

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用 .....刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析 .....任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式 .....田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO<sub>2</sub>协同效益评估 .....肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同 .....李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径 .....张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益 .....邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM<sub>2.5</sub>浓度的多尺度驱动机制 .....张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM<sub>2.5</sub>浓度时空分布特征及影响因素分析 .....王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM<sub>2.5</sub>碳组分空间差异性来源解析 .....武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM<sub>2.5</sub>中碳质气溶胶的变化特征及来源解析 .....桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析 .....刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素特征及健康风险评估 .....杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析 .....潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析 .....罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化 .....吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源 .....卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析 .....崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价 .....张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估 .....李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算 .....丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估 .....赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估 .....高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估 .....钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析 .....马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测 .....王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例 .....代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素 .....刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应 .....张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平 .....林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制 .....廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性 .....何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析 .....傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析 .....赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP<sub>GS</sub>变化的影响 .....徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响 .....李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响 .....鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响 .....丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系 .....邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征 .....王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响 .....宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响 .....胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响 .....陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测 .....王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析 .....李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征 .....杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估 .....杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价 .....肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估 .....沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例 .....董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应 .....易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响 .....刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应 .....肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征 .....李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制 .....李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险 .....白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征 .....高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应 .....闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

# 苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化

吴也正<sup>1,2</sup>, 张鑫<sup>3,4\*</sup>, 顾钧<sup>2,5</sup>, 缪青<sup>2,5</sup>, 魏恒<sup>2,5</sup>, 熊宇<sup>2,5</sup>, 杨倩<sup>2,5</sup>, 吴斌<sup>1</sup>, 沈文渊<sup>1</sup>, 马强<sup>3\*</sup>

(1. 苏州市环境监测站, 苏州 215000; 2. 江苏省环境保护空气复合污染物监测重点实验室, 苏州 215000; 3. 生态环境部环境规划院大气环境规划研究所, 北京 100041; 4. 北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100871; 5. 江苏省苏州环境监测中心, 苏州 215000)

**摘要:** 以 2017~2021 年的 5~6 月苏州市城区站点的大气污染物浓度为研究对象, 分析了臭氧(O<sub>3</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、总氧化剂(O<sub>x</sub>)、一氧化碳(CO)和挥发性有机物(VOCs)等污染物的变化特征, 利用基于观测的模型(OBM)研究了 O<sub>3</sub> 污染成因及其年际变化, 解析了环境空气 VOCs 的主要来源及其变化趋势. 结果表明: ①近年来苏州 O<sub>x</sub> 平均体积分数以及 NO<sub>x</sub> 和 CO 平均浓度整体呈下降趋势, 但 VOCs 的体积分数整体呈上升趋势; O<sub>3</sub> 污染天光化学反应前体物浓度水平仍较高, 且显著高于优良天. ②近年来苏州 O<sub>3</sub> 生成处于 VOCs 控制区; 苏州市 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 长期减排比例应不低于 5:1, 在 VOCs 控制方面应注重对芳香烃和烯烃的减排. ③源解析结果显示, 工业排放、汽油车尾气和柴油机尾气是苏州市 VOCs 的主要排放源; 近年来工业排放源和溶剂使用源有所下降, 但汽油车尾气源和油气挥发源贡献率上升明显, 且上述两类污染源排放 VOCs 的 O<sub>3</sub> 生成潜势较高. ④综合分析各排放源对 O<sub>3</sub> 生成潜势的贡献发现, 溶剂使用源和汽油车尾气源的 VOCs 排放是影响苏州市 O<sub>3</sub> 生成的关键因素.

**关键词:** 臭氧; O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOCs 敏感性; 源解析; 基于观测的模型(OBM); 苏州市

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1392-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304103

## Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation

WU Ye-zheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>3,4\*</sup>, GU Jun<sup>2,5</sup>, MIAO Qing<sup>2,5</sup>, WEI Heng<sup>2,5</sup>, XIONG Yu<sup>2,5</sup>, YANG Qian<sup>2,5</sup>, WU Bin<sup>1</sup>, SHEN Wen-yuan<sup>1</sup>, MA Qiang<sup>3\*</sup>

(1. Suzhou Environmental Monitoring Station, Suzhou 215000, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Combined Pollution Monitoring, Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province, Suzhou 215000, China; 3. Institute of Atmospheric Environment, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100041, China; 4. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 5. Jiangsu Suzhou Environmental Monitoring Center, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** This study investigated the concentrations of atmospheric pollutants in the urban area of Suzhou from May to June, 2017-2021. The variation characteristics and annual changes of ozone (O<sub>3</sub>), nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>), total oxidant (O<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO), and volatile organic compounds (VOCs) were analyzed. The O<sub>3</sub> formation mechanism and its annual changes were studied using an Observation-Based Model (OBM), and VOCs source apportionments and their trends were discussed. The results indicated that ① The volume fractions of O<sub>x</sub> and the concentrations of NO<sub>x</sub> and CO have decreased in the urban area of Suzhou in recent years, while the volume fractions of VOCs have increased, and sufficient photochemical conditions for O<sub>3</sub> formation still existed during polluted days. ② The O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOCs sensitivity in Suzhou was in the VOCs-limited regime. The long-term reduction ratio between VOCs and NO<sub>x</sub> should not be less than 5:1, and aromatics and alkenes were the critical VOCs for mitigating O<sub>3</sub> pollution. ③ The results of VOCs source apportionment revealed that industrial emissions, gasoline vehicle exhaust, and diesel engine exhaust were the major sources of VOC emissions in Suzhou. Industrial emissions and solvent usage declined from 2017 to 2021; however, gasoline vehicle exhaust and gasoline evaporation, which possess higher O<sub>3</sub> formation potential (OFP), increased significantly. ④ The OFP source apportionments results indicated that controlling VOC emissions from solvent usage and gasoline vehicle exhaust is crucial for O<sub>3</sub> pollution control in Suzhou.

**Key words:** ozone; O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOCs sensitivities; source apportionments; observation-based model (OBM); Suzhou

环境空气高浓度臭氧(O<sub>3</sub>)能够对人体健康和生态环境产生一系列不利影响, 不仅能够增强大气氧化性, 促进其他污染物的转化, 还会对人体产生致癌、致敏和致畸变, 对农作物产生减产等不利健康和生态影响<sup>[1-4]</sup>. 此外, O<sub>3</sub>是第三重要的温室气体, 能够导致全球变暖<sup>[5]</sup>. O<sub>3</sub>在大气化学反应、生态效应和气候变化中扮演着重要的角色, 因此广受关注.

2013 年我国开始实施《大气污染防治行动计划》, 并于 2016 年实施修订后的《大气污染防治法》, 2018 年开展了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 一系列清洁空气行动和计划使得全国细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)浓度显著下降<sup>[6]</sup>, 但区域性光化学污染形势仍较为严

峻, 突出表现为近地面 O<sub>3</sub> 浓度波动升高且污染范围逐渐扩大<sup>[7-10]</sup>. 长江三角洲(长三角)地区是我国经济最为发达的地区之一, 也是我国 O<sub>3</sub> 污染较为严重的区域之一. 目前, O<sub>3</sub> 已经成为制约长三角地区空气质量改善最重要的污染物, 控制 O<sub>3</sub> 污染也成为这一区域当前最迫切的需求<sup>[11-15]</sup>. O<sub>3</sub> 是在光照条件下, 由挥

收稿日期: 2023-04-13; 修订日期: 2023-06-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3700704); 苏州市大气环境质量优化提升战略合作项目(2020H018)

作者简介: 吴也正(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境监测和臭氧污染成因, E-mail: wuyezheng@hotmail.com

\* 通信作者, E-mail: zhangxin199307@pku.edu.cn; maqiang@caep.org.cn

发性有机物(VOCs)和氮氧化物( $\text{NO}_x$ )发生光化学反应而生成的, $\text{O}_3$ 生成对各前体物的敏感性在不同区域和季节均有不同的特征<sup>[16,17]</sup>.因此众多学者对长三角地区 $\text{O}_3$ 生成敏感性和 $\text{O}_3$ 前体物来源开展了研究,空气质量模型和基于观测的模型计算结果显示,长三角城市地区 $\text{O}_3$ 生成处于VOCs控制区或VOCs和 $\text{NO}_x$ 的协同控制区<sup>[18-20]</sup>, $\text{O}_3$ 生成对人为源VOCs最为敏感<sup>[21]</sup>.近年来长三角区域环境空气污染物浓度变化显著,VOCs和 $\text{NO}_x$ 组成以及浓度的年际差异较为明显<sup>[22,23]</sup>,针对典型城区 $\text{O}_3$ 前体物浓度变化及其对 $\text{O}_3$ 污染影响的研究较为缺乏,无法有效支撑当前长三角地区 $\text{O}_3$ 污染的精细化管控.

