

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



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数

梁小明¹, 陈来国¹, 孙西勃², 赵伟¹, 卢清¹, 孙家仁¹, 陈朋龙¹, 叶代启³

(1. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; 3. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要:以珠三角地区典型溶剂使用行业为研究对象,包括印刷业、家具制造业和电子元件及设备制造业,进行基于不同原料类型和末端治理的 VOCs 排放系数研究,对比研究了典型生产工艺不同类型的原料 VOCs 组分与含量特征,不同原料类型及末端综合治理情况对 VOCs 排放的影响,最终建立了三大行业典型生产工艺基于原料类型及末端综合治理情况的精细化 VOCs 排放系数。结果表明,印刷业有机原料中 VOCs 组分主要为乙酸乙酯、乙酸丙酯、异丙醇、正丙醇和乙醇等含氧 VOCs,其占比约为原料总 VOCs 的 60%~80%;家具制造业有机原料中含氧 VOCs 主要为乙酸乙酯和乙酸丁酯,占比约为原料总 VOCs 的 45%~65%;电子元件及设备制造业有机原料 VOCs 组分主要为醇、醚、酚等含氧 VOCs,苯系物及卤代烃等。印刷业 VOCs 治理前后综合排放系数分别为 415.2 kg·t⁻¹ 和 184.3 kg·t⁻¹。其中,溶剂型原料为 704.9 kg·t⁻¹ 和 200.1 kg·t⁻¹,水溶性原料为 325.6 kg·t⁻¹ 和 230.3 kg·t⁻¹,UV 型原料为 197.0 kg·t⁻¹ 和 129.0 kg·t⁻¹,植物型原料为 89.0 kg·t⁻¹ 和 89.0 kg·t⁻¹。家具制造业 VOCs 治理前后综合排放系数分别为 379.0 kg·t⁻¹ 和 290.2 kg·t⁻¹。其中,溶剂型原料为 603.0 kg·t⁻¹ 和 448.5 kg·t⁻¹,水溶性原料为 80.0 kg·t⁻¹ 和 80.0 kg·t⁻¹,粉末型原料为 230.0 kg·t⁻¹ 和 184.0 kg·t⁻¹。电子元件及设备制造中,AC 陶瓷电容器、CC 陶瓷电容器、压敏电阻、铝电解电容器治理前后 VOCs 排放系数[单位:kg·(百万只)⁻¹]分别为 59.7 和 40.8、394.1 和 269.6、282.4 和 193.2、1.2 和 1.0。连续端子、漆包线和 PCB 印制电路板治理前后 VOCs 排放系数分别为 56.3 kg·t⁻¹ 和 42.8 kg·t⁻¹、87.2 kg·t⁻¹ 和 28.3 kg·t⁻¹、26.4 kg·(100 m²)⁻¹ 和 11.6 kg·(100 m²)⁻¹。

关键词:溶剂使用;挥发性有机物(VOCs);原料类型;末端治理;排放系数

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4382-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901103

Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources

LIANG Xiao-ming¹, CHEN Lai-guo¹, SUN Xi-bo², ZHAO Wei¹, LU Qing¹, SUN Jia-ren¹, CHEN Peng-long¹, YE Dai-qi³

(1. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 3. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A database of refined raw materials and end treatment-based VOCs emission factors for typical solvent use sources was developed for the Pearl River Delta. For this, the impact of composition and the content of raw materials, production process, and comprehensive end treatment on the emission of VOCs was analyzed. The solvent use sources included printing, furniture manufacturing, and electronic component and equipment manufacturing. The results showed that the main VOCs in the raw materials used in printing were ethyl acetate, propyl acetate, isopropanol, propanol, and ethanol, which contributed 60%-80% to the total amount of VOCs. Ethyl acetate and butyl acetate were the main oxygenated VOCs (OVOCs) from the raw materials used in furniture manufacturing, contributing 45%-65% of the total. The main VOCs from the raw materials used in electronic component and equipment manufacturing were OVOCs such as alcohols, ethers and phenols, BTEX, and halohydrocarbons. The uncontrolled and controlled emission factors for VOCs from printing were 415.2 kg·t⁻¹ and 184.3 kg·t⁻¹, respectively. Of these, solvent-based raw materials accounted for 704.9 kg·t⁻¹ and 200.1 kg·t⁻¹, water-based raw materials accounted for 325.6 kg·t⁻¹ and 230.3 kg·t⁻¹, UV raw materials accounted for 197.0 kg·t⁻¹ and 129.0 kg·t⁻¹, and plant-based raw materials accounted for 89.0 kg·t⁻¹ and 89.0 kg·t⁻¹, respectively. The uncontrolled and controlled emission factors for VOCs from furniture manufacturing were 379.0 kg·t⁻¹ and 290.2 kg·t⁻¹, respectively. Of these, solvent-based raw materials accounted for 603.0 kg·t⁻¹ and 448.5 kg·t⁻¹, water-based raw materials accounted for 80.0 kg·t⁻¹ and 80.0 kg·t⁻¹, and powder raw materials accounted for 230.0 kg·t⁻¹ and 184.0 kg·t⁻¹, respectively. In electronic component and equipment manufacturing, the uncontrolled and controlled emission factors (unit: kg·million⁻¹) for VOCs from AC ceramic capacitors, CC ceramic capacitors, varistors, and aluminum electrolytic capacitors were 59.7 and 40.8, 394.1 and 269.6, 282.4 and 193.2, and 1.2 and 1.0, respectively. The uncontrolled and controlled emission factors

收稿日期: 2019-01-11; 修订日期: 2019-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212606); 国家自然科学基金项目(41807309); 第二次全国污染源普查项目(144028000000175027)

作者简介: 梁小明(1992~),女,硕士,主要研究方向为大气挥发性有机物的排放与控制对策, E-mail: 291562122@qq.com

for VOCs from the manufacturing of continuous terminals, enameled wire, and printed circuit boards were $56.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ and $42.8 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, $87.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ and $28.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, and $26.4 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ and $11.6 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$, respectively.

Key words: solvent use; volatile organic compounds (VOCs); raw materials; end treatment; emission factors

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是近地面 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 在 NO_x 和日光照射的条件下形成的重要前体物^[1-5]. 珠三角区域臭氧季节性频繁超标问题一直是区域空气质量改善的重点. 大量的研究表明, 珠三角区域臭氧形成受 VOCs 控制^[6-11]. 作为 VOCs 敏感区域, 了解本地区 VOCs 排放源特征对于区域 VOCs 减排及减少臭氧污染具有重要意义.

溶剂使用源是珠三角人为源 VOCs 排放的重点贡献源, 占人为源 VOCs 排放总量约 40%^[12-15]. 印刷业、家具制造业和电子产品制造业作为珠三角地区多个城市 (如东莞和深圳) 的支柱产业, 其产量与产值均居工业行业前列, 生产过程中有机原辅材料的高挥发性有机物极易挥发逸散, 是溶剂使用源最主要的 VOCs 排放贡献行业, 占溶剂使用 VOCs 排放总量约 36%^[13].

珠三角溶剂使用源 VOCs 排放特征已有一定的研究基础. 余宇帆^[16] 和 Zheng 等^[17] 研究了印刷、木质家具制造、制鞋、涂料生产和金属表面涂装这五大行业共 263 种 VOCs 源成分谱; 于广河等^[18] 研究了深圳市 6 个典型行业 VOCs 成分谱特征, 包括印刷、家具制造、电子行业、制鞋、自行车制造和塑胶. 杨杨等^[19] 研究了珠三角印刷行业不同印刷工艺 VOCs 成分谱特征, 并分析了行业 VOCs 关键活性组分. 肖景方等^[20] 以深圳印制电路板、塑胶零件和主板这三大类典型消费电子产品行业为研究对象, 分别研究了 VOCs 排放浓度、成分谱及排放系数特征. 何梦林等^[21] 研究了广东省典型城市手机、相机及笔记本电脑这 3 类典型产品 VOCs 排放浓度水平和成分谱特征等; 王宇楠等^[22,23] 采用源头追踪法, 研究了东莞城市漆包线全过程 VOCs 的输入与输出, 得出漆包线行业基于产品的 VOCs 排放系数、行业 VOCs 成分谱以及各排放环节 VOCs 贡献情况.

