

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.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机物的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)

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

朱媛媛^{1,2}, 高愈霄^{1,2*}, 柴文轩¹, 王帅¹, 李亮¹, 王威¹, 王光¹, 刘冰¹, 王晓彦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: 选取京津冀及周边区域 2018 年 11 月 23 日至 12 月 4 日一次大范围、长时间且 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加两次沙尘传输的复合型重度污染过程开展特征研究, 分析了首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的发展演变, 以及污染气象影响因素; 结合激光雷达地基和车载走航监测结果, 以及 HYSPLIT 后向轨迹结果, 讨论了区域污染传输的情况; 并对重污染期间 NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 这 3 个空气质量模式的预报效果进行了回顾分析。结果表明, 研究时段 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加两次沙尘传输导致区域中南部多数城市达到重至严重污染水平, 张家口、北京、石家庄、邯郸和郑州 PM_{10} 小时峰值分别为 1 589、864、794、738 和 766 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 小时峰值浓度分别为 239、319、387、321 和 380 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。地面弱气压场、高湿、逆温等静稳条件和沙尘是重要的污染气象和天气因素。激光雷达地基和车载走航监测数据结合 HYSPLIT 后向轨迹分析表明重污染期间区域西南和东南方向发生了 $\text{PM}_{2.5}$ 传输; 区域两次沙尘过程主要受西北路径传输影响。此外, NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 这 3 个模式均可较好地预测到京津冀及周边区域的重污染过程, 但对个别城市预报略有偏差。该次重污染过程中模式对 $\text{PM}_{2.5}$ 的预报效果要好于 PM_{10} , 这与气象模式预报、大气化学反应机制、污染源清单的不确定性, 以及重污染应急措施导致的污染源排放的改变有一定关系。

关键词: 京津冀; NAQPMS 模式; $\text{PM}_{2.5}$; 污染气象; 沙尘; 后向轨迹; 激光雷达; 预报评估

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0574-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908123

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

ZHU Yuan-yuan^{1,2}, GAO Yu-xiao^{1,2*}, CHAI Wen-xuan¹, WANG Shuai¹, LI Liang¹, WANG Wei¹, WANG Guang¹, LIU Bing¹, WANG Xiao-yan¹, 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: This study discusses the concentration characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} , as well as pollution meteorology in large-scale and long-term heavy pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding areas from November 23 to December 4, 2018, where the primary pollutants are comprised of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} . The monitoring results obtained from ground-based and vehicle-mounted lidars, as well as the HYSPLIT-4 backward trajectory combined with meteorological factors analysis are discussed. The accuracy and uncertainty of the air quality forecast model of NAQPMS, CMAQ, and CAMx during heavy air pollution were analyzed retrospectively. The results show that $\text{PM}_{2.5}$ and sand dust in most cities in the south-central region contribute to severe pollution levels. The hourly peak concentrations of PM_{10} in Zhangjiakou, Beijing, Shijiazhuang, Handan, and Zhengzhou were 1 589, 864, 794, 738, and 766 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The respective hourly peak concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ were 239, 319, 387, 321, and 380 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Ground static pressure field, high humidity, inversion, and other static and stable conditions, as well as sand dust transmitted from the northwest, were important pollution meteorological and weather factors. The monitoring data of ground-based lidar and vehicle-mounted lidar combined with the HYSPLIT-4 backward trajectory analysis showed that the air pollutant transmitted from the Southwest and Southeast during the heavy pollution period was primarily $\text{PM}_{2.5}$. The air pollutant transmitted from the Northwest during the two sand dust processes. Moreover, the model of NAQPMS, CMAQ, and CAMx performed well in forecasting the heavy pollution process in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding areas. However there are slight deviations for some individual cities, related to uncertainty in the meteorological model prediction, atmospheric chemical reaction mechanism, and pollution source list. Furthermore, the reduction in pollution source emissions caused by pollution emergency measures was also one of the main reasons for the overestimation.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; nested air quality prediction modeling system (NAQPMS); $\text{PM}_{2.5}$; air pollution meteorology; sand dust; back trajectory; lidar; forecast assessment

收稿日期: 2019-08-14; 修订日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875164); 国家重点研发计划项目(2017YFC0209805)

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@cncmc.cn

* 通信作者, E-mail: gaoyx@cncmc.cn

近年来,京津冀及周边区域频繁出现长时间、大范围重污染过程,对人体健康和生产、生活造成了很大影响,引起了政府、媒体和广大学者的广泛关注,不少研究针对重污染过程的成因、来源、 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征或污染气象条件展开了分析讨论^[1-7]. 现有研究表明,区域地形和污染排放是京津冀及周边重污染的主要原因,此外,地面受弱气压场控制、高湿度、静小风、较低的混合层高度、逆温等静稳天气条件也是秋冬季污染的重要原因^[8-15]. 京津冀及周边区域污染主要来自于生活源、交通源和工业源^[16],二次转化在重污染的形成过程中起到重要作用,二次无机离子和二次有机碳是导致重污染的主要原因^[17-20]. 京津冀地区主要受沿太行山东侧的西南向输送通道影响^[9],西南和东南路径为北京典型污染传输通道^[8,21], $\text{PM}_{2.5}$ 在西南方向上的传输通量最高,有时占总传输通量的 60% 以上^[22]. 郑州市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的潜在污染源主要为北部的京津冀传输通道城市,包括焦作、开封、新乡、鹤壁、濮阳、安阳、邯郸和邢台^[23]. 太原空气质量受西南方向外来污染物输送的显著影响,汾渭平原的陕西汉中、西安和山西的吕梁、临汾等地是重要潜在源^[24].

京津冀及周边是我国大气污染防治的重点区域之一,包括北京市、天津市、河北省、山西省和山东省全部城市、以及内蒙古自治区中部和河南省北部部分城市,仅京津冀大气污染传输通道上就有 28 个城市(以下简称“2+26”城市). 但已有研究多数仅针对单个城市,污染分析的监测数据也多来自地面监测单一维度. 由于重污染通常不是单一城市的静态过程,多数出现在连片城市群间,而且单个城市不仅受本地污染排放的影响,同时也受气象条件和外来污染传输的影响,因此,在分析重污染过程时,宜全面分析区域污染演变过程,可采用地面及激光雷达等监测手段,利用多维监测数据结合气象条件进行综合研究. 此外,回顾重污染过程模式预报效果,分析模式预报偏差原因,可有效提高预报准确率,有利于政府管理部门根据预报结果制订并采取有针对性地重污染应急响应措施,对区域大气污染进行综合防治和管控,从而消减重污染期间污染物排放量,缩短重污染持续时间,减低峰值浓度,进而改善环境质量,保护人民身体健康.

以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的重污染叠加沙尘过程,是加重污染过程的重要形式之一. 吴兑等^[25] 的研究表明,粗粒子气溶胶远距离传输可造成华南地区空气的严重污染. 此外,长三角地区受天气系统、地面及边界层气象条件共同作用也会受到西北沙尘传输

影响,出现沙尘重污染过程^[26]. 京津冀及周边地区地处华北平原,受西北沙尘长距离传输更为明显,沙尘过境时,不仅会使 PM_{10} 浓度上升,也对 $\text{PM}_{2.5}$ 有所贡献^[27]. 北京地区在春季较容易经历沙尘传输影响,过程前期主要受西北气流作用或是蒙古气旋配合地面锋面导致外围沙尘南下,过程后期可能受偏南风作用下的污染回流影响,导致霾和沙尘混合污染的形成^[28,29].

2018 年 11 月 23 日至 12 月 4 日,京津冀及周边地区发生了一次重度及以上污染过程,与以往重污染过程相比,具有影响范围大、持续时间长的特点,且为 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加两次沙尘传输的复合型污染过程. 分析此次污染过程的特点和预报效果,对今后环境空气质量预报和重污染应急管控具有重要意义. 为此,本文从首要污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度变化特征和污染气象条件展开,从空气质量自动监测和激光雷达监测两方面入手,较为全面地分析了污染过程的演变,并对空气质量模式预报效果进行了回顾分析,讨论了模式预报不确定性的原因,通过提高区域和城市预报准确率,促进环境空气质量改善.

1 材料与方法

1.1 数据来源

空气质量数据采用中国环境监测总站(“总站”)国家空气质量监测网空气质量自动监测城市审核数据,主要包括 AQI (air quality index)、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,依据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)进行评价. 激光雷达数据采用总站点位地基雷达及总站车载走航监测数据,气象资料来自韩国气象局天气实况分析. 数据分析处理采用 SPSS 19、Origin 2018 和 Excel.

