

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附铅的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
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	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛满萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

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

王红丽¹, 高雅琴¹, 景盛翱¹, 楼晟荣¹, 胡馨遥¹, 安静宇¹, 吴宇航¹, 高伟², 朱亮³, 黄成¹

(1. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 2. 暨南大学质谱仪器与大气环境研究所, 广州 510632; 3. 南京拓服工坊科技有限公司, 南京 211800)

摘要: 挥发性有机物(VOCs)是大气臭氧及细颗粒物污染的重要前体物。工业园区是我国 VOCs 排放的重要来源,但是其污染水平及特征尚不清晰。本研究采用两类 VOCs 走航监测技术,在长三角主要工业园区开展了 108 园区次的走航监测,系统分析了长三角不同工业园区 VOCs 的污染水平及示踪组分特征。结果表明,园区周边 VOCs 平均浓度变化范围为 39 ~ 533 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5% ~ 95% 分位值浓度),平均值为 183 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是城市环境大气浓度的 3 倍左右;最大峰值浓度的变化范围为 307 ~ 12 006 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5% ~ 95% 分位值浓度),平均值为 2 812 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。所有园区周边监测到异常高浓度的频率为 64%,其中异常排放频率出现较高的组分主要包括甲苯(32%)、二甲苯(18%)、苯(9%)以及含 9 个及以上碳数的芳香烃(19%)。不同工业类型的园区周边 VOCs 浓度水平及主要特征组分存在一定差异;纺织行业园区周边浓度最高,其次是化工、涂装和石化,电子工业园区周边浓度相对最低。鉴于现有走航技术对环境大气常见 VOCs 组分的覆盖率不足 50%,因此上述走航结果相对于实际浓度应该有一定的低估。本研究有助于系统认识我国工业园区 VOCs 污染水平及特征,为园区 VOCs 监管及减排提供重要支撑。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 走航监测; 工业园区; 污染特征; 长三角(YRD)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1298-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007265

Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China

WANG Hong-li¹, GAO Ya-qin¹, JING Sheng-ao¹, LOU Sheng-rong¹, HU Qing-yao¹, AN Jing-yu¹, WU Yu-hang¹, GAO Wei², ZHU Liang³, HUANG Cheng¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Institute of Mass Spectrometry and Atmospheric Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. TOFWERK China, Nanjing 211800, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) play important roles in the formation of ozone and fine particles in the troposphere. Industrial parks emit significant amounts of VOCs in China, while few studies have characterized them. In the present study, a mobile platform was employed to measure the levels and composition VOCs around industrial parks in the Yangtze River Delta region. The average concentration of VOCs ranged from 39 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5% percentile) to 533 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (95% percentile) with an average of 183 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, which was three times that of ambient concentrations. Maximum VOC concentrations ranged from 307 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5% percentile) to 12 006 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (95% percentile) with an average of 2 812 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The frequency of abnormal peak values was as high as 64% across all the industrial parks, of which toluene (32%), xylene (18%), benzene (9%), and >C9 aromatics (19%) were the most common species. Differences in VOC characteristics were observed among the different types of industrial parks. Specifically, highest concentrations of VOCs were observed in textile industrial parks followed by chemical, painting, and petrochemical industrial parks, and VOC concentrations in electronics industrial parks were the lowest. Importantly, species measured using the mobile platform only contributed ~50% of VOCs present in ambient samples, indicating that the concentrations of VOCs in the industrial parks were underestimated overall. These results can inform measures to control VOC pollution in industrial parks in China.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); mobile monitoring; industrial parks; characteristics; Yangtze River Delta region (YRD)

2013年以来,随着清洁空气行动计划(2013 ~ 2017年)和污染防治攻坚战计划(2018 ~ 2020年)的发布和实施,我国大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)、二氧化硫和氮氧化物等主要污染物排放总量及环境浓度大幅下降,空气质量总体改善^[1];但是,期间我国大气臭氧污染呈恶化趋势^[2]。有研究表明, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降促使臭氧生成对挥发性有机物(VOCs)减排更敏

感^[3],未来需强化 VOCs 减排以实现臭氧污染和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的协同改善^[4]。

收稿日期: 2020-07-28; 修订日期: 2020-08-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0202201, 2018YFC0213801); 上海市科委启明星计划项目(18QA1403600); 上海市生态环境局进博会空气质量保障工作专项

作者简介: 王红丽(1983 ~),女,博士,主要研究方向为大气反应性有机物测量及源汇机制, E-mail: wanghl@saes.sh.cn

VOCs 的准确测量及精准溯源是开展 VOCs 减排工作的重要前提。VOCs 的测量主要是采用传统的手工采样或 VOCs 自动站开展针对环境大气以及针对污染源排放的两类测量。基于环境大气的测量,结合源解析等各类溯源工具可以解析不同环境大气 VOCs 的污染来源乃至主要特征组分的来源^[5~7];基于污染源的测量,结合活动水平等相关资料可以得到不同污染物的排放总量及特征,该方法可以一定程度上识别污染源排放存在的问题^[8~13]。上述提到的 VOCs 源解析以及源清单法相互结合校验有助于识别不同地区各类污染源的排放特征,已被广泛应用于城市和区域地区 VOCs 的源识别工作^[5~7];但是上述方法时间分辨率和空间分辨率难以兼顾,不利于识别排放波动性较大的无组织排放问题^[14],难以支撑 VOCs 的精细化减排工作。最近几年逐步出现了针对 VOCs 的走航监测技术,可以在车辆行驶过程中同步开展周边环境大气的 VOCs 浓度及组成监测,大大提高了污染排查的时空效率,目前已被广泛应用于工业园区 VOCs 周边环境的监测,但是该技术对工业园区 VOCs 监测的适用性尚有待评估。

