

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙晨翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙灼兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

COVID-19 疫情期间雄安地区 VOCs 的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析

刘新军¹, 王淑娟^{1*}, 刘程¹, 范莉茹¹, 付翠轻¹, 齐堃¹, 宿文康²

(1. 河北省生态环境监测中心, 石家庄 050037; 2. 河北省生态环境科学研究院, 石家庄 050037)

摘要: 利用挥发性有机物(VOCs)在线监测数据对新冠肺炎疫情(COVID-19)期间(2019年12月25日~2020年2月24日)雄安地区环境空气中VOCs进行监测,探讨了疫情防控前、后VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析。结果表明,疫情防控后 φ (TVOCs)平均值为 45.1×10^{-9} ,约为疫情防控前 φ (TVOCs) 90.5×10^{-9} 的一半,芳香烃、卤代烃和OVOCs体积分数下降幅度超过60%。VOCs构成发生了较大变化,烷烃贡献率由37.6%增加至53.8%,芳香烃和卤代烃贡献率由13.3%和12.0%降低为7.5%和7.8%。疫情防控前、后体积分数前10物种有7种相同,主要为低碳烷烃、烯烃和醛酮类。疫情防控后二氯甲烷和三氯甲烷等卤代烃及苯系物下降幅度超过70%,具有机动车尾气示踪作用的甲基叔丁基醚体积分数下降超过60%。疫情防控前、后OFP分别为 $566 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $231 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,疫情防控后各类VOCs的OFP下降幅度均大于30%。芳香烃OFP贡献率在疫情防控后明显下降;疫情管控前、后烯烃OFP保持高贡献率,是雄安地区未来 O_3 控制关键物种。源解析结果表明,疫情防控后溶剂使用源对TVOCs的贡献率从24%降低到9%,机动车尾气源在疫情防控前、后贡献率分别为21%和18%。疫情防控后背景源、油气挥发源和燃烧源的贡献率由6%、14%和13%升高为13%、34%和24%。观测点在疫情防控前受到了阵发性工业源VOCs排放的影响,疫情防控后停止排放,其贡献率由疫情防控前22%降低为防控后1%。工业源、溶剂使用源、机动车尾气源和燃烧源浓度在疫情防控后分别下降97%、82%、61%和15%,背景源浓度保持稳定,油气挥发源浓度增加7%。雄安地区未来VOCs控制除了管控工业和交通活动,也要加强对油气挥发源的防控。

关键词: 雄安; 挥发性有机物(VOCs); 源解析; 正交矩阵因子分解模型(PMF); 新冠肺炎疫情(COVID-19); 臭氧生成潜势(OFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1268-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106253

Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an

LIU Xin-jun¹, WANG Shu-juan^{1*}, LIU Cheng¹, FAN Li-ru¹, FU Cui-qing¹, QI Kun¹, SU Wen-kang²

(1. Hebei Province Ecology Environmental Monitoring Center, Shijiazhuang 050037, China; 2. Hebei Provincial Academy of Ecological Environmental Science, Shijiazhuang 050037, China)

Abstract: Many restrictive measures were implemented in China from January-February 2020 to control the rapid spread of COVID-19. Many studies reported that the COVID-19 lockdown impacted $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 , volatile organic compounds (VOCs), etc. VOCs play important roles in the production of ozone and $\text{PM}_{2.5}$. Ambient VOCs in Xiong'an were measured from December 25, 2019 to January 24, 2020 (prior to epidemic prevention, P1) and from January 25, 2020 to February 24, 2020 (during epidemic prevention, P2) through a VOCs online instrument. In the study, VOCs characteristics and ozone generation potential (OFP) of ambient VOCs were analyzed, and source apportionment of VOCs were analyzed by using Positive Matrix Factorization (PMF). The results showed that φ (TVOCs) during epidemic prevention and control was 45.1×10^{-9} , which was approximately half of that before epidemic prevention and control (90.5×10^{-9}). The chemical composition of VOCs showed significant changes after epidemic prevention and control, the contribution rate of alkanes increased from 37.6% to 53.8%, and the contribution rate of aromatic hydrocarbons and halogenated hydrocarbons decreased from 13.3% and 12.0% to 7.5% and 7.8%, respectively. Aromatic hydrocarbons, halogenated hydrocarbons, and OVOCs decreased by more than 60%. Seven types of the top ten species were the same before and during the epidemic prevention and control, mainly low-carbon alkanes, olefins, aldehydes, and ketones. Dichloromethane, trichloromethane, and BTEXs decreased significantly. The OPP was $566 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and $231 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in P1 and P2, respectively. The OPP of VOCs decreased by more than 30%. The proportion of OFP contribution of aromatic hydrocarbons decreased significantly after the epidemic prevention and control, and the proportion of OFP contribution of alkanes and alkynes increased significantly. Positive matrix factorization (PMF) was then applied for VOCs sources apportionment. Six sources were identified, including background sources, oil-gas volatile sources, combustion sources, industrial sources, solvent use sources, and vehicle exhaust sources. The results showed that after the epidemic prevention and control, the contribution rate of solvent use sources to TVOCs decreased from 24% to 9%. The contribution rates of background sources, oil-gas volatile sources, and combustion sources increased from 13%, 34%, and 24% to 6%, 14%, and 13%, respectively. The relative contributions of vehicle exhaust sources before and after epidemic prevention and control were 21% and 18%, respectively. The observation points were affected by the emission of VOCs from paroxysmal industrial sources before the epidemic prevention and control. The emission was stopped after the epidemic prevention and control, and its contribution rate was reduced from 22% before the epidemic prevention and control to 1%. The concentrations of industrial sources, solvent sources, motor vehicle tail gas sources, and combustion sources decreased by 97%, 82%, 61%, and 15%, respectively, after the epidemic prevention and control. The concentration of background sources remained stable, and the concentration of oil and gas volatile sources increased by 7%. The control of production and traffic activities cannot reduce the emission of VOCs from oil and gas volatile

收稿日期: 2021-06-30; 修订日期: 2021-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0213001)

作者简介: 刘新军(1989~),男,硕士,工程师,主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: 844736428@qq.com

* 通信作者, E-mail: 37879343@qq.com

sources, which is the focus of VOCs control in Xiong'an.

Key words: Xiong'an; volatile organic compounds (VOCs); source apportionment; positive matrix factorization (PMF); COVID-19; ozone formation potential (OFP)

2020年1月,新型冠状病毒(COVID-2019)疫情在全国范围内蔓延,对经济、工业生产和社会生活造成了严重影响.为预防新冠疫情流行,保护人类健康,我国采取了关闭餐馆、商场和学校,限制公共交通(如飞机、火车及公共汽车等)甚至私家车等限制性措施,减少了人们的社会交往以及非必要业务.交通排放源和工业源等人为源是城市空气污染物的重大贡献者^[1],因此新冠疫情期间的封锁将导致人为源空气污染物排放的减少^[2,3],为研究各种大气污染物受人类活动的影响程度提供了时机.

