

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.8

第40卷 第8期

目次

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	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一字, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

2016年京津冀地区红色预警时段 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征与浓度控制效果

张冲, 郎建垒, 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: 2016年12月京津冀地区发生一次重污染过程, 北京和天津于12月16日20:00至12月21日24:00, 河北省(除张家口、承德和秦皇岛)于12月16日00:00至12月22日18:00发布了重污染红色预警. 为研究重污染过程与应急措施的控制效果, 基于环境监测数据与模型模拟结果对本次重污染过程的污染物浓度、天气形势与气团输送、区域传输和减排效果进行了研究. 本次重污染过程中各地市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度均超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 小时均值峰值为 $834.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 重污染期间气象条件非常不利于污染物扩散, 低压控制与气团传输加剧了污染过程. 各地市平均本地贡献为 47.1%, 受天气形势影响传输效果存在一定差异. 本次红色预警期间京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均下降比例为 27.6%, 减排效果明显. 如果提前实施重污染应急措施, 可以使 $\text{PM}_{2.5}$ 下降浓度有一定提升. 提前 2 d 实施可以使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均下降比例增加 4.4%, 提前 3 d 以上效果提升不明显.

关键词: 京津冀; $\text{PM}_{2.5}$; 重污染; 红色预警; 效果评估

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3397-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811155

Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016

ZHANG Chong, LANG Jian-lei, 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: The Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region experienced a heavy pollution episode in December 2016. Beijing and Tianjin issued a red alert from 20:00 December 16 to 24:00 December 21, while every city in Hebei Province (except Zhangjiakou, Chengde, and Qinhuangdao) issued a red alert from 00:00 December 16 to 18:00 December 22. In order to study the process of heavy pollution and the effect of implementing emergency measures, pollutant concentrations, meteorological conditions, air mass transmission and region transmission, and control effects were analyzed based on environmental monitoring data and simulation. Mean $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during the heavy pollution episode in each city all exceeded $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and the peak value of hourly averaged concentration ($834.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) occurred in Handan. The meteorological conditions during the heavy pollution episode restricted the diffusion of pollutants, with low pressure and air mass transmission exacerbating the problem. The mean fraction of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in local emissions was 47.1%, but this differed between cities due to variable meteorological conditions. The average reduction of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations was 27.6%, indicating that the implementation of a red alert measure was effective. If the emergency measures had been implemented a few days earlier, a greater reduction ratio would have been achieved; a 4.4% greater average reduction in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations would have occurred if the measures were implemented two days earlier, while taking action three or more days in advance would not have achieved significant improvement.

Key words: BTH region; $\text{PM}_{2.5}$; heavy pollution; red alert; effect assessment

近年来,随着我国经济社会高速发展,大气复合污染问题集中出现,大气污染防治任务十分艰巨^[1-3]. 其中京津冀地区定位特殊,地形复杂,大气污染问题较为严重. 根据生态环境部公布的《2017 中国生态环境状况公报》显示,2017 年京津冀地区 13 个城市空气质量优良天数比例平均为 56.0%, 超标天数中以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数占污染总天数的 50.3%. 京津冀地区污染物排放量大^[4-6], 刘建国等^[7] 利用 NAQPMS 模式对京津冀地区环境容量进行的模拟表明,若实现各污染物日均浓度达到国家二级标准,需要削减的 SO_2 、 NO_x 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别占 2013 年对应污染物排放量

的 47%、52% 和 44%.

目前针对重污染成因分析与控制效果评估展开了大量的研究. 王申博等^[8] 利用在线金属分析仪器与气象仪器观测结合正矩阵因子分解法 (PMF) 对郑州市 2017 年 11 月 21 ~ 29 日两次大气重污染过程进行了分析,发现两次重污染过程主要归因于东北方向污染物传输以及本地排放积累,郑州市

收稿日期: 2018-11-20; 修订日期: 2019-03-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213206); 国家自然科学基金项目 (51638001, 91544232); 总理基金项目 (DQGG-05-01&DQGG-05-09); 北京市科技计划项目 (Z181100005418017)

作者简介: 张冲 (1993 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境规划管理与污染防治, E-mail: zhch081@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chengsy@bjut.edu.cn

PM_{2.5}中元素主要来自扬尘与机动车,二者分别占比36.8%与27.6%。何玉洁等^[9]利用WRF-CMAQ模式对上海市2015年1月7~12日的重污染过程进行模拟,研究发现上海市重污染I级应急措施对重污染时段PM_{2.5}浓度削减效果不大,“十三五”环境规划减排措施对重污染时段PM_{2.5}浓度削减有一定效果。上海市重污染时段空气质量改善效果可能受到区域传输影响。Jia等^[10]对利用WRF-CAMx模式对北京2015年12月8~31日期间的两次重污染过程进行了模拟,研究发现北京第一重污染过程主要来自于区域传输,第二次重污染过程主要来自于本地排放与积累。同时对污染物减排效果进行了研究,发现京津冀地区重污染红色预警应急减排措施能有效降低北京市区PM_{2.5}浓度,两次重污染红色预警期间PM_{2.5}浓度平均下降比例为17.1%和22.2%。Cheng等^[11]对2015年北京两次重污染红色预警措施提前实施效果进行了研究,发现提前1~2 d实施减排措施对重污染期间PM_{2.5}浓度削减有明显效果。对重污染与红色预警应急措施的空气质量改善效果进行评估,对于秋冬季重污染天气防治与应对决策具有科学、有效地指导意义。

