

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)
《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)	

广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性

吴影¹, 莫招育^{1,2}, 吴琴琴³, 陆嘉晖¹, 毛敬英¹, 陈雪梅¹, 粟少丽¹, 覃纹¹, 刘慧琳^{1*}, 韦敏⁴

(1. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433; 3. 广西生态工程职业技术学院生态环境保护学院, 柳州 545004; 4. 柳州市生态环境局, 柳州 545001)

摘要: 位于广西柳州市郊区的柳城县存在突出的臭氧(O_3)污染问题,但目前尚未有当地 O_3 污染成因分析的相关报道。为探究其 O_3 污染成因,在2021年10月1~15日开展了116种挥发性有机物(VOCs)的在线连续观测,并对 O_3 敏感性进行分析。结果表明,观测期间 φ [总挥发性有机物(TVOCs)]平均值为 27.52×10^{-9} ,其中污染过程(10月1~6日) φ (TVOCs)的平均值为 32.15×10^{-9} ,比非污染过程(10月8~15日)高32.79%。从物种浓度来说,含氧挥发性有机物(OVOCs)贡献最高,贡献率为43.70%,其次是烷烃(23.00%)、芳香烃(11.75%)和卤代烃(7.35%)。从臭氧生成潜势(OFP)来说,OVOCs对OFP的贡献率最高(41.96%),其次是芳香烃(32.60%)和烯烃(17.92%)。观测期间VOCs主要来自机动车排放(32.44%)、生物质燃烧源(29.31%)、溶剂使用源(16.43%)、植物源(11.34%)和化工企业排放(10.49%),溶剂使用源和植物源在污染过程贡献比例分别增加28.58%和28.53%。EKMA曲线结果显示柳城县在观测期间整体处于VOCs和氮氧化物(NO_x)的协同控制区,因此,柳城县 O_3 高发秋季应以VOCs和 NO_x 协同减排为重点。

关键词: 臭氧(O_3); 挥发性有机物(VOCs); 臭氧生成潜势(OFP); 来源解析; 臭氧敏感性

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0075-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202207

Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone- NO_x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi

WU Ying¹, MO Zhao-yu^{1,2}, WU Qin-qin³, LU Jia-hui¹, MAO Jing-ying¹, CHEN Xue-mei¹, SU Shao-li¹, QIN Wen¹, LIU Hui-lin^{1*}, WEI Min⁴

(1. Guangxi Research Institute of Environmental Protection, Nanning 530022, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. School of Environment Protection, Guangxi Eco-engineering Vocational & Technical College, Liuzhou 545004, China; 4. Liuzhou Bureau of Ecology and Environment, Liuzhou 545001, China)

Abstract: Liucheng county, as a suburb of Liuzhou City in Guangxi province, has a prominent ozone (O_3) pollution problem; however, there have been no relevant analyses of the cause of local O_3 pollution reported. In order to investigate the causes of O_3 pollution, an online observation of 116 VOCs with a time resolution of 1 h was carried out in Liucheng county from October 1st to 15th, and the sensitivity of ozone to the relative changes in the NO_x and VOCs was analyzed. The results showed that the average value of φ [total volatile organic compounds (TVOCs)] during the observation period was 27.52×10^{-9} , and the average value of φ (TVOCs) during the polluting process (October 1st to 6th) was 32.15×10^{-9} , which was 32.79% higher than that of the non-pollution process (October 8th to 15th). In terms of species concentration, oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) contributed the highest, accounting for 43.70%, followed by alkanes (23.00%), aromatics (11.75%), and halocarbons (7.35%). In terms of ozone formation potential (OFP), OVOCs contributed the highest (41.96%) to OFP, followed by aromatics (32.60%) and alkenes (17.92%). During the observation period, VOCs mainly came from motor vehicle emissions (32.44%), biomass combustion sources (29.31%), solvent use sources (16.43%), plant sources (11.34%), and chemical industry emissions (10.49%). The contribution ratios of solvent use sources and plant sources in the pollution process increased by 28.58% and 28.53%, respectively. The EKMA curve shows that, during the observation period, Liucheng county was in a synergistic control area for VOCs and nitric oxide (NO_x). Therefore, in the high ozone-occurrence autumn of Liucheng county, the key will be to reduce both VOCs and NO_x emissions.

Key words: ozone (O_3); volatile organic compounds (VOCs); ozone formation potential (OFP); source analysis; ozone sensitivity

臭氧(O_3)污染是指近地面 O_3 浓度增高的现象,会造成人体健康受损^[1]、农作物减产^[2,3]和加速全球变暖^[4]。2018~2020年我国337个地级及以上城市中以 O_3 首要污染物的超标天数占总超标天数分别为33.5%、41.7%和37.1%^[5]。2019年广西以 O_3 为首要污染物的超标天数占比高达53.9%,高于全国平均水平^[6], O_3 污染问题已经成为制约广西大气环境质量改善的重要因素。 O_3 污染主要来自挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)和氮氧化物(NO_x)光化学二次生成,三者之间呈复杂非

线性关系,一般利用 O_3 生成的敏感性(O_3 - NO_x -VOCs敏感性)来分析 O_3 生成的主控因子^[7]。 NO_x 主要来自燃料的燃烧,而大气环境中VOCs物种成百上千,且各物种之间光化学活性差异巨大,VOCs

收稿日期: 2022-02-27; 修订日期: 2022-05-05

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科AB20238014); 广西环科院科研创新基金项目(HKY-HT-2021-170); 2020年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY37010); 广西大气污染来源解析及预报预警工程技术研究中心项目

作者简介: 吴影(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为挥发性有机物来源及其大气化学作用, E-mail: wuying@pku.org.cn

* 通信作者, E-mail: 517507123@qq.com

来源复杂,包括工业、生活、交通和天然植物等排放^[8,9]. 因此开展 VOCs 污染特征、来源和 O₃ 生成的敏感性研究,明确 O₃ 污染主控因子和 VOCs 重点物种和来源,制定有效的减排政策是 O₃ 污染防治的关键^[7,10].

目前诸多学者对重点城市群如京津冀^[11~14]、珠三角^[15~19]、长三角^[20~23]、成渝地区^[24~27]和汾渭平原^[28,29]等的 VOCs 污染特征、来源和 O₃ 生成的敏感性进行过分析. 而广西的相关报道较少,刘慧琳等^[30]梳理了广西地区工业源 VOCs 排放源清单,刘齐等^[31]对柳州春季大气 VOCs 浓度特征和来源进行研究,目前对广西地区 O₃ 污染过程分析和 O₃ 生成敏感性的研究尚未有报道.

