

关于推进减污降碳协同增效实现化工行业绿色发展的研究与分析

顾金凤 (江苏环保产业技术研究院股份公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为解决化工行业污染治理与碳减排措施脱节的关键问题, 以典型化工企业为研究对象, 构建减污降碳协同效果评估指标系统, 通过整合生命周期评估以及物质流追踪技术, 从源头替代、过程优化、末端一体化治理三个层面开展协同减排实验。研究发现污染物减排与温室气体管控存在明显协同效应, 在协同治理模式下单位治理成本呈现下降的态势, 同时资源使用效率得到显著提高, 这种协同治理模式能够有效化解传统治理方式的内在冲突, 为化工产业绿色升级提供切实可行的技术方案。

关键词: 化工行业; 减污降碳; 协同增效; 绿色发展

中图分类号: X323

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 008-0007-03

Research and Analysis on Promoting Synergistic Effects of Pollution Reduction and Carbon Emission Reduction for the Green Development of the Chemical Industry

Gu Jinfeng (Jiangsu Environmental Protection Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210000, China)

Abstract: To address the key issue of the disconnection between pollution control and carbon emission reduction measures in the chemical industry, this study takes typical chemical enterprises as the research object, constructs an assessment index system for the synergistic effects of pollution reduction and carbon emission reduction, and conducts experiments on synergistic emission reduction from three aspects: source substitution, process optimization, and end-of-pipe integrated treatment by integrating life cycle assessment and material flow tracking technology. The research finds that there is a significant synergy between pollutant reduction and greenhouse gas control. Under the synergistic governance model, the unit governance cost shows a downward trend, and the resource utilization efficiency is significantly improved. This synergistic governance model can effectively resolve the inherent conflicts of traditional governance methods and provide a practical technical solution for the green upgrade of the chemical industry.

Keywords: Chemical industry; Pollution reduction and carbon emission reduction; Synergistic effect; Green development

我国的生态文明建设已经步入一个崭新的发展时期, 其中降碳、减污、扩绿、增长被视为主要目标。化工产业因其生产流程特别繁琐、能源需求量极大、污染物排放类型繁多, 一直都承受着污染防治与碳减排的双重挑战。因此, 突破污染防治与碳减排分割局面、发掘二者之间的协同效应, 成为化工行业实现绿色转型的当务之急, 也是建设环保低碳新型工业体系的关键切入点。

1 化工行业减污降碳协同增效的理论基础

1.1 减污降碳协同增效的内涵与理论依据

减污降碳协同增效是指在化工生产的各个具体环节当中, 通过综合运用各类技术方法与管理制

度, 实现减少污染物排放与降低温室气体的同步开展, 促使两者形成相互促进且共同增益的积极关系, 以更低的总体成本达成更优的环境治理成效^[1]。该理念依托工业生态学物质代谢理论与循环经济原理, 其基本观点在于化工生产过程中污染物产生与碳排放均与化石能

1.2 污染物排放与碳排放的耦合关联特征

源使用、原料转化效率以及工艺运行条件紧密相关, 二者在形成机制方面具有一致性。基于这种一致性, 当采取某一技术措施改善能源利用效率时, 往往能够在降低 CO₂ 排放的同时, 还可以同步减少常规污染物, 使单一技术投入产生多重环境效益, 这正是协同增效与传统分别治理模式相比的关键优势。

化工行业污染物排放与碳排放联系紧密, 这种关联性主要源于两方面: ①排放来源具有统一性; ②控制响应具备一致性。从排放源头分析, 化工企业的主要碳排放来源集中于高耗能环节, 例如燃料燃烧、工艺加热和蒸汽供应, 而这些环节同样也是氮氧化物、二氧化硫及烟尘等大气污染物的核心产生点, 根据行业观察, 化工企业的能源消耗过程通常是其污染物排放的一个重要环节; 从控制响应角度观察, 当燃烧效率得到改善或者能源消耗强度降低时, 碳与污染物的排放量通常会同步增减, 这显示出高度的正相关关系。

这种内在耦合关系意味着，通过优化能源利用环节的技术手段，能够同时减少这两类污染物的排放，进而为设计综合性减排策略奠定理论基础^[2]。

2 化工行业减污降碳协同增效的技术途径

2.1 协同增效评价指标体系构建

科学衡量减污降碳的综合效果需要构建全面的评价指标体系，该体系应包含污染物减排、碳排放管控以及协同效应评估三个层面。污染物减排层面主要关注化学需氧量、氨氮、二氧化硫等关键污染物的排放强度与处理效率，并结合环境危害当量加权综合评判；碳排放管控层面着重分析单位产品碳排放量、能源碳排放系数及工艺碳排放比例等核心指标；协同效应评估层面通过设置协同减排系数精准刻画污染物减排与碳减排之间的相互作用关系^[3]。协同减排系数的计算公式如下：

$$S = \frac{\Delta P/P_0}{\Delta C/C_0} \quad (1)$$

式中：S 为协同减排系数； ΔP 为污染物削减量，kg； P_0 为污染物基准排放量，kg； ΔC 为碳排放削减量，t CO₂； C_0 为碳排放基准量，t CO₂。当 S 值大于 1 时意味着污染物削减力度强于碳减排力度，若 S 值小于 1 则协同效应更侧重于碳减排方面，当 S 值趋近 1 是说明污染物削减与碳减排达到协调统一，该指标能够为技术方案的优化选择提供科学依据。

