

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

炼化行业转型路径分析建模研究进展与展望

于贺江¹, 谢艳丽², 曹煜恒¹, 陈定江^{1,3,4}, 周文戟⁵, 朱兵^{1,3,4}

(¹ 清华大学化学工程系, 北京 100084; ² 中石化节能技术服务有限公司, 北京 100120; ³ 化学工程与低碳技术全国重点实验室, 北京 100084; ⁴ 清华大学循环经济研究院, 北京 100084; ⁵ 中国人民大学应用经济学院, 北京 100086)

摘要: 随着现代化产业体系建设和经济社会发展全面绿色转型加快推进, 炼化行业正处于绿色低碳高质量发展的关键转型期, 基于模型开展科学评估并系统分析行业转型路径至关重要。炼化行业近中期同时面临自身生产侧严峻的减排压力和下游消费侧产品结构变革带来的深刻影响, 长期来看基于清洁能源和替代原料的“未来炼厂”愿景备受关注。基于对炼化行业转型路径分析研究的系统梳理, 综述了聚焦生产侧、兼顾生产侧消费侧以及面向“未来炼厂”等三个方面的建模方法进展, 总结提出四个主要观点: (1) 综合建模生产侧和消费侧的转型趋势及其相互作用, 对于全面评估行业转型路径具有重要意义; (2) 在生产侧建模中打开工艺黑箱构建炼厂原型, 是科学评估不同炼厂差异化转型路径的重要基础; (3) 在消费侧, 在社会经济系统背景下建立行业产品需求未来情景, 有助于评估外部需求变革背景下的行业结构转型; (4) 面向未来, 在建模评估中统筹“未来炼厂”愿景与存量资产的渐进式演进, 对构建和评估切实可行的转型路径至关重要。

关键词: 炼化行业; 建模研究; 绿色低碳; 再生能源; 生物质; 废弃材料回收; 未来炼厂

中图分类号: TQ 01; TE 65

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-13

Research progress and prospects of modeling for transition pathways in refining and petrochemical industry

YU Hejiang¹, XIE Yanli², CAO Yuheng¹, CHEN Dingjiang^{1,3,4}, ZHOU Wenji⁵, ZHU Bing^{1,3,4}

(¹ Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ² Sinopec Energy Management Co., Ltd., Beijing 100120, China; ³ State Key Laboratory of Chemical Engineering and Low-carbon Technology, Beijing 100084, China;

⁴ Institute for Circular Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ⁵ School of Applied Economics, Renmin University of China, Beijing 100086, China)

Abstract: As the comprehensive green transformation of economic and social development accelerates, the refining and petrochemical industry is entering a critical period of transition toward green, low-carbon, and high-quality development. In this context, scientific assessment and systematic analysis of industry transition pathways based on modeling are of great importance. Considerable research has employed different modeling approaches, each with a distinct emphasis, to investigate various aspects of this transition process, including the deepening of green and low-carbon development on the production side, the rapid evolution of product demand structures on the consumption side, the fast development of waste material recycling, and the emergence of "future refineries" based on clean energy and alternative feedstocks. This paper reviews modeling methods for analyzing transition pathways in the

收稿日期: 2026-04-13 修回日期: 2026-05-09

通信作者: 朱兵(1967-), 男, 博士, 教授, bingzhu@tsinghua.edu.cn; 谢艳丽(1976-), 女, 硕士, 正高级工程师, xieyl.sem@sinopec.com

第一作者: 于贺江(2002-), 男, 博士研究生, yuhj23@mails.tsinghua.edu.cn

引用本文: 于贺江, 谢艳丽, 曹煜恒, 陈定江, 周文戟, 朱兵. 炼化行业转型路径分析建模研究进展与展望[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-13

Citation: YU Hejiang, XIE Yanli, CAO Yuheng, CHEN Dingjiang, ZHOU Wenji, ZHU Bing. Research progress and prospects of modeling for transition pathways in refining and petrochemical industry[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-13

refining and petrochemical industry and systematically summarizes research progress in three areas: studies focusing on the production side, studies integrating both production and consumption sides, and studies oriented toward "future refineries." On this basis, four main conclusions are proposed: (1) integrated modeling of transition trends on the production and consumption sides, as well as their interactions, is of great significance for comprehensively evaluating industry transition pathways; (2) in production-side modeling, opening the process black box and constructing refinery prototypes provide an important foundation for scientifically assessing differentiated transition pathways for different refineries; (3) on the consumption side, situating the industry within the broader socioeconomic system to develop future product demand scenarios helps evaluate structural transformation of the industry under changing external demand conditions; and (4) looking ahead, coordinating the vision of "future refineries" with the gradual evolution of existing assets in modeling and assessment is crucial for constructing and evaluating pragmatic and feasible transition pathways.

Keywords: refining and petrochemical industry; modeling; green and low-carbon; high-quality development; renewable energy; biomass; waste material recycling; future refinery

引 言

“十五五”规划纲要系统部署了建设现代化产业体系、加快经济社会发展全面绿色转型等重大战略任务^[1],为推动炼化行业高质量发展指明了方向、提供了根本遵循。作为典型的原材料工业,炼化行业为经济社会下游部门和终端消费提供交通燃料、基础化工原料和合成材料等重要产品,在保障能源和产业安全、支撑国民经济发展中发挥重要作用^[2-3]。面向“十五五”时期和更长远未来,炼化行业不仅面临着生产侧严峻的减排压力,而且受到下游消费侧结构变革的深刻影响,同时面对清洁能源和低碳原料发展普及的重要机遇,亟需持续深入推进绿色低碳高质量发展。

具体而言,在生产侧,2021年我国炼化产业二氧化碳排放总量约5.3亿吨,约占全国碳排放量的5%,能源消耗超90%依赖化石资源^[3]。随着碳排放双控、碳市场扩围等政策相继落地,炼化行业传统的高碳排放生产模式亟须转变。在消费侧,一方面能源转型背景下我国成品油消费已达峰并进入下行阶段^[4],化工原料用油占比预计将稳步提升,石油消费总量进入峰值平台期^[5];另一方面,随着炼化产品中塑料等材料产品占据更大比重,消费后的废弃材料再生利用等循环经济举措成为行业绿色低碳发展的重要路径。面向碳中和未来,构建以生物质、CO₂及绿氢等替代原料为核心、深度集成清洁能源并产出低碳燃料与材料的“未来炼厂”,已成为当前学术研究与产业实践的前沿热点方向^[6-7]。

在上述多重转型趋势交织下,需要基于科学模

型来分析和评估炼化行业在不同情景、不同技术路线组合下的转型路径。侧重于转型进程中的不同问题,近年来国内外大量研究采用不同方法开展分析。综述方面,Yao等和Jin等分别综述了化学工业净零路径模型的方法和要素^[8-9],但目前仍缺乏针对炼油化工行业并从模型方法视角出发的系统性综述。基于此,本文围绕转型进程中的现实问题(如图1所示),系统梳理已有建模进展并提出未来展望:第1节聚焦生产侧的建模研究,评述当前研究如何解析行业生产流程和碳排放模式;第2节兼顾生产消费的建模研究,主要关注当前研究如何评估消费侧变革趋势下的结构转型路径,以及研究如何支撑行业循环经济技术与实践;第3节评述面向“未来炼厂”的分析建模,探讨当前研究如何评估行业面向未来的务实转型路径;第4节基于文献综述提出未来研究展望。



图1 炼化行业绿色低碳高质量发展现实问题与建模方法综述框架

Fig.1 Review framework for practical topics and modelling methods of green, low-carbon and high-quality development in the refining and petrochemical industry

