

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)

2015~2018年我国PM_{2.5}健康损害价值的动态评估 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)

2011~2017年中国PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)

关中地区PM_{2.5}时空演化及人口暴露风险 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)

中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)

西北工业城市冬季PM_{2.5}污染特征及理化性质 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)

基于PMF模型的PM_{2.5}中金属元素污染及来源的区域特征分析 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏(5276)

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)

鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴(5295)

杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)

石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)

厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)

建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)

我国西北工业区城市大气多氯联苯来源及健康风险 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)

基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)

宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)

梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 禚映雪, 李睿, 陈建耀(5410)

汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)

山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 王世亮, 曹雪雅(5428)

太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)

岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)

澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)

白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)

生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)

Bi₂MoO₆/Bi₂S₃异质结构催化降解四环素-铜复合物 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)

超滤膜负载UiO-66@Fe₃O₄@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)

盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)

限NH₄⁺和限NO₂⁻厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)

厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)

二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)

中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)

我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)

晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)

胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)

毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)

1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)

铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)

生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章(5648)

基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥(5656)

氮肥和秸秆还田方式对麦玉米轮作土壤N₂O排放的影响 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)

《环境科学》第41卷(2020年)总目录 (5677)

《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

厦门市工业源 VOCs 排放清单及控制对策分析

吴冬阳¹, 庄马展², 吴艳聪², 金磊¹, 吴义诚¹, 高攀峰¹, 刘建福¹, 金月正¹, 潘亚雷¹, 傅海燕^{1*}

(1. 厦门理工学院环境生物技术福建省高校重点实验室, 厦门 361024; 2. 厦门市环境科学研究院, 厦门 361021)

摘要: 根据收集厦门市所辖6个区的工业源活动水平数据和厦门市环境统计数据等相关资料,运用排放因子法计算得到2019年厦门市6个辖区的8个行业的工业源VOCs排放清单,分析了厦门市各辖区VOCs排放强度的空间分布格局.在工业源VOCs排放清单的基础上结合企业调研,分析排放清单企业VOCs污染处理技术情况并提出相应的控制对策建议.结果表明,2019年厦门市工业源VOCs产生总量为16 027.88 t,排放总量为5 514.58 t,其中厦门岛外的海沧区、同安区、翔安区和集美区VOCs排放量分别为1 648.35、2 111.13、667.52和750.48 t,岛内的湖里区和思明区VOCs排放量较少,分别为292.42 t和44.68 t.除了湖里区,厦门市排放强度呈现岛外大于岛内的空间分布特点.厦门市8个行业中,VOCs排放主要来自于涂装、印刷、化工和橡胶行业,分别占厦门市总排放量的51.21%、20.18%、13.63%和10.67%.厦门市VOCs废气处理工艺情况分析结果表明,从源头控制层面,企业使用低(无)产生VOCs的原辅材料,可有效地从源头控制VOCs产生和排放;从末端处理工艺层面,UV光解/光催化、吸附处理、低温等离子体和生物法的实际处理效率均低于80%,吸附与催化燃烧等组合工艺以及燃烧法的实际处理效率均高于90%.

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 排放因子; 排放清单; 工业源; 控制对策

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5336-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003245

Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen

WU Dong-yang¹, ZHUANG Ma-zhan², WU Yan-cong², JIN Lei¹, WU Yi-cheng¹, GAO Pan-feng¹, LIU Jian-fu¹, JIN Yue-zheng¹, PAN Ya-lei¹, FU Hai-yan^{1*}

(1. Key Laboratory of Environmental Biotechnology of Fujian University, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Xiamen Academy of Environmental Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on data from industrial activities and environmental surveys in the six districts of Xiamen, the emission inventory of industrially sourced volatile organic compounds (VOCs) from eight industries in the six districts of Xiamen was calculated for 2019 by applying the emission factor analysis method. The spatial distribution pattern of VOC emission intensity in the six districts of Xiamen was analyzed. VOCs treatment technologies applied in the industries in the VOCs emission inventory were analyzed and countermeasures for improving VOC control were proposed based on the survey of the industries. The results showed that the total VOCs production and VOCs emission from industrial sources in Xiamen was 16 027.88 t and 5 514.58 t in 2019, respectively. Among them, the VOCs emission from Haicang, Tong'an, Xiang'an, and Jimei districts outside Xiamen Island were 1 648.35, 2 111.13, 667.52, and 750.48 t, respectively. Fewer VOC emissions from Xiamen Island were observed, which included 292.42 and 44.68 t from Huli and Siming districts, respectively. Except for the Huli District, the spatial distribution of emissions showed a spatial characteristic that the VOCs emission intensities outside Xiamen Island are higher than that of Xiamen Island. Among the eight industries in Xiamen, VOCs emissions were mainly from coating, printing, chemical, and rubber industries, which accounted for 51.21%, 20.18%, 13.63%, and 10.67%, respectively, of the total emissions. The analytic results of the VOCs waste gas disposal technique in Xiamen indicate that, from the perspective of source control, enterprises can effectively control the generation and emission of the VOCs at the source by using low (zero) raw materials. For the terminal disposal procedure, the actual disposal efficiency of UV photolysis/ photocatalysis, low-temperature plasma, and biological methods are all lower than 80%, and that of the combined technique of adsorption and catalytic combustion, and the combustion method are both higher than 90%.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); emission factor; emission inventory; industrial sources; countermeasures