1.2 模式与设置

空气质量预报基于全国空气质量预报预警系统,采用 NAQPMS (nested air quality prediction modeling system) 模式、CMAQ (community multiscale air quality) 模式和 CAMx (comprehensive air-quality model with extensions) 模式. 3 个模式区域大小设置、网格数和分辨率相同,均为三层嵌套网格,覆盖东亚、中国中东部和京津冀区域,水平网格分辨率分别为 45、15 和 5 km. 模式中心经纬度为 25°N , 115°E ,水平方向为 Lambert 投影方式,垂直方向为 Sigma-Z 地形追随坐标系. 采用清华大学 2016 年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 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. 采用 WRF (weather research and forecasting

model)气象模式提供动力驱动,气象预报的初始条件、边界条件来自 NCEP (national centers for environmental prediction) 全球气象预报分析资料 GFS(global forecast system). 使用 HYSPLIT-4(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model-4) 后向轨迹模式向后追踪 24 h 污染轨迹,轨迹起始点经纬度 39.93°N , 116.33°E ,高度分别为 100、500 和 1 000 m. 采用美国国家海洋和大气管理局 NOAA (national oceanic and atmospheric administration) 全球气象资料同化系统 GDAS(global data assimilation system)气象资料,精度 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,数据来源 <https://ready.arl.noaa.gov/archives.php>.

2 结果与讨论

2.1 污染演变过程分析

2018 年 11 月 23 日至 12 月 4 日,京津冀及周边地区出现了一次大范围、长时间、 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加两次沙尘传输的重度及以上污染过程,图 1(a)为京津冀及

周边区域部分城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 小时变化情况. 此次重污染过程起始于 11 月 23 日,河北中南部城市石家庄、邯郸、邢台、衡水和河南北部安阳首先出现以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的中至重度污染, $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度最高值 $245 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (安阳). 11 月 24 ~ 25 日,区域大部城市污染加重, $\text{PM}_{2.5}$ 基本维持重度污染水平. 11 月 26 日傍晚至 11 月 28 日,区域大部地区受到西北沙尘传输过程影响,沙尘过境城市 PM_{10} 浓度迅速上升[图 1(b)],先后达到严重污染水平,自北向南张家口、北京、石家庄、邯郸和郑州 PM_{10} 小时浓度峰值先后达到 1 589、864、794、709 和 656 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 11 月 29 日至 12 月 2 日,区域北部受小股弱冷空气影响,空气质量逐步改善至良,其他地区仍维持中至重度污染,个别城市严重污染,首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 或 PM_{10} . 12 月 3 日凌晨起,受伴随冷空气的沙尘过程影响,区域大部城市再次出现以 PM_{10} 为首要污染物的短时严重污染,自北向南张家口、北京、石家庄、邯郸和郑州 PM_{10} 小时浓度峰值先后达

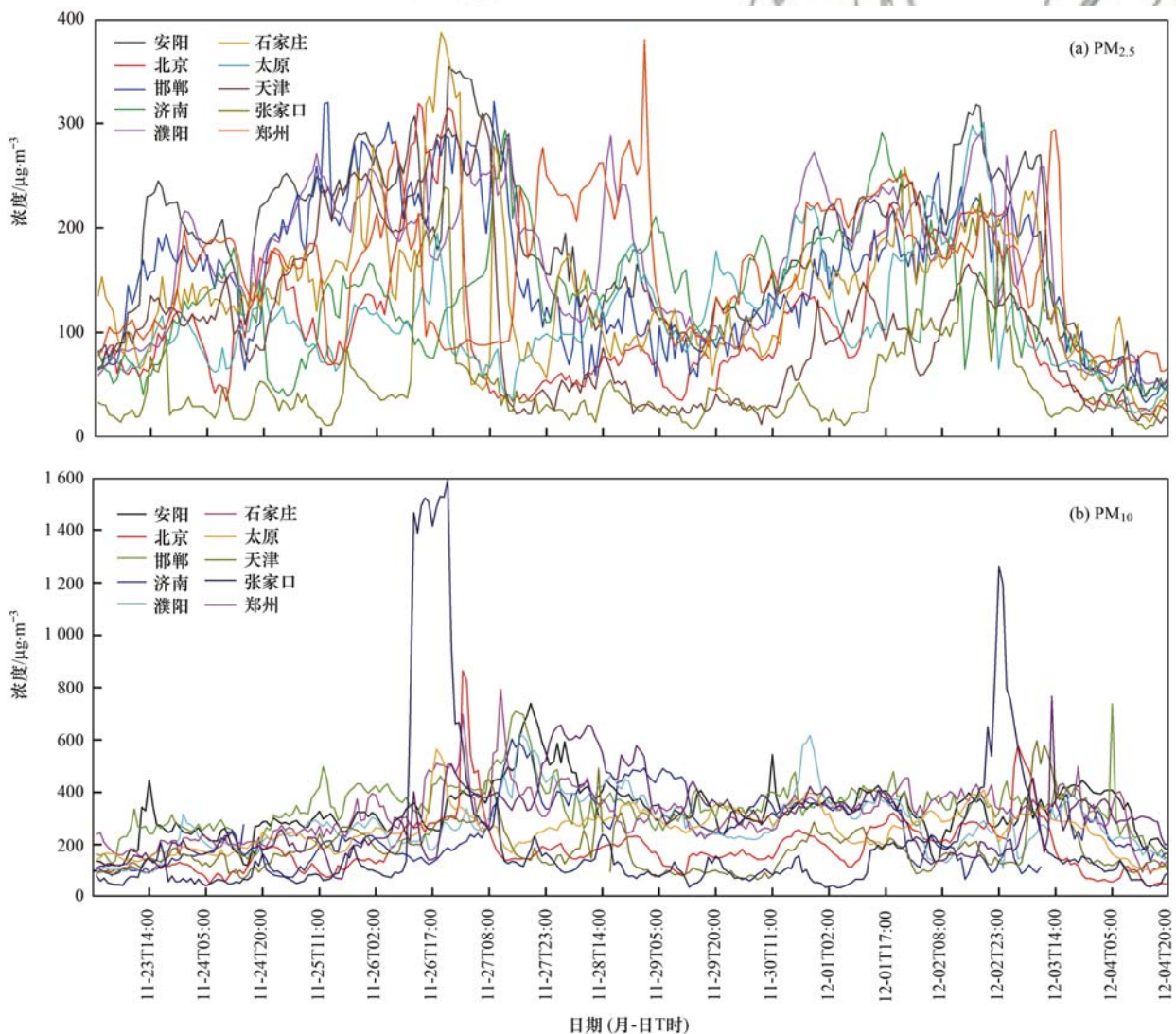


图 1 京津冀及周边区域部分城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 小时变化

Fig. 1 Time series of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in parts of cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region

到 1 263、580、499、738 和 766 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 12 月 4 日凌晨起,受冷空气持续影响,各项污染物浓度均下降;至 12 月 4 日午间,区域大部地区空气质量转为良至轻度污染,污染过程基本结束. 整个过程中,张家口、北京、石家庄、邯郸和郑州 PM_{2.5}小时峰值浓度分别为 239、319、387、321 和 380 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

京津冀及周边区域秋冬季的重污染通常以 PM_{2.5}为首要污染物,但本次重污染中经历了两次沙尘传输过程,因此以 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值考量沙尘传输过程影响,当 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值大于 0.5 时,主要为 PM_{2.5} 影响阶段,反之为 PM₁₀ 影响阶段^[30, 31]. 北京市重污染

过程中 PM_{2.5} 浓度、PM₁₀ 浓度、以及 PM_{2.5}/PM₁₀ 比例随时间变化情况见图 2. 从中可知,第一次沙尘传输过程前,PM_{2.5}/PM₁₀ 比值范围 0.55 ~ 1.14,首要污染物主要为 PM_{2.5}. 11 月 27 日 01:00 至 11 月 30 日 03:00,以及 12 月 3 日 03:00 至 12 月 4 日 13:00 的大部分时段,受沙尘传输过程影响,PM₁₀ 浓度急剧上升,PM_{2.5}/PM₁₀ 比值小于 0.5. 第一次沙尘传输过程中,北京 PM₁₀ 小时浓度峰值出现在 11 月 27 日 01:00,浓度为 864 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}/PM₁₀ 比值 0.20;第二次沙尘传输北京过程中 PM₁₀ 峰值出现在 12 月 3 日 04:00,浓度为 580 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}/PM₁₀ 比值 0.24.

