

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区

谢放尖¹, 郑新梅¹, 窦焘焘¹, 杨峰¹, 刘春蕾¹, 李洁¹, 谢轶嵩¹, 王艳¹, 胡建林^{2,3,*}, 陈长虹⁴

(1. 南京市生态环境保护科学研究院, 南京 210093; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 3. 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; 4. 上海市环境科学研究院国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233)

摘要: 基于南京市空气质量数据和 NCEP 全球再分析资料, 利用后向轨迹模式计算了 2019 年 3 月至 2020 年 2 月以南京城区为受体点的逐小时气团 24 h 后向轨迹, 并将后向轨迹数据和 $PM_{2.5}$ 浓度数据结合, 进行轨迹聚类分析和潜在源区分析。结果表明, 研究期间南京市 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值为 $(36 \pm 20) \mu g \cdot m^{-3}$, 超过国家二级标准限值的污染天数为 17 d, $\rho(PM_{2.5})$ 的季节变化特征明显: 冬季 $(49 \mu g \cdot m^{-3}) >$ 春季 $(42 \mu g \cdot m^{-3}) >$ 秋季 $(31 \mu g \cdot m^{-3}) >$ 夏季 $(24 \mu g \cdot m^{-3})$, 全年 $PM_{2.5}$ 浓度和地面气压显著正相关, 而跟气温、相对湿度、降水量和风速均为显著负相关关系; 春季气团输送路径为 7 条, 其余季节均为 6 条, 其中, 春季的西北路和东南偏南路, 秋季东南路和冬季西南路是各季主要的污染输送路径, 均具有传输距离短, 气团移动慢的特点, 说明静稳天气下本地累积是 $PM_{2.5}$ 出现高值的主要原因之一; 冬季西北路气团传输路径较长, $\rho(PM_{2.5})$ 为 $58 \mu g \cdot m^{-3}$, 是所有路径中第 2 高值, 说明皖东北城市对南京输送影响较大; PSCF 和 CWT 潜在源区分布较为一致, 主要的潜在源区分布以南京本地和邻近区域为主, 说明控制 $PM_{2.5}$ 污染需要强化本地管控并和邻近区域开展联防联控, 冬季污染输送影响最大, 主要潜在源区分布在南京西北和滁州交界地带, 且主要范围在滁州境内, 联防联控的范围需要扩大到安徽。

关键词: 细颗粒物; 后向轨迹; 聚类分析; 潜在源区贡献函数; 浓度权重轨迹; 南京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3071-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206256

Transport Influence and Potential Sources of $PM_{2.5}$ Pollution for Nanjing

XIE Fang-jian¹, ZHENG Xin-mei¹, DOU Tao-tao¹, YANG Feng¹, LIU Chun-lei¹, LI Jie¹, XIE Yi-song¹, WANG Yan¹, HU Jian-lin^{2,3,*}, CHEN Chang-hong⁴

(1. Nanjing Municipal Academy of Ecological and Environment Protection Science, Nanjing 210093, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring & Pollution Control, Nanjing 210044, China; 4. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: In this study, 24-hour backward trajectories of the air mass in Nanjing were calculated by using the HYSPLIT model with the NCEP global reanalysis data from March 2019 to February 2020. The backward trajectories combined with the hourly concentration data of $PM_{2.5}$ were then utilized in the trajectory clustering analysis and potential pollution source analysis. The results showed that the average concentration of $PM_{2.5}$ in Nanjing was $(36 \pm 20) \mu g \cdot m^{-3}$ during the study period, with 17 days exceeding the grade II national ambient air quality standards ($75 \mu g \cdot m^{-3}$). $PM_{2.5}$ concentration exhibited clear seasonal variation, with winter $(49 \mu g \cdot m^{-3}) >$ spring $(42 \mu g \cdot m^{-3}) >$ autumn $(31 \mu g \cdot m^{-3}) >$ summer $(24 \mu g \cdot m^{-3})$. $PM_{2.5}$ concentration was significantly positively correlated with surface air pressure but significantly negatively correlated with air temperature, relative humidity, precipitation, and wind speed. Based on the trajectories, seven transport routes were identified in spring, and six routes for the other seasons. The northwest and south-southeast routes in spring, southeast route in autumn, and southwest route in winter were the main pollution transport routes in each season, with the characteristics of short transport distance and slow air mass movement, indicating that local accumulation was one of the main reasons for the high value of $PM_{2.5}$ in quiet and stable weather. The distance of the northwest route in winter was large, and the $PM_{2.5}$ concentration was $58 \mu g \cdot m^{-3}$, which was the 2nd highest concentration in all routes, indicating that the cities in the northeast of Anhui had a great transport influence on Nanjing $PM_{2.5}$. The distribution of PSCF and CWT was relatively consistent, and the main potential source areas were mainly local and adjacent areas of Nanjing, indicating that $PM_{2.5}$ control is needed to strengthen local control and carry out joint prevention and control with adjacent areas. Winter was most affected by transport, its main potential source area was located at the junction of northwest Nanjing and Chuzhou, and the main source origin was in Chuzhou; therefore joint prevention and control should be expanded to Anhui.

Key words: $PM_{2.5}$; backward trajectories; cluster analysis; potential source contribution function analysis (PSCF); concentration weighted trajectory method (CWT); Nanjing

细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 是指空气动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu m$ 的颗粒物, 对人体健康和能见度等均具有较大的影响^[1,2], 一直是我国大气污染防治攻坚的焦点。南京是长三角区域中心城市, 也是典型的复合型污染城市。近年来, 南京市通过采取煤炭消费总量控制、重点行业超低排放改造和老旧机动车淘汰等一系列措施, 大气环境质量改善明显, 2020 年 $\rho(PM_{2.5})$ 为 $31.3 \mu g \cdot m^{-3}$, 相比 2015 年下降

42.6%^[3]。减排空间的逐步压缩, 空气质量持续改善面临瓶颈。 $PM_{2.5}$ 粒径小, 质量轻, 在大气中滞留时间长, 区域输送影响不容忽视^[4-6]。此前, 南京城区

收稿日期: 2022-06-22; 修订日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42007187); 江苏省 $PM_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制重大专项

