

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.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国(4767)

中国水泥排放清单及分布特征 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞(4776)

环境空气 PM_{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例 张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹(4786)

南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程(4803)

郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析 张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹(4813)

山西大学城 PM_{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估 李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇(4825)

2000~2019年中国 PM_{2.5} 时空演化特征 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富(4832)

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军(4844)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐(4855)

基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠(4864)

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 孙佳宁, 谢绍东(4874)

芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜(4885)

密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双(4895)

北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫(4905)

2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 辛华荣, 朱广伟, 王雷松, 李骏, 陆隽(4914)

雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆(4924)

基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强(4936)

会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评估 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一(4948)

太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程(4958)

强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海(4970)

长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 苏超, 崔严(4981)

嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评估 杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷(4989)

污水处理厂对漓江桂林市河段淡水生物中微塑料累积的影响 谢元沅, 张清科, 张漓杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳(4999)

村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送(5008)

冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌(5016)

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇(5027)

长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣(5037)

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟(5050)

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰(5060)

纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金山, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英(5073)

温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N₂O 释放的影响 王丝可, 于恒, 左剑恶(5082)

以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A²/O 污染物去除特性 荣懿, 邵劲博, 于优城, 石恒, 金鹏康(5089)

不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清(5097)

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 田中科, 王芬, 闫钊(5106)

基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 韩琳, 徐夕博(5114)

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 沈城, 刘霞雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛(5125)

有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因素 侯静雯, 施维林, 高娟(5133)

硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英(5143)

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰(5151)

重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 王晓宇, 韩辉(5160)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君(5168)

氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发影响 张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔(5176)

生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋(5185)

铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰(5193)

典型水环境微生物源异味物研究进展 张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥(5201)

广告:国家微生物科学数据中心 (前插)

《环境科学》征订启事(4785) 《环境科学》征稿简则(4947) 信息(5015, 5124, 5132)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析

蔡子颖^{1,2}, 杨旭^{1,2}, 韩素芹^{1,2}, 姚青^{1,2}, 刘敬乐³

(1. 天津市环境气象中心, 天津 300074; 2. 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300074; 3. 天津市气象科学研究所, 天津 300074)

摘要: 区域输送是大气污染防治中需要考虑的重要因素, 本文利用大气化学模式定量估算 2016 年 10 月~2017 年 9 月区域输送对天津的影响, 重点基于天气背景分析区域输送影响和气象条件的关系, 为京津冀地区大气污染联防联控提供支撑. 结果表明, 京津冀地区各城市区域输送贡献百分率平原城市显著高于沿山城市, 天津一次 PM_{2.5} 本地贡献 62.9%, 区域输送贡献 37.1%, 主要受沧州、廊坊、河北中南部、北京、唐山和山东等地输送影响, 每年 4~6 月区域输送最显著, 7~8 月区域输送最弱. 区域输送与天气形势、风场和降水等气象条件密切相关, 高压后和锋前低压是区域输送占比最高的两种污染天气类型, 西南风、西风和南风 3 个风向下天津大气污染输送影响最为明显, 风速 2~3 m·s⁻¹ 时最有利于 PM_{2.5} 区域传输, 降水超过 5 mm 以上将降低大气污染物区域传输效率. 对于不同污染类型和重污染阶段, 轻度污染天气时区域输送贡献最为明显, 比均值偏高 20.5%, 重污染天气虽受静稳气团控制, 但由于周边区域高浓度的 PM_{2.5}, 污染气团迁移对区域内污染聚集传输有显著影响, 重污染期间 PM_{2.5} 输送贡献占比超过均值, 约偏高 10%~15%. 重污染过程中, 开始积累阶段和峰值阶段, 输送贡献占比高于其它时期, 与暴发阶段相比偏高 14.5% 和 19.5%, 重污染暴发阶段本地排放贡献更明显, 比均值偏高 9.9%.

关键词: 区域输送; 数值模拟; 标记法; 天津; 天气背景

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-4855-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202004252

Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background

CAI Zi-ying^{1,2}, YAN Xu^{1,2}, HAN Su-qin^{1,2}, YAO Qing^{1,2}, LIU Jin-le³

(1. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China; 2. CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Meteorological Institute, Tianjin 300074, China)

Abstract: Regional transport is an important factor when considering the prevention and control of air pollution. The aim of this study was to provide support for the joint prevention and control of air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region. With a focus on an analysis of the relationship between regional transport and meteorological conditions based on the weather background, an atmospheric chemical model was developed to quantitatively estimate the impact of regional transport on Tianjin from October 2016 to September 2017. The results showed that the contribution percentage of regional transport in cities in plains in the Beijing-Tianjin-Hebei region was significantly higher than in cities in mountains. The local contribution of PM_{2.5} in the Tianjin area was 62.9% and the contribution of regional transport was 37.1%. This was mainly affected by transmissions of Chanzhou, Langfang, central and southern Hebei, Beijing, Tanshan, and Shandong. Regional transport was the most significant from April to June, the weakest from July to August, and the highest contributor to local emissions. Regional transport was closely related to weather situation, wind field, precipitation, and other meteorological conditions. Post-high pressure and pre-frontal low pressure were the two types of pollution weather with the highest proportion in regional transport, and the impact of air pollution transport under the southwest wind, westerly wind and south wind was the most apparent. Wind speed of 2-3 m·s⁻¹ was beneficial to the regional transport of PM_{2.5}, and precipitation above 5 mm will effectively reduce the regional transport of air pollutants. For different pollution types and heavy pollution stages, the contribution of regional transport was the most apparent in light pollution weather, being 20.5% higher than the average. The heavy pollution weather was controlled by static stable air mass, and because of the migration of high PM_{2.5} concentrations, pollution air mass in the surrounding area had a significant impact on the accumulation of pollution and transport in the region. The contribution ratio of PM_{2.5} transport in the heavy pollution period was more than the average and was approximately 10% and 15% higher. In the process of heavy pollution, the proportion of transport contribution in the initial accumulation stage and peak stage were higher than in other periods, and 14.5% and 19.5% higher than in the outbreak stage. The contribution of local emissions in the outbreak stage was more significant, being 9.9% higher than average.

