

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

成都市工业挥发性有机物排源成分谱

周子航¹, 邓也¹, 周小玲¹, 吴柯颖¹, 谭钦文^{1*}, 尹代娟², 宋丹林¹, 陈秋宇¹, 曾文豪¹

(1. 成都市环境保护科学研究院, 成都市大气科研重点实验室, 成都 610072; 2. 四川唐臣检测技术有限公司, 成都 610046)

摘要: 选取成都市汽车制造和石油化工等典型工业行业, 通过瓶采样和 SUMMA 罐采样及 GC-MS 分析方法, 研究了不同生产工艺环节的挥发性有机物 (VOCs) 排放特征。结果表明, 汽车制造各工艺环节均有各自的优势组分, 其中喷漆排放以烷烃 (32%) 和芳香烃 (35%) 为主。家具制造排放特征与使用原辅料高度相关, 以芳香烃 (50%) 和 OVOCs (38%) 为主。石油化工各装置区 VOCs 浓度范围为 $49 \sim 1\,387 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 不同装置区存在较大差异, 主要是由于炼油区主要产品为 $\text{C}_5 \sim \text{C}_9$ 的汽油和苯系物等, 化工区则较多使用了溶剂同时生成烯烃类产品。电子制造均以 OVOCs 为主, 占 VOCs 总排放的 50% 以上。制鞋行业排放 VOCs 主要由烷烃和 OVOCs 贡献, 平均占比分别为 52% 和 36%, 与所用溶剂组分高度相关。汽车制造 VOCs 排放组分差异较大, 主要以正十二烷和 2-丁酮等为主。家具制造排放组分主要为苯乙烯、乙酸乙酯和间/对-二甲苯等, 为涂料和稀释剂的典型组分。石油化工各装置区排放组分有差异, 炼油区以苯乙烯等为主, 化工区主要为 1,3-丁二烯等, 仓储区主要为 $\text{C}_3 \sim \text{C}_5$ 烷烃等, 废水处理则主要为 $\text{C}_6 \sim \text{C}_8$ 烷烃等。电子制造主要组分均为乙醇和丙酮等醛酮组分。制鞋企业排放组分以 C_5 和 C_6 等烷烃为主。通过臭氧生成潜势计算比较, 汽车制造和石油化工行业对臭氧生成潜势贡献较大的 VOCs 排放组分以烯烃和芳香烃为主, 具有较高的污染源反应活性。研究表明各工业行业 OVOCs 排放比例 (17%~96%) 和对臭氧生成潜势贡献均较为显著, 因此在进行 VOCs 排放控制时, 除重点管控芳香烃和烯烃外, 亦应提高对 OVOCs 组分的关注。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 工业排放; 源成分谱; 石油化工; 电子制造; 臭氧生成潜势 (OFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3042-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912203

Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu

ZHOU Zi-hang¹, DENG Ye¹, ZHOU Xiao-ling¹, WU Ke-ying¹, TAN Qin-wen^{1*}, YIN Dai-juan², SONG Dan-lin¹, CHEN Qiu-yu¹, ZENG Wen-hao¹

(1. Chengdu Key Laboratory of Air Pollution Research, Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Tonsin Testing Corporation, Chengdu 610046, China)

Abstract: The volatile organic compound (VOC) emission characteristics of various production procedures were analyzed through GC-MS after the emissions of typical enterprises such as automobile manufacturing, petrochemical, and other industries had been sampled with SUMMA canisters. Each production procedure in the automobile manufacturing and petrochemical industries was considered. The results showed that each automobile manufacturing procedure had its own dominant species, and alkanes (32%) and aromatics (35%) were the main emission species of coating spraying. The emission characteristics of furniture manufacturing were highly correlated with the raw materials, and the VOC emission species were mainly composed of aromatics (50%) and oxygenated VOCs (OVOCs) (38%). As for the petrochemical industry, VOC concentrations in various process plant areas ranged from $49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1\,387 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. As the main products of the refining area were $\text{C}_5 \sim \text{C}_9$ gasoline and benzene series, whereas comparatively more solvents were used in the chemical area, which would generate alkene products, VOC concentrations greatly differed in the various process plant areas. In terms of electronic manufacturing, OVOCs were the main emission species, accounting for more than 50% of total VOCs. Alkanes and OVOCs were the main contributors to VOC emissions in shoemaking, accounting for 52% and 36% on average, respectively, which was strongly related to the species of the used solvents. The VOC emission species of automobile manufacturing were quite different, predominantly including n-dodecane and 2-butanone. The emission species of furniture manufacturing mainly included styrene, ethyl acetate, *m/p*-xylene, etc., which are typical species of coatings and diluents. As for the differences in the emission species of process plant areas in the petrochemical industry, styrene was the main species in the refining area, 1,3-butadiene in the chemical area, $\text{C}_3 \sim \text{C}_5$ alkanes in the storage area, and $\text{C}_6 \sim \text{C}_8$ alkanes in the wastewater treatment area. The main emission species of electronic manufacturing were ethanol, acetone, and other aldehyde ketone species. The emission species of shoemaking enterprises are mainly C_5 and C_6 alkanes. According to the results of ozone formation potential (OFP), alkenes and aromatics were the main VOC emission species that contribute significantly to the OFP in the automobile manufacturing and petrochemical industries, with relatively high pollution source reaction activity. The results showed that the emission ratio (17%~96%) and OFP contributions of OVOCs were significant in various industries. Therefore, for VOC emission control, in addition to focusing on the control of aromatics and alkenes, attention should also be paid to OVOCs.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); industrial emission; source profiles; petrochemical; electronic manufacturing; ozone formation potential (OFP)

收稿日期: 2019-12-24; 修订日期: 2020-02-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0214005)

作者简介: 周子航 (1985~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气污染源排放控制, E-mail: gorezhou@cdaes.cn

* 通信作者, E-mail: tanqw@cdaes.cn

近地面臭氧(O_3)是由挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)和氮氧化物(NO_x)等多种前体物通过复杂光化学反应生成, O_3 污染会危及人类健康并对植被、农作物造成不利影响^[1-3].随着我国社会经济的快速发展,以颗粒物和 O_3 为主的大气复合型污染问题逐渐显现,尤其是京津冀、长三角、珠三角和成渝地区等特大城市群^[4-8].成都市作为成渝地区和四川盆地的中心城市,在采取了压减燃煤、能源结构优化和提升废气排放治理技术水平等一系列措施后,自2013~2018年,成都市 $PM_{2.5}$ 年均值由 $97\ \mu g\cdot m^{-3}$ 下降至 $51\ \mu g\cdot m^{-3}$,而 O_3 小时年均值由 $88\ \mu g\cdot m^{-3}$ 上升至 $96\ \mu g\cdot m^{-3}$.成都市 O_3 频繁出现较高浓度,大部分时间段和区域以VOCs控制为主,且烯烃类组分对 O_3 生成贡献最大^[9].由于 O_3 污染区域传输影响较小,本地生成成为成都市 O_3 积累的重要因素^[10].不同VOCs组分因反应活性等差异对于近地面 O_3 生成有着不同的影响^[11, 12],因此精确表征VOCs人为源排放特征,确定对成都市 O_3 生成贡献最大的烯烃类等VOCs组分的主要排放源,并采取相应的源头和末端减排管控措施,有利于更为高效精准地控制臭氧的浓度水平^[4].基于排放清单和源解析结果,移动源和工业源为成都市主要VOCs排放源^[13-17],虽然已经建立了部分工业过程源VOCs源成分谱^[18],但全面的本地化VOCs源成分谱对于识别和削减VOCs高活性组分起到关键作用,同时能够支撑VOCs总量管控向更为有效的组分活性管控转变^[19].

VOCs源成分谱研究起步于欧美等发达国家和地区^[20-22],建立了广泛使用的SPECIATE数据库和其它源成分谱数据库^[23-25].此后,我国东部沿海经济发达地区首先在国内开展了大量VOCs源排放特征研究工作^[26, 27].涉及VOCs排放的工业源主要包括工业化石燃料燃烧设备、工业过程源和溶剂使用源^[28].工业源作为我国首要VOCs排放源^[29-31],国内研究主要集中在工业锅炉的化石燃料使用、化工和家具涂装等行业;Shi等^[32]在炼焦、钢铁、火电厂和热电站使用稀释通道采样设备进行采样,获取了包含醛酮类和卤代烃的107种 $C_2\sim C_{12}$ 的VOCs组分;Mo等^[33]在珠三角石化企业基于23个工艺设施单元开展测试,分别研究了炼油、化工和氯化工这3个区域的排放特征,建立了基于生产装置的源成分谱;Tsai等^[34]对中国台湾省长流程钢铁制造企业主要工艺环节进行测试,获取了炼焦、烧结、热成型和冷成型4个环节的源成分谱并建立了其排放因子;Hsu等^[35]对人造纤维等7种化工制品有组织排放进行了测试,建立了典型化工制品的源成分谱;

Zhong等^[36]在珠三角区域建立了汽车制造、船舶制造、木器喷涂和金属表面喷涂等行业的源成分谱,获取了相应排放因子并评估其不确定性;与此同时,其它研究也建立了我国典型工业源的VOCs源成分谱^[37-47].上述报道虽然较为全面地开展了工业源VOCs排放特征研究,但不同地区由于经济发展程度的差异,导致原辅料、生产工艺和末端治理设备等影响VOCs排放的主要环节均存在差异,如成都市制药和涂料制造等典型工业源与其它区域排放特征存在一定差异^[18].由于工艺过程源产品和工艺复杂,不同行业之间、同一行业的不同生产过程之间,VOCs的排放组成都可能存在显著差异^[40],开展VOCs排放成分环节测试可有效降低源成分谱的不确定性.因此针对本地VOCs排放特征开展研究,开展基于生产工艺环节源成分谱采集和分析,获取具有代表性的VOCs源成分谱,对降低VOCs组分清单的不确定性具有重要意义.

本研究在已有研究基础上^[18],继续对成都市典型工业源开展源样品采集和分析,构建了基于工艺环节的源成分谱,估算了典型工艺过程源反应活性,以期对VOCs活性管控和 O_3 污染控制提供基础支撑.

