

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.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

京津冀秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染概况和预报结果评估

朱媛媛^{1,2}, 高愈霄^{1,2*}, 刘冰¹, 王晓彦¹, 朱莉莉¹, 许荣¹, 汪巍¹, 丁俊男¹, 李健军¹, 段小丽²

(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: 对京津冀区域 2013 年 9 月至 2018 年 2 月连续 5 个秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征和气象影响因素, 2015 年 10 月至 2018 年 2 月连续 3 个秋冬季以及典型污染过程时 NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 这 3 个模式 $\text{PM}_{2.5}$ 的预报结果进行了分析评估, 对模式预报的不确定性和改进措施进行了探讨。结果表明, 5 个秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 区域均值浓度分别为 122、98、82、99 和 65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 污染过程(中度及以上污染过程)期间浓度分别为 229、198、210、204 和 180 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。5 个秋冬季累计发生 64 次 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的区域污染过程, 2013~2014 年秋冬季污染过程平均持续时间最长, 2017~2018 年持续时长最短。除 2016~2017 年外, 其他年份 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值和均值逐年降低, 区域总体污染形势减轻。秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度、风速和日照时数相关性相对较好, 与温度和气压的相关性整体较弱。当风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、大气相对湿度 65% 以上、主导风向为西南和东北风时, 容易出现区域中度及以上污染过程。此外, 3 个模式均能够预测出京津冀区域秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染过程, 预报值与监测值体现了较好地相关性。3 个模式对张家口、承德和秦皇岛的预报结果较好, 对唐山、石家庄、保定、北京和天津等城市预报偏高, 这与污染源清单、气象初始场和气象预报、以及大气化学反应机制的不确定性有一定关系。

关键词: 京津冀; $\text{PM}_{2.5}$; 空气质量; 预报; 评估

中图分类号: X513; X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5191-11 DOI: 10.13227/j. hjkx. 201905007

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of $\text{PM}_{2.5}$ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter

ZHU Yuan-yuan^{1,2}, GAO Yu-xiao^{1,2*}, LIU Bing¹, WANG Xiao-yan¹, ZHU Li-li¹, XU Rong¹, WANG Wei¹, DING Jun-nan¹, LI Jian-jun¹, DUAN Xiao-li²

(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: This paper discusses the concentration characteristics of $\text{PM}_{2.5}$, as well as its relationship with meteorological factors in autumn and winter (from September to the following February), from 2013 to 2018 in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region. The accuracy and uncertainty of the air quality forecast models NAQPMS (nested air quality prediction modeling system), CMAQ (community multiscale air quality modeling system), and CAMx (comprehensive air quality model with extensions) were analyzed based on the model-predicted and measured $\text{PM}_{2.5}$ concentration in autumn and winter from 2015 to 2018. The accuracy of NAQPMS, CMAQ, and CAMx during typical heavy air pollution was also tested. Moreover, methods to improve the accuracy of the model forecast were discussed. The results showed that the mean concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in the BTH region were 122, 98, 82, 99, and 65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in the five autumn and winter periods, respectively. When the air quality index (AQI) exceeded 150 during each autumn and winter, it reached 229, 198, 210, 204, and 180 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. There were 64 occurrences of heavy regional $\text{PM}_{2.5}$ air pollution in autumn and winter from 2013 to 2018. The average duration was longest in the 2013 to 2014 period, and shortest in the 2017 to 2018 period. The peak concentration and average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ decreased year on year, except for the period from 2016 to 2017. In autumn and winter, $\text{PM}_{2.5}$ concentration had a relatively close relationship with relative humidity, wind and sunshine duration, compared with a weak relationship with temperature and air pressure. Regional heavy air pollution always happened under the condition of low wind speed (less than $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), higher relative humidity (greater than 65%), and southwest and northeast wind direction. In addition, the heavy air pollution of $\text{PM}_{2.5}$ in BTH in autumn and winter can be effectively forecasted by NAQPMS, CMAQ, and CAMx. The predicted and measured $\text{PM}_{2.5}$ concentration showed a close relationship. The models performed well in forecasting Zhangjiakou, Chengde, and Qinhuangdao, but by contrast overestimated in Tangshan, Shijiazhuang, Baoding, Beijing, and Tianjin. The uncertainty of emission sources, measured and predicted meteorological data, and the atmospheric chemical reaction mechanism may be the main reasons for the overestimate.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; $\text{PM}_{2.5}$; air quality; forecast; assessment

秋冬季节, 我国京津冀地区频繁出现以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的长时间、大范围重污染过程。重污染来临之前, 各级人民政府和生态环境主管部门会根据环境空气质量预报的结果, 启动相应的重污染应急预案, 通过限停产、限行等管控措施, 削减大气污

染物排放, 降低污染物浓度, 缩短重污染过程持续时

收稿日期: 2019-05-03; 修订日期: 2019-07-22

基金项目: 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@cnemc.cn

* 通信作者, E-mail: gaoyx@cnemc.cn

间,降低污染物峰值浓度,从而达到改善环境空气质量,保护人民群众身体健康的目的. 自 2013 年以来,京津冀及周边区域空气质量预报,为辖区各级政府预警应急和管控措施提供了关键信息和决策依据,同时也为重大活动提供了有效地空气质量保障服务^[1].

通常,环境空气质量预报工作是在业务化的预报结果基础上,根据预报的一般方法和基本原则^[2],由预报员综合分析空气质量实况、污染物排放情况、气象影响因素等,并结合对比方法^[3]比较历史同期或相似气象条件下空气质量状况,与气象预报部门和相关区域、省、市级环境空气质量预报部门进行联合会商,最终发布人工客观订正后的预报结果. 因此,掌握历史同期污染特征,分析预报主要影响因素,回顾模式预报效果,对提高区域及城市预报准确率具有非常重要的现实意义.

近年来,伴随环境空气质量预报在全国范围内的开展,不少研究围绕预报方法^[2~5]、空气质量数值模式建立与改进^[4,5]、预报业务体系建设^[6]、预报平台系统建设^[7,8]等方面展开,也有不少研究针对一段时期内 $\text{PM}_{2.5}$ 变化趋势^[9,10],重污染过程的影响因素^[11,12]、气象条件^[13,14]、天气分型^[15~17]等方面进行了分析,但针对京津冀区域秋冬季节 $\text{PM}_{2.5}$ 污染开展的、兼顾污染特征、主要气象影响因素、模式预报结果评估和不确定性分析的综合研究还鲜见报道.

为此,通过分析 2013 年 9 月至 2018 年 2 月连续 5 个秋冬季(9 月 1 日至次年 2 月底)京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征,分析气象影响因素与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系,评估空气质量模式预报效果,讨论预报不确定性的原因与改进方法,通过提高区域及城市预报准确率,不断提升环境质量预报对重污染应急管控和区域污染联防联控等环境管理的技术支撑水平,促进环境空气质量改善,以期打赢污染防治攻坚战做出积极作用.

