

南开大学

硕士学位论文

天津市环境空气中颗粒物污染状况与大气能见度水平相关性研究

姓名：韩毓

申请学位级别：硕士

专业：环境工程

指导教师：白志鹏;孙韧

20070401

摘 要

近年来,颗粒物一直为影响天津市环境空气质量的首要污染物,较大程度上影响城市环境空气质量的整体水平。并且,颗粒物污染会对人体健康构成威胁,导致诱发多种疾病。因此,关于天津市环境空气中颗粒物污染状况的研究对提升该地区环境空气质量整体水平及改善城市居民的人体健康状况,建设宜居城市具有重要意义。

环境空气中颗粒物污染程度与气象条件有着密不可分的关系,不利气象导致的雾、霾或是沙尘暴等天气往往会导致颗粒物污染明显加重。本文着重分析了特殊天气条件下天津市环境空气中颗粒物的污染程度及变化特征,明确了目前天津市环境空气中颗粒物在不利气象日期间所处的污染水平。

环境空气中的颗粒物污染是导致大气能见度水平下降的重要原因,很多情况下大气能见度水平下降直观的反应出颗粒物污染的加重。本文通过分析不同天气条件下颗粒物浓度水平上升及大气能见度水平下降情况,做颗粒物浓度-大气能见度相关性分析,并得到一定的相关方程,据此可根据大气能见度对颗粒物进行定性/量化的研究。这将为颗粒物污染程度的诊断提供技术依据,对污染预报预警并及时有效的采取污染控制对策具有一定的实际意义。

关键词: 颗粒物 大气能见度 气象条件 雾 霾 沙尘暴

Abstract

In recent years particles have been turning into the chief pollutants of air pollution in Tianjin and have affected the city's overall standard of air quality. Particle pollution threatens the public's health by causing many diseases. Thus, the study on the particle pollution status of the atmosphere in Tianjin is of great importance in promoting the overall atmosphere quality, improving the citizens' health conditions and building a living-friendly city.

The degree of particle pollution in atmosphere and the meteorological condition are closely linked to each other. Unfavorable weather conditions, like fog, haze and sandstorm generally lead to a visible aggravation of particle pollutions. This essay emphatically analyzes the degree of particle pollution and its movement trend feature in Tianjin area's atmosphere under special weather conditions, and clarifies the level of particle pollutions in the city's atmosphere during unfavorable meteorological days.

Particle pollution in the atmosphere is an important factor causing the decrease of atmospheric visibility. In many cases, a lowering level of atmospheric visibility apparently indicates an aggravation of particle pollution. By analyzing the increases in the level of particle consistency and the decreases in the level of atmospheric visibility in different weather conditions, and by doing the correlation analysis of particle consistency—atmospheric visibility, certain correlation formulas are constructed and thereupon qualitative and quantitative studies on particles can be carried out based on the atmospheric visibility. This method will provide technological supports to the diagnosis of the degree of particle pollution, and will have a practical significance in pollution forecast and alert and in taking timely and effective measures to control pollution.

Key word: particle, atmospheric visibility, meteorological condition, fog, haze, sandstorm

南开大学学位论文授权使用授权书

本人完全了解南开大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

指导教师签名：		学位论文作者签名：	
解 密 时 间：		年 月 日	

各密级的最长保密年限及书写格式规定如下：

内部 5年（最长5年，可少于5年）
秘密★10年（最长10年，可少于10年）
机密★20年（最长20年，可少于20年）

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

第一章 引言

第一节 研究目的与意义

近年来天津市在大气污染防治方面取得了一定成果，但仍存在很多问题。由于受清洁能源紧张和地理、气象条件的限制以及周边区域生态环境退化等诸多因素的影响，在影响天津市环境空气质量的多种污染物质中，颗粒物目前仍为首要污染物之一，在较大程度上影响着城市环境空气质量的整体水平。另外，有关研究表明，颗粒物污染会造成多方面的危害，特别是会对人体健康构成威胁，导致诱发多种疾病。因此，对天津市环境空气中颗粒物污染状况研究对提升该地区环境空气质量整体水平，改善城市居民的人体健康状况，建设宜居城市具有重要意义。

《天津市灰霾的形成机理、危害评估及防控技术研究》课题是天津市南开大学承担的天津科技发展计划项目。本论文依托该项目，对天津市环境空气中颗粒物污染状况与大气能见度水平相关性进行研究。

本文的主要研究内容为特殊天气条件下天津市环境空气中颗粒物污染程度以及颗粒物浓度—大气能见度相关性分析。导致大气能见度水平下降的原因很多，其中环境空气中的颗粒物污染是影响能见度水平的重要原因，很多情况下能见度水平下降直观的反应出颗粒物污染的加重。对颗粒物浓度—大气能见度的相关性研究将为颗粒物污染程度的诊断提供技术依据，对污染预报预警并及时有效的采取污染控制对策具有一定的实际意义。

第二节 国内外文献综述

长期以来，国内外科学家对颗粒物污染进行了多方面的研究工作，如在颗粒物污染性质、环境影响、污染源调查、输送模式、颗粒物来源解析、颗粒物谱分布、不同粒径颗粒物相关性、对污染物的富集、颗粒物病理成分等方面都做了大量研究。

关于城市大气颗粒物污染对城市能见度影响方面的研究，主要始于20世纪中叶的一些发达国家。多年来，各国科学家在这方面做了大量分析研究工作，从中得出了一些很有价值的研究成果。

(一) 20 世纪 50 年代至今, 各国科学家通过大量事实与统计数据证实了空气中的颗粒物污染状况与能见度之间存在着必然的相关:

20 世纪 50 年代, 一些科学家对伦敦商业区有关监测数据的统计结果表明, 自 1954~1956 年伦敦实施空气净化措施后, 该区域空气中的颗粒物状污染物质有显著减少现象。1959~1964 年空气中烟尘含量比 1954~1956 年间降低了 32%, 同时, 能见度明显好转, 能见度 $<0.5\text{km}$ 的天数显著减少。另外, 英国其它城市也有类似情况。

同样, 印度孟买市近年来的监测数据表明, 随着该市工业的发展, 排放至空气中的颗粒状污染物与年俱增, 与之对应, 城市低值能见度 ($<3\text{km}$) 的出现次数在 15 年内增加了 50 倍。

另外, 美国科学家提供的统计数据显示, 其近年来的城市良好能见度出现频率比 20~70 年代下降了 10%~30%, 蓝天出现的频率减少了 20%~70%。值得指出的是, 1967~1968 年期间, 美国西南部钢厂工人进行了 9 个月的大罢工, 使空气中污染物浓度大幅下降, 其间该地区能见度水平显著提高。

近几十年来, 随着中国城市全方位的迅猛发展, 颗粒物污染导致能见度水平下降的环境问题同样出现在中国的很多大中型城市。据北京中国科学院环境化学研究所的研究表明, 1970~1979 年北京地区大气能见度平均值几乎是逐年下降, 1980~1984 年期间北京地区低值能见度 ($<4\text{ km}$) 出现频率为 13%~20%, 其中约有一半出现在上午 8 时, 能见度 $<10\text{ km}$ 的出现频率高达 50%。天津能见度情况与北京相类似。

(二) 研究结果表明, 不同来源产生的颗粒物因其成分不同对能见度的影响程度不同。

20 世纪 70 年代, 美国一些科学家指出, 不同类型的污染源排放对能见度的影响效果不同。研究者对洛杉矶监测数据的统计结果显示, $<2\text{km}$ 和 $>50\text{km}$ 的能见度日数都比以前减少, 而 $5\sim 10\text{km}$ 的中等能见度日数却显著增加, 研究认为这与能源使用情况有关。由于洛杉矶过去使用能源以煤为主, 燃煤所产生的烟尘往往能导致能见度 $<2\text{km}$ 。后改用石油为主要能源, $<2\text{km}$ 的能见度出现的频率明显减少, 但因光化学烟雾增多, $>50\text{km}$ 的能见度亦锐减。据研究, 当洛杉矶飞机场风速小时, 能见度的降低与每天石油消耗量具线性关系, 约消耗石油量每增多 2500L/d , 会导致能见度降低 1km 。

一些科学家通过对大气颗粒物成分的分析研究认为, 大气颗粒物中的硫酸盐

和含碳化合物对大气能见度的降低起着重要作用，两者对消光系数的贡献分别为 52%~58%和 22%~29%。这些颗粒主要来自于工业燃煤、建筑材料、汽车尾气和风蚀扬尘，对能见度的影响十分明显。

IMPROVE 按照五大源类考察能见度贡献：硫酸盐、硝酸盐、元素碳、有机碳和地壳物质。

Sisler James F对细粒子成分进行了研究，提出高湿伴生的高浓度硫酸盐是影响能见度的最大因素，硝酸盐和有机物是第二大因素。1949~1976年间，对美国 Phoenix和Tucson两地的统计资料表明，二氧化硫与能见度的相关系数分别为 0.81和0.88。Appel等则认为，细粒子硝酸盐颗粒对光的散射效应比硫酸盐更强。

元素碳（又称碳黑）对光的吸收是影响大气消光系数的又一大因素。元素碳主要来自于以柴油车为主的流动源， bap （颗粒物产生的光的吸收）约为 $5\sim 20\text{m}^2/\text{g}$ ，远远大于其它光吸收物质，是透明颗粒的2~3倍。目前国内已经有人用线性回归初步考察了有机碳（OC）/无机碳（EC）相关性，考察二次气溶胶的存在。得出北京市春、夏、秋、冬四季的相关系数为0.98、0.28、0.79、0.68，但由于目前OC和EC分析方法尚未标准化，相关的数据的可比性需要斟酌。北京大学在对比分析北京 2000年1月细粒子质量浓度不高、能见度较低的情况时认为，能见度与细粒子中主要的化学组分具有密切关系，此间燃煤可能是主要原因。对西安市2003年秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 中总碳（TC）的源解析表明：汽油燃烧贡献高达73%，柴油燃烧占23%，生物燃烧占到4%。可见，尾气排放对灰霾和能见度的贡献的增加不容低估。

（三）研究表明，颗粒物因其粒径不同对能见度的影响程度也不同。

颗粒物对能见度的影响主要是散射作用。灰霾天气下颗粒物的散射能造成60%~95%的能见度减弱。如北京市散射消光占总体消光（包括散射消光和吸收消光）的80%，Brisbane地区颗粒物散射占到了77%。

根据研究人员近年来对上海市气溶胶分级采样的分析表明，有些地区可吸入颗粒物可占总悬浮颗粒物总量的 70%~80%，而这些细颗粒对能见度的影响要大于粒径较大的粒子。

通过对北京地区车辆排放颗粒物与能见度关系的研究发现，能见度与某些粒径段的粒子相关性非常好，对能见度影响较大的为 $0.7\sim 0.8\mu\text{m}$ 左右和 $10\mu\text{m}$ 左右的粒子。

另外一些科学家通过研究认为，粒径为 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 的颗粒对光散射影响

较大，这是由于它们与可见光波长接近的缘故。散射效应主要同 $PM_{2.5}$ 有关，北京研究表明， $PM_{2.5}$ 与大气能见度线性相关系数高达 0.96。

(四) 在对能见度的区域性研究方面，一些科学家通过大量观测事实证明城市市区能见度水平低于同时期的近郊区。

研究者对盐湖城、菲尼克斯、塔克森和丹佛等四个城市的机场站的能见度进行观测，得出其能见度累积频率中值为 48.270~88.495 km，而郊区 12 个站能见度累积频率中值为 104.585~128.720 km。

另外，香港皇家观测所 2 个城区站和 2 个郊区站的同步能见度观测资料分析表明，一年中 3 月份低值能见度出现的频率最大，15 年中城区站的低值能见度出现频率皆大于郊区站。

(五) 能见度除受到环境空气中污染物影响外，同时与很多气象要素有着直接的关系。

在能见度与气象条件的关系方面，很多科学家也做了大量相关研究。

研究人员对上海 20 年的统计资料分析表明，城区能见度除受大气污染影响外，与湿度、风速、风向等气象条件有密切的关系。如能见度 <1km 时，相对湿度没有 <85% 的，而相对湿度 <50% 时，能见度一般 >2 km。这是由于相对湿度大时，空气中的水汽含量较高，水汽能吸收一部分太阳辐射，且又易被吸湿性的颗粒污染物吸收，特别是在硫酸盐等盐粒子的潮解中起着重要作用。另外，风速对能见度的影响比较复杂，随着风速的加大，能见度逐渐好转，但其影响主要表现在对污染物和水汽的输送上，不同背景下，具体表现不同。

综上所述，在对颗粒物及能见度的研究方面，中外学者从不同角度进行了大量研究与探索，至今已经得到了很多有价值的成果，并且研究工作将会一直持续下去。近年来，包括中国在内的一些国家针对沙尘暴、灰霾等与颗粒物密切相关的特殊污染建立了相应的监测预警系统，这也将对颗粒物的研究起到深远的影响。

由于能见度观测起来较为直观，同时又是环境空气质量状况的直观反映，因此根据能见度水平对环境空气中的颗粒物污染程度进行诊断的研究，对于环保部门进行污染预报预警并及时有效的采取污染控制对策具有一定的实际意义。目前关于颗粒物浓度与能见度之间的相关性方面所做的研究还比较少，这将是本文研究的重点。

第三节 研究内容与技术路线

1.3.1 研究区域

以天津市（全市共计 19 个区、县）为研究的主要区域，计 1.19 万 km²，人口约 939.1 万人。

1.3.2 主要研究内容

1.3.2.1 近年来天津市环境空气中颗粒物污染状况分析

- (1) 环境空气中颗粒物污染现状、变化趋势及污染特征分析
- (2) 环境空气中颗粒物污染状况综合分析

1.3.2.2 不同天气条件对环境空气中颗粒物污染程度的影响分析

环境空气中颗粒物污染程度与气象条件有着密不可分的关系。统计天津市近几年各种不利气象出现的频率，对应污染日出现频率，分析不利气象对环境空气质量整体水平的影响。

另外，选择某些典型的由于不利气象导致的特殊天气条件（雾、霾、沙尘等天气）下的污染日，对其间环境空气中颗粒物浓度水平及变化趋势进行分析，并与污染前后的空气质量状况进行比较，得出不利天气对颗粒物污染的影响程度。

1.3.2.3 颗粒物浓度-大气能见度相关性分析

环境空气中的颗粒物污染是导致大气能见度水平下降的重要原因，很多情况下大气能见度水平下降直观的反应出颗粒物污染的加重。结合气象要素，分析不同原因导致的颗粒物浓度水平上升及大气能见度水平下降情况，做颗粒物浓度—大气能见度相关性分析，并尝试建立不同情况下根据大气能见度对颗粒物浓度进行定量化的方法。

1.3.3 数据资料说明

本论文所应用的环境空气颗粒物监测资料为天津市环境空气自动系统监测网络（监测区域涵盖全市范围的共计 19 个区、县，共计 22 个监测站）监测得到的实时监测数据。监测方法分别采用 Beta 射线法和 TEOM 微量振荡天平法两种国标方法，监测频次均为 24 小时/天。

本论文所应用的气象资料一部分来自于天津市气象局近年来的统计数据；另一部分为在武清区观测得到的实时气象数据资料，其中能见度的观测方法为专业人员肉眼观测，观测频次为 24 小时/天。

1.3.4 研究的技术路线

课题研究技术路线如框图 1-1 所示：

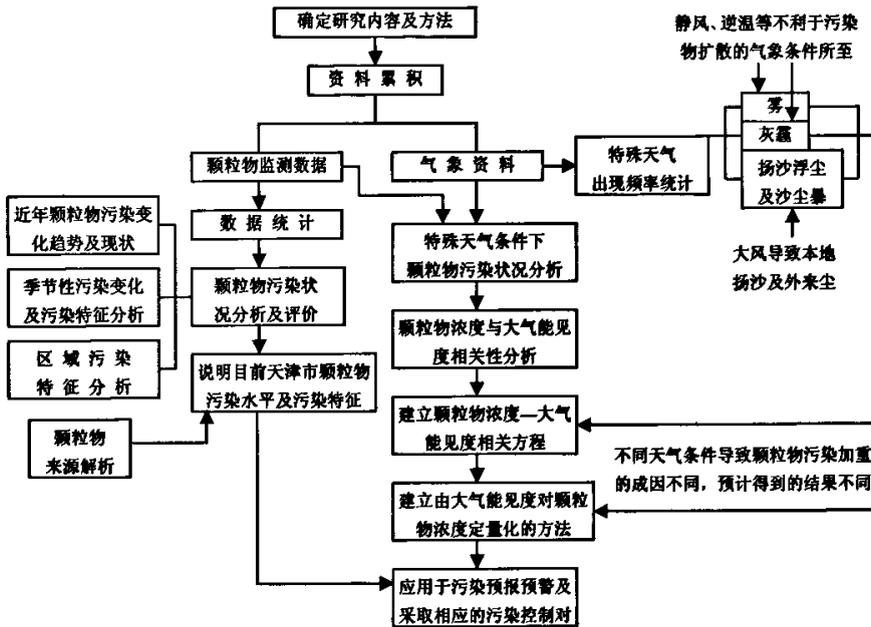


图 1-1 研究技术路线

第二章 气候特征及污染气象要素分析

第一节 气候特征概况

天津市位于中纬度欧亚大陆东岸，虽然靠近渤海，但属内陆海湾，受海洋影响较小，主要受季风环境支配，因此仍然属于暖温带半湿润大陆季风型气候。主要气候特点是：季风显著，四季分明，温差较大，景象多姿。冬季寒冷，干燥少雪；春季干旱，多风少雨，冷暖多变；夏季炎热，温高湿度大，雨水集中；秋季天高云淡，寒暖适中，风和日丽，气爽宜人。全年中以冬季最长，约为 160 天；夏季次之，为 100 天左右；春秋季最短，约 50~55 天左右。

