

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                                                                  |                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 .....                                                               | 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)              |
| 北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 .....                                                               | 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)                  |
| 利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 .....                                                      | 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)                    |
| 兰州城区大气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 .....                                                         | 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)                              |
| 成都市西南郊区春季大气 PM <sub>2.5</sub> 的污染水平及来源解析 .....                                                   | 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)                           |
| 中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 .....                                                                   | 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)                               |
| 固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 .....                                                                        | 陈强,吴焕波(1646)                                          |
| 北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 .....                                                                       | 胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)                              |
| 南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 .....                                                                        | 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)                               |
| CoCuMnO <sub>2</sub> 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 .....                                                 | 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)                        |
| 大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 .....                                                                 | 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)                   |
| 典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 .....                                                                       | 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)                           |
| 利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 和 $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 ..... | 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)             |
| 柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 .....                                                                    | 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)                              |
| 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 .....                                                                     | 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)                               |
| 亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 .....                                                                  | 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)                     |
| 平原河网典型污染物生物降解系数的研究 .....                                                                         | 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)                                      |
| 沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 .....                                                                 | 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)                             |
| 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 .....                                                                         | 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)                 |
| 河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 .....                                                                        | 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)                       |
| 顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 .....                                                                  | 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)                              |
| 台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 .....                                                              | 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)                       |
| 乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 .....                                                                      | 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)                         |
| 岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 .....                                                      | 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)                                      |
| 广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 .....                                                                     | 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798) |
| 基于 PCR-DGGE 和拟杆菌( <i>Bacteroides</i> ) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 .....            | 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)                          |
| 典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 .....                                                              | 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)                   |
| 钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 .....                                                                      | 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)                                |
| 天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 .....                                                                   | 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)                                  |
| 臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 .....                                                                    | 董秉直,张佳丽,何畅(1837)                                      |
| 污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 .....                                                                      | 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)                                  |
| HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 .....                                                            | 郭俊元,王彬(1852)                                          |
| 放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选 .....                                                                         | 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)                                  |
| 微米 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 .....                                      | 钱旭,王毅力,赵丽(1864)                                       |
| 间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 .....                                                                     | 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)                          |
| 不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO <sub>2</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放通量的影响 .....                               | 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)                      |
| 卫河新乡市区段春季溶解 CH <sub>4</sub> 与 N <sub>2</sub> O 浓度特征 .....                                        | 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)                               |
| 模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N <sub>2</sub> O 排放的影响 .....                                                     | 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)                                   |
| 土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 .....                                                                   | 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)                    |
| 黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 .....                                                                     | 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)                  |
| 耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 .....                                                               | 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)                                 |
| 北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 .....                                                                    | 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)                               |
| 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 .....                                                                   | 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)                                |
| 纳米 TiO <sub>2</sub> 对土壤重金属释放及形态变化的影响 .....                                                       | 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)                         |
| 纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 .....                                                             | 马少云,祝方,商执峰(1953)                                      |
| 低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 .....                                                              | 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)                          |
| 粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 .....                                                                      | 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)                                   |
| 萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 .....                                                                  | 王亚男,程立娟,周启星(1978)                                     |
| 高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 .....                                                                      | 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)                   |
| 磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征 .....                                                                            | 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)                          |
| 《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)                                             |                                                       |

# 2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化

薛亦峰<sup>1,3</sup>, 周震<sup>1</sup>, 聂滕<sup>1</sup>, 潘涛<sup>1,4</sup>, 齐珺<sup>1</sup>, 聂磊<sup>1</sup>, 王占山<sup>2\*</sup>, 李云婷<sup>2</sup>, 李雪峰<sup>1</sup>, 田贺忠<sup>3,5</sup>

(1. 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 3. 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 4. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 5. 北京师范大学大气环境研究中心, 北京 100875)

**摘要:** 2015年12月, 北京市及周边地区连续多次出现重污染天气。在此期间, 北京市空气重污染应急指挥部两次发布红色预警。为厘清该月重污染的发生过程、生消变化, 测算了应急措施下的污染源排放变化情况, 并采用数值模拟和地面观测相结合的分析方法, 对重污染的形成原因进行初步分析, 同时对应急措施的环境效果进行评估。结果表明: ①虽然2015年12月北京市主要大气污染物排放量较去年同期有所下降, 但排放强度仍然较大, 是重污染过程的内在原因; 气象扩散条件不利是重要的外因, 地面风速弱, 大气稳定度高, 相对湿度高, 边界层高度降低, 源排放及气象因素共同导致了此轮重污染过程。②红色预警应急措施可实现污染物日排放强度减少36%左右,  $PM_{2.5}$ 浓度下降11%~21%, 预警的应急措施不能扭转重污染的态势, 但对于缓解 $PM_{2.5}$ 污染加重趋势有明显的效果。③在重污染天气下, 污染物仍在大气中累积, 应急措施最明显的效果发生在实施后的48~72 h后, 因此建议在 $PM_{2.5}$ 浓度快速上升前36~48 h实施减排措施, 从而对空气质量预报准确性提出更高的要求。

**关键词:** 重污染; 红色预警; 排放清单; 气象条件; 应急措施

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1593-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.001

## Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015: Pollution Process and Emissions Variation

XUE Yi-feng<sup>1,3</sup>, ZHOU Zhen<sup>1</sup>, NIE Teng<sup>1</sup>, PAN Tao<sup>1,4</sup>, QI Jun<sup>1</sup>, NIE Lei<sup>1</sup>, WANG Zhan-shan<sup>2\*</sup>, LI Yun-ting<sup>2</sup>, LI Xue-feng<sup>1</sup>, TIAN He-zhong<sup>3,5</sup>

