

石化行业产品生命周期碳足迹评价研究现状及展望

常斐^{1,2}, 师人博¹, 刘士花¹, 高文倩¹, 王一飞¹, 郑镔¹, 焦怡萱¹, 蓝兴英¹, 徐春明¹, 韩晔华¹

(¹ 中国石油大学(北京)重质油全国重点实验室, 北京 102249; ² 石油和化学工业规划院, 北京 100013)

摘要: 在全球“脱碳”进程加速的背景下, 产品碳足迹将成为衡量企业及产品环境责任的关键指标。石油化工行业作为我国减碳的重点领域和国民经济的支柱性产业, 其碳足迹评价工作不仅是推动行业绿色转型及应对国际贸易新壁垒的必要准备, 也是促进行业实现“碳达峰”“碳中和”目标的重要途径。首先从与碳足迹相关的核心概念出发, 通过系统辨析生命周期评价方法、生命周期碳足迹评价方法以及石化行业碳盘查评价框架等内容厘清了目前碳足迹评价方法的发展脉络。然后进一步分析了碳足迹相关国际标准体系及主流工具的特点, 为石化行业重点产品建立国际互认的碳足迹核算标准和数据库提供参考。最后总结了石化行业碳足迹评价的典型应用案例和瓶颈问题, 为未来领域的进一步发展完善指明方向。

关键词: 碳足迹评价; 石油化工; 生命周期评价; 碳达峰碳中和; 温室气体; 可持续性; 环境

中图分类号: X 5; TE 9

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2025) 02-0419-19

Product life cycle carbon footprint evaluation for petrochemical industry

CHANG Fei^{1,2}, SHI Renbo¹, LIU Shihua¹, GAO Wenqian¹, WANG Yifei¹, ZHENG Bin¹, JIAO Yixuan¹,
LAN Xingying¹, XU Chunming¹, HAN Yehua¹

(¹ State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

² China National Petroleum & Chemical Planning Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The accelerating global “decarbonization” process makes product carbon footprint a key indicator of evaluating the environmental responsibilities of companies and products. As a key field for carbon reduction and a pillar industry of the national economy in China, the carbon footprint evaluation in the petrochemical industry is not only necessary for promoting the green transformation of the industry and coping with new barriers in international trade but also an important way for achieving the goal of carbon peak and carbon neutrality. This review starts with the core concepts related to carbon footprint, and through systematic analysis the life cycle assessment methods, life cycle carbon footprint assessment methods, and petrochemical industry carbon inventory assessment framework, it clarifies the development context of current carbon footprint assessment methods. The characteristics of international standards and mainstream tools related are further analyzed to provide references for establishing international mutually recognized carbon footprint accounting standards and databases for key products in the petrochemical industry. Finally, the typical application cases and bottlenecks in carbon footprint evaluation within the petrochemical industry are summarized, which points out directions for further development in the future field.

收稿日期: 2024-10-07 修回日期: 2024-11-07

通信作者: 韩晔华(1984—), 女, 博士, 教授, hanyehua@cup.edu.cn

第一作者: 常斐(1990—), 女, 博士, 工程师, changfei@npcpi.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA1501201)

引用本文: 常斐, 师人博, 刘士花, 高文倩, 王一飞, 郑镔, 焦怡萱, 蓝兴英, 徐春明, 韩晔华. 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

Citation: CHANG Fei, SHI Renbo, LIU Shihua, GAO Wenqian, WANG Yifei, ZHENG Bin, JIAO Yixuan, LAN Xingying, XU Chunming, HAN Yehua. Product life cycle carbon footprint evaluation for petrochemical industry[J]. CIESC Journal, 2025, 76(2): 419–437

Key words: carbon footprint evaluation; petrochemical industry; life cycle assessment; carbon peak and carbon neutrality; greenhouse gas; sustainability; environment

引 言

随着全球气候问题的不断加剧,遏制气候变暖、减少温室气体排放已成为全球共识。近年来,各国纷纷制定了碳中和的时间表和路线图,并通过以碳关税、碳标签以及碳排放交易体系为代表的一系列政策措施加速推进减碳进程。特别是2023年10月1日欧盟碳边境调节机制(CBAM)的正式生效,标志着全球减碳行动已进入实质性执行阶段。

在这一背景下,准确估算温室气体排放量是进行碳中和评估的前提,为决策者制定减排政策提供依据^[1]。因此,全球范围内对温室气体排放评价方法的关注持续升温,其中碳足迹评价方法因其科学性、灵活性和符合国际标准的特点,受到各国政府、企业和国际组织的广泛青睐。随着ISO 14067《产品碳足迹》第二部分信息交流标准的发布,碳足迹已成为全球公认的温室气体排放评价工具,并在多个国家和地区得到推广与应用。在发达国家,如英国和日本,已经初步建立了产品碳足迹评价规范标准体系^[2],这不仅推动了碳足迹评价的标准化进程,也为这些国家在绿色低碳转型中赢得了先机。相比之下,我国在产品碳足迹评价方面尚处于起步阶段,相关标准以团体标准为主,地方、行业和国家标准尚显不足。然而,随着国家标准《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》(GB/T 24067—2024)于2024年10月1日正式实施,我国产品碳足迹评价工作将迎来快速发展期。

石油化工行业作为我国减碳的重点领域和国民经济的支柱性产业,其碳足迹评价工作具有重要意义。建立石化行业重点产品的碳足迹核算方法及标准体系不仅能够挖掘行业节能降碳潜力,助力实现“碳达峰”“碳中和”目标,还能为上下游关联行业提供碳足迹评价的基础数据,推动碳足迹评价在全行业的普及和应用。目前,国内知名石油公司已在石化行业碳足迹评价领域开展了一系列研究。例如田涛等^[3-5]在遵循碳足迹相关国际标准原则的基础上提出基于生命周期的碳足迹评价框架在石化行业的实践范式,并针对航煤、对二甲苯、聚丙烯等典型产品开展了评价应用,万子岸等^[6]则系统分

析了炼化一体化型企业将间接排放分摊到各产品的分配方法及适用范围,均为后续石化行业进行更广泛的产品碳足迹评价提供有益借鉴。然而,现有研究多聚焦于应用层面的拓展,对碳足迹评价方法及相关国际标准原则在石化行业的转化应用分析仍不充分,重点产品碳足迹标准制定进展相对滞后。

