

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析

钟嶷盛, 周颖, 程水源*, 王晓琦, 邵玄逸

(北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 以2015年“9·3”阅兵活动及同年冬季两次空气重污染红色预警为例, 针对气象要素及污染物浓度变化特征进行对比分析, 对不同减排措施下污染物减排比例估算, 并利用WRF-CAMx模型, 对减排带来的PM_{2.5}污染改善效果进行了定量评估与对比分析。结果表明, 阅兵期间(8月20日至9月4日)PM_{2.5}日均浓度(19.0 μg·m⁻³)分别比阅兵前(8月15~19日)和阅兵后(9月5~15日)日均浓度降低了60.0%和48.0%, 第一次红色预警期间PM_{2.5}日均浓度(232.3 μg·m⁻³)高于第二次红警(216.6 μg·m⁻³), 第二次启动重污染红色预警之前的空气质量好于第一次红警。阅兵期间北京及周边省市污染物减排比例普遍大于红警期间, 为保障“阅兵蓝”的实现提供了人为可控的有利条件。“9·3”阅兵、北京首次及第二次红色预警期间采取污染物应急减排措施情况下, 北京PM_{2.5}浓度分别平均降低了32.4%、17.1%和22.0%。阅兵期间与红色预警相比, PM_{2.5}浓度降低比例较高, 归因于更大力度的区域污染物协同减排以及阅兵期间易于污染物扩散的气象条件。污染减排力度、应急控制措施实施时机以及气象条件是可能影响应急污染控制措施污染改善效果的重要因素。

关键词: PM_{2.5}; 阅兵; 红色预警; WRF-CAMx模型; 减排效果

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3449-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910166

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital

ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan*, WANG Xiao-qi, SHAO Xuan-yi

(Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Taking the “9.3” military parade in 2015 and two red alerts of heavy air pollution in December of the same year as examples, the characteristics of meteorological factors and pollutant concentration variation were compared. Based on the estimation of pollutant emission reduction under different periods, the WRF-CAMx model was used to evaluate the effect of PM_{2.5} pollution improvement. The results showed that the daily average PM_{2.5} concentration (19.0 μg·m⁻³) during the parade (from August 20 to September 4) decreased by 60.0% and 48.0%, respectively, in comparison to that before (August 15-19) and after (September 5-15) the parade. The daily average PM_{2.5} concentration (232.3 μg·m⁻³) during the first red alert period was higher than that of the second red alert (216.6 μg·m⁻³). The air quality before the second red alert was better than that before the first red alert. The proportion of emission reduction during the parade was generally larger than that during the red alert periods, which provided a controllable and favorable condition for the realization of the “Parade Blue”. The PM_{2.5} concentration in Beijing decreased by 32.4%, 17.1%, and 22.0% under the control measures during the periods of the “9.3” parade, the first red alert, and second red alert, respectively. The higher proportion of PM_{2.5} concentration reduction could be attributed to the more intensive regional emission reduction and the favorable meteorological conditions. The intensity of the pollution reduction, the timing of the implementation of emergency control measures, and meteorological conditions were the most important factors that may have influenced the improvement of pollution.

Key words: PM_{2.5}; parade; red alerts; WRF-CAMx model; emission reduction effect

随着经济社会快速发展,我国区域空气污染问题愈发严重^[1]。北京作为我国的首都,空气质量受到社会和学者的高度关注^[2~6]。近年来,为改善北京空气质量,政府采取了多项污染控制措施^[7]。特别是在重大活动(如2008年北京奥运会^[8,9]、2014年APEC会议^[10,11]以及2015年的“9·3”阅兵)期间,为保障活动期间空气质量,北京及周边地区会采取更为严格的污染源减排措施。此外,由于目前污染物排放总量仍然巨大,在不利的气象条件下容易引发空气重污染,例如在2015年12月8日07:00到10日12:00、12月19日07:00到12月22日24:00,

北京在短期内连续发生空气重污染,北京市也相应实施了历史上首次及第二次空气重污染红色预警,并采取了相应的污染物控制措施。

目前已有学者针对污染物减排措施带来的空气质量改善效果进行了评估研究,研究结果显示减排措施能够显著降低PM_{2.5}浓度,有效改善空气质量^[12~25]。然而现有研究多是针对某次重大活动或某

收稿日期: 2019-10-22; 修订日期: 2020-02-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51638001); 国家重点研发计划项目(2018YFC0213206)

作者简介: 钟嶷盛(1986~),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: zhongyisheng@bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chengsy@bjut.edu.cn

一时段应急措施实施后的空气质量改善效果开展研究,对不同季节典型应急措施实施效果的对比及评估研究较少。

本文以 2015 年“9·3”阅兵、同年冬季北京首次及第二次空气重污染红色预警为案例,针对上述同年不同季节下的污染应急控制措施,基于减排量估算,利用 WRF-CAMx 模型开展减排措施实施效果对比分析,并分析污染源减排、气象特征等因素对环境质量影响(以北京 $\text{PM}_{2.5}$ 为代表)的差异,以期为今后制定科学和优化的污染应急控制方案提供科学依据,并为环境管理部门提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究中大气污染物(包括 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$)浓度监测数据来自北京市环境保护监测中心发布的逐时数据,选取北京 12 个国控站点(官园、天坛、海淀万柳、万寿西宫、顺义新城、怀柔、昌平、定陵、奥体中心、农展馆、东四和古城)污染物浓度平均值代表污染水平,并用于数值模拟评价。气象数据来自 WEATHER UNDERGROUND 站点气象数据(<https://www.wunderground.com/>),时间间隔 1h,用于气象特征分析。日最大混合层高度是根据北京首都国际机场($40^{\circ}04'N$, $116^{\circ}35'E$)提供的 AMDAR 数据,依据干绝热线法获得。

