

环境科学

(HUANJING KEXUE)

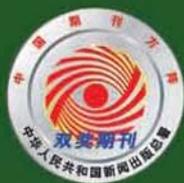
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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年北京市两次红色预警期间PM_{2.5}浓度特征 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM_{2.5}变化特征对气象因素的响应 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO₂交换通量变化过程及其环境影响 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生药的分布特征及人体健康风险评价 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 王振翔, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co₃O₄活化过一硫酸盐降解金橙G 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX₂的筛选及脱氮特性 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N₂O排放及其影响因素 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N₂O排放研究 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe₂O₃及其NH₃-SCR活性探究 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

2015 年北京市两次红色预警期间 PM_{2.5} 浓度特征

程念亮^{1,2,3}, 张大伟^{1*}, 陈添⁴, 石爱军¹, 孙峰¹, 刘保献¹, 邹本东¹, 王琴¹, 李倩¹, 王小菊¹, 姜磊¹, 孟凡^{2,3*}

(1. 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; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 4. 北京市环境保护局, 北京 100048)

摘要: 利用北京市及周边地区大气污染物监测数据, 综合分析了 2015 年北京市两次空气重污染红色预警期间 PM_{2.5} 浓度变化特征并初步评估了减排措施对 PM_{2.5} 浓度的影响. 结果表明: 第 1 次红色预警期间, 北京市 PM_{2.5} 平均最高小时浓度出现在 12 月 9 日 19:00, 为 282 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 单站最高小时值出现在京东南市界永乐店站, 浓度达 496 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 第 2 次红色预警期间, PM_{2.5} 全市平均最高小时浓度出现在 12 月 22 日 20:00, 为 421 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 单站最高小时值出现在京西南市界琉璃河站, 浓度达 831 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 两次红色预警累积持续时间均呈现出南部站 > 城区站 > 北部站的特征, 且第 2 次红色预警期间 PM_{2.5} 浓度南北差异明显大于第 1 次, PM_{2.5} 平均浓度在 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的面积明显大于第 1 次, 第 2 次红色预警期间重污染面积可达总面积的 93%. 两次预警期间气象条件均不利于污染物的扩散, 均存在不同程度的二次转化和区域输送现象, 极端气象条件是重污染形成的外因, 区域污染物排放量才是导致重污染形成的内因. 初步评估结果显示红色预警应急措施实施后, 北京市 PM_{2.5} 环境浓度下降约 20% ~ 25%, 减排效果显著.

关键词: PM_{2.5}; 北京; 减排; 红色预警; 重污染

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2409-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.001

Concentration Characteristics of PM_{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods

CHENG Nian-liang^{1,2,3}, ZHANG Da-wei^{1*}, CHEN Tian⁴, SHI Ai-jun¹, SUN Feng¹, LIU Bao-xian¹, ZHOU Bendong¹, WANG Qin¹, LI Qian¹, WANG Xiao-ju¹, JIANG Lei¹, MENG Fan^{2,3*}

(1. Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology of Beijing, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Beijing Environmental Protection Bureau, Beijing 100048, China)

Abstract: Variations of PM_{2.5} concentrations and effects of pollution control measures during two red alert periods in 2015 in Beijing were analyzed based on atmospheric pollutant monitoring data. The results showed that during the first red alert, the highest hourly-averaged PM_{2.5} concentration occurred at 19:00 on 9th December with a value of 282 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and the highest hourly PM_{2.5} concentration appeared at Yongledian station which is near the southeast border of Beijing, with the peak concentration of 496 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. During the second red alert, the highest hourly-averaged concentration of PM_{2.5} occurred at 20:00 on 22th with a value of 421 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The highest hourly PM_{2.5} concentration was monitored at Liulihe station which is near the southwest border of Beijing, with the peak concentration of 831 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. During the duration period of both red alerts, the concentrations at the southern stations were higher than those at downtown stations and the PM_{2.5} concentrations at northern stations were found to be the smallest. The difference between these two red alerts was that during the second red alert, the PM_{2.5} concentrations in southern Beijing were significantly higher than those in the northern area, while the magnitude of this south-to-north gradient was much smaller during the first one. During the second red alert, up to 93% of Beijing area showed an average PM_{2.5} concentration of above 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, which was much larger than that in the first one. The meteorological conditions during the two red alerts were both not conducive to the spread of pollutants. Formation of secondary pollutants and regional pollutant transport existed as well. Though the stagnant weather conditions were in favor of the development of severe pollution, large regional-wide pollutant emission was the main reason for these two heavy air pollutions in Beijing. PM_{2.5} concentrations were decreased by 20% - 25% after the implementation of emergency response measures, which showed the significance of emission reduction in air pollution control.

Key words: PM_{2.5}; Beijing; pollution control measures; red alert; heavy air pollution

近年来,北京市大气污染防治措施力度逐步加大,通过采取压减燃煤、控车减油、治污减排、清洁

收稿日期: 2016-01-21; 修订日期: 2016-02-29

基金项目: 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 VOCs 基准监测体系评估及环境水平状况研究项目; 北京市共青团优秀青年人才培养项目; 北京市环境保护监测中心课题项目(2016-01-03)

作者简介: 程念亮(1987 ~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气环境监测、模拟、预报, E-mail: 15001195306@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn; mengfan@craes.org.cn

降尘等措施,主要大气污染物浓度逐年下降,空气质量持续改善^[1,2].但目前的大气污染物排放总量仍然超过其环境容量,在较为不利的气象扩散条件下易形成空气重污染.为及时有效实施应急措施,减缓污染程度及保护公众健康,2015年北京市空气重污染应急指挥部结合近年来空气重污染应急工作实际,借鉴2014年APEC会议空气质量保障经验^[3],在对《北京市空气重污染应急预案(试行)》^[4]进行修订完善的基础上,形成了《北京市空气重污染应急预案》^[5].

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)^[6]分级方法,空气质量指数在200以上为空气重污染.依据空气质量预测结果,综合考虑空气污染程度和持续时间,将空气重污染预警分为4个级别,由轻到重依次为蓝色预警(预警四级)、黄色预警(预警三级)、橙色预警(预警二级)和红色预警(预警一级),其中红色预警即为预测空气重污染将持续3 d以上(72 h以上).规定红色预警实施后,中小学、幼儿园停课;全市范围内机动车单双号行驶,禁止施工工地室外施工作业,采取实施停产限产等措施.

