



文章栏目: 大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202008145

中图分类号 X511

文献标识码 A

金月正, 金磊, 吴义诚, 等. 厦门市工业源 VOCs 治理技术及区域性治理效果评估[J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 1956-1965.

JIN Yuezheng, JIN Lei, WU Yicheng, et al. Evaluation of industrial VOCs treatment techniques and regional treatment effect in Xiamen [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(6): 1956-1965.

厦门市工业源 VOCs 治理技术及区域性治理效果评估

金月正¹, 金磊¹, 吴义诚¹, 高攀峰¹, 刘建福¹, 苏国新², 庄马展³, 傅海燕^{1,*}

1. 厦门理工学院环境科学与工程学院, 环境生物技术福建省高校重点实验室, 厦门 361024

2. 厦门海洋职业技术学院, 厦门 361100

3. 厦门市环境科学研究院, 厦门 361006

第一作者: 金月正 (1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 大气与水污染控制工程。E-mail: jyz.xm@qq.com

*通信作者: 傅海燕 (1979—), 女, 博士, 教授。研究方向: 大气与水污染控制工程、环境生物技术、固废资源化。E-mail: fuhy@xmut.edu.cn

摘要 选取厦门市 8 大重点监测行业 370 家企业的 439 套废气处理系统进行了调研, 对不同 VOCs 治理技术在不同行业的应用情况及实际净化效果进行分析, 并结合 GIS 平台, 对厦门市的 VOCs 治理效果进行了区域性评估。结果表明: 活性炭吸附、UV 光解、UV 光解+活性炭、等离子+UV 光解、燃烧类工艺及其他类(低温等离子法、冷凝回收法、生物法)等 6 类治理技术对 VOCs 的平均去除率分别为 79.6%、73.7%、71.9%、69.2%、82.1%、68.6%; 燃烧类工艺对苯系物去除率最高, 其次是活性炭吸附工艺, UV 光解及其组合工艺对苯系物的去除率较低; UV 光解及其组合工艺在设备管理及企业工艺选取方面尚存在问题, 整体处理效果较差, 但该工艺适用于低浓度有机废气的处理, 例如在汽修行业的去除率较高(80%左右); 燃烧类工艺及活性炭吸附工艺处理效果较好, 燃烧类工艺的去除率较高, 且对工况的适应性较强, 可用于高浓度 VOCs(>1 000 kg·d⁻¹) 和高进口风量(>20 000 m³·h⁻¹) 条件下的废气治理; 其他类相关工艺由于成本较低, 虽处理效率不高, 但可根据实际情况选择应用。厦门市域各二级行政区对 VOCs 8 大重点监测行业区域治理效果排序为: 思明区>湖里区>海沧区>翔安区>集美区>同安区。

关键词 挥发性有机物(VOCs); 治理工艺; 去除率; 地理信息系统; 效果评估

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是城市大气中一种重要的大气污染物。VOCs 化学反应活性较高, 是产生臭氧的重要前体物质^[1-2], 并参与雾霾形成^[3], 故受到越来越多研究者关注。王佳颖等^[4]的研究结果表明, 北京市夏季大气中 O₃ 的生成主要受 VOCs 控制, 特别是受人为源 VOCs 控制; 罗恢泓等^[5]发现, 上海市中部及东部大气 O₃ 的生成亦主要受 VOCs 控制; 韩旸等^[6]发现, 天津市大气中 VOCs 的化学反应活性较强, 尤其是低碳(C₂~C₃)的烯烃和烷烃。部分 VOCs 具有一定的致癌和非致癌毒性作用, 如苯、甲苯和 1,3-丁二烯等, 长期暴露则对人体具有

收稿日期: 2020-08-16; 录用日期: 2021-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109181); 福建省科技厅引导性项目(2018Y0079); 福建省中青年骨干教师教育科研项目(JT180452); 厦门理工学院科技项目(XPKDT18008)

健康风险^[7]。现有研究表明,工业源是我国VOCs的主要排放源^[8],因此,加强工业污染控制是大气治理的首要内容^[9]。

厦门市位于福建省南部,毗邻台湾海峡。近年来多位学者的研究表明,厦门空气质量呈现明显下降趋势^[10]。NIU等^[11]研究了厦门市海沧工业区VOCs的污染特征;徐慧等^[12]研究了厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势;王坚^[13]进行了厦门市VOCs排放特征及光化学反应特征研究。目前,针对厦门市VOCs的相关研究多集中于VOCs污染排放特征及臭氧生成潜势方面,少有针对厦门市具体企业VOCs治理工艺效果及区域性治理效果的评估。空间地理信息系统(geographic information system, GIS)结合区域地理信息,可更有针对性地对各区域VOCs来源及分布等情况进行评估。高爽等^[14]借助GIS对常州市区各类大气污染贡献源进行了分析,结果表明工业污染是常州市区最主要的大气污染源,主要污染行业为热电厂和钢铁厂,交通污染次之。黄络萍^[15]借助GIS平台对成都市工业源VOCs空间分布特征进行了研究,得出了工业源、溶剂使用源、工艺过程源、化石燃烧源、生物质燃烧源等的相关空间分布及相关地区排放贡献率。