1.2 数值模拟

本研究基于构建的 WRF-CAMx 耦合模型系统进行空气质量模拟研究,并用于定量评估不同污染控制措施实施对北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响。其中气象模型采用 WRF3.3 版本,模拟初始场数据采用美国国家环境预报中心提供的时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 1° 的 FNL 全球分析资料。空气质量模型采用三维多尺度欧拉空气质量模型 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extension) V6.0 版本。模拟区域地图投影采用兰波托投影,设置两层嵌套模拟网格,其中外层网格分辨率为 $27\text{ km} \times 27\text{ km}$,覆盖范围包括北京市、天津市、河北省、山东省、山西省、河南省、内蒙古和辽宁省部分地区;内层网格分辨率为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$,覆盖京津冀地区及周边部分地区。空气质量模型 CAMx 所需排放清单来自于本研究团队自下而上建立的区域大气污染物排放清单^[26]。本文基于情景分析法对比分析不同污染控制措施对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响,包括以下模拟情景。基准情景:不考虑阅兵及红色预警期间的减排措施;减排情景①考虑阅兵期间减排措施;减排情景②考虑第一次红色预警减排措施;减排情景③

考虑第二次红色预警减排措施。根据基准情景与各减排情景(即减排措施实施前后) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化对减排效果进行评估及对比分析。评估时段包括阅兵减排(8月20日至9月4日)、第一次红警减排(12月8~10日)和第二次红警减排(12月19~22日)时段。



图1 WRF-CAMx 模型双层嵌套示意

Fig. 1 Double nested simulation area of WRF-CAMx model

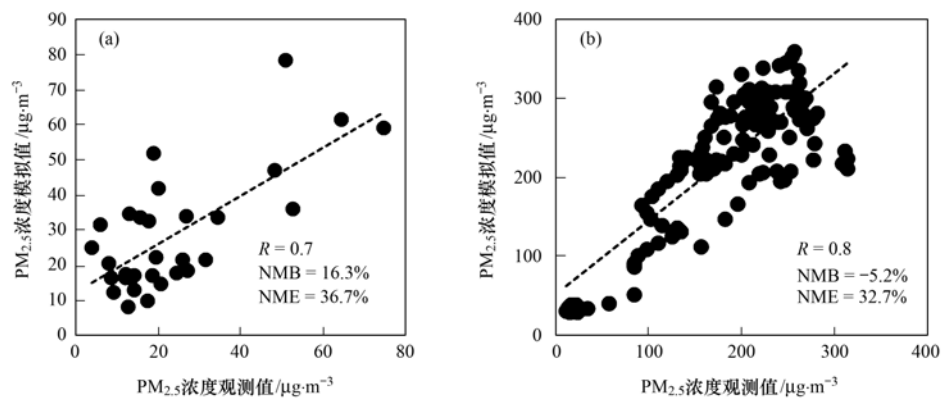
1.3 模型验证

本文通过对比阅兵和红色预警期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的模拟值与监测值,对模型模拟效果进行评估, $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值与监测值均使用北京 12 个国控监测站点的平均值,模型验证结果如图 2 所示。考虑到阅兵期间时段相对较长,阅兵期间模型验证以逐日值显示,红色预警期间模型验证以小时值显示。阅兵期间和红色预警期间 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟浓度与观测浓度的相关系数分别为 0.7 和 0.8,标准化平均偏差(NMB)分别为 16.3% 和 -5.2%,标准化平均误差(NME)分别为 36.7% 和 32.7%,表明模拟效果较好,模拟误差在可接受范围内。模拟误差可能的原因包括排放源清单的不确定性以及模型反应机制的不完善等因素。

2 结果与讨论

2.1 浓度特征分析

阅兵期间北京 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度如图 3 所示。本文分析阅兵期间北京空气质量特征,分为阅兵前(8月15~19日)、阅兵期间(8月20日至9月4日)和阅兵后(9月5~15日)这3个阶段。阅兵期间是北京及京津冀区域减排措施实施的时段,与阅兵前和阅兵后未采取减排措施的时段进行比较,考虑到减排措施取消后其影响持续时间会稍长,故阅兵



(a) 阅兵时段(2015 年 8 月 15 日至 9 月 15 日); (b) 红色预警时段(2015 年的 12 月 8~10 日和 12 月 19~22 日)

图 2 模拟时段内北京 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟浓度与监测浓度对比散点图

Fig. 2 Comparison between the simulated and monitored $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Beijing during the simulation period

