

石化企业 VOCs 治理设施碳排放核算及案例分析

郝慧敏¹, 段淮超², 陈军³, 朱文帝¹, 王永强¹, 沙莎⁴, 买里旦·莫塔里甫⁵, 赵东风^{1*}

(1. 中国石油大学(华东)化学化工学院, 山东 青岛 266580; 2. 青岛欧赛斯环境与安全技术有限责任公司, 山东 青岛 266555; 3. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司, 宁夏 银川 750411; 4. 生态环境部环境工程评估中心石化轻纺评估部, 北京 100012; 5. 欧赛斯(新疆)科技发展有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 基于生命周期理论, 构建了石化企业 VOCs 治理设施碳排放核算体系。案例分析显示, 某炼化企业全厂 VOCs 治理年碳排放约为 1.3 万 tCO₂。从排放结构看, 电力消耗是主要碳排放源, 占比 71.71%; 从处理系统看, 污水处理系统碳排放占比高达 79.67%。不同治理技术的碳排放强度差异显著: 焚烧法最高 (50~160 tCO₂/tVOCs), 物理法次之 (低于 40 tCO₂/tVOCs), 生物法最低 (2~6 tCO₂/tVOCs)。该研究为石化行业实现 VOCs 治理的减污降碳协同增效提供了量化依据。

关键词: 石化企业; VOCs 治理设施; 碳排放; 减污降碳

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0013-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.003

Carbon emission accounting and case analysis of VOCs control facilities in petrochemical enterprises

XI Hui-min¹, DUAN Wei-chao², CHEN Jun³, ZHU Wen-di¹, WANG Yong-qiang¹,
SHA Sha⁴, MAILIDAN·Motalifu⁵, ZHAO Dong-feng^{1*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Qingdao Oasis Environmental and Safety Technology Co., Ltd., Qingdao 266555, China; 3. Coal-to-oil Branch of Ningxia Coal Industry Co., Ltd., National Energy Group, Yinchuan 750411, China; 4. Review Division of Petrochemical and Light Industry Projects, Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 5. Oasis (Xinjiang) Science and Technology Development Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the life cycle theory, a carbon emission accounting system for VOCs treatment facilities in petrochemical enterprises was established. The case study shows that the annual carbon emissions from the VOCs treatment of refining and chemical enterprise are approximately 13 000 tCO₂. From the perspective of emission structure, electricity consumption is the main source of carbon emissions, accounting for 71.71%; from the perspective of treatment systems, the carbon emissions from the wastewater treatment system account for as high as 79.67%. The carbon emission intensities of different treatment technologies vary significantly: incineration has the highest (50–160 tCO₂/tVOCs), followed by physical methods (less than 40 tCO₂/tVOCs), and biological methods have the lowest (2–6 tCO₂/tVOCs). This study provides a quantitative basis for achieving the synergy of pollution reduction and carbon emission reduction in VOCs treatment in the petrochemical industry.

Key words: petrochemical enterprises; VOCs control facilities; carbon emissions; pollution reduction and carbon mitigation

全球气候变化加剧背景下, 国际社会对减污降碳协同增效的共识持续深化^[1]。《巴黎协定》确立全球温控目标后, VOCs 作为臭氧、PM_{2.5} 前体物及部分温室气体的双重属性, 成为国际协同治理重点^[2]。

“十四五”时期是我国生态文明建设的关键阶

段, 其核心战略方向聚焦于以降碳为重点, 着力推动减污降碳协同增效, 旨在促进经济社会发展全面绿色转型^[3]。为落实这一战略目标, 国家层面相继出台了一系列重要的政策文件。2021年7月, 生态环境部发文要求在环评中纳入碳排放分析, 并基于最小碳排放原则比选治污方案^[4]。2022年6月, 生

收稿日期: 2025-10-09; 修回日期: 2026-03-24

基金项目: 2024年自治区自然科学基金青年科学基金项目(2024D01B10)

作者简介: 郝慧敏(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向为石化企业绿色低碳技术, xihuimin1@163.com; 赵东风(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为化工安全、环保与节能研究, 通讯联系人, zhaodf@vip.sina.com。

态环境部等七部委联合印发的《减污降碳协同增效实施方案》系统提出强化污染与温室气体协同控制^[5]。2024年8月,《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》进一步明确,需在石化等重点行业深化温室气体环评与协同控制^[6]。上述政策表明,精准量化污染物治理设施自身碳排放已成为实现协同增效目标的关键环节。