(1. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. School of Environmental Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 5. Center of Atmospheric Environmental Studies, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Severe haze episodes shrouded Beijing and its surrounding regions again during December, 2015, causing major environmental and health problems. Beijing authorities had launched two red alerts for atmospheric heavy pollution in this period, adopted a series of emergency control measures to reduce the emissions from major pollution sources. To better understand the pollution process and emissions variation during these extreme pollution events, we performed a model-assisted analysis of the hourly observation data of  $PM_{2.5}$  and meteorological parameters combined with the emissions variation of pollution sources. The synthetic analysis indicated that: ① Compared with the same period of last year, the emissions of atmospheric pollution sources decreased in December 2015. However, the emission levels of primary pollutants were still rather high, which were the main intrinsic causes for haze episodes, and the unfavorable diffusion conditions represented the important external factor. High source emissions and meteorological factors together led to this heavy air pollution process. ② Emergency control measures taken by the red alert for heavy air pollution could decrease the pollutants emission by about 36% and the  $PM_{2.5}$  concentrations by 11% to 21%. Though the implementation of red alert could not reverse the evolution trend of heavier pollution, it indeed played an active role in mitigation of  $PM_{2.5}$  pollution aggravating. ③ Under the heavy pollution weather conditions, air pollutants continued to accumulate in the atmosphere, and the maximum effect by taking emergency measures occurred 48-72 hours after starting the implementation, therefore, the best time for executing emergency measures should be 36-48 hours before the rapid rise of  $PM_{2.5}$  concentration, which requires a more powerful demand on the accuracy of air quality forecast.

**Key words:** heavy air pollution; red alert; emission inventory; meteorological conditions; emergency control measures

收稿日期: 2015-01-18; 修订日期: 2015-03-03

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B02, 2014BAC23B03, 2014BAC06B05)

作者简介: 薛亦峰(1983~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: xueyf\_iep@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: 18701650609@163.com

根据环境保护部《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633-2012)分级方法,空气质量指数在 200 以上为空气重污染,在华北地区,首要污染物主要为细颗粒物,尤其在冬季<sup>[1-4]</sup>. 近年来,北京市加大了大气污染防治力度,实施了一系列污染控制对策,包括《清洁空气行动计划(2013~2017)》,采取了压减燃煤、控车减油、治污减排、清洁降尘等措施<sup>[5]</sup>来减少主要大气污染源的排放. 2015 年北京市  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度为  $80.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 比 2014 年下降 6.2%, 虽然同比有所改善,但仍超过国家标准的 1.3 倍. 2015 年 11、12 月有 22 d 处于重污染之下,超过全年重污染天数的一半,从而拉高了北京市  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度. 此外,重污染过程对人体健康也造成较大的影响<sup>[6-8]</sup>.

空气重污染的出现,主要受两个方面的影响,一是区域及本地污染源的排放变化,二是气象条件<sup>[9, 10]</sup>. 自入冬以来,受居民采暖的需要,北京市污染源发生了很大的变化,大气污染物排放量相对于非采暖季有明显的增加. 如果再叠加气象条件不利,大气稳定度高,逆温层结等因素,极易出现空气重污染. 有很多研究<sup>[11-16]</sup>对于北京市一次或几次,甚至典型月份的重污染过程及成因进行了梳理和分析, Zheng 等<sup>[17]</sup>利用观测数据和空气质量模型对北京市 2012~2013 年冬季出现重污染过程进行分析,探讨气象因素与区域污染排放变化的影响与贡献. 程念亮等<sup>[18]</sup>同样采用数值模拟与观测资料相结合的方式,对 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程的大气环境背景、气象条件和形成原因进行了分析. 这些研究对于揭示北京市重污染形成条件、物理化学反应过程及污染前后  $\text{PM}_{2.5}$  化学组分变化特征具有一定的帮助.

但与以前不同的是,2015 年 12 月重污染过程中,北京市按照《北京市空气重污染应急预案》(京政发[2015]11 号)中的规定首次发布了红色预警,并实施相应的污染减排的应急措施,整个污染过程夹杂着污染源排放、气象条件变化、污染排放的临时干扰调整,在三者的共同作用下形成了此次较为特殊的重污染过程. 为厘清该月的重污染发生过程、生消变化,分析了空气质量观测数据和气象数据,并结合污染源排放变化情况,对空气重污染形成的原因进行探讨,获得了 12 月空气重污染过程的时空演变特征,并对应急措施的实施效果进行评估,以期对冬季大范围空气重污染天气防治及污染控制管理提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

北京市位于华北平原北部,西部为太行山脉西山,北部和东北部为燕山山脉,地形上不利于污染的扩散. 全市面积  $16\,410.54 \text{ km}^2$ , 常住人口 2151.6 万,机动车保有量 561 万辆,煤炭消耗量 1 728 万 t, 天然气用量 113.7 亿  $\text{m}^3$ , 大量的燃料燃烧及机动车尾气排放,再加上量大面广的扬尘源(施工扬尘、道路扬尘等),导致北京市颗粒物、气态污染物( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、VOCs)排放量较大<sup>[19-22]</sup>.

### 1.2 数据来源

北京市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度数据来自北京市环境保护监测中心自动监测实时发布的 35 个监测站逐时数据(站点位置如图 1 所示),气象资料来自北京市气象台地面观测数据. 2014 年 12 月和 2015 年 12 月北京市主要大气污染物排放量来自北京市环境保护科学研究院 2014 年、2015 年大气污染物排放清单. 黄色、橙色和红色预警包含强制性应急减排措施,其减排量按照类别(固定源、移动源和无组织排放源)分别进行核算.

