

# 北京地区气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度的 相关因子及其估算模型\*

周 丽

(中国气象科学院, 北京, 100081; 南京气象学院, 南京, 210044)

徐祥德 匡安 苗秋菊 魏凤英

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘 要

文中运用统计分析和气象统计预报的方法, 使用北京白石桥小区的污染物观测资料和同期北京地区的气象观测资料, 对影响大气污染的气象因子进行了综合分析, 并分别建立了气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度与气体污染物、气象要素场的两类统计相关拟合模型。发现气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度与气体污染物浓度存在不同程度的相关性, 且与气象条件亦存在显著的相关关系, 此类时空变化及其量化估算模型具有一定实际应用价值。通过确定气象要素场和气溶胶浓度的关系可进一步研究不同地区的污染物输送和污染源扩散影响的问题。

关键词: 气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子, 逐步回归模型, 拟合。

## 1 引 言

目前, 城市污染问题得到人们的普遍关注。火电厂、汽车尾气、化工厂等排放的氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、以及二次污染物臭氧(O<sub>3</sub>)和气溶胶细粒子等是影响人体健康的主要污染物。这些污染物将直接或间接地危害人类的健康以及植物的生长<sup>[1, 2]</sup>。气溶胶细粒子极易被人体吸入并沉积在肺中, 其本身的毒性和携带的细菌及病毒将危害人体的健康, 引起了公众的极大关注。另外, 大气气溶胶自身的污染特性与其物理化学性质与在大气中的非均相化学反应有着密切的关系<sup>[3]</sup>。研究表明, 气溶胶的粒径不同其在大气中的寿命也不同, 直径 1 μm 左右的气溶胶粒子寿命最长。在对流层下部, 稳定气溶胶粒子(直径 0.1~10 μm)的寿命约为 1 个星期; 在对流层上部, 为 1 个月; 在平流层中可达数年。在对流层下部直径大于 10 μm 和小于 0.01 μm 的粒子的寿命均小于 1 d<sup>[4]</sup>。众多学者的研究表明气象条件与污染物的关系十分

密切, 例如庐山云雾水中离子浓度和上风方污染源关系密切, 其主要通过气溶胶的输送而影响云雾水成份<sup>[5]</sup>。大气扩散的理论和实践研究表明, 在不同的气象条件下, 同一污染源排放所造成的近地层污染物体积份数可相差几十倍乃至几百倍<sup>[6]</sup>; 北京地区 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO 和 O<sub>3</sub> 污染气体浓度变化、气溶胶垂直分布廓线及其浓度峰值层次与边界层大气热力状况结构(逆温层特征)存在显著联系<sup>[7]</sup>; 北京冬季的 SO<sub>2</sub> 与气象条件的关系分析表明: 风速越小, 大气越稳定, 近地层大气的 SO<sub>2</sub> 污染越重, 北京冬季西南风强时有较高的 SO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>。北京 325 m 气象塔资料的分析表明: 强天气过境, 可造成 NO<sub>x</sub>、CO 体积份数的急剧降低, 而 O<sub>3</sub> 也受到平流层高体积份数 O<sub>3</sub> 向低层输送的影响<sup>[9]</sup>。不稳定大气, 为最利于空气中污染物垂直扩散的情况, 烟流常呈波浪型, 空气上下层混合强烈, 在污染源下风处, 污染浓度较轻。稳定大气, 在地面上空形成逆温层, 湍流交换很弱, 烟流只沿下风方向水平伸展, 十分不利于空气中污染物的扩散。在中性大气状态下, 对空气中污染物

\* 初稿时间: 2003 年 5 月 22 日; 修改时间: 2003 年 8 月 11 日。

资助课题: 国家重点基础研究发展规划项目: 首都北京及周边地区大气、水、土壤污染机理与调控原理(项目编号: G1999045700)。

的垂直扩散不发生很大影响,上述研究表明污染物的维持、扩散和气象条件有密切的关系,本文采用逐步回归的统计方法建立气-粒相关统计拟合模型,分别探讨大气污染物浓度、气象因子与气溶胶细粒子 PM<sub>2.5</sub> 的相互关系,即通过确定气象要素和气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度统计-动力关系,以进一步考虑不同地区的远距离输送问题和污染源扩散等动力机理问题。

## 2 测点和采样方法

国家科技部“973”项目“首都北京地区及周边地区大气、水、土环境污染机理与调控原理”项目在2001年实施了“BECAPEX”(Beijing City Air Pollution Observation Field Experiment)大气环境试验,试验目标是对北京城区冬季大气污染、边界层结构及物理化学过程进行综合观测研究。观测期间使用美国RP公司生产的PM<sub>2.5</sub>(粒径小于2.5 μm的细小颗粒物)颗粒测量仪(型号RP1400),该仪器利用PM<sub>2.5</sub>质量浓度与微振荡天平频率之间的良好相关关系,对大气中PM<sub>2.5</sub>浓度直接进行在线测量。文中使用白石桥小区的污染物观测资料和同期北京地区的气象观测资料,对影响大气污染的气象因子进行了分析。