本研究采用目前常见的两类 VOCs 走航监测技术,分别于 2018 年及 2019 年的进博会前后在长三角主要涉 VOCs 工业园区开展了集中走航观测实验。鉴于涉 VOCs 园区周边环境大气中主要 VOCs 组

分浓度水平与环境大气水平相当或处于同一数量级水平,本研究通过与环境大气不同 VOCs 浓度水平的比较,初步评估了现有 VOCs 走航监测技术对环境大气常见 VOCs 组分的适用性及监测代表性,研究结果对于未来开展 VOCs 走航监测有一定的借鉴。基于长三角涉 VOCs 工业园区走航监测实验结果,较系统探讨了长三角不同类型工业园区 VOCs 污染水平及组分特征,研究结果有助于系统认识我国工业园区 VOCs 污染水平及特征,以期为园区 VOCs 监管及减排提供重要支撑。

1 材料与方法

1.1 走航园区分布

本研究分别于 2018 年及 2019 年国际进口博览会前后(10 月 15 日至 11 月 15 日)在长三角区域开展涉 VOCs 工业园区走航监测,期间分别走航 43 园区次及 65 园区次,累计 108 组样本,走航园区空间分布如图 1 所示。其中,2018 年走航园区以国家级工业园区为主,2019 年在 2018 年基础上进一步拓展到其他中小型工业园区。按照园区主要产业类型分类,本研究走航的园区可以分为以纺织、化工、涂装、电子、石化以及其他行业为主的 6 类园区;不同类型走航样本量依次为 3、64、19、9、6 和 7 园区次。

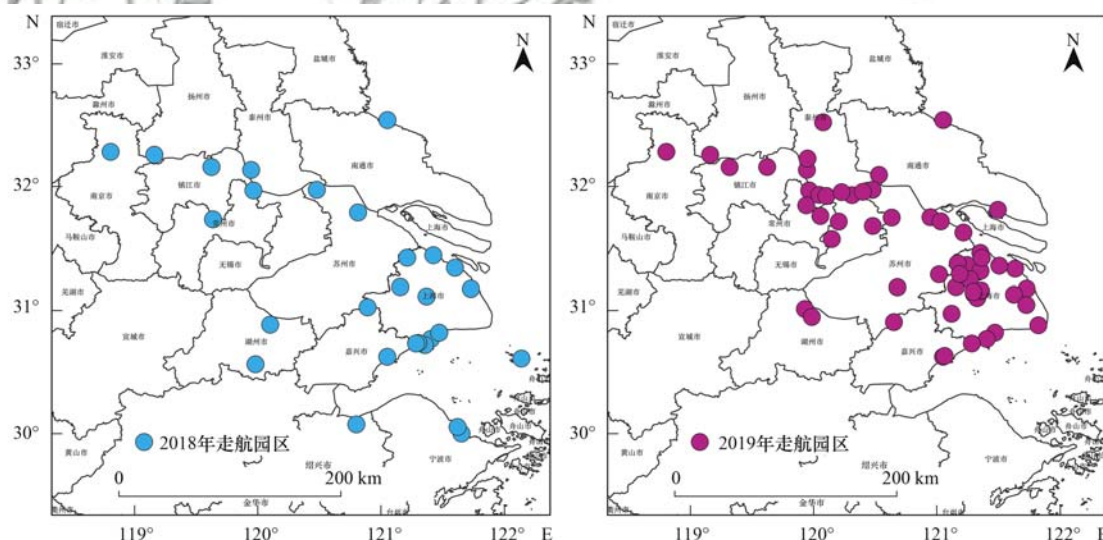


图1 本研究走航园区空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of industrial parks used to monitor VOCs

1.2 走航监测设备

本研究采用的走航监测设备主要涉及两类技术,一是基于真空紫外光电离飞行时间质谱仪的走航技术(光电离技术),另一类是基于质子转移反应飞行时间质谱仪的走航技术(质子转移技术)。前者的监测原理大致为样品 VOC 分子被单光子紫外光

电离为分子离子,被电离的分子离子通过飞行时间质量分析器检测得到全谱的分子质量信息^[15],该技术理论上可测量几百余种有机组分,其中对芳香烃、酮类、硫醇、硫醚、C3 以上卤代烃和醛类、C6 以上烷烃类化合物具有检测优势^[16]。后者的监测原理大致为 VOCs 分子与水电离产生的水合氢离子发生质子

转移反应生成可检测的带质子离子,从而得到分子质量信息,该技术对质子亲和力大于水的组分均可测量,该技术理论上可测量几百余种有机组分,其中对芳香烃、C7 以上烷烃、C3 以上烯烃、含氧组分和杂化原子组分(氮、硫、卤素等)均有较好响应^[17,18];该方法只需少数十几种 VOC 标气的测量数据,就可

以给出其他待测目标物的半定量浓度信息;此外,该方法可以通过改变初始离子种类来拓展可检测种类和增加物种的鉴别能力^[17]. 两种走航技术可检测组分及其检测限如表 1 所列. 从中可知,两种技术对于开展 VOCs 浓度相对较高的园区环境均比较适合.

