

程念亮,张大伟,李云婷,等.风向对北京市重污染日 PM<sub>2.5</sub> 浓度分布影响研究[J].环境科学与技术,2016,39(3):143-149. Cheng Nianliang, Zhang Dawei, Li Yunting, et al. Effects of wind direction on spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> during heavy pollution days in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(3):143-149.

# 风向对北京市重污染日 PM<sub>2.5</sub> 浓度分布影响研究

程念亮<sup>1,2</sup>, 张大伟<sup>1</sup>, 李云婷<sup>1\*</sup>, 陈添<sup>3</sup>, 邹本东<sup>1</sup>, 王欣<sup>1</sup>,  
郇宁<sup>1</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 孙乃迪<sup>1</sup>, 孟凡<sup>4</sup>

(1.北京市环境保护监测中心,北京 100048; 2.北京师范大学水科学研究院,北京 100875;  
3.北京市环境保护局,北京 100048; 4.中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室,北京 100012)

**摘要** 对 2013 年北京市 58 d 重污染日 PM<sub>2.5</sub> 浓度水平进行了分析,并用克里格插值法统计了重污染期间不同风向 PM<sub>2.5</sub> 不同浓度区间的国土面积。结果显示 2013 年北京市重污染日主要集中在冬季,占到全年天数的 15.9%,且重污染日 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度为 218 μg/m<sup>3</sup>,重污染日 PM<sub>2.5</sub> 空间分布较为均匀且统计的平均浓度在 150 μg/m<sup>3</sup> 以上的国土面积约占总面积的 82%,重污染期间重度污染(>150 μg/m<sup>3</sup>) 以上面积占比分别为南风(87%)、东风(81%)、西风(70%)、北风(66%),重污染日不同风向下 ρ(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ρ(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), ρ(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 之和约占 ρ(PM<sub>2.5</sub>) 的 60%~65%,且各组分浓度相差不大。

**关键词** PM<sub>2.5</sub>; 季节分布; 空间分布; 重污染; 北京

中图分类号 X823 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2016.03.026 文章编号:1003-6504(2016)03-0143-07

## Effects of Wind Direction on Spatial Distribution of PM<sub>2.5</sub> During Heavy Pollution Days in Beijing

CHENG Nianliang<sup>1,2</sup>, ZHANG Dawei<sup>1</sup>, LI Yunting<sup>1\*</sup>, CHEN Tian<sup>3</sup>,

ZOU Bendong<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, HUAN Ning<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, SUN Naidi<sup>1</sup>, MENG Fan<sup>4</sup>

(1. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing100048, China; 2. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Environmental Protection Bureau, Beijing100048, China;  
4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract**: The spatial and temporal distribution of PM<sub>2.5</sub> during heavy pollution days was analyzed and the proportions of land area of Beijing City hit by smog with different PM<sub>2.5</sub> concentrations at different wind directions were estimated by Kriging. The analysis showed that the City's average PM<sub>2.5</sub> concentration was 218 μg/m<sup>3</sup> during heavy smog days that mainly occurred in winter, accounting for 15.9% of the whole year; the land area where the average PM<sub>2.5</sub> concentration was above 150 μg/m<sup>3</sup> accounting for 82%; and meantime the spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> during those days was relatively uniform. In addition, wind direction had a significant effect on the spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> during heavy smog days (>150 μg/m<sup>3</sup>), i.e., the proportion of land area in condition of south wind was 87%, east wind 81%, west 70% and north wind 66%; and during heavy smog days the major components in PM<sub>2.5</sub> were NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, the content of them were almost the same under various wind directions, which accounted for 60%~65% of the total PM<sub>2.5</sub>.

**Key words**: PM<sub>2.5</sub>; seasonal distribution; spatial distribution; heavy pollution; Beijing

近年来,我国中东部地区以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物的空气重污染现象频发,严重影响人体健康和城市景观<sup>[1-3]</sup>,PM<sub>2.5</sub> 是指环境空气中空气动力学粒径 ≤ 2.5 μm 的颗粒物,也称为细颗粒物<sup>[4]</sup>。2013 年新《环境空

气质量标准》(GB 3095-2012)<sup>[5]</sup>将 PM<sub>2.5</sub> 纳入常规空气质量评价,标志着我国从污染物排放总量控制管理阶段向环境质量管理阶段转变。实施新标准、开展污染物监测和分析分布特征及变化规律是解决大气环

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期 2015-05-16 修回 2015-07-10

基金项目 环保公益性行业科研专项(201409005),国家科技支撑计划课题(2014BAC23B03),北京市空气质量达标规划课题(Z131100005613046)

作者简介 程念亮(1987-),男,工程师,博士,主要从事大气环境预警预报及环境监测研究(电子信箱)15001195306@163.com;\* 通讯作者。

境问题的第一步。

北京市是我国的首都,三面环山,地形呈典型的“簸箕状”特征,大气扩散条件较差。随着城市的发展,大气污染呈严峻态势<sup>[6]</sup>。改善空气质量首先要认清影响空气质量的主要因素,研究表明<sup>[7]</sup>大气中 PM<sub>2.5</sub> 浓度大小主要取决于污染源排放和气象条件,在污染源排放量相对稳定的情况下,空气质量主要受气象条件的影响和支配。由于重污染天气中污染物主要集中在边界层内,除了受大尺度环流背景场影响外,低空的风、温、压、湿等气象因素最为重要;在众多气象条件中,低空风向是影响空气质量的关键因子。当重污染发生时风向的微妙变化直接影响着高污染浓度的范围及变化趋势<sup>[8]</sup>。

