

青岛市工业源 VOCs 治理技术应用及环境治理成本分析

李瑞芃, 和 慧, 邵 蕊, 吕建华, 付 飞
(青岛市环境保护科学研究院, 青岛 266003)

摘要: 文章分析了各行业 VOCs 治理技术应用现状及环境治理成本情况, 针对青岛市橡胶和塑料制品业、金属制品业、化学原料和化学制品制造业、汽车制造业等 8 个重点行业开展了 VOCs 治理现状进行调查研究。结果表明: 青岛市橡胶和塑料制品业、金属制品业在企业数量及 VOCs 排放量均占优势, 属本地特色行业; 化学原料和化学制品制造业、汽车制造业虽然企业数量较少但 VOCs 排放量占比较高。青岛市目前应用最多的治理技术为光解/光催化, 主要应用于橡胶和塑料制品业; 冷凝、生物降解技术对废气成分及处理条件有一定要求, 导致应用相对受限; RTO、RCO 技术运行稳定且处理效率高, 但治理成本也较高。青岛市应加快推进低挥发性有机物含量原辅料和产品替代工作, 从源头削减 VOCs 排放, 同时建设区域共享喷涂中心、注塑中心等, 集中采用 RCO、RTO 设备进行废气处理, 缓解部分企业单独处理高浓度、低排放量、非连续的有机废气而导致的经济压力。

关键词: 工业源; VOCs 治理技术; 环境治理成本; 青岛市
中图分类号: X511 **文献标志码:** A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022050011

Analysis of application of industrial VOCs treatment technologies and environmental treatment costs in Qingdao

LI RuiPeng, HE Hui, SHAO Rui, LYU Jianhua, FU Fei
(Qingdao Research Academy of Environmental Sciences, Qingdao 266003, China)

Abstract: The current situation of VOCs treatment technology application and environmental treatment costs for various industries in Qingdao are investigated, including rubber and plastic products, metal products, chemical raw materials and chemical products manufacturing, automobile manufacturing, etc. The results show that the rubber and plastic products industry and metal products industry in Qingdao are dominant in the number of enterprises and VOCs emissions, which are local characteristic industries. Although the number of enterprises in chemical raw material and chemical product manufacturing and automobile manufacturing is small, the proportion of VOCs emissions is relatively high. At present, the most widely used treatment technology is photolysis/photocatalysis, which is mainly used in the rubber and plastic products industry. Condensation and biodegradation technologies have certain requirements on exhaust gas components and treatment conditions with a limited applicability. RTO and RCO are operated stably and both of them have a high processing efficiency. However, the cost of governance is high. It is recommended to accelerate the replacement of raw materials with low volatile organic contents, and reduce VOCs emissions from the source. In addition, regional shared spraying centers and injection molding centers using RCO and RTO equipment for waste gas treatment, should be built to alleviate the economic pressure for some enterprises dealing with high-concentration, low-emission, and discontinuous organic waste gas alone.

Keywords: industrial source; VOCs treatment technology; environmental treatment cost; Qingdao
CLC number: X511

当前我国正全面开展臭氧(O₃)污染治理攻坚, 挥发性有机物(VOCs)作为 O₃ 和细颗粒物(PM_{2.5})的共同前体物^[1-6], 其污染防治已成为“十四五”重

点治理目标。工业源是人为源 VOCs 最主要来源类之一, 根据中国生态环境统计年报^[7], 全国 VOCs 年排放量为 610.2 万吨, 工业源排放占比最高, 为

收稿日期: 2022-05-11 录用日期: 2022-06-27

基金项目: 青岛市科技惠民示范引导专项(20-3-4-1-nsh)

作者简介: 李瑞芃(1986-), 女, 博士。研究方向: 大气污染防治。E-mail: lrp1226@163.com

通信作者: 吕建华(1982-), 女, 博士。研究方向: 大气污染源清单编制及污染控制研究。E-mail: sallylv1982@163.com

引用格式: 李瑞芃, 和 慧, 邵 蕊, 等. 青岛市工业源 VOCs 治理技术应用及环境治理成本分析[J]. 环境保护科学, 2023, 49(1): 110-116.