1 材料与方法

1.1 工业排放源识别

基于已开展的研究工作,汽车制造、人造板和石油化工等为成都市工业源主要VOCs排放行业,但是即使为同行业,由于原辅料和工艺过程等差异均会传导至测试结果^[48],测试企业选取需具有代表性.本研究选取了汽车制造、家具制造、石油化工、电子产品制造和制鞋行业中原辅料和工艺类型占比达成都市50%以上的多家企业作为测试企业,在已有研究基础上,进而基本覆盖了成都市典型工业VOCs排放行业.

1.2 样品采集

有组织样品采集使用1 L硅烷化处理采样瓶,有组织采样方法参考EPA method-18,采样时间由流量阀控制约为5 min.无组织样品采集使用3.2 L不锈钢内表面硅烷化处理SUMMA罐,无组织样品在采集时靠近排放源(工艺装置)中心区域并在地面高度1.5 m处以代表装置排放特征,采样时间约为1 h.样品采集方法详见文献^[18].

1.2.1 汽车制造

成都市2017年整车年产量超过130万,成为我国主要汽车产地之一.汽车制造VOCs排放主要来源于喷漆、涂胶和防腐蜡等有机原辅料使用,基于成

都市大气污染源排放清单数据,其中 80% 为溶剂型涂料.生产涉及 VOCs 排放的工艺包括了汽车涂装整个流程:电泳及烘干、车身密封及烘干、中涂及烘干、面漆及烘干.汽车制造行业生产工艺全球同步情况较好,废气收集措施相较其它行业更为先进和完备,对于喷涂和烘干废气均做到密闭空间和管道收集.但废气收集后的处理,则存在地区差异,测试工作开展时成都市所有整车制造企业均仅对喷涂后废气使用水幕除去漆雾,而烘干后废气则使用热力燃烧方法去除 VOCs,相较于上海和广东等地全流程使用热力燃烧方法作为末端设施,仍存在较多需改进

环节.因此,采样位置基于生产工艺和废气收集方式,在电泳、中涂、面涂和涂胶排气筒分别进行样品采集,其中电泳等喷涂工艺分别在喷涂和烘干排气筒进行样品采集,以获取不同末端治理装置处理后的排放特征.共在 2 家企业中获取样品 29 个,其中电泳烘干废气热力燃烧(RTO)装置排放口采集 6 个样品,密封胶烘干 RTO 装置排放口采集 6 个样品,中涂烘干废气 RTO 装置排放口采集 4 个样品,面漆烘干 RTO 装置排放口采集 6 个样品,喷漆(包括电泳、中涂和面漆)废气水幕处理装置排放口采集 7 个样品,采样位置见表 1.

表 1 VOCs 源成分谱采样位置、数量和工艺情况

Table 1 Positions, quantities, and processes of sampling for VOCs source profiles

污染源	生产工艺或产品类型	采样位置	处理装置	样品数量/个
汽车制造	电泳	电泳烘干排气筒	RTO	6
	密封胶	密封胶烘干排气筒	RTO	6
	中涂	中涂烘干排气筒	RTO	4
	面漆	面漆烘干排气筒	RTO	6
	喷漆	喷漆排气筒	水幕	7
家具制造	底漆	底漆排气筒	水幕、光催化氧化、吸附	26
	面漆	面漆排气筒		
	底漆	底漆车间-无组织	—	12
	面漆	面漆车间-无组织	—	12
石油化工	炼油区	硫磺回收等 8 个装置区	—	24
	化工区	高密度聚乙烯等 8 个装置区	—	24
	仓储区	原油库等 5 个仓储区	—	15
	废水处理	生化池等 4 个废水处理装置	—	12
电子制造	电子产品制造	烤漆车间排气筒	喷淋吸收	4
	电子产品制造	组装车间排气筒	活性炭吸附	4
	电子产品制造	注塑车间-无组织	—	2
	显示屏制造	生产车间排气筒	沸石转轮吸附 + 催化燃烧	8
	显示屏制造	废水处理站	—	2
	芯片制造	生产车间排气筒	沸石转轮吸附 + 催化燃烧、直接燃烧	8
	芯片制造	废水处理站	—	3
制鞋	成型车间	车间废气排气筒	活性炭吸附	5
	粘合车间	车间废气排气筒	活性炭吸附	4
	生产车间	无组织	—	9
合计				191

1.2.2 家具制造

成都市作为全国家具主要产地之一,家具行业年使用 5.9 万 t 涂料等有机溶剂,其中 93% 为溶剂型涂料.由于家具行业在底漆和面漆中大量使用涂料、稀释剂和胶粘剂,其 VOCs 排放主要来自于底漆和面漆工艺环节.家具行业废气收集和末端治理措施总体水平较差,收集装置主要以半敞开式喷漆房为主,存在着较为严重的逸散,约 50% 的 VOCs 末端治理装置为水幕(去除漆雾) + 光催化降解法或吸附法(活性炭为主),VOCs 去除效率总体较低.因此,家具行业同时存在着较严重的有组织和无组织排放,在获取家具行业排放特征时,应同时收集其有

组织和无组织废气.本研究共在 6 家企业中获取样品 31 个,其中底漆和面漆末端治理装置排气筒 26 个,生产车间无组织 12 个,末端治理装置后采样分别包括了光催化降解法和吸附法等成都市主要类型,采样描述见表 1.

1.2.3 石油化工

石化企业生产工艺装置复杂,主要以工艺有组织排放、设备动静密封点泄漏、储罐呼吸排放、废水逸散和燃烧烟气排放等环节为主.由于石化企业生产装置复杂、泄漏点位多,且排气筒等采样点可达性较差,因此针对石化企业的 VOCs 排放研究主要以生产装置区域或厂界的环境采样为主^[33,42,43,47,49],

本研究参考已有研究方法以生产装置或其它设施区域的环境空气采样来表征其排放特征,将测试企业划分为炼油区、化工区、仓储区和废水处理 4 个区域,包括 16 套生产装置、5 个仓储区和 4 个废水处理装置,合计 25 个点位,共获取了 75 个样品,采样描述见表 1。

1.2.4 电子制造

成都市电子产品制造以平板电脑等电子产品、显示屏和芯片制造为主,其 VOCs 排放主要来源于制品涂装过程中的溶剂使用、显示屏和芯片等半导体制品的溶剂清洗和印刷等生产环节^[50,51]。电子制造行业 VOCs 治理水平较高:生产车间密闭性良好,以负压或密闭收集为主;VOCs 废气末端治理主要选用沸石转轮+催化燃烧或直接燃烧等高效处理方式;VOCs 废气潜在逸散源的废水处理装置部分密闭收集和处理。因此,选取了产品制造、显示屏和芯片制造等类型的主要电子企业,采样位置集中于末端治理装置排放口处,同时对部分企业未完全密闭的废水处理进行了样品收集,共采集 31 个样品,采样描述见表 1。

1.2.5 制鞋

成都市为中国西部地区主要的制鞋企业聚集地,生产工艺以胶粘为主,即使用胶粘剂对鞋帮和内底等进行拼接,在黄胶、处理剂和清洗剂等胶粘剂和有机溶剂使用过程中,造成大量 VOCs 排放,且成都市制鞋企业以溶剂型原料为主,其 VOCs 含量达 70% 以上。制鞋行业 VOCs 治理水平较差,末端治理主要选用活性炭吸附等去除效率较低技术,同时由于生产车间内以劳动密集为主,从人体安全角度考虑难以对全过程废气进行密闭收集,因此通常仅在大量使用溶剂的粘合和成型工段使用集气罩等部分收集装置对废气进行收集。因此,基于行业现状,主要对粘合和成型工艺排气筒进行有组织样品采集,并在生产车间各工段处同时采集较多无组织样品,综合评估其实际排放特征,采样描述见表 1。

1.3 样品分析

基于美国环保署 TO-14 和 TO-15 方法,气体样品经冷阱浓缩和热解析后,进入气相色谱分离,用质谱检测器进行检测,通过与标准物质的质谱图和保留时间比较定性,内标法定量。采用美国 Linde 公司的 PAMS、TO-15 两种标准气体和含有 4 种化合物的内标标准气(一溴一氯甲烷、1,4-二氟苯、氯苯-d5 和 4-溴氟苯)对仪器进行标定。样品分析方法详见文献[18]。在质控时,保证运输空白与实验室空白中目标物的质量浓度均低于方法测定下限,每批次分析一个平行样,平行样中目标物的相对偏差小于

30%,样品中内标保留时间与校准曲线中内标保留时间偏差在 20 s 以内,每 24 h 分析校准曲线中间质量浓度点或次高点,其测定结果与初始质量浓度相对偏差小于 30%,分析高质量浓度样品后,增加空白分析去除系统残留,样品经过的管路和接头均进行惰性化处理,并保温以消除样品吸附、冷凝和交叉污染。

1.4 源成分谱建立

在建立 VOCs 源成分谱时,需考虑所获取的不同企业样品之间的差异性,由于企业生产工艺、有机原辅物料和末端治理技术等多种因素的差异性,均会导致同一行业各企业间测试结果差异。因此,将 VOCs 源成分谱测试结果显示为各种 VOCs 组分相对于所测得 VOCs 总质量浓度的百分比(质量分数)^[12],将相同采样位置的源样品取平均值,获得了所测污染源 VOCs 组分的源成分谱。

PAMS 组分占据城市环境空气中 70%~80% 的非甲烷碳氢化合物质量浓度,且在不同实验室开展比对实验时比总 VOCs 具有更好的重现性^[52],国内外有研究推荐以 PAMS 的 VOCs 组分为通用标准组分,来构建 VOCs 源成分谱^[12,41]。同时将 OVOCs 组分纳入到 VOCs 源成分谱中,有助于更准确识别 VOCs 排放特征^[38,53-56]。所以,本研究在 PAMS 组分基础上,加入包含 OVOCs 组分的 TO-15 标气组分,构建了基于 104 种 VOCs 组分的源成分谱。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 组分排放特征

