

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, 娄亚敏, 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O₃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, 方运震 (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, 王日起, 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, 贾璐杰, 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)

海水中的红霉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, 贾竞宇, 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, 于健全, 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-nFe⁰/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)

一硫代砷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, 韩徽, 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CO₂及CH₄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N₂O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)

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

(四川省生态环境科学研究院, 成都 610000)

摘要: 本研究选取了四川省汽车制造、木制家具、人造板制造、涂料生产和合成树脂生产等挥发性有机物(VOCs)排放源典型行业,通过GC-MS国标方法分析各环节有组织排放的VOCs组分,采用排放总量归一化法处理,获取了四川省汽车制造等典型行业挥发性有机物的成分谱.结果表明,汽车整车制造、木制家具和油性涂料生产企业的VOCs主要组分为芳香烃和含氧化合物,占总VOCs的70%以上,汽车零部件制造企业排放物种主要为芳香烃,其占比达90%以上.人造板制造业含氧化合物占比达97%,其中甲醛占比为75%,其次为异丙醇、丙酮等物质.合成树脂行业芳香烃、烯烃占比较高,占比之和达80%以上,其中烯烃物种主要为1,3-丁二烯和1-丁烯.不同行业排放物种虽存在一定差异,但主要以芳香烃和含氧化合物为主,因此,应加强对芳香烃和含氧化合物等浓度高、活性高、毒性大的组分进行识别和控制,采取源头、过程和末端全过程控制,达到总量减排的效果.

关键词: 挥发性有机物; 成分谱; 典型行业; 识别和控制; 总量减排

中图分类号: X511; X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3031-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.201911118

Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan

XU Chen-xi, CHEN Jun-hui*, HAN Li, WANG Ji-qin, WANG Bo

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

Abstract: In this study, typical industries that act as sources of volatile organic compound (VOCs) emission in Sichuan, including automobile manufacturing, wooden furniture, wood-based panel manufacturing, and paint production, were selected and GC-MS national standard analysis to study the organized emission VOC components of every procedure. The spectra of VOCs in the automobile industry were obtained by means of total emission normalization. The results showed that the VOC components of automobile manufacturing, wooden furniture, and oil paint manufacturing enterprises were mainly aromatic hydrocarbons and oxygen-containing compounds, accounting for more than 70% of total VOCs; the emissions from automobile part manufacturing enterprises were mainly aromatic hydrocarbons, with a ratio of over 90%. The proportion of oxygen-containing compounds in the wood-based panel manufacturing industry was found to be up to 97%, mainly caused by the emission of formaldehyde, which accounts for 75%, followed by isopropanol, acetone, and other substances. The proportion of aromatic hydrocarbon and olefin in synthetic resin enterprises is relatively high at over 80%. The olefin species are mainly 1,3-butadiene and 1-butene. Although there are some differences in emission species between different industries, they are mainly composed of aromatic hydrocarbons and oxygenates. Therefore, it is necessary to improve the identification and control of components with high concentration, activity, and toxicity for aromatic hydrocarbons and oxygenates. The source, process, and end process control should be monitored to achieve the effect of total emission reduction.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); source composition spectrum; typical industry; identification and control; total emissions

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为臭氧和PM_{2.5}中二次有机气溶胶(SOA)重要的前体物^[1],城市VOCs污染防治已成为环保工作重点之一.针对VOCs排放的精细化管控,首先需要准确识别排放源,掌握本地重点行业VOCs排放特征,建立本地化VOCs成分谱^[2].本地化污染源成分谱是模型的关键输入文件之一,是模型的关键影响因素,可有效提高模型模拟结果的准确性^[3];也是化学组分清单、污染形成机制研究、源解析、光化学污染控制策略制定和风险暴露评估等研究的重要基础,可为环境空气质量改善提供科学依据和技术支撑.欧美等发达国家和地区早在20世纪80年代就开始开展VOCs源成分谱的测量和研究^[4],美

国环保署将源谱进行总结建立了SPECIATE数据库,目前已更新到Version4.5,是目前排放源类别和VOCs组分最全面的成分谱库^[5].欧洲、墨西哥、韩国和埃及等地也依据当地测量编制了欧洲VOCs源谱数据库,为化学传输模型提供输入数据^[6].VOCs排放来源多,组成成分复杂,我国源谱研究主要集中在珠三角、京津冀和长三角等地^[7].目前,VOCs相关研究仍存在一定局限性,例如:测试VOCs物种不统一,各地源谱之间没有可比性,源谱测试样本不能

收稿日期: 2019-11-13; 修订日期: 2020-02-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0214001)

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

* 通信作者, E-mail: 9503062@qq.com

完全反映当前污染源的排放特征,缺乏部分排放源的研究,已有排放源成分谱未进行及时更新等^[8,9]. 本研究选取四川省重点行业典型企业,进行基于生产工艺的源样品采集和分析,对污染源工艺流程排放特征进行识别,构建重点行业源成分谱,以期协助环保部门制定科学、有效和精细地管控及减排措施,保障四川省环境空气质量持续改善.

1 材料与方法

1.1 实验对象筛选

依据四川省 2018 年污染源 VOCs 排放清单结果,选取汽车制造、家具行业、人造板制造、涂料生产和合成树脂等 VOCs 重点行业,根据行业特点筛选典型 VOCs 排放企业. 其中汽车制造行业分为汽车零部件制造和整车制造(分为溶剂型喷涂、水性喷涂),家具行业主要为木制家具,人造板制造主要为中高密度纤维板制造,涂料生产的 VOCs 主要来源

于油性涂料生产过程,合成树脂行业主要筛选醇酸树脂企业. 此外,考虑企业生产规模、生产工艺和治理设施的差异,各行业分别选择 1~4 家企业开展测试,共测试 13 家企业,企业基本信息如表 1 所示.

1.2 采样方法

本研究采样位置均为污染物治理设施后,监测企业有组织 VOCs 排放情况. 样品采集使用 1 L 接头硅烷化处理的 Bottle-Vac 采样瓶 (Entech Instrument, Inc., SimiValley, CA, USA), 采样前使用高纯氮气清洗并抽真空,采样瓶前端连接含有过滤头的可加热烟枪,烟枪伸入排气筒采样口进行样品采集,采样时间由限流阀控制约为 5min,当排气筒内废气温度高于环境温度,则开启加热枪加温功能,将采样管温度加热至 80℃. 在同一采样点位采集 3 个样品. 同时,采用烟气分析仪 (德国 Testo 3008) 获取烟气流量、温度、湿度信息. 源成分谱测试企业监测点位如表 1 所示.

