

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



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

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	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

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

吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源*, 王晓琦

(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:北京市空气重污染应急指挥部分别于2015年12月7日18:00、12月18日07:00和2016年12月15日13:00发布了3次空气重污染红色预警。为了厘清3次红色预警的成因差异, 评估应急措施在应对空气重污染的有效性, 本文基于北京市环境和气象监测数据, 分析了红色预警期间PM_{2.5}浓度、气象条件、天气形势及气团传输。3次预警期间均受污染物二次转化影响, 但造成高浓度PM_{2.5}的原因主要为气象条件影响。第1、第2次预警期间, 地面受均压场控制, 区域传输分别受西南和南部气团影响, 第3次预警地面受大范围低压场控制, 受西南传输及局地气团叠加影响。第3次红色预警期间北京市PM_{2.5}污染最为严重, PM_{2.5}平均小时浓度最高为273.6 μg·m⁻³, 是前两次预警的1.2倍和1.3倍。此外, 结合各污染源减排量, 采用WRF-CMAQ模式对第3次红色预警应急措施效果进行评估, 结果表明:应急措施实施后, 污染物日平均减排量为678.4 t, PM_{2.5}质量浓度平均下降了79.1 μg·m⁻³, 平均下降比例为26.9%。应急措施中增加燃煤源及加大交通源和其他源控制、预警启动时间提前及区域联防联控有效缓解了PM_{2.5}浓度加重趋势。

关键词: PM_{2.5}; 北京; 重污染; 红色预警; 应急措施

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0001-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806087

Cause and Effect Evaluation of PM_{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016

LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan*, WANG Xiao-qi

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

Abstract: Beijing authorities issued three red alerts for heavy air pollution at 6 pm on December 7 and 7 am on December 18, 2015, and at 1 pm on December 15, 2016, respectively. To better understand the different causes of the three red alerts and assess the effectiveness of emergency measures dealing with heavy air pollution, the PM_{2.5} concentrations, meteorological conditions, weather conditions, and air mass transmission were analyzed during the red alerts using data from environmental and meteorological monitoring stations in Beijing. All three red alerts were affected by secondary transformation, but the high PM_{2.5} concentrations were mainly affected by meteorological conditions. During the first and second red alerts, the ground in Beijing was controlled by a uniform pressure field and the regional transport was mainly affected by southwestern and southern air masses. During the third red alert, the ground was under the control of a wide range of low pressure and affected by the superposition of southwestern and local air masses. During the third red alert, the PM_{2.5} pollution was the most serious. Its average concentration was the highest (273.6 μg·m⁻³), that is, 1.2 times and 1.3 times higher than that of the previous two alerts, respectively. The WRF-CMAQ model was used in combination with the emission reduction of each source to evaluate the effects of the emergency measures related to the third red alert. The results show that the average daily emission reduction of pollutants was 678.4 t, the average concentration of PM_{2.5} decreased by 79.1 μg·m⁻³, and the average reduction ratio was 26.9% after the emergency measures were implemented. The increase of coal-fires, traffic, and other sources control the emergency measures, early alert start-up time, and inter-region joint prevention and effectively mitigate the increasing PM_{2.5} concentration.

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

近年来, 伴随着我国经济和城市化的快速发展, 大气污染日趋严重^[1~3]。京津冀及周边地区是全国空气重污染高发地区, 2015年区域内70个地级以上城市共发生1 710 d重度及以上污染, 占年全国的44.1%, 其中京津冀地区13个城市超标天数比例为47.6%, 以PM_{2.5}为首要污染物的超标天数占68.4%^[4]。北京市政府在固定源(工业源和居民源)、移动源(主要是道路移动源)、无组织源(主要是无组织扬尘)分别采取了燃煤锅炉改造、退出污

染企业、“煤改电”工程、淘汰老旧车、加强道路清扫等系列措施, 2017年全市空气中的细颗粒物年均浓度控制在60 μg·m⁻³左右, 大气污染程度得到有效缓解^[5]。但污染物排放总量大、三面环山的地形

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0209901); 国家自然科学基金项目(91544232, 51638001)

作者简介: 吕喆(1992~), 女, 博士, 主要研究方向为环境规划管理与污染防治, E-mail: lvzhe@emails.bjtu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chengsy@bjtu.edu.cn

及不利的气象条件,导致大气重污染过程仍旧频发.因此,开展红色预警应急措施的有效性和效果评估,对于冬季空气重污染天气防治及应对决策具有重要的意义.

目前,围绕红色预警开展了大量研究,如 Nie 等^[6]的研究发现 2015 年 2 次红色预警,大气污染物日均排放量有所下降,但主要污染物的排放水平仍然较高,应急措施实施导致污染物排放减少了 36%. Qi 等^[7]发现第 3 次红色预警期间,NO₃⁻ 在重度污染时对气溶胶吸湿增长起着重要作用. Cheng 等^[8]的研究发现,第 1、2 次预警期间应急措施实施后,总排放量减少了 10%~30%,PM_{2.5} 浓度峰值降低了 10%~20%,而且在红色预警前 1~2 d 实施减排措施,可显著降低 PM_{2.5} 峰值. Zhong 等^[9]的研究发现,第 3 次红色预警污染累积开始后的 10 h 内,稳定的边界层贡献了约 84% 的 PM_{2.5} 质量,地面温度下降和低边界层高度发展增加了 PM_{2.5} 浓度水平. Wang 等^[10]的研究发现,第 1 次红色预警污染物受南部传输影响,第 2 次红色预警受西南传输影响.然而上述研究多针对于同一年的红色预警应急措施的减排效果进行评估,缺乏对多次不同年之间红色预警的 PM_{2.5} 成因和效果评估.本研究对北京市 2015~2016 年 3 次红色预警的重污染成因及效果评估进行对比分析,以期对日后制定更加科学、有效的重污染天气污染控制管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 空气重污染预警概况

依据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[11] 和《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)^[12],将空气质量按照空气质量分指数(individual air quality index, IAQI)分为 6 级,其中 PM_{2.5} 质量浓度 $\geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为空气重污染.依据污染程度及持续时间,将空气重污染预警由轻到重分为:蓝色预警(四级)、黄色预警(三级)、橙色预警(二级)及红色预警(一级),其中红色预警是指预测 AQI 日均值 >200 将持续 4 d 及以上,且日均值 >300 将持续 2 d 及以上或 AQI 日均值 >500 将持续 1 d 及以上^[13].