35.6%。近年来,生态环境部先后发布《重点行业挥发性有机物综合治理方案》《关于加快解决当前挥发性有机物治理突出问题的通知》等文件,要求强化 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制,推动环境空气质量持续改善和“十四五”VOCs 减排目标顺利完成,而青岛市也按照国家、省有关部署积极部署持续开展了 VOCs 污染治理工作并取得较大成效,包括完成重点行业 VOCs 治理项目及工业源 VOCs 排放清单编制^[8-9],开展重点区域 VOCs 走航监测和 VOCs 重点排放企业监督性监测等^[10-12]。

目前,工业源 VOCs 治理工作主要从源头、过程、末端 3 个方面开展,即通过低挥发性有机物原辅料替代、生产过程中的废气有效收集、有组织废气末端治理的方式减少 VOCs 排放^[13-17]。其中针对工业源 VOCs 治理技术相关研究已有许多^[18-22],但在青岛本地实际工作中也发现,部分企业仍然存在 VOCs 治理措施不完善,治理设施运行情况和治理效果不明确等现象,无法有效、准确评估企业 VOCs 治理现状。因此,本研究拟在青岛市 VOCs 治理相关研究成果基础上,对涉及有机化工、表面涂装和包装印刷等重点行业 VOCs 治理现状进行调查研究,分析各行业 VOCs 治理技术应用情况及环境治理成本,深化“十四五”期间青岛本地工业源 VOCs 污染治理工作,遏制 O₃ 污染态势,改善青岛市环境空气质量。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

根据青岛市工业企业环境统计信息及大气源清单等已有数据资料,选取了对青岛本地工业源 VOCs 排放占比较高的 8 个重点行业开展相关研究,分别为橡胶和塑料制品业、金属制品业、化学原料和化学制品制造业、汽车制造业、通用/专用设备制造业、铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业、印刷和记录媒介复制业、家具制造业,收集相关基础资料企业数量 700 家。涉及 VOCs 治理技术包括吸附法、吸收法、冷凝法、蓄热式催化燃烧(RCO)、蓄热式热力焚烧(RTO)、生物法、光解/光催化和低温等离子。补充监测企业 56 家,涵盖以上重点行业及 VOCs 治理技术,重点监测分析 VOCs 治理设施进口、出口废气样品以核实该治理技术实际去除效率。

1.2 研究方法

1.2.1 基础数据获取 本研究中针对重点行业企业开展的调研和资料收集主要包括:(1)源头控制情况,VOCs 排放主要来自含 VOCs 原辅材料的使用,使用环保型、低 VOCs 含量原辅料可以在从源头减少 VOCs 排放;(2)生产过程管理情况,包括企业生产管理流程是否完善并符合相关安全环保要求、在保证产品质量的前提下是否采用先进生产工艺以提高原辅料利用效率,是否采取高效的废气收集方式以减少无组织排放等;(3)末端治理情况,包括企业 VOCs 治理设施建设运行情况、治理设施前后有无规范的采样口可开展 VOCs 废气的采集和监测、相应治理技术是否存在二次污染风险以及二次污染物是否正确处置等;(4)企业监测情况,目前青岛市部分重点企业已安装 VOCs 在线监测设备并联网,如企业自行开展监测或管理部门开展过监督性监测,也可以最新监测报告作为参考;(5)企业目前针对 VOCs 治理的资金投入、运行维护费用、能源消耗情况和设备使用年限等信息,以综合评估其治理技术环境及经济效益。

1.2.2 VOCs 治理设施去除率 依据青岛市工业企业 VOCs 末端治理技术应用情况,在企业已有监督性监测结果基础上,从每个行业里选取 5~8 家采用不同 VOCs 治理技术的企业开展补充监测,采集 VOCs 治理设施进、出口样品,计算相应治理工艺实际去除率 p , 见式(1):

$$p = \frac{E_1 \times Q_1 - E_2 \times Q_2}{E_1 \times Q_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为治理设施进、出口 VOCs 浓度, mg/m³; Q_1 、 Q_2 分别为治理设施进、出口气体流量, m³/h, 若治理设施进、出口流量相同,公式可简化为式(2):

$$p = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (2)$$

1.2.3 环境治理成本核算 企业环境治理成本从实际治理成本和虚拟治理成本 2 个方面进行核算:企业的实际治理成本是按照一般工业行业污染物去除率去除污染物所发生的治理成本,企业的虚拟治理成本是对企业排放到环境中的污染物按照现有的去除水平进行完全治理的成本^[23-25]。计算见式(3~5):

$$Cs = E \times p \times c \quad (3)$$

$$Cx = E \times (1 - p) \times c \quad (4)$$

$$Ct = Cs + Cx \quad (5)$$

式中: Cs 为实际治理成本, 元; Cx 为虚拟治理成本, 元; E 为污染物产生量, t ; c 为污染物单位治理成本, 元/ t ; p 为污染物去除率, %; Ct 为环境治理成本, 元。

