

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.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分时空分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435)	
《环境科学》征稿简则 (4445)	
信息 (4606, 4625, 4732)	

2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估

朱媛媛^{1,2}, 高愈霄^{1*}, 汪巍¹, 鲁宁¹, 许荣¹, 刘冰¹, 李健军¹

(1. 中国环境监测总站, 北京 100012; 2. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 为评估京津冀及周边区域重污染过程期间应急减排措施的效果, 基于情景模拟的方法, 采用 NAQPMS 模式和多种观测资料, 分析了 2019 年 10~12 月期间京津冀及周边区域环境空气质量、重污染过程和气象条件概况, 评估了模式 24、72 和 144 h 的 PM_{2.5} 预报效果, 并对应急减排措施的效果和不确定性进行了讨论。结果表明, 2019 年 10~12 月京津冀及周边“2+26”城市 PM_{2.5} 平均浓度 64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 同比降低了 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 区域性重污染过程 4 次, 受影响城市重污染过程期间 PM_{2.5} 平均浓度 156 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。“2+26”城市 PM_{2.5} 气象条件评估指数 (EMI) 变化值范围为 -15.6%~16.8%, EMI 显示北京、天津和石家庄等 12 个城市气象条件与同期相比变差, 变差程度范围为 3.2%~16.8%。减排情景模拟分析显示应急减排措施有效减少了区域性重污染过程的发生, 污染物峰值浓度降幅明显, 未出现区域性严重污染过程。典型重污染期间, 北京、石家庄、保定和唐山等城市 PM_{2.5} 日均浓度削减 2%~9%。区域应急减排措施促使“2+26”城市 PM_{2.5} 季度均值分别降低 1~3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 区域性减排效果明显。

关键词: 京津冀; PM_{2.5}; 减排效果; 情景模拟; NAQPMS 模式; 评估

中图分类号: X51; X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4402-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003198

Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area (“2+26” Cities) from October to December 2019

ZHU Yuan-yuan^{1,2}, GAO Yu-xiao^{1*}, WANG Wei¹, LU Ning¹, XU Rong¹, LIU Bing¹, LI Jian-jun¹

(1. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 2. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To evaluate the effect of emergency emission reduction measures during the heavy air pollution episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and its surrounding areas, a scenario simulation method was used. The concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, and O₃-8h, air quality index (AQI), characteristics of heavy air pollution, and climate and meteorological factors were analyzed using the observation data available from October to December 2019. The 24 h, 72 h, and 144 h prediction results of NAQPMS model were analyzed. The uncertainties of the assessment and model prediction were discussed. The results showed that the average PM_{2.5} concentration in Beijing, Tianjin, and its surrounding 26 cities (“2+26” cities) from October to December 2019 was 64 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, indicating a decrease of 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ as compared with that during the same period in 2018. There were 4 occurrences of regional heavy air pollution episodes, with the average PM_{2.5} concentration of 156 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ of affected cities. The value of evaluation on meteorological condition index of PM_{2.5} pollution (EMI) of “2+26” cities ranged from -15.6%~16.8%. The meteorological conditions of 12 cities, including Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang, deteriorated as compared with those during the same period in 2018, and the changes ranged from 3.2%~16.8%. However, the emergency emission reduction measures effectively reduced the occurrence of regional heavy air pollution episodes, the peak concentration of PM_{2.5} was decreased significantly, and no severe regional pollution episode occurred. The daily PM_{2.5} concentrations reduced by 2% to 9% in Beijing, Shijiazhuang, Baoding, Tangshan, and other cities during a typical heavy air pollution period. The quarterly average concentrations of PM_{2.5} in the “2+26” cities reduced by 1 to 3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The regional emergency emission reduction measures have played an active role in protecting the health of the people and improving the quality of ambient air.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; PM_{2.5}; reduction effect; scenario simulation; NAQPMS model; assessment

京津冀及周边区域受污染物排放、地理位置、地形和不利气象条件等因素综合影响^[1~6], 在秋冬季时常出现以 PM_{2.5} 为首要污染物的大气重污染过程^[7~10]。由于 PM_{2.5} 复合型污染特征以及大气结构不稳定性影响, 容易形成区域间的污染传输, 造成区域间连片污染。为保障人民群众的身体健康, 面对可能发生的重污染过程, 京津冀及周边各级人民政

府和生态环境主管部门会根据环境空气质量联合预报会商研判的结果, 依照相关文件要求^[11], 根据不

收稿日期: 2020-03-19; 修订日期: 2020-04-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0213004); 国家自然科学基金项目(41875164)

作者简介: 朱媛媛(1981~), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为环境质量预报和环境健康, E-mail: zhuyy@cncm.cn

* 通信作者, E-mail: gaoyx@cncm.cn

同地区的实际情况,分别制定和执行成本有效的、差别化的重污染应急预案^[12],采取限停产和限行等管控措施进行区域间协同减排。

近年来,伴随大气污染联防联控机制的制订、完善和有效落实,不少研究围绕应急控制措施效果评估展开。Wang 等^[13]对北京及周边城市 APEC 会议和阅兵期间污染管控的效果进行了评估,显示管控促使北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 APEC 会议和阅兵期间分别下降了 51.6% ~ 65.1% 和 34.2% ~ 64.7% 左右。有研究对 APEC 会议和阅兵期间北京和石家庄等城市的研究也发现了类似的结论^[14~18]。徐峻等^[19]讨论了污染应急控制措施效果的快速评估的方法,Zhao 等^[20]对 2014 年南京青奥会期间,Li 等^[21]和毛敏娟等^[22]对杭州 G20 峰会期间空气污染控制的状况进行了评估。还有一些研究针对大气重污染过程期间的管控措施评估,如 Cheng 等^[23]对北京两次重污染过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度特征和管控效果进行了讨论,Jia 等^[24]利用 WRF-CAMx 模型对北京红色预警期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的控制措施进行了评估,翟世贤等^[25]、王凌慧等^[26]和吕喆等^[27]对北京重污染管控减排效果进行了讨论。此外,Cai 等^[28]采用 WRF-CMAQ 模型系统,评估了阶段性排放控制措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低的影响,显示自《大气污染防治行动计划》实施以来,京津冀地区 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量将分别比 2012 年减少 40%、44% 和 40%。吴文景等^[29]利用 CMAQ/2D-VBS 模型分析了冬夏两季京津冀地区主要排放源减排 30% 对改善区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的效果。Zhao 等^[30]和 Wang 等^[31]针对中国近年来污染管控措施对颗粒物减排的效果进行了讨论。

尽管已有不少管控措施评估研究开展,但基于业务预报,针对京津冀及周边区域传输通道“2 + 26”城市的区域性重污染应急响应管控措施效果评估还鲜见报道。为此,采用 NAQPMS (nested air quality prediction modeling system) 空气质量数值模式和多种观测资料,对 2019 年 10 ~ 12 月期间京津冀及周边区域“2 + 26”城市环境空气质量、重污染过程、气候和气象概况进行分析,评估 24、72 和 144 h 模式 $\text{PM}_{2.5}$ 的预报效果,以及区域重污染天气应急减排措施的效果和不确定性,以期更加有效地为开展重污染天气应对提供决策技术支持,为精细化生态环境管理提供科学参考依据,并为打赢蓝天保卫战和保护人民群众身体健康做出积极作用。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究对象为京津冀大气污染传输通道上的

28 个城市(“2 + 26”城市),包括北京、天津、河北省石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台和邯郸,山西省太原、阳泉、长治和晋城,山东省济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州和菏泽,河南省郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作和濮阳。