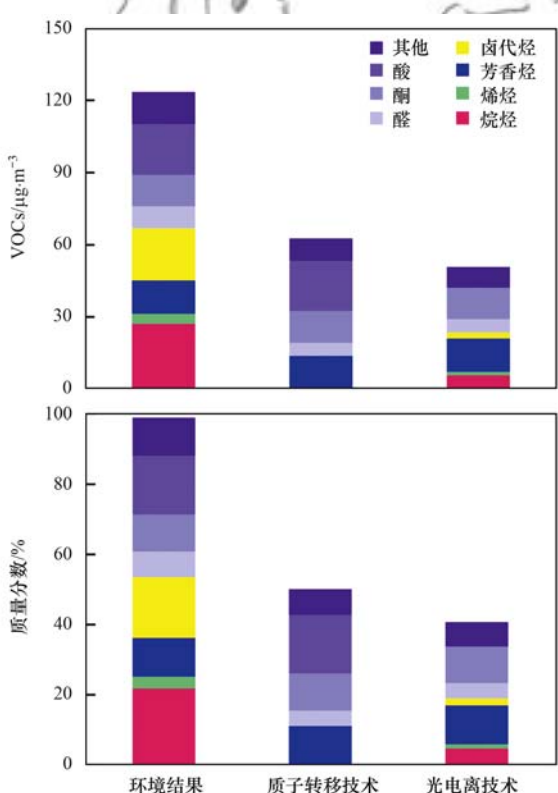
表 1 两类走航技术可检测组分及其检测限的比较¹⁾
Table 1 Comparisons of two methods for measuring VOCs and their detection limits

项目	光离子技术 ^[15,16]		质子转移技术(水离子模式)	
	是否可检测	检测限	是否可检测	检测限
芳香烃	√	~ 几 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	√ ^[19,20]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
烷烃	> C6 烷烃	几到几十 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	> C7 烷烃 ^[21]	未报道
烯烃	> C4 烯烃	几到几十 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	> C2 烯烃 ^[21]	未报道
炔烃	×	/	乙炔和丙炔 ^[22]	未报道
醛类	> C3 醛类	几到几十 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	√ ^[19,20]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
酮类	√	几到几十 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	√ ^[19,22]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
酸类	×	/	√ ^[19,22]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
含硫类	√	几到几十 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	√ ^[22]	> 几百 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
卤代烃	> C2 卤代烃	几到几十 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	√ ^[19]	> 几百 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
腈类	×	/	√ ^[19,20]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
酰胺类	未报道	未报道	√ ^[22]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
呋喃	未报道	未报道	√ ^[23]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
酯类	未报道	未报道	√ ^[23]	未报道
含氮杂环	未报道	未报道	√ ^[23]	> 几十 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$

1) “√”表示可检测;“×”表示不可检测;“/”表示不存在

以上两种技术对于烷烃及烯烃,特别是环境大气中浓度比较丰富的低碳数烷烃的测量有一定局限性. 图 2 比较了两种技术对于环境大气主要 VOCs 组分的响应情况. 其中,环境大气 VOCs 的浓度及组成以 2018 年 10 月 15 日至 11 月 15 日上海大气观测实验结果为例,累计测量包括烷烃(28 种)、烯烃(19 种)、炔烃(1 种)、芳香烃(17 种)、卤代烃(28 种)、醛类(10 种)、酮类(6 种)、酸类(5 种)以及其他组分(15 种)等在内的 129 种环境大气 VOCs 主要组分;覆盖 PAMS、TO14、TO15 以及 TO11 等 VOCs 组分,相关方法介绍可见文献[6]. 在环境大气结果的基础上,把不同走航监测技术可监测的组分提取加和即得到图 2 中不同走航技术对应的测量结果. 从中可知,质子转移反应技术对芳香烃及含氧类组分基本可做到全覆盖,但是对短链(< C8)烷烃和(< C3)烯烃基本无响应;光电离技术对芳香烃及卤代烃和酮类组分基本全覆盖,甲醛以外的其他醛类也可检测,对 6 个碳以上的烷烃及 3 个碳以上的烯烃也有一定响应. 从图 2 中可知,目前两类走航监测技术对于环境大气 VOCs 质量浓度的覆盖率不到 50%.