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为形成O₃和PM_{2.5}污染的重要前体物,是引起光化学烟雾和灰霾等大气污染问题的重要因素,对人类健康造成严重危害^[1~4]. VOCs排放清单的建立是研究VOCs排放特征和VOCs污染物控制对策的重要基础和依据^[5,6].近5年来,国内外有关专家和学者针对VOCs污染源排放清单开展了大量研究,从国家^[7,8]到区域、省份^[5,9~11]已经建立了多尺度排放清单.然而,随着大气环境质量管理要求的提升,国家和区域尺度VOCs排放清单

已难以满足城市大气的管控要求^[12].当前,许多研究将VOCs排放清单提升至城市尺度^[13~16].厦门市作为东南沿海国际旅游城市,近年来随着能源消耗量和人为污染物排放量的增长,其空气质量呈现下降趋势^[17,18].因此,研究建立厦门市VOCs排放

收稿日期: 2020-03-24; 修订日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109181); 福建省科技厅引导性项目(2018Y0079); 福建省中青年教育科研项目(JT180452); 厦门理工学院科技项目(XPDKT18008)

作者简介: 吴冬阳(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气与水污染控制, E-mail: 1158753927@qq.com

* 通信作者, E-mail: fuyh@xmut.edu.cn

清单并分析控制对策具有重要意义。

有研究表明,工业源是厦门市 VOCs 排放的最主要来源^[19]。然而,目前涉及厦门市 VOCs 排放清单的研究多以人为源和 VOCs 排放特征为主^[19~21],针对厦门市工业源 VOCs 的排放清单研究较少,且研究中尚未对工业源 VOCs 控制技术应用现状进行研究分析,这不利于有针对性地控制 VOCs 排放以及控制对策的研究。

鉴于此,本研究以 2019 年为基准年,以厦门市所辖全部 6 个区为研究对象,通过厦门环境统计数据、企业排放调查表收集以及实地调查等方式获取该地区活动水平数据,运用排放因子计算法,建立 2019 年厦门市分辖区、分行业的工业源 VOCs 排放清单,绘制分析了厦门市各辖区 VOCs 排放强度的空间分布。在工业源 VOCs 排放清单的基础上,对排放清单中的工业企业采用的 VOCs 污染控制技术进行了分析,并提出控制对策建议,以期对厦门市产业结构和产业布局提供一定的指导,并为控制厦门市 VOCs 和决策规划提供科学依据及数据支撑。

1 材料与与方法

1.1 研究区域与对象

本研究以 2019 年为基准年,以厦门市所辖全部 6 个区为研究区域,如图 1 所示。选取 1 035 家工业企业作为调研对象,涉及印刷、化工、汽修、涂装、橡胶、制鞋、工艺品和船舶维修这 8 个行业。

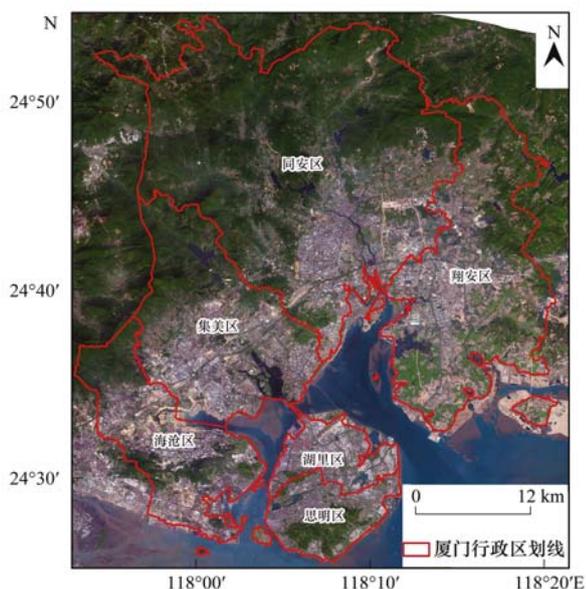


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Map of the study area

1.2 计算方法

本研究采用排放因子法对厦门市工业源 VOCs

排放进行计算。VOCs 产生量和排放量计算公式分别如式(1)和(2)所示^[22]。

$$F_{i,j} = \sum_{k=1}^n A_{j,k} \times EF_{i,j,k} \quad (1)$$

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^n A_{j,k} \times EF_{i,j,k} \times (1 - \eta) \quad (2)$$

式中, $F_{i,j}$ 为 VOCs 产生量(t); $E_{i,j}$ 为 VOCs 排放量(t); $A_{j,k}$ 为 j 区第 k 个活动或原辅材料的年使用量或产品产量(kg); $EF_{i,j,k}$ 为第 i 个物种在第 j 个区域的第 k 个活动或原辅材料使用的排放因子; n 为该地区原辅材料类型的总数; η 为污染控制技术对 VOCs 的去除效率。

橡胶行业中的轮胎制造企业涉及的橡胶制品部件有轮胎胎面、轮胎皮带、轮胎基座(侧壁)、轮胎内胆和轮胎气囊等,生产工艺涉及混炼、压出、压延、成形、硫化及其他辅助工艺^[23],各部件在不同生产工艺中均产生 VOCs。文献[24]综合各部件在各个生产工艺的 VOCs 排放因子为 $910 \text{ g} \cdot \text{条}^{-1}$,若采用该排放因子进行计算,厦门市的轮胎制造企业年 VOCs 产生量将大于 10^4 t ,与企业实际排放情况产生较大的估算误差。因此,通过实测获得轮胎制造企业的各工艺废气排放口的进气和排气流量、非甲烷总烃(NMHC)浓度和实际运行时间,从而计算出橡胶行业中轮胎制造企业的 VOCs 产生量和排放量,计算公式如式(3)所示^[25]。

$$E = \sum Q_i \times \rho_i \times T_i \times 10^{-9} \quad (3)$$

式中, E 为 VOCs 生产量或排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; Q_i 为第 i 个处理设施进口或排放口的废气流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; ρ_i 为第 i 个处理设施进口或排放口的非甲烷总烃(NMHC)浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; T_i 为第 i 个处理设施的运行时间, $\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

