

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祺, 胡建林 (635)
2006~2021 年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面 O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季 VOCs 特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气 VOCs 污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)
郑州市 PM _{2.5} 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群 PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于 LEAP 模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市 2015~2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中 Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca 改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炯彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)
基于 Monte-Carlo 模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd 复合污染土壤中 Cd 释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析

秦阳^{1,2,3}, 胡建林^{3*}, 孔海江^{1,2,4*}

(1. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003; 2. 河南省气象台, 郑州 450003; 3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 4. 安阳国家气候观象台, 安阳 455000)

摘要: 基于2015~2019年南京细颗粒物(PM_{2.5})和臭氧(O₃)逐小时浓度数据,通过T-mode主成分分析法对南京发生PM_{2.5}和O₃污染同时高浓度并存(双高污染)时的天气形势进行了分型,利用后向轨迹聚类分析法、潜在来源贡献法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT)研究不同天气形势对南京双高污染的输送路径及潜在源区分布。结果表明,有利于南京地区双高污染的天气形势分别为弱的低压型(Type1)和高压中心型(Type2)。天气形势会对后向轨迹的方位来源产生影响。Type1时,南京地区受到东北和西南两个低气压影响,气团的聚类轨迹主要来自东西两个方位,轨迹中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为83.48 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和106.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。Type2时,南京及其周边在高压中心边缘,气团聚类轨迹主要来自北方和东方,轨迹中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为94.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和92.32 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。同时两种类型后向轨迹绝大部分属于中短距离区域输送,说明周边临近省份的污染是影响南京地区双高污染主要原因之一。PSCF和CWT分析表明,两者高值区域基本保持一致。Type1和Type2两种类型中PM_{2.5}和O₃的最主要潜在源区均出现分布并不完全一致的情况,表明双高污染中的两种污染物并非来自同一地区。

关键词: 双高污染; 天气分型; 污染输送路径; 潜在源区; 南京

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0626-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302177

Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations

QIN Yang^{1,2,3}, HU Jian-lin^{3*}, KONG Hai-jiang^{1,2,4*}

(1. Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China; 2. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of High Technology for Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Anyang National Climate Observatory, Anyang 455000, China)

Abstract: Based on the hourly concentration data of fine particulate matter (PM_{2.5}) and ozone (O₃) in Nanjing from 2015 to 2019, the synoptic situation that occurred in Nanjing, in which high PM_{2.5} and high O₃ coexisted (hereinafter referred to as double high pollution (DHP)), was typed using T-mode principal component analysis. Additionally, the backward trajectory clustering analysis method, potential source contribution method (PSCF), and concentration weight trajectory analysis method (CWT) were used to study the transport paths and potential source region distribution of the DHP of Nanjing by different synoptic situations. The synoptic situations favorable to the DHP in Nanjing were the control of weak low-pressure type (Type1) and high-pressure center (Type2). Synoptic situations could have had an effect on the directional origin of the backward trajectory. In Type1, the Nanjing area was affected by two low pressures in the northeast and southwest, and the clustering trajectories of the Nanjing air mass mainly came from the eastern and western directions. The average concentrations of PM_{2.5} and O₃ in the trajectory were 83.48 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 106.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. In Type 2, Nanjing and its surroundings were at the edge of the high-pressure center, and the air mass cluster trajectories mainly came from the north and east. The average concentrations of PM_{2.5} and O₃ in the trajectory were 94.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 92.32 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. Most of the two types of backward trajectories belonged to short and medium-distance regional transportation, indicating that the pollution of neighboring provinces was one of the main factors affecting the DHP in Nanjing. PSCF and CWT analysis showed that the distribution of the most important potential sources of PM_{2.5} and O₃ in Type1 and Type2 were not completely consistent, which indicates that the two pollutants did not come from the same area in the DHP.

Key words: double high pollution; synoptic situation; pollution transporting pathway; potential pollution source; Nanjing

细颗粒物(PM_{2.5})和近地面臭氧(O₃)是中国东部最主要的两种污染物^[1-3]。二次PM_{2.5}和O₃关系错综复杂,它们有着共同的前体物NO_x和VOC并且能够通过光化学和非均相路径产生非线性响应^[4-7]。近些年,随着我国政府强有力的管控,PM_{2.5}浓度逐年降低^[2,8],但是高浓度的PM_{2.5}污染事件在中国东部仍有发生^[9,10]。与此同时,O₃浓度的升高^[11,12]使得这两种污染物高浓度并存的双高污染现象在中国东部地区时有发生^[13-16],并且这对于健康危害更大^[17,18]。

有研究表明不同区域双高污染主要发生的月份有差异,春秋季节的4月和10月是长三角地区双高污染高发月份^[13,19];广州地区的双高污染主要是以秋季的9~11月为主^[20];京津冀地区双高污染高发月份为

收稿日期: 2023-02-22; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0213802); 安阳国家气候观象台开放研究基金项目(AYNCOF202301); 河南省青年科学基金项目(212300410172)

作者简介: 秦阳(1990~),男,博士,工程师,主要研究方向为环境气象影响, E-mail: njqiny185@163.com

* 通信作者, E-mail: jianlinhu@nuist.edu.cn; hjkong@foxmail.com

5~7月^[15]。强烈的光化学作用和较强的大气氧化性也会促进双高污染的产生。陶丽萍等^[21]通过研究雷达反演的消光系数垂直分布,发现广州双高污染日与非双高日相比,光化辐射更强,使得PM_{2.5}和O₃同时维持高值。Ou等^[22]研究京津冀地区夏季双高污染产生的原因发现,61.9%的双高污染由白天高浓度的O₃引发,并且认为双高污染中化学过程引起的大气氧化比物理过程强。不利的气象条件和大气环流也往往是双高污染发生的重要原因。毛卓成等^[23]统计分析了上海2013~2017年PM_{2.5}和O₃双高污染时气象条件,发现地面天气形势辐合和较低的边界层高度是双高污染的主要气象因素。He等^[24]通过雷达观测发现冷锋过境前,相对弱的风场、低混合高度和高污染的产生共同导致了珠海地区的双高污染。Zong等^[25]研究发现受西太平洋高压影响的天气类型作为中国东部夏季(6~8月)双高污染的驱动因素发挥着重要作用。Luo等^[26]研究发现不利的大气环流类型在春季增多导致了京津冀地区早春双高污染事件增加。