位于广西柳州市郊区的柳城县 O₃ 问题突出,在 2021 年 4~7 月,共发生 7d 的 O₃ 污染, $\rho(\text{O}_{3-8\text{h-Max}})$ (日最大 8h 浓度平均值)均超过环境空气质量二级浓度限值^[32], $\rho(\text{O}_3)$ 小时值最高达 234 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 本研究通过对污染过程 VOCs 在线观测和 O₃ 生成敏感性分析,探讨柳城县 O₃ 污染成因,以期对柳州市乃至广西其他地区 O₃ 污染防控提供参考.

1 材料与方法

1.1 观测地点和时间

VOCs 观测点位于柳城中学教学楼楼顶 (109.27°E, 24.647°N, 如图 1), 采样口高度距地面约 20 m, 该站点为广西区(省)控空气质量监测站点. 站点北向为居民区,南向为林地,西向为工业园区(园区内有制糖企业、生物质发电厂、食品厂和制药厂等企业),无明显局地排放源,能够较好地代表柳城县污染浓度水平,观测时间为 2021 年 10 月 1~15 日.



图 1 VOCs 在线观测站点(柳城中学)示意

Fig. 1 VOCs online monitoring site (Liucheng Middle School) location

1.2 仪器及测量方法

VOCs 测量采用北京大学研制北京鹏宇昌亚公

司生产的 ZF-PKU-VOC1007 大气挥发性有机物快速在线观测系统,通过双通道采样两路样品分别在冷冻除水后进入两路捕集柱,在 -150℃ 的条件下被冷冻富集;在解析和分析状态下,捕集柱被加热到 100℃,进入色谱柱中分离并分别用氢离子化火焰检测器(FID)和质谱(MS)进行检测. 一次完整的分析过程可以分为 4 个步骤:样品采集(含内标采集)、解析、分析和加热反吹.

质量控制质量保证:测量 VOCs 物种 116 种,利用内标和外标对仪器进行系统标定,标准气体为 EPA 认可的 PAMS、TO15 和醛酮 12 种定制标准气体. 采用 6 点标准法做标准曲线,相关系数均在 0.99 以上,同时每天 00:00 通入体积分数为 2×10^{-9} 的 116 混合标准气体,通过单点校准外标数据对每天的数据进行浓度及峰窗漂移校准, FID 检测器所检测的目标化合物的浓度偏差小于 15%, MSD 所检测的 90% 以上目标化合物的浓度偏差小于 30%,同时目标化合物保留时间漂移与最后一次曲线检查的保留时间相比小于 0.5 min,内标校准物质为溴氯甲烷、1,4-二氟苯、氯苯-D5 和 4-溴苯. 在线观测系统的 VOC 物种工作曲线的线性相关系数、方法检测限和测量精密密度如表 1 所示. VOCs 在观测期间剔除由于仪器故障和维护造成的数据缺失,共获得有效数据 323 组,有效数据率为 94%.

NO_x、O₃、CO 和气象因素(温度、风速等)浓度数据为同一站点数据,由柳州市生态环境局提供. NO_x 采用 Thermo 42i(化学发光法)NO-NO₂-NO_x 分析仪、O₃ 为 Thermo 49i(紫外光度法)分析仪、CO 为 Thermo 48i(红外吸收法)分析仪;气象因素采用德国路斌德的 Lufft WS600-UMB 设备,各仪器按规范^[33]定期校准维护,时间分辨率均为 1 h.

1.3 臭氧生成潜势

为识别柳城县大气中关键活性 VOCs 物种,本研究采用最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)计算臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)的方法来评估 VOCs 对于 O₃ 生成的贡献大小. MIR 指增加单位量 VOCs 所产生的 O₃ 浓度的最大增量, OFP 计算公式如式(1)所示.

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

式中, OFP 表示 VOCs 的臭氧生成潜势, $[\text{VOC}]_i$ 表示物种 i 的环境浓度; MIR_i 表示单位 VOC 物种浓度的增加产生的最大 O₃ 浓度,单位为 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 以 O₃/VOCs 计,本研究 MIR 值采用 Carter 实验室 2013 年最新研究成果^[34].