1 聚焦生产侧的转型路径分析建模

不同于聚焦特定炼厂的研究,本文探讨的模型旨在刻画行业全景。尽管针对具体炼厂物质能量代谢和碳排放的建模分析^[10-17]在工艺层面具有高分辨率,但难以支撑涉及工艺、炼厂、行业多尺度问题的转型决策。炼化工艺流程由一系列高度集成的装置构成,不同炼厂的原料性质、工艺流程和产品方案具有显著差异,同一炼厂也能够灵活调整运行工况以应对动态的市场需求,这些都对构建兼顾炼厂异质性和模型通用性、支撑跨尺度转型决策的行业模型提出了很高要求。当前研究主要从两方面开展:一是通过行业碳核算宏观界定行业排放基准,二是基于通用的炼厂生命周期清单模型从工艺层面解析行业物质代谢与碳排放模式。这些由不同现实问题催生的差异化建模方法虽然目标各异,但共同为解析行业生产侧原料、工艺流程、产品结构、能耗碳排放间的内在关联,进而评估其中长期转型路径提供了重要基础。

1.1 行业碳排放核算分析模型

行业碳排放核算分析主要聚焦低碳转型,基于排放因子(系数)核算行业碳排放,旨在摸清碳排放家底、评估不同举措的减碳潜力。基于排放因子的核算研究大体可分为两类:一是从真实炼厂出发核算企业碳排放,累加折算得到行业整体排放;二是在识别炼厂差异的基础上,按照炼厂类型构建排放系数,以更高效率计算行业整体排放。第一类研究基于企业碳核算的通行标准^[18-20],按照排放源种类核算行业碳排放^[3,21-27],为全行业评估提供了可靠的基础与基准。例如,贾翌基于40家典型炼油企业的燃料消耗量、烧焦量和产氢量等基础数据,基于产能折算和行业标准核算2019年行业总碳排放^[25]。针对企业生产数据获取受限的挑战,有研究结合公开发布的能源统计数据开展核算^[28-31]。

第二类研究则更强调通过炼厂分类高效测算行业整体碳排放。现有研究表明,原油性质、加工流程和产品结构是不同炼厂碳排放强度的主要影响因素,这为构建基于炼厂分类的共性分析框架提供了重要的实证支撑。Karras和Venkatesh的研究分别证实了原油性质(如密度和含硫量)和炼厂构型对排放差异与核算不确定性的决定性影响^[32-33]。李承卓等人基于国内84家炼厂的研究指出炼厂碳强度随复杂性指数先增加后降低^[34]。李明丰等人指

出相较于燃料型炼厂,炼化一体化炼厂生产环节排放虽因加工流程较长而增加,但受益于化工品的固碳作用,其全生命周期碳强度反而下降^[35-36];炼厂碳强度对加工流程的敏感度高于其他因素,优良的低碳流程基因是炼厂最有效的碳减排手段^[37]。国际能源署较早针对欧洲地区炼油行业的碳排放强度开展分析^[38],测算了欧洲不同构型炼厂的碳排放系数,被后续研究广泛用作分类核算的依据和参考^[39-41]。例如,Lei等人引用该研究对全球炼厂按加工深度分为5类,建立全球炼厂2000-2018年时间序列排放清单^[39]。

总体来看,上述两类核算路径各有侧重并形成互补。基于真实炼厂数据的核算方法更贴近企业实际运行,能够为行业排放总量核算提供坚实的底层依据,但受制于企业数据可得性,推广到长时间序列和全行业范围时存在一定限制。基于炼厂分类的核算方法立足行业全景,高效刻画长时间序列、炼厂级的碳排放模式,实现了其他建模方法难以企及的建模效率;针对不同炼厂工艺流程的显著差异,研究依据加工深度或复杂性系数分类考察炼厂,识别简单型、复杂型及一体化流程特征以及催化裂化、加氢裂化等关键深加工装置,一定程度上刻画了行业内部的炼厂异质性。然而,这类研究主要围绕碳排放本身展开,针对不同炼厂基于工艺流程的差异化减碳路径评估仍有待进一步深化。

1.2 通用的炼厂生命周期清单模型

通用的炼厂生命周期清单模型基于工艺流程的物质能量平衡搭建,不仅用于提供炼油环节的产品生命周期清单数据,而且能有效建模一般炼厂物质代谢与碳排放模式。尽管各炼厂基于自身运行数据开展核算更接近物理真实,但由于涉及商业机密而难以保证方法一致和结果透明,同时实际生产的灵活调整不可避免地引入“噪声”,因而难以支撑政策实践;反之,若采用简化的行业平均数据,则无法有效反映企业运营优化与技术创新对产品生命周期表现的提升作用,导致政策引导缺乏足够的灵敏度。因此,通用的炼厂生命周期清单模型在可操作性和有效性方面寻求平衡,旨在搭建宏观政策与微观工艺之间的分析桥梁。例如,卡尔加里大学开发的石油炼制生命周期清单模型(Petroleum REfinery Life cycle Inventory Model, PRELIM)^[42]以原油性质与工艺流程类型为模型输入,基于质量能量守恒原则在装置层面搭建工艺流程(如图2所示),

通过建模行业内各炼厂的方式形成了一套行之有效的行业资源能源代谢建模方法论,其应用也由产品生命周期清单分析^[43-46],拓展至全行业物质代谢和碳排放模式解析^[47-50]、减碳技术评估^[51]及行业转型路径分析^[52-53]等领域。在国内,石科院研发的炼化资源可视化智能优化系统(Visualized Intelligent System for Petrochemical Resources Optimization, VISPRO)^[35]可用于炼化企业的总流程优化,并通过集成原油数据库与模块化工艺建模,搭建了覆盖国内100多家炼厂、2000套装置的石化生产过程物流碳流数据库,为制定行业碳减排路线图提供基础数据支撑。

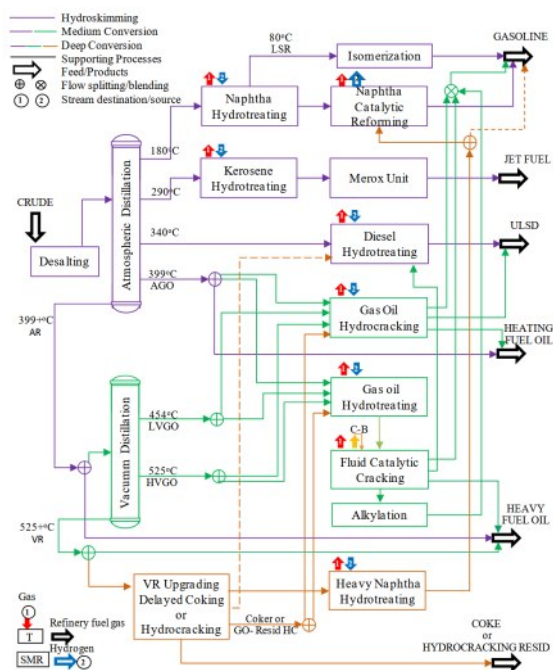


图2 PRELIM模型炼厂简化流程图^[42]

Fig.2 Simplified process flow diagram of refineries in the PRELIM model^[42]

通用的炼厂生命周期清单模型在工艺层面细致刻画炼厂的物质流动和碳排放,为评估减排技术路径提供重要支撑。深入工艺流程是定量评估各类减排技术可行性和减排潜力的前提,以碳捕集技术为例,只有识别高浓度二氧化碳的产生环节及其规模,才能评估其应用潜力;同样,只有明确用电环节、用电规模及相关工艺可行性,才能判断绿电替代的减排潜力。通用的炼厂生命周期清单模型基于原料、工艺流程等关键影响因素对炼厂进行分类,通过分类将不同炼厂之间的差异纳入分析,对于评估同一减排技术在不同炼厂中的应用潜力,以

