

# 北京市大气细粒子的质量浓度特征研究\*

王京丽 谢 庄

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京, 100089)

张远航 邵 敏 曾立民

(北京大学环境科学中心环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京, 100871)

程丛兰 徐晓峰 赵习方 孟燕军

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京, 100089)

## 摘 要

大气能见度的降低是当今国际上比较突出的城市环境问题。北京近年的监测结果表明, 大气中通过消光作用使大气能见度下降的气溶胶细粒子的污染程度呈现上升趋势。从 2001 年对北京市气溶胶细粒子(空气动力学直径小于  $2.5\mu\text{m}$  的粒子)4 个季节的采样监测结果分析(有效采样天数为 50 d)得出, 北京市细粒子质量浓度年平均值已超过美国国家标准的 7 倍以上。研究发现细粒子的质量浓度不仅与环境条件有关, 而且与气象条件也有着密切的关系。文中以细粒子的观测数据为基础, 结合当时的气象条件进行细粒子浓度与气象条件定量关系的研究。

关键词: 气象条件, 定量关系, 细粒子。

## 1 引 言

大气气溶胶是当今国际上大气化学研究的前沿领域, 气溶胶的物理化学特征的研究一直是大气环境研究的重要且普遍的问题<sup>[1]</sup>。早期的研究对象着重于直接排放的一次污染颗粒物, 20 世纪 90 年代后期, 二次污染颗粒物研究受到重视, 现今则侧重于 PM<sub>2.5</sub> 的研究<sup>[2]</sup>。PM<sub>2.5</sub> 是危害人体健康和环境的最重要的空气污染物之一<sup>[3, 4]</sup>, 它还能通过消光作用造成大气能见度的下降。

中国对大气城市气溶胶细粒子的研究正处于起步阶段, 虽还没有进行过系统性研究<sup>[5]</sup>, 但许多研究机构已经对细粒子相继展开了一系列的实验和监测<sup>[6]</sup>。结果表明: 大气中通过消光作用使大气能见度下降的细粒子污染程度呈现上升趋势。大气能见度的降低已成为当今国际上比较突出的城市环境问题。北京市“蓝天工程”的研究成果表明: 北京市大气能见度与细粒子质量浓度呈现很好的负相关性,

无疑细粒子污染是造成大气能见度下降的主要原因, 它已成为目前中国大气污染研究的重要内容之一<sup>[7]</sup>。

大气细粒子污染与气象条件有非常密切的关系, 不利气象条件是导致 PM<sub>2.5</sub> 严重污染的重要因素之一。北京市气象局与北京大学合作于 2001 年春季(3 月)、夏季(6 月)、秋季(9 月)和冬季(12 月)开展了大气细粒子与气象条件的同步综合观测, 旨在探求细粒子污染与气象条件之间的定量关系, 为中国开展细粒子常规业务监测, 进而开展预测预报, 以及制定改善北京市大气能见度的对策提供技术支持。

## 2 实 验

2001 年北京总体降水偏少, 气温偏高。冬季多雪, 气温正常; 春季降水少, 气温高, 多大风、沙尘天气; 夏季降水少, 气温明显偏高; 秋季降水接近常年, 气温偏高<sup>①</sup>。

PM<sub>2.5</sub> 采样点设在中国气象局大气探测基地

\* 初稿时间: 2003 年 6 月 9 日; 修改稿时间: 2003 年 8 月 27 日。

资助课题: 北京市自然科学基金项目: 用能见度推算  $2.5\mu\text{m}$  细粒子浓度方法的研究(项目合同号: 8012009)。

① 王桂田等, 北京市气候影响评价, 北京市气候中心, 2001。

(AEBCEMA) 观测场、北京大学、北京市环境监测中心东四监测站。各站均安装美国 Anderson 公司的 RAAS-400 四通道 PM<sub>2.5</sub> 膜采样器, 4 个采样通道的采样流量均为 16.7 L/min。采样器使用 3 种滤膜, 分别为 2 张孔径为 2 μm 聚四氟乙烯 (Teflon) 滤膜, 1 张孔径为 1 μm 的尼龙滤膜和 1 张孔径为 1 μm 石英纤维滤膜。AEBCEMA 观测场位于北京的东南方向, 地势较低, 雾日较多, 能见度明显偏低, 仪器安装在探测基地观测场的地面上; 北京大学位于北京西北方向, 仪器放在北京大学校园内一座 6 层实验楼的楼顶上, 距地面约 20 m; 东四位于北京市中心, 地处北京市商业和交通的繁华地段, 仪器放在东四监测站 3 层楼的楼顶上, 距地面约 10 m。

