

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

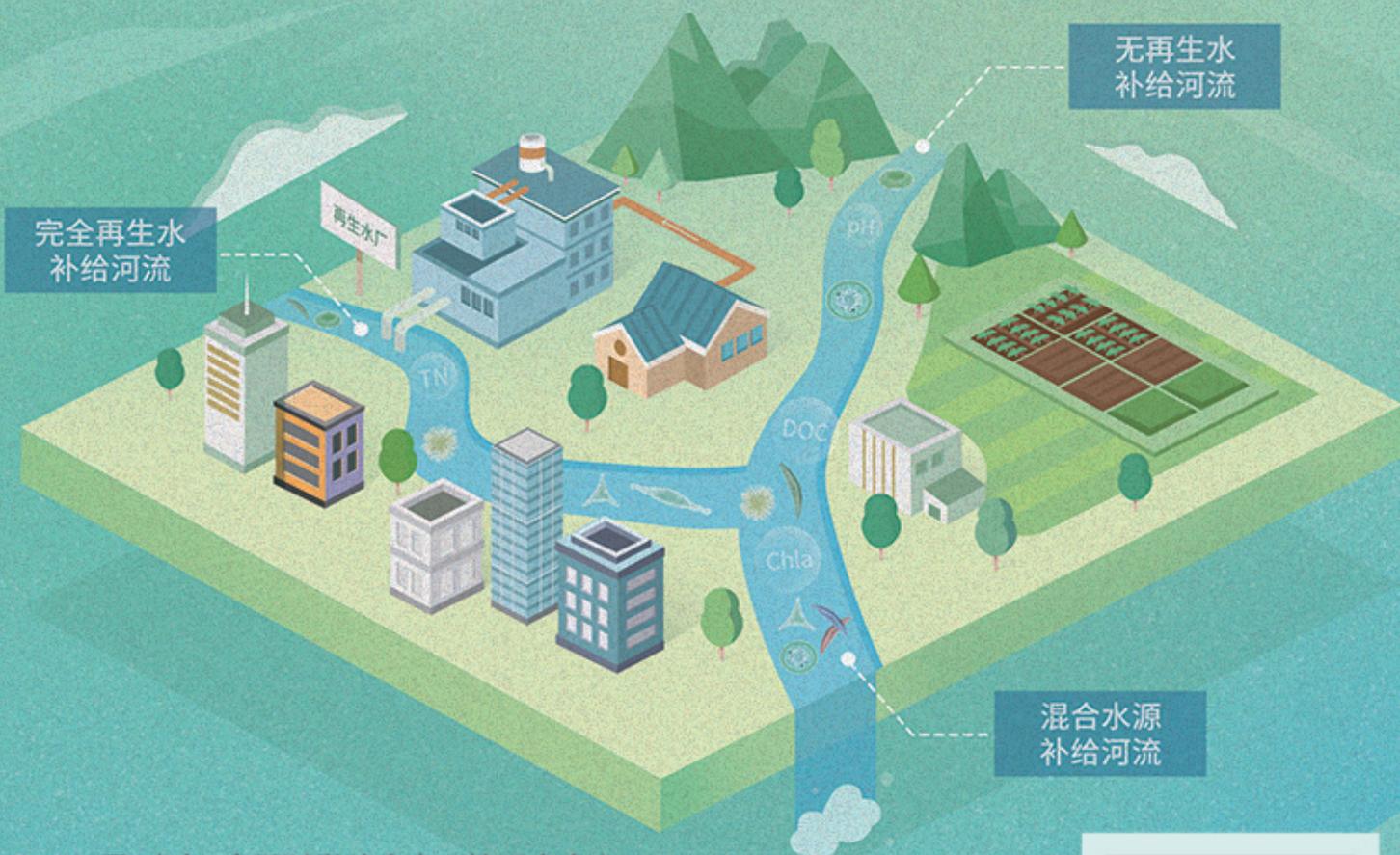
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)

中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)

长株潭城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)

2018~2019 年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)

2015~2021 年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨 (5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)

2011~2019 年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析: 以重庆城口地区为例 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏 (5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉 (5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)

基于 g-C₃N₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 杨旭, 刘贤赵 (5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607, 5741, 5768)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析

齐一谨¹, 王玲玲², 倪经纬^{1*}, 何海洋¹, 赵东旭¹, 龚山陵^{1,3*}

(1. 河南天朗生态科技有限公司, 郑州 450000; 2. 河南省环境监测中心, 河南省环境监测技术重点实验室, 郑州 450000; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 采用 GC5000 在线气相色谱仪, 于 2019 年和 2020 年夏季 6~8 月分别对郑州市城区中大气环境挥发性有机化合物 (VOCs) 进行监测, 探究了 VOCs 的污染特征, 并重点利用比值分析, PMF 受体模型和条件概率函数 (CPF) 模型对比研究了其来源贡献。结果表明, 2019 年和 2020 年夏季 $\rho(\text{VOCs})$ 平均值分别为 $65.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $71.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2019 年烷烃占比逐月变化幅度不大, 占比在 55% 左右, 芳香烃整体呈上升趋势, 烯烃呈下降趋势; 前 10 物种占总 VOCs 的 65.5%, 主要物种依次为异戊烷、乙烷、丙烷、甲苯、正丁烷和间/对-二甲苯等。2020 年烷烃和烯烃占比呈逐月升高趋势, 芳香烃呈逐月降低趋势; 前 10 物种占总 VOCs 的 71.1%, 主要物种依次为乙烷、乙烯、丙烷、异戊烷、正丁烷、甲苯和间/对-二甲苯等。2019 年夏季 OFP 平均值为 $224.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中芳香烃对 OFP 贡献率逐月升高, 烯烃逐月降低; 对 OFP 贡献的物种主要为间/对-二甲苯、异戊二烯、反式-2-丁烯、甲苯和乙烯等。2020 年夏季 OFP 平均值为 $243.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中芳香烃对 OFP 贡献逐月降低, 烯烃逐月升高; 对 OFP 贡献的物种主要为乙烯、间/对-二甲苯、异戊二烯、甲苯和间-乙基甲苯等。PMF 和 CPF 模型解析表明, 2019 年对 VOCs 贡献较大的是溶剂使用源和油气挥发源, 贡献率分别为 36.7% 和 25.1%, 其对 OFP 贡献也较大, 分别为 39.9% 和 23.3%, 需重点关注西南部区域。2020 年对 VOCs 贡献较大的仍为溶剂使用源和油气挥发源, 贡献率分别为 24.9% 和 22.5%; 对 OFP 贡献较大的为溶剂使用源和机动车尾气排放源, 贡献率分别为 33.6% 和 22.9%, 需重点关注北部和南部区域。因此, 今后应重点关注溶剂使用、机动车尾气排放和油气挥发源的排放, 尤其监测点位的西南部、北部和东南部区域污染源。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 臭氧生成潜势 (OFP); 比值分析; 正定矩阵因子分解 (PMF) 模型; 源解析 (RA); 条件概率函数 (CPF) 模型; 夏季

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5429-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203084

Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China

QI Yi-jin¹, WANG Ling-ling², NI Jing-wei^{1*}, HE Hai-yang¹, ZHAO Dong-xu¹, GONG Shan-ling^{1,3*}

(1. Henan Tianlang Ecological Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 2. Key Laboratory of Environmental Monitoring Technology, Henan Environmental Monitoring Center, Zhengzhou 450000, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The concentrations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmospheric environment in the urban area of Zhengzhou were investigated by a GC5000 online gas chromatography in the summer of 2019 and 2020 from June to August, respectively, and the pollution characteristics, especially the source apportionment, were explored with the methods of ratio analysis (RA), positive matrix factorization (PMF) model, and conditional probability function (CPF) model. The results showed that the average VOCs concentrations in 2019 and 2020 summer were $65.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $71.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. In 2019, the proportion of alkanes was changed little, accounting for about 55%. The aromatic hydrocarbon showed an upward trend and olefin was decreased month by month. The top ten species were accounted for 65.5% of the total VOCs with the main species of isopentane, ethane, propane, toluene, *n*-butane, and *m/p*-xylene, etc. In 2020, the proportion of alkanes and olefins was increased, while the proportion of aromatic hydrocarbons was decreased month by month. The top ten species were accounted for 71.1% of the total VOCs with the main species of ethane, ethylene, propane, isopentane, *n*-butane, toluene and *m/p*-xylene, etc. The average ozone formation potential (OFP) concentration in summer 2019 was $224.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. It was found that the contribution ratio of aromatic hydrocarbons to OFP was increased, while that of olefin was decreased month by month, and the main species contributing to OFP were *m/p*-xylene, isoprene, trans-2-butene, toluene, ethylene, etc. In 2020, The average OFP concentration in summer was $243.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, the contribution of aromatic hydrocarbons to OFP was decreased, while the contribution of olefin was increased month by month, and the major species contributing to OFP were ethylene, *m/p*-xylene, isoprene, toluene, and *m*-ethyltoluene, etc. The RA, PMF and CPF model analysis showed that the major contributions in 2019 were the solvent usage and the oil/gas volatilization sources, accounted for 36.7% and 25.1% of VOCs, and their contributions to the OFP were accounted for 39.9% and 23.3% respectively, mainly from the southwest region of Zhengzhou. In 2020, the solvent usage and oil/gas volatilization sources were accounted for 24.9% and 22.5%, and solvent usage and motor vehicle exhaust were the major contribution to the OFP, accounting for 33.6% and 22.9%, respectively, mainly from the north and south regions. Therefore, more attention should be paid to the use of solvent, vehicle exhaust emissions, oil and gas volatilization sources emissions in the future, especially for the pollution sources in the southwest, north and southeast areas.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); ozone formation potential (OFP); ratio analysis (RA); positive matrix factorization (PMF) model; source apportionment; conditional probability function (CPF) model; summer

收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91744209); 河南省重大科技专项 (201400210700); 郑州市臭氧污染天气管控项目 (郑财磋商采购-2020-35)

作者简介: 齐一谨 (1988~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气挥发性有机物的测量及污染防治, E-mail: yijinqi2017@163.com

* 通信作者, E-mail: nijingwei@hh12369.com; gongsl@cma.gov.cn

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是形成 O_3 和二次有机气溶胶等二次污染物的重要前体物^[1]. 近些年近地面臭氧 (O_3) 污染对空气质量的影响成为仅次于细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 的污染, O_3 污染治理迫在眉睫^[2]. 鉴于 VOCs 种类繁多、各物种光化学反应活性差异大及来源广泛, 研究 VOCs 污染特征和来源成为国内外学者研究的热点.