北京市第 1 次红色预警启动时间为 2015 年 12 月 8 日 07:00 至 10 日 12:00,共 54 h.第 2 次红色预警提前 24 h 发布,规定启动时间为 2015 年 12 月 19 日 07:00 至 22 日 24:00,共 90 h.第 3 次红色预警提前 31 h 发布,规定启动时间为 2016 年 12 月 16 日 20:00 到 22 日 00:00,共 124 h.与前 2 次红

色预警相比,第 3 次预警提前发布时间与预警持续时间均更长.

1.2 数据收集

大气污染物 PM_{2.5} 及 CO 浓度数据来自北京市环境保护监测中心发布的逐时数据,本文选取 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)平均值代表北京市监测值.气象逐时数据(温度、风向风速、相对湿度、能见度及大气压)来自 underground 网站(<https://www.wunderground.com/>).日最大混合层高度是根据北京首都国际机场(40°04'N, 116°35'E)提供的 AMDAR 数据,依据干绝热线法获得^[14].天气形势图来自韩国气象局网站(<http://web.kma.go.kr/chn/index.jsp>)每 3 h 发布的资料.

1.3 模型模拟

1.3.1 HYSPLIT 模型

本文采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)共同研发的 HYSPLIT-4 后向轨迹模型对北京市大气气团来源及轨迹变化进行分析^[15],追踪 3 次预警期间(2015 年 12 月 9 日 19:00、2015 年 12 月 22 日 17:00 和 2016 年 12 月 21 日 13:00)PM_{2.5} 浓度最高时刻的 48 h 后向气流轨迹.以北京市天安门广场(39°54'N, 116°23'E)为轨迹起始点,选取地面以上 100、500 和 1 000 m 这 3 个高度,对大气污染物传输来向进行分析.后向轨迹 HYSPLIT 模型气象资料通过 <ftp://gus.arlhq.noaa.gov/> 网站获得.

1.3.2 气象/空气质量模型设置

本文采用中尺度模型 WRFv3.3 模拟气象场,该模式具有全面的物理参数化方案^[16].地图投影采用兰勃托投影,初始背景场由美国国家环境预报中心提供的时间分辨率为 6h 的 1°×1°FNL 全球分析资料、地形资料、土地利用数据来自美国 USGS 的全球地形和土地利用数据^[17].WRF 气象场垂直分为 28 层,通过 CMAQ 预处理模块将气象场 28 层数据差值为 14 层,用作空气质量模式 CMAQ 模型的输入数据.

CMAQ 模型基于“一个大气”的概念,对各种复杂尺度的物理、化学以及区域传输过程均有较好的模拟效果^[18].本文选用 CMAQv4.7,模拟采用双层嵌套网格见图 1,网格中心坐标为(39.02°N, 116.44°E),其中外层嵌套网格(Do1)分辨率为 12 km×12 km,主要覆盖了我国华北、华中、华东、西北及川渝地区大部分地区;内层网格(Do2)分辨率为 4 km×4 km,主要覆盖了京津冀地区及周边城市.其中京津冀区域采用实验室建立的“自下而上”

的大气污染源排放清单计算方法^[19], 清单的基准年为 2014 年, 物种包括 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO_x、CO、VOCs 和 NH₃, 区域外采用清华大学建立的高分辨率排放源 MEIC 清单^[20], 其基准年为 2012 年. 考虑初始条件的影响, 提前 5 日启动模型, 模拟时间段为 2016 年 12 月 8~26 日. 本文共设置两个不同的模拟情景: 情景 1 为基准情景, 不考虑红色预警应急措施; 情景 2 为考虑应急措施实施的控制场景(包括京津冀及周边城市), 根据应急措施实施前后 PM_{2.5} 浓度变化对应急效果进行评估.

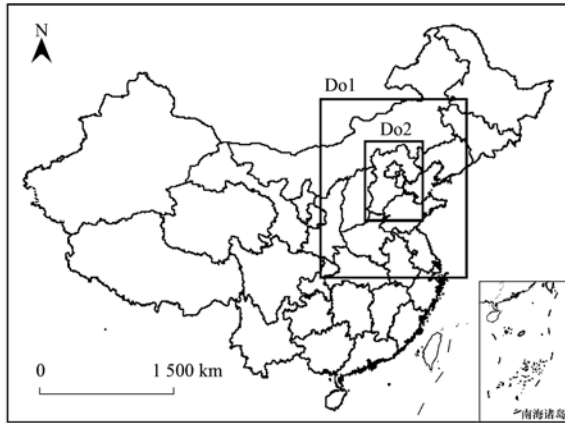


图1 模式系统的双重嵌套模拟区域

Fig. 1 Double-nested simulation area of the model

1.3.3 模型验证

图 2 对比了重污染过程 PM_{2.5} 模拟浓度与监测值, 本研究参考美国 EPA (Environmental Protection Agency) 评价标准^[21], 利用标准化平均偏差 (normalized mean bias, NMB)、标准化平均误差 (normalized mean error, NME) 和相关系数 (correlation coefficient, COR) 这 3 个统计指标进行验证. 选取模拟评估时段为非预警期间(2016 年 12 月 8~15 日及 22~26 日), PM_{2.5} 模拟与监测平均浓度为 76.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 89.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NMB 为 -17.3%, NME 为 57.2%, COR 为 -0.7, 与同类研究相比^[22], 本次模拟误差在可接受范围之内, 模拟系统可靠. 本文已经考虑了北京及周边省市红色预警应急措施, 并对源清单进行了调整. 现有误差可能由于: 污染源排放清单不确定性、数值模型中缺少重污染时段二次污染物转化机制及应急措施实际实施情况与预期之间的差异^[23].

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度与气象条件变化

本文预警期间, 指上文提到的预警启动时间, 预警前、后分别指预警期间前 72 h 和后 48 h, 重污染时段指 PM_{2.5} 小时浓度 $\geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的持续时间,

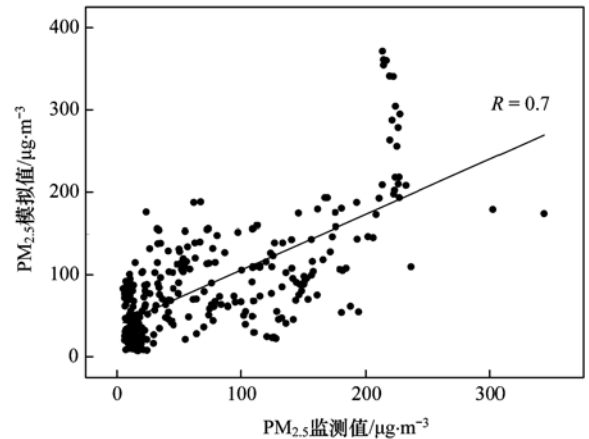


图2 PM_{2.5} 浓度模拟值与监测值对比

Fig. 2 Contrast between the PM_{2.5} concentration simulation value and monitoring values

严重污染时段指 PM_{2.5} 小时浓度 $\geq 250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的持续时间.