本次观测无PM<sub>10</sub>仪器,所以不能分析其变化规律,但需要指出的是PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>有很好比例关系,平均而言,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>约为0.6~0.7。污染气体观测已有比较成熟的方法,而气溶胶细粒子受观测仪器的限制,目前仅限于部分地区和部门。由于PM<sub>2.5</sub>在大气污染中已上升为主要的空气污染物,如果能建立统计数学方法把两者结合起来,将有助于其开展预报。PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>为仪器连续自动记录,24 h连续观测,观测时段从2001年11月3日10时至28日14时,共571个时次的样本。观测地点在白石桥小区,高度40 m,南临紫竹院公园,北临民族大学,东面200 m处为南北走向的中关村南大街,西面为西三环公路。

## 3 PM<sub>2.5</sub>粒子浓度与SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>的相关特征

城市大气气溶胶对太阳辐射的削弱和对于对流边界层发展的延缓,在一定条件下,均可对城市气温产生明显的影响<sup>[10]</sup>。冬季日出后相当一段时间,在400 m附近仍可维持一浅薄的逆温层,其下风速微

弱,相应在场风、气溶胶污染浓度场和温度场之间的相互作用,可能导致恶性循环:高浓度气溶胶污染 $\rightarrow$ 太阳辐射受削弱 $\rightarrow$ 对流边界层发展缓慢 $\rightarrow$ 阻隔向下的动量输送 $\rightarrow$ 低层小风持续 $\rightarrow$ 高浓度气溶胶污染维持,直到对流边界层缓慢地发展到较高层次,使上层动量输送至低层,促使高浓度气溶胶污染状况得以改变<sup>[11]</sup>。上述循环过程描述了气溶胶浓度场与大气动力-热力结构的相互作用,此类循环结构亦可反映在PM<sub>2.5</sub>粒子浓度与SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>污染气体浓度的相关特征等方面。

综合分析北京污染过程地面观测与卫星TOMS反演可吸收气溶胶指数高值区域逐日动态变化,可发现卫星反演气溶胶分布与天气系统动态演变的相关性,例如,2001年2月20~24日北京一次污染过程,当时北京处于西南气流之中,相对北京地区污染现场观测高值时段(图略),卫星TOMS反演气溶胶高值区自南缓慢北推,随后南压,其气溶胶指数高值区域北京及城郊周边地区呈连成一片的区域性特征<sup>[12]</sup>。

本文从PM<sub>2.5</sub>与SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>的对比图(图1)中可以看出,与SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>的变化趋势基本一致,与O<sub>3</sub>的变化反位相。PM<sub>2.5</sub>与NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>的相关系数分别为0.83、0.72,均超过0.001的显著性检验,存在较高的正相关;而PM<sub>2.5</sub>与O<sub>3</sub>的相关系数为-0.41,超过了0.01的信度检验。可见,在2001年11月的观测时段中,当PM<sub>2.5</sub>增加,NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>相应增加,而O<sub>3</sub>则减少。

## 4 PM<sub>2.5</sub>粒子浓度变化的气象背景

城市环境污染问题研究领域广泛,首先城市内单体空气污染源直接造成微尺度和区域尺度的污染物传输,这种污染在特定的气象条件下易于造成严重危害,尤其是在城市大气多尺度环流系统的相互作用下城市点源、线源、面源空气污染等混合、扩散,并通过不同时空尺度的化学成份转化及光化学过程,形成时空多尺度分布特征<sup>[11]</sup>。

在大气污染严重的大城市上空,城市边界层积聚着各种各样的排放气体,好像是污染物充满天幕的“大锅盖”,覆盖整个城市,甚至周边地区构成连成一片大范围城市群污染覆盖层结构。在大气风温湿特定条件下通常污染物以城市烟羽的形式被传播到下风方,烟羽范围可以向下游输送数百公里远<sup>[13,14]</sup>。

杨东贞等<sup>[15]</sup>指出气象因子对气溶胶的浓度分布有很大的影响。风速减小、层结稳定性增加、湿度增大等可导致气溶胶总悬浮颗粒物TSP(Total Suspended Particles)及其化学组分浓度增高。并指出人为源对北京的气溶胶的贡献是主要的,风速小、层结相对稳定天气条件下的气溶胶主要来自北京当地及周边地区的排放源。

#### 4.1 PM2.5 粒子浓度与风向、风速相关性

大气低层风向、风速影响着污染物的传输及扩散过程,风的主要作用是对污染物的平流输送,通常风速越大越有利于空气中污染物质的稀释扩散。而

长时间的微风或静风则会抑制污染物的扩散,使近地面层的污染物成倍地增加。本次采样资料间隔3h,对PM2.5浓度和风速做8点平滑(图2),发现它与风速的反相关特征显著。2001年11月3~27日的风速和气溶胶的相关系数为-0.45,样本数为199,超过了0.01的相关信度检验。这表明气溶胶高浓度的数值往往发生在大气环境小风或静风即随风速增大,气溶胶浓度相应减小。杨军等<sup>[16]</sup>综合分析西藏泽当观测的大气气溶胶与风速资料也得出类似的结论,统计分析表明泽当10m高处风速与气溶胶细粒子反相关。说明随风速增大,细粒子浓度因