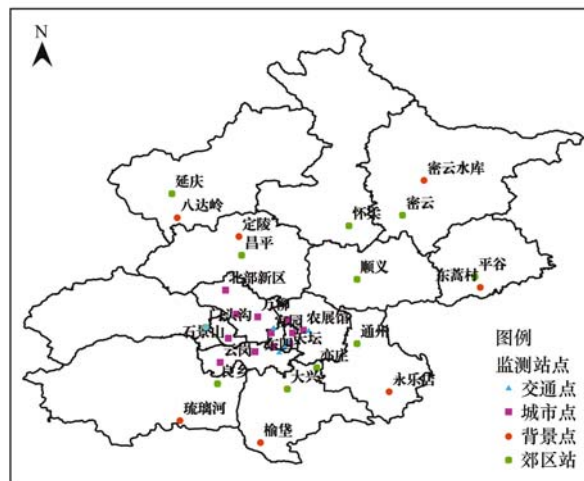


图 1 北京市空气质量监测站分布示意

Fig. 1 Locations of air quality monitoring sites in Beijing

### 1.3 模型设置

本研究采用 WRF/SMOKE/CMAQ 模式系统模拟两次红色预警期间北京市空气质量变化情况. 模式系统水平方向采用三重嵌套模拟域(图 2), 网格分辨率分别为 36、12、4 km, 第一、二重模拟域分别覆盖了中国大陆全境和华北地区, 第三重模拟域覆盖了本研究所关注的北京市以及周边的天津、河北和内蒙古部分地区以及渤海部分海域. 垂直方向分

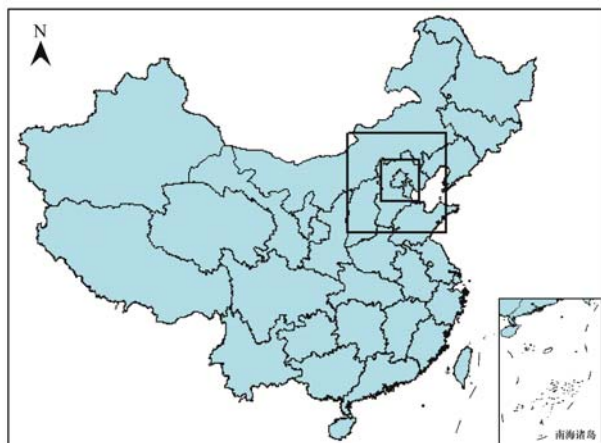


图2 模式系统的三重嵌套模拟域

Fig. 2 Triple-nested domain for simulation of the model system

为 13 层,最低层高度约为 20 m.

WRF 模型使用 NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$  全球分析资料生成第一次猜值场. SMOKE 模型第一重模拟域采用 INTEX-B 人为污染源排放清单<sup>[23]</sup>,第二、三重模拟域采用北京市环境保护科学研究院建立的人为源排放清单,包括  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{VOCs}$ 、 $\text{NH}_3$  这 7 种污染物. 天然源的处理模块为 BEIS,使用 MODIS 卫星反演的植被覆盖数据. CMAQ 模型选用 SAPRC99 气相化学反应机制和 AERO5 气溶胶机制<sup>[24~26]</sup>. 模拟时段为 2015 年 12 月 7~10 日和 12 月 19~22 日,每个时段提前 3d 启动模型,以减小初始条件的影响.

模拟时,对每次预警均设置两个模拟情景:无应急措施的基准情景和应急措施实施的控制情景(仅包含北京市应急措施减排量,周边省市的应急措施减排量没有纳入进来). 根据应急措施实施前后  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的变化评估应急效果.

## 2 结果与讨论

### 2.1 12 月份北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化及空间分布

2015 年 12 月北京市发生 4 次重污染过程,且持续时间较长, $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度超过  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  有 13 d,占全月的 42%. 重污染日  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度为  $270 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,高值出现在 12 月 1 日和 12 月 24 日,分别为  $478 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $476 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 12 月 1 日处于橙色预警当中,随后气象条件转好,地面风速抬升,污染物得到扩散. 12 月 24 日出现的  $\text{PM}_{2.5}$  高值紧随着第二次红色预警解除之后,静稳天气,空气相对湿度(RH)高,扩散条件较差,与此同时,由于未采取应急措施,污染排放水平未减少,两者共同作用下重

污染过程得以延续, $\text{PM}_{2.5}$  浓度甚至超过第二次红色预警期间. 2015 年 12 月北京市  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度为  $153 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,是 2014 年同期 1.65 倍,重污染日增加 11 d,重污染日平均浓度是 2014 年同期的 1.38 倍,如图 3 所示.

实行空气重污染预警的应急措施对于降低  $\text{PM}_{2.5}$  浓度起到积极的作用,由图 3 可以看出,橙色预警 1、2,红色预警 1、2,黄色预警 1、2 期间,基本上呈现  $\text{PM}_{2.5}$  浓度先上升或稳定后下降,可见预警控制的初期, $\text{PM}_{2.5}$  未能立刻呈现出明显的下降,但随着时间推移,减排效果不断增加. 应急措施的实施对于缓解  $\text{PM}_{2.5}$  污染加重趋势有明显的效果. 但是,鉴于这种预警减排效果的滞后性,预警的发布和应急措施的实施时间应有所预见和提前,相对第一次启动的红色预警 1,红色预警 2 应急措施的实施介入较好,在  $\text{PM}_{2.5}$  浓度抬升过程中,对于减少污染物的累积有效性更强,应急措施实施对污染减缓的效果相对更好.

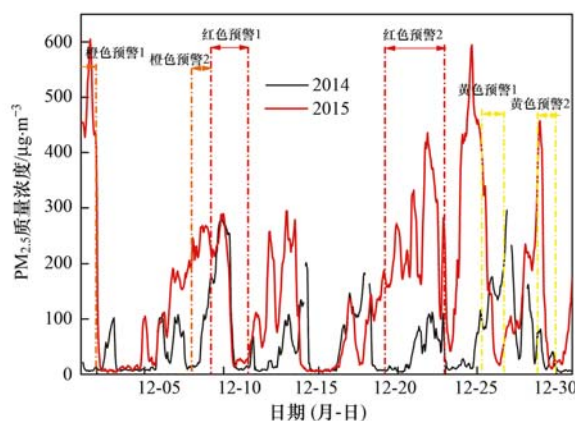
图3 2015 年 12 月北京市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度及同比变化情况Fig. 3  $\text{PM}_{2.5}$  Concentrations of Beijing in December, 2015 and the comparison with those in December, 2014