Key words: regional transport; numerical simulation; labeling method; Tianjin; weather background

京津冀地区受排放、气象和地理环境等多重因素影响, PM_{2.5} 始终高于全国平均水平, 重污染天气频发成为困扰该地区政府和公众的突出生态环境问题. 为提升区域大气环境综合治理能力, 近年来从大气污染特征^[1] 到气象条件影响^[2,3], 从污染来源到

收稿日期: 2020-04-28; 修订日期: 2020-05-20

基金项目: 天津市自然科学基金项目(19JCQNJC08000); 国家自然科学基金项目(4177012485); 天津市重大专项(18ZXAQSF00130, 18ZXSZSF00160); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-007)

作者简介: 蔡子颖(1984~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: 120078030@163.com

能源结构影响^[4],从监测方法^[5]到控制策略影响^[6,7],从行业影响到治理方式,从风险评估到健康影响^[8-10]均开展了深入研究,2017年启动大气重污染成因与治理攻关项目,几乎汇聚所有国内顶尖大气环境专家,对京津冀大气污染成因进行研判分析,区域空气质量也在技术攻关和防控措施执行中明显改善.近年该区域建立了京津冀及周边综合立体观测网^[11],空气质量站、气溶胶激光雷达、单颗粒质谱、在线 EC/OC、在线离子和在线元素的仪器被用于网络化的观测,基于大气颗粒物浓度及其化学组分精准观测的大气污染成因和来源解析被有序开展^[12],构建了高精度分行业的排放清单^[13-15],NAQMS(中国科学院大气物理研究所嵌套空气质量预报系统)模式^[16-18]和 CUACE^[19](Chinese unified atmospheric chemistry environment)等一些优秀的国产大气化学模式不断发展成熟,在区域大气环境解析、预测和模拟中发挥积极作用,模式分析的伴随技术^[20],过程分析技术和源追踪技术也得到发展,大气环境中二次有机气溶胶机制被深度研究^[21-25],建立了区域联合会商机制,从小时到月尺度的大气污染气象条件和空气质量变化趋势被精准预测,精细化和科学大气污染防治措施被提出,一些高耗能的行业和专项行业的大气污染防治方案被研究,京津冀区域空气质量规划和中长期路线图被制定.

在大气环境研究中,区域输送是一个不可被忽略的问题,京津冀区域西侧太行山、北侧燕山形成的弧形山脉,既有对冷空气活动阻挡和削弱作用,也使得过山气流越过弧形山脉,容易在背风地区产生弱下沉运动,导致下沉逆温的增加,进一步降低区域平原地区垂直扩散能力和大气环境容纳能力.区域山前空气之流动性较弱,形成气流滞留区,但沿山和平原的大气污染传输依旧明显,区域内各城市空气质量的改善,不仅与本地治理和气象条件密切相关,也与气流导致的大气污染物和水汽聚集传输密切相关.关于该区域输送影响的研究,观测和数值模拟是最主要的手段,如 Han 等^[25]通过系留气艇探空和激光雷达对天津 2015 年 12 月 20~25 日重污染天气输送影响进行解析.关于区域输送数值模拟的方法,早期多使用开关模式的排放源进行敏感性试验,如刘琳等^[26]对河南冬季大气颗粒物的区域输送特征研究,或者基于一些简单的大气扩散模式进行估算,如王媛等^[27]基于 WRF 和 CALPUFF 比较了 2012 年 1 月和 2016 年 1 月京津冀“受体城市”和“源地城市”变化情况.近年随着模式技术的发展,伴随技术和标记法被更多地用于区域输送的模拟,其有效地提高了研究的效率,如 Wang 等^[7]利用自

主研制的嵌套网格空气质量数值预报模式,分析 2013 年 1 月我国中东部的持续强灰霾天气中京津冀区域外的跨城市群输送对京津冀 PM_{2.5}浓度贡献和区域内输送的贡献;王燕丽等^[28]通过 CMAX-PSAT 空气质量模型对该京津冀区域 2015 年输送特征开展研究.

天津毗邻渤海西侧,是京津冀地区重要城市,其区域输送影响研究也是大气污染防治中一个重要问题,薛文博等^[29]基于 CMAX-PSAT 空气质量模型估算 2010 年天津 PM_{2.5}外来输送贡献约为 42%,Hao 等^[30]基于 HYSPLIT 的轨迹确定了天津主要传输路径和潜在源区,周阳等^[31]在城市输送分析的基础上,进一步明确了天津各区之间传输的影响.相比天津之前的研究,更多地偏向模式结果的统计,缺少气象和传输影响的相关研究.大气污染的产生,受到排放源和气象条件双重影响,在天气背景下研究大气污染输送规律,将有助于更好地精准开展大气污染区域联防联控.

本文基于 WRF/Chem 模式,在模式中通过在线标记法^[32,33]实现区域输送对天津影响的定量估算,通过中国多尺度排放清单模型 MEIC2016 源^[34,35](分辨率 0.25°)模拟 2016 年 10 月~2017 年 9 月城市输送对天津影响,在此基础上结合天气背景开展区域输送特征研究,分析区域输送和气象条件的关系,以期更好地理解区域输送对天津大气环境的影响,并为京津冀地区大气污染防治区域联防联控提供支撑.

1 材料与方法

1.1 监测数据

监测数据分为 2 个部分,其中 PM_{2.5}质量浓度数据来自天津市生态环境监测中心发布的 28 个站逐小时 PM_{2.5}质量浓度监测数据,周边地区空气质量监测数据来自生态环境部发布的逐小时 PM_{2.5}质量浓度监测数据.气象数据来自中国气象部门监测,包括地面海平面气压分布,以及国家站和区域气象站的风速、温度和湿度监测数据.