鉴于此,本文首先从与碳足迹相关的核心概念出发,通过系统辨析生命周期评价方法、生命周期碳足迹评价方法以及化工行业碳盘查评价框架等内容理清目前碳足迹评价方法的发展脉络,在此基础上进一步分析碳足迹相关国际标准体系及主流工具的特点,为石化行业重点产品建立国际互认的碳足迹核算标准和数据库提供参考。此外,本文还将系统总结石化行业碳足迹评价的典型应用案例和瓶颈问题,为未来该领域的进一步发展完善指明方向。

1 碳足迹评价方法

1.1 碳足迹认知发展

1996年,哥伦比亚大学Wackernagel和Rees共同提出“生态足迹”(ecological footprint)的概念^[7],将自然资本提供的资源及服务抽象为生产性土地^[8],而足迹的大小则描述了生产性土地受到人类直接或间接活动影响的程度。“碳足迹”是在“生态足迹”思想上的进一步引申,通过丈量引起全球变暖潜能(global warming potential, GWP)的温室气体排放量^[9]辅助人们评价一个活动、产品、组织或个人在其生命周期内造成的温室气体排放情况,“碳足迹”也称为“能源足迹”^[10]。目前社会各界关于“碳足迹”的详细定义具备争议,主要的争议有以下两点:第一,研究对象为具体的二氧化碳的排放量还是温室气体的排放量(以二氧化碳当量为度量),其中关于温室气体的具体细分又包括化石二氧化碳、非化石二氧化碳和含碳气体等^[11-13];第二,研究对象的表征单位是重量单位还是土地面积单位。显然,“碳足迹”的概念奠定了各类核算标准制定的基础,但目前其内涵定义尚未形成共识且实操性不强。

本文提到的碳足迹概念主要参考国际标准ISO 14067:2018《产品碳足迹量化与交流的要求与指导

技术规范》以及我国标准 GB/T 24067—2024《温室气体产品碳足迹 量化要求和指南》中的相关内容，即碳足迹是基于生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 的产品系统中温室气体排放量和清除量之和，以二氧化碳当量 (carbon dioxide equivalent, CO₂e) 表示。

1.2 碳足迹评价方法

1.2.1 基于生命周期评价的碳足迹评价方法 根据国际标准化组织对 LCA 的技术框架定义, LCA 是对某一种产品从原材料的开采收集直至最终的处理处置整个生命周期系统(包括开采、加工、生产、运输、销售、使用、回收及最终处理)所产生的环境影响进行评价。该过程分为四个核心步骤^[14]: 目标和范围定义、清单分析、影响评价及结果解释。目标和范围定义旨在明确 LCA 的目的、对象、系统边界和功能单位等; 清单分析旨在数据的采集和计算; 影响评价旨在对清单中的环境影响因素分类、特征化和量化, 评估其对环境的影响程度; 结果解释旨在分析 LCA 结果, 进行敏感性分析, 提出改进建议并清晰报告结果。随着 LCA 在各行业中的应用愈发广泛且其评价对象日益复杂化、系统化, 该方法体系也在持续演进。如图 1 所示, 各类 LCA 方法尽管在具体细节上有所不同, 但总体上都遵循上

述 LCA 评价框架。

目前 LCA 评价方法形成了以面向问题为主的中间类型 (mid-point) 评价方法和以面向结果为主的损害类型 (end-point) 评价方法两大类。中间类型评价方法^[15]着重于直观解释产品对环境造成的影响, 其评价内容主要涉及与气候变化^[16]、酸化、富营养化^[17]、臭氧层消耗^[18]和人类毒性^[19]相关的环境影响, 该类方法直接将产品或过程在不同环境影响类别上的排放量作为评价结果^[20-21]。损害类型评价方法^[22]则需要建模, 将清单分析 (life cycle inventory, LCI) 结果或中间影响类型结果转化为对人类健康、环境及资源等最终保护领域造成的伤害。以 IMPACT 2002+ 为例, 该方法将面向问题的方法 CML-IA 和面向损害的方法 Eco-Indicator 99 相结合, 以二者为基础指标, 将清单数据通过中间点水平的 15 个影响类别与 4 个环境损害类型相连接, 用环境损害指标的量化结果代表资源环境变化的影响^[15]。由此可以看出, 中间类型评价方法的模型相对简单^[23], 损害类型评价方法则提供了更多选择权, 使用者可根据需要选择是采用中间类型还是采用损害类型。此外, 对比中间类型和损害类型的影响结果, 可直观地反映化工等过程中各工序与资源环境的关系。

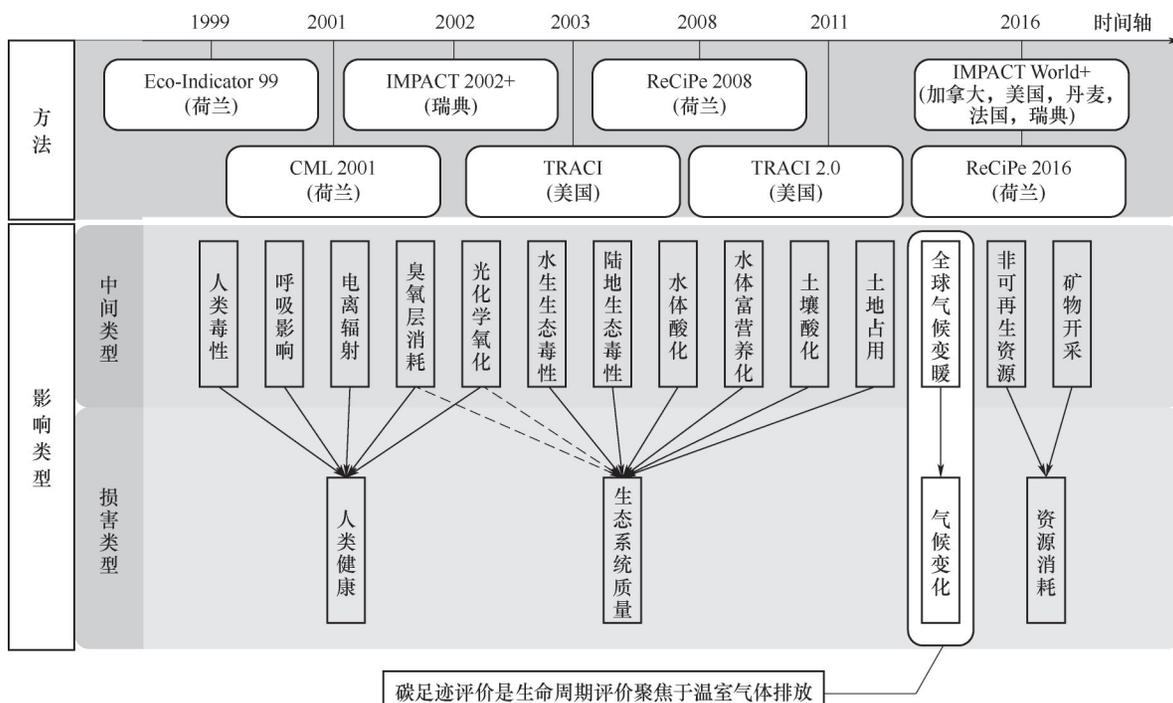


图 1 生命周期评价方法及其影响类型^[24]