有研究表明疫情封锁期间长三角地区 $PM_{2.5}$ 虽然有所下降但仍保持较高水平,背景污染和残留很高^[3].武汉地区 $PM_{2.5}$ 浓度明显下降,但其化学成分和来源与空气污染控制措施具有复杂的非线性响应,需要区域联合控制^[4].疫情防控后石家庄地区HONO降低了约31%、NO降低了约62%、 NO_2 降低了约36%^[5].王申博等^[6]的研究表明河南省在春节和疫情影响下除 O_3 外, $PM_{2.5}$ 和NO明显下降,但浓度仍较高.疫情期间京津冀大气污染物除 O_3 外各污染物总体处于下降趋势,控制工业排量仍是治理大气污染的关键^[7].以上研究均表明重污染天气没有因为人为排放量的减少而消失.挥发性有机物(VOCs)是臭氧和 $PM_{2.5}$ 的重要前体物,VOCs的减排将是我国实现臭氧和 $PM_{2.5}$ 协同控制的关键^[8,9].Wang等^[2]研究了南京市疫情封控前、后VOCs污染特征及来源变化情况,结果发现疫情封控开始后VOCs体积分数有了较为明显地下降,化工行业和机动车污染源对VOCs贡献有较为明显的降低.王红果等^[10]研究了济源市疫情封控期间VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析,结果表明疫情封控期间VOCs体积分数比疫情封控前有所增加,机动车尾气、工艺过程和溶剂使用源对济源市TVOCs的贡献率大幅降低,但来自于消毒剂使用的乙醇和含氯物质等对济源市TVOCs的贡献明显增加.

2017年4月1日,我国正式宣布设立“雄安新区”,旨在建设实体经济、科技创新、现代金融和人力资源协同发展的现代产业体系,发展成为高质量高水平社会主义现代化城市.雄安新区所在的保定市属于京津冀大气污染传输通道“2+26”城市,是全国空气污染最为严重的城市之一.目前尚未有学者针对雄安新区VOCs污染特征进行研究.2020年1月暴发了新型冠状病毒,期间全国人民居家隔离,

交通源和工业源等典型污染源排放量大幅度下降,是一次全国范围的极限减排情景.因此,本研究基于疫情防控期间VOCs在线监测数据,探究了雄安新区环境空气中VOCs疫情防控前、后的差异及来源变化,通过厘清人为源管控对VOCs污染变化的影响,以期为该地区进一步治理VOCs污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 观测地点及时间

VOCs在线监测点位于雄安新区育才街白洋淀文化广场(115°56'01"E, 38°56'33"N),周边主要有居民区和商业区.本研究观测时段为2019年12月25日~2020年2月24日,其中2019年12月25日~2020年1月24日为疫情封控前的观测时段(P1);2020年1月25日河北省启动重大突发公共卫生事件一级响应,实施了一系列严格的管控措施如封锁交通干线、限制人员流动、工厂停工和学校停课等,2020年1月25日~2020年2月24日为疫情封控后的观测时段(P2),期间恰逢春节,各地人民居家隔离,机动车和工业排放等典型污染源排放量大幅度下降.

1.2 监测仪器及质控措施

观测期间的VOCs数据来自国家大气颗粒物组分及光化学监测数据集成和综合分析平台(106.37.208.242;30018/cnemc/#/login).VOCs观测采用BCT 7800A PLUS大气挥发性有机物在线监测系统实时连续监测,采样频率为1 h.该系统由采集单元、质控单元、气源单元、分析单元、数据采集和传输单元以及其他辅助设备等组成,符合《环境空气挥发性有机物气相色谱连续监测系统技术要求及检测方法》(HJ 1010-2018)中样品采集、分析前处理和标样配制等相关的质量保证的有关要求.所用数据均经过三级审核.初审:对数据联网状态和仪器运行状态进行检查确认,对日常监测环节中的质量控制结果进行检查审核,补录缺失数据、标注无效数据,并对部分异常数据重积分等.复审:对初审结果进行复核,如有存疑数据,与初审人员核实,对初审过程中遗漏的异常数据做补审或退回初审重审;定期跟进掌握监测数据有效率,有效率不足时进行改进监督.终审:对复审数据进行审核确认,从数据规律、逻辑性和化学机制等方面开展数据终审,必要时核查仪器状态、监测数据质控结果等,最

终核实数据,完成入库.本研究均采用完成入库审的数据,最终在观测时间内有效数据获取率为 94%.监测数据包含 116 种 VOCs,其中烷烃 30 种、烯烃 11 种、炔烃 1 种、芳香烃 17 种、卤代烃 35 种、OVOCs 21 种和有机硫 1 种,方法检出限均在 0.1×10^{-9} 以下.

1.3 臭氧生成潜势计算

臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 是综合衡量各类 VOCs 反应活性对臭氧生成贡献的指标参数,可用于识别 VOCs 中臭氧生成的关键活性物种. OFP 大小由 VOCs 物种的大气浓度和该物种的最大增量反应活性 (maximum incremental reactivity, MIR) 决定,计算公式如下:

$$\text{OFP}_i = [\text{VOC}]_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中, OFP_i 为组分 i 的臭氧生成潜势 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), $[\text{VOC}]_i$ 为 VOCs 中物种 i 的浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), MIR_i 为物种 i 的最大增量反应活性 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以每 g VOCs 生成的臭氧量计算). 本研究引用 Carter^[11] 在 2010 年研究的 MIR 值,并计算了各 VOCs 物种的 OFP,从而识别出影响臭氧生成的关键 VOCs 物种.

1.4 PMF 源解析方法

正定矩阵因子分解模型 (positive matrix factorization, PMF) 是一种广泛应用的多元因子分析受体模型,已用于许多 VOCs 源解析研究^[12-14]. PMF 的基本原理是质量守恒分析,利用样品中的物种浓度和不确定度可以得到影响取样点的化学成分来源和贡献^[11,15],将受体矩阵 (\mathbf{x}_{ij}) 分解为源成分谱矩阵 (\mathbf{g}) 与贡献率矩阵 (\mathbf{f}) 以及残差矩阵 (\mathbf{e}),通过使目标函数 Q 最小得到矩阵 \mathbf{g} 和 \mathbf{f} ,原理见公式(2)和(3):

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

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

式中, \mathbf{x}_{ij} 为第 j 个污染物于第 i 个样品中的浓度, \mathbf{g}_{ik} 为第 k 个源在第 i 个样品中对该污染物的贡献, \mathbf{f}_{kj} 为第 k 个源对所有样品中第 j 个污染物的贡献,而 \mathbf{e}_{ij} 为所对应的残差, p 是源的个数, \mathbf{u}_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个物种的不确定度, Q 值越小越好. 通过 PMF 分析,同时比对不同来源的源谱,可以确定 VOCs 的不同来源并计算其贡献. 本研究利用美国 EPA 的 PMF5.0 进行源解析,对采集的 116 种物质进行筛选,筛选剔除检出率低于 50% 的物质以及信噪比 (S/N) 小于 0.5 的物质,最终选择了 47 种浓度较高指示意义明确的物质进行模型计算. PMF5.0 中输

入文件包括物种浓度和不确定度 2 个文件,若数据中物质浓度低于检出限则替换为 1/2 检出限、不确定度 (Unc) 替换为 5/6 倍的检出限,若物质浓度大于检出限,其不确定度按公式(4)计算:

$$\text{Unc} = \sqrt{(c \times \text{Error Fraction})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (4)$$

式中, c 为物种浓度, Error Fraction 为误差分数,根据物质活性一般赋值 5% ~ 50% 之间, MDL 为该物种的方法检出限. 利用 Q_{true} 和 Q_{robust} 的比值来判断解析结果的稳定性,越接近 1 结果越好,具体参见文献 [16].