表1 在线监测系统 VOC 物种工作曲线的线性相关系数、方法检测线和测量精密度

Table 1 Linear correlation coefficient, detection line, and measurement precision of VOC species working curve for online monitoring system							
物种名称	线性相关系数	方法检测限 × 10 ⁻⁹	测量精密度 /%	物种名称	线性相关系数	方法检测限 × 10 ⁻⁹	测量精密度 /%
烷烃(29 种)				卤代烃(35 种)			
乙烷	0.999	0.045	1.402	氟利昂 12	0.997	0.047	7.048
丙烷	0.998	0.047	1.037	氟里昂 114	0.997	0.074	2.068
异丁烷	0.998	0.05	0.497	氯甲烷	0.998	0.05	0.773
正丁烷	0.998	0.027	0.578	氯乙烯	0.999	0.045	1.182
环戊烷	0.998	0.029	0.668	溴甲烷	0.998	0.043	2.431
异戊烷	0.998	0.039	0.497	氯乙烷	0.999	0.058	0.982
正戊烷	0.998	0.025	0.5	氟利昂 11	0.993	0.052	1.608
2,2-二甲基丁烷	0.998	0.057	1.064	二氯乙烯	0.995	0.041	1.726
2,3-二甲基丁烷	0.997	0.053	1.726	氟利昂 113	0.997	0.054	1.069
2-甲基戊烷	0.997	0.067	3.077	二氯甲烷	0.998	0.033	1.771
3-甲基戊烷	0.996	0.034	0.913	反 1,2-二氯乙烯	0.998	0.053	1.062
正己烷	0.998	0.043	1.183	1,1-二氯乙烷	0.998	0.048	1.381
2,4-二甲基戊烷	0.997	0.037	1.342	顺-1,2-二氯乙烯	0.997	0.049	1.276
甲基环戊烷	0.997	0.039	1.207	氯仿	0.994	0.038	1.133
2-甲基己烷	0.999	0.046	0.959	1,1,1-三氯乙烷	0.994	0.047	1.128
环己烷	0.997	0.048	0.996	四氯化碳	0.998	0.037	0.696
2,3-二甲基己烷	0.998	0.053	1.262	1,2-二氯乙烷	0.998	0.035	2.194
3-甲基己烷	0.994	0.035	0.755	三氯乙烯	0.998	0.04	0.836
2,2,4-三甲基戊烷	0.997	0.025	0.835	1,2-二氯丙烷	0.997	0.038	1.845
正庚烷	0.995	0.035	0.674	一溴二氯甲烷	0.997	0.027	1.056
甲基环己烷	0.998	0.03	0.905	反-1,3-二氯丙烯	0.994	0.023	0.808
2,3,4-三甲基戊烷	0.995	0.032	0.659	顺-1,3-二氯丙烯	0.993	0.019	0.717
2-甲基庚烷	0.995	0.032	0.718	1,1,2-三氯乙烷	0.996	0.027	0.803
3-甲基庚烷	0.995	0.031	0.662	四氯乙烯	0.998	0.038	1.026
正辛烷	0.993	0.019	0.593	二溴一氯甲烷	0.997	0.027	1.055
正壬烷	0.997	0.013	0.769	二溴乙烷	0.996	0.026	0.708
正癸烷	0.997	0.016	0.852	氯苯	0.997	0.028	0.762
正十一烷	0.998	0.016	0.966	溴仿	0.996	0.04	1.586
正十二烷	0.998	0.03	0.809	1,1,2,2-四氯乙烷	0.996	0.016	0.763
烯烃(11 种)				1,3-二氯苯	0.998	0.025	0.937
乙烯	0.999	0.059	0.686	1,4-二氯苯	0.998	0.025	0.957
丙烯	0.998	0.079	0.512	氯化苄	0.991	0.018	0.682
反式-2-丁烯	0.998	0.04	0.531	1,2-二氯苯	0.998	0.028	0.86
1-丁烯	0.998	0.035	0.459	1,2,4-三氯苯	0.997	0.023	1.041
顺式-2-丁烯	0.998	0.08	0.546	六氯-1,3-丁二烯	0.997	0.021	1.436
1,3-丁二烯	0.999	0.045	1.194	OVOCs(21 种)			
1-戊烯	0.999	0.052	1.075	乙醛	0.999	0.083	9.131
反式-2-戊烯	0.998	0.044	1.226	丙烯醛	0.998	0.042	5.015
异戊二烯	0.998	0.058	1.555	丙醛	0.99	0.035	9.507
顺式-2-戊烯	0.999	0.038	1.16	丙酮	0.995	0.094	2.178
1-己烯	0.997	0.035	1.514	异丙醇	0.995	0.027	3.03
炔烃(1 种)				甲基叔丁基醚	0.992	0.051	1.055
乙炔	0.998	0.044	0.595	乙酸乙烯酯	0.998	0.053	2.118
芳香烃(18 种)				异丁烯醛	0.993	0.046	3.385
苯	0.997	0.033	0.791	正丁醛	0.991	0.056	3.316
甲苯	0.997	0.021	0.821	乙酸乙酯	0.995	0.038	1.031
乙苯	0.997	0.019	0.771	丁酮	0.993	0.059	1.836
间/对-二甲苯	0.998	0.038	0.821	四氢呋喃	0.995	0.037	1.598
邻-二甲苯	0.997	0.021	0.76	反式丁烯醛	0.998	0.032	2.786
苯乙烯	0.997	0.028	0.68	甲基丙烯酸甲酯	0.996	0.031	0.872
异丙苯	0.997	0.024	0.754	戊醛	0.999	0.069	0.727
正丙基苯	0.997	0.019	0.775	1,4-二氧六环	0.996	0.014	5.852
3-乙基甲苯	0.997	0.033	1.528	4-甲基-2-戊酮	0.993	0.019	0.593
4-乙基甲苯	0.997	0.036	1.312	2-己酮	0.994	0.033	5.976
1,3,5-三甲苯	0.998	0.022	0.68	己醛	0.995	0.015	5.076
2-乙基甲苯	0.997	0.024	0.629	苯甲醛	0.997	0.025	5.48
1,2,4-三甲苯	0.997	0.017	1.967	间甲基苯甲醛	0.995	0.015	6.207
1,2,3-三甲苯	0.998	0.022	0.612	有机硫(1 种)			
1,3-二乙基苯	0.998	0.018	0.654	二硫化碳	0.997	0.059	0.966
1,4-二乙基苯	0.998	0.018	0.583				
萘	0.993	0.02	0.79				

1.4 VOCs 来源解析

正交矩阵因子分解 (positive matrix factorization, PMF) 受体模型运行过程中只需要输入环境数据, 不需要输入源成分谱信息和气象数据, 可通过分析各 VOC 组分的变化规律 (时间变化或空间差异) 识别出主要的 VOCs 排放源及其化学组成特征^[35]. 基本原理为将受体点处 VOCs 浓度观测矩阵分解为源的贡献矩阵和源成分谱特征矩阵, 如式(2)所示^[36].

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

式中, $\mathbf{x}_{ij}$ 表示第 j 个污染物于第 i 个样品中的浓度; $\mathbf{g}_{ik}$ 为第 k 个源在 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; $\mathbf{e}_{ij}$ 为所对应的残差; p 是源的个数.

1.5 EKMA 曲线

基于观测的模型 (observational based model, OBM) 是研究 O_3 - NO_x -VOCs 敏感性常用的方法. OBM 模型不依赖源清单数据, 不受源清单误差的影响, 被广泛应用于京津冀、长三角、珠三角和其他地区^[37~42]. 以 07:00~09:00 时太阳辐射较弱, 光化学反应速率较慢时的大气污染物浓度数据作为 OBM 模型的初始输入, 用实时的气象观测数据进行模型约束, 通过设置系列初始输入的大气污染物浓

度组合, 得出不同初始 VOCs 和 NO_x 浓度下的 O_3 生成最大速率曲线, 即 EKMA 曲线 (empirical kinetics modeling approach, EKMA)^[40]. 将 O_3 生成最大速率等值线转折点连线即为 EKMA 脊线, 位于脊线下方表示 O_3 生成受 NO_x 控制, 削减 NO_x 排放有利于控制 O_3 生成; 位于脊线上方表示 O_3 生成受 VOCs 控制, 削减 VOCs 浓度有利于控制 O_3 生成; 脊线附近表示 O_3 生成受 NO_x 和 VOCs 的共同影响, 需同时削减 VOCs 和 NO_x 才能控制 O_3 ^[41].