应急预案实施以来,北京市实施了两次空气重污染红色预警,分别是2015年12月8日00:00到12月10日12:00、12月19日07:00至12月22日24:00.国内外针对空气重污染红色预警所采取的临时性减排措施为重污染过程研究分析及评估工作提供了难得的机会^[7,8].目前,国内外对国际重大活动空气质量保障,评估临时性减排措施效果研究较多,如2002年釜山亚运会^[9]、2010年印度德里联邦运

动会^[10]、2008年北京奥运会^[11]、2014年北京APEC会议^[12]、广州亚运会^[13]、南京亚青会^[14]、上海世博会^[15]等,但对红色预警的特点、成因及评估研究工作研究较少.分析认识空气重污染红色预警期间北京及周边地区保障措施的实施效果,开展减排措施分析及评估研究是国内外急需研究和关注的问题.本研究综合分析了两次空气重污染红色预警期间北京市PM_{2.5}的浓度特征、成因,并初步评估了减排措施的贡献及影响.

1 材料与方法

1.1 区域概况

北京位于东经115.7°~117.4°E,北纬39.4°~41.6°N,地处华北平原西北端,地形为簸箕型,三面环山,平均海拔43.5 m.国土面积16 410.54 km²,62%为山区,全市森林覆盖率37.6%.位于北纬40°地区,属温带大陆性季风气候,近10年年降水量平均不足450 mm,年均降水的80%集中在夏季6~8这3个月^[8];全市2 100多万常住人口、560万辆机动车、年复工面积2亿m²以及大量的生产、服务活动主要集中在平原地区,污染物排放强度较高^[16].

1.2 站点与仪器

CO、NO₂、PM_{2.5}、SO₂和PM₁₀监测数据为北京市环境保护监测中心发布的逐时浓度数据(<http://zx.bjmemc.com.cn/>),地面监测站点共计35个站点(见图1),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功能类型;周边省市PM_{2.5}数据为中国环境监测总站发布的逐时浓度数据(<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>).

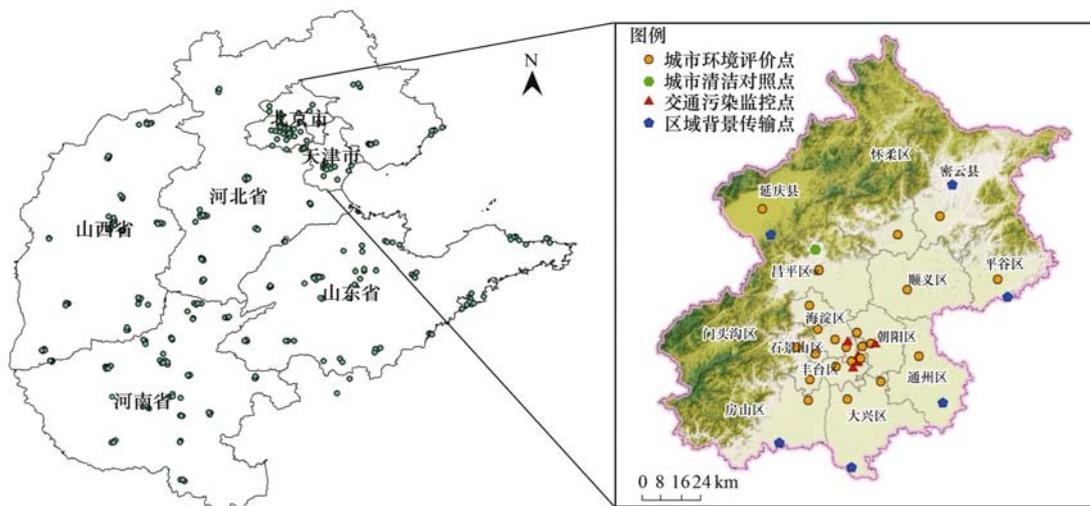


图1 污染物观测站点分布和分类

Fig. 1 Distribution and classification of pollutants observation sites

北京市 35 个空气质量自动监测子站操作流程严格按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193-2005)^[17]进行,其中 PM_{2.5}、PM₁₀均采用微量振荡天平法,SO₂采用紫外荧光法、NO/NO₂采用化学发光法,O₃采用紫外光度法,CO采用气体滤波红外吸收法,监测设备由技术人员定期检查并及时维护保养.气象资料为北京市观象台地面观测资料、探空资料(<http://cdc.cma.gov.cn/>),观测仪器为荷兰 WAISALA 公司的 WXT520 气象观测仪.垂直方向消光系数为永乐店激光雷达监测结果,仪器为 EV-LIDAR 型微脉冲激光雷达.PM_{2.5}组分数据则为北京市环境保护监测中心(车公庄站点)综合观测实验平台分析的结果,采用大气 PM_{2.5}水溶性离子在线测量仪(URG-9000B)对水溶性离子 Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、NH₄⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻进行在线观测.天气实况图为韩国天气实况资料和数值预报产品(<http://web.kma.go.kr/eng/weather/images/analysischart.jsp>).在 35 个监测点位中,城市环境站包括定陵、东四、官园、天坛、万寿西宫、奥体中心、农展馆、万柳、古城、顺义、昌平、怀柔共 12 个监测点,12 监测点位 PM_{2.5}平均浓度的日平均值对应的空气质量指数来定义重污染日.

2 结果与分析

2.1 空气质量演变

表 1 为统计的 2015 年两次红色预警前后北京市空气质量与天气形势的变化,图 2 为红色预警期间北京市 PM_{2.5}浓度时空分布,可以看出第 1 次红色预警前后,12 月 5 日北京市空气质量整体为二级良,下午 17:00 北京市空气重污染应急指挥部提前 31 h 发布空气重污染橙色预警,规定 12 月 6 日 00:00 至 12 月 9 日 24:00 为橙色预警时期;12 月 6 日浓度迅速上升,空气质量转为中度污染水平,12 月 7 日浓度进一步上升,空气质量转为五级重度污染,北京市空气重污染应急指挥部于 12 月 7 日 18:00 提前 13 h 升级为空气重污染红色预警,规定预警时间从 12 月 8 日 00:00 到 12 月 10 日 12:00

为红色预警时期;整体来看 12 月 8~9 日浓度整体波动在 200~300 μg·m⁻³之间,国控站点峰值浓度 290 μg·m⁻³左右,整体为五级重度污染水平;12 月 10 日受冷空气影响,地面转北风,浓度迅速下降,重污染过程结束.第 1 次红色预警是在橙色预警基础上提升了级别,而不是直接从无预警启动至红色预警;市空气重污染应急指挥部及其办公室可根据污染程度变化和最新预报结果,按预警发布程序报批后,适时提高了预警级别,从 12 月 7 日 00:00 起至 12 月 10 日 12:00,一共 84 h,已超过 72 h(3 d),符合红色预警启动级别;且本次红色预警已经保证了充足的时间给相关单位启动减排措施,由于本次红色预警是在橙色预警基础上发布的,橙色预警则由市空气重污染应急指挥部办公室提前 24 h 组织发布,12 月 5 日 17:00 橙色预警发布时,比启动时间提前了 31 h 发布.