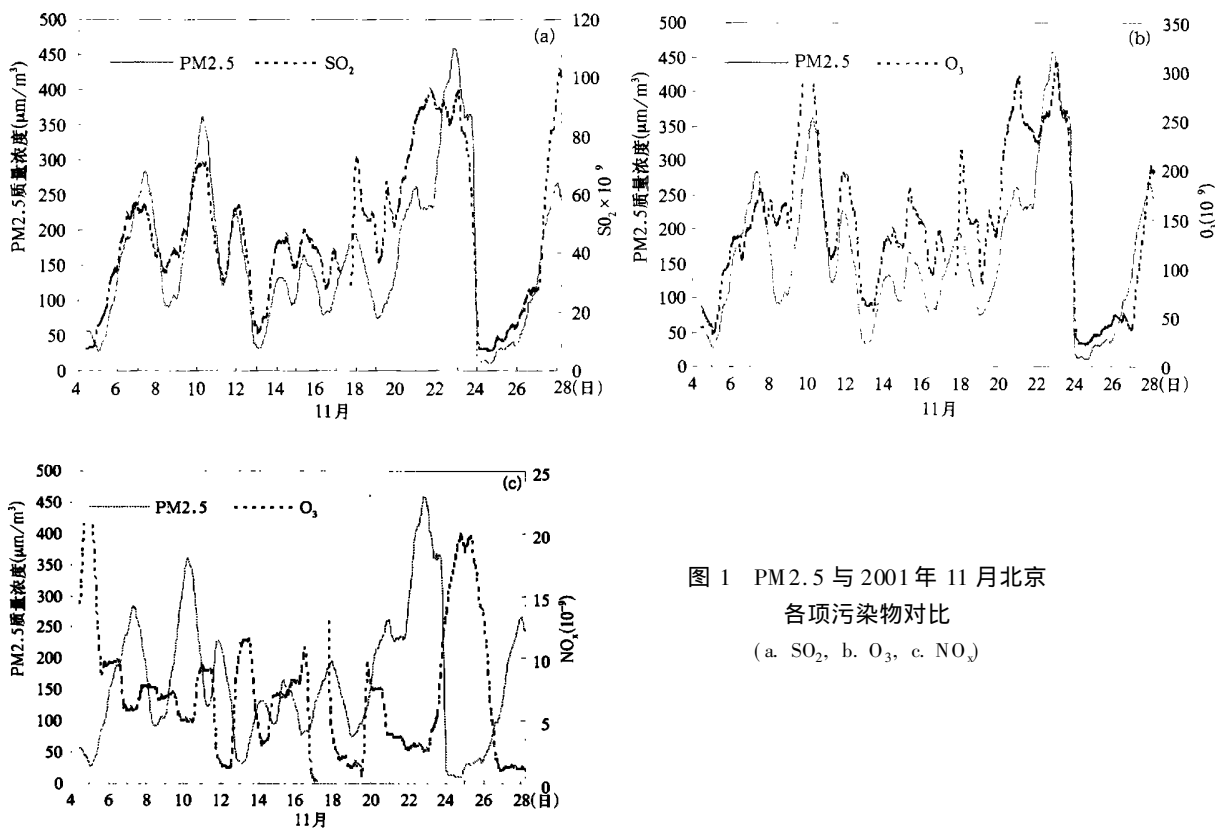


图1 PM2.5与2001年11月北京各项污染物对比  
(a. SO<sub>2</sub>, b. O<sub>3</sub>, c. NO<sub>x</sub>)

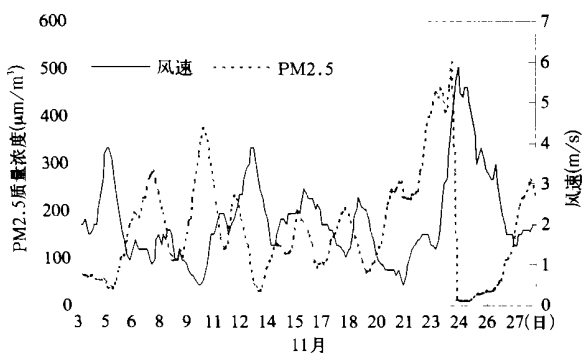


图2 2001年11月PM2.5与风速的对比

湍流扩散作用而减小。另外,本文分析PM2.5和前期风场相关,发现PM2.5和前期24h风速的负相关显著,为-0.64,达到0.001的信度检验,PM2.5与同期风速的相关为-0.44,可见观测时段中,前期至同期的风速对气溶胶的浓度均有显著影响。

