

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

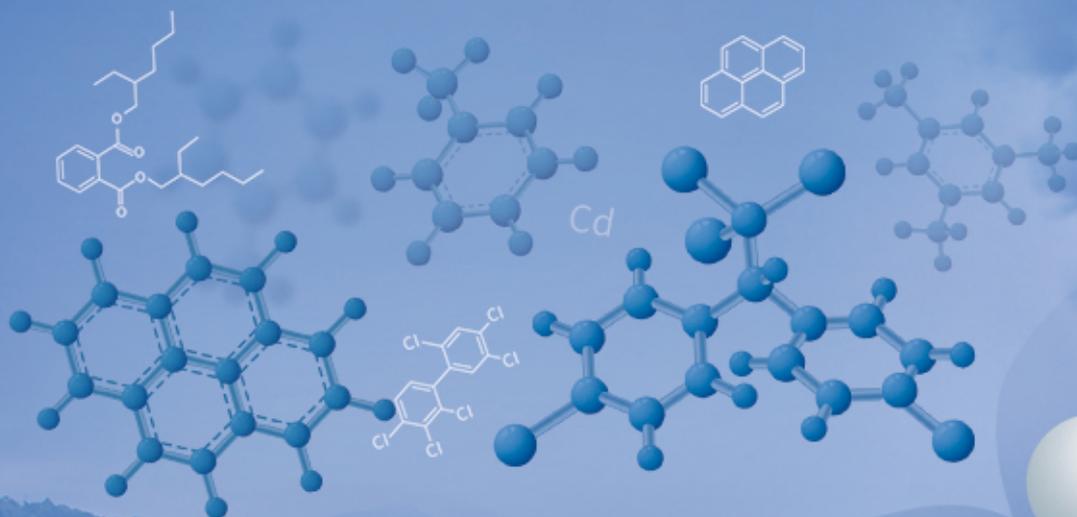
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

## 升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM<sub>2.5</sub>化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 ..... 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原PM<sub>2.5</sub>空间分布的地形效应 ..... 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例 .....  
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 ..... 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季O<sub>3</sub>污染特征及关键前体物识别 ..... 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区O<sub>3</sub>来源特征 ..... 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区8~9月O<sub>3</sub>污染过程VOCs污染特征及来源分析 ..... 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的VOCs排放特征及其环境影响 .....  
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 ..... 徐超, 吴水平, 刘怡婧, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 ..... 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响 .....  
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 ..... 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 ..... 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 ..... 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于eDNA技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征 .....  
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中PPCPs的污染水平、分布特征及生态风险评价 ..... 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 ..... 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 ..... 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 ..... 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 ..... 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度 .....  
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对PMS/Co<sup>2+</sup>均相催化氧化有机物的影响因素与机制 ..... 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 金刚 (4789)

磁性生物炭负载α-MnO<sub>2</sub>活化过一硫酸盐降解2,2',4,4'-四溴联苯醚 ..... 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体MS2的特性及机制 ..... 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 ..... 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 ..... 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 ..... 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 ..... 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 ..... 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 ..... 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 ..... 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 ..... 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 ..... 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 ..... 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤DTPA-Cd降低苹果砷木镉积累和镉伤害 ..... 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险 .....  
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于Web of Science数据库检索 ..... 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 ..... 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 ..... 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 ..... 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及nirS型反硝化细菌群落特征分析 .....  
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构 .....  
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 ..... 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 ..... 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 ..... 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 ..... 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放对长期大气CO<sub>2</sub>浓度升高的响应 ..... 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 ..... 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国84个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素 ..... 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 ..... 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

# 广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响

曾春玲<sup>1</sup>, 邵霞<sup>2</sup>, 刘锐源<sup>1</sup>, 姚懿娟<sup>1</sup>, 李银松<sup>1</sup>, 侯墨<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 范丽雅<sup>1,3,4,5\*</sup>, 叶代启<sup>1,3,4,5</sup>

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 北京市环境保护科学研究院, 城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室, 北京 100037; 3. 挥发性有机物污染治理技术与装备国家工程实验室, 广州 510006; 4. 广东省大气环境与污染控制重点实验室, 广州 510006; 5. 广东省环境风险防控与应急处置工程技术研究中心, 广州 510006)

**摘要:** 为掌握不同涂料类型废气之间的排放差异, 基于溶剂型、水性、溶剂型辐射固化 (ultra-violet, UV)、水性 UV 和粉末等不同涂料类型, 选取典型家具制造企业进行废气采样, 对比研究不同涂料类型废气挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 排放浓度和组分差异, 并对不同涂料类型废气的臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 和二次有机气溶胶生成潜势 (secondary organic aerosol formation potential, SOAFP) 进行分析。结果表明, 溶剂型涂料废气的总挥发性有机化合物 (total volatile organic compound, TVOC) 浓度、OFP 和 SOAFP 均高于水性、溶剂型 UV、水性 UV 和粉末涂料废气。不同涂料类型有组织废气 VOCs 浓度水平和组成差异较大。溶剂型涂料和溶剂型 UV 涂料废气以芳香烃和含氧挥发性有机物 (oxygenated volatile organic compounds, OVOCs) 为主, 芳香烃的占比分别为 41.91%~60.67% 和 42.51%~43.00%, OVOCs 的占比分别为 24.75%~41.29% 和 41.34%~43.21%。水性涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气中 VOCs 占比最高的是 OVOCs, 占比分别为 54.02%~62.10%、55.23%~64.81% 和 42.98%~46.45%。溶剂型涂料废气的主要组分为苯乙烯 (14.68%), 水性涂料废气的主要组分为甲缩醛 (14.61%), 溶剂型 UV 涂料和水性 UV 涂料废气的主要组分均为乙酸丁酯 (15.36% 和 20.56%), 粉末涂料废气的主要组分是 3-乙氧基丙酸乙酯 (20.19%)。芳香烃对溶剂型涂料和溶剂型 UV 涂料废气的 OFP 贡献最大, 分别为 79.84% 和 80.32%。水性涂料和水性 UV 涂料废气 OFP 的主要贡献者是芳香烃 (51.48% 和 36.71%) 和 OVOCs (42.30% 和 41.03%)。芳香烃 (43.46%)、OVOCs (28.06%) 和烯烃 (25.24%) 是粉末涂料 OFP 的主要贡献者。芳香烃是溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型 UV 涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气 SOAFP 的绝对贡献者, 占比均超过 99%。

**关键词:** 家具行业; 挥发性有机物 (VOCs); 涂料类型; 排放浓度; 臭氧生成潜势 (OFP); 二次有机气溶胶 (SOAFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4641-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.202101235

## Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province

ZENG Chun-ling<sup>1</sup>, SHAO Xia<sup>2</sup>, LIU Rui-yuan<sup>1</sup>, YAO Yi-juan<sup>1</sup>, LI Yin-song<sup>1</sup>, HOU Mo<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, FAN Li-ya<sup>1,3,4,5\*</sup>, YE Dai-qi<sup>1,3,4,5</sup>

