

目 次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于 LEAP 模型的工业园区碳达峰路径: 以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析: 以北京 A 高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率: 来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)
2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季 PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物 PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀 PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区 VOCs 污染特征及健康风险评估案例: 高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域锑富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP 和 XGBoost 的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析

雷丽娟^{1,2}, 张懿³, 罗伊娜¹, 张潇¹, 冯森^{1*}

(1. 成都市环境保护科学研究院, 成都 610072; 2. 无锡中科光电技术有限公司, 无锡 214135; 3. 四川省生态环境科学研究院, 成都 610041)

摘要: 基于气象再分析资料及成都市芳邻路站点大气综合观测数据, 采用PMF、PSCF和CWT等方法对成都市2022年发生的一次持续性臭氧(O₃)污染过程进行分析。结果表明, 本次污染过程持续了18 d, O₃浓度最大8 h平均值第90百分位数达242.62 μg·m⁻³。由于副热带高压强大且长时间控制四川, 气温屡创新高, 成都市日最高温度达到41.63℃, 异常持久高温强辐射为O₃生成提供有利气象条件。面对持续高温干旱灾害性天气影响, 四川电网面临极其严峻的保供形势, 污染期间四川省多地出现不同程度的让电于民。分析对比让电前后空气质量科研数据发现: ①让电后O₃前体物NO₂和VOCs浓度均有不同程度降低, O₃浓度削峰效果较好; ②让电后大气反应活性OFP和L_{OH}中烷烃和芳香烃贡献率均下降, 但贡献前10物种贡献率较让电前提高, 主要是因为高温所致植物排放异戊二烯增加; ③从源解析结果来看, 让电前后移动源、工业源和油气挥发源贡献率基本不变, 天然源贡献率上升, 溶剂源贡献率下降; ④让电前成都近郊短距离传输叠加眉山一带传输对成都有影响, 强潜在源位于主城区偏东区域, 让电后潜在源区域缩小、强潜在源弱化、影响减弱, 由此可见联防联控对成都市O₃污染防治作用较大。

关键词: 高温极端天气; 臭氧污染; 让电于民; 正定矩阵因子分解法(PMF); 潜在源贡献因子法(PSCF); 浓度轨迹加权法(CWT)

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2028-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305021

Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes

LEI Li-juan^{1,2}, ZHANG Yi³, LUO Yi-na¹, ZHANG Xiao¹, FENG Miao^{1*}

(1. Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China; 2. Wuxi Cas Photonics Co., Ltd., Wuxi 214135, China; 3. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on meteorological reanalysis data and comprehensive atmospheric observation data from the Fanglin Road site in Chengdu, the positive matrix factorization (PMF), potential source contribution function (PSCF), and concentration weighted trajectory (CWT) methods were used to analyze a continuous ozone pollution process in Chengdu in 2022. The results showed that the process lasted 18d, with a maximum 8h mean 90th percentile O₃ concentration of 242.62 μg·m⁻³. Owing to the strong and prolonged control of Sichuan by the subtropical high pressure, temperatures reached record highs, with a daily maximum temperature of 41.63℃ in Chengdu. The unusually high and persistent temperatures and strong radiation provided favorable meteorological conditions for ozone production. In the face of the catastrophic effects of persistent high temperatures and drought, the Sichuan power grid faced an extremely challenging situation to maintain supply. During the pollution period, power restrictions of varying degrees occurred in many parts of Sichuan province. In this study, we found that: ① concentrations of the ozone precursors NO₂ and VOCs were reduced to varying degrees after the power restriction, and the O₃ concentrations had a good peak-shaving effect. ② The proportion of alkanes and aromatic hydrocarbons in the atmospheric reactivity ozone formation potential (OFP) and ·OH radical loss rate (L_{OH}) decreased after the power restriction, but the proportion of the top ten contributing species increased compared with that before the power restriction, mainly due to the increase in isoprene emission from plants caused by high temperature. ③ From the source analysis results, the contribution of mobile sources, industrial sources, and oil and gas volatile sources remained the same before and after the power restriction, whereas the contribution of natural sources increased and that of solvent sources decreased. ④ Before the power restriction, the short-range transmission in the suburbs of Chengdu and the transmission around Meishan had an impact on Chengdu; however, after the power restriction, the potential source area was narrowed, the strong potential source weakened, and the impact weakened, which indicated that joint prevention and control had a greater effect on ozone pollution prevention and control in Chengdu.

Key words: high temperature extremes; ozone pollution; power rationing; positive matrix factorization (PMF); potential source contribution function (PSCF); concentration weighted trajectory (CWT)

国务院“大气十条”实施之后, 全国重点城市空气质量得到了明显改善, 其中PM_{2.5}浓度下降显著, 但以O₃为标志的区域性大气复合污染问题日益突出, 尤其是在以京津冀、长江三角洲(长三角)、珠江三角洲(珠三角)和成渝地区为主的特大型城市群及其周边地区O₃污染形势不容乐观^[1~4], O₃污染事件多发, 成为影响城市空气质量的主要污染之

—^[5]。城市地区O₃主要来源大致分为全球背景、区域输送和本地生成这3个方面^[6]。而O₃转化生成的机制受前体物类别多、气象及环境因素复杂^[7]等影响依

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42175124)

作者简介: 雷丽娟(1992~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 764592692@qq.com

* 通信作者, E-mail: fengm@cdaes.org.cn

旧是现今研究的热点. 已知近地面 O_3 主要来源于氮氧化合物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)在太阳紫外辐射下, 经过一系列复杂的链式光化学反应生成^[8,9], VOCs 按照化学结构的不同, 可以分为: 烷烃类、烯烃类、芳香烃类、卤代烃类、酯类、醛类和酮类等; 其来源则包括: 机动车、工业排放、溶剂使用、植物排放及固定燃烧源等多种来源^[10-12]. 且目前, 对 O_3 持续污染过程形成机制的研究仍较少.

四川盆地受独特的地理环境影响, 具备静风频次高、大气湿度高和逆温频现等不利气象条件. 2022年夏季, 受副热带高压异常稳定影响, 四川盆地出现了持续高温的极端天气. 成都市作为四川盆地超大城市^[13,14], 于2022年8月7~24日发生了一次持续时间长达18 d的 O_3 污染事件. 本次污染期间, 成都市及周边区域启动了重污染天气黄色预警, 叠加受少雨、干旱及高温影响而出台的“让电于民”举措, 为研究不同气象环境和排放影响下的 O_3 污染成因提供了重要案例. 因此, 本研究基于气象再分析资料、成都市芳龄路站点观测数据等, 从大气环流背景场及气象要素与 O_3 的关系、对比让电前后前体物浓度变化特征、污染来源及传输等方面对此次过程进行深入剖析, 以期对成都市 O_3 污染防治及空气质量改善提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

监测数据来源于成都市芳龄路站点(30.65°N, 104.05°E)逐小时观测资料, 包括常规污染物 NO_2 和 O_3 、气象因素温度、湿度和风速以及 VOCs 数据等. 气象数据还包括美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分析资料(FNL)以及全球数据同化系统 GDAS 数据. 缺失数据为停电、仪器运维后去除所致.

1.2 VOCs 反应活性

VOCs 反应活性(VOCs reactivity)指的是有机物生成 O_3 的潜势. 目前, 对 VOCs 物种反应活性的研究主要有 O_3 生成潜势^[15]、羟基消耗速率^[16]和等效丙烯浓度^[17]等. 本研究采用最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)和 $\cdot OH$ 消耗速率两种方法对大气中 VOCs 反应活性进行计算.

