

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)

全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙(1214)

湖泊水质参数遥感监测研究进展 王思梦, 秦伯强(1228)

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超(1244)

长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)

中国土地利用碳排放变化及协调分区 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)

基于 STIRPAT 模型天津减排降碳协同效应多维度分析 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)

基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)

浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静(1297)

南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)

珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)

2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)

港口自有移动源大气污染物排放清单 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)

黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)

桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评估 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)

典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)

石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)

拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)

南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)

调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)

典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晚艳, 郑蕾(1497)

滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)

窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 曾少毅, 李坤权(1519)

高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 闵炳坤, 李坤权(1528)

不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 刘晨旭, 白晓慧(1537)

水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)

鄱阳湖平原直播稻 CH₄ 通量及其与 CO₂ 通量的综合温室效应 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)

不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)

石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建清(1593)

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)

三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)

兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)

粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评估 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)

三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)

化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)

再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)

稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)

巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕(1706)

蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复镉污染土壤的影响 陈敏妮, 袁小奇, 张李峰, 何川黔, 高波(1714)

地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区微量元素富集特征及成因分析 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)

三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)

黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)

鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 张丹, 彭双, 王丹青, 王-明, 林先贵(1780)

牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)

《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征： 含氧挥发性有机物的重要性

宋鑫^{1,2}, 袁斌^{1,2*}, 王思行^{1,2}, 何贤俊^{1,2}, 李小兵^{1,2}, 彭钰雯^{1,2}, 陈钰彬^{1,2}, 齐吉朋^{1,2}, 蔡嘉骅^{1,2}, 黄山^{1,2}, 胡丹³, 魏文³, 刘可旋⁴, 邵敏^{1,2}

(1. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 2. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 511443; 3. 北京雪迪龙科技股份有限公司, 北京 102206; 4. 东莞市生态环境局, 东莞 523009)

摘要: 挥发性有机物 (VOCs) 是对流层大气的关键化学组分, 其中工业排放是 VOCs 的重要来源之一. 于 2021 年夏初在中国珠江三角洲的典型工业地区中开展了 74 种 VOCs 的在线观测. 在整个观测期间, 总挥发性有机物 (TVOC) 的体积分数平均值为 $(81.9 \pm 45.4) \times 10^{-9}$. 其中, 含氧挥发性有机物 (OVOCs) 在 TVOC 中的占比最大, 平均值为 51.5%, 并且其占比随 TVOC 体积分数的升高而逐渐增大. 芳香烃在 TVOC 中的占比为 19.4%. 进一步分析发现, 与工业活动相关的排放是工业区环境大气中芳香烃与 OVOCs 的主要来源. 芳香烃和 OVOCs 对臭氧生成潜势 (OFP) 的贡献最为显著, 在总 OFP 中的贡献率分别为 56.4% 和 26.7%. 此外, 与烃类组分相比, OVOCs 的大气化学活性同样较高, 贡献了大气中总 $\cdot\text{OH}$ 反应活性的 40.0%. 二甲苯、甲苯、丙烯醛和乙酸乙酯对二次污染形成的贡献较大, 在制定大气二次污染管控策略时应优先考虑. 研究结果强调了工业地区中 OVOCs 对 TVOC 的重要贡献以及 OVOCs 在大气二次污染形成过程中的重要作用.

关键词: 二次污染; 工业地区; 含氧挥发性有机物 (OVOCs); 臭氧生成潜势 (OFP); $\cdot\text{OH}$ 反应活性

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1336-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202204104

Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds

SONG Xin^{1,2}, YUAN Bin^{1,2*}, WANG Si-hang^{1,2}, HE Xian-jun^{1,2}, LI Xiao-bing^{1,2}, PENG Yu-wen^{1,2}, CHEN Yu-bin^{1,2}, QI Ji-peng^{1,2}, CAI Jia-hua^{1,2}, HUANG Shan^{1,2}, HU Dan³, WEI Wen³, LIU Ke-xuan⁴, SHAO Min^{1,2}

(1. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2. Guangdong-Hongkong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 511443, China; 3. Beijing SDL Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China; 4. Dongguan Ecological Environmental Bureau, Dongguan 523009, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) are key components of tropospheric chemistry, of which industrial emissions are an important source of atmospheric VOCs. In this study, online measurements of 74 VOCs were made in a typical industrial area of the Pearl River Delta in southern China during the early summer of 2021. The mean volume mixing ratio of total volatile organic compounds (TVOC) was $(81.9 \pm 45.4) \times 10^{-9}$ during the campaign. Among them, oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) accounted for the largest fraction of TVOC, with an average of 51.5%, followed by aromatics, accounting for 19.4% of TVOC. The proportion of OVOCs in TVOC gradually increased with the increase in TVOC concentration. Industry-related emissions were the main contributors to aromatics and OVOCs in this region. Aromatics and OVOCs were the two major contributors to the ozone formation potential (OFP), accounting for 56.4% and 26.7%, respectively. Furthermore, OVOCs also contributed 40.0% of the total $\cdot\text{OH}$ reactivity from VOCs. Xylenes, toluene, acrolein, and ethyl acetate had a greater contribution to the formation of secondary pollution; thus, these species should be given priority for controlling secondary pollution. Our results underscore the severity of OVOCs pollution in industrial areas and the important roles of OVOCs in secondary pollution.

Key words: secondary pollution; industrial area; oxygenated volatile organic compounds (OVOCs); ozone formation potential (OFP); $\cdot\text{OH}$ reactivity

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 作为大气中重要痕量气体^[1], 在促进臭氧 (O_3) 和其他氧化剂产生的同时^[2,3], 还能够生成二次有机气溶胶 (SOA), 进而驱动细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 浓度的积累^[4-7]. 近年来由臭氧和 $\text{PM}_{2.5}$ 主导的污染事件在中国许多城市频繁发生, 对区域气候和人体健康造成不利影响, 而 VOCs 在其中扮演着关键角色^[8-10]. VOCs 的一次来源主要包括生物源排放和人类生产活动中涉及的各种人为源排放^[11,12]. 在全

球尺度上, 生物源与人为源 VOCs 的排放比约为 9:1, 而在中国, 这一比例大约是 1.7:1^[2]. 因此, 人为源对中国 VOCs 总排放量的贡献极其重要.