2.2 清洁原料替代的源头协同控制

源头协同控制的关键之处在于运用清洁原料替代策略，从根源上降低污染物及碳排放的生成可能，该方法着眼于化工生产流程的初始环节，通过调整物质投入结构系统性改善工艺环境表现，具备标本兼治的优势。在基础原料层面，采用天然气代替煤炭作为合成氨生产的氢源，可使单位产品碳排放量减少约 40%，同时抑制硫化物与粉尘的排放；利用生物乙醇替代石油基乙烯作为聚合物原料，可以实现原料层面碳中和还能规避污染物产生。

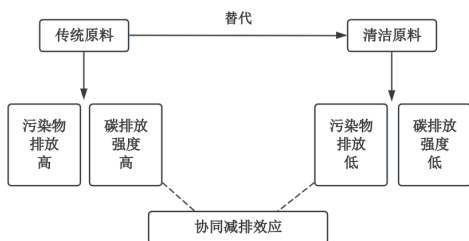


图1 清洁原料替代的协同减排效果示意图

在溶剂与助剂层面，采用水性涂料替代溶剂型产品，能够削减超过 70% 的挥发性有机物排放，且因无需配备废气焚烧设备降低了辅助燃料消耗及相关碳排放；使用无铬钝化剂替代传统铬酸盐钝化工艺，可以

从源头规避六价铬污染风险，还减少了含铬废水处理过程中的间接碳排放，清洁原料替代的综合减排效果见图 1。

2.3 工艺过程优化的中端强化调控

化工生产环节的优化主要聚焦于中间转化过程，通过改善反应参数与增强设备性能，可有效降低物料与能源消耗并减少污染物排放^[4]。在反应系统的优化方面，应用高效催化剂可降低反应所需的活化能，进而减少加热能耗，同时提升目标产物选择性来抑制副产物生成，比如在加氢精制工艺中采用新型负载型贵金属催化剂，可让反应温度下降 30 ~ 50℃，从而显著降低加热炉燃料消耗及烟气中氮氧化物排放；在分离系统的优化过程中，采用膜分离技术替代传统的多塔精馏工艺，能够大幅减少再沸器的蒸汽用量，进而同步降低蒸汽锅炉燃烧产生的 CO₂ 与 SO₂ 排放。

过程集成技术依靠热量梯级利用与物料循环的有机结合，能够更深入挖掘协同减排的潜力。夹点分析法可找出换热网络的优化空间，推动冷热物流实现高效匹配以减少公用工程消耗；反应精馏技术将放热反应与吸热分离过程整合在同一塔设备中，利用反应热直接为精馏分离提供能量；热泵精馏通过压缩塔顶蒸汽提升其温度，再将其作为再沸器热源使精馏过程能耗减少超 50%，实现碳排放与污染物排放同步降低。

2.4 末端多污染物与碳排放一体化治理

末端一体化治理主要是对生产过程产生的污染物与碳排放进行综合处理，其核心目标在于解决传统分治模式造成的设施重复建设与运行能耗累加问题。在废气治理方面，活性炭吸附浓缩与催化燃烧联合工艺可高效清除挥发性有机物并回收燃烧热能，利用回收热量预热进气能让辅助燃料消耗减少六成以上；烟气多污染物协同净化技术可在单个吸收塔内同步完成脱硫、脱硝以及细颗粒物去除，与串联的多塔系统相比，既能节省设备投入又能降低运行耗电量^[5]。

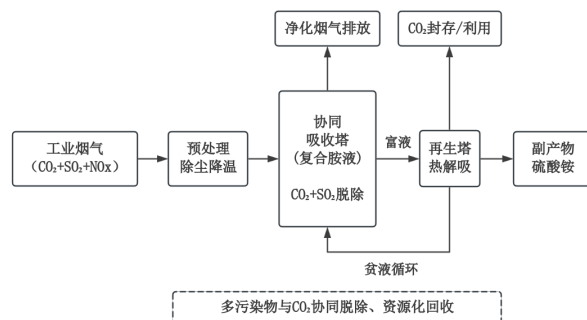


图2 末端多污染物与碳排放一体化治理技术路线图

将碳捕集与传统污染物的治理技术深度融合，是当前末端协同治理的重要发展趋势，其主要工艺流程参考图 2。以化学吸收法为例，使用复合胺吸收液能

够高效捕捉烟气中的 CO₂，还能同时去除硫化物，吸收了 CO₂ 的富液在再生塔中被加热，释放出高纯度 CO₂ 用于后续封存或作化工原料，而脱硫过程中产生的副产物可通过氧化结晶技术回收制成硫酸铵化肥，一体化的工艺设计使污染物处理与碳减排功能在设备层面实现有机结合。

