

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分	闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启 (5215)
2015~2018年我国PM _{2.5} 健康损害价值的动态评估	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (5225)
2011~2017年中国PM _{2.5} 多尺度时空分异特征分析	杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮 (5236)
关中地区PM _{2.5} 时空演化及人口暴露风险	黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨 (5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源	贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉 (5256)
西北工业城市冬季PM _{2.5} 污染特征及理化性质	杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽 (5267)
基于PMF模型的PM _{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析	邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏 (5276)
重庆主城区降尘中重金属污染特征及评价	张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达 (5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析	孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴 (5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽 (5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏 (5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析	王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷 (5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析	吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕 (5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单	梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国 (5345)
我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险	毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民 (5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征	黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏 (5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析	卓海华, 姜保峰, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静 (5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征	钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠 (5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价	张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮 (5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征	崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌 (5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析	江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀 (5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子	赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发 (5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险	王世亮, 曹雪稚 (5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析	吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建 (5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价	叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕 (5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素	孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生 (5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性	申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升 (5470)
生物炭粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响	王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠 (5480)
Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制	尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭 (5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试	廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳 (5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响	高京, 张少华, 王锐, 金鹏康 (5518)
限NH ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征	宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性	闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能	毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖 (5544)
中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析	赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫 (5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术	窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明 (5562)
晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明 (5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价	叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章 (5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果	王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊 (5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能	赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩 (5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解	杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性	韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍 (5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征	贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏 (5628)
生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响	崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰 (5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响	侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余嫻, 杨林章 (5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析	夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ O排放的影响	许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪 (5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录	(5677)
《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)	

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析

徐晨曦, 陈军辉*, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏

(四川省生态环境科学研究院, 成都 610000)

摘要: 2019年6~9月在成都市区对挥发性有机物(VOCs)进行在线观测,研究夏季VOCs浓度水平、变化特征、臭氧生成贡献(OFP)及来源贡献。结果表明,成都市区夏季TVOCs(总挥发性有机物)平均质量浓度为 $112.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,烷烃(29.51%)和卤代烃(23.23%)为主要组分;VOCs日变化峰值主要出现在上午10:00~11:00,受城市机动车、油气挥发和工业排放影响;夏季VOCs的OFP贡献中芳香烃贡献率(42.7%)最高,其次为烯烃(27.4%),关键活性物种为间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、邻-二甲苯、异戊烷、环戊烷和丙烯醛等;使用PMF受体模型进行来源解析表明,移动源为成都市区夏季VOCs的主要贡献源,贡献率为34%,其次为工业源(17%)和油气挥发(14%),溶剂使用源和天然源分别贡献11%和13%。因此,机动车和工业排放为成都市区VOCs的重点控制源,同时溶剂使用及油气挥发等污染源的管控也不可忽视。

关键词: 成都市; 夏季; 挥发性有机物(VOCs); 浓度特征; 臭氧生成潜势(OFP); PMF受体模型

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5316-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006040

Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu

XU Chen-xi, CHEN Jun-hui*, JIANG Tao, HAN Li, WANG Bo, LI Ying-jie, WANG Cheng-hui, LIU Zheng, QIAN Jun

(Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610000, China)

Abstract: In the research, volatile organic compounds (VOCs) were observed online in urban areas of Chengdu to study VOC concentration level, change characteristics, ozone generation contribution (OFP), and source contribution from June to September 2019. The results showed that the average concentration of TVOCs (total volatile organic compounds) was $112.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with alkanes (29.51%) and halogenated hydrocarbons (23.23%) forming the main components. The diurnal peak in VOCs mainly occurred from 10:00 am to 11:00 am, which is affected by urban motor vehicles, oil or gas volatilization, and industrial emissions. For OFP contribution of VOCs in summer, the contribution rate of aromatic hydrocarbons (42.7%) was the highest, followed by alkenes (27.4%). The key active species were *m/p*-xylene, ethylene, propylene, *o*-xylene, isopentane, cyclopentane, and acrolein. According to the source analysis by the PMF model, mobile sources are the main contributors of VOCs in summer in Chengdu, contributing 34% to TVOCs, followed by industrial sources (17%), volatile oil and gas (14%), and solvent use and natural sources contributing 11% and 13%. Therefore, motor vehicle and industrial emissions are the key control sources of VOCs in Chengdu, although control of pollution sources such as solvent use and oil or gas volatilization cannot be ignored.

Key words: Chengdu; summer; volatile organic compounds (VOCs); concentration characteristics; ozone formation potential(OFP); PMF receptor model

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)主要是指常温常压条件下,饱和蒸气压大于133.32 Pa,沸点在50~250℃的有机化合物,或常温常压条件下以蒸气形式存在于空气中的有机物,主要包括碳氢化合物、芳香烃化合物、含氧化合物(酚类、醛类和酮类等)、卤代烃化合物等^[1,2]。VOCs作为光化学反应中的重要污染物,可与氮氧化物发生光化学反应,同时也可与·OH发生反应,对生成臭氧和二次有机气溶胶至关重要,直接影响环境空气质量^[3]。同时,多种VOCs物种被美国环保署认定为毒性污染物,对人体具有致癌作用,影响人类身体健康^[4]。而VOCs的来源较为广泛,有自然源和人为源等多方面,其中自然源排放主要来自于植被挥发释放,人为源排放主要来自于机动车尾气、工业生产、生活溶剂、燃料燃烧以及油品挥发等^[5]。针对城

市而言,人为源VOCs排放贡献远大于自然源排放^[6]。由于VOCs来源广泛,成分复杂,使得管理部门对其管控具有一定难度,近年来,国家不断加强VOCs污染防治工作力度,2017年《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》出台,提出强化重点地区、重点行业及重点污染源VOCs减排工作,污染防治管控手段应具有科学性、针对性和有效性,全面遏制臭氧上升的势头,促进空气质量改善^[7]。

目前,国内已开展了大量VOCs相关研究,基于观测开展的VOCs研究主要包括污染特征分析,来

收稿日期: 2020-06-04; 修订日期: 2020-06-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0214001, 2018YFC0214006)