及为不同炼厂制定差异化转型策略,具有关键的决策支撑作用。

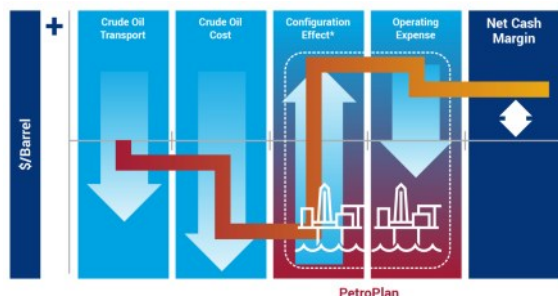
2 兼顾生产消费的转型路径分析建模

行业转型路径由生产侧与消费侧共同塑造。在成品油需求达峰及“减油增化”持续推进、循环经济作为重要转型路径备受关注的背景下,消费侧不仅驱动产品结构转型,而且为行业提供资源闭环的重要机遇,兼顾生产消费两侧的分析模型成为评估行业转型路径的重要基础。本节系统综述兼顾消费侧变化的行业技术经济环境影响评估模型、在气候行动背景下模拟中长期外部需求变革和跨部门影响的综合评估模型,以及关注材料循环利用的全链条物质代谢分析模型。

2.1 行业技术经济环境影响评估模型

行业技术经济环境影响评估模型将产品需求作为模型外部约束,可以评估供需平衡条件下行业兼顾消费侧变化的系统转型路径。研究在方法上引入产业实践中被广泛使用的线性规划技术,通过建模工艺流程和设定经济优化目标,在有限数据基础上模拟全行业在工艺生产能力、产品供需平衡、产品质量标准等多重约束下的生产行为和成本收益。例如,欧洲石油公司环境保护协会(Concawe)使用自行开发的欧盟炼油行业线性规划模型^[54-56],评估未来产品需求结构及质量要求变化对行业碳排放的影响。模型结果显示,为应对消费侧柴汽比持续提升的趋势,2000至2020年间欧盟炼厂年碳排放量将增加约2800万吨,而质量法规升级带来的增量影响约2700万吨^[55]。现有研究将原料成本、产品价格、投资运营支出及盈亏平衡分析纳入模型,为系统评估行业转型路径提供重要基础。例如,伍德麦肯兹(Wood Mackenzie)使用线性规划工具PetroPlan搭建炼厂评估模型(如图3所示),基于工艺核算净现金利润等经济指标,定量评估具体资产在净零排放目标下的生存能力^[57]。最新的研究报告指出,由于石油需求即将达峰、碳成本持续上升,以及缺乏炼化一体化配套设施等因素,到2035年全球可能有超过五分之一的炼油产能需要重组或关闭^[58]。

通过将消费侧产品需求和经济运行指标纳入转型路径分析,现有研究为评估炼化行业产品结构

图3 伍德麦肯兹炼厂评估模型概念框架图^[57]Fig.3 Conceptual framework of the Wood Mackenzie's refinery evaluation model^[57]

转型、评估转型路径的成本效益提供科学支撑。当前,全球石油需求正步入峰值平台^[59],我国也将在“十五五”时期推动石油消费达峰^[1];石油应用场景正由“燃料型”加速转向“原料型”,石化原料增量预计将占到达峰前全球石油总需求增量的60%^[59-60]。在此背景下,相关研究强化需求侧预测来提升路径评估的系统性,如庞凌云等从生产端和消费端两方面综合设计行业碳达峰情景^[61],王琪等结合对石化产品需求的预测评估行业碳中和路径^[62],消费侧产品需求的深刻变革已成为行业转型建模中不可忽视的重要方面。与此同时,行业已进入产能过剩和盈利承压的结构性动荡期,预计到2030年炼油利润率将从当前水平下降5%至30%^[63]。消费侧变革和存量竞争成为炼化行业中长期转型不可忽视的关键要素,评估生产端如何适配消费端产品需求快速分化,经济效益评估成为转型路径分析中的重要课题。行业技术经济环境影响评估模型旨在为转型路径分析提供多维度系统分析视角,具有重要的参考价值 and 实践指导意义。

2.2 结合综合评估模型的减碳路径分析

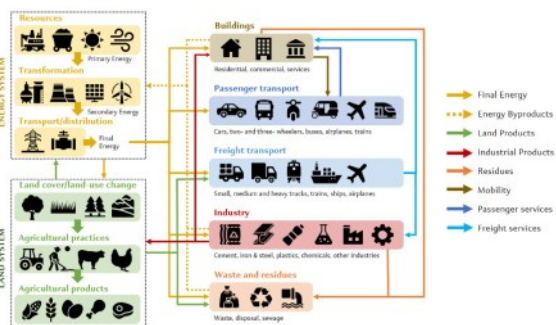
气候变化综合评估模型(Integrated Assessment Model, IAM)模拟气候行动背景下炼化行业与经济社会其他部门,特别是能源部门转型的相互作用,为评估行业中长期低碳路径提供了重要的宏观框架。IAM基于对复杂的社会生态系统建模提供合理的未来情景,模型包括核心的能源模块以及气候环境、土地利用等其他相互关联的模块,被广泛用于探索缓解气候变化的技术路线组合与未来成本^[64]。炼化行业既是能源消费者也是多种能源产品的生产者,IAM能够全面表征炼化行业与电力、交通、原油开采等部门间的关联特征,预测未来炼化行业使用和生产不同能源载体的需求。例如,交通部门电气化进程加速将引致成品油需求收缩,未来能源结

构清洁化将促进炼化行业清洁低碳转型。这种跨部门的宏观建模将炼化行业置于更广阔的国家或全球供应链背景下,建模行业与其他部门变量间的动态交互,从而确保行业减碳路径与全社会气候行动宏观背景的内在一致性。

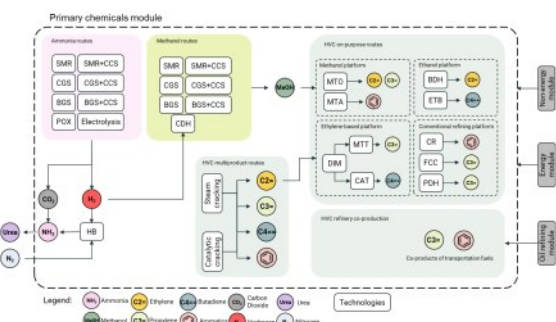
IAM能够基于宏观社会经济驱动因素直接或间接地分析炼化产品的长期需求动态,为研判炼化产品结构调整趋势提供量化工具。模型使用的典型情景包括五种共享社会经济路径(Shared Socio-economic Pathways, SSPs)等,以人口规模、经济增速及城市化水平作为核心变量,建模经济社会对终端能源服务与石化材料的具体需求指标^[65]。在石油资源材料属性增强、总量即将达峰的“后石油时代”,这种建模范式能够揭示非能源需求对化石资源消费增长的支撑作用。例如,巴西里约热内卢联邦大学 Cenergia 团队在 MESSAGEix 框架下开发的能源与环境可计算框架模型(COMputable Framework For Energy and the Environment model, COFFEE, 一种 IAM)(如图4(a)),通过内生表征炼油与大宗化学品生产的关联(如图4(b)),揭示了非能源用途需求是化石燃料逐步淘汰进程中的关键约束,为评估“减油增化”进程中的全球炼化行业转型提供了系统性视角^[66-67]。

关注如何通过提高服务供给效率来降低能源与材料需求,已成为IAM研究领域衡量炼化转型路径的新兴趋势。通过改变社会需求行为模式缓解气候变化的需求侧减量措施,将逐步推动全社会资源利用模式的深入变革,是炼化行业未来转型发展不可忽视的关键趋势^[68]。例如,交通服务的模式转变(如从私家车转向共享电动交通)决定了交通燃料需求上限,而材料效率举措则通过降低原生材料需求促使上游生产侧变革。在方法论上,模型开始整合“避免-转移-改进”框架^[69],量化评估共享出行、城市空间优化及材料效率提升(如轻量化、再利用)等需求侧策略如何减少对初级石化产品的依赖。尽管需求侧方案展示了巨大的减排潜力,但现有IAM在系统性整合社会行为变革、基础设施约束等方面仍处于快速发展阶段,亟需进一步深化以评估消费范式变革对行业转型的深层驱动。

IAM长期以来将炼化设施描述为高度聚合节点的建模范式,导致其在刻画行业内部复杂的机理与底层工艺细节方面存在显著局限。现有的IAM大多基于宏观经济或能源平衡框架,倾向于通过经济