石化企业 VOCs 排放强度高、治理设施应用广^[7],现有研究多关注污染物达标排放,对其治理过程的能源资源消耗所致碳排放尚缺乏系统探讨。当前研究主要集中在碳排放核算方法及来源与范围界定方面。刘业业^[8]提出对于油气回收系统收集气体采用实测法核算含碳气体排放量,或按碳含量系数 0.6 将 VOCs 折算为 CO₂ 排放量;杨纯尔^[9]结合生命周期评价,采用碳排放因子法和碳平衡法核算燃烧法处理 VOCs 的温室气体排放,发现年削减 1.34~984.94 tVOCs 将伴生 182.60~2 459.33 tCO₂ 排放;于示林^[10]界定了 VOCs 治理全流程 CO₂ 排放范围,包括生产过程无组织排放、辅助燃料燃烧过程排放、废气末端治理过程排放、含碳废物处理过程排放、消耗电力或热力引起的排放。尽管已有研究在一定程度上揭示了 VOCs 治理过程中的碳排放特征,但存在 3 方面局限:一是研究对象局限性集中于 RTO 法等单一技术,缺乏对其他治理设施的碳排放研究;二是核算边界不全,多聚焦燃料燃烧、VOCs 氧化及电力排放,忽略蒸汽、氮气等耗能工质消耗的间接碳排放;三是领域针对性不足,缺乏针对工艺复杂、排放源异质性显著的石化行业的系统研究。因此,亟需建立完善的核算体系以全面量化石化企业 VOCs 治理设施碳排放水平。

基于此,本研究旨在建立全面的石化企业 VOCs 治理设施的碳排放核算体系,准确量化 VOCs 治理设施的碳排放水平,科学分析 VOCs 治理设施的碳排放特征,寻找治理设施减排空间,并为石化企业提供有效的碳排放优化建议,以支持碳中和目标的实现。

1 石化企业 VOCs 治理设施碳排放核算体系

1.1 核算边界

本研究以石化企业单个 VOCs 治理设施为核算单元,核算边界覆盖 VOCs 从收集到排放的全流程,包括主体治理设施和辅助治理设施 2 个核算单元,主体设施包括废气收集设施、预处理设施、核心处理设施 3 个处理阶段,辅助设施包括监测控制系统、能源供给系统、介质输送系统;自下而上至全厂 VOCs 治理设施,涵盖企业四大产污系统,即油气装卸系统、储罐储存系统、污水处理系统、工艺废气系统^[11],包含物理法、生物法、焚烧法 3 类治理方法^[12],及其 10 种治理技术,即冷凝法、吸收法、吸附法、膜分离法、生物滴滤法、生物滤池法、蓄热式焚烧法(RTO 法)、直接焚烧法(TO 法)、蓄热催化燃烧法(RCO 法)、催化燃烧法(CO 法)^[13];以年为核算单位,核算气体为 CO₂。

1.2 碳排放源及种类识别

基于单套治理设施具体工艺流程进行碳排放源分析,碳排放源主要包括直接排放和间接排放,直接排放包括燃料燃烧、VOCs 氧化,间接排放包括电力消耗、热力消耗、耗能工质消耗,共五类排放源。

以 RTO 治理设施工艺流程为例进行碳排放源分析,废气通过助力风机进入碱洗塔,在循环喷淋泵作用下对杂质进行吸收处理,废气经过预处理后进入蒸汽换热器升温,降低湿度,再由主风机送入 RTO 焚烧炉,在高温 780~940℃ 下氧化分解,生成 CO₂ 和 H₂O,处理达标后的废气通过烟囱排放^[14]。RTO 工艺碳排放一部分为直接排放,即助燃气燃烧、VOCs 可燃组分氧化,另一部分是间接排放即助力风机电耗、循环喷淋泵、蒸汽消耗、RTO 主风机电耗、助燃风机电耗、仪表风消耗及伴热水消耗等。具体碳排放节点如图 1 所示。

