

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

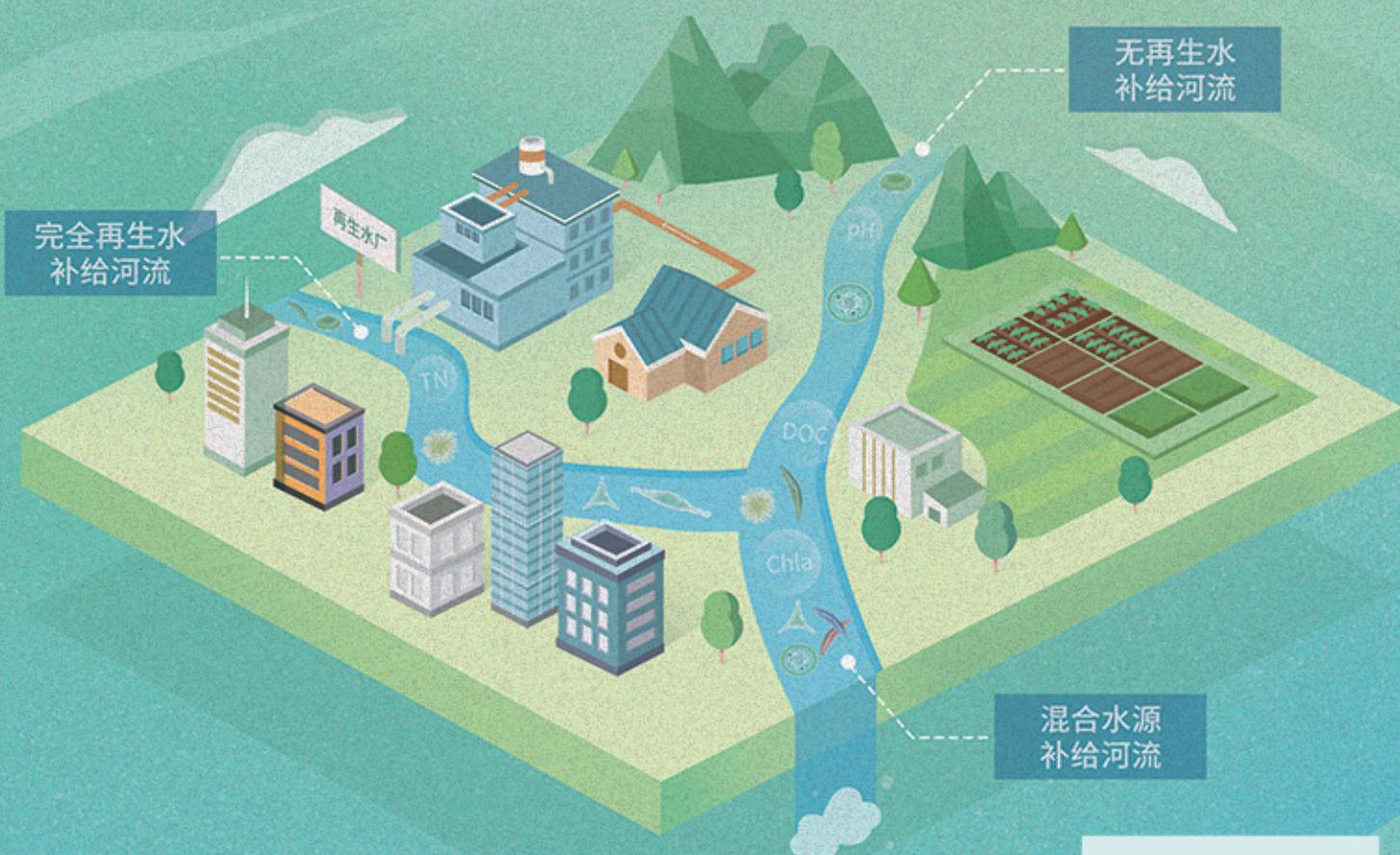
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析

杨燕萍^{1,2,3,4}, 陈强^{1*}, 孟宪红^{2,3}, 孙健⁴, 王莉娜⁴, 陶会杰⁴, 杨丽丽^{1,4}

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 甘肃省环境监测中心站, 兰州 730000)

摘要: 为研究兰州市夏季大气挥发性有机物(VOCs)污染特征和来源,采用实时在线监测仪器 TH-300B(GC-MS/FID)等多种设备联用,于2021年7月开展为期1个月的综合观测。结果表明,监测期间总挥发性有机物 ρ (TVOCs)为 $99.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,烷烃占比最大,其次是芳香烃和含氧挥发性有机物(OVOCs),烯炔烃和卤代烃占比较小,各组分浓度呈现早晚高,中午低的日变化特征。VOCs 臭氧生成潜势(OPF)前10种物质贡献率占57.3%,二次有机气溶胶(SOA)生成潜势前10种物质贡献率占93.10%,以芳香烃和高碳烷烃为主,其中,甲苯和间/对-二甲苯对OPF和SOA贡献最大。采用正交矩阵因子分解法(PMF)进行污染源解析,其中工业溶剂源(22.25%)、油漆涂料源(21.70%)和机动车尾气源(16.25%)是研究区环境空气中VOCs的主要来源;基于污染源排放清单法,2017年兰州市VOCs排放量为94761.6 t,主要来自溶剂使用源和移动源,贡献率分别为56.70%和18.03%。因此解决兰州大气复合污染问题,实现 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 协同控制,应以工业溶剂排放和机动车管控为主,重点减少VOCs中甲苯和间/对-二甲苯等芳香烃化合物排放。

关键词:挥发性有机物(VOCs); 污染特征; 来源解析; 正交矩阵因子分解法(PMF); 兰州

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5442-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201281

Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou

YANG Yan-ping^{1,2,3,4}, CHEN Qiang^{1*}, MENG Xian-hong^{2,3}, SUN Jian⁴, WANG Li-na⁴, TAO Hui-jing⁴, YANG Li-li^{1,4}

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Gansu Environmental Monitoring Center, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study characteristics and sources of atmospheric volatile organic compound (VOCs) pollution in Lanzhou in summer, the real-time online monitoring instrument TH-300B (GC-MS/FID) was used to carry out a one-month comprehensive observation in July 2021. The results showed that the concentration of total volatile organic compounds ρ (TVOCs) was $99.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ during the monitoring period, with alkanes comprising the largest proportion, followed by aromatic hydrocarbons and oxygen-containing volatile organic compounds (OVOCs), and the proportion of alkynes and halogenated hydrocarbons was relatively small. The concentration of each component showed a diurnal variation characteristic of being high in the morning and evening and low at noon. The contribution rate of the top ten VOCs to ozone formation potential (OPF) reached 57.3%, and the contribution rate of the top ten substances in the generation potential of secondary organic aerosol (SOA) accounted for 93.10%, mainly including aromatic hydrocarbons and high-carbon alkanes. Among them, toluene, *m/p*-xylene OPF, and SOA contributed the most. Positive matrix factorization (PMF) was used to analyze the pollution sources. The results showed that industrial solvent sources (22.25%), paint and coatings sources (21.70%), and motor vehicle exhaust sources (16.25%) were the main sources of VOCs in the ambient air of the study area. Based on the pollution source emission inventory method, VOCs emissions in 2017 were 94761.6 t in Lanzhou, mainly from solvent emission and mobile sources, with contribution rates of 56.70% and 18.03%, respectively. Therefore, to solve the complex atmospheric pollution problem in Lanzhou and realize the coordinated control of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$, industrial solvent emission and motor vehicle control should be given priority, and focus should be on reducing the emission of toluene, *m/p*-xylene, and other aromatic hydrocarbons in VOCs.