苏州市位于江苏省东南部,是长三角城市群的中心城市之一.苏州市近年来空气质量显著提升,2021年相比2017年 $\text{PM}_{2.5}$ 、粗颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )、二氧化氮( $\text{NO}_2$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )和一氧化碳(CO)的年评价价值均明显下降,但是 $\text{O}_3$ 年评价价值上升了5.9%. $\text{O}_3$ 已经成为影响苏州市空气质量的一项重要污染物,控制 $\text{O}_3$ 污染成为持续深入打好污染防治攻坚战中面临的一项紧迫任务.2017~2021年苏州市 $\text{O}_3$ 污染天数共计发生194 d,其中5~6月 $\text{O}_3$ 污染达85 d,占比为43.8%;5 a中 $\text{O}_3$ 中度污染以上天数共计19 d,5~6月共计占10 d,占比为52.6%.因此,探究苏州市5~6月 $\text{O}_3$ 污染特征与成因对提升其全年空气质量具有重要意义.本研究选取2017~2021年的5~6月 $\text{O}_3$ 及其前体物和气象参数监测数据,分析了苏州环境空

气 $\text{O}_3$ 及其前体物的浓度水平、变化特征和 $\text{O}_3$ 优良天与污染天前体物浓度的差异及其年际变化,基于观测的模型(OBM)识别了 $\text{O}_3$ 生成控制区及关键敏感性物种,利用正定矩阵因子分解法(PMF)获得了VOCs的主要来源,并讨论了VOCs敏感物种及其来源的变化趋势,以期为苏州市 $\text{O}_3$ 污染精细化防治提供技术支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测与资料收集

本研究基于国家VOCs组分网苏州南门超级站(南门站)监测数据开展分析.南门站位于苏州市环境科学研究所办公大楼四楼楼顶(120.63°E, 31.29°N),见图1.站点布设符合《环境空气质量监测点位布设技术规范(试行)》(HJ 664-2013)相关要求,站点附近主要为居民和商业混合区,周边无明显的局地大气污染源,对于研究苏州环境空气质量具有代表性,适于开展 $\text{O}_3$ 污染特征与成因分析等相关研究.

环境空气 $\text{O}_3$ 监测采样口距离地面高度为15 m,在同一地点同步观测VOCs、 $\text{NO}_x$ 和CO等气态污染物.气象数据(温度、湿度、风速风向和气压)选取苏州市气象站数据进行同比分析,气象站与南门站距离约4 km,二者周围环境基本类似.本研究选取2017~2021年的5~6月 $\text{O}_3$ 及其他气态污染物(VOCs、 $\text{NO}_x$ 和CO)数据以及气象参数进行分析.

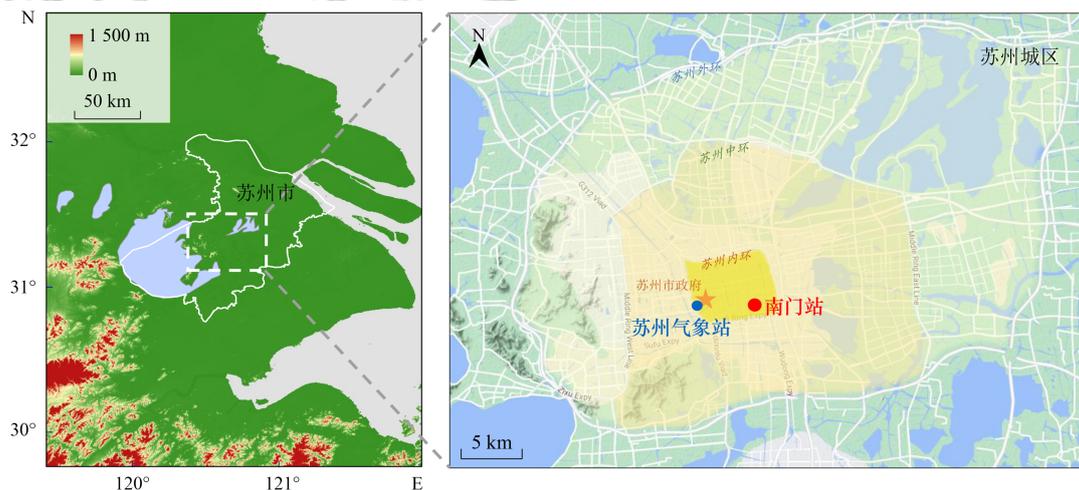


图1 观测点位置及周围环境示意

Fig. 1 Location of the ambient air monitoring site

$\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 和CO等常规气态污染物的监测仪器均为美国赛默飞公司生产. $\text{O}_3$ 的监测方法为紫外光度法(model 49i),该仪器体积分数的检测下限为 $1.0 \times 10^{-9}$ ;  $\text{NO}_x$ 的监测方法为化学发光法(model 17i),该仪器体积分数的检测下限为 $1.0 \times 10^{-9}$ ;CO的监测方法

为气体过滤相关法(model 48i),该仪器体积分数的检测下限为 $0.04 \times 10^{-6}$ .采用荷兰Synspec GC955-611/811在线监测仪对环境空气VOCs开展自动监测.GC955-611/811由低碳( $\text{C}_2\sim\text{C}_6$ )分析仪和高碳( $\text{C}_6\sim\text{C}_{12}$ )分析仪两套仪器组成,并采用FID和PID双检测器组

合,可检出 28 种烷烃、11 种烯烃、16 种芳香烃以及乙炔等共计 56 种 VOCs,检测时间分辨率为 1 h,工作温度湿度要求分别为 5~35°C 和 20%~90%。

## 1.2 质量保证与质量控制

本研究中所有污染物监测仪器均在 22°C 的恒温环境下运行. 为确保仪器监测准确性, O<sub>3</sub> 分析仪每年定期进行 O<sub>3</sub> 校准仪的量值溯源, 其他常规污染物分析仪每月通过标准物质进行校准. 在线 VOCs 监测仪定期进行校准: 每日使用标准混合气体对仪器各组分进行单点(工作点)检查与校准, 并对氢气发生器、载气、零气发生器性能检查与流量等各项指标检查; 每周开展仪器状态和运行状况巡检, 内容包括: 主要性能指标检查、氢气发生器、载气和零气供应情况检查, 基线空白漂移和响应值; 使用标准气体混合物(PAMS, Linde)每周对仪器各组分进行单点检查与校准, 每月开展 5 个浓度点的校准曲线更新, 单物种多点线性要求相关系数(R<sup>2</sup>)不低于 0.991; 每 3 个月开展一次采样管路清洗。

## 1.3 数据处理方法

### 1.3.1 污染物浓度数据处理

参考《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)<sup>[24]</sup>和《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 663-2012)<sup>[25]</sup>等中国生态环境部颁布的相关标准进行空气质量评价. O<sub>3</sub> 日最大 8 h 滑动平均值(MDA8 O<sub>3</sub>)为 O<sub>3</sub> 的日评价值, 月和年评价值为 O<sub>3</sub> 日评价值的第 90 百分位数. 所有污染物浓度均在参比状态下(101.325 kPa, 25°C)测定。

### 1.3.2 VOCs 的 O<sub>3</sub> 生成潜势

采用最大增量反应活性(MIR)因子加权法计算 O<sub>3</sub> 生成潜势(OFP)以评估 VOCs 对 O<sub>3</sub> 生成的潜在贡献<sup>[26]</sup>. OFP 计算公式如下:

$$\text{OFP} = \sum \text{MIR}_i \times [\text{VOC}_i]$$

式中, OFP 为 O<sub>3</sub> 生成潜势, μg·m<sup>-3</sup>, MIR<sub>*i*</sub> 为第 *i* 种 VOC 的最大增量反应活性, g·g<sup>-1</sup>, [VOC<sub>*i*</sub>] 为第 *i* 种 VOC 的浓度, μg·m<sup>-3</sup>.