作者简介: 徐晨曦(1990~),女,硕士,工程师,主要研究方向为大气挥发性有机物污染防治, E-mail: 172626527@qq.com

* 通信作者, E-mail: 9503062@qq.com

源解析以及对环境造成的影响分析等几方面^[8]。温彦平等^[9]利用 VOCs 在线监测系统对太原市环境空气中 55 种 VOCs 进行监测,其中烷烃和芳香烃为主要组分,分别占 48.26% 和 38.63%;张立慧^[10]等利用 Airmo VOC(GC-86)对北京市春季 VOCs 质量浓度进行监测发现 TVOCs(总挥发性有机物)为 $34.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中烷烃和芳香烃分别占 57.13% 和 22.18%,夜间 TVOCs 质量浓度高于白天,峰值出现在 05:00、11:00 和 23:00,最低值出现在 18:00。目前基于观测数据的 VOCs 来源解析,主要包括化学质量平衡法(CMB)、正交矩阵因子法(PMF)及主成分分析法(PCA)^[11,12]。赵秋月等^[13]基于 PMF 模型分析南通市夏季 7 月 VOCs 主要贡献源为工业排放与溶剂使用(40%)和机动车尾气(34%);刘丹等^[14]采用 PMF 模型分析北京冬季雾-霾频发期间 VOCs 主要来源于机动车排放和溶剂/涂料使用;Cai 等^[15]分析上海徐家汇地区 VOCs 主要来源于工业溶剂和机动车排放;国外学者 Morino 等^[16]和 Xie 等^[17]针对日本和美国城区 VOCs 进行来源解析发现,城市大气 VOCs 主要来源于天然气/液化石油气挥发及燃料燃烧挥发。

成都市作为四川省重要经济、工业发展中心,近年来机动车保有量不断增加,随着社会经济不断发展,成都市臭氧污染问题不断凸显,2019 年成都市臭氧 8 h 90 百分位年均浓度 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较 2018 年上升了 4.6%,臭氧超标天数达 36 d,其中轻度污染 28 d,中度污染 8 d。但成都市关于夏季 VOCs 相关研究较少,因此,本研究在成都市区开展夏季 VOCs 在线观测,分析夏季 VOCs 浓度水平、组分特征和来源贡献情况,评估各 VOCs 物种对 O_3 的生成影响,以期成都市政府制定夏季 VOCs 及臭氧污染防控措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 观测地点与观测时间

本研究的观测地点位于成都市武侯区人民南路四川省生态环境科学研究院大气复合污染超级监测站(104.07°E , 30.63°N),观测点距离地面高度约 35 m,位于南一环内侧,周边有居民区、医院、商场和餐饮等生活配套,且毗邻交通主干道,其居民人口及交通流量较大,属于成熟的居民、商业和交通混合区,周围无明显大气污染源,观测数据基本代表了成都市区的大气污染状况。

1.2 仪器设备

环境空气中的 VOCs 组分观测采用 TH-300B 大气挥发性有机物监测系统(武汉天虹),属于在线气相

色谱-质谱/氢火焰离子化检测器法(GC-MS/FID),分析物种为 PAMS 和 TO15,合计 97 种物质,其中烷烃 27 种,烯烃 15 种,炔烃(乙炔)1 种,卤代烃 30 种,芳香烃 13 种,含氧化合物 10 种,其他(二硫化碳)1 种。该系统联用超低温在线预浓缩仪和 GC-MS/FID 检测仪,样品通过采样系统采集后,进入浓缩系统,在毛细管捕集柱中被冷冻捕集,进行快速加热解吸,然后进入分析系统,经色谱柱分离后由检测器分析,其中低沸点($\text{C}_2 \sim \text{C}_5$) VOCs 物种由氢火焰检测器(FID)分析,高沸点($\text{C}_5 \sim \text{C}_{12}$) VOCs 物种由质谱检测器(MS)分析。设备整点时刻自动采集样品,00:00 进标准气体进行校核,采样时间为 10 min,数据时间分辨率为 60 min,每天共采集 23 个样品数据。观测站点同时使用 EC9800 气态污染物连续自动监测系统(Ecotech 公司)实时监测 NO_2 、 NO 、 O_3 和 CO 浓度。

1.3 质量保证与质量控制

为确保在线 VOCs 监测系统数据的准确性和有效性,使用美国林德(Linde)的标准气体(PAMS、TO15)和含有 4 种化合物(溴氯甲烷、1,4-二氟苯、氘代氯苯和 1-溴-4-氟苯)的内标气体进行校准,FID 检测器的定量分析采用外标法,MS 定量分析采用内标法,每次校准设置 5 个质量浓度梯度;同时参考国标 HJ 1010-2018^[18]质控要求,选取目标化合物的标准曲线相关系数在 0.98 以上的物质;每日 00:00 进标准气体进行单点校准,目标物浓度与标准浓度相对标准偏差(RSD)应小于 15%,否则查找原因重新绘制标准曲线;每个样品数据内标保留时间与最近绘制标准曲线中内标保留时间偏差不超过 20 s,定量离子峰面积变化在 60%~140%之间。为消除潮湿空气对样品分析的影响,维护人员定期更换 CO_2 去除管、空气发生器使用的硅胶、分子筛和活性炭等。EC9800 气态污染物连续自动监测系统每天采用自动零点校正仪进行校准。

1.4 臭氧生产潜势(OFP)的计算方法

不同 VOCs 物种其大气反应活性有所差异,导致不同 VOCs 对臭氧生成影响不同,常采用 MIR(最大增量反应活性)来计算 VOCs 的 OFP 值,以衡量 VOCs 生成臭氧的能力^[19]。OFP 计算公式如下:

$$\text{OFP}_i = \rho(\text{VOC}_i) \times \text{MIR}_i$$

式中, OFP_i 为 VOCs 中 i 物种的 OFP 值, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\rho(\text{VOC}_i)$ 为 VOCs 中 i 物种的质量浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; MIR_i 为 VOCs 中 i 物种的 MIR 值,见文献[20]。

2 结果与讨论

2.1 成都市区夏季 VOCs 浓度组成特征

成都市区夏季(6~8月)VOCs 物种浓度均值如

表 1 所示. TVOCs 质量浓度为 $112.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、含氧化合物、卤代烃和其他(二硫化碳)分别为 33.24、6.43、2.87、15.96、25.13、26.17 和 $2.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占 TVOCs 质量浓度的 29.51%、5.71%、2.55%、14.16%、22.30%、23.23% 和 2.54%. 烷烃中质量浓度较大的物种为乙烷、丙烷、2,3-二甲基丁烷、正丁烷、异丁烷和异戊烷等, $\text{C}_2 \sim \text{C}_5$ 的烷烃主要来源于机动车和汽油蒸发^[21]; 烯烃中质量浓度较大的物种为乙烯和丙烯, 主要来源于燃烧源及石油化工等排放; 芳香烃中质量浓度较高的物种为间/对-二甲苯、甲苯、苯、邻-二甲苯和乙苯等, 主要来源于机动车和溶剂使用排放, 其中甲苯/苯(T/B)比值为 2.79(>2), 说明监测站点的苯和甲苯受溶剂使用和机动车共同影响^[22]; 含氧化合物质量浓度较高的物种主要为丙酮和乙酸乙酯, 由于站点周边餐馆较多, 丙酮和乙酸乙酯可能一部分来源于餐饮排放, 一部分来源于溶剂使用和二次生成; 卤代烃中质量浓度较高的物种为二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷, 主要来源于工业排放, 二氯甲烷主要来源于医药工厂排放. 2019 年 6~8 月 TVOCs、烷烃、烯烃、卤代烃、芳香烃和含氧化合物质量浓度均呈现逐月递增趋势, 说明温度对 VOCs 浓度的影响较为明显.

