

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析

陈木兰¹, 李振亮^{1*}, 彭超¹, 邓也², 宋丹林², 谭钦文^{2*}

(1. 重庆市生态环境科学研究院, 城市大气环境综合观测与污染防治重庆市重点实验室, 重庆 401147; 2. 成都市环境保护科学研究院, 成都市大气科研重点实验室, 成都 610072)

摘要: 2022年8月成都和重庆呈现显著的臭氧(O₃)污染差异, 成都O₃污染天高达20 d, 重庆无O₃污染天, 本文从前体物排放水平和气象条件分析此差异的影响因素。结果表明: ①成都52种挥发性有机物(VOCs)(包含26种烷烃、16种芳香烃和10种烯烃)的总体积分数(18.8×10^{-9})是重庆(6.6×10^{-9})的2.8倍, 总O₃生成潜势(OFP = 51.2×10^{-9})是重庆(25.0×10^{-9})的2.0倍, 总·OH损耗速率($L_{\cdot OH} = 3.9 \text{ s}^{-1}$)是重庆(2.3 s^{-1})的1.7倍。成都OFP前3是乙烯、间/对-二甲苯和异戊二烯; 重庆OFP前3是异戊二烯、乙烯和丙烯。重庆仅烯烃对O₃的贡献率是60.7%, 而成都烯烃和芳香烃的OFP分别是重庆的1.6倍和2.9倍。综上, 成都VOCs总体积分数、大气光化学活性和O₃生成潜势均较重庆高。②成渝两地 $L_{\cdot OH}$ 排名第1均为异戊二烯, 表明8月O₃污染生物源贡献显著, 但生物源排放活性与温度存在响应关系, 8月14~24日重庆高温(38.3℃)使得生物源排放活性下降, 而成都温度(34.9℃)加剧了生物源排放活性。③重庆水平、垂直大气扩散条件整体优于成都, 且成都受到了区域性污染传输的影响。

关键词: O₃污染; 影响因素; 传输轨迹; 前体物排放水平; O₃生成潜势

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0061-10 DOI: 10.13227/j.hjx.202301019

Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022

CHEN Mu-lan¹, LI Zhen-liang^{1*}, PENG Chao¹, DENG Ye², SONG Dan-lin², TAN Qin-wen^{2*}

(1. Key Laboratory for Urban Atmospheric Environment Integrated Observation & Pollution Prevention and Control of Chongqing, Chongqing Research Academy of Environmental Sciences, Chongqing 401147, China; 2. Chengdu Key Laboratory of Atmospheric Research, Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China)

Abstract: In August 2022, Chengdu and Chongqing showed significant differences in ozone (O₃) pollution. Chengdu had O₃ pollution days for 20 days, whereas Chongqing had no O₃ pollution days. In this study, we analyzed the influencing factors of this difference from the emission level of precursors and meteorological conditions. The results showed that: ① the total mixing ratio of 52 VOCs (volatile organic compounds) (including 26 alkanes, 16 aromatics, and 10 alkenes) in Chengdu (18.8×10^{-9}) was 2.8 times that of Chongqing (6.6×10^{-9}), and the total O₃ formation potential (OFP) (51.2×10^{-9}) was 2.0 times that of Chongqing (25.0×10^{-9}). The ·OH radical loss rate ($L_{\cdot OH}$) (3.9 s^{-1}) was 1.7 times that of Chongqing (2.3 s^{-1}). The top three OFP in Chengdu were ethylene, *m/p*-xylene, and isoprene, and those in Chongqing were isoprene, ethylene, and propylene. The contribution rate of alkenes to O₃ in Chongqing was 60.7%, whereas the OFP of alkenes and aromatics in Chengdu were 1.6 times and 2.9 times that in Chongqing. In conclusion, the total mixing ratio of VOCs, atmospheric photochemical activity, and O₃ formation potential of Chengdu were higher than those of Chongqing. ② Isoprene was ranked first place in $L_{\cdot OH}$ in both Chengdu and Chongqing, indicating that the contribution of biogenic sources to O₃ pollution in August was significant. However, the biogenic source emission activity was in response to temperature. From August 14 to 24, the high temperature in Chongqing (38.3℃) decreased biogenic source emission activity, whereas the temperature in Chengdu (34.9℃) increased the biogenic sources emission activity. ③ The horizontal and vertical atmospheric diffusion conditions of Chongqing were better than those of Chengdu, and Chengdu was affected by regional pollution transmission.

Key words: O₃ pollution; influencing factors; transmission track; precursor emission level; O₃ formation potential

近年来,我国大气PM_{2.5}(空气动力学直径≤2.5 μm的颗粒物)浓度水平显著下降,夏季O₃污染在城市环境空气质量中受到了广泛的关注^[1-3]。对流层O₃作为对人体健康有害的空气污染物^[4],在大气中由其关键前体物氮氧化物(NO_x)和VOCs通过复杂的和非线性的光化学反应产生^[5]。成渝城市群位于四川盆地,四面环山,夏秋季发生高温干旱、降雨少、静风及弱风的天气概率较高^[6],大气边界层稳定度高于同纬度地区,污染物不易扩散^[7-9],也是成渝地区O₃污染高发季节,O₃呈现区域性污染的态势^[10-12],因此成都和重庆是我国大气污染备受关注的地区之一。

影响O₃浓度既有内因本地排放源,也有外因不

利的气象条件,常利用物理-化学模型和监测数据研究O₃污染成因。Li等^[13]利用观测数据结合全球气候-化学传输模型(GEOS-Chem)模拟发现甲醛光解产生的自由基是驱动华北冬季2月O₃快速上升的主要机制;Han等^[14]利用气相-色谱质谱(GC-MS)和质子转移反应质谱仪(PTR-MS)监测发现珠三角地区含氧挥发性有机物(OVOCs)是VOCs中体积分数较高的物

收稿日期: 2023-01-04; 修订日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0214005); 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX0504); 重庆市基本科研业务费计划项目(Cqhkyl2021jxjl00004)

作者简介: 陈木兰(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境化学,E-mail: chenmulan18@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者,E-mail: zhenliangli@163.com; tanqw@cdaes.org.cn

种,对本地 O_3 生成贡献最大,甲醇为 OVOCs 中的主要成分;Huang 等^[15]利用后向轨迹模型(Hysplit)计算高空气团传输轨迹,当存在高空干净气团且长距离传输时,利于污染物的扩散,当以短距离传输为主时,加重 O_3 污染程度;Tan 等^[16]为了解成都 VOCs 的来源,利用苏玛罐采样和 GC-MS 离线分析 28 个不同类型的站点,结果表明成都 VOCs 主要来源于机动车尾气和溶剂源,而夏季生物源排放对 O_3 的贡献也相对较高;徐锟等^[17]利用长时间序列的气象监测数据发现,成都夏季高温、低湿、强辐射气象条件下利于 O_3 的生成;曹庭伟等^[11]利用国控点监测数据对比分析川渝 15 个城市,春末和夏季 O_3 污染较严重,呈区域性污染,且边界层较低的区域极易产生 O_3 污染;李陵等^[18]发现在重庆 O_3 污染期间 OVOCs 占比最高,体积分数靠前物种是甲醛、乙烯和丙酮,三者之和占比超过 30%。

