学转化的信息。气溶胶颗粒物的表面结构及其组成对于研究包括沙尘暴在内的气溶胶在其长距离传输过程中化学变化的微观机制至关重要。张兴赢等(2004)通过研究沙尘气溶胶在长距离传输中铁-硫耦合机制,得到了沙尘气溶胶远距离传输的重要证据,进一步证实了沙尘气溶胶对全球环境变化可能的重要影响。此外,沙尘气溶胶的粒谱分布也是沙尘气溶胶的一个重要物理特征,牛生杰等(2001)利用 APS-3310A 型激光空气动力学气溶胶粒谱仪观测了内蒙古中西部沙漠地区不同天气下的气溶胶粒谱分布和演变规律以及沙尘天气下,以亲地壳元素为主的气溶胶元素浓度均高于背景大气和浮尘天气,而且沙尘暴强度大,元素浓度的增加显著。沙尘气溶胶基本特征及其气候和环境效应研究成为当前国际大气化学研究的热点之一。通过对大气中沙尘气溶胶的特性进行监测与分析来探讨区域性气溶胶对气候、环境、人类健康等方面的影响,并为国内类似研究积累经验,也为建立区域大气沙尘气溶胶的污染治理对策提供科学依据。

1.4 本论文拟解决的问题

通过以上分析表明,近年来国内外学者对我国沙尘气溶胶进行了较全面的研究,取得了较好的研究成果。但是主要研究成果大都集中在研究沙尘气溶胶的天气学特征以及单个站点的沙尘气溶胶的相关属性,对于沙尘源区气溶胶物理化学特征,以及从起沙到传输过程中化学特性的转化方面研究仍然较少,需要进行深入的研究,因此本文对于沙尘气溶胶的研究主要包括以下几个方面:

- (1) 根据牛生杰等(2001)研究发现,发现不同类型沙尘天气的气溶胶质量浓度具有一定的比例关系,根据这个比例关系本论文建立一个能够较好反映沙尘天气气候学特性的沙尘指数。
- (2) 当我国黄土高原地区发生沙尘天气时,其爆发的天气学原因较为复杂,导致沙尘气溶胶在大气传输过程中物理化学特征及其光学属性的观测研究难度较高,因此急需进一步进行深入分析。

- (3) 结合空气气团后向轨迹分析, 准确分辨出局地沙尘源与外来沙尘源, 对比局地沙尘源与外来沙尘源气溶胶的化学组分、矿物组分, 浓度分布等特征信息; 研究沙尘气溶胶从起沙到传输过程中气溶胶粒子谱分布的特征变化, 定量分析本地污染源与外来污染源的质量浓度与粒子谱分布的相对贡献。

1.5 本论文研究内容及章节安排

第一章 绪论

对黄土高原地区沙尘气溶胶研究状况做了简要回顾, 针对目前国内外该领域研究内容的不足, 提出本论文拟研究的问题, 并对论文的主要内容进行介绍。

第二章 资料简介和研究方法

本章内容主要介绍了有关沙尘气溶胶长期观测资料的来源以及分析沙尘天气所需要的大气环流形势和 HYSPLIT 模式等相关资料来源, 并对 SACOL 气候站采集沙尘气溶胶资料的相关仪器进行介绍, 此外本章还介绍了用来研究沙尘气溶胶特征的一些数学统计方法, 主要包括相关分析、因子分析、富集因子分析等方法。

第三章 沙尘天气的长期变化趋势背景分析

对我国北方地区沙尘天气的空间分布特征及其发生频率的趋势进行研究, 利用两个主要发生源地的沙尘天气站点的沙尘天气发生频率资料, 建立了能够反映我国沙尘天气气候学特征的沙尘指数, 并与 TOMS 卫星的气溶胶吸收指数进行对比分析, 来检验沙尘指数的可信度。

第四章 黄土高原春季沙尘天气个例分析

对 2007 年 5 月 2 日的一次西北地区大范围沙尘天气个例进行分析与讨论, 探讨沙尘天气过程中气溶胶的物理及其光学属性。

第五章 黄土高原气溶胶季节变化特征分析

通过 SACOL 气候观测站上大气成分观测系统, 包括(APS 粒子谱仪、黑碳仪)等仪器, 对我国黄土高原地区不同种类气溶胶的季节变化以及日变化的总体特征进行了分析与讨论。

第六章 沙尘气溶胶传输过程中微量元素的转化特征

利用兰州市、武威市和皋兰县三个地区建立的沙尘气溶胶采样点, 对 2002

年整个春季天气过程进行采样,通过分析采集气溶胶样品的化学微量元素特征,来讨论沙尘气溶胶在大气传输过程中化学元素特征的转化,为研究沙尘气溶胶的来源建立基础。并初步分析了 2008 年中美联合观测沙尘气溶胶特性的相关研究结果。

第七章 结论与展望

对本论文的主要工作进行总结,并对将来的工作进行讨论与展望。

1.6 本论文的主要创新点

本文首先从我国 40 多年来沙尘天气总体的时空分布以及变化趋势入手,通过 SACOL 气候站长期观测的气溶胶相关数据,分析了黄土高原地区沙尘气溶胶物理特征及其光学属性,同时对我国 2007 年 5 月 2 日的一次沙尘天气过程进行了深入分析,通过对比几个沙尘源地以及城市附近化学元素的变化特征,研究沙尘气溶胶在传输过程中化学特征的转化,进而探讨不同沙尘天气气溶胶的来源。对沙尘气溶胶物理化学特性及其光学属性研究这一国际前沿问题进行讨论,本文的主要创新和特色之处有以下几点:

- (1) 利用国家气象局在新疆与内蒙地区的沙尘天气基准站 40 多年沙尘天气记录,综合沙尘暴、浮尘、扬沙三种沙尘天气类型,建立了能够较好反映沙尘天气气候学特征的沙尘指数;
- (2) 全面分析了我国黄土高原地区不同气溶胶种类的季节变化特征,其中包括黑碳气溶胶的日变化特征、沙尘气溶胶质量浓度、粒径分布、气溶胶光学属性等参数的日变化,用来研究黄土高原地区沙尘气溶胶的物理特征及其光学属性。
- (3) 通过沙尘气溶胶在传输过程中化学元素组成的转化,详尽研究沙尘气溶胶从起沙过程到人为影响区域的来源、浓度以及组分等物理化学组成变化机制,其中化学组成研究包括(常、微量、稀土元素等)、矿物组成和磁学性质的示踪分析等。
- (4) 利用化学示踪指标和数学统计方法研究源区与沉降区沙尘气溶胶,来区分沙尘气溶胶与人为气溶胶的相对贡献率。

第二章 资料简介和研究方法

2.1 资料来源

- (1) 采用中国气象局气候资料中心提供的全国 701 个气象台站沙尘暴、扬沙、浮尘月平均发生次数的资料(1960~2000), 其中沙尘天气次数的定义依据《地面气象观测规范》, 气象日界为 20 时。在统计沙尘暴出现日数时, 若某一次沙尘暴跨越 20 时, 按两个出现日计算。当某一天沙尘暴过程出现两次或以上时, 按一个出现日计算。在做日变化及持续时间统计时, 将跨越 20 时出现的沙尘暴作为一次连续的过程处理。
- (2) 本文使用的再分析资料, 是由美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的月平均格点数据集。包括了海平面气压资料以及 17 个不同层次的(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa)纬向 U 风场资料和高度场资料。网格为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。
- (3) 气溶胶质量浓度和数浓度、及其光学厚度等气溶胶相关数据来源于兰州大学干旱与半干旱教育部重点实验室(SACOL)的气溶胶粒子谱仪以及太阳光度计等仪器, 此外还有一部分主要研究资料来源于 PECDEX 试验计划与中美联合观测试验, 其中所有观测资料都经过严格的质量控制, 有较高的可信度。有关的两次联合观测试验的相关内容介绍见本章 2.3。
- (4) 兰州市沙尘气溶胶化学元素分析, 利用兰州大学西部教育部重点试验 ICP-MS 处理。
- (5) 气溶胶吸收指数(AAI)来源于 TOMS 卫星观测, 卫星观测 AAI 的空间分辨率为 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$, 时间分辨率为 24h。

2.2 SACOL 气候观测站

2.2.1 SACOL 观测站概况

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)位于兰州大学榆中校区海拔1961米的萃英山顶上(35.946°N, 104.137°E)。下垫面属于典型的黄土高原地貌,塬面梁峁基本为原生植被。属温带半干旱气候,年平均气温 6.7°C, 1 月平均气温 -8°C, 7 月平均气温 19°C。年平均降雨量 381.8mm, 相对湿度 63%。山顶全年盛行西北和东南风, 年平均风速约为 1.6 m/s。全年日照时数 2607.2h 左右。山顶的环境基本属于自然状态, 受人类活动的影响较小, 观测点的气候状况可以代表方圆几百公里半干旱地区气候状况, 具有典型的黄土高原地表特征。SACOL 气候站主要研究黄土高原地区沙尘气溶胶的物理化学特征及其光学属性与辐射效应, 上述研究涉及的区域主要包括沙漠地区和城市地区, 特别是典型的黄土高原半干旱地区的沙尘气溶胶传输过程中的物理化学特性的变化方面的研究仍鲜见报道。黄土高原半干旱区是中国半湿润气候区向干旱气候区的过渡带, 生态环境脆弱, 地表性质复杂, 是气候变化的敏感区域, 以往缺乏对该地区气溶胶相关属性的系统观测研究。

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)是按国际标准建设的气候观测平台, 拥有先进的气候和环境观测设备和仪器, 可以进行各种大规模的气象观测实验。



图 2.1 SACOL 站点地理位置

目前全世界共有 32 个此类观测点，分别位于不同的国家和地区，兰州大学气候观测点是国内第一个在高校建立的气候观测点。在此之前国内已经建成两个此类气候观测平台，同时本站是继中国科学院吉林通榆站之后，第二个由我国自主建设的长期观测站。本站目前已被批准加入国际 CEOP 项目、国际 AERONET 项目、国际 MPLNET 项目，并作为参加此项计划的全球协同加强观测站之一。

2.2.2 样品采集

论文主要依靠 SACOL 气候站长期采集的气溶胶相关资料，主要采集资料包括沙尘气溶胶质量浓度、数浓度、及气溶胶光学特征等重要参数，其中，气溶胶质量浓度、数浓度每 5 分钟采样一次，气溶胶光学厚度每 15 分钟采样一次，黑碳气溶胶也是每 5 分钟采样一次，大气成分仪器主要用来采集沙尘天气过程和背景大气情况下空气中的 NO_x 和 SO_2 等相关污染气体，采样间隔为每 5 分钟一次。以上所有数据经过气候站工作人员进行相关数据的质量控制与标定。此外，兰州武威和皋兰三地的沙尘气溶胶化学元素以及我国西北地区地表土壤粒子化学元素利用兰州大学资源环境学院的教育部重点实验室的 ICP-MS 质谱仪来进行测定。

2.2.3 主要观测仪器

采集沙尘天气气溶胶相关数据及重要参数所利用的仪器包括：黑碳仪、气溶胶粒子谱仪、气溶胶浊度仪、太阳光度计以及大气成份监测系统等。具体见图 2.2~2.3。各种主要仪器的相关参数见表 2.1。



图 2.2 采集沙尘气溶胶主要仪器

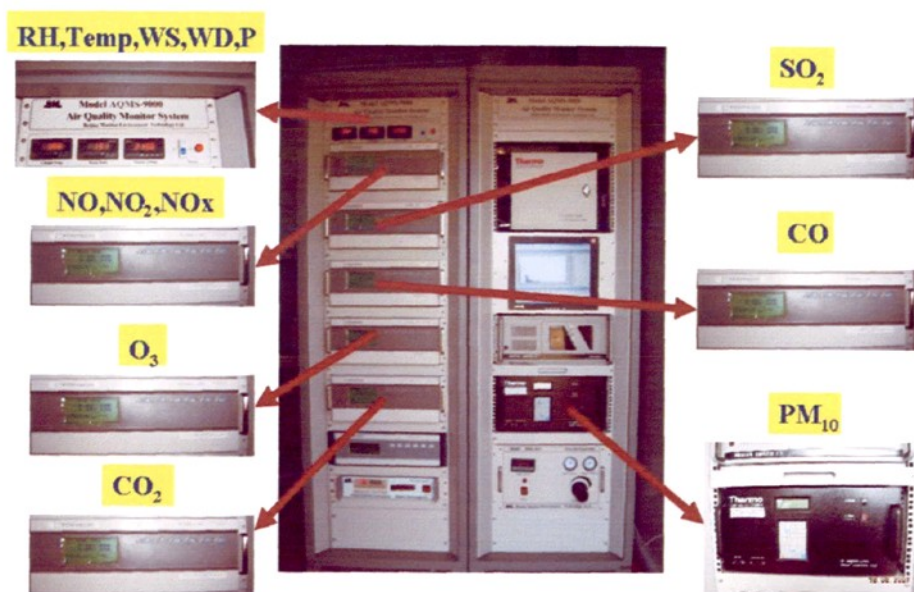


图 2.3 大气成分观测系统

表 2.1 部分试验观测仪器相关型号与主要参数指标

仪器名称	型号	性能	观测项目	精度	制造商
多波段太阳光度计	CE-318	一种高精度太阳和天空辐射测量仪器, 具有易携带安装、自动瞄准、太阳能供电和自动传输数据	测量太阳和天空在可见光和近红外的不同波段、不同方向的辐射亮度, 可推算各波段的	340, 440, 670, 870, 940, 1020, 1640nm 七个波段	Cimel 公司, 法国

		特点	大气气溶胶、水汽和臭氧含量等特性	半波宽度为10nm	
空气动力学直径粒子谱仪	APS 3321	高性能、多用途的新一代粒子测量仪器,通过精密的飞行时间(TOF)技术可以实时测量粒子的空气动力学粒径	0.5~20 μ m 粒子数浓度和空气动力学粒径 0.37~20 μ m 光学散射强度	最大检测浓度: 1000 个/cm ³ 在 0.5 μ m, 最小为 0.001 个/cm ³ 最大处理速度: 200000 个/s	TSI 公司, 美国
黑碳仪	AE-31	全自动、不需消耗化学品、无需维护校准,样品收集在石英纤维滤膜带上	测量可见光、近红外 7 个波段的吸收光谱、大气光学特性	370, 470, 520, 590, 660, 880 和 950nm 七个波段 精度 0.1 μ g/m ³	Magee Scientific 公司, 斯洛文尼亚
积分浑浊度仪/3台	TSI Nephelometer	采用标准积分的几何原理来检测光散射衰减系数的一种能见度测定仪器,新技术、维护率低,适用于一般的环境监测	气溶胶粒子在三种不同波段的总散射	站上有 450, 520 和 700nm 三种波段的 3 台仪器 平均采样时间 1min	Ecotech 公司, 澳大利亚
环境质量监测系统	AQMS-9000 /6 台	一种测量大气微量气体成分的分析仪器,可手动或自动控制对仪器进行标气、零气标定,还可遥控环境监测站	测量 SO ₂ , CO, CO ₂ , NO, NO _x , O ₃ 等气体成分浓度		Ecotech 公司, 澳大利亚
环境粒子监测仪	RP1400a	设计用于测量近地面层可吸入颗粒物 PM ₁₀ 的浓度,不需要实验室	测量近地面层可吸入颗粒物 PM ₁₀ 的浓度	低维护 快速响应	Thermo 公司, 美国

以下是 SACOL 气候站为本论文提供气溶胶研究相关数据的部分主要仪器介绍:

RP-1400 震荡微天平:

RP-1400 震荡微天平是用特殊的含硼非热胀高温玻璃材质制成的锥形管,其根部固定,可换式滤膜置于按自然频率震荡的锥形管顶端,其上部两侧粘有小磁铁,与磁铁相对应处置有线圈,其一为震荡系统提供激励能量,其二是检测震荡信号,记录震荡频率,该频率取决于锥形管的物理特性、滤膜质量和小磁铁组成的震荡系统,电子系统能连续监测出震荡频率的变化。当颗粒物积聚于滤膜上时,震荡天平的震荡频率相应减少。其质量与振荡频率的平方成反比:

$$m=K/f^2,$$

式中： f 为频率(rad/s)； m 为质量； K 为弹性比率。根据质量和频率间的相关变化，微处理器系统能及时计算出滤膜上所累计大气气溶胶的质量浓度。

M9003 积分混浊度计：

M9003 型浊度计是一种可以准确测量大气中颗粒物的光学散射系数 σ_{sp} 的一种先进的仪器。气溶胶的光学散射系数 σ_{sp} 可以反映大气中颗粒物的污染程度， σ_{sp} 值越高，大气中颗粒物的含量就越高。此外， σ_{sp} 还与气溶胶的体积有直接的关系，其中单个粒子的表面积越大，散射系数 σ_{sp} 就越高，因此，相比较污染气溶胶和沙尘气溶胶，人为污染气溶胶能更好的反映散射系数的变化，同时它还可以反映大气能见度的好坏， σ_{sp} 值越高，表示能见度就越低。

AE-31 型黑碳仪：

AE-31 型黑碳仪是一种利用光学衰减法测量黑碳质量浓度的监测仪器，具有 7 个不同波长的测量通道，其中 $0.88\mu\text{m}$ 通道为黑碳浓度的标准通道。黑碳仪利用黑碳气溶胶对可见光的吸收特性来进行测量。汤洁等(1999)对黑碳仪的详细工作原理及资料处理方法进行了分析。

CE-318 太阳光度计

法国 CIMEL 公司的多波段自动跟踪扫描太阳辐射计 CE-318 不仅是一种大气气溶胶监测仪器，也是一种测量大气光学参数的重要仪器，该仪器可以自动跟踪太阳进行太阳直接辐射测量、太阳高度角天空扫描、太阳主平面扫描和极化通道天空扫描。胡秀清等研究发现，CE-318 太阳光度计可以很好的监测沙尘暴天气发生时大气中光学属性的相关变化。根据 Lambert-Beer 定律，通过测量不同波段太阳直接辐射的强度，反演整层大气的光学厚度。辛金元等(2006)以及刘玉洁等(2004)对太阳光度计的原理及其标定等进行了深入的分析。

APS-3321 型空气动力学直径粒子谱仪

APS-3321 型空气动力学直径粒子谱仪可以测定气溶胶颗粒的空气动力学粒径，并给出气溶胶数量浓度、表面积浓度、体积浓度及质量浓度随粒径的分布情况。它具有宽阔的动力学粒径范围、很高的分辨率，仪器可精确、实时对空气动力学粒径在 $0.5\sim 20\mu\text{m}$ 的粒子进行测定，也可测量相应光学粒径范围($0.37\sim 20\mu\text{m}$)的光散射强度。测量结果受颗粒物折射率、密度、形状等因素影响较小，准确度和稳定性均高于同类的激光散射颗粒度仪，为当今应用最广泛的粒子分析

仪器之一。有关 APS-3321 粒子谱仪的相关信息可参考文献(牛生杰等, 2005)。

AQMS-9000 环境大气质量监测系统

AQMS-9000 型环境大气质量监测系统是北京莫尼特尔环境公司利用美国 Monitor Labs 公司和澳大利亚 Ecotech 公司技术, 并采用世界著名厂家的监测仪器组成的具有高性能化, 高透明度, 运行稳定可靠的环境大气质量自动监测系统。可提供实时环境大气质量监测的 NO/NO₂/NO_x、CO、CO₂、SO₂、O₃、碳氢化合物、空气粒子等污染参数和风速、风向、温度、相对湿度、大气压、降雨量、太阳辐射、净辐射等气象参数。

2.3 研究方法

2.3.1 相关分析方法

两个随机气候变量之间的关系密切程度可以通过计算相关系数来进行分析。

设有两个样本量为 n 的变量:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

$$y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$$

它们之间的相关系数的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

相关系数 r 的取值为 $-1.0 \sim 1.0$ 。当 $r > 0$ 时, 表明两个变量之间为正相关, 值越接近 1.0, 正相关越显著; 当 $r < 0$ 时, 表明两个变量之间为负相关, 值越接近 -1.0 , 负相关越显著。对于两个气候变量之间的相关是否显著, 即相关系数的值达到多少才算是存在显著的相关关系, 必须要进行相关检验。所谓相关检验, 其实就是检验两个变量间的总体相关系数 ρ 为 0 的假设是否显著, 具体做法: 提出原假设 $H_0: \rho = 0$, 相关系数 r 的概率密度函数正好是 t 分布的密度函数, 因此可以用

t 检验来对 r 进行显著性检验。统计量:

$$t = \sqrt{n-2} \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}$$

遵从自由度 $\nu=n-2$ 的 t 分布。给定显著性水平 α ，查 t 分布表，若 $t > t_\alpha$ ，则拒绝原假设 $H_0: \rho=0$ ，认为相关系数是显著的。

2.3.2 因子分析法

因子分析是多元统计分析方法之一，是分析多个变量之间存在关系的一种统计方法。其目的在于对大量观测数据，用较少量的有代表性的因子来说明由多个变量所提供的信息。也就是要把一些具有复杂关系的变量或样品归结为数量较少的几个综合因子。

因子分析可以通过检验变量间的关系或样品间的关系来进行。利用变量(或样品)间的相关系数为基础的叫做 R 型因子分析；利用变量(或样品)间的相似系数为基础的叫做 Q 型因子分析。前者用于研究变量间的组合与关联状况，后者用于研究变量间的组合、演化及相似的情况。我们在判别气溶胶来源的因子分析中更常用前者。

因子分析方法的经典模型是，假设取 m 个样品，每个样品观测到 n 个变量，这样就构成了一个 $M \times N$ 阶数矩阵，即：

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

如果可用较少的 k 个因子来描述这个系统，则数目较少的新变量必定是原变量的线性组合，这样可使观察系统结构简化，有利于抓住系统的主要特征。

变量 x_j 可以有下面的线性关系式：

$$x_j = a_{j1}f_1 + a_{j2}f_2 + \cdots + a_{jk}f_k + d_ju_j$$

式中 f_k 为第 k 个因子得分； a_{jk} 为第 k 个公因子对 x_j 的相对重要性。它也称

为因子载荷; u_j 是个别变量特有的因子(单子), d_j 是其权重系数。上式的矩阵为:

$$X = AF + DU$$

等式右边的各个矩阵式为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{s1} & a_{s2} & \cdots & a_{sk} \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1s} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{k1} & f_{k2} & \cdots & f_{ks} \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & & & 0 \\ & d_{22} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & d_{sk} \end{pmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1t} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{k1} & u_{k2} & \cdots & u_{kt} \end{pmatrix}$$

s 和 t 分别表示, 当进行 Q 型分析时, $t=n$ (变量数), $s=m$ (样品数); 当进行 R 型分析时, $t=m$, $s=n$ 。

因子分析规定原始变量、公因子及单因子的期望为 0, 方差为 1。因此, Q 型分析时将原始数据作如下变换:

$$x_{ij} = x_{ij} / e_i$$

$$e_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2 / (n-1)}$$

R 型分析时, 原始数据变为:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}$$

其中 $\bar{x}_j$ 为变量 j 的均值, σ_j 为其标准差。

因子分析不仅仅只是找出几个有代表性的因子, 而且必须知道每个因子所代

表的意义，以及每个因子的相对重要程度等。因此，引出以下概念：

公因子方差：由于因子载荷实际是变量(或样品)与公因子之间的“相关系数”，即

$$A = E(XF)$$

另外，新组合的变量方差可分解成两部分，其中矩阵 A 的行元素平方和称之为公因子方差，矩阵 B 的行元素平方和称之为单因子方差，它们的和等于 1。

$$V_{ar}(x_i) = \sum_{j=1}^k a_{ij}^2 + g_i^2$$

若记 $\sum_{j=1}^k a_{ij}^2 = h_i^2$ 称之为公因子方差，由上述可知

$$V_{ar}(x_i) = h_i^2 + g_i^2 = 1$$

则：
$$h_i^2 = 1 - g_i^2$$

以上各式中 $i = 1, 2 \dots s$ 。当 h_i^2 越接近 1，则越能说明由 k 个因子就可以代表原始变量(或样品)的变化情况。

如上所述，因子分析不仅仅只是找出几个有代表性的因子，而且还必须知道每个因子所代表的意义，以及每个因子最大限度的相对重要性程度等。因此，获得初始因子载荷还不够，因为这种情况下的因子解具有不稳定性。为了克服这一点，常对估计的因子载荷(初始因子载荷)在不同准则下进行变换。依据简单构成原则，即每个因子只有少数几个变量具有高载荷，其余载荷均很小，以及每个变量只在少数因子上具有显著载荷，求出最终(或目标)因子载荷。

2.3.3 富集因子分析

为讨论大气气溶胶元素来源以及传输中化学变化等特征，本文引入富集因子的概念，因为大气气溶胶可以有不同的来源和不同的形成机制，其中所含的元素富集程度也不尽相同，因此分析沙尘期间元素的富集程度，有助于确定沙尘的源地。研究我国北方地区沙尘天气与背景大气的大气气溶胶的富集程度，进行大气

污染状况的分析,判断沙尘源与人为污染源的来源以及两者之间的相对比例,富集因子是一种双重归一化数据处理的方法,可以减少在采样过程中受风速、风向、以及污染源地的影响,因此比用气溶胶的质量浓度进行分析更为可靠,富集因子(EF)定义为:所感兴趣元素在沙尘气溶胶的化学成分与背景气溶胶元素的相对比值,其公式为:

$$EF=(X/Ref)_{\text{气溶胶}}/(X/Ref)_{\text{参考}}$$

式中 $(X/Ref)_{\text{气溶胶}}$ 表示沙尘气溶胶与背景气溶胶的元素与参考元素在样品中的含量比, $(X/Ref)_{\text{参考}}$ 表示地壳中相应元素在地壳中的平均元素丰度比,又叫参比物质。参考元素一般选择人为污染较小,且化学特性稳定的元素。

早在1975年Duce等(1975)在研究大西洋以北30°高空中的物质组成时,就用到了Zoller等(1974)提出的富集因子计算方法,并得到了较好的研究成果。经过多年的发展,这种方法已经应用到识别和表示诸如大气、降水、土壤、湖泊沉积物等系统中元素的自然来源和人为来源(Woitke等, 2003; Gordeev等, 2004)。Reimann等(2000)认为选择地壳或全球土壤元素平均含量作为参比系统是不可能得出合理的结果的。Blaser等(2000)提出应该采用当地的背景值(如当地未被污染的深层土壤)来代替平均地壳含量作为参考。尽管富集因子分析中存在着一定的缺陷,但是该方法具有统一的公式,所以仍不失为一种相对简单易行的评价不同环境介质中元素富集程度和污染状况的好方法。因此,许多研究中仍使用该方法。

目前,对于富集因子数值的大小反映富集程度的判定仍然有多种看法,本文引用 Sutherland(2000)的方法作为分级标准,具体见表 2.2。

表 2.2 富集因子分级表(引自 Sutherland, 2000)

EF 值	富集程度	污染级别
<2	<1 为无富集或 1-2 为轻度富集	1
2-5	中度富集	2
5-20	显著富集	3
20-40	强烈富集	4
>40	极强富集	5

第三章 我国沙尘天气背景特征分析

3.1 引言

浮尘、扬沙、沙尘暴是我国西北地区春季频发的一种灾害性天气，由于沙源充足，加上冬、春两季降水偏少，气候干旱，大风偏多，造成冬、春季节沙尘暴频繁发生，尤其是4~5月是全年沙尘暴的高发期，也是春季大气气溶胶的主要来源。其中强沙尘暴是一种严重的灾害性天气，它不仅造成极大的损失和久远的危害，而且其本身就是一种大范围、高浓度的污染物。我国北方干旱地区属于中亚沙尘暴发生源区的一部分，尤其以西北地区最为严重，我国西北地区沙漠、戈壁广布，整个地区年降水量多在150mm以下，植被稀少，沙尘物质极其丰富，风蚀强烈，成为亚洲沙尘暴的多发区之一。沙尘暴多发于我国北方地区，尤其是这些沙尘暴多起源于塔克拉玛干沙漠和戈壁以及蒙古地区，其发生频率最高的季节为晚冬和初春(Haywood et al., 1999; Higurashi et al., 2002; Takemura et al., 2002)，是我国沙尘暴的主要起源地。沙尘暴不仅对工农业生产和人民生命财产造成重大损失，而且污染环境，并对气候变化产生重要影响。

近年来我国学者从不同角度对沙尘天气的形成及其相关特征进行了简要分析，飞机观测沙尘气溶胶 (Ramanathan, 2003)、沙尘暴的卫星监测和预报(张杰等, 2006; 张小曳等, 2007)、气溶胶的气候效应进行定量研究(邱金桓, 2003)，沙尘气溶胶的物理和化学组分特征(申彦波等, 2007; 成天涛等, 2005)、大气沙尘的光学特性等方面(牛生杰, 2001; 刘晓云等, 2007; 宗雪梅等, 2005; 常倬林等, 2008)，对沙尘暴进行了较深入的研究，得到了一些研究沙尘暴天气的重要结论。

我国西北地区主要分布的沙尘源地包括：塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地、以及刚刚被证明有可能成为新源区的青藏高原地区(方小敏等, 2004)。我国沙漠地区，主要包括塔克拉玛干沙漠、蒙古国南部和我国的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地，当春季降水量较少，且冷空气活跃时，容易导致裸露于地表的源地沙尘很容易形成沙尘暴天气。周自

江等(2002)对近48年99例群发性强沙尘暴天气进行研究发现:阿拉善高原、鄂尔多斯高原及河西走廊的大部分地区是强沙尘暴的主要多发区;强沙尘暴的多发季节为3~5月,约占全年的78.8%;强沙尘暴的发生次数、持续时间和覆盖范围以20世纪90年代最少、最短和最小,但是1997年以后有明显的增加趋势。钱正安等(2002)利用近50年我国西北及华北地区的强沙尘暴资料等进行了分析,认为我国北方沙尘暴主要分布在河西走廊和阿拉善高原、南疆盆地南缘及内蒙古中部等三个地区,这些地区是我国产生沙尘天气的主要源地,也是我国沙尘暴监测、预测和防治的重点地区。陈洪武等(2003)对塔里木盆地沙尘暴天气过程进行研究,系统地研究其分布规律和变化特征,不仅揭示出塔里木盆地区域性沙尘暴天气过程趋于减少、同时发现,形成塔里木盆地沙尘暴的地面高压移动路径,不仅有西方路径还有东方路径。

张莉等(2005)利用地面气象观测资料,分析了我国北方1954~2001年、季沙尘天气发生日数的演变规律及其与主要气候要素,风速、相对湿度、降水、气温和干燥度的相关关系,用NCEP / NCAR再分析资料分析了冬春气压梯度的变化趋势。结果表明:近50年来,造成我国北方沙尘天气频率显著下降的直接自然原因是沙尘源区和发生区平均风速和大风日数的减少、主要沙尘源区降水量特别是春季及其前冬降水量的增加以及由于源区降水增加引起的大气和土壤湿润程度的改善。王式功等(2003)利用筛选的1954~2000年中国338个站沙尘天气资料及相关气候资料,从沙尘天气区划方面着重分析研究了我国沙尘天气的区域特征,认为全国沙尘暴天气易发区可划分为北疆、南疆、河西、柴达木盆地、河套、东北和青藏等7个亚区。丁瑞强等(2004)对我国北疆等7个亚区春季1960~2000年的沙尘暴日数的趋势和周期进行了初步分析,结果表明:除北疆未表现出明显的趋势外,南疆等其他6个区春季沙尘暴日数变化总的趋势是减少的,都是在20世纪60年代和70年代偏多,80年代沙尘暴开始减少,90年代最少;其中南疆、河西和东北的年代际变化最为明显,大约是80年代初开始沙尘暴明显减少,其他几个区的年代际变化不是很明显。李耀辉等(2004)研究发现近40年我国西北地区大风与沙尘暴发生次数随时间变化基本呈线性减少趋势,说明在下垫面状况不变或变化不大的情况下,近年来沙尘暴次数减少可能主要是由于大风天气减少而造成的。刘树林和王涛等(2005)利用浑善达克沙地地区8个典型气象站近50年的气候资

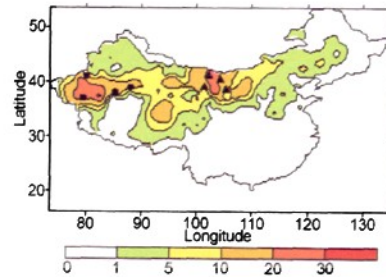
料,对整个浑善达克沙地进行了研究,发现自1970年以来,年平均风速在减小,但近40年来浑善达克沙地西部地区沙尘暴一直在发展;东部地区的沙尘暴在1980年以前呈增加的趋势,1980年以后则明显减少.

根据以上内容可见,我国沙尘天气总体上呈现了下降的趋势,因此本论文首先根据一些站点观测的最新研究成果,讨论了我国沙尘天气的空间分布特征,进一步讨论了沙尘天气的长期变化趋势,然后探讨新疆与内蒙古地区沙尘源地不同沙尘类型的季节变化特征,通过分析表明仅仅利用沙尘暴频率来反映沙尘天气的气候学特征是不全面的,因此,本文最后利用新疆与内蒙古沙漠地区的观测站点观测沙尘天气发生频次资料,建立了一个能够反映沙尘天气气候学特征的沙尘指数.同时利用TOMS卫星观测的气溶胶吸收指数对新疆与内蒙古沙尘指数进行检验.