OFP 为某种挥发性有机物环境浓度与该物种的 MIR 系数的乘积, 计算公式为:

$$OFP_i = MIR_i \times [VOCs]_i \quad (1)$$

式中, OFP_i 为某 VOCs 物种 i 的生成 O_3 的潜势, $\times 10^{-9}$; MIR_i 为某挥发性有机物 i 的最大增量反应活性; $[VOCs]_i$ 为实际观测中的某挥发性有机物 i

的体积分数, $\times 10^{-9}$.

$L_{i\cdot OH}$ 为某种挥发性有机物环境浓度与该物种的 K 系数的乘积, 计算公式为:

$$L_{i\cdot OH} = K_i^{\cdot OH} \times [VOCs]_i \quad (2)$$

式中, $L_{i\cdot OH}$ 为 VOCs 中物种 i 的 $\cdot OH$ 消耗速率, s^{-1} ; $[VOCs]_i$ 为实际观测中的某挥发性有机物 i 的浓度, $\times 10^{-9}$; $K_i^{\cdot OH}$ 为物种 i 与 $\cdot OH$ 的反应速率, $10^9 s^{-1}$.

1.3 正定矩阵因子分解法(PMF)

正定矩阵因子分解法, 是由 Paatero 等提出的一种数据分析方法, 假设受体点测量的污染物环境浓度是不同污染源排放的各组分的线性加和^[18]. PMF 是受体模型, 其数据序列由样品数目以及污染物种类 2 个矩阵所构成, 从所得到的观测数据中选择观测物种的数据作为模型输入, 运用矩阵内嵌的分析方法, 得到 VOCs 不同来源的源谱及不同源对不同污染物组分的贡献. 计算公式为:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (3)$$

式中, x_{ij} 为第 j 个污染物于第 i 个样品中的浓度; g_{ik} 为第 k 个源在 i 个样品中对该污染物的贡献; f_{kj} 为第 k 个源对所有样品中第 j 个污染物的贡献; e_{ij} 为所对应的残差; p 为源的个数. 本研究选取相对浓度较高的和具有代表性的物种, 共 24 个物种进行源解析.

1.4 潜在源贡献因子(PSCF)和浓度轨迹加权法(CWT)

潜在源贡献因子(PSCF)算法, 也称为滞留时间分析法, 是一种根据气流轨迹分析辨别源区的方法^[19]. 该方法基于 HYSPLIT 模型所计算的后向轨迹在空间中的停留时间, 通过污染过程与所有轨迹在途经区域所停留时间的比值, 来确定每个区域对受点地区的污染贡献. PSCF 函数基于空间网格计算, 定义为研究区内经过某一网格(i, j)的污染气流轨迹端点数(m_{ij})与经过该网格的所有气流轨迹端点数(n_{ij})的比值, 即:

$$PSCF_{ij} = m_{ij} / n_{ij} \quad (4)$$

PSCF 的值越大, 表明该地区对于受点区域 O_3 的质量浓度贡献也越大. 因 PSCF 是一种条件概率, 当各网格内气流滞留时间较短时(n_{ij} 值较小), PSCF 值的不确定性较大. 因此, 以研究区域内全部网格平均轨迹端点数(Avg)的 3 倍为边界, 引入经验权重函数(W_{ij})以降低不确定性, 权重函数 W_{ij} 定义为:

$$W_{ij} = f(x) = \begin{cases} 1.00, & n_{ij} > 3Avg, \\ 0.70, & Avg < n_{ij} \leq 3Avg, \\ 0.42, & 0.5Avg < n_{ij} \leq Avg, \\ 0.17, & 0 < n_{ij} \leq 0.5Avg. \end{cases} \quad (5)$$

对 PSCF 进行加权计算:

$$\text{WPSCF}_{ij} = \text{PSCF}_{ij} \times W_{ij} \quad (6)$$

WPSC 仅能反映出经过某网格气团对目标对象的污染概率,但不能区分对目标对象污染水平的贡献^[20].因此,采用CWT方法可突破上述限制并计算不同源区域的相对贡献,其通过将每个污染物浓度与网格相关的轨迹求平均,将停留时间加权浓度分配给每个网格单元,反映不同轨迹的污染程度^[21].CWT计算公式为:

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^m C_l \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^m \tau_{ijl}} \quad (7)$$

式中, C_{ij} 为第 (i, j) 网格单元的平均权重浓度, i 为轨迹的指数, m 为轨迹的总数, C_l 为轨迹 l 经过网络单元 (i, j) 时对应的污染物浓度, τ_{ijl} 为轨迹 l 在网格单元 (i, j) 停留的时间. CWT方法也存在不确定性,采用与PSCF相同的权重因子 W_{ij} 降低其不确定性.

本研究通过MeteoInfo软件以受点成都市芳龄路站点(30.65°N 、 104.05°E),计算2022年8月7~24日地面以上500 m的气团的24 h后向轨迹(间隔为1 h),这主要是因为500 m高度的风场既能减少地面摩擦对于气流轨迹的影响,又能较准确地反映近地层的气团输送特征.按 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 对研究区进行网格化处理,计算每个网格内污染轨迹端点数出现的概率及经过该网格的轨迹对应的观测点粒子浓度的平

均值获得每个网格点上的权重浓度.

2 结果与讨论

2.1 O_3 污染概况

2022年夏季四川盆地(6~8月)出现了1961年以来历史同期最高温度^[22],在极端高温、强辐射影响下,8月7~24日四川盆地多地出现 O_3 持续污染过程.据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633-2012)标准,日 O_3 浓度最大8 h平均值大于 $160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 则被定义为 O_3 污染日.成都市出现连续18 d O_3 污染,且于8月23日达中度污染.

2.1.1 气象背景

西太平洋副热带高压(副高)于8月3日加强并西伸与高原西部的伊朗高压打通,稳定维持至8月25日,8月26日副高受到冷空气和台风两股势力的挤压,稳定形势得以打破,持续高温天气结束.图1为2022年8月的7日和24日的08:00和14:00的500 hPa高度场图,污染期间(2022年8月7~24日)四川盆地一直受副高控制,以成都为例(芳龄路站点监测数据),期间8月8~23日受下沉气流影响(如图2),日最高温度均超 37°C ,其中8月21~23日最高温度超 40°C ,详见表1.图3显示污染后期,即8月20日起气温出现了进一步升高,但 O_3 峰值浓度不升反降,出现较为明显的前后差异,初步判断与夏季工业、企业让电于民的调控相关.