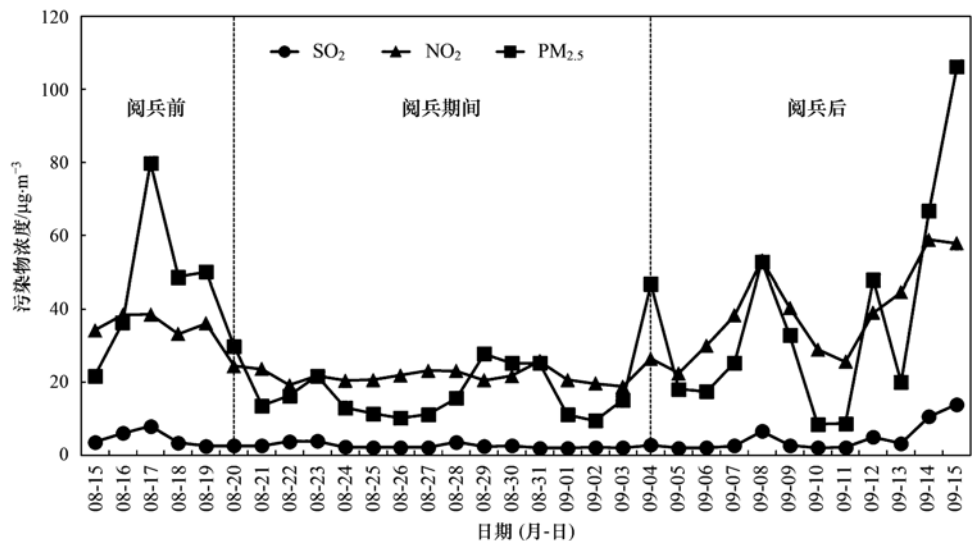


图 3 阅兵期间北京 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度特征

Fig. 3 Characteristics of the SO_2 , NO_2 , and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Beijing during the parade

后时段比阅兵前时段多选取 5 d. 阅兵期间 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度分别为 3.0、22.0 和 $19.0\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别比阅兵前和阅兵后污染物日均浓度降低了 45.0%、39.0%、60.0% 和 46.0%、45.0%、48.0%. 阅兵期间 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度最大值均达到国家二级标准, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度连续 15 d 达到一级优.

两次红警期间北京 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度如图 4 所示. 结果显示, 12 月 5~10 日大气污染以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主, 日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别是 47.8、124.3、178.1、233.7、243.1 和 $183.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 12 月 5 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低, 空气质量为良, 12 月 6 日 09:00~15:00, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由 $67.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增至 $155.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量在 7 h 内由良迅速恶化至重度污染, 随后至 12 月 10 日 08:00, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均高于 $150\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量持续重污染水平, 且从 12 月 8 日 12:00 起 (预警启动后 6 h) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于 250

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 达到严重污染水平. 第一次红色预警期间 (12 月 8 日 07:00 到 12 月 10 日 12:00) 平均日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $232.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 峰值浓度为 $281.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (12 月 9 日 19:00, 预警启动后 37 h). 在第二次红色预警之前, 12 月 18 日 06:00~17:00, 北京市空气质量处于优/良等级, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最低为 $18\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 自 12 月 18 日 17:00 起, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈大幅增长趋势, 7 h 内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加至之前水平的 5 倍, 至 23:00 空气质量达到轻度污染, 12 月 19 日 22:00 (预警启动后 16 h), 空气质量达到重污染水平; 12 月 22 日 20:00 (预警启动后 38 h), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大于 $250\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量达到严重污染水平, 12 月 22 日 17:00 (预警启动后 83 h) 达到峰值 $417.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 12 月 18~22 日北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别是 39.1、108.5、192.6、207.6 和 $298.4\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 第二次红色预警期间 (12 月 19 日 07:00 至 12 月 22 日 24:00) 平均日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $216.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

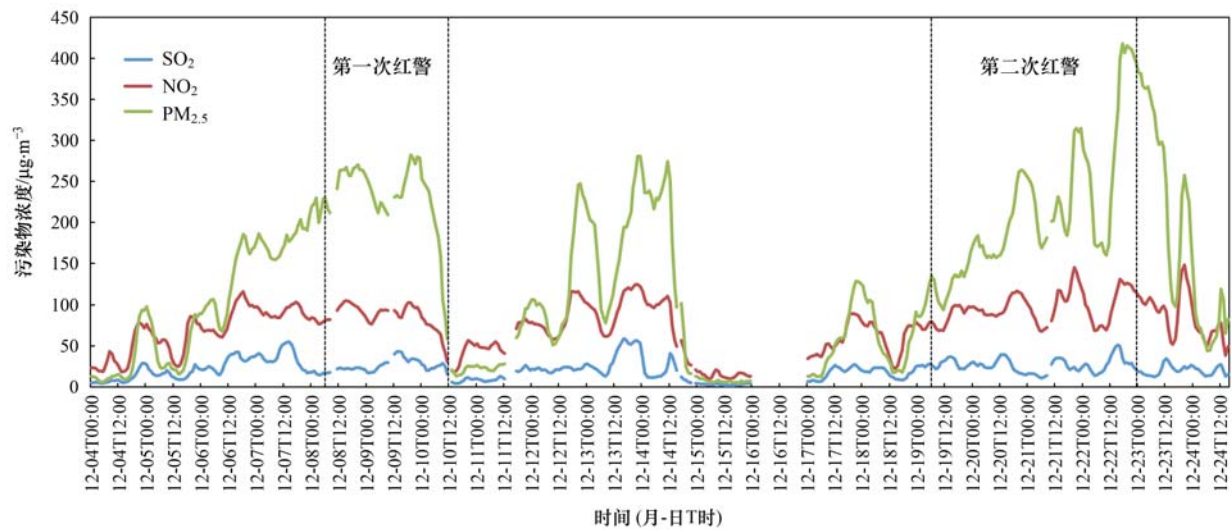


图4 两次红色预警期间北京SO₂、NO₂和PM_{2.5}浓度特征

Fig. 4 Characteristics of the SO₂, NO₂, and PM_{2.5} concentrations in Beijing during the two red alerts