针对全厂 VOCs 治理设施三类 VOCs 治理方法、10 种治理技术分别进行工艺流程进行碳排放节点识别,详见表 1。

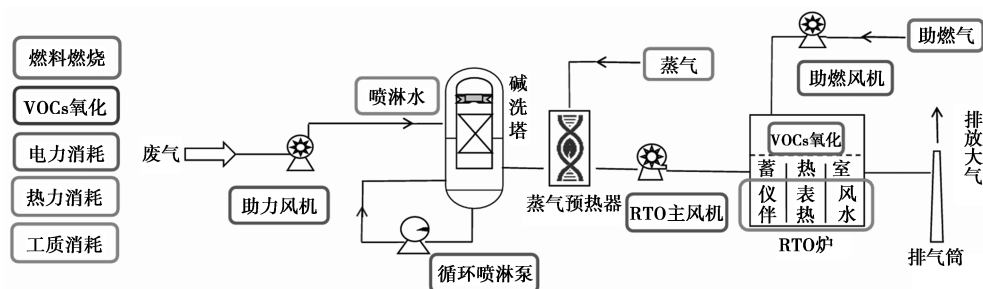


图 1 RTO 治理设施工艺流程图

表 1 典型石化企业各种治理设施碳排放节点分析

治理方法	治理技术	排放节点	
		直接排放环节	间接排放环节
物理法	冷凝法	—	电力消耗、耗能工质消耗
	吸收法	—	电力消耗、热力消耗、耗能工质消耗
	吸附法	—	电力消耗、热力消耗、耗能工质消耗
	膜分离法	—	电力消耗、耗能工质消耗
生物法	生物滴滤法	VOCs 生物氧化	电力消耗、耗能工质消耗
	生物滤池法	VOCs 生物氧化	电力消耗、耗能工质消耗
焚烧法	RTO 法	燃料燃烧、VOCs 氧化	电力消耗、热力消耗、耗能工质消耗
	TO 法	燃料燃烧、VOCs 氧化	电力消耗、热力消耗、耗能工质消耗
	RCO 法	燃料燃烧、VOCs 氧化	电力消耗、热力消耗、耗能工质消耗
	CO 法	燃料燃烧、VOCs 氧化	电力消耗、耗能工质消耗

1.3 核算方法

当前 VOCs 治理设施碳排放核算方法主要包括

实测法、排放因子法^[15]、碳平衡法^[16]和生命周期法^[17],详见表 2。

表 2 主流碳排放核算方法

方法	核算原理	优势	局限	适用性
实测法	对各环节碳排放进行直接测量,收集实时排放数、样本	数据直接、精度高	设备成本高	大型焚烧设施
排放因子法	以活动量乘以相应的排放因子计算碳排放量的方法	计算高效、数据易获取	依赖排放因子准确性	间接排放源核算
碳平衡法	输入系统碳总量与输出系统碳总量的差值	基于碳元素守恒、结果较为准确	忽略间接排放源	直接工艺排放核算
生命周期法	覆盖全生命周期,量化资源消耗与排放	覆盖全流程环境影响	数据需求量大、实施复杂	系统性环境评估

相比之下,本研究采用排放因子法与碳平衡法结合核算,排放因子法覆盖治理设施的主要间接排放源,碳平衡法可精准量化 VOCs 降解产生的直接工艺排放,弥补排放因子法对过程碳排放的遗漏^[18]。因此,双法结合兼具透明度高^[19]、成本可控及覆盖全面的优势,符合石化企业多技术并存的治

理场景。

根据 VOCs 治理设施五大碳排放源,基于排放因子法和碳平衡法,结合石化企业治理设施特点,对 CO₂ 排放量进行核算^[20]。单个治理设施碳排放量核算如式(1)及表 3 所示。

$$E = E_{\text{燃烧}} + E_{\text{VOCs氧化}} + E_{\text{电力}} + E_{\text{热力}} + E_{\text{耗能工质}} \quad (1)$$

表 3 VOCs 治理设施碳排放核算公式及参数说明

排放源类别	核算公式	参数说明
燃料燃烧	$E_{\text{燃烧},i} = AD_i \times CC_i \times OF_i \times (44/12)$ $CC_i = NCV_i \times EF_i$	$E_{\text{燃烧},i}$ 为燃料燃烧产生的 CO ₂ 排放量, tCO ₂ ; AD_i 为燃料 i 燃烧量, (固体/液体燃料: t, 气体燃料: 万 Nm ³); CC_i 为燃料 i 的含碳量, (固体/液体燃料: tC/t, 气体燃料: tC/10 ⁴ Nm ³); OF_i 为燃料碳氧化率, %; NCV_i 为燃料低位发热量, (GJ/t 或 GJ/10 ⁴ Nm ³); EF_i 为单位热值含碳量, tC/GJ
VOCs 氧化	$E_{\text{VOCs氧化}} = (M_{\text{VOCs,进口}} - M_{\text{VOCs,出口}}) \times \eta \times (44/12)$	$E_{\text{氧化},i}$ 为 VOCs 氧化生成的 CO ₂ 排放量, tCO ₂ ; $M_{\text{VOCs,进口}}$ 为设备进口处 VOCs 量, t; $M_{\text{VOCs,出口}}$ 为设备出口处 VOCs 量, t; η 为 VOCs 氧化效率(%)取值参考设备设计值或实测数据;适用于燃烧法和生物法治理过程, VOCs 以非甲烷总烃(NMHC)表示
电力消耗	$E_{\text{电力},i} = AD_{\text{电力},i} \times EF_{\text{电力}}$	$E_{\text{电力},i}$ 为电力消耗产生的 CO ₂ 排放量, tCO ₂ ; $AD_{\text{电力},i}$ 为电力消耗量, MWh; $EF_{\text{电力}}$ 为电力排放因子 (tCO ₂ /MWh) 排放因子取值参考所属区域电网年平均供电排放因子
热力消耗	$E_{\text{热力},i} = AD_{\text{热力},i} \times EF_{\text{热力}}$	$E_{\text{热力},i}$ 为热力消耗产生的 CO ₂ 排放量, tCO ₂ ; $AD_{\text{热力},i}$ 为热力消耗量, GJ; $EF_{\text{热力}}$ 为热力排放因子 (tCO ₂ /GJ) 热力包括蒸汽、热水等排放因子参考企业年平均热力排放因子

