

◆新污染物与生态环境安全◆

郑州市重点行业 VOCs 治理效率与减排潜力研究*

孙鹏¹, 罗艺琳¹, 刘洋², 李方³, 付广宇¹, 徐媛倩¹, 曹佳慧¹, 岳利波¹, 曹霞^{1**}

(1. 郑州轻工业大学材料与化学工程学院, 河南郑州 450000; 2. 郑州市生态环境局, 河南郑州 450000; 3. 河南省生态环境厅, 河南郑州 450000)

摘要:为改善大气环境, 深入探索行业减排潜力, 本研究选取郑州市包装印刷、工业涂装、橡胶及塑料制品等重点行业作为研究对象, 对 226 家重点企业的挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 治理现状进行调查, 分析量化其 VOCs 治理效率。结合 5 种 VOCs 治理情景, 进一步估算重点行业 VOCs 减排潜力。调查发现, 重点行业尚未完成涉 VOCs 排放原辅料的源头替代且末端治理技术以紫外线 (UV) 光氧+活性炭吸附、活性炭吸附+催化燃烧、蓄热式燃烧为主, 同时蓄热式燃烧、直接燃烧治理效率相对较高, 平均治理效率均在 85% 以上。研究表明, VOCs 进口浓度是影响治理效率的主要因素, 如催化燃烧技术在处理浓度为 20—160 mg/m³ 的废气时, 浓度越高处理效果越好。在综合各环节治理的情景下, 重点企业的 VOCs 减排潜力最大, 减排率为 62%; 从源头、过程、末端单个环节治理来看, 重点企业更换高效末端治理设施的减排潜力最大, 减排率达 44%, 其次为重点企业维护末端治理设施 (减排率 39%) 和源头替代 (减排率 32%)。综上, 通过源头替代、过程控制、末端治理等方式, 可有效提升郑州市重点行业 VOCs 的治理效率。本研究可为管理部门及企业的 VOCs 精细化管控和减排提供科技支撑。

关键词: VOCs; 治理效率; 减排潜力; 包装印刷; 工业涂装; 橡胶及塑料制品

中图分类号: X823 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)04-0635-10

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20241206.003

自《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施以来, 大气环境 6 项污染因子中除臭氧 (O₃) 呈现污染加重的趋势外, 其余污染均已明显减弱, O₃ 已逐步成为影响环境空气质量的重要

因素^[1]。挥发性有机物 (VOCs) 是 O₃ 的前体物, 在光照下与 NO_x 反应生成 O₃, 减少 VOCs 的排放可以降低 O₃ 污染。一方面, VOCs 种类繁多、来源广泛且成分复杂^[2-4], 导致其治理难度大, 已成为大气环

收稿日期: 2024-06-30 修回日期: 2024-07-31

* 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG202136), 河南省科技攻关项目 (242102320152) 和郑州轻工业大学博士科研基金项目 (2022BSJJZK11) 资助。

【第一作者简介】

孙鹏 (1985—), 男, 高级工程师, 主要从事生态环境保护与污染防治研究。

【**通信作者简介】

曹霞 (1967—), 女, 教授, 主要从事大气环境与污染防治研究, E-mail: 2020003@zzuli.edu.cn。

【引用本文】

孙鹏, 罗艺琳, 刘洋, 等. 郑州市重点行业 VOCs 治理效率与减排潜力研究[J]. 广西科学, 2024, 31(4): 635-644.

SUN P, LUO Y L, LIU Y, et al. Governance Efficiency and Emission Reduction Potential of VOCs from Typical Industries in Zhengzhou [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(4): 635-644.

境管理短板。另一方面,工业涂装、包装印刷、橡胶及塑料制品等行业生产工艺不同,导致 VOCs 排放特征、排放环节多而不同,且涉 VOCs 排放企业的规模及其 VOCs 治理的经济承受能力不同,导致其治理水平也存在较大差异^[5,6],VOCs 治理设施的实际治理效率也因企业管理水平不同而存在差异^[7-12]。例如在缺少具体减排数据指导的情况下,污染减排路径不清,管理部门在制定具体减排措施时会面临诸多问题。因此,掌握重点行业 VOCs 治理现状,摸清现行 VOCs 末端治理技术的实际治理效率,评估 VOCs 减排潜力,是推进 VOCs 精细化管控、制定更合理减排措施的重要基础。

本研究以郑州市重点行业(工业涂装、包装印刷、橡胶及塑料制品等)为研究对象,选取 226 家企业进行实地调研与现场采样,从源头替代、过程控制、末端治理等环节进行治理现状分析,量化不同末端治理技术的实际治理效率,并从行业减排层面设计减排情景,估算重点行业的 VOCs 减排潜力,以期对 VOCs 精细化管控和减排提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究在无疫情防控期间,于 2023 年 5 月至 10 月调研郑州市重点涉 VOCs 排放企业 226 家,其中工业涂装 88 家、包装印刷 47 家、橡胶及塑料制品 91 家,主要调研源头替代(如涉 VOCs 排放的原辅料种类)、过程控制(如废气收集方式)、末端治理(如末端治理技术)等 3 方面内容,具体分析重点行业不同环节 VOCs 污染防治现状并获取企业活动水平。

1.2 研究依据

涉 VOCs 排放的原辅料主要选取工业涂装、包装印刷等企业的涂料、油墨、清洗剂等。废气收集调查主要依据《挥发性有机物无组织排放控制标准》(GB 37822-2019)^[13]、《挥发性有机物治理实用手册(第二版)》^[14]、《重点行业企业挥发性有机物现场检查指南(试行)》^[15]等标准或指南。目前 VOCs 末端治理技术众多,对废气组分、浓度、温度、湿度、风量等因素有不同要求,末端治理调查主要参考《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》(HJ 2026-2013)^[16]、《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》(HJ 1093-2020)^[17]、《催化燃烧法工业有机废