从阅兵及两次红警期间整体污染物浓度来看,第一次红色预警期间,PM_{2.5}日均浓度最高.12月8日07:00,在北京市启动第一次红色预警之前(12月6日15:00起),PM_{2.5}浓度已超过150 μg·m⁻³,空气质量一直处于重污染级别,静稳型天气持续近两天,污染物易大量积累;第二次红色预警启动时,PM_{2.5}浓度尚未达到重污染水平(131.1 μg·m⁻³),预警启动后16 h空气质量达到重污染水平.第二次红色预警启动后38 h空气质量达到严重污染水平,比第一次红色预警期间出现严重污染的时间(预警启动后6 h)较为滞后.第二次启动重污染红色预警之前的空气质量好于第一次.

2.2 气象特征分析

表1为阅兵前(8月15~19日)、阅兵期间(8月20日至9月4日)和阅兵后(9月5~15日)温度、湿度、风速、气压及日最大混合层高度情况,其中阅兵期间分为前段(仅有北京实施减排措施,8月20~27日)及后段(北京及周边地区共同实施减排措施,8月28日至9月4日).表2为两次红色预警

前后温度、湿度、风速、气压及日最大混合层高度情况.阅兵前、中和后期整体处于北京秋季,相较于两次红色预警期间,阅兵期间地面温度较高,风速较高,湿度相对较低,日最大混合层高度较高,大气对流活动更强,使阅兵期间大气扩散条件比较有利,相对不容易为二次粒子生成反应创造条件,污染物浓度远低于红色预警期间污染物浓度水平.第一次红色预警前期,12月5日之后,风速变小,相对湿度增加,有利于二次粒子的形成,气压大、风速小有利于污染物积累,日最大混合层高度也逐渐降低,造成高浓度污染,这使得污染物浓度迅速增加.第二次红色预警前期,12月18日白天,北京地区受西北弱高压控制,近地面受偏北气流影响,风速相对较高,PM_{2.5}浓度相对较低.12月19日开始气压逐渐减弱,日最大混合层高度逐渐降低,扩散条件转差,PM_{2.5}浓度开始升高.从气象条件平均水平上看,第二次红警期间温度较低,风速较低,湿度略高,更不利于污染物的扩散,因此第二次红警期间峰值PM_{2.5}浓度(417.8 μg·m⁻³)远高于第一次红警期间(281.8 μg·m⁻³).

表1 阅兵前后主要气象要素

Table 1 Meteorological parameters during the parade

项目	温度/℃	湿度/%	风速/m·s ⁻¹	气压/hPa	日最大混合层高度/m
阅兵前	26.7	60.3	3.4	1 005.8	1 567
前段	25.7	59.0	2.9	1 009.2	1 554
阅兵中	23.5	72.1	2.7	1 012.6	1 224
后段	24.6	65.5	2.8	1 009.2	1 517
阅兵后	20.3	64.3	2.9	1 016.0	1 290

2.3 减排量估算

阅兵活动期间,北京111家重点企业停产、限产,工艺无组织环节污染物减排30%左右,部分燃

煤电厂发电量减少;除保障车辆外,全市机动车启动单双号限行,部分车辆禁限行,车辆限行、工地停工等导致非道路机械减量;全市停止施工工地所有

土石方、拆除等作业,加强道路清扫保洁;通过调休假、减少社会活动、加强监管等方式进一步降低排放.同时北京周边的天津、河北、山西、山东、内蒙和河南等省市均采取了污染物减排措施,尤其是强化燃煤电厂、水泥、钢铁等高架源管控,减少污染物传输对北京的影响.

表 2 两次红色预警前后主要气象要素

Table 2 Meteorological parameters during the two red alerts						
红色预警	日期(月-日)	温度/℃	湿度/%	风速/m·s ⁻¹	气压/hPa	日最大混合层高度/m
第一次	12-05	2.2	47.0	2.9	1 029.5	1 594
	12-06	0.6	62.5	1.3	1 029.5	931
	12-07	1.1	73.5	1.6	1 032.9	1 130
	12-08	0.0	88.5	0.9	1 029.5	558
	12-09	2.8	83.5	1.6	1 026.1	675
	12-10	3.3	56.0	3.4	1 026.1	1 157
第二次	12-18	-1.1	47.0	2.5	1 032.9	1 287
	12-19	-1.7	67.5	0.9	1 036.3	1 104
	12-20	-1.7	74.0	0.9	1 026.1	916
	12-21	-1.1	69.5	2.0	1 029.5	511
	12-22	-1.5	89.0	1.3	1 026.1	409