本研究以厦门市8大重点监测行业的企业为代表,通过企业实地调研,实地设备检测等方式,得到VOCs治理设备参数和去除率,进而相关对治理工艺的去除效果进行了评估。同时,运用空间地理信息系统(GIS)将VOCs去除率、排风口VOCs浓度等企业实测参数在地图上进行可视化呈现,据此对厦门市VOCs治理情况进行区域性评价,并与治理工艺的特点相结合进行分析,提出针对不同治理工艺的应用建议,以期为厦门市各重点监测行业的VOCs治理技术选用策略提供参考。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

综合考虑所调研行政区各行业占比、企业VOCs排放量、国家行业规范以及各级政府管理文件的具体要求,本研究选取厦门市地区8个VOCs重点监测行业(汽车维修、工业涂装、印刷、橡胶、化工、工艺品、制鞋业、船舶维修)的370家典型工业企业共计439套设备为研究对象,进行了3个阶段的调查(各行业企业数占比如图1所示)。图1数据表明,汽车维修、印刷、化工、橡胶制造4个行业为此次调查所涉及到的主要行业,相关企业分布在厦门全市6个辖区(思明区、湖里区、集美区、海沧区、同安区、翔安区),涉及区域广、VOCs排放占比高。

1.2 研究方法

1) 数据获取方法。本次调查数据来自于厦门市8大行业VOCs调研,通过实地调研对企业相关处理设备参数(活性炭填装量及更换周期、紫外灯管功率及安装数目、催化剂种类等)进行收集;通过实地检测,对企业设备进出口风量、进出口相关物质浓度(VOCs、苯、甲苯、二甲苯)等进行测量和记录。采用HJ 732-2014《固定污染源废气挥发性有机物的采样气袋法》^[16]、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》^[17]及HJ 584-2010《环境空气苯系物的测定活性炭吸附/二硫化碳解吸-气相色谱法》^[18]对废气进行收集与检测,符合国家相关检测方法规定。

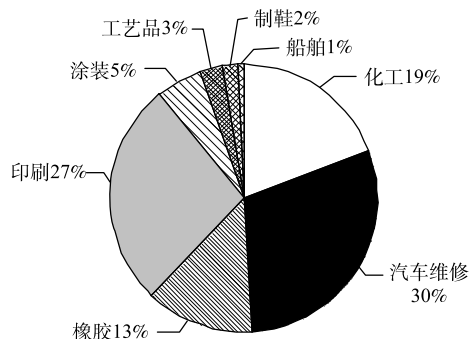


图1 厦门市8大行业企业数量占比图

Fig. 1 Proportion of different industries in Xiamen

2)VOCs 治理工艺实际效果评估方法。工业 VOCs 治理工艺的去除率(η)根据式(1)计算得到。

$$\eta = \frac{C_1 \times Q_1 - C_2 \times Q_2}{C_1 \times Q_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中： C_1 、 C_2 分别为治理前、后 VOCs 浓度， $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； Q_1 、 Q_2 分别为治理前、后采样口在分析状态下的气体流量， $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ；根据式(1)可计算出各治理工艺对 VOCs 的去除率。将苯系物进出口浓度带入 C_1 、 C_2 ，根据式(1)可计算各治理工艺对苯、甲苯、二甲苯等苯系物的去除率。

3) 基于 GIS 平台的治理效果评估方法。运用 ArcGIS 软件将受调查企业标注在厦门市地图上，并按照行业、设备去除率、出口 VOCs 浓度进行分类，不同梯度采用不同颜色的点进行标注(部分企业存在多套相同工艺设备，需将对应参数取平均值后再进行分类标注)，得到相关参数的区域分布图，结合区域图对 VOCs 的治理效果进行区域性评估。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 排放企业分析

根据国民经济行业分类梳理 8 大行业的细分情况、各子行业排放源及各行业 VOCs 产生量，结果如表 1 所示。由表 1 可见，各种有机化学原料、橡胶、活性剂、黏合剂等原辅材料被广泛使

表 1 行业划分及 VOCs 产生量情况

Table 1 Industry classification and VOCs production

行业大类	行业子类	排放源	企业数量/ 家	平均VOCs 产生量/($\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)
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	8	
	涂料、油墨、颜料及类似产品制造	油墨、油漆、炭黑、染料和印染	10	
	合成材料制造	合成橡胶、丙烯腈、乙二醇、涤纶、涤纶、合成纤维单体、腈纶、丙纶、维纶和黏胶纤维等	36	1 651.0
	专用/其他专用化学品制造	促进剂和黏合剂	5	
	日用化学品制造	合成洗涤剂香料和活性剂	11	
涂装	金属家具涂层	—	3	
	木质家具涂层	—	6	
	金属制品业	—	7	1 479.9
	机械设备制造	设备和机床防腐、卷材、其他涂料和装配用胶黏剂	6	
橡胶	橡胶制品制造	橡胶制品	24	
	其他橡胶制品制造	橡胶制品	11	64.6
	橡胶和塑料制品业	人造革和合成革	13	
印刷	装订及印刷相关服务	装订用胶黏剂	15	
	包装装潢及其他印刷	油墨印刷润版液和稀释剂	85	5 158.1
汽修	汽车喷涂	轿车、汽车(大车)和摩托车修补涂料	111	344.1
工艺品	雕塑工艺品制造	油漆、固化剂和天那水	2	
	金属工艺品制造	油漆、固化剂和天那水	2	1.3
	其他工艺品制造	油漆、固化剂和天那水	7	
船舶维修	船舶改装与维修	船舶涂料	2	14.2
制鞋业	橡胶鞋制造	胶黏剂	1	
	皮鞋制造	胶黏剂	5	67.5