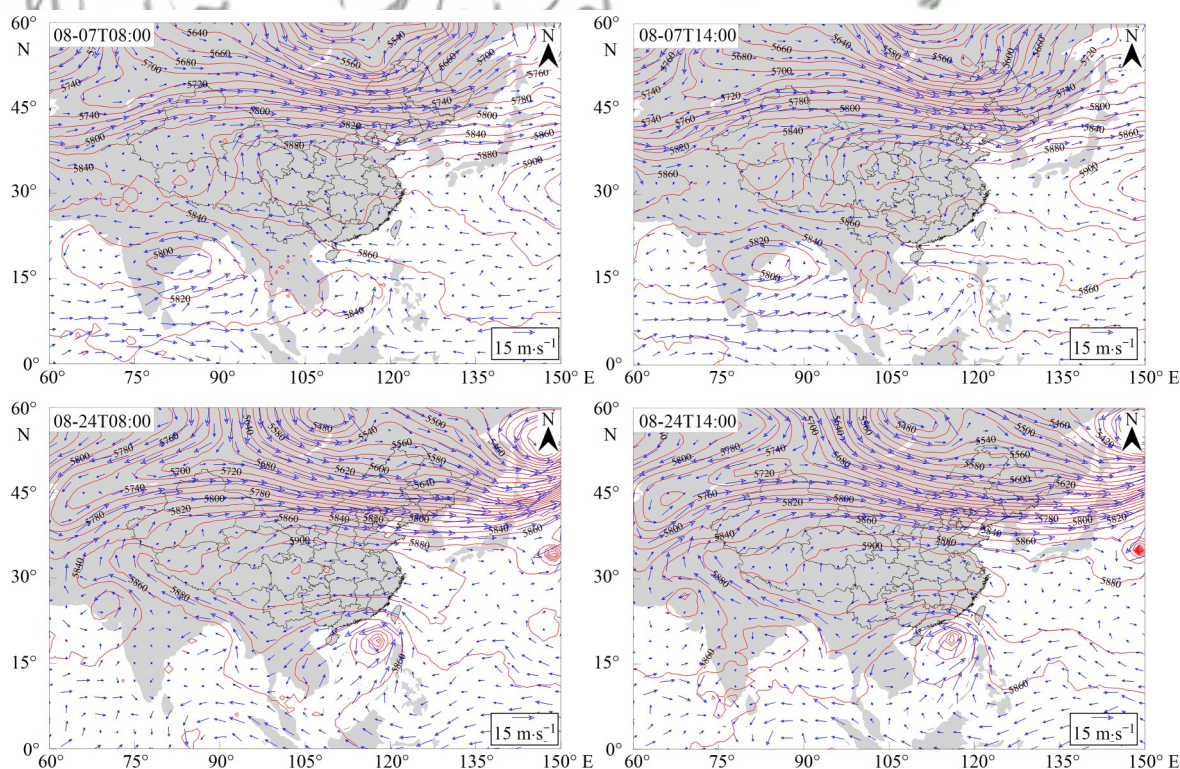


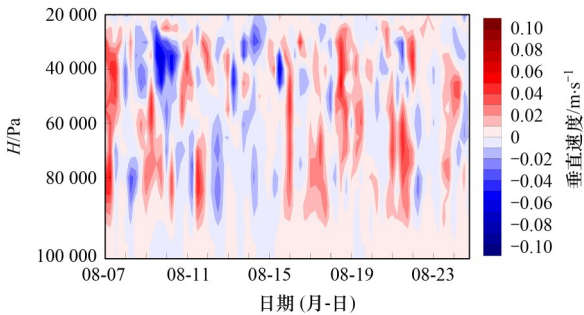
图1 500 hPa位势高度场及风速场

Fig. 1 Geopotential heights and wind velocity at 500 hPa

表1 气象参数及O₃浓度

Table 1 Meteorological parameters and concentration of ozone

日期(月-日)	日最高温度/℃	日均湿度/%	日均 $\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{O}_3)$ 日最大8 h 平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
08-07	36.08	69.32	107.55	189.98
08-08	37.92	62.26	143.76	209.22
08-09	38.78	69.66	150.96	229.65
08-10	38.84	65.18	114.75	200.09
08-11	39.11	55.76	124.55	210.52
08-12	39.99	49.06	136.90	244.72
08-13	39.88	50.59	156.84	222.18
08-14	37.82	53.58	150.40	229.77
08-15	40.00	52.12	139.31	241.72
08-16	40.46	51.33	140.50	233.41
08-17	37.38	56.10	151.00	215.72
08-18	37.86	54.43	117.78	190.49
08-19	37.18	52.85	122.40	178.72
08-20	40.51	50.30	109.03	194.00
08-21	41.63	46.91	103.29	178.69
08-22	40.39	41.94	125.03	205.81
08-23	40.22	45.34	139.92	246.26
08-24	36.22	54.70	108.31	166.54



正值为上升运动,负值为下沉运动
图2 污染期间垂直速度小时变化

Fig. 2 Hourly variations in vertical velocity during the pollution period

2.1.2 O₃及前体物变化特征

由于今夏高温天气导致用电负荷持续攀升,叠加流域干旱导致水力发电能力大幅下降、外省煤入川运力不足等因素影响,四川面临严峻的能源保供形势,8月15日起大部分高载能企业受到停产让电于民的调控,而工业企业的停产致O₃前体物排放大幅下降.图4为污染期间O₃浓度、NO₂浓度、TVOCs

(VOCs物种加和)体积分数、烷烃体积分数、烯烃体积分数、芳香烃体积分数时间序列,NO₂浓度、TVOCs体积分数及烷烃体积分数变化趋势较为一致,呈现波动下降趋势,自让电于民的调控开始后,即8月15日起TVOCs体积分数大部分时段稳定在10×10⁻⁹左右.本研究以8月15日为节点,将此次污染过程分为让电前(8月7~14日)和让电后(8月15~24日)两段时间.

让电前成都市平均气温维持高值(33.61℃),让电后进一步升高达35.31℃,而 $\rho(\text{O}_3)$ 平均值则表现为前高后低,分别为135.81 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和125.91 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.让电前 $\varphi(\text{TVOCs})$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 平均值分别为20.21×10⁻⁹和27.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,让电后分别下降至15.62×10⁻⁹和24.81 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (详见表2).

2.2 日变化特征

从日变化特征来看(图5),让电前后O₃浓度日均变化均呈单峰分布,与气温变化一致,昼高夜

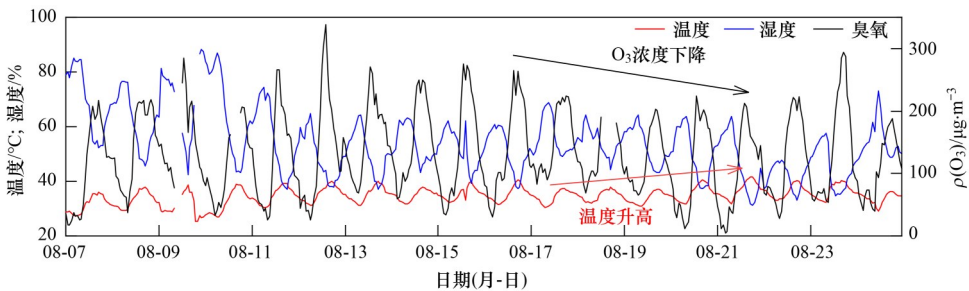


图3 污染期间温度、湿度和O₃浓度小时变化

Fig. 3 Hourly variations in temperature, humidity, and ozone concentration during pollution