1.2 标记法大气化学模式建立

WRF/Chem^[36,37]模式是 NCAR 和 NOAA 联合一些大学和研发机构开发的中尺度在线大气化学模式,模式考虑大气污染的化学过程、平流输送、湍流扩散和干湿沉降过程,在全球空气质量预报和模拟中有广泛的运用.本文采用 WRF/chem3.4 版本,模式的人为排放源清单使用清华大学 MEIC2016,分辨率 0.25°×0.25°,化学过程采用 MOZART-4,长波辐射方案和短波辐射方案均采用 RRTMG,边界层方案

使用 YSU 方案,模式采用两层嵌套,水平分辨率分别为 27 km 和 9 km(图 1),水平网格 91×91 和 109×109 ,中心经纬度为 38.6°N , 116.2°E ,垂直方向分为 27 层,气象初始场和背景场均使用 NECP 的 FNL 全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 数据. 开发过程中将一次源 $\text{PM}_{2.5}$ 标记方法整合到模型中,以便在污染期间识别不同源区对模拟地区的主要 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献. 标记方法是类似于颗粒物分配技术(PAST)的质量平衡技术,可以将其应用于任何区域,它跟踪并计算了较大模拟区域内各标记区 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献浓度,这种标记方法中的示踪剂考虑了物理过程(例如平流、垂直混合和对流)的影响,在该方法中,模拟区域被分成 20 个源区域(包括天津、北京和河北地区 11 个城市),并且将每个源区域识别的主要 $\text{PM}_{2.5}$ 作为独立变量进行跟踪. 对于每个时间,通过 i 识别的一次源 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度使用以下等式计算:

$$C_i(t + \Delta t) = C_i(t) + \Delta C_i \quad (1)$$

式中, $C_i(t)$ 是在 t 时刻识别区域 i 的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, Δt 是时间步长, ΔC_i 是初始 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化,由下式确定:

$$\Delta C_i = \Delta \text{Chem}_i + \Delta \text{Phy}_i + \Delta \text{EmiS}_i \quad (2)$$

式中, ΔChem_i 是由化学反应引起的浓度变化,在气溶胶化学中,一次源 $\text{PM}_{2.5}$ 不参与化学计算,因此, ΔChem_i 为 0; ΔPhy_i 是物理过程的总和(包括平流、垂直混合、干湿沉降和对流),每个跟踪变量都像正常模拟那样进行物理过程的所有相关计算,但不会干扰正常模型计算,因此将直接获得物理过程引起的浓度变化. ΔEmiS_i 是区域 i 内的总排放量,由下式确定:

$$\Delta \text{EmiS}_i(x, y, z) = \begin{cases} \Delta \text{EmiS}(x, y, z), & (\text{在 } i \text{ 区域内}) \\ 0, & (\text{在 } i \text{ 区域外}) \end{cases}$$

表 1 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日在线源追踪模型 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟能力

Table 1 $\text{PM}_{2.5}$ simulation capability of online source tracking model from October 1, 2016 to September 30, 2017

城市	相关系数	模拟均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	实况均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	平均偏差/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对误差/%
天津	0.81	72.96	73.72	-0.76	38
北京	0.75	59.23	72.57	-13.35	39
保定	0.8	94.92	100.81	-5.89	31
沧州	0.82	66.86	75.12	-8.26	34
邯郸	0.7	102.76	94.84	7.92	45
衡水	0.82	77.31	86.71	-9.40	33
廊坊	0.81	72.15	71.72	0.43	37
石家庄	0.78	109.16	111.47	-2.31	34
唐山	0.84	80.37	77.17	3.20	32
邢台	0.81	96.56	93.08	3.48	36

2 结果与讨论

2.1 基于数值模拟天津及周边地区细颗粒物来源分析

基于标记法大气化学模式,计算 2016 年 10 月

对于区域中的任何网格,如果它在区域 i 中,则为 $\Delta \text{EmiS}_i(x, y, z)$ 等于 $\Delta \text{EmiS}(x, y, z)$, 否则等于 0. 与传统的灵敏度分析相比,这种一次源 $\text{PM}_{2.5}$ 标记模型可以更准确地测量所有相关区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,同时减少计算误差.

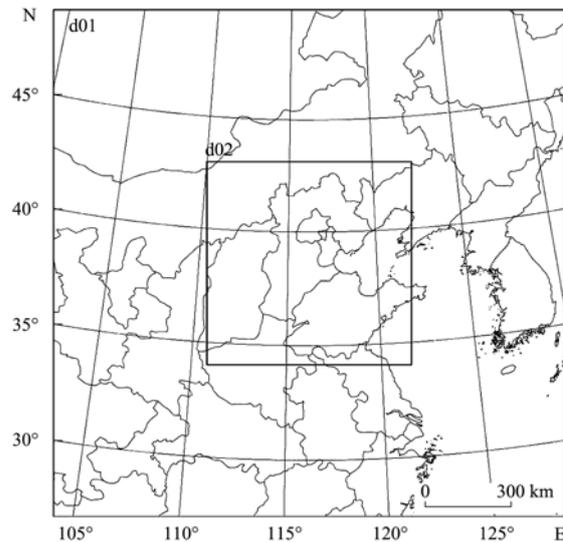


图 1 模式模拟区域和范围

Fig. 1 Area and range of the model simulation

1.3 基于标记法的大气化学模式检验

本研究时间为 2016 年 10 月 1 日至 2017 年 9 月 30 日,对研究期间京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和模拟进行检验,京津冀地区 10 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值和观测值相关系数 0.79,模拟均值 $83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,实况均值 $86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,平均偏差从 $-13 \sim 8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相对误差 36%. 本研究期间数值模拟可以较好地反映细颗粒物变化趋势(见表 1、表 2 和图 2),且空间分布合理. 气象要素模拟检验显示,风、温和湿度模拟准确,可用于区域传输影响分析.

