

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡德豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳峰, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钡, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析

李万勇^{1,2}, 黄浩瑜^{1,2}, 王艳振³, 朱子博⁴, 王一秋⁴, 高艳珊^{1,2*}, 彭娜娜^{1,2}, 伦小秀^{1,2}, 黄亮^{1,2}, 冯如帆^{1,2}, 菅月诚^{1,2}, 王强^{1,2*}

(1. 北京林业大学环境科学与工程学院, 水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学环境科学与工程学院, 污染水体源控制与生态修复技术北京市高等学校工程研究中心, 北京 100083; 3. 聊城智慧环保调度中心, 聊城 252000; 4. 聊城市环境信息与监控中心, 聊城 252000)

摘要: 基于聊城市 2021 年 6 月挥发性有机物 (VOCs) 和臭氧 (O_3) 在线监测数据, 系统分析了 O_3 污染日和清洁日 VOCs 的浓度水平、组成特征、日变化特征和 O_3 生成潜势 (OFP), 通过潜在源贡献因子法 (PSCF) 和浓度权重轨迹分析法 (CWT) 识别了 VOCs 的潜在源区, 利用特征物种比值和正定矩阵因子分解 (PMF) 模型对 VOCs 来源进行了解析。结果表明, 聊城市 2021 年 6 月 O_3 污染日和清洁日 ρ (VOCs) 小时均值分别为 $(115.38 \pm 59.12) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(88.10 \pm 33.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 各类别 VOCs 浓度水平在污染日和清洁日的大小均表现为: 含氧挥发性有机物 (OVOCs) > 烷烃 > 卤代烃 > 芳香烃 > 烯烃 > 炔烃 > 有机硫。污染日和清洁日浓度差值较大的 VOCs 物种均出现在二者 VOCs 浓度小时均值贡献前 10 物种中。总 VOCs、烷烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和有机硫浓度日变化趋势表现为日间低于夜间, OVOCs 浓度日变化呈现出白天高, 夜间低的特征。OFP 在污染日为 $285.29 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 在清洁日为 $212.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, OVOCs、烯烃和芳香烃对 O_3 生成贡献大。PSCF 和 CWT 结果发现, 聊城市 VOCs 潜在源区集中分布在东昌府区北部和东北部以及茌平区中部和西南部。特征物种比值结果表明, 聊城市 VOCs 可能较多来源于燃煤、汽油挥发和机动车尾气; PMF 模型解析结果显示工业排放源 (30.57%)、机动车尾气及油气挥发源 (19.44%)、燃烧源 (17.23%)、空气老化及二次生成源 (13.69%)、溶剂使用源 (12.75%) 和天然源 (6.32%) 为聊城市 VOCs 的主要来源。

关键词: 聊城市; 挥发性有机物 (VOCs); 污染特征; 臭氧生成潜势 (OFP); 来源解析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6564-12 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202212229

Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer

LI Wan-yong^{1,2}, HUANG Hao-yu^{1,2}, WANG Yan-zhen³, ZHU Zi-bo⁴, WANG Yi-qiu⁴, GAO Yan-shan^{1,2*}, PENG Na-na^{1,2}, LUN Xiao-xiu^{1,2}, HUANG Liang^{1,2}, FENG Ru-fan^{1,2}, JIAN Yue-cheng^{1,2}, WANG Qiang^{1,2*}

(1. Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center for Water Pollution Source Control & Eco-remediation, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Centre for Liaocheng Intelligent Environmental Dispatch, Liaocheng 252000, China; 4. Centre for Liaocheng Environmental Information and Monitoring, Liaocheng 252000, China)

Abstract: Based on the online monitoring data of volatile organic compounds (VOCs) and ozone (O_3) in Liaocheng in June 2021, the concentration levels, compositional characteristics, daily variation characteristics, and ozone formation potential (OFP) of VOCs on polluted days and clean days were systematically analyzed. Potential source areas of VOCs were identified by the potential source contribution function (PSCF) and concentration-weighted trajectory (CWT). The sources of VOCs in Liaocheng were analyzed using the characteristic species ratio and positive matrix factorization (PMF). The results showed that the hourly mean values of VOCs concentrations on polluted days and clean days in Liaocheng in June 2021 were $(115.38 \pm 59.12) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(88.10 \pm 33.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, and the concentration levels of VOCs in each category showed that oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) > alkanes > halogenated hydrocarbons > aromatic hydrocarbons > alkenes > alkynes > organosulfur. VOCs species with large differences in concentrations between polluted and clean days were among the top ten species of the hourly mean VOCs concentrations. The daily trends of concentrations of total VOCs, alkanes, alkynes, aromatic hydrocarbons, halogenated hydrocarbons, and organosulfur showed that the daytime concentrations were lower than the nighttime concentrations, and the daily changes in OVOCs concentrations showed the characteristics of high in the daytime and low at nighttime. The OFP was $285.29 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ on polluted days and $212.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ on clean days, and OVOCs, alkenes, and aromatic hydrocarbons contributed significantly to ozone formation. The PSCF and CWT results found that the potential source areas of VOCs in Liaocheng were concentrated in the northern and northeastern part of Dongchangfu District and the central and southwestern part of Chiping District. The results of the characteristic species ratio indicated that the VOCs in Liaocheng might have been more from coal combustion, gasoline volatilization, and motor vehicle exhaust. The results of PMF showed that industrial emission sources (30.57%), motor vehicle exhaust and oil and gas volatilization sources (19.44%), combustion sources (17.23%), air aging and secondary generation sources (13.69%), solvent usage sources (12.75%), and natural sources (6.32%) were the main sources of VOCs in Liaocheng.

Key words: Liaocheng; volatile organic compounds (VOCs); pollution characteristics; ozone formation potential (OFP); source apportionment

收稿日期: 2022-12-29; 修订日期: 2023-02-18

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG202126); 聊城市细颗粒物 and 臭氧污染协同防控综合解决方案研究项目 (2021-HXFW-HJ-0024); 国家自然科学基金项目 (42077454)

作者简介: 李万勇 (1999 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气挥发性有机物和臭氧污染防治, E-mail: 1829767197@qq.com

* 通信作者, E-mail: yanshan_gao@bjfu.edu.cn; qiangwang@bjfu.edu.cn

自 2013 年以来,我国不断深入推进大气污染治理工作,细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)等大气污染物环境浓度持续下降,但臭氧(O_3)污染问题日益凸显^[1]。《2021 中国生态环境状况公报》显示,全国 168 个地级以上城市以 O_3 为首要污染物的超标天数在总超标天数中占比为 41.6%,“2+26”城市该项比例为 41.8%^[2]。由此可见, O_3 已成为影响我国空气质量的重要因素。大气中超过 90% 的 O_3 位于平流层,剩余不足 10% 的 O_3 存在于对流层^[3],对流层 O_3 主要由其前体物经光化学反应生成,挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是 O_3 生成的重要前体物,因此,开展针对 VOCs 的科学研究是防治 O_3 污染的前提和关键。