Fig.1 Life cycle assessment methods and its impact categories^[24]

从对LCA方法的分析可以看出,该方法具有覆盖行业范围广泛、评价环境影响种类齐全的优点,但对专业知识和复杂计算模型的要求也使得其使用门槛较高。基于生命周期评价的碳足迹评价方法则是在LCA基础上的简化和聚焦,该方法仍然遵循LCA的基本框架步骤,但在评价内容上重点聚焦对气候变化影响最大的温室气体(greenhouse gas, GHG)的排放。具体来说,如图2所示,生命周期碳足迹评价方法在目标与范围定义阶段需要确定是针对特定产品的碳足迹评价还是对整个企业的温室气体排放进行核算;在清单分析阶段,该方法只收集与温室气体排放相关的数据;而在影响评价阶段,通常采用全球变暖潜能等指标量化温室气体排放对气候变化的影响;最后在结果解释阶段,也重点展示产品或相关活动的温室气体排放情况。因此,相较于传统LCA评价方法,生命周期碳足迹评价方法兼具针对性和实用性的特点,能够辅助企业

和组织更快速地了解自身活动或产品的温室气体排放情况,从而有针对性地采取减排措施。

1.2.2 石化行业碳足迹评价框架 目前,石化行业内主要遵循2013年颁布的《中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[25]开展碳足迹评价活动。该标准的评价对象是企业,重点核算企业边界内所有生产设施产生的直接或间接的温室气体排放。其核算流程示意图如图3所示,主要包括5部分。

(1)确定评价对象及边界。明确评价对象及边界,即确定生产过程的哪些流程纳入碳足迹研究。

(2)确定应核算的排放源和气体种类。根据国标确定需要核算的排放源,如直接排放、能源间接排放、其他间接排放等;确定需要核算的温室气体种类,如二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等。

(3)识别流入流出边界的碳源流及其类别。对

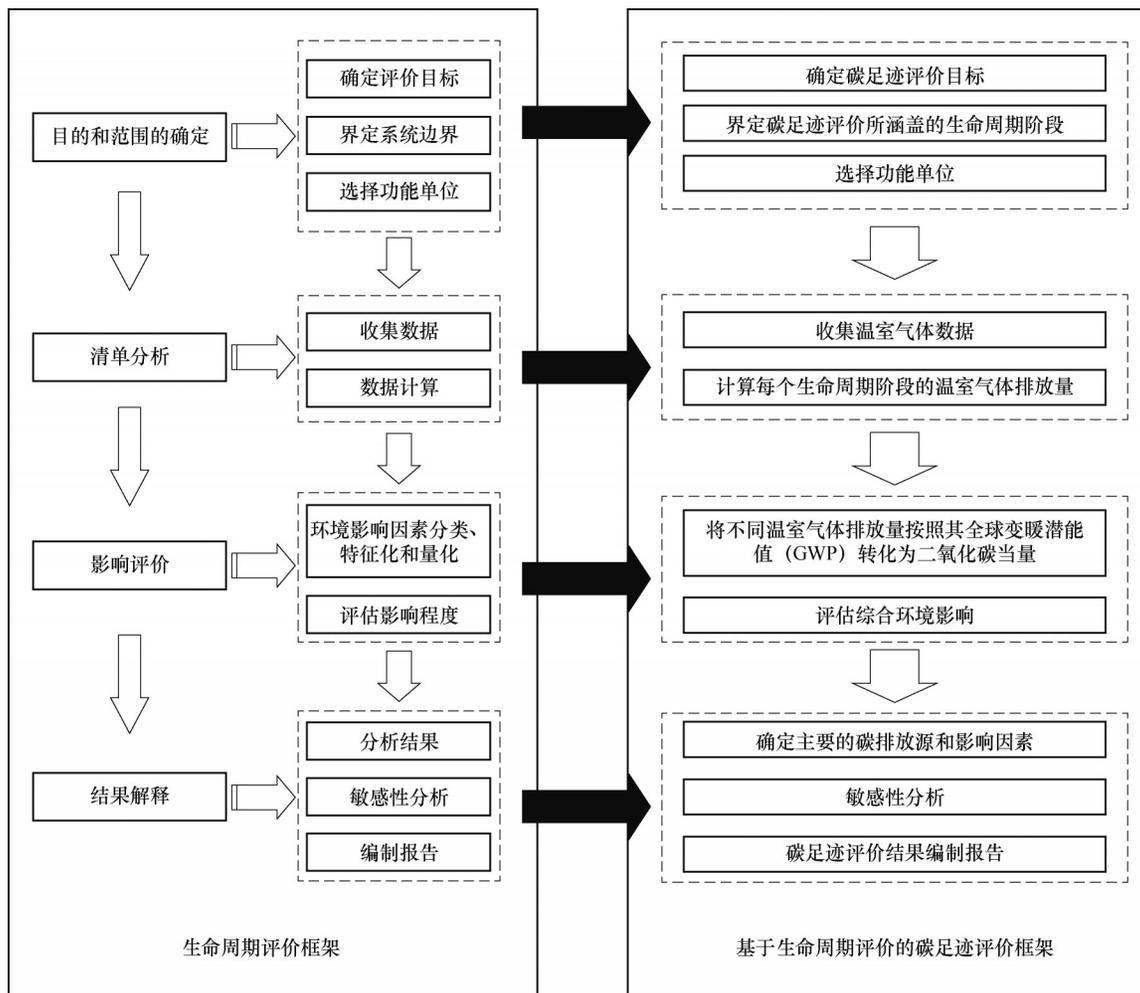
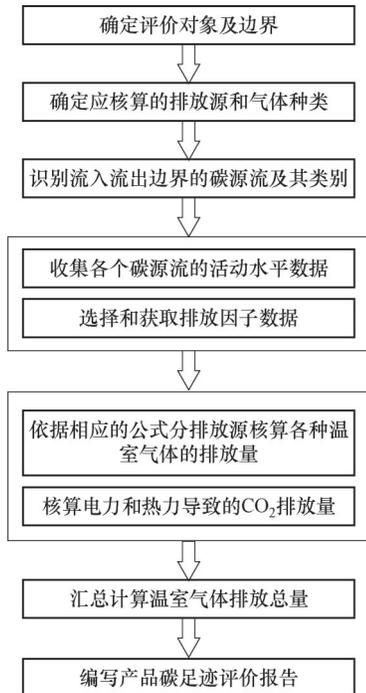