### 1.3.3 基于观测的模型

基于观测的模型(OBM)是一个用实际观测资料来评价 O<sub>3</sub> 生成对其前体物排放灵敏性的箱式模型. 将 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、VOCs 以及温度、湿度、压力等逐小时观测数据输入模型中进行 O<sub>3</sub> 化学生成与消耗的计算. 本研究中 OBM 模型使用的化学机制为 MCM(v3.3.1, <http://mcm.leeds.ac.uk/MCM>), MCM 是一种近似详细的化学机制, 可以用来模拟近真实情况下的大气光化学反应过程, 并逐一计算每个 VOCs 物种的消耗路径, 量化其中包含的所有物种反应速率, 本

研究 OBM 计算使用的框架为 FOAM<sup>[27]</sup>.

利用 OBM 模型计算了相对增量反应性(RIR)以评估 O<sub>3</sub> 对前体物的敏感性<sup>[28]</sup>. RIR 值为正表明 O<sub>3</sub> 生成对此污染物敏感, 且 RIR 值越大表明该前体物越为优控物种<sup>[29,30]</sup>. 在假设污染源减排 20% 的情况下计算不同 O<sub>3</sub> 前体物的 RIR 值, O<sub>3</sub> 前体物主要包括 NO<sub>x</sub>、CO、人为源 VOCs(AHC)以及植物源 VOCs(BHC, 异戊二烯). 为进一步判断 O<sub>3</sub> 生成对人为源 VOCs 的敏感性, 本研究计算了烷烃、烯烃(除异戊二烯)、炔烃和芳香烃的 RIR. 其相关计算公式如下:

$$\text{RIR}(X) = \frac{P_{\text{O}_3, \text{NO}}(X) - P_{\text{O}_3, \text{NO}}([X] - \Delta[X])}{P_{\text{O}_3, \text{NO}}(X)} = \frac{\Delta S(X)}{S(X)}$$

式中, *X* 为某个特定物种, *S*(*X*) 为物种 *X* 在一定时间内的排放总量, Δ*S*(*X*) 为假设的源效应变化造成排放总量的变化, Δ*X* 为因假设的源效应变化造成物种 *X* 浓度的变化量, P<sub>O<sub>3</sub>, NO</sub> 为 09:00~15:00 的 O<sub>3</sub> 生成速率的平均值。

### 1.3.4 正定矩阵因子分解法

本研究采用正定矩阵因子分解法(PMF, v5.0)对环境空气 VOCs 开展来源解析, 通过调整试验不确定性参数和不同因子参数, 使得残差矩阵最小化, 从而提高观测结果与 PMF 模拟结果的相关性<sup>[31-34]</sup>. 根据实际观测情况, 参考中国生态环境部发布的技术文件: 城市大气挥发性有机化合物(VOCs)监测技术指南(试行)中列举的 VOCs 物种, 选择具有明显污染源特征、反应活性相对较低、变化规律明显的 VOCs 物种进行源解析, 共计筛选出 12 种烷烃、6 种烯烃和 6 种芳香烃等 24 种 VOCs, 对不同年份的 VOCs 开展来源解析. 分析 VOCs 各源贡献的差异, 并计算各源 VOCs 的 OFP, 以分析不同污染源对 O<sub>3</sub> 生成贡献的变化情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 O<sub>3</sub> 污染概况

2017~2021 年苏州 ρ(O<sub>3</sub>) 年评价价值分别为 159、159、171、162 和 162 μg·m<sup>-3</sup>. 年际变化呈现先上升后下降的趋势, 2019 年最高、2020 和 2021 年相比 2019 年略有下降. 分析各年 O<sub>3</sub> 月评价价值的 Spearman 秩相关系数发现<sup>[35,36]</sup>, 3、5~6 和 8~12 月 O<sub>3</sub> 年际变化均整体呈现上升趋势; 2、4 和 7 月整体呈现下降趋势. 2017~2021 年苏州 ρ(O<sub>3</sub>) 月评价价值最高分别为 197、185、209、202 和 201 μg·m<sup>-3</sup>, 除 2018 年出现在 9 月外, 其余年份均出现在 5 月或 6 月, 见图 2. 2017~2021 年的 5~6 月苏州环境空气以 O<sub>3</sub> 为首要污染物的

天数分别为 40、38、41、42 和 43 d,其他污染物作为首要污染物的天数分别为 8、10、4、2 和 4 d(AQI≤50 不计算首要污染物<sup>[24]</sup>).  $O_3$  已经成为影响苏州 5~6 月环境空气质量最主要的污染物.

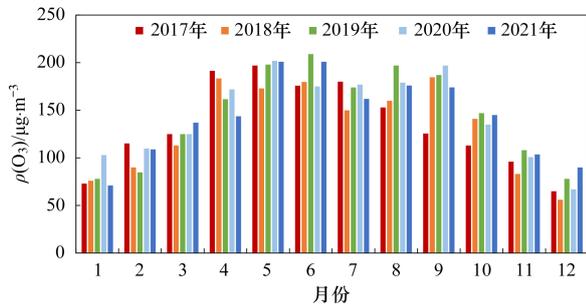


图2 2017~2021年苏州  $O_3$  浓度月评价变化

Fig. 2 Monthly variation in  $O_3$  concentrations in Suzhou from 2017 to 2021

2017~2021年5~6月苏州  $\rho(\text{MDA8 } O_3)$  算术平均值分别为 130、127、137、130 和 137  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 上述时期  $\rho(\text{MDA8 } O_3)$  的第 90 百分位数分别 185、175、209、194 和 201  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\rho(\text{MDA8 } O_3)$  算术平均值和  $\rho(\text{MDA8 } O_3)$  的第 90 百分位数年际变化不完全一致, 2020年  $\rho(\text{MDA8 } O_3)$  算术平均值与 2017年基本持平,  $\rho(\text{MDA8 } O_3)$  的第 90 百分位数 2020年高于 2017年, 整体来看二者年际变化均呈现上升趋势, 算术平均值和第 90 百分位数的年际上升速率分别为  $1.55 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$  和  $4.00 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ .

2017~2021年的5~6月苏州分别发生了8、9、4、4和11次  $O_3$  污染过程( $O_3$  污染等级从优良到轻度污染以上再回落至优良为1次污染过程), 其中中度污染过程分别为1、1、2、0和3次( $O_3$  污染等级从优良到中度污染以上再回落至优良为1次中度污染过程), 无重度及以上污染天气.

## 2.2 $O_3$ 及其前体物浓度与变化特征分析

由于大气环境中 NO 会与  $O_3$  反应转化为  $\text{NO}_2$ , 从而降低实际生成的  $O_3$ , 因此采用总氧化剂 ( $O_x = O_3 + \text{NO}_2$ ) 表示总的潜在  $O_3$ <sup>[37]</sup>. 2017~2021年的5~6月苏州市南门站  $O_x$  体积分数以及 CO 和  $\text{NO}_x$  浓度见图 3. 2017~2021年  $\varphi(O_x)$  平均值分别为  $67\times 10^{-9}$ 、 $62\times 10^{-9}$ 、 $62\times 10^{-9}$ 、 $58\times 10^{-9}$  和  $60\times 10^{-9}$ , 除 2021年有所回升外, 年际变化整体呈现下降的趋势, 下降速率为  $1.8\times 10^{-9} \text{a}^{-1}$ ,  $O_x$  体积分数的降低表明苏州近年来大气氧化性有所下降.  $\rho(\text{CO})$  平均值分别为 0.8、0.7、0.6、0.6 和 0.5  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 呈逐年下降趋势, 下降速率为  $0.08 \text{mg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ;  $\rho(\text{NO}_x)$  平均值分别为 44、39、34、31 和 32  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 同样呈现逐年下降的趋势, 下降速率为  $3.0 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ; 表明近年来上述  $O_3$  前体物浓度水平逐渐下降.