气治理工程技术规范》(HJ 2027-2013)^[18]等技术规范。

1.3 末端治理效率测定

对 226 家重点企业的 VOCs 治理设施进口、出口废气浓度进行采样,共获取 452 个样品。烟气流速、非甲烷总烃浓度分别依据《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157-1996)^[19]和《固定污染源废气总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法》(HJ 38-2017)^[20]测定。采样及分析过程严格执行质量保证和质量控制。

将分析得到的 VOCs 治理设施进口、出口废气浓度与气体流量数据代入公式(1)中,可获得废气净化效率:

$$\mu = \frac{C_1 Q_{sn1} - C_2 Q_{sn2}}{C_1 Q_{sn1}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, μ 代表治理设施[紫外线(UV)光氧+活性炭吸附、活性炭吸附+催化燃烧、蓄热式燃烧等]的净化效率, C_1 、 C_2 分别代表 VOCs 治理设施进口、出口废气浓度, Q_{sn1} 、 Q_{sn2} 分别代表标准状态下 VOCs 治理设施进口、出口干气体流量。

1.4 减排潜力计算

VOCs 减排不仅要考虑单个环节的减排,而且还应考虑多环节相结合的综合减排。根据行业特点及企业调研,从源头替代、过程控制、末端治理等方面优化,并对 5 种减排情景进行分析(表 1)。情景 1 考虑企业进行涉 VOCs 排放的原辅料源头替代后的 VOCs 排放变化,从长远来看,VOCs 减排应强化源头削减,以降低后续处理浓度及处理费用;情景 2 考虑仅对废气收集设备进行维护后的 VOCs 减排量;情景 3 考虑在环保要求加严的情况下,通过维护末端治理设施来提高 VOCs 废气治理效率;情景 4 考虑在较严环保条件下,企业淘汰简易低效及老旧的末端治理技术,更换为高效清洁的末端治理技术来提高治理效率;情景 5 为综合减排情景,在此情景下,企业已经完成涉 VOCs 排放的原辅料源头替代,废气收集设备已维护并且已淘汰简易低效及老旧的末端治理技术,更换高效清洁的末端治理技术并保持良好运行。不同减排情景参数变化主要为涉 VOCs 排放的原辅料源头替代后的排放因子变化、废气收集维护后的收集效率变化、末端治理设施维护或升级后的治理效率变化。

表 1 5 种减排情景

Table 1 Five Emission reduction scenarios

情景 Scenario	治理环节 Governance stage	具体措施 Concrete measure
Scenario 1	Source substitution	Enterprises have completed the replacement of clean and environmentally friendly raw and auxiliary materials
Scenario 2	Gas collection	Maintain gas collection equipment and improve exhaust gas collection rate
Scenario 3	End treatment	All maintain the existing end-of-pipe treatment technology, timely maintenance of treatment facilities, replacement of consumables, etc.
Scenario 4	End treatment	Eliminate simple, inefficient and old governance technologies, and adopt suitable and efficient governance technologies
Scenario 5	Source substitution	Enterprises have completed the replacement of clean and environmentally
	Gas collection	Maintain gas collection equipment and improve exhaust gas collection rate
	End treatment	Eliminate simple, inefficient and old governance technologies, and adopt suitable and efficient governance technologies

采用排放因子法计算 VOCs 排放量,排放因子参考《大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)》^[21]、《城市大气污染物排放清单编制技术手册》^[22]、《城市大气污染源排放清单编制技术指南》^[23]及《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》^[24]中的相关数据。企业排放源活动水平数据来自企业实地调研、台账及大气污染源排放清单系统数据,其中废气收集率计算参考《广东省工业源挥发性有机物减排量核算方法(2023 修订版)》^[25]和柯云婷^[3]的相关研究方法。

2 结果与分析

2.1 重点行业 VOCs 治理现状

2.1.1 源头替代

工业涂装行业使用溶剂型涂料与水性涂料的企业数量比例约为 6 : 4,仍以溶剂型涂料为主,与柯云婷^[3]、宁森等^[26]研究一致。溶剂型涂料及其使用过程中配套的溶剂均含有大量 VOCs 组分,往往对环境及人体健康有害,企业应逐步完成源头替代,调研过程中发现部分涂装企业仅部分工序完成水性涂料替代或部分产品选择水性涂料,如在汽车整车制造业中,底涂、中涂环节水性涂料使用比例较高,但面涂环节则以溶剂型涂料为主。在部分设备制造企业,企业会根据客户需求或气温变化来选择合适的涂料类型。若改用水性涂料,往往需要改造现有生产线且水性涂料干燥速度慢,会导致生产成本上升和生产速率下降,甚至面临未知的产品性能不足等问题。包装印刷行业使用水性等环保型油墨与溶剂型油墨的企业数量比例约为 1 : 1,其中采用瓦楞纸(箱)为承印物

的凸版印刷(柔印)、采用纸张为承印物的本册平版印刷、采用织物为承印物的丝网印刷工艺的企业多数已完成水性油墨替代,而采用塑料薄膜为承印物的凹版印刷、采用铝箔和金属板材为承印物的平版印刷工艺的企业仍以溶剂型油墨为主。橡胶和塑料制品行业原料均含有大量 VOCs 组分,无法进行源头替代。