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 3. National Engineering Laboratory for Volatile Organic Compounds Pollution Control Technology and Equipment, Guangzhou 510006, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Atmospheric Environment and Pollution Control, Guangzhou 510006, China; 5. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Centre for Environmental Risk Prevention and Emergency Disposal, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** To determine the differences in emissions among different types of coatings, such as solvent-based, water-based, solvent-based ultra-violet (UV), water-based UV, and powder coatings, representative furniture manufacturing companies were selected for analysis. The emission concentrations and compositional characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in different types of coatings were compared and studied. The ozone formation potential (OFP) and secondary organic aerosol formation potential (SOAFP) of the different types of coatings were also analyzed. Solvent-based coatings has higher TVOC concentrations, OFPs, and SOAFPs than water-based, solvent-based UV, water-based UV, and powder coatings. The concentrations and composition of VOCs emitted from the different types of coatings were also different. The main VOC groups of the solvent-based and solvent-based UV coatings were aromatic hydrocarbons and oxygenated volatile organic compounds (OVOCs). Specifically, the proportions of aromatic hydrocarbons are 41.91%-60.67% and 42.51%-43.00%, respectively, and the proportions of OVOCs were 24.75%-41.29% and 41.34%-43.21%, respectively. OVOCs accounted for the highest proportion of VOCs in the water-based, water-based UV, and powder coatings, at 54.02%-62.10%, 55.23%-64.81%, and 42.98%-46.45%, respectively. The major VOC compound of the solvent-based coatings was styrene (14.68%), and the main component of the water-based coatings was methylal (14.61%). The main species of VOCs from the solvent-based UV and water-based UV coatings were butyl acetate (15.36% and 20.56%, respectively). The most abundant species from the powder coatings was ethyl 3-ethoxy propionate (20.19%). Aromatic hydrocarbons were the most important contributor to the OFP of the solvent-based and solvent-based UV coatings, accounting for 79.84% and 80.32%, respectively. Aromatic hydrocarbons (51.48% and 36.71%) and OVOCs (42.30% and 41.03%) were the major contributors to the OFP of the water-based and water-based UV coatings, respectively. Aromatic hydrocarbons (43.46%), OVOCs (28.06%), and olefins (25.24%) were the

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212804, 2017YFC0212805); 国家环境技术体系建设项目 (技-2018-004)

作者简介: 曾春玲 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与污染控制, E-mail: zeng.c.1@foxmail.com

\* 通信作者, E-mail: fanly@scut.edu.cn

main factors affecting the OFP of the powder coatings. Aromatic hydrocarbons dominate the SOAFP of solvent-based, water-based, solvent-based UV, water-based UV, and powder coatings, accounting for more than 99%.

**Key words:** furniture industry; volatile organic compounds (VOCs); types of coating; emission concentration; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol formation potential (SOAFP)

近年来,我国以臭氧(O<sub>3</sub>)和细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)为特征污染物的区域性大气污染问题日益突出<sup>[1-3]</sup>.二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)是细颗粒物的重要组成,VOCs是形成O<sub>3</sub>和SOA的重要前驱物<sup>[4,5]</sup>.大量VOCs排放不仅会造成环境污染<sup>[6,7]</sup>,还会危害人体健康<sup>[8,9]</sup>.控制VOCs排放对降低污染物排放,改善大气环境质量,保护人体健康至关重要.

我国是世界家具生产和消费第一大国,据国家统计局数据显示(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>),2019年我国规模以上家具企业达到6472家.家具行业作为重要的工业涂装排放源之一,在制造过程中使用大量的涂料、稀释剂和有机溶剂等含VOCs的原辅材料,其VOCs排放量不可忽视,据梁小明等<sup>[10]</sup>的计算,每年的排放量可达31万t.目前,我国对家具行业VOCs排放研究已取得一些进展.徐晨曦等<sup>[11]</sup>和周子航等<sup>[12]</sup>分别开展了四川和成都家具行业VOCs成分谱的研究,Zheng等<sup>[13]</sup>报道了珠三角地区家具行业VOCs成分谱.Wang等<sup>[14]</sup>和莫梓伟等<sup>[15]</sup>分析了长三角地区家具喷涂VOCs排放特征,齐一谨等<sup>[16]</sup>研究了郑州市家具喷涂VOCs的排放特征,Yuan等<sup>[17]</sup>和王迪等<sup>[18]</sup>对北京家具行业VOCs排放特征进行了研究.Zhong等<sup>[19]</sup>分析了珠三角地区家具喷涂工业VOCs排放因子及来源概况,姚轶等<sup>[20]</sup>对浙江省木制品行业VOCs排放系数进行了报道.然而目前针对家具行业的研究也存在一些局限,以上研究的对象大多集中在溶剂型涂料废气.近年来我国针对VOCs出台了多个政策文

件<sup>[21,22]</sup>,加强了对家具等重点溶剂使用行业的调整和管控,家具行业所使用的原辅材料种类等产生了较大幅度的变化,低VOCs含量原辅材料源头替代取得了快速发展,部分家具制造企业已实现水性涂料替代、辐射固化涂料替代和粉末涂料替代.然而,针对水性涂料、辐射固化涂料和粉末涂料废气的VOCs排放特征研究还比较缺乏.张嘉妮等<sup>[23]</sup>和方莉等<sup>[24]</sup>的研究结果也表明家具行业的VOCs排放特征发生了较大的变化,已有的研究结果不能反映家具行业目前的排放特征.因此,研究不同涂料类型废气的VOCs排放特征差异十分必要.

本研究选取使用溶剂型、水性、溶剂型UV、水性UV和粉末等不同涂料的典型家具制造企业,开展VOCs排放特征分析,对比研究不同涂料类型废气VOCs排放浓度和组分差异,识别其关键VOCs组分,分析家具行业不同涂料类型废气VOCs的环境影响,旨在为家具行业的VOCs污染防治与管理工

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集及分析

#### 1.1.1 采样对象

本文以使用溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型UV涂料、水性UV涂料和粉末涂料等7家典型家具制造企业为行业代表,采集了不同涂料类型排放的有组织废气,共来自12个排气筒.排气筒1~4号为溶剂型涂料废气,5号和6号为水性涂料废气,7号和8号为溶剂型UV涂料废气,9号和10号为水

表1 样品涂料类型、涂装工艺及废气处理工艺<sup>1)</sup>

Table 1 Summary of the examined coatings, painting processes, and exhaust treatment processes

排气筒编号	家具类型	涂料类型	废气类型	涂装工艺	废气处理工艺	样品数量
1	木质家具	溶剂型涂料	喷涂+晾干废气	喷涂	活性炭+蓄热式催化燃烧	4
2	木质家具	溶剂型涂料	喷涂+晾干废气	喷涂	水喷淋+紫外光催化氧化+活性炭吸附	4
3	木质家具	溶剂型涂料	喷涂+晾干废气	喷涂	水喷淋+紫外光催化氧化+活性炭吸附	4
4	木质家具	溶剂型涂料	喷涂+晾干废气	喷涂	水喷淋+活性炭吸附	4
5	木质家具	水性涂料	喷涂+烘干废气	喷涂	水喷淋+活性炭吸附	4
6	木质家具	水性涂料	喷涂+烘干废气	喷涂	水喷淋+活性炭吸附	4
7	木质家具	溶剂型UV涂料	辊涂废气	辊涂	紫外光催化氧化+活性炭吸附	4
8	木质家具	溶剂型UV涂料	辊涂废气	辊涂	活性炭+蓄热式催化燃烧	4
9	木质家具	水性UV涂料	辊涂废气	辊涂	—	4
10	木质家具	水性UV涂料	辊涂废气	辊涂	—	4
11	金属家具	粉末涂料	喷粉废气	喷涂	袋式除尘	4
12	金属家具	粉末涂料	喷粉废气	喷涂	袋式除尘	4

1)2、5和7号排气筒属于同一家企业,3和6号排气筒属于同一家企业,9、10和12号排气筒属于同一家企业;“—”表示企业没有实施相应的VOCs废气处理工艺

性 UV 涂料废气, 11 号和 12 号为粉末涂料废气. 其中, 同一企业的不同排气筒对应不同的生产车间, 有各自独立的收集系统. 表 1 给出了各企业对应的排气筒、家具类型、涂料类型、涂装工艺、废气类型、废气处理工艺及样品数量.

