

北京市采暖期可吸入颗粒物时空分布特征及源追踪

赵文慧^{1, 2}, 赵文吉^{1, *}, 宫辉力¹, 宫兆宁¹

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048)

摘要: 可吸入颗粒物是北京市大气主要污染物之一, 春秋两季的沙尘天气除部分是由于受到区域气流的影响外, 多数情况下是原地污染造成, 尤其是冬季采暖期。本文通过遥感技术和地面监测结合的方法, 研究采暖期北京市近地面不同粒径可吸入颗粒物时空分布规律及其与影响因素间的相互关系。应用高分辨率遥感影像分析下垫面的变化, 应用地面观测仪器收集不同粒径颗粒物的含量, 并分析颗粒物的化学组成; 应用地理信息系统的空间分析技术, 研究颗粒物的分布与下垫面的关系。研究表明, 可吸入颗粒物污染分布和下垫面介质、人为污染源、人口密度、气象因素有非常密切的关系。

关键词: 可吸入颗粒物; 时空分布; 源分析

文章编号: 1000-0585(2012)03-0417-12

1 前言

北京作为中国的首都, 是一个拥有 1000 多万人口的综合性特大城市。伴随国民经济持续、快速、健康地发展的同时, 城市规模不断扩大, 城市楼房向群落化、高层化发展, 以沥青和水泥为主体的城市道路向高架、高速、“宽带”化发展。与此同时, 各种机动车辆的增多以及冬季取暖、建筑工地以及周边季节性土地裸露等因素, 使得北京的城市空气质量阶段性恶化, 1999~2006 的北京市环境状况公报表明, 可吸入颗粒物成为首要污染物的天数在逐年增长, 并超过国家二级标准。可吸入颗粒物作为北京市环境空气首要的污染物, 加强可吸入颗粒物污染控制, 对实现北京市环境空气质量根本好转尤为重要。

对细颗粒物的研究越来越得到人们的重视。国外许多国家在这方面的工作开展的较早。美国对可吸入颗粒物的研究始于上世纪八十年代初, 并且于 1985 年美国国家环保局将原颗粒物指示物总悬浮颗粒物 (TSP) 项目修改为 PM_{10} ^[1]。欧美其他国家也在 $PM_{2.5}$ 研究方面做了大量的工作。我国在这方面起步比较晚。大量研究表明, 城市可吸入颗粒物的数量与市民各种慢性病发病率、癌症及其死亡率有很强的相关性; 可吸入颗粒物对阳光具有较强的选择性和散射性, 其长期漂浮在大气中, 能够改变当地气候。可吸入颗粒物已成为我国城市最为重要的大气污染物。到目前为止, 对 $PM_{2.5}$ 的观测手段相对缺乏, 数据

收稿日期: 2011-04-13; 修订日期: 2011-10-15

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目 (KZ200910028006)

作者简介: 赵文慧 (1982-), 女, 博士, 主要从事遥感与 GIS 在资源环境等领域的应用研究。

E-mail: zhwenhui99@gmail.com.

通讯作者: 赵文吉 (1967-), 男, 河南人, 教授, 博士生导师, 主要从事城市环境遥感研究。

E-mail: zhwenji1215@163.com

系统性较差,已有的观测结果表明,我国大部份地区细粒子污染较重。北京地区较中国其他地区而言在 $PM_{2.5}$ 研究方面开展的相对较早,所做的工作也较多。

赵越等^[2]研究发现,北京近郊区南部和西南部 PM_{10} 浓度最高,东部次之,城区也较高,北部和东北部较低, PM_{10} 浓度由北至南逐步加重;程承旗等^[3]通过对空气总悬浮颗粒物来源和分布影响的因子分析,将地表覆盖情况因子,降雨强度和风速因子建立了空气总悬浮颗粒物遥感信息模型。该模型较好的模拟了空气总悬浮颗粒物的分布,为空气总悬浮颗粒物浓度的分布研究提出一种新思路;段菁春等^[4]通过监测北京市冬季远郊区(密云)、交通道路(北四环)和生活区(清华大学)大气细颗粒物(FPs)和超细颗粒物(UFPs)的数浓度,对 FPs 和 UFPs 数浓度的粒径分布特征和来源进行了研究;陈媛等^[5]研究了北京市区大气气溶胶中细粒子的污染特征,分析其质量浓度变化与各种自然影响因素的相关性,结果表明温度、相对湿度、风速、降水和气压等是影响 $PM_{2.5}$ 污染程度的重要因素;袁杨森等^[6]于 2005 年秋季在北京市设立了 9 个采样点进行采样监测,研究表明,即使是同一地点同一采样时间, $PM_{2.5}$ 质量浓度的空间分布也不完全同于 PM_{10} ;Tao Tang 等^[7]对北京市居民人口与可吸入颗粒物浓度进行了相关分析,研究发现冬季 $PM_{0.3}$ 浓度与西南部、中西部地区的高密度人口社区有很强的相关性,时空模型分析表明 $0.3\mu m$ 的粒子可能有不同的污染来源;王伟武等^[8]研究表明引入克立格内插方法和地理图层空间相关分析方法对城市空气污染的程度估计和影响因子的相关评价,能够更为客观地反应城市空气污染水平与受其他影响因子影响程度的空间分布的差异性与相关性。

借鉴以上研究,本文通过对采暖期北京市空气中可吸入颗粒物污染浓度进行采样分析,给出不同时期不同粒径的颗粒物污染浓度空间分布规律与影响因子的相关性,使环境管理部门做到有的放矢,有针对性地对各类污染源进行治理,使北京市环境空气质量实现根本好转,对实现北京市污染物总量控制目标,维护环保模范城市形象具有重要的意义。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

北京市地形特殊,西、北、东北三面环山,东南面向海,造成气候的局地性特征明显。受中一大尺度过程作用下,北京城市的大气环流特征表现得与大区域完全一致,而当大尺度系统趋于稳定时,边界层下层必然出现局地中尺度山谷风流场系统^[9,10]。此时,北京城市的污染会往复搬运,容易对背景点污染浓度产生贡献。所以,北京市的大气环境背景和中尺度、系统性天气过程有着紧密的联系^[11]。研究区位及采样点分布见图 1。