1 材料与方法

1.1 模式与设置

基于全国空气质量预报预警系统,采用中国科学院大气物理研究所研发的 NAQPMS (nested air quality prediction modeling system) 模式、美国环保署 CMAQ (community multiscale air quality) 模式和美国 Environ 公司开发的 CAMx (comprehensive air-quality model with extensions) 模式进行数值模拟. NAQPMS 模式^[18~20] 基于三维欧拉化学输送模式,考虑了气溶胶及其前体物在大气中的平流与对流、湍流扩散和

干湿沉降等物理过程,气相化学、液相化学和气溶胶非均相化学等化学过程,从而实现多种污染物的模拟;此外,还可模拟沙尘输送^[21]、酸雨和污染物跨界输送等. CMAQ 模式^[22,23] 是基于“一个大气”的理念,考虑大气中多物种、多相态污染物及其相互影响的第三代空气质量模式,涵盖化学输送平流、气象化学、烟羽处理和干湿沉降等过程,包含气溶胶模块,可计算气溶胶转化,提供多种气象化学机制选项. CAMx 模式^[24,25] 是三维欧拉型空气质量模式,可进行光化学烟雾和细颗粒物大气污染综合模拟,融入了双向嵌套、次网格和快速化学数值解法等技术,具有抽样识别、颗粒物识别和过程分析技术. 上述 3 种模式均广泛应用于区域和城市等多尺度空气质量预报.

3 个模式均采用三层嵌套网格,覆盖东亚、中国中东部和京津冀区域,水平网格分别为 $45\text{ km} \times 45\text{ km}$ 、 $15\text{ km} \times 15\text{ km}$ 和 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$,采用 Lambert 投影方式,模式中心经纬度为 115°E , 25°N . 垂直方向采用 Sigma-Z 地形追随坐标系,不均匀地划分为 20 层,模式层顶海拔高度为 20 km,近地层中心高度约 47 m,其中 2 km 以下 8 层. 采用清华大学空气质量模式网格化全国污染源清单 MEIC (multi-resolution emission inventory for China),精度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,基准年分别为 2013 年(2013 年预报)、2014 年(2014 年和 2015 年预报)和 2016 年(2016~2018 年预报). 3 个模式区域大小设置、网格数和分辨率相同,均由 WRF 气象模式提供输入气象场,其区域设置与化学传输模式相同. 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) 全球气象预报资料. 业务预报采用准实时同化,对全国城市空气质量国控网所有站点的 6 项常规污染物 ($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO) 观测数据进行协同同化. 3 个模式 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预报时效均为 168 h.

1.2 数据来源

本研究时间段为 2013 年 9 月至 2018 年 2 月连续 5 个秋冬季(9 月 1 日至次年 2 月 28~29 日). $\text{PM}_{2.5}$ 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日均审核数据. 数据有效性满足文献^[26,27]的要求. 气象数据采用国家气象信息中心城市地面气候日值数据资料,包括气压、气温、降水量、相对湿度、风向风速、日照时数等. 数据处理与统计分析采用 Excel、Origin 2018 和 SPSS 19. 京津冀区域 13 个地级及以上城市包括:北京、天津、石家庄、张家口、承德、秦皇岛、

廊坊、唐山、保定、沧州、衡水、邢台和邯郸。

1.3 评价方法

PM_{2.5}浓度根据文献[22,28]进行评价。京津冀13个城市中,有3个及以上城市连续3d(含)出现PM_{2.5}分指数为中度及以上,定义为“中度及以上污染过程”(区域污染过程)。至少3个城市PM_{2.5}日均浓度大于115 μg·m⁻³(PM_{2.5}分指数达到中度及以

上)的第一天为区域污染过程的起始时间,绝大多数城市空气质量好转为该次污染过程结束时间。起始时间与结束时间之间的天数为持续时长。

PM_{2.5}数值预报结果采用相关系数(*R*)、平均偏差(MB)、均方根误差(RMSE)和标准化平均偏差(NMB)等模式研究领域较为常用的统计指标进行评估,计算方法见表1。

表1 预报结果评价方法¹⁾

Table 1 Assessment index of forecasting result

指标	计算方法	编号
相关系数 correlation coefficient (<i>R</i>)	$\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$	(1)
平均偏差 mean bias (MB)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)$	(2)
均方根误差 root mean square error(RMSE)	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}$	(3)
标准化平均偏差 normalized mean bias (NMB)	$\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100\%$	(4)

1)公式(1)~(4)中,*N*表示全部统计天数,*M_i*表示第*i*天的预报值, $\bar{M}$ 表示预报结果平均值,*O_i*表示第*i*天的观测结果, $\bar{O}$ 表示监测结果平均值;公式(1)中,*R*反映了预报值与监测值变化趋势的相似程度,*R*>0表示预报值与监测值正相关,*R*<0表示预报值与监测值负相关;公式(2)~(4)中,MB、RMSE和NMB等指标反映模式预报值和监测值的偏差水平,当预报值与监测浓度差异较小时,一般主要参考MB和RMSE指标;当预报值与实测浓度差异较大时,可参考NMB等指标。^[29]

2 结果与讨论

2.1 秋冬季 PM_{2.5}污染特征与分析

2013年9月至2018年2月连续5个秋冬季,京津冀区域13城市PM_{2.5}平均浓度分别为122、98、82、99和65 μg·m⁻³。如图1所示,除2016~2017年秋冬季以外,其他年份PM_{2.5}浓度平均值和中位数均呈下降趋势,浓度跨度收窄,浓度峰值逐步降低,区域总体污染形势减轻。PM_{2.5}空气质量分指数日数分布如图2所示,除2016~2017年秋冬季以外,其他年份秋冬季PM_{2.5}分指数优良级别日数比例逐步升高,优良率由2013~2014年的40%逐步提高至2017~2018年的70%左右,重度及以上污染级别日数由30%左右降低至6%,中度及以上污染级别日数显著减少,空气质量得到一定程度改善。

从污染空间分析,位于区域北部的张家口、承德和秦皇岛经历中度及以上污染过程日数最少。连续5个秋冬季,北京、天津、廊坊、唐山和沧州等区域中东部城市平均超过190d处于中度及以上污染过程中。区域中南部的衡水、邯郸、保定、石家庄和邢台污染最重,单个城市5 a累计平均290 d处于

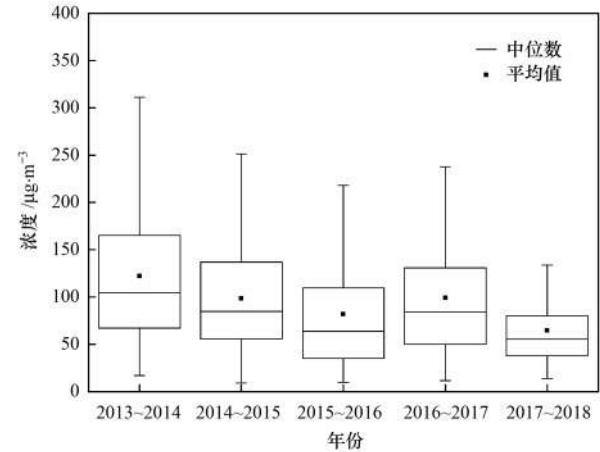


图1 京津冀秋冬季 PM_{2.5}浓度箱型图

Fig. 1 Box plots of Mass concentration of PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter

中度及以上污染过程。13城市PM_{2.5}浓度聚类分析结果表明:京津冀区域可划分为北部较清洁带(张家口、承德和秦皇岛)、中东部环渤海污染带(北京、天津、唐山和沧州)和中南部污染带(石家庄、邢台、邯郸、衡水和保定)。京津冀区域污染呈现“南高北低”的特点,即与区域污染源排放空间分布有关,同时也与地理条件和地形条件^[30]有一定的关

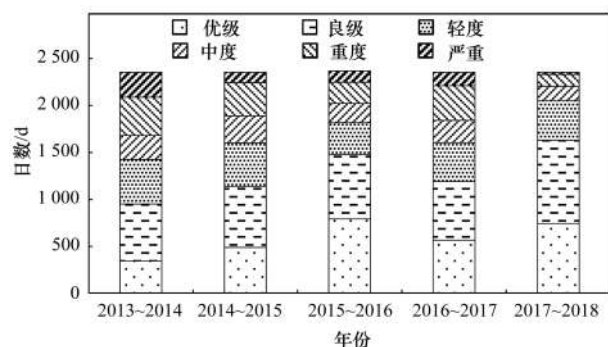


图2 京津冀秋冬季空气质量级别日数分布

Fig. 2 Variation of AQI in the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter

系。现有研究表明^[31],京津冀地区污染源主要集中在中南部地区,再加上京津冀复杂的山地、平原、城市和海陆地理环境,容易形成山谷风、城市热岛环流和海陆风,对区域污染物的传输、扩散和大气环境容量具有重要影响^[32,33],容易导致秋冬季区域中南部出现污染过程。此外,京津冀区域还处于青藏高原大地形“背风坡”,冬季容易受下卷气流和弱风效应影响,不利于大气对流、扩散及污染物清除^[34]。

如图3所示,5年来秋冬季区域污染过程(中度及以上污染过程)累计发生64次,分别为14、16、12、16和6次,过程期间区域 $PM_{2.5}$ 平均浓度分别为229、198、210、204和 $180 \mu g \cdot m^{-3}$ 。2013~2014年秋冬季单次污染过程平均持续时间最长,平均为7.4 d,浓度水平5年中最高;2017~2018年最短,平均为4.5 d,浓度水平5年中最低;其余3年平均污染过程持续时长为4.8~6 d。

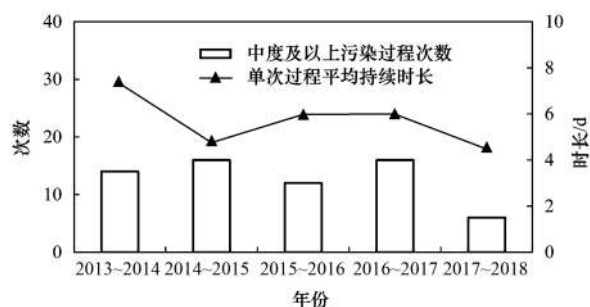


图3 京津冀秋冬季污染过程频次和持续时长

Fig. 3 Frequency and duration of heavy air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter

不同年份秋冬季空气质量总体状况不同,以及不同污染过程持续时间和影响范围的不同,不仅与污染物排放状况有关,还与气象和气候条件有关。总体来讲,自2010年我国采取清洁空气行动以来,截至2017年, $PM_{2.5}$ 人为源排放已减少35%^[35],但污染气象条件不利,大气对污染物的清除能力明显转差,尤其是2010年以来,整个区域大气重污染气

象条件平均发生次数和大气滞留条件发生次数为近40年最多,天气系统相对稳定,气流垂直和水平扩散能力弱^[36]。此外,北极海冰融化、青藏高原地形地貌和厄尔尼诺(ENSO)等因素^[37]也通过改变东亚冬季风及中高层西风环流等气候背景影响重污染过程发生。但在近年来强有力的大气污染治理作用下,京津冀区域污染形势自2013年以来明显缓解,空气质量总体向好。通过对影响我国的平均冷空气强度指数距平百分率^[37]对比发现,冷空气活动较弱的年份(2013年和2017年),大气扩散条件较差,秋冬季节污染会较其他年份相对严重,进一步说明空气质量受污染排放和气象因素的双重影响。

2.2 污染气象影响因素分析

京津冀污染情况与气象条件密切相关,因此分析 $PM_{2.5}$ 浓度与气象资料之间的关系,对预报员根据气象预报和气象观测数据,对空气质量模式预报结果进行客观订正具有非常重要的意义。京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度与气象观测数据的相关性分析结果表明: $PM_{2.5}$ 浓度与温度、24 h变温、气压和24 h变压的Pearson相关系数(双尾检验,显著性水平0.05)分别为 $-0.338 \sim -0.015$ 、 $0.104 \sim 0.374$ 、 $-0.155 \sim 0.224$ 和 $-0.418 \sim -0.118$ 。与相对湿度和日照的Pearson相关系数(双尾检验,显著性水平0.01)为 $-0.202 \sim 0.568$ 和 $-0.511 \sim -0.346$ 。与降水和平均风速的Pearson相关系数(双尾检验,显著性水平0.05)在 $-0.173 \sim -0.081$ 和 $-0.423 \sim 0.039$ 之间。 $PM_{2.5}$ 与相对湿度、风速和日照时数存在一定关系,与温度和气压的相关性整体较弱,这与以往的研究结果^[38]基本一致。

连续5 a秋冬季 $PM_{2.5}$ 中度污染以下时的气象数据与中度及以上污染时的气象数据对比分析结果见表2。如表所示,当发生域污染过程时,24 h变温均为正值,范围 $0.20 \sim 0.65^\circ C$;24 h变压均为负值,范围 $-2.123 \sim -1.037$ hPa。平均气压 $1016.0 \sim 1019.0$ hPa高于空气质量较好(中度污染以下)阶段的 $1004.0 \sim 1006.5$ hPa,这与重污过程期间常见的逆温、高压区控制等气象影响因素一致,使得近地面水平辐合增强、污染物逐渐汇聚。 $PM_{2.5}$ 分指数中度及以上污染级别时平均温度范围为 $1.75 \sim 5.82^\circ C$,而中度及以下污染时平均温度范围为 $5.15 \sim 6.22^\circ C$ 。污染过程时温度较低可能与气溶胶中颗粒物的直接反馈效应有关,高浓度的颗粒物通过反射及散射作用有效减少了到达地面的太阳辐射量,引发地表温度下降^[39],并且低温天气更有利于二次无机组分中的 NO_3^- 以粒子形态存在^[40]。中度及以上污染时相对湿度范围 $65\% \sim 75\%$,明显高于空气

质量较好时的 53% ~ 61%。较高的相对湿度,不仅加强了颗粒物吸湿增长的能力,增加了消光性,还促进了部分气态前体物的二次转化,使硝酸盐生成加快^[41]。同时,这种低温高湿的气象条件,有利于液相氧化反应和非均相反应,促进 PM₁ 中二次无机物组分的生成,从而使污染加剧^[42]。此外,日照时数与空气质量较好时相比缩短一半左右,减小到 2.6 ~ 3.4 h,这可能与颗粒物中高浓度的硫酸盐、硝酸