图2 生命周期评价框架图和基于生命周期评价的碳足迹评价框架图

Fig.2 LCA framework and carbon footprint evaluation framework based on LCA

图3 石化企业碳足迹评价流程图^[25]Fig.3 Flowchart of carbon footprint evaluation of petrochemical enterprises^[25]

所有流入流出企业边界的碳源流进行识别与分类,包括原材料、能源、废物等,其目的在于能够更清晰地区分原材料用途,并在后续核算过程中避免重复计算或漏算。

(4)获取各个碳源流的活动水平数据及排放因子数据。活动水平及排放因子数据包括燃料燃烧排放量、原料带入排放量、工业生产排放量等,可根据系统边界内企业的台账或统计报表确定。

(5)温室气体排放量计算。根据收集到的活动水平数据和选定的排放因子,依据相应的公式分排放源进行核算;根据产品系统所需的热力和电力值,采用供热、供电单位提供的排放因子进行计算,这通常涉及对电力和热力供应商排放数据的获取和转换。最后进行温室气体排放总量的汇总。值得注意的是,“一头多尾”是石化行业生产过程的主要特征之一,因此该步骤通常还涉及碳足迹分配的内容,目前行业内主要包括从工程视角出发的质量分配法和能量分配法以及从经济视角出发的经济分配法和附加值分配法^[26-27]。

综上所述可以看出,以企业为主体的碳足迹评价的技术框架与产品生命周期碳足迹评价高度一致,若能将前者的核算范围进一步扩展至产品原材料开采运输环节及使用回收处理环节,两者则几乎

等同。

1.3 碳足迹评价标准

国际上现行以LCA为基础的产品碳足迹评价标准^[28-29]主要有《产品生命周期核算与报告标准》(GHG protocol, 2011)^[30]、《产品与服务生命周期温室气体排放的评价规范》(PAS 2050:2011)^[31]、《产品碳足迹量化与交流的要求与指导技术规范》(ISO 14067:2018)^[32]和《产品碳足迹评估和标示通则》(TS Q 0010:2009)^[33]。我国在2024年8月23日也发布了产品碳足迹标准《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》(GB/T 24067—2024)^[34]。这些标准都建立在LCA标准ISO 14040和ISO 14044之上,遵循LCA的一般原则和框架,区别主要在于评价目的不同。本节将在解析各标准内容的基础上从横向和纵向两个角度对比分析标准间的交叉、逻辑关系,梳理标准的发展历程,并阐述应用进展,以促进对标准的理解和应用。

各标准的基本信息和主要内容见表1所示。GHG protocol是最早的标准,拥有一套标准体系;PAS 2050是最专业的标准,也在较早阶段推出;ISO 14067是最新的国际标准^[36];TS Q 0010是日本独立应用的标准;GB/T 24067是我国近期发布的产品碳足迹核算通用标准。

这些标准提供了量化产品温室气体影响的原则和要求。虽然它们的方法和程序相似,但仍存在一些差异^[37]。GHG protocol开发了一套核算工具,旨在鼓励用户了解、量化和管理温室气体排放。该标准在数据采集、计算等方法上相对开放灵活,选择性强,但是较强的主观性降低了核算的对比性。PAS 2050在方法上提供的指导相对具体细致,给出了参数的具体指标,侧重点在于开发一致的评估方法,是一个非常实用的标准。ISO 14067的编制综合了前两个标准,兼容性更好。它的服务对象不仅包括商业认证和目标,也包括个人的科研工作等,具有普遍适用性,但目前在很多方面缺乏明确的方法参考和定量的参数规定,因此实际指导性较弱。TS Q 0010是日本产品碳足迹国家标准,在内容和执行步骤上与PAS 2050基本一致,侧重于对产品进行分类并完善分类规则。GB/T 24067参照ISO 14067,针对中国产品碳足迹规定了研究范围、原则和量化方法等,还明确了编制具体产品碳足迹标准的参考框架、数据地理边界信息建议等,相较于国际标准内容更加丰富,也更具有操作性,为国内各方研究编

表 1 产品碳足迹标准的比较^[35]Table 1 Contrastive analysis of standards of product carbon footprint^[35]

对比维度	GHG protocol	PAS 2050	ISO 14067	TS Q 0010	GB/T 24067
颁布组织	世界可持续工商发展理事会 (WBCSD) 和世界资源研究所 (WRI)	英国标准协会 (BSI)	国际标准化组织 (ISO)	日本工业标准委员会 (JISC)	国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会
颁布年份	2011	2011	2018	2009	2024
制定目的	提供评估和报告的详细规范	制定关于产品温室气体评价的统一指导	规范温室气体结果的量化过程和沟通	规定日本产品碳足迹评价和标识方法	规定中国产品碳足迹量化和报告的原则、要求和指南
主要特征	计算方法详细且选择多; 不便于结果对比	评价参数指标详细; 便于执行操作	具有普遍适用性; 不便于实际操作	规定产品种类规则 (PCR); 针对性强	明确 PCR 编制框架、建议等; 操作性强
执行范围	评估和交流	评估	评估和交流	评估和交流	评估和交流
评估原则	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性、连贯性、参与性、公平性、避免重复计算	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性、连贯性、参与性、公平性、避免重复计算
温室气体	《京都议定书》中的 6 种温室气体及 NF_3	政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 规定的 63 种气体	IPCC 规定的 63 种气体	《京都议定书》中的 6 种温室气体	《京都议定书》中的 6 种温室气体及 NF_3
系统边界	摇篮到大门; 摇篮到坟墓	摇篮到大门; 摇篮到坟墓	摇篮到大门; 摇篮到坟墓	摇篮到坟墓	摇篮到坟墓
分配方式	优先物理分配, 再次经济分配	经济分配	优先物理分配	遵循 PCR	物理关系; 经济比值; 回收次数
取舍标准	对碳足迹达到 1% 的实质贡献都应包含在内, 通过上限假设决定是否有意义并进行报告	对碳足迹达到 1% 的实质贡献都应包含在内, 至少 95% 的预期排放	无明确规定	遵循 PCR	可舍弃产品碳足迹影响小于 1% 的环节, 总舍弃不应超过总量的 5%
功能单元	遵循 PCR	遵循 PCR	遵循 PCR	遵循 PCR	遵循 PCR
数据来源	使用质量指标评估后的数据; 环境扩展的投入产出模型数据; 国际生命周期数据系统	经同行评议的发表数据; 国际生命周期数据系统	基于控制的独立过程数据; 兼顾性与定量的数据; 国际生命周期数据系统	通用数据; 政府建立的排放因子数据库	数据库 (推荐本土化数据库); 公开文献; 国家排放因子; 计算估算; 其他具有代表性的数据
边界细化	无	无	敏感性分析	无	如果没有 PCR, 要进行敏感性分析

