

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

|                                             |                                            |                         |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 2014年APEC前后北京城区PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征分析 | 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明                 | (4325)                  |
| 2013年北京市不同方位PM <sub>2.5</sub> 背景浓度研究        | 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨                  | (4331)                  |
| APEC期间北京空气质量改善对比分析                          | 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达                     | (4340)                  |
| 嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应                 | 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥                   | (4348)                  |
| 烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响                       | 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁                             | (4358)                  |
| 典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡                            | 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤                       | (4366)                  |
| 上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应                      | 刘飞,褚慧敏,郑祥民                                 | (4374)                  |
| 重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析                        | 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立                     | (4381)                  |
| 利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究                      | 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤                              | (4389)                  |
| 低浓度CO <sub>2</sub> 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附        | 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真                        | (4396)                  |
| 红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制               | 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞                              | (4403)                  |
| 中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征                     | 安思危,孙涛,马明,王定勇                              | (4414)                  |
| 基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数              | 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮                      | (4420)                  |
| 白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征               | 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明                       | (4430)                  |
| 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应                     | 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰             | (4436)                  |
| 湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响               | 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治                     | (4444)                  |
| 贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义                    | 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖                  | (4455)                  |
| 碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析                  | 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国             | (4464)                  |
| 钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征                | 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳               | (4471)                  |
| 长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价                     | 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣                         | (4479)                  |
| 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例           | 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁                          | (4486)                  |
| 柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响                    | 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇                           | (4494)                  |
| 微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响                     | 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩                          | (4501)                  |
| 扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律                     | 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍                           | (4509)                  |
| 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应                            | 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水                             | (4516)                  |
| 开放系统下方解石对磷的去除                               | 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文                    | (4523)                  |
| 铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系                   | 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生                         | (4531)                  |
| 基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究              | 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良                             | (4539)                  |
| ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验                      | 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵                      | (4546)                  |
| 基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价                        | 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春               | (4553)                  |
| 北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析                   | 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平                       | (4561)                  |
| 广州市小学生多环芳烃内暴露水平                             | 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞                    | (4567)                  |
| 构建三元混合污染物的三维等效图                             | 刘雪,刘树深,刘海玲                                 | (4574)                  |
| 化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征                 | 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新              | (4582)                  |
| 不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性                   | 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑                            | (4591)                  |
| 基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图                          | 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩                         | (4600)                  |
| 土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究                            | 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰                | (4609)                  |
| 纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响                      | 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳                             | (4615)                  |
| 蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用                          | 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚                      | (4623)                  |
| 纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响                      | 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体 | (4630)                  |
| 黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响                   | 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭         | (4642)                  |
| 耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化         | 马聪,秦丹,孙倩,于昌平                               | (4651)                  |
| 浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征                    | 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎                          | (4659)                  |
| 缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化                | 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源                      | (4667)                  |
| 华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响                       | 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊                            | (4676)                  |
| 再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估                | 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙                      | (4682)                  |
| 《环境科学》第36卷(2015年)总目录                        |                                            | (4690)                  |
| 《环境科学》征订启事(4347)                            | 《环境科学》征稿简则(4454)                           | 信息(4463,4530,4573,4581) |

# 2013年北京市不同方位PM<sub>2.5</sub>背景浓度研究

李云婷,程念亮,张大伟\*,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨

(北京市环境保护监测中心,大气颗粒物监测技术北京市重点实验室,北京 100048)

**摘要:** 利用2013年北京市6个站点PM<sub>2.5</sub>浓度及5个站点气象监测数据,综合采用数理统计、物理识别、数值模拟的方法分析了2013年北京市不同方位PM<sub>2.5</sub>的背景值. 结果表明,2013年北京市西北、东北、东、东南、南、西南这6个方向边界点位的背景浓度在40.3~85.3 μg·m<sup>-3</sup>之间,按由低到高顺序依次为密云水库、八达岭、东高村、榆堡、永乐店和琉璃河;2013年北京市PM<sub>2.5</sub>北风时段背景值最低,西风时段次之,南风、东风时段明显偏高,不同风向下背景浓度的平均值分别在6.5~27.9、22.4~73.4、67.2~91.7、40.7~116.1 μg·m<sup>-3</sup>之间,表现出北京东、南方向PM<sub>2.5</sub>背景浓度较高分布特点;模拟的2013年北京市PM<sub>2.5</sub>背景浓度空间分布呈现出南高北低的特征,周边区域对北京市PM<sub>2.5</sub>背景浓度空间分布影响显著.

**关键词:** 北京; PM<sub>2.5</sub>; 裁剪平均; 背景浓度; 模拟; 2013

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4331-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.12.002

## PM<sub>2.5</sub> Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013

LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei\*, SUN Rui-wen, DONG Xin, SUN Nai-di, CHEN Chen

(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

**Abstract:** PM<sub>2.5</sub> background concentration at different directions in 2013 in Beijing was analyzed combining the techniques of mathematical statistics, physical identification and numerical simulation (CMAQ4.7.1) as well as using monitoring data of six PM<sub>2.5</sub> auto-monitoring sites and five meteorological sites in 2013. Results showed that background concentrations of PM<sub>2.5</sub> at northwest, northeast, eastern, southeast, southern and southwest boundary sites were between 40.3 and 85.3 μg·m<sup>-3</sup> in Beijing. From the lowest to the highest, PM<sub>2.5</sub> background concentrations at different sites were: Miyun reservoir, Badaling, Donggaocun, Yufa, Yongledian and Liulihe. Background concentration of PM<sub>2.5</sub> was the lowest under north wind, then under west wind, and significantly higher under south and east wind. Calculated PM<sub>2.5</sub> background average concentrations were 6.5-27.9, 22.4-73.4, 67.2-91.7, 40.7-116.1 μg·m<sup>-3</sup> respectively in different wind directions. Simulated PM<sub>2.5</sub> background concentration showed a clear north-south gradient distribution and the surrounding area had a notable effect on the spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> background concentration in 2013 in Beijing.

**Key words:** Beijing; PM<sub>2.5</sub>; trimming average; background concentration; simulation; 2013

随着我国经济及城市化进程的的发展,大气污染呈现复合型、区域型特征<sup>[1]</sup>;一方面污染物来源更加复杂,另一方面区域性污染问题愈加突出<sup>[2]</sup>. 环境背景是大气、水、土壤等环境领域的一个重要的概念<sup>[3]</sup>,关于某一地区环境空气中污染物背景值的确立一般依靠设立的环境背景站获得相应的监测数据,然而连绵成片的城市群排放的污染物在一定气象条件下被远距离输送,必然导致背景区域污染物浓度的抬升<sup>[4]</sup>.