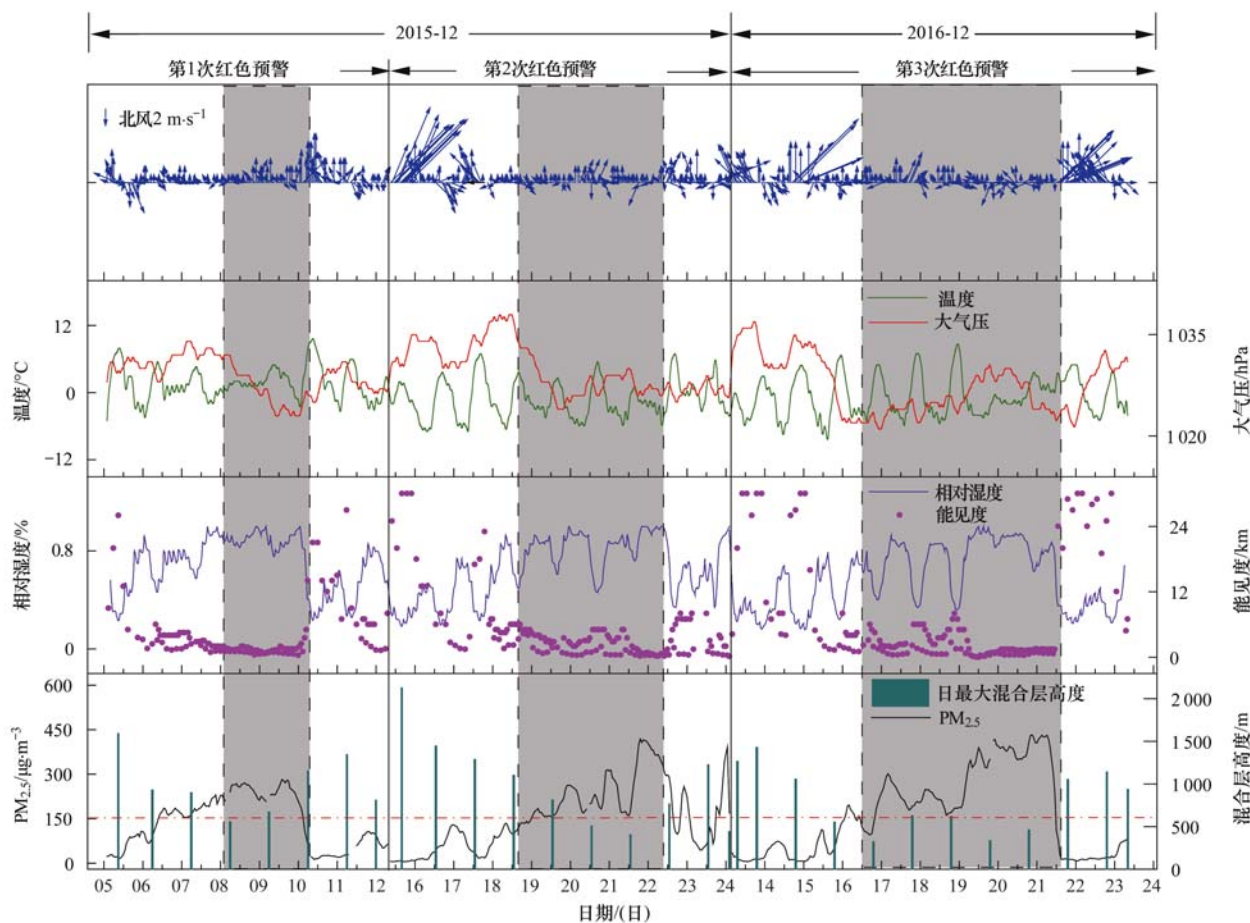
北京市 3 次红色预警 PM_{2.5} 小时浓度和气象要素变化如图 3 所示. 整体来看, 3 红色预警期间 PM_{2.5} 平均质量浓度均最高, 是预警前后的 1.8~6.3 倍. 预警期间, 低平均风速、日最大混合层高度和大气压, 抑制了污染物在水平和垂直方向扩散, 同时主导风向为偏南风, 将南部污染较重城市的污染物传输到本地, 造成污染物在地面不断积累, 较高的相对湿度利于污染物的吸湿增长及气溶胶的二次反应, 加剧了前体物的转化, 造成 PM_{2.5} 浓度升高. 预警期间, 第 1 次预警 PM_{2.5} 平均和峰值浓度分别为 232.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 281.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 重污染和严重污染时段分别为 50 h 和 21 h, 占预警期间总时段的 92.6% 和 38.9%. 第 2 次预警 PM_{2.5} 平均和峰值浓度为 216.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 417.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 重污染和严重污染时段分别为 75 h 和 26 h, 占预警期间总时段的 55.5% 和 28.9%. 第 3 次预警 PM_{2.5} 平均和峰值浓度为 273.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 432.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 重污染和严重污染时段分别为 114 h 和 61 h, 占预警期间总时段的 91.2% 和 48.8%. 与前 2 次预警相比, 第 3 次红色预警大气压及日最大混合层高度均最低, 分别为 1025.3 hPa 和 487 m, 其中混合层高度比前 2 次预警降低了 38.9% 和 31.4%, 垂直方向不利的扩散条件, 造成 PM_{2.5} 更易在近地面积累, 导致其浓度和重污染持续时间均最高.

进一步对 PM_{2.5} 浓度与气象要素进行相关性分析, 表 1 显示 PM_{2.5} 浓度与平均风速和日最大混合层高度呈显著的负相关性, 与大气压总体上呈负相关性, 与相对湿度呈显著正相关性, 与气温的相关性有正负, 因此气温高低不能反映重污染程度, 而预警期间较高的相对湿度和较低的混合层高度对

PM_{2.5} 浓度上升影响较大。

PM_{2.5} 来源于一次排放和二次反应生成, 而 CO 主要来自一次排放, 利用 PM_{2.5}/CO 可以定性评估 PM_{2.5} 的二次转化强度^[24]。由图 4 可以看出, 预警前后 CO 及 PM_{2.5}/CO 比值均较低, 预警期间随着 CO 浓度升高, PM_{2.5}/CO 比值先上升后下降, 平均