一项针对中国地区的 VOCs 排放清单研究表明, 在 6 个主要人为源中, 工业过程源在 VOCs 总排

收稿日期: 2022-04-09; 修订日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877302); 广东省引进创新创业团队项目 (2016ZT06N263)

作者简介: 宋鑫 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气中 VOCs 的组成和化学过程, E-mail: songxinchi@163.com

* 通信作者, E-mail: byuan@jnu.edu.cn

放量中占主导地位(46%),其次是溶剂使用源(18%)^[13].工业相关的排放已成为近年来中国VOCs总排放量持续增长的主要驱动力^[14],而工业地区作为工业排放集中地,具有VOCs排放量大且组分多样等特点,经常被视为VOCs排放热点^[15~18].截至目前,全球许多地区已经广泛报道了不同工业地区VOCs的排放水平和化学组成等信息.例如,在加拿大艾伯塔省的油砂工业区中总挥发性有机物(total volatile organic compounds, TVOC)以烷烃为主(48%),其次是酮类(30.9%)^[19];在韩国蔚山综合工业区,甲苯是最丰富的VOCs物种,其次是乙酸乙酯^[20];而在泰国以工业过程和石化工业为主要排放贡献的工业区,烯烃是环境大气中VOCs的主要贡献来源(4.0%~60.7%)^[21].

中国近年来工业发展迅速,有研究报道了不同工业区的排放成分谱特征及对环境VOCs浓度的影响,包括石化工业区^[22]、精细化工厂^[15~18,22]、炼油厂^[23]、焦炭厂^[24]、冶铁厂^[24]和车辆制造工业区^[25]等.但针对轻工业行业(如家具制造和制鞋等行业)的研究多数为根据源排放测试构建行业VOCs源成分谱^[26,27],对于表征轻工业集中地区环境VOCs特征的研究则相对较少,而这类研究能够更直观地表明工业排放对环境VOCs的综合影响.此外,现有研究中关于工业地区VOCs数据的获取主要为离线方法^[23,24]或使用快速在线走航监测^[15,28],有限的样品数量通常难以有效揭示关键VOCs组分短期或长期的趋势变化.此外,已有研究表明,含氧挥发性有机物(oxygenated volatile organic compounds, OVOCs)是工业地区环境大气中VOCs体积分数的重要贡献来源^[22,24,29],但大部分研究未进行对OVOCs的同步监测.

珠江三角洲地区是中国四大工业基地之一,其特点是以轻工业为主的综合性工业基地,已有大量研究阐述了珠三角地区的VOCs污染特征和其来源^[6,30~33].东莞市作为珠三角地区工业化程度最高的城市之一,其主导产业为家具制造、制鞋和印刷等与溶剂使用密切相关行业.已有研究结果表明,东莞市贡献了珠三角地区VOCs总排放量的18.2%,与溶剂使用相关的排放达到东莞市VOCs排放总量的一半以上^[34~37].本研究于2021年夏初在东莞市某工业地区,通过在线质谱技术对环境大气中包含OVOCs在内的74种VOCs进行同步测量,分析了VOCs组成及来源,并评估各类型VOCs对二次污染物的贡献.本研究将加深现有研究对工业区环境VOCs特征的理解,以期对珠三角工业地区建立有效的空气污染控制策略和梳理VOCs重点研究方向

提供启示.

1 材料与方法

1.1 采样地点

厚街镇是东莞市工业活动最密集的地区之一,截至2019年底,厚街镇拥有各类企业2.67万家,以家具制造业和制鞋业作为优势产业.采样地点位于东莞市厚街镇的环境空气VOCs监测站(113°38'22"E, 22°55'29"N,如图1),仪器放置在建筑楼顶的监测站房中,距地面约30 m,周围无高层建筑物,采样点周边区域分布着大量的制鞋、家具制造、印刷和塑料制品等工业企业,能够在一定程度上表征工业区的大气化学组分特征.

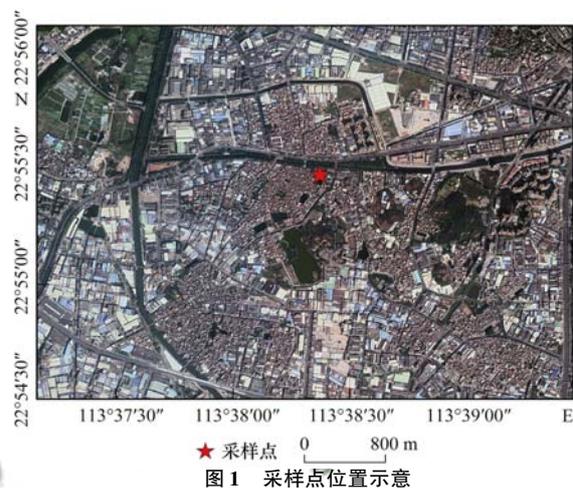


图1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of sample site in this study

1.2 VOCs的测量和分析

VOCs在线分析系统包括在线气相色谱仪(GC-866, Chromatotec Inc., 法国)与质子转移反应飞行时间质谱仪(PTR-ToF-MS, Kore Inc., 英国). GC-866具有两个独立的高性能气相色谱火焰电离检测器(GC-FID),能够在线分析C₂~C₁₂烃类化合物. PTR-ToF-MS是一种软电离的在线质谱技术,不需要样品的预处理就能实时测量大气中痕量VOCs的丰度水平^[38],在本次观测中主要用于OVOCs组分测量.观测期间,GC-866的检测限为0.01 × 10⁻⁹~0.38 × 10⁻⁹, PTR-ToF-MS的检测限为0.10 × 10⁻⁹~0.42 × 10⁻⁹.有关上述仪器更详细的信息可以参考文献[32,39]中的描述.

VOCs采样时间为2021年4月17~27日,观测期间,在线GC-866时间分辨率为1 h,并于观测前进行PAMS标气标定. PTR-ToF-MS的时间分辨率为10 s,每天采用定制VOCs标气在干燥(RH < 1%)条件和环境湿度条件下分别进行标定.此外,为了避免仪器背景对观测数据的影响, PTR-ToF-MS使用带有环境湿度的洁净空气每30 min进行

一次背景测量. 其中, 洁净空气由环境空气通入定制催化箱后得到的, 催化箱中具有加热到 365℃ 的铂丝催化剂, 能够有效去除 VOCs 组分并保留环境湿度. 两台仪器均放置在监测站房中, 仪器的进样管路均配备单独采样泵持续抽入环境空气, 以缩短环境空气在管路中的停留时间, 降低观测数据的不确定性^[40].

1.3 臭氧生成潜势 (OFP) 和 ·OH 反应活性计算

VOCs 是生成臭氧的重要前体物, 由于不同 VOCs 物种之间的化学反应活性存在显著差异, 不同 VOCs 物种对 O₃ 的相对形成贡献也不同. 本研究采用最大增量反应性 (maximum incremental reactivity, MIR) 来估算不同 VOCs 物种的臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP). MIR 是一个广泛使用的概念, 主要用于评估不同 VOCs 物种在 O₃ 生成中的贡献, 通过将 VOCs 物种体积分数乘以相应的 MIR 值来计算单个 VOCs 物种的 OFP^[41]. 对于 VOCs 物种 *i*, 其 OFP 可以通过式(1)进行计算:

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

式中, $[\text{VOC}_i]$ 为观测中 VOC 物种 *i* 的体积分数, MIR_i 为对应 VOCs 物种 *i* 的最大增量反应性^[42].