我国针对 VOCs 的污染特征和来源等方面做了大量研究, 主要集中于京津冀及周边、长三角、珠三角和川渝等地^[1]. Li 等^[3] 研究表明京津冀地区 VOCs 中烯烃在 O_3 形成过程中占主导作用, 其中乙烯和丙烯贡献最大, 机动车尾气排放对该地区环境中 VOCs 贡献最大. Zhu 等^[4] 研究表明长三角 VOCs 排放主要来自于船舶和工业企业排放, 说明不同地区受产业结构的影响 VOCs 排放差异较大. Meng 等^[5] 研究表明珠三角 O_3 生成敏感区为 VOCs 控制区, VOCs 主要来源于溶剂使用、油气挥发和汽车尾气排放. Deng 等^[6] 对成都地区 O_3 污染成因和 VOCs 污染特征进行研究, 表明烯烃对 O_3 的生成贡献达到 50% 以上, 尤其乙烯、戊烯和丙烯等贡献最大. 蒋美青等^[7] 对我国典型城市群 O_3 污染成因和活性进行分析, 表明京津冀、长三角、珠三角和成渝地区四大城市群中 O_3 生成敏感区多数处于 VOCs 控制区, 机动车尾气和汽油挥发是环境中 VOCs 主要来源, 贡献率为 30% ~ 50%. 郑州市地处中原, 交通发达, 工业种类繁多, 其涉 VOCs 的主导产业主要为整车制造、家具、印刷、橡胶和食品加工等, 其作为大气污染传输通道城市 (“2 + 26” 城市) 之一, 环境空气污染形势严峻, 尤其夏秋季 O_3 污染形势较为严峻^[8]. Li 等^[9] 研究发现郑州市 O_3 污染处于 VOCs 敏感区, 削减 VOCs 排放有利于削弱 O_3 污染. 目前郑州市关于 VOCs 污染特征和来源报道主要集中在春季和冬季, 夏秋季的研究鲜见报道^[10-14]. 在 VOCs 监测时, 不同地区受当地产业结构和时空等因素的影响, VOCs 排放组分和来源存在差异. 鉴于郑州市夏季 O_3 高值频发, O_3 污染成因、VOCs 来源复杂和不同季节 VOCs 来源可能存在差异. 因此, 开展近两年夏季 VOCs 污染特征和来源研究工作极为必要.

本研究采用 GC5000 在线气相色谱仪对郑州市夏季大气环境中 VOCs 进行实时监测, 分析 VOCs 浓度水平和关键活性组分, 并重点利用 PMF 受体模型和 CPF 模型对近两年夏季 VOCs 来源进行对比探讨, 以期摸清郑州市夏季 VOCs 关键活性组分和对 O_3 生成的主要来源贡献, 并为夏季 O_3 管控和削减 VOCs 排放提供基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 监测位置与时间

利用 GC5000 在线气相色谱仪在 2019 年和 2020 年的夏季 6 月 1 日至 8 月 31 日分别采集并经处理后小时有效数据 1 917 份和 2 064 份, 监测周期较长, 能较好反映夏季大气 VOCs 的污染特点. 监测点位于河南省环境监测中心站楼顶 (东经 113. 69°, 北纬 34. 76°), 处于主城区内. 经现场调研点位周边主要为商业和住宅小区, 北部约 300 m 为金水路主干道, 车流量大, 尤其东部道路施工易造成交通拥堵, 周边存在道路翻修施工、老旧小区改造、餐饮店和加油站等污染源, 属于典型的市中心城市结构特征. 具体监测点位见图 1.



图 1 郑州市 VOCs 监测点位示意

Fig. 1 Monitoring site of VOCs in Zhengzhou

1.2 分析仪器

采用德国 AMA-GC5000 在线气相色谱仪对环境 VOCs 进行全天自动连续 24 h 监测, 时间分辨率为 1 h. GC5000 型监测系统具有自动采样、富集和分析功能, 包括两套采样系统、双色谱柱、稀释模块和其他辅助设备. 其中采样系统分别为低沸点的 GC5000 VOCs 色谱仪, 目标化合物为 $C_2 \sim C_6$; 和高沸点的 GC 5000 BTX 色谱仪, 目标化合物 $C_6 \sim C_{12}$, 色谱柱分别为 plot 柱和 DB-1 色谱柱. 检测器均为氢火焰离子化检测器 (FID). 稀释模块 DIM200 主要用于标准配气, 稀释倍数通常为 1 ~ 2500 倍. 该系统共监测 PAMs 规定的 56 种 VOCs 物种, 包括 29 种烷烃、10 种烯烃、16 种芳香烃和 1 种炔烃. 为保证监测数据的有效性和可靠性, 在观察期间, 每两周使用标准气体通过五点法对设备进行校准和验证, 校准时相关系数均在 0.995 ~ 0.999 之间.

1.3 臭氧生成潜势

本文采用臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 表征 VOCs 不同组分对 O_3 的生成贡献, 初步判定 VOCs 排放对 OFP 的影响, 其计算公式见式 (1)^[8,9].

$$\text{OFP} = \sum_{i=1}^m \text{VOC}_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中, OFP 表示 O_3 最大生成潜力 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); VOC_i 表示第 i 种 VOCs 实测浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); MIR_i 表示物种 i 单位质量 VOCs 的 O_3 生成量 ($\mu\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$), MIR 值参考 Carter^[15,16] 研究的 MIR 系数; VOC_i 为总 VOCs 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

1.4 PMF 模型

本研究采用美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 正定矩阵因子分解 (PMF) 5.0 受体模型对 VOCs 进行来源解析, 计算公式见式 (2) ~ (5)^[17-19].

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij} \quad (2)$$

式中, \mathbf{x}_{ij} 表示第 i 个样本中第 j 个组分的浓度; \mathbf{g}_{ik} 表示第 k 个排放源对第 i 个样本的贡献; \mathbf{f}_{kj} 表示第 k 个排放源中 j 组分的含量; \mathbf{e}_{ij} 表示第 i 个样本中第 j 个物种的残差; p 表示需要解析的因子数. 由于物质浓度存在误差及方法检出限的原因, 式 (2) 中存在不确定性, 一般采用目标函数 (Q) 来减少误差和不确定性, Q 计算公式见式 (3).

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{\mathbf{x}_{ij} - \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj}}{\mathbf{u}_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

式中, n 和 m 分别表示样品数量和组分数量; \mathbf{u}_{ij} 表示第 i 个样品中组分 j 的不确定度, 可以由误差比例和方法检出限确定. 当物种中 VOCs 浓度高于检出限 (MDL) 时, 采用公式 (4) 计算 \mathbf{u}_{ij} ; 当其低于 MDL 时, \mathbf{u}_{ij} 采用公式 (5) 计算.

$$\mathbf{u}_{ij} = \sqrt{(\text{EF} \times \text{conc})^2 + (0.5 + \text{MDL})^2} \quad (\text{conc} > \text{MDL}) \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_{ij} = (5/6) \text{MDL} \quad (\text{conc} \leq \text{MDL}) \quad (5)$$

式中, EF 表示富集因子; conc 表示 VOCs 浓度; MDL 表示检测限.

PMF 受体模型方法是芬兰赫尔辛基大学提出的多元统计分析方法, 广泛应用于大气环境颗粒物及 VOCs 等方面的源解析. 经过反复运算和调试模型, 2019 年 PMF 模型运算参数为 $Q_{\text{robust}} = 21\,110.9$ 、 $Q_{\text{true}} = 21\,586.7$, $Q_{\text{true}}/Q_{\text{robust}}$ 为 1.02; 2020 年 PMF 模型运算参数为 $Q_{\text{robust}} = 24\,133.6$ 、 $Q_{\text{true}} = 24\,375.6$, $Q_{\text{true}}/Q_{\text{robust}}$ 为 1.01, $Q_{\text{true}}/Q_{\text{robust}}$ 均小于 1.5, 拟合结果收敛高. 各物种残差均符合正态分布, 主要分布在 $-3 \sim 3$ 范围内. 各物种拟合值与实测值之间相关系数主要分布在 0.6 ~ 0.9 之间, 相关性较高.

1.5 CPF 模型

利用条件概率函数 (CPF) 模型对郑州市夏季 VOCs 解析出的不同污染源的进行分析, 评估不同方向 VOCs 污染源贡献的影响^[20,21]. CPF 值表明了该区域固定时间段内对观测点污染物的贡献大小, 判断污染物的主要来源方向, 其值越大, 表征不同方位污染物对观测点 VOCs 排放的贡献越大^[22]. CPF 计算公式见 (6).

$$\text{CPF} = a\Delta\theta/b\Delta\theta \quad (6)$$

式中, CPF 表示风向在 $\Delta\theta$ 范围内的 CPF 值, CPF 值是无量纲, 介于 0 ~ 1 之间; $a\Delta\theta$ 表示风向在 $\Delta\theta$ 范围内的样品总数; $b\Delta\theta$ 表示在 $\Delta\theta$ 范围内观测值大于等于阈值的样品数. 该研究中, $\Delta\theta$ 设置为 22.5° , 阈值为观测值的 75% 分位数, 分析过程中考虑受静风风向的不确定性, 把风速小于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速样品剔除, 排除静风影响.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度污染特征

2.1.1 浓度组分变化

图 2 展示了 2019 年和 2020 年的夏季监测期间 VOCs 浓度及各组分占比情况, 从中看出, 2019 年和 2020 年的夏季 $\rho(\text{VOCs})$ 平均值分别为 $65.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $71.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2019 年 6 ~ 8 月 $\rho(\text{VOCs})$ 平均值依次为 71.9 、 69.5 和 $55.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 8 月有所降低, 其中 2019 年 6 ~ 8 月烷烃质量分数依次为 55.4%、57.4% 和 54.3%; 烯烃依次为 16.0%、11.0% 和 6.4%, 芳香烃依次为 26.8%、26.6% 和 36.9%, 炔烃依次为 1.9%、4.9% 和 2.4%; 2020 年 6 ~ 8 月 $\rho(\text{VOCs})$ 依次为 73.5 、 69.6 和 $70.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中烷烃质量分数依次为 52.8%、55.9% 和 56.3%, 烯烃依次为 14.0%、14.1% 和 15.2%, 芳香烃依次为 31.7%、28.6% 和 26.9%, 炔烃依次为 1.4%、1.4% 和 1.6%.