盐及铵盐等无机组分的不断吸湿增长,以及消光作用造成的大气能见度明显降低有关。降水量小于空气质量较好时,平均仅为 0 ~ 0.22 mm,湿清除作用非常有限。平均风速、最大风速和极大风速比空气质量较好时弱,区域污染过程期间平均风速仅为 1.5 ~ 1.9 m·s⁻¹,静风和小风频率高,反映出区域大气扩散条件较差,如果大气污染物排放量较高,较容易引发区域污染过程。

表 2 不同空气质量等级对应的气象观测数据统计

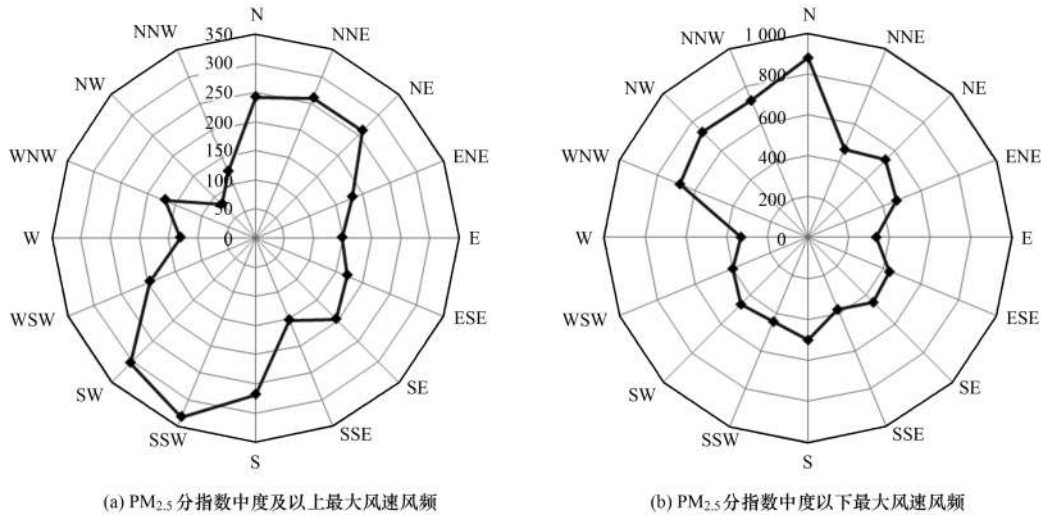
项目	PM _{2.5} 分指数中度污染级别以下平均值					PM _{2.5} 分指数中度及以上污染级别平均值				
	2013 ~	2014 ~	2015 ~	2016 ~	2017 ~	2013 ~	2014 ~	2015 ~	2016 ~	2017 ~
	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
PM _{2.5} 平均浓度/μg·m ⁻³	61	56	47	53	50	229	198	210	204	179
平均气温/℃	6.04	6.22	5.73	7.20	5.15	4.30	5.82	1.81	2.91	1.75
24 h 变温均值/℃	-0.47	-0.41	-0.28	-0.42	-0.19	0.49	0.47	0.20	0.65	0.46
平均气压/hPa	1 004.0	1 004.8	1 006.5	1 004.3	1 006.4	1 017.1	1 016.0	1 019.0	1 016.4	1 016.5
24 h 变压均值/hPa	0.714	0.849	0.539	1.147	0.216	-1.037	-1.390	-1.328	-2.123	-1.400
相对湿度/%	54	53	60	61	53	67	66	75	75	65
日照时数/h	6.9	6.3	6.0	6.1	6.6	3.3	3.1	2.6	2.7	3.4
降水/mm	0.52	0.62	0.91	0.60	0.57	0.04	0.22	0.05	0.16	0
平均风速/m·s ⁻¹	4.4	2.0	2.3	4.2	2.2	1.5	1.5	1.6	1.7	1.9
最大风速/m·s ⁻¹	4.9	4.8	5.1	5.0	5.3	3.5	3.5	3.6	3.9	4.5
极大风速/m·s ⁻¹	8.1	7.9	8.4	8.3	8.8	5.6	5.6	5.5	6.1	6.8

取 2013 年 9 月至 2018 年 2 月连续 5 个秋冬季京津冀 13 城市日均最大风速(10 min 平均风速的最大值)的风向为区域代表风向,绘制的风玫瑰图。如图 4 所示,PM_{2.5}浓度在 115 μg·m⁻³ 以上(中度及以上污染)时[图 4(a)],区域以西南(SW、SSW)和东北(NNE、NE)风为主,分别占 20% 和 16%。在此主导风向下,区域中南部受燕山和太行山阻挡,特别是太行山东部坡度较大,使太行一线的石家庄、邢台、邯郸、衡水和保定正好处于山体背后的“死水

区”,风速常年偏低,不利于污染物的扩散,容易形成区域污染过程。PM_{2.5}浓度在 115 μg·m⁻³ 以下(中度污染以下)时[图 4(b)],以西北(WNW、NW、NNW、N)方向气流最为明显,占总数的 40%。即有西北冷空气过境时,扩散条件较好,区域 PM_{2.5} 浓度普遍较低,空气质量通常相对较好。

2.3 模式日均值预报结果评估

京津冀区域空气质量业务化预报自 2013 年 10 月开始试运行,2013 ~ 2014 年期间,区域空气质量



数值单位: μg·m⁻³

图 4 2013 年 9 月至 2018 年 2 月秋冬季京津冀区域风玫瑰图

Fig. 4 Windrose in the Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter from Sept. 2013 to Feb. 2018

预报预警系统开展能力建设,参数不断调整,系统不断调试完善,因此,选取 2015 年 10 月至 2018 年 2 月连续 3 个秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 24 h 模式日均值预报结果进行评估. 如表 3 所示,NAQPMS 模式 $\text{PM}_{2.5}$ 预报值与实际监测值的 Pearson 相关系数(双尾检验,显著性水平 0.05)为 0.483~0.770,CMAQ 模式为 0.648~0.772,CAMx 模式为 0.669~0.772,3 个模式 $\text{PM}_{2.5}$ 预报结果均体现了与监测实况较好的相关性. RMSE 值平均分别为 66、54 和 58 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,表明各模式对秋冬季京津冀区域的污染情况均有高估. MB 值范围分别为 -2~65、-22~42 和 -13

~55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值分别为 29、11 和 21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. NMB 值范围分别为 -1%~78%、-21%~51% 和 -13%~72%,平均值分别为 35%、14% 和 26%,表明模式 $\text{PM}_{2.5}$ 预报值与实际监测值趋势总体一致. 从表 3 各城市 MB 值可以看出,CMAQ 模式对廊坊和邢台,CAMx 模式对秦皇岛,3 个模式对衡水均有低估,对其它城市均为高估. 这主要是由于不同模式采用了不同的模式框架或物理化学模拟方案,使得不同模式结果在同样输入数据下结果也会有差异,并且在不同预报情形下展现不同模式的优缺点.

