

我国化工园区减污降碳技术路径研究

陈吕军^{1,2,3}, 田金平^{1,2,3}, 吕一铮¹, 廖恺玲¹, 严坤¹, 盛雅琪⁴,
杨坤⁴, 曹宏斌⁵, 朱利中^{4*}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 清华大学生态文明研究中心, 北京 100084; 3. 清华大学碳中和研究院, 北京 100084; 4. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 5. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190)

摘要: 化学工业是推动制造强国战略实施的重要支撑, 化工园区是新型工业化的关键载体, 开展化工园区减污降碳技术应用研究具有重要的现实意义。本文针对化工园区减污降碳面临的资源利用率低、减污和降碳协同性差、末端治污成本高、环境安全与风险突出等挑战, 分析了化工园区碳和污染物产生的特点并梳理相关研究进展, 剖析了减污降碳协同增效的内涵。在此基础上, 建立了基于一般性工业过程的分析框架, 以物质、能量代谢过程为纽带, 从企业生产、基础设施、产业共生等层面演绎提出了化工园区减污降碳的技术路径: 建立化工园区内企业的碳、污染物排放清单; 集成优化化工园区的技术与产业结构, 加强绿色低碳生产技术开发、基础设施升级共生、企业间合作、减污降碳与安全生产统筹、产品-产业-空间结构优化; 开展全生命周期减污降碳成本效益评估。选取杭州湾上虞经济技术开发区为典型案例, 总结了化工园区减污降碳技术路径的应用实践, 进而提出了化工园区减污降碳实施路径建议: 完善精细计量体系, 加强化工园区物质流管理; 强化化工园区共生链接, 运用系统工程赋能减污降碳; 激发系统效率变革, 推动化工园区绿色高质量发展。

关键词: 化工园区; 减污降碳; 生命周期分析; 物质流管理; 排放清单; 基础设施; 产业共生

中图分类号: R-1 文献标识码: A

Pathways for Reducing Pollutants and Carbon Emissions Synergistically Targeting Chemical Industrial Parks in China

Chen Lyujun^{1,2,3}, Tian Jinping^{1,2,3}, Lyu Yizheng¹, Liao Kailingli¹, Yan Kun¹, Sheng Yaqi⁴,
Yang Kun⁴, Cao Hongbin⁵, Zhu Lizhong^{4*}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Center for Ecological Civilization, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
5. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The chemical industry plays a crucial role in strengthening the manufacturing sector of China, and chemical industrial parks are key platforms for new industrialization. Chemical industrial parks encounter numerous challenges in mitigating pollution and

收稿日期: 2024-01-25; 修回日期: 2024-02-17

通讯作者: *朱利中, 浙江大学环境与资源学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为土壤污染控制与修复; E-mail: zlz@zju.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC1809204); 中国工程院咨询项目“化学工业园区场地污染风险防控对策”(2023-XZ-37); 国家自然科学基金项目(72274103)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

carbon emissions, encompassing issues such as a low resource-utilization rate, deficient recycling practices, substantial costs associated with end-of-pipe pollution control, and escalated safety and environmental risks. This study investigates collaborative pathways for pollution reduction and carbon mitigation within chemical industrial parks. According to the characteristics and research progress of carbon emissions and pollution generation, the implications of carbon reduction synergies are analyzed. A comprehensive analytical framework is established for general industrial processes, covering material metabolic processes in enterprise production, symbiotic metabolism in industrial parks, and material metabolism in park infrastructure. Moreover, specific technical pathways for pollution reduction and carbon mitigation are proposed: (1) establishing a comprehensive inventory of carbon and pollutant emissions; (2) integrating and optimizing the technological and industrial structures of chemical industrial parks through the development of green production technologies, symbiotic upgrades in infrastructure, enhanced inter-enterprise cooperation, coordinated efforts in pollution reduction, carbon mitigation, and safety production, and optimization of product-industry-space structures; and (3) conducting a cost-benefit analysis of pollution reduction and carbon mitigation technology pathways through a life cycle assessment. Employing the Hangzhou Bay Shangyu Economic and Technological Development Zone as a case study, an empirical analysis of pollution reduction and carbon mitigation technology pathways is undertaken. Furthermore, recommendations are made from three perspectives: improving precision measurement systems to strengthen material flow management in chemical industrial parks, reinforcing symbiotic links through systems engineering to empower pollution reduction and carbon mitigation, and stimulating systemic efficiency reforms for the green and high-quality development of chemical industrial parks.

Keywords: chemical industrial park; pollution reduction and carbon mitigation; life cycle analysis; material flow management; emissions inventory; infrastructure; industrial symbiosis

一、前言

我国已进入减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。化工行业是国民经济的支柱，也是制造强国的基石，其能耗占全国总能耗的12%、全国工业能耗的18%^[1]。2020年，石化和化工行业的碳排放量占全国碳排放总量的13%^[2]，位于工业领域第二位，实现碳中和的任务艰巨。化工行业挥发性有机物（VOCs）的排放量高，是当前及今后相当长一段时间化工行业污染防治的重点和难点。2018年，全球化工行业与VOCs相关的环境治理成本达2363亿美元^[3]。化工行业的CO₂和污染物（碳污）的来源、去向因化学反应及分离过程多样且复杂，加之化学品流动网络繁杂，导致对化工园区碳污排放的精细化与定量刻画难度加大，协同减污降碳面临严峻挑战。

建设化工园区是全球化工行业发展的趋势。我国化工园区具有两个基本特点：一是企业之间的空间距离临近，可以为生产原料“隔墙供应”或建立“门到门”上下游供应链提供空间便利；二是基础设施共享，可以提高园区的生产效率。我国积极推动化工企业进入化工园区，2022年，工业和信息化部等六部门发布《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》并明确，推进化工项目向园区集中，并出台了系列政策以规范化工园区发展。目前，全国重点化工园区或以石油和化工为主

导产业的工业园区共有643家；2022年，全国石化行业的营业收入为16.56万亿元，其中化工园区的工业产值为8.45万亿元，占全行业营业收入的51%^[4]。与此同时，化工园区作为化工行业减污降碳的重要载体，尤其是精细化工园区，普遍面临资源利用率低、末端治污成本高、环境安全风险突出等问题。因此，探讨化工园区减污降碳协同的技术路径，具有重大的科学价值和现实意义。

当前，化工园区在减污降碳的具体实践中面临园区产业结构复杂多样、园区内物质/能量流动网络复杂、污染物排放种类多、CO₂产生量大、减污降碳数据基础薄弱等问题。针对减污降碳国家战略的发展需求和化工园区绿色低碳发展的现实需求，本文围绕加强化工生产和治污全过程减污降碳协同机理研究，厘清化工园区系统边界内污染物和碳排放的迁移转化规律；明确化工园区减污降碳的内涵，形成兼具化工行业特征和园区特点、一般意义上的减污降碳技术与产业结构优化集成路线；从减污降碳促进化工园区经济高质量发展的角度，提出相应的化工园区减污降碳实施路径建议，以期通过多目标优化方法提升协同效益^[5]。

二、化工园区减污降碳研究现状

（一）化工园区碳污产生的特点

化工园区排放的污染物主要来自化工生产过程和园区基础设施。化工园区中对能源及环境基础设施的

废水、废气、固废（“三废”）治理已较为成熟，而生产过程中的“三废”治理以及难降解的污染物防控仍然是化工园区绿色高质量发展亟需解决的难题。

化工园区的碳排放主要有三大类。① 化学品中的碳元素。大部分化工反应过程是碳-碳键等官能团的转化过程，未进入产品的部分可能成为副产物或变为废弃物，从而成为化工园区碳排放管理中的“可变部分”，因产品、结构变化而变化。② 燃料中的碳元素，如化石能源所含的碳。这部分通常是化石能源经化学反应（氧化反应），将化学能转化为热能，同时碳元素基本转化为 CO_2 ，为化工园区碳排放管理中的“不变部分”。燃料燃烧类基础设施投入运营后，其过程及效率基本固定，因此，相关碳排放量基本与燃料消耗量成正相关。③ 从全生命周期角度来看，所有化学原料和能源的生产、加工、运输过程等都会有碳排放，即园区所用原料和能源的碳足迹。化工园区减污降碳的系统边界包括污染物边界和碳排放边界。污染物排放的边界为园区边界，碳排放的边界则较为复杂，对于第一类、第二类碳，其边界为园区边界；对于第三类碳，尤其是电力和热力的碳排放，则需要追溯其上游生产过程的碳排放。为此，化工园区减污降碳研究和实践中需要明确系统边界。