图 4 显示了基于 Kriging 插值<sup>[27, 28]</sup>得出的 2015 年 12 月非重污染和重污染日的北京市  $\text{PM}_{2.5}$  空间分布. 可以看出,非重污染日和重污染北京市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均呈现南高北低的空间分布规律. 非重污染日北京市城区以北的大部分地区  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度低于  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,污染最重的为西南部边界地区,平均浓度超过  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 重污染日北京市整体  $\text{PM}_{2.5}$  浓度水平明显高于非重污染日,南部  $\text{PM}_{2.5}$  浓度高值区范围更大,包含了北京市整个南部边界,平均浓度超过  $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;北部的昌平、延庆、怀柔和密云等地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度也超过  $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;城六区  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度超过  $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 非重污染日和污染日  $\text{PM}_{2.5}$

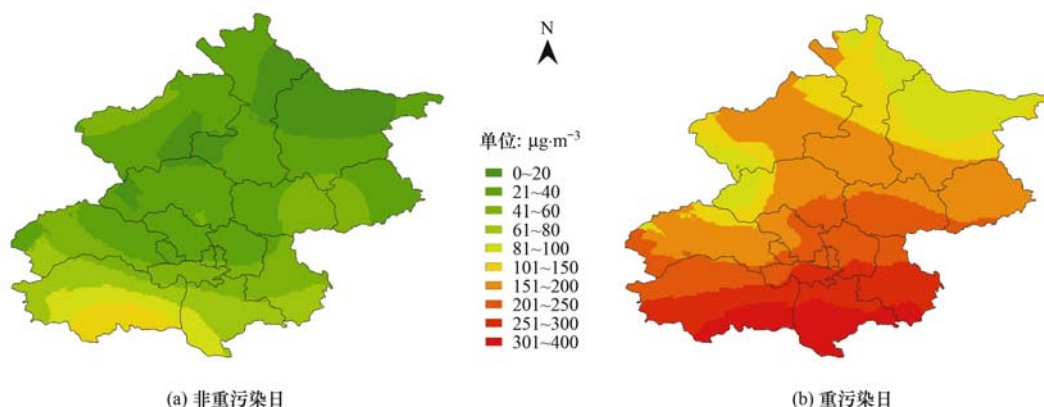


图4 北京市2015年12月非重污染日和重污染日PM<sub>2.5</sub>浓度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentrations in heavy air pollution days and other days in December, 2015

浓度空间分布也说明了北京市城区及南部地区排放强度较高于北部地区。

## 2.2 污染源排放变化情况

2015年北京市落实了清洁空气行动计划工作措施,淘汰约38万辆老旧机动车,国华和高井热电厂的燃煤机组陆续关停,约6000蒸吨的燃煤锅炉实现清洁能源改造,工业源方面,怀柔兴发、房山强联等水泥厂停产;完成百项环保技改项目,对化工、汽车制造、家具、包装印刷等行业VOCs进行了治理。在2014年北京市主要大气污染物排放清单的基础上,对排放清单进行动态更新,核算的2015年采暖季SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、VOCs日排放量比2014年同期分别减少约28%、21%、4%、4%和6%(如图5)。排放量的变化在2015年前三季度的空气质量得到较好的印证,2015年前三季度北京市空气中SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>质量浓度分别比2014年前三季度下降了40%、16%、18%和19%左右。

根据污染源的活动水平,结合黄色、橙色、红色预警的减排量,得到2015年12月期间采取应急措施、假设未采取应急措施及2014年同期污染源SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、VOCs日变化曲线,如图6所示。从总体上来讲,2015年12月PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>相对2014年同期下降较少,与扬尘源排放量居高不下有关,气态污染物SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs排放下降较为明显。采取黄色、橙色和红色预警的强制性减排措施,污染源的排放水平得到明显下降,单日NO<sub>x</sub>、VOCs减排量较大,最高减排比例可达约34%和40%,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>减排比例最高可达约56%和43%,施工工地停工贡献较大,SO<sub>2</sub>下降5%左右,减排幅度较小,5种污染物平均减排比例估计约为36%。

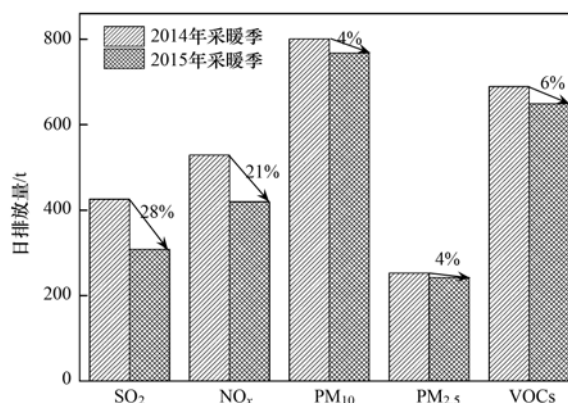


图5 北京市2015年采暖季主要大气污染物日排放量及同比变化

Fig. 5 Comparison on daily emissions of primary air pollutants in Beijing during the heating season of 2015 and 2014

总体上来看,红色预警污染物减排主要集中在城区(如图7),SO<sub>2</sub>减排空间分布较为分散,NO<sub>x</sub>减排主要集中在城市快速路和高速路上,PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>减排空间分布与道路扬尘及施工工地集中在人口较为稠密的六环内有关,VOCs减排空间受机动车减排和工业企业停产空间分布有关,也主要集中在城区。结合重污染日PM<sub>2.5</sub>浓度分布情况,可以看出,南部地区主要污染物减排力度仍然较小,污染排放强度较大。因此,今后应急措施应更多地考虑污染的空间分布,强化北京市南部大气污染源的减排措施并加强监管。

## 2.3 气象变化情况

不利的气象条件是导致重污染过程发生的重要外部因素<sup>[29~31]</sup>。图8显示了2015年12月及去年同期观象台的气温、RH、风速以及WRF模型模拟的边界层(PBL)高度。从全月来看,2015年12月平均气温为-0.46℃,比2014年同期高