2.1.2 过程控制

有效收集废气可以减少 VOCs 的无组织排放,是过程控制的关键环节。我国现阶段废气收集设备主要分为全密闭空间、包围型、外部型等类型,其中全密闭空间分为单层密闭负压、单层密闭正压、双层密闭空间。226 家企业的废气收集设备调研结果见图 1(a),从废气收集设备类型来看,采用单层密闭负压和包围型集气设备的企业较多,分别有 93 家(占总数的 41%)和 70 家(占总数的 31%);采用双层密闭空间和单层密闭正压集气设备的企业较少,分别仅占总数的 4%(9 家)和 2%(5 家)。从行业类型来看,工业涂装行业以单层密闭负压收集为主(76 家),行业占比达 86%;包装印刷行业以包围型集气设备为主(19 家),行业占比 40%;橡胶与塑料制品行业以包围型集气设备、外部型集气设备为主,分别为 45 家(行业占比 49%)和 39 家(行业占比 43%);采用全密闭空间集气设备的企业较少。综合行业集气效果,工业涂装行业 > 包装印刷行业 > 橡胶及塑料制品行业。

本次调研企业中,共有 70 家企业采用包围型集气设备,49 家采用外部型集气设备,分别有 25 套(占比 36%)、34 套(占比 69%)设备未达到风速 0.3 m/s 要求[图 1(b)]。其主要原因有:①管道较长。在考虑车间结构及不影响生产的前提下,集气罩连接在

VOCs 产生点的上方, 废气管道需沿着车间上方或墙壁布置, 管道长度和弯曲连接点增加, 导致风量损失较多。某家企业废气收集管道长达 50 m, 风速不足 0.1 m/s。②集气罩连接排气管道过多。部分企业为降低环保成本, 将较多的排气管道连接至同一集气罩而不增加其风量, 进而影响单个集气罩的集气效果。③排气管道破损。排气管道较长、分支较多, 加剧了管道破损的概率。

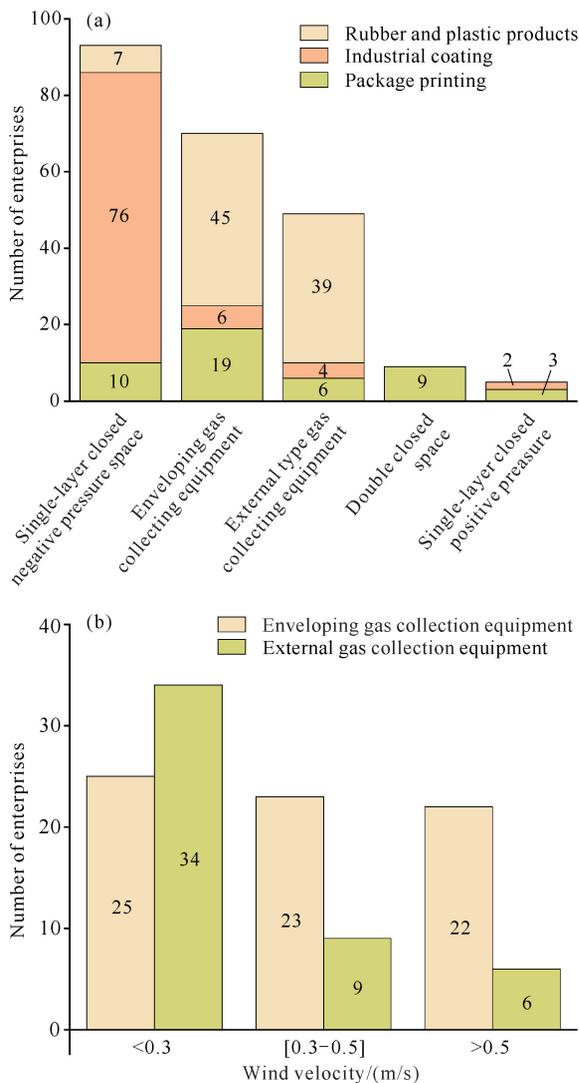


图 1 采用不同废气收集设备及风速的企业数量

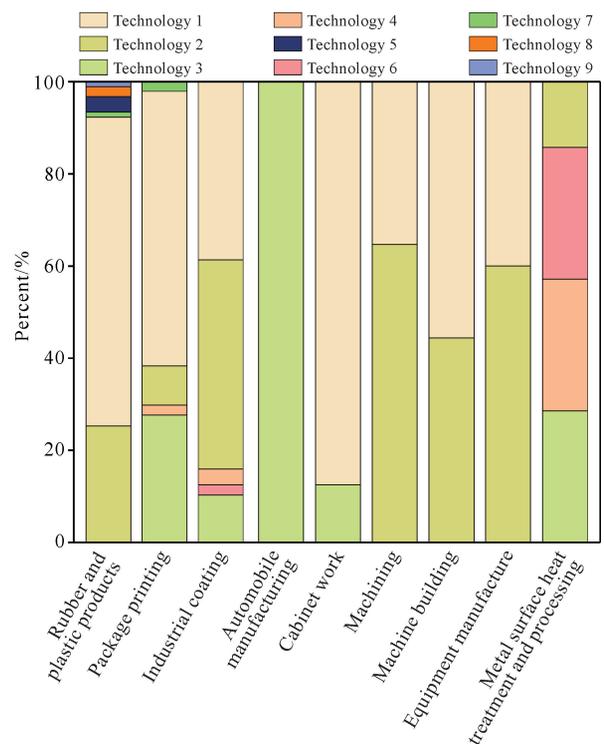
Fig. 1 Number of enterprises adopting different exhaust gas collection equipments and wind velocities

