

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)

粤港澳大湾区大气PM_{2.5}浓度的遥感估算模型代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)

典型输送通道城市冬季PM_{2.5}污染与传输变化特征代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)

郑州市夏季PM_{2.5}中二次无机组分污染特征及其影响因素和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 (48)

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)

2020年“三连击”台风对我国东部地区O₃污染的影响分析花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 (71)

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)

机动车减排降碳综合评价体系综述范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 (151)

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)

富春江水库浮游植物功能群变化的成因张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 (218)

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析王耕, 张芙蓉 (228)

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 (287)

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 (314)

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 (439)

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 (470)

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 (576)

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)

CO₂气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb²⁺吸附性能对比江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

典型输送通道城市冬季PM_{2.5}污染与传输变化特征

代武俊, 周颖*, 王晓琦, 齐鹏

(北京工业大学环境与生命学部, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:以京津冀典型输送通道上的河北西南4个城市邯郸、邢台、衡水和沧州为例,分析了2019~2021年冬季3a气象条件与PM_{2.5}浓度变化特征,运用潜在源贡献分析(PSCF)和浓度权重分析(CWT)识别了研究期内4个城市PM_{2.5}输送特征,基于气象-空气质量模型(WRF-CMAQ)传输矩阵法和传输通量法量化评估了邯郸、邢台、衡水和沧州与周边地区之间的PM_{2.5}传输贡献,揭示了PM_{2.5}传输净通量的垂直分布变化特征,并进一步识别4个城市两条PM_{2.5}污染主要传输路径.结果表明,在研究期间,4个城市PM_{2.5}浓度呈下降趋势,下降比例分别为45.85%、49.45%、42.40%和31.65%;邯郸和邢台潜在源贡献较大的区域主要分布在山西中南部(临汾、长治和晋中)和河南北部(新乡、开封和郑州)以及少部分内蒙古部分地区(PSCF > 0.9),衡水和沧州潜在贡献较大的区域主要集中在河北南部(邯郸、石家庄)、山西中部(太原、阳泉)和部分山东地区(PSCF > 0.7),CWT结果显示与PSCF类似;研究时段内4个城市冬季PM_{2.5}均呈现本地贡献率(51.11%~62.99%)略高于区域贡献率(37.01%~48.89%)的特征,受水平湍流和垂直扩散等影响,4个城市2020年区域传输影响较其他年份稍高(0.50%~9.52%),而2021年由于PM_{2.5}浓度较低、气象因素影响等原因,区域传输影响较其他年份稍低(-2.15%~-9.52%);邯郸、邢台、衡水和沧州这4个城市3a冬季与周边区域总流入(流出)通量强度大小均为:2020年>2021年>2019年,对于总净通量而言,4个城市3a冬季分别为邯郸:0.094、-0.070和0.087 kt·d⁻¹;邢台:0.212、0.395和0.544 kt·d⁻¹;衡水:-0.040、-0.228和0.185 kt·d⁻¹;沧州:0.062、0.126和0.128 kt·d⁻¹.在研究期间邯郸、邢台和沧州多作为污染传输受体,而衡水多为传输源体.在0~1260m之间,PM_{2.5}净传输通量强度基本随着高度的升高而增大,不同时期不同城市最大净通量不同,邯郸最大净通量位于252~1261m,邢台最大净通量位于817m,衡水最大净通量位于252~817m,沧州最大净通量位于252~359m;分析4个城市传输特征发现存在两条主要PM_{2.5}传输方向,即西北-东南方向(山西→邯郸→河南、山东;石家庄→邢台→邯郸、山东;保定→沧州→山东)以及西南-东北方向(山西→邢台→衡水→沧州→渤海湾).

关键词: PM_{2.5}; 潜在源贡献分析法(PSCF); 浓度权重分析法(CWT); 气象-空气质量模型(WRF-CMAQ); 传输贡献; 传输通量
中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)01-0023-13 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202301117

Variation Characteristics of PM_{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter

DAI Wu-jun, ZHOU Ying*, WANG Xiao-qi, QI Peng

(Beijing Key Laboratory of Regional Air Pollution and Control, Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Taking Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou, four cities in southwest Hebei Province along the Beijing-Tianjin-Hebei typical transport route, as examples, we analyzed the variation characteristics of 3a meteorological conditions and PM_{2.5} concentration in winter from 2019 to 2021 and used potential source contribution analysis (PSCF) and concentration weight analysis (CWT) to identify the transport characteristics of PM_{2.5} in the four cities during the study period. Based on the meteorological air quality model (WRF-CMAQ) transmission matrix method and transport flux method, the contribution of PM_{2.5} transport between Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou and the surrounding areas was quantitatively assessed; the vertical distribution characteristics of PM_{2.5} net transport flux were revealed; and the two main transport routes of PM_{2.5} pollution were further identified. The results showed that during the study period, the PM_{2.5} concentration decreased by 45.85%, 49.45%, 42.40%, and 31.65%, respectively. The potential source contribution of Handan and Xingtai was mainly distributed in south-central Shanxi (Linfen, Changzhi, and Jinzhong), northern Henan (Xinxiang, Kaifeng, and Zhengzhou), and a small part of Inner Mongolia (PSCF > 0.9). The potential contribution areas of Hengshui and Cangzhou were mainly concentrated in southern Hebei (Handan and Shijiazhuang), central Shanxi (Taiyuan and Yangquan), and some Shandong regions (PSCF > 0.7), and the CWT results were similar to those of PSCF. During the study period, the local contribution (51.11%-62.99%) was slightly higher than the regional contribution (37.01%-48.89%) during winter in the four cities. Affected by horizontal turbulence and vertical diffusion, the impact of regional transmission in 2020 was slightly higher than that in other years (0.50%-9.52%). In 2021, the influence of regional transmission was slightly lower than that of other years (-2.15%~-9.52%) due to low PM_{2.5} concentration and meteorological factors. For Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou, the total inflow (outflow) flux intensity of the four cities during winter and the surrounding areas was in 2020 > 2021 > 2019. For the total net flux, the total inflow (outflow) flux intensity of the four cities in winter was 0.094, -0.070, and 0.087 kt·d⁻¹ (Xingtai: 0.212, 0.395, and 0.544 kt·d⁻¹; Hengshui: -0.040, -0.228, and 0.185 kt·d⁻¹; Cangzhou: 0.062, 0.126, and 0.128 kt·d⁻¹). During the study, Handan, Xingtai, and Cangzhou were mostly used as transport receptors, whereas Hengshui was mostly used as a transport source. In the range of 0-1260 m, the net transport flux intensity of PM_{2.5} increased basically with the increase in height, and the maximum net flux of the various cities in different periods was different. The maximum net flux of Handan, Xingtai, and Hengshui was 252-1261 m, 817 m, and 252-817 m, respectively. The maximum net flux in Cangzhou was 252-359 m. By analyzing the transmission characteristics of the four cities, it was found that there were two main transport directions of PM_{2.5}, that is, the northwest-southeast direction (Shanxi → Handan → Henan and

收稿日期: 2023-01-17; 修订日期: 2023-03-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213200); 中国博士后科学基金项目(2019M660382); 北京市博士后研究基金项目

作者简介: 代武俊(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境污染传输, E-mail: daiwujun@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: y.zhou@bjut.edu.cn

Shandong; Shijiazhuang → Xingtai → Handan and Shandong; Baoding → Cangzhou → Shandong) and the southwest-northeast direction (Shanxi → Xingtai → Hengshui → Cangzhou → Bohai Bay).

Key words: PM_{2.5}; potential source contribution function (PSCF); concentration-weighted trajectory (CWT); meteorological air quality model (WRF-CMAQ); transmission contribution; transmission flux

大气污染物、气象条件与我国空气质量密切相关. 尤其是在冬季,以煤炭燃烧为主的高污染源排放和不利的气象条件常常容易引发PM_{2.5}污染,区域气象条件变化影响着污染物的扩散和转化^[1,2]. 我国自2013年国务院颁布《大气污染防治行动计划》至2017年颁布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》以来,PM_{2.5}污染治理已取得了显著进展,但对于京津冀及其周边多数城市而言,PM_{2.5}年均值还是超过《环境空气质量标准》颁布的二级标准(35 μg·m⁻³)^[3],PM_{2.5}污染治理已从单个城市单独治理转变为区域协同治理^[4],许多研究者已开始对区域性污染问题展开了研究.