污染浓度除了受风速的影响外,还受风向的影响。从图3看出,白石桥小区的PM2.5浓度变化和北京市区域空气污染指数API(Air Pollution Index)<sup>[17]</sup>演变特征相类似,因而在本次观测时段PM2.5浓度具有区域性代表性。白石桥小区的

PM<sub>2.5</sub> 浓度与北京南部的南北风分量大部分地区为正相关, 超过 0.01 的信度检验, 说明北京南部地区的风向为南风的气象条件与北京地区高污染浓度的关系密切。从 11 月的多次污染过程(11 月 6~7, 9~10, 20~23 日)的 1000 hPa 流场图(图 4)亦可看出, 北京地区及周边地区在污染日及污染日前期大部分处于西南或偏南气流中。北京的南部的太原、石家庄、济南等地都可能是影响北京地区的重要污染源。徐祥德等<sup>①</sup>分析 TOMS, MODIS 卫星遥感气溶胶区域性特征, 发现了北京城市污染过程与南部或东南部为主的周边城市排放源污染显著相关, 即北京周边向南开口的“马蹄型”地形可能导致南部周边城市排放源远距离输送的污染“滞留”或动力扩散

效应, 形成北京与南部周边地区污染源的“南—北向带状相关影响域”。因此观测时段中 PM<sub>2.5</sub> 浓度与风速和风向均有密切相关。

#### 4.2 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度与气压要素的相关性

王淑英等<sup>[18]</sup>指出, 北京地区 PM<sub>10</sub> 污染状况的略微变化与气象条件密切相关。其浓度的变化在稳定天气时与能见度、风速和气压呈反相关; 受风沙影响时, 其浓度的变化与风速和气压呈正相关。图 5 描述了 PM<sub>2.5</sub> 浓度与气压要素的时间演变特征, 两者的反相关特征很明显。11 月份气压和 PM<sub>2.5</sub> 的同期相关为 -0.68, 样本数为 199, 超过了 0.01 的信度检验。

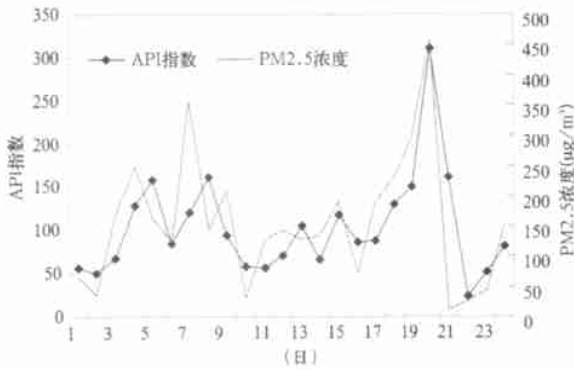


图 3 2001 年 11 月白石桥小区 PM<sub>2.5</sub> 浓度与北京地区 API 指数对比

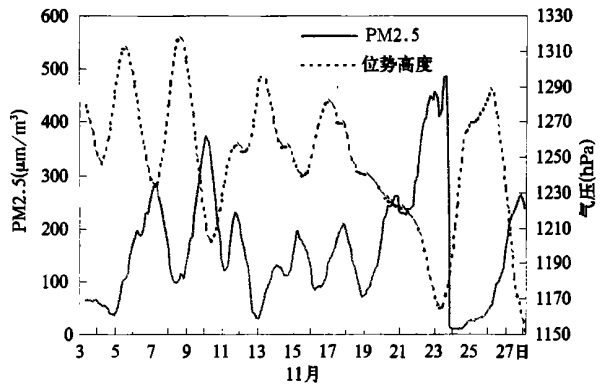


图 5 2001 年 11 月 PM<sub>2.5</sub> 和气压对比

分析 11 月的天气形势发现, 污染过程(11 月 6~7, 9~10, 21~23 日)均发生在高压后部或低压槽前部相对偏南的气流的环流背景过程中, 北京及周边地区边界层风场以偏南气流为主, 恰好使北京处于城市南部周边污染源的下风方, 又由于北京的西北及东北群山环绕的地形, 易造成污染, 因而在 2001 年 11 月的观测时段中气压的变化和 PM<sub>2.5</sub> 浓度在统计上呈显著的反相关关系。

### 5 气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度综合相关逐步回归模型

#### 5.1 气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子的气体污染物回归模型

分析本次采样期间 PM<sub>2.5</sub> 浓度与 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 的相关特征, 各自的相关系数分别为 0.83, 0.72 和 -0.41, 3 类气体污染物相关均超过 0.01 的信度检验。表明气体污染物与 PM<sub>2.5</sub> 浓度密切相关, 本