2022 年 8 月成都和重庆呈现显著的 O_3 污染差异,8 月成都超标 20 d,重庆未一天超标(<https://air.cnemc.cn:18007/>)。本文利用 O_3 污染时空特征、前体物浓度水平、大气化学活性、 O_3 生成潜势、近地面气象条件和高空气团传输轨迹及污染源潜在源区,分析成都和重庆 O_3 污染差异的特征及其关键驱动因素,以期对 O_3 污染科学防控提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 采样地点

重庆采样地点位于重庆渝北区龙山小学教学楼楼顶科研观测站(29.59°N, 104.05°E),采样口离地面约 25 m;成都采样地点位于成都青羊区成都环科院楼顶超级监测站(30.65°N, 104.05°E),采样口离地面约 25 m。两个站点周围无明显建筑遮挡物,无规模以上企业等,均位于集交通干道、商业和居民混合区,是一个典型的城市站点。采样时间为 2022 年 8 月 1 日至 8 月 31 日。

1.2 仪器设备信息及数据分析

在线 VOCs 数据获取:重庆利用杭州谱育公司生产的 EXPEC 2000 获得 116 种物质(本文仅使用其中 52 种物种和成都进行对比分析)^[19,20],成都利用荷兰 SYNSPRC 公司生产的 GC955-611/811 获得 52 种物种^[21,22],包含 26 种烷烃、16 种芳香烃和 10 种烯烃。重庆仪器的检测原理为 GC-FID/MS(气相色谱-火焰离子化检测器/质谱检测器),测量原理是样品气通过预处理浓缩富集,进入 GC 分离后通过 MS 或 FID 进行测量,低碳($C_2 \sim C_5$)VOCs 样品使用 FID 检测,其余组分,比如高碳($C_6 \sim C_{12}$)和含氧 VOCs 使用 MS 检测。成都 GC955-611/811 仪器采用了双通道检测系统,低碳烃

($C_2 \sim C_5$)使用 FID 检测,高碳烃($C_6 \sim C_{12}$)使用光电离检测器(PID)进行检测。

重庆和成都的空气质量数据包括 NO_2 (二氧化氮)和 O_3 分别由美国赛默飞热电公司 i 系列气体监测仪 42i 和 49i 测得。气象数据包括温度、湿度、风向和风速,重庆由 Lufft WS502-WTB100 气象仪获得,成都由 WS600-UMB 气象仪获得。边界层高度数据重庆由安徽蓝盾光电子公司生产的 LG0-01 获得^[23,24],该仪器基于差分吸收原理,根据气溶胶粒子浓度变化的快慢,反映在激光雷达回波信号上,即回波信号的快速衰减,通过查找衰减最快的高度,得出大气边界层高度;成都边界层数据由北京怡孚和融公司生产的 EV-LIDAR-CAM 获得。

1.3 质量控制与质量保证(QA/QC)

为保证数据准确性、有效性,观测期间采取严格的质量保证和质量控制措施,参考 HJ1010-2018(环境空气挥发性有机物气相色谱连续监测系统技术要求及检测方法)中质控单元执行,利用 Spectra/Linde 标准气体进行 PAMS 标样每周一次的空白和单点校准,80% 以上的物质偏差在 20% 以内,经 AQMS-200 动态气体校准仪,利用高纯氮气将 1×10^{-6} 标气稀释成摩尔分数依次为 0.5、2、4、6、8 和 10 nmol·mol⁻¹ 的标准气体进样,每个浓度分析 3 次来校准仪器,校准相关系数均大于 0.99。热电器器通过零气和标准气体校准,采样期间零点漂移和跨度漂移测试结果范围均为 $\pm 2\%$ 之间。 O_3 激光雷达也是进行零点校准,调整底噪和背景噪声平整度,使拟合斜率 $\leq 10^{-5}$,计算饱和度或线性度,使得 $R^2 \geq 95\%$ 。

1.4 $\cdot OH$ 损耗速率和 O_3 生成潜势

利用 $\cdot OH$ 损耗速率($\cdot OH$ loss rate, L_{OH})量化污染物在大气中的化学反应活性^[25,26]:

$$L_{OH,i} = k_{OH,i} \times [VOC]_i$$

式中, $L_{OH,i}$ 表示物种 i 的 $\cdot OH$ 损耗速率, s⁻¹; $k_{OH,i}$ 表示物种 i 与 $\cdot OH$ 的反应速率常数^[27], cm³·(molecule·s)⁻¹; $[VOC]_i$ 表示 VOC 物种 i 的环境浓度, molecule·cm⁻³。

利用 VOCs 最大增量反应活性(MIR)量化 VOCs 的 O_3 生成潜势(OFP)^[25,26]:

$$OFP_i = MIR_i \times [VOC]_i$$

式中, OFP_i 表示物种 i 的 O_3 生成最大潜势, MIR 表示物种 i 的最大增量反应活性^[28], g·g⁻¹(以 O_3 /VOC 计), $[VOC]_i$ 单位为 $\times 10^{-9}$ 。

1.5 后向气团轨迹模型(Hysplit)和潜在来源贡献因子法(PSCF)

利用 Hysplit^[29]官网上(<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>)公布的气团轨迹数据,基于 Wang 等^[30,31]开发 MeteoinfoMap 软件中的 TrajStat 工具,采用

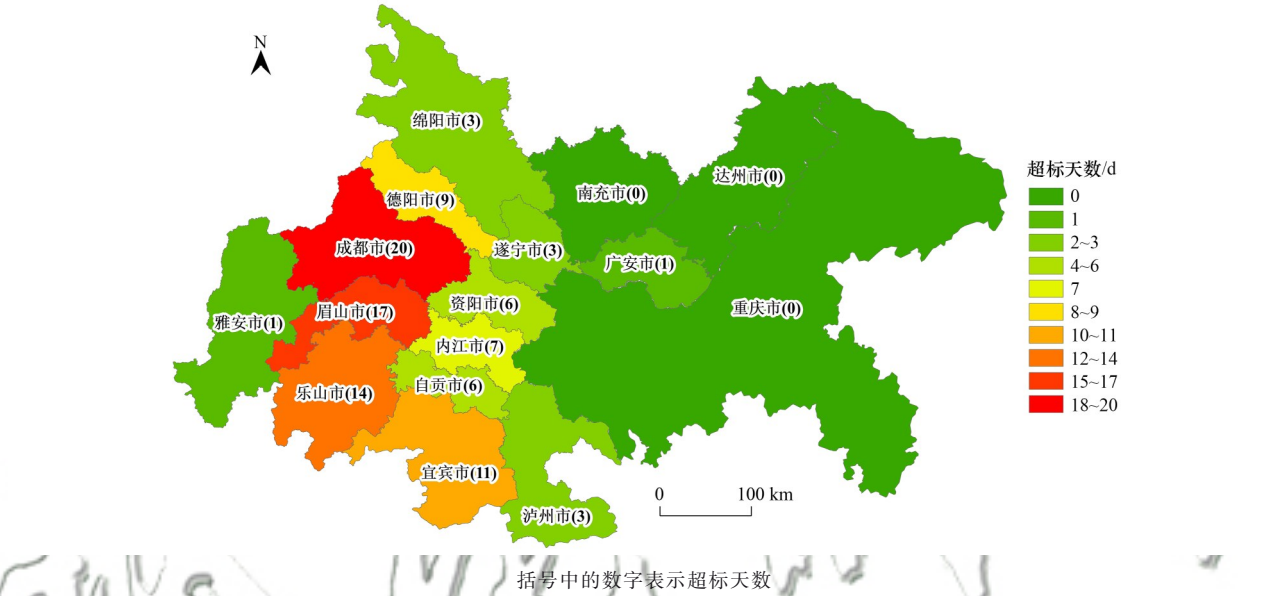
角距离轨迹聚类方法,模拟计算采样期间典型时刻(00:00、03:00、06:00、09:00、12:00、15:00、18:00和21:00)实时混合边界层中间高度的48 h 气团后向轨迹.再利用PSCF模型^[30,32]计算O₃潜在源贡献分析,该模型已广泛应用于识别监测点位大气污染物高浓度时所对应的潜在来源区域^[33~36];PSCF值越大,表明该网格区域对点位污染物浓度的影响越大.