天津年平均气温在摄氏 11.1℃~12.5℃ 之间，1 月最冷，平均气温在摄氏 -1.7℃ 以下，7 月最热，平均气温在摄氏 26℃ 以上，气温年较差为 30~32℃。年平均相对湿度在 55%~65% 之间。年平均无霜期为 200 天左右。年平均降水量在 550~680mm 之间，全年 75% 左右的降水量集中在 6、7、8 三个月。日照较长，阳光充足，年日照时数在 2600~3000 小时之间，全年以 5 月份日照时数最长。年平均风速为 2~5m/s。

第二节 污染气象要素分析

2.2.1 大气水平能见度分析

大气水平能见度是反映近地面层大气清晰程度的重要参数，它对城市环境状况的研究具有独特的意义。

2005 年全年天津市区能见度 $\geq 10\text{km}$ 的出现几率较 2004 年增多 2%，蓝天天数持续缓慢增多。北辰区、宝坻区与 2004 年相比略减少（见表 2-1）。

表 2-1 “十五”期间市区、北辰、宝坻 $\geq 10\text{km}$ 能见度出现几率 (%)

年度	市区	北辰	宝坻
2001 年	62	57	43
2002 年	49	62	45
2003 年	56	79	59
2004 年	62	79	63
2005 年	64	78	62
平均	58.6	71.0	54.4

“十五”期间，全市 $\geq 10\text{km}$ 的能见度出现几率总体呈逐年增加的趋势。市区2002年最低，为49%，以后逐年增多，至2005年达64%。北辰区和宝坻区均是2001年 $\geq 10\text{km}$ 的能见度出现几率最低，至2004年逐年增加，2005年又略有下降。

另外，由近几年的统计数据显示，天津地区同样存在市区中的能见度小于同时期郊区能见度的状况。2002年至2005年连续四年天津市区能见度 $\geq 10\text{km}$ 的出现几率均明显低于位于天津近郊的北辰区。

2.2.2 沙尘项分析

我国北方地区沙尘暴的季节变化特点是：春季最多，约占全年总数的1/2，夏季次之，秋季最少；其月变化规律为，4月份发生频率最高，3月和5月次之，秋季的9月最低。其原因主要是由于春季我国北方地区冷空气活动频繁，多大风，气温回暖解冻，地表裸露，易于起沙。

由近年的统计数据显示，2005年度，天津市区、北辰区和宝坻区三地区出现浮尘天气的日数与2004年接近。扬沙天气则比2004年明显减少，2005年平均出现1.0日，2004年为4.7日。2005年与2004年一样未出现沙尘暴天气。

表2-2 “十五”期间市区、北辰、宝坻浮尘、扬沙、沙尘暴日数(日)

区划	年度	浮尘	扬沙	沙尘暴
市 区	2001年	1	7	0
	2002年	6	8	0
	2003年	0	1	0
	2004年	1	5	0
	2005年	2	1	0
	平均	2.0	4.4	0
北 辰	2001年	7	3	1
	2002年	6	6	0
	2003年	0	1	0
	2004年	1	3	0
	2005年	1	1	0
	平均	3.0	2.8	0.2
宝 坻	2001年	7	9	1
	2002年	2	7	0
	2003年	0	0	0
	2004年	2	6	0
	2005年	1	1	0
	平均	2.4	4.6	0.2

“十五”期间，2001年、2002年市区、北辰区和宝坻区三地区浮尘、扬沙日数出现均较多，浮尘天气平均出现4.8日，扬沙出现6.7日。2003年后明显减少，2005年浮尘平均1.3日，扬沙平均1.0日。沙尘暴天气2001年北辰区、宝坻区各出现1日，2002年至2005年全市均没有沙尘暴天气出现（见表2-2）。

2.2.3 雾日与静风出现频率

2005年天津市区雾日为7日，比2004年少11日。“十五”期间，市区雾日出现最多年份为2004年，共出现18日，2005年最少为7日，年际变化较大，且无规律，多数年份第四季度雾日较多，平均占年雾日总数的69%。

2005年市区静风出现年平均频率为26.1%，比2004年（27.3%）略少。第四季度出现频率最多为36.7%，第二季度出现最少为14.0%。

“十五”期间，市区静风频率出现最多年份为2001年和2004年，均为27.3%，最少年份2003年为14.8%，年际间变化较大。静风最多出现在秋末冬初，最少出现在春天。静风的出现不利于空气中污染物的扩散。

表 2-3 “十五”期间市区雾日（日）

年份	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	平均
轻雾日数	142	184	231	195	188	188
雾日数	8	15	13	18	7	12.2

表 2-4 市区静风出现频率月、季分布（%）

时 间		一季度（月）			二季度（月）			三季度（月）			四季度（月）			平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
月值	2005年	26	21	14	9	15	18	20	44	36	35	51	24	26.1
	2004年	48	36	18	11	15	20	22	31	37	46	24	20	27.3
季值	2005年	20.3			14.0			33.3			36.7			
	2004年	34.0			15.3			30.0			30.0			

表 2-5 “十五”期间市区静风出现频率状况（%）

年 \ 月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年均
	2001年	21	29	20	17	15	24	35	21	33	41	44	28
2002年	35	46	15	12	14	8	22	27	23	25	34	29	24.2
2003年	16	16	14	4	8	3	13	27	15	27	22	12	14.8
2004年	48	36	18	11	15	20	22	31	37	46	24	20	27.3
2005年	26	21	14	9	15	18	20	44	36	35	51	24	26.1
平均	29.2	29.6	16.2	10.6	13.4	14.6	22.4	3.0	28.8	34.8	35.0	22.6	23.9

2.2.4 城市热岛

为反映天津城市热岛状况，选取市区与四郊气温差进行表征。2005 年天津城市热岛与 2004 年相比略有增强。城市热岛强度冬季 1 月最强，达 1.5℃，夏季 8 月最弱，为 0.7℃。

2001~2005 年城市热岛最强年份为 2002 年、2005 年，市郊区平均气温差为 0.9℃。2003 年为最弱年份，市郊区平均气温差为 0.7℃。城市热岛强度年际间变化在近三年呈逐年加强趋势。城市热岛易产生向市区辐合的风环流，不利于市区的空气污染稀释扩散（见表 2-6）。

表 2-6 “十五”期间天津城市热岛状况（℃）

站 点	市区	东丽	西青	津南	北辰	郊区平均	市—郊
2001 年	13.9	13.1	13.1	13.2	12.8	13.1	0.8
2002 年	14.2	13.3	13.3	13.4	13.0	13.3	0.9
2003 年	13.6	13.0	12.8	13.0	12.8	12.9	0.7
2004 年	14.0	13.3	13.2	13.4	12.9	13.2	0.8
2005 年	13.9	13.0	12.9	13.2	12.7	13.0	0.9
平 均	13.9	13.1	13.1	13.2	12.8	13.1	0.8

2.2.5 灾害性天气

“十五”期间，天津市区灾害性天气（大风： $\geq 17\text{m/s}$ ；暴雨： $\geq 50\text{mm/日}$ ）日数状况如表 2-7。2005 年大风出现 2 日，与五年平均（2.2 日）接近，暴雨出现 3 日，比五年平均（1.8 日）偏多。2001 年至 2005 年大风出现日数变化幅度不大，多为 1~3 日。暴雨出现日数变化幅度较大，其中 2002 年、2004 年为 0 日，2003 年为 4 日，年际间变化较大，且无规律。

表 2-7 “十五”期间市区灾害性（大风、暴雨日）天气状况（日）

年 份	大风日数	暴雨日数
2001 年	4	2
2002 年	3	0
2003 年	1	4
2004 年	1	0
2005 年	2	3
平 均	2.2	1.8

2.2.6 海陆风状况

由于天津市位于渤海之滨，海陆风除对市区有一定的影响外，对滨海地区产生直接的影响（天津市海陆风状况见表 2-8）。

第二章 气候特征及污染气象要素分析

表 2-8 天津市海陆风基本状况

季节	出现频率 (%)	海风平均风速 (m/s)	陆风平均风速 (m/s)
冬半年	13.1	3.3	4.4
夏半年	28.9	5.1	4.2

海陆风多出现在夏半年和弱天气系统，有着明显的风环流和日变化特征。通常高度 500~600m 以下为海风，其上为陆风。形成海风吹向陆地，抬升上层陆风又吹向海洋。海陆风环流日变化特征为在近中午时海风生成，并随时间增加高度抬升，向内陆推进。14:00~15:00 达最强，高度 400m，深入内陆 60km。傍晚 17:00 减弱，海风层高度降低至 200m，并退回到近海 10km，至 20:00 左右，只有海边 50m 以下存在微弱海风，23:00 起全为陆风。这种海陆风环流及其日变化特征，会使沿海陆地受到再次的空气污染。

2.2.7 小结

综上所述，天津市区 2005 年与 2004 年相比年平均风速略增大，静风出现频率略偏少， $\geq 10\text{km}$ 能见度出现几率增加，雾日、浮尘、扬沙日有所减少，年降水量略有减少，湿度偏小，城市热岛强度有所增强。

“十五”期间，市区年平均风速变化不大，是全市风速最小的地区。降水量、静风出现频率、雾日年际间变化较大。 $\geq 10\text{km}$ 能见度的出现几率在近三年来增加明显；浮尘、扬沙、沙尘暴日五年来显著减少；城市热岛在近三年来有所增强。

气象条件是大气自净能力的表征，它决定着大气环境容量和某一环境质量目标的大气环境允许污染物总量，是影响大气环境质量的重要条件。影响大气污染的气象条件年际间都有相当的变化，气象条件变化无明显规律性，有利和不利都是相对而言的。各种气象因素既能对大气环境产生不同效果的影响，同时也能在某些方面反映环境质量的变化，如近年来浮尘、扬沙和沙尘暴天气的减少正在一定程度上体现了多年来实施环境保护措施的结果；而城市热岛强度的不断增强、灰霾日有所增多则是当今众多城市发展中必然需要面对的环境问题，为今后的环境保护工作带来了新的挑战。

第三章 天津市环境空气中颗粒物污染状况

第一节 颗粒物概述

3.1.1 颗粒物的概念

环境空气中的颗粒物即大气中或气流中的粒子状污染物，其数量很大，成分也较复杂。颗粒物浓度是一项综合指标，用以表示气流中具有不同化学组成的细微粒子的含量。

3.1.2 颗粒物的危害

颗粒物具有多方面的危害：

首先，环境空气中的颗粒物是降低能见度的主要原因。

其次，颗粒物会对人体健康构成威胁。

颗粒物被人吸入后，会累积在呼吸系统中，引发许多疾病，这对于老人、儿童和已患心肺病者等敏感人群，存在较大风险。颗粒物的直径越小，进入呼吸道的部位越深： $10\mu\text{m}$ 直径的颗粒物通常沉积在上呼吸道， $5\mu\text{m}$ 直径的可进入呼吸道的深部， $2\mu\text{m}$ 以下的可 100% 深入到细支气管和肺泡。研究表明，对粗颗粒物的暴露可侵害呼吸系统，诱发哮喘病；而细颗粒物则可能引发心脏病、肺病、呼吸道疾病，降低肺功能等。

另外，颗粒物还会对建筑物表面造成损坏。

3.1.3 颗粒物的分类

3.1.3.1 一次颗粒物和二次颗粒物

空气中的颗粒物根据其形成机理不同可分为一次颗粒物和二次颗粒物。

一次颗粒物是由自然污染源和人为污染源释放到空气中直接造成的，比如烟囱排放、在未铺沥青或水泥的路面上行使的机动车、材料的破碎碾磨处理过程以及被风扬起的尘土。

二次颗粒物则是由环境空气中硫的氧化物、氮氧化物、挥发性有机化合物及其它化合物互相作用形成的细小颗粒物，它们的化学和物理组成依地点、气候、一年中的季节不同而变化很大。

3.1.3.2 降尘和飘尘

颗粒物中，有些因其粒径大或颜色黑可以为肉眼所见，比如烟尘；有些则小到使用电子显微镜才可观察到。根据颗粒物直径的不同和在重力作用下沉降的速度不同，可分为降尘和飘尘。

降尘是指大气污染物中因受重力和雨水的冲刷作用而降落到地面上的尘粒及夹杂物。人们通常用降尘量来判断大气的清洁度。降尘量是指每月在每平方千米面积上降落尘埃的吨(t)数。一般降尘量达到 $30\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{mon}$ ，为中度大气污染；降尘量达 $50\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{mon}$ 以上，为重度大气污染。

飘尘是指能在空气中长期飘浮的粒子状污染物。

3.1.3.3 总悬浮颗粒物(TSP)、可吸入颗粒物(PM₁₀)和PM_{2.5}

根据粒径不同，颗粒物又可分为总悬浮颗粒物、可吸入颗粒物、PM_{2.5}。

总悬浮颗粒物(Total Suspended Particular)是指能悬浮在空气中，空气动力学当量直径 $\leq 100\mu\text{m}$ 的颗粒物，记作TSP。总悬浮颗粒物的浓度以每立方米空气中可吸入颗粒物的毫克数表示，是大气质量评价中的一个通用的重要污染指标。

可吸入颗粒物(Particulate Matter less than $10\mu\text{m}$)是指可长期悬浮在空气中，能进入人体的呼吸系统，空气动力学当量直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的颗粒物，记作PM₁₀。可吸入颗粒物的浓度同样以每立方米空气中可吸入颗粒物的毫克数表示。国家环保总局1996年颁布修订的《环境空气质量标准(GB3095-1996)》中将飘尘改称为可吸入颗粒物，作为正式大气环境质量标准。

PM_{2.5}是指空气动力学当量直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物，同样以每立方米空气中可吸入颗粒物的毫克数表示。目前天津市还未将PM_{2.5}作为环境空气的常规监测项目，但必将成为未来的发展方向。

第二节 我国关于环境空气中颗粒物的标准

《中华人民共和国环境空气质量标准》(GB3095-1996)给出了环境空气中总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物的评价标准(见表3-1)。

表3-1 总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物年、日平均标准浓度限值(单位: mg/m^3)

标准 级别	总悬浮颗粒物		可吸入颗粒物	
	年平均标准	日平均标准	年平均标准	日平均标准
一级	0.08	0.12	0.04	0.05
二级	0.20	0.30	0.10	0.15
三级	0.30	0.50	0.15	0.25

降尘量的评价标准为：清洁对照点实测均值+7.00t/km²·mon。

同时为了更直观、简便的评价环境空气质量及污染程度，我国环境监测部门颁布了空气污染指数（Air Pollution Index）API 及评价方法。该方法定量的反映和评价环境空气质量状况。我国将 API 指数按照污染轻重划分为五级，其计算方法和等级划分如下：

● 计算方法

污染物（X）的分项指数 I_x ，按照下列公式计算。对于污染物 X 的第 j 个转折点（ C_x, I_x ）的分项指数和浓度值可由相应的标准级别来确定。

当污染物 X 的浓度 $C_x, C_x < C_x \leq C_{x,j+1}$ 时，其分指数 I_x ：

$$I_x = \frac{(C_x - C_{x,j})}{(C_{x,j+1} - C_{x,j})} (I_{x,j+1} - I_{x,j}) + I_{x,j}$$

式中： I_x ：污染物 X 的污染分指数；

C_x ：污染物 X 的浓度监测值；

$I_{x,j}$ ：第 j 转折点的污染分项指数值；

$I_{x,j+1}$ ：第 j+1 转折点的污染分项指数值；

$C_{x,j}$ ：第 j 转折点上污染物的（对应于 $I_{x,j}$ ）浓度限值；

$C_{x,j+1}$ ：第 j+1 转折点上污染物的（对应于 $I_{x,j+1}$ ）浓度限值。

● 等级划分

我国空气污染指数（API）参照国家环境空气质量标准及国外相关标准，对人体健康短期与长期保护目标，由 0~>300 共分为 V 级，其中 I~II 级为优、良水平，III₁~III₂ 级为轻微污染与轻度污染水平；IV₁~IV₂ 级为中度污染与中度重污染水平；V 级为重污染水平。不同的空气质量级别对人体健康产生不同的影响，API 分级以及对应的空气质量级别见表 3-2。

表 3-2 空气污染指数（API）范围及相应的空气质量级别

空气污染指数 API	空气质量级别	空气质量描述	对健康的影响
0~50	I	优	可正常活动
51~100	II	良好	可正常活动
101~200	III ₁	轻微污染	长期接触，易感人群症状有轻度加剧，健康人群出现刺激症状。
	III ₂	轻度污染	
201~300	IV ₁	中度污染	一定时间接触后，心脏病和肺病患者症状显著加剧，运动耐受力降低，健康人群中普遍出现症状。
	IV ₂	中度重污染	
>300	V	重污染	健康人群明显强烈症状，降低运动耐受力，提前出现某些疾病。

第三节 天津市颗粒物来源分析

对天津市的大气颗粒物源解析研究发现：

(一) 天津市大气颗粒物主要排放源类有：扬尘、煤烟尘、土壤风沙尘、建筑水泥尘、机动车尾气尘等。其中各源类的颗粒物的中位直径为：城市扬尘 21 μm ，民用锅炉烟尘 19 μm ，电厂锅炉烟尘 9 μm ，土壤风沙尘 19 μm ，建筑水泥尘 19 μm 。

(二) 天津市可吸入颗粒物占总悬浮颗粒物的比例为：风沙季为 63%，非采暖季为 54%，采暖季为 58%，全年占到 57%。天津市区内的可吸入颗粒物与总悬浮颗粒物的比例超过 50%，风沙季超过 60%。从时间分布特点来看，总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物一样，均为在采暖季和风沙季污染情况基本相当，非采暖季较轻。