第 2 次红色预警前后,12 月 18 日 07:00 北京市提前 24 h 发布空气重污染红色预警,规定红色预警时段为 12 月 19 日 07:00 至 12 月 22 日 24:00,共计 90 h.从污染物浓度日变化特征上看,12 月 19 日空气质量整体为重度污染,12 月 20~21 日维持五级重度污染,12 月 22 日上升为六级严重污染,全市 PM_{2.5}最高小时均值出现在 12 月 22 日 20:00,为 421 μg·m⁻³.12 月 23 日浓度缓慢下降,早上 08:00 北京市空气质量南北差异较大,北部地区空气质量在轻度到中度污染水平,城六区为重度污染水平,南部地区则还维持严重污染状态,这是由于此次弱高压系统较弱,只影响到北部地区,对城六区和南部地区的空气质量没有明显影响;午后污染有所回流并进一步加重,傍晚时分污染物浓度水平较高,全市的空气质量均陷入严重污染水平.根据此前的预报,12 月 23 日的污染虽然不能完全消除,但从预报来看,已经达不到重度污染的水平,所以没有延时红色预警,按照应急预案来对比,今日预报的空气质量是中度污染;但由于冷空气受燕山阻挡,势力较弱,西北部浓度下降明显,但全市平均来看 12 月 23 日空气质量仍为重污染水平^[18].

表 1 红色预警期间北京市 PM_{2.5}与气象条件变化

Table 1 Variation of PM_{2.5} and meteorological elements during the two air pollution red alerts in Beijing

项目	12-05	12-06	12-07	12-08	12-09	12-10	12-18	12-19	12-20	12-21	12-22	12-23
地面气压场	高压	高压底	高压后	均压	均压	高压前	高压	弱高压	低压	高压底	均压	高压前
500 hPa 形势场	槽后	槽后	偏西气流	弱脊	槽前	槽后	槽后	槽区	槽前	偏西气流	槽前	偏西气流
AQI	77	174	232	296	297	128	81	168	249	281	349	312
SO ₂ /μg·m ⁻³	16.8	32.0	36.3	20.0	32.7	15.1	17.8	29.4	26.7	22.7	29.3	21.4
NO ₂ /μg·m ⁻³	61.0	87.5	92.7	91.7	94.1	52.2	64.2	87.1	101.0	103.8	103.1	105.0
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	50.2	131.7	181.3	245.8	246.2	96.8	58.6	127.1	198.9	230.2	298.4	261.1

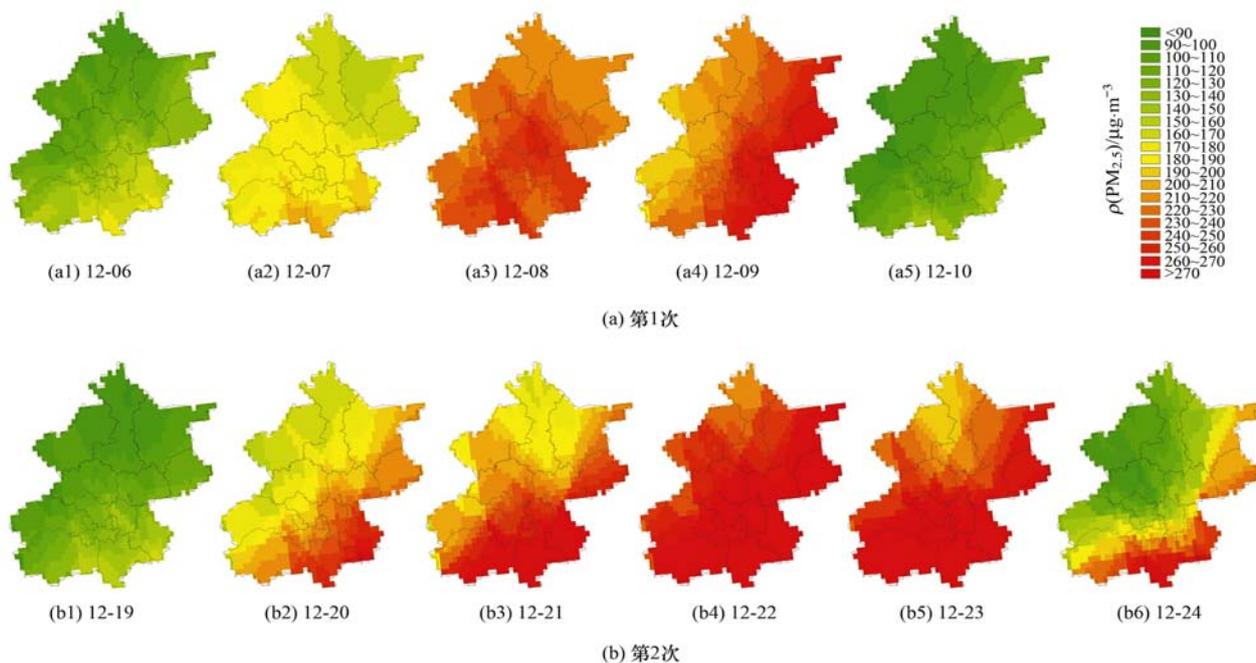


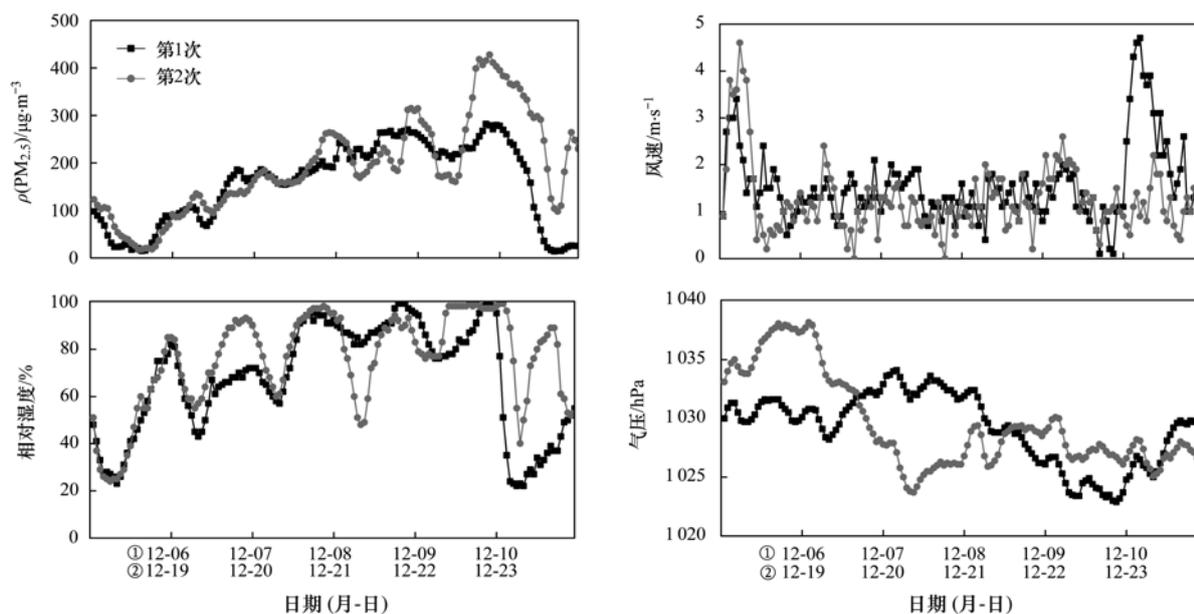
图2 红色预警期间北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of observed $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing during the two air pollution red alerts