### 1.1.2 采样及分析方法

参照标准 HJ 734-2014<sup>[25]</sup>, 使用组合 1~3 吸附管、采用定容模式采样, 流量设置为  $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 采样体积为 300~600 mL, 每个采样点采集 4 个样品. 吸附管使用 Camsco 公司的组合吸附管, 采样泵采用深圳国技仪器有限公司的 EM-300 和 EM-500 防爆个体恒流采样器, 量程范围分别为 20~200  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  和 50~500  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 计量误差范围均为  $\pm 3\%$ .

本研究采用热脱附-气相色谱质谱联用仪对吸附管样品进行分析, 热脱附仪为美国 Perkin Elmer 公司的 Turbo Matrix TD, 气相色谱质谱仪为日本岛津公司的 GCMS-QP2010 Ultra, 样品分析使用的标准物质为上海安普实验科技股份有限公司的 22 种 VOC 混合标准液体和 35 种 VOC 混合标准液体. 热脱附仪设置参数为: 阀门温度  $150^\circ\text{C}$ , 吸附管脱附流量  $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 脱附时间 12 min, 脱附温度  $270^\circ\text{C}$ , 传输线温度  $250^\circ\text{C}$ , 捕集阱温度  $-3^\circ\text{C}$ . 气相色谱仪设置参数为: 载气为氦气, 进样口温度  $200^\circ\text{C}$ , 不分流; 色谱柱初始温度  $35^\circ\text{C}$ , 保持 5 min, 以  $11^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升温到  $220^\circ\text{C}$ , 保持 5 min. 质谱仪设置参数为: 采集方式 SIM, 间隔 0.3 s, 检测电压 0.85 V, 离子源温度  $200^\circ\text{C}$ .

为保证监测数据的可靠性和有效性, 采样位置、采样频次和采样时间的选择等有关操作严格按照 HJ/T 397<sup>[26]</sup> 的相关规定执行, 采样前准备、样品采集、样品保存和样品分析等过程严格按照 HJ 734-2014<sup>[25]</sup> 的相关规定进行. 用于采集 VOCs 样品的吸附管均使用高纯氮气进行老化, 每批次随机抽取 20% 的吸附管进行空白检验, 保证目标化合物浓度小于检出限. 在监测采样前, 对企业进行预调研或预监测, 结合 HJ 734-2014<sup>[25]</sup> 相关要求, 确定合适的采样体积. 每个采样点至少采集一根串联吸附管, 用于监视采样是否穿透. 若吸附管发生穿透, 则重新进行采样. 标准曲线相关系数均大于 0.995, 符合标准要求. 利用保留时间和质谱图对 VOCs 组分定性, 外标法定量. 本研究共检测出 73 种 VOCs, 具体组分如表 2 所示.

## 1.2 VOCs 环境影响分析

### 1.2.1 臭氧生成贡献分析

臭氧生成潜势 (OFP) 表示挥发性有机物在最佳

表 2 VOCs 分析组分列表

Table 2 Summary of VOCs analysis component

编号	组分名称	编号	组分名称
1	2,2-二甲基己烷	38	正丁醇
2	2,3-二甲基丁烷	39	2-丁酮
3	2,3-二甲基戊烷	40	2-庚酮
4	2-甲基己烷	41	2-己酮
5	2-甲基戊烷	42	2-壬酮
6	3-甲基己烷	43	3-戊酮
7	3-甲基戊烷	44	丙酮
8	正庚烷	45	环己酮
9	正己烷	46	环戊酮
10	异丁烷	47	甲基异丁酮
11	环戊烷	48	2-羟基-2-甲基丙酸甲酯
12	环己烷	49	2-乙氧基乙酸乙酯
13	1-十二烯	50	3-乙氧基丙酸乙酯
14	1-戊烯	51	丙二醇单甲醚乙酸酯
15	1-癸烯	52	丙烯酸乙酯
16	环戊烯	53	乙酸丙酯
17	环辛四烯	54	乙酸丁酯
18	间/对-二甲苯	55	乙酸甲酯
19	苯	56	乙酸乙烯酯
20	1,2,3-三甲苯	57	乙酸乙酯
21	1,2,4-三甲苯	58	乙酸异丁酯
22	1,3,5-三甲苯	59	乙酸仲丁酯
23	1,2-二氯苯	60	乙酸仲戊酯
24	1,4-二氯苯	61	苯甲醚
25	邻-乙基甲苯	62	丙二醇甲醚
26	间-乙基甲苯	63	乙二醇丁醚
27	苯乙烯	64	苯甲醚
28	萘	65	甲缩醛
29	邻-二甲苯	66	戊醛
30	氯苯	67	1,1-二氯乙烷
31	甲苯	68	1,2-二氯乙烷
32	乙苯	69	二氯甲烷
33	正丙苯	70	反式-1,3-二氯丙烯
34	2-丁基辛醇	71	顺式-1,3-二氯丙烯
35	乙醇	72	1,2-丙二胺
36	异丙醇	73	二乙烯三胺
37	异丁醇		

条件下对臭氧生成的贡献, 本研究采用最大增量反应活性 (MIR) 法计算 OFP, 公式如下:

$$\text{OFP}_i = \text{VOC}_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中,  $\text{OFP}_i$  表示组分  $i$  的最大臭氧生成潜势,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{VOC}_i$  表示组分  $i$  的排放浓度,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{MIR}_i$  表示组分  $i$  的最大反应活性值. 本研究中的 MIR 值均引自 Carter<sup>[27]</sup> 的研究成果.