质量浓度排名前十的 VOCs 物种如图 1 所示, 分别为丙酮、二氯甲烷、间/对-二甲苯、乙酸乙酯、丙烷、乙烷、2,3-二甲基丁烷、异戊烷、正丁烷和 1,2-二氯乙烷, 合计占 TVOCs 质量浓度的 55.40%. 其中丙酮和乙酸乙酯为餐饮、溶剂使用和二次生成的特征物种, 二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷为工业排放特征物种, 间/对-二甲苯为溶剂使用和机动车示踪物种, 乙烷和丙烷为机动车尾气和燃烧源示踪物种, 2,3-二甲基丁烷、异戊烷和正丁烷为机动车尾气和汽油挥发示踪物种^[23]. 说明监测站点周围受机动车、溶剂使用、餐饮和工业等排放影响.

本研究测得的成都市区 2019 年夏季 VOCs 质量浓度与国内其他城市夏季 VOCs 研究对比如表 2 所示. 成都市 TVOCs 质量浓度接近于南京的浓度水平, 高于其他城市 TVOCs 质量浓度, 其中一部分原因是由于监测物种数量上存在一定差异. 成都市烷烃质量浓度($33.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)与厦门、天津和台中较为接近, 低于太原、南京和阳泉; 烯烃质量浓度($6.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)低于太原、南京、佛山; 芳香烃质量浓度($15.96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)与阳泉和天津较为接近, 低于表 2 中其他地区; 炔烃质量浓度($2.87 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)与太原、天津和台中较为接近, 低于南京和阳泉.

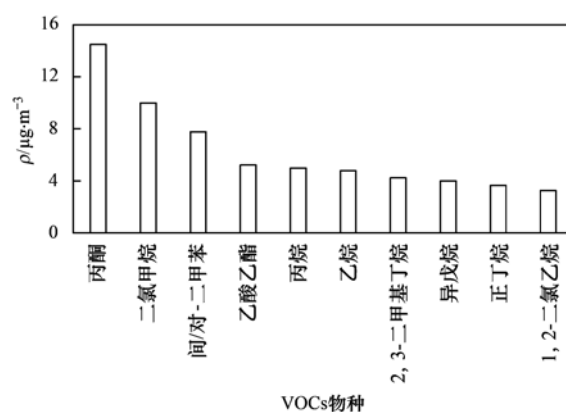


图 1 成都市区夏季质量浓度排名前十 VOCs 物种

Fig. 1 Concentration of top ten VOCs species in summer in Chengdu

2.2 成都市区夏季 VOCs 日变化特征

根据环境空气中污染物日变化特征, 可初步探讨污染物来源情况. 成都市区夏季 VOCs、 NO_x 和 O_3 质量浓度日变化趋势如图 2 所示. 其中, TVOCs 质量浓度在 10:00~11:00 出现一个明显峰值, 峰值浓度为 $135.22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 烷烃、炔烃和芳香烃日变化趋势与 TVOCs 较为类似, 含氧化合物和卤代烃也在此时刻出现明显峰值, 该时段正丁烷、异丁烷、异戊烷、甲苯、丙酮和二氯甲烷质量浓度均出现峰值, 这可能与城市机动车、油气挥发和工业排放有关. 随着气温升高, 光照强度增强, VOCs 与空气中 NO_x 发生光化学反应, 生成 O_3 , 19:00 TVOCs 质量浓度降到最低值, $89.82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 19:00 后 TVOCs 质量浓度持续升高, 在 23:00 再次出现峰值, 峰值浓度 $107.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该峰值可能是由于夜间光化学反应减弱, 边界层降低不利于污染物扩散, 以及夜间机动车排放等原因导致.

O_3 日变化呈典型的单峰型, 最大值出现在 16:00 ($134.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 由于中午至下午时段光照增强, 温度持续上升, VOCs 与 NO_x 光化学反应增强, VOCs 与 NO_x 浓度下降, 而 O_3 浓度上升. 随后 VOCs 与 NO_x 均随着城市晚高峰和夜间边界层降低浓度上升, O_3 随着光化学反应的减弱浓度下降. 由图 2 可见, VOCs 与 NO_x 日变化趋势较为类似, 均在早晚高峰时段浓度有所上升, 说明站点受机动车尾气排放影响较大.

2.3 VOCs 对 O_3 的潜在贡献

由表 1 可知, 成都市区夏季总 OFP 为 $227.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中烷烃、烯烃、炔烃(乙炔)、芳香烃、含氧化合物、卤代烃和其他(二硫化碳)的 OFP 分别为 34.00、62.23、2.73、97.03、22.00、8.45 和 $0.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 芳香烃对 OFP 的贡献率最高, 间/对-二甲苯、甲苯和邻-二甲苯为主要的 OFP 贡献物种, 主要来自溶剂使用及机动车尾气排放. 其次烯烃和烷烃