表 1 测试企业基本情况

Table 1 Information about monitoring industries

编号	产品	监测工段	排放口高度/m	废气标干流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	处理设施	所属行业
企业 1	汽车减震器	手工喷漆室废气处理后排放口	27	15 778	活性炭吸附	汽车零部件制造
		静电喷漆室废气处理后排放口	33	2 939	活性炭吸附	
		流平及烘干室废气处理后排放口	43	399	活性炭吸附	
企业 2	小型乘用车	电泳烘干废气处理后排放口	15	4 364	RTO 焚烧	整车制造
		PVC 胶烘干废气处理后排放口	15	3 892	直接排放	
		面漆烘干废气处理后排放口	15	4 119	RTO 焚烧	
		喷漆车间废气处理后排放口	65	116 766	RTO 焚烧	
企业 3	微型轻卡货车整车	喷漆车间废气处理后排放口	15	324 423	文丘里水幕式漆雾净化器	整车制造
		烘干车间废气处理后排放口	20	14 823	RTO 焚烧	
企业 4	城市 SUV 整车	中涂烘干车间废气处理后排放口	20	10 541	RTO 焚烧	整车制造
		面涂烘干车间废气处理后排放口	20	9 749	RTO 焚烧	
		喷漆车间废气处理后排放口	20	225 551	RTO 焚烧	
企业 5	小型乘用车	喷漆车间废气处理后排放口	50	232 611	RTO 焚烧	整车制造
企业 6	木质酒店家具	底漆房处理设施排放口	15	5 227	UV 光解	木制家具制造业
		面漆房处理设施排放口	15	12 716	UV 光解	
企业 7	实木家具	底漆房处理设施排放口	15	10 758	UV 光解	木制家具制造业
		面漆房)处理设施排放口	15	6 059	UV 光解	
企业 8	实木家具	废气处理设施排放口	20	44 777	水帘 + 活性炭吸附、水帘 + 分子筛吸附	木制家具制造业
企业 9	实木家具	底漆房处理设施排放口	17	22 018	UV 光解 + 低温等离子体	木制家具制造业
		面漆房处理设施排放口	17	75 111		
企业 10	中高强度纤维板	热压废气排放口	45	90 687	布袋 + 旋风除尘 + 水幕	人造板制造业
企业 11	中高强度纤维板	车间废气处理后总排口	55	351 723	水喷淋 + 活性炭	人造板制造业
		制胶车间废气排放口	17	1 437	旋风除尘 + 水幕	
		热压车间废气排放口	15	64 764	旋风除尘 + 水幕	
企业 12	醇酸树脂、亚克力树脂、不饱和聚酯树脂	废气处理设施出口	15	11 530	RTO 焚烧	合成树脂
企业 13	油性涂料	油性涂料车间废气处理后排放口	15	938	活性炭装置	涂料制造

1.3 样品分析

不同行业, VOCs 组分具有一定差异, VOCs 物种繁多, 很难在使用单一色谱柱、色谱条件和检测器的情况下实现所有目标物种的完全分离和检测^[10], 因此本研究采用双检测器设备进行分析. 利用液氮冷却低温预浓缩技术对废气中 VOCs 进行富集, 加热解析后使用 GC-MS/FID 进行分析测量. 样品预浓缩条件, 一级冷阱: 捕集温度 -150°C , 解析温度 10°C , 阀温 100°C , 烘烤温度 150°C , 烘烤时间 15 min; 二级冷阱: 捕集温度 -30°C , 解析温度 180°C , 烘烤温度 190°C , 烘烤时间 15 min; 三级聚焦: 聚焦温度 -160°C , 解析时间 2.5 min. GC-MS/FID 分析条件: -50°C 保持 1 min, 以 $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 150°C , 保持 0 min, 再以 $15^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 220°C , 保持 3 min. 进样口温度 230°C , FID 检测器温度 300°C , MS 扫描范围 25 ~ 300 u.

仪器的标定采用美国 Linde 公司的 56 种 PAMS、65 种 TO15 和含有 4 种化合物(溴氯甲烷、1,4-二氟苯、氘代氯苯和 1-溴-4 氟苯)的内标气体. FID 检测器的定量采用外标法, MS 定量分析采用内标法. 标准样品选取 6 个质量分数梯度(0.5×10^{-9} 、 1×10^{-9} 、 2×10^{-9} 、 4×10^{-9} 、 6×10^{-9} 和 8×10^{-9}), 同一梯度标样重复进样 3 次后取平均值, 绘制各目标化合物的标准曲线. 每次分析过程中进行标气单点校正和空白测定, 单点校正测定结果与标准值偏差应小于 30%, 空白测定时目标物浓度应低于方法测定下限. 本研究检测 VOCs 物种 107 种, 其中烷烃 28 种, 烯烃 10 种, 芳香烃 19 种, 卤代烃 37 种和含氧化合物 13 种.

甲醛作为人造板制造业 VOCs 特征组分, 人造板制造典型企业参考国标法^[11]进行采样和分析.

1.4 源成分谱建立

同一行业不同工艺环节排放的 VOCs 物种排放强度可能不同, 导致即使同一企业采集的不同环节多个样品 VOCs 浓度存在差异^[12]. 为了消除某一环节对行业成分谱的单一影响, 建立能够反映行业整个生产环节排放源的成分谱, 需要对各样品质量浓度数据进行数据统计分析, 本研究将同一类型典型企业的相同生产环节 VOCs 成分谱进行平均值处理后, 得到该行业各环节的成分谱. 同时, 将同一企业排放特征相近的样品进行归类, 各环节排放量进行加权平均, 以质量分数的形式表示该企业 VOCs 成分谱, 然后将同类企业 VOCs 组分占比进行算术平均, 得到行业 VOCs 成分谱. 企业 VOCs 成分谱公式:

$$X_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_j \times c_{ij}}{\sum_{j=1}^n W_j \times c_j}$$

式中, W_j 为工艺环节的风量; c_{ij} 为 i 种组分的质量浓度; c_j 为工艺环节的总 VOCs 质量浓度; X_i 为 i 组分的质量分数.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 排放特征