2 结果与讨论

2.1 重点行业 VOCs 排放情况

本研究涉及各行业企业数量分布情况, 见表 1。

表 1 重点行业企业数量分布及 VOCs 排放量占比情况
Table 1 Distribution of enterprises in key industries and proportion of VOCs emissions

行业	企业数量 占比/%	VOCs排放量 占比/%
橡胶和塑料制品业	29	26
金属制品业	15	26
化学原料和化学制品制造业	4	14
汽车制造业	6	13
通用/专用设备制造业	24	8
铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	4	7
印刷和记录媒介复制业	10	4
家具制造业	8	2

表 1 中, 企业数量较多的行业为橡胶和塑料制品业(29%)、通用/专用设备制造业(24%), 合计数量占比一半以上。另根据 2020 年青岛市工业源清单结果, 全市工业源 VOCs 排放总量约为 1.5 万吨, 本研究中八类重点行业 VOCs 排放量占全市工业源总量 75%, 约为 1.1 万吨, 各行业 VOCs 排放占比情况见表 1, 其中排放量最高的为橡胶和塑料制品业(26%)和金属制品业(26%), 其次是化学原料和化学制品制造业(14%)、汽车制造业(13%)。

综合各重点行业企业数量及 VOCs 排放量占比情况可知, 青岛市橡胶和塑料制品业、金属制品业在企业数量及 VOCs 排放量均占优势, 属本地特色产业; 化学原料和化学制品制造业、汽车制造业虽然企业数量较少, 但 VOCs 排放量占比较高, 应重点关注其行业减排及污染治理情况; 此外通用/专用设备制造业企业数量也较多, 但 VOCs 排放量占比相对较低, 部分企业或工序不涉及 VOCs 排放。

2.2 低 VOCs 含量原辅料替代情况

按照山东省及青岛市“十四五”生态环境保护

规划、深入打好蓝天保卫战行动计划等文件要求, 低 VOCs 含量原辅料替代是“十四五”期间工业源 VOCs 深度治理重点任务之一。本研究涉及重点行业中, 橡胶和塑料制品业、化学原料和化学制品制造业排放的 VOCs 主要来自生产工艺过程中原辅料成分挥发或各类化学反应释放, 其他行业 VOCs 主要来自涂料、油墨、稀释剂和清洗剂等有机溶剂的使用, 其低 VOCs 含量原辅料与传统溶剂型原辅料合计年用量占比变化情况, 见表 2; 各行业用量占比情况, 见表 3。

表 2 低 VOCs 含量原辅料替代进展
Table 2 Development of replacement of raw materials with low VOCs

t/a	含 VOCs 原辅料使用占比/%	
	传统溶剂型	水性及其他低挥发性
2019	64	36
2020	57	43

表 3 重点行业低 VOCs 含量原辅料使用情况 (2020 年)
Table 3 Utilization of raw materials with low VOCs in key industries (2020)

行业	含 VOCs 原辅料使用占比/%	
	传统溶剂型	水性及其他低挥发性
金属制品业	53	47
汽车制造业	58	42
通用/专用设备制造业	80	20
铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	68	32
印刷和记录媒介复制业	49	51
家具制造业	26	74

从年际变化可知, 青岛市重点行业低 VOCs 含量原辅料替代比例由 2019 年的 36% 增长为到 2020 年的 43%, 源头替代工作初见成效。其中家具制造业低 VOCs 含量原辅料使用占比最高, 为 74%, 其次是印刷和记录媒介复制业、金属制品业和汽车制造业, 分别为 51%、47% 和 42%, 而通用/专用设备制造业低 VOCs 含量原辅料使用占比最低, 为 20%。源头替代工作的推进不仅需要原辅料使用企业提升生产工艺和设备, 更依赖于整个工业生产体系的技术升级和产品优化, 但部分低 VOCs 含量原