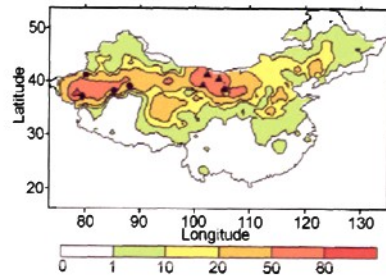
3.2 我国沙尘天气年发生日数的空间分布

新疆塔克拉玛干沙漠地区与内蒙古戈壁沙漠地区是我国沙尘天气多发的两个主要源区，新疆地处我国西北边陲，远离海洋，气候干燥，沙漠广阔，是我国沙尘暴的多发区之一。新疆四周高山环绕，北有阿尔泰山，西有准噶尔界山、西天山、帕米尔高原，南有昆仑山脉，天山山脉横亘中央，形成两大盆地。北部的准噶尔盆地地广人稀，中有古尔班通古特沙漠，气候干燥，植被稀少。南部的塔里木盆地中有广袤无垠的塔克拉玛干沙漠，为沙尘暴的产生提供了良好的物质条件，是世界四大沙源之一，而内蒙古地区的戈壁沙漠地区也分布着几大主要沙漠：包括腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地等主要沙尘源区，本文利用1960~2000年全国701个站点的沙尘暴、扬沙和浮尘发生日数的空间分布资料进行了统计分析，并分别绘制了沙尘天气年平均发生日数的空间分布图(图3.1)，从图3.1a中可发现，我国沙尘暴的空间分布基本上与我国北方沙漠地区及沙漠化土地分布相一致(吴正，1987)，反映了下垫面特征和沙尘源分布状况对沙尘天气形成的重要作用，从图3.1a中可以明显看

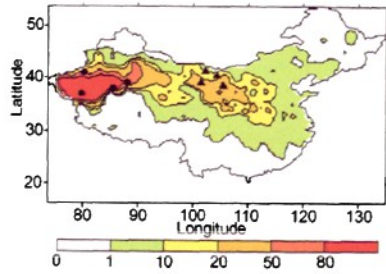
出，我国沙尘暴多发区主要发生在南疆与内蒙古戈壁沙漠地区，对比南疆与北疆地区，南疆地区的沙尘暴发生频率明显高于北疆地区，南疆沙尘暴年均日数多于10次以上的高发区基本上覆盖了整个塔克拉玛干沙漠地区，沙漠南部、西南部(喀什、和田和若羌等地区)



(A) 沙尘暴



(B) 扬沙



(C) 浮尘

图 3.1 我国沙尘天气年平均发生次数空间分布图(a 沙尘暴、b 扬沙、c 浮尘)

沙尘暴发生频率明显高于北部地区，南疆塔克拉玛干沙漠地区沙尘暴发生频率能达到20次以上，另外沙尘暴天气多发生在河西地区及青藏高原东北部的沙漠及其边缘地区，其余地区沙尘暴年均日数在4~10天之间，这些地区属内陆干旱区或半干旱草原区，位于我国第二级地势阶梯上，干旱少雨，多沙漠、沙地和旱地，植被稀少，当大风过境时，极易形成沙尘暴。而蒙古地区的沙尘暴多发地主要分布在腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠以及毛乌素沙地及其边缘地区，其最高发生地区包括拐子湖，巴音毛道等地区，沙尘暴年发生频率均超过了20天。图3.1b显示了我国北方地区扬沙天气年发生频率分布图，从图中可以看出，扬沙天气多发区的分布总体上与沙尘暴分布基本一致，多发区仍然处在南疆与蒙古戈壁沙漠地区，只是扬沙天气的年平均发生日数明显增多，如位于两个多发中心的和田和拐子湖，47年平均年发生日数分别为65天和46天，同时多发区的区域也明显扩大，其中蒙古地区的扬沙天气高于50次以上的区域从蒙古戈壁沙漠地区明显向东延伸到内蒙古的大部分地区外，向南也逐渐扩展到长江流域，而新疆沙尘源地的扬沙次数也明显增加，区域也明显向北疆与河西走廊地区扩展，其中塔克拉玛干沙漠及其边远地区的扬沙次数，均高于50天，位于塔克拉玛干沙漠中心的扬沙天气发生频率大于80天以上。而从新疆到河西走廊地区一直延伸到内蒙古地区的扬沙发生频率平均高于20次以上，整个黄河以北的大部分地区的扬沙天气次数都在1~10天之间，最后图3.1c显示的是我国北方地区浮尘天气的空间分布图，从图中可以看出，我国北方地区的浮尘发生次数的总体分布与沙尘暴、扬沙天气相比，多发区与沙尘暴和扬沙天气大体一致，但是对比沙尘暴与扬沙的发生次数，内蒙古地区的浮尘次数与新疆地区发生次数差别较大，从图中可以看出，新疆地区的多发区南疆地区的浮尘天气发生日数多在80天以上，局部地区大于200天以上，而内蒙古戈壁沙漠地区浮尘多发区的发生日数仅仅是在50~80天之间，根据以上内容分析可以看出，新疆与内蒙古地区的浮尘天气发生次数相差较大，这可能是由于南疆塔克拉玛干沙漠地区与内蒙古戈壁沙漠地区的地表植被类型不同造成的，南疆地区的塔克拉玛干沙漠地区的地表类型是沙漠型下垫面，当有大风天气发生时，就会引起浮尘天气的发生，而内蒙古戈壁地区的地表主要是荒漠草原，不易经常发生浮尘天气。对比我国北方地区的沙尘暴天气发生频率，内蒙古戈壁沙漠地区浮尘天气发生次数明显较少，且浮尘天气分布范围主要是向东南扩展到低纬地区，涉及到长江中下游地区。这表明浮尘天气影响范围更广。

3.3 1960~2004 年我国沙尘暴的年际变化趋势

沙尘暴天气是在特定地理环境和下垫面条件下，由特定的大尺度环境背景和某种天气系统发展所诱发的一种小概率的灾害性天气。沙尘暴扬起的沙尘气溶胶随高空西风环流远距离输送数千公里，影响范围极其广阔，对人们的生活与社会发展造成了巨大的危害。因此，本节论文主要讨论新疆塔克拉玛干沙漠与内蒙古戈壁沙漠地区两个主要沙尘源地沙尘暴的年际变化趋势，沙尘暴发生频次资料主要选取了新疆塔克拉玛干沙漠与内蒙古戈壁沙漠地区具有代表性的8个沙尘天气观测基准站，包括：阿克苏、若羌、和田、且末、拐子湖、巴音毛道、阿拉善右旗、阿拉善左旗。沙尘暴天气年发生次数来自于各站点年沙尘暴发生频数的累加，其时序分布如图3.2所示。

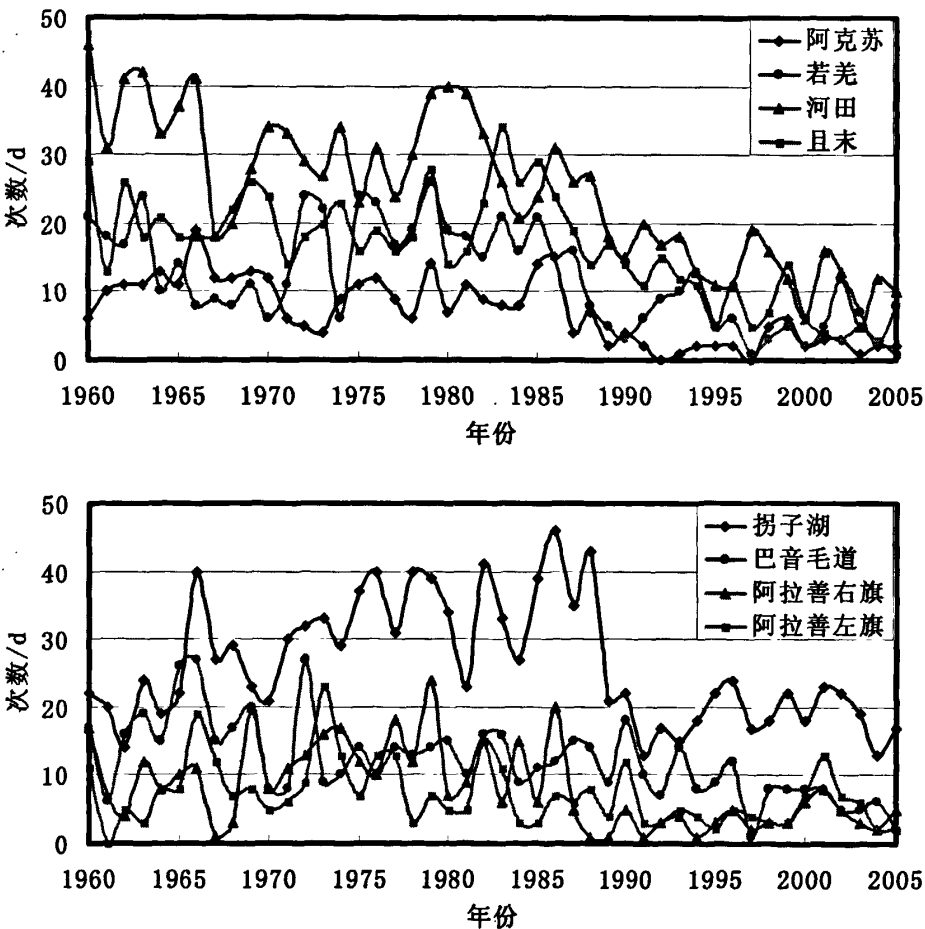


图 3.2 新疆(a)与内蒙古(b)站点观测沙尘暴年平均发生次数的变化

图3.2分别是新疆的塔克拉玛干沙漠和内蒙古的戈壁沙漠地区年平均发生沙尘暴日数的

年际变化趋势(图3.2)。图3.2a表明,在我国新疆地区,和田地区的沙尘暴发生频率最高,而若羌、且末、和阿克苏地区的沙尘暴发生频率较为一致,从图中可以看出,这三个地区沙尘暴发生次数从1960年至2000年总体上呈现波动式单调下降趋势。通过近45年来4个站点沙尘暴发生日数的对比分析,发现新疆地区沙尘暴天气发生次数呈现出不规则的波动变化态势。总体上来说,20世纪60年代上下波动较大,70年代末到80年代初又呈现出不断增长的态势,1985年出现最高值,1985年以后呈现出不断减少的态势,到1991年出现最低值,2000年以后又呈现出略微增长的趋势。在这4个代表区中,和田地区沙尘暴天气发生次数最多,平均年发生沙尘暴天气次数为26.2次,80年代前,和田沙尘暴发生次数平均为32次,80年代后期出现急剧下降的趋势,平均发生日数为19次,减少率为45.8%。其中沙尘暴发生次数最少的站点为阿克苏,阿克苏的位置在塔克拉玛干沙漠的上游地区,处在北疆地区的南部,因此阿克苏地区受沙尘暴天气的影响较小,从60年代开始到80年代中期呈现不规则的波动变化趋势,平均发生沙尘暴的日数为13次,其中80年代中期到2000年以后沙尘天气发生突变较明显,平均发生次数仅为3次左右,但是其沙尘天气发生次数的总体趋势大体上与其他几个站点相同,从图中可以看出且末的沙尘暴发生频率仅次于和田地区,且末从60年代开始到80年代中期呈现波动增长的趋势,1983年达到沙尘暴发生天气频率的最大值34次,且末60年代至80年代的平均发生沙尘暴日数大于20次,从1983年开始到2000年以后,沙尘暴发生日数下降趋势较明显,且年平均发生沙尘暴日数为7天,但是若羌的变化趋势与其他三个站点略有不同,其中60年代为沙尘暴发生日数的减少期,平均年发生日数为12~14天,而从70年代开始到80年代中期为若羌沙尘暴天气爆发的多发期,70年代到80年代中期沙尘暴发生日数平均达到了19次以上。

图3.2b是内蒙古戈壁沙漠地区沙尘暴年平均发生日数的年季变化趋势,由图3.2b可知,内蒙古阿拉善右旗与阿拉善左旗地区的沙尘暴年平均发生次数较少,高发年代多在60年代和70年代,年平均发生沙尘暴次数为9.7次,从80年代至2004年之间平均发生次数为5次,可以看出,这两个地区沙尘暴年平均发生次数的年代际变率较小,没有明显的沙尘暴天气次数的突变。但是拐子湖地区的沙尘暴发生频次有所不同,拐子湖地处戈壁沙漠内部地区,发生沙尘暴次数较多,从60年代至80年代中期波动式增加,沙尘暴年平均发生次数在1985年达到最大值45次,1985年以后沙尘暴天气发生突变,沙尘天气从60年代至80年代中期的32次到80年代后期的20次左右,沙尘天气骤减了43%,说明在拐子湖地区的沙尘天气从1985年左右发生了突变,巴音毛道地区的沙尘暴发生次数呈现显著的波动式下降的趋势,90年代沙尘暴的平均发生次数明显减少。以上结果与王式功等(2000),钱正安等(2002)的研究结

果相一致，由以上分析可知，近40年来，由于受到区域性气候变化的影响，我国新疆与内蒙古地区的沙尘暴发生频率的年际变化总体上呈现波动式下降的趋势，从以上8个气象站点沙尘暴天气频数的年代际变化中反映的很明显，其中新疆与内蒙古地区的大部分站点60、70年代沙尘暴发生次数呈现波动式下降的趋势，其中大部分站点在1966年都是沙尘暴发生频数的峰值时段；80年代中后期，8个站点年沙尘暴发生日数总体上呈下降趋势，发生了较为明显的气候突变，而进入2000年以后，各站点沙尘暴次数均有明显增加的趋势。2001年和2002年的沙尘天气次数达到了20世纪以来的最高值，其中2001年4月15日和2002年3月19日的两次强沙尘暴天气是20世纪以来沙尘天气强度的最高值，从而受到了政府和社会各界的关注，也促使有关各方面加大了对沙尘暴的研究力度。

3.4 我国沙尘天气的季节变率

3.4.1 新疆地区沙尘天气月季变化

图3.3是新疆地区4个代表站45年平均沙尘天气发生日数的月季变化，就新疆地区来说，4个站点的沙尘天气具有以下两个共同点：(1)浮尘的发生次数较多，且多呈现单峰或者双峰值分布；(2)扬沙和沙尘暴天气的季节分布总体上是春季发生次数较多，夏季次之，冬季最低。造成这种天气的主要原因是由于我国春季北方地区冷空气相对活跃，多大风天气，同时气温回暖，地表解冻，地表的土壤较疏松，一旦冷锋过境，很容易起沙，而冬季主要由于地表被冰雪覆盖，不易引起沙尘天气的发生；(3)阿克苏和若羌发生沙尘天气较少，年平均浮尘天气发生次数仅为6次和9次，远少于和田和且末地区发生浮尘日数的20和15次，说明南疆地区的沙尘天气日数高于北疆地区。同时这几个代表站有以下不同点：其中阿克苏地区的浮尘天气发生日数的主峰值形成于3~4月，次峰值形成于9月，且浮尘天气主要集中在2~6月份发生，占全年发生日数的65%，属于春季沙尘天气发生类型，阿克苏地区的扬沙和沙尘暴天气发生时间上滞后于浮尘天气，且呈现双峰值，但是整个春季发生沙尘暴和扬沙的日数占整年发生频率的55%，而和田、且末、若羌3个代表站的浮尘天气主要发生月份出现于2~9月，占全年发生日数的85%以上，尤其春季是浮尘天气的高发时段，属于春季多发型；

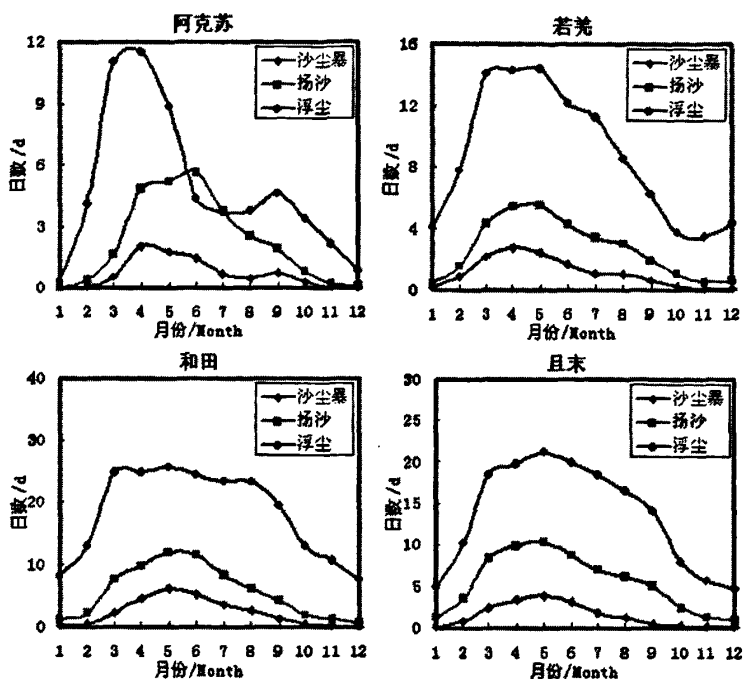


图3.3 新疆地区站点沙尘天气日数月季变化曲线

从季节统计的结果看,春季和田、且末地区的沙尘暴发生频率明显高于阿克苏和若羌地区,夏季次之,新疆冬季沙尘暴发生频率最低。春季和夏初是和田、且末、若羌3个代表站沙尘暴和扬沙天气的高发期,从图中可以看出每年10月份到次年3月份新疆这4个站点沙尘暴发生次数较少,但是这四个地区全年的浮尘天气发生频率较高,表明这四个地区冬季浮尘天气仍有发生。形成这种分布的主要原因是由于这几个地区周边地表的土壤主要是沙漠型地表土壤,而冬季冷空气活动频繁,大风天气多,因此容易形成较多较强的浮尘天气。

3.4.2 内蒙古地区沙尘天气月季变化

图3.4是我国内蒙古戈壁沙漠地区4个代表站45年平均沙尘天气发生日数的月季变化,就该区域来说,可以发现,4个站点的沙尘天气具有以下三个共同点:(1)浮尘的发生次数较多,且多呈现双峰或者三峰分布;(2)扬沙和沙尘暴天气的季节分布总体上来看基本上是以春季为主,夏季次之,冬季最低。(3)不同于新疆4个代表站点,内蒙古4个站点扬沙天气发生次数明显高于当地的浮尘和沙尘暴天气,原因主要在于塔克拉玛干沙漠的下垫面主要以荒漠草原地表形态为主,减少了由于大风天气导致的局地浮尘天气的发生,只有在大的冷锋系

统过境时容易产生沙尘暴天气。

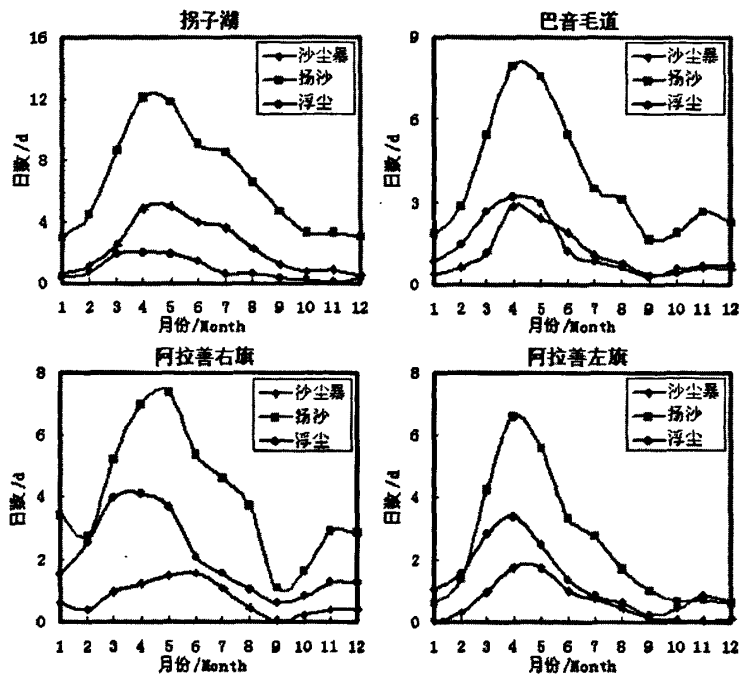


图3.4 内蒙古荒漠区沙尘天气日数月季变化曲线

此外，这4个代表站之间也存在不同点：其中拐子湖地区的沙尘天气发生次数最高，3月~8月期间沙尘暴、扬沙、浮尘平均发生次数分别大于2天、9天和4天，扬沙的主峰值出现在4月份，次峰值形成于7月，占全年发生扬沙日数的72%，属于春夏季节多发型，阿拉善右旗和巴音毛道地区除春季沙尘天气多发外，扬沙天气的次峰值出现在8月，此外，在11~12月份也存在一个明显的峰值，表明，这两个地区冬季由于冷空气活跃，也会频繁发生扬沙天气。而阿拉善左旗的沙尘暴、扬沙和浮尘主要发生在春季，属于春季沙尘天气多发型。

3.5 1960~2005年沙尘天气年发生次数频率分布

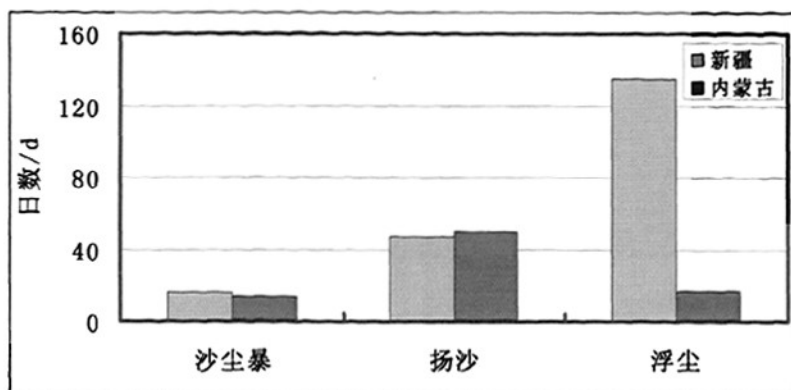


图3.5 1960~2005年沙尘天气年发生次数频率分布

利用新疆塔克拉玛干沙漠、内蒙古巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的8个气象台站1960~2000年逐月的常规沙尘天气发生频次的观测资料，计算各站点各年平均发生浮尘、扬沙、沙尘暴的次数，其中沙尘暴、扬沙、浮尘的频次资料分别为新疆与内蒙古4个站点的平均值。根据图3.5可以看出，我国春季南疆塔克拉玛干沙漠沙尘暴发生次数高于内蒙古戈壁沙漠沙尘暴发生次数，年平均发生频率分别为17次和15次，但是内蒙古戈壁沙漠地区的扬沙天气略高于南疆地区，从图中可以看出新疆地区与内蒙古地区沙尘天气最大区别在于浮尘的发生日数，两者差异较大，平均年发生日数分别为134次和18次，新疆地区的浮尘天气是内蒙古地区的7.4倍，新疆地区的浮尘明显高于内蒙古戈壁沙漠地区，分析其主要原因与两个地区的下垫面地表植被类型和覆盖程度有关，南疆地区地表类型为沙漠型下垫面，地表植被覆盖较低、降水稀少、当冷空气活动频繁或者遭遇大风天气时就会出现浮尘。对比南疆地区，内蒙古戈壁沙漠地区的下垫面为荒漠草原，由于有一定的植被覆盖，因此地表土壤尘不易被大风天气吹起，形成浮尘，因此根据以上内容可以看出内蒙古戈壁沙漠地区的浮尘天气明显少于南疆地区，而沙尘暴与扬沙天气的发生频率则较为一致。

3.6 建立沙尘指数

关于沙尘天气频率影响气候变化方面的研究已有了很多进展，成天涛等(2005)利用浑善达克沙地气象站的常规气候资料，分析了气候要素和沙尘暴频率的多年变化状况，建立了能够很好描述区域沙尘暴频率年际变化的沙尘暴指数，并建立了适合浑善达克沙地气候特征的气候因子影响沙尘暴频率指数模型。Ding等(2005)利用沙尘暴发生频率建立了一个用于分析沙尘天气气候学效应的沙尘指数，但是以上学者对于沙尘暴天气的研究大多集中在

沙尘暴次数或与大风日数、风速、降水及气温等气象要素的多年变化及时空分布相互关系的统计分析上,且研究方法主要以定性为主,定量研究方法较少。此外,根据上一节内容分析,新疆与内蒙古地区浮尘的发生次数有明显的不同,而浮尘天气对大气中沙尘气溶胶的贡献也较高,仅仅利用沙尘暴发生次数作为影响沙尘天气的气候学指数是不科学的,因此本节论文将利用沙尘暴、扬沙和浮尘之间的相互关系来建立一个能够反映沙尘天气气候学特征的指数。牛生杰等(2001)于1996~1998年4~5月分别在内蒙古的吉兰泰、阿拉善右旗、宁夏盐池气象站、银川机场气象台和银川城区用Anderson、KB-120E以及PM₁₀等采样器进行采样,分析了沙漠地区背景大气、浮尘、扬沙和沙尘暴天气(以测站气象观测的天气现象和能见度作为区分标准)下的气溶胶质量浓度,结果显示,在背景大气、浮尘天气、扬沙天气和沙尘暴天气下,沙尘气溶胶的TSP浓度分别为82.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ 、356.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ 、1205.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和3955.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ 。从这些数据中可以看出,浮尘天气是背景大气的4.35倍,扬沙天气是浮尘天气的3.38倍,沙尘暴天气是扬沙天气的3.28倍。从以上结果可以看出,在发生沙尘天气时,浮尘、扬沙和沙尘暴天气时沙尘气溶胶质量浓度之间存在1:3:9的比例关系。因此本文借鉴牛生杰的研究结果,根据浮尘、扬沙和沙尘暴之间的权重关系,利用新疆塔克拉玛干沙漠地区和内蒙古巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠地区的8个气象台站1960~2000年逐月的常规沙尘天气观测资料,应用统计分析方法,建立能够反映新疆塔克拉玛干沙漠地区与内蒙古戈壁沙漠地区沙尘天气频率变化的沙尘指数,并初步分析沙尘指数对气候变化造成的影响。新疆与内蒙古地区各4个站点分别代表沙地不同方位,其资料基本能够反映整个地区的气候变化,站点的相关信息具体见表3.1。浮尘、扬沙和沙尘暴的权重系数根据牛生杰等的结论进行认定,我们将沙尘天气发生次数进行归一化处理,将沙尘天气的发生次数认定为沙尘气溶胶质量浓度,因此新疆与内蒙古沙尘天气气溶胶的混合权重系数作为沙尘指数,定义为:

$$\text{塔克拉玛干(戈壁)沙尘指数TDI(GDI)}=\text{浮尘次数}\times 1+\text{扬沙}\times 3+\text{沙尘暴}\times 9$$

式中TDI和GDI分别是新疆塔克拉玛干沙尘指数和内蒙古戈壁沙尘指数。下文简称新疆与内蒙古沙尘指数,FD代表浮尘(Floating Dust)、BD代表扬沙(Blowing Dust)和DS代表沙尘暴(Dust Strom)。

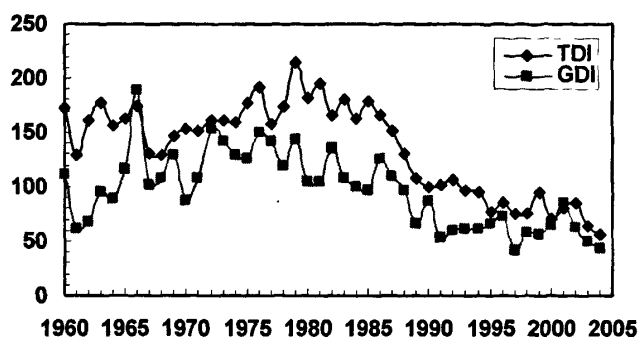


图3.6 新疆与内蒙古沙尘指数

图3.6是新疆与内蒙古沙尘指数的时间序列分布图，TDI和GDI分别代表新疆与内蒙古沙尘指数，从图中可以看出，总体上来说，新疆沙尘指数20世纪60年代上下波动较大，70年代末到80年代初又呈现出不断增长的态势，1979年出现最高值，从1979年以后呈现出不断减少的态势，到90年代以后沙尘天气出现一次明显的突变，由于新疆地区的沙尘天气明显减少，导致新疆地区的沙尘指数也明显减少，到2000年以后新疆地区的沙尘指数达到了最小值，这与沙尘暴天气的发生次数有所不同，这可能是20世纪后沙尘暴天气发生次数减少有明显的关系，而内蒙古沙尘指数与新疆沙尘指数的主要区别出现在60年代期间，从1960年开始内蒙古沙尘指数逐渐增加，到1966年达到了最高值，从70年代初期到2000年以后，内蒙古沙尘指数呈现出了波动下降的趋势。

表3.1 研究沙尘天气相关气象站点列表

区域	地名	纬度(°N)	经度(°E)	海拔高度(m)	时间序列(年)
新疆	和田	37.08	79.56	1374.6	1960~2004
	且末	38.09	85.33	1247.5	1960~2004
	阿克苏	41.10	80.14	1103.8	1960~2004
	若羌	39.02	88.10	888.3	1960~2004
内蒙古	阿拉善右旗	39.13	101.41	1510.1	1960~2004
	阿拉善左旗	38.50	105.40	1561.4	1960~2004
	拐子湖	41.22	102.22	960.0	1960~2004
	巴音毛道	40.45	104.30	1328.1	1960~2004

3.7 新疆(内蒙古)沙尘指数与沙尘暴发生日数的相关统计分析

上一节内容主要是建立了一个能够反映沙尘天气变化整体特征的沙尘指数,本节内容为了验证建立的新疆(内蒙古)沙尘指数的可信度,利用新疆与内蒙古地区各4个气象观测站点监测沙尘暴天气发生日数与沙尘指数进行相关统计分析,见图3.7。从图3.7中可以明显看出,标准化后的新疆与内蒙古沙尘指数与沙尘暴发生频率的变化趋势基本上较为一致,新疆沙尘指数与阿克苏、若羌、和田、且末这四个站点的沙尘暴发生次数的相关系数分别

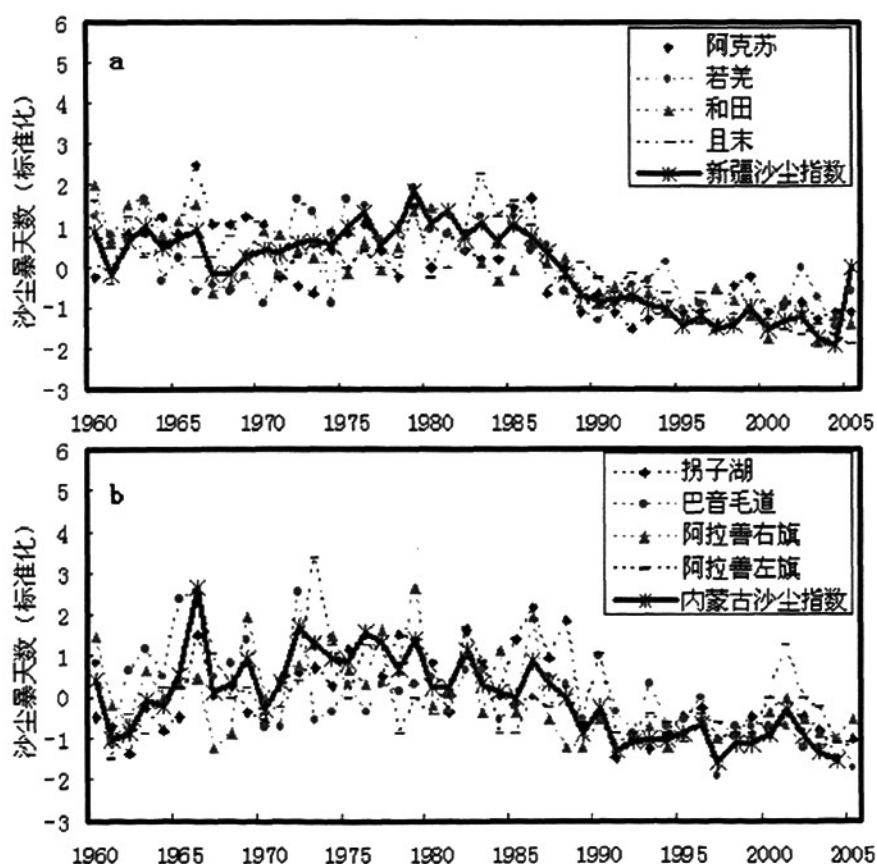


图3.7 新疆(内蒙古)沙尘气溶胶指数与沙尘暴天气发生次数的相关分析

为 0.742、0.809、0.848 和 0.802,可以看出,相关系数都在 0.7 以上,通过了 99%的置信水平检验。而标准化后的内蒙古沙尘气溶胶指数与拐子湖、巴音毛道、阿拉善右旗和阿拉善左旗的相关系数分别为 0.778、0.649、0.739 和 0.68,也明显的通过了 99%的置信水平检验,

这说明新的新疆与内蒙古沙尘指数能够较好的反映这两个沙尘天气多发地区沙尘天气发生的变化趋势, 具有较好的代表性。因此可以利用新建立的沙尘指数来研究沙尘天气对全球气候变化造成的影响, 为沙尘天气的发生频率提供定量属性。

3.8 沙尘指数与TOMS卫星气溶胶吸收指数的相关分析

卫星观测资料是由美国宇航局搭载在极轨卫星Nimbus 7 上的TOMS 传感器获得的吸收气溶胶指数(AI), 气溶胶指数算法参见文献Herman等(1997). Prospero等(2002)和Washington等(2003)已利用TOMS的AI数据分析了全球沙尘源区特征. 本研究仅就塔克拉玛干沙漠地区的大气沙尘活动进行分析。EP/TOMS气溶胶指数可以定量描述沙尘天气强度的指标体系, TOMS气溶胶指数是一个非常有用的识别气溶胶源和传输类型的定性和定量指标。Moulin and Chiapello(2004)利用EP/TOMS气溶胶指数并结合气象观测资料, 可以对大规模的沙尘天气进行及时判别、监视, 并预报影响范围及传输路径; 同时, 利用TOMS气溶胶指数建立起来的指标体系可以半定量地描述沙尘天气的强度和影响范围。

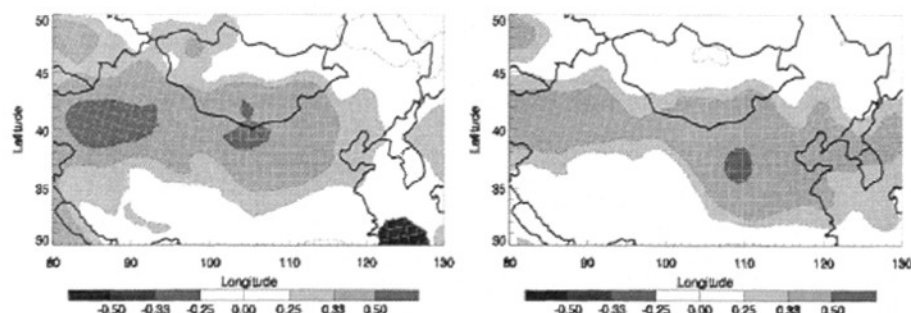


图3.8 (a)新疆与(b)内蒙古沙尘指数和TOMS AAI指数的相关分析.