本研究选择京津冀地区为研究对象,采用WRF-CAMx-PSAT模式对京津冀地区2016年12月8~26日期间的PM_{2.5}浓度进行模拟,并结合后向轨迹模型,对一次污染过程进行污染特征研究、成因分析与减排效果评估,旨在为日后应对重污染天气采取更加科学有效同时对社会生产活动影响较小的联防联控措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究采用的大气污染物(包括PM_{2.5}、CO、

SO₂和NO₂)浓度数据来自北京市环境保护监测中心与中国环境监测总站发布的逐时数据。以各地市国控站点污染物浓度平均值表征该区域的污染水平。气象数据来自中国气象监测中心发布的数据,时间间隔为3 h,用于对气象背景场进行分析。天气形势图来自中国国家气象中心。

1.2 后向轨迹模型

后向轨迹模型是由美国国家海洋与大气管理局(NOAA)和澳大利亚气象局联合开发的混合型单粒子拉格朗日综合轨迹(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model, HYSPLIT)模型。该模型是欧拉和拉格朗日混合型扩散模式,可对气团移动方向进行识别追踪^[12]。选取北京(39.87°N, 116.43°E)、唐山(39.66°N, 118.18°E)、石家庄(38.02°N, 114.53°E)和衡水(37.74°N, 115.69°E)这4个城市,用HYSPLIT-4模型对4个城市100 m高度的气团来向与轨迹变化进行分析,追踪12月16日16:00、12月17日16:00、12月21日16:00与12月22日16:00的24 h气团后向轨迹。

1.3 空气质量模型

本研究采用WRF-CAMx-PSAT耦合模型对京津冀地区2016年12月8~26日的PM_{2.5}浓度进行模拟。其中气象模型采用WRF3.5.1版本,初始背景边界条件采用美国国家环境预报中心(NCEP)发布的final operational global analysis data,时间间隔为6 h,空间分辨率为1°。空气质量模型采用的是CAMx 6.3,其内嵌PSAT颗粒物来源识别工具,能针对颗粒物与各种组分,有效识别不同排放源对受体区域不同污染物的浓度贡献^[13, 14]。

空气质量模型CAMx采用Lambert投影,如图1所示,外层网格分辨率为36 km,覆盖四川、甘肃

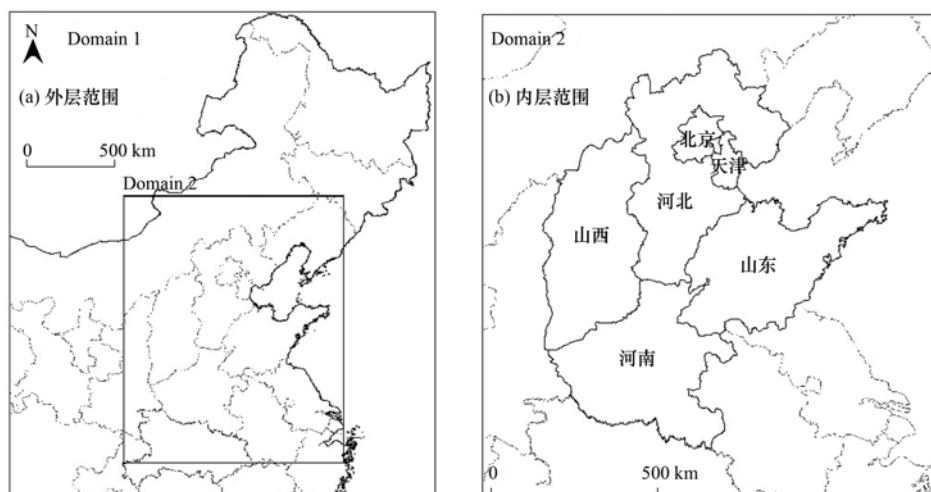


图1 两层嵌套模拟区域示意

Fig. 1 Two-level nested-grid modeling domain

东部、华北地区、东北地区、华南和华东北部，内层网格分辨率为 12 km，覆盖京津冀地区、山西省、山东省、河南省以及内蒙古、辽宁、陕西、湖北、安徽和江苏部分地区。内层划分为 14 个受体区域，包括北京、天津、保定、石家庄、邢台、邯郸、廊坊、沧州、衡水、唐山、秦皇岛、张家口、承德与其他。气象化学机制选用 CB05（碳键 2005），水平湍流和气象化学扩散机制选用 PPM（分段抛物线法）和 EBI（欧拉反向迭代法）。光解速率常数由 TOMS（臭氧总测绘光谱仪）臭氧浓度资料计算。

1.4 污染源清单

本研究使用的污染源清单中京津冀区域排放数据是由课题组采用自下而上方式建立的高分辨率排放清单^[15]，污染物包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO_x、VOCs、CO 和 NH₃。京津冀以外的部分采用的是清华大学建立的高分辨率 MEIC 清单^[16]。为应对重污染天气，京津冀地区启动了红色预警以削减污染物排放量。北京和天津于 12 月 16 日 20:00 至 12 月 21 日 24:00 启动红色预警，河北省除张家口、承德和秦皇岛外，其他地市均于 12 月 16 日 00:00 至 12 月 22 日 18:00 启动红色预警。根据各地市红色预警应急减排措施核算各地污染物减排比例见表 1。

