

兰州大学

博士学位论文

兰州不同粒径颗粒物污染特征及沙尘天气对其影响的研究

姓名：冯鑫媛

申请学位级别：博士

专业：大气科学 气象学

指导教师：王式功

20090501

摘 要

沙尘暴作为一种灾害性天气不仅对工农业生产产生严重的直接危害,而且由此形成的沙尘气溶胶通过多种途径对气候、环境、生态和人体健康等多方面造成的滞后、持续、长期的间接危害更加严重。因此,在环境问题日趋突出的今天,深入研究沙尘暴对城市大气环境的影响具有重要意义。本文利用我国西北五省(区)及内蒙古自治区 1954~2005 年 235 站的沙尘暴观测资料、2000~2008 年北方 17 个环保重点城市 API 指数资料、2005~2007 年兰州市不同粒径大气颗粒物(TSP、PM₁₀、PM_{2.5}和 PM_{1.0})浓度监测资料以及 2007 年 4~5 月兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)PM₁₀浓度监测资料、铁塔梯度观测资料和超声资料,在分析近 52 年来我国北方中西部地区沙尘暴气候特征的基础上,探讨了沙尘天气造成的颗粒物污染对我国北方城市大气环境的影响,并较为全面、深入地分析了沙尘重点影响地区——兰州市的不同粒径颗粒物污染特征以及不同类型典型天气过程对其颗粒物污染影响的变化规律及其产生机制。主要结论如下:

(1) 我国北方中西部沙尘暴发生日数的年变化特征可划分为四大类型,即春季型、冬春夏型、春夏型和冬春型,它们分别占总数的 29.7%、29.7%、27.1%和 13.5%,除冬春型冬季沙尘暴发生最多外,其它类型均为春季最多。沙尘暴日变化和持续时间分布规律也分别划分为三种类型。沙尘暴的时间变化特征存在明显的地域差异,这一差异是某一时期内强风、沙尘源和不稳定层结三者在不同地区配置情况差异的综合反映。尽管近年来我国北方城市大气环境治理力度明显加大,北方多数环保重点城市的大气颗粒物污染状况依然严重,这主要与沙尘天气影响有关。春季沙尘输送对北方城市颗粒物污染的平均影响程度自西向东降低,其中对银川、兰州和西宁的影响程度最大。沙尘暴天气发生期间,各地颗粒物污染程度自强沙尘暴中心区向外围逐渐减轻。即使在并未出现沙尘天气的地区,在上游沙尘输送的作用下其颗粒物浓度也会受到较大影响。

(2) 沙尘重点影响地区——兰州市的不同粒径大气颗粒物(TSP、PM₁₀、PM_{2.5}和 PM_{1.0})污染特征分析表明,粗颗粒物(TSP和 PM₁₀)浓度的年变化呈双峰型分布,特别是 4 月份出现的主峰值有别于其他城市;而细颗粒物(PM_{2.5}和 PM_{1.0})的年变化则呈单峰型分布,峰值在 12 月;这一差异反映出春季沙尘天

气明显加剧兰州市粗颗粒物污染，而由于其风扩散效应则降低细颗粒物污染浓度。正常情况下（无沙尘）兰州市粗颗粒物日变化为双峰型；而沙尘天气影响期间，受沙尘天气的影响午后增加了一个浓度高峰，其日变化变为三峰型。另外，粗、细颗粒物在边界层大气中的稀释扩散过程也存在明显差异。上游地区大风沙尘天气是影响兰州市颗粒物污染状况的重要因素，其中青海地区和河西地区对其影响最大。

(3) 关于不同类型典型天气过程对兰州市不同粒径颗粒物（TSP、 $PM_{>10}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ ）浓度影响的研究表明：沙尘天气发生时兰州市颗粒物污染严重， $PM_{2.5-10}$ 浓度升幅最大，不同粒径颗粒物浓度的变化规律存在差异。降水对颗粒物浓度的影响以湿清除为主，粗粒子的清除率明显高于细粒子。不同类型的降水对颗粒物的清除率存在明显差异，对流性降水对 TSP、 $PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 的清除率是相同降水量锋面降水的数倍，这是由它们不同的产生机制和降水特征造成的。冷锋对颗粒污染物的影响也以清除为主，粗粒子的清除率较高。根据冷锋过境初期颗粒物浓度变化趋势，冷锋可分为先升后降型和直降型。先升后降的变化特征是冷锋对颗粒污染物与气态污染物浓度影响的重要差别之一。

(4) 为了更好地探讨典型天气过程中兰州地区颗粒物污染的形成机制，对沙尘、冷锋等不同类型典型天气过程中兰州地区大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系进行研究，结果表明：沙尘天气过境前，边界层有较强逆温出现；随着沙尘天气爆发，逆温层被破坏，混合层迅速发展，边界层低层温度和湿度垂直梯度变得很小，而风速垂直梯度则增大；此时随着风速迅速增大， PM_{10} 浓度骤增。沙尘过境期间垂直湍流输送强烈，经向和纬向动量均是向下输送的（其中经向输送较强）。上游有明显沙尘输送时，沙尘浓度峰值落后于风速峰值。先升后降型冷锋过境初期对颗粒物浓度的影响机制与沙尘天气类似。动量下传特别是经向动量下传是造成沙尘天气和先升后降型冷锋过境初期颗粒物严重污染的主要原因之一。

关键词：颗粒物污染；不同粒径（TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ ）；沙尘天气；典型天气过程；边界层结构；湍流输送；气候特征

Abstract

Dust storms, as a kind of disastrous weather, can cause serious immediate harms on industrial and agricultural production. However, the dust aerosol generated by them has much more harm which is lagged, continued and long-term on many aspects such as climate, environment, ecosystem and human health by several ways. As environmental problems attract more and more attention in our lives today, it has significant meaning to deeply study the influence of dust storms on urban atmospheric environment. The data used in this study include: (1) the observation data of dust storms from 235 meteorological observation stations in the middle and west of northern China during 1954~2005; (2) the API data of 17-key environmental protection cities in northern China during 2000~2008; (3) the concentration data of PM with different sizes (TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}) in Lanzhou during 2005~2007; (4) PM₁₀ concentration, gradient observation data of meteorological tower and turbulent data observed at SACOL from April to May 2007. Based on the analysis of climatic characteristics of dust storms in the middle and west of Northern China during 52 years, the influence of particulate pollution caused by dust events on urban atmospheric environment in Northern China was evaluated. Lanzhou is one of the regions mainly affected by dust events. Therefore, both the variations of the concentrations of PM with different sizes in Lanzhou city and the influence of different kinds of typical weather processes on its PM concentrations and the influence mechanism were comprehensively and deeply studied. The main results are as follows:

(1) The annual variations of the number of dust storm days in the middle and west of Northern China can be divided into four types, namely spring type, winter-spring-summer type, spring-summer type and winter-spring type, and they respectively account for 29.7%, 29.7%, 27.1% and 13.5% of the total number of stations. The dust storms of three types of them (except winter-spring type) most frequently occur in spring. The diurnal variations and the duration patterns of dust

storms can be respectively divided into three types. These above classified results indicate that there are obvious regional differences in the temporal variations of dust storms. The differences are due to the match of the time in which strong wind, dust sources and thermal instability happen in different regions. Although more efforts have been devoted to the environmental protection and control in northern cities in recent several years, the particulate pollution of most key environmental protection cities in Northern China is still serious. This is associated with the influence of dust events. The degree of the influence of springtime dust intrusions on particulate pollution in northern cities decreases from west to east and the influence on Yinchuan, Lanzhou and Xining is the most serious. During a dust storm, the particulate pollution in the strong dust-storm occurrence regions is the most serious. In the regions where no dust events occurs, the PM concentration can also be influenced, which results from dust transports from upstream regions.

(2) The variations of the concentrations of PM with different sizes (TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}) in Lanzhou city (the region mainly affected by dust events) are analyzed. The result shows that the annual distribution of monthly average concentrations for coarse particles (TSP and PM₁₀) is bimodal with the highest peak in April, which is different from the situation in other cities not affected by dust events. However, the annual distribution for fine particles (PM_{2.5} and PM_{1.0}) is unimodal with the peak in December. This difference indicates that while dust events aggravate obviously coarse particle pollution in Lanzhou, they reduce the concentrations of fine particles (from local emissions) due to wind diffusion. Under normal conditions (without dust intrusions), the diurnal distribution of coarse particle concentration in Lanzhou is bimodal. However, the distribution is trimodal during dust intrusions, with an extra peak in the afternoon. There are obvious differences in the diffusion behaviors in the atmospheric boundary layer between coarse and fine particles. Strong wind and dust intrusions from upstream regions have an important impact on particulate pollution in Lanzhou, and those from Qinghai and Hexi regions have the most serious influence.

(3) The influence of different kinds of typical weather processes on the

concentrations of PM with different sizes (TSP, $PM_{>10}$, $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$) in Lanzhou is evaluated. It can be found that, during dust events, the PM pollution in Lanzhou is very heavy and the relative increase rate of $PM_{2.5-10}$ concentration is the highest. There are differences in the temporal evolution of PM concentrations among particles with different sizes during dust periods. The major effect of precipitation events on PM concentration is wet scavenging. While precipitation reduces the concentrations of coarse particles, it sometimes increases the concentrations of fine particles. There are obvious differences in the scavenging rates of particles by different kinds of precipitation events. The scavenging rates of TSP, $PM_{>10}$ and $PM_{2.5-10}$ by convective precipitation are several times as much as by frontal precipitation. This is due to their different formation mechanism and precipitation characteristics. The major effect of cold front on PM concentration is clearance and coarse particles can be cleared more efficiently. Based on the variations of PM concentrations during the initial stages of cold front events, cold front can be classified into increasing-first-and-decreasing-afterwards-type and continuous-decreasing-type. The characteristic—increasing first and decreasing afterwards—is one of the important differences in the influence of cold front on particulate and gaseous pollutant.

(4) In order to deeply understand the influence mechanism of typical weather events on PM pollution, the characteristics of atmospheric boundary-layer structure and turbulent flux transfer during typical weather events such as dust and cold front events and their relation with particulate pollution are studied. The result shows that, before the dust events break out, there exists strong inversion in the atmospheric boundary layer. As the dust events break out, the inversion layer is broken and a mixing layer develops quickly. The vertical gradient of air temperature and humidity in the lower boundary layer decreases and that of wind speed increases. As the great increasing of wind speed, the PM_{10} concentration increases sharply. During dust periods, the vertical transfer of turbulence flux is very strong. The meridional and latitudinal momentum transports downward (the meridional momentum transportation is much greater). If there is obvious dust transport from upstream regions, the peak of

dust concentration can lag behind the peak of wind speed. The mechanism of the influence of increasing-first-and-decreasing-afterwards-type of cold front events on particulate pollution is similar to that of dust events. The momentum downward transportation (especially the meridional momentum transportation) is one of the major factors which cause the blowing dust and the heavy particulate pollution during dust events and increasing-first-and-decreasing-afterwards-type of cold front events.

Keywords: Particulate pollution; Different PM sizes (TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}); Dust event; Typical weather process; Boundary-layer structure; Turbulent flux transfer; Climatic characteristics

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。对本文的研究成果做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 冯鑫媛 日期： 2009.6.5.

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：冯鑫媛 导师签名：王功 日期：2009.6.5.



第一章 绪 论

§ 1.1 研究意义

沙尘暴作为一种灾害性天气不仅对工农业生产产生严重的直接危害,而且由此形成的沙尘气溶胶通过多种途径对气候、环境、生态和人体健康等多方面造成的滞后、持续、长期的间接危害更加严重。在环境问题日趋突出的今天,深入研究沙尘暴对城市大气环境的影响具有重要意义。

沙尘暴 (sand-dust storm) 是沙暴 (sand storm) 和尘暴 (dust storm) 两者兼有的总称,是指强风把地面大量沙尘卷入空中,使空气特别混浊,水平能见度低于 1km 的天气现象^[1],它是沙尘天气(包括浮尘、扬沙、沙尘暴)中最强烈的一种表现形式。沙尘暴天气是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和各种不同尺度的天气系统叠加所诱发的一种概率小,危害大的灾害性天气。全世界有四大沙尘暴多发区,分别位于中亚、北美、中非和澳大利亚^[2]。我国北方地区属于中亚沙尘暴区的一部分,是全球现代沙尘暴的频发地区之一。

从本质上来说,沙尘暴是一种自然现象,古已有之。《朔方通志》载天启元年(公元 1621 年)“四月乙亥午宁夏洪广堡,风霾大作,坠灰片如瓜籽,纷纷不绝,逾时而止,日将沉,作红黄色”^[3]。雍正元年(公元 1723 年)四月初七,“献县风霾,昼晦”;恩县“夜起大风,飞石拔木有顷,黑霾如墨,良久复变为红霾,乍明乍暗,逮晓方息”^[4]。张德二^[5]根据历史文献的记载,对我国从唐朝以来的沙尘暴事件进行了系统分析,给出了公元 3 世纪以来的“雨土”年表。

沙尘暴,尤其特强沙尘暴是一种危害极大的灾害性天气。当其形成之后,会以排山倒海之势滚滚向前移动,携带沙粒的强劲气流所经之处,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,使大片农田或受沙埋、或遭风蚀刮走沃土,或者农作物受霜冻之害;致使有的农作物基本绝收,大幅度减产;它加剧土地沙漠化,对大气环境造成严重污染,对交通和供电线路产生重要影响,给人民生命财产造成严重损失^[1]。我国每年都会因沙尘暴的影响造成各种损失。例如 1993 年 5 月 5 日发生在西北地区的黑风暴造成数百人死伤,直接经济损失达 5.6 亿元,其影响范围总面积约 110 万 km²,占全国总面积的 11.5%,受灾人

口 1200 多万^[6]。

沙尘暴除了上述的直接影响外,它还可以引发气候学效应,对大气能见度、大气光学特性、地气辐射平衡等产生影响,导致自然生态环境的破坏,沙尘物质长距离输送还会对下游地区,如城市大气环境、海洋生态环境等带来直接和潜在影响作用。美国根据北太平洋 7 个站的观测研究认为,自亚洲大陆到达北太平洋 25°N-40°N 之间的尘粒,估计每年在 $(2.3\sim 566)\times 10^6\text{t}$ 。据日本 GMS 卫星测值估计,中国西北地区每年黄沙输送量大致在 $(4.1\sim 5.3)\times 10^6\text{t}$ ^[7]。因此,沙尘暴作为一种不可忽视的大气和生态环境问题,已经越来越受到人们的关注,对沙尘暴进行更广泛、深入、细致的研究,特别是对大气环境影响的研究,在人们日益注重生存质量的今天就显得尤为重要。

§ 1.2 研究现状

沙尘暴是全球干旱半干旱地区特有的灾害性天气,国内外学者一直致力于这方面的研究。国外对沙尘暴的研究开始较早,从 20 世纪 20 年代就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策方面的研究: Hankin^[8]、Sutton^[9]和 Wolfson^[10]等分别对“Andhi”型、“Haboob”型和“Phantom”型沙尘暴的特征进行了分析研究; Brazel^[11]总结了美国亚利桑那州西南部 15 年产生沙尘暴的 4 类天气形势:锋面型、雷暴/对流型、热带风暴型和高空切断低压型; Mcnaughton^[12]认为沙尘暴天气总是与中尺度低压或飚线相联系; Jauregui^[13]系统研究了墨西哥城沙尘暴的时空分布; Littmann^[14]分析了亚洲沙尘暴的发生频率; Goudie^[15]总结了沙尘天气导致的一系列环境效应和灾害; Tegen^[16]在全球模式中模拟了撒哈拉地区沙尘的起源、传输和分布; Uemastu^[17]模拟了亚洲沙尘的跨太平洋传输; Bergam^[18]研究了在全球范围内沙尘暴主要的源地; Soddoway^[19]研究了地表植被覆盖对土壤风力侵蚀的影响; Gillette^[20]通过野外风洞试验和观测得出了沙尘粒子起动的摩擦速度与下垫面土壤的特性有着很大关系的结论; Nilgun^[21]还分析了沙尘气溶胶的成分及含量。此外,利用数值模拟方法研究起沙率的做法,也渐渐发展起来,并得到越来越广泛的应用^[22-24]。

我国对沙尘暴的研究开始于上世纪 70 年代,徐国昌等^[25]首先对 1977 年 4 月 22 日发生在甘肃河西走廊的特大沙尘暴过程进行了较为详尽的研究,初步揭

示了沙尘暴的大尺度天气成因、沙尘输送过程和运移路径,首次提出了“黑风暴”的定义及判别标准。自1993年5月5日我国西北地区发生特强沙尘暴并造成重大损失后,引起了我国政府和科学工作者的高度重视,有力地推动了沙尘暴研究的广泛开展,取得了丰硕的成果:

(1) 沙尘暴气候学。王式功等^[26]利用筛选的1954~2000年我国338个气象站资料及相关气候资料,分析指出47年来沙尘暴平均年发生日数10d的区域主要分布在南疆盆地、河西地区及青藏高原东北部,其中塔里木盆地以及甘肃河西走廊东北部至内蒙古的阿拉善分别为两个多发区,多发中心分别在民勤和甘肃民勤,47a平均年发生日数分别为35.8d和28.1d。钱正安等^[27-28]增补了部分新资料后,得到1952~2001年间我国北方292个强和特强沙尘暴个例序列,指出频数在20次以上的多发区有5个:1)以民勤为中心(53次)的河西走廊区;2)和田为中心(42次)的南疆盆地南缘区;3)以拐子湖为中心(25次)的内蒙古阿拉善高原区;4)以伊克乌素镇为中心(27次)的鄂尔多斯高原区;以及5)以朱日和为中心(22次)的浑善达克沙地区。近年来,对沙尘暴频数演变趋势的研究得到比较一致的结果:自20世纪50年代以来,我国沙尘暴发生次数或沙尘暴日数总体上呈波动减少趋势,其中50年代最多,60~70年代波动上升,80~90年代波动减少,90年代最少,2000~2002年又相对偏多^[26,27,29-31]。

(2) 沙尘暴的成因。沙尘源、强风及热力不稳定的空气层结是产生沙尘暴的三个主要条件^[32-33]。沙尘暴是多种因素共同作用的产物,尤其是特强沙尘暴的发生发展,在具备宏观的气候和下垫面条件的前提下,还需要有利的环流形势和天气系统相配合。根据许宝玉等^[34]和郑新江等^[35]对历史上特强沙尘暴爆发环流形势的合成分析,西北路冷空气入侵是沙尘暴爆发最常见的环流形势。平均说来,60%左右的沙尘暴由西北路冷空气入侵造成,北路其次,西路只占10%左右。沙尘暴主要出现在上述三路冷空气(冷高压)前缘冷锋后,有时也出现在强烈发展的蒙古气旋冷锋后^[36],这些是纯冷锋型沙尘暴。与我国西部地区沙尘暴起因的冷空气活动及冷锋锋生作用,以及偏东风“倒灌”等不同,赵琳娜等^[37]注意到,近年来发生于我国东部地区的沙尘暴却多与快速气旋的发生发展有关,其中又主要是蒙古气旋。另外,钱正安等^[38-39]、许宝玉等^[34]、江吉喜等^[40]及胡隐樵等^[41]在深入分析“93.05.05”金昌特强沙尘暴后揭示,河西地区还存在另一类干

飏线加冷锋的强对流性混合型沙尘暴，这类沙尘暴强度更大，持续时间更长。尚可政等^[42]、杨建玲等^[43]和李栋梁等^[44]还分别研究了沙尘暴对赤道东太平洋海温、北极海冰及青藏高原感热异常变化的响应，分析了作为大气环流外强迫条件的海温、海冰和青藏高原感热等对沙尘暴的影响。

(3) 沙尘暴天气数值模拟与沙尘输送。申绍华等^[45]分别利用二维和三维数值模式研究了沙尘暴爆发时，沙尘辐射强迫的锋生过程和孤立的沙尘暴辐射效应对锋面环流的影响。赵琳娜等^[37]和周秀骥等^[46]对沙尘暴的起沙机制进行了数值模拟研究。宋振鑫等^[47]、康凤琴等^[48]和王劲松等^[49]对典型沙尘暴个例的天气形势以及物理量做了模拟和诊断。在沙尘远距离输送的研究方面，Schutz^[50]首先发展了一个二维稳态沙尘输送模式，研究了撒哈拉地区沙尘在赤道大西洋上空的远距离传输。Westphal^[51]等将 NCAR 的有限区域动力模式和 NASA 的气溶胶远距离传输模式相结合，发展成二维动力学沙尘传输模式，真实地模拟撒哈拉沙尘在大气边界层中的许多特征。随后，又在二维模式基础上，发展了三维动力学传输模式^[52]。纪飞等^[53-54]在 MM4 的基础上设计了一个沙尘传输扩散模式，详细地模拟了一次发生在东亚地区的沙尘暴天气过程，得到了沙尘暴起动、传输和沉降的具体特征。黄美元和王自发^[55]在比较国内外起沙机制模型的基础上，结合我国北方大量气象台站有关起沙过程的观测资料，提出了一个适合我国北方地区用于黄沙长距离输送模拟与预报的起沙模型。

(4) 沙尘大气辐射特性及卫星遥感监测。大气中的沙尘会削弱太阳辐射，在特定天气条件下，部分沙尘被注入平流层，能长期参与平流层的物理化学过程，并通过改变大气的辐射平衡对全球气候产生影响^[56]。Carlson^[57]通过观测研究表明，撒哈拉的沙尘对热带地区的太阳辐射能量平衡有明显的影响。利用遥感技术从空间对沙尘暴进行监测是目前最为有效的手段，随着遥感技术的不断发展，它在沙尘暴研究中发挥越来越重要的作用。一方面利用多种遥感数据监测沙尘暴，提取沙尘暴信息，定量分析沙尘暴的有关参数。叶笃正等^[58]、孙司衡等^[59]、方宗义等^[60]和吴晓京等^[61]通过应用卫星遥感监测信息对 2000~2001 年的沙尘暴过程进行了研究，结合 GIS 技术确定了沙尘暴的起源、空间分布、移动路径和降尘区域，分析了沙尘暴遥感图像的特征，讨论了我国北方地区沙尘暴源地的分布。另一方面，通过遥感技术反演沙尘暴途经区域下垫面的有关参数，分析其与沙尘

暴天气形成和演化之间的关系^[62-65]。

(5) 沙尘气溶胶的理化特性及其环境和生态效应。目前,国内外学者在沙尘气溶胶的物理化学特性的研究等方面已取得了进展。庄国顺等^[66]指出沙尘暴期间空气中总悬浮颗粒物的浓度比平日高近 30 倍,主要污染源不单来自局部地区,还来自于沙尘传输过程中的区域污染源。宣捷^[67]的研究结果表明,中国北方地面尘的释放量约为 43×10^6 吨/年,春季起尘量约占全年的一半以上。Wang 等^[68]分析了沙尘天气发生季节大气气溶胶的水溶成分的理化属性,进一步指出大气气溶胶的组成反映了沙尘天气发生时,当地的空气污染具有明显的自然沙尘和人为污染的混合污染特征。沈建国等^[69]对内蒙古地区的一次沙尘暴过程 TSP 质量浓度的连续观测和分析结果表明,沙尘天气导致的空气污染远大于一切人为排放源造成的污染。娜仁花等^[70]总结了沙尘暴的生态效应,指出沙尘暴能促进全球生态环境中生物地球化学循环,重新分配和平衡地球生态系统的生产力,促进生物繁殖体扩散,促进生态系统演替。袁薇等^[71]揭示了中国大陆沙尘暴及气旋系统与海洋表层基础生产力之间的关系。陈晓燕等^[72]、黄玉霞等^[73]和原会秀等^[74]还对沙尘暴对呼吸系统疾病的影响进行了研究,指出其对人体健康的严重危害。

§ 1.3 本文主要研究内容

目前虽然对沙尘暴的形成机制、输送过程及其气候环境效应已经有了不少的研究,但仍有许多重要的问题有待解决。

颗粒污染物,是指以固体或液体微粒形式存在于空气介质中的分散体,自分子大小到大于 $10\mu\text{m}$ 粒径的各种微粒,有飘尘、降尘等^[75]。大气颗粒物是我国大部分城市的首要大气污染物,兰州市尤为如此。大气颗粒物粒径范围一般在 $0.01\sim 100\mu\text{m}$ 之间,统称为总悬浮颗粒物(TSP)。若按粒径大小进行划分,常将颗粒物分为 TSP、 PM_{10} (也称可吸入颗粒物,粒径 $\leq 10\mu\text{m}$)、 $\text{PM}_{2.5}$ (也称为可入肺颗粒物,粒径 $\leq 2.5\mu\text{m}$)、 $\text{PM}_{1.0}$ (粒径 $\leq 1\mu\text{m}$) 等。尽管大气颗粒物只是地球大气成分中含量很少的成分之一,但由于其在许多大气过程中的重要作用而日益受到重视,例如,对大气环境质量、人体健康和气候变化等都会产生直接或间接的重要影响^[76-81]。

不同粒径颗粒物（TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM_{1.0}）的来源及其对环境和人体健康的危害不同。随着对大气颗粒物物理化学特性的认识，人们逐步意识到颗粒污染物对人体健康的影响是多层次的。流行病学研究证明，城市大气气溶胶浓度越高，死亡率和发病率也越高^[82,83]。粒径大小不同的颗粒物，它们沉积在人体呼吸系统的部位也不相同，会对人体造成不同程度的伤害。大于10 μm 的颗粒物会被人的鼻子阻挡；5 μm ~10 μm 的颗粒物会被呼吸道阻挡，粒径<10 μm 的颗粒物通常沉积在上呼吸道，粒径<5 μm 的颗粒物可进入呼吸道的深部；而小于2.5 μm 的颗粒物可进入肺泡中，并可能导致与心、肺功能障碍有关的疾病（如心血管病）。与粗颗粒物相比，细粒子具有更大的危害性，除其本身多是有毒有害物质外，同时还易成为其它有毒有害物质的传输运载体或反应体。因此，对不同粒径颗粒物浓度的变化特征进行研究具有特殊意义。

每年春季在我国北方和蒙古国地区频繁发生的沙尘暴，不仅对邻近沙尘源区的内陆城乡的空气质量产生重要影响，还可使北京地区 PM₁₀ 浓度比正常情况升高 5-10 倍^[84]；而且对台湾地区 PM₁₀ 浓度也有影响，可使其浓度比正常情况升高 1 倍多，其最高 PM₁₀ 浓度也是出现在春季 3~5 月份^[85,86]；对邻近的韩国等也产生影响^[87]，甚至对大洋彼岸的美洲大陆都产生明显的影响^[88]。不仅如此，沙尘所产生的颗粒物污染还会影响人体健康^[89,90]，由此可见，沙尘天气的频繁发生已引发了几乎是全球性的环境以及人类健康问题。

随着沙尘暴研究工作的不断深入，科技工作者们逐渐认识到，沙尘暴的危害不仅仅局限于它作为一种灾害性天气的直接危害，而其所产生的沙尘气溶胶通过多种途径对气候、环境、生态和人体健康等多方面造成的滞后、持续、长期的间接危害要比直接危害大得多。兰州是我国乃至全世界空气污染最严重的城市之一（被列入全世界空气污染最严重的 10 个城市之一），其颗粒物污染尤为突出。究其原因，与外来沙尘输送及强沉降密切相关，因为兰州是西方路径沙尘暴和西北路径沙尘暴东移南下的必经之地，加之高原大地形、河西走廊及其东端乌鞘岭和当地河谷盆地等不同尺度复杂地形的共同作用，使之成为国内外重点关注的沙尘污染和黄土堆积区。关于沙尘输送对其所经之地大气环境的影响虽有所关注，但重视程度还很不够，尤其像兰州这样的沙尘输送和沉降最典型的地区，目前也还没有进行系统、综合、深入的研究，有许多重要科学问题亟待研究。

鉴于上述问题, 本文在对近 52 年来我国北方中西部地区沙尘暴的气候特征进行分析的基础上, 将探讨沙尘天气造成的颗粒物污染对我国北方城市空气质量的影响程度、影响范围和影响过程, 并以颗粒物污染最严重的城市之一、同时也是受沙尘污染影响最严重的城市之一的兰州市作为受沙尘天气重点影响地区的代表城市, 对其不同粒径颗粒物 (TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0}) 的浓度进行了前后长达 30 个月的连续监测。利用上述颗粒物浓度监测资料分析兰州市不同粒径大气颗粒物浓度的年变化、日变化特征及其成因, 并从上游沙尘输送以及当地气象条件两方面对影响兰州市颗粒物污染的因素进行了初步分析和研究。然后, 从天气学角度, 研究了不同类型典型天气过程对大气颗粒物污染的影响——分析和研究沙尘、降水和冷锋三种典型天气过程的演变对兰州市不同粒径颗粒物污染的影响程度及其变化规律。最后, 结合颗粒物浓度监测资料、探空资料、边界层铁塔梯度观测资料和超声资料, 对不同类型典型天气过程 (即浮尘、扬沙和冷锋) 中大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系进行探讨, 以期搞清沙尘天气等典型天气过程对兰州地区大气颗粒物污染的影响机制, 为进一步预报和改善兰州地区大气环境质量提供有力的科学依据。

本论文主要包括如下几个部分:

- 第一章 绪论
- 第二章 资料说明与研究方法
- 第三章 近 52a 我国北方中西部沙尘暴的气候特征
- 第四章 近几年沙尘天气对我国北方环保重点城市可吸入颗粒物 (PM₁₀) 浓度影响的研究
- 第五章 沙尘天气重点影响地区——兰州市不同粒径大气颗粒物污染特征及其成因分析
- 第六章 沙尘、降水和冷锋三种典型天气过程对兰州市不同粒径大气颗粒物浓度影响的研究
- 第七章 典型天气过程中兰州地区大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物浓度关系的研究
- 第八章 总结与展望

参考文献

- [1] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 李希良, 金炯. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20 (4): 349-356.
- [2] Pre K. Aolian Dust and Dust Deposits [M]. London: Academic Press Inc Ltd, 1987, 113-126.
- [3] 王炜, 方宗义. 沙尘暴天气及其研究进展综述[J]. 应用气象学报, 2004, 15 (3): 366-381.
- [4] 孟昭华. 中国灾荒史记[M]. 中国社会出版社, 1999, 980pp.
- [5] 张德二. 历史时期“雨土”现象剖析[J]. 科学通报, 1982, 27: 294-297. 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J]. 中国科学 (B), 1984, 27: 278-288.
- [6] 卢琦, 杨有林主编, 全球沙尘暴警示录, 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [7] 瞿章, 许宝玉, 贺慧霞等, 我国沙尘暴灾害的概况和对策, 见: 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997, 155-158.
- [8] Hankin E H. On dust raising winds and descending currents [J]. India Meteorological Memoirs, 1921, 22: 210-223.
- [9] Sutton L J. Haboobs [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1925, 51: 25-30.
- [10] Wolfson N, Matson M. Satellite observations of a phantom in the desert [J]. Weather, 1986, 41(2): 57-60.
- [11] Brazel A J, Nicking W C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona [J]. Journal of Climatology, 1986, 6(3): 255-275.
- [12] Mcnaughton D L. Possible connection between anomalous anticyclones and sandstorms [J]. Weather, 1987, 42(1): 8-13.
- [13] Jauregui E. The dust storms of Mexico City [J]. International Journal of Climatology, 1989, 9(2): 169-180.
- [14] Littmann T. Dust storm frequency in Asia: Climatic control and variability [J]. International Journal of Climatology, 1991, 11: 393-412.
- [15] Goudie A S, Middleton N J. The changing frequency of dust storms through time [J]. Climatic Change, 1992, 20: 197-225.
- [16] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Source, transport and optical thickness [J]. Geophysical Research, 1994, 99(22): 897-914.

- [17] Uemastu M, Duce P, Prospero J, et al. Transport of mineral aerosol from Asia over North Pacific Ocean [J]. *Geophysical Research*, 1993, 88(c9): 5343-5352.
- [18] Bergametti G. *Encyclopedia of Earth System Science* [M]. San Diego: Academic Press, 1992, 171-192.
- [19] Soddoway F H, Chepil W S, Armbrust D V. Effect of kind, amount and placement of residue on wind erosion control [J]. *Transactions of the ASAE*, 1965, 8(3): 327-331.
- [20] Gillette D A, Adams J, Endo A, et al. Threshold velocities for input of soil particles in the air by desert soils [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(c15): 5621-5630.
- [21] Nilgun Kubilay, Slobodan Nickovic, Francois Dulac, et al. An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the eastern Mediterranean [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 1293-1303.
- [22] Shao, Y.P., M. Raupach and D. Short. Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Darling Basin, Aust. *J. Soil Res.*, 1994, 34: 309-342.
- [23] Shao, Y. P. and I. M. Leslie. Wind erosion prediction over the Australian continent, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102 (D25): 30091-30105.
- [24] Marticorena, B. G., Bergametti, et al. Modeling the atmospheric dust cycle, Part 2: Simulation of Saharan dust sources, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102 (D4): 4387-4404.
- [25] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃“4.22”特大沙尘暴分析[J]. *气象学报*, 1979, 37 (4): 26-35.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 李栋梁, 柳中明, 宋敏红. 中国北方沙尘暴研究的若干进展[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18 (增刊): 1-8.
- [29] 邱新法, 曾燕, 缪启龙. 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.
- [30] 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.
- [31] 丁瑞强, 王式功, 尚可政等. 近 45a 我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 306-310.
- [32] 夏训诚, 杨根生等. *中国西北地区沙尘暴灾害及防治* [M]. 北京: 中国环境科学出版社,

1996年10月.