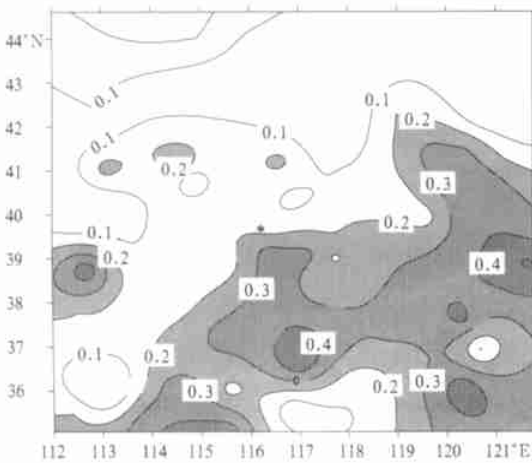


图 4 2001 年 11 月白石桥 PM<sub>2.5</sub> 浓度与周边地区南风分量相关 (阴影区为相关信度大于 0.01 的区域)

① 徐祥德, 周丽, 周秀骥等. BECAPEX 城市环境现场观测试验重污染过程周边源影响域及其外源扩散特征. 待发表.

文建立了逐步回归模型试图通过其他污染物拟合 PM<sub>2.5</sub> 浓度。自变量 NO<sub>x</sub>( $x_1$ ), SO<sub>2</sub>( $x_2$ ), O<sub>3</sub>( $x_3$ ), 变量长度为 2001 年 11 月 4 日 17 时至 11 月 28 日 14 时共 168 个样本, 并进行 8 点平滑, 建立 PM<sub>2.5</sub> ( $y$ ) 的多元回归方程。为了检验各个自变量对 PM<sub>2.5</sub> 的作用是否显著, 需要逐一对 3 个自变量进行检验。构造统计量<sup>[19]</sup>:

假设 H<sub>0</sub>:  $\beta_i = 0$  ( $i = 0, 1, 2 \dots m$ ) 时

$$F_i = \frac{b_i^2 / C_i}{Q(n-2)} \quad (1)$$

其中,  $C_i = \left[ \sum_{i=1}^n (x_{ii} - \bar{x}_i)^2 \right]^{-1}$ ,  $n$  为样本长度,  $m$  为自变量个数,  $Q$  为残差平方和,  $b_i$  为回归系数估计值。统计量  $F_i$  遵从分子自由度为 1, 分母自由度为  $n-2$  的  $F$  分布。若  $F_i > F_{\alpha}$ , 则拒绝原假设, 认为  $x_i$  在显著性水平  $\alpha$  上对  $y$  的作用是显著的。

根据式 (1) 计算可得,  $F_1 = 205.124$ ,  $F_2 = 18.7598$ , 当  $\alpha = 0.05$  时,  $F_{0.05}(1, 100) = 3.92$ 。可见,  $F_1, F_2$  均大于  $F_{0.05}$ , 因此认为, NO<sub>x</sub>( $x_1$ ), SO<sub>2</sub>( $x_2$ ) 对方程的作用是显著的, 其中 SO<sub>2</sub> 所占的权重大于 NO<sub>x</sub>, 而 O<sub>3</sub>( $x_3$ ) 对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响不显著。运用逐步回归方法, 从包含全部变量的回归方程中逐步剔除不显著的因子<sup>[20]</sup>, 最优回归方程为

$$y = -40.8685 + 1.1625x_1 + 2.2951x_2 \quad (2)$$

复相关系数  $R$  为 0.7291, 显著性检验  $F$  为 130.5285, 均方根误差为 33。当  $\alpha = 0.05$  时,  $F_{0.05}(2, 100) = 3.07$ ,  $F > F_{0.05}$ , 因此认为, 回归方程 (2) 在  $\alpha = 0.05$  显著性水平上具有显著性。

为了检验回归方程, 运用式 (2) 拟合了从 11 月 20~28 日的 68 个时次的 PM<sub>2.5</sub> 浓度, 从图中可见, 拟合效果不错。

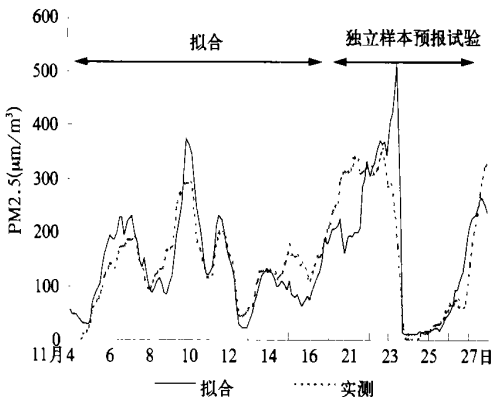


图 6 2001 年 11 月份白石桥小区 PM<sub>2.5</sub> 观测及气体污染物相关模型拟合、实测曲线

从逐步回归结果来看, 影响 PM<sub>2.5</sub> 的因子中权重较大的为 SO<sub>2</sub>, 其次为 NO<sub>x</sub>。从图 6 可见, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 等污染物建立的回归模型拟合 PM<sub>2.5</sub> 的效果较好, 模拟的趋势基本与 PM<sub>2.5</sub> 相似, 但在有些地方, 例如 23 日的值与实测偏差较大, 需要进一步增加统计样本和预测因子才能提高预报效果。采用独立样本估测检验, 即用同样的逐步回归方法建立的回归方程拟合 2001 年 9 月份的 PM<sub>2.5</sub> 的浓度可见, 逐步回归相关模型计算估测值和气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度观测实况的变化趋势很相似(图略)。证明用 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 等污染物通过该模型拟合的 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度具有一定的可信度, 基本能估算气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度的变化趋势。