1.3 活动水平确定

本研究中所使用的 VOCs 活动水平数据主要来自如下途径:厦门环境统计数据、企业排放调查表和实地调查表,共计 1 035 家工业企业,行业包括了印刷、化工、汽修、涂装、橡胶、制鞋、工艺品和船舶维修这 8 个行业,并根据国民经济行业进行细分,具体情况见表 1。企业排放调查表和实地调查表等数据基于厦门市生态环境局 3 个阶段的大气污染防治工作,采取自下而上的方式对每家企业进行调查,采取的方式包括发放企业调查表、现场监测和实地调研等,并对企业填报的数据存在的错漏和存疑数据进行复核,以提高企业活动水平数据的可靠性。

1.4 排放因子确定

具体排放因子选取见表 2。

表 1 厦门市各辖区调查数量¹⁾

Table 1 Survey number of each jurisdiction in Xiamen

行业分类		辖区企业数量/家						总计
行业大类	行业子类	海沧区	同安区	翔安区	集美区	湖里区	思明区	
化工	基础化学原料制造	1	—	4	2	—	—	7
	涂料、油墨、颜料及类似产品制造	3	8	4	3	—	—	18
	合成材料制造	3	6	7	1	—	—	17
	专用化学品制造	1	2	6	1	—	—	10
	日用化学品和其他日用化学品制造	1	7	6	2	—	—	16
涂装	金属家具涂层	7	4	5	4	—	—	20
	木质家具涂层	2	8	2	1	—	—	13
	金属制品业	13	11	9	10	3	2	48
	机械设备制造	10	18	8	11	4	1	52
	家电涂层	3	2	2	2	1	—	10
橡胶	橡胶制品制造	3	4	—	5	—	—	12
	塑料和其他橡胶制品制造	—	2	3	2	—	—	7
印刷	装订及印刷相关服务	12	39	10	25	61	23	170
	包装装潢及其他印刷	23	98	31	43	74	43	312
汽修	汽车喷涂	51	36	19	28	119	45	298
工艺品	雕塑工艺品制造	—	2	1	1	—	—	4
	金属工艺品制造	—	1	—	2	—	—	3
	其他工艺品制造	—	1	3	—	—	—	4
船舶维修	船舶改装与维修	2	—	5	—	—	—	7
制鞋业	橡胶鞋制造	—	3	1	—	—	—	4
	皮鞋制造	—	2	1	—	—	—	3

1) “—”表示文章中没有相关内容或数据,下同

表 2 VOCs 排放因子

Table 2 VOCs emission factors

行业大类	行业子类	排放源	活动水平	排放因子	单位	文献
化工	基础化学原料制造	乙烯、丙烯、丙烯腈、丁乙烯、苯乙烯、苯和化学原料药	产品产量	0.097、0.111、0.988、139.74、0.223、0.1和430	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[24]
		邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯	产品产量	1.72×10^5	$\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ (以生产线计)	[24]
	涂料、油墨、颜料及类似产品制造	油墨、油漆、炭黑、染料和印染	产品产量	50、15、52、81.4、81.4和81.4	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[24]
	合成材料制造	合成橡胶、丙烯腈、乙二醇、涤纶、合成纤维单体、腈纶、丙纶、维纶和粘胶纤维	产品产量	7.17、0.988、0.515、3.3、0.7、48.79、37.1、37.1、7.7和14.5	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[24]
	专用化学品制造	促进剂和粘合剂	产品产量	1.872和227	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[12]
涂装	日用化学品和其他日用化学品制造	合成洗涤剂	产品产量	0.025	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[26]
		香料和活性剂	产品产量	22.89和0.983	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[12]
	家具家电制造	家具家装喷涂	涂料用量	640	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[27]
	金属制品业	—	产品产量	0.2	$\text{kg}\cdot\text{件}^{-1}$	[24]
	机械设备制造	设备和机床	产品产量	0.4	$\text{kg}\cdot\text{件}^{-1}$	[24]
印刷	包装装潢及其他印刷	防腐、卷材、其他涂料和装配用胶黏剂	溶剂用量	440、455、750和89	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[28]
		传统和新型油墨印刷	油墨用量	750和100	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[24]
	润版液和稀释剂	溶剂用量	200和100	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[29]	
	装订及印刷相关服务	装订用胶黏剂	溶剂用量	89	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[28]
	橡胶制品制造	橡胶制品	产品产量	6.641	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[12]
橡胶	塑料和其他橡胶制品制造	塑料制品	产品产量	0.539	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[18]
		人造革和合成革	产品产量	0.182	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	[24]
	汽车喷涂	轿车、汽车(大车)和摩托车	产品产量	2.43、20和1.8	$\text{kg}\cdot\text{辆}^{-1}$	[24]
汽修	修补涂料	涂料用量	470	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[28]	
工艺品	雕塑、金属和其他工艺品制造	油漆、固化剂和天那水	溶剂用量	466、500和1000	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[29]
船舶维修	船舶改装与维修	船舶涂料	涂料用量	442	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[26]
制鞋	橡胶鞋和皮鞋制造	胶黏剂	溶剂用量	670	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	[15]