2.1.3 末端治理

涉 VOCs 排放企业应依据排放废气的浓度、组分、气量、温度、湿度及生产工况等, 选择合理的末端治理技术。经现场调查, 大部分企业已完成从简单

一的末端治理工艺(吸附、UV 光氧、喷淋等)升级为高治理效率的组合工艺(UV 光氧+活性炭吸附、吸附浓缩+催化燃烧等)。调研重点企业末端治理技术主要采用 UV 光氧+活性炭吸附、活性炭吸附+催化燃烧、蓄热式燃烧技术, 分别占调研重点企业数量的 54%、30%、10%。

不同行业废气末端治理技术选择有所差异, 不仅需要关注末端治理技术的效率、适用性, 还要考虑经济成本。蓄热式燃烧等燃烧技术的治理效果优于广泛使用的活性炭吸附等传统技术, 但经济成本较高。采用燃烧技术的大多为大中型企业, 而小微企业受限于企业规模与资金不足多选择低成本技术。活性炭吸附、UV 光氧等技术及其组合技术适用范围有限, 不适用于 VOCs 浓度较高、成分复杂的废气^[27]。末端治理技术应用情况如图 2 所示, 工业涂装行业主要使用活性炭吸附+催化燃烧技术, 以大中型机械加工、设备制造企业为代表。汽车整车制造企业规模普



Technologies 1-9 respectively represent UV photo oxidation + activated carbon adsorption, activated carbon adsorption + catalytic combustion, regenerative thermal combustion, regenerative catalytic combustion, low-temperature plasma + activated carbon adsorption, direct combustion, low-temperature plasma + UV photo oxidation, activated carbon adsorption, and low-temperature plasma + UV photo oxidation + activated carbon adsorption.

图 2 不同行业末端治理技术的占比

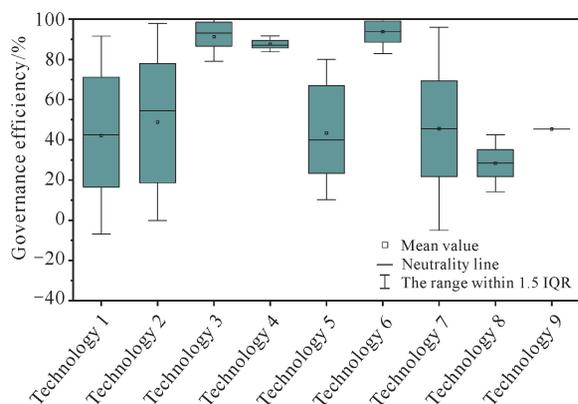
Fig. 2 Proportions of end-of-pipe governance technologies in different industries

遍较大, VOCs 废气具有大风量、中低浓度的特点, 废气治理均采用蓄热式燃烧技术。在金属表面热处理及加工行业中, VOCs 废气温度和浓度较高, 活性炭吸附等技术不再适用, 主要以蓄热式燃烧技术、直接燃烧技术为主。包装印刷行业以 UV 光氧+活性炭吸附技术、蓄热式氧化燃烧技术为主, 占比分别为 60%、28%, 而且所采用的废气处理技术与企业的规模、采用的油墨类型有关, 大型企业、采用溶剂型油墨的企业废气治理采用蓄热式氧化燃烧技术, 中小型企业、采用环保型油墨的企业以 UV 光氧+活性炭吸附技术为主。橡胶塑料制品行业以 UV 光氧+活性炭吸附技术为主。

2.2 末端治理效率分析

2.2.1 治理效率总体情况

在治理效率方面(图 3), 蓄热式燃烧技术、直接燃烧技术治理效率较高, 总体治理效率在 85% 以上, 其中蓄热式氧化燃烧技术、直接燃烧技术治理效率的均值、中位值均在 90% 以上, 略优于蓄热式催化燃烧技术。UV 光氧+活性炭吸附技术、活性炭吸附+催化燃烧技术治理效率范围波动较大, 较不稳定, 治理效率高值均可达 90%, 但低值出现效率负值情况, 波动范围差值分别高达 126%、116%。UV 光氧+活性炭吸附技术、低温等离子+活性炭吸附技术、低温等离子+UV 光氧技术治理效率均值、中位值均为 40% 左右, 单一活性炭吸附技术均值为 28%。



Technologies 1-9 respectively represent UV photo oxidation + activated carbon adsorption, activated carbon adsorption + catalytic combustion, regenerative thermal combustion, regenerative catalytic combustion, low-temperature plasma + activated carbon adsorption, direct combustion, low-temperature plasma + UV photo oxidation, activated carbon adsorption, and low-temperature plasma + UV photo-oxidation + activated carbon adsorption.

图 3 不同治理技术的治理效率

Fig. 3 Governance efficiency of different governance technologies

2.2.2 治理效率影响因素分析

本研究按不同企业排气筒的进口废气浓度大小进行排序, 分析其末端治理效率。将应用最广的 UV 光氧+活性炭吸附技术与活性炭吸附+催化燃烧技术的治理效率, 按企业占比进行统计分析(图 4)。这两种方案的治理效率分布范围较大, 但其主要效率数值范围分布存在不同。UV 光氧+活性炭吸附技术的废气治理效率主要分布在 0% - 10%、40% - 50%、80% - 90% 区间, 占比均在 10% 以上, 其中 40% - 50% 区间企业占比最多; 活性炭吸附+催化燃烧技术的治理效率主要分布在 30% - 40%、50% - 60%、80% - 90% 区间, 占比呈现递增趋势。