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象条件的变化

图3为红色预警前后北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象条件的变化,整体来看,第1次红色预警前后的12月7~9日北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $224 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均风速为 $1.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均相对湿度为 85.1% ,平均气压为 1028.7 hPa ;第2次红色预警前后的12月20~23日北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $247 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

平均风速为 $1.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平均相对湿度为 81.7% ,平均气压为 1017.1 hPa 。两次预警期间,平均风速较低,比常年同期偏小 10% ;大气层结稳定,混合层顶高度低,抑制了污染物的垂直扩散,北京地区混合层顶高度 550 m ,常年同期则有 1050 m ;空气湿度大,污染物吸湿性增长和化学反应更加明显,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 骤升,湿度大有利于气溶胶的二次反应,使得重污染



①为第1次;②为第2次

图3 红色预警期间北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象条件的变化

Fig. 3 Variations of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and meteorological elements in Beijing during the two air pollution red alerts

浓度迅速升高^[19].

图 4 为两次红色预警前后实测 12 月 10 ~ 14 日探空观测的北京市观象台 08:00 温廓线. 从中可见, 两次预警期间出现了明显的逆温现象, 500 m 以下逆温强度最大, 大气层结较稳定, 多数重污染日存在两重逆温. 其中第 1 次红色预警

期间 (12 月 8 日 00:00 至 12 月 10 日 12:00) 贴地逆温强度平均在 0.91℃/100 m, 而第 1 次红色预警期间 (12 月 19 日 07:00 至 12 月 22 日 24:00) 贴地逆温强度平均达 3.4℃/100 m; 逆温不利于污染物的垂直扩散, 易造成污染物浓度的积累^[20,21].

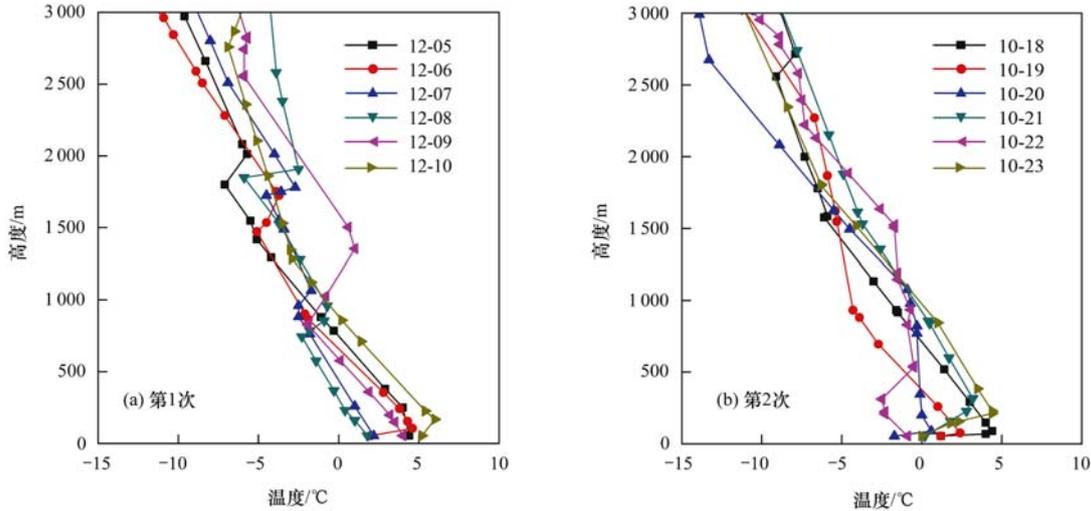


图 4 红色预警期间 08:00 北京市观象台实测温度廓线

Fig. 4 Temperature profiles at Guangxiangtai at 08:00 in Beijing during the two air pollution red alerts