辅料暂时无法满足一些特殊产品的涂装及使用需求,一些生产工艺也有待进一步改进提升,源头替代工作仍有较大改进空间。

2.3 主要 VOCs 治理技术应用情况

VOCs 末端治理技术可分为回收技术和销毁技术,在青岛市工业企业中均有应用,见表 4 和表 5。

表 4 重点行业主要 VOCs 治理技术应用情况

Table 4 Application of industrial VOCs treatment technologies in key industries

名称	特点	青岛市应用情况	
回收技术	吸附法	设备简单,操作维修方便;进气需要预处理;吸附剂需频繁再生,涉及危废处理;适用于大风量、低温、低湿、中浓度VOCs	主要为组合方式的前端处理设施使用
	吸收法	对吸收剂和吸收设备的要求较高,对有机组分选择性大;适用于处理低温、高湿、中浓度的VOCs	与吸附法等技术联合,或用于其他技术的前处理
	冷凝法	设备及操作简单,可回收有机物,但对冷凝温度要求严格,净化效率不高,需后续再处理;适用于处理高浓度VOCs	多用于有机化工类行业某些特定有机物的回收
销毁技术	RCO	起燃温度低、处理效率高、催化剂成本高,有燃烧爆炸的危险,复杂废气需预处理	广泛应用于表面涂装、印刷、化工行业,前端一般有活性炭吸附脱附或沸石转轮吸附脱附设备
	RTO	处理效率高、运行费用高、可能需要天然气助燃,会产生NO _x 二次污染物	
	直接燃烧	高温条件下直接燃烧VOCs废气,适用于高浓度、高热值废气处理	用于涉及涂装工序的行业,处理高浓度废气
	生物降解	对生物培养条件要求较高,对处理的VOCs组分有特定选择,处理效果不稳定,适合某些特殊行业,不适用于浓度过高的VOCs	目前青岛本地应用较少,可处理某些特定VOCs组分
	光解/光催化	设施简单,运行成本低;对高浓度、大风量废气处理效果不佳,废气需要前处理;催化剂易失活;需定期检查电压、电流、更换灯管	青岛市目前使用最多的设施,但受VOCs成分影响,治理效率变化范围较大,不能确保稳定达标
低温等离子	设备维护简单;投资费用低、运行费用低、能耗低;处理量较小,对电源的要求很高,易产生二次污染	青岛市橡胶和塑料制品行业使用较多,用于处理臭气,对VOCs去除效率不稳定	

表 5 青岛市主要 VOCs 治理技术应用占比情况

Table 5 Proportion of industrial VOCs treatment technologies in Qingdao

治理技术	应用占比/%
光解/光催化	21
吸附法	18
吸附脱附+燃烧	13
光解/光催化+等离子	10
吸附+光解/光催化	9
吸收法	8
直接燃烧	6
冷凝法	4
低温等离子	4
RCO	3
RTO	2
生物降解法	2

回收是通过物理的方法改变温度、压力或采用选择性吸附剂等方法来富集分离有机污染物,包括吸附法、吸收法和冷凝法等;销毁是通过化学或生化反应,采用热、光、催化剂或微生物等将有机污染物转变为 CO₂ 和 H₂O 等无害小分子化合物,包

括燃烧、低温等离子体和光催化、生物降解等。企业在选择 VOCs 治理技术时需综合考虑 VOCs 废气浓度、废气量和废气温度等废气性质和行业排放标准等废气处理要求,以及工程投资费用和运行费用等经济因素,并将 VOCs 废气收集集中处理,避免多个排气筒及无组织排放等现象。

青岛市重点行业 VOCs 废气的复杂性和单一治理技术的局限性决定了部分企业采用单一治理技术难以达到环境管理要求,而利用不同治理技术的优势形成组合工艺可以在一定程度上提高 VOCs 治理效果。目前青岛市应用最多的治理技术为光解/光催化(表 5),一般与吸附法、低温等离子技术等组合使用,从行业分布上来看主要是应用于橡胶和塑料制品业(图 1)。光解/光催化、吸附法、低温等离子等技术应用占比超过 60%,但在本次研究现场监测中发现,此类治理设施受企业生产负荷、VOCs 废气组成和设备运维情况是否良好等因素影响较大,实际去除率偏低。