值分别为 0.06、0.05、0.05, 是预警前后的 1.5、1.3 和 1.3 倍, 说明预警期间污染物二次转化程度高于预警前后, 且第 1 次预警最明显。第 2、3 次预警期间 PM_{2.5} 及 CO 浓度较高, 而 PM_{2.5}/CO 比值却低于第 1 次预警, 说明预警期间 PM_{2.5} 浓度升高除了污染物二次转化, 还主要受气象条件影响。



灰色区域代表红色预警期间

图 3 3 次红色预警 PM_{2.5} 小时浓度和气象要素

Fig. 3 Hourly PM_{2.5} concentration and meteorological parameters during the three red alerts

表 1 3 次红色预警 PM_{2.5} 浓度与主要气象要素的相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficient between the three red alert PM_{2.5} concentrations and main meteorological elements

项目	时段	大气压	气温	相对湿度	平均风速	日最大混合层高度
第 1、2 次预警	预警期间	-0.278	-0.267	0.870 *	-0.459	-0.972 **
	预警前后	-0.358	0.219	0.849 **	-0.611	-0.828 **
	整个阶段	-0.387	-0.114	0.903 **	-0.601 **	-0.909 **
第 3 次预警	预警期间	0.602	0.505	0.954 **	-0.456	-0.640
	预警前后	-0.381	-0.014	0.894 *	-0.937 *	-0.626
	整个阶段	-0.462	0.412	0.953 **	-0.624 *	-0.818 **

1) * 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关

2.2 天气形势及区域传输影响分析

大气重污染的形成与天气形势及其演变过程有着密切的联系^[25]。本文分别选取红色预警前 PM_{2.5} 小时浓度低于 35 μg·m⁻³ (时刻 I)、PM_{2.5} 小时浓度达到 150 μg·m⁻³ (时刻 II)、PM_{2.5} 小时浓度达到峰

值 (时刻 III) 及预警后 PM_{2.5} 小时浓度首次低于 75 μg·m⁻³ (时刻 IV) 这 4 个典型时段, 对重污染形成、发展、积聚和消散过程近地面天气形势进行分析。

如图 5 所示, 预警前、后 (时刻 I 和时刻 IV) 近地面多受高压控制, 气象扩散条件较好, 预警期间

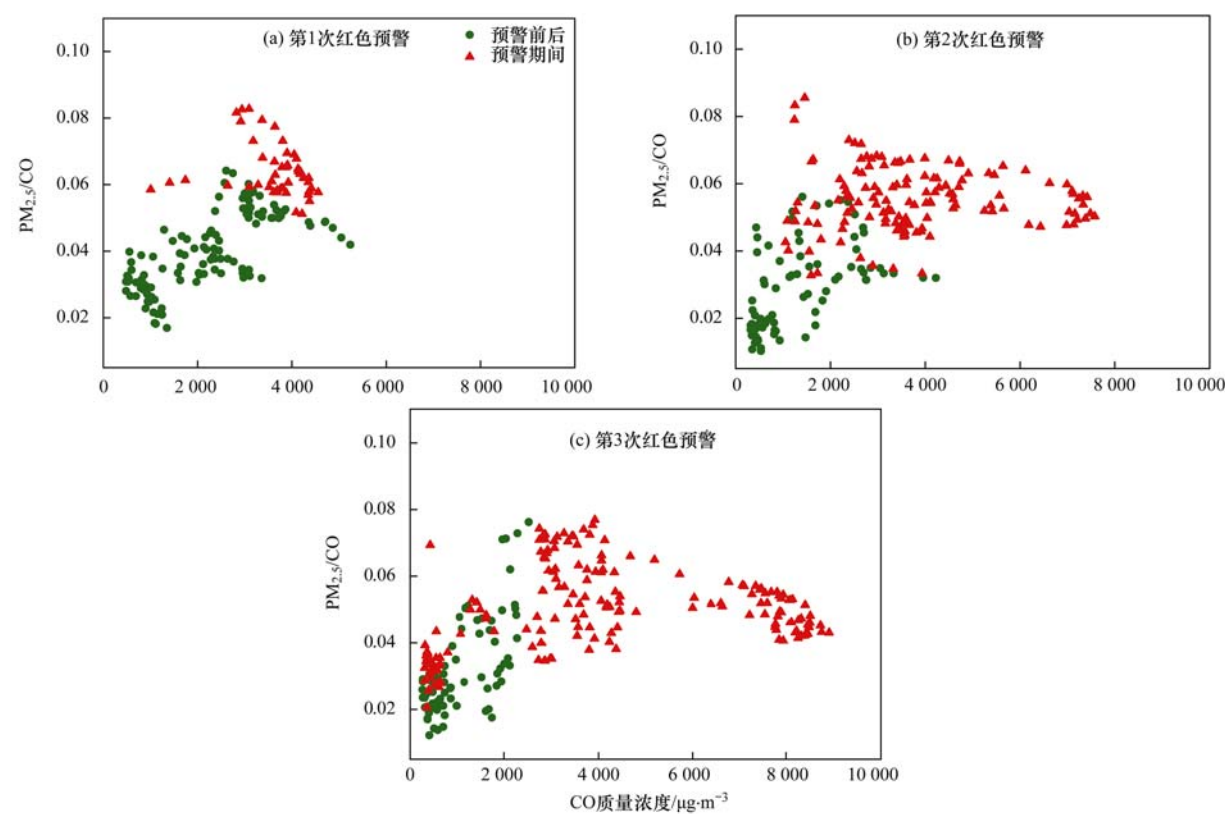
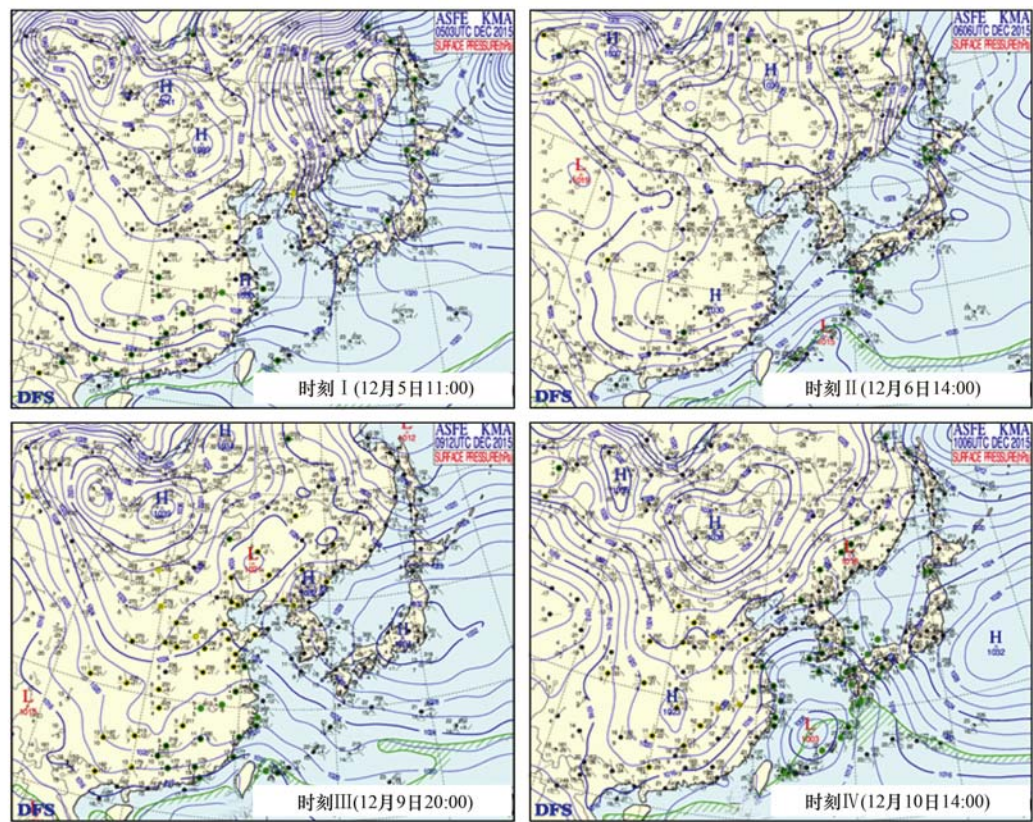