表1 成都市区夏季 VOCs 物种平均质量浓度及 OFP 值¹⁾

Table 1 Concentration of VOCs and OFP in summer of Chengdu

种类	VOCs 物种	6 月		7 月		8 月		平均质量 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	质量分数 /%	OFP / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	在总 OFP 中占比 /%
		质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对 偏差	质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对 偏差	质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对 偏差				
烷烃	乙烷	4.55	0.37	4.62	0.38	5.19	0.45	4.79	4.25	1.34	0.59
	丙烷	3.85	0.59	5.00	0.58	6.12	0.64	4.99	4.43	2.45	1.08
	正丁烷	2.63	0.61	3.76	0.68	4.57	0.69	3.65	3.24	4.20	1.85
	异丁烷	1.64	0.63	2.40	0.70	2.79	0.70	2.28	2.02	2.80	1.23
	环戊烷	0.16	0.41	0.21	0.67	0.23	0.74	0.20	0.18	0.48	0.21
	正戊烷	1.12	0.66	1.47	0.65	1.78	0.68	1.46	1.29	1.91	0.84
	异戊烷	2.91	0.73	4.21	0.75	4.87	0.75	3.99	3.55	5.79	2.55
	甲基环戊烷	0.22	0.72	0.33	0.75	0.34	0.72	0.30	0.26	0.65	0.29
	环己烷	0.13	1.84	0.22	1.03	0.21	1.46	0.19	0.16	0.23	0.10
	正己烷	0.86	0.96	1.68	0.84	2.53	0.69	1.69	1.50	2.10	0.92
	3-甲基戊烷	0.75	0.76	1.35	0.80	1.72	0.68	1.27	1.13	2.29	1.01
	2-甲基戊烷	1.39	0.69	2.22	0.69	2.09	0.69	1.90	1.68	2.84	1.25
	2,3-二甲基丁烷	3.60	1.24	3.44	0.97	5.66	0.84	4.23	3.76	4.11	1.81
	2,2-二甲基丁烷	0.13	0.65	0.16	0.67	0.18	0.70	0.16	0.14	0.19	0.08
	甲基环己烷	0.12	0.82	0.19	0.76	0.35	1.09	0.22	0.19	0.48	0.21
	正庚烷	0.18	1.02	0.32	1.04	0.45	1.66	0.32	0.28	0.34	0.15
	3-甲基己烷	0.13	1.03	0.25	1.08	0.26	1.14	0.21	0.19	0.35	0.15
	2-甲基己烷	0.14	0.82	0.25	0.97	0.26	1.00	0.22	0.19	0.26	0.11
	2,4-二甲基戊烷	0.04	0.54	0.09	0.81	0.07	0.58	0.07	0.06	0.11	0.05
	2,3-二甲基戊烷	0.09	0.65	0.13	0.76	0.15	0.75	0.12	0.11	0.16	0.07
	辛烷	0.18	0.94	0.28	0.80	0.35	0.98	0.27	0.24	0.24	0.11
	3-甲基庚烷	0.05	0.56	0.09	0.69	0.09	0.69	0.08	0.07	0.10	0.04
	2-甲基庚烷	0.09	0.63	0.11	0.66	0.14	0.60	0.11	0.10	0.12	0.05
	正壬烷	0.11	0.63	0.16	0.68	0.21	0.77	0.16	0.14	0.12	0.05
	正癸烷	0.14	0.50	0.20	1.33	0.20	0.69	0.18	0.16	0.12	0.05
	2,3,4-三甲基戊烷	0.05	0.49	0.07	0.78	0.08	0.61	0.06	0.06	0.07	0.03
	2,2,4-三甲基戊烷	0.08	0.69	0.13	0.73	0.14	0.71	0.12	0.11	0.15	0.07
	小计	25.34	0.55	33.36	0.58	41.03	0.60	33.24	29.51	34.00	14.97
烯烃	乙烯	1.61	0.65	2.23	0.63	2.46	0.64	2.10	1.86	18.87	8.31
	丙烯	0.86	0.45	1.05	0.53	1.19	0.40	1.03	0.92	12.04	5.30
	1,3-丁二烯	0.14	0.42	0.16	0.61	0.20	0.61	0.17	0.15	2.13	0.94
	顺-2-丁烯	0.17	1.36	0.20	0.56	0.24	0.75	0.20	0.18	2.88	1.27
	反-2-丁烯	0.17	0.63	0.23	0.68	0.25	0.83	0.22	0.19	3.28	1.44
	1-丁烯	0.18	0.58	0.22	0.55	0.24	0.88	0.21	0.19	2.09	0.92
	2-甲基-2-丁烯	0.24	0.26	0.20	0.30	0.19	0.18	0.21	0.19	2.97	1.31
	3-甲基-1-丁烯	0.19	0.17	0.33	0.43	0.31	0.38	0.28	0.24	1.93	0.85
	顺-2-戊烯	0.08	0.39	0.18	1.00	0.26	0.83	0.17	0.15	1.79	0.79
	反-2-戊烯	0.06	0.41	0.12	1.01	0.11	0.63	0.09	0.08	0.98	0.43
	1-戊烯	0.14	1.74	0.09	0.54	0.10	0.73	0.11	0.10	0.78	0.34
	异戊二烯	0.52	1.13	0.64	0.91	0.67	0.89	0.61	0.54	6.48	2.85
	1-己烯	0.08	0.48	0.18	0.82	0.10	0.61	0.12	0.11	0.66	0.29
	环戊烯	0.74	0.87	0.80	0.75	0.83	0.71	0.79	0.70	5.36	2.36
	2-甲基-1-戊烯	0.10	0.24	0.15	0.66	0.11	0.28	0.12	0.11	0.00	0.00
	小计	5.27	0.54	6.79	0.52	7.24	0.53	6.43	5.71	62.23	27.39
炔烃	乙炔	2.29	0.63	3.10	0.77	3.22	0.60	2.87	2.55	2.73	1.20
	苯	0.98	0.61	1.24	0.71	1.25	0.57	1.16	1.03	0.83	0.37
	甲苯	2.06	1.14	3.51	1.10	4.12	1.10	3.23	2.86	12.91	5.68
	乙苯	0.62	1.05	1.16	0.95	1.55	0.97	1.11	0.98	3.37	1.48
	邻-二甲苯	0.64	1.18	1.33	1.13	1.70	1.19	1.22	1.08	9.32	4.10
	间/对-二甲苯	4.11	1.33	7.97	1.13	11.25	1.14	7.78	6.90	60.66	26.71
	苯乙炔	0.11	1.13	0.22	1.70	0.34	1.89	0.22	0.20	0.38	0.17
	芳香烃 正丙基苯	0.11	0.63	0.14	1.18	0.13	1.27	0.13	0.11	0.26	0.11
	1,3,5-三甲基苯	0.12	0.57	0.19	1.42	0.24	1.58	0.18	0.16	2.13	0.94
	1,2,4-三甲基苯	0.17	0.79	0.34	1.88	0.58	2.92	0.36	0.32	3.19	1.40
	1,2,3-三甲基苯	0.03	0.82	0.06	1.91	0.10	2.73	0.07	0.06	0.79	0.35