为了验证沙尘指数的可信度, 本论文拟利用TOMS卫星监测的气溶胶吸收指数来验证沙尘指数的可信度, 图3.8给出的是新疆与内蒙古沙尘指数和TOMS气溶胶吸收指数的相关分析, 从图3.8a中可以明显看出, 新疆沙尘指数与TOMS气溶胶吸收指数的正相关区域从我国新疆地区延伸到我国东部沿海地区, 整个长江以北地区都呈现正相关区域, 呈现由西向东的带状分布, 说明在我国新疆地区发生的沙尘天气产生的沙尘气溶胶与TOMS气溶胶吸收指数有较好的相关性, TOMS气溶胶吸收指数能够较好的反映我国沙尘气溶胶, 同时新疆沙尘

指数能够较好的反映沙尘气溶胶天气的气候学效应，同时存在两个明显的正相关区域，一个是南疆地区塔克拉玛干沙漠及其临近区域，另外一个高值区域出现在我国内蒙古戈壁沙漠及其临近区域，这两个区域也正好对应着我国沙尘暴发生频率的多发地区，相关系数达到了0.33以上，就通过了99%的置信水平检验，其中南疆塔克拉玛干沙漠地区与内蒙古戈壁沙漠地区的相关系数达到了0.5以上，这表明沙尘指数能够较好的反映我国沙尘天气的总体气候学特征，可以为研究全球气候变化提供气溶胶的气候学变化趋势。图3.8b反映了内蒙古沙尘指数与TOMS气溶胶吸收指数的相关特征，从图中可以看出，内蒙古沙尘指数与TOMS气溶胶吸收指数的相关区域从内蒙古地区延伸到了我国的东海地区，呈现由西向东的带状分布，其中与内蒙古地区的相关性最高，超过了0.33，也通过了99%的置信水平检验。表明内蒙古沙尘指数与TOMS气溶胶吸收指数有较好的相关性，能够较好地反映内蒙古地区沙尘天气的气候学效应。因此，根据以上内容分析，新疆与内蒙古地区的沙尘指数能够较好地反映当地区域性沙尘天气的发生频率，可以作为影响气候变化的沙尘气溶胶因子来进行研究。

3.9 利用HYSPLIT-4模式模拟不同季节气团后向轨迹来源

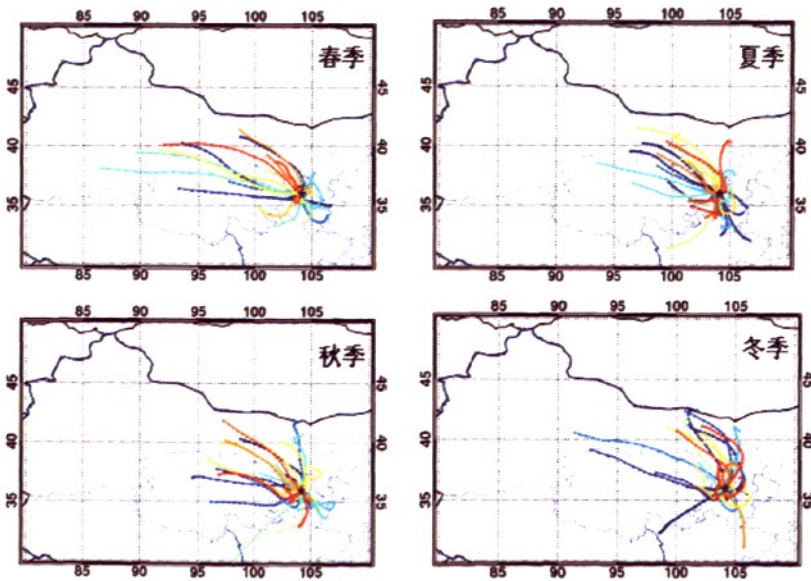


图3.9 SACOL气候站1000m高度48h空气气团后向轨迹季节分布图

最后本文利用HYSPLIT-4模式对SACOL气候站不同季节的空气后向轨迹进行了讨论，

通过后向轨迹分析可以为后面对SACOL气候站的沙尘气团来源分析奠定基础,图3.9是2007年春季至2008年冬季HYSPLIT-4模式模拟的空气气团后向轨迹,模拟高度为1000m,时间尺度为48h,每个季节平均为90天。从图中我们可以看出,SACOL气候站春季的空气气团后向轨迹主要来源于两个路径,包括西北路径(河西走廊)和北方路径,分别占整个春季空气气团轨迹来源的47%和35%,表明,这两个路径是我国春季空气气团的主要移动路径。而其他夏季、秋季的气团轨迹来源较为复杂,而冬季的气团轨迹来源路径主要以北方路径为主。

3.10 本章小结

本章论文主要利用我国701个站点观测的沙尘天气发生频率资料,重点分析了我国沙尘天气的空间分布特征,结论主要包括以下几个方面:

(1)通过统计近40年来我国沙尘天气发生日数的长期变化趋势,可以看出:从20世纪60年代以来,我国沙尘天气整体呈现波动式下降的趋势,其中70年代沙尘天气略有增长,而80年代初期,我国的沙尘天气出现了一次突变,但是我国北方沙尘天气发生次数急剧下降,同时90年代沙尘天气也同样维持在一个相对发生较少的水平上,但是20世纪初开始沙尘天气又呈现出了明显增加的趋势,其中2001年和2002年沙尘天气的发生次数较多。

(2)通过对新疆塔克拉玛干沙漠与内蒙古戈壁沙漠地区4个代表站点45年沙尘天气发生日数的月季变化统计分析,发现相比较扬沙与沙尘暴天气,新疆地区浮尘天气的发生次数较多,且多呈现单峰或者双峰值分布,扬沙和沙尘暴天气的季节分布总体上来看基本上是以春季为主,夏季次之,冬季最低。内蒙古地区的浮尘天气较少;从空间分布上来看,南疆地区的沙尘天气日数高于北疆地区,而内蒙古戈壁沙漠地区的沙尘天气发生频率较为平均,内蒙古地区除阿拉善右旗外,其他三个站点的沙尘天气均呈现春季多发型。

(3)通过计算4个站点各月的浮尘、扬沙、沙尘暴发生频率,表明我国春季南疆塔克拉玛干地区沙尘暴高于内蒙古戈壁沙漠沙尘暴发生频率,年平均发生频率分别为17次和15次,但是内蒙古戈壁沙漠地区的扬沙天气略高于南疆地区,同时得出新疆地区与内蒙古地区沙尘天气最大区别在于浮尘的发生日数两者差异较大,平均年发生日数分别为134次和18次,新疆地区的浮尘天气是内蒙古地区浮尘天气发生次数的7.4倍,造成这种现象的主要原因为:两个地区的下垫面地表植被类型和覆盖程度不同,南疆塔克拉玛干沙漠地区地表植被覆盖较低、降水稀少、当冷空气活动频繁或者遭遇大风天气时就会出现浮尘天气。对比南疆地区,内蒙古戈壁沙漠地区的下垫面为荒漠草原,由于有一定的植被覆盖,因此地表土壤尘

不易被大风天气吹起，形成浮尘。

(4)建立了一个能够较好反映沙尘天气气候学变化趋势的沙尘指数，并初步分析了沙尘指数与沙尘暴发生频次之间的关系，研究发现，新的沙尘指数与新疆和内蒙古地区的沙尘暴发生频次具有较好的相关性，并通过了99%的置信水平检验，可以作为影响沙尘天气变化的气溶胶因子进行研究与分析。

(5)为了验证以上建立的新疆与内蒙古沙尘指数的可信度，本论文拟利用TOMS卫星监测的气溶胶吸收指数来验证沙尘指数的可信度，通过沙尘指数与TOMS卫星气溶胶吸收指数之间的相关分析结果可见，两者相关系数均通过了99%的置信水平检验，认为这个新的沙尘指数能够较好地反映沙尘天气变化的气候学特征，为气候变化研究提供合理的依据。

(6)利用HYSPLIT模式对SACOL气候站各个不同季节的空气后向轨迹进行了讨论，发现SACOL气候站春季的空气气团后向轨迹主要来源于两个路径，包括西北路径(河西走廊)和北方路径，分别占整个春季空气气团轨迹来源的47%和35%。

第四章 黄土高原地区沙尘天气个例分析

4.1 引言

本论文上一章内容重点讨论了我国北方地区沙尘天气的总体分布特征及其变化趋势。发现虽然我国沙尘天气的总体变化趋势趋于减少,但是沙尘天气的发生仍然对人们生活和社会发展都造成了重要的危害,同时由于沙尘天气所引发的气候学效应,对人类生存环境的危害以及对经济、社会活动都具有重要的影响,沙尘天气已经成为一种不可忽视的大气和生态环境问题之一。此外大范围的强沙尘天气常常导致交通中断、财产损失、人员伤亡,给工农业生产带来影响,危及人类的生存环境。特强沙尘暴能摧毁房屋、拔起树木、危及人类生命,低能见度会引发大量交通事故,搬运的沙尘能毁坏农田、阻塞交通。沙尘暴由于风力大、能见度低和含尘量高,更具有危害性,能在很短时间内给生态环境和人类社会造成严重损失。

孙业乐等(2005)对2002年3月20日北京发生的有历史记录以来的最大沙尘暴进行了研究,发现沙尘暴天气发生时,北京大气中总颗粒物浓度高达 10.9 mg m^{-3} ,高出国家颗粒物污染标准54倍。主要地壳源元素Ca、Al、Fe、Mg、Na、Ti等高达平日的30~58倍,污染元素Zn、Cu、Pb、As、Cd、S比平时高出几倍至近十倍。其中Pb、As、Cd、S在 $\text{PM}_{2.5}$ 中富集系数分别高达12.7、29.6、43.5、28.4,这些污染物部分来自于沙尘暴长距离传输过程中矿物气溶胶与沿途污染源排放的污染气溶胶的混合,污染物增加的另一原因是沙尘暴入侵气团和北京当地污染气团之间的交汇叠加。王鑫等(2006)通过对2002年兰州地区春季沙尘天气分析,认为沙尘暴期间TSP中细粒子的含量比非沙尘暴期间的含量相对减少;背景大气条件下,飘尘对人体健康影响比较严重。岳平等(2007)对2004年5月23~24日民勤基准气象站发生的一次沙尘天气过程加密探测发现:沙尘暴来临前到沙尘暴过境的前半期,大气温湿结构的分布有利于沙尘暴的发生、发展;沙尘暴过境的后期,大气层结调整到稳定状态,抑制了干对流的发展;沙尘天气结束后整层大气湿度增大,并出现了小雨天气。邵龙义等(2007)应用X射线衍射(XRD)和带能谱的场发射扫描电镜(FESEM-EDX)对在北京2002年3月20日收集的一次特大亚洲沙尘暴样品进行了分析,发现此次沙尘暴颗粒中矿物颗粒达94%,表明沙尘天气发生时,空气中的气溶胶粒子以矿物粒子为主。矿物气溶胶通过散射、透射和吸收太阳光辐射能直接影响全球气候,并且当矿物颗粒表面被可溶性物质覆盖时可作为云凝

结核从而间接影响全球气候(Huang等, 2006; Buseck等, 1999)。

我国西北地区作为亚洲沙尘气溶胶的主要源区之一, 其沙尘气溶胶在气候效应、远程输送以及辐射强迫效应等方面的重要作用, 成为国内外科学界关注的热点。国际上已经开展了很多针对亚洲地区气溶胶特性的试验, 如APEX(Nakajima等, 2003), ABC-EAREX(Takamura等, 2005; Nakajima等, 2007), 以及ACE-Asia(Gong等, 2001; Zhang等, 2003)等, 其中作为全球大气化学的重要研究计划之一, ACE-Asia就是由中国、美国、日本、韩国等多个国家联合组织实施的、将亚洲沙尘气溶胶的特性作为研究对象的一项大型国际研究计划。同时大量关于我国沙尘气溶胶的研究表明, 西北地区沙尘被强风吹卷进入大气, 并随高空气流向下游陆地及海洋地区远程传输, 不仅降落在我国西北地区, 还可以飘移到日本和太平洋(陈广庭, 2001; Gong等, 2005), 甚至被西风带到北美(Jaffe等, 1999, 2005; Husar等, 2001; VanCuren等, 2005), 根据沙尘气溶胶的这种属性, 我国多家科研单位与美国合作, 于2007年4~5月份进行了太平洋地区沙尘气溶胶联合观测试验(PACDEX), 该项目主要是通过研究沙尘气溶胶粒子传输过程中的物理属性的变化来搞清楚这些大范围的沙尘气溶胶在穿过太平洋时大气中的转变过程, 搞清各种沙尘气溶胶粒子如何影响云与气候, 这种影响能达到下风方多远的距离, SACOL气候站作为这次联合观测项目沙尘气溶胶的源区观测站, 主要负责提供沙尘天气预报以及沙尘天气发生时沙尘气溶胶的物理化学及其光学特征的地表观测, 此时, 美国利用最先进的环境研究飞机从美国本土起飞, 并横穿太平洋地区, 主要目的在于研究起源于亚洲经过太平洋飘到北美的沙尘气溶胶的物理属性及其在传输过程中气溶胶粒子对于大气辐射的影响。整个试验计划方案见图4.1。



图 4.1 太平洋沙尘气溶胶综合观测试验方案设计

根据以上联合观测, 通过2007年春季沙尘天气的监测发现, 2007年春季我国西北地区发生10多次沙尘天气。其中影响到SACOL站的沙尘天气以5月2日的最严重。这次沙尘暴影

响了我国北方的大部分地区。因此本章内容将重点讨论这次较大范围的沙尘天气过程，首先从这次沙尘天气的天气系统着手，对这次沙尘天气的天气学背景进行了简要的分析，此后，以SACOL气候站为基站，利用HYSPLIT模式对沙尘气团传输路径进行了分析，最后本文重点讨论了这次沙尘天气过境前后沙尘气溶胶的物理及其光学特征方面的相关研究成果。

4.2 利用 OMI 气溶胶吸收指数(AAI)分析沙尘天气过程

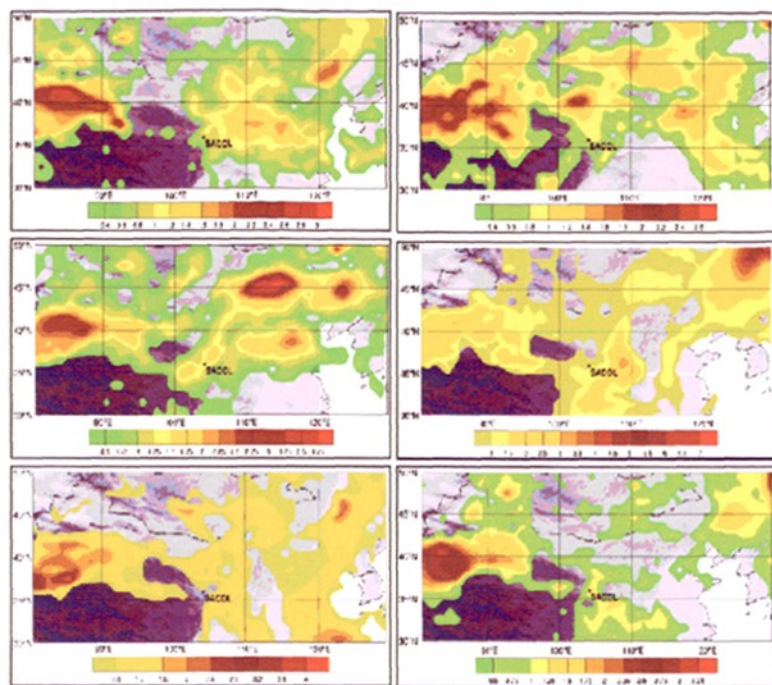


图 4.2 OMI 卫星气溶胶吸收指数空间分布的日变化特征

卫星观测资料是由美国宇航局搭载在极轨卫星上的OMI 传感器获得的吸收气溶胶指数(AI)。Duncan等(2003)证明了OMI气溶胶指数是一个非常有用的识别气溶胶源和传输类型的定性和定量指标, Yumimoto等(2008)研究发现利用OMI气溶胶指数并结合气象观测资料, 可以对大规模的沙尘天气进行及时判别、监视, 并预报影响范围及传输路径; 同时, 利用OMI气溶胶指数建立起来的指标体系可以半量化地描述沙尘天气的强度和影响范围。

首先本节为了讨论2007年5月2日这次沙尘天气的空间分布特征, 利用OMI气溶胶吸收指数来反演沙尘气溶胶的空间分布, 图5.1是2007年4月27日到5月2日一次沙尘天气过程OMI卫星气溶胶吸收指数的空间分布特征的日变化分布图, 从图4.2a可以看出, 此次沙尘天气过程起源于2007年4月27日, 沙尘气溶胶浓度在南疆和内蒙古下游地区的沙尘天气较为严重, 然后沙尘天气从我国南疆地区向下游地区发展, 影响到黄河以北的大部分地区, 此时, 北方大部分地区都发生沙尘天气, 同时, 内蒙古地区上空的沙尘天气向太平洋地区发展并开始消散, 图4.2b显示, 4月28日开始, 这次沙尘天气过程从南疆地区开始向东部方向开始扩

散,影响逐渐增强,4月28日开始已经影响到了我国的大部分地区。图4.2c表示从4月29日开始,又一次较大范围的沙尘天气形成,中心主要分布在新疆的南疆地区以及内蒙古戈壁沙漠地区,沙尘天气随着西风带向东发展,图4.2d和图4.2e都表明了沙尘天气的传输和逐渐消散过程,图4.2f显示到5月2日这一天,沙尘天气影响到SACOL,出现扬沙天气,同时南疆地区的局地沙尘天气又开始发展,并随着西风带向下游地区发展。

4.3 沙尘天气的天气形势分析

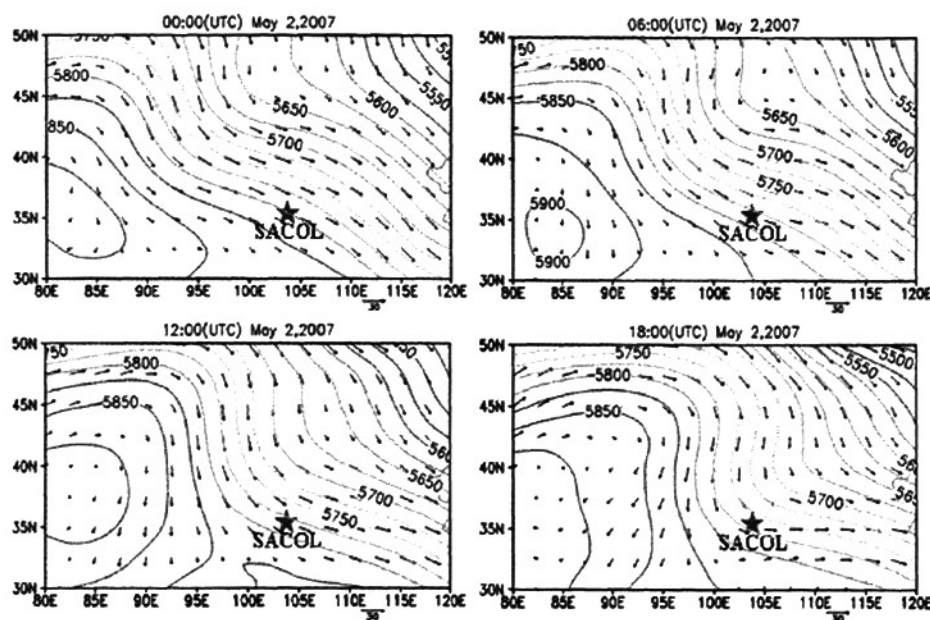


图 4.3 2007 年 5 月 2 日沙尘暴天气形势分析

根据上一节内容分析,本节内容将从天气学的角度对本次影响SACOL气候站的沙尘天气过程进行分析,从图4.3中看出,5月2日00时,一气旋在新疆北部生成,气旋生成于槽前,此后,高空槽向前移动,气旋也随之前移,气旋后部的大风区卷起大量的沙尘,形成大范围的沙尘天气。根据气象记录分析,2007年5月2日,这次冷空气影响范围较大,内蒙古南部、宁夏、陕西北部、甘肃及青海都不同程度地遭遇了扬沙及浮尘天气影响;其中甘肃民勤、环县、内蒙古陕西等地不同程度地出现了沙尘暴。兰州市区于当日中午遭受到了沙尘暴天气袭击,风速10m/s,因此,本节利用NCEP再分析资料,对2007年5月2日沙尘暴发生

前后的天气系统及风场等情况进行了分析, 本文选取了我国500hPa等压面与对应风场, 从图4.3中可以看出, 此次过程即对流层中部一低槽从中国新疆东南方向移动至中国东部沿海地区的过程。2日00时, 兰州处于槽前脊后, 为暖高脊所控制。2日06时, 槽东移至95°E, 兰州处于槽后, 风场从东南方向开始向正北转变, 东南风减弱, 北风逐渐加强, 伴随着大风, 大气处于极端不稳定状态, 更加有利于河西走廊爆发强沙尘暴天气。5月2日12时, 低槽东移至100°E, 槽已到达SACOL气候站的上空(115°E)。此时SACOL气候站上空风场风向转换成正北风, 5月2日18时, 低槽东移至105°E, 至2日18时, SACOL气候站处于槽后。

4.4 沙尘天气过程大气纬向风分布

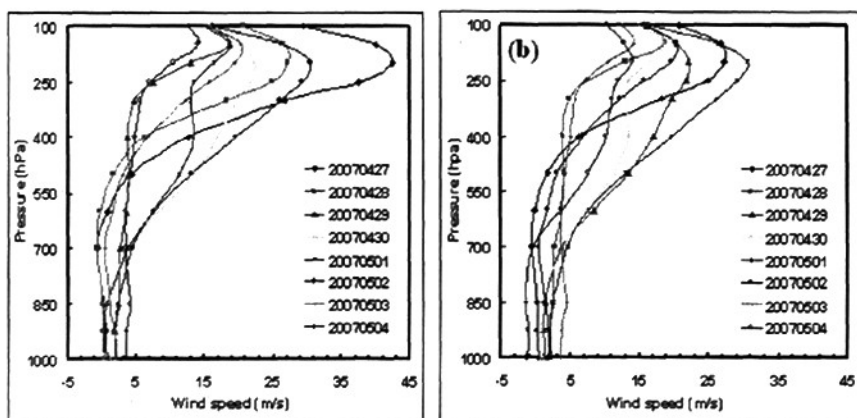


图4.4 SACOL气候站沙尘天气过程纬向风垂直廓线

为了进一步研究5月2日沙尘天气发生时的天气形势, 这里利用NCEP再分析资料分析沙尘天气前后SACOL气候站纬向风的垂直分布, 统计结果显示了从2007年4月27日至5月4日, 图4.4a和4.4b分别讨论了SACOL气候站0000 UTC和1200 UTC从地面到100hPa高度场的垂直风速, 图5.3a中可以看出, 从4月30日到5月2日00时的垂直风速明显不同于其他几天, 从700hPa到400hPa之间的风速明显高于其他几天, 其中5月2日500hPa高度场的纬向风平均为15m/s, 而到5月2日1200 UTC纬向风急剧减小, 表明沙尘天气从5月2日中午的强纬向风到傍晚纬向风减弱。

4.5 HYSPLIT-4模式模拟沙尘天气气团后向轨迹

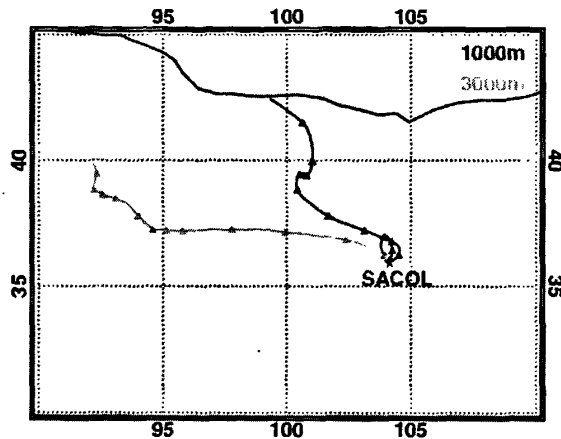


图4.5 2007年5月2日SACOL站点空气气团96h气团后向轨迹模拟

气团后向轨迹方法是分析污染气团输送路径与天气形势变化关系之间的一种简单直观的方法, Jaffe(1999)等利用此种方法对东亚地区沙尘气溶胶经西风带传输到太平洋甚至北美地区的轨迹作了分析。我国西北地区春季沙尘天气频发, 沙尘天气发生时可以产生大量的沙尘气溶胶, 气溶胶在输送的过程中, 不断沉降、同时吸附沿途人为气溶胶, 导致沙尘气溶胶的物理化学特征发生了根本性的改变, 因此了解沙尘沿输送轨迹的成分浓度变化规律, 对于沙尘沉降地区的大气污染物研究具有相当大的重要意义。

为了解2007年5月2日发生在我国西北的这次强沙尘暴的来源, 本文采用HYSPLIT-4模式, 对沙尘暴期间, SACOL站上空的氣团进行后向轨迹模拟研究, 来模拟这次沙尘天气过程气溶胶的来源以及主要路径。以SACOL站5月2日1200 UTC为起点, 模拟向后96h的气团轨迹运行图, 气团的初始高度分别取为1000m, 3000m(图4.5)。从图中可以看出其中3000m高度的气团后向轨迹主要源地在南疆塔克拉玛干沙漠地区, 向东南方向移动, 途经青海中部、甘肃南部河西走廊地区, 而1000m高度的空气气团后向轨迹与3000m高度的轨迹路径明显不同, 从1000m的空气气团轨迹来看, 主要来源从内蒙古戈壁沙漠地区起沙, 经过腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠到达SACOL站, 由此可以看出2007年5月2日沙尘暴的冷空气移动路径可分为西北路径和北方路径, 这次沙尘天气过程的沙尘源区主要为塔克拉玛干沙漠和内蒙古戈壁沙漠地区。

4.6 沙尘天气气象要素的地面观测

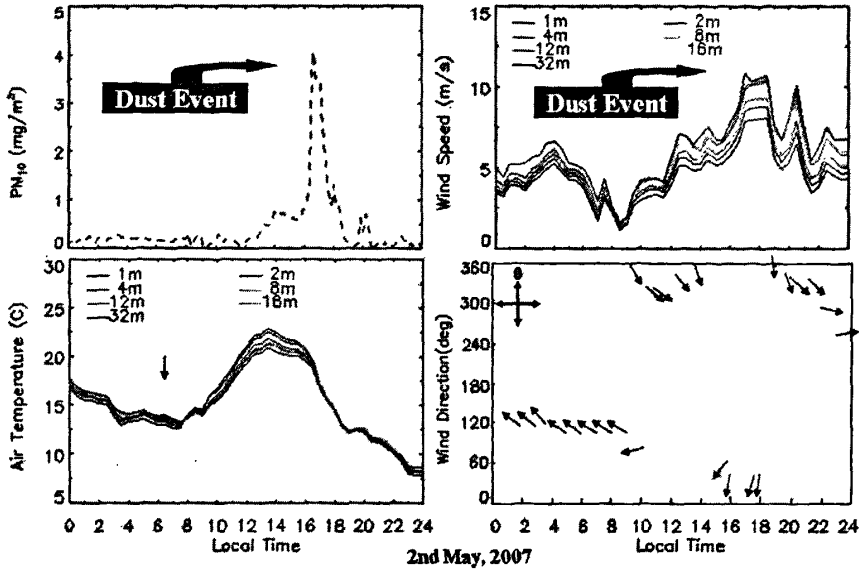


图 4.6 沙尘天气气溶胶质量浓度及地面气象要素

图 4.6 分析了 SACOL 气候站 2007 年 5 月 2 日沙尘天气 PM₁₀ 的质量浓度及其相应气象要素变化, 从图 4.6a 中可以看出, 发生沙尘天气前, PM₁₀ 的平均质量浓度小于 0.2mg/m³, 小于国家空气质量 3 级标准, 空气质量良好, 但是当沙尘天气过境 12 时开始, 气溶胶 PM₁₀ 质量浓度形成第一个峰值, 达到到 0.6~0.8 mg/m³, 而后从下午 15 时开始, 气溶胶 PM₁₀ 质量浓度从 0.7 mg/m³ 左右迅速升高到大于 3.5 mg/m³, 这表明沙尘天气过境时, 沙尘气溶胶质量浓度明显升高, 空气质量污染严重, 而 12 时左右形成的次峰值经判断可能是由于沙尘天气到达 SACOL 站之前, 冷锋天气将兰州市局地的扬尘吹起, 导致气溶胶 PM₁₀ 形成了第一次峰值, 图 4.6b 显示了沙尘天气发生时从地表 1m 至 32m 7 层大气风速的日变化, 从图中可以看出, 5 月 2 日早晨兰州市风速逐渐减小, 处于静温天气, 08 时左右达到风速的最小值 2m/s, 从 08 时开始风速开始逐渐增强, 表明冷锋天气已经开始过境, 这与气溶胶 PM₁₀ 的变化趋势相对应, 而从图 4.6d 中可以发现, 5 月 2 日清晨 SACOL 站的风向以东南风为主, 但是从早晨 08 时以后, 风向突然转变为北风为主, 这也相应证明了此时的天气系统主要受到了沙尘过境之前冷锋的影响, 图 4.6c 代表了 5 月 2 日 SACOL 站气温的日变化, 从图中可以看出, 兰州市早晨温度较低, 造成 7 天开始温度升高, 从中午 12 时开始地面温度从 21~22°C 迅速降温, 因此表明, 沙尘天气过境时导致了温度大幅度下降。

4.7 沙尘天气气溶胶的光学特性

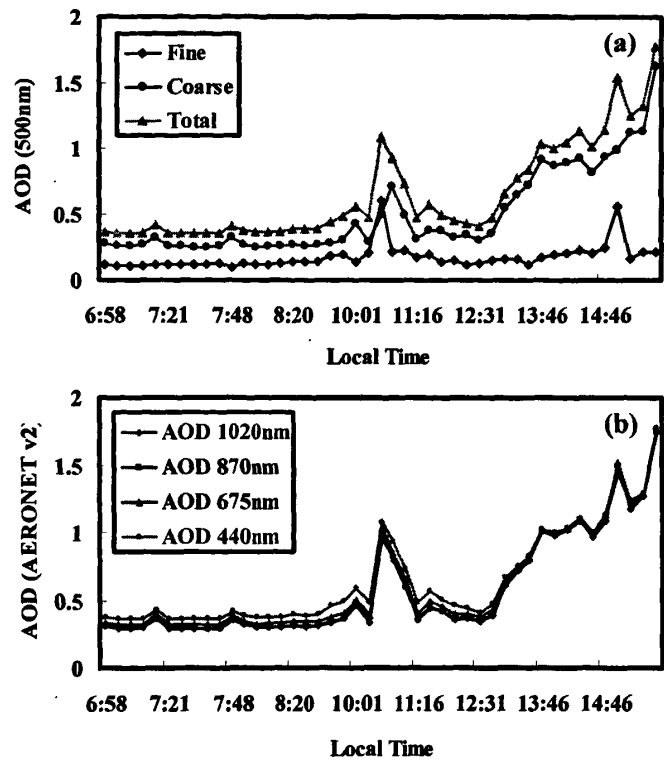


图 4.7 沙尘天气时气溶胶不同波段的光学厚度

图 4.7 给出了 2007 年 5 月 2 日 SACOL 气候站沙尘天气气溶胶光学属性特征，图 4.7a 显示了 5 月 2 日早晨到下午 15 时细粒子和粗粒子的光学厚度特征，从图中可以看出，沙尘天气气溶胶的光学厚度主要有两个特点，第一个特点是细粒子和粗粒子及气溶胶总的光学厚度从早晨 07 时开始到中午 09 时 30 分之间分别小于 0.1、0.3 和 0.5，气溶胶光学厚度较稳定，没有明显的区别，表明早晨 SACOL 气候站没有受到沙尘天气的影响，从 09 时 30 分开始大气气溶胶光学厚度发生了明显变化，其中 10~11 时之间，粗、细粒子的气溶胶光学厚度都有一个明显的峰值，表明此时 SACOL 站区域大气中的粗、细粒子气溶胶的含量突然升高，这可能是由于沙尘天气过境前期冷锋天气到来影响到 SACOL 气候站，大风天气将 SACOL 气候站周边地表的土壤吹起，产生扬沙天气，导致大气气溶胶中粗、细粒子都明显增加，第二个特点是从中午 12 时开始，粗、细粒子的气溶胶光学厚度之间有明显的变化，

其中粗粒子的光学厚度迅速增加，从 0.3 左右增加到 1.5 以上，表明沙尘天气使兰州市空气中气溶胶粗颗粒粒子浓度增加比较明显，而从图中来看，细粒子的光学厚度变化较平稳，除 15 时左右有一次峰值达到 0.4 左右，其他时刻都明显低于 0.15，从以上两点来看，沙尘天气明显增加了兰州市空气中粗粒子的含量，细粒子气溶胶光学厚度基本保持不变。图 4.7b 是沙尘暴发生当天 4 个波段的气溶胶光学厚度，气溶胶的波段分别为 1020nm、870nm、675 nm 和 440nm，从图中可以看出，4 个波段变化趋势比较一致，总体上与粗、细粒子的变化趋势大致相同，10 时 30 分左右呈现第一次峰值，从 12 时开始，气溶胶光学厚度明显增加，到 15 时达到了最大值。

4.8 沙尘天气爆发前后气溶胶的体积谱分布

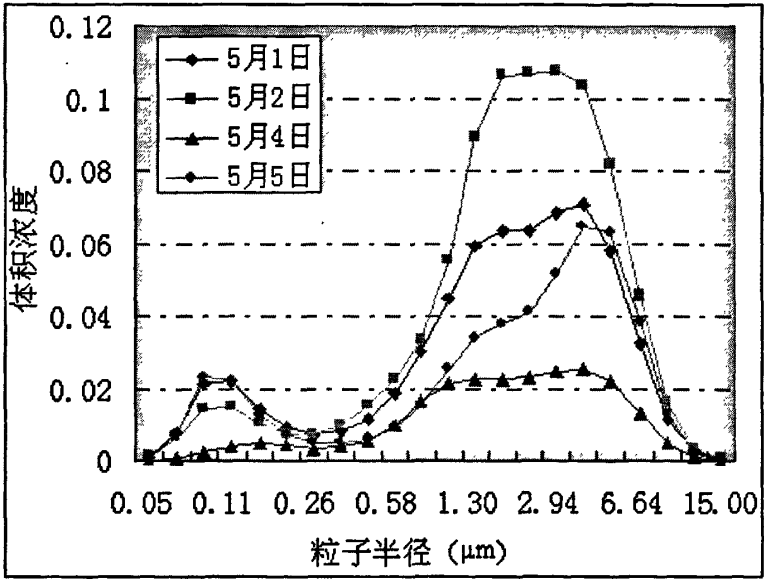


图4.8 沙尘天气发生前后气溶胶体积浓度随粒子半径的变化

图4.8是利用SACOL站太阳光度计(CE-318)观测到的2007年5月2日沙尘暴天气过程前后气溶胶粒子体积谱分布的变化，从图中可以看出，从2007年5月1日到5月5日，除5月4日，气溶胶主要呈现不明显的双峰值分布以外，其他几天气溶胶的体积谱总体呈现明显双峰型分布，峰值分别出现在0.08~0.13μm和1.3~7μm之间，虽然图中显示气溶胶的体积谱分布冬春季都呈现双峰型分布，通过对比分析，5月2日沙尘天气过程时气溶胶的粗模态的体积谱浓度最高，从1.3μm到7μm之间的气溶胶体积谱分布明显高于其他三天，表明，此时大气中

粗模态粒子主要是沙尘气溶胶，这充分说明了沙尘天气过程中，沙尘气溶胶中主要以粗模态粒子为主，而5月1日的气溶胶粗模态的体积谱浓度仅仅低于5月2日沙尘天气过程，但是当沙尘天气发生时，气溶胶中细粒子的体积谱低于其他两天，因此，根据以上内容分析可以看出，在发生沙尘天气时，气溶胶粒子明显以粗模态为主，大气中的气溶胶粒子以矿物气溶胶为主，同时，大气中的污染气溶胶由于沙尘过境前期的大风天气导致浓度降低，而由于兰州市区污染较为严重，导致SACOL气候站沙尘过境前后大气中细粒子的体积谱浓度较高。

4.9 沙尘天气与背景大气条件下痕量气体的物理特性

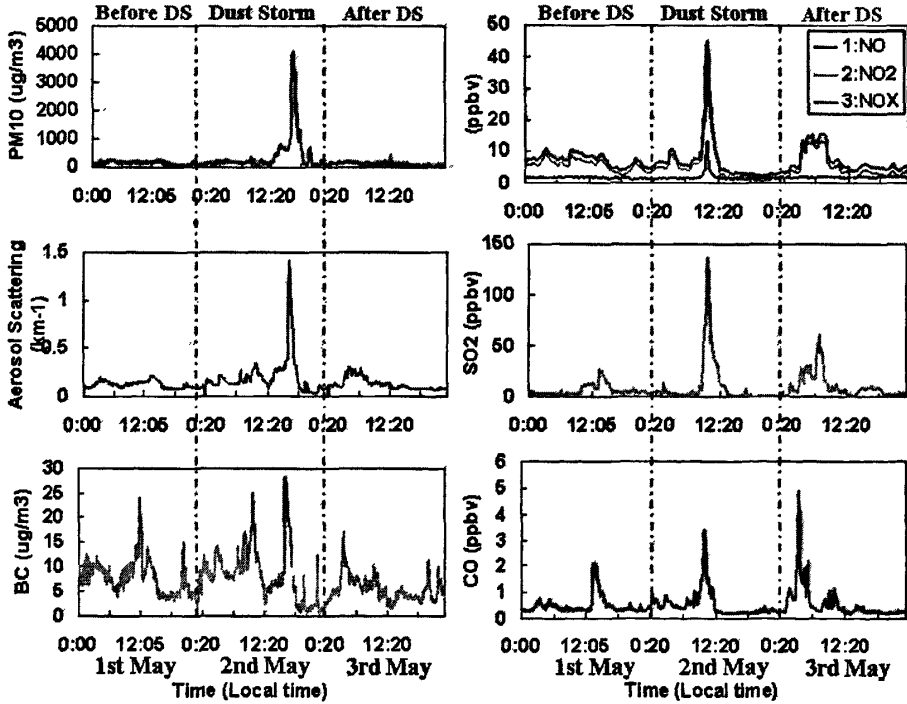


图 4.9 沙尘天气发生前后 PM₁₀ 与污染气体的日变化

图 4.9 是 2007 年 5 月 1 日~5 月 3 日之间沙尘天气前后 SACOL 站 PM₁₀ 和黑碳气溶胶与痕量气体的日变化特征，同时由于兰州市区人为污染较为严重，导致兰州市大气中存在大量的污染气溶胶，这些污染气溶胶中存在大量的黑碳气溶胶，黑碳气溶胶可以强烈吸收大气辐射，同时在沙尘天气发生时可以产生大量的沙尘气溶胶，沙尘气溶胶在传输过程中

不断地吸附和混合大气中的污染气溶胶，导致沙尘气溶胶物理化学及其光学属性发生变化，因此沙尘天气过程中 PM_{10} 与黑碳气溶胶的研究对于分析我国北方地区的气候变化具有重要的意义，此外，由于兰州市存在大量的可以造成污染的工厂，例如：炼铁与化肥厂可以产生大量的污染气体，包括 NO_x 、 SO_2 以及 CO 等，而在这些气体中 NO_x 与 SO_2 分别是硝酸盐和硫酸盐的前体物， NO_x 和 SO_2 在大气中经过一系列的化学反应可以形成硝酸盐和硫酸盐气溶胶，因此，对于 NO_x 和 SO_2 污染气体的研究有助于研究沙尘天气过程中硫酸盐与硝酸盐气溶胶的变化过程，沙尘气溶胶在传输过程中也不断地吸附大气中的污染气体，并且混合大气中的污染气体，因此可以通过研究沙尘天气过程中污染气体的变化来反映沙尘气溶胶传输过程中相应的变化，有助于研究沙尘天气的污染属性，此外，气溶胶的散射系数也是一种反映沙尘气溶胶的重要参数，由于 PM_{10} 在上一节已经讨论，因此本节不再赘述，从图 4.9 中可以看出，沙尘天气发生前后，气溶胶的散射系数变化较为平稳，平均值小于 0.1，表明此时大气中气溶胶质量浓度较低，气溶胶散射系数受气溶胶的影响较小，但是 5 月 2 日沙尘天气发生时，气溶胶散射系数迅速升高到 1.4，这时气溶胶的散射系数主要受到了沙尘气溶胶的影响，导致其迅速升高，而黑碳的变化除沙尘天气发生时黑碳气溶胶有一个明显峰值之外，5 月 2 日前后两天，黑碳质量浓度的变化趋势较为剧烈，黑碳气溶胶的日变化较为明显，因此表明兰州市黑碳气溶胶除受到了来自于沙尘天气的影响，其对应的日变化也较为明显，这同时证明了 SACOL 气候站的影响较强，黑碳气溶胶污染较为严重。接下来我们将讨论 NO_x 、 SO_2 和 CO 三种痕量气体随沙尘天气发生前后的变化趋势，从图中可以看出，当沙尘天气发生在 12 时前，三种痕量气体都形成了一次明显的峰值，当沙尘天气过境时，三种痕量气体的平均体积浓度明显小于 SACOL 气候站 3 天平均的背景值。而从图中来看，这三种气体平均每天都在造成 10~14 时之间又一次明显的峰值，这主要是由于兰州市清晨多静风天气，此时风速较小，大气中的污染气体不易扩散，因此容易在中午形成这次峰值，而 5 月 2 日则不同，当沙尘天气过境时，大风天气将 SACOL 气候站附近的 NO_x 、 SO_2 和 CO 这三种气体起到了清除作用，当这几种气体经过 SACOL 时，但是这三种气体体积浓度迅速增加，而此后由于是沙尘过境，从源地方向来的沙尘气溶胶携带了较少的痕量气体，因此导致此后的气体浓度明显降低。