### 1.2.2 二次有机气溶胶生成贡献分析

二次有机气溶胶生成潜势 (SOAFP) 表示挥发性有机物对二次有机气溶胶生成的贡献, 本研究采用气溶胶生成系数 (fractional aerosol coefficient, FAC) 法计算 SOAFP, 公式如下:

$$\text{SOAFP} = \text{VOC}_s \times \text{FAC} \quad (2)$$

式中, SOAFP 表示二次有机气溶胶生成潜势,

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{VOCs}_0$  表示排放源的  $\text{VOCs}$  初始浓度,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{FAC}$  表示气溶胶生成系数. 本研究中的  $\text{FAC}$  值引自 Grosjean 等<sup>[28,29]</sup> 的研究成果. 若本研究中涉及的物质暂无测定  $\text{FAC}$  值的, 则暂不纳入计算.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{VOCs}$ 排放特征及对比研究

#### 2.1.1 $\text{VOCs}$ 浓度及组分特征

对不同涂料类型有组织废气总挥发性有机物浓度水平及  $\text{VOCs}$  组成特征进行分析, 将  $\text{VOCs}$  组成为烷烃、烯烃、芳香烃、 $\text{OVOCs}$ 、卤代烃和其他, 结果如图 1 所示. 从中可知, 不同涂料类型有组织废气的  $\text{TVOC}$  浓度水平存在明显差异. 1~4 号排气筒所使用的涂料均为溶剂型涂料, 其有组织废气中  $\text{TVOC}$  浓度水平各不相同, 分别为 34.63、198.37、122.03 和 76.89  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 这可能是由于 1~4 号排气筒的废气处理工艺不同, 对  $\text{VOCs}$  的治理效果也不同. 5 号和 6 号排气筒所使用的涂料为水性涂料, 其  $\text{TVOC}$  浓度水平分别为 12.11  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和 10.89  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . 使用溶剂型 UV 涂料的 7 号和 8 号排气筒废气, 其  $\text{TVOC}$  浓度水平分别为 36.20  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和 23.93  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . 使用水性 UV 涂料的 9 号和 10 号排气筒废气中  $\text{TVOC}$  浓度水平分别为 4.90  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和 2.29  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 仅为溶剂型涂料废气  $\text{TVOC}$  浓度的 1.86%~14.15%. 使用粉末涂料的 11 号和 12 号排气筒废气中  $\text{TVOC}$  浓度均比较低, 分别为 4.76  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和 6.20  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 仅为溶剂型涂料废气  $\text{TVOC}$  浓度的 2.40%~17.90%. 可见, 使用溶剂型涂料的企业有组织废气  $\text{VOCs}$  浓度要远大于水性涂料、溶剂型 UV 涂料、水性 UV 涂料及粉末涂料的废气, 原因是水性涂料、UV 涂料和粉末涂料的  $\text{VOCs}$  含量远低于溶剂型涂料<sup>[30]</sup>. 将本研究检测结果与广东省地方标准 (DB 44/814-2010)<sup>[31]</sup> 中 I 时段  $\text{VOCs}$  排放限值 60  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  比较, 可以看到使用溶剂型涂料的 2~4 号排气筒废气经水喷淋 + 紫外光催化氧化 + 活性炭吸附或水喷淋 + 活性炭吸附处理后,  $\text{VOCs}$  排放浓度仍然超标, 需要选择其他合适的  $\text{VOCs}$  末端治理工艺进行整改.

使用溶剂型涂料的家具企业其 1~4 号排气筒废气中  $\text{VOCs}$  占比最高的组分均为芳香烃, 分别占  $\text{TVOC}$  的 60.67%、41.91%、44.25% 和 44.85%. 其中, 1 号排气筒的芳香烃占比大于 2~4 号排气筒, 可能是因为不同企业之间涂料配比的差异, 1 号排气筒中苯乙烯的占比远大于其他三者, 而卤代烃的占比远远小于其他三者. 其次, 1~4 号排气筒废气

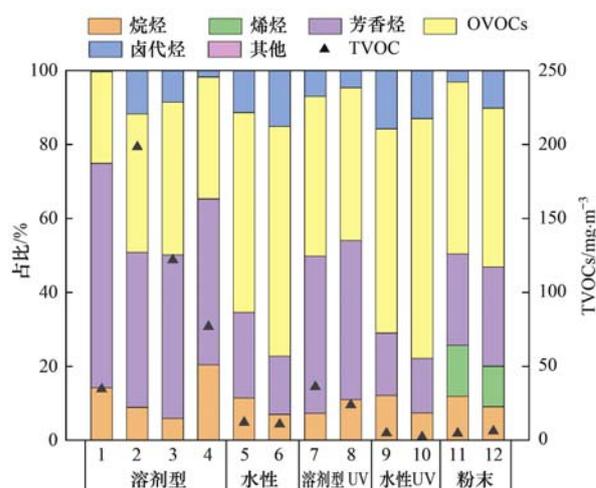


图 1 不同涂料类型有组织废气  $\text{TVOC}$  浓度水平及  $\text{VOCs}$  组成特征

Fig. 1 Group patterns of  $\text{VOCs}$  and concentration levels of  $\text{TVOC}$  from the organizational emissions of different coating

中  $\text{OVOCs}$  也占有较大的比例, 分别为 24.75%、37.45%、41.29% 和 32.99%. 这与莫梓伟等<sup>[15]</sup> 和田亮等<sup>[32]</sup> 指出家具行业以芳香烃为主 (97.92% 和 90.19%) 的研究结果差异较大, 与徐晨曦等<sup>[11]</sup>、Zheng 等<sup>[13]</sup> 和高宗江<sup>[33]</sup> 的研究类似, 其中芳香烃及  $\text{OVOCs}$  占比分别为 60.44% 及 31.20%、64.77% 及 29.80% 和 47.40% 及 34.70%. 1 号排气筒中, 其他类  $\text{VOCs}$  也占有一定的比例. 由于占比过低, 仅占 0.12%, 故在图 1 未能显示.

水性涂料以水为溶剂或以水为分散介质, 因此使用水性涂料的 5 号和 6 号排气筒废气中芳香烃占比远低于溶剂型涂料, 分别占  $\text{TVOC}$  的 23.10% 和 15.80%. 5 号和 6 号排气筒废气中  $\text{VOCs}$  占比最高的组分均为  $\text{OVOCs}$ , 分别占  $\text{TVOC}$  的 54.02% 和 62.10%. 方莉等<sup>[24]</sup> 的研究也表明, 家具行业水性涂料废气中  $\text{OVOCs}$  的占比大于芳香烃, 两者的占比分别为 55.08% 和 18.98%.

使用溶剂型 UV 涂料的 7 号和 8 号排气筒废气中  $\text{VOCs}$  组成以芳香烃 (42.51% 和 43.00%) 以及  $\text{OVOCs}$  (43.21% 和 41.34%) 为主, 溶剂型 UV 涂料废气的  $\text{OVOCs}$  占比高于溶剂型涂料. 使用水性 UV 涂料的家具企业 9 号和 10 号排气筒废气中  $\text{VOCs}$  组成与水性涂料的情况类似, 以  $\text{OVOCs}$  为主 (55.23% 和 64.81%), 其次为芳香烃 (16.85% 和 14.78%). 在使用不同涂料类型的企业中, 水性涂料和水性 UV 涂料的卤代烃占比高于溶剂型涂料和溶剂型 UV 涂料. 在使用同涂料类型的企业中, 末端处理设施为活性炭吸附 + 蓄热式催化燃烧的企业的卤代烃占比小于末端处理设施为水喷淋 + 紫外光催化氧化 + 活性炭吸附或水喷淋 + 活性炭吸附的占比, 这

可能是因为催化燃烧技术能较好去除卤代烃<sup>[34]</sup>. 使用粉末涂料的 11 号和 12 号排气筒的 VOCs 废气组分主要是 OVOCs, 占比分别为 46.45% 和 42.98%, 其次为芳香烃, 占比分别为 24.72% 和 26.83%. 与其他涂料类型明显不同的是, 粉末涂料中烯烃占有一定的比例, 占比分别为 13.82% 和 10.95%.