1.2 模式设置

基于全国空气质量预报预警系统,采用 NAQPMS 模式进行数值模拟。模式采取三层嵌套网格,覆盖东亚、中国中东部和京津冀区域,所采用的京津冀及周边区域模拟分辨率为 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 。采用清华大学 2016 基准年 MEIC (multi-resolution emission inventory for China) 网格化排放清单,精度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。气象处理模块利用 WRF 模式 (weather research and forecasting model) 中尺度气象模式输出的逐小时气象要素场作为模式的动力驱动,气象要素主要包括气温、湿度、降水、风向、风速和云量等。气象预报的初始条件、边界条件基于美国国家环境预报中心 NCEP (national centers for environmental prediction) 的 GFS (global forecast system) 全球气象预报系统。业务预报采用环境空气质量六项污染物准实时同化。具体模型设置和参数方案见参考文献^[7,8]。

重污染减排情景模拟依据各地预警启动情况设置,黄色、橙色和红色预警分别对应各地重污染天气应急预案中Ⅲ级、Ⅱ级和Ⅰ级应急响应。根据各地重污染天气应急预案中制订的差异化减排措施,调整污染源排放清单,一般将 SO_2 、 NO_x 、PM 和 VOCs 的排放清单分别下调 10%、20% 和 30%,以对应黄色、橙色和红色预警的减排措施。

1.3 数据来源

环境空气质量数据采用中国环境监测总站国家环境空气质量监测网城市空气质量自动监测审核数据。气候数据及资料采用中国气象局国家气候中心气候系统诊断数据, $\text{PM}_{2.5}$ 气象条件评估指数 EMI (evaluation on meteorological condition index of $\text{PM}_{2.5}$ pollution) 数据来自中国气象局国家气象中心。数据处理与统计分析采用 Excel、SPSS 和 Python 等。

1.4 评价方法

AQI 指数、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和分指数依据《环境空气质量指数 (AQI) 技术规范 (试行)》(HJ 633-2012)^[32]、《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[33] 和《环境空气质量评价技术规范 (试行)》(HJ/T 663-2013)^[34] 进行评价。3 个及以上城市至少连续 2 d 达到中度及以上污染级别时,定义为区域污染过程。采用 EMI 指数^[35] 评估综合气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的贡献。

将模式预报(基准预报,未考虑减排及管控措施的执行)数据与实际监测数据进行比较,使用相关系数(R)、均方根误差(RMSE)、平均偏差(MB)和标准化平均偏差(NMB)评估空气质量模式预报效果,具体计算方法参见文献[7,36].将应急减排措施模拟结果与基准预报结果进行比较,评估重污染应急减排措施效果.

2 结果与讨论

2.1 空气质量和污染概况

2019年10~12月,“2+26”城市空气质量级别优良率63%,轻度、中度和重度污染级别天数占比分别为25%、7%和5%. PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、CO平均浓度和 O_3 日最大8h滑动平均浓度分别为 $112 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $64 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $14 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $49 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 $1 mg \cdot m^{-3}$ 和 $60 \mu g \cdot m^{-3}$.2019年10~12月与2018年同期空气质量级别天数对比见图1,从中可知,2019年“2+26”城市10~12月空气质量较2018年改善,优良级别天数提升6%,中度及以上污染级别天数下降7%.

空气质量级别在中度污染及以上时,首要污染物主要为 $PM_{2.5}$,占比达93%.污染过程发生时段和平均浓度见图2.从中可知,“2+26”城市发生区域性重污染过程4次,单次过程受影响城市平均为23个,受影响城市 $PM_{2.5}$ 平均浓度 $156 \mu g \cdot m^{-3}$.与2018年同期相比,区域性重污染过程减少了2次,但受不利气象条件等因素综合影响,受影响城市数量平均增加5个,受影响城市在重污染过程期间 $PM_{2.5}$ 平均浓度上升了 $2 \mu g \cdot m^{-3}$.

重污染过程期间各城市 $PM_{2.5}$ 分指数中度及以上污染级别累计天数及 $PM_{2.5}$ 浓度水平见图3.从中

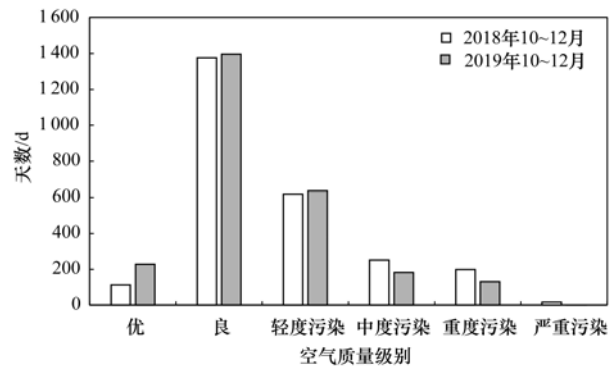


图1 2018年10~12月和2019年同期“2+26”城市空气质量级别天数总体分布

Fig. 1 Variation of AQI in “2+26” cities from Oct. to Dec. in 2018 and 2019

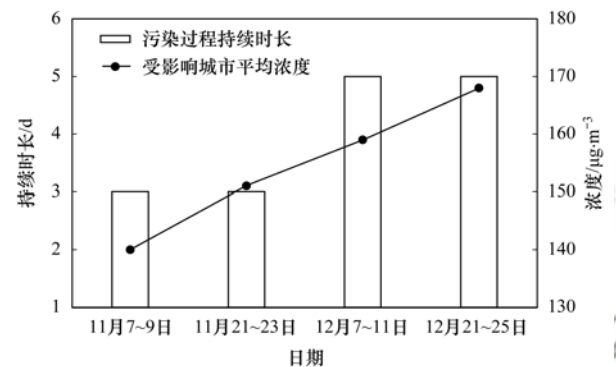


图2 2019年10~12月“2+26”城市重污染过程持续时长和受影响城市平均浓度

Fig. 2 Average concentrations of $PM_{2.5}$ and durations of heavy air pollution in “2+26” cities from Oct. to Dec. in 2019

可知,各城市污染天数与 $PM_{2.5}$ 日均浓度水平高度相关,Pearson相关系数为0.93(双尾检验,显著性水平0.05),长治、阳泉、北京和晋城等12个城市在区域性污染过程期间,中度及以上污染级别天数占区域性污染过程总持续天数的50%以下,过程期间

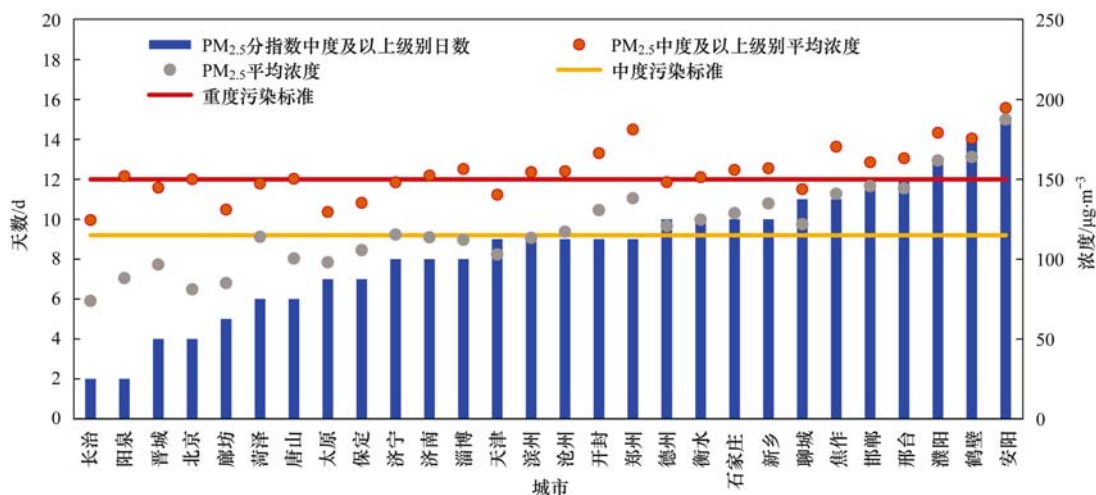


图3 2019年10~12月“2+26”城市中度及以上污染级别累计天数及 $PM_{2.5}$ 浓度水平

Fig. 3 Cumulative days of moderate and heavy pollution levels, and concentrations of $PM_{2.5}$ in heavy air pollution episodes in “2+26” cities from Oct. to Dec. in 2019