4.10 沙尘天气气溶胶光学特征以及污染气体的传输与转化

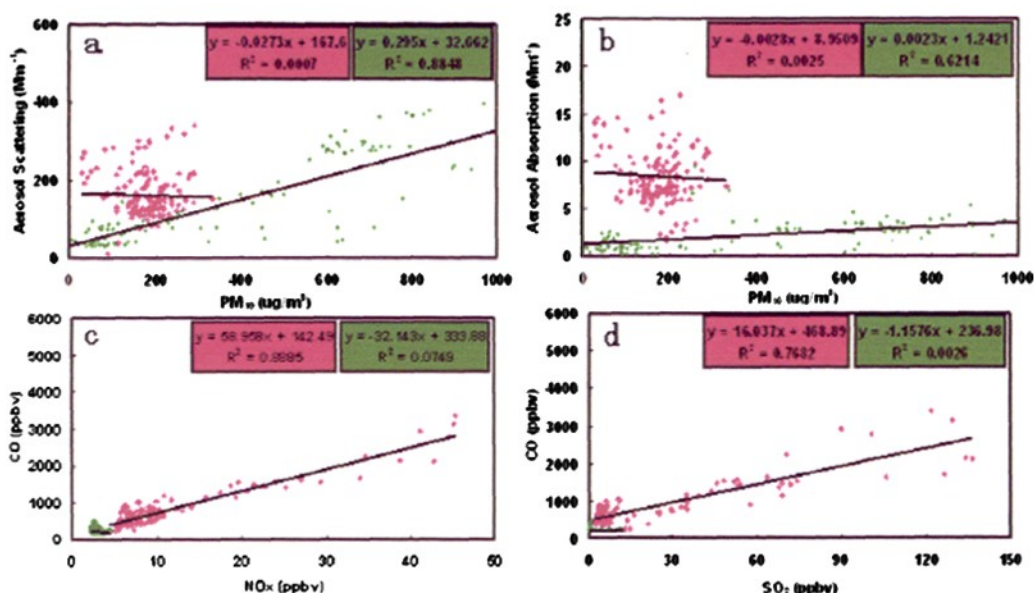


图 4.10 气溶胶与散射系数、CO 与 NO_x 和 CO 与 SO_2 之间的散点图

这一节将讨论沙尘天气前后气溶胶的光学属性与 PM_{10} 之间的相互关系，同时讨论沙尘天气前后几种痕量气体的相应变化的散点趋势图。以上分析主要以兰州市5月2日沙尘天气为例，由于之前讨论中发现5月2日12时以前基本上没有受到沙尘天气过境的影响，因此本节研究结果主要以5月2日中午12时后作为SACOL背景值和沙尘天气时的区分，沙尘天气发生前的散点图以粉色代表，而发生沙尘天气时的散点图以绿色来代表。图4.10a-d分别讨论气溶胶散射系数与 PM_{10} 、气溶胶吸收系数与 PM_{10} 、CO与 NO_x 、CO与 SO_2 之间的相互关系。从图4.10a气溶胶散射系数与 PM_{10} 的散点图中可以看出，沙尘天气发生前气溶胶散射系数与 PM_{10} 之间没有明显的相互关系，经过线性拟合的斜率为-0.00273，变化趋势不明显，这表明此时气溶胶的种类比较复杂，SACOL气候站此时有多种气溶胶物质存在，对散射系数都存在一定的影响，但是当沙尘天气发生时，由于大风天气对SACOL站本地背景大气中的气溶胶起到了清除作用，大气中的气溶胶主要以沙尘气溶胶为主，此时气溶胶散射系数与 PM_{10} 有很好的线性关系，线性拟合的斜率为0.295，表明气溶胶的散射系数随着 PM_{10} 质量浓度的增加而升高，这同时表明沙尘气溶胶是影响气溶胶散射系数的一种主要气溶胶，从图中还反映出 PM_{10} 小于 $200\mu\text{g/m}^3$ 的时候，背景气溶胶的散射系数明显高于沙尘气溶胶的散射系数，这说明SACOL气候站背景大气中的黑碳气溶胶、硫酸盐气溶胶能够更好的反映气溶胶的散

射吸收,这主要是由于气溶胶粒子与污染气溶胶粒子的表面积不同,污染气溶胶单位质量的表面积更大,当污染气溶胶与沙尘气溶胶的质量浓度相同时。污染气溶胶的表面积明显大于沙尘气溶胶的表面积,从而导致相同质量浓度情况下,污染气溶胶的散射系数高于沙尘气溶胶的散射系数,图4.10b是沙尘天气发生前后气溶胶的吸收系数与 PM_{10} 之间的线性关系,气溶胶的吸收系数是通过当天气溶胶散射系数与黑碳气溶胶的质量浓度之间的相互关系,根据Arnett等(2005)的方法计算得到的。从图4.10b中可以看到,沙尘天气发生之前气溶胶的吸收系数与 PM_{10} 之间相关性较差,但是吸收系数平均高于沙尘气溶胶的吸收系数,这主要是由于对太阳辐射均有强烈吸收,对气溶胶光学吸收系数的贡献率达90%左右,因而它对气溶胶的吸收系数的影响较为明显,而沙尘气溶胶与气溶胶的吸收系数则有明显的线性增加的趋势,但是沙尘气溶胶对气溶胶吸收系数明显低于SACOL气候站背景大气气溶胶的吸收系数,斜率仅为0.073,这说明了尽管沙尘气溶胶也可以影响气溶胶吸收系数,导致吸收系数增加,但是背景大气气溶胶对气溶胶吸收系数的影响更为显著。图4.10c和4.10d分别讨论了CO与 NO_x 、CO与 SO_2 之间沙尘天气前后之间的关系,从图中可以看出,当沙尘天气发生前CO与 NO_x 、CO与 SO_2 之间有显著的线性相关,线性拟合的斜率分别为58.958和16.037,同时可以看出沙尘天气影响SACOL气候站之前,兰州背景大气中污染气体的体积比浓度较高、当沙尘天气发生时,由于大风将SACOL气候站附近的污染气体清除,导致沙尘天气时污染气体体积浓度明显减小,同时可以看出,从源区传输的沙尘气团中这三种痕量气体含量也较少。

4.11 本章小结

本章内容主要讨论了在发生沙尘天气过程前后,沙尘气溶胶的质量浓度、光学厚度、散射与吸收等属性的相关变化,以及沙尘天气发生过程中,大气中可以形成硫酸盐、硝酸盐的前体物 NO_x 和 SO_2 等污染气体浓度的变化规律,主要结果包括以下几点:

(1) 利用OMI卫星气溶胶吸收指数的空间分布,分析了2007年5月2日沙尘天气过程的沙尘气溶胶的空间分布特征,研究发现,这次沙尘天气过程从2007年4月27日开始就在南疆地区开始发展向我国下游地区方向传输,于4月28日形成了一次较大范围的沙尘天气过程,而5月2日这次沙尘天气过程,是从4月29日开始从南疆地区开始发展的,于2007年5月2日沙尘天气从SACOL气候观测站过境,形成了这次大范围的沙尘天气过程。

(2) 利用 NCEP 再分析资料, 对 2007 年 5 月 2 日沙尘暴发生前后的天气系统及风场等情况进行了分析, 发现这次冷空气影响范围较大, 内蒙古南部、宁夏、陕西北部、甘肃及青海都不同程度的遭遇了扬沙及浮尘天气影响; 其中甘肃民勤、环县、内蒙古、陕西等地不同程度地出现了沙尘暴。兰州市区于当日中午遭受到了沙尘暴天气袭击, 风速 10m/s, 此次过程即对流层中部一低槽从中国新疆东南方向移动至中国东部沿海地区的过程。2 日 00 时, 兰州处于槽前脊后, 为暖高脊所控制。2 日 06 时, 槽东移至 95°E, 兰州处于槽后, 风场从东南方向开始向北风转变, 东南风减弱, 北风逐渐加强, 伴随着大风, 大气处于极端不稳定状态, 更加有利于河西走廊爆发强沙尘暴天气。

(3) 利用 HYSPLIT-4 模式, 对 2007 年 5 月 2 日影响 SACOL 气候观测站的这次沙尘天气过程进行分析, 并讨论这次沙尘气溶胶的来源以及主要传输路径。通过分析表明, 3000m 高度的气团后向轨迹主要源地在南疆塔克拉玛干沙漠地区, 向东南方向移动, 途经青海中部, 甘肃南部河西走廊地区, 而 1000m 高度的空气气团后向轨迹与 3000m 高度的轨迹路径明显不同, 从 1000m 的空气气团轨迹来看, 主要来源从内蒙古戈壁沙漠地区起沙, 经过腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠到达 SACOL 站。

(4) 在发生沙尘暴天气前, PM_{10} 的平均质量浓度小于 $0.2mg/m^3$, 小于国家空气质量 3 级标准, 空气质量良好, 但是当沙尘天气过境时, 气溶胶 PM_{10} 质量浓度从 $0.7 mg/m^3$ 左右迅速升高到大于 $3.5 mg/m^3$, 这表明沙尘天气过境时, 沙尘气溶胶质量浓度明显升高, 空气质量污染严重, 而从地表风速来看, 5 月 2 日早 08 时开始风速逐渐增强, 表明冷锋天气已经开始过境, 同时根据早晨 08 时以后的风向来看, 风向突然转变为北风, 这也相应证明了此时的天气系统主要受到了沙尘过境之前冷锋的影响, 同时沙尘天气过境时导致了明显的大幅度降温过程。

(5) 对沙尘天气过程中气溶胶的光学厚度进行了分析, 主要有以下几个特点: 1) 细粒子和粗粒子及气溶胶总的光学厚度从中午 12 时开始, 粗、细粒子模态的气溶胶光学厚度之间有明显的变化, 其中粗模态粒子的光学厚度迅速增加, 从 0.3 左右增加到 1.5 以上, 表明沙尘天气使兰州市空气中气溶胶粗粒子的光学厚度增加比较明显, 但是细粒子的光学厚度变化较平稳, 除 15 时左右有一次峰值达到 0.4 左右, 其他时刻都明显低于 0.15, 2) 从气溶胶不同波段光学厚度来看, 4 个波段变化趋势比较一致, 总体上与粗、细粒子的变化趋势大致相同, 10 时 30 分左右呈现第一次峰值, 从 12 时开始, 气溶胶光学厚度明显增加, 到 15 时达到了最大值。

(6) 利用 SACOL 站太阳光度计(CE-318)观测得到 2007 年 5 月 2 日沙尘暴天气过程前后气溶

胶粒子体积谱分布的变化,结果显示,5月2日沙尘天气过程时气溶胶粗模态的体积谱浓度最高,从 $1.3\mu\text{m}$ 到 $7\mu\text{m}$ 之间的气溶胶体积谱分布明显高于其他3天,而细粒子的体积浓度较小,这充分说明了沙尘天气过程中,沙尘气溶胶中主要以粗模态粒子为主,大气中的粗模态气溶胶粒子是矿物气溶胶,同时,大气中的污染气溶胶由于沙尘过境前期的大风天气导致浓度降低,而由于兰州市区污染较为严重,导致SACOL气候站沙尘过境前后大气中细粒子的体积谱浓度较高。

(7) 通过对 NO_x 与 SO_2 等可以参加大气化学反应而形成硝酸盐和硫酸盐的前体物进行分析发现,对于 NO_x 和 SO_2 污染气体的研究有助于研究沙尘天气过程中气溶胶传输过程中气溶胶参与的相应化学反应过程,当沙尘天气发生12时前,三种痕量气体都形成了一次明显的峰值,当沙尘天气过境时,3种痕量气体的平均体积浓度明显小于SACOL气候站3天平均的背景值。

(8) 最后本章对沙尘天气过程前后气溶胶的光学属性与 PM_{10} 之间的相互关系进行了分析,同时讨论沙尘天气前后几种痕量气体的相应变化的散点趋势图。沙尘天气发生之前,气溶胶的吸收系数与 PM_{10} 之间没有较明显的相关性,但是其吸收系数明显高于沙尘气溶胶的吸收系数,这主要是由于黑碳气溶胶等污染气溶胶尽管所占比例较小,但是其单位质量粒子的表面积明显高于沙尘气溶胶造成的。黑碳气溶胶从可见到红外的波长范围内,对太阳辐射均有强烈吸收,对气溶胶光学吸收系数的贡献率达90%左右,因而它对气溶胶的吸收系数的影响较为明显,虽然沙尘气溶胶的质量浓度与吸收系数线性相关较明显,但是背景大气气溶胶对气溶胶吸收系数的影响更为显著。此外,当沙尘天气发生前 CO 与 NO_x 、 CO 与 SO_2 之间有显著的线性相关。

第五章 黄土高原地区沙尘气溶胶特征研究

5.1 引言

本文前一章主要分析了一次典型沙尘天气过程沙尘气溶胶的物理及其光学属性,使我们对于沙尘天气发生时,气溶胶的一些重要特点有了一定的了解,但是对于整个黄土高原地区大气气溶胶的整体特征了解较少,同时,由于大部分学者对于大气气溶胶的研究主要集中在沙尘源地以及城市地区,对于典型的黄土高原半干旱地区的大气气溶胶物理特性及其光学属性的相关研究较少,而黄土高原半干旱区是我国半湿润气候区向干旱气候区的转换区域,由于种种原因,黄土高原生态环境脆弱现象日益扩张,水土流失、沙漠化、干旱、沙尘暴等灾害频繁发生,生态环境的可持续性引起了科技工作者的关注,是研究沙尘气溶胶对全球气候变化影响的敏感区域,近几年,沙尘暴的频繁肆虐、水土流失的加剧、降雨量的不断减少、黄河的频繁断流,从黄土高原2 000a左右的环境演变史分析,其森林植被不断减少,土壤侵蚀不断加剧,自然灾害发生频率不断增加,人口持续膨胀,这说明黄土高原生态环境在诸多因素的作用下,正在走向不可持续发展。

沙尘气溶胶主要来自干旱或半干旱的沙漠、戈壁、荒漠化土地,其受下垫面和天气状况影响较大。在全球尺度,主要的源地在北非的撒哈拉沙漠、中亚的塔克拉玛干沙漠。东亚地区的沙尘源区主要为中亚和中国西北地区沙漠以及黄土高原。在春季,中国北方裸露的草原和耕地也会成为沙尘源区。起源于沙尘源区的矿物气溶胶进入大气中,可以造成局部的空气污染,此外,沙尘气溶胶还通过大气输送对下游广大地区的生态系统、大气环境等都产生很大影响(李霞等, 2005)。沙尘气溶胶的大量存在还可能改变沙尘源区下游大气气溶胶及云和降水的物理化学特性。近年来对沙尘天气过程及其沙尘气溶胶气候学效应的研究也越来越受到重视。2007年第四次IPCC报告指出,气溶胶总体的辐射强迫呈现降温的趋势,但是对于沙尘气溶胶的辐射强迫效应仍然没有给出一个有效的范围,这主要是由于沙尘气溶胶的矿物形态区别较大,因此无法较详细地估算沙尘气溶胶的辐射强迫,这主要是对于沙尘气溶胶的来源及其对气候系统的反馈机制认识不足,同时,对于沙尘气溶胶的物理化学和光学特性了解较少,这主要是对于全球和区域范围内沙尘气溶胶理化性质(质量浓度、粒度分布、化学成分组成、形貌特征)的观测数据不足造成的。黄建平等(Huang et al., 2006a, 2006b, 2006c)利用MODIS和CERES资料研究了中国北方沙尘气溶胶对云和辐射强

迫的影响。

同时, 由于人类活动的影响, 造成黑碳气溶胶不断增加, 黑碳气溶胶强烈吸收太阳辐射而影响气候; 此外, 黑碳气溶胶的表面还可以吸附一些有毒、有害物质, 经呼吸道系统进入人体, 直接危害人体健康, 因此, 黑碳气溶胶也成为当前大气气溶胶研究领域的热点问题。Streets等(2001)研究认为, 我国的黑碳气溶胶排放量占到世界人为排放总量的1/4。高润祥等(2008)利用西北地区兰州、敦煌和塔中3个观测站2006年3~5月黑碳气溶胶(BC)的观测资料及相关台站 PM_{10} 和气溶胶光学厚度(aerosol optical depth; AOD)的观测数据, 分析该地区2006年春季BC分布特征。结果表明: 兰州地区BC质量浓度均值最高, 达 $2.22\mu g/m^3$, 敦煌地区为 $1.89\mu g/m^3$, 塔中地区为 $2.07\mu g/m^3$, 低于北京、上海和珠三角等地区, 高于瓦里关本底站观测值。付培健等(1998)通过对大气气溶胶轨迹线的研究, 可以明显地看到由戈壁沙漠与黄土高原地区的沙尘到达北极的路径。根据这一研究结果, 可以认为黄土高原地区是北极地区大气气溶胶源地之一。在大尺度沙尘暴范围期间, 沙尘暴卷起的沙尘或土尘在2~3 d内就可以到达北极; 而小尺度沙尘暴卷起的沙尘在较低气层中需要数天的运动到达北极。小粒径的沙尘易被吹到高层, 而在输运路径上, 越高气层到达北极的轨迹线比例越大。沈振兴等(2004)通过2001年春季黄土高原沉降区大气气溶胶(TSP)的观测结果显示, 其平均质量浓度为 $210\mu g/m^3$ 。牛生杰等(2005)将APS-3310型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪安装在飞机上, 于1999年春末对中国西北沙漠地区上空气溶胶进行探测。结果表明: 沙漠地区上空沙尘气溶胶粒子数浓度一般为 $1\sim 10$ 个/ cm^3 , 平均直径为 $1.6\sim 4.6\mu m$, 最大直径为 $13.0\sim 28.0\mu m$; TSP质量浓度为 $0.01\sim 0.08mg/m^3$, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别占TSP的3.6%~13.8%和50.3%~88.1%。

同时沙尘气溶胶的光学特征也可以用来定性估算大气中气溶胶的含量和类型, 同时可以用来评估大气污染, 也是气溶胶对太阳辐射进行散射和吸收消光属性的一个定量指标, 可以用来评估气溶胶的直接辐射强迫。美国NASA AERONET计划采用CE-318太阳光度计在全球布设了180多个站点, 用来研究气溶胶包括沙尘气溶胶的物理特性及其光学属性的时空分布变化。目前国内研究气溶胶光学特征的主要仪器是CE-318型太阳光度计。刘晓云等(2007)利用CE-318全自动太阳光度计, 反演了2001年春季敦煌地区不同类型天气条件下大气气溶胶的光学厚度。刘玉杰等(2004)利用CE-318全自动太阳光度计, 分析了银川地区大气气溶胶光学厚度的分布特征。申彦波等(2007)认为大气AOD值的大小可以作为表征沙尘天气发生强度的一个重要参数, 在有沙尘天气发生时, AOD可以用于反映大气中沙尘气溶胶含量的高低, 并进而判断沙尘天气的强弱。沙尘气溶胶作为东亚地区的一种重要气溶胶, 光学厚度均值高达5.27, 张文煜等(2003)在沙坡头利用太阳光度计对腾格里沙漠沙尘气溶胶进行了研

究,发现总体上来说气溶胶的光学厚度较大,时空变化较大,但是在同等条件下,各波段的变化规律基本一致,4月和5月份的平均光学厚度明显偏大,平均值为0.72,9月份为最小,平均值为0.30。沈建国等(2007)通过内蒙古5个站点几次沙尘天气过程气溶胶光学厚度特征得出,在沙尘天气发生过程中,气溶胶的光学厚度随着沙尘的发生、发展和消亡显示不同的日变化特征,其空间分布与沙尘天气本身的空间分布具有很好的一致性,可以很好的反映沙尘输送过程。刘菲等(2006)在2002年6月~2003年5月期间,利用CE-318太阳光度计在内蒙古额济纳旗、东胜和锡林浩特三地分析了沙尘气溶胶的光学厚度和粒子谱分布,结果表明,该地区气溶胶光学厚度具有明显的时空分布:春季最大,冬季最小,光学厚度的平均最大值为0.78,最小值为0.13。Angstrom浑浊度系数是表示大气气溶胶含量的大气光学参数;常用来监测大气污染的状况。

本章内容分别利用SACOL气候站大气成分观测室内的黑碳仪、RP1400、积分浑浊度仪、以及太阳光度计等仪器,来讨论黄土高原地区大气气溶胶的物理属性及其光学特征,本章内容具体分为以下三个部分,第一部分讨论SACOL气候站大气气溶胶的季节与年的质量浓度特征变化,第二部分分析沙尘气溶胶的数浓度谱分布特征,第三部分讨论SACOL气候站气溶胶的光学属性。

5.2 2007~2008年我国黄土高原地区大气气溶胶的年变化特征

5.2.1 SACOL气候站大气气溶胶质量浓度的年变化特征

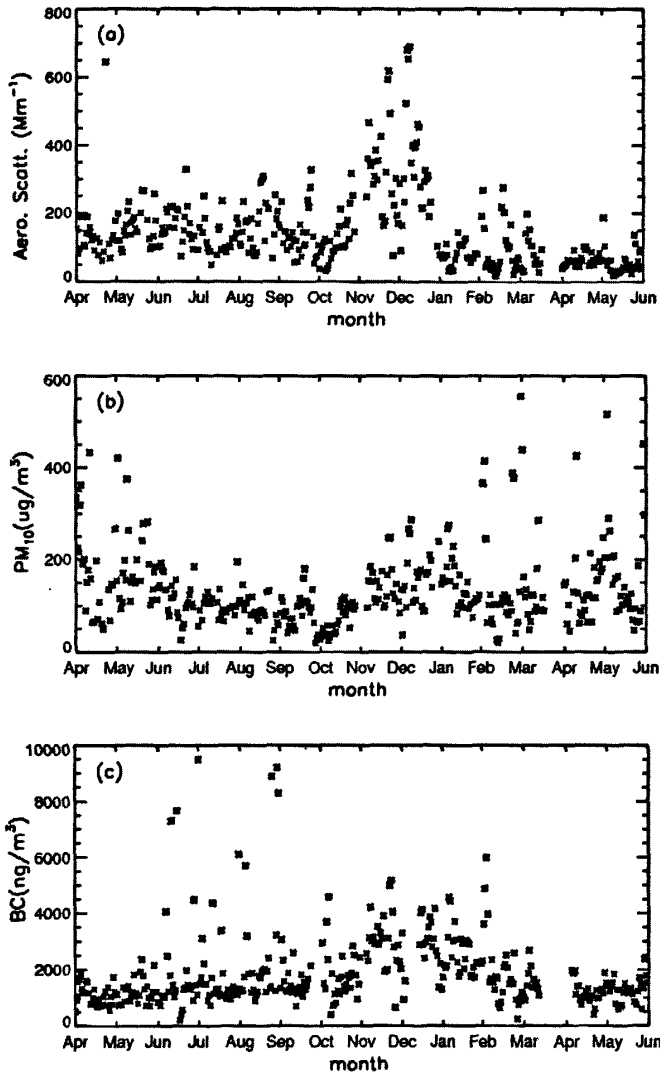


图5.1 (a)气溶胶散射系数、(b)PM₁₀和(c)黑碳气溶胶质量浓度的年变化

图 5.1 是 SACOL 站气溶胶散射系数、PM₁₀ 和黑碳气溶胶浓度的年变化示意图，总体上来看，气溶胶的散射系数受人为气溶胶与沙尘气溶胶的影响较强，从图 5.1a 中可以看出，气溶胶散射系数的最大值出现在 10 月底到 1 月初期，最大值达到 700Mm^{-1} ，这主要是受到兰州市冬季燃煤等造成的气溶胶浓度增加的影响，造成人为气溶胶浓度急剧增加，因此表明。人为气溶胶对散射系数的影响大于沙尘气溶胶的影响，最小值出现在 2008 年 1 月份～

5 月底,这主要是由于 2008 年春季沙尘天气较少,大气气溶胶的浓度较低,因此,气溶胶的散射系数较小,而 2007 年春季沙尘天气较多,因此 2007 年 3 月份至 9 月份散射系数较高,平均值达到 187 Mm^{-1} ,其中最大值和最小值分别为 227 和 63 Mm^{-1} ,图 5.1b 是 SACOL 站 PM_{10} 气溶胶质量浓度的年变化特征,从图中可以看出, PM_{10} 质量浓度的分布与气溶胶散射系数基本上一致,最大值出现在我国冬、春季节,由于 2007 年春季沙尘天气多于 2008 年春季沙尘天气,因此从图中可以看出,当沙尘天气出现时, PM_{10} 质量浓度的日变化可以达到 $400\sim 550\mu\text{g}/\text{m}^3$,且 2007 年春季的 PM_{10} 质量浓度大于 2008 年春季,而冬季的平均气溶胶浓度为 $310 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 的最低浓度值出现在我国夏季的 7~9 月份,这主要是由于西北地区夏季多降水,降水可以减少大气中气溶胶的质量浓度,导致夏季气溶胶质量浓度较低。图 5.1c 表示黑碳气溶胶的质量浓度的年变化特征,如图 5.1c 所示,除冬季黑碳气溶胶质量浓度较高以外,其他 3 个季节黑碳气溶胶的质量浓度较低,冬季由于燃煤取暖造成冬季黑碳气溶胶增加,平均值可以达到其他 3 个季节的 2 倍。

5.2.2 SACOL 气候站大气气溶胶质量浓度的季节变化和日变化特征

5.2.2.1 黑碳气溶胶质量浓度的季节变化和日变化

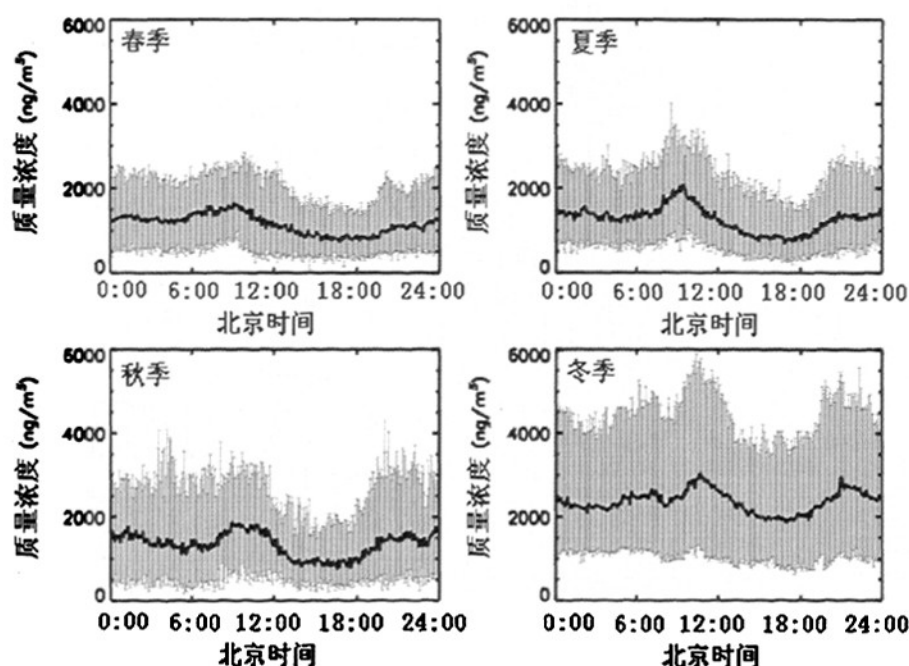


图 5.2 SACOL 气候站黑碳气溶胶质量浓度的季节变化和日变化

黑碳气溶胶(Black Carbon)是大气气溶胶的重要组成部分,主要来自于燃煤和生物质的不完全燃烧,人为源是大气中黑碳气溶胶的主要来源,本文使用 AE-31 型黑碳气溶胶进行黑碳气溶胶的连续观测,最低值为 $950\text{ng}/\text{cm}^3$, 10%分数的平均值 $480\text{ng}/\text{cm}^3$, 90%分数的平均值为 $1960\text{ng}/\text{cm}^3$, 图 5.2 是 SACOL 站黑碳气溶胶 4 个季节的日变化特征,阴影部分为黑碳气溶胶的 10%和 90%分数,从图中可以看出,黑碳气溶胶具有明显的日变化特征,春季黑碳气溶胶质量浓度主要呈现双峰型分布,主峰值出现在春季早上 08 时左右,而次峰值出现在傍晚 22~00 时左右,黑碳气溶胶 50%分数的最高值 $1670\text{ng}/\text{cm}^3$,表明春季黑碳气溶胶质量浓度的变率从 $480\text{ng}/\text{cm}^3$ 到 $1960\text{ng}/\text{cm}^3$ 之间,其中小于 $480\text{ng}/\text{cm}^3$ 为春季黑碳气溶胶的背景值天气,夏季黑碳气溶胶的日变化趋势与春季基本相同,而秋季黑碳气溶胶的变化趋势波动较大,呈现 3 峰型分布,上午 10~12 时为黑碳气溶胶质量浓度的峰值,中午 13 时到 18 时为黑碳气溶胶的波谷值,到了晚上 22 时和 01 时左右又形成了 2 次明显的峰值分布,这主要是由于兰州市早晨和傍晚容易形成静风天气,对流运动较小,不易黑碳气溶胶的扩散,而兰州市的下午一般对流较强,容易导致黑碳气溶胶扩散,冬季的变化趋势虽然同其他三个季节较相似,但是由于冬季燃煤取暖的原因,但是黑碳气溶胶质量浓度明显增加,50%分数的黑碳气溶胶浓度平均值大于 $2000\text{ng}/\text{cm}^3$,大于其他 3 个季节的 90%分数,表明冬季 SACOL 受黑碳气溶胶影响较强,黑碳气溶胶浓度较高。

5.2.2.2 PM_{10} 质量浓度的季节变化和日变化

大气气溶胶的尺度范围很大,小到直径为千分之几微米,大到直径为几毫米量级的雨滴,本文研究的大气气溶胶的粒径范围主要为 $0.5\sim 10\mu\text{m}$,其中 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 的部分叫做细粒子或者小粒子,直径为 $1\sim 10\mu\text{m}$ 的部分叫做粗粒子或者大粒子,在大气气溶胶的定义中,粒径 $\text{De}<1\mu\text{m}$ 的粒子作为原生粒子和再生粒子,即细粒子和粗粒子的分界线,这种粒子主要通过燃烧、汽车尾气、工业燃烧以及二次形成的气溶胶中产生。 PM_{10} 是观测大气气溶胶的一个重要参数,由于本文研究的范围是我国黄土高原地区的大气气溶胶,本节利用 APS-3110 激光空气动力学气溶胶粒子谱仪首先分析沙尘气溶胶粒子(coarse mode)直径为 $1\mu\text{m}$ 以下粒度谱分布的日变化,然后分析细粒子(fine mode)粒径小于 $2.5\mu\text{m}$ 以下的粒子谱分布的日变化,最后分析粒径为 $10\mu\text{m}$ 以下的气溶胶粒子的粒径。

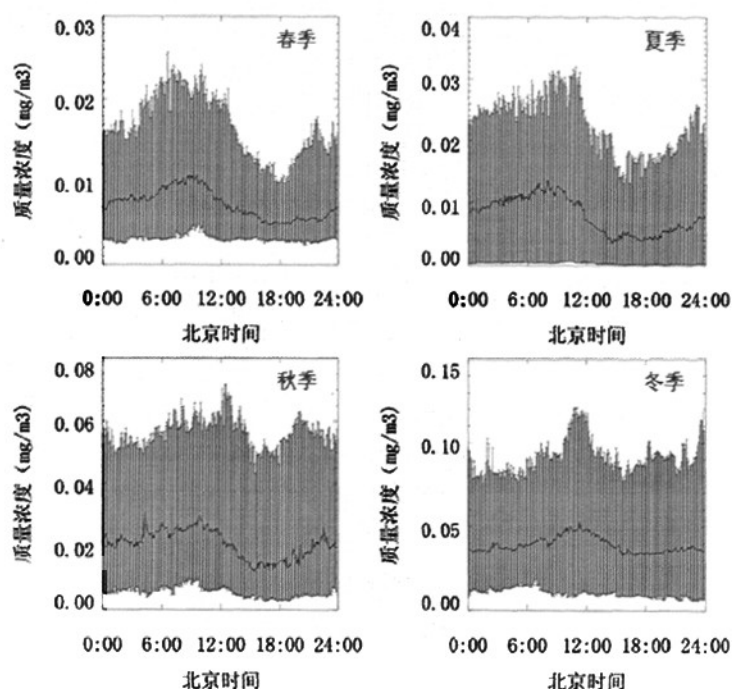


图 5.3 SACOL 气候站 PM_{10} 质量浓度的季节变化和日变化

首先图 5.3 反映的是 SACOL 气候站细粒子($De < 1\mu m$)气溶胶质量浓度的季节变化, 阴影部分为气溶胶 PM_{10} 的 10%和 90%分数, 从图中可以看出, 春季 SACOL 气候站大气中 PM_{10} 质量浓度变化范围为 $0.005 \sim 0.013 mg/m^3$, 平均值为 $0.009 mg/m^3$, 春季 PM_{10} 的日变化呈现单峰值分布, 峰值出现在上午 09 时左右, 质量浓度达到 $0.013 mg/m^3$, 其中春季 PM_{10} 的 10% 平均主分数达到 $0.003 mg/m^3$, 而 90%的平均主分数则达到了 $0.016 mg/m^3$, 90%主分数的最高值同样出现在上午 10 时左右。达到了 $0.016 mg/m^3$, 但是对比其他几个季节, 从图中可以看出, 春季大气中 PM_{10} 质量浓度从 10%到 90%主分数的变率是最小的, 夏季与冬季 50%主分数质量浓度的日变化分布与春季大体相同, 都呈现单峰值分布, 结果显示, 夏季期间 PM_{10} 的质量浓度变化范围为 $0.004 \sim 0.013 mg/m^3$, 平均值为 $0.009 mg/m^3$, 大体与春季相同, 但是夏季 PM_{10} 质量浓度的日变化较为明显, 峰值同样出现在早晨 09 时左右, 通过分析春季与夏季 PM_{10} 质量浓度的变化特征, 表明春季与夏季大气中 PM_{10} 的质量浓度较小, 这主要是由于 PM_{10} 通过燃烧、汽车尾气、以及二次形成的气溶胶中产生, 但是春季兰州市燃煤期已过, 而 SACOL 站又建在榆中翠英山上, 受到汽车尾气以及其他原因产生的 PM_{10} 影响较低, 因此, 春季大气 PM_{10} 质量浓度相对较低。而夏季主要是由于兰州市大气中降水较多, 对细粒子 PM_{10} 起到了极好的湿消除作用, 夏季 PM_{10} 的 10%平均主分数达到 $0.001 mg/m^3$, 而 90%的平均主分数则达到了 $0.021 mg/m^3$, 表明夏季大气中污染型气溶胶含量相对较低的日数较多。对比

春季与夏季, 秋季与冬季大气中的 PM_{10} 相对较多, 这主要是从秋季 10 月份起, 兰州市已经进入采暖期, 由于兰州市特有的地理位置, 以及多逆温天气, 造成大气中由于燃烧产生的 PM_{10} 质量浓度较高, 尤其是冬季, 质量浓度可以达到春季与夏季的 4~6 倍。从图中可以看出, 秋季大气中 PM_{10} 的质量浓度变化范围为 $0.018\sim 0.03mg/m^3$, 平均值为 $0.019mg/m^3$, 兰州市春季大气中 PM_{10} 呈现双峰值分布, 主峰值出现在早晨 09 时左右, 达到 $0.03mg/m^3$, 而傍晚 22 时又会出现一个次峰值, 质量浓度为 $0.28mg/m^3$, 主峰值主要是由于兰州市的早晨风速较低, 对流性天气一般出现在下午, 因此导致大气污染物在早晨容易聚集, 从而在 09 时左右达到最高值, 而秋季的次峰值主要是由于, 秋季的燃煤取暖等原因造成的, PM_{10} 质量浓度最高的为冬季, 大气中 PM_{10} 的 50% 主分数的质量浓度变化范围为 $0.042\sim 0.058mg/m^3$, 平均值为 $0.048mg/m^3$, 明显高于兰州市区其他 3 个季节, 且呈现双峰值分布, 次峰值同秋季基本相同, 但是不明显。因此通过以上分析可以发现, 属于污染型气溶胶的 PM_{10} 在春季与夏季的质量浓度较低, 主要是春季多大风天气, 且燃煤取暖季节已过, 大气中 PM_{10} 含量较少, 而夏季的降水可以很好的起到湿清除的作用。冬季 PM_{10} 污染最为严重, 这主要是兰州冬季取暖产生的污染物以及兰州市特有的地理位置所致。

