

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 ..... 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM<sub>2.5</sub>浓度调控模拟 ..... 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM<sub>2.5</sub>碳质组分特征 ..... 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM<sub>1</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 ..... 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 ..... 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 ..... 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 ..... 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 ..... 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 ..... 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 ..... 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 ..... 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 ..... 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 ..... 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 ..... 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 ..... 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 ..... 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 ..... 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 ..... 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 ..... 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 ..... 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 ..... 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 ..... 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 ..... 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 ..... 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 ..... 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 ..... 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 ..... 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 ..... 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 ..... 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 ..... 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 ..... 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 ..... 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 ..... 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 ..... 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 ..... 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 ..... 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 ..... 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 ..... 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的时空变化特征及影响因素 ..... 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 ..... 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 ..... 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 ..... 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 ..... 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

# 东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间 VOCs 组分特征及其来源

周振<sup>1</sup>, 肖林海<sup>2</sup>, 费蕾蕾<sup>3\*</sup>, 余纬<sup>1</sup>, 林满<sup>1</sup>, 黄筠钧<sup>2</sup>, 张智胜<sup>3</sup>, 陶俊<sup>2,3</sup>

(1. 广东省东莞生态环境监测站, 东莞 523009; 2. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 3. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655)

**摘要:** 为探讨东莞典型工业区夏季大气挥发性有机物 (VOCs) 污染特征及来源, 于 2020 年夏季在厚街镇对大气环境中 56 种 VOCs 开展了在线观测, 并同步收集了臭氧 (O<sub>3</sub>)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 和一氧化碳 (CO) 等气体污染物浓度和气象因子等资料, 在此基础上分析了 VOCs 总体积分数和主要物种体积分数特征, 进一步估算了主要 VOCs 物种对臭氧生成潜势的贡献和不同臭氧浓度下 VOCs 的主要污染源贡献率。结果表明, 观测期间 56 种 VOCs 的体积分数平均值为  $53.1 \times 10^{-9}$ , 其中  $\varphi$  (芳香烃)、 $\varphi$  (烷烃)、 $\varphi$  (烯烃) 和  $\varphi$  (炔烃) 分别为  $24.7 \times 10^{-9}$ 、 $23.7 \times 10^{-9}$ 、 $3.9 \times 10^{-9}$  和  $0.7 \times 10^{-9}$ 。与非臭氧污染期间相比, 臭氧污染期间  $\varphi$  (芳香烃)、 $\varphi$  (烷烃)、 $\varphi$  (烯烃) 和  $\varphi$  (炔烃) 分别上升约 10%、43%、38% 和 98%。无论是臭氧污染还是非臭氧污染期间, 芳香烃对臭氧生成潜势的贡献率均最大, 其次为烷烃、烯烃和炔烃。整个夏季观测期间, 溶剂源、液化石油气泄漏、化石燃料燃烧源和油气挥发源对 VOCs 的贡献率分别为  $60\% \pm 20\%$ 、 $16\% \pm 11\%$ 、 $15\% \pm 11\%$  和  $9\% \pm 6\%$ ; 臭氧污染期间, 溶剂源的贡献率下降到 44%, 而液化石油气泄漏和油气挥发源的贡献率分别上升到 21% 和 16%。

**关键词:** 在线监测; 芳香烃; 烷烃; 臭氧生成潜势 (OFP); 溶剂源

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4497-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111285

## Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer

ZHOU Zhen<sup>1</sup>, XIAO Lin-hai<sup>2</sup>, FEI Lei-lei<sup>3\*</sup>, YU Wei<sup>1</sup>, LIN Man<sup>1</sup>, HUANG Jun-jun<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-sheng<sup>3</sup>, TAO Jun<sup>2,3</sup>

(1. Dongguan Ecology and Environment Monitoring Station of Guangdong Province, Dongguan 523009, China; 2. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) in a typical industrial zone in Dongguan, 56 VOCs species were continuously measured in Houjie Town of Dongguan in summer of 2020. In addition, mass concentrations of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO and meteorological data were synchronously collected. Then, characteristics of total VOCs and major species, the contributions of major VOCs species to ozone formation potential (OFP), and source apportionment of VOCs under the different ozone concentrations were discussed. The mean mixing ratio of VOCs was  $53.1 \times 10^{-9}$  including aromatics ( $24.7 \times 10^{-9}$ ), alkanes ( $23.7 \times 10^{-9}$ ), alkenes ( $3.9 \times 10^{-9}$ ), and alkynes ( $0.7 \times 10^{-9}$ ). The mean mixing ratios of aromatics, alkanes, alkenes, and alkynes increased approximately 10%, 43%, 38%, and 98% during the period of ozone pollution, respectively, compared with those during the period of non-ozone pollution. Aromatics contributed the most to OFP during the periods of both ozone pollution and non-ozone pollution, followed by alkanes, alkenes, and alkynes. Solvent sources, liquefied petroleum gas (LPG) leakage, fossil fuel combustion, and hydrocarbon volatilization were resolved using the PMF model, which accounted for  $60\% \pm 20\%$ ,  $16\% \pm 11\%$ ,  $15\% \pm 11\%$ , and  $9\% \pm 6\%$  of total VOCs, respectively. During the period of ozone pollution, the contribution of solvent sources to the total VOCs decreased to 44%, whereas that of LPG leakage and hydrocarbon volatilization increased to 21% and 16%, respectively.

**Key words:** online measurement; aromatics; alkane; ozone formation potential (OFP); solvent source

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是指参与大气光化学反应的有机化合物, 包括非甲烷烃类 (烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃等)、含氧有机物 (醛、酮、醇、醚等)、含氯有机物、含氮有机物和含硫有机物等<sup>[1]</sup>。VOCs 是臭氧 (O<sub>3</sub>) 和二次有机气溶胶 (second organic aerosol, SOA) 生成的重要前体物之一。VOCs 可参与光化学反应导致臭氧污染, 也可通过气-固转化为 SOA, 进而导致细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 污染<sup>[2]</sup>。此外, 部分有毒有害如 VOCs 物种 (如苯、甲苯、甲醛、乙醛和丙烯醛等) 可通过呼吸道和皮肤等进入人体, 进而影响人体健康<sup>[3]</sup>。

因此, 开展环境空气中 VOCs 污染特征及来源解析研究, 对于有针对性地提出科学可行的 VOCs 管控措施, 切实改善区域 O<sub>3</sub> 污染具有重要意义。

随着我国城市地区臭氧污染态势日益严重<sup>[4]</sup>, 近年来很多学者在城市地区、城市郊区和农村地区开展了大量关于 VOCs 污染特征的观测研究<sup>[5~13]</sup>。有研究显示, 京津冀和长三角 (如北京和上海等) 特