2 结果与讨论

2.1 O₃污染时空特征

从空间分布上看,成都超标20 d(1 d重度),重庆

未一天超标.四川省O₃污染以成都为辐射中心,其中川南O₃污染较重,如眉山超标17 d(3 d中度)、乐山超标14 d(1 d中度),而紧挨重庆的川东北和川南区县,除达州和南充未一天超标,其余区县均超标1~7 d(图1).从时间上看,观测期间成都O₃-8h(指连续8 h平均浓度算术平均值的日最大8 h平均,也称8 h滑动平均)均值161 μg·m⁻³,高于国家环境空气质量二级标准(160 μg·m⁻³);重庆O₃-8h均值118 μg·m⁻³,低于国家环境空气质量二级标准,但高于国家环境空气质量一级标准(100 μg·m⁻³, <https://www.mee.gov.cn/>,图2).



括号中的数字表示超标天数
图1 2022年8月成渝城市群超标天数空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of days exceeding standard in Chengdu-Chongqing urban agglomeration (CCUA) in August 2022

城市区县	2022年8月																																
	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日	18日	19日	20日	21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日	28日	29日	30日	31		
重庆	140	147	141	136	142	119	113	139	119	127	112	106	116	129	143	128	106	107	131	121	100	132	114	107	133	114	100	101	102	64	64	优 良 轻度 中度 重度 严重	
成都	121	138	160	133	170	132	174	188	196	189	184	198	192	186	204	201	208	195	164	182	171	189	216	161	101	175	138	77	69	73	106		
自贡	168	140	159	148	131	120	132	150	163	137	112	116	139	154	184	184	147	153	205	155	114	142	158	112	156	130	129	164	60	75	96		
泸州	167	152	143	130	132	125	120	147	135	142	97	107	122	141	189	146	127	125	172	133	104	140	135	108	117	128	108	144	83	76	100		
德阳	103	155	129	95	122	125	142	166	147	202	223	166	176	159	145	149	165	171	138	201	174	142	156	126	84	134	114	75	68	99	94		
绵阳	130	147	123	80	91	128	131	153	150	174	186	145	142	142	124	148	152	155	126	170	154	134	147	155	82	109	122	63	61	91	86		
遂宁	142	152	149	135	146	129	130	136	140	142	106	131	134	133	166	185	139	143	148	169	97	135	153	118	129	131	120	106	65	74	79		
内江	172	157	170	138	141	140	146	158	170	148	114	128	155	142	207	185	142	144	210	165	120	140	156	119	152	134	120	143	60	83	90		
乐山	103	140	140	130	122	119	144	159	170	147	148	154	166	174	170	175	205	184	155	170	176	174	201	246	197	142	161	91	65	57	74		
南充	115	139	136	132	128	104	134	137	128	143	119	127	127	120	137	148	107	134	134	150	112	104	110	99	120	119	117	100	68	77	75		
眉山	102	135	132	129	153	138	152	165	175	143	158	163	173	190	196	190	233	221	204	173	191	197	200	220	173	157	184	75	70	67	91		
宜宾	166	131	142	107	132	115	137	157	169	141	131	134	153	173	168	176	176	179	162	160	125	167	176	131	176	149	154	156	69	77	92		
广安	136	176	139	138	140	126	131	148	124	126	125	114	138	114	142	128	118	124	125	129	116	116	106	115	147	147	117	120	70	60	67		
达州	107	104	106	114	151	124	106	106	101	100	106	92	96	88	159	98	94	88	111	101	97	98	80	104	119	118	86	79	53	52	52		
雅安	77	100	133	98	132	140	144	152	121	137	141	142	152	158	152	160	142	144	94	139	136	173	144	157	115	141	103	63	63	41	46		
资阳	172	130	150	144	142	140	143	153	152	168	138	142	158	138	146	182	160	158	175	174	133	135	168	142	135	143	155	109	68	84	107		

数值单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

数值单位为 μg·m⁻³
图2 2022年8月成渝城市群O₃-8h污染特征
Fig. 2 Pollution characteristics of O₃-8h in CCUA in August 2022

2.2 VOCs变化特征

2.2.1 VOCs体积分数

表1总结了观测期间重庆和成都污染物的浓度

水平,成都52种VOCs的总体积分数(18.8×10⁻⁹)明显高于重庆(6.6×10⁻⁹).烯烃和芳香烃是大气化学活性较高的物种^[26],而成都烯烃(2.6×10⁻⁹)和芳香

烃(3.0×10^{-9})分别是重庆的 1.9 倍和 2.7 倍;烷烃来源复杂且大部分活性不高^[37],成都烷烃(13.2×10^{-9})是重庆的 3.2 倍. 成都 VOCs 各组分从高到低排序为烷烃(70.3%)、芳香烃(15.9%)和烯烃(13.8%),体积分数排名前 3 为乙烷(4.4×10^{-9})、丙烷(2.8×10^{-9})和正丁烷(1.6×10^{-9}),累计占比为 39.4%;重庆和成都组分占比相似,占比最大均为烷烃(61.8%),其次烯烃(21.2%)和芳香烃(17.0%),排名前 3 为乙烷(0.9×10^{-9})、异戊烷(0.7×10^{-9})和正丁烷(0.5×10^{-9}),累计占比为 49.3%. 由此可见,成都和重庆高

体积分数组分主要以低碳数的 VOCs 为主, $C_2 \sim C_5$ 的烷烃主要来源于机动车尾气和汽油蒸发^[37,38],且观测期间成渝总 VOCs 的时序趋势和峰值时间与 NO_2 相似(图 3),机动车尾气影响显著. 异戊二烯通常作为生物源示踪物^[39],8 月 1~13 日重庆异戊二烯(0.6×10^{-9})较成都高(0.4×10^{-9}),但 8 月 14~24 日重庆异戊二烯浓度较 8 月 14 日前显著下降,约 70.9%,而成都异戊二烯浓度上升约 31.5%,8 月 14~24 日成都异戊二烯是重庆的 1.4 倍(图 3);生物源活性差异可能也是成渝两地 O_3 污染差异成因之一.