本研究中 2018 年走航监测结果全部来自光电离技术,2019 年的走航监测结果包括光电离技术以及质子转移技术两类技术的走航结果. 鉴于两类技术对不同 VOCs 组分的不同表现,本研究后续讨论



环境结果:上海 2018 年进博会期间环境大气 VOCs 浓度及组成; 质子转移技术:该技术理论可检测 VOCs 组分浓度,检测限高于环境浓度水平的视为不可检测; 光电离技术:该技术理论可检测 VOCs 组分浓度,检测限高于环境浓度水平的视为不可检测
图 2 不同走航监测技术可测组分在环境大气中的浓度及占比
Fig. 2 Comparisons of different methods for the measurements of ambient VOCs in Shanghai

重点探讨总 VOCs 和芳香烃的走航结果,同时基于含氧类组分的讨论主要基于质子转移反应技术的测量结果探讨,卤代烃组分的讨论主要基于光电离技术的测量结果。

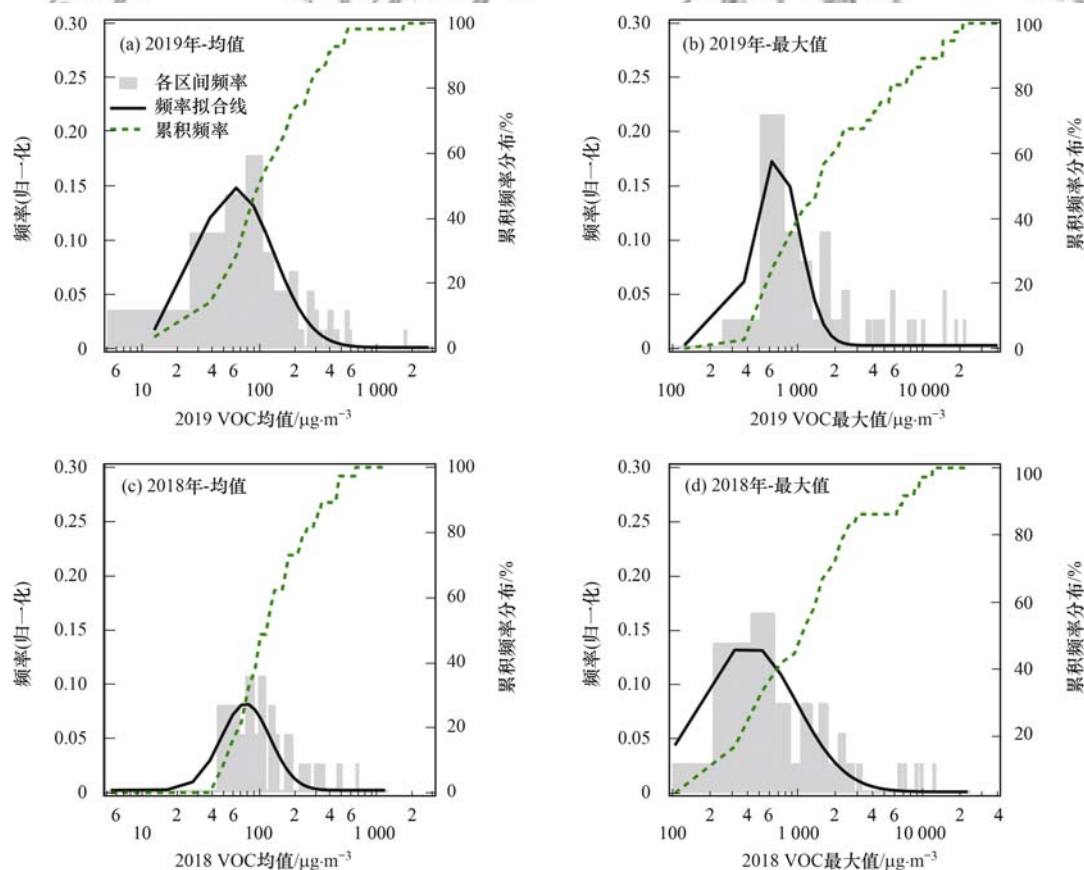
2 结果与讨论

2.1 园区周边 VOCs 浓度水平

不同园区周边 VOCs 走航浓度分布如图 3 所示。从中可知,两次走航期间,无论是园区周边 VOCs 平均走航浓度还是最高峰值浓度总体呈正态分布。两次走航期间,平均浓度及最高峰值浓度的统计结果如表 2 所列。就平均浓度而言,2018 年及 2019 年两次走航结果比较一致,平均值浓度分别为 $171 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $191 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,该浓度是图 2 所列的 2018 年 10 月 15 日至 11 月 15 日期间环境大气浓度 ($\sim 125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 1.5 倍左右。但是由图 2 可知,本研究采用的走航监测技术对于环境大气 VOCs 的监测覆盖率大约在 50% 左右,因此可初步推测园区周边 VOCs 浓度是环境大气浓度的 3 倍左右。