### 2.1.2 VOCs 主要化合物及与其他研究对比

表 3 给出了本研究中家具企业主要 VOCs 的浓度贡献占比. 溶剂型涂料废气的主要组分是苯乙烯、乙酸丁酯和甲缩醛, 占比分别为 14.68%、13.07% 和 9.22%. 间/对-二甲苯 (8.85%)、甲苯 (8.61%)、乙苯 (7.02%)、二氯甲烷 (5.05%)、邻-二甲苯 (4.65%)、正己烷 (4.30%) 和乙酸乙酯 (3.63%) 也是溶剂型涂料废气中占比排名前 10 的物质. 水性涂料废气 VOCs 浓度贡献占比最高的是甲缩醛、二氯甲烷和丙二醇单甲醚乙酸酯, 占比分别为 14.61%、13.29% 和 11.81%. 甲苯 (9.65%)、乙酸丁酯 (9.41%)、乙酸乙酯 (7.59%)、异丁烷

(5.37%)、乙苯 (3.89%)、间/对-二甲苯 (3.42%) 和邻-二甲苯 (2.49%) 也是水性涂料废气的主要 VOCs. 水性涂料废气中的二氯甲烷占比是溶剂型涂料废气的 2 倍多, 但间/对-二甲苯的占比不到溶剂型涂料废气的一半. 溶剂型 UV 涂料废气以乙酸丁酯、间/对-二甲苯和甲苯为主, 占比分别为 15.36%、11.85% 和 11.00%. 水性 UV 涂料废气中占比前三的 VOCs 均为酯类, 分别为乙酸丁酯 (20.56%)、丙二醇单甲醚乙酸酯 (12.98%) 和乙酸乙酯 (12.32%). 粉末涂料废气的主要 VOCs 和其他涂料类型废气差异比较大, 其最主要的 VOCs 组分是 3-乙氧基丙酸乙酯, 占比达 20.19%. 其次是乙酸丁酯、1-戊烯和间/对-二甲苯, 占比分别为 15.73%、12.38% 和 7.89%. VOCs 浓度贡献占比排名前 10 的化合物加和分别贡献了溶剂型涂料废气的 79.08%、水性涂料废气的 81.52%、溶剂型 UV 涂料废气的 84.25%、水性 UV 涂料废气的 80.86% 和粉末涂料废气的 87.24%.

表 3 本研究中家具企业主要 VOCs 的浓度贡献占比/%

Table 3 Concentration proportion of primary VOCs emitted from furniture industry in this study/%

序号	溶剂型涂料	水性涂料	溶剂型 UV 涂料	水性 UV 涂料	粉末涂料
1	苯乙烯 14.68	甲缩醛 14.61	乙酸丁酯 15.36	乙酸丁酯 20.56	3-乙氧基丙酸乙酯 20.19
2	乙酸丁酯 13.07	二氯甲烷 13.29	间/对-二甲苯 11.85	丙二醇单甲醚乙酸酯 12.98	乙酸丁酯 15.73
3	甲缩醛 9.22	丙二醇单甲醚乙酸酯 11.81	甲苯 11.00	乙酸乙酯 12.32	1-戊烯 12.38
4	间/对-二甲苯 8.85	甲苯 9.65	异丁烷 8.73	正己烷 7.36	间/对-二甲苯 7.89
5	甲苯 8.61	乙酸丁酯 9.41	邻-二甲苯 7.96	2-丁酮 5.44	二氯甲烷 6.67
6	乙苯 7.02	乙酸乙酯 7.59	丙酮 6.86	1,2,3-三甲苯 5.38	甲苯 5.52
7	二氯甲烷 5.05	异丁烷 5.37	乙苯 6.46	反式-1,3-二氯丙烯 4.49	丙二醇单甲醚乙酸酯 5.39
8	邻-二甲苯 4.65	乙苯 3.89	二氯甲烷 5.84	苯乙烯 4.43	2,2-二甲基己烷 4.55
9	正己烷 4.30	间/对-二甲苯 3.42	苯乙烯 5.48	丙酮 4.16	正庚烷 4.53
10	乙酸乙酯 3.63	邻-二甲苯 2.49	甲缩醛 4.70	1,1-二氯乙烷 3.75	邻-二甲苯 4.40
	合计 79.08	合计 81.52	合计 84.25	合计 80.86	合计 87.24

选取 Zheng 等<sup>[13]</sup>、张嘉妮等<sup>[23]</sup>、方莉等<sup>[24]</sup>、高宗江<sup>[33]</sup> 和包亦姝等<sup>[35]</sup> 的研究, 将不同研究中的结果进行归一化对比, 结果如表 4 所示. 文献 [13, 23, 33, 35] 的研究对象为溶剂型涂料, 文献 [24] 的研究对象为水性涂料. 经过对比可以发现: 溶剂型涂料废气 VOCs 组成中, 间/对-二甲苯、甲苯、乙酸乙酯和邻-二甲苯是本研究以及文献 [13, 23, 33, 35] 的主要 VOCs, 其中, 本研究的乙酸乙酯的占比低于其他研究. 苯乙烯也是本研究占比最高的 VOCs, 这与 Zheng 等<sup>[13]</sup> 的研究一致. 乙酸仲丁酯是张嘉妮等<sup>[23]</sup> 和高宗江<sup>[33]</sup> 的研究中占比最高的 VOCs, 在本研究中的占比却小于 0.5%. 与张嘉妮等<sup>[23]</sup> 的研究结果一致, 甲缩醛是本研究的主要 VOCs 之一, 而在文献 [13, 33, 35] 中排名前 10 的 VOCs 均不含有甲缩醛. 二氯甲烷是本研究中最主要的 VOCs 之一, 而在文献 [13, 23, 33, 35] 中排名前 10 的 VOCs

均未发现. 将本研究的水性涂料废气主要 VOCs 与方莉等<sup>[24]</sup> 的研究相比, 发现甲缩醛是本研究水性涂料废气占比最高的 VOCs, 乙醇是方莉等<sup>[24]</sup> 的研究中水性涂料废气占比最高的 VOCs. 本研究和方莉等<sup>[24]</sup> 的研究中水性涂料废气共同的主要 VOCs 是二氯甲烷 (13.29% 和 7.35%)、甲苯 (9.65% 和 3.66%)、乙酸乙酯 (7.59% 和 8.22%)、乙苯 (3.89% 和 2.89%)、间/对-二甲苯 (3.42% 和 5.51%) 和邻-二甲苯 (2.49% 和 3.16%), 但占比有一定的差异.

由此可见, 不同涂料类型废气的 VOCs 组成有很大差别, 原因可能是: 一方面使用的原辅材料不同. 根据实地调研情况, 不同涂料类型、不同企业的涂料组分、稀释比例等都存在区别, 柯云婷等<sup>[30]</sup> 的研究也证实了这一点. 另一方面, 废气处理工艺也会对 VOCs 的组成产生影响.