2.1.1 不同行业 VOCs 排放总体特征

将所建立的 VOCs 源成分谱组分划分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃、OVOCs 和其他 VOCs 共计 6 类,图 1 为汽车制造、家具制造、石油化工、电子制造和制鞋行业分生产工艺的 VOCs 排放特征,组分数据列于表 2 中。汽车制造中,电泳环节主要 VOCs 组分为烷烃,占 VOCs 总排放的 40% 以上,密封胶以烷烃(32%)和 OVOCs(35%)为主,中涂以 OVOCs(64%)为主,面漆以烷烃(29%)和芳香烃(30%)为主,喷漆以烷烃(32%)和芳香烃(35%)为主。由于汽车涂料中含有大量芳香烃和 OVOCs 类组分,其废气排放也以这两类为主。家具制造有组织和无组织排放均以芳香烃(50%)和 OVOCs(38%)为主。由于不同生产装置的排放差异,石油化工各装置区 VOCs 浓度范围为 49~1 387 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,存在较大差异:炼油区以烷烃(35%)、芳香烃(32%)和 OVOCs(29%)为主;化工区以烷烃(38%)和烯烃(22%)为主;仓储区以烷烃(52%)和芳香烃(23%)为主;废水处

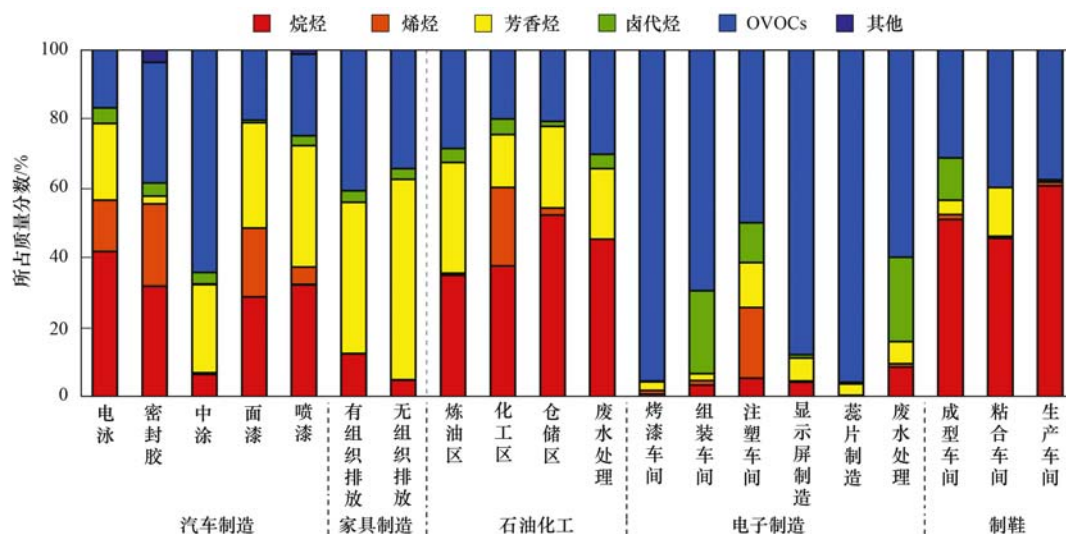


图1 汽车制造、家具制造、石油化工、电子制造和制鞋行业各生产环节 VOCs 组分构成

Fig. 1 VOCs species in various automobile manufacturing, furniture manufacturing, petrochemical, electronic manufacturing, and shoemaking procedures

理以烷烃(45%)和OVOCs(30%)为主。这主要是由于炼油区主要产品为C5~C9的汽油和苯系物等,化工区则较多使用了溶剂同时生成烯烃类产品。电子制造各工艺环节均以OVOCs为主,占VOCs总排放的50%以上,是因为酮类等目前为电子行业主要使用的溶剂。制鞋以烷烃和OVOCs为主,平均占比分别在52%和36%,主要来自于生产中使用的胶粘剂和有机溶剂。

各行业VOCs源成分谱的组分差异在下文中进行讨论。

2.1.2 不同行业VOCs排放组分差异

表2列出了汽车制造中电泳、密封胶、中涂和面漆烘干废气排气筒,以及喷漆废气排气筒的有组织排放VOCs组分。不同工艺环节排放的VOCs组分差异较明显:电泳为正十二烷(8%)和乙苯(7%)等;密封胶为2,3-二甲基丁烷(24%)、2-丁酮(15%)和1-丁烯(11%);中涂为2-丁酮(23%)、异丙醇(21%)和1,4-二恶烷(11%);面漆为2,3-二甲基丁烷(15%)、邻-二甲苯(13%)和乙苯(8%);喷漆筒废气在排放时仅去除漆雾,因此其组分主要为异丙基苯等芳香烃,与所使用涂料的组分更为接近。电泳等工艺则由于直接燃烧处理方式,其排放组分与原辅料成分存在差异。总体来看,经过直接燃烧处理后,将废气组分由芳香烃为主转变为以低活性的烷烃为主,有效实现了活性减排。

家具制造有组织和无组织排放VOCs组分见表2,两种排放方式的主要组分非常一致,均主要为苯乙烯、乙酸乙酯、间/对-二甲苯、2-丁酮、邻-二甲苯和乙苯等,其中苯乙烯、乙酸乙酯和苯系物等组分为涂料和稀释剂的典型组分,表明家具制造排放特征

与所使用的原辅料高度相关,同时光催化氧化和活性炭吸附等末端治理技术并不能显著改变排放组分,现用治理技术可达到总量减排的效果,但对于活性减排作用较小。

石油化工各装置区排放存在一定差异,炼油区主要VOCs组分与其产品成分相关度较高,化工区则与产品和所用溶剂均相关,仓储区主要与所储存VOCs物料有关,废水处理为全厂生产废水汇集处,其排放特征主要与生产装置废水和废水处理工艺所用药剂有关。由于石油化工装置较多,且本研究在各装置处采集样品较少,主要针对不同区域的排放特征进行分析,对于单一装置排放特征研究仍待今后持续进行,因此分别将炼油区、化工区、仓储区和废水处理各采样点结果取平均值以表征该区域的平均排放特征。结果表明,炼油区以乙醇、苯乙烯、正辛烷、3-乙基甲苯、乙酸乙酯和甲基叔丁基醚等为主,分别占总VOCs排放的16%、13%、10%、8%、7%和5%,其中烷烃以C₆~C₈为主,占总VOCs排放的23%;化工区主要为1,3-丁二烯、正己烷、乙醇、苯乙烯、丙烯和正十二烷等,分别占13%、12%、9%、8%、7%和5%;仓储区主要为C₃~C₅烷烃、C₆~C₈烷烃、乙醇、苯乙烯和乙酸乙酯等,分别占25%、21%、12%、8%和5%;废水处理则主要为C₆~C₈烷烃、乙醇、乙酸乙酯、邻-二甲苯、苯乙烯和甲基叔丁基醚,分别占35%、14%、8%、8%、7%和5%。分析上述主要VOCs组分的来源,炼油区中苯乙烯、3-乙基甲苯和1,2,3-三甲基苯均为芳烃装置产物,正辛烷、正庚烷和正十二烷为常减压蒸馏装置馏分,C₆~C₈组分同时也来自于汽油产品;1,3-丁二烯为化工区顺丁橡胶等装置的原料和产品,正己

烷为高密度聚乙烯装置溶剂,丙烯是乙烯等多个装置的原料或产品;仓储区内主要为 C₃ ~ C₁₂ 烷烃组分,均为汽油罐区、芳烃罐区和中间原料罐区等装置存储物料的主要组分;废水逸散的主要 VOCs 组分则与炼油和化工装置的特征组分均相关. 石油化工 VOCs 排放组分见表 2.

电子制造的 VOCs 排放特征显现出与涂装和石化较大的行业差异,其排放主要为醛酮酯类的 OVOCs 组分:电子产品制造烤漆车间排放以乙酸乙酯、乙醇、异丙醇和丙酮为主,分别占总 VOCs 排放的 31%、27%、19% 和 11%,合计占 89% 以上;组装车间的乙醇占 60%;注塑车间乙醇、1,3-丁二烯和甲苯,分别占 31%、19% 和 12%;显示屏制造主要排放组分为乙醇(42%)、丙酮(32%)和甲基丙烯酸甲酯(8%);芯片制造以异丙醇(93%)为主;废水处理则主要为丙酮(41%)、乙醇(13%)、氯仿(9%)和丙烷(6%). 总体来看,虽然不同电子产品制造排放的主要 VOCs 组分不尽相同,但主要组分均为醇类、酮类和酯类等 OVOCs,贡献了 50% 以上的总 VOCs,这是由于这些组分近年来作为苯系物溶剂的替代组分,使用量显著增加^[50],而汽车和家具制造等典型涂装企业仍然以苯系物作为重要溶剂,其排放也以苯系物为主. 电子制造 VOCs 排放组分见表 2.

制鞋企业不同工段排放的 VOCs 组分主要为:成型工段以 2-甲基戊烷(13%)和环戊烷(10%)等烷烃为主,粘合车间以 3-甲基戊烷(21%)、丙酮(14%)、甲苯(14%)和乙醇(14%)等为主,无组织排放以丙酮(15%)、乙酸乙酯(15%)和环戊烷(14%)等为主. 结果表明,制鞋企业使用活性炭对废气进行处理,其有组织和无组织排放组分均较为相似,表明制鞋企业废气经活性炭处理,VOCs 组分

改变较小,这一点与家具制造企业类似. 同时,所排放的 VOCs 组分与企业所使用的有机溶剂中组分吻合,表明制鞋行业排放的 VOCs 组分受原辅料影响较大. 制鞋 VOCs 排放组分见表 2.

2.2 4 组分活性评估

本研究基于 VOCs 污染源反应活性 (source reactivity, SR),对污染源的臭氧生成贡献进行定量评估^[18,41],将其定义为污染源排放单位质量 VOCs 的臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP),OFP 用最大增量反应 (MIR) 来表征^[57],计算方法见下式:

$$SR_i = \sum_{j=1}^n f_{i,j} \times MIR_j$$

式中,SR_i 为污染源 i 排放 1 g VOCs 时的 O₃ 生成量 (g·g⁻¹);f_{i,j} 为污染源 i 中 j 组分的质量分数;MIR_j 为组分 j 的最大增量反应活性,其系数取自文献^[57].