### 5.2 PM<sub>2.5</sub> 与气象要素综合相关逐步回归模型

PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度与风速、气压、湿度和温度的相关系数分别为 -0.45, -0.68, 0.48 和 0.2, 样本长度为 2001 年 11 月 3 日 14 时至 11 月 15 日 23 时共 100 个样本, 均超过 0.05 的相关信度检验。由于气象条件与 PM<sub>2.5</sub> 有较好的相关关系, 本文采用逐步回归的方法建立了回归模型试图通过常规气象场拟合 PM<sub>2.5</sub>。自变量为风速( $x_1$ )、气压( $x_2$ )、气温( $x_3$ )、湿度( $x_4$ )。拟合对象  $y$  为 PM<sub>2.5</sub>, 用逐步回归建立模型, 拟合从 11 月 16 日 3 时至 11 月 28 日 14 时的 99 个时次的 PM<sub>2.5</sub>。通过回归分析可知,  $F_1 = 69.9074$ ,  $F_2 = 102.7002$ ,  $F_3 = 2.6207$ ,  $F_4 = 0.0089$ , 而  $F_{0.05}(1, 97) = 3.92$ 。  $F_1, F_2$  均大于  $F_{0.05}$ , 而  $F_3, F_4$  小于  $F_{0.05}$ 。因此认为, 风速( $x_1$ )、气压( $x_2$ ) 对 PM<sub>2.5</sub> 的作用是显著的, 气温( $x_3$ )、湿度( $x_4$ ) 是不显著的。模型的复相关系数  $R$  为 0.7165, 显著性检验  $F$  为 122.5772, 均方根误差为 34.8211。回归方程为:

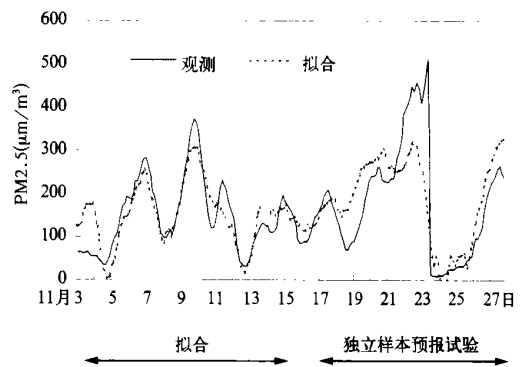


图 7 2001 年 11 月白石桥小区 PM<sub>2.5</sub> 分布及气象因子回归分析

$$y = 695.2881 - 56.3768x_1 - 1.6396x_2 \quad (2)$$

从回归分析也可以看出,影响因子中对 PM2.5 浓度影响最显著的是气压,其次是风速,两者与 PM2.5 的变化反相关。从本次采样样本分析看,由于采样时段、地理位置、气候背景的不同,PM2.5 与有些气象要素包括湿度的相关具有复杂性。由于影响 PM2.5 浓度的因子的多样和复杂性及观测时段的限制,有些拟合量与观测有偏差(例如 11 月 23 日),但从独立样本预报试验(图 7)总体效果看,拟合曲线和实况变化趋势相似,足以说明气象场与 PM2.5 浓度的密切关系和用气象因子建立模型拟合 PM2.5 浓度的可能性。

### 5.3 PM2.5 与北京周边站点 $u, v$ 的逐步回归模型

以北京东北(阜新、承德、赤峰)、北(围场、多伦、丰宁)、西北(张家口、集宁、怀来)、西(蔚县、大同)、西南(石家庄、保定、太原)、南(济南、廊坊)、东南(天津、塘沽、潍坊)、东(大连、唐山、秦皇岛)及北京的南风 and 西风分量为自变量,PM2.5 浓度为因变量建立回归方程,经逐步筛选所得方程如下:

$$y = 193.9853 + 10.742x_{25} + 12.8656x_{26} + 14.3815x_{27} + 9.6823x_{33} + 9.4065x_{38}$$

这些筛选出的对 PM2.5 影响较显著的站点是  $x_{25}$

(济南南风)、 $x_{26}$ (济南西风)、 $x_{27}$ (石家庄南风)、 $x_{33}$ (大连西风)、 $x_{38}$ (潍坊南风),分别位于北京的南、西南、东南和东部,模型的显著性检验  $F$  为 31.3238,复相关系数为 0.4781,均方根误差为 73.03,方程的显著性检验超过了  $F_{0.05}(1, 170) = 2.29$  的显著性水平。