表 4 其他研究中家具企业主要 VOCs 的浓度贡献占比<sup>1)</sup>/%

Table 4 Concentration proportion of primary VOCs emitted from furniture industry in other studies/%

序号	溶剂型涂料								水性涂料	
	文献[13]		文献[33]		文献[23]		文献[35]		文献[24]	
1	苯乙烯	19.90	乙酸仲丁酯	12.82	乙酸仲丁酯	25.09	乙酸乙酯	17.30	乙醇	36.71
2	乙酸乙酯	16.12	间/对-二甲苯	12.45	甲苯	11.04	邻-二甲苯	10.00	乙酸乙酯	8.22
3	乙苯	9.50	甲苯	10.32	甲缩醛	8.24	乙醇	9.50	丙酮	7.77
4	乙酸丁酯	9.50	乙苯	10.28	间-二甲苯	5.29	间-二甲苯	9.00	二氯甲烷	7.35
5	甲苯	7.36	苯乙烯	9.04	乙酸乙酯	3.72	对-二甲苯	9.00	间/对-二甲苯	5.51
6	间/对-二甲苯	5.82	乙酸乙酯	8.38	1,2-二氯乙烷	3.21	甲苯	6.80	环己烷	3.70
7	邻-二甲苯	3.82	邻-二甲苯	5.76	邻-二甲苯	2.82	异丙醇	6.30	甲苯	3.66
8	1,2-二氯乙烷	3.15	间-乙基甲苯	3.44	对-二甲苯	2.73	乙苯	5.10	邻-二甲苯	3.16
9	间-乙基甲苯	3.06	1,2,4-三甲苯	1.40	乙酸丁酯	2.42	—	—	2-甲基戊烷	3.12
10	异丙苯	1.16	1,2-二氯乙烷	1.32	甲基环己烷	2.33	—	—	乙苯	2.89
	合计	79.39	合计	75.21	合计	66.89	合计	73.00	合计	82.09

1)“—”表示文章中没有相关数据

## 2.2 VOCs 环境影响

### 2.2.1 臭氧生成贡献

对不同涂料类型废气中 VOCs 的 OFP 及不同类别 VOCs 对 OFP 的贡献进行分析,结果如图 2 所示. 溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型 UV 涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气中 VOCs 的平均 OFP 分别为 279.27、21.77、82.97、8.05 和 19.09  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . 溶剂型涂料废气的 OFP 最大,应优先控制其排放. 其次是溶剂型 UV 涂料、水性涂料、粉末涂料和水性 UV 涂料. 从臭氧生成潜势的贡献组成上看,芳香烃是溶剂型涂料废气 OFP 的绝对贡献者,贡献占比高达 79.84%. 芳香烃和 OVOCs 是水性涂料 OFP 的主要贡献者,分别贡献了 51.48% 和 42.30%. 虽然芳香烃和 OVOCs 对溶剂型 UV 涂料 VOCs 浓度贡献相近,但由于芳香烃较高的反应活性,芳香烃对 OFP 的贡献最大,占 80.32%. 水性 UV 涂料废气中 OVOCs 浓度占比最高,导致其 OFP 也占比最高,占 41.03%; 其次是芳香烃,其 OFP 贡献占 36.71%. 芳香烃是粉末涂料 OFP 的最主要贡献者,贡献了 OFP 的 43.46%; OVOCs 由于其较高的浓度贡献,对粉末涂料 OFP 的贡献也较高,占 28.06%; 烯烃对粉末涂料 VOCs 浓度贡献为 10.95%~13.82%,但是烯烃具有较高的反应活性,导致烯烃对 OFP 的贡献较大,占 25.24%.

图 3 为不同涂料类型废气中对 OFP 贡献占比排名前 10 的 VOCs 组分. 溶剂型涂料废气中对 OFP 贡献占比排名前 5 的化合物都是芳香烃,贡献占比加和为 71.81%. 其中,对 OFP 贡献占比最高的是间/对-二甲苯,占比高达 28.33%; 其次是邻-二甲苯和甲苯,贡献占比分别为 15.59% 和 11.95%; 其余物质的贡献占比均低于 10%. 甲苯在水性涂料废气中 OFP 贡献占比排名第一,占 20.26%; 其次是

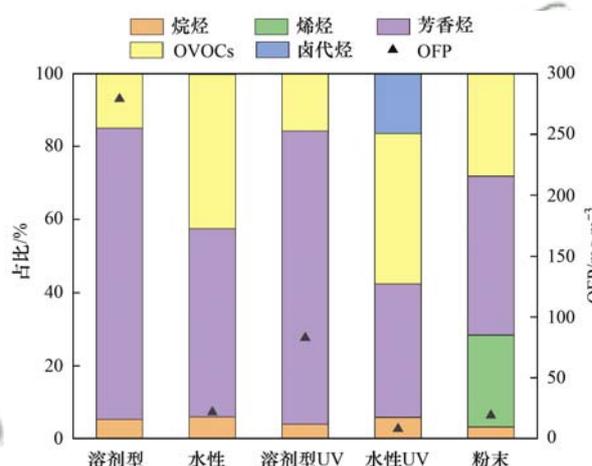


图 2 不同涂料类型废气中不同类别 VOCs 对 OFP 的贡献  
Fig. 2 Contribution of different components of VOCs emitted from different coatings to the OFP

间/对-二甲苯和丙二醇单甲醚乙酸酯,贡献占比分别为 14.60% 和 11.63%. 溶剂型 UV 涂料废气中对 OFP 贡献占比前三位的是间/对-二甲苯、邻-二甲苯和甲苯,其贡献占比分别为 33.05%、20.77% 和 15.66%. 1,2,3-三甲苯、乙酸乙烯酯和丙二醇单甲醚乙酸酯是水性 UV 涂料废气中对 OFP 贡献占比前三位的物质,分别占 27.25%、14.01% 和 12.31%. 粉末涂料废气中对 OFP 贡献占比最高的是 1-戊烯,占 25.24%; 其次是 3-乙氧基丙酸乙酯和间/对-二甲苯,占比分别为 18.84% 和 18.81%. OFP 贡献占比排名前 10 的化合物分别贡献溶剂型涂料废气 OFP 的 86.63%、水性涂料废气的 89.88%、溶剂型 UV 涂料废气的 95.01%、水性 UV 涂料废气的 89.85% 和粉末喷涂废气的 95.41%.

对比 VOCs 浓度贡献占比前 10 的化合物(表 3)和 OFP 贡献占比前 10 的组分(图 3),可以发现,二氯甲烷对溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型 UV 涂料和粉末涂料废气 VOCs 浓度贡献占比均在前 10,