5.2.2.3 $PM_{2.5}$ 质量浓度的季节变化和日变化

大气气溶胶中 $PM_{2.5}$ 的粒径较小而表面积大, 因此可以在空气中长时间滞留, 通过吸附有毒重金属、酸性物质、有机污染物、细菌和病毒等, 对人类健康造成影响。 $PM_{2.5}$ 可以通过呼吸道, 沉积在肺泡, 引起各种呼吸系统疾病。因此, 气溶胶粒径为 $2.5\mu m$ 成为当前气溶胶研究的重点之一, 是观测大气气溶胶的一个重要参数, 本节利用 APS-3110 激光空气动力学气溶胶粒子谱仪分析细粒子(fine mode)粒径小于 $2.5\mu m$ 以下的粒子粒度谱分布的日变化, 图 5.4 反映的是 SACOL 气候站细粒子($De < 2.5\mu m$)气溶胶质量浓度的季节变化, 阴影部分为气溶胶 $PM_{2.5}$ 的 10% 和 90% 分数, 从图中可以看出, 春季 SACOL 气候站大气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化范围为 $0.018\sim 0.035mg/m^3$, 平均值为 $0.023mg/m^3$, 春季 $PM_{2.5}$ 的日变化呈现单峰值分布, 峰值出现在上午 09 时左右, 质量浓度达到 $0.035mg/m^3$, 其中春季 $PM_{2.5}$ 的 10% 平均主分数达到 $0.015mg/m^3$, 而 90% 的平均主分数则达到了 $0.031mg/m^3$, 90% 主分数的最高值同样出现在上午 10 时左右。达到了 $0.067mg/m^3$, 但是对比其他几个季节, 从图中可以看出, 春季大气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度从 10% 到 90% 主分数的变率是最小的, 夏季与冬季 50% 主分数质量浓度的日变化分布与春季大体相同, 都呈现单峰值分布, 结果显示,

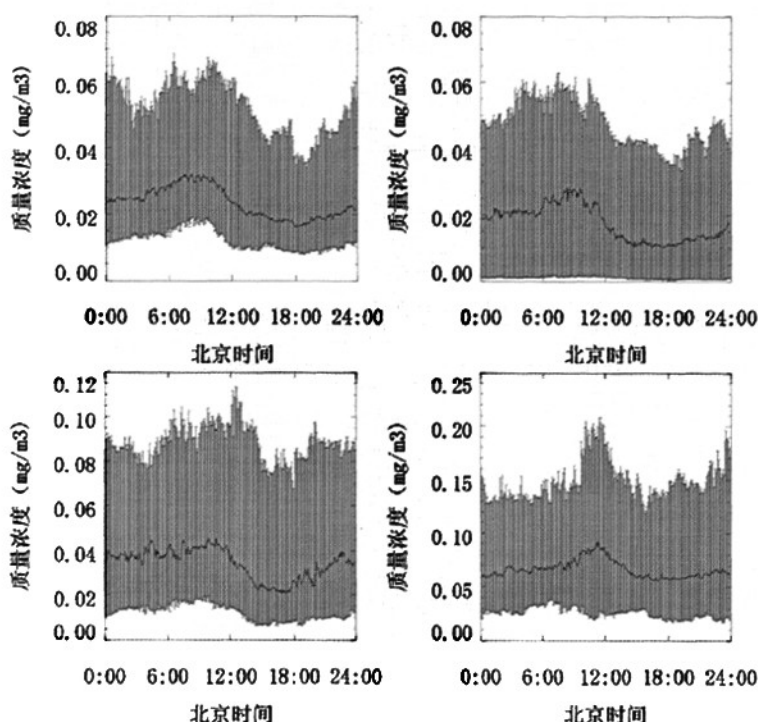


图 5.4 SACOL 气候站 $PM_{2.5}$ 质量浓度的季节变化和日变化

夏季期间 $PM_{2.5}$ 的质量浓度变化范围为 $0.012 \sim 0.023 \text{ mg/m}^3$ ，平均值为 0.018 mg/m^3 ，大体与春季相同，但是夏季 $PM_{2.5}$ 质量浓度的日变化较为明显，峰值同样出现在早晨 09 时左右，通过分析春季与夏季 $PM_{2.5}$ 质量浓度的变化特征分析，表明春季与夏季大气中 $PM_{2.5}$ 的质量浓度较小，夏季 $PM_{2.5}$ 的 10% 平均主分数达到 0.001 mg/m^3 ，而 90% 的平均主分数则达到了 0.054 mg/m^3 ，表明夏季大气中污染型气溶胶含量相对较低的日数较多。对比春季与夏季，秋季与冬季大气中的 $PM_{2.5}$ 相对较多，这主要是从秋季 10 月份起，兰州市已经进入采暖期，由于兰州市特有的地理位置，以及多逆温天气，造成大气中由于燃烧产生的 $PM_{2.5}$ 质量浓度较高，尤其是冬季，质量浓度可以达到春季与夏季的 4~6 倍。从图中可以看出，秋季大气中 $PM_{2.5}$ 的质量浓度变化范围为 $0.028 \sim 0.046 \text{ mg/m}^3$ ，平均值为 0.036 mg/m^3 ，兰州市春季大气中 $PM_{2.5}$ 呈现双峰值分布，主峰值出现在早晨 09 时左右，达到 0.03 mg/m^3 ，而傍晚 22 时又会出现一个次峰值，质量浓度为 0.28，主峰值主要是由于兰州市的早晨风速较低，对流性天气一般出现在下午，因此导致大气污染物在早晨容易聚集，从而在 09 时左右达到最高值，而秋季的次峰值主要是由于，秋季的燃煤取暖等原因造成的， $PM_{2.5}$ 质量浓度最高的为冬季，大气中 $PM_{2.5}$ 的 50% 主分数的质量浓度变化范围为 $0.06 \sim 0.095 \text{ mg/m}^3$ ，平均值为 0.079

mg/m^3 , 明显高于兰州市区其他 3 个季节, 且呈现双峰值分布, 次峰值同秋季基本相同, 但是不明显。因此通过以上分析可以发现, 属于污染型气溶胶的 $\text{PM}_{2.5}$ 在春季与夏季的质量浓度较低。

5.2.2.4 PM_{10} 质量浓度的季节变化和日变化

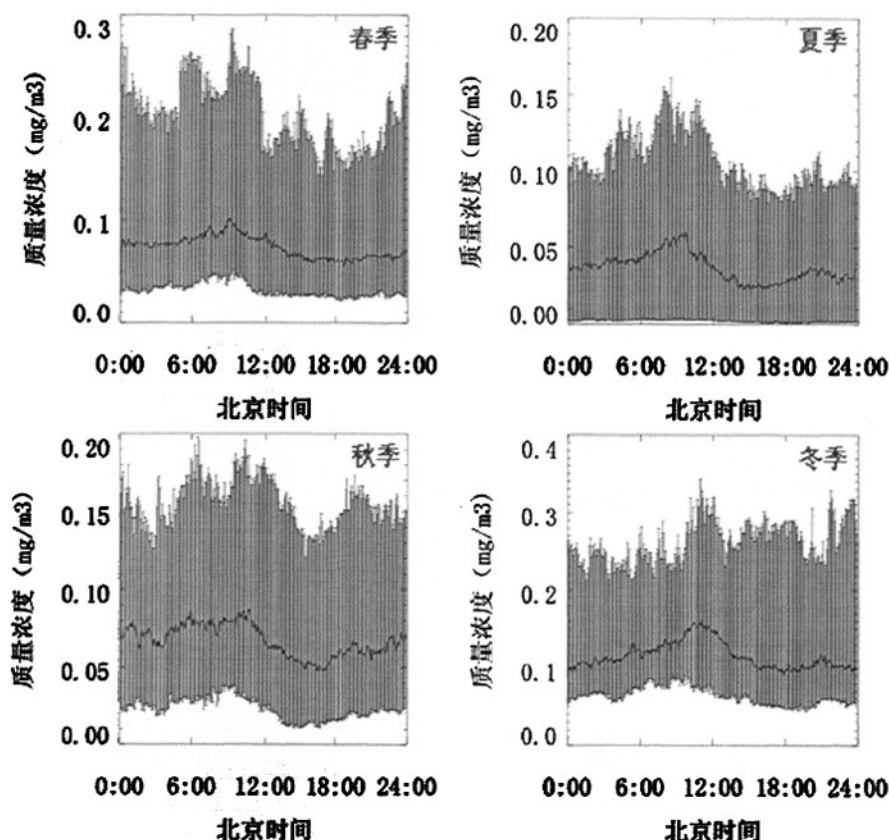


图 5.5 SACOL 气候站 PM_{10} 质量浓度的季节变化和日变化

大气气溶胶中 PM_{10} 称为浮尘, 主要是通过沙尘天气产生的气溶胶造成的, 因此, 气溶胶种类主要以矿物质气溶胶为主, 沙尘气溶胶可以通过远距离传输对其下游地区造成影响, 从而对人类健康造成危害, 因此, 气溶胶粒径为 $10\mu\text{m}$ 成为当前气溶胶研究的重点之一。本节利用 APS-3110 激光空气动力学气溶胶粒子谱仪分析粗粒子(coarse mode)粒径小于 $10\mu\text{m}$ 以下的粒子粒度谱分布的日变化, 图 5.5 反映的是 SACOL 气候站细粒子($\text{De}<10\mu\text{m}$)气溶胶质量浓度的季节变化, 阴影部分为气溶胶 PM_{10} 的 10%和 90%分数, 从图中可以看出, 春季

SACOL 气候站大气中 PM_{10} 质量浓度变化范围为 $0.08 \sim 0.12 \text{ mg/m}^3$, 平均值为 0.103 mg/m^3 , 春季 PM_{10} 的日变化呈现单峰值分布, 峰值出现在上午 09 时左右, 质量浓度达到 0.103 mg/m^3 , 其中春季 PM_{10} 的 10% 平均主分数达到 0.032 mg/m^3 , 而 90% 的平均主分数则达到了 0.21 mg/m^3 , 90% 主分数的最高值同样出现在上午 10 时左右, 达到了 0.28 mg/m^3 , 夏季与冬季 50% 主分数质量浓度的日变化分布与春季大体相同, 都呈现单峰值分布, 结果显示, 夏季期间 PM_{10} 的质量浓度变化范围为 $0.028 \sim 0.067 \text{ mg/m}^3$, 平均值为 0.049 mg/m^3 , 夏季 PM_{10} 质量浓度的日变化较为明显, 峰值同样出现在早晨 09 时左右, 通过分析春季与夏季 PM_{10} 质量浓度的变化特征分析, 表明春季大气中 PM_{10} 的质量浓度明显高于夏季, 表明春季空气质量污染较为严重, 这主要是由于我国春季西北地区沙尘天气频发, 造成大气中 PM_{10} 质量浓度明显增加, 夏季 PM_{10} 的 10% 平均主分数达到 0.001 mg/m^3 , 而 90% 的平均主分数则达到了 0.16 mg/m^3 , 从图中可以看出, 秋季大气中 PM_{10} 的质量浓度变化范围为 $0.062 \sim 0.083 \text{ mg/m}^3$, 平均值为 0.072 mg/m^3 , 兰州市春季大气中 PM_{10} 呈现双峰值分布, 主峰值出现在早晨 9:00 左右, 达到 0.083 mg/m^3 , 而傍晚 22 时又会出现一个次峰值, 质量浓度为 0.076 , PM_{10} 质量浓度最高的为冬季, 大气中 PM_{10} 的 50% 主分数的质量浓度变化范围为 $0.11 \sim 0.16 \text{ mg/m}^3$, 平均值为 0.13 mg/m^3 , 明显高于兰州市其他三个季节, 且呈现双峰值分布, 次峰值同秋季基本相同, 但是不明显。因此通过以上分析可以发现, 属于污染型气溶胶的 PM_{10} 在春季与夏季的质量浓度较低。

5.3 大气气溶胶数浓度的分布变化

5.3.1 大气气溶胶数浓度的年变化特征

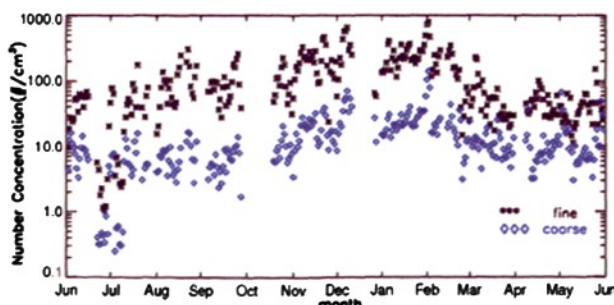


图 5.6 SACOL 站沙尘气溶胶粒子数浓度年变化特征

理论计算结果表明, 半径在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的粒子在大气气溶胶的消光作用中贡献最大。对

于沙尘气溶胶, 已有的研究结果表明, 尺度越小的粒子对短波辐射的散射能力相对较强, 尺度越大的粒子对长波辐射的吸收作用相对较强, 半径小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子对太阳辐射散射能力最强, 同时由于气溶胶粒子的数浓度与人们的健康密切相关, 其中 PM_{10} 以下的气溶胶还有大量的有毒物质, 可以被人体吸收, 对人体健康造成影响, 同时可以通过沙尘气溶胶的数浓度来分析气溶胶的沉降率与传输距离, 对于研究沙尘气溶胶的物理属性具有重要的作用, 图5.6是利用APS空气动力学粒谱仪观测SACOL站大气气溶胶的粒子数浓度年变化特征示意图, 根据Marinoni(2008)的研究发现, 人为气溶胶的粒径主要小于 $1\mu\text{m}$, 而沙尘气溶胶的粒径主要小于 $10\mu\text{m}$, 因此, 本节将气溶胶的粒子数浓度以 PM_{10} 和 PM_1 作为区分, 分别计算从2007年6月至2008年6月期间大于和小于 $1\mu\text{m}$ (含 $1\mu\text{m}$)粒子的数浓度。从图5.6可以看出, 矿物气溶胶的数浓度的年变化总体较低, 其中数浓度最高值出现在冬季, 平均值小于 $40\text{个}/\text{cm}^3$, 其次是2009年春季, 矿物气溶胶的数浓度的平均值为 $20\text{个}/\text{cm}^3$ 左右, 仅仅是冬季数浓度的一半左右, 而秋季和夏季的数浓度非常低, 平均小于 $10\text{个}/\text{cm}^3$, 表明SACOL站气溶胶污染主要出现在冬季和春季, 而小于 $1\mu\text{m}$ 的气溶胶的数浓度与小于 $10\mu\text{m}$ 的气溶胶的数浓度的趋势大致相同, 从图4.6来看, 冬季 PM_1 的数浓度达到了 $435\text{个}/\text{cm}^3$, 是2009年春季 PM_1 的3倍左右, 小于2008年 PM_1 春季的数浓度, 表明2007年春季总体沙尘天气多于2008年沙尘天气。

5.3.2 PM_1 数浓度的季节变化和日变化

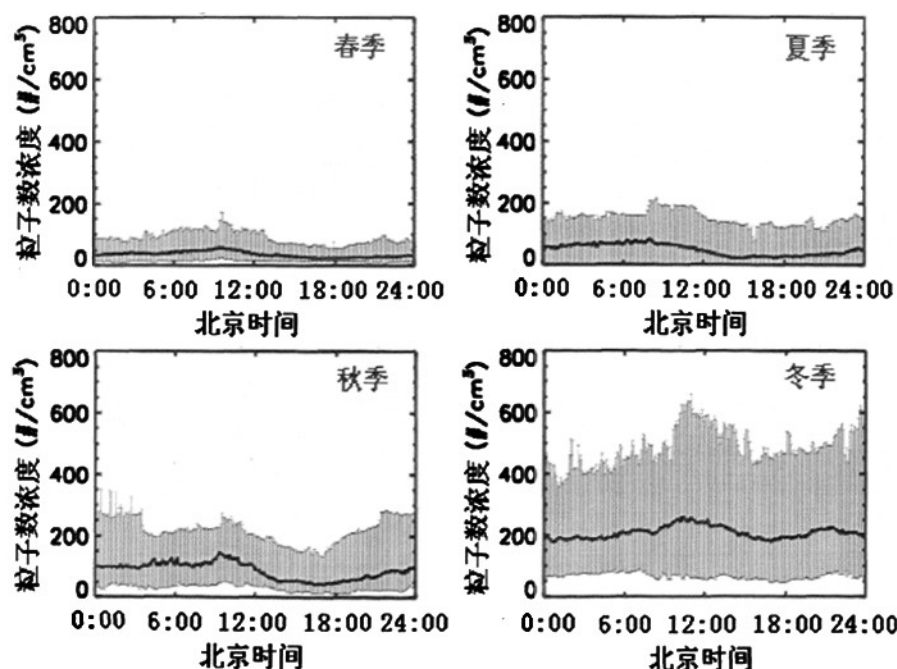


图5.7 PM_1 数浓度的季节变化和日变化

在 SACOL 地区, PM_{10} 是观测大气气溶胶的一个重要参数, 大气气溶胶的尺度范围很大, 小到直径为千分之几微米, 大到直径为几毫米量级的雨滴, 本文研究的大气气溶胶的粒径范围主要为 $0.5\sim 10\mu m$, 其中 $0.1\sim 1\mu m$ 的部分叫做细粒子或者小粒子, 直径为 $1\sim 10\mu m$ 的部分叫做粗粒子或者大粒子, 由于本文研究的范围是我国黄土高原地区的大气气溶胶, 气溶胶的种类主要以春季的沙尘气溶胶和冬季的黑碳气溶胶研究为主, 因此本节研究的气溶胶属于多谱型气溶胶, 本文研究本节利用 APS-3110 激光空气动力学气溶胶粒子谱仪首先分析细粒子(fine mode)直径为 $0.5\sim 1\mu m$ 粒度谱分布的季节变化和日变化, 然后分析粒度沙尘气溶胶粒子(coarse mode)直径小于 $10\mu m$ 粒度谱分布的季节变化和日变化, 图 5.7 是 SACOL 站细粒子气溶胶 4 个季节的日变化特征, 阴影部分为污染气溶胶的 10%和 90%分数, 从图中可以看出, 除冬季外, 其他三个季节的沙尘气溶胶没有明显的日变化特征, 春季大气污染气溶胶的粒度谱分布主要呈现单峰型分布, 主峰值出现在春季早上 8 点左右, 春季污染气溶胶数浓度的 50%分数为 $25 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 10%分数的平均值为 $7 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 90%分数的平均值为 $37 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 春季污染气溶胶的数浓度与夏季基本相同, 夏季污染气溶胶数浓度的变化从 $18\sim 42 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 平均值为 $24 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 表明兰州市春季与夏季大气气溶胶中污染气溶胶较少, 这主要是由于我国春季取暖期已过, 大气中主要是以矿物气溶胶为主, 而夏季主要由于降水较多, 造成大气中的气溶胶数浓度较低。从图中可以看出, 秋季与冬季大气中污染气溶胶的数浓度明显高于秋季和冬季, 秋季大气气溶胶中细粒子的数浓度从 $45\sim 137 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 平均值为 $85 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 而冬季大气中污染气溶胶数浓度最高, 且呈现双峰型分布, 上午 $10\sim 12$ 时为沙尘气溶胶粒度谱分布的峰值, 沙尘气溶胶数浓度的 50%分数超过 $200 \text{ 个}/\text{cm}^3$, 明显高于其他三个季节的最大值, 这主要是由于冬季兰州市燃煤取暖对污染气溶胶起到了聚集的作用, 同时由于兰州市特有的峡谷型地理位置, 造成冬季大气中的污染不易扩散, 导致大气中污染气溶胶明显高于其他几个季节, 表明, 兰州市冬季大气污染较为严重, 空气质量较差, 亟待解决。

5.3.3 PM_{10} 数浓度的季节变化和日变化

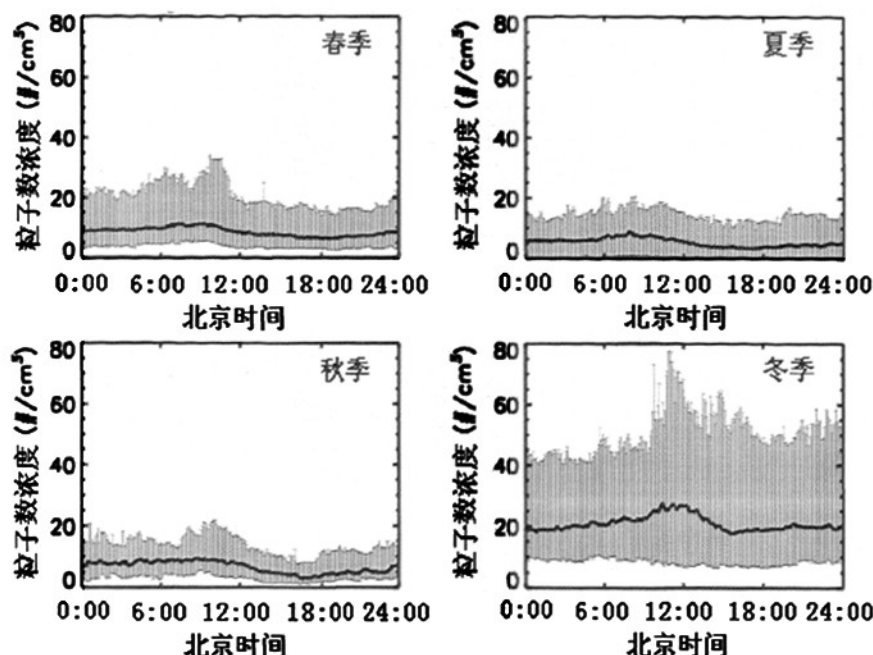


图5.8 PM_{10} 数浓度的季节变化和日变化

在SACOL地区, PM_{10} 是观测大气气溶胶的一个重要参数, 本节研究的 PM_{10} 气溶胶属于矿物气溶胶, 且气溶胶主要来源于我国干旱和半干旱沙漠地区, 图5.8是SACOL站沙尘气溶胶4个季节的日变化特征, 阴影部分为沙尘气溶胶的10%和90%分数, 从图中可以看出, 除冬季外, 其他三个季节的沙尘气溶胶没有明显的日变化特征, 总体上来看春季与冬季沙尘气溶胶数浓度较高, 而夏季和秋季沙尘气溶胶数浓度较低, 四个季节均呈现单峰型分布, 主峰值出现在春季早上08时左右, 春季沙尘气溶胶数浓度的50%分数为10个/ cm^3 , 10%分数的平均值3个/ cm^3 , 90%分数的平均值为32个/ cm^3 , 春季沙尘气溶胶的数浓度与冬季基本相同, 且略低于冬季, 这主要是由于2008年春季沙尘天气较少, 兰州市观测到的沙尘天气仅有2~4次, 且强度不高, 因此, 2008年春季的沙尘气溶胶数浓度还低于冬季大气中的沙尘气溶胶, 而冬季大气中沙尘气溶胶主要是通过地表的扬尘造成的, 冬季多大风天气, 大风天气可以造成兰州市局地扬尘增加, 导致大气中沙尘气溶胶含量较高, 而夏季和冬季沙尘气溶胶数浓度较低, 夏季兰州市沙尘气溶胶的数浓度的变化范围为3~9个/ cm^3 , 平均值为6个/ cm^3 , 表明兰州市夏季大气气溶胶中沙尘气溶胶含量较少, 主要是由于降水较多, 造成大气中的气溶胶数浓度较低。从图中可以看出, 秋季兰州市沙尘气溶胶基本上与夏季相同。

5.3.4 SACOL 气候站大气气溶胶的数浓度谱的年变化

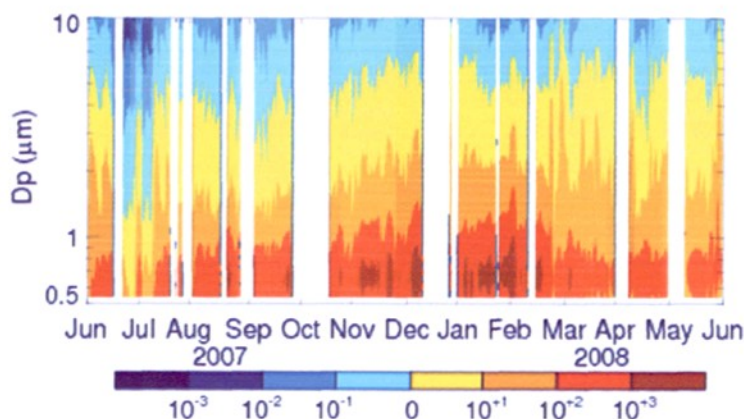


图 5.9 沙尘气溶胶粒子数浓度谱年变化分布特征

图 5.9 是利用 APS-31 型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪分析了 2007 年 6 月至 2008 年 5 月底的气溶胶粒子数浓度谱分布，该仪器在 $0.5\sim 20\mu\text{m}$ 范围内分为 58 个波段，可用于测量各种大气气溶胶的粒子谱分布，包括数浓度谱、表面积谱、质量浓度谱等。由图 4.8 可知，SACOL 站观测的春、夏、秋、冬季节细粒子谱数浓度分别为 35 、 41 、 75 和 201 个/ cm^3 ，其中冬季大气气溶胶小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子数浓度明显高于其他三个季节，大于 1000 个/ cm^3 ，说明冬季气溶胶主要以污染气溶胶为主，人为污染较为严重，造成这种现象的主要原因在于由于兰州市区冬季燃煤取暖，导致污染气溶胶数浓度急剧增加。而仅次于冬季大气气溶胶数浓度的季节就是春季，从不同粒径的粒子来看，春季大气气溶胶的数浓度高于秋季和夏季，这主要是由于兰州市区春季受沙尘天气影响，大气中气溶胶主要以外来沙尘和本地扬尘为主，因此导致春季大气气溶胶数浓度较高，而夏季最低，其中空白处为降水天气过程中，气溶胶粒子谱仪关闭气溶胶粒子数浓度缺测造成，从图中可以看出，由于夏季多降水性天气过程，因此大气中的气溶胶粒子数浓度较低，空气质量较好。而秋季 10 月底是兰州市区燃煤季节的开始，气溶胶数浓度明显增加。

5.3.5 SACOL气候站大气气溶胶的数浓度谱的季节变化随粒径的分布

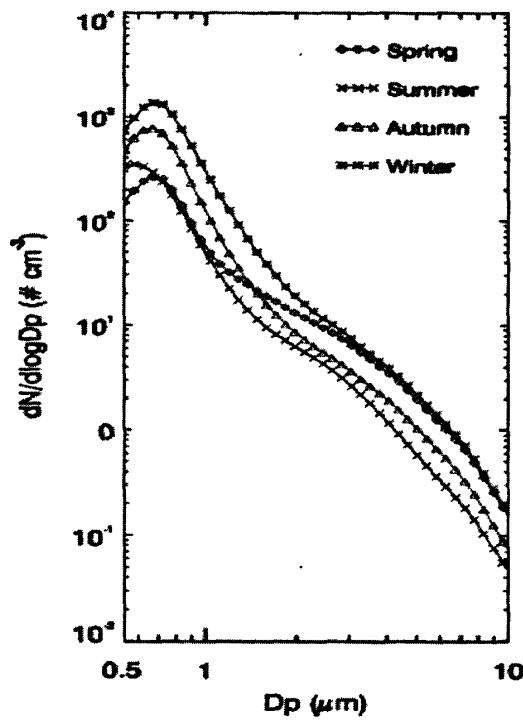


图 5.10 沙尘气溶胶粒子数浓度谱的季节变化随粒径的分布

图 5.10 是利用 APS-3310 型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪分析了大气气溶胶粒子数浓度随粒子半径的季节变化特征，该仪器在 0.5~20μm 范围内分为 58 个波段，可用于测量各种大气气溶胶的粒子谱分布，包括数浓度谱、表面积谱、质量浓度谱等。由图 5.10 可知，SACOL 站大气气溶胶数浓度呈现双峰型分布，除春季外，其他三个季节的大气气溶胶的粒子数浓度从高到底依次分别为冬季、秋季、夏季，说明冬季气溶胶大气气溶胶数浓度较高，人为污染较为严重，其原因主要是由于冬季燃煤取暖，导致污染气溶胶数浓度明显高于其他几个季节，而夏季气溶胶数浓度随粒径的分布最低，这主要是由于兰州市区夏季多降水天气，且黄土高原地区沙尘天气较少，空气质量良好，导致气溶胶数浓度较低。

5.3.6 SACOL气候站大气气溶胶的体积谱的年变化

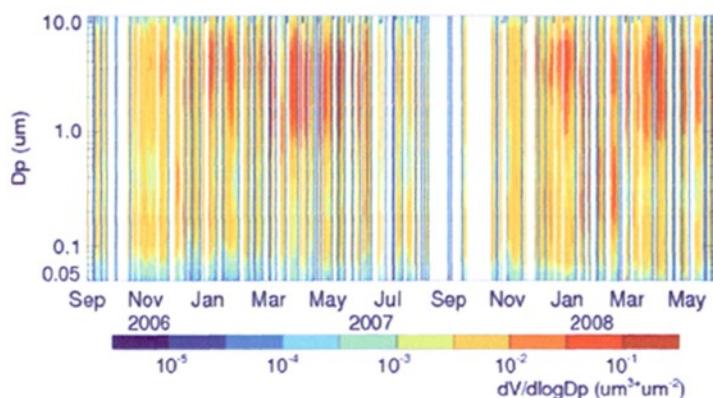


图 5.11 沙尘气溶胶粒子体积谱年变化分布特征

通常大气气溶胶谱分布与气溶胶的来源、种类、和悬浮状态有关，大量的研究表明，不同种类的气溶胶体积谱分布明显不同，同时气溶胶粒子谱分布特征可以用来反演气溶胶的沉降率、传输距离等特征，对于研究沙尘气溶胶的物理属性具有重要的意义，大气气溶胶的体积谱分布，不仅仅可以反演出气溶胶的积聚模态特征，而且可以清楚的揭示气溶胶粒子粗细模态的特征，因此，气溶胶体积谱可以用来较好地研究我国北方地区不同类型的气溶胶特征，以及不同类型气溶胶的相对含量等属性，图5.11利用SACOL站太阳光度计(CE-318)观测的沙尘气溶胶粒子体积谱分布的年变化特征，从图中可以看出，从2007年6月份开始到2008年5月底，气溶胶的体积谱总体呈现明显双峰型分布，峰值分别出现在 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 和 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ ，虽然图中显示气溶胶的体积谱分布冬春季都呈现双峰型分布，但是通过比较，春季3~5月份的 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ 气溶胶体积谱最高，这主要是由于春季沙尘天气较多，沙尘气溶胶属于粗模态粒子，因此，其体积谱浓度较高，而在春季向夏季过渡的过程中，气溶胶的体积谱浓度降低，粗粒子模态的体积谱浓度分布明显降低，而细粒子的体积谱浓度没有发生较大变化，这主要是由于夏季不需要采暖，且沙尘天气较少，同时降水天气增加，降水过程清除了空气中大量粗模态的气溶胶粒子，导致粗粒子较少，大气中气溶胶主要以细粒子为主，而由于2007年秋季降水天气较多，因此从图中没有明显反映出秋季大气气溶胶的体积谱分布特征，但是总体上来说秋季气溶胶体积谱分布与夏季基本上一致。

5.3.7 SACOL气候站大气气溶胶体积谱的季节变化随粒径的分布

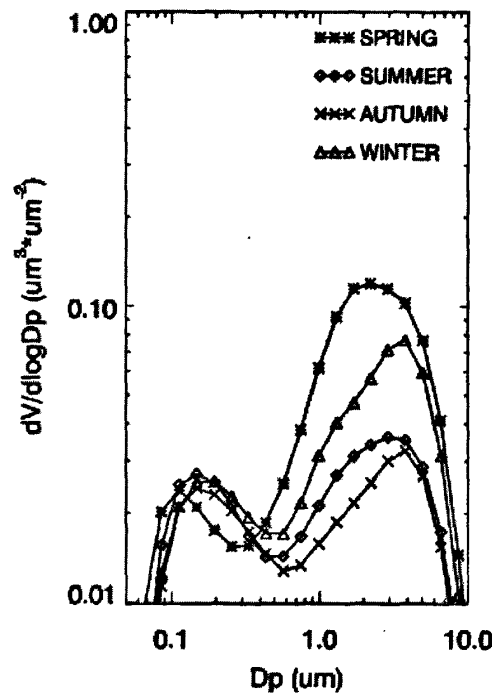


图 5.12 沙尘气溶胶粒子体积谱季节变化分布随粒径的分布

通常大气气溶胶谱分布与气溶胶的来源、种类和悬浮状态有关，大量的研究事实表明，不同种类的气溶胶体积谱分布明显不同，同时气溶胶粒子谱分布特征可以用来反演气溶胶的沉降率、传输距离等特征，对于研究沙尘气溶胶的物理属性具有重要的意义，大气气溶胶的体积谱分布，不仅可以反演出气溶胶的积聚模态特征，而且可以清楚地揭示气溶胶粒子粗细模态的特征，因此，气溶胶体积谱可以用来较好地研究我国北方地区不同种类的气溶胶特征，以及不同种类气溶胶的相对含量等属性，图5.12利用SACOL站太阳光度计(CE-318)观测的沙尘气溶胶粒子体积谱分布的年变化特征，从图中可以看出，从2007年6月份开始到2008年5月底，气溶胶的体积谱总体呈现明显双峰型分布，峰值分别出现在0.2~0.5 μm 和2~6 μm ，虽然图中显示气溶胶的体积谱分布冬春季都呈现双峰型分布，但是通过比较，春季3~5月份的2~6 μm 气溶胶体积谱最高，这主要是由于春季沙尘天气较多，沙尘气溶胶属于粗模态粒子，因此，其体积谱浓度较高，而在春季向夏季过渡的过程中，气溶胶的体积谱浓度降低，粗粒子模态的体积谱浓度分布明显降低，而细粒子的体积谱浓度没有发生较大变化，这主要是由于夏季不需要采暖，且沙尘天气较少，同时降水天气增加，降

水过程清除了空气中大量粗模态的气溶胶粒子，导致粗粒子较少，大气中气溶胶主要以细粒子为主，而由于2007年秋季降水天气较多，因此从图中没有明显反映出秋季大气气溶胶的体积谱分布特征。

5.4 大气气溶胶光学特性的年变化

5.4.1 大气气溶胶光学厚度与浑浊度参数的年变化

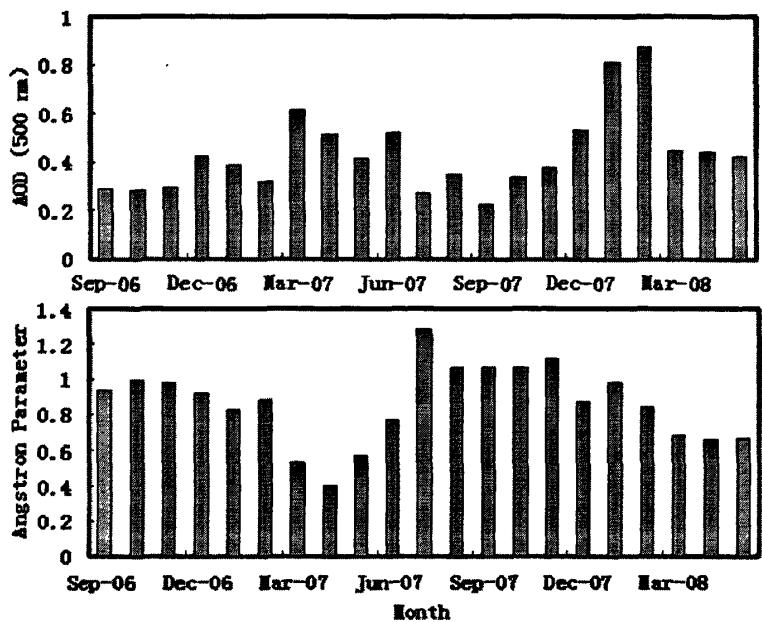


图 5.13 气溶胶光学厚度与浑浊度参数的年变化

图 5.13a 是 SACOL 站 500nm 大气气溶胶光学厚度的年变化示意图，从图中可以看出，冬季(12~1 月份)的气溶胶光学厚度出现全年的最大值，其中 1~2 月份平均光学厚度大于 0.8，这主要是由于兰州市冬季燃煤等造成的气溶胶浓度增加，根据任国玉等（2005）分析，燃煤产生的黑碳气溶胶及其他污染型气溶胶对大气的吸收最为强烈，可以导致大气气溶胶光学厚度明显增加，次峰值出现在我国春季(3~5 月份)，这主要是受到我国春季沙尘天气经常发生，引发大气中的沙尘气溶胶大量增加，导致气溶胶光学厚度在全年中较大，而最小值出现在夏季(7~9 月份)，小于 0.4，这主要是夏季多降水天气，空气较清洁，大气中气溶胶浓度较低，从以上分析可以看出，在冬、春季节 SACOL 站气溶胶光学厚度主要受到季节

性沙尘天气和冬季燃煤等造成的污染的影响，导致大气中的沙尘气溶胶和人为气溶胶大量增加，导致 SACOL 站气溶胶光学厚度在全年中较大，除冬季外，其他季节 SACOL 站气溶胶光学厚度的变化规律与牛生杰等(2001)在贺兰山地区观测到的 450nm 气溶胶光学厚度大体一致，同时，也与张文煜等(2003)对腾格里沙漠地区气溶胶光学厚度的季节变化的结果相一致，这说明了 SACOL 站春季大气气溶胶的光学厚度主要受到我国北方沙漠地区气溶胶的影响。