北京市第一、二次红色预警应急措施^[27]主要包括机动车单双号限行、公务用车停驶车辆总数的30%、施工工地停止室外施工作业、建筑垃圾和渣土运输车、混凝土罐车和砂石运输车等重型车辆禁止上路、重点道路每日增加1次清扫保洁、工业企业按红色预警期间停产限产名单实施停产限产措施,禁止燃放烟花爆竹和露天烧烤等,天津市预警措施包括加强工业及无组织排放控制,河北省预警措施包括加强工业、燃煤、移动源及无组织排放控制、部分城市实施单双号限行或尾号限行.北京红色预警期间周边省市也启动了不同等级预警.天津市在北京第一次红色预警时,于12月6日00:00启动空气重污染黄色预警,12月8日14:00升级为空气重污染橙色预警.北京第二次红色预警时,天津市于12月

19日07:00开始实施橙色预警强制性措施.河北省在北京第一次红色预警时,于12月4日起于不同地市开始启动空气重污染预警,于12月9日00:00启动橙色(Ⅱ级)应急响应.北京第二次红色预警时,河北省自12月18日00:00启动区域橙色预警.邯郸市启动红色预警,邢台、石家庄等8个城市启动橙色预警,廊坊市12月19日升级为红色预警.本文在课题组前期APEC空气质量保障方案减排测算等工作的基础上^[18],对阅兵期间和北京市两次红色预警期间北京及周边地区污染物减排比例进行了估算,估算结果见表3.各地阅兵期间减排比例普遍大于红警期间,为保障“阅兵蓝”的实现提供了人为可控的有利条件.两次红色预警期间北京及周边地区的减排比例相差不大.

表 3 阅兵及两次红色预警期间京津冀三地减排比例估算/%

Table 3 Estimation of the emission reduction ratio for Beijing, Tianjin, and Hebei during the parade and two red alerts/%						
地区	时段	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs
北京	阅兵期间	35	51	44	44	30
	红色预警期间	14	31	29	25	29
天津	阅兵期间	32	33	—	46	32
	第一次红色预警期间	8~12	5~7	21~24	18~20	11~16
	第二次红色预警期间	12	7	24	20	16
	阅兵期间	33	26.8	39.8	—	29
河北	第一次红色预警期间	15~17	21~27	16~19	16~18	14~17
	第二次红色预警期间	20	29	26	24	22

2.4 减排措施实施PM_{2.5}影响差异

分别利用基准情景与阅兵、两次红警减排情景的排放清单进行模拟,评估减排措施实施效果.图5为阅兵活动期间北京及不同典型区域PM_{2.5}浓度降低比例.图6为北京及不同典型区域两次红色预警期间PM_{2.5}浓度降低比例.图5显示,阅兵期间北京

PM_{2.5}浓度降低比例约为32.4%.图6显示,第一次红警期间,受污染物累积的影响,预警控制措施实施后(8日7时),北京市大气PM_{2.5}浓度未立刻呈现出明显的下降.随着时间推移,减排效果在不断增强.模拟结果显示,在北京及周边地区应急控制措施的前提下,应急预案措施实施后,北京市PM_{2.5}浓度下

降0.8%~21.9%,平均下降17.1%左右.从12月9日21:00开始,风速逐渐增大,北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例呈现下降趋势.第二次红警期间,在北京及周边地区应急控制措施的前提下,应急预案措施实施后,北京市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例呈现逐渐上升趋势,截止到12月22日24:00, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均降低比例为20.0%~25.0%,平均下降比例约为22.0%.

从结果上看,阅兵期间与红色预警相比, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例较高,主要因素可能为:①阅兵期间污染物减排比例显著大于红色预警期间,并且阅兵期

间除京津冀三省市外,鲁、豫、晋和蒙这4省也有不同程度的减排,较高的减排比例对空气质量改善具有重要影响;②阅兵前的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $50.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,显著低于两次红色预警前期(第一次为 $150.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,第二次为 $108.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),在污染物尚未累积时实施污染物控制措施,为防止高浓度污染形成提供有利条件;③阅兵期间为北京秋季,气象条件优于红色预警时的冬季,易于污染物的扩散,这对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的改善也起到积极作用^[28~31].