图4 3次红色预警 PM_{2.5}/CO 比值变化
Fig. 4 Variation of the PM_{2.5}/CO ratios during the three red alerts

(时刻Ⅱ~时刻Ⅲ)地面多受均压和低压场控制,扩散条件较差,污染物易在近地面积累.第1次红色预警,时刻Ⅰ,近地面由受东北弱高压控制,等压线

分布稀疏,地面以南风为主,扩散条件不利,污染物浓度开始上升.时刻Ⅱ~时刻Ⅲ,地面受均压场控制,等压线分布较为稀疏,稳定的大气环境背景场,



(a) 第1次红色预警

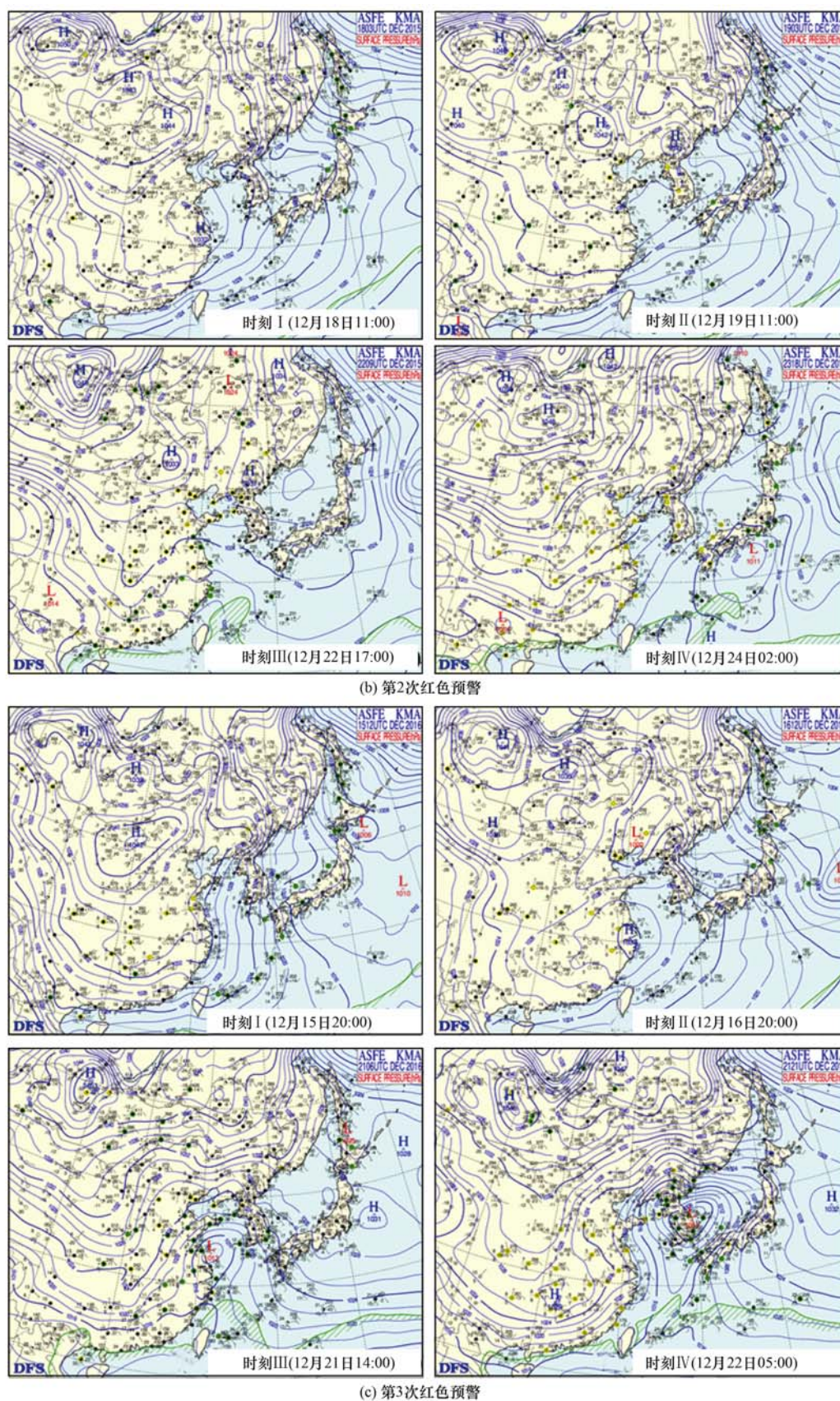


图 5 3 次红色预警典型时段地面天气形势

Fig. 5 Surface field pressure pattern under typical operation modes of the three red alerts

阻碍了污染物水平运动, 导致污染物在近地面停滞, 污染物浓度达到峰值. 时刻 IV, 受高压前部控制, 等压线分布密集, 地面以北风为主, 加速了污染物在水

平方向上扩散, 缓解了此次重污染过程. 第 2 次红色预警, 时刻 I, 近地面受西北弱高压控制, 扩散条件有利. 时刻 II~时刻 III, 京津冀受均压场控制, 等压