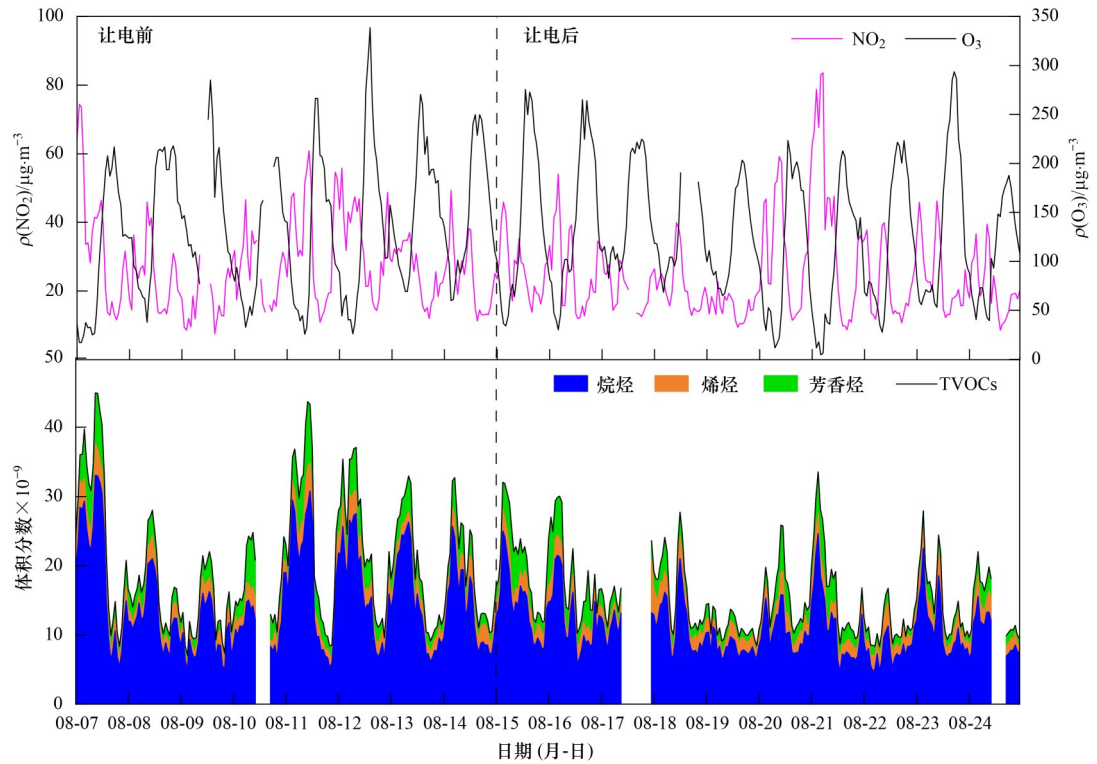


图4 污染期间NO₂浓度、O₃浓度、TVOCs体积分数及其组分时间序列

Fig. 4 Hourly variations in NO₂, O₃, TVOCs, and their components during pollution

表2 让电前后各参数对比

Table 2 Comparison of parameters before and after power rationing

参数	让电前	让电后
温度/℃	33.61	35.31
湿度/%	59.15	50.60
风速/m·s ⁻¹	0.92	1.42
ρ(O ₃)/μg·m ⁻³	135.81	125.91
ρ(NO ₂)/μg·m ⁻³	27.45	24.81
φ(TVOCs)×10 ⁻⁹	20.21	15.62
φ(烷烃)×10 ⁻⁹	14.71	10.95
φ(烯烃)×10 ⁻⁹	2.17	2.05
φ(芳香烃)×10 ⁻⁹	3.33	2.62

低.但让电后浓度抬升速率明显弱于让电前,峰值出现时间推迟1 h,浓度峰值为218.12 μg·m⁻³,较让电前下降14.00%.NO₂浓度和TVOCs体积分数日变化均呈双峰特征,其中NO₂浓度夜晚峰值出现在02:00,TVOCs出现在03:00~05:00,主要受垂直扩散条件较差叠加前一日晚高峰机动车排放累积影响;NO₂浓度白天峰值出现在08:00~10:00时,TVOCs出现在09:00~11:00时,此时受人类活动及早高峰移动源排放影响较大.两个时段ρ(NO₂)峰值分别为39.45 μg·m⁻³和36.10 μg·m⁻³,φ(TVOCs)峰值分别为30.19×10⁻⁹和20.91×10⁻⁹.综上,此次污染过程后期污染程度降低,尤其是NO₂浓度峰值降低的主要原因在于前体物排放水平显著下降.

2.3 VOCs大气反应活性特征

图6为让电前后VOCs各组分的体积分数贡献率及OFP和L_{OH}贡献对比.让电后烷烃、烯烃和芳香烃贡献率分别为70.12%、13.14%和16.74%,其中烷烃贡献率较让电前下降2.66个百分点,烯烃和芳香烃贡献率分别升高2.42和0.25个百分点.污染期间,烯烃体积分数虽然显著低于烷烃,但由于它具有更高的化学反应活性,成为对OFP和L_{OH}贡献最大的物种,让电前贡献率分别为39.95%和54.47%,让电后贡献率上升为44.83%和62.86%,烷烃贡献率下降至24.26%和14.55%,芳香烃贡献率下降至30.91%、22.58%.图7为让电前后VOCs、OFP及L_{OH}贡献排名前10物种,从体积分数来看,让电前后排序靠前的物种较为一致,均包含:乙烷、丙烷、正丁烷、异戊烷、异丁烷、甲苯、乙烯、间/对-二甲苯、苯和异戊二烯,且对VOCs贡献率均在82%左右,让电后仅在排序上略有差异.让电前后OFP排名前10物种也基本一致,均包含:乙烯、间/对-二甲苯、异戊二烯、甲苯、异戊烷、邻-二甲苯、正丁烷、反-2-丁烯、丙烯和顺-2-丁烯,让电后前10关键物种对总活性的贡献率为76.37%,较让电前略有上升.让电前后L_{OH}贡献前10物种类别则出现差异,让电前物种分别为:异戊二烯、间/对-二甲苯、反-2-丁烯、乙烯、顺-2-丁烯、甲苯、异戊烷、丙烯、邻-二甲苯和正丁烷,让电后1-己烯代替了正丁烷,前