表 1 各地区污染物减排比例/%

地区	SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs
北京	10 ~ 56	10 ~ 51	10 ~ 64	10 ~ 64	20 ~ 51
天津	10 ~ 27	10 ~ 55	10 ~ 58	10 ~ 58	10 ~ 55
河北	10 ~ 40	10 ~ 45	10 ~ 48	10 ~ 48	10 ~ 45

2 结果与讨论

2.1 污染物浓度变化特征

京津冀地区 2016 年 12 月发布大气重污染红色预警的地市在其发布重污染的时间段内各项污染物平均浓度如图 2。

红色预警期间，各地市 PM_{2.5} 平均浓度均超过 200 μg·m⁻³，污染最严重的邯郸和石家庄 PM_{2.5} 平均浓度超过 400 μg·m⁻³。从各地市 PM_{2.5} 平均浓度比较，明显呈现出沿太行山西南通道地区污染较重，中东部地区污染较轻的趋势，且沿太行山脉呈现出污染程度自西南向东北逐渐减轻的趋势。由于太行山脉与燕山山脉阻挡，张家口与承德受到此次重污染过程的影响较小，两市同时段 PM_{2.5} 平均浓度均未超过 70 μg·m⁻³。从 PM_{2.5} 浓度峰值上看，污染最严重的邯郸 PM_{2.5} 浓度峰值为 834.5 μg·m⁻³，PM_{2.5} 浓度峰值最低的是天津，为 381.9 μg·m⁻³，前者是后者的 2.2 倍。北京 SO₂ 浓度在 10 个城市

中最低，为 20.0 μg·m⁻³，从北京向西南方向各城市呈现出上升趋势，保定、石家庄、邢台和邯郸平均 SO₂ 浓度为 77.9 μg·m⁻³。中东部城市 SO₂ 浓度较低，天津、廊坊、沧州和衡水平均 SO₂ 浓度为 38.4 μg·m⁻³。NO₂ 浓度几个城市相差不大，中部城市相对较低。CO 浓度唐山最高，为 9.1 μg·m⁻³，其他城市水平较为接近。

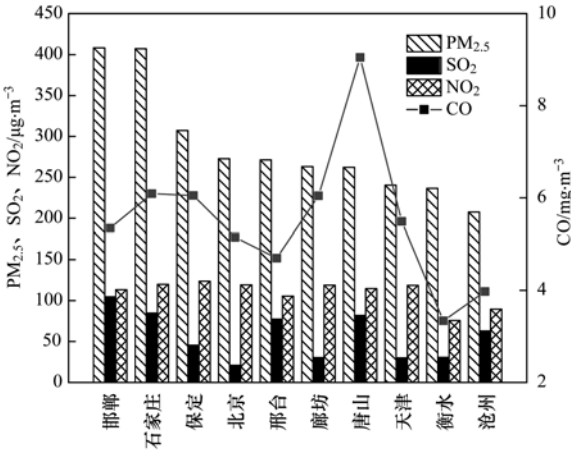


图 2 各地市红色预警期间污染物浓度

Fig. 2 Concentrations of different pollutants in each city during the red alert period

2.2 情景设置与模拟验证

本研究为了对红色预警实际减排效果与减排时间对减排效果的影响进行研究，设置了如下 3 种不同的减排情景。实际排放情景为考虑京津冀地区各地市发布红色预警应急措施的控制情景，根据各地应急措施对排放清单对应污染物进行核减，将模拟结果与实际监测值进行对比验证。基准情景为不考虑任何应急控制措施的情景，与其它情景对比进行减排效果评估。提前减排情景在实际排放情景的基础上，将减排开始时间提前 1 ~ 5 d，对比提前不同减排天数对重污染期间减排效果的影响。

本研究参考文献[17, 18]，采用标准化平均偏差(normalized mean bias, NMB)、标准化平均误差(normalized mean error, NME)和相关系数(correlation coefficient, R)对 10 个城市 PM_{2.5} 浓度模拟逐时结果进行校验，校验结果见表 2。对于区域欧拉模型 PM_{2.5} 浓度模拟结果的评价标准为 -50% < NMB < 50%，NME < 150%。

10 个城市 NMB、NME 和 R 值的平均值分别为 -42.5%、46.3% 和 0.77。与其它使用 CAMx 模型对 PM_{2.5} 浓度进行模拟的研究^[19~21]相比，相关系数 R 值较高，NME 值与 NMB 值属于正常水平。10 个城市中邯郸和石家庄的模拟结果 NMB 值较低，分别为 -48.7% 和 -46.1%，原因是两城市在重污染

时段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度过高, 邯郸 $\text{PM}_{2.5}$ 小时均值监测值峰值为 $834.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 石家庄为 $693.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 两市 $\text{PM}_{2.5}$ 小时均值模拟值峰值为 $466.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与 $334.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与监测值相比明显偏低, 其它城市存在同样的问题, 因此 NMB 值普遍偏低. 出现模拟值相对监测值偏低的情况可能有以下几方面的原因: 清单本身存在不确定性; 实际控制措施的执行实施效果与理想减排效果存在一定差异; CAMx 模型本身的化学机制不够完善, 对二次无机粒子存在一定程度的低估^[22].