- [33] 钱正安, 贺慧霞, 瞿章等.我国西北地区沙尘暴的分级标准、个例谱及其统计特征[A].方宗义等编.中国沙尘暴研究[C].北京: 气象出版社, 1997, 1-10.
- [34] 许宝玉, 钱正安, 焦彦军.西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析与预报[A].方宗义等编.中国沙尘暴研究[C], 北京: 气象出版社, 1997, 44-51.
- [35] 郑新江, 徐建芬, 罗敬宁等.1998年4月14-15日强沙尘暴过程分析.高原气象, 2001, 20(2): 180-185.
- [36] 刘景涛, 郑明倩.内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征[J].高原气象, 2003, 22(1): 51-64.
- [37] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄.一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究[J].气候与环境研究, 2002, 7, 279-294.
- [38] 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].方宗义等编.中国沙尘暴研究[C], 北京: 气象出版社, 1997, 37-43.
- [39] 钱正安, 焦彦军.中、美和苏丹强沙尘暴的对比分析[J].甘肃气象, 1996, 15(1): 1-5.
- [40] 江吉喜, 项续康, 王子厚等.以卫星资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探[A].方宗义等编.中国沙尘暴研究[C], 北京: 气象出版社, 1997, 98-102.
- [41] 胡隐樵, 光田宁.强沙尘暴发展与干飚线-黑风暴形成的一个机理分析[J].高原气象, 1996, 15(2): 178-185.
- [42] 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, 18(3): 239-243.
- [43] 杨建玲, 何金海, 赵光平.宁夏春季沙尘暴与北极海冰之间的遥相关关系[J].高原气象, 2003, 26(3): 296-307.
- [44] 李栋梁, 钟海玲, 魏丽等.中国北方年沙尘暴日数的气候特征及对春季高原地面感热的响应[J].高原气象, 2003, 22(4): 337-345.
- [45] 申绍华, 陈受钧.沙尘辐射强迫的锋生过程分析[J].气象学报, 1993, 51(4): 425-433.
- [46] 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.
- [47] 宋振鑫, 程麟生.“93.5”黑风暴扰动能源的诊断分析[J].兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 116-122.
- [48] 康凤琴, 李耀辉, 吕世华.2001年4月8日强沙尘暴天气的数值模拟研究[J].中国沙漠,

- 2003, 23 (6): 681-685.
- [49] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴等.“4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析[J].高原气象, 2004, 23 (1): 89-96.
- [50] Schutz L. Saharan dust transport in the NE-trade wind region over the North Atlantic Ocean [J]. Proc Sym Rdiatom, 1997, 1: 68-70.
- [51] Westphal, Toon O B and Carlson T N. A two-dimension numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms [J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92: 3027-3049.
- [52] Westphal, Toon O B and Carlson T N. A case study of mobilization and transport of Saharan dust [J]. Journal of Atmospheric Science, 1998, 45: 2145-2175.
- [53] 纪飞, 秦瑜.东亚沙尘暴的数值模拟(I)模式建立[J].北京大学学报(自然科学版), 1996, 32 (3): 384-392.
- [54] 纪飞, 秦瑜.东亚沙尘暴的数值模拟(II)个例分析[J].北京大学学报(自然科学版), 1998, 34 (5): 639-644.
- [55] 黄美元, 王自发.东亚地区黄沙长距离输送模式的设计[J].大气科学, 1998, 22, 625-637.
- [56] 石广玉, 赵思雄.沙尘暴研究中的若干科学问题[J].大气科学, 2003, 27 (4): 591-606.
- [57] Carlson T N. Atmospheric turbidity in Saharan dust outbreaks as determined by analyses of satellite brightness data[J]. Mon Wea Rev, 1979, 107: 322-335.
- [58] 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.
- [59] 孙司衡, 郑新江.沙尘暴的卫星遥感监测与减灾服务[J].测绘科学, 2000, 25 (2): 33-36.
- [60] 方宗义, 张运刚, 郑新江等.用气象卫星遥感监测沙尘的方法和初步结果[J].第四纪研究, 2001, 21 (1): 48-55.
- [61] 吴晓京, 陆均天, 张晓虎等.2001年春季沙尘天气分析[J].国土资源遥感, 2001, 3: 8-10.
- [62] 范一大, 史培军, 王秀山等.中国北方典型沙尘暴的遥感分析[J].地球科学进展, 2002, 17 (2): 289-294.
- [63] 张增祥, 周全斌, 刘斌等.中国北方沙尘灾害特点及其下垫面状况的遥感监测[J].遥感学报, 2001, 5 (5): 377-382.
- [64] 张国平, 张增祥, 赵晓丽等.2000年华北沙尘天气遥感监测[J].遥感学报, 2001, 5 (6): 466-471.

- [65] 顾卫, 蔡雪鹏, 谢峰等.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.
- [66] 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙等.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.
- [67] 宣捷.中国北方地面起尘总量分布[J].环境科学学报, 2000, 20 (4): 426-430.
- [68] Wang Ying, Zhuang Guoshun, Sun Yele and An Zhisheng. Water-soluble part of the aerosol in the dust storm season-evidence of the mixing between mineral and pollution aerosols. *Atmospheric Environment*, 2005, 39, 7020-7029.
- [69] 沈建国, 刘菲, 牛生杰等.一次沙尘暴过程 TSP 质量浓度的连续观测和分析[J].中国沙漠, 2006, 26 (5): 786-791.
- [70] 娜仁花, 高润宏, 张明铁.沙尘暴生态效应与防治的探讨[J].中国沙漠, 2007, 27 (1): 110-116.
- [71] Yuan Wei and Zhang Jin. High correlations between Asian dust events and biological productivity in the western North Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett*, 2006.
- [72] 陈晓燕, 牛静萍, 丁国武等.沙尘暴对呼吸系统疾病的影响[J].环境与健康杂志, 2007, 24 (2): 63-65.
- [73] 黄玉霞, 王宝鉴.兰州市呼吸道疾病与沙尘天气关系的分析[J].甘肃气象, 2001, 19 (3): 41-44.
- [74] 原会秀, 吴宜进.沙尘暴对人体健康的影响及防治措施[J].科技信息, 博士.专家论坛, 20-21.
- [75] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊, 等.空气污染气象学教程[M].北京: 气象出版社, 2004.2-3.
- [76] Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley, New York.
- [77] Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., LeTertre, A., Monopoli, Y., Rossi, G., Zmirou, D., Ballester, F., Boumghar, A., Anderson, H., Wojtyniak, B., Paldy, A., Braunstein, R., Pekkanen, J.S., 2001. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiology* 12: 521-531.
- [78] Pope, C.R., Burnett, R., M.J., T., Calle, E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution.

- Journal of the American Medical Association 287: 1132-1141.
- [79] Samet, J., Dominici, F.C., Coursac, I., Zeger, S., 2000. Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. *New England Journal of Medicine* 343: 1742-1749.
- [80] 钱云, 符淙斌, 王淑瑜. 沙尘气溶胶与气候变化[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 391-394.
- [81] 宿兴涛. 中国沙尘气溶胶研究新进展[J]. *气象与环境科学*, 2008, 31(3): 72-77.
- [82] Bérubé K A, Jones T P, Williamson B J, et al. Physicochemical characterisation of diesel exhaust particles: Factors for assessing biological activity [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 35: 1599-1614.
- [83] Berico M, Luciani A, Formignani M. Atmospheric aerosol in an urban area—measurements of TSP and PM₁₀ standards and pulmonary deposition assessments [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31: 3659-3665.
- [84] Xie Shaodong, Tong Yu, Yuanhang, Zhang, et al.. Characteristics of PM₁₀, SO₂, NO_x and O₃ in ambient air during the dust storm period in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 345: 153-164.
- [85] Yang Kuang-Ling. Spatial and seasonal variation of PM₁₀ mass concentration in Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 3403-3411.
- [86] Lin Chuan-Yao, Shaw C. Liu, Charles C.-K., et al.. Long-range transport of aerosols and their impact on the air quality of Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 6066-6076.
- [87] In Hee-Jin, Soon-Ung Park. A simulation of long-range transport of Yellow Sand observed in April 1998 in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 4173-4187.
- [88] Tratt, D. M., Frouin, R. J. and Westphal, D. L., April 1998 Asian dust event: A southern California perspective [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (D16): 18371-18379.
- [89] Hwan-Goo Yeo and Jong-Ho Kim. SPM and fungal spores in the ambient air of west Korea during the Asian dust (Yellow sand) period [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36 (35): 5437-5442.
- [90] 金星, 郭新彪, 黄雪莲等. 沙尘暴颗粒物对人肺成纤维细胞的细胞毒性研究[J]. *环境与健康杂志*, 2004, 21(4): 199-201.

第二章 资料说明与研究方法

§2.1 资料说明

2.1.1 1954~2005 年西北五省（区）及内蒙古自治区沙尘暴观测资料

采用西北五省（区）及内蒙古自治区 235 个有沙尘暴天气记录的气象观测站 1954~2005 年 52a 沙尘暴出现日期及起止时间资料（起止时间精确到分钟），站点分布如图 2.1 所示。从中得出单站沙尘暴发生日数以及每次沙尘暴过程的起沙时间和持续时间。

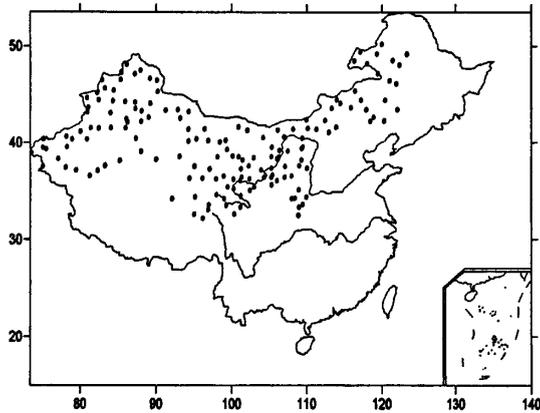


图 2.1 中国北方中西部 235 个有沙尘暴天气记录的气象站点分布图

Fig. 2.1 Distribution of 235 dust-storm observation stations in the middle and west of Northern China

2.1.2 2000~2008 年我国北方 17 个环保重点城市的 API 指数资料

采用国家环境保护总局公布的我国北方 17 个环境保护重点城市（其分布如图 2.2 所示）2000~2008 年环境质量日报空气污染指数 API（Air Pollution Index）资料，并根据国家环保总局提供的空气污染指数计算公式，反算出首要污染物为可吸入颗粒物（ PM_{10} ）时，对应的 PM_{10} 质量浓度。

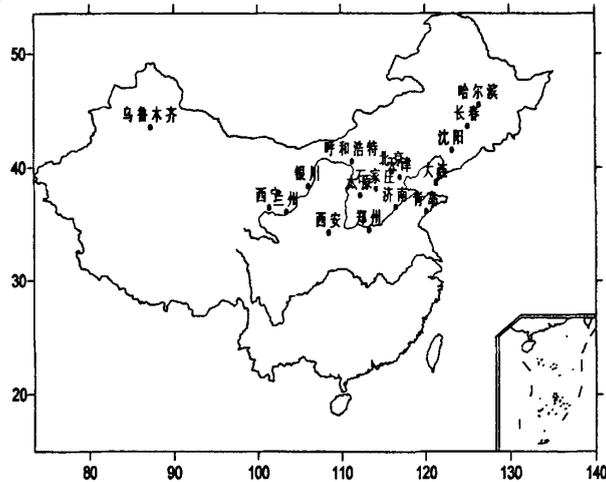


图 2.2 我国北方 17 个环保重点城市分布图

Fig. 2.2 Distribution of 17-key environmental protection cities in Northern China

2.1.3 2005~2007 年兰州市不同粒径大气颗粒物浓度监测资料

2005~2007 年在兰州大学盘旋路校区综合楼楼顶平台进行了不同粒径大气颗粒物 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 浓度监测试验，每日连续 24 小时监测，前后共监测 30 个月，获得了兰州市不同粒径颗粒物浓度较长时间的第一手的观测资料。详细情况见 § 2.2 部分。

2.1.4 2007 年 4~5 月兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) PM₁₀ 浓度监测资料、铁塔梯度观测资料和超声资料

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)。观测场占地约 120 亩，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。其周围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。该站可为大气科学、资源环境、区域生态等多个学科的研究提供丰富的实际观测资料。

采用该站 2007 年 4~5 月的 PM₁₀ 浓度监测资料、铁塔梯度观测资料和超声资

料。其中铁塔梯度观测资料为 30min 一次的自动观测，垂直共有 7 层，观测高度分别为离地面 1、2、4、8、12、16 和 32m，包括风速、气温、相对湿度和水气压的观测，同时还在 8m 处进行气压和风向观测。湍流资料所使用的观测仪器是 CSAT3 三维超声风速仪，采样频率 10Hz。PM₁₀ 浓度监测使用环境颗粒物监测仪 RP1400a。

2.1.5 2000~2008 年常规气象观测资料

常规气象观测资料（包括地面观测和探空资料）来自中国气象局 MICAPS 系统。

§2.2 兰州市不同粒径大气颗粒物浓度监测试验

2.2.1 试验介绍——监测点概况

兰州市（36°03'N，103°53'E）是甘肃省的省会，地处中国地理几何中心（如图 2.3），位于青藏高原东北侧的黄河河谷盆地，市区东西长（约 35km）南北窄（约 2~8km），海拔 1520 米。气候属于大陆性半干旱气候，年平均温度仅为 9.3℃，多年平均年降水量为 327.7mm。由于其河谷盆地的特殊地形条件，逆温频率

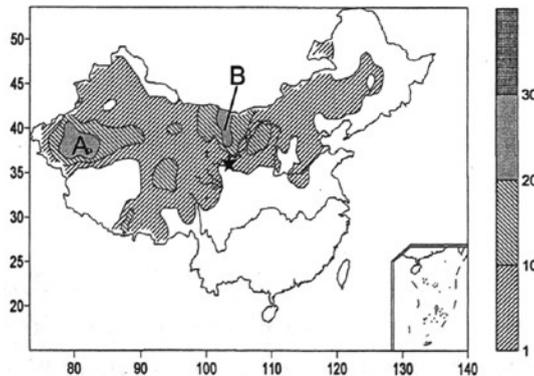


图 2.3 兰州市地理位置以及 1954~2000 年我国 701 个气象站 47 年平均的沙尘暴年发生日数的空间分布

Fig. 2.3 Location of Lanzhou and spatial distribution of 47-year mean annual occurrence days of dust storms in China during 1954~2000 (from 701 meteorological observation stations)

高, 冬季逆温层发生频率甚至高达95.8%^[1]。市区面积约210平方公里, 人口约150万人。市区内工业主要是石化、机械加工和电力等高污染排放行业。能源结构以煤炭为主。

我国有两大沙尘暴高频区(分别为塔里木盆地及其周围地区和阿拉善、河西走廊东北部及其邻近地区(如图2.3中A、B所示)), 位于其下游的兰州市恰好在这两个地区的沙尘暴的移动路径上。再加上上游河西地区特殊的走廊地形引起的有利的沙尘输送, 春季上游地区沙尘暴的频繁发生及其大量尘埃向该地区的输送也是造成兰州市颗粒物严重污染的重要原因。风成黄土的研究结果也指出: 兰州市区黄河北岸的九州台^[2]是目前已知的我国和世界上风成黄土堆积最厚的地区, 这表明, 外来沙尘输送对兰州市空气污染的严重影响古已有之。

由以上分析可知, 受当地大量污染源的排放、特殊地形造成的不利的大气扩散条件以及沙尘输送三方面因素的共同影响, 尤其是沙尘输送, 使兰州市成为我国乃至全世界颗粒物污染最严重的城市之一。因此, 在兰州市设立监测点监测大气颗粒物污染状况对于研究沙尘天气对城市不同粒径颗粒物污染的影响具有十分重要的意义。

监测地点设在兰州市区东部的兰州大学盘旋路校区(位于兰州市城关区)校园内综合楼的楼顶平台。为了避免人为活动造成的二次扬尘对颗粒物浓度的监测产生直接影响, 监测高度设在距地面 55m 处。测点周围无重大污染源。

2.2.2 监测仪器及数据采集

使用大气颗粒物监测器(Environmental Dust Monitor (EDM), LN5, Munro Environmental, a division of The Munro Group, Britain) 对颗粒物浓度进行连续的实时监测。EDM 基于光散射原理测定大气颗粒物的浓度。该仪器采用微电脑自动控制气流流量, 采样流量 600 cc min^{-1} , 工作时通过测定粒子通过激光束时所产生的散射量的多少从而得出粒子的浓度。可同时测定 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、PM_{1.0} 4 种不同粒径大气颗粒物的浓度。监测时间为 2005 年 1 月 1 日至 2006 年 9 月 30 日以及 2007 年 4 月 13 日至 11 月 25 日。监测仪器每 5min 读数 1 次, 每日连续 24h 监测, 实际共监测 859 天。对 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 监测其质量浓度, 单位为 $\mu\text{g m}^{-3}$; 对 PM_{1.0} 监测数浓度, 单位 cm^{-3} 。



图 2.4 LN5 型大气颗粒物监测器(EDM)

Fig. 2.4 Environmental Dust Monitor (EDM), LN5

在连续实时监测的同时，使用 2 台大流量采样器（采样流量 1000 L min^{-1} ）和 1 台中流量采样器（采样流量 100 L min^{-1} ），采用滤膜采集称重法分别对 TSP、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 进行采样。每周采样两次，TSP 采样频率为 12h， PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 为 24h。具体情况如表 2.1 所示。

表 2.1 不同粒径颗粒物质量浓度监测采样方法

Table 2.1 Monitoring method of mass concentrations of PM with different sizes

监测项目	采样仪器	颗粒物粒径切割器	滤膜	采样时间	工作流量	样品数
TSP	智能大流量空气颗粒物采样器 TH-1000C II 型（武汉天虹智能仪表厂）	切割粒径 $D_{50}=100\mu\text{m}$	玻璃纤维滤膜	12h	1000L min^{-1}	50
PM_{10}	同 TSP	切割粒径 $D_{50}=10\mu\text{m}$	玻璃纤维滤膜	24h	1000L min^{-1}	35
$\text{PM}_{2.5}$	智能中流量空气颗粒物采样器 TH-150C III 型（武汉天虹智能仪表厂）	切割粒径 $D_{50}=2.5\mu\text{m}$	玻璃纤维滤膜	24h	100 L min^{-1}	30

采样严格按照中华人民共和国国家标准 GB/T 15432《环境空气总悬浮颗粒物测定 重量法》、GB 6921-86《大气飘尘浓度测定方法》、HJ/T 194-2005《环境空气质量手工监测技术规范》(<http://www.zhb.gov.cn/tech/index.htm>) 进行。滤膜采样前后在温度 $20\pm 1^\circ\text{C}$ 及相对湿度 $50\pm 5\%$ 的微电子天平（万分之一）室内平衡

24 小时后称重。颗粒物质量浓度 $c=(G_2-G_1)/V_T$ ，其中 G_1 是采样前滤膜重量， G_2 是采样后滤膜重量， V_T 是换算成标准状态下的采样体积。

2.2.3 数据质量控制

2.2.3.1 资料处理及计算方法

首先对原始监测数据进行去除野点的处理：对于第 m 个数据 x'_m ，先将其与

前后各 6 个数据求平均： $\bar{x}'_m = \frac{1}{13} \sum_{j=-6}^6 x'_{m+j}$ ，并求出该点的涨落方差

$\sigma_m^2 = \frac{1}{13} \sum_{j=-6}^6 (x'_{m+j} - \bar{x}'_m)^2$ ，对于 $x'_m \in [\bar{x}'_m - 3\sigma_m, \bar{x}'_m + 3\sigma_m]$ 的数据认为是正确的，在这个

范围以外的数据作为野点被剔除，并以第 $m-1$ 和第 $m+1$ 个数据的插值代替。

然后，按照空气污染物数据统计有效性的要求，对监测数据进行小时、日、月平均浓度的统计平均。有效性的具体要求如下：

1) 大气颗粒物浓度连续监测数据应能满足每小时的算术平均值计算。每小时至少有 45min 的监测时间，则本小时的监测结果有效，用本小时内所有正常输出一数值计算的算术平均值作为该小时平均值。

2) 每日有不少于 12 个有效小时平均值的算术平均值为有效日均值，日均值的统计时间从当日 00:00（北京时，以下同）算起。

3) 每月不少于 15 个有效日均值的算术平均值为有效月均值。

本文中所用的所有颗粒物浓度数据如无特别说明均根据以上原则进行统计平均。

2.2.3.2 试验数据的有效性分析——与常规监测方法结果的比较

在我国，颗粒物浓度的监测通常采用滤膜采集称重法。将 EDM（基于光散射法）监测数据换算为与称重法每次采样时间一致的 TSP 浓度 12h 均值和 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 浓度 24h 均值。然后，对称重法与光散射法在相同采样期所测得的结果进行相关性分析，结果表明：对于同一种粒径的颗粒物，用两种方法所测数据的相关性非常好，相关系数分别为 0.885（TSP）、0.919（ PM_{10} ）、0.843（ $PM_{2.5}$ ），均

通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。这说明在兰州市使用基于光散射法的大气颗粒物监测仪器监测颗粒物浓度是完全可行的。

2.2.3.3 试验数据的代表性分析——与 API 指数的比较

API 指数与浓度的换算：

$$I = \frac{I_{\text{大}} - I_{\text{小}}}{C_{\text{大}} - C_{\text{小}}}(C - C_{\text{小}}) + I_{\text{小}}$$

其中 I 为某空气污染物的污染指数； C 为该污染物的浓度； $C_{\text{大}}$ 与 $C_{\text{小}}$ 分别是在 API 分级限值表中最贴近 C 值的两个值， $C_{\text{大}}$ 为大于 C 的限值， $C_{\text{小}}$ 为小于 C 的限值； $I_{\text{大}}$ 与 $I_{\text{小}}$ 是在 API 分级限值表中最贴近 I 值的两个值， $I_{\text{大}}$ 为大于 I 的值， $I_{\text{小}}$ 为小于 I 的值。

根据此计算公式，反算出首要污染物为可吸入颗粒物时对应的 PM_{10} 日均浓度值。以 2005 年监测结果为例，对比试验自测的 PM_{10} 浓度与环保局公布的数据，结果表明，试验自测的 PM_{10} 质量浓度日均值（为了与环保部门规定的日界保持一致，此处日界定义为 12:00，即日均值是指前一日 12:00 至当日 12:00 的小时浓度的平均值）与兰州市环保局公布的日均值变化趋势一致，相关系数 $R=0.622$ ($n=324$)，通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。兰州市环保局公布的数据为多个观测点的平均值，代表了兰州市空气污染的整体情况。试验自测数据与兰州市环保局的观测数据有很明显的相关性，说明该观测点在兰州有区域代表性。

§2.3 主要研究方法

本文主要使用统计学方法^[3]进行数据的分析和研究，具体统计方法将在以后各章中分别详细说明。

参考文献

- [1] 姜大勝, 王式功, 郎咸梅等. 兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2001, 37(4):133-139.

- [2] 滕志安、申西平, 中国风成黄土及其形成下限研究, 地层学杂志, 1995, 19(2): 81-87.
- [3] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000, 第二版.

第三章 近 52a 我国北方中西部沙尘暴的气候特征

§ 3.1 引言

沙尘暴天气是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特定的大尺度环流背景和各种不同尺度的天气系统叠加所诱发的一种概率小,危害大的灾害性天气^[1]。它的频繁发生不仅对工农业生产造成巨大的直接危害和经济损失,还可加剧土地荒漠化,造成严重的大气颗粒物污染事件,并对大气能见度、大气光学特性、地气辐射平衡等地球环境的多方面带来严重影响,导致自然生态环境进一步恶化,危害人体健康。因此,越来越多的人认识到沙尘暴是不可忽视的大气和生态环境问题之一。

沙尘暴时空分布特征研究是沙尘暴研究的基础性工作。国外从上世纪 30 年代就开始对美国中南部和非洲撒哈拉地区沙尘暴的分布进行研究。Jauregui^[2]对墨西哥城沙尘暴的时空分布进行了系统研究。Gillette^[3]研究了美国由于风蚀所引起的沙尘的时空变化。Snow^[4]对美国新墨西哥州沙尘暴的时空分布用详细的观测资料进行了分析研究。在国内,周自江等^[5]分析了我国北方近 49 年强沙尘暴的时空分布和演变趋势。钱正安等^[6]对强和特强沙尘暴的变化趋势及原因进行了分析,并指出中国北方沙尘暴源区主要分布在河西走廊和阿拉善高原、南疆盆地南缘以及内蒙古中部三地区。邱新法等^[7]利用地面天气图等资料对我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径进行了研究。

沙尘暴天气的时空分布及其发生发展与特定的地理条件、下垫面生态环境和环流背景天气系统等密切相关。我国北方中西部(包括西北五省(区)及内蒙古自治区中西部)是我国沙尘暴多发区,幅员辽阔、地形情况复杂,各地区下垫面生态环境、天气系统、大气稳定度情况等差异较大,使得各地沙尘暴天气的时间变化特征差别很大,因此,对此进行分型研究很有必要。本章利用 1954~2005 年 52a 西北五省(区)及内蒙古自治区 235 个气象观测站的沙尘暴出现日期及起止时间资料,对该区域沙尘暴的年变化、日变化以及持续时间频率分布特征进行分型和分析研究,并初步探讨了沙尘暴时间变化特征的地域差异及其成因。

§ 3.2 资料处理与研究方法

本章采用西北五省（区）及内蒙古自治区共 235 个气象观测站 1954~2005 年 52a 沙尘暴出现日期及起止时间资料（起止时间精确到分钟），从中得出单站沙尘暴发生日数以及每次沙尘暴过程的起沙时间和持续时间。依据《地面气象观测规范》，气象日界为 20:00。在统计沙尘暴出现日数时，若某一次沙尘暴跨越 20:00，按两个出现日计算。在做起沙时间及持续时间统计时，将跨越 20:00 出现的沙尘暴作为一次连续过程处理。统计候沙尘暴发生日数时将一年分为 72 个候，即每月有 6 候，第 1 候至第 5 候各有 5 天，第 6 候为 26 日至当月最后一天。

在本章所涉及的 235 个气象站观测数据中，52a 平均年沙尘暴发生日数大于等于 1d 的站点达 152 个（如图 3.1 所示），占总数的 64.7%。由于年沙尘暴日数小于 1d 的站点一般被定义为无沙尘暴灾害^[8]，故本文只对年日数大于等于 1d 的 152 个站点进行分析和研究。

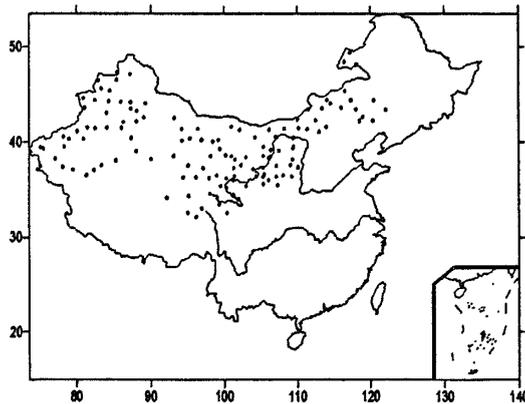


图 3.1 西北五省（区）及内蒙古自治区 52 年平均年沙尘暴发生日数 ≥ 1 d 的观测站点分布图

Fig. 3.1 Distribution of 152 stations in which average annual occurrence days of dust storms are greater than or equal to 1 day

沙尘暴的年变化、日变化以及持续时间频率分布规律的分型，使用分层聚类的方法，其原则是近似的聚为一类。具体步骤是：(1)对原始数据进行标准化处理；(2)每个变量自成一类，并进行相似性测度；(3)根据相似性进行合并聚类，即分别将最相似的合并成新类；(4)计算新类和其它类的相似性；(5)重复(2)~(4)

各步，直到合并为一个大类为止。然后，以聚类分析结果为主，根据具体情况进一步调整，对沙尘暴测站划分类型。最后根据类型划分结果进行空间分布分析。

§ 3.3 沙尘暴发生日数的年变化特征

3.3.1 年变化类型划分

以沙尘暴发生时间和日数作为因子进行聚类分析，然后以聚类分析结果为主，根据具体情况进一步调整，将西北五省（区）及内蒙古自治区 152 站的沙尘暴日数年变化特征划分为四大类型，即春季型、冬春夏型、春夏型和冬春型，它们分别占总站点数的 29.7%、29.7%、27.1%和 13.5%。然后根据上述类型划分结果，按照不同的年变化类型进行区划划分，各种类型的空间分布如图 3.2 所示。

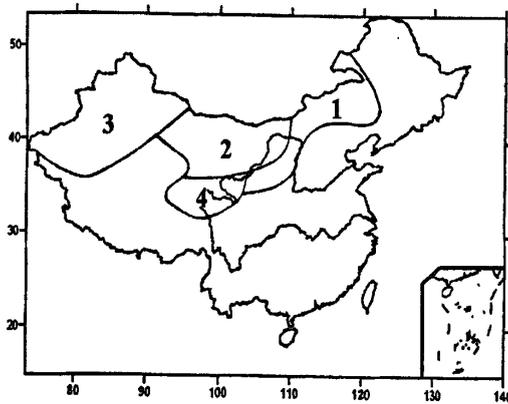


图 3.2 沙尘暴发生日数年变化各类型的空间分布

(1-春季型, 2-冬春夏型, 3-春夏型, 4-冬春型)

Fig. 3.2 Diagram of divisional distributions of the classification of annual variation of dust-storm occurrence days in the middle and west of Northern China (Label 1, 2, 3 and 4 respectively represent spring type, winter-spring-summer type, spring-summer type and winter-spring type.)

3.3.2 各类型变化特征

根据上述沙尘暴日数年变化类型的空间分布区划结果，对各区的区域平均沙尘暴日数年变化及各季节沙尘暴日数占年总日数的百分比进行了统计，结果如图

3.3 和表 3.1 所示。从表 3.1 中可以看出,除冬春型冬季沙尘暴发生最多外,其它三大类型均为春季最多;春夏型冬季沙尘暴最少,冬春型夏季最少,其它两种类型均为秋季最少。众所周知,强风、沙尘源和不稳定层结是沙尘暴发生的三个基本条件。中国北方中西部幅员辽阔、地形情况复杂,各地区下垫面生态环境、大气环流、天气系统、大气稳定度等的季节变化差异较大,是造成沙尘暴年变化的主要原因之一。下面本文将在分析上述各类型变化特征的基础上,从沙尘暴发生的三个主要条件出发来初步探讨不同类型沙尘暴年变化特征的成因。

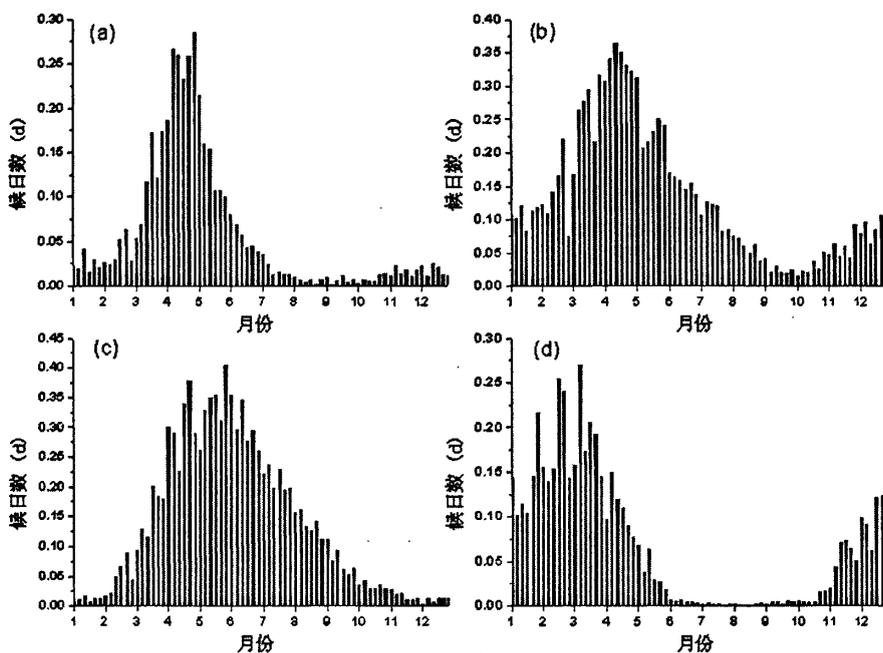


图 3.3 各区的区域平均候沙尘暴日数的年变化

(a-春季型, b-冬春夏型, c-春夏型, d-冬春型)

Fig. 3.3 Regional average annual variation of dust-storm occurrence days in the four regions

(Label a, b, c and d respectively represent spring type, winter-spring-summer type, spring-summer type and winter-spring type.)