Davis 等<sup>[9]</sup>指出短时间内大尺度环流形势和局地气象条件对重污染过程起着决定作用;吴兑等<sup>[10]</sup>发现近年来珠江三角洲地区的气溶胶污染日趋严重,受长期风场影响及源排放影响重污染区位于珠江口以西的珠江三角洲西侧;李琼等<sup>[11]</sup>在珠江三角洲地区研究发现前期高压脊带来的稳定层结和静小风条件使得大气污染物逐日累积,难以扩散;周敏等<sup>[12]</sup>研究 2013 年 1 月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征发现除不利气象条件外,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的生成效率较高,二次转化对灰霾持续起到促进作用;任阵海等<sup>[13]</sup>指出弱冷空气弱高压及小尺度系统对风向风速的改变,对流扩散的触发,南北空气质量的差异,阈值浓度起着非常重要的作用。王喜全等<sup>[14]</sup>研究发现北京西南部地区经常出现的小尺度辐合型流场,是形成北京地区“南北两重天”现象的重要原因。王跃等<sup>[15]</sup>研究北京冬季 PM<sub>2.5</sub> 重污染发现局地西南风和东南风输送与北部山区偏北风在山前的汇聚,配合边界层低层顺时针方向的风切变,易发生大气中细颗粒物的爆发性增长。王跃思等<sup>[16]</sup>指出单一站点颗粒物短时间迅速增长可能与排放源有关,但区域多站点共同表现为此种形式,则与气象过程特别是风场密不可分。

目前国内外关于北京市重污染 PM<sub>2.5</sub> 多点位、长时间序列的研究较为缺乏,本文利用 2013 年一个完整年北京市 35 站点监测的 PM<sub>2.5</sub> 浓度数据及观象台气象观测数据,从年均及重污染日 PM<sub>2.5</sub> 浓度基本水平、时间分布、空间分布等多个侧面展开分析研究,并重点探讨 PM<sub>2.5</sub> 与风向的关系,以为管理部门提供准确、及时、全面的信息,积极应对大气重污染。

## 1 实验方法

### 1.1 区域概况

北京位于东经 115.7°E~117.4°E,北纬 39.4°N~

41.6°N,地处华北平原西北端,临近半沙漠化地带边缘,地形为簸箕型,三面环山,平均海拔 43.5 m,山地一般海拔 1 000~1 500 m,地形较不利于污染物扩散。国土面积 16 410.54 km<sup>2</sup>,62%为山区,平原面积仅 6 000 多 km<sup>2</sup>,森林资源总量偏低,平原区森林覆盖率仅 14.85%,远低于全市覆盖率(37.6%),大气自净功能较弱。位于北纬 40°地区,属温带大陆性季风气候,四季分明,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,近 10 年年降水量平均不足 450 mm,又易受沙尘影响,年均降水的 80%集中在夏季 6、7、8 三个月<sup>[17]</sup>。

### 1.2 数据来源

1984 年北京市建立了我国第一套环境空气质量自动监测系统,随着城市规模发展以及城市空间布局的变化,站点不断增加,截至目前,北京市的空气质量地面自动监测网络由 35 个站点(见图 1)组成,包括 1 个城市清洁对照点,23 个城市环境评价点,6 个区域背景传输点,5 个交通污染监控点,35 个站点分布在城六区(东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山);西北部(昌平、延庆);东北部(怀柔、密云、平谷、顺义);东南部(通州、大兴、亦庄);西南部(房山、门头沟),覆盖所有区县,包括区域背景、郊区、城镇、交通干道、居住区等不同的环境类型,所有站点全部经过 GPS 定位<sup>[18]</sup>。35 个空气质量自动监测子站 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的监测均采用微量振荡天平(TEOM)方法的 Thermo 1405F 系列仪器,操作流程严格按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193-2005)<sup>[19]</sup>进行,每天 24 h 连续进行采样,设备由技术人员定期检查及维护保养,有效数据捕获率超过 95%。气象资料为北京市观象台地面观测数据(<http://cdc.cma.gov.cn/>),仪器为荷兰 WAISALA 公司的 WXT520 气象观测仪。

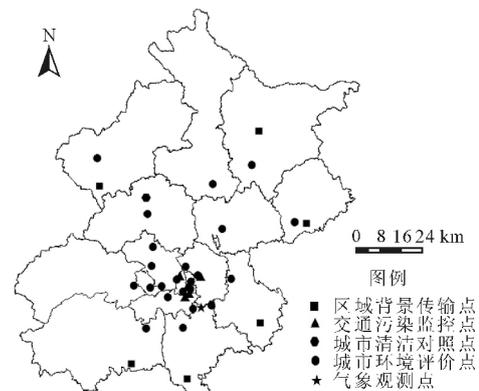


图1 观测站点分布和分类  
Fig.1 Distribution and classification of observation sites

### 1.3 研究方法

将 PM<sub>2.5</sub> 浓度与观象台风向小时数据一一对应,设定静风(无明显风向)、北向风(西北、北西北、北、北

东北、东北)、南向风(西南、南西南、南、南东南、东南)、东向风(东南、东南东、东、东北东、东北)、西向风(西南、西西南、西、西西北、西北),设为4个象限,同一象限下,风向角度持续2个小时以上,单小时风向跨越2个象限将予以剔除,由于缺乏其它站点气象观测数据,以观象台风向代表全市整体风向,默认为全市多数情况为受到系统风场的影响。风速则按照气象的定义,划分为静风(0~0.2 m/s)、1级风(0.3~1.5 m/s)、2级风(1.6~3.3 m/s)、3级风(3.4~5.4 m/s),由于4级风(5.5~7.9 m/s)对污染物的清除效应已经非常明显,且在北京地区发生频率已经较低,4级以上风速统一划归为一类,合计分为5种风速类别。研究表明静风风频较低,本文重点针对重污染日35站点不同风向下PM<sub>2.5</sub>浓度,用克里格插值方法<sup>[20]</sup>将北京市最优化分为4537个网格(约1.9 km一个网格)统计不同风向不同浓度段的所占的网格数即可计算出其对应的国土面积,以此分析不同风向对PM<sub>2.5</sub>浓度空间分布影响,克里格插值法较为灵活,是对有限区域变量无偏最优估计的一种方法。

