

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.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响

张嘉妮¹, 曾春玲¹, 刘锐源¹, 姚懿娟¹, 柯云婷¹, 范丽雅^{1,2,3}, 叶代启^{1,2,3}*

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 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; 3. 广东省大气环境与污染控制重点实验室, 广州 510006)

摘要: 家具制造业是典型的高污染低附加值、工艺相对落后、污染治理水平低和挥发性有机物(VOCs)排放较为严重的行业, 是我国 VOCs 防治的重点行业. 本文以典型家具制造企业为研究对象, 开展家具制造业 VOCs 排放特征和环境影响研究, 获取了典型企业 VOCs 排放浓度水平和成分谱, 分析了家具制造业 VOCs 的环境影响. 结果表明, 封边、底漆、底色、面漆和晾干等车间 VOCs 浓度范围为 9.18 ~ 181.58 mg·m⁻³, 处理设施出口 VOCs 浓度为 30.64 ~ 155.94 mg·m⁻³, 处理效率为 7.43% ~ 67.14%; 车间主要 VOCs 物种为芳香烃、酯类和醛酮类物质; 排气筒主要 VOCs 物种为酯类和芳香烃, 其次为烷烃类物质; 行业主要 VOCs 物质为乙酸仲丁酯、甲苯、间-二甲苯、甲缩醛和乙苯等. 车间和排气筒 VOCs 平均臭氧生成潜势(OFP)分别为 258.01 mg·m⁻³和 289.14 mg·m⁻³, 平均二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP)分别为 148.66 mg·m⁻³和 165.31 mg·m⁻³, 各排放环节中对 OFP 和 SOAFP 贡献最大的皆为芳香烃类物质, 封边车间的 OFP 和 SOAFP 较大, 应加强控制. 车间边界 VOCs 中主要恶臭物质为乙酸仲丁酯、间-二甲苯、乙酸丁酯、对-二甲苯、乙苯、1-乙基-3-甲基苯、邻-二甲苯和甲苯, 厂界 VOCs 几乎不产生恶臭污染. 建议有针对性地加强芳香烃和酯类物质的控制.

关键词: 家具制造; 挥发性有机物(VOCs); 排放浓度; 成分谱; 环境影响

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5240-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905046

Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment

ZHANG Jia-ni¹, ZENG Chun-ling¹, LIU Rui-yuan¹, YAO Yi-juan¹, KE Yun-ting¹, FAN Li-ya^{1,2,3}, YE Dai-qi^{1,2,3}*

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. National Engineering Laboratory for VOCs Pollution Control Technology and Equipment, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Atmospheric Environment and Pollution Control, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The furniture manufacturing industry is a typical industry with high pollution, low added value, relatively outdated technology and low levels of pollution control. The process of furniture manufacturing uses a large number of paints and adhesives, which emit a great quantity of volatile organic compounds (VOCs). The furniture manufacturing industry is a key industry for the control of VOCs in China. The VOCs emission characteristics and environmental impact of the furniture manufacturing industry has been studied in this work, which could be helpful for the Chinese government when formulating VOCs pollution control policy for this industry. In this study, a typical furniture manufacturing enterprise was chosen as the object. The emission concentration level and source profile of VOCs in a typical enterprise was obtained, and an assessment of the environmental impact of furniture manufacturing was developed. The results showed that the concentration of VOCs in the workshop ranged from 9.18 to 181.58 mg·m⁻³, the concentration of VOCs in the stack was 30.64-155.94 mg·m⁻³, and the treatment efficiency was 7.43%-67.14%. The main species of VOCs in the workshop were aromatic hydrocarbons, esters, and aldehydes and ketones; the main species of VOCs in the stack are esters and aromatic hydrocarbons, followed by alkanes, and the main VOCs in the industry are sec-butyl acetate, toluene, *m*-xylene, methylal and ethylbenzene. The average ozone generation potential (OFP) of workshop and stack VOCs was 258.01 and 289.14 mg·m⁻³, respectively, and the average secondary organic aerosol generation potential (SOAFP) of workshop and stack VOCs was 148.66 and 165.31 mg·m⁻³, respectively. The most important contribution to the OFP and SOAFP in each emission sector is aromatic hydrocarbons. The OFP and SOAFP in the edge-sealing workshop are large and the VOCs should be controlled. The main malodorous substances at the shop boundary are sec-butyl acetate, *m*-xylene, butyl acetate, *p*-xylene, ethylbenzene, 1-ethyl-3-methylbenzene, *o*-xylene, and toluene; the VOCs at the factory boundary produce almost no odor pollution. Targeted enhanced control of aromatic hydrocarbons and esters should be adopted to achieve effective emission reduction of VOCs in furniture manufacturing.

Key words: furniture manufacturing; volatile organic compounds (VOCs); emission concentration; source profile; environmental impact

近年,我国重度空气污染事件频发,以细颗粒物(PM_{2.5})和臭氧(O₃)为特征的大气复合污染问题日益突出^[1-3],挥发性有机物(VOCs)作为其重要前体物,在大气化学反应中扮演着重要角色. 在光照下,

收稿日期: 2019-05-07; 修订日期: 2019-07-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212805); 国家污染防治可行技术指南计划项目(技-2018-004)

作者简介: 张嘉妮(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境与污染控制, E-mail: 949677364@qq.com

* 通信作者, E-mail: cedqye@scut.edu.cn

VOCs 和氮氧化物发生化学反应会生成臭氧与二次有机气溶胶,二次有机气溶胶作为大气气溶胶重要的组成部分,约占大气有机气溶胶的 20% ~ 80%^[4, 5];此外,VOCs 的排放可能还会产生恶臭。家具制造业是典型的高污染低附加值、工艺相对落后、污染治理水平低、VOCs 排放较为严重的行业,是我国 VOCs 防治的重点行业^[6, 7]。