Key words: volatile organic compounds(VOCs); pollution characteristics; source analysis; positive matrix factorization(PMF); Lanzhou

近些年,随着我国经济快速发展,以细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)和臭氧(O_3)为主的大气复合污染问题日益突出,二次有机气溶胶(SOA)是细颗粒物的重要组成部分^[1,2],约占 $\text{PM}_{2.5}$ 有机组分的20%以上^[3]。挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为SOA和 O_3 生成的前体物^[4,5],具有种类繁多,化学性质复杂等特征,在光化学反应过程中扮演重要角色,对颗粒物污染、大气氧化性等具有较大影响;同时VOCs影响大气能见度和地球辐射平衡,其本身对公众身体健康造成潜在威胁^[6],易引起过敏、哮喘和中毒等症^[7,8]。VOCs来源包括天然源和人

为源^[9],天然源主要来自植被排放,人为源产生于化石燃料燃烧、溶剂涂料使用和油料储存运输等生产生活活动^[10]。有学者开展了不同区域和城市尺度的VOCs污染特征和来源解析研究,国外如法国巴黎^[11]和巴西里约热内卢^[12]等,国内如上海^[13,14]、苏州^[15]、广州^[16]、兰州^[17]、成都^[18]和拉萨^[19]等,已有研究中常见的VOCs来源解析包括定性和定量

收稿日期: 2022-01-27; 修订日期: 2022-04-01

基金项目: 甘肃省青年科技基金项目(20JR5RA122, 21JR7RA691)

作者简介: 杨燕萍(1989~),女,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为大气环境挥发性有机物污染控制, E-mail: 306252573@qq.com

* 通信作者, E-mail: 18193351805@163.com

方法;特征比值法是依据不同污染源排放特征物种进行来源识别的定性法;定量法包括正交矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)、主成分分析法(principal component analysis, PCA)、化学质量平衡法(chemical balance method, CMB)和污染源排放清单法等,不同区域城市 VOCs 浓度、组分和污染来源等差异较大,需针对不同城市开展 VOCs 研究。

兰州市作为我国西北地区典型的工业城市,拥有西北最大的石油化工基地,形成了以石化、能源和冶炼等工业类型为主导的产业结构,尤其兰州西固区,石化行业众多, VOCs 排放量较大,20 世纪 80 年代,西固区发生的光化学烟雾开启了我国对 O₃ 和 VOCs 的深入研究;近年,兰州市 O₃ 污染呈现上升趋势,2019 年相较于 2016 年 O₃ 浓度增幅达 35.5%^[20],细颗粒物中 SOA 占比较高^[21], VOCs 有效减排已成为兰州市大气污染治理的当务之急。

本研究于 2021 年 7 月对兰州市夏季环境空气 VOCs 进行连续在线采样,分析其污染特征和环境效应,将定性和定量方法相结合开展来源解析,以期为更加精准管控 VOCs 污染和改善大气环境质量提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本次观测地点设置在甘肃省兰州市城关区环境科技大厦院内(北纬 36°02′50″,东经 103°54′36″),周围主要为道路、学校和居民区,无明显污染源,监测仪器均安装在大气移动综合监测车内,仪器采样口布设在监测车车顶(离地面 4.5 m)。本次观测时间为 2021 年 7 月 1 日 00:00 至 2021 年 7 月 31 日 23:00。

利用中国武汉天虹 TH-300B 进行 VOCs 采样分析,主要包括进样装置、超低温预浓缩系统和气相色谱质谱联用仪(FID/GC-MS),同时配备自动清罐仪、标准气体自动稀释仪等,监测组分信息如表 1 所示,可实现 56 种 PAMS(不区分间/对-二甲苯)、12 种醛、酮类和 47 种 TO15 等共计 115 种 VOCs 组分的连续在线监测,分析周期 ≤ 60 min;一次完整的工作循环包括:样品采集、冷冻捕集、加热解析、GC-FID/MS 分析和加热反吹净化等 5 个步骤;采用芬兰 Vaisala WXT536 型气象仪观测气象参数,主要观测因子包括温度(*T*)、相对湿度(RH)、风速/风向(WS/WD)和气压等,PM₁₀和 PM_{2.5/1}质量浓度采用美国赛默飞(Thermo Fisher)5014ibeta 在线监测,时间分辨率为 5 min。本研究中数据绘图使用

OriginPro 2021 完成。

1.2 质量保证/质量控制

为保证数据准确有效,监测过程实施全程序质量控制:气路采用全聚四氟乙烯材料气管,有效防止 VOCs 在管中吸附;利用溴氯甲烷等 4 种内标, PAMS、TO15 和醛酮类等 115 种混合标准气体作为外标(美国 Linde Electronics And Specialty Gases 公司),如表 1 所示,进行 VOCs 定性和定量校准,每日 00:00 自动进外标样,单点标定校准所有目标化合物,分析 00:00 时外标样和每小时内标气体响应情况,及时对仪器调谐和多点标定,利用动态稀释仪和苏玛罐配制标准气体,至少标定 6 个浓度点(体积分数为 0.5×10^{-9} 、 2×10^{-9} 、 4×10^{-9} 、 6×10^{-9} 、 8×10^{-9} 和 10×10^{-9}),各物质标准曲线相关性均在 0.99 以上,有效确保仪器稳定和数据准确性,扣除仪器标定和异常情况数据缺失,观测期间数据有效率为 92.44%。

1.3 臭氧生成潜势和二次有机气溶胶生成潜势

Carter^[22]提出 VOCs 增量反应性(incremental reactivity, IR,以 O₃/VOCs 计)的相关概念,定义为在给定气团 VOCs 中,加入或去除单位被测 VOCs,所产生的 O₃ 浓度变化,IR 与给定气团性质和 VOCs/NO_x 有关,通过改变 VOCs/NO_x,使 IR 达到最大值,得到最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)。臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)则是基于 MIR 量化 VOCs 对臭氧生成贡献^[23],MIR 值如表 1 所示,衡量 VOCs 的反应活性,VOCs 物种浓度和该物种 MIR 常数决定了 OFP 大小,用于研究区域 VOCs 对臭氧生成的贡献能力,OFP 同时考虑了 VOCs 机制和力学反应性,定义为多种痕量组分浓度与其 MIR 乘积的加和:

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

式中, [VOC]_{*i*} 为第 *i* 种 VOC 在环境大气中的浓度,因受当地 NO_x、·OH 浓度和其他污染气象条件等制约,OFP 仅说明研究区域大气 VOCs 具有的臭氧生成最大能力,本研究只根据不同痕量组分对 OFP 的贡献率大小识别关键活性组分,筛选控制近地面 O₃ 浓度的优先物种。

采用气溶胶生成系数法(fractional aerosol coefficient, FAC),表示消耗单位质量 VOCs 可生成 SOA 的量,基于 Grojean 烟雾箱实验数据^[24],同时参考其他研究人员成果,得到主要 VOCs 物种的气溶胶生成系数。总 SOA 生成潜势(aerosol formation potentials, AFPs)为多种污染组分浓度与其气溶胶生成系数乘积的加和:

表 1 兰州市大气 VOCs 组分信息统计¹⁾

Table 1 Information statistics of atmospheric VOCs in Lanzhou

编号	化合物中文名	检出限 ×10 ⁻⁹	MIR	FAC	编号	化合物中文名	检出限 ×10 ⁻⁹	MIR	FAC
12 种醛、酮类物质(OVOCs)					56 种 PAMS 物质				
1	乙醛	0.02	6.54	—	1	乙烯	0.026	9	—
2	丙烯醛	0.03	7.45	—	2	乙炔	0.020	0.95	—
3	丙酮	0.03	0.36	—	3	乙烷	0.016	0.28	—
4	丙醛	0.05	7.08	—	4	丙烯	0.031	11.66	—
5	丁烯醛	0.06	9.39	—	5	丙烷	0.020	0.49	—
6	甲基丙烯醛	0.07	6.01	—	6	异丁烷	0.020	1.23	—
7	2-丁酮(MEK)	0.08	1.48	—	7	正丁烯	0.011	9.73	—
8	正丁醛	0.06	5.97	—	8	正丁烷	0.022	1.15	—
9	苯甲醛	0.05	-0.67	—	9	顺-2-丁烯	0.009	14.24	—
10	戊醛	0.16	5.08	—	10	反-2-丁烯	0.011	15.16	—
11	间甲基苯甲醛	0.07	—	—	11	异戊烷	0.005	1.45	—
12	己醛	0.16	4.35	—	12	1-戊烯	0.009	7.21	—
47 种其他挥发性有机物(部分 TO15 物质)					13	正戊烷	0.005	1.31	—
1	二氟二氯甲烷	0.050	—	—	14	反-2-戊烯	0.004	10.56	—
2	一氯甲烷	0.007	0.038	—	15	2-甲基 1,3-丁二烯	0.020	—	—
3	1,1,2,2-四氟-1,2-二氯乙烷	0.002	—	—	16	顺-2-戊烯	0.016	—	—
4	氯乙烯	0.042	2.83	—	17	2,2-二甲基丁烷	0.005	1.17	—
5	1,3-丁二烯	0.037	12.61	—	18	环戊烷	0.009	2.39	—
6	一溴甲烷	0.024	0.02	—	19	2,3-二甲基丁烷	0.013	0.97	—
7	氯乙烷	0.031	0.29	—	20	2-甲基戊烷	0.040	1.50	—
8	一氯三氯甲烷	0.046	—	—	21	3-甲基戊烷	0.007	1.80	—
9	1,1-二氯乙烯	0.031	1.79	—	22	1-己烯	0.011	5.49	—
10	1,2,2-三氟-1,1,2-三氟乙烷	0.027	—	—	23	正己烷	0.016	1.24	—
11	二硫化碳	0.033	0.25	—	24	2,4-二甲基戊烷	0.007	1.55	—
12	二氯甲烷	0.037	0.04	—	25	甲基环戊烷	0.015	2.19	0.17
13	异丙醇	0.009	0.61	—	26	苯	0.018	0.72	2
14	顺-1,2-二氯乙烯	0.024	1.70	—	27	环己烷	0.020	—	—
15	甲基叔丁基醚	0.015	0.73	—	28	异庚烷	0.011	1.19	—
16	1,1-二氯乙烷	0.031	0.07	—	29	2,3-二甲基戊烷	0.007	1.34	—
17	乙酸乙烯酯	0.015	3.20	—	30	3-甲基己烷	0.016	1.61	—
18	反-1,2-二氯乙烯	0.020	1.70	—	31	2,2,4-三甲基戊烷	0.015	1.26	—
19	乙酸乙酯	0.029	0.63	—	32	正庚烷	0.009	1.07	0.06
20	三氯甲烷	0.029	0.02	—	33	甲基环己烷	0.011	1.70	2.7
21	四氢呋喃	0.022	4.31	—	34	2,3,4-三甲基戊烷	0.009	1.03	—
22	1,1,1-三氯乙烷	0.027	—	—	35	2-甲基庚烷	0.016	1.07	0.5
23	1,2-二氯乙烷	0.027	0.21	—	36	甲苯	0.011	4	5.4
24	四氯化碳	0.024	—	—	37	3-甲基庚烷	0.013	1.24	0.5
25	三氯乙烯	0.020	0.64	—	38	正辛烷	0.016	0.9	0.06
26	1,2-二氯丙烷	0.018	0.29	—	39	间/对-二甲苯	0.022	7.8	4.7
27	甲基丙烯酸甲酯	0.029	—	—	40	乙苯	0.009	3.04	5.4
28	1,4-二氧杂环己烷	0.050	2.62	—	41	正壬烷	0.022	0.78	1.5
29	一溴二氯甲烷	0.024	—	—	42	苯乙烯	0.018	1.73	—
30	顺式-1,3-二氯-1-丙烯	0.007	3.7	—	43	邻-二甲苯	0.015	7.64	5
31	4-甲基-2-戊酮	0.050	3.88	—	44	异丙苯	0.013	2.52	4
32	反-1,3-二氯-1-丙烯	0.018	5.03	—	45	正丙苯	0.026	2.03	1.6
33	1,1,2-三氯乙烷	0.026	0.09	—	46	1-乙基-2-甲基苯	0.022	5.59	5.6
34	2-己酮	0.050	3.14	—	47	1-乙基-3-甲基苯	0.038	7.39	6.3
35	二溴一氯甲烷	0.015	—	—	48	1,3,5-三甲苯	0.007	11.76	2.9
36	四氯乙烯	0.026	0.03	—	49	4-乙基甲苯	0.027	4.44	2.5
37	1,2-二溴乙烷	0.018	0.10	—	50	癸烷	0.038	0.68	2
38	氯苯	0.011	0.32	—	51	1,2,4-三甲苯	0.007	8.87	2
39	三溴甲烷(溴仿)	0.022	—	—	52	1,2,3-三甲苯	0.035	11.97	3.6
40	1,1,2,2-四氯乙烷	0.018	—	—	53	1,3-二乙基苯	0.040	7.1	6.3
41	1,3-二氯苯	0.016	0.18	—	54	1,4-二乙基苯	0.040	4.43	6.3
42	氯代甲苯	0.013	—	—	55	十一烷	0.033	0.61	2.5
43	1,4-二氯苯	0.024	0.18	—	56	十二烷	0.050	0.55	3
44	邻-二氯苯	0.007	0.18	—					
45	1,2,4-三氯苯	0.046	—	—					
46	萘	0.022	3.34	—					
47	六氯丁二烯	0.007	—	—					

1) “—”表示文献中没有相关数据

$$AFP_s = \sum AFP_i = \sum [VOC]_i \times FAC_i$$

式中, $[VOC]_i$ 为第 i 种 VOC 在环境大气中的浓度, FAC_i 为第 i 种 VOC 的气溶胶生成系数. 可根据不同痕量组分对 AFPs 的贡献率大小识别关键活性组分, 筛选控制近地面 SOA 浓度的优先物种.

1.4 污染来源解析

大气中 VOCs 污染来源及其贡献研究是控制大气 VOCs 污染的重要前提. PMF 为多元统计分析方法, 1993 年由芬兰赫尔辛基大学 Paatero 和 Tapper 教授提出, 其不需要输入源排放相关信息, 并且能同时识别二次生成结果, 基本原理见文献[17, 19], 本次采用美国 EPA 开发的 PMF5.0 版本^[25].

以 2017 年为基准年, 建立兰州市 VOCs 污染源排放清单, 利用第二次污染源普查数据, 对其未覆盖排放源活动水平通过统计年鉴、部门资料调查、环境统计和互联网信息收集等方式获取, 补充现场调研, 以完善本地大气污染源及其活动水平数据库; 经过分析统计, 获得 2017 年兰州市不同污染源 VOCs 排放贡献.

2 结果与讨论

2.1 环境空气质量与气象因素

观测期间, 环境空气质量与气象因素变化如图 1 所示, 风速平均值为 $(0.8 \pm 0.4) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风向以东北风为主, 降雨量较少, 相对湿度平均值为 $(42.4 \pm 17.1) \%$, 气温在 $14.4 \sim 39.1^\circ\text{C}$ 变化; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均

值为 $(23.9 \pm 12.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{10})$ 平均值为 $(44.8 \pm 25.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 低于国家二级标准 ($150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), $\rho(\text{O}_3)$ 平均值为 $(90.6 \pm 61.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中, 7 月 19 ~ 26 日, 天气晴朗, 臭氧昼夜持续保持较高浓度, VOCs 浓度降低, 昼夜变化趋势不明显.

2.2 挥发性有机物污染特征

$\rho(\text{TVOCs})$ 变化幅度较大 ($4.56 \sim 857.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 平均值为 $99.77 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 如图 1 所示, 其中烷烃浓度最大, 为 $31.19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占比达 31.26%, 烷烃优势物种为正丁烷 ($7.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、异戊烷 ($5.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和丙烷 ($4.01 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 等; 其次为 OVOCs 和芳香烃, 浓度分别为 $26.75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $20.33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占比 26.81% 和 20.38%, 芳香烃优势物种为甲苯和间/对-二甲苯等; 炔烃占比相对较低, 炔烃是燃烧源的典型排放物种^[26, 27], 观测季节为夏季, 供暖燃煤贡献较小, 炔烃排放较低, 乙烷、乙烯和乙炔主要来自于机动车尾气排放^[28, 29], 其中, 乙烷和乙烯也可能来源于化工排放^[30, 31].