PM<sub>2.5</sub>是大气中主要的污染物之一,它是空气动力学粒径小于或等于2.5 μm的颗粒物,也称为细颗粒物<sup>[5]</sup>. 研究特定时期一定区域内PM<sub>2.5</sub>背景浓度具有极大的理论和现实意义,国内外对不同地区PM<sub>2.5</sub>浓度水平及影响因素做了大量研究,但对PM<sub>2.5</sub>背景值研究较少且国内外并没有统一的、公认的关于PM<sub>2.5</sub>背景值的科学定义<sup>[6-8]</sup>. 苏彬彬

等<sup>[9]</sup>将背景站点的监测数据的算术平均值作为背景浓度,并分析了武夷山站2011年3月~2012年2月PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>为期1a的监测数据,发现华东森林及高山区域现阶段PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>背景浓度分别为(23±16) μg·m<sup>-3</sup>和(18±12) μg·m<sup>-3</sup>且背景地区主要以细粒子为主;张晓勇等<sup>[10]</sup>认为城市大气颗粒物背景值不同于颗粒物本底值,本底值是指不受人类活动影响的自然条件下颗粒物的浓度值,而背景值是个相对值,其所在的环境条件有可能已经受到了环境污染;蔡旭晖等<sup>[11]</sup>认为背景浓度指研究

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-06-30

基金项目: 北京市科技计划项目(Z131100006113009); 环境保护公益性行业科研专项(201409005); 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B03); 北京市空气质量达标规划项目(Z131100005613046)

作者简介: 李云婷(1977~),女,高级工程师,主要研究方向为大气环境研究与空气质量预警预报, E-mail: lee\_yunting@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn

区域内未受人类活动直接影响的浓度值,通常在远郊或清洁对照点设站观测,并利用 2000 年 1、4、7、10 月北京市定陵站观测站的逐时监测资料,结合风场诊断和随机游走扩散的模拟方法分析了北京市  $\text{PM}_{10}$  背景浓度,该地区  $\text{PM}_{10}$  背景浓度估计值约为  $10 \sim 40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 李金香等<sup>[12]</sup> 提出大气环境背景值为未叠加城市局地污染时环境中大气污染物的浓度,利用 2003 年 11 月至 2004 年 12 月北京市北部和南部 2 个清洁站点的监测数据,计算了 117 个中尺度天气系统影响下北京市  $\text{PM}_{10}$  的背景值为  $58 \sim 67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 马志强等<sup>[13]</sup> 认为  $\text{PM}_{2.5}$  背景值指的是在一定时段内能代表和反映数千平方公里及以上尺度的大气平均状况的浓度值,并通过气团识别方式,定量评估了不同风向下北京上甸子站  $\text{PM}_{2.5}$  背景值,结果显示偏北风过程中  $\text{PM}_{2.5}$  背景值介于  $10.3 \sim 13.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 偏南风过程中  $\text{PM}_{2.5}$  背景值介于  $60.2 \sim 92.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

这些研究  $\text{PM}_{2.5}$  背景值方法多为数理统计、物理识别、化学识别的方法<sup>[14]</sup>,如何合理地剔除本地污染源贡献,同时对区域浓度水平给予客观评价,反映出相对的背景浓度水平,是关键点同时也是难点所在. 随着空气质量数值模型的发展,观测数据及数值模拟技术相结合研究  $\text{PM}_{2.5}$  背景值成为可能<sup>[15, 16]</sup>. 目前北京市  $\text{PM}_{2.5}$  多点位、长时间序列的研究较少,对北京市的  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度研究较为缺乏,急需开展北京市  $\text{PM}_{2.5}$  背景值的估算研究; 自 2013 年北京市环境保护监测中心建立  $\text{PM}_{2.5}$  监测网络以来,已经积累了超过一个完整自然年的监测数据,本文采用观测数据及数值模拟技术相结合的方式,综合采用数理统计、物理识别、数值模拟的方法研究 2013 年北京市不同方位  $\text{PM}_{2.5}$  的背景值浓度,以期管理部门提供多角度的决策支持信息.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测站点和数据

北京位于东经  $115.7^\circ \sim 117.4^\circ\text{E}$ , 北纬  $39.4^\circ \sim 41.6^\circ\text{N}$ , 处于华北平原西北端,三面环山,平均海拔  $43.5\text{m}$ , 山地一般海拔  $1000 \sim 1500\text{m}$ , 总面积  $16410.54\text{km}^2$ , 国土面积 62% 为山区,全市森林覆盖率为 37.6%. 气候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  $450\text{mm}$ , 年均降水的 80% 集中在夏季 6、7、8 这 3 个月<sup>[17]</sup>.

北京市的空气质量地面自动监测网络由 35 个

站点组成,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. 采用基于微量振荡天平法的 Thermo 1405F 系列仪器监测  $\text{PM}_{2.5}$  浓度. 仪器操作流程严格按照文献<sup>[18]</sup> 进行. 为更好研究北京  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度,在北京市西北、东北、东、东南、南、西南这 6 个不同方位选取了密云水库、八达岭、东高村、琉璃河、永乐店、榆堡这 6 个站点(位置见图 1)的 2013 年逐时观测数据进行研究.

北京市地面自动站气象资料从中国气象科学共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>) 获得,从 28 个地面气象站的监测数据中挑选出北京市不同方位的 5 个气象观测站点,分别为西北方位的延庆、东北方位的密云、东侧的金海湖、城区东南方位的南郊观象台以及西南方位的房山(位置见图 1); 仪器为荷兰 WAISALA 公司的 WXT520 气象观测仪,对风、温、压、湿等地面气象参数进行观测. 高空气象观测站点为南郊观象台,天气图为韩国天气实况图(<http://web.kma.go.kr/eng/weather/images/analysischart.jsp>), 遥感资料为 MODIS 遥感产品(<http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/imagery/>).



图 1 监测站分布和分类

Fig. 1 Distribution and classification of observation sites

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 背景时段筛选与估算

本研究定义北京市  $\text{PM}_{2.5}$  背景值是指未叠加北

京市局地的人为污染时,大气环境中 PM<sub>2.5</sub> 的浓度水平;既包括北京市自然环境背景,又包括大范围长距离输送的贡献,并以 2013 年为情景年进行研究.对情景年内的 5 个地面观测站的风向进行筛选,筛选出 5 站点均为北向风(西北、北西北、北、北东北)、均为南向风(南西南、南、南东南、东南)、均为东向风(东南东、东、东北东、东北)和均为西向风(西南、西西南、西、西西北)的时段,各风向设为 4 个象限,同一象限下,风向角度持续 3 个时次以上,单小时风向跨越两个象限将予以剔除,主要是考虑这种稳定持续的风场已对本地污染起到了一定的清除作用,也不易形成重新积累,使测算结果能进一步接近背景真实情况;在依据上述标准进行风向筛选后,结合每日 08:00 和 20:00 的探空数据资料及实况天气图做进一步的判别,中低空天气形势配置中尺度过程清楚,且 850 hPa 至低空风向较为一致,风向差 $\leq 60^\circ$ ,这样得到了整体风向较为统一的气象数据时间序列,中层和低空风场的一致性,可进一步保证对前期污染过程和局地积累的清除.结合遥感、实测天气图、后向轨迹等资料或方法对特殊污染(沙尘过程、烟花爆竹、秸秆燃烧、污染回流)时段的数据

也进一步剔除.