1 日至 2017 年 9 月 30 日京津冀地区主要城市一次 $\text{PM}_{2.5}$ 来源(表 3). 通过数据分析显示:尽管区域输送对 $\text{PM}_{2.5}$ 有显著影响,但本地排放仍然是地区空气质量好坏的决定性因素,13 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 来源平均本地贡献 58%,区域输送贡献 42%,其中保定、唐山、

石家庄和北京本地贡献均超过 70%。影响京津冀地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度主要来自京津冀本身,其贡献 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 83%;天津、北京、保定、廊坊、石家庄、唐山和承德 $PM_{2.5}$ 主要来自京津冀地区,京津冀对上述城市 $PM_{2.5}$ 贡献超过 85%;沧州和衡水位于京津冀东南部,山东对其影响明显,贡献分别为 17.2% 和 8.9%;邯郸和邢台位于京津冀南端,河南省对其输送有一定影响,贡献分别为 10.1% 和 5.0%;张家口受到山西和陕西一次细颗粒物输送

的影响,贡献为 12.9%;秦皇岛受到辽宁一次细颗粒物输送的影响,贡献为 18.8%。

表 2 2016 年 10 月 1 日-2017 年 9 月 30 日在线源追踪模型
天津地区气象模拟能力

项目	相关系数	相对误差/%	平均偏差
相对湿度	0.89	13.1	-5.3
气温	0.99	7.0	-0.38
平均风速	0.73	44.7	0.63

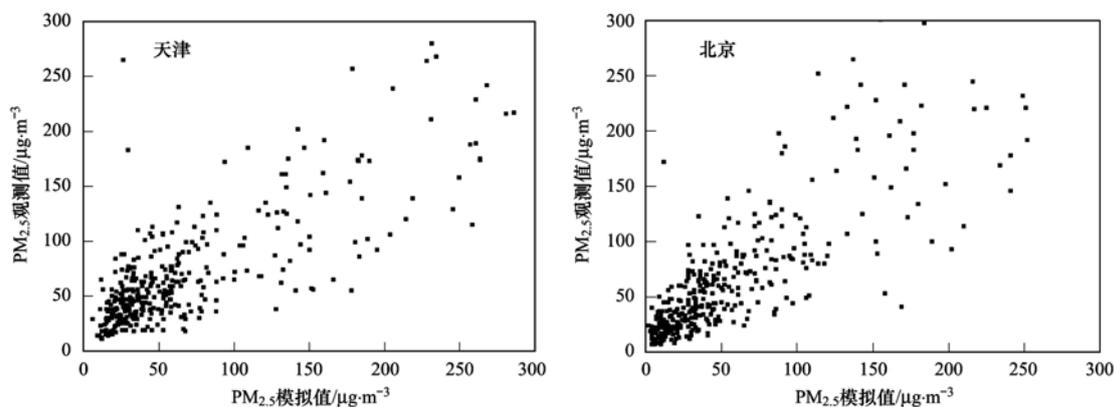


图 2 天津和北京地区 $PM_{2.5}$ 模拟和观测值比较

Fig. 2 $PM_{2.5}$ simulation and real-time comparison between Tianjin and Beijing

对比京津冀地区各城市本地源和区域输送贡献,受地理环境和排放空间分布影响,各城市之间有显著差异。燕山山脉和太行山附近城市,由于山体对气流的阻塞,本地排放贡献更高,如保定本地排放贡献达到 82%;平原地区大气自由流动性更强,区域输送影响更明显,天津外地输送占 37%,沧州为 47%;本地排放贡献占比与行政区大小也密切相关,如衡水 8 815 km^2 ,面积约为保定 1/3,且与沧州、石家庄、邢台和山东均接壤,本地排放贡献仅为 33%。

作为京津冀地区的核心城市,北京 $PM_{2.5}$ 区域传输路径主要为两条,一是保定、廊坊、石家庄、邢台和邯郸的沿山输送,贡献在 12%;二是唐山、天津和沧州的偏东路径,贡献在 5%;石家庄的区域输送,主要来自北部保定,其贡献 7%,南部邢台和邯郸,贡献 5%;唐山区域输送影响主要为西南输送通道的天津、廊坊和北京,约占其 $PM_{2.5}$ 的 10%;邢台和邯郸的输送均与太行山输送通道密切相关,河南省对下游邯郸贡献达到 10%,邯郸对下游邢台贡献 16%。基于表 3,总结京津冀地区 $PM_{2.5}$ 区域输送通道,大致可以分为 3 条主要影响通道,一是沿太行山从河南途经邯郸、邢台、石家庄、保定和廊坊,直到北京的沿山西南输送通道;二是途经山东、衡水、沧州、天津、北京和唐山,直到燕山山脉前偏南输送通道;三

是沿燕山山脉唐山、天津、沧州和廊坊,直到北京的偏东输送通道。

天津位于华北平原中部,东临渤海,北部蓟州地区属于燕山山脉一部分,其本地排放占比 62.90%,略高于京津冀平均水平,对其贡献影响较大的几个地区,主要位于其周边,分别为沧州贡献 6.41%,廊坊贡献 5.72%,北京贡献 4.08%,唐山贡献 2.73%,河北中南部(保定、邢台、邯郸、衡水和石家庄)贡献 5.75%,京津冀以外省份主要来自于山东,贡献 5.13%。逐月分析(图 3),天津每年 4~6 月平均风速较高,区域输送贡献占比达到全年峰值,约为 41%~42%,7~8 月进入雨季, $PM_{2.5}$ 质量浓度为全年最低,大气自净能力最强,一次 $PM_{2.5}$ 传输性下降,区域传输贡献约为 33%,采暖季(10 月~次年 3 月)区域传输贡献与全年均值近似,约为 35%~38%。其周边几个影响较为明显的城市,沧州对天津除 7~8 月外,输送贡献占比均超过 5%,在季节转化的 5 月和 9 月表现最为明显,可以达到 8% 以上;廊坊的影响则有明显的季节特征,11 月~次年 4 月,西北风相对频繁,其贡献为 5.8%,5~10 月,冷空气活动弱,地面以西南风为主,其贡献仅为 3.0%;北京对天津的输送与廊坊类似,其更集中在 11 月~次年 3 月,其贡献为 4.6%,其余月份仅为 1.4%;唐山输送影响与东北风的季节分布密切相关,7 月偏东气流盛行时,其

贡献可达到6%,秋冬季贡献为2.8%;河北中南部的影响在每年9月~次年4月,均有明显表现,贡献在6%左右,其余季节则相对较小,约为3.6%,山东省对天津的影响,需要远距离传输,主要集中在每年5~10

月,尤其是海陆温差发生变化时,更多的偏东风会影响天津地区,该期间贡献可以达到8.6%,11月~次年2月,大陆以西南风为主,且陆地温度低于海洋,少海风影响,其贡献仅为3.9%.