2 结果与讨论

2.1 主要污染物浓度特征

观测期间 VOCs、 O_3 、 NO_x 、温度、湿度和风速风向的时间序列如图 2 所示, 浓度均值如表 2 所示. 观测期间 10 月 1 日柳城县 $\rho(\text{O}_{3-8\text{h-Max}})$ 为 $164 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超过环境空气质量标准 (GB 3095-2012)^[32] 中规定的 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 为 O_3 超标天, 10 月 2~6 日期间均观测到明显的 O_3 生成过程, $\rho(\text{O}_{3-8\text{h-Max}})$ 平均值为 $129.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 浓度处于高位且集中. 考虑到 O_3 污染发生的持续性, 将 10 月 1~6 日定义为一个 O_3 污染过程进行研究^[43]. 10 月 8~15 日空气质量为优, $\rho(\text{O}_{3-8\text{h-Max}})$ 平均值为 75.0

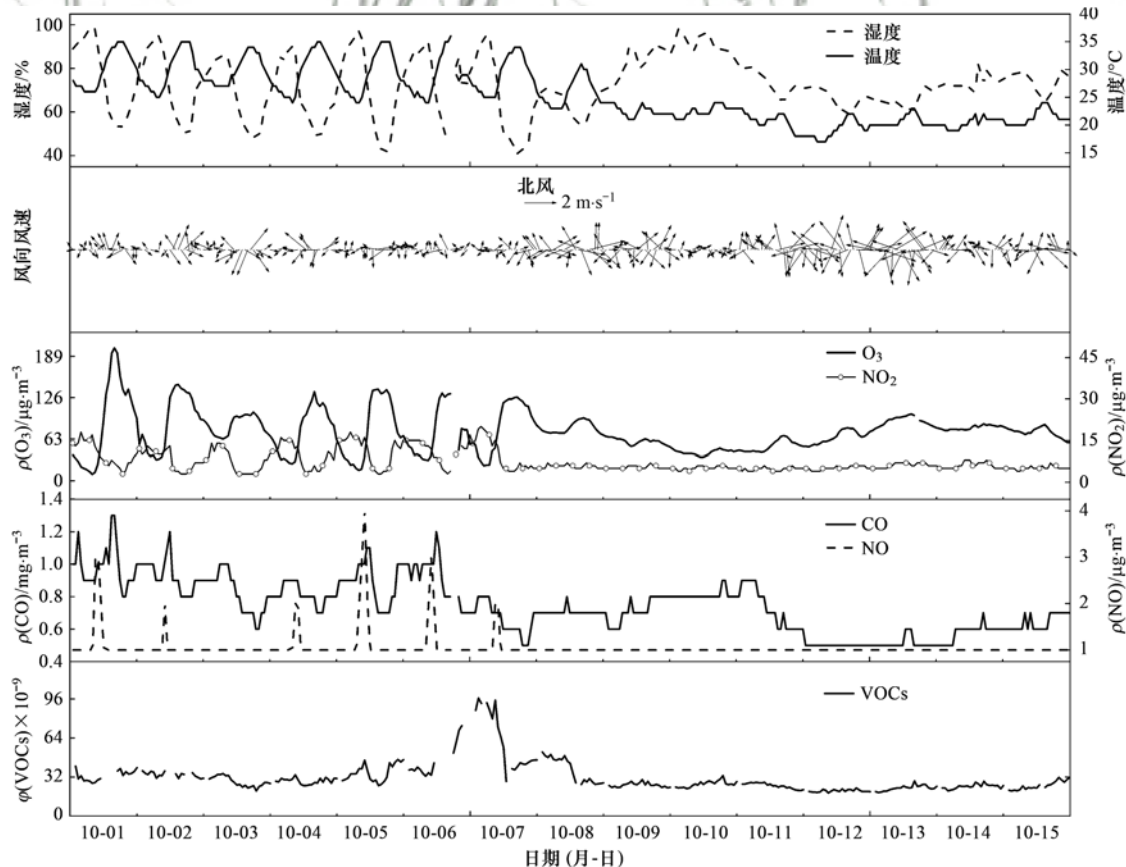


图 2 观测期间气象参数和污染物浓度时间序列

Fig. 2 Time series diagram of meteorological parameters and pollutant concentration during observation period

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 定义为非污染过程. 通过将污染过程与非污染过程对比发现, 污染过程的平均温度为 29.6°C 高于非污染过程的 21.4°C , 平均风速 ($1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 低于非污染过程 ($2.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 湿度 (71.6%) 低于非污染过程的 (74.4%); 高温、静稳和低湿是诱发 O_3 污染的重要气象条件, 成都^[24] 和淄博^[44] 等研究结果均表明污染过程存在气温偏高、风速较低和湿度较低的情况.

表 2 观测期间污染物浓度及气象参数¹⁾
Table 2 Pollutant concentration and meteorological parameters during the observation period

参数	平均值	污染过程	非污染过程
时间	(10月1~15日)	(10月1~6日)	(10月8~15日)
$\rho(\text{O}_{3-8\text{h-Max}})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	99.9	129.2	75.0
$\rho(\text{NO}_x)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	8.80	11.17	6.75
$\rho(\text{CO})/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.74	0.88	0.64
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.7	1.3	2.2
温度/ $^{\circ}\text{C}$	25.0	29.6	21.4
湿度/ $\%$	73.2	71.6	74.4
TVOCs	27.52	32.15	24.21
丙烷	1.69	1.16	2.07
乙烷	1.76	1.00	2.30
正丁烷	0.84	0.70	0.95
异丁烷	0.79	0.81	0.78
总烷烃	6.33	5.13	7.19
乙炔	1.06	0.92	1.17
乙烯	0.88	1.12	0.71
异戊二烯	0.76	1.71	0.09
总烯烃	6.9	3.18	0.97
间/对-二甲苯	0.87	1.57	0.37
甲苯	1.04	2.11	0.27
乙基苯	0.45	0.86	0.16
邻-二甲苯	0.27	0.48	0.12
苯	0.36	0.36	0.36
总芳烃	11.8	5.78	1.42
氯甲烷	0.72	0.62	0.79
二氯甲烷	0.26	0.54	0.58
二氟二氯甲烷	0.32	0.30	0.34
总卤代烃类	2.02	2.01	2.03
乙醛	5.39	5.64	5.21
丙酮	3.19	4.25	2.44
总 OVOCs	12.02	14.17	10.49

1) TVOCs 和 VOCs 物种单位为 $\times 10^{-9}$

观测期间 $\varphi(\text{TVOCs})$ 范围在 ($17.52 \sim 114.09$) $\times 10^{-9}$ 之间, 其中 10 月 6 日 17:00 至 10 月 8 日 12:00, $\varphi(\text{TVOCs})$ 大幅度升高, 主要受局地突发源站房所在的楼顶有刷防水漆溶剂挥发的影响, 后续 VOCs 浓度、活性和来源的分析结果均是剔除了相关数据的结果. 观测期间 $\varphi(\text{TVOCs})$ 平均值为 27.52×10^{-9} , 对 TVOCs 贡献最高的是 OVOCs, 贡献率为 43.70% , 其次是烷烃 (23.00%)、芳香烃 (11.75%) 和卤代烃 (7.35%). 污染过程各污染物均有上升, $\text{O}_{3-8\text{h-Max}}$ 、 NO_x 和 CO 浓度分别高于非污染过程

72.27% 、 65.48% 和 37.50% . 污染过程 $\varphi(\text{TVOCs})$ 为 32.15×10^{-9} , 比非污染过程平均浓度高 32.79% ; 污染过程 $\varphi(\text{烷烃})$ 为 5.13×10^{-9} , 低于非污染过程 (7.19×10^{-9}), 而芳香烃浓度有大幅度上升, 较非污染过程浓度升高了 307.04% , 主要是甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯升高, 此外烯烃也出现了升高, 较非污染过程升高了 227.83% , 其中异戊二烯升幅最大. 综上所述, 污染过程中低活性的烷烃类物质浓度在降低, 而高活性的芳烃类和烯烃类物质浓度显著升高.