根据行业的生产工艺、排放特征和可能造成的环境影响因业制宜地开展从生产到使用的全过程控制,是实现挥发性有机物减排和改善环境空气质量的主要途径。目前,已有不少学者对家具制造业 VOCs 排放特征进行了研究,但大都只关注涂装环节^[8~10]或排放系数^[11, 12],没有进行胶粘剂使用等环节的排放分析;同时目前也鲜有学者专门针对家具制造业排放的 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶(SOA)生成贡献及其恶臭污染等环境影响展开分析,严重影响了家具制造业 VOCs 防治工作的开展。

本文以典型家具制造企业为研究对象,开展典

型家具制造企业 VOCs 排放特征和环境影响研究,获取典型企业 VOCs 排放浓度水平和成分谱,分析家具制造业 VOCs 的环境影响,以期为国家开展家具制造业 VOCs 污染防治工作提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 VOCs 采样和分析

通过书面资料收集、专家咨询以及现场调研,基于企业规模、生产工艺、所采用的 VOCs 控制技术以及现场监测工作开展的可行性等因素,筛选出典型企业开展现场监测。

1.1.1 采样对象

现场监测企业是一家年营业收入为6 100万元,职工数为 810 人的中型木质家具制造企业,主要产品为活动家具和固定家具,使用的涂料包括聚氨酯涂料(PU 涂料)、硝基涂料(NC 涂料)以及紫外光固化涂料(UV 涂料)等,各原辅材料的主要组分及其 VOCs 含量如表 1 所示。

表 1 原辅材料主要组分及其 VOCs 含量
Table 1 Main composition and VOCs content of raw and auxiliary materials

原辅材料名称	主要组分	VOCs 含量/%
聚氨酯涂料	乙酸丁酯、乙酸乙酯、二甲苯、乙苯、2-丁酮、醇酸树脂、膨润土、硬脂酸锌	38~65
硝基涂料	乙酸丁酯、乙酸乙酯、二甲苯、乙苯、丙醇、丙二醇甲醚醋酸酯、树脂 1、树脂 2、助剂、填料	41~75
UV 涂料	甲苯、乙酸乙酯、乙酸丁酯、二丙酮醇、树脂 1、树脂 2、添加剂、粉剂、活性单体、光致引发剂	31~65
稀释剂	乙酸丁酯、乙酸乙酯、丁醇、乙醇、丙酮、甲苯、二甲苯	100

企业主要工艺为项目原料木材经开料、冷压热压、封边、成型、砂光和涂装后进行包装,具体流程根据项目订单要求略有不同。本次监测时段,该企业使用 NC 涂料进行涂装,且未进行木材的冷压和热压,故该企业涉及 VOCs 排放环节为封边、调漆、底色、底漆、面漆和晾干等。该企业设有备料车间、木工车间、涂装 A 车间和涂装 B 车间 4 个生产车间,木材仓、涂料仓和成品仓这 3 个仓库,调漆直接在涂料仓进行,未设置单独的调漆间。涂装 A 车间设有 4 个底漆、2 个底色和 2 个面漆涂装点,均采用喷涂工艺,在喷柜中完成,且每个喷柜配置一套集气罩点对点收集活性炭吸附组合紫外光催化氧化设施对含 VOCs 废气进行收集处理,此外涂装 A 车间还设有晾干区;涂装 B 车间分为吊线喷涂和手工喷涂两条线,各涂装过程直接在车间中进行,对整个车间废气进行整体收集后采用多套活性炭吸附组合紫外光催化氧化设施进行处理,其他车间未配置 VOCs 收集处理装置。涂装 A 车间的 VOCs 收集处理设施是对各涂装环节分开收集和处理的,比混合收集和底漆、色漆和面漆喷涂等环节废气的涂装 B 车

间的 VOCs 收集处理设施更具代表性,因此本研究中仅对涂装 A 车间各排气筒进出口 VOCs 进行监测。此外,分别在 A 车间的 4 个底漆、2 个底色和 2 个面漆喷柜中各选取 1 个进行监测,企业平面分布和监测点位示意如图 1 所示。

1.1.2 样品采集与分析

挥发性有机物样品采集通常可分为离线和在线两类方式;其中,离线采样包括罐采样和气袋采样等全空气采样、吸附剂采样以及衍生化采样,而在线采样则为低温捕集法^[13]。根据 HJ/T 397、HJ 194、HJ 732、HJ 759、HJ 644、HJ 734 和 GB/T 16157 等标准,结合企业现场调研情况,本研究中采用吸附管采样的方法采集排气筒进出口、车间气体及车间边界空气,采用罐采样的方法采集厂界空气。吸附管使用 HJ 734^[14]规定采用的组合管 1~3,采样泵为深圳国技仪器有限公司 EM-300 防爆个体恒流采样器,量程范围为 20~200 mL·min⁻¹,示值误差不超过 ±3%;采用美国 ENTECH 容积为 3.2 L 的 SUMMA 罐以及型号为 CS1200E 的真空压力计。吸附管采集的样品采用全自动热脱附-气相色谱质谱

(5) 购买美国 Spectra Gases Inc 的 PAMS 和 TO-15 标准气体来建立多点校准工作曲线,各物质的标准曲线的相关系数为 0.92~0.999 不等,线性显著;吸附管和 SUMMA 罐的平行样的相对偏差均小于 15%。

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条件下对臭氧生成的贡献,其大小主要取决于 VOCs 物种的浓度及其反应活性, OFP 的估算方法主要有最大增量反应活性法、光化学臭氧生成潜势法及 OH 消耗速率法,其中,最大增量反应活性 (MIR) 法因综合考虑了挥发性有机物的动力学活性和反应机制活性,被广泛应用于 OFP 的计算^[15~17]。

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

式中, OFP_i 为第 i 种 VOC 的臭氧生成潜势, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; VOC_i 为第 i 种 VOC 的排放浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; MIR_i 为第 i 种 VOC 的最大增量反应活性。