表 2 模拟值与监测值统计指标对比
Table 2 Comparison of statistical indicators
between simulated and observed data

城市	NMB/%	NME/%	R
保定	-41.3	41.9	0.84
北京	-38.7	41.4	0.89
沧州	-40.9	45.8	0.76
邯郸	-48.7	49.6	0.78
衡水	-43.2	47.5	0.57
廊坊	-41.8	49.5	0.72
石家庄	-46.1	47.2	0.83
天津	-43.4	49.3	0.75
唐山	-37.5	44.6	0.80
邢台	-44.1	46.2	0.75

2.3 区域 $\text{PM}_{2.5}$ 传输分析

2.3.1 天气形势与后向轨迹分析

图 3 为 12 月的 16 日、17 日、21 日与 22 日每天 08:00 的天气形势, 本研究选取位于西南传输通道的

北京、石家庄, 以及京津冀地区东部典型工业城市唐山, 位于中部的衡水 4 个城市进行重点分析, 图 4 为北京、石家庄、唐山和衡水这 4 个城市 100 m 高度 24 h 气团来向模拟结果. 结合地面天气形势与后向轨迹模型, 对污染物传输进行定性分析.

气象条件与天气形势的演变对大气中重污染过程的发生与变化有密切联系^[23~25]. 从天气形势图看, 12 月 16~17 日华中地区存在一个向东移动的高压中心, 12 月 16 日京津冀地区气压梯度不明显, 高压位于西南部, 存在微弱的南风与西南风, 后向轨迹模型选取的 4 个城市均有西南来向的气团, 受天气形势的影响, 位于西南传输通道的石家庄与北京气团来向偏西, 而衡水与唐山气团来向偏南. 12 月 16 日除位于西南端的邯郸外, 京津冀地区其他城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈现上升趋势. 12 月 17 日高压中心已从华中地区移动至长江入海口, 京津冀地区完全处于低压中心呈现大范围静稳天气, 北京以静风为主, 石家庄有微弱的北风与东北风, 天气形势十分不利于污染物扩散. 后向轨迹模型显示北京和石家庄有非常近距离的气团传入, 唐山和衡水气团来自西南偏南方向. 12 月 17 日污染物开始迅速积累, 全京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 小时平均浓度从 $212.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 迅速攀升至 $320.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增幅达 51%. 12 月 21 日京津冀地区处于低压槽控制区域, 北京和石家庄以静风为主, 唐山和衡水存在微弱的东北风. 后向轨迹模型结果呈现出同样的情况. 由于不良的扩散

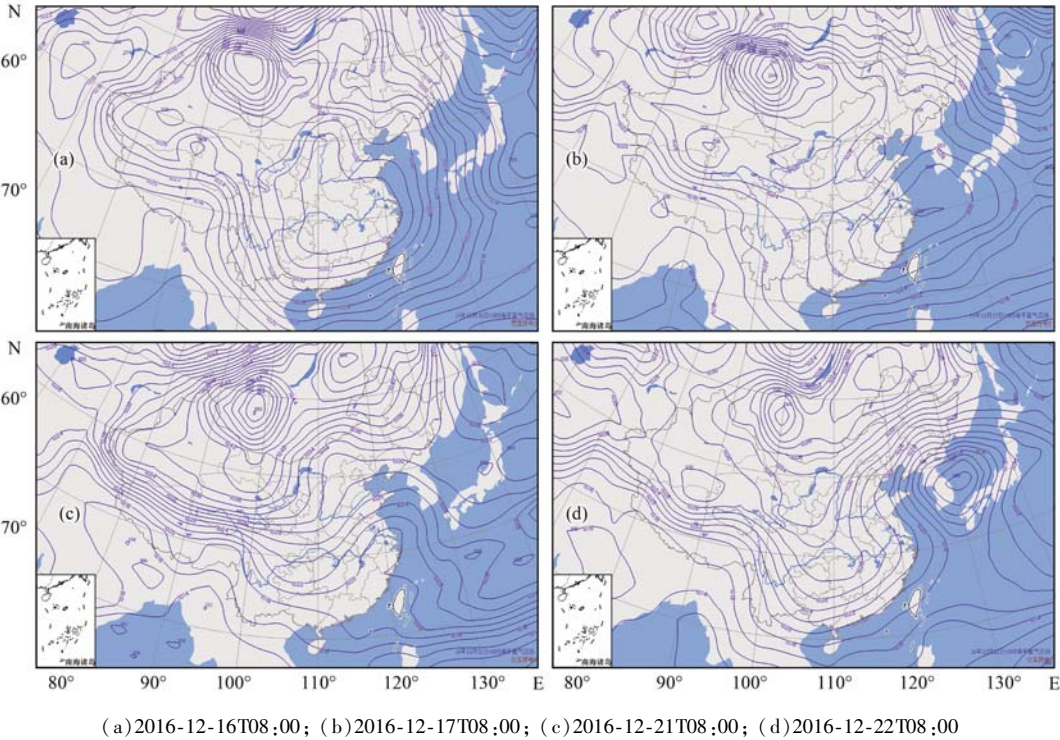


图 3 典型时段天气形势
Fig. 3 Typical surface pressure patterns during the study period

条件,使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度再次出现了上升. 保定、北京和廊坊 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 12 月 21 日达到整个重污染过程的最高值. 12 月 22 日受到西北方向来自蒙古的高压南下的影响,华北、东北地区位于高压前部,气压梯度变化大,气象条件对污染物扩散非常有

利. 后向轨迹模型显示 4 个城市均受到来自西北方向的气团影响. 由于西北方向清洁气团到来,污染物被驱散,各地市 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度均降低到 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,最低可达 $7.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,本次重污染过程结束.

