

# 纽约市 $PM_{2.5}$ 研究计划 (PMTACS - NY) 简介

徐 敬 丁国安

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要** 以往的研究表明,细粒子富集了大气气溶胶中的大部分有害物质,它可以进入呼吸系统并沉积于肺泡,严重影响人类健康,并且是导致环境恶化的重要因素,因此,对细粒子的研究越来越得到人们的重视。文章介绍了纽约市  $PM_{2.5}$  研究的背景、规划,以及依规划制定的科学策略和提出的设想,详述了观测点的选择、采用的方法,并介绍了已有的初步结果,为我国同类研究提供参考。

**关键词** 气溶胶 细粒子 大气污染

## 引言

由北京市环保局 1999 年以来发布的空气质量日报可知,可吸入颗粒物是北京市主要空气污染物之一,而且往往居于首位。其对人类的危害已被国内外大量流行病学和毒理学研究所证实。特别是颗粒物中的细粒子,即粒径小于  $2.5\mu\text{m}$  的气溶胶粒子的总称,也称为  $PM_{2.5}$ ,因为其粒径很小,可以进入肺泡,从而导致呼吸系统和其他病症,并有可能引发癌症。由于其在气候、生态、健康方面的重要性越来越得到人们的重视,国外近年来在这方面作了大量的观测和研究工作,美国是开展  $PM_{2.5}$  研究较早的国家之一,从 20 世纪 90 年代中期开始,美国进行了一系列外场观测试验,获得了大量原始资料,在  $PM_{2.5}$  的物理特性、化学组成、来源分析,以及与其他污染物之间的关系,及其对人类健康的影响等研究方面取得了重要进展,这些都为环境保护系统制定空气质量管理方法、评估监测技术、制定合理的调控措施提供了依据。随着经济的发展,人民生活发生了翻天覆地的变化,越来越多的人认识到:改善生存环境与提高生活质量密切相关。美国作为一个经济高度发达的国家,政府在环境治理方面一直都很重视,特别是近些年来对  $PM_{2.5}$  的研究尤为重视,美国

纽约市环境保护局于 1999 年制定了一个系统的  $PM_{2.5}$  研究计划,整个计划的实施是从 2000 年到 2004 年。我国在  $PM_{2.5}$  研究方面起步较晚,到目前为止,对  $PM_{2.5}$  的观测手段相对缺乏,数据系统性较差,但从已有的观测结果分析来看,我国大部分地区细粒子污染较重,对环境观测研究要求日益迫切,为了推动这方面的工作,本文将美国纽约市的  $PM_{2.5}$  观测研究计划(简称 PMTACS - NY)做一个比较全面的介绍,以供我国同类研究参考。

## 1 背景

纽约市环境保护局从 2000 年 7 月开始对纽约地区细粒子污染状况进行了系统的观测研究,这项工作要持续到 2004 年秋季,其研究主要目的是分析细粒子与污染气体、气象场的相关性;追踪纽约地区细粒子的来源;确定各种污染源之间的相互关系。表 1 列出了其研究内容、采用仪器和时间计划等。

目前,纽约这项  $PM_{2.5}$  研究计划已经进行了将近 3 年的时间,取得了很大进展。其研究结果表明:空气中污染气体与细粒子间存在明显的关系,图 1 简要说明了源排放气态污染物,这些气态污染物在一系列物理化学作用下生成有机物、硫酸盐、硝酸盐颗粒物,揭示了气溶胶细粒子的形成过程。