VOCs 是大气中重要的痕量组分,具有种类繁多、成分复杂、来源广泛和化学活性差异显著等特点^[4,5]。目前,针对 VOCs 的研究主要集中于污染特征分析、化学反应活性计算以及来源解析等方面^[6]。Yang 等^[7]于 2017 年和 2018 年的秋季与冬季对北京市、望都县以及德州市同时进行了 VOCs 实地观测,观测结果显示 3 个站点浓度最高的 VOCs 组分均是烷烃。孟祥来等^[8]发现北京市城区 2020 年夏季最主要的 VOCs 来源是汽车排放源。王艺璇等^[9]发现 2019 年夏季天津市郊 O_3 污染事件 VOCs 平均体积分数同非 O_3 污染事件相比增加 15.69%,烯烃 O_3 生成潜势(ozone formation potential, OFP)最高。Li 等^[10]使用正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型分析发现,机动车尾气、煤炭和生物质燃烧以及溶剂使用为郑州市 VOCs 的主要来源。裴成磊等^[11]在分析广州市 2020 年冬季一次典型 O_3 污染过程中发现 VOCs 组分中烷烃占比最大,二甲苯、甲苯和丙烯是 O_3 生成的关键 VOCs 物种。Li 等^[12]通过监测位于重庆市中部、南部和北部 3 处地点的 VOCs 浓度发现乙烷是最丰富的物种,机动车尾气对重庆市 VOCs 排放贡献显著。综上可知,我国已开展较多 VOCs 污染相关工作,但研究地点大多集中于京津冀地区、长三角地区、珠三角地区、汾渭平原地区以及成渝地区的大城市,较少涉及经济发展相对落后、VOCs 排放量较多同时 O_3 污染更为严重的地区和城市,此外,针对该类地区及城市不同 O_3 污染程度的 VOCs 精细化特征分析和夏季典型月份 VOCs 来源解析相对缺乏,不利于我国整体 O_3 污染治理与管控。

聊城市是京津冀大气污染传输通道“2+26”城市之一,位于山东省西部。近年来,聊城市 O_3 污染问题严重,2021 年 $\rho(\text{O}_3)$ 年评价值为 $166 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,同

2013 年相比增长 29.69%。虽然聊城市 O_3 污染形势严峻,但目前相关研究较少。赵修敏等^[13]于 2020 年 5~10 月对聊城市 VOCs 进行手工监测,发现监测期间聊城市 $\varphi(\text{VOCs})$ 均值为 26.1×10^{-9} ,烷烃占比最高,在 OFP 方面芳香烃贡献最大。除此之外,相关研究鲜见报道。因此,本研究利用 2021 年 6 月聊城市大气环境监测超级站(简称超级站)高时间分辨率 VOCs 在线监测数据和聊城市国控环境空气质量自动监测站(简称国控站) O_3 在线监测数据,针对 2021 年 6 月聊城市 O_3 污染日和清洁日,分析 VOCs 的污染特征,通过计算 OFP 判断各 VOCs 物种的化学反应活性;利用潜在源贡献因子法(potential source contribution function, PSCF)和浓度权重轨迹分析法(concentration-weighted trajectory, CWT)识别聊城市 2021 年 6 月 VOCs 的潜在源区;基于 PMF 模型解析聊城市 2021 年 6 月 VOCs 的来源,以期为聊城市相关部门环境空气质量精细化管理和决策提供参考。

1 材料与方法

1.1 监测地点与时间

监测地点(超级站)位于东昌府区聊城智慧环保调度中心($36^\circ 29' 54.9''\text{N}$, $115^\circ 58' 39.7''\text{E}$),如图 1 所示。超级站海拔 30.00 m,采样高度 10.30 m。该站点东邻周公河湿地公园,四周被柳园路、北外环路、卫育路和济聊高速环绕,北侧有较多物流园区,嘉明工业园区位于其西北方向,南侧主要为住宅区,周围无明显遮挡物,能够代表聊城市城区大气环境污染状况。聊城市 O_3 污染高发期集中于夏季的 6 月,故选取的监测时间为 2021 年 6 月 1~30 日。



图 1 聊城市大气环境监测超级站位置

Fig. 1 Location of Liaocheng superstation for atmospheric environment monitoring

1.2 数据来源

本研究所用 VOCs 在线监测数据来自超级站。超级站利用 TH-300B 大气环境 VOCs 在线监测系统

对环境空气中的 VOCs 进行监测. 该系统由预浓缩仪、色质联用仪、苏玛罐和机柜组成. 预浓缩仪使用两个硅烷化苏玛罐、质量流量计和真空泵进行连续不间断采样, 每小时累计采样时长 ≥ 45 min, 可保证输出 1 h 时间分辨率的数据; 采用超低温三氧化二铝填充管捕集浓缩环境空气中的 $C_1 \sim C_5$ 组分, 超低温空管捕集浓缩环境空气中的 $C_6 \sim C_{12}$ 、卤代烃、含氧挥发性有机物 (oxygenated volatile organic compounds, OVOCs) 和有机硫等组分. VOCs 的检测工作由色质联用仪完成, 其中色谱仪型号为 8860, 质谱仪型号为 5977B. 为确保监测数据的准确性, 监测过程中使用标准气体 (PAMS、TO-15 和醛酮类标气) 以及内标气体 (一溴一氯甲烷、1,4-二氟苯、氯苯-d5 和 1-溴-4-氟苯) 进行校准, 每日 00:00 通过分析标准气体进行单点校准, 按需进行多点标定, 目标化合物的标准曲线相关系数 > 0.98 , 每周完成 1 次空白试验. 监测期间共得到 115 种 VOCs 监测数据, 包括烷烃 29 种、烯烃 11 种、炔烃 (乙炔) 1 种、芳香烃 17 种 (因间-二甲苯和对-二甲苯在色谱柱上难以区分, 本研究中二者作为 1 种 VOCs 表示)、卤代烃 35 种、OVOCs 21 种和有机硫 (二硫化碳) 1 种.

为减少系统操作问题、延长系统使用寿命和确保系统数据质量, 每 7 d 更换 CO_2 管, 根据需要更换钢瓶气以及老化部件, 每 14 d 进行滤膜更换工作, 气体净化器更换周期为 1 a. O_3 数据来自国控站, O_3 数据及其监测设备均由专业人员进行审核和维护, 所有操作均经过严格质量控制, 数据质量得到保证.

1.3 臭氧生成潜势 (OFP)

VOCs 各组分化学活性存在差异, 对 O_3 生成的贡献各不相同^[14]. 通过最大增量反应活性 (maximum incremental reactivity, MIR) 计算各 VOCs 的 OFP 可识别对 O_3 生成贡献大的关键物种. OFP 计算公式为:

$$OFP_i = VOCs_i \times MIR_i \quad (1)$$

式中, OFP_i 为物种 i 的 O_3 生成潜势, 单位为 $\mu g \cdot m^{-3}$; $VOCs_i$ 为物种 i 的浓度, 单位为 $\mu g \cdot m^{-3}$; MIR_i 为物种 i 的最大增量反应活性, 单位为 $\mu g \cdot \mu g^{-1}$. 本研究所用 MIR 值来自 Carter^[15] 的研究结果, 因部分 VOCs 物种 MIR 值缺失, 本研究共计算 103 种 VOCs 的 OFP, 所用 VOCs 物种及其 MIR 值 (本研究取间-二甲苯和对-二甲苯 MIR 值的算术平均值作为间/对-二甲苯的 MIR 值) 见表 1.

