山东师范大学

硕士学位论文

基于遥感技术的我国内陆沙尘对中东部城市颗粒物污染的影响研究

姓名：刘晓丽

申请学位级别：硕士

专业：地图学与地理信息系统

指导教师：徐跃通;孙林

20090425

中文摘要

近几年来城市颗粒物污染已受到人们越来越多的关注，成为环境监测和治理的一个重点。我国城市颗粒物污染的来源较复杂，其主要的来源有：生物燃烧、建筑扬尘以及周围区域沙尘等。而随着近年来沙尘暴的频繁发生，内陆沙尘暴所携带沙尘的远距离输送逐渐成为我国部分城市颗粒物污染的一个重要来源。当沙尘天气发生时，强风将大量沙粒卷扬到空中并造成严重的空气污染。而被卷扬到空中的沙粒可随气流继续运行至我国的中东部地区，引起我国中东部地区较大范围内的空气污染。因此研究内陆沙尘与中东部城市颗粒物污染之间的相关关系，对中东部城市的环境污染治理有着重要的意义。

传统的颗粒物探测方法是地基探测法，具有探测精度高以及可探测指标多等优点。但是由于该方法不能反映较大区域范围内颗粒物的时空分布，因此在了解颗粒物的起源以及影响范围方面受到很大的限制。而卫星遥感技术具有覆盖面广、信息获取方便快捷等特点，使用卫星遥感技术可以了解沙尘的起源、空间分布、移动路径和降尘区域，使探测结果达到空间上和时间上的连续性，相对于地基探测方法可以更高效地获取颗粒物的宏观信息，真正达到动态监测的目的。

因此在黄土与第四纪国家重点实验室开放基金项目“内陆粉尘对中东部城市颗粒物污染的影响”的支撑下，本文选择北京市、青岛市、西安市作为中东部城市示范区，利用“中国强沙尘暴序列及其支撑数据集”（1982 年至 2007 年）、空气污染指数 API 数据、MODIS 气溶胶光学厚度产品 MOD04 以及气溶胶全球观测网 AERONET 数据，研究内陆沙尘对中东部城市地区颗粒物污染的影响。全文从六个方面进行阐述：

第一部分，主要介绍国内外学者对沙尘天气的研究现状，本研究的主要内容及研究区域概况。

第二部分，介绍我国内陆沙尘源地的分布以及沙尘的传输路径，并结合 1982 年至 2007 年 26 年间的沙尘数据集对中东部地区的沙尘源地进行分析，得到其受内陆沙尘影响的时空分布规律，并利用 MODIS-NDVI 产品对沙尘传输过程中植被覆盖的影响做了分析。

第三部分，利用沙尘数据集提取出的沙尘指数与利用 MODIS 气溶胶数据

产品 MOD04、AERONET 数据所提取的气溶胶光学厚度 AOT 进行相关性分析，得出三个城市的 AOT 对内陆沙尘的响应。

第四部分，利用 MODIS 气溶胶数据产品 MOD04、AERONET 数据所提取的表征颗粒物粒径大小的 Ångström 波长指数 α 对三个城市春季大气中的颗粒物变化情况进行分析，并将分析结果与对应时间内内陆沙尘以及三个城市 API 数据的变化进行对比，从而探寻内陆沙尘对中东部城市颗粒物的贡献及其对城市 API 的影响。

第五部分，利用 MODIS 数据对两次沙尘过程进行动态监测及分析，从而验证内陆沙尘对中东部城市的影响。

第六部分，总结全文，得出结论，并提出日后进一步的工作展望

关键词：遥感技术，内陆沙尘，颗粒物污染，中国中东部

中图分类号：P208

Study on the Effects of Inland Dust on the Particulate Pollution of Mid-Eastern China Based on RS Technology

Abstract

In recent years, urban particulate matter has become the main aspect in environment monitoring and treatment. The source of urban particulate matter in China is complex, biomass burning; building construction dust, etc are the main sources of it. But with the frequent occurrence of sandstorm in recent years, the inland dust has become an important source of particulate matter in some cities of China. When the sandstorm and blowing sand weather happened, the strong wind blows massive sand dust into air and causes serious air pollution. Some dust rolled up into upper atmosphere and then transmitted distance with the airflow, so the sand dust can effect the air pollution in large-scale regions. So find the correlation between the inner dust and the particulate pollution of Mid-Eastern is significant for the environmental pollution control.

The traditional method of monitor particulate matter is foundation exploration, high precision and plentiful indices are the advantages of it. But it cannot reflect the temporal-spatial distribution of the particulate matter in a large range, so it has a lot of limit in finding the source origin and influence scope of the particulate matter. Satellite remote sensing technology has the characteristics of large scope of coverage, convenient and fast in information acquisition. Using this method we can get the origin, spatial distribution, moving track and drop region of dust, and make the monitor results continuous, both in temporal and spatial. So compare the foundation exploration, satellite remote sensing technology can get the macroscopic information of particulate matter more efficient and realize dynamic monitoring.

In this paper we use the "Strong-sandstorm sequences and supporting dataset of China" (SSDC, 1982 to 2007), Air Pollution Index (API) of cities, MODIS aerosol optical thickness (AOT) product data and Aerosol Robotic Net-work (AERONET) data to analysis the influence of the west sand dust on the urban particulate matter pollution of Mid-eastern china, and we chose Beijing, Qingdao and Xian as the

representative areas. The whole text describes through six parts.

Part Ⅰ: This part mainly introduces the current research situation both home and abroad, and presents the mainly research content of this paper and the general situation of the study regions.

Part Ⅱ: This part introduces the distributing of the west dust source region and the transmission path of the dust, and uses the SSDC to analysis the dust sources of the Mid-eastern China, then finds the west dust effect on the Mid-eastern China and the temporal-spatial distribution of the effect. And Using MODIS-NDVI products to analysis the effect of vegetation cover on the sand-dust storm transmission.

Part Ⅲ:Using SSDC to get the dust index, and using the MODIS MOD04 and AERONET data to get the AOT, finding the correlation between the dust index and AOT, then we can obtain the response mechanism of the AOT to the west dust.

Part Ⅳ: Using MODIS MOD04, AERONET to extract Ångström wavelength exponent α to analysis the change of the particulate composition in spring of the three cities, and then using the analysis results to compare the west dust and the cities API in the same time to find the contribution of the west dust to the particulate and the API of the Mid-eastern China.

Part Ⅴ: In this part we use MODIS to monitor and analysis two sand-dust processes dynamically to validate the effect of the west sand-dust to the Mid-eastern China.

Part Ⅵ: This part makes a summary over the whole paper and gets the conclusion of the analysis, then puts forward the issues the further research prospect in future.

Key words: RS technology, Inland dust, particulate pollution, Mid-eastern China
Classification: P208

独 创 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得_____（注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：刘晓丽　　导师签字：徐跃进

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 学校 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 学校 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：刘晓丽　　导师签字：徐跃进

签字日期：2009 年 6 月 9 日　　签字日期：2009 年 6 月 9 日

1 绪论

1.1 研究背景

近年来,随着经济的发展，我国大多数城市都面临着严峻的大气污染问题。大气污染物主要包括空气中的可吸入颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等。我国城市的大气污染物主要为可吸入气溶胶颗粒物[1]。气溶胶是指悬浮在气体中的固体和液体微粒与气体载体共同组成的多相体系,其动力学直径约 10^{-3}-10^{2}μm。空气中含有各种悬浮大气气溶胶粒子,其组分复杂,具有独特的物理化学性质[2]。气溶胶颗粒物影响着气候变化以及人类的生活和健康，即它的气候效应和环境效应。在气候效应上，一方面气溶胶通过散射、吸收太阳辐射和地球辐射直接影响整个地气系统的辐射收支平衡，另一方面，气溶胶作为云凝结核,可以使单位体积的云粒子数量增加，云滴半径减小，增加云的短波反射率，同时使云的生命周期增加，从而通过云对地气系统的辐射平衡产生影响[3-6]。气溶胶同时具有显著的环境效应，直径小于 2.5μm 的颗粒物($PM_{2.5}$)因为对可见光的消光(散射和吸收)作用导致地面能见度的显著下降[7]；此外，颗粒物还对人体健康造成危害，直径在 10μm 以下的颗粒物(PM_{10})可到达人类呼吸系统的支气管区,直径小于 5μm 的微粒可到达肺泡区，颗粒物表面会富集化学物质、病毒及重金属，使得有害物质沉积在肺部，甚至穿过肺泡进入血液，最终引发流感、肺结核、肺癌以及其他心血管和哮喘疾病[8],直接对人类的健康造成影响,威胁着人类的生存。鉴于我国城市地区颗粒物污染严重的现状及其对环境和人体健康造成的极大危害,尽早开展对城市颗粒物污染的监测及来源分析非常必要。

我国城市颗粒物污染的来源较复杂，一般来讲其主要来源有三个部分：城市正常生产生活产生的颗粒物、大的沙尘天气过程的传输型扬沙以及局地性扬沙。当沙尘暴、扬沙天气发生时,大风将大量沙尘卷入空气中,造成地区环境空气严重污染。一些颗粒较细的沙尘粒子被卷扬到高空,随上层气流进行远距离传播,可以对大范围内的空气质量造成影响[9]。由于近年来沙尘暴的频繁发生，内陆沙尘的远距离输送逐渐成为我国部分城市颗粒物污染的一个重要来源。特别是我国西北内陆地区是世界上沙尘天气的高发区[10]，沙尘天气发生后，沙粒在沙漠及沙漠化地区就近堆积，而卷扬到高空的沙尘随气流继续运行[11]，波及我国的中东部地区，使我国中东部城市大气颗粒物浓度增加，城市环

境污染加重。内陆沙尘对中东部城市颗粒物影响随着城市的空间分布和季节的变化有较大的差异，通过研究不同季节沙尘的起源地、空间分布、传输路径以及降尘的区域，发现内陆沙尘与中东部城市颗粒物污染之间的相关关系，对中东部城市的环境污染治理有着重要的意义。

在颗粒物的探测方法方面，传统的颗粒物探测方法使用的是地基探测方法[12]，地基探测方法主要依靠太阳分光光度计对颗粒物的光学特性进行监测，地面探测具有探测精度高，可探测的指标多等优点，但地面采样方法获取的只是空间点上的数据，不能反映大区范围域颗粒物的时空分布，在了解颗粒物的起源以及影响范围等方面受到很大的限制。卫星遥感技术具有覆盖面广、信息获取方便快捷等特点，使用卫星遥感技术可以了解沙尘的起源、空间分布、移动路径和降尘区域，使探测结果具有空间上和时间上的连续性[13]，相对于地基探测方法可以更高效地获取颗粒物的宏观信息，真正达到动态监测的目的。

基于上述分析，本文将研究内陆沙尘对我国中东部部分城市颗粒物污染的影响。根据距离内陆沙尘源区的距离不同，将选择西安、北京、青岛三个城市作为示范区，采用遥感技术分析内陆沙尘对中东部不同城市地区颗粒物的影响机制。

1.2 国内外的研究现状及存在的问题

1.2.1 国外研究现状

国外在沙尘天气的研究方面开展较早，Hankin[14]在上世纪 20 年代初就对印度地区的沙尘天气进行了初步研究。在此之后，随着观测资料的增多和方法的不断改进，在沙尘天气的气候特征、发生频率、时空分布特点、气候成因等方面的研究均取得了较多的成果[15-21]。

在城市地区颗粒物污染监测方面，随着遥感技术的发展，上世纪末国际上实施了一系列卫星观测计划以获取气溶胶颗粒物光学特性的全球分布、气溶胶直接强迫、间接强迫的季节和年变化。其中，美国国家宇航局(NASA)的 EOS 卫星 Terra 和 Aqua 上搭载的中分辨率成像光谱仪(MODIS)为全天候、连续区域的动态监测提供了强大的数据支持，利用气溶胶光学厚度（AOT）来分析大气污染现状[22]。国外学者在利用遥感卫星数据对大气污染研究方面也取得了很大的进展：Engel Cox 等[23]利用 MODIS 真彩色图像和气

溶胶光学厚度从定性和定量两方面研究了 AOT 在大气污染研究中的应用问题，通过将卫星遥感资料与地面污染物质量浓度的比较发现二者在美国中部、东部地区比内陆地区具有较高的相关。Wang 等[24]利用美国阿拉巴马州的一个城市多个站点的地面和卫星资料研究了污染物浓度和 AOT 之间的相关关系，研究表明 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 AOT 具有较高的相关性，表明主要污染物分布在混合层内，且 AOT 可以被定量用于空气质量的评估之中。Lau 等[25]研究表明，MODIS 遥感的 AOT 与地面观测颗粒物质量浓度具有较好的相关关系，MODIS 的 AOT 分布可以在污染物区域输送监测发挥重要作用。Chu 等[26]对 MODIS 气溶胶产品进行全球的精度验证，得到其相对误差在 20%左右，可以满足科研的需要。

1.2.2 国内研究现状

自上世纪 70 年代开始我国学者对沙尘天气从多角度进行了大量的研究并取得了大量的研究成果：徐启运和胡敬松[27]分析了我国西北地区沙尘暴的时空分布特征；钱正安等[28]给出了我国西北地区沙尘天气的分级标准；王式功等[29-30]利用 1954-2000 年台站沙尘资料和相关的气候资料，研究了我国沙尘天气的区域特征。邱新法[31]邱玉珺等[32]分析了影响我国的沙尘暴传输路径，周自江等[33-34]研究了我国近 47 年来沙尘暴气候的特征并对近 49 年来北方典型沙尘暴事件进行了分析。

而在利用遥感手段在城市颗粒物环境污染的监测方面，近几年来我国学者也取得了重要进展：李成才、毛节泰等[35]利用 MODIS 气溶胶产品统计了中国东部地区气溶胶光学特征以及季节性变化规律，得出东部工业发达区的气溶胶以人类活动的贡献为主，但在春、秋、冬季受到来自北方的沙尘影响显著的结论；李成才等[36]对 2001 年在北京地区利用太阳光度计观测的气溶胶光学厚度和 NASA 发布的 MODIS 气溶胶产品进行了比较，验证了这一卫星遥感产品的可靠性，并比较了 2001 年 MODIS 气溶胶光学厚度(AOT)产品和由空气污染指数(API)计算出的每日平均可吸入颗粒物(PM_{10})浓度，得到了较高的相关系数，证实该气溶胶产品可用于污染分析；朱爱华等[37]利用 MODIS level 2 产品，结合在北京大学多波段太阳光度计观测的数据，分析检验了 2001 年 1 月至 2002 年 11 月北京地区大气气溶胶光学厚度(550 nm)的变化情况，认为遥感反演的 AOT 在一定程度上可以反映颗粒物污染物的空间分布和变化趋势，对分析有关气溶胶来源和区域性输送等问题提供了一个有效的手段；韩晶晶，王式功等[38]利用 MODIS 卫星遥感光学厚度资

料,分析了中国大气气溶胶光学厚度的时空分布特征,并与同期沙尘天气进行了对比及相关分析，得出中国主要内陆地区的气溶胶光学厚度的分布有4个高值区，并得出在沙尘天气的多发区,气溶胶光学厚度与沙尘天气有较好的相关性。王皓[39]，刘勇[13]，孙林等[40]对MODIS气溶胶光学厚度产品与城区空气污染指数(API)进行对比分析，得到的结果能比较好地反映地面空气污染的状况。申彦波等[41]利用MODIS气溶胶光学厚度资料研究了我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气的关系。

综上可以得出，在沙尘天气的成因、分布、各区域沙尘天气的特征，以及利用遥感手段对沙尘颗粒物的研究方面，国内外学者的研究方法已经发展得比较成熟。

1.2.3 存在的问题

目前国内外学者对城市大气颗粒物来源的研究重点多是静态监测城市地区的污染现状，监测的参数和分析的重点都是针对颗粒物本身的，缺少动态监测以及相关影响因素的分析。在沙尘的传输机制、沙尘来源等方面的研究较少，部分研究虽然也在沙尘的传输过程以及外来沙尘的贡献方面有所研究，但是对于外来沙尘如何影响城市大气环境，影响后该城市环境污染的进一步发展趋势，以及探求不同城市在受到外来沙尘影响后所产生的不同结果的原因等方面未作更深入的研究。

因此本文利用遥感与地面资料相结合的方法针对内陆沙尘远距离传输对中东部城市颗粒物污染造成的影响展开相应的研究工作。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究内容

本文利用“中国强沙尘暴序列及其支撑数据集”（1982年至2007年)，空气污染指数API，MODIS气溶胶光学厚度产品MOD04以及气溶胶全球观测网AERONET等数据，选择北京、青岛、西安作为中东部城市示范区，研究内陆沙尘对中东部城市地区颗粒物污染的影响。主要研究内容有：

1)本文将使用多时相MODIS/TERRA和MDOIS/AQUA数据中的气溶胶光学厚度产品，选取2000-2007年晴空条件下的数据进行计算，由于数据量较大，将对多时相遥感数据信息的提取进行批量算法研究，寻找利用多时相遥感数据进行地区气溶胶光学厚度

批量提取的方法。

2)通过对强沙尘数据集的统计分析，得出中东部地区沙尘的来源及其时空分布特征。

3)利用 MODIS 植被指数产品研究植被覆盖在内陆沙尘对中东部地区起尘中的影响。

4)将中东部城市地区作为一个受影响面，分析内陆沙尘源区对不同的受影响区域颗粒物光学厚度的影响，并研究这种影响的时空分布规律。

5)借助城市中气溶胶光学厚度的 Ångström 波长指数分析各年间内陆沙尘对中东部城市地区空气污染指数的影响。

1.3.2 技术路线

本文的技术路线如图 1-1 所示：

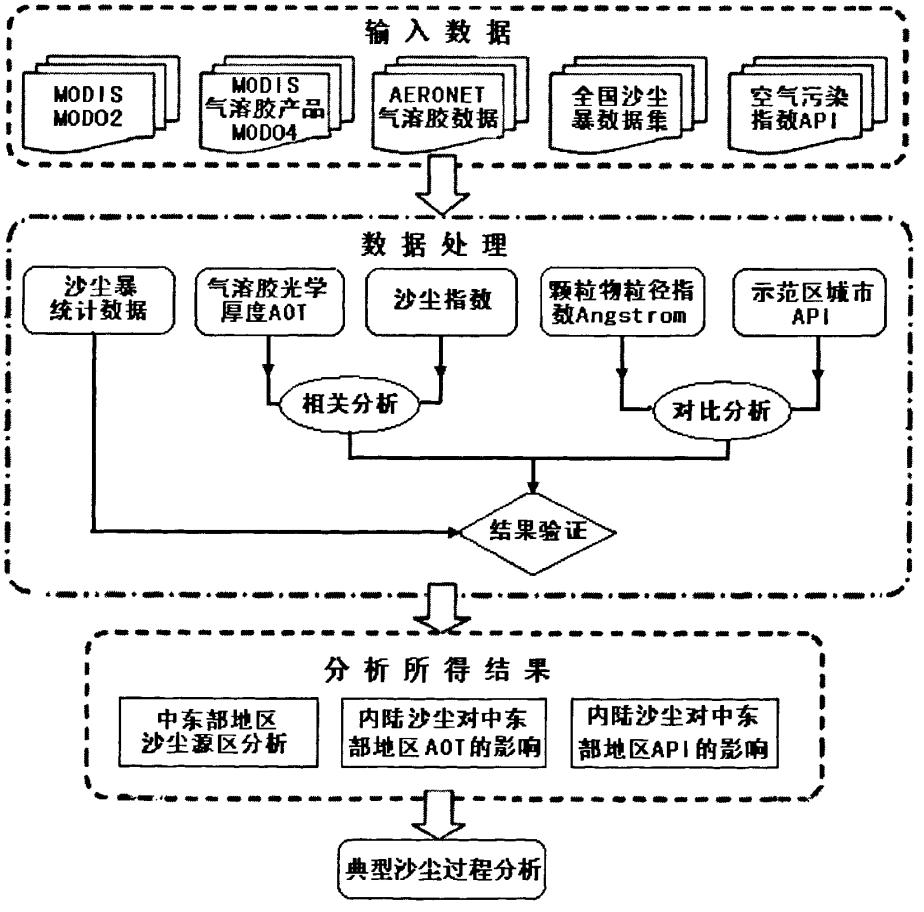


图 1-1 技术路线图

2 研究区域概况

2.1 沙尘源区概况

我国是世界上沙尘暴易发生和受其影响最严重的国家之一，其中西北地区是沙尘暴的主要发源地。我国西北地区处于欧亚大陆的腹地，气候干燥，降水少且不均匀，地表植被稀疏，土层疏松，形成了丰富的沙源，如新疆的塔克拉玛干大沙漠、甘肃和内蒙古内陆地区的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠、毛乌苏沙地和浑善达克沙地沙地等世界上著名的沙漠沙地。