·OH 反应活性 ($k_{\cdot\text{OH}}$) 可以用于确定大气痕量气体对 ·OH 的总体影响, 其中 VOCs 的 ·OH 反应活性可以有效地表征各种 VOCs 对与二次污染物形成相关的大气化学反应的贡献^[43,44]. 通常总 ·OH 反应活性为 VOCs 和无机气体的 ·OH 反应活性总和^[44,45], 本研究只讨论 VOCs 贡献的 ·OH 反应活性. ·OH 反应活性被定义为反应物体积分数乘以与 ·OH 的气相反应速率常数, 对于 VOCs 物种 *i*, 它的 $k_{\cdot\text{OH}}$ 可以通过式(2)进行计算:

$$k_{\cdot\text{OH}} = k_{\cdot\text{OH}+\text{VOC}_i} \times [\text{VOC}_i] \quad (2)$$

式中, $[\text{VOC}_i]$ 为观测中 VOC 物种 *i* 的体积分数, $k_{\cdot\text{OH}+\text{VOC}_i}$ 为对应 VOCs 物种 *i* 与 ·OH 的反应速率常数, 各种 VOCs 的速率常数参考文献[1,46,47]中的结果.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 体积分数特征分析

本研究选择了 74 种 VOCs 物种进行分析 (29 种烷烃、11 种烯烃、1 种炔烃、17 种芳香烃和 16 种 OVOCs), 使用 TVOC 表示它们的总和. 图 2 展示了观测期间的各类 VOCs 组分体积分数之和的时间序列, $\varphi(\text{TVOC})$ 在观测期间波动较大 ($9.9 \times 10^{-9} \sim 245.6 \times 10^{-9}$), 平均值为 $(81.9 \pm 45.4) \times 10^{-9}$, 显著高于中国其他大型城市的水平 ($29.1 \times 10^{-9} \sim 59.4 \times 10^{-9}$, 表 1). 本研究中烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃分别占总 TVOC 体积分数的 $(25.1 \pm 7.9)\%$ 、 $(2.5 \pm 1.1)\%$ 、 $(1.6 \pm 0.7)\%$ 和 $(19.4 \pm 6.0)\%$, 而 OVOCs 占比最高, 达到了 $(51.5 \pm 9.6)\%$, 并且其占比随着 TVOCs 体积分数的升高而逐渐增大 (图 3).

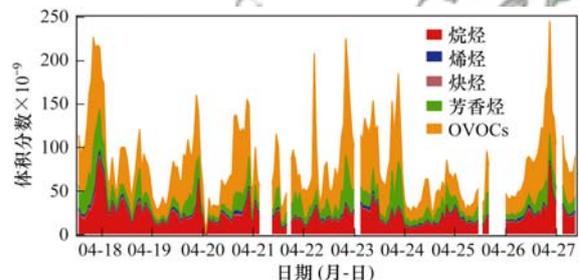


图 2 观测期间各 VOCs 组分体积分数的时间序列

Fig. 2. Time series of concentration of each VOCs component during the observation period

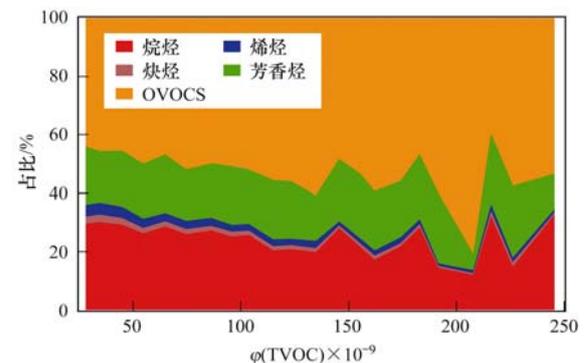


图 3 不同 TVOC 体积分数下各 VOCs 组分在 TVOC 中的占比

Fig. 3. Proportion of each VOCs components in TVOC under different TVOC concentrations

表 1 中国其他城市 VOCs 组分体积分数和占比¹⁾

Table 1 Volume mixing ratio and proportion of VOCs components in other cities in China

地点	日期(年-月)	TVOC	烷烃	烯烃	炔烃	芳香烃	OVOCs	文献
东莞	2021-04	81.9	20.6(25.1)	2.1(2.5)	1.3(1.6)	15.9(19.4)	42.1(51.5)	本研究
北京	2016-01 ~ 2016-10	44.0	16.2(36.8)	5.24(11.8)	3.13(7.0)	3.39(7.7)	11.00(25.0)	[48]
武汉	2016-11 ~ 2017-08	34.65	15.90(45.9)	4.19(12.1)	2.35(6.8)	3.23(9.3)	4.94(14.3)	[49]
成都	2016-10 ~ 2017-9	41.8	23.6(57)	8.2(20)	2.7(6)	7.2(17)	—	[50]
郑州	2018 ~ 05	29.11	9.00(30.9)	3.10(10.7)	—	1.64(5.6)	9.06(31.1)	[51]
杭州	2018-05 ~ 2019-04	59.4	14.9(25.0)	2.6(4.40)	1.7(2.90)	6.5(11.0)	24.9(41.9)	[52]
香港	2011-05 ~ 2012-02	52.05	32.67(62.77)	7.05(13.54)	4.34(8.34)	6.11(11.74)	—	[53]

1) 括号外数值表示体积分数, 单位 10^{-9} , 括号内数值表示占比, 单位%; “—”表示文献中没有相关数据

以往国内针对工业区的研究中烷烃通常是占比最高的组分(约为 40%~50%)^[17,25,54,55],例如叶露等^[25]在汽车工业区的研究中,发现园区大气中 TVOC 的体积分数为 26.5×10^{-9} ,其中烷烃占比为 50.2%,其次是芳香烃为 22.4%,Zhang 等^[54]在石化产业区的研究中发现 TVOC 平均体积分数为 94.14×10^{-9} ,以烷烃(41.8%)和芳香烃(20.1%)为主,对比发现,两个工业区中烷烃的占比均大于本研究的结果,主要原因是上述两项研究缺乏对 OVOCs 的监测.另外在不考虑 OVOCs 时,研究地区芳香烃的占比几乎是上述两个工业区的两倍,这是由于本研究的工业区中溶剂使用源的芳香烃排放比重较大.由于大部分工业区研究缺乏对 OVOCs 的监测,这可能引起人们对工业地区 OVOCs 的重要性缺少认知,而本研究的数据表明了 OVOCs 在工业地区的重要性.