续表 1

种类	VOCs 物种	6 月		7 月		8 月		平均质量 浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	质量分数 /%	OFP / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	在总 OFP 中占比 /%
		质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对 偏差	质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对 偏差	质量浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	相对 偏差				
芳香烃	2-乙基甲苯	0.08	0.77	0.13	1.45	0.16	2.08	0.12	0.11	0.69	0.30
	3-乙基甲苯	0.16	0.85	0.28	1.32	0.34	1.96	0.26	0.23	1.90	0.84
	4-乙基甲苯	0.07	0.96	0.15	1.71	0.18	2.07	0.14	0.12	0.60	0.26
	小计	9.25	1.05	16.71	0.97	21.92	1.00	15.96	14.16	97.03	42.71
含氧化 合物	丙烯醛	0.66	0.57	0.77	0.52	0.62	0.58	0.69	0.61	5.10	2.25
	丙酮	14.11	0.41	13.03	0.36	16.38	0.50	14.51	12.88	5.22	2.30
	2-丁酮	0.75	0.94	0.99	1.03	1.87	0.74	1.20	1.07	1.78	0.79
	异丙醇	0.60	1.52	1.04	1.09	1.82	1.28	1.15	1.02	0.70	0.31
	乙酸乙烯酯	0.05	0.72	0.05	0.78	0.07	1.19	0.06	0.05	0.18	0.08
	乙酸乙酯	3.59	1.07	3.99	1.15	8.08	0.95	5.22	4.63	3.29	1.45
	甲基丙烯酸甲酯	0.35	0.62	0.26	1.38	0.23	2.02	0.28	0.25	4.41	1.94
	甲基叔丁基醚	0.60	0.87	1.19	1.09	1.82	0.76	1.20	1.07	0.88	0.39
	乙酸正丁酯	0.51	1.06	0.79	0.85	0.83	1.28	0.71	0.63	0.00	0.00
	四氢呋喃	0.04	0.73	0.08	1.10	0.17	5.88	0.10	0.09	0.43	0.19
	小计	21.25	0.46	22.20	0.49	31.92	0.56	25.13	22.30	22.00	9.69
卤代烃	氟利昂 12	1.54	0.60	1.45	0.62	1.26	0.59	1.42	1.26	—	—
	氟利昂 11	1.96	0.25	1.86	0.34	1.72	0.24	1.85	1.64	—	—
	氟利昂 114	1.23	0.61	0.71	0.83	0.84	0.62	0.93	0.82	—	—
	氟利昂 113	0.66	0.28	0.60	0.19	0.59	0.31	0.61	0.54	—	—
	四氯化碳	0.70	0.16	0.67	0.21	0.69	0.19	0.69	0.61	—	—
	二氯甲烷	7.08	0.63	10.33	0.76	12.56	0.73	9.99	8.87	0.41	0.18
	溴甲烷	0.05	0.66	0.05	0.92	0.06	0.93	0.05	0.05	0.00	0.00
	氯甲烷	1.96	0.79	1.80	0.53	0.74	0.70	1.50	1.33	0.06	0.03
	一氯二溴甲烷	0.24	0.98	0.27	1.02	0.56	1.06	0.36	0.32	—	—
	溴仿	0.29	1.09	0.06	0.00	0.07	1.06	0.14	0.13	—	—
	三氯甲烷	0.84	1.93	0.75	0.78	0.70	0.62	0.76	0.68	0.02	0.01
	1,1,2-三氯乙烷	0.10	0.56	0.14	1.32	0.13	1.15	0.12	0.11	0.01	0.00
	1,1,1-三氯乙烷	0.13	1.20	0.21	1.26	0.21	1.89	0.19	0.17	0.00	0.00
	1,2-二溴乙烷	0.14	0.58	0.28	1.57	0.23	2.20	0.22	0.19	0.02	0.01
	1,2-二氯乙烷	2.44	0.75	3.36	0.79	3.98	0.83	3.26	2.89	0.68	0.30
	1,1-二氯乙烷	0.16	0.86	0.31	0.97	0.28	0.81	0.25	0.22	0.02	0.01
	氯乙烷	0.10	0.95	0.06	0.95	0.04	0.93	0.07	0.06	0.02	0.01
	1,2-二氯丙烷	0.67	0.62	0.68	0.94	0.88	0.82	0.74	0.66	0.22	0.09
	四氯乙烯	0.27	0.76	0.37	0.82	0.38	0.77	0.34	0.30	0.01	0.00
	顺-1,2-二氯乙烯	0.75	1.18	0.19	2.39	0.10	2.79	0.35	0.31	0.59	0.26
	1,1-二氯乙烯	0.08	1.08	0.12	1.36	0.11	1.72	0.10	0.09	0.19	0.08
	反-1,2-二氯乙烯	0.04	0.76	0.05	0.72	0.04	1.28	0.04	0.04	0.07	0.03
	氯乙烯	0.09	1.37	0.08	1.75	0.13	1.84	0.10	0.09	0.28	0.12
	三氯乙烯	0.17	0.38	0.20	0.76	0.20	0.94	0.19	0.17	0.12	0.05
	顺式-1,3-二氯丙烯	0.10	0.50	0.13	0.97	0.13	1.58	0.12	0.11	0.44	0.19
	反式-1,3-二氯丙烯	0.16	0.52	0.17	0.89	0.16	1.17	0.16	0.14	0.81	0.36
	1,3-二氯苯	0.22	0.90	0.18	0.95	0.45	1.21	0.28	0.25	0.05	0.02
	1,4-二氯苯	0.54	0.64	0.67	0.73	0.37	0.78	0.53	0.47	0.09	0.04
	氯苯	0.05	0.46	0.07	1.65	0.05	1.61	0.05	0.05	0.02	0.01
	4-甲基-1-戊烯	1.07	1.14	0.70	1.66	0.51	2.47	0.76	0.67	4.32	1.90
	小计	23.83	0.39	26.54	0.52	28.15	0.56	26.17	23.23	8.45	3.72
其他	二硫化碳	2.87	2.25	2.62	2.32	3.08	2.24	2.86	2.54	0.71	0.31
总计		84.02	0.46	105.43	0.54	130.97	0.58	112.66	—	227.15	—

1) “—”代表无相关数据

对 OFP 贡献较大,主要为乙烯、丙烯、异戊二烯、正丁烷、异丁烷和 2,3-二甲基丁烷等物种. 在 VOCs 物种中,烷烃、卤代烃和含氧化合物质量浓度较高,但其 OFP 贡献率明显低于芳香烃和烯烃,主要由于芳香烃和烯烃化学反应活性较高,导致其对 OFP 贡

献率较大. 由图 3 可知,OFP 贡献率位于前十的物种分别为:间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、甲苯、丙烯、邻-二甲苯、异戊二烯、异戊烷、环戊烷、丙酮和丙烯醛,其 OFP 贡献占比之和为 62.60%,控制夏季臭氧生成,应重点控制 OFP 贡献较大的物种.

表 2 成都与国内其他城市夏季 VOCs 组分质量浓度对比¹⁾/μg·m⁻³
Table 2 Comparison of VOCs component concentrations in Chengdu and other cities/μg·m⁻³

来源	烷烃	烯烃	芳香烃	炔烃	卤代烃	其他 VOCs	TVOCs
本研究	33.24(27)	6.43(15)	15.96(13)	2.87(1)	26.17(30)	2.86(1)	112.66(97)
太原(2014 年) ^[9]	47.2(28)	10.0(10)	37.8(17)	2.8(1)	—	—	97.8(56)
南京(2013 年) ^[24]	51.5(29)	7.5(10)	38.6(17)	4.7(1)	—	—	102.3(57)
佛山(2015 年) ^[25]	19.1(24)	10.8(14)	24.7(17)	1.6(1)	—	—	56.2(56)
厦门(2014 年) ^[26]	39.9(29)	6.3(10)	27.6(17)	—	—	—	73.8(56)
阳泉市区(2018 年) ^[27]	42.5(29)	6.2(10)	14.6(17)	3.1(1)	—	15.5(11)	82.1(68)
天津(2018 年) ^[28]	30.02(29)	6.25(10)	15.42(16)	2.72(1)	—	—	54.44(56)
台中 ^[29]	33.8(28)	5.4(9)	34.8(17)	2.2(1)	—	—	76.2(55)