上述主要研究行业 VOCs 成分谱, 虽然部分研究尝试建立了溶剂使用源的排放系数, 但并未考虑生产工艺、原料类型及末端治理情况对排放系数的影响, 构建的排放系数较粗, 具有很大不确定性. 正是由于溶剂使用行业的生产工艺相当复杂, 同一行业的不同生产工艺、同一工艺的不同原料类型间 VOCs 的排放均存在一定的差异; 同时, 生产工艺的末端综合治理情况也是影响 VOCs 排放组成的重要因素. 因此, 在溶剂使用源开展典型生产工艺基于原

料类型和末端治理的 VOCs 排放特征研究、识别影响排放系数的关键因素, 对于建立具有代表性的复杂工业源排放系数、减少排放系数的不确定性具有重要意义.

本文选取了珠三角地区典型溶剂使用行业, 包括印刷业、家具制造业和电子元件及设备制造业, 进行基于不同原料类型和末端治理的 VOCs 排放系数研究, 对比分析了典型生产工艺不同类型原料 VOCs 组分与含量特征, 不同原料类型及末端治理情况对 VOCs 排放的影响, 最终建立了三大行业典型生产工艺基于原料类型及末端治理的精细化 VOCs 排放系数.

1 材料与方法

1.1 研究范围与对象

以珠三角典型溶剂使用源为研究对象, 主要包括印刷业、家具制造业和电子元件及设备制造业三大典型行业. 各行业根据其典型生产工艺分别选取代表性工艺进行研究. 其中, 印刷业选取典型印刷工艺包括平版印刷、凹版印刷、凸版印刷、孔板印刷和复合 (干式复合和挤出复合). 不同印刷工艺, 进一步选取溶剂型及环保型原料类别进行对比研究; 家具制造业选取木质家具制造和金属家具制造两类典型工艺, 同时进一步分析溶剂型和环保型原料类别排放特征; 电子元件和设备制造选取电容器制造、连续端子制造、印制电路板和漆包线制造为对象, 研究其 VOCs 排放特征. 研究选取的代表性企业及工艺基本信息见表 1.

1.2 排放系数的构建

1.2.1 VOCs 排放量核算

本研究采用物料衡算法核算溶剂使用源各行业 VOCs 排放量, 认为所有有机原辅物料使用过程中, 未被治理和回收的 VOCs (包括产品残留的 VOCs) 均一次性逸散到大气中. 其排放量核算公式如下:

$$E_{i,j} = E_{i,j\text{物料}} - E_{i,j\text{回收}} - D_{i,j\text{去除}} \quad (1)$$

$$E_{i,j\text{物料}} = \sum_{k=1} W_{i,j,k} \times \text{WF}_{i,j,k} \quad (2)$$

$$D_{i,j\text{去除}} = E_{i,j\text{物料}} \times \theta_{i,j} \times \delta_{i,j} \quad (3)$$

式中, i 为溶剂使用行业; j 为行业特定的工艺; k 为有机原辅物料; $E_{i,j}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应的 VOCs 排放量; $E_{i,j\text{物料}}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应的有机原辅物料中 VOCs 量之和; $E_{i,j\text{回收}}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应回收的有机溶剂总量; $D_{i,j\text{去除}}$ 为行业 i 的工

表 1 典型溶剂使用源研究对象基本信息

Table 1 Summary information for typical solvent use sources

行业	企业	主要产品	工艺	原料类型	收集方式	治理技术
印刷业	A	药业、食品饮料、个人护理品及家庭用品等的复合膜包装	凹印工艺	溶剂型	车间全密闭负压收集	沸石转轮吸附 + 氧化焚烧
			干式复合	溶剂型	车间全密闭负压收集	沸石转轮吸附 + 氧化焚烧
			挤出复合	溶剂型	集气罩或管道关键工序局部收集和车间半密闭式负压收集	活性炭吸附 + UV 光解
	B	烟包装	平板印刷	UV 型	车间半密闭式负压收集	活性炭吸附
			凹版印刷	水型 + 醇型	车间全密闭负压收集	活性炭吸附(原位再生)
			孔板印刷	UV 型	未收集	未治理
			干式复合	水型	集气罩或管道关键工序局部收集	活性炭吸附
	C	各种包装盒	平板印刷	溶剂型	集气罩或管道关键工序局部收集	活性炭吸附
			孔板印刷	水型	集气罩或管道在废气关键产生工序局部收集	活性炭吸附
	D	标签纸	平板印刷	水溶型	集气罩或管道关键工序局部收集	UV 光解
	E	地龙白板纸,不干胶贴纸,说明书	平板印刷	植物型	未收集	未治理
	F	不干胶贴纸,说明书	平板印刷	植物型	未收集	未治理
	G	瓦楞纸箱、彩纸	凸版印刷	溶剂型	车间半密闭式负压收集	活性炭吸附
	H	食品包装袋	凸版印刷	水溶型	集气罩或管道关键工序局部收集	低温等离子体
	I	生活用品包装盒	孔板印刷	溶剂型	车间全密闭负压收集	活性炭吸附 + 催化燃烧
家具制造业	J	木质家具、柜子	木质家具	溶剂型	集气罩关键工序收集和车间半密闭收集	活性炭吸附(仅喷漆环节)
	K	木洗手柜、木柜、木桌	木质家具	溶剂型	集气罩关键工序收集和车间半密闭收集	活性炭吸附(仅喷漆环节)
	L	木家具、木制工艺品,中纤板木柜	木质家具	溶剂型	集气罩关键工序收集和车间半密闭收集	活性炭吸附(仅喷漆环节)
	M	木质家具	木质家具	水溶型	未收集	未治理
	N	铁器家具	金属家具	溶剂型	集气罩关键工序收集和车间半密闭收集/管道密闭收集	活性炭吸附
				粉末型	集气罩关键工序收集和车间半密闭收集/管道密闭收集	活性炭吸附
	O	金属家具	金属家具	粉末型	集气罩关键工序收集	活性炭吸附
电子元件及设备制造	P	陶瓷电容器、压敏电阻	AC 陶瓷电容器	/	管道收集、密闭收集	溶剂回收 + 活性炭吸附
			CC 陶瓷电容器	/	管道收集、密闭收集	溶剂回收 + 活性炭吸附
			压敏电阻	/	管道收集、密闭收集	溶剂回收 + 活性炭吸附
	Q	铝电解电容器		/	局部收集,车间半密闭式收集	活性炭吸附
	R	连续端子		/	槽体上方集气罩局部收集	化学处理法喷淋洗涤
	S	漆包线		/	设备一体化密闭收集	催化燃烧
	T	PCB 印刷线路板		/	局部收集,车间半密闭式收集	活性炭吸附

艺 j 所对应的治理设施 VOCs 去除量; $W_{i,j,k}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应的有机原辅物料 k 使用量; $WF_{i,j,k}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应的有机原辅物料 k 中 VOCs 质量分数,来自物料 MSDS 或检测报告; $\theta_{i,j}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应的废气收集效率; $\delta_{i,j}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应的 VOCs 治理效率. 废气收集效率和控制设施治理效率分别来自文献[24,25]中工艺废气污染控制设施的捕集效率和文献[26]中常见设施的治理效率.

1.2.2 VOCs 排放系数

VOCs 排放系数指在正常技术经济和管理等条件下,单位活动水平所产生的原始污染量经控制措施削减后或未经消减直接排放到环境中的大气污染物(VOCs)的量. 其中,活动水平一般对应行业生

产过程与 VOCs 排放相关的原料使用量或产品产量. 本研究根据行业特征及系数成果后续应用过程对应活动水平获取的可操作等,确定各行业 VOCs 排放系数基量. 其中,印刷业和家具制造业以“单位有机原辅物料使用的 VOCs 排放量”为基准,即“以 VOCs/即用状态下主要有机原辅物料计, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ”. 电子元件及设备制造行业以“单位产品生产的 VOCs 排放量”为基准,即“以 VOCs/单位产品产量计, $\text{kg}\cdot\text{产量}^{-1}$ ”.