表 3 NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 模式 24 h 预报结果评估

Table 3 Evaluation of 24 h forecasting results with NAQPMS, CMAQ, and CAMx

城市	NAQPMS 模式				CMAQ 模式				CAMx 模式			
	R	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MB / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	NMB /%	R	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MB / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	NMB /%	R	RMSE / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MB / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	NMB /%
张家口	0.483	29	10	31	0.648	27	10	30	0.676	29	14	41
承德	0.662	34	9	21	0.688	27	3	6	0.716	29	8	19
秦皇岛	0.691	35	7	14	0.725	30	-8	-17	0.739	29	-2	-4
唐山	0.627	106	65	78	0.658	76	42	51	0.671	85	55	66
北京	0.705	82	48	65	0.694	64	22	31	0.697	69	36	48
天津	0.677	76	43	58	0.722	60	36	49	0.703	77	53	72
廊坊	0.770	57	25	31	0.759	49	-3	-4	0.752	50	6	8
保定	0.692	94	50	44	0.696	63	7	6	0.693	67	19	17
沧州	0.666	63	28	34	0.695	50	19	23	0.699	50	22	27
石家庄	0.701	92	42	35	0.700	81	31	26	0.702	89	46	39
衡水	0.728	50	-1	-1	0.772	50	-21	-21	0.772	47	-13	-13
邢台	0.748	68	30	27	0.723	55	-5	-4	0.726	56	7	7
邯郸	0.698	79	39	37	0.650	70	24	22	0.669	73	36	34

选取区域北部城市张家口、中部城市北京、中南部城市邢台和污染严重城市保定 4 个城市进行 $\text{PM}_{2.5}$ 模式预报与实际监测浓度对比,如图 5 所示,3 个模式均能较好地预测区域典型城市的污染过程,以及污染的峰值浓度、污染形势缓解时间和污染清除后的浓度水平,对日常业务预报,尤其是区域性污染过程预报具有较强的指导作用. 结合表 3 可以看出,3 个模型对京津冀区域大多数城市的预报值偏高,尤其是对唐山、石家庄、保定、北京和天津等污染相对较重的中部城市;对区域北部张家口、承德和秦皇岛的预报结果明显好于对中南部城市的预报结果. 整体而言,3 个模式对区域中空气质量相对较好的城市,预报偏高不多,但对污染较重的城市预报整体偏高.

2.4 典型污染过程模式小时预报结果评估

选取 2016 年 10 月 31 日~11 月 6 日的重污染过程对模式小时预报结果进行评估. 图 6 为典型城市重污染过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 实测小时浓度与 24 h 模式预报浓度的对比情况. 10 月 31 日 18:00,保定首先出现中度污染, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 117 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 11 月 1 日,

石家庄和保定日均 $\text{PM}_{2.5}$ 轻度污染,其他城市均为优良. 模式预测污染过程的第一个高峰出现在 11 月 1 日傍晚至 2 日凌晨期间,但前期污染积累缓慢,多数城市在 11 月 3~4 日期间达到中度至严重污染的峰值. 模式对典型城市污染最重期间(11 月 3~4 日)的预测整体较为准确,但对污染形势缓解时间的预报偏早,3 个模式均预测 11 月 5 日早多数城市空气质量改善,但实际上中南部城市自 11 月 6 日凌晨起空气质量才改善. 11 月 5 日晚,受近地面东南风影响,区域中部积聚的大量污染物向区域西北部的张家口传输,导致在北京、保定和石家庄等中部城市污染缓解的同时,张家口 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升,对此模式预测不足. 此外,3 个模式对此次过程石家庄污染峰值预报略有偏低.

从小时预报结果分析,3 个模式基本上均能够预测到整个污染过程的时空演变,但对个别城市的污染起始时间、浓度峰值、改善时间、以及区域传输预报略有偏差. 这可能是由于目前对局地较小扰动的物理化学机制还不是非常清楚,因此,区域空气质量模式对小尺度城市级别的精细化预报准确度还

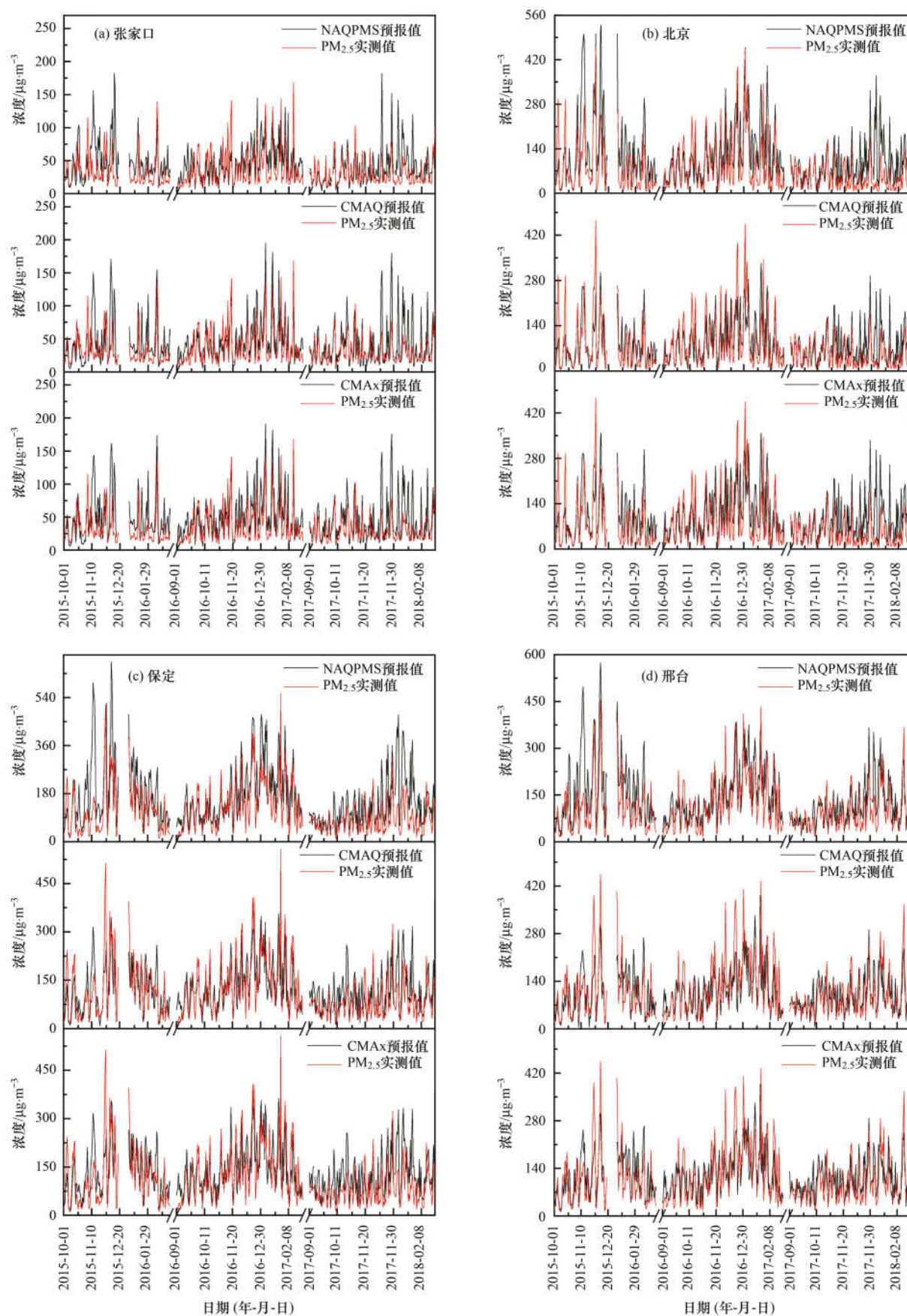


图5 2015-10-01~2018-02-28 秋冬季张家口、北京、保定和邢台模式预报与实际监测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对比