采样时间是 2001 年春季(3 月)、夏季(6 月)、秋季(9 月)和冬季(12 月), 每隔 6 d 采样一次, 每一张膜的采样时间为 24 h。遇沙尘天气则加密观测。因此每个季度观测有 5~6 张膜样品。采用离子色谱 (IC) 分析细粒子中的水溶性离子; 采用 X 射线荧光 (XRF) 和等离子光谱法 (ICP) 分析细粒子中的元素含量; 采用热/光反射 (TOR) 法分析细粒子中的有

机碳 (OC) 和无机碳 (EC)。

此外, 在 AEBCEMA 观测场还采用美国 Anderson 公司生产的 CAMMS PM<sub>2.5</sub> 在线实时采样器对 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度进行了连续监测。气象资料来自 (AEBCEMA) 观测场的常规气象观测。风速资料为每日逐时风速, 湿度资料为每日 4 个时次 (02, 08, 14, 20 时) 的相对湿度。

### 3 细粒子的化学组成特征及其特点

#### 3.1 PM<sub>2.5</sub> 的污染程度和特征

环境气溶胶的污染程度和特征的时空变化比较明显。从时间上来看, 同一地点, 在不同季节、不同环境条件下气溶胶的物理化学特征各有不同, 所观测到的 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成也有所不同; 从空间上来看, 虽然是同一座城市的两个不同监测点, 但 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成没有明显差别。城市气溶胶中各种成分的含量将直接决定颗粒物对光的散射和吸收的贡献, 导致大气能见度不同程度的下降, 文中选择北京大学和东四的数据分春、夏、秋、冬 4 个季节分别进行讨论。

表 1 2001 年北京大学 4 季 PM<sub>2.5</sub> 组分质量浓度观测结果

Table 1 The chemical composition characteristics of PM<sub>2.5</sub> at PKU in the four seasons of 2001

观测季节	有机碳	元素碳	氯离子	硝酸根	硫酸根	铵根	地壳元素	痕	其他
春季	24.42%	2.81%	2.64%	9.72%	9.89%	4.37%	31.75%	1.59%	12.82%
夏季	18.92%	2.98%	0.42%	9.20%	18.95%	4.09%	20.56%	1.11%	23.77%
秋季	34.12%	5.16%	0.47%	6.79%	12.71%	3.03%	24.97%	1.51%	11.25%
冬季	39.19%	3.40%	3.45%	5.44%	10.63%	4.31%	17.18%	1.72%	14.70%

表 2 2001 年北京东四 4 季 PM<sub>2.5</sub> 组分质量浓度观测结果

Table 2 The chemical composition characteristics of PM<sub>2.5</sub> at DS in the four seasons of 2001

观测时间	有机碳	元素碳	氯离子	硝酸根	硫酸根	铵根	地壳元素	痕	其他
春季	27.25%	2.38%	3.54%	8.29%	10.69%	4.63%	31.36%	2.29%	9.56%
夏季	21.76%	2.68%	0.68%	9.45%	21.59%	5.38%	16.78%	1.42%	20.27%
秋季	44.09%	4.01%	0.60%	7.75%	13.99%	3.61%	13.66%	1.87%	10.41%
冬季	44.09%	3.01%	3.95%	5.22%	11.40%	4.67%	13.92%	1.56%	12.18%

表 1、2 分别给出了北京大学和东四 2 个采样点 2001 年 4 季所有采样日化学组分的平均监测结果。从表中可以看出: PM<sub>2.5</sub> 质量贡献主要为有机碳 (OC)、地壳元素和硫酸盐, 其质量浓度之和超过 PM<sub>2.5</sub> 的 60%。其中 OC 的质量贡献最大, 这是一个非常重要的污染化学特征。由于 EC 的化学结构类似于不纯的石墨, 主要来自燃烧源的直接排放, 而 OC 则既可以来自直接排放, 也可以是大分子量的有机气体在大气中转化而成的二次粒子<sup>[8]</sup>。通常