图 5.13b 是 Angstrom 波长指数的年变化，从图中可以看出，春季 3~5 月份的气溶胶波长指数 a 最小，平均值小于 0.6，这表示在我国西北地区春季沙尘暴天气可以产生大量的沙尘气溶胶导致 a 较小。夏季(7~9 月份)最高，表明 SACOL 站夏季气溶胶粒子的平均半径较小，小粒子占主要地位，且空气相比较其他三个季节最为清洁，Angstrom 波长指数按夏、秋、春和冬季依次降低。

5.4.2 大气气溶胶的质量散射系数的季节变化

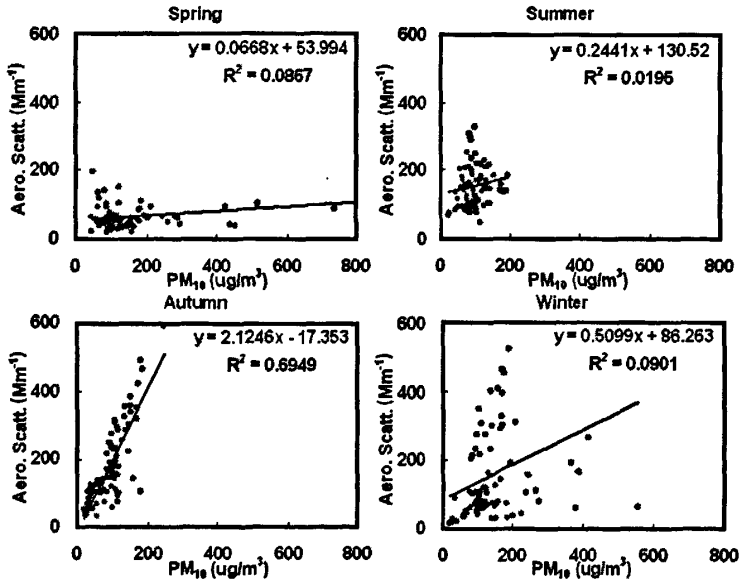


图5.14 大气气溶胶质量散射系数季节变率特征

大气气溶胶质量散射系数是大气气溶胶研究的一个重要参数，通过大气气溶胶质量散射系数可以判断局地大气气溶胶的种类和粒子的大小以及气溶胶对光的散射属性的强弱，同时可以通过沙尘气溶胶的散射系数特征来研究气溶胶对大气辐射的影响，图5.14是 PM_{10}

与气溶胶散射系数季节变化特征的散点图,从图5.14a中可以看出,由于黄土高原地区春季大气中气溶胶种类主要以沙尘天气为主,因此大气气溶胶主要以矿物气溶胶为主,气溶胶质量浓度较高,当发生沙尘天气条件时,沙尘气溶胶的质量浓度一般大于 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$,但是气溶胶的散射系数相对于沙尘气溶胶的质量浓度仍然较低,散射系数平均小于 100Mm^{-1} ,从图中可以看出,虽然气溶胶散射系数因为受到沙尘气溶胶质量浓度的影响而发生变化,但是散射系数变化的幅度较小,而气溶胶质量浓度小于 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 对于气溶胶的散射系数的贡献率较高,而质量浓度小于 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的气溶胶的主要来源于本地的污染型气溶胶,因此根据以上结论分析,我国黄土高原地区沙尘气溶胶对于气溶胶散射系数的贡献率较小,而当地的污染气溶胶的散射系数较高;从图5.14b可以看出,夏季气溶胶质量散射系数分布较混乱,没有明显的变化趋势,从图中可以看出,气溶胶质量浓度平均值小于 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$,而气溶胶的散射系数平均值达到了 200Mm^{-1} ,根据以上分析可以看出,由于夏季降水较多,降水天气可以使空气中的气溶胶粒子进行湿沉降,同时夏季空气中气溶胶粒子的种类较为复杂,从图5.14c可以看出,我国西北地区的秋季气溶胶质量浓度较小,但是气溶胶的散射系数相对较高,线性趋势较为明显,气溶胶的散射系数的最高值可以达到 400Mm^{-1} 以上,表明黄土高原地区秋季大气气溶胶的种类主要以燃烧取暖等造成的人为气溶胶为主,同时也证明,气溶胶的散射系数受人为污染型气溶胶的影响较大。从图5.14d可以看出,在SACOL的冬季,气溶胶的种类出现了2种变化趋势,一种是以燃煤等产生的人为气溶胶为主,另外一种是以冬末春初的沙尘气溶胶为主,因此,大气气溶胶的种类较复杂。

5.5 本章小结

大气沙尘气溶胶主要来自干旱或半干旱的沙漠、戈壁、荒漠化土地,其受下垫面和天气状况影响较大。在全球尺度,主要的源地在北非的撒哈拉沙漠、中亚的塔克拉玛干沙漠。东亚地区的沙尘源区主要为中亚和中国西北地区沙漠以及黄土高原。在春季,中国北方裸露的草原和耕地也会成为沙尘源区。本章内容包括以下几点:

- (1) 当沙尘天气出现时, PM_{10} 质量浓度的日变化可以达到 $400\sim 550\mu\text{g}/\text{m}^3$,且2007年春季的 PM_{10} 质量浓度大于2008年春季的 PM_{10} 质量浓度,而冬季的平均气溶胶浓度为 $310\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 的最低浓度值出现在我国夏季的7~9月份,这主要是由于西北地区夏季多降水,降水可以减少大气中气溶胶的质量浓度,导致夏季气溶胶质量浓度较低。表

示黑碳气溶胶的质量浓度的年变化特征，同时黑碳气溶胶具有明显的日变化特征，春季黑碳气溶胶质量浓度主要呈现双峰型分布，而秋季黑碳气溶胶的变化趋势波动较大，呈现3峰型分布，冬季的变化趋势虽然同其他三个季节较相似，但是由于冬季燃煤取暖的原因，黑碳气溶胶浓度较高。

- (2) 在大气气溶胶的定义中，粒径 $De < 1\mu\text{m}$ 的粒子作为原生粒子和再生粒子，即细粒子和粗粒子的分界线， PM_{10} 主要通过燃烧、汽车尾气、工业燃烧以及二次形成的气溶胶中产生，而 PM_{10} 主要是通过沙尘天气或者局地扬沙天气造成。通过分析春季与夏季 PM_{10} 质量浓度的变化特征，表明夏季大气中的质量浓度较小，这主要是由于我国北方地区夏季多降水天气，降水可以很好的清除大气中的气溶胶粒子，因此，夏季大气气溶胶质量浓度相对较低。小于 $1\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子冬季质量浓度较高，而冬季兰州市已经进入采暖期，由于兰州市特有的地理位置，以及多逆温天气，造成大气中由于燃烧产生的 PM_{10} 质量浓度较高。
- (3) 本节还分析了气溶胶的数浓度谱分布特征。总体上矿物气溶胶的数浓度的年变化总体较低，其中数浓度最高值出现在冬季，平均值小于 $40 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ，其次是 2008 年春季，矿物气溶胶的数浓度的平均值为 $20 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 左右，是冬季数浓度的一半左右，而秋季和夏季的数浓度非常低，平均小于 $10 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ，表明 SACOL 站气溶胶污染主要出现在冬季和春季，而小于 $1\mu\text{m}$ 的气溶胶的数浓度与小于 $10\mu\text{m}$ 的气溶胶的数浓度的趋势大致相同，冬季 PM_{10} 的数浓度达到了 $435 \text{ 个}/\text{cm}^3$ ，是 2009 年春季 PM_{10} 的 3 倍左右。
- (4) 通过对 500nm 大气气溶胶光学厚度的年变化特征分析，发现冬、春季节 SACOL 站气溶胶光学厚度主要受到季节性沙尘天气和冬季燃煤等造成的污染的影响，导致大气中的沙尘气溶胶和人为气溶胶大量增加，导致 SACOL 站气溶胶光学厚度在全年中较大，
- (5) 大气气溶胶质量散射系数是气溶胶研究的一个重要参数，通过气溶胶质量散射系数可以判断气溶胶的种类和粒子的大小，同时可以通过沙尘气溶胶的散射系数特征来研究气溶胶对大气辐射的影响，春季大气气溶胶主要以矿物气溶胶为主，气溶胶质量浓度较高，但是散射系数相对较低，而夏季的气溶胶质量散射系数较混乱，没有明显的变化趋势，秋季气溶胶质量浓度较小，但是气溶胶的散射系数相对较高，冬季大气气溶胶的种类出现了2种变化趋势，一种是以燃煤等产生的人为气溶胶为主，另外一种是以冬末春初的沙尘气溶胶为主，因此，大气气溶胶的种类较复杂。

第六章 黄土高原地区沙尘气溶胶化学微量元素特征研究

6.1 引言

沙尘气溶胶作为影响气候变化的一个重要因子,引起了全世界科学家的普遍关注(叶笃正等, 2000; Sokolik 等, 2001; Bishop 等, 2002; Xuan 等, 2002; Arimoto 等, 2006)。在全球尺度的辐射平衡中, 沙尘气溶胶矿物质颗粒的持续时间、空间分布和粒子的物理化学特性是变率最大, 也是最难确定的部分, 这导致全球辐射研究和气候预测的不准确性(Ramanathan 等, 2003; Xia 等, 2007)。

方小敏等(2004)、韩永翔等(2005)研究发现青藏高原上发生的沙尘暴过程较亚洲任何其他地区更容易将沙尘扬升到西风急流区, 成为沙尘气溶胶远程传输的主要沙尘源区之一。近来, Huang 等(2007)利用 CALIPSO 激光雷达的气溶胶观测资料, 分析了青藏高原夏季的沙尘天气, 结果显示青藏高原上空的沙尘层通常出现在海平面以上的 4~7km 处。据 Zhang 等(1997)估计, 亚洲中、高纬干旱地区年粉尘排放量约 800 Tg, 是全球年粉尘排放量(约 1500 Tg)的一半(Andreae 等, 1995), 其中 400~500 Tg 输入北太平洋, 约 240 Tg 沉降在中国沙漠。沙尘气溶胶在传输过程中经过城市, 可能吸附城市上空的黑碳、硫酸盐等人为气溶胶, 原本纯净的沙尘一旦被污染, 它的化学特性和物理特性都会有所改变, 不仅沙尘气溶胶的体积会变大, 加热性也会增强, 导致其物理形态、化学组成甚至其辐射属性都发生了变化(Ramanathan 等, 2003)。

近年来, 随着扫描电镜、透射电镜、场发射扫描电镜等先进仪器的应用, 通过对大气气溶胶单个颗粒物的形状、大小、颜色的识别, 结合形态分析、表面分析、微区分析和图象分析等实验分析方法, 已经能较好地鉴定气溶胶的来源, 尤其是场发射扫描电镜对超细颗粒物识别的分辨率可达到纳米量级, 是分析气溶胶物貌的有效手段。Zhang等(2001)采用透射电镜(TEM)和带X射线能谱的扫描电镜(SEM-EDX), 研究了拉萨市区和附近山区烟尘气溶胶的物理化学特征。臧家业、张代洲等(2003)在青岛采集了3次沙尘暴过境时的大气气溶胶粒子, 并利用单个气溶胶粒子分析方法对沙尘粒子含有硫酸盐和硝酸盐的状况进行了分析研究。结果发现3%~13%的沙尘粒子含有硫酸盐, 6%~10%的沙尘粒子含有硝酸盐。这些比例远小于无沙尘时北京、青岛等城市污染大气中矿物粒子所含这些成分的比例, 表明沙尘粒子在从内陆源区传输到沿海地区的过程中对大气中硫酸盐和硝酸盐生成的促进作用远

不如城市污染大气中的矿物粒子明显。

国内外许多研究表明, 沙尘气溶胶粒子在传输过程中表面化学特性受污染物作用产生变性, 如 SO_2 与沙尘粒子的相互作用即可在沙尘粒子上形成可溶性硫酸盐(Zhang等, 1999; Yin等, 2002), 这种特殊的气溶胶粒子在大气中增多, 改变了云的微物理特征, 从而影响降水过程(Rosenfeld等, 2001; Zhang等, 2004; Huang等, 2006)。图6.1是沙尘气溶胶与海盐气溶胶的转化过程(Zhang等, 2003, 2005), 可以发现, 尽管大于 $3\sim 4\mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶粒子在传输过程中通过重力沉降落到地面, 但是仍然有一部分沙尘气溶胶可以转化成海盐气溶胶。Fu等(2007)通过对 SO_2 在矿物气溶胶表面发生多相反应生成硫酸盐气溶胶, 来探讨大气矿尘和 SO_2 多相反应的机理, 并且明确提出了大气矿尘表面硫酸盐的形成机制。

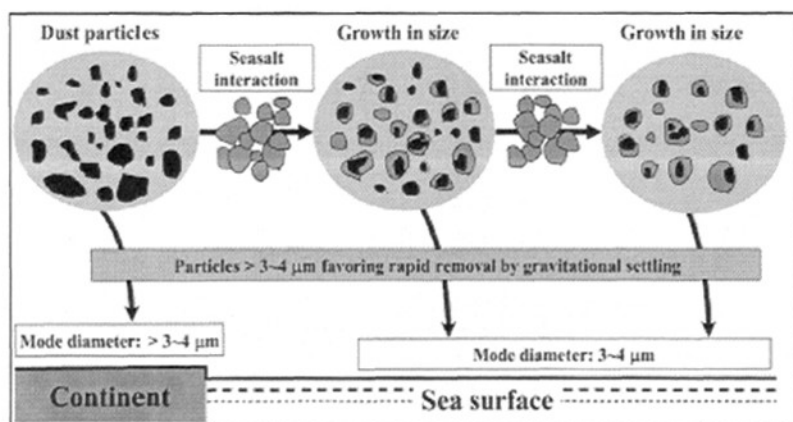


图6.1 沙尘气溶胶与海盐气溶胶的相互转化过程(Zhang等, 2003, 2005)

邵龙义等(2007)应用X射线衍射(XRD)和带能谱的场发射扫描电镜(FESEM-EDX)对在北京2002年3月20日收集的一次特大亚洲沙尘暴样品进行了分析, 获得了矿物组成及粒度分布信息。结果表明, 沙尘暴期间采集的样品在数量上主要以矿物颗粒为主(94%), 大于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒占颗粒总数的46.2%。而沙尘暴过后, 矿物颗粒下降到65%, 烟尘颗粒则有大幅度上升, 大于 $1\mu\text{m}$ 的矿物颗粒的比例下降到15.0%。Zahra等(2007)通过光学显微镜对2005年3月15日一次沙尘天气过程进行研究发现(图6.2), 在发生沙尘天气条件时, 沙尘气溶胶的直径一般都小于 $30\mu\text{m}$ (图6.2b), 而图6.2a则反映了沙尘天气条件下, 人为气溶胶吸附并混合沙尘气溶胶的单颗粒物理形貌特征。

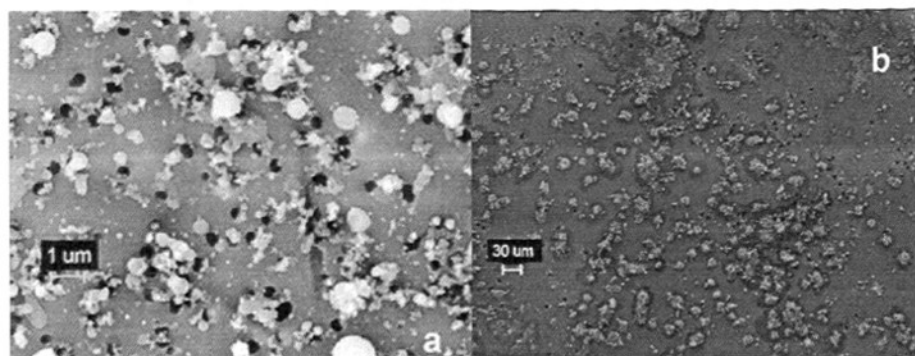


图6.2 2005年3月15日人为气溶胶(a)与沙尘气溶胶(b)光学显微镜扫描图(Zahra等, 2007)

由于各沙尘源地具有不同的理化特性与起沙条件,因而很难做出由此及彼的推论,需要对重要沙尘源区进行直接观测,国内关于这方面的研究相对较多,如通过分析气溶胶的元素、矿物和水溶性离子可以用来分辨区域沙尘气溶胶的来源(牛生杰等, 2000; 刘明哲等, 2003; Wang 等, 2005; Shen 等, 2006, 2007)。孙业乐等(2004)通过2002年的一次北京特大沙尘天气个例研究,发现主要地壳源元素Ca、Al、Fe、Mg、Na等高达平日的30~58倍,污染元素Zn、Cu、Pb、As、Cd、S比平时高出几倍至近十倍,沙尘暴长距离传输过程中矿物气溶胶与沿途污染源排放的污染气溶胶进行混合,证明了沙尘暴带来的大量矿物气溶胶有利于污染物的转化和积聚。庄国顺等(2001)对我国近年来的沙尘暴作了系统研究,发现沙尘暴在输送沙尘的同时又输送比常日气溶胶高得多的污染物。并且在长距离传输过程中,沙尘暴入侵气团与沿途污染气团之间的交汇叠加和沙尘暴矿物气溶胶与沿途污染源排放的污染气溶胶混合,导致沙尘气溶胶的物理化学特性发生变化。张兴赢等(2004)通过研究沙尘气溶胶在长距离传输中铁—硫耦合机制,得到了沙尘气溶胶远距离传输的重要证据,进一步证实了沙尘气溶胶对全球环境变化可能的重要影响。成天涛等(2005)研究发现强沙尘天气中主要元素Al和Fe的含量,分别为124.67和129.21g/m³,较之晴天分别高出近8和11倍,污染元素主要集中在较小粒子中,Pb、S和Zn含量,较晴天高出1~2倍。刘昌岭等(2002)发现深海粘土中的化学元素与Al的比值,与黄土和沙土的比值十分接近,说明我国西北沙尘与黄土区可能是西北太平洋海洋沉积物的重要来源。张美根等(2005)也通过研究证明,东亚地区春季间歇性的长距离输送对于西北太平洋海域的黑碳气溶胶浓度分布具有非常重要的影响。颜鹏和毛节泰等(2004)通过一次沙尘天气过程研究发现气溶胶的尺度分布、元素、离子成分等都发生了显著的变化。气溶胶中地壳类元素成分显著增加,且主要出现在粗粒子中,在整个观测期间,受沙尘影响,SO₄²⁻、NO₃⁻与Ca²⁺有较好的相

关, 反映了 SO_2 和 NO_2 在沙尘表面的非均相反应。张仁健等(2000, 2003)也证实沙尘中携带了大量的矿物元素, 如 Fe、Al、Ti 等, 同时, 沙尘气溶胶也有利于污染元素如 Cu、Pb、As、S 等的转化和积累, 使得这些元素的浓度显著增加。浦一芬等(2006)用 PIXE 方法进行了分析, 得到了 20 种元素的浓度及其谱分布。并对北京颗粒物的谱分布、富集因子和来源进行了分析研究, 结果表明, 土壤尘、生物质燃烧、煤烟尘、工业源和汽车尾气排放源对秋季北京局地排放源有明显贡献。

6.2 资料与方法

6.2.1 沙尘气溶胶样品采集

采样地点分别建在武威、景泰和兰州 3 个观测站点, 在 2002 年春季 3~5 月份进行沙尘气溶胶的采集。并详细记录每天各观测站点的气象要素资料(温度、压力、湿度、风向及风速等), 样品滤膜采用 Teflon 滤膜, 采样前经过干燥皿干燥, 采样前后分别称重 3 次, 以便准确计算沙尘气溶胶的质量浓度, 称重后密封保存在冰箱中。

6.2.2 沙尘气溶胶化学微量元素分析

微量元素的测定将利用兰州大学西部环境教育部重点实验室 ICP-MS 质谱仪完成。为了降低溶液的基体, 便于测试, 使用 HF 酸溶法。兰州大学 ICP-MS 使用蠕动进样系统, 混合均匀样品, 烘干样品至恒重。实验采用 Milestone 微波消解系统。称取样品约 30 毫克放至干净的溶样胆中, 加优级纯 HNO_3 5ml, 然后加 30% HF 2ml; 旋紧后, 按消解程序消解; 单程序时间控制在 40 分钟。在使用微波消解时, 最高工作温度设定为 190°C 。消解完成后, 样品呈澄清溶液。

实验用 ICP-MS 的检出限约为几十 ppt(甚至更低), 测量上限约为 100 ppm 以上。ICP-MS 的理想检测限约为几百 ppt(约 10^{-8} 克/升), 理想测量上限为 10 ppm。按照上述的样品量, 几乎所测的绝大多数微量元素均在仪器的理想测试范围中。测试时仪器稳定性优于 3%, 仪器灵敏度 40000 cps/ppb(In)。检测器测试一天的信号衰减小于 20%。标准曲线的制定采用光谱纯单元素复合标准和国家地质测试中心一级标准(GGS07408)复合标准制作, 实际测试时元素的线性一般在 0.999 以上。一次测试元素成功元素超过 45 个。

每次测定前均对仪器进行优化处理。测试过程中采用单元素标准和国家地质测试中心一级标准复合校正和监测。每 20 个样品加监测样一个，用 Rh 做仪器内标监测。

利用磁化率仪和各种岩石磁学参数测量仪进行沙尘磁学性质测量。

6.3 2002年我国西北地区春季大气气溶胶的质量浓度

浮尘、扬沙和沙尘暴统称为沙尘天气，沙尘天气主要发生在春季，3、4 月份尤为严重。继 2000 年春季发生多次频率高、范围广，强度大的沙尘天气后，2002 年又出现了数次大范围的沙尘天气过程(牛若芸等，2004)。根据国家气象局出版的 2002 年沙尘天气年鉴中分析来看，2002 年全年共出现了 15 次大范围的沙尘天气过程，其中春季 3~5 月份发生了 10 次大范围沙尘天气过程，具体见表 6.1。

表 6.1 2002 年我国春季沙尘暴天气过程(牛若芸等，2004)

序号	时间 (月-日)	天气过程	主要影响 系统	沙尘暴影响范围
1	03-15~03-17	沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	内蒙古中部偏东地区、内蒙古西部和青海北部的局部地区
2	03-18~03-22	强沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	南疆盆地中西部、内蒙古中西部和东部偏南地区、青海西北部和东部、甘肃河西地区中东部等地
3	03-24~03-25	强沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	内蒙古中部偏东地区
4	03-28~03-30	沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	内蒙古西部、甘肃河西地区、宁夏和青海的局部地区
5	03-30~03-31	沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	内蒙古中部偏东地区
6	04-01~04-03	沙尘暴	冷空气、 低气压	南疆盆地南部和东部、甘肃河西地区东部、内蒙古东部偏南地区、辽宁西部、吉林 局地地区
7	04-05~04-09	强沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	南疆盆地南部和东部、青海西北部、内蒙古中部和东部偏南地区、河北北部、辽宁中部
8	04-11	沙尘暴	冷空气、 低气压	内蒙古故中部偏东地区、河北西北部、山西北部局部
9	04-13~04-17	沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	新疆南部的部分地区、内蒙古中西部、青海西北部和东部、陕甘宁的局部地区
10	04-19~04-20	沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	内蒙古中部偏东地区
11	04-21~04-24	强沙尘暴	蒙古气旋 冷空气	南疆盆地北部、青海西北部、甘肃西北部、内蒙古西部和宁夏的局部地区

沙尘天气的发生不仅给国计民生带来很大的损失和灾害,而且对太阳辐射、能见度及云物理过程等均有影响,注入高层大气的沙尘还参与大气环流过程,因此沙尘天气成为人们极为关注的大气环境和大气化学问题之一。2002年春季沙尘天气较为频繁,是21世纪初沙尘天气最多的一年,沙尘天气给人们的生活和社会发展都带来了巨大的影响。因此研究沙尘气溶胶的物理化学特征,有助于人们更好地了解沙尘天气特性,为人类更好地治理沙尘天气提供较好的理论依据。

本文通过采集兰州市、武威市和皋兰县三个观测点的沙尘气溶胶资料,来揭示我国西北地区沙尘气溶胶的物理化学特征,同时揭示沙尘气溶胶传输过程中化学特征的转化过程。武威市位于甘肃省河西走廊的东部,地处西北内陆干旱区,北邻腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠,处于沙尘暴源区的边缘,皋兰地处甘肃中部、兰州市北部郊区,位于北纬36度05分至36度50分、东经103度32分至104度22分,平均海拔1700米左右,属温带半干旱气候,年均气温7.2摄氏度,年均降水量266毫米。北邻巴丹吉林沙漠,是我国沙尘暴北方传输的主要经过地区。

本节论文主要讨论我国西北地区兰州市、武威市和皋兰县2002年春季沙尘天气过程,图6.3显示的2002年春季3~5月份三个观测点的沙尘气溶胶质量浓度。根据中国气象局提供的2002年沙尘天气年鉴,2002年春季兰州市、武威市和皋兰县共发生了10多次较大沙尘天气过程,且3~4月份沙尘天气比较频繁,与国家3级标准比较发现,兰州市区沙尘气溶胶质量浓度91d中有64d超过国家3级标准,占总天数的53.54%,其中3月份占40.45%,4月份占23.59%,表明2002年兰州市区春季3~4月沙尘天气十分严重,对比武威与皋兰地区,从图中可以看出,武威和皋兰地区2002年春季平均沙尘气溶胶质量浓度除沙尘天气过程外明显小于兰州市区,其中武威与皋兰地区5月份沙尘气溶胶质量浓度分别小于 0.31mg/m^3 和 0.19mg/m^3 ,均小于兰州市区5月份沙尘气溶胶含量,表明武威与皋兰地区除沙尘天气造成气溶胶含量明显增加外,本地气溶胶污染较小,5月份武威和皋兰地区气溶胶污染较小,空气质量较好,兰州市区气溶胶污染明显较好的原因主要由于除沙尘天气外,周边为黄河及其水系所连接,形成哑铃型带状河谷盆地,形成特有的盆地型沿河带状气候,导致兰州市区逆温频率极高,特别是夜间的贴地逆温,因此空气中的气溶胶含量不易扩散;排放到大气中的污染随之增大,从而严重影响兰州市区空气质量。

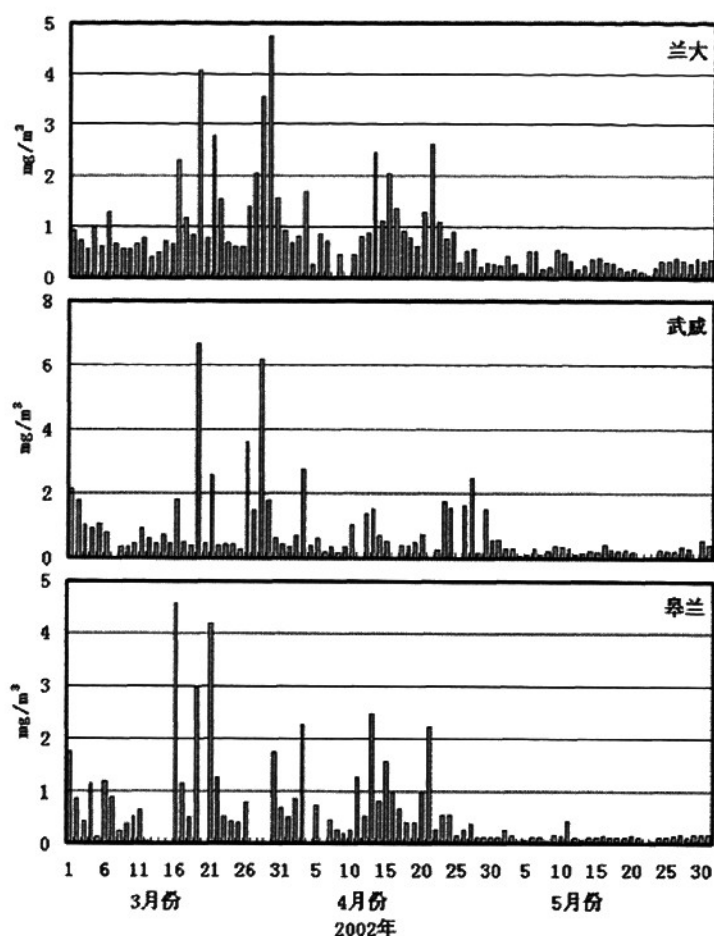


图 6.3 2002 年春季兰州市、武威市、皋兰县沙尘气溶胶质量浓度

根据牛若芸等(2004)分析兰州市、武威市和皋兰县三地市 2002 年春季沙尘天气 TSP 质量浓度特征, 3 月 19 日为沙尘暴天气, 3 月 29 日为强浮尘天气, 4 月 3 日为扬沙天气, 根据图 6.3 可见, 3 月 29 日发生强浮尘天气时, 兰州、武威地区当地沙尘气溶胶质量浓度分别为 $4.73\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $1.77\text{mg}/\text{m}^3$, 皋兰地区由于仪器故障强浮尘天气沙尘气溶胶质量浓度缺测, 分别为国家空气质量三级标准的 9.46 倍和 3.54 倍。而 4 月 3 日扬沙天气时, 兰州、武威和皋兰地区的沙尘气溶胶质量浓度分别为 1.68、2.73、2.27, 分别是国家空气质量三级标准的 3.36 倍、5.46 倍和 4.54 倍, 根据以上结果表明, 当发生扬沙天气时, 武威和皋兰地区的沙尘气溶胶质量浓度明显高于兰州地区, 这主要是由于当沙尘天气发生时, 武威和皋兰地区更接近于沙尘源区, 粗模态气溶胶粒子从沙尘源区传输过程中不断沉降, 因此导致兰州市区的扬沙天气气溶胶质量浓度较低, 而发生强浮尘天气条件下, 兰州市区的气溶胶质量浓度较高, 这主要是当发生浮尘天气时, 空气中除外来沙尘影响外, 还包括本地的扬尘, 而

兰州市区本地污染较为严重,因此当发生浮尘天气时,气溶胶质量浓度高于武威地区。此外,本章将重点分析2002年3月18~22日这次较大的沙尘天气过程为主,因此本节首先分析武威、皋兰和兰州市区这次沙尘天气过程气溶胶TSP的质量浓度,这次过程主要是蒙古气旋冷空气造成的,伴随着强降温和强降水过程,甘肃省爆发了当年第一次大范围、区域性强沙尘暴。河西五市地、白银、兰州、定西、临夏、平凉等地出现了不同程度的沙尘天气,白银、武威、皋兰、兰州等地出现了强沙尘暴天气,其中鼎新和金昌为特强沙尘暴。2002年3月19日爆发的这次沙尘天气过程,导致兰州、武威和皋兰当日TSP质量浓度分别达到了 $4.08\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $6.67\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $2.96\text{mg}/\text{m}^3$,与国家环境空气质量标准相比,其浓度均超过国家环境空气质量三级标准($0.50\text{mg}/\text{m}^3$),分别是国际三级标准浓度的8倍、13倍和6倍。从数据中可以看出,武威市受这次沙尘天气影响最为严重,其次是兰州和皋兰,表明此次沙尘天气过程对这三个城市造成的影响较为严重。由数据可以看出,这三个地区春季发生沙尘天气时,大气中沙尘气溶胶质量浓度会明显升高,大气污染极其严重,空气中污染物主要以沙尘气溶胶为主。

6.4 2002年3月19日沙尘暴天气气溶胶质量浓度的粒度分布

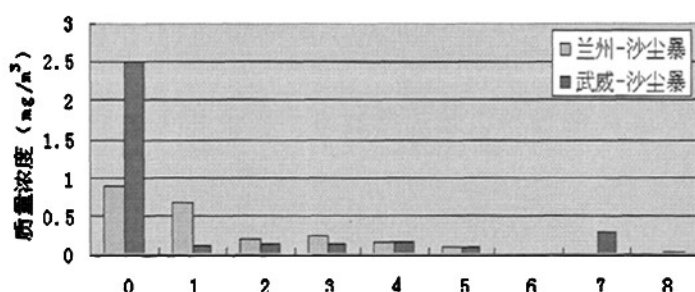


图 6.4 2002 年 3 月 19 日沙尘暴天气 PM_{10} 质量浓度粒度分布特征

本节论文将对2002年3月19日这次沙尘天气过程的气溶胶质量浓度的粒度分布进行讨论,这次沙尘暴天气影响了整个西北地区,从图6.4中可以看出,武威和兰州的气溶胶粒度分布特征有所不同,武威气溶胶粒度分布呈现三峰值的分布特征,而兰州市区沙尘暴天气气溶胶粒度分布呈现双峰值分布,武威地区沙尘暴天气时气溶胶粒度的主峰值出现在大于 $9\mu\text{m}$ 处,其值达到了 $2.5\text{mg}/\text{m}^3$,占气溶胶总质量浓度的71.9%,而次峰值分别出现在2~4级和第7级,气溶胶质量浓度分别达到 $0.14\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $0.29\text{mg}/\text{m}^3$,尽管武威地区气溶胶粒度呈

现三峰值分布,但是从数据中表明,武威发生沙尘天气时,大气气溶胶主要以大于 $9\mu\text{m}$ 粒径的矿物气溶胶为主,这主要是由于武威地区更接近于沙漠地区,当发生沙尘暴天气时,武威地区的气溶胶粒子基本上以源区纯沙尘气溶胶为主,此时沙尘气溶胶粒子从武威地区开始向下游地区传输,兰州则完全不同,对比武威地区气溶胶的粒度分布,兰州市区气溶胶粒度的质量浓度呈现明显的双峰值分布,其主峰值则处于0~1级,粒径分别为 $4.7\sim 9.0\mu\text{m}$ 和大于 $9.0\mu\text{m}$,质量浓度分别为 $0.892\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $0.676\text{mg}/\text{m}^3$ 。这两级气溶胶粒子的质量浓度占气溶胶总质量浓度的67%,而次峰值出现在第4级,仅占气溶胶总质量浓度的11.4%,可见,随着沙尘暴输送距离的增加,沙尘气溶胶中粗粒子在传输过程中不断通过重力沉降,当传输到兰州附近时,粗模态气溶胶粒子的质量浓度明显低于武威地区,气溶胶质量浓度从武威地区的大于 $9.0\mu\text{m}$ 向 $4.7\sim 9.0\mu\text{m}$ 转化。

6.5 2002年3月19日沙尘暴天气气溶胶化学元素的质量浓度分析

本节主要讨论兰州、武威和皋兰三个地区发生沙尘天气时气溶胶中微量元素的质量浓度特征,见表6.2。

表6.2 兰州、武威、皋兰沙尘暴(2002年3月19日)和晴空期间气溶胶微量化学元素的质量浓度(ng/m^3)。

元素 ng/m ³	兰州		武威		皋兰		
	晴天	沙尘暴	晴天	沙尘暴	晴天	沙尘暴	
亲硫 元素	Zn	544	2382	198.79	1790.86	379.71	2317.4
	Ga	5.3	19.72	17.19	161.19	19.73	126.68
	Ge	3.38	12	1.08	15.71	1.38	9.43
	Ag	0.2	0.94	0.117	0.537	0.023	0.115
	Cd	4.16	24.38	3.2	11.17	3.55	17.75
	In	0.53	1.5	0.67	1.79	0.93	6.07
	Tl	1.88	4.38	0.444	5.869	0.71	3
	Pb	33.46	33.74	25.66	173.65	284.53	1430.29
亲石 分散 元素	Rb	397.9	2152	52.89	776.61	88.89	644.87
	Sr	488.26	2132	126.8	1511.35	162.47	1230.21
	Ba	63.91	290.6	274.93	2570.7	332.77	2159.96
	Cs	0.0079	0.04	-	0.036	0.0026	0.0164
亲铁 元素	V	56.8	277.6	61.88	561.88	58.51	410.34
	Cr	17.58	81.72	10.4	148.52	1.08	13.27
	Co	5.44	18.16	3.21	47.67	3.61	25.57
稀有 元素	Li	46.63	228.8	17.92	248.37	25.44	179.75
	Be	3.49	17.22	1.04	16.28	1.47	10.76
	Nb	11.35	55.24	2.81	10.88	1.29	9.32
	Hf	21.97	69.78	9.36	6.98	1.7	12.48
	Ta	0.85	5.96	0.368	0.465	0.0856	0.525

	Zr	848.46	2642	380.58	723.65	128.93	919.91
钨	W	3.35	15.3	0.97	5.01	0.47	3.21
铋	Bi	2.58	9.9	2.07	20.44	3.38	13.51
钼	Mo	6.6	19.36	1.78	13.28	1.72	8.54
锡	Sn	13.38	34.02	0.51	27.13	5.71	28.04
	Sc	2.33	6.48	1.13	20.79	1.44	12.78
	Y	39.36	203.4	12.85	223.39	20.09	165.15
	La	29.64	75.08	12.41	268.63	20.92	182.21
	Ce	65.05	236.4	34.05	497.1	45.26	351.79
	Pr	8.88	33.54	2.85	58.98	4.81	41.72
	Nd	31.88	137.52	11.19	219.81	17.53	152.53
	Sm	5.96	31.6	2.14	39.87	3.25	28.06
稀土元素	Eu	0.65	3.4	0.543	6.59	0.71	5.1
	Gd	5.64	29.2	2.1	36.5	3.13	26.93
	Tb	0.94	4.98	0.33	5.55	0.485	4.182
	Dy	5.95	31.28	2.12	33.21	2.96	25.06
	Ho	1.15	6	0.41	6.73	0.604	5.035
	Er	3.48	17.7	1.34	21.12	2.06	16.79
	Lu	0.53	2.42	0.29	9.36	0.49	3.82
	Yb	3.43	16.32	1.68	25.8	2.66	21.03