对比发现, 2020 年 VOCs 平均浓度比 2019 年同期高 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 两年整体占比表现为: 烷烃 > 芳香烃 > 烯烃 > 炔烃. 2019 年烷烃质量分数逐月变化幅度不大, 为 55% 左右, 芳香烃整体呈上升趋势, 烯烃呈下降趋势; 2020 年烷烃和烯烃质量分数呈逐月升高趋势, 芳香烃呈逐月降低趋势. 有研究表明, 烷烃主要来自机动车尾气、油气挥发和燃烧源, 芳香烃主要来自溶剂涂料使用, 烯烃主要来自机动车尾气、油气挥发和燃烧源等^[12,14]. 分析表明, 2019 年逐月需重点关注芳香烃和烷烃的排放; 2020 年逐月需重点关注烷烃和烯烃的排放.

2.1.2 前 10 物种变化

图 3 展示了 2019 年和 2020 年的夏季监测期间

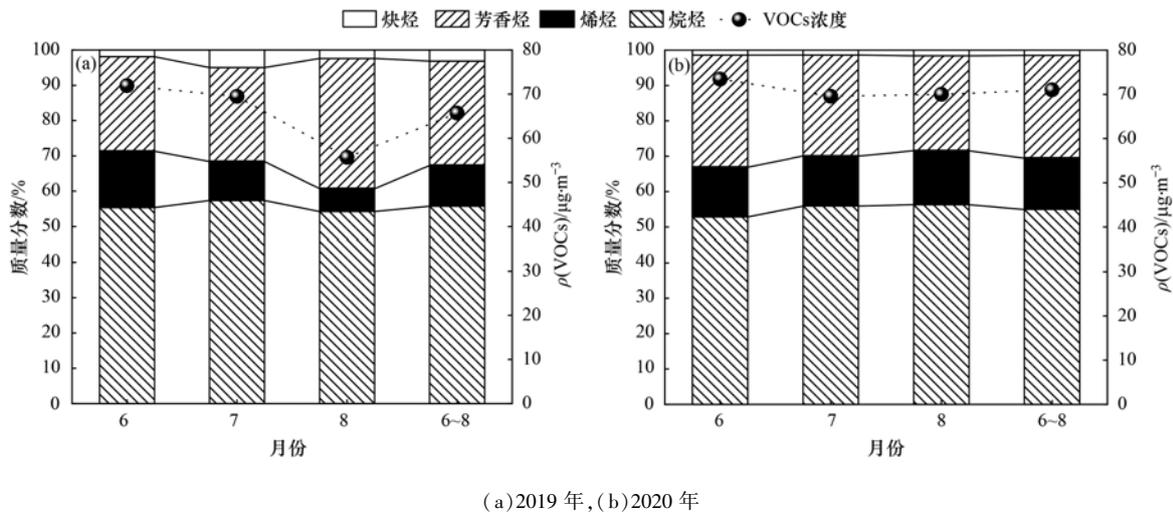


图2 2019和2020年夏季VOCs浓度和各组分质量分数

Fig. 2 Concentrations and mass fractions of each component of VOCs in summer 2019 and 2020

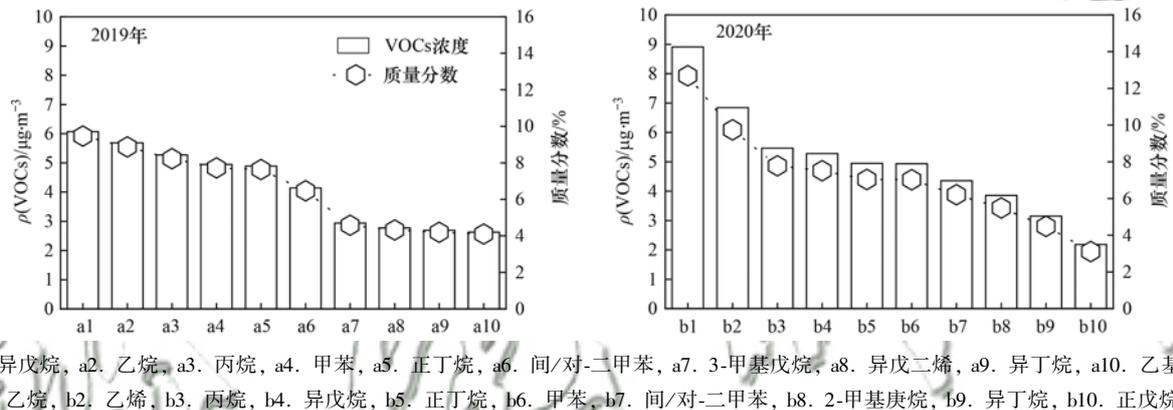


图3 2019年和2020年的夏季VOCs前10物种浓度和质量分数

Fig. 3 Concentration and mass fractions of the top ten species of VOCs in summer 2019 and 2020

VOCs前10物种浓度和质量分数,从中看出2019年和2020年浓度排名前10物种分别占总VOCs浓度的质量分数为65.5%和71.1%,其中2019年主要物种依次为异戊烷(9.5%)、乙烷(8.9%)、丙烷(8.2%)、甲苯(7.7%)、正丁烷(7.6%)、间/对-二甲苯(6.5%)、3-甲基戊烷(4.6%)、异戊二烯(4.3%)、异丁烷(4.2%)和乙基苯(4.1%);2020年依次为乙烷(12.7%)、乙烯(9.7%)、丙烷(7.8%)、异戊烷(7.5%)、正丁烷(7.0%)、甲苯(7.0%)、间/对-二甲苯(6.2%)、2-甲基庚烷(5.5%)、异丁烷(4.5%)和正戊烷(3.1%)。

对比发现,2020年前10物种占比高于2019年,其中2019年主要是 $C_2 \sim C_4$ 的烷烃和 $C_7 \sim C_8$ 的芳香烃,2020年除 $C_2 \sim C_4$ 的烷烃和 $C_7 \sim C_8$ 的芳香烃外,还包含乙烯。有研究表明,乙烷、丙烷和丁烷主要来自液化石油气(LPG)和天然气(NG)的使用排放,正戊烷和异戊烷主要来自汽油挥发,苯系物主要来自汽车尾气及溶剂使用排放,乙烯主要来自机动车尾气和燃烧源^[14,23]。分析表明,2020年乙烯的浓

度占比较去年增加,需重点关注机动车尾气和燃烧源的排放。

2.1.3 与其他城市对比

表1展示了京津冀、长三角、珠三角和汾渭平原部分城市夏季VOCs浓度水平与本研究的对比情况。从中看出,天津^[24,25]、佛山^[26]、厦门^[27]和台中(中国台湾)^[28]和太原^[29]与郑州监测物种相当,主要为烷烃、烯烃、芳香烃和炔烃,其中佛山、厦门、台中 $\rho(\text{VOCs})$ 水平与郑州市相当,维持于 $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右。北京^[21]、绍兴^[30]和南京^[31]除了监测了烷烃、烯烃、芳香烃和炔烃外,还对卤代烃、OVOCs等组分进行了监测;石家庄^[32]、天津^[24]、厦门、台中和北京^[21,33]除了对夏季VOCs浓度特征进行研究外,并且与其他季节进行了对比分析。对比发现,有的地市夏季VOCs浓度相比秋冬季节VOCs浓度较低,分析表明可能因夏季辐射强、温度高,易于VOCs参与光化学反应消耗,且秋冬季边界层较低,不利于污染物扩散,VOCs易累积,使得秋冬季VOCs略高于夏季。从组分看,厦门、太原^[29,34]、北京、阳泉^[35]、台中和天

津等城市与郑州市烷烃占比相当,维持于 55% 左右,而石家庄 2017 年研究发现,烷烃占比较少,主要来自卤代烃、芳香烃和 OVOCs 的排放,有研究表明烷烃主要来自机动车尾气排放、油气挥发及燃烧源等^[24],而石家庄 OVOCs 贡献较高,除了一次排放外,也与夏季光化学反应二次生成有关^[32]. 烯炔排放中郑州市与天津、佛山和太原城市占比相当,维持于 15% 左右,相比郑州市自身,烯炔 2020 年较 2019 年略有增加,其中乙烯浓度贡献较为突出,乙烯等烯炔主要来自机动车尾气排放、燃烧源及溶剂使用,结合现场调研发现,2020 年郑州市夏秋季监测站点附近施工工地和道路改造工程较多,车辆易造成拥堵,周边老旧小区,存在燃烧现象,推测 2020 年烯炔增加可能与机动车尾气和燃烧源排放有关^[35]. 郑州和其他

城市夏季芳香烃质量分数均较为突出,尤其佛山、北京、厦门、台中、南京和郑州等芳香烃占比高达近 30% 以上,其中佛山最为突出,占比达 40.9%,郑州和南京市相当,占比约 29%,芳香烃随气温升高,挥发性增强,通常来自溶剂使用源和机动车尾气排放源等^[25,29]. 炔烃中主要是乙炔,有研究表明乙炔除了来自燃烧源外,交通源和溶剂使用源也有所排放^[26,31],各城市中炔烃的占比均较小,维持于 2% 左右.