研究针对各重点行业典型企业涉及 VOCs 的有组织排放口进行监测, 不同行业间 TVOC (VOCs 物种加和) 存在一定差异, TVOC 浓度相对较高的主要有企业 1 (汽车减震器企业) 静电喷漆室 TVOC 浓度达 $389.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 企业 7 (家具企业) 底漆房 TVOC 浓度为 $360.7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 企业 9 (家具企业) 底漆房 TVOC 浓度为 $369.3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. TVOC 浓度相对较低的是采用 RTO 焚烧法处理废气的整车制造企业, 具体各企业 TVOC 浓度如图 1 所示. 基于废气 VOCs 排放浓度和废气流量, 计算各企业有组织 VOCs 年排放量, 如图 2 所示. 汽车制造企业 VOCs 年排放量高于其他行业, 主要由于汽车制造企业多为大型企业, 年运行时间约 7 200 h, 同时, 汽车制造业的废气排放量普遍高于其他行业, 在 1 ~ 30 万左右 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. 家具行业的企业 7 和企业 9 VOCs 排放浓度均较高, 但企业 9 VOCs 年排放量明显高于企业 7, 同样由于其废气流量明显更大.

基于实验数据采用归一化的方法得到四川省典型行业 VOCs 组分所占质量分数统计结果, 如表 2 所示. 并将 VOCs 组分划分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃和含氧化物共 5 种, 各行业 VOCs 组分占比情况如图 3 所示, 四川省典型行业不同工艺环节 VOCs 成分谱如图 4 ~ 6 所示, 四川省典型行业 VOCs 成分谱如图 7 所示.

2.1.1 汽车制造业

汽车制造业可分为汽车整车制造、汽车用发动机制造、改装汽车制造、低速汽车制造、电车制造、汽车车身、挂车制造、汽车零部件及配件制造等^[13]. 本研究主要选取汽车零部件制造(汽车减震器)、汽车整车制造企业开展 VOCs 排放特征研究. 汽车减震器生产工艺中的喷漆过程(喷漆、流平和烘干)为主要有机废气产生环节^[14], 整车制造企业 VOCs 主要产生于涂装过程中的电泳底漆、中涂、面漆的喷涂及烘干工序^[15].