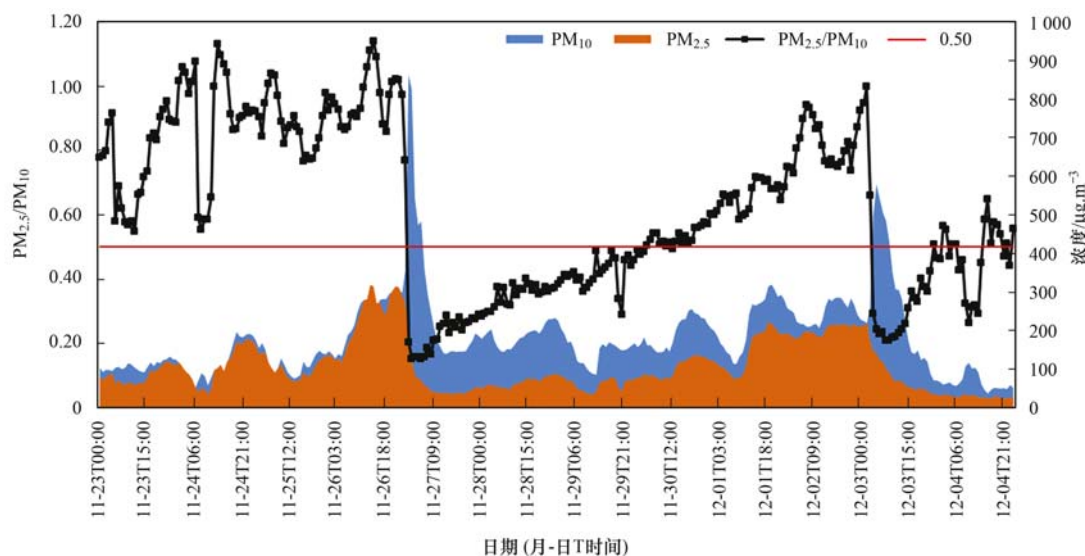


图 2 北京市 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度和 PM_{2.5}/PM₁₀ 比值时间序列

Fig. 2 Times series of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in Beijing

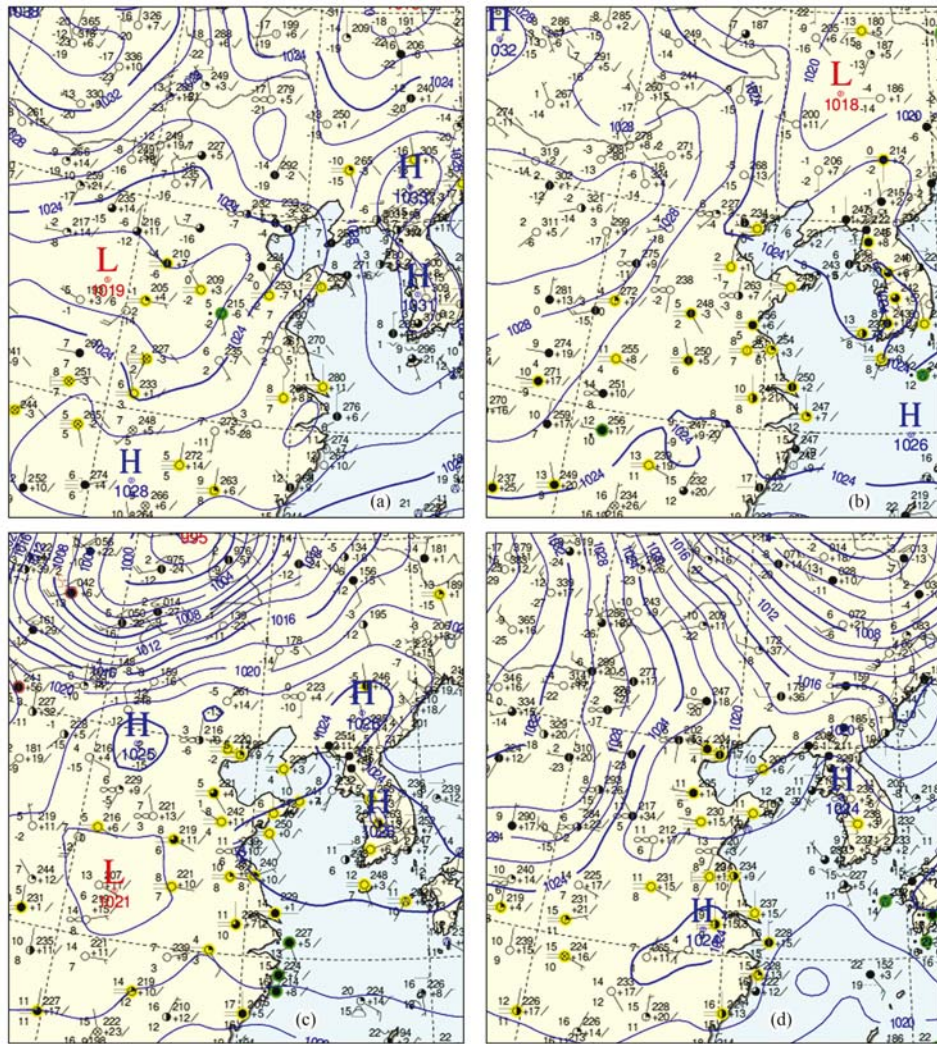
此外,对比两次沙尘传输过程中典型城市 PM₁₀ 浓度峰值[图 1(b)]、污染传输路径和速度发现,第一次沙尘过程对京津冀及周边区域颗粒物浓度及空气质量的影响要大于第二次沙尘传输过程. 第一次沙尘过程中,以张家口为代表的北部城市 PM₁₀ 小时浓度峰值更高,河南和山东省大部城市也受到第一次沙尘传输过程影响出现污染堆积,空气质量以中至重度污染为主,局地达到严重污染水平. 此次重污染过程中,京津冀传输通道“2+26”城市中保定、唐山、廊坊、邢台、石家庄、安阳、天津、邯郸、开封、焦作、郑州和菏泽等 12 个城市 AQI 日均值达到严重污染水平,其余 16 个城市均达到重度污染水平. 河南安阳、濮阳和山东菏泽等城市污染持续时间最长,持续 8 d 重度污染.

2.2 污染天气过程特征分析

2018 年 11 月 23 日,京津冀及周边地区 500 hPa 高空位于槽前,地面受低压控制[图 3(a)],受空中西南暖湿气流和地面水平辐合共同影响,河北中南部至河南北部大气扩散条件较差,有利于污染物累

积,污染物浓度呈现南高北低分布. 11 月 24 日傍晚[图 3(b)],区域水平辐合加强,大气静稳,夜间湿度增大,导致颗粒物吸湿增长和二次转化作用加强,区域污染持续加重,多个城市达到重度污染水平,河南部分城市出现严重污染. 11 月 25 日早晨,受高压前部弱冷空气影响,区域北部扩散条件略有改善;夜间,受低空西南暖湿气流影响,地面弱气压场[图 3(c)],维持高湿、静稳的不利扩散条件,在本地累积、偏南风区域输送、颗粒物吸湿增长和二次转化共同作用下,污染物在太行山-燕山山前堆积,区域污染形势整体加剧,河北南部达到严重污染. 11 月 26 日夜間开始,地面冷空气东移南下[图 3(d)],PM_{2.5} 浓度降低,而该股冷空气携带上游沙尘过境,叠加本地扬尘,PM₁₀ 浓度急剧升高,多个城市 AQI 值达到 500 峰值.