表 2 列举了研究期间组成占比排名前 20 的物

种.烷烃中正丁烷与丙烷的体积分数最高,分别为 $(4.0 \pm 2.3) \times 10^{-9}$ 和 $(3.7 \pm 2.0) \times 10^{-9}$,其体积分数水平低于石化工业区的体积分数水平(8.64×10^{-9} 和 7.46×10^{-9})^[54],但高于一些城市站点的结果^[16,56].与珠三角地区以往的研究结果类似,本研究中甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯是芳香烃中体积分数最高的物种^[31,34,35],体积分数分别为 $(6.0 \pm 6.0) \times 10^{-9}$ 、 $(4.9 \pm 3.6) \times 10^{-9}$ 和 $(2.0 \pm 1.5) \times 10^{-9}$.甲醇、乙酸乙酯和甲基乙基酮(MEK)是本研究中体积分数最高的 OVOCs 物种,分别为 $(14.5 \pm 10.0) \times 10^{-9}$ 、 $(7.8 \pm 5.9) \times 10^{-9}$ 和 $(6.5 \pm 8.2) \times 10^{-9}$.甲醇作为大气中仅次于甲烷的第二丰富的有机气体,是许多城市地区的主要 OVOCs 物种,例如深圳(6.1×10^{-9})、北京(19.7×10^{-9})和匹兹堡($2.35 \times 10^{-9} \sim 14.6 \times 10^{-9}$)^[57,58],研究地区甲醇与乙酸乙酯($r=0.86$)和甲苯($r=0.81$)具有较强的相关性,表明它们可能具有相同来源.

表 2 组成占比及 OFP 值和 ·OH 反应活性贡献率排名前 20 的 VOCs 物种/%

Table 2 Top 20 VOCs species of volume mixing ratio, OFP, and ·OH reactivity and their contribution/%

序号	组成		OFP		·OH 反应活性	
	物种	占比	物种	贡献率	物种	贡献率
1	甲醇	17.7	间/对-二甲苯	25.4	间/对-二甲苯	15.5
2	乙酸乙酯	9.5	甲苯	13.7	乙酸乙酯	8.5
3	MEK	7.9	邻-二甲苯	10.3	苯乙烯	7.7
4	甲苯	7.3	丙烯醛	4.7	丙烯醛	6.0
5	间/对-二甲苯	6.0	MEK	4.4	甲苯	5.6
6	丙酮	5.5	甲醛	3.5	乙醛	4.7
7	正丁烷	4.9	乙醛	3.3	邻-二甲苯	4.6
8	丙烷	4.5	乙苯	2.8	反式-2-丁烯	3.5
9	异丁烷	2.7	乙酸乙酯	2.7	单萜烯	3.4
10	邻-二甲苯	2.5	MIBK	2.1	MEK	3.2
11	甲醛	2.4	甲醇	1.9	甲醛	3.2
12	氢氰酸	2.4	乙烯	1.8	苯酚	2.7
13	乙醛	2.2	正丁烷	1.7	甲醇	2.2
14	丙烯醛	2.2	反式-2-丁烯	1.6	甲酚	1.9
15	乙烷	2.0	1,2,4-三甲基苯	1.4	正辛烷	1.8
16	乙苯	1.7	MVK + MACR	1.1	异戊二烯	1.7
17	正辛烷	1.6	戊酮	1.0	乙苯	1.7
18	异戊烷	1.6	异丁烷	1.0	正丁烷	1.6
19	乙炔	1.6	丙烯	0.9	乙烯	1.5
20	乙烯	1.4	苯酚	0.9	丙烯	1.5

2.2 VOCs 特征比值分析

一些典型 VOCs 物种的体积分数比值具有指示剂,可用于解析其来源以及提供光化学和大气迁移过程等重要信息^[59~61].

甲苯与苯的体积分数比值(T/B)通常用作评估交通排放及工业活动排放的指标,以往的研究表明甲苯和二甲苯普遍来源于机动车尾气、溶剂使用和工业活动排放等^[50,62].世界上许多城市地区车辆排放特征中 T/B 通常在 2.0 左右^[35],当 T/B 大于 5 甚

至更高时,可认为受工业排放的强烈影响^[35,63].这是由于甲苯被广泛用作溶剂,而苯在工业中的使用相对较少,因此典型溶剂使用源排放的气团能够显著提高环境大气中的 T/B^[34].在本次观测期间 T/B 的平均值为 24.6 ± 20.4 ,较高的 T/B 表明了溶剂使用源对环境大气中 VOCs 组分的严重影响.

通常认为正丁烷与丙烷来自液化石油气逸散和石化工业^[17,64,65],但一些轻工业活动中也可能会排放正丁烷与丙烷,例如塑料注塑和焊接工艺过程存

在高体积分数的正丁烷与丙烷的排放^[27]. 丙烷与正丁烷的比值可以进一步指示两种物种的来源, 观测期间丙烷/正丁烷的平均值为 1.0 ± 0.4 , 高于在汽油车尾气中的比值(0.49), 低于液化石油气中的比值(6.12)^[65], 而与塑料注塑(1.28)^[27]、印刷车间(0.96)^[60]的排放比值比较接近. 因此, 这两种小分子烷烃可能主要来自工业活动的排放, 例如注塑和印刷行业, 本次观测的丙烷与正丁烷比值结果更可能代表了复杂工业排放环境下的特征比值.

其中乙酸乙酯和甲苯是化工行业中广泛使用的溶剂^[15], 也在印刷、家具制造、涂料制造和制鞋等

行业中排放显著^[26,41]. 乙酸乙酯与甲苯在研究地区被认为主要来自一次源排放, 并且体积分数具有较高的相关性($r=0.75$). 本研究期间乙酸乙酯与甲苯的体积分数比值为 1.6, 接近家具喷涂的排放比值(1.85 ~ 2.19), 介于印刷(0.09 ~ 18.25)和制鞋(0.31 ~ 2.89)的排放比值区间^[26], 这表明乙酸乙酯和甲苯主要来自当地的溶剂使用源排放贡献.

2.3 VOCs 的日变化特征

大气污染物的昼夜变化特征是气象条件、污染源排放和大气化学反应的综合结果, 图 4 中展示了本次观测中典型 VOCs 物种的日变化曲线.