因家具制造业无组织排放占有一定的比例,故本研究将分别对车间和排气筒排放的 VOCs 的 OFP 展开分析,本研究中的 MIR 值均引自 Carter 等^[18]的研究成果。

1.2.2 二次有机气溶胶生成贡献分析

VOCs 的二次有机气溶胶生成贡献常用二次有机气溶胶生成潜势 (SOAFP) 来描述,目前, SOAFP 估算方法主要包括气溶胶生成系数 (FAC) 法、OC/EC 比值法、水溶性有机物法、受体模型法以及示踪物-产率法等,其中, FAC 法被广泛应用^[19]。

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

式中, SOAFP_i 为第 i 种 VOC 的二次有机气溶胶生成潜势, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; VOC_i 为第 i 种 VOC 的排放浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; FAC_i 为第 i 种 VOC 的气溶胶生成系数。

因家具制造业无组织排放占有一定的比例,故本研究将分别对车间和排气筒排放的 VOCs 的 SOAFP 展开分析。本研究中的 FAC 值引自 Grosjean 等^[20]、吕子峰等^[21]以及 Dechapanya 等^[22]的研究成果,若本研究中涉及的物质暂无测定 FAC 值的,暂不纳入计算。

1.2.3 恶臭污染分析

恶臭污染对人的嗅觉刺激程度常用臭气浓度与臭气强度这两个指标来表征。恶臭气体一般由多种恶臭物质组成,各物质对恶臭的贡献值各不相同。以各恶臭物质浓度与其嗅阈值的比值,即阈稀释倍数来评估各物质的恶臭贡献值的方法被广泛运用^[23]。

$$M_i = \text{VOC}_i / O_i \quad (3)$$

式中, M_i 为第 i 种 VOC 的阈稀释倍数; VOC_i 为第 i 种 VOC 的排放浓度, $\times 10^{-6}$; O_i 为第 i 种 VOC 的嗅阈值, $\times 10^{-6}$ 。本研究中各物质的嗅阈值引自 Yoshio^[24]和加藤龙夫等^[25]的研究成果,若本研究中涉及的物质暂无测定嗅阈值的,暂不纳入计算。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 排放浓度特征

车间与仓库 VOCs 浓度监测结果如图 2。生产车间各工段 VOCs 浓度为 9.18~181.58 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 不等,木工车间、涂装 A 车间和涂装 B 车间的平均 VOCs 浓度分别为 62.11、93.36 和 15.72 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。木工车间机械封边与手工封边工段 VOCs 浓度相近,分别为 60.19 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 64.03 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;涂装 A 车间各工段 VOCs 浓度相差较大,其中底色工段 VOCs 浓度最低,为 9.18 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,晾干工段 VOCs 浓度最高,为 181.58 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,底漆和面漆工段浓度分别为 37.15 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 145.54 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;涂装 B 车间吊线喷涂和手工喷涂工段 VOCs 浓度分别为 16.81 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 14.63 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,浓度远低于涂装 A 车间,这可能是因为涂装 B 车间吊线喷涂和手工喷涂工段的涂装作业面积、喷涂频次以及涂料使用量都远低于涂装 A 车间而导致的。此外,木材仓、涂料仓和成品仓 VOCs 浓度分别为 2.36、84.85 和 5.80 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,因调漆直接在涂料仓进行,而导致涂料仓浓度较大,后文将涂料仓称为调漆间。对涂装 A 车间的车间边界和厂界进行监测,结果显示其车间边界浓度为 66.77 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 23.45 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;厂界上下风向浓度分别为 0.41 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 1.60 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

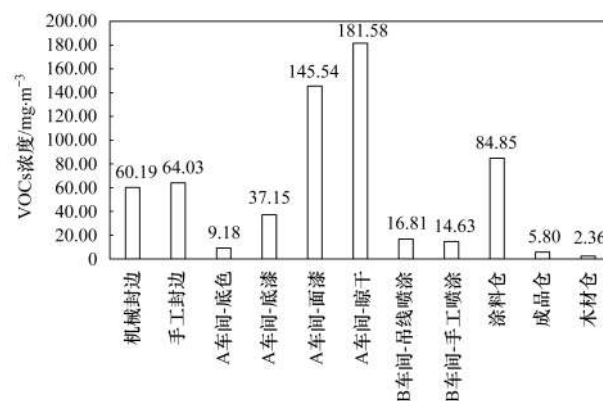


图2 车间和仓库 VOCs 浓度

Fig. 2 VOCs concentration of workshops and warehouses

采用活性炭吸附组合紫外光催化氧化设施处理喷涂车间含 VOCs 废气,有组织 VOCs 排放浓度监测结果如图 3 所示。处理设施进口 VOCs 的浓度为 36.85~231.45 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,出口 VOCs 浓

度为 $30.64 \sim 155.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图 2 和图 3 可知,车间与排气筒的 VOCs 浓度分布情况较为一致,皆为底漆、面漆涂装工段对应浓度高于底色涂装工段对应浓度。其中,底漆废气处理设施出口 VOCs 平均浓度为 $83.55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,对应进口 VOCs 平均浓度为 $158.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;面漆废气处理设施出口 VOCs 平均浓度为 $134.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,

对应进口 VOCs 平均浓度为 $197.24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;底色废气处理设施出口 VOCs 平均浓度为 $32.73 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,对应进口 VOCs 平均浓度为 $63.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。该企业采用的活性炭吸附组合紫外光催化氧化设施处理 VOCs 的效率为 $7.43\% \sim 67.14\%$ 不等,应对处理效率较低的系统进行原因分析和维护,以保证 VOCs 的有效削减。