图5及图6北京不同区域 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度降低

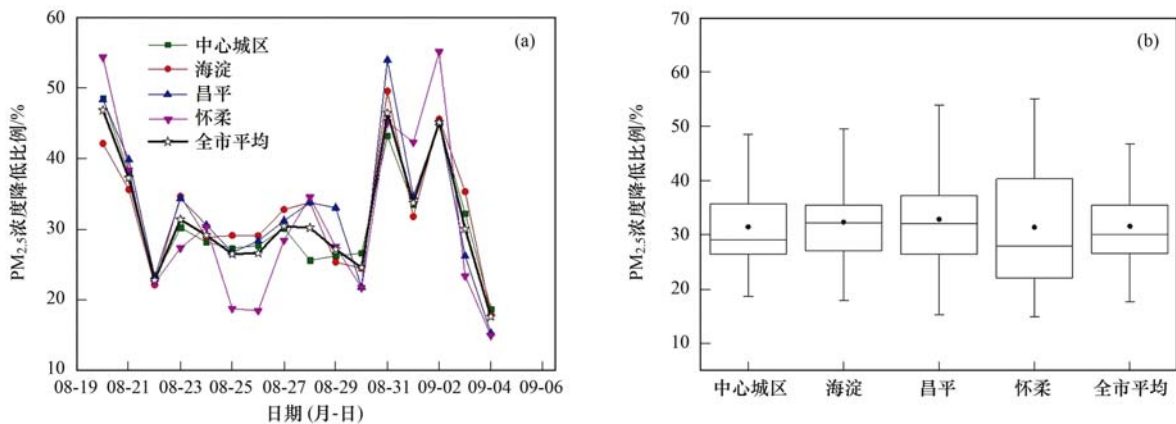
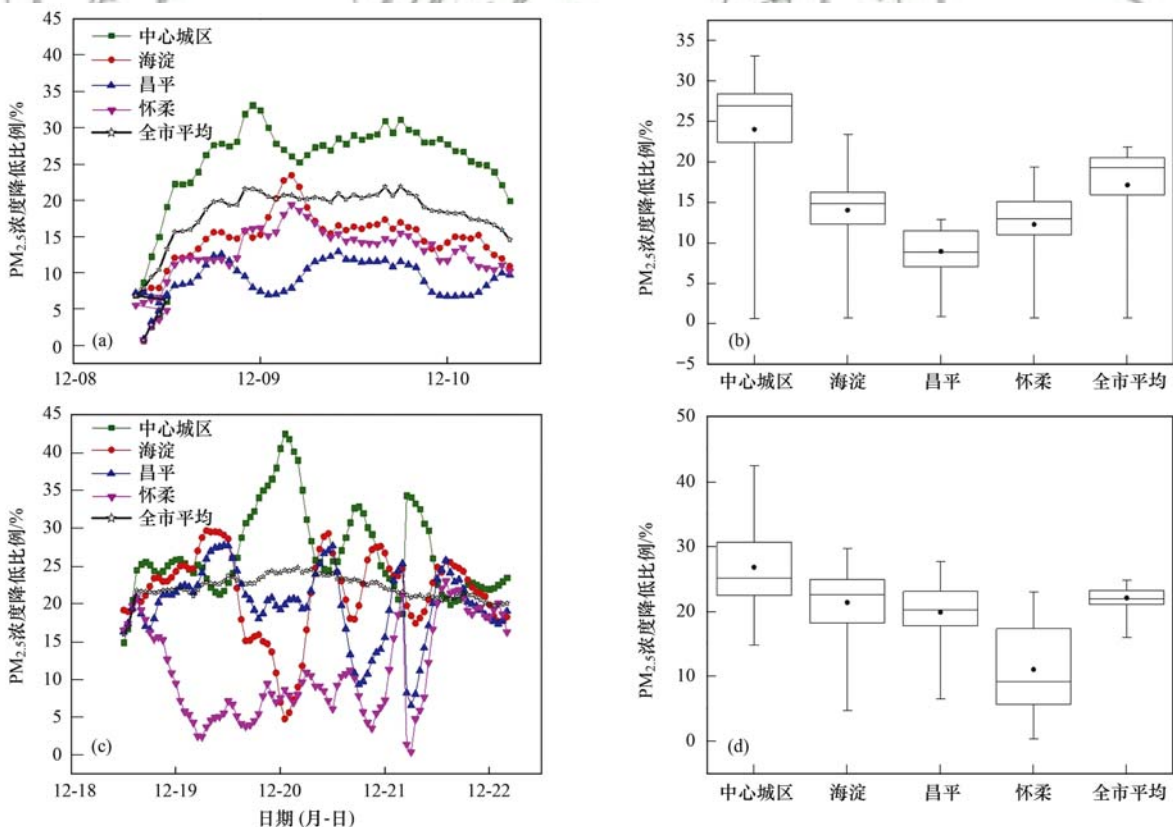


图5 阅兵活动期间北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例

Fig. 5 $\text{PM}_{2.5}$ concentration reduction ratio during the parade in Beijing



(a) 第一次红色预警北京不同区域减排效果对比; (b) 第一次红色预警北京不同区域减排效果对比箱线图;
(c) 第二次红色预警北京不同区域减排效果对比; (d) 第二次红色预警北京不同区域减排效果对比箱线图

图6 北京两次红色预警期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例

Fig. 6 $\text{PM}_{2.5}$ concentration reduction ratio during the two red alerts in Beijing

比例显示,中心城区、海淀、昌平和怀柔这4个区域阅兵期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例的差异性小于两次红色预警期间.主要原因可能为阅兵期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本底值相对较低,加上处于初秋季节,大气扩散条件较好,故各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例差异并不明显.两次红色预警期间,均表现出中心城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例显著高于海淀、昌平和怀柔等非中心区域,可能的因素是由于中心城区处于中心位置,其他区域减排措施均能对其产生影响,北部区域(海淀、昌平和怀柔)受减排措施影响相对较少,故 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例相对较低.

此外,两次红色预警相比,第一次重污染红色预警在12月8日07:00启动空气重污染红色预警时,静稳型天气已经持续近两天,污染物已大量积累,北京及周边地区减排措施实施后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均下降17.1%左右;第二次重污染红色预警(12月19日07:00至12月22日24:00)是在北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 达到重污染级别之前就实施减排措施,周边区域河北省廊坊、保定和石家庄等城市在12月18日00:00就开始实施重污染预警减排措施,当时污染物还未大量积累,因此,尽管第二次红色预警期间污染物扩散条件更为不利,第二次红色预警期间 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度更低一些,且第二次红色预警实施带来的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善效果好于第一次重污染红色预警,减排措施实施更加有效^[32].