作者简介: 谢放尖 (1982~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 $PM_{2.5}$ 与 O_3 污染协同控制, E-mail: strong886@126.com

* 通信作者, E-mail: jianlinhu@nuist.edu.cn

PM_{2.5}源解析显示^[7],全年有22%~38%的PM_{2.5}来源于区域输送,但目前尚未对其污染输送路径和主要的污染贡献源区开展系统研究。

后向轨迹模式是研究污染区域污染输送的常用工具之一,相比复杂的空气质量模型,后向轨迹模式更容易掌握,气团轨迹以线条的形式展现,结果较为直观。获取的大量轨迹经聚类分析可以得到污染输送路径,而结合潜在源贡献函数(potential source contribution function analysis, PSCF)和浓度权重轨迹分析法(concentration weighted trajectory method, CWT)可以进一步识别污染潜在源区,目前已有较多的研究案例^[8~13]。Wang^[14]利用后向轨迹模式研究了北京沙尘天气传输路径和贡献源区,认为北京春季沙尘主要传输路径有3条,贡献的源区为哈萨克斯坦和中国的边境地区,蒙古西部的沙漠和半沙漠地区,北部的高沙尘沙漠和中国的黄土高原;王世强等^[15]研究了广州地区污染输送通道,认为主要输送路径有6条,且不同的输送通道对应的PM_{2.5}浓度差异显著,局地 and 东北路输送时,PM_{2.5}浓度最大;葛跃等^[16]研究了苏锡常地区颗粒物输送影响,结果表明来自内陆的污染气流和来自海洋的清洁气流是苏锡常地区两种主要输送类型,外源污染气流不仅直接输送颗粒物,还贡献了大量的气态污染物。郭蒙蒙等^[17]分析了郑州市PM_{2.5}潜在来源分布和其贡献特征,发现PM_{2.5}污染源区主要分布在河南省内的周边城市、山西南部、陕西东部、湖北北部、山东西北部 and 河北南部等相邻省份,其中,近距离传输对郑州市PM_{2.5}的质量浓度贡献更为显著。

南京位于苏皖交界,长三角腹地,容易受周边城市影响,科学认识污染输送影响特征十分必要。南京国家基准气候站数据显示,2019年南京平均气温17.1℃,较常年偏高1.1℃,为历史第2高值,年降水量721.8mm,较常年平均偏少3.4成^[18],选取该年份在PM_{2.5}污染气象特征分析基础上,计算到达南京城区的后向轨迹,叠加同时段PM_{2.5}浓度数据,通过聚类分析和潜在源区分析方法,识别出南京地区PM_{2.5}污染输送路径和潜在源区,旨在为PM_{2.5}区域联防联控措施的制定提供依据。

1 材料和方法

1.1 数据来源

空气质量数据为2019~2020年南京市9个大气国控点逐小时观测数据,气象数据为2019年以来南京国家基准站大气压、气温、风速、相对湿度和降水等逐日观测数据;模式所需要的全球资料同化系统(GDAS)数据来源于美国国家环境预报中心

(NCEP),空间分辨率为1°×1°,时间分辨率为3 h(00:00、06:00、12:00和18:00为同化资料,03:00、09:00、15:00和21:00为模式预报,均为世界时),从ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1获取。

1.2 研究方法

1.2.1 后向轨迹模型

后向轨迹计算采用混合单粒子拉格朗日综合轨迹模式(hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model, HYSPLIT),该模型由美国国家海洋和大气管理局和澳大利亚气象局联合开发,用于分析计算大气污染物输送和扩散轨迹,是可以处理多种气象要素输入场、多种物理过程和不同类型污染物排放源的综合模式系统^[19,20]。本文采用HYSPLIT 4版本,选取近年来气象条件较为不利的2019年为典型年份进行分析,计算时段为2019年3月1日00:00至2020年2月29日23:00(均为世界时),受体点为南京城区(118.79°E, 32.05°N),高度为10 m,轨迹计算时长为24 h,分辨率为1 h,每条轨迹代表了气团到达受体点前的运动轨迹,轨迹的端点代表了该时刻气团的位置和高度。受体点高度取10 m主要是考虑目前大气环境监测站点一般在3~15 m的近地面;计算24 h后向轨迹主要是将研究范围集中在长三角联防联控区域,且PM_{2.5}污染呈现明显的日变化规律;分辨率选1 h主要是方便和污染物小时浓度数据进行联合分析。

1.2.2 聚类分析

通过轨迹计算获得大量的轨迹后,采用聚类分析将其中相似方向和速率的轨迹进行合并归类以代表一类气团输送路径。本文共获得了2019年3月1日至2020年2月29日共8761条以南京城区为受体的24 h后向轨迹。南京四季分明,按春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)和冬(12~2月)季分别进行轨迹的聚类分析,以获取四季的污染输送路径。聚类方法采用Ward's最小方差法^[15,21],其基本思想是先将 n 条轨迹归为 n 类,然后每减少一类时,需满足两两轨迹的欧式距离之和和原来的差距最小,直到减少到合适的类别为止。欧式距离计算见公式(1)。

$$d_{12} = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(X_{1i} - X_{2i})^2 + (Y_{1i} - Y_{2i})^2]} \quad (1)$$

式中, d_{12} 为轨迹1和2之间的欧几里得距离, X_{1i} 和 Y_{1i} , X_{2i} 和 Y_{2i} 分别为轨迹1和2上节点 i 的位置, n 为轨迹节点数,24 h后向轨迹节点数为25个。为确定合理的聚类数,一般采用总体空间方差(total spatial variance, TSV)方法^[22],选取TSV计算结果

突变时的轨迹条数作为聚类数。

1.2.3 潜在源区贡献函数 PSCF 方法

潜在源区贡献函数 PSCF 方法是一种条件概率函数^[23], 利用污染轨迹和所有轨迹在途经区域停留时间的比(以轨迹节点数量来近似表征停留时间, 逐时计算的 24 h 后向轨迹共 25 个节点)来表征每个区域对受体点的污染贡献。将研究区分为 $i \times j$ 个网格, 每个网格 PSCF 计算见公式(2)。

$$\text{PSCF} = m_{ij}/n_{ij} \quad (2)$$

式中, n_{ij} 为落在某一网格内的所有轨迹节点数, m_{ij} 为其中污染轨迹节点数。污染轨迹指受体点浓度超过某一浓度阈值时对应的轨迹, 浓度阈值一般为所有轨迹对应浓度的平均值或空气质量标准值, 本文将获取的所有轨迹对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度作为阈值。设定的 PSCF 网格区域包含主要轨迹所覆盖的地理区域($112^\circ \sim 130^\circ\text{E}$, $24^\circ \sim 42^\circ\text{N}$), 覆盖南京周边东西约 1 500 km, 南北约 2 000 km 的范围, 网格分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 共计约 32 400 个网格, 总轨迹条数为 8 761 条, 约 22 万个节点。