2 结果与讨论

2.1 厦门市 2019 年 VOCs 总排放清单

表 3 列出了厦门市 2019 年各辖区工业源 VOCs 排放量大小,图 2 为厦门市各辖区 VOCs 排放强度的空间分布。

表 3 厦门市 2019 年各辖区工业源 VOCs 排放清单¹⁾

Table 3 VOCs emissions inventory of industrial sources in different districts of Xiamen in 2019

辖区	VOCs 产生量 /t·a ⁻¹	VOCs 排放量 /t·a ⁻¹	削减比/%
海沧区	5 101. 21	1 648. 35	67. 68
同安区	6 617. 48	2 111. 13	68. 09
翔安区	1 726. 97	667. 52	61. 34
集美区	1 740. 15	750. 48	56. 87
湖里区	674. 75	292. 42	56. 66
思明区	167. 32	44. 68	73. 29
总计	16 027. 88	5 514. 58	65. 59

1) 削减比 = (VOCs 产生量 - VOCs 排放量) / VOCs 产生量

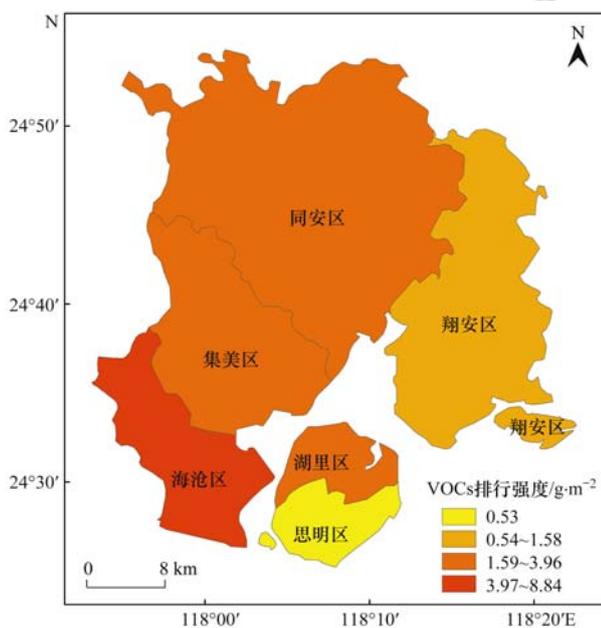


图 2 厦门市各辖区 VOCs 排放强度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of VOCs emission intensity in different districts of Xiamen

由表 3 可知,厦门市工业源 VOCs 产生总量和排放总量分别为 16 027. 88 t 和 5 514. 58 t。结合表 3 和图 2 分析可知,从 VOCs 排放总量上看,2019 年厦门市各辖区工业源 VOCs 排放最大的 4 个区分布于厦门市岛外的同安区 (2 111. 13 t)、海沧区 (1 648. 35 t)、集美区 (750. 48 t) 和翔安区 (667. 52 t),最小的 2 个区域分布于厦门市岛内的湖里区 (292. 42 t) 和思明 (44. 68 t)。从排放强度看,2019 年厦门市各辖区工业源 VOCs 排放强度由大到小依次为海沧区 (8. 84 g·m⁻²)、湖里区 (3. 96 g·m⁻²)、

同安区 (3. 15 g·m⁻²)、集美区 (2. 72 g·m⁻²)、翔安区 (1. 58 g·m⁻²) 和思明区 (0. 53 g·m⁻²)。从地理区域分布看,厦门市 VOCs 排放总量呈现岛外 > 岛内的空间分布特点,此外,除了湖里区,厦门市排放强度也呈现岛外 > 岛内的空间分布特点。

结合厦门市各辖区的社会经济发展状况以及产业布局分析,各辖区排放的行业是不同的,由表 1 可知,厦门岛外区域主要以化工、涂装、橡胶行业为主,而厦门岛内除了少数的企业是涂装行业,化工、橡胶等 VOCs 产生量高的行业的企业基本没有,这与厦门市的产业布局有关,厦门市岛内主要以旅游、金融和软件等第三产业为主,因此导致厦门市 VOCs 排放总量呈现岛外大于岛内的空间分布特点。湖里区的排放强度高于岛外的大部分区域仅次于海沧区,原因可能是此次调查中,湖里区的印刷和汽修行业的企业数多达 254 家,印刷和汽修行业企业规模较小,数量多,VOCs 的处理设施大多是活性炭吸附装置和 UV 光解/光催化等单一处理工艺,存在活性炭更换不及时、活性炭装填量不足以及紫外灯功率和数量不足等问题。此外,湖里区位于岛内,区域面积小,因此导致排放强度比岛外的大部分区域高。

由表 3 中各区的 VOCs 削减比可了解各区对于 VOCs 的整体防控、防治能力。从中可知,厦门市整体 VOCs 削减比为 65. 59%,思明区、海沧区、同安区和翔安区的 VOCs 削减比高于厦门市整体削减比,而集美区和湖里区的 VOCs 削减比低于厦门市整体削减比。湖里区的印刷和汽修行业的企业规模较小且数量多,单个企业 VOCs 排放量小,因此相关部门对 VOCs 的污染防治和管理具有比较大的难度。集美区接近一半的企业使用单独 UV 光解/光催化处理工艺,存在处理设施水平与企业排污量不匹配的问题。因此建议湖里区和集美区相关部门加大对企业的监督管理,指导并扶持企业提升相关工艺处理效率。