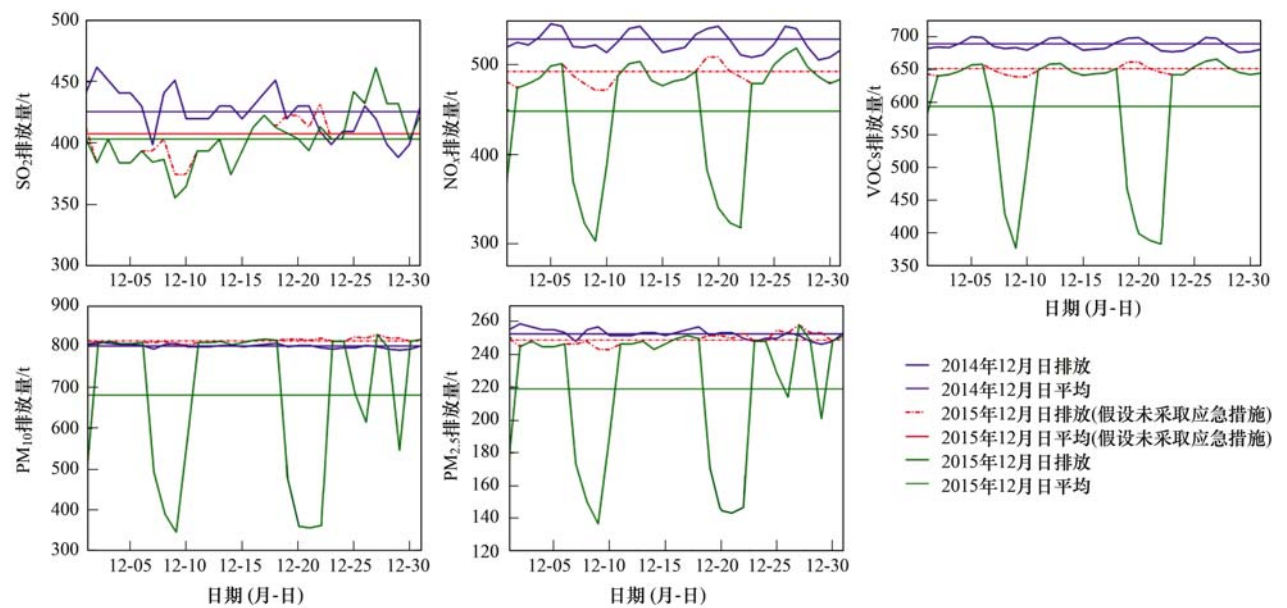


图 6 2015 年 12 月北京市污染源主要大气污染物排放及同比变化情况

Fig. 6 Comparison on air pollutants emissions in Beijing during December, 2015 and 2014

58.3% ;平均相对湿度为 63.8% ,比 2014 年同期高 78.4% ;平均风速为  $2.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ,比 2014 年同期低 27.0% ;北风频率为 64.6% ,比 2014 年同期减少了 10.8% ;平均边界层高度为 680.0 m ,比 2014 年同期低 31.3% . 整体来看,2015 年 12 月地面气温和湿度同比上升,平均风速、北风频率和大气边界层高度同比下降,特别是湿度水平整体较高,均不利于大气污染物的扩散,即 12 月整体大气扩散条件较差. 同时计算了 2015 年 12 月重污染期间和非重污染期间北京市气象要素水平. 重污染期间地面气温、相对湿度、平均风速和边界层高度分别为  $-0.44^{\circ}\text{C}$ 、78.9%、 $1.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和 647.0 m ,与非重污染期间相比分别升高了 7.5%、升高了 49.1%、降低了 43.4% 和降低了 10.9% . 因此,气象条件的分析表明,与去年同期相比 2015 年 12 月整体大气扩散条件不利,而重污染期间气象条件更加不利,即整体持续不利的气象背景场为频发的重污染过程创造了外部条件.

为进一步探讨  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和气象要素的关系,对其进行相关性分析,结果见表 1. 相关性分析的结果也表明  $\text{PM}_{2.5}$  浓度与气温和相对湿度呈显著正相关性,与风速和 PBL 高度呈显著负相关性,其中重污染期间较高的湿度和较低的边界层高度对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的快速增长影响较大.

2.4 应急措施效果评估

在使用上文所述模型系统模拟评估应急措施实施效果之前,首先利用观测数据对模型模拟性能进

行验证,验证方法见文献[32]. 所用观测数据为北京市 12 个国控站 2015 年 1、4、7、10 月  $\text{PM}_{2.5}$  的日均浓度. 结果显示,12 个站点的标准化平均偏差在 0.05 ~ 0.43 之间,标准化平均误差在 0.29 ~ 0.50 之间,相关系数在 0.64 ~ 0.80 之间. 误差水平与已有报道持平,相关性比较好,优于同类研究<sup>[32]</sup>,整体而言模拟效果可以接受.

表 1 2015 年 12 月  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和气象要素的相关性系数

Table 1 Correlation coefficients among concentration of  $\text{PM}_{2.5}$  and meteorological factors in December 2015

| 项目     | 非重污染期间              | 重污染期间  | 全月     |
|--------|---------------------|--------|--------|
| 气温     | 0.116 <sup>1)</sup> | 0.201  | 0.156  |
| 相对湿度   | 0.493               | 0.710  | 0.611  |
| 风速     | -0.553              | -0.206 | -0.362 |
| PBL 高度 | -0.412              | -0.585 | -0.503 |

1) 表示置信水平为  $\alpha = 0.05$  (2-tailed), 其余置信水平均为  $\alpha = 0.01$  (2-tailed)

图 9 表示两次红色预警期间假设无措施和有措施情景下  $\text{PM}_{2.5}$  浓度时间变化. 第一次红色预警应急措施实施后,北京市空气质量得到了明显改善, $\text{PM}_{2.5}$  浓度平均下降 16.1% . 12 月 8 日,北京  $\text{PM}_{2.5}$  浓度显著降低,降幅为 16.8% . 12 月 9 日,北京市仍为静稳天气,湿度大,以弱南风为主,扩散条件进一步转差. 同时,太行山东部地区的高浓度污染气团持续向北京传输, $\text{PM}_{2.5}$  浓度应继续升高,但红色预警的实施在一定程度上减缓了  $\text{PM}_{2.5}$