为了分析北京周边的前期风场对北京地区的影响,以周边站点风场为自变量,PM2.5 滞后 6 h 为因变量,建立的回归方程为:

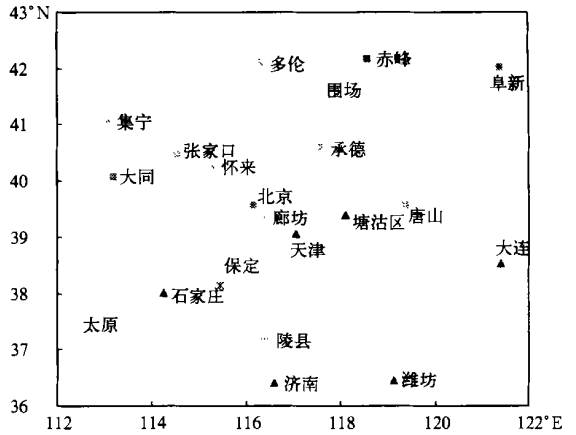


图 8 北京周边站点分布  
(三角形站点表示经逐步回归筛选的风场对白石桥小区 PM2.5 影响较显著的站点)

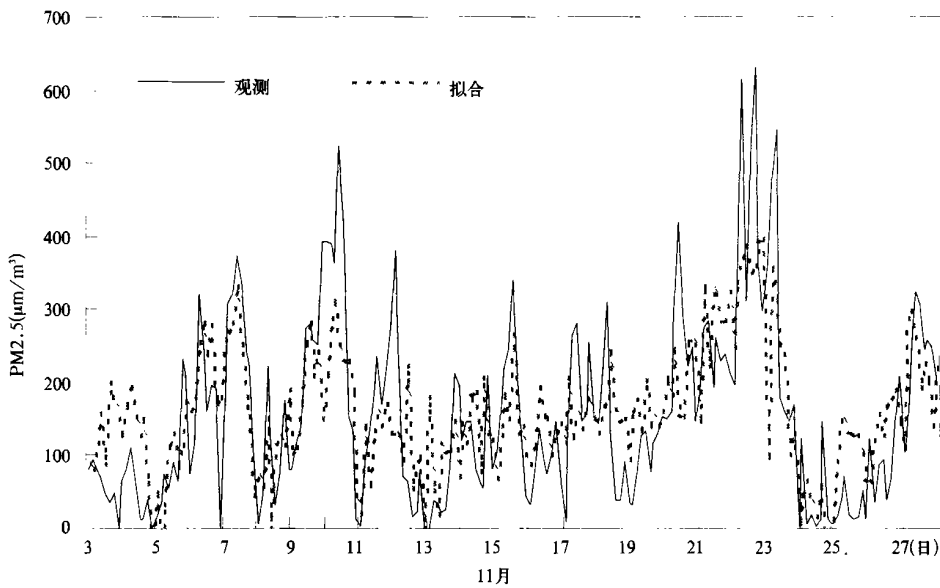


图 9 北京周边站点的南风分量和西风分量(超前 6 h)与北京地区 PM2.5 浓度的回归拟合

$$y = 214.4712 + 27.5285x_{20} + 11.4216x_{25} + 16.9710x_{27} + 24.4092x_{31} + 19.4520x_{32} +$$

$$7.7618x_{33}$$

其中影响最显著的是  $x_{20}$ (石家庄南风)、 $x_{32}$ (唐山

西风),其次是  $x_{31}$ (唐山西风)、 $x_{27}$ (天津南风)、 $x_{33}$ (大连西风),这些站点位于北京的东、东南和西南,与前面分析的相关结论相类似,这表明北京周边排放源的显著影响域主要位于北京城市东-东南-西南象限。从拟合效果(图8)看,只用北京周边的  $u$ ,  $v$  分量为自变量,而大致能拟合 PM<sub>2.5</sub> 的趋势,在适当气象背景下控制北京周边南部、东部和西南部污染排放源将有利于北京地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的减弱。

## 6 结 论

本文利用北京白石桥小区的污染物观测资料和北京地区的气象常规资料,以 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、风、温、压、湿为自变量,对 PM<sub>2.5</sub> 多元回归分析,建立了两类回归模型:

(1) 初步研究了 PM<sub>2.5</sub> 与 3 类大气污染物浓度相关模型,并通过统计分析,提示了污染物中对 PM<sub>2.5</sub> 影响最显著的是 SO<sub>2</sub>,其次是 NO<sub>x</sub>。由这两

个量 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 基本能拟合 PM<sub>2.5</sub> 的变化。

(2) 初步建立了 PM<sub>2.5</sub> 与气象因素的相关模型,并经过独立样本检验,统计相关模型揭示出观测时段的气象条件中对 PM<sub>2.5</sub> 的影响最显著的是气压和风速要素,上述相关性反映了 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度的变化与大气动力结构及其近地层风场扩散能力密切相关。用风速和气压可以较好地预报出 PM<sub>2.5</sub> 的趋势。