续表

排放源类别	核算公式	参数说明
	$AD_{\text{蒸汽}} = Ma_{\text{st}} \times (En_{\text{st}} - 83.74) \times 10^{-3}$	$AD_{\text{蒸汽}}$ 为蒸汽的热量, GJ; Ma_{st} 为蒸汽质量, t; En_{st} 为蒸汽热焓, kJ/kg; 83.74 为 20℃ 给水焓值, kJ/kg; 蒸汽热焓根据温度和压力确定; 计算结果单位为 GJ
	$AD_{\text{热水}} = Ma_w \times (T_w - 20) \times 4.1868 \times 10^{-3}$	$AD_{\text{热水}}$ 为热水热量, GJ; Ma_w 为热水质量, t; T_w 为热水温度, °C; 4.1868 为水的比热 (kJ/kg·°C) 基准温度: 20℃; 计算结果单位为 GJ
耗能工质消耗	$E_{\text{耗能工质}, i} = AD_{\text{耗能工质}, i} \times CE_{\text{耗能工质}, i} \times EF_{\text{标煤}}$	$E_{\text{耗能工质}, i}$ 为耗能工质消耗产生的 CO ₂ 排放量, tCO ₂ ; $AD_{\text{耗能工质}, i}$ 为耗能工质消耗量, (液体: t; 气体: m ³); $CE_{\text{耗能工质}, i}$ 为折标煤系数 (kgce/t 或 kgce/m ³) 取值参考《炼化行业单位产品能源消耗限额》 ^[21] ; $EF_{\text{标煤}}$ 为标煤排放因子 (tCO ₂ /tce)

基于排放源层面的核算方法, 本文采用自下而上方法构建层级化核算体系, 不论是全厂 VOCs 治理系统角度还是某一类治理设施角度均可以进行其碳排放量的核算, 该核算方法具有模块化特点^[22], 其碳排放核算公式如表 4 所示。

表 4 不同类别治理方法核算公式

治理设施类别	核算表达式
物理法	$E = E_{\text{电力}} + E_{\text{热力}} + E_{\text{耗能工质}}$
生物法	$E = E_{\text{VOCs氧化}} + E_{\text{电力}} + E_{\text{热力}} + E_{\text{耗能工质}}$
焚烧法	$E = E_{\text{燃料燃烧}} + E_{\text{VOCs氧化}} + E_{\text{电力}} + E_{\text{热力}} + E_{\text{耗能工质}}$
全厂治理设施	$E = E_{\text{物理法}} + E_{\text{生物法}} + E_{\text{焚烧法}}$

1.4 数据来源

本研究以某典型石化企业为研究对象, 该企业位于中国石化产业的重要区域辽宁省, 具备千万吨级炼化一体化规模, 涵盖炼油、乙烯及下游化工产品生产, 核心装置包括常减压蒸馏、催化裂化、乙烯裂解等典型石化工艺单元; 生产过程中 VOCs 排放环节完整且具有行业共性, 涵盖炼油装置设备泄漏、储罐呼吸损耗、液体装卸料挥发及废水处理系统无组织排放等多类典型源; VOCs 治理设施配置主流技

术路线, 包括泄漏检测与修复体系、吸附-膜分离-吸收装置、蓄热式焚烧法等, 其运行参数与碳排放特征能够反映行业普遍治理水平, 因此其 VOCs 治理设施碳排放核算结果对同类企业具有显著的代表性与参考价值。