(a) COFFEE 模型框架图



(b) COFFEE 模型中的石油化工模块

图4 COFFEE模型及其石油化工模块^[66-67]Fig.4 COFFEE model and its petrochemical module^[66-67]

成本寻优而非工艺物理现实来描述行业行为,且大多数模型并不满足质量与能量守恒的底层约束^[64]。这导致模型难以解析原料性质波动、装置间流量分配及物理化学平衡等生产侧关键约束,难以在工艺实际层面评估低碳技术方案与既有生产系统的物理兼容性。针对上述局限,已有研究尝试通过在综合评估框架内嵌入炼厂典型工艺流程、细化原材料工业全生命周期模块,以及耦合具有高分辨率的炼化子系统模型,以实现质量与能量平衡、设施动态退役以及投资决策演变的精细化模拟,弥补IAM在生产侧刻画的缺失^[70-72]。这种前沿建模范式有助于在满足全球气候目标的前提下,探索技术可行、物理真实且全局优化的行业转型路径。

2.3 合成材料全链条物质代谢分析

合成材料(包括塑料、合成纤维与合成橡胶等)是炼化行业向下游延伸的关键产物。随着石油资源的原料属性愈发增强,合成材料在行业产出结构中的重要性持续上升^[73]。不同于燃料产品,合成材料在消费后持续形成大量废弃物流,由此带来的环境污染已成为国内外共同面对的治理议题^[74-75]。与此同时,消费后废弃的合成材料是可回收利用的二次资源,经化学循环后能够重新投入生产并减少对

原生资源的依赖,炼化企业的生产设施和物流网络也为化学循环产业化提供重要基础。因此,废弃材料化学循环作为污染治理的有效手段,正成为推动炼化行业绿色低碳转型的重要途径之一。例如,《关于促进炼油行业绿色创新高质量发展的指导意见》要求加快废塑料化学循环工程试点示范^[76],《炼油行业节能降碳专项行动计划》进一步明确鼓励有条件的炼油企业探索废塑料与原油耦合加工^[77]。然而,废弃材料化学循环并非孤立的末端处置问题,其可行规模、适用边界及其对炼化行业转型的贡献,亟须通过“生产-加工-消费-废弃-回收”全链条物质代谢分析予以系统评估。

合成材料物质代谢分析为废弃材料循环利用潜力评估提供科学模型和数据基础。动态物质流分析(dynamic Material Flow Analysis, dMFA)通过引入寿命分布函数,可以量化合成材料在“生产-加工-消费-废弃-回收”全链条中的流量和存量,被广泛用于刻画废弃材料的总体产生规模与处置方式^[78]。已有研究针对中国1978至2022年的长时序数据,开展通用塑料、非通用塑料、纺织纤维、橡胶的全链条物质流量和存量测算分析,实现了对中国三大合成材料物质代谢的系统量化^[79-83]。基于历史数据,动态物质流分析还可以模拟合成材料未来需求,进一步得到未来报废量,具体方法大致可分为两类:一类是基于历史生产量或消费量时间序列数据,直接外推拟合其未来随时间的变化^[84-85];另一类采用流量驱动与存量驱动相结合,分别基于短寿命部门的流入量和长寿命部门的在用存量,通过其与人均GDP之间的饱和型函数推演未来需求^[86-87]。上述方法可以实现对合成材料未来报废规模与回收潜力的评估,进一步支撑炼化行业转型路径分析建模。

3 面向“未来炼厂”的转型路径分析建模

3.1 “未来炼厂”构建与评估

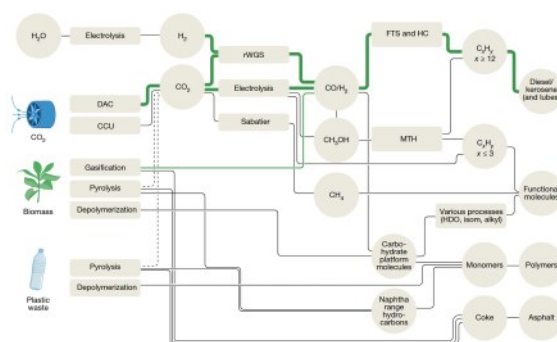
构建以替代原料为核心并深度耦合可再生能源的“未来炼厂”模型,是当前国内外定量评估行业如何实现全生命周期零碳排放的前沿研究方法。不同于传统炼厂评价体系主要聚焦于运营端(范围一、二)的节能降碳,此类建模研究致力于从全生命周期视角出发,系统性地解决燃料燃烧及材料末端

处置所导致的范围三排放问题^[6-7]。研究者通过设计“零化石炼厂”蓝图,模拟在全流程由零碳能源驱动的前提下,利用二氧化碳、生物质及废旧塑料作为初始碳源的生产范式,从而在源头赋予产品碳中和属性。这种建模逻辑不仅回应了气候行动对“清洁分子”的需求,更将炼化行业定位为消纳可再生能源的重要枢纽^[88]。

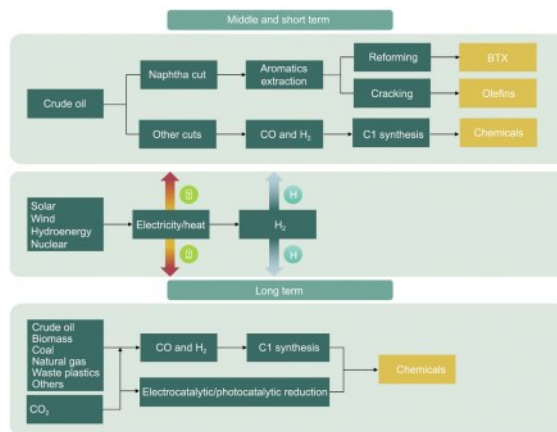
此类建模研究的核心挑战在于对现代高度集成工艺流程的系统性重塑,而非简单的输入端原料替代。现有炼化系统是基于石油烃分子化学性质、历经百年演进形成的复杂网络,其催化体系、反应分离工艺及公用工程平衡具有极强的机理耦合性^[6]。因此,前沿研究通常采用流程模拟与系统集成方法,将“未来炼厂”抽象为集可再生能源转换与低碳分子供给于一体的“综合能源枢纽”^[89-90]。建模过程通常涵盖三类核心技术路径的解构与重组:一是生物质炼制(Biorefinery)路径,通过评估加氢处理、气化、液化、加氢裂化等工艺,评估脂质、纤维素等生物质资源向可持续燃料材料产品转化的规模化潜力;二是废塑料化学回收路径,也被称作废弃物炼厂(Waste refinery)^[91],重点研究热解或解聚产物作为原料进一步加工的技术和经济可行性;三是耦合绿氢与二氧化碳的PtX(Power-to-X)路径,即所谓的二氧化碳炼厂^[92-93]或电力炼厂^[94],定量分析电驱合成燃料和化学品在能量转化效率与碳原子闭环流动方面的表现。

基于模型的定量评估结果显示,完全独立运行的“零化石炼厂”将面临极高的资本支出与热力学效率损失。Vogt 等人通过 Nature 封面文章提出以废塑料、生物质和二氧化碳为原料,完全由清洁能源驱动的“未来炼厂”理想化模型(如图 5(a)所示),指出若全面替换全球现存炼厂以实现炼化碳中和,其单厂建设成本可达 140–230 亿欧元,全球范围内的年度投资需求高达 3200–5200 亿欧元^[6]。Zhang 等人深入探讨了石油化工未来基于碳一化学的至简发展路径(如图 5(b)所示),认为当前诸多关键技术尚未成熟,且存在转化效率低、选择性不足等问题,主张以渐进改造补充优化现有产业体系^[7]。Ioannou 等人的研究指出 PtX 技术路线在热力学上的本质劣势,即相较于直接电气化,将电能通过化学键储存再释放的过程伴随着剧烈的效率损失,这直接推高了单位产品的绿色溢价^[92]。De Lun 等人认为,在缺乏强力碳税补贴的情况下,只有当绿电成本降至极