线稀疏, 气压梯度小, 地面风速小, 扩散条件不利, 污染物不断积聚, 浓度上升。时刻 IV, 受西北方向高压前部控制, 近地面以西北风为主, 污染物浓度逐渐从西北向东南递减, 污染程度逐渐减轻。第 3 次红色预警, 时刻 I, 近地面受高压前部控制, 时刻 II~时刻 III, 华北大部分地区受高压后部转低压控制, 等压线稀疏, 地面风速小, 水平扩散条件差, 污染物浓度维持在较高水平, 时刻 IV 受西北高压前部控制, 污染物浓度迅速下降。

总体而言, 第 1、2 次预警期间, 京津冀大部分地区主要受均压场控制, PM_{2.5} 平均浓度接近, 分别为 $232.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $216.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 第 3 次预警期间, 近地面受高压后部转低压控制, 影响范围从京津冀扩大到华北大部分地区, 持续时间为 124 h, 远高于前两次预警的 54 h 和 90 h, 影响范围和持续时间增大, 导致 PM_{2.5} 浓度上升, 峰值浓度达到 $432.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

基于上文分析结果, 通过 HYSPLIT 后向轨迹模型进一步对 3 次红色预警污染最严重的时刻 III, 进行污染气团来向定性分析。

如图 6 所示, 3 次预警 PM_{2.5} 浓度峰值阶段均有来自南部气团传输影响。第 1 次红色预警区域高空、低空和近地面均以西南气团为主, 500 m 和 100 m 处气团皆起始于陕西省, 12 月 9 日 14:00 到达北京后, 在低于 1 000 m 的近地面移动, 对地面污染影响较大。第 2 次红色预警区域高空、低空和近地面均以南部气团为主, 气团传输距离均较近, 移动速度较慢, 区域气象条件稳定, 风速较小, 由于途经省市污染较重且长时间在近地面移动, 为北京市输送污染较多。第 3 次红色预警区域高空、低空为西南气团, 传输距离较远高度较高, 对地面污染影响有限。近地面为局地气团, 始于沧州市, 一直在河北省境内停滞, 加重了北京本地污染。

第 1、2 次红色预警期间分别受西南和南部传输影响, 第 3 次预警受西南传输和局地累积叠加影响。前 2 次预警天气形势相似, 但是第 2 次污染过程更严重, 说明南部气团携带污染物浓度更高。而第 1 次和第 3 次预警气团轨迹相似, 但第 3 次预警污染浓度更高, 一方面, 地面受大范围低压场控制, 扩散条件更加不利; 另一方面, 局地气团传输距离近、移动速度慢, 污染物在本地持续积累, 造成了污染物浓度升高。

2.3 红色预警期间应急措施影响分析

北京市第 1、2 次红色预警应急措施主要有^[26]机动车单双号限行, 且本市公务用车在单双号限行的基础上, 再停驶车辆总数的 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、砂石运输车等非道路移动源禁止上路、重点道路每日增加 1 次清扫、工业企业按红色预警期间停

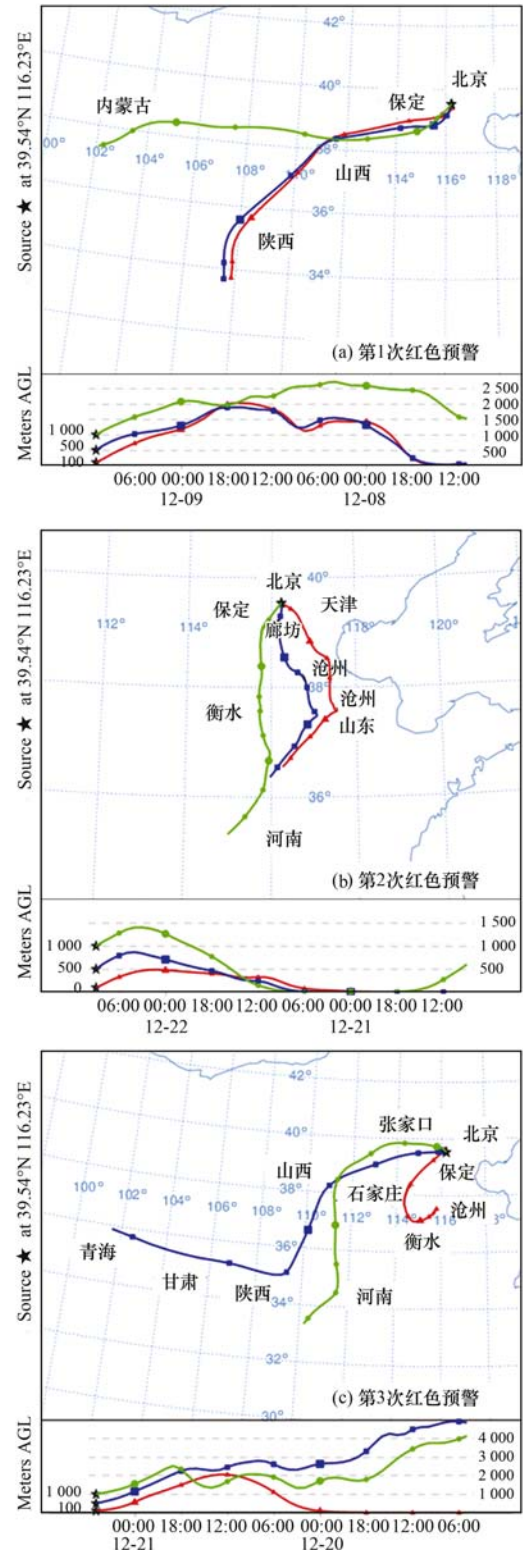


图 6 3 次红色预警期间 PM_{2.5} 浓度最大值对应的气团轨迹

Fig. 6 Air mass trajectory corresponding to the maximum PM_{2.5} concentration during the three red alerts

产限产名单实施停产限产、禁止燃放烟花爆竹和露天烧烤等。第 3 次红色预警应急措施在前两次的基

础上更加严格,增加了国Ⅰ国Ⅱ轻型汽油车禁止上路、工业企业停产限产名单由111家增长到170家,及协调加大外调电力度,降低本市发电量负荷等^[13].此外预警期间北京周边地区(天津、河北省等)也采取了相应的应急措施^[27~30].根据北京市空气重污染应急措施,结合实验室前期(APEC会议及9·3阅兵)测算基础^[17]及已有的污染源排放清单,对北京市3次红色预警期间污染物日平均减排量进行了计算,结果见图7.