（二）化工园区碳污排放的研究进展

化工园区既有一般工业园区的共性特点，也具备与生产过程高度关联的碳污排放特性。① 在废水治理方面，我国化工园区大多采用企业自建污水处理站+园区集中式污水处理厂的两级处理模式^[6,7]。其中，废水末端处理日益突出能源资源高效循环利用，建设污水处理绿色低碳厂，但大部分园区尚未针对难降解有机污染物建立分类收集及处理体系^[8]。② 在废气治理方面，化工园区使用的化学品种类众多、VOCs组分复杂、无组织排放点多、监测管理难度大^[9]，尤其是VOCs导致的异味扰民问题仍是园区大气污染物减排和空气质量改善的重要难题。近年来，已有研究较多关注基于过程的VOCs排放特征、有机污染物种类及组分识别、特征污染因子库构建、VOCs精准防控和系统工程减排等^[9,10]。③ 在固废治理方面，化工园区产生的固废污染组成多样，有毒难降解污染物在污水厂污泥中高度富集^[11]。土壤污染防治研究突出化工园区及周边土壤

污染物健康风险评价和空间扩散，化工园区地下水污染物运移规律、影响范围确定及浓度分布，化工园区环境污染事故高发区域污染物风险水平评价等^[12]。目前，化工园区土壤与地下水污染多介质协同治理的研究处于起步阶段。

近年来，污染治理突出源头预防，强化减污降碳协同，从系统工程和全生命周期视角寻求新的解决方法。例如，生产端多通过环境友好原料替代、绿电/绿氢等低碳能源及原料替代、原子经济性反应/高效低碳分离，以减少污染物产生和碳排放。以卡塔尔某工业园区为例^[13]，建立了一个由化学过程（包括天然气制油、甲醇、合成氨和液化天然气等）、海水淡化、废水处理、生物质气化、废热回收和碳捕集等多过程组成的产业共生网络，模拟了不同情景下的资源管理协同潜力和平衡策略。

关于化工园区减污降碳协同的内涵剖析，已有研究从操作性方面进行了探讨^[14]：一是定义污染物与碳排放的种类；二是制定碳污核算相关数据收集及质量检查原则；三是运用脱钩指数来判别减污降碳协同关系；四是判断不同脱钩情景下的减污降碳协同态势，并对化工园区碳污治理阶段进行分类，进而以减污或控碳为主，针对性地推进减污降碳。本研究认为，减污降碳协同增效的重点是实现减污和降碳等多目标的“帕累托改进”或“帕累托最优”；协同增效的核心是脱钩发展，即实现化工园区经济发展与资源能源消耗、环境排放的脱钩。脱钩指单位经济产出使用更少的资源和能源，同时改善污染物产生量、碳排放量等非期望环境指标。当前，已有一些案例研究讨论了园区经济发展与资源环境影响的脱钩关系，如基于脱钩弹性模型分析典型园区经济增长与资源消耗和污染物排放的耦合关系，运用Tapio脱钩评价法分析园区经济发展与土地集约利用水平之间的关系、园区经济增长与碳排放之间的脱钩关系^[15,16]；运用多目标优化方法研究经济发展与碳排放脱钩的最优途径^[17,18]。化工园区经济发展和碳排放的脱钩状态以及污染协同效应具有显著的空间异质性^[14]，凸显了减污降碳“一园一策”的必要性。

物质流、能量流分析是化工园区碳减排研究中重要的基础性工作。通过自下而上地梳理化工园区特征元素的流动特征和长时间跨度分品种能源流动相应的结构、路径和影响^[19-22]，可以识别减污降碳的关键环节和重要节点，针对性地制定碳效率提升

方案。化工园区的化学品和能量代谢过程，既是影响园区环境质量的直接因素，又与园区经济发展密切相关。化工园区的化学品种类多、结构差异大、化工工艺过程中的碳排放和与能源相关的碳排放交织，导致园区内碳元素的流动路径极为复杂。因此，厘清各种化学物质及其内在特征、流动模式和集群内的传递关系，定量阐明化工园区化工生产过程中化学品和能量的结构、流动过程、随时间的变化及其环境影响，揭示资源能源浪费及污染产生的源头和原因，在此基础上针对性地调控化学品和能量代谢，优化园区化学品管理，可实现化学品共生网络最大化，提高经济效益，减少对环境的影响^[5]。这是推动化工园区减污降碳、实现经济环境社会多赢的重要基础。

综上所述，化工园区减污降碳协同增效的实质为：① 识别园区化学物质和能量的输入输出、污染物数量及性质、污染物迁移路径及其环境影响；② 建立园区经济活动与化学品流动、资源消耗、环境影响之间的定量关系，揭示园区化学品和能量代谢的动态演化规律；③ 统筹园区内多个利益相关主体，优化调控园区的物质代谢，实施全流程污染防治，持续改善区域环境质量。

三、我国化工园区减污降碳技术路径探讨

(一) 化工园区减污降碳研究的技术思路

我国化工企业大部分已集中至化工园区，对推动化工园区碳污协同减排具有重要的现实意义。目前，相关研究重点为污染物的削减途径及潜力、碳排放的核算及减排途径等，系统深入推进化工园区减污降碳，仍需解决以下问题。① 园区物理边界与管理边界不统一，加之经济统计边界、物质流/能量流/碳流分析边界各异，尚未构建针对性的统计、核算和计量体系，减污降碳协同所需精细化数据基础薄弱。② 减污降碳措施的交互作用不清晰，针对化工生产环节以及面向生产-治污全过程减污降碳的技术集成优化方式不明确。③ 园区减污降碳与信息技术未深度融合，系统性和整体性研究不足。

化工园区实施减污降碳需摸清园区的碳污基数，厘清碳污产生与排放的规律，在此基础上设计减污降碳协同增效的路径。本研究采用“演绎+案例实证”的研究方法（见图1），开展化工园区污

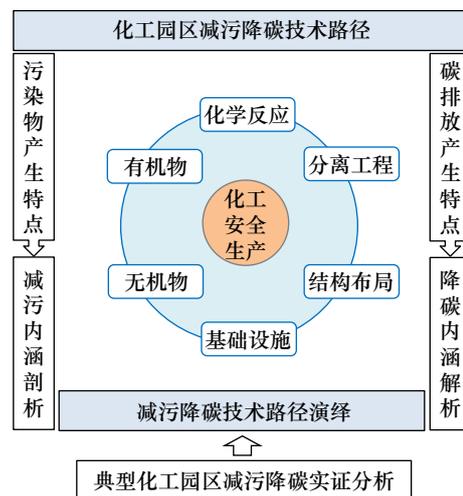


图1 研究技术路线

染物产生及减污的特点与内涵剖析、碳排放特点及降碳内涵解析、减污降碳技术路径演绎分析。其中，碳污产生分析紧扣化工生产过程，内涵解析兼顾化工行业与园区的基本特点，从化学反应-分离工程、有机物-无机物、基础设施-空间布局3组关系出发，并与化工生产安全结合。