表 3.1 各季节沙尘暴发生日数占年总日数的百分比 (%)

Table 1 Percentage of the occurrence days of dust storms in each season

类型	春季%	夏季%	秋季%	冬季%
春季型	72.5	11.6	4.4	11.5
冬春夏型	52.1	20.1	7.1	20.7
春夏型	48.0	40.0	7.8	4.2
冬春型	40.6	0.9	7.8	50.7

从图 3.2、图 3.3 和表 3.1 中可以看出,春季型主要分布在内蒙古 110°E 以东、陕西和甘肃东部。此类型沙尘暴高发期非常集中,在 3~5 月(占 72.5%),其中仅 4 月份沙尘暴发生日数就占全年的 35.5%,峰值出现在 4 月 6 候(如图 3.3(a))。下半年(6~12 月)沙尘暴极少发生(仅占 10.6%)。陕西、甘肃东部和内蒙古东部大部分地区下垫面植被覆盖情况相对较好,因此沙尘暴集中出现在植被覆盖率低、地表干燥疏松易于起沙、冷空气活动频繁的春季,尤其是 4 月份。

冬春夏型主要分布在内蒙古中西部、河西地区、宁夏和青海东北部(如图 3.2)。多发期 2~6 月,9 月最少。10 月中旬起沙尘暴逐渐增多,到次年春季达到最大,峰值出现在 4 月 3 候(如图 3.3(b))。春季沙尘暴日数占全年的 52.1%,夏季和冬季也各占 20%(表 3.1),沙尘暴多发期较长。冬春夏型分布地区多沙漠、戈壁,一方面提供了丰富的沙尘源,另一方面,干燥的下垫面产生的热力不稳定和河西地区地形“狭管效应”产生的气流加速作用,导致大风沙尘暴天气的频繁出现。该区是大风天气容易发生的地区,其沙尘暴的年变化主要与大风有关——大风集中发生在 3~7 月^[9,10],与沙尘暴年分布相符。夏季大风主要以系统加局地的对流不稳定引起的短时阵性大风为主,受高空小槽、切变线、热低压等天气系统影响,出现范围小、尺度小、持续时间短的夏季沙尘暴天气^[11~14]。冬季该区地处冷空气活动路径上,盛行强劲的偏西风,受冷空气入侵影响,沙尘暴有所增多,但由于近地层空气比较稳定、地表土壤冻结不易起沙,冬季仅是次高发季节。

春夏型主要分布在新疆(如图 3.2)。沙尘暴春、夏两季多发,多发期 4~7 月,峰值出现较晚,在初夏的 5 月 6 候,冬季最少(如图 3.3(c))。北疆夏季沙尘暴所占比重比南疆更高(占全年的 48.9%,较春季高 17.8%),是第一高发季节,峰值出现也更晚(在 6 月)。南疆塔里木盆地中央是面积 $33 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的塔克

拉玛干沙漠, 沙尘源一年四季都很丰富, 因而能否起沙主要取决于风力与热力条件。春夏季节, 塔克拉玛干沙漠增温剧烈, 在盆地中易形成热低压, 这时若有冷空气入侵塔里木, 将会触发不稳定加剧, 形成地面持续大风, 出现沙尘暴天气。冬季盆地被冷空气所堆积形成“冷空气湖”^[15], 大气稳定度非常高, 地面风力很小, 致使发生沙尘暴的概率很小。北疆与南疆相比虽然下垫面同样是沙漠, 但天气系统、地形走向、植被覆盖情况的不同使得北疆沙尘暴的年变化特征与南疆存在一定的差异。

冬春型分布在青海南部高原地区(如图 3.2), 冬季沙尘暴发生最多, 占全年比重较春季多 10.1% (表 3.1)。多发期 1~4 月, 峰值出现早, 在 3 月 2 候(图 3.3(d))。沙尘暴 6~10 月极少发生(仅占 2.3%), 11 月开始逐渐增多。青海南部高原地区海拔高, 强风易到达地面将地表沙尘扬起从而导致沙尘暴天气出现。受高原冬季风的影响, 高原地区大风日数冬、春季多, 夏季最少^[16], 与沙尘暴发生日数冬多夏少的年变化特征一致。

§ 3.4 沙尘暴日变化类型及其空间分布

热力不稳定是沙尘暴发生的基本条件之一, 沙尘暴的起沙时间则可以表征热力因子的特征。这里采用起沙时间(地方时)(即一次沙尘暴天气过程开始出现的时间)描述沙尘暴的日变化特征。将单个站点每次沙尘暴开始出现的具体时段以 0.5^h 为单位进行统计, 得出 24^h 每 0.5^h 沙尘暴起沙的频数, 与总沙尘暴次数相比得到该站起沙时间频率。以起沙频率分布作为因子进行聚类分析, 将沙尘暴日变化特征划分为三种类型, 各种类型的空间分布如图 3.4(a)所示。由图 3.4(b)可以看出, 午后到傍晚是沙尘暴的主要多发时段。各类型的日变化特征及空间分布区域(如图 3.4(a)和图 3.4(b)所示)是: ① 1 型分布最广、站点最多, 主要分布在研究区域内除青海东、南部和南疆盆地以外的其它地区。沙尘暴高发时段较长, 在 10~18 时, 峰值在 13 时。这显然与近地层空气热力稳定性的日变化有关。② 2 型主要分布在青海东、南部, 起沙高峰期非常集中, 在 11~14 时(仅这四个小时起沙的沙尘暴就占总数的 69.2%), 峰值在 12 时, 19 时至次日 7 时沙尘暴极少发生(仅占 3.4%)。这是因为, 从热力因子上看, 由于青藏高原突出于大气中, 午后近地层接受太阳辐射较强, 大气层经常处于不稳定状态。然而, 平均而言,

10月至次年2月(即该区沙尘暴高发期)青藏高原上空大气有净得的热量亏损,是大气冷源^[17],因而热力条件有限,热力不稳定层结仅多发于午后几小时,使得沙尘暴起沙高峰期非常集中。③ 3型主要分布在南疆盆地,沙尘暴全天都有发生,活跃期长,有两个高发时段分别在7~10时和14~20时,最高峰值在16时,次峰值在8时。在南疆塔克拉玛干沙漠地区,春夏季节由于热力不稳定条件容易得到满足并且沙尘源丰富,因此沙尘暴起沙活跃期长。

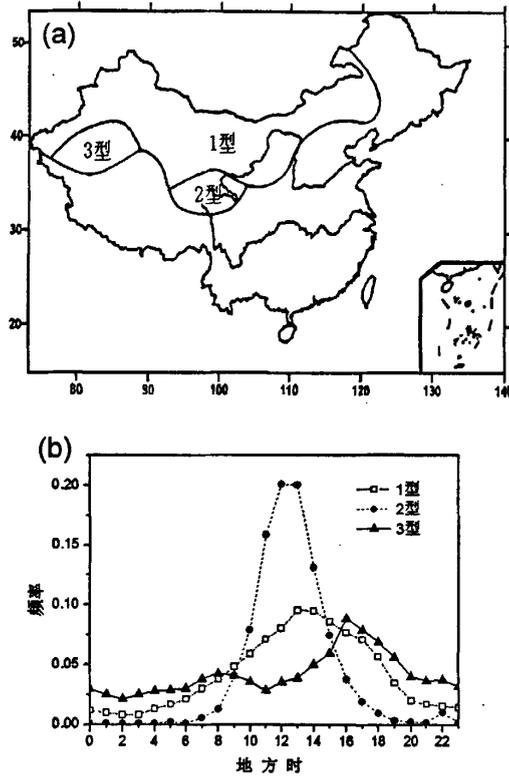


图 3.4 沙尘暴日变化各类型的空间分布(a)及其各区平均沙尘暴起沙时间频率分布(b)

Fig. 3.4 (a) Divisional distributions of the classification of diurnal variation of dust storms and (b) regional average diurnal variation of dust-storm frequency in these regions

§ 3.5 沙尘暴持续时间分布类型及其空间分布

以 0.5^h 为单位统计出沙尘暴在各持续时间段内的频率分布,以此作为因子进

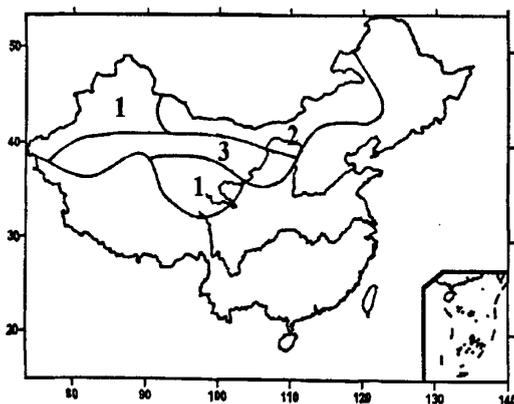


图 3.5 沙尘暴持续时间频率分布各类型的空间分布

(1-短时型, 2-中间型, 3-持续型)

Fig. 3.5 Diagram of divisional distributions of the classification of duration variation of dust storms (Label 1, 2 and 3 respectively represent short-time type, medium type and continuous type.)

表 3.2 各区域平均的沙尘暴持续时间 (min) 频率分布 (%)

Table 3.2 Temporal statistical characteristics of dust-storm duration in the three regions

类型	持续时间 (min) 的频率 %						
	1~30	31~60	61~90	91~120	121~240	241~360	>360
短时型	72.8	12.0	5.6	2.6	4.4	1.4	1.1
中间型	47.0	15.1	8.5	5.8	12.8	5.4	5.4
持续型	32.0	17.7	11.2	7.9	16.9	7.2	7.0

行聚类分析, 将沙尘暴持续时间分布特征划分为三种类型: 短时型、中间型和持续型, 各种类型的空间分布如图 3.5 所示。各类型的持续时间频率分布特征及空间分布 (如表 3.2 和图 3.5 所示) 的具体结果是: 短时型主要分布在北疆、南疆北部沿天山一带和青海, 沙尘暴持续时间短, 大部分在 0.5h 以内 (占 72.8%), 绝大部分不超过 1h (占 84.9%), 持续 2h 以上的极少 (仅占 6.9%); 中间型主要分布在新疆东部、甘肃西北部和内蒙古大部分地区, 沙尘暴持续时间较长, 大部分在 1h 以内 (占 62.1%), 2h 以上的占 23.6%; 持续型主要分布在南疆盆地、河西地区、宁夏、陕西、甘肃东部和内蒙古南部, 沙尘暴持续时间长, 持续 1h 以

内的不到一半，大部分在 1.5h 以内（占 60.9%），2h 以上的占 30.1%。很显然，沙尘暴发生频率高的地区，沙尘暴持续时间也长。另外，还有少数站点持续时间很长，0.5h 以内的沙尘暴不到 20%，此类站点分布散乱、多为沙尘暴高发站，故而未单独划为一类。

§ 3.6 沙尘暴时间变化特征的地域差异

由以上分析可知，沙尘暴的年变化、日变化和持续时间分布特征可分别被划分为四种、三种和三种类型，表明沙尘暴的时间变化特征存在明显的地域差异。因此，依据上述类型划分的结果，把时间变化特征相似的相邻站点划成一片，然后对各个地区沙尘暴的年变化、日变化和持续时间分布特征进行了总结，结果如表 3.3 所示，旨在为今后的研究和预报工作提供依据。

表 3.3 中国北方中西部各地区沙尘暴的时间变化特征

Table 3.3 Temporal statistical characteristics of dust storms in different regions of the middle and west of Northern China

地区	年变化	日变化	持续时间	变化特征
北疆	春夏型	1 型	短时型	4~8 月多发，夏季最多冬季最少，峰值在 6 月；起沙高峰期 12~18h；持续时间短，大部分在 0.5h 以内
南疆塔里木盆地	春夏型	3 型	持续型	4~7 月多发，春夏季最多冬季最少；起沙高峰期有两个；大部分持续 1.5h 以内，2h 以上的占一定比例
内蒙古西部、甘肃西北部	冬春夏型	1 型	中间型	2~6 月多发，春季最多，全年仅秋季较少；起沙高发期 10~18h；大部分持续 1h 以内
河西地区、宁夏和内蒙古南部	冬春夏型	1 型	持续型	2~6 月多发，春季最多，全年仅秋季较少；起沙高发期 10~18h；大部分持续 1.5h 以内，2h 以上的占一定比例
青海东北部	冬春夏型	2 型	短时型	2~6 月多发，春季最多，全年仅秋季较少；起沙高峰期 11~14h；持续时间短，大部分在 0.5h 以内
青海南部高原地区	冬春型	2 型	短时型	1~4 月多发，冬季最多；起沙高峰期 11~14h；持续时间短，大部分在 0.5h 以内
内蒙古东部	春季型	1 型	中间型	3~5 月多发；起沙高发期 10~18h；大部分持续 1h 以内
陕西、甘肃东部	春季型	1 型	持续型	3~5 月多发；起沙高发期 10~18h；大部分持续 1.5h 以内，2h 以上的占一定比例

从以上对沙尘暴的年变化、日变化以及持续时间频率特征的各种类型进行分

析及成因探讨中可知,某一时期内强风、沙尘源和热力不稳定层结三者在不同地区配置情况的差异导致了沙尘暴时间变化特征的地域差异。当三者配置情况最适宜沙尘暴发生条件的时候便是当地沙尘暴天气的高发期和高发时段。

§ 3.7 沙尘暴年发生日数的变化趋势

不同年变化类型的沙尘暴年发生日数的年际变化如图 3.6 所示。由图可以看出,从 1954~2005 年沙尘暴年发生日数总体呈波动减少趋势,这与以往关于沙尘暴日数变化趋势的研究结果^[6,7,18-20]基本一致。各种类型沙尘暴的变化趋势又略有差异(如图 3.6 所示)。其中 50 年代中后期沙尘暴年发生日数最多,1955 年冬春夏型沙尘暴的年发生日数多达 23.7d;60 年代初略有降低,之后又有增加;春季型、冬春夏型和冬春型沙尘暴日数从 60 年代末、70 年代初开始波动下降,春夏型则从 70 年代末才开始下降;70 年代末到 90 年代,春季型、冬春夏型和春夏型均呈下降趋势,而冬春型沙尘暴年发生日数在 80 年代中期又有所增加,之后降低;到 1997 年,4 种类型沙尘暴的年发生日数均降至最低,21 世纪初期沙尘暴又有所增加。

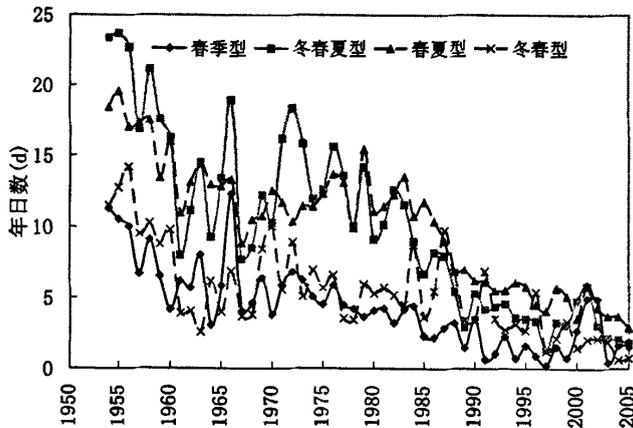


图 3.6 不同年变化类型的沙尘暴年发生日数的年际变化

Fig 3.6 Interannual variation of annual occurrence days of different kinds of dust storms

§ 3.8 本章小结

(1) 我国北方中西部沙尘暴日数的年变化特征可划分为四大类型, 即春季型、冬春夏型、春夏型和冬春型, 它们分别占总数的 29.7%、29.7%、27.1%和 13.5%。除冬春型冬季沙尘暴发生最多外, 其他三大类型均为春季最多; 春夏型冬季沙尘暴最少, 冬春型夏季最少, 其他两种类型均为秋季最少。

(2) 沙尘暴的日变化(起沙时间)特征可划分为三种类型: 1型分布最广, 分布在研究区域内除青海东、南部和南疆盆地以外的其它地区, 起沙高峰期在 10~18 时; 2型主要分布在青海东、南部, 起沙高峰期非常集中, 在 11~14 时; 3型主要分布在南疆盆地, 有两个高发时段。

(3) 沙尘暴的持续时间分布特征也可划分为三种类型: 短时型、中间型和持续型。短时型主要分布在北疆、南疆北部沿天山一带和青海, 沙尘暴持续时间短, 大部分在 0.5h 以内; 中间型主要分布在新疆东部、甘肃西北部和内蒙古大部分地区, 沙尘暴持续时间大部分在 1h 以内; 持续型主要分布在南疆盆地、河西地区、宁夏、陕西、甘肃东部和内蒙古南部, 沙尘暴持续时间大部分在 1.5h 以内。

(4) 沙尘暴的时间变化特征存在明显的地域差异, 这种差异是同一时期内强风、沙尘源和不稳定层结三者在不同地区配置情况差异的综合反映。

参考文献

- [1] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349-356.
- [2] Jauregui E. The dust storms of Mexico City. *Inter. J. Climatol.*, 1989, 9(2): 169-180.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 邱新法, 曾燕, 缪启龙.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.
- [8] 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.
- [9] 江灏, 吴虹, 尹宪志, 等.河西走廊沙尘暴的时空变化特征与其环流背景[J].高原气象, 2004, 23 (4): 548-552.
- [10] 丁荣, 张德玉, 梁俊宁, 等.甘肃河西走廊中部近 45a 来大风沙尘暴气候背景分析[J].中国沙漠, 2006, 26 (5): 792-796.
- [11] 岳平, 牛生杰, 王连喜, 等.一次夏季强沙尘暴形成机理的综合分析[J].中国沙漠, 2006, 26 (3): 370-374.
- [12] 王锡稳, 黄玉霞, 刘治国, 等.甘肃夏季特强沙尘暴分析[J].气象科技, 2007, 35 (5): 681-686.
- [13] 王锡稳, 刘治国, 黄玉霞, 等.河西走廊盛夏一次强沙尘暴天气综合分析[J].气象, 2006, 32 (7): 102-109.
- [14] 李玲萍, 罗小玲, 王润元.盛夏一次区域性强沙尘暴天气个例分析[J].灾害学, 2007, 22 (4): 81-85.
- [15] 韩永翔, 方小敏, 宋连春, 等.塔里木盆地中的大气环流及沙尘暴成因探讨——根据沙漠风积地貌和气象观测重建的风场[J].大气科学, 2005, 29 (4): 627-635.
- [16] 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.
- [17] 宋敏红, 吴统文, 钱正安.高原地区 NCEP 热通量再分析资料的检验及在夏季降水预测中的应用[J].高原气象, 2000, 19 (4): 467-475.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 丁瑞强, 王式功, 尚可政等.近 45a 我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J].中国沙漠, 2003, 23 (3): 306-310.

第四章 近几年沙尘天气对我国北方环保重点城市可吸入颗粒物 (PM₁₀) 浓度影响的研究

§4.1 引言

随着社会经济的快速发展以及工业化水平的提高,人们越来越重视生存环境质量。20世纪80年代以来,由于工业突飞猛进、世界人口不断增加、城市化进程加快等,造成城市大气污染严重,环境质量评价以及大气污染防治已成为城市环境和城市气候研究领域的主要课题之一。

国家环保总局每日公布的大气环境污染物主要有三种:二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)和可吸入颗粒物(PM₁₀)。其中PM₁₀是总悬浮颗粒物(TSP)中对人体危害较大的污染物质,它是指粒径(空气动力学当量直径)≤10μm的颗粒物。因其粒径小,可在大气中长期飘浮,能长驱直入眼、鼻、喉、皮肤等器官和组织,并经过呼吸道沉积于肺泡。肺内尘粒一旦超过肺本身的清除能力,就会沉积于肺与胸腔内,导致肺及胸膜的病变,引起支气管炎、肺炎、肺气肿等疾病(<http://env.people.com.cn/>)。因此,颗粒物污染特别是沙尘污染造成的大气环境问题正越来越受到关注。

大气颗粒物重污染事件是沙尘天气最常见的危害之一。诸多大气重污染事件均与沙尘天气的发生有关^[1-4]。近年来,很多学者对沙尘天气造成的颗粒物污染进行过观测和研究。在国外,沙尘天气对空气质量的影响是气象学者关注的重点问题之一。有关研究已表明,北非地区粉尘的释放可以造成相关地区严重的环境问题。人们特别关注从非洲撒哈拉地区向东北和西北大西洋地区^[5-11]、南美地区^[12]和地中海地区^[13-14]的长距离的大气沙尘颗粒物质的输送对相关地区的影响。

我国学者对沙尘天气的频繁发生对颗粒物污染的影响也做了一些有益的研究,王伟等人^[15]的研究表明发生沙尘暴时北京市TSP和PM₁₀质量浓度极高,远远超过了相应的标准,大气气溶胶的污染也表现出沙尘污染特征:来源于沙尘和土壤的大粒子对大气气溶胶的贡献明显增加,其中来源于土壤的离子和元素浓度骤增。徐鸣^[16]等通过对2001年5月11日乌鲁木齐市发生的特大沙尘暴及同期有关监测数据进行分析,指出沙尘暴所携带的沙尘及其造成的城市扬尘是沙尘暴来

临时影响环境空气质量的主要因素。张宁等^[17]研究了沙尘暴对甘肃大气降尘背景值的影响及其沉降的分布状况，其研究表明，与非沙尘暴期相比，沙尘暴发生期河西走廊的背景降尘量平均上升了 1.87 倍。荀建国等^[18]的研究也表明沙尘暴的袭击对济南市大气环境造成严重危害，影响时间长，城市空气中颗粒物浓度可比平时高出 22.7 倍。

上述研究多数侧重于沙尘暴天气对个别城市空气质量的影响方面，对沙尘天气影响我国北方不同城市空气质量的程度和范围研究较少，缺乏不同城市受影响程度的对比研究。本章将在分析我国北方 17 个环保重点城市可吸入颗粒物（ PM_{10} ）污染现状的基础上，对比分析不同城市的颗粒物污染受春季沙尘天气影响的程度，并以一次强沙尘暴天气过程为例，对沙尘暴影响我国北方城市空气质量的程度和范围进行探讨。这 17 个城市（其空间分布见图 4.1）为北京、天津、石家庄、太原、呼和浩特、济南、青岛、大连、沈阳、长春、哈尔滨、郑州、西安、银川、兰州、西宁和乌鲁木齐。

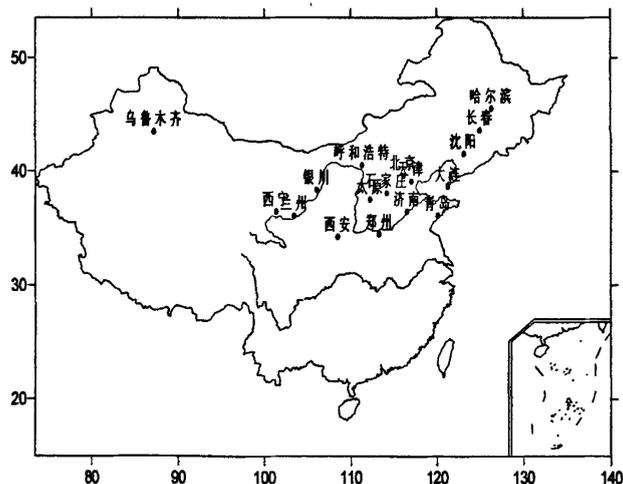


图 4.1 我国北方 17 个环保重点城市分布图

Fig. 4.1 Distribution of 17-key environmental protection cities in Northern China

§4.2 我国北方环保重点城市可吸入颗粒物（ PM_{10} ）污染现状分析

2000~2008 年我国北方 17 个环保重点城市大气中 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 三种污

染物分别为首要污染物时的平均出现频率如图 4.2 所示，可以明显看出北方城市最主要的大气污染物是可吸入颗粒物（ PM_{10} ），各个城市 PM_{10} 为首要污染物的平均发生频率都非常高，达到 80~100%，即使出现频率最小的天津也达到 81.5%，可见大气颗粒物在我国北方城市的大气污染中占有极其重要的地位。

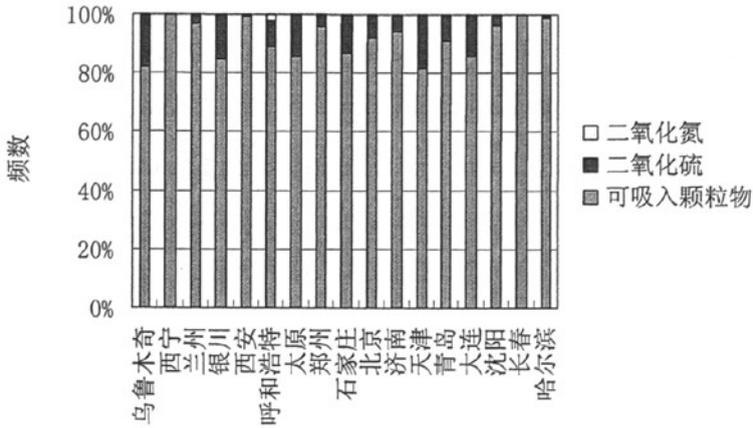


图 4.2 2000~2008 年我国北方环保重点城市大气中首要污染物的平均发生频数

Fig. 4.2 Average occurrence frequency of primary air pollutant in key environmental protection cities in Northern China during 2000~2008

空气污染指数（Air Pollution Index，简称 API）是根据大气环境质量和标准以及各项污染物的生态环境效应以及对人体健康的影响程度，将常规检测的空气污染物浓度简化成单一的概念性指数，指数分为 5 级（如表 4.1 所示），其中污染指数 III 级及以上会对人体和环境产生危害（污染指数 III 级属于轻微污染，IV 级属于中度污染，V 级属于重度污染）。这里计算了 PM_{10} 为首要污染物时污染指数 III 级及以上污染日发生频数，结果如图 4.3 所示，可以看出，总体而言，2000~2008 年我国北方城市 PM_{10} III 级及以上污染日发生频数较高，除青岛、大连和长春三城市外，其它城市均超过 15%，兰州、太原和北京 III 级及以上污染日发生频数最高，分别达到 45.6%、44.4%和 39.1%。虽然由于各方面环保力度的加强，我国北方城市空气质量恶化的趋势得到一定的遏制^[19]，但是不能否认的是颗粒物污染状况仍然很严重。

表 4.1 空气污染指数的等级和分级限值

Table 4.1 Levels of API and its limiting values in different levels

API	污染状况	污染等级	相应的 PM ₁₀ 浓度值 (μg/m ³)
0~50	优	I	<50
51~100	良	II	50~150
101~150	轻微污染	III1	150~350
151~200	轻度污染	III2	
201~250	中度污染	IV1	350~420
251~300	中度重污染	IV2	
>300	重污染	V	>420

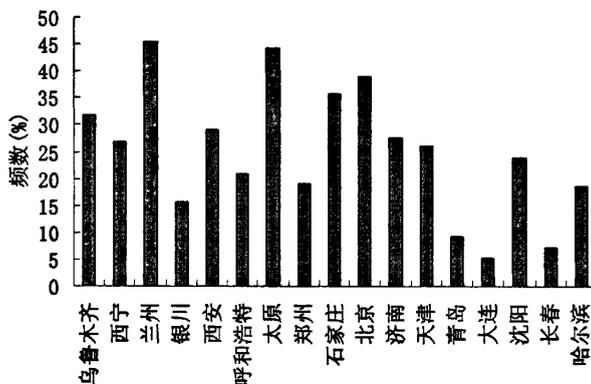


图 4.3 2000~2008 年我国北方环保重点城市 PM₁₀III 级及以上污染日发生频数

Fig. 4.3 Occurrence frequency of PM₁₀ pollution above level III in key environmental protection cities in Northern China during 2000~2008

下面看一下这 17 个城市 PM₁₀ 月平均浓度的年变化, 如图 4.4 所示, 可以清楚地看到 PM₁₀ 浓度冬、春两季高, 夏、秋两季低。我国北方城市都是以燃煤为主要能源, 冬季采暖期主要以燃煤取暖, 燃烧排放量大, 加之逆温频发, 造成冬季 PM₁₀ 浓度较高。在沙尘天气多发的春季, PM₁₀ 污染状况严重, 3、4 月份月平均浓度均超过国家 II 级标准 (150μg/m³), 如图 4.4。

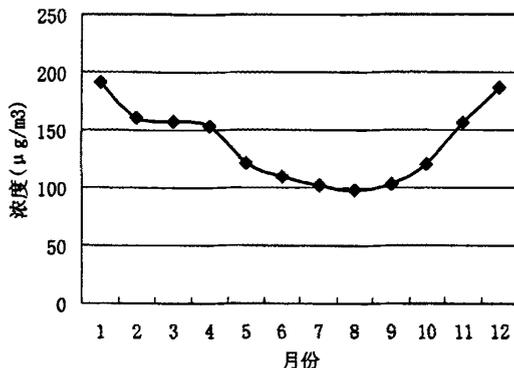


图 4.4 2000~2008 年我国北方环保重点城市 PM₁₀ 月平均浓度的年变化

Fig. 4.4 Annual variations of monthly averages of PM₁₀ concentrations in key environmental protection cities in Northern China during 2000~2008

§4.3 北方环保重点城市颗粒物污染受沙尘天气影响程度的分析

由第三章的分析可知,沙尘暴通常春季最多,秋季尤其是9月份最少。因此,用春季(3~5月)PM₁₀月平均浓度与9月份月均值之比可以表征沙尘天气对空气质量的影响程度(即沙尘影响指数),据此就可以对比近8年来(即2001~2008年,2000年无3~5月PM₁₀浓度资料)沙尘天气对不同城市颗粒物污染的影响程度,如图4.5所示。可以看到,在春季沙尘天气多发期,北方城市颗粒物污染均受到不同程度的影响,影响程度自西向东降低,对西部城市的影响高于东部城市,其中对银川、兰州和西宁三城市的影响程度最大。这与各城市离主要沙尘源地的远近以及沙尘的传输路径有关。

2006年是我国进入新世纪以来沙尘天气最为严重的一年(如图4.6),沙尘天气频次高,多于前5年同期平均值(12.2次)。相应地,与2001年以来近8年沙尘影响指数的平均水平(图4.5)相比,2006年沙尘天气对我国北方城市颗粒物污染的影响程度也出现倍增(如图4.7所示),清楚地表明北方春季颗粒物高污染主要与沙尘天气有关。2006年17个重点城市的沙尘影响指数平均达到4.17(即春季(沙尘天气最多)PM₁₀月均浓度是9月份(沙尘天气最少)月均值

的 4.17 倍), 而在空气质量受沙尘天气影响最为严重的银川和兰州, 其影响指数高达 6.27 和 5.90, 可见沙尘天气对城市颗粒物污染的影响之重。

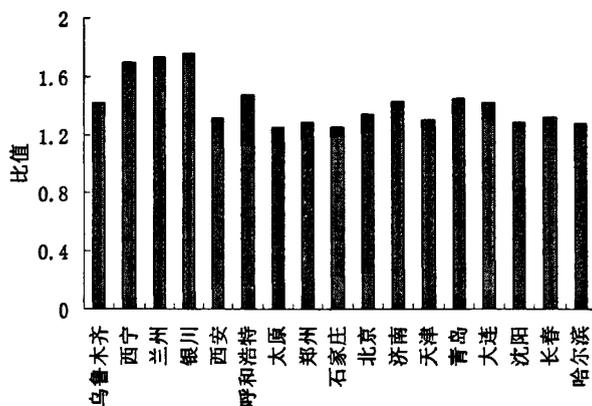


图 4.5 2001~2008 年北方环保重点城市春季 PM₁₀ 月平均浓度与 9 月份月均值的比值
(以上城市按其地理位置自西向东排列)

Fig. 4.5 Ratio of monthly average of PM₁₀ concentration in spring to that in September in key environmental protection cities in Northern China during 2001~2008
(These cities arranged from west to east according to their geographic position.)

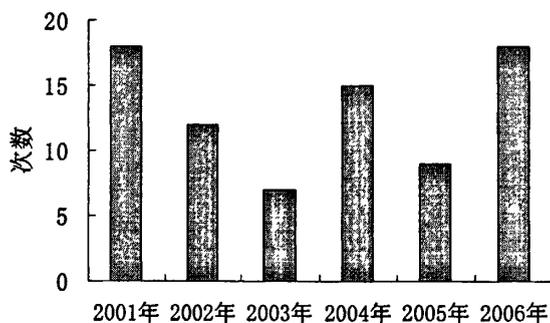


图 4.6 2001~2006 年我国春季沙尘天气次数

Fig. 4.6 Number of dust events in China in the spring of 2001~2006

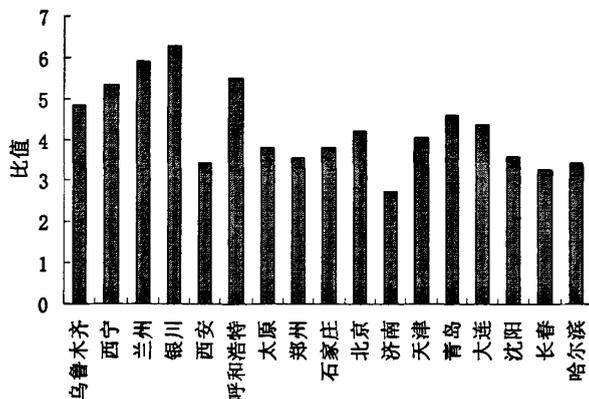


图 4.7 2006 年北方环保重点城市春季 PM_{10} 月平均浓度与 9 月份月均值的比值
(以上城市按其地理位置自西向东排列)

Fig. 4.7 Ratio of monthly average of PM_{10} concentration in spring to that in September
in key environmental protection cities in Northern China in 2006
(These cities arranged from west to east according to their geographic position.)

§4.4 一次强沙尘暴过程对我国北方城市 PM_{10} 浓度影响的分析

本小节以发生在 2006 年 3 月 9 日~12 日的强沙尘暴天气过程为例, 分析其对我国北方城市空气质量的影响, 以期对沙尘暴过程影响我国北方城市空气质量的程度和范围进行探讨。

由于目前国家环保总局每日发布的环保重点城市空气质量日报中, API 指数是指前一日 12:00 至当日 12:00 的空气污染状况, 因此, 为了与污染日界相吻合, 在本小节中, 日界定为 12:00, 定义前一日 12:00 至当日 12:00 有沙尘天气(浮尘/扬沙/沙尘暴/强沙尘暴)发生的记为一个沙尘日。

2006 年 3 月 9~12 日, 由西伯利亚强冷空气形成的蒙古气旋在加强东移的过程中携带着滚滚沙尘由蒙古国入境袭击我国。此次强沙尘暴天气强度大、持续时间长、影响范围广, 是近 5 年来影响范围最大的一次沙尘天气, 其先后影响西北、华北、东北和华中等地区的 16 个省(区、市), 受影响人口约 4.3 亿^[20]。受

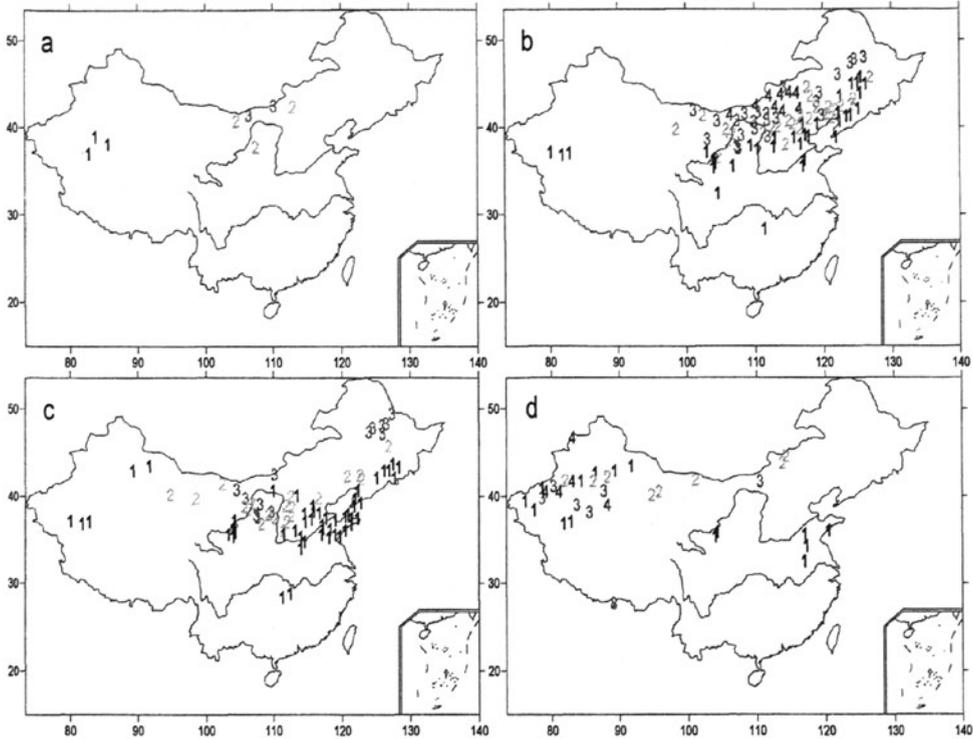


图 4.8 2006 年 3 月 9 日~12 日观测到沙尘天气的气象站点

(a: 3 月 9 日, b: 3 月 10 日, c: 3 月 11 日, d: 3 月 12 日, 日界为 12 时; 1、2、3、4 分别表示浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴)

Fig. 4.8 Distribution of meteorological observation stations where the dust event occurred during 9~12 March 2006. a: 9 March; b: 10 March; c: 11 March; d: 12 March. Labels of 1, 2, 3 and 4 respectively represent floating dust, blowing dust, dust storm and strong dust storm.