制具体产品碳足迹核算标准提供了指导。

除了 GB/T 24067 和 TS Q 0010 是基于国际标准发展而来的国家标准, 仅在中国和日本使用外, GHG protocol、PAS 2050 和 ISO 14067 都是目前国际上较为通行的产品碳足迹评价标准。图 4 通过纵向对比梳理了标准间的发展逻辑关系, 可以直观清晰地了解产品碳足迹标准发展的历程。从整个产品碳足迹的发展历程来看, 在 ISO 14040 和 ISO 14044 提供的 LCA 的基本框架和原则基础上, PAS 2050 首先提出专门针对产品碳足迹核算的相关规范, 可视作产品碳足迹标准的始祖^[38]。2011 年出台的 GHG protocol 借鉴了 PAS 2050(2008) 的内容, 在此基础上做了完善补充, 为企业核算产品碳足迹提供详细指

导和规范, 主要服务于企业的商业目标^[39]。PAS 2050 在其 2011 年修订版中也吸取了 GHG protocol 产品标准开发过程中的经验教训, 两个标准在内容上相互调整^[40]。ISO 14067 依据 PAS 2050 标准发展而来, 内容上部分引用和参照了 PAS 2050(2011) 中的“特殊过程的处理”和 GHG protocol(2011) 中的“回收分配”^[41]。

上述产品碳足迹标准的适用范围较广, 在应用于不同行业和产品时还需要制定具体的产品种类规则 (product category rules, PCR), 确立一套标准化的指导原则, 明确产品或服务的功能单位、技术规范、使用寿命、系统边界、生命周期阶段、取舍规则、分配规则和数据质量要求, 以解决 LCA 在应用于特

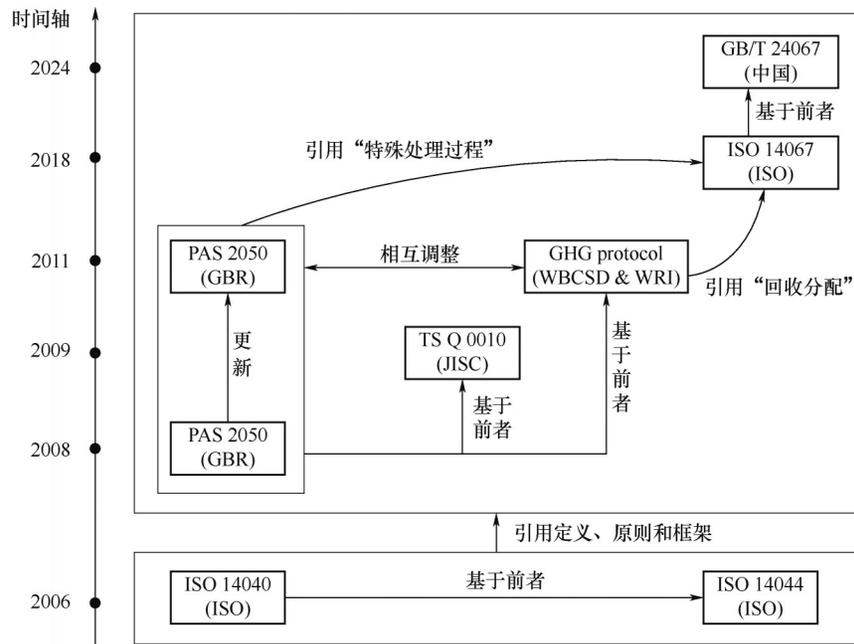


图4 产品碳足迹标准的发展逻辑图

Fig.4 Evolutionary logic of product carbon footprint standards

定产品类别评价时的可操作性等问题,并为比较类似产品的生命周期评估结果或环境产品声明(environmental product declaration, EPD)构建一个公正透明的竞争平台^[42]。

世界各个国家或地区都高度重视PCR的制定。国外PCR发展起步较早^[43],已制订了覆盖行业广、数量多的PCR。瑞典是最早建立PCR的国家,在1998年发布全球首份PCR,对其水电生产进行了公开的、定量的环境影响披露。欧盟在环境保护领域一直处于世界领先地位,其环保法规在全球享有很高的声誉。欧盟不仅较早发布了PCR体系,还在2013年发布了另一套产品种类规则体系——产品环境足迹种类规则(product environmental footprint category rules, PEFCR),前者更适用于企业,后者侧重于产品,二者互补,都可推动可持续生产和消费。随着欧盟碳边境调节机制(CBAM)的提出,欧盟产品环境碳足迹(product environmental footprint, PEF)很有可能渗透到全球产业链,逐步成为碳足迹全球准则^[44]。我国PCR发展目前仍处于起步阶段。近年来,我国部分地方政府部门和团体组织参与制定了《家用电器产品碳足迹评价导则》(DB44/T 1503—2014)、《产品碳足迹评价通则》(SZDB/Z 166—2016)、《产品碳足迹评价技术通则》(T/GDES 2001—2016)等团体标准,工信部发布了液晶显示器和液晶电视机产品种类规则标准,国家质检总局发布了

钢铁产品生命周期评价的产品种类规则^[45]。这些标准虽然规范了具有产业地域特性的碳足迹评价方法,但应用范围有限,不足以代表整个行业,针对地方、行业和国家适用的产品种类规则标准仍然缺乏。随着国家标准《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》(GB/T 24067—2024)于2024年10月1日正式实施,我国的产品碳足迹标准管理体系将迎来快速发展期。