2.2 VOCs 活性评估

观测期间柳城县 VOCs 的 OFP 平均值为 $226.02\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, OVOCs 对 OFP 的贡献率最高为 41.96% , 其次是芳香烃和烯烃, 贡献率分别为 32.60% 和 17.92% . 污染过程的 OFP 平均值为 $334.10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 非污染过程为 $148.83\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 污染过程是非污染过程的 2.24 倍. 表 3 为污染过程和非污染过程 OFP 排名前 10 的 VOCs 组分, 两段过程中物种基本一致, 主要为 OVOCs 和芳香烃, 但贡献率大小不尽相同. 其中二甲苯类 (间/对-二甲苯、邻-二甲苯) 和异戊二烯对 OFP 的贡献率在污染过程中相比非污染过程有明显上升, 分别上升了 10.40% 和 14.58% , 甲苯和乙基苯对 OFP 的贡献率也有略微上升, 乙醛和丙醛的 OFP 值大小基本持平. 前 10 物种 OFP 贡献率之和在污染过程中为 83.70% , 在非污染过程则为 76.48% . 因此柳城县优控 VOCs 物种为: 乙醛、间/对二甲苯、异戊二烯、甲苯、邻二甲苯、乙烯、乙基苯、正己醛、丙醛、丙烯和异丙醇. 其中乙醛、丙醛和丙酮等 OVOCs 主要来自生物质燃烧源^[7], 间/对二甲苯、甲苯、邻二甲苯和乙基苯等芳香烃主要来自于溶剂使用源^[13], 异戊二烯主要来自植物排放^[7].

2.3 VOCs 来源解析

溶剂涂料中苯的含量极低, 而新鲜排放的机动车尾气和生物质燃烧等污染源中甲苯和苯的比值 (T/B) 相对固定, 因此可以用 T/B 的值对环境大气 VOCs 进行初步的定性分析^[45, 46]. 环境大气中 T/B 体积比值为 1.67 左右就代表典型的机动车尾气排放特征^[47], 若该比值低于 1.25 则受燃煤或者其它生物质燃烧影响较大^[48], 若高于 2.0 则受有机溶剂挥发或石油化工的排放的影响^[46]. 污染过程 T/B 的平均值为 5.86, 表明污染过程可能受到溶剂使用等富含甲苯的排放源影响. 非污染过程 T/B 的平均值为 0.75, 表明受到燃煤或者生物质燃烧源的影响较大. 基于 PMF 模型对 VOCs 组分进行定量源解析. VOCs 组分选取原则为: ①优先选取浓度信噪比大

于2的物种,保障数据测量的准确性;②优先选取具有源示踪意义的物种;③优先考虑反应活性较低的组分^[36].最终选取34种物种参与解析,经过多次模拟运算获得5个因子,如图3所示.因子1中贡献最大的物种为乙基苯、二甲苯和甲苯等,这些物种常作为油漆中的稀释剂使用^[13],因此被识别为溶剂使用源;因子2主要组分为氯甲烷、乙烷和乙炔,对氯甲烷解析度最高,氯甲烷为生物质燃烧的示踪物,乙烷和乙炔这些组分也与生物质燃烧相关^[8],因此识别为生物质燃烧源.结合西向工业园区企业使用的大部分为生物质锅炉,其中一个生物质发电厂生物质燃料年使用量约为16万t,因此生物质燃

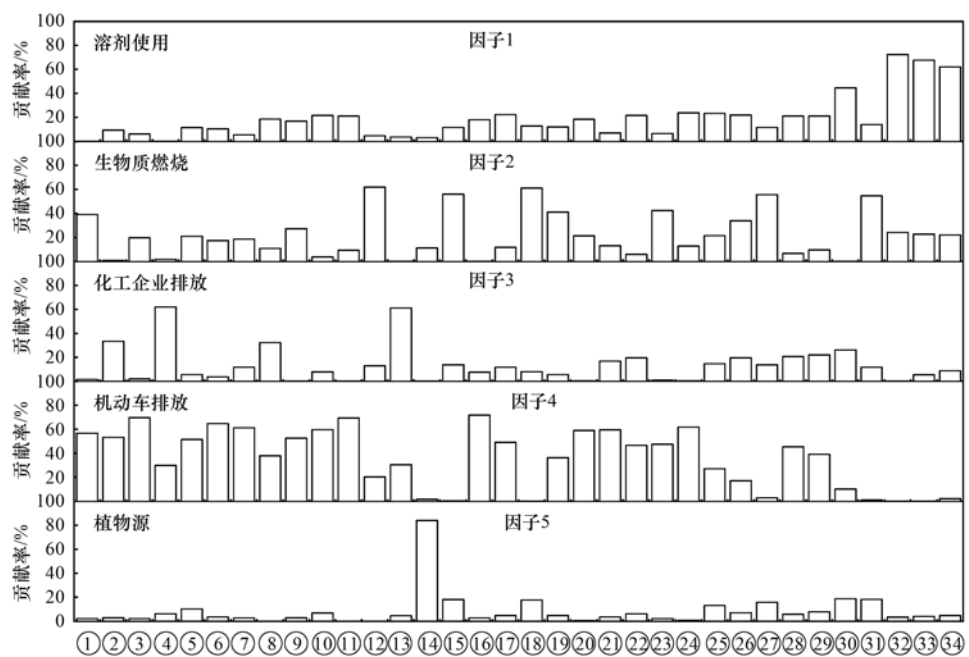
烧源主要指生物质锅炉燃烧排放.因子3中主要组分为丙烯、1,3-丁二烯和苯等,这些组分与化工企业排放相关^[25],被识别为化工企业源;因子4中主要组分为甲基叔丁基醚、异戊烷、乙烷、丙烷和乙炔等,其中甲基叔丁基醚常作为汽油的添加剂,是汽油挥发的示踪物^[24],异戊烷是汽油重要成分^[8],是机动车源和汽油挥发的特征物种,乙烷、丙烷和乙炔为机动车尾气中的特征物种^[49],因此被识别为机动车排放源.因子5中贡献最大的为异戊二烯,一般为植物源的示踪物^[13],被识别为植物源.