就园区周边走航监测到的 VOCs 最大峰值浓度而言,2019 年走航结果总体高于 2018 年走航结果,其中一个重要原因可能是 2018 年走航园区以国家

级工业园区为主,而 2019 年走航园区在 2018 年园区基础上进一步向中小园区拓展,一定程度上说明中小园区 VOCs 异常排放问题可能更突出。综合两年走航结果可知,园区周边 VOCs 最大峰值浓度的变化范围为 $307 \sim 12\,006 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5%~95% 分位值浓度),平均值为 $2\,812 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,中位值浓度 $1\,218 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,75% 分位值浓度为 $2\,447 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。根据《挥发性有机物无组织排放控制标准》(GB 37822-2019),厂区内在操作间下风向 1 m 处非甲烷总烃特别排放限值为 $6\,000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从图 3 可知,以 2019 年走航结果为例,大约 20% 的园区周边 VOCs 走航峰值浓度超过 $6\,000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。值得注意的是,上述标准中提到的目标物是非甲烷总烃,而本研究走航监测的主要组分以芳香烃、卤代烃及含氧组分为主,两个目标物有一定交集但不存在包含与被包含关系;另外,上述标准提到的目标区域为园区或厂区内操作间的下风向 1 m,而本研究走航的区域均在园区外围,因此理论上本研究走航监测到的浓度应该比园区或厂区操作间下风向 1 m 处的浓度低。尽管如此,本研究基于较大样本量的园区周边走航监测结果仍能说明我国工业园区 VOCs 异常排放问题比较突出。



均值为园区周边 VOCs 平均浓度;最大值为园区周边 VOCs 峰值浓度,下同

图 3 长三角园区周边 VOCs 走航监测浓度分布

Fig. 3 Average and maximum concentrations of VOCs around the studied industrial parks

表 2 长三角园区周边 VOCs 走航监测浓度统计结果/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Concentrations of VOCs around industrial parks in the YRD region/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

统计参数	均值			最大值		
	2019 年	2018 年	全部	2019 年	2018 年	全部
95 分位值	545	478	533	14 714	8 706	12 006
75 分位值	234	226	221	4 311	1 988	2 447
50 分位值	115	125	114	1 540	1 074	1 218
平均值	191	171	183	3 721	1 988	2 812
25 分位值	61	79	75	727	546	644
5 分位值	35	53	39	522	225	307
样本量	66	42	108	66	42	108

2.2 不同类型园区周边 VOCs 污染特征

按照园区主要产业类型分类,本研究走航的园区可以分为以纺织、化工、涂装、电子、石化以及其他行业为主的 6 类园区. 不同园区周边走航监测得到的 VOCs 平均浓度以及最大峰值浓度统计结果如图 4 所示. 从中可知,以纺织行业为主的园区周边 VOCs 浓度最大,平均浓度为 $919\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,峰值浓度的平均值高达 $7877\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 均明显高于其他行业. 需要指出的是本研究中以纺织行业为主的园区样本量为 3 个,其中两个园区监测到了峰值浓度超过 $8\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的极高值浓度. 化工行业以及涂装行业园区周边 VOCs 的最大峰值浓度的平均值也均在 $2\ 000$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,但涂装行业园区周边 VOCs 的平均浓度相对其他类型园区较低. 石化园区周边 VOCs 的峰值浓度相较其他园区最低,为 $1\ 039\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但其平均浓度与化工及电子园区基本相当. 这说明石化行业异常排放问题相对较少,但 VOCs 排放导致周边环境大气 VOCs 污染也比较严重,平均为 $150\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是环境大气(以上海为例)的 2.5 倍. 需要指出的是,石化行业排放大量的低碳烷烃及烯烃等组分^[24-26],这些组分不能被本研究所采用的走航监测技术检测,因此可能导致石化园区周边走航监测浓度较真实情况偏低. 所有园区周边 VOCs 峰值浓度的平均值均在 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,如图 4(b) 所示.

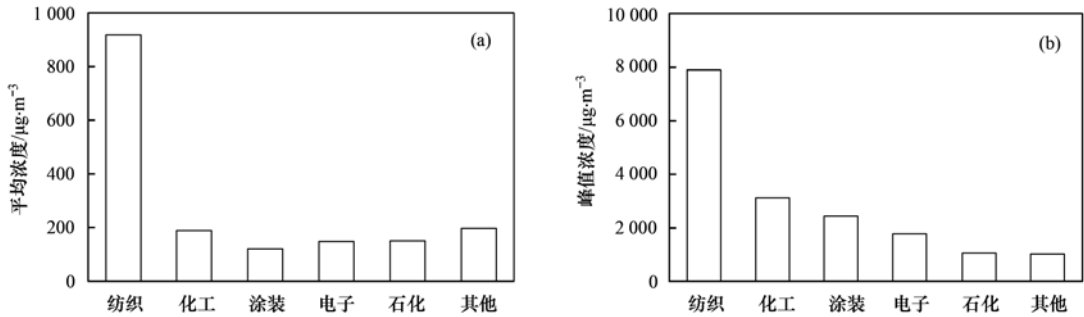


图 4 长三角不同类型园区周边不同 VOCs 走航监测浓度

Fig. 4 Concentrations of VOCs in different types of industrial parks in the YRD region