## 2 结果分析

### 2.1 重污染现状

根据环境保护部《环境空气质量指数(AQI)技术规范》(HJ 633-2012)分级方法,200<AQI≤300即150 μg/m<sup>3</sup><PM<sub>2.5</sub>日均值≤250 μg/m<sup>3</sup>为重度污染,300<AQI≤500即250 μg/m<sup>3</sup><PM<sub>2.5</sub>日均值≤600 μg/m<sup>3</sup>为严重污染。依据国家标准,结合2013年北京市逐日AQI变化情况,计算了北京市重污染日天数的逐月分布,见图2。2013年全市PM<sub>2.5</sub>年均浓度为89.5 μg/m<sup>3</sup>,超过年均35 μg/m<sup>3</sup>国家标准的1.56倍。2013年重度污染日累计有58 d,占到全年天数的15.9%。重污染日细颗粒物24 h平均浓度为218 μg/m<sup>3</sup>;1月份重污染日最多,其次是2和3月份,8月份没有重污染日。整体来说重污染日冬季最多,其次是春秋季节,夏季最少;夏季比冬季次数明显偏少是因为夏季大气垂直运动

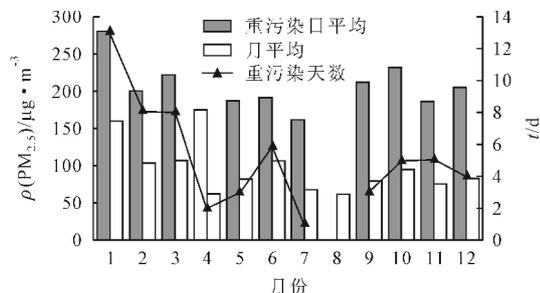


图2 2013年北京PM<sub>2.5</sub>浓度和重污染天数逐月分布  
Fig.2 Distributions of  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  and heavy pollution days in Beijing in 2013

活跃,气旋活动频繁,降水较多,污染物扩散条件较好,而冬季为采暖季,燃煤量增加,逆温较强,污染物容易积累易形成重污染<sup>[21-22]</sup>。1-2月、12月重污染日PM<sub>2.5</sub>平均浓度与该月月均浓度相比,差别最大,在110 μg/m<sup>3</sup>以上,7月重污染日PM<sub>2.5</sub>平均浓度高出该月月均浓度幅度最小,为93.7 μg/m<sup>3</sup>。

### 2.2 地面气象要素统计特征

监测数据显示静风、北风、东风、南风、西风的分布频率分别为2.6%、28.7%、23.3%、31.6%、13.8%,频率从高到低的排序为南风、北风、东风、西风,静风频率明显占比较低,重污染日静风、北风、东风、南风、西风的分布频率分别为2.9%、21.5%、24.4%、40.9%、10.3%,与全年相比,静风、东风频率略有增加,南风频率明显增大,增大9.3%,北风、西风风频减小。本文重点研究北风、东风、南风、西风对PM<sub>2.5</sub>浓度影响。图3为2013年全年及58 d重污染日北京市观象台地面观测的风向玫瑰图及不同风向下PM<sub>2.5</sub>浓度分布。由图3可知,与全年相比重污染日偏东风(NE-E-SE)、西南方向(SW)风频明显增加,同时风速有所减小,风速降低约24%。不同风向下年均PM<sub>2.5</sub>浓度在18.35~111.3 μg/m<sup>3</sup>之间,不同风向下重污染日PM<sub>2.5</sub>平均浓度在162.86~220.77 μg/m<sup>3</sup>之间,与年均浓度分布相比,重污染日各个方向PM<sub>2.5</sub>浓度大幅增加,且各个方向PM<sub>2.5</sub>浓度分布较为均匀,北风控制下浓度达到162.81 μg/m<sup>3</sup>,是年均北风下均值18.35 μg/m<sup>3</sup>的8.87倍,其它各方向约为相同方向年均浓度的2倍。

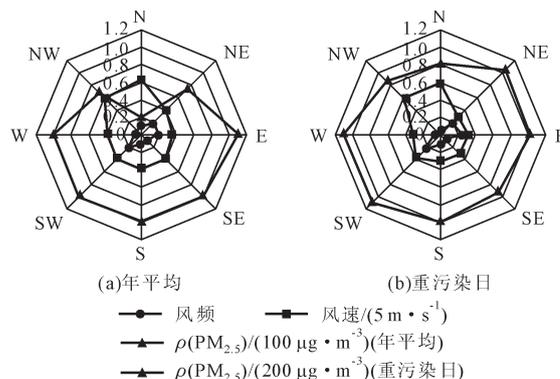


图3 PM<sub>2.5</sub>与风速、风向频率分析  
Fig.3 Analysis about PM<sub>2.5</sub>, wind speed and frequency of wind direction

从全年的情况看,静风、1级风、2级风、3级风、4级以上风5种风速条件下PM<sub>2.5</sub>的平均浓度分别为105.4、109.5、86.4、46.1、33.3 μg/m<sup>3</sup>,具有随着风力增大,PM<sub>2.5</sub>浓度水平呈明显递降特征。静风和1级风的弱风速条件下,PM<sub>2.5</sub>浓度水平超过100 μg/m<sup>3</sup>,2级风条件下PM<sub>2.5</sub>扩散能力有所增强,但仍维持在80 μg/m<sup>3</sup>以上的高浓度水平,3、4级风速条件下PM<sub>2.5</sub>扩散能力