收稿日期: 2021-11-28; 修订日期: 2022-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41875160)

作者简介: 周振 (1985~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气环境监测和大气污染成因, E-mail: 61810955@qq.com

\* 通信作者, E-mail: feileilei@scies.org

大城市 VOCs 主要来源于交通源,烷烃是优势物种<sup>[14~16]</sup>.成渝地区(如成都)城市地区 VOCs 主要来源是汽车尾气,其主要物种是烷烃和乙炔<sup>[17]</sup>.此外,对山东德州等农村地区的研究结果表明生物质燃烧对当地大气 VOCs 的组成有显著的影响,其主要物种为甲苯、异戊二烯、乙烯和丙烯等<sup>[18]</sup>.作为我国臭氧污染最为严重的地区之一,珠三角地区也开展了大量的 VOCs 外场观测研究.王伯光等<sup>[2]</sup>分析了珠三角 VOCs 的时空分布特征,发现广州和东莞的  $\varphi(\text{VOCs})$  水平较高,烷烃和单环芳烃是其主要的贡献物种.朱少峰等<sup>[19]</sup>在深圳的研究发现秋冬季  $\varphi(\text{VOCs})$  显著高于春夏季,且芳香烃对臭氧生成潜势贡献最大.古颖纲等<sup>[20]</sup>在广州雨季研究发现 VOCs 主要的来源是交通源、溶剂使用源和石化源.总体来讲,珠三角涉 VOCs 来源解析的研究主要集中在广州和深圳,在工业较为发达且臭氧浓度较高的东莞的研究还较为缺乏.

已有的研究发现东莞城区 VOCs 工业源溶剂源的贡献率高达 37%,其特征物种甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯的体积分数显著高于珠三角其它城市<sup>[21,22]</sup>.东莞厚街镇位于东莞城区西南部,夏季

位于城区的上风向.全镇拥有各类企业约 3 万家,主要以家具、制鞋、印刷和玩具等 4 个重点行业为主,涉及大量工业溶剂使用.为了进一步了解厚街镇 VOCs 污染特征及其来源,本研究选取臭氧污染较严重的夏季,在厚街镇工业溶剂源使用量较大的工业企业集中区开展了为期 3 个月的 VOCs 连续在线观测.在此基础上分析了厚街镇环境大气中 VOCs 优势物种的污染特征、臭氧生成潜势及其来源,以期对厚街镇进一步开展 VOCs 精准管控提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测点位和监测时间

VOCs 监测地点位于厚街镇涌口社区居委会楼顶,采样高度约 20 m.点位东、南和西方向 1 km 范围内密集分布着约 300 家以家具制造企业为主的中小企业,在家具生产过程中大量使用油漆等溶剂.厚街镇常规大气监测站位于体育中心楼顶.两站点相距约 3.8 km,相对位置见图 1.本研究收集了两个站点 2020 年夏季(6 月 1 日至 8 月 31 日) VOCs、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub> 和气象因子等数据.

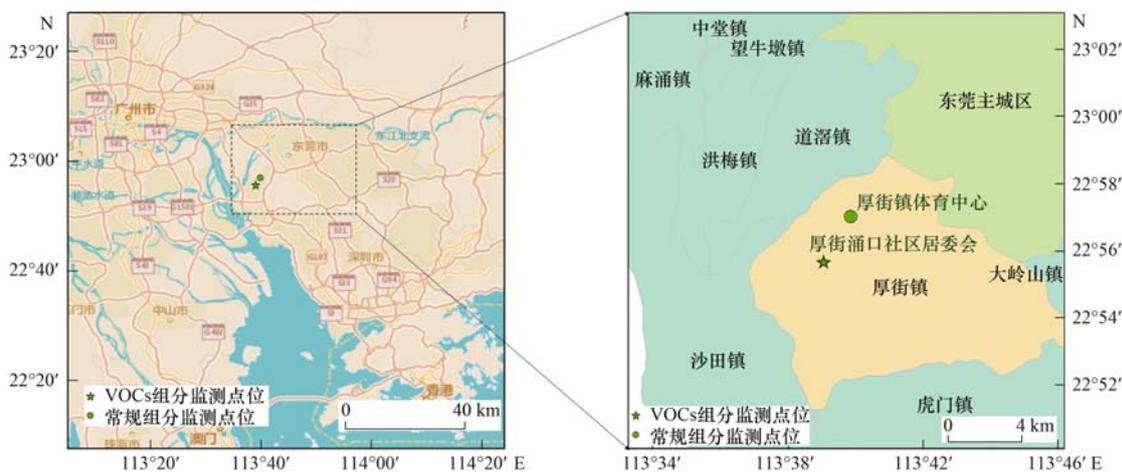


图 1 监测点位地理位置示意

Fig. 1 Locations of monitoring stations

### 1.2 VOCs、NO<sub>x</sub>、CO 和 O<sub>3</sub> 监测仪器

使用在线气相色谱仪-质谱仪(airmo SCANXPRT, Chromatotec, 法国)对 VOCs 进行实时在线监测,监测的 56 种 VOCs 主要包括烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃,时间分辨率为 1 h.该监测系统严格按照《国家环境空气监测网环境空气挥发性有机物连续自动监测质量控制技术规范(试行)》(总站气函[2019]785 号)中系统日常运维要求、系统质量控制要求、量值溯源和数据审核及处理的相关规范要求进行,确保数据准确可靠.关键系统质量控制措施主要包括以下几点:该监测系统自带校准系

统,由 3 根装有丁烷、己烷和苯的渗透管组成.在每日开始进样之前,该监测系统自动分析上述 3 种标准物质,运行频率为 24 h.每周使用混合标气(SCOTT, 美国)对监测的 56 种 VOCs 进行标定,仪器误差控制在 10% 以内.