用，印刷、化工及涂装行业大量使用粘合剂、稀释剂等高 VOCs 产生量的原辅材料，导致这些行业 VOCs 产生量较大 ($>1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$)，其中印刷行业 VOCs 产生量最大，达到 $5\ 158.1\ \text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ，其余行业的 VOCs 产生量较低。

厦门市 8 大行业企业地理位置分布情况如图 2 所示。由图 2 可见，本次调查企业广泛分布于厦门市 6 个区 (海沧区、集美区、同安区、翔安区、湖里区、思明区)，其中岛外区域企业数量远多于岛内区域。岛外区域主要以印刷、化工、涂装等高 VOCs 产生量 ($>1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$) 行业为主。岛内区域主要以汽车、船舶维修等低 VOCs 产生量 ($<1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$) 的服务类行业为主，基本不涉及印刷、化工、涂装等行业，这与厦门市辖区规划和产业布局有关。由于岛内地理位置靠近海域且辖区面积较小，岛内产业主要以旅游、软件、电子以及服务类行业为主，岛外则以大规模的工业企业为主，所以 VOCs 产生量及排放量也呈现出岛外 $>$ 岛内的特点。

2.2 各类 VOCs 废气治理工艺的应用情况

各类 VOCs 治理工艺在厦门市 8 大行业中的应用情况如图 3 所示。由图 3 可见，从工艺组合上看，多数企业采用单一 VOCs 治理技术，占调研企业的 59.5%，采用组合式 VOCs 治理技术的企业占被调研企业总数的 40.5%。从治理技术的使用分布上看，UV 光解 (包含 UV 光解和 UV 光催化) 及其相关组合工艺应用最广，共有 304 套处理系统，占总数的 69.2%，涉及行业主要为汽修、印刷、化工和橡胶；其次为活性炭吸附工艺，共有 75 套处理系统，占总数的 17.1%，其中采用含蜂窝活性炭的处理系统有 125 套，含颗粒活性炭吸附的处理系统有 24 套，含纤维活性炭的有 18 套，涉及行业主要为印刷、化工和汽修；燃烧类工艺 (包括直接燃烧、蓄热燃烧、沸石吸附+蓄热燃烧和活性炭/沸石+催化燃烧工艺) 在本次调研企业中也有有一定比例的应用，共计 32 套设备，占总数的 7.3%，涉及行业主要为化工、汽修和涂装；另有个别企业采用除上述工艺的其他工艺，因数量较少，将其归为其他类工艺进行分析。

2.3 不同治理技术的处理效果及影响因素

2.3.1 对 VOCs 的去除率

6 类处理技术的 VOCs 去除率如图 4 所示。在处理的稳定性方面，与活性炭吸附及 UV 光解有关的工艺 VOCs 去除率波动较大，去除率的标准偏差也较大，其中“UV 光解+活性炭”工艺的标准偏差最大。其可能原因有 3 点：1) 不同行业存在原辅材料、生产工艺和现场环境等方面的差异，故采用同一治理工艺，去除效果也有差异；2) 活性炭吸附及其组合工艺存在活性炭相关参数和更

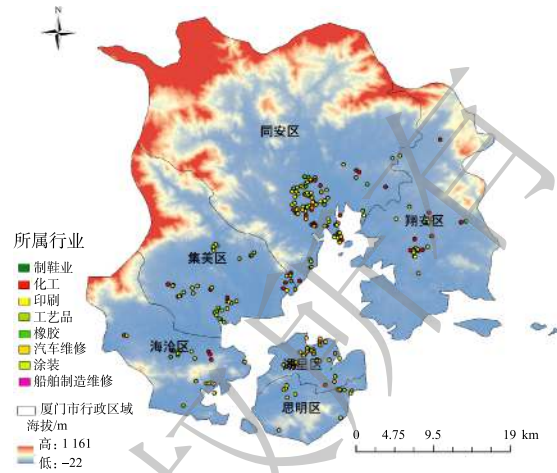
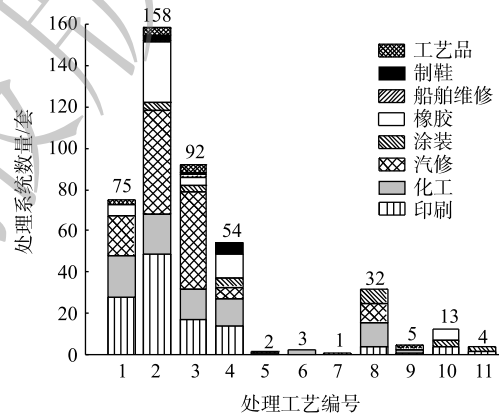