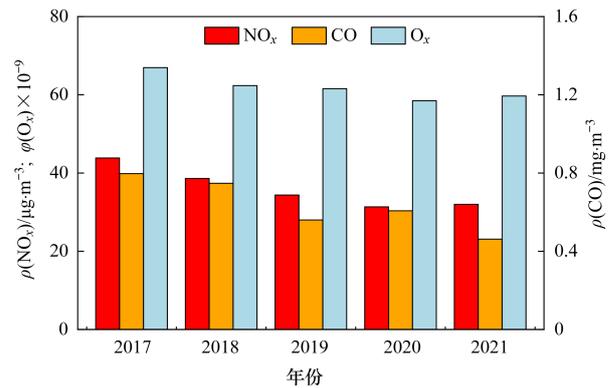


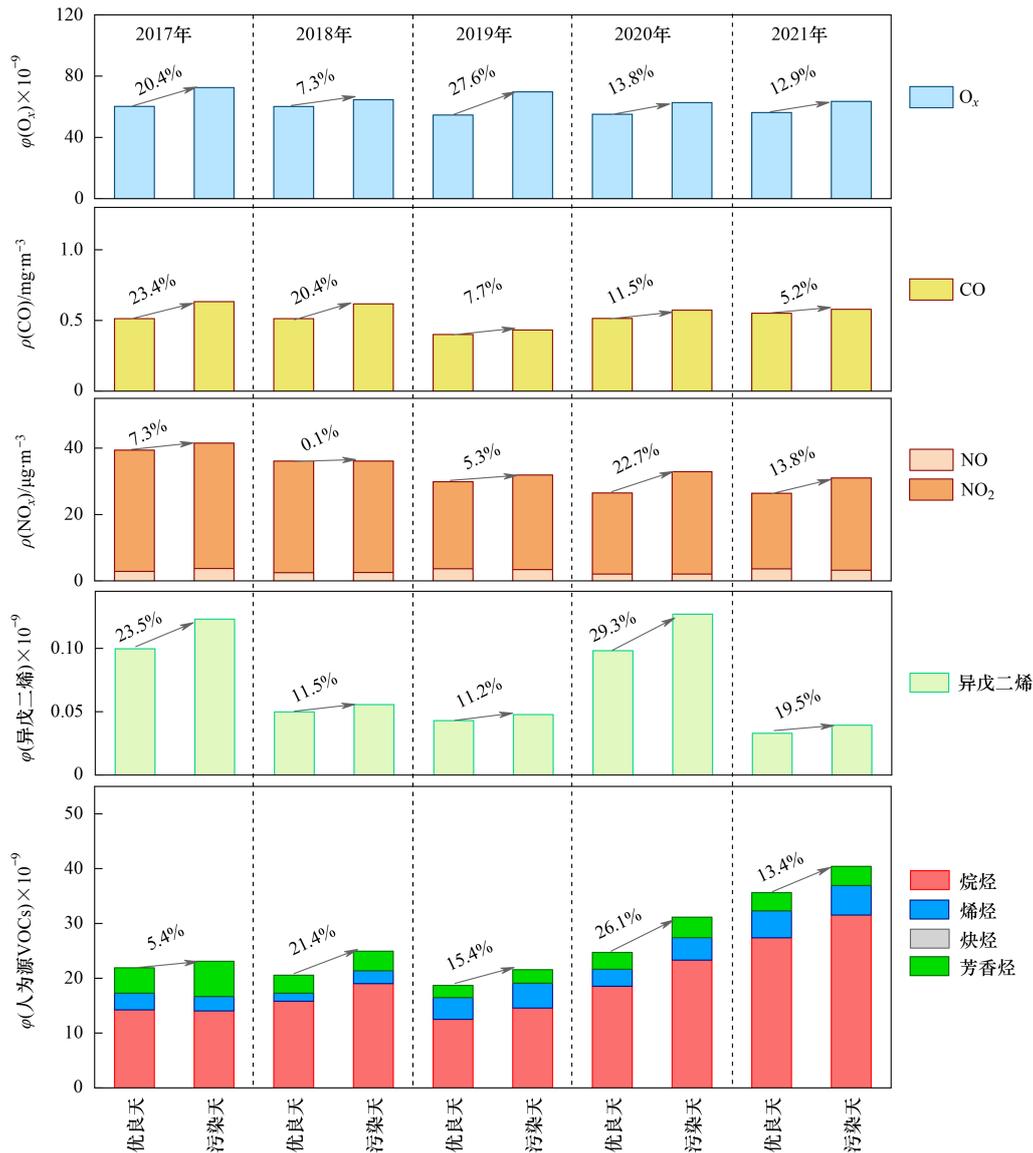
图3 2017~2021年南门站  $O_x$  体积分数以及 CO 和  $\text{NO}_x$  浓度

Fig. 3 Volume fractions of  $O_x$ , concentrations of CO and  $\text{NO}_x$  at Nanmen site from 2017 to 2021

2017~2021年污染天 [ $\rho(\text{MDA } O_3) > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]<sup>[24]</sup> 的  $\varphi(O_x)$  平均值相比优良天 [ $\rho(\text{MDA } O_3) \leq 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]<sup>[24]</sup> 上升幅度在 7.3%~27.6%, 表明  $O_3$  污染时段大气氧化性显著增强; 2017~2018年污染天的 CO 浓度平均值相比优良天上升幅度均在 20% 以上, 2019~2021年上升幅度回落明显, 但也不低于 5%; 除 2018 年外, 其余 4 年污染天的  $\text{NO}_x$  浓度平均值相比优良天均有明显上升, 幅度均在 5% 以上. 5 a 中,  $\varphi$ (异戊二烯) 总平均值小于  $0.1 \times 10^{-9}$ , 但污染天的异戊二烯体积分数较优良天均有所上升. 除异戊二烯外, 2017~2021年的  $\varphi$ (人为源 VOCs) 平均值分别为  $22.2 \times 10^{-9}$ 、 $21.6 \times 10^{-9}$ 、 $19.7 \times 10^{-9}$ 、 $26.2 \times 10^{-9}$  和  $37.1 \times 10^{-9}$ , 年际变化整体呈现上升的趋势, 平均上升速率为  $3.72 \times 10^{-9} \text{a}^{-1}$ ; 其中烯烃(除异戊二烯外)的体积分数总体呈波动上升趋势, 上升速率为  $0.53 \times 10^{-9} \text{a}^{-1}$ ; 芳香烃的体积分数年际变化整体呈现先下降后上升的趋势, 2020年和 2021年相比 2017年明显下降, 5 a 总体下降速率为  $0.43 \times 10^{-9} \text{a}^{-1}$ , 表明苏州市对于芳香烃排放的控制效果较为明显, 但仍需进一步加强对人为源烯烃排放的控制. 2017~2021年污染日的 VOCs 体积分数均高于优良天, 较高的 VOCs 体积分数为  $O_3$  的光化学生成提供了充足的前体物, 从而进一步加快  $O_3$  生成速率<sup>[38]</sup>(图 4).