核算过程中所需数据均通过企业现场调研获取, 一是从企业管理部门获取全厂基本资料; 二是以每套 VOCs 治理设施为单位设计现场调查清单, 现场调查各生产部各车间治理设施的实际运行情况。现场调查清单主要包括: 工艺流程及实际运行参数, 进出口 VOCs 组分浓度、处理气量、处理效率、年运行时间、燃料消耗量、蒸汽温度压力及用量、用电设备电耗及相关耗能工质用量等详细数据。

2 案例结果与分析

根据碳排放核算方法及案例企业原始数据, 对该企业 VOCs 治理设施碳排放量进行核算, 本研究采用碳排放强度分析 VOCs 治理设施碳排放情况, VOCs 治理设施的碳排放强度是指单位 VOCs 处理量的 CO₂ 排放量, 即吨 CO₂/吨挥发性有机物 (tCO₂/tVOCs)。结果如表 5 所示。

表 5 企业 VOCs 治理设施年碳排放核算结果

tCO₂

系统类别	治理工艺	碳排放强度/ (tCO ₂ ·tVOCs ⁻¹)	总量	燃料 燃烧	VOCs 氧化	电力 消耗	热力 消耗	耗能工质 消耗
油气装卸系统	吸收+吸附-1 [#]	0.58	87.40	0.00	0.00	56.20	0.00	31.20
	吸收+吸附-2 [#]	4.69	98.04	0.00	0.00	74.55	0.00	23.49
	吸收+膜+吸附-1 [#]	14.67	286.94	0.00	0.00	176.62	0.00	110.32
	吸收+膜+吸附-2 [#]	14.37	222.77	0.00	0.00	133.00	0.00	89.77
污水处理系统	生物滴滤-1 [#]	5.29	1864.81	0.00	358.94	1337.42	0.00	168.45
	RTO-1 [#]	50.44	2083.47	91.55	151.45	1460.99	327.07	52.42
	生物滴滤-2 [#]	2.06	1521.86	0.00	529.14	922.09	0.00	70.63
	生物滴滤-3 [#]	3.76	2252.53	0.00	926.54	1323.18	0.00	2.81
	RTO-2 [#]	109.80	2573.85	35.70	85.95	2150.81	296.26	5.13
	吸附-1 [#]	10.63	87.70	0.00	0.00	87.70	0.00	0.00
	吸附-2 [#]	33.68	87.70	0.00	0.00	87.70	0.00	0.00

续表

系统类别	治理工艺	碳排放强度/ (tCO ₂ ·tVOCs ⁻¹)	总量	燃料 燃烧	VOCs 氧化	电力 消耗	热力 消耗	耗能工质 消耗
储罐储存系统	吸收+膜+吸附-3#	7.17	998.01	0.00	0.00	874.61	0.00	123.40
	吸收+膜+吸附-4#	9.18	535.06	0.00	0.00	377.36	0.00	157.70
	吸收+吸附-3#	7.09	66.51	0.00	0.00	24.53	0.00	41.98
工艺废气系统	TO-1#	152.40	158.09	3.16	0.30	150.10	0.00	4.52
	TO-2#	100.15	219.87	7.40	15.45	189.42	0.00	7.60

2.1 全厂碳排放总体特征

根据以上核算方法及所收集数据结果,该石化企业全厂 VOCs 治理设施年度碳排放量为 13 144.6 tCO₂,单位 VOCs 处理量的碳排放强度为 5.95 tCO₂/tVOCs。如图 2 及表 6、表 7 所示,其碳排放结构呈现“间接排放主导、电力驱动突出”的特征,直接碳排放量为 2 205.58 tCO₂,占总碳排放量的 16.78%;间接碳排放量为 10 939.02 tCO₂,占总碳排放量的 83.22%,其中电力消耗占比为 71.71%,说明治理设施的运行高度依赖外部能源供应,能源结构转型是降低碳排放的关键,企业应以节能改造与绿电替代推动电力能源结构转型。值得注意的是,

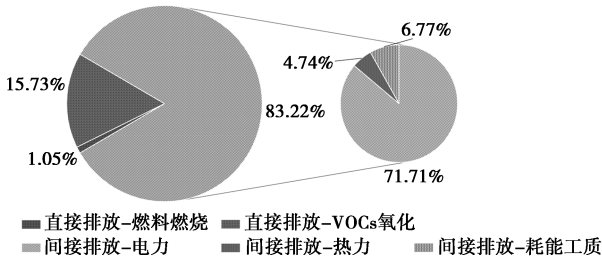


图 2 企业全厂 VOCs 治理设施不同排放源碳排放占比

表 6 企业全厂 VOCs 治理设施不同排放源碳排放占比

排放类别	占比/%	碳排放源	占比/%
直接排放	16.78	燃料燃烧	1.05
		VOCs 氧化	15.73
间接排放	83.22	电力消耗	71.71
		热力消耗	4.74
		耗能工质消耗	6.77