对于我国内陆以及中东部地区沙尘源地的分析，将在第三章中着重介绍。

2.2 中东部示范区城市概况

由于沙尘天气多发生于我国的西北地区，相对于长江以南地区，我国北方城市特别是西北华北地区所受影响更为明显，因此选择北京、西安、青岛三个分别地处中国中东部的华北、西北部边缘地区以及华北东部沿海的三个经济较发达的城市作为本次研究的受影响示范区，来寻找西北沙尘对中东部城市地区大气颗粒物污染的影响。

2.2.1 北京市概况

北京市是我国的首都，也是我国政治、文化、经济中心，其位于东经115°24′～117°30′，北纬39°28′～41°05′，太行山和燕山山脉脚下的华北平原北端，平原地区西、北和东北向环山，与天津相邻且被河北省所环绕。

北京市的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，春、秋季较为短促。2007年全年平均气温14.0℃，平均降雨量483.9毫米，为华北地区降雨最多的地区之一，但降水季节分配很不均匀，全年降水的80%集中在夏季6、7、8三个月，7、8月常有暴雨。

北京市的大气污染状况与其周围大区域的环境背景有着密切的关系，其距离我国北部地区沙尘源地较近，春季多发沙尘暴，大气污染物中可吸入颗粒物污染占主导地位，市区2007年达到轻微污染以上天数为119天。但近几年在政府环境治理下，北京的沙尘状况以及空气质量都有所好转。

2.2.2 西安市概况

西安市位于中国大陆腹地黄河流域中部的关中盆地，东经 107°40′～109°49′，北纬 33° 42′～34° 45′。西安城区在关中盆地中部的渭河南岸，东以零河和溯源山地为界，南至北秦岭主脊，北至渭河，东北跨渭河，秦岭山脉横旦于西安以南，是我国地理上北方与南方的重要分界。

西安属暖温带大陆性季风气候，气候干燥，雨量较少，年平均气温 13.3℃，年平均降水量 604.2 毫米，主导风向为东北风，次主导风向为西南风。

西安市主要的大气污染物为可吸入颗粒物， 2007 年全年空气质量达到二级及优于二级的天数为 294 天，其中达到优的天数为 13 天，全年没有重度污染情况。

2.2.3 青岛市概况

青岛市地处山东半岛南部，位于东经 119°30′～121°，北纬 35°35′～37°09′，东、南濒临黄海，东北与烟台市毗邻，西与潍坊市相连，西南与日照市接壤。

青岛地处北温带季风区域，属温带季风气候。市区由于海洋环境的直接调节，受来自洋面上的东南季风及海流、水团的影响，故又具有显著的海洋性气候特点。空气湿润，雨量充沛，温度适中，四季分明。市区年平均气温 12.2℃，平均降水量为 775.6 毫米，春、夏、秋、冬四季雨量分别占全年降水量的 14%、57%、22%、7%，全年以南东风为主导风向。

青岛地区的大气污染状况较轻，主要的大气污染物为可吸入颗粒物，2007 年全年空气质量达到二级及优于二级的天数为 333 天，其中达到优的天数为 47 天。

3 我国沙尘源地及中东部沙尘源地分析

3.1 我国沙尘源地及其移动路径

3.1.1 沙尘源区的空间分布

沙尘天气细分包括浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴以及特强沙尘暴(黑风)[27]。浮尘

天气是指在无风情况或者风力很小的情况下，尘土细粒均匀地浮游在空气中，使水平能见度＜10km 的天气现象；扬沙天气是指较强的风将地面沙尘吹起，使空气相当混浊，水平能见度在 1km～10km 之间的天气现象。其中浮尘多由外地或本地沙尘暴、扬沙天气出现后尚未下沉的尘土和细沙引起。沙尘暴是由于强风将地面大量尘沙卷入空中，使空气特别混浊，水平能见度＜1km 的风沙天气现象。强沙尘暴是当瞬间风速≥20m/s 且局部区域能见度在 50m～200m 之间时的沙尘天气。特强沙尘暴则是当观测区域两站或两站以上出现瞬间风速≥25m/s，最小能见度≤50m 时的沙尘天气，又称“黑风”。

我国西北部地区是世界上四大沙尘暴区之一，为了确定我国主要的沙尘源区的空间分布，采用 1982 年～2007 年的中国强沙尘暴数据集来进行分析，其中涵盖了全国 753 个气象观测站点所记录的沙尘暴及以上级别的天气数据，没有包括扬沙及浮尘天气记录，因此我们仅利用已有的沙尘天气记录进行统计。筛选出数据集中沙尘总次数大于 200 次的站点作为我国沙尘源区站点，其结果如图 3-1 所示，可以发现沙尘源区集中在四个大区域，分别是北疆准格尔盆地南沿，南疆塔克拉玛干沙漠、青海柴达木盆地、甘肃河西走廊以及内蒙古中内陆沙漠沙地区域，内蒙古中部沙地以及青藏高原中部。其中沙尘频次最高的区域为塔克拉玛干沙漠区域，其中民丰地区 26 年来共有 1010 次沙尘报告，柯田、和田等地区也有大于 400 次沙尘报告，其次为内蒙古沙漠中内陆沙漠沙地区域以及甘肃河西走廊，其中内蒙古拐子湖区域共有 681 次沙尘报告，甘肃民勤地区有 498 次沙尘报告。

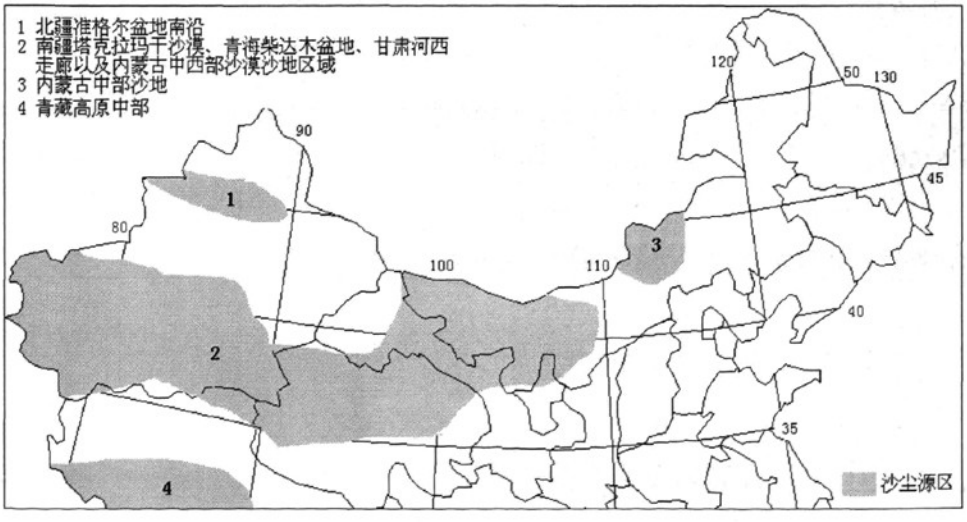


图 3-1 我国沙尘源区分布示意图

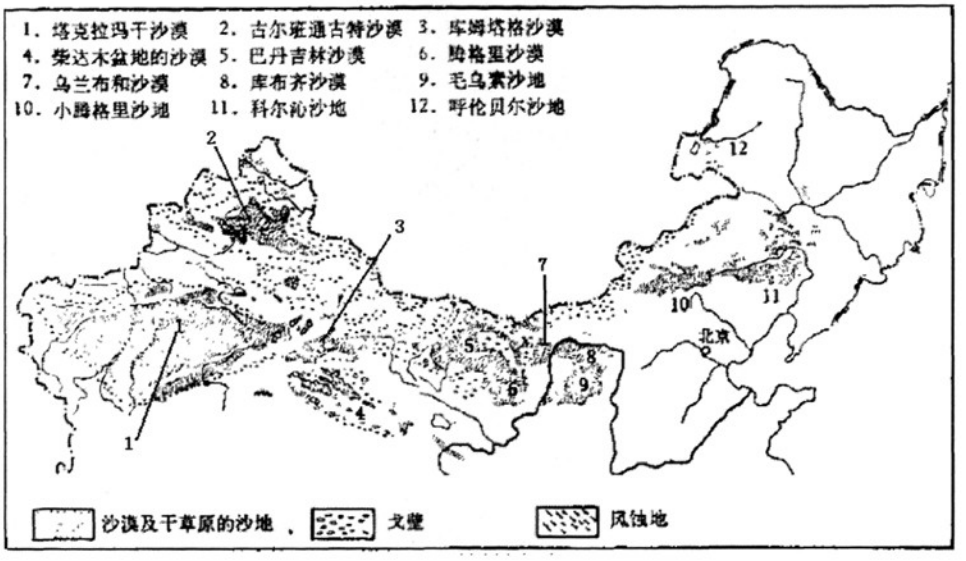


图 3-2 中国沙漠分布图[42]

对比我国沙漠分布图 3-2 可见，四个沙尘源区中除青藏高原地区外均位于我国沙漠沙地地区，而青藏高原中部虽然不是沙漠地区，但由于过去三十年间全球气候变暖导致青藏高原荒漠化程度日益加重，据西藏气象据统计分析，西藏近 30 年来气温升幅约为 0.9℃，增长率每 10 年达到 0.47℃。气温上升导致青藏高原冰川和冻土加速退化[1]，方小敏[43]、韩永祥等[44]的研究表明，青藏高原季风是主要的沙尘制造者和搬运载体，青藏高原更容易将细粒沙尘扬升至西风急流区，已经成为全球最高效的沙尘输送源区。

3.1.2 沙尘源区的时间分布

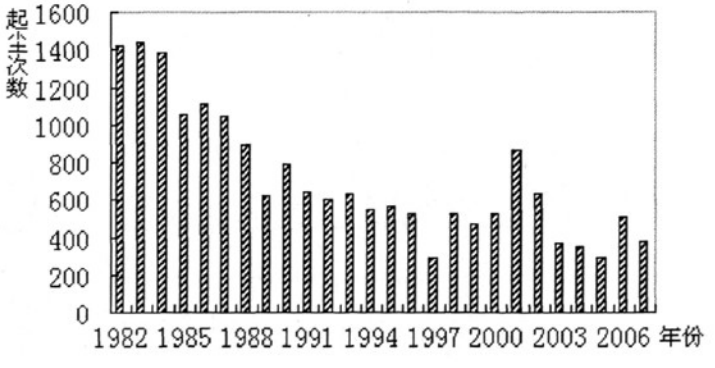


图 3-3 1982-2007 年沙尘源区发生沙尘暴报告站点总数统计图

[1] http://china.pub.zjol.com.cn/05china/system/2006/04/29/006597135.shtml

图 3-3 为 1982-2007 年各年间沙尘源区发生沙尘天气报告站点总数统计，从图中可见 20 年来沙尘天气发生次数有明显的减少趋势，这与周自江等[34]阐述的结论一致，近 47 年来我国北方大部分地区扬沙和沙尘暴出现的日数是以减少为主的。但到了 2000 年后又开始呈增加趋势，这种变化趋势说明，沙尘暴有其自身演变规律，这种演变规律可能主要受气候因素制约，人对土地的改造作用并不是沙尘暴爆发的主要原因，最多只是起了缓解或加重的作用。另外，风力条件的变化对沙尘暴变化趋势的也有影响。研究成果表明，沙尘暴的发生一般需要足够强劲持久的风力和地表丰富的松散干燥的沙尘[45]。而统计数据显示我国沙化土地面积自 20 世纪 50 到 60 年代中期始平均每年扩展约为 1560km^2，90 年代每年扩展达 2460km^2[46]。这意味着我国沙尘暴的物质源越来越丰富，理论上沙尘天气的发生日数应逐渐增加，但实际上沙尘天气发生次数却有逐渐减少的趋势，因此大风的年际振荡应该在沙尘暴的减少中起到得了主导作用[47]。

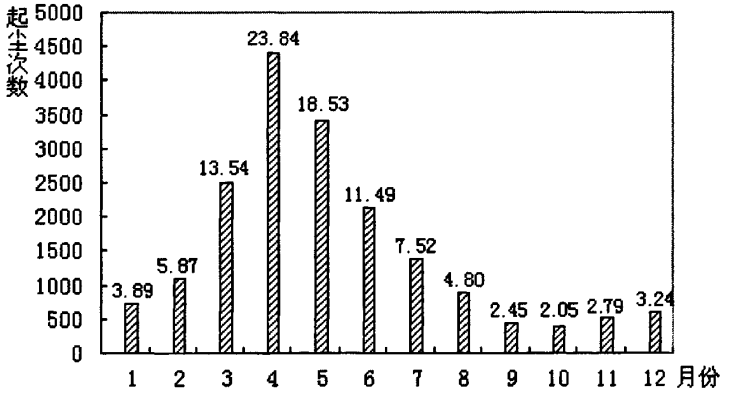


图 3-4 内陆沙尘源区沙尘发生时间季节分布

对沙尘源区站点发生沙尘天气的时间进行统计结果如图 3-4 所示，图中数字表示各月起尘占总数的百分比。结果显示一年当中 3、4、5 月发生沙尘天气的次数较多，这三个月发生沙尘天气次数占到总数的 55.92%，其中又以 4 月份为最多，仅四月份起尘数占到总起尘数的 23.84%。其次为 3 月、5 月。5 月后沙尘天气发生次数明显下降，其中 9、10 月最低，其中 9 月占沙尘总数的 2.45%，10 月仅占 2.05%。沙尘天气发生时间春季频次最高，是由于一年中风速在春季较大，此时气温上升、地面开冻融化、裸露的沙土地表结构逐渐变得松散，一旦有较强的天气系统活动就较容易生成沙尘天气。而夏季雨水增多、风力减弱且植被繁茂，下垫面植被覆盖率较高，沙尘暴发生的几率随之减少。秋季由于受夏季湿润、植被茂盛的条件持续影响，使得沙尘暴发生几率继续下降，成为

全年发生沙尘暴频率最小的季节。而冬季地面结冻，大风也难以将冻结成块的沙土吹离地面形成沙尘暴，故冬季沙尘暴次数也较少[31]，但由于植被覆盖度降低，因此相比秋季沙尘暴次数仍有增加。

3.1.3 沙尘暴移动路径分析

根据鞠洪波等[48]的研究，我国沙尘暴的移动路径可以归纳为西路、西北路以及北路三条路径。

偏西路径：沙尘经帕米尔高原后进入南疆盆地，然后东移影响青海、甘肃等地区。

西北路径：沙尘经由北疆和蒙古国内陆，到达新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河北、山东等地区，主要影响我国的西北地区、华北地区。此路径发生强度大、次数多，影响范围广。

偏北路径：是由贝加尔湖或蒙古国中东部地区进入我国，影响内蒙古、内蒙古、甘肃、宁夏、陕西、山西、河北、山东等地区。

此外，根据尹晓慧等[49]以及耿敏[47]的研究，分别提出了影响北京、青岛沙尘移动路径：

影响北京地区的沙尘暴路径有三条：一是自内蒙古浑善达克沙地经河北省坝上，到达北京及其周边地区的偏北路径；二是自内蒙古朱日和，经由张家口、河北洋河河谷，传播到北京及其周边地区的西北路径；三是经河北桑干河谷到达永定河谷，然后进入北京的偏西路径。

影响青岛地区的沙尘暴路径有三条：一是自内蒙古科尔沁沙地，过辽东半岛影响青岛及其周边地区的偏北路径；二是源于蒙古国沙尘经由内蒙古沙漠，东移经黄土高原、河北最终到达山东半岛从而影响青岛及其周边地区的西北路径；三是沙尘起自新疆地区，经甘肃、河套地区、华北南部到达山东半岛从而影响青岛地区的偏西路径。

无论是影响全国还是北京、青岛等地的沙尘暴移动路径，据统计其中西北路径次数最多，以全国为例[27]占 76.9%，偏西路径次之，占 15.4%，偏北路径最少，占 7.7%。

3.2 中东部地区的沙尘源地分析

根据我国沙尘的起尘源地以及中东部城市的区域位置，统计得到位于中国中东部地区站点 99 个，分布于 9 省市，其中山东 31 个，河北 21 个，山西 18 个，陕西 11 个，

河南 10 个，天津 3 个，北京 2 个，江苏 2 个，安徽 1 个。

对各年 99 个中东部站点的沙尘报告进行统计，规则为：若中东部某站点有沙尘报告，在沙尘发生当日至发生前两日的时间段内，位于内陆的各站点的沙尘报告总数若大于等于 5 次，认为该次中东部站点的沙尘是由内陆沙尘的外来输送引起，若在该时间段内内陆各站点沙尘报告总数少于 5 次，则认为该中东部站点的沙尘是由于局部沙尘引起。

根据数据处理的结果得到，1982～2007 年 26 年间，中东部 99 个站点共有 68 个站点有沙尘报告，各省市均有沙尘监测报告数据，其中中东部局地起尘站点总数 26 站，受内陆影响有沙尘报告的站点总数 68 站。各站沙尘报告总数共 782 次，其中受内陆沙尘影响的站点总次数 726 次，占总数的 92.84%，中东部局地起尘的站点次数 56 次，仅占总数的 7.16%。可以看出中东部各省市的沙尘与内陆沙尘的外来输送有密切关系。

3.2.1 中东部局地起尘站点结果分析

1982～2007 年 26 年间，中东部局地起尘的站点数共 25 站，占中东部站点总数的 25%，起尘总数共 56 次，占中东部总起尘数量的 7.16%，起尘站点分布于河北、河南、山东、山西、陕西以及天津，起尘累计总数在空间分布上呈西多东少，北多南少的趋势，且中东部局地起尘的各站点中 26 年的总次数最多的仅为 7 次，5 次以上的站点仅有 4 站，说明中东部城市由于局地起尘而造成的沙尘天气较少。

在时间分布上，80 年代早期以及 2000 年后中东部局地起尘次数较多，而 80 年代中后期到 90 年代次数较少

3.2.2 受内陆沙尘影响的中东部起尘站点结果分析

1982～2007 年 26 年间，中东部 99 个站点中出于受到内陆沙尘的影响而出现沙尘报告的站点共 68 站，占中东部站点总数的 68.7%，起尘总次数为 726 次，占中东部总起尘数量的 92.84%。受影响站点分布范围广，各省市均有受到内陆沙尘影响而起尘的中东部站点。