溶剂使用行业 VOCs 排放系数核算公式如下:

$$\text{EF}_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{\sum_{k=1} W_{i,j,k} (P_{i,j})} \tag{4}$$

式中, $\text{EF}_{i,j}$ 为行业 i 的工艺 j 所对应的 VOCs 排放系

数; P_{ij} 为行业 i 的工艺 j 所对应的产品产量. 其中印刷业和家具制造业 VOCs 排放系数“以 VOCs/即用状态下主要有机原辅物料计, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ”, 电子元件及设备制造“以 VOCs/单位产品产量计, $\text{kg}\cdot\text{产量}^{-1}$ ”.

2 典型生产工艺与排污环节

2.1 印刷业

印刷是使用模拟或数字的图像载体将呈色剂/色料(如油墨)转移到承印物上的复制过程. 选取典型印刷工艺为对象, 包括凹版印刷、凸版印刷、平版印刷、孔板印刷和复合等, 研究其排放特征. 印刷业典型生产工艺如图 1 所示, 主要包括调墨、印刷、烘干和复合等过程, VOCs 排放环节主要为油墨和胶黏剂调配、印刷、烘干和洗车等工序.

2.2 家具制造业

选取家具制造业涉 VOCs 排放相对突出的木质

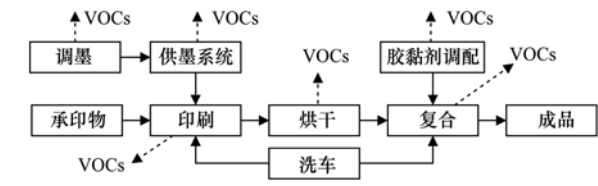


图 1 珠三角印刷业典型工艺流程与排污环节
Fig. 1 Typical process flow chart and sewage link for printing

家具和金属家具为对象, 主要考虑涂料使用排放的 VOCs. 木质家具指通过选取一种或几种木质材料为基料, 按照设计要求进行加工、组装, 然后在基料表面涂装一层或几层涂料, 形成产品. 金属家具则以铸铁、钢材、钢板、钢管等金属为主要材料, 结合使用木、竹、塑料等材料, 配以人造革、尼龙布、泡沫塑料等其他辅料制作的家具. 家具制造业典型生产工艺及各环节 VOCs 排放情况如图 2 所示, VOCs 主要排放环节来自涂料调配、喷涂和干燥等工序.

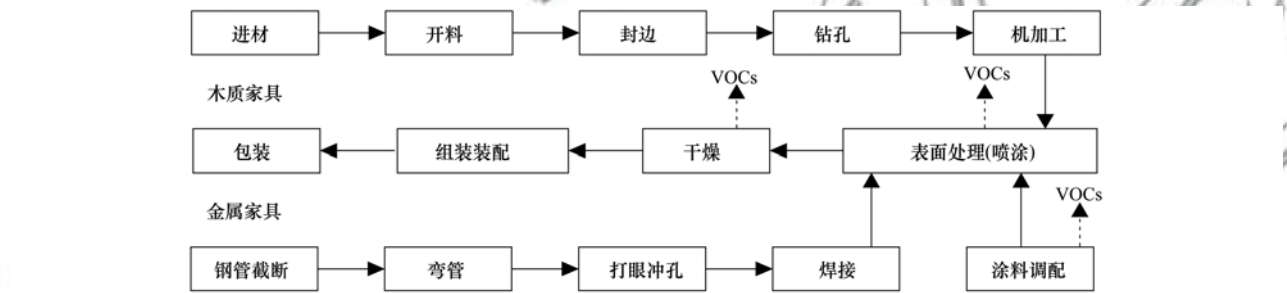


图 2 珠三角家具制造业典型工艺流程与排污环节
Fig. 2 Typical process flow chart and sewage link for furniture manufacturing

2.3 电子元件与设备制造业

电子元件与设备制造业分别选取了基础电子元件和电子中间产品设备制造为研究对象. 其中, 电子元件如电容器、电阻和端子制造, 电子中间产品设备如印制电路板和漆包线制造. 各行业生产工艺流程及 VOCs 排污环节具如下.

2.3.1 陶瓷电容器及压敏电阻制造

典型陶瓷电容器和压敏电阻制造工艺流程如图 3 所示. 主要将外购的铁线, 经打线机打线后, 沾上

液态锡, 使用助焊剂将铁线与素子进行组合后焊接、粘合成半成品. 采用不同的涂料粉料进行包封或喷涂后, 进行烘干, 打印机印码等, 最后进行测试和包装入库. 其 VOCs 产生工序主要来自打线焊接、涂料包封、喷印打印和烘干等环节.

2.3.2 铝电解电容器

铝电解电容器典型生产工艺流程如图 4 所示, 主要包括裁切、钉卷、烘干、含浸、组立、套管、清洗、充电选别和加工包装等过程. 根据其生产工艺

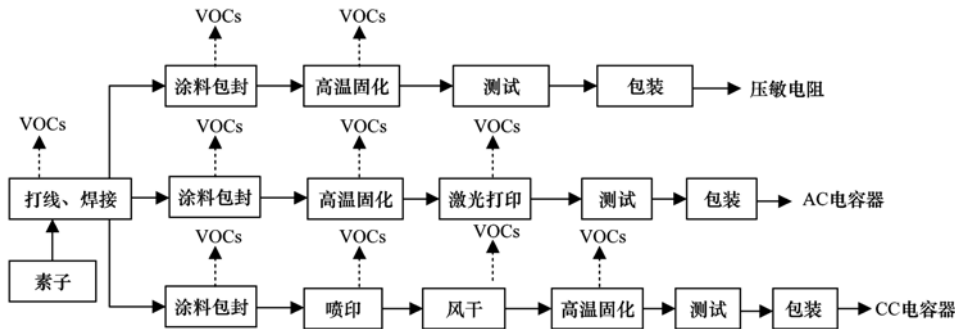


图 3 珠三角陶瓷电容器和亚敏电阻制造典型工艺流程与排污环节
Fig. 3 Typical process flow chart and sewage link for ceramic capacitors and piezoresistors

分析,VOCs 的排放环节为含浸车间中含浸工序,装填及取出素子时电解液的挥发,在相对密闭的车间

内完成.该工序使用到的有机溶剂为电解液(主要成分是乙二醇和己二酸胺).

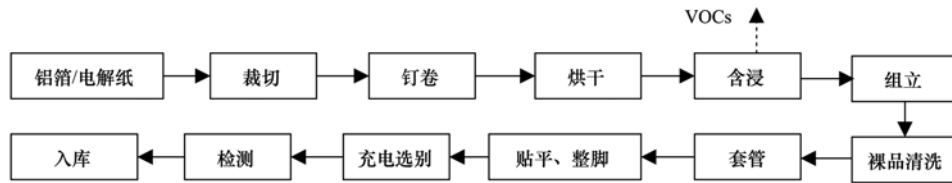


图 4 珠三角铝电解电容器制造典型工艺流程与排污环节

Fig. 4 Typical process flow chart and sewage link for aluminum electrolytic capacitors

2.3.3 连续端子

连续端子典型生产工艺流程如图 5 所示,主要包括除油、酸清洗、镀镍、回收、水洗、镀金和水溶

性封孔.其中 VOCs 产生环节为水溶性封孔工序,水溶性封孔的原料为二氯甲烷,其主要作用为弥补镀层缺陷,提高镀层防护性能.



图 5 珠三角连续端子制造典型工艺流程与排污环节

Fig. 5 Typical process flow chart and sewage link for continuous terminals

2.3.4 印制电路板

印制电路板制造典型生产工艺流程如图 6 所示,主要包括清洗、线路制作、氧化、压合、刻蚀、黑化、钻孔、去黑化、清洗、镀铜、防焊、表面处理

和有机涂覆等过程.其中 VOCs 产生环节主要来自防焊和有机涂覆两个环节.印制电路板制造过程中,除了 VOCs 排放以外,也伴随大量的酸性气体排放,主要排放环节如图 6 所示.