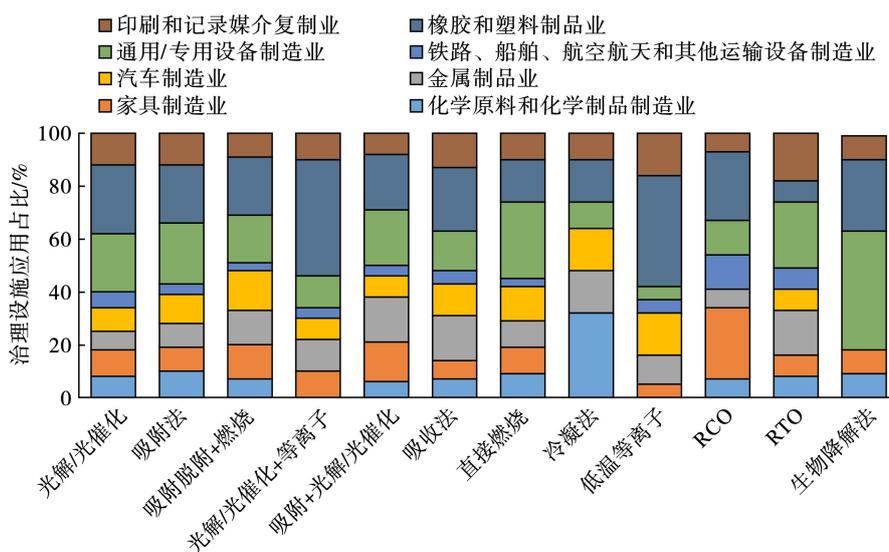


图 1 主要 VOCs 治理技术应用行业分布情况

Fig. 1 Distribution of industrial VOCs treatment technologies in key industries

2018 年以来青岛市涉 VOCs 企业末端治理设施不断升级改造,尤其是涉及有机溶剂使用较多的行业(即 2.2 章节所讨论 6 类行业),逐步将原有吸附、光解等处理方式升级为吸附浓缩+燃烧处理的组合方式,实测去除效率可达 90% 以上。而近年随着国家及省对工业源 VOCs 管控要求的不断强化,橡胶和塑料制品业作为青岛地区特色产业也逐渐开始使用燃烧法进行 VOCs 废气处理,但燃烧设备建设、运行费用较高,且部分小型橡塑企业由于废气量、废气浓度均较小,不适宜燃烧处理,因此这些企业依然使用光解/光催化+吸附或低温等离子等处理方式。

此外,冷凝法主要用于化工类行业处理组分单一、浓度较高废气,可以回收某些特定有机物;而生

物降解法应用最少,主要是由于微生物培养环境较为严格,且对处理的废气选择性较强,实际监测过程中发现其处理效率也偏低。

2.4 主要治理技术环境治理成本分析

综合本次研究实测数据及调研获取资料,利用环境治理成本核算方法计算得到各类治理技术应用企业年均环境治理成本,见表 6。

表 6 中,各企业污染物产生量基于工业源清单核算结果;各类治理技术的去除率基于实测数据,包括企业自行监测、管理部门监督性监测和调研中采样实测;各企业 VOCs 单位治理成本指各企业治理单位质量(t) VOCs 所发生的费用,包括能源消耗、设备运维管理等治理设施运行费及相关费用,主要基于企业调研及相关统计资料。

表 6 主要 VOCs 治理技术年均环境治理成本

Table 6 Annual average environmental treatment costs of industrial VOCs treatment technologies

企业所用主要治理技术	平均去除率/%	年均污染物去除量/t	年均实际治理成本/万元	年均虚拟治理成本/万元	年均环境治理成本/万元
直接燃烧	69	169.78	732.07	327.62	1 059.69
RTO	83	141.31	222.44	45.02	267.46
RCO	90	131.26	279.33	31.04	310.37
冷凝法	47	14.46	32.98	37.38	70.35
光解/光催化	39	9.59	43.88	67.50	111.38
吸收法	57	4.40	76.81	57.94	134.75
生物降解法	52	4.18	87.27	80.55	167.82
吸附法	26	3.79	12.89	35.82	48.71
低温等离子	43	1.46	44.35	57.77	102.12

综合各类主要治理技术在青岛市工业企业中应用效果及环境治理成本可知, RCO、RTO 技术去除率高且效果相对稳定, 但同时环境治理成本也相对较高, 对部分中小规模企业可能会带来一定经济压力, 从经济适用性上可以考虑整合资源、集中处理; 对于实际治理成本相对较低、应用较广的光解/光催化、吸收、吸附和低温等离子等技术, 去除率整体偏低, 虚拟治理成本偏高, 表明对环境存在较大潜在危害, 采用这些类技术的企业应提高治理设施的运维投资, 确保废气收集率、设备运行和处理率稳定达标, 同时进一步强化环境责任和环境风险意识, 提高环境风险防范、环境应急处理等环境行政管理水平; 直接燃烧技术实际治理成本及虚拟治理成本均较高, 其治理效果稳定的同时也存在一定环境风险, 可根据企业实际情况进一步改进升级为 RCO、RTO 等技术, 保证去除率的同时又可降低治理成本。