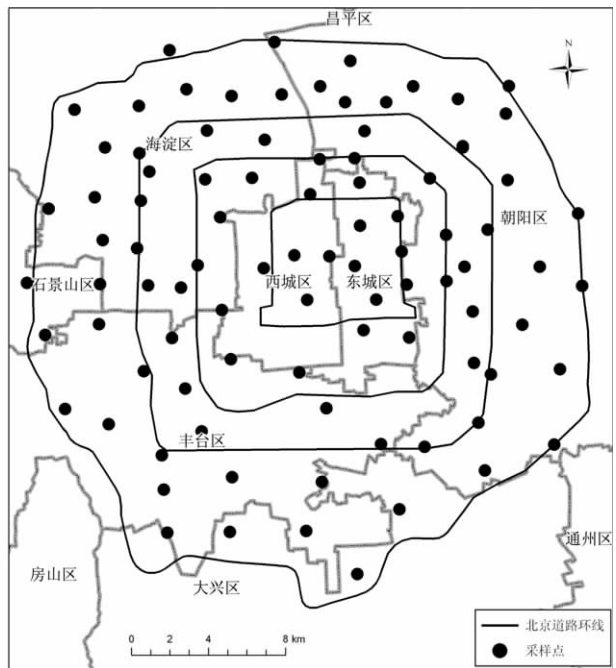


图 1 研究区范围示意图

Fig. 1 Location of the study area

2.2 数据采样方法

于 2007 年、2008 年、2009 年采暖期（12 月 4 日～12 月 14 日），采用美国 KANO-MAX 手持激光粒子计数器（3886GEOX）和 Trimble GPS 手持机仪器对空气中的颗粒物进行了采样观测，布设监测点 93 个（有效点为 90 个）（图 1），采样时段为：早晨八点至下午六点，为保证数据的可比性，每年采样点顺序及采样时间均保证一致（偶然堵车除外）。分别获取不同粒径（ $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ 、 $3.0\mu\text{m}$ 、 $5.0\mu\text{m}$ ）的颗粒物浓度、即时的气象因子数据（温度、相对湿度和风速）与采样点的点位坐标。为使数据具有代表性，采样点布置在北京市主城区内不同的下垫面上，空间分布遵循广泛性、均匀性、规律性的原则。同时在典型下垫面上选取 10 个样品点，采用美国 IMPROVE 仪器，每个样点的取样时间为 8 小时，将采样得到的粉尘滤膜样品送至中国科学院海洋研究所海洋地球化学实验室进行 ICP-MS 分析报告。

其他数据有：

- （1）北京市环保公众网提供的市环境空气质量数据 API（2004～2009）；
- （2）北京市城八区街区图以及城八区行政边界底图；
- （3）其他有关北京市生态环境的图件、数据、文字等资料；
- （4）北京市各区行政区划图（1：1 万）。

2.3 研究方法

（1）对于采样数据，在水平尺度上，利用当年采暖期的数据，按照不同下垫面类型进行归类统计，分析北京城区五环路内不同下垫面的可吸入颗粒物分布情况；对颗粒物浓度的时空分布规律进行分析；

（2）尝试将地统计学中普通克里格方法模拟北京市五环内空气污染物的空间分布特征（表 1），以探索城区空气污染物的空间分布特征和产生规律，利用多因子分析方法定量分析北京五环内城市区域空气污染物及与其影响因子的空间相关性，从而揭示了空气中颗粒物污染的主要影响机理，并提出相应的减缓策略；

表 1 可吸入颗粒物浓度克里格空间插值预测误差

Tab 1 Prediction errors by Kriging with IPM concentration

采暖期	均方根预测误差	平均标准误差	标准平均值	标准均方根预测误差
PM _{0.3}	104500	113800	0.01077	0.94730
PM _{0.5}	115000	128400	0.00323	0.94080
PM _{1.0}	55610	65070	0.00640	0.90220
PM _{3.0}	7491	8362	0.01900	0.91990
PM _{5.0}	1539	1616	0.02891	0.95670

（3）根据滤膜采样的粉尘分析结果，分析颗粒物的来源。

2.4 数据处理

颗粒物浓度数据的处理：对获取的具有空间坐标的监测数据转换成具有北京 54 坐标系的 shp 文件。在 ArcGIS 软件的 Geostatistics Analyst 中，导入 shp 格式文件，建立分析数据。利用软件中 Geostatistics 模块分别对各测点不同粒径颗粒物污染数据进行半方差分析、空间变异函数分析，并归纳不同粒径颗粒物的空间分布图，以栅格形式存储。

判断半方差函数模型及其参数是否合适,可按以下标准综合进行:平均误差(ME)的绝对值最接近于0;标准化平均误差(MSE)最接近于0;均方根误差(RMSE)越小越好;平均标准误差(ASE)与均方根误差(RMSE)最接近,如果 $ASE > RMSE$ 则高估了预测值,反之,如果 $ASE < RMSE$ 则低估了预测值;标准化均方根误差(RMSSE)最接近于1,如果 $RMSSE < 1$,则高估了预测值,反之如果 $RMSSE > 1$,则低估了预测值^[12]。分析表1可以看出,采暖期的原始数据进行Kolmogorov-Smirnov(K-S)正态分布检验的概率(Pk-S)后均符合Kriging插值要求,可以进行插值预测。

3 结果分析

3.1 颗粒物污染浓度季节空间分布规律

从图2可看出,采暖期时绿地和裸地对 $PM_{0.3}$ 的颗粒物浓度贡献比较大,道路的贡献最小,其余四种粒径的颗粒物浓度受不同下垫面的影响比较相近,下垫面为建筑工地和道路对颗粒物浓度的贡献较大,其中建筑工地对 $PM_{3.0}$ 的贡献最大。统计结果更进一步表明,细颗粒物浓度数量级要远大于粗颗粒物浓度。对于在采暖期野外采样得到的90个点,将每个点对应的不同粒径颗粒物浓度进行统计成图,由图2可看出在五种不同粒径中, $0.3\mu m$ 粒径的粒子浓度最大,依颗粒物粒径从小到大,污染物浓度依次减少。但在不同下垫面中,可以看到建筑工地的四种粒径的污染浓度都是最大的,而最小粒径为 $0.3\mu m$ 的在建筑工地中则不是十分突出,其次是工业区的浓度,也略高于其他下垫面对应浓度。