图 2 行业地理位置分布图

Fig. 2 Geographical location of the industries



注: 1-活性炭吸附; 2-UV光解工艺; 3-UV光解+活性炭; 4-等离子+UV光解; 5-直接燃烧; 6-蓄热燃烧; 7-沸石吸附+蓄热燃烧; 8-活性炭/沸石+催化燃烧; 9-冷凝回收法; 10-低温等离子; 11-生物法。

图 3 各类 VOCs 废气处理工艺的应用情况

Fig. 3 Application of VOCs waste gas treatment technologies

换周期差异问题；3)UV光解及相关组合工艺的处理效果受紫外灯管品牌和功率差异、催化剂装填量和方式不同等问题影响。

在平均VOCs去除率方面，6类治理工艺在现场实测条件下的平均去除率为68.6%~82.1%，其中燃烧类工艺的平均去除率最高，其次为活性炭吸附工艺。燃烧类工艺中“活性炭/沸石+催化燃烧”工艺的平均去除率达到80.5%，直接燃烧、蓄热燃烧、“沸石吸附+蓄热燃烧”等工艺虽采用企业较少，但平均去除率也均在90%以上；UV光解及其组合工艺平均去除率较低（均低于75%）。其他类工艺中生物法、低温等离子法、冷凝回收法的平均去除率均在70%左右。

不同处理系统在各个行业中的平均处理效率如表2所示。由表2可知，活性炭吸附工艺对工艺品、印刷、汽修行业的平均去除率较高（均高于80%），治理效果较好，但对橡胶行业的平均去除率仅为63.4%，治理效果较差；UV光解及其组合工艺对汽修行业的平均去除率较高（80%左右），但在印刷、化工、橡胶等行业中平均去除率均较低，治理效果差。燃烧类工艺在各行业处理效果均较好（高于75%），其中在印刷、化工行业处理效果最好，平均处理率均在80%以上。其他类工艺在各行业中发平均去除率为61.2%~74%，处理效果相对较差。

表2 不同处理工艺在各行业的处理效果

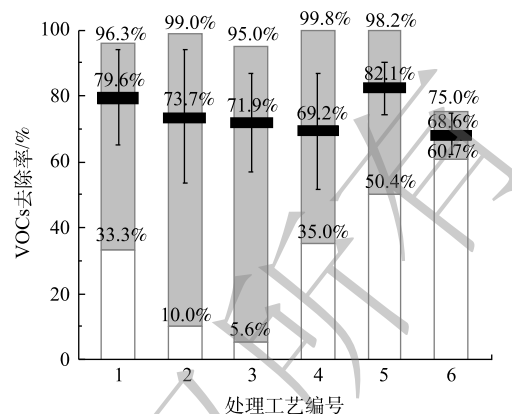
Table 2 Treatment efficiency of process in various industries

处理工艺	各行业VOCs平均去除率/%							
	印刷	化工	汽修	涂装	橡胶	船舶维修	制鞋	工艺品
活性炭吸附	83.0	78.0	85.3	—	63.4	—	—	92.5
UV光解工艺	69.2	75.3	81.6	72.5	69.2	53.1	83.1	67.4
UV光解+活性炭	60.0	70.9	79.0	77.0	72.0	62.3	52.6	76.5
等离子+UV光解	75.4	70.3	92.9	72.5	53.7	—	57.0	—
燃烧类工艺	92.1	81.4	76.1	77.2	—	—	—	—
其他工艺	61.2	72.4	—	74.0	72.3	—	—	63.0

2.3.2 对苯系物的去除效果

甲苯、二甲苯属于苯的同系物，都是煤焦油分馏或石油的裂解产物^[19]。苯系化合物已被世界卫生组织确定为强烈致癌物质^[20]。由于本次调查涉及大量汽修以及印刷行业企业，部分涂装行业企业，其中含苯系物的油漆、涂料和防水材料的溶剂或稀释剂被广泛使用，故将苯系物去除率也作为VOCs去除效果评定指标。

5种处理工艺的苯系物去除率如图5所示。5种工艺中，燃烧类工艺对苯系物的去除率最高，对苯、甲苯、二甲苯的平均去除率分别达到93.6%、86.9%、87.6%；其次是活性炭吸附工艺，对苯、甲苯、二甲苯的平均去除率分别为83.8%、76.8%、82.5%；“UV光解+活性炭联用”工艺，因为与活性炭工艺联用，去除率有一定的提升，高于UV光解及“等离子+UV光解”工艺，但整体UV光



注: 1.活性炭吸附;2.UV光解技术;3.UV光解+活性炭;4.等离子+UV光解;5.燃烧类技术;6.其他类技术。
柱状图顶部数字表示最大去除效率,底部数字表示最小去除效率,中间数字表示平均去除效率。