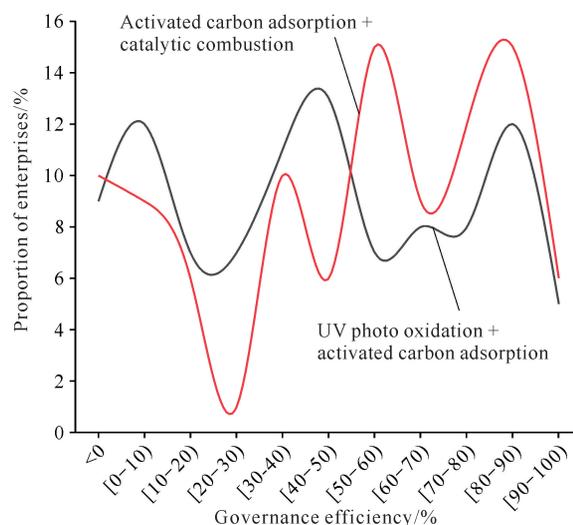


图 4 不同治理效率的 UV 光氧+活性炭吸附技术与活性炭吸附+催化燃烧技术使用企业占比

Fig. 4 Proportion of enterprises using UV photo oxidation + activated carbon adsorption and activated carbon adsorption + catalytic combustion technologies in different governance efficiency

UV 光氧+活性炭吸附技术的废气治理效率在 80% - 90% 区间, 浓度处于 40 - 140 mg/m³ 的废气治理效率随浓度降低而升高, 虽然浓度为 800 mg/m³ 废气的治理效率也能够达到 80%, 但是对于高浓度废气并不推荐使用该技术, 因为这会增加活性炭的更换频次进而增加企业经济负担, 且存在排放超标风险。活性炭吸附+催化燃烧技术治理效率在 50% - 60%、80% - 90% 区间的企业呈现治理效率随进口浓度降低而降低的现象, 废气浓度过高或过低时, 治理效率均会受到不同程度的影响。催化燃烧技术的治理效率均在 85% 以上, 处理废气浓度为 20 - 160 mg/m³, 且呈现废气浓度越高处理效果越好的趋势。蓄热式氧化燃烧技术多集中于中高浓度废气处理, 在

处理浓度高于 500 mg/m^3 的废气时, 治理效率多数可达到 95%, 而在处理浓度小于 100 mg/m^3 的废气时, 则呈现出治理效率随进口浓度降低而降低的现象。

为探究影响 VOCs 治理效率的因素, 选取实测废气排放浓度超标的 13 家企业与部分废气进口浓度较高但未超标的企业(以下称风险企业)进行对比分析, 见图 5、图 6 和图 7。使用 UV 光氧+活性炭吸附技术的排放超标企业及风险企业中, 工业涂装 1(C-1)、包装印刷 4(P-4)企业末端治理设施基本维护到位(治理效率 80%左右), 超标是处理废气浓度过高(大于 800 mg/m^3)所致, 其余废气进口浓度大于 800

mg/m^3 的企业均选用蓄热燃烧技术进行处理。工业涂装 5(C-5)、包装印刷 8(P-8)企业均采用环保型涂料/油墨, 废气进口浓度均在 100 mg/m^3 左右, 而废气治理设施治理效率不足 45%。风险企业工业涂装 H(C-H)、工业涂装 J(C-J)、包装印刷 K(P-K)、包装印刷 L(P-L)和包装印刷 N(P-N)的废气进口浓度与工业涂装 5(C-5)、包装印刷 8(P-8)的废气进口浓度相近, 治理效率最小值大于 70%。这表明工业涂装、包装印刷企业即使完成环保型涂料/油墨替换工作, 也要保持治理设施的高效运行, 才能有效避免超标排放。