源解析过程中物种浓度的计算如公式(5)所示:

$$x = \varphi \times M / 22.4 \quad (5)$$

式中, x 为浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), φ 为体积分数 ($\times 10^{-9}$), M 为目标物的摩尔质量 ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), 22.4 为标准状态下 (273.15 K, 101.325 kPa) 气体的摩尔体积 ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 VOCs 污染水平及组成特征

2.1.1 VOCs 污染特征

观测期间各类 VOCs 和 TVOCs 体积分数见图 1. 疫情防控后 φ (TVOCs) 平均值为 45.1×10^{-9} , 较疫情防控前 φ (TVOCs) 90.5×10^{-9} 下降 50%, 芳香烃、卤代烃和 OVOCs 下降幅度超过 60%, 该结果与南京疫情期间 VOCs 体积分数变化相似 (TVOCs 下降 47%, 烷烃下降 42%, 芳香烃下降 62%)^[2]. 本研究期间卤代烃明显下降, 与济源疫情期间受含氯消毒剂影响卤代烃体积分数上升 79.5% 明显不同^[10]. 图 2 为疫情防控前、后 VOCs 构成的变化, 烷烃贡献率由 37.6% 增加至 53.8%, 这可能与烷烃化学活性较为稳定有关; 芳香烃贡献率由 13.3% 降低为 7.5%, 卤代烃由 12.0% 降低为 7.8%.

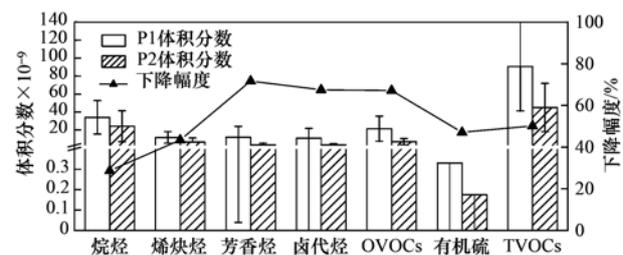


图 1 疫情防控前 (P1)、后 (P2) 各类别 VOCs 体积分数变化情况

Fig. 1 Changes in VOCs before and during epidemic prevention and control

2.1.2 VOCs 的主要排放物种

疫情防控前、后 VOCs 主要排放物种如图 3 所

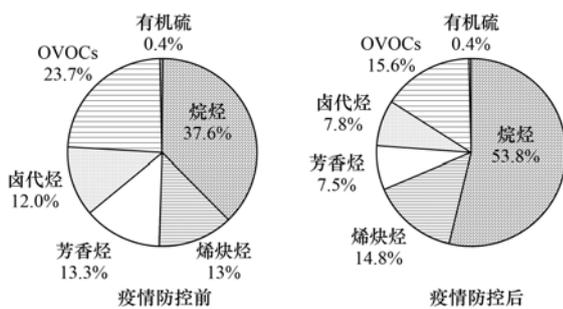


图2 疫情防控前、后 VOCs 组分分布

Fig. 2 Proportion of components in VOCs before and during epidemic prevention and control

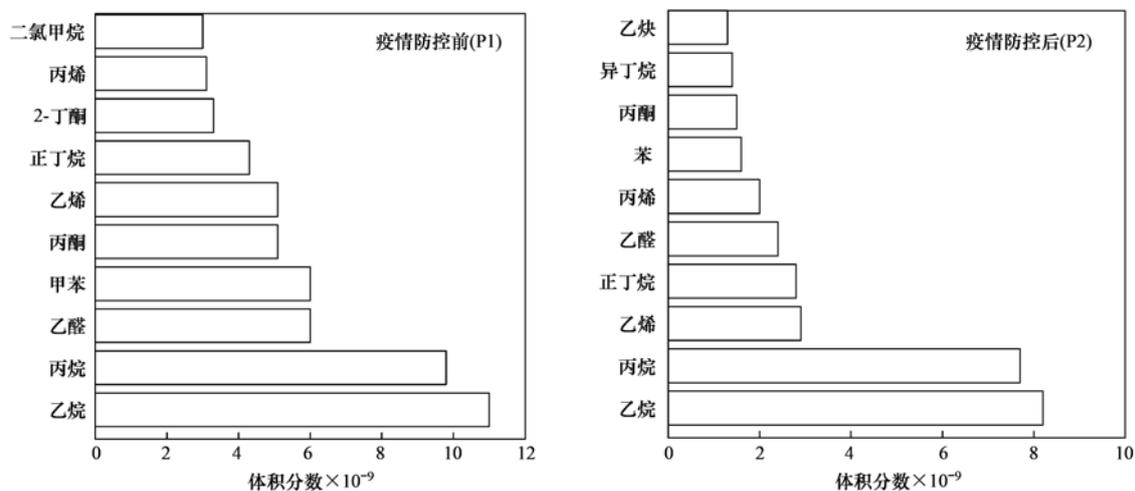


图3 疫情防控前、后体积分数前 10 物种

Fig. 3 Top ten VOCs in volume fraction before and during epidemic prevention and control