SR 计算结果见图 2,汽车制造各排放环节的 SR 值范围为 2.44 ~ 5.00 g·g⁻¹,家具制造为 1.93 ~ 2.03 g·g⁻¹,石油化工为 2.06 ~ 4.03 g·g⁻¹,电子制造为 0.76 ~ 3.81 g·g⁻¹,制鞋为 1.72 ~ 2.07 g·g⁻¹. 汽车制造具有较高的反应活性,以面漆环节为最高,SR 值达到 5.00 g·g⁻¹,主要由高活性的烯烃贡献,其它工艺环节也主要以芳香烃和烯烃的贡献为主. 家具制造以芳香烃贡献为主,SR 值占比达到 55% 以上. 石油化工 SR 值贡献以芳香烃和烯烃为主,其中炼油区芳香烃贡献为 61%,化工区烯烃为 68%,仓储和废水处理的芳香烃贡献分别为 43% 和 47%. 电子制造则有极大差异,全部工艺环节的 OVOCs 平均贡献达到了 64%,部分工艺达到了 85% 以上,显示了较为明显的行业特征. 制鞋行业以烷烃和 OVOCs

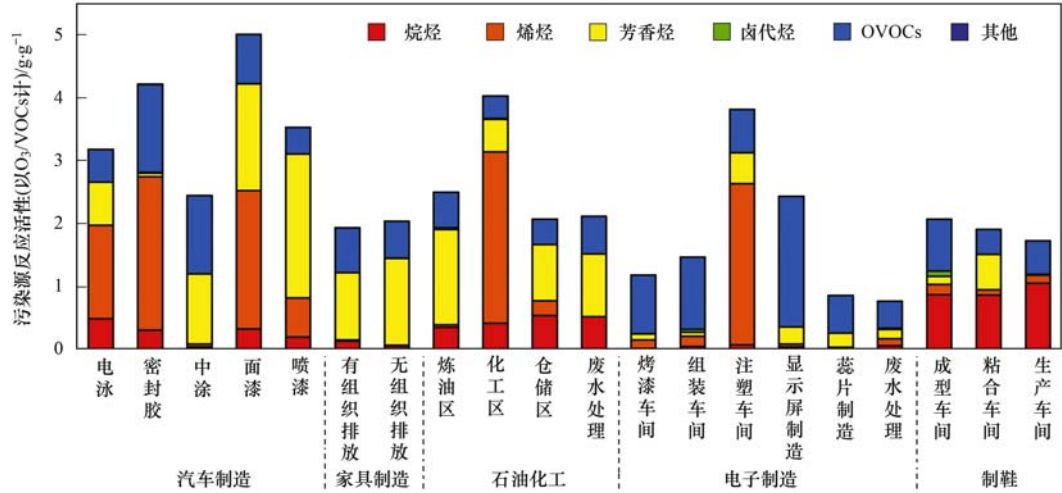


图2 生产环节 VOCs 污染源反应活性

Fig. 2 VOCs source reactivities in various automobile manufacturing, furniture manufacturing, petrochemical, electronic manufacturing, and shoemaking procedures

表 2 工业源 VOCs 源成分谱¹⁾/%

Table 2 VOCs source profiles associated with automobile manufacturing, furniture manufacturing, petrochemical, electronic manufacturing and shoemaking/%

编号	VOCs 组分	汽车制造					家具制造		制鞋		
		电泳	密封胶	中涂	面漆	喷漆	有组织排放	无组织排放	成型车间	粘合车间	生产车间无组织
1	丙烷	3.55(12.9)	0.39(4.36)	nd	2.40(2.28)	0.58(1.17)	0.33(0.73)	0.04(0.05)	1.03(1.50)	nd	0.25(2.53)
2	正丁烷	1.55(1.34)	0.17(0.89)	nd	0.69(1.50)	0.1(0.06)	0.03(0.07)	0.01(0.01)	1.28(1.46)	0.25(0.05)	0.70(3.04)
3	异丁烷	1.01(0.90)	0.10(0.58)	nd	0.45(0.99)	0.03(0.04)	0.08(0.23)	0.01(0.01)	0.02(0.04)	nd	0.03(0.50)
4	正戊烷	1.69(1.46)	0.17(0.94)	nd	0.74(1.64)	0.05(0.07)	0.04(0.09)	0.25(0.76)	0.54(0.37)	0.32(0.07)	1.08(1.50)
5	异戊烷	0.92(0.87)	0.12(0.58)	nd	0.50(0.93)	0.12(0.12)	0.04(0.05)	0.13(0.29)	0.13(0.09)	0.13(0.03)	0.36(0.64)
6	环戊烷	nd	nd	nd	nd	nd	0.16(0.45)	nd	10.31(6.98)	12.21(1.81)	14.46(7.35)
7	正己烷	0.58(0.57)	0.16(0.11)	nd	nd	nd	0.45(1.28)	0.06(0.12)	0.11(12.15)	0.03(0.00)	0.17(4.68)
8	2,2-二甲基丁烷	3.78(3.42)	0.38(2.13)	nd	1.59(3.79)	0.11(0.16)	0.03(0.06)	nd	1.64(1.44)	1.57(0.43)	1.99(1.39)
9	2,3-二甲基丁烷	2.83(5.78)	24.12(12.64)	0.12(0.65)	15.20(7.48)	0.17(6.74)	9.88(12.59)	3.50(4.68)	5.32(5.97)	4.78(2.18)	9.23(3.63)
10	2-甲基戊烷	4.52(4.05)	0.45(2.53)	nd	1.90(4.46)	0.14(0.18)	0.44(1.17)	0.09(0.16)	13.21(12.08)	0.03(0.00)	0.11(5.12)
11	3-甲基戊烷	2.73(2.36)	0.25(1.43)	nd	1.07(2.50)	0.08(0.11)	0.31(0.85)	0.01(0.01)	7.61(7.01)	20.70(3.46)	9.35(7.25)
12	环己烷	1.02(1.66)	0.25(0.25)	nd	nd	0.31(0.33)	0.03(0.07)	0.04(0.09)	0.31(0.32)	nd	1.34(6.11)
13	甲基环戊烷	1.84(1.59)	0.17(0.96)	nd	0.71(1.68)	0.05(0.07)	0.01(0.01)	nd	6.61(5.89)	5.31(1.12)	9.6(4.52)
14	正庚烷	1.72(1.54)	nd	nd	nd	nd	0.01(0.01)	0.12(0.37)	0.22(0.27)	nd	0.21(1.71)
15	2,3-二甲基戊烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.09(0.13)	nd	2.13(2.96)
16	2,4-二甲基戊烷	3.74(3.94)	0.23(1.31)	nd	2.47(2.09)	0.07(0.10)	0.01(0.02)	nd	0.02(0.03)	nd	1.92(3.05)
17	2-甲基己烷	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.02)	0.02(0.05)	0.22(0.32)	nd	3.29(2.77)
18	3-甲基己烷	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.01)	0.02(0.05)	0.75(0.31)	0.14(0.26)	2.84(3.63)
19	甲基环己烷	1.03(0.94)	0.11(0.60)	nd	0.44(1.03)	0.03(0.04)	0.01(0.01)	0.01(0.01)	0.06(0.08)	nd	0.29(3.78)
20	正辛烷	nd	nd	nd	nd	nd	0.37(0.61)	0.48(0.99)	0.04(0.04)	nd	0.93(2.49)
21	2,2,4-三甲基戊烷	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.01)	nd	0.10(0.08)	nd	nd
22	2,3,4-三甲基戊烷	nd	0.02(0.10)	nd	0.07(0.17)	0.01(0.01)	0.01(0.02)	nd	0.47(0.54)	nd	nd
23	2-甲基庚烷	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.02)	0.01(0.02)	0.03(0.03)	nd	0.13(2.20)
24	3-甲基庚烷	1.33(1.20)	0.13(0.75)	nd	0.56(1.34)	0.04(0.06)	0.01(0.02)	0.01(0.02)	0.03(0.03)	nd	0.13(1.68)
25	正壬烷	nd	nd	nd	nd	0.12(0.26)	0.09(0.19)	0.08(0.15)	0.75(0.81)	nd	nd
26	正癸烷	nd	nd	nd	nd	0.43(0.82)	nd	nd	nd	nd	nd
27	正十一烷	0.39(0.52)	nd	0.54(0.77)	nd	1.14(4.09)	0.01(0.03)	0.01(0.02)	nd	nd	nd
28	正十二烷	7.46(7.40)	4.66(14.89)	5.92(2.85)	nd	28.62(13.89)	0.04(0.07)	0.01(0.04)	nd	nd	nd
29	丙烯	0.49(0.26)	7.41(5.75)	nd	5.74(5.78)	nd	0.09(0.25)	0.05(0.07)	nd	nd	nd
30	1-丁烯	1.70(1.15)	11.71(7.89)	0.44(0.66)	2.39(4.32)	1.87(1.73)	nd	nd	0.23(0.22)	nd	nd
31	顺-2-丁烯	1.31(1.14)	0.31(0.70)	nd	0.80(1.18)	1.28(1.17)	nd	nd	0.45(0.38)	0.58(0.08)	0.21(0.08)
32	反-2-丁烯	1.36(1.12)	0.68(0.64)	nd	1.03(1.09)	1.47(1.24)	nd	nd	nd	nd	nd
33	1,3-丁二烯	0.28(0.22)	0.39(0.23)	nd	4.80(3.17)	0.06(0.05)	0.02(0.03)	0.06(0.09)	0.37(2.44)	nd	0.52(0.47)
34	1-戊烯	1.81(1.53)	2.09(0.88)	nd	1.53(1.40)	0.05(0.07)	nd	nd	nd	nd	nd
35	顺-2-戊烯	1.15(1.04)	0.11(0.65)	nd	0.48(1.15)	0.03(0.05)	nd	nd	nd	nd	nd
36	反-2-戊烯	1.97(1.79)	0.20(1.11)	nd	0.9(1.96)	0.06(0.08)	nd	nd	nd	nd	nd
37	异戊二烯	2.37(2.14)	0.39(1.31)	nd	1.01(2.38)	0.15(0.08)	0.02(0.01)	0.03(0.02)	0.27(0.12)	0.06(0.04)	0.31(0.22)
38	1-己烯	2.28(2.06)	0.23(1.27)	nd	0.98(2.30)	0.07(0.09)	0.01(0.02)	nd	0.06(0.09)	nd	nd
39	苯	0.06(0.04)	0.04(0.05)	nd	1.59(1.01)	nd	0.01(0.01)	0.06(0.12)	0.03(0.03)	nd	nd
40	甲苯	2.32(1.96)	0.02(0.17)	nd	0.27(1.62)	0.01(0.02)	1.40(1.85)	4.79(5.32)	2.44(2.22)	13.58(1.19)	0.41(0.43)
41	乙苯	7.34(7.36)	0.02(0.22)	nd	7.69(5.75)	0.48(0.24)	7.21(4.03)	5.63(4.84)	nd	nd	nd
42	邻二甲苯	2.57(2.55)	0.02(0.23)	8.70(7.98)	12.99(8.42)	0.75(0.39)	7.46(5.38)	6.79(5.87)	nd	nd	nd
43	苯乙烯	2.74(2.95)	1.00(0.55)	9.05(3.45)	2.79(3.23)	0.09(0.06)	11.52(13.21)	27.16(13.22)	1.55(1.48)	nd	nd
44	正丙苯	nd	nd	nd	0.02(7.55)	0.25(0.15)	0.01(0.01)	0.01(0.01)	nd	nd	nd
45	异丙基苯	nd	nd	nd	nd	11.47(11.89)	0.02(0.03)	0.04(0.06)	nd	nd	nd
46	间-乙基甲苯	nd	nd	nd	0.10(0.06)	2.15(2.06)	0.01(0.01)	0.02(0.03)	nd	nd	nd
47	邻-乙基甲苯	nd	nd	nd	0.03(6.48)	0.72(0.77)	0.01(0.01)	0.01(0.02)	nd	nd	nd
48	对-乙基甲苯	nd	nd	nd	0.17(0.30)	0.75(0.64)	0.02(0.03)	0.04(0.07)	nd	nd	nd
49	1,2,3-三甲基苯	nd	nd	nd	2.26(0.86)	8.34(6.23)	0.03(0.04)	0.02(0.03)	nd	nd	nd
50	1,2,4-三甲基苯	1.26(0.94)	0.03(0.31)	nd	0.92(1.93)	4.53(6.46)	0.07(0.07)	0.12(0.13)	nd	nd	nd
51	1,3,5-三甲基苯	nd	0.01(0.06)	nd	0.19(0.37)	1.34(1.55)	0.01(0.01)	0.04(0.08)	nd	nd	nd