3.2.2.1 空间分布规律

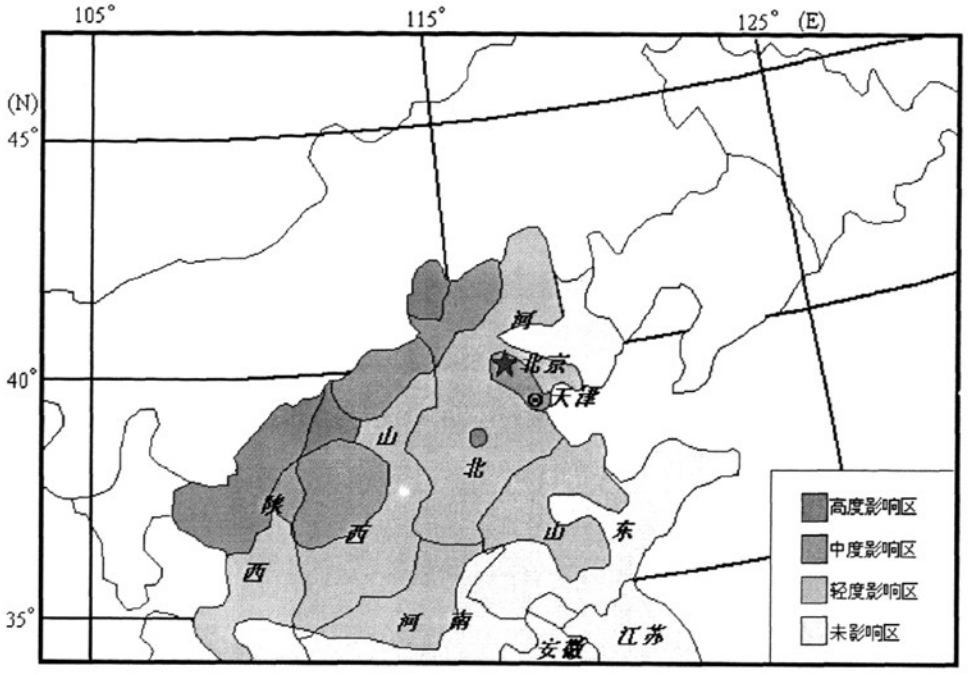


图 3-5 1982～2007 年受内陆影响的中东部起尘站点区域分布示意图

图 3-5 给出的是根据强沙尘暴数据集得到的受内陆沙尘影响的中东部各站点在 26 年间的起尘总次数区域分布，由于其中某些地区没有沙尘统计资料，因此统计结果仅限于沙尘数据集中已有的资料进行分析。将总次数大于 30 次的站点所在区域定为高度影响区，10～30 次定为中度影响区，1～10 次定为轻度影响区，0 次的定义为未影响区。从图中可以发现，26 年间的高度中度影响区多分布于内蒙古、宁夏、甘肃等内陆起尘源地的周边区域，特别是陕西西北部、山西北部以及河北西北部分区域累计起尘次数达到 30 次以上，其中陕西横山 95 次、榆林 72 次，是中东部起尘最高中心，其原因是由于横山、榆林均位于内蒙古与陕西交界处，且位于毛乌素沙地的南缘，是内陆起尘区与中东部受影响区的交界地带。两地气候干燥降水较少，毗邻内蒙古毛乌素沙地，当内陆有沙尘天气发生时极易受到影响。而值得注意的是河北饶阳总次数达到 33 次，为高度影响，但其地理位置位于轻度影响区域，查找资料发现，其与当地有沙地、裸露旱地以及干枯河床裸露淤沙等有关[34]，随着内陆沙尘天气以及大风的来袭，外来沙尘与局地沙尘的共同影响使得饶阳地区的起尘次数较多持续时间较长，导致饶阳地区的受影响区域出现类似于岛状分布的现象。而北京、天津起尘次数也分别达到 11 次、13 次，这与城市集中

区易出现逆温层，气流流动较慢，污染物不易扩散有关，致使浮尘扬沙在城市区域停留时间较长，污染加重。此外，北京位于太行山和燕山山脉脚下的华北平原北端，平原地区西、北和东北向环山，山脊连成平均海拔1000m左右的弧形屏障，地形呈簸箕状，大气流动受到阻挡，大气污染物不易向外输送，大气自净能力不强。受“簸箕”地形影响，华北地区特别是北京地区常年风速偏小，比其他地区更容易导致污染物累积。因此地形因素使得外来沙尘积聚在此不易扩散。从以上两则特例可见局地环境会延长沙尘天气持续时间，从而增大沙尘天气在中东部城市发生的频率，使得外来沙尘与局地沙尘共同作用，增加污染天气持续的时间。

从图中还可以发现，我国中东部地区受内陆沙尘影响有从西北到东南逐渐减弱的趋势，而入侵我国的强冷空气也正是以西北路径为主，且影响高频区域位于我国内陆沙尘源地周边，内陆裸露的地表沙尘随冷空气入侵带来的大风沿西北东南方向移动，从而使我国的中东部地区的沙尘天气的增多，而受影响的强度上也由于风力的逐步减弱以及沙尘总量的沿途逐步减少而呈现由西北向东南逐步减少的趋势。

表3-1　1982～2007年受内陆影响的中东部起尘站点平均沙尘次数各省统计

陕西	山西	河南	河北	山东	北京	天津	安徽	江苏
27	11	5.375	10.375	2.5	11	8.5	1	1

表3-1为对26年间各省受到影响的站点数据进行统计得到的站点平均沙尘次数，可见中东部各省市中，受内陆沙尘影响最严重的为陕西省，其次为河北、山西两省，河南、山东两省所受影响较小，而东南的安徽江苏两省也受到了影响，但26年间仅有一次，所受影响相对较弱。

3.2.2.2 年际变化规律

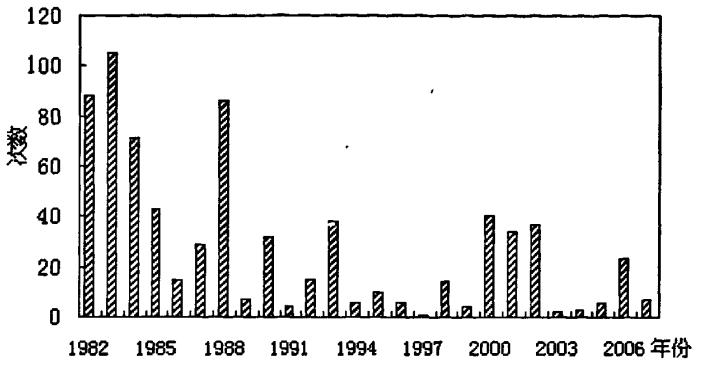


图 3-6　1982～2007 年受内陆影响的中东部起尘次数年际变化图

图 3-6 是 26 年间受内陆影响的中东部站点沙尘报告次数年际分布图，可见内陆沙尘天气对中东部各站点的影响在上世纪八十年代最多，在九十年代有所缓解，年平均值仅为每年 13 次，大大少于八十年代的每年 55.5 次，而在 2000 年后年平均值为每年 19 次，沙尘天气对中东部站点的影响又有所回升，特别是 2000 年～2002 年三年间，年平均值为每年 37 次。这种年际分布大趋势与前一节中沙尘源区年际分布一致，但是具体年份之间的对照又有所区别，特别是在 90 年代沙尘源区整体起尘总数虽比 80 年代有所下降，但从图 3-6 中所显示的 90 年代各年次数明显比其他年份少，也就是说 90 年代沙尘源区发生的沙尘对中东部地区的影响出于某种原因受到了明显的阻碍，袁薇[50]通过对 1980-2000 年沙尘天气与北半球大气环流之间的关系进行研究后发现，80 年代末期后蒙古国及我国北方地区偏北风偏弱，由此引起两个地区冷空气活动较少，使得我国北方地区风速减小，此外也导致上述地区温度相对偏高，这也是沙尘天气发生日数降低的重要原因。除此之外，植被的覆盖情况也会导致沙尘天气出现年代际的变化，而由于这种现象也在 2000-2007 年中期出现，因此对于植被的影响将在下一节中进行分析。

3.2.2.3 季节变化规律

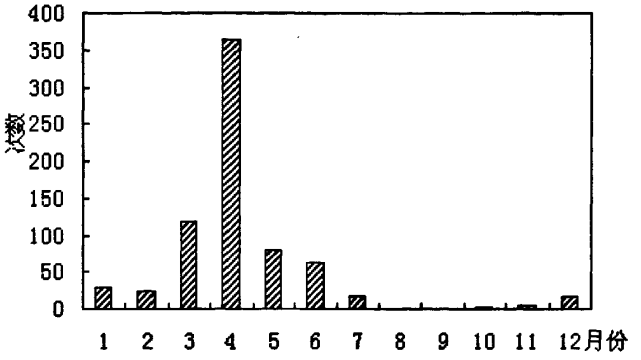


图 3-7 1982～2007 年受内陆影响的中东部起尘次数季节变化图

图 3-7 为 26 年间受内陆影响的中东部站点沙尘次数的各月总数统计图，可以发现整体上 4 月份受内陆沙尘的影响最大，占到全年的 50.28%，九月份最低，没有受影响站点的沙尘报告。四季中春季受影响最严重，占全年的 77.69%，其次为夏季 11.16 %，冬季 9.92%，秋季最少，仅占 1.24%。而对比沙尘源区的季节分布可以看出，中东部受内陆沙尘影响的季节分布更为集中，一是由于春季是沙尘暴高发期，二是由于 6-8 月份虽然沙尘源区沙尘暴发生也较多，但此时沙尘暴向中东部地区传输路径上的降水、植被条件都较好，有效地阻碍了沙尘向中东部地区的传输。

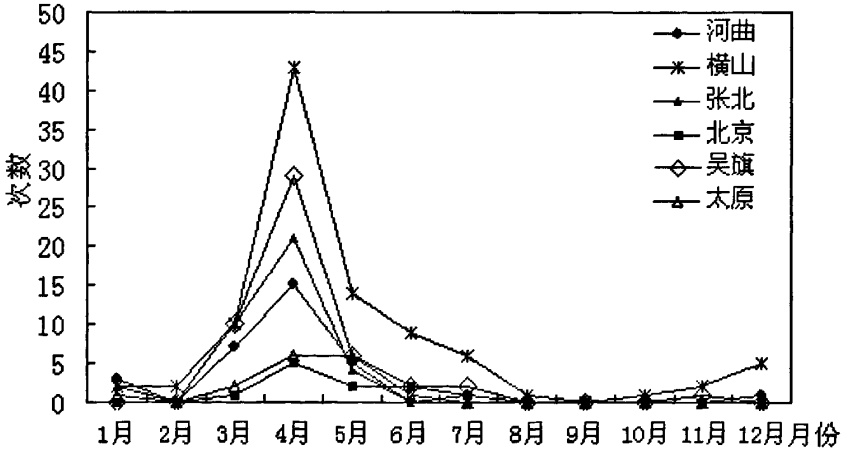


图 3-8 1982～2007 年北京等六站点受内陆影响起尘总次数季节变化图

而对于不同地理位置的站点其受内陆影响的季节规律又有所差异。在受内陆影响的中东部站点中根据其地理位置选取六个年总数大于 10 次的典型站点，分别为横山（陕

西西北部）、吴旗（陕西内陆）、河曲（山西西北部）、太原（山西中部）、张北（河北西北部）以及北京。计算1982～2007年26年间，六站受内陆影响起尘的总次数季节变化曲线如图3-8所示，可以看出中东部受内陆影响起尘基本上是春多秋少，这是因为我国春季北方地区冷空气活动频繁且多大风天气，气温回暖解冻，地表裸露易起沙，其总趋势与我国沙尘天气发生规律一致，说明中东部各站点的沙尘天气发生多来源于内陆沙尘天气的输送。而各站比较而言其受影响的季节分布又略有差异，其中横山除9月份外全年均受影响，河曲、张北受影响时间集中在冬末以及春季（1～5月），北京、吴旗、太原则集中在春夏季（3～7月）。

3.3 植被覆盖在内陆沙尘向中东部传输过程中的作用

我们利用MODIS NDVI产品计算2000-2007年沙尘传输路径区域内的植被指数距平值来反映植被覆盖变化情况，从而探寻沙尘传输过程中传输路径下垫面植被覆盖情况与中东部地区受西部沙尘影响而起尘的频率之间的关系。

所用数据采用月合成的NDVI产品，空间分辨率为1km，该产品去除了云以及卫星天顶角、方位角等传感器几何参数对于地表反射率的影响，采用四个优先级的最佳合成算法计算每月的植被指数，因此具有较好的数据质量。

由于距平值能够较好的反映出计算指标在单一年份相对于较长统计时间的变化趋势情况，因此常被用于研究气象数据的年际变化情况。根据公式（1）计算得到春季、夏季的NDVI距平值，以3-5月距平值作为当年春季植被覆盖变化情况，6-8月距平值作为夏季植被覆盖变化情况。所得距平值结果大于0时为正距平，表示植被覆盖在对应计算年季较好，而结果小于0时为负距平，代表植被覆盖在对应年季较差。

$$NDVI\ 距平值_{i,j}=(NDVI_{i,j}-NDVI_{avg,j})/NDVI_{avg,j} \quad (1)$$

其中：$NDVI_{i,j}$为第i年第j季节的NDVI均值，$NDVI_{avg,j}$为2000-2007年第j季节的NDVI均值，$NDVI\ 距平值_{i,j}$为第i年第j季节的NDVI距平值[51]。

计算后的结果如图3-9所示，从图中可以很明显的看出，在各年间的春季，2000、2001、2006年沙尘传输路径范围内NDVI距平值呈现出明显的负距平，2002、2005以及2007年对于北京影响最大的西北路径的上也有较大范围的负距平出现，而2003、2004年则呈现出明显的正距平，说明这两年春季的植被覆盖在整个传输区域内较好。与东部沙尘受西部影响而起尘得到的结果进行对比可以看出，计算得到2000-2002以及2006

四年沙尘次数距平值为正值，即这四年中东部受西部沙尘而发生沙尘天气的次数较多，其余四年距平值为负值即这四年中东部受西部起尘次数较少，而对比可以发现，植被覆盖出现负距平的年份，沙尘次数多表现为正距平，因此两者之间存在负相关特性。

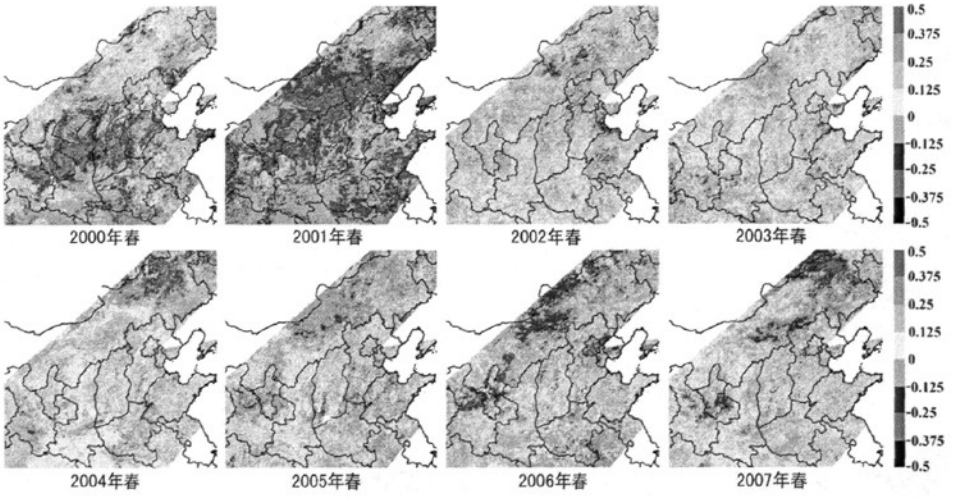


图 3-9　2000-2007 年春季 NDVI 距平值分布图

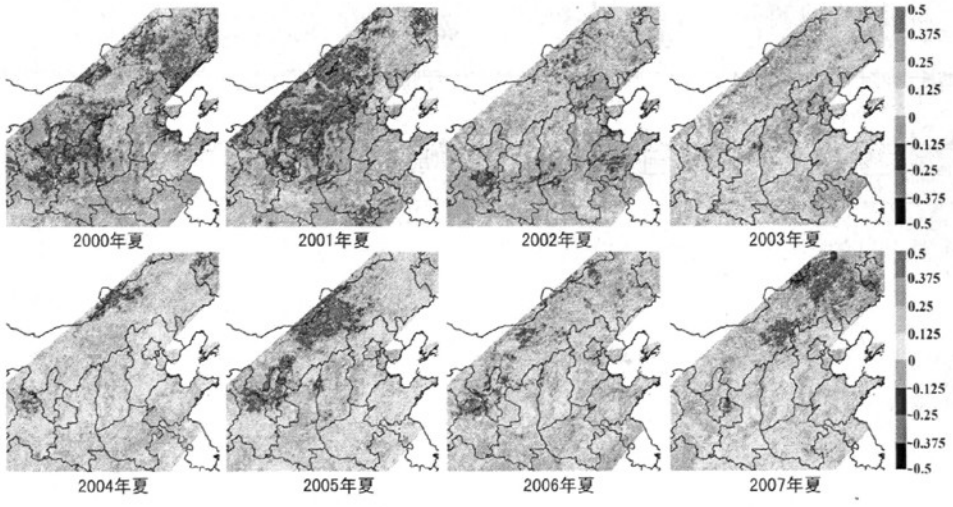


图 3-10　2000-2007 年夏季 NDVI 距平值分布图

为了研究这种负相关特性的大小以及春夏两季之间的差别，我们选取影响北京地区的三条传输路径上较有代表性的三个地区（图 3-11）：偏西路径的包头地区(a)，西北路径的朱日和附近地区(b)以及偏北路径的锡林郭勒盟地区(c)，统计三个地区的 NDVI 距平值八年间的变化，并与北京地区八年间的起尘总次数距平值进行相关性分析，结果如图 3-12 所示，可见三个区域的春季的植被覆盖情况均对北京地区当年的起尘次数有较大的

影响，其中以西北路径朱日和地区的影响最大，相关系数达到-0.712，其次为偏西路径的包头地区为-0.594，而偏北路径上的锡林郭勒盟地区也达到了-0.202，从另一方面说明了影响北京的沙尘路径中，西北路径占比重较大。可见沙尘传输路径区域范围内春季的植被覆盖情况的好坏对当年北京地区起尘次数的多少有一定的影响作用，并且不同的路径区域其影响力也有所差别。

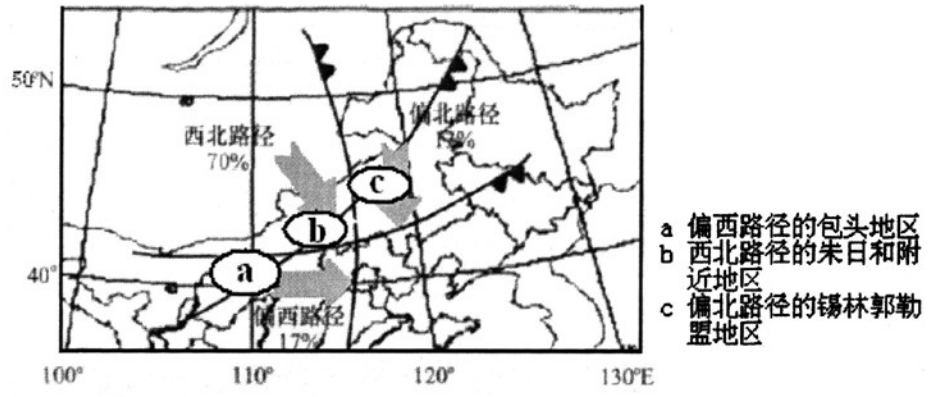


图 3-11 影响北京地区的传输路径[49]及代表地区示意图

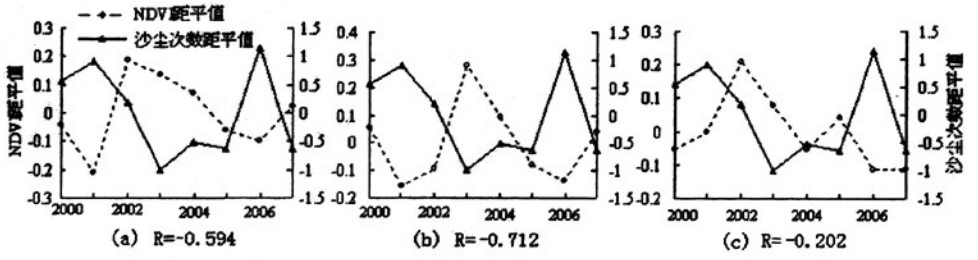


图 3-12 2000-2007 年春季传输路径区域 NDVI 距平值与北京当年起尘次数距平值对比图

（a 代表偏西路径，b 代表西北路径，c 代表偏北路径）

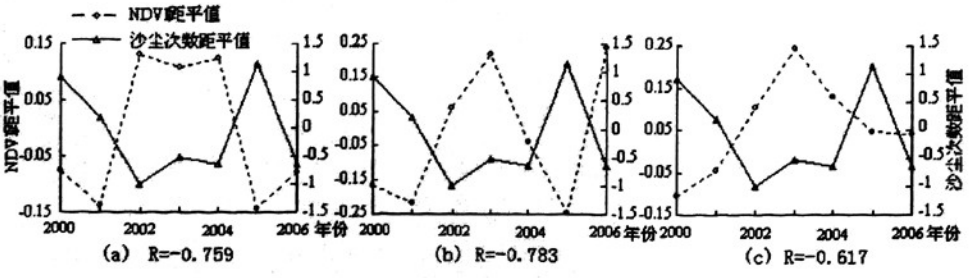


图 3-13 2000-2006 年夏季传输路径区域 NDVI 距平值与北京次年起尘次数距平值对比图

（a 代表偏西路径，b 代表西北路径，c 代表偏北路径）

而对于夏季的植被覆盖变化情况，从图 3-10 中可以看出在 2000、2001 以及 2005

年的夏季主要传输路径区域出现了大片的负距平，2004、2006、2007 年则在某些小区域范围内出现负距平，2002、2003 两年则出现明显的正距平。由于沙尘多发生在春季，而前一年夏季植被残留根系的固沙作用、残留茎秆增加地表摩擦力[52]等会减弱沙尘在次年的传输，因此我们将计算得到的各区域夏季NDVI距平值与次年北京起尘次数进行对比，结果如图 3-13 所示，可以看出，相比春季而言，夏季的 NDVI 距平值与次年北京地区沙尘次数距平值的相关性明显提高，其中西北路径朱日和地区的影响仍然为三个地区中最大，相关系数达到-0.783，其次为偏西路径的包头地区也上升为-0.759，偏北路径上的锡林郭勒盟地区也上升至-0.617。从得到的结果可以看出，在春季、夏季的植被覆盖对内陆沙尘向中东部地区传输中的负相关作用中，前一年的夏季植被覆盖情况的影响更为显著，这也与顾卫等[53]得到的结果相一致，分析其原因是由于前一年沙尘源区及传输路径区域中夏季植被的长势若较好，次年植被的残留根茎会固沙并对大风有抑制作用[52]，因此将大大降低沙尘源区的起尘以及沙尘在传输过程中的强度。