3.2 不同粒径的颗粒物分布分析

对于测量数据,按照不同下垫面类型进行归类统计,分析北京市五环内城市典型下垫面的空气颗粒物分布情况。

因细粒径与粗粒径的颗粒物浓度数量级上相差较大,故将 $PM_{0.3}$ 、 $PM_{0.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 放在一起讨论,将 $PM_{3.0}$ 、 $PM_{5.0}$ 放在一起讨论。

从图3可以看出,采暖期时,细粒径粒子浓度所占比例上升而粗粒径粒子浓度所占比例下降。所有下垫面对应的采暖期不同粒径的颗粒物污染浓度差异很大, $PM_{0.3}$ 、 $PM_{0.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 比 $PM_{3.0}$ 、 $PM_{5.0}$ 浓度高出2个数量级。建筑用地和工业区相对浓度要高于其他下垫面浓度,这可能与工业区和建筑用地中包含了较多的裸地有关。所有下垫面对应的粒径为 $0.3\mu m$ 的浓度相差不大,只是工业区和交通用地中相对其他功能区的稍高一些,而对应于粒径为 $0.5\mu m$ 和 $1.0\mu m$ 的下垫面浓度则相对于 $0.3\mu m$ 的浓度并不显著。总体来看,所有下垫面对应的细粒径的颗粒物浓度相差并不显著。只有 $PM_{0.3}$ 浓度要显著高于其他两种粒径。

由图3、图4可以清楚看出,建筑用地中两种粒径 $PM_{3.0}$ 、 $PM_{5.0}$ 的浓度要显著高于其他下垫面。这很可能与建筑用地中较频繁的人为活动以及堆积的沙土有关系。工业区中有一个次高浓度。在所有下垫面中,交通用地的粒子浓度最低,这种现象的可能是由于车辆行驶过程中,对于较大粒径的粒子的贡献率较低,从而推断汽车尾气排放所带来的颗粒物污染主要集中在细粒径颗粒物上。城市中的高大建筑物,体型大的建筑物或构筑物,能使气流在小范围内产生涡流,阻碍气态污染物质迅速排走扩散,致使污染物停滞在某一地段内,加重污染。

3.3 颗粒物浓度空间分布规律分析

对各测点不同粒径颗粒物污染数据进行半方差分析、空间变异函数分析,分析并归纳

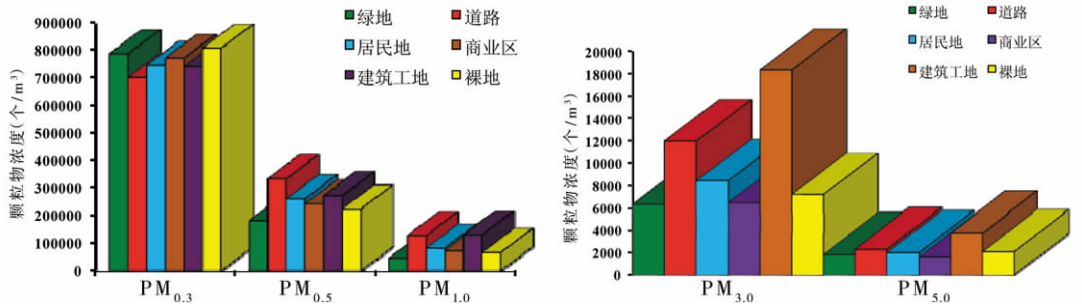


图2 采暖期颗粒物浓度统计

Fig. 2 Statistical values of IPM in heating season

不同粒径颗粒物的空间分布图，以栅格形式存储。各点的原始数据进行 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 正态分布检验的概率 (P_{k-S}) 符合 Kriging 插值要求。在 ArcGIS 中 Geostatistical Analyst 模块中分别对各测点不同粒径颗粒物污染数据进行半方差分析、空间变异函数分析，分析并归纳不同粒径颗粒物的空间分布图，以栅格形式存储。获取的 Kriging 分析结果如图 5。

从克里格预测结果来看，粗细粒径的空间污染分布规律和特征大致相同，但分布范围却有所差异，主要表现在：2007 年 $PM_{0.3}$ 的浓度高值区分布在西南部，而冬季干燥多风的条件，更加重了细颗粒物的污染，东部区污染相对较弱，至 2008 年和 2009 年，细粒径的污染重心转移到了东南部以及城区中心； $PM_{0.5}$ 、 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{3.0}$ 和 $PM_{5.0}$ 的浓度分布较为相似，2007 年高值区都集中在东北五环附近，西北和东南部则为低值区，至 2008~2009 年，污染重心由东北部转移至西南部。 $PM_{0.5}$ 颗粒物浓度污染面积相对较大，高浓度区占了研究区的近 3/4，这与此处有建筑工地以及堆积的沙土有很大关系。2007 年 $PM_{5.0}$ 的次高点落在北五环，这是因为附近有在建的奥运体育馆和奥运森林公园，同时附近的交通较为拥堵，车辆多，排量大，导致颗粒物的污染较为严重。