表 1 各 VOCs 物种的 MIR 值
Table 1 Maximum incremental reactivity of VOCs

VOCs 物种	MIR	VOCs 物种	MIR	VOCs 物种	MIR	VOCs 物种	MIR
乙烷	0.28	正癸烷	0.68	邻-乙基甲苯	5.59	1,3-二氯苯	0.178
丙烷	0.49	十一烷	0.61	1,2,4-三甲苯	8.87	1,2-二氯苯	0.178
异丁烷	1.23	十二烷	0.55	1,2,3-三甲苯	11.97	反-1,3-二氯乙炔	1.70
正丁烷	1.15	1-己烯	5.49	间-二乙苯	7.10	1,4-二氯苯	0.178
异戊烷	1.45	乙烯	9.00	对-二乙苯	4.43	乙醛	6.54
正戊烷	1.31	丙烯	11.66	萘	3.34	正丁醛	5.97
2,2-二甲基丁烷	1.17	反-2-丁烯	15.16	氯甲烷	0.038	1,4-二氧六环	2.62
环戊烷	2.39	1-丁烯	9.73	氯乙烯	2.83	丙烯醛	7.45
2,3-二甲基丁烷	0.97	顺-2-丁烯	14.24	溴甲烷	0.018 7	丙醛	7.08
2-甲基戊烷	1.50	反-2-戊烯	10.56	氯乙烷	0.29	丙酮	0.36
3-甲基戊烷	1.80	1-戊烯	7.21	1,1-二氯乙炔	1.79	甲基叔丁基醚	0.73
正己烷	1.24	顺-2-戊烯	10.38	二氯甲烷	0.041	甲基丙烯醛	6.01
甲基环戊烷	2.19	异戊二烯	10.61	1,1-二氯乙烷	0.069	戊醛	5.08
2,4-二甲基戊烷	1.55	1,3-丁二烯	12.61	顺-1,2-二氯乙炔	1.70	己醛	4.35
环己烷	1.25	乙炔	0.95	三氯甲烷	0.022	异丙醇	0.61
2-甲基己烷	1.19	苯	0.72	1,1,1-三氯乙烷	0.004 9	乙酸乙烯酯	3.20
2,3-二甲基戊烷	1.34	甲苯	4.00	四氯化碳	0	乙酸乙酯	0.63
3-甲基己烷	1.61	乙苯	3.04	1,2-二氯乙烷	0.21	2-丁酮	1.48
2,2,4-三甲基戊烷	1.26	间/对-二甲苯	7.79	三氯乙烯	0.64	四氢呋喃	4.31
正庚烷	1.07	苯乙烯	1.73	1,2-二氯丙烷	0.29	甲基丙烯酸甲酯	15.61
甲基环己烷	1.70	邻-二甲苯	7.64	反-1,3-二氯丙烯	5.03	4-甲基-2-戊酮	3.88
2,3,4-三甲基戊烷	1.03	异丙苯	2.52	顺-1,3-二氯丙烯	3.70	2-己酮	3.14
2-甲基庚烷	1.07	正丙苯	2.03	1,1,2-三氯乙烷	0.086	丁烯醛	9.39
3-甲基庚烷	1.24	间-乙基甲苯	7.39	四氯乙烯	0.031	苯甲醛	-0.67
正辛烷	0.90	对-乙基甲苯	4.44	1,2-二溴乙烷	0.102	二硫化碳	0.25
正壬烷	0.78	1,3,5-三甲苯	11.76	氯苯	0.32		

1.4 潜在源贡献因子法(PSCF)

PSCF 是在后向气团轨迹和污染物浓度基础上识别污染物潜在源区的分析方法^[16]. 本研究使用 MeteorInfo 软件^[17]中的 TrajStat 插件计算聊城市 2021 年 6 月后向延伸 24 h, 时间间隔 1 h, 每日 24 条后向气团轨迹, 后向气团轨迹受体位置为超级站, 后向气团轨迹模拟起始高度为 500 m, 所用气象数据为美国国家环境预报中心的全球资料同化系统数据 (ftp://arlftp.arl.hq.noaa.gov/pub/archives/gdas1), 后向气团轨迹计算完成后将聊城市 2021 年 6 月 VOCs 浓度数据(数据缺失值用 -9 999 表示)输入后向气团轨迹图层中. 基于上述后向气团轨迹和 VOCs 浓度数据进而计算 PSCF, 计算公式为:

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

式中, m_{ij} 为经过网格 (i, j) 的污染后向气团轨迹端点数, n_{ij} 为经过网格 (i, j) 的所有后向气团轨迹端点数. 本研究定义对应 VOCs 浓度 $> 88.10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (2021 年 6 月聊城市 O_3 清洁日 VOCs 浓度小时均值) 的后向气团轨迹为污染后向气团轨迹. 设置网格范围为东经 $115.27^\circ \sim 116.54^\circ$, 北纬 $35.78^\circ \sim 37.03^\circ$, 每个网格大小为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. 为减少低 n_{ij} 值对结果造成的高不确定性, 引入经验权重函数 W_{ij} , 则 WPSCF 高值网格代表 VOCs 的潜在源区^[18], WPSCF 计算公式为:

$$\text{WPSCF}_{ij} = W_{ij} \times \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (3)$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 48 < n_{ij} \\ 0.70, & 12 < n_{ij} \leq 48 \\ 0.42, & 6 < n_{ij} \leq 12 \\ 0.05, & 6 \geq n_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

1.5 浓度权重轨迹分析法(CWT)

PSCF 仅表明每个网格中污染后向气团轨迹所占比例, 不能反映污染后向气团轨迹的污染程度^[19]. 因此, 本研究采用 CWT 定量分析 VOCs 潜在源区对受体位置造成污染的相对贡献, CWT 计算公式为:

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

式中, CWT_{ij} 为网格 (i, j) 中 VOCs 平均污染权重浓度, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; l 为后向气团轨迹; M 为后向气团轨迹总数; C_l 为后向气团轨迹 l 经过网格 (i, j) 时对应的 VOCs 浓度, 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; τ_{ijl} 为后向气团轨迹 l 落在网格 (i, j) 内的端点数. CWT 所用网格范

围、网格大小、权重函数 W_{ij} 均与 PSCF 所用相同, WCWT 计算公式为:

$$\text{WCWT}_{ij} = W_{ij} \times \frac{\sum_{l=1}^M C_l \times \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \quad (6)$$

1.6 正定矩阵因子分解(PMF)模型

本研究使用美国环境保护署推荐的 PMF 5.0 模型^[20]对 VOCs 进行来源解析. 作为多元因子分析工具, PMF 模型将输入的数据分成因子贡献矩阵和因子成分谱矩阵^[21]. 因此, PMF 模型可以表示为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{GF} + \mathbf{E} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{X}$ 为数据矩阵; $\mathbf{G}$ 为因子贡献矩阵; $\mathbf{F}$ 为因子成分谱矩阵; $\mathbf{E}$ 为残差矩阵. $\mathbf{G}$ 和 $\mathbf{F}$ 是根据不确定度迭代计算使目标函数 Q 达到最小而得到的, Q 值计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{\mathbf{x}_{ij} - \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj}}{\mathbf{u}_{ij}} \right]^2 \quad (8)$$

式中, n 为样本总数, m 为 VOCs 物种总数, p 为因子总数, $\mathbf{x}_{ij}$ 为样本 i 中物种 j 的浓度, $\mathbf{g}_{ik}$ 为第 k 个因子对样本 i 的贡献, $\mathbf{f}_{kj}$ 为第 k 个因子中物种 j 的含量, $\mathbf{u}_{ij}$ 为样本 i 中物种 j 的不确定度.

PMF 模型需要输入 VOCs 物种浓度数据文件和不确定度数据文件. 本研究中, 若 VOCs 物种浓度低于或等于其方法检出限 (method detection limit, MDL), 其浓度替换为对应 MDL 的 0.5 倍, 不确定度替换为 MDL 的 5/6; 若高于 MDL, 不确定度通过下式计算:

$$\text{Unc}_j = \sqrt{(\text{EF}_j \times C_j)^2 + (0.5 \times \text{MDL}_j)^2} \quad (9)$$

式中, Unc_j 为物种 j 的不确定度, EF_j 为物种 j 的误差分数 (本研究中该值为 20%), C_j 为物种 j 的浓度, MDL_j 为物种 j 的方法检出限.