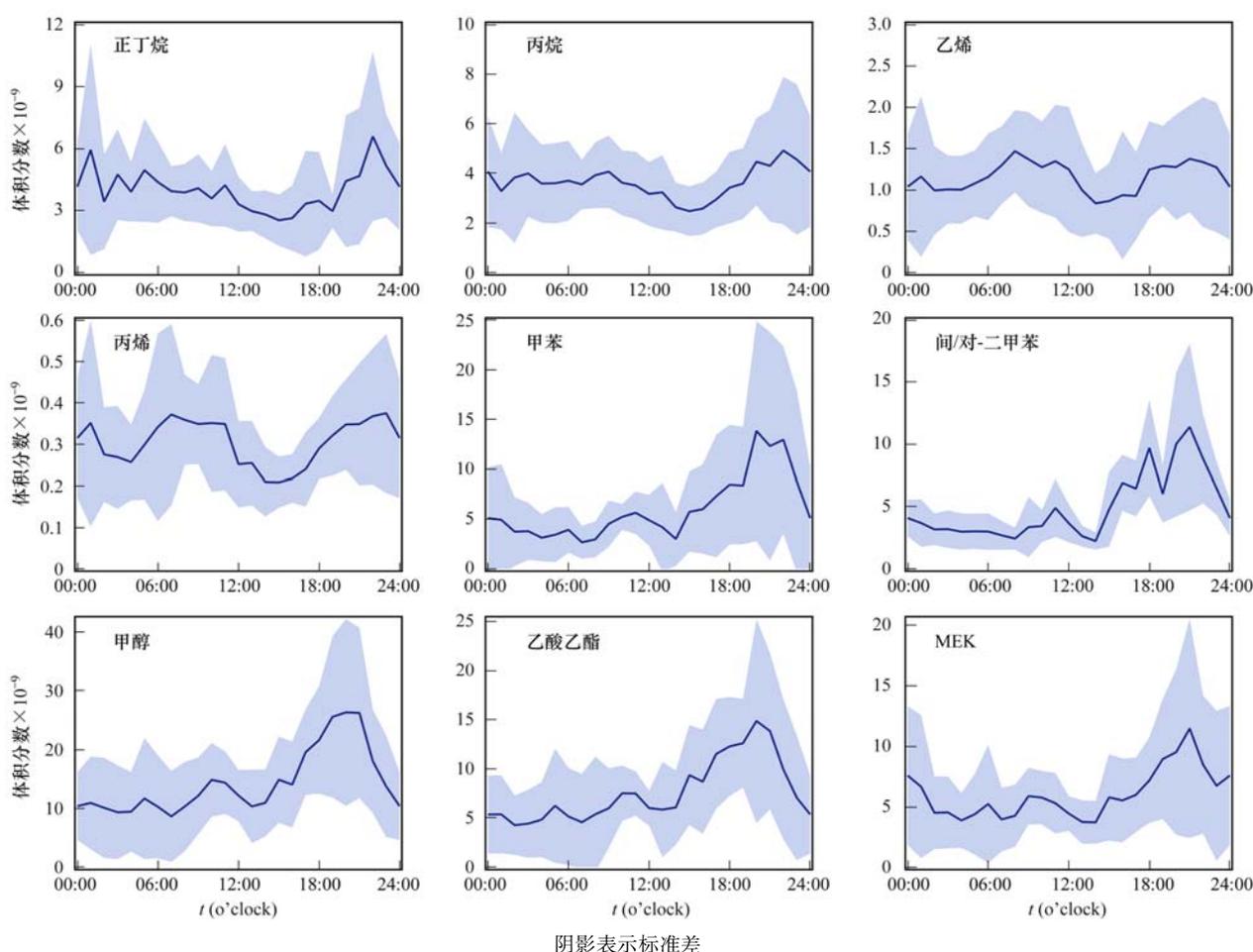


图 4 观测期间典型 VOCs 日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variations in representative VOCs species during the observation period

丙烷与正丁烷的日变化呈现整体平稳和中午体积分数降低的特点, 中午时段的体积分数下降可能是由于边界层升高时污染物在垂直方向上的稀释和中午较为剧烈的光化学反应共同导致^[63]. 由于本研究的观测地点附近没有石化工业区, 因此丙烷与正丁烷可能来自液化石油气逸散或塑料制造业等相关排放^[19]. 而液化石油气主要用于居民烹饪^[65], 但在烹饪时间段未观测到明显的峰值出现, 因此小分子烷烃更可能来自工业活动排放, 例如塑料注塑等工

艺过程, 这与根据 VOCs 比值判断的结果相同. 涉及这类工艺的工厂通常 24 h 连续运转, 与丙烷与正丁烷的日变化曲线波动相对较小吻合.

乙烯与丙烯表现出明显的双峰型日变化特征, 峰值出现在早晚高峰时段, 而在正午和夜间时段体积分数出现低值并且大小基本相等, 这种日变化特征表明乙烯和丙烯在研究地区主要受机动车排放影响. 乙炔通常被认为是机动车排放的示踪物^[50], 在本次观测中乙炔和乙烯之间存在良好的相关性($r =$

0.82), 表明它们可能同样来自机动车排放源^[62,66], 乙烯和丙烯的日变化峰值低于北京(2.02×10^{-9} 、 0.46×10^{-9})^[67] 和广州(2.99×10^{-9} 、 1.32×10^{-9})^[68] 观测的体积分数均值, 这可能与研究地区机动车保有量相对较低有关。

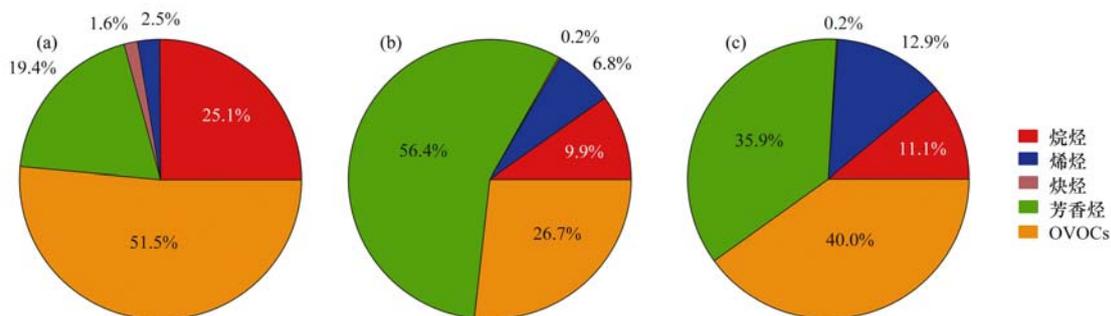
甲苯、二甲苯、甲醇、乙酸乙酯和 MEK 相似的日变化表明它们来自相同的排放源贡献, 其日变化特点是具有两个峰值, 分别对应 09:00 和 21:00 前后, 并且 21:00 的体积分数峰值远高于 09:00 的体积分数峰值。在这里考虑了 3 种可能原因: ①夜间 VOCs 的化学消耗途径相对白天减弱。上午 VOCs 可通过化学反应或光解被大量消耗, 而这种消耗机制在夜间较弱, 从而造成在夜间 VOCs 更容易积累的现象^[69]。但监测点靠近排放源, 污染物可能不具备足够的反应时间^[17,65]。②夜间边界层下降导致的局地污染积累可能会造成 VOCs 在近地面的体积分数增长^[70]。边界层的物理作用通常会影响到几乎所有的一次排放的 VOCs, 但烷烃和烯烃却未出现类似芳香烃和 OVOCs 的日变化特征, 因此边界层降低可能并不是主要原因。③排放源具有明显的排放强度日变化, 即排放活动主要集中在下午至夜间。物种的体积分数水平在 16:00 左右达到下午的峰值水平, 继续积累至 21:00 后出现了快速的体积分数下降, 说明排放源在这个时间段可能存在 1d 中最强烈的芳香烃和 OVOCs 排放活动。以上纳入考虑的 3 个原因可能共同作用导致部分芳香烃和 OVOCs 出现特殊的日变化特征, 但推测最重要的原因是相关排放源的排放强度在 16:00~21:00 大幅度升高。发现排放强度具有日间变化对工业地区 VOCs 监测研究及管控等工作具有一定的启示意义, 例如对 VOCs 进行管控时考虑日间排放强度变化可能引起的环境效应。