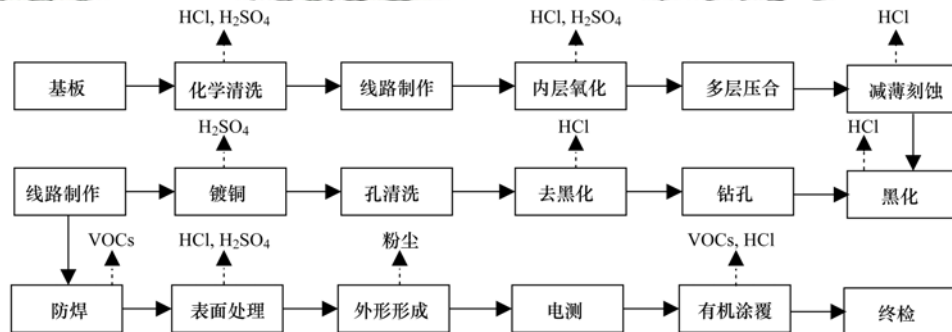


图 6 珠三角印制电路板制造典型工艺流程与排污环节

Fig. 6 Typical process flow chart and sewage link for printed circuit boards

2.3.5 漆包线

漆包线典型生产工艺流程如图 7 所示,主要包括放线、退火、涂漆、烘培、冷却和收线等过程,其 VOCs 主要排放环节为涂漆、烘干和收线等环节.



图 7 珠三角漆包线制造典型工艺流程与排污环节

Fig. 7 Typical process flow chart and sewage link for enameled wire

3 结果与讨论

3.1 原辅材料组分与含量特征

3.1.1 印刷业

印刷业不同印刷工艺及原料类型的原料组分及 VOCs 含量如表 2 所示.各印刷工艺主要原料包括油墨、稀释剂、润版液及胶黏剂等.从印刷业不同原

料类型 VOCs 含量分析,不同类型印刷原料 VOCs 含量存在明显差异.印刷业溶剂型原料(主要为油墨和胶黏剂) VOCs 含量为 20% ~ 70%,根据产品需求不同 VOCs 含量范围跨度较大;醇型原料 VOCs 含量为 60% ~ 85%;UV 型原料 VOCs 含量为 10% ~ 15%;植物型原料 VOCs 含量 0% ~ 20%;水溶性原料 VOCs 原料 0% ~ 10%.总体而言,印刷业各类型原料 VOCs 含量从大到小通常为:醇型原料 > 溶剂型原料 > UV 型原料 > 植物型 > 水溶型原料,但也存在个别类型原料 VOCs 含量差异大的现象.与不同类型原料的 VOCs 含量相比,同一原料类型不同印刷工艺的原料 VOCs 含量差别相对较小,有些甚至含量基本相近.以溶剂型原料类型为例,平板印刷溶剂型油墨 VOCs 含量为 40% ~ 65%,凸版印刷 40% ~ 65%,凹版印刷 30% ~ 70%,孔板印刷 45%

~70%。

在印刷业原料 VOCs 含量分析的基础上,结合各类原料实际用量及配比,分析印刷业原料 VOCs 组分特征.结果显示,印刷业 VOCs 组分主要为酯类和醇类等含氧挥发性有机物,乙酸乙酯、乙酸丙酯、异丙醇、正丙醇和乙醇是其主要成分,其占比约为印刷业原料总 VOCs 含量的 60%~80%。其中,溶剂型油墨主要 VOCs 组分为乙酸乙酯、异丙醇、乙酸正丙酯和异丙酯等,约占该类原料 VOCs 总量的

65%;水溶型油墨中 VOCs 组分主要为乙醇和丙二醇,其占比达 90% 以上;UV 型油墨 VOCs 主要组分基本均为酯类和酮类;溶剂型胶黏剂(聚氨酯胶黏剂) VOCs 中 90% 以上为乙酸乙酯;水溶型胶黏剂 VOCs 主要组分为苯乙烯和 1,3-丁二烯;溶剂型原料用稀释剂主要含氧 VOCs 为乙酸乙酯、正丙酯、乙醇、异丙醇和正丙醇等;水溶型或 UV 型等用原料稀释剂含氧 VOCs 较相对单一,约 85% 以上为乙醇。

表 2 印刷业不同工艺类型原料组分与 VOCs 含量

Table 2 Composition and content of raw materials from different printing processes				
工艺类型	原料类型	原辅材料名称	主要组分	VOCs 含量/%
平板印刷	溶剂型	油墨	颜料、合成树脂、植物油、矿物油、助剂、溶剂	40 ~ 65
		稀释剂	二甲苯、环己酯、乙酯、乙醇、丙二醇甲醚、丙二醇甲醚醋酸酯、戊二酸二甲酯	100
		润版液	异丙醇、乙醇、乙二醇	60 ~ 80
	水溶型	油墨	颜料、乙醇、松香、水	0 ~ 10
		稀释剂	乙醇、异丙醇	100
	UV 型	UV 胶印光油	丙烯酸脂 30% ~ 40%、三丙酮 8% ~ 10%、HDDA(1,6-己二醇二丙烯酸酯)40% ~ 50%、光起始剂 5% ~ 10%、其他	10 ~ 15
		UV 油墨系列	三羟甲基丙烷三丙烯酸酯 10% ~ 20%、二缩三丙二醇二丙烯酸酯 10% ~ 20%、1,6-己二醇二丙烯酸酯 6% ~ 10%、丙烯酸酯类共聚物 20% ~ 50%、叔丁基对苯二酚 0.1% ~ 0.2%、光引发剂 10% ~ 16%、其他	10 ~ 15
		稀释剂	乙醇(主要)、正丙酯、乙酸乙酯、异丙醇	100
		润版液	1,2-丙二醇、甘油、水、其他	0 ~ 10
	植物型	环保型大豆油墨	颜料、合成树脂、大豆油	0 ~ 20
凸版印刷	溶剂型	油墨	乙酸乙酯、异丙醇、甲苯、聚酰胺树脂、硝化棉树脂、颜料	40 ~ 65
		稀释剂	乙酸正丁酯、乙酸乙酯、正丁醇、乙醇、丙酮、甲苯、苯	100
	水溶型	油墨	丙二醇、水性丙烯酸乳液、水性颜料、水性消泡剂	0 ~ 5
		稀释剂	乙醇	100
凹版印刷	溶剂型	油墨	乙酸正丙酯、异丙酯、乙酸乙酯、颜料、合成树脂、助剂	30 ~ 70
		稀释剂	乙醇、乙酸乙酯、异丙醇、正丙醇、丙二醇、甲醚	100
	水溶型	水性光油	水性丙烯酸树脂 70% ~ 80%、丙二醇 3% ~ 5%、乙醇 4% ~ 6%、其他	7 ~ 11
		水性油墨系列	丙烯酸树脂 18% ~ 40%、二氧化硅 2% ~ 5%、无水乙醇 10% ~ 20%、水 10% ~ 20%、颜料 7% ~ 20%	10 ~ 20
		稀释剂	乙醇	100
	醇型	醇性油墨系列	无水乙醇 30% ~ 40%、丙二醇甲醚 2% ~ 10%、乙酸乙酯 25% ~ 35%、合成树脂 1% ~ 10%、颜料 0% ~ 20%、硝酸纤维素树脂 10% ~ 20%、其他	60 ~ 85
		稀释剂	乙醇、乙酸乙酯、异丙醇、正丙醇、丙二醇、甲醚	100
	孔板印刷	溶剂型	油墨	颜料、合成树脂、芳烃类、醚类、异佛尔酮
稀释剂			乙醇、丙二醇甲醚、丙二醇甲醚醋酸酯、戊二酸二甲酯、异佛尔酮和石油醚	100
水溶型		油墨	树脂、水、颜料、助溶剂(乙醇、乙二醇醚)、助剂、水	0 ~ 10
		稀释剂	乙醇	100
UV 型		UV 油墨系列	三羟甲基丙烷三丙烯酸酯 10% ~ 20%、二缩三丙二醇二丙烯酸酯 10% ~ 20%、1,6-己二醇二丙烯酸酯 6% ~ 10%、丙烯酸酯类共聚物 20% ~ 50%、叔丁基对苯二酚 0.1% ~ 0.2%、光引发剂 10% ~ 16%、其他	10 ~ 15
		稀释剂	乙醇	100
干式复合	溶剂型	聚氨酯胶黏剂	聚氨酯 73% ~ 77%、乙酸乙酯 23% ~ 27%	23 ~ 27
		稀释剂	乙酸乙酯、正丙酯	100
	水溶型	水性胶黏剂	苯乙烯、1,3-丁二烯	5 ~ 10
		稀释剂	乙醇	100
挤出复合	溶剂型	聚氨酯胶黏剂	聚氨酯 73% ~ 77%、乙酸乙酯 23% ~ 27%	23 ~ 27
		稀释剂	乙酸乙酯	100