$\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度也相对较低, 为 $126 \sim 157 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 而安阳、鹤壁、濮阳、邯郸和邢台等城市中度及以上污染级别天数占比达到 75% 以上, 受污染过程持续时间较长影响, 过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度也相对较高, 为 $161 \sim 195 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2019 年 10~12 月“2+26”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度聚类分析结果见图 4. 从中可知, 以 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为依据的聚类分析结果体现了明显的地域城市群特点, 28 个城市大致可分为 6 类, 分别为北京周边城市群 (北京、天津、保定、廊坊和唐山)、河北和山东省交界城市群 (沧州、衡水、德州和滨州); 山西中部城市群 (太原、晋城、长治和阳泉); 山东西部城市群 (菏泽、聊城、济南、淄博和济宁); 河北和河南省交界城市群 (石家庄、邯郸、邢台、安阳、鹤壁和濮阳); 以及河南北部城市群 (郑州、焦作、新乡和开封).



图 4 “2+26”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度系统聚类树状图

Fig. 4 Cluster results of “2+26” cities

“2+26”城市污染源排放种类和强度、地形地貌、局地小尺度气象条件均不相同, 环境空气质量污染特点各不相同, 但污染发生时, 城市群内不同城市间污染发生的时间和强度又体现出相似之处. 以 2019 年 12 月 7~11 日区域性污染过程为例, 12 月 6 日起, 受大雾、静稳、逆温等不利气象条件影响, 河北南部和河南北部地区率先出现小时重度污染, 随后在偏南风作用下, 发展形成至京津冀及周边区域性重污染过程. 12 月 10 日午后, 受西北方向冷空气影响, 京津冀北部空气质量逐步转为优良水平, 但河北中南部、山东大部 and 河南北部在本地污染叠加西北风作用的污染传输影响下, 仍维持重度污染水平, 直至 12 月 11 日冷空气进一步加强, 区域性污染过程结束. 此次污染过程, 区域偏南和偏北气流的先后

影响, 造成了污染物在区域内不同方向上的传输, 地理位置相近的城市在气流的影响下形成了相似的浓度变化趋势.

2.2 污染气象条件分析

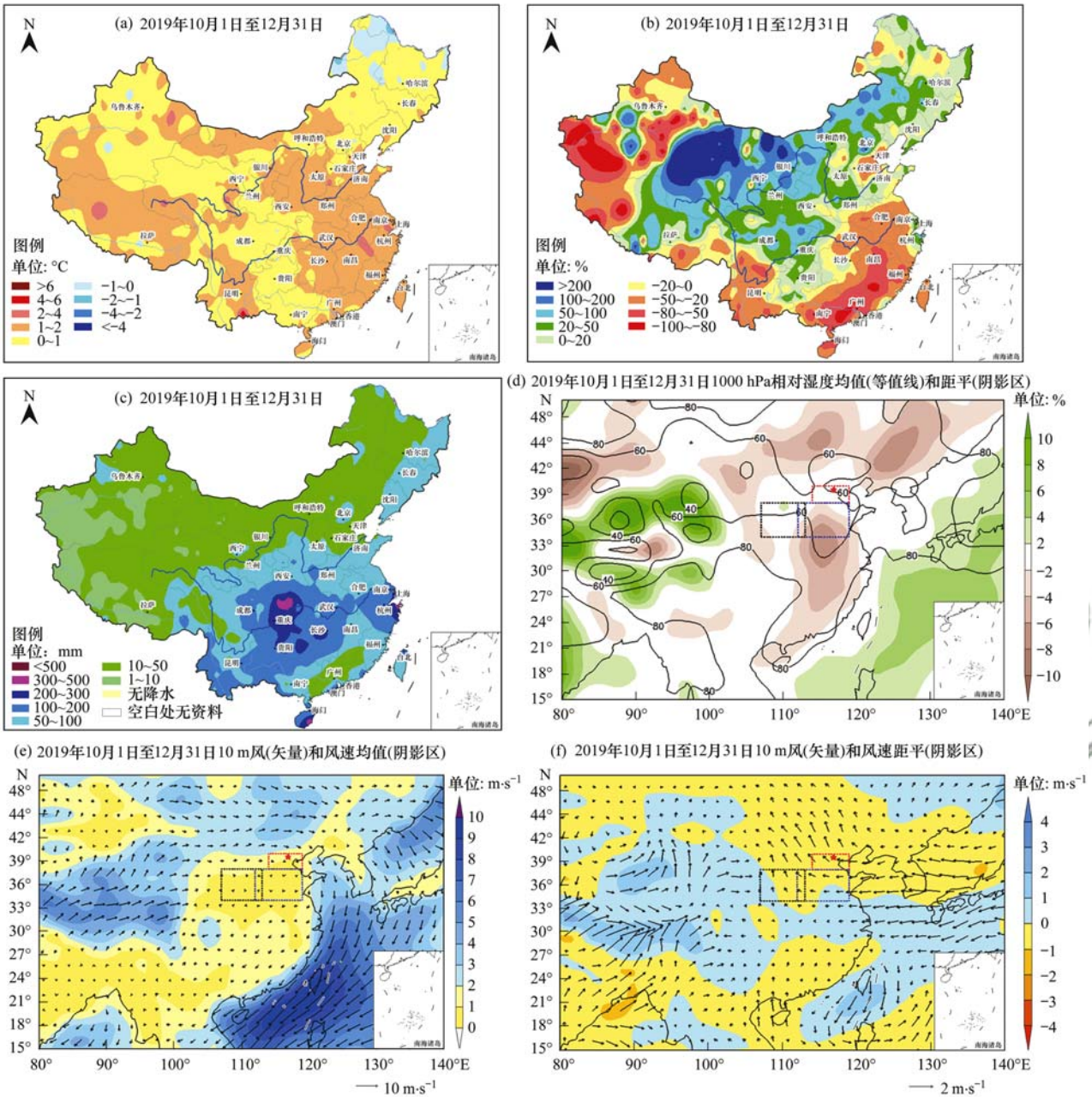
气象资料显示, 2019 年 10~12 月欧亚中高纬以纬向环流为主, 东亚槽偏弱, 大部地区以偏南风距平为主, 西伯利亚高压和东亚冬季风总体接近常年, 西太平洋副热带高压偏强. 京津冀及周边区域城市气温较往年同期偏高 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ [图 5(a)]; 降水量除区域中东部城市低于往年同期外, 大部分城市高于往年同期 [图 5(b)]; 北京及区域南部城市降水量总体比往年同期偏高 50% 以上 [图 5(c)]; 近地面北京及周边 (红色虚线) 和汾渭地区 (黑色虚线) 相对湿度与往年相近, 京津冀南部地区 (蓝色虚线) 低于往年同期 [图 5(d)]; 北京及周边和京津冀南部地区风向总体偏北, 汾渭地区以偏西为主, 区域近地面风力较小, 日均风速 $1 \sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [图 5(e)]; “2+26”城市日均风速 $\leq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的小风天数较多, 占比 70% 左右, 且大部分城市近地面为偏东南方向距平, 平均风速略低于往年同期 [图 5(f)].