本研究按照以下原则选择 VOCs 物种: ①剔除数据缺失比例 $> 25\%$ 或 25% 以上浓度低于 MDL 的物种; ②选择示踪性较强的物种. 筛选后共 43 种 VOCs 和 626 个样本被输入模型, 所用物种浓度小时均值占总 VOCs 浓度小时均值的 93.02%. 因子数根据 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{expected}}$ 以及 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{robust}}$ 确定, 理论上, 最优因子数具有相对稳定的 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{expected}}$ 变化率^[22, 23]. 结合测试结果和聊城市实际情况, 本研究选择 6 个因子 ($Q_{\text{true}}/Q_{\text{robust}} = 1.01$, $Q_{\text{true}}/Q_{\text{expected}} = 1.24$) 作为聊城市 VOCs 的主要来源. 首先进行 100 次基础运行, 根据基础运行中的残差分析、 r^2 和 Q/Q_{expected} , 将丙烷、正丁烷、乙烯、丙烯、乙炔、苯、氟利昂-12、氯甲烷、氟利昂-11、氟利昂-113、三氯甲烷、四氯化

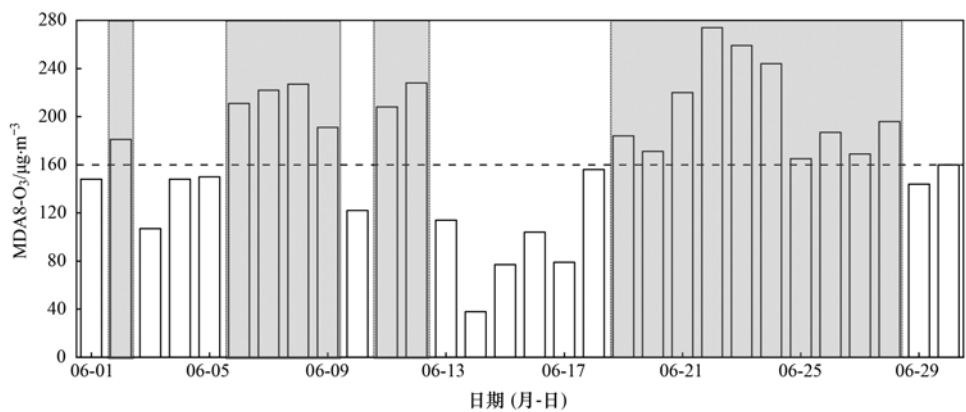
碳、丙酮、甲基叔丁基醚、2-丁酮和二硫化碳设置为“week”;其余为“strong”.再次进行100次基础运行,之后进行误差评估,以探究随机误差和旋转模糊性对PMF结果的影响. DISP (displacement) 误差评估错误代码为0,表示未出现错误, Q 值未发生下降, $dQ_{\max}=4$ 所在行均为0,代表各因子之间不存在显著旋转模糊性. BS (bootstrap) 误差评估结果显示100次运行中各因子映射率均 $\geq 95\%$,表明误差结果可接受,因子数量合适. BS-DISP 误差评估结果可接受率为98%, Q 值最大下降0.002%,代表PMF运

行结果可靠.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度水平及组成特征

《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中规定 O_3 日最大8 h 平均浓度(MDA8- O_3) 二级标准限值为 $160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2021年6月聊城市有17 d 超过该限值(如图2),超标率为56.67%,本研究将MDA8- $O_3>160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的日期定义为污染日,未超标日期定义为清洁日.



阴影部分为污染日

图2 2021年6月聊城市O₃污染状况

Fig. 2 Situation of ozone pollution in Liaocheng in June 2021

2021年6月聊城市清洁日 ρ (VOCs)小时均值为 $(88.10\pm33.04)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,污染日 ρ (VOCs)小时均值同清洁日相比上升 $27.28\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,为 $(115.38\pm59.12)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.污染日和清洁日烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃、OVOCs和有有机硫这7类VOCs浓度小时均值及占比见表2.与济南市^[24]、淄博市^[25]、东营市^[26]、郑州市^[27]和成都市^[28]各类别VOCs中均以烷烃占比最大所不同的是,聊城市各类别VOCs浓度小时均值在污染日和清洁日的大小均表现为:OVOCs>烷烃>卤代烃>芳香烃>烯烃>炔烃>有机硫,这与城市之间产业结构和能源结构不同以及地理条件与研究时段存在差异有关^[29].污染日和清洁日各类别VOCs浓度小时均值大小顺序相同,表明污染日和清洁日VOCs来源一致.污染日除有机硫浓度小时均值低于清洁日外,其余类别VOCs浓度小时均值均高于清洁日,其中污染日OVOCs浓度小时均值比清洁日OVOCs浓度小时均值升高37.60%,增幅最大,烷烃次之,涨幅为30.72%,芳香烃浓度小时均值上升28.47%,这可能与污染日温度更高、太阳辐射更强以及相对湿度更低从而加剧OVOCs的二次生成并利于烷烃和芳香烃等的挥发有关.

表2 污染日和清洁日各类别VOCs浓度小时均值及占比

Table 2 Hourly mean and proportion of VOCs concentrations in each category on polluted days and clean days

类别	污染日		清洁日	
	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%
烷烃	33.02 ± 32.38	28.62	25.26 ± 14.24	28.67
烯烃	5.47 ± 3.29	4.74	4.38 ± 2.28	4.97
炔烃	2.79 ± 3.06	2.42	2.49 ± 2.33	2.83
芳香烃	11.19 ± 12.13	9.69	8.71 ± 7.78	9.89
卤代烃	17.21 ± 8.51	14.91	13.58 ± 6.03	15.41
OVOCs	44.94 ± 19.95	38.95	32.66 ± 13.51	37.07
有机硫	0.76 ± 0.87	0.66	1.02 ± 2.41	1.16

聊城市2021年6月污染日和清洁日浓度小时均值排名前10的VOCs物种见表3.污染日由大到小依次是:丙酮、丙烷、正丁烷、2-丁酮、乙醛、乙酸乙酯、二氯甲烷、乙烷、甲苯和间/对-二甲苯,上述物种占污染日总VOCs浓度小时均值的55.77%;清洁日由大到小依次是:丙酮、正丁烷、丙烷、2-丁酮、乙醛、乙酸乙酯、二氯甲烷、乙烷、甲苯和乙炔,上述物种占清洁日总VOCs浓度小时均值的53.14%.此外,污染日和清洁日浓度小时均值差值较大($>1.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的VOCs物种有丙烷、乙醛、2-丁酮、正丁烷、丙酮、乙酸乙酯以及二氯甲烷,差值分别为3.13、3.02、2.97、

2.11、2.01、1.56 以及 1.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 上述物种均出现在污染日和清洁日 VOCs 浓度小时均值贡献前 10 物种中,进一步证明污染日和清洁日 VOCs 的来源一致. 工业溶剂和清洗剂等挥发会产生较多丙酮,二氯甲烷主要来自工业排放^[30]; 乙烷、

丙烷和正丁烷与机动车尾气排放相关^[31]; VOCs 光化学反应强烈导致乙醛与乙酸乙酯等 OVOCs 浓度较高. 以上表明聊城市 VOCs 可能主要来自人为源中的工业排放源和机动车尾气源,并伴有明显二次生成特征.