2.3 PM_{2.5} 极值及污染持续时间

图 5 红色预警期间北京市不同站点 PM_{2.5} 极值

及重污染累计小时数, 结合图 3 可知第 1 次红色预警期间, 从全市平均来看, PM_{2.5} 浓度最高小时均值

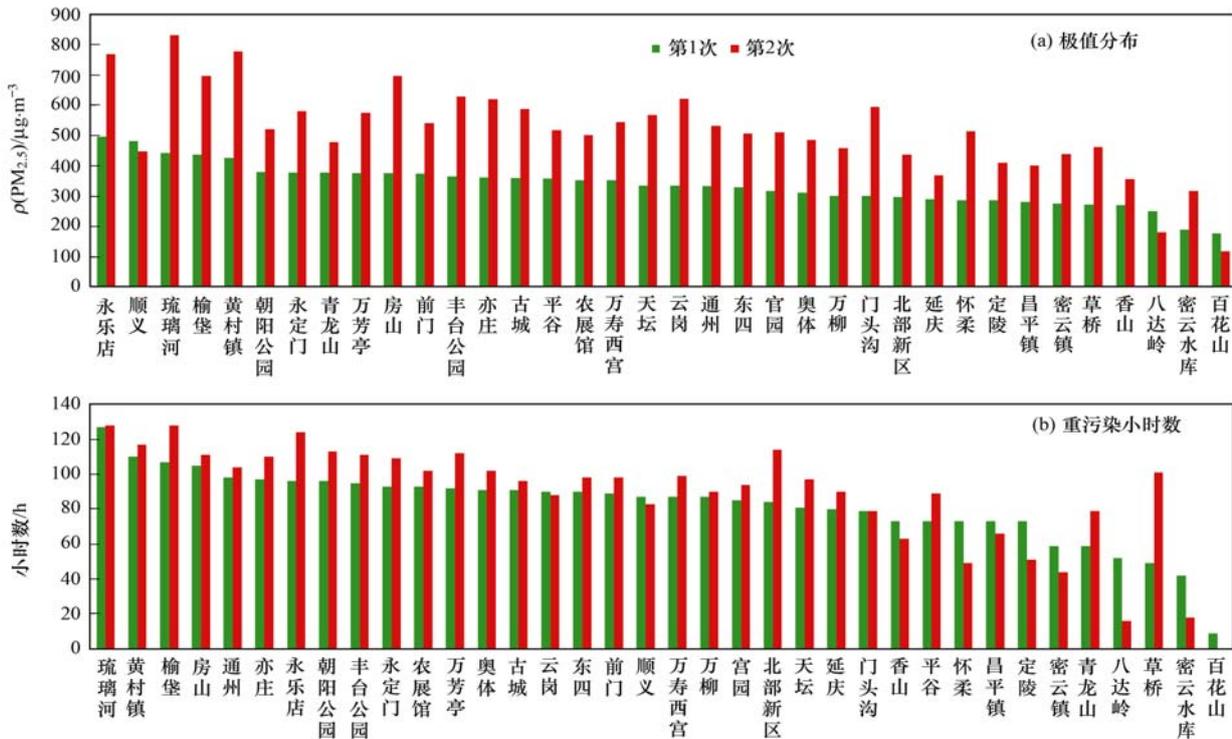


图 5 红色预警期间北京市不同站点 PM_{2.5} 极值及重污染累计小时数

Fig. 5 Extreme value and cumulative hours over heavy pollution at different stations in Beijing during the red warning period

出现在12月9日19:00,为 $282 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;从不同站点峰值浓度上看,单站最高小时值出现在京东南市界永乐店站,浓度达到 $496 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.第2次红色预警期间,从全市平均来看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高小时均值出现12月20日21:00,为 $271 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;从不同站点峰值浓度上看,单站最高小时值出现在京西南市界琉璃河站,浓度达到 $831 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

从重污染累积持续时间上看,第1次红色预警前后,从实测 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度达到重度污染水平(浓度 $>150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)统计数据上看,重污染累积持续在9~127 h之间,单站最高小时值出现在京西南市界琉璃河站,累积持续127 h.第2次红色预警前后,累积持续在0~128 h之间,单站最高小时值出现在京西南市界琉璃河站,累积持续128 h.两次红色预警累积持续时间均呈现出南部站 $>$ 城区站 $>$ 北部站的特征,但第2次红色预警期间, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度南北差异明显大于第1次.

2.4 区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布

图6为采用克里格(Kriging)插值法对北京市及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行空间插值后的分布,表2为北京及周边五省市不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度区间对应面积统计,从中可知,污染开始阶段,高值区 $[\rho(\text{PM}_{2.5}) > 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 主要集中在河南省北部地区及河北省

南部地区;污染持续阶段,高值区范围由南向北进一步扩大,河北省中南部地区浓度迅速上升,并蔓延到太行山山前的保定-廊坊-北京中南部等地区;污染峰值阶段,污染物主要堆积在燕山及太行山前,北京地区浓度进一步上升;污染结束阶段,受冷空气影响,北京及周边地区自西北向东南方向浓度依次降低,高值区中心向南推移.

从统计的两次红色预警前后 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度在 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的面积可以看出,第1次红色预警期间,12月9日北京及周边五省市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度在 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的面积最大,为 $50.93 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占各省市总面积的73%.第2次红色预警期间,12月23日北京及周边五省市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度在 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的面积最大,为 $65.22 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占各省市总面积的93%.本文插值后污染物浓度空间分布及面积统计的不确定性主要来自:①“簸箕状”的特殊地形影响,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;②二次化学反应的影响,没有考虑特定气象条件下,二次化学反应增加的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度;③插值方法误差,由于站点主要为各地区国控站点,集中分布在城区,郊区、山区点个数较少,插值受采样点范围、采样点密度等参数影响^[22].

表2 北京及周边五省市不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度区间对应面积统计 $\times 10^4/\text{km}^2$

Table 2 Land area of different observed $\text{PM}_{2.5}$ average concentrations in Beijing and its surrounding areas $\times 10^4/\text{km}^2$

参数	12-06	12-07	12-08	12-09	12-10	12-18	12-19	12-20	12-21	12-22	12-23
$150 \sim 250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.00	28.88	39.92	43.12	30.90	0	0.63	23.67	47.42	42.06	33.27
$>250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.00	0.99	0.60	7.81	5.74	0	0	0	14.21	21.28	31.95
合计	0.00	29.87	40.52	50.93	36.64	0.00	0.63	23.67	61.64	63.33	65.22

2.5 $\text{PM}_{2.5}$ 组分分析

笔者进一步分析了红色预警期间 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成及转化特征,见图7.观测结果显示第1次红色预警期间的12月7~9日, $\text{PM}_{2.5}$ 主要组分 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 质量浓度分别为 (37.45 ± 11.54) 、 (40.25 ± 13.37) 、 $(36.29 \pm 7.58) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,3种无机组分之和约占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的71%, SO_4^{2-} 占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高为25%, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 平均约为98%.第2次红色预警期间的12月20~23日, $\text{PM}_{2.5}$ 主要组分 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 质量浓度分别为 (43.90 ± 13.91) 、 (41.64 ± 24.34) 、 $(34.03 \pm 14.03) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,3种无机组分之和约占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的68%, SO_4^{2-} 占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高为24%, $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 平均约为105%;预警浓度积累期间较高的 $\rho(\text{NO}_3^-)/\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 比值表明北京市移动源贡献较大.

研究采用硫转化率 $\text{SOR} = [\text{SO}_4^{2-}]/\{[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{SO}_2]\}$ 和氮转化率 $\text{NOR} = [\text{NO}_3^-]/\{[\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2]\}$ 来表征,其中各物质均采用浓度 $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$,SOR、NOR为无量纲量.第1次红色预警期间的12月7~9日SOR、NOR分别为 0.51 ± 0.16 、 0.34 ± 0.06 .第2次红色预警期间的12月20~23日SOR、NOR分别为 0.64 ± 0.13 、 0.41 ± 0.06 .两次预警期间的SOR、NOR远大于2013~2014年SOR(0.34)、NOR(0.14)均值^[7],表明北京本地也存在较强的二次无机盐转化过程.预警期间低风速、高湿度及强逆温等气象条件易造成一次污染气体在大气颗粒物表面通过非均相反应转化生成硫酸盐和硝酸盐等二次气溶胶,对重污染形成起到了促进作用^[23,24].