对比发现,郑州市与佛山、厦门和台中等城市 VOCs 浓度水平相当,但各城市 VOCs 浓度水平和排放组分占比也存在差异,主要与当地产业结构、能源结构、采样时间、周期和物种数量等因素差异有关^[24]. 因此持续跟踪研究当地 VOCs 浓度水平和组分变化极为重要.

表 1 郑州市夏季 VOCs 浓度与其他城市比较¹⁾

Table 1 Comparison of summer VOCs concentrations between Zhengzhou and other Chinese cities

城市	观测时间	物种数量	$\rho(\text{VOCs})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\omega/\%$				文献
				烷烃	烯炔	芳香烃	炔烃	
北京	2016 年 7 月	99	86.6	31.6	4.7	12.0	2.3	[21]
北京	2017 年 7~8 月	59	32.5 ± 17.4	49.2	9.8	38.3	2.7	[33]
天津	2019 年 6~8 月	56	32.9 ~ 47.1	61.7 ~ 63.4	15.0 ~ 15.5	18.5 ~ 19.1	2.7 ~ 4.1	[25]
天津	2019 年 6~8 月	56	42.0	62.8	15.4	19.1	2.7	[24]
石家庄	2017 年 7~8 月	61	107.1	4~5	1~2	18~20	—	[32]
绍兴	2019 年 8 月	98	77.6	31.3	5.2	20.5	1.6	[30]
南京	2013 年 8 月	69	128.7	31.2	5.0	29.6	3.7	[31]
佛山	2015 年 6~7 月	55	56.22	34.0	18.5	40.9	2.9	[26]
厦门	2015 年 6~8 月	56	73.8	54.1	8.5	37.4	—	[27]
台中	2014 年 6~8 月	55	57.6	44.3	9.2	42.5	4.0	[28]
太原	2018 年 8 月	56	32.2	58.0	16.5	20.1	5.4	[29]
太原	2019 年 6~7 月	47	48.1	53.0	15.1	26.6	5.3	[34]
阳泉	2018 年 7~8 月	68	82.1 ± 22.7	51.8	8.0	17.8	3.8	[35]
郑州	2019 年 6~8 月	56	65.7	55.8	11.5	29.6	3.1	本研究
郑州	2020 年 6~8 月	56	71.0	55.0	14.4	29.1	1.5	本研究

1) “—”表示参考文献中无相关数据

2.2 臭氧生成潜势

2.2.1 OFP 组分变化

图 4 展示了 2019 年和 2020 年的 OFP 及各组分

贡献率情况,从中发现 2019 年和 2020 年的 OFP 平均值分别为 $224.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $243.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中芳香烃和烯炔对 OFP 贡献率最大,分别为 43.3% 和

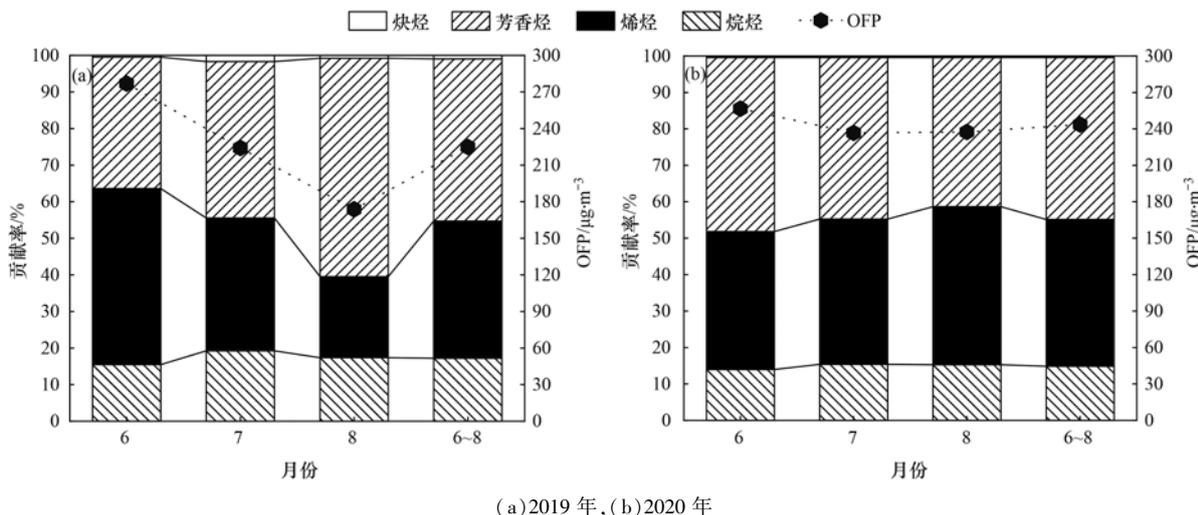


图 4 2019 和 2020 年夏季 OFP 和各组分贡献率

Fig. 4 OFP and contribution rates of each component in summer 2019 and 2020

37.5%。从6~8月看,2019年的OFP平均值依次为276.9、224.1和173.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中烷烃贡献率依次为15.5%、19.3%和17.4%,烯烃依次为48.1%、36.3%和22.1%,芳香烃依次为35.9%、42.8%和59.7%,炔烃依次为0.5%、1.7%和0.8%。2020年的OFP平均值依次为256.6、236.7和237.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从逐月看,烷烃贡献率依次为14.0%、15.4%和15.3%,烯烃依次为37.9%、39.9%和43.4%,芳香烃依次为47.8%、44.4%和40.9%,炔烃依次为0.4%、0.4%和0.4%。

对比发现,2020年夏季OFP平均值为243.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,比2019年同期高18.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2019年芳香烃OFP贡献率逐月升高,烯烃逐月降低,2020年变化趋势与之相反。其中芳香烃和烯烃OFP平均值贡献最大,贡献率均为40%左右;烷烃对OFP贡献率逐月波动幅度不大,均在15%左右。

2.2.2 OFP前10物种变化

图5展示了2019年和2020年的夏季监测期间OFP前10物种及贡献率情况,2019年和2020年OFP排名前10物种分别占总OFP值的76.8%和78.9%,其中2019年主要为间/对-二甲苯(14.5%)、异戊二烯(13.2%)、反式-2-丁烯(12.4%)、甲苯(8.9%)、乙烯(6.3%)、丙烯(5.0%)、间-乙基甲苯(4.6%)和邻-二甲苯(4.3%)等,2020年主要为乙烯(25.5%)、间/对-二甲苯(14.1%)、异戊二烯(8.3%)、甲苯(8.2%)、间-乙基甲苯(6.5%)、邻-二甲苯(4.5%)和丙烯(3.1%)等。对比发现,2019年和2020年OFP前10物种基本一致,主要为 $\text{C}_7\sim\text{C}_9$ 的芳香烃和 $\text{C}_2\sim\text{C}_5$ 烯烃,其中 $\text{C}_7\sim\text{C}_9$ 的芳香烃占比分别为35.9%和38.8%, $\text{C}_2\sim\text{C}_5$ 烯烃贡献率均为36.9%,其中2019年反式-2-丁烯、异戊二烯对OFP贡献率均高于2020年,乙烯对OFP的贡献率低于2019年,分析表

明,2019年受油气挥发和植物排放源影响较大,2020年受机动车和燃烧源影响较大。

2.3 VOCs来源解析

2.3.1 比值分析

通常采用苯与甲苯(B/T)比值初步判断大气环境中VOCs的主要来源,一般当B/T小于0.2时,受溶剂使用源的影响较大;当B/T在0.5左右时,主要受机动车排放影响;当B/T大于1时,VOCs主要来自燃烧源,尤其B/T在1.5~2.2时被认为受燃煤源排放影响较大,当B/T为2.5时受生物质燃烧影响大^[12,14,21]。苯、乙基苯和间/对-二甲苯具有同源性,但大气寿命有显著差异,二甲苯与·OH的反应速率一般是乙基苯的3倍左右,通常采用乙基苯与间/对-二甲苯(E/X)或苯与间/对-二甲苯(B/X)的比值来评估气团的老化程度^[17]。BTEX(苯、甲苯、乙基苯和二甲苯)在大气中光化学寿命和参与光化学反应活性存在差异,常用于评价气团的老化程度^[36~38]。当E/X大于0.33或B/X大于1.7时,认为该区域受老化气团控制可能性较大^[35,39]。异戊烷与正戊烷具有相似的大气寿命,通过异戊烷与正戊烷的比值(I/N)可初步判断VOCs的来源。有研究表明,我国隧道实验和汽油挥发I/N值分别约为2.9和3.8,燃煤源I/N值变化范围约为0.56~0.8^[35,40,41]。也有研究表明当I/N值在3.1左右,主要受汽车和工业混合挥发排放的影响,通常是由于工业油气的存储泄漏、机动车尾气排放及机动车的蒸发损失等因素引起的^[42]。

图6展示了2019年和2020年不同特征物种比值情况,从中看出2019年郑州市B/T在0.3~1.4之间,平均值为 0.6 ± 0.2 ;2020年比值为0.3~3.6,平均值为 0.8 ± 0.7 ,初步判断2019年VOCs排放受溶剂使用的影响较大,2020年受溶剂使用、机动车排放及燃烧源的影响较大。2019年和2020年