2.4 VOCs 的臭氧生成潜势与 ·OH 反应活性分析

本研究基于观测期间的 VOCs 测量结果, 进行了 VOCs 物种的 OFP 和 ·OH 反应活性的计算及分析, 用于评估 VOCs 物种对二次污染物形成的贡献。

观测期间 OFP 均值为 $(334.1 \pm 45.4) \times 10^{-9}$, 表 2 中总结了对 OFP 贡献率前 20 的物种, 其中间/对二甲苯、甲苯、邻二甲苯、甲醛、丙烯醛、MEK 和乙醛共贡献了超过 65% 的 OFP。此外对 OFP 贡献率前 10 的物种均为芳香烃和 OVOCs, 表明研究地区芳香烃和 OVOCs 对臭氧二次生成的重要性。在图 5(b) 中展示了 5 种 VOCs 组分对 OFP 的贡献率, 芳香烃与 OVOCs 对 OFP 的贡献率最大, 分别是 56.4% 和 26.7%。部分研究强调芳香烃对 VOCs 的臭氧生成潜势的重要贡献^[71,72], 这是由于芳香烃具有的高碳数和高 MIR 值, 比如在广州地区发现芳香烃贡献了 70% 的 OFP^[73]。研究地区烯烃对 OFP 的贡献率仅有 6.8%, 不同于部分研究中烯烃对 OFP 存在重要贡献的结论^[74], 烯烃对 OFP 的贡献率相对较低, 主要是由于其环境体积分数较低的原因。此外, 烷烃和炔烃的贡献率仅为 9.9% 和 0.2%。OFP 评估结果表明控制该地区的芳香烃和 OVOCs 来源对于缓解当地及周边地区臭氧污染非常重要。

基于 ·OH 反应活性的研究分析, 发现观测期间 VOCs 的 ·OH 总反应活性的范围为 $1.5 \sim 44.2 \text{ s}^{-1}$, 平均值为 $(14.8 \pm 7.8) \text{ s}^{-1}$, 高于城市地区的研究结果, 如广州(10.9 s^{-1})、上海(6.2 s^{-1})、北京(7.1 s^{-1})、南京(10.4 s^{-1}) 和重庆(8.9 s^{-1})^[22,73]。表 2 中列举了对 ·OH 反应活性贡献率前 20 的物种, 其中间/对二甲苯、乙酸乙酯、苯乙烯和丙烯醛是最重要的 ·OH 反应活性贡献物种。总 ·OH 反应活性的日变化曲线如图 6 所示, 表现出上午和夜间双峰型的特征, 夜间总 ·OH 反应活性峰值达到上午峰值的 2 倍, 并且主要由芳香烃和 OVOCs 物种贡献。OVOCs 体积分数与总 ·OH 反应活性的小时均值具有较高的相关性($r = 0.90$), 这表明了 OVOCs 对 ·OH 反应活性的重要影响。图 5(c) 展示了 VOCs 组分对总 ·OH 反应活性的贡献率, 其中 OVOCs 与芳香烃的贡献率最大, 分别为 40.0% 和 35.9%, 烷烃、烯烃和炔烃仅占总 ·OH 反应活性的 11.1%、12.9% 和 0.2%。



(a) VOCs 各组分的组成占比, (b) VOCs 各组分对总 OFP 的贡献率, (c) VOCs 各组分对总 ·OH 反应活性的贡献率

图 5 各 VOCs 组分的组成占比及对总 OFP 和总 ·OH 反应活性的贡献率

Fig. 5 Contribution of alkanes, alkenes, alkynes, aromatics, and OVOCs to volume mixing ratio, OFP and ·OH reactivity

在研究地区 OVOCs 对 $\cdot\text{OH}$ 反应活性的贡献率 (13.0% ~ 62.3%) 高于南京工业地区 (9% ~ 17%)^[21], 这是由于本研究检测的 OVOCs 物种种类更多, 并且 OVOCs 物种在研究地区体积分数水平相对更高. 尽管 OVOCs 反应速率常数普遍低于其他烃类, 但工业地区高丰度的 OVOCs 对总反应活性的贡献仍非常显著. OVOCs 的 $\cdot\text{OH}$ 反应活性较高, 说明其清除过程需要消耗大量的氧化剂 ($\cdot\text{OH}$), 并且在氧化降解过程中可能生成臭氧和 SOA, 这些数据从 $\cdot\text{OH}$ 反应活性的角度强调了 OVOCs 在二次污染形成中所具有的重要作用, 此外 OVOCs 可能是以往研究中臭氧或 SOA 前体物缺失的重要组成部分, 未来对于工业地区 $\cdot\text{OH}$ 反应活性的研究中需要更加重视 OVOCs 物种.

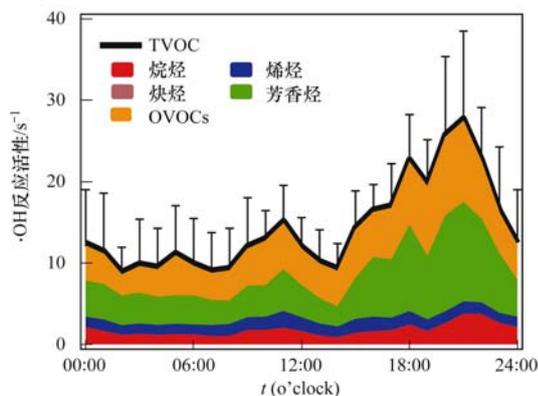


图6 观测期间 VOCs 总 $\cdot\text{OH}$ 反应活性日变化

Fig. 6 Diurnal profiles of total $\cdot\text{OH}$ reactivity of VOCs during the observation period

3 结论

(1) 本研究基于 PTR-ToF-MS 和 GC-FID 在线测量技术, 在珠三角典型工业地区进行了全面的 VOCs 测量. 本研究期间 φ (TVOC) 平均值为 81.9×10^{-9} , OVOCs 和芳香烃是工业地区环境大气中 TVOC 的主要组成成分.