南京是长三角地区重点城市,易受到双高污染的影响^[13]。天气形势与双高污染的形成关系密切,但是目前针对不同天气形势对重点城市双高污染形成的影响还缺乏系统性研究。基于国家环境空气质量标准(NAAQS)(GB 3095-2012)^[27],本研究将1 d中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值大于75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,日最大8h臭氧浓度(MDA8 O₃)大于160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的污染称为双高污染,该污染日定义为双高污染日。使用850 hPa位势高度场和相应风场对2015~2019年期间南京地区的双高污染事件中的天气环流进行客观分型,考察了与双高污染有关的典型气象条件。同时利用后向轨迹模式聚类与潜在源区等分析方法,揭示南京地区双高污染在不同天气形势下PM_{2.5}和O₃输送途径和潜在源区空间分布特征,以期对双高污染防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中2015~2019年南京及其周边城市的PM_{2.5}和O₃小时数据来自中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台(<http://air.cnemc.cn:18007/>)。南京气象数据来自天气网站(<http://q-weather.info/weather/>),包括2 m温度、相对湿度、风速、风向和海平面气压。后向轨迹模式气象资料为美国国家环境预报中心(NCEP)提供的全球资料同化系统(GDAS)数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>),空间水平分辨率0.5°×0.5°,每日4个时次,即00:00、06:00、12:00和18:00。利用分辨率为1°×1°的美国国家环境预报中心和美国国家大气研

究中心(NCEP/NCAR)的FNL资料对850 hPa的位势高度场和风场进行客观天气分型。

1.2 天气分型方法

天气形势分型方法一般分为主观分型和客观分型法。与主观分型相比,客观分型可以消除主观经验判断的影响,具有处理大样本的优势^[28, 29]。Huth等^[30]比较了多种客观天气分型方法,指出T-mode主成分分析法(PCA)能够准确反映原始环流场的特征,不会因分型对象的调整而有太大变化,从而获得稳定的环流时空场。因此本研究采用欧盟cost733项目开发的天气客观分型软件(<http://cost733.met.no>),基于T-mode主成分分析方法对850 hPa位势高度场和水平风(U和V)进行多变量斜交旋转分解,目前该方法已在多项研究中应用于PM_{2.5}和O₃污染的天气分类^[31~33]。考虑到污染事件的演变有形成、维持和消亡过程,因此分型对象选取了1 d中4个时次的平均场,这是为了消除局地小尺度系统的影响扰动,着重分析天气尺度系统的特征。

1.3 HYSPLIT轨迹模型及聚类分析

为了研究气团输送对双高污染的影响,本研究采用美国海洋与大气管理局(NOAA)与澳大利亚气象部门(BOM)联合开发的后向轨迹HYSPLIT模型。该模型使用欧拉和拉格朗日混合型大气扩散模式,通过气象要素和当地污染物浓度,来计算、模拟和分析大气污染物来源、输送、扩散过程,具有模拟精度高、模拟时间连续的特点,广泛应用于各地污染物的来源和传输路径的确定,尤其是火山喷发、沙尘以及森林火灾等的传输过程研究^[34]。使用基于HYSPLIT模型和GIS技术结合的TrajStat软件提供的欧拉距离(Euclidean distance)算法^[35],来确定研究时段内轨迹类型。将南京市(32.04°N, 118.78°E)作为模拟受点,计算2015~2019年间南京双高污染日到达受点的72 h后向轨迹,1 d中每小时模拟一条后向轨迹(时间分辨率为1 h),轨迹计算起始高度设置为100 m,以反映对近地面PM_{2.5}和O₃传输影响^[36]。

1.4 潜在源贡献分析法

本研究采用TrajStat软件中潜在源贡献因子算法(PSCF)对南京地区双高污染潜在源区进行分析。PSCF是计算每个网格的相对污染贡献点比例来识别潜在来源区域的方法,也即通过计算途径或起始于某个区域的气团抵达观测点时,相应的大气污染物浓度值大于提前设定的阈值的条件概率,是一种基于后向轨迹和本地污染物浓度来判断污染源的可能存在方位的方法^[37]。PSCF的计算如公式(1):

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

式中, n_{ij} 表示经过第 (i, j) 网格单元的所有轨迹的总数, m_{ij} 表示经过该网格单元污染轨迹数, 也即超过规定阈值的轨迹总数. $PSCF_{ij}$ 的值越大, 表明该网格对应的区域对目标地区污染物浓度影响也最大. 由于 $PSCF$ 是一种条件概率, 当网格内的气流时间较短时, $PSCF$ 值会出现较大波动. 为了减少不确定性^[38], 当某一网格中的 n_{ij} 小于研究区域每个网格平均轨迹点数 (n_{ave}) 的 3 倍时, 在公式 (1) 中引入任意权重换算函数 W_{ij} , 修正后的潜在源贡献值 $WPSCF_{ij} = PSCF_{ij} \times W_{ij}$, 权重值参数的选取和设定参考以往学者的经验^[39, 40], W_{ij} 函数定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.0, & n_{ij} > 3n_{ave}, \\ 0.7, & 3n_{ave} \geq n_{ij} > 1.5n_{ave}, \\ 0.4, & 1.5n_{ave} \geq n_{ij} > n_{ave}, \\ 0.2, & n_{ave} \geq n_{ij}. \end{cases} \quad (2)$$

1.5 浓度权重轨迹分析法

$PSCF$ 只能体现每个网格中污染轨迹的比例, 不能反映污染轨迹的污染程度, 也不能展现高污染物浓度的源区. 因此需要采用浓度权重轨迹 (CWT) 分析法确定研究区域污染轨迹的相对贡献大小, CWT 法能够通过公式 (3) 计算不同轨迹在网格内的平均权重浓度, 分析不同轨迹和潜在源区的污染程度^[39].

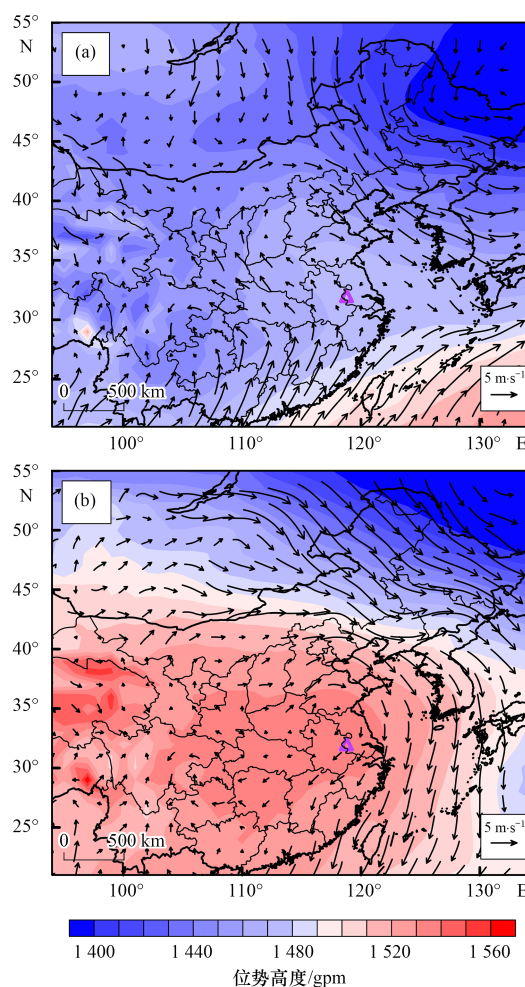
$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \times \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \quad (3)$$