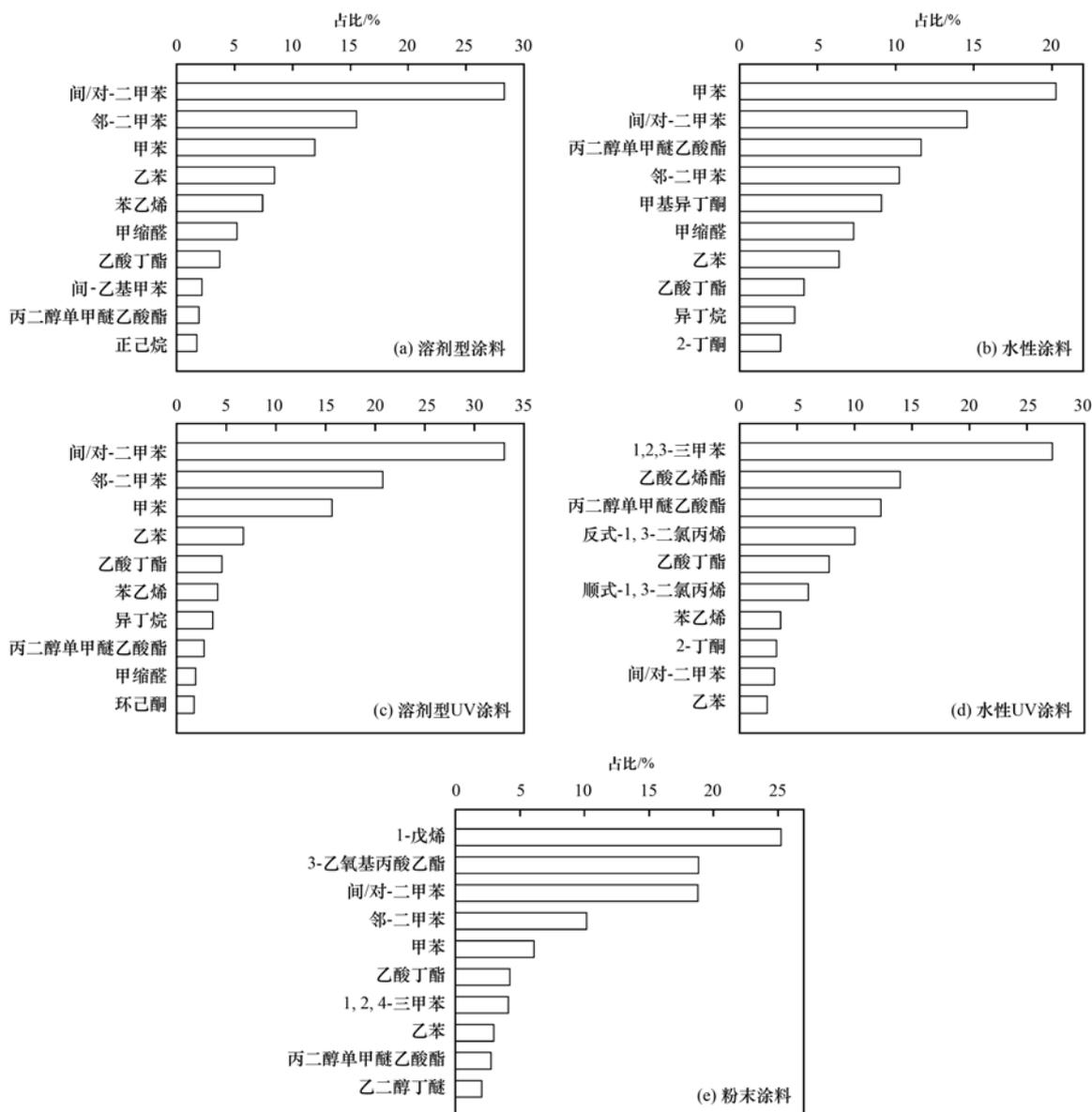


图3 不同涂料类型废气中对 OFP 贡献排名前 10 的 VOCs 组分

Fig. 3 Top 10 species of VOCs contributing to the OFP in different coatings

但由于二氯甲烷的 MIR 值相对较低,对 OFP 的贡献也比较低。二甲苯不仅是溶剂型涂料和溶剂型 UV 涂料 VOCs 的主要组分,也是影响 OFP 的主要物质。因此,应该优先控制二甲苯的使用和排放。甲苯对水性涂料废气中 VOCs 的浓度贡献(9.65%)和 OFP 的贡献(20.26%)均比较高,应优先控制;间/对-二甲苯在水性涂料废气中 VOCs 的浓度贡献占比较低(3.42%),但其对 OFP 贡献占比位居第二,也应进行控制。水性 UV 涂料废气中,1,2,3-三甲苯浓度贡献比较低,为 5.38%,但其对 OFP 的贡献远远大于其他物质,需进行控制。粉末涂料废气中,1-戊烯和 3-乙氧基丙酸乙酯的浓度贡献和 OFP 的贡献占比均排名前三,应该优先控制这两者的排放。特别地,在粉末涂料废气中,乙二醇丁醚的浓度贡献和 OFP 的贡献均小于 5%,但乙二醇丁醚对生物有较高的毒

害性,可使用物化性质相似的丙二醇醚替代<sup>[30]</sup>。

### 2.2.2 二次有机气溶胶生成贡献

不同涂料类型废气中 VOCs 的 SOAFP 及不同类别 VOCs 对 SOAFP 的贡献占比有一定差异。根据 Grosjean 等<sup>[28,29]</sup>的研究成果,只有部分烷烃、烯烃和芳香烃类物质有对应的 FAC 值,其他物质暂无测定 FAC 值,因此暂未纳入计算。不同涂料类型废气的平均 SOAFP 从大到小依次是:溶剂型涂料、溶剂型 UV 涂料、水性涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料,SOAFP 分别为 1.78、0.55、0.12、0.01 和 0.01  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。溶剂型涂料废气的 SOAFP 最大,应优先控制其排放。从 SOAFP 的贡献组成上看,芳香烃是溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型 UV 涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气 SOAFP 的绝对贡献者,贡献占比均超过 99%。

溶剂型涂料废气中对 SOAFP 贡献占比前三的是间/对-二甲苯、甲苯和乙苯,分别占 26.82%、25.33% 和 23.68%。水性涂料废气中对 SOAFP 贡献占比最高的是甲苯,占比达 50.47%;其次是乙苯和间/对-二甲苯,两者的贡献占比分别为 20.93% 和 16.25%。溶剂型 UV 涂料废气中对 SOAFP 贡献占比最高的是甲苯,占 31.74%;其次是间/对-二甲苯和邻-二甲苯,分别占 29.91% 和 20.40%。1,2,3-三甲苯在水性 UV 涂料中对 SOAFP 贡献最高,占比达 45.13%;其次是乙苯和氯苯,分别占 23.57% 和 13.85%。间/对-二甲苯是粉末涂料废气中 SOAFP 绝对贡献者,占比为 34.57%;其次是甲苯和邻-二甲苯,分别占 25.09% 和 20.35%。SOAFP 贡献占比排名前三的化合物分别贡献溶剂型涂料废气 SOAFP 的 75.83%、水性涂料废气的 87.64%、溶剂型 UV 涂料废气的 82.06%、水性 UV 涂料废气的 82.55% 和粉末涂料废气的 80.01%。

对比 VOCs 浓度贡献占比前 10 化合物(表 3)和 SOAFP 贡献占比前三组分,可以发现,在溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型 UV 涂料和粉末涂料废气中,SOAFP 贡献占比前三组分是甲苯、乙苯和二甲苯等  $C_7$  和  $C_8$  芳香烃,其 VOCs 浓度贡献占比均在前 10。因此,应该优先控制  $C_7$  和  $C_8$  芳香烃的使用和排放。水性 UV 涂料废气中,1,2,3-三甲苯和乙苯既是 VOCs 浓度贡献占比前 10 的化合物,也是 SOAFP 贡献占比前三的组分,应进行控制。

### 3 结论

(1)家具行业中,不同涂料类型废气 TVOC 浓度水平差异较大。溶剂型涂料废气的 TVOC 高达  $198.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,远高于其他涂料类型废气。不同涂料类型废气的 VOCs 组成存在一定差异。溶剂型涂料、溶剂型 UV 涂料废气以芳香烃和 OVOCs 为主。水性涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气中占比最高的是 OVOCs,其次为芳香烃。