表 3 污染日和清洁日浓度小时均值贡献前 10 的物种及其贡献率

Table 3 Top ten species contributions to hourly mean concentrations and their contribution rates on polluted days and clean days							
污染日				清洁日			
物种	类别	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%	物种	类别	$\rho/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%
丙酮	OVOCs	11.70	10.14	丙酮	OVOCs	9.68	10.99
丙烷	烷烃	8.64	7.49	正丁烷	烷烃	5.69	6.46
正丁烷	烷烃	7.81	6.77	丙烷	烷烃	5.51	6.25
2-丁酮	OVOCs	7.69	6.66	2-丁酮	OVOCs	4.71	5.35
乙醛	OVOCs	7.68	6.66	乙醛	OVOCs	4.66	5.29
乙酸乙酯	OVOCs	5.42	4.70	乙酸乙酯	OVOCs	3.86	4.39
二氯甲烷	卤代烃	5.33	4.62	二氯甲烷	卤代烃	3.86	4.38
乙烷	烷烃	4.35	3.77	乙烷	烷烃	3.71	4.22
甲苯	芳香烃	2.90	2.52	甲苯	芳香烃	2.62	2.98
间/对-二甲苯	芳香烃	2.82	2.44	乙炔	炔烃	2.49	2.83

2.2 VOCs 日变化特征

污染日和清洁日总 VOCs 以及各类别 VOCs 浓度日变化趋势如图 3 所示. 污染日总 VOCs、烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和有机硫浓度变化趋势均表现为日间的(07:00~20:00)低于夜间的(21:00 至次日 06:00). 清洁日除烯烃和 OVOCs 外,其余类别 VOCs 也呈现上述现象. 污染日总 VOCs、烷烃、烯烃和芳香烃浓度于 03:00~07:00 上升趋势显著,并于 07:00 达到峰值,此外 17:00~19:00 浓度再次上升; 19:00 起清洁日总 VOCs 出现明显上升趋势,与烷烃、烯烃和卤代烃均于 21:00 出现峰值,上述时段处于早晚高峰,推断峰值出现与机动车排放有关. 日间光照增强且温度升高,夜间大气边界

层降低以及扩散条件不利等也会造成上述 VOCs 早晨和夜晚浓度高于中午及下午的现象^[29]. 此外,聊城市在夏季高温时段(08:00~18:00)实施涉 VOCs 企业错峰生产、城市建成区户外工程涉 VOCs 排放工序错峰作业以及鼓励市民避开高温时段进行加油等措施也是造成上述现象的重要原因. 污染日和清洁日 OVOCs 浓度日变化表现出白天高,夜间低的特征,与上海市^[32]和武汉市^[33, 34]观测结果相同. 在光化学反应较强的午间及下午,污染日和清洁日的烷烃、烯烃和芳香烃均呈下降趋势,表明较多 OVOCs 是在光照强且温度高的时段由烷烃、烯烃和芳香烃通过光化学反应二次生成所致^[35],同时造成烷烃等浓度的下降. 忽略外地传输作用, O_3 日变化特征一般表现为日

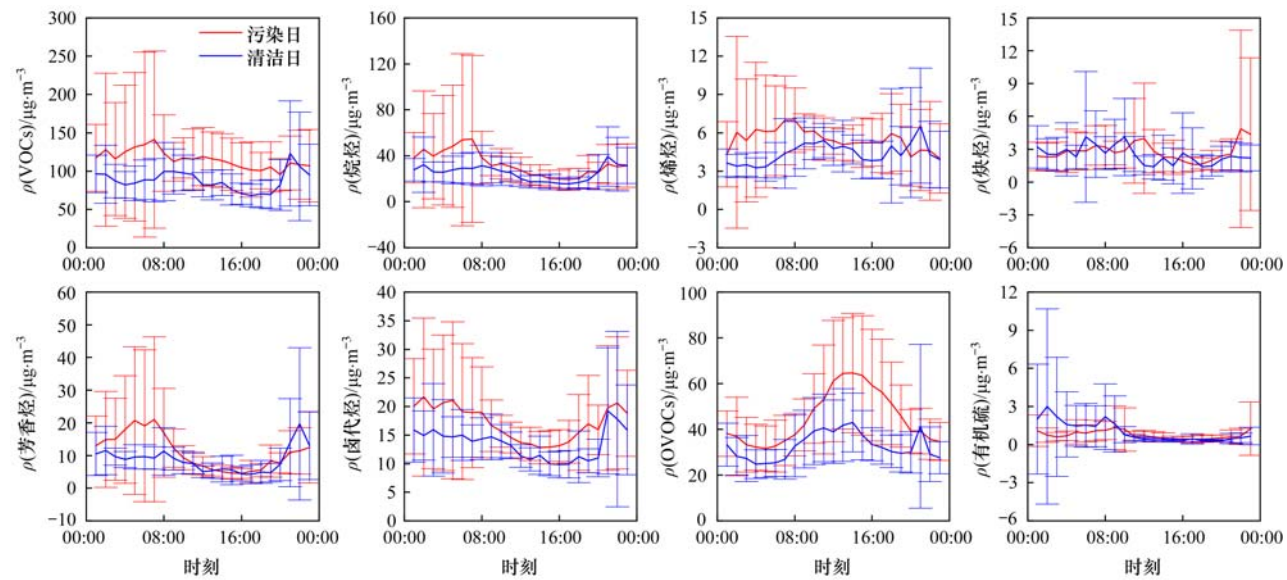


图 3 VOCs 日变化特征

Fig. 3 Daily variation characteristics of VOCs

间高,夜间低,同 OVOCs 日变化特征较为一致,且污染日 OVOCs 浓度显著高于清洁日,表明 OVOCs 对 O₃ 生成并造成 O₃ 污染起重要作用.

2.3 VOCs 反应活性

2021 年 6 月聊城市 OFP 为 253.91 μg·m⁻³,本研究共计算 103 种 VOCs 的 OFP,多于赵修敏等^[13]所用 VOCs 物种的数量,故 OFP 大于其研究的结果,同时高于济南市^[24]和东营市^[26],低于淄博市^[25],与南京市^[36]相近. OFP 在污染日达到 285.29 μg·m⁻³,在清洁日为 212.00 μg·m⁻³,各类别 VOCs 的 OFP 占比情况如图 4 所示. 污染日和清洁日各类别 OFP 占比大小情况一致,以 OVOCs 的 OFP 及占比最大,污染日和清洁日分别为 138.28 μg·m⁻³ 及 48.47% 和 97.13 μg·m⁻³ 及 45.82%; 其次是烯烃,

分别为 56.78 μg·m⁻³ 及 19.90% 和 45.03 μg·m⁻³ 及 21.24%; 芳香烃的 OFP 及占比分别为 55.16 μg·m⁻³ 及 19.33% 和 41.85 μg·m⁻³ 及 19.74%; 烷烃的 OFP 及占比表现为 30.24 μg·m⁻³ 及 10.60% 和 23.66 μg·m⁻³ 及 11.16%; 炔烃的 OFP 及占比分别为 2.65 μg·m⁻³ 及 0.93% 和 2.37 μg·m⁻³ 及 1.12%; 卤代烃的 OFP 及占比分别为 1.98 μg·m⁻³ 及 0.70% 和 1.69 μg·m⁻³ 及 0.80%; 有机硫的 OFP 及占比最小,为 0.19 μg·m⁻³ 及 0.07% 和 0.26 μg·m⁻³ 及 0.12%. 污染日 OVOCs 的 OFP 同清洁日相比增加 42.36%,增幅最大,其次为芳香烃(31.79%),说明聊城市 O₃ 污染的发生与前体物 OVOCs 和芳香烃密切相关,二者对聊城市 O₃ 污染贡献显著.