NO<sub>x</sub>、CO 和 O<sub>3</sub> 分别采用氮氧化物分析仪(42i, Thermo, 美国)、一氧化碳分析仪(48i, Thermo, 美国)和臭氧分析仪(49i, Thermo, 美国)进行测量,采样时间分辨率为 5 min.该常规大气污染物监测系统严格按照《环境空气气态污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、CO)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ

818-2018) 进行日常运维和质量控制, 确保数据质量准确可靠。

### 1.3 臭氧生成潜势计算方法

臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP)<sup>[23]</sup> 基于各 VOCs 物种的大气环境浓度和最大增量反应活性 (maximum incremental reactivity, MIR), 计算公式如下:

$$OFP_i = [VOCs]_i \times MIR_i$$

式中,  $i$  为具体 VOCs 物种;  $OFP_i$  为某种 VOC 的臭氧生成潜势;  $[VOCs]_i$  为某种 VOC 的大气环境浓度;  $MIR_i$  为该物种生成臭氧的最大增量反应活性<sup>[24]</sup>。

### 1.4 PMF 源解析方法

采用美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 的正交矩阵因子分解 (positive matrix factorization, PMF) 模型 (version 5.0) 计算了厚街镇 VOCs 的主要贡献源及其贡献率。本研究实测了厚街镇 56 种 VOCs, 但由于部分物种缺测或低于检出限被剔除, 本研究最终选取了 26 种主要 VOCs 进行来源解析, 其占 56 种  $\varphi(VOCs)$  的 90% 以上, 因此, 这 26 种 VOCs 解析的来源及其贡献率可代表实测

的 56 种 VOCs 来源。

## 2 结果与讨论

### 2.1 VOCs 体积分数水平和组成特征

本研究主要对 56 种 VOCs 开展了在线监测, 其中包括 29 种烷烃、11 种烯烃、1 种炔烃和 15 种芳香烃。观测期间  $\varphi(VOCs)$  平均值为  $53.1 \times 10^{-9}$ ,  $\varphi(\text{芳香烃})$ 、 $\varphi(\text{烷烃})$ 、 $\varphi(\text{烯烃})$  和  $\varphi(\text{炔烃})$  分别为  $24.7 \times 10^{-9}$ 、 $23.8 \times 10^{-9}$ 、 $3.9 \times 10^{-9}$  和  $0.7 \times 10^{-9}$ , 分别占  $\varphi(VOCs)$  的 47%、45%、7% 和 1%。由此可见, 东莞市厚街镇工业集中区大气环境中 VOCs 主要的物种是芳香烃和烷烃。与其它城市对比<sup>[25-30]</sup>, 东莞市厚街镇工业集中区夏季  $\varphi(VOCs)$  略高于北京, 显著高于成都、广州、珠海、上海和武汉等城市。 $\varphi(\text{烷烃})$  与珠三角地区的广州和珠海基本相当, 但是显著高于北京、成都、上海和武汉等城市 (表 1)。 $\varphi(\text{烯烃})$  和  $\varphi(\text{炔烃})$  较低, 且与其它城市总体相当。值得注意的是,  $\varphi(\text{芳香烃})$  显著高于其它城市, 是其它城市的 3.4~13.7 倍, 表明厚街镇工业集中区排放大量的芳香烃类 VOCs。

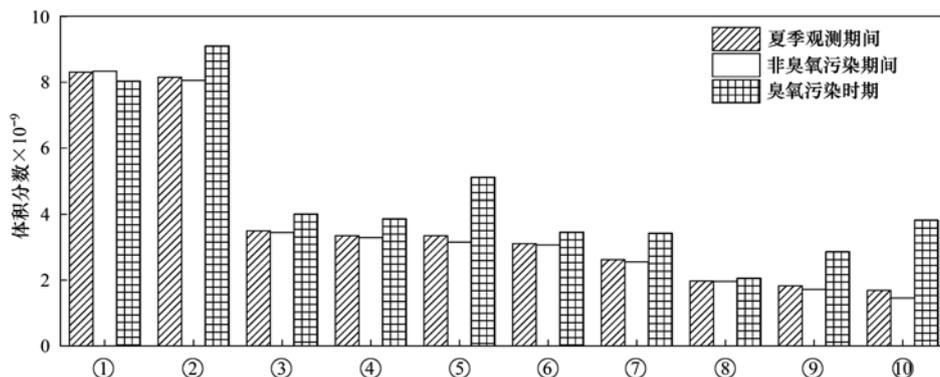
表 1 厚街镇大气中 VOCs 及其主要物种体积分数与其它城市对比  $\times 10^{-9}$

Table 1 Comparisons of mixing ratios of VOCs and dominant species in Houjie Town and other cities  $\times 10^{-9}$

项目	本研究	武汉 <sup>[25]</sup>	成都 <sup>[26]</sup>	珠海 <sup>[27]</sup>	广州 <sup>[28]</sup>	上海 <sup>[29]</sup>	北京 <sup>[30]</sup>
观测时间	2020 年 6~8 月	2017 年 6~8 月	2016 年 10~2017 年 9 月	2016 年 9~10 月	2016 年 7 月	2018 年 5~8 月	2015 年 8 月
VOCs	53.1	21.9	41.8	34.5	40.1	32.7	45.4
烷烃	23.7	10.3	23.6	19.3	22.1	7.8	15
烯烃	3.9	3.8	8.2	/	4.8	3.1	3.9
炔烃	0.7	/	2.7	/	1.6	0.7	2.8
芳香烃	24.7	1.8	7.2	4.1	6	3.2	4.5

东莞市厚街镇工业集中区占 VOCs 比例最高的 10 种物种依次是: 甲苯、间/对-二甲苯、正辛烷、邻-二甲苯、正丁烷、乙苯、丙烷、2,3,4-三甲基戊烷、异丁烷和异戊烷 (图 2), 10 种物种体积分数之

和占 VOCs 的 72%。上述 10 种物种中, 芳香烃和烷烃分别占 VOCs 的 43% 和 28%。芳香烃中体积分数最高的是甲苯, 分别占芳香烃和 VOCs 的 34% 和 16%; 烷烃中体积分数最高的是正辛烷, 分别占烷



①甲苯, ②间/对-二甲苯, ③正辛烷, ④邻-二甲苯, ⑤正丁烷, ⑥乙苯, ⑦丙烷, ⑧ 2,3,4-三甲基戊烷, ⑨异丁烷, ⑩异戊烷

图 2 厚街镇大气 VOCs 体积分数前 10 名的物种

Fig. 2 Top ten VOC species in Houjie Town

烃和 VOCs 的 15% 和 7%。上述 10 种物种在臭氧污染和非臭氧污染期间体积分数差异明显,除甲苯外,其余 9 种物种的体积分数在臭氧污染期间都高于非臭氧污染期间,尤其是正丁烷、异丁烷和异戊烷,这 3 种物质在臭氧污染期间比非臭氧污染期间的体积分数分别增加 62%、67% 和 162%。

为初步了解工业集中区 VOCs 可能的来源,本研究重点分析了 VOCs 主要物种的日变化特征(见图 3)。由图 3 可知,VOCs 日内出现 3 个较为明显的峰值。08:00 ~ 10:00 期间 VOCs 上升明显并在 10:00 出现第 1 个峰值;午前开始逐渐下降并在午后 12:00 ~ 14:00 期间迅速下降,随后 VOCs 再次回升并在 18:00 出现第 2 个峰值;19:00 的 VOCs 略