强冷空气影响, 3 月 9~12 日我国西北以及中东部的大部分地区先后出现了 5~7 级偏北风, 短时风力达 8~9 级, 受大风影响, 北方地区出现了大范围沙尘天气过程。其中, 南疆盆地、内蒙古中西部和东南部、青海西北部、甘肃中部、宁夏北部、陕西北部、山西中北部、河北北部、辽宁北部、吉林中西部、黑龙江西部以及北京市出现了扬沙和沙尘暴天气, 局部地区出现了能见度为 100~500 米的强沙尘暴 (<http://www.duststorm.com.cn/>)。9 日, 内蒙古锡林郭勒盟的局部地区能见度曾一度为零, 达到黑风暴标准。根据气象卫星监测, 此次沙尘天气影响范围达 230.5 万 km^2 [21]。

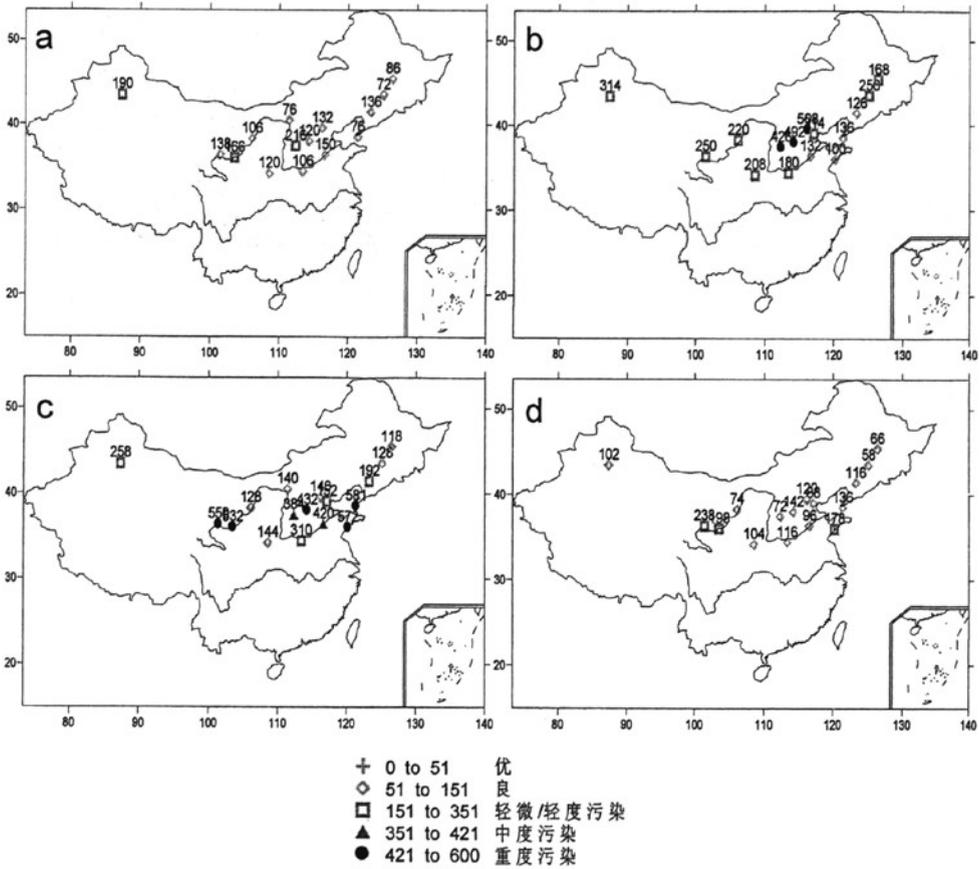


图 4.9 2006 年 3 月 9 日~12 日北方 17 个环保重点城市的 PM₁₀ 日平均浓度 (µg/m³)
 (a: 3 月 9 日, b: 3 月 10 日, c: 3 月 11 日, d: 3 月 12 日, 日界为 12 时, 图中标注
 数字为 PM₁₀ 日浓度值)

Fig. 4.9 Daily PM₁₀ concentrations in 17-key environmental protection cities in Northern China during 9~12 March 2006 (unit: µg/m³). a: 9 March; b: 10 March; c: 11 March; d: 12 March.

此次强沙尘暴天气发生区的空间分布以及在此期间我国北方 17 个环保重点城市 PM₁₀ 浓度的变化如图 4.8 和图 4.9 所示。将图 4.8 和图 4.9 进行对比分析, 可以看到, 3 月 9 日 12 时之前仅有内蒙古中部的个别地区出现沙尘天气 (图 4.8 (a))。9 日 12 时至 10 日 12 时, 大范围沙尘天气出现, 沙尘发生区主要位于南疆盆地、黄河中上游地区、华北北部以及东北西部地区 (图 4.8 (b)), 受其影响我国北方大部分环保重点城市的 PM₁₀ 浓度明显上升 (图 4.9 (b)), 多个城市出

现 III 级及以上 ($>150\mu\text{g}/\text{m}^3$) 污染, 兰州、呼和浩特、太原、石家庄和北京出现 V 级重度污染 ($>420\mu\text{g}/\text{m}^3$), 兰州和呼和浩特的空气污染指数甚至达到 500 ($>600\mu\text{g}/\text{m}^3$), 出现沙尘暴天气的呼和浩特的 PM_{10} 浓度更是较前一日增加了 6.9 倍。10 日 12 时至 11 日 12 时, 沙尘区向东、向南扩展, 影响到黄河下游地区和胶东半岛 (图 4.8 (c)), 随着沙尘向下游输送, 位于黄河下游的郑州和济南、胶东半岛的青岛、辽东半岛的大连和沈阳的 PM_{10} 浓度显著升高 (图 4.9 (c)), 其中济南和青岛还出现浮尘天气。11 日 12 时至 12 日 12 时, 北方中、东部地区的沙尘天气结束, 各城市 PM_{10} 浓度回落 (图 4.9 (d)), 而南方部分地区在沙尘输送的作用下也受到此次过程的影响, 江苏徐州、安徽寿县和山东兖州等地出现浮尘, 如图 4.8 (d) 所示。由以上分析可以看出, 颗粒物浓度的变化可以清楚地反映沙尘的输送、移动及强度变化。在沙尘天气发生区颗粒物浓度受到严重影响, 容易造成严重的大气颗粒物污染事件, 污染指数甚至会高达 500, 各地受污染的程度从强沙尘暴中心区向外围逐渐减轻; 而在非沙尘天气发生区, 虽然当地并未出现沙尘天气, 但在上游沙尘输送的作用下其颗粒物浓度也会受到较大影响。这表明即使在远离沙尘源地的地区, 沙尘天气依然会对其产生重要影响, 由此可见沙尘天气对我国北方城市颗粒物污染影响的范围之广、程度之大。

§4.5 本章小结

本章在分析我国北方 17 个环保重点城市可吸入颗粒物 (PM_{10}) 污染现状的基础上, 对比分析了不同城市颗粒物污染受春季沙尘天气影响的程度, 并以一次强沙尘暴天气过程为例, 对沙尘暴影响我国北方城市空气质量的程度和范围进行探讨。结果表明:

(1) 2000~2008 年我国北方 17 个环保重点城市大气的首要污染物主要是可吸入颗粒物 (PM_{10}), 其为首要污染物时的平均发生频率极高 (17 个城市均高于 80%), PM_{10} III 级及以上污染日发生频数也较高 (其中兰州市超标率最高), 颗粒物污染状况严重。

(2) 春季北方城市颗粒物污染的严重状况主要与沙尘天气有关。春季沙尘天气对北方城市颗粒物污染的平均影响程度 (即沙尘影响指数) 自西向东降低, 其中对银川、兰州和西宁三城市的影响程度最大。在沙尘天气活跃年, 其对城市

颗粒物污染的影响程度倍增。

(3) 沙尘天气过程的发生容易造成严重的颗粒物污染事件。在沙尘暴天气发生期间,各地受颗粒物污染的程度从强沙尘暴中心区向外围逐渐减轻。在非沙尘发生区,虽然当地并未出现沙尘天气,但在上游沙尘输送的作用下其颗粒物浓度也会受到较大影响。颗粒物浓度的时空变化可以清楚地反映沙尘的输送、移动及强度变化。

参考文献

- [1] Wang Shigong, Yuan Wei and Shang Kezheng. The impacts of different kinds of dust events on PM10 pollution in northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 7975-7982.
- [2] 杨民, 王式功, 李文莉等. 沙尘暴天气对兰州市环境影响的个例分析[J]. *气象*, 2004, 30 (4): 46-50.
- [3] Lee Byeong-Kyu, Jun Na-Young, Lee Haengah Kim. Comparison of particulate matter characteristics before, during, and after Asian dust events in Incheon and Ulsan, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 1535-1545.
- [4] 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 赵承易. 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.
- [5] Prospero, J.M., Ness, R.T., Impact of the North African drought and El Niño on mineral dust in the Barbados trade winds [J]. *Nature*, 1986, 320: 735-738.
- [6] Conde-Gaussen, G., Rognon, P., Bergametti, G., et al., Saharan dust over Fuerteventura Island (Canaries), chemical and mineralogical characteristics, air mass trajectories and probable sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 9711-9753.
- [7] Bergametti G., Gomes L., CoudeH-Gaussen, et al., African dust observed over Canary Islands: source regions identification and transport pattern for some summer situation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 14855-14864.
- [8] Muhs, D.R., Bush, C.A., Stewart, K.G., Geochemical evidence of Saharan dust parent material for soils developed on quaternary limestones of the Caribbean and Western Atlantic islands [J]. *Quaternary Research*, 1990, 33: 157-177.

- [9] Savoie D.L., Prospero J.M., Oltmans S.J., et al., Sources of nitrate and ozone in the marine boundary layer of the tropical North Atlantic. *Journal Geophysical Research* [J], 1992, 97: 11575-11589.
- [10] Chiapello, I., Bergametti, G., Gomes, L., Chatenet, B., Dulac, F., Pimienta, J., Santos Soares, E., An additional low layer of Sahelian and Saharan dust over the North~Eastern Tropical Atlantic [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22: 3191-3194.
- [11] Rajkumar, W.S., Siung Chang, A., Suspended particulate matter concentrations along the East-West Corridor, Trinidad, West Indies [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 1181-1187.
- [12] Prospero, J.M., Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: impact of African dust on the environment of Southeastern United States [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1999, 96: 3396-3403.
- [13] Loÿe-Pilot, M.D., Martin, J.M., Morelli, J., Influence of Sahara dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean [J]. *Nature*, 1986, 321: 427-428.
- [14] Guerzoni, S., Molinaroli, E., Chester, R., Saharan dust inputs to the western Mediterranean sea: depositional pattern, geochemistry and sedimentological implications [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 44: 631~654.
- [15] 王玮, 岳欣, 刘红杰等.北京市春季沙尘暴天气大气气溶胶污染特征研究[J].*环境科学学报*, 2002, 22 (4): 494-498.
- [16] 徐鸣, 王建国.一次特大沙尘暴对乌鲁木齐市环境空气质量的影响分析[J].*干旱环境监测*, 2002, 16 (3): 139-144.
- [17] 张宁, 黄维, 常沁春等.沙尘暴对甘肃大气降尘背景值的影响研究[J].*中国沙漠*, 1998, 18 (增1): 95-98.
- [18] 荀建国, 韩道汶, 王志国等.济南市沙尘暴污染影响和物理化学特性分析[J].*内蒙古环境保护*, 2003, 15 (4): 34-36.
- [19] 马雁军, 崔劲松, 刘晓梅, 张菁.1987—2002年辽宁中部城市群大气污染物变化特征分析[J].*高原气象*, 2005, 24 (3): 428-435.
- [20] 彭继平, 李钢铁.2006年我国沙尘暴灾害特点及原因分析[J].*干旱区资源与环境*, 2008, 22 (2): 61-64.
- [21] 邹旭恺, 张强.2006年沙尘天气解析[J].*中国减灾*, 2006, 5: 16-17.

第五章 沙尘天气重点影响地区——兰州市不同粒径 大气颗粒物污染特征及其成因分析

§5.1 引言

从上一章中可知,兰州市是我国颗粒物污染最严重的城市之一,同时,它也是我国北方城市之中受沙尘天气影响程度(沙尘影响指数)最严重的城市之一。因此,在兰州市设立监测点监测大气颗粒物污染状况对于研究沙尘天气对城市不同粒径颗粒物污染的影响具有十分重要的意义。在下面几章中,本文以兰州市作为受沙尘天气重点影响地区的代表城市,探讨兰州市不同粒径颗粒物的污染特征以及沙尘天气等不同类型的典型天气过程对其颗粒物污染影响的变化规律及其产生机制。

由于受当地污染源的排放^[1]、特殊地形^[2]、不利的大气扩散条件^[3,4]以及上游地区沙尘输送^[5-7]等多方面因素的综合影响,尤其是上游沙尘输送,使兰州市成为我国颗粒物污染最严重的城市之一。然而,已有的研究工作仅限于 TSP 和 PM₁₀,对小粒径颗粒物 PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 污染浓度的变化特征却研究甚少,尤其缺乏对不同粒径颗粒物污染浓度的同时监测和综合性的比较研究。由于不同粒径颗粒物的来源及其对环境和人体健康的危害不尽相同,为了对其有一个全面的了解,本章选取颗粒物浓度资料最全的 2005 年,采用 2005 年 1 月至 2006 年 2 月兰州市 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 4 种不同粒径大气颗粒物的浓度监测资料,分析了此段时间内兰州市不同粒径大气颗粒物浓度的年变化、日变化特征及其成因,并从上游沙尘输送以及当地气象条件两个方面,对其与兰州市不同粒径颗粒物污染的关系进行了初步研究。

§5.2 2000~2008 年兰州市可吸入颗粒物 (PM₁₀) 污染现状

首先,利用兰州市环保局公布的 API 指数反算出首要污染物为可吸入颗粒物 (PM₁₀) 时对应的 PM₁₀ 日均浓度,对近年来兰州市可吸入颗粒物污染现状作一分析。2000~2008 年兰州市大气中 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 三种污染物分别为首要

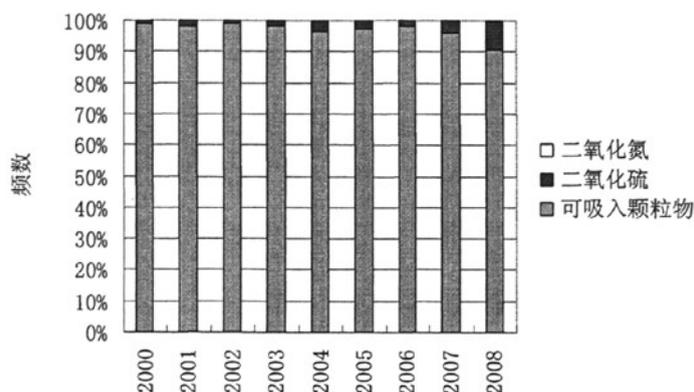


图 5.1 2000~2008 年兰州市大气中首要污染物的平均发生频数

Fig. 5.1 Average occurrence frequency of primary air pollutant in Lanzhou during 2000~2008

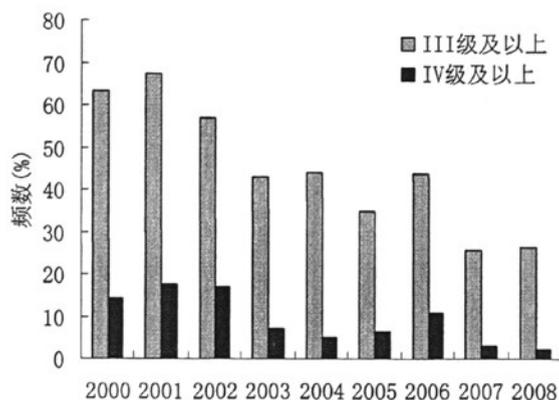


图 5.2 2000~2008 年兰州市 PM₁₀ III 级/IV 级及以上污染日发生频数

Fig. 5.2 Occurrence frequency of PM₁₀ pollution above level III/IV in Lanzhou during 2000~2008

污染物时的平均出现频率如图 5.1 所示,可以看出,兰州市最主要的大气污染物是可吸入颗粒物,与其它北方环保重点城市类似。自 2000 年以来,PM₁₀ III 级及以上污染日的发生频率呈下降趋势,III 级及以上污染物发生频数 2001 年最高,达到 67.4%,2007 年最低,但也仍然达到 25.8%,如图 5.2 所示。虽然由于各方面环保力度的加强,兰州市空气质量恶化的趋势得到一定的遏制^[8],然而与国内

其它城市相比,近年来兰州市颗粒物浓度超标率位于北方环保重点城市之首(如图 4.3 所示),其颗粒物污染状况仍然十分严重。

下面本章将利用 2005 年兰州市不同粒径颗粒物 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 的浓度监测资料,对其年变化、日变化及成因进行深入分析。

§5.3 不同粒径大气颗粒物浓度的年变化、日变化及其成因分析

5.3.1 不同粒径大气颗粒物浓度的年变化

兰州市 2005 年不同粒径颗粒物月平均浓度的年变化如图 5.3 所示,总体情况是冬春两季浓度高,夏秋两季浓度低。由图 5.3 可看出,不同粒径颗粒物浓度的年变化特征有所不同,具体情况如下所述:粗颗粒物 TSP 和 PM₁₀ 月平均浓度的年变化均呈双峰型分布,主峰值出现在 4 月份,其月平均浓度分别为 899.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和 541.9 $\mu\text{g m}^{-3}$;次高峰值出现在 12 月份,其月平均浓度分别为 726.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和 460.5 $\mu\text{g m}^{-3}$;最低谷值出现在 7 月份,其月平均浓度分别为 310.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和 164.9 $\mu\text{g m}^{-3}$ 。而细颗粒物 PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 月平均浓度的年变化则呈现为单峰型,即在 12 月份出现峰值,其月平均浓度分别为 164.9 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和 161.5 cm^{-3} ;浓度的最低值都出现在 6 月份,分别为 37.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ 和 30.3 cm^{-3} 。

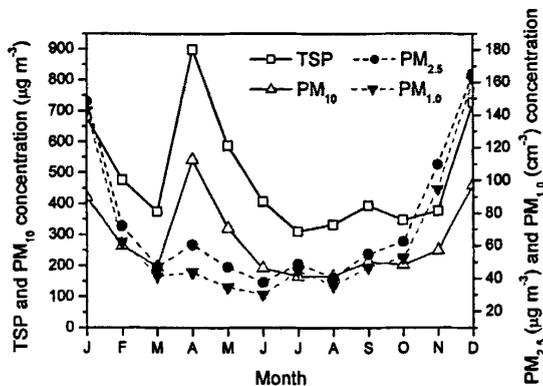


图 5.3 2005 年兰州市 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 月平均浓度的年变化

Fig. 5.3 Annual variations of monthly averages of TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} concentrations in 2005 in Lanzhou

如果仅从当地污染源排放的角度,是无法解释为什么4月份能出现粗颗粒物(TSP和 PM_{10})月平均浓度的最高峰值——因为兰州市是冬季采暖期间的颗粒物排放量最大。4月粗颗粒物浓度的这个高峰应当归咎于沙尘天气的影响。因为春季是我国沙尘天气高发期,尤其是4月是一年中沙尘暴发生最多的月份,上游地区沙尘输送以及当地大风扬尘是4月份兰州市粗颗粒物浓度出现最高峰值的主要原因。相比而言,细颗粒物($PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$)在春季并没有明显的峰值出现,这表明沙尘天气所造成的沙尘输送主要对兰州市的粗颗粒物污染影响较大,对细颗粒物(尤其是 $PM_{1.0}$)污染影响较小。夏、秋季节良好的扩散条件以及降水的湿沉降作用使得兰州市颗粒物浓度明显降低。冬季12月份浓度的次高峰值与采暖期燃烧排放量大以及逆温频发的不利于扩散的大气层结状况有关。

$PM_{2.5}/PM_{10}$ 反映可吸入颗粒物 PM_{10} 中细粒部分($PM_{2.5}$)的相对含量。兰州市2005年 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的平均值为26.4%,即可吸入颗粒物主要由粗粒部分($PM_{2.5-10}$)构成。这一比值远远低于国内其它城市^[9-11]。产生这一差异的主要原因在于兰州市的地理位置及其上游地区的地形特征。如§2.2部分中所述,这些独特的地理及地形特征使得兰州市易受来自于上游地区沙尘的影响,土壤粒子和风沙扬尘等粒径较大的粒子浓度较高。因此,粗粒子相对污染程度高于南方及东部城市。

5.3.2 不同粒径大气颗粒物浓度的日变化

如上所述,某些天气过程,如本地的大风扬尘和上游沙尘天气造成的沙尘输送等,对兰州市大气颗粒物浓度影响非常大。在第三章中对沙尘暴发生日数年变化的分析表明每年的4月份是沙尘天气发生最多的月份。因此,我们选取2005年4月的平均日变化图(图5.4)来比较兰州市正常情况下(滤去沙尘天气发生日)以及沙尘天气期间的粗颗粒物质量浓度的日变化规律。如图5.4(a)所示,正常情况下粗粒子浓度的日变化呈双峰型分布,两个高峰分别在9时和22时。然而,沙尘天气期间粗粒子浓度的日变化变为三峰型(图5.4(b)),即正常情况下,午后16时的低谷此时变为第三个高峰。这是因为,在我国沙尘暴多发生在春季午后,加之受太阳辐射日变化的影响,沙尘暴强度往往在午后到傍晚达到最强^[12],粗粒子浓度日变化的午后高峰就是由沙尘天气造成的。然而对于细粒子而言,4月份不论有无沙尘天气其浓度的日变化(图略)特征并无明显差异,表

明兰州市区的细粒子污染主要是由于当地污染源的排放和特殊地形造成的不利的大气扩散条件造成的。

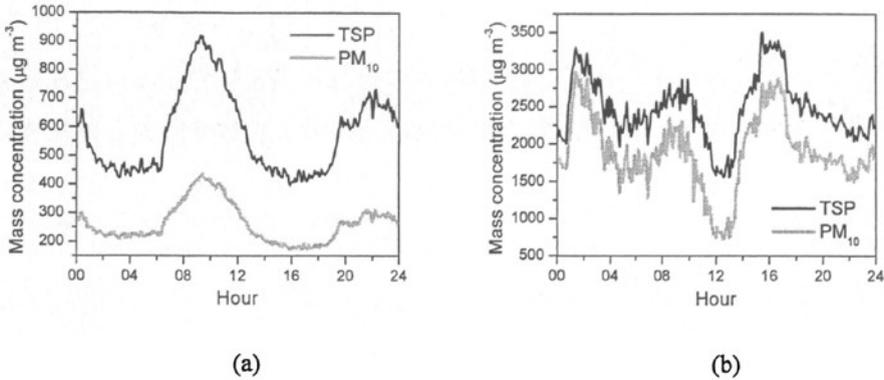


图 5.4 2005 年 4 月份 TSP 和 PM₁₀ 质量浓度的平均日变化

(a: 正常情况下 (滤去沙尘天气发生日), b: 沙尘天气发生日 (包括 4 月 7~9 日、18 日和 30 日))

Fig. 5.4 Average diurnal variations of TSP and PM₁₀ mass concentrations in April 2005, calculated for (a) days without dust events and (b) days with dust events (including 7~9, 18 and 30 Apr 2005), respectively.

对比图 5.4 中 (a) 和 (b) 两图的日变化分布特征可清楚地看出, 春季沙尘天气的发生会显著改变兰州市粗颗粒物浓度的日变化, 因而在下面的日变化分析中滤去沙尘天气发生日, 以便反映出兰州市区颗粒物浓度日变化一般规律的季节差异。

2005 年 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 浓度各季节平均的日变化如图 5.5 所示。总体而言, 4 种不同粒径颗粒物浓度的日变化以双峰型分布为主 (春、夏季细颗粒物日变化呈单峰型), 最高峰值出现在上午或中午, 次高峰在傍晚到午夜, 凌晨和下午各有一个低谷。具体情况如下所述: TSP 浓度高峰春季分别出现在 9 时和 21 时, 夏季出现在 9 时和 22 时, 秋季出现在 11 时和 18 时, 冬季在 12 时和 19 时; PM₁₀ 浓度高峰春季分别出现在 9 时和 0 时, 夏季出现在 9 时和 22 时, 秋季在 11 时和 20 时, 冬季在 12 时和 19 时; PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 浓度高峰春季出现在 10 时, 夏季出现在 9 时, 秋季出现在 11 时和 23 时, 冬季在 12 时和 20 时。

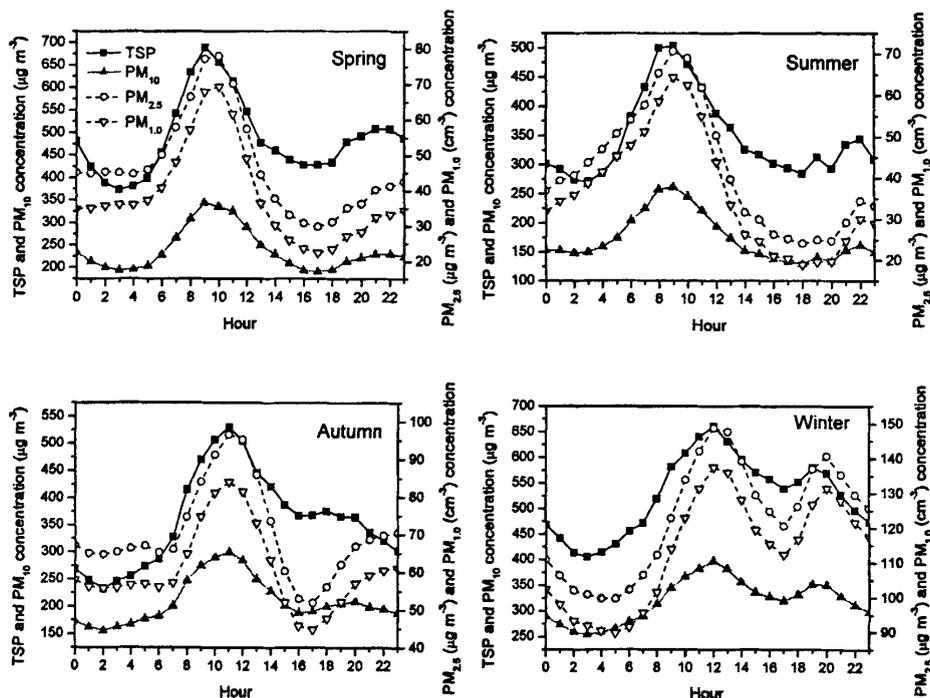


图 5.5 兰州市 2005 年不同季节 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 浓度各季节平均的日变化
(2005 年冬季指 2005 年 12 月至 2006 年 2 月)

Fig. 5.5 Diurnal variations of TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} concentrations for the four seasons of 2005 in Lanzhou. The winter is from Dec 2005 to Feb 2006.

从图 5.5 和表 5.1 可看出，同一季节 4 种不同粒径大气颗粒物浓度的季节平均日变化虽有较好的相似性，但不同粒径颗粒物浓度日变化峰、谷值的出现时间依然存在一定差异。总的来说，它们的最高峰值出现时间略有差异但不明显。然而，不同粒径颗粒物浓度的日最低值的出现时间则存在明显差异——TSP 浓度的日最低值各季节均出现在凌晨 2-3 时；PM₁₀ 浓度的日最低值秋、冬季节出现在凌晨 2-3 时，而春、夏两季则出现在下午；细粒子浓度的日最低值除冬季外均出现在傍晚之前（如表 5.1 所示）。这种粗、细粒子浓度日最低值出现时间的明显差异，正好反映出粗、细粒子在边界层大气中稀释扩散过程的差异，即细粒子质量小，易在大气中悬浮较长的时间，所以其浓度的高低主要取决于大气扩散条件，午后大气边界层逆温的消失和垂直混合层的发展，有利于细颗粒污染物的扩散，

致使傍晚前出现细粒子浓度的日最低值；反之，对于粗颗粒物，其质量较大，不易在大气中悬浮较长的时间，所以其浓度的高低主要取决于当时的污染源排放情况，一般进入午夜后，当地污染源排放量会进入一天中的最少阶段，再加之交通和各种人为活动造成的二次扬尘等也进入一日之中的最少阶段，故此使得在凌晨2-3时出现粗颗粒物浓度的最低值。由于兰州市区处于黄河河谷盆地之中，冬季逆温层厚、逆温强度大，即使午后逆温层也不会完全消失^[13]，因此造成该市冬季粗、细颗粒物日浓度的最低值都出现在凌晨。

表 5.1 不同粒径颗粒物浓度各季节平均的日变化最高峰值与最低谷值出现时间

Table 5.1 Occurrence time (Beijing Time) of maximum/minimum concentrations of PM diurnal variations

	TSP		PM ₁₀		PM _{2.5}		PM _{1.0}	
	t _{max}	t _{min}	t _{max}	t _{min}	t _{max}	t _{min}	t _{max}	t _{min}
春季	9时	3时	9时	17时	10时	17时	10时	17时
夏季	9时	3时	9时	18时	9时	18时	9时	18时
秋季	11时	2时	11时	2时	11时	17时	11时	17时
冬季	12时	3时	12时	3时	12时	5时	12时	5时

注：t_{max} 和 t_{min} 分别是最高峰值及最低谷值出现时间。

由表 5.1 及其它相关分析还可得出，对于同一种粒径的颗粒物，其浓度的日变化同样有一定的季节差异。例如，最高峰值出现时间存在季节差异——各种颗粒物浓度日变化最高峰值的出现时间均是春、夏季比秋、冬季早 1-3 小时。颗粒物浓度最大值出现时间的这种季节变化与各月日出时间及逆温层消失时间密切相关。如表 5.2 所示，兰州市日出夏季最早、冬季最晚。日出后，在太阳辐射作用下，使得混合层从近地面开始发展，导致夜间形成的大气边界层逆温被破坏而

表 5.2 兰州市 (N36°03', E103°53') 每月 15 日日出时刻

Table 5.2 Sunrise time on 15th of each month in Lanzhou (N36°03', E103°53')

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
日出时刻	7:10	6:47	6:11	5:27	4:54	4:42	4:54	5:18	5:42	6:06	6:36	7:03

逐渐消失，在逆温层完全消失前地面出现颗粒污染物浓度的最高峰值。因而日出早，则逆温层被破坏消失早，浓度最高峰值出现就早；反之，浓度最高峰值出现则晚。再者，从人类活动上看，日出早（迟），则相应的人类生产活动开始就早（迟），污染源排放高峰也来得早（迟）。

综上所述，在通常情况下，影响兰州市颗粒物浓度日变化的主要因素是当地日出时间的迟早、人类活动、边界层大气层结状况以及气象条件的日变化等。

§5.4 气象因子对兰州市不同粒径大气颗粒物浓度的影响

已有研究表明，在污染源一定的条件下，污染物浓度的大小及其变化主要取决于气象条件^[14-16]。由于污染物浓度与同期气象要素之间通常存在明显的非线性关系，本文利用不同粒径颗粒物浓度监测资料与同期兰州市常规观测的地面气

表 5.3 不同粒径颗粒物浓度与同期兰州市地面气象要素的相关系数

Table 5.3 Correlation coefficient between logarithms of PM concentration and local

		surface meteorological elements		
		风速	能见度	相对湿度
春季	lgTSP	0.118**	-0.291***	-0.429***
	lgPM ₁₀	0.099**	-0.401***	-0.312***
	lgPM _{2.5}	-0.081*	-0.614***	0.037
	lgPM _{1.0}	-0.159***	-0.600***	0.132***
夏季	lgTSP	0.028	-0.315***	-0.002
	lgPM ₁₀	-0.074*	-0.476***	0.198***
	lgPM _{2.5}	-0.243***	-0.697***	0.551***
	lgPM _{1.0}	-0.258***	-0.685***	0.567***
秋季	lgTSP	-0.036	-0.166***	-0.241***
	lgPM ₁₀	-0.103**	-0.340***	-0.089*
	lgPM _{2.5}	-0.217***	-0.630***	0.192***
	lgPM _{1.0}	-0.231***	-0.644***	0.195***
冬季	lgTSP	-0.191***	-0.474***	-0.206***
	lgPM ₁₀	-0.227***	-0.572***	-0.104*
	lgPM _{2.5}	-0.293***	-0.734***	0.127**
	lgPM _{1.0}	-0.309***	-0.738***	0.156***

注：*，**，***分别表示通过 $\alpha=0.05, 0.01, 0.001$ 的显著性水平检验

象要素资料,对颗粒物浓度取对数后与气温、24h变温、气压、24h变压、风速、水平能见度、相对湿度、6h降水量进行了相关性统计分析。相关分析结果表明:颗粒物浓度与上述气象因子相关性较好,大部分相关系数都能够通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。不同气象因子对大气颗粒物浓度的影响存在明显差异,其相关关系也存在季节变化。其中与水平能见度、相对湿度和风速的相关关系尤其显著(见表5.3)。

如表 5.3 所示,在上述三种气象要素中,能见度与颗粒物浓度呈显著性负相关,且冬季相关系数最大。粒径小的颗粒物对能见度影响大,因而细粒子浓度与能见度的相关系数明显高于粗粒子,这是由不同粒径颗粒物的光学特性决定的。相对湿度对粗、细颗粒物的影响差异较大,并且存在季节变化:春、秋、冬季相对湿度与 TSP、PM₁₀ 浓度负相关,与 PM_{2.5}、PM_{1.0} 浓度正相关。然而,夏季相对湿度与 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 均为正相关,此时相对湿度高则不利于污染物的扩散和传输且粒径越小所受影响越大。风速与 4 种颗粒物的浓度在夏、秋、冬三季均呈负相关(夏季除 TSP 外),并且由于重力作用的原因使得粒径越小、风速的扩散传输作用越显著;特别值得一提的是春季风速与细颗粒的 PM_{2.5}、PM_{1.0} 浓度呈负相关,而与粗颗粒的 TSP、PM₁₀ (尤其是 PM_{>10}、PM_{2.5-10}) 浓度呈正相关。这正好反映了兰州所特有的一种重要现象,即兰州市春季风速增大往往是沙尘天气过境造成的,因而,此时风速的增大在促使以当地污染源排放为主的细颗粒物迅速扩散、浓度降低的同时,又将大量粗颗粒的沙尘物质输送到兰州市,再加之大风也会加剧当地的二次扬尘污染,两者的共同作用使粗颗粒物浓度反而升高。

§5.5 上游沙尘天气对兰州市不同粒径颗粒物浓度的影响

由前述分析可知,兰州市大气颗粒物的严重污染与外来的沙尘输送及强沉降密切相关,因为兰州是西方路径和西北路径沙尘暴东移南下的必经之地,加之高原大地形、河西走廊及其东端乌鞘岭和当地河谷盆地等不同尺度复杂地形的共同作用,使之成为国内外重点关注的沙尘污染和黄土堆积区。

由于沙尘天气的空间分布与特定的地理条件、下垫面生态环境密切相关,因此将位于兰州市上游的西北沙尘天气多发区分为5个亚区(如图5.6):北疆区、

南疆区、河西西区、河西东区和青海地区，分别分析各区沙尘天气对兰州市不同粒径颗粒物浓度的影响。

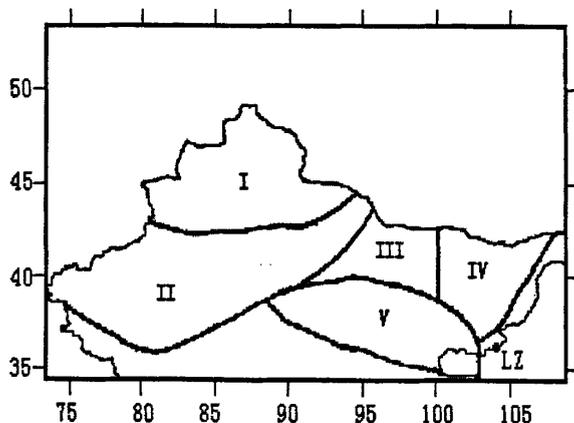


图5.6 西北地区沙尘暴天气易发区分区图

(I-北疆区, II-南疆区, III-河西西区, IV-河西东区, V-青海地区, LZ-兰州)

Fig. 5.6 Diagram of divisional distributions of the areas where dust storms occur frequently in Northwest China. Labels I, II, III, IV, V and LZ respectively represent the North Xinjiang Region, the South Xinjiang Region, the western Hexi Region, the eastern Hexi Region, the Qinghai Region and Lanzhou city.