式中, C_{ij} 表示网格 (i, j) 的平均权重浓度; l 表示轨迹; M 表示轨迹个数; C_l 表示轨迹 l 到达网格时对应污染物的质量浓度; τ_{ijl} 表示轨迹 l 在网格 (i, j) 的停留时间. 为减少 C_{ij} 计算过程中可能出现的不确定性, CWT 与 $PSCF$ 使用相同的权重因子, $WCWT_{ij} = C_{ij} \times W_{ij}$. $PSCF$ 和 CWT 模型一直是识别大气污染物潜在来源区域的重要工具.

2 结果与讨论

2.1 南京双高污染天气分型

2015~2019 年南京地区发生 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染共存的双高污染共计 17 d. 通过对南京双高污染发生时的 850 hPa 位势高度场和水平风速场 (U 和 V) 先进行客观分型, 得到两种环流类型: Type1 为低压型, Type2 为高压中心型 (图 1), 累积方差贡献率超过 70%, 同时其分型结果与主观诊断分型一致. Type1 时南京同时受到西南低压和东北低压的影响, Type2 时南京处于高压中心边缘. 根据经验低压型天气一般以多云天气为主. 高压中心天气一般为下沉气流为主, 天气相对晴朗, 污染物不容易扩散, 空气质量差.



(a) Type1: 9 d, (b) Type2: 8 d; 双高污染期间天气类型被分成两类: 弱低压型 (Type1) 和高压中部型 (Type2); 紫色三角表示南京位置

图 1 2015~2019 年南京地区双高污染期间 850 hPa 位势高度场和相应高度水平风场

Fig. 1 The 850 hPa geopotential height field and the corresponding height horizontal wind field during DHP in Nanjing from 2015 to 2019

图 1 显示了这两种类型合成的 850 hPa 位势高度场和相应高度的水平风场, 详细的日期见表 1. 其中 Type1 污染天数为 9 d, $\rho(PM_{2.5})$ 和 $MDA8 O_3$ 平均值分别为 $83.5 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $195.3 \mu g \cdot m^{-3}$, 而 Type2 污染天数为 8 d, $\rho(PM_{2.5})$ 和 $MDA8 O_3$ 平均值分别为 $94.8 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $177.6 \mu g \cdot m^{-3}$. Type1 多集中在春夏季节, 而 Type2 以春秋为主. 从南京地区近地面气象条件上看 (表 2), Type1 风向 (WD) 以偏东风为主, Type2 以偏南风为主, Type2 的温度 (T_2)、相对湿度 (RH) 和风速 (WS) 要低于 Type1, 海平面气压 (SLP) 要大于 Type1. 气象因素比较符合这两种的天气类型的特点. 对于 Type2, 在高压中心控制下气流下沉, 风速一般不高, 同时会有逆温出现, 容易出现污染物的堆积, 因此 $PM_{2.5}$ 的浓度一般要稍大于 Type1. 而 Type1 主要发生在春夏季节, 温度相比以春秋为主的 Type2 高, 因此 Type1 的 O_3 浓度要大于 Type2.

表 1 2015~2019 年南京地区双高污染时天气环流类型

Table 1 Weather circulation types during DHP in Nanjing from 2015 to 2019

类型	日期(年-月-日)	数量/d	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MDA8 O_3 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Type1	春季:2015-03-29、2015-05-19、2015-05-24、2016-04-14 和 2019-04-08	9	83.5	195.2
	夏季:2015-06-01、2016-06-08、2016-06-11 和 2015-07-03			
Type2	冬季:2019-02-25	8	94.8	177.6
	春季:2015-04-25、2017-05-07 和 2018-04-01			
	秋季:2015-10-14、2015-10-16、2015-10-17 和 2017-10-22			

表 2 2015~2019 年南京两种类型天气形势的气象因素

Table 2 Meteorological factors of two types of synoptic situations in Nanjing from 2015 to 2019

项目	Type1	Type2
$T_2/^{\circ}\text{C}$	23.4 $\pm$ 2.8	18.7 $\pm$ 4.5
RH/%	72.0 $\pm$ 7.6	65.6 $\pm$ 8.0
WS/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.4 $\pm$ 0.8	2.0 $\pm$ 0.5
WD/ $^{\circ}$	115.5 $\pm$ 48.2	166.5 $\pm$ 98.6
SLP/hPa	1 007.2 $\pm$ 3.9	1 016.4 $\pm$ 4.0

图 2 给出了南京地区发生两种类型双高污染时, 南京及其周边城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 空间分布. 由于 Type2 时南京及长三角地区大部分处于高压中心, 长三角区域整体风速明显小于 Type1 时的风速, 水平近乎处于停滞状态, 大气稳定性较强, 此时长三角区域大部分城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 超标(大于 $75\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 同时也大于 Type1 时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 尤其是在长三角西北地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度严重超标. 而在 Type1 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标区域范围较 Type2 时小, 主要集中在以南京为中心的长三角中部地区. 对于 O_3 , 本研究发现长三角中东部沿江地区(南京、镇江、扬州、无锡、常州)的 MDA8 O_3 在 Type1 和 Type2 两种环流情况下均超标(大于 $160\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 是这两种天气形势下 O_3 超标较为一致的区域, 并且由于 Type1 类型主要发生在温度较高的春夏季节, 因此该区域 O_3 污染程度要比 Type2 严重. 同时也发现, 南京在这两种天气形势下发生双高污染时, 南京附近的长三角中东部沿江地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 也极易出现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 超标的污染事件(图 2). 这说明南京单个城市的双高污染很可能受到附近周围区域的污染影响.