3 结论

(1)阅兵期间 SO_2 、 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度分别为3.0、22.0和19.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,分别比阅兵前和阅兵后污染物日均浓度降低了45.0%、39.0%、60.0%和46.0%、45.0%、48.0%.第一次红色预警期间 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度(232.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)高于第二次红警(216.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).北京市第二次启动重污染红色预警之前的空气质量好于第一次红警,第二次红色预警期间空气质量达到严重污染的时间晚于第一次红警.

(2)综合温度、湿度、风速和气压等气象因素,阅兵期间大气扩散条件比两次红色预警期间有利,第二次红色预警期间的气象条件相比于第一次红色预警更不利于污染物的扩散.

(3)各地阅兵期间污染物减排比例普遍大于红警期间.北京地区阅兵期间日均减排比例显著高于红警期间, SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和VOC的减排比例分别比红色预警期间高21.0%、20.0%、15.0%、19.0%和1.0%.

(4)阅兵期间、两次红警期间应急减排措施实

施导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例分别为32.4%、17.1%和22.0%.阅兵期间与红色预警相比, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例较高,主要归因于较高的污染物减排比例,阅兵期间易于污染物扩散的气象条件也为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善起到积极作用.

(5)两次红色预警相比,尽管第二次红色预警期间污染物扩散条件更为不利,但由于在达到重污染级别、污染物尚未大量积累之前,提前实施区域协同减排措施,第二次红色预警减排效果好于第一次重污染红色预警,对于控制重污染形成,降低污染浓度更为有效.

(6)对阅兵和红色预警期间北京中心城区、海淀、昌平和怀柔4个不同区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例进行分析,阅兵期间各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例差异并不明显.两次红色预警期间,均表现出中心城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低比例显著高于海淀、昌平和怀柔等非中心区域,说明重污染应急减排措施对中心城区空气质量改善效果要比非中心城区更明显.

参考文献:

- [1] Zhang L, Wang T, Lv M Y, et al. On the severe haze in Beijing during January 2013: unraveling the effects of meteorological anomalies with WRF-Chem [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **104**: 11-21.
- [2] Wang X Q, Wei W, Cheng S Y, et al. Characteristics and classification of $\text{PM}_{2.5}$ pollution episodes in Beijing from 2013 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 170-179.
- [3] Wang X Q, Wei W, Cheng S Y, et al. A monitoring-modeling approach to SO_4^{2-} and NO_3^- secondary conversion ratio estimation during haze periods in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **78**: 293-302.
- [4] 徐文帅, 张大伟, 李云婷, 等. 北京两次沙尘污染过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2016, **21**(1): 78-86.
Xu W S, Zhang D W, Li Y T, et al. Variation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration during two dust pollution events in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, **21**(1): 78-86.
- [5] 张岳鹏, 李璇, 聂滕, 等. 2014年2月北京 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程及天气形势分析[J]. *气象与环境科学*, 2016, **39**(2): 55-62.
Zhang Y P, Li X, Nie T, et al. Analysis of $\text{PM}_{2.5}$ pollution process and weather situation in Beijing in February 2014 [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, **39**(2): 55-62.
- [6] Wang Y J, Bao S W, Wang S X, et al. Local and regional contributions to fine particulate matter in Beijing during heavy haze episodes [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 283-296.
- [7] 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公告[EB/OL]. <https://hk.lexiscn.com/law/law-chinese-1-2135449-T.html>.
- [8] 周颖, 程水源, 陈东升, 等. 后奥运时期大气污染控制措施对北京 PM_{10} 影响[J]. *北京工业大学学报*, 2012, **38**(1): 139-144.
Zhou Y, Cheng S Y, Chen D S, et al. Impact of air quality restriction measures on PM_{10} in Beijing during post-Olympic times