(三) 就全年均值而言，总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物中各源类的分担率分别为：城市扬尘为 38%和 34%、煤烟尘为 11%和 16%、建筑水泥尘为 3%和 3%、土壤风沙尘为 18%和 11%、机动车尾气尘为 11%和 13%、硫酸盐为 6%和 7%、硝酸盐为 2%和 2%、海盐粒子为 2%和 2%、其它尘为 8%和 11%。

(四) 源贡献值和分担率时间变化规律是：就总悬浮颗粒物而言，不同季节各源类对总悬浮颗粒物污染的影响程度各不相同，采暖季以城市扬尘和煤烟尘的分担率为最高，共占 60%；风沙季和非采暖季则以城市扬尘和土壤风沙尘的分担率为最高，分别共占 60%和 56%。就可吸入颗粒物而言，采暖季以城市扬尘和煤烟尘的分担率为最高，共占 58%；风沙季以城市扬尘和土壤风沙尘的分担率为最高，共占 63%；非采暖季城市扬尘分担率最高，土壤风沙尘和煤烟尘的分担率相当，这三种源类的分担率共占 64%。

可以看出，城市扬尘、煤烟尘、机动车尾气尘等尘源均对天津市颗粒物污染占有相当高的分担率，而这些均是对能见度的降低起重要作用的硫酸盐、含碳化合物等粒子的重要来源，会对天津市的能见度水平造成显著影响。

第四节 近年天津市环境空气中颗粒物污染状况分析

3.4.1 1983~2005 年期间天津市颗粒物污染总体年际变化趋势分析

1983 年天津市开展环境空气质量监测工作以来，对环境空气中的颗粒物进行监测，监测项目有总悬浮颗粒物及降尘。“十五”期间环境空气自动监测系统

建立后，新增对可吸入颗粒物的监测。

由多年来的监测结果显示，天津市环境空气中总悬浮颗粒物及降尘的年均浓度值总体呈波动下降趋势。另外，近五年的自动系统监测结果显示，天津市环境空气中可吸入颗粒物的污染水平也呈逐年减轻趋势（见图 3-1）。

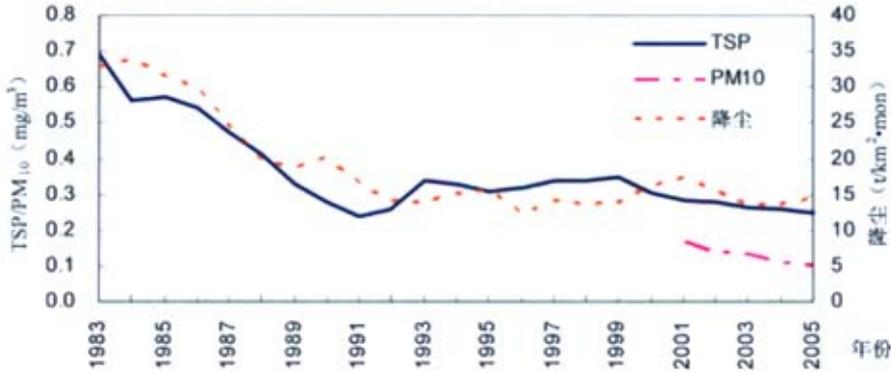


图 3-1 1983-2005 年度 TSP、PM₁₀、降尘年均浓度变化趋势图

3.4.2 “十五”期间天津市颗粒物污染年际变化污染特征分析

“十五”期间可吸入颗粒物污染水平始终处于超标状态，但从年际变化来看，各年浓度年均值呈逐年下降趋势，2005 年的浓度年均值为 0.106mg/m³，已接近标准限制，并且该年度的日均值超标率也达到五年来的最低值。从期别来看，各年的采暖期均值均高于非采暖期，偏高幅度为 12.7%~45.7%。

与可吸入颗粒物相同，五年中总悬浮颗粒物年际变化也呈逐年下降趋势，2005 年度浓度年均值及日均值超标率均为五年来的最低值。但从污染程度来看，总悬浮颗粒物污染相对较重，各年浓度年均值均超过国家年均值二级标准，超

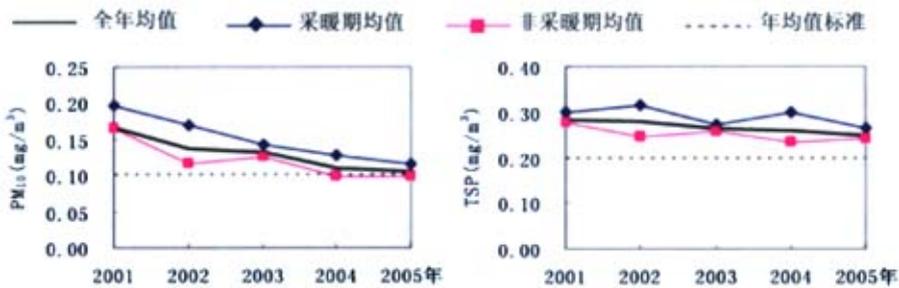


图 3-2 “十五”期间天津市国控点 PM₁₀、TSP 各期别浓度变化趋势图

标幅度在 25.0%~41.5%之间。从期别来看, 各年的采暖期均值均高于非采暖期, 偏高幅度为 5.8%~28.9% (见图 3-2)。

“十五”期间, 降尘浓度年均值也呈下降趋势, 高值出现在 2001 年和 2002 年, 其间春季扬沙、浮尘及沙尘暴天气出现较为频繁, 致使第二季度的降尘污染明显加重; 2003 至 2004 年降水较频繁, 未出现强沙尘暴天气, 降尘污染有所减轻; 2005 年春季扬沙浮尘天气增多, 虽未对空气质量造成严重影响, 但监测数据显示, 第二季度尘污染有所加重 (见图 3-3)。

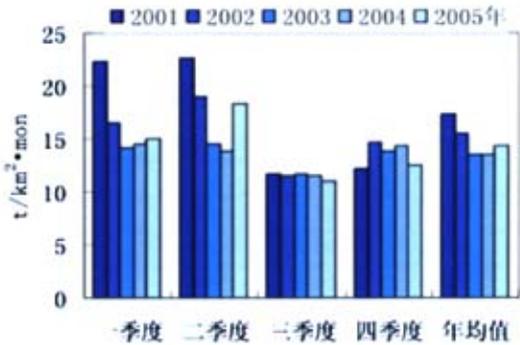


图 3-3 “十五”期间天津市城区降尘各期别浓度变化趋势

3.4.3 颗粒物浓度分布状态分析

“十五”期间, 各年天津市中心城区可吸入颗粒物的第 25 百分位数水平在 0.067~0.108 mg/m³ 范围, 除 2001 年外, 其余各年均达到国家年均值二级标准。其中, 2004、2005 年度可吸入颗粒物的第 50 百分位数水平分别为 0.096 mg/m³ 和 0.093 mg/m³, 均达到国家年均值二级标准。第 75 及以上百分位数的可吸入颗粒物浓度值普遍超标。

表 3-3 “十五”期间天津市中心城区可吸入颗粒物浓度分布状况 (单位: mg/m³)

年度	日数	最小值	百分位数							最大值	算术均值
			5	10	25	50	75	90	95		
2001	1820	0.021	0.073	0.085	0.108	0.147	0.203	0.270	0.321	1.020	0.167
2002	4242	0.014	0.045	0.058	0.081	0.116	0.160	0.232	0.304	1.452	0.138
2003	4063	0.009	0.048	0.059	0.085	0.122	0.169	0.221	0.254	0.627	0.133
2004	4262	0.010	0.037	0.047	0.067	0.096	0.139	0.191	0.237	0.498	0.111
2005	3969	0.005	0.037	0.048	0.067	0.093	0.130	0.175	0.212	0.562	0.106

3.4.4 颗粒物污染季节变化特征

由 2001~2005 年五年中的可吸入颗粒物统计值来看, 浓度值最高的时段为春季的 3、4 月份以及冬季的 1 月及 11、12 月份。前者是由于沙尘天气的影响, 而后者一是由于采暖燃煤导致的污染物排放量增加, 二是由于冬季是雾、霾等

不利天气多发的季节。

可以看出，环境空气中的颗粒物污染具有明显的季节性变化特征，污染加重的时段多集中于春季风沙期和冬季采暖期。另外，根据历年的气候状况不同，其污染程度也不尽相同（表 3-4，图 3-4）。

表 3-4 “十五”期间天津市城区可吸入颗粒物浓度季节变化统计（单位： mg/m^3 ）

季节划分	月份	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	五年平均
春季	3 月	0.227	0.203	0.140	0.134	0.101	0.161
	4 月	0.194	0.189	0.157	0.118	0.132	0.158
	5 月	0.196	0.103	0.154	0.096	0.090	0.128
夏季	6 月	0.177	0.109	0.140	0.088	0.095	0.122
	7 月	0.135	0.096	0.122	0.076	0.087	0.103
	8 月	0.115	0.104	0.095	0.081	0.081	0.095
秋季	9 月	0.109	0.099	0.097	0.102	0.105	0.102
	10 月	0.152	0.111	0.122	0.124	0.101	0.122
	11 月	0.164	0.154	0.133	0.123	0.183	0.151
冬季	12 月	0.151	0.177	0.164	0.147	0.100	0.148
	1 月	0.208	0.169	0.136	0.118	0.110	0.148
	2 月	0.188	0.142	0.137	0.119	0.084	0.134
全 年		0.167	0.138	0.133	0.111	0.106	0.131

由逐年的监测结果来看，其中：

2001 年，发生浮尘、扬沙和沙尘暴的日数明显高于 80 年代后期，是沙尘天气的多发年份。据统计，该年度天津市城区观测到浮尘 1 次，扬沙 7 次。与之对应，该年度春季颗粒物污染明显加重，其中 3 月份可吸入颗粒物月均浓度值达到 $0.227 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，超过国家日均值二级标准 51.3%。另外，2001 年第四季度出现的雾日相对较少，为 2 天，而 1、2 月份雾日较多为 5 天，由空气自动系统监测数据显示，该年度 1、2 月份污染明显高于同处于采暖期 11、12 月份，说明不利的天气条件对环境空气质量影响显著。

2002 年仍为是沙尘暴及扬沙浮尘天气的高发年。据统计，该年度天津市城区观测到浮尘 6 次，扬沙 8 次。受其影响，该年度春季 3、4 月份的可吸入颗粒物浓度值为全年最高。其次为 11、12 月份及 1、2 月份。该年度雾日主要出现在第四季度，1、2 月份没有雾日，但静风出现频率较高，同样不利于空气中污染物稀释扩散。比较而言，11、12 月份可吸入颗粒物浓度值相对偏高。总体来看，

虽然 2002 年度的扬沙、浮尘及雾日出现的日数均多于 2001 年，但环境空气整体水平好于 2001 年，全年可吸入颗粒物年均浓度值降低了 17.4%，这与该年度其它月份空气质量较好有关。

2003 年没有出现沙尘暴天气，这与该年度春季降水偏多，大风天气偏少有关。相关数据显示，该年度天津市区仅出现 1 次扬沙天气。另外，2003 年市区雾日也相对偏少，全年为 13 天，比 2002 年少 2 天，其中第四季度 7 天，比 2002 年少 6 天。由空气自动系统监测数据显示，该年度 12 月份可吸入颗粒物月均浓度值最高，其次为春季 3、4、5 月份。虽然 2003 年没有出现严重的沙尘天气，但比较而言，春季气候仍相对干燥多风，且为施工旺季，各种施工及道路扬尘仍会对环境空气中的颗粒物污染造成一定影响。总体来看，2003 年可吸入颗粒物污染较 2002 年有所减轻，全市蓝天天数增多，能见度 $\geq 10\text{km}$ 的出现几率为 56%，比 2002 年增多 13%，但 2003 年度能见度 $\geq 10\text{km}$ 的出现几率市区最少，这与近年来市区霾现象增多有关。

2004 年同样未出现沙尘暴天气，但发生局地浮尘、扬沙的日数有所增多，全年共出现 1 天浮尘和 5 天扬沙天气。另外市区雾日数也有所增多，全年共计 18 次，其中 14 次出现在第四季度。受其影响，该年度 3 月份和 10、11、12 月份可吸入颗粒物月均浓度值相对高于其它月份。虽然 2004 年度的不利气象日较 2003 年有所增多，但整体来看，全市蓝天天数仍有所增加，能见度 $\geq 10\text{km}$ 的出现几率比 2003 年增多 6%。与 2003 年相同，该年度市区出现能见度 $\geq 10\text{km}$ 的几率最少。

2005 年，连续第三年未出现沙尘暴天气，相关数据显示，该年度天津市区出现 2 天浮尘天气及 1 天扬沙天气，其中扬沙天气较 2004 年有所减少。另外，2005 年出现的雾日为五年中最少，共计 7 天（其中第四季度有 6 天），但是霾日有所增加。空气自动系统监测数据显示，该年度 11 月份可吸入颗粒物月均浓度值最高，这是由于该月份连续受到稳定的天气系统影响，出现长时间的大雾天气，导致污染明显加重。其次为 4 月份，受春季沙尘天气影响，该月可吸入颗粒物月均浓度值相对偏高。

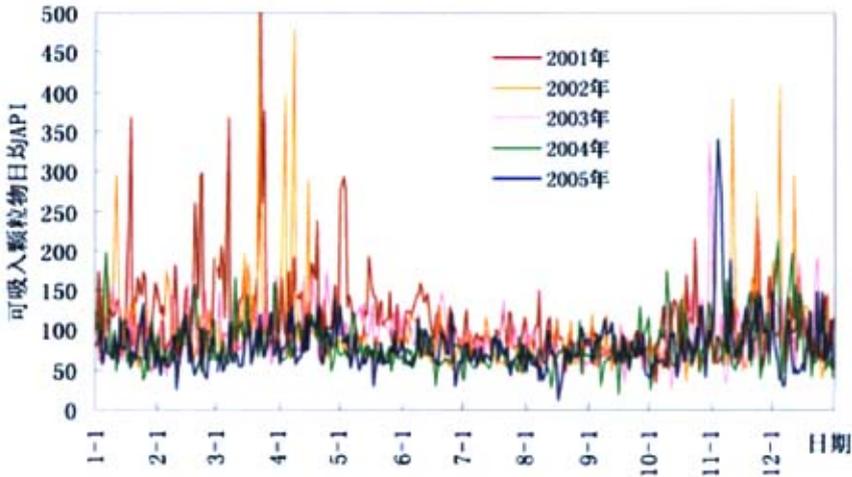


图 3-4 2001~2005 年可吸入颗粒物 API 季节变化图

五年来的分析结果表明：

(一) 由于沙尘天气多集中在春季，因此，在受沙尘暴影响严重的年份，春季 3、4、5 月份颗粒物污染会明显加重；即使在没有发生沙尘暴的年份，由于春季具有干燥多风的气候特点，加之这些时段又正值施工旺季，很容易形成局地的浮尘、扬沙天气，也会对空气中颗粒物污染造成一定影响，导致春季颗粒物浓度值偏高。

(二) 由历年气象部门统计数据显示，虽然静风、雾日出现频率的年际变化较大，但静风一般最多出现于秋末冬初，雾日多数年份第四季度较多，“十五”期间第四季度的雾日数平均占年雾日总数的 69%。而这些时段又正值采暖期，不利的气象因素与污染物排放增加相耦合，对环境空气质量的影响非常明显，导致污染加重。

(三) 由近年空气自动监测系统监测结果显示，每年的夏季和初秋季节为全年空气质量最好的时段，尤其近两年，环境空气质量整体状况有所提升，该时段的可吸入颗粒物日均 API 基本可维持在 II 级良好水平，达到 I 级优的水平天数也相对较多。另外，其它时段中，在气象条件比较有利于污染物稀释扩散时（未出现静风、逆温等不利气象时），可吸入颗粒物日均值一般也可达到 II 级良好水平，在天气条件非常有利时，如遇大风降温、强降水时，甚至可达到

I 级优的水平。

3.4.5 颗粒物污染状况综合分析

“十五”期间，天津市控制城市扬尘污染采取了诸多有效措施，五年间总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物的浓度年均值均呈下降趋势，但尘类污染问题依然存在，尘类污染仍是环境空气污染的主要问题之一。

由国控点监测数据显示，五年间，天津市总悬浮颗粒物的浓度均值为 0.267 mg/m^3 ，较“九五”期间下降了 19.1%，但仍超过国家年均二级标准浓度限值 33.5%；2005 年可吸入颗粒物的浓度年均值为 0.106 mg/m^3 ，达到近五年的最低值，但仍未达到国家年均二级标准，并且全年有 73.4% 的天数可吸入颗粒物成为影响城市空气质量的首要污染物。影响空气中尘类污染物含量偏高的主要因素仍然是城市扬尘、煤烟尘及机动车尾气尘污染所致。

首先，建筑施工、交通运输所产生的城市二次扬尘污染较重。“十五”期间是天津城市面貌变化最大的时期，市政公路建设快速发展，各类市政公用基础设施建设项目继续全面展开。大范围土建工程施工及运输构成城市的主要尘源，由天津市近年大气颗粒物来源解析结果显示，各类施工及运输产生的扬尘污染对环境空气中颗粒物的贡献比率达 34%。

其次，冬季煤烟尘污染的影响依然存在。受城市气候条件及能源结构影响，燃煤排放的煤烟尘，是尘类污染的又一来源。近年监测结果显示，城市冬季采暖期尘类污染明显重于非采暖期。

第三，自然风沙尘的影响显著。“十五”初期的 2001~2002 年，我国西北地区连续发生多次大范围的强沙尘暴，影响范围由西部至东部，席卷了半个中国，造成了全国性的自然灾害。天津地处华北平原东部，北临北京，是受沙尘暴灾害影响较重城市之一。沙尘天气发生时颗粒物污染明显加重，当日 API 一般可达中、重度污染水平。