图4 不同处理工艺的VOCs去除率

Fig. 4 VOCs removal rate of different treatment technologies

解及其组合工艺对苯系物去除率较低。

2.3.3 对 VOCs 处理效果的影响因素

1) 进口 VOCs 浓度。各处理工艺在不同进口 VOCs 浓度下的去除率如表 3 所示。由表 3 可见, 进口 VOCs 浓度对各种治理技术的处理效果有较大影响。各工艺 VOCs 去除率均随着进口 VOCs 浓度的升高而增大, 且波动范围变小, 处理效果更加稳定。经分析, 其主要原因为 VOCs 浓度偏低, 影响了吸附反应、化学或光化学反应的速率, 在相同反应时间内, VOCs 的转化速率下降, 从而影响 VOCs 的去除效率。

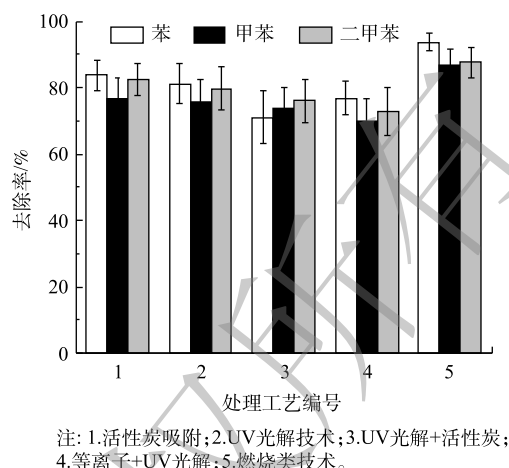


图 5 不同处理工艺的苯系物去除率

Fig. 5 MACHs removal rate of different treatment process

表 3 不同进口 VOCs 浓度下各种处理工艺的处理效果

Table 3 Treatment efficiency of various processes under different VOCs concentrations at the inlet

处理工艺	ρ_1 下的去除率/%			ρ_2 下的去除率/%			ρ_3 下的去除率/%		
	η_{\min}	η_{adv}	η_{\max}	η_{\min}	η_{adv}	η_{\max}	η_{\min}	η_{adv}	η_{\max}
活性炭吸附	33.3	77.6	96.3	86	90.5	95	87.3	91.2	95
UV光解	10	72.6	99	70.5	70.2	85.1	80.6	89	95.2
UV光解+活性炭	5.6	71.4	95	63.9	82.5	92.1	89.6	90.4	90.6
等离子+UV光解	35	67.5	99.1	60.9	80.7	99.8	82.9	82.9	82.9
燃烧类工艺	50.4	77.1	95.3	—	—	—	82.9	91.5	98.2
其他	60.7	68.6	75	—	—	—	—	—	—

注: $\rho_1 \sim \rho_3$ 分别表示 $\rho < 100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \leq \rho < 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $\rho \geq 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; η_{\min} 、 η_{adv} 、 η_{\max} 分别表示最小去除率、平均去除率、最大去除率。

2) 进口风量。各处理工艺在不同进口风量下的 VOCs 去除率如表 4 所示。由表 4 可见, 进口风量对 UV 光解类工艺影响较大, 随着风量的增大, 这类工艺的 VOCs 去除率下降, 且波动变大; UV 光解类工艺在高风量 ($>20\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 条件下对 VOCs 去除率较低。活性炭吸附和燃烧类工艺受风量影响较小, 这 2 类工艺在高风量 ($>20\,000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 条件下, 对 VOCs 仍保持较高的去除率 (高于 80%)。

3) 设计参数选取。对于不同的 VOCs 治理工艺, 要发挥其最佳处理效果, 必须选取合适的设计参数。本次调研的企业中, 大部分处理效率不佳的 VOCs 处理设备均存在设计参数选取不当的问题。如采用活性炭吸附和其组合工艺的企业中, 有 58 家企业的设备不符合《厦门市生态环境局关于加强挥发性有机物污染防治的通告》^[21-23] (后简称“通告”) 中的相关规定。根据规定中的要求, 采用不具备脱附功能的吸附法治理废气时, 每 $10\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 设计风量的吸附剂装填量应不小于 1 m^3 , 否则会出现活性炭装填量不足的现象, 从而导致部分设备 VOCs 去除率偏离正常值。又如采用 UV 光解及其组合工艺的企业中, 有 93 家企业设备使用的紫外灯管在每 $10\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 风量下总功率低于 8 kW , 有 7 家企业设备每 $10\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 风量停留时间不足 1 s , 不符合通告^[21-23] 中“采用光催化氧化法治理废气时, 每 $10\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 设计风量的紫外灯管总功率不得低于 8 kW , 废气停留时间不得低于 1 s ”的相关要求。紫外灯管功率与废气停留时间均不足, 导致 UV 光解类工艺大量设备处理

表4 不同进口风量下各种处理工艺的处理效果

Table 4 Treatment efficiency of various processes under different air volume of inlet