制定化工园区减污降碳技术路径，首先宜从分析化工园区内的物质流和能量流入手。沿着化工园区物质、能量流动的过程，分析碳污产生总量和强度的关键节点，进而制定关键节点的减污降碳技术方案，系统性思考化工园区整体性减污降碳的路径^[22]。本研究提出从产品生产、基础设施治污系统、减污降碳与化工安全统筹、企业间合作、结构优化等方面演绎主要的技术路径（见表1）。其中，企业间合作既需要上下游供应链的合作，也需要产业共生形成的链接；化工园区基础设施共享是园区产业共生的重要体现方式，基础设施投入运营后的碳污排放态势趋于稳定，但仍存在减排难度大等问题。

(二) 化工园区减污降碳技术路径演绎

基于化工园区减污降碳协同的内涵剖析，本研究建立了化工园区一般性生产过程分析框架（见图2）。具体包括：企业生产过程的物质与能量代谢（即企业层面），企业间通过上下游原料、产品供应及副产品/废弃物资源化在园区内形成的共生链接（即产业共生层面），废弃物最终处理处置过程（即园区基础设施层面）。基于图2，化工园区减污降碳的基本技术路径具体如下。

表1 化工园区减污降碳技术及产品结构集成优化方向与着力点

技术名称	优化方向	减污降碳着力点
绿色低碳生产技术	低碳能源绿色化学	运用绿色化学和绿色化工“双12原则”，实现源头减污降碳原子经济性，有机物和无机物效率提升兼顾
基础设施优化	绿色化工	绿色、低能耗、深度分离，绿电、绿氢等低碳能源和原料
	能源集中供应	提高能效，污染超低排放治理
	污水深度处理	两级处理：企业二级处理+园区集中式处理； 一级处理：企业预处理+园区集中式分类处理
	工业气体供应	集中供应降本提效
安全生产统筹	危险废物处置	化工有机废料焚烧处理回收
	物质循环与安全平衡	危险工艺物料全生命周期安全特性定量分析，化学反应安全风险评价
企业间合作	产业链接	围绕优势原料延长产业链，依托关键节点物质拓展产品网
	产业共生	以基础设施共享、副产物/废弃物资源化为主
结构优化	产品结构	化工园区淘汰退出高污染、高环境风险产品
	产业结构	化工园区围绕支柱产业或新兴产业重点发展
	空间结构	厂房从一层平面布局改为多层垂直布局

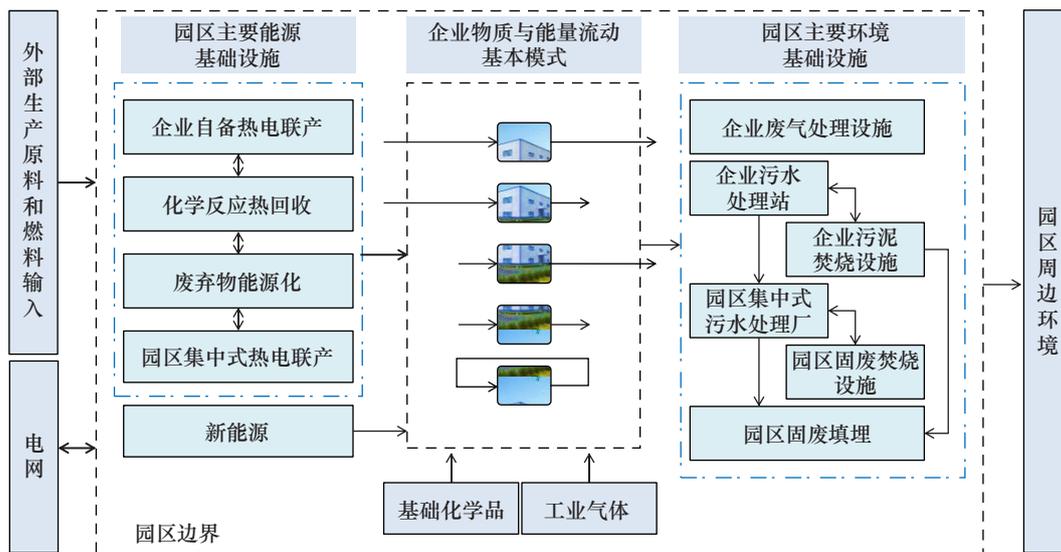


图2 化工园区一般性生产过程及物质代谢作用相互关联示意图

1. 建立化工园区碳污排放清单

对化工园区内的化学品流动及能量代谢开展核算，辅以必要的监测，阐明化学物质、特征元素以及能源在企业内、产业共生以及基础设施等多个层面的流动、代谢过程及环境影响，建立碳污排放融合清单；在此基础上，识别提高物质/能量代谢效率、降低环境影响的关键节点。在建立化工园区碳污排放清单后，需要进一步开展以下工作。① 基于化工行业特点，阐明化工园区碳污排放的性质和联系。② 建立化工园区碳污排放与园区经济活动联系

的纽带，精准识别化工园区企业、生产过程、具体产品的碳污产生量或排放量。针对高碳排放/高污染物排放的产品，分析其在化工园区及相关供应链中的作用，从减污降碳与供应链、产业链安全协调的视角加以剖析。③ 识别化工园区碳污中的有机物和无机物是研究其碳污特征的重要方面。在实践中，化工园区通常更重视有机物的循环过程，而对无机物的减量和循环缺乏足够的关注。

2. 化工园区减污降碳技术与产业结构优化集成
化工园区减污降碳技术及产品结构集成优化

方向与着力点如表 1 所示, 主要包括 5 个方面。① 开发和应用绿色低碳生产技术。运用绿色化学“12 原则”、绿色化工“12 原则”、绿色深度分离、低碳能源等, 针对产品生产过程进行减污降碳^[5]。② 基础设施优化, 实现减污降碳协同。随着碳排放标准的不断提高, 需对企业集中式污水处理厂的污水处理设施进行升级改造。化工园区的污水处理系统减污降碳, 除了“一园一策”分析具体的处理体系外, 还需兼顾污染物在气、液、固三相间的迁移转化, 充分挖掘污水中能源资源的高效循环利用潜力。推进化工园区热电联产能源基础设施, 工业气体、危险废物处理处置设施等协同, 进而推动能源基础设施与环境基础设施之间通过“能-水-固废”建立产业共生^[7,23]。③ 减污降碳与安全生产统筹。实践发现, 化工生产尤其是精细化工过程, 相关的减污降碳举措与化工安全生产之间可能存在一定的矛盾冲突, 如为减少无机废弃物或危险废物的产生, 需从源头减少酸、碱、盐等的使用或减少反应过程中有机溶剂的用量; 从安全生产角度来看, 在释放酸性气体的反应或放热反应过程中加入适当过量的碱作为缚酸剂/溶剂, 有利于减少反应副产物/缓冲反应放热, 但会增加后处理分离环节的能耗。为此, 需在保证安全生产的前提下, 探究物质减量化驱动的减污降碳措施。④ 强化企业间合作, 主要的优化方向有产业链接和产业共生。产业链接一方面依托化工园区的内在技术和在规模上形成优势的原料/产品延长产业链; 另一方面, 针对大宗基础化学品, 拓展产品网络, 提高附加值, 以经济价值增值带动减污降碳技术的开发应用。产业共生则主要针对副产物和废弃物, 即发掘化工园区内企业间的合作潜力, 实现一个过程的副产物或废弃物经过必要的加工纯化, 成为另一个过程的原料的共生链接^[23]。⑤ 优化产品、产业和空间结构。产品结构优化大多针对高污染、高环境风险产品并对其实施淘汰退出机制; 产业结构优化多为化工园区围绕支柱产业或新兴产业, 采取重点发展策略; 空间结构优化是以提高化工园区的土地利用率为切入点, 间接提高物质能源效率以实现减污降碳。