2.2 VOCs 行业排放分担率

表 4 是 2019 年厦门市行业 VOCs 排放清单,从中可知,涂装、印刷、化工和橡胶行业 VOCs 产生量占了此次行业统计的 95. 69%。其中,涂装行业排放量最大,为 2 824. 55 t,是厦门市所有行业中 VOCs 排放权重最大的行业,其行业去除率为 67. 24%。印刷、化工和橡胶行业 VOCs 排放贡献次之,分别为 1 112. 37、752. 05 和 589. 15 t,行业去除率分别为 63. 12%、74. 77% 和 61. 91%。从各行业的去除率看,制鞋行业去除率最低,原因可能与厦门市制鞋业大部分企业采用实际处理效率较低的 UV 光解/光催化技术有关。

表 4 2019 年厦门市行业 VOCs 排放清单

Table 4 Emission list of VOCs in Xiamen industry in 2019

行业	企业数量	年 VOCs 排放量 /t·a ⁻¹	行业去除率 /%
涂装	143	2 824.55	67.24
印刷	482	1 112.37	63.12
汽修	298	196.91	62.49
化工	68	752.05	74.77
橡胶	19	589.15	61.91
工艺品	11	12.57	64.64
制鞋	7	13.28	42.05
船舶维修	7	13.7	62.14
总计	1 035	5 514.58	—

图 3 是各辖区工业源的行业排放情况及行业分担率. 从中可知,海沧区 VOCs 的主要贡献源为涂装行业, VOCs 贡献率约为 46.12%, 化工行业和印刷行业次之, VOCs 贡献率分别为 31.04% 和 15.61%; 集美区 VOCs 排放主要来源于涂装、汽修、印刷和橡胶行业, 总占比达到 97.13%, 相对应的贡献率分别为 59.81%、18.63%、14.25% 和 6.05%; 翔安区的橡胶行业对 VOCs 的排放贡献率最大(71.15%), 其次是印刷行业(12.90%) 和化工行业(12.68%); 同安区的 VOCs 排放量主要由涂装和印刷行业贡献, 其贡献率分别为 67.56% 和 22.71%; 湖里区的 VOCs 排放量贡献较多的行业主要是涂装和印刷行业, 其贡献率分别为 44.35% 和 45.62%; 思明区的 VOCs 排放量主要由涂装和汽修行业贡献, 分别为 86.07% 和 13.51%. 此次调查中, 思明区的涂装行业仅有 3 家企业, 然而对思明区的 VOCs 排放量贡献率最

大, 达到了 86.24%, 建议相关部门对思明区有关涂装行业的企业进行有效地防治管控.

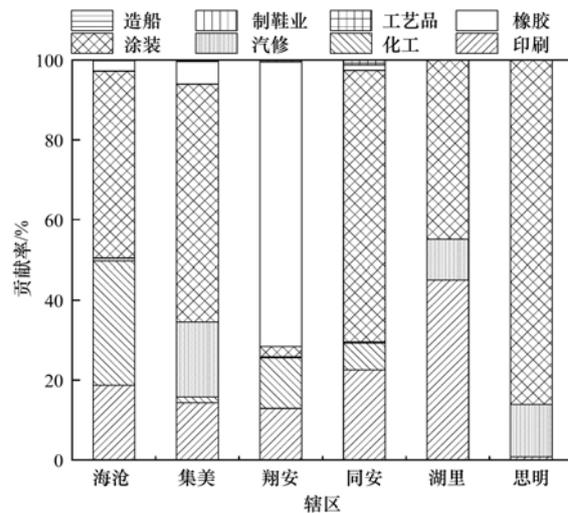


图 3 2019 年厦门市各辖区 VOCs 排放行业分担率

Fig. 3 VOCs emission contribution rates of different industries in Xiamen in 2019

2.3 控制对策分析

2.3.1 VOCs 废气处理工艺情况分析

表 5 按照 8 个行业将 1 035 家企业使用的处理工艺进行了分类汇总, 图 4 将每种工艺处理效率范围内的企业数量占比进行了分析比较. 并结合文献 [30] 的规定进行分析, 该规定要求: ①采用不具备脱附功能的吸附法治理废气的, 每 $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 设计风量的吸附剂装填量应不小于 1 m^3 . ②采用光催化氧化法, 每 $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 设计风量的紫外灯管总功率不得低于 8 kW. ③采用低温等离子法或光催化氧化法的, 废气停留时间不得低于 1 s.

表 5 企业各种 VOCs 处理工艺行业分布情况

Table 5 Industry distribution of VOCs treatment technologies

具体处理工艺	不同行业的企业处理工艺/家								总计
	印刷	化工	汽修	涂装	橡胶	船舶维修	制鞋	工艺品	
吸附处理	108	9	78	40	2	—	—	2	239
UV 光解/光催化	146	21	105	32	6	—	4	3	317
低温等离子体	7	—	6	2	3	—	—	—	18
燃烧法	2	9	—	14	—	—	—	—	26
生物法	2	—	—	2	—	—	—	—	4
吸附 + UV 光解/光催化	48	11	92	16	4	—	2	6	179
吸附 + 催化燃烧	3	3	—	13	—	2	—	—	21
吸附 + 冷凝回收	1	3	—	—	—	—	—	—	4
低温等离子 + UV 光解	23	3	11	10	1	—	1	—	49
UV 光解 + 低温等离子 + 活性炭吸附	1	4	6	9	—	1	—	—	21
活性炭吸附脱附 + 催化蓄热燃烧	—	5	—	3	—	—	—	—	8
使用低(无)原辅材料 ¹⁾	140	—	—	5	—	4	—	—	149