表 1 观测期间重庆和成都 O_3 和 NO_2 浓度水平以及 VOCs 体积分数
Table1 Concentration levels of O_3 and NO_2 and the mixing ratio of VOCs in Chongqing and Chengdu during the observation period

位置	$\rho(O_3)$ / $\mu g \cdot m^{-3}$	$\rho(NO_2)$ / $\mu g \cdot m^{-3}$	$\varphi(\text{烷烃}) \times 10^{-9}$	$\varphi(\text{烯烃}) \times 10^{-9}$	$\varphi(\text{芳香烃}) \times 10^{-9}$	$\varphi(\text{异戊二烯}) \times 10^{-9}$
重庆	81.1 ± 24.7	16.9 ± 10.3	4.1 ± 3.1	1.4 ± 0.8	1.1 ± 0.6	0.5 ± 0.2
成都	111.4 ± 42.0	23.9 ± 9.2	13.2 ± 5.0	2.6 ± 0.7	3.0 ± 1.4	0.4 ± 0.2

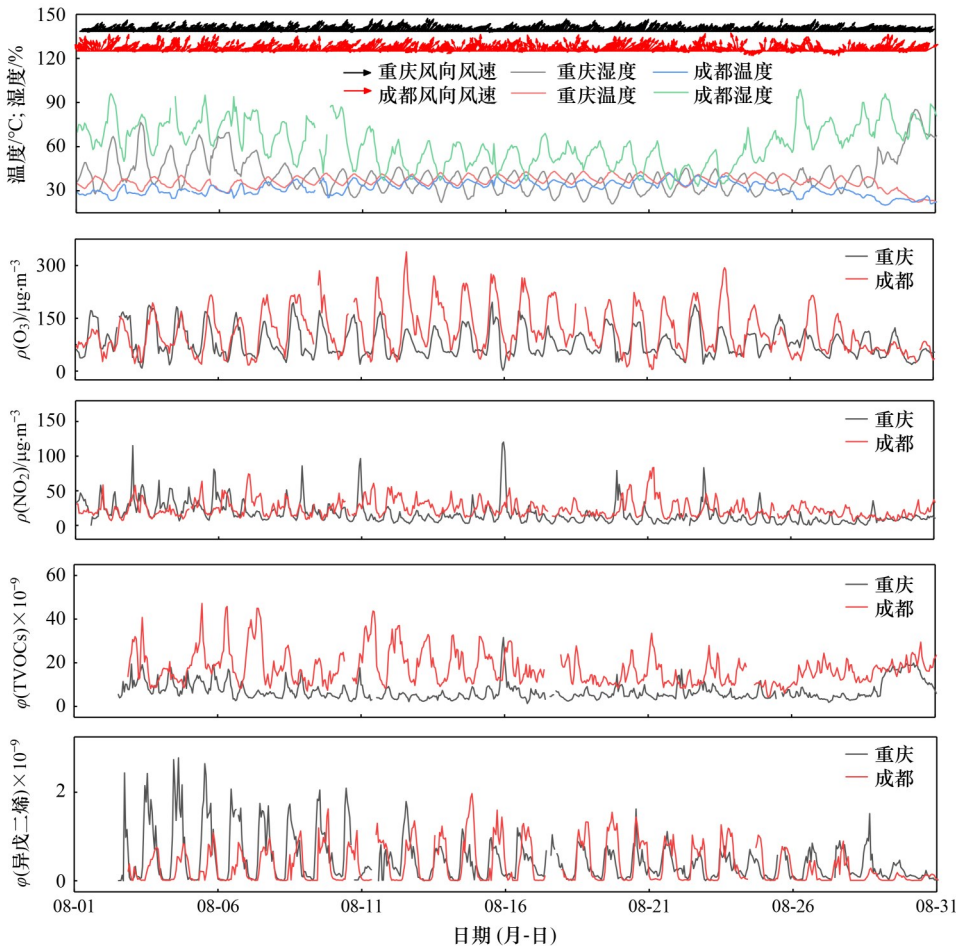


图 3 观测期间重庆和成都的温湿度、风速风向、 O_3 、 NO_2 、TVOCs 和异戊二烯时间序列变化
Fig. 3 Temperature and humidity, wind speed and direction, O_3 , NO_2 , TVOCs and isoprene time series in Chongqing and Chengdu during the observation period

2.2.2 日变化规律

图 4 比较了重庆和成都 O_3 、 NO_2 和 VOCs 各组分的日变化趋势,成渝两地 O_3 均呈现单峰态势, NO_2 呈

双峰态势. 从 VOCs 各组分上看,成都呈现夜间高、日间低和双峰的特征,表明夜间存在一次源,而日间低是受到大气氧化反应的影响. 而重庆 VOCs 在

08:00~10:00有明显的峰值,与 NO_2 日变化时间同步,是交通源所致;重庆夜间 NO_2 浓度峰值较成都高,也是日最大值,这可能与夜间大货车运行有关。芳香烃作为主要的人为源非甲烷挥发性有机物(NMHCs),成都芳香烃在04:00~12:00维持在较高水平,除早高峰交通源贡献外,还受到了溶剂使用源的影响,这与Tan等^[16]的研究结果相似,而在重庆主要是来源于机动车尾气^[18]。异戊二烯主要由生物源在日间排放,在10:00~11:00排放速率达到最高,迅速升高接近日最高值,与 O_3 的日变化趋势相似。

2.2.3 L_{OH} 和OFP

成都总OFP为 51.2×10^{-9} ,其中烷烃、烯烃和芳香烃的OFP分别为 10.9×10^{-9} 、 24.6×10^{-9} 和 15.7×10^{-9} ;总 L_{OH} 为 3.9 s^{-1} ,烷烃、烯烃和芳香烃的 L_{OH} 分别为0.5、2.5和 0.9 s^{-1} 。重庆总OFP为 25.0×10^{-9} ,烷烃、烯烃和芳香烃的OFP分别为 4.4×10^{-9} 、 15.2×10^{-9} 和 5.4×10^{-9} ;总 L_{OH} 为 2.3 s^{-1} ,烷烃、烯烃和芳香烃的 L_{OH} 分别为0.2、1.8和 0.3 s^{-1} 。对比结果显示成都的大气光化学活性更强, O_3 生成潜势也更高;OFP显示成都烯烃和苯系物的占比分别达48.1%和30.1%,而重庆仅烯烃就占比60.7%。