张文娟等^[5]对2020年12月10~12日济南市出现的一次重污染过程进行分析,结果表明,气象因素对重污染过程的形成有很大影响,低风速、高湿度、高空环流平直和地面均压场的控制是本次重污染过程的重要气象因素. 同时,不同区域之间PM_{2.5}的传输影响也起着至关重要的作用^[6],后向轨迹模型(Hysplit)^[7-10]、潜在源贡献分析法(potential source contribution function, PSCF)^[11-15]和浓度权重分析法(concentration-weighted trajectory, CWT)^[16-20]可以定性判断气团来源和PM_{2.5}传输. 王中杰等^[21]利用PSCF法和CWT法分析日照PM_{2.5}质量浓度,发现外来主要潜在源区位于临沂、潍坊、连云港和青岛. 关于定量衡量污染物跨界输送以及模式模拟,张晗宇等^[22]基于CMAx-PSAT模块,选取京津冀区域解析典型污染城市唐山2015年夏季冬季PM_{2.5}空间来源,结果表明夏季北京、天津、河北西北部、东北部和南部对唐山PM_{2.5}贡献率分别为3.9%、9.2%、0.8%、4.8%和6.1%;冬季对唐山PM_{2.5}贡献率分别为3.6%、7.5%、0.4%、3.4%和5.6%. Wang等^[23]利用MM5-CMAQ模型,基于Brute-Force清零法对京津冀典型重污染城市邢台、石家庄和邯郸2013年1月PM_{2.5}进行来源分析,结果表明区域传输来源占27.5%(石家庄)~28.6%(邯郸). 在这3个城市中,石家庄只有4.2%的PM_{2.5}来自邢台和邯郸,邯郸有14.6%的PM_{2.5}来自石家庄和邢台,而邢台有19.5%的PM_{2.5}来自石家庄和邯郸. 陈显元等^[24]基于WRF-CMAQ(meteorological air quality model),对京津冀和长三角地区2017年一次重霾过程展开分析,分析结果表明由于时空地理差异,京津冀和长三角地区污染物本地贡献高值阶段分别出现在污染物累积阶段和污染物消散阶段,京津冀

对长三角贡献主要在重污染累积阶段,贡献率为20%~30%,长三角对京津冀贡献主要在重污染前期,贡献率为15%~20%. 薛文博等^[25]基于CMAx-PSAT建立了全国31个省市(源体)与333个地级市(受体)PM_{2.5}及其化学组分传输矩阵,解析了PM_{2.5}跨区域输送特征. 王文丁等^[26]利用中国科学院大气物理研究所自主研发的NAQPMS系统,对2013年冬季珠三角PM_{2.5}重污染过程进行数值模拟,数据显示广州和佛山是区域输送主要城市,中山和珠海是主要受体城市;对中山贡献最大的5类源为交通源、工业源、扬尘源、火力发电源和生物质燃烧源,贡献率分别为26%、24%、16%、15%和8%. Gao等^[27]使用WRF-Chem模型对APEC期间北京及周边五省PM_{2.5}的排放控制措施和区域输送进行研究,结果显示污染物输送路径和速度共同影响着排放控制措施的有效性,来自高污染地区的输送无法使排放措施降低到水平,同时在APEC期间,区域输送占北京PM_{2.5}浓度的41.3%. Liu等^[28]基于WRF模式和NAQPMS系统对河北沙河地区PM_{2.5}跨境输送进行建模研究,模拟显示沙河地区半径50 km内PM_{2.5}排放占全市PM_{2.5}总浓度的63.4%,工业源、交通源、电力源和居民源是沙河地区主要PM_{2.5}来源,贡献率分别为47%、10%、17%和26%. 但是现研究阶段多集中于单一城市潜在源区识别以及不同城市或区域间近地面污染相互影响研究,缺乏对于多个城市不同年份污染与传输特征系统研究与关联分析.

因此,本文以京津冀典型输送通道上^[29,30]位于河北西南方向4个城市邯郸、邢台、衡水和沧州为研究对象,选择近3年(2019~2021年)冬季代表月(1月),基于地面观测数据、PSCF法和CWT法定性识别了4个城市PM_{2.5}潜在来源,应用WRF-CMAQ研究大气PM_{2.5}时空分布和传输特征,综合运用模型和传输通量方法来分别定量研究4个城市与周边区域冬季传输通量,以及不同高度下PM_{2.5}在水平方向的传输特征,系统识别4个城市PM_{2.5}污染传输路径,以期为进一步区域大气污染联防联控精细化方案制定提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究邯郸、邢台、衡水和沧州4个城市的风

速、相对湿度等常规气象数据来自各个城市气象站点(<http://data.cma.cn>),PM_{2.5}数据来自各个城市国控站点监测数据(<http://www.cnemc.cn/sss/j/>),用于WRF-CMAQ模拟结果验证.WRF气象模型采用NCEP(美国气象环境预报中心)发布的1°×1°(空间分辨率)、6h(时间分辨率)的FNL(全球再分析资料)数据.CMAQ数值模型所需的大气污染物排放清单在京津冀地区模拟使用的人为源排放数据来自本课题组自上而下建立的清单^[31,32]和京津冀以外区域采用清华大学研发的0.25°分辨率的MEIC排放源清单(<http://www.meicmodel.org>).

1.2 模型设置与验证

1.2.1 模型模拟

本研究气象场模拟采用WRF4.2,空气质量模型采用CMAQ5.3.2,以此开展PM_{2.5}传输特征研究.模拟时段为2019~2021年的1月作为冬季代表月,WRF和CMAQ模式参数化设置如表1所示^[33],模型设置两层嵌套,分辨率分别为36 km×36 km和12 km×12 km,如图1所示.第一层覆盖中国东部大部分地区,第二层覆盖京津冀区域以及河南省、山东省等其他省份,在模拟区域内设置27个气压层,其对应的δ坐标分别为1.000、0.994、0.988、0.981、0.969、

0.956、0.944、0.926、0.902、0.881、0.852、0.828、0.796、0.754、0.704、0.648、0.589、0.546、0.495、0.445、0.387、0.287、0.187、0.136、0.091、0.061、0.020和0.000.

1.2.2 模型验证

为评估WRF-CMAQ模拟效果,参考EPA评价标准,采用标准化平均偏差(NMB)、标准化平均误差(NME)和相关系数(COR)这3个统计指标^[34],如表2所示,WRF模式能够较好地模拟气象要素时间变化特征,存在显著的正相关性,COR均高于0.62.其中温度模拟效果最好,COR均在0.91以上,NMB为3.55%~19.17%,NME为29.42%~42.27%,风速和相对湿度模拟效果低于温度,但COR仍在0.62~0.84之间,风速的NMB为10.08%~28.96%,NME为32.80%~38.24%,相对湿度的NMB为-28.80%~-13.92%,NME为27.55%~30.88%.4个城市PM_{2.5}模拟值与观测值演变趋势较为一致,COR均高于0.63,NMB为-18.88%~-11.60%,NME为32.79%~41.17%,主要是由于气象模式产生的模拟误差,排放清单的不确定性以及空气质量模型内部针对重污染时段二次污染物转化的化学机制不完善造成了冬季重污染时段PM_{2.5}模拟效果的低估^[35].综合各项模拟

表1 WRF与CMAQ参数化方案

Table 1 Parameterization schemes of WRF and CMAQ

项目	类型	结果	项目	类型	结果
WRF	模型版本	4.2	CMAQ	模型版本	5.3.2
	微物理过程方案	WSM6		气相化学机制	CB05
	长波辐射方案	RRTM		气溶胶化学机制	AERO5
	短波辐射方案	Dudhia		光化学速率	In-line
	近地层方案	Noah		风沙尘	关
	边界层方案	YSU		边界条件	默认
	积云对流方案	Kain-Fritsch		初始条件	逐日重启

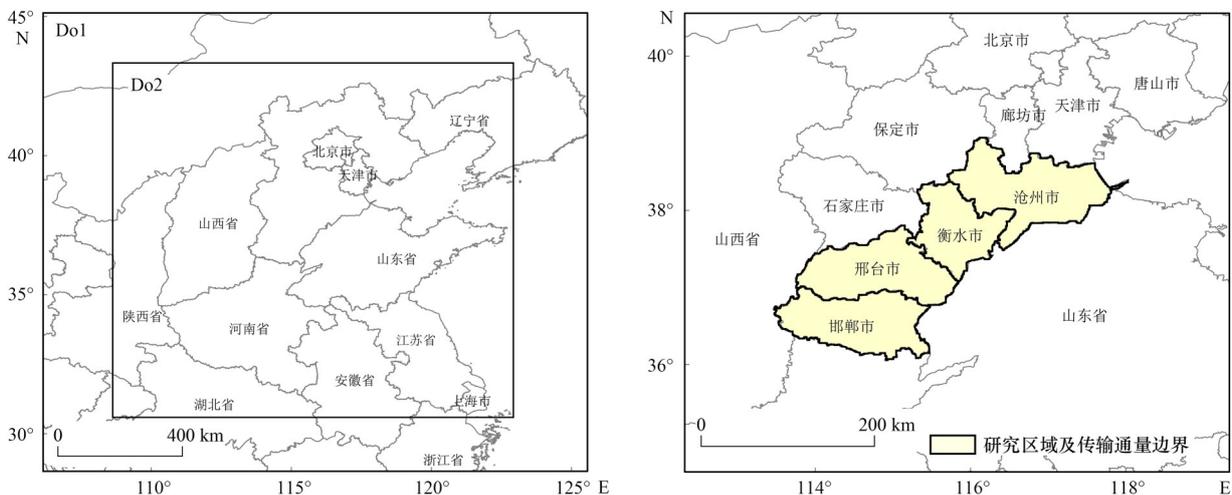


图1 模拟区域嵌套示意

Fig. 1 Nesting simulation domain of the CMAQ model

验证指标,本研究采用的WRF-CMAQ误差在可接受范围内,可以进行下一步研究.