微下降,随后在 21:00 出现第 3 个峰值。总体来讲,VOCs 分别在早晚出现峰值,在午后出现谷值。早晚峰值可能是受到机动车尾气排放及大气边界层的日变化影响,而午后谷值除了受到边界层日变化的影响外,可能还受到 VOCs 光化学反应的损耗影响。VOCs 排名前 10 的物种日变化趋势总体与 VOCs 日变化趋势基本一致。值得注意的是,苯系物(甲苯、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯)、正辛烷和 2,3,4-三甲基戊烷体积分数与  $\text{NO}_x$  和 CO 峰值浓度出现时间差异明显。相反,丙烷、正丁烷、异丁烷和异戊烷的日变化趋势与  $\text{NO}_x$  的变化趋势一致,可能与机动车排放有关。由此可见,东莞厚街镇 VOCs 可能的来源是溶剂源和交通源。

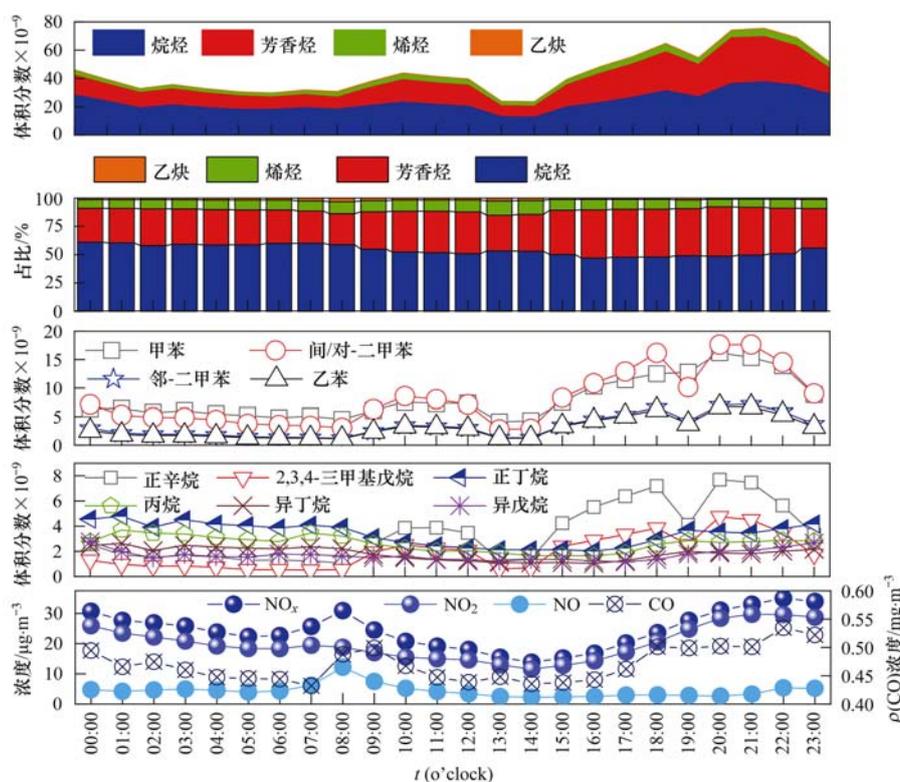


图 3 厚街镇大气中各类 VOCs 及其主要物种平均浓度日变化趋势

Fig. 3 Diurnal variations in total VOCs and major species in Houjie Town

## 2.2 OFP 分析

采用 1.3 节中 OFP 公式,计算了夏季不同  $\text{O}_3$ -8h 浓度条件下烷烃、烯烃和芳香烃对 OFP 贡献率。由图 4(a)可知,在不同  $\text{O}_3$ -8h 浓度条件下烷烃、烯烃和芳香烃对 OFP 的贡献率差异较小。总体来讲,芳香烃对 OFP 贡献率最大(79%~84%)、其次为烷烃(11%~15%)和烯烃(5%~8%)。尽管烷烃和芳香烃体积分数相当,但芳香烃对 OFP 贡献率是烷烃的 7 倍;尽管烯烃体积分数仅为烷烃体积分数的 16%,但烯烃 OFP 贡献率却占烷烃 OFP 贡献率的 43% 以上。研究结果表明控制厚街镇芳香烃类的 VOCs 是缓解周边臭氧污染的关键,但烯烃对臭氧

生成的贡献也不容忽视。

就具体物种而言[图 4(b)],在不同  $\text{O}_3$ -8h 浓度条件下,对 OFP 贡献率较大的物种排序变化较小。在所有  $\text{O}_3$ -8h 浓度范围内,OFP 贡献率占比前 5 种 VOCs 物种排名无变化,其中对 OFP 贡献率排名靠前的 4 种苯系物在体积分数占比中也较高,而体积分数处于前 10 位的烷烃中,仅正辛烷 OFP 贡献率较高。尽管 1,2,3-三甲基苯、1,2,4-三甲基苯和乙炔体积分数较低,但其活性较强,因此对 OFP 贡献率较大。当  $\text{O}_3$ -8h 浓度处于  $100 \sim 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时,乙炔对 OFP 的贡献率略有增加,并超过正辛烷和 1,2,4-三甲基苯,成为第 6 位对 OFP 贡献率较大的

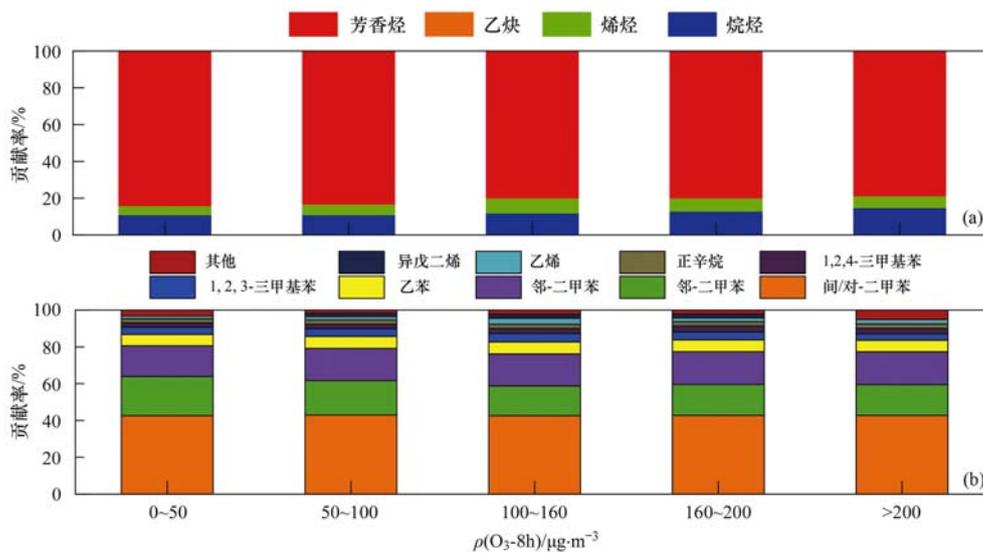


图4 不同  $O_3$ -8h 浓度下前 10 种 VOCs 对 OFP 贡献率

Fig. 4 Contributions of top 10 VOCs to OFP under the different  $O_3$ -8h concentrations

物种. 此外, 当  $O_3$ -8h 浓度在  $50 \sim 200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  区间时, 异戊二烯对 OFP 的贡献率明显增加, 可能的原因是相应时段环境温度较高, 促进了自然植被排放更多的异戊二烯.