大大增强,浓度大幅度下降,分别达到 45 和 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  上下水平。弱风速和较大风速条件下  $\text{PM}_{2.5}$  浓度水平差异显著。静风、1 级风、2 级风、3 级风、4 级以上风 5 种风速条件下  $\text{PM}_{2.5}$  的平均浓度分别为 212.8、211.6、209.5、148.4、118.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。对于重污染日  $\text{PM}_{2.5}$  小时浓度而言,由于重污染日平均风速为 1.69 m/s,大多时候风速起着加重污染的作用,重污染日持续的静小风易造成污染物高浓度,从而为重污染的维持提供了有利条件。

表 1 给出了 2013 年全年及 58 d 重污染日地面气象要素统计,由表 1 可知 2013 年全年北京市观象台总降雨量为 574.3 mm,是重污染日总降水量(35.7 mm)的 16 倍,重污染日平均相对湿度 68.60%,比全年平均相对湿度 54.7%高约 26.04%;重污染日平均风速 1.69 m/s,比年均风速(2.10 m/s)明显减小,全年能见

度约 12 km,远高于重污染日平均能见度(3.5 km)。对比表格中各项物理量的统计值可以看出,重污染日与年均值差异最大的为总降雨量,其次是能见度、相对湿度及风速。

分风向来看,重污染日东风风速(1.63 m/s)最小,湿度(90.07%)最大,累计降雨量最大(26.5 mm),可能与渤海湾湿润气团及污染回流有关;其它各方向物理量差异较小; $\text{PM}_{2.5}$  浓度按升序排列依次为:北风<西风<东风<南风。静小风是造成污染物高浓度的重要条件<sup>[23]</sup>,较大相对湿度容易造成  $\text{PM}_{2.5}$  在近地面层吸湿性增长及累积<sup>[24]</sup>;低气压且变化平缓,有利于污染物汇集,降水少,湿沉降作用较弱<sup>[25]</sup>,高湿天气并伴有低压控制,垂直对流、水平扩散条件较弱,是造成近地层浓度较高的主要原因。

表 1 地面气象要素统计  
Table 1 The simulation statistical results of meteorological elements

项目	气温/ $^{\circ}\text{C}$	总雨量/mm	相对湿度/%	气压/hPa	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	能见度/m	$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
年平均	12.95	574.3	54.70	1 013.08	2.10	12 133	89.50
重污染日北风	8.01	5.1	68.98	1 012.58	1.76	3 533	200.18
重污染日西风	5.40	3.5	65.13	1 013.61	1.76	3 290	203.77
重污染日东风	8.13	26.5	90.07	1 012.03	1.63	3 088	207.26
重污染日南风	8.23	0.6	64.78	1 012.36	1.74	2 814	223.31
重污染日平均	14.71	35.7	68.60	1 012.84	1.69	3 417	218.34

从  $\text{PM}_{2.5}$  与气象要素的相关性上看,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度与气温、风速呈负相关,与相对湿度呈正相关,而地面气压与  $\text{PM}_{2.5}$  相关性很弱,正负相关性主要取决于气压中心的位置(见表 2);不同风向下,相对湿度越大,正相关性越低,风速越大,负相关性越好。研究<sup>[26-27]</sup>表明,重污染发生时,风速较小,相对湿度加大,  $\text{PM}_{2.5}$  逐渐积累,冷空气过境时,出现正变压、负变温,边界层跃升,北风较大,大气水平及垂直扩散能力增强,使  $\text{PM}_{2.5}$  迅速下降。

2.3 风向对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度影响

分析方向对不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  浓度影响时,补充了部分环保局区县监测站点。整体来看不同风向条件下各点位的浓度有所波动范围,浓度由小至大顺序基本

为北风<西风<东风<南风<静风,不同站点浓度顺序有些差异,见图 4。

表 2  $\text{PM}_{2.5}$  与气象要素的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients of  $\text{PM}_{2.5}$  and meteorological elements

项目	气温	相对湿度	气压	风速
年平均	-0.223	0.407	-0.073	-0.280
重污染日北风	-0.136	0.371	-0.061	-0.360
重污染日西风	-0.489	0.361	-0.324	-0.208
重污染日东风	-0.188	0.097	0.125	-0.037
重污染日南风	-0.273	0.262	0.116	-0.140
重污染日平均	-0.257	0.237	-0.119	-0.184

注:置信水平均为  $\alpha=0.01$ 。

进一步采用 Kriging(克里格)插值法对北京市 2013 年重污染日不同风向、不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  浓度插值,见图 5。由图 5 可知重污染日北京市城六区以南地

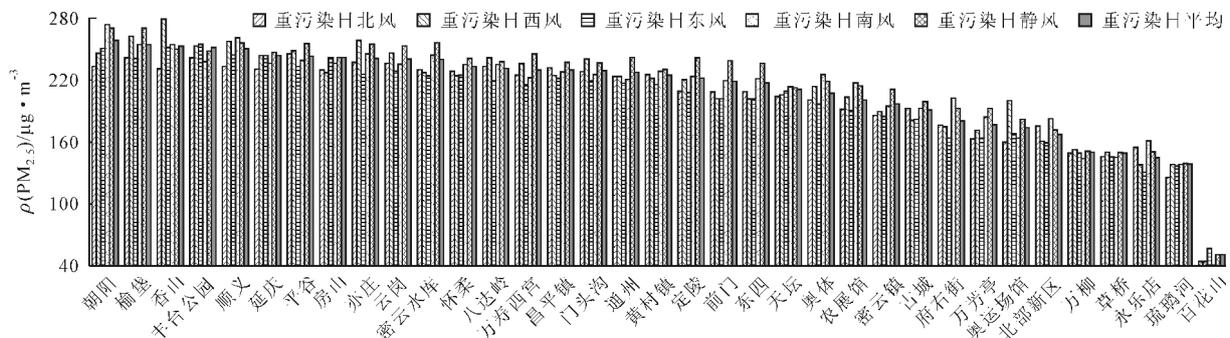


图 4 不同风向下不同站点重污染日  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度  
Fig. 4  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations at different sites and wind direction in heavy pollution days