表2 模拟值与监测值统计指标对比

Table 2 Comparison of statistical index between simulated value and monitored value

城市	统计指标	风速	温度	相对湿度	PM _{2.5}
邯郸	NMB/%	26.39	19.12	-28.80	-18.88
	NME/%	35.23	29.42	30.88	37.80
	相关系数(COR)	0.78	0.94	0.78	0.68
邢台	NMB/%	10.08	3.55	-13.92	-18.50
	NME/%	35.44	42.27	27.61	41.17
	相关系数(COR)	0.65	0.91	0.62	0.63
衡水	NMB/%	28.96	4.60	-25.25	-11.60
	NME/%	38.24	39.53	27.55	37.50
	相关系数(COR)	0.76	0.92	0.84	0.71
沧州	NMB/%	18.62	19.17	-19.32	-18.61
	NME/%	32.80	40.56	27.93	32.79
	相关系数(COR)	0.79	0.91	0.76	0.77

1.3 潜在源贡献分析法介绍

选取邯郸、邢台、衡水和沧州作为目标城市,2019~2021年的1月为研究时段,根据《环境空气质量标准》将 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 阈值设为 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [36],纬度范围设置为 $\text{N}30^\circ \sim 55^\circ$,经度范围设置为 $\text{E}85^\circ \sim 125^\circ$,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,为防止不确定性,将PSCF值与网格权重系数 W 相乘,计算公式如下[37]:

$$\text{WPSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} W(n_{ij}) \quad (1)$$

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00, & (80 < n_{ij}), \\ 0.70, & (20 < n_{ij} \leq 80), \\ 0.42, & (10 < n_{ij} \leq 20), \\ 0.05, & (n_{ij} \leq 10). \end{cases} \quad (2)$$

式中,WPSCF_{ij}为潜在源区贡献; m_{ij} 为污染轨迹端点数; n_{ij} 为网格 (i,j) 内所有轨迹端点数,区域内PSCF值越高,表示该区域为高原潜在源区.

1.4 浓度权重分析法介绍

浓度权重分析法(CWT)可计算每条轨迹的平均权重浓度,进而揭示不同区域对邯郸、邢台、衡水和沧州地区大气污染贡献,计算公式如下[38]:

$$\text{CWT}_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk}} \sum_{k=1}^M C_k \tau_{ijk} \quad (3)$$

$$\text{WCWT}_{ij} = \text{CWT}_{ij} \times W(n_{ij}) \quad (4)$$

式中,CWT_{ij}为平均权重浓度; k 为轨迹; M 为轨迹总数; C_k 为轨迹 k 经过网格 (i,j) 时对应的某要素值; τ_{ijk} 为轨迹 k 在网格 (i,j) 停留时间.CWT值越高,表明所经过的轨迹对观测点污染物浓度贡献越大.

1.5 Brute-Force情景分析法

Brute-Force情景分析法即基于原始污染源排放

清单利用CMAQ对区域PM_{2.5}浓度进行模拟,随后清空某特定排放区域的大气污染排放再次进行模拟,二者求差值所得的目标区域PM_{2.5}浓度下降值即为排放区域对目标区域的PM_{2.5}浓度贡献值,该方法在模型内置源识别技术开发前就得到应用,且研究结果得到认可,计算公式如下:

$$P_{ij} = \frac{c_{i0} - c_{ij}}{c_{i0}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, P_{ij} 为某排放区对目标区的贡献率; i 为目标区; j 为某分析情景下的排放区; c_{i0} 为基础情景下目标区PM_{2.5}浓度; c_{ij} 为分析情景下目标区PM_{2.5}浓度.当 $i=j$ 时, P_{ij} 为目标区自身贡献率.本研究为对邯郸、邢台、衡水和沧州及周边地区PM_{2.5}传输贡献进行分析,共设置9个模拟情景,如表3所示.

表3 基准情景与目标情景方案设计

Table 3 Design of baseline scenario and target scenario

情景	排放	情景	排放
Case 0	所有排放不清零	Case 5	山西排放清零
Case 1	邯郸排放清零	Case 6	河南排放清零
Case 2	邢台排放清零	Case 7	山东排放清零
Case 3	衡水排放清零	Case 8	京津冀其他区域排放清零
Case 4	沧州排放清零	Case 9	周边排放清零

1.6 传输通量计算

PM_{2.5}传输通量是指在单位时间内通过某个垂直界面PM_{2.5}的质量,CMAQ属于欧拉三维网格模式,每个网格具有固定的三维位置,该模式可分别提供每个网格内所需的气象数据和浓度数据[39].有研究表明,在大气边界层以下的PM_{2.5}传输通常为有效传输,且京津冀地区大气边界层平均为300~900 m之间.因此,本研究选取垂直分层中10层以下的高度(离地约1261 m)作为垂直空间传输通量研究范围[40,41],通过提取邯郸、邢台、衡水和沧州与其他地方接壤区域对应高度层的风场和PM_{2.5}浓度,研究不同高度下PM_{2.5}传输通量的垂直分布.传输通量计算公式如下所示:

$$\text{Flux} = \sum_{k=1}^h \sum_l L \cdot H_k \cdot c \cdot v \cdot s \cdot n \cdot 8.64 \times 10^{-8} \quad (6)$$

式中,Flux为PM_{2.5}传输通量, $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$; h 为垂直方向研究的最高层; l 为相邻两城市边界线(无量纲); L 为模拟网格分辨率, m ; H_k 为垂直层 k 和 $k+1$ 层间的高度差, m ; c 为PM_{2.5}浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; v 为风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; s 为风向, $(^\circ)$; n 为通过垂直截面法向量(无量纲).PM_{2.5}流入通量为单位时间周边城市向目标城市传输PM_{2.5}的质量,用正值来表示;PM_{2.5}流出通量为单位时间目标城市向周边城市传输PM_{2.5}的质量,用负值来表示;PM_{2.5}净通量则为PM_{2.5}流入与流出通量的矢量和.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度及气象特征变化分析

图 2 显示了 2019 ~ 2021 年的 1 月河北南部 4 个城市邯郸、邢台、衡水和沧州 PM_{2.5} 日浓度和湿度变化趋势。从整体上看, 4 个城市 PM_{2.5} 浓度呈下降趋势, 分别从 2019 年的 132.90、133.06、106.97 和 87.97 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到 2021 年的 71.97、67.26、61.61 和 60.13 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 下降比例分别为 45.85%、49.45%、42.40% 和 31.65%。受新冠肺炎疫情影响, 2020 年交通和工业源排放以及无组织粉尘均有不同程度减少, 但相比之下, 2020 年研究时间段内 PM_{2.5} 浓度仍然

为 3 a 最高, 4 个城市分别为 143.55、138、124.06 和 111.39 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 且重度污染 ($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 天数占比高于其他两年, 重污染天数占比分别为 35.48% (邯郸和邢台)、29.03% (衡水) 和 22.58% (沧州)。PM_{2.5} 浓度的积累和消散与气象条件密切相关, 2019 ~ 2021 年的 1 月邯郸平均相对湿度分别为 45.54%、72.97% 和 40.87%, 邢台为 36.52%、68.84% 和 39.42%, 衡水为 47.23%、78.16% 和 44%, 沧州为 43.13%、63.90% 和 54.55%。重污染时期相对湿度与 PM_{2.5} 浓度在非降水阶段呈显著正相关, 相对湿度决定了大气非均相反应速率从而影响二次无机盐的生成, 是重污染形成的重要机制。

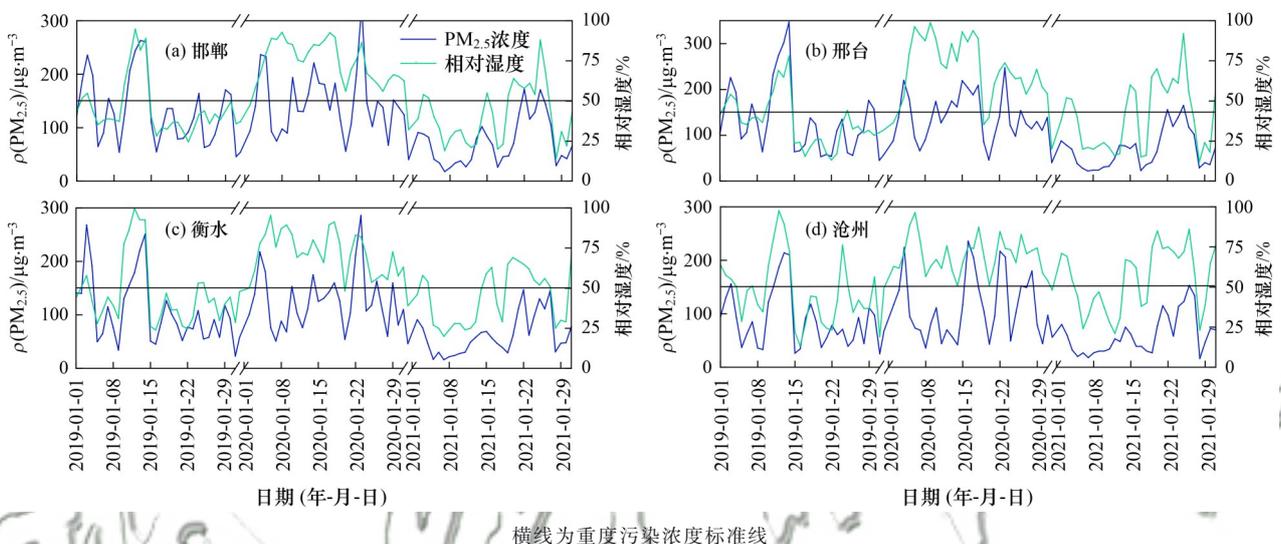


图 2 2019 ~ 2021 年的 1 月邯郸、邢台、衡水和沧州 PM_{2.5} 日浓度与相对湿度时间序列

Fig. 2 Time series of daily PM_{2.5} concentration and relative humidity in Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou from 2019 to 2021

图 3 显示了研究期间内风场与 PM_{2.5} 浓度耦合分布, 4 个城市主导风向多为北风或者偏北风, 在风速小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区间内, 各个方向的 PM_{2.5} 小时浓度值较高 (大于 $176.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 随着风速的增加, PM_{2.5} 小时浓度开始降低, 但是依旧存在高风速对应高 PM_{2.5} 小时浓度情况, 主要是由于受风力的扩散作用, 污染物进行城市之间污染传输。同时, 4 个城市上风向地区多为高排放重污染地区, 表明风是影响区域污染传输的重要因素。