本研究部分属于“北京及其周边地区大气环境研究”项目,并受到“974 - 02 - 02”课题资助

收稿日期:2002 年 5 月 24 日;定稿日期:2003 年 2 月 14 日

作者简介:徐敬,女,1977 年生,中国气象科学研究院在读硕士研究生

表 1 纽约 2000 ~ 20004 年细粒子研究计划

	研究内容	仪器	采样频率	时间
PM <sub>10</sub>	质量浓度	离子色谱仪 R & P TEOM 1400 AB	每天 1 次 每天 1 次	2000 年 7 月至 2004 年 10 月 2000 - 07 ~ 2004 - 10
	硫酸盐	离子色谱仪	每 6 天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10
	硝酸盐	离子色谱仪	每 6 天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10
	离子浓度	R & P 2400	因需要而定	2001 ~ 2003 年
			离子色谱仪	每天 1 次
PM <sub>2.5</sub>	质量浓度	FRM - R & P TEOM R & P TEOM 1400 AB R & P TEOM 1400 AB	每天 1 次 每天 1 次 每天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10 2000 - 07 ~ 2004 - 10 2000 - 06 ~ 2003 - 05
		ESP R & P TEOM	每天 1 次	2001 - 07 ~ 2004 - 10
	硫酸盐	离子色谱仪 离子色谱仪	每天 1 次 每 6 天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10 2000 - 07 ~ 2004 - 10
		R & P 8400 NS	每天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10
	硝酸盐	离子色谱仪	每天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10
		R & P 8400 NS	每天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10
		ICP/ AES, ICP/ MS & 中子活化剂	每天 1 次	2000 - 07 ~ 2004 - 10
	金属元素	XRF	每 6 天 1 次	2001 - 07 ~ 2003 - 12
		ICP/ AES, ICP/ MS & 中子活化剂	每天 1 次	于 2001 年夏至 2003 年冬间选 4 周进行

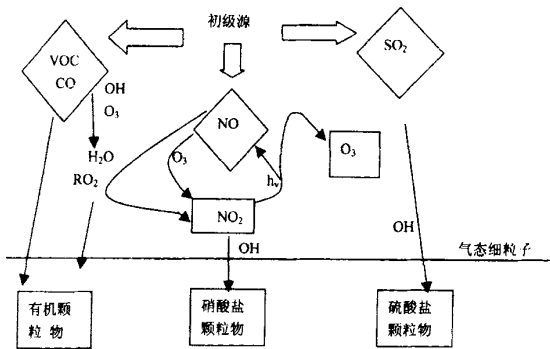


图 1 细粒子生成过程

PMTACS - NY 涉及了许多现场观测,选择的观测点包括城市和郊区的一些具有代表性的点。从观测结果来看,城郊 PM<sub>2.5</sub> 的化学组分有很大差别,而且各种物质占细粒子总质量的比重也不同。对于典型美国东部城市来说,细粒子中硫化物占总质量的 42%,碳化合物占 33%,氮化物占 14%,粉尘占 4%,其他占 2%;就白面山地区而言,硫化物占 52%,氮化物占 7%,碳化合物占 24%,浮尘占 2%,其他占 15%。另外研究结果还表明,郊区细粒子的污染状况比城市区要轻,但郊区细粒子的污染水平也会出现超标现象,这种情况下,受传输的作用会影响到城市地区空气质量。此外,城郊总体统计结果表明:夏季细粒子中的有机硫化物浓度达到最大值,冬

季氮化物浓度达到最大值。城郊比较研究具有十分重要的意义,通过这项工作,环境工作者可以更好地了解纽约地区城市与郊区间空气质量的关系,特别是在人为及天然源对 VOC、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 的排放影响细粒子生成方面有了更深的认识。所有这些工作对规范化排放控制,最终降低 PM<sub>2.5</sub> 对空气质量的影响有积极意义。

研究结果还发现以往的观测方法存在很大的局限性,原因在于采集和分析过程中温度和湿度的改变损失了样品中的可挥发性物质,因此,在一定程度上低估了空气中 PM<sub>2.5</sub> 的实际含量。在 PMTACS - NY 中,纽约市环境保护局采用了一种新方法,简称 EPA FRM 方法,这种方法是在原有方法基础上改良而成的。多次试验比较显示,改进后的采样方法使 PM<sub>2.5</sub> 质量在滤膜收集过程中几乎没有损失,24h 细粒子质量浓度测量能如实反映局地实际情况。尽管纽约市已经在 PM<sub>2.5</sub> 的研究方面取得了很大进展,目前仍有一些问题有待解决,如无机硫化物、氮化物、氨气和有机颗粒物的季节性分布特征,以及它们与氧化剂之间的关系;有机碳氢化合物对空气质量的影响及其对氧化剂的敏感性;硝酸铵的作用以及其对氨气浓度变化的敏感性;特别是污染气体与 PM<sub>2.5</sub> 间的气 - 粒转化关系等,这些都将作为今后研究工作的重点。

## 2 研究目标

纽约市环境保护局制定的 PMTACS - NY 研究目标包括以下几点:

①在研究过程中不断探索新技术,更深入地了解  $PM_{2.5}$  污染特征、形成过程和源的贡献;

②研究细粒子对人类健康的影响;