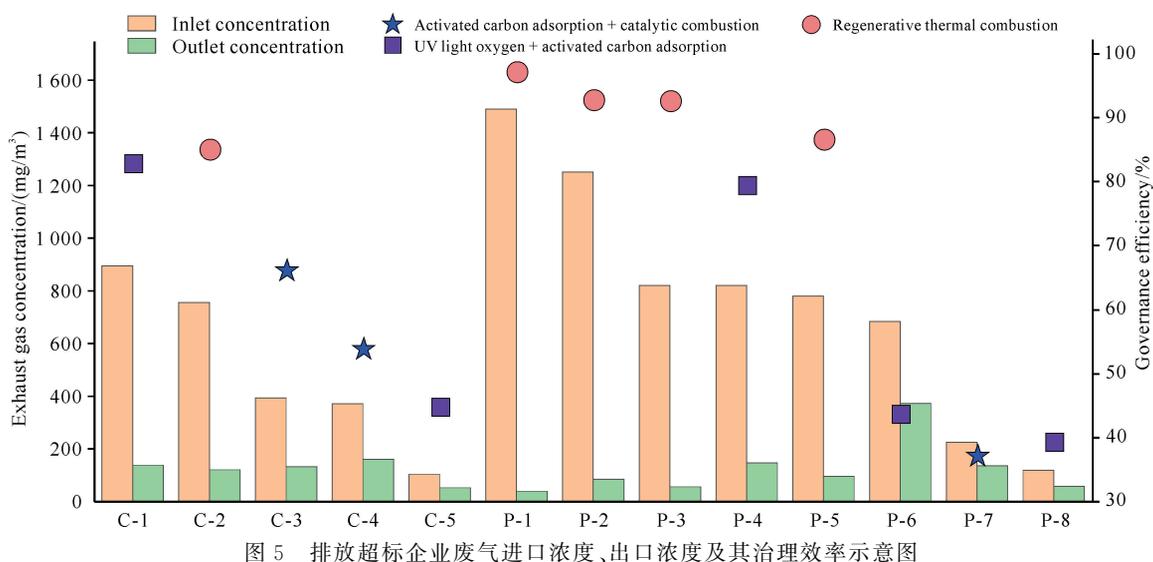


图 5 排放超标企业废气进口浓度、出口浓度及其治理效率示意图

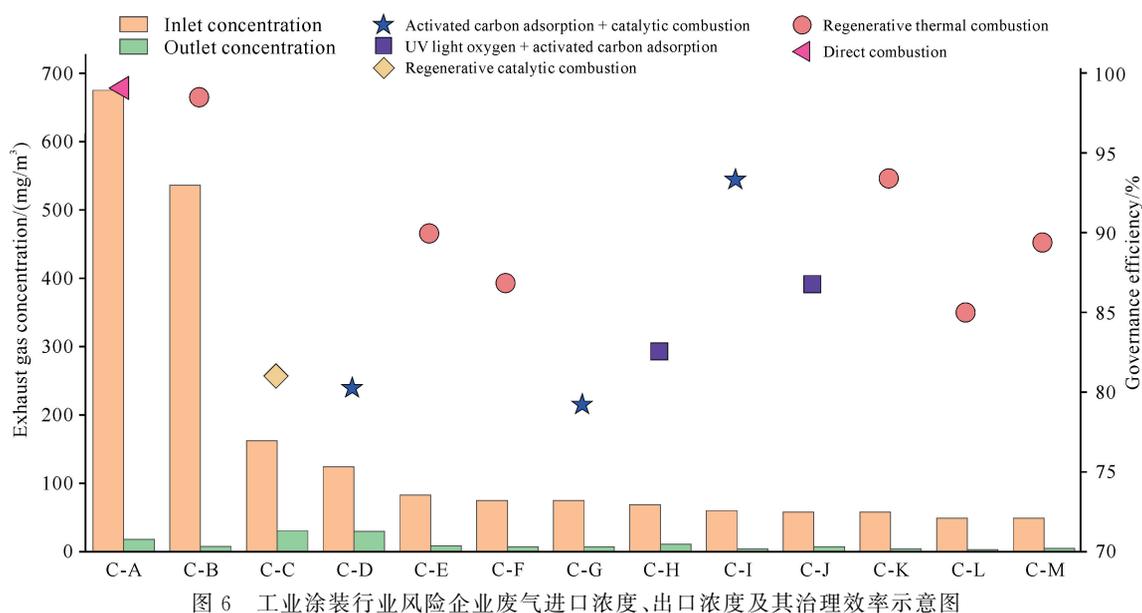


图 6 工业涂装行业风险企业废气进口浓度、出口浓度及其治理效率示意图

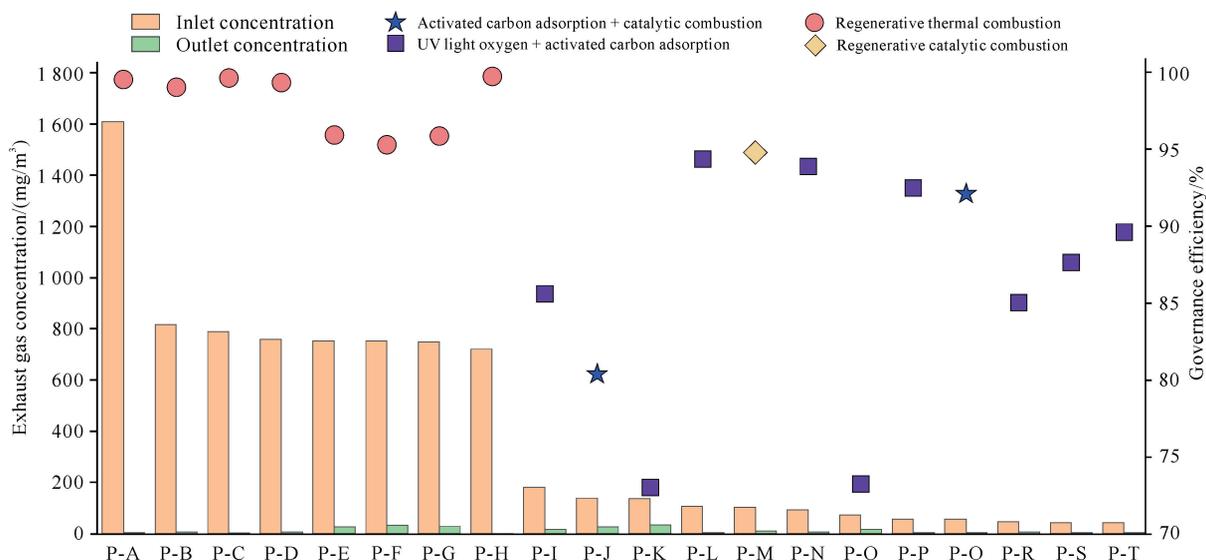


图7 包装印刷行业风险企业废气进口浓度、出口浓度及其治理效率示意图

Fig. 7 Inlet and outlet concentrations and governance efficiency of risk enterprises in package printing industry

使用蓄热燃烧技术的排放超标企业及风险企业中,工业涂装 2(C-2)、包装印刷 3(P-3)、包装印刷 5(P-5)废气处理浓度均在 800 mg/m^3 左右,治理效率分别为 85%、92%、87%,低于应达到的 95% 的治理效率。包装印刷 1(P-1)企业废气进口浓度 1490 mg/m^3 ,治理设施治理效率达 97%,高于应达到的 95% 的治理效率,但依旧出现废气排放浓度超标现象。包装印刷 A(P-A)企业废气进口浓度 1610 mg/m^3 ,治理设施治理效率达 99%,虽其废气进口浓度高于包装印刷 1(P-1),但排放未超标。由此可见,在处理高浓度废气时,对蓄热燃烧技术治理效率要求较高,这表明使用溶剂型涂料/油墨且废气排放量大的企业,在选择蓄热燃烧技术时要充分考虑其自身排放特点,合理设计各项参数,同时也要进行源头削减,避免超标排放。