利用大气中的 OC 和 EC 的比值可以表征大气中的二次污染的程度<sup>[9,10]</sup>。从观测结果分析可知: 北京大学 PM<sub>2.5</sub> 的 OC 和 EC 之比约为 8, 而东四约为 11, 远远高于一般用于界定二次污染的临界值 2<sup>[11]</sup>, 这说明北京存在着明显的二次污染。另外从表中还可以看出: PM<sub>2.5</sub> 的组分在 4 季里是有明显差别的; 而对于不同的监测站来说, 在相同季节里其 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成差别不大。PM<sub>2.5</sub> 化学组成特征的 4 季变化有一定规律, 有机碳是冬季最多, 已占

到 40% 以上, 秋季次之, 春夏季相对少一些; 地壳元素是春季最多, 已占到 30% 以上, 夏秋季次之, 冬季最少; 地壳尘主要由 Al, Si, Ca, Mg 和 Fe 的氧化物组成, 其中 Mg, Fe 一般来自土壤, 而 Ca 则是建筑扬尘的标识, 冬季地壳元素最少与这个季节建筑施工活动大大减少相一致。春季沙尘天气较多, 可能也是春季 PM<sub>2.5</sub> 中地壳元素含量高的一个重要原因。硫酸根离子是夏季最多, 约占 20%, 秋季次之, 春冬季最少。这是因为 PM<sub>2.5</sub> 中大多数的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是通过 SO<sub>2</sub> 气体氧化而形成的, 由 SO<sub>2</sub> 生成 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的转化率在不同季节存在较大的差异, 夏季最高, 冬季最低。夏季的高转化率可能是由于夏季太阳辐射强度大, 持续高温使大气光化学反应异常活跃所致<sup>[12]</sup>。

### 3.2 北京市 PM<sub>2.5</sub> 的污染程度

取北京大学、东四、中国气象局大气探测基地 3 个观测站每个代表月的所有观测日的平均值作为北京市该季度 PM<sub>2.5</sub> 的质量浓度值, 并根据 4 季浓度值得到年平均值。图 1 显示了 2001 年北京 4 季及年平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度概况, 从图中可以看出: 夏季浓度最大, 为 137.57 μg/m<sup>3</sup>; 最小是秋季, 为 79.39 μg/m<sup>3</sup>; 冬、春季分别为 115.83 μg/m<sup>3</sup> 和 105.60 μg/m<sup>3</sup>, 年平均浓度为 109.60 μg/m<sup>3</sup>。

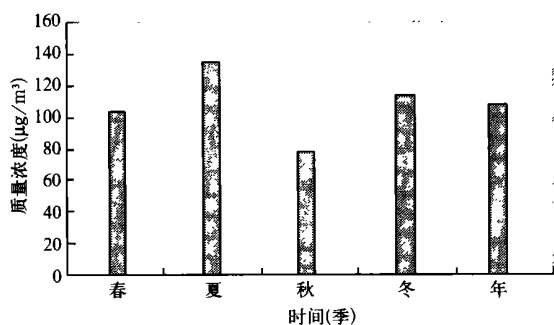


图 1 2001 年北京 4 季和年平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化

Fig. 1 The average of mass concentration of PM<sub>2.5</sub> at AEBCMA in each season and the year of 2001

鉴于目前中国尚未制定 PM<sub>2.5</sub> 的国家标准, 在此本文采用 1997 年美国环保局推荐的标准, 即日均值不超过 65 μg/m<sup>3</sup>, 年均值不超过 15 μg/m<sup>3</sup><sup>[13]</sup>。从图 1 可以看出: 2001 年北京市 PM<sub>2.5</sub> 的年平均值为 109.60 μg/m<sup>3</sup>, 是美国标准年均限值的 7 倍。