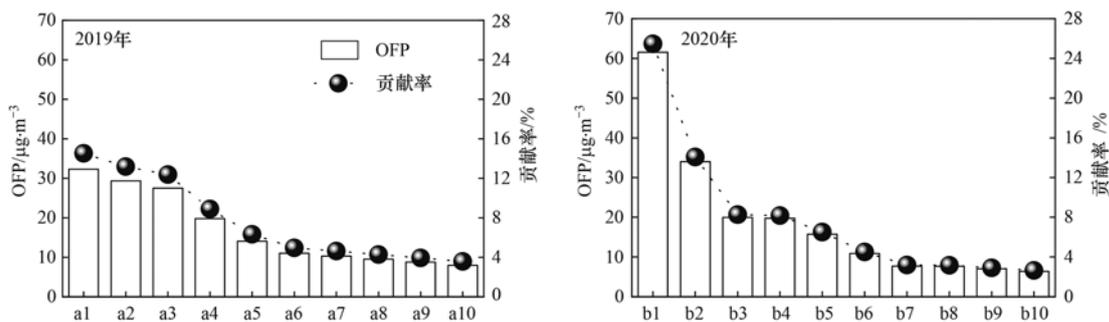


图5 2019和2020年夏季OFP前10物种和贡献率
a1. 间/对-二甲苯, a2. 异戊二烯, a3. 反式-2-丁烯, a4. 甲苯, a5. 乙烯, a6. 丙烯, a7. 间-乙基甲苯, a8. 邻-二甲苯, a9. 异戊烷, a10. 乙基苯; b1. 乙烯, b2. 间/对-二甲苯, b3. 异戊二烯, b4. 甲苯, b5. 间-乙基甲苯, b6. 邻-二甲苯, b7. 丙烯, b8. 异戊烷, b9. 对-乙基甲苯, b10. 1,3,5-三甲基苯

图5 2019和2020年夏季OFP前10物种和贡献率

Fig. 5 Concentration and contribution rates of top ten species for OFP in summer 2019 and 2020

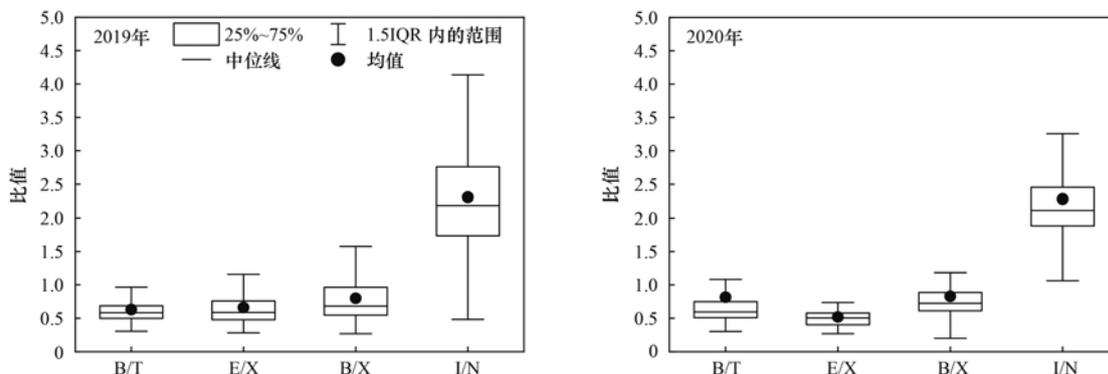


图6 2019 和 2020 年夏季各特征物种比值关系

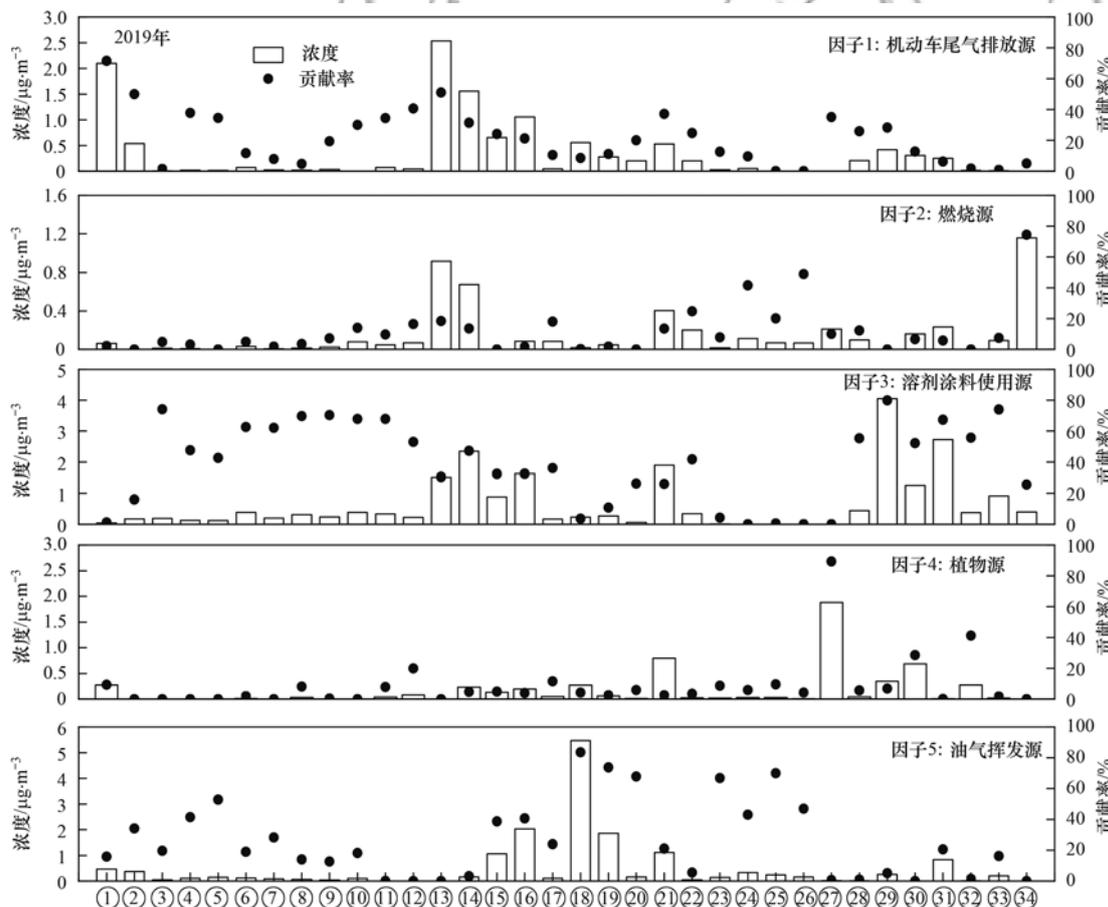
Fig. 6 Ratios of characteristic species in summer 2019 and 2020

E/X 分别在 0.2 ~ 1.5 和 0.1 ~ 1.2, 均值分别为 0.7 ± 0.3 和 0.5 ± 0.2 ; B/X 分别在 0.2 ~ 2.0 和 0.2 ~ 1.8, 均值分别为 0.8 ± 0.4 和 0.8 ± 0.5 , 采样期间均位于夏季且晴天居多, VOCs 反应较快, 加之区域传输的影响, 因而郑州市环境空气中 VOCs 可能受老化气团控制. 2019 年 I/N 在 0.5 ~ 5.1 之间, 2020 年在 1.0 ~ 3.9 之间, 平均值均为 2.3 ± 0.8 , 初步判断

为郑州市 VOCs 受汽油挥发的影响较大. 综上, 2019 年和 2020 年 B/T、E/X、B/X 和 I/N 值结果较为接近, 初步研判为 VOCs 排放主要受溶剂使用影响和汽油挥发的影响较大, 且 2020 年机动车尾气排放及燃烧源影响也不容忽视.

2.3.2 PMF 模型来源解析

从图 7 和图 8 中看出, 因子 1 贡献率较高的物



- ① 3-甲基戊烷, ② 正己烷, ③ 环己烷, ④ 2-甲基己烷, ⑤ 3-甲基己烷, ⑥ 正庚烷, ⑦ 甲基环己烷, ⑧ 正辛烷, ⑨ 正壬烷, ⑩ 正癸烷, ⑪ 正十一烷, ⑫ 正十二烷, ⑬ 乙烷, ⑭ 丙烷, ⑮ 异丁烷, ⑯ 正丁烷, ⑰ 环戊烷, ⑱ 异戊烷, ⑲ 正戊烷, ⑳ 2,3-二甲基丁烷, ㉑ 乙烯, ㉒ 丙烯, ㉓ 反式-2-丁烯, ㉔ 1-丁烯, ㉕ 顺式-2-丁烯, ㉖ 1-戊烯, ㉗ 异戊二烯, ㉘ 苯, ㉙ 甲苯, ㉚ 乙苯基, ㉛ 间/对-二甲苯, ㉜ 苯乙炔, ㉝ 邻二甲苯, ㉞ 乙炔

图7 2019 年夏季各因子中 VOCs 物种浓度和贡献率

Fig. 7 VOCs species concentration and contribution ratios of various sources during the summer in 2019