1) 括弧内数字代表物种数量；“—”表示无相关监测数据

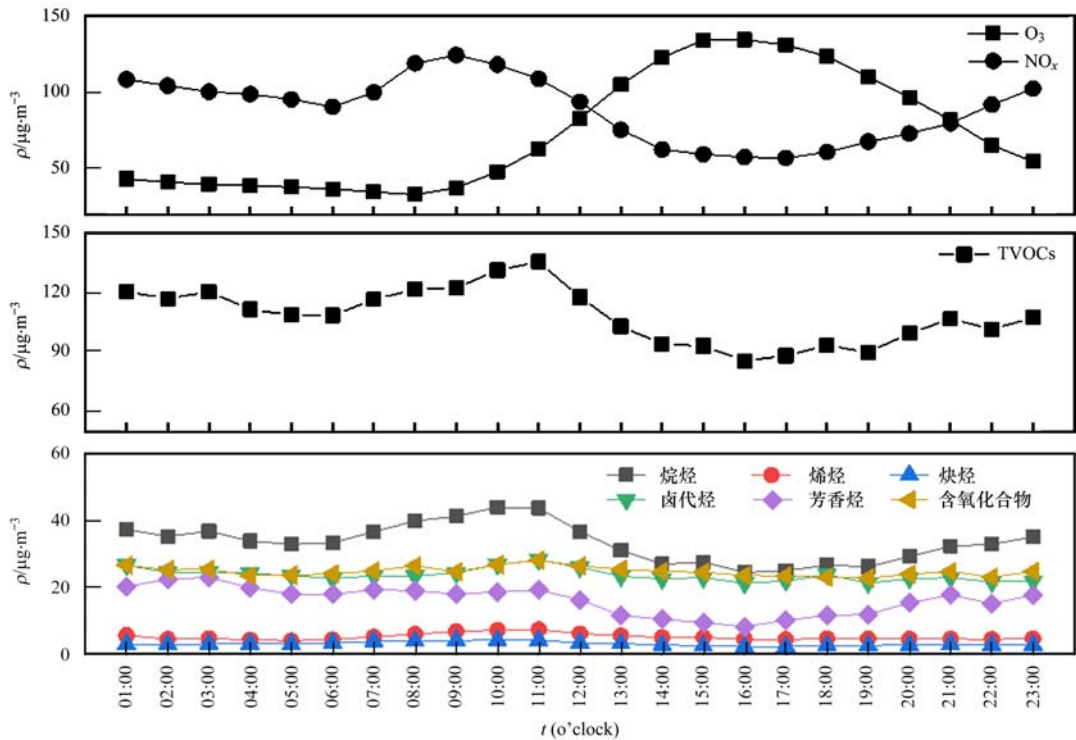


图 2 污染物质量浓度日变化
Fig. 2 Daily change in pollutant concentration

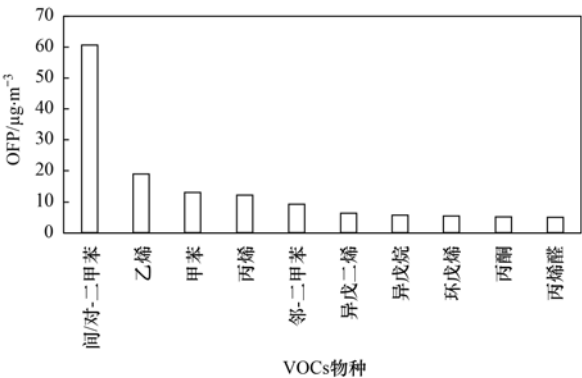


图 3 成都市区夏季 OFP 贡献排名前十 VOCs 物种
Fig. 3 OFP of the top ten contributors VOCs species in summer in Chengdu

进一步分析 OFP 贡献率排名前十的 VOCs 物种和质量浓度占比前十的物种,如图 4 所示. OFP 贡献率排名前十的 VOCs 物种质量浓度占比之和仅有

31.90%,但 OFP 贡献占比之和为 62.60%;而质量浓度排名前十的 VOCs 物种浓度占比之和虽为 55.40%,但 OFP 贡献占比之和仅占 38.93%. 由此可见,控制成都市城区 O₃ 的生成,需控制 VOCs 质量浓度排名靠前的物种,同时重点控制活性靠前的 VOCs 物种,主要为芳香烃和烯烃物种. 其中,间/对-二甲苯、甲苯、邻-二甲苯来源于机动车和溶剂使用,乙烯和丙烯来源于机动车及石油化工,异戊烷和环戊烷来源于机动车及油气挥发,异戊二烯来源于天然源排放,丙酮和丙烯醛来源于溶剂使用、餐饮和二次生成等^[30,31]. 因此,成都市城区夏季应加强机动车管控,提升机动车油品质量,监督油品储、运、输环节采用油气回收装置,工业企业加强废气收集及采用合理的处理设施,提倡家具、汽车和机械等喷涂行业采用水性漆替代.

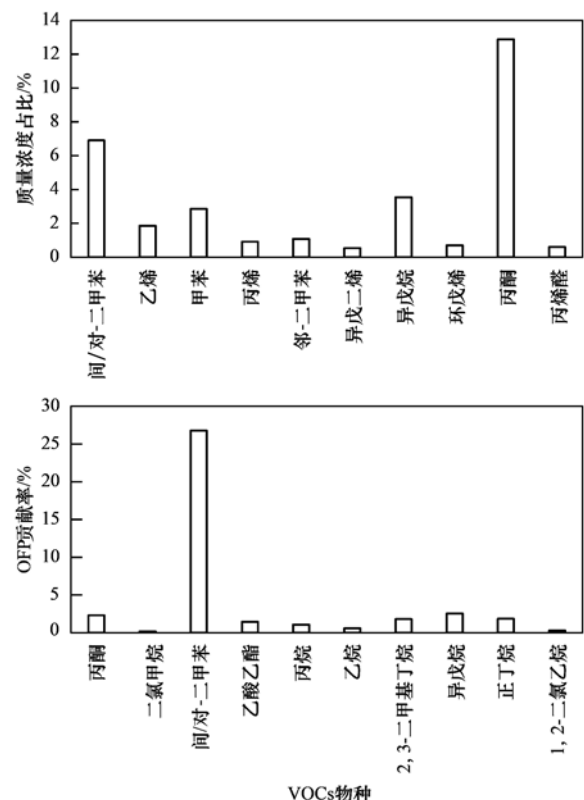


图4 OFP 贡献率排名前十的 VOCs 物种质量浓度占比及质量浓度占比排名前十的 VOCs 物种 OFP 贡献率

Fig. 4 Mass concentration ratio of the top 10 OFP species and the OFP ratio of the top 10 concentration species