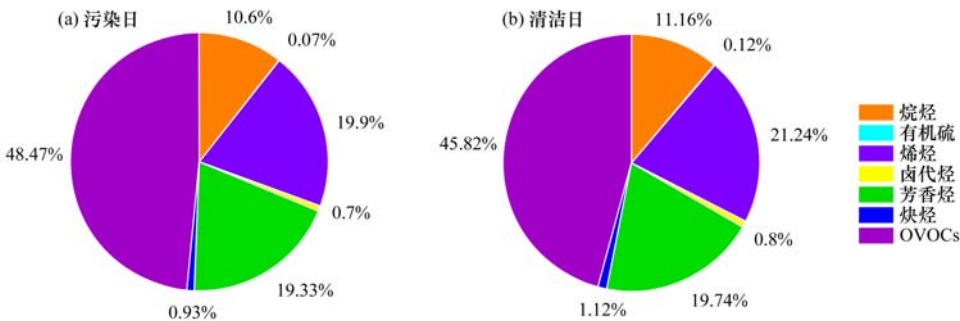


图 4 污染日和清洁日各类别 VOCs 对 OFP 的贡献率
Fig. 4 Contribution rates of each category VOCs to OFP on polluted days and clean days

污染日和清洁日 OFP 前 10 物种及各自占比情况如表 4 所示. 污染日和清洁日 OFP 前 10 物种相同,均为乙醛、间/对-二甲苯、乙烯、丙烯醛、丙醛、丙烯、异戊二烯、甲苯、2-丁酮以及正丁烷. 污染日前 10 物种的 OFP 占总 OFP 的 66.18%,清洁日该比例为 66.49%. 烷烃和卤代烃的浓度小时均值占比虽然较高,但 OFP 前 10 物种中仅出现正丁烷 1 种烷烃类 VOCs,未有卤代烃,相比之下,具有高反应活

性的 OVOCs、芳香烃和烯烃对聊城市 O₃ 生成起重要作用,需重点关注相应排放源. 此外,浓度小时均值占比和排名较低的异戊二烯(污染日为 0.97%,排名第 26;清洁日为 0.91%,排名第 28)在污染日的 OFP 为 11.83 μg·m⁻³,占比 4.15%,排名第 7;在清洁日的 OFP 为 8.53 μg·m⁻³,占比 4.02%,位列第 8,可见以异戊二烯为特征物种的天然源^[16]对 O₃ 生成的贡献也不容忽视.

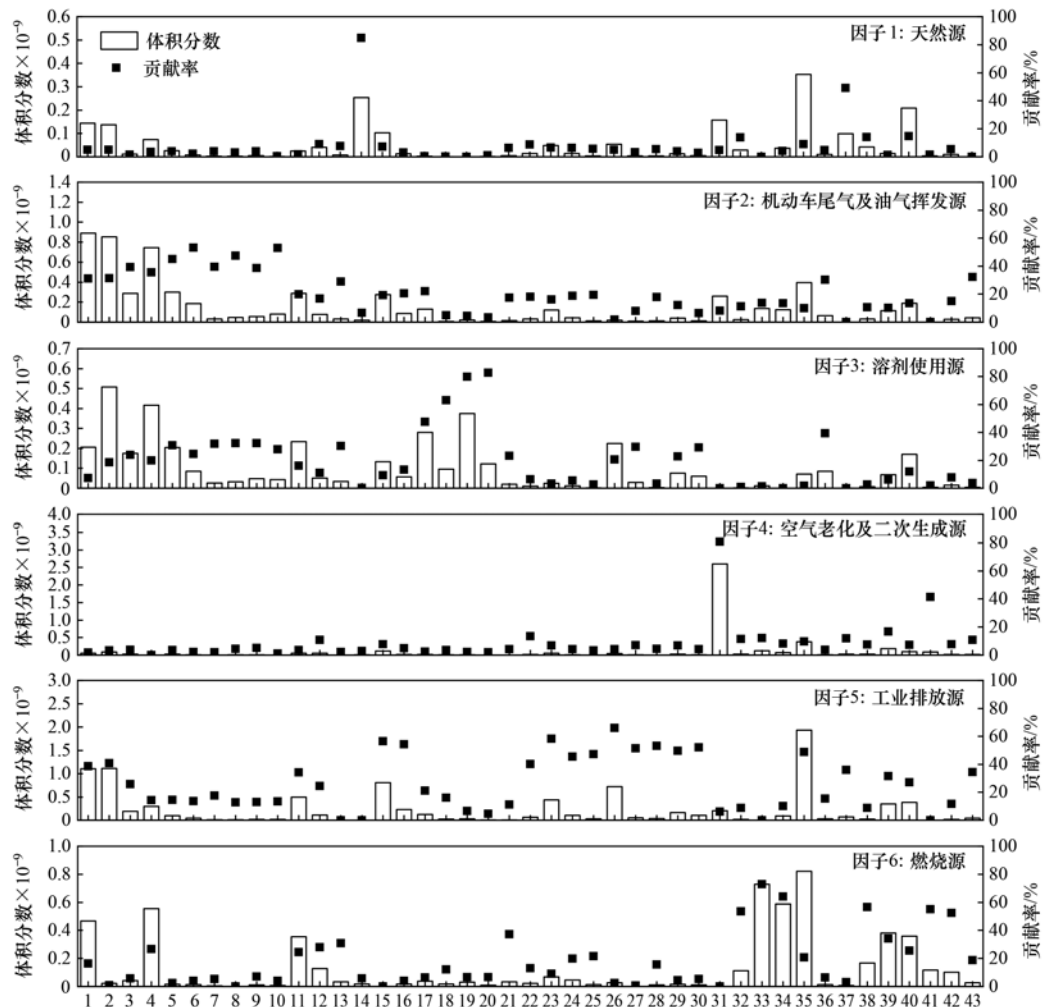
表 4 污染日和清洁日 OFP 贡献前 10 的物种及其贡献率

Table 4 Top ten species contributions to OFP and their contribution rates on polluted days and clean days							
污染日				清洁日			
物种	类别	OFP/μg·m ⁻³	占比/%	物种	类别	OFP/μg·m ⁻³	占比/%
乙醛	OVOCs	50.23	17.61	乙醛	OVOCs	30.50	14.39
间/对-二甲苯	芳香烃	21.96	7.70	乙烯	烯烃	18.44	8.70
乙烯	烯烃	20.93	7.34	丙烯醛	OVOCs	17.02	8.03
丙烯醛	OVOCs	20.52	7.19	丙醛	OVOCs	16.87	7.96
丙醛	OVOCs	17.78	6.23	间/对-二甲苯	芳香烃	15.41	7.27
丙烯	烯烃	13.56	4.75	甲苯	芳香烃	10.49	4.95
异戊二烯	烯烃	11.83	4.15	丙烯	烯烃	10.14	4.79
甲苯	芳香烃	11.62	4.07	异戊二烯	烯烃	8.53	4.02
2-丁酮	OVOCs	11.38	3.99	2-丁酮	OVOCs	6.98	3.29
正丁烷	烷烃	8.98	3.15	正丁烷	烷烃	6.55	3.09

2.4 VOCs 潜在源区

PSCF 分析结果如图 5 所示. 聊城市 VOCs 潜在

源区主要分布在物流园区集中、车流量大以及涉 VOCs 企业多的监测点位的北部和东北部. 高值区



1. 乙烷, 2. 丙烷, 3. 异丁烷, 4. 正丁烷, 5. 异戊烷, 6. 正戊烷, 7. 2,3-二甲基丁烷, 8. 2-甲基戊烷, 9. 3-甲基戊烷, 10. 正己烷, 11. 乙烯, 12. 丙烯, 13. 反-2-丁烯, 14. 异戊二烯, 15. 乙炔, 16. 苯, 17. 甲苯, 18. 乙苯, 19. 间/对-二甲苯, 20. 邻-二甲苯, 21. 1,2,4-三甲苯, 22. 氟利昂-12, 23. 氯甲烷, 24. 氟利昂-11, 25. 氟利昂-13, 26. 二氯甲烷, 27. 三氯甲烷, 28. 四氯化碳, 29. 1,2-二氯乙烷, 30. 1,2-二氯丙烷, 31. 乙醛, 32. 正丁醛, 33. 丙烯醛, 34. 丙醛, 35. 丙酮, 36. 甲基叔丁基醚, 37. 甲基丙烯醛, 38. 戊醛, 39. 乙酸乙酯, 40. 2-丁酮, 41. 丁烯醛, 42. 苯甲醛, 43. 二硫化碳