1) 低(无)原辅材料指低或无产生 VOCs 的原辅材料

单独使用吸附处理工艺的企业有 239 家, 其中印刷、汽修和涂装行业的企业主要使用该工艺. 各个企业的吸附处理工艺实际净化效率波动较大, 由

图 4 可知, 吸附处理工艺处理效率较低, 使用该工艺的企业处理效率都在 60% 以下, 且有 31% 的企业处理效率偏低, 低于 20%, 54% 的企业处理效率在

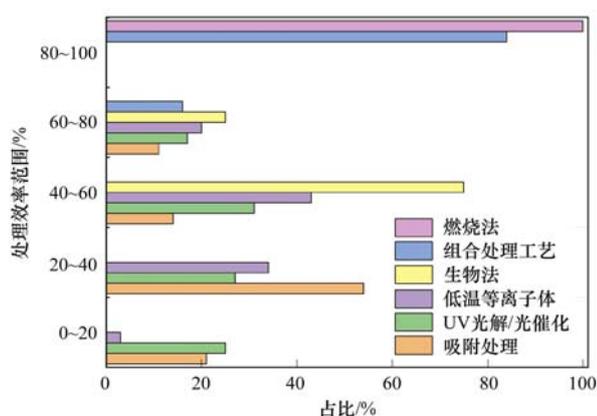


图 4 同种工艺在不同处理效率的企业分布

Fig. 4 Distribution of enterprises with the same technology with different efficiency ranges

20%~40%之间,仅有14%和11%的企业处理效率在40%~60%和60%~80%之间. 吸附处理工艺的实际净化效率与预处理效果、处理系统的设计参数规范性等有着密切的关系^[31],通过对企业调查发现,在印刷、汽修和涂装行业中,少数企业使用了除尘、水喷淋和过滤棉等预处理,这些企业的处理效率均在60%~80%之间,处理效率相比没有预处理系统的企业要高;处理系统设计参数规范性主要存在吸附剂(活性炭、沸石等)装填量不足的问题,其中有58家企业不满足文献[30]中的规定要求①,处理效率较低(处理效率均<60%);此外,单独使用吸附处理工艺的企业中有25%的企业存在吸附剂更换不及时问题,导致吸附剂的吸附性能下降,处理能力偏低,处理效率均<20%.

单独使用UV光解/光催化、低温等离子体和生物法处理工艺的企业分别为317、18和4家,处理效率均低于80%. 单独使用UV光解/光催化处理工艺的企业在本次调查中最多,整体处理效果一般,调研企业中使用该工艺存在每 $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 设计风量的紫外灯管总功率不足和废气停留时间不足的问题,有90家企业不满足文献[30]中的规定要求②或③. 此外,使用该工艺的企业存在催化剂催化活性不高、易流失、易中毒失活等问题,导致净化效率波动较大;低温等离子体处理工艺在企业中应用较少,由图4知,使用该技术的企业处理效率范围为20%~80%,企业实际处理中存在等离子体产生量少,风速过大,停留时间短等问题,未能满足文献[30]中的规定要求③,导致处理效率达不到预期效果. 同时,使用UV光解/光催化和低温等离子体处理工艺在去除VOCs废气的同时产生 O_3 ,造成了二次污染^[31,32];使用生物法处理工艺的企业仅有4家,由图4知,实际运用处理效率为40%~80%,使用该工艺的企业存在风量偏大,超过生物法的适用

气体设计风量范围等问题.

单独使用燃烧法的企业共有29家,主要用于化工、涂装和印刷行业的废气处理,其中有催化燃烧、直接燃烧和RTO燃烧,分别为13、8和5家企业,这些企业的3种燃烧工艺在实际应用中处理效率均高于90%以上,处理效率高.

组合处理工艺的企业共有282家,其中,使用吸附+UV光解/光催化、吸附+催化燃烧、吸附+冷凝回收和活性炭吸附脱附+催化蓄热燃烧的企业有179、21、4和8家,广泛应用于8个行业里,由图4可知,使用该技术中的84%企业处理效率>90%,有6%的企业使用吸附+UV光解/光催化存在处理效率低于90%,可能原因是部分涂装企业在进行喷涂废气湿法前处理时,含湿量较大,使得活性炭吸附受到气体中水分子的干扰,导致活性炭吸水饱和而吸附性能下降,甚至产生脱附现象^[33]. 低温等离子+UV光解和UV光解+低温等离子+活性炭吸附分别有49家和21家,处理效率较高. 其中,企业使用UV光解+低温等离子+活性炭吸附处理工艺减少了活性炭的使用量,降低了 O_3 产生量,而使用低温等离子+UV光解工艺的企业存在 O_3 产生量增加的问题.

使用低(无)产生VOCs原辅材料的企业主要有印刷、涂装和船舶维修行业,现场监测该类企业的VOCs产生量和排放量很少. 此次调查中,印刷行业中的企业使用水性、植物油墨等新型环保油墨;涂装行业中的企业使用UV涂料、水性涂料、高固含量涂料和粉末涂料等环保型涂料;船舶维修行业的4家企业VOCs原辅材料用量少,并且承诺不再刷漆.

2.3.2 控制对策建议

由于每种处理工艺在实际运用中各有其优缺点,因此企业选择处理工艺需要从多个因素综合考虑,如处理效率、安全性、经济性和当地环保管理规定要求等. 结合本次厦门市8个行业的工业VOCs废气处理技术情况分析,提出如下建议.