Fig. 5 Comparison of predicted $\text{PM}_{2.5}$ concentration by NAQPMS, CMAQ and CAMx with measured data in Zhangjiakou, Beijing, Baoding, and Xingtai in autumn and winter (01 Oct., 2015 to 28 Feb., 2018)

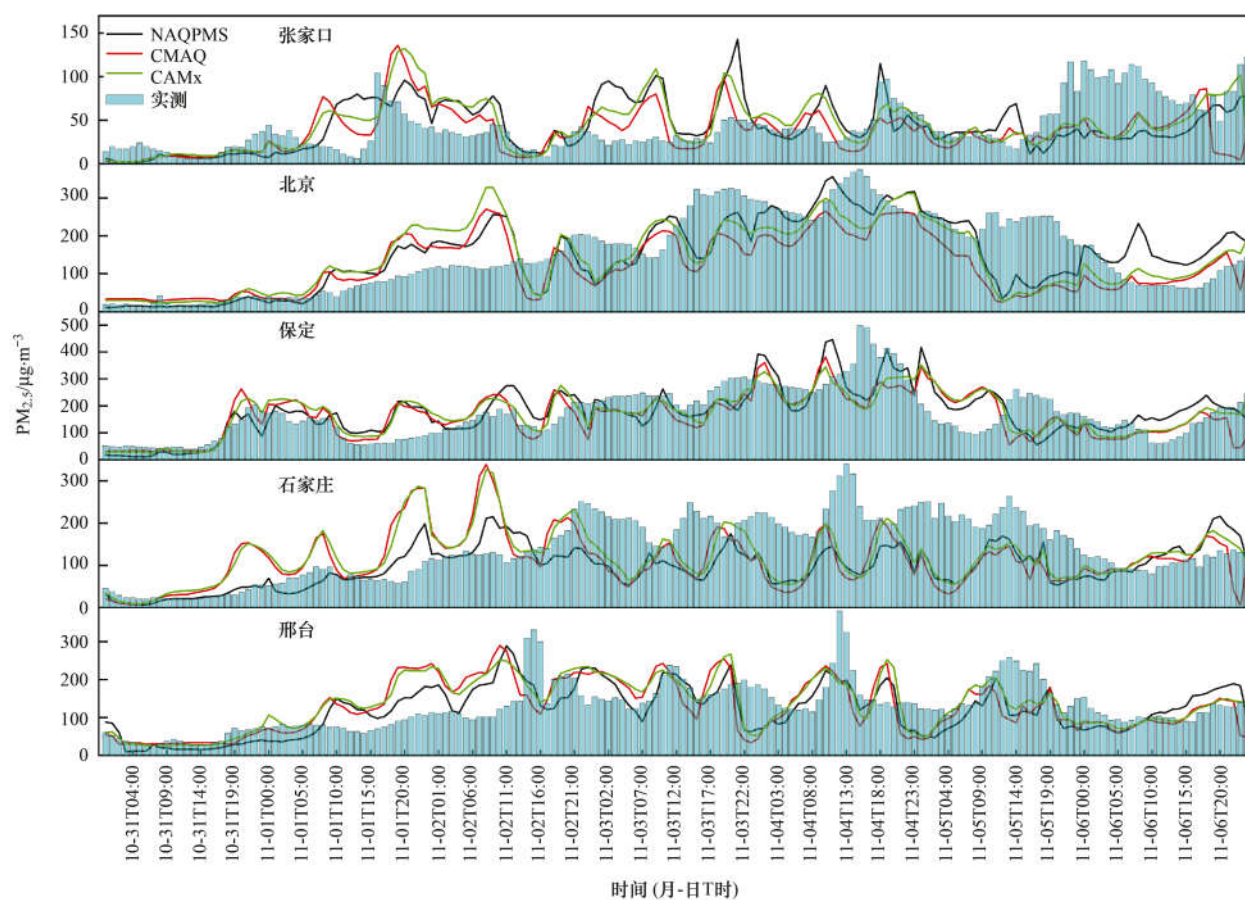


图6 2016-10-31T00:00~2016-11-07T00:00 张家口、北京、保定和邢台模式预报与实际监测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小时对比

Fig. 6 Comparison of predicted hourly $\text{PM}_{2.5}$ concentration by NAQPMS, CMAQ, and CAMx with measured data in Zhangjiakou, Beijing, Baoding and Xingtai in autumn and winter (31 Oct., 2016 to 07 Nov., 2016)

有待提高。再者,排放源清单未能提供准确地污染物排放日变化特征也是小时浓度预报不准的重要原因之一。此外,气象模式 WRF 中边界层准确模拟仍面临很大挑战,特别是夜间边界层模拟,这可能是小时浓度预报关键误差来源。

2.5 模式预报不确定性分析

模式预报结果的偏差主要体现在模式预报的不确定性,模式预报结果的偏高或偏低,客观上主要来源于污染源清单、气象初始场和气象预报、以及大气化学反应机制等的不确定性。因此,需要分析讨论模式预报结果的不确定性,并持续改进,以提高模式预报准确率。京津冀区域3个模式在2015年10月~2018年2月3个秋冬季间对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预报的偏差,可能主要存在以下3个方面的原因。

(1) 污染源排放清单的不确定性 污染源排放清单与实际污染源排放有一定偏差,例如,全国空气质量预报预警系统在2015年预报中采用2014年的排放源清单,2016和2017年采用2016年的排放源清单,但由于近几年京津冀区域产业结构调整、污染减排力度较大,当年污染排放实际情况与基于上一年调查结果编制的污染源排放清单相比,可能存

在对排放量高估的情况。尤其是近几年环保督查工作的持续开展,京津冀区域工业污染源、生活污染源、机动车尾气源、扬尘源、以及“散乱污”排放源均有较大幅度的减少。此外,在重污染来临之前,各级人民政府都会根据环境空气质量预报结果发布相应级别的重污染预警,重污染期间各种响应措施的坚决执行,都会导致污染排放量的下降,起到降低污染物峰值浓度、缩短重污染持续时长的效果,这是模式预报结果偏高的主要原因之一。

(2) 气象预报的不确定性 目前国际主流高水平气象预报机构的大尺度环流形势预报,在秋冬季通常为5~7d内相对较准,但是,即使是最高水平的气象预报,也经常在时间上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。气象预报在时间和空间上的偏差以及缺少高水平精细化气象预报产品,都会导致对受大气环流系统边缘影响的城市预报产生偏差,同时也会影响预报员根据气象预报等多因素综合分析的客观订正,这是相同模式对不同城市预报效果不同的重要原因之一。

(3) 大气化学反应机制的不确定性 国内空气质量数值预报模式所采用的大气化学反应机制,大

部分来源于欧美前期研究成果,部分来源于我国近二十多年的持续研究成果。这些发达国家的大气化学反应机制,与其开展观测和研究时的大气污染条件密切相关,与我国目前的大气污染形势存在一定的差异,这些差异都可能带来大气化学反应机制的偏差,从而导致模式预报结果的偏差。