由于不同强度沙尘天气对颗粒物浓度的影响存在显著区别,故采用沙尘指数表征沙尘天气的强度。单个站点沙尘指数 $S = \frac{1}{4}S_1 + \frac{1}{2}S_2 + S_3 + 2S_4$, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴。各时次有上述沙尘天气发生时相应的 S_i 记为 1, 没有记为 0。各区沙尘指数为该区域内所有站点沙尘指数的累加值。

由第三、四章分析可知,春季是我国北方沙尘天气高发期,由此也导致许多北方城市出现仅次于冬季的 TSP、PM₁₀ 重污染期。本小节以 PM₁₀ 为例分析上游各区沙尘天气对兰州市颗粒物浓度的影响。图 5.7 为春季上游不同区域不同时次沙尘指数与兰州市 PM₁₀ 浓度的滞后相关系数图,纵轴是时次,横轴是时间(滞后时间从当日 02 时起至第五日 02 时),图上各点代表上游各时次沙尘指数与当日当时至第五日 2 时兰州市 PM₁₀ 浓度的滞后相关系数。

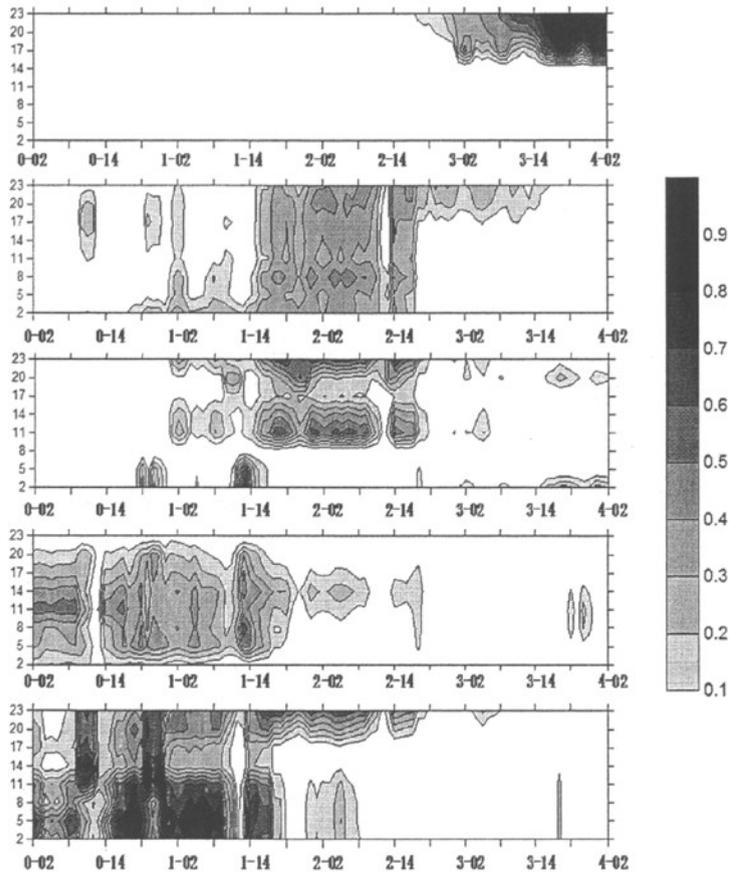


图 5.7 春季上游地区沙尘指数与兰州市 PM_{10} 浓度的滞后相关系数

(从上至下依次为北疆区、南疆区、河西西区、河西东区和青海地区；纵轴为时次，即 02、05...23 时；横轴为时间，0-02、0-08、0-14、0-20 分别代表当日 02、08、14、20 时，1-02 代表第二日 02 时，依此类推，4-02 代表第五日 02 时；图中相关系数大于 0.2050、0.2673 和 0.3375 时可分别通过 $\alpha=0.05$ 、0.01 和 0.001 的显著性水平检验)

Fig. 5.7 Lag correlation coefficient between dust indexes in the upstream regions and PM_{10} concentrations in Lanzhou in spring

(The figures from top to bottom are the North Xinjiang Region, the South Xinjiang Region, the western Hexi Region, the eastern Hexi Region and the Qinghai Region, respectively.)

总体而言，图 5.7 所示的滞后相关系数较高，表明上游地区大风沙尘天气是影响兰州市颗粒物污染的重要因素。上游五区中青海地区影响最大，其次是河西

东区、河西西区和北疆区，南疆区影响最小。青海地区、河西东区沙尘天气影响的滞后时间较短，主要在当日至第二日。各区沙尘天气影响时间和程度的差异是由其地理位置和距离兰州的远近不同造成的。青海地区、河西东区距兰州较近，两区沙尘天气出现后，引发沙尘天气的天气系统很快影响到兰州，影响既快又大。河西西区、南疆区距离较远，天气系统需要一定时间才能影响到兰州。青海地区、河西东区之所以影响较大，除了上述原因外，还因为发生在北疆区、南疆区和河西西区并且最终能够影响到下游地区的沙尘天气过程，在东移南下的过程中都要经过前两区。TSP、PM_{2.5}和PM_{1.0}浓度与上游沙尘指数的滞后相关系数图（图略）和PM₁₀的较为一致，相关系数 $PM_{10} > TSP > PM_{2.5} > PM_{1.0}$ 。

由§3.3部分可知，冬季是河西地区、青海地区沙尘暴的次高发期（如图3.2、图3.3和表3.1所示）。因此，本小结对冬季上游地区沙尘指数与兰州市颗粒物浓度也作了滞后相关分析，结果表明：与春季相比，冬季上游沙尘天气对兰州市颗粒物浓度的影响较小且滞后时间较长，但与河西西区和青海地区的相关系数的最大值仍超过0.9（通过 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验），表明冬季上游沙尘天气仍会对兰州市PM₁₀浓度产生一定的影响。

§5.6 本章小结

本章采用2005年1月至2006年2月兰州市TSP、PM₁₀、PM_{2.5}和PM_{1.0}4种不同粒径大气颗粒物浓度监测资料，分析了2005年兰州市不同粒径大气颗粒物浓度的年变化、日变化特征及其成因，并从上游沙尘输送以及当地气象条件两个方面，对其与兰州市颗粒物污染的关系进行了初步研究。结论如下：

（1）兰州市2005年粗颗粒物（TSP和PM₁₀）月平均浓度的年变化呈双峰型，主峰值出现在4月份；而细颗粒物（PM_{2.5}和PM_{1.0}）月平均浓度的年变化则呈现为单峰型，即在12月份出现峰值。这种粗、细颗粒物浓度年变化特征的差异，反映出春季沙尘天气所产生的沙尘输送主要对兰州市的粗颗粒物污染影响较大，对细颗粒物污染影响较小。兰州市春季风速与粗颗粒物浓度呈正相关，而与细颗粒物浓度呈负相关的统计事实也证实了这一点。

（2）正常情况下（无沙尘），兰州市4月份粗颗粒物浓度的日变化呈现出双峰型，即两个高峰分别出现在上午和晚上。但是在4月份沙尘天气期间，其平均

日变化则变为三峰型，即受沙尘天气的影响午后增加了一个浓度高峰。

(3) 不同粒径颗粒物浓度日最低值的出现时间存在明显差异，即粗颗粒物浓度日最低值出现时间一般在凌晨 2-3 时，而细颗粒物浓度日最低值出现时间一般在傍晚之前，反映出粗、细颗粒物在边界层大气中稀释扩散过程的差异，即细颗粒物浓度的高低主要取决于大气扩散条件，而粗颗粒物浓度的高低则主要取决于当时的污染源排放情况。

(4) 上游地区大风沙尘天气是影响兰州市颗粒物污染的重要因素。春季青海地区和河西地区的沙尘天气对其影响最大。

需要指出的是，对于各种影响颗粒物污染的天气过程，不同天气过程及其相关气象要素的变化对颗粒物浓度的影响应该有所不同。为了进一步弄清这个问题，在下一章中，我们将对沙尘、降水和冷锋三种典型天气过程控制下的颗粒物污染特征进行分析。

参考文献

- [1] 胡雅宁, 祁斌, 王剑锋.兰州市大气污染物排放量的统计分析[A].王式功, 杨德保, 尚可政, 祁斌.城市空气污染预报研究[C].兰州: 兰州大学出版社, 2002, 14-21.
- [2] 张文煜, 王式功, 辛金元, 刘静.兰州河谷盆地上、下坡风环流特征[A].王式功, 杨德保, 尚可政, 祁斌.城市空气污染预报研究[C].兰州: 兰州大学出版社, 2002, 149-153.
- [3] 姜大膀, 王式功, 郎咸梅等.兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系[J].兰州大学学报(自然科学版), 2001, 37(4):133-139.
- [4] 王式功, 姜大膀, 杨德保等.兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J].高原气象,2000, 19(3):363-370.
- [5] 刘晓东, 田良, 张小曳.塔克拉玛干沙尘活动对下游大气 PM_{10} 浓度的影响[J].中国环境科学, 2004,24(5):528-532.
- [6] 王式功, 杨民, 祁斌等.甘肃河西沙尘暴对兰州市空气污染的影响[J].中国沙漠, 1999, 19(4):154-158.
- [7] Ta Wanquan, Wang Tao, Xiao Honglang et al. .Gaseous and particulate air pollution in the Lanzhou Valley, China [J]. Science of the Total Environment, 2004, 320: 163-176.

- [8] 尉元明, 潘峰, 王静, 牛磊. 兰州城区 TSP 高浓度污染与自然降尘的关系[J]. 中国沙漠, 2006, 26 (5): 763-766.
- [9] 黄鹂鸣, 王格慧, 王荟等. 南京市空气中颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5} 污染水平[J]. 中国环境科学, 2002, 22(4): 334-337.
- [10] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮等. 北京 PM_{2.5} 浓度的变化特征及其与 PM₁₀、TSP 的关系. 中国环境科学, 2002, 22(6):506-510.
- [11] 魏复盛, 滕恩江, 吴国平等. 我国 4 个大城市空气 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染及其化学组成[J]. 中国环境监测, 2001, 17(特刊):1-6.
- [12] 姜学恭, 沈建国, 刘景涛等. 导致一例强沙尘暴的若干天气因素的观测和模拟研究[J]. 气象学报, 2003, 61(5):606-620.
- [13] 王式功, 杨德保, 祁斌, 黄建国, 尚可政. 兰州城区冬半年逆温特征及其与空气污染的关系[A]. 王式功, 杨德保, 尚可政, 祁斌. 城市空气污染预报研究[C]. 兰州: 兰州大学出版社, 2002, 126-130.
- [14] 王淑英, 张小玲. 北京地区 PM₁₀ 污染的气象特征. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 177-184.
- [15] 周江兴. 北京市几种主要污染物浓度与气象要素的相关分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16 (增刊): 123-127.
- [16] 周慧, 王自发, 安俊岭等. 城市空气污染持续维持机制研究 I 2002 年西安市空气污染持续维持过程分析及其气象成因[J]. 气候与环境研究, 2005, 10 (1): 124-131.

第六章 沙尘、降水和冷锋三种典型天气过程对 兰州市不同粒径大气颗粒物浓度影响的研究

§ 6.1 引言

众所周知,大气颗粒物浓度受边界层大气扩散能力的影响,而边界层大气扩散能力的大小又受天气过程演变的制约。因此,研究典型天气过程对城市大气颗粒物污染的影响有着十分重要的意义。沙尘和降水天气过程是我国西北干旱半干旱地区重要的大气颗粒物源、汇过程。研究表明,沙尘天气过程常常会造成严重的大气颗粒物污染^[1-3]。庄国顺等^[4]指出2000年4月6日沙尘暴期间北京市总悬浮颗粒物浓度超过 $6000\mu\text{g m}^{-3}$,较平常高出近30倍。Rodríguez^[5]等指出撒哈拉沙尘暴是造成西班牙南部地区 PM_{10} 日浓度值超标的主要原因。在美国西部的一些城市,沙尘对 PM_{10} 的贡献甚至高达79.5%^[6]。

降水对大气颗粒物的湿清除是维持大气中悬浮粒子源汇平衡、大气自清洁的重要过程^[7]。制作区域或城市空气质量预报应用的多种模式中,大多只对降雨云的湿清除作用作参数化处理^[8]。大量研究表明,在云下清除过程的微物理结构中,降水对气溶胶粒子的湿清除率取决于气溶胶粒子和降水粒子的谱分布、雨滴对气溶胶粒子的捕获率、雨滴下落末速度以及降水强度^[9-11]。

锋是冷暖气团之间的狭窄过渡带。锋面过境最明显的特征是气象要素突变,气象要素的变化势必引起污染气象参数和大气扩散能力的变化,从而引起污染物浓度的变化。冷锋天气过程对大气扩散能力有很大影响,王式功等^[12]指出冬季当兰州地区处于冷锋过境前时平均最大混合层厚度最低,处于小高压控制时次之,而处于冷锋过境后蒙古高压前部控制时平均最大混合层厚度最高。张秀宝等人^[13]的研究表明移动缓慢的暖锋临近使得混合层逐渐变薄,扩散条件在锋面过境以前越来越差,空气污染日趋严重;冷锋过境,出现大风和降水天气,污染浓度迅速降低。Robert等^[14]研究指出城市对锋面移动有阻滞作用,同时当锋面从上风方向城市推进时,如下风方是对着锋的来向刮风时,城市污染物浓度增加;冷锋前暖空气中污染浓度大,锋后冷空气中污染浓度小。与气态污染物不同的是,大气颗粒物还会受到冷锋过境时大风扬尘的强烈影响,影响机制较气态污染物复

杂。

然而，对沙尘天气过程影响的研究以往主要集中在分析单次沙尘暴过程对 TSP 和 PM₁₀ 的影响，对其中的细粒子影响研究较少，缺乏对沙尘期间不同粒径颗粒物浓度变化特征的对比分析。对于降水过程影响的研究则侧重于降水粒子和气溶胶粒子的微物理过程，对于它的宏观环境效应研究得却很不够。对于冷锋也只局限于研究其对 SO₂、CO_x 和 NO_x 等气态污染物的影响。那么，沙尘天气过程对不同粒径颗粒物浓度的影响一致吗？不同类型降水过程对颗粒物的清除作用有无差异？冷锋对颗粒污染物和气态污染物的影响一致吗？不同类型的天气过程对颗粒物浓度的影响有何异同之处？这些问题目前仍不清楚。

为了就典型天气过程对不同粒径大气颗粒物浓度的影响有一个全面的了解，本章利用 2005~2007 年兰州市 5 种不同粒径颗粒物 (TSP、PM_{>10}、PM_{2.5-10}、PM_{2.5} 和 PM_{1.0}) 的浓度监测资料，分析了沙尘、降水和冷锋三种典型天气过程对不同粒径颗粒物浓度的影响，以期搞清不同类型天气过程对兰州市颗粒物浓度影响的程度及其变化过程，为进一步改善兰州地区大气环境质量提供科学依据。

本章所采用的颗粒物浓度监测资料的具体时段为 2005 年 1 月 1 日至 2006 年 9 月 30 日以及 2007 年 4 月 13 日至 11 月 25 日。监测仪器共监测 4 种颗粒物的浓度，对 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 监测其质量浓度，单位 $\mu\text{g m}^{-3}$ ；对 PM_{1.0} 监测数浓度，单位 cm^{-3} 。TSP 浓度减去 PM₁₀ 浓度、PM₁₀ 浓度减去 PM_{2.5} 浓度就分别得到 PM_{>10} (粒径 >10 μm 粒子) 和 PM_{2.5-10} (粒径 2.5~10 μm 粒子) 的浓度。在整个监测期间，颗粒物监测资料完整的沙尘天气过程共计 15 次；降水天气过程共计 225 次 (其中不包括有沙尘天气发生的降水过程)；冷锋天气过程共计 222 次 (其中不包括有沙尘天气发生的冷锋过程)。

§ 6.2 沙尘天气过程对不同粒径颗粒物浓度的影响

6.2.1 沙尘天气过程对不同粒径颗粒物日均浓度值的影响

首先看一下沙尘天气对颗粒物日均浓度值的影响。在监测到的这 15 次沙尘天气过程中，沙尘天气发生日不同粒径颗粒物 TSP、PM_{>10}、PM_{2.5-10}、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 的日均浓度较过境前分别增加 1.9~15.0 倍、0.5~4.9 倍、4.2~29.7 倍、0.5~4.7

倍和 0.2~2.7 倍, 沙尘天气发生时兰州市颗粒物污染的严重程度可见一斑。沙尘天气结束后, 粗粒子($PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$)浓度较过境前明显偏高($PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 浓度分别平均偏高 53.1%和 70.9%)。然而, 若影响沙尘天气系统过境后未出现可能造成持续污染的静稳天气形势时, 过境后细粒子($PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$)的日均浓度低于过境前一日($PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 降幅分别为 1.6%~74.2%和 15.8%~83.7%)。这表明, 虽然沙尘天气发生时粗、细粒子浓度均会有较大幅度的升高, 但就整体而言, 其风扩散效应对以当地排放为主的细粒子有加快扩散、减轻其污染的作用, 同时也明显加剧受干燥裸露地表扬尘影响较大的粗粒子污染。上一章中, 兰州市春季风速(沙尘天气主要发生在春季)与 TSP、 PM_{10} 浓度呈正相关, 而与 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 浓度呈负相关的统计事实(如表 5.3 所示)也证实了这一点。

6.2.2 沙尘天气发生时不同粒径颗粒物浓度的变化特征

在沙尘天气发生当日, 沙尘期及其后非沙尘期的颗粒物浓度相对变幅如表 6.1 所示, 可以看出, 沙尘期浓度升幅最大的是 $PM_{2.5-10}$, 最小的是 $PM_{1.0}$ ——这与以往研究中得到的兰州市沙尘暴期间粒径 1.1~9.0 μm 粒子相对增加最多^[15]的结论相符。沙尘期后的非沙尘期, 大气中的沙尘粒子由于重力沉降和大气扩散的作用而逐渐被清除, 其中 $PM_{2.5-10}$ 降幅最大、 $PM_{>10}$ 降幅最小(如表 6.1)。

表 6.1 沙尘期及其后非沙尘期的颗粒物浓度相对变幅 (%)

Table 6.1 Relative increase rate and decrease rate of PM concentrations during dust periods and subsequent non-dust periods in the dust events occurrence days, respectively.

阶段	TSP	$PM_{>10}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{1.0}$
沙尘期	1113.9	280.7	2402.0	292.3	133.5
非沙尘期	-76.9	-36.0	-85.8	-58.2	-56.0

以发生在 2006 年 3 月 31 日的区域性沙尘暴天气为例, 了解沙尘暴期间兰州市不同粒径颗粒物浓度及相关气象要素变化。由图 6.1 可以看到, 3 月 31 日 13 时随着冷锋经过兰州, 地面风速增大、水平能见度降至 1km 以下, 沙尘暴天气出现, $PM_{2.5-10}$ 浓度达到峰值, 然而以本地排放为主的 $PM_{1.0}$ 浓度却由于风扩散效应而持续下降。14 时以后, 随着风速的减小、局地起沙量亦减少, 能见度有

所好转 (图 6.1 (d)), 沙尘暴已减弱为浮尘, 这时从上游沙尘天气发生区传输而来的沙尘逐渐增加。由于传输来的沙尘中也含有一定量的细粒子, 使得 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 浓度迟于较粗粒子 $PM_{2.5-10}$ 3 小时达到峰值 (如图 6.1 (b))。19 时左右, 兰州市的沙尘天气结束。从以上分析可以看出, 沙尘暴天气对兰州市不同粒径颗粒物浓度的影响过程是: 冷锋过境初期大风在对本地排放的细颗粒污染物进行清除的同时, 将地表沙尘吹起造成沙尘暴天气出现、 $PM_{2.5-10}$ 浓度达到峰值; 然后上游沙尘天气发生区输送的沙尘才到达兰州并对其颗粒物浓度施加影响, 细颗粒物浓度随后出现峰值。

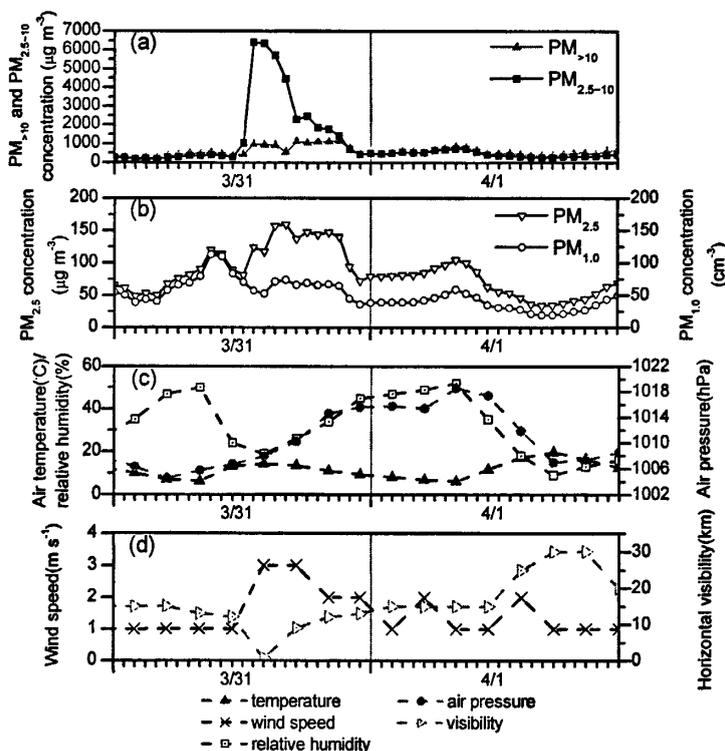


图 6.1 2006 年 3 月 31 日~4 月 1 日沙尘暴天气期间兰州市不同粒径颗粒物浓度及相关气象要素的变化 (气象要素值每 3 小时观测一次)

Fig. 6.1 Variations of the concentrations of PM with different sizes and relevant meteorological elements during the dust storm from 31 March to 1 April, 2006. The meteorological observations are made once every three hours.

此外,从图 6.1 还可以看出,沙尘天气期间颗粒物浓度呈现出明显的快升慢降的变化特征。对这 15 次沙尘天气爆发期和清除期颗粒物浓度变化速率的统计结果如表 6.2 所示,可以清楚地看到,爆发期不同粒径颗粒物 TSP、PM_{>10}、PM_{2.5-10}、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 浓度的平均变化速率分别是清除期的 6.5 倍、3.5 倍、7.1 倍、6.5 倍和 5.7 倍。

表 6.2 沙尘天气爆发期和清除期的颗粒物浓度平均净增速率

Table 6.2 Average increase speed rate of PM concentrations during burst periods and scavenging periods

阶段	TSP $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$	PM _{>10} $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$	PM _{2.5-10} $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$	PM _{2.5} $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$	PM _{1.0} $\text{cm}^{-3} \text{h}^{-1}$
爆发期	3683.4	301.5	3277.6	104.4	40.2
清除期	-563.6	-85.4	-462.1	-16.1	-7.0

清除期有降水出现时,会极大地提高颗粒物的沉降速率,不同粒径颗粒物 TSP、PM_{>10}、PM_{2.5-10}、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 浓度的清除速率分别是干沉降(无降水)时的 2.9 倍、2.4 倍、3.0 倍、2.9 倍和 2.9 倍。

§ 6.3 降水天气过程对不同粒径颗粒物浓度的影响

6.3.1 不同降水量对颗粒物浓度的影响

由图 6.2 (a) 可以看出,颗粒物的清除率随降水量(3h 降水量, P_{3h}) 增大,粗粒子的清除率明显高于细粒子。细粒子的清除率通常较小。1.0mm 以下降水对不同粒径颗粒物浓度的影响均很小,对降低颗粒物浓度基本无效(如图 6.2 (a)),在一定程度上是天气过程的标志。

降水天气过程并不一定都能够使颗粒物浓度降低,有时也会加重污染,如图 6.2 (b) 所示(颗粒物浓度下降概率是指造成颗粒物浓度下降的降水次数占总数的百分比)。在哈尔滨^[6]和乌鲁木齐^[7]降水期间对 PM₁₀ 浓度的观测也发现有这种现象的存在。这时,其他因素(例如当地污染源排放和气象条件)对颗粒物浓度的增加效应大于降水粒子的湿清除效应,颗粒物浓度反而上升。从图 6.2 (b) 还可以看出,细粒子浓度下降概率低于粗粒子,也就是说,降水使粗粒子浓度下降

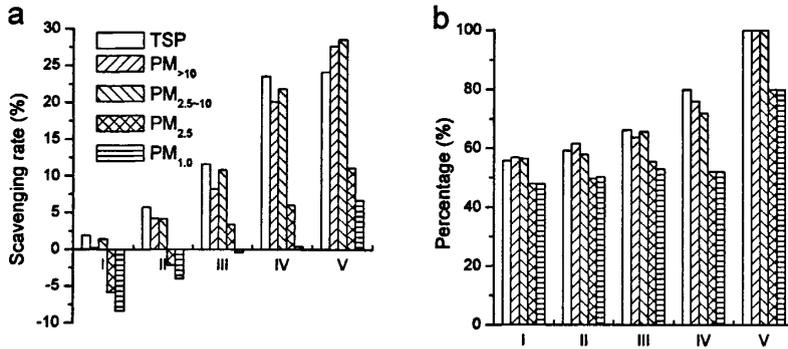


图 6.2 不同强度降水对不同粒径颗粒物的平均清除率(a)和颗粒物浓度下降概率(b)

(I-0.1mm 以下降水, II-0.1~1.0mm 降水, III-1.0~5.0mm 降水,
IV-5.0~10.0mm 降水, V-10.0mm 以上降水)

Fig. 6.2 (a) Average scavenging rates of particles with different sizes and (b) the reducing rates of PM concentration by the precipitation with different 3h-precipitation.

The I, II, III, IV, V respectively represent the $P_{3h} \leq 0.1$ mm, $0.1 < P_{3h} < 1.0$ mm, $1.0 \leq P_{3h} < 5.0$ mm, $5.0 \leq P_{3h} < 10.0$ mm and $P_{3h} \geq 10.0$ mm.

的同时,有时也会造成细粒子浓度上升。这是因为,降水粒子对半径 $0.1\mu\text{m} \leq r \leq 1.0\mu\text{m}$ 范围气溶胶粒子的清除系数相当低(称为“Greenfield gap”)^[18~19],再加上当地污染源排放及大气扩散条件等其它因素的影响,使得细粒子浓度有时反而上升;对于粗粒子而言,一方面,它被降水有效地冲刷;另一方面,降水润湿地表、可有效地抑制与生产、交通活动有关的二次扬尘,因此,粗粒子的清除率和浓度下降概率均高于细粒子。

6.3.2 不同类型降水对颗粒物清除作用的对比

6.3.2.1 降雨和降雪——按降水物质的状态划分

根据降水物质的状态可将降水分为降雨和降雪。雨滴和冰晶的碰并过程、表面形状、相态等不同,因此降雨和降雪对大气颗粒物的清除作用也有所差异。如

图 6.3 所示, 1.0mm 以下降雨对降低颗粒物浓度基本无效; 而 0.1~1.0mm 降雪却能减轻粗粒子污染。0.1mm 以下降雪对不同粒径颗粒物的清除率均为负, 即造成颗粒物浓度升高, 这是因为兰州市冬季出现微量降雪天气时通常大气层结稳定、不利于扩散, 导致颗粒物浓度有所上升。

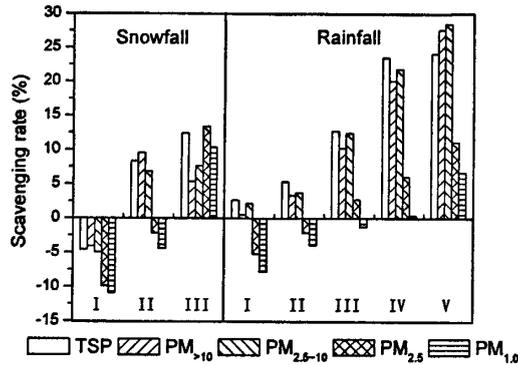


图 6.3 降雪和降雨对不同粒径颗粒物的平均清除率

(I-0.1mm 以下降水, II-0.1~1.0mm 降水, III-1.0~5.0mm 降水,
IV-5.0~10.0mm 降水, V-10.0mm 以上降水)

Fig. 6.3 Average scavenging rates of particles with different sizes by snowfalls and rainfalls. The I, II, III, IV, V respectively represent the $P_{3h} \leq 0.1$ mm, $0.1 < P_{3h} < 1.0$ mm, $1.0 \leq P_{3h} < 5.0$ mm, $5.0 \leq P_{3h} < 10.0$ mm and $P_{3h} \geq 10.0$ mm.

6.3.2.2 连续性降水和阵性降水——按降水的性质划分

按降水的性质划分, 液态降水还可划分为连续性降水和阵性降水。由于固态降水的个例较少, 因而未对其进行进一步的划分。从图 6.4 (a) 可以看出, 对于连续性降水而言, 对各种粒径颗粒物清除率均最大的是 5.0~10.0mm 降水, 降水量超过 10.0mm 时清除率反而下降, 1.0mm 以下降水对颗粒物浓度的影响微乎其微; 而对于阵性降水而言, 如图 6.4 (b) 所示, 所有不同等级的降水量 (也包括 1.0mm 以下的降水) 均对 TSP、 $PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 起明显的清除作用, 清除率通常随降水量增大, 10.0mm 以上降水的清除率最大。在兰州绝大多数 3 小时降水

量在 5.0mm 以下，对于 5.0mm 以下降水，阵性降水对 TSP、PM_{>10} 和 PM_{2.5-10} 的清除率明显高于连续性降水，也就是说，对兰州市颗粒物浓度影响较大的是阵性降水。

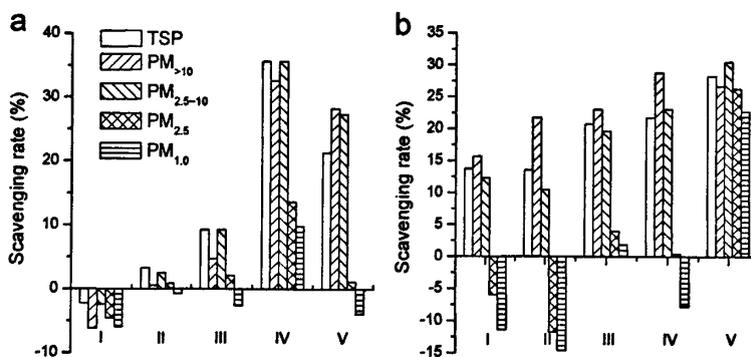


图 6.4 不同性质降水对不同粒径颗粒物的平均清除率 (a)连续性降水和(b)阵性降水
(I-0.1mm 以下降水, II-0.1~1.0mm 降水, III-1.0~5.0mm 降水,
IV-5.0~10.0mm 降水, V-10.0mm 以上降水)

Fig. 6.4 Average scavenging rates of particles with different sizes by (a) continuous precipitation and (b) shower precipitation. The I, II, III, IV, V respectively represent the $P_{3h} \leq 0.1$ mm, $0.1 < P_{3h} < 1.0$ mm, $1.0 \leq P_{3h} < 5.0$ mm, $5.0 \leq P_{3h} < 10.0$ mm and $P_{3h} \geq 10.0$ mm.