对于石化行业,目前已有多个产品(服务)的碳足迹评价方法研究,建立了以总流程为基础、以工艺装置为单元、以质量分配为规则的碳足迹评价方法,但对石化行业和石化产品碳足迹评价的产品种类规则仍未有正式的标准文件^[46]。中国化工情报信息协会在2023年11月29日针对重点产品完成了《产品碳足迹产品种类规则》团体标准的立项工作^[47],我国也在GB/T 24067中明确了PCR编制的参考框架和建议等^[48],这些标准将为我国石化行业产品碳足迹核算打下基础。

1.4 碳足迹评价工具

产品生命周期碳足迹评价涉及大量数据的采集工作,运算过程也需要与国际标准相一致,借助计算机分析软件则能够缩短评价周期,提高评价效率。目前暂未开发出针对产品碳足迹评价的软件,但环境影响类型涵盖更全面的LCA软件开发已取得一定进展,例如SimaPro及Gabi等评价工具已被

表 2 国内外主流 LCA 评价工具在产品碳足迹方面的应用和指导意义

评价工具	主要应用领域	支持产品碳足迹的主要评价标准	支持的数据库类型	对石化行业的指导意义
SimaPro	产品生态设计	PAS 2050, GHG Protocol, ISO 14067	欧盟生命周期基础数据库(主要)	数据库实时更新、可进行网络联机操作、较好的可视化输入输出、操作便利性较好、配置用户友好的在线学习说明、数据及核算过程参照标准兼顾产品及企业两个层面,适用性更强
GaBi	环境管理、产品生态设计	PAS 2050, GHG Protocol	Gabi数据库、瑞士 Ecoinvent 数据库、美国 LCI 数据库	可进行敏感度分析、数据库容量较大且支持实时更新、较好的可视化输入输出、配置用户友好的在线学习说明、数据及核算过程参照标准兼顾产品及企业两个层面,适用性更强
eBalance	资源环境影响评估	PAS 2050, ISO 14067	欧盟生命周期基础数据库、瑞士 Ecoinvent 数据库、中国生命周期基础数据库	实现国内国际数据标准衔接互认,提供更多维度的解决方案
DHU	纺织服装工业领域	PAS 2050	—	软件需兼顾灵活性和适应性,使其能够根据石化行业流程特点和具体需求进行定制化开发,以满足不同场景下的碳足迹评价需求
BaosteelLCA	钢铁行业领域	ISO 14067	—	发挥龙头企业在产业链中的话语权,建立基于行业重点产品的全生命周期清单数据,为行业数据库建立提供基础

各国政府及企业广泛采用。下面依次对国内外主流 LCA 评价工具进行分析,为石化行业进行碳足迹评价工具开发提供借鉴。具体见表 2。

(1) SimaPro 软件。SimaPro 软件由荷兰莱顿大学和 Pre Consultants B.V. 于 1990 年开发,是目前世界上应用广泛的 LCA 软件^[49]。SimaPro 软件支持影响评价、中间类型评价和损害类型评价等多种评价方法,能够满足不同场景下的分析需求。该软件内嵌的数据库主要包括欧盟生命周期基础数据库,使用者可以获得符合欧盟标准的生命周期清单数据和影响评估方法。SimaPro 软件同时参考 PAS 2050、GHG Protocol 以及 ISO 14067 三个国际标准,可提供基于产品层面及企业层面的不同维度的评价分析结果^[50]。与其他软件相比,Simapro 提供网络联机操作且支持数据库定期更新,已被用于多个行业领域的 LCA 研究。

(2) GaBi 软件。GaBi 软件是由德国 Private Equity International 公司开发的一款 LCA 分析软件,广泛应用于环境管理和产品生态设计。该软件具有友好的交互式界面,支持新的数据交互格式,极大地提高了数据传输效率。GaBi 自身开发的专业及扩展数据库拥有 26 个子行业数据库,系统数据集近 17000 条^[51],同时该软件还兼容瑞士 Ecoinvent 数

据库及美国 LCI 数据库等多个数据库,为用户提供更广泛的数据源,降低跨区域评价数据获取难度。目前 GaBi 软件也可以提供产品及企业等不同层次的评价结果^[52],广泛应用于多个行业领域^[53]。

(3) 国内 LCA 软件。为了实现与国际领先水平接轨,我国自主研发了多款生命周期评估软件,并在提供本土化高质量数据库方面有了一定突破。东华大学纺织服装工业碳足迹研究团队开发的 LCA 核算软件(DHU),采用模块式的核算方法,将工业碳足迹拆分为若干个单元,以便于在产品品种繁多和生产工序链复杂的情况下理清各个影响因素之间的相互关系^[49]。上海宝钢集团面向国内钢铁行业建立了针对钢铁产品的生命周期评价数据库软件 BaosteelLCA,并有清晰的 LCA 计算方法适配生产系统的先后顺序^[54]。亿科环境科技有限公司和四川大学共同推出的 eBalance 软件是国内首个自主开发并公布的通用型 LCA 分析软件^[55]。但是与国外数据库相比,其内嵌的中国生命周期基础数据库目前只包括 600 多个大宗能源、原材料及运输的清单数据,丰富程度仍有待提升。

总体来看,目前 LCA 软件开发机构主要以欧洲国家为主,其数据输入及处理核算方法体系大多参照 PAS 2050、GHG Protocol、ISO 14067,以商业数据

库和企业获取等方式作为数据来源,确保了评价结果的可比性及准确性。而目前国内石化行业的产品碳足迹评价在规范性及精确度上仍需进一步完善,一方面是因为石化行业上下游排放点源数量多、种类杂,清单数据一致性难以保证,另一方面则受限于本土数据库的局限,行业常规做法是以大型工业示范企业的公开值或行业均值为主,采用国际IPCC标准数据库数值对评估模型数据缺省项进行补充,但是国际数据难以表示国内实际情况^[56]。开发基于本土化的行业碳足迹评价软件可以较好地解决上述问题。软件的应用一方面能够实现基础数据共享、核算方法统一的目的,同时还能在解决数据存储与调用问题以及自动生成表格和图像等方面发挥作用。未来进行相关开发工作时可依托LCA软件基础,以丰富石化行业产品清单数据及拓展评价边界从企业界区至产品全生命周期为重点,通过建立统一的数据平台和标准化的数据接口简化碳足迹核算流程,提高数据处理的效率和准确性。此外,还应考虑软件的灵活性和适应性,以产品生产工序为子模块,用户可根据具体需求选择相应组合,使其能够根据石化行业不同流程特点进行定制化开发,以满足不同场景下的碳足迹评价需求。