在全年 8 760 个时段内,5 个气象观测站点均为东、南、西、北风时段分别为 450、381、101、262 个.从各风向的风速统计结果来看,除东风外, P30<sup>[19]</sup> (将数据从小到大排序, P30 为第 30% 位置数值) 风速已基本全部达到  $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上(表 1).除东风外, P50 (将数据从小到大排列, P50 为第 50% 位置数值) 风速也基本全部达到  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上.整体来看,北风风速最大,西风次之,南风略低于西风,东风时段风速最小,风速的这种分布主要与导致北京地面出现系统性风场的中尺度天气过程强度有关<sup>[20]</sup>.一般情况下,从西北方向南移动的大陆性高压系统多以深厚、风力较大为特征,西风和北风属于这类风场,而南风 and 东风过程风力相对较弱.情景年内东风类型较为复杂,大致分为两类,一类为常见的海上副高底部东风-东南风类型,近地面风力不大,但湿度较高,扩散能力一般,对污染物的清除效果还与上游污染水平有关;另一类属于大陆高压系统中心位于我国河北省北部、内蒙古东部或者辽宁吉林一带,地面位于高压底部,偏东北风显著,清除能力较强;由于北部高压中心位置偏东情况较多,造成情景年内偏东风样本较多<sup>[21, 22]</sup>.

表 1 不同站点各风向背景时段统计

Table 1 Statistics of the wind background time at different directions and sites

| 项目 | 小时数<br>/h | P30/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |     |     |     |     | P50/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |     |     |     |     |
|----|-----------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|    |           | 观象台                               | 延庆  | 房山  | 密云  | 金海湖 | 观象台                               | 延庆  | 房山  | 密云  | 金海湖 |
| 东风 | 450       | 1.4                               | 0.9 | 0.9 | 1.1 | 1.2 | 1.9                               | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.8 |
| 南风 | 381       | 2.2                               | 2.2 | 1.5 | 1.6 | 1.4 | 2.7                               | 2.7 | 1.8 | 2.1 | 1.9 |
| 西风 | 101       | 2.8                               | 2.2 | 1.4 | 1.9 | 1.8 | 3.5                               | 3.3 | 1.9 | 2.3 | 2.5 |
| 北风 | 262       | 3.4                               | 2.1 | 2.4 | 2.6 | 1.9 | 4.4                               | 3.1 | 3.5 | 3.6 | 2.8 |

通过上述条件筛选的背景时段在风速和天气系统识别方面具有一定的代表性,其对应时段的浓度监测结果可表征 PM<sub>2.5</sub> 背景浓度的大致水平,将筛选出的各风向背景时段与 PM<sub>2.5</sub> 监测站点逐时监测数据进行一一匹配,分析实测值统计特征、背景值范围,进一步采用裁剪平均的计算方法排除较高和较低的监测极值带来的影响,初步估算北京市不同方位站点 PM<sub>2.5</sub> 的背景值浓度.

1.2.2 模式验证及估算

综合空气质量模式 CMAQ(4.7.1)<sup>[23]</sup> 采用双向嵌套技术,水平分辨率分别为 12 km 及 4 km,水平模拟区域分别为华北地区及北京地区,垂直方向上设置 20 层粗网格,8 层位于 1 000 m 以下.采用 SAPRC99 化学机制模拟气态及气溶胶浓度,气溶胶

粒径分布采用三模态表示,分别是爱根核模态、积聚模态和粗模态.模拟时间为 2013 年一完整年,提前 7 d 启动模式,作为模拟的初始化过程,以减少初始及边界条件的模拟误差.采用 ARW-WRF3.2<sup>[24]</sup> 模拟 2013 年一完整年气象场, WRF 模式水平网格与 CMAQ 模式相对应;垂直层次设为 35 层;使用气象前处理模块 MCIP 将 WRF 的输出结果转化为 CMAQ 模型可识别的数据格式.运用天然源数据处理模型 MEGAN<sup>[25]</sup> 获得自然源,人为源排放清单则采用 2010 年清华大学 MEIC<sup>[26]</sup> 排放清单,其中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 排放数据以 2013 年污染源普查数据替代, NH<sub>3</sub> 排放数据取自 2010 年日本国立环境研究所开发的亚洲地区 REAS 排放清单,整合、处理后的天然源、人为源排放清单共同输入到 SMOKE

中. SMOKE 在物种分配时,将  $\text{PM}_{2.5}$  分为较为详细的 5 个物种,包括初始硝酸盐  $\text{PNO}_3$  (1%)、初始硫酸盐  $\text{PSO}_4$  (9%),初始有机物 POA (30%)、初始元素碳 PEC (24%) 和更细颗粒物  $\text{PMFINE}$  (36%),在计算网格内采用统一的分配方案<sup>[27]</sup>.

为验证 CMAQ 的模拟效果,使用 2013 年 1~12 月榆堡、密云水库、永乐店、琉璃河、青龙山、八达岭 4 km 网格分辨率的数值模拟结果与实测值逐日进行比对,图 2 为密云水库、琉璃河  $\text{PM}_{2.5}$  模拟值与观测值的散点图,可以看出 2 个站点  $\text{PM}_{2.5}$  的模拟值与

观测值的时间序列变化较为一致, $\text{PM}_{2.5}$  模拟值均在观测值的 0.5~2 倍的范围内,模拟结果低估,模拟误差的可能原因包括:①模型自身存在不足,模型使用的化学反应机制简化,不能全面描述所有的大气化学反应,而模式网格的 4 km 空间分辨率会将更小空间尺度的影响平滑掉;②源清单的不确定性, $\text{PM}_{2.5}$  排放来源排放十分复杂,且排放源清单中没有考虑海盐和扬尘,源排放估算的不确定会对模拟结果产生影响;③气象场模拟的误差,气象要素的不确定性如边界层上层情况的不准确也起着一定作用<sup>[28]</sup>.