不同工艺环节 VOCs 排放特征分析, 汽车零部件制造: 手工喷漆室、静电涂装和流平室主要 VOCs 物

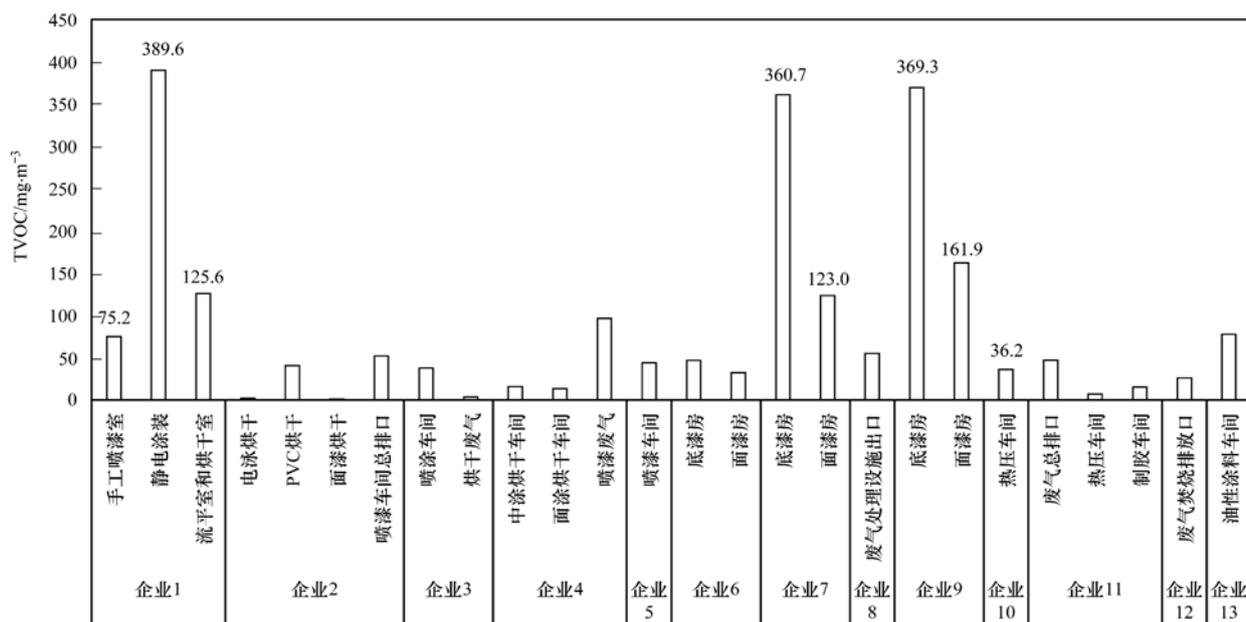


图1 各企业有组织排放 TVOC 监测结果

Fig. 1 TVOC monitoring results of organized emission for various enterprises

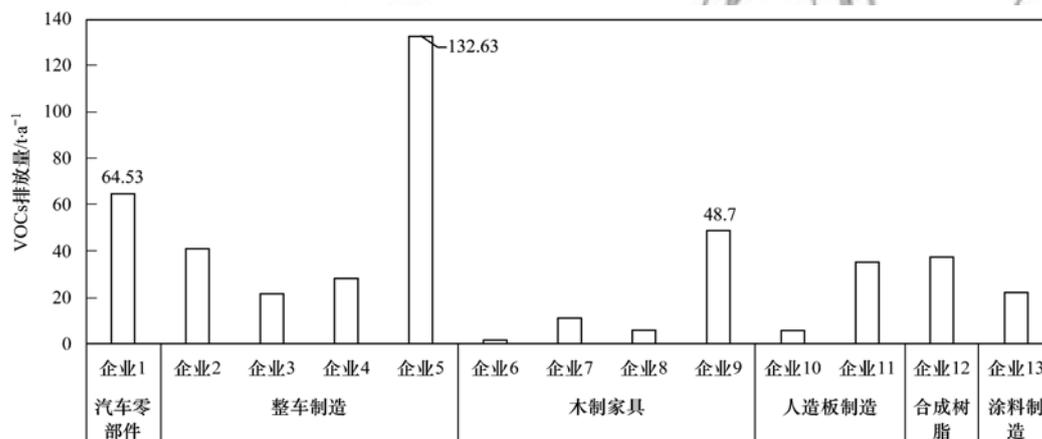


图2 各企业有组织 VOCs 年排放量

Fig. 2 Annual emissions of organized VOCs for various enterprises

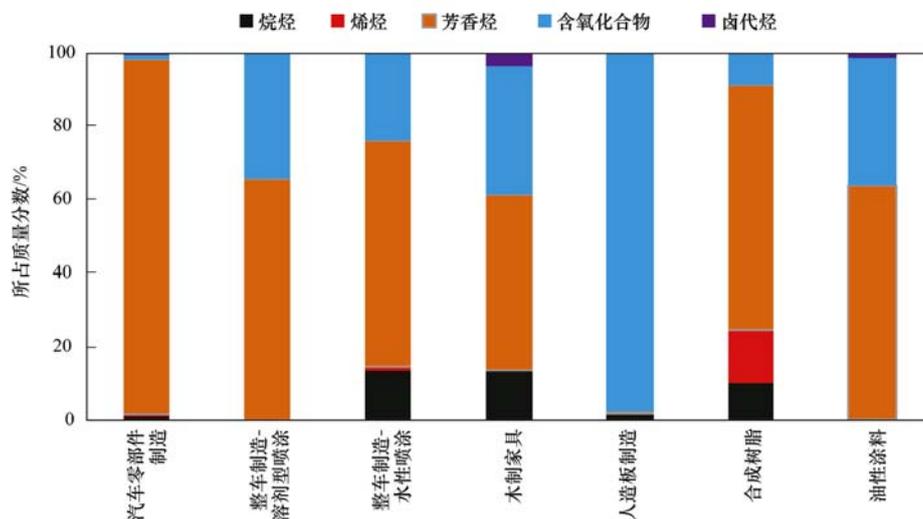


图3 各行业 VOCs 组分构成

Fig. 3 Composition chart of VOCs components for various industries

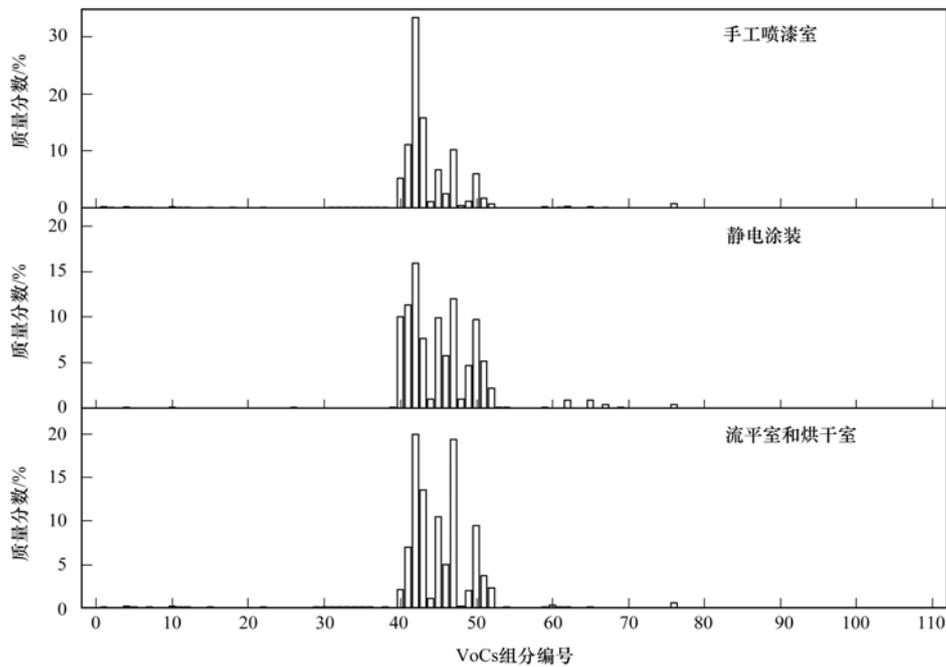


图4 汽车零部件制造行业不同工艺环节成分谱

Fig. 4 Component spectrum of different processes for the automotive parts manufacturing industry

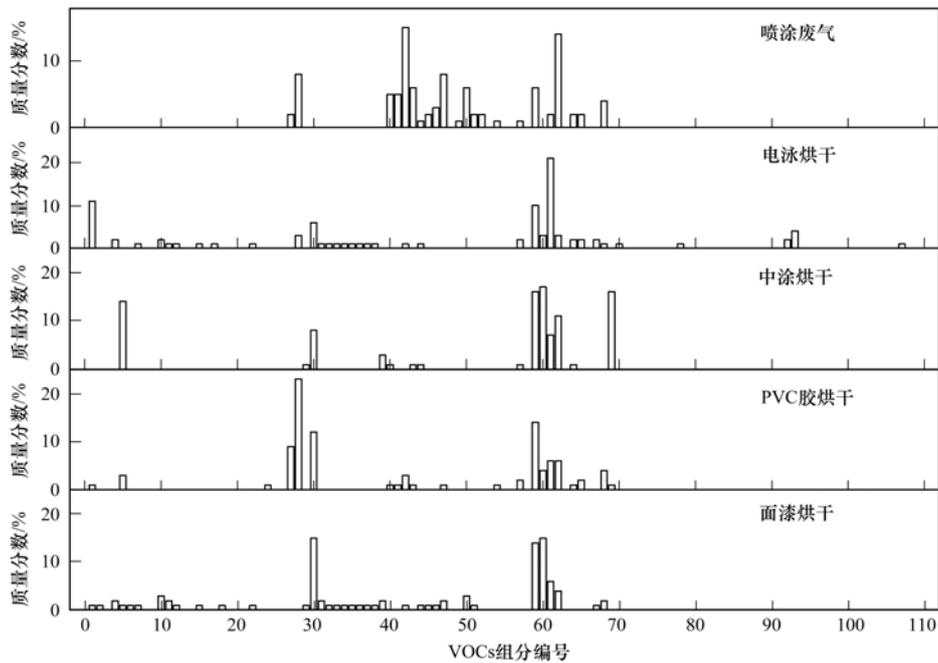


图5 整车制造行业不同工艺环节成分谱

Fig. 5 Component spectrum of different processes for the vehicle manufacturing industry