2.4 VOCs 来源解析

根据已有的清单研究,成都市 VOCs 来源主要有工业源、移动源、溶剂使用源、生物质燃烧、油气挥发和天然源等. 本研究采用 USEPA 最新版的 EPA PMF5.0 模型对成都市夏季在线 VOCs 数据进行来源贡献分析,并从 48 种污染源主要 VOCs 特征物种中筛选出 32 种物种输入模型进行计算,参与 PMF 计算的物种在各源中的贡献率如图 5. 因子 1 中,贡献较大的物种主要为 C₂ ~ C₅ 烷烃、乙炔、苯、甲苯和甲基叔丁基醚,均为机动车尾气示踪物种^[32],因此判断该因子为移动源;因子 2 中,贡献较大的物种主要为 2,3-二甲基丁烷、丙酮、2-丁酮、1,2-二氯丙烷、苯、乙烷和丙烯,其中丙酮、2-丁酮、1,2-二氯乙烷和丙烯等均为工业排放物质^[33],同时本地化成分谱研究中曾发现家具、汽车喷涂废气中 2,3-二甲基丁烷占比靠前,因此判断该因子为工业源排放;因子 3 中,贡献较大的物种有油气挥发示踪物种甲基叔丁基醚,机动车示踪物种乙炔、甲苯、丙烷、正丁烷和异丁烷等^[30],工业排放的卤代烃如二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷,溶剂使用示踪物种 2-丁酮和乙酸乙酯,同时本地化成分谱研究中餐饮排放特征物种中有乙酸乙酯等含氧化合物,分析站点周边排放源情况,主要受机动车、餐饮及溶剂使用影响,而因子 3

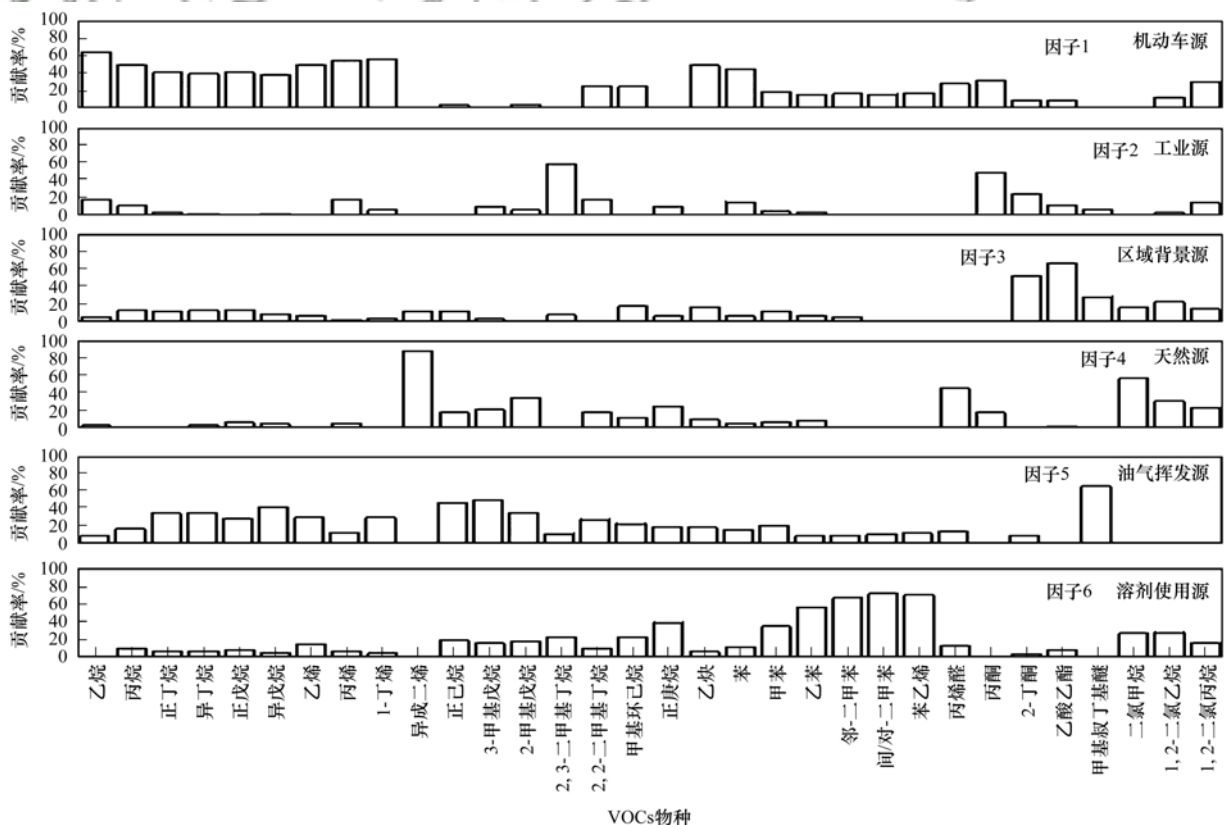


图5 成都市夏季 PMF 来源解析因子分析结果

Fig. 5 Results of source analytical factor analysis of PMF in summer in Chengdu

中的主要物种为站点周边主要污染源的特征混合物种,因此判断因子3为区域背景源;因子4中异戊二烯贡献占比为88%,因此判定该因子为天然源;因子5中,甲基叔丁基醚占比为64%,其次2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、异戊烷、正戊烷、正丁烷和异丁烷等物种占比均在35%~50%,这些物种为油气挥发特征物种^[34],因子5为油气挥发源;因子6中,贡献比较大的物种是芳香烃,如乙苯、邻二甲苯、间/对二甲苯和苯乙烯等,各物种占比在55%以上,其他物种占比相对较低,因此判定该因子为溶剂使用源。

成都市区夏季环境空气 VOCs 来源贡献占比如图6所示。由于该站点靠近交通区主干道,其移动源排放在各源中占比最高,为34%;其次为工业源和油气挥发源,分别占17%和14%;天然源和溶剂使用源占比分别为13%和11%。

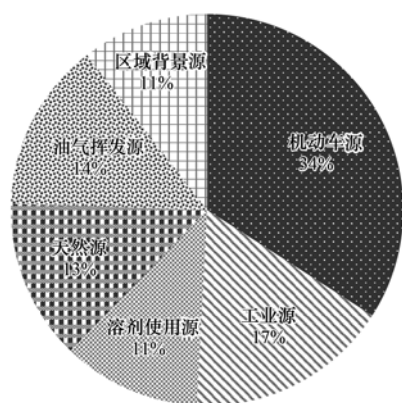


图6 成都市夏季 PMF 来源解析结果

Fig. 6 Results of PMF source in summer in Chengdu

3 结论

(1) 成都市城区夏季 TVOCs 质量浓度为 $112.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、含氧化合物、卤代烃和其他分别占 29.51%、5.71%、2.55%、14.16%、23.30%、23.23% 和 2.54%。质量浓度排名前十位为: 丙酮、二氯甲烷、间/对-二甲苯、乙酸乙酯、丙烷、乙烷、2,3-二甲基丁烷、异戊烷、正丁烷和 1,2-二氯乙烷, 前十物质质量浓度之和占 TVOCs 的 55.4%。