沙尘天气观测期间气溶胶中化学微量元素的含量列于表7.1中，从图中我们可以看出沙尘天气与背景天气对比中的一些主要特点：

在沙尘暴发生前，亲硫元素中Zn、Ga、Ge、Ag、Cd、In、Tl和Pb在沙尘天气时也有不同程度的增加。其中Zn和Pb两种元素的含量最高，从表中可以看出背景天气时兰州、武威和皋兰地区的Zn含量分别是544ng/m³、198.79ng/m³、379.71ng/m³，可以看出，在这3个地区中兰州市的Zn含量明显高于武威和皋兰地区，这表明兰州市区的人为污染源高于其他两个地区，对比北京地区大气气溶胶中Zn的含量为155.9ng/m³，表明这三个地区的人为污染较为严重，而亲硫元素中Pb的含量则是皋兰地区明显高于其他两个地区，当发生沙尘天气时，三个站点的Zn急剧增加，分别为兰州、武威、皋兰地区背景大气中的4.2倍、9倍和6.1倍，同时皋兰和武威地区的Zn含量小于兰州地区，表明兰州市除了受到沙尘气溶胶中的Zn含量影响外，还在气溶胶传输过程中吸附了武威及皋兰等地沿途的污染物。对比背景大气中亲硫元素，兰州市Pb含量增长不明显，基本与沙尘天气时持平，但是武威和皋兰地区的Pb含量在沙尘天气时明显增加。

亲硫元素中，背景大气中Rb和Sr的含量高于武威和皋兰地区，当发生沙尘天气条件时，兰州市区的Rb含量从397.9ng/m³急剧增加到2152ng/m³，Rb含量从488.26ng/m³急剧增加到2132ng/m³，同时对武威和皋兰两个地区，发生沙尘天气条件时都低于兰州市区Pb和Sr的含量，因此表明兰州市区的污染程度明显高于武威和皋兰两个地区。表明这些元素更多的来自人为污染源，即沙尘暴在输送的过程中与兰州本地污染物交汇同时吸附了大量的气态

污染物,造成污染物浓度增加。

亲铁元素中,V的含量最高,兰州、武威和皋兰三个地区背景大气中的V含量为56.8 ng/m³、61.88 ng/m³和58.51 ng/m³,对比北京城区的V含量为66.5,可以看出,三个地区V含量与北京地区基本持平。发生沙尘天气时,兰州市的V含量为277.6ng/m³,明显小于武威V含量的561.88ng/m³和410.34ng/m³,由于V是亲铁元素,主要分布在矿物气溶胶中,因此,通过V的分析可以表明2002年3月19日发生沙尘天气时,武威和皋兰地区的沙尘气溶胶含量高于兰州市区含量。

稀有元素和钨钼族元素中,总体来看,Li、Be、Nb、Hf、Ta、Zr、W、Bi、Mo、Sn中,平均含量兰州市区明显高于武威和皋兰两个地区,其中Zr的含量最高,当发生沙尘天气时,兰州市区Zr的含量为2642,明显高于武威和皋兰两个地区的含量,表明兰州市区的沙尘气溶胶中,除外来沙尘外,还混合了当地的局地污染属性,对比三个地区稀土元素的含量,除沙尘天气是元素浓度明显高于背景大气的浓度外,稀土元素的值相差不大,表明稀土元素的变化较稳定。

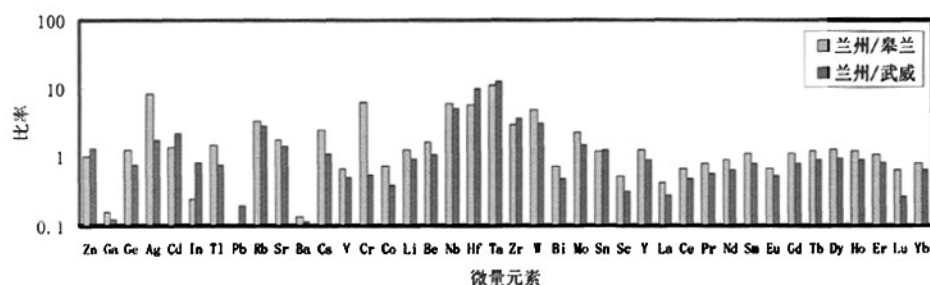


图6.5 兰州、武威和皋兰三个地区化学微量元素比值

为了研究沙尘气溶胶在传输过程化学属性的转化与改变,本文引用相对浓度的方法对从武威、皋兰到兰州传输过程中气溶胶化学元素含量的变化进行分析。为了判断沙尘气溶胶在传输过程中化学微量元素质量浓度增加或者减少,消除气溶胶粒子质量浓度的变化对判断的影响,本文采用兰州、武威和皋兰三个地区之间气溶胶化学元素质量浓度的比值来衡量。即用相对浓度来衡量。如果相对浓度比值比1大得多时;可以认为化学元素在传输过程中增加,造成了气溶胶化学性质的改变;反之,则表明沙尘天气减弱了城市地区的大气污染。图6.5是兰州、武威和皋兰三个地区发生沙尘天气时气溶胶微量元素的比值,此图用来定性说明在发生沙尘天气时,沙尘气溶胶在从武威和皋兰传输到兰州市过程中吸附污染物,导致化学元素含量增加的定性分析,从图中可以看出,大部分元素的比值都大于1,表明沙尘气溶胶在传输过程中其粒子表面吸附了大量的污染元素,导致其化学微量元素浓度升

高,,其中以Hf、Ta、Ag、Cr、Hb、Nb、Zr等人为污染元素的比值最高。平均大于5,表明这几种元素在传输过程中,有明显的增加。说明沙尘气溶胶在传输过程中吸附了当地的污染元素。此外,还有几种元素在传输过程中的质量浓度而比值明显小于1 (Pb、Sc等),表明,在传输过程,沙尘天气缓解了大气中的污染物,导致大气中的气溶胶成分主要以矿物气溶胶为主。从武威传输到兰州过程中V、Cr、Ce等几种元素的浓度降低,说明这些元素主要集中在粗粒子中,沙尘气溶胶在输送过程中粗粒子的快速沉降造成V、Ce 等元素的相对含量下降。

6.6 2002年3月19日沙尘暴天气气溶胶化学元素的富集因子分析

前一节内容主要讨论兰州市区背景大气和沙尘天气气溶胶微量元素的质量浓度特征,本节内容拟利用富集因子方法,对沙尘气溶胶中化学微量元素的富集程度进行深入的分析,本文选用Y(钇),Y 是地壳中含量最丰富的稀土元素,且化学特性稳定(中国大百科全书,1989)。

表6.3 兰州、武威、皋兰沙尘暴天气与背景大气气溶胶微量元素富集因子。

元素 ng/m ³		兰州		武威		皋兰	
		晴天	沙尘暴	晴天	沙尘暴	晴天	沙尘暴
亲 硫 元素	Zn	6.52	5.52	7.29	3.78	8.91	6.62
	Ga	0.30	0.21	2.94	1.59	2.16	1.69
	Ge	1.89	1.30	1.85	1.55	1.51	1.26
	Ag	2.40	2.18	4.29	1.13	0.54	0.33
	Cd	17.44	19.78	41.09	8.25	29.16	17.73
	In	4.44	2.43	17.21	2.64	15.28	12.13
	Tl	3.67	1.65	2.65	2.02	2.71	1.39
	Pb	2.24	0.44	5.27	2.05	37.39	22.86
亲 石 分 散 元素	Rb	3.71	3.88	1.51	1.27	1.62	1.43
	Sr	1.09	0.92	0.87	0.60	0.71	0.66
	Ba	0.13	0.11	1.66	0.89	1.29	1.02
	Cs	0.002	0.002	0	0.002	0.001	0.001
亲 铁 元素	V	0.35	0.33	1.18	0.61	0.71	0.61
	Cr	0.15	0.13	0.27	0.22	0.02	0.03
	Co	0.18	0.12	0.33	0.28	0.24	0.20
稀 有 元素	Li	1.95	1.86	2.30	1.83	2.09	1.80
	Be	1.05	1.00	0.95	0.86	0.86	0.77
	Nb	0.48	0.45	0.36	0.08	0.11	0.09
	Hf	6.14	3.77	8.01	0.34	0.93	0.83

	Ta	0.36	0.48	0.47	0.03	0.07	0.05
	Zr	4.31	2.60	5.92	0.65	1.28	1.11
钨 钼	W	1.87	1.65	1.66	0.49	0.51	0.43
族 元	Bi	12.72	9.45	31.27	17.76	32.66	15.88
素	Mo	3.69	2.09	3.05	1.31	1.88	1.14
	Sn	5.61	2.76	0.65	2.00	4.69	2.80
	Sc	0.09	0.05	0.13	0.14	0.11	0.12
	Y	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	La	0.83	0.41	1.06	1.32	1.15	1.21
	Ce	0.91	0.64	1.46	1.22	1.24	1.17
	Pr	0.91	0.66	0.89	1.06	0.96	1.02
	Nd	0.95	0.80	1.03	1.16	1.03	1.09
	Sm	0.83	0.85	0.92	0.98	0.89	0.93
稀 土	Eu	0.45	0.46	1.16	0.81	0.97	0.85
元 素	Gd	0.88	0.88	1.00	1.00	0.95	1.00
	Tb	0.88	0.90	0.94	0.91	0.89	0.93
	Dy	1.66	1.69	1.81	1.64	1.62	1.67
	Ho	0.80	0.81	0.88	0.83	0.83	0.84
	Er	1.04	1.03	1.23	1.11	1.21	1.20
	Lu	0.89	0.79	1.49	2.77	1.61	1.53
	Yb	0.96	0.88	1.44	1.27	1.46	1.40

表6.3列出了2002年3月19日兰州、武威、皋兰三地沙尘暴及其前总颗粒物及有关元素的富集因子。对富集因子数值的大小反映富集程度的判定规则有多种看法，当土壤中的富集因子显著大于1时，表示该元素有外来污染；当富集因子小于1时，表示该元素被淋溶；当富集因子近似等于1时，表示该元素未被污染也未被淋溶。根据富集因子的大小，可以将元素的富集(污染)程度分为五个级别。污染级别越高受到人类活动的影响越大。

Lantzy和Mackenzie曾提出大气中元素的富集因子值(EF)大于10，被认为是极度富集的，小于10或者接近于1的元素，主要是由于土壤或者岩石风化的尘埃被风刮入大气所引起的，因此可以确定，富集因子大于1的元素，可以确定它们并不是来自于地壳物质，而主要是由于人类污染造成的，根据表6.3中的数据可以看出，富集因子亲硫元素尤其是Pb、Zn、Cd、TI的富集因子较大，Zn和Pb主要是来源于人为污染，Pb主要来源于汽车尾气污染，Zn则与燃烧等人为排放有关系，从表中可以看出，当发生沙尘天气时，三个地区的Zn的富集因子与背景大气时Zn的富集因子差别不大，说明，在没有发生沙尘天气时，这三个地区当地的大气污染也是非常严重的，根据Zn和Pb的富集因子分析，说明兰州、武威还有皋兰三个地区春季大气人为造成的污染较为严重。从三个地区对比来看，三个地区背景大气亲硫

元素的富集因子明显大于沙尘暴发生时的富集因子,尤其是Cd明显大于10,表明Cd属于极度富集,由于这些亲硫元素主要来自于人为源(化石燃料的燃烧、矿石冶炼、汽车尾气等),因此,表明这三个地区由于人为造成的污染较为严重,有待急需治理。

此外Sr、Ba、Cs等亲硫元素与Sc、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy等稀土元素,沙尘暴期间和当地背景大气时的富集因子基本上都接近于1~2 之间,表明这些元素主要来源是地壳源(庄国顺, 2000)。V、Cr和Co三种亲铁元素的富集因子明显小于1,这三种元素主要来源于地壳源,我国新疆塔克拉玛干沙漠和内蒙古戈壁沙漠形成的大量的沙尘气溶胶显然是这些元素的源头。

在几种稀有元素中,除Hf和Zr在城市地区有一定的富集外,其他几种元素都接近于1,表明大部分稀有元素也来自于地壳源。相比较而言,钨钼族元素的富集程度较高,表明在几个地区背景大气中,钨钼族元素的富集度较高,由于人类活动对以上这几种元素造成污染较为严重。

6.7 2002年兰州市区春季本底气溶胶来源解析

兰州市由于其地形原因,导致兰州市春季大气气溶胶污染除了主要由沙尘天气过程从源区传输到兰州来的沙尘气溶胶,还包括兰州市本地区局地沙尘气溶胶来源以及本地燃烧等方式产生的大气气溶胶,因此,导致兰州市春季大气气溶胶中的污染物来源比较复杂,虽然通过以上等方法对沙尘气溶胶的化学特征做了一定的分析,但是总体上主要集中在对沙尘气溶胶化学微量元素质量浓度的分析,但是分析的结果主要以定性结果为主,结论无法反映兰州市春季城市大气气溶胶中各种污染物的来源,并无法判断沙尘气溶胶的远程输送与本地混合扬尘之间的关系,因此,对兰州市大气气溶胶化学成分的测量研究,对建立用以比较污染空气和外来沙尘天气产生的大气气溶胶化学成分的背景资料是很有意义的。本节主要内容希望可以帮助利用因子分析的方法来定量分析兰州市区春季大气气溶胶中各种来源的比例。

因子分析是多元统计分析方法之一,是分析多个变量之间潜在关系的一种统计方法。其目的是将大量观测数据,用尽可能少的有代表性的因子来说明由多个变量所提供的信息,本文利用兰州市 2002 年春季 3~5 月份三个月的气溶胶采集数据资料,除个别样品因为仪器损坏或者停电等原因,共收集有效样品 77 个,每个样品分析其化学微量元素,每个样品

可以得到 45 种微量元素，通过前一节的讨论，认为以下 13 种元素可以较好地代表兰州市春季大气气溶胶的各种污染来源，这些元素包括 Li、V、Cr、Co、Cu、Zn、As、Rb、Sr、Mo、Sn、Pb、Bi。样品采集时间为每天 20 个小时的气溶胶总量，采样点设在兰州大学本部校区内小二楼楼顶，可以尽量避免工厂等造成的污染，

本节通过统计方法对样品的化学元素浓度数据进一步分析，在采集的 77 个样品中，首先对以下 13 种化学元素进行相关分析以确定各种元素之间的主要关系，然后对所有数据进行因子分析，来分析确定相关元素的基本组成，最后，利用多元分析和时间序列分析对气溶胶化学微量元素及其来源和传输过程进行分析，并以此来判断气溶胶的各种来源，兰州市区春季气溶胶化学微量元素之间的相关系数具体结果见表 6.4。

6.7.1 气溶胶化学微量元素相关统计分析

表6.4 2002年兰州市春季气溶胶粒子化学微量元素对角相关系数

	Li	V	Cr	Co	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Sn	Pb	Bi
Li	1.00												
V	.926	1.00											
Cr	.908	.957	1.00										
Co	.866	.906	.923	1.00									
Cu	.537	.537	.539	.501	1.00								
Zn	.896	.924	.868	.814	.516	1.00							
As	.875	.926	.858	.808	.502	.946	1.00						
Rb	.805	.828	.789	.620	.448	.832	.743	1.00					
Sr	.923	.952	.912	.810	.512	.925	.885	.942	1.00				
Mo	.846	.879	.870	.775	.435	.800	.777	.852	.902	1.00			
Sn	.848	.900	.908	.939	.487	.823	.871	.612	.810	.782	1.00		
Pb	.203	.198	.263	.273	.148	.134	.101	-.07	.083	.060	.236	1.00	
Bi	.803	.866	.807	.830	.464	.852	.944	.532	.760	.670	.901	.262	1.00

表 6.4 是 2002 年兰州市春季大气气溶胶化学微量元素的对角相关，从表 6.4 中可以看出，13 种化学元素之间的相互关系存在以下几个特点：(1)除 Rb 和 Pb 之间的相关系数呈现负值以外，其他 13 种相关元素都呈现正相关的关系，且大部分元素之间的相关系数都达到了 0.6 以上，通过了 99%的置信水平检验，表明这些元素之间存在明显的相关；(2)其中 Pb 与其他元素之间的相关系数较低，这主要是除 Pb 来源于外来沙尘气溶胶外，大部分的 Pb

主要来源于兰州本地区的污染源，因此导致其与其他微量元素相关系数较低，(3)从表中可以看出，其中铁族元素中，V、Cr 和 Co 之间的相关系数较高，通过了 99%的置信水平检验，表明三种铁族元素之间存在明显的相关，这主要是由于铁族元素主要存在矿物气溶胶之中，而 2002 年春季沙尘天气较多，大气中气溶胶成分主要以矿物气溶胶为主。

6.7.2 本底大气气溶胶化学元素来源判别分析

表6.5 兰州市气溶胶的因子(主成分)负荷矩阵

元素	Component			
	因子1贡献	因子2贡献	因子3贡献	因子4贡献
Li	0.622	0.675	0.226	0.130
V	0.691	0.665	0.207	0.110
Cr	0.646	0.660	0.214	0.203
Co	0.767	0.464	0.189	0.210
Cu	0.256	0.240	0.933	0.069
Zn	0.674	0.636	0.211	0.017
As	0.805	0.503	0.195	-0.039
Rb	0.268	0.926	0.180	-0.111
Sr	0.533	0.812	0.195	0.010
Mo	0.466	0.808	0.115	0.023
Sn	0.845	0.411	0.168	0.142
Pb	0.138	-0.024	0.056	0.980
Bi	0.918	0.277	0.166	0.113

表 6.5 列出了在上一步相关分析中的 13 种元素经过最大方差旋转后得到的因子负载，从表 6.5 中可以看出，利用以上四种气溶胶可以很好地表示所测的 13 种元素的浓度，表 6.5 中因子 1 至因子 4 表示这四种因子中元素的相对组成，这些系数乘以四个因子的浓度平均值，得到所测数据中每个因子向当地大气中释放的各种元素的浓度平均值。从表 6.5 中可以看出，因子 1 中 As、Co、Sn、Bi 这几种元素的贡献率较高，而这几种元素主要是来自于春季源区产生的土壤尘，进一步结合气象条件分析，证明因子 1 主要来源于外来沙尘气溶胶的贡献，Pb、Rb 等由于燃煤产生的化学元素贡献率较低，而因子 2 中贡献率较高的元素为 Rb 和 Sr，由于 Rb 主要来自于本地燃煤，而 Sr 主要来源于本地土壤尘，同时由于亲铁元素中 Cr、Co 与外来源的土壤尘的贡献率基本一致，因此认为因子的主要贡献来自于本地的土壤尘；因子 3 中 Cu 的贡献率较高，而城市大气中 Cu 的主要来源之一是由于燃煤造成的污染尘埃中富集度较高，因此因子 3 被认定为是来自于兰州市本地的燃煤尘；因子 4 中 Pb 的

相对贡献率较高，由于 Pb 的来源比较复杂，但是一种主要途径是通过建筑物等水泥石灰尘等造成的富集原因较多，因此，被认定为是由于兰州市区的水泥石灰尘。

6.7.3 气溶胶不同来源的相对贡献率分析

表 6.6 兰州市春季气溶胶化学元素浓度来源分配(2002 年 3~5 月份)

元素	ng/m ³				
	外来土壤尘	本地土壤尘	本地煤烟尘	水泥石灰尘	其他源
Li	17.33	18.23	3.56	4.31	2.09
V	27.20	25.39	4.62	5.18	1.98
Cr	7.87	7.79	1.48	2.95	0.18
Co	2.60	1.52	0.36	0.85	0.20
Cu	6.08	5.53	12.54	1.96	12.73
Zn	255.98	234.05	45.31	7.51	77.54
As	18.34	11.12	2.51	1.07	4.22
Rb	44.06	147.69	16.77	21.85	38.53
Sr	120.53	178.09	25.01	2.72	43.43
Mo	1.39	2.33	0.19	0.08	0.87
Sn	6.77	3.19	0.76	1.36	1.01
Pb	13.48	2.25	3.12	114.17	26.57
Bi	2.67	0.78	0.27	0.39	0.64

通过前一部分对 2002 年兰州市春季大气气溶胶的主分量分析，根据表 6.5.中的贡献率，则可以利用因子分析法直接求出各种源对气溶胶总质量的贡献。

由于前面计算方法求出了各种样品的质量浓度，可以用最小二乘法求出 Bk，从而得到各种污染源贡献的质量浓度。由表 6.6 中可以看出，兰州市区春季大气气溶胶的来源较为复杂，主要分为外来土壤尘、本地土壤尘、本地煤烟尘、水泥石灰尘以及未知的其他源 5 种来源。这 5 种最主要的来源的强度变化表明，兰州市春季大气气溶胶的主要来源是外来沙尘源与本地土壤尘源，由于春季还处在燃煤期，并没有完全结束，因此燃煤以及建筑水泥石灰尘也占有一定的比例。

6.8 2008 年中美沙尘暴研究联合观测的初步研究结果

2008 年中美沙尘暴研究联合观测项目是由兰州大学大气科学学院、中科院大气物理所、

中国气象局、美国能源部大气辐射计划和马里兰大学等单位联合进行的为了研究沙尘气溶胶传输过程中物理化学属性等相关重要参数改变过程的一次联合观测，综合观测试验于2008年4月8日正式开始，目的旨在进一步了解沙尘暴的形成机理、传输特征及其对气候系统的影响。与以往单点进行沙尘暴的观测不同，此次观测中将使用移动监测系统对沙尘暴过程进行“追踪”监测。此次观测试验共设置了三个观测点，其中位于甘肃省白银市景泰县和张掖市的两个观测点靠近沙尘暴形成的沙漠边缘地区，另一个观测点则设置在沙尘暴传输中都会经过的兰州市兰州大学的榆中校区。观测试验以兰州大学半干旱气候与环境观测站为中心，根据西北地区不同下垫面获取沙尘天气过程中气溶胶的相关信息；针对上述试验来获取我国西北地区沙尘气溶胶的时空分布及尺度分布和光学特性，从而来反映我国西北地区沙尘气溶胶的辐射效应及其对我国西北地区干旱化的影响，观测点分布与试验设计见图6.6。

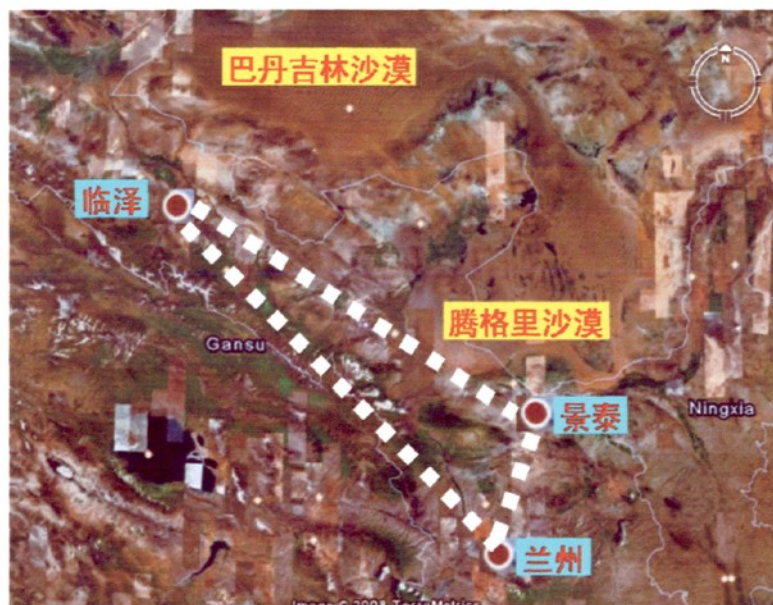


图 6.6 2008 年中美大型沙尘气溶胶联合观测地点分布

由这三个点形成的空间分布，将有利于更准确地观测不同类型的沙尘暴及其传输路径。此次大型的国际试验在中国尚属首次，同时通过试验可以获得研究沙尘气溶胶的第一手资料，利用相关资料分析该地区沙尘气溶胶物理化学特征及其光学属性，可有助于进一步了解沙尘暴的形成机理、传输特征以及其与全球气候变暖的关系。这对于了解半干旱地区气溶胶特征，对于研究气溶胶对区域气候的影响有一定的科学意义，同时为本论文提供有关沙尘气溶胶研究的相关数据。

6.8.1 2008 年 5 月 2 日沙尘气溶胶质量(数)浓度特征

根据气象资料分析，2008 年 5 月 2 日我国西北地区有一次强沙尘天气过程，而且影响范围较广，由于景泰站缺少 APS 粒子谱仪，因此本节论文主要选取 SACOL 观测点与张掖观测站点沙尘天气过程前后的气溶胶观测资料进行对比分析。

图 6.7 为 SACOL 气候站和张掖临泽观测站 5 月 1 日、5 月 2 日和 5 月 3 日 3 天的 PM₁₀ 质量浓度和数浓度日变化图。从图 6.7a 中可以看出，SACOL 观测站 5 月 1 日~5 月 3 日沙尘天气过程中气溶胶质量浓度与数浓度的分布较为一致，5 月 2 日凌晨 00 时开始爆发沙尘暴，持续到早上 07 时开始回落，PM₁₀ 质量浓度最高值为 2.5mg/m³，达到了国家空气质量 3 级标准的 5 倍，数浓度最高值达到了 250 个/cm³，沙尘天气过程持续至 2 日下午 18 时，到 5 月 3 日凌晨开始又形成了一次明显的峰值。根据图 6.7b 临泽地区的气溶胶质量浓度发生晚于 SACOL 地区，因此表明 SACOL 地区的这次沙尘天气过程主要是由于冷锋天气造成的一次本地扬尘过程，对比 SACOL 气候站，5 月 1 日气溶胶质量浓度平均值仅 0.17mg/m³，数浓度为 21.5 个/cm³，表明当沙尘天气发生时，由于沙尘气溶胶质量浓度增加造成了空气质量污染非常严重，并且气溶胶数浓度也急剧增加。

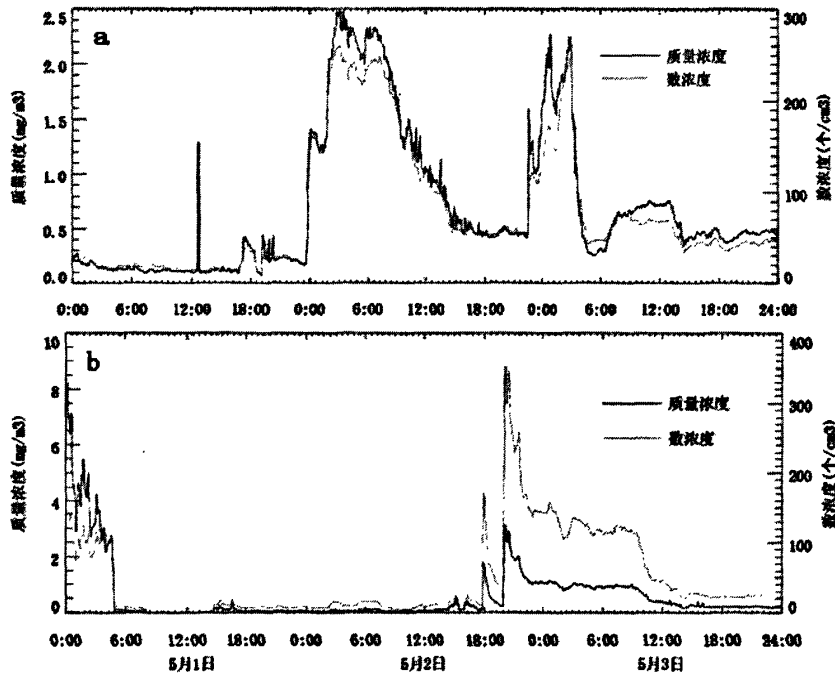
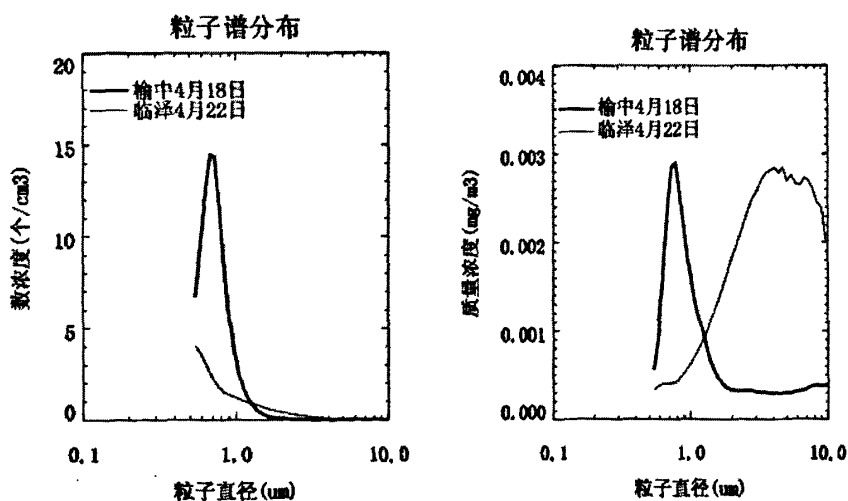


图 6.7 2008 年 5 月 2 日沙尘天气过程气溶胶质量(数)浓度的日变化

图 6.7b 为临泽观测站 5 月 1 日~5 月 3 日的气溶胶质量浓度与数浓度的日变化, 从图中可以看出, 5 月 1 日零点左右爆发了一次明显的沙尘天气过程, 由于到了早晨 6: 00 降水天气的出现, 抑制了这次沙尘天气的发生, 净化了空气质量。而另外一次沙尘天气过程发生在 5 月 2 日 18 时以后, 气溶胶质量浓度已超过了 $3\text{mg}/\text{m}^3$, 数浓度为 $350\text{个}/\text{cm}^3$ 以上, 对比 SACOL 气候站的观测结果, 由于临泽地区更接近于沙漠地区, 因此, 当沙尘天气发生时, 临泽地区的气溶胶质量(数)浓度都明显高于 SACOL 地区。

6.8.2 沙尘天气与背景大气气溶胶质量(数)浓度随粒径的分布



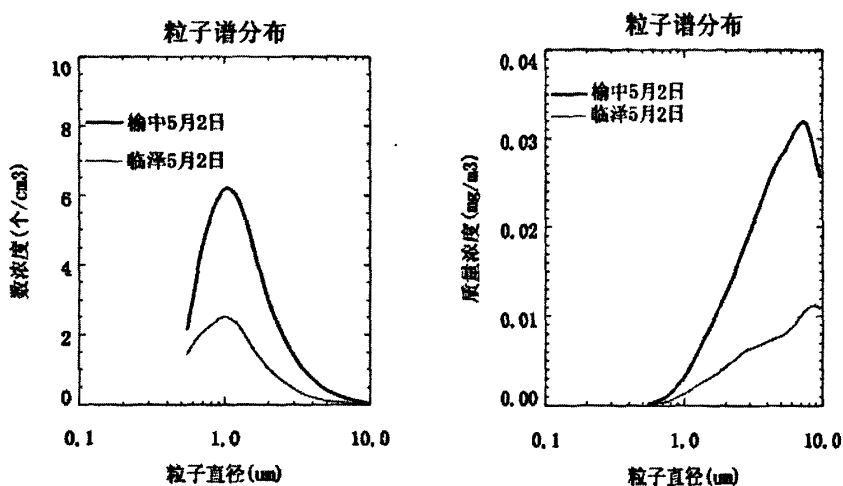


图 6.8 沙尘天气与背景大气沙尘气溶胶质量(数)浓度随粒径的分布

兰州榆中站以 4 月 18 日资料作为背景资料，张掖临泽站则以 4 月 22 日资料作为背景资料，由于张掖临泽站春季资料不全，故其背景资料和月平均结果反映情况的可靠性可能没有榆中站好。图 6.8 是榆中站和临泽站背景天气和 5 月 2 日沙尘暴天气的质量浓度和数浓度粒子谱分布图，可以看到背景天气下，榆中站数浓度峰值在直径 $0.7\mu\text{m}$ 处，且远大于临泽站，当然其中可能有前一天弱沙尘天气的影响存在。临泽站的峰值出现在 $0.5\mu\text{m}$ 处，但其粒子在 $4\mu\text{m}$ 以后才趋于 0，榆中站在 $2\mu\text{m}$ 以后就已经趋于 0；榆中站的质量浓度峰值出现 $0.8\mu\text{m}$ 处，与数浓度相差不大，临泽站则出现在 $4\mu\text{m}$ ，且 $3\sim 8\mu\text{m}$ 谱段内含量比较高。可见两地的环境背景差异比较大，临泽站受周围沙漠环境影响比较大空气中大粒子含量比较高，而榆中站能反映受人为影响较小的背景大气状况。但是从质量浓度谱上，临泽站 $0.6\mu\text{m}$ 和榆中站 $8\mu\text{m}$ 处的小突起可以看出，临泽站还是受微小的人为影响，榆中站受源区影响。5 月 2 日在沙尘暴天气下，榆中站和临泽站的数浓度峰值都在 $1\mu\text{m}$ ，并且在直径趋于 $10\mu\text{m}$ 时，浓度都趋向于 0。质量浓度峰值分别出现在 $7\mu\text{m}$ 和 $9\mu\text{m}$ ，可见沙尘暴天气下两地大粒子含量都很高，而临泽站峰值更靠后，可能是由于它离沙尘源地更近。

6.9 本章小结

本章内容主要分析了 2002 年春季兰州、武威和皋兰三个地区大气气溶胶的物理化学特征，并重点讨论了 2002 年 3 月 19 日影响我国整个北方地区的一次强沙尘暴天气过程，并对沙尘天气过程时沙尘气溶胶化学微量元素在传输过程中的转化与改变进行了主要的分析

与讨论，具体分为以下几个方面：

- (1) 2002 年春季兰州市、武威市和皋兰县共发生了 10 多次较大规模的沙尘天气过程，且 3~4 月份沙尘天气比较频繁，与国家 3 级标准比较发现，兰州市区沙尘气溶胶质量浓度 91d 中有 64 d 超过国家 3 级标准，占总天数的 53.54%，其中 3 月份占 40.45%，4 月份占 23.59%，表明 2002 年兰州市区春季 3~4 月沙尘天气十分严重，对比武威与皋兰地区，从图中可以看出，武威和皋兰地区 2002 年春季平均沙尘气溶胶质量浓度除沙尘天气过程外明显小于兰州市区，其中武威与皋兰地区 5 月份沙尘气溶胶质量浓度分别小于 $0.31\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $0.19\text{mg}/\text{m}^3$ ，均小于兰州市区 5 月份沙尘气溶胶含量，表明武威与皋兰地区除沙尘天气造成气溶胶含量明显增加外，本地气溶胶污染较小
- (2) 沙尘天气时，武威与兰州地区气溶胶粒度分布特征有所不同，武威气溶胶粒度分布呈现三峰值的分布特征，而兰州市区沙尘暴天气气溶胶粒度分布呈现双峰值分布，武威地区沙尘暴天气时气溶胶粒度的主峰值出现在大于 $9\mu\text{m}$ 处，其值达到了 $2.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，占气溶胶总质量浓度的 71.9%，而次峰值分别出现在 2~4 级和第 7 级，气溶胶质量浓度分别达到 $0.14\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $0.29\text{mg}/\text{m}^3$ ，兰州市气溶胶粒级分布的峰值则处于 $4.7\sim 9.0\mu\text{m}$ 和 $9.0\mu\text{m}$ 以上，质量浓度分别为 $0.892\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $0.676\text{mg}/\text{m}^3$ 。
- (3) 沙尘气溶胶在从武威和皋兰传输到兰州市过程中吸附污染物，导致化学元素含量增加的定性分析，在所有微量元素中。Hf、Ta、Ag、Cr、Hb 的比值大于 5，表明这几种元素在传输过程中，有明显地增加。
- (4) 在几种稀有元素中，除 Hf 和 Zr 在城市地区有一定的富集外，其他几种元素都接近于 1，表明大部分稀有元素也来自于地壳源。相比较而言，钨钼族元素的富集程度较高，表明在几个地区背景大气中，由于人类活动对以上这几种元素造成污染较为严重。
- (5) 兰州市区春季大气气溶胶的来源较为复杂，主要分为外来土壤尘、本地土壤尘、本地煤烟尘、水泥石灰尘以及未知的其他源五种来源。这 5 种最主要的来源的强度变化表明，兰州市春季大气气溶胶的主要来源是外来沙尘源与本地土壤尘源，由于春季还处在燃煤期，并没有完全结束，因此燃煤以及建筑水泥石灰尘也占有一定的比例。