1.5 碳足迹评价发展趋势

碳足迹评价最初主要关注温室气体排放的定义、意义及其存在现象^[57-59]。随着研究的深入,测量方法和工具逐渐成为研究重点^[60]。现阶段,生命周期分析方法的丰富应用使得碳足迹评价逐渐拓展至企业、组织和行业层面的碳排放测量^[61],研究内容从宽泛逐渐深入、具体,反映了全球气候变化应对的复杂性和多维性^[62]。当前碳足迹评价领域的研究热点集中在国际衔接互认^[45],以实现对产品跨区域供应链的全面评估,进而提出针对主要环节的节能降碳措施,在实现经济增长的同时达到可持续发展的目的。这一演变趋势要求碳足迹评价过程从单一聚焦环境科学逐步拓展至涵盖环境科学、经济学、数字化与区块链技术等领域的交叉学科^[63-64]。

因此,未来石化行业开展碳足迹评价要注重与经济、管理以及信息技术等学科的融合,特别是通过引入大数据、物联网等技术构建数字化碳足迹管理系统,实现对产业链各环节碳排放的实时监控和管理,提高碳足迹核算的精确度。在此基础上,重点选取产业链长、涉及面广、经济影响力大的典型

产品如聚丙烯、润滑油、航空煤油等,建立贯通全产业链产品碳排放特征数据库,研制支撑国际数据互认的碳足迹数据文件通用标准格式,构建以数字技术为支撑的全产业链碳排放国际互认模式。

2 碳足迹评价在石化行业的应用

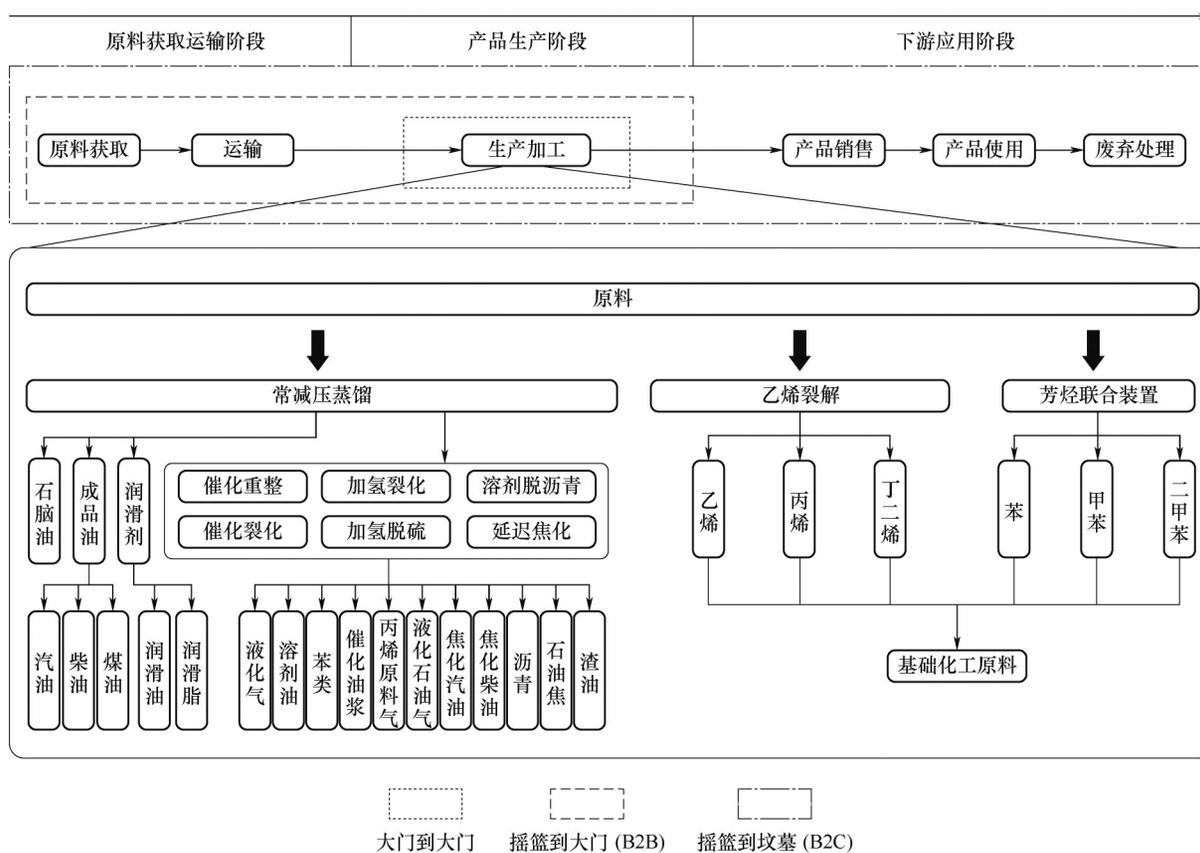
石油化工业在为国民经济发展和能源及化工原料供应提供物质基础保障的同时,高耗能属性也使其成为二氧化碳(CO₂)排放大户^[65-69]。随着“碳达峰”“碳中和”政策的推行,石化行业正面临向低碳、绿色生产转型的压力^[70-74]。因此,基于LCA评价框架开展重点产品碳足迹评价研究具有重要的现实意义,不仅可以帮助石化企业掌握其产品对环境的影响,还能指导石化企业制定有效的碳减排方案,减少供应链中的温室气体排放^[75]。此外,作为工业基础原料的主要供应者,石化企业的碳足迹评价数据还可为其他行业产品的碳足迹评价提供基础数据^[76],从而推进其他行业的可持续发展。

石化产业是一个复杂且庞大的系统,其产品从石油、天然气等原料出发,通过一系列物理或化学过程转化为广泛的化学品和材料。主要产品包括原油经过常减压蒸馏和其他单元操作提炼出的汽油、煤油、柴油、润滑油等一系列炼油产品,部分炼油产品和其他原料通过提炼精制得到的基础化工原料即“三烯三苯”^[77],以及基于这些化工基础原料经过复杂化学反应得到的精细化工产品^[78-80]。

根据ISO 14067,石油化工业的产品碳足迹评价理论上需要涵盖从原料获取到最终废弃处理的产品全生命周期过程,结合行业自身特点主要包括原料获取运输、产品生产和下游应用三个环节,评价核算范围如图5所示。本节将系统阐述产品碳足迹评价在石化行业的典型应用案例及瓶颈问题,为后续持续深入开展评价工作提供借鉴。