PSCF 值越大表示该区域对于受体点污染贡献越大, 由于 PSCF 是一种条件概率, 当 n_{ij} 较小时, PSCF 计算结果的不确定性较大。为降低计算的不确定性, 一些学者引入了权重函数 W_{ij} 计算 WPSCF 值^[24,25], 见公式(3)。

$$\text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF} \quad (3)$$

参考设置权重的做法, 为减少方法不确定性, 权重函数 W_{ij} 具体设定见公式(4)。

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & n_{ij} > 60 \\ 0.70 & 30 < n_{ij} \leq 60 \\ 0.42 & 20 < n_{ij} \leq 30 \\ 0.05 & n_{ij} \leq 20 \end{cases} \quad (4)$$

1.2.4 浓度权重轨迹 CWT 方法

为区分相同 PSCF 值的网格对受体点污染贡献

的差异, 引入 CWT 方法^[26] 定量计算权重浓度来表征具体的网格贡献。首先创建网格, 范围和分辨率均和 PSCF 网格相同, 每个网格的 CWT 计算见公式(5)。

$$\text{CWT}_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \times \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \quad (5)$$

式中, CWT_{ij} 为网格 (i, j) 的平均污染权重浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; l 为气团轨迹; M 为轨迹的总数; C_l 为轨迹 l 经过网格 (i, j) 时对应的污染物质质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; τ_{ijl} 为轨迹 l 在网格 (i, j) 停留的时间, 计算时使用落在网格内的轨迹节点数来代替停留时间, 同样当节点数较少时, 也会增大不确定性, 采用和 PSCF 方法相同的权重函数 W_{ij} 来计算 WCWT 值, 见公式(6)。WCWT 值越大, 表明该区域对受体点的污染贡献越大。

$$\text{WCWT}_{ij} = W_{ij} \times \text{CWT}_{ij} \quad (6)$$

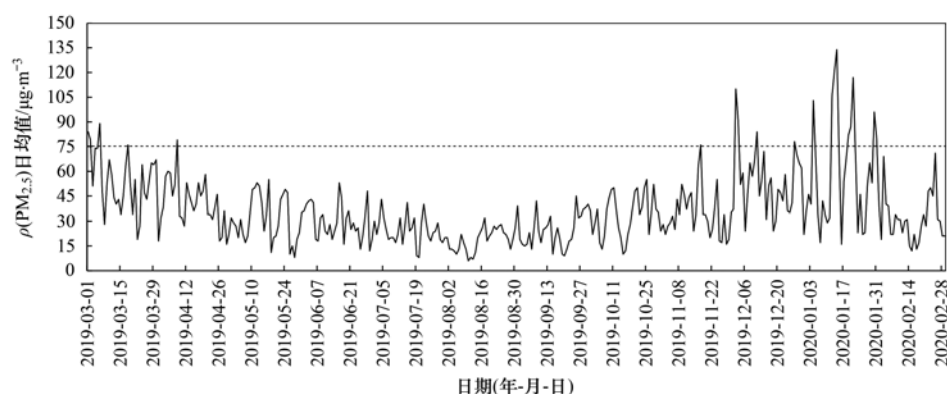
1.2.5 TrajStat 模型

中国科学院大气物理研究所王亚强研究团队为方便轨迹的计算和后续分析, 对轨迹计算、聚类分析、PSCF 和 CWT 分析等进行了软件封装, 开发了 TrajStat 模型^[27]。该模型可以单独使用也可以作为插件嵌入到 MeteoInfo 软件当中, 并且可以结合 GIS 进行分析, 使用较为方便, 本文采用 TrajStat3.0 版本。

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征

图 1 给出了 2019 年 3 月 1 日至 2020 年 2 月 29 日的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间序列, 可见, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 范围在 $6 \sim 134 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 平均值为 $(36 \pm 20) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超过国家二级标准^[28] 限值 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的污染天数为



虚线为国家二级标准

图 1 2019 年 3 月 1 日至 2020 年 2 月 29 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间序列

Fig. 1 Time series of $\text{PM}_{2.5}$ concentration distribution from March 1, 2019 to February 29, 2020

17 d,其中冬季 12 d,春季 4 d,秋季 1 d,污染天主要集中在冬春季,这主要和冬春季不利气象条件有关。

图 2 给出了各季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度箱线图,可见, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节变化特征明显,平均值为:冬季 ($49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季 ($42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季 ($31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季 ($24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),冬季箱体较长,污染物浓度变化幅度较大,而夏季箱体较为扁平,总体浓度较低.这和 Gao 等^[29]关于南京 2012 ~ 2016 年这 5 年间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体冬季最高,依次为春季、秋季和夏季的结论一致,2014 起秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度开始低于春季,可能和大气污染防治行动计划实施后,秋季秸秆禁烧力度增强有关。

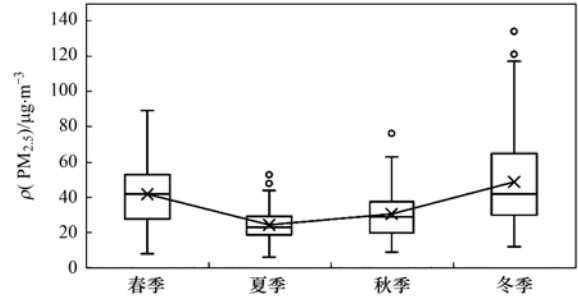


图 2 2019 年四季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 2 Distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in four seasons in 2019

表 1 气象要素和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis between meteorological elements and $\text{PM}_{2.5}$ concentration