(2) 根据源解析结果, 研究地区重要的芳香烃及 OVOCs 物种都受到溶剂使用源一次排放的直接影响, $\text{C}_2 \sim \text{C}_3$ 烯烃主要受到机动车排放影响.

(3) 根据物种日变化特征分析发现, 工业活动的污染物排放强度可能在 1 d 中有所变化, 排放活动更可能集中在 16:00 ~ 21:00 之间.

(4) 值得注意的是, 工业地区大气环境中的 OVOCs 占 VOCs 总体积分数的 51.5%, 此外还贡献了 40.0% 的总 $\cdot\text{OH}$ 反应活性以及 26.7% 的总 OFP, 这说明 OVOCs 在工业区具有巨大排放量以及对二次污染形成的重要贡献.

(5) 考虑到 OVOCs 的权重会在气团老化后进

一步增加, OVOCs 在工业园区和下风向地区的二次污染形成过程中将扮演更加重要角色. 因此未来有必要加强对工业地区及下风向地区 OVOCs 组分及化学过程的关注, 从而科学调整空气污染控制策略.

参考文献:

- [1] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103** (12): 4605-4638.
- [2] Mozaffar A, Zhang Y L, Fan M Y, *et al.* Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O_3 and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104923.
- [3] Qu H, Wang Y H, Zhang R X, *et al.* Chemical production of oxygenated volatile organic compounds strongly enhances Boundary-Layer oxidation chemistry and ozone production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55** (20): 13718-13727.
- [4] Sheng J J, Zhao D L, Ding D P, *et al.* Characterizing the level, photochemical reactivity, emission, and source contribution of the volatile organic compounds based on PTR-TOF-MS during winter haze period in Beijing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2018, **212**: 54-63.
- [5] Ehn M, Thornton J A, Kleist E, *et al.* A large source of low-volatility secondary organic aerosol [J]. *Nature*, 2014, **506** (7489): 476-479.
- [6] He Z R, Wang X M, Ling Z H, *et al.* Contributions of different anthropogenic volatile organic compound sources to ozone formation at a receptor site in the Pearl River Delta region and its policy implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19** (13): 8801-8816.
- [7] Kuang Y, He Y, Xu W Y, *et al.* Photochemical aqueous-phase reactions induce rapid daytime formation of oxygenated organic aerosol on the North China Plain [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54** (7): 3849-3860.
- [8] Wang Y M, Wang Y H, Tang G Q, *et al.* High gaseous carbonyl concentrations in the upper boundary layer in Shijiazhuang, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **799**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149438.
- [9] Zhao R J, Yin B H, Zhang N, *et al.* Aircraft-based observation of gaseous pollutants in the lower troposphere over the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144818.
- [10] Dong Y M, Li J, Guo J P, *et al.* The impact of synoptic patterns on summertime ozone pollution in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **735**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139559.
- [11] Sharma N, Agarwal A K, Eastwood P, *et al.* Air pollution and control (Energy, Environment, and Sustainability) [M]. Singapore: Springer, 2018.
- [12] Yáñez-Serrano A M, Nölscher A C, Boutsoukidis E, *et al.* Monoterpene chemical speciation in a tropical rainforest: variation with season, height, and time of day at the Amazon Tall Tower Observatory (ATTO) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18** (5): 3403-3418.
- [13] Sun W, Shao M, Granier C, *et al.* Long-Term trends of anthropogenic SO_2 , NO_x , CO, and NMVOCs emissions in China [J]. *Earth's Future*, 2018, **6** (8): 1112-1133.
- [14] Li B W, Ho S S H, Li X H, *et al.* A comprehensive review on anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emission

- estimates in China: comparison and outlook [J]. *Environment International*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106710.
- [15] Huang Y Z, Che X, Jin D, *et al.* Mobile monitoring of VOCs and source identification using two direct-inlet MSs in a large fine and petroleum chemical industrial park [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **823**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153615.
- [16] Jia C H, Mao X X, Huang T, *et al.* Non-methane hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, Northwest China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **169**: 225-236.
- [17] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176-177**: 64-74.
- [18] Sharma S, Giri B, Patel K S. Ambient volatile organic compounds in the atmosphere of industrial central India [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2016, **73**(4): 381-395.
- [19] Bari A, Kindziarski W B, Spink D. Twelve-year trends in ambient concentrations of volatile organic compounds in a community of the Alberta Oil Sands Region, Canada [J]. *Environment International*, 2016, **91**: 40-50.
- [20] Kim M J, Seo Y K, Kim J H, *et al.* Impact of industrial activities on atmospheric volatile organic compounds in Sihwa-Banwol, the largest industrial area in South Korea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(23): 28912-28930.
- [21] Pinthong N, Thepanondh S, Kondo A. Source identification of VOCs and their environmental health risk in a petrochemical industrial area [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2022, **22**(2), doi: 10.4209/aaqr.210064.
- [22] Mozaffar A, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Measurement report: high contributions of halocarbon and aromatic compounds to atmospheric volatile organic compounds in an industrial area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(23): 18087-18099.
- [23] Zhang Z J, Yan X Y, Gao F L, *et al.* Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 452-461.
- [24] Shi J W, Deng H, Bai Z P, *et al.* Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **515-516**: 101-108.
- [25] 叶露, 郇菁菁, 俞华明. 汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 624-633.
- Ye L, Tai Q Q, Yu H M. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the automobile industrial park of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 624-633.
- [26] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 127-136.
- [27] Tang J H, Chu K W, Chan L Y, *et al.* Non-methane hydrocarbon emission profiles from printing and electronic industrial processes and its implications on the ambient atmosphere in the Pearl River Delta, South China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, **5**(1): 151-160.
- [28] 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 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.
- [29] Na K, Kim Y P, Moon K C, *et al.* Concentrations of volatile organic compounds in an industrial area of Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(15): 2747-2756.
- [30] Liu Y, Shao M, Lu S H, *et al.* Volatile organic compound (VOC) measurements in the pearl river delta (PRD) region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(6): 1531-1545.
- [31] Tang J H, Chan L Y, Chan C Y, *et al.* Characteristics and diurnal variations of NMHCs at urban, suburban, and rural sites in the Pearl River Delta and a remote site in South China [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(38): 8620-8632.
- [32] Pei C L, Yang W Q, Zhang Y L, *et al.* Decrease in ambient volatile organic compounds during the COVID-19 lockdown period in the Pearl River Delta region, south China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **823**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153720.
- [33] Yuan B, Chen W J, Shao M, *et al.* Measurements of ambient hydrocarbons and carbonyls in the Pearl River Delta (PRD), China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **116**: 93-104.
- [34] Chan L Y, Chu K W, Zou S C, *et al.* Characteristics of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in industrial, industrial-urban, and industrial-suburban atmospheres of the Pearl River Delta (PRD) region of south China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, **111**(D11), doi: 10.1029/2005JD006481.
- [35] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban centers of the Pearl River Delta (PRD) region; Guangzhou and Dongguan [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4393-4408.
- [36] Mo Z W, Shao M, Liu Y, *et al.* Species-specified VOC emissions derived from a gridded study in the Pearl River Delta, China [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-21296-y.
- [37] Yin S S, Zheng J Y, Lu Q, *et al.* A refined 2010-based VOC emission inventory and its improvement on modeling regional ozone in the Pearl River Delta Region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **514**: 426-438.
- [38] Yuan B, Koss A R, Warneke C, *et al.* Proton-transfer-reaction mass spectrometry: applications in atmospheric sciences [J]. *Chemical Reviews*, 2017, **117**(21): 13187-13229.
- [39] González-Méndez R, Watts P, Olivenza-León D, *et al.* Enhancement of compound selectivity using a radio frequency ion-funnel proton transfer reaction mass spectrometer: improved specificity for explosive compounds [J]. *Analytical Chemistry*, 2016, **88**(21): 10624-10630.
- [40] Tanimoto H, Kameyama S, Iwata T, *et al.* Measurement of air-sea exchange of dimethyl sulfide and acetone by PTR-MS coupled with gradient flux technique [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(1): 526-533.
- [41] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China [J].