表3统计了红色预警期间、2013~2014年均及

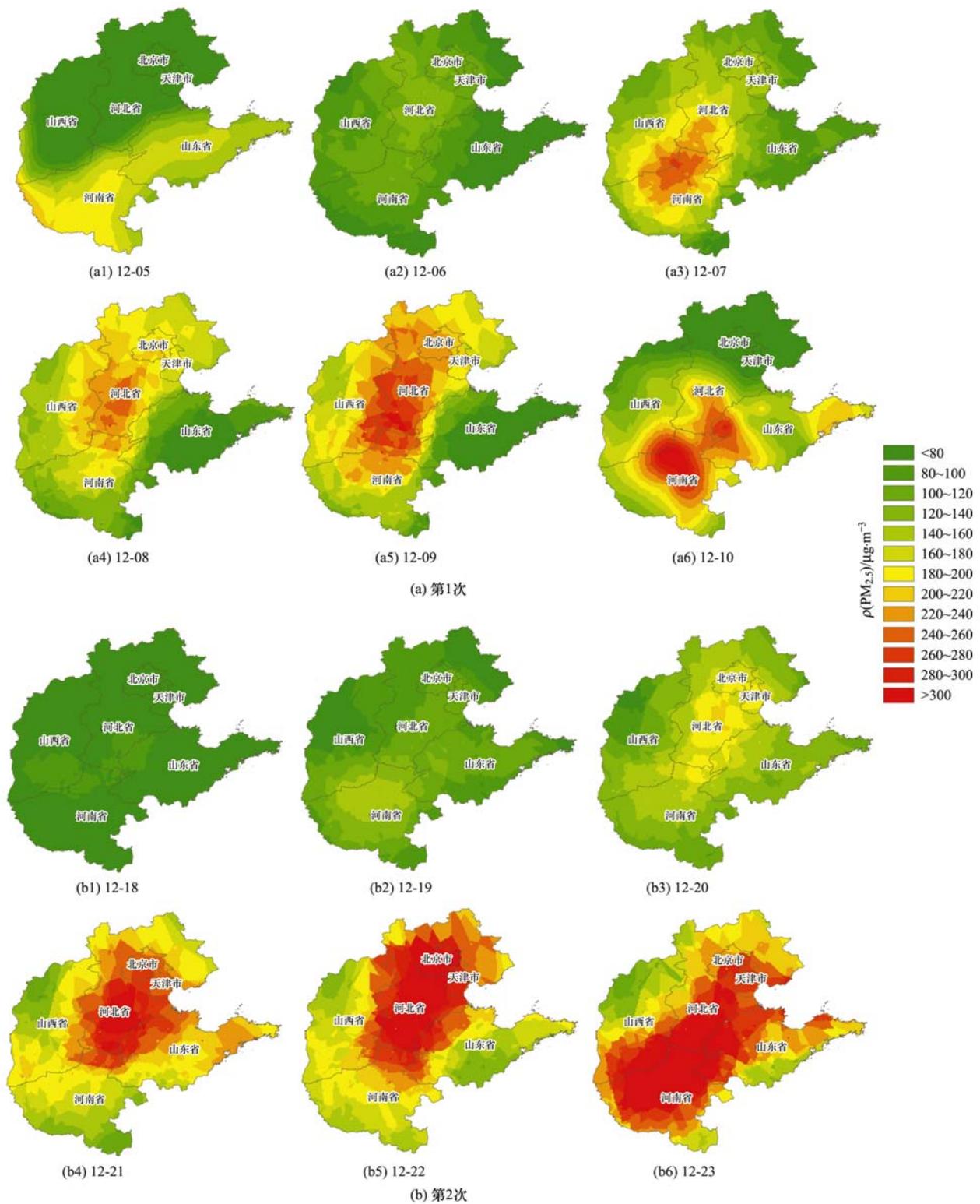


图 6 北京市及周边地区实测 PM_{2.5} 浓度空间分布

Fig. 6 Temporal and spatial distribution of observed PM_{2.5} in Beijing and its surrounding areas

重污染日 PM_{2.5} 中水溶性无机离子 (NO₃⁻、NH₄⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺) 的平均浓度. 从中可知, 重污染日中无机组分 ρ(NO₃⁻)、ρ(NH₄⁺)、ρ(SO₄²⁻) 值较高, ρ(Cl⁻)、ρ(K⁺)、

ρ(Ca²⁺) 值较低, 重污染日各离子组分按质量浓度大小排序为: ρ(SO₄²⁻) > ρ(NO₃⁻) > ρ(NH₄⁺) > ρ(Cl⁻) > ρ(K⁺) > ρ(Na⁺) > ρ(Ca²⁺) > ρ(Mg²⁺); 年均各离子组分按质量浓度排序为 ρ(SO₄²⁻) >

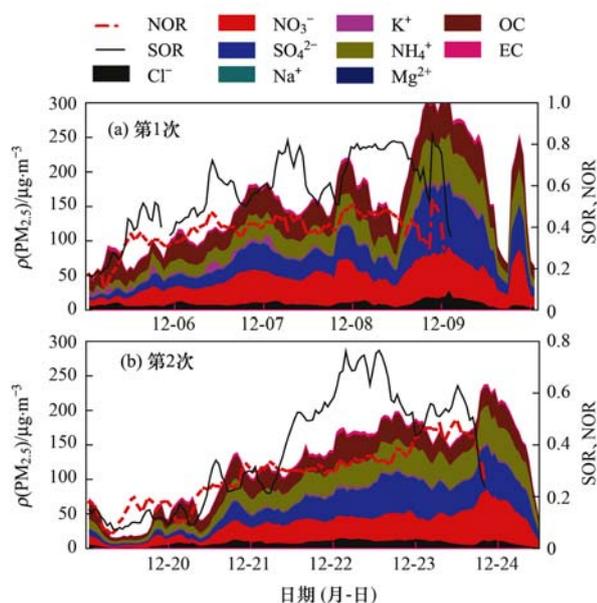


图7 红色预警前后北京市 $PM_{2.5}$ 化学组成及转化特征

Fig. 7 Particle chemical composition and transformation characteristics before and after the red alert in Beijing

表3 北京市 $PM_{2.5}$ 组分浓度统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 Average mass concentrations of major chemical components in $PM_{2.5}$ in Beijing/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{NH}_4^+)$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$
2013~2014年平均	3.64 ± 3.35	14.55 ± 10.81	21.76 ± 20.65	0.47 ± 0.33	0.96 ± 0.85	13.56 ± 8.94	0.56 ± 0.36	0.08 ± 0.03
2013~2014重污染日平均	5.40 ± 4.79	28.62 ± 15.57	53.61 ± 25.02	0.69 ± 0.63	2.03 ± 1.84	22.30 ± 9.18	0.49 ± 0.37	0.11 ± 0.04
第1次(12月7~9日)	9.58 ± 2.55	37.46 ± 11.54	40.25 ± 13.37	1.28 ± 0.21	2.21 ± 0.56	36.29 ± 7.58	0.17 ± 0.09	0.05 ± 0.03
第2次(12月20~23日)	9.11 ± 4.45	43.90 ± 13.91	41.64 ± 24.34	1.55 ± 0.32	3.46 ± 3.04	34.03 ± 14.03	0.19 ± 0.08	0.11 ± 0.02

层高度之上仍监测到较高消光系数. 一般来讲受污染源排放影响, 高浓度污染物主要集中在地表; 而两次红色预警期间, 垂直方向 500~800 m 存在明显的污染带且持续时间很长, 表明在特定气象条件下, 存在明显的区域污染物向北京地区输送. 研究表明重污染发生后, 偏南风导致污染传输加剧, 贡献率可达 50% 以上, 区域输送加重了本地空气重污染的水平, 是引发空气重污染的重要原因^[24,25].