低水平且电化学转化效率取得突破时,二氧化碳制燃料路径才具备商业竞争潜力^[94]。这些评估结果不仅界定了“未来炼厂”的技术经济边界,同时为行业转型提供了关于关键矿物、土地、生物质及水资源消耗等多维度的可行性分析。



(a) Vogt 等(Nature 封面文章)提出的未来炼厂路线图



(b) Zhang 等针对石化流程简化重构的两步路线图

图5 国内外重要期刊及团队关注未来炼厂转型愿景^[6-7]

Fig.5 Research focus of leading global journals and teams on the transformation vision of future refineries^[6-7]

虽然“零化石炼厂”建模为行业定义了终极转型愿景,但其揭示的巨大技术经济瓶颈提示研究重心应向更具务实性的系统演进策略转移。现有研究已清晰指出,脱离既有产业基础的系统性重建不仅会造成巨大的资产搁浅压力^[95],更可能因原料供应体系(如生物质季节性波动、废塑料跨区域收集)的不成熟而面临运行风险^[96]。因此,未来的建模趋势正转向如何通过统筹理想蓝图与存量设施,在满足全球气候目标的前提下,探索技术可行且成本最优的循序渐进式转型路径,从而为“未来炼厂”从设想走向实践提供科学依据。

3.2 结合“未来炼厂”的行业转型路径研究

通过对存量炼化设施进行模块化改造的建模

分析,研究者揭示了依托现有资产实现低成本、低风险转型的路径可行性。现有炼厂拥有完善的生产设施、成熟的储运网络以及专业的工程化人才储备,这将成为新兴低碳技术规模化落地的重要基础^[90,97-98]。立足现实的建模研究强调,向未来炼厂转型并非只有“彻底推倒重建”这一选项,而是涵盖了炼厂集成(Integrated)、原料共加工(Co-processing)和原料完全替代(Conversion)等多元化路径^[90]。例如,相关咨询机构通过对全球典型炼厂改造案例的模拟分析证实,约三分之二的低碳转型项目实际上是通过存量传统炼厂的深度集成或局部转型实现的^[97]。这种建模范式通过量化既有核心装置(如加氢处理或催化裂化)对替代原料的兼容性,为行业提供了更具竞争力的初步减碳方案。

针对我国炼化一体化程度极高的产业现状,相关研究重点评估了可再生电力耦合、绿氢替代及低碳原料共加工等渐进式路径的技术经济表现。例如,吴德飞针对1.20 Mt/a规模的大型乙烯装置开展建模研究,量化评估了部分蒸汽用户改为电驱动后的减排效益,发现在电气化率提升至34.7%且接入绿电的前提下,年减排二氧化碳可达51万吨^[99]。伍洛等人选取燃料型与燃料化工型两类典型炼厂开展案例研究,深入剖析了制氢装置的碳排放特点并提出差异化绿氢耦合方案,量化评估了绿电价格与电耗对绿氢替代技术经济性的决定性影响^[100]。刘迪等人系统论述了可再生油脂及废塑料热解油与石油共加工的技术路径,揭示了利用现有炼油设施开展低比例掺炼在降低投资成本、实现生物燃料规模化生产等方面的显著优势^[101]。

基于现有设施改造的渐进式路径分析为“未来炼厂”提供了稳健的技术支撑,为兼顾产业链供应链安全与绿色低碳转型提供基础。考虑到炼化设施长寿命、资本密集的属性,建模研究不仅关注技术层面的可行性,而且同时兼顾了产能退出过程中的资产处置与公正转型问题。通过模拟不同需求场景下存量设施的动态演化逻辑,模型可以辅助决策者识别哪些资产通过微调即可适应“后石油时代”,哪些资产因缺乏灵活性而面临关闭风险。这种基于现状的平稳过渡思路,有助于处理好绿色低碳转型与能源安全、产业链供应链安全之间的复杂关系,为制定兼顾国民经济发展与低碳目标的策略提供量化支撑。

4 结论与展望

当前炼化行业正处于绿色低碳高质量发展的关键转型期,亟须面向行业实际决策需求开展转型路径分析建模。作为基础性原材料工业和高载能产业,炼化行业转型发展不仅与自身生产侧有关,而且受到下游消费侧的深刻影响,同时面临可再生能源资源快速发展的重要机遇。炼化行业转型背景和约束条件的复杂性,决定了转型路径评估必须依托能够回应行业现实问题的分析模型。结合图1所示生产侧减排、消费侧变革和未来炼厂流程重构等具体场景,本文认为:

(1)建模不能只围绕生产侧节能降碳展开,还需要把消费结构变化对炼厂工艺路线和碳排放的影响纳入统一的分析框架。例如,传统的燃料型炼厂亟须加快转型升级,以适应汽柴油消费持续萎缩的长期趋势,而这将不免地与节能降碳要求之间存在协同和权衡。若模型仅刻画生产侧减排技术,而缺少对消费侧需求演变的约束,往往难以准确评估行业中长期转型压力,对政策制订和行业战略研判的支撑价值也将受限。

(2)生产侧建模中打开工艺黑箱,通过分类构建炼厂原型是评估不同炼厂差异化转型路径的重要基础。不同炼厂中同一技术路线的可行性及其对原料、产品及碳排放的潜在影响差异显著,而原料性质、产品方案和工艺路线是主导炼厂物质代谢和碳排放模式的重要因素,据此分类构建典型的炼厂原型,兼顾炼厂异质性表征与建模可操作性,能够为不同类型企业识别差异化转型路径提供重要支撑。基于真实炼厂数据、装置参数和物质能量平衡的碳核算及生命周期清单模型,对生产侧排放基准和减排热点具有较强解释力;但当其推广到长时间序列和全行业范围时,仍受到企业数据可得性、样本代表性等因素的制约。

(3)消费侧建模应将行业置于社会经济系统背景下建立产品需求未来情景,从而实现针对外部需求变革背景下行业结构转型的有效评估。将炼化行业置于社会经济系统背景下,利用综合评估模型(IAM)分析炼化产品的长期需求动态,并结合合成材料动态物质流分析,一方面可基于历史数据刻画流量与存量演变规律并建立未来情景,为炼化行业材料产品未来需求分析提供支撑;另一方面可表征废弃材料的产生规模和处置方式,有助于耦合化学

循环和现有炼厂生产。综合评估模型和情景分析方法能够较好刻画消费侧变化对行业结构转型的约束,但其工艺分辨率相对有限,具体的转型路径分析还需结合生产侧建模。

(4)构建科学的转型决策支撑体系,需统筹中短期转型压力与长期“未来炼厂”愿景,寻求兼具短期务实和长期韧性的转型路径。在中短期,存量设施的运营优化和结构转型将是转型主线,而从长期来看,炼厂将逐步超越传统的石油资源加工者角色,通过大规模引入替代碳源、深度耦合可再生能源,开辟产业高质量可持续增长新模式的同时,为全社会迈向碳中和提供关键的低碳物质和能源基础。炼化设施的寿命长、资本密集等属性决定了近中短期决策需要前瞻性分析行业长期发展趋势,“未来炼厂”转型显著的技术经济瓶颈要求依托现有资产,借助前瞻性技术评价、情景分析和综合评估模型等工具,兼顾转型路径在跨周期演进中的韧性和可行性,支撑务实转型路径的评估分析。