2.1.3 VOCs 各物种变化特征

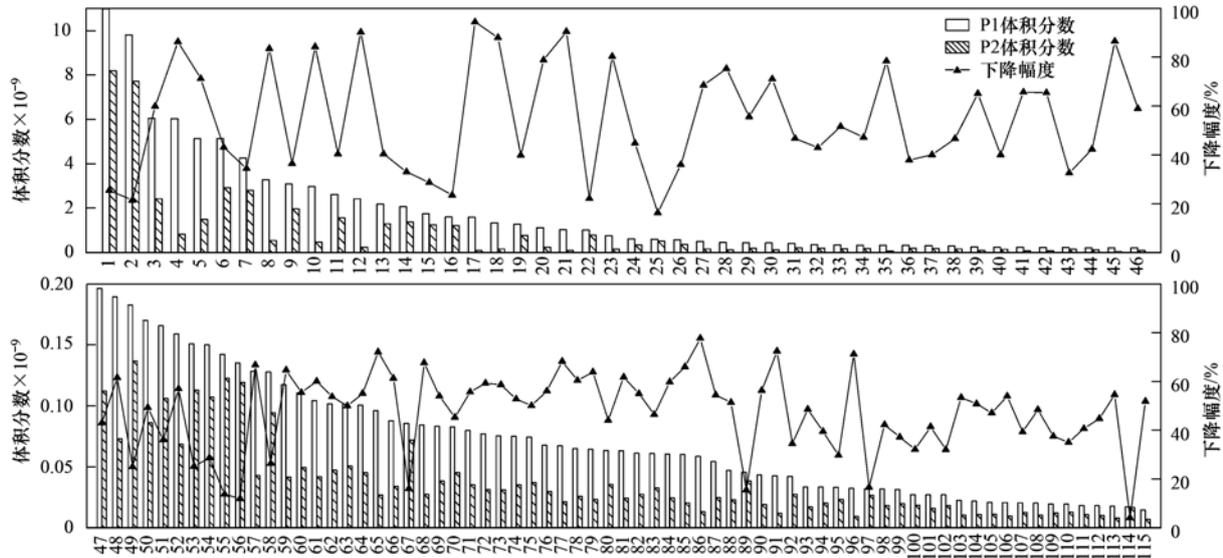
图4显示了疫情防控前(P1)和疫情防控后(P2)单个VOC物种的体积分数平均值及下降幅度.长寿命氟利昂类物质(如四氟二氯乙烷、三氟三氯乙烷和二氟二氯甲烷)的下降幅度小于20%.这是因为中国禁止工业生产和使用这些氟氯烃(CFC),因此在整个测量期间,其环境水平保持相对稳定.此外,正丁醛、戊醛、氯苯和邻-二氯苯变化较小,这些物质在大气中体积分数较低.乙烷、丙烷等低碳烷烃活性较低寿命较长且受到了输送和背景气团的影响,体积分数有所下降(21%~25%)但仍保持较高体积分数.在冬季一般认为异戊二烯主要来自机动车尾气^[17].疫情防控后异戊二烯下降幅度超过了70%,同时机动车尾气源示踪物甲基叔丁基醚体积分数下降超过60%,表明疫情防控后机动车尾气源VOCs排放明显降低.二氯甲烷和三氯甲烷是典型的工业源,乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯主要与涂料及有机溶剂使用有关^[18],乙酸乙酯均是溶剂使用行业的特征污染物^[19].以上物质均是典型的人为源排放,体积分数均下降超过70%,这是因为

示.疫情防控前体积分数前10物种分别为乙烷、丙烷、乙醛、甲苯、丙酮、乙烯、正丁烷、2-丁酮、丙烯和二氯甲烷;疫情防控后前10物种为乙烷、丙烷、乙烯、正丁烷、乙醛、丙烯、苯、丙酮、异丁烷和乙炔.乙烷和丙烷在疫情防控后有所下降但仍保持较高体积分数($>7 \times 10^{-9}$).疫情防控前、后体积分数前10物种有7种相同,主要为低碳烷烃、烯炔和醛酮类,可能与这些物质本底体积分数高有关;疫情防控前的二氯甲烷和甲苯体积分数较高,疫情防控后已不属于前10物种,可能与它们属于阵发性工业源逸散有关,疫情防控后排放停止大幅度降低.

疫情防控期间工业生产大幅度停滞减少了VOCs的排放.疫情防控前、后大气VOCs各物种体积分数贡献率如图5所示.从中可知,乙烷是体积分数贡献率最高的物种,疫情防控前、后分别为12.1%和18.2%.二氯甲烷从3.3%降低为1.0%,可能是工业源的影响出现了中断.疫情防控后燃烧源示踪物苯和乙炔体积分数贡献率有所上升,苯从2.9%上升到3.5%,乙炔由2.4%上升到2.9%.间/对-二甲苯和乙酸乙酯由2.7%和1.2%降低为0.5%和0.5%,表明溶剂源对VOCs的贡献率明显下降.通过比对物种体积分数和体积分数贡献率变化可知,疫情防控后各人为源VOCs体积分数有不同程度下降,工业源和溶剂使用源对TVOCs贡献率下降明显,燃烧源贡献率变化较小.

2.2 臭氧生成潜势变化特征

疫情防控前、后TVOCs的OFP分别为 $566 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $231 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,各类VOCs的OFP贡献率下降幅度均大于30%(见图6).如图7所示,疫情防控前芳香烃和烯炔烃OFP贡献率较大,疫情防控后以烯炔烃和OVOCs对OFP的贡献为主.伴随芳香烃



1. 乙烷, 2. 丙烷, 3. 乙醛, 4. 甲苯, 5. 丙酮, 6. 乙烯, 7. 正丁烷, 8. 2-丁酮, 9. 丙烯, 10. 二氯甲烷, 11. 苯, 12. 乙酸乙酯, 13. 乙炔, 14. 异丁烷, 15. 一氯甲烷, 16. 异戊烷, 17. 三氯甲烷, 18. 1,2-二氯乙烷, 19. 丙醛, 20. 间/对-二甲苯, 21. 1,2-二氯丙烷, 22. 正戊烷, 23. 异丙醇, 24. 正己烷, 25. 二氟二氯甲烷, 26. 丙烯醛, 27. 萘, 28. 邻-二甲苯, 29. 正丁烯, 30. 乙苯, 31. 2-甲基戊烷, 32. 一氟三氯甲烷, 33. 3-甲基戊烷, 34. 二硫化碳, 35. 异戊二烯, 36. 苯甲醛, 37. 甲基环戊烷, 38. 正庚烷, 39. 甲基叔丁基醚, 40. 甲基环己烷, 41. 丁二烯, 42. 苯乙炔, 43. 环己烷, 44. 环戊烷, 45. 四氢呋喃, 46. 3-甲基己烷, 47. 乙酸乙烯酯, 48. 2-甲基己烷, 49. 己醛, 50. 正辛烷, 51. 间甲基苯甲醛, 52. 1,2,4-三甲苯, 53. 氯乙烷, 54. 四氯化碳, 55. 戊醛, 56. 正丁醛, 57. 十二烷, 58. 氯乙烯, 59. 2,2,4-三甲基戊烷, 60. 正壬烷, 61. 1-乙基-3-甲基苯, 62. 十一烷, 63. 2-甲基庚烷, 64. 2,3-二甲基丁烷, 65. 四氯乙烯, 66. 正癸烷, 67. 1,2,2-三氟-1,1,2-三氯乙烷, 68. 三氯乙烯, 69. 2,3-二甲基戊烷, 70. 甲基丙烯醛, 71. 反-2-丁烯, 72. 1-戊烯, 73. 4-甲基-2-戊酮, 74. 丁烯醛, 75. 2,2-二甲基丁烷, 76. 3-甲基庚烷, 77. 顺-2-丁烯, 78. 2,3,4-三甲基戊烷, 79. 甲基丙烯酸甲酯, 80. 1,2,3-三甲苯, 81. 1-己烯, 82. 对乙基甲苯, 83. 1,3,5-三甲苯, 84. 2,4-二甲基戊烷, 85. 1,1,2-三氯乙烷, 86. 反-2-戊烯, 87. 1-乙基-2-甲基苯, 88. 正丙苯, 89. 氯苯, 90. 对-二乙苯, 91. 1,1-二氯乙烷, 92. 异丙苯, 93. 顺式-1,3-二氯-1-丙烯, 94. 2-己酮, 95. 1,1,2,3,4,4-六氯-1,3-丁二烯, 96. 顺-2-戊烯, 97. 邻-二氯苯, 98. 1,4-二氧六环, 99. 1,2,4-三氯苯, 100. 一溴甲烷, 101. 反式-1,3-二氯-1-丙烯, 102. 对-二氯苯, 103. 1,1,1-三氯乙烷, 104. 1,3-二乙基苯, 105. 二溴一氯甲烷, 106. 氯代甲苯, 107. 1,2-二溴乙烷, 108. 一溴二氯甲烷, 109. 四氯乙烷, 110. 1,3-二氯苯, 111. 三溴甲烷, 112. 反-1,2-二氯乙烯, 113. 顺-1,2-二氯乙烯, 114. 1,1,2,2-四氟-1,2-二氯乙烷, 115. 1,1-二氯乙烷