图8 2021年6月聊城市VOCs来源成分谱图

Fig. 8 Source profiles of VOCs in Liaocheng in June 2021

因子2为机动车尾气及油气挥发源. 因子3中邻-二甲苯、间/对-二甲苯、乙苯和甲苯贡献率分别为82.64%、79.90%、63.05%和47.51%,苯系物是有机溶剂的主要成分,乙苯和间/对-二甲苯等芳香烃与溶剂使用行业相关^[29,49],故判断因子3为溶剂使用源. 因子4中乙醛(80.75%)、丁烯醛(41.52%)、乙酸乙酯(16.63%)、氟利昂-12(13.46%)、丙烯醛(12.16%)、甲基丙烯醛(11.83%)以及正丁醛(11.42%)等贡献率较高,乙醛、丙烯醛在大气中的寿命较长^[50],甲基丙烯醛为二次生成源的示踪剂^[51],乙酸乙酯主要由光化学反应生成^[52],氟利昂分子在对流层中极其稳定,故因子4为空气老化及二次生成源. 因子5中含有较多乙烯和丙烯,此外氯甲烷、二氯甲烷和三氯甲烷等卤代烃和丙酮载荷较高,在石化行业中乙烯和丙烯是重要的原料和产

品^[53],氯甲烷和氯乙烷等卤代烃被认为是工业源的示踪物^[50],丙酮主要用于工业过程^[54],故因子5为工业排放源. 因子6和因子4均为OVOCs占比高,与后者不同的是因子6包含较多乙烷、正丁烷、乙烯和丙烯,乙烷、乙烯以及丙烯为典型的燃烧源特征^[7],结合生物质燃烧和化石燃料燃烧过程会释放较多OVOCs^[55,56],故因子6为燃烧源.

2021年6月聊城市6类VOCs排放源对VOCs的贡献率如图9所示. 各排放源对VOCs的贡献率大小顺序为:工业排放源(30.57%)>机动车尾气及油气挥发源(19.44%)>燃烧源(17.23%)>空气老化及二次生成源(13.69%)>溶剂使用源(12.75%)>天然源(6.32%). 为改善聊城市O₃污染状况,聊城市应加大对工业排放源、机动车尾气及油气挥发源的管控.

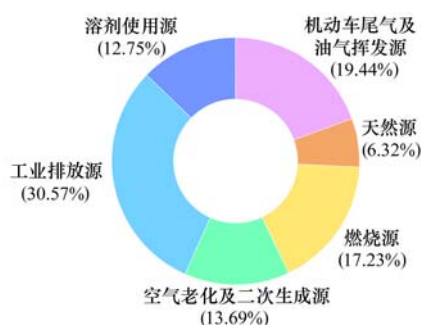


图9 各类源对 VOCs 排放的贡献率

Fig. 9 Contribution rates of various sources to VOCs emissions

3 结论

(1)聊城市 2021 年 6 月 O_3 污染日和清洁日 $\rho(\text{VOCs})$ 小时均值分别为 $(115.38 \pm 59.12) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(88.10 \pm 33.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 且污染日和清洁日 VOCs 来源一致. 受高温、强辐射和低湿的气象条件影响, 污染日 OVOCs、烷烃和芳香烃同清洁日相比有较大增幅. 工业排放源、机动车尾气源和二次生成源是 2021 年 6 月聊城市 VOCs 的主要排放源.

(2)受早晚高峰、气象条件以及聊城市实施错时生产, 错时加油等措施影响, 聊城市 2021 年 6 月总 VOCs、烷烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和有机硫浓度日变化趋势均表现为日间浓度低于夜间浓度. OVOCs 浓度日变化表现出白天高, 夜间低的特征, 受烷烃、烯烃和芳香烃的光化学反应二次生成影响, OVOCs 对 O_3 生成以及造成 O_3 污染起重要作用.

(3)聊城市 2021 年 6 月 OFP 为 $253.91 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中污染日为 $285.29 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 清洁日为 $212.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 污染日和清洁日对 O_3 生成贡献大的前 10 物种均为乙醛、间/对-二甲苯、乙烯、丙烯醛、丙醛、丙烯、异戊二烯、甲苯、2-丁酮和正丁烷, 污染日 OFP 前 10 物种占总 OFP 的 66.18%, 清洁日为 66.49%. OVOCs、烯烃和芳香烃对 O_3 生成贡献较大.

(4)通过 PSCF 和 CWT 分析, 聊城市 VOCs 潜在源区位于监测点位的北部和东北部, 涉及东昌府区的北部和东北部地区以及茌平区的中部和西南区域.

(5)聊城市 VOCs 可能较多来源于燃煤、汽油挥发和机动车尾气. 基于 PMF 模型, 2021 年 6 月工业排放源 (30.57%)、机动车尾气及油气挥发源 (19.44%)、燃烧源 (17.23%)、空气老化及二次生成源 (13.69%)、溶剂使用源 (12.75%) 和天然源 (6.32%) 为聊城市 VOCs 的主要来源.

参考文献:

- [1] 张英南, 薛丽坤, 陈天舒, 等. 基于观测的模型(OBM)的发展历程及其在我国大气化学研究中的应用与展望[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 621-632.
Zhang Y N, Xue L K, Chen T S, et al. Development history of observation-based model(OBM) and its application and prospect in atmospheric chemistry studies in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(3): 621-632.
- [2] 中国环境监测总站. 2021 中国生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/>, 2022-06-24.
- [3] 姜华, 常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1576-1582.
Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of causes and prevention and control recommendations[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(7): 1576-1582.
- [4] 李陵, 李振亮, 张丹, 等. 重庆市主城区 O_3 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.
- [5] 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 等. 我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4393-4399.
Wang M, Chen W T, Lu S H, et al. Ratios of volatile organic compounds in ambient air of various cities of China[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4393-4399.
- [6] 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 等. 运城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, 2022, 43(6): 2979-2986.
Wen X Y, Zhao W T, Luo S Z, et al. Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric volatile organic compounds in summer in Yuncheng City[J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 2979-2986.
- [7] Yang S D, Li X, Song M D, et al. Characteristics and sources of volatile organic compounds during pollution episodes and clean periods in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Science of the Total Environment, 2021, 799, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149491.
- [8] 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 等. 北京市城区夏季 VOCs 变化特征分析与来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4484-4496.
Meng X L, Sun Y, Liao T T, et al. Characteristic analysis and source apportionment of VOCs in urban areas of Beijing in summer[J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4484-4496.
- [9] 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 等. 天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5644-5655.
Wang Y X, Liu B S, Wu J H, et al. Chemical characteristics and source apportionment with temporal refinement for VOCs in Tianjin suburb in summer[J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5644-5655.
- [10] 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.
- [11] 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 等. 广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4305-4315.
Pei C L, Xie Y T, Chen X, et al. Analysis of a typical ozone pollution process in Guangzhou in winter[J]. Environmental