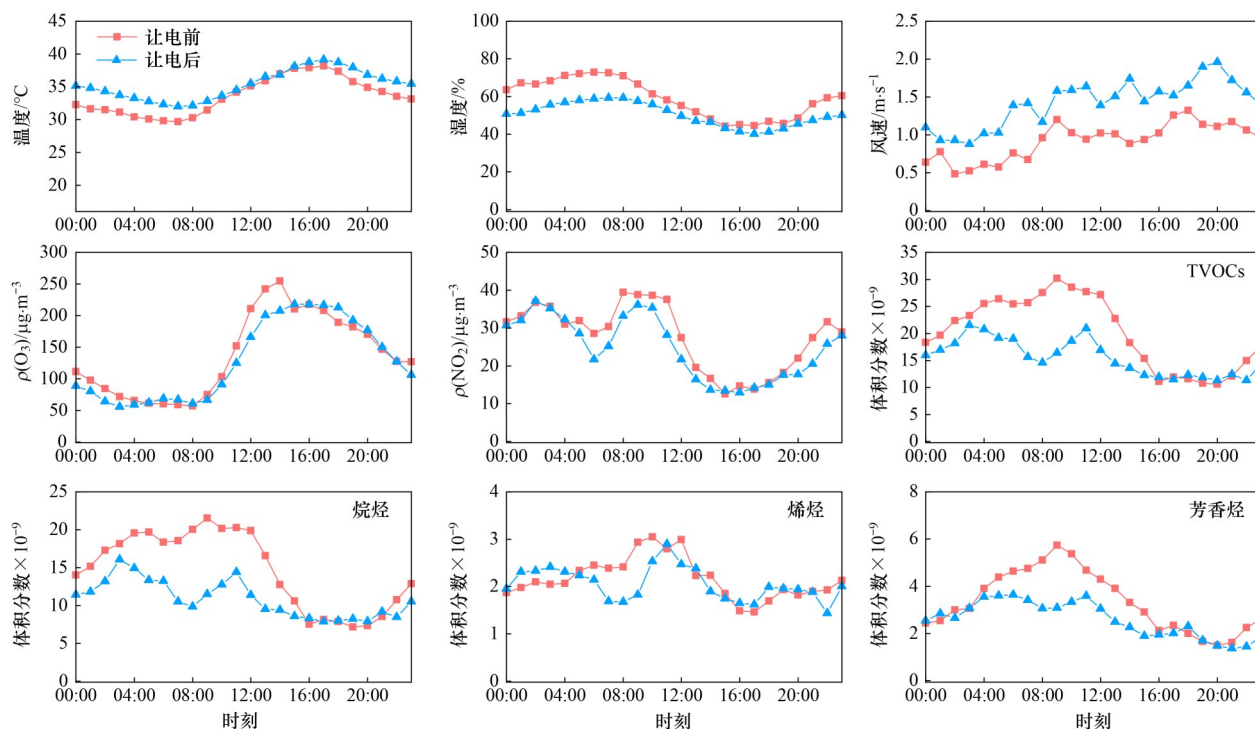


图5 让电前后温度、湿度、风速、 O_3 浓度、 NO_2 浓度、TVOCs 体积分数、烷烃体积分数、烯烃体积分数和芳香烃体积分数日变化对比

Fig. 5 Diurnal variation in temperature, humidity, wind speed, O_3 , NO_2 , TVOCs, alkanes, olefins, and aromatic hydrocarbon before and after power rationing comparison of daily changes

10物种贡献率为79.27%，较让电前升高4.05个百分点。进一步分析OFP和 L_{OH} 排名前10物种在让电后贡献率均有所提高的主因是异戊二烯浓度上升，而异戊二烯体积分数的增长或与让电后气温升高，辐射增强相关^[23]。

2.4 PMF来源解析

本研究采用PMF模型对让电前后VOCs进行定量解析，分析判断污染期间VOCs来源。本次分析最终确定5个合理因子，各因子的特征谱图和贡献时序如图8所示。

因子1为移动源，移动源的特点是含较高浓度的低碳烷烃、低碳烯烃和低碳芳香烃^[24]，汽油车尾气中典型VOCs物种主要为乙烷、丙烷、乙烯、丙烯和甲苯^[25,26]，同时异戊烷是典型的汽油挥发示踪剂^[27]，苯系物物种比例高也是我国油品的一个主要特点^[28]。乙烷、正戊烷、异戊烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、甲基环戊烷和正庚烷等在汽油车、柴油车尾气中占有较高比例^[29]，乙烯为不完全燃烧示踪剂，主要来源有汽车尾气等^[30-32]。因C2~C5烷烃、乙烯、丙烯在因子1中贡献率均较高，且符合移动源排放特征，故判定其为移动源。在污染期间，移动源是贡献最大的源类，让电后其贡献浓度下降，这指示受让电影响移动源活动水平存在一定下降。据报道受让电措施影响，四川电网有序用电方案中所有工业电力用户(含白名单重点保障企业)停工停

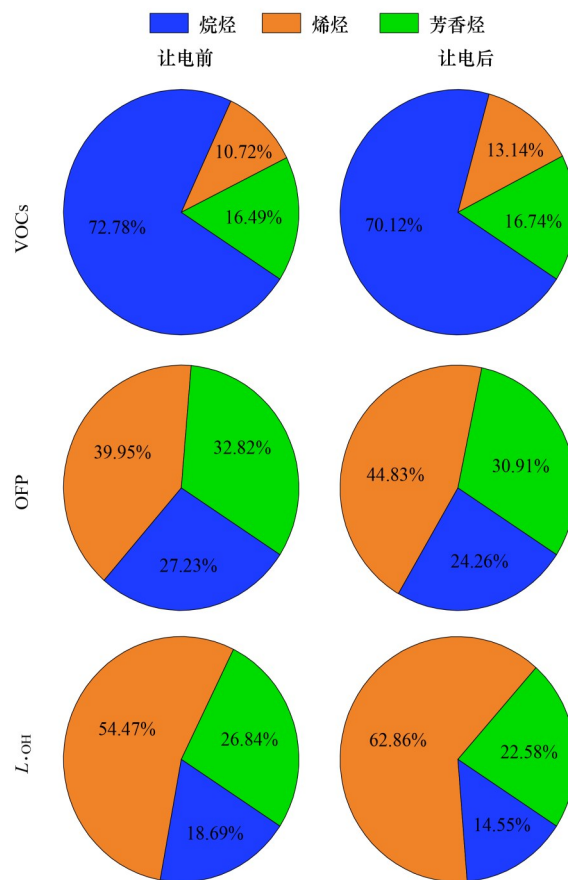
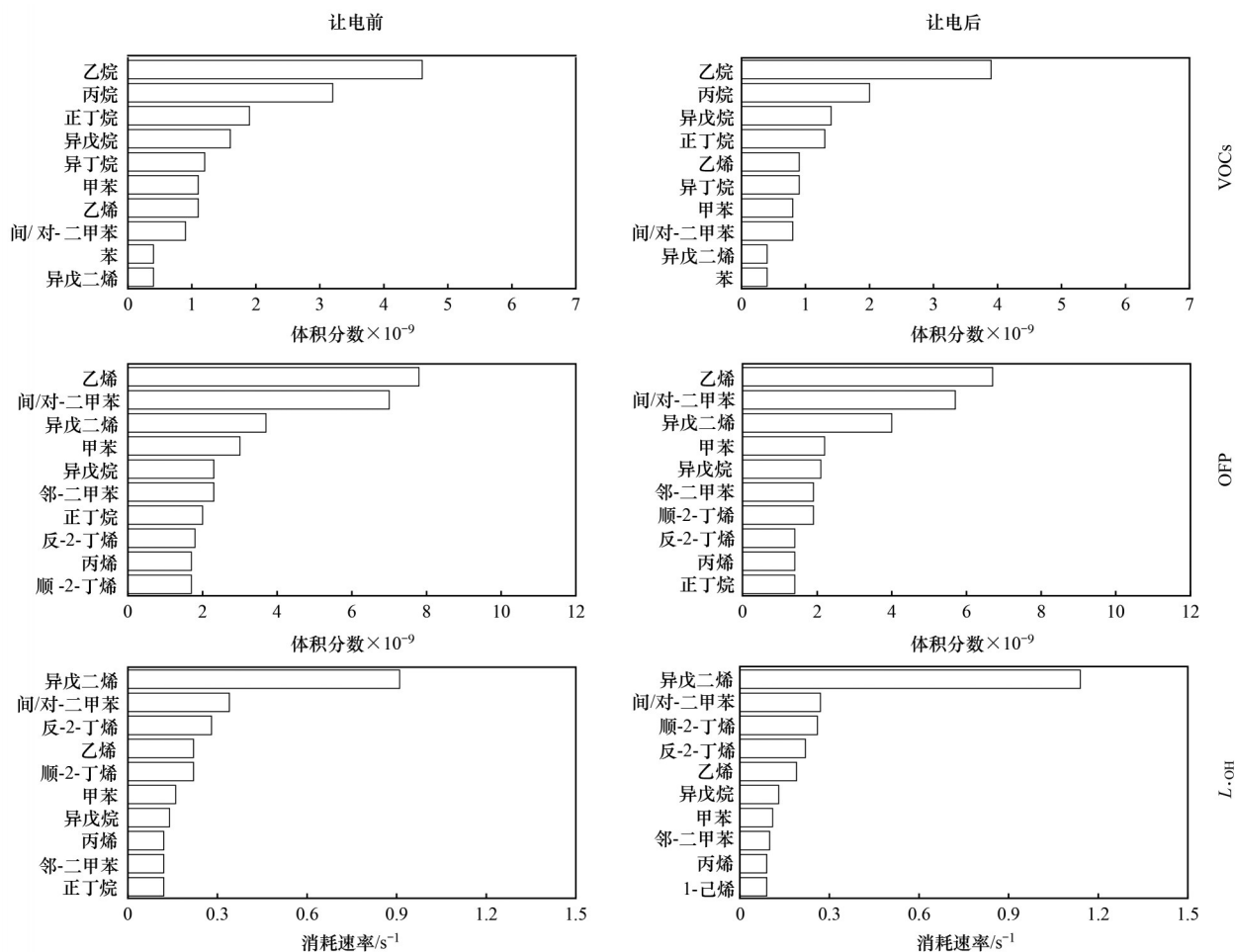