3. 化工园区减污降碳技术路径的成本效应分析
面对日益严格的减污降碳要求, 精准定量描述

减污降碳的成本效益, 是推动化工园区环境效益和经济效益协同提升的关键。目前, 化工园区的减污降碳技术路径面临末端治理成本高且边际效益锐减^[23,24], 减污降碳过程要统筹生产过程与污染治理, 企业治污设施与化工园区集中式治污设施、污染物在气-液-固多相间的迁移转化, 多产业间的联系等挑战。为此, 需建立化工园区减污降碳系统优化成本效益核算模型, 定量分析各技术措施单独作用或组合作用下全生命周期的减污降碳潜力及成本效益, 充分揭示化工园区对标先进和实现深度减污降碳的潜力。

四、我国减污降碳技术路径的应用实践——以上虞化工园区为例

本研究选取杭州湾上虞经济技术开发区(简称上虞园区)为案例^[24,25], 从物质流与能量流分析、绿色化工技术开发应用、基础设施升级和共生、企业间合作构建产业链、产业结构优化等方面进行化工园区减污降碳技术路径的实证分析。相关内容可为更多化工园区提供减污降碳内涵理解参照, 也为针对性设计“一园一策”的减污降碳技术路径提供借鉴和启发。

上虞园区创建于 1998 年, 2013 年 11 月升级为国家级经济技术开发区, 已建成的化工园区面积为 21 km², 已有投产企业 210 多家; 2022 年, 规模以上工业企业的产值为 1780 亿元, 约占全区总产值的 82%。上虞园区是典型的精细化工园区, 主要特点为: 一是以苯为主要起始原料, 硫磺制酸、离子膜烧碱等大宗基础化学原料, 衍生出 10 多类产业链关键节点产品、30 多种分散染料产品, 建立了包含分散、活性、还原等染料类型及其配套中间体的完整染料产业链, 分散染料产量约占全国染料总产量的 70%; 二是园区形成了喹诺酮类抗生素和大环内酯抗生素两大医药产业链, 其中喹诺酮产业链围绕 7 种原料药, 形成了由 10 多种主要中间体、10 家企业组成的共生网络, 经济规模达到 100 亿元, 喹诺酮类抗生素产量约占全国的 50%。

(一) 基于物质流、能量流的园区碳污排放特征及减污降碳路径识别

通过对长时间跨度内的物质代谢和能量代谢进

行分析,可以厘清化工园区中的化学品、碳元素、硫元素、分品种能源流动及碳污排放的特征。以2007年为基准年,在上虞园区的碳输入总量中,化石能源所含碳、化工原料所含碳占的比重分别为68%、32%;在碳的输出中,化工产品所含碳占总量的22%,废弃物中所含碳占总量的74%,其余4%为输入输出差额^[20]。2013年,上虞园区两种碳的输入量占比分别为45%、55%,输出比例分别为40%、55%,输入输出差额为5%^[25,26]。其中,能源输入的碳元素基本转化为CO₂。

进一步分析化工原料的代谢演变(见图3),可以发现:2007年,上虞园区化工原料中碳元素的总利用效率为69%,其余31%的碳元素以不同结构和形态进入“三废”^[20];2013年,碳元素的利用效率提升至71.7%,其余28.3%的碳元素进入“三废”^[26]。2007—2013年,上虞园区内企业间上下游供应链相应的碳元素占原料中碳元素比例由3.4%提高至16.8%,企业间共生关系进一步强化,但进入VOCs中的碳元素占比从1.4%下降至1.2%,但总量增加了1.4倍。VOCs减排是较长时期内上虞园区加强污染减排、提升环境质量的主要挑战之一。

上虞园区能源基础设施呈多样化、多功能化发展,其中硫磺制酸化学反应热回收利用、垃圾焚烧发电、污泥干化焚烧热电联产、生物质热电联产等已成为上虞园区能源结构持续优化和低碳化发展的重要特点。2007—2019年,上虞园区的能量代谢结构持续变化^[24]。由图4可见,2019年与2007年相比,上虞园区的煤炭使用量占比由82.7%下降至63.3%,天然气使用量提升至7.5%,可再生能源使用量提升至12.4%;2019年,上虞园区内使用的生物质、生活垃圾、污泥等燃料的热值超过园区能源消耗总量的15%,利用硫磺制酸化学反应热占园区能量消耗的10.4%。近年来,上虞园区能源结构优化和低碳化发展取得显著成效,2011—2019年,单位工业增加值的碳排放量从1.44 t/万元下降至1.11 t/万元。

基于物质流和能量流分析,可以识别出上虞园区协同推进减污降碳的3个关键着力点。①强化源头预防污染,减少资源能源浪费,提高碳元素的利用效率。②强化产业共生链接,发掘补链、延链、强链机会,构建园区产业生态系统,提高园区整体资源能源利用效率。③园区投入的碳元素通常会进

入污染物并主要以CO₂形式排入大气,其中又以煤炭输入的碳含量最多,因此,持续优化能源结构是园区减污降碳协同增效亟需解决的问题。

(二) 减污降碳技术与产业结构集成优化应用

1. 应用绿色化学与绿色化工“双12原则”

化学合成反应与后处理是化工生产绿色化的核心,也是最具挑战的两个重要环节。合成反应的选择性和效率对化工产品的物质效率与污染物产生量影响显著。通过开发短流程、原子经济性化学合成工艺,可显著提高化学合成过程碳原子及其他原料的利用率,尤其是可以使产品得率提升和单位产品废弃物产生量下降。化工生产的后处理指从反应混合物中分离、纯化得到产品的过程,包括洗涤、萃取、蒸馏、精馏、结晶、干燥等化工单元过程。上虞园区典型染料和医药产品的反应、分离步骤较长,且后处理单元操作的数量平均高于化学反应过程。后处理过程与合成工艺的选择密切相关,化工反应与分离工程统筹,可以实现全过程优化,缩短反应、分离等操作步骤,以减少废弃物产生量。

基于对染料、医药产品生产过程特点及物质流、能量流的分析,上虞园区运用绿色化学与绿色化工的“双12原则”^[24,27],从化学反应选择性、转化率等入手,开展工艺革新和技术改进,从源头提高化学合成碳原子的效率,形成了众多典型案例^[27,28]。例如,针对染料产业链上间苯二胺等关键中间体,自主开发连续硝化、连续催化加氢、高效后分离等原子经济性合成技术;针对喹诺酮类抗生素医药产业链上2-氨基丙醇、烯胺衍生物等多个关键中间体,开发了短流程绿色合成技术,从源头上提高资源利用效率。总的来说,从化学合成的源头着手来提高化学合成碳原子效率,是根本实现减污降碳最有效的技术路径,也凸显了化工园区减污降碳的特殊性。

2. 基础设施共生升级推动减污降碳

由于化工企业在生产过程中蒸汽用量较多,化工园区一般建有集中式热电联产装置。上虞园区建立了燃煤背压机组热电联产、硫磺制酸化学能回收热电联产、垃圾发电、污泥干化焚烧发电、生物质发电、危险废物焚烧余热回收等多源能源供给基础设施,形成了清洁化、多功能、集中与分散相结合