图4为观测期间各类源对VOCs浓度贡献率及

表3 污染过程和非污染过程 OFP 排名前10 的 VOCs 组分

Table 3 Top ten species of OFP on polluted and non-polluted days

序号	VOCs 组分	污染过程		VOCs 组分	非污染过程	
		OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献率/%		OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献率/%
1	乙醛	72.40	21.67	乙醛	66.91	44.96
2	间/对-二甲苯	57.89	17.33	间/对-二甲苯	13.52	9.08
3	异戊二烯	55.01	16.47	乙烯	7.97	5.35
4	甲苯	34.70	10.39	邻二甲苯	4.50	3.02
5	邻二甲苯	17.27	5.17	甲苯	4.40	2.96
6	乙烯	12.65	3.79	正己醛	4.23	2.84
7	乙基苯	12.31	3.68	丙醛	4.21	2.83
8	正己醛	7.57	2.27	正丁烷	2.81	1.89
9	丙醛	5.67	1.70	异戊二烯	2.80	1.88
10	丙烯	4.17	1.25	异丙醇	2.48	1.67
	合计	279.64	83.70	合计	113.83	76.48



①乙烷, ②乙烯, ③丙烷, ④丙烯, ⑤异丁烷, ⑥正丁烷, ⑦乙炔, ⑧1-丁烯, ⑨环戊烷, ⑩异戊烷, ⑪正戊烷, ⑫氯甲烷, ⑬1,3-丁二烯, ⑭异戊二烯, ⑮丙酮, ⑯2-甲基戊烷, ⑰甲基叔丁基醚, ⑱正己烷, ⑲丁醛, ⑳三氯甲烷, ㉑苯, ㉒2,2,4-三甲基戊烷, ㉓1,2-二氯乙烷, ㉔庚烷, ㉕1,2-二氯丙烷, ㉖甲基丙烯酸甲酯, ㉗戊醛, ㉘2-甲基庚烷, ㉙3-甲基庚烷, ㉚甲苯, ㉛正己醛, ㉜乙基苯, ㉝间/对-二甲苯, ㉞邻-二甲苯

图3 本研究 PMF 解析出的各类源 VOCs 化学组成特征

Fig. 3 VOCs profiles of the resolved factors from PMF in this study

对 OFP 的贡献率. 机动车排放对 VOCs 浓度的贡献率最高, 为 32.44%, 其次是生物质燃烧源 (29.31%) 和溶剂使用源 (16.43%), 植物源和化工企业源的贡献率较低, 分别是 11.34% 和 10.49%.

对 OFP 贡献率最大的源为溶剂使用源 (贡献率 34.98%), 其次为植物源 (贡献率 21.56%) 和生物质燃烧源 (贡献率 18.27%), 而浓度贡献最大的机动车排放源对 OFP 的贡献不显著.

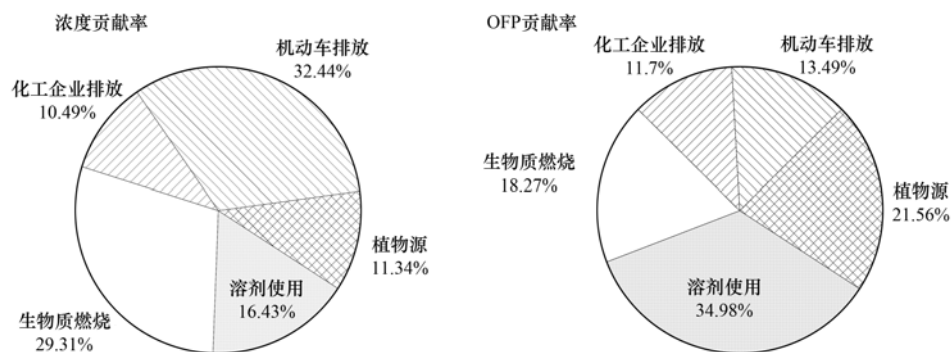


图4 各类源对 VOCs 浓度贡献率及对 OFP 的贡献率

Fig. 4 Contribution of each source to VOCs and OFP

图5为污染过程和非污染过程中各类源对 VOCs 的贡献率. 污染过程中溶剂使用对 VOCs 的贡献最高, 为 32.94%, 其次是植物源 (30.32%) 和化工企业 (24.95%); 而非污染过程中生物质燃烧对 VOCs 的贡献率最高, 达 38.88%, 其次是机动车排放源 (38.50%) 和化工企业 (16.47%). 溶剂使用源和植物源在污染过程中贡献率分别增加了 28.58% 和 28.53%; 与 T/B 的值分析结果较为一致. 在成都研究表明溶剂源污染日较非污染日上升 15% 左

右^[24], 在廊坊观测到溶剂使用及挥发源和植物源污染日较非污染日升高了 13.1% 和 1.2%^[13], 说明该现象的普遍性, 这与污染过程温度较高、光照较强, 导致植物排放增加、溶剂挥发性更强有关. 观测点南向为大量植被, 天然源在污染过程的贡献更加突出. 同时结合优先控制物种来源分析和 VOCs 来源解析的结果, 柳城县应重点控制的人为源 VOCs 为生物质燃烧源和溶剂使用源, 在污染时段重点关注溶剂使用源.

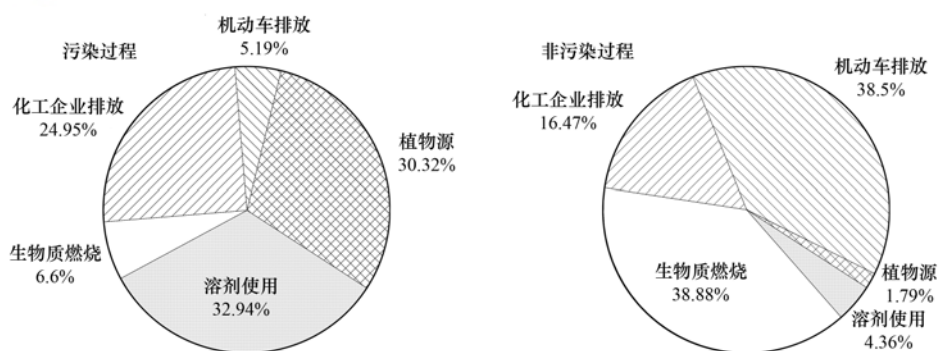


图5 污染过程和非污染过程各排放源对 VOCs 的贡献率

Fig. 5 Percentages of each source on polluted and non-polluted days

2.4 EKMA 曲线分析

基于实测的 VOCs、NO_x、CO、O₃ 数据和气象参数数据, 利用 OBM 模型绘制 EKMA 曲线 (如图 6). 观测期间每日模拟结果显示: 观测期间, NO_x 和 VOCs 平均浓度对应的数据点整体均位于脊线附近, 表明柳城县整体处于 VOCs 和 NO_x 的协同控制区. 同时也发现 10 月 7 日数据点位于脊线下方, 处于 NO_x 控制区, 由于 VOCs 受局地源的影响浓度大