EMI 指数表示在假设不同年度相同月份间排放率不变的条件下, 气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的贡献, 值越大表征气象条件越不利于近地面大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 稀释与扩散. EMI 指数表明, 2019 年“2+26”城市 10 月气象条件较去年同期变差 26%, 2019 年 11 月和 12 月较同期改善 7%~10%. 2019 年 10~12 月与 2018 年同期“2+26”城市 EMI 值见图 6. 不同城市 EMI 变化值范围为 $-15.6\% \sim 16.8\%$, 气象条件比去年同期变差的有 12 个, 主要分布在北京、天津、河北省和山东省, 城市分别为北京 (变差程度 16.8%)、天津 (6.9%)、石家庄 (3.3%)、唐山 (5.6%)、保定 (3.2%)、沧州 (4.2%)、廊坊 (4.1%)、太原 (5.2%)、济南 (6.5%)、德州 (9.5%)、聊城 (4.0%) 和滨州 (5.8%).

2.3 模式预报效果评估

WRF 气象模式在京津冀及周边区域预测与观测数据对比分析结果表明: 气象模式可以较好地捕捉到研究区域气象条件的主要特征, 风速、气温、相对湿度、降水量预报值与观测值的相关系数 (R) 平均分别为 0.95、1.00、0.94 和 0.88; 平均偏差 (MB) 平均分别为 $-0.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 -0.64°C 、 -7.37% 和 $0.28 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$; 均方根误差 (RMSE) 平均分别为 $1.29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 1.12°C 、9.11% 和 $2.69 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ [37].

2019 年 10~12 月期间 NAQPMS 模式对京津冀及周边区域典型城市 AQI 指数的基准预报效果见



(a) 全国平均气温距平; (b) 全国平均降水量距平; (c) 全国降水量分布; (d) 1 000 hPa相对湿度; (e) 10 m 风速均值; (f) 10 m 风速距平

图 5 2019 年 10 ~ 12 月全国平均气温、降水量、相对湿度和风速水平

Fig. 5 Temperature, precipitation, relative humidity, and wind speed levels in China from Oct. to Dec. in 2019

图 7. 从中可知,模式可以较为准确地预测出北京 [图 7(a)]、邯郸 [图 7(b)] 和安阳 [图 7(c)] AQI 上升和下降的趋势. 以 2019 年 12 月 7 ~ 11 日重污染过程为例 (图 7 红色虚线框时段),模式可以提前 6 d 较为准确地预测出 3 个城市污染累积和清除的过程,经预报员客观订正及会商研判后的预报结果准确率进一步提高,可以有效支撑重污染天气应急预案的启动和解除,为生态环境管理提供科学决策依据.

“2 + 26”城市提前 1 d (24 h)、提前 3 d (72 h) 和提前 6 d (144 h) PM_{2.5} 日均基准预报值与监测值统计分析结果见图 8. 从中可知,NAQPMS 模式“2 +

26”城市 24 h 基准预报 Pearson 相关系数 (双尾检验,显著性水平 0.05) 在 0.36 ~ 0.80 之间,平均值为 0.64. 尽管随着预报时效延长,相关系数总体呈减小趋势,但 144 h 预报的相关系数仍接近 0.50,反映模式能较好地预测出 PM_{2.5} 浓度的变化趋势 [图 8(a) ~ 8(c)].

24、72 和 144 h 模式预报与监测实况比较的 RMSE 值范围分别为 38 ~ 111、49 ~ 129 和 48 ~ 146 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图 8(d) ~ 8(f)],平均分别为 61、75 和 86 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,表明模式对京津冀区域的污染情况均有高估. MB 值范围分别为 30 ~ 90、29 ~ 103 和 29 ~ 115 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图 8(g) ~ 8(i)],平均值分别为 49、54 和