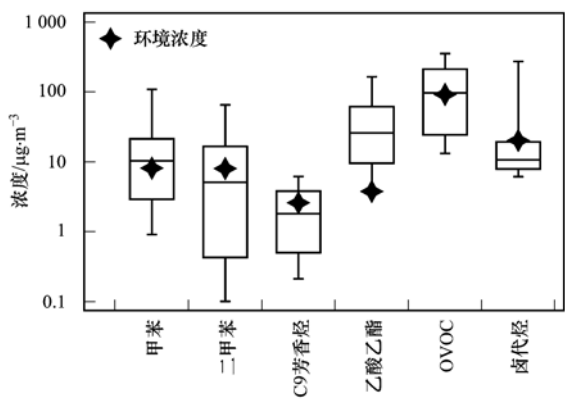
2.3 园区周边主要 VOCs 组分浓度水平

所有园区周边主要 VOCs 组分浓度如图 5 所示. 如 1.2 节所述,本研究采用的走航监测技术对芳香烃、卤代烃以及含氧 VOCs 组分比较灵敏,因此,本节重点讨论上述组分的浓度分布. 为方便比较,图 5 中也标注了 2018 年 10 月 15 日至 11 月 15 日上海环境大气不同组分的浓度. 从中可知,园区周边所有组分的浓度均高于环境大气浓度水平,其中卤代烃以及乙酸乙酯等含氧组分的浓度超过环境大气浓度较多. 从中可知,园区周边浓度最高的是含氧 VOCs,中位值浓度达到 $97\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是环境浓度 ($43\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 2 倍之多; 其中乙酸乙酯的中位值浓度高达 $26\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是环境浓度 ($2.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 10 倍. 甲苯、二甲苯以及含 9 个碳的芳香烃中位值浓度

也均不同程度高于环境浓度. 园区周边卤代烃的中位值浓度 ($11\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 与环境浓度 ($13\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 相当,但是园区周边卤代烃平均浓度高达 $68\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明园区周边卤代烃的极大值浓度出现频率较高.

2.4 不同类型园区周边特征组分

本研究 108 园区次走航监测中,出现异常值的园区次为 69 次,异常值出现频率为 64%; 其中,芳香烃组分出现异常值的频率最高 (79%),其次是卤代烃 (19%). 按照不同园区各组分出现异常浓度的频率进行分类统计,得到不同园区的特征组分,如图 6 所示. 从中可知,出现异常浓度的组分主要包括甲苯、二甲苯、苯、丙酮、乙酸乙酯、三氯乙烷、丁烯、戊烯以及二甲基甲酰胺 (*N,N*-Dimethylformamide, DMF). 对于不同园区而言,芳香烃组分出现异常高



箱式图为园区周边浓度,箱式图上下两侧分别代表90%分位和10%分位浓度值;中间箱体的上下边分别代表75%分位和25%分位浓度值;箱体中间的横线代表中位值

图5 长三角园区周边不同VOCs组分走航监测浓度

Fig. 5 Concentrations of the major species around the industrial parks in YRD region

值的频率均比较高,在各类园区中甲苯出现异常值频率均为最高;甲苯在各类园区周边出现异常值的频率从高到低依此为纺织(67%)>化工(36%)>石化(33%)>涂装(26%)>电子(11%)。

不同园区周边出现异常值的组分名录存在一定差异.对于纺织行业园区而言,除甲苯外,出现异常值的组分还包括苯、丙酮、乙酸乙酯、三氯乙烷以及DMF,上述组分均为该行业主要原辅料组分^[8].对于化工行业园区周边而言,出现异常值频率较高的组分依此为芳香烃(86%)>卤代烃(25%)>烯烃(19%)>含氧VOCs(14%)>烷烃(13%)>含硫类化合物(3%).对于涂装行业园区周边而言,芳香烃出现异常值的频率高达84%,其中甲苯、二甲苯以及含9个碳的芳香烃出现异常值的频率均超过20%,卤代烃、含氧VOCs、烯烃类、烷烃以及含硫化合物等组分也均有出现异常值.电子类园区周边出现异常值的频率(22%)总体较低,组分主要有芳香烃和丙酮.石化园区周边出现异常值的频率为50%,低于所有园区出现异常值的频率(64%),但高于电子行业园区出现异常值的频率;石化园区周边出现异常值组分主要有甲苯、二甲苯以及戊烯.因此,不同园区周边出现异常值的组分主要与相关行业的原辅料及产品有关^[8~10],这些组分对相关行业的排放有一定的示踪作用。