2.3 重点行业减排潜力分析

郑州市重点行业现阶段 VOCs 排放总量为 8 734 t,其中工业涂装、包装印刷、橡胶及塑料制品行业分别为 6 110、1 189、1 435 t。通过分情景展开减排潜力分析(图 8),情景 5 减排潜力最大,重点行业共减排 5 422 t,减排率 62%;其次为情景 4,重点行业共减排 3 855 t,减排率 44%;情景 3 减排潜力与情景 4 较为相近,共减排 3 404 t,减排率 39%,可见,企业治理设施均维护到位且高效运行,使用广泛的 UV 光氧+活性炭吸附技术与活性炭吸附+催化燃烧技术等高效末端治理技术并没有太大差距,且现阶段 VOCs 排放量较大的企业已基本已更换为活性炭吸附+催化燃烧技术;情景 1 中重点行业共减排 2 818

t,减排率 32%;情景 2 减排潜力最小,重点行业仅减排 252 t。

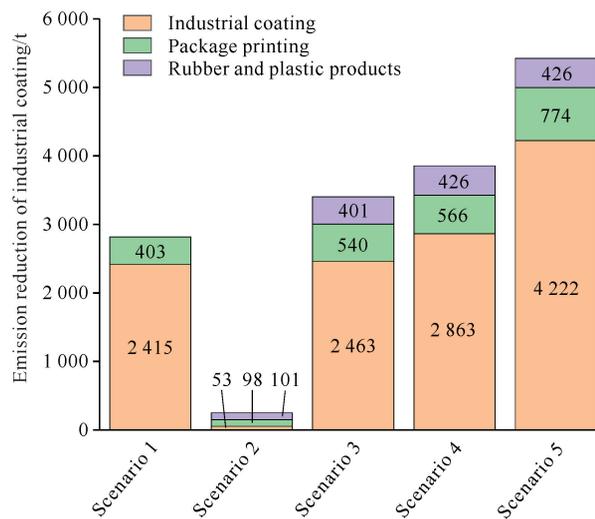


图8 重点行业不同减排情景下的减排潜力

Fig. 8 Emission reduction potential of key industries in different emission reduction scenarios

3 讨论

将不同治理技术实测治理效率与相关研究进行对比,发现柯云婷^[3]研究中的 UV 光氧+活性炭吸附技术治理效率波动也较大,且出现效率负值情况,与本研究相似。在高宗江等^[28]研究中,其治理效率范围在 4%—67%,与本研究低值情况相近。本研究的蓄热式氧化燃烧技术治理效率与柯云婷^[3]的研究相同,平均治理效率为 92%,低于张永明等^[29]研究(平均治理效率为 96%),治理效率最大值均达 99%。低

温等离子+活性炭吸附技术、活性炭吸附技术在本研究平均治理效率中均低于柯云婷^[3]、张永明等^[29]研究,可能的原因是相关企业治理设施维护相对较差,导致效率偏低。同时,调研发现,现阶段还未进行治理设备升级的多为小微企业,确实存在使用单一低效治理技术的现象,不符合环保要求。

从源头替代、过程控制、末端治理3方面开展5种减排情景分析,情景5综合考虑了各个环节的优点,减排潜力最大;情景2仅考虑提高废气收集率,减排潜力最小,主要由于排放量较大的工业涂装和包装印刷行业大部分已采用全密闭方式进行废气收集,收集效率较高。另外采用局部密闭方式收集废气的企业由于企业规模不大,VOCs产生量较小,通过维护后废气收集率提升,因此总体减排量无较大变化。工业涂装、包装印刷行业与重点行业整体减排趋势相一致,由情景2的减排率不足10%提升至情景5的62%。而橡胶及塑料制品行业在情景5中减排率也低于30%,由于其无法进行源头替代,与工业涂装、包装印刷行业相比占比会被拉低。

4 结论

通过对郑州市重点行业(工业涂装、包装印刷、橡胶及塑料制品等)的226家重点企业现场调研与采样,分析发现:①重点行业尚未完成涉VOCs排放原辅料的源头替代,VOCs污染源头控制进展缓慢;②36%的包围型和69%的外部型集气设备集气罩控制风速未达到0.3 m/s的标准要求,存在废气收集不到位的问题;③末端治理以UV光氧+活性炭吸附、活性炭吸附+催化燃烧、蓄热式燃烧等末端治理技术为主,分别占54%、30%、10%;④蓄热式燃烧、直接燃烧等技术治理效率相对较高,平均治理效率均在85%以上;⑤VOCs进口浓度是影响治理效率的主要因素,如催化燃烧技术处理浓度在20—160 mg/m³的废气时,浓度越高处理效果越好;⑥在5种减排情景下,综合各环节治理情景的情景5减排潜力最大,减排率为62%。从源头替代、过程控制、末端治理单个环节来看,更换高效末端治理设施的减排潜力最大,减排率达44%,其次为维护末端治理设施(减排率39%)、源头替代(减排率32%)。综上,企业VOCs治理在源头、过程及末端等阶段都有减排空间,需加快涉VOCs排放原辅料的源头替代并加强VOCs废气收集、治理设施等方面的技改与维护,进一步提高VOCs精细化管理水平和治理能力。