	平均气温	相对湿度	降水量	地面气压	风速
全年	-0.447 **	-0.095 **	-0.190 **	0.344 **	-0.267 **
春季	-0.286 **	0.139	-0.216 *	0.112	-0.097
夏季	-0.097	-0.328 **	-0.234 *	0.265 *	-0.303 **
秋季	-0.114	-0.316 *	-0.128	-0.012	-0.308 **
冬季	-0.137	-0.136	-0.272 **	0.010	-0.333 **

1) ** 表示在 0.01 级别显著相关,* 表示在 0.05 级别显著相关

2.2 污染输送路径分析

对获得的 8761 条轨迹中具有相似方向和速率的轨迹进行聚类,每条聚类代表一条气团输送路径.图 3 给出了 4 个季节具体气团输送路径,其中春季 7 条,夏、秋和冬季各 6 条,表 2 给出了路径名称、途经范围、出现比例和输送距离。

春季,西北路(N2,13.5%,占比,下同)和东南偏南路(N4,14.2%)气团对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是主要的污染路径,其共同特点是气团移动速度慢,传输距离短,不利于污染扩散,说明春季污染主要和静稳天气下本地污染累积有关。

夏季,长三角夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体较低,污染输送影响小,东南偏南路(N1,26%)出现概率最大,且对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高,为 $34 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

秋季,东南路(N4,11.5%) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 52

表 1 列出了逐日气象要素(平均气温、相对湿度、降水量、地面气压和风速)和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关关系,可见,全年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和地面气压显著正相关,而跟气温、相对湿度、降水量和风速均为显著负相关关系,各季节相关关系和全年基本保持一致,说明研究期间高温、高湿、大风、有效降水和较低气压时,总体有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 清除.值得注意的是,相对湿度对于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有两面性,一方面,相对湿度较高时一般伴随着降水,本研究期间,共有 58 d 相对湿度超过 90%,其中 41 d 为有效降水日(雨量超过 1.5 mm),有利于污染清除,这和江家坤等^[30]发现云浮市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度显著负相关的结论较为一致;但另一方面,随着湿度增加,有助于硫酸盐和硝酸盐等生成^[31],而硫酸盐和硝酸盐吸湿性较强^[32],进一步促进 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸湿增长^[33].因此, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度的相关性主要跟污染清除和吸湿增长两者的作用强弱有关,如郑州 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度在夏季负相关,而其余季节则为正相关^[17].南京夏季湿度较高,降水多, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度负相关关系最显著,春季呈现正相关,这可能与春季多小雨天气,颗粒物吸湿增长作用较强有关。

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,途经常州和南京东南区域,传输距离短,主要为本地累积性污染;其次东路(N1,23.5%)气团 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,途经南通、常州和镇江等经济发达区域,有一定的输送影响;西北路(N6,3.6%)和北路(N2,25%) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,南京北面城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较高,对南京有一定污染输送影响。

冬季,西南路(N4,28.9%)出现概率最高, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $59 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,轨迹集中在南京西面和安徽交界,输送距离短,说明静稳天气下 $\text{PM}_{2.5}$ 受本地累积影响易出现高值;其次西北路(N1,16.4%) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,途经淮北、宿州、蚌埠和滁州等地,皖北城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,对南京有较大的污染输送影响;东北路(N2,18.1%) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,主要途经连云港、淮安和扬州等地,东南路(N3,13.9%)途经常州,也有一定污染输送影响;而东路

(N6, 11.4%) 和东北偏北路(N5, 11.3%) 出现概率较高, 且均来自海上, 气团较为清洁。

综上, 各季节 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较高的路径, 包括春季的西北路和东南偏南路, 秋季的东南路和冬季的西南路等气团, 其共同特点是移动缓慢, 传输距离短, 说明静稳天气下本地累积是出现 $\text{PM}_{2.5}$ 高值的主要原因之一, 这和 Xing 等^[34] 在京津冀研究发现 $\text{PM}_{2.5}$ 本地化学生成超过区域输送的结论类似。Hu 等^[35] 在美国的研究也发现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受本地影响达 60%,

而区域输送约为 10%, 但 O_3 浓度则受输送的影响更大, 这个可能跟 $\text{PM}_{2.5}$ 来源于一次排放和二次生成, 而 O_3 为纯二次生成有关。南京拥有大型炼油和钢铁企业, 本地污染负荷相对周边较重, 说明进一步强化本地减排并开展接壤城市联防联控对降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度非常关键。另外, 冬季西北路 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $58 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 所有传输路径中仅次于冬季西南路, 传输距离约 300 km, 输送距离较远, 需要强化和安徽东北部城市的联防联控。