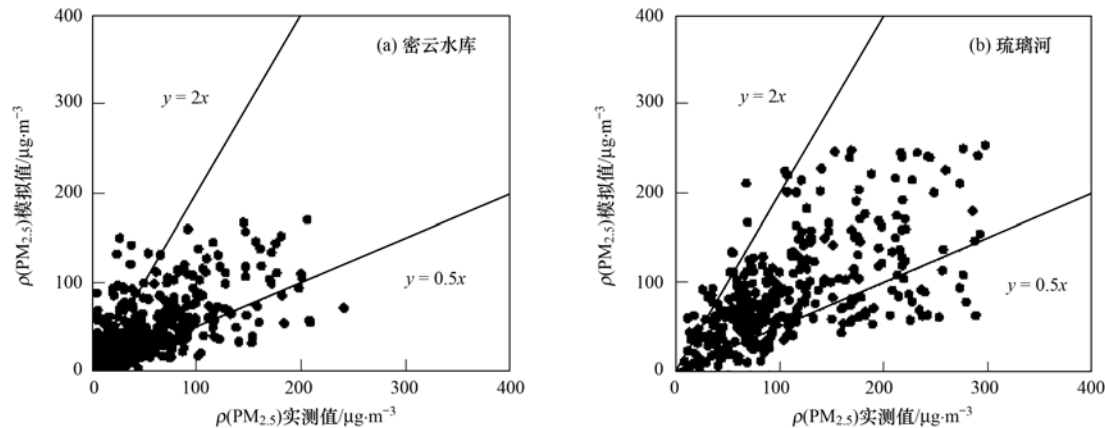


图 2 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  模拟值与实测值的散点图

Fig. 2 Scatter diagram of measured and simulated data of  $\text{PM}_{2.5}$  in 2013 in Beijing

研究进一步统计了 6 个监测点位观测值与模拟值的标准平均偏差 (NMB)、标准平均误差 (NME)、平均相对偏差 (MFB)、平均相对误差 (MFE) 和相关系数  $R$  统计指标来评估模拟结果与实测值的吻合程度,结果见表 2. 经计算  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  模拟值与监测值的相关系数在 0.69~0.80 之间,NMB 在 -25%~-13% 之间,NME 在 18%~31% 之间,MFB 在 -40%~-21% 之间,MFE 在 30%~42% 之间. 刘宁<sup>[29]</sup>对 2009 年珠三角 1、4、8、11 月的臭氧和颗粒物及其化学组分进行模拟,各站点  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{10}$  的模拟结果均低于观测值, $\text{PM}_{2.5}$  平均模拟值低于模拟结

果约 29.1%,偏差在 -3.61%~-57.3%;Mebust 等<sup>[30]</sup>用 CMAQ 模拟了美国东部  $\text{PM}_{10}$  的日均浓度,验证结果显示  $\text{PM}_{10}$  的模拟值与监测值的 NMB 为 -29.2%、NME 为 50.8%;王茜<sup>[31]</sup>用 CMAQ 对上海市秋季  $\text{PM}_{2.5}$  污染过程模拟 NMB 在 -45.9%~10% 之间,NME 在 20%~65.5% 之间;本文验证结果与 Boylan 等<sup>[32]</sup>设定的评价标准 (MFB $\leq\pm 60\%$  和 MFE $\leq 75\%$ ) 较一致,同时与 EPA 推荐的颗粒物评价标准<sup>[33]</sup>一致,模拟值的偏差、误差、均方根误差和一致性指数大都落在参考标准的范围内,并与文献报道的评估结果相当,说明本次模拟结果可以接受.

表 2 2013 年全年北京市不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  观测值与模拟值的统计参数

Table 2 Performance statistical parameters for  $\text{PM}_{2.5}$  at different sites in Beijing in 2013

| 项目   | 监测值<br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 模拟值<br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | $R$  | NMB/% | NME/% | MFB/% | MFE/% |
|------|------------------------------------------|------------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| 榆堡   | 112.10                                   | 94.14                                    | 0.71 | -25   | 29    | -40   | 42    |
| 密云水库 | 58.70                                    | 49.11                                    | 0.80 | -16   | 20    | -33   | 38    |
| 永乐店  | 115.01                                   | 86.37                                    | 0.70 | -23   | 31    | -36   | 39    |
| 琉璃河  | 121.80                                   | 105.06                                   | 0.69 | -16   | 18    | -32   | 34    |
| 东高村  | 84.40                                    | 74.63                                    | 0.76 | -13   | 19    | -29   | 30    |
| 八达岭  | 61.80                                    | 51.97                                    | 0.78 | -17   | 24    | -27   | 31    |

研究采用情景分析的方法模拟北京市 PM<sub>2.5</sub> 的背景浓度,步骤如下:①利用 CMAQ 模拟一个完整年北京市及周边所有源都不关闭时的 PM<sub>2.5</sub> 污染分布;②利用 CMAQ 模拟一个完整年北京人为源关闭时的 PM<sub>2.5</sub> 污染分布,其结果代表了北京市的背景浓度或天然源与周边源贡献相对分布;③计算北京市所有网格第 2 步骤的模拟结果与第 1 步骤的模拟结果的比值,得出不同网格的周边源的贡献率;④利用第 3 步骤计算的贡献率乘以不同监测点位的实测值,得到背景浓度绝对值及其空间分布.这一方法在计算某一地区外来源贡献时应用较为广泛,但对模拟某一地区背景浓度应用较少<sup>[34]</sup>.

2 结果与讨论

2.1 PM<sub>2.5</sub> 浓度统计分布

表 3 为不同站点各风向下 PM<sub>2.5</sub> 浓度统计特

征量的分布,标准差、峰度、偏度分别是数据样本离散程度、曲线陡峭程度、偏离平均值程度统计量.整体来看不同风向下各监测点位的浓度标准差由小至大顺序均为北风<西风<南风<东风,6 个监测点位均为此顺序,反映了北风对 PM<sub>2.5</sub> 浓度有着较强的清除效果;而南风对 PM<sub>2.5</sub> 浓度有着较强的累积效果;东风作用下 PM<sub>2.5</sub> 浓度则更多地受到来自上游地区的浓度水平、较为潮湿的海上气团和降水等气象条件影响,浓度变化波动较大.在偏度和峰度上,各点位各风向收集的样本分布总体呈现向低浓度区间的偏态分布,但密云水库、八达岭和东高村 PM<sub>2.5</sub> 浓度在南风背景时段、榆堡在西风背景时段的样本分布都更加接近正态分布,一定程度上反映出这些地区在系统风影响下,背景浓度为多重因素的影响的综合结果<sup>[35]</sup>.