(2)不同涂料类型废气的 OFP 差异较大。溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型 UV 涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气的平均 OFP 分别为 279.27、21.77、82.97、8.05 和  $19.09 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;不同涂料类型废气的 OFP 最主要贡献者分别为间/对-二甲苯、甲苯、间/对-二甲苯、1,2,3-三甲苯和 1-戊烯。

(3)不同涂料类型废气的 SOAFP 存在一定差异。溶剂型涂料、水性涂料、溶剂型 UV 涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气的平均 SOAFP 分别为 1.78、0.12、0.55、0.01 和  $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;其中,溶剂型涂料、溶剂型 UV 涂料、水性涂料和粉末涂料

废气的 SOAFP 主要贡献者均为甲苯、乙苯和二甲苯等  $C_7$  和  $C_8$  芳香烃,水性 UV 涂料的 SOAFP 最主要贡献者为 1,2,3-三甲苯。

(4)溶剂型涂料废气的 TVOC 浓度、OFP 和 SOAFP 均高于水性涂料、溶剂型 UV 涂料、水性 UV 涂料和粉末涂料废气。因此,我国应加大力度推广使用水性涂料、UV 涂料和粉末涂料等低 VOCs 含量的涂料替代溶剂型涂料,在保证产品质量的基础上减少污染。

### 参考文献:

- [1] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [2] Wang J D, Zhao B, Wang S X, *et al.* Particulate matter pollution over China and the effects of control policies [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 426-447.
- [3] 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.
- [4] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and  $\text{NO}_x$  in its production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.
- [5] Hatfield M L, Huff Hartz K E. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2211-2219.
- [6] 吕子峰,郝吉明,段菁春,等.北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J].*环境科学*, 2009, **30**(4): 969-975.  
Lü Z F, Hao J M, Duan J C, *et al.* Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing summertime [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 969-975.
- [7] 吴方堃,王跃思,安俊琳,等.北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J].*环境科学*, 2010, **31**(1): 10-16.  
Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during Olympics period [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 10-16.
- [8] Su F C, Mukherjee B, Batterman S. Modeling and analysis of personal exposures to VOC mixtures using copulas [J]. *Environment International*, 2014, **63**: 236-245.
- [9] Tong R P, Zhang L, Yang X Y, *et al.* Emission characteristics and probabilistic health risk of volatile organic compounds from solvents in wooden furniture manufacturing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **208**: 1096-1108.
- [10] 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.
- [11] 徐晨曦,陈军辉,韩丽,等.四川省典型行业挥发性有机物源成分谱[J].*环境科学*, 2020, **41**(7): 3031-3041.  
Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Source composition spectrum of volatile organic compounds in typical industries in Sichuan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3031-3041.
- [12] 周子航,邓也,周小玲,等.成都市工业挥发性有机物排源

- 成分谱[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- Zhou Z H, Deng Y, Zhou X L, *et al.* Source profiles of industrial emission-based VOCs in Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3056-3065.
- Qi Y J, Ni J W, Zhao D X, *et al.* Emission characteristics and risk assessment of volatile organic compounds from typical factories in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3056-3065.
- [17] 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.
- [18] 王迪, 赵文娟, 张玮琦, 等. 溶剂使用源挥发性有机物排放特征与污染控制对策[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1687-1695.
- Wang D, Zhao W J, Zhang W Q, *et al.* Emission profile and control countermeasures of volatile organic compounds in solvent-using source [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1687-1695.
- [19] 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.
- [20] 姚轶, 王浙明, 何志桥, 等. 浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4080-4085.
- Yao Y, Wang Z M, He Z Q, *et al.* Pollution characteristics and emission coefficient of volatile organic compounds from woodwork-making industry in Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4080-4085.
- [21] 中华人民共和国国务院. 关于印发大气污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content\\_2486773.htm](http://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm), 2013-09-12.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《重点行业挥发性有机物综合治理方案》的通知 [EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201907/t20190703\\_708395.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201907/t20190703_708395.html), 2019-06-26.
- [23] 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.
- [24] 方莉, 刘文文, 陈丹妮, 等. 北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4395-4403.
- Fang L, Liu W W, Chen D N, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent-based industries in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4395-4403.
- [25] HJ 734-2014, 固定污染源废气 挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法[S].
- HJ 734-2014, Stationary source emission-Determination of volatile organic compounds-Sorbent adsorption and thermal desorption gas chromatography mass spectrometry method[S].
- [26] HJ/T 397-2007, 固定源废气监测技术规范[S].
- HJ/T 397-2007, Technical specifications for emission monitoring of stationary source[S].
- [27] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [28] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment*(1967), 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [29] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(6): 953-963.
- [30] 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 等. 我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4446-4454.
- Ke Y T, Sun Y H, Cheng H R, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds in wood coatings and automotive coatings in China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4446-4454.
- [31] DB 44/814-2010, 家具制造行业挥发性有机化合物排放标准[S].
- DB 44/814-2010, Emission standard of volatile organic compounds for furniture manufacturing operations[S].
- [32] 田亮, 魏巍, 程水源, 等. 典型有机溶剂使用行业 VOCs 成分谱及臭氧生成潜势[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(1): 314-320.
- Tian L, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Source profiles and ozone formation potential of volatile organic compounds from the use of solvents in typical industry [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, **17**(1): 314-320.
- [33] 高宗江. 典型工业涂装行业 VOCs 排放特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- Gao Z J. Source characteristics of VOC emissions from typical industrial painting sources [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [34] 高宗江, 李成, 郑君瑜, 等. 工业源 VOCs 治理技术效果实测评估[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(6): 994-1000.
- Gao Z J, Li C, Zheng J Y, *et al.* Evaluation of industrial VOCs treatment techniques by field measurement [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(6): 994-1000.
- [35] 包亦姝, 王斌, 邓也, 等. 成都市典型有机溶剂使用行业 VOCs 组成成分谱及臭氧生成潜势研究[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 76-82.
- Bao Y S, Wang B, Deng Y, *et al.* Source profiles and ozone formation potential of VOCs emitted from typical industries using organic solvents in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 76-82.

## CONTENTS

Continuous PM <sub>2.5</sub> Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events .....	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> on the Fen-Wei Plain .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province .....	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China .....	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O <sub>3</sub> Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring .....	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O <sub>3</sub> Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations .....	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O <sub>3</sub> Pollution Between August to September, Langfang Development Zones .....	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province .....	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay .....	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution .....	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter .....	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants .....	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin .....	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China .....	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA .....	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China .....	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake .....	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China .....	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China .....	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO <sub>3</sub> -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area .....	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria .....	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co <sup>2+</sup> System; Influencing Factors and Mechanisms .....	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported $\alpha$ -MnO <sub>2</sub> .....	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate .....	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar .....	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process .....	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China .....	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types .....	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage .....	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge .....	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China .....	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin .....	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area .....	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi .....	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil .....	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province .....	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches .....	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan .....	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil .....	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China .....	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau .....	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain .....	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow .....	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings .....	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils .....	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO <sub>2</sub> Concentrations .....	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars .....	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities .....	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials .....	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)