3.4.6 不利的气象因素对空气污染程度起着重要作用

环境空气质量状况除与区域污染源的多寡、分布状况有关外，更与气旋活动、气象条件的变化密不可分。

“十五”期间，影响天津市大气污染状况的各种气象条件年间间都有相当的变化，变化无明显规律。在不利气象条件下，空气中污染物浓度会在较短时

间内出现较高峰值，造成城市空气质量迅速恶化。“十五”前期连续两年天津市受沙尘暴灾害影响严重；“十五”后期，城市热岛效应逐年突出，城市热岛易产生向市区辐合的风环流，不利于市区的空气污染稀释扩散。同时市区是全市平均风速最小的地区，更加剧了污染物的累积效应，导致灰霾等天气增多。近年来，静风出现频率、雾日年际间变化较大，但具有一般规律，即静风仍最多出现于秋末冬初，多数年份第四季度雾日较多。而这些时段正值采暖期，不利气象因素与污染物排放增加相耦合，对环境空气质量的影响非常明显，极易出现污染过程。

第四章 不利天气条件下颗粒物污染程度分析

大气是空气扩散的载体，空气中颗粒物的输送、扩散、沉降及化学转化在很大程度上取决于气象条件。由于空气污染是发生在城市区域或更小的尺度范围内且有明显的日变化，它既不能脱离大尺度的天气背景又具有城市边界层气象的独特性。天津市对边界层气象的研究已在一些课题中做了专项研究，因此有了较明确的结论。影响空气中颗粒物稀释扩散的气象因素主要有：气温场、气压场、风场、近地面湍流特征等。这些因子在不同的天气形势下发生变化，从而影响环境空气中颗粒物的浓度水平。

颗粒物污染程度的加重往往会出现在稳定的天气系统中。在稳定的天气系统影响下，会出现静风、逆温等不利于污染物扩散的气象，导致雾、霾等天气现象的出现，此时颗粒物浓度会出现明显上升。另外，会导致颗粒物污染明显加重的还有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種不同尺度的天气系统叠加所诱发的沙尘天气。

下面将重点论述不利于大气污染物扩散的几种特殊天气条件并分析该种天气下颗粒物的污染状况。

第一节 雾与霾

4.1.1 概述

雾 (Fog)：近地面空气中的水蒸气发生的凝结现象。

霾 (Haze)：空气中的灰尘、硫酸与硫酸盐、硝酸与硝酸盐、有机碳氢化合物等粒子能使大气混浊，视野模糊并导致能见度恶化，如果水平能见度小于 10km 时，将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾 (Haze) 或灰霾 (Dust-haze)。

霾与雾不同。其区别在于发生霾时相对湿度不大，而雾中的相对湿度是饱和的（如有大量凝结核存在时，相对湿度不一定达到 100%就可能出现饱和）。一般认为，相对湿度小于 80%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾造成的，相对湿度大于 90%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的，相对湿度介于 80~90%之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的

混合物共同造成的，但其主要成分是霾粒子。另外，霾的厚度比较厚，与晴空区之间没有明显的边界。霾粒子的分布比较均匀，而且霾粒子的尺度比较小，从 $0.001\ \mu\text{m}$ 到 $10\ \mu\text{m}$ ，平均直径大约在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 左右，肉眼看不到空中漂浮的颗粒物。由于灰尘、硫酸盐、硝酸盐等粒子组成的霾，其散射波长较长的光比较多，因而霾看起来呈黄色或橙灰色。

表 4-1 霾与雾对照表

天气现象	霾	雾
成分	尘、硫酸盐、硝酸盐、碳氢化合物	水滴、冰晶
水平能见度	<10km 中度霾现象:5~8 km; 重度霾现象:3~5 km; 严重的霾现象:<3km	<1km 轻雾或霭 (Mist) :1~10 km
水汽	不饱和	饱和
粒子尺度	0.001~10 μm ，平均直径 1~2 μm 肉眼不可见	1~100 μm ，平均直径 10~20 μm 肉眼可见
厚度	1~3 km	10~100m
颜色	黄色或橙灰色	乳白色或青白色
边界	与晴空区之间无明显的边界	与晴空区之间有明显的边界

4.1.2 成因

雾的形成有两个基本条件，一是近地面空气中的水蒸气含量充沛，二是地面气温低。在水气充足、微风及大气层稳定的情况下，如果接近地面的空气冷却至某程度时，空气中的水气便会凝结成细微的水滴悬浮于空中，使地面水平的能见度下降，当水平能见度降低到 1km 以内时，就形成了雾。因此，凡是在有利于空气低层冷却的地区，如果水汽充分，风力微和，大气层结稳定，并有大量的凝结核存在，便最容易生成雾。一般在空气污染较重的地区形成雾的机会更多，因为那里有丰富的凝结核存在。

天津市处于内陆海渤海的沿海地区，受天气条件的影响，秋冬季节比较容易出现雾天，多数年份第四季度雾日较多，1997~2005 年的统计数据显示，第四季度雾日平均占年雾日总数的 71%。

与雾相同，霾也多形成于大气层稳定的天气条件下：

一是水平方向静风现象的增多。近年来随着城市建设的迅速发展，高层建筑的数量和层高明显增加，增大了地面摩擦系数，使风流经城区时明显减弱。静风现象增多，不利于大气污染物向城区外围扩展稀释，并容易在城区内积累

高浓度污染。

二是垂直方向的逆温现象。逆温层好比一个锅盖盖在城市上空，使上空出现了高空比近空气温更高的逆温现象。污染物在正常气候条件下，从气温高的近空向气温低的高空扩散，逐渐循环排放到大气中。但是逆温现象下，近空的气温反而更低，导致污染物停留在近空，排放不出去。

另外近些年来随着社会经济的迅速发展，城市化进程的快速推进，污染物排放大量增加，大气污染日趋严重，直接导致了能见度降低，使得整个城市看起来灰蒙蒙一片。

形成霾天气的大气气溶胶主要来源于自然排放和人类活动的排放，城市化、工业化的发展造成下垫面属性改变，往往使得城市大气边界层的物理结构发生变化，造成城市扩散条件不好，各种污染物无法得到及时扩散，并在近地面积聚，若加上对流层连续数日比较稳定，近地面空气中会充斥大量烟气、尘埃和微粒，又无法升腾散去，致使这些污染物郁结在空气中，形成霾。

据统计，除工业气体排放、城市扬尘外，汽车尾气排放也是霾形成的重要因素。近年来，各地机动车保有量的剧增，在车辆繁忙的交通要道，霾情况会显得尤其严重，能见度比其它地方更低。高速公路周边虽然空旷，但霾情况有时比城市还要严重。

目前，在我国存在着四个明显的大气棕色云区，即霾严重地区：北部的黄、淮、海地区；东部的长江三角洲；四川盆地；珠江三角洲。前三个地区的霾与采暖季更替有关，而珠三角一年四季都能找到霾的踪影。霾的日趋势严重导致这四个区域空气浑浊，能见度恶化，对城市和都市人的危害越来越大。

天津市属于黄淮海霾污染区，在不利于污染物扩散的气象条件下，也会时常出现灰霾天气。尤其近年来，天津市观测到的霾日呈增多的趋势。

第二节 典型雾/霾天气条件下环境空气中颗粒物污染状况分析

4.2.1 典型雾日天气条件下环境空气中颗粒物污染状况分析

雾日形成于稳定的天气系统中，其间一般风力很小，不利于环境空气中污染物稀释扩散，往往会伴随污染物的不断累积而导致污染加重。下面通过一次典型的雾日天气分析该种天气条件下颗粒物的污染程度及变化。

2005年12月底发生的一次雾日污染过程，当时天津市区雾气很浓，选取市

监测中心站的吸入颗粒物监测数据做实况分析：

这是一次发生在冬季的雾日污染过程（图 4-1）：

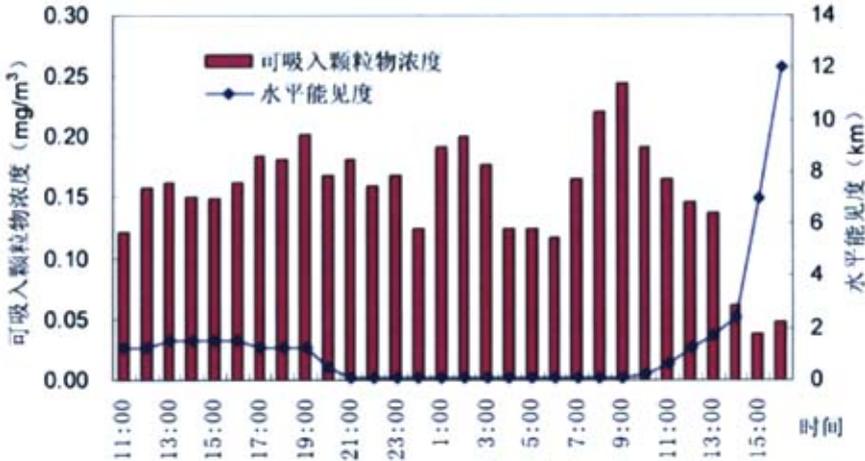


图 4-1 2005 年 12 月 29 日至 30 日期间雾污染过程

2005 年 12 月 28 日以来，天津市受到高空低涡影响，出现间歇性小雪天气。29 日午间，降雪过程基本结束，地面风向由北风逐渐转至南到西南风，风力不大，间或出现静风，空气中相对湿度很大，出现轻雾天气，能见度维持较低水平，可吸入颗粒物污染也随之出现加重趋势。29 日晚间 20:00 前后，雾气变浓，能见度最低降至 0.1km 以下的水平。30 日上午，出现雾凇，可吸入颗粒物小时浓度均值最高达到 $0.245\text{mg}/\text{m}^3$ 。之后地面风向转为东到东北风，到中午雾开始变薄，地面能见度有所上升，可吸入颗粒物污染随之减轻。下午，风力加大，16:00 前后雾气完全消散，能见度达到 10km 以上，可吸入颗粒物小时浓度均值降至 I 级优的水平。此次污染过程持续了近 30 个小时。

值得注意的是，在此次污染过程中，可吸入颗粒物浓度值在较为不利的气象条件下，曾出现一次较为明显的下降过程，该过程是在相对湿度较长时间处于近饱和的状态下出现的，当时可吸入颗粒物小时浓度均值由原来的 III 级轻微污染水平降至 II 级良好水平（降幅约为 $0.080\text{mg}/\text{m}^3$ ），并且维持了 3 个小时之后才再次上升。

分析此次可吸入颗粒物浓度值下降的原因，应是由于当时相对湿度很大，环境空气中的水汽处于接近饱和状态较长时间后，会产生沉降作用，导致空气中的污染物质随着水滴凝结沉降下去，从而使空气中的污染物质有所减少。但这

种沉降作用是有限的，不利于污染物扩散的天气条件持续存在，并且污染物的排放源依然存在，随着排放源不断的排出污染物，环境空气中的污染物在静风等不利于污染物扩散的情况下再次得到积累，致使污染状况得到暂时缓解后，再次加重。

4.2.2 典型灰霾天气条件下环境空气中颗粒物污染状况分析

灰霾天气同样形成于稳定的天气系统条件下，是环境空气污染程度加重的直观体现。下面通过一次典型的灰霾天气分析该种天气条件下颗粒物的污染程度及变化。

2005年3月中旬发生的一次霾污染过程，同样选取市监测中心站的可吸入颗粒物监测数据做实况分析（图4-2）：



图 4-2 2005 年 3 月 15 日至 17 日期间霾污染过程

2005年3月15日傍晚，天津市地面形势处于变性高压后部，地面以南到西南风为主，风力较小，比较不利于污染物扩散。当时空气相对湿度不大，但在不利的扩散条件下，空气中的烟气、尘埃和其它微粒不断累积。19:00左右，能见度降至10km以下，出现灰霾天气，空气中可吸入颗粒物含量有所上升。21:00，可吸入颗粒物小时浓度均值升至 0.160 mg/m^3 ，处于III级轻微污染水平。之后能见度最低降至2.3km，可吸入颗粒物浓度值长时间维持在III级以上的水平，最高达到 0.243 mg/m^3 。至16日夜間，风向转为西北风，风力逐渐加大，17日凌晨2:00，灰霾吹散，能见度上升，空气质量好转，可吸入颗粒物浓度值降至

II级良好水平。此次污染过程持续了约30个小时。

由此次的灰霾污染来看,在该过程中,空气中的水汽含量处于较低水平,从污染开始到污染结束的整个过程中,相对湿度最高未超过60%,能见度的恶化很大程度上是由于空气中悬浮的霾粒子造成的。

另外,虽然霾可以导致能见度明显下降,但单纯由霾导致的能见度下降程度一般不会达到由雾或雾和霾共同作用所导致的能见度恶化程度。在雾天,空气中水汽含量很高的时候,能见度可降至0.1km以下,而在灰霾天气下,一般能见度降至3km以下,就已属于较严重的霾了。

4.2.3 雾与霾的转化

霾和雾可随天气相互转化。潮湿的日子里,霾粒子不会随雾气消失,而是吸湿膨胀,和水汽混杂在一起,变成了茫茫一片的可称之为“污染雾”的现象;而干燥的日子里,污染雾里的颗粒去水,又可变回霾。

污染雾和霾对人体机理功能的危害大致相同,但是,污染雾对人的影响比霾来得快。当霾进入人体,常常需要一个人体潮解的过程,即霾粒子被吸入肺泡后,需要人体液的溶解,才能通过血液循环进入肝、肾组织和淋巴系统,但污染雾本来就是浓度很高的溶液,它无需这个体液潮解霾粒子的过程,即可融入肺部体液,进入血液循环,把其中的有毒物质带入人体器官。所以从这个角度说,污染雾比霾更为有害。

下面通过两次较为典型的霾—雾转化过程来分析这种污染过程对空气质量的影响。

4.2.3.1 2005年8月底发生的一次污染过程

这是一次发生在夏季的历时数天的污染过程,选取武清区监测子站的可吸入颗粒物监测数据做实况分析(图4-3):

在此次污染过程中,地面以西到西南风为主,风力较小,间或出现静风,能见度长时间处于10km以下水平。其间,空气中的相对湿度的日变化规律基本为:白天相对较低,一般在60%左右;傍晚时分随着地表气温下降,相对湿度开始逐渐上升至90%以上,直至次日早晨或上午,在日光照射下,随着气温上升,相对湿度再次下降回复至60%左右的水平。在此期间,随着相对湿度的日间变化,霾与雾之间不断相互转换,可吸入颗粒物小时浓度值也随之有所浮动,但大部分

第四章 不利天气条件下颗粒物污染程度分析

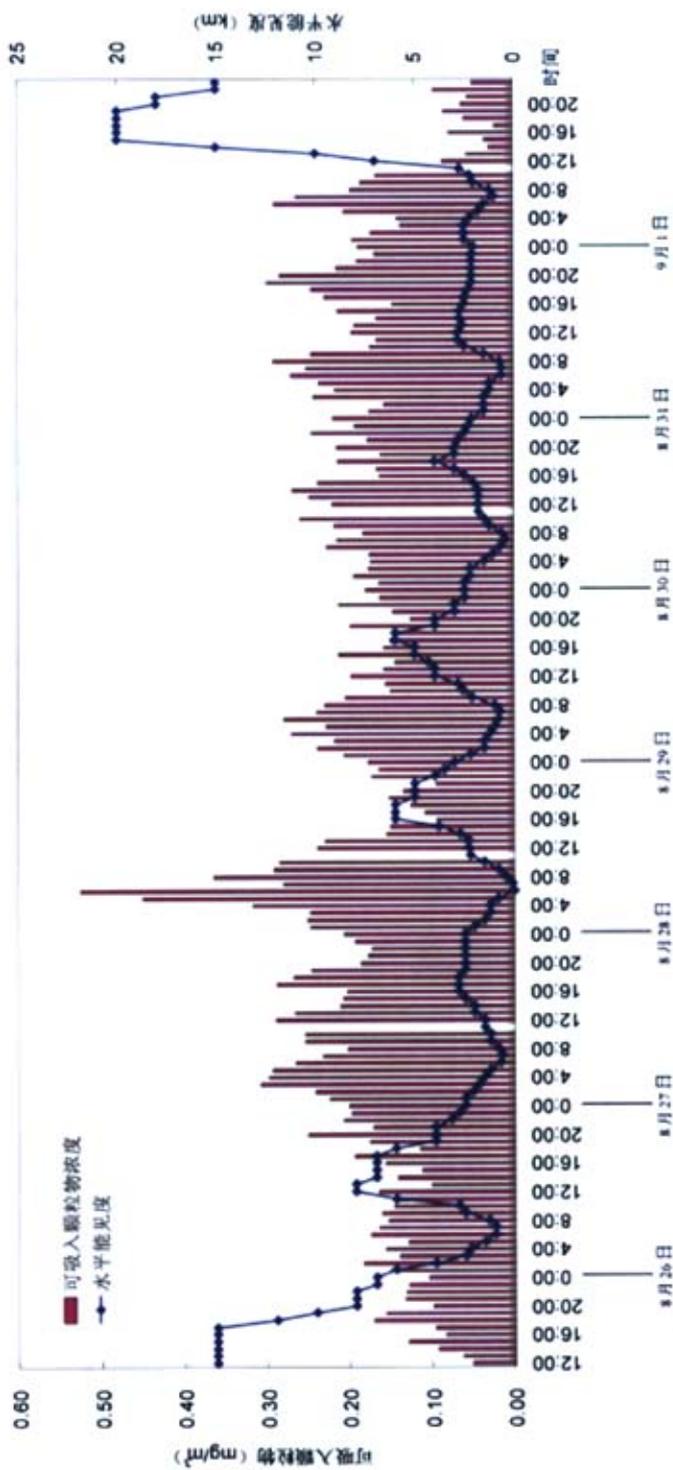


图 4-3 2005 年 8 月 25 日至 8 月 31 日期间雾-霾污染过程

时间都保持在Ⅲ级及以上水平。

此次污染过程的特点是以每日为一个周期波动变化：每日清晨由于辐射逆温及湿度较大，出现能见度<1km 的雾，可吸入颗粒物污染较重。之后湿度降低，随着雾逐渐变薄，能见度上升，增至 1km 以上，可吸入颗粒物浓度值有小幅下降，污染略有缓解。但是由于天气系统稳定，地面风力不大，以 1~2 级的南到西南风为主，间或出现静风，扩散条件较差，能见度均在 10km 以下，整日处于有霾或轻雾的天气状况之下，污染状况基本保持在Ⅲ级及以上污染水平。至傍晚 19:00 前后，随着湿度逐渐加大，轻雾逐渐变浓，能见度降至 5km 以下，大部分时间为 2~3km。直至次日清晨，再次出现能见度<1km 的雾。此过程中，可吸入颗粒物浓度值也会随之逐渐上升，至次日清晨前后出现一个或大或小的峰值。几天中可吸入颗粒物浓度值最高的时间出现在 8 月 28 日早晨 6:00 前后，当时空气湿度较高，为 96%，能见度在 0.1km 以下，可吸入颗粒物浓度最高小时值达到 0.525 mg/m^3 。