4 中东部城市颗粒物对内陆沙尘的响应分析

利用卫星遥感数据监测气溶胶具有覆盖面广、时空连续、信息获取方便快捷的特点，从而弥补了地面观测难以反映气溶胶空间具体分布和变化趋势的不足。本章将利用 EOS-MODIS 的气溶胶数据产品 MOD04 及全球气溶胶探测网 AERONET（Aerosol Robotic Net-work)提供的站点数据，结合沙尘暴数据集所记录的监测数据，选取北京、西安、青岛三个城市作为中东部地区的示范点，通过对内陆沙尘发生时三个城市的气溶胶光学厚度的变化趋势分析，研究内陆沙尘对中东部城市地区颗粒物污染的贡献。

绪论中已经提到气溶胶是指悬浮在气体中的固体和液体微粒与气体载体共同组成的多相体系。空气中含有各种悬浮的固体和液体粒子，即大气气溶胶粒子，其具有很宽的粒子尺度范围，有效直径量级由 $10^{-3}\mu m$-$10^{2}\mu m$。

气溶胶光学厚度 AOT 是指无云大气铅直气柱中气溶胶散射的消光程度，是气溶胶最重要的参数之一，可以表征大气的浑浊度，是确定气溶胶气候效应的关键因子和大气模型的重要参量。大气浑浊度随时间和地理位置的变化而变化，其分布一般夏季高于冬季，下午高于上午，并在夏季中午前后达最大值，冬季日变化较小。在北半球，从高纬度地区向赤道，大气浑浊度可增加约 1-2 倍，冬季增加的幅度最大。其变化规律对于研究大气气溶胶的分布和输送、垦荒的气候效应、大气污染及全球辐射平衡过程都有一定

的价值[54]。

因此本章利用AOT数值表示中东部城市地区大气颗粒物污染状况，从而研究内陆沙尘暴发生时所输送的沙尘粒子对中东部城市地区颗粒物污染影响的情况。

4.1 数据源介绍

4.1.1 MODIS介绍

EOS(Earth Observing System，地球观测系统)是美国国家宇航局(NASA)建立的一个对全球变化进行观测研究的综合计划。目前发射了Terra(EOS AM-1)和Aqua(EOS PM-1)两颗极地轨道环境遥感卫星，其中Terra于1999年12月18日发射成功，Aqua于2002年5月4日成功发射。两颗卫星目前均开始提供全球遥感数据，目前一天可获取4景MODIS影像。

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer，中分辨率成像光谱仪)是搭载在Terra和Aqua卫星上的一个重要传感器，为目前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器。MODIS传感器每天覆盖全球一次，具有从可见光、近红外到红外共36个光谱通道，分布在0.4μm -14μm的电磁波谱范围之内，每日一次或两次获取有关陆地、云、气溶胶、水汽、臭氧、海洋水色、浮游植物、生物地理化学等全球观测数据。MODIS传感器扫描宽度2330km，其中可见光通道1(0.62μm-0.67μm)和通道2(0.841μm-0.876μm)具有星下点250m的分辨率，可见光和近红外的通道3-7星下点分辨率为500m，其他通道星下点分辨率为1000m[56]。与NOAA/AVHRR等数据相比，MODIS具有高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率、高辐射分辨率的特点，且目前MODIS数据实行全球免费接收的政策，数据获取方便快捷。

陆地上的稠密植被、湿土壤及水体覆盖区在可见光波段反射率很低，在遥感影像中称为暗像元。Kaufman 等通过大量飞机试验发现对于植被密集的具有低反射率的地表暗像元，2.13μm近红外通道反射率与0.47μm 、0.66μm可见光通道反射率具有很好的线性相关并将这一结论成功地运用于MODIS 的气溶胶反演[55]。下面介绍NASA利用这一结论业务化反演气溶胶产品的方法。

用于MODIS气溶胶分析的光谱通道是250m分辨率的0.66μm红波段、500m分辨率的0.47μm蓝波段和2.13μm近红外波段以及1km分辨率的3.8μm中红外波段等。此

外还需要 11μm 窗区通道订正 3.8μm 通道地表辐射，以及气体吸收通道如近红外水汽通道（1.38μm）订正大气可降水总量和 9.6μm 通道订正臭氧总量。晴空条件下获取全球气溶胶光学厚度有以下几个步骤[56]：

第一步，选取暗像元，确定其地表反射率：为了获得较高的信噪比，将 250m 和 500m 的晴空资料合成为 1km 分辨率的资料，以下列具有不同精确度的 4 个优先级进行蓝光 0.47μm 以及红光 0.66μm 通道地表反射率的确定[55]：

1) 如果 $0.01 \leqslant R^*2.1 \leqslant 0.05$，则 $R^S_{0.47}=R^*_{2.1}/4, R^S_{0.66}=R^*_{2.1}/2$；

2) 如果 $R^*3.8 \leqslant 0.025$，则 $R^S_{0.47}=0.01, R^S_{0.06}=0.02$；

3) 如果 $0.01 \leqslant R^*2.1 \leqslant 0.10$，则 $R^S_{0.47}=R^*_{2.1}/4, R^S_{0.66}=R^*_{2.1}/2$；

4) 如果 $0.01 \leqslant R^*2.1 \leqslant 0.15$，则 $R^S_{0.47}=R^*_{2.1}/4, R^S_{0.66}=R^*_{2.1}/2$；

其中 R^*_i 为红外波段表观反射率，R^S_i 为对应波段的地表反射率。

第二步，初步估计光学厚度：在 10x10km 的像素点中选择出反射率最低的 10%-40% 像素点进行反演并取平均，作为 10x10km 的代表值。

第三步，确定气溶胶模式：利用前一步得到的气溶胶光学厚度确定气溶胶模式以及在红、蓝通道气溶胶单次散射路径辐射之比。这里先利用大陆型气溶胶模式计算单次散射辐射，并在后面用此值确定气溶胶模式。

第四步，重新计算光学厚度：一旦气溶胶模式确定以后，就可以订正红光和蓝光通道的光学厚度。最后通过两个通道的光学厚度进一步确定 Ångström 波长指数以及 0.55μm 处的光学厚度（Ångström 波长指数将在下一章介绍）。NASA 利用上述方法每天业务地反演了 Level2 的全球气溶胶产品 MOD04 用于全球气候变化研究，10x10km 分辨率已经基本满足全球气候研究的需要。

但如果有下列原因，AOT 数据会发生缺失[54]：有阴雨等恶劣天气时无法获得地面遥感影像；有云的区域，MODIS 气溶胶光学厚度产品也无从获取；几何校正后，裁剪时无法匹配的像元，这种情况常常发生在图像的边角处。

NASA 发布的 MODIS 的气溶胶数据产品经过验证得到其相对误差在 20%[26]，李成才等[7-8]对北京等地区 MODIS 气溶胶产品进行检验，表明产品的气溶胶光学厚度具有一定的精度，朱爱华等[37]计算得到 MODIS 气溶胶产品与地面光度计观测结果相关系数达到 0.72，超过 99%的置信度要求，在一定程度上可反映气溶胶污染物较大范围的空间分布，对分析气溶胶来源和区域性输送等问题提供了有效的手段。

4.1.2 AERONET 简介

一般地面观测难以反映污染物空间的具体分布和变化趋向的不足，高分辨率的卫星遥感弥补了这一不足，因此利用遥感反演气溶胶光学厚度的手段为大尺度空间连续监测城市大气污染提供了可能性。但对于光学厚度反演过程中由于地表反照率和气溶胶模型带来的误差难以估计，卫星遥感需要同时有地面太阳光度计观测结果进行对比。为此NASA在全球几个洲的大陆部分和少数海岛海岸建立了一个包含大约100个[57]地面太阳光度计的全球自动观测网 AERONET(Aerosol Robotic Net-work)对全球气溶胶进行监测，并为 MODIS 气溶胶遥感结果提供地面多通道遥感的对比资料[1]。整个网络统一采用法国 CIMEL 公司 20 世纪 90 年代发明生产的多波段太阳直射辐射计，实现了仪器、校验和处理过程的标准化。因此，AERONET 具有较高的精度，广泛应用于各种方法所获得的气溶胶光学特性的验证方面。AERONET 所得到的气溶胶光学厚度根据精度分为三种：实时观测结果 level 1.0、去云影响的修正结果 level 1.5 以及前后校正的结果 level 2.0。本文采用的是AERONET经过严格去云和验证后有质量保证的level 2.0的逐日产品资料数据。

4.2 2000-2007 年我国沙尘天气概况

根据“中国沙尘暴网”以及“中国强沙尘暴序列及其支撑数据集”中沙尘监测站点的统计数据分析，2000～2007 年间我国共经历了 131 次沙尘天气，其中强沙尘暴共 19 次，各年间沙尘天气分布如图 4-1。从图中发现，7 年间我国沙尘暴总数有先减少但近几年又有所增加的趋势，但强沙尘暴发生频率明显降低。在对各年间沙尘天气发生频率较高的 3～5 月份的沙尘数据统计分析（图 4-2）发现，各年间沙尘暴发生的时间差别较大，但总体 4 月份为发生次数最多的月份。

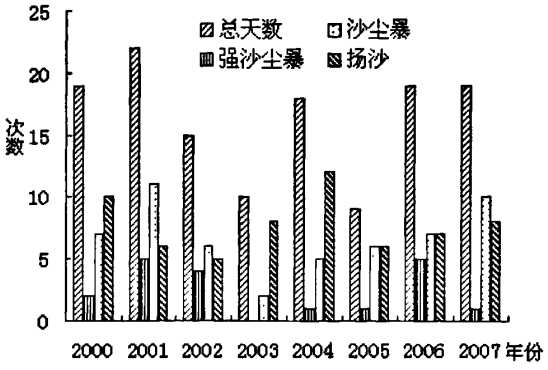


图 4-1 2000-2007 年我国各类沙尘过程次数对比图

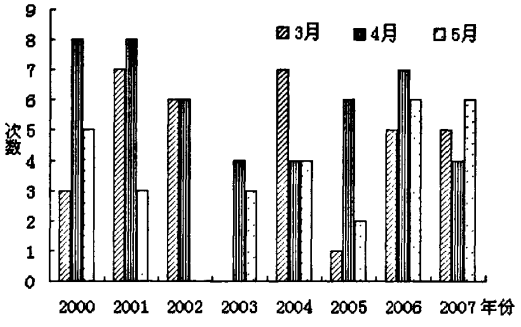


图 4-2 2000-2007 年春季各月我国沙尘过程次数对比图

4.3 中东部城市气溶胶光学厚度对内陆沙尘的响应

对沙尘天气发生最强烈的 2001 年数据进行对比分析，发现如果仅以沙尘能见度与中东部城市各数据进行比对相关指数很小，以北京为例，沙尘能见度与北京 AERONET 相关性仅 0.405，置信度水平大于 95%，而加入单日站点、持续时间信息后得到的沙尘总指数后相关性达到 0.610，置信度水平大于 99%，相关性明显提高，说明沙尘的强度、范围以及持续时间对内陆沙尘传输到中东部地区有较大的推动作用。提取 2001 年沙尘天气发生日期的数据对比后相关性提高为 0.707，置信度水平大于 99%，相关性较好，说明北京气溶胶光学厚度的变化与内陆沙尘的输送有较大的相关性。

4.3.1 北京市光学厚度对内陆沙尘的响应

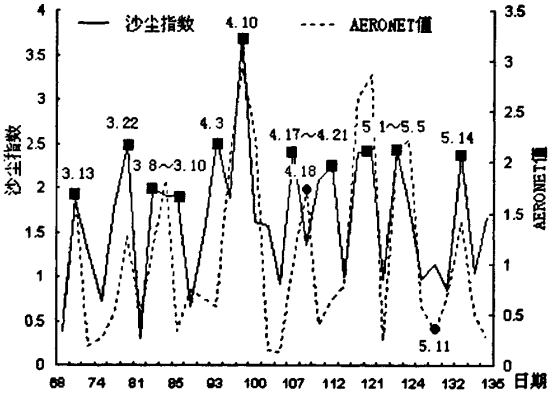


图 4-3 沙尘指数与北京市 AERONET 气溶胶数据对比图

图 4-3 为计算后的沙尘总指数与北京 AERONET 数据对比图，时间为 3 月 9 日～5 月 15 日，有效天数为 34 天，从图中可以看出两者有较好的相关性，起伏趋势较为一致，其相关系数为 0.610，置信度水平大于 99%。方点表示出现的大值拐点出现的时间，经过与 2001 年全国内陆沙尘暴记录对比发现，这些点出现的日期均与沙尘暴发生日期相对应，可以看出北京的 AERONET 值增大与内陆沙尘暴发生有相关。圆点表示走向相反的两日，其中 4 月 18 日沙尘指数走低而 AERONET 走高的原因为 4 月 17 日沙尘区沙尘指数比较高，但是 17 日起尘的站点与北京地理位置相隔较远，传输中有时间的延迟现象。而 5 月 11 日由于起尘区为扬沙天气，沙尘影响力较小，在远距离传输过程已大幅度减弱，难以造成北京地区空气质量的大幅下降。而从对北京影响较大的沙尘日期所对应的沙尘起尘区域对比发现，发生在内蒙古中内陆的沙尘对北京市 AOT 的增加有明显的促进作用，因此可以推断北京市主要的外来沙尘源区为内蒙古中内陆地区。

4.3.2 西安市光学厚度对内陆沙尘的响应

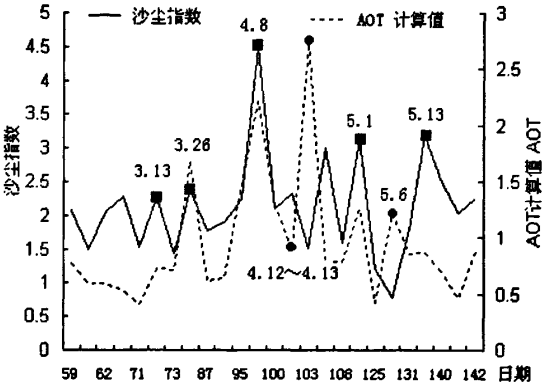


图 4-4 沙尘指数与西安市 MODIS AOT 计算值对比图

图 4-4 为计算后的沙尘总指数与利用 EOS-MODIS 中的气溶胶数据产品计算得到的西安市 AOT 数值对比图，时间为 2 月 28 日～5 月 22 日，有效天数为 25 天，从图中可以看出两者整体相关性不高，仅为 0.317，置信度小于 95%，相关性不明显，但在某些天数有较好的相关性，提取这些日期的数据进行对比，得到其相关系数提高为 0.488，置信度大于 95%，相关性较好。图 3 中方点表示大值拐点出现的日期，经与 2001 年全国内陆沙尘暴记录对比发现，这些点出现的日期均与沙尘暴发生日期相对应，特别是 3 月 13 日～3 月 15 日以及 3 月 26 日沙尘数据表明起尘区仅为扬沙天气但却引起了西安市气溶胶数据的提升，对照西安市的空气污染指数，两日都达到了轻度污染。图中圆点表示走向相反的三日，其原因均是由于沙尘传输过程中的延迟，4 月 13 日的走高是由于前一日 4 月 12 日在南疆盆地以及甘肃河西地区发生的沙尘暴引起了第二日西安市 AOT 的提高， 5 月 6 日则是由于 5 月 1 日～5 月 4 日在南疆盆地发生了两次沙尘暴。从对西安影响较大的沙尘日期所对应的沙尘起尘区域对比发现，发生在南疆盆地、甘肃以及宁夏的沙尘对西安市 AOT 的增加有明显的促进作用，而发生在内蒙中部的沙尘对其影响较小，因此可以推断西安市主要的外来沙尘源区为南疆以及甘肃、宁夏等地区。

此外从对北京、西安两市的分析中可以看出，由于我国目前的沙尘源区为南疆盆地、内蒙古中内陆以及甘肃河西地区，且沙尘天气过程以偏西和西北路径为主，起尘区纬度较高，因此位于同一纬度区域的北京地区（39N° 相关性 0.610，置信度大于 99%）受沙尘天气的影响仍然高于距离内陆沙尘源区较近但纬度较低的西安地区（34 N° 相关性 0.488，置信度大于 95%）。而图 4-5 显示的是同样与沙尘源区位于同一纬度范围的河北

省香河县（39 N° 相关性 0.730，置信度大于 99%）以及陕西省榆林市（38 N° 相关性 0.585，置信度大于 95%）的沙尘与 AERONET 数据对比图，可以看出两者有较高的相关性，因此可以看出我国沙尘天气对于纬度较高的北部地区的影响较为严重，而对处于内陆地区但纬度较低的北部城市影响稍弱。