区 PM<sub>2.5</sub> 空间分布相对均匀,北部地区呈现出浓度梯度特征。西北的延庆、怀柔、昌平定陵以南地区,浓度均在 120 μg/m<sup>3</sup> 左右,中心城区浓度水平在 180 μg/m<sup>3</sup>

左右,而南部的丰台、房山、大兴、亦庄、通州等区县浓度升高到 190 μg/m<sup>3</sup> 以上,南部及城六区存在明显的高污染区。

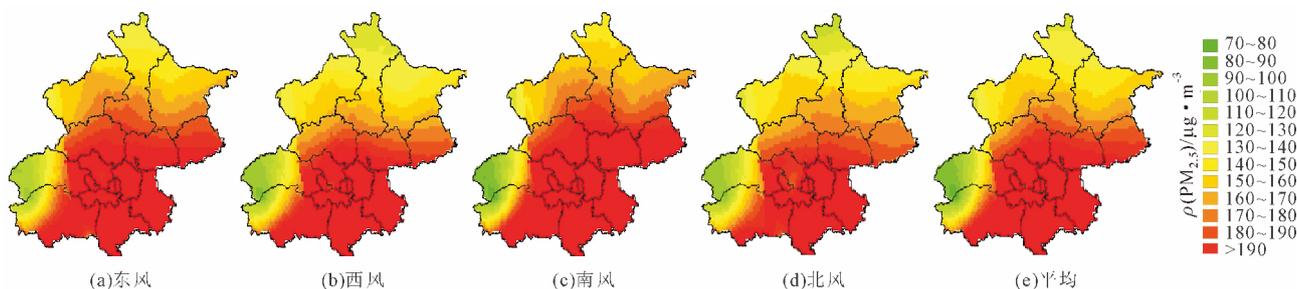


图5 不同风向下重污染日PM<sub>2.5</sub>平均浓度的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of average PM<sub>2.5</sub> concentrations at different wind directions in heavy pollution days

总体来说,北京重点污染源主要集中在城市的东部、南部等地区,上风向空气比较清洁<sup>[28]</sup>,清洁的北风稀释了污染物的浓度,城区及北部地区空气质量较好。当北京盛行偏南风时,局地及周边输送的污染物(邯郸、石家庄、保定一线)抵达城市上空,受地形与风向的影响,污染物会受到燕山、太行山的阻挡,无法扩散,滞留在城区的上空,使 PM<sub>2.5</sub> 浓度与北风相比空间分布上明显提高<sup>[29]</sup>,PM<sub>2.5</sub> 浓度在偏东风时较高,因为西南风引起的周边高浓度污染物传输到北京上空后,北面山脉阻挡,使得气团在城市上空移速减慢,一段时间后风向突然间转为东北风,污染物回流,加之湿度加大,细粒子稀释性增长及局地及周边输送的污染物(唐山-廊坊一线)加重了空气污染;当北京盛行偏西风时,垂直扩散条件较好,全市整体浓度较低,仅次于北风作用下的浓度。

表3为不同风向下 PM<sub>2.5</sub> 不同浓度段的国土面积占比,可以看出重污染发生时与全年相比中度污染(PM<sub>2.5</sub>>115 μg/m<sup>3</sup>)以上对应的国土面积占比显著增加,空气质量为良(35 μg/m<sup>3</sup><PM<sub>2.5</sub>≤75 μg/m<sup>3</sup>)对应的国土面积占比显著减小。经计算重污染日 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度在 75~115 μg/m<sup>3</sup> 所占的国土面积比例比全年 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度在 75~115 μg/m<sup>3</sup> 国土面积比例减少约 49%,PM<sub>2.5</sub> 平均浓度在 115~150 μg/m<sup>3</sup> 所占的国土面积比例比全年增加了约 16%,PM<sub>2.5</sub> 平均浓度在 150 μg/m<sup>3</sup> 以上的国土面积比年均浓度对应的国土面积增加了约 82%(全年 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度在 150 μg/m<sup>3</sup> 以上对应的国土面积为 0)。重污染日北风时对应的国土面积占比(PM<sub>2.5</sub>>150 μg/m<sup>3</sup>)最小,南风占比最大,国土面积(PM<sub>2.5</sub>>150 μg/m<sup>3</sup>)占比按升序排列依次为:北风<西风<东风<南风,重度污染以上面积占比分别为南风(87%)、东风(81%)、西风(70%)、北风(66%)。

表3 重污染日不同风向 PM<sub>2.5</sub> 浓度区间对应国土面积占比  
Table 3 The proportion of land area of PM<sub>2.5</sub> average concentration during heavy pollution days at different wind directions (%)

项目	0~35 μg·m <sup>-3</sup>	35~75 μg·m <sup>-3</sup>	75~115 μg·m <sup>-3</sup>	115~150 μg·m <sup>-3</sup>	150~250 μg·m <sup>-3</sup>	>250 μg·m <sup>-3</sup>
年平均	0	49	50	1	0	0
重污染日 平均	0	0	1	17	77	5
重污染日 东风	0	0	4	16	79	2
重污染日 西风	0	0	5	25	70	1
重污染日 南风	0	0	5	8	72	15
重污染日 北风	0	0	5	29	61	5