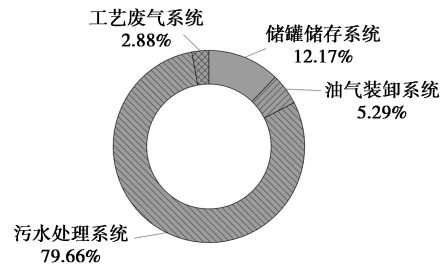
表 7 全厂 VOCs 治理设施碳排放量统计

排放类别	碳排放量/tCO ₂	碳排放源	碳排放量/tCO ₂
直接排放	2205.58	燃料燃烧	137.81
		VOCs 氧化	2067.77
间接排放	10939.02	电力消耗	9426.28
		热力消耗	623.33
		耗能工质消耗	889.41

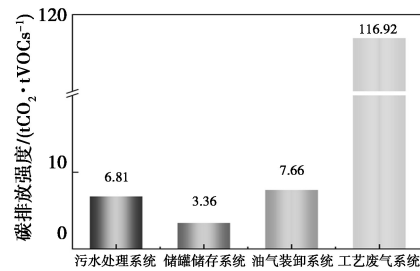
燃料燃烧碳排放占比仅为 1.05%,显著低于传统石化生产环节,表明企业全厂 VOCs 治理设施的燃料利用效率相对可控,但氧化反应过程的碳排放仍需通过工艺优化降低。

2.2 不同排放系统碳排放差异

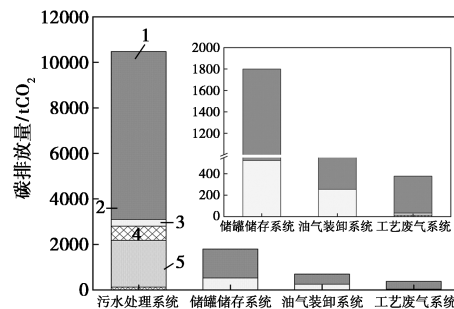
图 3 为不同排放系统碳排放贡献情况,4 个污染物排放系统中,污水处理系统碳排放贡献最大,占全厂碳排放量的 79.66%。相对而言,其他 3 个系



(a) 不同排放系统碳排放占比分布



(b) 不同排放系统碳排放强度



1—电力消耗;2—耗能工质消耗;3—热力消耗;4—VOCs 氧化;5—燃料燃烧

(c) 不同排放系统碳排放源分布

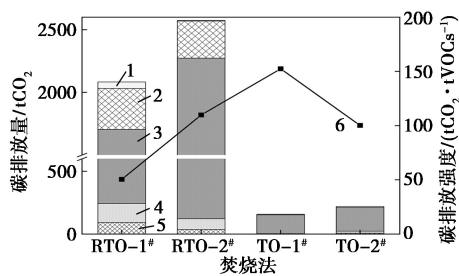
图 3 不同排放系统碳排放贡献

统碳排放量贡献较低,储罐储存系统和油气装卸系统碳排放量次之,分别占总碳排放量的 12.17% 和 5.29%,工艺废气系统碳排放最低仅占总排放量的 2.88%。

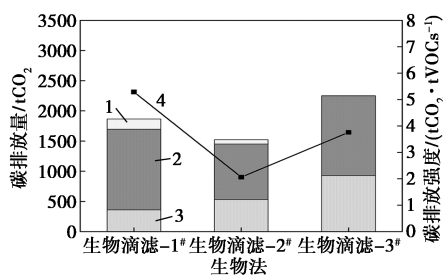
这一分布特征源于两类核心矛盾:其一,污水处理系统因 VOCs 产生强度高、浓度低,难以通过经济性回收工艺处理,技术路径依赖高能耗焚烧法、生物法氧化工艺,形成低浓度-高能耗-高排放的负向循环;其二,工艺废气系统虽总量最低,但碳排放强度突出,说明其处理的废气规模极小,且单位处理的能源消耗和工艺效率存在燃烧不充分、设备能耗高等问题,反映其治理技术存在规模不经济与能效短板。上述量化结果证实,VOCs 废气特性与治理技术能效的匹配度是驱动碳排放差异的核心变量。