表3 京津冀地区主要城市一次PM_{2.5}来源百分比/%

Table 3 Percentage of primary PM_{2.5} sources in major cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region/%

	天津 ¹⁾	北京	保定	沧州	承德	邯郸	衡水	廊坊	秦皇岛	石家庄	唐山	邢台	张家口
北京 ²⁾	4.08	72.65	1.80	1.92	6.76	0.54	2.33	28.20	1.75	0.73	1.99	0.61	2.59
天津	62.90	2.56	0.87	4.19	3.67	0.43	1.66	7.31	3.96	0.47	6.41	0.42	0.74
张家口	0.38	1.97	0.33	0.34	0.86	0.09	0.27	0.78	0.25	0.12	0.19	0.10	65.29
邢台	0.57	0.36	0.84	1.11	0.53	8.25	5.34	0.46	0.53	3.00	0.28	49.60	0.58
唐山	2.73	1.74	0.48	0.98	5.59	0.30	0.75	2.45	17.65	0.29	76.53	0.32	0.85
石家庄	1.02	1.12	4.49	1.33	1.11	4.72	9.89	1.55	1.00	74.64	0.55	9.48	2.03
秦皇岛	0.18	0.14	0.05	0.11	0.44	0.04	0.08	0.18	29.23	0.04	0.72	0.04	0.10
廊坊	5.72	3.14	0.82	2.41	2.70	0.38	1.91	39.72	1.45	0.50	1.61	0.37	0.54
衡水	1.20	0.36	0.68	3.07	0.55	1.15	33.42	0.66	0.65	0.93	0.36	1.03	0.28
邯郸	0.50	0.41	0.67	0.79	0.58	56.08	2.91	0.41	0.49	1.70	0.26	16.46	0.70
承德	0.16	0.23	0.05	0.09	58.07	0.03	0.08	0.22	1.24	0.03	1.38	0.03	0.10
沧州	6.41	0.90	1.05	53.06	1.64	0.98	6.63	2.42	1.78	1.14	1.30	1.00	0.51
保定	2.46	6.23	81.80	2.44	2.68	2.45	13.45	8.12	1.87	7.28	1.31	3.28	3.61
陕西	0.45	1.15	0.49	0.44	2.44	0.20	0.50	0.68	1.14	0.34	0.48	0.25	5.94
山西	0.87	1.81	1.56	1.17	1.68	3.43	2.23	1.20	0.88	3.95	0.49	5.04	6.95
山东	5.13	1.54	1.20	17.17	3.28	4.28	8.85	2.09	6.71	1.26	2.57	2.16	1.26
河南	1.20	0.79	0.79	1.87	1.66	10.08	3.26	0.84	4.79	1.21	0.88	5.03	1.04
辽宁	0.60	0.21	0.09	0.45	0.41	0.08	0.18	0.31	18.81	0.07	0.55	0.09	0.12
其它	1.81	0.99	0.88	2.31	2.07	10.16	3.44	1.15	23.60	1.28	1.42	5.12	1.16

1) 此行所在城市; 2) 此列城市一次PM_{2.5}来源地区

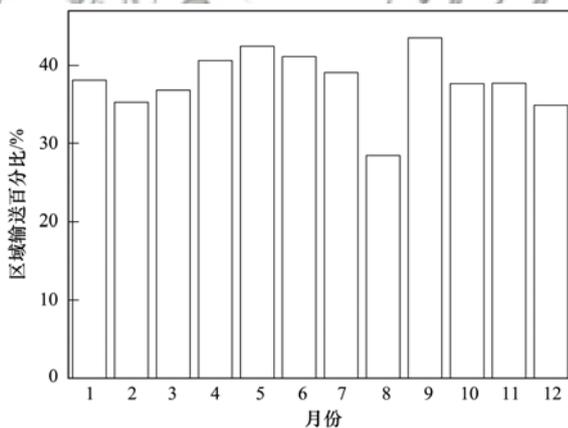


图3 不同月份天津区域输送影响百分比

Fig. 3 Percentage of regional transportation in different months in Tianjin

2.2 气象条件对天津细颗粒物区域输送的影响

污染天气排放是内因,气象条件是外因,大气扩散条件和大气污染输送与气象条件密切相关.天气形势决定大气流场和扩散条件,对颗粒物传输有显著影响.将研究期间天气形势分为高压前、高压后、弱高压、均压场、锋前低压、低压前、低压、低压槽、低压后和倒槽这10种类型,其中弱高压、均压场、锋前低压和低压槽这4种形势属于不利大气扩散类型;高压前和低压后属于有利大气扩散类型;高压后、低

压前、低压和倒槽是偏中性扩散条件.其中低压天气多出现在夏季,对应PM_{2.5}质量浓度最低,高压后天气在全年出现频次仅次于高压前,平均PM_{2.5}质量浓度与全年均值接近,但秋冬季节,也是重污染天气发生的一种重要天气形势.

从输送百分率贡献分析(表4),弱高压天气和倒槽天气传输贡献百分率最低,弱高压天气风速较小,气团移动较慢,传输贡献影响最弱,约为32.6%;倒槽天气,天津以偏东风为主,且多伴有降水天气,海上干净气团对天津PM_{2.5}贡献较少,输送影响为32.6%,两类天气输送贡献均显著低于平均值37.5%;其次为高压前,由于大气自净能力较强,输送气团较为干净,区域输送贡献百分率仅为34.1%;均压场天气风速低,气团移动慢,但相对弱高压系统,周边污染累积更明显,其输送贡献占比略有增加,为36.3%,仍低于均值;低压后相比高压前,冷空气影响略弱,有时候会导致北部污染输送,输送贡献率略增,为38.3%;与之相似的是低压槽天气,由于多伴有辐合风场,且出现重污染天气多为传输和本地双重影响,其输送贡献率38.6%,略高于平均水平.