图4 疫情防控前、后各组分体积分数变化及下降幅度

Fig. 4 Changes in individual VOC species and their relative decreases rates during P2 versus P1

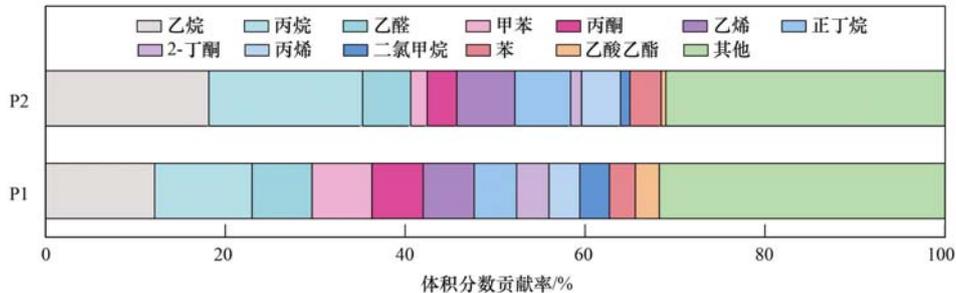


图5 疫情防控前、后 VOCs 物种体积分数贡献率

Fig. 5 Proportion of mixing ratio of VOCs species during P1 and P2

体积分数降低,其 OFP 贡献率在疫情防控后由 33.8% 降低至 18.7%,烷烃和烯炔烃 OFP 贡献率明显增加.结合 2.1.1 节,虽然烯炔烃体积分数贡献率仅 14% 左右,但其 OFP 贡献率在疫情防控前、后分别为 27.4% 和 35.6%.综合疫情防控前后变化,疫情期间工业生产和交通活动管控能够降低芳香烃 OFP 贡献率,但烯炔烃保持对 OFP 较大的贡献率,是未来雄安地区控制 O₃ 污染的关键.

图 8 为疫情防控前、后 OFP 贡献率排名前 10 的 VOCs 物种.疫情防控前 OFP 贡献率前 10 的关键活性物种依次为:甲苯、乙醛、丙烯、乙烯、间/对-二甲苯、丙醛、邻-二甲苯、2-丁酮、正丁烷和正丁烯,贡献率合计为 69%;疫情防控后 OFP 贡献率排名前 10 的关键活性物种依次为:丙烯、乙烯、乙醛、丙醛、甲苯、间/对-二甲苯、正丁烷、丙烷、丙烯醛和异戊烷,贡献率合计 70%.疫情防控前 OFP 贡献

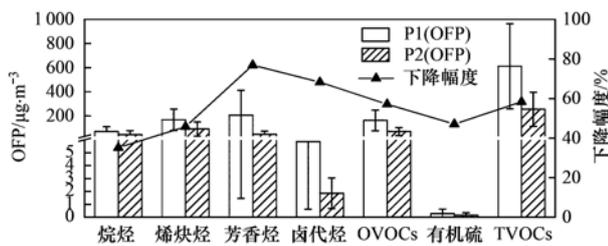


图6 疫情防控前、后 OFP 变化情况

Fig. 6 Changes in different components to OFP before and during epidemic prevention and control

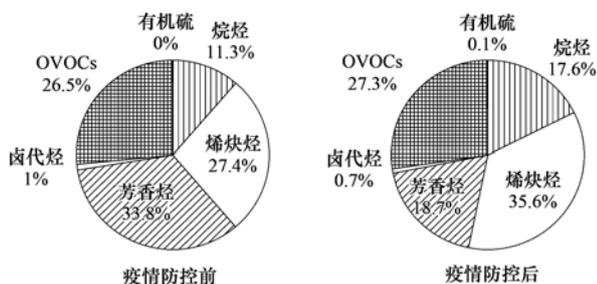


图7 疫情防控前、后不同组分的 OFP 贡献占比

Fig. 7 Contribution of different components to OFP before and during epidemic prevention and control

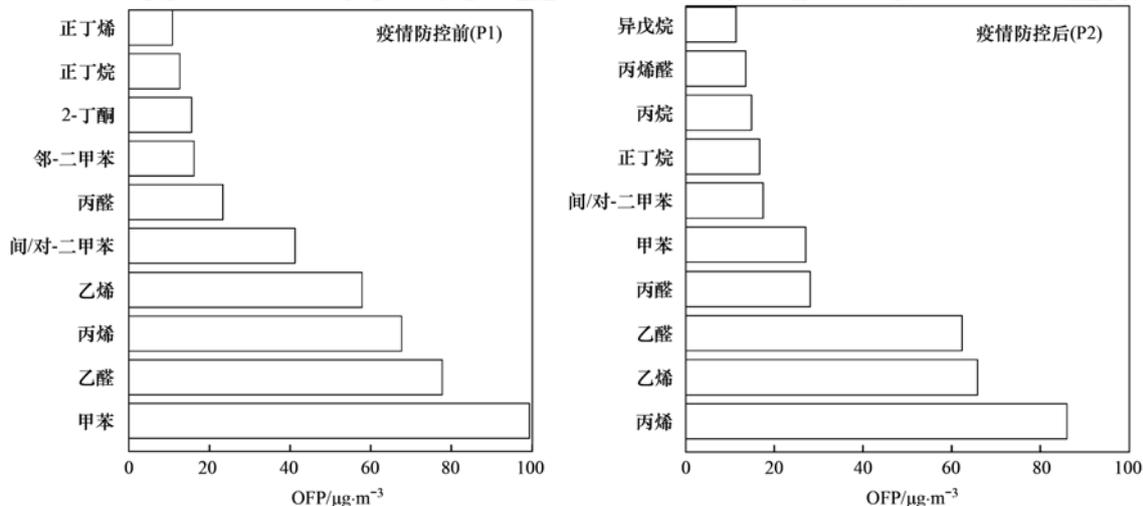


图8 疫情防控前、后 OFP 贡献率排名前 10 的组分

Fig. 8 Contribution of top ten active species to OFP before and during epidemic prevention and control

显消失. 因此该工业源为涉及到甲苯和二氯甲烷生产和使用的工业源, 疫情防控后生产中断排放停止, 建议进一步摸排.