11 月 27 日,伴随地面冷高压持续向南推进[图 4(a)],上游沙尘和细颗粒物持续输送,区域中南部污染物浓度暴发式增长,石家庄、济南和郑州 AQI 先后达到 500 峰值. 11 月 28 日,中层天气形势转为



(a)11月23日08:00;(b)11月24日20:00;(c) 11月25日20:00;(d)11月26日20:00

图3 污染过程期间地面天气形势

Fig. 3 Surface field pressure pattern in heavy air pollution

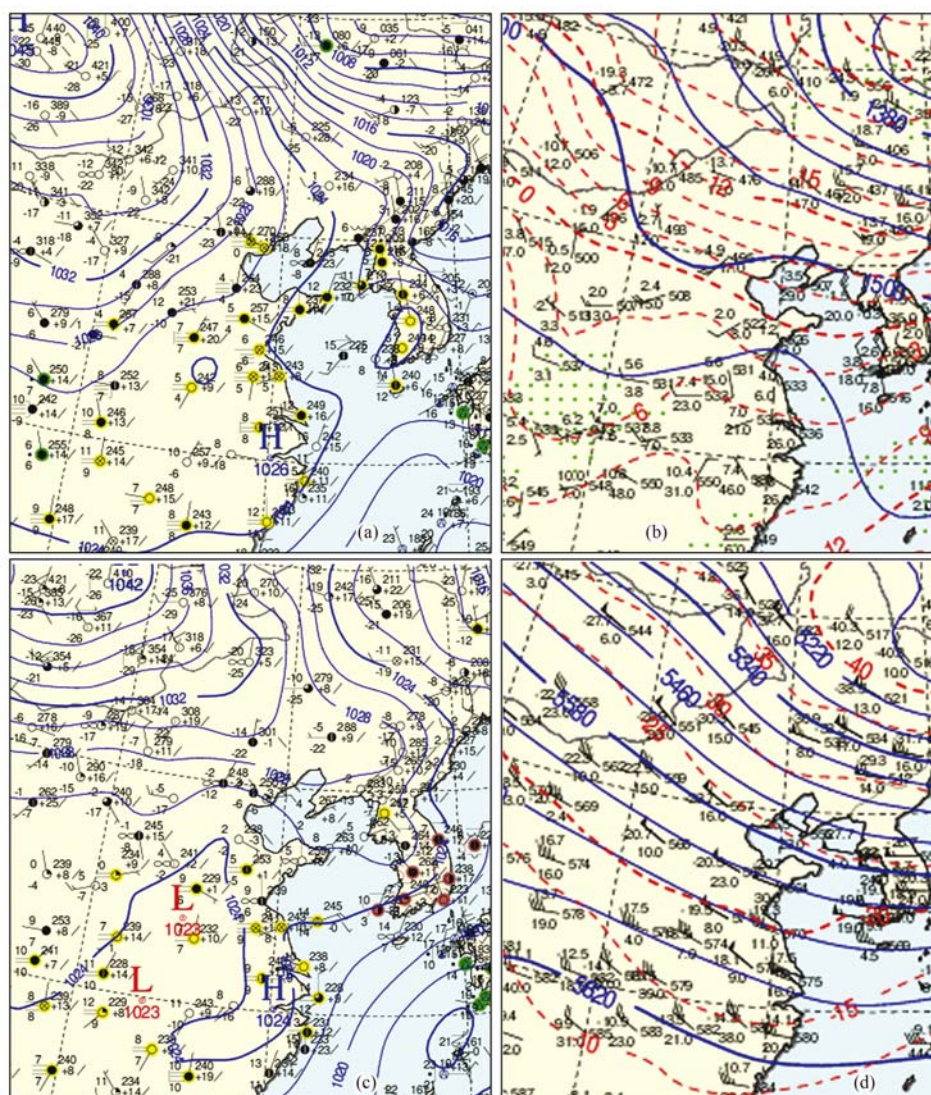
槽前西南气流控制[图4(b)],区域中南部受不断发展北伸的倒槽控制[图4(c)],风力微弱,近地面逆温,水平和垂直方向均不利于污染物扩散,前期传输至此的污染物仅靠粗颗粒物自身重力沉降无法达到污染浓度快速下降的效果,因此在河南北部和山东西部形成污染堆积,空气质量以重度污染为主,局地达到严重污染. 11月29日凌晨,在新一轮弱冷空气作用下[图4(d)],区域扩散条件自北向南依次改善,高浓度污染区向南推移至河南中南部,京津冀及周边地区空气质量以中度污染为主.

11月30至12月1日,地面弱气压场[图5(a)],扩散条件不利,前期沙尘和细颗粒物污染尚未彻底消散,仍残留在区域中南部,而地面东北高压又带来了小股偏东气流[图5(b)],残留污染叠加回流污染气流,再次导致河北南部和河南北部等太行山脉东侧城市的重度污染. 12月2日夜间起,地面冷锋过境[图5(c)],受锋后冷高压影响,降湿效

果显著,大气扩散条件改善,PM_{2.5}浓度持续下降,与此同时受上游沙尘传输影响,PM₁₀浓度陡升,但由于传输路径及速度不同,未达到前期污染水平. 12月3日白天至12月4日上午,在地面冷高压不断作用下[图5(d)],大气扩散条件自北向南依次改善,同时上游沙尘伴随冷高压前锋不断向南推移,下游地区在经历短时污染加重之后,空气质量自北向南依次好转. 12月4日12:00,区域大部空气质量良到轻度污染,南部局地中度污染,京津冀及周边区域的污染过程逐步结束.

2.3 污染传输分析

重污染过程期间,在北京及周边进行激光雷达监测. 2018年11月24日“北京-天津-霸州-固安-北京”车载激光雷达走航路线结果如图6所示,去程北京至天津路段,消光系数相对较低,表明细颗粒物浓度相对较低,行至霸州路段时消光系数明显增大,颗粒物浓度显著升高. 回程霸州至北京路段,两城市



(a) 11月27日08:00 ;(b) 11月28日08:00 ;(c) 11月28日08:00 ;(d) 11月29日08:00

图4 污染过程期间地面、850 hPa 和 500 hPa 天气形势

Fig. 4 Surface field pressure, 850 hPa pressure, and 500 hPa pressure pattern in heavy air pollution

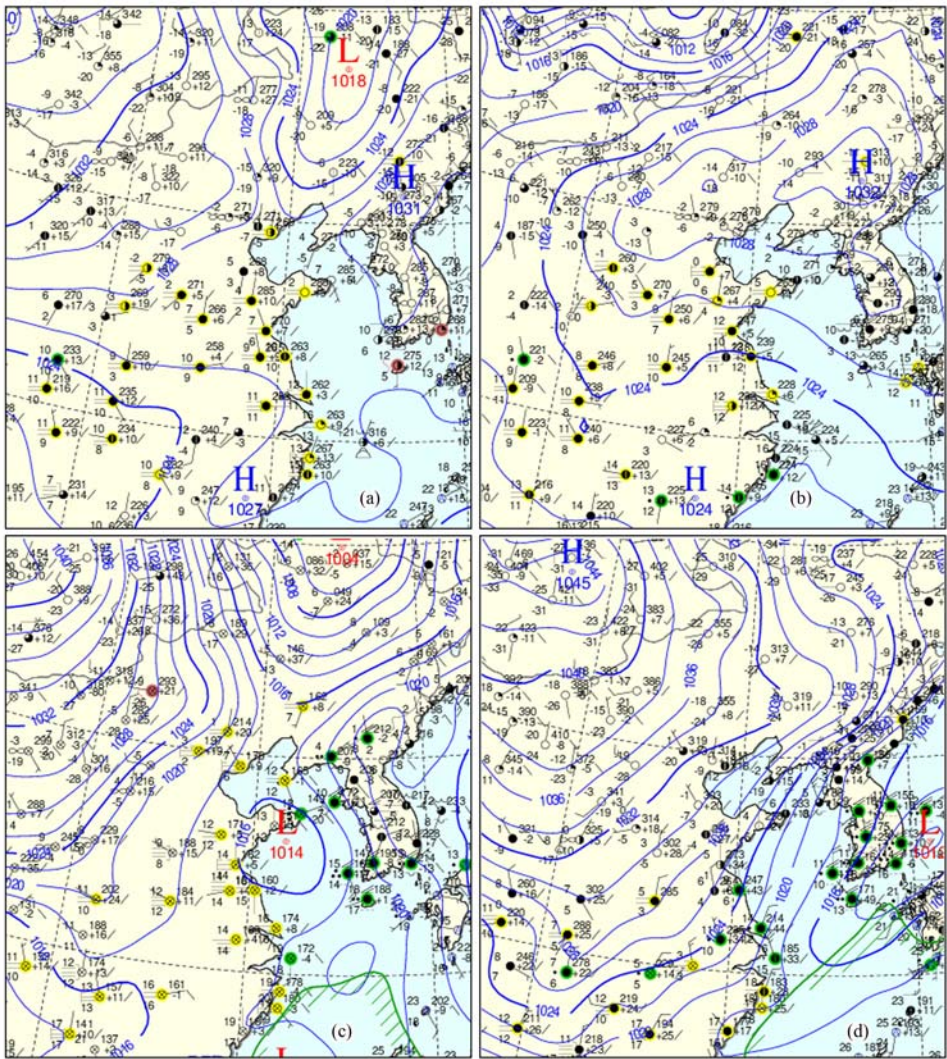
消光系数均抬升至较高水平,北京市消光系数较去程显著增大.结合风场分析可知,走航期间0.5 km高度以下有明显的风向转换,由3~4级偏北风转为3~4级偏南风,北京一定程度上受霸州等偏西南方向近地面传输影响,颗粒物浓度升高.同时,在天津至霸州和霸州至北京路段,可见高空1 km左右存在颗粒物传输带,与本地近地面污染物融合,加重当地污染.