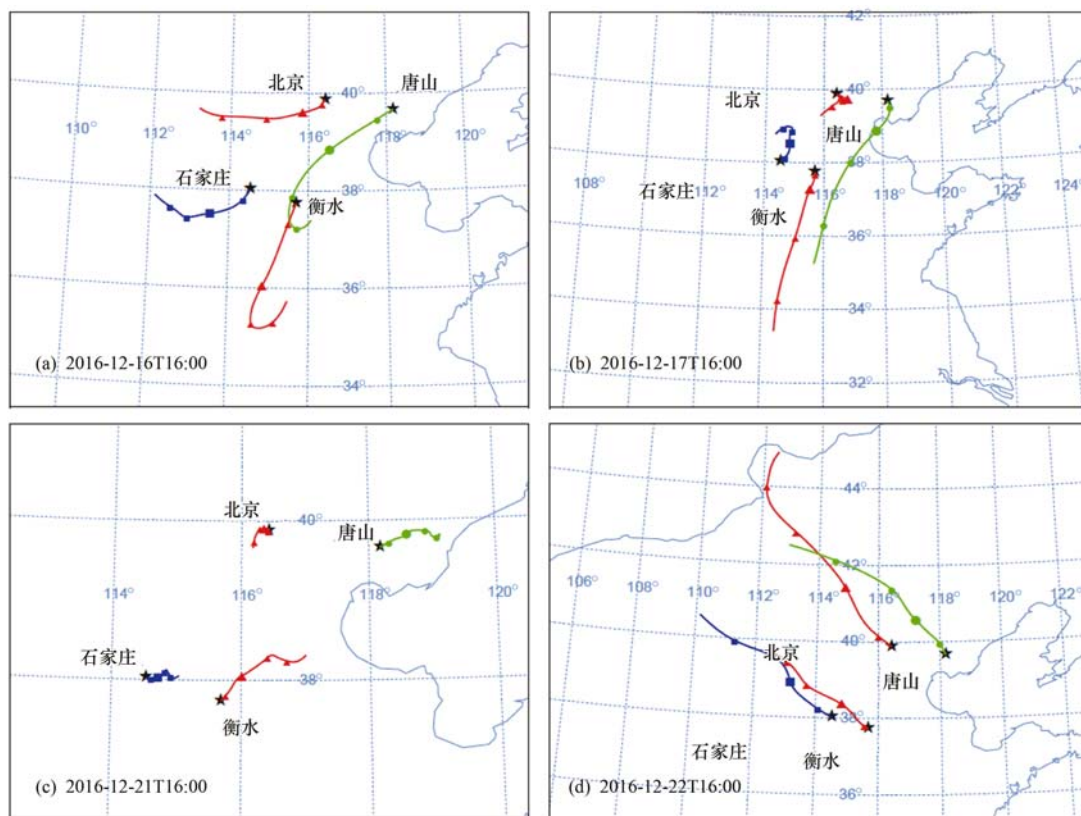


图 4 2016 年 12 月京津冀重污染过程气团后向轨迹

Fig. 4 Back trajectories for heavy pollution in the BTH region during December 2016

2.3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 空间来源

后向轨迹模型结果显示,重污染过程受到区域传输的影响较大,尤其是 12 月的 16 日与 17 日污染物积累的过程存在明显的区域传输. 北京、唐山、石家庄和衡水这 4 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 传输矩阵见图 5. 模拟结果显示,京津冀地区各地市 12 月 8 ~ 25 日 $\text{PM}_{2.5}$ 平均本地贡献为 47.2%,其中廊坊本地贡献最低,在 2.9% ~ 27.4% 间,由于其本身土地面积较小,地理位置特殊,且污染物排放少,容易受到周边地市的传输影响. 上文讨论的 4 个地市中,唐山与石家庄由于其本身工业比较发达,污染物排放量大, $\text{PM}_{2.5}$ 本地贡献在京津冀地区处于最高水平,平均值分别为 69.3% 与 65.9%. 北京和衡水 $\text{PM}_{2.5}$ 本地贡献较低,平均值分别为 48.5% 与 39.2%.

结合后向轨迹模型与天气形势分析结果对 $\text{PM}_{2.5}$ 区域来源进行分析. 12 月 16 ~ 17 日京津冀地区由西南风转入静稳天气,4 个城市本地贡献均呈现上升趋势. 后向轨迹模型显示 12 月 17 日石家庄

受到由保定方向输入气团的影响,保定对石家庄 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献由 12 月 16 日的 0.6% 增加至 10.2%. 衡水 12 月 16 ~ 17 日持续受到西南偏西方向来自邯郸与邢台的气团输入,两市对邯郸 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献之和稳定在 18.3% ~ 19.2%. 唐山 12 月 17 日受来自山东地区较为清洁气团影响,外地 $\text{PM}_{2.5}$ 输入被驱散,本地 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献上升,在 4 个城市中增幅最大,达到 28.4%,并且在其他城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈上升趋势的同时,唐山 12 月 17 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在略微下降. 12 月 21 ~ 22 日京津冀地区由低压控制转为高压前锋区,来自西北方向的清洁气团驱散污染物,结束了本次重污染过程,本地污染物排放重新占主导地位. 12 月 21 日由于多日污染物传输积累, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本地贡献相对于前几日已达到最低点,12 月 22 日 4 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本地贡献分别有 3.5% ~ 32.1% 的上升. 其中衡水 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本地贡献上升最少,其他 3 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本地贡献平均上升 27.9%. 结合后向轨迹模型结果分析,衡水位于京津冀地区东南部,12 月 22

日4个城市均受到西北来向的气团影响,北京、石家庄和唐山后向轨迹模型显示气团来自太行山、燕山以外空气较为清洁的地区,衡水气团来自保定,且24h后向轨迹相对另外3个城市较短,污染物驱散效果较差.保定对衡水 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度贡献由12月21日的1.2%上升至11.8%,使得衡水 $\text{PM}_{2.5}$ 浓

度本地贡献上升速度减缓.