③通过对源排放的控制,减少  $PM_{2.5}$  的生成,进而降低其对空气质量的影响,并且评估控制措施的有效性。

此项计划的外场观测主要是在曼哈顿、昆士兰、南布鲁克斯、尖塔公园和白面山进行,涉及的测量方法包括:EPA(美国环境保护局)的常规测量方法、颗粒物分级测量方法、R&P 8400 NS 测量方法;另外,还针对曼哈顿、尖塔公园和白面山采用了低温低湿条件下 TEOM(Tapered Element Oscillating Microbalance)方法,即微振荡天平测量方法。

## 3 研究内容

### 3.1 研究 $PM_{2.5}$ 及相关污染物的时空分布特征

这些污染物包括:  $SO_2$ 、 $CO$ 、 $VOC$ 、 $NO$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $NO_x$ 、 $H_2CO$ 、 $HNO_3$  及  $HONO$ ,其中以对  $PM_{2.5}$  的质量浓度和化学组分研究为重点。通过对测量数据的分析来确定污染物的排放源,为制定减排措施提供依据。

### 3.2 论证排放控制措施的有效性

纽约正不断扩大天然气汽车的使用量,通过在开放路面上、机动车平台以及固定点的监测发现,与柴油机汽车相比,天然气汽车尾气中  $NO$ 、 $SO_2$  和细颗粒物的含量明显降低。

### 3.3 改进测量方法

以往采用的 EPA 测量方法因为采样过程中温度和湿度的改变损失了部分可挥发性物质,因此,  $PM_{2.5}$  质量测量值比大气中的实际含量低 30%。PMTACS 计划中改良了原有的方法,形成的新方法简称 EPA FRM 方法。其工作原理是由 R&P TEOM 系统测量细粒子的质量浓度,整个过程必须在  $30^\circ C$  恒温有干燥器的情况下进行,温度和湿度都受到严格控制。此外,还辅助了遥感系统对大气光学特性的测量。

## 4 措施

### 4.1 PMTACS - NY 测点选择

PMTACS - NY 中在纽约市区和纽约州北部选

取了 7 个具有区域代表性的点,在这些测点上进行  $PM_{2.5}$  的质量浓度及其气态前体物的观测。这 7 个点中有 2 个区域背景监测站:白面山和尖塔公园;3 个设于市区内的监测站;另外还有 2 个可选站:南布鲁克斯和昆士兰,在这些地区除了进行  $PM_{2.5}$  的质量浓度观测外还进行了空气质量常规测量项目的同步监测。

### 4.2 重点实验

纽约市环境保护局 PMTACS - NY 在 5 年内完成,其中把 2001 年夏天和 2003 年冬天的集中观测作为两个重要个例来研究。在这两段时间里,将进行 4~6 周的连续观测,并增加了颗粒物粒径的分级测量项目。通过对  $PM_{2.5}$  化学组分的研究来确定纽约地区的污染源及大气传输过程。其意义在于:有助于揭示气-粒转换过程;为单个污染源贡献提供数据;通过把新兴技术和已有的常规观测作比较,并评估它们的性能。

### 4.3 CNG/ CRT 排放扰动试验(CEPEX)

纽约市政府在控制排放污染方面作了许多努力,1996 年末,纽约市政府、自然资源保护协会和城市运输委员会达成了引进 500 种可替代燃料的协议,并在 1998 年对 34 种天然气汽车和相同型号的柴油机汽车的尾气排放作了比较研究,同时还试运行了 210 部压缩型天然气汽车,而且对大型供给站进行了调整以适应天然气汽车的发展。另外许多科研机构正不断改进尾气处理技术来降低目前还在使用的柴油机汽车的排放污染。以下介绍这项规划的具体实施措施:①在可代表天然气汽车行驶道路上,采用红外激光分光计遥感系统测量汽车尾气排放;②利用流动测量平台实时监测尾气轨迹实现对离散点的监测,同时还可以结合全球定位系统和气象数据绘制污染水平图,这样不仅可以研究流动源排放强度,而且可以确定其位置,从而可以估计整个城市交通运输排放污染的发展趋势;③对  $SO_2$ 、 $CO$ 、 $NO$ 、 $NO_2$ 、 $H_2CO$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3$  和 CN 进行固定点观测,模拟纽约市柴油机汽车源廓线。

## 5 测点选择

PMTACS - NY 中选择的 2 个郊区监测点:白面山和尖塔公园,在这 2 个测点已有大量痕量气体的历史记录,根据计划,又于 1999 年和 2000 年进行了一系列的  $PM_{2.5}$  相关测量,主要目的是用来分析