2.7 预警效果及成因初步分析

根据北京市空气重污染应急预案, 应急措施启动后, 污染物排放量得到相应削减. 用大气污染源排放清单技术方法(详细方法见文献[25])分别测算工地停工、机动车禁限行、工业停限产、道路保洁、弹性上班等强制性和建议性措施实施所实现的主要污染物减排量, 污染物项目包括 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOC 这 5 种. 综合来看, 第 1 次红色预警期间, 与不采取应急措施相比, 实施橙色预警应急减排措施以后, 主要污染物排放量平均削减比例为 20%~25%; 预警升级为红色以后, 实施红色应急减排

$\rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{NH}_4^+) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Mg}^{2+})$; 第 1 次红色预警期间各离子组分按质量浓度大小排序与 2013~2014 年重污染日各离子组分平均质量浓度排序一致, 而第 2 次红色预警期间各离子组分按质量浓度大小排序中, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 浓度大于 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$.

2.6 污染输送分析

重污染过程开始前, 北京中南部及河北中南部地区浓度逐渐上升, 在偏南风左右下, 污染逐渐覆盖北京市北部地区; 北京市 $PM_{2.5}$ 浓度呈南高北低阶梯状分布特征. 图 8 为两次红色预警前后在北京东南市界永乐店采用激光雷达监测的垂直方向的消光系数. 从中可知, 消光系数的高低较好地显示了两次污染过程近地面污染物浓度的演变, 第 1 次红色预警期间, 监测到垂直方向上 200~800 m 高度消光系数最高, 达 $0.40 \times 10^{-4} \text{ km}^{-1}$, 大气透明度显著降低, 表明此高度大气污染最重; 第 2 次红色预警期间, 大气污染物主要集中在边界层高度之下, 但边界

措施的主要污染物排放量在橙色应急基础上, 继续削减了 10%~15%. 与不采取应急措施相比, 红色预警应急措施实现的污染物平均减排量在 30% 左右. 而区域层面上, 周边城市天津市提前启动了空气重污染橙色预警; 河北省保定、廊坊、衡水、邢台这 4 个城市启动橙色预警, 且保定、廊坊、衡水采取了高于橙色预警的机动车单双号限行措施; 石家庄、邯郸、定州和辛集这 4 个城市启动了黄色预警, 沧州市启动了蓝色预警; 河南省郑州、开封、洛阳、平顶山、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、三门峡、济源、巩义、滑县、长垣这 14 个县市启动了橙色预警, 许昌、漯河、南阳、商丘、信阳、周口、驻马店、兰考、汝州、邓州、永城、固始、鹿邑等这 13 个县市启动了黄色预警, 新蔡启动蓝色预警.

第 2 次红色预警, 应急措施启动时间较早, 北京市从 12 月 19 日 07:00 就开始启动, 在大气转入静稳状态初期就开始采取减排措施, 污染积累量明显减少; 北京市直接启动了最高级别的红色预警, 在工业、燃煤、机动车等各方面都采取了最为严格的

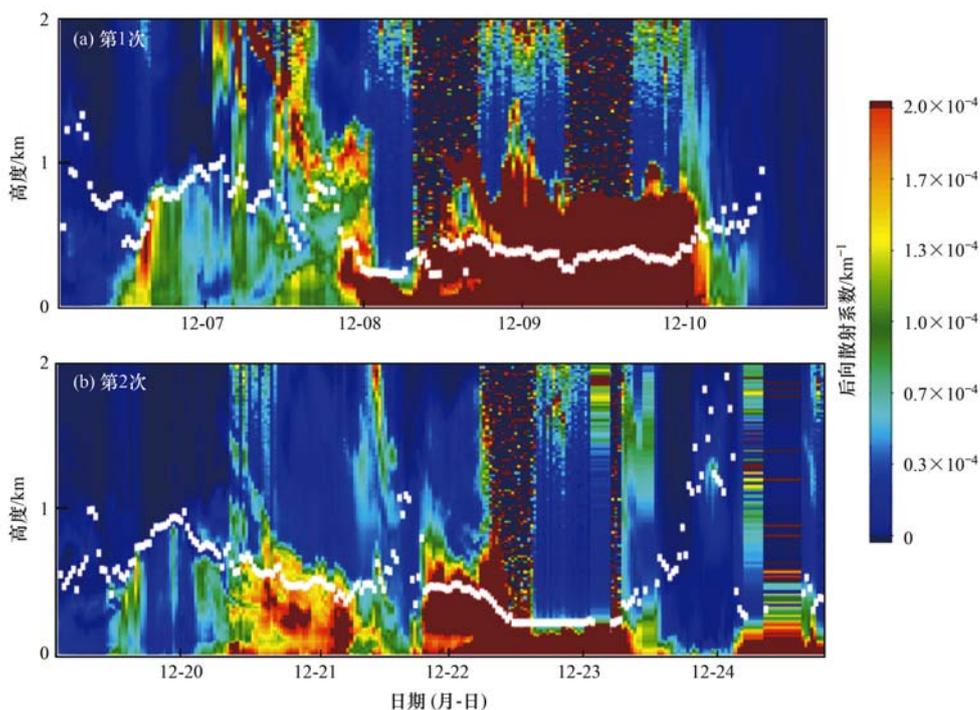


图 8 预警前后激光雷达监测的消光系数

Fig. 8 Extinction coefficients measured by radar before and after the red alert at Yongledian

减排措施;减排措施力度整体比第 1 次红色预警较大,减排措施实施后, SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、VOCs 日平均减排量分别为 32、125、168、46、159 t. 天津市也提前启动空气重污染橙色预警;河北省邯郸市、保定市这 2 个城市启动红色预警;邢台、石家庄、衡水、廊坊、沧州、唐山这 6 个城市启动橙色预警;秦皇岛启动蓝色预警;山西省运城市黄色预警;山东省济南市为橙色预警,德州、聊城、济宁、淄博这 4 个城市已启动黄色预警;河南省濮阳、新乡这 2 个城市启动橙色预警,开封、鹤壁、安阳这 3 个城市启动黄色预警.