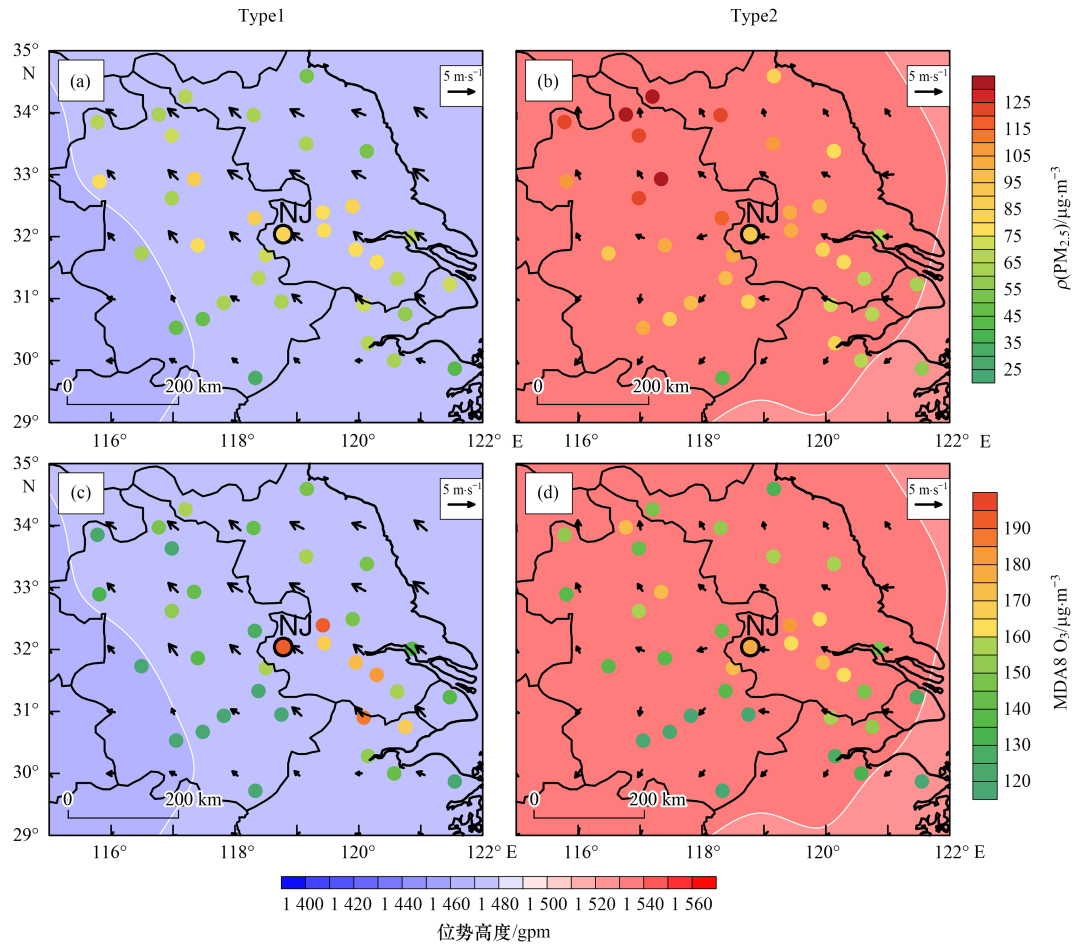
2.2 轨迹聚类分析

本研究采用 TraiStat 软件中总空间方差(TSV)来确定轨迹聚类数目^[41]. 基于此, 将南京 2015~2019 年两种天气环流下的双高污染日的后向轨迹就分别聚类为 3 类(Type1)和 4 类(Type2)(图 3). 同时, 将研究期间两种类型双高污染日 72 h 后向轨迹的 $\text{PM}_{2.5}$ 及 O_3 浓度平均值、主要途经区域和出现概率列表分析, 如表 3 所示. 由图 3 和表 3 可知, 双高污染日各类气流轨迹所对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 及 O_3 浓度、主要途经区域和分布范围差异显著. 轨迹越长表明气团移动速度越快, 轨

迹越短表明气团移动速度越慢.

Type1 中所有轨迹的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为 $83.48\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $106.85\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 气团的聚类轨迹主要来自东西两个方位, 这与图 1(a)中南京地区在 850 hPa 上受来自东北和西南两个低气压影响相符. 其中轨迹 3 的气流轨迹占比最高, 占比为 49.07%, 并且轨迹 3 中的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为 $86.70\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $111.55\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 也是 Type1 类型中浓度最高的, 这表明轨迹 3 是双高污染日中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的主要传输方向. 轨迹 1 和轨迹 2 的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度较为接近, 轨迹占比分别为 30.09% 和 20.83%, 轨迹 1 来自湖北中部, 经安徽中部到达南京, 轨迹 2 来自东海, 经过舟山群岛、上海和苏南到达南京, 两者路径长度相比较为一致, 属于中等距离传输. 轨迹 3 源自南京附近的安徽中东部, 经过南京, 并在到达苏南地区后再次折返输送回南京, 其轨迹较短移动速度较慢, 表明该区域大气环境较为稳定而导致沿途污染物难以扩散, 有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的积累, 属于短距离输送的局地污染, 因此轨迹 3 中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度最高.

Type2 中所有轨迹的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为 $94.47\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $92.32\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 与 Type1 不同, Type2 气团聚类轨迹主要来自长三角的北部和东部, 这与图 1(b)中南京及其周边处于高压中心下 850 hPa 气流为偏东北走向相符. 来自东部的轨迹 1 和来自北部的轨迹 4、轨迹 2 是 Type2 中主要的气团轨迹, 分别占总气流轨迹的 42.19%、30.21% 和 20.31%. 来自北方的轨迹 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均大于来自东方的轨迹 1, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高的是轨迹 4, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 达到了 $101.47\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与轨迹 4 中高 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相反, 轨迹 4 中的 $\rho(\text{O}_3)$ 只有 $79.38\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是所有轨迹中最低的. 轨迹 1 源自东海, 经过上海、苏南到达南京, 可能是源自东海, 空气质量相比大陆清洁, 因此轨迹 1 中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $90.15\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是所有聚类轨迹中最低的, 同时 O_3 浓度也不高. 轨迹 2 来自河南北部经过安徽到达南京, 轨迹 2 经过的地区均为北方人口稠密, 属于人为污染较多的地区, 因此轨迹 2 中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较高. 轨迹 4 源自山东半岛南部, 经过黄海、苏北到达南京, 轨迹



(a)和(c)Type1, (b)和(d)Type2;散点表示南京及其周围城市PM_{2.5}和O₃污染情况
图2 2015~2019年南京地区双高污染时两种天气形势在850 hPa位势高度场和近地面风场叠加图

Fig. 2 Superimposed maps of the two type-synoptic situations at 850 hPa geopotential height field and near-surface wind field during DHP in Nanjing from 2015 to 2019