综上所述,京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度区域传输受天气形势变换的影响存在一定的差异性,总体来看区域传输在重污染过程中起到一定程度的影响,是形成重污染过程的主要原因之一,因此,为有效改善空气质量,区域联防联控是非常重要的手段.

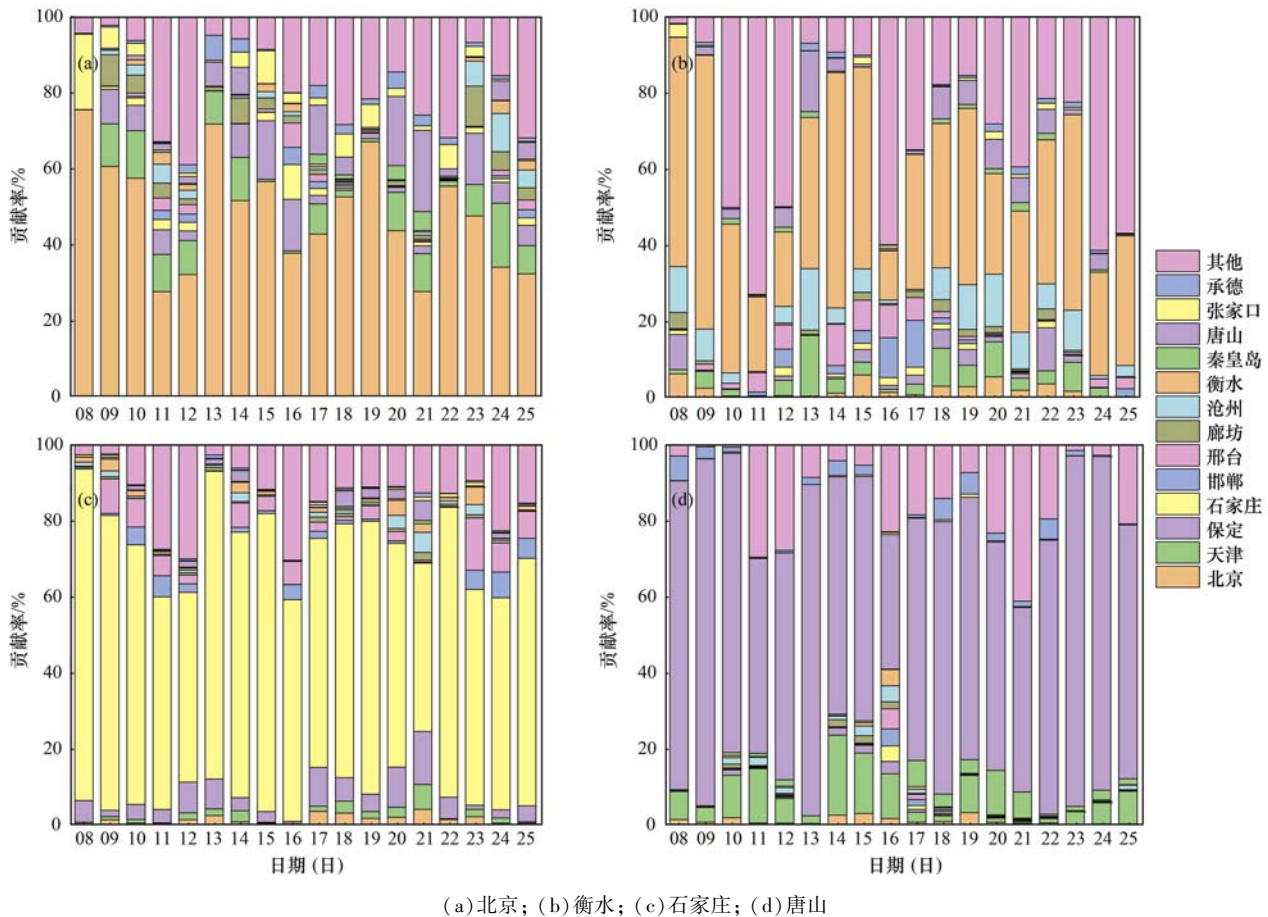


图5 京津冀地区12月8~25日 $\text{PM}_{2.5}$ 传输矩阵

Fig. 5 Transmission matrix of $\text{PM}_{2.5}$ in the BTH region between December 8 and December 25, 2016