3 结论

针对青岛市橡胶和塑料制品业、金属制品业、化学原料和化学制品制造业、汽车制造业、通用/专用设备制造业、铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业、印刷和记录媒介复制业、家具制造业 8 个重点行业开展了 VOCs 治理现状进行调查研究, 分析各行业 VOCs 治理技术应用情况及环境治理成本情况如下。

青岛市橡胶和塑料制品业、金属制品业在企业数量及 VOCs 排放量均占优势, 属本地特色行业; 化学原料和化学制品制造业、汽车制造业虽然企业数量较少, 但 VOCs 排放量占比较高; 青岛市目前应用最多的治理技术为光解/光催化, 从行业分布上来看也主要是应用于橡胶和塑料制品业; 冷凝、生物降解等技术对废气成分及处理条件有一定要求, 适用性相对受限; 光解/光催化、吸附法和低温等离子等技术应用占比超过 60%, 这些技术实际治理成本较低但去除率不稳定; RTO、RCO 等技术运行稳定且处理效率高, 但治理成本也较高, 给中小型企业增加一定的经济压力。

综合各类主要治理技术应用效果及环境治理成本, 针对继续深化青岛本地工业源 VOCs 治理工作提出以下建议: (1) 进一步推进涂装、印刷等行业低挥发性有机物含量原辅料和产品替代示范项目

建设, 从源头削减 VOCs 排放; (2) 对于有机化工类行业倡导错峰生产, 改进生产工艺同时加强泄漏检测与修复(LDAR)工作; (3) 加快推进区域共享喷涂中心、注塑中心等建设, 集中采用 RCO、RTO 设备进行废气处理, 缓解中小企业单独处理高浓度、低排放量、非连续的有机废气而导致的经济压力; (4) 针对橡胶和塑料制造等具有一定本地化特色行业继续开展“一行一策”或“一厂一策”研究工作, 探索最适宜本地企业产排污特征的治理措施。

参考文献

- [1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] VARUTBANGKUL V, BRECHTEL F J, BAHREINI R, et al. Hygroscopicity of secondary organic aerosols formed by oxidation of cycloalkenes, monoterpenes, sesquiterpenes, and related compounds[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(9): 2367–2388.
- [3] HALLQUIST M, WENGER J C, BALTENSPERGER U, et al. The formation, properties and impact of secondary organic aerosol; current and emerging issues[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 5155–5236.
- [4] HATFIELD M L, HARTZ K E. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13): 2211–2219.
- [5] LING Z H, GUO H, CHENG H R, et al. Sources of ambient volatile organic compounds and their contributions to photochemical ozone formation at a site in the Pearl River Delta, southern China[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2310–2319.
- [6] SHAO P, AN J L, XIN J Y, et al. Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 176-177: 64–74.
- [7] 生态环境部. 2020 年中国生态环境统计年报 [EB/OL]. 2022-02-18. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t2022018_969391.shtml.
- [8] 薛莲, 徐少才, 孙萌, 等. 气象要素及前体物对青岛市臭氧浓度变化的影响[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(4): 179–185.
- [9] 吕建华, 李瑞芃, 付飞, 等. 青岛市挥发性有机物排放清单及重点行业排放特征研究[J]. *中国环境管理*, 2019, 11(1): 60–66.
- [10] 李瑞芃, 吕建华, 付飞, 等. 青岛市重点工业行业挥发性有机物对二次污染物生成的贡献及健康风险研究[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(2): 87–92.
- [11] 薛莲, 陈晓峰, 方渊, 等. VOCs 走航观测在城市污染源排查中的应用[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(2): 205–213.
- [12] 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 等. 基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 113–125.
- [13] 王迪, 赵文娟, 张玮琦, 等. 溶剂使用源挥发性有机物排放特征