续表 2

编号	VOCs 组分	汽车制造					家具制造		制鞋		
		电泳	密封胶	中涂	面漆	喷漆	有组织排放	无组织排放	成型车间	粘合车间	生产车间无组织
52	间-二乙基苯	nd	nd	1.01(0.67)	nd	1.48(1.38)	nd	nd	nd	nd	nd
53	对-二乙基苯	nd	nd	nd	nd	0.14(0.24)	0.04(0.05)	0.03(0.05)	nd	nd	nd
54	萘	0.28(0.54)	1.10(2.14)	6.65(14.56)	0.29(0.58)	0.48(1.01)	0.37(0.57)	0.04(0.05)	0.13(0.25)	0.45(0.05)	nd
55	间/对-二甲苯	5.48(6.23)	0.04(0.46)	nd	0.95(1.20)	1.83(0.75)	15.11(7.88)	12.62(7.63)	nd	nd	nd
56	乙醇	1.21(0.49)	0.75(1.17)	0.04(0.02)	0.95(0.61)	0.46(0.26)	2.04(2.15)	2.21(2.64)	0.11(5.71)	13.58(10.07)	5.01(4.48)
57	丙烯醛	2.84(2.08)	0.17(0.18)	0.15(0.16)	4.33(7.04)	2.89(2.27)	0.29(0.44)	0.04(0.08)	4.12(3.20)	0.93(0.19)	1.16(0.25)
58	丙酮	4.71(3.03)	0.27(9.02)	0.10(0.06)	2.78(2.96)	0.51(0.18)	0.61(0.63)	0.31(0.31)	5.36(4.62)	14.33(1.84)	14.96(7.33)
59	异丙醇	0.72(0.42)	0.47(1.16)	20.73(11.16)	2.04(2.17)	12.68(10.3)	0.34(0.31)	0.22(0.66)	3.67(3.33)	0.17(4.78)	nd
60	四氢呋喃	0.34(0.43)	0.3(0.34)	2.64(1.64)	0.20(0.29)	nd	0.02(0.02)	0.01(0.01)	7.69(6.39)	nd	nd
61	2-丁酮	0.29(0.20)	15.13(10.28)	23.29(11.86)	4.15(4.22)	0.31(0.33)	13.34(9.32)	11.05(6.41)	4.78(3.07)	0.09(0.01)	0.23(11.81)
62	乙酸乙酯	nd	0.01(1.10)	0.54(0.28)	3.47(2.16)	nd	nd	0.01(0.02)	nd	0.09(9.75)	nd
63	1,4-二甲苯	1.20(1.49)	0.66(7.41)	11.13(5.64)	0.65(0.71)	0.74(0.81)	0.12(0.53)	nd	1.67(5.07)	nd	nd
64	乙酸乙酯	1.78(2.41)	8.51(6.68)	2.71(1.41)	0.57(0.71)	5.38(4.38)	14.85(7.9)	13.03(5.48)	2.22(0.31)	10.67(1.30)	14.64(6.30)
65	甲基叔丁基醚	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.01)	1.55(1.55)	nd	nd
66	甲基丙烯酸甲酯	0.53(1.56)	6.35(3.52)	1.82(4.71)	1.46(4.79)	0.38(0.40)	nd	0.01(0.02)	0.01(0.50)	nd	1.38(7.69)
67	4-甲基-2-戊酮	2.43(2.20)	0.04(0.41)	0.26(0.33)	nd	0.02(3.32)	9.21(5.58)	7.59(6.89)	nd	nd	nd
68	2-己酮	0.95(1.33)	2(1.07)	0.90(2.35)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
69	一氯甲烷	0.10(0.42)	0.24(0.15)	2.28(1.19)	0.13(0.15)	0.71(0.57)	0.02(0.03)	0.05(0.08)	0.41(0.45)	nd	0.31(0.17)
70	二氯甲烷	0.23(1.04)	0.89(0.45)	nd	0.21(0.44)	1.88(1.60)	1.56(3.67)	1.27(1.59)	0.40(0.47)	nd	nd
71	一溴甲烷	nd	0.35(0.22)	nd	nd	nd	nd	nd	2.26(2.18)	nd	nd
72	氯仿	2.15(3.17)	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.01)	nd	nd	nd
73	四氯化碳	0.63(2.42)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
74	氯乙烯	nd	0.23(0.14)	nd	nd	nd	0.01(0.01)	0.01(0.01)	nd	nd	nd
75	氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
76	1,1-二氯乙烯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
77	反-1,2-二氯乙烯	nd	0.31(0.17)	nd	nd	nd	nd	nd	0.57(0.56)	nd	nd
78	1,1-二氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
79	1,2-二氯乙烷	nd	0.01(0.06)	nd	nd	nd	0.08(0.11)	0.51(0.69)	nd	nd	nd
80	三氯乙烯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
81	1,1,1-三氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
82	1,1,2-三氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.92(1.89)	nd	nd
83	四氯乙烯	nd	nd	nd	nd	nd	0.08(0.21)	0.01(0.02)	nd	nd	nd
84	1,2-二溴乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
85	反式-1,3-二氯-1-丙烯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
86	顺式-1,3-二氯-1-丙烯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.03)	1.78(1.70)	nd	nd
87	1,2-二氯丙烷	1.24(1.71)	nd	nd	nd	nd	0.11(0.30)	1.09(2.28)	0.20(0.76)	nd	nd
88	氯苯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
89	1,4-二氯苯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
90	1,2-二氯苯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.50(2.37)	nd	nd
91	二氯二氟甲烷	0.06(0.06)	0.01(0.07)	nd	0.12(0.17)	0.01(0.01)	nd	0.02(0.03)	0.18(0.18)	nd	nd
92	一氟三氯甲烷	nd	0.01(0.03)	nd	nd	nd	nd	0.01(0.02)	nd	nd	nd
93	1,3-二氯苯	0.02(0.63)	0.27(0.16)	nd	nd	nd	nd	nd	0.06(0.09)	nd	nd
94	顺-1,2-二氯乙烯	nd	0.27(0.15)	nd	nd	nd	nd	nd	1.31(1.24)	nd	nd
95	1,2-二氯四氟乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.55(0.52)	nd	nd
96	1,1,2-三氟三氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
97	一溴二氯甲烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
98	二溴一氯甲烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
99	三溴甲烷	nd	0.70(0.41)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
100	1,1,2,2-四氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
101	氯代甲苯	nd	nd	nd	nd	0.01(0.12)	nd	nd	nd	nd	nd
102	1,2,4-三氯苯	0.07(0.86)	0.43(0.24)	0.97(12.47)	0.16(0.33)	0.29(0.24)	1.40(2.15)	0.04(0.07)	nd	nd	nd
103	六氯-1,3-丁二烯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.01(0.02)	nd	nd	nd
104	二硫化碳	0.04(1.02)	3.94(2.41)	nd	0.05(0.60)	1.67(1.32)	0.01(0.01)	0.01(0.02)	0.26(0.24)	nd	0.33(0.85)