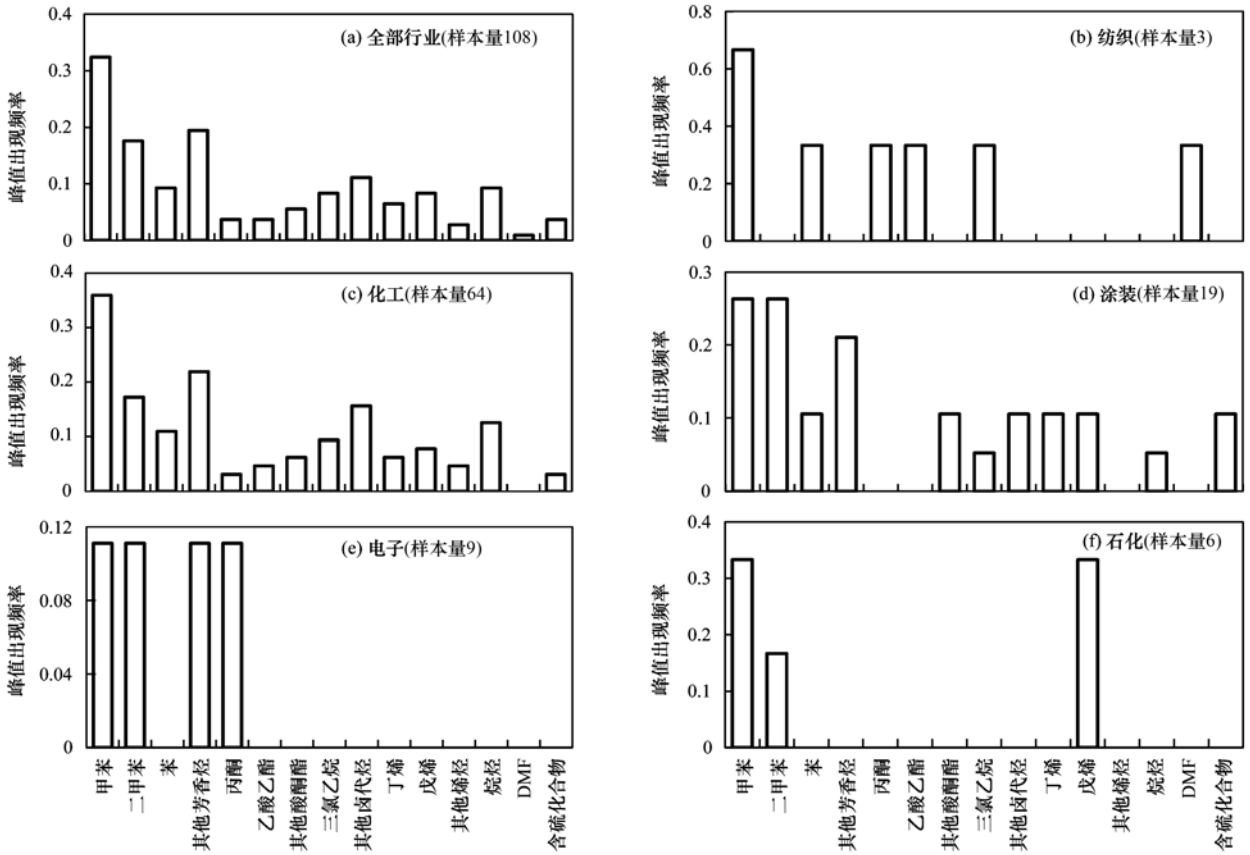


图6 长三角不同类型园区周边不同组分高浓度出现频率

Fig. 6 Frequency of peak values of each species in different types of industrial parks in the YRD region

3 结论

(1) 目前比较常见的两类VOCs走航技术主要

依托两类监测技术,分别是光电离飞行时间质谱技术和质子转移反应飞行时间质谱技术.两类技术对环境大气常见VOCs组分的监测覆盖率不足50%,

其中对芳香烃、卤代烃以及含氧组分覆盖率较高。这说明采用上述技术对园区周边 VOCs 走航监测的结果可能较真实浓度有一定程度偏低,特别是以排放烷烃和烯烃为主的石化园区,本研究走航监测结果可能较真实情况偏低较多。

(2) 园区周边 VOCs 走航监测的平均浓度变化范围为 $39 \sim 533 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5%~95% 分位值浓度), 平均值为 $183 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是城市环境大气浓度的 3 倍左右。园区周边 VOCs 最大峰值浓度的变化范围为 $307 \sim 12\,006 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (5%~95% 分位值浓度), 平均值为 $2\,812 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。以 2019 年走航结果为例, 其中约有 20% 的园区周边 VOCs 最大峰值浓度超过《挥发性有机物无组织排放控制标准》(GB 37822-2019) 中规定的厂区内非甲烷总烃的特别排放限值 ($6\,000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。值得注意的是, 本研究的监测区域以及监测组分与上述标准文件的规定有一定差异, 一是本研究监测区域是园区或厂区外围, 相关监测结果应该比厂区内要更低; 二是本研究测量的组分主要包括芳香烃、卤代烃和含氧组分, 与标准中规定的非甲烷总烃有交集但并无包含与被包含关系; 鉴于现有的走航技术对环境大气常见 VOCs 组分的覆盖率不足 50%, 可以推测园区周边 VOCs 浓度应该更高。这说明我国涉 VOCs 园区异常排放及超标排放问题比较突出, 异常排放平均出现频率高达 64%, 其中异常排放频率出现较高的主要特征组分包括甲苯 (32%)、二甲苯 (18%)、苯 (9%) 以及含 9 个及以上碳数的芳香烃 (19%), 此外部分卤代烃、含氧组分及烯烃也有异常值出现。

(3) 不同工业类型的园区周边 VOCs 浓度水平及主要特征组分存在一定差异。以纺织为主要产业的工业园区周边 VOCs 的平均浓度及最大峰值浓度均明显高于其他类型园区, 分别达到 $919 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $7\,877 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 园区周边监测到异常高值的频率为 67%, 主要异常组分包括甲苯、苯、丙酮、乙酸乙酯、三氯乙烷及 DMF。化工类园区周边 VOCs 浓度仅次于纺织类园区, 但其异常浓度出现频率更高 (69%)。涂装行业园区周边 VOCs 平均浓度较其他类型园区低, 但是峰值浓度仅次于纺织和化工类园区, 异常浓度出现的频率高达 68%。电子行业类园区周边 VOCs 异常浓度出现的频率明显低于其他类型园区, 仅为 22%。石化类园区周边峰值浓度较其他类型园区低, 但平均浓度与化工及电子类园区相当, 说明石化行业整体排放较高, 值得注意的是本研究采用的走航技术对石化园区排放的大量烷烃和烯烃组分监测效率较低。