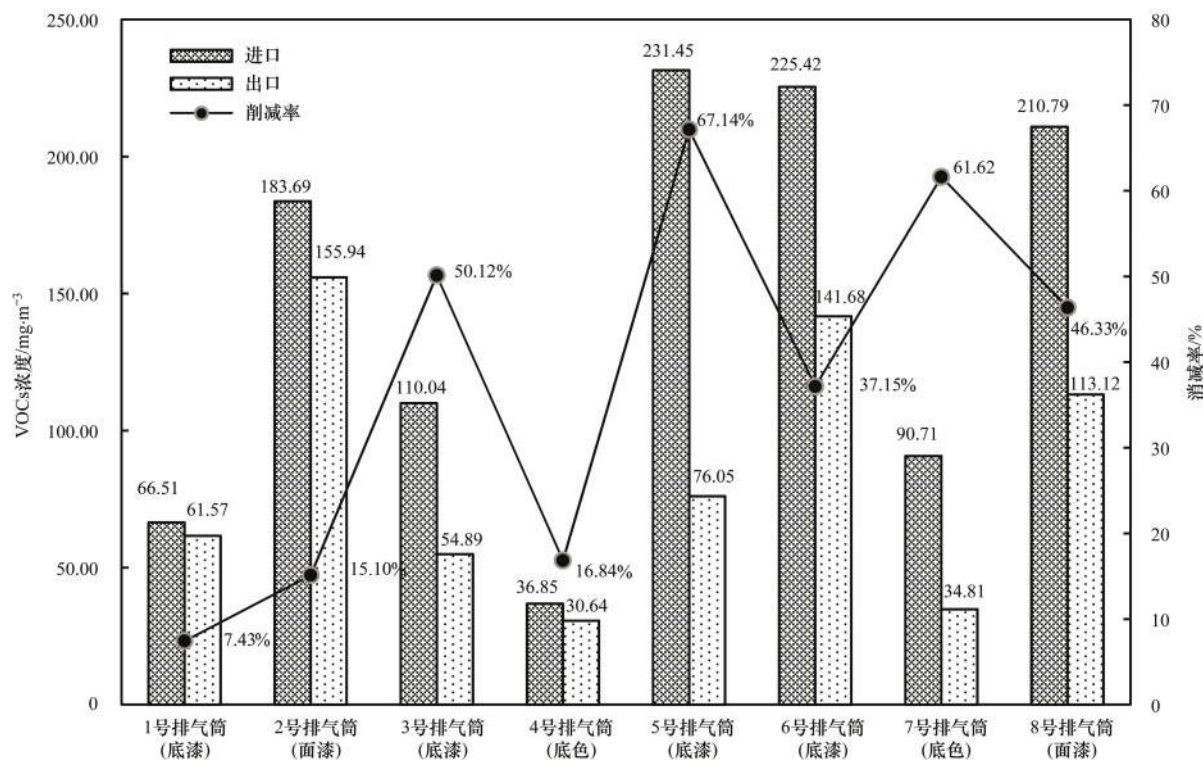


图3 有组织 VOCs 排放浓度

Fig. 3 Organized emission concentration of VOCs

目前木质家具制造业 VOCs 排放相关研究主要集中于排放因子,专门针对行业各环节 VOCs 浓度水平的研究较少,仅有少数学者对木质家具制造业车间和排气筒出口的 VOCs 浓度进行了研究,且皆集中于涂装环节,谭赞华^[9]对 8 家使用溶剂型涂料的木质家具制造企业的涂装车间进行监测分析,其车间 VOCs 浓度为 $3.84 \sim 323.77 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 不等,与本研究结果较为类似;而洪沁^[26]对 1 家使用溶剂型涂料的木质家具制造企业的 2 个涂装车间和 1 个干燥车间进行监测分析,其车间 VOCs 浓度为 $1.33 \sim 3.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 不等,跟本研究结果差异较大。谭赞华^[9]只对其中一家企业的一个排气筒出口 VOCs 浓度进行了监测分析,结果为 $35.87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;洪沁等^[26]对 1 家使用溶剂型涂料的木质家具制造企业的 1 个排气筒出口进行监测分析,其 VOCs 浓度为 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,这些研究样本数较小,且与本研究结果差异较大。

2.2 VOCs 成分谱

对监测的所有车间、排气筒和仓库等的 VOCs 组分进行综合分析,将各 VOCs 组分归为烷烃类、烯烃类、芳香烃类、醇醚类、醛酮类、酯类和其他这 7 大类,得到家具制造业 VOCs 成分谱如表 2 所示。

由表 2 可知,总的来说,车间主要 VOCs 物质为芳香烃、酯类和醛酮类物质,平均占比为 29.87% 、 27.08% 和 24.42% ;排气筒主要 VOCs 物种为酯类和芳香烃,平均占比为 32.39% 和 31.45% ,其次为烷烃类物质;成品仓和木材仓主要 VOCs 物种为芳香烃,占比依次为 71.53% 和 70.24% ,其次为酯类物质;车间边界主要 VOCs 物种为酯类物质,占比为 62.81% ,其次为芳香烃。各车间具体物种占比稍有差异,封边车间以芳香烃为主,其次为酯类物质;底色和晾干车间主要物种为酯类和芳香烃;底漆车间以酯类物质为主,其次为芳香烃;面漆车间主要物种