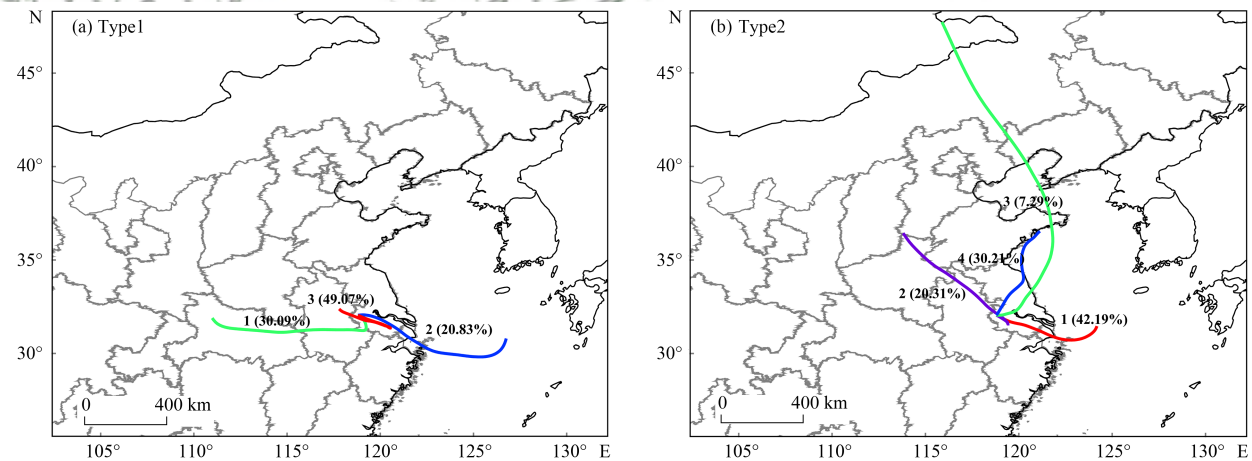


图3 2015~2019年南京地区两种双高污染日72 h后向轨迹聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of 72 h backward trajectories of two types of DHP days in Nanjing from 2015 to 2019

4中PM_{2.5}浓度最高,这一方面可能是由于其源自山东半岛,途经苏北,人为污染较多,另一方面,由于途经黄海,污染物吸湿增长,导致PM_{2.5}增加^[42],同时高PM_{2.5}也抑制了气团轨迹O₃的生成^[43],因此轨迹4中O₃浓度最低。

综上,本研究发现两类后向轨迹气团均受各自

天气形势的影响。Type2类型中所有轨迹的PM_{2.5}浓度均大于Type1中轨迹浓度,而Type1轨迹中的O₃浓度平均要大于Type2。这表明受高压控制的南京双高污染气团轨迹中的PM_{2.5}浓度比低压控制时的高,O₃浓度比处于低压控制时的低。当处于低压控制时南京双高污染气团轨迹浓度则相反。这也从气团输送方

面解释了南京地区在 Type1 类型中 O_3 浓度较高,而 Type2 类型中 $PM_{2.5}$ 浓度较高的原因. Type1 和 Type2 天气形势下的 72 h 后向轨迹大部分是在以南京为原点,半径 500 km 的范围内,属于的中短距离区域输送,说明周边临近省份的污染是影响南京地区双高污染主要原因之一.

表 3 2015~2019 年南京两种双高污染日轨迹 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度统计结果
Table 3 Statistical results of $PM_{2.5}$ and O_3 mass concentrations for two types of DHP day trajectories in Nanjing from 2015 to 2019

轨迹	编号	途经区域	所有轨迹		
			出现概率/%	$\rho(PM_{2.5})/\mu g \cdot m^{-3}$	$\rho(O_3)/\mu g \cdot m^{-3}$
Type1	1	湖北西部和安徽中部	30.09	80.56	101.53
	2	东海、舟山群岛、上海和苏南	20.83	80.10	103.47
	3	皖中东和苏南	49.07	86.70	111.55
	总和			83.48	106.85
Type2	1	东海、上海和苏南	42.19	90.15	92.78
	2	豫北、豫东、皖北和皖东	20.31	95.64	93.56
	3	外蒙、内蒙、辽西、山东半岛、黄海和苏中	7.29	91.64	139.78
	4	山东半岛南部、黄海和苏北	30.21	101.4	79.38
	总和			94.47	92.32

2.3 潜在源区分析

2.3.1 PSCF 分析

为了进一步厘清 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的潜在来源,采用 PSCF 进行计算分析. $PM_{2.5}$ 的阈值采用《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中的二级日均标准限值 $75 \mu g \cdot m^{-3}$, O_3 采用两种类型双高污染日各自 O_3 日均值为阈值,WPSCF 计算结果如图 4 所示.

图 4 中,WPSCF 值越大对应的颜色越深,表明网格对研究地区的影响概率越大. WPSCF 高值所在的网格区域就是影响南京地区双高污染日 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的主要潜在源区. 本研究将 WPSCF 值大于 0.7 的区域定义为最主要的潜在源区. Type1 中 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的潜在源区分布广泛. 对于 $PM_{2.5}$,高值区呈点状分布,安徽中部、苏南、浙北和杭州湾附近是最主要的潜在源区,安徽中南部的合肥甚至达到了 0.9. 对于 O_3 ,大于 0.6 以上的区域主要集中在苏南、皖东南、浙北和上海,其中最主要的潜在源区分布在浙北和上海. Type2 中的 $PM_{2.5}$ 潜在源区最为集中,最主要潜在源区在安徽中北部,苏北和山东半岛南部,这片区域 WPSCF 值高达 0.9 以上,是南京地区在 Type2 类型的天气形势下,双高污染日 $PM_{2.5}$ 主要的来源地区. 但是对于 O_3 ,最主要潜在源区较为分散,主要集中在山东半岛南部,宿迁、苏州和南通等地.

本研究发现 Type1 和 Type2 两种类型中 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的最主要潜在源区均出现分布不一致的情况,这说明两种污染物在双高污染的输送中并非来自同一地区. 需要指出的是 O_3 并不是直接排放到大气中, O_3 与其前体物 VOCs 和 NO_x 有着复杂的化学联系,包含 O_3 的气团在输送过程也夹带着大量的前

体物,这些前体物可能在传输路径上或到达南京后通过光化学反应产生大量 O_3 . 同时,两种双高污染在海上也有相当高的潜在源,这些来自海上的污染很可能源自海上船舶排放^[42,44]、日本及韩国的长距离传输^[46]和长三角及杭州湾地区周围海风和陆风环流对来自内陆污染物再循环的输送^[36]的影响.

2.3.2 CWT 分析

PSCF 方法可以反映网格中污染轨迹发生的概率,但是无法定量反映出该网格对受点贡献的污染的程度. CWT 分析法可以通过确定每个网格的平均权重浓度,定量地反映不同轨迹的污染程度,能够弥补 PSCF 方法的不足^[34]. 南京地区 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的 WCWT 分析结果见图 5.