2.2 PM_{2.5} 传输特征分析

2.2.1 PSCF 分析和 CWT 分析

结合后向气团轨迹和 PM_{2.5} 污染物浓度阈值 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 来确定某地区潜在污染源的可能区域, 本研究基于此方法得到邯郸、邢台、衡水和沧州 2019 ~ 2021 年冬季的 PSCF 结果如图 4 所示, PSCF 值越接近 1, 表示其区域对研究区域影响越大。从整体上来看, 4 个城市冬季主要潜在源区分布在河北南部、河南和山西, 上述区域工业排放量大, 在冬季季风作用及地

形地貌作用下对研究区域的传输影响较大^[42], 其中邯郸、邢台的 PSCF 高值主要集中在山西中南部 (临汾、长治和晋中) 和河南北部 (新乡、开封和郑州) 以及少部分内蒙古部分地区, PSCF 值高于 0.9。衡水、沧州的 PSCF 高值主要集中在河北南部 (邯郸、石家庄)、山西中部 (太原、阳泉) 和少部分山东地区, PSCF 值高于 0.7。因此, 来自山西和河南方向的污染物输送依旧是今后治理大气区域性污染的重点关注对象。对比相同城市不同年份冬季潜在源区发现, 2021 年冬季与 2019 和 2020 年冬季相比, 潜在源区高值较少, PSCF 值介于 0.2 ~ 0.6 之间, 位于西北方向 (内蒙古) 的 PSCF 值有所降低, 降低幅度趋于 0.5, 说明内蒙古方向对邯郸、邢台、衡水和沧州的大气污染影响逐渐趋于好转。

PSCF 只反映了潜在源区贡献率大小, 利用 CWT 法对污染轨迹进行浓度权重分析, 可反映潜在源区的污染贡献水平。如图 5 所示, 4 个城市 CWT 值受年份影响明显, 邯郸 CWT 高值区域 ($> 180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

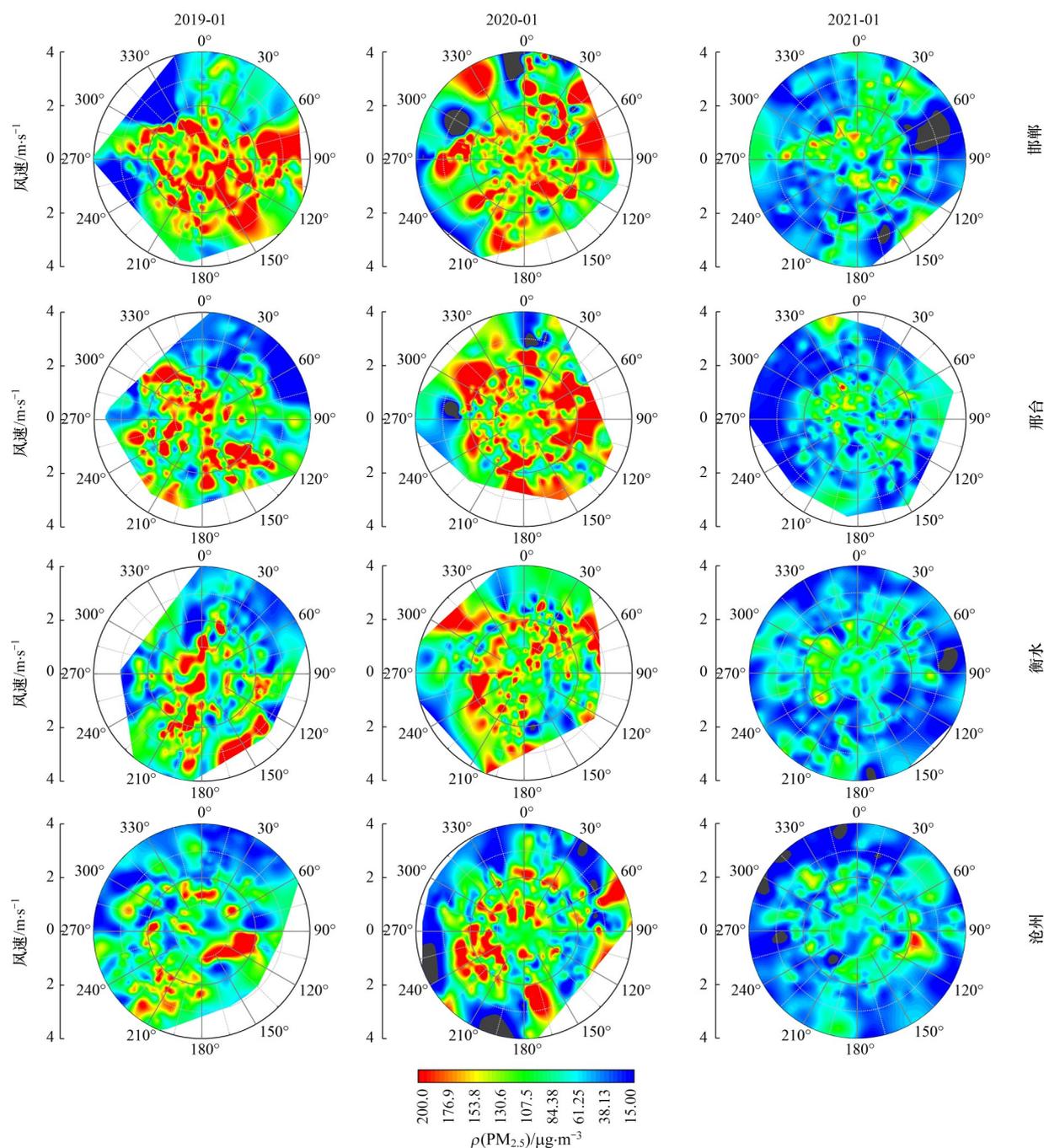


图3 2019~2021年的1月邯郸、邢台、衡水和沧州的风场和 $PM_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 3 Wind field and $PM_{2.5}$ concentration distribution in Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou from 2019 to 2021

2019年和2020年主要分布在山西中南部、河南北部和少部分陕西地区,2021年邯郸CWT高值区域($> 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分布较广,从渤海湾到宁夏均有分布;邢台在2019年和2020年同样受山西中南部和河南北部影响较高,CWT值在 $160 \sim 200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,2021年邢台CWT高值区域($> 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)与邯郸类似;衡水的CWT高值($> 200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)2019年主要在河南山东交界地带,2020年高值($> 180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要在山西南部,2021年CWT高值($> 90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)较2019年和2020年低,且区域分布分散;沧州2019年CWT高值($> 200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要分布在山东、安徽和江苏交界处,2020

年CWT高值($> 90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要来源于渤海湾,2021年CWT高值与衡水类似。

结合两种分析结果,可发现分析结果基本吻合,来自山西中南部、河南山东方向的 $PM_{2.5}$ 输送对邯郸、邢台、衡水和沧州较为显著。

2.2.2 $PM_{2.5}$ 传输贡献分析

为了更好地了解近地面区域传输贡献情况,利用CMAQ Brute-Force情景分析法^[43]定量分析了4个城市本地和区域排放对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献。如表3所示,从模拟结果来看,4个城市 $PM_{2.5}$ 均为本地排放贡献相对略高,冬季邯郸3a的 $PM_{2.5}$ 本地贡献率为