表 2 家具制造业 VOCs 成分谱/%

Table 2 VOCs source profile of furniture manufacturing industry/%

物种名称	封边 车间	底色 车间	底漆 车间	面漆 车间	晾干 车间	调漆间	所有 车间	底漆 排气筒	底色 排气筒	面漆 排气筒	所有 排气筒	成品仓	木材仓	车间 边界
烷烃	n. d.	n. d.	1.54	7.05	7.11	9.27	11.68	26.47	12.32	3.27	18.17	6.52	9.56	n. d.
2-甲基丁烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	5.30	9.56	n. d.
2,3-二甲基丁烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.80	n. d.	n. d.	0.78	n. d.	n. d.	n. d.
环戊烷	n. d.	n. d.	1.54	n. d.	n. d.	n. d.	0.56	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
2-甲基戊烷	n. d.	n. d.	n. d.	2.56	1.97	1.29	2.73	3.95	2.19	0.89	1.93	n. d.	n. d.	n. d.
3-甲基戊烷	n. d.	n. d.	n. d.	2.05	1.56	1.11	2.19	2.97	1.70	0.70	1.47	n. d.	n. d.	n. d.
己烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	1.33	1.54	1.81	1.89	1.68	0.77	1.15	1.22	n. d.	n. d.
甲基环戊烷	n. d.	n. d.	n. d.	0.79	0.75	1.18	1.14	2.70	1.12	n. d.	1.50	n. d.	n. d.	n. d.
2,4-二甲基戊烷	n. d.	n. d.	n. d.	0.95	0.82	1.84	1.44	3.01	2.26	n. d.	1.85	n. d.	n. d.	n. d.
2,3-二甲基戊烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.92	n. d.	n. d.	0.90	n. d.	n. d.	n. d.
3-甲基己烷	n. d.	n. d.	n. d.	0.71	0.70	1.51	1.16	2.79	2.14	n. d.	1.72	n. d.	n. d.	n. d.
1,3-二甲基环戊烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	1.93	n. d.	n. d.	1.88	n. d.	n. d.	n. d.
1,2-二甲基环戊烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.68	n. d.	n. d.	0.66	n. d.	n. d.	n. d.
庚烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.80	0.66	1.55	1.23	n. d.	0.96	n. d.	n. d.	n. d.
甲基环己烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	2.39	n. d.	n. d.	2.33	n. d.	n. d.	n. d.
3,3-二甲基己烷	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.89	n. d.	0.91	1.05	n. d.	n. d.	n. d.
芳香烃	63.17	43.64	36.57	22.99	36.25	7.29	29.87	29.98	45.19	32.95	31.45	71.53	70.24	36.84
甲苯	12.50	12.37	11.47	11.69	15.71	2.83	9.62	9.02	6.93	16.37	11.04	11.78	16.51	4.18
乙苯	12.63	9.44	7.21	2.69	5.37	1.29	4.77	3.38	5.01	3.57	3.26	17.60	16.93	7.40
间-二甲苯	17.92	11.70	9.87	4.54	7.71	1.66	6.88	5.49	7.63	5.93	5.29	20.52	17.48	11.69
对-二甲苯	6.79	3.97	3.42	1.59	2.73	0.68	2.52	1.90	2.52	4.09	2.73	9.27	9.90	4.39
邻-二甲苯	9.53	6.16	4.61	2.49	4.15	0.83	3.65	3.09	4.31	2.99	2.82	12.36	9.42	6.26
正丙苯	0.55	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.34	1.19	1.47	n. d.	0.82	n. d.	n. d.	n. d.
1-乙基-3-甲基苯	0.91	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.56	1.49	5.83	n. d.	1.13	n. d.	n. d.	0.77
1-乙基-2-甲基苯	0.63	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.39	1.42	2.54	n. d.	1.12	n. d.	n. d.	0.62
1,2,3-三甲苯	0.53	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.33	1.02	1.70	n. d.	0.78	n. d.	n. d.	0.52
1,3,5-三甲苯	1.18	n. d.	n. d.	n. d.	0.58	n. d.	0.82	1.97	5.51	n. d.	1.88	n. d.	n. d.	1.01
1,2,4-三甲苯	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.00	1.72	n. d.	0.57	n. d.	n. d.	n. d.
醛酮类	1.98	1.14	4.10	31.98	11.37	60.08	24.42	5.74	2.94	16.47	10.17	n. d.	n. d.	0.36
丙酮	n. d.	n. d.	n. d.	0.94	n. d.	1.05	1.10	0.90	n. d.	n. d.	0.88	n. d.	n. d.	n. d.
甲缩醛	1.15	n. d.	3.04	29.49	9.69	58.44	21.80	4.03	1.89	14.98	8.24	n. d.	n. d.	n. d.
2-丁酮	n. d.	n. d.	n. d.	0.35	n. d.	0.58	0.49	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
甲基异丁基酮	0.84	1.14	1.05	1.21	1.68	n. d.	1.03	0.80	1.05	1.49	1.04	n. d.	n. d.	0.36
酯类	33.87	52.77	52.81	27.03	40.36	13.70	27.08	31.43	36.89	38.59	32.39	21.96	20.20	62.81
乙酸乙酯	1.28	4.07	3.12	3.66	3.62	3.95	2.56	3.12	2.71	5.37	3.72	n. d.	n. d.	0.37
乙酸仲丁酯	21.65	41.07	42.03	20.89	30.79	9.01	19.58	24.97	29.75	30.48	25.09	12.92	11.25	56.94
乙酸丁酯	9.15	7.63	6.28	2.47	5.19	0.75	3.93	2.14	4.43	2.75	2.42	9.04	8.95	4.67
丙二醇甲醚醋酸酯	1.79	n. d.	1.39	n. d.	0.76	n. d.	1.01	1.19	n. d.	n. d.	1.16	n. d.	n. d.	0.82
其他	0.98	2.46	4.98	10.94	4.91	9.66	6.95	6.39	2.66	8.72	7.82	n. d.	n. d.	n. d.
二氯甲烷	0.98	n. d.	1.84	9.12	4.09	4.19	4.97	1.79	n. d.	5.55	4.61	n. d.	n. d.	n. d.
1,2-二氯乙烷	n. d.	2.46	3.14	1.82	0.82	5.47	1.98	4.60	2.66	3.17	3.21	n. d.	n. d.	n. d.
烯烃	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.	n. d.
醇醚类	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.	n. d.

为醛酮类、酯类和芳香烃;而调漆间则以醛酮类物质为主. 所有车间、排气筒、仓库和车间边界都未检出烯烃和醇醚类物质.