从图5可知,成都 L_{OH} 、OFP和VOCs体积分数排放前10的物种都包括乙烯、甲苯、间/对-二甲苯和1-己烯,而重庆都包括异戊二烯、乙烯、甲苯和间/对-二甲苯。成都和重庆 L_{OH} 排名第1均为异戊二烯,成都异戊二烯(1.0 s^{-1})的 L_{OH} 占比为26.0%,而重庆仅异戊二烯(1.2 s^{-1})的 L_{OH} 就占比50.9%。成都 L_{OH} 排名前10中,7种烯烃累计占比为59.3%,3种芳香烃

累计占比为15.6%。重庆 L_{OH} 排名前10中,6种烯烃累计占比为74.5%,3种芳香烃累计占比为8.3%和1种烷烃占比为1.4%。成都OFP前3(乙烯、间/对-二甲苯和异戊二烯)累计占比为37.8%,重庆OFP前3(异戊二烯、乙烯和丙烯)累计占比为44.5%。与 L_{OH} 形成对比的是,成都OFP前10中,6中烯烃累计占比为42.9%,3种芳香烃累计占比为24.2%和1种烷烃占比为3.8%;重庆OFP前10种,5种烯烃累计占比为56.0%,3种芳香烃累计占比为16.1%和2种烷烃累计占比为6.5%,表明烯烃在成渝两地 L_{OH} 和OFP占主导地位。综上,成渝应重点管控烯烃排放源,但芳香烃对成都 O_3 生成的影响也不可忽略,芳香烃不仅对 O_3 生成潜势大,也对二次气溶胶的生成有着较强的优势^[40]。

2.2.4 特征比值

利用特征比值法初步分析成渝大气VOCs来源差异。成都 $\text{C}_3 \sim \text{C}_6$ 烷烃之间的相关性较好(r^2 为0.6~0.9),丙烷和丁烷是液化石油气(LPG)的主要成分,也是成都体积分数较高的物种,成都丙烷/异丁烷(2.9)和丙烷/正丁烷(1.9)与LPG排放比(分别为3~7和2~4)相似^[41],而重庆分别为1.4和0.7,表明成都液化石油气使用率高于重庆。当甲苯/苯(T/B)小于1时,燃煤或生物质影响更大^[41];T/B小于2,机动车尾气为主要贡献源;T/B大于5,被认为受工业、溶剂源等影响明显。异戊烷/正戊烷(I/N)在0.56~0.80之间时,燃煤贡献占主导^[42];I/N在2.2~3.8之间时机动车尾气占主导;I/N在1.8~4.6之间时溶剂源占主导^[43,44]。重庆和成都T/B分别为1.7和2.7,这表明重

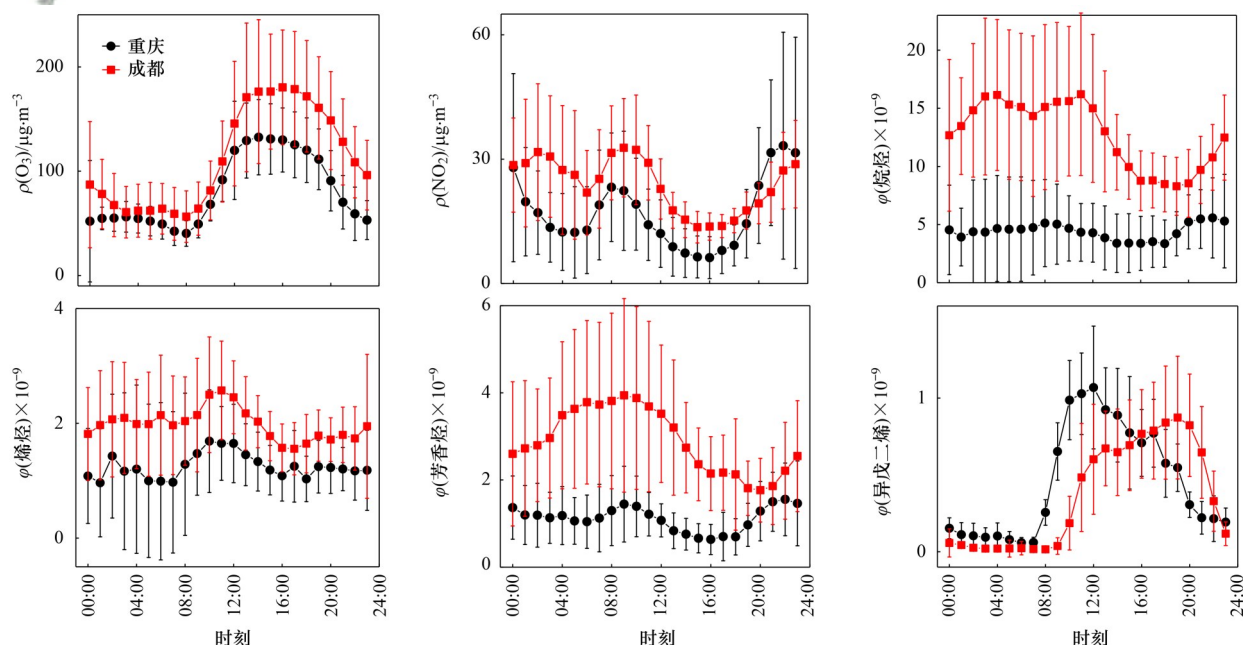


图4 观测期间重庆和成都 O_3 、 NO_2 和VOCs日变化趋势对比

Fig. 4 Comparison of diurnal variation trends of O_3 , NO_2 and VOCs between Chongqing and Chengdu during the observation period