## 2.3 $O_3$ 生成控制区及敏感性分析

基于 OBM 模型计算得到了苏州 2017~2021 年的 5~6 月  $O_3$  生成等浓度曲线(EKMA 曲线). 该时段内苏州  $O_3$  生成控制区整体处于 EKMA 脊线以上, 判断  $O_3$  生成整体处于 VOCs 控制区(图 5),  $O_3$  生成对 VOCs 最为敏感. 从年际变化上来看, 2017~2021 年苏州  $O_3$  生成从 VOCs 控制区逐渐转向 VOCs 和  $\text{NO}_x$  的协同控制区, 但  $O_3$  生成速率呈现加快趋势, 上升速率为  $1.9 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}\cdot\text{a})^{-1}$ . 2017~2019 年,  $\text{NO}_x$  体积分数相对较高,  $O_3$  生成处于强烈的 VOCs 控制区; 受制于 NO 滴定



箭头上方百分数表示污染天较优良天污染物浓度或体积分数的升幅;人为源 VOCs 不含异戊二烯

图 4 2017~2021 年南门站各污染物在  $O_3$  污染天与优良天浓度或体积分数对比

Fig. 4 Concentrations or volume fractions of pollutants on  $O_3$  pollution days and no-pollution days at Nanmen site from 2017 to 2021

效应,  $O_3$  生成速率较慢, 平均速率为  $9.4 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ . 2020~2021 年  $\text{NO}_x$  体积分数较前 3 年明显降低,  $O_3$  生成平均速率上升至  $15.6 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ .

2017 年  $\text{NO}_x$  体积分数处于 5a 中最高的水平, VOCs 体积分数仅次于 2021 年, 此时  $O_3$  生成处于强烈的 VOCs 控制区,  $\text{NO}_x$  的减排会导致  $O_3$  浓度上升, 不利于  $O_3$  污染的控制. 2020 年苏州  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的体积分数在 5a 中均处于较低水平,  $O_3$  生成速率较 2017~2019 年平均值上升  $4.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ . 2021 年  $O_3$  生成速率、 $\text{NO}_x$  和 VOCs 的体积分数相比 2020 年均升高,  $O_3$  生成速率达 5a 来最高水平 [ $17.4 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ ]. 2020~2021 年,  $O_3$  平均生成速率较 2017~2019 年上升  $6.2 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ , 主要原因为: ①2020~2021 年  $\text{NO}_x$  体积分数较 2017~2019 年下降明显, 削弱了  $\text{NO}$  对于  $O_3$

的滴定效应; ②2020~2021 年 VOCs 体积分数有所上升, 意味着大气光化学反应“原料”增加. 两方面的共同作用是导致苏州近年来  $O_3$  污染加剧的化学成因<sup>[39]</sup>. 从 2017~2021 年平均情况分析, 为有效控制  $O_3$  的生成, VOCs 和  $\text{NO}_x$  长期减排比例应不低于 5:1.

2017~2021 年  $O_3$  生成敏感性分析结果如图 6 所示, 敏感性判断  $O_3$  生成控制区结果与 EKMA 结果基本一致, 人为源 VOCs 的 RIR 数值显著高于其他污染物的 RIR 数值, 且  $\text{NO}_x$  的 RIR 始终为负值, 因此判断苏州市  $O_3$  生成整体处于 VOCs 控制区,  $O_3$  生成对于 VOCs 最为敏感;  $O_3$  生成对人为源 VOCs 组分中芳香烃和烯烃较为敏感, 烷烃次之、炔烃最低. 因此苏州市在 VOCs 控制方面应注重对芳香烃和烯烃的减排.

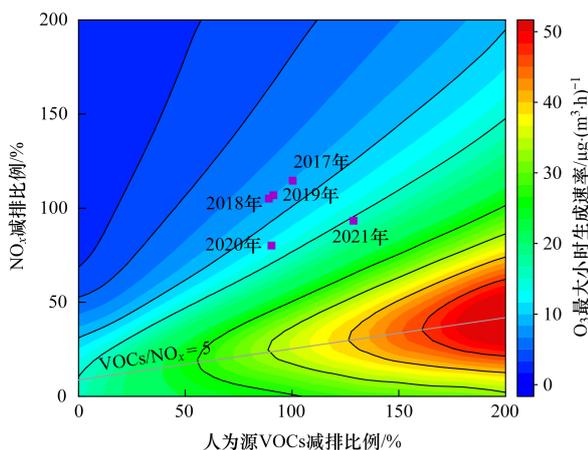


图5 苏州2017~2021年O<sub>3</sub>最大生成速率等浓度曲线

Fig. 5 Isopleth diagram of the maximum O<sub>3</sub> formation rates in Suzhou from 2017 to 2021

从年际变化来看,虽然苏州2017~2021年均处于

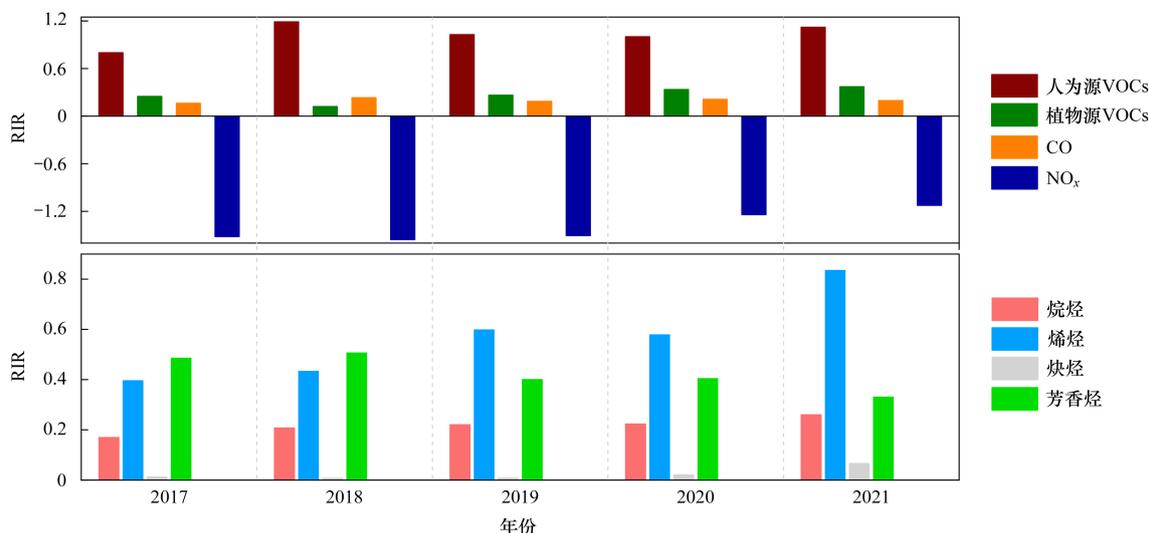


图6 苏州2017~2021年O<sub>3</sub>生成敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of O<sub>3</sub> formation in Suzhou from 2017 to 2021