参考文献

- [1] 严刚,薛文博,雷宇,等.我国臭氧污染形势分析及防控对策建议[J].环境保护,2020,48(15):15-19.
- [2] 曹小聪,吴晓晨,徐文帅,等.三亚市大气VOCs污染特征、臭氧生成潜势及来源解析[J].环境科学研究,2021,34(8):1812-1824.
- [3] 柯云婷.溶剂使用行业挥发性有机物排放特征及控制技术[D].广州:华南理工大学,2020.
- [4] 朱新志.江苏省工业源挥发性有机物排放清单及减排潜力研究[D].南京:南京大学,2021.
- [5] YOU G Y, LIU H F, SUN R, et al. Characterizing VOCs emissions of five packaging and printing enterprises in China and the emission reduction potential of this industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 138445.
- [6] WANG H, SUN S, NIE L, et al. A review of whole-process control of industrial volatile organic compounds in China [J]. 环境科学学报:英文版, 2023(1):127-139.
- [7] PAN Z, WANG Y, REN J Z, et al. Volatile organic compounds pollution control technologies: past, current and future analysis based on patent text mining and technology life cycle analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379:134760.
- [8] 吴文璐,单春艳,赵菁林,等.济南市典型行业VOCs排放特征及减排潜力分析[J].环境科学,2023,44(11):5924-5932.
- [9] 齐一谨,倪经纬,赵东旭,等.邢台市典型行业VOCs排放特征研究[J].环境科学研究,2021,34(10):2339-2349.
- [10] 陆建海,董壁,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):113-117,121.
- [11] 王力明,彭燕坤,王宝成,等.北京市家具制造业涉VOCs原辅料调查研究[J].中国资源综合利用,2022,40(3):78-82.
- [12] 王丽娟,邵霞,宁森,等.重点工业涂装行业VOCs减排路径与潜力评估[J].环境科学研究,2023,36(5):866-874.
- [13] 中华人民共和国生态环境部,国家市场监督管理总局.挥发性有机物无组织排放控制标准:GB 37822—2019[S].北京:中国环境出版集团,2019.
- [14] 生态环境部大气环境司,生态环境部环境规划院.挥发性有机物治理实用手册[M].2版.北京:中国环境出版集团,2021:71-258.
- [15] 生态环境部生态环境执法局,生态环境部环境工程评估中心.重点行业企业挥发性有机物现场检查指南(试行)[M].北京:中国环境出版集团,2020:22-63.

- [16] 中华人民共和国环境保护部. 吸附法工业有机废气治理工程技术规范: HJ 2026-2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范: HJ 1093-2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [18] 中华人民共和国环境保护部. 催化燃烧法工业有机废气治理工程技术规范: HJ 2027-2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [19] 国家环境保护局. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法: GB/T 16157-1996[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 固定污染源废气总烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法: HJ 38-2017[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- [21] 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]. [2024-06-29]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>.
- [22] 贺克斌. 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: 80-142.
- [23] 中国环境科学学会. 城市大气污染源排放清单编制技术指南: T/CSES 144-2024[EB/OL]. [2024-06-29]. http://www.chinaces.org/xw/gsgg/202406/t20240619_1076206.shtml.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 排放源统计调查产排污核算方法和系数手册[EB/OL]. [2024-06-29]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202106/W020210624327149500026.pdf>.
- [25] 广东省生态环境厅. 广东省工业源挥发性有机物减排量核算方法(2023 修订版)[EB/OL]. [2024-06-29]. <https://sthjj.gz.gov.cn/attachment/7/7636/7636603/9764673.pdf>.
- [26] 宁森, 邵霞, 刘杰, 等. 对构建工业涂装 VOC 全过程管控体系的系统思考[J]. 涂料工业, 2017, 47(12): 42-47, 52.
- [27] 武宁. 河南省典型行业 VOCs 排放控制技术体系与成本-效益研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [28] 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.
- [29] 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): 46-50.

Governance Efficiency and Emission Reduction Potential of VOCs from Typical Industries in Zhengzhou

SUN Peng¹, LUO Yilin¹, LIU Yang², LI Fang³, FU Guangyu¹, XU Yuanqian¹, CAO Jiahui¹, YUE Libo¹, CAO Xia^{1**}

(1. College of Materials and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan, 450000, China; 2. Bureau of Ecology and Environment of Zhengzhou, Zhengzhou, Henan, 450000, China; 3. Department of Ecology and Environment of Henan Province, Zhengzhou, Henan, 450000, China)

Abstract: In order to improve the atmospheric environment and explore the emission reduction potential of industries, this study selected key industries such as package printing, industrial coating, and rubber and plastic products in Zhengzhou as research objects. The current governance situations of Volatile Organic Compounds (VOCs) in 226 key enterprises were investigated, and their VOCs governance efficiency was analyzed. Furthermore, the emission reduction potential for VOCs was estimated in five treatment scenarios. The results indicated that source substitution of raw and auxiliary materials with VOCs content had not been completed in key industries, and end-of-pipe treatments mainly comprised ultraviolet (UV) photo oxidation + activated carbon adsorption, activated carbon adsorption + catalytic combustion, and regenerative thermal combustion. Regenerative thermal combustion and direct combustion had high governance efficiency, with the means over 85%. The inlet concentration of VOCs was the main factor affecting the governance efficiency. When catalytic

combustion technology is used to treat exhaust gas with a concentration of $20-160 \text{ mg/m}^3$, the higher the concentration, the better the treatment effect. Among the five emission reduction scenarios, the comprehensive scenario considering all stages exhibited the highest emission reduction potential, achieving a reduction rate of 62%. Regarding the emission reduction potential of individual governance stages, replacing high efficiency treatment facilities at the end-of-pipe stage had the strongest potential, achieving a reduction rate of 44%, followed by end-of-pipe maintenance (39%) and source substitution (32%). In summary, the governance efficiency of VOCs in key industries in Zhengzhou is effectively enhanced by source substitution, process control, and end treatment. This study provides scientific and technological support for the management departments and enterprises in the precise treatment and emission reduction of VOCs.

Key words: VOCs; governance efficiency; emission reduction potential; package printing; industrial coating; rubber and plastic products

责任编辑:米慧芝,南旭



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>