需要说明的是,本文重点关注炼油化工行业转型路径分析建模,研究范围主要围绕石油炼制及下游石化展开,进出口对供需平衡的影响有待探讨。未来还需将全球石化生产格局调整、产业出海布局以及油气资源供应风险纳入模型,同时统筹考虑炼化生产与煤化工、轻烃裂解等不同路线之间的协同与竞争关系,以提升转型评估对复杂外部环境的适应性。另外,两层级的废弃材料化学回收体系值得关注:一是旨在靠近废弃物源头的分布式初级转化单元,将废塑料、废轮胎转化为中间体(如热解油);二是集中式的高级处理单元,包括将其运送至传统炼油厂协同加工。开展针对废弃资源与炼厂空间分布的耦合分析,将成为评估该类循环路径可行性与经济性的关键基础。总体而言,面向炼化行业的转型路径分析建模,关键在于以现实决策问题为牵引,为行业在多重约束下制定稳健转型方案、支撑高质量发展科学决策提供坚实基础。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要[N]. 人民日报, 2026-03-14(1).
The outline of the 15th five-year plan for economic and social development of the People's Republic of China[N]. People's Daily, 2026-03-14(1).
- [2] 工业和信息化部,科技部,自然资源部. 关于印发“十四五”原材料工业发展规划的通知[EB/OL]. (2021-12-21)[2026-04-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/29/content_5665166.htm.
- [3] 魏志强,曹建军,孙丽丽,等. 中国炼化产业实现碳达峰与碳中和路径及支撑技术[J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(1): 1-11.
Wei Z Q, Cao J J, Sun L L, et al. The path and supporting technology of carbon peak and carbon neutrality in china's refining and chemical industry[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2024, 40(1): 1-11.
- [4] 中国石油和化学工业联合会. 2025年度中国石油和化学工业经济运行情况发布会[EB/OL]. (2026-02-06)[2026-04-01]. https://www.pcmeeting.cn/conference/detail/2026/c_e76fc522773286a8.html.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Press conference on the 2025 economic performance of China's petroleum and chemical industry[EB/OL]. (2026-02-06)[2026-04-01]. https://www.pcmeeting.cn/conference/detail/2026/c_e76fc522773286a8.html.
- [5] 中石化经研院. 中国能源展望2060[M]. 北京: 中国石化出版社, 2025: 54-56.
Sinopec Economics & Development Research Institute. China Energy Outlook 2060[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2025: 54-56.
- [6] Vogt E T C, Weckhuysen B M. The refinery of the future[J]. Nature, 2024, 629(8011): 295-306.
- [7] Zhang Y, Xing E H, Han W, et al. Petrochemical industry for the future[J]. Engineering, 2024, 43: 99-114.
- [8] Yao Y, Lan K, Graedel T E, et al. Models for decarbonization in the chemical industry[J]. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2024, 15(1): 139-161.
- [9] Jin E Z, Jabarivelisdeh B, Schoeneberger C, et al. Critical review of technologies, data, and scenario elements in net-zero pathway modeling for the chemical industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 205: 114831.
- [10] 彭鑫,沈菲菲,张庭伟,等. 大型炼化一体化过程全流程低碳运行分析与决策优化综述[J]. 中国科学基金, 2024, 38(4): 571-582.
Peng X, Shen F F, Zhang T W, et al. A review of low-carbon operation analysis and decision optimization in large-scale integrated refinery-petrochemical production processes[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2024, 38(4): 571-582.
- [11] Zhang T W, Shen F F, Peng X, et al. Carbon-efficient production planning for long-chain integrated refinery-petrochemical processes: a material-energy-carbon optimization perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 138916.
- [12] 吴明,李雪,贾冯睿,等. 炼化企业碳流动与隐含碳排放分析[J]. 现代化工, 2018, 38(8): 1-7.
Wu M, Li X, Jia F R, et al. Analysis on carbon flow and hidden carbon emissions in refining companies[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(8): 1-7.
- [13] 吴明,姜国强,贾冯睿,等. 基于物质流和生命周期分析的石油行业碳排放[J]. 资源科学, 2018, 40(6): 1287-1296.

- Wu M, Jiang G Q, Jia F R, et al. Carbon emissions from the petroleum industry based on the analysis of material flow and life cycle[J]. Resources Science, 2018, **40**(6): 1287–1296.
- [14] Yang K X, Kong W X, Zhong X L, et al. Collaborative optimization of pollution and carbon reduction through carbon flow tracking integrated with life cycle assessment for petrochemical production[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **488**: 151123.
- [15] 徐东. 炼厂碳足迹核算及碳减排研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- Xu D. Carbon footprint accounting and carbon mitigation research of refinery[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [16] 常斐, 师人博, 刘士花, 等. 石化行业产品生命周期碳足迹评价研究现状及展望[J]. 化工学报, 2025, **76**(2): 419–437.
- Chang F, Shi R B, Liu S H, et al. Product life cycle carbon footprint evaluation for petrochemical industry[J]. CIESC Journal, 2025, **76**(2): 419–437.
- [17] 田涛, 韦桃平, 王北星. 石化产品全生命周期碳足迹评价研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2016, **1**(2): 12–18.
- Tian T, Wei T P, Wang B X. Carbon footprint assessment on petrochemicals life cycle[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2016, **1**(2): 12–18.
- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. 石油化工生产企业 CO₂ 排放量计算方法: SH/T 5000—2011[S]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. The Calculation Method of CO₂ Emissions in Petrochemical Production: SH/T 5000—2011[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012.[LinkOut]
- [19] 国家发展改革委, 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心. 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]. 2014[2026-04-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/W020190905507323633548.pdf>.
- National Development and Reform Commission, National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation. Guidelines for accounting and reporting greenhouse gas emissions of Chinese petrochemical enterprises (Trial)[EB/OL]. 2014[2026-04-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/W020190905507323633548.pdf>.
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 碳排放核算与报告要求 第15部分: 石油化工企业: GB/T 32151.15—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Requirements of the carbon emissions accounting and reporting: Part 15: Refinery and petrochemical enterprise: GB/T 32151.15—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [21] 孟宪玲. 炼厂二氧化碳排放估算与分析[J]. 当代石油石化, 2010, **18**(2): 13–16.
- Meng X L. The estimation and analysis of carbon dioxide emissions in refineries[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2010, **18**(2): 13–16.
- [22] 马敬昆, 蒋庆哲, 宋昭峥, 等. 低碳经济视角下炼厂碳产业链的构建[J]. 现代化工, 2011, **31**(6): 1–5, 7.
- Ma J K, Jiang Q Z, Song Z Z, et al. Construction of refinery carbon industry chain in low carbon economy perspective[J]. Modern Chemical Industry, 2011, **31**(6): 1–5, 7.
- [23] 沈浩. 中国石化炼油企业能源效率研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- Shen H. Study on the refinery's energy efficiency of SINOPEC corp[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [24] 贾翌. 部分典型炼油企业碳排放和碳减排措施研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2022, **7**(1): 11–16.
- Jia Z. The study on carbon emission reduction curve of some typical refineries[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2022, **7**(1): 11–16.
- [25] 贾翌. 中国炼油行业碳排放量及碳减排曲线研究[J]. 石油炼制与化工, 2022, **53**(5): 109–114.
- Jia Z. Study on carbon emissions and carbon emission reduction curve of China's refining industry[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2022, **53**(5): 109–114.
- [26] 刘红光, 何铮, 刘潇潇, 等. 我国石化产业碳达峰、碳中和实现路径研究[J]. 当代石油石化, 2022, **30**(2): 1–4.
- Liu H G, He Z, Liu X X, et al. Research on the path to achieve carbon peak and carbon neutrality in China's petrochemical industry[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2022, **30**(2): 1–4.
- [27] Chen S B, Guo J, Ma Q. Limited synergy of existing emission controls for carbon and air pollutants in the Chinese refining industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2026, **540**: 147478.
- [28] 宋铁君. 中国石油石化行业碳排放波动与低碳策略研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
- Song T J. Carbon wave of China petroleum and petrochemical industry and research on low-carbon strategy[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.
- [29] 刘玲. 我国石化行业温室气体排放变动分析及减排潜力研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
- Liu L. Research on greenhouse gas emission changes and reduction potential in China's petrochemical industry[D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [30] Xie X, Shao S, Lin B Q. Exploring the driving forces and mitigation pathways of CO₂ emissions in China's petroleum refining and coking industry: 1995 – 2031[J]. Applied Energy, 2016, **184**: 1004–1015.
- [31] 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.
- Liu Y Y. Process-based carbon emission estimation method and life cycle environment assessment of the petroleum refining industry[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [32] Karras G. Combustion emissions from refining lower quality oil: what is the global warming potential?[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(24): 9584–9589.
- [33] Venkatesh A, Jaramillo P, Griffin W M, et al. Uncertainty analysis of life cycle greenhouse gas emissions from petroleum-based fuels and impacts on low carbon fuel policies[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(1): 125–131.
- [34] 李承卓, 马丹竹, 牛皓, 等. 炼化行业复杂性与碳排放之间的关系[J]. 石油学报(石油加工), 2024, **40**(1): 239–247.
- Li C Z, Ma D Z, Niu H, et al. Relationship between complexity and carbon emissions in refining and chemical industry[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2024, **40**(1): 239–247.
- [35] 中石化石油化工科学研究院, 德勤中国. 迈向2060碳中和石化行业低碳发展白皮书[R]. 北京: 石科院, 2022.
- Sinopec Research Institute of Petroleum Processing, Deloitte