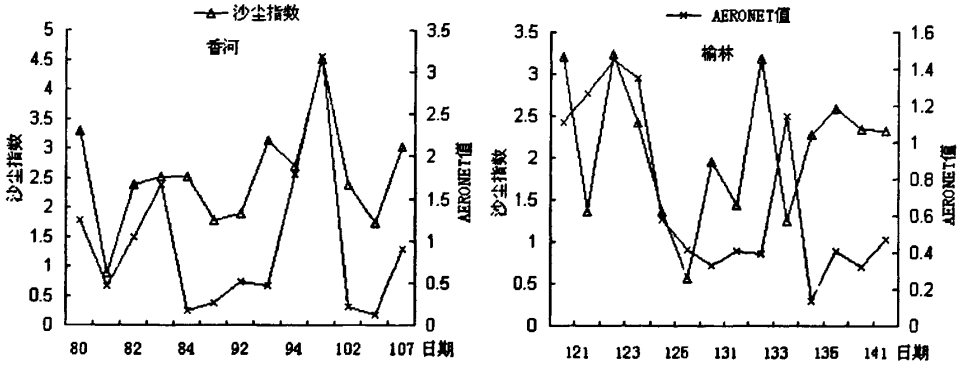


图 4-5　沙尘指数与香河、榆林地区 AERONET 气溶胶数据对比图

4.3.3 青岛市光学厚度对内陆沙尘的响应

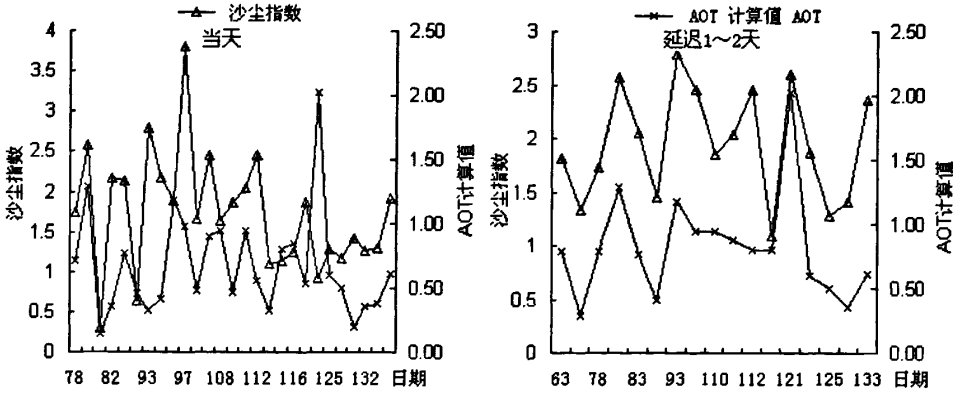


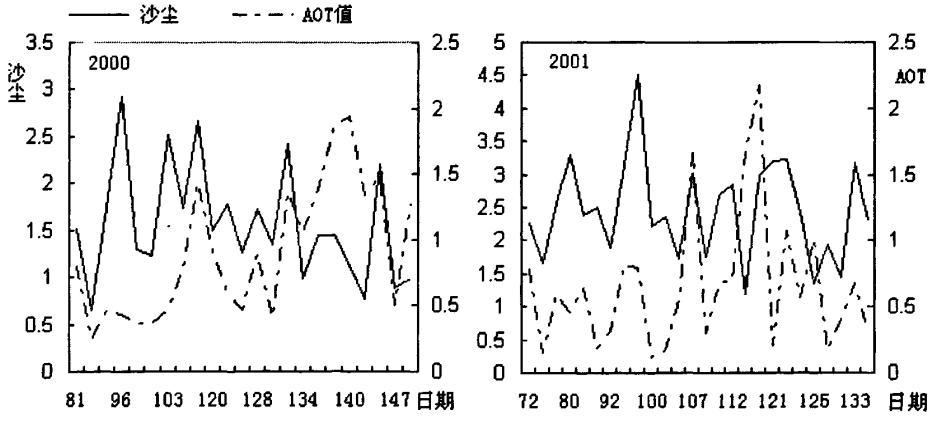
图 4-6　沙尘指数与青岛市 MODIS AOT 计算值对比图

图 4-6 显示的为沙尘总指数与 EOS-MODIS 中的气溶胶数据产品计算得到的青岛市 AOT 当天数值以及延迟 1～2 天数值对比图，时间为 3 月 2 日～5 月 6 日，有效数据天数当天为 27 日，为了更好显示沙尘数据的影响力，延迟数据仅选择沙尘天气较强烈的沙尘暴以及强沙尘暴日期数据，因此其有效天数为 17 天，从图中可以看出，由于青岛市距离沙尘源区较远且靠海，空气湿度比较大，因此沙尘天气对其影响力较小，相关性

仅为 0.205，置信度小于 95%，两者无明显相关性。但是从延迟对比图中仍然可以看出，当沙尘天气较强烈时，仍然可以远距离传输到青岛市造成市内气溶胶厚度的升高，两者相关指数为 0.691，置信度大于 99%，比前者有显著提高。对比青岛市 API 数据可以发现，当内陆有强烈沙尘天气发生时，青岛市的空气污染指数会随之上升，对比青岛市 3～5 月份 API 数据与沙尘数据发现，其在 3 级（轻微污染）以上的天数达 21 日，出现日期也均为沙尘暴发日期，特别是 3 月 22 日青岛市空气污染指数达 302，为重度污染，而 3 月 21 日～3 月 22 日在内蒙古中东部以及偏南地区发生了强沙尘暴，影响范围波及宁夏、陕西、山西、河北、京津唐地区以及山东中东部。可见当内陆特别是内蒙古地区有强度较大的沙尘天气发生时，仍可以远距离传输到青岛等沿海城市导致城市空气质量的下降。

4.3.4 北京市多年沙尘数据与 AOT 对比

以北京市为例来说明内陆沙尘对中东部城市颗粒物光学厚度多年间的影响趋势，如图 4-7 所示，为 2000 年到 2007 年沙尘天气发生时段内的沙尘指数与根据 EOS-MODIS 中的气溶胶数据产品计算得到的北京市 AOT 对比图，选取时间为沙尘天气集中的 3～5 月。



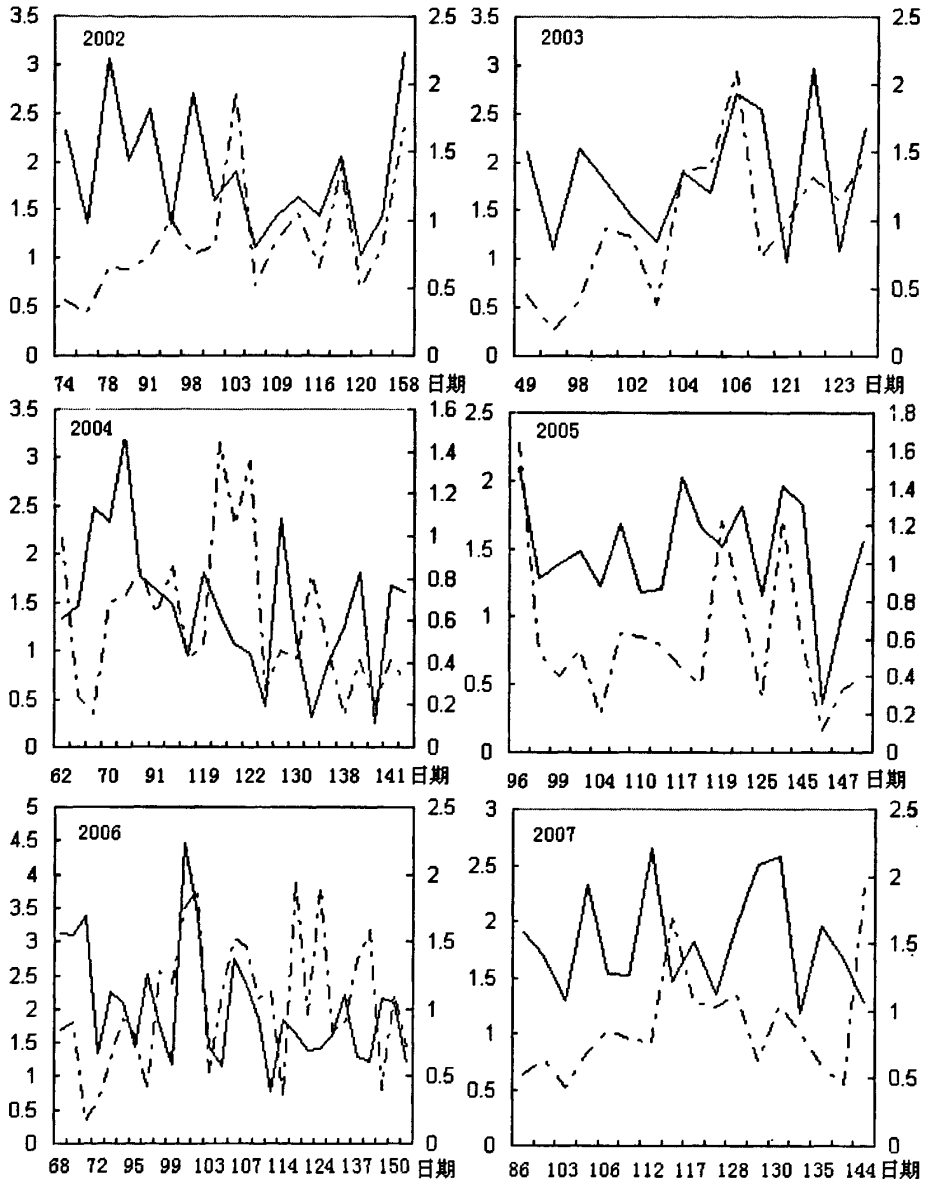


图 4-7 2000～2007 年 3～5 月沙尘指数与北京市 MODIS AOT 计算值对比图

从图中可以发现八年间北京市 AOT 的变化在某些时间内与内陆沙尘指数值的变化趋势是一致的，即内陆沙尘的发生对北京市 AOT 产生影响。而从时间对应情况上看有，北京 AOT 高值点的出现以 4 月前后最为明显，而 4 月份正是这八年间沙尘天气爆发最为频繁的时期，表明外来沙尘的输送可以引起北京地区气溶胶光学厚度的显著升高。而在年际变化上，北京 AOT 大值出现的概率呈现先下降后增加的趋势，而这与八年间沙尘天气发生的概率一致。而从各年间的差异看，2003、2005 以及 2007 三年无论从对应持

续时间长度以及强度看较其他年份弱。北京地区2000～2002年沙尘天气总数分别为13天、16天、10天，而2003年为0天，没有明显的沙尘天气，2004年为4天，2005年为3天，2006年猛增至18天，是2000年后沙尘天气最为严重的一年，2007年回落为3日。出现这种年际间差别的原因，一是与全国沙尘天气总体变化趋势有关，二是与北京当地的气候条件密不可分。查看北京对应气象资料显示，自2002年冬季至2004年春季北京地区降水较常年增多，特别是2003年降水比常年多近一倍，丰富的降水使北京地区土地湿润，地面没有形成干土层或浮土层，且冬春季冷空气活动明显减少、大风日数也偏少，故全年没有明显的沙尘天气，进而也使得2004北京在全国沙尘天气数量又有所回升的状况下也没有出现较多的沙尘天气，2007年同样是由于降水比常年偏多使得北京受到的内陆沙尘天气的影响相对减弱。

因此从历年数据分析可以看出北京地区春季污染物的一个重要来源为内陆沙尘的外来输送，但是天气现象如降水的增多、冷空气的减少以及大风天气的减少会大大降低外来沙尘对中东部城市的侵袭。

5 中东部城市空气污染指数API对内陆沙尘的响应分析

5.1 数据源介绍

5.1.1 API

空气污染指数（Air Pollution Index，简称API）是一种反映和评价空气质量的方法，就是将常规监测的几种空气污染物的浓度简化成为单一的概念性数值形式并分级表征空气质量状况与空气污染程度，其结果简明直观，使用方便，适用于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势[2]。

空气污染指数的确定原则：空气质量的好坏取决于各种污染物中危害最大的污染物的污染程度。空气污染指数是根据环境空气质量标准和各项污染物对人体健康和生态环境的影响来确定污染指数的分级及相应的污染物浓度限值。具体的计算方法如下：

1) 计算监测区域内各种污染物浓度C

设统计区域内分布有多个监测点，则该区域内各种污染物浓度的计算方法为

[2] 中华人民共和国环境保护部网站

①求某污染物每一监测点的日均值：$C_{点日均值}=\sum_{i=1}^{n}Ci \Big/ n$

其中 Ci 为逐点逐时污染物浓度，n 为测点日测次数

②求某污染物污染浓度的全市日均值：$C_{市日均值}=\sum_{j=1}^{l}C_{点日均值j} \Big/ 1$

其中 l 为全市区域内的监测点总数

所得结果即为市区统计区域内每种污染物的日均污染浓度 $C_{市日均值}=C_x$

2) 根据 API 分级标准计算各种污染物的污染分指数

表 5-1 空气污染指数对应的污染物浓度限值

污染指数	污染物浓度（毫克/立方米）				
API	SO_2（日均值）	NO_2（日均值）	PM10（日均值）	CO（小时均值）	O_3（小时均值）
50	0.05	0.08	0.05	5	0.12
100	0.15	0.12	0.15	10	0.2
200	0.8	0.28	0.35	60	0.4
300	1.6	0.565	0.42	90	0.8
400	2.1	0.75	0.5	120	1
500	2.62	0.94	0.6	150	1.2

设 I_x 为第 x 种污染物的污染分指数，C_x 为该污染物的浓度，则当该种污染物浓度 $C_{x,y+1}\leq C_x\leq C_{x,y-1}$ 时，其污染分指数

$Ix=[(C_x-C_{x,y-1})/(C_{x,y+1}-C_{x,y-1})]*(I_{x,y+1}-I_{x,y-1})+I_{x,y-1}$

其中 $C_{x,y+1}$ 与 $C_{x,y-1}$ 分别为表 5-1 中最贴近 C_x 的两个浓度值，$C_{x,y+1}$ 为大于 C_x 的限值，$C_{x,y-1}$ 为小于 C_x 的限值。

$I_{x,y+1}$ 与 $I_{x,y-1}$ 分别为表中中最贴近 I_x 值的两个污染分指数，$I_{x,y+1}$ 为大于 I_x 的值，$I_{x,y-1}$ 小为小于 I_x 的值。

3) 确定主要污染物：各种污染物的污染分指数计算完以后，选取最大者为该区域或城市空气污染指数 API，则该种污染物即为区域内当日的首要污染物。

$API=\max(I_1,I_2,\ldots,I_n)$

例如：假定某地区的 PM_{10} 日均值为 0.205 毫克/立方米，SO_2 日均值为 0.105 毫克/立方米，NO_2 日均值为 0.080 毫克/立方米，则其污染指数的计算如下：按照表 5-1，PM_{10} 实测浓度 Cx=0.205 毫克/立方米介于 0.150 毫克/立方米和 0.350 毫克/立方米之间，按照此浓度范围内污染指数与污染物的线性关系进行计算，即此处浓度限值 $C_{x,y-1}$ =0.150 毫克/立方米，$C_{x,y+1}$ =0.350 毫克/立方米，而相应的分指数值 $I_{x,y-1}$ =100，$I_{x,y+1}$ =200，则

PM_{10}的污染分指数为：

I_x＝（(0.205－0.150)／(0.350－0.150)）×(200-100)+100＝128

即PM_{10}的分指数 I=1278；其它污染物的分指数分别为 I=76（SO_2），I=50（NO_2）。取污染指数最大者报告该地区的空气污染指数：

API =max（128,76,50）=128

因此区域内该日的首要污染物为可吸入颗粒物PM_{10}。

从 API 的计算方法可以看出，它是对一个区域内污染物浓度分段线性平均表达，能够直观的显示区域当天主要污染物的平均污染程度。目前我国所用的空气指数的分级标准是：(1) API 50 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值一级标准；(2)API 100 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值二级标准；(3)API 200 点对应的污染物浓度为国家空气质量日均值三级标准；(4)API 更高值段的分级对应于各种污染物对人体健康产生不同影响时的浓度限值，API 500 点对应于对人体产生严重危害时各项污染物的浓度。

表 5-2 空气污染指数范围及其相应的空气质量类别

空气污染指数 API	空气质量级别	空气质量状况	对健康的影响	建议采取的措施
0-50	I	优	可正常活动	
51-100	II	良		
101-150	III1	轻微污染	长期接触易感人群症状有轻度加剧，健康人群出现刺激症状	心脏病和呼吸系统疾病患者应减少体力消耗和户外活动
151-200	III2	轻度污染		
200-250	IV1	中度污染	一定时间接触，心脏病和肺病患者症状显著加剧，运动耐受力降低，健康人群中普遍出现症状	老年人和心脏病、肺病患者应在停留在室内，并减少体力活动
250-300	IV2	中度重污染		
300 以上	V	重度污染	健康人运动耐受力降低，有明显强烈症状，提前出现某些疾病	老年人和病人应当留在室内，避免体力消耗，一般人群应避免户外活动

注：中华人民共和国环境保护部 每日空气质量报告背景资料

自 2000 年开始，国家环境保护总局要求中国环境监测总站组织 47 个环境保护重点城市开展城市环境空气质量日报工作。监测项目为SO_2、NO_2和PM_{10}，发布形式为空气污染物指数、首要空气污染物、空气质量级别和空气质量状况。2000 年 6 月 5 日，实现了 42 个环境保护重点城市环境空气质量日报，并向社会发布。到目前为止，全国已有 180 个地级以上城市（含 109 个大气污染防治重点城市）实现了环境空气质量日报，并通过地方电视台、电台、报纸或互网站等媒体向社会发布。

5.1.2 Ångström

Ångström 是用来表征颗粒物粒径大小的一个参数。Ångström 给出了气溶胶光学厚度与波长之间的关系式，具体见公式(1)：

$$\tau_{aer}(\lambda, z) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

公式中 τ_{aer} 为气溶胶光学厚度，λ 是波长，z 是对流层顶高度，β 是 Ångström 浑浊度因子，它与测站上空垂直气柱内的气溶胶质粒总数有关，可以代表大气中气溶胶的相对浓度，α 即为 Ångström 波长指数，表征气溶胶质粒的平均半径[58]。将方程（1）代入不同的波长且相除后取对数，即可计算出 Ångström 波长指数 α，具体见方程（2）：

$$\alpha = -\frac{\ln[\tau_{aer}(\lambda_2)] - \ln[\tau_{aer}(\lambda_1)]}{\ln\lambda_2 - \ln\lambda 1} \quad (2)$$

α 范围一般为 $0<\alpha<2$, 均值约为 1.3[59]。较小的 α 代表较大粒径的气溶胶粒子为主控粒子，而较大的 α 代表较小粒径的粒子为主控粒子。例如当大粒径的沙尘粒子为主控粒子时，α 值接近于 0，而当较小粒径的烟雾粒子为主控粒子时，α 值接近于 2。一般城市-工业气溶胶为 $1.1\leq\alpha\leq2.4$，生物质燃烧气溶胶为 $1.2\leq\alpha\leq2.3$，海盐气溶胶为 $1.1\leq\alpha\leq1.8$，而沙尘气溶胶为 $-1\leq\alpha\leq0.5$[58]。我国研究人员也研究的出，对于陆地上空的气溶胶, Ångström 波长指数 $0.8\leq\alpha\leq1.5$[60]。

5.2 我国城市空气污染现状分析

5.2.1 我国城市颗粒物污染现状分析

可吸入颗粒物 PM_{10} 是指粒径在 10 微米以下的颗粒物，是目前影响我国城市空气质量的首要污染物，绪论中已经介绍了其危害。国家环保总局在 2001-2007 年发布的中国环境状况公报中报告的城市颗粒物污染污染情况（图 5-1）可以发现，虽然 7 年内我国城市颗粒物污染有明显改善，但部分地区颗粒物污染仍然很严重。因此尽管由于各方面环保力度的加强，我国城市空气质量恶化的趋势得到一定的遏制，但是不能否认的是空气污染状况仍然很严重，尤其是那些人口较多的特大城市污染较为严重。北方城市颗粒物污染总体上重于南方城市，颗粒物污染较重的城市主要分布在华北、西北、东北和中原及四川东部、重庆市等。颗粒污染物一直是影响我国城市空气质量的主要污染物，且总体上北方城市颗粒物污染明显重于南方城市。

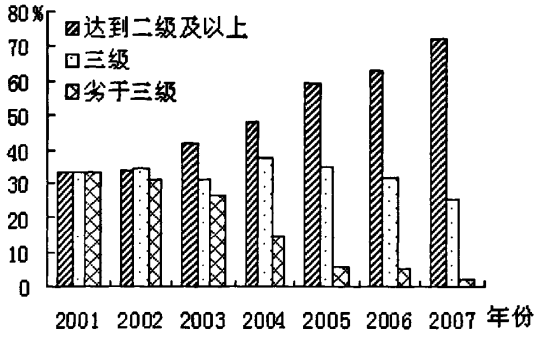


图 5-1 2001-2007 年颗粒物污染浓度分级城市比例

城市的 PM_{10} 来源主要有人为源和自然源两方面，其中人为源主要为工业、机动车、燃煤、人类活动等的排放，而自然源则来源于裸露土地以及沙尘物质的输送等。近几年我国沙尘天气的频繁爆发对城市大气中可吸入颗粒物浓度的变化有着重要的影响，加重了相关地区的颗粒物污染程度。