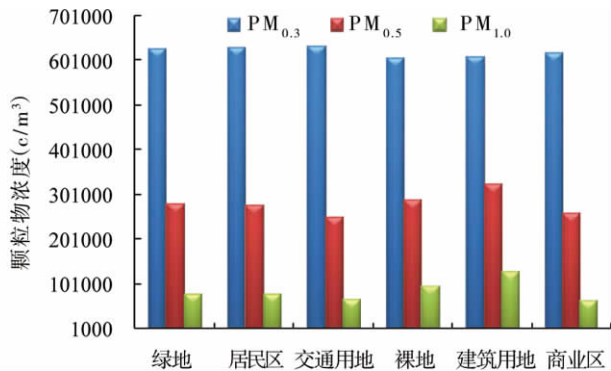


图3 细粒径颗粒在不同下垫面的污染浓度

Fig. 3 Concentration of fine particle on different underlying surfaces

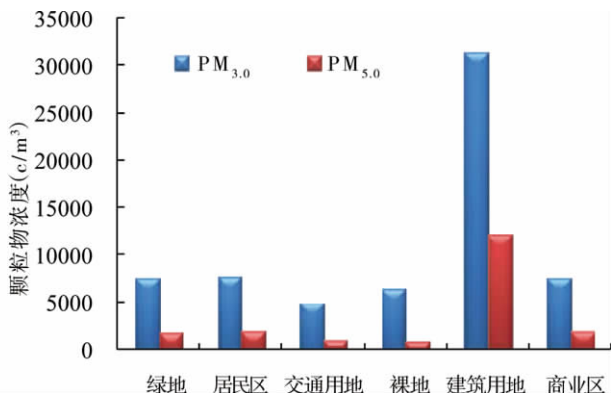


图4 粗粒径颗粒在不同下垫面的污染浓度

Fig. 4 Concentration of coarse particle on different underlying surfaces

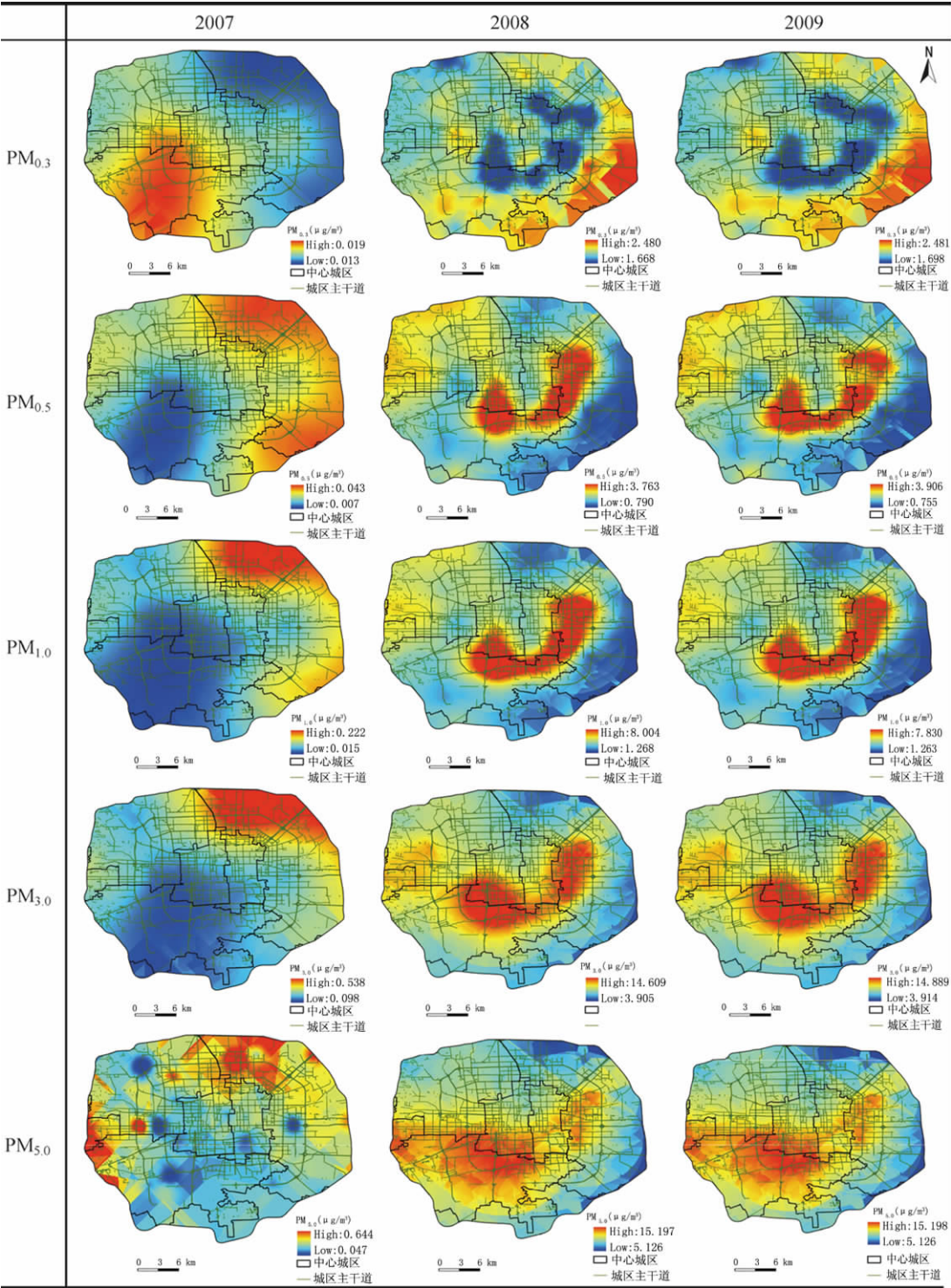


图 5 采暖期可吸入颗粒物空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of IPM in heating season

根据分析，以上污染分布主要是由污染源以及下垫面性质引起的。除了高热量和高能量的工业区由于其烟囱散发的污染物外，由于市区内建筑工地较少，公园绿地水面的面积相对较大，故颗粒物污染相对较弱；而南北五环因为有大片的建筑工地（包括奥运场馆），都间接导致了颗粒物污染浓度的增高。