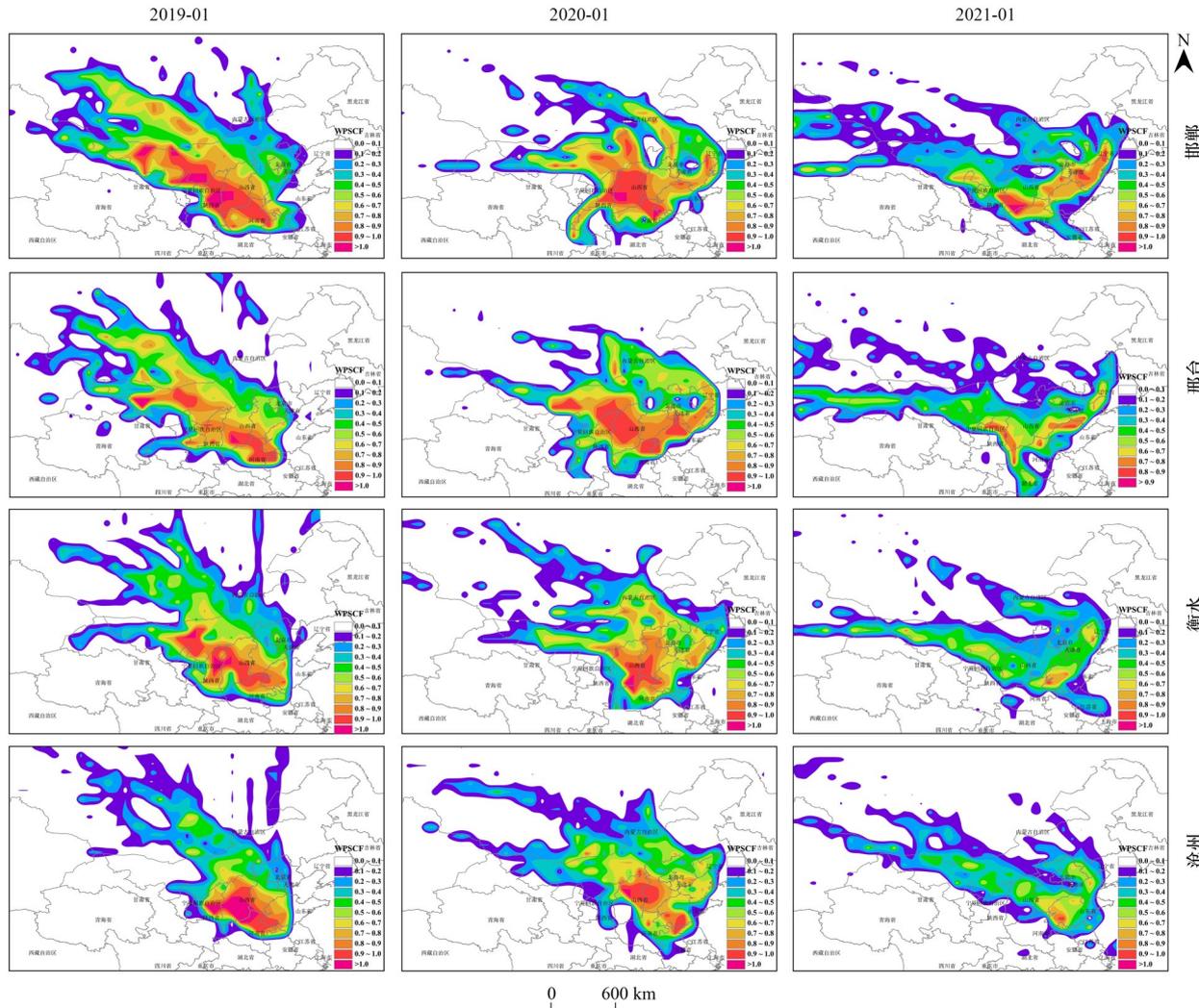


图4 2019~2021年的1月邯郸、邢台、衡水和沧州PM_{2.5}的PSCF分布
 Fig. 4 PSCF distribution of PM_{2.5} in Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou from 2019 to 2021

53.57% ~ 62.99%，邢台本地贡献率为 52.17% ~ 57.29%，衡水本地贡献率为 51.11% ~ 60.63%，沧州本地贡献率为 53.67% ~ 58.01%，而受传输贡献率为 37.01% ~ 46.43%（邯郸）、42.71% ~ 47.83%（邢台）、39.37% ~ 48.89%（衡水）和 41.99% ~ 46.33%（沧州）。主要是由于冬季低风速、高湿度、低边界层以及逆温等不利于污染物扩散的气象条件与采暖季燃煤的高排放叠加^[44]，导致本地贡献较大。

对比同一时间段的不同城市在本地贡献上的差异可知，邯郸市受本地贡献最显著，这主要是受到该城市的地理位置及污染排放布局的影响。4个城市中，邯郸市属于河北省南部地区典型的重工业城市^[45]，本地污染排放强度高，所以受传输的影响最小。对比不同时间段的相同城市，除去污染物排放布局，不同时间主导的风向风速、湿度等气象条件不同会导致污染物传输强度发生改变。根据收集常规气象站点数据可得，2020年1月邯郸、邢台、衡水和沧州平均风速分别为 1.84、1.54、1.85 和 2.15 m·s⁻¹，

2021年1月邯郸、邢台、衡水和沧州平均风速分别为 2.28、1.89、2.49 和 2.72 m·s⁻¹，由 2.1 节可知，2020年1月4个城市平均相对湿度大于2021年1月，因此研究期间内，4个城市在2020年1月呈现低风高湿的不利扩散气象，2021年1月呈现高风低湿的有利扩散气象，在有利气象条件下，受强水平湍流和垂直扩散作用影响，本地污染物易于消散，尚不足以远距离传输影响周围城市，因此降低了区域传输贡献作用，同时高风低湿的气象特征可抑制污染物二次转化，难以形成污染物浓度的暴发式增长，因此2020年受传输影响较其他年份稍高（0.50% ~ 9.52%），2021年区域传输影响较其他年份稍低（-2.15% ~ -9.52%）。

2.2.3 PM_{2.5}跨界传输通量

为分析研究地区与各周边区域近地面和高空传输通量具体情况，图6给出了研究期间距地面1261 m内4个城市与周边区域PM_{2.5}总流入、流出和净通量的变化。整体来看3 a内PM_{2.5}总流入与总流出通量强度大小均为：2020年 > 2021年 > 2019年，其中山

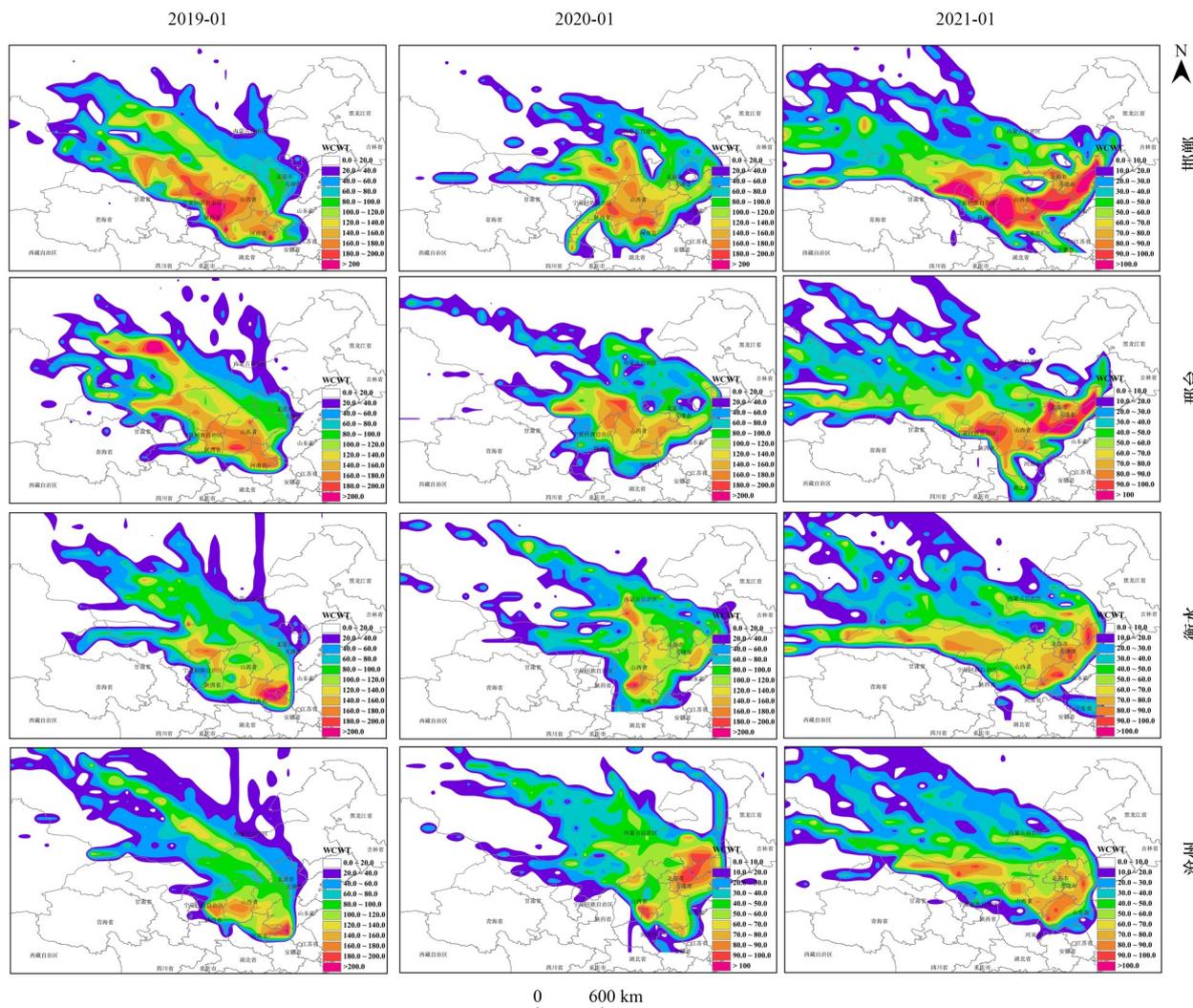


图5 2019~2021年的1月邯郸、邢台、衡水和沧州PM_{2.5}的CWT分布
 Fig. 5 CWT distribution of PM_{2.5} in Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou from 2019 to 2021

表3 2019~2021年的1月邯郸、邢台、衡水和沧州PM_{2.5}传输贡献率/%

Table 3 PM_{2.5} transmission contribution rate in Handan, Xingtai, Hengshui, and Cangzhou from 2019 to 2021/%

城市	年份	邯郸	邢台	衡水	沧州	河南	山东	山西	京津冀其他	周边
邯郸	2019	56.36	7.67	1.67	2.64	10.50	6.40	4.20	9.52	1.04
	2020	53.57	10.78	2.16	1.27	11.04	6.71	2.95	10.46	1.06
	2021	62.99	6.26	1.63	1.20	9.86	6.18	4.45	6.72	0.70
邢台	2019	12.76	55.14	2.99	2.75	2.77	5.08	2.99	14.47	1.05
	2020	13.79	52.17	4.04	2.86	2.83	5.20	2.82	15.17	1.12
	2021	11.94	57.29	3.66	1.95	2.32	3.99	2.01	15.57	1.27
衡水	2019	3.33	7.33	54.02	7.36	2.38	9.12	2.95	12.23	1.28
	2020	3.34	7.25	51.11	8.59	4.20	8.60	2.55	12.88	1.48
	2021	3.16	6.19	60.63	5.36	2.23	8.12	3.15	10.35	0.80
沧州	2019	2.04	2.29	4.77	54.17	2.80	12.00	3.59	16.93	1.41
	2020	2.20	3.20	4.75	53.67	3.74	9.51	2.07	19.27	1.59
	2021	1.10	1.29	4.14	58.01	2.30	13.52	2.57	16.04	1.03