(2) 成都市城区夏季大气 VOCs 的 OFP 为 $227.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中芳香烃对 OFP 的贡献率最大 (42.7%), 其次为烯烃 (27.4%)。间/对-二甲苯、乙烯、丙烯、邻-二甲苯、异戊烷、环戊烷和丙烯醛为主要的 O_3 生成贡献物种, 其 OFP 贡献占比之和为 62.60%。

(3) 使用 PMF 模型对成都市城区夏季 VOCs 进行来源解析, 移动源为主要的贡献源, 占比为 34%; 其次为工业源和油气挥发源, 分别占 17% 和 14%;

天然源和溶剂使用源占比分别为 13% 和 11%。

参考文献:

- [1] 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 等. 鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1085-1092.
Fu Y M, Yang H G, Lu M Y, et al. Analysis of pollution characteristics and sources of atmospheric VOCs in Ezhou City [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1085-1092.
- [2] Wei W, Lv Z F, Yang G, et al. VOCs emission rate estimate for complicated industrial area source using an inverse-dispersion calculation method: a case study on a petroleum refinery in northern China[J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 681-688.
- [3] An J L, Zhu B, Wang H L, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 206-214.
- [4] 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 等. 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4042-4050.
Yang F, Yan Y L, Ge Y F, et al. Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Winter in Jincheng [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4042-4050.
- [5] 王雨, 王丽涛, 杨光, 等. 邯郸市秋季大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(7): 1134-1142.
Wang Y, Wang L T, Yang G, et al. Characteristics of volatile organic compounds in autumn in Handan City, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(7): 1134-1142.
- [6] Wang H L, Chen C H, Wang Q, et al. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the source analysis through a two-year continuous measurement [J]. Atmospheric Environment, 2013, **80**: 488-498.
- [7] 闫磊, 黄银芝, 高松, 等. 杭州湾北岸 36 种挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(3): 536-546.
Yan L, Huang Y Z, Gao S, et al. Pollution characteristics and source analysis of 36 volatile organic compounds on the North Coast of Hangzhou Bay [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(3): 536-546.
- [8] Geng F H, Zhao C S, Tang X, et al. Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: a case study [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(5): 989-1001.
- [9] 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.
- [10] 张立慧, 毋振海, 李斌, 等. 北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(3): 526-535.
Zhang L H, Wu Z H, Li B, et al. Pollution characterizations of atmospheric volatile organic compounds in spring of Beijing urban area [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(3): 526-535.
- [11] Zhang Y J, Tang L L, Wang Z, et al. Insights into characteristics, sources, and evolution of submicron aerosols during harvest seasons in the Yangtze River delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(3): 1331-1349.

- [12] Hatfield M L, Hartz K E H. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2211-2219.
- [13] 赵秋月, 李春燕, 陈凤, 等. 南通市夏季 VOCs 污染特征与来源研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(2): 148-156.
Zhao Q Y, Li C Y, Chen F, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of ambient VOCs in summer in Nantong [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(2): 148-156.
- [14] 刘丹, 解强, 张鑫, 等. 北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3693-3701.
Liu D, Xie Q, Zhang X, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of VOCs during the haze period in the winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3693-3701.
- [15] Cai C J, Ceng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [16] Morino Y, Ohara T, Yokouchi Y, *et al.* Comprehensive source apportionment of volatile organic compounds using observational data, two receptor models, and an emission inventory in Tokyo metropolitan area [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(D2): D02311.
- [17] Xie Y L, Berkowitz C M. The use of positive matrix factorization with conditional probability functions in air quality studies: an application to hydrocarbon emissions in Houston, Texas [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(17): 3070-3091.
- [18] HJ 1010-2018, 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[S].
- [19] An J L, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Characterizations of volatile organic compounds during high ozone episodes in Beijing, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(4): 1879-1889.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气臭氧污染来源解析技术 试 行 [EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/58e143be250c844769eae009581b6bd97f19bca3.html>, 2018-08-20.
- [21] 张敬巧, 吴亚君, 李慧, 等. 廊坊开发区秋季 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3186-3192.
Zhang J Q, Wu Y J, Li H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in autumn in Langfang development zones [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3186-3192.
- [22] Sweet C W, Vermette S J. Toxic volatile organic compounds in urban air in Illinois [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(1): 165-173.
- [23] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(12): 4348-4353.
- [24] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成势的相关性分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [25] 周雪明, 项萍, 段青春, 等. 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
Zhou X M, Xiang P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of non-methane hydrocarbons during winter and summer in Foshan city [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- [26] Hong Z Y, Li M Z, Wang H, *et al.* Characteristics of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) at a mountainous forest site and two urban sites in the southeast of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 1491-1500.
- [27] 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 等. 阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
Niu Y Y, Liu Z C, Li R M, *et al.* Characteristics, source apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in summer in Yangquan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
- [28] Yan Y L, Peng L, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shuozhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [29] Huang Y S, Hsieh C C. Ambient volatile organic compound presence in the highly urbanized city: source apportionment and emission position [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **206**: 45-59.
- [30] 赵乐, 刘新军, 范莉茹, 等. 石家庄夏季典型时段臭氧污染特征及来源解析 [J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(4): 78-84.
Zhao L, Liu X J, Fan L R, *et al.* Pollution characteristic and source apportionment of VOCs during summer typical periods in Shijiazhuang [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(4): 78-84.
- [31] 王鸣, 项萍, 牛其恺, 等. 南阳市冬春交替期大气 VOCs 污染特征及来源解析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2233-2241.
Wang M, Xiang P, Niu Q K, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs during alternating period between winter and spring in Nanyang City, Henan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2233-2241.
- [32] Wang M, Shao M, Lu S H, *et al.* Evidence of coal combustion contribution to ambient VOCs during winter in Beijing [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2013, **24**(9): 829-832.
- [33] Yurdakul S, Civan M, Kuntasal Ö, *et al.* Temporal variations of VOC concentrations in Bursa atmosphere [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9**(2): 189-206.
- [34] Thornhill D A, Williams A E, Onasch T B, *et al.* Application of positive matrix factorization to on-road measurements for source apportionment of diesel- and gasoline-powered vehicle emissions in Mexico City [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(8): 3629-3644.

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)