因子 2 中乙炔、苯和乙烯等物质贡献率和浓度均较高. 乙炔和苯是燃烧源的示踪物^[23], 同时甲苯与苯的比值(T/B)符合燃烧源的特征^[24]. 虽然生物质燃烧的典型示踪物一氯甲烷^[25]有一定占比, 但该因子中低碳烷烃比低碳烯炔浓度高, 苯比乙炔浓度高, 这说明该因子来自充分燃烧源, 符合燃煤排放特征. 因此判断因子 2 为化石燃料燃烧特征的燃烧源.

因子 3 以高贡献率的 C₂ ~ C₅ 烷烃、C₂ ~ C₃ 烯炔和 C₆ ~ C₈ 芳香烃为特征, 符合机动车尾气排放特

率最大的甲苯明显下降, 可能是疫情防控开始后工业活动大幅度下降导致环境空气中甲苯体积分数降低. 疫情防控前、后 OFP 贡献率排名前 10 物种有 7 种是一致的, 主要为低碳烯炔、低碳醛酮类和苯系物, 与这些物质体积分数较高和 MIR 值较大有关. 结合 2.1.1 节, 乙烷虽然体积分数较高, 但因其 MIR 值较低, OFP 贡献率并不高.

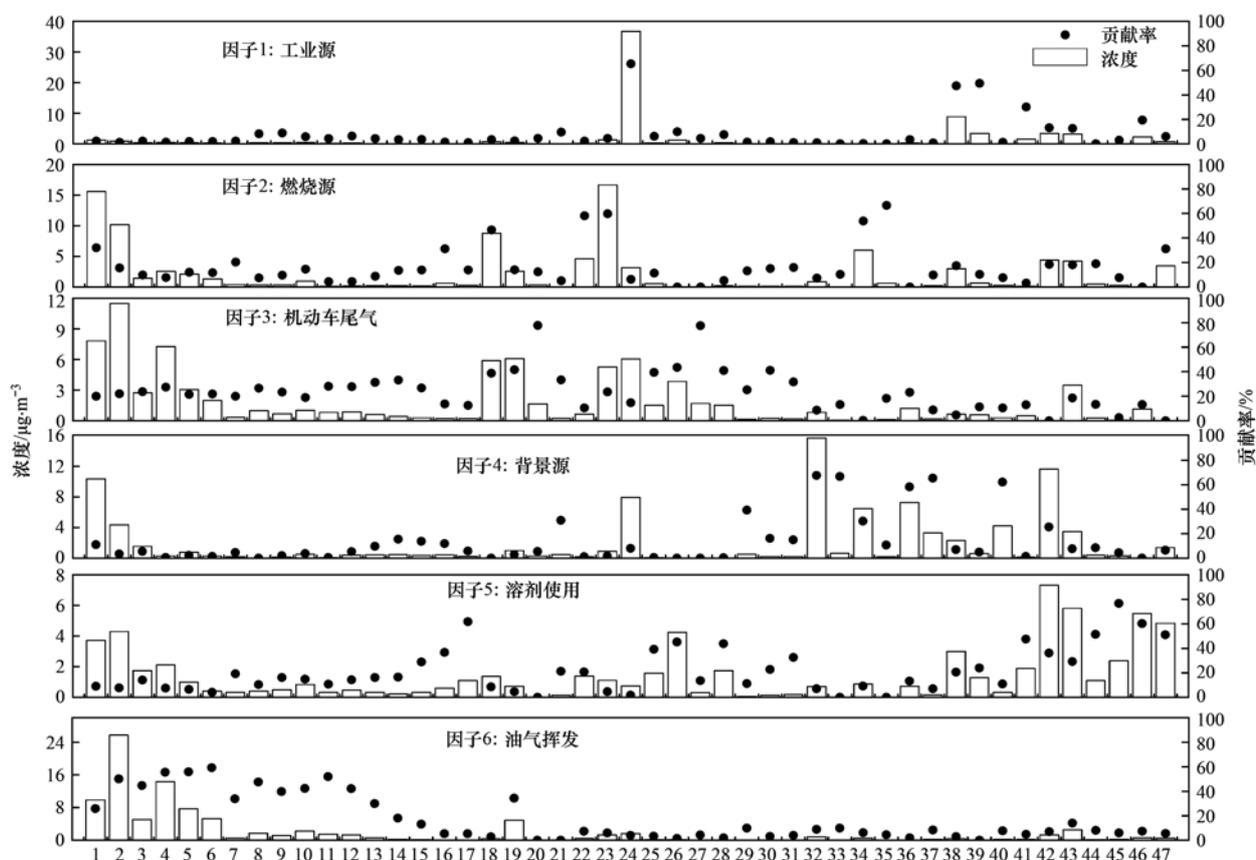
2.3 VOC 来源分析

本研究优先选择浓度较高、测量不确定度低、检出率大于 50% 和来源指示性强的 VOCs 物种输入 PMF5.0 进行分析. 最终选择 47 个物种 (包括 17 种烷烃、9 种芳香烃、4 种烯炔、1 种炔烃、10 种卤代烃和 6 种醛酮类) 输入 PMF 进行源解析. PMF 解析出 6 个因子的化学组成特征如图 9 所示.

因子 1 中贡献率较高的物质包含二氯甲烷和三氯甲烷等卤代烃类物质, 具有典型的工业源特征^[20-22]. 同时, 该因子具有高浓度的甲苯, 但没有观测到二甲苯和乙酸乙酯等溶剂性物质, 从时间序列看该因子属于阵发性的无组织逸散, 疫情管控后明

征^[23]. 机动车尾气排放的示踪物甲基叔丁基醚、2-甲基戊烷和 3-甲基戊烷在因子 3 中有一定贡献率^[24]. 此外, 该源在疫情防控前存在与早晚交通高峰对应的两次峰值, 因此将该因子定义为机动车尾气源.

因子 4 对二氟二氯甲烷、四氟二氯乙烷、一氟三氯甲烷、三氟三氯乙烷和四氯化碳的贡献率分别为 68%、67%、58%、65% 和 62%, 这些化学物质在大气中具有很长的寿命^[26]. 乙烷和丙烷等活性较低的物质在因子 4 也有较高的浓度. 同时考虑到因子 4 在观测期间具有稳定的贡献, 将因子 4 定为背景源.