西、邢台对邯郸的流入通量最高,邯郸对河南、山东的流出通量最高;山西、石家庄对邢台的流入通量最高,邢台对衡水的流出通量最高;石家庄、邢台对衡水的流入通量最高,沧州、山东对衡水的流出通量最

高;衡水、保定对沧州的流入通量最高,山东对沧州的流出通量最高. 导致年际变化的差异一方面可能与每年的PM_{2.5}浓度有关,不同高度的PM_{2.5}浓度不同会导致通量强度发生变化,另一方面是因为不同年

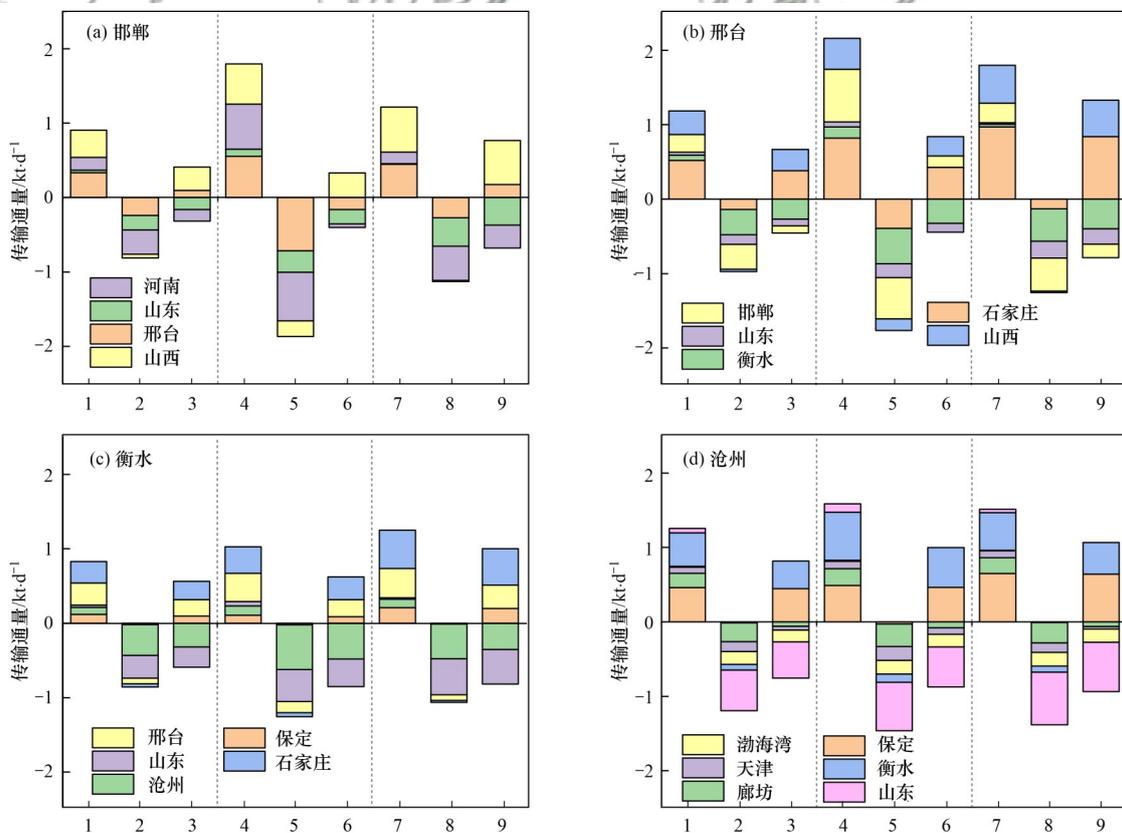
的气象因素存在差异。对于总净通量而言,4个城市3 a 冬季分别为邯郸:0.094、-0.070和0.087 kt·d⁻¹;邢台:0.212、0.395和0.544 kt·d⁻¹;衡水:-0.040、-0.228和0.185 kt·d⁻¹;沧州:0.062、0.126和0.128 kt·d⁻¹。根据总净通量可知,邯郸、邢台和沧州在研究期间作为受体(接受周边地区流入 PM_{2.5} 通量高于向周边地区流出的通量)较多,而衡水更多作为源体(向周边地区输出 PM_{2.5} 的量高于周边城市对自身的输入量)。

图7为2019~2021年1月1261 m内邯郸、邢台、衡水和沧州与周边地区 PM_{2.5} 净通量垂直分布,由图可知,随着离地高度的不同,PM_{2.5} 净通量强度也随之改变。

邯郸2019年1月各离地高度 PM_{2.5} 总净通量基本为正值,表明邯郸为受体城市,PM_{2.5} 总净通量在近地面至离地817 m高度处变化较为平缓,在817 m处达到最大值13.32 t·d⁻¹,817 m以上强度逐渐降低,净流入通量主要来自山西和邢台,二者贡献强度为14.04~66.54 t·d⁻¹;2020年1月,邯郸 PM_{2.5} 总净通量在近地面至离地359 m表现为正值,流入本地 PM_{2.5} 的量高于向周边流出 PM_{2.5} 的量,随着高度增加,邢台对邯郸转

变为净流出,邢台、山东和河南对邯郸较大的净流出强度(-50.61~-76.57 t·d⁻¹)远高于山西对邯郸的净流入强度(30.57~39.76 t·d⁻¹),使得 PM_{2.5} 总净通量转变为总净流出,并在1261 m左右达到净流出通量强度最大值-40.32 t·d⁻¹;2021年1月,邯郸 PM_{2.5} 总净通量在垂直方向上主要表现为净流入,随高度变化较为平缓,在离地252 m左右达到了总净通量的最大值(16.06 t·d⁻¹),与2019年1月和2020年1月相比,虽然净流入流出通量显著增大,但由于来自邢台、山西较大的净流入通量(20.37~145.12 t·d⁻¹)与去向河南、山东较大的净流出通量(-11.74~-142.30 t·d⁻¹)相互抵消,导致总净通量强度最低。

邢台2019年1月 PM_{2.5} 总净通量距地面252 m以下为负值,表明邢台在近地面作为源体,在359~1261 m转变为正值,作为受体接受来自石家庄和山西的净流入通量(57.35~121.41 t·d⁻¹),同时向邯郸、衡水和山东净流出,强度范围是-42.84~-61.20 t·d⁻¹,并在817 m处左右达到了总净通量的最大值(61.39 t·d⁻¹);2020年1月,邢台整个垂直方向上作为受体表现为流入通量高于向周边地区的流出通量,在距地面817 m附近达到了 PM_{2.5} 总净通量的最大值



1. 流入-2019年,2. 流出-2019年,3. 净-2019年,4. 流入-2020年,5. 流出-2020年,6. 净-2020年,7. 流入-2021年,8. 流出-2021年,9. 净-2021年

图6 2019~2021年的1月邯郸、邢台、衡水和沧州与周边 PM_{2.5} 总流入、流出和净通量汇总

Fig. 6 Summary of the total inflow, outflow and net flux of PM_{2.5} in Handan, Xingtai, Hengshui, Cangzhou, and their surrounding areas from 2019 to 2021

81.51 t·d⁻¹,与2019、2021年1月不同的是,受风向和风速的影响,邯郸从对邢台的净流入转变为对邢台的净流出,石家庄、邯郸和山西贡献了净流入流量分别为20.09~60.98、0.97~40.24和19.25~35.07 t·d⁻¹,而衡水和山东则接受了大部分的净流出流量,强度范围分别为-22.39~-44.76 t·d⁻¹和-3.04~-19.71 t·d⁻¹;2021年1月邢台净通量的垂直分布与2020年1月较为相似,邢台作为受体,PM_{2.5}总净通量随离地高度逐渐增加,主要净流入流量来自石家庄(11.68~174.67 t·d⁻¹)和山西(11.81~86.97 t·d⁻¹),净流出流量主要去向邯郸(-1.05~-41.86 t·d⁻¹)、山

东(-0.81~-46.09 t·d⁻¹)和衡水(-23.59~-57.48 t·d⁻¹)。

衡水2019年1月在距地面97 m内总净通量表现为较弱的净流出,主要来自山东和沧州,随后在153~359 m转为较弱的净流入,随着高度增加,衡水对山东的净流出通量增加,PM_{2.5}总净通量再次转变为负值,且在距地面817 m处达到净通量最大值-13.41 t·d⁻¹。2020年1月,衡水PM_{2.5}总净通量在离地97 m以下强度较低,而在97 m以上迅速升高并维持较高强度(-23.50~-43.01 t·d⁻¹),与2019年相比,衡水对山东和沧州的净流出通量分别提高了37%和49.72%,