## 2.4 VOCs源解析结果

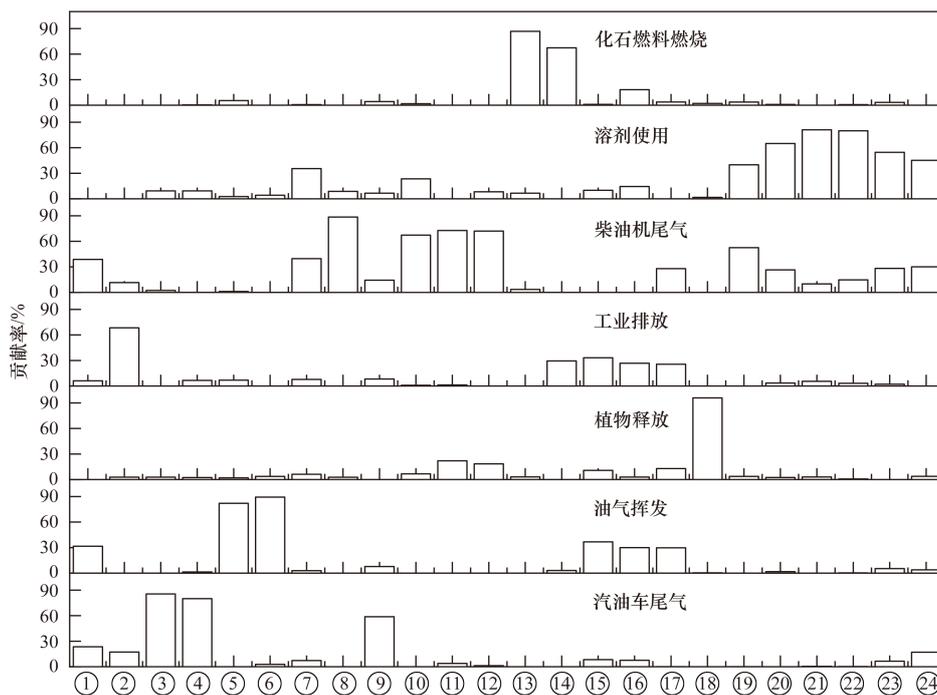
利用PMF模型对苏州市2017~2021年的VOCs开展源解析,VOCs污染源谱见图7,源解析结果见图8.本研究共计解析出7大类VOCs来源,分别为:柴油机尾气(包括柴油车、非道路机械、内河船舶等以柴油作为燃料的内燃机)、化石燃料燃烧(主要为煤炭、天然气等燃烧过程)、油气挥发、汽油车尾气、工业排放、溶剂使用和植物释放.各VOCs来源识别方法简述如下.

化石燃料燃烧的产物与内燃机类似,乙烯和丙烯的比例相对较高<sup>[41,42]</sup>.溶剂使用源中主要物种为C<sub>7</sub>~C<sub>8</sub>芳香烃,其中甲苯等被广泛用作有机溶剂<sup>[43]</sup>.对于柴油机尾气源,主要来自柴油货车、柴油非道路机械和内河船舶等的尾气排放,其中高碳数烷烃贡献率相对较高,芳香烃也存在一定比例<sup>[44,45]</sup>.对于油气

VOCs控制区,但不同年份的O<sub>3</sub>生成敏感性逐渐发生变化.2017~2021年,人为源VOCs中烯烃对于O<sub>3</sub>生成敏感性逐年升高,自2019年开始已成为影响O<sub>3</sub>生成敏感程度最高的VOCs物种,并仍有不断上升的趋势;与此同时,芳香烃的O<sub>3</sub>生成敏感性逐年降低,自2019年开始O<sub>3</sub>生成对其敏感程度已低于烯烃,但仍是苏州O<sub>3</sub>生成敏感性较高的VOCs物种.上述分析结果进一步证实了苏州市对芳香烃的控制已渐显成效,未来需加强对烯烃的控制.此外,敏感性分析结果显示,植物源VOCs的O<sub>3</sub>生成敏感性也有逐年升高的趋势,根据苏州市统计年鉴(<http://tjj.suzhou.gov.cn/sztjj/tjnj/2022/zk/indexce.htm>),2021年苏州市城市园林绿化面积达48 010 hm<sup>2</sup>,较2017年增长15.8%,城市绿化覆盖率的提升也增加了植物源VOCs对O<sub>3</sub>生成的贡献<sup>[40]</sup>.

挥发源,一般以正戊烷和异戊烷作为示踪剂<sup>[46]</sup>,因此正戊烷和异戊烷贡献率较高.汽油车尾气源主要由汽油燃烧产物烯烃类物质组成,包括C<sub>2</sub>~C<sub>6</sub>烷烃,反-2-丁烯、顺-2-戊烯等烯烃,以及苯乙烯、间-乙基甲苯等芳香烃,其中2,3-二甲基丁烷作为常见的车用汽油添加剂,因此贡献率较高.工业排放源的烷烃和烯烃贡献率较大<sup>[43]</sup>.植物释放源,一般以异戊二烯作为示踪剂<sup>[47,48]</sup>.

从2017~2021年整体来看,对苏州市VOCs贡献率最大的源为工业排放源,贡献率为28.1%;其次是汽油车尾气源和柴油机尾气源,贡献率分别为20.9%和19.4%;油气挥发源和溶剂使用源分列第4、5位,贡献率分别占16.5%和8.7%;最后是化石燃料燃烧源(贡献率4.2%)和植物释放源(贡献率2.2%).工业排放源与溶剂使用源对VOCs的加和贡献率达到了



①乙烷,②丙烷,③正丁烷,④异丁烷,⑤正戊烷,⑥异戊烷,⑦正己烷,⑧2-甲基戊烷,⑨2,3-二甲基丁烷,⑩3-甲基己烷,⑪正辛烷,⑫正癸烷,⑬乙烯,⑭丙烯,⑮反-2-戊烯,⑯顺-2-戊烯,⑰1-戊烯,⑱异戊二烯,⑲苯,⑳甲苯,㉑二甲苯,㉒邻-二甲苯,㉓苯乙烯,㉔间-乙基甲苯

图7 PMF源解析源谱

Fig. 7 Source profiles resolved with positive matrix factorization

36.8%,这与苏州的工业规模密切相关,统计年鉴显示,2021年苏州市第二产业生产总值达10 872.81亿元,占江苏省的21.0%. 2017~2021年规模以上工业总产值年平均增幅7.7%,巨大的工业体量和持续较高的增速使得工业生产相关排放成为苏州市环境空气VOCs的主要来源. 汽油车尾气源与油气挥发源贡献率之和达37.4%,超过了工业排放源与溶剂使用源贡献率之和,2021年苏州市机动车保有量已接近500万辆,均以汽油燃料为主,因此汽油车尾气和汽油挥发对苏州VOCs贡献显著. 柴油机尾气的贡献同样不容忽视,平均贡献达19.4%,其来源主要是公路及水路货运,工地企业非道路移动机械. 由于本研究源解析时段跨度较长且人为源VOCs排放量较大,因此植物源VOCs的贡献率相对较低,对苏州市VOCs贡献量为2.2%.

从2017~2021各年的源解析结果来看,工业排放源和溶剂使用源的贡献率总体呈下降趋势,表明苏州市近年来强化重点VOCs行业治理,鼓励引导企业和消费者实施清洁涂料(溶剂、原辅料替代)等措施<sup>[49]</sup>已渐显成效. 与此同时,2021年汽油车尾气源和油气挥发源的贡献率之和为53.9%,较2017年上升了27.1%,这与苏州近年来的机动车保有量的快速增长以及城区交通拥堵加剧密切相关<sup>[50]</sup>. 2017~2019年苏州市柴油机尾气对VOCs的贡献率总体上升较快,2020~2021年柴油机尾气贡献

率明显回落,可能与该时段苏州市受到周边地区疫情影响,水、陆货运及非道路移动机械排放有所减少相关<sup>[51,52]</sup>.

由于不同污染源排放的VOCs存在明显差异,本研究将各排放源中VOCs物种贡献按照其MIR数值进行重新分配,计算得到7大类VOCs污染源OFP贡献率. 从2017~2021年整体来看,各污染源对O<sub>3</sub>生成