种较为类似,主要为芳香烃物种,如间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯、1,2,4-三甲苯、4-乙基甲苯和甲苯等,芳香烃浓度之和占TVOC浓度的80%以上.整车制造:电泳烘干环节,占比贡献最突出的是丙酮(20.7%),其次为丙烷、乙醇和1,3-丁二烯占比为10%左右.中涂烘干(两家企业有中涂烘干)丙烯醛占比突出(17%),其次是乙醇和4-甲基-2-戊酮(16%),2,3-二甲基丁烷(14%),异丙醇、丙酮和1,3-丁二烯占比分别在11%~7%左右.面漆烘干环节,1,3-丁二

烯和丙烯醛贡献最高,占比均为15%左右,乙醇平均占比为14%,丙酮和异丙醇等分别占比贡献6%~4%左右.PVC胶烘干环节,十二烷平均浓度占比较高,为23%左右,其次为乙醇、1,3-丁二烯占比分别为14%和12%.喷涂环节,质量分数占比最突出的是间/对-二甲苯、异丙醇和乙醇,分别为15%、14%和6%左右.不同烘干过程的物种类别总体较为一致,但物种占比有一定的差异,主要受加热过程和原辅料使用的综合影响,且加热影响较大.

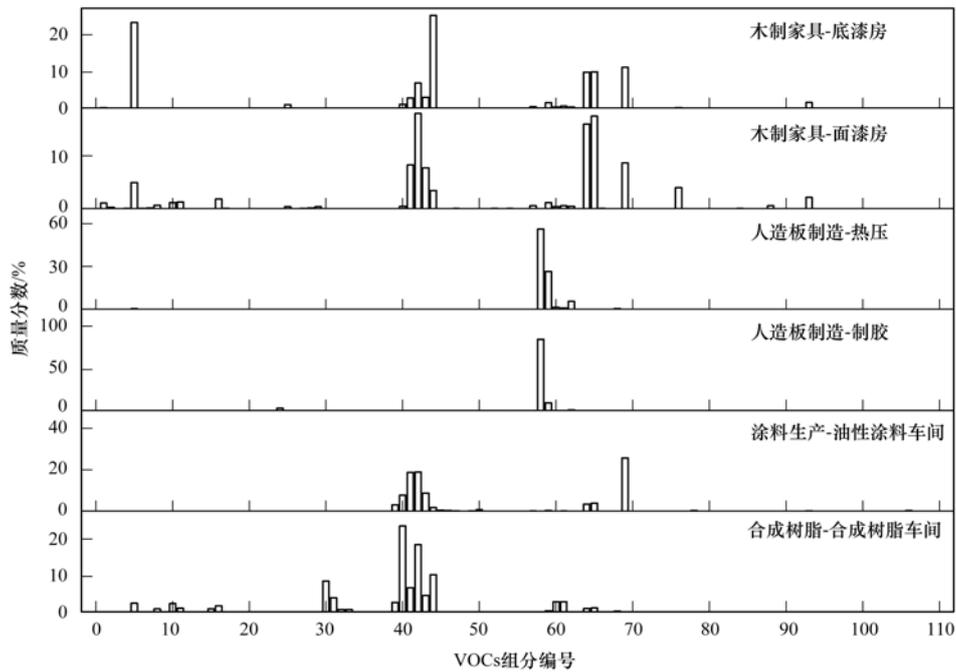


图6 木制家具、人造板制造、涂料生产和合成树脂行业不同工艺环节成分谱

Fig. 6 Component spectrum of different processes for the wood furniture, wood-based panel manufacturing, coating production, and synthetic resin industries

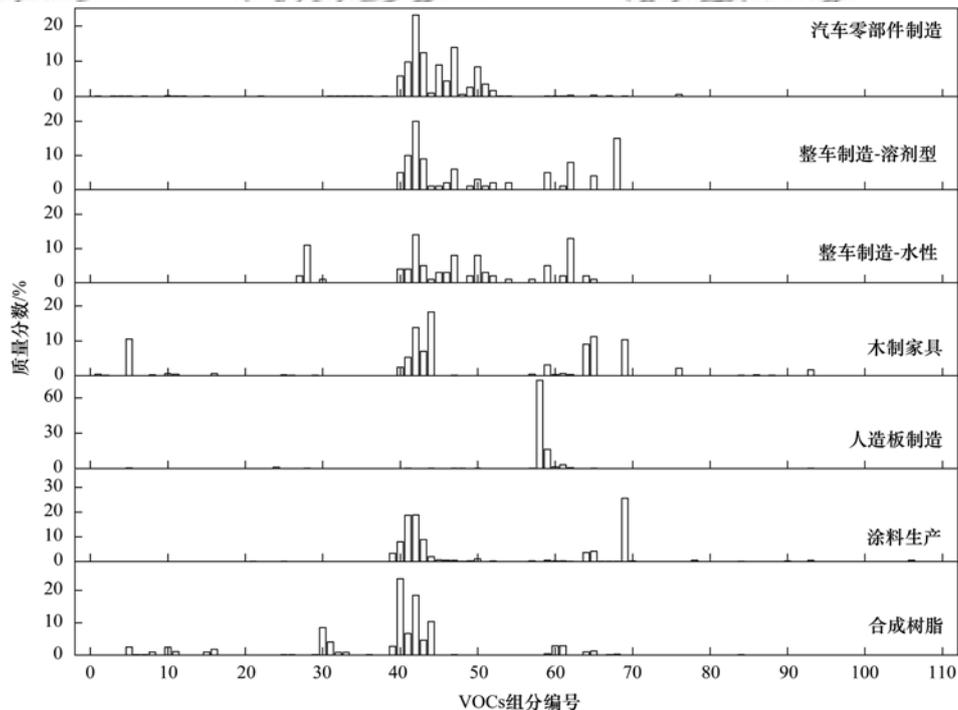


图7 各行业成分谱

Fig. 7 VOCs composition spectra of typical industries

行业成分谱 VOCs 特征分析,汽车减震器制造与整车制造 VOCs 特征物种均以芳香烃为主,其中汽车减震器制造芳香烃占比为 96%,主要物种为间/对-二甲苯(23.1%)、1,2,4-三甲苯(13.9%)、邻-二甲苯(12.4%)、乙苯(9.8%)、4-乙基甲苯(9.0%)、间-乙基甲苯(8.4%)和甲苯(5.8%)。整