6.3.2.3 对流性降水和锋面降水——按降水天气系统的类型划分

按降水天气系统的类型划分，降水可分为对流性降水（本文中指雷暴降水）和锋面降水。对流性降水是指，近地面气层强烈受热，造成不稳定的对流运动，使气块强烈上升，气温急剧下降，水汽迅速达到饱和而产生的降水；锋面降水是指两种物理性质不同的气团接触，暖湿空气沿交界面滑升，绝热冷却，达到凝结高度时产生的降水。雷暴降水与锋面降水不论在形成机制、空间和时间尺度或是在各种气象参数的量级上都存在显著的差别，因此，它们对颗粒物浓度的影响也有一定的差异。

我国的雷暴降水天气主要出现在 5~8 月。因此，以 5~8 月的雷暴降水和锋面

降水为例，对比它们对颗粒物的清除作用。由图 6.5 可以看到，雷暴降水对 TSP、PM_{>10} 和 PM_{2.5-10} 的平均清除率明显高于相同降水量的锋面降水。各种量级的雷暴降水均能对这三种颗粒物起明显的清除作用，其清除率一般随降水量增大清除作用增强；而对于锋面降水，1.0mm 以上降水才会对其产生较为明显的影响。那么，为什么这两种类型的降水对 TSP、PM_{>10} 和 PM_{2.5-10} 的清除率会相差几倍呢？这是因为，雷暴降水持续时间短、雨强大，再加上对流性天气发生时的短时阵性大风造成的本地扬尘往往导致粗粒子浓度急速升高，紧随其后的降水又对粗粒子进行了显著地清洗，使得雷暴降水对 TSP、PM_{>10} 和 PM_{2.5-10} 的平均清除率远高于锋面降水。

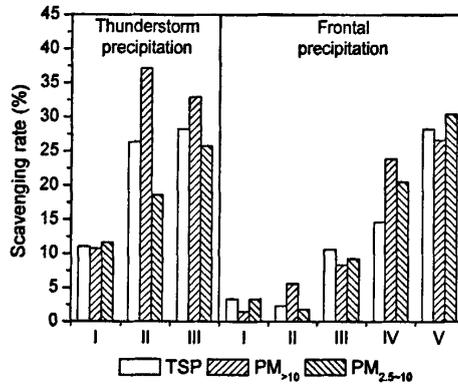


图 6.5 雷暴降水和锋面降水对不同粒径颗粒物的平均清除率
(I-0.1mm 以下降水，II-0.1~1.0mm 降水，III-1.0~5.0mm 降水，
IV-5.0~10.0mm 降水，V-10.0mm 以上降水)

Fig. 6.5 Average scavenging rates of particles with different sizes by thunderstorm precipitation and frontal precipitation. The I, II, III, IV, V respectively represent the $P_{3h} \leq 0.1$ mm, $0.1 < P_{3h} < 1.0$ mm, $1.0 \leq P_{3h} < 5.0$ mm, $5.0 \leq P_{3h} < 10.0$ mm and $P_{3h} \geq 10.0$ mm.

6.3.3 降水期间不同粒径大气颗粒物的清除率随时间的变化

将持续时间 10 小时以上的连续降水过程挑出，以分析降水期间不同粒径大气颗粒物的清除率随降水持续时间的演变过程。由图 6.6 可以看出，降水初期颗

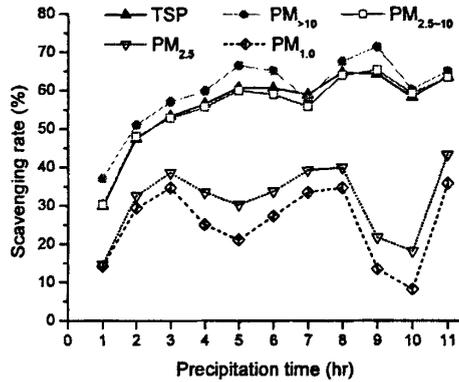


图 6.6 连续降水过程对不同粒径颗粒物的清除率随降水持续时间的变化

Fig. 6.6 Temporal variation of the scavenging rates of particles with different sizes for the duration of precipitation.

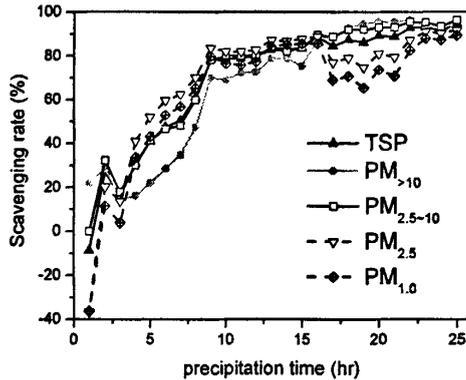


图 6.7 清除率最大的一次连续降水过程（2007 年 6 月 16~17 日）的清除率随时间的变化

Fig. 6.7 Temporal variation of the scavenging rates of the precipitation event occurring in 16~17 June 2007 by which the values of scavenging rates of particles were the maximum.

粒物的清除率随降水持续时间增大，降水持续 5 小时后 TSP、PM_{>10} 和 PM_{2.5-10} 的清除率达到 60%以上，之后清除率便在 60%附近上下波动；细粒子也有类似的现象，即降水持续 3 小时、清除率超过 30%之后清除率开始上下波动且波动幅度较大。这表明，降水对颗粒物的清除率存在一个极限值——当降水持续一定时

间、清除率达到一定程度之后，颗粒物浓度由于前期降水的清除作用已降至较低水平，单位时间内降水粒子的湿清除量已经很小了、以至于与其它因素造成的颗粒物浓度的增加量几乎相互抵消，这时清除率就会在这个极限位置附近波动变化。清除率最大的一次连续降水过程出现在 2007 年 6 月 16~17 日，此次降水持续 25 小时，降水量 74.0mm，对不同粒径颗粒物 TSP、PM_{>10}、PM_{2.5-10}、PM_{2.5} 和 PM_{1.0} 的最大清除率分别为 94.5%、96.3%、96.2%、91.6%和 89.2%，均出现在降水末期，如图 6.7 所示。

§ 6.4 冷锋天气过程对不同粒径颗粒物浓度的影响

6.4.1 冷锋对不同粒径颗粒物浓度的清除率

王式功等^[20]、刘建忠等^[21]研究表明，强、弱不同的冷锋对气态污染物浓度影响各异。为了定量表示冷锋对颗粒污染物浓度的影响，参考前人对锋面强度的定义，在此制定以下划分冷锋强度的标准：地面 24 小时降温 $-\Delta T_{24} \geq 2.0^{\circ}\text{C}$ 才算

表 6.3 冷锋对不同粒径颗粒物的平均清除率 (%)

Table 6.3 Average clearance rates of PM with different sizes by cold fronts (unit: %)

冷锋强度	冷锋次数	TSP	PM _{>10}	PM _{2.5-10}	PM _{2.5}	PM _{1.0}
弱	47	21.1	24.1	19.2	6.3	5.9
较强	92	23.9	23.8	22.3	17.6	18.1
强	83	34.5	35.1	32.6	23.3	22.5

表 6.4 无降水或降水量小于 1.0mm 的冷锋对颗粒物的平均清除率 (%)

Table 6.4 Average clearance rates of PM with different sizes by cold fronts without and with little precipitation (unit: %)

冷锋强度	冷锋次数	TSP	PM _{>10}	PM _{2.5-10}	PM _{2.5}	PM _{1.0}
弱	44	20.8	23.6	18.3	5.7	5.2
较强	85	21.3	20.8	20.2	15.8	15.9
强	50	25.9	27.0	24.0	17.6	19.0

作冷锋, $-\Delta T_{24} < 3.0^{\circ}\text{C}$ 为弱冷锋, $3.0 \leq -\Delta T_{24} < 6.0^{\circ}\text{C}$ 为较强冷锋, $-\Delta T_{24} \geq 6.0^{\circ}\text{C}$ 为强冷锋。根据上述冷锋划分标准, 对 2005~2007 年有颗粒物浓度监测资料的 222 次冷锋, 按强、较强、弱冷锋三种类型分别对不同粒径颗粒物浓度的降低幅度(即清除率)进行统计。结果如表 6.3 所示, 可以看出, 冷锋对颗粒污染物的清除率与其强度有关, 这一点与气态污染物^[20,21]类似。一般而言, 冷锋强度越大清除率越高, 粗颗粒物的清除率高于细颗粒物。锋面降水经常与冷锋天气过程伴随出现。由 § 6.3.2.3 部分分析可知, 降水量 1.0mm 以下的锋面降水对颗粒物的清除率极小、其影响可以忽略, 因此, 为了剔除降水湿清除的影响, 这里还统计了无降水或降水量小于 1.0mm 的冷锋对不同粒径颗粒物浓度的平均清除率, 结果如表 6.4 所示, 可以看出, 剔除降水湿清除影响后, 冷锋对颗粒物的清除率依然与其强度有关。

6.4.2 冷锋过境期间不同粒径颗粒物浓度的变化特征

根据冷锋过境初期颗粒物浓度的变化趋势, 可将冷锋大致分为两类: 第一类冷锋过境期间颗粒物浓度先升后降, 即先升后降型冷锋; 第二类冷锋过境期间颗粒物浓度单调递减, 即直降型冷锋。

先升后降型冷锋过境时颗粒物浓度的变化如图 6.8 所示, 可以看到: 冷锋过境期间, 粗粒子浓度先急升后缓降, 细粒子浓度也是先升后降, 但升幅较小, 不如粗粒子明显。虽然冷锋过境会造成地面沙尘扬起、使颗粒物浓度升高, 然而由于起沙条件不足、扬尘维持时间不长, 并且没有上游沙尘输送配合, 颗粒物浓度很快就不再继续上升了, 随后在风扩散作用下, 颗粒污染物被迅速扩散出去, 其浓度相比过境前明显降低。先升后降的这种变化特征也是冷锋对颗粒污染物与气态污染物浓度影响的重要差别之一。刘应辰^[22]、边纬乐等^[23]分析了冷锋过境时 SO_2 、 NO_x 和 CO_x 等气态污染物浓度变化特征, 结果表明过境期间气态污染物浓度持续降低。

直降型冷锋过境期间颗粒物浓度的变化如图 6.9, 可以看到, 冷锋过境初期未出现大风扬尘, 颗粒物浓度无明显上升; 在整个冷锋过境期间, 各种粒径颗粒物浓度均呈单调下降趋势。

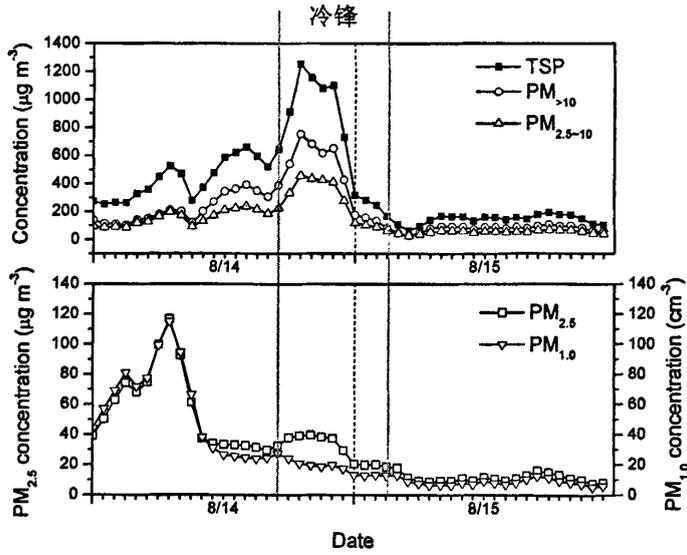


图 6.8 2005 年 8 月 14 日冷锋过境期间兰州市不同粒径颗粒物浓度

Fig. 6.8 Variations of the concentrations of PM with different sizes in Lanzhou during cold front event in 14 August 2005

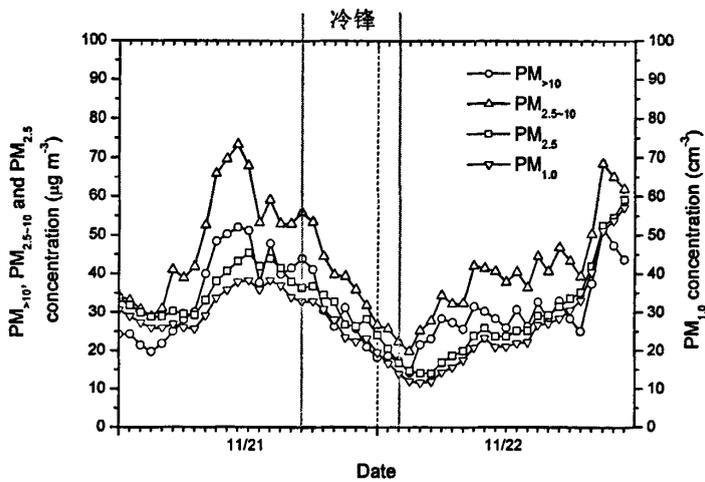


图 6.9 2005 年 11 月 21 日冷锋过境期间兰州市不同粒径颗粒物浓度

Fig. 6.9 Variations of the concentrations of PM with different sizes in Lanzhou during cold front event in 12 November 2005

进一步分析图 6.8 和图 6.9 可以看出, 两类冷锋过境初期虽然颗粒物浓度的变化趋势有所差异 (即一升一降), 但它们最终都能够明显减轻颗粒物污染 (过境后的颗粒物浓度低于过境前)。那么, 为什么在两类冷锋过境初期颗粒物浓度的变化会出现如此大的差异呢? 为此, 这里对两类冷锋过境时的气象要素值进行了统计 (如表 6.5 和表 6.6 所示), 结果表明: 先升后降型与直降型冷锋在冷锋强度、冷锋过境时平均风速和最大风速上均存在一定的差异——先升后降型冷锋强度较强, 平均风速较大, 特别是最大风速明显高于直降型, 先升后降型冷锋的清除率通常也较高。由以上初步分析可知, 风速是冷锋过境初期颗粒物浓度是否出现急升的重要原因。

表 6.5 不同类型冷锋的平均气象要素值和清除率

Table 6.5 Average meteorological elements and clearance rates in different kinds of cold front events

冷锋 类型	冷锋 强度	平均 风速	最大 风速	颗粒物平均清除率				
				TSP	PM _{>10}	PM _{2.5-10}	PM _{2.5}	PM _{1.0}
先升后降	-5.8	1.9	2.6	37.7	40.4	34.7	18.5	19.5
直降	-5.6	1.6	2.1	33.5	34.8	32.3	22.2	20.8

表 6.6 无降水或降水量小于 1.0mm 的不同类型冷锋的平均气象要素值和清除率

Table 6.6 Average meteorological elements and clearance rates in different kinds of cold front events without and with little precipitation

冷锋 类型	冷锋 强度	平均 风速	最大 风速	颗粒物平均清除率				
				TSP	PM _{>10}	PM _{2.5-10}	PM _{2.5}	PM _{1.0}
先升后降	-5.2	1.8	2.4	35.4	37.7	33.0	19.8	19.3
直降	-4.9	1.7	2.0	29.5	30.5	28.4	19.3	18.9

§ 6.5 本章小结

本章利用 2005~2007 年兰州市 5 种不同粒径颗粒物 (TSP、PM_{>10}、PM_{2.5-10}、PM_{2.5} 和 PM_{1.0}) 的浓度监测资料, 分析了沙尘、降水和冷锋三种典型天气过程对

不同粒径颗粒物浓度的影响程度及其变化过程。总的来说，天气过程对粗粒子（ $PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$ ）浓度的影响较细粒子（ $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$ ）明显。天气过程发生的初期，颗粒物浓度变化通常比较剧烈，容易出现骤升骤降，随后变化趋于平缓。

沙尘天气发生时兰州市颗粒物污染严重，颗粒物浓度快升慢降。沙尘期不同粒径颗粒物浓度升幅最大的是 $PM_{2.5-10}$ 、最小的是 $PM_{1.0}$ 。沙尘天气结束后粗粒子日均浓度依然偏高，然而细粒子日均浓度则低于过境前，体现出沙尘天气过境对受干燥裸露地表扬尘影响较大的粗粒子和以人为排放为主的细粒子浓度的影响的差异。沙尘暴期间，兰州市粗、细颗粒物浓度的变化过程也有明显差异。

降水天气过程对颗粒物浓度的影响以湿清除为主，清除率通常随降水量增大，粗粒子的清除率明显高于细粒子。在粗粒子浓度下降的同时，有时也会造成细粒子浓度上升。1.0mm 以下降水对降低颗粒物浓度基本无效。不同类型的降水天气过程对颗粒物的清除作用存在明显差异。对于 5.0mm 以下降水（占兰州市降水的绝大部分），阵性降水对 TSP、 $PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 的清除率高于相同降水量的连续性降水。从不同的降水天气系统类型来看，对流性降水（雷暴降水）对 TSP、 $PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 的清除率是相同降水量锋面降水的数倍，这是由这两种降水不同的形成机制和降水特征决定的。

冷锋对颗粒污染物的影响也以清除为主，清除率通常与其强度有关，强度越大清除率越高，粗粒子的清除率高于细粒子。根据冷锋过境初期颗粒物浓度的变化趋势，可将冷锋分为先升后降型和直降型。先升后降的变化特征也是冷锋对颗粒污染物与气态污染物浓度影响的重要差别之一。

最后，需要指出的是，天气过程是通过控制边界层大气扩散能力来对颗粒污染物浓度产生影响的。那么，天气系统是如何影响大气边界层结构，进而对颗粒物浓度产生影响的呢？为了进一步弄清这些问题，在下一章中，我们将对典型天气过程控制下的大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系进行探讨。

参考文献

- [1] Wang Shigong, Yuan Wei and Shang Kezheng. The impacts of different kinds of dust events on PM₁₀ pollution in northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 7975-7982.
- [2] 杨民, 王式功, 李文莉等. 沙尘暴天气对兰州市环境影响的个例分析[J]. *气象*, 2004, 30 (4): 46-50.
- [3] Lee Byeong-Kyu, Jun Na-Young, Lee Haengah Kim. Comparison of particulate matter characteristics before, during, and after Asian dust events in Incheon and Ulsan, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 1535-1545.
- [4] 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 赵承易. 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.
- [5] Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., Kakaliagou, O., 2001. Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain [J]. *Atmospheric Environment* 35: 2433-2447.
- [6] Gertler, A.W., Lowenthal, D.A., Coulombe, W.G., 1995. PM₁₀ source apportionment study in Bullhead City, Arizona [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association* 45 (2): 75-82.
- [7] Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics* [M]. Wiley, New York, USA.
- [8] 王明星. 大气化学 (第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [9] Mihaela Mircea, Sabina Stefan, Sandro Fuzzi, 2000. Precipitation scavenging coefficient: influence of measured aerosol and raindrop size distributions [J]. *Atmospheric Environment* 34: 5169-5174.
- [10] SooYa Bae, Chang Hoon Jung, Yong Pyo Kim, 2006. Development and evaluation of an expression for polydisperse particle scavenging coefficient for the below-cloud scavenging as a function of rain intensity using the moment method [J]. *Journal of Aerosol Science* 37: 1507-1519.
- [11] Jiyoung Kim, Chang H. Jung, Byoung-Cheol Choi, Sung-Nam Oh, Fred J. Brechtel, Soon-Chang Yoon, Sang-Woo Kim, 2007. Number size distribution of atmospheric aerosols during ACE-Asia dust and precipitation events [J]. *Atmospheric Environment* 41: 4841-4855.

- [12] 王式功, 姜大膀, 杨德保, 尚可政, 祁斌.兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J].高原气象, 2000, 19 (3): 363-370.
- [13] 张秀宝等.大气污染类型.大气环境污染概论[M].北京: 中国环境科学出版社, 1989, 107-112.
- [14] Robert D. Bornstein and William Thompson. Effects of Frictionally Retarded Sea Breeze and Synoptic Frontal Passages on Sulfur Dioxide Concentrations in New York City [J]. Journal of Applied Meteorology, 1981, 20(8): 843-858.
- [15] 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[J].中国沙漠, 2005, 25 (1): 93-97.
- [16] 王艳秋, 杨晓丽.哈尔滨市降水形势对大气污染物浓度稀释的影响[J].自然灾害学报, 2007, 16(5):65-68.
- [17] 李霞, 杨青, 吴彦.乌鲁木齐地区雪和雨对气溶胶湿清除能力的比较研究[J].中国沙漠, 2003, 23(5):560-564.
- [18] Greenfield, S., 1957, Rain scavenging of radioactive particulate matter from atmosphere [J]. J. Meteor., 14: 115-125.
- [19] B. J. Mason. The physics of clouds [M]. Oxford University Press 1971, 86-91.
- [20] 王式功, 杨德保, 李腊平, 黄建国, 祁斌.兰州城区冬半年冷锋活动及其对空气污染的影响[J].高原气象, 1998, 17 (2): 142-149.
- [21] 刘建忠, 王式功, 杨德保, 尚可政.冷锋天气过程对兰州城区空气污染影响的研究[A]. 王式功, 杨德保, 尚可政, 祁斌.城市空气污染预报研究[C].兰州: 兰州大学出版社, 2002, 157-164.
- [22] 刘应辰.青岛市区污染气体浓度变化及其与天气系统的关系[D].中国海洋大学, 2006.
- [23] 边纬乐.冷锋天气系统对天津市空气质量的影响分析[J].天津科技, 2007, 5: 42-44.

第七章 典型天气过程中兰州地区大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物浓度关系的研究

§7.1 引言

观测与研究城郊大气边界层和大气污染物浓度的变化规律,揭示大气边界层结构对大气污染形成的影响机理,对于加深对城市颗粒物污染的综合了解以及制定合理的防治对策具有重要作用。国内外对此已有不少研究^[1-3]。

由于大气边界层是高空自由大气和地面进行双向物质输送的必经地带,地面1~2km的大气边界层对大气污染物质的输送起着重要作用^[4-5]。因此把大气颗粒物的理化特性与气象条件、边界层结构和湍流输送特征结合起来分析,可以更好地探讨颗粒物污染的形成机制及其在大气中的输送规律。有学者对沙尘气溶胶浓度与边界层结构特征的关系做过一些研究^[6-9]。胡泽勇等^[10]的研究结果表明,沙尘暴过境时地面水平风风向经历了从稳定到多次调整再到稳定,最后崩溃的演变;风向调整时,风速减弱,调整之后,风速加大,同时伴有很强的上升气流;沙尘暴过境前,地面空气相对干热,过境后,地面相对湿冷。刘东升^[11]指出沙粒的起动与边界层湍流运动、冷空气锋面附近动力抬升以及地面水平强风场的动力结构相关。周明煜等^[12]利用北京325m气象塔观测资料,对2001年3月下旬北京地区的一次沙尘暴过程进行了较为细致的研究,并得到了由于低空急流的影响,120m高度的湍流通量和感热通量明显高于47m和280m高度的值,城市边界层内存在很强的湍流动量通量由上向下输送的结论。彭珍等^[13]同样利用北京325m气象塔的风速和温度观测资料,分析了2002年3月18~22日北京地区一次强沙尘暴过程过境前后北京城市边界层结构特征和湍流输送特征。

大气污染程度与大气边界层的物质输送和扩散能力密切相关,因此兰州市的大气边界层结构和输送特征也是研究兰州市大气污染的主要方面之一。以往不少研究都是围绕这一问题进行的^[14-17]。诸多研究表明,冬季兰州市山谷大气边界层长时间日夜维持的大气逆温层和静风状态是兰州市较其它城市污染更严重的主要客观原因之一^[18-20]。然而,到目前为止,对沙尘天气等典型天气过程控制下兰州市大气边界层结构和输送特征的研究很少,认识还非常有限,特别是缺乏

对它们与颗粒物浓度关系的分析和研究。对于由冷锋引起的污染过程的大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物浓度的关系的研究几乎没有。

为了更好地探讨不同类型典型天气过程中兰州地区颗粒物污染的形成机制,本章利用气候站(SACOL)边界层低层 32m 铁塔梯度观测资料、湍流资料和 PM₁₀ 浓度监测资料,以及兰州市气象台常规地面气象资料、逐日 08:00 和 20:00 探空资料,对比分析了 2007 年 4 月 22~23 日浮尘天气、5 月 2 日扬沙天气以及 4 月 19 日先升后降型冷锋过境期间兰州地区大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系,以期搞清沙尘和冷锋两种典型天气过程对兰州地区大气颗粒物污染的影响机制,为进一步改善兰州地区大气环境质量提供科学依据。

该铁塔的梯度观测资料为 30min 一次的自动观测,垂直共有 7 层,观测高度分别为离地面 1、2、4、8、12、16 和 32m,包括风速、气温、相对湿度和水气压的观测,同时还在 8m 处进行气压和风向观测。湍流资料所使用的观测仪器是 CSAT3 三维超声风速仪,采样频率 10Hz。PM₁₀ 浓度监测使用环境颗粒物监测仪 RP1400a,该仪器采用了石英微量振荡天平的工作原理(Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM),每 5 分钟采集 1 个数据。当颗粒物连续聚集在滤膜上,滤膜质量增加时,其振荡频率同时相应减少,根据质量与频率的相关变化,结合自动记录的大气采样流量数据和温度数据,微电脑处理系统可计算出滤膜上所累计颗粒物的质量浓度。

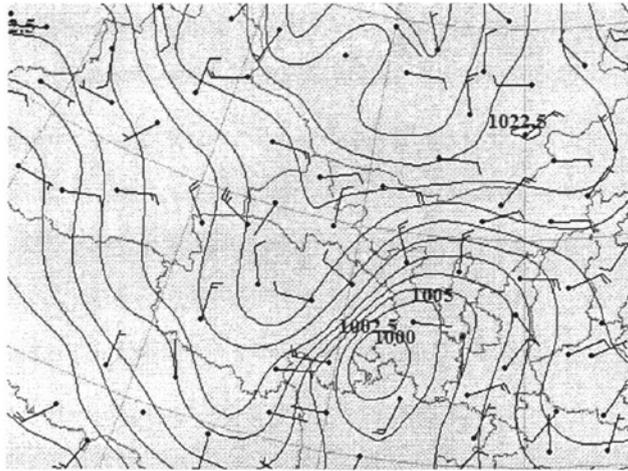
§7.2 沙尘天气过程的大气边界层特征与颗粒物污染

本小节以 2007 年 4 月 22~23 日浮尘天气和 5 月 2 日扬沙天气为例(SACOL 站自运行以来兰州地区未出现过沙尘暴天气),分析不同类型沙尘天气的大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系。

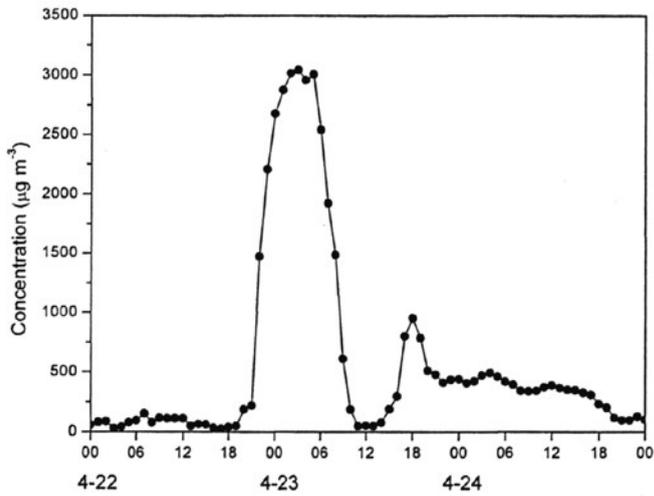
7.2.1 沙尘天气背景

(1) 2007 年 4 月 22~23 日浮尘天气过程

2007 年 4 月 22~23 日,受蒙古高压底部锋区影响,西北地区出现了一场大范围的沙尘天气,甘肃、内蒙古、青海、宁夏以及南疆盆地出现沙尘天气,局部



(a)



(b)

图 7.1 2007 年 4 月 22~23 日浮尘期间气象要素场及颗粒物浓度

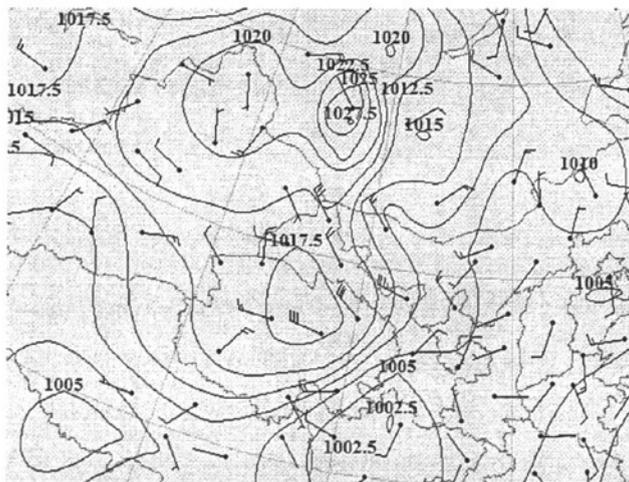
(a) 4 月 22 日 20 时海平面气压场和地面风场; (b) 4 月 22~24 日 PM_{10} 浓度

Fig. 7.1 Variations of PM_{10} concentration and the fields of relevant meteorological elements during the floating dust event in 22~23 April 2007. (a) Atmospheric pressure field and surface wind field at 20:00, 22 April; (b) PM_{10} concentration during 22~24 April.

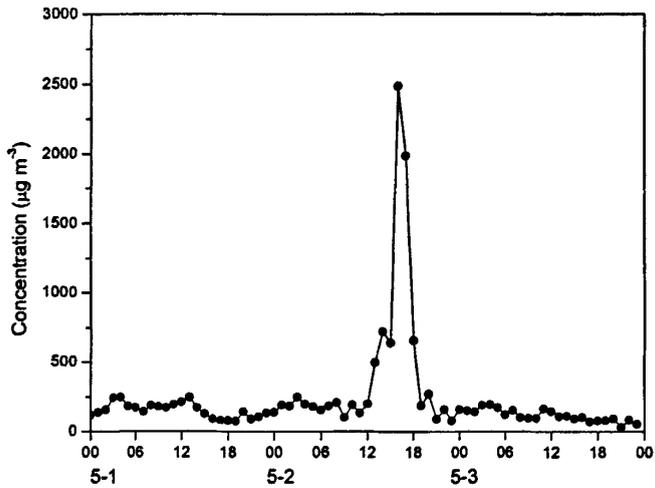
地区出现沙尘暴天气。沙尘暴主要出现在内蒙古的拐子湖、吉兰泰、巴音毛道、头道湖、新疆的且末、青海的冷湖，平均风力 4-5 级，最小能见度仅为 100 米。另外，新疆还有 3 站出现扬沙、16 站出现浮尘；青海 2 站扬沙；甘肃 3 站扬沙、18 站浮尘；内蒙古 3 站扬沙、1 站浮尘；宁夏 1 站扬沙 (<http://www.duststorm.com.cn/>)。此次沙尘过程于 22 日晚至 23 日白天影响兰州地区并出现浮尘。整个浮尘天气期间，兰州地区颗粒物污染严重，如图 7.1b 所示，PM₁₀ 浓度峰值为 3044.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，出现在 23 日凌晨 3 时，23 日 11 时左右出现微量降水，PM₁₀ 浓度出现谷值，然而降水持续时间短、降水量少，23 日下午 PM₁₀ 浓度又开始上升，到 18 时达到次峰值 (953.7 $\mu\text{g m}^{-3}$)，直到 24 日晚此次浮尘天气造成的颗粒物污染才结束。浮尘期间，在兰州大学盘旋路校区监测点监测到的兰州市区的 PM₁₀ 浓度变化趋势 (图略) 与榆中气候站的监测结果 (图 7.1b) 十分一致——也是 23 日凌晨出现最大值，23 日下午 17 时出现次峰值，24 日晚颗粒物浓度降至正常水平、污染过程结束。

(2) 2007 年 5 月 2 日扬沙天气过程

2007 年 5 月 2 日，受新疆东移冷空气影响 (图 7.2a)，内蒙古南部、宁夏、陕西北部、甘肃及青海都遭遇了不同程度的扬沙及浮尘天气影响，其中甘肃民勤、环县，内蒙古头道湖，陕西定边出现了沙尘暴，最小能见度 500m，极大风速



(a)



(b)

图 7.2 2007 年 5 月 2 日扬沙期间气象要素场及颗粒物浓度

(a) 5 月 2 日 14 时海平面气压场和地面风场; (b) 5 月 1~3 日 PM_{10} 浓度

Fig. 7.2 Variations of PM_{10} concentration and the fields of relevant meteorological elements during the blowing dust event in 2 May 2007. (a) Atmospheric pressure and surface wind field at 14:00, 2 May; (b) PM_{10} concentration during 1~3 May.