与其他城市相比, 如表 2 所示, 南方城市 VOCs 排放高于北方, 兰州在北方城市中, VOCs 浓度处于较高水平, TVOCs 低于广州和成都, 高于天津、银川和济南, 与太原水平相当; 组成特征上, 活性较低的烷烃浓度水平与天津、银川、济南和成都相当, 烷、烯烃在各城市中处于中等水平; 芳香烃浓度明显高于其他城市, 活性较强的芳香烃是有机溶剂的重要

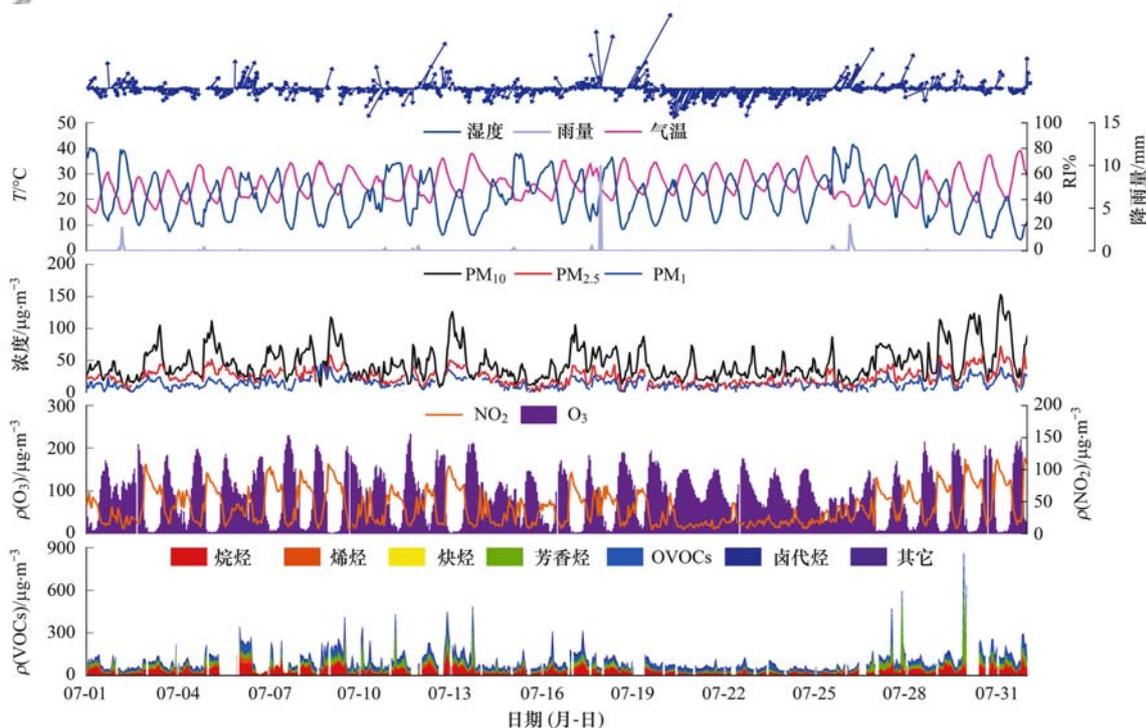


图 1 2021 年观测期间气象因子和污染物时间序列

Fig. 1 Time series of meteorological factors and pollutant concentration during the measurement period in 2021

表 2 兰州市与国内其他典型城市 VOCs 浓度水平比较¹⁾/μg·m⁻³Table 2 Comparison of VOCs concentration between Lanzhou and other typical cities in China/μg·m⁻³

项目	本研究	太原 ^[32]	天津 ^[33]	银川 ^[34]	济南 ^[35]	广州 ^[36]	成都 ^[37]
烷烃	31.19	47.19	31.79	34.23	37.06	59.97	33.24
烯烃	6.66	9.98	7.14	12.50	14.82	15.18	6.43
炔烃	1.32	2.84	1.48	—	0.65	0.12	2.87
芳香烃	20.33	37.78	8.51	8.30	9.67	39.24	15.96
OVOC	26.75	—	—	11.41	—	—	25.13
卤代烃	13.52	—	—	11.18	—	—	26.17
TVOCs	99.77	97.8	48.90	77.61	62.20	114.51	112.66

1) “—”表示文献中没有相关数据

成分,较高浓度与兰州石化工业产业密切相关,城市地理位置、产业能源结构、研究时段和监测仪器不同均导致监测结果差异。

观测期间,通过对所监测 VOCs 物种进行分析,浓度最高的前 10 种 VOCs 组分如图 2(a) 所示,主要

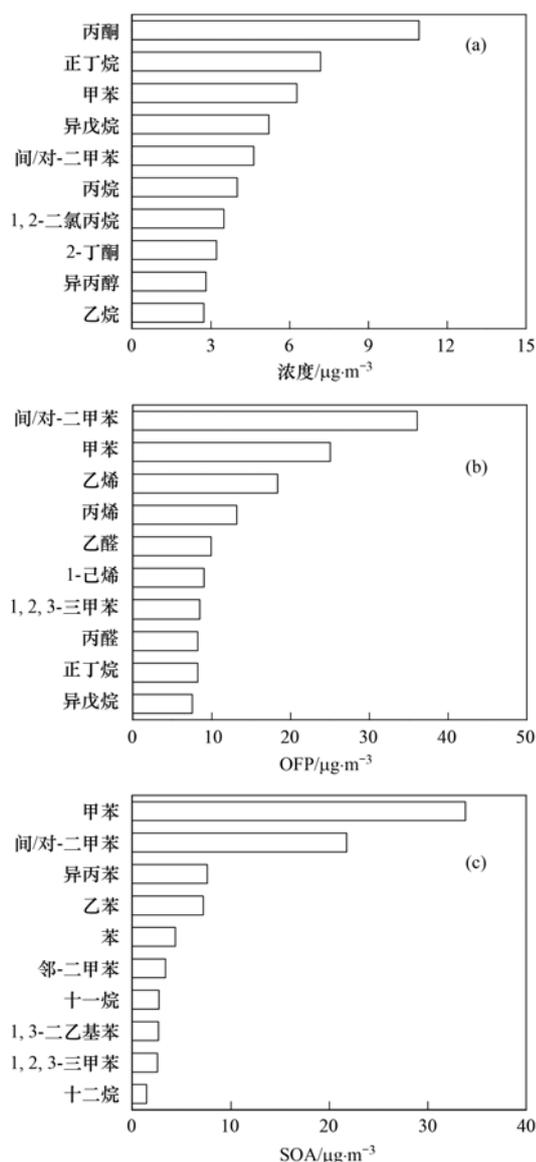


图 2 主要 VOCs 物种浓度、臭氧生成潜势和二次有机气溶胶贡献

Fig. 2 Concentrations of main VOCs species, contribution to OFP, and SOA

为丙酮、正丁烷和甲苯等,占 TVOCs 浓度的 50.6%。其中丙酮是重要的工业溶剂,常用于塑料、橡胶和喷漆等行业中,芳香烃中甲苯和间/对-二甲苯浓度相对较高。

VOCs 日变化呈双峰特征,如图 3 所示,TVOCs 第一个峰值出现在 08:00 左右,浓度为 137.58 μg·m⁻³,烷、烯烃和炔烃在 08:00 ~ 10:00 达到日最大值,主要来源于早高峰机动车排放,同时上午边界层相对较低,VOCs 反应消耗较少;随着紫外辐射和湍流加强,大气边界层和温度逐渐升高,对流作用激烈^[38],污染物扩散能力增强,大气光化学反应加剧,TVOCs 浓度大幅降低,至 14:00 时,达到 1 d 中最低值(55.67 μg·m⁻³),后持续保持低值,17:00 左右随着光照减弱,温度和大气边界层降低,光化学反应减弱,污染物累积,同时晚高峰机动车排放增加,TVOCs 浓度逐渐升高,至 21:00 达到另一个峰值(145.87 μg·m⁻³),此时芳香烃、OVOCs 和卤代烃浓度达到 1d 最高值;凌晨 01:00 ~ 04:00 是边界层最低时刻,受工业源夜间排放影响,TVOCs 浓度持续较高;日烷烃浓度变化幅度最大,最低浓度是最高浓度的 33.38%;OVOCs 和卤代烃浓度变化幅度较小,最低浓度分别是最高浓度的 72.32% 和 73.27%,OVOCs 作为非甲烷总烃二次生成产物,在