车制造的 4 家企业中,有一家企业为溶剂型涂料使用企业,3 家为水性涂料使用企业,获得两类企业的成分谱。整车制造业的溶剂型喷涂企业芳香烃占比 63.0%、含氧化合物占比 33.0%,整车制造业的水性喷涂企业芳香烃占比 59.0%、含氧化合物占比 23.0%、烷烃占比 13.0%。溶剂型喷涂排放的主要物

种分别是:间/对-二甲苯(20.0%)、1,4-二噁烷(15.0%)、乙苯(10.0%)、邻-二甲苯(9.0%)、异丙醇(8.0%)等。水性喷涂排放的主要物种分别是:间/对-二甲苯(14.0%)、异丙醇(13.0%)、十二烷(11.0%)、1,2,4-三甲苯(8.0%)、间-乙基甲苯(8.0%)和邻-二甲苯(5.0%)等。可明显看出,溶剂型喷涂苯系物占比明显高于水性喷涂,水性喷涂添加了部分含氧化合物及烷烃溶剂,因而异丙醇和十二烷等占比靠前。

2.1.2 木制家具制造业

家具制造按工艺及功能一般将车间分为调漆房、底漆房、面漆房和干燥室。调漆房用于油漆的调配,大多靠自然通风,存在 VOCs 无组织排放^[16]。底漆房和面漆房在涂装过程产生大量含气溶胶(漆雾)的有机废气,一般采用封闭式喷漆房,废气收集处理后排放^[17]。干燥室大部分都采用自然风干,废气多与喷涂车间相连,共同处理后排放。

本研究选取了4家木制家具企业进行 VOCs 监测,不同环节 VOCs 排放特征分析,底漆房 VOCs 主要排放物种中2,3-二甲基丁烷贡献最为突出,占比25%,其次为苯乙烯(23.4%)、4-甲基-2-戊酮(11%)、乙酸乙酯(10%)、2-丁酮(10%)、间/对-二甲苯(7%)和邻-二甲苯(3%)等。面漆房 VOCs 主要排放物种中间/对-二甲苯和乙酸乙酯贡献最为突出,均占18%,其次为2-丁酮(16%)、4-甲基-2-戊酮(8%)、乙苯(8%)、邻-二甲苯(8%)和2,3-二甲基丁烷(5%)。家具行业成分谱研究中,2,3-二甲基丁烷占比较高,该组分为油漆的添加剂成分,如企业使用的聚氨酯漆中含有200号溶剂油,溶剂油中含有烷烃类物质。

行业成分谱 VOCs 特征分析,家具行业的芳香烃占比47.4%、含氧化合物占34.7%、烷烃占13.4%。各 VOCs 物种中苯乙烯占比最高,为18%左右,间/对-二甲苯、乙酸乙酯、2,3-二甲基丁烷和4-甲基-2-戊酮等物质占比分别在14%~10%之间。其中苯乙烯主要来自于底漆房排放口,可能来自于胶黏剂或涂料成分,间/对-二甲苯为油漆成分,2,3-二甲基丁烷为油漆的添加剂,乙酸乙酯和4-甲基-2-戊酮为溶剂。

2.1.3 人造板制造业

人造板制造过程中会大量使用脲醛、酚醛和三聚氰胺甲醛树脂作为胶粘剂,其中应用最多是脲醛树脂,它是由尿素和甲醛缩聚而成,在制造和胶合使用过程中会大量逸出游离甲醛^[18,19]。本研究针对2家中高强度纤维板制造企业有组织废气 VOCs 进行监测,不同环节 VOCs 排放特征分析,制胶车间甲醛

浓度占比最高,达84.7%,其次乙醇占9.7%;热压车间甲醛占比55.9%,乙醇占26.6%、异丙醇占5.7%;旋风除尘后经过水幕排放口的甲醛占72.8%,乙醇占15.3%、丙酮占5.2%。人造板制造企业各环节排放中,甲醛占主要成分,其次排放少量乙醇、丙酮等溶剂组分。

人造板制造行业 VOCs 成分谱分析,排放主要为含氧化合物,占90%以上。其中甲醛、乙醇和丙酮为主要的 VOCs 物种,占比分别为75.0%、16.3%和3.2%。甲醛主要为胶黏剂中游离的甲醛逸散排放,乙醇主要来源于调胶工艺中加入的醇类物质,丙酮的排放可能与热压工艺温度较高,VOCs 物种之间发生化学反应有关。

2.1.4 油性涂料制造业

油性涂料又称为溶剂型涂料,主要为湿法制备,包括颜料、树脂、溶剂和助剂的预混合,研磨,调配,过滤,储存和包装等主要工艺流程^[20]。其中油性涂料生产的成分复杂,含有多种有机物。这些有机物在使用过程中可向环境中释放苯、甲醇、氯乙烯、氯化铵及酚类等有毒有害气体,涂料生产过程中所使用的相关溶剂同样是污染的来源^[21]。油性涂料生产过程中通常将各环节的废气收集后统一处理排放。本研究选取1家油性涂料生产企业涂料生产车间废气处理总排口进行 VOCs 分析,其中芳香烃、含氧化合物占比较高,分别占62.9%、34.3%。VOCs 成分谱主要物种是4-甲基-2-戊酮(25.6%)、间/对-二甲苯(18.9%)、乙苯(18.67%)、邻-二甲苯(8.8%)、甲苯(7.9%)、乙酸乙酯(4.1%)、2-丁酮(3.6%)和苯(3.3%)。排放量占比较高的苯系物、含氧化合物与产品的原辅料非常相似,说明此类行业 VOCs 源头管控非常重要。

2.1.5 合成树脂行业

合成树脂为高分子化合物,是由低分子原料——单体(如乙烯、丙烯和氯乙烯等)通过聚合反应结合成大分子而生产的^[22]。该行业废气排放环节主要为:①聚合反应过程中未参与反应的原料和有机溶剂将以废气形式排出反应釜,若废气的冷却冷凝效果不好,或者废气收集不严密,或者后续处理不彻底,则未参与反应的原料(包括过量加入的原料)以及有机溶剂将从废气排放口处排出,主要为 VOCs。②干燥、造粒和挤压工段产生的废气,主要为颗粒物,含有少量 VOCs。本研究选取了1家合成树脂企业进行监测,该企业车间废气集中收集后焚烧处理排放^[23]。监测结果表明,合成树脂企业 VOCs 物种中芳香烃、烯烃和含氧化合物占比较高,VOCs 成分谱主要物种是甲苯(23.6%)、间/对-二甲苯(18.5%)、苯乙烯