1) 括号中数字为标准偏差；“nd”表示没有检出

续表 2

编号	VOCs 组分	石油化工				电子产品制造					
		炼油区	化工区	仓储区	废水处理	烤漆车间 排气筒	组装车间 排气筒	注塑车间 无组织	显示屏制造 排气筒	芯片制造 排气筒	废水处理
1	丙烷	2.16(4.42)	2.37(2.57)	9.66(6.88)	nd	nd	nd	nd	0.12(0.29)	nd	6.09(2.93)
2	正丁烷	0.09(0.27)	0.07(0.09)	8.64(6.98)	nd	0.02(0.01)	1.02(0.01)	1.55	0.01(0.01)	nd	0.14(0.07)
3	异丁烷	0.30(0.85)	2.24(5.65)	1.96(2.44)	1.25(2.49)	nd	nd	0.24	nd	nd	0.09(0.06)
4	正戊烷	nd	0.01(0.02)	3.53(3.18)	3.10(6.20)	0.02(0.00)	1.30(0.00)	0.12	0.01(0.01)	nd	0.21(0.10)
5	异戊烷	nd	nd	nd	nd	0.03(0.01)	0.46(0.02)	0.24	0.01(0.01)	nd	0.27(0.23)
6	环戊烷	0.25(0.48)	0.45(0.44)	0.67(0.27)	0.21(0.42)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
7	正己烷	0.05(0.11)	11.79(15.71)	1.05(1.14)	1.60(3.20)	nd	nd	nd	0.02(0.02)	0.01(0.01)	0.12(0.11)
8	2,2-二甲基丁烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.09(0.06)	nd
9	2,3-二甲基丁烷	0.75(0.37)	0.16(0.17)	0.60(0.31)	0.18(0.36)	0.81(0.52)	0.74(0.13)	1.66	0.17(0.20)	nd	1.48(5.51)
10	2-甲基戊烷	2.95(1.39)	1.21(0.37)	3.27(0.91)	4.74(0.60)	nd	nd	0.59	0.03(0.04)	0.11(0.07)	0.16(0.14)
11	3-甲基戊烷	0.17(0.48)	2.37(2.90)	0.63(0.72)	0.70(1.40)	nd	nd	0.24	nd	0.06(0.04)	nd
12	环己烷	nd	nd	nd	0.23(0.46)	nd	nd	nd	nd	0.02(0.03)	nd
13	甲基环戊烷	0.17(0.46)	1.02(1.48)	0.33(0.40)	0.54(1.08)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
14	正庚烷	3.00(3.26)	0.60(0.48)	3.26(2.26)	1.01(2.02)	nd	nd	nd	0.01(0.01)	nd	nd
15	2,3-二甲基戊烷	1.36(1.47)	0.31(0.22)	1.28(0.52)	0.58(0.68)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
16	2,4-二甲基戊烷	0.74(1.40)	0.31(0.44)	0.72(0.72)	0.12(0.24)	nd	nd	nd	nd	0.01(0.03)	nd
17	2-甲基己烷	1.05(1.73)	1.62(1.60)	1.93(1.57)	4.93(3.85)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
18	3-甲基己烷	nd	nd	0.05(0.07)	0.25(0.49)	nd	nd	0.12	0.13(0.09)	nd	nd
19	甲基环己烷	1.83(0.40)	0.19(0.12)	1.17(0.67)	3.08(0.74)	nd	nd	0.59	nd	0.03(0.02)	nd
20	正辛烷	9.45(3.40)	4.85(3.62)	4.94(2.29)	12.8(6.86)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
21	2,2,4-三甲基戊烷	1.10(1.81)	0.63(0.32)	1.41(0.97)	2.86(2.62)	nd	nd	nd	nd	nd	0.14(0.07)
22	2,3,4-三甲基戊烷	nd	nd	nd	0.19(0.39)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
23	2-甲基庚烷	nd	nd	0.24(0.35)	0.26(0.52)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
24	3-甲基庚烷	0.37(0.70)	0.14(0.21)	0.40(0.70)	0.46(0.92)	nd	nd	nd	nd	0.03(0.02)	nd
25	正壬烷	1.03(1.58)	0.23(0.40)	0.83(1.16)	0.50(1.00)	nd	nd	nd	3.65(14.84)	nd	nd
26	正癸烷	1.87(2.33)	1.27(0.79)	1.20(1.19)	0.57(1.15)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
27	正十一烷	2.14(3.45)	0.39(0.91)	2.26(2.36)	1.00(1.99)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
28	正十二烷	4.02(5.01)	5.34(5.38)	2.17(3.02)	4.02(4.74)	nd	nd	0.12	0.12(0.13)	nd	nd
29	丙烯	nd	7.27(11.16)	0.06(0.14)	nd	nd	nd	nd	0.28(0.25)	0.15(0.54)	0.45(0.69)
30	1-丁烯	nd	1.82(2.97)	0.14(0.30)	nd	0.01(0.00)	nd	nd	nd	nd	nd
31	顺-2-丁烯	nd	nd	0.36(0.60)	nd	nd	nd	0.83	nd	nd	nd
32	反-2-丁烯	0.09(0.13)	0.10(0.12)	0.82(0.98)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
33	1,3-丁二烯	nd	13.31(16.89)	nd	nd	1.07(0.05)	1.2(0.66)	19.14	0.09(0.08)	0.01(0.06)	0.36(0.12)
34	1-戊烯	nd	nd	nd	nd	0.01(0.02)	nd	0.24	nd	nd	nd
35	顺-2-戊烯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.12	nd	0.03(0.02)	nd
36	反-2-戊烯	nd	nd	0.07(0.16)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
37	异戊二烯	nd	nd	nd	nd	0.01(0.00)	0.09(0.01)	nd	0.01(0.01)	nd	0.08(0.19)
38	1-己烯	0.49(0.94)	nd	0.57(0.62)	0.08(0.15)	nd	nd	nd	nd	0.06(0.04)	nd
39	苯	nd	nd	1.50(3.06)	0.02(0.03)	nd	nd	nd	0.04(0.02)	0.01(0.19)	0.32(0.82)
40	甲苯	0.70(0.22)	0.51(0.27)	0.61(0.20)	1.05(0.36)	2.45(0.78)	nd	11.89	0.11(0.08)	nd	0.51(1.45)
41	乙苯	0.31(0.25)	0.21(0.16)	0.08(0.02)	0.28(0.14)	nd	nd	nd	0.47(0.62)	0.48(0.37)	2.09(1.28)
42	邻-二甲苯	1.03(2.23)	0.18(0.14)	2.91(2.10)	8.33(4.76)	nd	nd	nd	1.01(1.85)	0.02(0.57)	0.80(1.03)
43	苯乙烯	12.8(4.70)	8.29(6.63)	8.08(4.43)	6.97(11.28)	nd	nd	0.83	0.36(0.25)	0.11(1.03)	0.32(1.07)
44	正丙苯	1.45(2.13)	1.01(0.47)	1.10(1.10)	0.65(0.97)	nd	nd	nd	0.02(0.14)	nd	nd
45	异丙基苯	0.17(0.48)	0.46(0.47)	0.83(0.99)	0.14(0.28)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
46	间-乙基甲苯	0.01(0.01)	1.97(1.11)	0.01(0.01)	0.01(0.01)	nd	nd	nd	0.14(0.77)	nd	nd
47	邻-乙基甲苯	2.95(2.88)	1.27(0.76)	1.50(1.07)	1.12(1.30)	nd	nd	nd	0.03(0.19)	nd	nd
48	对-乙基甲苯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.38(0.77)	0.41(0.37)	nd
49	1,2,3-三甲基苯	3.44(3.36)	0.62(0.61)	0.78(1.76)	nd	nd	nd	nd	0.02(0.12)	nd	nd
50	1,2,4-三甲基苯	0.03(0.02)	0.01(0.02)	0.01(0.01)	0.01(0.02)	nd	nd	nd	1.33(2.09)	1.87(2.07)	nd
51	1,3,5-三甲基苯	nd	nd	1.05(1.03)	0.86(1.27)	nd	nd	nd	0.18(0.29)	0.23(0.15)	nd
52	间-二乙基苯	7.92(5.28)	nd	2.12(2.50)	nd	0.03(0.01)	nd	nd	nd	nd	nd
53	对-二乙基苯	nd	0.18(0.35)	nd	0.10(0.20)	nd	nd	nd	0.01(0.07)	nd	nd
54	萘	0.03(0.03)	0.03(0.02)	nd	nd	0.02(0.02)	1.94(0.07)	nd	0.07(0.06)	nd	nd
55	间/对-二甲苯	0.92(0.71)	0.45(0.33)	2.85(5.85)	0.65(0.22)	nd	nd	nd	2.45(4.28)	0.14(1.42)	2.43(1.61)
56	乙醇	15.51(9.32)	9.26(6.47)	12.08(7.53)	14.39(7.97)	27.17(0.27)	59.54(0.84)	27.71	42.12(12.67)	0.49(1.31)	12.26(8.10)