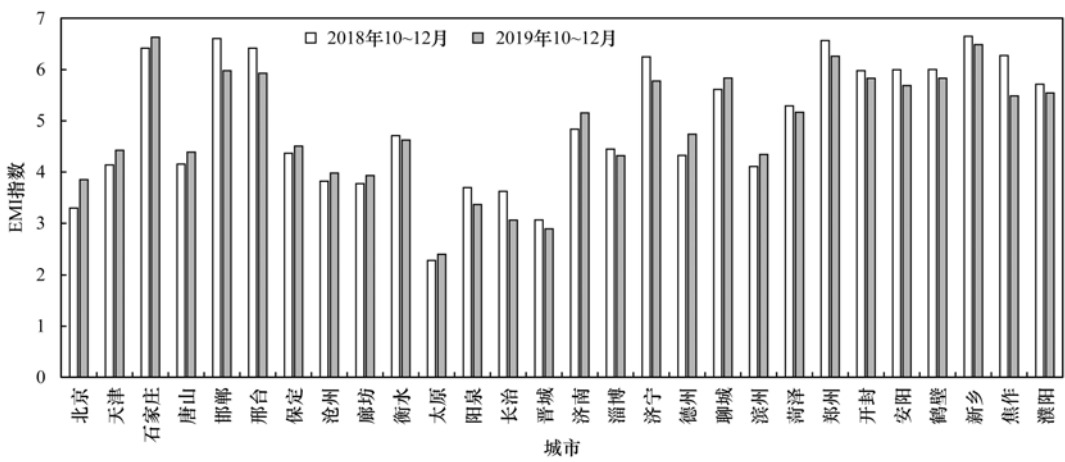


图 6 2018 年 10 ~ 12 月和 2019 年同期“2 + 26”城市 EMI 值

Fig. 6 EMI values of “2 + 26” cities from Oct. to Dec. in 2018 and 2019

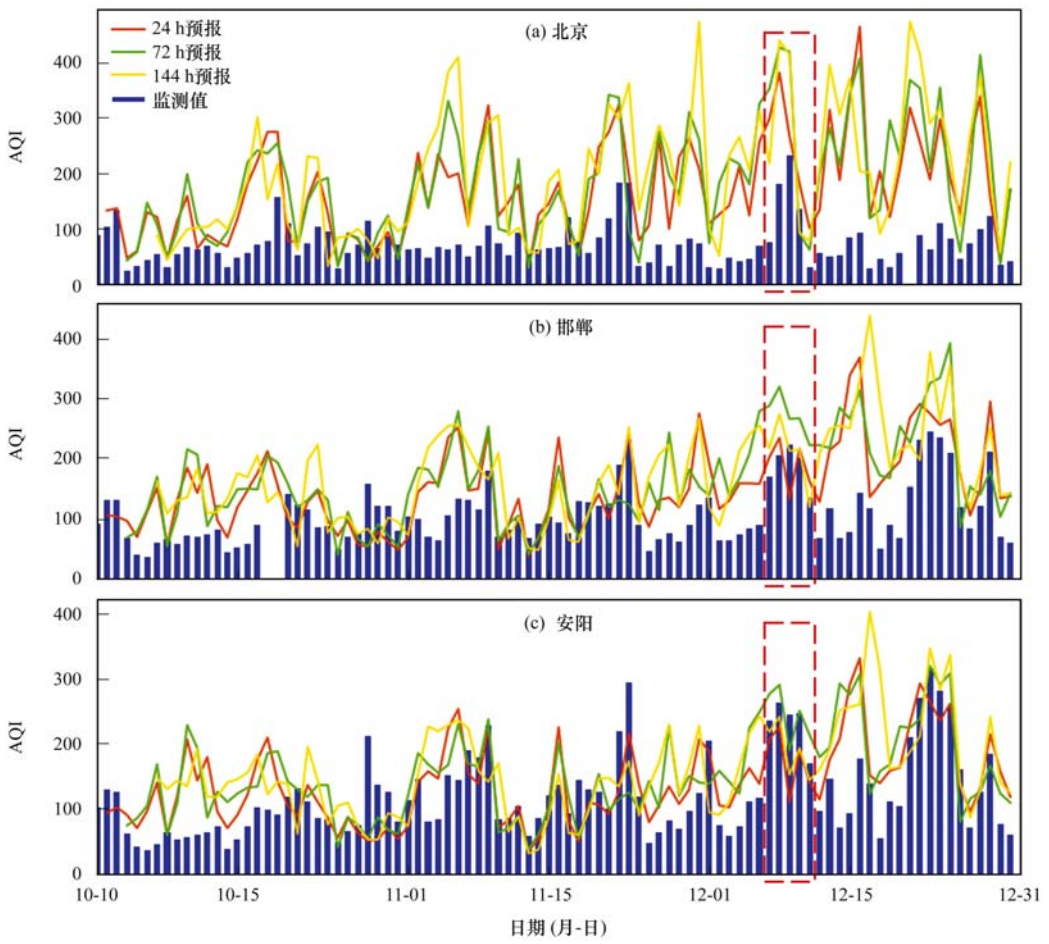


图 7 北京、邯郸和安阳 24、72、144 h 模式预报和监测实况 AQI 对比

Fig. 7 Comparison of AQI values between 24, 72, and 144 h NAQPMS model and measured data in Beijing, Handan, and Anyang

$60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. NMB 值范围分别为 24% ~ 213%、36% ~ 247% 和 37% ~ 269% [图 8(j) ~ 8(l)], 平均值分别为 72%、89% 和 98%, 表明模式 $\text{PM}_{2.5}$ 预报值与实际监测值趋势总体一致.

2.4 减排效果评估

2.4.1 预警启动情况

2019 年 10 ~ 12 月期间, 中国环境监测总站发

布 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程提示 9 次, 为应对秋冬季重污染天气, 京津冀及周边城市根据空气质量预报联合会商结果, 启动了相应级别的重污染天气预警. 各城市重污染预警启动累计天数情况见图 9. “2 + 26”城市均启动过橙色预警, 其中 22 个城市启动过黄色预警, 15 个城市启动过红色预警, 河南省北部城市预警天数达 60 d 以上.

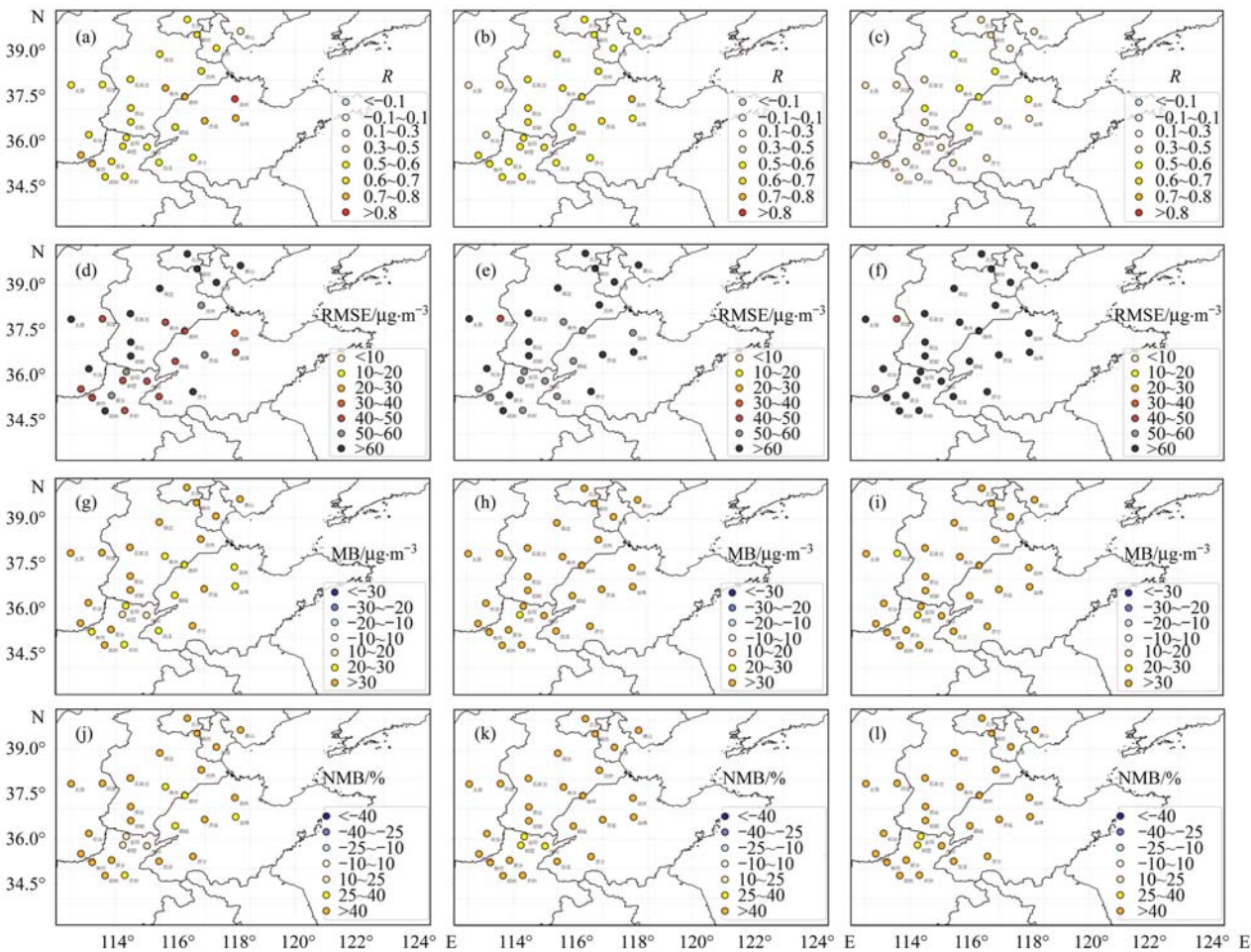


图 8 “2+26”城市 24、72 和 144 h $\text{PM}_{2.5}$ 日均基准预报值与监测值统计分析结果
Fig. 8 Evaluation of 24 h, 72 h, and 144 h air quality forecasting results of “2+26” cities

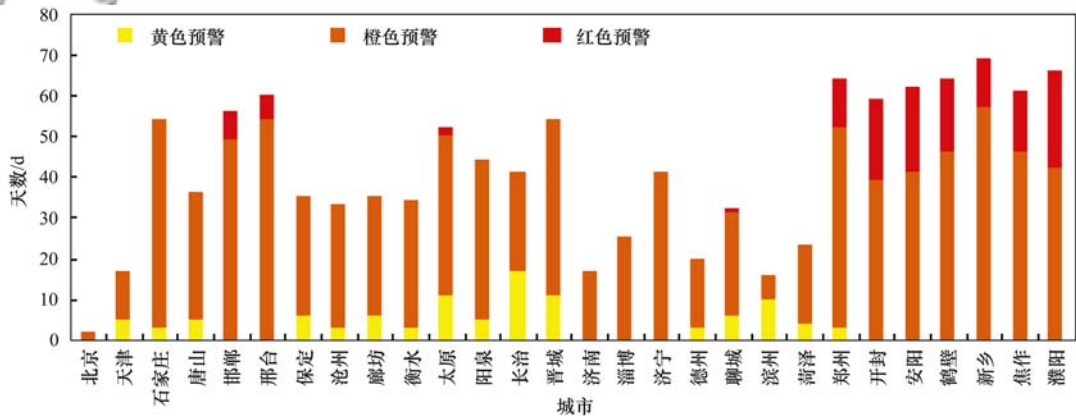


图 9 2019 年 10 ~ 12 月“2+26”城市重污染天气预警启动情况
Fig. 9 Initiation of heavy air pollution alert in “2+26” cities from Oct. to Dec. in 2019