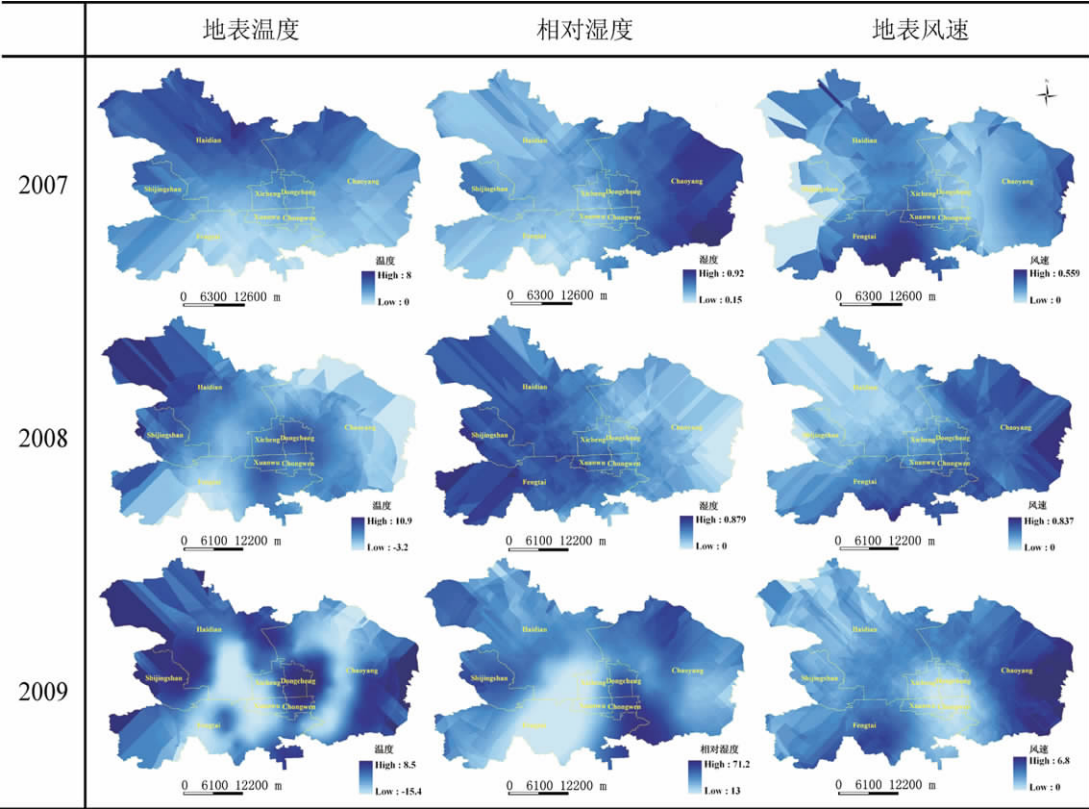


图 6 采暖期气象因子空间分布图

Fig 6 Spatial distribution of meteorological factors in heating season

从图中可见，粒径为 $0.3\mu\text{m}$ 的空间分布与其他四种粒径不同，但由于细微颗粒物的产生、传输、扩散和化学衰变过程是一个非常复杂的过程，可能是自然源或者人为源，也有可能是一次颗粒或气粒转换的二次颗粒，故 $\text{PM}_{0.3}$ 的空间分布特征还需进一步研究。

综合图 5 和图 6，可以看到湿度的预测走势与 $\text{PM}_{0.5}$ 、 $\text{PM}_{1.0}$ 、 $\text{PM}_{3.0}$ 和 $\text{PM}_{5.0}$ 的大致相符，随着湿度的增

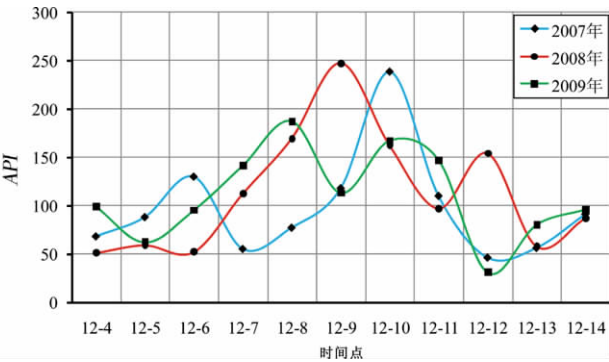


图 7 2007~2009 采样时间段对应的 API 值

Fig. 7 API values in sampling period during 2007~2009

大, 颗粒物浓度也随之增大; 而温度的分布与 $PM_{0.3}$ 的分布较为相似, 而温度与其余四种粒子浓度则呈反向趋势, 随着温度的升高, 粒子浓度则是相对减弱。风速的克里格预测图与粒径浓度预测也能很好的说明在风速大的地方, 粒径浓度也相对较低, 而在风速低的地方, 污染程度相对较低。

为了解环境背景值与不同颗粒物的相关性, 根据北京市环保公众网提供的数据提取每年采样时间段的 API 值 (空气污染指数) (图 7)。从图 7 可以看到, 采暖时间段内, 每日的首要污染物均为可吸入颗粒物; 采样时间段内虽气象条件较为平稳, 但污染程度依然有较大起伏; 2009 年的 API 值较前两年来看整体呈下降趋势, 与本次研究分析结果基本一致。

3.4 颗粒物浓度与影响因子的相关性综合分析

为了进一步量化空气颗粒物污染浓度与环境影响因子之间的关系, 本文将城区五环内各监测点与气象因子做了相关性分析^[13]。将统计好的数据进行相关性计算, 得到不同粒径颗粒物浓度与三个气象因子的相关矩阵:

分析表 2 可以看出, 五组不同粒径的粒子浓度, $PM_{0.3}$ 的与其他四组均为负相关, 其中与 $PM_{1.0}$ 负相关最大; $PM_{0.5}$ 与其他四组都是正相关, 与 $PM_{1.0}$ 最大, 达到 0.968, 这也很好的解释了在进行克里格预测时, $PM_{0.5}$ 与 $PM_{1.0}$ 的走势非常相近; 在粗粒径方面, $PM_{3.0}$ 和 $PM_{5.0}$ 的相关性高达 0.998, 二者的克里格插值结果也很相似。

表 2 颗粒物浓度与气象因子的相关矩阵 ($n=90$)

Tah 2 Correlation matrix of IPM concentration and meteorological factors ($n=90$)