吸附处理工艺具有装置简易和前期投入小的特点,对于涂装和汽修行业中VOCs排放量较少的企业,如小型家具企业、涉及喷漆的汽车维修店等可单独采用吸附法. 建议使用吸附处理工艺时可在处理前加上预处理,或者与其他工艺组合较合适. 特别注意,活性炭吸附饱和后必须及时更换,喷涂企业使用湿法前处理除漆雾,后端必须有水分截留装置并定期更换. 吸附剂装填量须满足文献[30]中的规定要求和相关技术规范要求.

UV光解/光催化、低温等离子体和生物法处理工艺处理效率和运行成本都较低,适用于低风量、低

浓度有机废气的处理。采用 UV 光解/光催化和低温等离子体处理工艺的企业,紫外灯管总功率和废气停留时间等设计参数须满足文献[30]中的规定要求和相关技术规范要求。

燃烧法及其组合工艺是处理效率最高的处理技术,处理效率可达 90% 以上,对于 VOCs 废气初始浓度较低的企业,应先富集浓缩后再进行燃烧。对于处理相对湿度较大废气,建议在进行吸附浓缩处理前需要采用过滤和除湿等前处理步骤^[34]。直接燃烧法适宜具有高浓度可燃有机废气的企业;催化燃烧法需注意催化剂中毒问题;处理有机废气的企业,可优先考虑蓄热燃烧法。采用活性炭吸附与燃烧法组合工艺的企业应注意避免活性炭热脱附产生着火现象。

使用低(无)产生 VOCs 原辅材料可从源头有效减少 VOCs 的产生与排放,如印刷行业的企业,可使用水性、植物油墨等新型环保油墨,涂装行业中的企业可使用 UV 涂料、水性涂料、高固含量涂料和粉末涂料等环保型涂料。

2.4 不确定性分析

经分析,本研究中不确定性主要来源于排放因子的选取和活动水平数据的收集^[35],具体分析如下。

排放因子的选取。本文中的排放因子主要来自于文献[24,26~29]。由于厦门市缺乏本地的排放因子,本研究所使用的排放因子可能存在一定的偏差,导致排放清单与厦门实际排放存在一定的差异。因此,下一阶段需对排放因子进行实际情况校核,研究建立本地化的排放因子。

活动水平数据的收集。本研究的的活动水平信息主要来自于企业调查报告表以及厦门市生态环境局和各辖区环境分局环境统计年报中的基础资料。其中的企业调查报告表存在数据单位换算错误和信息填报不全的情况,增加了排放清单核算工作量的同时在一定程度上造成数据准确性的降低。因此,建议厦门市需加强对相关的工作人员和填报人员等专业水平进行培训。

3 结论

(1)厦门市 2019 年 VOCs 产生量和排放量分别为 16 027.88 t 和 5 514.58 t。从区域分布看,VOCs 产生量和排放量均呈现岛外大于岛内的分布特点,与厦门市岛内和岛外的产业布局 and 经济发展水平高度吻合;从行业看,涂装、印刷、化工和橡胶行业是排放量最主要的 4 个行业,占工业源 VOCs 排放量的 95.69%。

(2)吸附处理工艺装置简易和前期投入小,适合 VOCs 排放量小的涂装和汽修行业的企业,但处理效率波动范围受吸附剂影响大,需及时更换活性炭等吸附剂;单独使用 UV 光解/光催化、低温等离子体和生物法处理工艺处理效率低,企业需根据处理工艺特点,结合废气实际情况,选择合适的处理工艺,优先考虑与吸附、催化燃烧等工艺组合;燃烧法及其组合工艺处理效率高,但投资和运行成本较高,建议排放中高浓度 VOCs 废气的中大型企业采用。

(3)建议推广使用低或无产生 VOCs 的原辅材料进行替代等方式从源头进行控制,如印刷行业的企业,可采用水性、植物油墨等新型环保油墨替代传统油墨;制鞋行业的企业可采用水性胶黏剂、热熔胶黏剂替代有机溶剂胶黏剂;涂装行业中的企业可采用水性涂料、高固含量涂料、粉末涂料等环保型涂料替代传统涂料。

参考文献:

- [1] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2624-2639.
- [2] 于燕,王泽华,崔雪东,等.长三角地区重点源减排对 PM_{2.5} 浓度的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 11-23.
Yu Y, Wang Z H, Cui X D, *et al.* Effects of emission reductions of key sources on the PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 11-23.
- [3] Zhou M M, Jiang W, Gao W D, *et al.* A high spatiotemporal resolution anthropogenic VOC emission inventory for Qingdao City in 2016 and its ozone formation potential analysis[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, **139**: 147-160.
- [4] 唐孝炎,张远航,邵敏. *大气环境化学*[M]. (第二版). 北京:高等教育出版社,2006.
- [5] 宋晓伟,郝永佩,朱晓东.长三角城市群机动车污染物排放清单建立及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 90-101.
Song X W, Hao Y P, Zhu X D. Vehicular emission inventory establishment and characteristics research in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 90-101.
- [6] 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.
- [7] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al.* High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13299-13317.
- [8] Wu R R, Bo Y, Li J, *et al.* Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008-2012[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **127**: 244-254.
- [9] 郝苗青,史恺,张时佳,等.天津市工业源挥发性有机物排放清单及区域分布研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(1): 35-39.
Hao M Q, Shi K, Zhang S J, *et al.* Inventory and regional