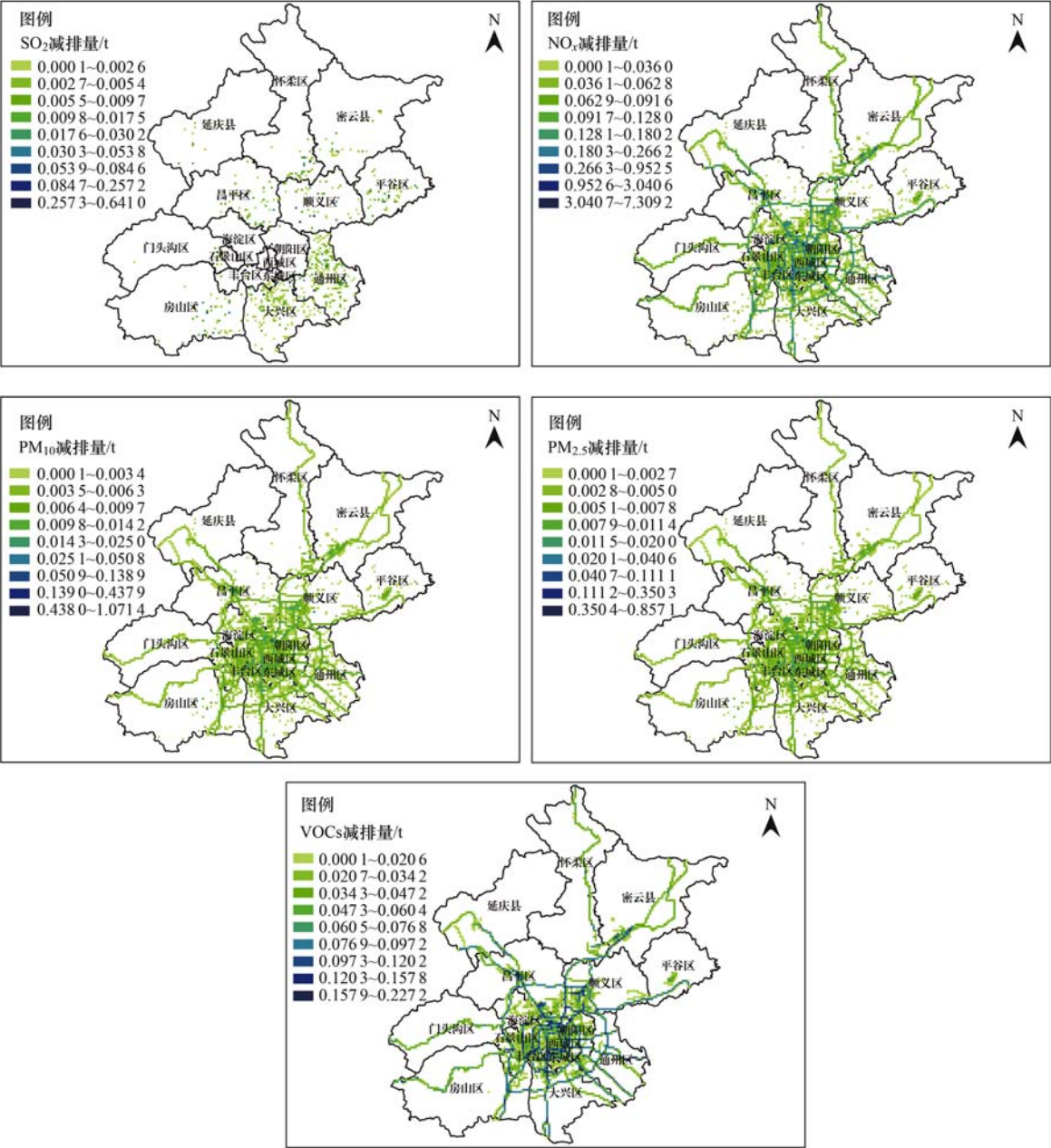


图7 北京市红色预警应急措施减排量的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the emission reductions during red alerts in Beijing

的升高趋势,使得该天  $\text{PM}_{2.5}$  浓度水平与12月8日基本持平. 模拟结果表明,应急措施实施后,12月9日  $\text{PM}_{2.5}$  浓度比假设无应急措施情况下降低16.7%. 12月10日,随着弱高压系统的到来和应急措施的持续实施,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度降低,其中由应急措施带来的  $\text{PM}_{2.5}$  降幅约达20.1%. 可见,此次红色预警有效抑制了空气重污染的加剧,达到了污染物“削峰、降速”的作用.

第二次红色预警中,应急措施实施后,北京市空气质量得到了一定改善,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度平均降幅为

17.9%. 12月19日,红色预警启动后,北京  $\text{PM}_{2.5}$  浓度略有下降,降幅10.6%. 12月20~22日,北京市受低压系统控制,扩散条件转差,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度持续升高,污染持续加重. 红色预警措施实施虽然没有降低每天的  $\text{PM}_{2.5}$  污染级别,但使得每天的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降  $50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上,在一定程度上抑制了  $\text{PM}_{2.5}$  的升高趋势. 从两次红色预警的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的削减效果来看,应急措施能够有效地减缓污染物的累积速率,最明显的效果发生在应急措施实施后的48~72 h.