高压后、低压前、锋前低压、低压这4类天气,区

域输送贡献占比相比其它类型明显偏大,其中高压后和锋前低压属于典型的污染天气类型,其占重污染天气的 43.2%,高压后天气与西南风密切相关,且平均风速弱于低压前天气,西南输送影响明显,尤其是秋冬季持续的入海高压后天气,会导致河北中南部地区大气污染对天津的持续输送,出现重污染天

气过程;锋前低压属于冷空气来临前的最后阶段,也是重污染天气的峰值阶段,上游多已转为北风,而下游为西南风,南北双重输送影响,且区域此时多已形成大范围污染区,使得区域输送更为明显,其不仅是输送贡献率最高的过程,从绝对浓度分析,其输送的 $PM_{2.5}$ 浓度是平均值的 157%.

表 4 天气形势和天津 $PM_{2.5}$ 输送影响贡献的关系

Table 4 Relationship between weather situation and impact contribution of $PM_{2.5}$ transportation in Tianjin

天气类型	$PM_{2.5}$ 质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	输送百分率 /%	输送浓度绝对量 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	重污染次数 /d	出现频次 /%
高压前	64.3	34.1	23.7	2	88
弱高压	85.7	32.6	32.7	9	44
高压后	69.5	40.1	30.2	6	61
低压前	66.6	43.7	28.8	1	49
低压后	63.5	38.3	27.2	1	11
锋前低压	118.7	40.2	47.4	10	30
低压槽	92.9	38.6	36.6	3	18
均压场	73.2	36.3	28.7	4	37
低压	57.9	43.4	27.4	0	8
倒槽	65.3	32.6	26.8	1	9
平均值	75.0	37.5	30.1		

逐气象要素分析输送与气象条件影关系.天津 $PM_{2.5}$ 输送影响与风速成正比,当风速小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,区域输送贡献百分比约为 24.3%,本地排放占绝对主导;风速介于 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,区域输送贡献百分比约为 34.2%,略小于平均水平;风速介于 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,区域输送贡献百分比为 41.3%,略大于平均水平,此风速条件最易于区域输送出现;风速大于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以后,区域输送并没有明显增加,约为 38.9%.降水天气对区域输送有明显影响,无降水日区域输送对天津 $PM_{2.5}$ 贡献为 37.8%,降水在 $0.1\sim 5\text{ mm}$ 的降水日,区域输送对天津 $PM_{2.5}$ 贡献变化不大,在 38% 左右,但当日降水超过 5 mm 以上, $PM_{2.5}$ 的区域传输性明显下降,区域输送对天津 $PM_{2.5}$ 贡献

降至 33.2%.雾日、湿度条件和区域输送强弱没有统计性关系,雾日天气区域输送对天津 $PM_{2.5}$ 贡献 38%,与平均值接近.

风向和区域输送密切相关,由于京津冀地区排放和 $PM_{2.5}$ 浓度均呈现南高北低的格局,当风向为西南风、南风时输送的贡献占比明显偏高,约为 45.1% 和 41.2%,其次是西风和东南风,约为 38.3%、37.1%;而北风和西北风时虽然风速较大,但大气相对较为干净,输送贡献率仅为 28.9% 和 33.3% (图 4).不同风向天津 $PM_{2.5}$ 质量浓度也存在显著差异,受输送和西南暖平流多逆温天气影响,西风和西南风天津 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $85.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $82.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,比平均值高 13.7% 和 10.3%,叠加浓

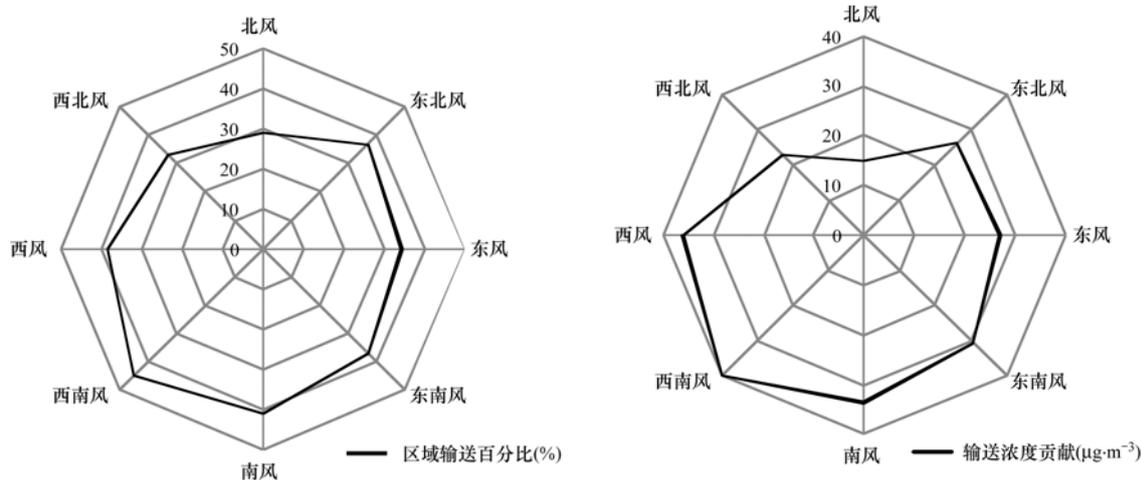


图 4 不同风向 $PM_{2.5}$ 区域输送百分比和输送浓度贡献

Fig. 4 Contribution of transport percentage and concentration of different wind to $PM_{2.5}$ region

度影响,西南风输送更加明显,贡献 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $39.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是北风天气 $14.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 1.6 倍,西风和南风次之,贡献 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $36.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $33.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,上述 3 个方向是天津大气传输需要重点监控关注的方向。