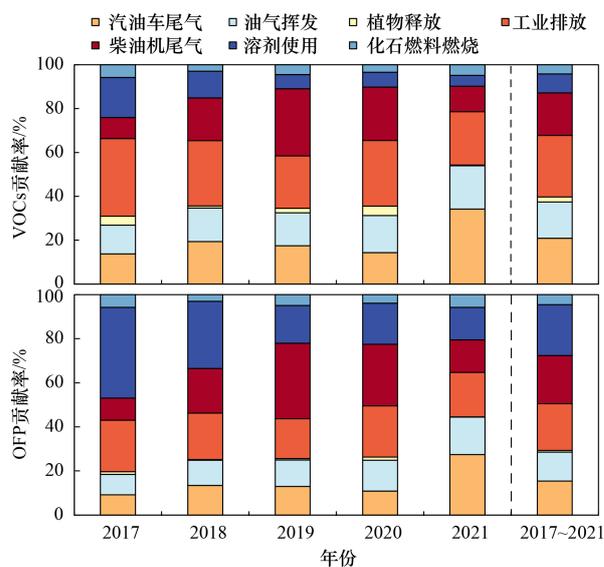


图8 苏州2017~2021年不同VOCs排放源体积分数和OFP相对贡献率

Fig. 8 VOCs and OFP source apportionments in Suzhou from 2017 to 2021

潜势的贡献率从高到底分别为：溶剂使用、柴油机尾气、工业排放、汽油车尾气、油气挥发、化石燃料燃烧和植物释放，贡献率分别为：23.1%、21.9%、21.2%、15.4%、13.2%、4.6%和0.7%。由于溶剂使用 VOCs 贡献率较高，且所排放的 VOCs 物质活性较高，对 OFP 的贡献最大，但近年来这一排放源的 OFP 贡献率显著下降，2021 年较 2017 年下降幅度达 18.1%。汽油车尾气和油气挥发的 OFP 贡献率总体呈逐年上升趋势，汽油车尾气源的 OFP 贡献率从 2017 年的 9.1% 上升至 2021 年的 27.4%，已经成为近年来 OFP 贡献最大的污染源。综合分析，溶剂使用源和汽油车尾气源的 VOCs 排放是影响苏州市 O<sub>3</sub> 生成的关键因素。

### 3 结论

(1) 2017~2021 年，苏州南门站 O<sub>3</sub> 体积分数以及 NO<sub>x</sub> 和 CO 浓度平均值均呈现逐年下降的趋势，整体下降速率分别为  $1.8 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 、 $3.0 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$  和  $0.08 \text{ mg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ；VOCs 体积分数的平均值年际变化整体呈上升的趋势，整体上升速率为  $3.72 \times 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ 。2017~2021 年 O<sub>3</sub> 的体积分数和 CO 和 NO<sub>x</sub> 浓度以及人为源 VOCs 的体积分数在 O<sub>3</sub> 污染日均高于优良天，污染天 O<sub>3</sub> 光化学生成过程中充分的大气光化学反应条件和充足的前体物，共同导致了 O<sub>3</sub> 污染的发生。

(2) 分析 EKMA 曲线发现，苏州市 O<sub>3</sub> 生成对于 VOCs 最为敏感，整体处于 VOCs 控制区。2017~2021 年 O<sub>3</sub> 生成从 VOCs 控制区逐渐转向 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 的协同控制区，O<sub>3</sub> 生成速率呈现加快趋势。未来应重点推动 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 的协同控制以降低 O<sub>3</sub> 污染，VOCs 和 NO<sub>x</sub> 长期减排比例应不低于 5:1。

(3) O<sub>3</sub> 生成敏感性分析结果显示，苏州市人为源 VOCs 的 RIR 数值最高、且 NO<sub>x</sub> 的 RIR 始终为负值。O<sub>3</sub> 生成对人为源 VOCs 中芳香烃和烯烃最为敏感，烷烃次之、炔烃最低。从年际变化来看，O<sub>3</sub> 生成对烯烃敏感性逐年升高，自 2019 年开始烯烃已成为影响 O<sub>3</sub> 生成最重要的 VOCs 物种；O<sub>3</sub> 生成对芳香烃的敏感性逐年降低，但 RIR 数值仍处于较高水平。近年来苏州市对芳香烃的控制已渐显成效，需进一步加强人为源烯烃的控制。

(4) 从总体时段来看，苏州市 VOCs 排放的主要来源依次为工业排放、汽油车尾气、柴油机尾气、油气挥发和溶剂使用。从年际变化来看，汽油车尾气和油气挥发源的排放贡献率呈上升趋势。溶剂使用源的 OFP 贡献率下降显著，汽油车尾气和油气挥发的 OFP 贡献率总体呈上升趋势。综合分析，在苏州市 O<sub>3</sub> 生成处于 VOCs 控制区的背景下，溶剂使用源和汽油

车尾气源的 VOCs 排放是影响苏州市 O<sub>3</sub> 生成的关键因素。

### 参考文献：

- [1] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, *et al.* Ground-level O<sub>3</sub> pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **199**: 42-48.
- [2] Mirowsky J E, Carraway M S, Dhingra R, *et al.* Ozone exposure is associated with acute changes in inflammation, fibrinolysis, and endothelial cell function in coronary artery disease patients [J]. *Environmental Health*, 2017, **16**(1), doi: 10.1186/s12940-017-0335-0.
- [3] Ruan Z L, Qian Z M, Guo Y F, *et al.* Ambient fine particulate matter and ozone higher than certain thresholds associated with myopia in the elderly aged 50 years and above [J]. *Environmental Research*, 2019, **177**, doi: 10.1016/j.envres.2019.108581.
- [4] 程育恺, 戴海夏, 张蕴晖, 等. 长三角地区 2017~2020 年臭氧浓度时空分布与人群健康效益评估 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 719-729.  
Cheng Y K, Dai H X, Zhang Y H, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of ozone concentration and population health benefit assessment in the Yangtze River-Delta Region from 2017 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 719-729.
- [5] Wang T, Wei X L, Ding A J, *et al.* Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of Southern China, 1994 - 2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(16): 6217-6227.
- [6] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM<sub>2.5</sub> air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [7] Li B W, Ho S S H, Gong S L, *et al.* Characterization of VOCs and their related atmospheric processes in a central Chinese city during severe ozone pollution periods [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(1): 617-638.
- [8] Lu X, Zhang L, Wang X L, *et al.* Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013 [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(4): 240-247.
- [9] Ma Z Q, Xu J, Quan W J, *et al.* Significant increase of surface ozone at a rural site, north of eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(6): 3969-3977.
- [10] Sun L, Xue L K, Wang T, *et al.* Significant increase of summertime ozone at Mount Tai in Central Eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(16): 10637-10650.
- [11] Wang M Y, Yim S H L, Wong D C, *et al.* Source contributions of surface ozone in China using an adjoint sensitivity analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **662**: 385-392.
- [12] Li Y, Lau A K H, Fung J C H, *et al.* Importance of NO<sub>x</sub> control for peak ozone reduction in the Pearl River Delta region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(16): 9428-9443.
- [13] 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 等. 2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5736-5746.  
Qian J, Xu C X, Chen J H, *et al.* Chemical characteristics and contaminant sensitivity during the typical ozone pollution processes of Chengdu in 2020 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5736-5746.