表 3 不同站点各风向 PM<sub>2.5</sub> 浓度分布特征量<sup>1)</sup>

Table 3 Distribution of statistical characteristics of PM<sub>2.5</sub> at different directions and sites

| 站点   | 项目  | 东风     | 西风    | 南风    | 北风    |
|------|-----|--------|-------|-------|-------|
| 榆堡   | 标准差 | 104.42 | 55.08 | 60.24 | 46.18 |
|      | 偏度  | 2.26   | 1.01  | 1.52  | 3.11  |
|      | 峰度  | 8.86   | 0.62  | 2.76  | 11.04 |
| 密云水库 | 标准差 | 78.29  | 43.75 | 46.04 | 23.80 |
|      | 偏度  | 2.42   | 1.59  | 0.70  | 3.56  |
|      | 峰度  | 9.87   | 2.30  | 0.15  | 14.41 |
| 八达岭  | 标准差 | 74.88  | 41.69 | 51.14 | 28.82 |
|      | 偏度  | 1.23   | 2.58  | 0.78  | 5.71  |
|      | 峰度  | 1.39   | 7.39  | 0.20  | 37.18 |
| 永乐店  | 标准差 | 105.48 | 57.64 | 71.23 | 49.00 |
|      | 偏度  | 1.59   | 2.13  | 2.19  | 3.01  |
|      | 峰度  | 4.36   | 5.40  | 8.84  | 9.37  |
| 琉璃河  | 标准差 | 115.29 | 67.91 | 71.08 | 58.71 |
|      | 偏度  | 1.90   | 1.92  | 1.78  | 2.63  |
|      | 峰度  | 5.67   | 4.34  | 4.34  | 7.36  |
| 东高村  | 标准差 | 87.76  | 57.12 | 61.51 | 45.64 |
|      | 偏度  | 2.13   | 1.27  | 0.85  | 3.40  |
|      | 峰度  | 7.70   | 1.22  | -0.22 | 11.27 |

1) 标准差单位 μg·m<sup>-3</sup>, 偏度、峰度无单位

2.2 PM<sub>2.5</sub> 背景浓度统计估算

表 4 为采用裁剪平均的计算方法排除较高和较低的监测极值后的统计结果,裁剪平均是样本数据排序后去掉最低和最高两个等比例部分之后剩下的样本平均,去掉极端值后剩下的结果更能接近稳定的值.从中可知各类裁剪平均的计算结果普遍低于所有样本的平均值,这可能由于高浓度样本数值普遍较高,对均值的影响比较显著;统计的中值整体也低于平均值.结合表 4 可知,各站各风向 20% ~

50% 裁剪平均的结果差异全部在 10 μg·m<sup>-3</sup> 以内,区间比较窄,说明以 80% (20% 裁剪平均) 的样本,已经可以代表背景值的整体水平,可以通过进一步计算获得背景浓度的参考值<sup>[36]</sup>.

图 3 为不同风向不同站点 PM<sub>2.5</sub> 背景浓度箱式分布,结合表 4 可知,各点位估算的情景年背景浓度北风时最低,其次为西风时段,南风时段和东风时段最高,不同风向下(北、西、南、东)背景浓度平均值分别在 6.5 ~ 27.9、22.4 ~ 73.4、67.2 ~ 91.7、

40.7 ~ 116.1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,表现出北京东、南方向  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度较高分布特点. 具体来看,密云水库和八达岭的东风时段背景值低于其南风时段估算结果,并且在东风背景时,各区域平均值差异比较显著,密云水库、八达岭和东高村整体较低,榆堡、永乐店和琉璃河整体水平较高,一定程度表征了东风背景下的区域影响对我市北部和南部地区存在空间上的差异. 西风时段榆堡和琉璃河浓度均值略高一些,八达岭最低,浓度跨度也最小;与其他风向背景不同,西风时段内没有出现 400  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上的异常高值. 南风时,各地区之间背景值的最高值有一定差异,但位于南侧郊区的榆堡最高值低于八达岭、永乐店、琉璃河和青龙山等点位,由于榆堡最接近

北京市最南端,也表明南风背景具有较弱的局部地区清洁能力. 北风时,琉璃河、永乐店和榆堡的浓度范围略宽一些,但各站之间的平均值差异不大. 在估算各点位全年均值时,对其 20% 裁剪平均范围内样本算术平均和依据风向时次加权平均两种计算方法结果进行比较,加权结果略高于前者且计算方式相对更为合理<sup>[37]</sup>. 加权结果可知,西北、东北、东、东南、南、西南 6 个方向边界点位的背景浓度在 45.5 ~ 85.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,由低到高顺序依次为密云水库、八达岭、东高村、榆堡、永乐店和琉璃河与各站情景年的实测结果相比,背景值的估算结果偏低 7 ~ 35  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右,约为 11% ~ 30% 左右.

表 4 不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  背景值概率分布特征统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| Table 4 Percentiles, trimmed means, probability maxima and ranged of $\text{PM}_{2.5}$ background concentration/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |    |             |             |             |               |               |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| 项目                                                                                                                                               | 类型 | 八达岭         | 密云水库        | 东高村         | 永乐店           | 榆堡            | 琉璃河           |
| 20% ~ 50% 裁剪平均浓度区间                                                                                                                               | 东风 | 56.8 ~ 66.8 | 40.7 ~ 50.0 | 72.8 ~ 80.3 | 102.0 ~ 111.5 | 102.3 ~ 110.4 | 108.7 ~ 116.1 |
|                                                                                                                                                  | 南风 | 74.9 ~ 79.6 | 67.2 ~ 70.0 | 77.1 ~ 85.6 | 76.1 ~ 84.5   | 78.2 ~ 83.7   | 84.3 ~ 91.7   |
|                                                                                                                                                  | 西风 | 22.4 ~ 25.5 | 24.2 ~ 30.0 | 42.4 ~ 51.3 | 45.4 ~ 57.8   | 57.8 ~ 64.3   | 61.3 ~ 73.4   |
|                                                                                                                                                  | 北风 | 9.4 ~ 11.0  | 6.5 ~ 8.6   | 10.2 ~ 14.6 | 15.6 ~ 22.3   | 18.1 ~ 25.9   | 19.9 ~ 27.9   |
| 20% ~ 50% 裁剪范围内平均                                                                                                                                |    | 40.9 ~ 45.7 | 34.7 ~ 39.7 | 50.6 ~ 58.0 | 59.8 ~ 69.0   | 64.1 ~ 71.1   | 68.6 ~ 77.3   |
| 20% 和 50% 裁剪平均值浓度差                                                                                                                               |    | 4.8         | 5.0         | 7.4         | 9.2           | 7.0           | 8.7           |
| 20% 裁剪范围内加权平均                                                                                                                                    |    | 55.0        | 45.5        | 65.1        | 78.6          | 79.3          | 85.2          |
| 100% 样本平均                                                                                                                                        |    | 54.2        | 49.4        | 68.6        | 81.8          | 83.5          | 90.4          |
| 2013 年实测值                                                                                                                                        |    | 61.8        | 58.7        | 84.4        | 115.8         | 112.1         | 121.8         |