2.3 重污染天气天津细颗粒物区域输送的影响

基于不同污染程度分析输送和本地贡献对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响,空气质量为优时,输送贡献 27.9%;空气质量为良时,输送贡献 38.0%;空气质量为轻度污染时,输送贡献 44.7%;空气质量为中度污染时,输送贡献 37.4%;空气质量为重度污染时,输送贡献 42.9%;空气质量为严重污染时,输送贡献 41.8%。由此显示在大气自净能力较好时,由于周边大气污染物积累较少,即使风速略大, $\text{PM}_{2.5}$ 的累积仍主要以本地为主。当出现轻度污染后,其风速条件最为适中,有利于大气污染输送,其输送贡献在各种污染类型中最高。重污染天气大气处于静稳状态,但周边均处于较高大气污染负荷,污染气团的移动对空气质量产生显著影响,其输送贡献要显著高于平均状态,偏高约 10%~15% 之间,输送贡献对于重污染天气的发生有显著影响,以天津为例,超过 50% 的重污染天气,区域输送贡献超过 45%,其最大值可以达到 70.5%,在重污染天气应急中要加强区域联防联控。

选择有连续 2 d 重污染天气的过程,分析重污染天气的各个阶段输送和本地排放的影响,其中 7 个过程经历了 4 d 时间,以第 1 d 为开始阶段,第 2 d 为暴发阶段,第 3 d 为峰值阶段,第 4 d 为消散阶段。过程分析显示,输送影响最显著的为峰值阶段,其平均值 44.7%,高出均值 9.0%,其次为开始阶段,其贡献为 42.8%,高出均 4.4%,由此说明,在污染的初始累积阶段,由于静稳天气还未完全建立,大气扩散条件已经初步转差,其输送贡献更为明显;在峰值阶段,虽然大气静稳天气已经建立,气团移动相对较慢,但周边污染物浓度已经较高,区域输送影响达到峰值。区域输送贡献占比最低是暴发阶段,其均值 37.4%,低于均值 8.8%。

基于此,可初步认为在重污染天气防治中,减缓初始污染物累积和实现重污染天气消峰,一定要加强区域的联防联控,而重污染天气的暴发时间跟本地排放和气象条件密切相关,此时需要加强本地排放的控制。研究期间还经历两个较长的重污染过程,分别为 2016 年 12 月 16~22 日和 2016 年 12 月 29 日至 2017 年 1 月 5 日,两次过程区域输送的贡献达到 59%,远超于一重的重污染天气,过程中区域输送影响甚至高于本地排放贡献。而两次过程中,也均有

弱冷空气活动,但弱冷空气并没有使得天津地区空气质量改善,反而由于区域输送导致污染加重持续,这两次过程弱冷空气影响期间区域输送贡献占比分别为 75.0% 和 46.3%。由此显示,在一些持续的重污染过程中,易导致区域整体污染的加重,从而使得污染气团在区域内迁移,在强冷空气影响前,出现持续的重污染天气,对于此类天气,更需关注大范围的区域联防联控。

3 结论

(1) 京津冀地区一次源 $\text{PM}_{2.5}$ 区域输送受地形和城市面积影响,平原城市本地排放贡献在 49%~63%,沿山地区本地排放贡献超过 70%,平原城市区域输送影响更明显。天津本地排放贡献 62.9%,区域输送贡献 37.1%,每年 4~6 月为区域输送影响最显著阶段,约为 41%~42%,7~8 月受雨季影响,区域输送减弱,约为 33%,采暖季(10 月~次年 3 月)与全年均值近似,约为 35%~38%。

(2) 区域输送与天气形势、风场、降水等气象条件密切相关。高压后、低压前、锋前低压、低压四类天气, $\text{PM}_{2.5}$ 输送占比明显偏高,其中高压后和锋前低压易于出现重污染天气。风向与 $\text{PM}_{2.5}$ 输送密切相关,西南风、西风和南风时,天津 $\text{PM}_{2.5}$ 输送百分比和绝对量都显著高于其它风向。湿度、雾与区域输送强弱没有统计性关系,风速统计显示,2~3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 最有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 区域传输,降水超过 5 mm 以上将有效降低大气污染物区域输送。

(3) 重污染天气虽受静稳气团控制,但由于周边大气中往往有高浓度 $\text{PM}_{2.5}$,污染气团迁移对区域内污染聚集传输有显著影响,重污染期间区域输送贡献占比超过均值,约偏高 10%~15%,且持续较长的重污染过程,区域输送影响越明显,重污染过程开始累积阶段和峰值阶段,其输送贡献占比明显高于其它时期,与暴发时期相比偏高 14.5% 和 19.5%,重污染暴发阶段本地排放贡献更明显,比均值偏高 9.9%。

参考文献:

- [1] 曹军骥. $\text{PM}_{2.5}$ 与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] Wang T J, Gao C T, Zhang H S, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: atmospheric physics and Atmospheric Environment[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 1903-1945.
- [3] Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, et al. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $\text{PM}_{2.5}$ mass reduction in key regions in China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(12): 1885-1902.
- [4] 郝吉明. 京津冀大气复合污染防治: 联防联控战略及路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [5] 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 我国大气环境立体监测技术