- [14] 严茹莎. 德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3961-3968.  
Yan R S. Ozone sensitivity analysis and emission controls in Dezhou in summer [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- [15] 奇奕轩, 胡君, 张鹤丰, 等. 北京市郊区夏季臭氧重污染特征及生成效率[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(5): 663-671.  
Qi Y X, Hu J, Zhang H F, *et al.* Pollution characteristics and production efficiency of ozone in summertime at rural site in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(5): 663-671.
- [16] Tan Z F, Lu K D, Dong H B, *et al.* Explicit diagnosis of the local ozone production rate and the ozone-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivities [J]. Science Bulletin, 2018, **63**(16): 1067-1076.
- [17] Lu H X, Lyu X P, Cheng H R, *et al.* Overview on the spatial-temporal characteristics of the ozone formation regime in China [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2019, **21**(6): 916-929.
- [18] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1603-1611.  
Wang H L. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1603-1611.
- [19] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群 O<sub>3</sub> 污染成因和关键 VOCs 活性解析[J]. 科学通报, 2018, **63**(12): 1130-1141.  
Jiang M, Lu K D, Su R, *et al.* Ozone formation and key VOCs in typical Chinese city clusters [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- [20] Wang M, Chen W T, Zhang L, *et al.* Ozone pollution characteristics and sensitivity analysis using an observation-based model in Nanjing, Yangtze River Delta Region of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **93**: 13-22.
- [21] Liu Z Q, Hu K, Zhang K, *et al.* VOCs sources and roles in O<sub>3</sub> formation in the central Yangtze River Delta region of China [J]. Atmospheric Environment, 2023, **302**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.119755.
- [22] Xu Z N, Zou Q L, Jin L L, *et al.* Characteristics and sources of ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) at a regional background site, YRD region, China; significant influence of solvent evaporation during hot months [J]. Science of the Total Environment, 2023, **857**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159674.
- [23] Wang N, Lyu X P, Deng X J, *et al.* Aggravating O<sub>3</sub> pollution due to NO<sub>x</sub> emission control in eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**: 732-744.
- [24] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].
- [25] HJ 663-2013, 环境空气质量评价技术规范(试行)[S].
- [26] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [27] Wolfe G M, Marvin M R, Roberts S J, *et al.* The framework for 0-D atmospheric modeling (FOAM) v3.1 [J]. Geoscientific Model Development, 2016, **9**(9): 3309-3319.
- [28] Cardelino C A, Chameides W L. An observation-based model for analyzing ozone precursor relationships in the urban atmosphere [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1995, **45**(3): 161-180.
- [29] Su R, Lu K D, Yu J Y, *et al.* Exploration of the formation mechanism and source attribution of ambient ozone in Chongqing with an observation-based model [J]. Science China Earth Sciences, 2018, **61**(1): 23-32.
- [30] Xue L K, Wang T, Guo H, *et al.* Sources and photochemistry of volatile organic compounds in the remote atmosphere of western China: results from the Mt. Waliguan Observatory [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(17): 8551-8567.
- [31] Buzcu B, Fraser M P. Source identification and apportionment of volatile organic compounds in Houston, TX [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(13): 2385-2400.
- [32] He Z R, Wang X M, Ling Z H, *et al.* Contributions of different anthropogenic volatile organic compound sources to ozone formation at a receptor site in the Pearl River Delta region and its policy implications [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(13): 8801-8816.
- [33] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997, **37**(1): 23-35.
- [34] Yang Y, Ji D S, Sun J, *et al.* Ambient volatile organic compounds in a suburban site between Beijing and Tianjin: concentration levels, source apportionment and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133889.
- [35] 蔡敏, 王莹, 金安, 等. 2013-2015年十堰市环境空气质量变化趋势分析研究[J]. 环境科学与管理, 2016, **41**(12): 130-136.  
Cai M, Wang Y, Jin A, *et al.* The analysis of the variation trend of air quality in Shiyan during 2013 to 2015 [J]. Environmental Science and Management, 2016, **41**(12): 130-136.
- [36] Kaushik R, Balasubramanian R, De La Cruz A A. Influence of air quality on the composition of microbial pathogens in fresh rainwater [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78**(8): 2813-2818.
- [37] 江明, 袁鸾, 温丽容, 等. 春节与疫情管控期间珠三角 VOCs 的组成和来源变化[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1747-1755.  
Jiang M, Yuan L, Wen L R, *et al.* Variety of the composition and sources of VOCs during the spring festival and epidemic prevention in the Pearl River Delta [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1747-1755.
- [38] 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 等. 青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1962-1973.  
Jia Z H, Gu Y, Kong C L, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment for VOCs during the ozone pollution episodes and non-ozone pollution periods in Qingdao [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 1962-1973.
- [39] Ren J, Hao Y F, Simayi M, *et al.* Spatiotemporal variation of surface ozone and its causes in Beijing, China since 2014 [J]. Atmospheric Environment, 2021, **260**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118556.
- [40] 刘岩, 李莉, 安静宇, 等. 长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 608-617.  
Liu Y, Li L, An J Y, *et al.* Emissions, chemical composition, and spatial and temporal allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014 [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 608-617.
- [41] Geng C M, Yang W, Sun X S, *et al.* Emission factors, ozone and secondary organic aerosol formation potential of volatile organic compounds emitted from industrial biomass boilers [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **83**: 64-72.

- [42] 沙青娥, 挥发性有机物组分与活性量化方法改进——以道路移动源为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
Sha Q E. Methodological improvement on speciated volatile organic compounds (VOCs) emission inventory and reactivity assessment: a case study of on-road Mobile Source[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [43] 王红丽, 杨肇勋, 景盛翱. 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2617-2628.  
Wang H L, Yang Z X, Jing S A. Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of industrial processing and solvent use emissions: a review[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2617-2628.
- [44] Sha Q E, Zhu M N, Huang H W, *et al.* A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148348.
- [45] Yao Z L, Shen X B, Ye Y, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **103**: 87-93.
- [46] Sun L N, Zhong C Z, Peng J F, *et al.* Refueling emission of volatile organic compounds from China 6 gasoline vehicles [J]. Science of the Total Environment, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147883.
- [47] Cheng X, Li H, Zhang Y J, *et al.* Atmospheric isoprene and monoterpenes in a typical urban area of Beijing: Pollution characterization, chemical reactivity and source identification [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **71**: 150-167.
- [48] Xie X, Shao M, Liu Y, *et al.* Estimate of initial isoprene contribution to ozone formation potential in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(24): 6000-6010.
- [49] 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 等. 基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4382-4394.  
Liang X M, Chen L G, Sun X B, *et al.* Raw materials and end treatment-based emission factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from typical solvent use sources [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4382-4394.
- [50] 朱燕玲, 姚玉刚, 丁黄达. 苏州市机动车尾气中主要污染物特征分析[J]. 环境监控与预警, 2019, **11**(1): 45-48.  
Zhu Y L, Yao Y G, Ding H D. Analysis of main pollutants in motor vehicle exhaust in Suzhou City [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, **11**(1): 45-48.
- [51] Tan Y, Wang T. What caused ozone pollution during the 2022 Shanghai lockdown? Insights from ground and satellite observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, **22**(22): 14455-14466.
- [52] Wang H L, Huang C, Tao W, *et al.* Seasonality and reduced nitric oxide titration dominated ozone increase during COVID-19 lockdown in eastern China [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2022, **5**(1), doi: 10.1038/s41612-022-00249-3.



## CONTENTS

|   |   |
|---|---|
| Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China .....  | LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)        |
| Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle .....                                      | REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)                                  |
| Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....                                      | TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)                   |
| Assessment of CO <sub>2</sub> Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan .....  | XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)               |
| Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province .....   | LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)            |
| Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study .....                                | ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)            |
| Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou .....  | ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)               |
| Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM <sub>2.5</sub> Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River .....                                      | ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)  |
| Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains ..... | WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)                   |
| Spatial Variability and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Carbon Components in Tianjin .....  | WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)         |
| Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> in Huaxi District, Guiyang .....  | GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)       |
| Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Xixiang, North China .....   | LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)       |
| Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018 .....  | DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)  |
| Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing .....   | PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)       |
| Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer .....   | LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)       |
| Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation .....  | WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)              |
| Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River .....               | LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)         |
| Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model .....  | CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)  |
| Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing .....   | ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)      |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin .....  | LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)          |
| Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City .....   | DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)     |
| Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xinyang Section) .....  | ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)         |
| Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia .....                           | GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)        |
| Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province .....  | ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)           |
| Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake .....   | MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)                 |
| Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years .....   | WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)  |
| Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example .....   | DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)      |
| Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin .....   | LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)            |
| Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes .....   | ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)     |
| Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process .....   | LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)                                       |
| Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water .....   | LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)          |
| Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System .....  | HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)   |
| Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index .....                 | FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)     |
| Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI .....   | ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)                             |
| Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River .....             | XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)               |
| Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis .....   | LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)    |
| Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon .....  | LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)     |
| Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil .....   | DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)    |
| Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages .....  | SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)               |
| Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River .....   | WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674) |
| Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field .....                                       | SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)   |
| Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China .....          | HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)          |
| Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland .....   | CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)       |
| Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model .....   | WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)     |
| Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin .....  | LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)                  |
| Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi .....   | YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)       |
| Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model .....   | YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)                           |
| Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province .....   | XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)           |
| Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil .....   | SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)     |
| Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province .....   | DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)          |
| Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice .....  | YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)       |
| Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor .....  | LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)                        |
| Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland .....   | XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)        |
| Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis .....   | LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)           |
| Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis .....   | LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)                 |
| Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms .....  | BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)     |
| Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River .....   | GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)      |
| Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish ( <i>Danio rerio</i> ) Embryos .....                    | YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)         |