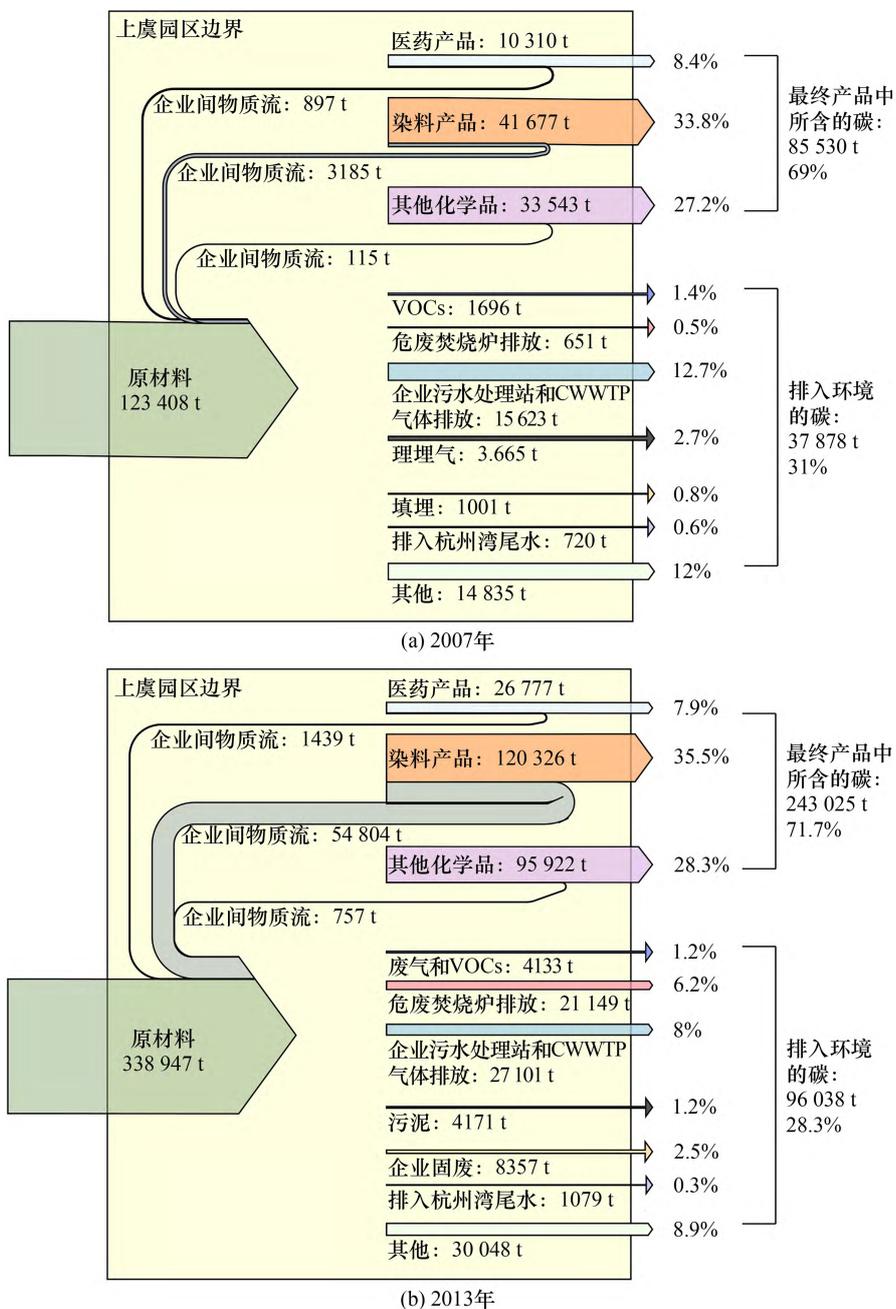


图3 上虞园区化学品生产碳元素的代谢演变

注：图中数据均以碳元素计；CWWPT表示集中式污水处理厂；CWWPT表示集中式污水处理厂。

的基础设施组团，为园区减污降碳提供重要支撑。例如，通过垃圾焚烧热电联产消纳园区和区域生活垃圾，利用热电厂余热推动园区集中式污水处理厂进行污泥干化后焚烧产热，在回收能源的同时实现固废减量化和资源化。

上虞园区针对园区中的基础设施，探究了3种产业共生情景下的减污降碳绩效^[5]。① 节水绩效：中水回用为冷却水。上虞园区集中式污水处理厂出

水符合部分工业过程用水标准，可用作热电联产设施的冷却水。目前，上虞园区已有2家能源基础设施企业采用中水作为固废焚烧的冷却水补水，同时集中式污水处理厂配套的污泥焚烧装置所用的新鲜水也在用中水替代，将进一步产生节水绩效。② 污泥利用绩效：污泥热电联产资源化利用。污泥热电联产的处理处置方式带来的环境影响显著低于填埋。在炉内掺烧污泥以产生电力和蒸汽，可以减少固废

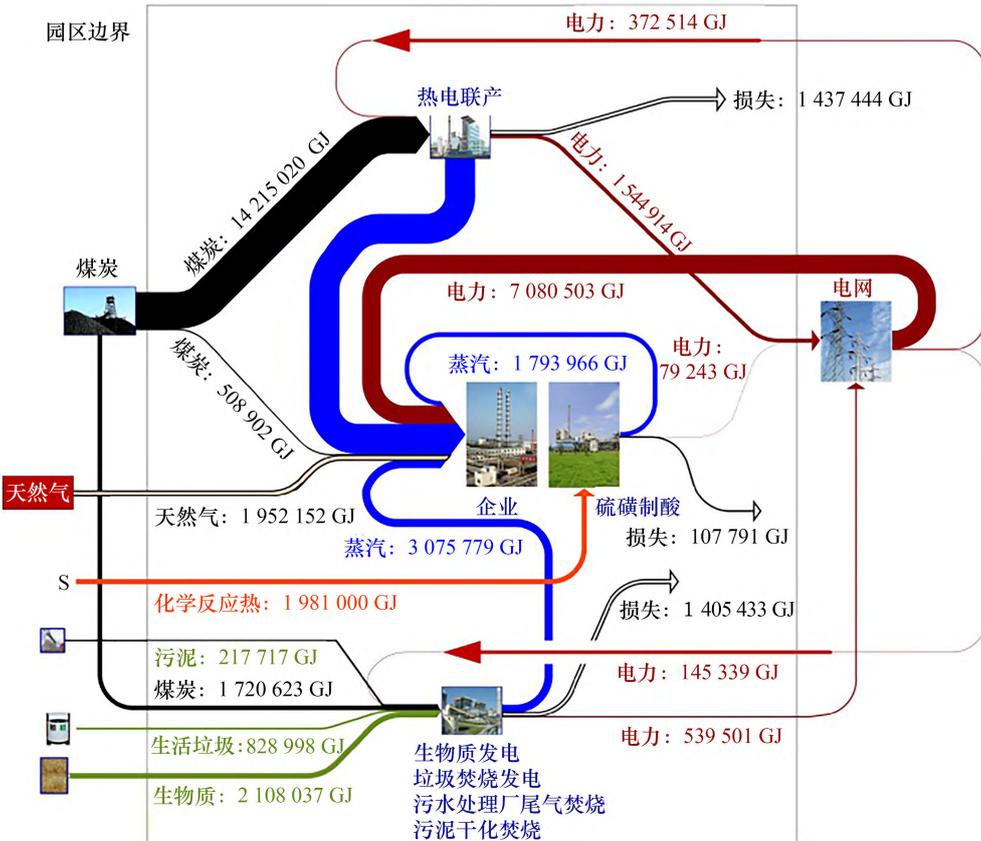
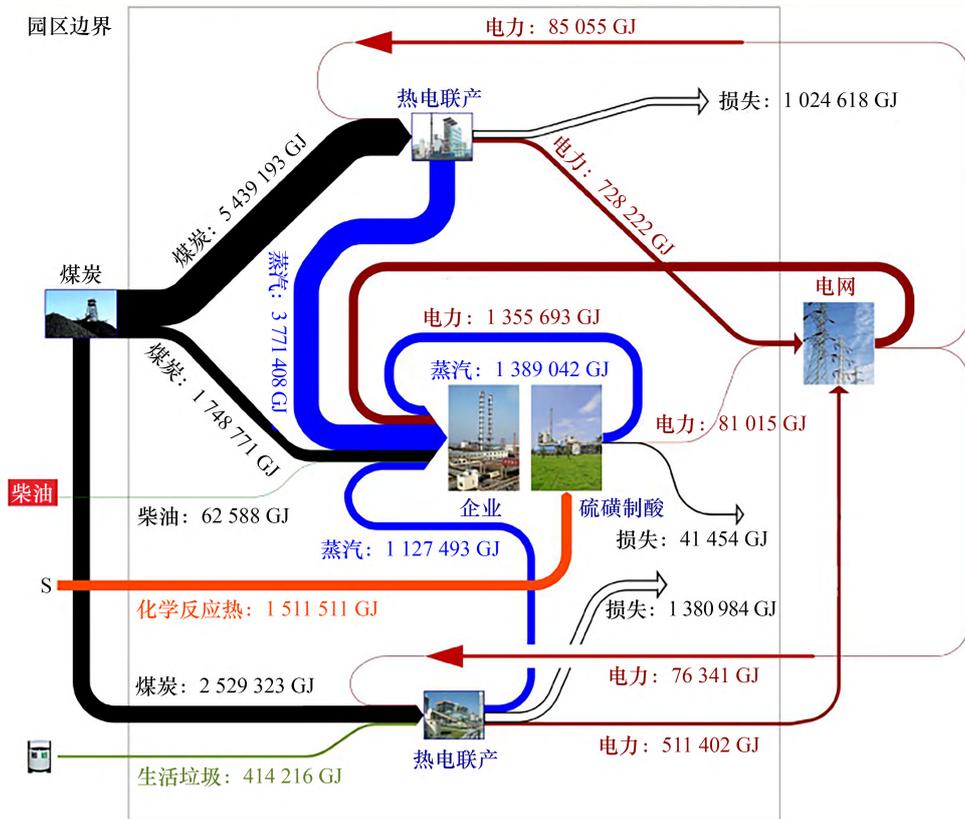