1. 乙烷, 2. 丙烷, 3. 异丁烷, 4. 正丁烷, 5. 异戊烷, 6. 正戊烷, 7. 环戊烷, 8. 2-甲基戊烷, 9. 3-甲基戊烷, 10. 正己烷, 11. 甲基环戊烷, 12. 正庚烷, 13. 正辛烷, 14. 正壬烷, 15. 正癸烷, 16. 十一烷, 17. 十二烷, 18. 乙烯, 19. 丙烯, 20. 正丁烯, 21. 异戊二烯, 22. 乙炔, 23. 苯, 24. 甲苯, 25. 乙苯, 26. 间/对-二甲苯, 27. 苯乙烯, 28. 邻-二甲苯, 29. 异丙苯, 30. 正丙苯, 31. 对-二乙苯, 32. 二氟二氯甲烷, 33. 四氟二氯乙烷, 34. 一氯甲烷, 35. 氯乙烷, 36. 一氟三氯甲烷, 37. 三氟三氯乙烷, 38. 二氯甲烷, 39. 三氯甲烷, 40. 四氯化碳, 41. 1,2-二氯丙烷, 42. 乙醛, 43. 丙酮, 44. 甲基叔丁基醚, 45. 异丙醇, 46. 乙酸乙酯, 47. 2-丁酮

图9 各因子中VOCs物种浓度及对各因子的贡献

Fig. 9 Concentrations and contributions of VOCs species for each factor

因子5中苯系物、丙酮、异丙醇和乙酸乙酯的浓度和贡献率较高。其中乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯主要与涂料及有机溶剂使用有关^[18]。丙酮、异丙醇和乙酸乙酯均是溶剂使用行业的特征污染物^[19]。因此因子5被认定为溶剂使用源。

因子6中乙烷、丙烷、异丁烷、正丁烷和丙烯等物质贡献率及浓度均较高,这些物质是油气挥发的主要组成物种^[27]。同时,与燃烧源相关的乙炔和苯占比极小。因此将因子6判定为油气挥发源。

图10为观测期间VOCs各因子浓度和贡献率变化。疫情防控前溶剂使用源对TVOCs的贡献率最大(24%),疫情防控后贡献率降低到9%。机动车尾气源在疫情防控前、后贡献率率分别为21%和18%。疫情防控后背景源、油气挥发源和燃烧源贡献率明显升高,分别为13%、34%和24%,而其在疫情防控前为6%、14%和13%。疫情防控后工业源贡献率仅为1%,显著低于疫情防控前(22%),可能因为该源为阵发性的工业源逸散,疫情防控后生产中

断排放停止。图11为疫情防控前、后各源浓度变化情况,工业源、溶剂使用源和机动车尾气源浓度在疫情防控后分别下降97%、82%和61%,这是因为疫情防控导致工业生产和交通运输大幅度停滞;燃烧源浓度下降15%,背景源浓度保持稳定,油气挥发源浓度增加7%。

3 结论

(1)疫情防控后 φ (TVOCs)平均值为 45.1×10^{-9} ,为疫情防控前的一半(90.5×10^{-9}),芳香烃、卤代烃和OVOCs体积分数下降幅度超过60%以上。VOCs构成发生了较大变化,烷烃贡献率由37.6%增加至53.8%,芳香烃和卤代烃贡献率由13.3%和12.0%降低为7.5%和7.8%。疫情防控前、后前10物种有7种相同,主要为低碳烷烃、烯烃和醛酮类。疫情防控后人为源特征物质二氯甲烷和三氯甲烷等卤代烃及苯系物下降幅度超过70%,机动车尾气示踪物甲基叔丁基醚体积分数下降超过60%。

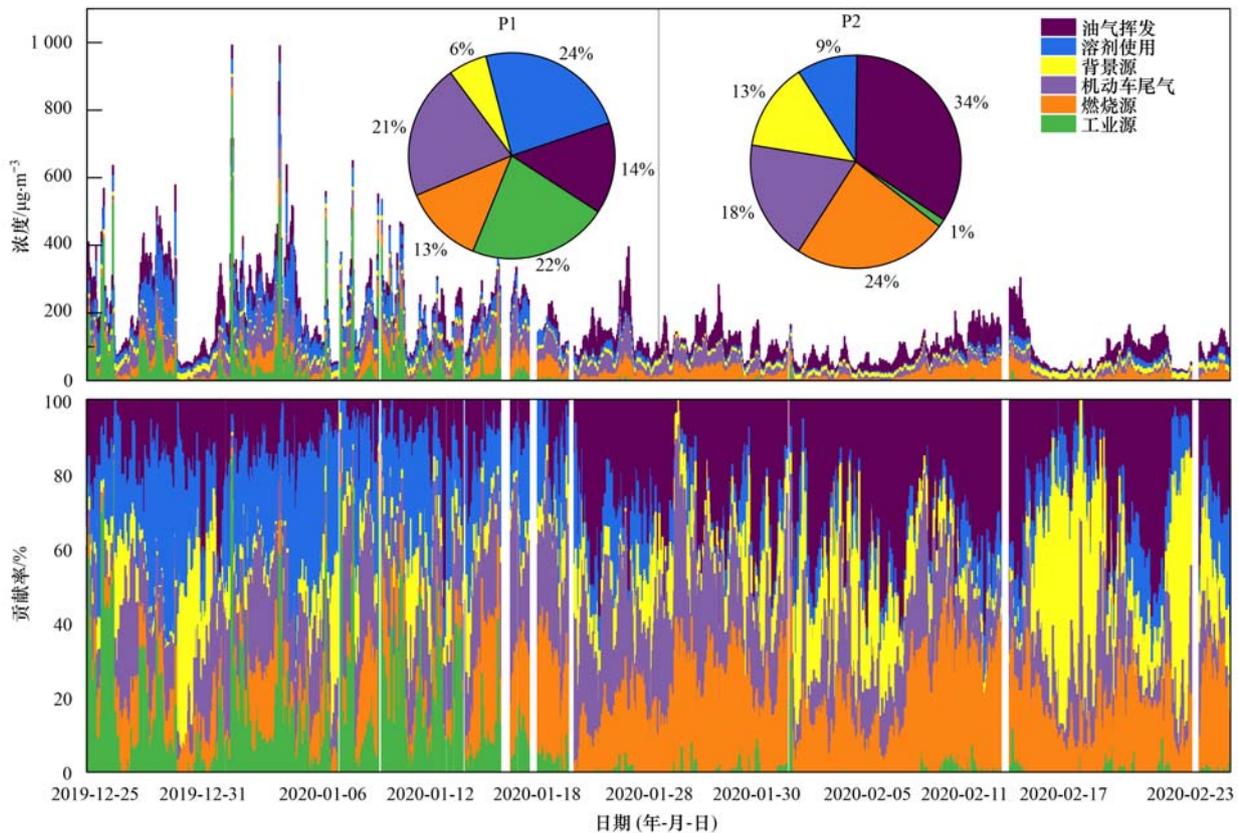


图 10 VOCs 各因子浓度和贡献率变化

Fig. 10 Changes of VOCs concentration and contribution of six emission sources to VOCs