2.3 不同治理技术碳排放对比

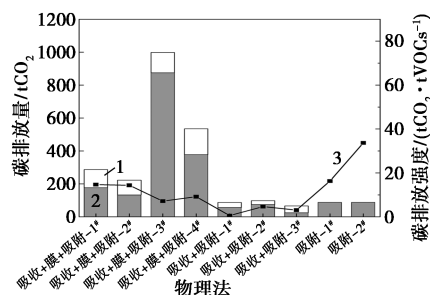
如图 4 所示,电力消耗为各类设施碳排放总量中贡献率最高环节,进一步揭示了 VOCs 治理设施的运行对电力能源的高度依赖。通过对三类主流治理技术的量化分析,碳排放强度呈现明确的梯度特征,焚烧法治理设施碳排放强度显著高于其他技术类别,其值域为 50~160 tCO₂/tVOCs;物理法碳排放强度维持在相对低位区间,普遍控制在 40 tCO₂/tVOCs 之内;生物法展现出最低的碳排放强度水平,其值域为 2~6 tCO₂/tVOCs 之间,远低于其他两类治理技术。



1—耗能工质消耗;2—热力消耗;3—电力消耗;4—VOCs 氧化;
5—燃料燃烧;6—碳排放强度
(a) 焚烧法治理设施碳排放贡献分布



1—耗能工质消耗;2—电力消耗;3—VOCs 氧化;4—碳排放强度
(b) 生物法治理设施碳排放贡献分布

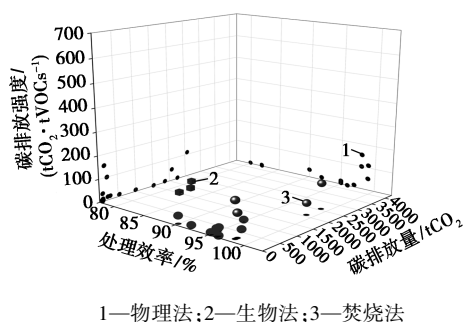


1—耗能工质消耗;2—电力消耗;3—碳排放强度
(c) 物理法治理设施碳排放贡献分布

图 4 不同治理设施碳排放贡献分布

焚烧法治理设施,理论上 TO 的碳排放量应显著高于 RTO,RTO 通过蓄热体回收余热,大幅降低了燃料消耗,TO 需持续通过燃料加热废气,且无余热回收。但实际结果显示,虽 RTO 设施碳排放强度低于 TO 设施,但其总碳排放量远高于 TO 设施,因 RTO 处理低浓度、大气量、连续运行的废气时,其辅助系统能耗会显著超过热回收效益,导致实际碳排放高于 TO 法;生物法主要是 VOCs 氧化和电力消耗贡献,碳排放量整体高于焚烧法和物理法,但碳排放强度均低于另外两种方法;物理法治理设施中组合工艺的碳排放量高于单一工艺,主要是设备电耗以及耗能工质消耗增加,而组合治理工艺的碳排放强度均低于单一吸附法治理设施,可以说明物理法组合治理工艺是更为低碳的治理工艺。以上 3 种治理方法,生物法和物理法组合治理技术具备低碳优势,可作为企业 VOCs 治理的优选低碳处理技术。

然而,企业实际运行中不能只依据碳排放高低选取治理技术,需兼顾处理效果,如图 5 所示,焚烧法处理深度最高,达 98% 以上,但碳排放量与排放强度居高;生物法碳排放强度最低,但处理深度有限,处理效率低于 90%;物理法碳排放强度居中,显著低于焚烧法且处理高效,物理法治理技术平衡了处理深度与碳排放,可以作为低碳技术选择。因此,综合不同 VOCs 治理方法处理深度-碳排放量-碳排放强度,物理法组合工艺是处理高效且低碳的技术路径,更符合企业运行实际。针对污水处理系统的 VOCs 治理,低浓度废气直接采用物理法效率低下,可通过吸附浓缩提升浓度以降低单位处理能耗,结合生物法或焚烧法构建物理浓缩+深度处理分级工艺,兼顾处理深度与碳排放控制。政府部门应鼓励企业建立碳排放与处理效率双目标评价体系,促进治理技术低碳高效发展,为《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》提供实践支撑。



1—物理法;2—生物法;3—焚烧法

图5 不同 VOCs 治理方法处理深度-碳排放量-碳排放强度耦合图

3 结论

本研究通过构建石化企业 VOCs 治理设施碳排放核算体系,结合典型案例分析,得出以下结论。

(1)本研究立足石化企业特点,创新性构建了单元设施-全厂系统的双层核算边界,覆盖四大排放系统、3类治理技术及10项治理工艺,采用排放因子法与碳平衡法相结合的核算方法,并将辅助耗能工质消耗产生的间接碳排放纳入核算体系,为石化企业 VOCs 治理设施的“碳排放双控”提供了设施级核算工具与理论支撑。