3 协同增效技术的实验验证与效益分析

3.1 典型化工工艺协同减排的实验设计

为评估减污降碳协同增效技术的应用成效，选取某石化企业催化裂化装置作为研究对象，该装置年处理量达到 1.2×10^6 t 且具备高能耗排放、类型复杂的典型特点。实验采用对照组与实验组同步运行的对比方法开展，对照组继续沿用原有工艺参数及治理设施配置情况，实验组则全面实施减污降碳协同增效改造工作，具体改造措施包括采用低碳再生型、催化剂替代原有催化剂、新增再生烟气余热回收系统以及将末端烟气处理设备升级为多污染物协同脱除装置。实验连续开展 180d，每周定期收集排放物与能耗方面信息，监测指标涵盖 CO₂、SO₂、NO_x、颗粒物以及挥发性有机物这五类污染物的浓度值与排放总量，同时记录设备的总体能源消耗量以及燃料使用情况等相关数据。分析过程整合物质流动分析与生命周期评价技术手段，并借助协同减排系数模型来评定改造措施所产生的协同效应。

3.2 污染物与温室气体同步削减的环境效益

经过 180d 的连续监测与数据分析，实验组在污染物排放以及碳排放方面均呈现明显下降态势，且二者存在显著的正向协同效应，详细数据见表 1。环境效益的协同性体现为污染物减排与碳减排之间的相互促进关系，余热回收系统启用后，一是通过降低燃料消耗直接减少了碳排放，二是因燃烧负荷降低也同步减少了氮氧化物生成。通过协同减排系数计算能够得出，实验组的整体协同系数大概为 1.05 左右，这表明污染物减排与碳减排已基本实现协同增效，两种环境效益相互叠加并非相互排斥，验证了协同增效技术方案的环境有效性。

表 1 协同增效改造前后主要排放指标对比

排放指标	对照组排放强度	实验组排放强度	削减率 /%
CO ₂	285kg/t 产品	234kg/t 产品	17.9
SO ₂	48mg/m ³	31mg/m ³	35.4
NO _x	125mg/m ³	90mg/m ³	28.0
颗粒物	24mg/m ³	14mg/m ³	41.7
VOCs	86mg/m ³	59mg/m ³	31.4

3.3 治理成本降低与资源利用率提升的经济效益

协同增效技术方案在带来显著环境收益的同时创造了丰厚经济回报，其核心体现为治理支出结构优化与资源利用效率整体性改善。在治理支出层面，传统

分散治理模式下企业需要单独配置脱硫、脱硝、除尘及碳捕集等独立装置，这导致设备投入与运维开支呈现线性累加的状况，相反，协同治理通过设施整合与功能复用使单位处理能力的资本投入与运营开销都呈现下降态势。这些增效收益在扣除改造投资折旧及额外运维成本后，实验组年度净收益能够达到 8.5×10^6 元，投资回收周期大约为 3.5 年，体现出该方案的经济可行性。

3.4 协同治理模式推动绿色发展的综合效益

协同增效技术方案的成效体现在环境与经济层面，还在化工行业绿色转型中扮演核心驱动角色。从产业升级视角分析，协同治理模式促使企业在原料采购、工艺流程及最终治理环节开展全面优化，这一变革倒逼企业革新生产技术、提升管理效能，推动其从被动合规走向主动实施清洁生产。从社会效益角度审视，协同增效举措能够有效减轻污染物对邻近居民健康造成的威胁，还能削弱温室气体排放给气候变化带来的负面影响，同时催生了环保技术研发以及设备维护等绿色就业机会，实现了经济、环境与社会效益这三者之间的协调统一，完美诠释出绿色发展理念的核心精髓内容。

4 结语

在化工行业绿色转型进程中减污降碳协同增效具备显著的技术优势与经济可行性，企业投入的环境治理绩效得以大幅提升。后续应进一步深化多污染物与碳排放协同作用机理方面的研究，推进低碳环保技术的产业化应用，以协同效应作为引擎，推动化工产业朝着绿色低碳方向持续发展。

参考文献：

- [1] 卢萃云, 黄天怡, 林少雄, 等. 精细化工园区减污降碳协同增效路径研究 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2025, 48(05): 11-19.
- [2] 徐孝民, 李伟. 产业绿色发展的减污降碳协同作用及机制: 以黄河流域为例 [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025, 25(04): 95-109.
- [3] 曹达成. 减污降碳协同发展对绿色全要素生产率的影响机制研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2024.
- [4] 贾林光. 淄博鑫泰石化: 把减污降碳协同增效作为绿色转型总抓手 [J]. 中华环境, 2023(11): 73-74.
- [5] 马从越. 智慧化建设助力化工示范基地减污降碳绿色发展 [J]. 新型工业化, 2023, 13(05): 9-17.

作者简介：

顾金凤 (1988.06—)，女，汉族，江苏如皋人，本科，中级职称，主要研究方向：工业园区规划及规划环境影响评价、土壤地下水研究与污染防治、企业与工业园区清洁生产创新。