由图7可见,第3次预警各污染源日排放量为2036.7 t,为前2次预警的1.1倍.虽然政府对污染物减排措施逐年严格,导致污染源排放量降低,但是机动车保有量和氨排放等快速增长,仍增高了交通源和其他源排放量,分别为前2次预警的1.9倍和1.5倍.与前2次预警相比,第3次预警从污

染源方面,新增了燃煤源控制,减排量为34.6 t,占减排总量的5.1%,同时加大了对交通源和其他源控制,减排量分别为358.5 t和60.9 t;从污染物方面, NO_x 和VOCs日平均减排量增大,分别是前2次预警的1.6倍和1.7倍.同时 NO_x 、VOCs、 SO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 这5种污染物平均减排比例升高到27.2%,高于前2次预警的26.0%.总体来说,第3次预警各污染物排放量增大,一次 $\text{PM}_{2.5}$ 及其前体物发生二次反应生成的 $\text{PM}_{2.5}$ 总量增加,结合不利的气象条件,导致第3次重污染相比于前2次更加严重.但是,应急措施实施后,污染物日平均减排量和减排比例分别为678.4 t和33%,高于前2次预警的529.4 t和28%,因此增加燃煤源及加大对交通源和其他源的控制,有效缓解了空气重污染进一步加剧.

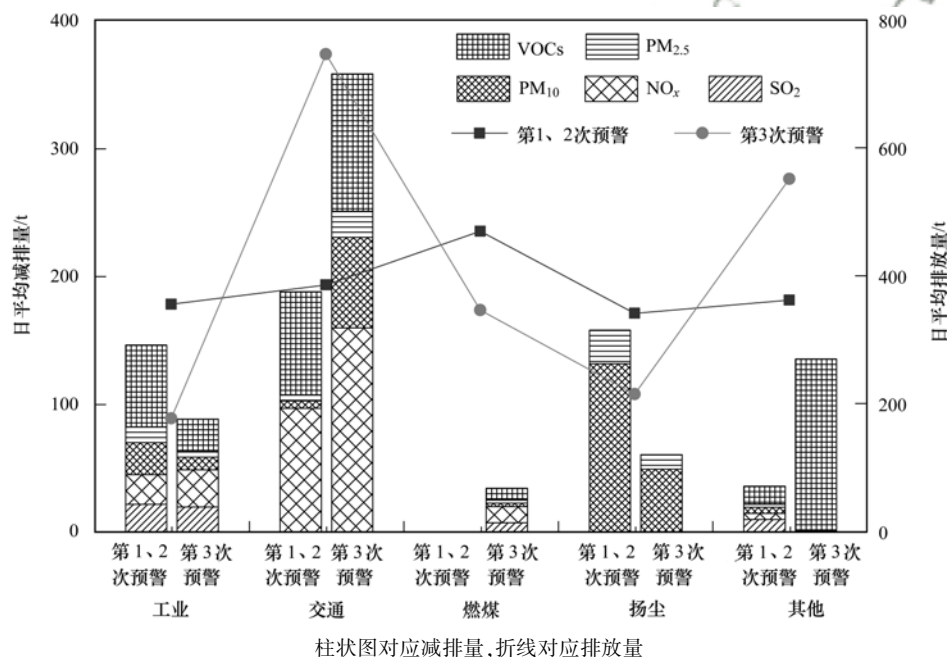


图7 应急措施实施期间污染源日平均排放量和减排量

Fig. 7 Average daily emissions and emission reduction during the implementation of emergency measures

Jia 等^[31]对2015年两次红色预警应急措施效果评估结果显示,第1、2次应急措施实施后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均下降了 $49.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $49.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均下降比例为17.1%和22.2%.本文评估的第3次红色预警应急措施效果如图8所示, $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度下降了 $79.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均下降比例为26.9%,是前2次预警的1.6倍和1.2倍. $\text{PM}_{2.5}$ 峰值质量浓度下降了 $133.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降比例为29.2%.12月16日20:00实施应急措施后,4 h内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降了 $55.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.12月17日扩散条件转差,应急措施在一定程度上缓解了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高趋势,其质量浓度下降了 $55.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.12月18~21日,近地面受大范围低压场控制,伴

随西南方向污染物传输和局地污染物累积影响, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到本次预警的峰值,与未实施应急措施相比, $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度下降了 $120.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降比例高达27.8%.

第3次红色预警应急措施实施后空气质量改善效果优于前2次预警,主要是由于①减排力度更大:应急措施加大了交通源和其他源控制,并新增了燃煤源控制,减少了 $\text{PM}_{2.5}$ 一次排放及其前体物排放量,减少了二次反应生成的 $\text{PM}_{2.5}$;②联防联控区增多:北京及周边城市预警应急联动由前2次预警的30多个增长到60多个,削减了污染源排放量;③预警启动时间提前:北京市前2次预警启动时,空气质量已经达到中度污染, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为

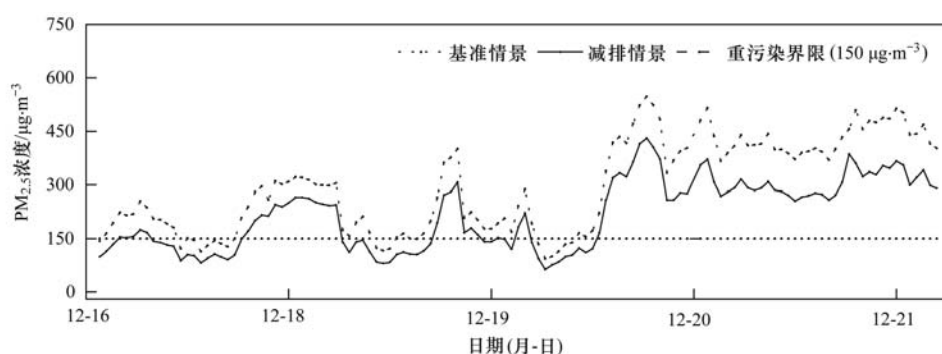


图 8 2016 年第 3 次红色预警基准情景和减排情景下 PM_{2.5} 浓度变化

Fig. 8 Variation of the PM_{2.5} concentrations under the reference and reduction scenarios during the third red alert in 2016

215.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 131.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 且周边城市还未实施应急措施. 而第 3 次红色预警启动时, 周边河北、山东、山西等多省市已经在 12 月 16 日 00:00 实施应急措施, 此时北京市污染物还未大量积累, PM_{2.5} 浓度仅为 63.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

3 结论

(1) 3 次预警期间污染物二次转化程度均高于预警前后, 且随着 CO 浓度升高 PM_{2.5}/CO 比值呈先上升后下降趋势, 说明预警期间造成高浓度 PM_{2.5} 的原因不仅是污染物的二次转化, 还主要受气象条件影响.