	$PM_{0.3}$	$PM_{0.5}$	$PM_{1.0}$	$PM_{3.0}$	$PM_{5.0}$	温度/℃	湿度/%	风速 m/s
$PM_{0.3}$	1							
$PM_{0.5}$	-0.472	1						
$PM_{1.0}$	-0.597	0.968	1					
$PM_{3.0}$	-0.432	0.850	0.865	1				
$PM_{5.0}$	-0.407	0.825	0.843	0.998	1			
温度 (℃)	0.322	-0.585	-0.658	-0.317	-0.302	1		
湿度 (%)	-0.377	0.609	0.662	0.295	0.277	-0.902	1	
风速 (m/s)	0.245	-0.527	-0.369	-0.396	-0.365	-0.057	0.116	1

从气象因子与不同粒径浓度的相关性方面分析, 温度除了对 $PM_{0.3}$ 的相关性为正外, 其他四组粒子浓度都为负相关, 其中与 $PM_{1.0}$ 的负相关指数最大, 为 -0.658; $PM_{0.3}$ 与湿度的相关性为负值, 其他四组粒子浓度均为正相关, $PM_{0.5}$ 与湿度相关性最高, 为 0.609, 粗粒径的粒子浓度与湿度的相关性不是很显著; 风速对 $PM_{0.3}$ 的相关性为正, 其他四组都为负相关。

要解释风速、温度和相对湿度与可吸入颗粒物浓度相关性的差异, 需要具体分析气象因素对颗粒物的影响。此次研究中由于篇幅有限, 故只分析 $PM_{0.3}$ 和 $PM_{3.0}$ (图 8)。风速和垂直温度梯度主要影响大气的水平扩散和垂直对流。当风速较大时, 大气流动加强, 扩散加快, 可以有效减小污染物浓度; 而静风或风速小时, 大气水平流动能力减弱, 大气污染物容易聚积^[14], 在本文中, 风的扩散作用占主导, 与大气污染物浓度呈负相关, 但对于细微粒径为 $0.3\mu m$ 的颗粒物浓度则为积聚效应, 风卷起的地面细小扬尘增大了其浓度。温度主要对大气垂直对流产生影响。温度较高时, 大气垂直对流作用加剧, 有利于大气扩散, 因而一般与污染物浓度呈负相关^[15]。相对湿度增大利于颗粒物粒径增大并在空气中

滞留（若不发生沉降），与污染物浓度往往呈正相关^[16]。

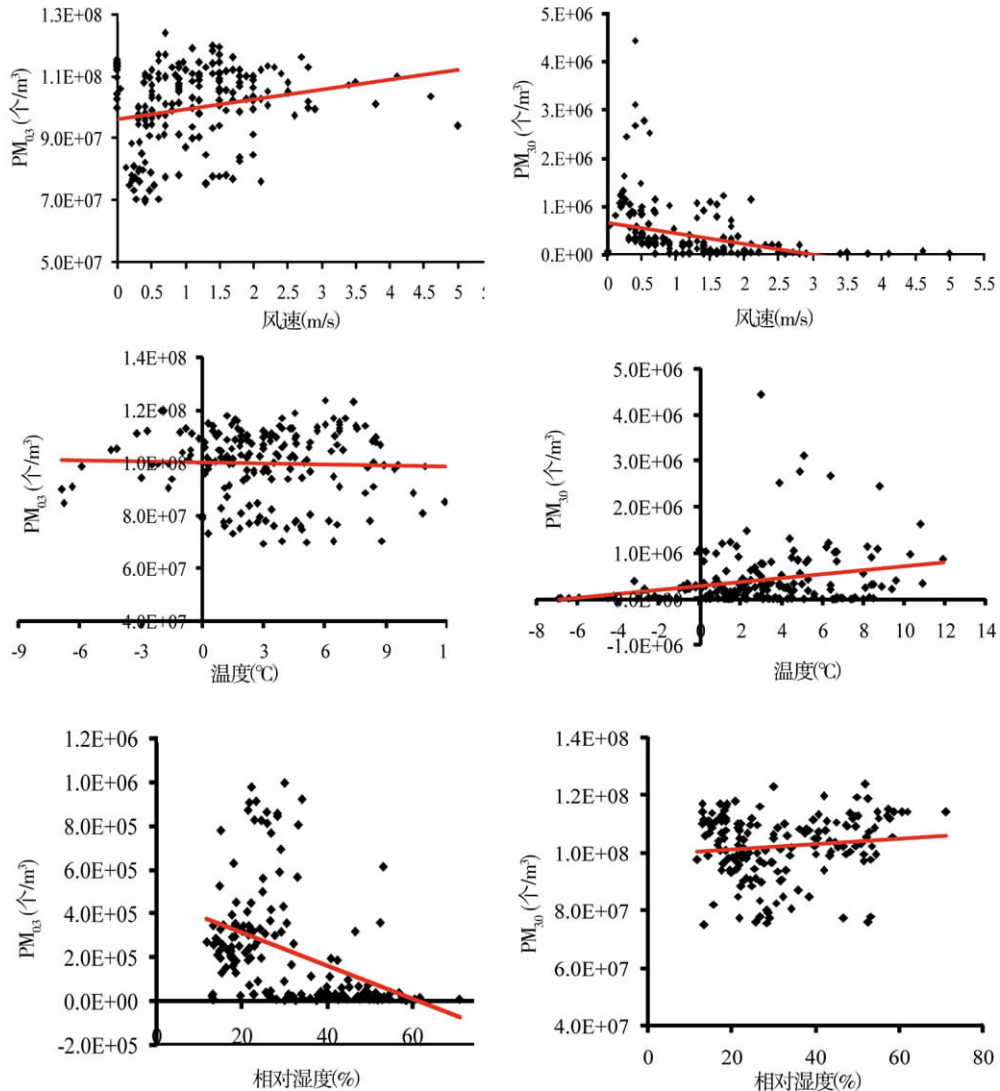


图 8 气象因子与不同粒径颗粒物浓度散点图

Fig 8 Scatter chart between meteorological factors and IPM concentration

3.5 颗粒物污染的来源及元素的初步分析

由于大气颗粒物的来源复杂，影响因素很多，它既来自固定排放源又来自无组织排放，既受人群活动的影响又受到风速、空气湿度及地面植被程度等诸多因素的制约。北京市颗粒物的成分复杂，其来源也复杂，正确判断颗粒物中组分的来源，对治理空气污染有着重要的意义。