5.2.2 2001-2007 年示范区城市 API 变化分析

由于 API 数据于 2000 年 6 月 5 日向全国发布，而沙尘主要在春季爆发,因此本章数据采用 2001-2007 年每日 API 数据，数据由中国环保部免费发布。统计北京、西安、青岛三城市 7 年数据可以发现（表 5-3），三城市的主要大气污染物为 PM_{10}，且对应沙尘天气爆发频繁的春季 API 数据其 PM_{10} 所占比重更高，说明春季是出现 PM_{10} 污染的主要季节。其中三城市中 PM_{10} 污染最严重的是西安市，PM_{10} 在大气中所占比例年均在 95% 以上，其次为北京、青岛，春季 PM_{10} 的所占比例同样为西安>北京>青岛。

表 5-3 2001-2007 年北京、西安、青岛大气中主要污染物为 PM_{10} 的发生频数（%）

城市 / PM_{10} 频数	北京		西安		青岛	
	春季	全年	春季	全年	春季	全年
2001	99	84	100	100	90	84
2002	99	84	99	99	80	84
2003	91	81	99	97	92	81
2004	93	83	100	98	91	81
2005	88	81	100	99	88	80
2006	97	91	99	95	88	81
2007	91	89	97	96	95	81

表 5-4 为 7 年间春季对应的内陆沙尘天气发生日期时三个城市的对应主要污染物

为 PM_{10} 时的 API 均值，以及没有内陆发生沙尘天气时对应的 API 均值，对比可以发现，当内陆有沙尘天气爆发时，三个城市对应的 API 均值都有明显的上升，其中北京 API 平均上升 52.5%，青岛上升 27.4%，西安上升 25.2%。若我们把对应的 API 当做 PM_{10} 的浓度的表示，则说明沙尘天气多发的时间段春季，日均 PM_{10} 浓度也处于高值阶段，当沙尘天气发生时，当日的 PM_{10} 浓度高于非沙尘天气时 PM_{10} 的均值，这充分说明沙尘天气与 PM_{10} 污染事件是密切相关的。

表 5-4 2001-2007 年北京、西安、青岛春季对应内陆沙尘天气发生日期时对应的主要污染物为 PM_{10} 时 API 均值

城市 / API 指数	北京		西安		青岛	
	无沙尘	有沙尘	无沙尘	有沙尘	无沙尘	有沙尘
2001	100.5	185.15	99.8	129.54	77.53	105.28
2002	96.23	190.4	87.73	151.77	75.47	139.4
2003	103.02	115.58	86.73	102.37	77.69	80.56
2004	95.32	136.41	93.04	111.31	74.2	84.22
2005	94.89	158.42	80.82	88.56	82.12	95.38
2006	123.64	179.28	86.44	92.83	83.68	94.62
2007	98.24	120.14	87.1	102.05	81.15	103.57

然而对比表 5-3 与表 5-4 可以发现，虽然西安市的大气污染物中 PM_{10} 所占的比重最大，但对应沙尘发生时期其受影响的幅度却同比最小，分析其原因有：

1) 北京市的大气污染物虽然以 PM_{10} 为主，但是其 SO_2 和 NO_2 污染也很严重，而西安市此两种污染物同比较低，青岛市由于靠海空气质量较好，因此在三城市中其各种污染物所占比例均为最小。因此对比 PM_{10} 在三城市中所占比例仅为说明城市主要污染物为 PM_{10}，并非指西安的空气污染最严重，而只能说明 PM_{10} 在西安市的大气污染物中占绝对优势。

2) 前面已经分析过影响西安的沙尘源区为南疆以及甘肃、宁夏等地区，而影响北京、青岛的沙尘源区为内蒙古中内陆地区，前者由于距离中内陆较远，传输到中内陆城市时其影响力已经大大减弱，而影响北京青岛的沙尘源地距离中东部城市区较近，影响较严重，且青岛市在没有较大污染情况发生时其天气状况较好，当有沙尘天气发生时其受影响也较为明显，因此反映到数据上其 API 上升也比西安市大。

5.3 示范区城市 API 对内陆沙尘的响应分析

虽然内陆沙尘对三个城市的 API 增加有明显贡献，但是由于城市大气中 PM_{10} 的组成较复杂，沙尘仅是其影响因素之一，城市中的工业排等人为源的影响也是城市 API 上升的重要原因。而由于沙尘粒子与其他工业排放的颗粒物粒子粒径大小有所不同，因此分析城市 API 的增加是否为沙尘粒子的影响还需要对主控粒子的粒径大小进行分析。

本章利用 Ångström 波长指数 α 标识污染物粒径大小来进行分析，从而筛选出对应城市污染物主要为沙尘粒子的日期，并与内陆沙尘天气进行对比，从而分析内陆沙尘对各城市 API 的影响。

5.3.1 Ångström 波长指数 α 与 AOT 和 API 的相关性分析

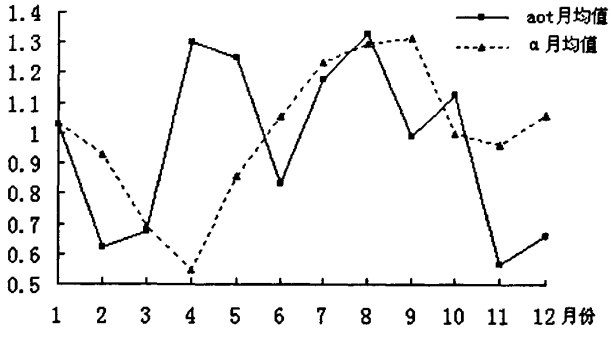


图 5-2 北京市 2006 年 Ångström 波长指数 α 与 AOT 月均值对比图

从上图可以看出，在春季 α 值较小，对应 AOT 与 α 明显呈负相关关系，而在夏季呈正相关关系，秋冬季 α 值也均较高，造成这种现象的原因是由于春季 AOT 受悬浮在大气中的大粒径沙尘气溶胶的影响较大，特别是 4 月份 AOT 均值达到 1.302 而对应 α 仅为 0.545，而在夏秋季节，AOT 受粒径较小的人为气溶胶的影响较大。

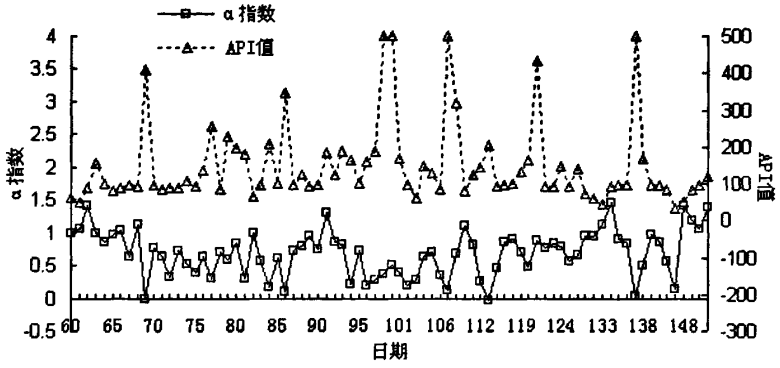


图 5-3 北京市 2006 年春季 Ångström 波长指数 α 与 API 逐日对比图

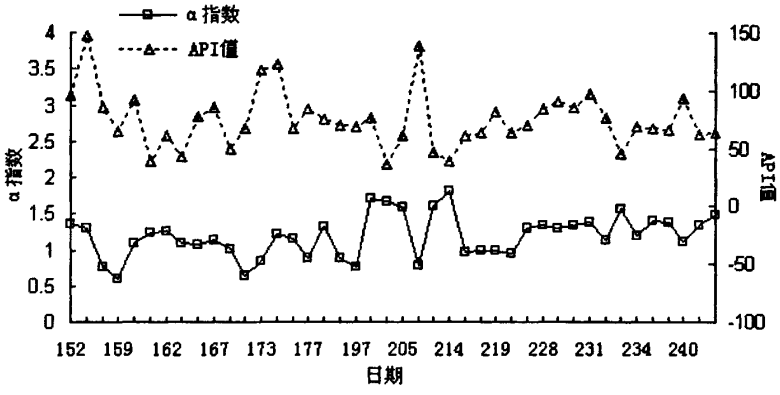


图 5-4 北京市 2006 年夏季 Ångström 波长指数 α 与 API 逐日对比图

而对北京 06 年春季的 α 与 API 进行对比发现(图 5-3)两者之间存在明显的负相关，相关系数达到-0.453，通过 99%的置信度检验，且 α 的均值为 0.69，相对较小。而夏季 α 与 API 进行对比（图 5-4）发现两者之间则这种负相关性降低为-0.282，没有通过置信度的检验，α 的均值也较大为 1.19。这说明春季大气中颗粒物粒子中大粒径粒子较多，且大粒径粒子是造成春季 API 变化的重要原因。而夏季大气中的颗粒物粒子粒径则相对较小，且粒子的组分与 API 的变化没有明显的相关性。因此可以说北京春季 API 的升高与大粒径颗粒物的增多密切相关的。

5.3.2 一次典型过程分析

2001 年 3 月 18-25 日期间我国西北地区连续发生了三次沙尘暴，此次沙尘天气过程是否对中东部地区产生了影响，本节将利用三个示范城市的 Ångström 波长指数 α 与 API 的相应变化来进行分析。

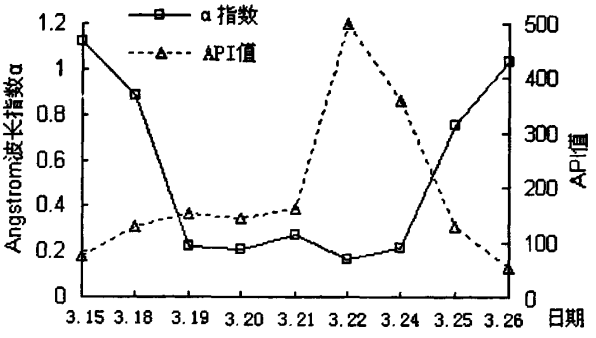


图 5-5 2001 年 3 月 15-26 日北京市 Ångström 波长指数 α 值与 API 对比图

图 5-5 为对应时间段内北京 α 值与 API 对比图，其中 API 主要污染物均为可吸入颗粒物（由于数据缺失某些日期没有对应的数值），两者在图中有明显的负相关性。从图中可以看出沙尘天气发生前的 15、18 日北京地区 α 值较高（1.12、0.89）而对应 API 也较低，说明此时北京的空气质量较好且以小粒径颗粒物为主，而随着沙尘天气的发生，19 日北京地区 α 值陡然下降至 0.23，而在这之后的 5 天之内 α 值均较低，对应的 API 也持续升高，至 3.22 日 α 值降至最低值 0.16 同时 API 也达到最高值 500，说明此时空气中大粒径颗粒物所占比重非常大，导致空气污染达到重度污染状态。而随着沙尘天气的退去，25 日时 α 值明显上升，API 也会落至 128，而 26 日时 α 值达到 1.04，说明空气中大粒径颗粒物所占比重已较同时 API 也降至 54。

从图中看出北京地区在 19-24 日期间的空气重污染现象是由于大气中大粒径颗粒物的陡然增加引起的，而这些大粒径颗粒物的增加正是由于西部沙尘暴所携带的大粒径粒子远距离输送至北京所引起的。

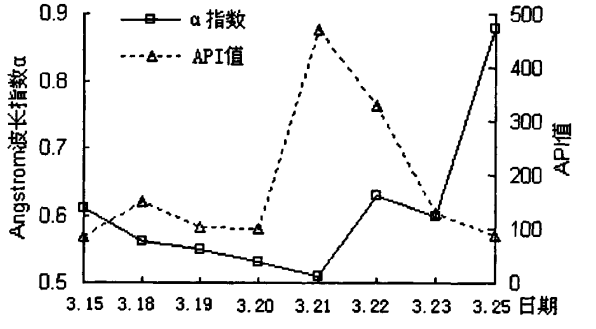


图 5-6 2001 年 3 月 15-25 日青岛市 Ångström 波长指数 α 值与 API 对比图

而对比青岛该段时期内 α 值与 API 也能发现两者具有明显的负相关特性，特别是在 3.21 日 α 值达到最低值而对应 API 则升至 470，说明该日空气的严重污染是由于大气中

大粒径颗粒物的增多而导致的，而随着α值的增高，大气中大粒径颗粒物逐渐减少，API也随之降低。由于青岛地区常年空气质量较好，因此可以断定大粒径颗粒物的增多是与该时期内内陆沙尘暴的远距离输送密不可分的。

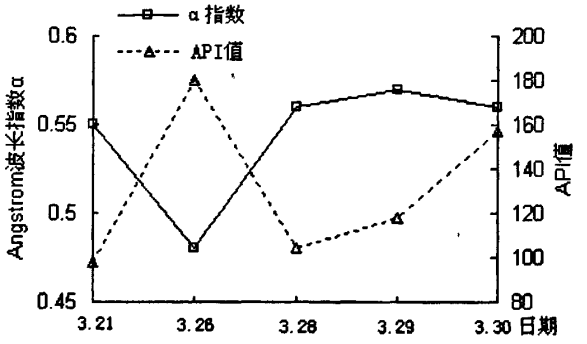


图5-7　2001年3月21-30日西安市Ångström波长指数α值与API对比图

而由于西安地区遥感数据的缺失因此仅提取了五天的数据，但是仍然可以看出α值与API在该段时期内明显的负相关特性，在3.26日α值降到最低同时API升值最高，说明API的升高是由于空气中大粒径颗粒物的增多导致的，而随着α值的增大，API明显回落，因此可以说此次空气质量的下降过程是由于大粒径颗粒物的陡然增多导致，而这些大粒径颗粒物的增多是与25日的沙尘暴的发生密不可分的。

从上面三个图可以看出，当内陆地区有沙尘暴发生时，沙尘暴所携带的大粒径沙粒物质会远距离输送到中东部城市地区，使城市地区空气中大粒径颗粒物所占比重陡然增加，引起空气的严重污染状况，而Ångström波长指数α则为研究内陆沙尘对中东部城市空气污染的影响提供了一种分析手段。下面将对三个城市2001-2007年间α值进行提取，从而分析年际之间两者的对应关系。

由于城市上空气溶胶粒子并非单一组分，是多粒径粒子的共同影响。当没有沙尘天气影响时，其排放的颗粒物多为工业、生活排放的较小粒径的烟雾粒子，α值相对较大，而当有沙尘天气影响时，由于大粒径的沙尘粒子影响，城市上空的污染物粒中会瞬时夹杂大量沙尘粒子，其α值必然会在污染当日突然减小，我们便认为该日城市上空有外来沙尘的输送，并据此提取其发生的时间，与内陆沙尘天气发生日期相比对并与城市当日API比对，从而探寻中东部城市空气污染指数对内陆沙尘的响应。

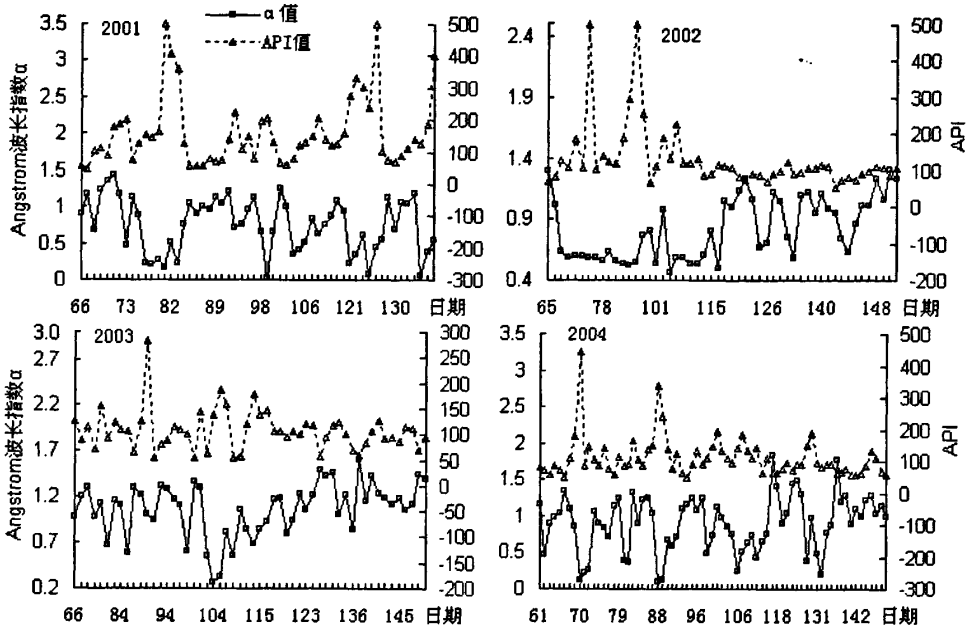
5.3.3 2001-2007 年示范区城市 API 对内陆沙尘的响应分析

我们利用 MODIS 气溶胶光学厚度产品 MOD04 来提取气溶胶 Ångström 波长指数 α，其产品的分辨率为 10×10km，计算每日北京、西安、青岛三地的中心经纬度点周围 9 个象元格内的 α 均值作为城市当日气溶胶的波长指数值，从而得到 2001-2007 年春季三个城市的 α 值序列。

此外 AERONET 数据集中也提供了某些波段范围内的 α 值，但由于中国境内的站点较少，因此本章中仅使用北京站点 AERONET 的 440-870nm 处的 α 来进行对比试验，提取北京地区的 Ångström 波长指数 α 。

由于所使用的 MOD04 产品分辨率为 10×10km，因此 α 值为栅格象元内所计算的均值，与 AERONET 提供的数据相比其数值的方差较小，且由于西安市由于本身总悬浮颗粒物本底值较高，空气中粒径较大粒子占得比重较大，因此提取的 α 值总体较低，而青岛由于空气质量较好，且出现的沙尘天气多为浮尘、扬沙等，因此 α 值总体较高。

5.3.3.1 北京市 API 对内陆沙尘的响应



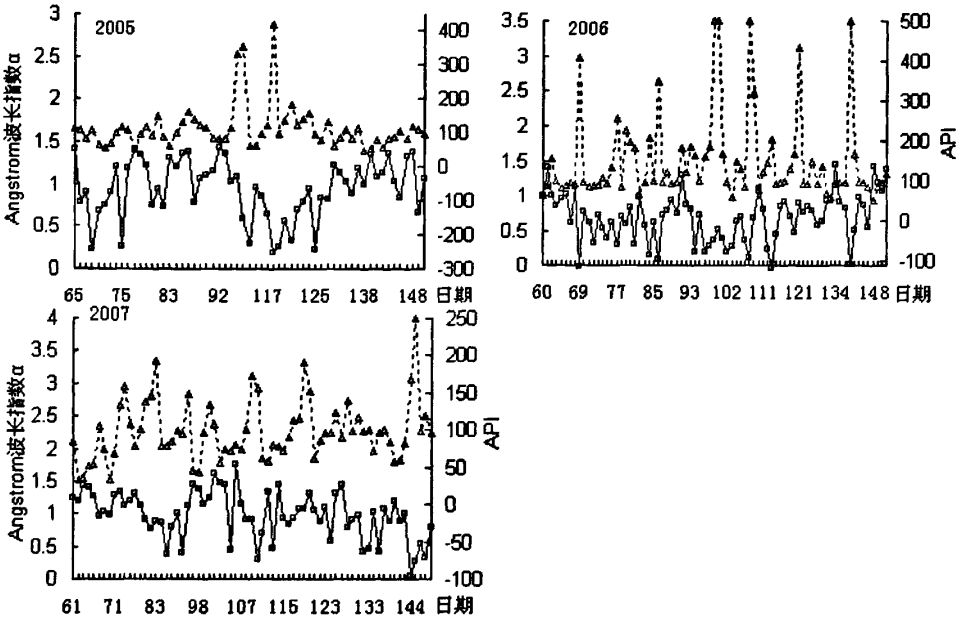


图 5-8 北京市 2001-2007 年春季 Ångström 波长指数 α 与 API 对比图

从上图中可以看出，在 7 年间北京市的 α 值与 API 均呈现出明显的负相关特性，且从不同年之间数据的对比可以看出，2006 年是 α 低值与 API 高值出现频次最高的年份，说明 2006 年北京地区受到大粒径颗粒物影响比较严重，而 2006 年正是内陆沙尘天气发生较频繁的一年，同样 2001，2002 年北京地区所受大粒径颗粒物影响也比较严重。而 2003 年 α 低值出现频次最少，且仅有三日空气污染较为严重，对应当天的 α 值也出现了下降，说明空气的污染与突然增加的大粒径颗粒物有关。