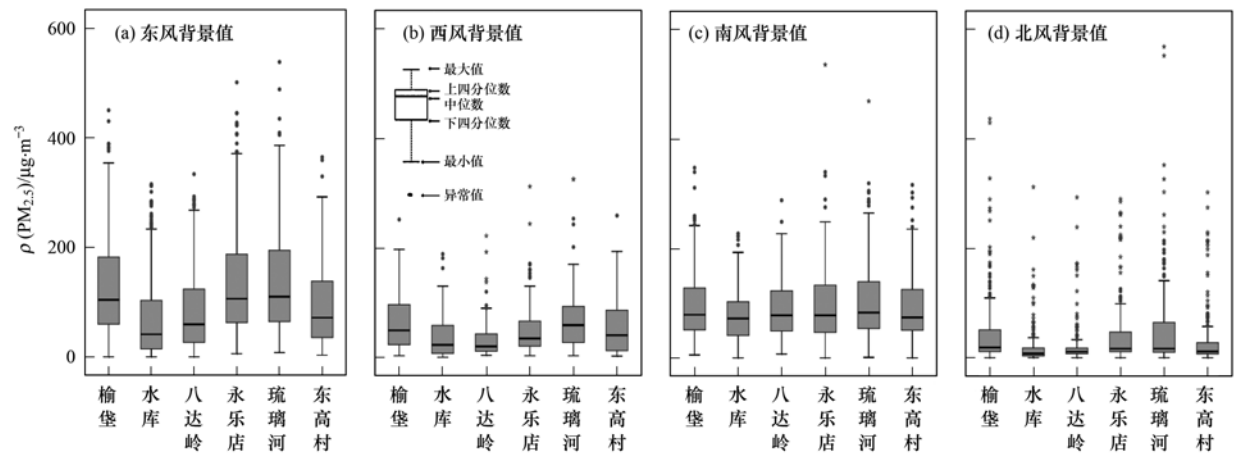


图 3 不同风向不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度箱式分布

Fig. 3 Background concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  at different directions and sites

在情景年内,东风的背景浓度水平高于南风和西风时段,这与往年其他污染物的分析结果<sup>[38]</sup>有所差异,这可能与东风作用下引起的周边区域污染输送及回流有关<sup>[39]</sup>;程念亮等<sup>[40]</sup>研究表明偏南风引起的周边高浓度污染物传输到北京上空后,污染物主要积聚在山前无法疏散,一段时间后风向突然间

转为偏东风,引起高浓度污染物回流. 一般情况下,大气中颗粒物浓度主要受污染源(包括城市本地源和周边源)及天气形势和气象条件的影响,本研究仅反映了情景年内的一些特征,对于跨年度长时间序列背景值分布还需进一步研究. 本统计方法测算的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分布误差主要来自: ①风速风向误差,

局地地形差异较大,山间河谷等地区风向转换快且风速偏大,监测站点附近气象观测站风速风向也很难代表  $\text{PM}_{2.5}$  监测点位风速风向;②背景时段筛选带来的误差,背景时段的代表性直接关系着研究的准确性;③统计方法误差,不同的统计方法结果也不尽相同。

### 2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 背景浓度模拟

采用模式情景分析方法,集成模型模拟相对值较为准确、监测点位实测浓度较为准确的各自优点,能够大幅降低背景浓度分析的不确定性。图 4 为情景模拟的北京市及周边所有源都不关闭时、北京人为源关闭时  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度的空间分布,表 5 为统计的不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度模拟值。由图 4 及表 5 可知,模拟及实测的  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度均呈现出南北梯度分布的特征,而模拟的北京人为源关闭后  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度是所有源都不关闭时年均浓度的 0.6 ~ 0.8 倍。经计算后模拟的北京市  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度空间分布与测算结果大体一致,呈现出南北梯度特征;北部的密云、怀柔、昌平定陵以南地区,浓度均在  $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右,中心城区浓度水平在  $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右,而南部的丰台、房山、大兴、亦庄、通州等区县浓度升高到  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上。由于重点污染源主要集中在北京市周边的东部、南部等地区,而北部上风向空气比较清洁<sup>[41]</sup>,在特定气象条件下,受地形与风向的影响,周边输送的污染物从东南和西南方向向北京输送,抵达城市上空后污染物会受到燕山、太行山的阻挡,无法扩散,滞留在城区的上空,使  $\text{PM}_{2.5}$  浓度聚积在边界层以下的平原上空,而北部、及西部山区上空浓度较平原低 50% 左右<sup>[42, 43]</sup>。不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度的模拟结果与测算的背景浓度的误差主要来源于:①颗粒物排放源强不同,不同时间不同省市采取的减排措施不同,且各省市经济

发展方式及能源结构也不同,污染物排放量差异较大;②气象条件的不确定性,天气系统转换的特定季节,不同地区气象要素(风速、小尺度环流、逆温、降水等)差异较大;③地形影响,地形引起的山谷风、海陆风等小尺度环流等对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度造成很大影响<sup>[44, 45]</sup>;④二次化学反应的影响,模式中二次化学反应生成  $\text{PM}_{2.5}$  化学机制尚不完善。

图 4(b) 为使用克里格插值法对 35 个监测站点  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度插值后的空间分布,总体来看北京市  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度呈现出南高北低的特征。在北京,重点工业源主要集中在南部的大兴及东南部的通州等地,受局地排放源及污染输送影响,南部地区  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度高出全市平均浓度 ( $89.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 40% 左右,北部的密云、延庆等地年均浓度低于全市平均浓度约 50% 左右。本研究插值后  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度空间分布的不确定性主要受插值方法误差及站点数量、分布影响;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,数据离散程度较高,导致标准误差较大。

模拟的北京市  $\text{PM}_{2.5}$  年均背景浓度的空间分布与实测年均浓度空间分布相比,背景浓度整体低于实测浓度 30% ~ 40% 左右。马志强等<sup>[13]</sup> 定量评估了不同风向下北京上甸子站  $\text{PM}_{2.5}$  背景值,结果显示偏北风过程中背景值占年均值的比例在 0.18 ~ 0.30 之间,偏南风过程中背景值与年均值的比例在 1.44 ~ 1.84 之间。可见偏北风对北京  $\text{PM}_{2.5}$  浓度具有较强的稀释作用,偏南风北京  $\text{PM}_{2.5}$  浓度具有较强的累积作用,表明周边区域源排放对北京市  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度空间分布有着十分重要的影响。2013 年国家空气质量标准规定的年均浓度达标值为  $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,以情景年的估算结果来看,即便是较为清