图6 让电前后VOCs、 O_3 生成潜势(OFP)和 $\cdot OH$ 反应活性(L_{OH})贡献率

Fig. 6 Proportion of VOCs, OFP, and L_{OH} before and after power rationing

图7 让电前后VOCs、OFP和 L_{OH} 贡献排名前10物种Fig. 7 Top ten species contributing to VOCs, OFP, and L_{OH} before and after power rationing

产(保安负荷除外), 放高温假, 让电于民^[33], 对应停产工业企业的生产生活用车活动水平下降, 建筑工地活动相关的物流用车和运渣车等车辆的活动水平有所降低; 电动私家车因充电受影响而流量减少, 但未直接带来减排量; 公共交通流量并未变化, 但新增CNG车辆^[34]带来了一定的排放量. 整体来看, 移动源排放贡献率在让电前后基本不变.

因子2为工业源. 高碳烷烃、烯烃及部分芳香烃贡献率较高是工业源的特点, 其中乙烯、丙烯、丁二烯和苯乙烯作为重要的化工原料被广泛使用^[35], 正辛烷是工业汽油主要成分之一. 因子2中1-戊烯、苯乙烯、正辛烷贡献率均较高, 故识别其为工业源. 工业源贡献浓度在让电期间明显降低, 指示了让电带来的被动减排, 但或许由于工业源多分布在郊区市县, 而观测站点位于市中心, 工业减排的特征受传输距离影响而弱化, 工业源的贡献率与让电前基本一致.

因子3为天然源, 组分中异戊二烯贡献率最高, 达90%以上. 异戊二烯是天然源(植物)排放的主要示踪物, 其在夏季高温天气排放最为显著, 排放总

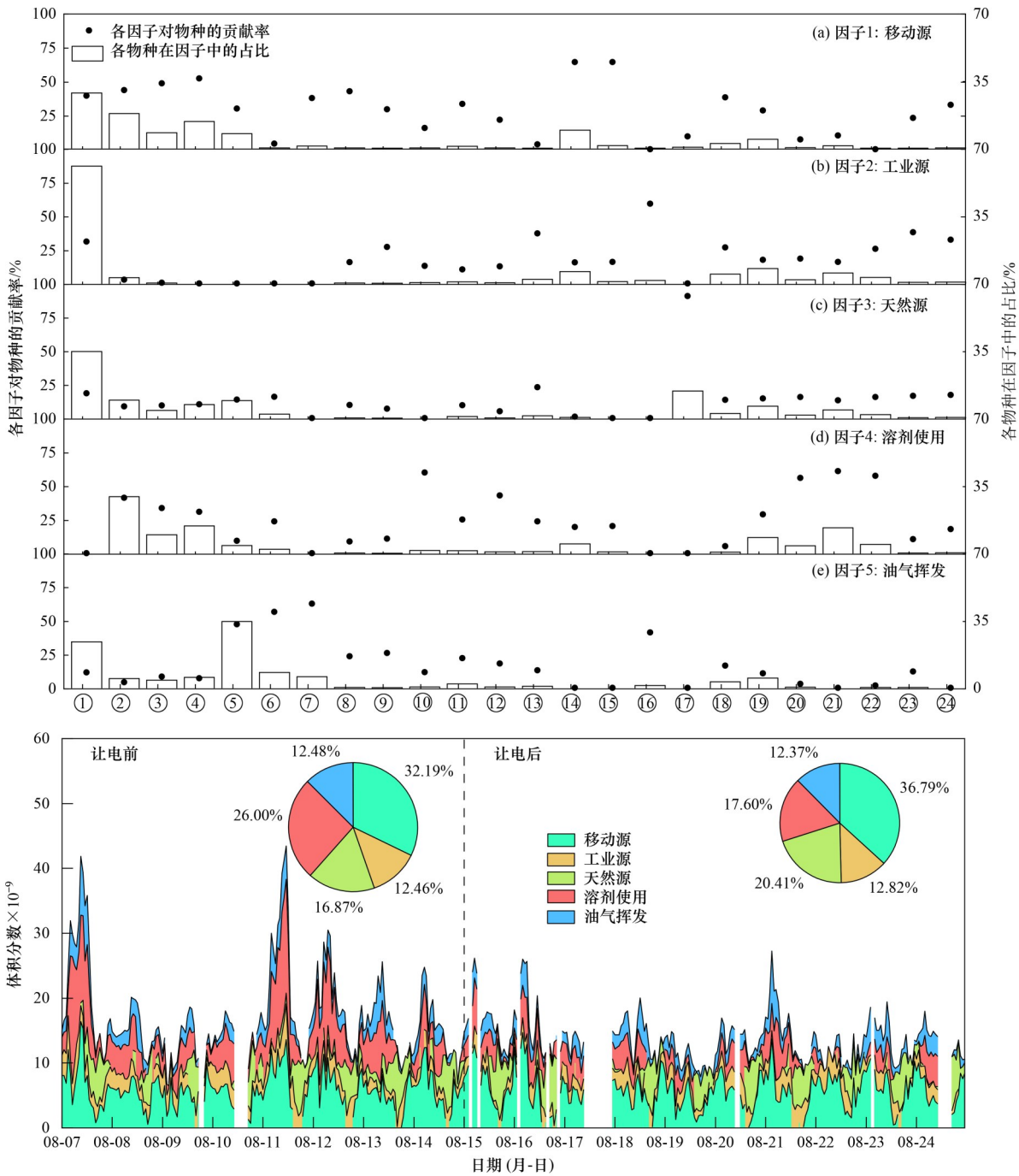
量可观^[36]. 让电后天然源贡献浓度和贡献率不降反升, 超越溶剂使用源成为第二大源. 初步判断让电后偏高的气温是天然源贡献增加的主要影响因素, 有研究发现高温会使得植物对异戊二烯的排放增大^[37], 而让电后平均温度(35.31℃)较让电前(33.61℃)上升了1.70℃.