由重污染日 PM<sub>2.5</sub> 浓度插值过程可知,中心城区由于监测点较多,插值误差较小,而监测点较少的门头沟、怀柔等周边地区,一方面周边污染差异及气象条件变化较大,另一方面数据离散程度较高,导致预测标准误差较大。在房山区西南边缘处、门头沟百花山等地 PM<sub>2.5</sub> 浓度插值误差达到 40 μg/m<sup>3</sup>。本文插值后统计的面积不确定性主要来自:(1)“簸箕状”的特殊地形影响,山间河谷等地区风向转换快且风速偏大,PM<sub>2.5</sub> 扩散速率较大,降低了周围 PM<sub>2.5</sub> 浓度;(2)在无风、高湿天气下,气体、液体多附着、溶解或混合于凝结核中,易发生二次化学反应,增加 PM<sub>2.5</sub> 浓度;(3)插值方法误差,由于 35 站点较集中分布在城六区,郊区点个数较少,插值受采样点范围、采样点密度等参数影响;(4)单点风速风向也很难代表全市的不同地区的风速风向,气象数据的不确定性直接影响着插值结果<sup>[30]</sup>。

#### 2.4 风向对 PM<sub>2.5</sub> 组分影响

为进一步分析重污染过程污染的特点和离子组成变化,表4统计了年均及重污染日 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>)及 OM、EC 的平均浓度,比较和分析不同风向下组分的

表 4 2013 年北京市 PM<sub>2.5</sub> 组分浓度统计  
Table 4 Average mass concentrations of major chemical components in PM<sub>2.5</sub> in 2013

项目	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{NH}_4^+)$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{OM})$	$\rho(\text{EC})$
年平均	2.05±3.35	11.87±10.81	24.96±22.65	0.34±0.33	0.86±0.85	9.53±8.94	0.46±0.36	0.07±0.03	24.16±12.65	1.98±1.64
重污染日北风	6.68±6.01	23.92±15.98	49.96±28.33	0.74±0.83	2.46±2.19	19.65±9.80	0.34±0.33	0.09±0.06	39.16±15.06	3.29±1.90
重污染日西风	5.58±3.94	26.16±15.28	50.28±24.48	0.73±0.50	1.82±1.13	21.79±8.32	0.55±0.32	0.13±0.04	43.55±15.78	3.91±1.89
重污染日东风	5.34±5.43	28.52±15.72	52.22±26.43	0.81±0.61	2.36±1.53	22.05±9.10	0.48±0.46	0.09±0.05	49.35±16.95	4.50±1.89
重污染日南风	4.77±3.65	29.05±16.31	53.99±25.75	0.61±0.48	1.63±1.39	22.14±10.09	0.60±0.42	0.14±0.08	46.27±17.65	3.75±2.10
重污染日静风	5.19±4.14	30.32±14.28	56.60±23.89	0.71±0.66	1.63±1.27	22.98±8.99	0.41±0.36	0.08±0.06	50.81±18.07	4.39±1.92
重污染日平均	5.41±4.79	28.67±15.57	53.65±25.02	0.69±0.63	2.01±1.84	22.33±9.18	0.49±0.37	0.10±0.04	47.69±17.42	4.12±1.97

差异,能更好了解污染形成的化学过程。重污染日中无机组分  $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  值较高  $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$  值较低,各离子组分按质量浓度大小排序均为  $\rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{NH}_4^+) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{Mg}^{2+})$ 。年均  $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  分别占  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  的 15.56%、32.71%、12.48%,重污染日  $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  分别占  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  的 17.35%、32.78%、13.51%,各组分比值大小与 Zhang 等<sup>[31]</sup>、Duan 等<sup>[32]</sup>在北京的研究结果一致,远高于上海<sup>[33]</sup>、西安<sup>[34]</sup>、青岛<sup>[35]</sup>研究结果,重污染日不同风向类别下  $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  之和约占  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  的 60%~65%,且  $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  浓度均呈现出静风>南风>东风>西风>北风的规律。OM、EC 也是大气中 PM<sub>2.5</sub> 的重要组分,重污染日不同风向下  $\rho(\text{OM})$ 、 $\rho(\text{EC})$  与年均值相比,明显增大  $\rho(\text{OM})$ 、 $\rho(\text{EC})$  之和约占  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  的 29%~32%。研究<sup>[36]</sup>认为  $\rho(\text{OM})$  约为  $\rho(\text{OC})$  的 1.4 倍,且  $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC}) > 2$  时指示大气中有 SOC 生成,经计算表明不同风向下重污染过程中  $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$  值在 7.8~8.7 之间,说明重污染日有较强的二次转化过程,而在此期间气温相对较高、RH 较大、大气氧化性相对较强、大气较为静稳,为 OC 二次转化过程提供了有利条件。

不同风向下各组分浓度相差不大,说明污染状况下污染的形成来源比较稳定,重污染日的形成更多表现为污染物“量”积累。由于污染排放量大,远超本身所具有的环境容量,静风、小风又使得污染物难以扩散,大气中化学反应较为强烈,PM<sub>2.5</sub> 组分持续的积累并保持稳定<sup>[37]</sup>。

### 3 结论

(1) 2013 年北京市重污染日共 58 d 主要集中在冬季,重污染日 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度为 218  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,重污染日 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度在 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上的所占的国土面积比例约为 82%。

(2) 重污染日国土面积 (PM<sub>2.5</sub> > 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 按升序排列依次为: 北风 < 西风 < 东风 < 南风,重度污染以上面积占比分别为南风(87%)、东风(81%)、西风(70%)、北

风(66%)。

(3) 重污染日不同风向下  $\rho(\text{NO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+)$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$  之和约占  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  的 60%~65%,且各组分浓度相差不大。