处理工艺	V_1 下的去除率/%			V_2 下的去除率/%		
	η_{\min}	η_{adv}	η_{\max}	η_{\min}	η_{adv}	η_{\max}
活性炭吸附	50.4	80.1	95.6	33.3	80.2	96.3
UV光解	29.1	75.4	99	10	71.9	90.2
UV光解+活性炭	33.1	75.4	95	5.6	68.3	91.6
等离子+UV光解	53	74.9	99.8	35	61.2	97
燃烧类工艺	50.4	80.3	90	57.6	81.5	98.2
其他	—	—	—	60.7	68.6	75

注： V_1 、 V_2 分别表示 $V < 20\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $V \geq 20\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 情况； η_{\min} 、 η_{adv} 、 η_{\max} 分别表示最小去除率、平均去除率、最大去除率。

效率低于理论值。

4) 工艺联用。本次调研企业采用的组合工艺为“UV光解+活性炭工艺”、“等离子+UV光解工艺”、“活性炭/沸石吸附+催化燃烧工艺”和“沸石吸附+蓄热燃烧工艺”。不同治理工艺的联用，可在反应上相互促进，能在提高处理VOCs去除率的同时节省能耗，如燃烧类工艺(催化燃烧、蓄热燃烧)与活性炭、沸石等吸附工艺联用，将大风量、低浓度的有机废气被浓缩成小风量、高浓度的废气后再进行燃烧处理，大大提升了工艺的VOCs去除率、热量的利用效率和对工况条件的适应性。其中，“活性炭/沸石吸附+催化燃烧”工艺利用燃烧余热对吸附饱和的活性炭进行脱附，不仅促进了热量循环，也在一定程度上克服了由于活性炭性质差异、更换周期过长以及填料不足所带来的负面影响。而本次调查中UV光解相关组合工艺去除率低于UV光解工艺，其可能原因有：①UV光解工艺本身存在设计参数选取和治理设施维护问题，导致部分设备VOCs去除率低于正常值；②与活性炭工艺联用中，部分设备活性炭装填量不足或更换周期过长，导致活性炭吸附效果较差，甚至出现脱附现象；③等离子体工艺中，等离子体产生量少而实际有效反应区的风速过大、停留时间过短，无法有效净化VOCs^[24]。

5) 治理设施维护。不同VOCs治理技术要达到稳定的处理效果，都需要做好维护工作，但因缺少专业人员维护和节约成本等原因，本次调研的企业中普遍存在日常管理及维护问题。采用活性炭吸附相关工艺的企业中，有57%的企业活性炭更换周期超过3个月，部分企业更换周期超过12个月，存在活性炭更换不及时的现象。活性炭吸附过程同时也是吸附和解离相平衡的过程，当活性炭吸附饱和时，就会出现脱附大于吸附的现象^[25]。这样的设备运行时会因为吸附饱和活性炭的脱附现象导致VOCs的去除率降低，甚至出现处理后VOCs浓度高于处理前的现象。部分采用UV光解类工艺的企业紫外灯管损坏维修不及时，设备无法达到设计功率，故导致VOCs去除率偏低。

2.4 区域治理效果评估

各企业治理效果的分布情况如图6所示，从处理效果上看，思明区90%以上企业去除率高于80%，50%左右企业去除率高于90%，治理效果最好；其次为湖里区，该区绝大多数企业去除率高于70%，超过70%企业的去除率在80%以上。可见，岛内2个区整体治理效果较好。岛外4个区域中，海沧区去除率在80%~90%与90%~100%区域上的企业最多，处理效果最好，但有部分企业去除率为50%~70%，治理效果差于岛内2区；翔安区80%左右企业去除率在70%~80%，但是中部及北部少数企业处理效率在40%~60%，处理效果一般。集美区与同安区虽有部分企业去除率高于80%，但整体去除率偏低，大量企业去除率分布在50%~70%，同安区中超过40%企业去除率低于70%，在6个区域内治理效果最差。