17.2m/s (<http://www.duststorm.com.cn/>)。5 月 2 日下午, 兰州地区遭遇了扬沙天气袭击, 风速 10m/s, 市区能见度为 6km。此次扬沙天气造成的颗粒物污染持续时间不长, 榆中气候站监测到的 PM_{10} 浓度最大值为 $2484.7\mu\text{g m}^{-3}$, 出现在 16 时, 如图 7.2b 所示, 随后浓度迅速下降, 19 时扬沙天气结束。由于学校停电造成 5 月 2 日下午盘旋路校区监测点无监测数据, 因而无法对比城郊 PM_{10} 浓度的变化特征。

7.2.2 沙尘过境前后大气边界层特征

(1) 2007 年 4 月 22~23 日浮尘天气过程

此次浮尘天气过境前后的温度垂直廓线如图 7.3 所示。可以看出, 22 日 08:00,

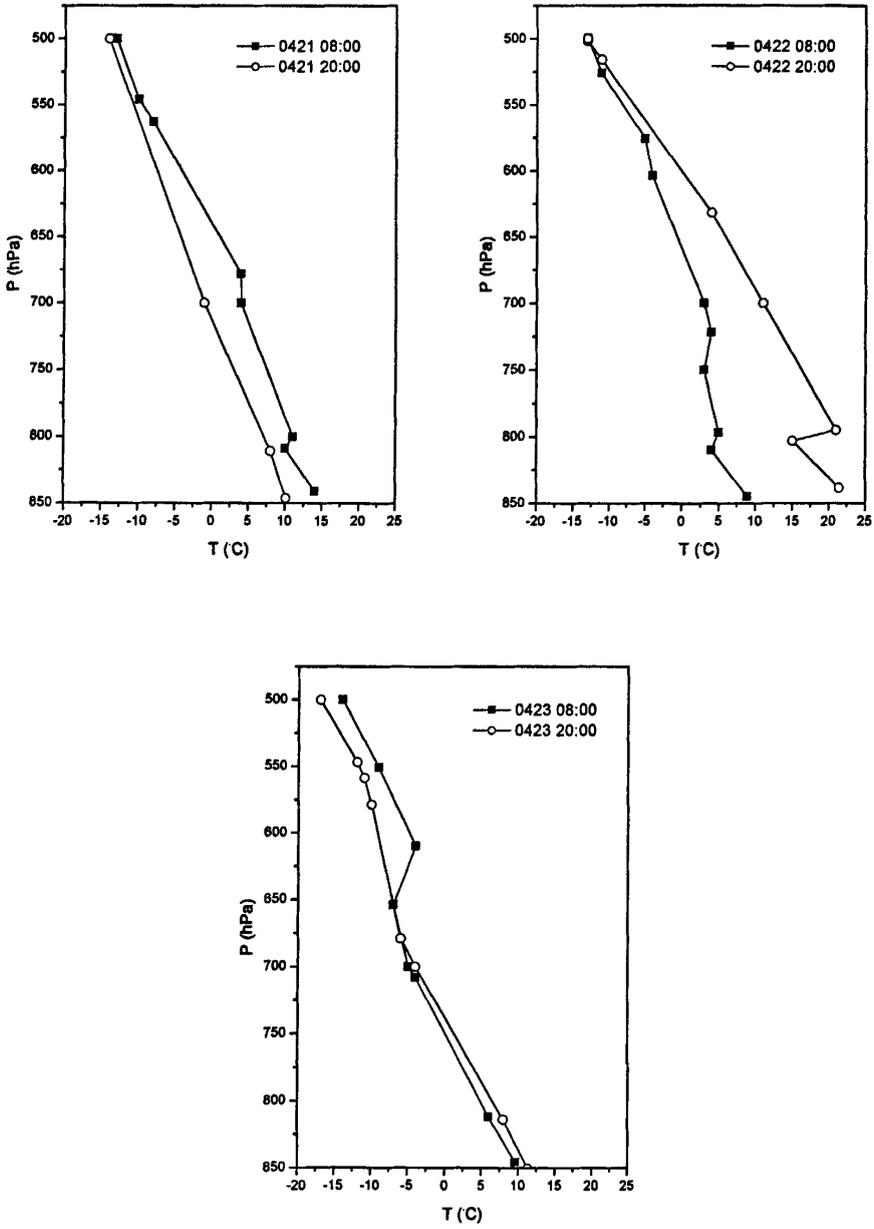


图 7.3 2007 年 4 月 21~23 日浮尘天气过境前后温度垂直廓线

Fig. 7.3 Vertical profiles of temperature during the floating dust event in 21~23 April 2007

边界层中 800hPa 和 750hPa 附近出现了两层逆温, 800hPa 附近的逆温层厚度和强度都不大。20:00, 即浮尘天气出现前 2h, 800hPa 附近的逆温层依然存在, 并且强度大大增强。到 23 日 08:00 (正值浮尘天气过境期间), 700hPa 以下的逆温层完全被破坏, 此时边界层中的大气混合均匀, 在本应形成逆温层的早晨并未出现逆温。650hPa 附近 (已高出边界层顶) 又出现一厚度较大的逆温层。从以上分析可以看出, 浮尘天气过境前, 大气边界层逆温的强度明显增大; 过境时, 边界层逆温完全被破坏, 边界层中的大气混合均匀。由于冷锋锋面次级环流往往产生垂直混合, 使锋后冷空气堆的层结接近等熵, 出现混合层^[21]。

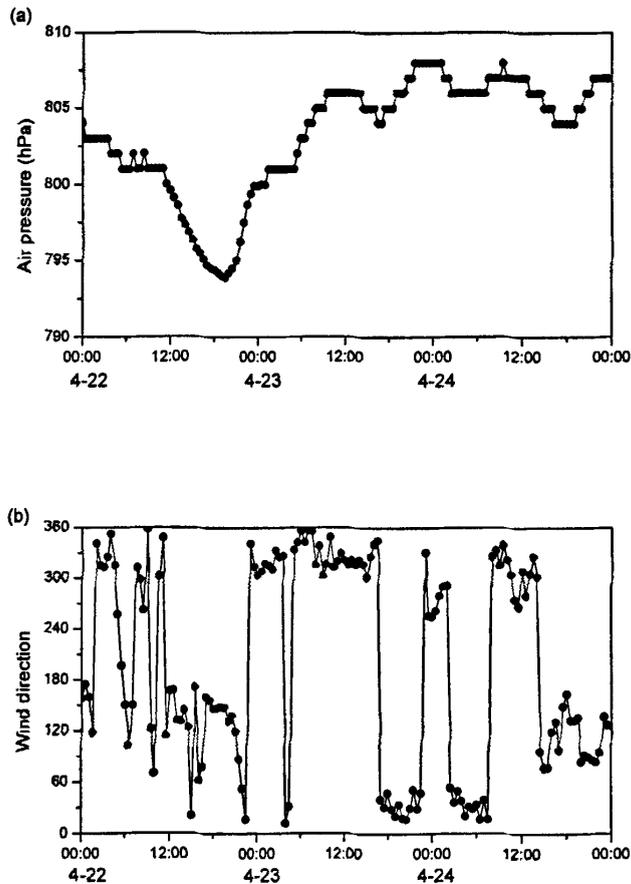


图 7.4 2007 年 4 月 22~24 日浮尘期间气压(a)和风向(b)的变化

Fig. 7.4 Variations of (a) atmospheric pressure and (b) surface wind direction during the floating dust event in 22~24 April 2007

图 7.4 为浮尘天气期间地面气压和风向的变化。从气压来看(如图 7.4a 所示), 22 日下午气压较低, 21:30 气压突然跃升。据兰州市气象站提供的资料显示, 浮尘发生时 22 日 23 时的 3 小时变压达 8.5hPa。之后随着冷空气过境, 兰州地区受地面冷高压控制, 气压持续上升。

为了进一步了解浮尘期间近地面的气象要素变化特征, 本小节还深入分析了在此期间气候站 32m 铁塔的梯度观测资料(其中包括 7 层风速、气温、相对湿度和水气压), 如图 7.5 所示。沙尘天气来临时, 边界层结构发生明显变化。

从风速(如图 7.5a)和风向(如图 7.4b)来看, 总体趋势是风速随高度的升高而增大, 各层风速随时间呈同位相波动。22 日下午风向为东南风和偏南风, 风速较小(约 2m/s)。傍晚前后风速开始增大, 风向仍为东南风。22:00 风向转北, 冷锋过境兰州, 此时风速达到最大, 32m 高度的风速增至 9.3m/s, 各层之间风速的梯度也增大, PM_{10} 浓度骤升, 出现浮尘。22 时之后, 风速迅速降低但其值仍然较大。值得注意的是, 此次浮尘天气期间风速最大值出现在 22 日 22:00, 此时对应的是 PM_{10} 浓度急增, 即大风将地表沙尘大量扬起, 造成浮尘天气出现; 然而 PM_{10} 浓度峰值却出现在 23 日 3:00, 此时恰逢风速低谷, 32m 高度的水平风速仅为 3.0m/s, 也就是说, 沙尘浓度峰值落后于风速峰值, 表明有明显的上游沙尘输送。

从温度来看(如图 7.5b), 22 日白天(浮尘天气爆发前)地面增温明显, 2m 处最高温度达到 20.6℃。午后到傍晚气温一直较高, 20:00 探空表明 800hPa 附近有强逆温层(图 7.3)存在, 受其影响, 20:00(即浮尘天气爆发前 2h)铁塔观测的气温仍高达 19.3~19.9℃。之后随着冷空气过境, 气温迅速下降, 温度垂直梯度减小(图 7.5b), 降温一直持续到浮尘天气过境以后才结束。

从相对湿度(如图 7.5c)和水气压(如图 7.5d)变化来看, 22 日上午由于前一日有降水的原因空气较为潮湿。21:00, 即浮尘天气爆发前 1h, 湿度出现一短暂的快速增大。22:00 浮尘天气爆发, 边界层中大气的水气压迅速降低(图 7.5c), 到 23 日 4:00 降至最低(0.4kPa), 11:00 前后出现微量降水, 湿度有所上升, 之后一直维持在较低水平。然而, 由于气温降低造成相对湿度增大, 使得浮尘天气过境时相对湿度的变化趋势与水气压不同, 相对湿度表现为上升趋势(如图 7.5c)。相对湿度的这一变化特征与沙尘源区^[10]的监测结果类似, 而与离沙尘

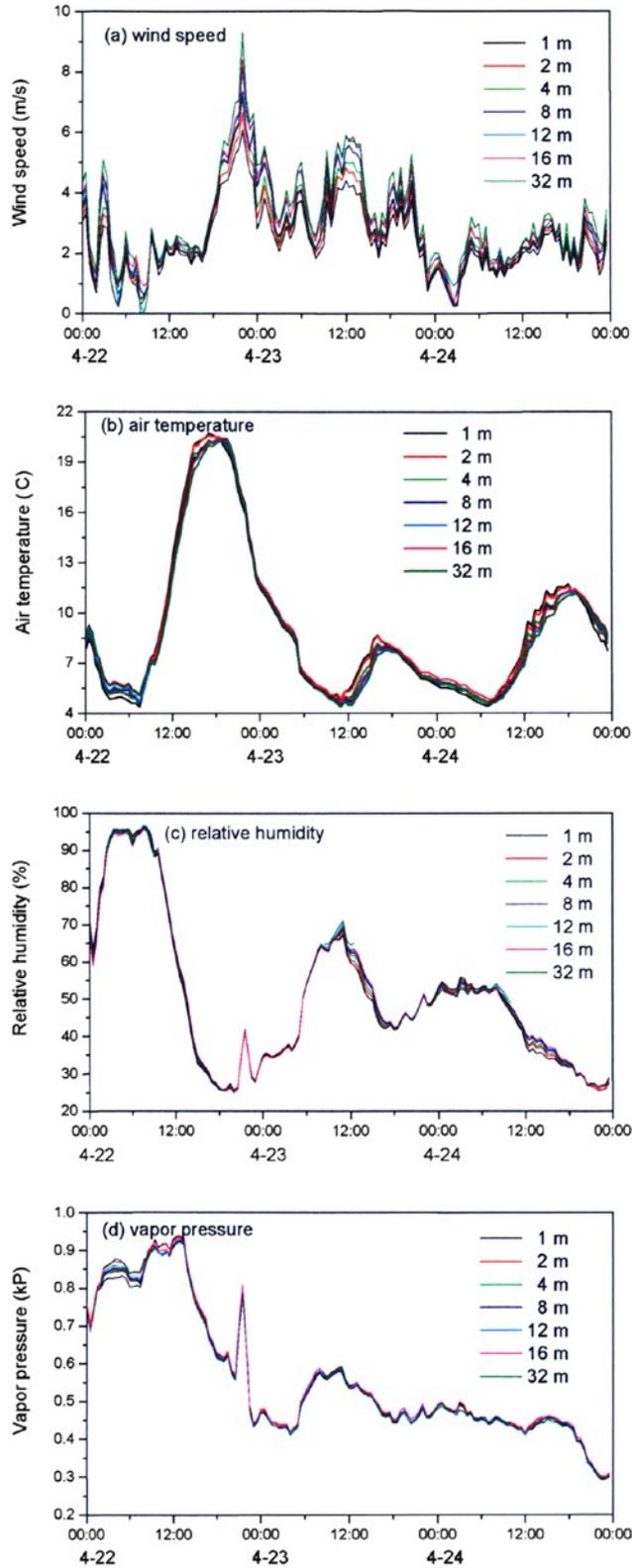


图 7.5 2007 年 4 月 22~24 日扬尘期间铁塔不同高度上风速(a)、
气温(b)、相对湿度(c)和水气压(d)的变化

Fig. 7.5 Variations of (a) wind speed, (b) air temperature, (c) relative humidity and (d) vapor pressure at different heights of gradient tower during the floating dust event in 22~24 April 2007

源区距离较远的北京地区^[13]的结果明显不同。

(2) 2007 年 5 月 2 日扬沙天气过程

此次扬沙天气过境前温度垂直廓线如图 7.6 所示。2 日 08:00，即扬沙发生之前几小时，750hPa~800hPa 附近有一逆温层存在，其厚度远大于前一日（1 日）同一时刻出现在 800hPa 附近的逆温层（如图 7.6）。遗憾的是此次扬沙天气持续时间较短，期间恰未逢探空观测，因此无法得知扬沙发生期间温度垂直廓线的特征。从以上分析可以看出，5 月 2 日扬沙天气发生前，大气边界层中有强度较大的逆温层出现，与 4 月 22~23 日扬尘天气类似。

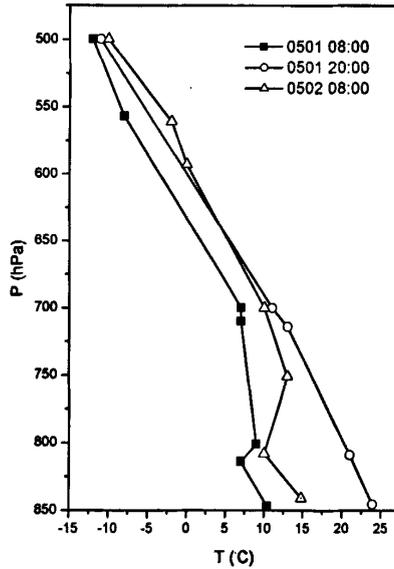


图 7.6 2007 年 5 月 2 日扬沙天气过境前温度垂直廓线

Fig. 7.6 Vertical profiles of temperature during the blowing dust event in 2 May 2007

此次扬沙天气期间地面气压和风向以及 32m 铁塔的风速、气温、相对湿度和水气压的变化如图 7.7 和图 7.8 所示。从气压来看(如图 7.7a), 5 月 2 日 16:30 气压突然跃升, 冷空气过境兰州, 之后气压持续上升。

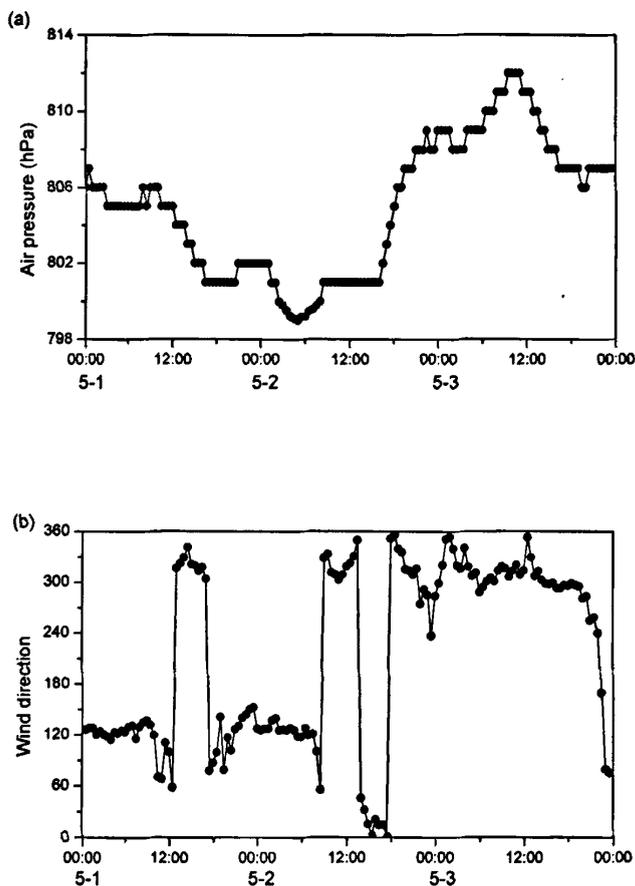


图 7.7 2007 年 5 月 2 日扬沙期间气压(a)和风向(b)的变化

Fig. 7.7 Variations of (a) atmospheric pressure and (b) surface wind direction during the blowing dust event in 2 May 2007

从风速(如图 7.8a)和风向(如图 7.7b)来看, 5 月 2 日 8:00 之前风向为东东南, 8:00 平均风速约 2m/s。9:00 风向转北, 风速逐渐增大。午后 13:00~14:00 风速已增至 6~7m/s, 与此同时 PM_{10} 浓度开始上升。到 16:00, 冷锋过境, 边界层风速迅速增大, 风速垂直梯度也增加, PM_{10} 浓度骤然上升(图 7.2b)。风速最

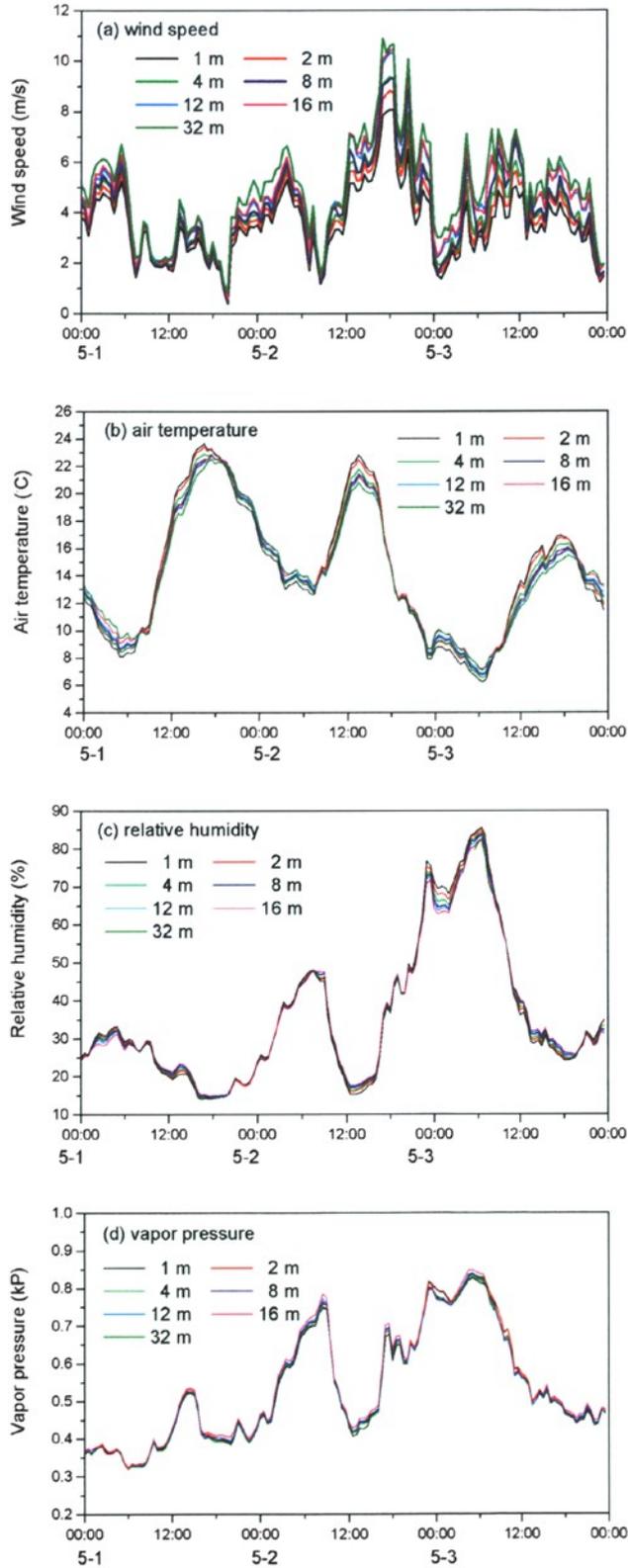


图 7.8 2007 年 5 月 2 日扬沙期间铁塔不同高度上风速(a)、气温(b)、相对湿度(c)和水气压(d)的变化

Fig. 7.8 Variations of (a) wind speed, (b) air temperature, (c) relative humidity and (d) vapor pressure at different heights of gradient tower during the blowing dust event in 2 May 2007

大值出现在 17:00~18:00, 32m 最大风速为 10.9m/s。PM₁₀ 浓度最大值为 4071.9 $\mu\text{g m}^{-3}$, 出现在 16:40, 也就是说, 沙尘浓度峰值与风速峰值基本同步, 这与 4 月 22~23 日浮尘天气期间沙尘浓度峰值落后于风速峰值的情况明显不同。这是因为, 5 月 2 日的沙尘天气是一次扬沙过程, 影响范围较小, 没有明显的上游沙尘输送。

从温度来看(如图 7.8b), 2 日白天扬沙爆发前气温较高。16:00, 随着冷空气过境, 边界层气温迅速降低, 温度垂直梯度变得很小。19:00 扬沙天气结束后, 降温趋势变缓, 温度垂直梯度逐渐增大, 表明混合层逐渐减弱、消散。

从湿度来看(如图 7.8c 和 7.8d), 与 4 月 22~23 日浮尘过程相比, 此次扬沙过程湿度(水气压)较大, 2 日 16:00~19:00 扬沙天气发生期间, 相对湿度和水气压有小幅增高。

7.2.3 沙尘过境期间的湍流输送特征

大气边界层中的通量输送过程是地气间的物质、动量、水热交换的必要条件之一。在沙尘天气期间, 边界层湍流输送过程是研究起沙、输送、降尘等物理机制中至关重要的一个环节。因此, 在这一小节中, 本文利用气候站超声资料分析了沙尘天气发生期间边界层湍流输送特征及其与颗粒物污染之间的关系。由于 2007 年 4 月 22~23 日浮尘天气期间超声资料缺测, 因此本小节仅就 2007 年 5 月 2 日的扬沙过程进行分析和研究。

(1) 2007 年 5 月 2 日扬沙天气过程

此次沙尘天气期间湍流速度方差和平均湍流动能(TKE)随时间的变化如图 7.9 和图 7.10 所示。可以看出, 沙尘天气爆发之前, 三个方向的湍流方差均不大。而在 2 日 16:00~19:00 即沙尘过境期间, 水平方向和垂直方向的湍流速度方差以

及 TKE 迅速增大, TKE 最大值出现在 18:00, 与沙尘浓度高峰的出现基本同步。

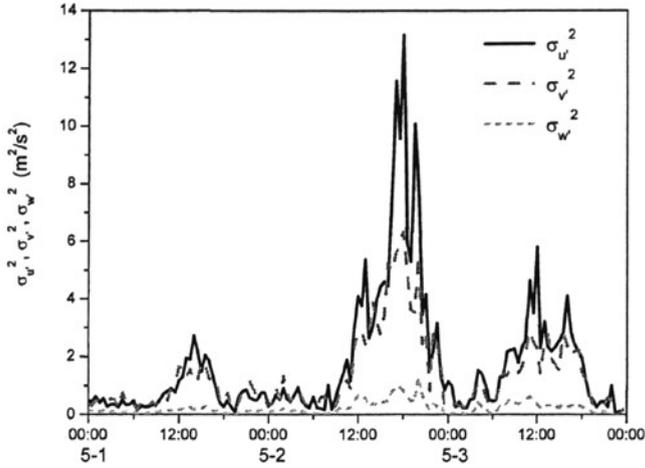


图 7.9 2007 年 5 月 2 日扬沙天气期间湍流速度方差

Fig. 7.9 Variations of the variance of turbulent velocity during the blowing dust event in 2 May 2007

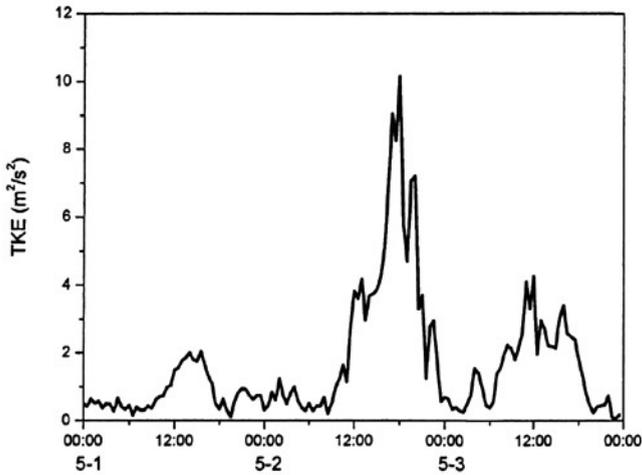


图 7.10 2007 年 5 月 2 日扬沙天气期间的平均湍流动能 (TKE)

Fig. 7.10 TKE variation during the blowing dust event in 2 May 2007

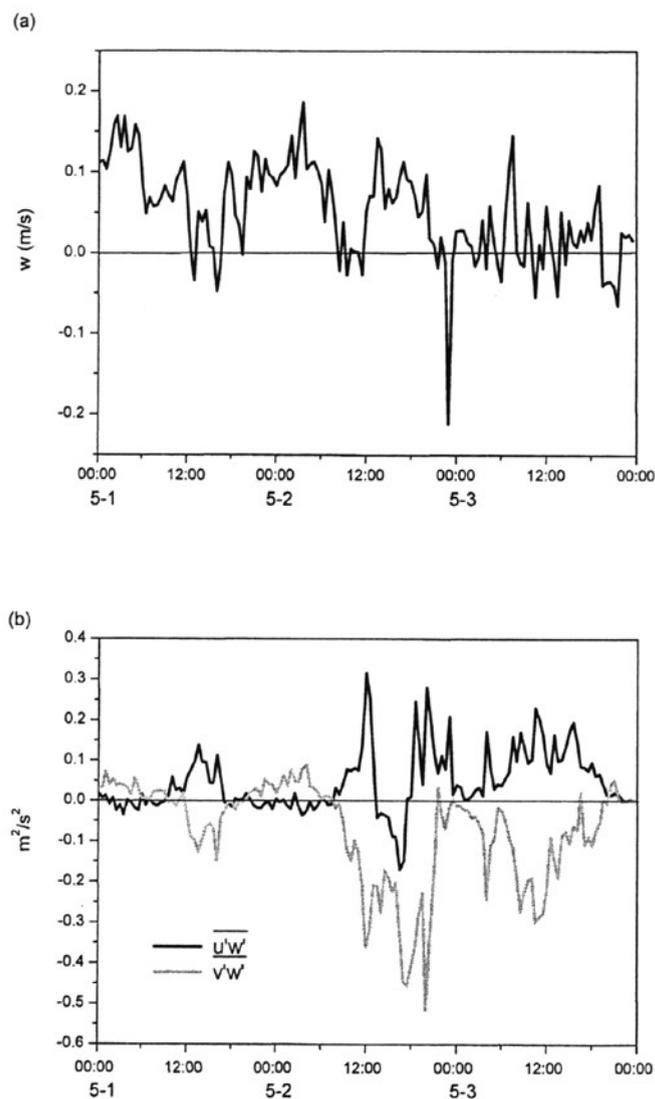


图 7.11 2007 年 5 月 2 日扬沙天气期间的平均垂直速度(a)
和垂直湍流动量通量（运动学通量）(b)

Fig. 7.11 Variations of (a) mean vertical velocity and (b) vertical turbulent momentum flux during the blowing dust event in 2 May 2007

再看沙尘过境期间的平均垂直速度和垂直湍流动量（运动学通量，以下同）输送的演变，如图 7.11 所示。可以看到，2 日中午之前（沙尘天气过境之前），u

方向和 v 方向的垂直动量输送 ($\overline{u'w'}$, $\overline{v'w'}$) 的值都很小, 在零值附近震荡。2 日中午随着水平风速的逐渐增大 (图 7.8a), 速度的脉动增强, u 、 v 方向的垂直动量通量有所增大, u 方向为正、 v 方向为负。16:00, 沙尘天气过境, 此时 u 方向垂直动量通量变为负值, 而 v 方向的通量负值则进一步增加 (图 7.11b), 说明沙尘期间经向和纬向的动量均是向下输送的, 且经向输送其值较大, 动量下传特别是经向动量下传造成地表沙尘被大量扬起, PM_{10} 浓度达到最大值 (图 7.2b)。此段时间 (即 2 日 16:00~19:00) 平均垂直速度的增强并不明显 (图 7.11a), 而垂直湍流动量输送则大大增强, 表明较强的垂直湍流动量向下输送是此次沙尘天气起沙的主要原因。19:00, 沙尘天气结束, u 方向垂直动量通量又变为正值, v 方向动量通量负值则迅速减小, PM_{10} 浓度很快降至较低水平。沙尘爆发期间并未观测到很强的系统性上升气流 (如图 7.11a), 这与胡泽勇等^[10]对沙尘源区沙尘天气伴有很强的上升气流的研究结论有所不同。

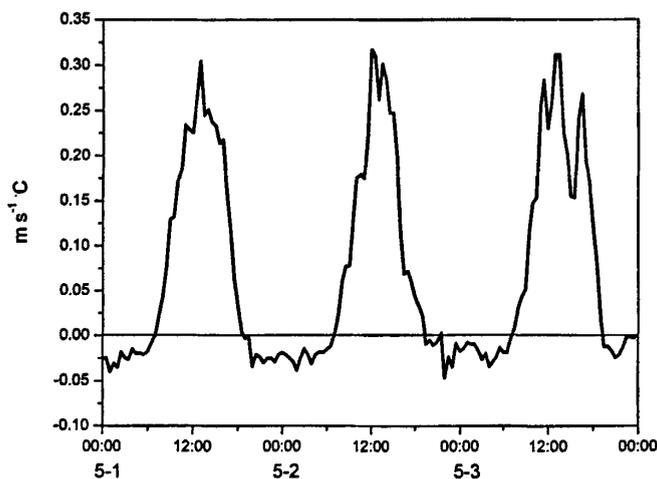


图 7.12 2007 年 5 月 2 日扬沙天气期间的垂直感热通量 (运动学通量)

Fig. 7.12 Variation of the vertical sensible heat flux during the blowing dust event in 2 May 2007

5 月 1 日天气晴好, 是典型晴天, 可将其作为非沙尘日的代表, 对比沙尘日与非沙尘日的湍流输送变化特征。非沙尘日的湍流速度方差和平均湍流动能均明显小于沙尘日, 峰值出现在午后 14:00~16:00 (如图 7.9 和图 7.10 所示)。非沙尘

日 u 方向和 v 方向的垂直动量输送 ($\overline{u'w'}$, $\overline{v'w'}$) 的值都不大, 在零值附近震荡, 峰值出现在午后 (如图 7.11)。以上分析表明沙尘日的湍流输送变化特征与非沙尘日有明显差异。

此次沙尘天气期间垂直感热输送的变化如图 7.12 所示, 可以看到, 沙尘天气发生期间 (2 日 16:00~19:00) 感热输送是上传的。沙尘日 (5 月 2 日) 感热通量日变化与非沙尘日 (5 月 1 日) 相比并未有明显差异 (如图 7.12), 这可能与此次沙尘过程的强度不是很大有关。

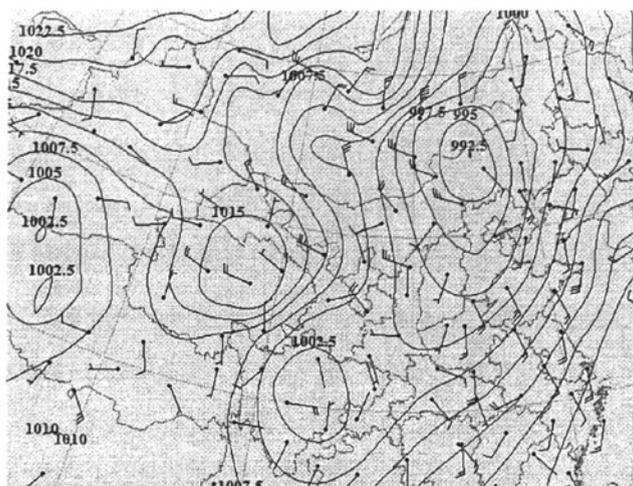
综合以上对 PM_{10} 浓度监测资料、探空资料、边界层低层 32m 铁塔梯度观测资料和超声 (湍流) 资料的分析, 可以看出, 随着沙尘天气的爆发, 逆温层完全被破坏, 混合层迅速发展, 边界层低层温度和湿度垂直梯度变得很小, 而风速垂直梯度则增大; 同时水平风速增至最大, PM_{10} 浓度骤增。沙尘过境期间三个方向的湍流速度方差和平均湍流动能 (TKE) 迅速增大, 垂直湍流输送强烈, 经向和纬向的动量均是向下输送的, 且经向输送值较大, 感热输送是上传的。对于浮尘天气来说, 冷锋过境初期风速达到最大时 PM_{10} 浓度并非最高, 之后风速降低, 上游沙尘输送源源不断而来, 在其影响之下 PM_{10} 浓度才达到最大值, 即沙尘浓度峰值落后于风速峰值; 而对于扬沙天气而言, 由于没有明显的上游沙尘输送, 其沙尘浓度峰值与风速峰值基本同步。

§7.3 冷锋天气过程的大气边界层特征与颗粒物污染

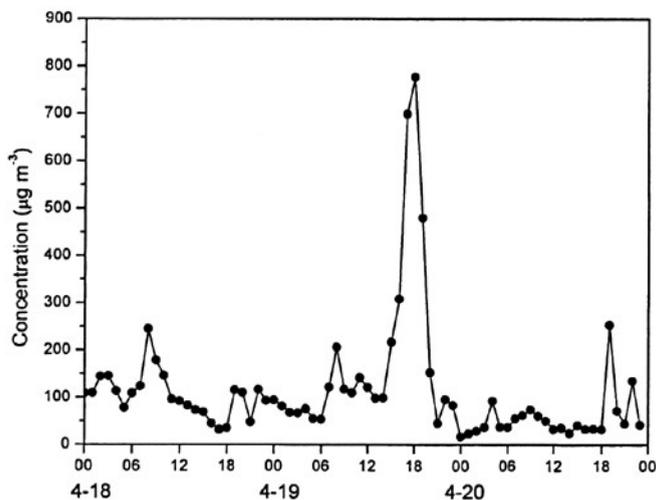
由上一章 § 6.4 节分析可知, 根据冷锋过境初期颗粒物浓度的变化趋势可将冷锋分为两类, 第一类冷锋即先升后降型冷锋过境时颗粒物浓度会先升后降, 而风速则是冷锋过境初期颗粒物浓度是否出现急升的重要原因。那么, 冷锋过境为什么会造成颗粒物浓度先升后降这种与气态污染物明显不同的变化特征呢? 为此, 本小节利用 32m 铁塔梯度观测资料、超声资料、探空资料以及 PM_{10} 浓度监测资料, 以 2007 年 4 月 19 日冷锋过程为例, 分析研究了先升后降型冷锋过境时兰州市大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物浓度的关系。

7.3.1 2007 年 4 月 19 日冷锋天气过程背景

2007 年 4 月 19 日, 一次冷锋天气过程影响兰州地区, 据兰州市气象站提供



(a)



(b)

图 7.13 2007 年 4 月 19 日冷锋过境期间气象要素场和颗粒物浓度

(a) 4 月 19 日 14 时海平面气压场和地面风场；(b) 4 月 18~20 日 PM₁₀ 浓度

Fig. 7.13 Variations of PM₁₀ concentration and the fields of relevant meteorological elements during the cold front event in 19 April 2007. (a) Atmospheric pressure field and surface wind

field at 14:00, 19 April; (b) PM₁₀ concentration during 18~20 April.