- [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, **38**(1): 139-144.
- [9] 李岩, 安兴琴, 左洪超, 等. 2008 年北京奥运交通限制效果的模式研究[J]. 高原气象, 2010, **29**(6): 1619-1626.
- Li Y, An X Q, Zuo H C, *et al.* Study of traffic restriction effects on air quality during Beijing Olympic Games in 2008 using CMAQ model[J]. Plateau Meteorology, 2010, **29**(6): 1619-1626.
- [10] 刘奇琛, 黄婧, 郭斌, 等. 2014 年 APEC 会议期间排放控制措施对大气污染物浓度的影响[J]. 首都公共卫生, 2017, **11**(5): 220-224.
- Liu Q C, Huang J, Guo B, *et al.* Investigation of emission control measures' impacts on air pollutants in Beijing during the 2014 Asia-Pacific Economic Cooperation[J]. Capital Journal of Public Health, 2017, **11**(5): 220-224.
- [11] 鲁绍伟, 蒋燕, 赵云阁, 等. 北京市 2014 年 APEC 期间及前后城区大气污染物变化特征[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(7): 40-47.
- Lu S W, Jiang Y, Zhao Y G, *et al.* Variation characteristics of air pollutants in urban area of Beijing before, during and after 2014 meeting of APEC [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(7): 40-47.
- [12] 刘文雯, 段菁春, 胡京南, 等. 基于环境监测数据的大气重污染应急减排措施效果评估[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(5): 734-741.
- Liu W W, Duan J C, Hu J N, *et al.* Effect assessment of emergency measures for heavy air pollution based on environmental monitoring data[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(5): 734-741.
- [13] 李涛, 程兵芬, 陈云波, 等. 红色预警期间北京市 PM_{2.5} 浓度特征及应急措施效果评估[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(9): 3262-3270.
- Li T, Cheng B F, Chen Y B, *et al.* Characteristics and effects of emergency measures on the concentration of PM_{2.5} in Beijing during the red alerts in 2015[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(9): 3262-3270.
- [14] 曹天慧, 王哲, 张晶, 等. “9·3”阅兵期间协同减排措施对北京市大气 PM_{2.5} 质量浓度及其来源影响的数值模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, **53**(2): 201-207.
- Cao T H, Wang Z, Zhang J, *et al.* Impact of coordinated emission controls on concentrations and sources of PM_{2.5} in Beijing during “9·3” military parade: a numerical model[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, **53**(2): 201-207.
- [15] 张晗, 余超, 苏林, 等. 基于 OMI 卫星遥感评估 2015 年阅兵期间华北地区 SO₂ 和 NO₂ 减排成效[J]. 遥感技术与应用, 2017, **32**(4): 734-742.
- Zhang H, Yu C, Su L, *et al.* Analysis on effectiveness of SO₂ and NO₂ emission reduction in north China plain by OMI data during the military parade 2015[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, **32**(4): 734-742.
- [16] 吕喆, 魏巍, 周颖, 等. 2015~2016 年北京市 3 次空气重污染红色预警 PM_{2.5} 成因分析及效果评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 1-10.
- Lv Z, Wei W, Zhou Y, *et al.* Cause and effect evaluation of PM_{2.5} during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 1-10.
- [17] 张冲, 郎建全, 程水源, 等. 2016 年京津冀地区红色预警时段 PM_{2.5} 污染特征与浓度控制效果[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3397-3404.
- Zhang C, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} pollution and the efficiency of concentration control during a red alert in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2016 [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3397-3404.
- [18] 贾佳, 郭秀锐, 程水源. APEC 期间北京市 PM_{2.5} 特征模拟分析及污染控制措施评估[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2337-2346.
- Jia J, Guo X R, Cheng S Y, *et al.* Numerical study on the characteristics of PM_{2.5} in Beijing and the assessment of pollution control measures during APEC [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2337-2346.
- [19] Yang X W, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Characterization of chemical composition in PM_{2.5} in Beijing before, during, and after a large-scale international event [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(4): 896-907.
- [20] 程念亮, 张大伟, 陈添, 等. 2015 年北京市两次红色预警期间 PM_{2.5} 浓度特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2409-2418.
- Cheng N L, Zhang D W, Chen T, *et al.* Concentration characteristics of PM_{2.5} in Beijing during two red alert periods [J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2409-2418.
- [21] 程念亮, 李云婷, 孙峰, 等. 北京市空气重污染天气类型分析及预报方法简介[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(5): 189-194.
- Cheng N L, Li Y T, Sun F, *et al.* Analysis on weather type and introduction to forecasting technique of Beijing heavy air pollution days[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(5): 189-194.
- [22] Lin J, An J L, Qu Y, *et al.* Local and distant source contributions to secondary organic aerosol in the Beijing urban area in summer [J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**: 176-185.
- [23] Pirovano G, Colombi C, Balzarini A, *et al.* PM_{2.5} source apportionment in Lombardy (Italy): comparison of receptor and chemistry-transport modelling results [J]. Atmospheric Environment, 2015, **106**: 56-70.
- [24] 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.
- Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(2): 163-170.
- [25] 贾佳, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀区域 PM_{2.5} 及二次无机组分污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(3): 801-811.
- Jia J, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Pollution characteristic of PM_{2.5} and secondary inorganic ions in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 801-811.
- [26] Zhou Y, Cheng S Y, Lang J L, *et al.* A comprehensive ammonia emission inventory with high-resolution and its evaluation in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **106**: 305-317.
- [27] 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.
- [28] 王占山, 李云婷, 张大伟, 等. 2015 年“九三阅兵”期间北京市空气质量分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(5): 1628-1636.
- Wang Z S, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Analysis on air quality in Beijing during the military parade period in 2015 [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(5): 1628-1636.

- [29] 张洁琼, 王雅倩, 高爽, 等. 不同时间尺度气象要素与空气污染关系的 KZ 滤波研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(10): 3662-3672.
Zhang J Q, Wang Y Q, Gao S, *et al.* Study on the relationship between meteorological elements and air pollution at different time scales based on KZ filtering[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(10): 3662-3672.
- [30] 杜吴鹏, 房小怡, 黄宏涛, 等. 北京近年地表风速和大气混合层厚度变化特征研究[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(6): 149-156.
Du W P, Fang X Y, Huang H T, *et al.* Variation characteristics of surface wind speed and atmospheric mixing layer height in recent years in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(6): 149-156.
- [31] 白鹤鸣, 师华定, 高庆先, 等. 基于气象调整的京津冀典型城市空气污染指数序列重建[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(1): 44-49.
Bai H M, Shi H D, Gao Q X, *et al.* Re-ordination of air pollution indices of some typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region based on meteorological adjustment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(1): 44-49.
- [32] Jia J, Cheng S Y, Liu L, *et al.* An integrated WRF-CAMx modeling approach for impact analysis of implementing the emergency PM_{2.5} control measures during red alerts in Beijing in December 2015[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(10): 2491-2508.

环境科学

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebirur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)