4.2.3.2 2005 年 11 月初发生的一次污染过程

这是一次发生在秋季的污染过程，选取宝坻区监测子站的可吸入颗粒物监测数据做实况分析（图 4-4）。

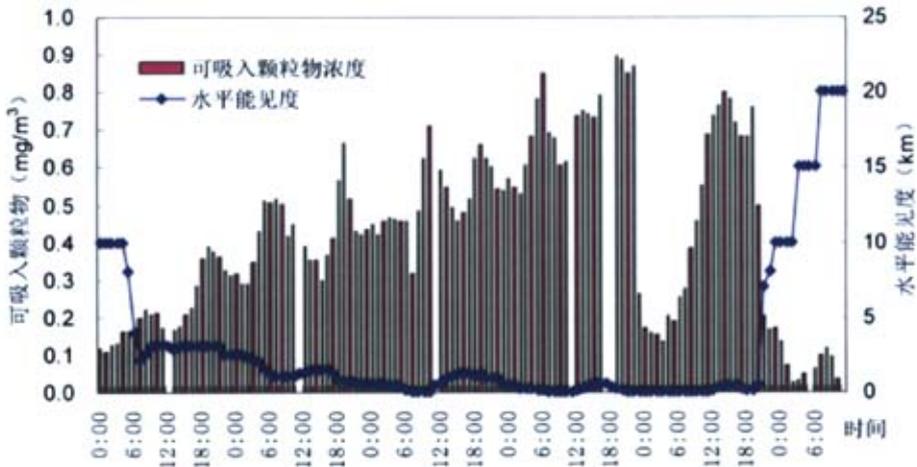


图 4-4 2005 年 11 月 1 日至 5 日期间雾-霾污染过程

11 月 1 日至 5 日期间，华北地区出现大范围的较为严重的霾和大雾天气：

10 月 31 日，天津市地面处于变性高压后部，南到西南风，风力适中，相对湿度不大，在 50%左右，除上午和傍晚受辐射逆温及风力减弱的影响，可吸入颗

颗粒物浓度值有短时间上升外（其中上午曾出现几个小时的轻霾现象，能见度为6~8km），全天能见度基本保持在10km，空气质量较好。

11月1日清晨，风力减弱，可吸入颗粒物浓度值呈现上升趋势，5:00之后，能见度降至10km以下，出现灰霾天气。

此后，长时间出现静风天气或很弱的微风，地面为灰霾笼罩，能见度在3km左右，可吸入颗粒物小时浓度均值也在逐步攀升，至1日晚19:00，可吸入颗粒物小时浓度均值达到 0.388 mg/m^3 ，为IV级中度重污染水平。

之后，空气中的相对湿度持续上升，21:00以后，相对湿度升至80%以上，灰霾逐渐向轻雾转化。

在静风的天气条件下，相对湿度很快增至90%以上，雾气逐渐变浓，可吸入颗粒物也在空气中不断积累。至2日清晨5:00左右，能见度降至1km左右，可吸入颗粒物小时浓度均值也攀升至 0.5 mg/m^3 以上，为V级重污染水平。

2日上午，随着气温回升，空气中的相对湿度开始下降，10:00以后，相对湿度降至80%以下，但空气质量并未明显好转，轻雾逐渐转为霾。此时能见度在1.0~1.5km的水平，可吸入颗粒物浓度值较之前两个小时略有下降，但仍维持较高水平，基本在 $0.35\sim 0.45\text{ mg/m}^3$ 之间，为IV级中度污染及以上水平。

灰霾天气持续约9小时之后，于2日傍晚，随着气温下降，空气中的湿度开始逐渐加大。20:00左右，相对湿度升至90%以上，形成雾，此时的能见度降至1km以下，可吸入颗粒物小时浓度均值再次达到 0.6 mg/m^3 以上。

此次能见度 $<1\text{ km}$ 的雾一直持续至3日中午，历时约18个小时。其间，能见度最低降至 0.1 km 以下，可吸入颗粒物小时浓度均值最高达到 0.7 mg/m^3 以上。

3日中午12:00以后，气温明显上升，由原来的 11.8°C 升至 15°C ，相对湿度由90%降至72%，能见度略有好转，基本在1km左右，仍为较为严重的灰霾天气，可吸入颗粒物一直处于V级重污染水平。

3日傍晚前后，静风，湿度加大，霾转为雾。20:00后雾变浓，能见度降至1km以下。之后，湿度继续加大至饱和，雾气加重，能见度持续下降至不足 0.1 km ，同时可吸入颗粒物浓度值也不断攀升。

在浓雾天气持续约24小时之后，4日晚间19:00小时浓度均值达到峰值，为 0.898 mg/m^3 ，并且此后连续4小时可吸入颗粒物小时浓度均值保持在 0.8 mg/m^3 以上。

至4日夜间23:00,地面仍为浓雾天气,静风,能见度仅为0.01km,但是此时可吸入颗粒物浓度值出现明显大幅下降,小时均值由原来的 0.8 mg/m^3 以上降至 0.2 mg/m^3 左右。4小时以后,至5日凌晨3:00,可吸入颗粒物小时浓度均值已降至II级良好水平。

此后,可吸入颗粒物浓度值又回升至III级水平,并逐步攀升。5日下午14:00,可吸入颗粒物小时浓度均值再次达到 0.8 mg/m^3 以上的峰值。

此次浓雾与霾的天气一直持续了近50个小时。直至5日傍晚,一直影响天津市的变性系统完全过去,地面处于高压前部,风向为北到西北风。至20:00,北风风力加大至 4 m/s ,湿度大幅降低,能见度开始好转,可吸入颗粒物浓度值明显下降,4小时后,可吸入颗粒物小时浓度均值降至II级良好水平。污染过程结束。

本次污染过程的特点是:地面处于变性高压后部,受均压场或地形槽控制,系统稳定,长时间处于静风状态,早晚逆温较强,不利于污染物水平及垂直扩散。这种不利的气象条件导致天空长时间被浓雾或灰霾笼罩,污染物质在空气中不断积累,可吸入颗粒物浓度值不断攀升,导致出现了一次较为严重的污染过程,可吸入颗粒物小时浓度均值最高达到将近 0.9 mg/m^3 的峰值。

在此次污染过程中,出现了与前述2005年12月29日至30日期间雾污染过程中曾出现的相似现象,即可吸入颗粒物浓度值在极为不利的气象条件下,由于环境空气中长时间存在的近饱和水汽凝结对污染物质产生了一定的沉降作用,出现一次较为明显的大幅下降过程。该过程是在能见度达到0.01km的浓雾天气持续约24小时之后出现的,当时可吸入颗粒物小时浓度均值由原来的 0.869 mg/m^3 降至 0.264 mg/m^3 ,并且小时浓度均值在小于 0.3 mg/m^3 以下维持了约9个小时。但由于这种沉降作用有限,在不利的天气条件下,环境空气中的污染物质很快再次得到积累,污染再次加重。

总之,一般情况下,霾和雾的出现往往反映一次污染加重过程,无论是由于清晨辐射逆温造成的短时间轻霾和轻雾天气,还是长时间稳定天气系统下形成的重度霾和浓雾天气,均会伴随颗粒物浓度值上升,其严重程度与当时的天气状况、层结稳定度、风向风速、相对湿度等气象要素以及污染源排放等多方面因素有关。

第三节 沙尘天气

4.3.1 浮尘、扬沙及沙尘暴

对沙尘天气强度的等级划分,一般采用风速和能见度两个指标。中国气象局制定的《沙尘天气预警业务服务暂行规定》中,将沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类,划分标准见表 4-2。

4-2 浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴划分标准

名称	成因(来源)	能见度	天空状况	风力	大致出现时间
浮尘	远地或本地产生沙尘暴或扬沙后,沙尘等细粒浮游空中而形成	水平能见度小于 10km,垂直能见度也较差	远物呈土黄色,太阳呈苍白色或淡黄色	≤3.0m/s	冷空气过境前后
扬沙	本地或附近沙尘被风吹起,使能见度显著下降	1~10 km	天空混沌,一片黄色	风较大	冷锋或雷暴、飑线过境
沙尘暴		0.5~1 km		风很大	
强沙尘暴		<0.5 km		风非常大	

其中,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、危害大并具有强大破坏力的灾害性天气现象。天津地处我国华北平原东部,北部与北京相比邻,属于典型的北方城市。由于位于天津北部的北京以北及西北部是我国荒漠化、沙化比较严重的地区,也是我国沙尘暴天气频繁发生的地区。天津与北京同处我国沙尘暴多发区的下游,受上游地区沙尘暴天气的影响较大,除了自身的局地扬尘外,沙尘暴灾害是造成天津春季尘类污染严重的主要原因。

4.3.2 我国沙尘天气主要发生区域分布

在世界沙尘暴上有四大大多发区,分别位于非洲、中亚、北美和澳大利亚。中国的沙尘暴多发区属于中亚沙尘暴区域的一部分,主要位于北纬 35°~49°N、东经 74°~119°E 的广大北方地区,东西绵延 4500km,南北跨越 600km。西北地区的强沙尘暴出现区域,一处是西起吐鲁番、哈密地区、东接延绵 1000 km 的甘肃河西走廊,北连内蒙古阿拉善盟、东扩外延到河套地区;另外一处是北疆克拉玛依地区、南疆的和田地区及青海西北部地区的三个局地性沙尘暴地区。总之,我国的沙尘暴主要发生在西北、华北大部、青藏高原和东北平原地区。由此可见,我国沙尘暴的空间分布基本上与中国北方沙漠及沙漠化土地分布相一致,反映了下垫面特征和沙尘源分布状况对沙尘天气形成的重要作用。

我国沙尘暴年发生日数大于 10 天的区域主要分布在南疆盆地,河西走廊及

内蒙古中部，均发生在沙漠及其边缘地区。其中南疆的塔里木盆地以及甘肃河西走廊东北部至内蒙古的阿拉善为两个多发区。

根据有关部门对我国北方 1952~2001 年间 292 例强和特强沙尘暴个例统计，频数在 20 次以上的多发区主要集中在甘肃河西走廊区（达 53 次）；南疆盆地南缘区（达 42 次）；内蒙古阿拉善高原区（达 25 次）；鄂尔多斯高原区（达 27 次）；浑善达克地区（达 22 次）。

沙尘天气直接导致城市环境空气中尘类污染明显加重，总体上北方城市颗粒物污染明显重于南方城市。下面是我国颗粒物浓度区域分布示意图：

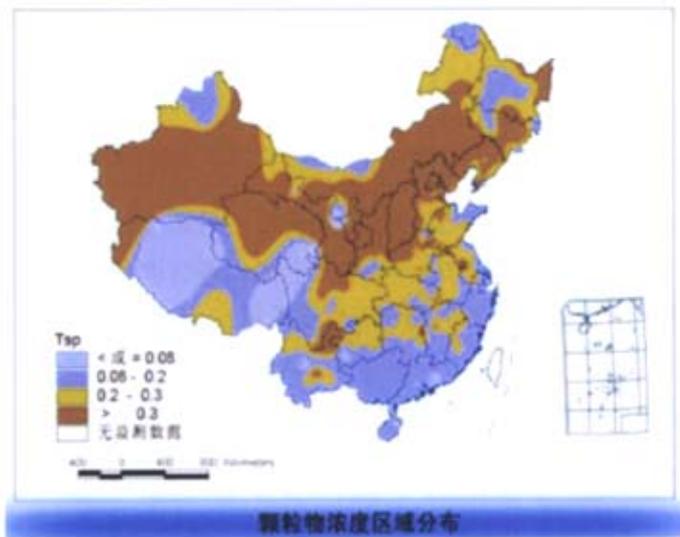


图 4-5 中国颗粒物浓度区域分布示意图

4.3.3 我国沙尘暴发生频率变化

据有关资料对我国北方 338 个测站 1954~2000 年间沙尘暴平均日数统计，可见其间我国沙尘暴的年度变化规律总体呈波动下降趋势：其中 50 年代最高，60 年代除个别峰值年外总体减少，70 年代总体又有所回升，到了 80 年代中期后呈减少趋势，90 年代在总体减少后又有回升（图 4-6）。

值得关注的是自 20 世纪 90 年代后期，特别是 1997 年之后，不论西北还是整个北方地区，沙尘暴又呈现回升增多的趋势。1999~2002 年春季发生沙尘暴天气达 53 次，其中 1999 年 9 次，2000 年 14 次，2001 年 18 次，2002 年 12 次

之多。其中三分之二左右起源于蒙古国中南部，然后在途径我国北方沙漠或沙地时得到加强或补充，另三分之一左右的沙尘天气为我国境内沙源所至。

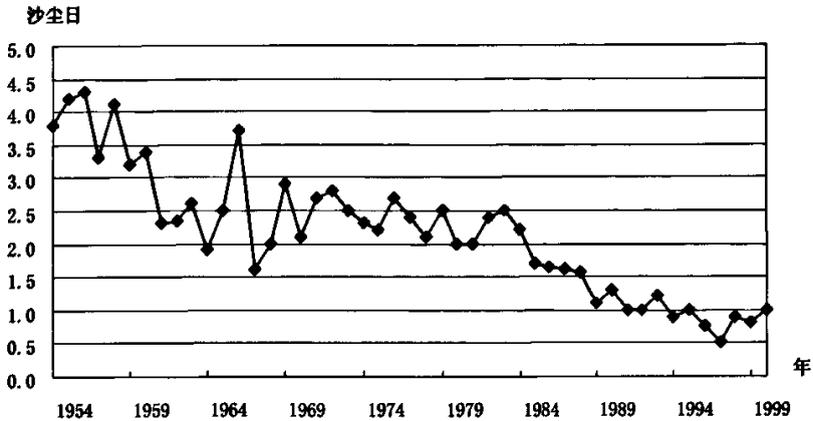


图 4-6 我国北方沙尘暴平均日数的年际变化趋势

另对北京、呼和浩特、银川和西宁不同年代平均年总沙尘暴日数统计，可见这四个城市 50 年代平均沙尘暴日数分别是 20 世纪 90 年代的 8.2 倍、10.7 倍、12.4 倍和 6.2 倍，表明近 45 年我国北方大部分城市沙尘暴日数呈现减少趋势(表 4-3)。

表 4-3 北京等四个城市不同年代的平均年总沙尘暴日数年际变化

城 市	平均年总沙尘暴日数 (天)					
	1954-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-1998	1959-1998
北 京	4.1	4.6	1.4	0.7	0.5	1.9
呼 和 浩 特	13.9	7.8	4.8	1.1	1.3	3.9
银 川	16.1	2.8	7.0	6.7	1.3	5.1
西 宁	12.6	6.5	6.2	0.2	0.3	3.7

4.3.4 沙尘天气对环境空气中颗粒物浓度的影响

由近年来天津市对环境空气中尘类污染物的监测结果可见，沙尘天气明显加重空气污染。以 2001 年和 2002 年为例，这两年是我国强沙尘暴、沙尘暴、扬沙、浮尘天气在本世纪初的高发年份。

4.3.4.1 2001~2002 年度对空气质量造成沙尘污染的典型沙尘天气背景分析

2001~2002 年我国出现的几次典型灾害性沙尘暴天气的相关背景如下：

- 2001 年度：

(1) 4月6~7日受强蒙古气旋影响,内蒙古全区大部分地区出现大风、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴、特强沙尘暴天气。这次沙尘暴强度之大、影响范围之广、危害之严重是当年入春以来最强的一次,也是近几年所不多见的。

(2) 4月7~8日甘肃出现扬沙、沙尘暴天气部分地区能见度为零;兰州市出现沙尘暴天气,能见度为0.2km。

(3) 4月8日宁夏大部分地区出现沙尘暴天气,部分地区出现强沙尘暴,能见度明显下降,有的地方能见度只有几百米;局部地区最大瞬时风力高达9级,沙尘高度达1km以上。

● 2002年度:

(1) 3月2~3日,西北地区东部、华北出现浮尘和扬沙,风力达到4~6级;

(2) 3月17~18日,西北地区东部、华北出现扬沙和浮尘,内蒙古中西部出现沙尘暴;

(3) 3月19~22日新疆、内蒙出现强沙尘暴,为近十年强度最大、影响范围最广的一次;

(4) 3月22~23日,西北地区东部、华北中部和北部及辽宁北部出现扬沙和沙尘暴,陕西下了泥雨,风力达到5~7级;

(5) 3月26~28日,甘肃中西部、宁夏、陕西、内蒙古中西部出现沙尘暴,西北地区东部、华北、东北南部、黄淮、江淮出现大范围扬沙和浮尘,上海、南京等地降泥雨;

(6) 4月3~4日,内蒙古中西部出现沙尘暴,阵风达到8~9级,华北大部出现扬沙和浮尘;