- Science of the Total Environment, 2015, **530-531**: 393-402.
- [42] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications[EB/OL]. <https://intra.engr.ucr.edu/~carter/SAPRC/MIR10.pdf>, 2010-01-28.
- [43] Yang Y D, Shao M, Wang X M, *et al.* Towards a quantitative understanding of total OH reactivity: a review[J]. Atmospheric Environment, 2016, **134**: 147-161.
- [44] Wu C H, Wang C M, Wang S H, *et al.* Measurement report: important contributions of oxygenated compounds to emissions and chemistry of volatile organic compounds in urban air [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, **20** (23): 14769-14785.
- [45] Pfannerstill E Y, Reijrink N G, Edtbauer A, *et al.* Total OH reactivity over the Amazon rainforest: variability with temperature, wind, rain, altitude, time of day, season, and an overall budget closure[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, **21**(8): 6231-6256.
- [46] 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.
- [47] Mellouki A, Ammann M, Cox R A, *et al.* Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Volume VIII- gas-phase reactions of organic species with four, or more, carbon atoms ($\geq C_4$) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, **21**(6): 4797-4808.
- [48] Liu Y F, Song M D, Liu X G, *et al.* Characterization and sources of volatile organic compounds (VOCs) and their related changes during ozone pollution days in 2016 in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113599.
- [49] Hu L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **192**: 55-71.
- [50] Song M D, Tan Q W, Feng M, *et al.* Source apportionment and secondary transformation of atmospheric nonmethane hydrocarbons in Chengdu, southwest China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, **123**(17): 9741-9763.
- [51] Li Y D, Yin S S, Yu S J, *et al.* Characteristics, source apportionment and health risks of ambient VOCs during high ozone period at an urban site in central plain, China [J]. Chemosphere, 2020, **250**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126283.
- [52] 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 等. 杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5306-5315.
- Jing S A, Gao Y Q, Shen J D, *et al.* Characteristics and reactivity of ambient VOCs in urban Hangzhou, China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5306-5315.
- [53] Huang Y, Ling Z H, Lee S C, *et al.* Characterization of volatile organic compounds at a roadside environment in Hong Kong: an investigation of influences after air pollution control strategies [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 809-818.
- [54] Zhang Y C, Li R, Fu H B, *et al.* Observation and analysis of atmospheric volatile organic compounds in a typical petrochemical area in Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **71**: 233-248.
- [55] 库盈盈, 任万辉, 苏枫枫, 等. 沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5201-5209.
- Ku Y Y, Ren W H, Su C C, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in different functional zones of Shenyang, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5201-5209.
- [56] 武彩虹. 广州城市地区大气挥发性有机物(VOCs)反应活性贡献研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.
- Wu C H. Reactivity contribution of volatile organic compounds (VOCs) in Guangzhou urban region [D]. Guangzhou: Jinan University, 2020.
- [57] Huang X F, Zhang B, Xia S Y, *et al.* Sources of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) in urban atmospheres in North and South China [J]. Environmental Pollution, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114152.
- [58] Millet D B, Donahue N M, Pandis S N, *et al.* Atmospheric volatile organic compound measurements during the Pittsburgh Air Quality Study: results, interpretation, and quantification of primary and secondary contributions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, **110** (D7), doi: 10.1029/2004JD004601.
- [59] Parrish D D, Stohl A, Forster C, *et al.* Effects of mixing on evolution of hydrocarbon ratios in the troposphere [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, **112** (D10), doi: 10.1029/2006JD007583.
- [60] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [61] Bari A, Kindzierski W B. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: sources and screening health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 627-640.
- [62] 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.
- [63] Kumar A, Singh D, Kumar K, *et al.* Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India; temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, **613-614**: 492-501.
- [64] 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.
- [65] Mo Z W, Huang S, Yuan B, *et al.* Tower-based measurements of NMHCs and OVOCs in the Pearl River Delta: vertical distribution, source analysis and chemical reactivity [J]. Environmental Pollution, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118454.
- [66] He X J, Yuan B, Wu C H, *et al.* Volatile organic compounds in wintertime North China Plain: insights from measurements of Proton Transfer Reaction Time-of-Flight Mass Spectrometer (PTR-ToF-MS) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, **114**: 98-114.
- [67] Li J, Wu R R, Li Y Q, *et al.* Effects of rigorous emission controls on reducing ambient volatile organic compounds in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **557-558**: 531-541.
- [68] Zou Y, Deng X J, Zhu D, *et al.* Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO_x and O₃ at a suburban site in Guangzhou, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(12): 6625-6636.

- [69] 王思行, 彭钰雯, 齐吉朋, 等. 挥发性有机物(VOCs)的不同化学去除途径: 城市与区域站点的对比[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(7): 2311-2322.
Wang S H, Peng Y W, Qi J P, *et al.* Different chemical removal pathways of volatile organic compounds (VOCs): comparison of urban and regional sites [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(7): 2311-2322.
- [70] Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, *et al.* Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(4): 2459-2475.
- [71] Louie P K K, Ho J W K, Tsang R C W, *et al.* VOCs and OVOCs distribution and control policy implications in Pearl River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 125-135.
- [72] 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**(19): 15239-15257.
- [73] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Daytime atmospheric oxidation capacity in four Chinese megacities during the photochemically polluted season: a case study based on box model simulation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(6): 3493-3513.
- [74] An J L, Su X Q, Zhang Y X, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds in Nanjing and Suzhou, Two urban sites in the Yangtze River Delta, China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, **78**(3): 416-429.



CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-cla, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-ni, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)