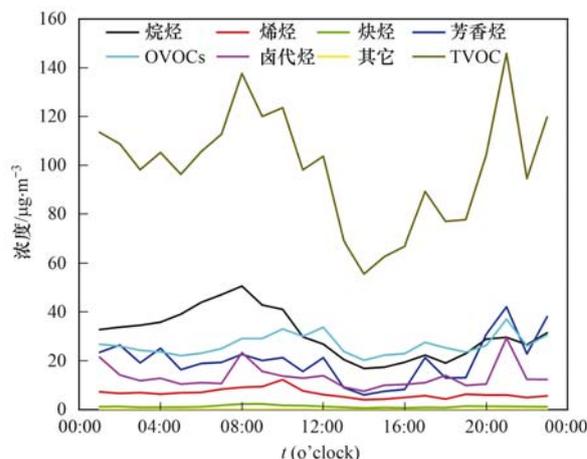


图 3 VOCs 浓度日变化特征

Fig. 3 Diurnal variation in VOCs concentration

臭氧高浓度时段占比增加,新生成 OVOCs 通过与 $\cdot\text{OH}$ 作用,继续生成臭氧。

控制关键 VOCs 物种排放可以有效降低臭氧和细颗粒物污染,改善环境空气质量。臭氧生成潜势全面考虑了 VOCs 在大气中反应以及各种后续反应,但由于部分 VOCs 的 MIR 系数缺乏,对最终结果也会产生一定影响。监测时段 VOCs 臭氧生成潜势最高的前 10 种 VOCs 组分如图 2(b) 所示,主要为间/对-二甲苯、甲苯和乙烯等,该 10 种 VOCs 对 OFP 的贡献率为 57.3%,其中烷烃类化合物虽浓度较高,但其光化学反应活性较低,臭氧生成能力相对较弱;烯、炔烃活性较强,对臭氧生成的贡献较大;芳香烃类化合物对兰州市大气环境中 O_3 影响较大,虽然在大气中含量不多,但由于其高化学活性,故对臭氧生成贡献明显,其中间/对-二甲苯和甲苯对 OFP 的贡献最为显著,分别达到 14.30% 和 10.00%。臭氧生成量同大气中 VOCs 浓度并不成绝对正比关系,对芳香烃削减能有效控制大气中臭氧生成。

对 SOA 贡献最高的前 10 种 VOCs 组分如图 2(c) 所示,以芳香烃和高碳烷烃组分对 SOA 贡献最为突出,烷烃为十二烷和十一烷,其余 8 种均为芳香烃,贡献率达 93.10%,其中甲苯和间/对-二甲苯贡献率分别达到 36.00% 和 23.10%,低碳 VOCs 的氧化产物由于饱和蒸气压较高,不易凝结成颗粒相,对 SOA 的贡献相对较小。

VOCs 对臭氧和 SOA 生成潜势贡献的优势物种有所不同。臭氧生成潜势较大的物种一般都是高浓度且低碳组分,但由于这些物种的氧化产物挥发性较高,对 SOA 生成贡献反而不高。SOA 生成潜势较大的 VOCs 物种一般为高碳烷烃和芳香烃。因此,综合考虑环境 VOCs 浓度、OFP 和 SOA,控制芳香烃类物种排放对改善 O_3 和颗粒物污染水平至关重要,尤其是甲苯和间/对-二甲苯等。

2.3 挥发性有机物污染来源解析

VOCs 主要来源于人为活动排放,具有来源多、排量大和成分复杂等特征,为实现 VOCs 管控和消减,利用不同来源解析方法进行对比分析。

2.3.1 PMF 来源解析

利用 PMF 模型对监测物种进行来源解析,最终确定 6 类因子,如图 4 所示,因子 1 中大多数烷烃物种和 1-己烯贡献较高,将因子 1 识别为工业排放源。因子 2 中正戊烷,正丁烷和异戊烷为主要成分,其中戊烷是汽油挥发的示踪物,因子 2 识别为油气挥发源。因子 3 中芳香烃贡献较高,包含乙苯、甲苯和间/对/邻-二甲苯等,这些组分在印刷油漆等行业使

用并广泛排放,综合判断为油漆涂料源^[39,40]。因子 4 对苯和甲苯贡献最高,二者均是重要工业合成原料,确定为工业原料源。因子 5 烯炔贡献最大,甲基叔丁基醚(MTBE)是汽油添加剂^[41],C2~C3 烷烃、烯炔和乙炔是燃烧过程的示踪物,苯、1-丁烯、异戊烷、顺-二丁烯、反-二丁烯、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷和 C3-C4 类烷烃化合物等,均为机动车尾气排放的主要物种^[42],因子 5 确定为机动车排放源。因子 6 卤代烃负载较高,主要来源于工业溶剂使用排放,因此将因子 6 识别为工业溶剂源^[43]。

如图 5(a) 所示,6 类污染来源中工业溶剂源贡献率最大为 22.3%,其次是油漆涂料源(21.7%)、机动车排放源(16.3%)和汽油挥发源(14.9%),工业排放源和工业原料源贡献率分别为 14.2% 和 10.7%。

不同时段污染源贡献率变化如图 6 所示,结果表明:工业溶剂源贡献率日变化幅度较小(13.13%~22.69%),在 11:00 左右达到峰值,工业原料和油漆涂料贡献率日变化较为一致,峰值出现在夜间,日间太阳辐射加强,VOCs 逐渐消耗,直至晚间随着光照减弱和边界层降低,污染物逐渐积累;机动车排放源贡献率变化幅度较大(3.55%~43.14%),在日间,贡献率随着车流量增加持续升高,夜间随着人类出行活动减少,贡献降低保持低值;油气挥发在夜间和上午时段贡献率较高,工业排放贡献主要集中在夜间和上午时段。