家具制造业主要 VOCs 物质为乙酸仲丁酯、甲苯、间-二甲苯、甲缩醛和乙苯等,与原辅材料中的主要 VOCs 组分基本一致. 其中,车间平均占比前三的 VOCs 物质为甲缩醛、乙酸仲丁酯和甲苯;排气筒平均占比前三的 VOCs 物质为乙酸仲丁酯、甲苯和甲缩醛;成品仓占比前三的 VOCs 物质为间-二

甲苯、乙苯和乙酸仲丁酯;木材仓占比前三的 VOCs 物质为间-二甲苯、乙苯和甲苯;车间边界占比前三的 VOCs 物质为乙酸仲丁酯、间-二甲苯和乙苯. 各车间和排气筒占比前三的 VOCs 物质稍有差异,封边车间为乙酸仲丁酯、间-二甲苯和乙苯,底色、底漆车间和底色、底漆排气筒为乙酸仲丁酯、甲苯和间-二甲苯,面漆、晾干车间和面漆排气筒为甲缩醛、乙酸仲丁酯和甲苯,调漆间为甲缩醛、乙酸仲丁酯和 1,2-二氯乙烷.

莫梓伟等^[27]、田亮等^[28]以及 Zheng 等^[29]国内早期相关研究显示木质家具制造业 VOCs 以芳香烃为主,占比超过 50% 以上. 近年来,随着环保型原辅材料的使用、配套工艺的改进以及 VOCs 末端处理设施的安装,木质家具制造业 VOCs 成分谱发生了较大的改变,方莉等^[30]和本研究结果均表明芳香烃占比下降明显,酯类和醛酮类等含氧 VOCs 总占比已超过芳香烃.

2.3 VOCs 环境影响分析

2.3.1 臭氧生成贡献分析

假设车间 VOCs 以其车间内监测浓度无组织排放,对车间和排气筒排放的 VOCs 的 OFP 进行分析,结果表明:车间和排气筒 VOCs 平均 OFP 分别为 $258.01 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $289.14 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,其中,封边、底色、底漆、面漆和晾干车间以及调漆间 VOCs 的 OFP 分别为 279.23、28.50、102.15、83.89、489.56 和 $105.56 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,底色、底漆和面漆排气筒 VOCs 的 OFP 依次为 138.04、286.19 和 $348.02 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;成品仓和木材仓 VOCs 的 OFP 分别为

$27.63 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $10.57 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 封边车间、底色车间、成品仓、木材仓和底色排气筒单位 VOCs 的臭氧生成量较大,为 3.10~4.41 不等,除封边车间外,由于这些排放环节 VOCs 浓度不大,其 OFP 亦非十分突出.

对比各排放环节各大类 VOCs 的臭氧生成潜势占比,如图 4 所示. 车间、排气筒、成品仓和木材仓 VOCs 中对臭氧生成潜势贡献最大的为芳香烃类物质,占比分别高达 72.93%、73.89%、94.25% 和 93.17%,而芳香烃类物质对各环节 VOCs 浓度贡献仅依次为 29.87%、31.45%、71.53% 和 70.24%. 车间对臭氧生成潜势贡献较大的前 10 种物质分别为间-二甲苯、甲苯、邻-二甲苯、甲缩醛、乙酸仲丁酯、对-二甲苯、乙苯、1,3,5-三甲苯、1-乙基-3-甲基苯和 2-甲基戊烷,排气筒对臭氧生成潜势贡献较大的前 10 种物质为间-二甲苯、甲苯、1,3,5-三甲苯、邻-二甲苯、乙酸仲丁酯、对-二甲苯、乙苯、1,2,3-三甲苯、1-乙基-3-甲基苯和甲缩醛.

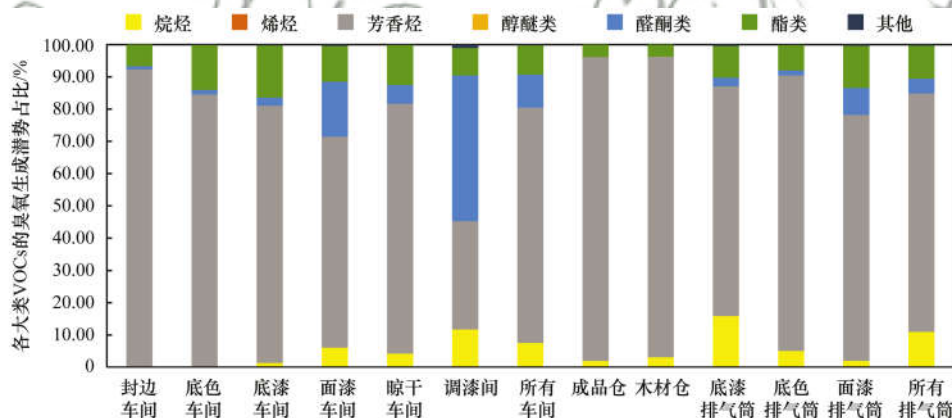


图 4 各 VOCs 排放环节的臭氧生成潜势占比

Fig. 4 Ozone generation potential of each VOCs emission sector

2.3.2 二次有机气溶胶生成贡献分析

假设车间 VOCs 以其车间内监测浓度无组织排放,对车间和排气筒排放的 VOCs 的 SOAFP 进行分析,结果显示:车间和排气筒 VOCs 平均 SOAFP 分别为 $148.66 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $165.31 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,其中,封边、底色、底漆、面漆和晾干车间以及调漆间 VOCs 的 SOAFP 分别为 186.13、19.27、67.58、166.20、321.51 和 $30.32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,底色、底漆和面漆排气筒 VOCs 的 SOAFP 依次为 74.31、156.95 和 $230.43 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$;成品仓和木材仓 VOCs 的 SOAFP 分别为 19.23 和 $7.68 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 封边车间、底色车间、成品仓、木材仓和底色排气筒单位 VOCs 的二次有机气溶胶生成量较大,为 2.05~3.32 不等,其中,除封边车间外,由于这些环节 VOCs 浓度不大,其 SOAFP 亦非十分突出. 封边车间 VOCs 的 OFP 和 SOAFP

较大,但目前绝大部分企业没有对封边等胶粘环节产生的 VOCs 进行收集和处理,应加强控制.