2.4 减排效果分析

2.4.1 重污染红色预警减排效果评估

基于CAMx模式得出的基准情景与控制情景模拟得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度见图6(以北京和石家庄为例).将基准情景、控制情景模拟结果对比,得出各地市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在红色预警期间全时段平均下降比例、小时均值最大下降比例和 $\text{PM}_{2.5}$ 小时均值峰值浓度下降比例见表3.京津冀地区在本次重污染过程中,红色预警应急措施启动期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降比例均值为27.6%,其中唐山减排效果最好,为30.6%,沧州、衡水与廊坊 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降比例相对较低.从京津冀地区整体地形方面来看,西南传输通道城市减排效果较好,中部地区相对较差.唐山由于其本身工业密集,减排力度大, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削减效果最为明显.本研究减排效果评估均选取国控站点为受

体点,河北省各地市国控站点均分布于市区,北京国控站点在市区与郊区均有分布.北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减排效果存在一定空间性差异,南部市区减排效果好,北部郊区相对较弱,北部地区相对于南部存在约10h的滞后,主要原因为南部人口、机动车与各类产业较密集,减排工作多分布在南部市区,因此南部相对于北部减排效果较好.结合本地排放贡献来看,将各地市区域传输结果中的本地贡献比例与实际减排效果对比发现, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本地贡献与减排效果存在正相关性,相关系数为0.69.因此可以推测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减排效果在一定程度上受到本地排放的影响.

2.4.2 提前减排效果分析

本研究设计按照原控制方案,保持各类污染物排放削减比例不变,提前实施减排,将提前不同天

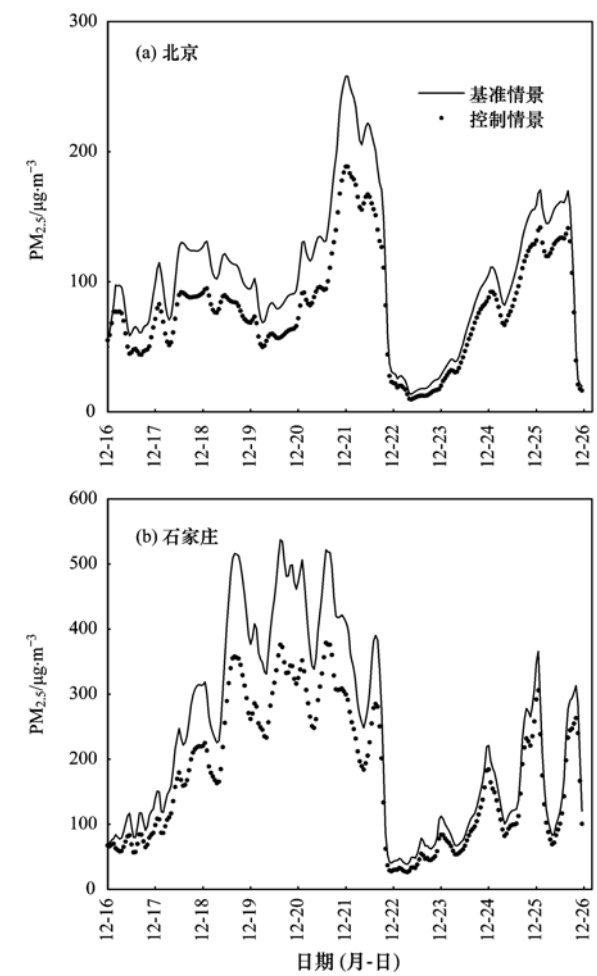


图 6 基准情景与控制情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化
Fig. 6 $\text{PM}_{2.5}$ concentrations under baseline and control scenarios

表 3 各地市 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果/%			
Table 3 $\text{PM}_{2.5}$ reduction in each city/%			
城市	全时段平均 下降比例	小时均值最大 下降比例	小时均值峰值浓度 下降比例
保定	27.3	32.4	29.1
北京	26.7	32.2	25.5
沧州	25.0	30.7	28.0
邯郸	29.5	38.1	30.9
衡水	25.7	30.9	26.2
廊坊	25.8	31.7	27.1
石家庄	28.2	31.2	30.4
天津	27.2	31.9	31.9
唐山	30.6	34.9	27.4
邢台	29.7	37.6	29.6

数进行减排所得的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削减结果进行对比. 由表 4 可以看出, 提前实施重污染应急预案对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削减有一定的作用. 不同城市提前减排效果略有出入, 总体而言提前 2 d 进行减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削减有比较明显的提高, 相对于按照原方案进行减排控制的情景有 4.0% ~ 4.7% 的提升, 平均值为 4.4%. 提前 2 d 以上进行减排有轻微的提升, 整体而言作用不大. 将减排措施提前实施对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的削减效果存在极限, 提前 5 d 实施重污染应急措施可以将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高削减百分比提升至 30.5% ~ 35.5%.

表 4 各地市提前减排结果/%						
Table 4 Reductions of concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ controlled in advance in each city/%						
	正常减排比例	提前不同天数减排比例				
		1 d	2 d	3 d	4 d	5 d
保定	27.3	30.1	31.8	32.6	32.6	32.6
北京	26.7	29.5	31.1	31.9	31.9	31.9
沧州	25.0	27.5	29.6	30.5	30.5	30.5
邯郸	29.5	31.7	33.6	34.4	34.4	34.4
衡水	25.7	28.1	30.2	31.0	31.0	31.0
廊坊	25.8	28.7	30.5	31.3	31.3	31.3
石家庄	28.2	30.6	32.2	33.0	33.0	33.0
天津	27.2	29.6	31.5	32.3	32.3	32.3
唐山	30.6	33.0	34.7	35.5	35.5	35.5
邢台	29.7	32.1	33.8	34.6	34.6	34.6

3 结论

(1) 京津冀地区 2016 年 12 月经历了一次持续时间较长, 污染物浓度水平较高的大气重污染过程. 重污染红色预警期间各地市全时段平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均超过 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大小时均值出现在邯郸, 为 $834.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 沿太行山西南传输通道城市污染较重, 中东部地区城市污染较轻.