## 4 细粒子污染日变化的季节特征

为了研究北京市细粒子的日变化特征, 本文取

2001 年中国气象局大气探测基地夏季和冬季的观测资料进行分析, 数据皆为小时均值。

### 4.1 夏季细粒子污染的日变化特征

图 2 是 2001 年夏季 (6 月 16~26 日) 11 个连续观测日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的平均日变化。2001 年夏季北京高温多雾, 特别是 6 月份雾天达 22 d。本文采样的这个时间段也正好处在烟雾日, 相对湿度较大, 日平均为 70.4%, 气温日平均为 24.7 °C。从图中可以看出 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度在一天中是夜间高白天低, 其中 02~08 时高, 14~16 时低, 这与北京夏季的天气气候特点是相吻合的。北京夏季的天气气候特点是: 夜间气温下降, 风速减小, 相对湿度增加<sup>[14]</sup>, 利于细粒子聚集, 日出前达最高值。日出后气温升高, 风速增大, 湍流交换增强, 相对湿度减小, PM<sub>2.5</sub> 浓度值迅速减小, 在 15 时达最小值, 这与夏季最高气温出现的时间 16 时<sup>[15]</sup> 前后是一致的。15 时之后气温逐渐下降, 风速减小, 湿度上升, 因而 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度逐渐上升。另外, 2001 年 6 月份中国气象局大气探测基地每天 4 次的湿度资料显示, 02 和 08 时的平均湿度均在 70% 以上, 而 14 时的平均湿度仅为 49.7%, 雾日的湿度将超过上述值, 说明了雾日(湿度大)不利于颗粒物的扩散, 污染严重。

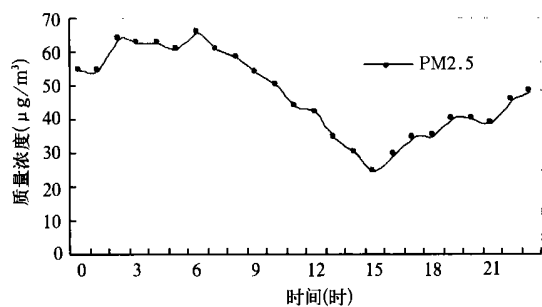


图 2 北京夏季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日变化 (2000 年 6 月 16~26 日平均)

Fig. 2 The diurnal variation of the mass concentrations of PM<sub>2.5</sub> in summer of Beijing (average from Jun. 16 to Jun. 26)

### 4.2 冬季细粒子污染的日变化特征

冬季经常有冷空气从西伯利亚南下, 北京出现大风天气。在大风日, 北京能见度好, 污染小, 故本文重点讨论冬季小风日(一日中所有瞬时风速都小于 5.5 m/s, 日平均风速小于 2.5 m/s), 即污染严重日。图 3 为 2001 年冬季小风日(2001 年 12 月 11 个小风日平均) PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的平均日变化结果。2001 年冬季平均气温为 -3.0 °C, 比常年偏高 0.1 °C, 12 月平均气温偏高 1.4 °C<sup>①</sup>。从图中可以

看出,冬季从 17 时日落以后气温开始下降,风速减小,细粒子逐渐富集,21~23 时达到高峰。午夜以后虽然气温继续下降,风速有所减小,但污染源排放(如汽车尾气)也大大减小,因此富集的污染物逐渐扩散出去,PM<sub>2.5</sub> 质量浓度略有下降。另外 07~09 时出现了一个小高峰,估计这和上班高峰期车流量密集、尾气排放量大有关系。14 时前后达到最小值的情况则与夏季一样,只是冬季的最高气温出现时间在 13~14 时,比夏季早。

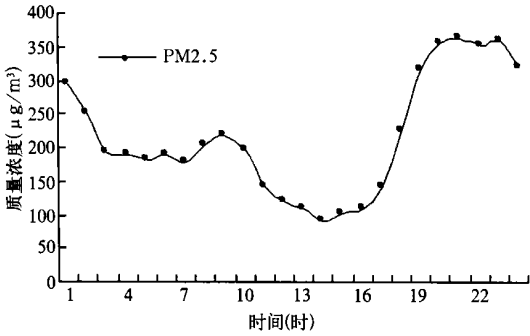


图 3 北京冬季 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度日变化 (12 月 10 个小风日平均)