(2)案例核算结果发现,该石化企业全厂 VOCs 治理设施碳排放总量为 13 144.61 tCO₂,碳排放强度为 5.95 tCO₂/tVOCs。结构特征表现为间接碳排放为主导占比 83.22%,电力消耗占总量 71.71%,治理设施的运行高度依赖外部能源供应,凸显能源结构转型对减排的关键作用。污水处理系统碳排放占全厂 79.67%,重点优化污水处理系统治理技术,开发浓缩-物理法组合技术管理升级。

(3)各类治理设施的碳排放强度呈梯度分布,焚烧法治理设施碳排放强度最高,为 50~160 tCO₂/tVOCs;物理法次之,普遍控制在 40 tCO₂/tVOCs 之内;生物法最低,其碳排放强度为 2~6 tCO₂/tVOCs。物理法组合工艺是兼具处理高效和低碳排放的技术路径,更符合企业运行实际。上述结论可为《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》中减污降碳协同控制提供关键数据支撑。

参考文献

[1] 王凯. 数实融合对减污降碳协同增效的影响:文献综述与展望[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2025, 19(3): 50-60.

[2] Zhu F H, Ahmed I, Roubaud D, *et al.* Assessment of synergistic governance of pollution and carbon reduction[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 375: 124226.

[3] 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和

2035年远景目标纲要》[EB/OL]. [2025-07-20]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/xw_zt/moe_357/2021/2021_zt01/yw/202103/t20210315_519738.html.

[4] 关于开展重点行业建设项目碳排放环境影响评价试点的通知[EB/OL]. [2025-07-20]. https://www.mee.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202107/t20210727_851553.html.

[5] 关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. [2025-07-20]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html.

[6] 国务院办公厅关于印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》的通知[EB/OL]. [2025-07-20]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202408/t20240806_1083433.shtml.

[7] Wu M, Liu W, Ma Z, *et al.* Global trends in the research and development of petrochemical waste gas from 1981 to 2022[J]. *Sustainability*, 2024, 16(14): 5972-5972.

[8] 刘业业. 石油炼制工业过程碳排放核算及环境影响评价[D]. 济南: 山东大学, 2020.

[9] 杨纯尔. 基于生命周期评价的挥发性有机物典型治理方法评价及综合环境效益研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2023.

[10] 于示林. 双碳政策形势下 VOCs 治理路线分析[J]. *辽宁化工*, 2023, 52(9): 1327-1330.

[11] Gao S, Zhang Z T, Wang Q M, *et al.* Emissions and health risk assessment of process-based volatile organic compounds of a representative petrochemical enterprise in East China[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2021, 15(6): 1-15.

[12] 盖涤浩, 王永祥, 徐强. 石化企业挥发性有机物回收及废气综合治理的方案研究[J]. *山东化工*, 2024, 53(12): 253-255, 260.

[13] Wang S, Xiao P, Yang J, *et al.* Catalytic combustion of volatile organic compounds using perovskite oxides catalysts—A review[J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2023, 17(11): 1649-1676.

[14] 王浩英. 炼油企业污水处理场 VOCs 治理技术应用与分析[J]. *石油化工安全环保技术*, 2024, 40(2): 43-46.

[15] Gao H, Wang X, Wu K, *et al.* A review of building carbon emission accounting and prediction models[J]. *Buildings*, 2023, 13(7): 13071617.

[16] Li Y, Yang X, Du E, *et al.* A review on carbon emission accounting approaches for the electricity power industry[J]. *Applied Energy*, 2024, 359: 122681.

[17] Meng W, Xu Q, Yang L, *et al.* Life cycle assessment of greenhouse gas emission intensity accounting and analysis of emission reduction potential for coal-to-olefin enterprise[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2025, 32(20): 1-16.

[18] Alina F, Julian K, Maximilian E, *et al.* Estimating CH₄, CO₂ and CO emissions from coal mining and industrial activities in the Upper Silesian Coal Basin using an aircraft-based mass balance approach[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(21): 12675-12695.

[19] 黄珊, 张羽成, 龚天成, 等. 餐厨垃圾收运与处理全过程温室气体排放量核算方法研究及案例分析[J/OL]. *中国环境科学*, 1-14 [2025-07-27].

[20] 国家发展改革委办公厅. 中国石油化工企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[EB/OL]. (2015-02-09). [2025-07-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963642.html.

[21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 炼化行业单位产品能源消耗限额 GB 30251—2024[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2025.

[22] 汪楚乔, 史晓凯, 李艳萍, 等. 生活垃圾收运环节温室气体排放量核算方法研究[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(5): 1127-1136. ■