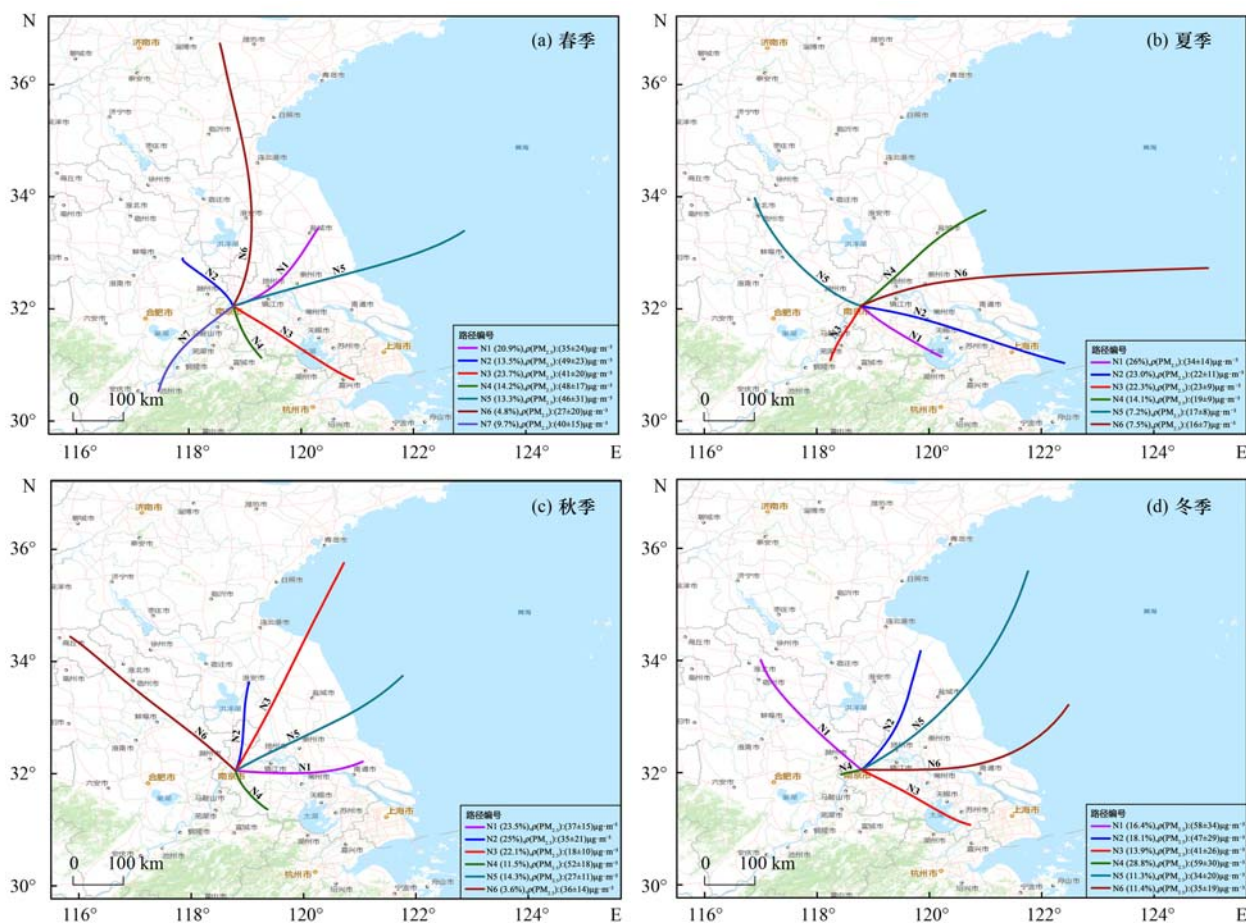


图3 春季、夏季、秋季和冬季气团输送路径

Fig. 3 Air mass transport channels inspring, summer, autumn, and winter

2.3 潜在源区分析

为进一步厘清污染的潜在来源区域, 图4给出了春夏秋冬各季的后向轨迹 WPSCF 结果。总体来看, 潜在源区分布存在较大的季节差异, 但主要潜在源区分布以本地和邻近区域为主。

春季, $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源区高值区 (WPSCF > 0.6) 主要集中在南京城区和东南部的常州西部和镇江西南部, 3个城市交界区域 WPSCF 超过 0.7, 这可能与交界区域环境管理相对较为薄弱有关, 另外马鞍山西北部也有部分高值区分布; 次高值区 (WPSCF > 0.5) 范围扩大到省内镇江和常州大部分地区, 还有浙江省湖州市、安徽省池州、安庆和巢湖等市的部

分区域。潜在源区主要集中在本地和周边区域, 说明 $\text{PM}_{2.5}$ 以本地累积性污染为主, 这和前文分析结论较为一致, 表明春季应重点加强本地防控, 并和接壤城市开展联防联控。

夏季, 没有类似春季的高值区域分布, 颗粒物污染输送影响较小。谢放尖等^[36] 研究表明, 夏季南京 O_3 受苏南城市群输送影响较大, 需强化苏南地区经济发达城市 VOCs 和 NO_x 等前体物的防控工作。

秋季, 高值区域 (WPSCF > 0.6) 主要集中在南京主城区和南部区域, 镇江和常州交界区域, 次高区域 (WPSCF > 0.5) 主要分布在高值区域周边, 范围扩大到镇江东部和常州东部, 少量分布在无锡和宣城。