11月26日08:00起,受较强西北气流影响,沙尘入境河北西北部地区,“北京六环绕行”走航结果见图7,从中可知,污染物主要集中在1.4 km以下,六环沿线全程消光系数普遍处在较高水平,颗粒物浓度较高,0.6~1.0 km上空存在沙尘污染带.15:30左右,颗粒物消光系数迅速减小,近地面退偏振比明显升高,表明有沙尘过境,高空沙尘将PM_{2.5}污染物压至0.2 km以下,北京地区近地面污染物加

速积累.

根据总站地基雷达监测结果(图8),11月26日全天北京地区近地面消光系数较高,12:00左右退偏振比明显升高,15:00高空沙尘沉降在0.5 km左右高度.11月27日00:00左右,沙尘沉降近地面,污染达到峰值,随后强度随时间逐渐减弱.12月3日00:00左右,总站地基雷达监测到沙尘再次入境,随后边界层内污染物主要以粗颗粒物为主,12月3日12:00后,随着冷空气进入,北京地区污染物逐渐扩散清除.

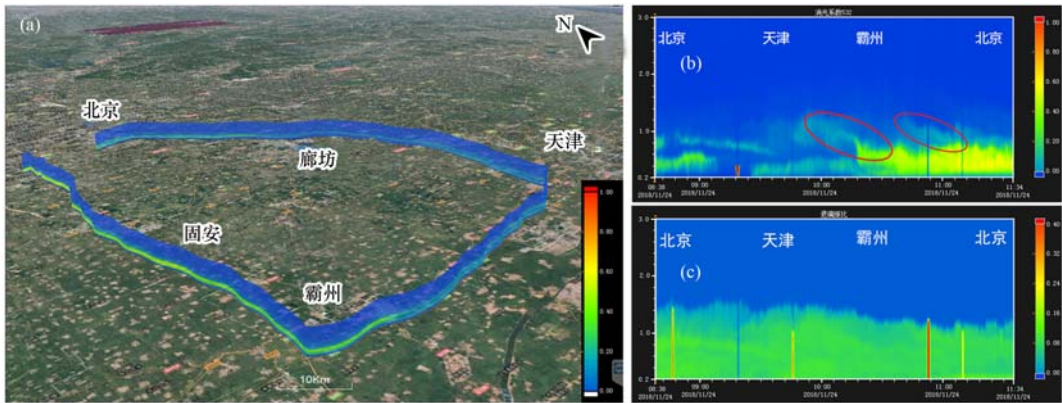
采用HYSPLIT4后向轨迹模型进一步对部分时刻北京的污染气团来向进行分析,结果见图9.此次重污染过程中北京PM_{2.5}浓度峰值浓度311 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 出现在2018年11月26日14:00,如图9(a)所示,该时刻高空1000 m、低空500 m和低空100 m污染气团均来自西南方向的河北中南部和河



(a) 11月30日08:00;(b) 12月1日08:00;(c) 12月2日23:00;(d) 12月4日08:00

图5 污染过程期间地面天气形势

Fig. 5 Surface field pressure pattern in heavy air pollution



(a) 走航路线示意;(b) 消光系数;(c) 退偏振比

图6 2018年11月24日“北京-天津-霸州-固安-北京”走航监测结果

Fig. 6 Extinction coefficients and depolarization ratio observed by mobile lidar along route of Beijing-Tianjing-Bazhou-Guan-Beijing on Nov. 24, 2018

南北部.如图9(b)所示,第一次沙尘过程,气团传输距离较远,移动速度较快,由新疆天山北麓,经多个沙源地进入京津冀及周边区域.12月2日00:00[图9(c)],北京本地污染叠加东南方向回流污染

气团,再次导致了重度污染.2018年12月3日04:00[图9(d)],北京出现本次重污染中第二次沙尘过程的 PM_{10} 峰值,对比图9(b)和图9(d)可以发现,该时段污染气团也是来自西北方向,但移动速度

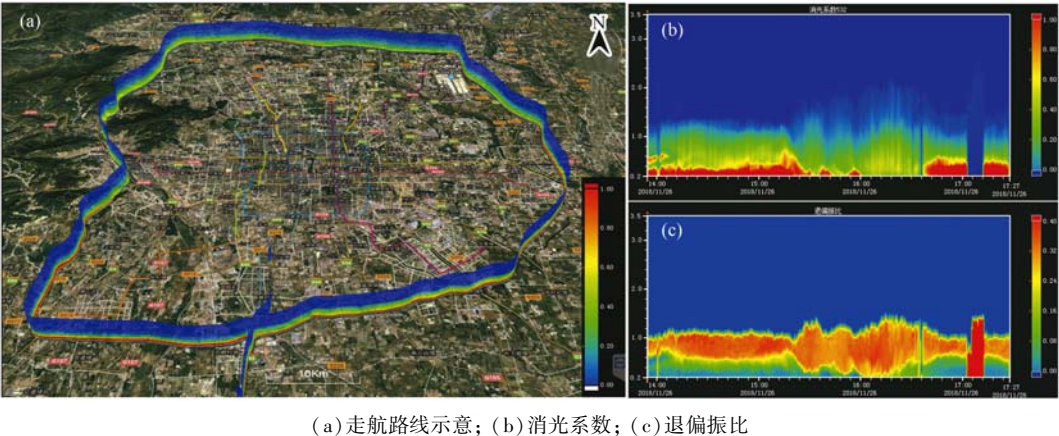


图 7 2018 年 11 月 26 日北京六环绕行走航监测结果

Fig. 7 Extinction coefficients and depolarization ratio observed by mobile lidar around Sixth Ring Road on Nov. 26, 2018

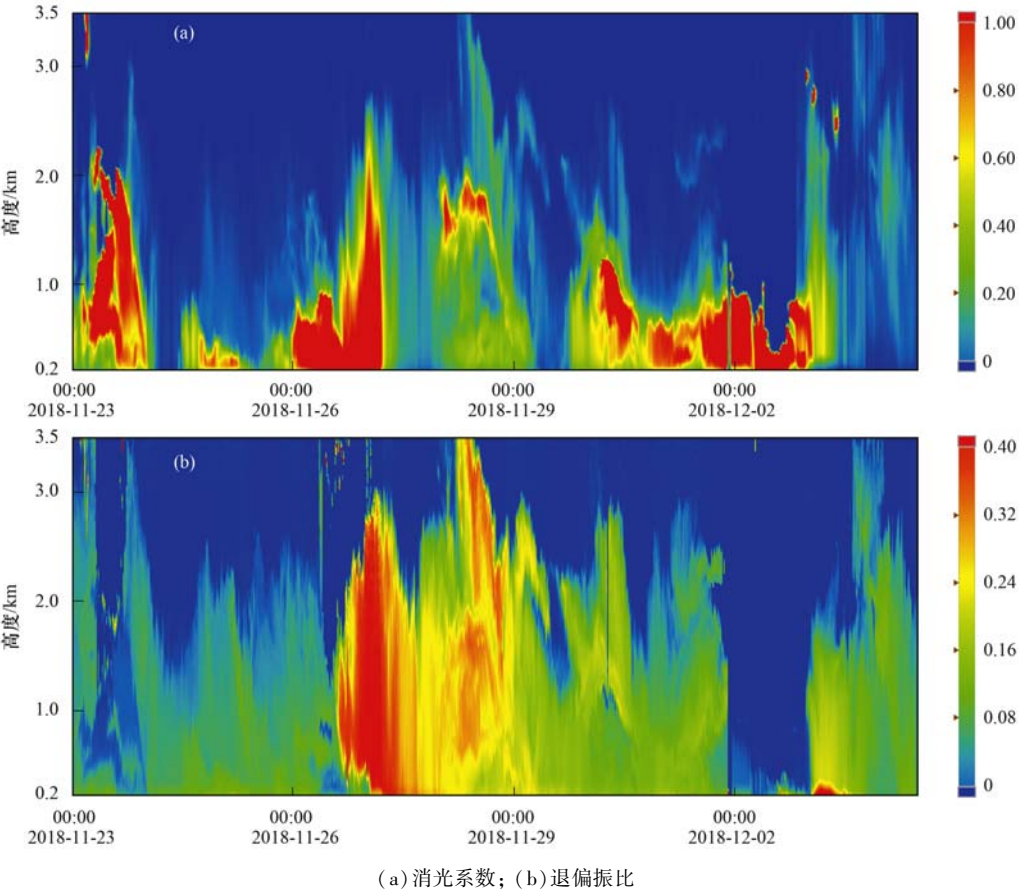


图 8 中国环境监测总站地基雷达监测结果

Fig. 8 Extinction coefficients and depolarization ratio observed by lidar located in China national environmental monitoring center (CNEMC)