(3) 本文初步研究的上述 PM<sub>2.5</sub> 的两类相关模型,描述了 PM<sub>2.5</sub> 粒子浓度的变化与大气污染物浓度及其大气动力结构(气象因子)时空变化具有不同程度的相关关系,本文的相关模型及其研究结论为大气污染预测模型及其观测系统设计提供了科学依据。

(4) 北京地区周边西南、南、东南和东部的同期及前期的排放源对北京地区的污染物浓度可能存在显著影响。

## 参考文献

- 1 Haagen Smit A J. Chemistry and physiology of los angeles smog. *Indust Eng Chem*, 1952, 44 : 1342~ 1346
- 2 Finlayson B J, Pitts J N. Photochemistry of the polluted troposphere. *Science*, 1976, 192 : 111~ 119
- 3 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题. *气候与环境研究*, 2001, 6(1): 119~ 124
- 4 王明星. 大气化学. 北京: 气象出版社, 1999. 467pp
- 5 丁国安, 纪湘明等. 庐山云雾水化学组分的某些特征. *气象学报*, 1991, 49(2): 190~ 197
- 6 李宗恺, 潘云仙, 孙润桥. 空气污染气象学原理及应用. 北京: 气象出版社, 1985. 122pp
- 7 徐祥德. 城市化环境大气污染模型动力学问题. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 1~ 12
- 8 陈辉, 胡非, 任丽红等. 北京冬季二氧化硫污染和气象条件的关系. *气候与环境研究*, 2000, 5(3): 287~ 295
- 9 刘小红, 洪钟祥等. 北京地区严重大气污染的气象和化学因子. *气候与环境研究*, 1999, 4(3): 231~ 236
- 10 桑建国, 刘万军. 冬季城市边界层风场和温度场结构分析. *气象学报*, 1990, 48(4): 459~ 468
- 11 徐祥德, 汤绪等. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 284pp
- 12 徐祥德, 丁国安, 周丽等. 北京地区冬季大气污染动力-化学过程区域性三维结构特征. *科学通报*, 2003, 48(1): 1~ 6
- 13 Oke T R. The surface energy budgets of urban areas. In: *Modeling the Urban Boundary Layer*. Boston: Amer Meteor Soc, 1987. 1~ 52
- 14 Anna S R, Ramsdell J V, Cramer H E. Urban Gaussian diffusion parameters. In: *Modeling the Urban Boundary Layer*. Boston: Amer Meteor Soc, 1987. 337~ 379
- 15 杨东贞, 于海青等. 北京地区冬季低空大气气溶胶分析. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 113~ 126
- 16 杨军, 朱彬, 李子华, 泽当, 景洪大气气溶胶粒子的物理、化学特性. *气象学报*, 2001, 59(6): 795~ 802
- 17 国家环保总局. <http://www.zhb.gov.cn>
- 18 王淑英, 张小玲. 北京地区 PM<sub>10</sub> 污染的气象特征. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 177~ 184
- 19 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 187pp
- 20 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 1990. 84~ 86

## THE CORRELATION FACTORS AND POLLUTION FORECAST MODEL FOR PM<sub>2.5</sub> CONCENTRATION IN BEIJING AREA

Zhou Li

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044; Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081*)

Xu Xiangde Ding Guoan Miao Qiuju Wei Fengying

(*Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081*)

### Abstract

The meteorological influencing factors on pollutions are analyzed by means of pollution data observed in Baishiqiao(Beijing) and meteorological data in Beijing ambient areas. The relationship between PM<sub>2.5</sub> concentration and air pollutants are explored in terms of successive regression method. The same method is used to investigate the relationship between PM<sub>2.5</sub> concentration and meteorological factors. Positive correlation exists in PM<sub>2.5</sub> and SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and negative correlation exists in PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub>. The analysis results indicate that SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> concentration basically fit the variety of PM<sub>2.5</sub> concentration. The relationship between PM<sub>2.5</sub> and air pollutants indicates regional pollution characteristics in Beijing area.

In addition, notable correlation exists in PM<sub>2.5</sub> in Beijing and wind in southern Beijing areas. The different selection of meteorological factors in successive regression method indicate the transportation of pollutants and diffusion of pollution source in different areas. According to the analysis of weather situation, the heavy pollution in Beijing happened in the rear of high pressure or in the front of low pressure. In these periods, southerlies are strong in Beijing and ambient areas. That means Beijing and ambient areas just located downwind of pollution sources in the southern of Beijing. Moreover, the high mountains are located to the western, northern and eastern of the Beijing and plain are located to the southern of Beijing, on which the heavy pollution sources are situated. Terrain and distribution of pollution sources make the relationship between air pressure and PM<sub>2.5</sub> in Beijing. Wind and air pressure basically fit the diversification of PM<sub>2.5</sub> using successive regression method.

**Key words:** Aerosol, PM<sub>2.5</sub>, Successive regression model, Fitting.