- China. Carbon neutrality by 2060: White paper on the low-carbon development of the petrochemical industry[R]. Beijing: Sinopec Research Institute of Petroleum Processing, 2022.
- [36] 李明丰, 吴昊. 炼油碳中和[M]. 北京: 中国石化出版社, 2024: 95.
- Li M F, Wu H. Refining carbon neutrality[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2024: 95.
- [37] 李明丰, 吴昊, 沈宇, 等. "双碳"背景下炼化企业高质量发展路径探讨[J]. 石油学报(石油加工), 2022, 38(3): 493-499.
- Li M F, Wu H, Shen Y, et al. High-quality development path for refining and chemical enterprises under the dual carbon background[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2022, 38(3): 493-499.
- [38] International Energy Agency. The European Refinery Industry under the EU Emissions Trading Scheme[R]. Paris: IEA, 2005.
- [39] Lei T Y, Guan D B, Shan Y L, et al. Adaptive CO₂ emissions mitigation strategies of global oil refineries in all age groups[J]. One Earth, 2021, 4(8): 1114-1126.
- [40] 陈宏坤, 田贺永, 肖远牲, 等. 我国炼油行业碳排放估算与分析[J]. 油气田环境保护, 2012, 22(6): 1-3.
- Chen H K, Tian H Y, Xiao Y S, et al. The estimation and analysis of carbon emissions in the oil refining industry of China[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2012, 22(6): 1-3.
- [41] 生态环境部环境规划院, 中国水利水电科学院. 中国石油真实成本研究[R]. 北京: 自然资源保护协会, 2019.
- Chinese Academy of Environmental Planning, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. A study on the true cost of oil in China[R]. Beijing: Natural Resources Defense Council, 2019.
- [42] Abella J P, Bergerson J A. Model to investigate energy and greenhouse gas emissions implications of refining petroleum: impacts of crude quality and refinery configuration[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(24): 13037-13047.
- [43] Young B, Hottle T, Hawkins T, et al. Expansion of the petroleum refinery life cycle inventory model to support characterization of a full suite of commonly tracked impact potentials[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(4): 2238-2248.
- [44] Cooney G, Jamieson M, Marriott J, et al. Updating the U.S. life cycle GHG petroleum baseline to 2014 with projections to 2040 using open-source engineering-based models[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(2): 977-987.
- [45] Oil Climate Index plus Gas[EB/OL]. 2025[2025-07-14]. <https://ociplus.rmi.org>.
- [46] Jing L, El-Houjeiri H M, Monfort J C, et al. Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7853.
- [47] Jing L, El-Houjeiri H M, Monfort J C, et al. Carbon intensity of global crude oil refining and mitigation potential[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(6): 526-532.
- [48] Ma S J, Lei T Y, Meng J, et al. Global oil refining's contribution to greenhouse gas emissions from 2000 to 2021[J]. The Innovation, 2023, 4(1): 100361.
- [49] 刘英洁, 高晗博, 田金平, 等. 中国炼油设施碳排放量化模型及排放特征研究[J]. 中国环境管理, 2025, 17(1): 90-101.
- Liu Y J, Gao H B, Tian J P, et al. Research on carbon emission quantification model and emission characteristics of China's refineries[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2025, 17(1): 90-101.
- [50] Bylsma S, Gordon D, Kirk T. Emissions Out the Gate: State of the Refining and Petrochemical Industries[R]. Basalt: RMI, 2022.
- [51] Motazedi K, Abella J P, Bergerson J A. Techno-economic evaluation of technologies to mitigate greenhouse gas emissions at north american refineries[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 1918-1928.
- [52] Ma S J, Meng J, Lei T Y, et al. Plant-level decarbonization pathways and mitigation costs of global oil refineries[J]. Nature Chemical Engineering, 2026: 1-13.
- [53] International Energy Agency. Emissions from Oil and Gas Operations in Net Zero Transitions: A World Energy Outlook Special Report on the Oil and Gas Industry and COP28[M]. Paris: OECD, 2023.
- [54] Bennett R J, Bosch W, Crociani G, et al. Interim Report on The European Refining Implications of Severe Reformulation of Gasoline and Diesel Fuel[R]. Brussels: Concawe, 1995.
- [55] Dastillung M, Flores R, Gardzinski W, et al. Impact of product quality and demand evolution on EU refineries at the 2020 horizon: CO₂ emissions trend and mitigation options[R]. Brussels: Concawe, 2008.
- [56] Catalá F C, Vuyst K D, Meerleer W D, et al. Estimating the marginal CO₂ intensities of EU refinery products[R]. Brussels: Concawe, 2017.
- [57] Wood Mackenzie. Refinery Evaluation Model[EB/OL]. (2017-06-23) [2026-04-01]. <https://www.woodmac.com/industry/oil-and-gas/midstream/refinery-evaluation-model/>.
- [58] Wood Mackenzie. Global refinery closure outlook to 2035[R]. Edinburgh: Wood Mackenzie, 2025.
- [59] International Energy Agency. World Energy Outlook 2025[R]. Paris: IEA, 2025.
- [60] 中石油经研院. 2060年世界和中国能源展望(2025年版)[R]. 北京: 中石油经研院, 2025.
- CNPC Economics & Technology Research Institute. World and China energy outlook 2060 (2025 edition) [R]. Beijing: CNPC Economics & Technology Research Institute, 2025.
- [61] 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.
- [62] 王琪, 蔡立乐, 于博, 等. 国内炼油行业碳排放预测及碳中和路径研究[J]. 炼油技术与工程, 2025, 55(12): 1-5.
- Wang Q, Cai L L, Yu B, et al. Research on carbon emission prediction and carbon neutrality path of domestic refining industry [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2025, 55(12): 1-5.
- [63] 麦肯锡公司. 展望未来: 炼油与石化行业战略转型已成必选项[EB/OL]. (2025-08-16)[2026-04-01]. <https://www.mckinsey.com.cn/%e5%b1%95%e6%9c%9b%e6%9c%aa%e6%9d%a5%ef%bc%9a%e7%82%bc%e6%b2%b9%e4%b8%8e%e7%9f%b3%e5%8c%96%e8%a1%8c%e4%b8%9a%e6%88%98%e7%95%a5%e8%bd%ac%e5%9e%8b%e5%b7%b2%e6%88%90%e5%bf%85%e9%80%89%e9%a1%b9/>.
- McKinsey & Company. Looking ahead: Strategic transformation has become imperative for the refining and petrochemical industry