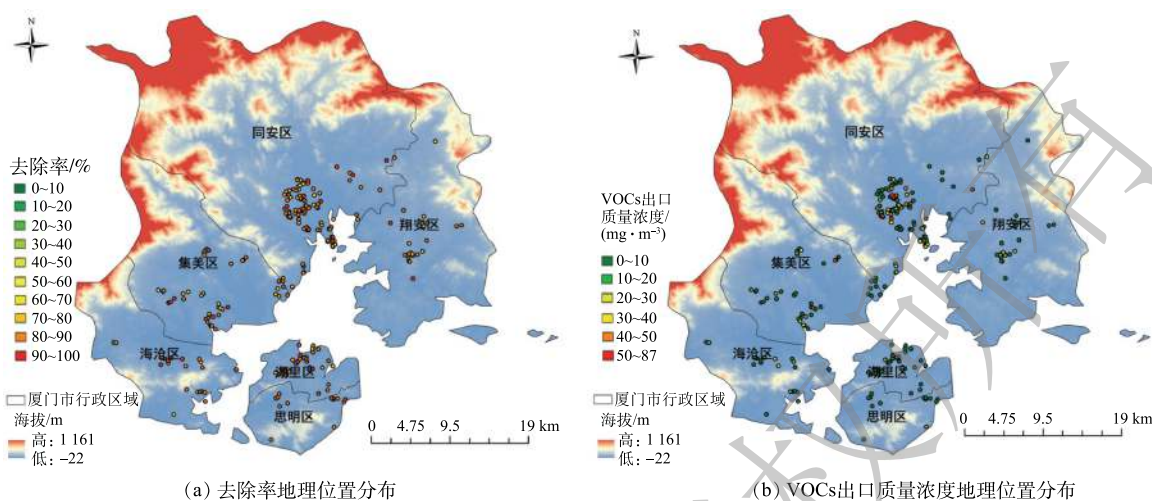


图6 VOCs的区域治理效果图

Fig. 6 VOCs outlet concentrations in the region

从出口 VOCs 浓度来看, 除湖里区某企业出口质量浓度高于 $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 外, 岛内各企业 VOCs 出口质量浓度均低于 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 出口浓度处在较低水平。在岛外区域, 海沧区有 2 家企业出口质量浓度为 $20\sim 30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 翔安区有 3 家企业出口质量浓度为 $20\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 集美区中有 3 家企业出口质量浓度为 $20\sim 40 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、2 家企业浓度超过 $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 部分企业出口浓度偏高。除这部分企业外, 上述 3 区各企业 VOCs 的出口质量浓度均低于 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。同安区中, 有将近 40% 左右的企业 VOCs 出口浓度高于 $20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 中部地区有大量企业 VOCs 出口质量浓度高于 $50 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 甚至出现了 $87 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高质量浓度值。该区整体 VOCs 出口质量浓度处于较高水平。综上所述, 对厦门市域各行政区 8 大 VOCs 重点监测行业的企业整体治理效果排序为: 思明区>湖里区>海沧区>翔安区>集美区>同安区。

2.5 VOCs 废气治理技术的应用建议

1) 在使用活性炭工艺处理 VOCs 废气时, 应确保活性炭填装量符合通告规定的标准, 并在活性炭达到吸附饱和时及时进行更换。

2) 在应用 UV 光解及其组合工艺时, 应确保紫外灯管总功率和废气停留时间符合通告中的相应技术规范。当处理苯系物含量较高的 VOCs 废气时, 建议用活性炭吸附工艺进行替代或联用, 以确保对苯系物的高效去除。光催化工艺中的催化剂优先考虑蜂窝陶瓷负载的光催化剂。

3) 在应用燃烧类工艺处理低浓度废气时, 应优先考虑通过吸附方式进行浓缩后再燃烧。直接燃烧能耗相对较高, 但净化更为彻底。蓄热燃烧可降低能源消耗。“活性炭/沸石+催化燃烧”工艺可在一定程度上避免因活性炭所导致的问题, 对工况适应性较强, 但当废气中含有硫、硅和卤素等易使催化剂中毒的物质时, 应优先考虑直接燃烧、蓄热燃烧等燃烧类工艺。

4) 生物法、冷凝回收法、低温等离子等 3 种工艺的处理效率较低, 但也具有低成本的优点, 可视具体情况应用于低 VOCs 排放企业。

5) 由于同安区、集美区、翔安区中印刷、化工等高 VOCs 产生量企业较多, 整体治理效果较差, 因此在今后应加强这 3 个区域的治理, 且不建议同安区、翔安区、集美区、海沧区等高 VOCs 产生量 ($>1000 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$) 与高进口风量 ($>20000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) 的企业使用 UV 光解及其组合工艺, 建议以燃烧类工艺进行替代。

3 结论

1) 本次调查的 6 类治理工艺中, 燃烧类工艺对 VOCs 处理效果最好, 平均去除率为 82.1%; 活

性炭吸附类工艺在工艺品、印刷、汽修行业的治理效果较好,但在橡胶行业治理效果较差;UV光解类工艺VOCs处理效果最差,但这类治理工艺在汽修行业具有较好的治理效果。

2) 燃烧类工艺对苯系物去除率最高,对苯、甲苯、二甲苯的平均去除率分别为93.6%、86.9%、87.6%,其次是活性炭吸附工艺,UV光解及其组合工艺对苯系物去除率较低。

3) UV光解及其组合工艺、活性炭吸附工艺在设计参数选取和治理设施维护中存在问题,导致UV光解及其组合工艺的整体去除效果较差。活性炭吸附工艺部分设备去除率低于正常值。在今后的废气治理中,应充分考虑各类影响因素,选择合适的处理技术,并应做好设备日常维护。