市区和工业区的空气质量对郊区的长期影响。几个位于市区内的观测点的选择考虑到了历史记录、社会经济状况、人类健康研究等各方面的影响。这5个测点的详细情况如下:

#### ①白面山(Whiteface Mountain)

位于纽约市北部的 Adirondack 山脉,高度约 1500 m,针叶松林从 900 m 到 1400 m,其中包括冷香杉和数量随高度增多的红云杉。顶点在植被线以上 90 m。主要测量装备放在山顶的观测台。最近的城市是蒙特利尔,在其北部 130 km 处。

#### ②尖塔公园(Pinnacle State Park)

位于纽约市和宾夕法尼亚州的交界地区,海拔约为 515 m。该点坐落于空旷干净的 Orr 山,在公园最高山的东部 100 m,比最高山低 12 m。最近的树林距此 50 m,周围是 50 英亩池塘、牧区以及森林绿地。

③Mable Dean Bacon 高级中学(Mable Dean Bacon High School)

位于纽约市曼哈顿大道第 14、15 街之间,气体采样器放置在楼顶最高点,气体监测系统放在第六层。颗粒物监测系统放于楼顶平台上。

#### ④南布鲁克斯

位于纽约南布鲁克斯市凯利大街 681 号。气体监测系统置于一所学校北面的三层楼上,气体采样器放在高于楼顶 1 m 处。颗粒物监测系统放在楼顶。

⑤昆士兰自治区公共大学(Queensborough Community College)

位于纽约昆士兰春天原野大街 56 大道。气体监测系统放在一座名为奥克兰建筑的二层。气体采样器放在高于楼顶 1 m 处。颗粒物监测系统放在距此建筑 100 m 的另一座建筑的顶上,比气体监测系统采样器低 50 m。

第 3~5 观测点都位于市区,周围视野较好,是受建筑物和源排放影响较小的点,具有局地代表性,并且这些测点还有条件进行其他辅助观测。

## 6 预期的结果和效应

①通过对颗粒物中  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  的含量分析,以及对空气中污染气体浓度测量发现,大气中  $PM_{2.5}$  及  $PM_{10}$  的含量变化与污染源( $NO_x$ 、 $SO_2$ 、VOCs)含量的变化不存在线性关系; $PM_{2.5}$  及  $PM_{10}$  中氮化物与硫化物的生成与  $O_3$  浓度关系密切,存

在一定的正比例关系;夏季  $SO_4^{2-}$  的生产率很大程度上由  $SO_2$  的浓度决定,而局地  $SO_2$  的浓度受传输作用影响很大。

②对燃烧源附近颗粒物中 Fe 和 Mg 的监测发现,Fe/Mg 的比率是燃烧生成气溶胶的显著信号,因此可以利用化学成分作为示踪信号追踪一些污染物来源。

③在研究气溶胶源属性问题上,通过对源的贡献、源的变化,以及对要素的分析可以区分气溶胶属局地生成还是异地传输。研究过程中采用了化学质量平衡模式,并选取了常规的以 24h 和 6h 为单位采样,通过对其中的痕量元素含量分析得出,颗粒物中 V/Se 的比率体现了以碳和油为燃料生成气溶胶的比例;颗粒物中 As/Se 的比例反映了中西部地区和加拿大地区气溶胶浓度的比例。因此可以利用实际分析技术来确定局地和区域性源对  $PM_{2.5}$  质量传输的影响。

④采用 TEOM 质量观测方法,对自然界中的碳氢化合物物种进行测量发现,生物排放影响局地  $PM_{2.5}$  中半挥发性有机物的浓度。

⑤测量结果显示,局地  $NH_4NO_3$  的产生与  $NH_3$  的浓度有关,环境空气中硫化物的比例与氮化物的比例是反相关的。

PMTACS 观测设计为新的有关  $PM_{2.5}$  现场观测,并为与  $PM_{2.5}$  有关的硫化物、氮化物、半挥发性有机化合物以及其他有关物特性观测提供一个范例。这些测量可以评估和比较 EPA FRM 过滤采样技术,以及找出多种探测方法错误的原因。现有的测量数据很好地解释了城市和郊区  $PM_{2.5}$  污染的形成机制、控制要素以及追踪气象源。