- [EB/OL]. (2025-08-16)[2026-04-01]. <https://www.mckinsey.com.cn/%e5%b1%95%e6%9c%9b%e6%9c%aa%e6%9d%a5%ef%bc%9a%e7%82%bc%e6%b2%b9%e4%b8%8e%e7%9f%b3%e5%8c%96%e8%a1%8c%e4%b8%9a%e6%88%98%e7%95%a5%e8%bd%ac%e5%9e%8b%e5%b7%b2%e6%88%90%e5%bf%85%e9%80%89%e9%a1%b9/>.
- [64] Pauliuk S, Arvesen A, Stadler K, et al. Industrial ecology in integrated assessment models[J]. *Nature Climate Change*, 2017, **7** (1): 13–20.
- [65] Vaidyanathan G. Integrated assessment climate policy models have proven useful, with caveats[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118** (9): e2101899118.[LinkOut]
- [66] Zanon-Zotin M, Baptista L B, Draeger R, et al. Unaddressed non-energy use in the chemical industry can undermine fossil fuels phase-out[J]. *Nature Communications*, 2024, **15**: 8050.
- [67] Draeger R, Cunha B S L, Müller-Casseres E, et al. Stranded crude oil resources and just transition: Why do crude oil quality, climate ambitions and land-use emissions matter[J]. *Energy*, 2022, **255**: 124451.
- [68] IPCC. Chapter 5: Demand, services and social aspects of mitigation[R]. Geneva: IPCC, 2022.
- [69] Creutzig F, Roy J, Lamb W F, et al. Towards demand-side solutions for mitigating climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2018, **8**(4): 260–263.
- [70] Zhao F, Fan Y, Zhang S H. Assessment of efficiency improvement and emission mitigation potentials in China's petroleum refining industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **280**: 124482.
- [71] Lantz F, Saint-Antonin V, Gruson J F, et al. The OURSE model: simulating the world refining sector to 2030[J]. *JRC Research Reports*, 2012: 11–24.
- [72] Ünlü G, Maczek F, Min J, et al. MESSAGEix-Materials v1.1.0: representation of material flows and stocks in an integrated assessment model[J]. *Geoscientific Model Development*, 2024, **17** (22): 8321–8352.
- [73] Jiang M, Cao Y H, Liu C G, et al. Tracing fossil-based plastics, chemicals and fertilizers production in China[J]. *Nature Communications*, 2024, **15**: 3854.
- [74] 朱兵. 塑料污染治理中国的行动意义重大[J]. *中国经贸导刊*, 2020(17): 46–48.
- Zhu B. Plastic pollution control: China's actions are of great significance[J]. *China Economic & Trade Herald*, 2020(17): 46–48.
- [75] 曹煜恒, 陈定江, 徐军, 等. 塑料污染治理国际文书谈判背景下“塑料”的定义及内涵辨析[J]. *高分子学报*, 2025, **56**(1): 166–178.
- Cao Y H, Chen D J, Xu J, et al. Analysis of the definition and scope of plastic in the context of the global plastics treaty[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2025, **56**(1): 166–178.
- [76] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部, 等. 关于促进炼油行业绿色创新高质量发展的指导意见[EB/OL]. (2023-10-10)[2026-04-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6911599.htm.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Guiding opinions on promoting green, innovative and high-quality development of the refining industry[EB/OL]. (2023-10-10)[2026-04-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6911599.htm.
- [77] 国家发展改革委, 工业和信息化部, 生态环境部, 等. 关于印发《炼油行业节能降碳专项行动计划》的通知[EB/OL]. (2024-05-27)[2026-04-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6956304.htm.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Ecology and Environment, et al. Notice of on issuing the special action plan for energy conservation and carbon reduction in the refining industry [EB/OL]. (2024-05-27) [2026-04-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6956304.htm.
- [78] Wang C Y, Liu Y, Chen W Q, et al. Critical review of global plastics stock and flow data[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2021, **25**(5): 1300–1317.
- [79] Jiang X B, Wang T, Jiang M, et al. Assessment of plastic stocks and flows in China: 1978–2017[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **161**: 104969.
- [80] Ren Y C, Zhu H Z, Jiang M, et al. Filling the gaps: tracing 12 types of non-commodity plastics in China's plastic socioeconomic metabolism[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, **59** (10): 5001–5011.
- [81] Ren Y C, Zhu H Z, Cao Y H, et al. Dataset on the dynamic stocks and flows of 20 types of plastics in China, 1978 – 2022[J]. *Scientific Data*, 2026, **13**: 64.
- [82] Zhou Z, Cao Y H, Du Z L, et al. Weaving through time: Stocks and flows of textile fibers in China (1978 – 2022) [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, **223**: 108522.
- [83] Li C L, Cao Y H, Ren Y C, et al. Beyond tires: 45 years of rubber flows and stocks in China (1978 – 2022) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2026, **60**(3): 2470–2480.
- [84] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, **3**(7): e1700782.
- [85] Liu Y J, Zhou C B, Li F, et al. Stocks and flows of polyvinyl chloride (PVC) in China: 1980–2050[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **154**: 104584.
- [86] Luan X Y, Cui X W, Zhang L, et al. Dynamic material flow analysis of plastics in China from 1950 to 2050[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **327**: 129492.
- [87] Gao Y H, Cabrera Serrenho A. Evaluating the potential to reduce the global demand for polymers[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, **223**: 108518.
- [88] Arslan M T, Tian G, Ali B, et al. Highly selective conversion of CO₂ or CO into precursors for kerosene-based aviation fuel *via* an aldol – aromatic mechanism[J]. *ACS Catalysis*, 2022, **12**(3): 2023–2033.
- [89] FuelEurope. Vision 2050: A Pathway for the Evolution of the Refining Industry and Liquid Fuels[R]. Brussels: FuelEurope, 2018.
- [90] Gudde N, Larivé J, Yugo M. Refinery 2050: Conceptual Assessment. Exploring opportunities and challenges for the EU refining industry to transition towards a low-CO₂ intensive economy: 2[R]. Brussels: Concaawe, 2019.
- [91] Palos R, Gutiérrez A, Vela F J, et al. Waste refinery: the valorization of waste plastics and end-of-life tires in refinery units, a review[J]. *Energy & Fuels*, 2021, **35**(5): 3529–3557.
- [92] Ioannou I, Javaloyes-Antón J, Caballero J A, et al. Economic and

- environmental performance of an integrated CO₂ refinery[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, **11**(5): 1949–1961.
- [93] Ramirez-Corredores M M. A carbon dioxide refinery: the core of a sustainable carbon-based circular economy[J]. Highlights of Sustainability, 2024, **3**(2): 205–239.
- [94] De Luna P, Hahn C, Higgins D, et al. What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes?[J]. Science, 2019, **364**(6438): eaav3506.
- [95] Yin Z H, Lu X, Nielsen C P, et al. Mitigating inequity risks in China's net-zero energy transition *via* an enhanced renewable-guided industrial spatial reconfiguration[J]. The Innovation, 2026, **7**(6): 101308.
- [96] Concawe. A look into the maximum potential availability and demand for low-carbon feedstocks/fuels in Europe (2020 – 2050) (literature review)[R]. Brussels: Concawe, 2019.
- [97] López A, Ure A, Wolf A, et al. What Future Role for Conventional Refineries in the Decarbonisation Transition[R]. Harwell: Ricardo Energy & Environment, 2022.
- [98] Leavens J, Malik R, Subramanian M, et al. Study on the potential evolution of Refining and Liquid Fuels production in Europe[R]. Brussels: Concawe, 2025.
- [99] 吴德飞. 新建大型乙烯装置提高电气化率研究与思考[J]. 石油炼制与化工, 2025, **56**(7): 1–7.
- Wu D F. Study on increasing electrification rate in new large ethylene plants[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2025, **56**(7): 1–7.
- [100] 伍洛, 张海桐, 韩月明, 等. 绿氢耦合炼油行业发展前景分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2025, **10**(4): 38–43.
- Wu L, Zhang H T, Han Y M, et al. Analysis on the development prospects of green hydrogen coupling in the refining industry[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2025, **10**(4): 38–43.
- [101] 刘迪, 韩伟, 王铃, 等. 共加工: 助力炼油行业迈向低碳未来[J]. 石油炼制与化工, 2025, **56**(3): 148–154.
- Liu D, Han W, Wang L, et al. Co-processing: enabling the refining industry to a low-carbon future[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2025, **56**(3): 148–154.