将采样得到的滤膜样品送到中国科学院海洋研究所海洋地球化学实验室进行 ICP-MS 分析报告。常量元素测试仪器为美国热电公司 ICP-AES，型号为 IRIS；微量元素与稀土元素测试的仪器为其实验室 ICP-MS 为美国 PE 公司生产的 Elan DRC II。

图 9 表示不同下垫面类型中可吸入颗粒物成分中常量元素百分比与标准值的对比图，

可以看出, Ca、Al、Fe、K 和 Na 等地壳元素比重较大, 因此认为它来自地面扬尘^[11]; Ca 在对应的五种下垫面类型中的含量均高于标准值, 认为它来自建筑源。

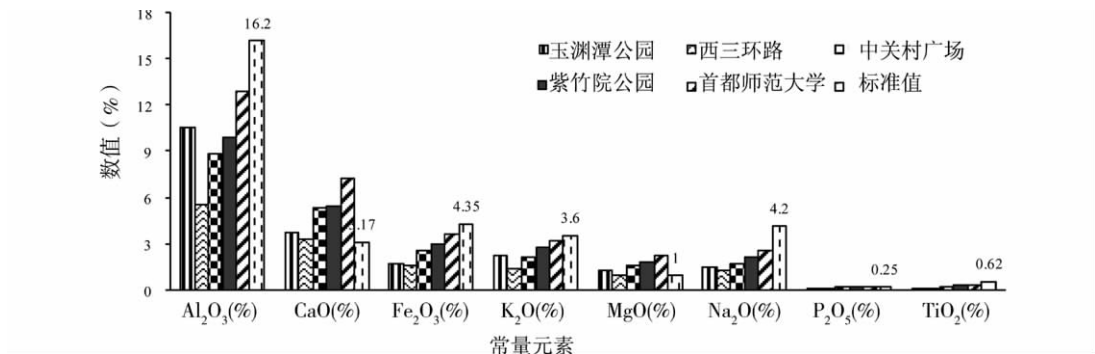


图 9 不同下垫面类型中可吸入颗粒物中常量元素百分比图

Fig. 9 Percentage of major elements in IPM on different underlying surfaces

使用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 对冬季采暖期北京市区五种下垫面上采样点的样品作了分析, 得出了 Cr、Mn、Cu、Zn、As、Ba、Pb、Ni 等 24 种微量元素的质量浓度结果。从图 10 对比来看, Zn 元素、Pb、Cr 和 Ba 元素的含量较高。Cu 和 As 的含量相对较低, 但是较其他元素比较, 还是属于浓度高值。

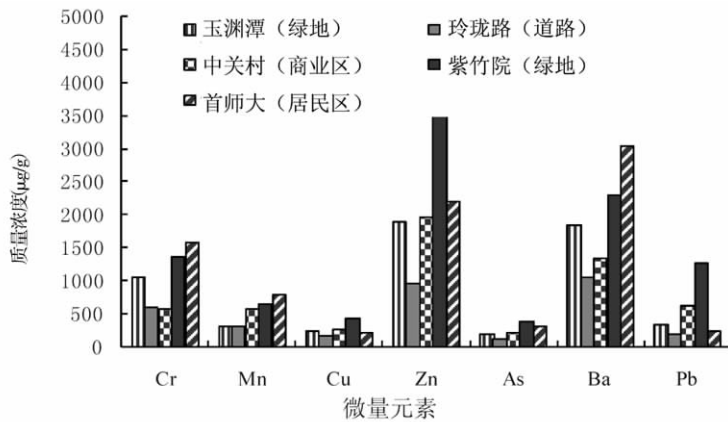


图 10 不同下垫面可吸入颗粒物中部分微量元素浓度

Fig. 10 Concentration of seven microelements in IPM on different underlying surfaces

Zn 是一种被认为可能具有生活活性的元素^[17,18], 它可以影响生物体中酶的形成和作用^[19]。北京市颗粒物样品中 Zn 的浓度最大。邵龙义等^[20]对北京颗粒物中 Zn 的含量分析后认为, 取样 Zn 的浓度最大值出现在马路边的样品中, 这支持了“Zn 元素是一种可能的汽车尾气颗粒物的标示元素”^[21,22]的结论, 但从本次实验结果分析, 对应最高值是在紫竹院公园里面, 周围并没有太多的车辆行驶, 但样品中的 Zn 含量却很高, Zn 元素的来源除了汽车尾气以外, 可能还来自其他人污染源, 如垃圾和废物焚烧以及工业排污等。

Cu 元素在大气中的增加与使用柴油代燃煤作为取暖燃料有关^[21,22], As 常被当作燃煤来源颗粒物的标示元素^[17], 它是一种典型的污染元素, 具有潜在的生物活性。Pb 常被当

作一种具有潜在生物活性的元素。从本次实验的结果分析,北京市区颗粒物中 Pb 的含量相对其他元素的含量已经很低,这应该是使用无铅汽油带来的可喜结果,但大气中 Pb 仍然有一定的含量,可能是局地污染尘或油箱中原来残留的铅。总之,从微量元素分析的结果可以看出,样品中微量金属元素的浓度相对较高。

4 结论与讨论

(1) 基于地统计的插值方法,根据半变异函数云图和试验方差最小的原理,选择合适的半变异函数理论模型进行变量的空间插值,能够较好地模拟可吸入颗粒物浓度的空间连续分布格局,并取得较好的效果。

(2) 城市的可吸入颗粒物污染分布和下垫面介质、人为污染源、人口密度气象因素有非常密切的关系。城市区域由于建筑物密集,人口密度大,以及交通繁忙,故小粒径的可吸入颗粒物污染浓度相对较严重;由于城区北部和西南部有相对密集的建筑工地,使得小粒径的颗粒物浓度由城区中心向东部和西北五环外逐渐增大的趋势。而相对较大粒径的颗粒物浓度则由城区向南北方向逐渐增大。