Fig. 3 Diurnal variation of PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in winter of Beijing (average of data in December)

春秋两季细粒子污染的日变化特征与上述冬夏季类似,本文不再详述。

### 5 细粒子的污染特征及与气象条件的关系

为研究细粒子污染及其与气象条件的关系,本文首先对 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与湿度、风速的关系做了统计,之后又分别利用中国气象局大气探测基地各季节典型天气的采样结果进行分析。图 4 给出了 4 季全部 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与对应相对湿度观测资料的统计关系,从图中可以看出两者具有正相关性。

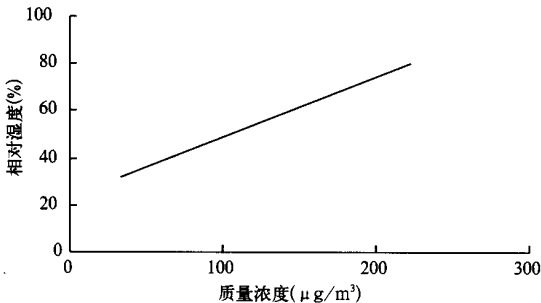


图 4 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与相对湿度的关系

Fig. 4 The contrast of the mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and the relative humidity in each season

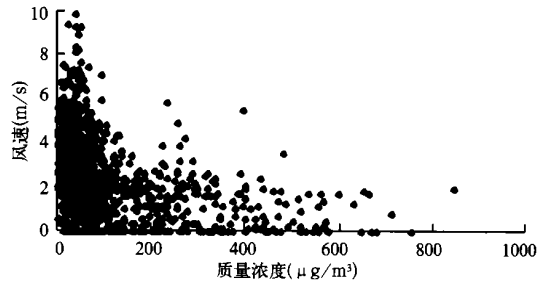


图 5 全部 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与风速的关系

Fig. 5 The contrast of the all mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and wind speed

图 5 给出了 4 季全部 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与对应风速资料的统计关系,从图中可以看出两者呈现负相关,当风速在 3 m/s 以下时,质量浓度变化不大;当风速大于 3 m/s 时,浓度迅速下降。下面本文从春、夏、秋、冬 4 个季节分别论述细粒子质量浓度与气象条件的关系。

#### 5.1 春季细粒子的污染特征及与风、湿度的关系

北京的春季干旱多风,有利于污染物的扩散。2001 年春季降水明显偏少,气温偏高,而且大风和沙尘天气日达 17 d,比常年明显偏多<sup>[7]</sup>,污染也较轻,但在小风日污染仍较重。

图 6 是北京春季小风日(3 月 16 日) PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与风速日变化对比结果,从图中可以看出,上午风速小,PM<sub>2.5</sub> 质量浓度高达 200 µg/m<sup>3</sup>,12 时以后风速增大,质量浓度迅速下降,15 时仅 60 µg/m<sup>3</sup>。说明春季小风日期间 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与风速呈较好的负相关性,资料样本数为 12,其相关系数为-0.60,通过 0.05 的信度检验。图 7 是北京春季小风日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与湿度平均日变化对比结果(3 月 28~31 日,每日 4 时次平均),从图中可

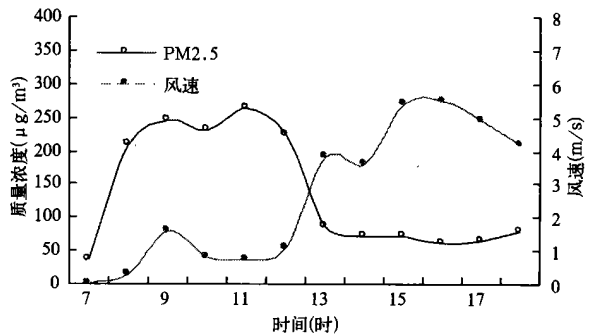


图 6 北京春季小风日 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度与风速日变化对比(3 月 16 日)

Fig. 6 The variation of PM<sub>2.5</sub> concentrations and wind speeds measured (Mar. 16)