对比各排放环节各大类 VOCs 物质的 SOAFP 占比,各排放环节的 VOCs 组分中只有部分烷烃和芳香烃类物质有对应的 FAC 值,而烯烃、醇醚类、醛酮类、酯类及其他物质暂无测定 FAC 值而暂未纳入计算,各 VOCs 排放环节各大类物质的 SOAFP 占比如图 5 所示. 车间、排气筒、成品仓和木材仓 VOCs 中对二次有机气溶胶生成潜势贡献最大的为芳香烃类物质,占比分别高达 98.19%、95.42%、100.00% 和 100.00%,而芳香烃类物质对各环节 VOCs 浓度贡献仅依次为 29.87%、31.45%、71.53% 和 70.24%. 车间对 SOAFP 贡献较大的前 10 种物质分别为甲苯、间-二甲苯、乙苯、邻-二甲苯、对-二甲苯、1-乙基-3-甲基苯、1,3,5-三甲苯、

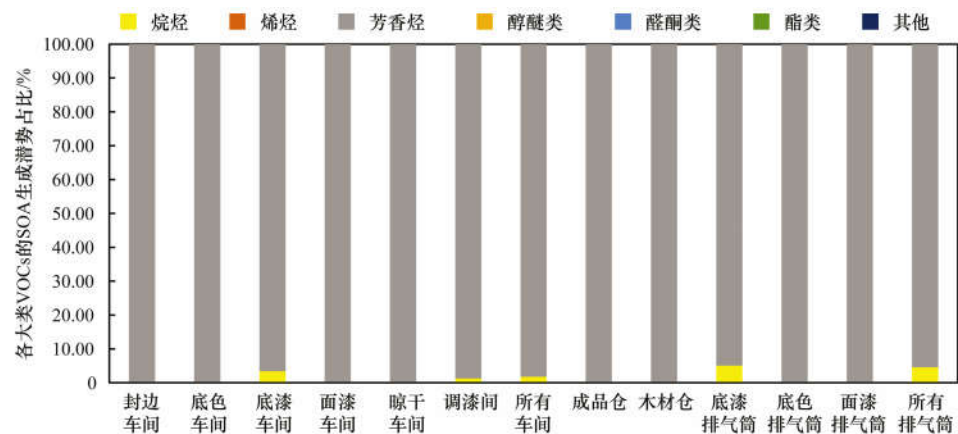


图5 各 VOCs 排放环节的二次有机气溶胶生成潜势占比

Fig. 5 Secondary organic aerosol generation potential of each VOCs emission sector

环戊烷、1-乙基-2-甲基苯和 1,2,3-三甲苯,排气筒对 SOAFP 贡献较大的前 10 种物质为甲苯、间-二甲苯、乙苯、邻-二甲苯、1-乙基-3-甲基苯、甲基环己烷、1-乙基-2-甲基苯、1,3,5-三甲苯、对-二甲苯和 1,2,3-三甲苯。

2.3.3 恶臭污染分析

对车间边界和厂界上下风向的 VOCs 的恶臭影响进行分析,结果如表 3 所示,车间边界主要恶臭物质为乙酸仲丁酯、间-二甲苯、乙酸丁酯、对-二甲苯、乙苯、1-乙基-3-甲基苯、邻-二甲苯和甲苯,厂

表3 车间边界和厂界 VOCs 恶臭影响

Table 3 Odor effects of VOCs at the boundary of workshop and factory

车间边界			厂界					
物质名称	嗅阈值 $\times 10^{-6}$	阈稀释倍数	物质名称	嗅阈值 $\times 10^{-6}$	阈稀释倍数	物质名称	嗅阈值 $\times 10^{-6}$	阈稀释倍数
乙酸仲丁酯	0.002 4	2.09E+03	间-二甲苯	0.041	6.70E-01	正己烷	1.5	4.12E-03
间-二甲苯	0.04	2.75E+01	苯乙烯	0.035	2.96E-01	二硫化碳	0.21	7.00E-04
乙酸丁酯	0.016	2.57E+01	对-二甲苯	0.058	2.18E-01	苯	2.7	4.30E-04
对-二甲苯	0.058	7.30E+00	乙苯	0.17	1.27E-01	三氯乙烯	3.9	3.34E-04
乙苯	0.17	4.20E+00	甲苯	0.33	1.13E-01	丙烯	13	2.52E-04
1-乙基-3-甲基苯	0.018	3.63E+00	1,2,4-三甲苯	0.12	6.55E-02	1,1,2-三氯乙烷	3.9	1.76E-04
邻-二甲苯	0.38	1.59E+00	邻-二甲苯	0.38	4.40E-02	丙酮	42	1.69E-04
甲苯	0.33	1.41E+00	乙酸乙酯	0.87	4.08E-02	二氯甲烷	160	9.50E-05
1-乙基-2-甲基苯	0.074	7.15E-01	1,3,5-三甲苯	0.17	1.15E-02	氯仿	3.8	5.24E-05
1,3,5-三甲苯	0.17	5.08E-01	甲乙酮	0.44	1.09E-02	异丙醇	26	4.98E-05
甲基异丁基酮	0.17	2.14E-01	2-己酮	0.5	7.39E-03	四氯化碳	4.6	1.65E-05
乙酸乙酯	0.87	4.96E-02	正庚烷	0.67	4.43E-03			

界 VOCs 几乎不产生恶臭污染。

3 结论

(1)封边、底色、底漆、面漆、晾干等车间及调漆间 VOCs 浓度为 9.18 ~ 181.58 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 不等,木材仓和成品仓 VOCs 浓度分别为 2.36 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 5.80 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,车间边界 VOCs 浓度为 66.77 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 23.45 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,厂界上下风向 VOCs 浓度分别为 0.41 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 1.60 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。采用活性炭吸附组合紫外光催化氧化设施对废气进行处理,设施进口 VOCs 浓度为 36.85 ~ 231.45 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,出口 VOCs 浓度为 30.64 ~ 155.94 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,处理效率为 7.43% ~ 67.14%。