(3) 不同的下垫面上可吸入颗粒物浓度是不同的。综合来看,建筑工地及周边的颗粒物污染最严重,其次为工业区,绿地附近的颗粒物污染最小。

(4) 气象因子方面,湿度对小粒径颗粒物浓度的影响最大,其次为温度,影响最小的为风速。湿度的预测走势与 $PM_{0.5}$ 和 $PM_{1.0}$ 的大致相符,随着湿度的增大,颗粒物浓度也随之增大,而温度与粒子浓度则呈反向趋势,随着温度的升高,粒子浓度则是相对减弱。但由于此次采样时间中,风速较小,故风速对颗粒物浓度的影响没有很好的体现出来,这是今后研究应当加强的地方。

(5) 对采暖期的颗粒物进行滤膜采样,分析发现 Zn、Pb、As 富集程度很高,受人为活动影响较大,表明土壤源、燃煤和交通工具尾气排放是本地区大气细颗粒物的主要来源,这些结论对国内大气可吸入颗粒物研究是一个很好的补充,不但可以为同类地区的进一步研究提供借鉴,而且对于修订和细化环境空气质量标准也具有重要意义。

参考文献:

- [1] Chow J C. Welcome to a special issue on $PM_{2.5}$: A fine particle standard. Journal of the Air & Waste Management Association, 1999, 49: 1.
- [2] 赵越,潘钧,张红远,等. 北京地区大气中可吸入颗粒物的污染现状分析. 环境科学研究, 2004, 17(1): 67~69.
- [3] 程承旗,常鹏飞,郭仕德,等. 空气总悬浮颗粒物浓度的遥感信息模型研究. 水土保持研究, 2006, 13(6): 243~246.
- [4] 段菁春,李兴华,谭吉华,等. 北京冬季大气颗粒物数浓度的粒径分布特征及来源. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1134~1140.
- [5] 陈媛,岑况, Norra S, 等. 北京市区大气气溶胶 $PM_{2.5}$ 污染特征及颗粒物溯源与追踪分析. 现代地质, 2010, 24(2): 345~354.
- [6] 袁杨森,刘大锰,车瑞俊,等. 北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究. 生态环境, 2007, 16(1): 18~25.
- [7] Tang T, Zhao W, Gong H, *et al.* GIS spatial analysis of population exposure to fine particulate air pollution in Beijing, China. Environmental Geosciences, 2010, 17: 1~16.
- [8] 王伟武,陈超. 杭州城市空气污染物的空间分布及其影响因子. 地理研究, 2008, 27(2): 241~250.
- [9] 任阵海,万本太,虞统,等. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平场输送. 环境科学研究, 2004, 17(1): 7~13.
- [10] 蔡旭晖,郭昱,刘辉志,等. 北京地区低层大气流动模态研究. 北京大学学报:自然科学版, 2002, 38(3): 387~392.

- [11] 李金香,虞统,赵越,等. 北京市大气 PM_{10} 环境背景值的计算方法探讨. 环境科学学报, 2007, 27(9): 1525~1533.
- [12] Combardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501~1511.
- [13] 范一大, 史培军, 辜智慧, 等. 行政单元数据向网格单元转化的技术方法. 地理科学, 2004, 24(1): 105~108.
- [14] 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析. 气象与环境学报, 2009, 25(1): 1~5.
- [15] 朱能文. 颗粒物浓度的影响因素及变化规律. 环境科学动态, 2005, 30(2): 16~18.
- [16] 刘大锰, 马永胜, 高少鹏, 等. 北京市区春季燃烧源大气颗粒物的污染水平和影响因素. 现代地质, 2005, 19(4): 621~633.
- [17] Richards R J, Atkins J, Marrs T C, *et al.* The biochemical and pathological changes produced by the intratracheal instillation of certain components of zinc-hexachloroethane smoke. Toxicology Letter, 1989, 54: 79~88.
- [18] Adamson I Y R, Frieditis H, Hedgecock C, *et al.* Zinc is the toxic factor in the lung response to an atmospheric particulate sample. Toxicology and Applied Pharmacology, 2000, 166: 111~119.
- [19] 常辉, 杨绍晋, 董金泉, 等. 大气气溶胶中元素种态研究. 环境化学, 2000, 19(6): 485~500.
- [20] 邵龙义, 时宗波, 李红, 等. 北京市大气中的 PM_{10} 的微区形貌及有害元素组成分析. 北京: 北京市自然科学基金研究报告, 2006. 1~209.
- [21] 张仁健, 王明星, 胡非, 等. 采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究. 中国科学院研究生院学报, 2002, 19(1): 75~81.
- [22] 张仁健, 王明星, 张文, 等. 北京冬春季气溶胶化学成分及其谱分布研究. 气候与环境研究, 2000, 5(1): 6~12.

Spatial and temporal distribution of inhalable particulate matters and the source tracing in the heating season of Beijing

ZHAO Wen-hui^{1,2}, ZHAO Wen-ji¹, GONG Hui-li¹, GONG Zhao-ning¹

(1. College of Resources Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: Inhalable particulate matter (IPM) is one of the principal pollutants in Beijing. Sandy weather in spring and winter seasons results from regional airflow to a certain degree, in most cases from autochthonic pollution, especially in heating season of winter. This paper focused on the spatial and temporal distribution of IPM and the relationship between IPM and its influencing factors, combined with RS techniques as well as ground-based monitoring. It analyzed the change of underlying surface observed from high resolution remote sensing images in different periods. We collected the contents of particles with different diameters by ground observation instrument and analyzed their chemical composition. In addition, this paper studied the relationship of distribution of IPM and underlying surface using spatial analysis of GIS. The results indicate that the distribution of IPM pollution is closely related with underlying surface, man-made pollution sources, population density and meteorological conditions.

Key words: inhalable particulate matter; temporal and spatial distribution; GIS; source tracing