3 结论

(1) 2013 年 9 月至 2018 年 2 月连续 5 个秋冬季,京津冀区域 PM_{2.5} 均值浓度分别为 122、98、82、99 和 65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 污染过程期间分别为 229、198、210、204 和 180 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。5 年秋冬季累计发生 64 次中度及以上污染过程,其中,2013~2014 年平均单次过程持续时间最长,2017~2018 年持续时长最短。除 2016~2017 年秋冬季外,区域其他年份 PM_{2.5} 浓度峰值和均值逐年降低,区域总体污染形势减轻。京津冀根据 PM_{2.5} 浓度分布可划分为北部较清洁带(张家口、承德和秦皇岛)、中东部环渤海污染带(北京、天津、唐山和沧州)和中南部污染带(石家庄、邢台、邯郸、衡水和保定)。

(2) 京津冀区域秋冬季 PM_{2.5} 浓度与相对湿度、风速和日照时数相关性相对较好,与温度和气压的相关性整体较弱。通过 PM_{2.5} 浓度与气象参数的相关分析和对比分析发现:当风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、大气相对湿度 65% 以上、主导风向为西南和东北风时,容易出现区域污染过程。

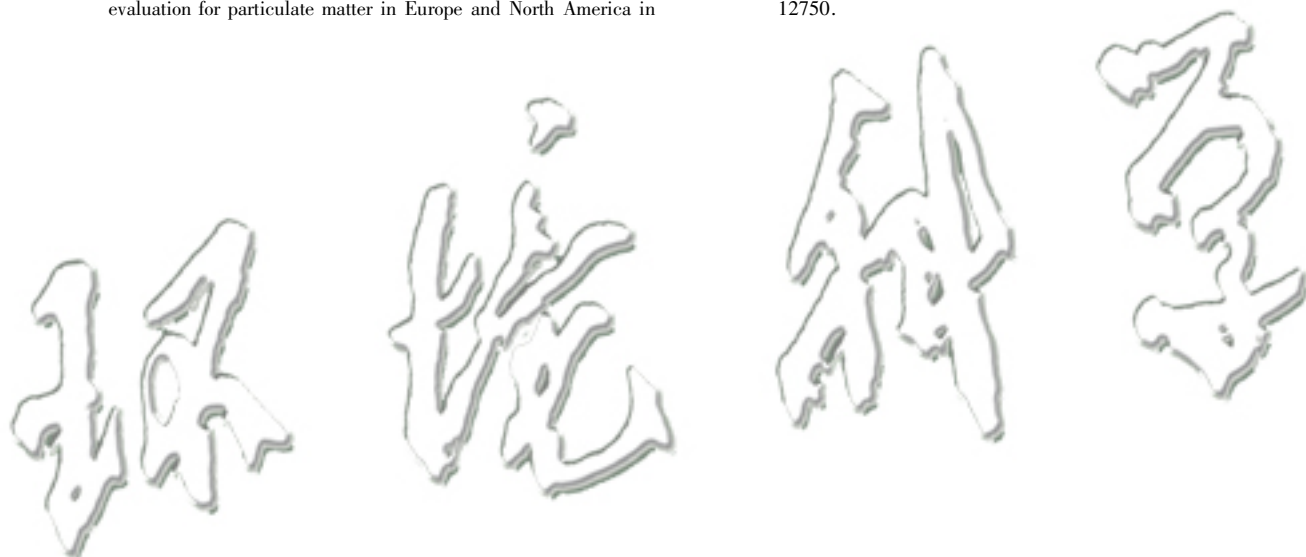
(3) NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 这 3 个模式均能够预测出京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染过程,预报值与监测值体现了较好地相关性。整体上,模式对区域北部张家口、承德和秦皇岛的预报结果较好,对唐山、石家庄、保定、北京和天津等中部城市预报略有偏高。3 个模式小时预报均能够预测到污染过程的时空演变,但对个别城市的污染起始时间、浓度峰值、改善时间、以及区域传输预报略有偏差。这与污染源清单与实际污染源排放存在一定偏差、气象初始场和气象预报、以及大气化学反应机制的不确定性有一定关系。

参考文献:

- [1] 柏仇勇,李健军. 环境监测预警在重污染天气应对中的作用与启示[J]. 环境保护, 2017, 45(8): 45-48.
- Bai C Y, Li J J. The effect and revelation of response to heavy pollution weather in environmental monitoring and early warning [J]. Environmental Protection, 2017, 45(8): 45-48.
- [2] 王晓彦,刘冰,李健军,等. 区域环境空气质量预报的一般方法和基本原则[J]. 中国环境监测, 2015, 31(1): 134-138.
- Wang X Y, Liu B, Li J J, et al. The general method and basic principles of regional ambient air quality forecast [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(1): 134-138.
- [3] 刘冰,赵熠琳,丁俊男,等. 对比分析法在环境空气质量预报业务中的应用[J]. 中国环境监测, 2018, 34(4): 1-7.
- Liu B, Zhao Y L, Ding J N, et al. Application of the comparison method in the air quality forecast [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(4): 1-7.
- [4] 赵俊日,肖昕,吴涛,等. 空气质量数值预报优化方法研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2047-2054.
- Zhao J R, Xiao X, Wu T, et al. A revised approach to air quality forecast based on Models-3/CMAQ [J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2047-2054.
- [5] 潘锦秀,朱彬,晏平仲,等. 京津冀区域重污染天气过程数值预报评估新方法[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2752-2760.
- Pan J X, Zhu B, Yan P Z, et al. An evaluation method for the operational NAQPMS numerical forecast of heavy pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8): 2752-2760.
- [6] 王晓彦,刘冰,丁俊男,等. 环境空气质量预报业务体系建设要点探讨[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(1): 103-105.
- Wang X Y, Liu B, Ding J N, et al. Discussion on the main points of the operational system construction of ambient air quality forecasting [J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(1): 103-105.
- [7] 刘冰,王晓彦,汪巍,等. 预报方法导向的系统化空气质量预报业务作业平台设计[J]. 中国环境监测, 2016, 32(2): 1-10.
- Liu B, Wang X Y, Wang W, et al. Systematic design for operation platform of air quality forecast based on forecast methods [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(2): 1-10.
- [8] 邓聪,王健,向峰,等. 典型高原山地城市环境空气质量预报预警平台设计[J]. 中国环境监测, 2017, 33(5): 95-100.
- Deng C, Wang J, Xiang F, et al. Study on establishment of air quality forecast and warning system in typical plateau city [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(5): 95-100.
- [9] 罗毅,邓琼飞,杨昆,等. 近 20 年来中国典型区域 PM_{2.5} 时空演变过程[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3003-3013.
- Luo Y, Deng Q F, Yang K, et al. Spatial-temporal change evolution of PM_{2.5} in typical regions of China in recent 20 years [J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3003-3013.
- [10] 郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,等. 北京地区近 35 年大气污染扩散条件变化[J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2202-2210.
- Guo C W, Sun Z B, Li Z M, et al. Change of atmospheric pollution diffusion conditions in Beijing in recent 35 years [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2202-2210.
- [11] 贺园园,胡非,刘郁珏,等. 北京地区一次 PM_{2.5} 重污染过程的边界层特征分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(1): 61-72.
- He Y Y, Hu F, Liu Y J, et al. Boundary layer characteristics during a heavy PM_{2.5} pollution process in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2019, 24(1): 61-72.
- [12] 郝静,孙成,郭兴宇,等. 京津冀内陆平原区 PM_{2.5} 浓度时空变化定量模拟[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1455-1465.
- Hao J, Sun C, Guo X Y, et al. Simulation of the spatio-temporally resolved PM_{2.5} aerosol mass concentration over the inland plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1455-1465.
- [13] 吴进,李琛,孙兆彬,等. 北京地区两次重污染过程中 PM_{2.5} 浓度爆发性增长及维持的气象条件[J]. 干旱气象, 2017,