而对每年 α 低值与 API 高值同时出现的日期与内陆沙尘发生的日期进行比对后发现，其中有 84%能够与内陆沙尘发生时间相对应，说明这些对应日期内大粒径颗粒物的增加是与内陆沙尘的发生密切相关的，因此，正是内陆沙尘爆发后大粒径颗粒物的远距离输送导致了北京空气质量的下降。

5.3.3.2 西安市 API 对内陆沙尘的响应

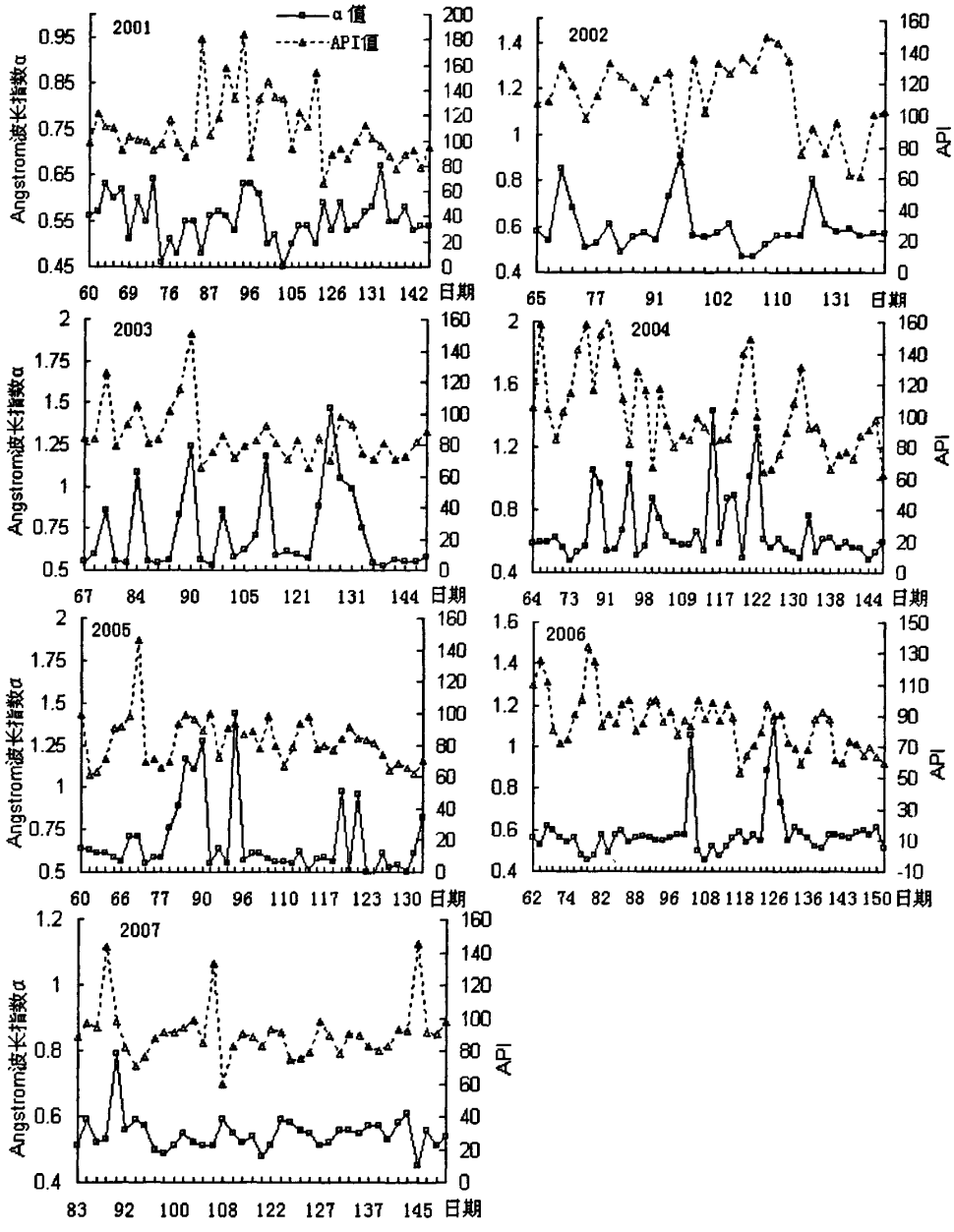


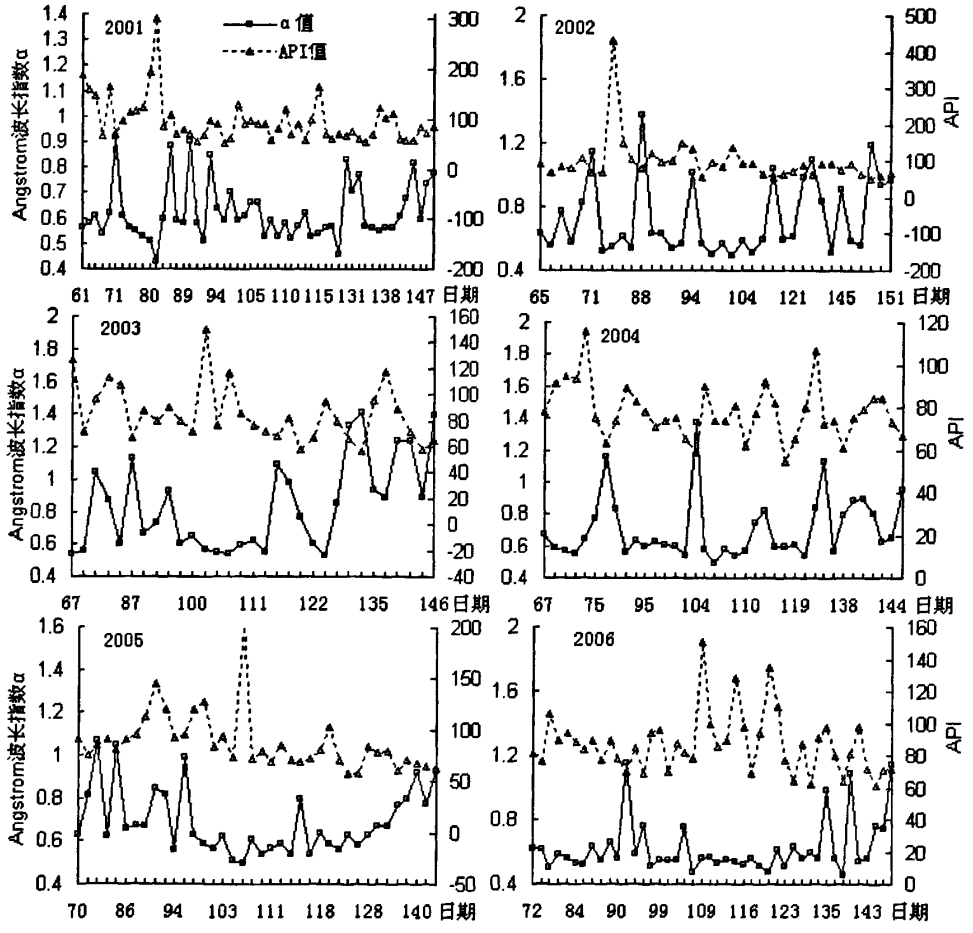
图 5-9 西安市 2001-2007 年春季 Ångström 波长指数 α 与 API 对比图

由于某些沙尘发生时伴随有大量云的出现，使得沙尘天气发生时缺少相对应的遥感影像数据，因此仅对有遥感数据计算得到的 Ångström 波长指数 α 与对应日期的 API 进行相关分析。从图中仍然可以看出西安市春季 Ångström 波长指数 α 与 API 有负相关特

性，除了 03、05 年外，各年均有 α 值陡然降低对应 API 陡然增加的现象，说明大粒径颗粒物的增加引起了空气质量的下降，提取这些时期的数据并与内陆沙尘爆发时间进行对应后能够确定：由于内陆沙尘天气远距离输送而导致的大粒径颗粒物上升的比重达到 70.5%，吻合程度较高。

而图中 03、05 年 API 的增加的同时 α 没有明显的下降趋势，说明空气质量的下降不是大粒径颗粒物引起的，而查看相关信息发现，对应这两次空气污染现象的发生的确不是由于沙尘天气的爆发引起的，也从另一个方面验证了其他各年份沙尘天气发生对城市空气质量的影响可以从对应 α 降低同时 API 增加的角度进行分析的可靠性。

5.3.3.3 青岛市 API 对内陆沙尘的响应



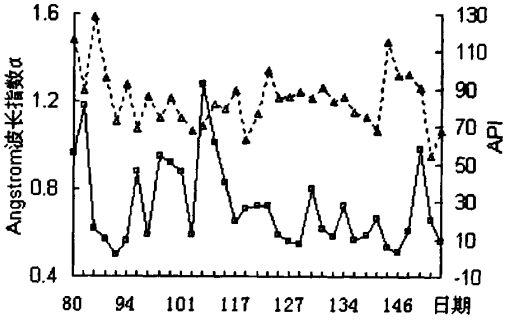


图 5-10 青岛市 2001-2007 年春季 Ångström 波长指数 α 与 API 对比图

从上图可以看出，虽然青岛市距离内陆沙尘源地较远且靠近海域，本身天气状况较好，但是从对其春季 Ångström 波长指数 α 与 API 对比中仍可以发现当 α 突然降低时 API 明显上升，如 2002-4-9 日重度污染，而对应 α 值则出前几日的 1.01 降至 0.5，而这段时间在内陆地区也对应有强沙尘暴天气的发生。统计出现类似现象的日期并与沙尘记录对比，其中能与沙尘天气的爆发所对应的达到 71%。虽然由于数据的缺失，某些强沙尘影响天气时的数据没有反映在上图中，但从已有的数据仍可表明正是西部内陆地区沙尘天气的爆发使得距离内陆地区较远且平均天气状况较好的青岛市也受到外来沙尘大粒径颗粒物的影响，导致其城市空气污染加重甚至达到重度污染的现象。

从对北京、青岛、西安三地分析得出，由于大气中颗粒物 Ångström 波长指数 α 可以表征城市大气的主控粒子粒径，提取 Ångström 波长指数 α 陡然下降至低值的日期，发现这些日期与内陆沙尘的爆发日期有较高的吻合度，且对应日期内城市的 API 值均有不同程度的升高，其中包括有达到多次重度污染天气的出现，表明这些日期内 α 的陡然降低是与内陆沙尘的输送有密切的关系。虽然某些日期的数据缺失，但是根据已有数据计算得到的 α 并提取其陡然下降日期与内陆沙尘能够对应的在北京地区达到 84%，青岛地区达到 71%，西安地区达到 70.5%，吻合程度均较高。而对于不同地区不同年份其影响也不同，其中北京、青岛两地除 03 年受影响较小外，其余 6 年所受影响均较大，特别是 01、02、06 三年重度污染天气频繁出现，三年中春季北京出现 22 次重度污染天气以及青岛出现的 7 次重度污染天气均是由于沙尘天气的出现导致，特别是青岛 2002 年全年出现了 5 次重污染天气，是 7 年中出现次数最多的一年。而对于西安地区 01、02 两年所受外来沙尘暴天气的影响较为严重，但近几年情况有多好转，主要是由于近几年内陆沙尘爆发的强度有所减弱，且西安地区处于陕西的中南部，处于沙尘暴移动路径的南缘地区，受影响力较陕西北部地区小。

而2003年三地所受沙尘影响均较小，除了全国沙尘天气明显减小，强度明显较弱外，2003北方地区的降水降雪过程增多，降水量明显增大，降水的增多使得土壤含水量大幅增加，植被长势良好，有效抑制了沙尘的输送。且2003年我国强冷空气的入侵明显减少，特别是沙尘源区的内蒙古地区1-4月份风速明显小于其他年份。

从对2001年至2007年三个示范区城市API对内陆沙尘的响应分析可以看出，在春季内陆沙尘的输送会引起城市大粒径颗粒物的数量显著增加，从而使城市中API数值增加，加重城市的空气污染状况。

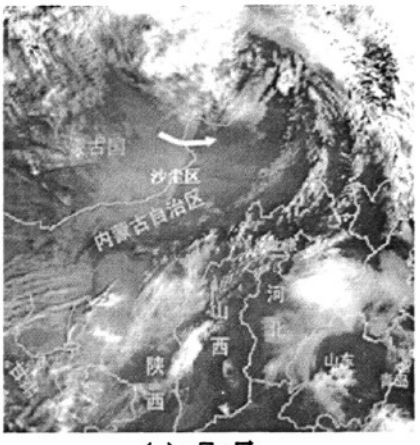
6 应用MODIS遥感影像对沙尘过程动态监测应用及分析

由于沙尘暴发生过程中时间、空间尺度比较大，利用传统的台站进行地面监测的方法往往受到一定的自然地理环境的限制，因而无法对沙尘暴的整个发展过程进行总体的把握。而遥感技术所具有的监测范围广、空间连续、时间连续等特点恰好可以弥补台站监测的不足，利用多时相遥感数据可以有效地监测一次沙尘暴过程的发源地、传输路径等。本章着重介绍利用MODIS遥感影像对2002年4月6日—10日以及2006年3月9日—12日两次强沙尘暴过程进行动态监测的应用以及结果分析。

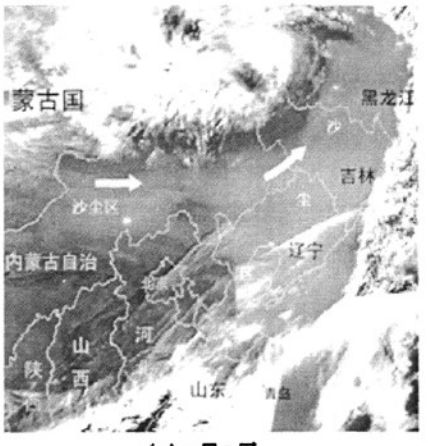
选择沙尘发生时间内Terra/Aqua双星的MODIS 1B原始数据，挑选出云量较少、能够较好反映出沙尘信息的遥感影像，并进行相应的数据处理，包括几何校正、辐射校正、波段选择及组合、影像裁切及拼接、矢量信息叠加显示等。其中波段合成采用真彩色合成（1红光波段4绿光波段3蓝光波段），合成后的影像中沙尘显示为土黄色，云显示为白色，陆地显示为深褐色或深蓝灰色，海洋显示为蓝灰色。

6.1 2002年4月6日—10日强沙尘暴过程动态监测

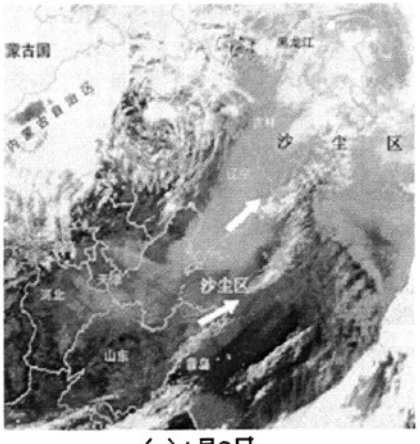
下列五景影像分别为2002年4月6日—10日的真彩色合成影像，从中可以清晰看出此次强沙尘天气过程的发展变化过程。



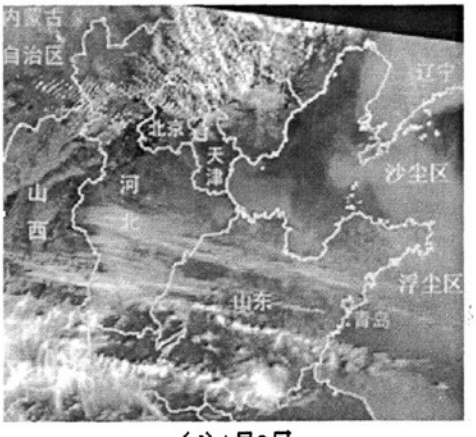
(a)4月6日



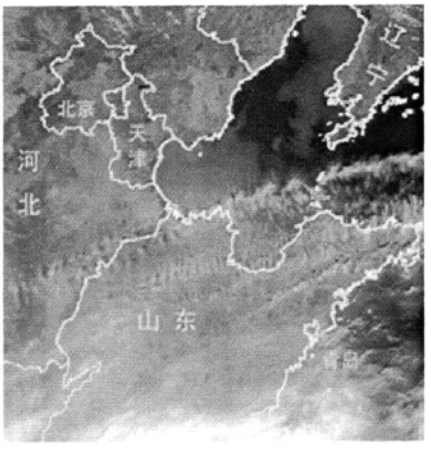
(b)4月7日



(c)4月8日



(d)4月9日



(e)4月10日

图 6-1 2002 年 4 月 6 日-10 日沙尘过程遥感图

从(a)图中看出 6 日此次沙尘天气发生于蒙古国以及我国内蒙古中东部地区，且从沙尘的纹理看出沙尘由北向东、东南方向移动的趋势。

7日的遥感影像显示出沙尘已经移动到陕西北部、山西北部、河北、山东北部、辽宁、吉林以及黑龙江，北京地区已经在沙尘区的范围之内。而在8日的影像中，河北东部、山东北部、渤海地区以及东北三省继续受到强沙尘天气的影响，且从沙尘移动的趋势看出青岛地区也已经受到沙尘的侵袭，而北京、天津地区的仍然有浮尘。9日影像显示在辽宁、山东半岛东部地区仍然有大片的浮尘区。至10日本次沙尘过程已经结束。

从这五景影像可以看出本次沙尘过程传输路径属于三种路径中的偏北路径，沙尘自蒙古国、我国内蒙古浑善达克沙地、科尔沁沙地进入华北地区，继而影响到陕西北部、山西北部、河北、山东北部、东北三省的大部分地区以及渤海地区，三个示范区城市中北京、青岛受影响较大，而西安受影响较小。而相对应时间内三个城市的API变化如图6-2显示。从图中可见北京在沙尘暴发生后的两天API均达到最大值500，为重度污染，而青岛的API也在第三日达到500，且之后的4月9日API仍居高不下为476，而西安的API虽然在4月7日有所升高，但有别于北京、青岛API所呈现出得变化趋势，其API没有随着沙尘天气的结束而降低，因此判定7日API的升高并非为此次沙尘天气影响所导致，这也与遥感影像所反映出的结果一致。因此可以说此次北京、青岛API的急剧升高是由于内陆沙尘暴天气的爆发以及传输到中东部地区所引起的，而对于没有波及到的西安地区，此次沙尘天气的爆发未对其产生严重影响。