- 与污染控制对策[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(10): 75 – 83.
- [14] 邵弈欣. 典型行业挥发性有机物排放特征及减排潜力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [15] 梁悦, 施雨其, 麦麦提·斯马义, 等. 农药制造企业的挥发性有机物排放特征及控制研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(10): 23 – 33.
- [16] 王松柏. 塑料行业挥发性有机物 VOCs 排放特征及防治策略研究[J]. *生态环境与保护*, 2021, 4(4): 101 – 104.
- [17] 黄冰, 张焱辉, 何明, 等. 工业源 VOCs 污染防治对策案例研究[J]. *环境与可持续发展*, 2021, 46(2): 104 – 108.
- [18] 高宗江, 李成, 郑君瑜, 等. 工业源 VOCs 治理技术效果实测评估[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(6): 994 – 1000.
- [19] 苏伟健, 徐绮坤, 黎碧霞, 等. 工业源重点行业 VOCs 治理技术处理效果的研究[J]. *环境工程*, 2016(s1): 518 – 522.
- [20] 张永明, 邓娟, 梁健. 工业源 VOCs 末端治理技术浅析及减排展望[J]. *环境影响评价*, 2018, 40(2): 62 – 66.
- [21] 陆建海, 董事壁, 李文娟, 等. 浙江省工业涂装 VOCs 治理现状[J]. *环境保护科学*, 2018, 44(1): 117 – 125.
- [22] 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): 130 – 139.
- [23] 闫家鹏. 大气污染治理设施运行成本分析[J]. *黑龙江科技信息*, 2009(28): 217.
- [24] 杨建军, 董小林, 张振文. 城市大气环境治理成本核算及其总量、结构分析——以西安市为例[J]. *环境污染与防治*, 2014, 36(11): 113 – 118.
- [25] 彭菲, 於方, 马国霞, 等. "2+26"城市"散乱污"企业的社会效益和环境治理成本评估[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(12): 1213 – 1219.

(上接第 101 页)

- [20] HE J B, FAN S X, MENG Q Z, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matters in Nanjing, China: distributions, sources and meteorological influences[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 89: 207 – 215.
- [21] 齐文静, 张瑞芹, 姜楠, 等. 洛阳市秋、冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, 42(2): 595 – 603.
- [22] LI J W, LI X D, LI M, et al. Influence of air pollution control devices on the polycyclic aromatic hydrocarbon distribution in flue gas from an ultralow-emission coal-fired power plant[J]. *Energy&Fuels*, 2016, 30(11): 9572 – 9579.
- [23] BRAGATO M, JOSHI K, CARLSON J B, et al. Combustion of coal, bagasse and blends thereof: part II: speciation of PAH emissions[J]. *Fuel*, 2012, 96: 51 – 58.
- [24] GAO Y, JI H B. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons components in fine particle during heavy polluting phase of each season in urban Beijing[J]. *Chemosphere*, 2018, 212: 346 – 357.
- [25] REN Y Q, ZHOU B H, TAO J, et al. Composition and size distribution of airborne particulate PAHs and oxygenated PAHs in two Chinese megacities[J]. *Atmospheric Research*, 2017, 183: 322 – 330.
- [26] MANCILL Y, MENDOZA A, FRASER M P, et al. Organic composition and source apportionment of fine aerosol at Monterrey, Mexico, based on organic markers[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(2): 953 – 970.
- [27] DE L TORRE-ROCHE R J, LEE W Y, CAMPOS-DIAZ S I. Soil-borne polycyclic aromatic hydrocarbons in El Paso, Texas: analysis of a potential problem in the United States/Mexico border region[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2-3): 946 – 958.
- [28] MVILLAR M, LERTXUND M A, MARTINEZ L, et al. Air polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with PM_{2.5} in a North Cantabric coast urban environment[J]. *Chemosphere*, 2014, 99: 233 – 238.
- [29] RAJPUT P, SARIN M M, SHARMA D, et al. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons and isomer ratios as tracers of biomass burning emissions in northern India[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014, 21(8): 5724 – 5729.
- [30] BOUROTTE C, FORTI M, TANIGUCHI S, et al. A wintertime study of PAHs in fine and coarse aerosols in Sao Paulo City, Brazil[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(21): 3799 – 3811.
- [31] KHAN M F, LATIF M T, LIM C H, et al. Seasonal effect and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5}[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 106: 178 – 190.
- [32] 宋光卫, 胡健, 崔猛, 等. 北京市奥林匹克公园 PM_{2.5} 中多环芳烃在采暖季和非采暖季的特征、来源及健康风险评估[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3400 – 3407.
- [33] MA Y, LIU A, EGODAWATTA P, et al. Quantitative assessment of human health risk posed by polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 895 – 904.