3.1.2 家具制造业

家具制造业不同工艺及原料类型的原料组分及 VOCs 含量如表 3 所示.木质家具和金属家具制造主

要原料包括涂料、胶黏剂、稀释剂和除油剂等。
从家具制造业不同原料类型 VOCs 含量分析,不同类型原料 VOCs 含量存在明显差异.家具制造

表 3 家具制造业不同工艺类型原料组分与 VOCs 含量

Table 3 Composition and content of raw materials from different furniture manufacturing processes

工艺类型	原料/工序类型	原辅材料名称	主要组分	VOCs 含量/%
木质家具	溶剂型	聚氨酯涂料	硝基纤维素、合成脂肪酸树脂、乙酸乙酯、甲苯、环己酮	45 ~ 65
		硝基涂料	醇酸树脂、乙酸丁酯、乙酸乙酯、丙二醇甲醚醋酸酯、钛白粉、滑石粉、硬脂酸锌、合成二氧化硅	15 ~ 45
		稀释剂	乙酸正丁酯、乙酸乙酯、正丁醇、乙醇、丙酮、甲苯、二甲苯	100
	水溶性	水性涂料	AVE 乳液、苯丙乳液、甲基丙烯酸甲酯、醚类、复合分散剂、成膜助剂、复合消泡剂、过硫酸钠、复合增稠剂、水	5 ~ 10
金属家具	溶剂型	聚氨酯涂料	硝化纤维素、醇酸树脂、乙酸正丁酯、二甲苯	40 ~ 65
		稀释剂	乙酸正丁酯、乙酸乙酯、二甲苯、乙醇	100
	粉末型	塑粉	LB1040、环氧树脂、甲酯、硫酸钡、流平剂、其他	0 ~ 5
	除油剂	/	加氢轻馏分(石油)、二丙烯二醇甲醚乙酸酯、二丙烯二醇单丁酯、二氧化碳	>95

业溶剂型涂料 VOCs 含量约为 15% ~ 65%;水溶性涂料 VOCs 含量为 5% ~ 10%;粉末型涂料 VOCs 含量约为 0% ~ 5%;胶黏剂中 VOCs 含量相对较小甚至基本为 0,主要体现在密封胶的使用,VOCs 含量约为 0.4% ~ 1%;金属家具制造中除油剂 VOCs 含量基本与稀释剂一样,接近 100%. 总体而言,家具制造业各类型原料 VOCs 含量从大到小通常为:溶剂型涂料 > 水溶性涂料 > 粉末型涂料,但也存在个别类型原料 VOCs 含量差异大的现象.

在家具制造业原料 VOCs 含量分析的基础上,结合各类原料实际用量及配比,分析家具制造业原料 VOCs 组分特征. 结果显示,VOCs 组分主要为酯类、醇类和酮类等含氧挥发性有机物,也包含一些甲苯和二甲苯类的苯系物. 其中含氧 VOCs 主要为乙酸乙酯和乙酸丁酯,其组分占比约为家具制造业原料总 VOCs 的 45% ~ 65%. 溶剂型涂料主要 VOCs 组分为乙酸乙酯、乙酸丁酯、甲苯和二甲苯;水溶性涂料主要 VOCs 组分为酯类和醚类物质;胶黏剂主要 VOCs 组分为烷烃类、硅酮类物质;家具制造业溶剂型原料用稀释剂主要组分为乙酸正丁酯、乙

酸乙酯、正丁醇、乙醇、丙酮、甲苯、二甲苯等,其中约 70% 为含氧 VOCs;除油剂主要组分为加氢轻馏分和一些酯类物质.

3.1.3 电子元件及设备制造业

根据电子元件及设备制造业不同生产工艺原料使用情况分析其 VOCs 含量及组分,如表 4 所示. 陶瓷电容器(包括压敏电阻)生产主要原料为银浆(VOCs 含量 20% ~ 35%)、免清洗助焊剂(50% ~ 95%)、无铅助焊剂(45% ~ 65%)、清洗剂(40% ~ 55%)和稀释剂(100%),其主要 VOCs 组分为醇类、醚类及苯系物类(甲苯与二甲苯);铝电解电容器生产主要原料为高压和低压电解液,其中,高压电解液 VOCs 含量远大于低压电解液,二者含量分别为 78% ~ 90% 和 10% ~ 30%,但 VOCs 组分基本一致,均为乙二醇和己二酸铵;连续端子生产工艺 VOCs 主要原料为封孔液,VOCs 含量为 100%;漆包线制造主要原料为涂料,本研究选取了聚氨酯类涂料(50% ~ 70%)为对象,其 VOCs 主要组分为聚酯树脂和封闭异氰酸酯、二甲苯、重芳烃溶剂、甲酚、苯酚和二甲酚.

表 4 电子元件及设备制造业不同工艺类型原料组分与 VOCs 含量

Table 4 Composition and content of raw materials from different electronic component and equipment manufacturing processes

工艺类型	原辅材料名称	主要组分	VOCs 含量/%
陶瓷电容器	银浆	银、二乙二醇一丁醚、溶剂石脑油、乙基纤维素、醇酸树脂、三氧化铋、氧化钴	20 ~ 35
	免清洗助焊剂	醇、活性剂、载体	50 ~ 95
	无铅助焊剂	天然树脂、硬脂酸树脂、合成树脂、活化剂、油酸、起泡剂、混合醇溶剂、抗挥发剂等	45 ~ 65
	清洗剂	天然树脂、硬脂酸树脂、合成树脂、活化剂、油酸、起泡剂、混合醇溶剂、抗挥发剂等	40 ~ 55
	香蕉水	二甲苯	100
	稀释剂	丙酮、甲醇、甲苯、乙醇	100
铝电解电容器	高压电解液	乙二醇、己二酸铵、添加剂等	78 ~ 90
	低压电解质	乙二醇、己二酸铵、添加剂等	10 ~ 30
连续端子	封孔液	二氯甲烷	100
漆包线制造	聚氨酯漆	聚酯树脂和封闭异氰酸酯 30% ~ 39%、二甲苯 15% ~ 35%、重芳烃溶剂 0% ~ 24%、甲酚 20% ~ 35%、苯酚 15% ~ 30%、二甲酚 2% ~ 4%	50 ~ 70

3.2 VOCs 排放系数

3.2.1 印刷业

印刷业 VOCs 排放系数与其末端综合治理情

况密切相关,其中,末端治理包括废气收集和废气治理技术两方面. 因此,分析印刷业 VOCs 排放系数,首先探讨其废气收集情况与治理技术. 调研选

取的六类典型印刷生产工艺对应原料类型及末端治理情况如表 5 所示. 调研显示,在治理技术的选取方面,原料类型为水溶型、UV 型或植物型的印刷企业,其末端一般不治理或选取治理成本和效率相对较低的治理技术,如普通活性炭吸附、UV 光解和低温等离子体等;采用溶剂型原料的印刷企业,其末端治理技术选择参差不齐,有效率较低的普通活性炭吸附,也有治理效率较高的沸石转轮吸附 + 氧化焚烧和活性炭吸附 + 催化燃烧等组

合技术. 在废气收集方面,活性炭吸附、UV 光解、低温等离子体及其组合技术等一类治理效率和成本相对较低的技术,其对应的废气收集主要采用集气罩或管道在废气关键产生工序进行局部收集或车间半密闭式负压收集,收集效率相对较低,为 40% ~ 75%;沸石转轮吸附 + 氧化焚烧和活性炭吸附 + 催化燃烧等治理效率较高的技术,废气收集主要采用设备管道或车间全密闭式收集,收集效率相对较高,为 90% ~ 95%.