第七章 总结和展望

7.1 全文总结

沙尘暴天气是我国西北地区频发的一种强灾害性天气，沙尘天气的发生对社会发展和经济发展都造成了严重的危害，特强沙尘暴能在短时间内给生态环境和人类社会造成严重损失，本文主要利用 SACOL 气候站大气成分观测系统，对黄土高原半干旱地区的沙尘天气过程、沙尘气溶胶的物理化学特征及其光学属性进行了深入的分析，归纳起来主要包括以下几个方面：

(1) 通过对我国沙尘天气的空间分布研究，发现我国沙尘天气的源区主要分布在几大沙漠地区、包括南疆地区的塔克拉玛干沙漠地区沿线，以及内蒙古戈壁沙漠地区，包括腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地等区域。研究发现，新疆地区与内蒙古地区沙尘天气最大区别在于浮尘的发生日数两者差异较大，平均年发生日数分别为134次和18次，新疆地区的浮尘天气是内蒙古地区浮尘天气发生次数的7.4倍，因此，利用沙尘天气气溶胶质量浓度之间关系的权重系数建立了一个能够较好反映沙尘天气气候学变化趋势的沙尘指数，并初步分析了沙尘指数与沙尘暴发生频次之间的关系，研究发现，新的沙尘指数与新疆和内蒙古地区的沙尘暴发生频次具有较好的相关性，并通过了99%的置信水平检验，可以作为影响沙尘天气变化的气溶胶因子进行研究与分析。

(2) 通过对黄土高原地区 2007 年 5 月 2 日一次大范围的沙尘天气过程分析，对沙尘天气发生过程前后沙尘气溶胶的物理及其光学属性进行了深入的讨论，结果显示，这次沙尘天气的源地主要是南疆地区和内蒙古的戈壁沙漠地区，当沙尘天气发生时，沙尘气溶胶对城市地区造成了严重的空气质量污染，空气中粗模态的矿物气溶胶粒子明显增加，同时沙尘天气还伴随着大风、降温天气的发生，当发生沙尘天气时，大风可以导致空气中 NO_x 和 SO_2 等污染物很快扩散，使得可以通过大气中的一系列反映生成硫酸盐和硝酸盐气溶胶的前体物 NO_x 和 SO_2 浓度降低，同时沙尘在传输过程中不易吸附 NO_x 和 SO_2 等污染气体成分，通过太阳光度计对沙尘天气过程中粗模态和细模态粒子的光学厚度讨论，沙尘天气发生之前，气溶胶的吸收系数与 PM_{10} 之间有很好的线性关系，黑碳气溶胶等污染气溶胶尽管质量浓度所占比例较小，但是单位质量的表面积明显大于沙尘气溶胶的表面积，因此，单位质量黑碳气溶胶的散射系数高于沙尘气溶胶的散射系数，从可见到红外的波长范围内，黑碳气溶

胶对太阳辐射均有强烈吸收,对气溶胶光学吸收系数的贡献率达 90%左右,因而它对气溶胶吸收系数的影响较为明显,线性拟合的斜率为 1.0563,而沙尘气溶胶对气溶胶吸收系数的斜率仅为 0.073,表明尽管沙尘气溶胶也可以影响气溶胶吸收系数,导致吸收系数增加,但是背景大气气溶胶对气溶胶吸收系数的影响更为显著。同理可以看出一般情况下 SACOL 气候站污染气溶胶的散射系数明显高于矿物气溶胶的散射系数,但是当沙尘天气发生时,矿物气溶胶的散射系数高于人为气溶胶的散射系数。

(3)本文利用 SACOL 气候站上黑碳仪、RP1400、积分浊度仪以及太阳光度计等先进仪器,分析了 2007 年 5 月~2008 年 5 月之间近一年的气溶胶资料,用来研究黄土高原地区大气中背景大气气溶胶的物理及其光学特征,通过研究发现,黄土高原地区的大气气溶胶来源比较复杂,且大气气溶胶造成的大气污染较为严重,其中,在晴空天气条件下,大气中主要以细颗粒的污染型气溶胶为主,而当春季出现沙尘天气条件时,黄土高原地区大气气溶胶主要以矿物气溶胶为主,根据太阳光度计观测的资料表明,沙尘气溶胶与污染气溶胶之间的光学属性有明显的不同,污染气溶胶能够有效地反映太阳辐射的变化特征。冬季 SACOL 气候站气溶胶的光学厚度明显高于其他三个季节,通过分析表明这种现象主要是由于兰州市特殊的地理位置,导致兰州市冬季大气多逆温天气发生,空气中的气溶胶颗粒物不易扩散,并且由于冬季大量燃煤取暖,导致大气中的污染气溶胶含量较高,而气溶胶的光学厚度可以较好地反映污染气溶胶的变化特征,因此导致冬季气溶胶光学厚度较高,而春季气溶胶的光学厚度仅次于冬季的原因是由于黄土高原地区春季多沙尘天气,外来的沙尘气溶胶主要以矿物气溶胶为主,因此也同样造成了春季气溶胶光学厚度较高。

(4)最后,本文对于 2002 年春季兰州市、武威市和皋兰县三个地区的大气 TSP 进行采样分析,利用 ICP-MS 质谱仪对采集的春季 TSP 进行化学微量元素分析,通过分析表明,2002 年春季是除 2001 年近 20 年以来沙尘天气最为严重的一年,2002 年沙尘天气对于我国整个北方地区的影响较为严重,给人们的生活和社会的经济与发展都造成了严重的危害,同时通过分析数据发现,当发生沙尘天气时,三个地区大气中的 TSP 质量浓度急剧升高,空气质量污染严重,通过相关分析和因子分析等统计方法对兰州市春季大气气溶胶进行了统计分析,对采集的沙尘气溶胶进行化学微量元素分析表明,兰州市沙尘天气发生时,气溶胶除来源于沙尘源地的外来矿物气溶胶以外,还包括了大量的本地扬沙尘,以及本地燃煤造成的污染尘和大量的水泥石灰尘。因此,表明兰州市区春季空气中的气溶胶来源比较复杂,需要通过不同方法来对当地的大气气溶胶进行研究与分析。

7.2 讨论和展望

7.2.1 讨论

本论文主要利用 SACOL 气候站提供的相关研究沙尘气溶胶的先进仪器对我国黄土高原地区近一年的沙尘气溶胶的相关特征进行了深入的分析, 针对我国黄土高原半干旱地区沙尘气溶胶的物理化学特征及其光学属性进行了深入的探讨, 从而来研究我国黄土高原半干旱地区沙尘气溶胶的相关属性对我国西北地区干旱化的影响, 为我国遥感沙尘暴监测方法研究、沙尘暴预报模式开发、气候影响评估等提供有力支撑。本论文关于沙尘气溶胶研究的相关数据均属于首次公布, 具有很好的创新性, 为国内外学者研究黄土高原地区沙尘气溶胶物理化学特征及其光学属性提供了基础条件。

7.2.2 展望

沙尘气溶胶是我国西北地区春季大气气溶胶的重要来源, 沙尘气溶胶在传输过程中不断吸附空气中的硫酸盐、黑碳等人为气溶胶, 同时在传输过程中气溶胶粒子之间也在不断地相互摩擦, 造成气溶胶从非球形粒子逐渐向球形粒子转化, 导致其物理化学属性发生质变, 对空气质量、地-气辐射收支平衡等影响巨大。但由于沙尘源区气溶胶的综合对比观测较少, 而沙尘气溶胶在远程传输过程中其物理化学属性发生了根本性的改变, 因此要判断下游地区观测到的气溶胶是从何而来, 至今为止仍然是一个亟待解决的难题。

因此, 结合本论文主要研究成果, 未来几年内的主要研究方向拟在研究以下几个方面的工作, 对沙尘气溶胶从起沙到短程传输过程中沙尘气溶胶与人为气溶胶之间的吸附与相互作用进行研究, 主要包括以下三个方面:

- (1) 沿沙尘传输路径采集各观测点地表土壤, 分析其化学元素和矿物组成, 通过对比各观测点的气溶胶化学元素组成, 结合当地背景大气气溶胶以及局地沙尘气溶胶化学组分特征, 以及远距离输送时的沙尘气溶胶化学成分的相对含量, 分析沙尘气溶胶传输过程中化学特征的变化;
- (2) 从沙尘源地和传输路径上设立多个监测点, 以兰州大学半干旱国际气候观测站为基站, 以点-面结合的方式, 在春季沙尘天气多发期利用粒子谱仪、大流量采样器等仪

器采集沙尘气溶胶样品，对比分析气溶胶浓度、粒子谱分布、沉降率等重要参数，并对沙尘气溶胶经过城市上空吸附并混合人为气溶胶的转化过程进行深入分析；

- (3) 利用光学显微镜、X 射线能谱仪等仪器，对气溶胶样品进行单个颗粒物的形状、大小、颜色和光学特性观测研究，从而比较好地、定性地准确区分气溶胶粒子的类别和来源；同时分析沙尘气溶胶在传输过程中对硫酸盐、黑碳等人为气溶胶的吸附与混合的相对贡献率等。

参考文献(References)

- 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22 (2): 106-111.
- 中央气象局, 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 1979, 21-27.
- 汪安璞. 大气气溶胶研究新动向[J]. 环境科学, 1999, 18(1): 10-15.
- 臧家业, 张代洲, 石广玉, 等. 沙尘粒子在我国内陆传输过程中对硫酸盐和硝酸盐生成的影响[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(3): 266-271.
- 沈志宝, 魏 丽. 黑河地区大气沙尘对地面辐射能收支的影响[J]. 高原气象, 1999, 18(1): 1-8.
- 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 360-368.
- 叶 芳, 安俊琳, 王跃思, 等. 北京近地层 O_3 、 NO_x 、CO 及相关气象因子的分析[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1425-1432.
- 杨勇杰, 王跃思, 温天雪, 等. 北京市大气颗粒物中 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度及其化学组分的特征分析[J]. 环境化学, 2008, 27(1): 117-118.
- 刘景涛, 杨耀芳, 李运锦, 等. 中国西北地区 1993 年 5 月 5 日黑风暴的机理探讨[J]. 应用气象学报, 1996, 7(3): 371-376.
- 成天涛, 吕达仁, 王革丽, 等. 浑善达克沙地气候因子对沙尘暴频率影响作用的模拟研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 68-74.
- 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 193-200.
- 陈洪武, 王 旭, 马 禹. 塔里木盆地局地性和区域性强沙尘暴天气过程研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 533-538.
- 刘树林, 王 涛. 浑善达克沙地地区的气候变化特征[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 557-562.
- 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于中国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.
- 徐启运, 胡敬松. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 479-482.
- 黄兆华. 我国历史时期的风沙尘暴[A]. 方宗义, 朱福康, 江吉喜, 等. 中国沙尘暴研究[C].北京: 气象出版社, 1997. 31-36.

钱正安, 胡隐樵, 龚乃虎, 等. “93. 5. 5”特强沙尘暴的调查报告及其分析[A]. 见:方宗义,朱福康,江吉喜等编. 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 37~43

周秀骥, 徐祥德, 颜鹏, 等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征[J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(4): 327-334.

徐建芬, 狄潇泓, 李耀辉. 西北地区沙尘暴天气概念模型及分类[A]. 陈晓光等. 西北地区重要天气成因及预报方法研究[C]. 北京: 气象出版社, 2002: 129-136.

韩永翔, 宋连春, 奚晓霞, 等. 中国沙尘暴月际时空特征及沙尘的远程传输[J]. 中国环境科学, 2005, 25(B06): 13-16.

王式功, 董光荣, 杨德保, 等. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 86-94.

尚可政, 孙黎辉, 王式功, 等. 甘肃河西走廊沙尘暴与赤道中、东太平洋海温之间的遥相关分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 239-243.

杨晓玲, 丁文魁, 钱 莉, 等. 一次区域性大风沙尘暴天气成因分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 702-705.

孟雪锋, 孙永刚, 娜 林, 等. 2002 年 4 月 6~8 日一次强沙尘暴天气成因分析[A]. 编者. 天气预报技术文集[C]. 北京: 气象出版社, 2003: 266-270.

任国玉, 徐德应, 石广玉, 等. 人类活动在气候变化中的作用. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰编. 中国气候与环境演变科学报告(上). 北京: 科学出版社, 2005. 464~477

周自江. 近 45 年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 9-17.

王 涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. 2001, 21(4): 322-327.

朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 51-86.

秦大河. 中国西部环境特征及其演变, 中国西部环境演变评估(第一卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 35.

方宗义, 王 炜. 2002 年我国沙尘暴的若干特征分析[M]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 513-521.

王金艳, 王式功, 马 艳, 等. 我国北方春季沙尘暴与气候因子之关系[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 296-300.

刘立超, 王 涛, 周茅先, 等. 沙坡头地区沙尘气溶胶质量浓度的试验观测研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 336-341.

徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4 22”特大沙尘暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26-35.

张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 259-266.

- 庄国顺, 郭敬华, 袁 惠, 等. 2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 191-197.
- 刘明哲, 魏文寿, 周宏飞, 等. 中国西北沙尘源区与日本沉降区大气气溶胶粒子理化特征及对比[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 408-414.
- 张兴赢, 庄国顺, 陈建民, 等. 沙尘暴颗粒物表面的元素存在形态和组成[J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2544-2550.
- 牛生杰, 孙继明, 陈 跃, 等. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 82-87.
- 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于中国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.
- 方小敏, 韩永翔, 马金辉, 宋连春, 杨胜利, 张小曳, 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以 2003-03-04 拉萨沙尘天气过程为例, 科学通报, 2004, 49(11): 1084-1090
- 牛生杰, 章澄昌. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶的化学组分和富集因子分析[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 264-268.
- 张美根, 徐永福, 张仁健, 等. 东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 46-51.
- 孙业乐, 庄国顺, 袁惠, 张兴赢, 郭敬华, 2002 年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析, 科学通报, 2004, 49(4): 340-346
- 成天涛, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的物理化学特性[J]. 科学通报, 2005, 50(5): 469-472.
- 刘昌岭, 张 经, 刘素美. 我国不同矿物气溶胶源区物质的物理化学特征[J]. 环境科学, 2002, 2(4): 28-32.
- 颜 鹏, 毛节奏, 杨东贞, 等. 临安一次沙尘暴过程影响气溶胶物理化学特征演变的初步分析[J]. 2004, 24(4): 437-447.
- 张仁健, 徐永福, 韩志伟. ACE-ASIA 期间北京 PM_{2.5} 的化学特征及其来源分析[J]. 科学通报, 2003, 48(7): 730-733.
- 浦一芬, 吴瑞霞. 2004 年北京秋季大气颗粒物的化学组分和来源特征[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 739-744.
- 陈广庭. 近 50 年北京的沙尘天气及治理对策[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 402-407.
- 韩永翔, 宋连春, 奚晓霞, 等. 中国沙尘暴月际时空特征及沙尘的远程传输[J]. 中国环境科学, 2005, 25(6): 13-16.

- 牛若芸, 薛建军, 周自江. 2002 年我国沙尘暴天气特征分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(2): 178-184.
- 邵龙义, 李卫军, 杨书申, 等. 2002 年春季北京特大沙尘暴颗粒的矿物组成分析[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(2): 215-221.
- 牛生杰, 孙照渤. 春末中国西北沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 604-610.
- 刘晓云, 岳平. 敦煌地区 2001 年春季气溶胶光学厚度反演[J]. 干旱区研究, 2007, 24(6): 790-795.
- 申彦波, 沈志宝, 杜明远. 敦煌地区春季大气气溶胶粒子数浓度的分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 158-164.
- 李霞, 胡秀清, 崔彩霞, 等. 南疆盆地沙尘气溶胶光学特性及我国沙尘天气强度划分标准的研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 488-495.
- 高润祥, 牛生杰, 张华, 等. 2006 年春季西北地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 655-661.
- 申振兴, 张小曳, 曹军骥, 等. 黄土高原春季大气气溶胶的质量浓度和矿物组成[J]. 过程工程学报, 2004(4): 793-797.
- 沈建国, 李嘉鹏, 牛生杰, 等. 沙尘天气中气溶胶光学特性的时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 495-501.
- 刘菲, 牛生杰. 北方沙尘气溶胶光学厚度和粒子谱的反演[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(6): 775-781.
- 付培健. 一个可能的北极地区气溶胶源[J]. 兰州大学学报, 1998, 34(1): 128-134.
- 岳平, 牛生杰, 张强. 民勤一次沙尘暴天气过程的稳定度分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 668-671.
- 邵龙义, 李卫军, 杨书申, 等. 2002 年春季北京特大沙尘暴颗粒的矿物组成分析[J]. 中国科学, 2007, 37(2): 215-221.
- 张仁健, 韩志伟, 王明星, 等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析[J]. 第四纪研究, 2002, 22(4): 374-380.
- 周自江, 王锡稳. 西北地区东部群发性强沙尘暴序列的建立与分析[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 437-442.
- 张莉, 丁一汇, 任国玉. 我国北方沙尘天气演变趋势及其气候成因分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 583-592.
- 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 中国春季沙尘暴的趋势变化及年代际变化[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 660-666.

- 李耀辉, 张存杰, 高学杰. 西北地区大风日数的时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 715–723.
- 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴天气气候特征研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 193–200.
- 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 12–16.
- 张杰, 郭锐, 郝志毅. 沙尘气溶胶对西北地区植被遥感的影响分析[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 116–122
- 邱金恒, 郑斯平, 黄其荣, 等. 北京地区对流层中上部云和气溶胶的激光雷达探测[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 1–7
- 常俅林, 张 武, 史晋森, 等. 黄土高原半干旱地区气溶胶特性[J]. 兰州大学学报, 2008, 44(2): 1–7.
- 宗雪梅, 邱金恒, 王普才. 近 10 年中国 16 个台站大气气溶胶光学厚度的变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 201–208.
- 牛生杰, 孙继明. 贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 298–301.
- 牛生杰, 孙继明, 陈 跃, 等. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 82–87.
- 杨晓玲, 丁文魁, 钱 莉, 等. 一次区域性大风沙尘暴天气成因分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 702–705.
- 汤 洁, 温玉璞, 周凌晞, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. 应用气象学报, 1999, 10(2): 160–170.
- 辛金元, 王跃思, 李占清, 等. 中国地区太阳分光辐射观测网的建立和仪器定标[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1697–1702.
- 刘玉洁, 牛生杰, 郑有飞. 用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特征[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615–622.
- 胡秀清, 张玉香. CE-318 自动跟踪扫描太阳光度计用户操作指南[S]. 国家卫星气象中心, 2002.
- 牛生杰, 孙照渤. 沙漠地区沙尘气溶胶物理特性的飞机观测[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 35–42.
- Andreae, M. O., 1995: Climate effects of changing atmospheric aerosol levels, In: *Henderson-Sellers A ed. World Survey of Climatology, Future Climates of the World*, Amsterdam: Elsevier, 341–392.
- Arimoto, R., Kim, Y.j., Kim, Y.P., et al., 2006: Characterization of Asian Dust during ACE-Asia, *Global and Planetary change*, 52, 23–56.
- Bishop, J. K. B., R. E. Davis, and J. T. Sherman, 2002: Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific, *Science*, 298, 817–821.

Blaser, P., S. Zimmermann, J. Luster, et al., 2000: Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils[J]. *The Science of the Total Environment*, 249, 257–280.

Buseck, P. R., and M. Pósfai, 1999: Airborne minerals and related aerosol particles: Effects on climate and the environment, *Proc Natl Acad Sci USA*, 96, 3372–3379.

Ding, R., J. Li, S. Wang, et al., 2005: Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation, *Geophys. Res. Lett.*, 32, doi: 10.1029/2004GL021561

Duce, R. A., R. Arimoto, B. J. Ray, et al., 1983: Atmospheric trace elements at Enewetak Atoll(I): concentrations, sources, and temporal variability, *J. Geophys. Res.*, 88, 5321–5342.

Duce, R. A., G. L. Hoffmann, and W. H. Zoller, 1975: Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: Pollution or natural, *Science*, 187, 59–61.

Fu, H. B., X. Wang, H. B. Wu, et al., 2007: Heterogeneous uptake and oxidation of SO₂ on iron oxides, *J. Phys. Chem.*, 9(41): 5542–5554.

Forster P , Ramaswamy V , Artaxo P , et al . Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. Climate Change 2007 : The Physical Science Basis . Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change , Solomon S , Qin D , Manning M , et al , Eds. United Kingdom and New York N Y, USA : Cambridge University Press , 2007

Gong, S. L., X. Y. Zhang, T. L. Zhao, et al., 2003: Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 2. Model simulation and validation, *J. Geophys. Res.*, 108(D9), doi: 10.1029/2002JD002633.

Gong, S. L., X. Y. Zhang, T. L. Zhao, et al., 2005: A simulated climatology of Asian dust aerosol and its Trans-Pacific transport: 2. Interannual variability and climate connections, *J. Climate*, 19, 104–122.

Gordeev, V. V., V. Rachold, and I. E. Vlasova, 2004: Geochemical behaviour of major and trace elements in suspended particulate material of the Irtysh river, the main tributary of the Ob river, Siberia, *Applied Geochemistry*, 19, 593–610.

Haywood, J. M., V. Ramaswamy, and B. J. Soden, 1999: Tropospheric aerosol climate forcing in clear-sky satellite observations over the oceans, *Science*, 283, 1299–1305.

Herman, J., W. Tobías, W. S. Allan, et al., 1997: The effects of artificial lung inflation on pulmonary blood flow and heart rate in the turtle *Trachemys scripta*, *The Journal of Experimental Biology*, 200, 2539–2545.

Higurashi, A., and T. Nakajima , 2002: Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1836, doi:10. 1029/2002GL015357.

Huang, J.-P., B. Lin, P. Minnis, et al., 2006a: Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi: 10.1029/2006GL026561.

Huang, J.-P., P. Minnis, B. Lin, et al., 2006b: Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L06824, doi: 10.1029/2005GL024724.

Huang, J.-P., Y.Wang, T.Wang, et al., 2006c: 2006: Dusty cloud radiative forcing derived from satellite data for middle latitude regions of East Asia, *Nature Science*, 16(10), 1084-1089.

Huang, J.-P., P. Minnis, Y. Yi, et al., 2007: Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L18805, doi:10.1029/2007GL029938.

Husar, R. B., J. M. Prospero, and L. L. Stowe, 1997: Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product, *J. Geophys. Res.*, 102, 16889–16909.

Husar, R. B., Tratt,D.M, Schichtel,B.A, et al., 2001: Asian dust events of April 1998, *J. Geophys. Res.*, 106, 18317–18330.

IPCC. 1995: *IPCC Second Assessment Report: Climate Change*, Geneva: Cambridge University Press, 64.

IPCC, Climate Change 2001: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

Jaffe, D., Anderson,T., Covert,D., et al., 1999: Transport of Asian air pollution to North America, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 711–714.

Jaffe, D., J. Snow, O. Cooper, 2003: The 2001 Asian dust events: transport and impact on surface aerosol concentrations in the US, *Eos.*, 84, 501–506.

Jaffe, D., A. S. Tamura, J. Harris, 2005: Seasonal cycle and composition of background fine particles along the west coast of the US, *Atmos. Environ.*, 39, 297–306.

Marinoni, A., P. Cristofanelli, P. Calzolari,F, et al., 2008: Continuous measurements of aerosol physical parameters at the Mt. Cimone GAW Station (2165 m asl, Italy), *Sci Total Environ*, 391, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.004.

Moulin, C., and I. Chiapello, 2004: Evidence of the control of summer atmospheric transport of African dust over the Atlantic by Sahel sources from TOMS satellites (1979–2000), *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi: 10.1029/

Nakajima, T., M.Sekiguchi, T.Takemura, et al., 2003: Significance of direct and indirect radiative forcings of aerosols in the East China Sea region, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), doi:10.1029/2002JD003261

Nakajima, T., S-C. Yoon, V. Ramanathan, et al., 2007: Overview of the atmospheric brown cloud East Asian regional experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in East Asia, *J.Geophys. Res.*, 112, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009.

Ramanathan, V., P.J.Crutzen, J.Lelieveld, et al., 2001: The Indian Ocean Experiment: An Integrated Assessment of the Climate Forcing and Effects of the Great Indo-Asian Haze. *J. Geophys. Res., Atmospheres*, 106(D22), 28371–28399.

Ramanathan, V., and P. J. Crutzen, 2003: New directions: Atmospheric brown “clouds”, *Atmos. Environ.*, 37(28), 4033–4035.

Rea, D. K., H. Snoeckx, and L. H. Joseph, 1998: Late Cenozoic Aeolian deposition in the Northern Pacific: Asian drying, Tibet uplift, an cooling of the northern hemisphere[J]. *Palaeoceanography*, 13: 215–224.

Reimann, C., and P. de Caritat, 2000: Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry, *Environmental Science and Technology*, 34, 5084–5091.

Rosenfeld, D., Y. Rudich, and R. Lahav, 2001: Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(11), 5975–5980.

Sinyuk, A., O. Torres, and O. Dubovik, Combined use of satellite and surface observations to infer the imaginary part of the refractive index of Saharan dust, *Geophysical Research Letters*, 30 (2), 1081, doi:10.1029/2002GL016189

Shao, Y., Y. Yang, J. Wang, et al., 2003: Northeast Asian dust storms: Real-time numerical prediction and validation[J]. *J. Geophys. Res.*, 108: doi: 10.1029/2003JDO03667.

Shaw, G E., 1980: Transport of Asian desert aerosol to the Hawaiian Islands, *J. Appl. Meteor.*, 19, 1254–1259.

Shen, Z. X., J. J. Cao, R. Ariomoto, et al., 2007: Chemical composition and source characterization of spring aerosol over Horqin sand land in Northeastern China, *J. Geophys. Res.*, 112, D14315, doi:10.1029/2006JD007991.

Shen, Z. X.,J. J. Cao, X. Y. Zhang, et al., 2006: Spectroscopy analysis of iron-oxide minerals in aerosol particles and its environmental significance in North China, *Science of the Total Environment*, 2006, 367, 899–907.

Sokolik, I., D. M. Winker, G. Bergametti, et al., 2001: Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust, *J. Geophys. Res.*, 106, 18015–18027.

Streets, D. G., S. Gupta, S. T. Waldhoff, et al., 2001: Black carbon emissions in China, *Atmos. Environ.*, 2001,

Takamura, T., N. Sugimoto, A. Shimizu, et al., 2007: Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the atmospheric brown cloud East Asian regional experiment 2005, *J. Geophys. Res.*, 112, D22S36, doi:10.1029/2007JD008506.

Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, et al., 2002: Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi: 10.1029/2002GL016251.

Uno, I., H. Amano, S. Emori, et al., 2001: Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: Numerical simulation, *J. Geophys. Res.*, 106, 18331–18344.

VanCuren, R. A., S. S. Cliff, K. D. Perry, et al., 2005: Asian continental aerosol persistence above the marine boundary layer over the eastern North Pacific: Continuous aerosol measurements from Intercontinental Transport and Chemical Transformation 2002 (ITCT 2K2), *J. Geophys. Res.*, 110, D09S90, doi:10.1029/2004JD004973.

Wang, Y.-Q., X.-Y. Zhang, R. Arimoto, et al., 2005: Characteristics of carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of Northern China soil and dust aerosol and its application to tracing dust sources, *Atmos. Environ.*, 39, 2631–2642.

Washington, R., M. Todd, N. J. Middleton, et al., 2003: Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations, *Annals of the Association of American Geographers*, 93, 297–313.

Watson, A. J., D. C. E. Bakker, A. J. Ridgwell, et al., 2000: Effect of iron supply on Southern Ocean CO₂ uptake and implications for glacial atmospheric CO₂, *Nature*, 407(6805): 730–733.

Woitke, P., J. Wellmütz, D. Helm, et al., Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube, *Chemosphere*, 2003, 51: 633–642.

Xia, X., H. Chen, P. Goloub, et al., 2007: A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in Northern China, *J. Geophys. Res.*, 112, D12203, doi:10.1029/2006JD008119

Xuan, J., and I. N. Sokolik, 2002: Characteristics of sources and emission rates of mineral dust in Northern China, *Atmos. Environ.*, 36: 4863–4876.

Yin, Y., S. Wurzler, Z. Levin, et al., 2002: Interactions of mineral dust particles and clouds: Effects on precipitation and cloud optical properties, *J. Geophys. Res.*, 107(D23), doi: 10.1029/2001JD001544.

Zahra, C., J. V. Martins, Z. Li, et al., 2007: In situ measurements of aerosol mass concentration and radiative properties in Xianghe, southeast of Beijing, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2007JD009055.

Zhang, D. Z., Y. Iwasaka, and G. Shi, 2001: Soot particles and their impacts on the mass cycle in the Tibetan

atmosphere, *Atmos. Environ.*, 35, 5883–5894.

Zhang, D., and Y. Iwasaka, 2004: Size change of Asian dust particles caused by sea salt interaction: Measurements in southwestern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15102, doi: 10.1029/2004GL020087.

Zhang, D., Y. Iwasaka, A. Matsuki, et al., 2005: Coarse and accumulation mode particles associated with Asian dust in southwestern Japan, *Atmos. Environ.*, 40, 1205–1215.

Zhang, D., J. Zang, G. Shi, et al., 2003: Mixture state of individual Asian dust particles at a coastal site of Qingdao, *Atmos. Environ.* (in Chinese), 37, 3895–3901.

Zhang, M., I. Uno, G. R. Carmichael, et al., 2003: Large-scale structure of trace gas and aerosol distributions over the western Pacific Ocean during TRACE-P, *J. Geophys. Res.*, 108 (D21), doi: 10.1029/2002JD00294.

Zhang, X. Y., R. Arimoto, and Z. S. An, 1997: Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation, *J. Geophys. Res.*, 102(D23): 28041–28047.

Zhang, X. Y., S. L. Gong, Z. X. Shen, et al., 2003: Characterization of soil dust distributions in China and its transport during ACE-Asia 1. Net work measurements, *J. Geophys. Res.*, 108, doi: 1029/2002jd002632.

Zhang, Y., and G. R. Carmichael, 1999: The role of mineral aerosol in Tropospheric chemistry in East Asia—A model study, *J. Appl. Meteor.*, 38(3), 353–366.

Zoller, W. H., E. S. Gladney, and R. A. Duce, 1974: Atmospheric Concentrations and Sources of Trace Metals at the South Pole, *Science*, 183, 199–201.

附录 1 个人简历

个人信息:

王鑫

电话: 0931-8914139

传真: 0931-8914278

地址: 甘肃省兰州市城关区天水南路 222 号

E-mail: wxin@lzu.edu.cn

教育经历:

硕博: 09/2003 – 07/2009, 兰州大学(甘肃省兰州市)

本科: 09/1999 -- 06/2003, 南京气象学院(江苏省南京市)

参加会议:

国际会议:

1、*Xin Wang*, The Second International Training School on Atmospheric Brown Clouds (ABC), 4-7 Dec., 2006 in Bangkok (Thailand) and 7-17 Dec., 2006 in Hanimandhoo (Maldives).

2、*Xin Wang*, 2007 AGU Fall Meeting, 10-14 Dec. San Francisco, California, USA(Poster).

国内会议:

1、王鑫, 第八届气候与环境研讨会(EACE, 报告), 2008 年 11 月, 台湾, 台北

2、王鑫, 2007 年“中国干旱/半干旱区多学科交叉协同观测研究”的理论与实践培训(报告), 2007 年 12 月 11-13 日, 北京。

3、王鑫, 2007 年气象学年会(报告), 2007 年 11 月 21-24 日, 广州。

- 4、王鑫, 第二届干旱气候变化与可持续发展国际学术研讨会(ISACS, 报告), 2007 年 9 月 11-13 日, 兰州。
- 5、王鑫, 半干旱地区陆地表面和大气相互作用国际会议, 2007 年 8 月 9-13 日, 兰州。
- 6、王鑫, 干旱气候变化与可持续发展国际学术研讨会(ISACS), 2005 年 5 月 23-26 日, 兰州。

在学期间的主要研究成果

已发表文章:

- 1、Xin Wang, Jianping Huang, Mingxia Ji and Kaz Higuchi, Variability of East Asia dust events and their long-term trend, *Atmospheric Environment*, 42 (2008) 3156–3165
- 2、Jianping Huang, Bing Lin, Patrick Minnis, Tianhe Wang, X. Wang, Yongxiang Hu, Yuhong Yi, and J. Kirk Ayers, Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 33, L19802, doi:10.1029/2006GL026561, 2006
- 3、Huang, J., P. Minnis, Y.Yi, Q.Tang, X. Wang, Y. Hu, Z. Liu, K. Ayers, C. Trepte, and D. Winker, 2007: Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L18805, doi:10.1029/2007GL029938.
- 4、Huang, J., W. Zhang, J. Zuo, J. Bi, J. Shi, X. Wang, Z. Chang, Z. Huang, S. Yang, B. Zhang, G. Wang, G. Feng, J. Yuan, L. Zhang, H. Zuo, S. Wang, C. Fu and J. Chou, 2008: An overview of the Semi-Arid Climate and Environment Research Observatory over the Loess Plateau, *Advances in Atmospheric Sciences*, **25**(6), 1-16.
- 5、王鑫, 奚晓霞, 郭治龙, 刘志国, 陈秀玲, 2002年兰州市春季大气气溶胶特征分析, 兰大学报, 2006, 42(3):42-47.
- 6、权建农, 奚晓霞, 王鑫等, 兰州市 2001 年沙尘气溶胶质量浓度的特征分析, 中国沙漠, 2005, 25(1):93-97.
- 7、季明霞, 黄建平, 王绍武, 王鑫等, 冬季中高纬地区阻塞高压活动及其气候影响
- 8、陈秀玲, 方小敏, 安芷生, 韩文霞, 王鑫等, 黄土高原 8. 1Ma 以来方解石记录的夏季风演化, 中国科学 D 辑, 2007, 37(1): 61-70.

待发表文章:

Xin Wang, Jianping Huang, Wenshou Tian and Kaz Higuchi, Surface measurements of dust and air pollution over semi-arid region of Northwest China during PACDEX
. (已投稿 JGR)

致 谢

博士毕业在即，从一个寒窗苦读 20 年的我到即将走向工作岗位之际；从一个顽皮年少、学习成绩一般的我，到一个即将成为对国家有用的人才，我不禁思绪万千，千言万语难以表达我对曾经帮助过我的人的感激之情。

首先，我要特别感谢的是我博士学习阶段的导师黄建平教授，本论文从选题、结构以及定稿都是在黄建平教授的悉心指导之完成的，是黄老师您凭借深厚的学术底蕴、严谨的治学态度和为人和善的学术作风，使我有今天的气溶胶研究方面取得的成就，您不但我是现实学习与生活中的导师，更是我今后为人处事与学术研究领域的好榜样。博士在读期间，是您给我提供了各种国内外学习的机会，通过学术交流，开阔了我的眼界，增长的知识，对我博士论文的完成提供了更好的前提条件。再此，再次真诚的感谢黄老师地精心指导，以及对我从事学术阶段时对我的家人的关爱。此外，还要感谢我硕士学习阶段的导师奚晓霞副教授，在兰大硕士阶段的学习生活中，是您渊博的学识和无私的指导，使我在科研起步阶段就对科学研究工作有了无限的向往与热爱。因此，再次感谢奚老师对我学术上的指导与关心。

衷心感谢袁九毅教授在我学习和工作中给予的大力支持，衷心感谢付强教授、田文寿教授、王式功教授、张镭教授、张武教授对于本论文与文章的悉心指导，并感谢丘崇践教授、王澄海教授、张文煜教授、左洪超教授、付培健老师、隆霄老师、刘玉芝老师、郭文琪老师、侯丽婷老师、张璐老师等人在我学业上的帮助，此外，还要特别感谢我院国际气候观测站(SACOL)以及在气候站上辛勤工作的张北斗老师、史晋森老师和闭建荣老师，本论文大部分资料都来源于我院国际气候观测站，是你们孜孜不倦、日以继夜的工作，保证了我论文中气候站提供相关资料的可信度与创新性，使本论文成为关于 SACOL 气候站气溶胶研究领域的第一篇博士论文，因此，再一次对以上各位老师的帮助表达我最衷心的感谢。

此外，还要特别感谢为本论文的完成提供大力支持的好友刘洪韬，是他在繁忙地学习和工作的同时对本论文进行认真地核对与校正，感谢王天河、金宏春、季明霞、葛颢铭、苏婧、谢静、管晓丹、郑志海、左金清、李积明、何敏、汤强、王文彩、李玥、陈斌、王国印、黄忠伟、阎虹如、张丁玲、马越界、陈思宇、张灵、凌霄露、张儒东、徐鑫强、石晓明等，感谢你们几年来在学习上给予我的帮助。

最后要特别感谢我的父母及家人对我多年来的关爱与照顾，他们都是勤劳朴实的工人，他们生活得是那么的艰苦，但是无怨无悔的给予我工作和学生上提供大力的支持，是他们的爱使我克服了学业上一切的艰辛与困惑，有了今天的成就。在此，仅以此文表达对我家人以及所有帮助过我的人的无限敬意！

王鑫

2009 年 5 月