### [参考文献]

- [1] 任阵海,万本太,苏福庆,等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1): 1-6.
- [2] Wang Wenxing, Chai Fahe, Zhang Kai, et al. Study on ambient air quality in Beijing for the summer 2008 Olympic Games[J]. Air Quality Atmosphere & Health, 2008, 1(1): 31-36.
- [3] Chan C K, Yao X. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.
- [4] 李令军,王英,李金香,等. 2000-2010 北京大气重污染研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1): 23-30.  
Li Lingjun, Wang Ying, Li Jinxiang, et al. The analysis of heavy air pollution in Beijing during 2000-2010 [J]. Environment Science in China, 2012, 32(1): 23-30. (in Chinese)
- [5] GB 3095-2012 环境空气质量标准[S].
- [6] Zhao P S, Zhang X L, Xu X L, et al. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin and Hebei, China[J]. Atmospheric Research, 2011, 101(3): 711-718.
- [7] Li M, Zhang L. Haze in China: Current and future challenges [J]. Environmental Pollution, 2014, 189: 35-86.
- [8] 张菊,苗鸿,欧阳志云,等. 近 20 年北京市城近郊区环境空气质量变化及其影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1886-1892.  
Zhang Ju, Miao Hong, Ouyang Zhiyun, et al. Ambient air quality trends and driving factor analysis since 1980's in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(11): 1886-1892. (in Chinese)
- [9] Davis R E, Kalksteinl S. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations[J]. Physical Geography, 1990, 11(4): 320-342.
- [10] 吴兑,刘啟汉,梁延刚,等. 粤港细粒子 (PM<sub>2.5</sub>) 污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2660-2669.

- Wu Dui ,Alexis Kai-Hon Lau ,Leung Yangang , et al. Hazy weather formation and visibility deterioration resulted from fine particulate (PM<sub>2.5</sub>)pollutions in Guangdong and Hong Kong [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 2012,32( 11) : 2660-2669.(in Chinese)
- [11] 李琼,李福娇,叶燕翔,等. 珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度的关系[J]. *热带气象学报*,1999,15(4) : 363-369.  
Li Qiong , Li Fujiao , Ye Yanxiang , et al. Analysis of relationships with the weather patterns ,potential contamination and pollution concentrations in Pearl River Delta region [J]. *Journal of Tropical Meteorology* , 1999 ,15(4) 363-369.(in Chinese)
- [12] 周敏,陈长虹,王红丽,等. 上海市秋季典型大气高污染过程中颗粒物的化学组成变化特征[J]. *环境科学学报*,2012,32(1) 81-92.  
Zhou Min , Chen Changhong , Wang Hongli , et al. The chemical characteristics of particulate matters in Shanghai during heavy air pollution episode[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* ,2013 ,33( 11) 3118-3126.(in Chinese)
- [13] 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流场输送[J]. *环境科学研究*,2004,17(1) :7-13.  
Ren Zhenhai , Wan Bentai , Yu Tong , et al. Influence of weather system of different scales on pollution boundary layer and the transport in horizontal current field [J]. *Research of Environmental Science* ,2004 ,17(1) :7-13.(in Chinese)
- [14] 王喜全,虞统,孙峰,等. 北京 PM<sub>10</sub> 重污染预警预报关键因子研究[J]. *气候与环境研究*,2006,11(4) :470-476.  
Wang Xiquan , Yu Tong , Sun Feng , et al. Key meteorological factors resulting in PM<sub>10</sub> heavy air pollution in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research* , 2006 ,11( 4) : 470-476.(in Chinese)
- [15] 王跃,王莉莉,赵广娜,等. 北京冬季 PM<sub>2.5</sub> 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J]. *气候与环境研究*,2014,19(2) :173-184.  
Wang Yue , Wang Lili , Zhao Guangna , et al. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM<sub>2.5</sub> heavy pollutions in Beijing during winter [J]. *Climatic and Environmental Research* , 2014 ,19( 2) : 173-184.(in Chinese)
- [16] 王跃思,姚利,刘子锐,等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考[J]. *中国科学院院刊*,2013,28(3) 353-363.  
Wang Yuesi , Yao Li , Liu Zirui , et al. Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* , 2013 ,28(3) 353-363.(in Chinese)
- [17] 中国环境年鉴编辑委员会. 中国环境年鉴[K]. 北京:中国环境年鉴社,2001-2010.
- [18] 谢淑艳,王晓彦,吴迺名,等. 环境空气中 PM<sub>2.5</sub> 自动监测方法比较及应用[J]. *中国环境监测*,2013,29(2) :150-155.  
Xie Shuyan , Wang Xiaoyan , Wu Yaming , et al. Study of the comparison and application of PM<sub>2.5</sub> automatic monitoring methods[J]. *Environmental Monitoring in China* , 2013 ,29( 2) :150-155.(in Chinese)
- [19] HJ/T 193-2005,环境空气质量自动监测技术规范[S].
- [20] Davis ,John C. *Statistics and Data Analysis in Geology*[M]. 3rd Edition. New York :John Wiley & Sons ,Inc ,2002.
- [21] 孟燕军,程丛兰. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析[J]. *气象*,2002,28(4) :42-47.  
Meng Yanjun , Cheng Conglan. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing aera[J]. *Meteorological Monthly* ,2002 ,28(4) :42-47.(in Chinese)
- [22] Zhang Y L. *Introduction to Mesoscale Atmospheric Dynamics* [M]. Beijing :Meteorological Press , 1999.
- [23] Yuan Meiyang ,Zhou Xiujie ,Zhang Guihua , et al. Effect of synoptic situation change on Harbin air quality [J]. *Meteorological Monthly* ,2005 ,31(1) :55-57.
- [24] 程念亮,孟凡,徐俊,等. 中国东部春季一次强冷锋活动空气污染输送的数值模拟研究[J]. *环境科学研究*,2013,26(1) :34-42.
- [25] Cogliani E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables [J]. *Atmospheric Environment* ,2001 ,35(16) :2871-2877.
- [26] Cao J J , Shen Z X , Chow J C , et al. Winter and summer PM<sub>2.5</sub> chemical compositions in fourteen Chinese cities [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association* , 2012 ,62(10) :1214-1226.
- [27] 程念亮,李云婷,孙峰,等. 北京市空气重污染天气类型分析及预报方法简介[J]. *环境科学与技术*,2015,38(5) :189-194.
- [28] Wang Zhifa Li Lina ,Wu Qizhong et al. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. *Science China Earth Science* ,2014 ,57 :3-13.
- [29] Cogliani E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables[J]. *Atmospheric Environment* ,2001 ,35(16) :2871-2877.
- [30] He K B ,Yang F M ,Ma Y L , et al. The characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing ,China [J]. *Atmospheric Environment* , 2001 ,35( 29) :4959-4970.
- [31] Zhang R J ,Jing J ,Tao J , et al. Chemical characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing seasonal perspective[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* ,2013 ,13(14) : 7053-7074.
- [32] Duan F K ,He K B ,Ma Y L , et al. Concentration and chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing ,China 2001-2002 [J]. *Science of the Total Environment* , 2006 ,355(1/2/3) :264-275.