图4 2007年和2019年上虞园区的能量代谢变化

数量、减小固废体积。从基础设施共生视角来看，上虞园区染料生产企业将污水处理产生的污泥掺烧用于热电联产，实现了污泥的资源化利用。③ 减污降本绩效：有机废气蓄热式氧化（RTO）设备运行优化延长寿命。2020年，上虞园区中的企业共有RTO设备69套，通过定期消除管道和设备积尘等措施加强运营与维护，设备使用寿命延长至10年，在减少污染物排放的同时获得了较好的减污降本绩效。

3. “补链延链”构建产业共生体系

企业间加强合作，构建完整的产业链、供应链，形成“隔墙供应”，既能减少中间环节、节约成本、提高系统生产效率，又能产生显著的减污降碳效应。以染料产业为例，上虞园区从两方面加强“补链延链”，构建产业共生体系，提高有机原料的利用率，减少无机原料硫酸的使用量；通过构建硫酸循环链，革除硫酸钙渣危险废物，实现硫酸的资源化利用。

一是依托硫磺制酸系统，建立无机硫化工产业链。上虞园区建有两套二转二吸硫磺制硫酸装置，从硫磺氧化的化学反应热中回收副产中压蒸汽，通过背压式汽轮发电机发电，发电后产生的低压过热蒸汽再用于染料生产。硫磺制酸过程中高温高压蒸汽产汽量可达1.2 t/t硫酸，辅以低温余热回收，能

量利用率达到90%以上。将 SO_2 转化成 SO_3 ，用于制备染料生产关键原料亚硝酰硫酸，用亚硝酰硫酸替代传统的复合物 NaNO_2+HCl 或 H_2SO_4 。硝化反应副产的69%浓度硫酸可经真空浓缩至浓度88%后，再用 SO_3 增浓至98%，回用于硝化反应，形成硫酸循环链。

二是分散染料全产业链^[28]（见图5）。以苯为主要起始原料，经初级中间体、专用中间体、耦合组分、重氮组分，合成分散染料。上虞园区企业面向关键中间体，突破补链、延链、强链及安全环保生产技术，建设了国内首台（套）万吨级生产装置，在显著减污降碳的同时，提升了染料全产业链的竞争力和绿色低碳水平。

4. 产品与产业结构优化驱动园区减污降碳协同

我国分散染料生产普遍存在硫酸用量大，废水、危险废物（危废）产生量大等共性问题，如染料滤饼分离过程会产生大量浓度约为30%的稀硫酸和5%~10%的极稀硫酸。稀硫酸处理较多采用电石渣中和后填埋，但自2008年起我国将硫酸钙渣列入危废，处理成本大幅上升，通过单一产品、单一系统难以解决硫酸钙渣问题。上虞园区的染料企业通过自主开发多产品、多系统耦合技术，协同实施硫酸用量源头削减、稀硫酸分浓度梯级利用、极稀硫酸副产硫酸铵，突破了长期困扰分散染料行业的稀

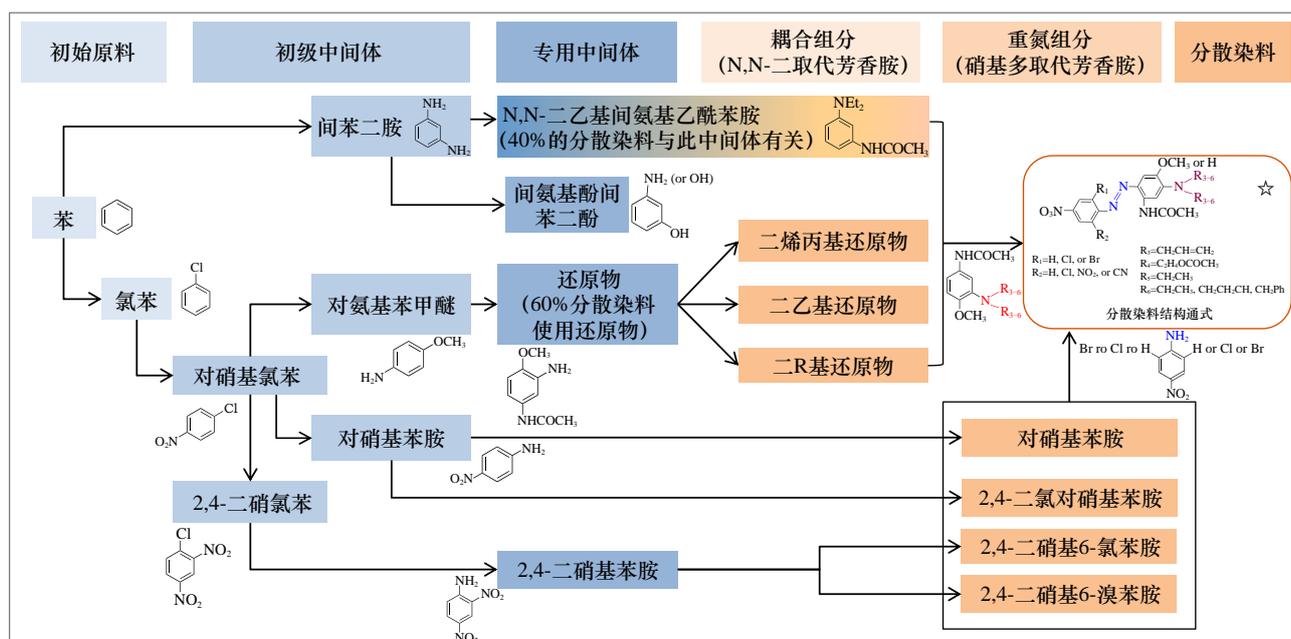


图5 上虞园区分散染料产业链

注：☆表示项目重大技术突破。

硫酸资源化及硫酸钙渣危废减量难题，减污降碳成效显著。此外，上虞园区进一步从产业链条长度、链网丰度两个维度开发了最长路径仿真算法和最多路径有界优化搜索算法，用于优化园区化学品流动网络^[29]。在关键化学品实现最多共生关系情景下，2025年，上虞园区原材料成本将减少约18亿元；2030年，将减少约37亿元。化工园区新增产业共生关系可显著降低化工产品生命周期的影响，带来显著的减污降碳效益。