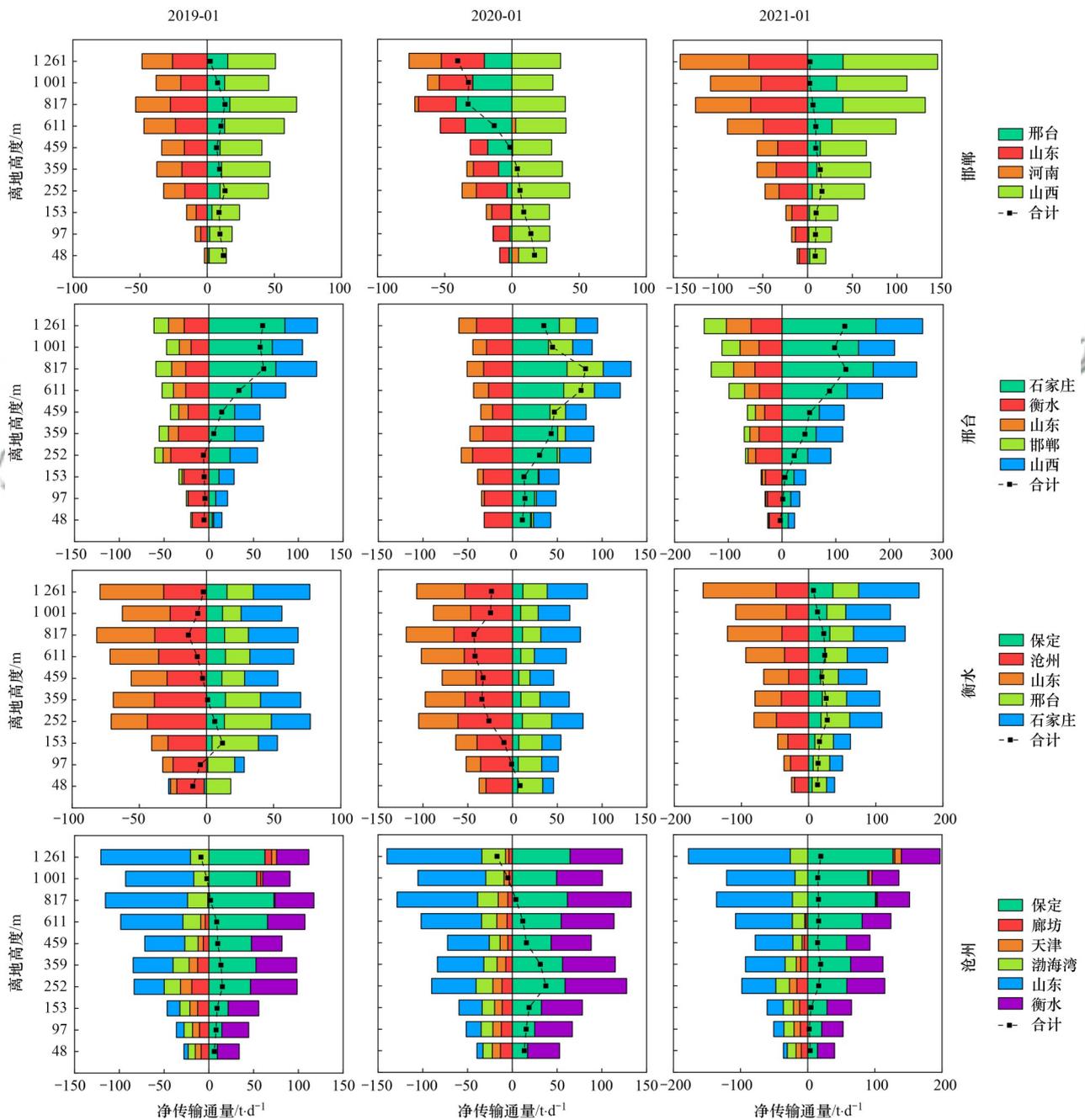


图7 2019~2021年的1月邯郸、邢台、衡水和沧州与周边PM_{2.5}净通量垂直分布

Fig. 7 Net flux of PM_{2.5} in Handan, Xingtai, Hengshui, Cangzhou, and their surrounding areas was vertically distributed from 2019 to 2021

导致衡水在 2020 年 1 月表现为源体. 2021 年 1 月, 衡水 PM_{2.5} 总净通量表现为正值, 净流入范围介于 7.33 ~ 27.92 t·d⁻¹, 最大值发生在离地 252 m, 通量强度为 27.92 t·d⁻¹, 其中净流入通量主要来自邢台和石家庄 (38.72 ~ 164.51 t·d⁻¹), 净流出通量主要去向山东和沧州 (-25.44 ~ -157.18 t·d⁻¹).

沧州 2019 年 1 月和 2020 年 1 月 PM_{2.5} 总净通量在离地 817 m 以下均表现为正值, 净通量范围为 1.87 ~ 15.12 t·d⁻¹ (2019 年) 和 3.99 ~ 37.49 t·d⁻¹ (2020 年), 在离地 817 ~ 1 261 m 处 PM_{2.5} 总净通量表现为负值, 净通量范围为 -2.25 ~ -8.83 t·d⁻¹ (2019 年) 和 -4.94 ~ -17.10 t·d⁻¹ (2020 年), 同时两年 PM_{2.5} 总净通量最大值也出现在同一高度 252 m 处左右, 分别为 15.12 t·d⁻¹ 和 37.49 t·d⁻¹. 2021 年 1 月, 沧州在 1 261 m 内作为受体城市, 接受主要来自保定 (14.51 ~ 127.07 t·d⁻¹) 和衡水 (25.43 ~ 57.93 t·d⁻¹) 的流入通量. 同时山东 (-5.85 ~ -151.84 t·d⁻¹) 和渤海湾 (-12.91 ~ -25.90 t·d⁻¹) 接受了沧州大部分的净流出通量. 值得注意的是, 由于季风影响, 渤海湾对沧州流入通量很低, 3 a 均值分别为 1.15、1.34 和 0.56 t·d⁻¹.

综合 2019 ~ 2021 年 1 月传输通量可以发现, 4 个城市 3 a 冬季近地面净通量变化不大, 高空由于风速和 PM_{2.5} 浓度的影响净通量差异较为明显. 同时邯郸最大的净输入通量来自山西, 最大净输出通量来自河南和山东; 邢台最大净输入通量来自石家庄和山西, 最大净输出通量来自衡水、邯郸和山东; 衡水最大净输入通量来自石家庄和邢台, 最大净输出通量来自沧州和山东; 沧州最大净输入通量来自保定和衡水, 最大净输出通量来自山东和渤海湾. 由此可以推断出 4 个城市两条主要传输方向, 即西北-东南方向 (山西→邯郸→河南、山东; 石家庄→邢台→邯郸、山东; 保定→沧州→山东) 以及西南-东北方向 (山西→邢台→衡水→沧州→渤海湾), 因此加强对山西、石家庄和保定等地区的大气污染物治理对改善传输通道其他城市空气质量很有必要.

3 结论

(1) 2019 ~ 2021 年 1 月河北南部 4 个城市邯郸、邢台、衡水和沧州 PM_{2.5} 浓度呈下降趋势, 下降比例分别为 45.85%、49.45%、42.40% 和 31.65%.

(2) PSCF 分析和 CWT 分析结果较为一致, 两种方法均显示来自山西中南部、河南山东方向的 PM_{2.5} 输送对邯郸、邢台、衡水和沧州较为显著.

(3) 邯郸、邢台、衡水和沧州冬季 PM_{2.5} 以本地排放为主, 区域贡献为辅. 本地排放贡献率分别为: 53.57% ~ 62.99% (邯郸)、52.17% ~ 57.29% (邢

台)、51.11% ~ 60.63% (衡水) 和 53.67% ~ 58.01% (沧州). 高风低湿的有利扩散气象和低风高湿的不利扩散气象会导致区域传输贡献强度发生差异.

(4) 邯郸、邢台、衡水和沧州 4 个城市 3 a 冬季与周边区域总流入 (流出) 通量强度大小分别为 2020 年 > 2021 年 > 2019 年. 4 个城市 3 a 冬季总净通量分别为邯郸: 0.094、-0.070 和 0.087 kt·d⁻¹; 邢台: 0.212、0.395 和 0.544 kt·d⁻¹; 衡水: -0.040、-0.228 和 0.185 kt·d⁻¹; 沧州: 0.062、0.126 和 0.128 kt·d⁻¹. 邯郸、邢台和沧州在研究期间作为受体较多, 而衡水更多作为源体.

(5) PM_{2.5} 净通量在近地面表现变化不大, 在垂直方向上由于风速和 PM_{2.5} 浓度的影响分布明显, 净传输通量强度基本随着高度的升高而增大, 不同城市最大净通量高度不同, 其次识别出 4 个城市 PM_{2.5} 两条主要传输方向, 即西北-东南方向 (山西→邯郸→河南、山东; 石家庄→邢台→邯郸、山东; 保定→沧州→山东) 以及西南-东北方向 (山西→邢台→衡水→沧州→渤海湾).