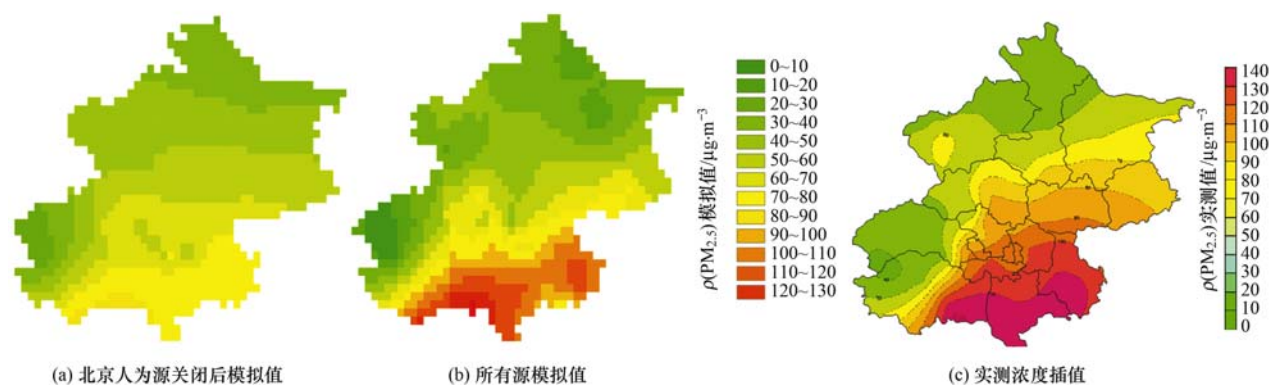


图 4 模拟与实测的北京市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of simulated and observed  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in Beijing

洁的背景区域,其浓度与这一限值相比还有一定的距离.背景浓度估算结果最低的密云水库子站年均浓度也高于  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,2013 年 9 月国务院发布的

《大气污染防治行动计划》要求到 2017 年,北京市细颗粒物年均浓度控制在  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  左右,可见北京市  $\text{PM}_{2.5}$  的整体达标形势仍较为严峻.

表 5 不同站点  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度模拟值

Table 5 Simulated  $\text{PM}_{2.5}$  background concentration at different sites

| 项目                                     | 八达岭  | 密云水库 | 东高村  | 永乐店   | 榆堡    | 琉璃河   |
|----------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 比值                                     | 0.71 | 0.67 | 0.69 | 0.72  | 0.74  | 0.73  |
| 实测背景值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 61.8 | 58.7 | 84.4 | 115.8 | 112.1 | 121.8 |
| 模拟背景值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 43.9 | 39.4 | 58.2 | 83.4  | 82.9  | 88.9  |

本研究采用观测数据及数值模拟技术相结合的方式,综合分析 2013 年北京市不同方位  $\text{PM}_{2.5}$  的背景值浓度分布,由于受数理统计方法、背景时段筛选导致的误差及受模式化学机制、物理过程不完善、所采用的源清单存在较大不确定性及气象场模拟误差影响,测算的北京市  $\text{PM}_{2.5}$  的背景浓度分布存在一定的不确定性.今后将进一步采用多站点、长时间序列的观测数据及降低数值模式的不确定性提高北京市  $\text{PM}_{2.5}$  的背景值浓度分布研究的准确性.

### 3 结论

(1) 2013 年北京市  $\text{PM}_{2.5}$  背景值测算结果显示西北、东北、东、东南、南、西南这 6 个方向边界点位的背景浓度在  $40.3 \sim 85.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,由低到高顺序依次为密云水库、八达岭、东高村、榆堡、永乐店和琉璃河.

(2) 6 个监测站点  $\text{PM}_{2.5}$  北风时段背景值最低,西风时段次之,南风、东风时段明显偏高,不同风向下背景浓度平均值分别在  $6.5 \sim 27.9$ 、 $22.4 \sim 73.4$ 、 $67.2 \sim 91.7$ 、 $40.7 \sim 116.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,表现出北京东、南方向  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度较高分布特点.

(3) 模拟的 2013 年北京市  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度空间分布呈现出南高北低的特征,周边区域对北京市  $\text{PM}_{2.5}$  背景浓度空间分布影响显著.

(4) 研究集成模型模拟相对值较为准确、监测点位实测浓度较为准确的各自优点,大幅降低了背景浓度分析的不确定性;今后将进一步采用多站点、长时间序列的观测数据及降低数值模式的不确定性提高北京市  $\text{PM}_{2.5}$  的背景值浓度研究的准确性.

#### 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] Li M N, Zhang L L. Haze in China: Current and future challenges[J]. Environmental Pollution, 2014, 189: 85-86.
- [3] 胡敏.北京大气细粒子和超细粒子理化特征、来源及形成机制[M].北京:科学出版社,2009.

- [4] 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.
- [5] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 11(2): 779-799.
- [6] Sue A F, Miriam L R. Regional pollution potential in the northwestern United States [R]. Portland, OR: U. S. Department of Agriculture, Forest Service Pacific Northwest Research Station General Technical Report, 2003. 259-314.
- [7] Mechler R, Amann M, Schoepp W. A methodology to estimate changes in statistical life expectancy due to the control of particulate matter in air pollution [J]. Transboundary Air Pollution Project, 2002, 7(5): 84-89.
- [8] Jianguo L, Jared D. China's environment in a globalizing world [J]. Nature, 2005, 435: 1179-1186.
- [9] 苏彬彬,刘心东,陶俊,等.华东区域高山背景点  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  背景值及污染特征[J].环境科学,2013,34(2):455-461.
- [10] 张晓勇,吴建会,徐虹,等.城市大气颗粒物背景值涵义及定值方法[J].环境科学与管理,2012,37(1):80-84.
- [11] 蔡旭晖,张睿,宋宇,等.北京地区大气  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{SO}_2$  的背景浓度分析[J].气候与环境研究,2004,9(3):445-453.
- [12] 李金香,虞统,赵越,等.北京市大气  $\text{PM}_{10}$  环境背景值的计算方法探讨[J].环境科学学报,2007,27(9):1525-1533.
- [13] 马志强,徐敏,张小玲,等.北京  $\text{PM}_{2.5}$  背景值定值方法及其变化特征研究[J].中国环境科学,2015,35(1):7-12.
- [14] 杨洪斌,邹旭东,张云海,等.城市空气污染二氧化硫数值预报中的背景值对比研究[J].气象与环境学报,2010,26(5):69-72.
- [15] 王自发,谢付莹,王喜全,等.嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用[J].大气科学,2006,30(5):778-790.
- [16] Wang Z F, Li J, Wang Z, 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 Sciences, 2014, 57(1): 3-13.
- [17] 中国环境年鉴编辑委员会.中国环境年鉴[M].北京:中国环境年鉴社,2001-2013.
- [18] HJ/T 193-2005,环境空气质量自动监测技术规范[S].
- [19] Dini J W. Challenging environmental statistics [J]. Vital