- 及应用[J]. 科学通报, 2016, **61**(30): 3196-3207.
- Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, *et al.* Stereoscopic monitoring technology and applications for the atmospheric environment in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, **61**(30): 3196-3207.
- [6] 郝吉明, 尹伟伦, 岑可发. 中国大气 PM_{2.5} 污染防治策略与技术途径[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [7] Wang Z F, Li J, Wang Z, *et al.* Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(1): 3-13.
- [8] 任泉仲, 徐立宁, 徐明, 等. 大气细颗粒物导致呼吸系统疾病及相关生物机制的研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2018, **48**(10): 1260-1268.
- Ren Q Z, Xu L N, Xu M, *et al.* Recent progress on respiratory diseases induced by atmospheric fine particulate matters and related biological mechanisms[J]. Scientia Sinica Chimica, 2018, **48**(10): 1260-1268.
- [9] 胡彬, 陈瑞, 徐建勋, 等. 雾霾超细颗粒物的健康效应[J]. 科学通报, 2015, **60**(30): 2808-2823.
- HU B, CHEN R, XU J X, *et al.* Health effects of ambient ultrafine (nano) particles in haze[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(30): 2808-2823.
- [10] 郭新彪, 魏红英. 大气 PM_{2.5} 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1171-1177.
- Guo X B, Wei H Y. Progress on the health effects of ambient PM_{2.5} pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1171-1177.
- [11] 王跃思, 宫正宇, 刘子锐, 等. 京津冀及周边地区大气污染综合立体观测网的建设与应用[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1651-1663.
- Wang Y S, Gong Z Y, Liu Z R, *et al.* Construction and application of comprehensive observation network for air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1651-1663.
- [12] Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017[J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1857-1871.
- [13] Zheng B, Zhang Q, Tong D, *et al.* Resolution dependence of uncertainties in gridded emission inventories: a case study in Hebei, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(2): 921-933.
- [14] Geng G N, Zhang Q, Martin R V, *et al.* Impact of spatial proxies on the representation of bottom-up emission inventories: a satellite-based analysis[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(6): 4131-4145.
- [15] Liu F, Beirle S, Zhang Q, *et al.* NO_x emission trends over Chinese cities estimated from OMI observations during 2005 to 2015[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(15): 9261-9275.
- [16] Ge B Z, Xu X B, Ma Z Q, *et al.* Role of ammonia on the feedback between AWC and inorganic aerosol formation during heavy pollution in the North China Plain[J]. Earth and Space Science, 2019, **6**(9): 1675-1693.
- [17] Li J, Chen X S, Wang Z F, *et al.* Radiative and heterogeneous chemical effects of aerosols on ozone and inorganic aerosols over East Asia[J]. Science of the Total Environment, 2018, **622-623**: 1327-1342.
- [18] Wei Y, Chen X S, Chen H S, *et al.* IAP-AACM v1.0: a global to regional evaluation of the atmospheric chemistry model in CAS-ESM[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(12): 8269-8296.
- [19] Zhang W J, Wang H, Zhang X Y, *et al.* Evaluating the contributions of changed meteorological conditions and emission to substantial reductions of PM_{2.5} concentration from winter 2016 to 2017 in Central and Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **716**: 136892.
- [20] 黄顺祥, 刘峰, 盛黎, 等. 基于伴随方法的大气污染溯源[J]. 科学通报, 2018, **63**(16): 1594-1605.
- Huang S X, Liu F, Sheng L, *et al.* On adjoint method based atmospheric emission source tracing[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(16): 1594-1605.
- [21] Peng J F, Hu M, Du Z F, *et al.* Gasoline aromatics: a critical determinant of urban secondary organic aerosol formation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(17): 10743-10752.
- [22] Tang R Z, Wu Z P, Li X, *et al.* Primary and secondary organic aerosols in summer 2016 in Beijing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(6): 4055-4068.
- [23] Zhang P, Chen T Z, Liu J, *et al.* Impacts of SO₂, relative humidity, and seed acidity on secondary organic aerosol formation in the ozonolysis of butyl vinyl ether[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(15): 8845-8853.
- [24] Wu D, Ding X, Li Q, *et al.* Pollutants emitted from typical Chinese vessels: potential contributions to ozone and secondary organic aerosols[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **238**: 117862.
- [25] Han S Q, Hao T Y, Zhang Y F, *et al.* Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **616-617**: 135-146.
- [26] 刘琳, 王玲玲, 白永清, 等. 应用 WRF/Chem 模拟河南冬季大气颗粒物的区域输送特征[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1843-1854.
- Liu L, Wang L L, Bai Y Q, *et al.* Simulation for the impacts of regional transport on winter particulate matter levels over Henan based on WRF/Chem model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(5): 1843-1854.
- [27] 王媛, 李玥, 乔治, 等. 京津冀城市群大气污染传输规律研究——两组排放清单的比较分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(11): 4561-4569.
- Wang Y, Li Y, Qiao Z, *et al.* Atmospheric transmission rule on air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration: A comparative analysis of two emission inventories[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(11): 4561-4569.
- [28] 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.
- [29] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- [30] Hao T Y, Cai Z Y, Chen S C, *et al.* Transport pathways and potential source regions of PM_{2.5} on the west coast of Bohai Bay during 2009-2018[J]. Atmosphere, 2019, **10**(6): 345.
- [31] 周阳, 陈璐, 孟丽红, 等. 天津市区县间大气污染相互传输贡献研究[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(4): 112-115, 127.
- Zhou Y, Chen L, Meng L H, *et al.* Inter-regional air pollutants

- transport among different districts in Tianjin City and relative pollution contribution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(4): 112-115, 127.
- [32] Zhang Y L, Zhu B, Gao J H, *et al.* The source apportionment of primary PM_{2.5} in an aerosol pollution Event over Beijing-Tianjin-Hebei region using WRF-Chem, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(12): 2966-2980.
- [33] 孟丽红, 蔡子颖, 李英华, 等. 天津市 PM_{2.5}浓度时空分布特征及重污染过程来源模拟分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(1): 9-17.
Meng L H, Cai Z Y, Li Y H, *et al.* Spatial and temporal distributions and source simulation during heavy pollution of PM_{2.5} in Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(1): 9-17.
- [34] 何斌, 梅士龙, 陆琛莉, 等. MEIC 排放清单在空气质量模式中的应用研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3658-3668.
He B, Mei S L, Lu C L, *et al.* The application of MEIC emission inventory in air quality model[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3658-3668.
- [35] Ma X Y, Sha T, Ying J Y, *et al.* Investigating impact of emission inventories on PM_{2.5} simulations over North China Plain by WRF-Chem[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **195**: 125-140.
- [36] Du Q Y, Zhao C, Zhang M S, *et al.* Modeling diurnal variation of surface PM_{2.5} concentrations over East China with WRF-Chem: impacts from boundary-layer mixing and anthropogenic emission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(5): 2839-2863.
- [37] 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 等. 天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2548-2556.
Cai Z Y, Han S Q, Zhang M, *et al.* Construction and application of vertical diffusion index for analyzing weather during pollution events in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2548-2556.



CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bathriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)