的资料显示,过程最大 3h 降温达 6.5°C ,最大 3h 变压达 12.8hPa 。冷锋过境期间, PM_{10} 浓度先迅速上升,如图 7.13 所示,并于 18 时达到最大值 ($777.1\mu\text{g m}^{-3}$),然后又大幅下降,21:00 冷锋已移出兰州, PM_{10} 浓度降至 $45.6\mu\text{g m}^{-3}$ 。虽然冷锋过境初期造成了较为严重的颗粒物污染,由于后期有效的风扩散作用,过境后 PM_{10} 浓度依然明显低于过境前,冷锋总体上起清除污染的作用。

7.3.2 冷锋过境前后大气边界层特征

4 月 19 日冷锋过境前后温度垂直廓线如图 7.14 所示,可以看到,19 日 08:00 (冷锋过境前) 边界层 800hPa 附近出现一强度较大的逆温层。到 20:00 正值冷锋过境,边界层逆温完全被破坏,800hPa 以下温度垂直递减率极小(图 7.14),呈现出明显的混合层的特征,混合层顶高度在 811hPa 附近。从以上分析可以看出,冷锋过境时边界层逆温完全被破坏,混合层出现。王式功等^[15]研究了兰州冬季冷锋过境前后混合层厚度的变化,指出当兰州地区处于冷锋过境前时平均最

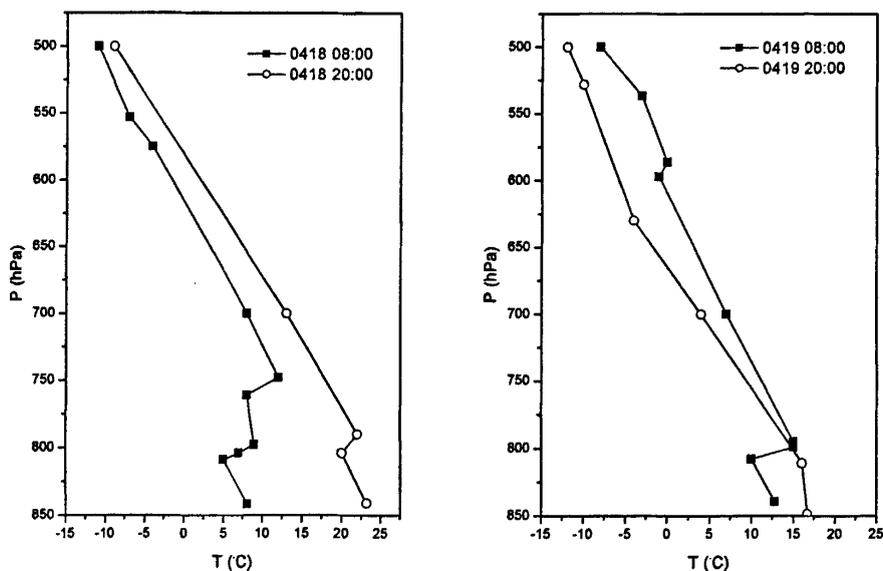


图 7.14 2007 年 4 月 18~19 日冷锋过境前后温度垂直廓线

Fig. 7.14 Vertical profiles of temperature during the cold front event in 18~19 April 2007

大混合层厚度最低，而处于冷锋过后的蒙古高压前部控制时平均最大混合层厚度最高。图 7.14 的结果表明春季冷锋与此结论（冬季冷锋）类似。

图 7.15 和图 7.16 分别为冷锋过境期间地面气压和风向以及边界层 32m 铁塔各层的风速、气温、相对湿度和水气压的变化。由图 7.15 和图 7.16 可以看到，19 日 15:00，风速陡然增大，风向东北，PM₁₀ 浓度随之升高。17:30 气压突然跃升，气温迅速降低，相对湿度和水气压增大（如图 7.15），冷锋过境兰州地区，

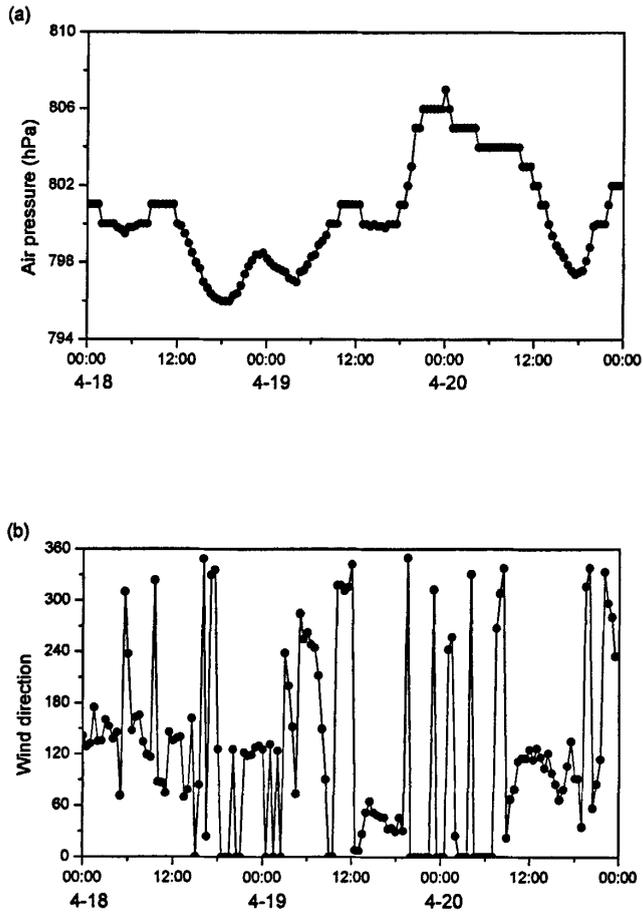


图 7.15 2007 年 4 月 19 日冷锋过境期间气压(a)和风向(b)的变化

Fig. 7.15 Variations of (a) atmospheric pressure and (b) surface wind direction during the cold front event in 19 April 2007

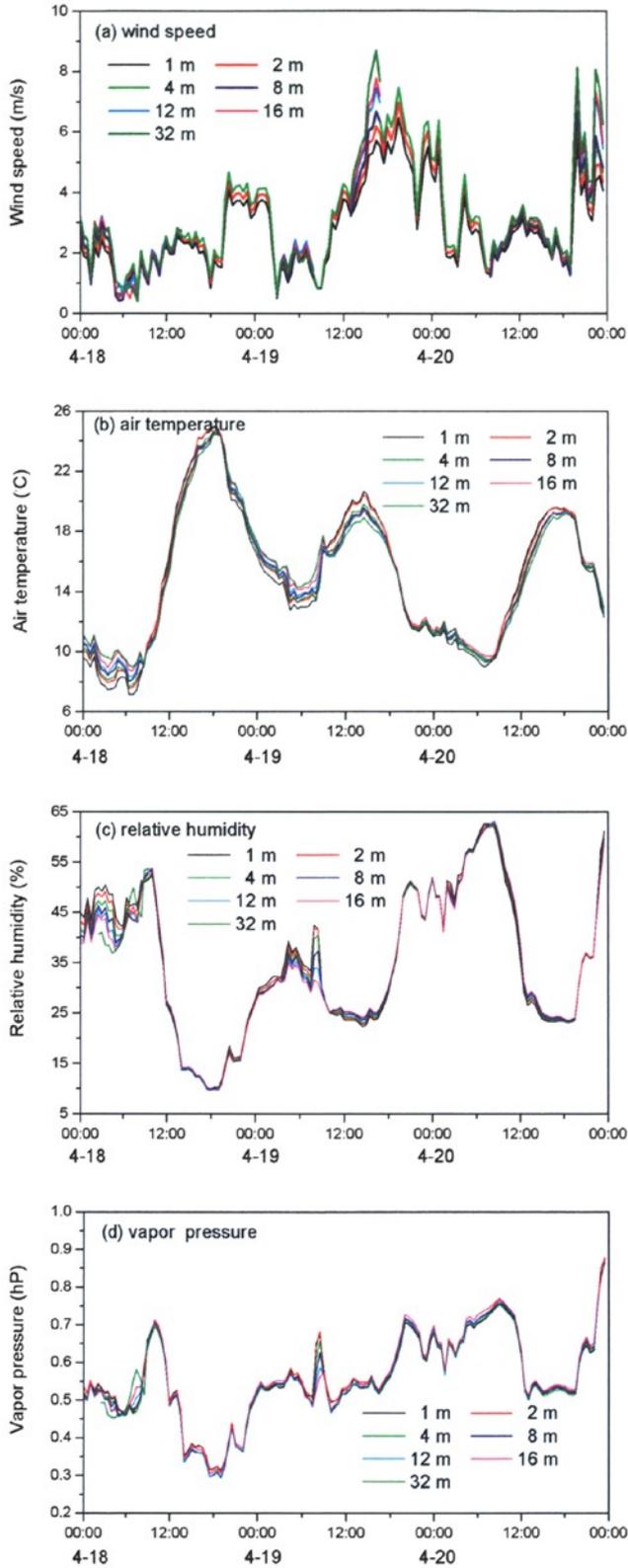


图 7.16 2007 年 4 月 19 日冷锋过境期间铁塔不同高度上风速(a)、
气温(b)、相对湿度(c)和水气压(d)的变化

Fig. 7.16 Variations of (a) wind speed, (b) air temperature, (c) relative humidity and (d) vapor pressure at different heights of gradient tower during the cold front event in 19 April 2007

边界层风速较大, PM_{10} 浓度急增, 18:15 达到峰值 $938.5\mu g m^{-3}$ 。冷锋过境时, 由于混合层的产生和发展(图 7.14), 边界层中的大气混合均匀, 边界层低层温度和湿度垂直梯度均极小(如图 7.15b、c 和 d)。19:30 风速达到最大(19 日 17:30 至 20 日 08:00 梯度塔 8m 以上风速记录缺失), 4m 处风速到达 7.5m/s, 之后随着风速的减小, PM_{10} 浓度迅速降低。21:00 冷锋过程结束, 此时 PM_{10} 浓度已降到很低(图 7.13b)。

7.3.3 冷锋过境期间的湍流输送特征

4 月 19 日冷锋过境期间湍流速度方差和平均湍流动能(TKE)的变化如图 7.17 和图 7.18 所示, 可以看到, 冷锋过境前湍流速度方差较小, 过境时(19 日

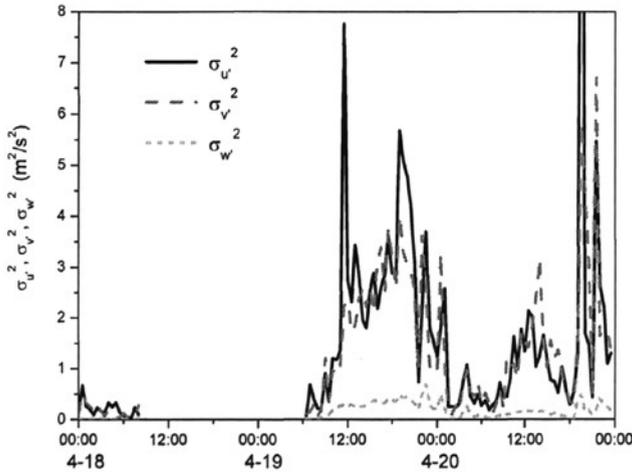


图 7.17 2007 年 4 月 19 日冷锋过境期间的湍流速度方差

Fig. 7.17 Variations of the variance of turbulent velocity during the cold front event in 19 April 2007

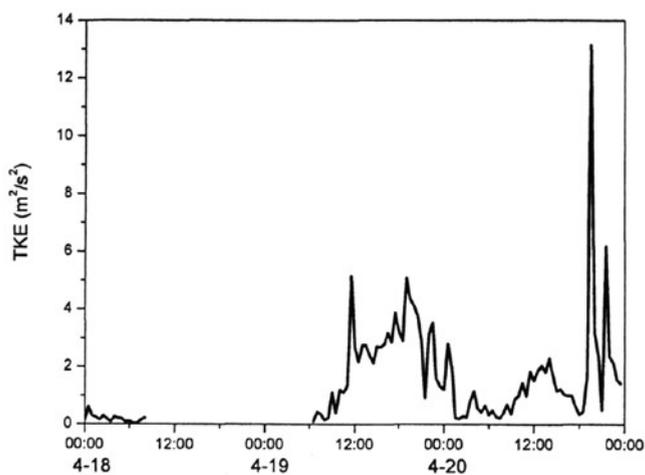


图 7.18 2007 年 4 月 19 日冷锋过境期间的平均湍流动能 (TKE)

Fig. 7.18 TKE variation during the cold front event in 19 April 2007

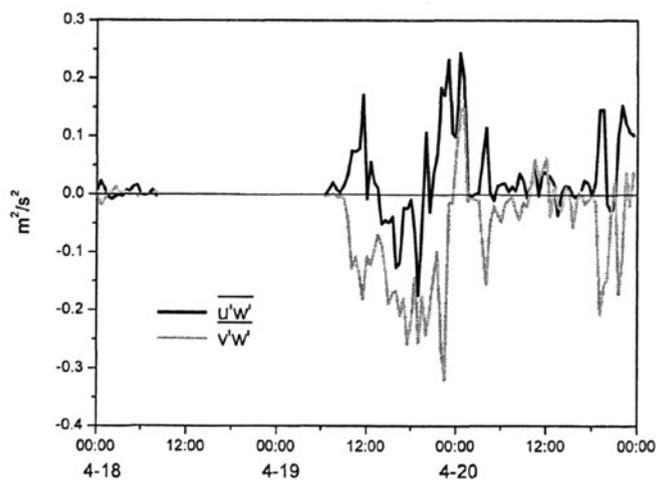


图 7.19 2007 年 4 月 19 日冷锋过境期间的垂直湍流动量通量 (运动学通量)

Fig. 7.19 Variation of the vertical turbulent momentum flux during
the cold front event in 19 April 2007

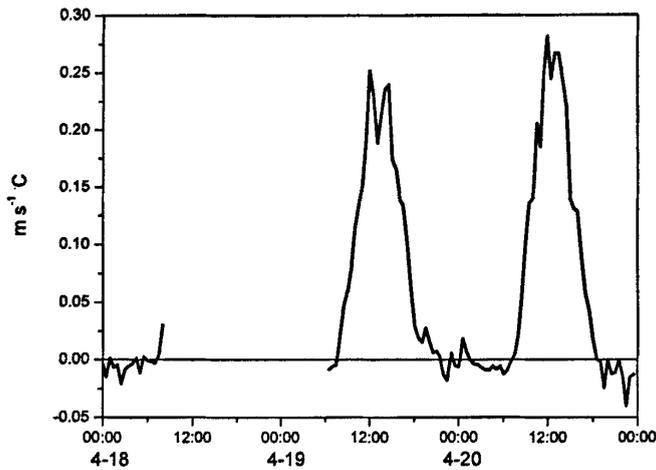


图 7.20 2007 年 4 月 19 日冷锋过境期间的垂直感热通量（运动学通量）

Fig. 7.20 Variation of the vertical sensible heat flux during the blowing dust event in 19 April 2007

17:30~21:00) 三个方向的湍流方差和 TKE 迅速增大, TKE 最大值出现在 19:00, 与 PM_{10} 浓度峰值的出现基本同步。从冷锋过境前后的垂直动量输送和垂直感热输送的变化 (如图 7.19 和图 7.20) 来看, 过境初期 u 方向垂直动量通量由正值变为负值、 v 方向的负通量值则进一步增大, 表明冷锋过境初期经向和纬向的动量均是向下输送的, 且经向输送较大, 感热输送是上传的。与经向和纬向动量下传相对应的是逆温层的破坏、消失和混合层的出现、发展, 如图 7.14。由以上分析可以看出, 先升后降型冷锋过境初期大气边界层结构和湍流输送特征与前述沙尘天气过境时的特征极为相似, 表明这种类型冷锋过境初期对颗粒物污染的影响机制与沙尘天气类似, 只是强度较弱而已。

§7.4 本章小结

本章综合利用气候站边界层低层 32m 铁塔梯度观测资料、超声资料和 PM_{10} 浓度监测资料, 以及兰州市气象台常规地面气象资料和逐日 08:00、20:00 探空资料, 对比分析了 2007 年 4 月 22~23 日浮尘天气、5 月 2 日扬沙天气以及 4 月 19

日先升后降型冷锋过境期间兰州地区大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系, 结论如下:

沙尘天气过境前, 边界层有强度较大的逆温层出现; 随着沙尘天气的爆发, 边界层中的逆温层完全被破坏、消失, 混合层迅速发展, 由于上下混合均匀, 边界层低层温度和湿度垂直梯度变得很小, 而风速垂直梯度则增大; 此时随着风速迅速增大, PM_{10} 浓度骤增。沙尘过境期间三个方向的湍流速度方差和平均湍流动能 (TKE) 迅速增大, 垂直湍流输送强烈, 经向和纬向的动量均是向下输送的, 其中经向输送较强, 感热输送是上传的。上游有明显沙尘输送时, 沙尘浓度峰值落后于风速峰值。

先升后降型冷锋过境初期大气边界层结构和湍流输送特征与沙尘天气过境时的特征极为相似, 表明此型冷锋过境初期对颗粒物污染的影响机制与沙尘天气类似, 只是强度较弱而已。动量下传特别是经向动量下传使得地表沙尘大量扬起, 这是造成沙尘天气和先升后降型冷锋过境初期颗粒物重污染的主要原因之一。

参考文献

- [1] Jaakko Kukkonen, Mia Pohjola, Ranjeet S Sokhi, Lakhu Luhana, Nutthida Kitwiroon, Lia Fragkou, Minna Rantamäki, Erik Berge, Viel Ødegaard, Leiv Håvard Slørdal, Bruce Denby and Sandro Finardi. Analysis and evaluation of selected local-scale PM_{10} air pollution episodes in four European cities: Helsinki, London, Milan and Oslo [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39 (15): 2759-2773.
- [2] M. Viana, C. Pérez, X. Querol, A. Alastuey, S. Nickovic and J.M. Baldasano. Spatial and temporal variability of PM levels and composition in a complex summer atmospheric scenario in Barcelona (NE Spain) [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39 (29): 5343-5361.
- [3] Päivi Aarnio, Jyrki Martikainen, Tareq Hussein, Ilkka Valkama, Hanna Vehkamäki, Larisa Sogacheva, Jari Härkönen, Ari Karppinen, Tarja Koskentalo, Jaakko Kukkonen and Markku Kulmala. Analysis and evaluation of selected PM_{10} pollution episodes in the Helsinki Metropolitan Area in 2002 [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42 (17): 3992-4005.
- [4] 周明煜, 曲绍厚, 宋锡铭等.北京地区一次尘暴过程的气溶胶特征[J].环境科学学报,

- 1981, 1 (3): 207-219.
- [5] 张仁健, 徐永福, 韩志伟.北京春季沙尘暴的近地面特征[J].气象, 31 (2): 8-11.
- [6] 孙继明, 肖稳安, 牛生杰, 杨有林, 黄顺祥.沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送特征分析[J].南京气象学院学报, 2002, 25 (4): 489-495.
- [7] 牛生杰, 章澄昌.贺兰山地区沙尘暴沙尘起动和垂直输送物理因子的综合研究[J].气象学报, 2002, 60 (2): 194-204.
- [8] 张正偲, 董治宝, 赵爱国.2006年春季天气背景下腾格里沙漠近地面气象要素与输沙通量的变化趋势[J].科学通报, 2008, 53 (16): 1953-1960.
- [9] 朱好, 张宏升, 彭艳, 陈家宜, 朴淳雄.不同沙尘天气微气象和沙尘演变规律的对比研究[J].北京大学学报(自然科学版), 2008, 44 (4): 579-584.
- [10] 胡泽勇, 黄荣辉, 卫国安等.2000年6月4日沙尘暴过境时敦煌地面气象要素及地表能量平衡特征的变化[J].大气科学, 2002, 26 (1): 1-8.
- [11] 刘东升.中国的黄土堆积.北京: 科学出版社, 1965.
- [12] 周明煜, 姚文清, 徐祥德, 于海青.北京城市大气边界层低层垂直动力和热力特征及其与污染物浓度关系的研究[J].中国科学D辑地球科学, 2005, 35 (增刊 I): 20-30.
- [13] 彭珍, 刘熙明, 洪钟祥, 王丙兰.北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征[J].气候与环境研究, 2007, 12 (3): 267-276.
- [14] 王式功, 杨德保, 尚可政, 黄建国, 王彩欣, 祁斌.兰州市城区冬半年低空风特征及其与空气污染的关系[J].兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33 (3): 97-105.
- [15] 王式功, 姜大膀, 杨德保, 尚可政, 祁斌.兰州市区最大混合层厚度变化特征分析[J].高原气象, 2000, 19 (3): 363-370.
- [16] 尚可政, 达存莹, 付有智, 王式功, 杨德保.兰州城区稳定能量及其与空气污染的关系[J].高原气象, 2001, 20 (1): 76-81.
- [17] 刘宇, 胡非, 王式功, 邹捍, 杨德保, 尚可政.兰州市城区稳定边界层变化规律的初步研究[J].中国科学院研究生院学报, 2003, 20 (4): 482-487.
- [18] 姜大膀, 王式功, 郎咸梅等.兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系[J].兰州大学学报(自然科学版), 2001, 37(4):133-139.
- [19] 张强.地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响[J].中国环境科学, 2001, 21(3): 230-235.
- [20] 刘宇, 王式功, 尚可政, 杨德保, 祁斌.兰州市低空风时空变化特征及其与空气污染的关系[J].高原气象, 2002, 21 (3): 322-326.

- [21] 姜学恭, 沈建国, 胡英华.沙尘暴过程中的混合层特征[J].干旱区资源与环境, 2004, 18 (增刊): 63-71.

第八章 总结与展望

§ 8.1 全文总结

本文在对近 52 年来我国北方中西部地区沙尘暴的气候特征进行分析的基础上,探讨沙尘天气造成的颗粒物污染对我国北方城市空气质量的影响程度、影响范围和影响过程,并以颗粒物污染最严重的城市之一、同时也是受沙尘污染影响最严重的城市之一的兰州市作为受沙尘天气重点影响地区的代表城市,对其不同粒径颗粒物(TSP、PM₁₀、PM_{2.5}和PM_{1.0})的浓度进行了前后长达 30 个月的连续监测。利用上述颗粒物浓度监测资料分析兰州市不同粒径大气颗粒物浓度的年变化、日变化特征及其成因,并从上游沙尘输送以及当地气象条件两方面对影响兰州市颗粒物污染的因素进行了初步研究。然后,从天气学角度,研究了不同类型典型天气过程对大气颗粒物污染的影响——分析和研究沙尘、降水和冷锋三种典型天气过程的演变对兰州市不同粒径颗粒物污染的影响程度及其变化规律。最后,结合颗粒物浓度监测资料、探空资料、边界层铁塔梯度观测资料和湍流资料,对不同类型典型天气过程(即浮尘、扬沙和冷锋)中大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系进行探讨,以期搞清沙尘天气等不同类型典型天气过程对兰州地区大气颗粒物污染的影响机制,为进一步预报和改善兰州地区大气环境质量提供有力的科学依据。主要结论如下:

(1) 1954~2005 年西北五省(区)及内蒙古自治区沙尘暴发生日数的年变化特征可划分为四大类型,即春季型、冬春夏型、春夏型和冬春型,它们分别占总数的 29.7%、29.7%、27.1%和 13.5%,除冬春型冬季沙尘暴发生最多外,其它类型均为春季最多。沙尘暴日变化划分为三种类型,各型高发时段和峰值时间均有明显差异,其中 2 型起沙高峰期非常集中(在 11~14 时),3 型有两个高发时段。持续时间分布规律也划分为三种类型:短时型、中间型和持续型。上述类型划分及分析结果表明,沙尘暴的时间变化特征也存在明显的地域差异,这一差异是某一时期内强风、沙尘源和不稳定层结三者在不同地区配置情况差异的综合反映。

(2) 尽管近年来我国北方多数城市大气环境治理的力度明显加大,但

2000~2008 年我国北方 17 个环保重点城市大气的首要污染物仍主要是可吸入颗粒物 (PM_{10}), 其为首要污染物时的平均发生频率极高 (17 个城市均高于 80%), PM_{10} III 级及以上污染日发生频数也较高 (其中兰州市超标率最高), 颗粒物污染状况依然严重。这主要与沙尘天气有关。春季沙尘输送对北方城市颗粒物污染的平均影响程度 (即沙尘影响指数) 自西向东降低, 其中对银川、兰州和西宁三城市的影响程度最大。在沙尘天气活跃年, 其对城市颗粒物污染的影响程度倍增。沙尘天气的发生容易造成严重的颗粒物污染事件。在沙尘天气发生期间, 各地受颗粒物污染程度从强沙尘暴中心区向外围逐渐减轻。在非沙尘天气发生区, 虽然当地并未出现沙尘天气, 但在上游沙尘输送的作用下颗粒物浓度也会受到较大影响。颗粒物浓度的时空变化可以清楚地反映沙尘的输送、移动及强度变化。

(3) 就沙尘重点影响地区——兰州市的不同粒径大气颗粒物 (TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$) 浓度的年变化、日变化特征及其影响因素进行分析, 粗颗粒物 (TSP 和 PM_{10}) 月平均浓度的年变化呈双峰型分布, 特别是 4 月份出现浓度的主峰值而有别于其他城市; 而细颗粒物 ($PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$) 的年变化则呈单峰型分布, 峰值在 12 月; 这一差异反映出春季沙尘天气明显加剧兰州市粗颗粒物污染, 而由于其风扩散效应则降低细颗粒物污染。兰州市春季风速与粗、细颗粒浓度的相关分析结果也证实了这一点。正常情况下 (无沙尘) 兰州市粗颗粒物 (TSP 和 PM_{10}) 浓度的日变化呈现出双峰型; 而 4 月份沙尘天气影响期间, 其日变化则变为三峰型, 即受沙尘天气的影响午后增加了一个浓度高峰。正常情况下 (无沙尘) 不同粒径颗粒物浓度日最低值的出现时间存在明显差异——即粗颗粒物浓度日最低值出现时间一般在凌晨 2-3 时, 而细颗粒物浓度日最低值出现时间一般在傍晚之前, 反映出它们在边界层大气中稀释扩散过程的差异。上游地区大风沙尘天气是影响兰州市颗粒物污染状况的重要因素, 其中青海地区和河西地区的沙尘天气对兰州影响最大。

(4) 关于沙尘、降水和冷锋三种不同类型典型天气过程对兰州市 5 种不同粒径颗粒物 (TSP、 $PM_{>10}$ 、 $PM_{2.5-10}$ 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$) 浓度影响的研究表明: 沙尘天气发生时兰州市颗粒物污染严重, $PM_{2.5-10}$ 浓度升幅最大, 不同粒径颗粒物浓度的变化规律存在差异。降水天气过程对颗粒物浓度的影响以湿清除为主, 粗粒子的清除率明显高于细粒子。不同类型降水对颗粒物的清除率存在明显差异:

阵性降水对兰州市颗粒物浓度的影响大于连续性降水；从不同的降水天气系统类型来看，对流性降水对 TSP、 $PM_{>10}$ 和 $PM_{2.5-10}$ 的清除率是相同降水量锋面降水的数倍，这是由它们不同的产生机制和降水特征造成的。冷锋对颗粒污染物的影响也以清除为主，清除率通常与其强度有关，粗粒子的清除率高于细粒子。根据冷锋过境初期颗粒物浓度的变化趋势，可将冷锋分为先升后降型和直降型。先升后降的变化特征是冷锋对颗粒污染物与气态污染物浓度影响的重要差别之一。

(5) 为了更好地探讨沙尘天气等不同类型典型天气过程中兰州地区颗粒物污染的形成机制，对 2007 年 4 月 22~23 日浮尘天气、5 月 2 日扬沙天气以及 4 月 19 日先升后降型冷锋过境期间兰州地区大气边界层结构和湍流输送特征及其与颗粒物污染的关系进行了对比分析，得到了一些有意义的结论：沙尘天气过境前，边界层有强度较大的逆温层出现；随着沙尘天气的爆发，逆温层完全被破坏、消失，混合层迅速发展，边界层低层温度和湿度垂直梯度变得很小，而风速垂直梯度则增大；此时随着风速迅速增大， PM_{10} 浓度骤增。沙尘过境期间三个方向的湍流速度方差和平均湍流动能 (TKE) 迅速增大，垂直湍流输送强烈，经向和纬向的动量均是向下输送的，其中经向输送较强，感热输送是上传的。上游有明显沙尘输送时，沙尘浓度峰值落后于风速峰值。先升后降型冷锋过境初期对颗粒物污染的影响机制与沙尘天气类似，只是强度较弱而已。动量下传特别是经向动量下传是造成沙尘天气和先升后降型冷锋过境初期颗粒物严重污染的主要原因之一。

§ 8.2 本研究特色与创新点

(1) 本研究是首次在沙尘重点影响地区——兰州市对不同粒径大气颗粒物 (TSP、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{1.0}$) 浓度进行较长时间 (长达 30 个月) 的同时监测和综合性的比较研究，得到了兰州市不同粒径大气颗粒物浓度的年变化和日变化特征，指出了不同粒径颗粒物在边界层大气中稀释扩散过程的差异，揭示了外来沙尘输送对兰州市颗粒物污染变化特征的重要作用及其对受干燥裸露地表扬尘影响较大的粗粒子和以人为排放为主的细粒子浓度的影响的差异。为正确解释西北欠发达地区，工业污染物排放量不大的情况下，为什么许多城市大气颗粒物污染却如此严重这一现象找到了合理答案。

(2) 传统研究主要从污染物源排放和大气扩散条件的日变化、年变化的角度来研究空气污染问题,但这却无法解释天气过程发生时污染物浓度的变化。本研究利用 30 个月的颗粒物浓度监测资料,首次对沙尘、降水和冷锋三种不同类型典型天气过程对兰州市不同粒径颗粒物浓度的影响程度及其变化过程进行研究,力图从天气学的角度出发,结合天气过程的演变,揭示了在其控制下不同粒径颗粒物污染的变化规律,并对其做出了合理解释。特别是对降水影响的研究,划分了对流性降水和锋面降水等多种不同类型进行对比研究,揭示了不同类型降水过程对颗粒物污染的影响规律,这在国内外文献中还未见报道。

(3) 综合利用气候站(SACOL)颗粒物监测资料、边界层 32m 铁塔梯度观测资料、湍流资料和气象站探空资料,从大气边界层结构与湍流输送特征的角度出发,初步揭示了沙尘、冷锋等不同类型典型天气过程对兰州地区大气颗粒物污染的影响机制,为进一步预报和改善兰州地区大气环境质量提供了有力的科学依据,是空气污染气象学、天气学和边界层气象学的多学科交叉性研究。

§ 8.3 本研究存在的不足与下一步的研究计划

本文对兰州不同粒径颗粒物污染特征及沙尘天气对其的影响进行了研究,揭示了沙尘天气等典型天气过程对城市不同粒径颗粒物污染影响的变化规律及其影响机制。但总的来说,还存在一些问题,需要在以后的工作中进一步完善。

(1) 在研究沙尘天气对我国北方环保重点城市可吸入颗粒物(PM_{10})浓度的影响时,由于 PM_{10} 浓度监测是近年来才成为环境监测的常规监测项目的,资料年限较短,无法分析 PM_{10} 浓度与沙尘天气年总日数的长期关系。另外,由于北方环保重点城市仅有 17 个,缺乏大范围地区的资料,无法评估沙尘天气对我国北方城市空气质量的总体影响。在下一步的工作中,尽可能获取更多城市和地区的高时空分辨率的颗粒物浓度观测资料,拓宽资料的种类和来源(例如使用卫星资料),以便能更深入地研究沙尘天气对我国相关城市大气颗粒物污染的影响程度。

(2) 本文对不同粒径大气颗粒物污染的研究是以兰州市为例进行的,希望今后可以对我国干旱、半干旱地区不同区域的颗粒物的污染特征及其与沙尘天气等典型天气过程的关系及影响机制开展更大范围的观测和研究。

博士在读期间参加的科研项目和主要研究成果

1. 参加的科研项目

- [1] 国家自然科学基金项目“沙尘天气对兰州地区空气质量影响的观测分析与数值模拟研究”(40675077);
- [2] 国家科技支撑计划项目课题“执行《联合国防治荒漠化公约》的支撑技术研究 与示范”——“风沙灾害对人体健康的影响评价”专题(2007BAC03A10);
- [3] 国家科技支撑计划项目“沙尘暴遥感监测与预报集成技术研究”——“沙尘暴 对人体健康的影响与评估”专题(2008BAC40B04)。

2. 发表和待发表论文

- [1] Wang, S.G., Feng, X.Y., Zeng, X.Q., Ma, Y.X., Shang, K.Z., 2009. A study on variations of concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China. *Atmospheric Environment* (SCI) 43, 2823-2828.
- [2] Feng, X.Y., Wang, S.G., et al. A study on influence of two kinds of typical weather processes on concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China. Submitted to *Atmospheric Environment* (SCI).
- [3] 冯鑫媛, 王式功, 杨德保, 尚可政. 中国北方中西部沙尘暴气候特征, *中国沙漠* (核心期刊), 已接收, 2009年(待发表)。
- [4] 冯鑫媛, 王式功, 尚可政等. 近几年沙尘天气对我国北方环保重点城市可吸入颗粒物(PM₁₀)污染影响的研究, 已投 *中国沙漠*。
- [5] 冯鑫媛, 王式功, 尚可政等. 冷锋天气过程对兰州地区不同粒径大气颗粒物浓度的影响, 已投 *中国沙漠*。

致 谢

弹指一挥间，五年的研究生生活即将远去，二十余年的求学生涯也即将结束，古人寒窗苦读也不过十载而已。回顾五年的求学生涯，心中几多感触。

首先要感谢我的导师王式功教授。本研究从选题立意、结果分析直至文章撰写和论文的修改都凝结了导师的心血和智慧的结晶。王式功教授是一位良师益友，他严谨的治学态度、渊博的知识、创新的思维和高尚的人格给我留下了深刻的印象，并将使我受益终身。在此向导师表示深深的敬意和衷心的感谢！

衷心感谢杨德保老师和尚可政老师在我求学过程中倾注的大量心血，我的毕业论文的完成离不开二位老师的悉心指导和无私的帮助。在此谨向两位老师致以最衷心的感谢。还有院里其它很多给予过我辛勤培养和帮助的在这里未提及姓名的老师，在此也谨向他们表示衷心感谢。

感谢各位同门，王金艳、袁薇、马玉霞、陶艳、李江萍、吴伟、郭勇涛、谢月玉、吴丹、孙川永、常燕、文小航、封彩云、刘炳杰、董继元、余峰、魏林波、张宇、崔冬林、曾淑玲、张兰慧、李旭、程一帆等师兄姐妹对我的大力支持和帮助，他们为本文提出了很多好的建议和意见。衷心祝愿各位师弟师妹科研有果，顺利完成学业。

感谢各位同窗和好友，在此不再一一列举姓名，大家在我迷茫的时候，坚持不懈地鼓励我，给了我前进的动力和战胜未知困难的勇气。在此表示最诚挚的谢意，愿我们的友谊相伴一生。感谢所有关心我、

帮助我的朋友。

最后，也是最特别地，我要感谢我的父母。二十七年来，父母含辛茹苦将我抚养成人，是父母无私的爱和支持伴随我走到了今天，使我在学习工作之外没有后顾之忧。在此我要把我的论文成果献给我的父母，千言万语只汇成一句“爸爸妈妈，我爱你们”。

冯鑫媛

2009年5月于兰州