2.4.2 区域性重污染过程减少

重污染过程基准模式预报和减排措施情景模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布见图 10, 从中可知, 重污染天气应急减排措施的实施, 可以有效减少污染物的浓度. 以 2019 年 10 月 17 ~ 24 日重污染过程为例, 模式预报和区域联合会商结果表明, 京津冀中南部扩散条件不利, 污染物积累可能导致区域中南部出现中度及以上污染过程, 沿山城市可能达到重度污染

水平 [图 10(a)]. 根据各地预警启动情况开展的减排措施情景模拟表明, 此期间重污染地区污染物浓度较模式预报结果有所降低 [图 10(b)], 使沿山城市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度削减率达到 2% ~ 6% 左右 [图 10(c)]. 监测实况表明仅石家庄在 10 月 19 日出现重度污染, 并在 10 月 21 日有效改善至轻度污染, 未形成区域性重污染过程. 2019 年 10 月 31 ~ 11 月 10 日重污染过程时段的基准预报 [图 10(d)]、减排措

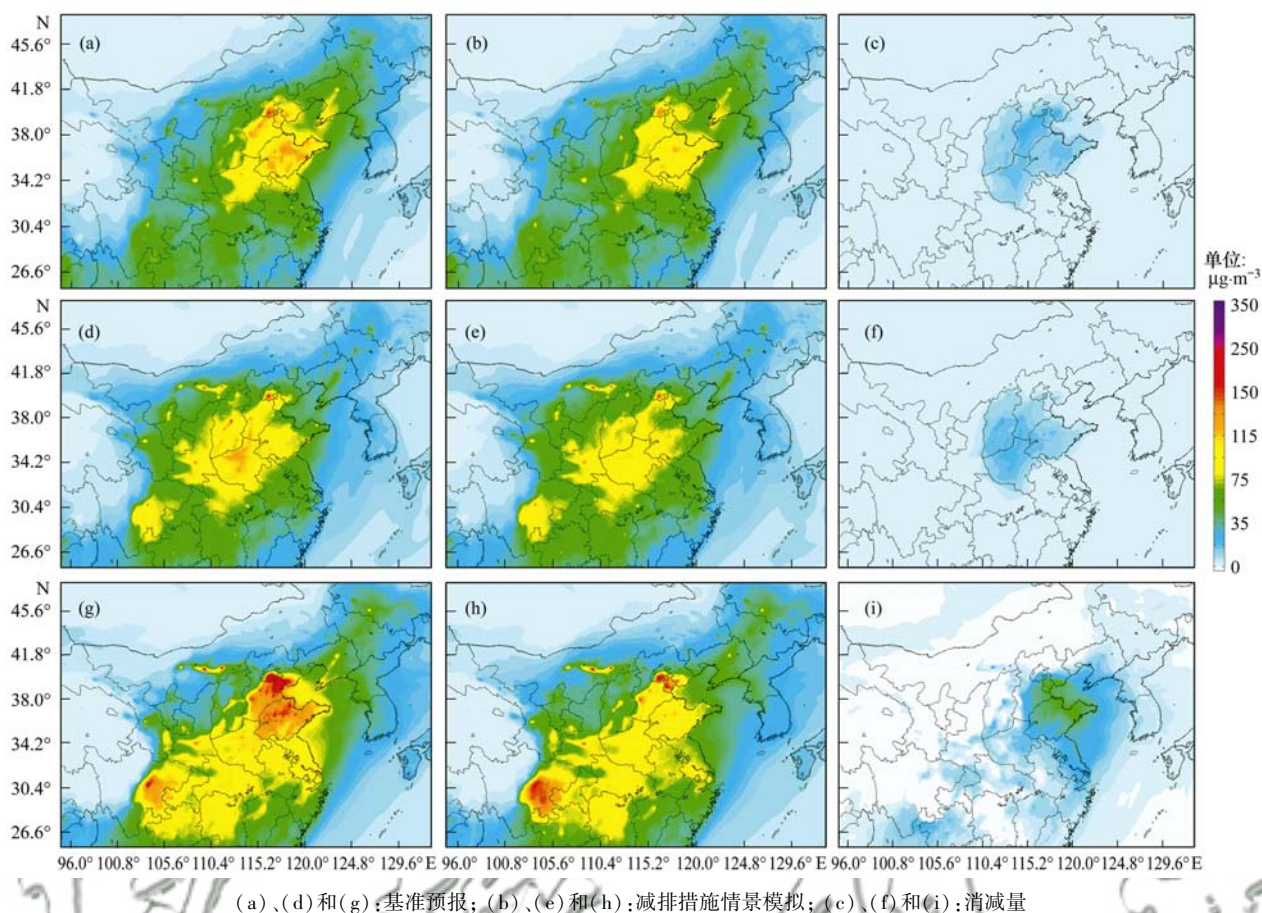


图 10 $PM_{2.5}$ 基准预报、减排措施情景模拟和消减量空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ basic forecasting, scenario simulation, and spatial distribution of reduction

施情景模拟 [图 10(e)]、浓度削减值 [图 10(f)] 以及 2019 年 12 月 6 ~ 11 日重污染过程模拟 [图 10(g) ~ 10(i)], 同样反映了 $PM_{2.5}$ 减排效果. 总体上, 相关城市根据预报结果启动应急预案的联防联控措施, 有效减少了区域性重污染过程的发生.

2.4.3 $PM_{2.5}$ 峰值浓度降幅明显

部分城市 $PM_{2.5}$ 小时浓度基准预报值与减排模拟值对比见图 11. 从中可知, 2019 年 12 月 21 ~ 25 日重污染过程中 (图 11 红框虚线框时段) 污染程度最重的 24 日, 北京 [图 11(a)]、石家庄 [图 11(b)]、保定 [图 11(c)] 和郑州 [图 11(d)] 等典型城市 $PM_{2.5}$ 浓度峰值均有所降低, 预警减排起到了较明显的削峰作用, 促使北京、石家庄、保定和郑州 $PM_{2.5}$ 小时浓度峰值分别削减了 15、9、11 和 6 $\mu g \cdot m^{-3}$. 整个污染过程持续时长缩短, 未形成区域性严重污染过程.

2.4.4 $PM_{2.5}$ 季度均值降低

2019 年 11 月 7 ~ 9 日、12 月 7 ~ 11 日和 12 月 21 ~ 25 日等重污染过程期间, 北京、石家庄、保定和唐山等城市 $PM_{2.5}$ 日均浓度分别约降低 9%、2%、4% 和 8%. 2019 年 10 ~ 12 月“2 + 26”城市 $PM_{2.5}$ 预

报浓度季度均值与减排模拟值对比见图 12. 从中可知, 重污染过程期间应急减排措施的执行, 使“2 + 26”城市 $PM_{2.5}$ 季度浓度均值分别降低约 1 ~ 3 $\mu g \cdot m^{-3}$.

2.5 不确定性分析

此次评估采用空气质量模式情景模拟方法, 通过对基准预报、减排情景模拟预报与环境质量监测实况对比的方法, 分析了京津冀及周边“2 + 26”城市的减排措施效果, 可能与个别城市实际预警启动情况存在几小时偏差. 模式基本上能够预测到污染过程的时空演变以及管控措施采取后空气质量的改善, 但对不同城市不同污染阶段预报效果略有偏差, 主要原因包括气象模式、大气化学反应机制和排放清单等存在的不确定性^[8].