夏季观测期间, 厚街镇芳香烃对 OFP 的贡献率达到 82%, 是珠海和广州地区芳香烃 OFP 贡献率的 2 倍. 烷烃和烯烃对 OFP 的贡献率远低于珠海和广州等城市<sup>[27,28]</sup>. 由此可见, 进一步加强对厚街镇涉芳香烃排放企业的监管对于改善周边臭氧污染非常重要.

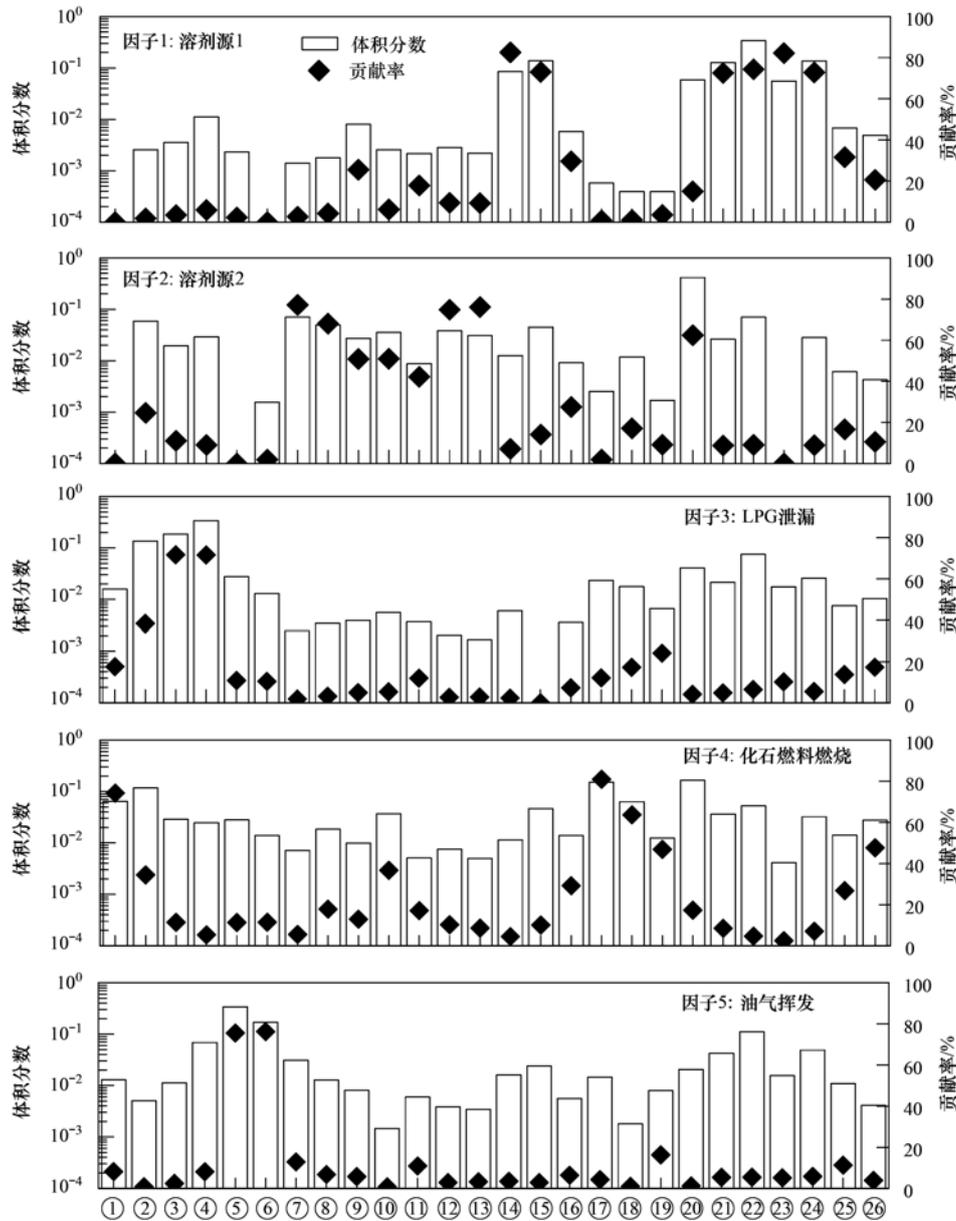
### 2.3 VOCs 来源解析

本研究尝试获取了 4、5 和 6 个污染源的解析结果, 最终确定了 5 种来源, 分别为溶剂源 1 (因子 1)、溶剂源 2 (因子 2)、液化石油气泄漏 (因子 3)、化石燃料燃烧 (因子 4) 和油气挥发 (因子 5), 5 种 VOCs 源的化学成分谱和贡献率分别见图 5 和图 6.

因子 1 (溶剂源 1) 中, 以 2,3,4-三甲基戊烷、正辛烷、乙苯、间/对-二甲苯、苯乙烯和邻-二甲苯为优势物种, 主要以芳香烃为主, 相对体积分数均超过 60%. 该因子中芳香烃体积分数占 VOCs 体积分数的 73%. 油漆、涂料和清洁剂等通常会排放乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯<sup>[31,32]</sup>; 织物表面涂料和金属表面涂装会明显释放苯乙烯<sup>[33]</sup>; 汽车表面涂装行业会明显排放 1,2,4-三甲基苯<sup>[34]</sup>; 油漆则会排放正辛烷和 2,3,4-三甲基戊烷<sup>[35,36]</sup>. 进一步结合图 7(a) 可知, 当东南和西南风向且风速较小时, 因子 1 对 VOCs 体积分数的贡献率明显增加, 与站点周边涉 VOCs 排放企业空间位置分布一致. 因此, 本研究判定因子 1 主要与站点周边家具表面涂装行业有关.