(7) 4月5~7日,西北地区东部、华北、东北南部、黄淮出现扬沙或沙尘暴,北京出现沙尘暴天气,风力达到5~7级,阵风达到8~9级;

(8) 4月8~9日,甘肃、宁夏、陕西、内蒙古中西部、辽宁西部有扬沙浮尘天气,部分地区出现沙尘暴,风力达到5~7级,阵风达到8~9级。

上述2001~2002年间发生的沙尘天气根据其发生强度、影响范围对我国不同地区环境空气质量产生不同程度的影响,并多次对天津的环境空气质量造成中、重度影响。

4.3.4.2 2001~2002 年间沙尘天气对环境空气中颗粒物浓度的影响

由 2001~2002 年天津市环境空气自动系统日监测结果显示：

2001 年度，全年有 21 天可吸入颗粒物 API 日均值达到或超过 IV 级中度污染水平，其中有 15 天（包括 1 天 V 级重度污染水平）发生在 3 月至 5 月初的沙尘天气频发时间段内，约占中、重度污染日的 71.4%，沙尘天气是明显加重环境空气污染主要因素之一（图 4-7）。

2002 年度，全年有 17 天可吸入颗粒物 API 日均值达到或超过 IV 级中度污染水平，其中有 9 天（包括 4 天 V 级重度污染水平）发生在 3 到 4 月份的时间段内，这些中、重度污染日均为沙尘天气所致（图 4-8）

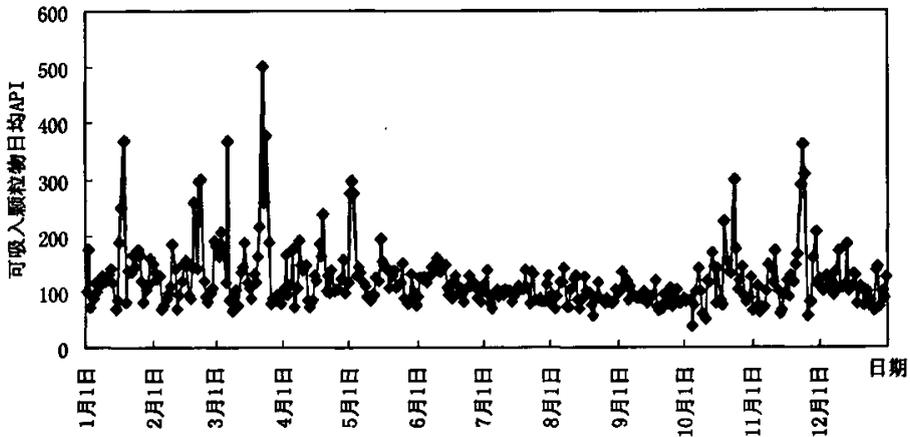


图 4-7 2001 年天津城区环境空气中可吸入颗粒物 API 日际变化图

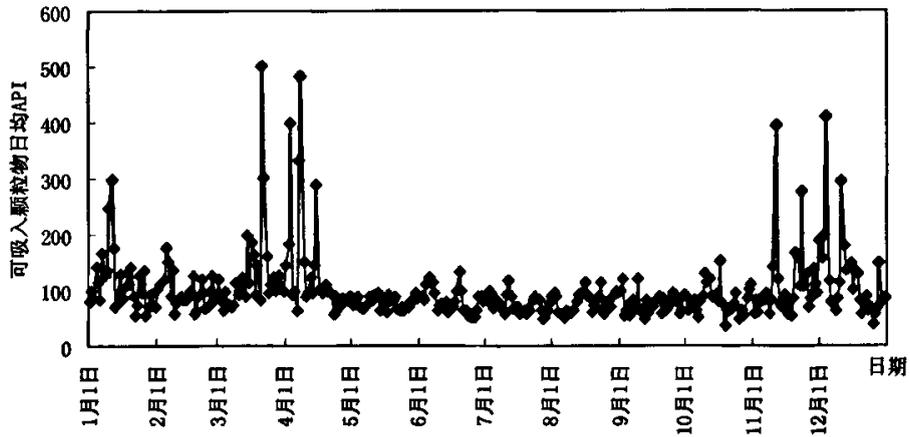


图 4-8 2002 年天津城区环境空气中可吸入颗粒物 API 日际变化图

4.3.4.3 沙尘污染的时空迁移特征分析

另从沙尘暴发生的整个过程来看,可以看出其对空气质量的影响具有较为明显的时间与空间的迁移变化特征。

以2002年3月19日新疆、内蒙发生的强沙尘暴为例。

中央气象局首次发布了强沙尘暴警报。这次强沙尘暴影响我国西北地区东部、华北北部、京津地区以及东北平原南部,其发生强度、持续时间、影响范围均为近十年之最。我国北方很多城市以及一些南方城市的环境空气自动监测系统的监测数据显示,该次沙尘暴发生和迁移过程中,大面积地区的环境空气质量明显恶化,可吸入颗粒物API突升至V级重污染水平。

由各城市监测到的可吸入颗粒物浓度值的变化趋势来看,内蒙的呼和浩特以及其它处于西北地区的城市如西宁、银川、兰州、西安、太原首先于19日出现沙尘污染。然后沙尘继续向东南部迁移,20日到达郑州、石家庄、北京、天津。同时,处于北部地区的哈尔滨、长春、沈阳等地也出现沙尘暴天气,并波及大连、秦皇岛、烟台、青岛,一直向南迁移输送,于21日到达济南、上海等地。整个过程历时4天,发生时间前后相差1~2天,具有较为明显的时空迁移特性(表4-4)。

表4-4 2002年3月18日至24日期间我国部分省市首要污染物API指数变化趋势

城市	18日12:00- 19日12:00	19日12:00- 20日12:00	20日12:00- 21日12:00	21日12:00- 22日12:00	22日12:00- 23日12:00	23日12:00- 24日12:00
呼和浩特	101	500	128	89	68	89
西宁	115	500	132	249	158	116
兰州	174	500	129	500	424	171
西安	132	462	209	155	131	128
银川	130	350	100	86	51	66
太原	142	394	397	105	152	96
郑州	153	95	318	135	123	129
石家庄	133	107	367	120	134	90
北京	139	155	500	370	164	105
天津	142	80	500	300	159	94
哈尔滨	98	109	500	410	92	85
长春	80	62	405	206	73	54
沈阳	174	98	398	431	94	107
大连	92	57	500	500	92	98
秦皇岛	107	88	185	377	108	109
烟台	85	78	500	206	74	86
青岛	104	100	470	329	128	93
济南	97	94	117	198	109	116
上海	134	110	129	401	180	114

第四节 典型沙尘天气下环境空气中颗粒物污染状况分析

沙尘天气下，空气中颗粒物的污染会明显加重。以下选取几次对天津市影响较为严重的沙尘天气加以分析。

4.4.1 2000年4月上旬的一次强沙尘暴天气

4月3~6日内蒙阿拉善地区发生强沙尘暴，4月8~9日宁夏全境再次发生大范围沙尘暴，影响到我国北方大部分地区。在此期间，由天津市对环境空气中总悬浮颗粒物逐时监测结果显示，6日午间，总悬浮颗粒物浓度值骤增，至下午16:00左右达到峰值，小时平均浓度值达 4.714 mg/m^3 ，超过国家日均二级标准14.7倍，造成重度污染。之后长时间持续高值，直至7日午间才有所降低，小时值降至 0.450 mg/m^3 ，但维持时间不长，6小时后又开始攀升。此后直至10日午间，共计又出现了3个高峰时段，小时平均浓度峰值均高出 1.0 mg/m^3 ，污染严重（图4-9）。

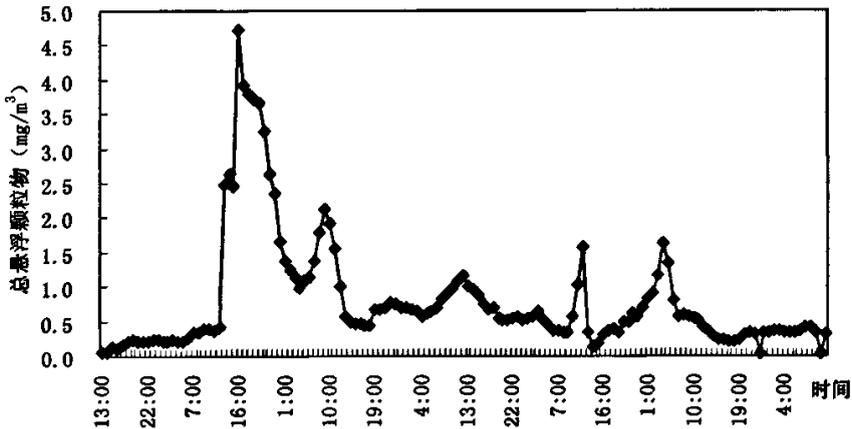


图4-9 2000年4月5至11日期间环境空气中总悬浮颗粒物浓度变化趋势图

4.4.2 2002年3月下旬的两次强沙尘暴天气

● 3月15日蒙古首次发生中等强度的沙尘暴，波及我国内蒙、河北、京津等地，沙尘暴覆盖总面积达 29万 km^2 ，我国有 22万 km^2 受到影响。据当日空气自动系统对空气中可吸入颗粒物监测结果显示，16日凌晨3:00沙尘暴主体开始进入天津，至4:00可吸入颗粒物的平均浓度值达到 1.043 mg/m^3 ，至5:00达到 1.203 mg/m^3 的最高值，此时可吸入颗粒物的浓度值为起尘前的6倍，超过国家

日均二级标准 7 倍，至上午 9:00 沙尘主体基本移出天津，可吸入颗粒物浓度值下降到 0.556 mg/m^3 ，仍处于较高水平。这次沙尘暴天气对天津市的影响持续了约 7 个小时，时间相对较短，当日空气质量为 IV 级中度重污染水平（图 4-10）。

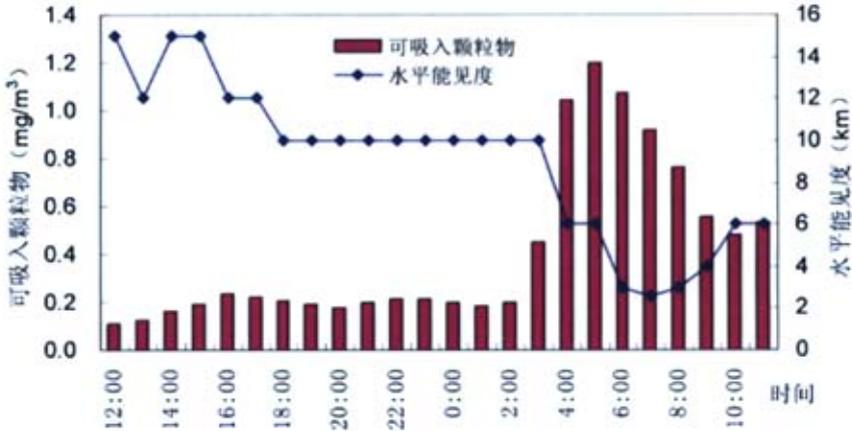


图 4-10 2002 年 3 月 15 日至 16 日期间环境空气中可吸入颗粒物浓度变化趋势图

● 3 月 19 日，新疆、内蒙发生强沙尘暴，这是近十年来影响我国范围最大、强度最大的一次沙尘暴天气。该次沙尘暴对天津市空气质量造成灾害性严重污染。19 日当日，天津地面风力较小，沙尘随高空西北气流输送到城市上空，当时我市天空被沙尘笼罩，呈现橙红色，白昼如同黄昏，能见度明显下降，低于 1km，局部低于 0.5 km。

由天津市自动监测系统对空气中可吸入颗粒物的监测结果显示：可吸入颗粒物小时浓度值于 20 日下午 2:00 开始陡然上升，4:00 至 7:00 三个小时出现峰值期，此间可吸入颗粒物小时浓度值高达 1.806 mg/m^3 ，是起尘前的 9 倍，直至次日上午 9:00，可吸入颗粒物小时浓度值仍维持在 1.0 mg/m^3 左右，上午 10:00 左右沙尘主体才移出天津。

这次沙尘持续时间长达 20 个小时，对天津市环境空气质量造成恶劣影响，空气质量达 V 级重污染，此间可吸入颗粒物浓度平均值为 1.294 mg/m^3 ，超过国家日均值二级标准 8.6 倍。在这次强沙尘暴影响 12 个小时后，天津市于 21 日 23:00 再度出现可吸入颗粒物浓度峰值，这是 20 日沙尘暴后的又一次沙尘影响过程，虽然强度比前者有所减弱，但小时浓度值也高达 1.126 mg/m^3 ，超过国家日均二级标准 6.5 倍，可见沙尘暴对环境空气质量影响的严重性（图 4-11）。



图 4-11 2002 年 3 月 20 日至 22 日期间环境空气中可吸入颗粒物浓度变化趋势图

此次沙尘暴之后，受西北地区东部、华北大部等地区沙尘暴影响，天津市又于 4 月 3 日、4 月 6 日至 7 日、4 月 8 日先后出现数次较为严重的沙尘天气，其间可吸入颗粒物小时浓度值最高均达到 1 甚至 2 mg/m^3 ，空气质量多为中、重度污染水平。

沙尘暴天气是一种具有强大破坏力的灾害性天气现象。无论是对其发生的源区，还是对受其影响的下游地区，都会在经济、交通方面产生恶劣影响，并且会对城市环境生态造成破坏，对环境空气质量造成严重污染，直接危害人体健康。

除受上游地区沙尘暴天气影响外，本地扬尘也会对环境空气中的尘类污染造成较为显著的影响，但影响时间一般会相对较短，程度上也不会达到沙尘暴所造成的严重程度。

第五章 颗粒物浓度与大气能见度的相关性分析

空气污染程度与气象条件有着直接的关系。无论是由于大风导致的沙尘天气还是由于静风或逆温等不利于污染物扩散的气象条件导致的雾天及灰霾天气，都会导致能见度明显下降。而由当日自动系统实时监测值显示，颗粒物浓度值会有相应的上升，可见大气能见度与颗粒物污染程度之间具有某种相关性。

雾、霾以及沙尘天气都会造成能见度水平下降以及颗粒物污染加重，但是不同天气状况下的污染状况不同，存在着本质的区别。其中沙尘天气下，造成能见度水平下降的主要因素即为被风吹入空中的大量沙尘颗粒，污染源相对单一；但是雾与灰霾的天气下，影响因素较为复杂。

第一节 导致能见度水平降低的影响机理

5.1.1 能见度概述

能见度是正常视力的人在当时天气条件下，从天空背景中能看到或辨认出目标物的最大水平能见距离。

能见度降低主要是由于物体和背景之间的对比度减少，以及细粒子和气态污染物对光的吸收和散射，使来自物体的光信号减弱造成的。

5.1.2 导致能见度水平降低的影响因素

5.1.2.1 颗粒物散射的影响

能见度与空气污染程度的变化密切相关。颗粒物对能见度的影响主要是散射作用。灰霾天气下颗粒物的散射可造成60%~95%的能见度减弱。如北京市散射消光占总体消光(包括散射消光和吸收消光)的80%，Brisbane地区颗粒物散射占到了77%。粒径为0.4~0.7 μm的颗粒对光散射影响较大，这是由于它们与可见光波长接近的缘故。

5.1.2.2 颗粒物化学成分的影响

IMPROVE 按照以下五大源类考察能见度贡献：硫酸盐、硝酸盐、元素碳、有机碳和地壳物质。

Sisler James F对细粒子成分进行了研究,提出高湿伴生的高浓度硫酸盐是影响能见度的最大因素,硝酸盐和有机物是第二大因素。Appel等则认为,细粒子硝酸盐颗粒对光的散射效应比硫酸盐更强。

元素碳(又称碳黑)对光的吸收是影响大气消光系数的又一大因素。元素碳主要来自于以柴油车为主的流动源, b_{ap} (颗粒物产生的光的吸收)约为 $5\sim 20\text{m}^2/\text{g}$,远远大于其它光吸收物质,是透明颗粒的 $2\sim 3$ 倍。

5.1.2.3 气体污染物的影响

气体对能见度也有一定影响。北京市 NO_x 气体的消光占总消光的比重不到10%。但 NO_x 污染严重,气体消光作用的绝对值并不小。此外,英国学者研究了 NH_3 气体对能见度的影响,发现 NH_3 与 SO_2 结合生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的散射效果比 NH_4NO_3 以及其他任何硝酸盐的散射效果都要强。

5.1.2.4 相对湿度的影响

相对湿度对能见度影响很大。当相对湿度大时,空气中的水汽含量较高,水汽具有较强的吸光作用,会吸收一部分太阳辐射。同时,吸湿性的颗粒污染物易吸收空气中的水汽发生潮解,而消光系数会随之增大。

第二节 雾/霾天气下颗粒物浓度与能见度的相关性分析

以2005年度全年武清区观测得到的气象数据及全市空气自动系统站监测得到的空气质量数据为基础进行颗粒物浓度与大气能见度间的相关性分析,两组数据的监测频次均为24小时/天。因为雨、雪天气会对能见度产生较大影响,对颗粒物与能见度的相关性分析造成一定的干扰;另外,沙尘天气作为特殊天气会在下面的章节进行单独分析,因此在本节中将有降水和沙尘天气发生时段的数据筛出后,再进行颗粒物浓度与能见度的相关性分析。