参考文献:

- [1] Wang X Q, Wei W, Cheng S Y, et al. Composition analysis and formation pathway comparison of PM₁ between two pollution episodes during February 2017 in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2020, **223**. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117223.
- [2] Wang X Q, Duan W J, Zhu J X, et al. Nonlinear influence of winter meteorology and precursor on PM_{2.5} based on mathematical and numerical models: a COVID-19 and Winter Olympics case study[J]. Atmospheric Environment, 2022, **278**. doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119072.
- [3] 杨晓辉, 肖登攀, 柏会子, 等. 2013-2020 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟及趋势分析[J]. 地理与地理信息科学, 2022, **38**(4): 58-67.
Yang X H, Xiao D P, Bai H Z, et al. Simulation and trend analysis of spatiotemporal variation of PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2013 to 2020 [J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, **38**(4): 58-67.
- [4] 邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 等. 京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM_{2.5} 污染影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4095-4103.
Shao X Y, Wang X Q, Zhong Y S, et al. Impacts of anthropogenic emission reduction and meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in typical cities of Beijing-Tianjin-Hebei in winter [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4095-4103.
- [5] 张文娟, 夏志勇, 孙凤娟, 等. 济南市一次持续性重污染天气的颗粒物化学组分演变分析[J]. 山东科学, 2022, **35**(3): 100-106.
Zhang W J, Xia Z Y, Sun F J, et al. Chemical composition evolution of particulate matter in persistent heavy-air pollution in Jinan[J]. Shandong Science, 2022, **35**(3): 100-106.
- [6] 郝建奇, 葛宝珠, 王自发, 等. 2013 年京津冀重污染特征及其气象条件分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(8): 3032-3043.
Hao J Q, Ge B Z, Wang Z F, et al. Characteristics and meteorological conditions analysis of severe haze events over

- Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 3032-3043.
- [7] Burr M J, Zhang Y. Source apportionment of fine particulate matter over the Eastern U. S. Part II: source apportionment simulations using CAMx/PSAT and comparisons with CMAQ source sensitivity simulations [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2011, **2**(3): 318-336.
- [8] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体 $PM_{2.5}$ 四季污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
Liu T, Wang X J, Chen Q, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of ambient $PM_{2.5}$ during four seasons in Yantai city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- [9] Wang T T, Du Z F, Tan T Y, *et al.* Measurement of aerosol optical properties and their potential source origin in urban Beijing from 2013-2017 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **206**: 293-302.
- [10] 林鑫, 仝纪龙, 王伊凡, 等. 基于CMAQ和HYSPLIT模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3098-3107.
Lin X, Tong J L, Wang Y F, *et al.* Analysis of causes and sources of summer ozone pollution in Rizhao based on CMAQ and HYSPLIT models [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3098-3107.
- [11] 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.
- [12] 余创, 张玉秀, 陈伟. 银川市 $PM_{2.5}$ 的输送路径及潜在源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3055-3065.
Yu C, Zhang Y X, Chen W. The transport pathways and potential source regions of $PM_{2.5}$ in Yinchuan, China [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3055-3065.
- [13] Zhao J W, Liu Y X, Shan M, *et al.* Characteristics, potential regional sources and health risk of black carbon based on ground observation and MERRA-2 reanalysis data in a coastal city, China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **256**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105563.
- [14] 冯春莉, 饶永才, 孟庆江, 等. 徐州市供暖期空气污染特征及来源分析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, **13**(2): 501-509.
Feng C L, Rao Y C, Meng Q J, *et al.* Characteristics and sources apportionment of air pollution during heating period in Xuzhou [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(2): 501-509.
- [15] 蒋子瑶, 彭王敏子, 陈琦. 基于PSCF与CWT方法的赣江新区大气污染物潜在源区个例分析[J]. *气象与减灾研究*, 2022, **45**(3): 216-224.
Jiang Z Y, Peng W M Z, Chen Q. Case study on potential sources of air pollutants over Ganjiang new district based on PSCF and CWT methods [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2022, **45**(3): 216-224.
- [16] 任浦慧, 解静芳, 姜洪进, 等. 太原市大气 $PM_{2.5}$ 季节传输路径和潜在源分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3144-3151.
Ren P H, Xie J F, Jiang H J, *et al.* Transport pathways and potential sources of $PM_{2.5}$ in different seasons in Taiyuan city [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3144-3151.
- [17] 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 等. 武汉冬季大气 $PM_{2.5}$ 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 61-73.
Jiang S N, Kong S F, Zheng H, *et al.* Real-time source apportionment of $PM_{2.5}$ and potential geographic origins of each source during winter in Wuhan [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 61-73.
- [18] 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 等. 鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3439-3450.
Kong X C, Zhang L X, Zhang C Y, *et al.* Temporal evolution and source appointment of black carbon aerosol in Ordos during summer and autumn 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3439-3450.
- [19] 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 等. 北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 46-60.
Zhao D L, Wang F, Liu D T, *et al.* Variation characteristics and potential sources of the Mt. Haituo aerosol chemical composition in different pollution processes during winter in Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 46-60.
- [20] 汪蕊, 丁建丽, 马雯, 等. 基于PSCF与CWT模型的乌鲁木齐市大气颗粒物源区分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(8): 3033-3042.
Wang R, Ding J L, Ma W, *et al.* Analysis of atmospheric particulates source in Urumqi based on PSCF and CWT models [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 3033-3042.
- [21] 王中杰, 霍娟, 杜惠云, 等. 2015~2019年日照市 $PM_{2.5}$ 长期变化特征及其潜在源区分析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(9): 3969-3980.
Wang Z J, Huo J, Du H Y, *et al.* Long term characteristics and potential sources of $PM_{2.5}$ in Rizhao city from 2015 to 2019 [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 3969-3980.
- [22] 张晗宇, 郎建垒, 温维, 等. 唐山 $PM_{2.5}$ 污染特征及区域传输的贡献[J]. *北京工业大学学报*, 2017, **43**(8): 1252-1262.
Zhang H Y, Lang J L, Wen W, *et al.* Pollution characteristics and regional transmission of $PM_{2.5}$ in Tangshan [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, **43**(8): 1252-1262.
- [23] Wang L T, Wei Z, Yang J, *et al.* The 2013 severe haze over southern Hebei, China: model evaluation, source apportionment, and policy implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3151-3173.
- [24] 陈颖元, 王晓琦, 程水源, 等. 京津冀和长三角地区一次重霾过程气象成因及传输特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(6): 2481-2492.
Chen H Y, Wang X Q, Cheng S Y, *et al.* Analysis of meteorological causes and transmission characteristics of a heavy haze process in Beijing Tianjin Hebei and Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2481-2492.
- [25] 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.
- [26] 王文丁, 陈焕盛, 吴其重, 等. 珠三角冬季 $PM_{2.5}$ 重污染区域输送特征数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2741-2751.
Wang W D, Chen H S, Wu Q Z, *et al.* Numerical study of $PM_{2.5}$ regional transport over Pearl River Delta during a winter heavy haze event [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2741-

- 2751.
- [27] Gao M, Liu Z R, Wang Y S, *et al.* Distinguishing the roles of meteorology, emission control measures, regional transport, and co-benefits of reduced aerosol feedbacks in "APEC Blue" [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **167**: 476-486.
- [28] Liu X Y, Pan X L, Li J, *et al.* Cross-boundary transport and source apportionment for PM_{2.5} in a typical industrial city in the Hebei Province, China: a modeling study [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **115**: 465-473.
- [29] 王德羿, 王体健, 韩军彩, 等. "2+26"城市大气重污染下 PM_{2.5}来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(1): 92-99.
Wang D Y, Wang T J, Han J C, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} under heavy air pollution conditions in "2+26" cities [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(1): 92-99.
- [30] 彭功, 赵媛媛, 赵吉麟, 等. 京津冀大气污染传输通道区大气污染时空格局研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 449-458.
Peng L, Zhao Y Y, Zhao J L, *et al.* Spatiotemporal patterns of air pollution in air pollution transmission channel of Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 449-458.
- [31] Lang J L, Tian J J, Zhou Y, *et al.* A high temporal-spatial resolution air pollutant emission inventory for agricultural machinery in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **183**: 1110-1121.
- [32] Li S Y, Lang J L, Zhou Y, *et al.* Trends in ammonia emissions from light-duty gasoline vehicles in China, 1999-2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134359.
- [33] Gao M, Carmichael G R, Wang Y, *et al.* Modeling study of the 2010 regional haze event in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1673-1691.
- [34] Huang L, Zhu Y H, Zhai H H, *et al.* Recommendations on benchmarks for numerical air quality model applications in China - Part 1: PM_{2.5} and chemical species [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(4): 2725-2743.
- [35] 张智答, 王晓琦, 张晗宇, 等. 京津冀地区典型城市秋冬季 PM_{2.5}输送特征研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(3): 993-1004.
Zhang Z D, Wang X Q, Zhang H Y, *et al.* PM_{2.5} transport characteristics of typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region in autumn and winter [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(3): 993-1004.
- [36] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [37] 王小兰, 王雁, 闫世明, 等. 晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5}传输特征分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3423-3438.
Wang X L, Wang Y, Yan S M, *et al.* Analysis of PM_{2.5} transmission characteristics in main cities of Jinzhong basin in winter [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3423-3438.
- [38] 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]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 86-93.
- [39] Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Insights into the temporal and spatial characteristics of PM_{2.5} transport flux across the district, city and region in the North China Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **218**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117010.
- [40] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Assessment of inter-city transport of particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4843-4858.
- [41] Zhang H Y, Cheng S Y, Yao S, *et al.* Multiple perspectives for modeling regional PM_{2.5} transport across cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region during haze episodes [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **212**: 22-35.
- [42] Zhou Y, Cheng S Y, Lang J L, *et al.* A comprehensive ammonia emission inventory with high-resolution and its evaluation in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 305-317.
- [43] 崔继宪, 郎建全, 陈添, 等. 2016年北京市空气质量特征及 PM_{2.5}传输规律[J]. *北京工业大学学报*, 2018, **44**(12): 1547-1556.
Cui J X, Lang J L, Chen T, *et al.* Characteristics of Beijing's air quality and regional transport of PM_{2.5} in 2016 [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2018, **44**(12): 1547-1556.
- [44] 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.
- [45] 关攀博, 周颖, 程水源, 等. 典型重工业城市空气重污染过程特征与来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(1): 31-40.
Guan P B, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of heavy pollution process and source appointment in typical heavy industry cities [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(1): 31-40.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)