因子 2 (溶剂源 2) 中甲苯、正庚烷、甲基环己烷、环己烷和正己烷相对体积分数较高 (超过 60%). 正庚烷和甲基环己烷等  $C_6 \sim C_7$  烷烃以及甲苯体积分数占 VOCs 体积分数的 67%. 各类涂料和溶剂的使用过程均会释放浓度较高的甲苯<sup>[37]</sup>. 在塑料和木制家具的溶剂使用过程会释放高浓度的 3-甲基己烷和正庚烷<sup>[38]</sup>. 此外, 印刷行业也会释放高浓度的正庚烷、甲基环己烷和正壬烷等重碳烷烃<sup>[39,40]</sup>. 制鞋行业溶剂使用过程中会排放浓度较高的正己烷和 2,2,4-三甲基戊烷等  $C_5 \sim C_8$  的烷烃<sup>[41]</sup>. 进一步结合图 7(b) 可知, 在风速较小和东北风向条件下, 因子 2 对 VOCs 体积分数的贡献率明显增加, 表明因子 2 与因子 1 来源有相同之处, 还与非家具企业有关. 经进一步调研, 站点东北方向零散分布了少量印刷和制鞋企业, 因此, 本研究判断因子 2 主要与家具、印刷和制鞋等行业溶剂使用过程有关.

因子 3 (液化石油气泄漏) 中正丁烷、异丁烷和丙烷相对体积分数较高 (超过 40%), 三者体积分数占 VOCs 体积分数的 66%. 通常情况下, 液化石油气 (liquefied petroleum gas, LPG) 包括高纯度丙烷、高纯度丁烷和二者混合物. 香港地区 LPG 中丙烷和丁烷的体积分数分别占 LPG 总体积分数的 26% 和 69%, 机动车隧道实验也发现丁烷的体积分数比丙烷高<sup>[42]</sup>. 尽管缺乏广州地区 LPG 中主要物种的体积分数, 但机动车隧道实验和随车实验发现丙烷的体积分数比丁烷高<sup>[43,44]</sup>. 因此, 东莞地区 LPG 中丁烷体积分数很可能也比丙烷体积分数高. 进一步结合图 7(c) 可知, 在西北和东北风向条件下, 因子 3 对 VOCs 体积分数的贡献率明显增加, 在此方向上



①乙烷, ②丙烷, ③异丁烷, ④正丁烷, ⑤异戊烷, ⑥正戊烷, ⑦2,3-二甲基丁烷, ⑧正己烷, ⑨环己烷, ⑩3-甲基己烷, ⑪2,2,4-三甲基戊烷, ⑫正庚烷, ⑬甲基环己烷, ⑭2,3,4-三甲基戊烷, ⑮正辛烷, ⑯正壬烷, ⑰乙烯, ⑱乙炔, ⑲苯, ⑳甲苯, ㉑乙苯, ㉒间/对-二甲苯, ㉓苯乙烯, ㉔邻-二甲苯, ㉕1,2,4-三甲苯, ㉖1,2,3-三甲苯

图5 5种污染源 VOCs 化学成分谱

Fig. 5 Chemical profiles of five resolved VOCs sources

主要分布了较为密集的居民区. 因此, 本研究判断因子3与居民LPG使用过程的泄漏有关.

因子4(化石燃料燃烧)中乙烷、乙烯和乙炔等的低碳物种相对体积分数较高(超过60%). 天然气和LPG等燃料燃烧过程会释放较高浓度的乙烯、乙炔和乙烷等 $C_2 \sim C_3$ 物种<sup>[45,46]</sup>. 进一步结合图7(d)可知, 当北风且风速较大时, 因子4对VOCs体积分数的贡献率明显增加, 在此方向上主要分布道滘镇和麻涌镇. 上述两镇工业较为发达, 大量使用天然气和LPG作为工业燃料. 因此, 本研究判断因子4主要来自天然气和LPG等化石燃料燃烧.

因子5(油气挥发)中正戊烷和异戊烷相对体积分数较高(约80%), 上述两种物种体积分数占VOCs体积分数的51%. 汽油和柴油蒸发过程会释放较高浓度的正戊烷和异戊烷<sup>[47]</sup>. 进一步结合图7(e)可知, 当西北或东北风且风速较小时, 因子5对VOCs体积分数的贡献率明显增加, 在此方向上主要分布了较为密集的居民区且路网较为发达、机动车较多. 因此, 本研究判断因子5主要与居民点机动车油气挥发有关.

总体来讲, 厚街镇夏季观测期间溶剂源1(因子1)、溶剂源2(因子2)、LPG泄漏(因子3)、化石燃

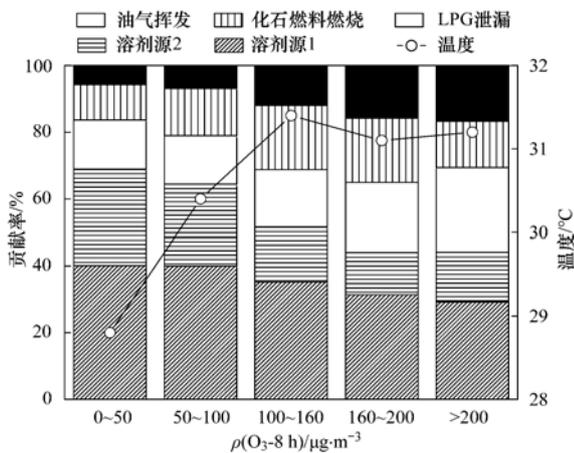


图 6 不同  $\text{O}_3$  浓度下环境温度和 5 种污染源贡献率的变化  
Fig. 6 Variations in ambient temperature and contributions of five resolved sources to VOCs under the different  $\text{O}_3$  levels

料燃烧(因子 4)和油气挥发(因子 5)对 VOCs 体积分数的贡献率分别为  $38\% \pm 23\%$ 、 $22\% \pm 15\%$ 、 $16\% \pm 11\%$ 、 $15\% \pm 11\%$  和  $9\% \pm 6\%$ 。由图 6 可知,当  $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$  小于  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时,溶剂源(因子 1 和因子 2 之和)的贡献率超过 60%;当  $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$  在  $100 \sim 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时,溶剂源的贡献率略有下降(略超过 50%);当  $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$  大于  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时,溶剂源的贡献率降低到约 44%。总体来讲,随着  $\text{O}_3\text{-}8\text{h}$  浓度逐渐上升,溶剂源的贡献率逐渐下降,可能的原因是与溶剂源有关的苯系物光化学反应损耗有关。然而,当  $\text{O}_3\text{-}8\text{h}$  浓度逐渐上升时,油气挥发源和 LPG 泄漏的贡献率却逐渐上升,可能是由于环境温度的上升增加了上述污染源的排放。总体来讲,加强对溶剂源的控制可有效地抑制厚街镇臭氧污染事件。