5.2.1 颗粒物浓度与大气能见度的对应关系

首先,统计不同水平能见度条件下环境空气中可吸入颗粒物的平均浓度值(全市平均),可以看出随着能见度水平的下降,可吸入颗粒物浓度值呈现上升趋势。

由图5-1可见:当雾或霾天气条件下,能见度处于 0.1km 以下的水平时,

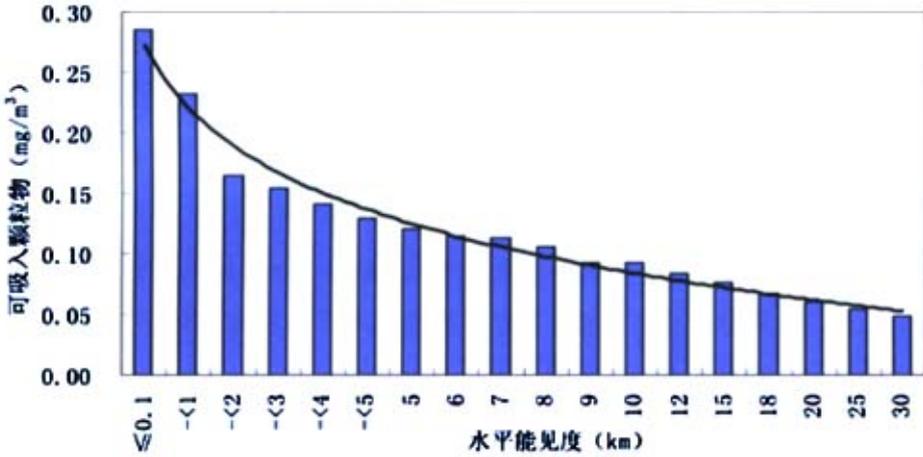


图 5-1 不同水平能见度条件下可吸入颗粒物浓度均值统计

可吸入颗粒物浓度值很高，均值达到 0.286 mg/m^3 ；随着能见度上升，可吸入颗粒物浓度均值呈逐步下降趋势，当能见度升至 3km 时，可吸入颗粒物浓度均值降至 0.15 mg/m^3 以下；当能见度升至 10km 左右时，可吸入颗粒物浓度均降至 0.15 mg/m^3 以下；当能见度升至 10km 左右时，可吸入颗粒物浓度均值降至 0.10mg/m^3 以下；当能见度升至 30km 时，可吸入颗粒物浓度均值降至 0.05 mg/m^3 以下，达到国家日均值一级标准。

以水平能见度为横轴，可吸入颗粒物浓度值为纵轴做散点图（图 5-2）。

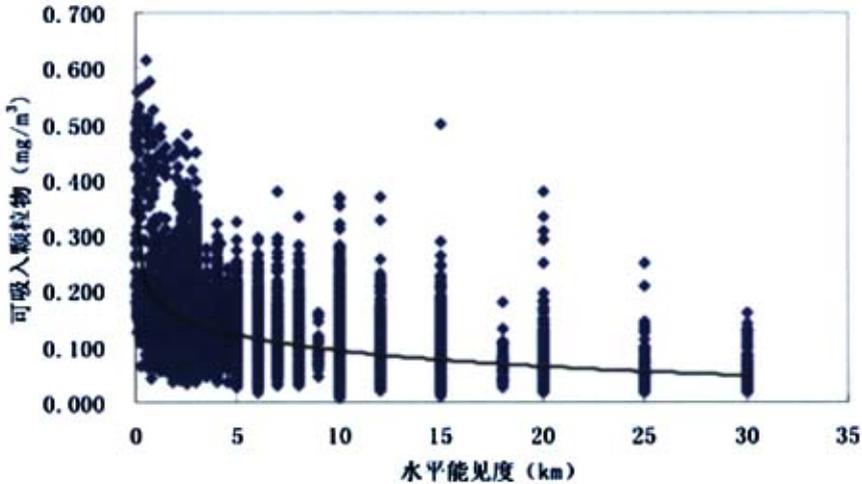


图 5-2 可吸入颗粒物浓度值—水平能见度相关散点图

其中可吸入颗粒物 $>0.4 \text{ mg/m}^3$ 的高值集中出现在能见度 $<3\text{km}$ 的时段。但是,总体来看,两者间的相关性较差,说明影响能见度的因素除颗粒物污染外还有很多,非常复杂,要分析颗粒物浓度值与能见度的相关关系,需引入其它的有关因素。

5.2.2 不同相对湿度条件下可吸入颗粒物浓度与能见度的对应关系

雾与霾之间没有严格的界限,它们会随着湿度的变化相互转换。一般认为,相对湿度小于80%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾造成的,相对湿度大于90%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的,相对湿度介于80~90%之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的,但其主要成分是霾粒子。

在霾日里,导致能见度下降的原因主要是由于空气中存在的颗粒物和气体污染物对光的吸收和散射。而雾日里,导致能见度下降的原因除了在稳定天气条件下空气中污染物质的累积外,很大程度上是由于空气中存在的大量水汽。因此,要研究空气中污染物质的含量对能见度的影响,相对湿度是一个重要指标。

将相对湿度分为 $<80\%$ 、 $80\% \sim 90\%$ 之间、 $>90\%$ 三级,统计在不同相对湿度范围内环境空气中可吸入颗粒物在不同水平能见度下的平均浓度值(见表5-1)。

分析结果表明:

(一)由2005年全年的监测数据显示,当水平能见度达到20km以上时,相对湿度均在80%以下,也就是说,如果相对湿度达到80%,即使颗粒物浓度处于较低水平,能见度一般也不会达到20km。这是由于当相对湿度较大时,空气中的水汽能吸收一部分太阳辐射,并且易被吸湿性的颗粒污染物吸收,尤其在硫酸盐等盐粒子的潮解中起着重要作用。

由于用于进行统计分析的数据仅为一年的数据,因此不能确定的说当相对湿度达到80%时,能见度一定不会达到20km以上,只能说明此种情况的发生具有相当大的概率。

(二)根据能见度水平不同,相对湿度处于不同范围的样本数所占比例有所变化:当能见度很好时, $<80\%$ 的相对湿度占绝大多数;随着能见度水平的下降, $<80\%$ 的相对湿度样本数所占比例会逐渐降低,而 $\geq 80\%$ 的相对湿度样本数所占比例则逐渐升高,当能见度降至3km以下时, $\geq 80\%$ 的相对湿度样本数所占比

第五章 颗粒物浓度与大气能见度的相关性分析

表 5-1 不同相对湿度条件下环境空气中可吸入颗粒物浓度与能见度的对应关系
(单位: mg/m^3)

能见度 (km)	相对湿度 (%)			
	RH < 80%	80% ≤ RH ≤ 90%	RH > 90%	
30	0.048 (258)	0.048 (258)	---	---
25	0.054 (116)	0.054 (116)	---	---
20	0.060 (835)	0.060 (835)	---	---
18	0.068 (39)	0.068 (36)	0.076 (3)	---
15	0.076 (832)	0.076 (801)	0.086 (26)	0.064 (5)
12	0.084 (486)	0.086 (444)	0.065 (29)	0.057 (13)
10	0.093 (1748)	0.097 (1505)	0.071 (166)	0.063 (77)
9	0.093 (25)	0.095 (21)	0.090 (3)	0.062 (1)
8	0.106 (434)	0.114 (334)	0.082 (69)	0.074 (31)
7	0.113 (209)	0.122 (157)	0.074 (28)	0.093 (24)
6	0.114 (459)	0.123 (331)	0.088 (73)	0.090 (55)
5.0	0.121 (319)	0.133 (219)	0.106 (70)	0.075 (30)
4.0~4.8	0.129 (448)	0.141 (300)	0.112 (101)	0.084 (47)
3.0~3.8	0.141 (554)	0.164 (314)	0.129 (141)	0.087 (99)
2.0~2.8	0.155 (836)	0.182 (363)	0.143 (243)	0.125 (230)
1.0~1.9	0.165 (391)	0.212 (91)	0.168 (111)	0.141 (189)
0.1~0.9	0.232 (194)	0.277 (13)	0.299 (26)	0.217 (155)
≤0.1	0.286 (42)	---	---	0.286 (42)

注: () 内为有效监测样本个数。

例升至半数以上; 当能见度降至 0.1km 以下时, >90%的相对湿度样本数所占比例达到 100%。

关于能见度与相对湿度的关系, 上海市的研究结果表明: 能见度<1km 时, 相对湿度均≥85%。两结果之间存在差异, 但相关趋势基本一致。同时也说明近年中天津在相对干燥的日子里, 也会由于空气污染导致能见度明显下降。

(三) 随着颗粒物浓度的上升, 能见度呈下降趋势。其中, 当相对湿度影响较小时, 即<80%时, 其变化规律最为显著。从颗粒物浓度对能见度的影响程度来看, 当可吸入颗粒物浓度升至 $0.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上时, 会对能见度造成较为明显的影响。

(四) 在同一水平能见度状况下, 颗粒物随相对湿度的变化规律一般为: 相对湿度<80%时的颗粒物浓度值最高, 相对湿度>90%时的颗粒物浓度值最低。例如当能见度同为 5km 时, 相对湿度<80%时对应的可吸入颗粒物浓度值为 $0.133 \text{ mg}/\text{m}^3$, 而相对湿度>90%时对应的可吸入颗粒物浓度值仅为 $0.075 \text{ mg}/\text{m}^3$, 说明当相对湿度很大时不能仅凭能见度下降断定颗粒物污染的加重, 需综合考虑。此时颗粒物浓度有可能并未达到一定的高度, 导致能见度下降的很大一部分原因是空气中悬浮的水汽。

(五) 另外, 由于气象观测数据是在武清区观测得到的, 与环境空气颗粒物监测数据的取得在空间上存在一定差异, 在分析中存在个别偏离较大的异常值, 主要出现在沙尘和降水过程发生之前和之后的时段, 在后面的相关性分析中将这些异常值剔除。

5.2.2.1 相对湿度<80%条件下可吸入颗粒物浓度与能见度的对应关系

(一) 统计值分析

总体来看, 在相对湿度<80%的条件下, 能见度分布在 $\leq 1 \sim 30$ km 的一个很大范围的区间内。若将能见度分为 9 级:

- 1 级 — ≤ 1 km
- 2 级 — 1 ~ 3 km
- 3 级 — 3 ~ 5 km
- 4 级 — 5 ~ 8 km
- 5 级 — 10 km
- 6 级 — 12 km
- 7 级 — 15 km
- 8 级 — 20 km
- 9 级 — ≥ 25 km

然后以能见度分级为横轴, 以可吸入颗粒物浓度值为纵轴, 绘制不同能见度级别下可吸入颗粒物浓度值所处区间的中位值、最大值、最小值、平均值的散点图。

由图可见(图 5-3), 可吸入颗粒物在不同能见度级别下的浓度中位值、平均值、最小值、最大值与其所在的能见度级别两者间均存在一定的相关性, 经计算得到回归方程:

$$\text{中位值—能见度: } y = -0.0928\ln(x) + 0.2432 \quad \text{相关系数 } R = 0.9971$$

$$\text{平均值—能见度: } y = -0.1027\ln(x) + 0.2677 \quad \text{相关系数 } R = 0.9967$$

$$\text{最小值—能见度: } y = 0.1339x^{-1.0934} \quad \text{相关系数 } R = 0.9677$$

$$\text{最大值—能见度: } y = 0.0054x^2 - 0.1053x + 0.6714 \quad \text{相关系数 } R = 0.9908$$

其中: x ——水平能见度分级, y ——可吸入颗粒物浓度统计值(中位值、平均值、最大值、最小值, 单位为 mg/m^3)。

通过上述分析, 可以看出可吸入颗粒物浓度中位值和平均值与其所在的能

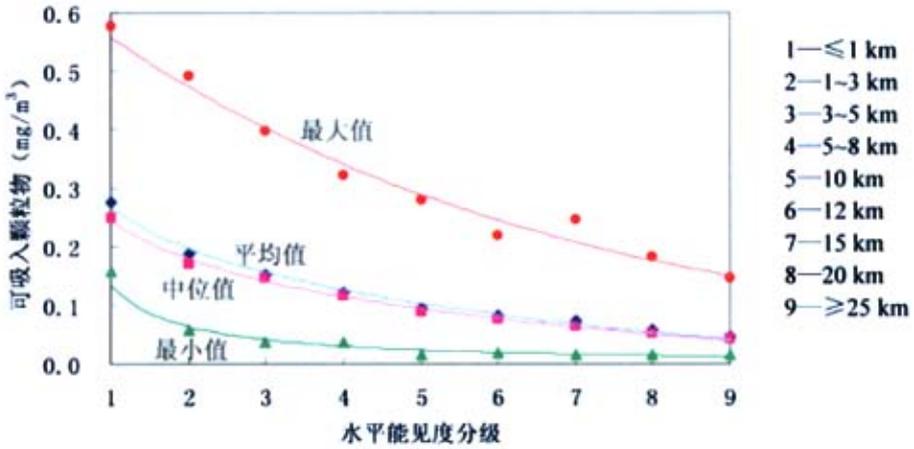


图 5-3 相对湿度<80%条件下可吸入颗粒物—水平能见度散点图

能见度级别两者间均存在较好的对数相关，相关系数分别为 0.9971 和 0.9967。最大值与能见度间存在相对较好的多项式相关，相关系数为 0.9908。最小值与能见度间存在一定的对数相关，相关性相对较差，相关系数为 0.9677。

(二) 相关性分析

做可吸入颗粒物浓度值与水平能见度之间的相关散点图 (图 5-4):

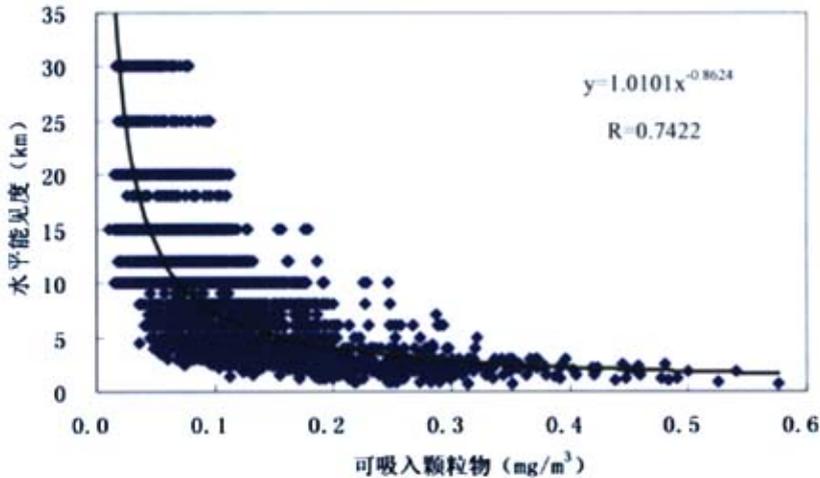


图 5-4 RH<80%条件下可吸入颗粒物浓度值—水平能见度相关散点图

可以看出，在不同的能见度水平条件下，可吸入颗粒物浓度值都会出现一个浓度区间。能见度好时，可吸入颗粒物浓度值会较为集中的落在低值区间内，

而能见度差时，可吸入颗粒物浓度值会出现在高值区间内。

经计算得到可吸入颗粒物浓度值与能见度观测值之间的乘幂指数相关关系，乘幂指数回归方程如下：

$$y=1.0101x^{-0.8624} \quad \text{相关系数 } R=0.7422$$

其中：x —— 可吸入颗粒物浓度值（毫克/立方米）

y —— 水平能见度（km）

但是两者之间的相关性不是很好，在同一能见度水平下，可能会出现一个较宽的可吸入颗粒物浓度值范围区间。

5.2.2.2 相对湿度在 80%~90%条件下可吸入颗粒物浓度与能见度的对应关系

做可吸入颗粒物浓度值与水平能见度之间的相关散点图（图 5-5）：

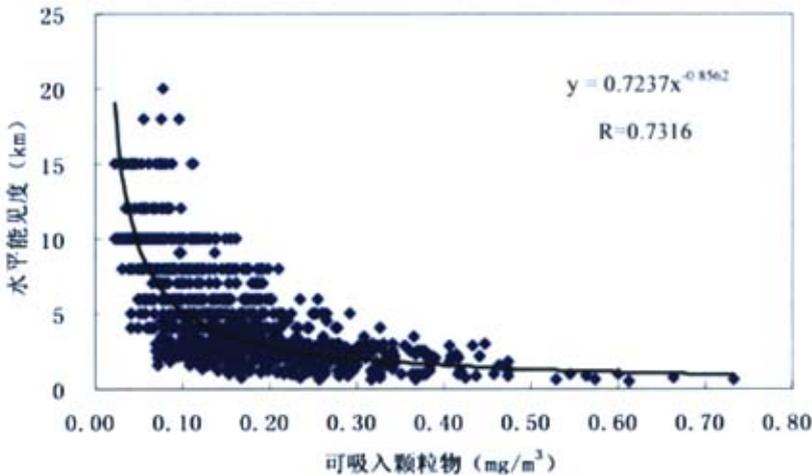


图 5-5 RH=80%~90%条件下可吸入颗粒物浓度值—水平能见度相关散点图

经计算得到可吸入颗粒物浓度值与能见度观测值之间的乘幂指数相关关系，乘幂指数回归方程如下：

$$y = 0.7237x^{-0.8562} \quad \text{相关系数 } R=0.7316$$

其中：x —— 可吸入颗粒物浓度值（毫克/立方米）

y —— 水平能见度（km）

可以看出，当相对湿度在 80%~90%之间时，可吸入颗粒物浓度值与能见度之间的相关性相对差于相对湿度 80%以下时的相关性，相关系数仅为 0.7316。说明相对湿度对能见度的影响降低了颗粒物浓度值与能见度之间的相关性。