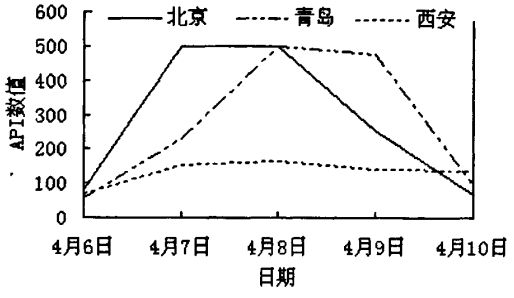
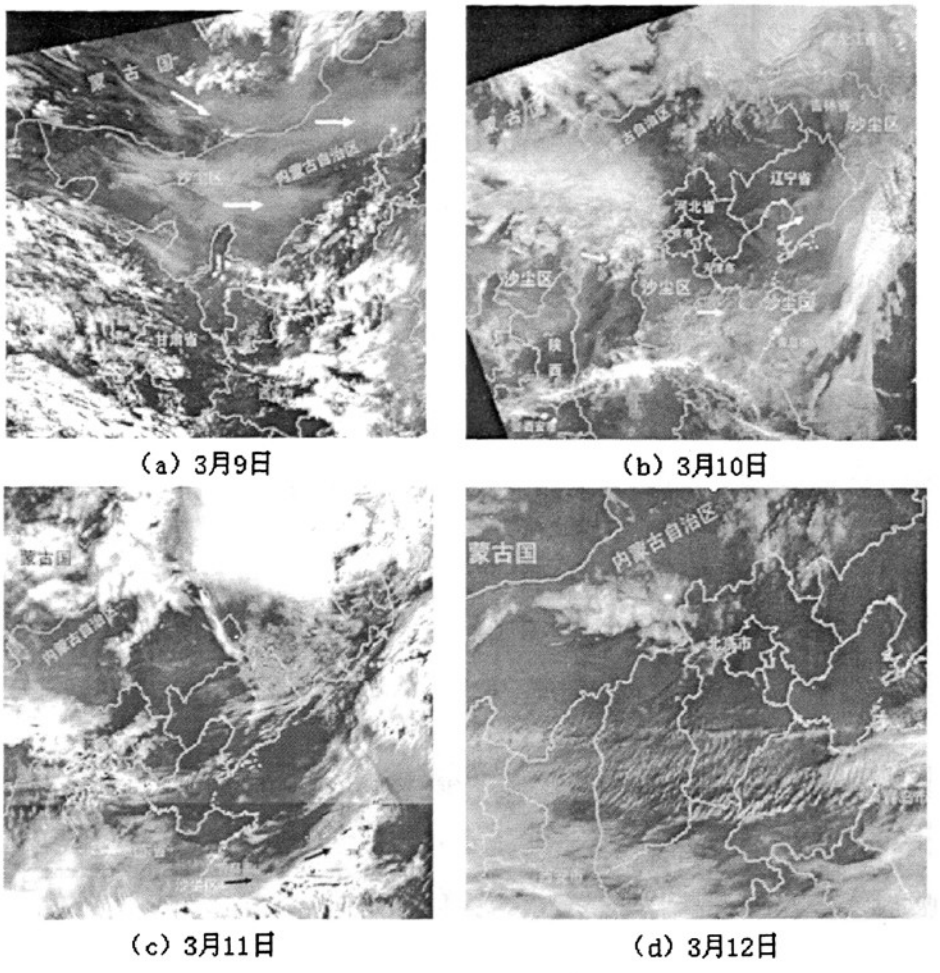


图6-2 2002年4月6日-10日北京、青岛、西安API变化图

6.2 2006年3月9日—12日强沙尘暴过程动态监测

图6-3的四景影像分别为2006年3月9日—12日的MODIS真彩色合成影像，从四景影像中可以很清晰地看出此次沙尘过程的发生传输过程。



（a）3月9日　（b）3月10日

（c）3月11日　（d）3月12日

图 6-3 2006 年 3 月 9 日-12 日沙尘过程遥感图

从(a)可以看出此次沙尘暴发源于蒙古国以及我国的内蒙古中内陆地区，图中箭头所指方向为根据沙尘纹理所判断的沙尘传输方向。从图中可以看出 3.9 日沙尘的影响区主要是内蒙古中内陆、甘肃中东部、宁夏北部以及陕西北部等地区。

3.10 日沙尘向东移动至华北北部以及东北地区，影响到内蒙古中内陆及东部偏南地区、陕西北部、山西北部、河北、北京、天津、山东、辽宁、吉林、黑龙江中南部，甚至已经影响到渤海以及朝鲜、韩国所在区域，影响范围较大。

到 3.11 日沙尘影响区域已经基本移出我国大陆区域，仅在山东东部以及渤海海域有部分沙尘影响区域。但在影像的东北部仍然可以看出有部分沙尘区域在继续向东移动。

至(d)图的 3.12 日显示出此次沙尘过程已经结束。

可以看出，此次沙尘过程传输路径属于三种路径中的西北路径，沙尘自蒙古国、内

蒙古巴丹吉林沙漠，经腾格里沙漠、乌兰巴布和沙漠、毛乌素沙地、甘肃东部、陕西北部、山西分两路，一路经由河北至北京、天津，向东北方向至辽宁中东部、吉林中东部以及黑龙江南部，一路经由河北中南部至山东济南、青岛、威海等地直至渤海地区。三个城市均在沙尘暴影响范围之内，相对应时间内三个城市的 API 变化如图 6-4 显示。从图中可见北京在沙尘暴发生后次 API 达到 408，而青岛的 API 在第三日达到 472 均为重度污染天气，而西安的 API 也由 85 升至 129，为轻微污染，且三个城市在 API 急剧升高后的次日 API 均显著回落，说明这次 API 的变化是由于外来因素引起的，即对应的 3 月 9 日在内陆所发生强沙尘暴天气的输送所导致。

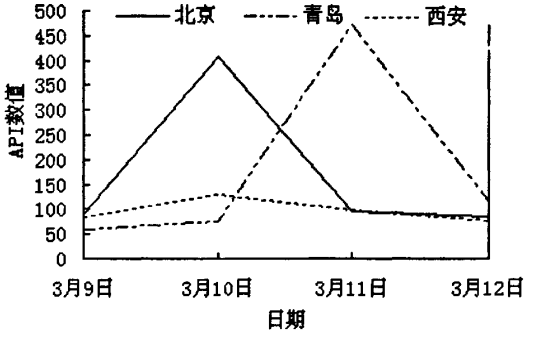


图 6-4 2006 年 3 月 9 日-12 日北京、青岛、西安 API 变化图

7 结论及展望

7.1 结论

本文利用多时相遥感数据 MODIS/TERRA 和 MDOIS/AQUA，结合地面观测的沙尘数据信息以及每日的 API 数据信息，提取内陆沙尘指数，并将其与根据遥感数据所计算得到的气溶胶光学厚度 AOT 以及颗粒物粒子粒径 Ångström 波长指数 α 进行对比分析，从而探寻内陆沙尘的传输机制以及其对中东部城市地区颗粒物污染的影响。分析结果表明：

1) 在中东部地区沙尘的来源方面，研究表明中东部地区由于局地引起的沙尘天气较少，92.84%的中东部起尘是由于外来沙尘的远距离传输所导致；我国中东部地区受内陆沙尘影响在空间上由西北到东南逐渐减弱，与入侵我国的强冷空气路径一致；中东部地区局地环境例如沙地、裸露旱地、干枯河床裸露的淤沙以及当地的地形等因素会延长

沙尘天气持续时间，从而增大沙尘天气在中东部城市发生的频率，使得外来沙尘与局地沙尘共同作用，增加污染天气持续的时间；我国中东部地区受内陆沙尘影响在上世纪 80 年代最为严重，90 年代逐渐减弱，2000 年以后有回升的趋势，但总体有逐年减少的趋势；我国中东部地区受内陆沙尘影响在春夏季（3～6 月）最为严重，秋季（9～10 月）最弱，但不同地区受影响的季节变化规律又略有不同。沙尘源区以及传输路径区域内的植被覆盖情况对中东部地区受内陆沙尘而起尘有较大的影响，其中夏季的植被覆盖与中东部地区受内陆沙尘影响的负相关性比春季植被覆盖明显。

2) 从对内陆沙尘对中东部颗粒物光学厚度 AOT 之间的相关关系分析得出内陆沙尘的输送是引起我国中东部城市空气中颗粒物光学厚度增加的一个重要因素；内陆沙尘对中东部城市颗粒物污染的贡献与起尘区沙尘强度、起尘范围、持续时间直接相关，此外，中东部城市的纬度高低以及与沙尘源区的距离远近也是其受影响强弱的重要因素。从来源上看，西安市的主要外来沙尘源区为南疆盆地以及甘肃、宁夏等地区，北京市以及青岛市的主要外来沙尘源区为内蒙古中内陆地区。2000-2007 年间内陆沙尘的爆发均引起北京地区的气溶胶光学厚度的升高，但各年所受影响程度随着内陆沙尘天气爆发的频率、春季全国冷空气的爆发强度以及北京地区的降水量而有所不同，其中 2003、2005、2007 年受影响相对较弱，其余年份较强。

3) 对 2001-2007 年北京、青岛、西安三个示范区的 API 进行统计的结果显示，三个城市的主要污染物均为可吸入颗粒物 PM_{10}，且当内陆有沙尘天气爆发时，三个城市对应的 API 均值都有明显的上升，充分说明沙尘天气与可吸入颗粒物污染事件是密切相关的。借助三个城市空气中颗粒物粒径大小 Ångström 波长指数 α，从而分析内陆沙尘对中东部城市 API 结果上看，三个城市春季大粒径颗粒物陡然增加主要是内陆外来沙尘大粒径粒子的输送导致，当有内陆沙尘携带大粒径颗粒物输送至中东部城市地区时，城市的 α 值会明显下降同时城市 API 数值也随之增加，甚至达到重度污染程度，说明内陆沙尘的输送加重了中东部城市地区的空气污染程度。

7.2 存在的问题及展望

1) 本文在内陆沙尘的分析过程中，仅考虑到沙尘的强度、频次以及持续时间等因素，而未考虑到起尘时期风的影响，因此在今后的研究中应该引入沙尘暴发生时期风力的因素，从而更好的探寻沙尘暴的传输机制。

2) MODIS 数据虽然具有免费共享、时间分辨率较高等优点，但由于沙尘天气一般都发生在非晴空条件下，大量的云层阻挡了传感器接受沙尘信息，因此无法获取对应时间内城市的气溶胶光学厚度等信息。因此在今后的研究中如能够结合其他的大气气溶胶获取手段，将会提高研究结果的精度及可靠性。

3) 在沙尘的传输过程中，仅对下垫面植被覆盖的影响做了相应的分析，对于降水以及地形等因素都会对传输造成影响，而本文未考虑这些影响因素，这也是今后工作中应该加强的部分。

参考文献

[1] 李成才,刘启汉,毛节泰等.利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染[J].应用气象学报，2004，15（6）：641-650

[2] 宋薇，张镭. 大气气溶胶光学厚度遥感研究概况[J].干旱气象，2007，25（3）：76-81

[3] 王明星.气溶胶与气候[J].气候与环境研究，2000，5(1):1-5

[4] 付培健,王世红,陈长和.探讨气候变化的新热点:大气气溶胶的气候效应[J].地球科学进展，1998，13(4)：387-393

[5] Owen B. Toon . How Pollution Suppresses Rain[J]. Science, 2000, 287:1763-1764

[6] Hansen J., Mki. Sato, R. Ruedy, Radiative forcing and climate response[J]. J Geophys Res, 1997, 102(D6): 6831-6864

[7] 李成才,毛节泰,刘启汉.利用 MODIS 资料遥感香港地区高分辨率气溶胶光学厚度[J].大气科学，2005，29（3）：335-342

[8] 李成才,毛节泰,刘启汉. 利用 MODIS 遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用[J].北京大学学报（自然科学版），2003，39（增刊）：108-117

[9] 康晓风,张建辉,刘红辉.2002.沙尘天气对我国城市空气质量影响的范围与强度分析[J].资源科学,24(4):1-4

[10] 颜宏.全国沙尘暴天气研讨会会议总结.甘肃气象，1993，11(3)：6-11

[11] 钟海玲,李栋梁,魏丽. 我国北方春季沙尘暴的异常及其对冬季青藏高原地面感热的响应[J].中国沙漠，2004，24（3）：323-329

[12] 李成才,毛节泰,刘启汉等，MODIS 卫星遥感气溶胶产品在北京市大气污染研究中的应用[J].中国科学 D 辑地球科学 2005,35(增刊Ⅰ):177-186

[13] 刘勇.MODIS 气溶胶光学厚度与南京主城区空气污染指数的关系研究[D].南京师范大学硕士论文，2007

[14] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents. India Met.Memoirs, 1921,22,partVI

[15] Brazel, A.J. and W.G. Nicking, The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona, J. Climatology,1986,6(3):255-275

[16] Gillette D A., Hanson K J. Spatial and Temporal Variability of Dust Production Cause by wind Erosion in the United States. J. Geophys. Res., 1989,94(D2):2197-2206

[17] Joseph, P.V., Raipal, D.K., Deka, S.N.“Andhi”, the convective dust storms of Northwest India. Mausam, 1980,31:431-442

[18] Jauregui E. The dust storms of Mexico City.Inter.J.Climatology ,1989, 9(2):169-180

[19] Littmann, T., Dust storm frequency in Asia: Climatic control and variability. Int. J. Climatology. 1991, 11:393-412

[20] Nickling .W. G , Brazel ,A.J ,Temporal and spatial characteristics of Arizona dust storms(1965-1980). Climatology, 1984, 4:645-660

[21] Snow, J.T.,Mcclelland, T.M., Dust Devils at White Sands Missile Range, New Mexico:1,Temporal and Spatial Distributions. J.Geophys.Res., 1990,95(D9):13707-13721

[22] 李柳霞.MODIS 影响数据预处理技术研究[D].中国农业大学硕士论文，2004

[23] Engel-Cox J.A., Christopher H.H., Basil W.C. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. Atmospheric Environment, 2004, 38:2495-2509

[24] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM 2.5 mass: Implications for air quality studies. Geophysical Research Letters, 2003, 30(21): Art. No. 2095

[25] Lau Kai-Hon Alexis, Li Chengcai, Mao Jietai, et al. A new way of using MODIS data to study air pollution over the Pear River Delta . Proceedings of the SPIE, 2003, 4891:105-114

[26] Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al.2002.Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land[J] .Geophys Res,29(12): Art. No. 1617, doi: 10.1029/2001GL013205

[27] 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

[28] 钱正安,贺慧霞，瞿章等.我国西北地区沙尘暴的分级标准贺个例谱及其统计特征,中国沙尘暴研究[M].北京:气象出版社，1997

[29] 王式功,董光荣,陈惠忠等.沙尘暴研究进展[J].中国沙漠，2000，20(40)：349-356

[30] 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

[31] 邱新法，曾燕，谬启龙.我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J].地理学报，2001，56(3)：316-322

[32] 邱玉珺,牛生杰,邹学勇等.北京沙尘天气成因概率研究[J].自然灾害学报, 2008，17(2):93-98

[33] 周自江，王锡稳，牛若芸.近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J].应用气象学报，2002,13(2):193-200

[34] 周自江，章国材.中国北方的典型强沙尘暴事件(1954-2002 年)[J].科学通报,2003,48(11):1224-1228

[35] 李成才,毛节泰,刘启汉等.利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J].科学通报,2003,48(19):2094-2100

[36] 李成才,毛节泰，刘启汉等.利用 MODIS 光学厚度遥感产品研究北京及周边地区的大气污染[J].

大气科学，2003，9（27）：869-880

[37] 朱爱华,李成才,刘桂青等.北京地区 MODIS 卫星遥感气溶胶资料的检验与应用[J].环境科学学报，2004，24（1）：86-90

[38] 韩晶晶,王式功，祈斌等.气溶胶光学厚度的分布特征及其与沙尘天气的关系 [J].中国沙漠，2006，26（3）：362-369

[39] 王皓,齐勇.MODIS 气溶胶光学厚度对城市空气质量的指示[J].城市环境与城市生态，2006，19（3）：21-24

[40] 孙林,商晓青,孙长奎等.城市地区气溶胶光学厚度与空气污染指数的相关性分析[J].山东科技大学学报(自然科学版)，2008(03):9-12

[41] 申彦波,王标,石广玉.2006 年春季我国东部海域气溶胶光学厚度与沙尘天气[J].地球科学进展,2008,23(3):290-298

[42] 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所沙漠研究室.中国沙漠概论[M].北京：科学出版社，1974

[43] 方小敏,韩永翔,马金辉等.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[J].科学通报,2004,49(11):1084-1090

[44] 韩永翔，奚晓霞，宋连春等.青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J].中国沙漠,2004,24(5):588-592

[45] 叶笃正，丑纪范，刘纪远等.关于我国华北沙尘暴天气的成因与治理对策[J].地理学报，2000，55（5）：513-521

[46] 吕世海,史晓燕.中国内陆绿洲区草业发展潜力与发展模式[J].中国草地，2004，26（1）：65-68

[47] 耿敏.青岛地区沙尘天气的特征及成因分析[D].中国海洋大学硕士论文，2005

[48] 鞠洪波,陈永富，郑新江等.沙尘暴检测技术[M].北京：中国林业出版社,2008

[49] 尹晓慧，时少英，张明英等. 北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析[J].高原气象，2007，26（5）：1039-1044

[50] 袁薇.中国沙尘天气对区域环境影响的初步研究[D].兰州大学博士论文，2006

[51] 杨胜天，刘昌明，孙睿.近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析[J].地理学报，2002,57(6):679-684

[52] 徐兴奎，王小桃，张凤.植被覆盖对沙尘天气滞后性影响的机制分析[J].环境科学，2009,30(2):322-327

[53] 顾卫,蔡雪鹏,谢锋等.植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨—以内蒙古中西部地区为例[J].地球科学进展，2002,17(2):273-277

[54] 王浩.南京市空气污染指数与 MODIS 气溶胶光学厚度的回归分析[D].南京师范大学硕士论文，2006

[55] 李成才.MODIS 遥感气溶胶光学厚度及应用于区域环境大气污染研究[D].北京大学博士论文，2002

[56] 刘玉洁,杨忠东等。MODIS 遥感信息处理原理与算法[M].北京：科学出版社，2001

[57] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N , et al . Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements [J].2000.Geophys. Res,105: 9791-9806

[58] 辛金元.中国地区气溶胶光学特性地基联网观测与研究[D].兰州大学博士论文，2007

[59] 章澄昌,周文贤.大气气溶胶教程[M].北京：气象出版社,1995

[60] 吴国柱,吴克勤译.卫星海洋学[M].北京:海洋出版社，1981

攻读学位期间承担的科研任务与发表的学术论文

一、 承担的研究课题

1，黄土与第四纪国家重点实验室开放基金：“内陆粉尘对中东部城市颗粒物污染的影响”

2，沈阳市环保局监测站：“沈阳市生态环境状况遥感调查与评价”

二、已发表的学术论文

1，青州市旅游信息查询系统的设计与实施（第一作者），潍坊教育学院学报，2008，21（4）：3—4

2，基于Clementine决策树的空间数据挖掘方法探讨—以平阴县安城乡为例（第二作者），中国测绘学会2006年学术年会论文集：560—566

致 谢

三年紧张充实的研究生学习生活即将结束，在这三年求学途中，我得到了许多老师、同学和朋友的指导、关心、帮助与支持，在此向所有帮助过我的老师、同学们致以最诚挚的感谢！

感谢导师徐跃通教授，导师渊博的专业知识、严谨的学术态度和宽厚的处世作风，是我学习的楷模。在此，向我的导师致以衷心的感谢和崇高的敬意！

感谢山东科技大学孙林副教授，孙老师正直的人格风范、严谨的科学态度都使我受益终身。孙老师丰富的理论知识、开阔的思维方式以及对问题的透彻分析和讲解，使我领悟到科研的真谛，衷心感谢孙老师在这两年中对我学习、科研、生活中的帮助与指导！

感谢山东师范大学的张祖陆、王召海、闫弘文、吴泉源、孙希华、穆新伟等老师，山东科技大学的蔡玉林、牟乃夏、明艳芳、肖兴媛等诸位老师对我学习、生活上的指导与帮助。感谢国家气象信息中心的王旻燕老师提供了所需的研究数据。感谢中国测绘科学研究院的李成名研究员对我继续求学上的鼓励。

感谢我的好友刘红艳、韩璐、荆林晓、喻萧萧、刘萍、邓姝杰、王维一、姚金明、李东东，山东科技大学的吕阳、狄美、姬大彬、王丽美、胡红、唐红梅、李新芝、余轶、程丽娟、韩笙生等同学以及 GIS 专业和 06 级研究生班的所有同学，在两地的求学过程中你们给我了我很多学习生活上的帮助，也让我的研究生生活过的丰富多彩，感谢你们一直以来对我的支持！

感谢我的父母和姐姐，是你们默默的支持与奉献使我得以专心学习，顺利完成学业，你们永远是我不断前进的动力和源泉！

此外，本文在撰写过程中，引用许多前辈和同行的研究资料，在此一并致以诚挚的感谢！

最后，感谢参与本论文评阅、答辩的全体专家、老师、同学！

对所有关心和支持我的师长、亲人、朋友，致以衷心的感谢和美好的祝愿！

刘晓丽

2009 年 4 月于青岛