两次红色预警期间区域应急减排,有效减缓了污染积累. 本研究利用 Models-3/CMAQ 模型,结合源模式 SMOKE 模型和中尺度气象模式 WRF 模型,根据上述减排量测算结果,考虑区域应急措施实施所实现的减排量,利用此模拟系统对本次重污染应急措施采取后北京市 $PM_{2.5}$ 环境浓度改善效果进行模拟. 模拟结果显示,实施红色应急措施与不实施应急措施相比, $PM_{2.5}$ 环境浓度下降约 20%~25%^[25].

一般来说,空气质量变化短期内受气象条件变化影响较大,但长期来看,主要取决于区域内大气污染物排放总量. 进入采暖季以来,极端气象条件导致重污染天气频发,浓度抬升迅猛. 强厄尔尼诺现象是导致今年秋冬季以来重污染过程频发的重要气候背

景,今年是有史以来最强的厄尔尼诺年之一,全球极端天气频发,近期多次强降雪过程(11 月 7 日、11 月 20 日、11 月 28 日等),降雪范围大,强度强,积雪消融期,导致近地面湿度持续接近饱和,大气层结趋于稳定,且利于颗粒物的吸湿增长和生成转化;地面温度降低的同时,中层大气明显回暖,形成大范围的强逆温;高湿度、低风速、强逆温的极端不利气象条件,导致污染扩散能力下降,各类污染源排放的大量污染物持续积累和转化,易形成重污染. $PM_{2.5}$ 重污染发生起始阶段,燃煤影响显著;环统数据显示^[16]北京市及周边省区仍然是全国大气污染排放量较大的区域;如 2014 年,京津冀区域排放颗粒物为 199.5 万 t、 SO_2 为 147.7 万 t、 NO_x 为 194.6 万 t,前者主要为直接排放的 $PM_{2.5}$,后者提供了丰富的 $PM_{2.5}$ 前体物;进入采暖期,全市每天燃煤排放的 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$,分别增加 14.3 倍、6.4 倍和 12.7 倍. 在 $PM_{2.5}$ 重污染积累阶段,机动车排放加重污染程度,城区 $PM_{2.5}$ 中硝酸盐组分高于硫酸盐,且从 S/N(硫酸盐/硝酸盐,值越小,机动车影响越大)来看,城区比例最低,也反映了城区机动车排放贡献率高^[26,27]. 由此可见区域燃煤和机动车排放大量的污染物,是造成空气重污染的本因.

3 结论

(1) 第 1 次红色预警期间,从全市平均来看,

PM_{2.5}全市平均最高小时浓度出现在12月9日19:00,为282 μg·m⁻³;单站最高小时值出现在京东南市界永乐店站,浓度达到496 μg·m⁻³.第2次红色预警期间,PM_{2.5}全市平均最高小时浓度出现12月22日20:00,为421 μg·m⁻³;单站最高小时值出现在京西南市界琉璃河站,浓度达到831 μg·m⁻³.

(2)两次红色预警前后,重污染累积持续时间均呈现出南部站>城区站>北部站的特征,但第2次红色预警期间,PM_{2.5}浓度南北差异明显大于第1次,且PM_{2.5}平均浓度在150 μg·m⁻³以上的面积明显大于第1次,北京及周边五省市重污染面积可达总面积的93%.

(3)两次预警期间气象条件均不利于污染物的扩散,均存在不同程度的二次转化和区域输送现象,极端气象条件是重污染形成的外因,区域污染物排放量才是导致重污染形成的内因.

(4)红色预警应急措施实施后,北京市PM_{2.5}环境浓度下降约20%~25%,减排效果显著.

致谢:感谢北京市空气质量监测子站和激光雷达观测点工程师的辛勤劳动和维护.

参考文献:

- [1] 程念亮, 张大伟, 李云婷, 等. 2000~2014年北京市SO₂时空分布及一次污染过程分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3961-3971.
- [2] 北京市环境保护监测中心. 基于AQI标准及三维立体监测的空气质量预报技术体系研究和应用示范[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2014.
- [3] 国家环境保护部. APEC会议空气质量保障方案(试行)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [4] 北京市环保局. 北京市空气重污染应急预案(试行)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [5] 北京市人民政府. 北京市空气重污染应急预案[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [6] 环境保护部. HJ 633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [7] 北京市环境保护局. APEC空气质量保障环境空气质量改善效果评估报告[R]. 北京: 北京市环境保护局, 2014.
- [8] 北京市环境保护监测中心. 2015年两大活动期间空气质量保障效果综合评估报告[R]. 北京: 北京市环境保护监测中心, 2015.
- [9] Lee B K, Jun N Y, Lee H K, *et al.* Analysis of impacts on urban air quality by restricting the operation of passenger vehicles during Asian Game events in Busan, Korea[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(12): 2323-2338.
- [10] Beig G, Dilip M C, Ghude S D, *et al.* Quantifying the effect of air quality control measures during the 2010 Commonwealth Games at Delhi, India[J]. Atmospheric Environment, 2013, **80**: 455-463.
- [11] Wang T, Xie S D. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(35): 5682-5690.
- [12] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014年APEC期间北京市空气质量改善分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 66-73.
- [13] 吴兑, 廖碧婷, 吴晟, 等. 2010年广州亚运会期间灰霾天气分析[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 521-527.
- [14] 谢放尖, 李文青, 喻义勇, 等. 南京亚青会空气质量保障回顾性评价及启示[J]. 环境监控与预警, 2014, **6**(2): 1-4.
- [15] 黄嫣旻, 魏海萍, 段玉森, 等. 上海世博会环境空气质量状况和原因分析[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(5): 58-63.
- [16] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴2001-2015[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2001-2015.
- [17] 环境保护部. HJ/T 193-2005 环境空气质量自动监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [18] 观察者. 红色预警没必要? 北京环保局: 使污染降低一个等级[EB/OL]. http://www.guancha.cn/society/2015_12_11_344340.shtml, 2015-12-11.
- [19] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [20] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, *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.
- [21] Cao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [22] 程念亮, 李军杰, 李云婷, 等. 基于matlab北京市PM_{2.5}动态分区统计预报模型的开发[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(10): 4965-4970.
- [23] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(49): 17373-17378.
- [24] 李莉, 蔡蓓琳, 周敏. 2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [25] 北京市环境保护监测中心. 2015年冬季北京市PM_{2.5}重污染状况及来源分析[R]. 北京: 北京市环境保护监测中心, 2016.
- [26] 张仁健, 王明星, 胡非, 等. 采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2002, **19**(1): 75-81.
- [27] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4325-4330.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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