较慢,传输距离较近,沙尘携带的粗颗粒物在传输过程中部分沉降,因此北京第二次沙尘过程 PM₁₀ 浓度峰值 632 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 低于第一沙尘浓度峰值 1 147 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.4 污染过程预报效果分析

选取河北北部张家口、北京、天津、河北中部石家庄、河北南部邯郸、山东西部济南、河北、山东和河南三省交界地区城市濮阳、以及河南北部郑州等 8 个典型城市,分析重污染过程期间 NAQPMS、

CMAQ 和 CAMx 这 3 个模式对京津冀及周边地区 PM_{2.5} 浓度的预报效果,部分城市模式 24 h PM_{2.5} 预报结果与实况小时监测结果对比见图 10. 从中可知,2018 年 11 月 23 ~ 26 日白天期间,3 个模式对京津冀中北部城市预报效果均较好,污染起始时间、发展演变趋势总体一致,但对河北南部邯郸和河南北部濮阳的污染形势预报偏低. 11 月 26 日晚间至 11 月 28 日本轮重污染第一次沙尘传输过程期间,模式对大部分城市预报偏低,这主要是由于模式

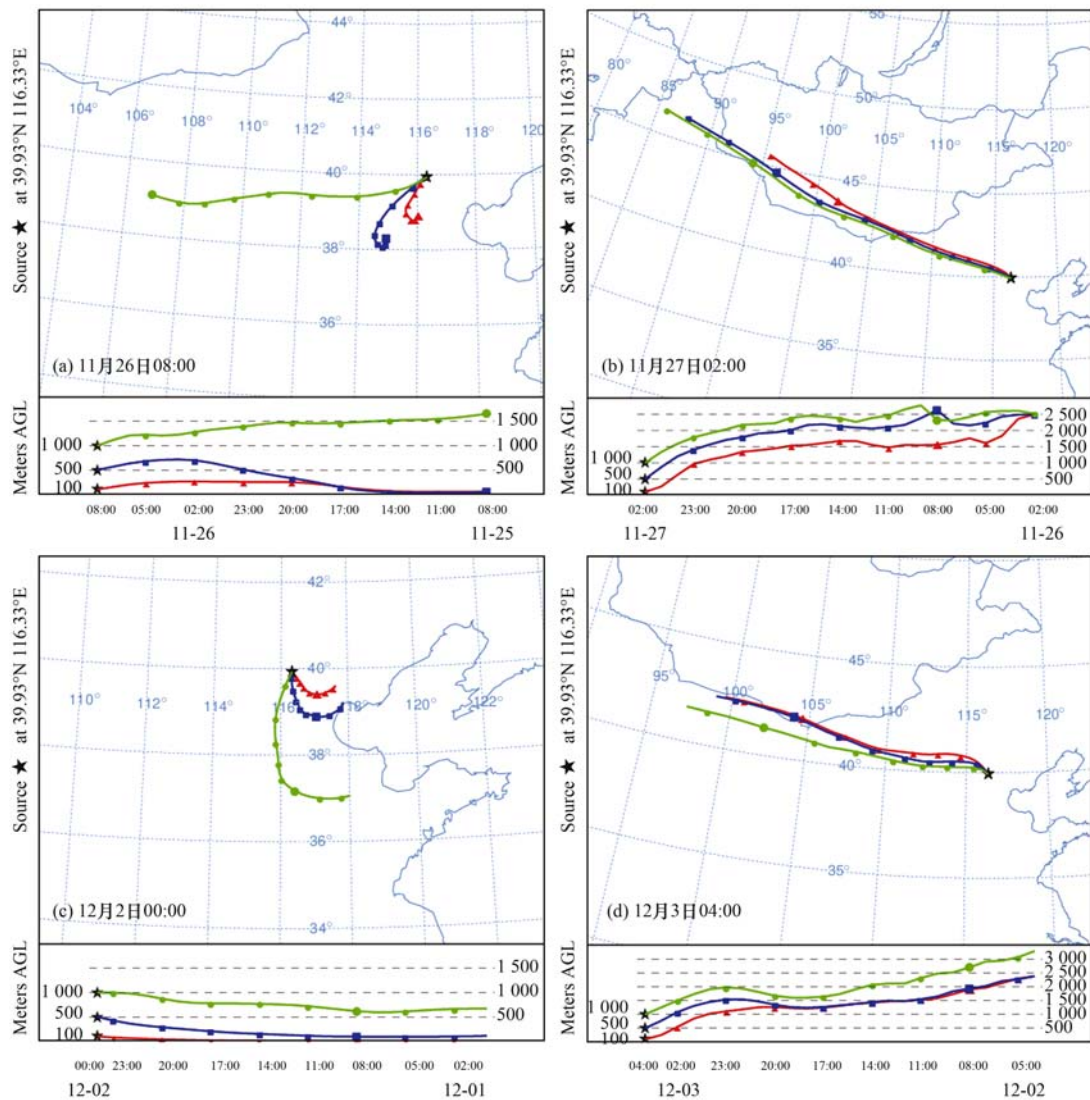


图9 北京市污染过程期间部分时段 24 h 污染气团轨迹

Fig. 9 The 24 h backward trajectories determined by HYSPLIT-4 model arriving at Beijing in typical period in heavy air pollution

$PM_{2.5}$ 预报对沙尘传输和本地扬尘所增加的 $PM_{2.5}$ 预测不足. 11 月 28 日至 12 月 1 日期间, 3 个模式对北京、天津和河北典型城市预报整体偏高, 主要原因是此期间区域北部白天有多次小股弱冷空气扰动, 而模式对局地较小扰动的物理化学机制还不非常清楚, 无法准确预测此期间污染物小时浓度的变化. 同时, 模式对京津冀下游东南方向的济南和濮阳预报总体偏低, 可能是模式未能预测到沙尘传输滞留期间, 细颗粒物浓度的攀升及维持. 12 月 2~3 日期间, 模式对张家口、北京污染低估, 对其它城市均略有高估, 这主要是由于在此期间京津冀北部区域遭遇了本次重污染过程的第二次沙尘传输影响, 模式对受沙尘传输过程影响的 $PM_{2.5}$ 浓度升高预测不足. 此外, 3 个模式均能较好地预测到 12 月 3 日午后至 12 月 4 日污染过程的消散.

采用相关系数 (R)、均方根误差 (RMSE)、平均偏差 (MB) 和标准化平均偏差 (NMB) 对模式数

值日均预报结果进行评估. 典型城市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 模式 24 h 预报评估结果见表 1 和表 2. 如表 1 所示 NAQPMS 模式 $PM_{2.5}$ 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 0.459 ~ 0.778, CMAQ 模式为 0.228 ~ 0.680, CAMx 模式为 0.301 ~ 0.686, 均与实况具有较好的相关性. RMSE 值范围分别为 9 ~ 23、9 ~ 24 和 9 ~ 27 $\mu g \cdot m^{-3}$, 表明模式略有高估. MB 值范围分别为 -2 ~ 2、-3 ~ 3 和 -3 ~ 4 $\mu g \cdot m^{-3}$, NMB 值范围分别为 -16% ~ 25%、-26% ~ 38% 和 -25% ~ 60%, 表明模式 $PM_{2.5}$ 预报值与实际监测值趋势总体一致, 预报效果较好. 3 个模式对比而言, NAQPMS 模式对此次重污染过程 $PM_{2.5}$ 浓度的预报效果要略好于其他模式.