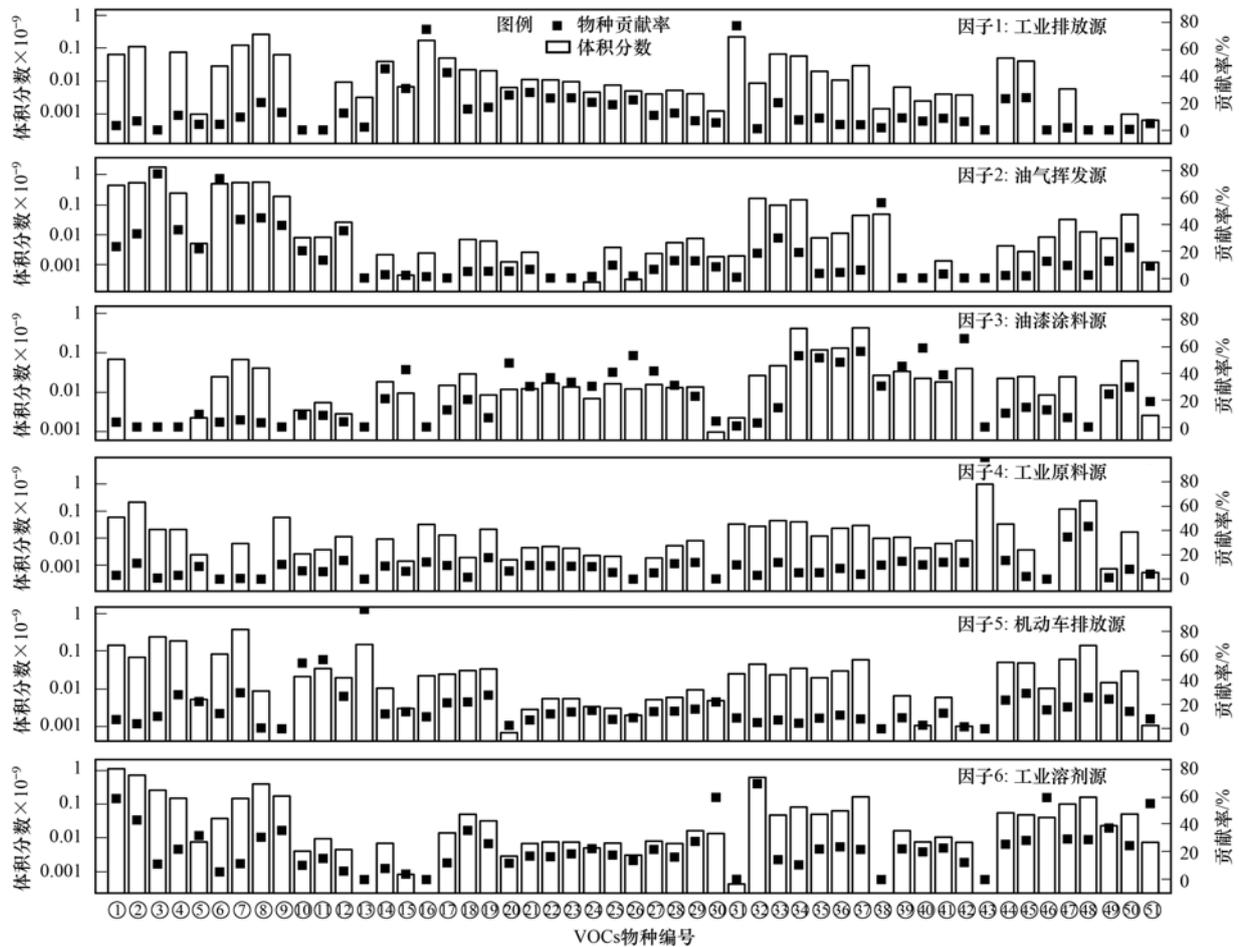
2.3.2 排放清单来源解析

根据环境保护部发布的挥发性有机物清单指南^[44],结合本地实测数据,采用“自上而下”与“自下而上”相结合方法,划分为固定燃烧源、工艺过程源、溶剂使用源、移动源、扬尘源、农业源、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和其它排放源 10 类人为污染源,建立兰州市 2017 年 VOCs 污染源排放清单,利用排放因子法和物料衡算法,确定污染源排放因子,此处不再逐一列出相应排放因子。兰州市 2017 年 VOCs 污染源排放清单结果如表 3 所示,VOCs 排放总量为 94 761.6 t,主要由溶剂使用源和移动源贡献,二者年排放量分别为 53 760.3 t 和 17 086.3 t,如图 5(b) 所示,溶剂使用源和移动源贡献率分别为 56.7% 和 18.0%。

2.3.3 特征 VOCs 来源解析

采用三对特征 VOCs 组分相关性比值,分析判断苯、甲苯和丙烯的来源特征。

(1) 甲苯和苯 在城市大气环境中,机动车尾气、生物质和燃煤等燃烧过程是苯的主要来源,甲苯除机动车排放外,涂料和溶剂使用也是其重要来



①乙烷, ②丙烷, ③正丁烷, ④异丁烷, ⑤环戊烷, ⑥正戊烷, ⑦异戊烷, ⑧乙烯, ⑨丙烯, ⑩顺-2-丁烯, ⑪反-2-丁烯, ⑫1-丁烯, ⑬异戊二烯, ⑭甲基环戊烷, ⑮环己烷, ⑯正己烷, ⑰3-甲基戊烷, ⑱2-甲基戊烷, ⑲2,3-二甲基丁烷, ⑳甲基环己烷, ㉑庚烷, ㉒3-甲基己烷, ㉓2-甲基己烷(异庚烷), ㉔2,3-二甲基戊烷, ㉕正辛烷, ㉖2-甲基庚烷, ㉗正壬烷, ㉘癸烷, ㉙十一烷, ㉚十二烷, ㉛1-己烯, ㉜乙炔, ㉝苯, ㉞甲苯, ㉟乙基苯, ㊱邻-二甲苯, ㊲间/对-二甲苯, ㊳苯乙烯, ㊴1,2,4-三甲基苯, ㊵1,2,3-三甲基苯, ㊶3-乙基甲苯, ㊷1,4-二乙基苯, ㊸异丙醇, ㊹乙酸乙酯, ㊺甲基叔丁基醚(MTBE), ㊻四氯化碳, ㊼二氯甲烷, ㊽氯甲烷, ㊾三氯甲烷, ㊿1,2-二氯乙烷, ①氯苯

图4 各因子 VOCs 化合物源谱

Fig. 4 Source profiles of VOCs in each factor

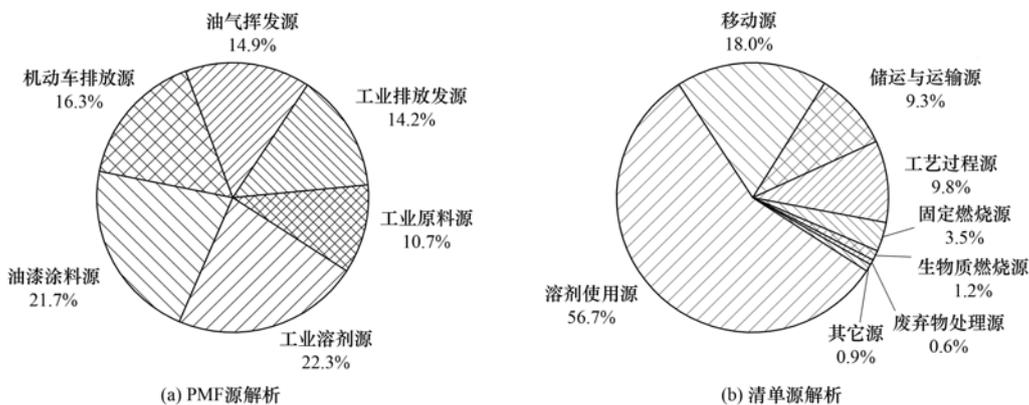


图5 不同污染来源贡献率

Fig. 5 Contribution ratio of different pollution sources

源^[29,45], 溶剂涂料使用中甲苯/苯(T/B)是11.5^[46], 如果甲苯/苯(T/B)在0.2~0.6之间, 则主要受燃烧源影响; 隧道实验中T/B在1.52左右,

主要受到机动车尾气影响; 工业区T/B在4.8~5.8之间. 如图7(a)所示, 观测期间, 监测点附近T/B平均值为2.43, 高于隧道实验结果1.52, 表明甲

表 3 兰州市 2017 年 VOCs 污染源排放清单结果

Table 3 VOCs pollution source emission inventory results of Lanzhou in 2017

排放源	排放源	排放量/t	排放源	排放源	排放量/t
固定燃烧源	电力热力	363.1	储存运输源	油品存储	7 606.6
	工业燃烧	1 624.6		油品运输	183.8
	民用燃烧	1 333.0		加油站	981.0
移动源	道路移动源	15 911.6	废弃物处理源	废水处理	0.2
	非道路移动源	1 174.7		固废处理	522.4
溶剂使用源	工业溶剂	1 068.3	其它排放源	餐饮企业	65.0
	非工业溶剂使用	52 692.0		城镇家庭烹饪	471.7
生物质燃烧源	生物质炉灶	30.5		农村家庭烹饪	294.6
	生物质开放燃烧	1 113.7	工艺过程源	9 324.7	