图 5 中南京双高污染日 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度权重轨迹,与 WPSCF 分布相似. 对于 Type1 类型中的 $PM_{2.5}$,较高 WCWT 值主要集中在苏南、浙北、上海和杭州湾,苏南和浙北的 WCWT 值超过 $80 \mu g \cdot m^{-3}$,而上海和杭州湾地区则超过 $90 \mu g \cdot m^{-3}$. O_3 较高的 WCWT 值呈区域分布,大于 $100 \mu g \cdot m^{-3}$ 的地方主要集中在苏南、皖西、浙北和上海. 对于 Type2, $PM_{2.5}$ 的 WCWT 值超过 $90 \mu g \cdot m^{-3}$ 的地方范围广泛,主要集中在安徽中北部、苏南、苏北和山东半岛南部一带. Type2 中 O_3 的 WCWT 值分布相对分散,其中超过 $100 \mu g \cdot m^{-3}$ 的区域主要集中在浙北、苏南、江苏沿海和山东半岛南部一块. 虽然 CWT 和 PSCF 分析可能会存在一定的不确定性,但是两者的高值区域基本保持一致,表明模拟的结果不确定较小,因此结果可信.

$PM_{2.5}$ [图 5(b)] 和 O_3 [图 5(c)] 高浓度贡献区域分

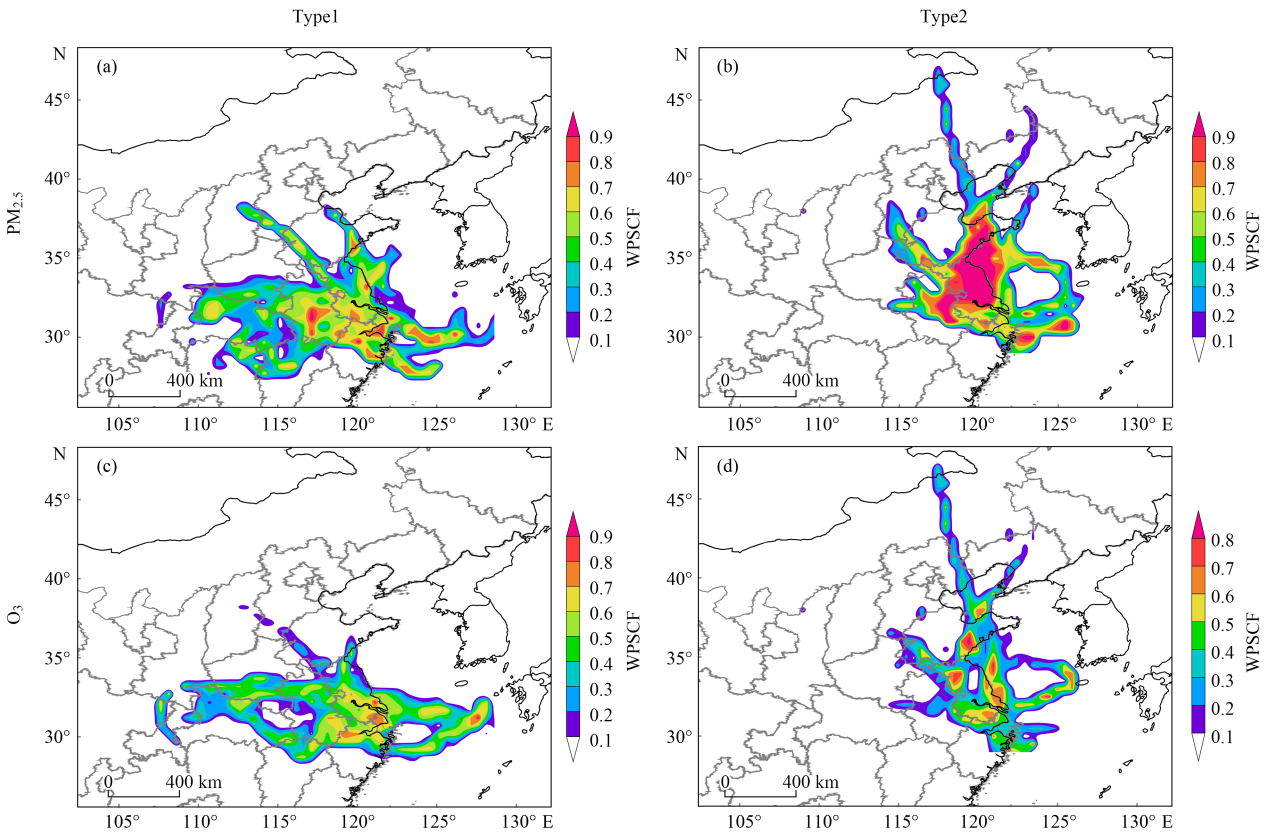


图 4 南京地区两种天气形势下双高污染日 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的 WPSCF 分布
Fig. 4 Distribution of WPSCF of $PM_{2.5}$ and O_3 on DHP days under two synoptic situations in Nanjing