幅度升高, 导致 O₃ 生成敏感性改变, 由协同控制区转变为 NO_x 控制区. 柳城县的经济社会发展水平与我国大城市郊区水平相当, 这与我国多数城市地区属于 VOCs 控制区, 郊区和乡村地区则以 NO_x 控制区和协同控制区为主的研究结果一致^[41,50,51]. 结果显示柳城县削减 VOCs 和 NO_x 均能使 O₃ 浓度下降. 同时后期需要持续关注 O₃ 生成机制随着人为源 VOCs 与 NO_x 减排而发生的变化, 以及时调整 O₃ 防

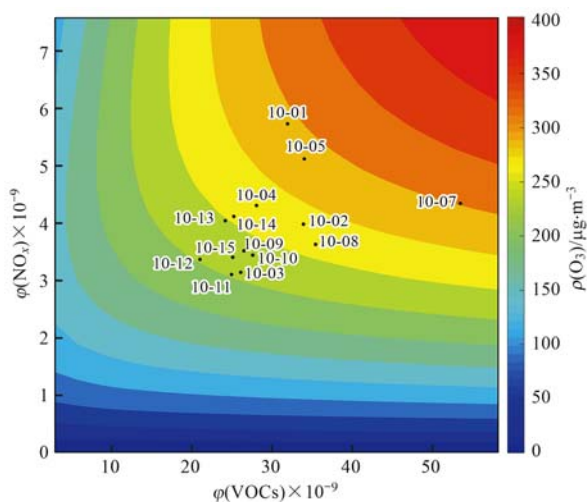


图6 柳城县观测期间 EKMA 曲线

Fig. 6 EKMA curve during observation in Liucheng county

控策略.

3 结论

(1)柳城县 2021 年 10 月 1~15 日 $\varphi(\text{TVOCs})$ 为 27.52×10^{-9} , 其中 OVOCs 对 VOCs 贡献率最高为 43.70%, 其次是烷烃 23.00%、芳香烃 11.75% 和卤代烃 7.35%; 污染过程 (10 月 1~6 日) $\varphi(\text{TVOCs})$ 为 32.15×10^{-9} , 比非污染过程 (10 月 8~15 日) 高 32.79%; 其中污染过程芳香烃类和烯烃类浓度大幅上升, 较非污染过程浓度分别升高了 307.04% 和 227.83%, 而烷烃类物质浓度略有下降.

(2)观测期间 OVOCs 对 OFP 的贡献率最高为 41.96%, 其次是芳香烃和烯烃, 贡献率分别为 32.60% 和 17.92%. 污染过程和非污染过程对 OFP 贡献前 10 物种基本一致, 总贡献率分别为 83.70% 和 76.48%, 因此柳城县优控物种为: 乙醛、间/对-二甲苯、异戊二烯、甲苯、邻-二甲苯、乙烯、乙基苯、正己醛、丙醛、丙烯和异丙醇等. 污染过程总 OFP 是非污染过程的 2.24 倍, 其中二甲苯类和异戊二烯类对 OFP 贡献率分别上升了 10.40% 和 14.58%, 应重点关注.

(3)观测期间 VOCs 主要来自机动车排放 (32.44%)、生物质燃烧源 (29.31%)、溶剂使用源 (16.43%)、植物源 (11.34%) 和化工企业排放 (10.49%). 污染过程主要受溶剂使用源和植物源的影响, 非污染过程主要受生物质燃烧源和机动车排放源的影响, 其中溶剂使用源和植物源在污染过程贡献比例分别增加 28.58% 和 28.53%. 同时结合优先控制物种来源分析和 VOCs 来源解析的结果, 柳城县应重点控制的人为源 VOCs 为生物质燃烧源和溶剂使用源, 在污染时段重点关注溶剂使用源.

(4)通过绘制 EKMA 曲线结果显示, 柳城县处于 VOCs 和 NO_x 的协同控制区, 因此应以 VOCs 和 NO_x 协同减排为重点.

参考文献:

- [1] US EPA. Health risk and exposure assessment for ozone (Final Report) [EB/OL]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100KBUF.PDF?Dockey=P100KBUF.PDF>, 2022-01-01.
- [2] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, *et al.* Ground-level O_3 pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **199**: 42-48.
- [3] Feng Z Z, Kobayashi K, Li P, *et al.* Impacts of current ozone pollution on wheat yield in China as estimated with observed ozone, meteorology and day of flowering [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **217**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116945.
- [4] Worden H M, Bowman K W, Worden J R, *et al.* Satellite measurements of the clear-sky greenhouse effect from tropospheric ozone [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(5): 305-308.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/>, 2022-01-01.
- [6] 莫招育, 陈蓓, 廖国莲. 广西大气污染成因分析及监测预报研究 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2021.
- [7] 苏榕, 陆克定, 余家燕, 等. 基于观测模型的重庆大气臭氧污染成因与来源解析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, **48**(1): 102-112.
- [8] Su R, Lu K D, Yu J Y, *et al.* Exploration of the formation mechanism and source attribution of ambient ozone in Chongqing with an observation-based model [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(1): 23-32.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [9] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] Edwards P M, Brown S S, Roberts J M, *et al.* High winter ozone pollution from carbonyl photolysis in an oil and gas basin [J]. *Nature*, 2014, **514**(7522): 351-354.
- [11] 孙杰, 王跃思, 吴方堃, 等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [11] Sun J, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Concentration and change of VOCs in summer and autumn in Tangshan [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [12] 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.
- [12] 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.
- [13] 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 等. 廊坊开发区 8~9 月 O_3 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4632-4640.
- [13] Zhang J Q, Wang H L, Fang X Y, *et al.* Characteristics and source of VOCs during O_3 pollution between August to September, Langfang development zones [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4632-4640.
- [14] 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.
- [15] 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 等. 广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4305-4315.
- Pei C L, Xie Y T, Chen X, *et al.* Analysis of a typical ozone pollution process in Guangzhou in winter [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4305-4315.
- [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] 冯凝, 唐梦雪, 李孟林, 等. 深圳市城区 VOCs 对 PM_{2.5} 和 O₃ 耦合生成影响研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 11-17.
- Feng N, Tang M X, Li M L, *et al.* Research on the influence of VOCs on the coupling generation of PM_{2.5} and O₃ in Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(1): 11-17.
- [18] 邓思欣, 刘永林, 司徒淑婷, 等. 珠三角产业重镇大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 2993-3003.
- Deng S X, Liu Y L, Situ S P, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in an industrial town of Pearl River Delta[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 2993-3003.
- [19] 江明, 袁鸾, 温丽容, 等. 春节与疫情管控期间珠三角 VOCs 的组成和来源变化[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1747-1755.
- Jiang M, Yuan L, Wen L R, *et al.* Variety of the composition and sources of VOCs during the spring festival and epidemic prevention in the Pearl River Delta[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1747-1755.
- [20] 王倩. 2019 年 5 月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2555-2564.
- Wang Q. Chemical characteristics and sources of volatile organic compounds in Shanghai during an ozone and particulate pollution episode in May 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2555-2564.
- [21] 严茹莎, 王红丽, 黄成, 等. 上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3577-3584.
- Yan R S, Wang H L, Huang C, *et al.* Characteristics and control strategies on summertime peak ozone concentration in Shanghai[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3577-3584.
- [22] 胡崑, 王鸣, 郑军, 等. 基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响: 以南京市江北工业区为例[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 493-501.
- Hu K, Wang M, Zheng J, *et al.* Quantification of the influence of industrial emissions on volatile organic compounds (VOCs) using PMF model: a case study of Jiangbei industrial zone in Nanjing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 493-501.
- [23] 王红丽, 高雅琴, 景盛翔, 等. 基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1298-1305.
- Wang H L, Gao Y Q, Jing S A, *et al.* Characterization of volatile organic compounds (VOCs) using mobile monitoring around the industrial parks in the Yangtze River delta region of China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1298-1305.
- [24] 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 等. 2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5736-5746.
- Qian J, Xu C X, Chen J H, *et al.* Chemical characteristics and contaminant sensitivity during the typical ozone pollution processes of Chengdu in 2020 [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5736-5746.
- [25] 周子航, 邓也, 周小玲, 等. 成都市工业挥发性有机物排放成分谱[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- Zhou Z H, Deng Y, Zhou X L, *et al.* Source profiles of industrial emission-based VOCs in Chengdu [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- [26] 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 等. 四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1296-1306.
- Qian J, Han L, Chen J H, *et al.* Emission characteristics and inventory of volatile organic compounds from cooking in Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1296-1306.
- [27] 李陵, 李振亮, 张丹, 等. 重庆市主城区 O₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3595-3603.
- Li L, Li Z L, Zhang D, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs during ozone pollution period in the main urban area of Chongqing [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3595-3603.
- [28] 解淑艳, 霍晓芹, 曾凡刚, 等. 2015-2019 年汾渭平原臭氧污染状况分析[J]. 中国环境监测, 2021, **37**(1): 49-57.
- Xie S Y, Huo X Q, Zeng F G, *et al.* Analysis of ozone pollution in Fenwei Plain from 2015 to 2019 [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, **37**(1): 49-57.
- [29] 关茜妍, 陆克定, 张宁宁, 等. 西安市大气臭氧污染光学化学特征与敏感性分析[J]. 科学通报, 2021, **66**(35): 4561-4573.
- Guan Q Y, Lu K D, Zhang N N, *et al.* Analysis of the photochemical characteristics and sensitivity of ozone pollution in Xi'an [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, **66**(35): 4561-4573.
- [30] 刘慧琳, 陈志明, 莫招育, 等. 广西工业源大气污染物排放清单及空间分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 229-242.
- Liu H L, Chen Z M, Mo Z Y, *et al.* Emission inventory of atmospheric pollutants from industrial sources and its spatial characteristics in Guangxi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 229-242.
- [31] 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.
- [32] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [33] HJ 654-2013, 环境空气气态污染物(SO₂、NO₂、O₃、CO)连续自动监测系统技术要求及检测方法[S].
- [34] Carter W P L. VOC reactivity scales (SAPRC-07) (May 11, 2011 for most compounds) [EB/OL]. <https://intra.engr.ucr.edu/~carter/SAPRC/>, 2022-02-08.
- [35] 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.
- [36] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R].

- Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2014.
- [37] Zhang Y H, Su H, Zhong L J, *et al.* Regional ozone pollution and observation-based approach for analyzing ozone-precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6203-6218.
- [38] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
- Wang H L. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
- [39] Yu D, Tan Z F, Lu K D, *et al.* An explicit study of local ozone budget and NO_x-VOCs sensitivity in Shenzhen China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117304.
- [40] Yu S J, Su F C, Yin S S, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds, source apportionment, and the ozone-NO_x-VOC sensitivities in a heavily polluted megacity of central China: effect of sporting events and emission reductions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(9): 15239-15257.
- [41] 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.
- [42] 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 等. 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 696-706.
- Yang X, An X Y, Liu Y Q, *et al.* Pollution characteristic and control factor analysis of atmospheric ozone during summer typical periods in Linyi, Shandong[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 696-706.
- [43] 符传博, 陈红, 丹利, 等. 2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5000-5008.
- Fu C B, Chen H, Dan L, *et al.* Characteristics and potential sources of four ozone pollution processes in Hainan province in autumn of 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5000-5008.
- [44] 王帅, 王秀艳, 杨文, 等. 淄博市城区臭氧超标期间的 VOCs 污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- Wang S, Wang X Y, Yang W, *et al.* Characteristics and source analysis of VOCs pollution during the period of ozone exceeding the standard in Zibo city[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- [45] 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.
- [46] 王鸣, 陈文泰, 陆思华, 等. 我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4393-4399.
- Wang M, Chen W T, Lu S H, *et al.* Ratios of volatile organic compounds in ambient air of various cities of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4393-4399.
- [47] Zhang Q J, Wu L, Fang X Z, *et al.* Emission factors of volatile organic compounds (VOCs) based on the detailed vehicle classification in a tunnel study [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 878-886.
- [48] Zhang Z, Zhang Y L, Wang X M, *et al.* Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China's developed coastal regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(11): 6669-6687.
- [49] Sha Q E, Zhu M N, Huang H W, *et al.* A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148348.
- [50] 陆克定, 张远航, 苏杭, 等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. *中国科学: 化学*, 2010, **40**(4): 407-420.
- Lu K D, Zhang Y H, Su H, *et al.* Regional ozone pollution and key controlling factors of photochemical ozone production in Pearl River Delta during summer time[J]. *Science China Chemistry*, 2010, **53**(3): 651-663.
- [51] Liu X F, Guo H, Zeng L W, *et al.* Photochemical ozone pollution in five Chinese megacities in summer 2018[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149603.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)