(三) 全生命周期减污降碳成本效益评估

通过核算上虞园区中的企业和园区两级深度处理污水处理系统的经济与环境效益，发现园区2016—2020年的废气、废水、固废全过程治污成本从13.1亿元增加至22.57亿元，实现污染物削减7.4%~70%，末端治理边际效益显著下降。从全生命周期视角来看，末端治污能降低酸化和富营养化潜力，但增加了全球变暖等其他环境影响，仅靠末端治理难以实现园区减污降碳协同^[23,24,30]。

本研究依据“以地定产、以产见碳（污）、以碳（污）优产”的设计思路，构建了上虞园区碳达峰“地—产—碳”综合模型^[30,31]。基于土地开发利用情况、经济发展、污染物和碳排放特征、产业结构等关键要素，评估了面向2030年上虞园区产业结构优化驱动的减污降碳协同增效潜力（见图6）。该模

型的输入数据包括园区经济、土地、能源、环境等数据。2020年，上虞园区四位代码工业行业有50个，其工业增加值占园区的97%，以这些行业为重点开展产业结构调整研究。碳核算边界为园区物理边界内的范围一（直接排放）和范围二（外购电力、热力的间接排放）。污染物选择化学需氧量、氨氮、总氮、总磷4项水体污染物指标和SO₂、NO_x、VOCs 3项大气污染物指标。

研究发现，在“以地定产”情景下，上虞园区通过产业结构优化，与2020年相比，2025年的工业产值将增长约45%，2030年的工业产值将增长约200%。模型结果显示，2025年，上虞园区的废水排放、废气排放、固废处理量将分别增长39%、38%、54%；2030年较2025年将分别增加1.13倍、0.93倍、0.76倍，总体呈现经济增长与污染物排放的相对脱钩。基于“以地定产”情景，上虞园区2025年的碳排放量相较2020年将增长20%，2030年的碳排放量较2025年将增长58%。同时，碳排放强度逐年下降，将从2020年的1.54 tCO₂当量/万元下降至2030年的0.94 tCO₂当量/万元，保持经济增长与碳排放的相对脱钩。

整体来看，上虞园区的实证分析显示，针对发展比较成熟的大型化工园区，在生产过程中实施减污降碳的经济与环境效益提升空间远大于末端治理。

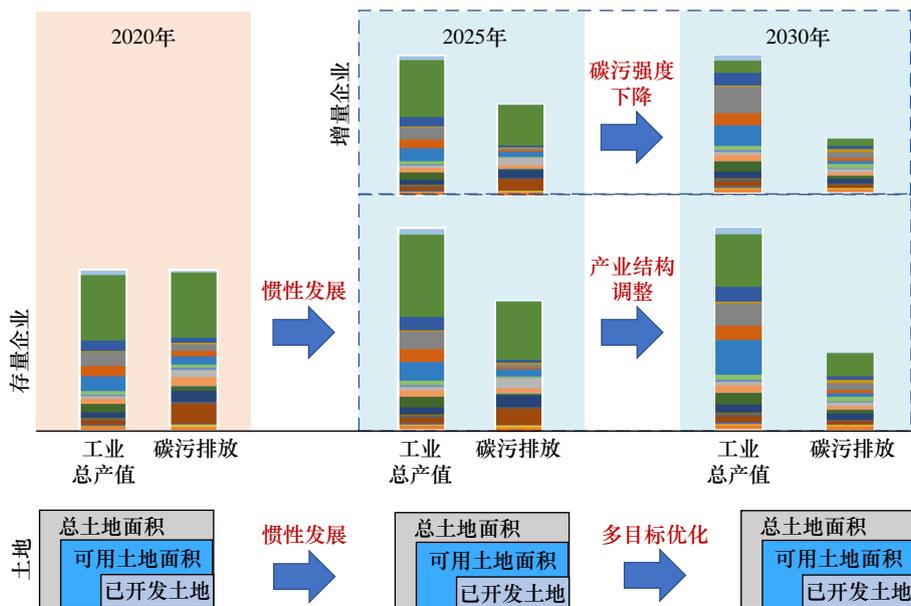


图6 上虞园区减污降碳协同增效评估路线

注：柱状图颜色代表不同行业代码企业的经济产出和碳污排放。

五、我国化工园区减污降碳实施路径建议

(一) 完善精细计量体系, 加强园区物质流管理

我国《2030年前碳达峰实施方案》明确要求, 加强园区物质流管理。上虞园区的具体实践表明, 化工园区开展物质流管理可行且管用。通过自下而上厘清多产品、多元素、多层级物质能量代谢的结构、路径、过程等特征, 定量揭示全生命周期环境影响, 提出靶向减污降碳调控措施, 推动企业内、企业间、产业间形成物料闭路循环, 并持续循环迭代优化, 成为化工园区加强物质流管理、减污降碳的题中之义。

推动企业建立和健全三级计量体系, 应用数字化、智能化三级计量仪表, 提升物质流、能量流管理的定量化与精准化水平。建议化工园区发布相关的支持政策, 加快企业数字化、智能化仪表升级, 运用机器学习等人工智能技术, 挖掘实时物质流、能量流等多源信息之间的定量关联, 强化数据驱动的园区智慧化物质流管理和前瞻性减污降碳管理决策。在实践中, 对于难以加装三级计量仪表的工艺环节, 可运用集散控制系统和安全仪表系统的数据进行辅助。

(二) 强化园区共生链接, 运用系统工程赋能减污降碳

化工园区减污降碳需要从系统工程和全局视角寻求新的技术路径。化工园区产业共生是一种重要的系统理念, 包括基础设施间、企业-基础设施和企业间的产业共生。基于物质流、能量流调控和优化的产业共生, 可以为化工园区减污降碳协同增效提供有力支撑。建议化工园区结合化工行业用能特点和产废特征, 持续完善能源、环境基础设施作为“分解者”的功能, 强化基础设施“生态绿岛”作用, 在解决化工园区及所在地区环境问题的过程中, 通过资源化和能源化实现环境效益与经济效益的双赢。化工园区需要创新商业模式, 行业管理部门应引导和建立化工园区管理部门-大型化工企业-国有基础设施企业等多个利益相关方的合作机制, 实施专业化、公益化运维危废处置模式, 显著降低化工园区企业危废处理处置成本, 解决小微产废企业的后顾之忧。

(三) 激发系统效率变革, 推动化工园区绿色高质量发展

化工园区产业的现代化与高质量发展需要坚持

和倡导全要素、全过程、全链条、全领域的系统观, 实施效率提升工程, 全面提升化工园区的全要素生产效率、产业效率、资源效率、碳生产率、生态效率、空间效率。建议以智能化、融合化赋能化工园区产业发展, 实现化工生产中“人、机、料、法、环、测”六要素的数字化集成和智慧化应用, 全面提升化工企业在工艺设计、安全环保、化学品管理等环节的智能化水平。以“延链、补链、强链”壮大化工园区主导产业, 深化产业共生体系横向拓展、纵向延伸、一体化发展, 切实增强产业生态系统的韧性和安全水平。以减污降碳提升化工园区的生态效率, 推动企业循环式生产、产业循环式组合, 通过生产过程-产业链接-基础设施-安全环境协同, 强化技术升级和减少源头排放, 推动化工园区能源系统优化和梯级利用。持续提高化工园区资源产出率和碳生产率, 推动化工园区经济发展与资源能源消耗及碳污排放脱钩, 着力“一园一策”推动基础设施共生, 深化化工园区减污降碳。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 25, 2024; Revised date: February 17, 2024