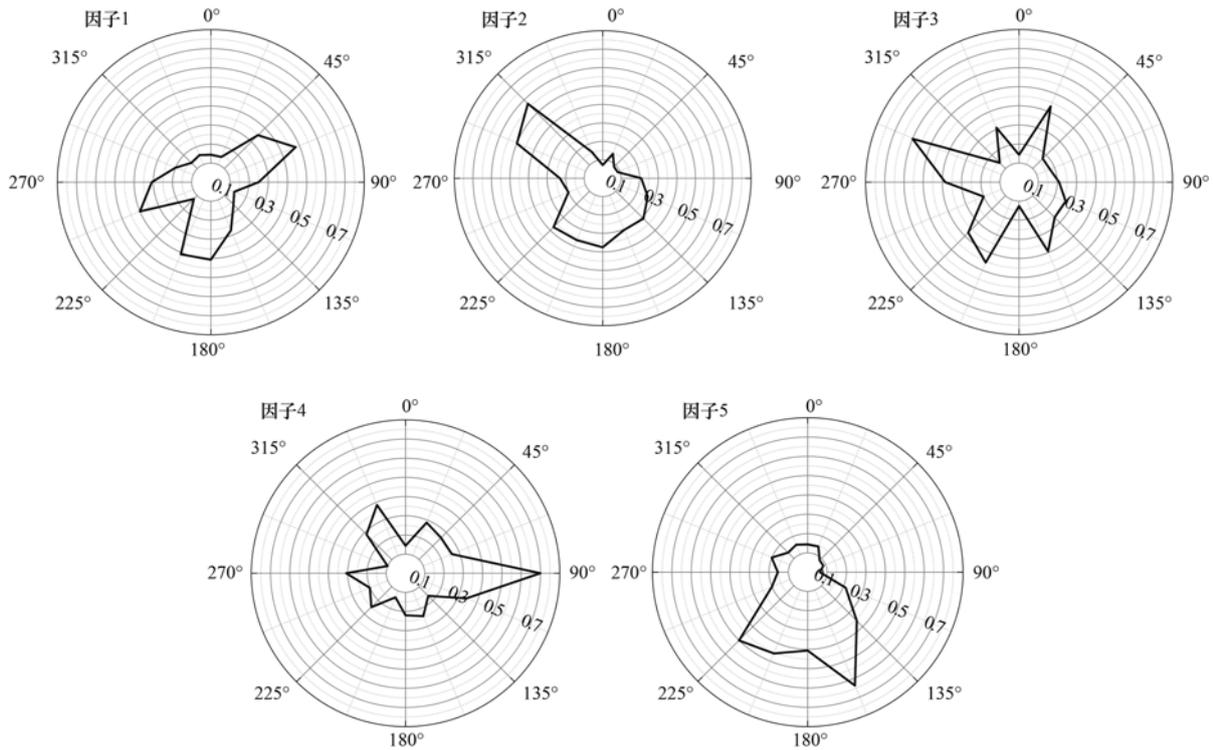


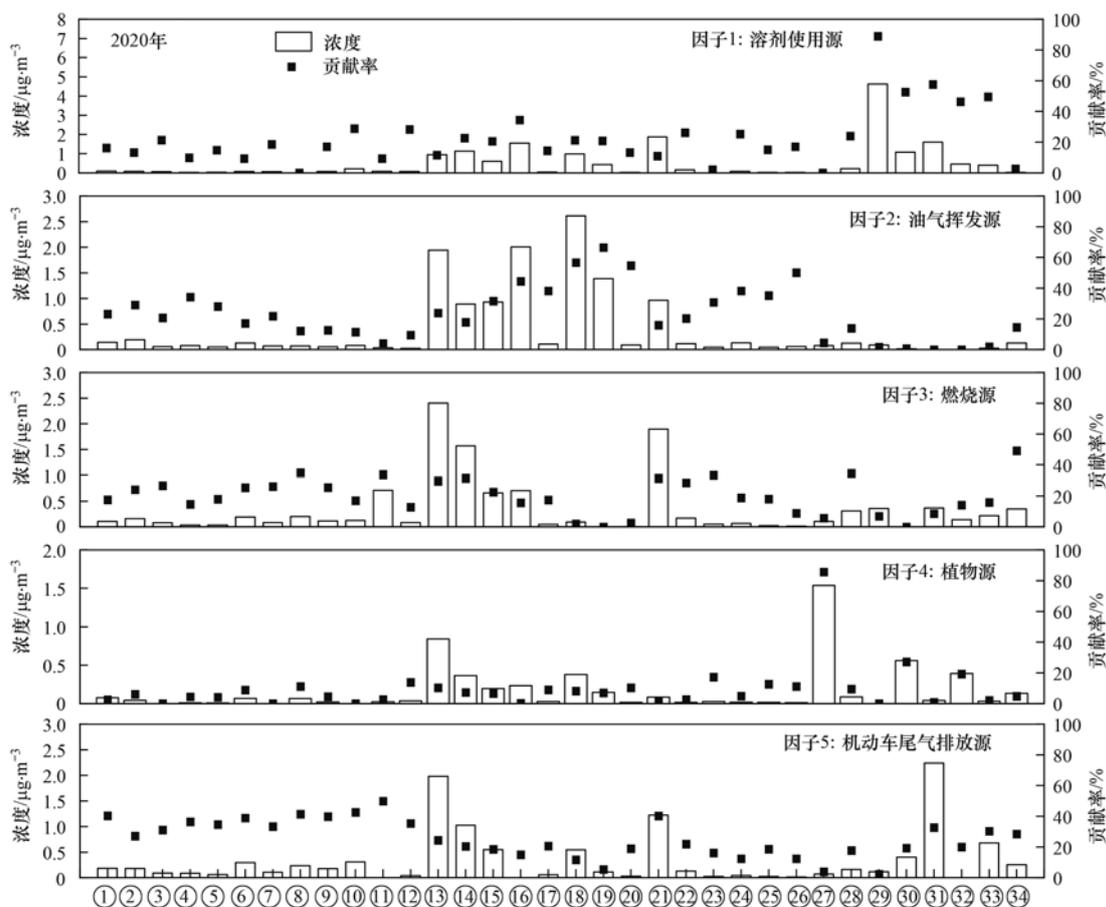
图 8 2019 年夏季不同 VOCs 源的 CPF 值

Fig. 8 CPF values of different pollution sources of VOCs in summer 2019

种有 3-甲基戊烷、正己烷、乙烷、丙烷、丙烯和苯等。乙烷、乙烯等在机动车尾气排放中较为显著^[17,43]。Brai 等^[42]和 Yao 等^[43]研究表明 3-甲基戊烷等支链烷烃、苯、乙烯、丙烯和 1,3-丁二烯通常从汽油车尾气中排放,故因子 1 为机动车尾气排放源;由因子 1 的 CPF 分析看,需重点关注监测点位西南部、南部和东北部污染源。因子 2 贡献率较高的物种有乙炔、乙烷、丙烷、丙烯、1-丁烯和 1-戊烯等。乙炔主要来自燃烧源,乙烷、丙烷除天然气和液化石油气挥发外,燃烧源中也有排放,丙烯和 1-丁烯等 $C_2 \sim C_4$ 烯烃也来自于燃煤^[18,43,44],乙炔、1-丁烯和乙烯是燃烧源示踪剂^[18],故因子 2 为燃烧源;由因子 2 的 CPF 分析看,需重点关注监测点位西北部和南部污染源。因子 3 贡献率较高的物种有苯、甲苯、乙基苯、间/对-二甲苯、苯乙烯和邻-二甲苯等。甲苯、乙基苯和二甲苯常作为溶剂被用于家具、制鞋类、粘合剂、印刷和其他溶剂使用行业^[19],有研究表明乙基苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯主要来自油漆、合成香料、粘合剂和清洁剂的使用^[33,44],故因子 3 为溶剂使用源;由因子 3 的 CPF 分析看,需重点关注监测点位周边污染源,尤其西北和西南部。因子 4 贡献率较高的物种有异戊二烯,贡献率高达 86%,异戊二烯主要来源于植物源排放,尤其在夏季影响较为突出,不容忽视^[35],故因子 4 为植物源排放;由因子 4 的 CPF 分析看,需重点关注监测点位东部污染源。因子 5 贡献

率较高的物种有异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷、反式-2-丁烯、1-丁烯、顺式-2-丁烯和 1-戊烯等。Liu 等^[21]和 Zhang 等^[45]研究表明丙烷、异丁烷、正丁烷、环戊烷和异戊烷等主要来自 LPG 和汽油挥发,故因子 5 为油气挥发源;由因子 5 的 CPF 分析看,需重点关注监测点位西南、南部和东南部污染源。

从图 9 和图 10 中看出,因子 1 贡献率较高的物种有甲苯、乙基苯、苯乙烯、邻-二甲苯和异丙基苯等,其中甲苯、乙基苯、邻-二甲苯和异丙基苯等 $C_7 \sim C_9$ 的苯系物是重要的工业溶剂,乙基苯、二甲苯和异丙基苯等受溶剂使用的影响较大^[23,33],尤其是苯乙烯和二甲苯是工业工艺过程中典型排放物种^[46],故因子 1 为溶剂使用源;由因子 1 的 CPF 分析看,需重点关注监测点位周边污染源,尤其北部和东南部。因子 2 主要为乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷、1-丁烯、反式-2-丁烯、顺式-2-丁烯和 1-戊烯等。Bari 等^[42]研究表明大多数 C_5 烷烃主要与未燃烧的汽柴油挥发所致有关,尤其异戊烷和正戊烷主要来自汽、柴油的挥发和泄漏。乙烷和丙烷主要来自天然气,正丁烷和异丁烷主要来自 LPG,反式-2-丁烯、顺式-2-丁烯和 1-丁烯等主要来自汽油的挥发^[10],尤其正丁烷、异丁烷和 1-丁烯是 LPG 泄漏挥发的主要物种^[47],故因子 2 为油气挥发源;由因子 2 的 CPF 分析看,油气挥发源的 CPF 值与 2019 年较为一致,需重点关注监测点位为西南、南部和东南部污



① 3-甲基戊烷, ② 正己烷, ③ 环己烷, ④ 2-甲基己烷, ⑤ 3-甲基己烷, ⑥ 正庚烷, ⑦ 甲基环己烷, ⑧ 正辛烷, ⑨ 正壬烷, ⑩ 正癸烷, ⑪ 正十一烷, ⑫ 正十二烷, ⑬ 乙烷, ⑭ 丙烷, ⑮ 异丁烷, ⑯ 正丁烷, ⑰ 环戊烷, ⑱ 异戊烷, ⑲ 正戊烷, ⑳ 2, 3-二甲基丁烷, ㉑ 乙烯, ㉒ 丙烯, ㉓ 反式-2-丁烯, ㉔ 1-丁烯, ㉕ 顺式-2-丁烯, ㉖ 1-戊烯, ㉗ 异戊二烯, ㉘ 苯, ㉙ 甲苯, ㉚ 乙苯, ㉛ 间/对-二甲苯, ㉜ 苯乙烯, ㉝ 邻二甲苯, ㉞ 乙炔

图9 2020年夏季各因子中VOCs物种浓度及贡献率

Fig. 9 VOCs species concentration and contribution ratios of various sources during the summer in 2020

染源. 因子3主要为乙炔、苯、乙烯、丙烯、乙烷和丙烷等,其中苯、乙炔和丙烯主要来自燃烧源,乙烷和丙烷除NG和LPG挥发外,燃煤过程也会排放^[33]. Guan等^[18]研究表明乙炔、 $C_2 \sim C_3$ 烷烃、 $C_2 \sim C_3$ 烯烃和芳烃等主要来源于煤炭燃烧,故因子3为燃烧源;由因子3的CPF分析看,需重点关注监测点位西北部污染源. 因子4贡献率较高的物种有异戊二烯,贡献率高达86%,异戊二烯和单萜主要来源于植物源排放^[33],故因子4为植物源排放;由因子4的CPF分析看,需重点关注监测点位东南部污染源. 因子5贡献率较高的物种有3-甲基戊烷、正壬烷、乙烷、丙烷、甲基环戊烷、乙烯、丙烯和苯等. 苯和乙烯通常是汽油车尾气中排放的主要物种,正壬烷、正癸烷、正十一烷和正十二烷是柴油排放的一个明显标志^[42], 3-甲基戊烷和甲基环戊烷等支链烷烃主要来自机动车尾气发动机燃烧过程中的排放^[19],故因子5为机动车尾气排放源;由因子5的CPF分析看,需重点关注监测点位西南部、南部和北部污染源.