表 5 典型印刷工艺基于原料类型及末端治理的 VOCs 排放系数

Table 5 Raw materials and end treatment-based VOC emission factors for typical printing processes

工艺类型	有机原料情况		末端综合治理情况		排放系数/kg·t ⁻¹	
	原料类型	油墨: 稀释剂	收集措施	控制技术	未治理	治理后
平板印刷	植物型	1:0	未收集	无治理	89.0	89.0
	UV 型	1:0.3	车间半密闭式负压收集	活性炭吸附	283.4	147.4
	溶剂型	1:1.13	集气罩或管道关键工序局部收集	活性炭吸附	633.4	481.4
	水溶型	1:0.01	集气罩或管道关键工序局部收集	UV 光解	328.3	279.0
凸版印刷	溶剂型	1:1.2	车间半密闭式负压收集	活性炭吸附	704.6	366.4
	水溶型	1:0.02	集气罩或管道关键工序局部收集	低温等离子体	340.1	289.1
凹版印刷	溶剂型	1:1.35	车间全密闭负压收集	沸石转轮吸附 + 氧化焚烧	791.5	114.8
	水醇型	1:0.19	车间全密闭负压收集	活性炭吸附(原位再生)	408.7	212.5
孔板印刷	溶剂型	1:1.30	车间全密闭负压收集	活性炭吸附 + 催化燃烧	710.9	103.1
	水溶型	1:0.02	集气罩或管道在废气关键产生工序局部收集	活性炭吸附	351.2	266.9
	UV 型	1:0.01	未收集	无治理	110.7	110.7
干式复合	溶剂型	1:1.5	车间全密闭负压收集	沸石转轮吸附 + 氧化焚烧系	502.9	34.7
		1:1.6	车间全密闭负压收集	沸石转轮吸附 + 氧化焚烧系	717.0	90.3
	水溶型	1:0.12	集气罩或管道关键工序局部收集	活性炭吸附	199.6	103.8
挤出复合	溶剂型	1:5	集气罩或管道关键工序局部收集和车间半密闭式负压收集	活性炭吸附 + UV 光解	873.9	209.7

印刷业六类典型生产工艺基于不同原料类型及末端治理的 VOCs 排放系数如表 5 所示. 同一印刷工艺的不同原料类型、同一原料类型的不同印刷工艺 VOCs 治理前后排放系数等均具有较大差异,主要与印刷业工艺类型、原料类型及末端综合治理情况等有关.

从同一印刷工艺来分析不同原料类型的排放系数,以平板印刷工艺为例,分析植物型油墨、UV 系列油墨、溶剂型和水溶型四类典型原料类型其 VOCs 排放系数的差异. 四类原料类型 VOCs 治理前后排放系数大小顺序均为:溶剂型 > 水溶型 > UV 型 > 植物型,治理前后排放系数(单位:kg·t⁻¹)分别为 633.4 和 481.4、328.3 和 279.0、283.4 和 147.4、89.0 和 89.0. 治理前 VOCs 排放系数大小顺序主要取决与原料中 VOCs 的含量,已于 3.1 节分析. 治理后 VOCs 排放系数大小顺序仍与治理前保持一致,主要是由于调研选取的平板印刷工艺四类原料类型对应的末端治理情况(废气收集效率和治理效率)具有一定的相似性.

从相同原料类型来分析六类典型生产工艺的排放系数,主要探讨原料类型应用较广泛的溶剂型原

料和水溶型原料. 溶剂型原料类型的不同印刷工艺 VOCs 排放系数有明显差异. 其中,治理前 VOCs 排放系数最大的是挤出复合工艺(873.9 kg·t⁻¹)和凹版印刷(791.5 kg·t⁻¹),这主要与两类印刷工艺上墨面积较大、墨层较厚、溶剂比例大(油墨:溶剂分别为1:5和1:1.35)有关. 干式复合工艺、孔板印刷和凸版印刷的排放系数相对较接近,分别为 717.0 kg·t⁻¹(油墨:溶剂为1:1.6)、710.9 kg·t⁻¹和 704.6 kg·t⁻¹. 平板印刷工艺相对较小,其未治理 VOCs 排放系数为 633.4 kg·t⁻¹. 另外,干式复合工艺中,当原料油墨与溶剂比例为 1:1.5 时,其未治理排放系数最小,为 502.9 kg·t⁻¹. 治理后各工艺 VOCs 排放系数大小依次为平板印刷 > 凸版印刷 > 挤出复合工艺 > 凹版印刷 > 孔板印刷 > 干式复合(1:1.6) > 干式复合(1:1.5),与治理前排放系数基本不同,这主要与工艺末端综合治理有关. 平板印刷治理前排放系数虽相对较小,但因其末端对应的废气收集效率(40% ~ 75%)和治理技术(普通活性炭吸附)治理效率相对较小,使治理后 VOCs 排放系数最大,为 481.4 kg·t⁻¹;凹版印刷、孔板印刷和干式复合采用沸石转轮吸附 + 氧化焚烧和活性炭吸附 + 催化燃

烧技术,其治理后 VOCs 排放系数相对较小;挤出复合工艺虽治理前 VOCs 排放系数最大,但由于其治理技术对应综合去除效率相对较高,其治理后 VOCs 排放系数居中,为 209.7 kg·t⁻¹. 水溶性原料类型的不同类印刷工艺 VOCs 排放系数差异相对较小. 其中,平板印刷、凸版印刷、孔板印刷治理前后 VOCs 排放系数相近,分别为 328.3 和 279.0、340.1 和 289.1、351.2 和 266.9 kg·t⁻¹;凹版印刷的水溶型较特殊,可与醇型油墨混合使用,因此,其治理前 VOCs 排放系数最高,为 408.7 kg·t⁻¹,其治理后 VOCs 排放系数相对前 3 种印刷工艺要小,为 212.5 kg·t⁻¹. 主要是因为其采用的活性炭吸附为可脱附再生蜂窝活性炭,与普通活性炭吸附、UV 光解和低温等离子技术相比,能更有效保障 VOCs 的去除效率;干式复合工艺的排放系数最小,治理前后分别为 199.6 kg·t⁻¹和 103.8 kg·t⁻¹.

3.2.2 家具制造业

选取调研的家具制造业末端治理情况如表 6 所示. 木质家具制造过程中,溶剂型原料类型 VOCs 末端治理主要针对喷漆环节,其晾干环节 VOCs 无治理. 喷漆环节采用活性炭吸附技术,主要通过车间半密闭式废气收集或集气罩/管道关键喷漆部位进行局部收集,其废气收集效率为 40% ~ 75%. 木质家

具中,水溶型原料类型 VOCs 未治理,主要因为其 VOCs 含量较低;金属家具制造工艺,主要采用溶剂型和粉末型两类原料类型,喷漆环节和烘干环节均采用活性炭吸附技术,其中喷漆环节废气收集方式与木制家具类似,为 40% ~ 75%. 烘干环节废气收集主要采用密闭收集,收集效率相对喷漆较高,为 75% ~ 80%. 然而,烘干环节采用活性炭吸附技术,治理效率较喷漆环节低,主要是由于烘干环节废气温度较高,未做好废气降温处理,存在 VOCs 无法被吸附或脱附的现象.

家具制造业两类典型制造工艺基于原料类型及末端治理 VOCs 排放系数如表 6 所示,从各工艺原料类型总体来看,VOCs 治理前后排放系数大小均依次为:木质家具(溶剂型) > 金属家具(溶剂型) > 金属家具(粉末型) > 木质家具(水溶型),VOCs 治理前后排放系数分别为 680.0 和 546.0、526.0 和 365.1、230.0 和 184.0 和 80.0 kg·t⁻¹. 治理前后 VOCs 排放系数大小顺序未发生变化,主要是由于其末端治理在废气收集方式及治理技术上具有一定的相似性. 溶剂型原料类型中,木制家具治理前后 VOCs 排放系数较金属家具大,主要是木质家具原料中稀释剂比例更大为 1:1,而金属家具为 4:1.