模式所采用的 WRF 边界层模拟有偏差, 在气象模拟上经常出现前后半天左右的偏差, 在空间上出现 1 ~ 2 个经纬度的偏差. 局地较小扰动的理化反应机制还不十分明晰, 区域空气质量模式对小尺度、精细化预报准确度有待提高. 近几年环保督察、检查工作的持续开展, 促进产业结构调整, 严控工业企业生产排放, 使京津冀及周边区域排放源有较大幅度

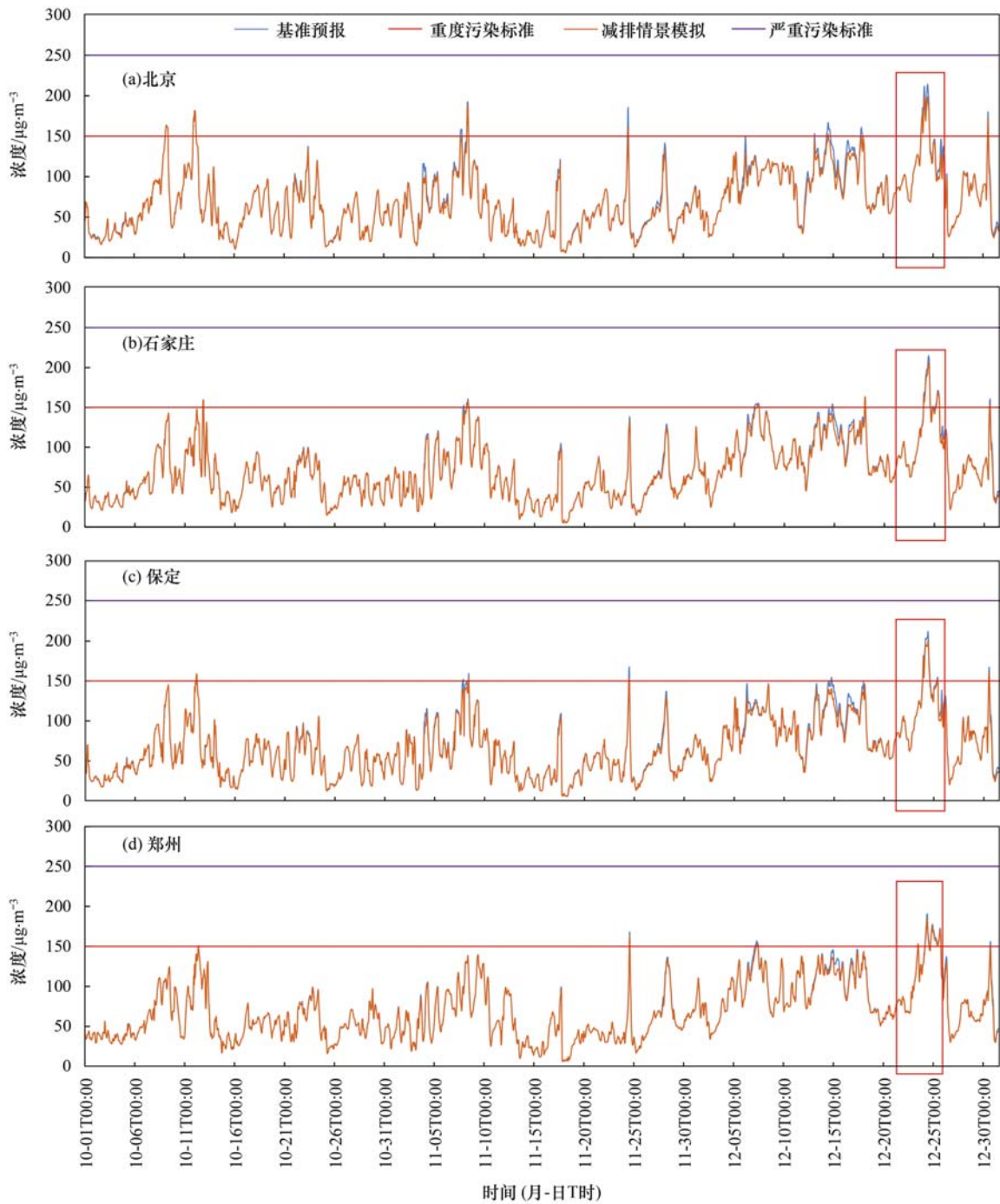


图 11 北京、石家庄、保定和郑州 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度基准预报值与减排模拟值比较

Fig. 11 Comparison of hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentration between basic simulation and scenario simulation in Beijing, Shijiazhuang, Baoding, and Zhengzhou

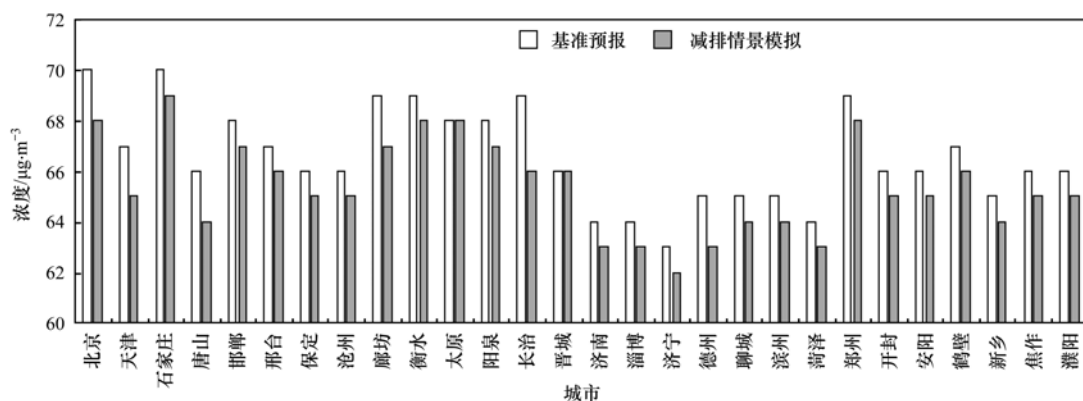
地减少,模式所采用的 2016 年排放源清单对排放量有高估.此外,排放源清单中污染物排放日变化特征缺乏或不准确,可能导致小时浓度预报存在偏差.

3 结论

(1)2019 年 10 ~ 12 月期间,京津冀及周边区域“2 + 26”城市高空受纬向环流控制,天气形势较为稳定,近地面平均风速总体低于往年同期,中北部城市相对湿度高于往年同期.“2 + 26”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 气象

条件评估指数 (EMI) 变化值范围为 $-15.6\% \sim 16.8\%$,EMI 变化显示北京、天津、石家庄、唐山、保定等 12 个城市气象条件比去年同期变差,变差程度范围为 $3.2\% \sim 16.8\%$.

(2)2019 年 10 ~ 12 月,“2 + 26”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度 $64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,同比降低 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,重污染过程期间受影响城市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度 $156 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 4 次区域性大范围重污染过程期间,长治和阳泉等 12 个城市总体影响较小,中度及以上污染天数不到 50%,安阳

图 12 “2+26”城市 $\text{PM}_{2.5}$ 预报浓度季度均值与减排模拟值对比Fig. 12 Comparison of average $\text{PM}_{2.5}$ concentrations between basic forecasting and scenario simulation in “2+26” cities

和鹤壁等城市影响较大,污染天数比例高于 75%。 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度聚类分析结果表明“2+26”城市可大致分为 6 类,尽管各城市污染源排放种类和强度、地形地貌、局地小尺度气象均不相同,但重污染过程期间,地域城市群内还是体现出相同的污染趋势。

(3) NAQPMS 模式可以较为准确地预测出 AQI 上升和下降的趋势,提前 1 d (24 h)、提前 3 d (72 h) 和提前 6 d (144 h) $\text{PM}_{2.5}$ 日均预报值(基准预报)与监测值相关性均较好,可以提前 6 d 较为准确地预测出污染物的累积和清除过程,预报员人工订正及会商研判后的预报准确率进一步提高,可为精细化生态环境管理提供科学决策参考。