(2)车间主要 VOCs 物种为芳香烃、酯类和醛酮类物质;排气筒主要 VOCs 物种为酯类和芳香烃,

其次为烷烃类物质;成品仓和木材仓主要 VOCs 物种为芳香烃,其次为酯类物质;车间边界主要 VOCs 物种为酯类物质,其次为芳香烃。家具制造业主要 VOCs 物质为乙酸仲丁酯、甲苯、间-二甲苯、甲缩醛和乙苯等。

(3)车间和排气筒 VOCs 平均 OFP 分别为 258.01 和 289.14 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,其中,晾干和封边车间、底漆和面漆排气筒的 OFP 浓度较大;车间和排气筒 VOCs 平均 SOAFP 分别为 148.66 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 165.31 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,其中,封边、面漆和晾干车间、底漆和面漆排气筒的 SOAFP 浓度较大。封边车间、底色车间、成品仓、木材仓和底色排气管单位 VOCs 的臭氧生成量和二次有机气溶胶生成量较大,各排放环节中对 OFP 和 SOAFP 贡献最大的皆为芳香烃类物质。车间边界 VOCs 中主要恶臭物质为乙酸仲丁酯、间-

二甲苯、乙酸丁酯、对-二甲苯、乙苯、1-乙基-3-甲基苯、邻-二甲苯和甲苯,厂界 VOCs 几乎不产生恶臭污染。

(4)行业 VOCs 中对环境影响贡献较大的主要为芳香烃和酯类物质,建议有针对性地进行控制;封边车间 VOCs 的 OFP 和 SOAFP 较大,但目前绝大部分企业没有对封边等胶粘环节产生的 VOCs 进行收集和处理,建议加强控制。

参考文献:

- [1] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(49): 17373-17378.
- [2] Xue L K, Wang T, Gao J, *et al.* Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(23): 13175-13188.
- [3] 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.
- [4] Wang F W, Guo Z G, Lin T, *et al.* Seasonal variation of carbonaceous pollutants in PM_{2.5} at an urban 'supersite' in Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2016, **146**: 238-244.
- [5] Zheng J, Hu M, Peng J F, *et al.* Spatial distributions and chemical properties of PM_{2.5} based on 21 field campaigns at 17 sites in China[J]. *Chemosphere*, 2016, **159**: 480-487.
- [6] 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 等. “十三五”挥发性有机物总量控制情景分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3544-3551.
- [7] Zhang J N, Chen X F, Liang X M, *et al.* Scenario analyses of the volatile organic compound emission allowance and allocation in the 13th Five-Year period[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3544-3551.
- [8] 袁纳新, 张具武, 孙平, 等. 木质家具制造产生的粉尘及挥发性有机物分析[J]. *木材工业*, 2014, **28**(6): 24-27.
- [9] Yuan N X, Zhang J W, Sun P, *et al.* Dust and volatile organic compound emissions during wood furniture manufacturing [J]. *China Wood Industry*, 2014, **28**(6): 24-27.
- [10] 谭赞华. 广东省木制家具行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究[J]. *广东化工*, 2012, **39**(1): 45-46, 76.
- [11] Tan Y H. Study on the emission of volatile organic compounds (VOCs) from woodiness furniture manufacture industry of Guangdong[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2012, **39**(1): 45-46, 76.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 罗超, 蔡慧华, 刘玲英. 木质家具制造过程 VOCs 排放系数研究[J]. *广东化工*, 2012, **39**(8): 77-78.
- [15] Luo C, Cai H H, Liu L Y. Study on emission factor of VOCs of wood furniture manufacturing industry [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2012, **39**(8): 77-78.
- [16] 谢铁嵩, 杨峰, 刘春蕾. 南京市家具行业 VOCs 排放清单及特征[J]. *科技资讯*, 2018, **16**(18): 107-109.
- [17] 李悦, 邵敏, 陆思华. 城市大气中挥发性有机化合物监测技术进展[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(4): 1-7.
- [18] Li Y, Shao M, Lu S H. Review on technologies of ambient volatile organic compounds measurement [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(4): 1-7.
- [19] 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].
- [20] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(5): 2574-2583.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Carter W P L. Updated Maximum Incremental Reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications[R]. California, USA: California Air Resources Board Contract, 2010.
- [25] 陈小方, 张嘉妮, 张伟霞, 等. 化工园区挥发性有机物排放清单及其环境影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- [26] Chen X F, Zhang J N, Zhang W X, *et al.* VOCs emission inventory of a chemical industry park and its influence on atmospheric environment [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- [27] Grosjean E, Grosjean D. The reaction of unsaturated aliphatic oxygenates with ozone[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1999, **32**(2): 205-232.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Dechapanaya W, Russell M, Allen D T. Estimates of anthropogenic secondary organic aerosol formation in Houston, Texas; special issue of *Aerosol science and technology* on findings from the fine particulate matter supersites program [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(S1): 156-166.
- [31] 石田立, 张伟霞, 陈小方, 等. 汽车制造企业恶臭来源及影响分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 557-566.
- [32] Shi T L, Zhang W X, Chen X F, *et al.* Stench sources and impact analysis in automobile making [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 557-566.
- [33] Yoshio N. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method [A]. In: *Odor Measurement Review* [C]. Tokyo, Japan: Office of Odor, Noise and Vibration, Environmental Management Bureau, Ministry of Environment, 2004. 118-127.
- [34] 加藤龙夫, 石黑智彦, 重田芳广. 恶臭的仪器分析[M]. 董福来, 荆治严, 李桂琴, 等译. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [35] 洪沁, 常宏宏. 家具涂装行业 VOCs 污染特征分析[J]. *环境*

- 工程, 2017, **35**(5): 82-86.
- Hong Q, Chang H H. Pollution characteristics analysis of VOCs emitted from furniture painting industry [J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(5): 82-86.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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 industries of solvent use in Beijing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4395-4403.

环境科学

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)