PMTACS 研究结果将被应用到论证排放控制措施的可行性上。纽约市环境保护局目前正在研究通过控制  $SO_2$  和  $NO_x$  固定源排放,以及汽车尾气排放等对减少  $PM_{2.5}$  生成,降低其对空气质量影响这一举措的有效性。这项研究工作对测量系统有很严格的要求,它要求仪器不仅能测量一次和二次气溶胶颗粒物,而且还能测量颗粒物前体物,同时还要监测  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $NH_3$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$  和  $H^+$  的浓度变化,以及监测气溶胶中元素碳、半挥发性有机物的浓度变化。

PMTACS - NY 中涉及的仪器见表 2。

表2 纽约市PM<sub>2.5</sub>观测中使用的主要采样仪器

仪器	功能
R & P TEOM	在 30 °C 恒温下,对样品进行持续的质量监测
R & P ESP TEOM ( DDET)	TEOM 系统的实时反应能力使该仪器可以进行直接质量读取,另外 TEOM 的 A、B 两个传感器间有效质量的不同为气溶胶粒子不挥发性和可挥发性成分的测量提供直接方法
R & P 8400 NS	该仪器可以实现对硝酸盐和硫酸盐连续的质量监测
AMS 系统 ( Aerodyne Research System)	系统中直径 0.055 ~ 5 μm 的气溶胶粒子主要集中在仪器内一个高真空系统中,粒子的动力学等效直径决定了粒子的速度,气溶胶中可挥发性、半挥发性物质经热蒸发电离,由质谱测量仪监测
激光二极管系统	使用激光二极管系统可以监测小分子的浓度,如: NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, HONO, NH <sub>3</sub> , CO, H <sub>2</sub> CO, 和 SO <sub>2</sub> 等

## 参考文献

- 1 De merjian K L. A Review of National Monitoring Networks in North America. *At mos. Environ.*, 2000, 34: 1861 - 1884
- 2 Hering S V and Friedlander S K. Origins of Sulfur Size Distributions in the Los Angeles Basin. *At mos. Environ.*, 1982, 16: 2647 - 2656
- 3 Jimenez J L, Koplow M D, Nelson D D, et al. Characterization of On - Road Vehicle NO Emission by a TILDAS Remote Sensor. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 1999, 49: 463 - 470
- 4 Lamb B K. Development of atmospheric tracer methods to measure methane emission from natural gas facilities and urban areas. *Environ. Sci. Technol.*, 1995, 29: 1468 - 1479
- 5 Mather J S, Stevens P S, Brune W H. OH and HO<sub>2</sub> measurements using laser - induced fluorescence. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 6227 - 6236
- 6 Nelson D D. Recent improvements in atmospheric trace gas monitoring using mid - infrared tunable diode lasers. *Proc. SPIE*, 1996, 2834: 148 - 159
- 7 Nelson D D, Zahniser M S, McManus J B, et al. A tunable diode laser system for the remote sensing of on - road vehicle emissions. *App. Phys.*, 1998, 67: 433 - 411
- 8 Roberts P T and Friedlander S K. Analysis of sulfur in deposited aerosol particles by vaporization and flame photometric detection. *At mos Environ.*, 1976, 10: 403 - 408
- 9 Stein S W, Turpin B J, Cai X P, et al. Measurement of relative humidity - dependent bounce and density for atmospheric particles using the DMA - impactor technique. *At mos. Environ.*, 1994, 28: 1739 - 1746
- 10 Winkler P. Relative humidity and the adhesion of atmospheric particles to the plates of impactors. *J. Aerosol Sci.*, 1974, 5: 235 - 240
- 11 Yamamoto M and Kosaks H. Determination of nitrate in deposited aerosol particles by thermal decomposition and chemiluminescence. *Anal. Chem.*, 1994, 66: 362 - 367
- 12 Zahniser M S, Nelson, D D. Measurement of trace gas fluxes using tunable diode laser spectroscopy. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 1995, 351: 371 - 382

## INTRODUCTION TO PM<sub>2.5</sub> RESEARCH IN NEW YORK CITY

Xu Jing Ding Guoan

( Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** From the previous research result it can be found that fine particle congregates most of the nocuous matter of aerosol. These matters can enter into respiration system of human being, and be deposited in the alveolus. Fine particles seriously affect people's health, and make environment even worse. Experts have attached great importance to the research in this field. The background, project, science policy and problem of the PM<sub>2.5</sub> research in New York City are given. The measurement sites and some already acquired primary results are particularly introduced in order that all these can provide some help to similar research in China.

**Key words:** aerosol, fine particle, air pollution.