(2) 3 次红色预警期间气象条件均不利于污染物扩散, 第 1、2 次预警期间近地面均受均压场控制, PM_{2.5} 浓度达到峰值阶段分别受西南传输和南部传输影响. 在低压场控制, 西南气团及局地气团叠加的条件下, 第 3 次预警污染过程最严重.

(3) 第 3 次预警污染物日平均排放量是前 2 次预警的 1.1 倍, 污染物排放量大导致第 3 次预警相比前 2 次更加严重. 污染应急措施加大了交通源和其他源控制, 并新增了燃煤源控制, 减少了一次 PM_{2.5} 及其前体物的排放量, 从而减少 PM_{2.5} 生成量. 同时提前启动预警, 区域联防联控也缓解了 PM_{2.5} 浓度升高趋势. 与前 2 次红色预警相比, 第 3 次预警应急措施实施后, PM_{2.5} 平均浓度下降了 79.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均下降比例为 26.9%, 空气质量改善更加明显.

参考文献:

- [1] Bei N F, Wu J R, Elser M, *et al.* Impacts of meteorological uncertainties on the haze formation in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) during wintertime: a case study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(23): 14579-14591.
- [2] Zhang Y L, Zhu B, Gao J H, *et al.* The source apportionment of primary PM_{2.5} in an aerosol pollution event over Beijing-Tianjin-Hebei region using WRF-Chem, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(12): 2966-2980.
- [3] Li M R, Hu M, Du B H, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} chemical composition in a coastal city of Southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 337-346.
- [4] 2015 年中国环境状况公报 (摘录) [J]. *环境保护*, 2016, **44**(11): 43-51.
- [5] China environmental status bulletin 2015 [J]. *Environmental Protection*, 2016, **44**(11): 43-51.
- [6] 北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划 [N]. *北京日报*, 2013-09-13(006).
- [7] Nie T, Nie L, Zhou Z, *et al.* Exploring the heavy air pollution in Beijing in the fourth quarter of 2015: assessment of environmental benefits for red alerts [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2018, **12**(2): 361-372.
- [8] Qi X F, Sun J Y, Zhang L, *et al.* Aerosol hygroscopicity during the haze red-alert period in December 2016 at a rural site of the North China plain [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, **32**(1): 38-48.
- [9] Cheng N L, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Spatio-temporal variations of PM_{2.5} concentrations and the evaluation of emission reduction measures during two red air pollution alerts in Beijing [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 8220.
- [10] Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q, *et al.* Relative contributions of boundary-layer meteorological factors to the explosive growth of PM_{2.5} during the red-alert heavy pollution episodes in Beijing in December 2016 [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31**(5): 809-819.
- [11] Wang X Q, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Characteristics and classification of PM_{2.5} pollution episodes in Beijing from 2013 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 170-179.
- [12] GB 3095-2012, 环境空气质量标准 [S].
- [13] HJ 633-2012, 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行) [S].
- [14] 北京市人民政府. 北京市空气重污染应急预案 (2016 年修订) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [15] Cheng S Y, Jin Y Q, Liu L, *et al.* Estimation of atmospheric mixing heights over large areas using data from airport meteorological stations [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2002, **37**(6): 991-1007.
- [16] Lv B L, Liu Y, Yu P, *et al.* Characterizations of PM_{2.5} pollution pathways and sources analysis in four large cities in China [J]. *Aerosols and Air Quality Research*, 2015, **15**(5): 1836-1843.
- [17] Tariku T B, Gan T Y. Sensitivity of the weather research and forecasting model to parameterization schemes for regional climate of Nile River Basin [J]. *Climate Dynamics*, 2018, **50**(11-12): 4231-4247.

- [17] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Characteristics and emission-reduction measures evaluation of $PM_{2.5}$ during the two major events: APEC and Parade [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 81-92.
- [18] Arunachalam S, Wang B Y, Davis N, *et al.* Effect of chemistry-transport model scale and resolution on population exposure to $PM_{2.5}$ from aircraft emissions during landing and takeoff [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(19): 3294-3300.
- [19] 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.
- [20] MEIC[EB/OL]. <http://www.meicmodel.org/>.
- [21] US EPA. Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals for ozone, $PM_{2.5}$, and regional haze[M]. Research Triangle Park, NC: BiblioGov, 2013.
- [22] Simon H, Baker K R, Phillips S. Compilation and interpretation of photochemical model performance statistics published between 2006 and 2012[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **61**: 124-139.
- [23] 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. 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.
- [24] 林小平, 巫楚, 曾树森, 等. 河源市城区春季 $PM_{2.5}$ 典型污染过程案例分析[J]. *环境监测与预警*, 2017, **9**(4): 49-54, 66.
- Lin X P, Wu C, Zeng S S, *et al.* Case study of $PM_{2.5}$ pollution episode in spring of Heyuan city[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2017, **9**(4): 49-54, 66.
- [25] 许建明, 常炉予, 马井会, 等. 上海秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染天气形势的客观分型研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4303-4314.
Xu J M, Chang L Y, Ma J H, *et al.* Objective synoptic weather classification on $PM_{2.5}$ pollution during autumn and winter seasons in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4303-4314.
- [26] 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.
- [27] 天津市人民政府. 天津市人民政府办公厅关于印发天津市重污染天气应急预案的通知[R]. 天津市人民政府公报, 2017, (22): 14-19.
- [28] 石家庄市裕华区人民政府. 石家庄市重污染天气应急指挥部关于启动重污染天气最高级别减排措施的通告[EB/OL]. <http://www.yuhuaqu.gov.cn/col/1389844012734/2015/12/22/1450781935899.html>, 2015-12-22.
- [29] 天津市人民政府. 天津市人民政府办公厅关于印发天津市重污染天气应急预案的通知[R]. 天津市人民政府公报, 2017, (22): 19-24.
- [30] 石家庄市裕华区人民政府. 河北省重污染天气应急预案[EB/OL]. <http://www.yuhuaqu.gov.cn/col/1389844143922/2016/12/01/1480557082677.html>, 2016-12-01.
- [31] 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.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i>	(1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i>	(11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i>	(24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i>	(33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i>	(55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i>	(76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i>	(86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i>	(104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i>	(114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i>	(121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i>	(126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i>	(149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i>	(157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i>	(164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue	(192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i>	(200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i>	(211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i>	(219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i>	(228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan	(239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i>	(256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i>	(263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i>	(273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i>	(281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i>	(293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i>	(300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i>	(310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i>	(318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i>	(336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i>	(360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i>	(369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i>	(376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i>	(383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i>	(392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i>	(412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i>	(421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i>	(437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping	(445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong	(461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i>	(480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i>	(488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i>	(496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i>	(504)