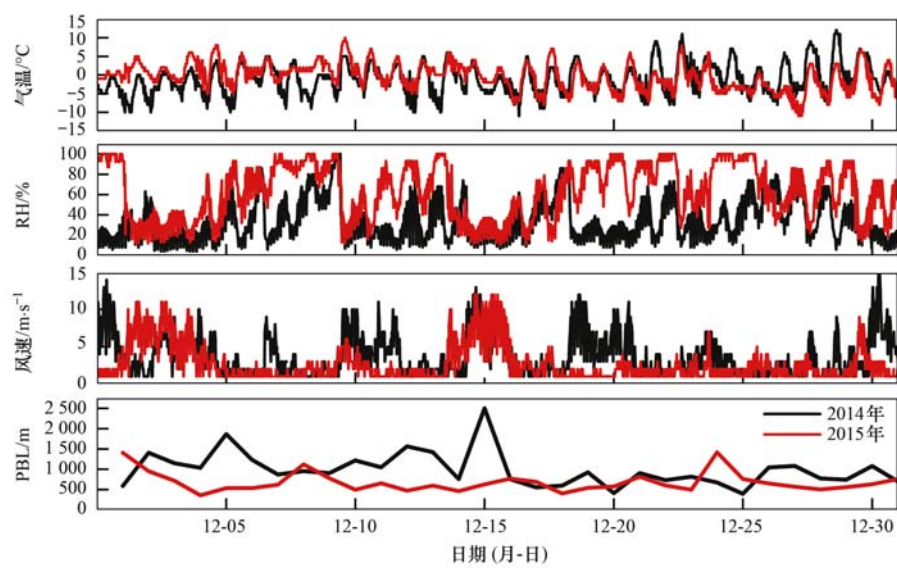


图 8 2015 年 12 月北京市气象条件及同期比较

Fig. 8 Comparison on meteorological conditions in December, 2015 and 2014

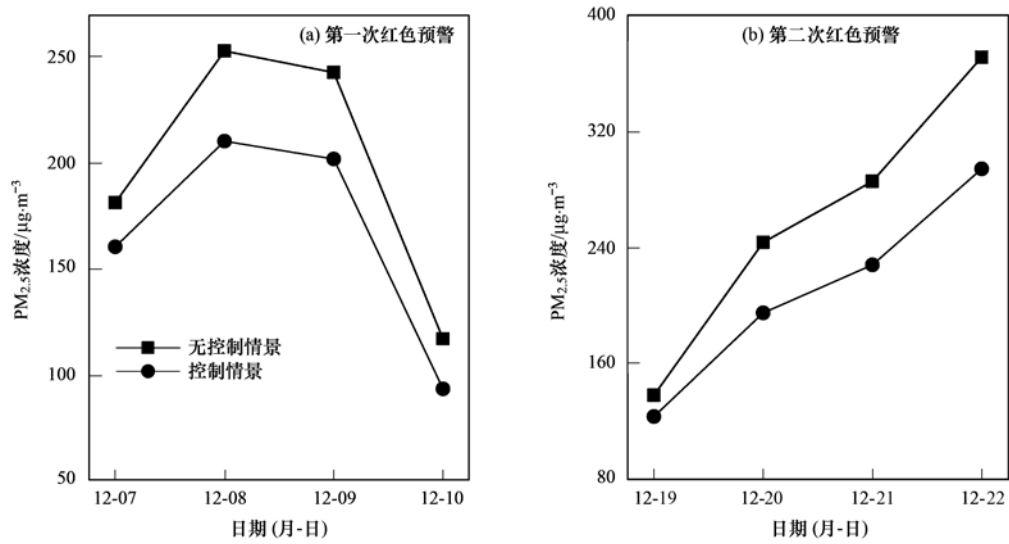


图 9 两次红色预警无措施和有措施情景下  $\text{PM}_{2.5}$  浓度时间变化

Fig. 9 Variations of  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations with and without the reduction measures during the two red alerts

3 结论

(1)2015 年北京市采暖季污染源的排放水平相对于 2014 年同期并未增加,而且通过清洁空气行动计划 2015 年工作措施的实施,主要大气污染物排放量有所减少.但相对于非采暖季,由于冬季供暖需求,煤、天然气等能源消耗增大,大气污染物排放量仍然巨大,是重污染过程发生的内因.

(2)在污染源排放水平降低的情况下,气象条件是影响地面大气污染程度的关键因素,是重要的外因.地面风速弱,大气稳定度高,相对湿度大,边界层高度低,导致污染物水平和垂直方向上扩散较

差,造成空气重污染过程.

(3)红色预警应急措施可实现污染物减排约 36%左右, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降 11% ~ 21%,由于污染物浓度处于较高水平加之不利的气象条件促进污染物的累积和二次生成,预警的应急措施不能迅速扭转重污染的态势,但对于缓解  $\text{PM}_{2.5}$ 污染加重趋势有明显的效果.目前的应急措施减排在空间分布上仍主要集中在城区,南部地区污染减排力度相对较小,这也是造成重污染日  $\text{PM}_{2.5}$ 浓度南高北低分布特征的原因之一.

(4)在重污染天气条件下,污染物仍在大气中不断累积并发生二次转化,应急措施对污染减排最

明显的效果发生实施后的 48 ~ 72 h 后,因此减排措施最佳介入时间应为  $\text{PM}_{2.5}$  浓度快速上升前 36 ~ 48 h,这样才能更好地防止  $\text{PM}_{2.5}$  重污染的发生,但对空气质量的预警预报准确性也提出更高的要求。