因子4为溶剂使用源. 芳香烃化合物排放浓度高是溶剂使用源的特征之一, 其中以甲苯、乙苯和二甲苯最为突出^[38-40]; 此外, 苯、甲苯、乙基苯、邻-二甲苯、间-二甲苯和对-二甲苯等芳香烃是有机溶剂的主要成分^[41,42], 在印刷和喷涂过程中排放显著. 因子4中乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯等芳香烃贡献率较大, 故识别因子4为溶剂使用源. 因子4贡献率在让电后下降幅度最大, 下降了8.4个百分点, 这一点与让电后溶剂使用源活动水平下降相关. 让电后家具制造、汽修等行业停工^[33], 油漆等溶剂使用大幅减少.

因子5为油气挥发源. 异戊烷、正戊烷和2-甲基戊烷等汽油主要成分的贡献率最高^[43]. 让电后因子5贡献浓度降低, 但贡献率前后基本一致, 这与因子

1 的情况类似。

综上所述，移动源是整个污染期间贡献最大的源类，其次是溶剂使用源和天然源，但由于让电后溶剂使用源活动水平降幅较大，且天然源受气温影响不降反升，两者排序互换。对比让电前后源类贡献的浓度变化，让电后除天然源上升外，其余源类均下降，降幅在 3.67%~42.97%，溶剂使用源为降幅最大的源类；对比让电前后源类贡献的占比变化，溶剂使用源依旧是降幅最大的源类。



①乙烷,②丙烷,③异丁烷,④正丁烷,⑤异戊烷,⑥正戊烷,⑦2-甲基戊烷,⑧2,4-二甲基戊烷,⑨2,3-二甲基戊烷,⑩2,3,4-三甲基戊烷,⑪正己烷,⑫正庚烷,⑬正辛烷,⑭乙烯,⑮丙烯,⑯1-戊烯,⑰异戊二烯,⑱苯,⑲甲苯,⑳乙苯,㉑间/对-二甲苯,㉒邻-二甲苯,㉓1,2,4-三甲苯,㉔苯乙烯

图8 污染期间成都市VOCs来源源谱及时间序列

Fig. 8 Source profiles and time series of VOCs in Chengdu during the pollution period

2.5 PSCF和CWT分析

本次污染过程除受到本地生成源影响，还受到传输影响。对让电前后O₃潜在源区(PSCF)和浓度轨迹加权(CWT)进行分析(如图9)，WPSCF值大于0.5，表示该区域对受点城市O₃的贡献较大，定义为

主要潜在源区^[44]。让电前最主要的O₃潜在源区位于

主城区偏东区域至简阳一带,另一潜在源区位于眉山偏东部,WPSCF值均大于0.8,由此来看近郊短距离传输和眉山一带的传输对城区O₃污染有贡献;让电后O₃的高WPSCF值主要位于主城区南部区域,另一较高WPSCF值区域范围较小,位于德阳偏南区域.WCWT值越大,该网格对成都大气污染物浓度贡献越大^[45,46],让电前强潜在污染源主要分布于主城区偏东区域至简阳一带,O₃浓度贡献超200 μg·m⁻³,另一较小区域位于眉山偏东部,O₃浓度贡献超180 μg·m⁻³;让电后强潜在源区位于

主城区偏南区域,O₃浓度贡献为160~180 μg·m⁻³.WCWT分析结果与WPSCF分析结果基本一致.让电后WPSCF高值区域明显缩小,强潜在源弱化,且区域位置均变动,主要是由于让电措施覆盖整个四川省,形成整个区域的减排效应.区域减排对成都的影响,一方面是减排区域O₃浓度降低导致其对成都的传输减弱,另一方面是其传输的前体物浓度减弱而降低了成都市O₃生成浓度.由此可见,在应对成都市O₃问题时,区域联防联控也非常重要.

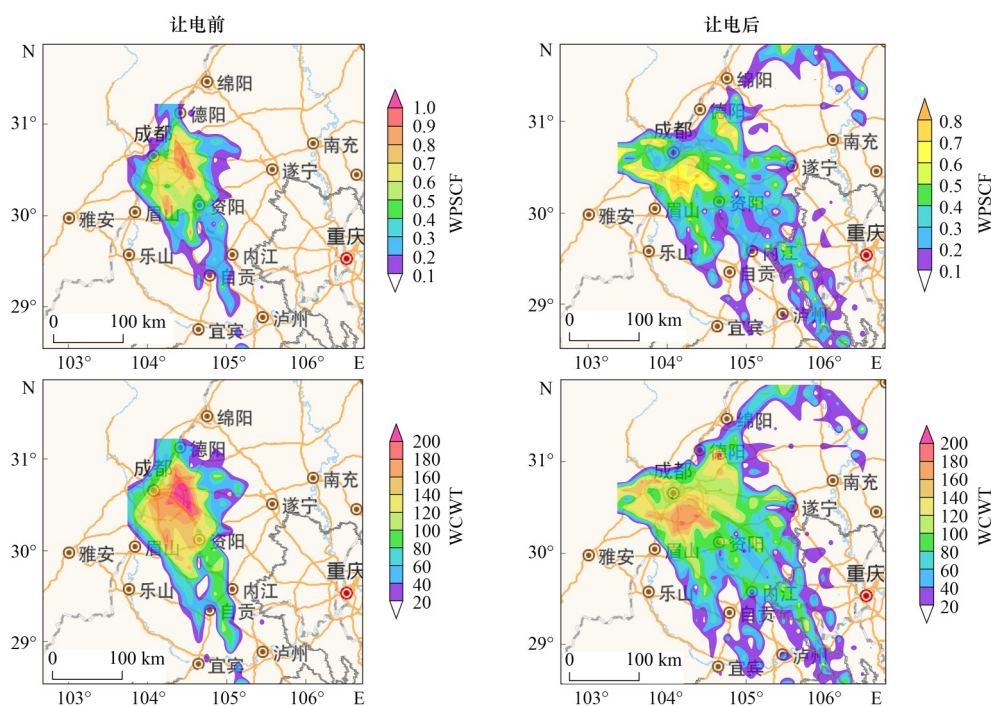


图9 让电前后WPSCF和WCWT分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of WPSCF and WCWT before and after power rationing

3 结论

(1)成都市2022年8月7~24日发生了一次持续时间长的O₃污染过程,副热带高压强大且长时间控制四川,成都市高温天持续,高温和强辐射为O₃生成提供有利气象条件.

(2)持续高温天也造成电力保供不足,为让电于民,成都市实行工业企业停工停产等措施,让电前后体物NO₂浓度和VOCs体积分数均下降,但OFP和L_{OH}贡献前10物种占比均较让电前提高,主要是因为让电后异戊二烯排放量增加.

(3)让电前后成都市污染来源相同,分别为移动源、工业源、天然源、溶剂使用源和油气挥发源,让电后移动源、工业源和油气挥发源占比基本不变,天然源占比升高,而溶剂使用源占比下降明显,说明让电措施对溶剂使用源影响最大.

(4)成都市O₃受到近郊短距离传输和眉山一带的传输影响,而让电后潜在源区域明显缩小,强潜在源减弱,由此可见联防联控对成都市O₃污染防治作用大.