- Speeches of the Day, 2002, **69**(3): 92-96.
- [20] 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.
- [21] Yuan M Y, Zhou X J, Zhang G H, *et al.* Effect of synoptic situation change on Harbin air quality [J]. Meteorological Monthly, 2005, **31**(1): 55-57.
- [22] 吕梦瑶, 何立富. 2013 年 12 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2014, **40**(3): 381-387.
- [23] CEMPD, UNC. Operational guidance for the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system [EB/OL]. Chapel Hill: Community Modeling and analysis System Center, 2010 [2014-09-01]. [http://www.airqualitymodeling.org/cmaqwiki/index.php?title=CMAQ\\_version\\_5.0\\_\(February\\_2010\\_release\)\\_OGD&CFID=2697260&CFTOKEN=6533698d7fbd00b-293E9D20-A489-F782-2FA77CF7FA3C2BDB](http://www.airqualitymodeling.org/cmaqwiki/index.php?title=CMAQ_version_5.0_(February_2010_release)_OGD&CFID=2697260&CFTOKEN=6533698d7fbd00b-293E9D20-A489-F782-2FA77CF7FA3C2BDB)
- [24] MMMD, NCAR. 2010. Weather Research and Forecast ARW Version 3 Modeling Systems User's Guide [EB/OL]. [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/ARWUsersGuideV3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf)
- [25] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, **6**: 3181-3210.
- [26] Multi-resolution emission inventory for China [EB/OL]. Beijing: Tsinghua University, 2013 [2013-01-02]. <http://www.meicmodel.org>.
- [27] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**: 5131-5153.
- [28] Xing J, Zhang Y, Wang S X, *et al.* Modeling study on the air quality impacts from emission reductions and a typical meteorological conditions during the 2008 Beijing Olympics [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(10): 1786-1798.
- [29] 刘宁. 珠江三角洲大气颗粒物污染特征与过程分析[D]. 北京: 北京大学, 2012
- [30] Mebust M R, Eder B K, Binkowski F S, *et al.* Models-3 community multiscale air quality (CMAQ) model aerosol component 2. Model evaluation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(D6): 4184.
- [31] 王茜. 上海市秋季典型 PM<sub>2.5</sub> 污染过程数值预报分析[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(2): 7-13.
- [32] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [33] US EPA. Guidance on the use of models and other analyses in attainment demonstrations for the 8-hour ozone NAAQS [M]. North Carolina, US Environmental Protection Agency, 2005 [2014-09-01]. <http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/8-hour-O3-guidance-final-version.pdf>.
- [34] Cheung H C, Wang T, Baumann K, *et al.* Influence of regional pollution outflow on the concentrations of fine particulate matter and visibility in the coastal area of southern China [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(34): 6463-6474.
- [35] U. S. State-Environmental Protection Agency. EPA establishes environmental statistical center [J]. Pollution Engineering, 2002, **34**(8): 8-12.
- [36] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, *et al.* Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(19): 3237-3250.
- [37] 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.
- [38] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 418-427.
- [39] Zhang Y L. Introduction to mesoscale atmospheric dynamics [M]. Beijing: Meteorological Press, 1999.
- [40] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析 [J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [41] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 [J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1935-1942.
- [42] Coglian E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(16): 2871-2877.
- [43] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Haze trends over the capital cities of 31 provinces in China, 1981-2005 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, **97**(3-4): 235-242.
- [44] 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**(1): 57-72.
- [45] 安俊岭, 李健, 张伟, 等. 京津冀污染物跨界输送通量模拟 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2684-2692.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                  |                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Characterization of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> of Beijing During 2014 APEC .....                                                                    | YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)   |
| PM <sub>2.5</sub> Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013 .....                                                                      | LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331) |
| Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC .....                                                                              | LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)     |
| Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing .....                                          | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)       |
| Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta .....                                                          | ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)       |
| Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry .....                                                                | ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)   |
| Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution .....                                                          | LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)                      |
| Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing .....                                                            | YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381) |
| Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material .....                                                        | MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)         |
| Low-Concentration CO <sub>2</sub> Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites .....                                                                            | LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)            |
| Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area .....                     | HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)         |
| Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem .....                                                     | AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)                 |
| Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data .....                      | ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)        |
| Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs .....                                                   | GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)                |
| Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir .....                                                              | LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)            |
| Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics .....       | YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)    |
| Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research .....                           | SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)         |
| Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis .....                                           | ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)     |
| Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section .....                | ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)      |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River .....          | TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)        |
| Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang .....                                     | QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)            |
| Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....                 | QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)             |
| Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season .....                        | ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)              |
| Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake .....                                                                                    | CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)          |
| Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches .....                                                           | ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)       |
| Removal of Phosphate by Calcite in Open-System .....                                                                                                             | LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)  |
| Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties .....                           | LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)          |
| Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR .....                                      | CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)      |
| Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions .....                                                        | ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)              |
| Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS .....                                                                                   | FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)             |
| Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing .....                            | ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)               |
| Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou .....                                                                                   | SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)               |
| Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures .....                                                                               | LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)                        |
| Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques .....                                  | ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582) |
| Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales .....                                                | YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)     |
| Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects .....                                                                   | SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)     |
| Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies .....                                                                           | XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)       |
| Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO <sub>4</sub> and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize .....                                                   | LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)         |
| Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L. ....                                                         | ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)         |
| Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage .....                                                                       | XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)    |
| Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil .....                                          | CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)      |
| Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization ..... | MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)                  |
| Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River .....                             | LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)           |
| Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests .....                                                          | ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)   |
| Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain .....                                            | ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)              |
| Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector .....                                                      | TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)     |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

( HUANJING KEXUE )

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                                           |                  |    |                                                                                                                                                                                                                           |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                                     | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                               |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                             | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                               |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清 华 大 学 环 境 学 院                                                                                                                              | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                            |
| 主 编     | 欧 阳 自 远                                                                                                                                                                   | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                            |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市 2871 信箱(海淀区双清路<br>18 号, 邮政编码: 100085)<br>电话: 010-62941102, 010-62849343<br>传真: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码: 100717                                                                                                                                | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                              |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                                   | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                            |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话: 010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                     | Distributed      | by | Science Press<br>Tel: 010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                                |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                                   | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                           |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易总公司<br>(北京 399 信箱)                                                                                                                                                | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                        |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行