#### 参考文献:

- [1] Chen W, Yan L, Zhao H M. Seasonal variations of atmospheric pollution and air quality in Beijing[J]. *Atmosphere*, 2015, **6** (11): 1753-1770.
- [2] Schleicher N J, Schaefer J, Blanc G, *et al.* Atmospheric particulate mercury in the megacity Beijing: spatio-temporal variations and source apportionment [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **109**: 251-261.
- [3] Ji D S, Zhang J K, He J, *et al.* Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon aerosols in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **125**: 293-306.
- [4] Yang Y J, Zhou R, Wu J J, *et al.* Seasonal variations and size distributions of water-soluble ions in atmospheric aerosols in Beijing, 2012 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **34**: 197-205.
- [5] 北京市人民政府. 北京市人民政府关于印发北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划的通知[J]. 北京市人民政府公报, 2013, (25): 4-19.
- [6] Zhou M, Wang H, Zhu J, *et al.* Cause-specific mortality for 240 causes in China during 1990-2013: a systematic subnational analysis for the global burden of disease study 2013[J]. *Lancet*, 2015, **387**(10015): 251-272.
- [7] Wei X, Gao B, Wang P, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **112**: 186-192.
- [8] Zhang W, Capps S L, Hu Y, *et al.* Development of the high-order decoupled direct method in three dimensions for particulate matter: enabling advanced sensitivity analysis in air quality models[J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(2): 355-368.
- [9] Liu X G, Li J, Qu Y, *et al.* Formation and evolution mechanism of regional haze: a case study in the megacity Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4501-4514.
- [10] Li Z, Gu X, Wang L, *et al.* Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(20): 10171-10183.
- [11] Sun Y L, Jiang Q, Wang Z F, *et al.* Investigation of the sources and evolution processes of severe haze pollution in Beijing in January 2013 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(7): 4380-4398.
- [12] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 578-584.
- [13] Andersson A, Deng J J, Du K, *et al.* Regionally-varying combustion sources of the January 2013 severe haze events over Eastern China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(4): 2038-2043.
- [14] Sun Y L, Du W, Wang Q Q, *et al.* Real-time characterization of aerosol particle composition above the Urban canopy in Beijing: insights into the interactions between the atmospheric boundary layer and aerosol chemistry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(19): 11340-11347.
- [15] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A A, *et al.* Chemical characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  in Haze-Fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [16] 田贺忠, 王艳, 赵丹, 等. 中国太行山东麓  $\text{NO}_x$  重污染成因分析[J]. *科学通报*, 2011, **56**(18): 1464-1469.
- [17] Zheng G J, Duan F K, Su H, *et al.* Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 2969-2983.
- [18] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(2): 163-170.
- [19] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* The variation of chemical characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **107**: 1-8.
- [20] Guo S, Hu M, Guo Q, *et al.* Quantitative evaluation of emission controls on primary and secondary organic aerosol sources during Beijing 2008 Olympics[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(16): 8303-8314.
- [21] Li J, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(14): 7945-7959.
- [22] Wang S X, Zhao M, Xing J, *et al.* Quantifying the air pollutants emission reduction during the 2008 Olympic Games in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2490-2496.
- [23] 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**(14): 5131-5153.
- [24] Bae S Y, Jeong J I, Park R J, *et al.* Weekly variability of precipitation induced by anthropogenic aerosols: a case study in Korea in summer 2004 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 1531-1539.
- [25] Park S U, Lee I H, Joo S J. Spatial and temporal distributions of aerosol concentrations and depositions in Asia during the year 2010 [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 210-222.
- [26] Syrakov D, Prodanova M, Georgieva E, *et al.* Simulation of

European air quality by WRF-CMAQ models using AQMEII-2 infrastructure [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2016, **293**: 232-245.

[27] 赵阳, 邵敏, 王琛, 等. 被动采样监测珠江三角洲  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{O}_3$  的空间分布特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 324-329.

[28] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京市臭氧的时空分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4446-4453.

[29] 尉鹏, 任阵海, 王文杰, 等. 2014 年 10 月中国东部持续重污染天气成因分析[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(5): 676-683.

[30] 黄元龙, 杨新. 大气细颗粒物对大气能见度的影响[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1165-1170.

[31] 马庆鑫, 马金珠, 楚碧武, 等. 矿质和黑碳颗粒物表面大气非均相反应研究进展[J]. 科学通报, 2015, **60**(2): 122-136.

[32] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市  $\text{PM}_{2.5}$  区域来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1148-1153.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                 |                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation .....                                                                                     | XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)            |
| Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC .....                                                                                                | ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)      |
| Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry .....                       | LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)        |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou City .....                                                                                                   | WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)                |
| Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM <sub>2.5</sub> in Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....                                                              | LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)         |
| Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region .....                                                                        | LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)       |
| Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources .....                                                                                                       | CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)                                     |
| Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing .....                                                                 | HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)          |
| Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing .....                                                                              | WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)           |
| CoCuMnO <sub>2</sub> Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis .....                                                                                                | MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)     |
| Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication .....                                                       | ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)             |
| Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region .....                                                                                                 | SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)           |
| $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers .....                                                                          | ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)      |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin .....                                                                        | WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)         |
| Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region .....                                                                                    | CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)       |
| Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China .....                                                                                 | WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)             |
| Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network .....                                                                                                             | FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)                      |
| Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake .....                                                                                                 | ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734) |
| Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors .....                                                       | REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)            |
| Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province .....                                                                                             | WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)   |
| Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China .....                                                   | CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)         |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou .....                                                         | CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)    |
| Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River .....                                                                                           | HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)      |
| Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing .....                                      | WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)                    |
| Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province .....                                              | HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)          |
| Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example ..... | ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)  |
| Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River .....                                                                                  | LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)  |
| Formation of Halogenated By-products in Co <sup>2+</sup> Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process .....                                                                                    | LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)                  |
| Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile .....                                                                                       | DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)      |
| Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process .....                                                                              | DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)                      |
| Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System .....                                                                                       | CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)     |
| Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters .....                                                                                     | GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)                                     |
| Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment .....                                                                                      | LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)             |
| Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge .....                                                          | QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)                               |
| Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor .....                                              | SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)           |
| Effect of Irrigation Patterns on Soil CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain .....                                                         | GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)        |
| Characteristics of Dissolved CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring .....                                                             | HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)       |
| Effect of Stimulated N Deposition on N <sub>2</sub> O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....                                                               | YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)    |
| Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism .....                                                                           | CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)               |
| Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China .....                                                                                      | GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)      |
| Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates .....                                                                                 | SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)  |
| Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....                                     | ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)               |
| Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang .....                                                                     | LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)            |
| Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil .....                                                                                                 | ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)    |
| Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic .....                                                                                 | MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)                      |
| Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil .....                        | SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)     |
| Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i> .....                                                    | HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)            |
| Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems .....                         | WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)                   |
| Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source .....                                                                                           | ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)     |
| Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting .....                                                                                                           | LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)        |

# 《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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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