- 35(5): 830-838.
- Wu J, Li C, Sun Z B, *et al.* Meteorological condition of explosive increase and maintaining of PM_{2.5} concentration during two heavy pollution processes in Beijing [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, **35**(5): 830-838.
- [14] 李青春, 李炬, 郑祚芳, 等. 冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 513-524.
- Li Q C, Li J, Zheng Z F, *et al.* Influence of mountain valley breeze and sea land breeze in winter on distribution of air pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 513-524.
- [15] 马小会, 廖晓农, 唐宜西, 等. 北京地区重空气污染天气分型及个例分析[J]. *气象与环境学报*, 2017, **33**(5): 53-60.
- Ma X H, Liao X N, Tang Y X, *et al.* Weather pattern and case analysis of air heavy pollution days in Beijing [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2017, **33**(5): 53-60.
- [16] 杨旭, 张小玲, 康延臻, 等. 京津冀地区冬半年空气污染天气分型研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(9): 3201-3209.
- Yang X, Zhang X L, Kang Y Z, *et al.* Circulation weather type classification for air pollution over the Beijing-Tianjin-Hebei region during winter [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3201-3209.
- [17] 赵娜, 马翠平, 李洋, 等. 河北重度污染天气分型及其气象条件特征[J]. *干旱气象*, 2017, **35**(5): 839-846, 856.
- Zhao N, Ma C P, Li Y, *et al.* Weather classification of heavy pollution in Hebei Province and its meteorological condition analysis [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, **35**(5): 839-846, 856.
- [18] Wang Y L, Chen H S, Wu Q Z, *et al.* Three-year, 5 km resolution China PM_{2.5} simulation: model performance evaluation [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **207**: 1-13.
- [19] 王哲, 王自发, 李杰, 等. 气象-化学双向耦合模式(WRF-NAQPMS)研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用[J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(2): 153-163.
- Wang Z, Wang Z F, Li J, *et al.* Development of a meteorology-chemistry two-way coupled numerical model (WRF-NAQPMS) and its application in a severe autumn haze simulation over the Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19**(2): 153-163.
- [20] Li J, Wang Z, Zhuang G, *et al.* Mixing of Asian mineral dust with anthropogenic pollutants over East Asia: a model case study of a super-duststorm in March 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(16): 7591-7607.
- [21] 郑捷, 王自发, 朱江, 等. 非结构网格空气质量模式对东亚强沙尘暴的初步模拟研究[J]. *气候与环境研究*, 2016, **21**(6): 663-677.
- Zheng J, Wang Z F, Zhu J, *et al.* A preliminary simulation study of an East Asian super dust storm by unstructured mesh air quality model [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, **21**(6): 663-677.
- [22] Zhang Q, Xue D, Liu X H, *et al.* Process analysis of PM_{2.5} pollution events in a coastal city of China using CMAQ [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **79**: 225-238.
- [23] 石佳超, 罗坤, 樊建人, 等. 基于CMAQ与前馈神经网络的区域大气污染物浓度快速响应模型[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(11): 4480-4489.
- Shi J C, Luo K, Fan J R, *et al.* Rapid response model of regional air pollutant concentration based on CMAQ and feed forward neural network [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(11): 4480-4489.
- [24] Wang Y J, Bao S W, Wang S X, *et al.* Local and regional contributions to fine particulate matter in Beijing during heavy haze episodes [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 283-296.
- [25] Meroni A, Pirovano G, Gilardoni S, *et al.* Investigating the role of chemical and physical processes on organic aerosol modelling with CAMx in the Po Valley during a winter episode [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **171**: 126-142.
- [26] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- GB 3095-2012, Ambient air quality standard[S].
- [27] 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].
- [28] 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].
- [29] 朱莉莉, 晏平仲, 王自发, 等. 江苏省级区域空气质量数值预报模式效果评估[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(2): 17-23.
- Zhu L L, Yan P Z, Wang Z F, *et al.* An operational evaluation of the regional air quality forecast modeling system in Jiangsu [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(2): 17-23.
- [30] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [31] 王健颖. 不同排放源清单对于京津冀PM_{2.5}影响的数值试验研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- Wang J Y. Impact of different emission inventories on PM_{2.5} over Beijing-Tianjing-Hebei area based on numerical study [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.
- [32] 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 1-11.
- Wu D, Liao B T, Wu M, *et al.* The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 1-11.
- [33] 曾佩生, 朱蓉, 范广洲, 等. 京津冀地区低层局地大气环流的气候特征研究[J]. *气象*, 2019, **45**(3): 381-394.
- Zeng P S, Zhu R, Fan G Z, *et al.* Study on climatic characteristics of local circulation in the lower atmosphere in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Meteorological Monthly*, 2019, **45**(3): 381-394.
- [34] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J]. *科学通报*, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, *et al.* “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- [35] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [36] 梅梅, 朱蓉, 孙朝阳. 京津冀及周边“2+26”城市秋冬季大气重污染气象条件及其气候特征研究[J]. *气候变化研究进*

- 展, 2019, **15**(3): 270-281.
- Mei M, Zhu R, Sun C Y. Study on meteorological conditions for heavy air pollution and its climatic characteristics in “2 + 26” cities around Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. *Climate Change Research*, 2019, **15**(3): 270-281.
- [37] 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.
- [38] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要影响因素及内在关系研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, **27**(4): 102-109.
- Zhou S D, Ouyang W Q, Ge J H. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(4): 102-109.
- [39] Solazzo E, Bianconi R, Pirovano G, *et al.* Operational model evaluation for particulate matter in Europe and North America in the context of AQMEII [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **53**: 75-92.
- [40] 贾佳, 韩力慧, 程水源, 等. 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 及二次无机组分污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 801-811.
- Jia J, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Pollution characteristic of $\text{PM}_{2.5}$ and secondary inorganic ions in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 801-811.
- [41] 张周祥. 秋冬季北京北部重污染事件 PM_1 化学组分特征及气象因素的贡献[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2017.
- Zhang Z X. Characteristics of PM_1 chemical composition and role of meteorological factors during heavy aerosol pollution episodes in northern Beijing area in autumn and winter [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2017.
- [42] Sun Y L, Zhang Q, Schwab J J, *et al.* A case study of aerosol processing and evolution in summer in New York City [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (24): 12737-12750.



CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)