- Science, 2022, **43**(10): 4305-4315.
- [12] 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.
- [13] 赵修敏, 王新, 韩明. 聊城市夏秋季大气 VOCs 特征及 OFP 分析[J]. 环境保护与循环经济, 2021, **41**(12): 73-75, 78.
- [14] 李凯, 潘宁, 梅如波, 等. 泰安市大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2022, **41**(2): 482-490.
- Li K, Pan N, Mei R B, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Taian [J]. Environmental Chemistry, 2022, **41**(2): 482-490.
- [15] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [16] Xiong C, Wang N, Zhou L, *et al.* Component characteristics and source apportionment of volatile organic compounds during summer and winter in downtown Chengdu, southwest China[J]. Atmospheric Environment, 2021, **258**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118485.
- [17] Wang Y Q. An open source software suite for multi-dimensional meteorological data computation and visualisation[J]. Journal of Open Research Software, 2019, **7**, doi: 10.5334/jors.267.
- [18] 曹娜, 王伟, 王大壮, 等. 疫情期间北京市大气污染特征及潜在源区分析[J]. 北京工业大学学报, 2022, **48**(11): 1168-1174.
- Gao N, Wang W, Wang D Z, *et al.* Air pollution characteristics and potential source regions during the COVID-19 in Beijing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, **48**(11): 1168-1174.
- [19] 严晓瑜, 缙晓辉, 杨苑媛, 等. 银川市臭氧污染天气形势客观分型研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(8): 13-25.
- Yan X Y, Gou X H, Yang Y Y, *et al.* Study on objective synoptic classification on ozone pollution in Yinchuan[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(8): 13-25.
- [20] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2014.
- [21] 王思宇. 应用 PMF 和 PCA/APCS 方法探究长春市大气中 PM_{2.5} 来源[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Wang S Y. Source apportionment of PM_{2.5} in atmosphere in Changchun using PMF and PCA/APCS methods [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [22] Gao J, Zhang J, Li H, *et al.* Comparative study of volatile organic compounds in ambient air using observed mixing ratios and initial mixing ratios taking chemical loss into account-A case study in a typical urban area in Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2018, **628-629**: 791-804.
- [23] Liu Y F, Qiu P P, Li C L, *et al.* Evolution and variations of atmospheric VOCs and O₃ photochemistry during a summer O₃ event in a county-level city, Southern China[J]. Atmospheric Environment, 2022, **272**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.118942.
- [24] 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 Jinan[J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, **29**(9): 1839-1846.
- [25] 王帅, 王秀艳, 杨文, 等. 淄博市城区臭氧超标期间的 VOCs 污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- Wang S, Wang X Y, Yang W, *et al.* Characteristics and source analysis of VOCs pollution during the period of ozone exceeding the standard in Zibo city[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- [26] 赵敏, 申恒青, 陈天舒, 等. 黄河三角洲典型城市夏季臭氧污染特征与敏感性分析[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(6): 1351-1361.
- Zhao M, Shen H Q, Chen T S, *et al.* Characteristics and sensitivity analysis of ozone in the representative city of the Yellow River Delta in summer[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(6): 1351-1361.
- [27] 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 等. 郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4372-4381.
- Zhang Y X, Yin S S, Yuan M H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4372-4381.
- [28] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(4): 619-626.
- Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Analyses of pollution characteristics, ozone formation potential and sources of VOCs atmosphere in Chengdu City in summer 2017 [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(4): 619-626.
- [29] 朱轲欣, 刘立忠, 刘煥武, 等. 大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 3944-3952.
- Zhu K X, Liu L Z, Liu H W, *et al.* Chemical reaction activity and source apportionment of atmospheric VOCs in summer in Dalian[J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 3944-3952.
- [30] 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.
- [31] 张利慧, 毋振海, 李斌, 等. 北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(3): 526-535.
- Zhang L H, Wu Z H, Li B, *et al.* Pollution characterizations of atmospheric volatile organic compounds in spring of Beijing urban area[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(3): 526-535.
- [32] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 132-139.
- Jin D. Role of atmospheric VOCs in ozone formation in summer in Shanghai suburb [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 132-139.
- [33] 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.
- [34] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, chemical reactivity and sources in urban Wuhan, central China [J]. Atmospheric Environment, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117340.
- [35] 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 等. 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2648-2658.
- Chen M L, Wang S N, Chen T S, *et al.* Sources apportionment

- of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) in a typical southwestern region in China during summer[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2648-2658.
- [36] 曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟. 南京工业区秋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**(6): 2565-2576.
- Cao M Y, Lin Y Q, Zhang Y L. Characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs in the Nanjing industrial area in autumn[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2565-2576.
- [37] Yu S J, Su F C, Yin S S, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds, source apportionment, and the ozone-NO_x-VOC sensitivities in a heavily polluted megacity of central China: effect of sporting events and emission reductions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(19): 15239-15257.
- [38] Yan Y L, Peng L, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds(VOCs) in a thermal power station centralized area: A study in Shuozhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [39] Zheng H, Kong S F, Xing X L, *et al.* Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for 1 year[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4567-4595.
- [40] Nelson P F, Qingley S M. The hydrocarbon composition of exhaust emitted from gasoline fuelled vehicles[J]. *Atmospheric Environment*, 1984, **18**(1): 79-87.
- [41] 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.
- [42] Kumar A, Singh D, Kumar K, *et al.* Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India: Temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 492-501.
- [43] Song C B, Liu B S, Dai Q L, *et al.* Temperature dependence and source apportionment of volatile organic compounds(VOCs) at an urban site on the north China plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **207**: 167-181.
- [44] 马啸. 基于 PMF 模型对大气 VOCs 源解析及其污染特征研究——以合肥市为例[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- Ma X. Source apportionment based on PMF model and pollution characteristics of atmospheric VOCs: a case study of Hefei city[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [45] Bari M A, Kindzierski W B. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: Sources and screening health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 627-640.
- [46] 罗达通, 张青梅, 刘湛, 等. 长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3463-3472.
- Luo D T, Zhang Q M, Liu Z, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in August in the Chang-Zhu-Tan urban area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3463-3472.
- [47] Liu Y F, Kong L W, Liu X G, *et al.* Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(3): 33-46.
- [48] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物(VOCs)排放源成分谱研究进展[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds(VOCs) source profiles measured in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [49] Zhang X Y, Yan Y L, Duan X L, *et al.* Sources and seasonal variance of ambient volatile organic compounds in the typical industrial city of Changzhi, northern China[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(3), doi: 10.3390/atmos13030393.
- [50] 周民锋, 刘华欣, 魏恒, 等. 基于质子转移飞行时间质谱法对苏州市冬季大气 VOCs 的观测研究[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(10): 2326-2338.
- Zhou M F, Liu H X, Wei H, *et al.* Observation of VOCs in Suzhou winter atmosphere based on proton transfer time-of-flight mass spectrometry[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(10): 2326-2338.
- [51] 高亢, 章慧, 刘梦迪, 等. 芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4885-4894.
- Gao K, Zhang H, Liu M D, *et al.* Characteristics, atmospheric reactivity, and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Wuhu[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4885-4894.
- [52] Han L X, Chen L H, Li K W, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds(VOCs) during ozone polluted days in Hangzhou, China[J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(12), doi: 10.3390/atmos10120780.
- [53] 肖致美, 徐虹, 高璟贇, 等. 天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- Xiao Z M, Xu H, Gao J Y, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- [54] 张浩然, 刘敏, 王小嫚, 等. 南昌市 2021 年春季大气 VOCs 污染特征和来源分析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(3): 1040-1047.
- Zhang H R, Liu M, Wang X M, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric VOCs during spring of 2021 in Nanchang[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3): 1040-1047.
- [55] 陆思华, 李晓华, 刘莹, 等. 大气中挥发性含氧有机物研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(10): 112-114.
- Lu S H, Li X H, Liu Y, *et al.* Study advance on oxygenated VOCs in atmosphere[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **29**(10): 112-114.
- [56] 何振. 福建省环境空气含氧挥发性有机物污染特征及来源研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)