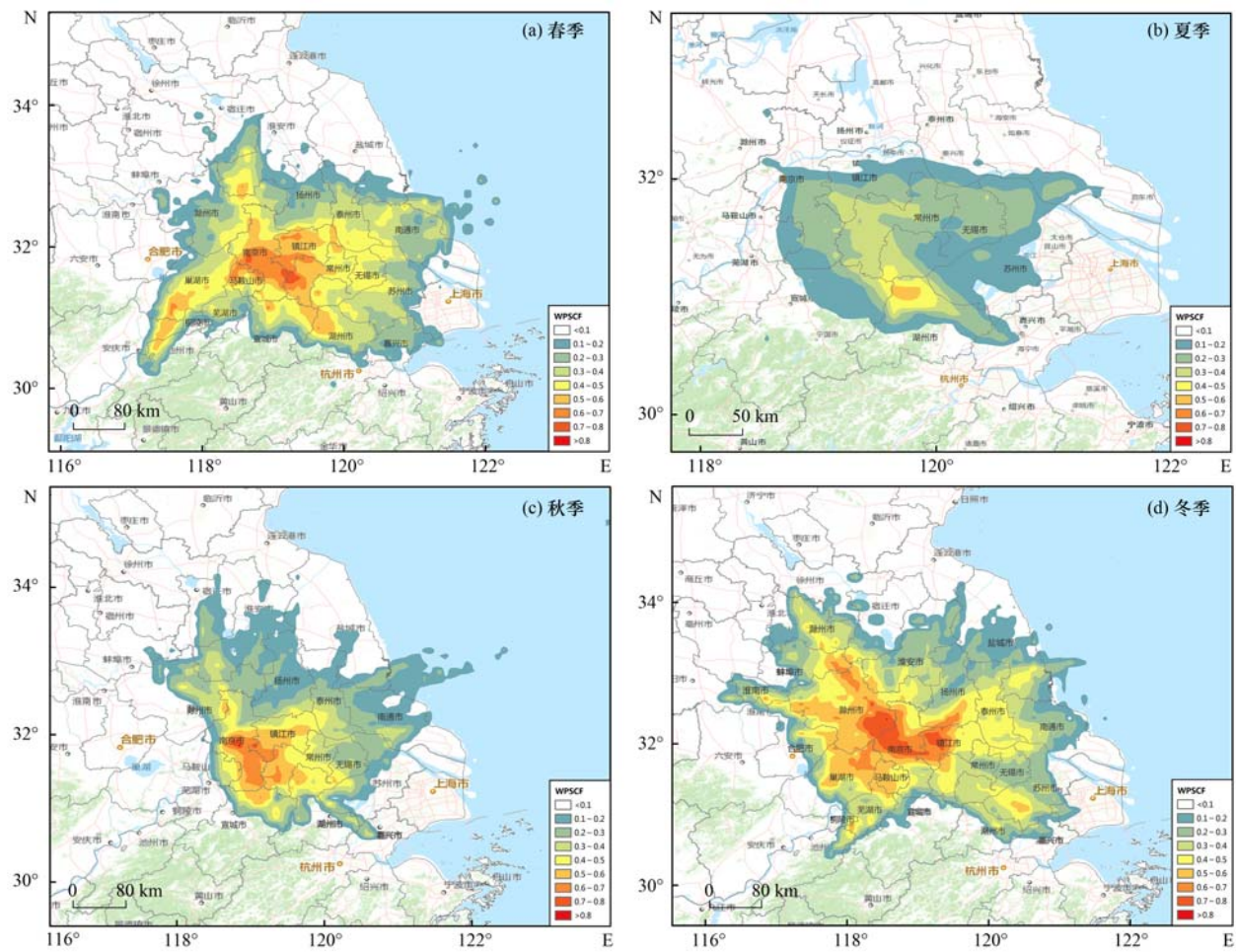


图 4 春季、夏季、秋季和冬季 $PM_{2.5}$ WPSCF 潜在源区分布

Fig. 4 WPSCF distribution of $PM_{2.5}$ in spring, summer, autumn, and winter

表 2 春夏秋冬四季污染气团轨迹

Table 2 Pollution air mass tracks in spring, summer, autumn, and winter

季节	路径编号	路径名称	主要途经区域	占比/%	大致输送范围/km
春季	N1	东北路	盐城、泰州和扬州	20.90	200
	N2	西北路	滁州	13.50	150
	N3	东南路	嘉兴、苏州、无锡和镇江	23.70	300
	N4	东南偏南路	宣城和高淳	14.20	100
	N5	东北偏东路	黄海、南通、泰州、扬州和镇江	13.30	400
	N6	北路	山东潍坊、临沂、连云港和淮安	4.80	600
	N7	西南路	安徽池州、铜陵、芜湖和马鞍山	9.70	200
夏季	N1	东南偏南路	无锡和常州	26	200
	N2	东南路	上海、苏州、无锡、常州和镇江	23	400
	N3	西南路	芜湖和马鞍山	22.30	100
	N4	东北偏北路	盐城、泰州和扬州	14.10	300
	N5	西北路	淮北、亳州、蚌埠和滁州	7.20	300
	N6	东路	东海、南通、泰州和扬州	7.50	600
秋季	N1	东路	南通、常州和镇江	23.50	300
	N2	北路	淮安和滁州	25	200
	N3	东北偏北路	黄海、盐城、淮安和扬州	22.10	400
	N4	东南路	常州	11.50	100
	N5	东北偏东路	黄海、盐城、泰州和扬州	14.30	300
	N6	东北路	商丘、淮北、宿州、蚌埠和滁州	3.60	400
冬季	N1	西北路	淮北、宿州、蚌埠和滁州	16.40	300
	N2	东北偏北路	盐城和扬州	18.10	300
	N3	东南路	苏州、无锡和镇江	13.90	200
	N4	西南路	南京和马鞍山交界	28.80	100
	N5	东路	东海、南通、泰州和镇江	11.40	400
	N6	东北路	黄海、盐城、泰州和扬州	11.30	500

总体来看,秋季的 PSCF 高值分布区域集中在本地和邻近区域,和春季的特征较为类似,同样说明应强化本地防控和接壤城市联防联控。

冬季,冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,受区域输送影响更大. 高值区域($\text{WPSCF} > 0.6$)主要分布在南京本地、滁州大部、镇江东部和巢湖东北部,尤其是南京、滁州和镇江的 WPSCF 高值超过 0.8,滁州和镇江冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $59 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远超南京的 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其输送影响不容忽视;次高区域($\text{WPSCF} > 0.5$)主要分布在高值区域周边,范围扩大到马鞍山和蚌埠等城市. 冬季南京以偏北风为主,皖北城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,对南京输送影响较大,提示南京在强化本土防控的同时,还应加强同安徽东北部城市的联防联控。

为进一步验证 PSCF 分析结果,图 5 给出了后向轨迹的 CWT 结果. 总体来看,WCWT 分布区域和 WPSCF 分布区域具有较好的一致性,均说明潜在源区主要高值分布以南京本地和邻近区域为主,控制

$\text{PM}_{2.5}$ 需要重点强化本地和周边污染减排。

春季高值区($\text{WCWT} > 40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)范围和 WPSCF 高值区接近,同样揭示南京本地、镇江、常州和马鞍山是主要的潜在源区。

夏季的 WCWT 值总体在 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内,整体区域内 $\text{PM}_{2.5}$ 均较低。

秋季 WCWT 高值区($\text{WCWT} > 40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)范围和 WPSCF 高值区范围基本一致,同样揭示南京本地和镇江西南部是主要的潜在源区,而次高值区($\text{WCWT} > 30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要分布在南京本地和苏南区域,包括镇江、常州大部、无锡和泰州局部区域。

冬季 WCWT 分布范围明显大于其余季节,高值区($\text{WCWT} > 60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)范围主要分布在南京西北和滁州交界地带,且主要范围在滁州境内,次高区域($\text{WCWT} > 40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要分布在南京城区、镇江东部、滁州大部、蚌埠和淮北部分区域,表明南京冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 受安徽东北区域城市的输送影响较大。