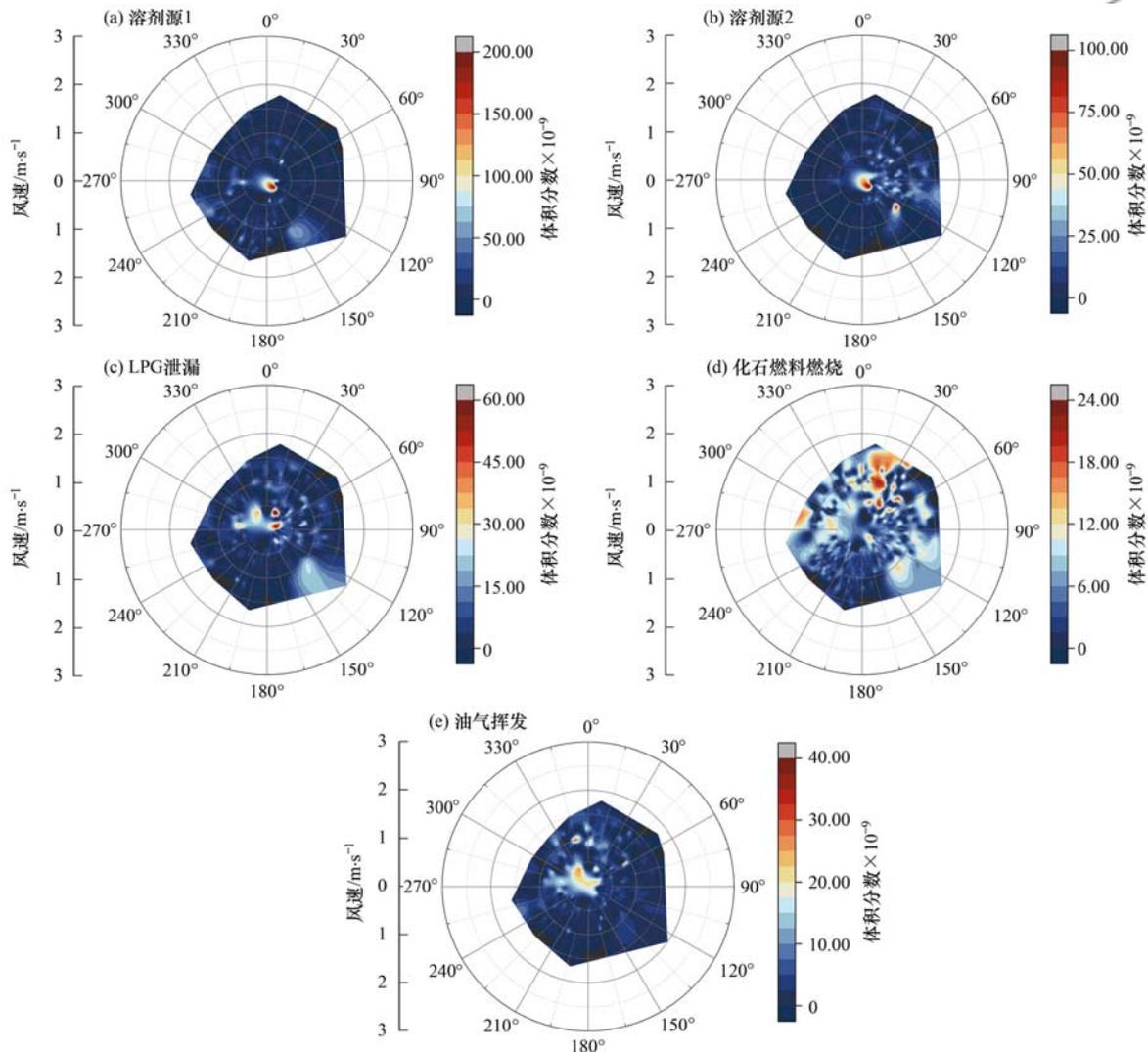


图 7 5 种污染源 VOCs 体积分数的风场分布  
Fig. 7 Wind maps of mixing ratios of five resolved sources

### 3 结论

(1) 芳香烃是厚街镇大气 VOCs 的主要物种,其

占 VOCs 体积分数的 47%, 高于烷烃(45%)、烯烃(7%)和炔烃(1%)。体积分数的最高的 10 种 VOCs 物种分别为甲苯、间/对-二甲苯、正辛烷、邻-二甲

苯、正丁烷、乙苯、丙烷、2,3,4-三甲基戊烷、异丁烷和异戊烷,占 VOCs 体积分数的 72%。与非臭氧污染期间相比,臭氧污染期间芳香烃、烷烃、烯烃和炔烃体积分数分别上升约 10%、43%、38% 和 98%。

(2) 监测期间厚街镇大气中不同 VOCs 物种的 OFP 贡献率在不同 O<sub>3</sub>-8h 浓度时的贡献率占比差异不大,其中芳香烃贡献率最大,其次为烷烃、烯烃和乙炔。从单个 VOCs 物种来看,厚街镇大气中 OFP 贡献率排名前 5 种均是苯系物,分别为间/对-二甲苯、甲苯、邻-二甲苯、乙苯和 1,2,3-三甲苯。

(3) 夏季观测期间,厚街镇 VOCs 的主要来源为溶剂源(溶剂源 1 和溶剂源 2) (60% ± 20%),其次为 LPG 泄漏(16% ± 11%)、化石燃料燃烧源(15% ± 11%)和油气挥发源(9% ± 6%)。当 O<sub>3</sub>-8h 浓度和环境温度逐渐升高时,溶剂源对 VOCs 体积分数的贡献率逐渐下降,而 LPG 泄漏和油气挥发源贡献率逐渐上升。当 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 大于 160 μg·m<sup>-3</sup> 时,溶剂源的贡献率下降至 44%,而 LPG 泄漏和油气挥发源的贡献率分别上升至 21% 和 16%。