图11展示了2019年和2020年夏季五类源排放对VOCs的贡献率情况. 2019年夏季对VOCs浓度来源贡献较大的是溶剂使用源和油气挥发源,贡献率分别为36.7%和25.1%,其他依次为机动车尾气排放源、燃烧源和植物源,贡献率依次为18.2%、10.4%和9.7%. 2020年贡献较大仍为溶剂使用源和油气挥发源,贡献率分别24.9%和22.5%,其他依次为燃烧源、机动车尾气和植物源,贡献率依次为21.9%、20.6%和10.1%. 对比发现,2019年溶剂使用源(36.7%)和油气挥发源(25.1%)的贡献率分别高出2020年11.8个百分点和2.6个百分点,2020年机动车尾气源排放贡献率为20.6%,高出去年同期2.4个百分点,2020年除植物源排放贡献率相对较小,其他较为平均,均在20%左右,需合理管控. 从CPF分析对比看,溶剂使用源主要来自监测点位东北、西北和西南部污染源,油气挥发源主要来自西南部区域,机动车尾气主要受周边区域影响,燃烧源主要来自西北部区域,植物源主要受东部区域

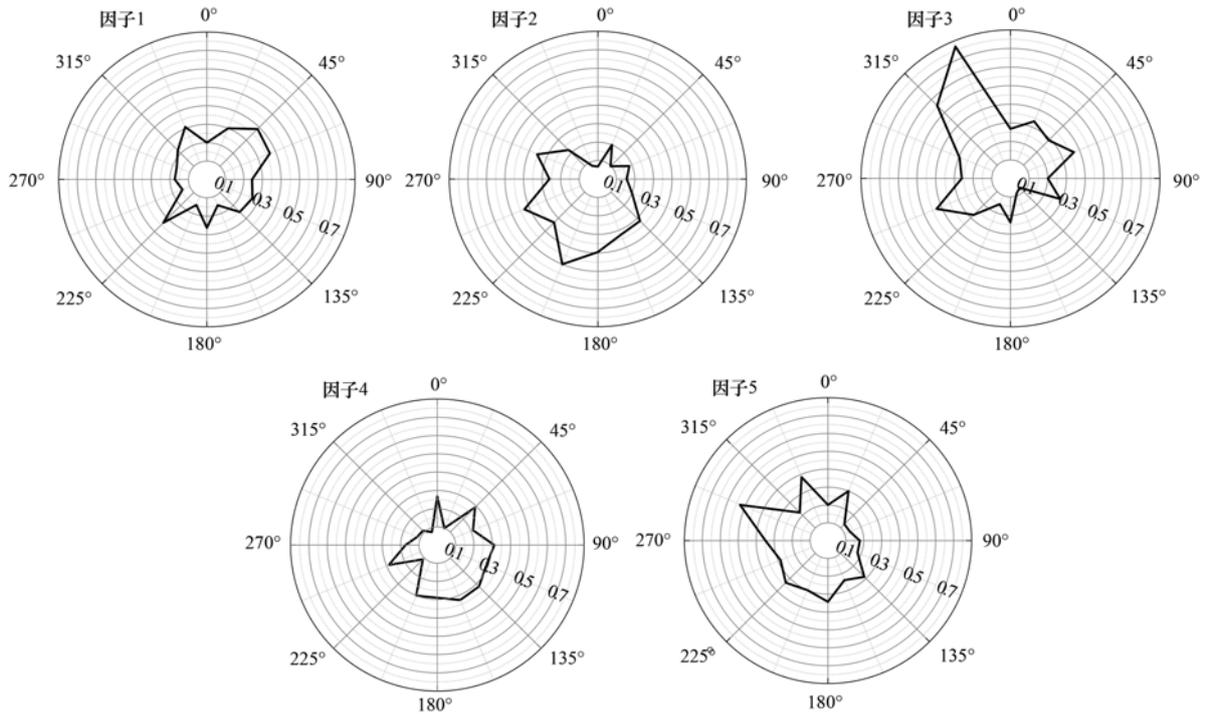
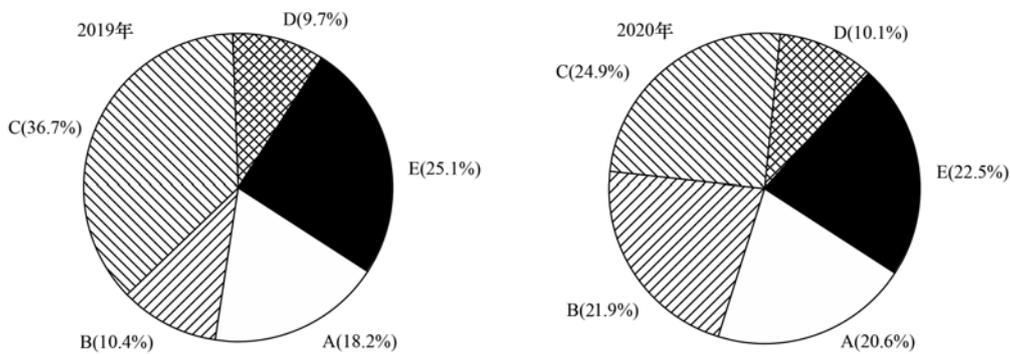


图 10 2020 年夏季不同 VOCs 源的 CPF 值

Fig. 10 CPF values of different pollution sources of VOCs in summer 2020



A. 机动车尾气排放源, B. 燃烧源, C. 溶剂使用源, D. 植物源, E. 油气挥发源

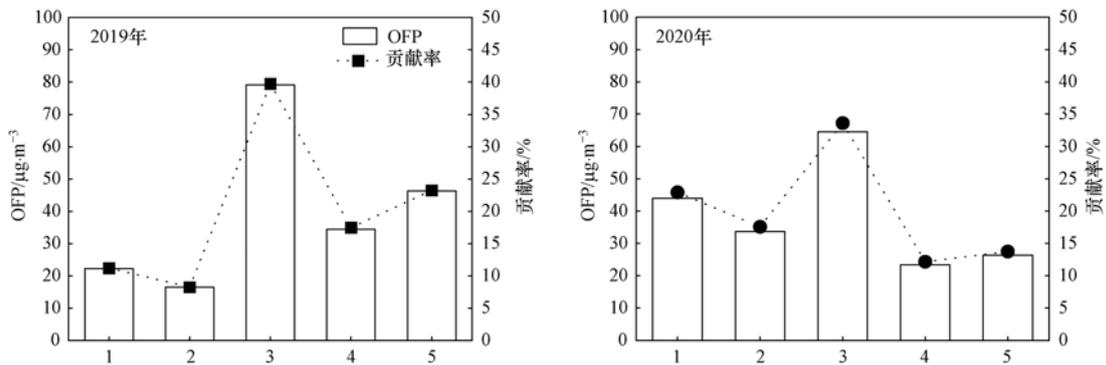
图 11 2019 和 2020 年夏季不同污染源对 VOCs 浓度来源贡献率

Fig. 11 Contribution ratios of different pollution sources to VOCs concentrations in summer 2019 and 2020

的影响. 因此,需重点关注溶剂使用、机动车尾气和油气挥发源的排放,尤其监测点位的西南部、北部和

东南部区域污染源.

图 12 展示了 2019 年和 2020 年不同污染源对



1. 机动车尾气排放源, 2. 燃烧源, 3. 溶剂使用源, 4. 植物源, 5. 油气挥发源

图 12 2019 和 2020 年不同污染源对 OFP 的贡献率

Fig. 12 Contribution ratios of different pollution sources to the OFP in summer 2019 and 2020

OFP 的贡献率情况. 从中可知, 2019 年 OFP 贡献较高的为溶剂使用源和油气挥发源, 贡献率分别为 39.9% 和 23.3%, 其他依次为植物源、机动车尾气和燃烧源, 贡献率依次为 17.5%、11.2% 和 8.3%; 2020 年 OFP 贡献较高的为溶剂使用源和机动车尾气, 贡献率分别为 33.6% 和 22.9%, 其他依次为燃烧源、油气挥发源和植物源, 贡献率依次为 17.6%、13.7% 和 12.2%. 对比发现, 2019 年溶剂使用源对 OFP 贡献率较 2020 年高出 6.3 个百分点, 均为 OFP 贡献最大的源; 其次 2019 年油气挥发源对 OFP 贡献率高出 2020 年 9.6 个百分点; 2020 年机动车尾气排放对 OFP 生成贡献率为 22.9%, 较去年同期高出 11.7 个百分点. 因此, 2019 年对 O₃ 生成贡献较大的源主要为溶剂使用和油气挥发源, 2020 年主要受溶剂使用和机动车尾气排放源的影响较大.