(下转第161页)

- vent extraction procedure for simultaneous analysis of carboxylic acids and sugars[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2013, 405: 1095–1104.
- [9] 何凌燕, 胡敏, 黄晓锋, 等. 北京大气气溶胶 PM<sub>2.5</sub> 中的有机示踪化合物[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(1): 23–29.  
He Lingyan, Hu Min, Huang Xiaofeng, et al. Determination of water soluble organic acids in PM<sub>2.5</sub> of atmosphere in Beijing[J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 25(5): 21–25.(in Chinese)
- [10] Simoneit B R T, Elias V O, Kobayashi M, et al. Sugars – dominant water –soluble organic compounds in soils and characterization as tracers in atmospheric particulate matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(22): 5939–5949.
- [11] Fraser M P, Lakshmanan K. Using levoglucosan as a molecular marker for the long–range transport of biomass combustion aerosols[J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(21): 4560–4564.
- [12] 王文辉, 杨俊, 刘川. 高效液相色谱法测定雪莲果等昆明市售 18 种水果中果糖、葡萄糖、蔗糖的含量[J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2008, 30(S1): 348–350.  
Wang Wenhui, Yang Jun, Liu Chuan. A study on the determination of glucose, fructose and sucrose in fruit by HPLC [J]. *Journal of Yunnan University Natural Science Edition*, 2008, 30(S1): 348–350.(in Chinese)
- [13] Medeiros P M, Conte M H, Weber J C, et al. Sugars as source indicators of biogenic organic carbon in aerosols collected above the Howland Experimental Forest, Maine [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(9): 1694–1705.
- [14] Bauer H, Claeys M, Vermeylen R, et al. Arabitol and mannitol as tracers for the quantification of airborne fungal spores [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(3): 588–593.
- [15] Dahlman L, Persson J, Nasholm T, et al. Carbon and nitrogen distribution in the green algal lichens *Hypogymnia physodes* and *Platismatia glauca* in relation to nutrient supply [J]. *Planta*, 2003, 217(1): 41–48.
- [16] Wang X Y, Lin X G, Ke Huiming, et al. Researches of effects of phthalate esters on rodents and human [J]. *Environmental Health*, 2007, 24(9): 736–738.
- [17] 沈婷, 王小逸, 林兴桃, 等. 空气中邻苯二甲酸酯类分析方法的研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2008, 25(9): 834–836.  
Shen Ting, Wang Xiaoyi, Lin Xingtao, et al. Advance in analytical methods for phthalate esters in air [J]. *J Environ Health*, 2008, 9: 834–836.(in Chinese)
- [18] 何凌燕. 城市大气颗粒有机物化学组成及变化特征[D]. 北京: 北京大学, 2003.  
He Lingyan. Characterization of Urban Particulate Organic Matter (POM) Identification, Abundance and Sources [D]. Beijing: Peking University, 2003.(in Chinese)
- [19] 张元勋. 燃烧源排放颗粒有机物的化学组成研究[D]. 北京: 北京大学, 2005.  
Zhang Yuanxun. Study on Speciation of Particulate Organic Matter from Combustion Sources [D]. Beijing: Peking University, 2005.(in Chinese)
- [20] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, et al. Chemical compositions of fine particulate organic matter emitted from Chinese cooking [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(1): 99–105.
- [21] Zheng M, Cass G R, Schauer J J, et al. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in the southeastern United States using solvent–extractable organic compounds as tracers [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36: 2361–2371.
- [22] 唐小玲, 倪金龙. 广州大气气溶胶总悬浮颗粒物中的有机示踪化合物[J]. *环境化学*, 2012, 31(2): 226–232.
- [23] 沈昊宇, 应丽艳, 曹云峰, 等. 固相萃取–气相色谱/质谱法同时测定化妆品中的邻苯二甲酸酯和对羟基苯甲酸酯[J]. *色谱*, 2007, 25(2): 272–275.  
Shen Haoyu, Ying Liyan, Cao Yunfeng, et al. Simultaneous determination of phthalates and parabens in cosmetic products by gas chromatography/mass spectrometry coupled with solid phase extraction [J]. *Journal of Chromatography*, 2007, 25(2): 272–275.(in Chinese)
- [33] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, et al. The ion chemistry, seasonal cycle and sources of PM<sub>2.5</sub> and TSP in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 2935–2952.
- [34] Shen Z, Gao J J, Arimoto R, et al. Ionic composition of TSP and PM<sub>2.5</sub> during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 2911–2918.
- [35] Hu M, He L Y, Zhang Y H, et al. Seasonal variation of ionic species in fine particles at Qingdao, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 5853–5859.
- [36] Sun Y L, Zhang G S, Tang A H, et al. Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in haze–fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(10): 3148–3155.
- [37] Li J, Zhuang G S, Huang K, et al. The chemistry of heavy haze over Urumqi central Asia [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2008, 61(9): 57–72.

(上接第 149 页)