如表 2 所示, 3 个模式 PM_{10} 预报值与实际监测值的相关系数相对较差, RMSE 值范围分别为 24 ~ 57、25 ~ 57 和 29 ~ 56 $\mu g \cdot m^{-3}$, 表明模式 PM_{10} 预报

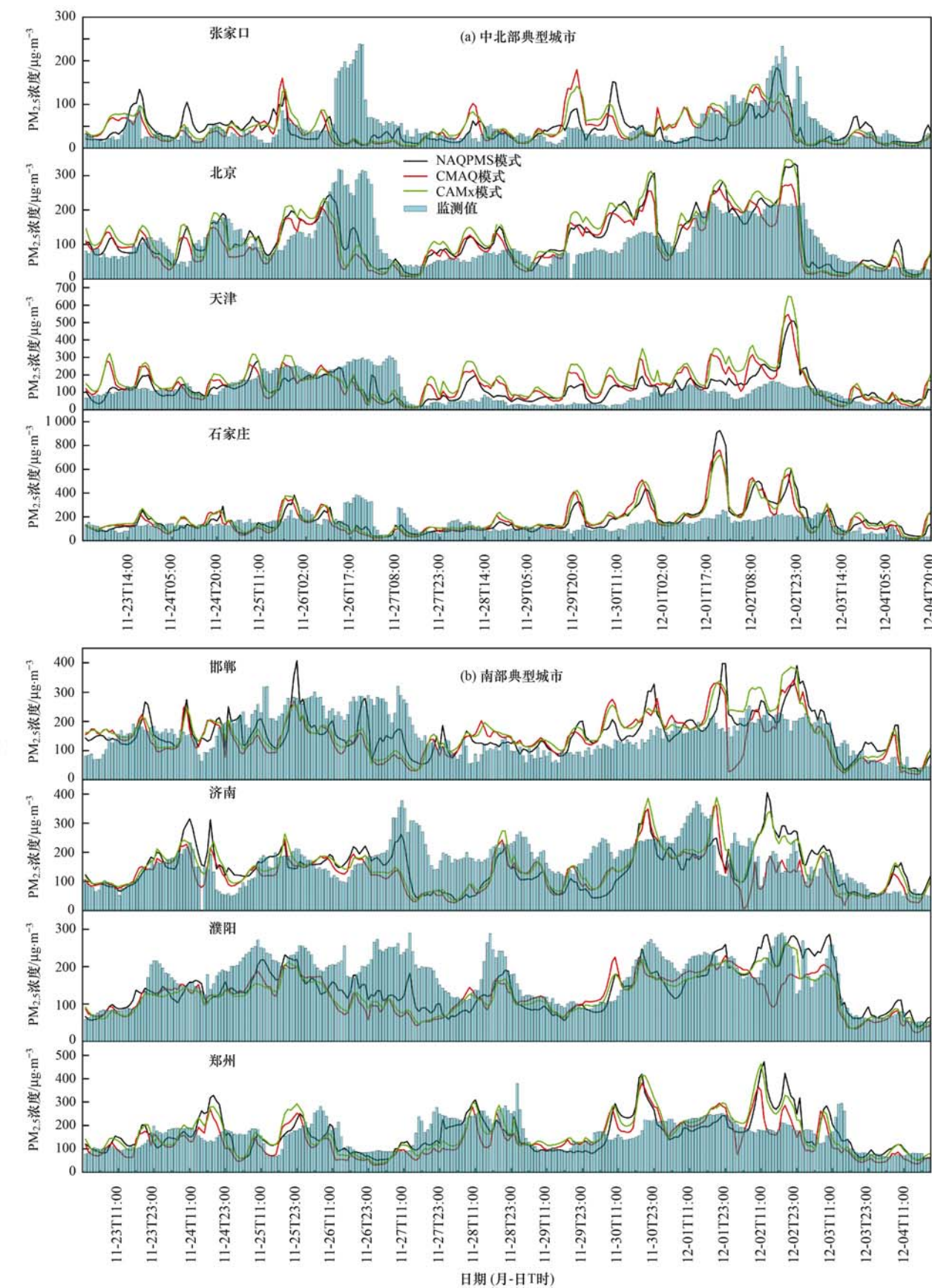


图 10 张家口、北京、天津、石家庄和邯郸、济南、濮阳、郑州 NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 模式 24 h PM_{2.5} 预报与实况监测小时结果对比

Fig. 10 Comparison of PM_{2.5} hourly concentration with NAQPMS, CMAQ, and CAMx between predicted and measured data in Zhangjiakou, Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, Handan, Jinan, Puyang, and Zhengzhou

有高估. MB 值范围分别为 $-11 \sim -2$ 、 $-12 \sim -1$ 和 $-11 \sim 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NMB 值范围分别为 $-72\% \sim -20\%$ 、 $-72\% \sim -10\%$ 和 $-68\% \sim 10\%$, 表明模式 PM_{10} 预报值与实际监测值趋势总体一致, 但存在预报偏差. PM_{10} 模式预报效果差于 $\text{PM}_{2.5}$, 主要是由于

模式对沙尘发展过程的动态演变趋势模拟预报存在一定偏差, 因此影响 PM_{10} 预报效果, 此外, 目前模式在计算 PM_{10} 浓度时没有把沙尘过程带来的 PM_{10} 计算进去, 造成此次 $\text{PM}_{2.5}$ 叠加两次沙尘的重过程中 PM_{10} 的预报存在一定偏差.

表 1 NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 模式 $\text{PM}_{2.5}$ 24 h 预报结果评估

Table 1 Evaluation of 24 h $\text{PM}_{2.5}$ 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	0.426	9	-1	-16	0.421	9	-1	-15	0.490	9	0	-6
北京	0.778	12	2	23	0.680	12	1	8	0.686	15	2	29
天津	0.549	16	1	19	0.375	21	3	38	0.301	27	4	60
石家庄	0.443	23	2	25	0.351	24	2	25	0.359	24	3	33
邯郸	0.583	13	1	6	0.228	17	0	-3	0.307	18	1	6
济南	0.474	12	1	9	0.560	10	0	-5	0.538	12	1	10
濮阳	0.667	13	-2	-16	0.634	15	-3	-26	0.629	15	-3	-25
郑州	0.679	12	1	9	0.663	11	-1	-7	0.628	14	1	10

表 2 NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 模式 PM_{10} 24 h 预报结果评估

Table 2 Evaluation of 24 h PM_{10} 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	-0.057	57	-9	-72	-0.096	57	-9	-72	-0.062	56	-9	-68
北京	0.122	26	-3	-25	0.074	28	-4	-36	0.056	27	-2	-19
天津	-0.027	24	-2	-20	-0.143	25	-1	-10	-0.184	29	1	10
石家庄	0.237	39	-7	-31	0.170	40	-7	-33	0.147	36	-5	-26
邯郸	0.062	48	-11	-47	-0.064	53	-12	-52	-0.107	49	-11	-45
济南	-0.154	42	-8	-40	0.217	44	-10	-49	0.064	39	-7	-38
濮阳	-0.006	38	-8	-43	0.128	41	-9	-50	0.021	40	-9	-47
郑州	-0.037	44	-7	-37	0.009	47	-9	-45	-0.074	42	-6	-30

从上述分析可以看出, 3 个模式基本上均能够预测到整个重污染过程的时空演变, 但对不同城市不同污染阶段预报效果不尽相同, 个别城市的污染起始时间、积累速度、浓度峰值、改善时间、以及沙尘区域传输预报结果也略有偏差, 这也是空气质量预报多采用多模式和集合预报的原因. 不同城市预报效果不同, 以及小时浓度预报偏差产生的可能原因主要是: ①气象模式预报存在不确定性: 气象模式 WRF 边界层模拟准确率以及沙源地起沙过程预报有待进一步提高. ②大气化学反应机制存在不确定性: 局地较小扰动的物理化学机制不明晰, 区域空气质量模式对小尺度城市级的精细化预报准确度有待提高. ③排放清单的不确定: 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不准; 此外模式预报未考虑人为污染源的改变, 因此, 此次重污染过程中各地区停产、限产、错峰生产等各种应急响应措施的执行也会导致预报偏差.