- distribution of the VOCs emissions from the typical industrial sources in Tianjin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, **39**(1): 35-39.
- [10] 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.
- [11] 刘慧琳, 陈志明, 莫招育, 等. 广西工业源大气污染物排放清单及空间分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 229-242.
- Liu H L, Chen Z M, Mo Z Y, *et al.* Emission inventory of atmospheric pollutants from industrial sources and its spatial characteristics in Guangxi [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 229-242.
- [12] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 533-542.
- Lu B, Huang C, Lu Q, *et al.* Emission inventory and pollution characteristics of industrial VOCs in Hangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 533-542.
- [13] 陈小方, 张伟霞, 陈柄旭, 等. 江门市人为源挥发性有机物排放清单[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 600-607.
- Chen X F, Zhang W X, Chen B X, *et al.* Emission inventory of anthropogenic VOCs in Jiangmen city [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 600-607.
- [14] Majumdar D, Purohit P, Bhanarkar A D, *et al.* Managing future air quality in megacities: Emission inventory and scenario analysis for the Kolkata Metropolitan City, India [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117135.
- [15] 华倩雯, 冯菁, 杨珏, 等. 苏州市人为源挥发性有机物排放清单及特征[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2690-2698.
- Hua Q W, Feng J, Yang J, *et al.* Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Suzhou City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2690-2698.
- [16] Hua H, Jiang S Y, Sheng H, *et al.* A high spatial-temporal resolution emission inventory of multi-type air pollutants for Wuxi city [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **229**: 278-288.
- [17] 徐慧, 张晗, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气 VOCs 的污染特征及臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 11-17.
- Xu H, Zhang H, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in winter and spring in Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 11-17.
- [18] Jin L, Huang G H, Fan Y R, *et al.* A pseudo-optimal inexact stochastic interval T2 fuzzy sets approach for energy and environmental systems planning under uncertainty: A case study for Xiamen City of China [J]. *Applied Energy*, 2015, **138**: 71-90.
- [19] 庄伟彬. 厦门市 VOCs 排放清单编制及典型 VOCs 催化燃烧催化剂研制[D]. 厦门: 厦门大学, 2016. 12-18.
- [20] 鲁斯唯, 胡清华, 吴水平, 等. 海峡西岸经济区大气污染物排放清单的初步估算[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(10): 2624-2634.
- Lu S W, Hu Q H, Wu S P, *et al.* Establishment of air pollutant emission inventory in the west coast of Taiwan strait [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(10): 2624-2634.
- [21] 魏淑珍, 杨圣佳, 陈子杰, 等. 福建省重点地区人为源 VOCs 排放清单[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(5): 35-39.
- Wei S Z, Yang S J, Chen Z J, *et al.* VOCs Emission inventory of anthropogenic sources in key areas of Fujian [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(5): 35-39.
- [22] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al.* A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(1): 481-501.
- [23] 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 等. 基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 2994-3000.
- Bai H X, Wei W, Wang Y T, *et al.* Characteristics of VOCs emitted from the rubber tire manufacturing industry based on the inverse-dispersion calculation method [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 2994-3000.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-20.
- [25] 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 等. 淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1078-1084.
- Wang Y Y, Wang X Y, Du M, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds from typical industries in Zibo [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1078-1084.
- [26] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 48-55.
- Chen Y, Ye D Q, Liu X Z, *et al.* Source tracing and characteristics of industrial VOCs emissions in China [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(1): 48-55.
- [27] 贺克斌, 王书肖, 张强. 城市大气污染物排放清单编制技术手册[M]. 北京: 清华大学, 2015.
- [28] 黄薇薇. 我国工业源挥发性有机化合物排放特征及其控制技术评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. 18-23.
- Huang W W. Characteristics of industrial VOCs emissions and evaluation of control technology in China [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. 18-23.
- [29] 江苏省生态环境厅. 江苏省重点行业挥发性有机物排放量计算暂行办法 [EB/OL]. http://hbt.jiangsu.gov.cn/art/2016/7/8/art_1581_6691890.html, 2016-07-08.
- [30] 厦门市环境保护局. 厦门市环境保护局关于加强挥发性有机物污染防治(第三阶段)的通告 [EB/OL]. http://sthjj.xm.gov.cn/zwgk/zcfg/gfxwj/201806/t20180606_1883754.htm, 2018-06-01.
- [31] 徐遵主, 陆朝阳, 张纪文, 等. 长三角典型城市工业 VOCs 处理技术应用状况分析[J]. *环境工程*, 2020, **38**(1): 54-59.
- Xu Z Z, Lu Z Y, Zhang J W, *et al.* Application status of industrial VOCs treatment technologies in typical cities of the Yangtze River Delta region [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(1): 54-59.
- [32] Veerapandian S K P, De Geyter N, Giraudon J M, *et al.* The use of zeolites for VOCs abatement by combining non-thermal plasma, adsorption, and/or catalysis: a review [J]. *Catalysts*, 2019, **9**(1), doi: 10.3390/catal9010098.
- [33] 许伟, 刘军利, 孙康. 活性炭吸附法在挥发性有机物治理中的应用研究进展[J]. *化工进展*, 2016, **35**(4): 1223-1229.
- Xu W, Liu J L, Sun K. Application progresses in the treatment of volatile organic compounds by adsorption on activated carbon [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, **35**(4): 1223-1229.
- [34] 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 等. 生物发酵制药 VOCs 与异味治理技术研究与发展[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1990-

1998.

Wang D S, Zhu X M, Yang X F, *et al.* VOCs and odors control and development in pharmaceutical fermentation industry [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1990-1998.

[35] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性

研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 305-312.

Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 305-312.

欢迎订阅 2021 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,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 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。

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:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forss.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)