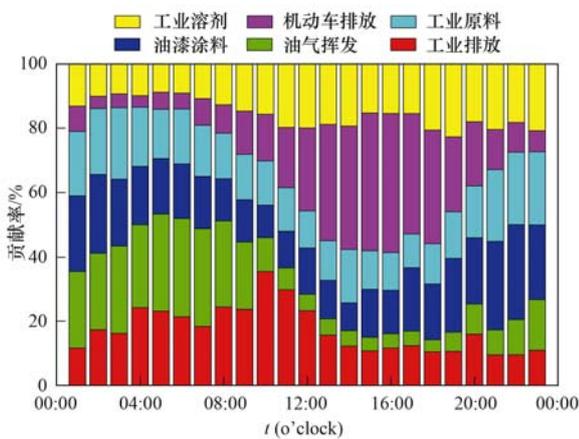


图 6 不同污染源贡献率日变化特征

Fig. 6 Diurnal variation characteristics of contributions from different sources

苯排放受机动车和工业排放共同影响。

(2) 苯和乙炔 乙炔主要来自燃烧排放, 苯来自燃烧或工业排放^[26,27]。如果苯和乙炔的相关性很好, 说明该地区的苯主要来自燃烧排放, 工业排放影响较小。图 7(b) 表明, 苯和乙炔相关性较差 ($R^2 = 0.01$), 监测点位周边苯主要来源为工业排放。

(3) 丙烯和乙炔 丙烯来自燃烧排放或工业排放, 如果丙烯和乙炔的相关性很好, 说明该地区的丙烯主要来自燃烧, 工业排放影响较小; 如果丙烯出

现高值离散点, 说明受到工业排放的影响。图 7(c) 中, 丙烯和乙炔相关性较差 ($R^2 = 0.10$), 丙烯主要受到工业排放的影响。

综上, 监测点附近甲苯、苯和丙烯主要来源于工业和机动车排放, 甲苯对 OFP 和 SOA 均有重要贡献, 并且苯是致癌风险较高的物种, 丙烯对 OFP 也有显著贡献, 因此, 控制工业排放的高活性物种, 对周边区域的 O_3 和 $PM_{2.5}$ 污染, 以及对人体健康都有重要的意义。

2.3.4 不同 VOCs 来源解析结果对比

用 PMF 和污染源排放清单两种定量来源解析方法, 对污染源进行了不同分类, PMF 将污染来源识别为 6 类, 清单经过统计分析污染来源确定为 8 类, 不同污染源贡献率结果也有差异。分析其主要原因有: 首先, 排放清单中移动源贡献 18%, PMF 中机动车尾气源和油气挥发源贡献率分别为 16.25% 和 14.9%, 两者之和大于清单中移动源贡献率, 其中油气挥发源部分可归于移动源, 近几年兰州市机动车保有量不断增加导致 PMF 中机动车尾气排放和油气挥发源贡献增大; PMF 和排放清单溶剂源贡献率分别为 22.3% 和 56.7%, 差别较大, 在清单结果中, 溶剂使用源包括工业溶剂和非工业溶剂使用, 范围较大, PMF 中的工业溶剂源可能与工业源和油漆涂料源存在交叉重合, 尤其是油漆涂料源中

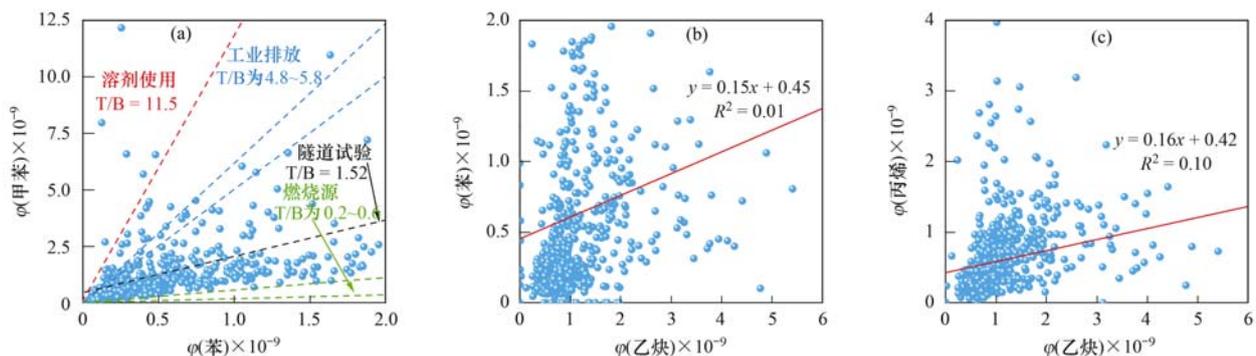


图 7 特征 VOCs 组分相关性

Fig. 7 Correlation of characteristic VOCs components

可能有部分未归入工业溶剂源,目前通过监测数据进行受体源解析,无法将此类来源进行严格区分,造成结果差异;在清单结果中,固定燃烧源、生物质燃烧源和废弃物处理源对 VOCs 排放贡献较低,在 PMF 结果中未体现,可能与采集数据为夏季,供暖等燃烧源贡献较低有关;两种方法中工业原料源和存储运输源贡献率分别为 10.67% 和 9.3%,结果基本一致.其次,PMF 和清单源解析存在时空差异,PMF 方法基于监测点位 2021 年 7 月 VOCs 实时在线数据,包含了大气中二次生成部分,而清单数据基于兰州所有城区一次污染来源统计结果,利用 2017 年全年各方面的 VOCs 排放数据开展.

下一步应优化清单的空间分布和时间分配,同时利用多点长时间序列监测数据进行受体源解析,将二者结果对比验证,以保证源解析结果的准确性和有效性.不同源解析定量和定性结果也表明,工业溶剂源和移动源是兰州地区 VOCs 重要来源,因此, VOCs 管控减排重点为工业企业和机动车排放,倡导周边工业企业使用低挥发性有机涂料,对废气采取集中处理,降低排放量;同时提高油品质量,降低机动车尾气排放,采取绿色出行生活方式.

3 结论

(1)监测期间,兰州市夏季 $\rho(\text{VOCs})$ 为 $99.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,烷烃排放浓度最大,为 $31.19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,占比达 31.26%,其次为 OVOCs 和芳香烃,浓度最高前 10 种物质为丙酮、正丁烷和甲苯等,占 TVOCs 浓度的 50.6%.

(2)臭氧生成潜势(OFP)较大的前 10 种 VOCs 组分贡献率达到 57.3%,对 SOA 贡献较大的前 10 种物质以芳香烃和高碳烷烃为主,贡献率达 93.10%,芳香烃类化合物氧化主导二次有机气溶胶生成,其中,甲苯和间/对-二甲苯贡献率分别为 36.00% 和 23.10%,芳香烃类对兰州市大气环境中 O_3 和细颗粒物影响较大.

(3)PMF 和排放清单等来源解析结果表明:工业溶剂源和移动源是兰州地区 VOCs 重要来源,因此, VOCs 管控减排重点为工业企业和机动车,减少石油化工和溶剂挥发等人为源排放,将 VOCs 活性物种列入重点控制对象,尤其是甲苯和间/对-二甲苯等芳香烃化合物,公众采取绿色出行方式,多措并举降低 O_3 和细颗粒物污染,进一步改善环境空气质量.

参考文献:

[1] Shrivastava M, Cappa C D, Fan J W, *et al.* Recent advances in

understanding secondary organic aerosol: Implications for global climate forcing[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, **55**(2): 509-559.

[2] Tsigaridis K, Kanakidou M. The present and future of secondary organic aerosol direct forcing on climate[J]. *Current Climate Change Reports*, 2018, **4**(2): 84-98.

[3] Hallquist M, Wenger J C, Baltensperger U, *et al.* The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5155-5236.

[4] Novakov T, Penner J E. Large contribution of organic aerosols to cloud-condensation-nuclei concentrations[J]. *Nature*, 1993, **365**(6449): 823-826.

[5] de Gouw J, Warneke C. Measurements of volatile organic compounds in the Earth's atmosphere using proton-transfer-reaction mass spectrometry[J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2007, **26**(2): 223-257.

[6] Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(2): 362-367.

[7] 孔琴心,刘广仁,李桂忱.近地面臭氧浓度变化及其对人体健康的可能影响[J].*气候与环境研究*, 1999, **4**(1): 61-66.