续表 2

编号	VOCs 组分	石油化工				电子产品制造					
		炼油区	化工区	仓储区	废水处理	烤漆车间 排气筒	组装车间 排气筒	注塑车间 无组织	显示屏制造 排气筒	芯片制造 排气筒	废水处理
57	丙烯醛	nd	0.40(0.34)	nd	nd	0.07(0.00)	2.87(0.31)	1.43	0.48(0.35)	0.04(18.46)	0.41(0.68)
58	丙酮	nd	1.03(1.60)	0.29(0.64)	0.55(1.09)	11.72(0.54)	6.94(0.33)	6.42	31.74(10.57)	2.22(6.96)	41.11(18.73)
59	异丙醇	nd	nd	nd	nd	19.18(0.18)	nd	2.02	4.46(4.01)	92.55(14.45)	4.46(13.23)
60	四氢呋喃	0.24(0.45)	0.05(0.13)	0.14(0.32)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.35(0.73)
61	2-丁酮	0.99(0.38)	0.97(0.44)	0.88(0.30)	0.70(0.64)	3.51(0.14)	nd	5.23	0.20(0.17)	0.04(0.36)	0.42(0.83)
62	乙酸乙烯酯	6.86(2.06)	3.47(2.21)	4.96(1.28)	8.43(4.55)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
63	1,4-二氯乙烷	nd	0.08(0.24)	nd	nd	0.19(0.21)	nd	nd	0.47(0.36)	0.21(0.23)	nd
64	乙酸乙酯	nd	2.60(3.48)	0.14(0.19)	0.35(0.70)	30.9(0.56)	nd	7.25	0.23(0.18)	0.14(0.41)	0.51(1.21)
65	甲基叔丁基醚	4.83(1.88)	1.67(0.91)	2.28(1.87)	5.24(5.47)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
66	甲基丙烯酸甲酯	0.32(0.92)	nd	0.07(0.15)	0.25(0.50)	nd	nd	nd	7.86(7.41)	nd	nd
67	4-甲基-2-戊酮	nd	0.50(1.42)	0.15(0.33)	0.16(0.31)	2.56(0.42)	nd	nd	0.18(0.81)	nd	0.17(0.16)
68	2-己酮	nd	0.14(0.40)	nd	0.26(0.53)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
69	一氯甲烷	nd	nd	nd	nd	nd	2.96(0.04)	nd	0.08(0.05)	0.06(0.09)	5.01(2.67)
70	二氯甲烷	nd	0.37(0.37)	nd	nd	0.21(0.12)	6.21(0.17)	9.16	0.39(0.23)	0.06(0.13)	5.60(0.79)
71	一溴甲烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
72	氯仿	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.59	0.03(0.01)	nd	9.25(3.79)
73	四氯化碳	nd	nd	nd	1.80(3.60)	nd	nd	1.66	0.01(0.03)	nd	0.23(0.14)
74	氯乙烯	nd	nd	nd	nd	nd	0.46(0.00)	nd	nd	nd	0.28(0.20)
75	氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
76	1,1-二氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
77	反-1,2-二氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
78	1,1-二氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
79	1,2-二氯乙烷	nd	0.28(0.24)	nd	nd	nd	14.26(0.85)	nd	0.29(0.24)	0.01(0.02)	0.48(1.55)
80	三氯乙烯	nd	0.18(0.31)	nd	0.18(0.37)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
81	1,1,1-三氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
82	1,1,2-三氯乙烷	nd	0.04(0.12)	nd	0.10(0.19)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
83	四氯乙烯	0.39(1.09)	1.29(1.13)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
84	1,2-二溴乙烷	0.08(0.22)	0.23(0.26)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
85	反式-1,3-二氯-1-丙烯	0.36(1.01)	0.09(0.25)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
86	顺式-1,3-二氯-1-丙烯	0.23(0.65)	0.27(0.54)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
87	1,2-二氯丙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.06(0.07)	0.17(0.11)	1.37(5.59)
88	氯苯	nd	nd	nd	0.01(0.01)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
89	1,4-二氯苯	0.01(0.01)	0.01(0.01)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
90	1,2-二氯苯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
91	二氯二氟甲烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.05(0.06)	0.11(0.09)	0.96(1.03)
92	一氟三氯甲烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.03(0.04)	nd	0.62(0.47)
93	1,3-二氯苯	0.01(0.01)	0.01(0.01)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
94	顺-1,2-二氯乙烯	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
95	1,2-二氯四氟乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
96	1,1,2-三氟三氯乙烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.19(0.22)
97	一溴二氯甲烷	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
98	二溴一氯甲烷	nd	0.03(0.09)	nd	1.55(3.09)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
99	三溴甲烷	0.03(0.08)	0.03(0.07)	nd	0.38(0.77)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
100	1,1,2,2-四氯乙烷	nd	0.36(0.62)	0.12(0.27)	0.09(0.18)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
101	氯代甲苯	2.78(3.94)	1.25(1.50)	0.18(0.41)	0.11(0.23)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
102	1,2,4-三氯苯	0.01(0.02)	0.01(0.01)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
103	六氯-1,3-丁二烯	0.14(0.12)	0.09(0.09)	1.06(2.35)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
104	二硫化碳	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.02(0.02)	0.01(0.02)	0.28(0.39)

1) 括号内数字为标准偏差,nd 表示没有检出

为主,其中烷烃平均贡献为 49%,OVOCs 为 30%,也体现了制鞋行业使用高烷烃组分的行业特征。

总体来看,SR 值的组分贡献与 2.1 节中各行业

VOCs 组分贡献类似. 国内在开展 O₃ 前体物控制时,主要从芳香烃和烯烃等组分着手. 本次测试结果表明,电子制造和制鞋行业的 OVOCs 排放贡献较为

显著,其它行业的 OVOCs 平均贡献也达到了 24%。因此在进行 VOCs 排放控制时,关注芳香烃和烯烃等重点组分的同时,亦应提高对 OVOCs 组分的关注,特别是电子制造等以含醛酮类组分有机溶剂使用为主的行业。此外,虽然烷烃整体活性较低,但制鞋中环戊烷等活性较大组分对 SR 值有极大贡献,所以加强对 VOCs 高排放行业特征组分的控制也十分重要。

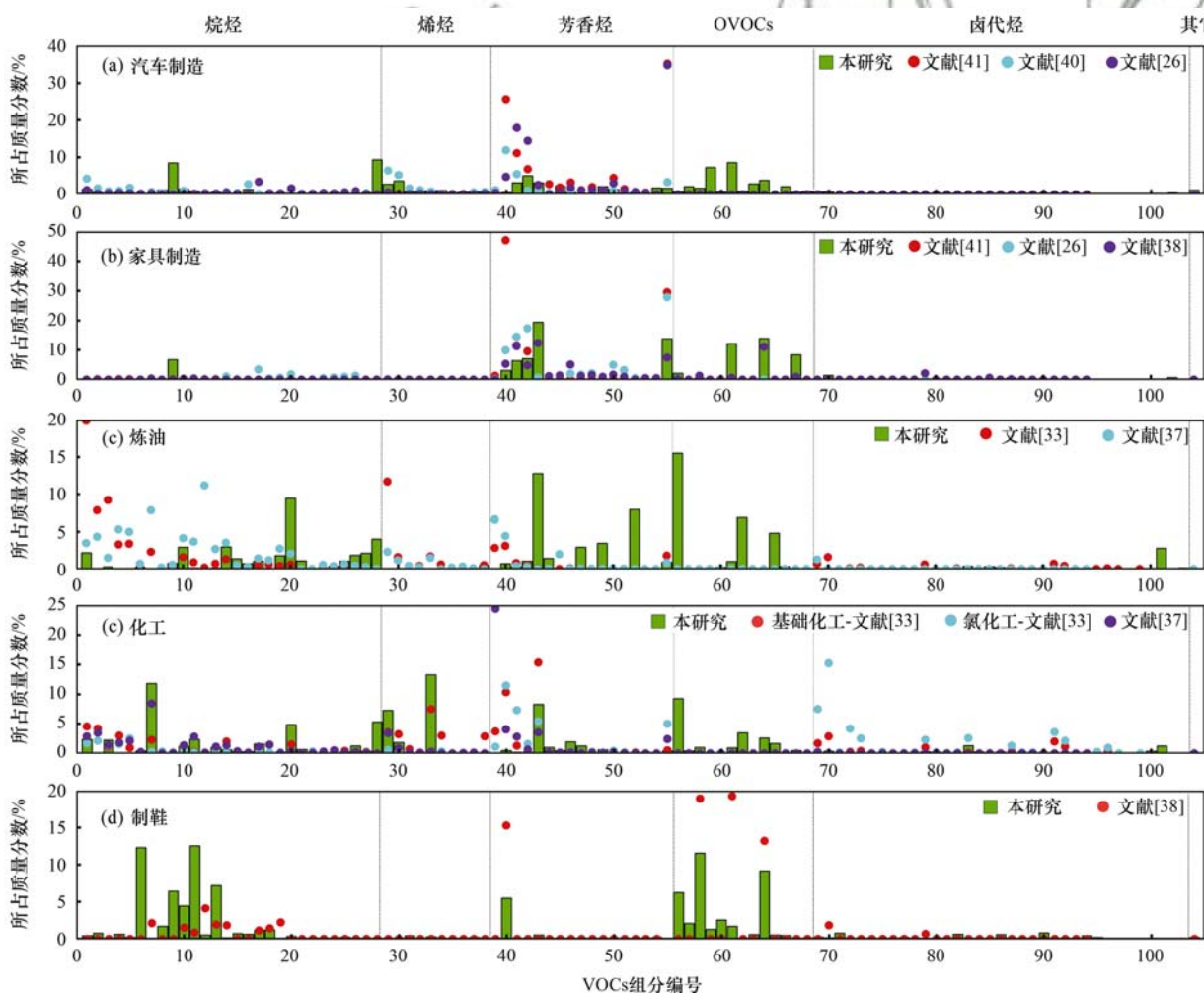
2.3 与其它研究的比较

汽车和家具制造等行业已开展了部分研究^[26,33,37,38,40,41],电子制造近年研究较少且难以直接获取结果数据,因此本研究基于 104 个组分,对汽车、家具制造、石油化工和制鞋进行比较,结果见图 3。

图 3(a)为汽车制造测试结果比较,由于本研究对不同工艺环节开展测试,因此图中结果均为算术平均值。本研究组分主要为烷烃(28%)、芳香烃(23%)和 OVOCs(32%),而其它研究由于没有分析

OVOCs,因此均以芳香烃为主(28%~97%),存在较大差异。从组分来看,本研究以正十二烷(9%)、2-丁酮(9%)和 2,3-二甲基丁烷(8%)等为主,文献[26,40,41]以间/对-二甲苯(34.8%~35.2%)和甲苯(11.9~25.7%)等芳香烃组分为主。结果的差异,不仅由于不同研究测试组分的不同,同时和原料中 VOCs 组分和工艺技术和末端治理设备等差异有关。

图 3(b)为家具制造测试结果对比,本研究和文献[38]组分均主要为芳香烃(50%和 56%)和 OVOCs(38%和 14%),文献[26,41]均为芳香烃(87%和 99%),总体来看各项研究均以芳香烃为主,但由于 OVOCs 组分分析,产生了显著差异。本研究组分以苯乙烯(19%)、间/对-二甲苯(14%)和乙酸乙酯(14%)等为主,文献[41]主要为甲苯(47%)和间/对-二甲苯(29.5%),文献[26]主要为间/对-二甲苯(28%)等,文献[38]以苯乙烯(12%)和乙酸乙酯(11%)等为主,从组分来看,各研究均以家具