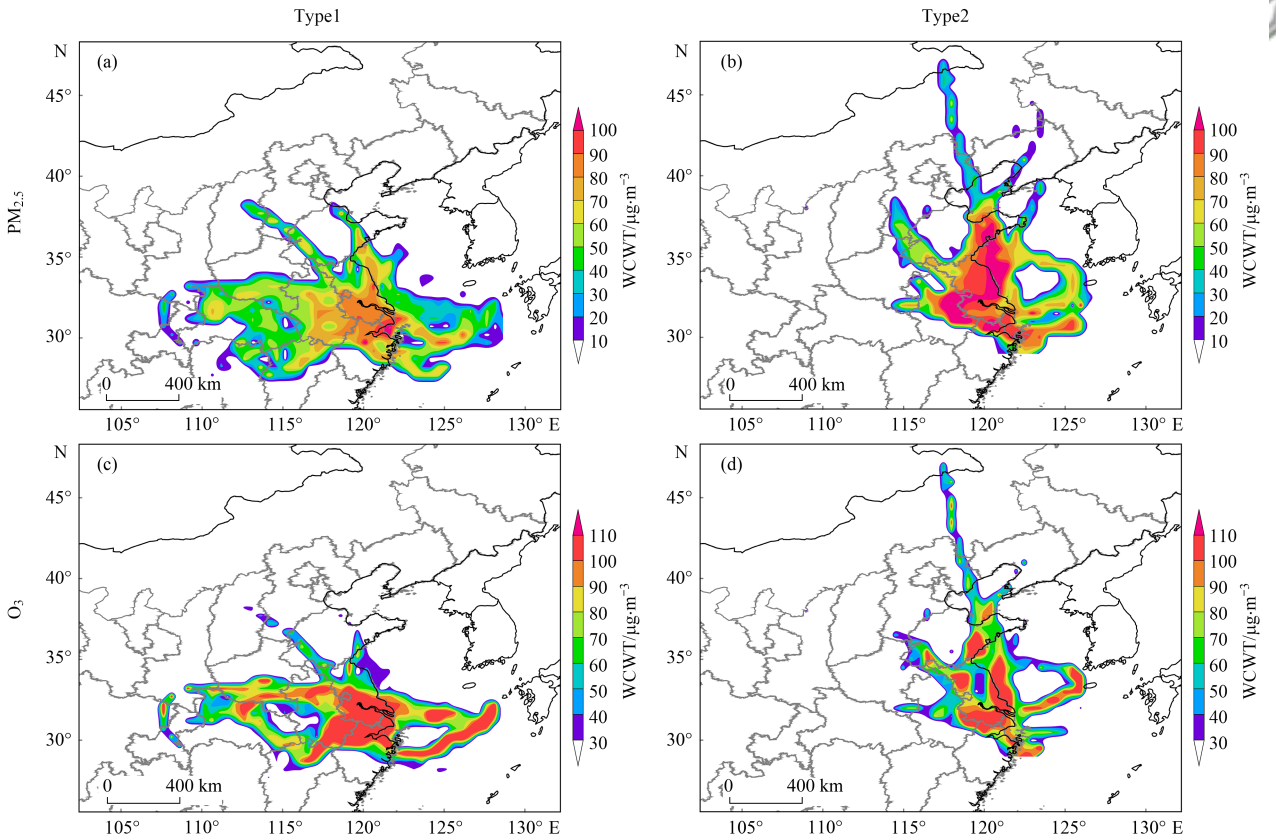


图 5 南京地区两种天气形势下双高污染日 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的 WCWT 分布
Fig. 5 Distribution of WCWT of $PM_{2.5}$ and O_3 on DHP days under two synoptic situations in Nanjing

别与观测得到的图 2 中 $PM_{2.5}$ [图 2(b)] 和 O_3 [图 2(c)] 高浓度区域范围相近, 这进一步表明南京双高

污染时周围高浓度的 $PM_{2.5}$ 和 O_3 地区会向南京地区传输, 对于南京 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度有很重要的贡献。

3 结论

(1)有利于南京地区双高污染的天气形势分别为弱的低压型(Type1)和高压中心型(Type2). Type1时南京地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和MDA8 O_3 平均值分别为 $83.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $195.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,而Type2时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和MDA8 O_3 分别为 $94.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $177.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

(2)天气形势会对后向轨迹的方位来源产生影响. Type1时,南京地区受到东北和西南两个低气压影响,气团的聚类轨迹主要来自东西两个方位,轨迹中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为 $83.48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $106.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Type2时,南京及其周边在高压中心边缘,气团聚类轨迹主要来自北方和东方,轨迹中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值分别为 $94.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $92.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 同时两种类型后向轨迹绝大部分属于中短距离区域输送,说明周边临近省份的污染是影响南京地区双高污染主要原因之一.

(3)PSCF和CWT分析表明,两者高值区域基本保持一致. Type1中 $\text{PM}_{2.5}$ 主要潜在源区为安徽中部、苏南、浙北和杭州湾, O_3 的则为浙北和上海. Type2中 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源区最为集中,最主要潜在源区在安徽中北部,苏北和山东半岛南部,而 O_3 在山东半岛南部,宿迁、苏州、南通等地. Type1和Type2两种类型中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的最主要潜在源均出现分布并不完全一致的情况,表明两种污染物在双高污染中并非来自同一地区.

参考文献:

- [1] Fan H, Zhao C F, Yang Y K. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014 - 2018[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117066.
- [2] Wang Y H, Gao W K, Wang S, *et al.* Contrasting trends of $\text{PM}_{2.5}$ and surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017[J]. *National Science Review*, 2020, **7**(8): 1331-1339.
- [3] 孙金金, 谢晓栋, 秦墨梅, 等. 不同时间尺度上 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧协同关系及其影响因素分析[J]. *科学通报*, 2022, **67**(18): 2018-2028.
- [4] Sun J J, Xie X D, Qin M M, *et al.* Analysis of coordinated relationship between $\text{PM}_{2.5}$ and ozone and its affecting factors on different timescales[J]. *China Science Bulletin*, 2022, **67**(18): 2018-2028.
- [5] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenchikov G, *et al.* The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog[J]. *Science*, 1997, **278**(5339): 827-830.
- [6] Xing J, Wang J D, Mathur R, *et al.* Impacts of aerosol direct effects on tropospheric ozone through changes in atmospheric dynamics and photolysis rates[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9869-9883.
- [7] Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter[J]. *Science*, 1997, **277**(5322): 116-119.
- [8] 胡建林, 张远航. 加强 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 协同控制, 持续改善我国环境空气质量[J]. *科学通报*, 2022, **67**(18): 1975-1977.
- [9] Hu J L, Zhang Y H. Reinforce the coordinated control of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ to continuously improve China's ambient air quality[J]. *China Science Bulletin*, 2022, **67**(18): 1975-1977.
- [10] Zhai S X, Jacob D J, Wang X, *et al.* Fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) trends in China, 2013 - 2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(16): 11031-11041.
- [11] Wang X Y, Li L, Gong K J, *et al.* Modelling air quality during the EXPLORE-YRD campaign - Part I. Model performance evaluation and impacts of meteorological inputs and grid resolutions[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118131.
- [12] Du H Y, Li J, Wang Z F, *et al.* Assessment of the effect of meteorological and emission variations on winter $\text{PM}_{2.5}$ over the North China Plain in the three-year action plan against air pollution in 2018 - 2020[J]. *Atmospheric Research*, 2022, **280**, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106395.
- [13] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [14] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [15] Qin Y, Li J Y, Gong K J, *et al.* Double high pollution events in the Yangtze River Delta from 2015 to 2019: characteristics, trends, and meteorological situations[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148349.
- [16] Yang K J, Kong L D, Tong S Y, *et al.* Double-high-level ozone and $\text{PM}_{2.5}$ Co-pollution episodes in Shanghai, China: pollution characteristics and significant role of daytime HONO [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(5), doi: 10.3390/atmos12050557.
- [17] Dai H B, Liao H, Li K, *et al.* Composited analyses of the chemical and physical characteristics of co-polluted days by ozone and $\text{PM}_{2.5}$ over 2013 - 2020 in the Beijing - Tianjin - Hebei region[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023, **23**(1): 23-39.
- [18] 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 等. 2015-2021年京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧复合污染时空特征分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1841-1851.
- [19] Song X H, Li Y, Wei L, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics of co-pollution of $\text{PM}_{2.5}$ and ozone over BTH with surrounding area from 2015 to 2021[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1841-1851.
- [20] Siddika N, Rantala A K, Antikainen H, *et al.* Synergistic effects of prenatal exposure to fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and ozone (O_3) on the risk of preterm birth: a population-based cohort study[J]. *Environmental Research*, 2019, **176**, doi: 10.1016/j.envres.2019.108549.
- [21] Kalashnikov D A, Schnell J L, Abatzoglou J T, *et al.* Increasing co-occurrence of fine particulate matter and ground-level ozone extremes in the western United States[J]. *Science advances*, 2022, **8**(1), doi: 10.1126/sciadv.abi9386.
- [22] Dai H B, Zhu J, Liao H, *et al.* Co-occurrence of ozone and $\text{PM}_{2.5}$ pollution in the Yangtze River Delta over 2013 - 2019: spatiotemporal distribution and meteorological conditions[J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105363.
- [23] 刘南希, 何成, 刘晨曦, 等. 2015—2021年广州市臭氧和 $\text{PM}_{2.5}$ 复合污染特征及天气分型研究[J]. *环境科学学报*, 2023, **43**(1): 42-53.