续表 2

组分	编号	物种	汽车零部件制造		整车制造业			木制家具制造		人造板制造		油性涂料		合成树脂	
			质量占比	相对偏差	溶剂型成分谱	水性成分谱	水性偏差	质量占比	相对偏差	质量占比	相对偏差	质量占比	相对偏差	质量占比	相对偏差
芳香烃	56	2-甲乙苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	57	萘	N. D.	N. D.	N. D.	1	1	0.4	0.6	0.1	0.1	0.3	0.1	N. D.	N. D.
含氧化合物	58	甲醛	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	74.9	1.5	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	59	乙醇	0.1	N. D.	5	5	4	3.1	3.2	16.3	N. D.	0.5	0.1	0.4	0.1
	60	丙烯醛	0.1	0.2	N. D.	N. D.	N. D.	0.3	0.5	1.4	2	0.2	0.1	2.9	0.8
	61	丙酮	0.1	N. D.	1	2	2	0.6	0.4	3.2	2.8	0.3	0.1	2.9	0.1
	62	异丙醇	0.4	0.4	8	13	15	0.3	0.3	0.7	0.9	0.1	N. D.	N. D.	N. D.
	63	甲基叔丁基醚	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
	64	2-丁酮	N. D.	N. D.	N. D.	2	2	9	7	N. D.	N. D.	3.6	0.8	1	0.1
	65	乙酸乙酯	0.4	0.5	4	1	2	11.2	4.9	0.1	0.2	4.1	1	1.2	0.1
	66	四氢呋喃	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.1	N. D.	N. D.	N. D.
	67	甲基丙烯酸甲酯	0.2	0.2	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.1	N. D.	0.1	N. D.
	68	1,4-二噁烷	N. D.	N. D.	15	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.1	N. D.	0.3	0.1
	69	4-甲基-2-戊酮	0.1	0.1	N. D.	N. D.	N. D.	10.3	6.3	N. D.	N. D.	25.6	2	N. D.	N. D.
	70	2-己酮	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.2	0.1	N. D.	N. D.
	卤代烃	71	氟利昂 12	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
72		氟利昂 11	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
73		氟利昂 113	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
74		氟利昂 114	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
75		一氯甲烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
76		二氯甲烷	0.6	0.2	N. D.	N. D.	N. D.	2.1	3.4	N. D.					
77		三氯甲烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
78		三溴甲烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.5	0.2	N. D.	N. D.
79		二氯溴甲烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
80		氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
81		三氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
82		反-1,2-二氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
83		四氯化碳	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
84		1,2-二氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.1	0.1	N. D.	N. D.	0.1	0.1	0.1	N. D.
85		三氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
86		1,2-二氯丙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.2	0.5	N. D.					
87		1,1,2-三氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
88		四氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.1	0.2	N. D.					
89		氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
90		1,1,2,2-四氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.2	0.1	N. D.	N. D.
91		1,3-二氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
92		氯代甲苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
93		1,2,4-三氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	1.6	2.4	0.1	0.2	0.4	0.2	N. D.	N. D.
94		溴甲烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
95		氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
96		1,1-二氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
97		顺-1,2-二氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.
98	1,1-二氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
99	1,1,1-三氯乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
100	反-1,3-二氯-1-丙烯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
101	一氯二溴甲烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
102	1,2-二溴乙烷	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
103	1,4-二氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
104	苯基氯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
105	邻二氯苯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	
106	六氯-1,3-丁二烯	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.5	0.2	N. D.	N. D.	
107	二硫化碳	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	

1) N. D. 表示未检出

(10.3%)、1,3-丁二烯(8.5%)、乙苯(6.7%)、邻二甲苯(4.6%)和1-丁烯(4.0%)。

2.2 与其他研究的比较

近几年针对工艺过程源和溶剂使用 VOCs 排放源成分谱的研究逐步受到重视,研究主要分布在北京、上海和珠三角等地区.我国源成分谱研究较为分散,测量方法大多参考国外研究,目前仍存在较大的局限性.大多研究的 VOCs 组分不统一,缺乏含氧 VOCs、卤代烃的测量,以 56 种 PAMS 作为 VOCs 主要测试组分.本研究测定物种包括 TO15 和 PAMS 共计 107 种,2017 年王红丽^[24]总结了较为详细的 VOCs 源成分谱数据,累计包括 107 种,与本研究具有一定可比性.图 8 比较了已有研究中汽车制造、家具喷涂、涂料制造行业与本研究的 VOCs 组分质量分数.在汽车喷涂行业中,溶剂型喷涂的间/对二甲

苯、乙苯和邻二甲苯质量占比明显高于水性喷涂,其中溶剂型喷涂间/对二甲苯质量分数达 20%.文献[25]中汽车喷涂为主要芳香烃物种,与本研究对应物种差异不大,进一步说明水性涂料降低了芳香烃占比.而本研究的异丙醇(8%)占比高于已有研究(0.49%),异丙醇主要为清洗剂使用所致.木制家具行业文献的间/对二甲苯、乙苯和甲苯占比明显高于本研究,而本研究的苯乙烯和乙酸乙酯占比较高,达到 18.3%和 11.15%.同时本研究的涂料生产企业,4-甲基-2-戊酮占比最高为 25.6%,其次为间/对二甲苯、乙苯、邻二甲苯和甲苯等物质,而已有研究总结的乙酸乙酯和异丙醇占比却最高,达 18.76%和 17.34%,其次为芳香烃物种.可见不同地区存在的组分排放差异可能由于生产过程中使用溶剂配比不同所致.