致谢: 感谢上海市环境监测中心高松博士以及

南京拓服工坊科技有限公司谭稳博士对本研究开展走航工作提供的帮助。

参考文献:

- [1] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [2] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [3] Xu W Y, Kuang Y, Bian Y X, *et al.* Current challenges in visibility improvement in southern China [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(6): 395-401.
- [4] Jiang M Q, Lu K D, Su R, *et al.* Ozone formation and key VOCs in typical Chinese city clusters [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- [5] Zhu H L, Wang H L, Jing S G, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) along the mid-lower Yangtze River in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **190**: 232-240.
- [6] Liu Y H, Wang H L, Jing S G, *et al.* Characteristics and sources of volatile organic compounds (VOCs) in Shanghai during summer: Implications of regional transport [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116902.
- [7] Yuan B, Shao M, De Gouw J, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) in urban air: how chemistry affects the interpretation of positive matrix factorization (PMF) analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117** (D24), doi: 10.1029/2012JD018236.
- [8] 王红丽, 杨肇勋, 景盛翱. 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2617-2628.
Wang H L, Yang Z X, Jing S A. Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of industrial processing and solvent use emissions: a review [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2617-2628.
- [9] 景盛翱, 王红丽, 朱海林, 等. 典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3090-3095.
Jing S A, Wang H L, Zhu H L, *et al.* Treatment status and emission characteristics of volatile organic compounds from typical industrial sources [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3090-3095.
- [10] 王红丽, 景盛翱, 王倩, 等. 溶剂使用源有组织排放 VOCs 监测方法及组成特征 [J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(10): 1433-1439.
Wang H L, Jing S A, Wang Q, *et al.* Measurement and characterization of emissions of volatile organic compounds in solvent use [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(10): 1433-1439.
- [11] Li M, Zhang Q, Zheng B, *et al.* Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(13): 8897-8913.
- [12] Zhong Z M, Sha Q, 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.

- [13] Qiu K Q, Yang L X, Lin J M, *et al.* Historical industrial emissions of non-methane volatile organic compounds in China for the period of 1980-2010[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **86**: 102-112.
- [14] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (5): 2574-2583.
- [15] Tan G B, Gao W, Huang Z X, *et al.* Vacuum ultraviolet single-photon ionization time-of-flight mass spectrometer[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2011, **39**(10): 1470-1475.
- [16] Gao W, Tan G B, Hong Y, *et al.* Development of portable single photon ionization time-of-flight mass spectrometer combined with membrane inlet[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2013, **334**: 8-12.
- [17] 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.
- [18] Karl T, Jobson T, Kuster W C, *et al.* Use of proton-transfer-reaction mass spectrometry to characterize volatile organic compound sources at the La Porte super site during the Texas Air Quality Study 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108** (D16), doi: 10.1029/2002JD003333.
- [19] De Gouw J A, Goldan P D, Warneke C, *et al.* Validation of proton transfer reaction-mass spectrometry (PTR-MS) measurements of gas-phase organic compounds in the atmosphere during the New England Air Quality Study (NEAQS) in 2002 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108** (D21), doi: 10.1029/2003JD003863.
- [20] Warneke C, Veres P, Murphy S M, *et al.* PTR-QMS versus PTR-TOF comparison in a region with oil and natural gas extraction industry in the Uintah Basin in 2013[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(1): 411-420.
- [21] Gueneron M, Erickson M H, VanderSchelden G S, *et al.* PTR-MS fragmentation patterns of gasoline hydrocarbons [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2015, **379**: 97-109.
- [22] Koss A R, Sekimoto K, Gilman J B, *et al.* Non-methane organic gas emissions from biomass burning: identification, quantification, and emission factors from PTR-ToF during the FIREX 2016 laboratory experiment [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(5): 3299-3319.
- [23] Yuan B, Koss A, Warneke C, *et al.* A high-resolution time-of-flight chemical ionization mass spectrometer utilizing hydronium ions (H_3O^+ ToF-CIMS) for measurements of volatile organic compounds in the atmosphere [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(6): 2735-2752.
- [24] 盛涛, 陈筱佳, 高松, 等. 上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (11): 4901-4908.
- Sheng T, Chen X J, Gao S, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs in areas surrounding a petrochemical park in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4901-4908.
- [25] 毛瑶, 李刚, 胡天鹏, 等. 某典型石油化工园区冬季大气中 VOCs 污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 525-532.
- Mao Y, Li G, Hu T P, *et al.* Characteristics of VOCs pollution in the winter atmosphere of a typical petrochemical industry park [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 525-532.
- [26] 胡天鹏, 李刚, 毛瑶, 等. 某石油化工园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 517-524.
- Hu T P, Li G, Mao Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs of a petrochemical industrial park during autumn in China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (2): 517-524.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage-polys to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)