- Liu N X, He C, Liu C X, *et al.* Study on characteristics and weather classification of ozone and PM_{2.5} complex pollution in Guangzhou from 2015 to 2021[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, **43**(1): 42-53.
- [21] 陶丽萍, 邓涛, 吴兑, 等. 广州旱季双高污染及消光系数垂直分布特征[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(2): 497-508.
- Tao L P, Deng T, Wu D, *et al.* High aerosol and high ozone pollution and vertical distribution of extinction coefficients in Guangzhou during the dry season [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(2): 497-508.
- [22] Ou S J, Wei W, Cai B, *et al.* Exploring the causes for co-pollution of O₃ and PM_{2.5} in summer over North China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, **194**, doi: 10.1007/s10661-022-09951-4.
- [23] 毛卓成, 许建明, 杨丹丹, 等. 上海地区 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象成因分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2730-2738.
- Mao Z C, Xu J M, Yang D D, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological causes of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2730-2738.
- [24] He Y P, Li L, Wang H L, *et al.* A cold front induced co-occurrence of O₃ and PM_{2.5} pollution in a Pearl River Delta city: temporal variation, vertical structure, and mechanism [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **306**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119464.
- [25] Zong L, Yang Y J, Gao M, *et al.* Large-scale synoptic drivers of co-occurring summertime ozone and PM_{2.5} pollution in eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(11): 9105-9124.
- [26] Luo Y H, Zhao T L, Yang Y J, *et al.* Seasonal changes in the recent decline of combined high PM_{2.5} and O₃ pollution and associated chemical and meteorological drivers in the Beijing - Tianjin - Hebei region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **838**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156312.
- [27] GB 3095-2012. 环境空气质量标准[S].
- [28] 蔡旭璋, 王成刚, 王华卿, 等. 双层 PCT 天气分型法的建立及其应用[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(1): 1-10.
- Cai X Z, Wang C G, Wang H Q, *et al.* The establishment of double-layer PCT classification method and its application [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(1): 1-10.
- [29] 严晓瑜, 缙晓辉, 杨苑媛, 等. 银川市臭氧污染天气形势客观分型研究[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(8): 13-25.
- Yan X Y, Gou X H, Yang Y Y, *et al.* Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Yinchuan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(8): 13-25.
- [30] Huth R, Beck C, Philipp A, *et al.* Classifications of atmospheric circulation patterns [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, **1146**(1): 105-152.
- [31] Liao Z H, Gao M, Sun J R, *et al.* The impact of synoptic circulation on air quality and pollution-related human health in the Yangtze River Delta region [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.031.
- [32] Miao Y C, Che H Z, Zhang X Y, *et al.* Integrated impacts of synoptic forcing and aerosol radiative effect on boundary layer and pollution in the Beijing - Tianjin - Hebei region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(10): 5899-5909.
- [33] 王莹, 智协飞, 白永清, 等. 长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 3913-3922.
- Wang Y, Zhi X F, Bai Y Q, *et al.* Analysis of typical weather circulation patterns of heavy PM_{2.5} pollution and the transport pattern in the Yangtze River Middle Basin [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 3913-3922.
- [34] 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): 2059-2077.
- [35] 雷雨, 张小玲, 康平, 等. 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3021-3030.
- Lei Y, Zhang X L, Kang P, *et al.* Analysis of transport pathways and potential sources of atmospheric particulate matter in Zigong, in south of Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3021-3030.
- [36] Zhang G, Xu H H, Qi B, *et al.* Characterization of atmospheric trace gases and particulate matter in Hangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(3): 1705-1728.
- [37] Nicolás J, Chiari M, Crespo J, *et al.* Assessment of potential source regions of PM_{2.5} components at a southwestern Mediterranean site [J]. *Tellus B*, 2011, **63**(1): 96-106.
- [38] 符传博, 陈红, 丹利, 等. 2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5000-5008.
- Fu C B, Chen H, Dan L, *et al.* Characteristics and potential sources of four ozone pollution processes in Hainan Province in Autumn of 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5000-5008.
- [39] Liu B S, Wu J H, Zhang J Y, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on error estimation from EPA PMF 5.0 model at a medium city in China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 10-22.
- [40] Dimitriou K, Kassomenos P. Combining AOT, Angstrom Exponent and PM concentration data, with PSCF model, to distinguish fine and coarse aerosol intrusions in Southern France [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **172-173**: 74-82.
- [41] 王姣涛, 张强, 温肖宇, 等. 运城市 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.
- Wang Y T, Zhang Q, Wen X Y, *et al.* Spatiotemporal distribution and seasonal characteristics of regional transport of PM_{2.5} in Yuncheng City [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 74-84.
- [42] 曾鹏, 辛存林, 于爽, 等. 典型西南工业城市春冬季 PM_{2.5} 来源与潜在源区分析—以柳州市为例[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3781-3790.
- Zeng P, Xin C L, Yu S, *et al.* Analysis of PM_{2.5} sources and potential source areas of typical industrial city in spring and winter: a case study in Liuzhou [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3781-3790.
- [43] 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 等. 2015~2020 年中国城市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染时空演变特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1830-1840.
- Niu X X, Zhong Y M, Yang L, *et al.* Spatiotemporal evolution characteristics of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Chinese cities from 2015 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1830-1840.
- [44] Bie S J, Yang L X, Zhang Y, *et al.* Source appointment of PM_{2.5} in Qingdao Port, East of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **755**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142456.
- [45] Shen L J, Wang H L, Kong X C, *et al.* Characterization of black carbon aerosol in the Yangtze River Delta, China: seasonal variation and source apportionment [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(1): 195-209.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)