表 6 典型家具制造业基于原料类型及末端治理的 VOCs 排放系数

Table 6 Raw materials and end treatment-based VOC emission factors for typical furniture manufacturing processes

工艺类型	原料类型	涂料: 稀释剂	末端综合治理情况		排放系数/kg·t ⁻¹	
			收集措施	控制技术	未治理	治理后
木质家具	溶剂型	1:1	集气罩关键工序收集和车间半密闭收集	活性炭吸附(仅喷漆环节)	680.0	546.0
	水溶型	/	未收集	无治理	80.0	80.0
金属家具	溶剂型	4:1	集气罩关键工序收集和车间半密闭收集/管道密闭收集	活性炭吸附	526.0	365.1
	粉末型	/	集气罩关键工序收集	活性炭吸附	230.0	184.0

3.2.3 电子元件及设备制造

调研 7 类典型电子元件及设备制造工艺对应末端治理情况如表 7 所示. 调研显示,在废气收集效率方面,溶剂回收 + 活性炭吸附和催化燃烧技术对应废气收集方式,主要采用管道、车间密闭或半密闭式进行收集,收集效率相对较高为 75% ~ 90%;活性炭吸附和化学处理法喷淋洗涤技术对应废气收集方式主要采用集气罩、管道管件局部收集或车间半密闭式收集,收集效率相对较低,为 40% ~ 75%. 在治理技术的选取方面,陶瓷电容器和压敏电阻生产工艺具有一定的相似性,均采用溶剂回收 + 活性炭吸附治理工艺,主要对生产过程清洗使用的溶剂进行回收;铝电解电容器和 PCB 印制电路制造主要采用治理效率相对较低的普通活性炭吸附技术;连续端子制造主要采用化学处理法喷淋洗涤治理封孔液

二氯甲烷的逸散;漆包线制造基本均采用公共或设备配套的催化燃烧装置进行治理.

电子元件及设备制造业对应不同工艺基于末端治理的 VOCs 排放系数表 7 所示,各类工艺排放系数均以单位产品产量为基量. AC 陶瓷电容器、CC 陶瓷电容器和压敏电阻制造工艺较相似,因此相同单位产品 VOCs 排放系数具有一定的可比性. 因末端治理情况基本相同,故 VOCs 治理前后排放系数大小均为:CC 陶瓷电容器 > 压敏电阻 > AC 陶瓷电容器,分别为 394.1 和 269.6、282.4 和 193.2、59.7 和 40.8 kg·(百万只)⁻¹. 其他生产工艺包括铝电解电容器、连续端子、漆包线和 PCB 印制电路板,因生产工艺对应不同的活动水平基量,故排放系数也有所不同,其 VOCs 治理前后排放系数分别为 1.2 kg·(百万只)⁻¹和 1.0 kg·(百万只)⁻¹、56.3 kg·t⁻¹

表 7 典型电子元件及设备制造基于原料类型及末端治理的 VOCs 排放系数

Table 7 Raw materials and end treatment-based VOC emission factors for typical electronic component and equipment manufacturing processes					
工艺类型	末端综合治理情况		排放系数		
	收集措施	控制技术	未治理	治理后	单位
AC 陶瓷电容器	管道收集、密闭收集	溶剂回收 + 活性炭吸附	59.7	40.8	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$
CC 陶瓷电容器	管道收集、密闭收集	溶剂回收 + 活性炭吸附	394.1	269.6	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$
压敏电阻	管道收集、密闭收集	溶剂回收 + 活性炭吸附	282.4	193.2	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$
铝电解电容器	局部收集, 车间半密闭式收集	活性炭吸附	1.2	1.0	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$
连续端子	槽体上方集气罩局部收集	化学处理法喷淋洗涤	56.3	42.8	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
漆包线	设备一体化密闭收集	催化燃烧	87.2	28.3	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
PCB 印制电路板	局部收集, 车间半密闭式收集	活性炭吸附	26.4	11.6	$\text{kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$

和 $42.8 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $87.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $28.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $26.4 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 和 $11.6 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 。

3.3 综合排放系数及其比较

3.3.1 综合排放系数

本研究将基于原料类型与末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数分别按行业、原料类型和生产工艺核算出综合的 VOCs 治理前后排放系数。如表 8 所示,印刷业 VOCs 治理前后综合排放系数分别为 $415.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $184.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,其中,溶剂型原料为 $704.9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $200.1 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,水溶性原料为 $325.6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $230.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,UV 型原料为 $197.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $129.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,植物型原料为 $89.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $89.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,平板、凸版、凹版、孔板和复合工艺治理前后排放系数分别为 $333.5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $249.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $522.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $327.7 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $600.1 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $163.7 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $390.9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $160.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $573.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $109.6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$;家具制造业 VOCs 治理前后综合排放系数分别为 $379.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $290.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,溶剂型原料为 $603.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $448.5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,水溶性原料为 $80.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $80.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,粉末型原料为 $230.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $184.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,木质家具和金属家具治理前后排放系数分别为 $380.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $313.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $378.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $267.5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$;电子元件及设备制造中,AC 陶瓷电容器、CC 陶瓷电容器、压敏电阻、铝电解电容器治理前后 VOCs 排放系数分别为 59.7 和 40.8、394.1 和 269.6、282.4 和 193.2、1.2 和 $1.0 \text{ kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$ 。连续端子、漆包线和 PCB 印制电路板治理前后 VOCs 排放系数分别为 $56.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $42.8 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $87.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $28.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $26.4 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 和 $11.6 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 。

3.3.2 综合排放系数比较

表 8 比较了印刷业、家具制造业和电子元件与设备制造行业不同研究 VOCs 排放系数,与国内其他研究建立的排放系数相比,本研究建立的三大行业 VOCs 排放系数更为精细化,并且更具有可操作性。

印刷业已有研究的 VOCs 排放系数中,基于不同原料类型的 VOCs 排放系数多为溶剂型和水溶型原料,UV 型原料和植物型原料印刷工艺对应的 VOCs 排放系数研究成果较少;基于不同印刷工艺中,对孔板印刷 VOCs 排放系数研究也较罕见。王家德等^[27]研究的浙江省印刷业 VOCs 排放系数为基于浙江省 2015 年印刷企业调研核算获取的治理后综合性排放系数。与本研究相比,其 VOCs 排放系数与本研究治理前 VOCs 排放系数较接近。除了两地印刷业原料和工艺等不同外,主要与调研期间浙江省包装印刷行业治理水平相对较低,同时约 2/3 企业未能有效治理^[27],导致治理前后 VOCs 排放差异不大有关。对王家德等^[27]研究的印刷行业排放系数和本研究印刷业综合排放系数进行不同印刷工艺 VOCs 排放系数比较,其中,本研究选取治理前系数进行比较,对比结果显示,VOCs 排放系数大小顺序均依次为:凹版印刷 > 复合工艺 > 凸版印刷 > 平板印刷。

家具制造业已有研究的 VOCs 排放系数中,文献[28]给出了针对不同工艺的排放系数。其中,木质家具以家具件数为活动水平基量,因家具大小及规模差异带来的涂装面积及有机原料使用差异较大,其排放系数不确定性较大;金属家具以企业数量为活动水平基量,因企业规模、工艺、生产量等影响,其排放系数比以件数带来的不确定性更大。因此,目前已有的家具制造业 VOCs 排放系数较粗。本研究以有机原料为活动水平基量,分别给出了家具制造业按典型原料类型(溶剂型、水溶型和粉末型)和工艺(木制家具和金属家具)的 VOCs 排放系数,为家具制造行业提供了更精细的 VOCs 排放系数。

电子元件与设备制造业已有研究的 VOCs 排放系数中,对漆包线及印制电路板生产工艺研究的较多,电容器、压敏电阻和连续端子 VOCs 排放系数目前国内暂未相关研究成果。漆包线 VOCs 排放系数中,王宇楠^[22,23]采用源头追踪法,根据漆包线生产全过程 VOCs 流动方向,核算了 VOCs 治理后排放

系数为 $(24.75 \pm 6.25) \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 与本研究漆包线 VOCs 治理后排放系数 $28.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 较接近. 文献 [28] 给出的漆包线 VOCs 排放系数, 以生产线为活动水平基量. 由于生产线规模和原料类型等差异大, 该 VOCs 排放系数不确定性大. PCB 印刷电路板 VOCs 排放系数中, 肖景芳等^[20] 以生产过程中使用的有机原料为活动水平基量, 研究得出 PCB 印刷电

路板治理后 VOCs 排放系数为 $128 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$. 目前企业 PCB 产量主要采用面积计, 与本研究选取的活动水平基量 PCB 产品的面积相比, 一方面, 肖景芳等研究的的活动水平基量在排放系数使用过程中难以获取, 另一方面, 单位面积 PCB 生产 VOCs 产生量差异不大, 因此, 本研究的排放系数在实际应用中更具有可操作性.