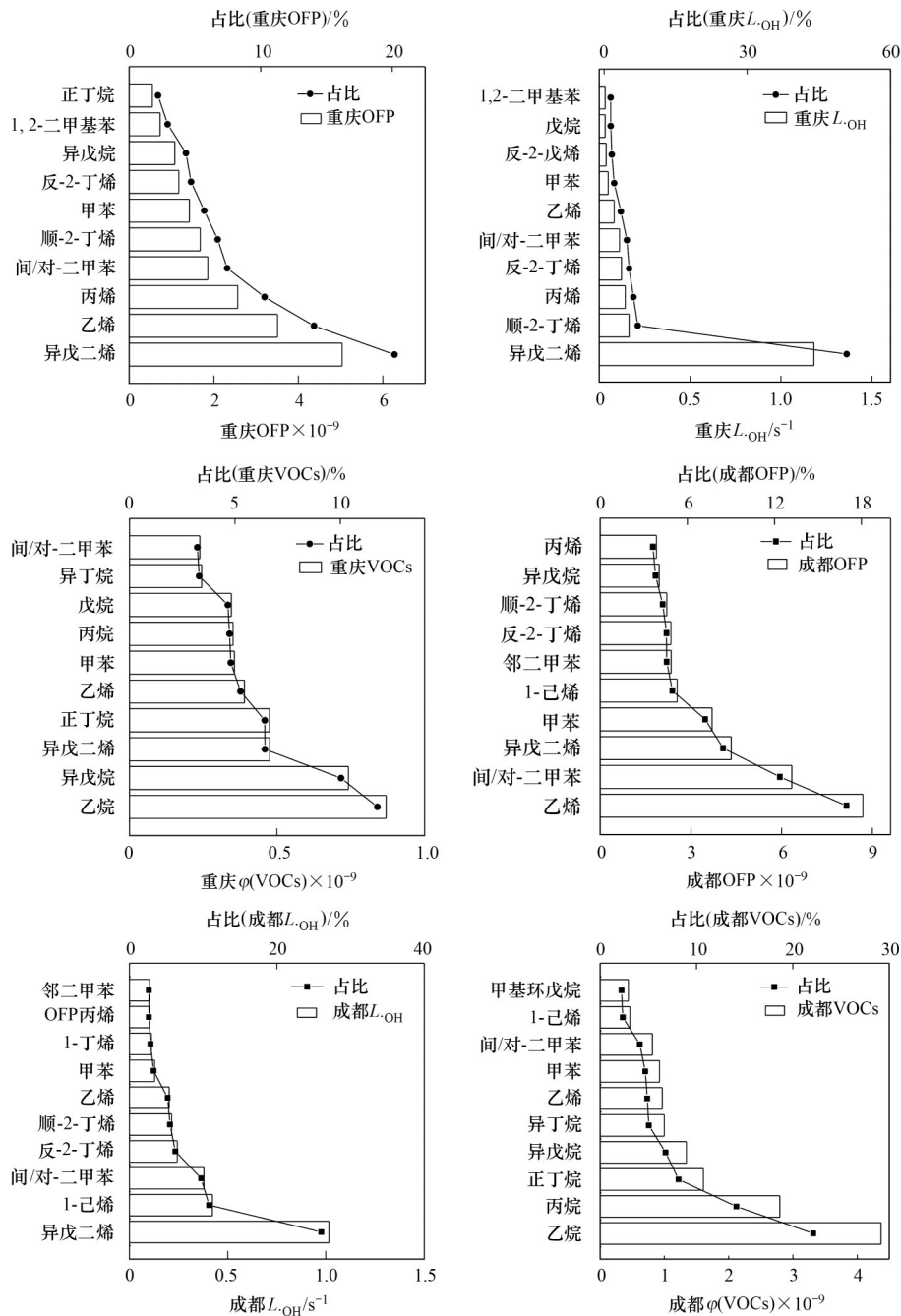


图5 观测期间重庆和成都 OFP、 L_{OH} 和 VOCs 体积分数排名前 10 位及其占比的物种

Fig 5 Top 10 OFP, L_{OH} and mixing ratios of VOCs and their percentages in Chongqing and Chengdu during the observation period

庆主要受机动车尾气的影响大;重庆 I/N 为 2.5,成都 I/N 为 5.3,表明成都受机动车尾气和溶剂源的共同影响。

2.3 近地面气象条件和高空气团传输

表2是观测期间成都和重庆的气象参数,重庆温度高于成都,湿度较成都低,可能会影响生物源 VOCs 的排放^[45]。O₃与温度呈非线性关系,温度是影响对流层瞬时 O₃生成速率多重因素中的主要天气变量^[46~48]。因 O₃仅在白天光化学反应生成,选取 07:00~19:00 的数据^[15],利用非线性拟合发现随温度上升、湿度下降(重庆 $r^2 = 0.88$,成都 $r^2 = 0.75$,图6),O₃

浓度明显呈先升后降的趋势。当重庆($r^2 = 0.49$)温度超过 39.1℃和湿度低于 39.3%时 O₃浓度开始下降;当成都($r^2 = 0.70$)温度超过 37.3℃和湿度低于 48.4%时 O₃浓度开始下降。8月14~24日成渝两地异戊二烯浓度存在差异,期间成都异戊二烯呈上升趋势,而重庆异戊二烯呈下降趋势(图3),生物源排放活性与温湿度存在响应关系^[45]。对比此期间成渝两地的温湿度发现,期间成都温度 34.9℃,湿度 51.8%,未达到成都 O₃浓度下降的温湿度环境;重庆温度 38.3℃,湿度 33.1%,接近重庆 O₃浓度下降的温湿度环境。因此,8月成渝生物源活性存在差异可能

是由不同的温湿度环境所造成,温湿度也是影响成渝 O₃ 污染存在差异的成因之一。

重庆边界层高度(2.2 km)是成都(0.7 km)的 3.1 倍,这表明重庆的垂直大气扩散条件较成都好(表 2)。利用 HYSPLIT 和 PSCF 计算高空气团传输轨迹和

O₃ 潜在源贡献水平(图 7),总体来看,重庆水平大气扩散条件较成都好。观测期间重庆以中长距离传输为主,来自贵州和云南的气团占比约 57.0%,上风向大气污染源分布较少,大气扩散条件较好;PSCF 显示 O₃ 高值点出现在綦江和巴南方向的轨迹上(24.4%)。成都以短距离传输为主(58.1%),轨迹较短,且“回旋”轨迹占比 8.9%,PSCF 显示 O₃ 高值点主要出现在川南气团(42.0%)和德阳(16.7%)回旋气团上,成都气团传输轨迹与川渝 O₃ 空间分布的结果相似(图 1),成都上风向的川南城市群和成都平原城市群大气污染源

表 2 观测期间成都和重庆的气象数据

Table2 Meteorological data of Chengdu and Chongqing during the observation period

位置	温度/℃	湿度/%	风速/m·s ⁻¹	边界层/km
重庆	35.9±4.0	41.1±11.7	0.7±0.2	2.2±0.7
成都	31.7±4.3	61.8±12.6	1.2±0.8	0.7±0.3