Corresponding author: Zhu Lizhong is a professor from the College of Environmental and Resource Sciences of Zhejiang University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research fields include soil pollution control and remediation. E-mail: zlz@zju.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2021YFC1809204); Chinese Academy of Engineering project “Countermeasures for Site Pollution Risk Prevention and Control in Chemical Industrial Park” (2023-XZ-37); National Natural Science Fund Project (72274103)

参考文献

- [1] 武振华. 我国化工行业碳排放效率、影响因素及碳配额分配研究 [D]. 天津: 天津大学(博士学位论文), 2018.
Wu Z H. Carbon emission efficiency, determinants and carbon quotas allocation in China's chemical industry [D]. Tianjin: Tianjin University (Doctoral dissertation), 2018.
- [2] 庞凌云, 翁慧, 常靖, 等. 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 356-367.
Pang L Y, Weng H, Chang J, et al. Pathway of carbon emission peak for China's petrochemical and chemical industries [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 356-367.
- [3] United Nations Environment Programme. Global chemicals outlook: Towards sound management of chemicals [R]. Gigiri Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019.
- [4] 马从越, 任芳. 构建化工园区高质量发展评价指标体系的

- 研究[J]. 现代化工, 2023, 43(9): 11–15.
- Ma C Y, Ren F. Research on establishing an evaluation index system for high-quality development of chemical industry parks [J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(9): 11–15.
- [5] 吕一铮. 精细化工园区全过程减污降碳协同技术路径研究[D]. 北京: 清华大学(博士学位论文), 2023.
- Lyu Y Z. Study on technology roadmap for whole-process synergistic reduction of pollution and carbon emissions targeting a fine chemical industrial park [D]. Beijing: Tsinghua University (Doctoral dissertation), 2023.
- [6] Hu W Q, Tian J P, Zang N, et al. Study of the development and performance of centralized wastewater treatment plants in Chinese industrial parks [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 939–951.
- [7] Lyu Y Z, Ye H Y, Zhao Z N, et al. Exploring the cost of wastewater treatment in a chemical industrial park: Model development and application [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155: 104663.
- [8] 周合喜, 罗华瑞, 李华伟, 等. 化工园区废水处理过程中溶解性有机物变化特征[J]. 中国给水排水, 2022, 38(23): 80–87.
- Zhou H X, Luo H R, Li H W, et al. Variation characteristics of dissolved organic matter in wastewater treatment process of chemical industrial park [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(23): 80–87.
- [9] 叶菡韵, 田金平, 陈吕军. 精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1116–1122.
- Ye H Y, Tian J P, Chen L J. Accounting methods of VOCs emission associated with production processes in a fine chemical industrial park [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1116–1122.
- [10] Mo Z W, Shao M, Lu S H, et al. Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 533: 422–431.
- [11] Wang J L, Qian Y, Horan N, et al. Bioadsorption of pentachlorophenol (PCP) from aqueous solution by activated sludge biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2000, 75(2): 157–161.
- [12] Li J, Lu Y L, Wang G, et al. Evaluation and spatial diffusion of health risk of persistent organic pollutants (POPs) in soils surrounding chemical industrial parks in China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2010, 16(5): 989–1006.
- [13] Fouladi J, AlNouss A, Al-Ansari T. Sustainable energy–water–food nexus integration and carbon management in eco-industrial parks [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 418: 138071.
- [14] 高晗博, 冯则实, 吕一铮, 等. 工业园区碳污协同的脱钩发展技术路径研究[J/OL]. 环境科学研究: 1–18 [2024-02-02]. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.10>.
- Gao H B, Feng Z S, Lyu Y Z, et al. Research on the technological pathway of decoupling development towards synergy between pollution and carbon reduction in industrial parks [J/OL]. *Research of Environmental Sciences*: 1–18 [2024-02-02]. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.10>.
- [15] Xu F, Shu C, Tian J P, et al. A decade advance in eco-efficiency and cost-benefits of emissions reduction targeting fine chemical manufacturers [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113476.
- [16] 王莉, 陈浮, 陈海燕, 等. 低碳经济和土地集约利用的脱钩分析体系研究——以江苏省昆山经济开发区为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 218–222.
- Wang L, Chen F, Chen H Y, et al. Study on decoupling analysis system of low-carbon economy and intensive land use—A case of Kunshan Economic Development Zone of Jiangsu Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(4): 218–222.
- [17] Qian Y S, Zhao J L, Lyu Y Z, et al. Uncovering the roadmap of decoupling economic growth and CO₂ emissions targeting energy-resource-emission-intensive industrial parks located nearby large river: Practices and implications from China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 393: 136306.
- [18] Guo Y, Tian J P, Chen L J. Managing energy infrastructure to decarbonize industrial parks in China [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 981.
- [19] 陈吕军, 田金平, 赵远. 杭州湾精细化工园区碳的物质流分析研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(12): 80–83.
- Chen L J, Tian J P, Zhao Y. Study on carbon flow analysis in fine chemicals industry park in Hangzhou Bay [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(12): 80–83.
- [20] Tian J P, Guo Q P, Chen Y, et al. Study on industrial metabolism of carbon in a Chinese fine chemical industrial park [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(2): 1048–1056.
- [21] 郭颖, 胡山鹰, 陈定江. 元素流分析在生态工业规划中的应用[J]. 过程工程学报, 2008, 8(2): 321–326.
- Guo Y, Hu S Y, Chen D J. Application of substance flow analysis in eco-industrial park planning [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2008, 8(2): 321–326.
- [22] 高洋, 王帅, 程蕾, 等. 工业园区物质流管理: 内涵、方法与建议[J]. 环境科学研究, 2023, 36(12): 2417–2424.
- Gao Y, Wang S, Cheng L, et al. Material flow management in industrial parks: Connotation, methods and suggestions [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(12): 2417–2424.
- [23] Lyu Y Z, Yan K, Tian J P, et al. High cost of waste treatment calls for systematic rethinking: A case study for a chemical industrial park in China [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2023, 27(1): 362–375.
- [24] 田金平, 李星, 陈虹, 等. 精细化工园区绿色发展研究: 以杭州湾上虞经济技术开发区为例[J]. 中国环境管理, 2019, 11(6): 121–127.
- Tian J P, Li X, Chen H, et al. The green development of fine chemical industrial parks in China: A case study in Hangzhou Bay [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2019, 11(6): 121–127.
- [25] 陈吕军, 何旭斌, 田金平, 等. 典型染料医药化工园区清洁生产与循环经济发展路径研究[J]. 中国环境管理, 2023, 15(4): 151–158.
- Chen L J, He X B, Tian J P, et al. Unveiling the roadmap of cleaner production and circular economy development in a typical Chinese chemical industrial park featured by dyestuff pharmaceutical manufacturing [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2023, 15(4): 151–158.
- [26] 郝乔. 中国典型化工园区物质能量代谢演化分析及绩效评价[D]. 北京: 清华大学(硕士学位论文), 2017.

- Hao Q. Assessment of material & energy metabolism and its performance in a typical chinese chemical industrial park [D]. Beijing: Tsinghua University (Master's thesis), 2017.
- [27] Hao Q, Tian J P, Li X, et al. Using a hybrid of green chemistry and industrial ecology to make chemical production greener [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122: 106–113.
- [28] Lyu Y Z, Tian J P, Chen L J. Enabling sustainable chemical manufacturing from product to industrial ecosystem [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 192: 106915.
- [29] Lyu Y Z, Feng Z A, Ji T S, et al. Networking chemicals flows: Efficiency-value-environment functionalized symbiosis algorithms and application [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(46): 18225–18235.
- [30] Lyu Y Z, Gao H B, Yan K, et al. Carbon peaking strategies for industrial parks: Model development and applications in China [J]. *Applied Energy*, 2022, 322: 119442.
- [31] Lyu Y Z, Chen L J, Tian J P, et al. Realizing synergy between pollution reduction and carbon mitigation in industrial parks: From model development to tool application [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 446: 141197.