VOCs 组分编号与表 2 中编号一致

图 3 不同研究中 VOCs 源成分谱比较

Fig. 3 Comparison of VOCs source profiles associated with automobile manufacturing, furniture manufacturing, petrochemical, and shoemaking in different studies

涂料和稀释剂中典型芳香烃组分为主,具有较高的-一致性。

图 3(c)分别为炼油和化工测试结果比较。炼油部分,本研究、文献[33,37]均以烷烃为主(35%、55%和65%),然后为芳香烃和烯烃,此外本研究中 OVOCs 贡献了总排放组分的 29%,不同研究结果总体较为一致,均主要以烷烃为主,但 VOCs 组分差异较大,本研究以乙醇(16%)和苯乙烯(13%)等为主,其它研究则主要为丙烷等烷烃组分。化工部分测试结果差异则较大,本研究以烷烃(38%)、烯烃(22%)和 OVOCs(20%)为主,文献[33]中基础化工以芳香烃(32%)、烷烃(22%)和烯烃(21%)为主,文献[33]中氯化工以卤代烃(43%)和芳香烃(33%)为主,文献[37]以芳香烃(39%)和烷烃(32%)为主,总的来看烷烃均为重要组分,其它组分则和被测试企业的工艺和产品类型存在关联。

图 3(d)为制鞋测试结果比较,本研究以烷烃(52%)和 OVOCs(36%)为主,文献[38]也以烷烃(17%)和 OVOCs 为主(51%),从组分类型来看较为一致。但 VOCs 组分存在一定差异,本研究主要为 3-甲基戊烷(13%)和环戊烷(12%)等烷烃和丙酮(12%)等 OVOCs,文献[38]为 2-丁酮(19%)和丙酮(18%)等,表明制鞋行业原辅料虽主要为含有烷烃和 OVOCs 组分的溶剂,但其具体组分含量差异较为显著。

3 结论

汽车制造电泳和密封胶环节烷烃占 VOCs 总排放的 30% 以上,中涂以 OVOCs 排放为主,面漆以烷烃和芳香烃为主,喷漆以烷烃和芳香烃为主,均存在一定差异。家具制造有组织和无组织排放以芳香烃和 OVOCs 为主。石油化工各装置区 VOCs 浓度范围为 $49 \sim 1\,387 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,存在较大差异:炼油区以烷烃、芳香烃和 OVOCs 为主;化工区以烷烃和烯烃为主;仓储区以烷烃和芳香烃为主;废水处理以烷烃和 OVOCs 为主。电子制造工艺环节以 OVOCs 为主,占 VOCs 总排放的 50% 以上。制鞋主要由烷烃和 OVOCs 贡献,平均占比在 52% 和 36%。通过臭氧生成潜势计算,汽车制造和石油化工行业 VOCs 排放组分以烯烃和芳香烃为主,因此具有较高的污染源反应活性,但本次测试结果表明,电子制造和制鞋行业的 OVOCs 排放贡献较为显著,其它行业的 OVOCs 平均贡献也达到了 24%。因此在关注芳香烃和烯烃等重点组分的同时,亦应提高对 OVOCs 组分的关注和排放控制。

参考文献:

- [1] Kan H D, Chen R J, Tong S L. Ambient air pollution, climate change, and population health in China [J]. *Environment International*, 2012, **42**: 10-19.
- [2] Felzer B S, Cronin T, Reilly J M, *et al.* Impacts of ozone on trees and crops [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2007, **339** (11-12): 784-798.
- [3] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, *et al.* Ground-level O₃ pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **199**: 42-48.
- [4] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群 O₃ 污染成因和关键 VOCs 活性解析 [J]. *科学通报*, 2018, **63** (12): 1130-1141.
- [5] 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.
- [6] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (1): 1-42.
- [7] Wang T, Wei X L, Ding A J, *et al.* Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of Southern China, 1994-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9** (16): 6217-6227.
- [8] Ma Z Q, Xu J, Quan W J, *et al.* Significant increase of surface ozone at a rural site, north of eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16** (6): 3969-3977.
- [9] Verstraeten W W, Neu J L, Williams J E, *et al.* Rapid increases in tropospheric ozone production and export from China [J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8** (9): 690-695.
- [10] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to O₃-VOC-NO_x sensitivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [11] Zhao S P, Yu Y, Qin D H, *et al.* Analyses of regional pollution and transportation of PM_{2.5} and ozone in the city clusters of Sichuan Basin, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10** (2): 374-385.
- [12] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34** (12-14): 2063-2101.
- [13] Watson J G, Chow J C, Fujita E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (9): 1567-1584.
- [14] 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.
- [15] Zhou Z H, Tan Q W, Liu H F, *et al.* Emission characteristics and high-resolution spatial and temporal distribution of pollutants from motor vehicles in Chengdu, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10** (3): 749-758.
- [16] Zhou Z H, Tan Q W, Deng Y, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutant sources and characteristics of VOCs species in Sichuan Province, China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2019, **76** (1): 21-58.
- [17] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (4): 1613-1626.
- [18] Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Speciated VOCs emission inventory and ozone formation potential in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (4): 1613-1626.
- [19] 周子航, 邓也, 陆成伟, 等. 成都市人为源挥发性有机物排放清单及特征 [J]. *中国环境监测*, 2017, **33** (3): 39-48.

- Zhou Z H, Deng, Y, Lu C W, *et al.* Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Chengdu [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(3): 39-48.
- [18] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- Zhou Z H, Deng, Y, Wu K Y, *et al.* Source Profiles of VOCs associated with typical industrial processes in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- [19] Shao M, Wang B, Lu S H, *et al.* Effects of Beijing olympics control measures on reducing reactive hydrocarbon species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(2): 514-519.
- [20] Wadden R A, Uno I, Wakamatsu S. Source discrimination of short-term hydrocarbon samples measured aloft [J]. *Environmental Science & Technology*, 1986, **20**(5): 473-483.
- [21] Scheff P A, Wadden R A. Receptor modeling of volatile organic compounds. 1. Emission inventory and validation [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(4): 617-625.
- [22] Fujita E M, Watson J G, Chow J C, *et al.* Receptor model and emissions inventory source apportionments of nonmethane organic gases in California's San Joaquin valley and San Francisco bay area [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(21): 3019-3035.
- [23] Hsu Y, Divita F, Dorn J. SPECIATE 4.5, database development documentation, final report [R]. EPA/600/R-16/294, Research Triangle Park, NC: Environmental Protection Agency, 2016.
- [24] Theloke J, Friedrich R. Compilation of a database on the composition of anthropogenic VOC emissions for atmospheric modeling in Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(19): 4148-4160.
- [25] Laurent A, Hauschild M Z. Impacts of NMVOC emissions on human health in European countries for 2000-2010: use of sector-specific substance profiles [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **85**: 247-255.
- [26] Wang H L, Qiao Y Z, Chen C H, *et al.* Source profiles and chemical reactivity of volatile organic compounds from solvent use in Shanghai, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(1): 301-310.
- [27] Huang Y, Ho S S H, Ho K F, *et al.* Characterization of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) in cleaning reagents and air fresheners in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6191-6196.
- [28] 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.
- [29] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [30] 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.
- [31] Wang S X, Zhao B, Cai S Y, *et al.* Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(13): 6571-6603.
- [32] 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.
- [33] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al.* Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **533**: 422-431.
- [34] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, *et al.* Volatile organic compound constituents from an integrated iron and steel facility [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **157**(2-3): 569-578.
- [35] Hsu Y C, Chen S K, Tsai J H, *et al.* Determination of volatile organic profiles and photochemical potentials from chemical manufacture process vents [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(6): 698-704.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 王伯光, 冯志诚, 周炎, 等. 聚氨酯合成革厂空气中挥发性有机物的成分谱 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(9): 914-918.
- Wang B G, Feng Z C, Zhou Y, *et al.* VOC components in the air caused by the local polyurethane synthetic leather industries in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(9): 914-918.
- [40] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- Mo Z W, Niu H, Lu S H, *et al.* Process-based emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from paint industry in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- [41] 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.
- [42] Zhang Z J, Wang H, Chen D, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds and their secondary organic aerosol formation potentials from a petroleum refinery in Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 1162-1174.
- [43] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [44] 何华飞, 王浙明, 许明珠, 等. 制药行业 VOCs 排放特征及控制对策研究——以浙江为例 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2271-2277.
- He H F, Wang Z M, Xu M Z, *et al.* Studies on the emission characteristics and countermeasures of VOCs from pharmaceutical industry—Based on Zhejiang Province [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2271-2277.
- [45] 曾培源, 李建军, 廖东奇, 等. 汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4592-4598.
- Zeng P Y, Li J J, Liao D Q, *et al.* Emission characteristics and

- safety evaluation of volatile organic compounds in manufacturing processes of automotive coatings [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4592-4598.
- [46] He Q S, Yan Y L, Li H Y, *et al.* Characteristics and reactivity of volatile organic compounds from non-coal emission sources in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **115**: 153-162.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Lin T Y, Sree U, Tseng S H, *et al.* Volatile organic compound concentrations in ambient air of Kaohsiung petroleum refinery in Taiwan[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(25): 4111-4122.
- [50] 何梦林, 王旒, 陈扬达, 等. 广东省典型电子工业企业挥发性有机物排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(5): 1581-1588.
- He M L, Wang N, Chen Y D, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from electronic manufacturing factory of Guangdong Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(5): 1581-1588.
- [51] 崔如, 马永亮. 电子产品加工制造企业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4585-4591.
- Cui R, Ma Y L. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emission from electronic products processing and manufacturing factory [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4585-4591.
- [52] Fujita E M. Hydrocarbon source apportionment for the 1996 paso del norte ozone study [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **276**(1-3): 171-184.
- [53] Wang S X, Wei W, Du L, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(27): 4148-4154.
- [54] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [55] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C₁ through C₃₀ organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [56] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 955-966.
- [57] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5324-5335.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)