5.2.2.3 相对湿度>90%条件下能见度与可吸入颗粒物浓度的对应关系

做可吸入颗粒物浓度值与水平能见度之间的相关散点图（图 5-6）：

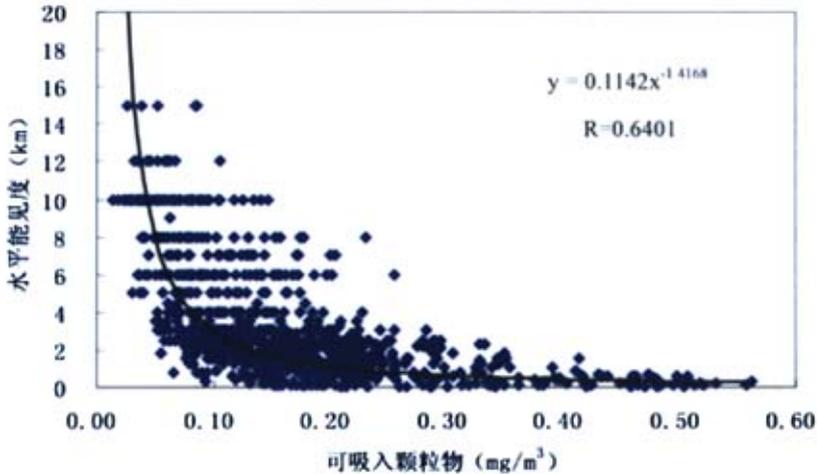


图 5-6 RH>90%条件下可吸入颗粒物浓度值—水平能见度相关散点图

经计算得到可吸入颗粒物浓度值与能见度观测值之间的乘幂指数相关关系，乘幂指数回归方程如下：

$$y = 0.1142x^{-1.4168} \quad \text{相关系数 } R=0.6401$$

其中：x —— 可吸入颗粒物浓度值（毫克/立方米）

y —— 水平能见度（km）

可以看出，当相对湿度 90% 以上时，可吸入颗粒物浓度值与能见度之间的相关性明显下降，相关系数仅为 0.6401。此时能见度受环境空气湿度影响较大。

第三节 沙尘天气下颗粒物浓度与能见度的相关性分析

沙尘暴发生期间，远地输送和本地扬起的沙尘，会造成空气浑浊，天空呈一片黄色，空气中可吸入颗粒物含量大幅上升，能见度水平显著下降。

根据 2002 年 3 月下旬和 4 月上旬，我国扬沙、浮尘及沙尘暴天气频发，天津市连续多次出现了较为严重的沙尘污染天气。以 3 月 14 日~24 日和 4 月 6 日~17 日期间天津市环境空气中可吸入颗粒物的逐时监测结果及相对应地大气水平能见度观测值加以统计分析。

建立了该时段的可吸入颗粒物小时浓度值和能见度观测值之间的乘幂指数回归方程，并依据两组监测数据绘制散点图（图 5-7）。

由图可见，其观测的可吸入颗粒物浓度值与能见度观测值存在较好的乘幂指数相关性，经计算得到乘幂指数回归方程：

$$y=3.381x^{-0.6924} \quad \text{相关系数 } R=0.7799$$

由于沙尘天气条件下,造成能见度水平下降的主要因素即为被风吹入空中的大量沙尘颗粒,污染源相对单一,因此能见度与颗粒物浓度间的相关性相对较好。

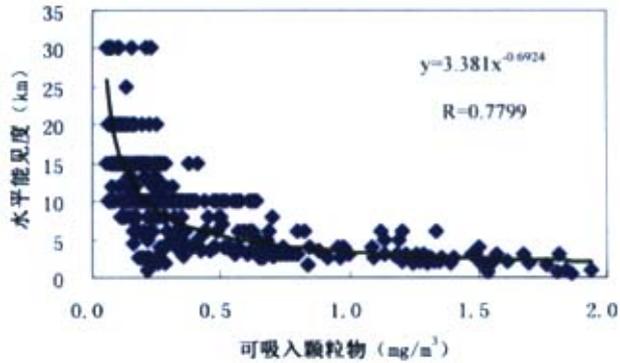


图 5-7 可吸入颗粒物浓度值—水平能见度相关散点图

第六章 结论与创新点

第一节 结论

通过本文研究，可以得到以下结论：

（一）一般情况下，霾和雾日的出现往往反映一次污染加重过程，无论是由于清晨辐射逆温造成的短时间霾和轻雾天气，还是长时间稳定天气系统下形成的重度霾和浓雾天气，均会伴随颗粒物浓度值上升，其严重程度与当时的天气状况、层结稳定度、风向风速、相对湿度等气象要素以及污染源排放等多方面因素有关。

（二）雾日中，由于天气系统稳定不利于污染物扩散，颗粒污染物会得到积累而使其浓度大幅上升。当上升到一定幅度后，由于环境空气中的水汽长时间处于饱和状态，会产生沉降作用，导致空气中的污染物随着水滴凝结沉降下去，从而使空气中的污染物有所减少。但这种沉降作用是有限的，不利于污染物扩散的天气条件持续存在，并且污染物的排放源依然存在，随着排放源不断的排出污染物，环境空气中的污染物在静风等不利于污染物扩散的情况下再次得到积累，致使污染状况得到暂时缓解后，再次加重。

（三）雾和霾均可以导致能见度明显下降，但单纯由霾导致的能见度下降程度一般不会达到由雾或雾和霾共同作用所导致的能见度恶化程度。这是因为空气中的水汽也是导致能见度下降的重要原因。当环境空气中的颗粒物浓度相当时，在雾天，空气中水汽含量很高的时候，能见度可降至 0.1km 以下，而在灰霾天气下，一般能见度降至 3km 以下，就已属于较严重的霾了。

这是因为能见度与相对湿度成反相关，当空气中颗粒物浓度水平相当时，在相对湿度偏高的情况下，空气中的水汽能吸收一部分太阳辐射，并且易被吸湿性的颗粒污染物吸收发生潮解，吸光系数随之增大，导致能见度水平进一步下降。

（四）霾和雾可随天气相互转化。湿度增大时，霾粒子会吸湿膨胀，和水汽混杂在一起，形成危害更大的“污染雾”；而湿度下降时，污染雾里的颗粒去水，又可变回霾。由于这种转化过程多会持续较长时间，污染物经过长时间累积，可达到很高的污染水平，可吸入颗粒物高时浓度可达到 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 以上。

(五) 随着颗粒物浓度的上升, 水平能见度呈下降趋势。当可吸入颗粒物浓度升至 0.1 mg/m^3 以上时, 会对能见度造成较为明显的影响。

(六) 在同一水平能见度状况下, 相对湿度 $<80\%$ 时的颗粒物平均浓度值高于相对湿度 $>90\%$ 时的颗粒物平均浓度值。也就是说, 当空气较为干燥时, 空气中的颗粒物等污染物质是导致能见度水平降低的重要原因之一, 能见度较差时, 空气中的颗粒物含量一般会偏高; 而空气较为潮湿时, 虽然能见度较差, 但有可能颗粒物浓度并未达到一定的高度, 此时导致能见度下降的很大一部分原因是空气中悬浮的水汽。

(七) 将相对湿度分为 $<80\%$ 、 $80\% \sim 90\%$ 之间、 $>90\%$ 三级, 分析可吸入颗粒物浓度与水平能见度间的相关关系, 得到三个相关方程:

$$\text{相对湿度} < 80\% \text{ 时: } y = 1.0101x^{-0.8624} \quad \text{相关系数 } R = 0.7422$$

$$\text{相对湿度在 } 80\% \sim 90\% \text{ 之间时: } y = 0.7237x^{-0.8562} \quad \text{相关系数 } R = 0.7316$$

$$\text{相对湿度} > 90\% \text{ 时: } y = 0.1142x^{-1.4168} \quad \text{相关系数 } R = 0.6401$$

其中, 当相对湿度 $<80\%$ 时, 两者间的相关性相对最好, 而当相对湿度 $>90\%$ 时, 两者间的相关性相对最差, 说明此时相对湿度干扰较大。

(八) 沙尘天气是一种特殊的灾害性天气, 会明显加重空气中颗粒物的污染。较为严重的沙尘天气中, 环境空气中的可吸入颗粒物经常能达到 1 mg/m^3 以上, 总悬浮颗粒物能达到几个 mg/m^3 。沙尘天气, 可吸入颗粒物浓度与能见度间也存在一定的相关, 统计得到的相关方程为:

$$y = 3.381x^{-0.6924} \quad \text{相关系数 } R = 0.7799$$

由于沙尘天气条件下, 能见度下降主要是由于悬浮在空中的大量颗粒物导致的, 污染源单一, 并且一般都发生在干燥的天气中, 因此得到的可吸入颗粒物浓度与能见度间的相关性相对较好。

(九) 虽然可吸入颗粒物浓度与水平能见度间存在一定的相关性, 但是, 导致能见度下降的影响因素非常复杂, 除相对湿度等气象条件影响外, 颗粒物的粒径分布、颗粒物成分以及环境空气中某些气体污染物均会导致对光的吸收和散射作用不同, 从而导致能见度下降的幅度不同。要用能见度观测值来推算颗粒物浓度水平, 只能得到一个大概的范围。因此, 在以后的研究中, 需要引入其它相关因素, 结合实际情况, 加入经验值, 对相关方程进一步优化, 使其更具有实用性。

(十) 除雨、雪天气外, 能见度下降是污染加重的直观反映, 是对环保等

相关部门的一个警示。因此当由于污染加重导致能见度下降时，可根据不同情况采取相应措施对污染加以人为控制，最大限度地降低污染严重程度，减少污染日的发生。

第二节 创新点

本文的创新点主要在于：

根据天津市多年的气象和环境质量监测数据，将相对湿度分级，建立了不同相对湿度条件下可吸入颗粒物浓度与大气水平能见度间的相关方程，为实际工作中依据大气能见度对颗粒物浓度进行定量化提供依据。

致 谢

时光荏苒，我即将结束在南开大学历时三年工程硕士的学习生活。在美丽的南开园，我度过了紧张而充实的三年，在导师和诸位专家学者的悉心指导下，使我对环境科学和环境工程及其相关问题进行了深入地学习、探讨和研究。在南开攻读学位的三年，我能够及时将学到的新知识融入日常工作中，工作能力有了一定的提高。三年的学习生活中，很多人给了我各个方面的帮助，在此，向曾经给予我帮助的人致以最诚挚的感谢。

首先，感谢我的论文指导老师白志鹏教授以及孙韧正高级工程师，感谢白志鹏老师对我论文的悉心指导，对我今后的工作受益良多；感谢孙韧老师在工作上给予我的帮助，并在论文编写过程中给予我的指导与支持，使我的论文能够顺利完成。同时，我还要感谢南开大学环境科学与工程学院的冯银厂老师和沈伯雄老师，他们为我的论文提出了许多宝贵的意见；感谢我的同事陈魁、刘彩霞，感谢他们在我完成论文过程中给予我的很多宝贵建议与帮助；感谢董海燕、蔡斌彬和李伟芳，他们对我的论文提出了一些很有价值的意见使得我的论文得以进一步完善。另外，我要特别感谢丛培芳老师、刘新亭老师和班长许祯在我们就读期间的辛勤付出。最后，我要感谢我的家人，他们在生活上给予我莫大的支持，使我能够顺利完成学业。

即将完成学业，再次步出校园，我将珍惜在南开大学学习的美好时光，将所学到的知识运用到实际工作中，不辜负众位老师的培养和自己三年来的努力。

参考文献

- [1] Commins B T, Waller R E. Observation from a ten years study of pollution at a sites in the city of London. *Atmospheric Environment*. 1975, (1): 49-54
- [2] Cornfield G A, Newton W G. Aresent change in visibility characteristics at finningley. *Meteorology Magazine*, 1968, 97: 204-208
- [3] Padamanabhanurty B. Some aspects of the urban climate of India. Proc of the Tech Cont, On Urban Climatology and Its Applications with Special Regard to Tropical Areas. WMO-No 652, 20 (10): 1874-1858
- [4] Trijons J. Visibility in the south western—an exploration of the historical date base. *Atmospheric Environment*. 1979, 13: 833-843
- [5] Keith Ralph W. Downtown los angels noon visibility trends. In conferences on air pollution meteorology april. 1971, 5-9. Raleigh N C. preprints American meteorology society. Boston, 1971, 85-91
- [6] Buchan W E, Carlson R J. Urban haze: the extent of automotive. *Contribution science*, 1968, 159: 192-194
- [7] Thomas M D. sulfur dioxide sulfuric acid aerosol and visibility in los angeles Int J. Air Water Pollution. 1962, 6: 443-454
- [8] Chang W L, Koo E H. A study of visibility in HongKong. *Atmospheric Environment*, 1986, 20 (10): 1847-1858
- [9] 苏维翰. 京津地区大气污染对大气能见度的影响. *中国环境科学*, 1986, 6(3): 24-28
- [10] 唐孝炎, 李金龙, 栗欣. *大气环境化学*. 北京: 高等教育出版社, 1998, 231-238
- [11] Fraser M, Cass G, Simoneit B. Gas phase and particle-phase organic compounds emitted from motor vehicle traffic in a los angeles roadway tunnel. *Environ Sci Technol*, 199832: 2051-2060
- [12] 王玮. 交通来源颗粒物粒径谱分布及其与能见度的关系. *环境科学研究*, 2004, 14 (4): 17-22
- [13] Shu Jiong. Magnetic properties of daily sampled total suspended particulates in Shanghai. *Environment Science and Technology*, 2000, 34: 2393-2400
- [14] Shu Jiong. Determing the sources of atmospheric particles in Shanghai China from magnetic and geochemical properties. *Atmospheric Environment*, 2001, (35-15): 2615-2625
- [15] Pritchard W M, Chopra K P. Effect of air pollution on urban visibility statistics. *Virginia Institute of Marine Science Contribution*, 473
- [16] Hage K D. Urban growth effects on low temperature. *Fog in Edmonton Boundary layer met*, 1972, 2: 334-347
- [17] Hopper J I. Urban visibility at low temperatures. *Atmospheric Environment*, 1986, 20 (9): 1819-1823

参考文献

- [18] 韩启祥, 杨福刚, 吴振远等. 天津统计年鉴-2005. 北京: 中国统计出版社, 2006
- [19] 秦保平, 孙韧, 袁倩等. 天津市环境质量报告书(2001-2005). 天津: 天津市环保局, 2006. 4
- [20] 天津市环境监测中心, 南开大学. 大气颗粒物源解析及环境监测信息管理系统, 天津市科技发展计划项目. 2003. 7
- [21] 天津市气象局, 天津市环境监测中心. 天津地区沙尘天气监测预报及防止沙尘对策研究——沙尘天气与城市沙尘污染程度的关系, 天津市科技发展计划项目. 2004. 1
- [22] 白志鹏. 环境空气气溶胶化学. 南开大学, 2004. 8
- [23] 白志鹏, 董海燕, 蔡斌彬等. 灰霾与能见度研究进展.
- [24] 吴兑. 华南气溶胶研究的回顾与展望. 热带气象学报, 2003, 19 (增刊): 145-151
- [25] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 2005, 31 (4): 3-7
- [26] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议. 广东气象, 2004, 4: 1-4
- [27] 张小曳, 张仁健等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析. 第四纪研究, 2002, 24 (4): 374-379
- [28] 孟燕军 王淑英 赵习方. 北京地区雾日大气污染状况及气象条件分析. 气象, 2000, 26 (3): 40-42
- [29] 朱岗萸. 大气污染物理学基础. 高等教育出版社. 1990
- [30] 宋宇, 唐孝炎, 方晨等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系. 环境科学学报, 2003, 23 (4): 468-471
- [31] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(19): 3237-3250
- [32] 唐孝炎. 大气环境化学. 高等教育出版社 1990
- [33] 董雪玲. 大气可吸入颗粒物对环境和人体健康的危害. 资源. 产业, 2004, 6(5): 50-53
- [34] William C. Malm. Introduction to visibility.11 Section 4: Transport and Transformation of Atmospheric Particulates and Gases URL: <http://www.epa.gov/visibility/pdfs/introvis.pdf>
- [35] Sisler James F, Malm William C. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States. Atmospheric Environment, 1994, 28(5): 851-862
- [36] Appel B R, Health Serv. Berkeley Visibility as related to atmospheric aerosol constituents. Atmospheric Environment, 1985, 19(9): 1525-1534
- [37] Lioussé C, Cachier H, Jennings S G, Optical and Thermal Measurements of Black Carbon Aerosol Content in Different Environments: Variation of the specific Attenuation Cross-Section, $\Sigma(s)$, Atmospheric Environment. 1993, 27(A): 1203-1209
- [38] 于凤莲, 刘东贤, 胡英. 有关气溶胶细粒子对城市能见度影响的研究. 气象科技, 2002, 30 (6): 379-383
- [39] 陈宗良 葛苏 张晶. 北京大气气溶胶小颗粒的测量与解析. 环境科学研究,

参考文献

- 1994, 7(3):1-9
- [40] J. J. Cao, J. C. Chow, S. C. Lee., et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'An, China. *Atmos. Chem. discuss*, 2005, 5:3561-3593
- [41] 刘新民, 邵敏. 北京市夏季大气消光系数的来源分析. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 186-188
- [42] R. J. Barthelmie, S. C. Pryor. Implications of Ammonia Emissions for Fine Aerosol Formation and Visibility Impairment-A Case Study from the Lower Fraser Valley, British Columbia. *Atmospheric Environment*. 1998, 32(3):345-352

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

韩毓，1976年6月生于天津，1994年~1997年就读于天津城市建设学院环境工程系，1997年至今于天津市环境监测中心工作。其间，2000年就读于南开大学，2003年毕业并获工学学士学位，2004年3月考入南开大学环境科学与工程学院攻读工程硕士。

在学期间发表的学术论文与研究成果：

[1] 刘伟，韩毓. 天津地区沙尘天气与沙尘污染程度特征分析. 城市环境与城市生态，2004年，17卷（第4期）：18~20

[2] 2002年10月-2004年2月，《“蓝天工程”实施效果评估研究》，主要参加人

[3] 2003年1月-2004年2月，《空气质量预报方法在滨海地区的应用研究》（天津市自然科学基金资助项目），主要参加人