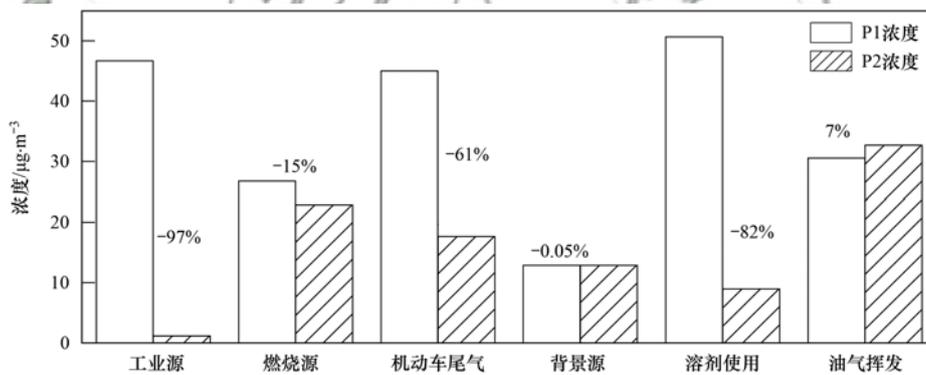


图 11 疫情防控前、后各因子浓度变化

Fig. 11 Source concentration of VOCs during P1 and P2

(2) 疫情防控前、后 OFP 平均值分别为 $566 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $231 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 各类 VOCs 的 OFP 贡献率下降幅度均大于 30%. 疫情期间工业生产和交通活动管控能够降低芳香烃 OFP 贡献率, 但烯炔烃保持对 OFP 较大的贡献率, 是未来雄安新区控制 O_3 污染的关键. 疫情防控前、后 OFP 贡献率排名前 10 物种有 7 种是一致的, 主要为低碳烯炔、低碳醛酮类和苯系物.

(3) 疫情防控后溶剂使用源对 TVOCs 的贡献率从 24% 降低到 9%. 背景源、油气挥发源和燃烧源的贡献率由 6%、14% 和 13% 升高为 13%、34% 和 24%. 机动车尾气源在疫情防控前、后贡献率分别

为 21% 和 18%. 观测点在疫情防控前受到了阵发性工业源 VOCs 排放的影响, 疫情防控后停止排放, 其贡献率由疫情防控前 22% 降低为 1%. 工业源、溶剂使用源、机动车尾气源和燃烧源浓度在疫情防控后分别下降 97%、82%、61% 和 15%, 背景源浓度保持稳定, 油气挥发源浓度增加 7%. 生产和交通活动管控不能实现油气挥发源 VOCs 排放的降低, 是该地区未来 VOCs 管控重点.

参考文献:

[1] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. Nature, 2015, 525(7569): 367-371.

- [2] Wang M, Lu S H, Shao M, *et al.* Impact of COVID-19 lockdown on ambient levels and sources of volatile organic compounds (VOCs) in Nanjing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **757**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143823.
- [3] Li L, Li Q, Huang L, *et al.* Air quality changes during the COVID-19 lockdown over the Yangtze River Delta Region: an insight into the impact of human activity pattern changes on air pollution variation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139282.
- [4] Zheng H, Kong S F, Chen N, *et al.* Significant changes in the chemical compositions and sources of PM_{2.5} in Wuhan since the city lockdown as COVID-19 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140000.
- [5] Liu Y C, Ni S Y, Jiang T, *et al.* Influence of Chinese New Year overlapping COVID-19 lockdown on HONO sources in Shijiazhuang[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141025.
- [6] 王申博, 范相阁, 和兵, 等. 河南省春节和疫情影响情景下 PM_{2.5}组分特征[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(12): 5115-5123.
Wang S B, Fan X G, He B, *et al.* Chemical composition characteristics of PM_{2.5} in Henan Province during the Spring Festival and COVID-19 outbreak [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(12): 5115-5123.
- [7] 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 等. COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1205-1214.
Zhao X, Shen N C, Li L J, *et al.* Analysis of changes and factors influencing air pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the COVID-19 pandemic [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1205-1214.
- [8] Atkinson R, Baulch D L, Cox R A, *et al.* Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: volume II-gas phase reactions of organic species[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3625-4055.
- [9] Shao M, Wang W J, Yuan B, *et al.* Quantifying the role of PM_{2.5} dropping in variations of ground-level ozone: inter-comparison between Beijing and Los Angeles[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147712.
- [10] 王红果, 孙永旺, 王芳, 等. 济源市疫情防控期间 VOCs 的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(3): 761-769.
Wang H G, Sun Y W, Wang F, *et al.* Characteristics, ozone formation potential and source apportionment of VOCs during epidemic prevention in Jiyuan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 761-769.
- [11] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [12] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs in the suburban area of Beijing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, **7**(4): 711-724.
- [13] 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.
- [14] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 227-237.
- [15] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [16] Chen W T, Shao M, Lu S H, *et al.* Understanding primary and secondary sources of ambient carbonyl compounds in Beijing using the PMF model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3047-3062.
- [17] Borbon A, Fontaine H, Veillerot M, *et al.* An investigation into the traffic-related fraction of isoprene at an urban location [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(22): 3749-3760.
- [18] Li G H, Wei W, Shao X, *et al.* A comprehensive classification method for VOC emission sources to tackle air pollution based on VOC species reactivity and emission amounts [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **67**: 78-88.
- [19] 包亦姝, 王斌, 邓也, 等. 成都市典型有机溶剂使用行业 VOCs 组成成分谱及臭氧生成潜势研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 76-82.
Bao Y S, Wang B, Deng Y, *et al.* Source profiles and ozone formation potential of VOCs emitted from typical industries using organic solvents in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 76-82.
- [20] Scheff P A, Wadden R A. Receptor modeling of volatile organic compounds. 1. Emission inventory and validation [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(4): 617-625.
- [21] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, *et al.* Volatile organic compound constituents from an integrated iron and steel facility [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **157**(2-3): 569-578.
- [22] 景盛翱, 王红丽, 朱海林, 等. 典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3090-3095.
Jing S A, Wang H L, Zhu H L, *et al.* Treatment status and emission characteristics of volatile organic compounds from typical industrial sources [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3090-3095.
- [23] 李颖慧, 李如梅, 胡冬梅, 等. 太原市不同功能区环境空气中挥发性有机物特征与来源解析[J]. *环境化学*, 2020, **39**(4): 920-930.
Li Y H, Li R M, Hu D M, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds of different functional areas in Taiyuan City [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(4): 920-930.
- [24] 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.
- [25] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物 (VOCs) 排放源成分谱研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [26] McCarthy M C, Aklilu Y A, Brown S G, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds measured in Edmonton, Alberta [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 504-516.
- [27] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(5): 757-763.
Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(5): 757-763.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polthioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)