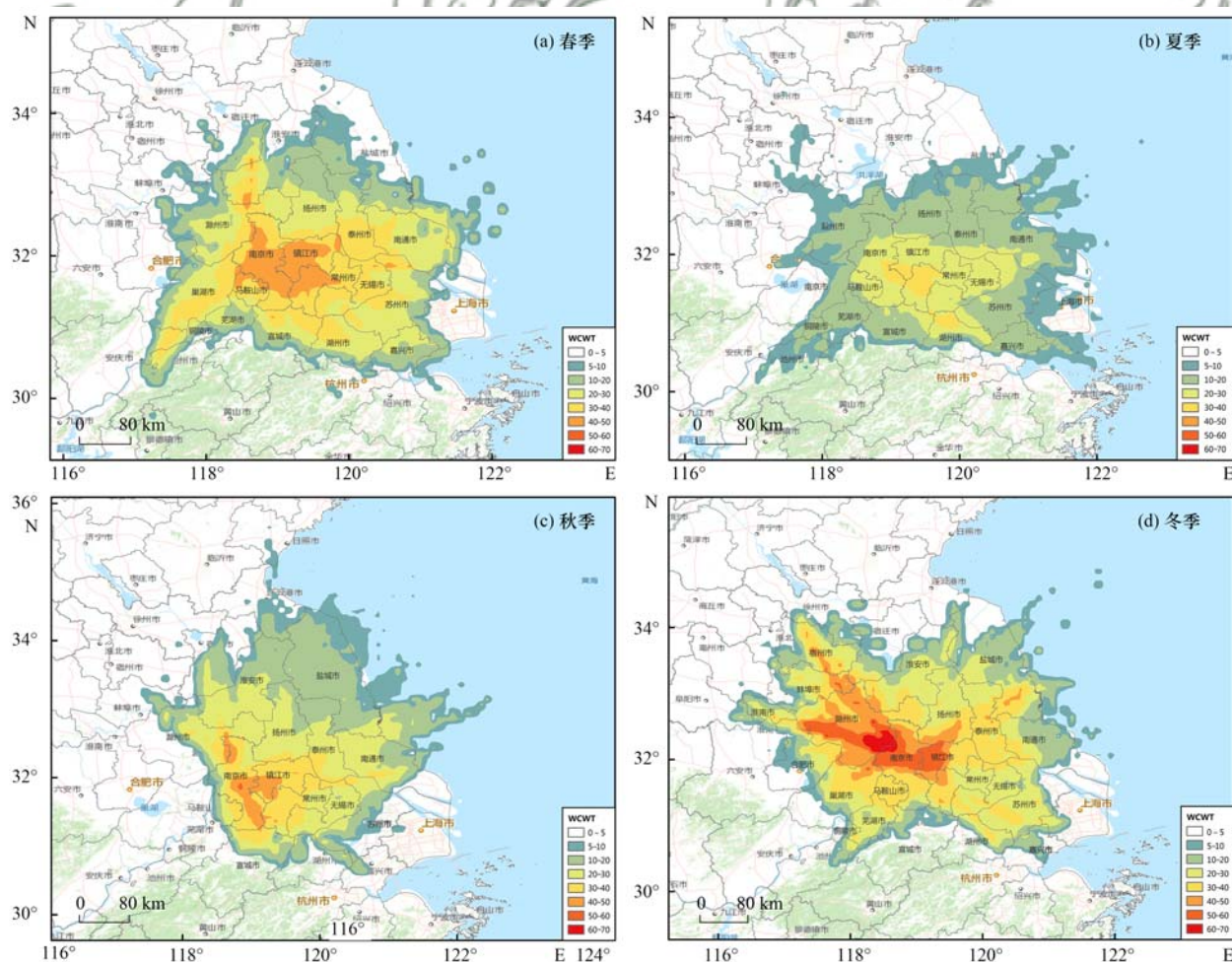


图 5 春季、夏季、秋季和冬季 $\text{PM}_{2.5}$ WCWT 潜在源区分布

Fig. 5 WCWT distribution of $\text{PM}_{2.5}$ in spring, summer, autumn, and winter

3 结论

(1) 2019 年 3 月至 2020 年 2 月,南京市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $(36 \pm 20) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 污染天数为 17 d, 主要分布在冬季和春季; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节变化特征明显: 冬季 $(49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) >$ 春季 $(42 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) >$ 秋季 $(31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) >$ 夏季 $(24 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$; 全年逐日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和地面气压显著正相关, 而跟气温、相对湿度、降水量和风速均为显著负相关关系; 不同季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与相对湿度相关性有所不同, 主要与污染清除与吸湿增长两者作用强弱有关。

(2) 模拟获得了 8 761 条以南京城区为受点的 24 h 后向轨迹, 经聚类分析, 春季气团传输路径为 7 条, 夏、秋和冬季传输路径均为 6 条, 其中春季的西北路和东南偏南路, 秋季东南路和冬季西南路等路径是各季主要的污染输送路径, 均具有传输距离短, 气团移动缓慢的特点, 说明静稳天气下本地累积是 $\text{PM}_{2.5}$ 出现高值的主要原因之一; 冬季西北路输送距离较长, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在所有路径中居第二位, 皖东北部城市对南京污染输送影响较大。

(3) PSCE 和 CWT 潜在源区高值区域分布较为一致, 除夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低, 没有明显的潜在源区外, 春季潜在源区主要分布在南京城区和宁、镇、常交界区域, 秋季潜在源区主要分布在南京城区、南部区域和镇江西南部, 冬季潜在源区主要分布在南京西北区域和安徽滁州市。总体来看, 潜在源区分布以南京本地和接壤城市为主, 说明要进一步降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 需要加强本地内源治理, 并和邻近城市开展联防联控。

参考文献:

- [1] 孙凤霞, 熊丽林, 杨华凤, 等. 2013-2019 年南京市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 短期暴露对人群超额死亡风险评估[J]. 中华疾病控制杂志, 2021, **25**(11): 1257-1263.
Sun F X, Xiong L L, Yang H F, *et al.* Assessing the excess mortality related to short-term exposure to $\text{PM}_{2.5}$ in Nanjing from 2013 to 2019 [J]. Chinese Journal of Disease Control & Prevention, 2021, **25**(11): 1257-1263.
- [2] Liu M M, Bi J, Ma Z W. Visibility-based $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in China: 1957-1964 and 1973-2014 [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(22): 13161-13169.
- [3] 中共南京市委办公厅, 南京市人民政府办公厅. 关于印发《南京市“十四五”生态环境保护规划》的通知[EB/OL]. <http://hbj.nanjing.gov.cn/njshbj/202202/P020220209513816107506.pdf>, 2022-08-20.
- [4] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Contributions of inter-city and regional transport to $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its implications on regional joint air pollution control [J]. Science of the Total Environment, 2019, **660**: 1191-1200.
- [5] 王姣涛, 张强, 温肖宇, 等. 运城市 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布特征和潜在源区季节分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 74-84.
- [6] Wang Y T, Zhang Q, Wen X Y, *et al.* Spatiotemporal distribution and seasonal characteristics of regional transport of $\text{PM}_{2.5}$ in Yuncheng city [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 74-84.
- [7] 张智答, 王晓琦, 张晗宇, 等. 京津冀地区典型城市秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 输送特征研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(3): 993-1004.
- [8] Zhang Z D, Wang X Q, Zhang H Y, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ transport characteristics of typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(3): 993-1004.
- [9] 南京市生态环境局. 关于南京市大气颗粒物来源解析工作进展情况的报告[R]. 2014.
- [10] Stohl A. Trajectory statistics-a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe [J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(4): 579-587.
- [11] Cheng I, Zhang L, Blanchard P, *et al.* Concentration-weighted trajectory approach to identifying potential sources of speciated atmospheric mercury at an urban coastal site in Nova Scotia, Canada [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(12): 6031-6048.
- [12] Brereton C A, Johnson M R. Identifying sources of fugitive emissions in industrial facilities using trajectory statistical methods [J]. Atmospheric Environment, 2012, **51**: 46-55.
- [13] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at XiAn, China during spring [J]. Science of the Total Environment, 2006, **368**(2-3): 875-883.
- [14] 铃伟妙, 张艳品, 陈静, 等. 石家庄大气污染物输送通道及污染源区研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(9): 3438-3448.
- [15] Qian W M, Zhang Y P, Chen J, *et al.* Air pollutant transport channels and its potential sources in Shijiazhuang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(9): 3438-3448.
- [16] 王郭臣, 王东启, 陈振楼. 北京冬季严重污染过程的 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [17] Wang G C, Wang D Q, Chen Z L. Characteristics and transportation pathways and potential sources of a severe $\text{PM}_{2.5}$ episodes during winter in Beijing [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 1931-1937.
- [18] Wang Y Q. The transport pathways and sources of PM_{10} pollution in Beijing during spring 2001, 2002 and 2003 [J]. Geophysical Research Letters, 2004, **31**(14), doi: 10.1029/2004GL019732.
- [19] 王世强, 黎伟标, 邓雪娇, 等. 广州地区大气污染物输送通道的特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(10): 2883-2890.
- [20] Wang S Q, Lee W B, Deng X J, *et al.* Characteristics of air pollutant transport channels in Guangzhou region [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(10): 2883-2890.
- [21] 葛跃, 王明新, 白雪, 等. 苏锡常地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及其潜在源区分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(3): 803-813.
- [22] Ge Y, Wang M X, Bai X, *et al.* Pollution characteristics and potential sources of $\text{PM}_{2.5}$ in Su-Xi-Chang region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(3): 803-813.
- [23] 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 等. 郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 3856-3867.
- [24] Guo M M, Jiang N, Wang S B, *et al.* Analysis of air pollution characteristics and meteorological conditions in Zhengzhou from

- 2014 to 2017[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3856-3867.
- [18] 南京市地方志编纂委员会. 南京年鉴 2020[M]. 南京: 南京年鉴编辑部, 2020.
- [19] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, **47**(4): 295-308.
- [20] 李颜君, 安兴琴, 范广洲. 北京地区大气颗粒物输送路径及潜在源分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(3): 915-927.
- Li Y J, An X Q, Fan G Z. Transport pathway and potential source area of atmospheric particulates in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 915-927.
- [21] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, *et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, **96**(12): 2059-2078.
- [22] Guan Q Y, Yang Y Y, Luo H P, *et al.* Transport pathways of PM₁₀ during the spring in northwest China and its characteristics of potential dust sources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117746.
- [23] Ara Begum B, Kim E, Jeong CH, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3719-3724.
- [24] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(7): 1499-1509.
- [25] Polissar A V, Hopke P K, Harris J M. Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(21): 4214-4226.
- [26] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 545-562.
- [27] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [28] GB3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [29] Gao S L, Yang L, Dong S Z, *et al.* A study on spatial-temporal distribution characteristics of PM_{2.5} concentrations in Nanjing during 2012- 2016 [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, **81**, doi: 10.1088/1755-1315/81/1/012070.
- [30] 江家坤, 马莹, 黄学良, 等. 云浮市 2018-2020 年颗粒物和臭氧污染特征及污染案例研究[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 691-698.
- Jiang J K, Ma Y, Huang X L, *et al.* Pollution characteristics and a pollution case of particulate matter and O₃ in Yunfu city from 2018 to 2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 691-698.
- [31] 苗蕾, 廖晓农, 王迎春. 基于长时间序列的北京 PM_{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2836-2846.
- Miao L, Liao X N, Wang Y C. Diurnal variation of PM_{2.5} mass concentration in Beijing and influence of meteorological factors based on long term date [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2836-2846.
- [32] 钟佳利, 王炜罡, 彭超, 等. 大气气溶胶吸湿性及其对环境的影响[J]. *化学进展*, 2022, **34**(4): 801-814.
- Zhong J L, Wang W G, Peng C, *et al.* Atmospheric aerosol hygroscopicity and their influence on environment [J]. *Progress in Chemistry*, 2022, **34**(4): 801-814.
- [33] 刘兆东, 王宏, 沈新勇, 等. 京津冀及周边地区冬季能见度与 PM_{2.5} 浓度和环境湿度的多元回归分析[J]. *气象学报*, 2020, **78**(4): 679-690.
- Liu Z D, Wang H, Shen X Y, *et al.* Multiple regression analysis of winter visibility, PM_{2.5} concentration and humidity in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, **78**(4): 679-690.
- [34] Xing J, Wang S X, Zhao B, *et al.* Quantifying nonlinear multiregional contributions to ozone and fine particles using an updated response surface modeling technique [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(20): 11788-11798.
- [35] Hu Y T, Odman M T, Russell A G, *et al.* Source apportionment of ozone and fine particulate matter in the United States for 2016 and 2028 [J]. *Atmospheric Environment*, 2022, **285**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119226.
- [36] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017 年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 88-96.
- Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 88-96.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)