4) 对厦门市VOCs 8大行业所进行的区域治理效果评估表明,厦门市各区的VOCs治理效果的排序为,思明区>湖里区>海沧区>翔安区>集美区>同安区。

参考文献

- [1] 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.
- [2] LING Z H, GUO H. Contribution of VOC sources to photochemical ozone formation and its control policy implication in HongKong[J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, 38: 180-191.
- [3] DURKEE B. Chemistry of Atmospheric reactions of VOCs leading to smog-cleaning with solvents[J]. *Cleaning with Solvents*, 2014, 14: 547-556.
- [4] 王佳颖, 曾乐薇, 张维昊, 等. 北京市夏季臭氧特征及臭氧污染日成因分析[J]. *地球化学*, 2019, 48(3): 293-302.
- [5] 罗恢泓, 袁自冰, 郑君瑜, 等. 上海夏季臭氧生成机制时空变化特征及其影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(1): 154-168.
- [6] 韩畅, 吴宇峰, 董海燕, 等. 天津滨海新区大气VOCs组成及光化学活性分析[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(7): 28-32.
- [7] JO W K, SONG K B. Exposure to volatile organic compounds for individuals with occupations associated with potential exposure to motor vehicle exhaust and/or gasoline vapor emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 269(1): 25-37.
- [8] 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.
- [9] ZHENG C H, SHEN J L, ZHANG Y X, et al. Quantitative assessment of industrial VOC emissions in China: Historical trend, spatial distribution, uncertainties, and projection[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 150: 116-125.
- [10] DENG J J, DU K, WANG K, et al. Long-term atmospheric visibility trend in Southeast China, 1973-2010[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 59: 11-21.
- [11] NIU Z C, ZHANG H, XU Y, et al. Pollution characteristics of volatile organic compounds in the atmosphere of Haicang District in Xiamen City, Southeast China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14(4): 1144-1151.
- [12] 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.
- [13] 王坚. 厦门市VOCs排放特征及光化学反应特征研究[J]. *环境工程*, 2015, 33(7): 105-108.
- [14] 高爽, 祝栋林, 杨新宇. 基于GIS的常州市区大气污染排放清单分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(6): 241-246.
- [15] 黄络萍. 基于GIS平台的成都市工业源VOCs空间分布特征[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [16] 国家环境保护局. 固定污染源废气挥发性有机物的采样气袋法: HJ 732-2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [17] 国家环境保护局. 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: HJ 734-2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- [18] 国家环境保护局. 环境空气苯系物的测定活性炭吸附/二硫化碳解吸-气相色谱法: HJ 584-2010[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [19] BERANJIAN A, CHAN N, MALMIRI H J. Volatile organic compounds removal methods: A review[J]. *American Journal of*

Biochemistry and Biotechnology, 2012, 4(8): 220-229.

[20] 史德, 苏广和. 室内空气质量对人体健康的影响[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.

[21] 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(第一阶段)的通告[EB/OL]. [2020-04-07]. 2016. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20160927/776218.shtml>.

[22] 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(第二阶段)的通告[EB/OL]. [2020-04-07]. 2018. http://www.xm.gov.cn/zfxxgk/xxgkznm/szfgz/bmgfwj/201802/t20180211_1848899.htm.

[23] 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]. [2020-06-01]. 2018. http://www.xm.gov.cn/zfxxgk/xxgkznm/szfgz/bmgfwj/201807/t20180706_2018644.htm.

[24] 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.

[25] 栾志强, 郝郑平, 王喜芹. 工业固定源VOCs治理工艺分析评估[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 19-29.

(责任编辑: 靳炜)

Evaluation of industrial VOCs treatment techniques and regional treatment effect in Xiamen

JIN Yuezheng¹, JIN Lei¹, WU Yicheng¹, GAO Panfeng¹, LIU Jianfu¹, SU Guoxin², ZHUANG Mazhan³, FU Haiyan^{1,*}

1. Key Laboratory of Environmental Biotechnology, Fujian Province University, School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China

2. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361100, China

3. Xiamen Academy of Environmental Sciences, Xiamen 361006, China

*Corresponding author, E-mail: fuh@xmut.edu.cn

Abstract 370 enterprises (439 waste gas treatment systems) in 8 industries subject to intensive monitoring in Xiamen were selected to investigate the application of VOCs treatment technique in different industries and the actual VOCs removal effect. The effect of VOCs treatment in Xiamen regionally was evaluated based on a GIS platform. Results show that the average removal rates of VOCs by 6 treatment processes, i.e. activated carbon adsorption, UV photolysis, UV photolysis+activated carbon, plasma+UV photolysis, combustion process and other processes (cryogenic plasma, condensation recovery and biological process) were 79.6%, 73.7%, 71.9%, 69.2%, 82.1% and 68.6%, respectively. Combustion process has the highest removal rate of Monoaromatic Hydrocarbons(MACHs), followed by adsorption of activated carbon process, and UV photolysis and its associated processes. UV photolysis and its associated processes have problems in equipment management and selection of process and the overall treatment effect is poor. However, the process is suitable for the treatment of low concentration waste gas, e.g. the removal rate is high (about 80%) in the automobile repair industry. Combustion process and activated carbon adsorption process have good treatment effect. Combustion process has high VOCs removal rate and strong adaptability to different working conditions. It can be used for the treatment of high concentration of waste gas under high VOCs production ($>1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$) and high inlet air volume ($>20\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$). Although the treatment efficiency of other processes is not high, they can still be used because of its low cost. The regional treatment effect of 8 industry enterprises subject to intensive monitoring of VOCs decreases in the order of Siming District, Huli District, Haicang District, Xiang'an District, Jimei District, and Tong'an District.

Keywords volatile organic compounds (VOCs); treatment techniques; treatment efficiency; geographic information system (GIS); effect evaluation