参考文献:

- [1] 胡洛铭,李奕璇,施念郁,等.京津冀地区臭氧浓度时空变化特征[J].环境科学与技术,2019,42(11):1-7,39.
Hu L M, Li Y X, Shi N F, et al. Spatio-temporal change characteristics of ozone concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 42 (11): 1-7, 39.
- [2] 排日迪古丽·阿力木,依帕热古丽·艾合麦提尼亚孜,于婷.长江三角洲地区臭氧污染现状研究[J].农业灾害研究,2020,10(7):166-168.
Pairidiguli A, Yiprgli A, Yu T. Study on ozone pollution in Yangtze River Delta [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2020, 10(7): 166-168.
- [3] 赵伟,高博,卢清,等.2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势[J].环境科学,2021,42(1):97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, et al. Ozone pollution trend in the Pearl

- River Delta region during 2006-2019[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [4] 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.
- 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.
- [5] Jacobeit J. Classifications in climate research[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, **35**(9-12): 411-421.
- [6] 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.
- [7] Chen Z Y, Li R Y, Chen D L, *et al.* Understanding the causal influence of major meteorological factors on ground ozone concentrations across China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **242**: 118498.
- [8] 符传博, 周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(2): 33-43.
- Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 33-43.
- [9] Fiore A M, Naik V, Spracklen D V, *et al.* Global air quality and climate[J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, **41**(19): 6663-6683.
- [10] Wu R R, Li J, Hao Y F, *et al.* Evolution process and sources of ambient volatile organic compounds during a severe haze event in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **560-561**: 62-72.
- [11] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176-177**: 64-74.
- [12] 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.
- [13] 史文彬, 屈坤, 严宇, 等. 成都市夏季臭氧污染的环流分型与来源分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2022, **58**(3): 565-574.
- Shi W B, Qu K, Yan Y, *et al.* Circulation classification and source analysis of summer ozone pollution in Chengdu[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, **58**(3): 565-574.
- [14] Song M D, Tan Q W, Feng M, *et al.* Source apportionment and secondary transformation of atmospheric nonmethane hydrocarbons in Chengdu, Southwest China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(17): 9741-9763.
- [15] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications[EB/OL]. California, USA, <https://www.researchgate.net/publication/284060890>, 2010-01-28.
- [16] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds[J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [17] 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.
- [18] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [19] Begum B A, Kim E, Jeong C H, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3719-3724.
- [20] 汪蕊, 丁建丽, 马雯, 等. 基于PSCF与CWT模型的乌鲁木齐市大气颗粒物源区分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(8): 3033-3042.
- Wang R, Ding J L, Ma W, *et al.* Analysis of atmospheric particulates source in Urumqi based on PSCF and CWT models[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(8): 3033-3042.
- [21] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 545-562.
- [22] 孙昭萱, 张强, 孙蕊, 等. 2022年西南地区极端高温干旱特征及其主要影响[J]. *干旱气象*, 2022, **40**(5): 764-770.
- Sun Z X, Zhang Q, Sun R, *et al.* Characteristics of the extreme high temperature and drought and their main impacts in southwestern China of 2022[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, **40**(5): 764-770.
- [23] 毛红梅, 张凯山, 第宝锋. 四川省天然源VOCs排放量的估算和时空分布[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1289-1296.
- Mao H M, Zhang K S, Di B F. Studies on estimates of biogenic VOC emission and its temporal and spatial distribution in Sichuan[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1289-1296.
- [24] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [25] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [26] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **143**: 209-217.
- [27] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放VOCs源成分谱及其大气反应活性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- Qiao Y Z, Wang H L, Huang C, *et al.* Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds from vehicle exhaust[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- [28] Zhu Y H, Yang L X, Kawamura K, *et al.* Contributions and source identification of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosols at Mt. Tai in 2014[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 863-872.
- [29] 王伯光, 张远航, 邵敏, 等. 广州地区大气中C2-C9非甲烷碳氢化合物的人为来源[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1430-1440.
- Wang B G, Zhang Y H, Shao M, *et al.* Sources apportionment of anthropogenic C2-C9 non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Guangzhou, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(7): 1430-1440.
- [30] Blake D R, Smith T W Jr, Chen T Y, *et al.* Effects of biomass burning on summertime nonmethane hydrocarbon concentrations in the Canadian wetlands[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, **99**(D1): 1699-1719.
- [31] Nelson P F, Quigley S M. The hydrocarbon composition of exhaust emitted from gasoline fuelled vehicles[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1984, **18**(1): 79-87.

- [32] Rudolph J. The tropospheric distribution and budget of ethane [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D6): 11369-11381.
- [33] 陈燕. 让电于民的四川: 电力供需矛盾仍未缓解, 企业等通知有序用电[EB/OL]. 南都即时, <https://static.nfapp.southcn.com/content/202208/21/c6811439.html>, 2022-08-21.
- [34] 何齐铁. 成都市公交进入“省电模式”——新增百余辆燃气公交车, 替换并减少短续航电动车使用[EB/OL]. 成都日报锦观新闻, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1741595651590283103&wfr=spider&for=pc>, 2022-08-19.
- [35] 高素莲, 闫学军, 刘光辉, 等. 济南市夏季臭氧重污染时段 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(9): 1839-1846.
Gao S L, Yan X J, Liu G H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in serious ozone pollution period of summer in Ji'nan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(9): 839-1846.
- [36] 王志辉, 张树宇, 陆思华, 等. 北京地区植物 VOCs 排放速率的测定[J]. *环境科学*, 2003, **24**(2): 7-12.
Wang Z H, Zhang S Y, Lu S H, *et al.* Screenings of 23 plant species in Beijing for volatile organic compound emissions [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(2): 7-12.
- [37] Oku H, Inafuku M, Takamine T, *et al.* Temperature threshold of isoprene emission from tropical trees, *Ficus virgata* and *Ficus septica*[J]. *Chemosphere*, 2014, **95**: 268-273.
- [38] An J L, Wang J X, Zhang Y X, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds in an urban environment at the Yangtze River Delta, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, **72**(3): 335-348.
- [39] Song M D, Liu X G, Zhang Y H, *et al.* Sources and abatement mechanisms of VOCs in southern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **201**: 28-40.
- [40] Li J, Zhai C Z, Yu J Y, *et al.* Spatiotemporal variations of ambient volatile organic compounds and their sources in Chongqing, a mountainous megacity in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1442-1452.
- [41] Guenther A, Geron C, Pierce T, *et al.* Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2205-2230.
- [42] Liu C T, Ma Z B, Mu Y J, *et al.* The levels, variation characteristics, and sources of atmospheric non-methane hydrocarbon compounds during wintertime in Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(17): 10633-10649.
- [43] Watson J G, Chow J C, Fujita E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(9): 1567-1584.
- [44] 卢宁生, 张小玲, 杜云松, 等. 成都平原城市群夏季臭氧污染天气形势与潜在源分析[J]. *高原气象*, 2023, **42**(2): 515-528.
Lu N S, Zhang X L, Du Y S, *et al.* Objective weather classification and potential source analysis of ozone pollution during summer in Chengdu Plain urban agglomeration [J]. *Plateau Meteorology*, 2023, **42**(2): 515-528.
- [45] 蒋子瑶, 彭王敏子, 陈琦. 基于 PSCF 与 CWT 方法的赣江新区大气污染物潜在源区个例分析[J]. *气象与减灾研究*, 2022, **45**(3): 216-224.
Jiang Z Y, Peng W M Z, Chen Q. Case study on potential sources of air pollutants over Ganjiang New District based on PSCF and CWT methods [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2022, **45**(3): 216-224.
- [46] 李星, 赵文吉, 熊秋林, 等. 北京采暖季 PM_{2.5} 水溶性无机离子污染特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(1): 93-100.
Li X, Zhao W J, Xiong Q L, *et al.* The pollution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} inorganic water-soluble ions in Beijing during heating season [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(1): 93-100.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiang, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)