3 结论

- (1)2018 年 11 月 23 日至 12 月 4 日, 京津冀及周边地区出现了一次大范围、长时间重度及以上污染过程, $\text{PM}_{2.5}$ 叠加两次沙尘传输, 导致京津冀传输通道“2+26”城市均达到重至严重污染水平. 第一次沙尘传输对京津冀及周边区域颗粒物浓度及空气质量的影响要大于第二次沙尘传输过程, 整个重污染期间, 张家口、北京、石家庄、邯郸和郑州 PM_{10} 小时浓度峰值为 1 589、864、794、738 和 766 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度峰值浓度为 239、319、387、321 和 380 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.
- (2)气象条件对区域重污染的形成、发展及消退具有很大影响, 地面弱气压场、高湿、逆温等静稳天气条件和西北路径沙尘传输是导致此次重污染过程的主要气象和天气因素.
- (3)激光雷达地基和车载走航监测, 结合地面环境空气质量自动监测和气象因素分析可较好地观

测和研究区域污染传输情况,揭示了该次重污染过程中,区域西南、西北和东南传输通道发生了污染物传输。HYSPLIT 后向轨迹表明,北京在以 PM_{2.5} 为首要污染物的重污染阶段主要受西南和东南方向污染输送影响,在 PM₁₀ 为首要污染物的重污染阶段主要受西北方向沙尘传输影响。

(4) NAQPMS、CMAQ 和 CAMx 这 3 个模式均可预测到重污染过程的时空演变,但对个别城市的污染起始时间、积累速度、浓度峰值、改善时间、以及沙尘传输预报略有偏差。这与气象模式预报、大气化学反应机制、污染源清单的不确定性和重污染应急响应导致的污染源排放改变有一定关系。

参考文献:

- [1] 王占山,李云婷,孙峰,等. 2015 年 1 月下旬北京市大气污染过程成因分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(7): 2324-2331.
Wang Z S, Li Y T, Sun F, *et al.* Formation mechanism of air pollution episodes in Beijing in late January 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(7): 2324-2331.
- [2] 薛亦峰,周震,聂滕. 2015 年 12 月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1593-1601.
Xue Y F, Zhou Z, Nie T, *et al.* Exploring the severe Haze in Beijing during December, 2015: Pollution process and emissions variation [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- [3] Hua Y, Wang S X, Jiang J K, *et al.* Characteristics and sources of aerosol pollution at a polluted rural site southwest in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 519-527.
- [4] 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.
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.
- [5] Kim B U, Bae C H, Kim H C, *et al.* Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: case study of high particulate matter event [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **162**: 55-70.
- [6] 王郭臣,王东启,陈振楼. 北京冬季严重污染过程的 PM_{2.5} 污染特征和输送路径及潜在源区[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 1931-1937.
Wang G C, Wang D Q, Chen Z L. Characteristics and transportation pathways and potential sources of a severe PM_{2.5} episodes during winter in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 1931-1937.
- [7] 滑申冰,师华定,王堃,等. 2016—2017 年冬季华北地区一次重污染过程的气象条件分析[J]. 气象与环境科学, 2018, **41**(4): 47-53.
Hua S B, Shi H D, Wang K, *et al.* Analysis of meteorological conditions for a heavy pollution process in North China during 2016-2017 winter [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2018, **41**(4): 47-53.
- [8] 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 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.
- [9] 皮冬勤,陈焕盛,魏巍,等. 京津冀一次重污染过程的成因和来源[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 1899-1908.
Pi D Q, Chen H S, Wei W, *et al.* The causes and sources of a heavy-polluted event in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 1899-1908.
- [10] 梁晓宇,单春艳,孟瑶,等. 唐山一次冬季重污染过程污染特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 1804-1812.
Liang X Y, Shan C Y, Meng Y, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a heavy winter air pollution event in Tangshan [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 1804-1812.
- [11] 贾小芳,颜鹏,孟昭阳,等. 2016 年 11—12 月北京及周边重污染过程 PM_{2.5} 特征[J]. 应用气象学报, 2019, **30**(3): 302-315.
Jia X F, Yan P, Meng Z Y, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} in heavy pollution events in Beijing and surrounding areas from November to December in 2016 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, **30**(3): 302-315.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
Lü 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.
- [15] 张敬巧,吴亚君,张萌,等. 聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4026-4033.
Zhang J Q, Wu Y J, Zhang M, *et al.* PM_{2.5} Pollution characterization and cause analysis of a winter heavy pollution event, Liaocheng City [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4026-4033.
- [16] 王涛,李杰,王威,等. 北京秋冬季一次重污染过程 PM_{2.5} 来源数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(4): 1025-1038.
Wang T, Li J, Wang W, *et al.* Numerical simulation study on source apportionment of PM_{2.5} in a heavy winter pollution event over Beijing area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(4): 1025-1038.
- [17] 李杏茹,白羽,陈曦,等. 北京冬季重污染过程大气细颗粒物化学组成特征及来源分析[J]. 环境化学, 2018, **37**(11): 2397-2409.
Li X R, Bai Y, Chen X, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} during winter in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, **37**(11): 2397-2409.
- [18] 刘盈盈,殷宝辉,王静,等. 济南冬季大气重污染过程颗粒

- 物组分变化特征[J]. 环境化学, 2018, **37**(12): 2749-2757.
- Liu Y Y, Yin B H, Wang J, *et al.* Characteristics of airborne particles compositions during winter heavy pollution days in Jinan [J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(12): 2749-2757.
- [19] 陈楚, 王体健, 李源昊, 等. 濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3421-3430.
- Chen C, Wang T J, Li Y H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of fine particulate matter in autumn and winter in Puyang, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3421-3430.
- [20] 徐虹, 肖致美, 陈魁, 等. 天津市2017年重污染过程二次无机化学污染特征分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2519-2525.
- Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Secondary inorganic pollution characteristics during heavy pollution episodes of 2017 in Tianjin [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2519-2525.
- [21] 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.
- [22] 肖致美, 徐虹, 李鹏, 等. 京津冀区域重污染期间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 PM_{2.5} during heavy pollution events in the Jing-Jin-Ji Region [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4303-4309.
- [23] 段时光, 姜楠, 杨留明, 等. 郑州市冬季大气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 86-93.
- Duan S G, Jiang N, Yang L M, *et al.* Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou [J]. Environment Science, 2019, **40**(1): 86-93.
- [24] 闫世明, 王雁, 郭伟, 等. 太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- Yan S M, Wang Y, Guo W, *et al.* Characteristics, transportation, pathways, and potential sources of air pollution during autumn and winter in Taiyuan [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 4801-4809.
- [25] 吴兑, 吴晟, 李菲, 等. 粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(4): 540-545.
- Wu D, Wu S, Li F, *et al.* Air pollution episode in southern China due to the long range transport of coarse particle aerosol [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(4): 540-545.
- [26] 霍彦峰, 邓学良, 弓中强, 等. 2017年5月长三角地区一次沙尘重污染天气成因分析[J]. 气象与环境学报, 2019, **35**(1): 26-34.
- Huo Y F, Deng X L, Gong Z Q, *et al.* Formation analysis of a heavy dust pollution event in the Yangtze River Delta in May 2017 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, **35**(1): 26-34.
- [27] 魏巍, 皮冬勤, 晏平仲, 等. 2017年春季华北地区一次典型沙尘重污染天气过程研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(5): 1699-1707.
- Wei W, Pi D Q, Yan P Z, *et al.* Study on a typical dust pollution process in North China in spring in 2017 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(5): 1699-1707.
- [28] 熊亚军, 唐宜西, 寇星霞, 等. 北京春季一次霾和沙尘混合污染天气过程分析[J]. 干旱气象, 2017, **35**(1): 100-107.
- Xiong Y J, Tang Y X, Kou X X, *et al.* Analysis of a haze and sand-dust mixed pollution weather in Spring of Beijing [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, **35**(1): 100-107.
- [29] 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 等. 北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2582-2594.
- Wang Y T, Li Q C, Zheng Z F, *et al.* Research on the pollution characteristics and causality of haze-sand air pollution in Beijing in spring [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2582-2594.
- [30] 徐文帅, 张大伟, 李云婷, 等. 北京两次沙尘污染过程中PM_{2.5}浓度变化特征[J]. 气候与环境研究, 2016, **21**(1): 78-86.
- Xu W S, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Variation of PM_{2.5} concentration during two dust pollution events in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research, 2016, **21**(1): 78-86.
- [31] 木拉提, 王佳佳, 丽娜, 等. 沙尘天气期间大气PM_{2.5}和PM₁₀中部分元素浓度的变化特征[J]. 环境与健康杂志, 2010, **27**(9): 755-758.
- Mu L T, Wang J J, Li N, *et al.* Feature analysis of metal components of PM_{2.5} and PM₁₀ during sand dust weather [J]. Journal of Environment and Health, 2010, **27**(9): 755-758.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)