#### 参考文献:

- [1] Kansal A. Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(1): 17-26.
- [2] 王伯光,张远航,邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2004, **25**(S1): 7-15.  
Wang B G, Zhang Y H, Shao M. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Peal River Delta Region [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(S1): 7-15.
- [3] 李雷,李红,王学中,等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4558-4564.  
Li L, Li H, Wang X Z, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in the downtown area of Guangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- [4] Li K, Jacob D J, Shen L, et al. Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(19): 11423-11433.
- [5] Sun J, Wang J H, Shen Z X, et al. Volatile organic compounds from residential solid fuel burning in Guanzhong Plain, China: source-related profiles and risks [J]. *Chemosphere*, 2019, **221**: 184-192.
- [6] 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.
- [7] An J L, Wang J X, Zhang Y X, et al. Source Apportionment of volatile organic compounds in an urban environment at the Yangtze River Delta, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, **72**(3): 335-348.
- [8] Liu Y F, Kong L W, Liu X G, et al. Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(3): 33-46.
- [9] Qin J J, Wang X B, Yang Y R, et al. Source apportionment of VOCs in a typical medium-sized city in North China Plain and implications on control policy [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **107**: 26-37.
- [10] Liu B S, Liang D N, Yang J M, et al. Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 757-769.
- [11] Mozaffar A, Zhang Y L, Fan M Y, et al. Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O<sub>3</sub> and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104923.
- [12] Zou Y, Deng X J, Zhu D, et al. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> at a suburban site in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(12): 6625-6636.
- [13] Zhang G Q, Wang N, Jiang X J, et al. Characterization of ambient volatile organic compounds (VOCs) in the area adjacent to a petroleum refinery in Jinan, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(4): 944-950.
- [14] Li C L, Liu Y F, Cheng B F, et al. A comprehensive investigation on volatile organic compounds (VOCs) in 2018 in Beijing, China: characteristics, sources and behaviours in response to O<sub>3</sub> formation [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150247.
- [15] Li Q Q, Su G J, Li C Q, et al. An investigation into the role of VOCs in SOA and ozone production in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137536.
- [16] Lin H T, Wang M, Duan Y S, et al. O<sub>3</sub> sensitivity and contributions of different NMHC sources in O<sub>3</sub> formation at urban and suburban sites in Shanghai [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(3), doi: 10.3390/atmos11030295.
- [17] Tan Z, Lu K, Jiang M, et al. Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to O<sub>3</sub>-VOC-NO<sub>2</sub> sensitivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [18] Zhu Y H, Yang L X, Chen J M, et al. Characteristics of ambient volatile organic compounds and the influence of biomass burning at a rural site in Northern China during summer 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 156-165.
- [19] 朱少峰,黄晓锋,何凌燕,等. 深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2140-2148.  
Zhu S F, Huang X F, He L Y, et al. Variation characteristics and chemical reactivity of ambient VOCs in Shenzhen [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2140-2148.
- [20] 古颖纲,虞小芳,杨闻达,等. 广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2528-2537.  
Gu Y G, Yu X F, Yang W D, et al. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in the rainy season of Guangzhou city [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2528-2537.
- [21] Qi J P, Mo Z W, Yuan B, et al. An observation approach in evaluation of ozone production to precursor changes during the COVID-19 lockdown [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118618.

- [22] Lei X W, Cheng H R, Peng J, *et al.* Impact of long-range atmospheric transport on volatile organic compounds and ozone photochemistry at a regional background site in central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118093.
- [23] Tan J H, Guo S J, Ma Y L, *et al.* Non-methane hydrocarbons and their ozone formation potentials in Foshan, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2012, **12**(3): 387-398.
- [24] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. Riverside: California Air Resources Board Contract, 2009.
- [25] Yang Y C, Liu X G, Zheng J, *et al.* Characteristics of one-year observation of VOCs, NO<sub>x</sub>, and O<sub>3</sub> at an urban site in Wuhan, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **79**: 297-310.
- [26] 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*, 2018, **123**(17): 9741-9763.
- [27] 宋锴, 俞颖, 陆思华, 等. 珠海市秋季大气挥发性有机物变化趋势和大气化学反应活性 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(7): 2323-2332.  
Song K, Yu Y, Lu S H, *et al.* Variation and reactivity of ambient volatile organic compounds (VOCs) in autumn of Zhuhai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(7): 2323-2332.
- [28] 虞小芳, 程鹏, 古颖纲, 等. 广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜势的研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 830-837.  
Yu X F, Cheng P, Gu Y G, *et al.* Formation potential of ozone and secondary organic aerosol from VOCs oxidation in summer in Guangzhou, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 830-837.
- [29] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 132-139.  
Jin D. Role of atmospheric VOCs in ozone formation in summer in Shanghai suburb [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 132-139.
- [30] Li J, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(14): 7945-7959.
- [31] Yang W Q, Zhang Y L, Wang X M, *et al.* Volatile organic compounds at a rural site in Beijing: influence of temporary emission control and wintertime heating [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(17): 12663-12682.
- [32] 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 等. 佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5334-5343.  
Li X, Su W J, Li B X, *et al.* Source profiles and chemical reactivity of volatile organic compounds from surface coating of aluminum products in Foshan, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5334-5343.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Zhong Z M, Sha Q E, Zheng J Y, *et al.* Sector-based VOCs emission factors and source profiles for the surface coating industry in the Pearl River Delta region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 19-28.
- [36] Kwon K D, Jo W K, Lim H J, *et al.* Characterization of emissions composition for selected household products available in Korea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **148**(1-2): 192-198.
- [37] Liu Y, Shao M, Zhang J, *et al.* Distributions and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing city, China [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2005, **40**(10): 1843-1860.
- [38] Mo Z W, Lu S H, Shao M. Volatile organic compound (VOC) emissions and health risk assessment in paint and coatings industry in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115740.
- [39] Shen L J, Xiang P, Liang S W, *et al.* Sources profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, Central China [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(8), doi: 10.3390/atmos9080297.
- [40] 方莉, 刘文文, 陈丹妮, 等. 北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4395-4403.  
Fang L, Liu W W, Chen D N, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent-based industries in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4395-4403.
- [41] Li Q Q, Su G J, Li C Q, *et al.* Emission profiles, ozone formation potential and health-risk assessment of volatile organic compounds in rubber footwear industries in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **375**: 52-60.
- [42] Tsai W Y, Chan L Y, Blake D R, *et al.* Vehicular fuel composition and atmospheric emissions in south China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3281-3288.
- [43] 区家敏, 冯小琼, 刘郁葱, 等. 珠江三角洲机动车挥发性有机物排放化学成分谱研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 826-834.  
Ou J M, Feng X Q, Liu Y C, *et al.* Source characteristics of VOCs emissions from vehicular exhaust in the Pearl River Delta region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 826-834.
- [44] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2624-2639.
- [45] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物 (VOCs) 排放源成分谱研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.  
Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [46] 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.
- [47] Yuan Z B, Zhong L J, Lau A K H, *et al.* Volatile organic compounds in the Pearl River Delta: identification of source regions and recommendations for emission-oriented monitoring strategies [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 162-172.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 .....	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form .....	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Under the Background of Emission Reduction .....	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM <sub>1</sub> During Autumn and Winter in Qingdao .....	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area .....	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin .....	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing .....	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer .....	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer .....	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill .....	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years .....	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin .....	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake .....	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors .....	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City .....	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments .....	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region .....	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate .....	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation .....	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area .....	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation .....	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil .....	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine .....	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River .....	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain .....	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments .....	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process .....	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project .....	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China .....	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau .....	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas .....	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou .....	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil .....	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City .....	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schum) .....	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis .....	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings .....	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield .....	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China .....	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve .....	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond .....	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Adsorption by Soil Around a Dressing Plant .....	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar .....	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau .....	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation .....	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)