表 8 不同研究典型溶剂使用源 VOCs 排放系数比较

Table 8 Comparisons of VOCs emission factors from typical solvent use sources with previous studies

行业	VOCs 排放系数 工艺类型	本研究			其他研究	
		治理前	治理后	单位	治理后	单位
印刷业	印刷业	415.2	184.3	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	485 ^[27]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
	溶剂型原料印刷	704.9	200.1	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	689 ^[27]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
	水溶型原料印刷	325.6	230.3	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	166 ^[27]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
	UV 型原料印刷	197.0	129.0	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
	植物型原料印刷	89.0	89.0	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
	平板印刷	333.5	249.2	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	391 ^[27]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
	凸版印刷	522.3	327.7	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	447 ^[27]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
	凹版印刷	600.1	163.7	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	634 ^[27]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
	孔板印刷	390.9	160.2	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
家具制造业	复合工艺	573.3	109.6	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	531 ^[27]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
	家具制造业	379.0	290.2	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
	溶剂型原料家具制造	603.0	448.5	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
	水溶型原料家具制造	80.0	80.0	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
	粉末型原料家具制造	230.0	184.0	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
	木质家具	380.0	313.0	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	0.4 ^[28]	$\text{kg} \cdot \text{件}^{-1}$
电子元件与 设备制造	金属家具	378.0	267.5	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	218 ^[28]	$\text{t} \cdot \text{厂}^{-1}$
	AC 陶瓷电容器	59.7	40.8	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$		
	CC 陶瓷电容器	394.1	269.6	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$		
	压敏电阻	282.4	193.2	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$		
	铝电解电容器	1.2	1.0	$\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$		
	连续端子	56.3	42.8	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		
	漆包线	87.2	28.3	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	24.75 ± 6.25 ^[22]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
PCB 印制电路板					84.37 ^[28]	$\text{t} \cdot (\text{生产线})^{-1}$
		26.4	11.6	$\text{kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$	128 ^[20]	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$

4 结论

(1) 印刷业有机原料中 VOCs 组分主要为乙酸乙酯、乙酸丙酯、异丙醇、正丙醇和乙醇等含氧 VOCs, 其占比约为原料总 VOCs 的 60% ~ 80%; 家具制造业有机原料中含氧 VOCs 为乙酸乙酯和乙酸丁酯, 其占比约为原料总 VOCs 的 45% ~ 65%; 电子元件和设备制造业有机原料 VOCs 组分主要为醇、醚、酚等含氧 VOCs, 苯系物及卤代烃等.

(2) 印刷业 VOCs 治理前后综合排放系数分别为 $415.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $184.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$. 其中, 溶剂型原料为 $704.9 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $200.1 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 水溶性原料为 $325.6 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $230.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, UV 型原料为 $197.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $129.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 植物型原料为 $89.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $89.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$.

(3) 家具制造业 VOCs 治理前后综合排放系数

分别为 $379.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $290.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$. 其中, 溶剂型原料为 $603.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $448.5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 水溶性原料为 $80.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $80.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 粉末型原料为 $230.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $184.0 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$.

(4) 电子元件及设备制造中, AC 陶瓷电容器、CC 陶瓷电容器、压敏电阻、铝电解电容器治理前后 VOCs 排放系数分别为 59.7 和 40.8、394.1 和 269.6、282.4 和 193.2、1.2 和 1.0 $\text{kg} \cdot (\text{百万只})^{-1}$. 连续端子、漆包线和 PCB 印制电路板治理前后 VOCs 排放系数分别为 $56.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $42.8 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $87.2 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $28.3 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $26.4 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$ 和 $11.6 \text{ kg} \cdot (100 \text{ m}^2)^{-1}$.

(5) 行业 VOCs 排放系数受原辅材料、废气收集和治理效率综合影响. 原辅材料为溶剂型且废气收集与治理效率较低的企业 VOCs 排放水平相对较高, 建议优先采用源头替代, 无法替代时, 需同时加

强废气收集与治理效率; 原辅材料为溶剂型且废气收集与治理效率较高、原辅材料为环保型(水溶型、UV 型、植物型和粉末型)的企业 VOCs 排放水平相对较低, 前者建议加强废气治理日常监督管理, 后者建议根据实际排放情况加强废气收集与治理。

参考文献:

- [1] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the pearl river delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90** (1): 512-518.
- [2] 中国地球物理学会. 中国地球物理[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2012. 102.
Chinese Geophysical Society. The Chinese geophysics [M]. Beijing: China University of Science and Technology Press, 2012. 102.
- [3] Sun G J, Yao L, Jiao L, *et al.* Characterizing $\text{PM}_{2.5}$ pollution of a subtropical metropolitan area in China [J]. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2013, **3**(1): 100-110.
- [4] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 389-398.
- [5] 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.
- [6] Liu X H, Zhang Y, Xing J, *et al.* Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II. Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(30): 3719-3727.
- [7] Cheng H R, Guo H, Saunders S M, *et al.* Assessing photochemical ozone formation in the Pearl River Delta with a photochemical trajectory model [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(34): 4199-4208.
- [8] Cheng H R, Guo H, Wang X M, *et al.* On the relationship between ozone and its precursors in the Pearl River Delta: application of an observation-based model (OBM) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, **17** (3): 547-560.
- [9] Ling Z H, Guo H, Zheng J Y, *et al.* Establishing a conceptual model for photochemical ozone pollution in subtropical Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 208-220.
- [10] Liang X M, Chen X F, Zhang J N, *et al.* Reactivity-based industrial volatile organic compounds emission inventory and its implications for ozone control strategies in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **162**: 115-126.
- [11] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 845-854.
Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al.* Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 845-854.
- [12] 李楠. 广东省 2012 年大气排放源清单定量不确定及校验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [13] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [14] 余宇帆, 卢清, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单[J]. *中国环境科学*, 2011, **31** (2): 195-201.
Yu Y F, Lu Q, Zheng J Y, *et al.* VOC emission inventory and its uncertainty from the key VOC-related industries in the Pearl River Delta Region [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31** (2): 195-201.
- [15] 杨柳林, 曾武涛, 张永波, 等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. *中国环境科学*, 2015, **35** (12): 3521-3534.
Yang L L, Zeng W T, Zhang Y B, *et al.* Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3521-3534.
- [16] 余宇帆. 珠江三角洲地区典型工业 VOCs 源排放成分谱研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [17] 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.
- [18] 于广河, 朱乔, 夏士勇, 等. 深圳市典型工业行业 VOCs 排放谱特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41** (S1): 232-236.
- [19] 杨杨, 杨静, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲印刷行业 VOCs 组分排放清单及关键活性组分[J]. *环境科学研究*, 2013, **26** (3): 326-333.
Yang Y, Yang J, Yin S S, *et al.* Speciated VOCs emission inventory and key species from printing industry in the Pearl River Delta region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26** (3): 326-333.
- [20] 肖景方, 叶代启, 刘巧, 等. 消费电子产品生产过程中挥发性有机物 (VOCs) 排放特征的研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1612-1619.
Xiao J F, Ye D Q, Liu Q, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the manufacturing process of consumer electronic products [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1612-1619.
- [21] 何梦林, 王旎, 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, Cheng 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.
- [22] 王宇楠, 叶代启, 林俊敏, 等. 漆包线行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32** (6): 980-987.
Wang Y N, Ye D Q, Lin J M, *et al.* A study on emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from enameled wire industry [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(6): 980-987.
- [23] 王宇楠. 漆包线生产过程中挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [24] 上海市环境保护局关于印发《上海市工业企业挥发性有机物排放量通用计算方法(试行)》的通知[EB/OL]. <http://www.voc.news/news/show.php?itemid=535>, 2017-03-07.
- [25] 广东省生态环境厅关于印发《广东省重点行业挥发性有机物排放量计算方法(试行)》的通知[EB/OL]. http://www.gd-sct.com/dgweb_content-915652.html, 2018-12-04.
- [26] 广东省环境保护厅《印刷、制鞋、家具、表面涂装(汽车制造)行业挥发性有机物总量减排核算细则》[EB/OL].

- http://www.gdep.gov.cn/zwxx_1/zfgw/shbtwj/201609/t20160906_214934.html, 2016-08-31.
- [27] 王家德, 吕建璋, 李文娟, 等. 浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3552-3556.
Wang J D, Lv J Z, Li W J, *et al.* Pollution characteristics and emission coefficients of volatile organic compounds from the packaging and printing industry in Zhejiang province [J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3552-3556.
- [28] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>.

欢迎订阅 2020 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2020 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkk@rcees.ac.cn;网址:www.hjkk.ac.cn

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)