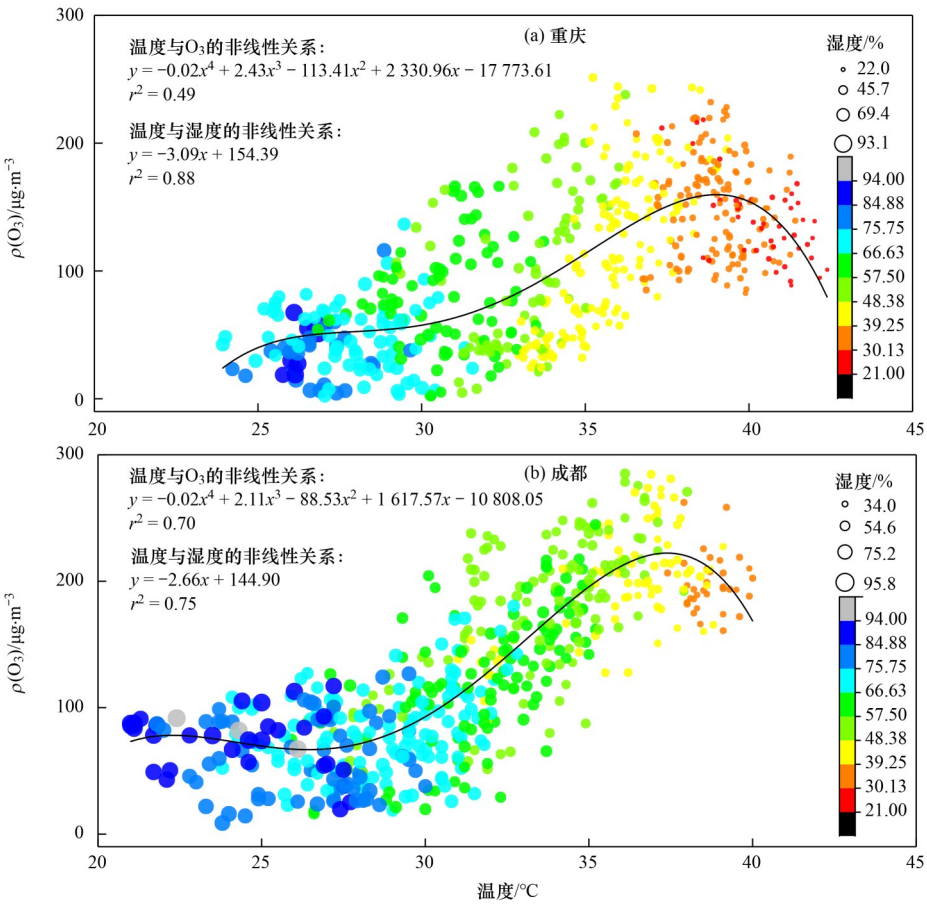


图 6 重庆和成都 O₃ 与温湿度的非线性关系

Fig. 6 Nonlinear relationship between O₃ and temperature and humidity in Chongqing and Chengdu

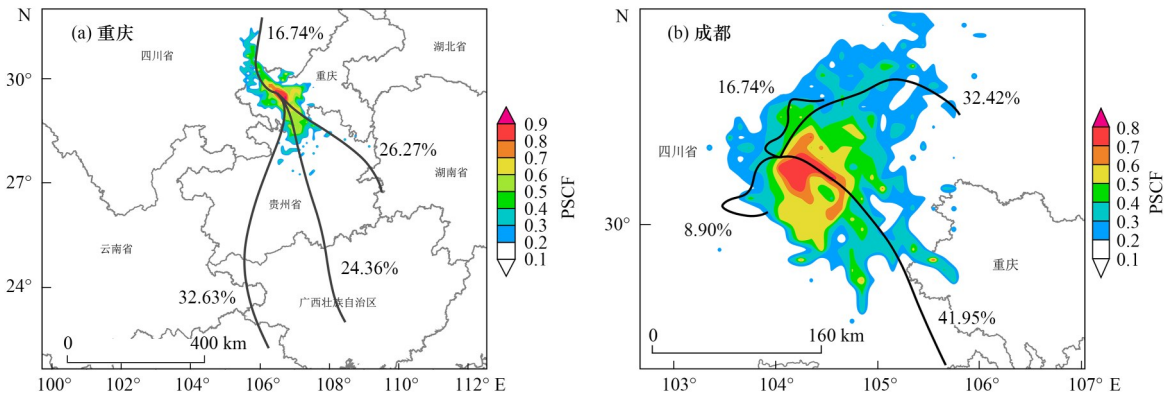


图 7 观测期间重庆和成都 O₃ 污染主要传输轨迹及其潜在源贡献

Fig. 7 Main transmission trajectories and potential contributions of O₃ pollution over Chongqing and Chengdu during the observation period

分布比较密集^[33],致使成都周边存在O₃区域性污染的态势.因此,重庆较成都垂直和水平大气扩散条件好,是导致夏季成渝两地O₃污染差异的成因之一.

3 结论

(1)观测期间成都VOCs的总体积分数(18.8×10^{-9})明显高于重庆(6.6×10^{-9}),成都和重庆高体积分数物种均以低碳数VOCs为主,优势组分也均为烷烃;成都体积分数前3为乙烷、丙烷和正丁烷,累计占比为39.4%;重庆体积分数排名前3为乙烷、异戊烷和正丁烷,累计占比为49.3%.

(2)成都总OFP(51.2×10^{-9})是重庆(25.0×10^{-9})的2.0倍, L_{OH} ($3.9 s^{-1}$)是重庆($2.3 s^{-1}$)的1.7倍,表明成都的大气光化学活性更强,O₃生成潜势也更高.成渝两地 L_{OH} 排名第1均为异戊二烯,成都OFP前3是乙烯、间/对-二甲苯和异戊二烯,重庆前3是异戊二烯、乙烯和丙烯,表明夏季O₃污染生物源贡献显著,烯烃是两地O₃污染主要贡献源,但芳香烃对成都的影响也不可忽略.此外,成都C₃~C₆烷烃之间的相关性较好,丙烷/丁烷的比值与LPG排放比相似,且烷烃日变化峰值与NO₂同步,表明成都VOCs受机动车尾气的影响显著.T/B和I/N显示重庆主要受机动车的影响,而成都受机动车和溶剂源的共同影响.

(3)气象条件的差异导致成渝两地生物源活性不同,8月14~24日重庆平均温度38.3℃使得生物源排放活性有所下降.重庆边界层高度(2.2 km)是成都(0.7 km)的3.1倍;重庆高空气团以中长距离传输为主,成都以短距离传输为主,轨迹较短且有“回旋”,总体上看,重庆水平和垂直大气扩散条件均较成都好.

参考文献:

- [1] Xiang S L, Liu J F, Tao W, *et al.* Control of both PM_{2.5} and O₃ in Beijing-Tianjin-Hebei and the surrounding areas[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117259.
- [2] Zhao S P, Yin D Y, Yu Y, *et al.* PM_{2.5} and O₃ pollution during 2015-2019 over 367 Chinese cities: spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114694.
- [3] Wu Z Y, Zhang Y Q, Zhang L M, *et al.* Trends of outdoor air pollution and the impact on premature mortality in the Pearl River Delta region of southern China during 2006-2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**: 248-260.
- [4] Jerrett M, Burnett R T, Pope C A, *et al.* Long-term ozone exposure and mortality [J]. *New England Journal of Medicine*, 2009, **360**(11): 1085-1095.
- [5] Rasmussen D J, Hu J L, Mahmud A, *et al.* The ozone - climate penalty: past, present, and future [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 14258-14266.
- [6] 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2006年川渝地区高温干旱特征及其成因分析[J]. *气候与环境研究*, 2007, **12**(3): 464-474.
- [7] Peng J B, Zhang Q Y, Bu H C L. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan-Chongqing Region in 2006 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2007, **12**(3): 464-474.
- [8] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Horizontal visibility trends in China 1981-2005 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(24), doi: 10.1029/2007GL031450.
- [9] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群O₃污染成因和关键VOCs活性解析[J]. *科学通报*, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- [10] Jiang M L, 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.
- [11] Yang X Y, Wu K, Lu Y Q, *et al.* Origin of regional springtime ozone episodes in the Sichuan Basin, China: role of synoptic forcing and regional transport [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116845.
- [12] 蒋婉婷, 谢汶静, 王碧菡, 等. 2014—2016年四川盆地重污染大气环流形势特征分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 180-188.
- [13] Jiang W T, Xie W J, Wang B H, *et al.* Analysis on the characteristics of heavy pollution atmospheric circulation in the Sichuan Basin from 2014 to 2016 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 180-188.
- [14] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- [15] Cao T W, Wu K, Kang P, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- [16] 张天岳, 沈楠驰, 赵雪, 等. 2015—2019年成渝城市群臭氧浓度时空变化特征及人口暴露风险评价[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(10): 4188-4199.
- [17] Zhang T Y, Shen N C, Zhao X, *et al.* Spatiotemporal variation characteristics of ozone and its population exposure risk assessment in Chengdu-Chongqing urban agglomeration during 2015 to 2019 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(10): 4188-4199.
- [18] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Ozone pollution in the North China Plain spreading into the late-winter haze season [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**(10), doi: 10.1073/pnas.2015797118.
- [19] Han C, Liu R R, Luo H, *et al.* Pollution profiles of volatile organic compounds from different urban functional areas in Guangzhou China based on GC/MS and PTR-TOF-MS: atmospheric environmental implications [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **214**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116843.
- [20] Huang X F, Zhang B, Xia S Y, *et al.* Sources of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) in urban atmospheres in North and South China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114152.
- [21] Tan Q W, Liu H F, Xie S D, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and source origins of volatile organic compounds in a megacity of Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Research*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109478.
- [22] 徐锟, 刘志红, 何沐全, 等. 成都市夏季近地面臭氧污染气象特征[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(5): 36-45.
- [23] Xu K, Liu Z H, He M Q, *et al.* Meteorological characteristics of O₃ pollution near the ground in summer of Chengdu [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(5): 36-45.
- [24] 李陵, 李振亮, 张丹, 等. 重庆市主城区O₃污染时期大气

- VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3595-3603.
- Li L, Li Z L, Zhang D, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs during ozone pollution period in the main urban area of Chongqing[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3595-3603.
- [19] 张涛, 王新明, 周炎, 等. VOCs在线监测设备数据识别能力的评估方法及应用[J]. 环境工程学报, 2021, **15**(1): 298-306.
- Zhang T, Wang X M, Zhou Y, *et al.* Evaluation method and application of data recognition capability of VOCs online monitoring equipment[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15**(1): 298-306.
- [20] 梁思远, 王帅, 高松, 等. 北京市城区挥发性有机物污染特征及其对臭氧影响分析[J]. 中国环境监测, 2021, **37**(6): 21-30.
- Liang S Y, Wang S, Gao S, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and its impact on O₃ formation in Beijing Urban Area[J]. Environmental Monitoring in China, 2021, **37**(6): 21-30.
- [21] 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 等. 基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1799-1807.
- Lin X, Yan R C, Jin J J, *et al.* Coordinated control of PM_{2.5} and O₃ in Hangzhou based on SOA and O₃ formation potential[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1799-1807.
- [22] 翟崇治, 刘芮伶, 余家燕, 等. 重庆城区大气VOCs的浓度变化特征与臭氧生成潜势[J]. 环境影响评价, 2013, (6): 45-49, 53.
- [23] 范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. 中国激光, 2014, **41**(10): 247-254.
- Fan G Q, Zhang T S, Fu Y B, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, **41**(10): 247-254.
- [24] 王琳, 谢晨波, 韩永, 等. 测量大气边界层高度的激光雷达数据反演方法研究[J]. 大气与环境光学报, 2012, **7**(4): 241-247.
- Wang L, Xie C B, Han Y, *et al.* Comparison of retrieval methods of planetary boundary layer height from lidar Data[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, **7**(4): 241-247.
- [25] Wu F K, Yu Y, Sun J, *et al.* Characteristics, source apportionment and reactivity of ambient volatile organic compounds at Dinghu Mountain in Guangdong Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **548-549**: 347-359.
- [26] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China[J]. Atmospheric Environment, 2018, **192**: 55-71.
- [27] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds[J]. Chemical Reviews, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [28] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. Air & Waste, 1994, **44**(7): 881-899.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Wang Y Q. MeteInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis[J]. Meteorological Applications, 2014, **21**(2): 360-368.
- [32] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China[J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 757-769.
- [33] 蒲茜, 李振亮, 曹云擎, 等. 重庆市2015—2020年秋冬季PM_{2.5}污染传输路径与潜在源贡献分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(5): 49-59.
- Pu X, Li Z L, Cao Y Q, *et al.* Transport pathways and potential source contribution of PM_{2.5} pollution in Chongqing from 2015 to 2020[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(5): 49-59.
- [34] 宋梦迪, 冯森, 李歆, 等. 成都市臭氧重污染成因与来源解析[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(3): 1057-1065.
- Song M D, Feng M, Li X, *et al.* Causes and sources of heavy ozone pollution in Chengdu[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(3): 1057-1065.
- [35] Liao T T, Wang S, Ai J, *et al.* Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China)[J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 1056-1065.
- [36] Sen A, Abdelmaksoud A S, Nazeer Ahammed Y, *et al.* Variations in particulate matter over Indo-Gangetic Plains and Indo-Himalayan Range during four field campaigns in winter monsoon and summer monsoon: role of pollution pathways[J]. Atmospheric Environment, 2017, **154**: 200-224.
- [37] 张敬巧, 吴亚君, 李慧, 等. 廊坊开发区秋季VOCs污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3186-3192.
- Zhang J Q, Wu Y J, Li H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in autumn in Langfang development zones[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3186-3192.
- [38] 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5316-5324.
- Xu C X, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds pollution in summer in Chengdu[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5316-5324.
- [39] Guenther A B, Zimmerman P R, Harley P C, *et al.* Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, **98**(D7): 12609-12617.
- [40] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气VOCs对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 424-433.
- Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 424-433.
- [41] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban centers of the Pearl River Delta (PRD) region: Guangzhou and Dongguan[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(18): 4393-4408.
- [42] 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.
- [43] Russo R S, Zhou Y, White M L, *et al.* Multi-year (2004-2008) record of nonmethane hydrocarbons and halocarbons in New England: seasonal variations and regional sources [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(10): 4909-4929.
- [44] Velasco E, Lamb B, Westberg H, *et al.* Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, **7**(2): 329-353.
- [45] Seco R, Holst T, Davie-Martin C L, *et al.* Strong isoprene emission response to temperature in tundra vegetation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, **119** (38), doi: 10.1073/pnas.2118014119.
- [46] Mahmud A, Tyree M, Cayan D, *et al.* Statistical downscaling of climate change impacts on ozone concentrations in California [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, **113** (D21), doi: 10.1029/2007JD009534.
- [47] Pusede S E, Steiner A L, Cohen R C. Temperature and recent trends in the chemistry of continental surface ozone [J]. Chemical Reviews, 2015, **115**(10): 3898-3918.
- [48] Steiner A L, Tonse S, Cohen R C, *et al.* Influence of future climate and emissions on regional air quality in California [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, **111** (D18), doi: 10.1029/2005JD006935.

欢迎订阅 2024 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发刊,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

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