Kong Q X, Liu G R, Li G C. Surface ozone concentration variation and possible influences on human health[J]. *Climatic and Environmental Research*, 1999, **4**(1): 61-66.

[8] 张银.化工园区挥发性有机物的污染扩散与健康风险评估——以天津临港化工园区为例[D].天津:南开大学, 2015.

[9] 王韵杰,张少君,郝青明.中国大气污染治理:进展·挑战·路径[J].*环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1755-1762.

Wang Y J, Zhang S J, Hao J M. Air pollution control in China: progress, challenges and future pathways[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1755-1762.

[10] 代伶文,孟晶,李倩倩,等.长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征[J].*环境科学*, 2021, **42**(3): 1039-1052.

Dai L W, Meng J, Li Q Q, *et al.* VOCs emission inventory and variation characteristics of artificial sources in Hubei province in the Yangtze river economic belt[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1039-1052.

[11] Baudic A, Gros V, Sauvage S, *et al.* Seasonal variability and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Paris megacity (France)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(18): 11961-11989.

[12] dos Santos Siqueira C Y, Lemos M V P, da Cunha Araujo B C, *et al.* Atmospheric distribution of organic compounds from urban areas near Olympic games sites in Rio de Janeiro, Brazil[J]. *Microchemical Journal*, 2017, **133**: 638-644.

[13] 林燕芬,段玉森,高宗江,等.基于 VOCs 加密监测的上海典型臭氧污染过程特征及成因分析[J].*环境科学学报*, 2019, **39**(1): 126-133.

Lin Y F, Duan Y S, Gao Z J, *et al.* Typical ozone pollution process and source identification in Shanghai based on VOCs intense measurement[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 126-133.

[14] 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.

[15] 华倩雯,冯菁,杨珏,等.苏州市人为源挥发性有机物排放清单及特征[J].*环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2690-2698.

- Hua Q W, Feng J, Yang J, *et al.* Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Suzhou city[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2690-2698.
- [16] 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 等. 广州番禺大气成分站复合污染过程 VOCs 对 O₃ 与 SOA 的生成潜势[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2246-2255.
- Zou Y, Deng X J, Li F, *et al.* Effect of VOCs on O₃ and SOA formation potential during the combined pollution process in Guangzhou Panyu atmospheric composition station [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2246-2255.
- [17] 齐安安, 周小平, 雷春妮, 等. 兰州市功能区环境空气中挥发性有机物关键活性组分与来源解析[J]. *环境化学*, 2020, **39**(11): 3083-3093.
- Qi A A, Zhou X P, Lei C N, *et al.* Key active components and sources of volatile organic compounds in ambient air of Lanzhou City [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(11): 3083-3093.
- [18] 赵锐, 黄络萍, 程军, 等. 成都市工业源重点 VOC 排放行业排放清单及空间分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1358-1367.
- Zhao R, Huang L P, Cheng J, *et al.* VOC emissions inventory from the key industries in Chengdu city and its associated spatial distribution characteristics [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1358-1367.
- [19] 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 等. 拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 113-122.
- Yu J Y, Han Y, Chen M L, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in Lhasa [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 113-122.
- [20] 李洪, 常莉敏, 吕沛诚, 等. 兰州市大气臭氧生成的敏感性分析及其前体物减排对策建议 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(5): 1628-1639.
- Li Y, Chang L M, Lü P C, *et al.* Sensitivity analysis of atmospheric ozone formation and its precursors emission reduction countermeasures in Lanzhou city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(5): 1628-1639.
- [21] 贾晨辉. 中国西部兰州盆地非甲烷烃大气污染特征及其化学行为 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- Jia C H, Characteristics and chemical behaviors of atmospheric non-methane hydrocarbons in Lanzhou valley, western China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [22] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [23] Carter W P L, Pierce J A, Luo D M, *et al.* Environmental chamber study of maximum incremental reactivities of volatile organic compounds [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(18): 2499-2511.
- [24] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(6): 953-963.
- [25] U. S. Environmental Protection Agency. EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [EB/OL]. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&direntryid=308292, 2022-01-25.
- [26] Kim E, Hopke P K, Edgerton E S. Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, **53**(6): 731-739.
- [27] 鲁晓晗, 王丽涛, 马笑, 等. 邯郸市 VOCs 变化特征及 O₃ 和 SOA 生成潜势 [J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(3): 30-37.
- Lu X H, Wang L T, Ma X, *et al.* Change characteristics of VOCs and their formation potential of O₃ and SOA in Handan city [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(3): 30-37.
- [28] Ling Z H, Guo H. Contribution of VOC sources to photochemical ozone formation and its control policy implication in Hong Kong [J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, **38**: 180-191.
- [29] Liu Y, Shao M, Kuster W C, *et al.* Source identification of reactive hydrocarbons and oxygenated VOCs in the summertime in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(1): 75-81.
- [30] Feng Y L, Wen S, Chen Y J, *et al.* Ambient levels of carbonyl compounds and their sources in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(10): 1789-1800.
- [31] 刘芮伶, 翟崇治, 李礼, 等. 重庆主城区夏秋季挥发性有机物 (VOCs) 浓度特征及来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1260-1267.
- Liu R L, Zhai C Z, Li L, *et al.* Concentration characteristics and source analysis of ambient VOCs in summer and autumn in the urban area of Chongqing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1260-1267.
- [32] 温彦平, 闫雨龙, 李丽娟, 等. 太原市夏季挥发性有机物污染特征及来源分析 [J]. *太原理工大学学报*, 2016, **47**(3): 331-336.
- Wen Y P, Yan Y L, Li L J, *et al.* Pollution characteristic and source analysis of volatile organic compounds in summer in Taiyuan [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, **47**(3): 331-336.
- [33] 高璟赟, 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.
- [34] 杨丽蓉, 尹伟康, 张欣荣, 等. 银川市大气中 VOCs 污染特征分析 [J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2021, **42**(3): 340-345.
- Yang L R, Yin W K, Zhang X R, *et al.* Analysis on pollution characteristics of VOCs in atmosphere in Yinchuan [J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2021, **42**(3): 340-345.
- [35] 刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 等. 济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3656-3661.
- Liu Z C, Zhang F, Hou L J, *et al.* Pollution characteristics of VOCs in ambient air of Ji'nan city in Summer [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3656-3661.
- [36] 李雷, 李红, 王学中, 等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- Li L, Li H, Wang X Z, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in the downtown area of Guangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- [37] 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5316-5324.
- Xu C X, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds pollution in summer in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5316-5324.
- [38] Srivastava A, Sengupta B, Dutta S A. Source apportionment of

- ambient VOCs in Delhi City [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **343**(1-3): 207-220.
- [39] 王学臣, 王帅, 刘大喜, 等. 典型工业源挥发性有机物排放特征及臭氧生成潜势分析[J]. *环境污染与防治*, 2020, **42**(11): 1387-1391.
Wang X C, Wang S, Liu D X, *et al.* VOCs emission characteristics and ozone formation potential analysis of typical industrial sources [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2020, **42**(11): 1387-1391.
- [40] Wang B, Shao M, Lu S H, *et al.* Variation of ambient non-methane hydrocarbons in Beijing city in summer 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(13): 5911-5923.
- [41] 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市冬季挥发性有机物污染特征及来源研究[J]. *四川环境*, 2019, **38**(3): 120-125.
Han L, Chen J H, Jiang T, *et al.* Pollution characteristics and source apportionments of volatile organic compounds of Chengdu in winter[J]. *Sichuan Environment*, 2019, **38**(3): 120-125.
- [42] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [43] Kirstine W, Galbally I, Ye Y R, *et al.* Emissions of volatile organic compounds (primarily oxygenated species) from pasture [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D9): 10605-10619.
- [44] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南[R]. 2014.
- [45] Chan L Y, Chu K W, Zou S C, *et al.* Characteristics of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in industrial, industrial - urban, and industrial - suburban atmospheres of the Pearl River Delta (PRD) region of south China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**(D11), doi: 10.1029/2005JD006481.
- [46] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(15): 1919-1926.



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)