(4) “2+26”城市联防联控有效减少了区域性重污染过程的发生,未出现严重污染过程,促使城市 $\text{PM}_{2.5}$ 季度均值降低 $1 \sim 3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右;有效削减了重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值,促使北京、石家庄、保定和郑州等典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度峰值分别削减 15、9、11 和 $6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,重污染期间日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅 2%~9%。

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所陈焕盛博士,中科三清科技有限公司张稳定和王嘉禾工程师对本研究的支持。中国气象局气候中心袁媛研究员在气候数据与资料、中国气象局气象中心桂海林高级工程师在气象数据与资料方面提供了指导与帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 胡京南,柴发合,段菁春,等. 京津冀及周边地区秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 爆发式增长成因与应急管控对策[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1704-1712.
Hu J N, Chai F H, Duan J C, et al. Explosive growth of $\text{PM}_{2.5}$ during the autumn and winter seasons in the Jing-Jin-Ji and surrounding area and its control measures with emergency response[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1704-1712.
- [2] 徐冉,张恒德,杨孝文,等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, et al. Concentration

characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3405-3414.

- [3] 张莹,贾旭伟,杨旭,等. 中国典型代表城市空气污染特征及其与气象参数的关系[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(2): 70-79.
Zhang Y, Jia X W, Yang X, et al. Characteristics of air pollution and its relationship with meteorological parameters in typical representative cities of China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2017, 33(2): 70-79.
- [4] Bei N F, Zhao L N, Wu J R, et al. Impacts of sea-land and mountain-valley circulations on the air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH): A case study [J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 429-438.
- [5] Ge B F, Wang Z F, Lin W L, et al. Air pollution over the North China Plain and its implication of regional transport: A new sight from the observed evidences [J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 29-38.
- [6] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, et al. Severe haze in Northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(18): 8657-8666.
- [7] 朱媛媛,高愈霄,刘冰,等. 京津冀秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染概况和预报结果评估[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5191-5201.
Zhu Y Y, Gao Y X, Liu B, et al. Concentration characteristics and assessment of model-predicted results of $\text{PM}_{2.5}$ in the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5191-5201.
- [8] 朱媛媛,高愈霄,柴文轩,等. 京津冀及周边区域 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 574-586.
Zhu Y Y, Gao Y X, Chai W X, et al. Heavy pollution characteristics and assessment of $\text{PM}_{2.5}$ predicted model results in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding areas during November 23 to December 4, 2018 [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 574-586.
- [9] 肖致美,徐虹,李鹏,等. 京津冀区域重污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直分布及输送[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4303-4309.
Xiao Z M, Xu H, Li P, et al. Vertical distribution and transport of $\text{PM}_{2.5}$ during heavy pollution events in the Jing-Jin-Ji Region [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4303-4309.
- [10] 王晓琦,郎建垒,程水源,等. 京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, 36(11): 3211-3217.
Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, et al. Study on transportation of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area [J]. China Environmental Science, 2016, 36(11): 3211-

- 3217.
- [11] 中华人民共和国生态环境部办公厅. 关于加强重污染天气应对夯实应急减排措施的指导意见(环办大气函[2019] 648号)[R]. 北京:生态环境部, 2019.
- [12] 何伟, 张文杰, 王淑兰, 等. 京津冀地区大气污染联防联控机制实施效果及完善建议[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1696-1703.
- He W, Zhang W J, Wang S L, *et al.* Effects and improvement suggestions on air pollution joint prevention and control mechanism in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1696-1703.
- [13] 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.
- [14] Han X K, Guo Q J, Liu C Q, *et al.* Effect of the pollution control measures on PM_{2.5} during the 2015 China Victory Day Parade: implication from water-soluble ions and sulfur isotope [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 230-241.
- [15] Zhou X M, Tan J H, Qin J J, *et al.* Impact of emissions controls on ambient carbonyls during the Asia-Pacific Economic Cooperation summit in Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(12): 11875-11887.
- [16] Tong P F, Zhang Q R, Lin H M, *et al.* Simulation of the impact of the emergency control measures on the reduction of air pollutants: a case study of APEC blue [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(2): 116.
- [17] 赵辉, 郑有飞, 徐静馨, 等. 大阅兵期间北京市大气质量改善效果评估[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 2881-2889.
- Zhao H, Zheng Y F, Xu J X, *et al.* Evaluation of the improvement of the air quality during the parade in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 2881-2889.
- [18] 王浩, 李轶, 高健, 等. APEC会议期间石家庄市大气污染特征及空气质量保障措施效果评估[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(2): 164-174.
- Wang H, Li Y, Gao J, *et al.* Characteristics of air pollution and evaluation of the effects of air quality assurance measures in Shijiazhuang city during the 2014 APEC meeting [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(2): 164-174.
- [19] 徐峻, 杜晓惠, 马圣冉, 等. 重污染应急控制措施效果的快速评估方法[J]. 环境工程, 2018, **36**(4): 165-169.
- Xu J, Du X H, Ma S R, *et al.* Quick assessment method of effects of countermeasures in response to severe air pollution [J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(4): 165-169.
- [20] Zhao H, Zheng Y F, Li T. Air quality and control measures evaluation during the 2014 Youth Olympic Games in Nanjing and its surrounding cities [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(6): 100.
- [21] Li P F, Wang L Q, Guo P, *et al.* High reduction of ozone and particulate matter during the 2016 G-20 summit in Hangzhou by forced emission controls of industry and traffic [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2017, **15**(4): 709-715.
- [22] 毛敏娟, 胡德云. 杭州 G20 峰会空气污染控制状况评估[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(12): 1822-1831.
- Mao M J, Hu D Y. Evaluation of the air pollution control over Zhejiang province during the G20 summit in Hangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(12): 1822-1831.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 翟世贤, 安兴琴, 刘俊, 等. 不同时刻污染减排对北京市 PM_{2.5} 浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1369-1379.
- Zhai S X, An X Q, Liu J, *et al.* Effects of emission-sources reduction at different time points on PM_{2.5} concentration over Beijing Municipality [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1369-1379.
- [26] 王凌慧, 曾凡刚, 向伟玲, 等. 空气重污染应急措施对北京市 PM_{2.5} 的削减效果评估[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2546-2553.
- Wang L H, Zeng F G, Xiang W L, *et al.* A model evaluation of the effect of implementing heavy air pollution emergency plan to PM_{2.5} reduction in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2546-2553.
- [27] 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.
- Ly 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.
- [28] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 197-209.
- [29] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 867-875.
- Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of PM_{2.5} pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 867-875.
- [30] Zhao B, Wang S X, Wang J D, *et al.* Impact of national NO_x and SO₂ control policies on particulate matter pollution in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 453-463.
- [31] Wang J D, Zhao B, Wang S X, *et al.* Particulate matter pollution over China and the effects of control policies [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 426-447.
- [32] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].
- HJ 633-2012, Technical regulation on ambient air quality index (on trial) [S].
- [33] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- GB 3095-2012, Ambient air quality standard [S].
- [34] HJ 663-2013, 环境空气质量评价技术规范(试行)[S].
- HJ 663-2013, Technical regulation for ambient air quality assessment (on trial) [S].
- [35] QX/T 479-2019, PM_{2.5} 气象条件评估指数(EMI)[S].
- QX/T 479-2019, Evaluation on meteorological condition index of PM_{2.5} pollution [S].
- [36] 张冲, 郎建垒, 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.
- [37] Kong L, Tang X, Zhu J, *et al.* Improved inversion of monthly ammonia emissions in China based on the Chinese ammonia monitoring network and ensemble Kalman filter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(21): 12529-12538.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)