3 结论

(1) 2019 年和 2020 年夏季的 ρ (VOCs) 平均值分别为 $65.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $71.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中 2019 年逐月 ρ (VOCs) 平均值依次为 71.9、69.5 和 $55.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2019 年烷烃质量分数逐月变化幅度不大, 为 55% 左右, 芳香烃整体呈上升趋势, 烯烃呈下降趋势; 2020 年 6~8 月 ρ (VOCs) 平均值依次为 73.5 、 69.6 和 $70.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2020 年烷烃和烯烃质量分数呈逐月升高趋势, 芳香烃呈逐月降低趋势, 两年整体质量分数表现为: 烷烃 > 芳香烃 > 烯烃 > 炔烃. 2019 年前 10 物种占总 VOCs 的质量分数为 65.5%, 主要物种依次为异戊烷、乙烷、丙烷、甲苯、正丁烷和间/对-二甲苯等; 2020 年前 10 物种占总 VOCs 的质量分数为 71.1%, 主要物种依次为乙烷、乙烯、丙烷、异戊烷、正丁烷、甲苯和间/对-二甲苯等.

(2) 2019 年和 2020 年 OFP 平均值分别为 $224.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $243.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2019 年芳香烃贡献率逐月升高、烯烃逐月降低, 2020 年变化趋势与之相反. 2019 年 OFP 排名前 10 物种占总 OFP 值的 76.8%, 其主要贡献物种依次为间/对-二甲苯、异戊二烯、反式-2-丁烯、甲苯和乙烯等; 2020 年 OFP 排名前 10 物种占总 OFP 值的 78.9%, 主要贡献物种依次为乙烯、间/对-二甲苯、异戊二烯、甲苯和间-乙基甲苯等.

(3) 2019 年夏季对 VOCs 浓度贡献较大的是溶剂使用源和油气挥发源, 贡献率分别为 36.7% 和 25.1%, 其中溶剂使用源和油气挥发源对 OFP 贡献较大, 贡献率分别为 39.9% 和 23.3%; 2020 年贡献较大的是溶剂使用源和油气挥发源, 贡献率分别为

24.9% 和 22.5%, 其中溶剂使用源和机动车尾气排放源对 OFP 贡献较大, 贡献率分别为 33.6% 和 22.9%. 从 CPF 分析对比看, 溶剂使用源主要来自监测点位东北、西北和西南部的污染源, 油气挥发源主要来自西南部区域, 机动车尾气排放源主要受周边区域影响, 燃烧源主要来自西北部区域, 植物源主要受东部区域的影响. 分析表明 2019 年对 O₃ 生成贡献较大的源主要为溶剂使用和油气挥发源, 2020 年主要受溶剂使用和机动车尾气排放源的影响较大, 需重点关注.

参考文献:

- [1] Guo H, Ling Z H, Cheng H R, *et al.* Tropospheric volatile organic compounds in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1021-1043.
- [2] 王冰, 李光明, 马红磊, 等. 濮阳市 VOCs 污染特征及其臭氧生成潜势分析[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(3): 59-65.
Wang B, Li G M, Ma H L, *et al.* Analysis of VOCs pollution characteristics and ozone generation potential in Puyang [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(3): 59-65.
- [3] Li L Y, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **113**: 247-254.
- [4] Zhu H L, Wang H L, Jing S G, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) along the mid-lower Yangtze River in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **190**: 232-240.
- [5] Meng Y, Song J W, Zeng L W, *et al.* Ambient volatile organic compounds at a receptor site in the Pearl River Delta region: variations, source apportionment and effects on ozone formation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **111**: 104-117.
- [6] Deng Y Y, Li J, Li Y Q, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds, NO₂, and effects on ozone formation at a site with high ozone level in Chengdu [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **75**: 334-345.
- [7] 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.
Jiang M Q, 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.
- [8] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3056-3065.
Qi Y J, Ni J W, Zhao D X, *et al.* Emission characteristics and risk assessment of volatile organic compounds from typical factories in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3056-3065.
- [9] 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.
- [10] 齐一谨, 赵起超, 李怀瑞, 等. 郑州市冬春季大气 VOCs 污染特征及源解析[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(S1): 237-244.
Qi Y J, Zhao Q C, Li H R, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of ambient VOCs in winter and spring in

- Zhengzhou[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41** (S1): 237-244.
- [11] 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 等. 郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3500-3510.
- Li Y D, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs at different pollution levels during the winter in an urban area in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3500-3510.
- [12] 张栋, 于世杰, 王楠, 等. 郑州市冬季 VOCs 污染特征、来源及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(8): 2935-2943.
- Zhang D, Yu S J, Wang N, *et al.* Characteristics, sources and health risk assessment of ambient VOCs in winter of Zhengzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(8): 2935-2943.
- [13] 任义君, 马双良, 王思维, 等. 郑州市春季大气污染过程 VOCs 特征、臭氧生成潜势及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2577-2585.
- Ren Y J, Ma S L, Wang S W, *et al.* Ambient VOCs characteristics, ozone formation potential, and source apportionment of air pollution in spring in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2577-2585.
- [14] 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.
- [15] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [16] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [D]. Riverside: University of California, 2010.
- [17] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2624-2639.
- [18] Guan Y N, Wang L, Wang S J, *et al.* Temporal variations and source apportionment of volatile organic compounds at an urban site in Shijiazhuang, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **97**: 25-34.
- [19] 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.
- [20] 闫磊, 黄银芝, 高松, 等. 杭州湾北岸 36 种挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(3): 536-546.
- Yan L, Huang Y Z, Gao S, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of 36 volatile organic compounds on the north coast of Hangzhou Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(3): 536-546.
- [21] 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.
- [22] 杨辉, 朱彬, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- Yang H, Zhu B, Gao J H, *et al.* Source apportionment of VOCs in the northern suburb of Nanjing in summer[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- [23] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 郑州市高新区大气 VOCs 源解析及风险评估[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(S2): 201-208.
- Qi Y J, Ni J W, Zhao D X, *et al.* Source apportionment and risk assessment of ambient volatile organic compounds from the High-tech Zone in Zhengzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(S2): 201-208.
- [24] 高璟贇, 肖致美, 徐虹, 等. 2019 年天津市挥发性有机物污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 55-64.
- Gao J Y, Xiao Z M, Xu H, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 55-64.
- [25] 王文美, 高璟贇, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, *et al.* Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [26] 周雪明, 项萍, 段菁春, 等. 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- Zhou X M, Xiang P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of non-methane hydrocarbons during Winter and Summer in Foshan City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- [27] Hu B Y, Xu H, Deng J J, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds for different functional zones in a coastal City of southeast China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(11): 2840-2852.
- [28] Huang Y S, Hsieh C C. Ambient volatile organic compound presence in the highly urbanized city: source apportionment and emission position [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **206**: 45-59.
- [29] 司雷霆, 王浩, 李洋, 等. 太原市夏季大气 VOCs 污染特征及臭氧生成潜势[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(9): 3655-3662.
- Si L T, Wang H, Li Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in summer in Taiyuan[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 3655-3662.
- [30] 李晶晶, 孙松华, 蒋晓军, 等. 绍兴城区夏季大气挥发性有机物特征、来源及大气反应活性[J]. *环境污染与防治*, 2020, **42**(9): 1145-1148, 1170.
- Li J J, Sun S H, Jiang X J, *et al.* Characteristics, sources and atmospheric reactivity of volatile organic compounds in Shaoxing urban during summer [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, **42**(9): 1145-1148, 1170.
- [31] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.
- Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing Urban District [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [32] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O₃ in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [33] Zhang L H, Li H, Wu Z H, *et al.* Characteristics of atmospheric volatile organic compounds in urban area of Beijing: variations, photochemical reactivity and source apportionment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**: 190-200.

- [34] 李如梅, 闫雨龙, 王成, 等. 太原市城区夏季 VOCs 来源及其对 O₃ 生成的贡献[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2515-2525.
Li R M, Yan Y L, Wang C, *et al.* Source apportionment of VOCs and its contribution to O₃ production during summertime in urban area of Taiyuan[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2515-2525.
- [35] 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 等. 阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3066-3075.
Niu Y Y, Liu Z C, Li R M, *et al.* Characteristics, source apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in summer in Yangquan[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
- [36] 姚青, 蔡子颖, 马志强, 等. 天津大气中 BTEX 的变化特征与健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(9): 3276-3284.
Yao Q, Cai Z Y, Ma Z Q, *et al.* Variation characteristics and health risk assessment of BTEX in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3276-3284.
- [37] 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 等. 南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 453-460.
Zhang Y X, An J L, Wang J Y, *et al.* Variation characteristics and health risk assessment of BTEX in the atmosphere of northern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 453-460.
- [38] Hong Z Y, Li M Z, Wang H, *et al.* Characteristics of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) at a mountainous forest site and two urban sites in the southeast of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 1491-1500.
- [39] Yurdakul S, Civan M, Kuntasal Ö, *et al.* Temporal variations of VOC concentrations in Bursa atmosphere [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9**(2): 189-206.
- [40] 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.
- [41] 聂焯, 彭瑾, 王祖武, 等. 黄石市大气挥发性有机物污染特征及源解析[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(S1): 183-190.
Nie Y, Peng J, Wang Z W, *et al.* Pollution characteristics, ozone formation potential, and sources of atmospheric volatile organic compounds in Huangshi [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(S1): 183-190.
- [42] Bari 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.
- [43] Yao D, Tang G Q, Wang Y H, *et al.* Significant contribution of spring northwest transport to volatile organic compounds in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **104**: 169-181.
- [44] Li J, Wu R R, Li Y Q, *et al.* Effects of rigorous emission controls on reducing ambient volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **557-558**: 531-541.
- [45] Zhang D, He B, Yuan M H, *et al.* Characteristics, sources and health risks assessment of VOCs in Zhengzhou, China during haze pollution season [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **108**: 44-57.
- [46] 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 等. 柳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, 2021, **42**(1): 65-74.
Liu Q, Lu X L, Zeng P, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Liuzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 65-74.
- [47] 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.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)