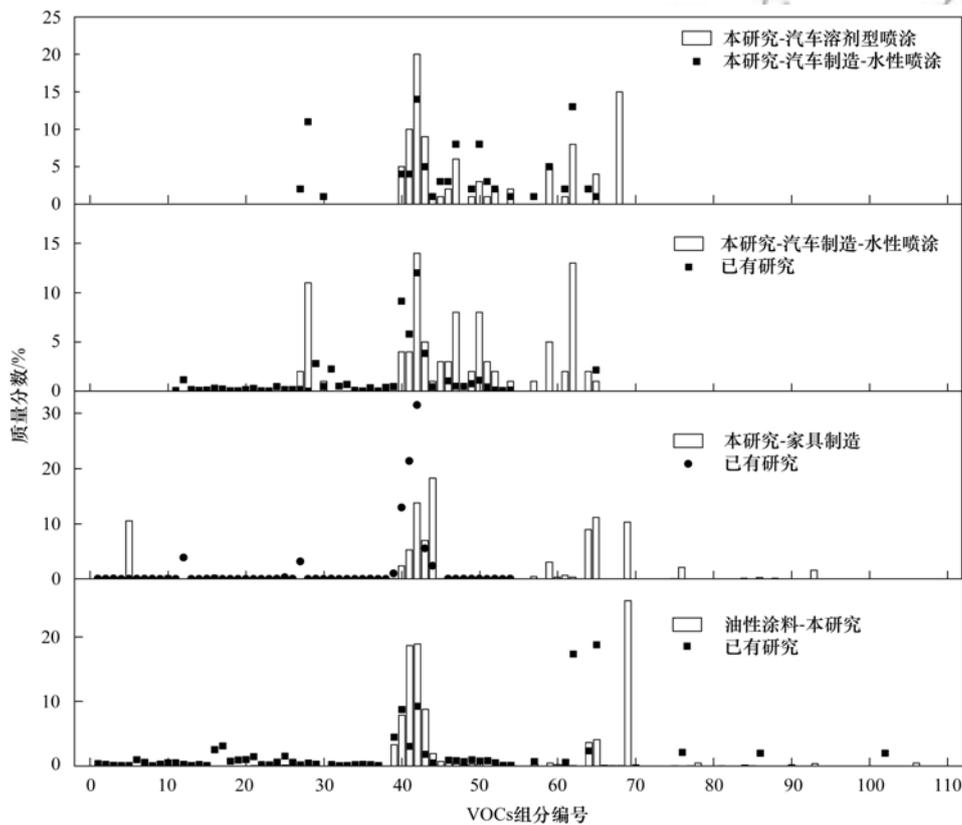


图 8 不同研究中成分谱比较

Fig. 8 Comparison of component spectra across different studies

3 结论

喷涂行业(汽车制造、家具制造)排放的主要物种均为油漆和溶剂的主要成分,如间/对二甲苯、邻二甲苯、乙苯、异丙醇和乙酸乙酯等,但汽车喷涂采用水性喷涂可明显发现芳香烃物种排放占比有所下降.人造板制造各环节排放主要 VOCs 组分均为甲醛,其占比可达 50% 以上,这是由于胶黏剂中的游离状甲醛存在于整个人造板生产工艺.油性涂料

以 4-甲基-2-戊酮、间/对二甲苯和乙苯等排放为主,同样来源于与产品相关的原辅料.合成树脂行业以甲苯、间/对二甲苯和苯乙烯等物种排放为主.不同行业排放物种虽存在一定差异,但主要以芳香烃和含氧化合物为主,多为原辅料相关组分,提倡使用水性涂料、低 VOCs 或无 VOCs 的环保型原辅料,从工艺的开端减少 VOCs 输入量,同时使用先进的生产工艺,优化工艺技术、加强过程监控,进一步减少 VOCs 排放量.最后加强 VOCs 末端治理,加强精细

化管理,实施排污许可制,通过源头预防、过程控制和末端治理等综合措施达到总量减排的效果。

参考文献:

- [1] Ning G C, Wang S G, Ma M J, *et al.* Characteristics of air pollution in different zones of Sichuan Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 975-984.
- [2] Zhao S P, Yu Y, Yin D Y, *et al.* Spatial patterns and temporal variations of six criteria air pollutants during 2015 to 2017 in the city clusters of Sichuan Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 540-557.
- [3] Liao T T, Wang S, Ai J, *et al.* Heavy pollution episodes, transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter of 2013 in Chengdu (China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 1056-1065.
- [4] Qiao X, Jaffe D, Tang Y, *et al.* Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: are China's air quality standards sufficient yet? [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(5): 250.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(20): 4976-4988.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] GB/T 15516-1995, 空气质量 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法[S].
- [12] 赵锐, 黄络萍, 张建强, 等. 成都市典型溶剂源使用行业 VOCs 排放成分特征[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1147-1154.
- Zhao R, Huang L P, Zhang J Q, *et al.* Emissions characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical industries of solvent use in Chengdu City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1147-1154.
- [13] 张新民, 柴发合, 岳婷婷, 等. 天津武清大气挥发性有机物光化学污染特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(10): 1085-1091.
- Zhang X M, Chai F H, Yue T T, *et al.* Photochemical characteristics and sources of volatile organic compounds in Wuqing, Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(10): 1085-1091.
- [14] 马召坤, 刘善军, 仇帅, 等. 山东省汽车喷涂行业 VOCs 排放特征研究[J]. *环境保护科学*, 2016, **42**(4): 133-138.
- Mao Z K, Liu S J, Qiu S, *et al.* Characteristics of volatile organic compound emission from the automobile painting industry in Shandong Province [J]. *Environmental Protection Science*, 2016, **42**(4): 133-138.
- [15] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al.* VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in Eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(17): 8815-8832.
- [16] 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 等. 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5240-5249.
- Zhang J N, Zeng C L, Liu R Y, *et al.* Volatile organic compound emission characteristics of furniture manufacturing enterprises and the influence on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5240-5249.
- [17] Zheng J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [18] Derwent R G, Jenkin M E, Utembe S R, *et al.* Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3374-3381.
- [19] 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.
- [20] Na K, Kim Y P. Chemical mass balance receptor model applied to ambient C₂-C₉ VOC concentration in Seoul, Korea: effect of chemical reaction losses[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(32): 6715-6728.
- [21] 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.
- [22] Zhang Y H, Su H, Zhong L J, *et al.* Regional ozone pollution and observation-based approach for analyzing ozone-precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6203-6218.
- [23] 展先辉. 天津市石化行业 VOCs 源排放成分谱及排放特征研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- Zhan X H. The investigation on chemical compositions and characteristics of petrochemical industrial VOCs emission sources in Tianjin City[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.
- [24] 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.
- [25] 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.

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 Liaohu 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)