(2) 重污染期间气象条件非常不利于污染物扩散, 受低压控制以及污染较重城市气团传输的影

响, 加剧了重污染过程. 各地市平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本地贡献为 47.1%, 受天气形势影响各地市间污染物传输效果存在一定差异性.

(3) 本次重污染过程各地市红色预警应急措施实施后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度控制效果较好, 平均下降比例为 27.6%. 各地市减排效果与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度本地贡献比例存在较好的正相关性. 提前减排情景模拟结果显示提前 2 d 进行减排有 4.0% ~ 4.7% 的效果提升, 考虑到红色预警应急措施需要较大的经济发展代价, 对于提前进行减排应谨慎.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Xing Y F, Xu Y H, Shi M H, *et al.* The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system [J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2016, **8**(1): E69-E74.
- [4] Yang W, Yu C Y, Yuan W, *et al.* High-resolution vehicle emission inventory and emission control policy scenario analysis, a case in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **203**: 530-539.
- [5] Li X, Wu J R, Elser M, *et al.* Contributions of residential coal combustion to the air quality in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH), China: a case study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(14): 10675-10691.
- [6] Guo Y Y, Gao X, Zhu T Y, *et al.* Chemical profiles of PM emitted from the iron and steel industry in northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **150**: 187-197.
- [7] 刘建国, 谢品华, 王跃思, 等. APEC 前后京津冀区域灰霾观测及控制措施评估 [J]. *中国科学院院刊*, 2015, **30**(3): 368-377.
- [8] Liu J G, Xie P H, Wang Y S, *et al.* Haze observation and control measure evaluation in Jing-Jin-Ji (Beijing, Tianjin, Hebei) area during the period of the Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) meeting [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2015, **30**(3): 368-377.
- [8] 王申博, 余雪, 赵庆炎, 等. 郑州市两次典型大气重污染过程成因分析 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- [8] Wang S B, Yu X, Zhao Q Y, *et al.* Analysis of the formation of two typical atmospheric heavy pollution episodes in Zhengzhou, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- [9] 何玉洁, 安静宇, 程真, 等. 上海市一次 PM_{2.5} 重污染事件的管控效果评估 [J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(7): 172-182.
- [9] He Y J, An J Y, Cheng Z, *et al.* Evaluation of PM_{2.5} control effect during a heavy air pollution episode in Shanghai [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(7): 172-182.
- [10] 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.
- [11] 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 Report*, 2017, **7**(1): 8220.
- [12] 周敏, 乔利平, 朱书慧, 等. 2013 年 12 月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1179-1187.
- [12] Zhou M, Qiao L P, Zhu S H, *et al.* Chemical characteristics of particulate matters and trajectory influence on air quality in Shanghai during the heavy haze episode in December, 2013 [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1179-1187.
- [13] 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源. 冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3476-3484.
- [13] Sun X W, Guo X R, Cheng S Y. Impact of the electric power industry on air quality in winter of urban agglomerations along the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3476-3484.
- [14] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [14] Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of PM_{2.5} in Jingjinji region, 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [15] Zhou Y, Cheng S Y, Liu L, *et al.* A coupled MM5-CMAQ modeling system for assessing effects of restriction measures on PM₁₀ pollution in olympic city of Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2012, **19**(2): 120-127.
- [16] Tsinghua University. Multi-resolution emission inventory for China [EB/OL]. <http://www.meicmodel.org>, 2015.
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 关于征求《环境质量模型规范化管理暂行办法》(征求意见稿)等 2 项文件意见的函 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgh/201508/t20150831_309098.htm, 2015-08-27.
- [19] 张婷慧, 陈报章, 王瑾, 等. 基于 CAMx 的徐州市 2016 年冬季 PM_{2.5} 污染过程及来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(10): 3918-3925.
- [19] Zhang T H, Chen B Z, Wang J, *et al.* Process analysis and source apportionment of PM_{2.5} pollution in Xuzhou in winter 2016 based on CAMx [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(10): 3918-3925.
- [20] 贾海鹰, 程念亮, 何友江, 等. 2014 年春季山东省 PM_{2.5} 跨界输送研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2353-2360.
- [20] Jia H Y, Cheng N L, He Y J, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in Shandong Province during spring in 2014 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2353-2360.
- [21] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 PM_{2.5} 区域来源解析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [21] Li X, Nie T, Qi J, *et al.* Regional source apportionment of PM_{2.5} in Beijing in January 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [22] 张晗宇, 郎建奎, 温维, 等. 唐山 PM_{2.5} 污染特征及区域传输的贡献 [J]. *北京工业大学学报*, 2017, **43**(8): 1252-1262.
- [22] Zhang H Y, Lang J L, Wen W, *et al.* Pollution characteristics and regional transmission of PM_{2.5} in Tangshan [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, **43**(8): 1252-1262.
- [23] 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.
- [23] 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.
- [24] Zhu W H, Xu X D, Zheng J, *et al.* The characteristics of abnormal wintertime pollution events in the Jing-Jin-Ji region and its relationships with meteorological factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 887-898.
- [25] 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.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenhe River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)