2.1 原料获取阶段

石化行业原料种类繁多,除了原油和天然气外,还包括原油经过常减压蒸馏后的一次加工产品和经过催化裂化、催化重整等的二次加工产品^[81]。此外,我国原油进口依赖度高,2023年进口原油占原油总加工量的比例高达70%以上,原料来源往往涉及多个国家和地区,包括海运、铁路和公路以及管道运输等多种运输方式。上述因素都会影响原料获取阶段的碳足迹评价结果。

图 5 石化产品生命周期及其生产加工路径^[46]Fig.5 Life cycle of petrochemical product and its production and processing path^[46]

相较于原料开采阶段的碳排放,运输阶段是该环节的排放瓶颈所在,国内已有相关机构及学者开展了围绕原油运输阶段的评价应用。田涛等^[4]基于 ISO 14067 标准,针对原油运输过程中的碳排放问题建立了原油运输路径模型,通过物料平衡计算、排放清单分析和排放分配进行碳足迹评价。他们以某管道公司在 2018 年输送至 JL 石化企业的原油为研究案例,分析来自不同地区的原油输送过程。综合分析各路径得到, JL 石化进厂原油碳足迹为 8.940 kg CO₂e/t,其结果如图 6 所示。通过对比不同路径的碳排放,该团队提出了一系列降低原油运输过程碳排放的策略,包括选择碳足迹较低的路径(即较短运输路径)、将复合路径分解为简单路径以及减少输送泵站的电耗等。在该研究基础上,国家管网集团东部原油储运有限公司^[82]进一步对原油管道运输过程中的碳排放问题进行研究,并提出缩短原油周转路径和降低输油泵站能耗的减碳策略。

整体而言,石化行业围绕原料开采运输环节的碳排放评价工作仍处于起步阶段,研究案例较少,不足以支撑行业的碳足迹体系建设。从目前研究

看,不同种类原料的数据质量差异较大。例如原油和天然气的原料数据主要来自上游企业的实测数据,相对精度更高;而一次加工产品和二次加工产品作为原料时涉及企业技术保密等问题,往往只能参考国内外公开数据或基于物料平衡法进行估算,这将导致评价结果与实际结果相差较大^[72]。此外,轻质原料在运输过程中的挥发泄漏问题也暂未考虑。上述问题均有待在未来评价工作中完善解决。

2.2 产品生产阶段

石化产品生产阶段总体分为炼化过程和化工过程。前者以物理变化为主,主要目的在于更加精细及充分地利用原油的各个组分,得到尽可能多的油品,过程碳排放主要来自过程消耗的燃料及电力;后者则以化学变化为主,重点是通过裂化、加氢以及重整等反应改变分子结构,生产出各类满足下游需求的产品,碳排放除了来自过程消耗的燃料及电力外,还涉及含碳原料以及辅料和催化剂等助剂的碳排放。此外,石化产业生产活动主要以装置为最小单元,典型千万吨级炼厂不同类型装置多达几十套,各装置间物质能量的循环利用也需要在进行

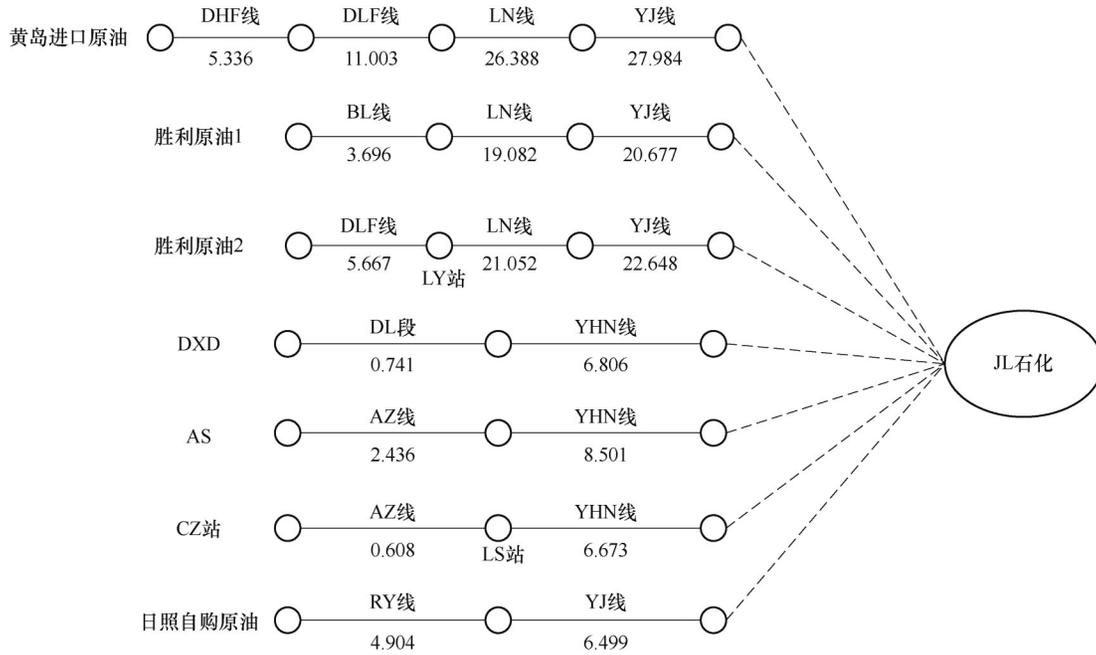


图6 JL石化原油输送过程碳足迹(单位:kg CO₂e/t)^[4]

Fig.6 Carbon footprint for crude oil transportation in JL petrochemical plant (unit: kg CO₂e/t)^[4]

碳排放评价时予以考虑,通过建立标准化核算方法以及科学的碳排放分配原则提高该环节评价的准确度。下面将从油品及化工产品两个维度对目前开展的碳评价应用进行介绍。

2.2.1 汽柴油产品碳足迹评价 王陶等^[83]基于PAS 2050标准对某南方炼厂的汽油产品进行了碳足迹核算。考虑到原油来源广泛、各地开采阶段的碳排放系数也不尽相同,该研究以不同产地碳排放系数的加权平均值作为原油的碳排放因子,最终计算得到炼厂从运输、生产到使用阶段的汽油产品碳足迹为3.7437 t CO₂e/t,如图7所示。

中国石油大学(北京)基于《石油化工生产企业

CO₂排放量计算方法》,选取3家典型炼厂作为案例,计算了汽柴油产品整个生命周期的碳排放^[84-85]。活动数据来源于国家相关统计年鉴、文献发表数据和数据推算。相关碳排放因子参考IPCC报告中的缺省值以及《石油化工生产企业CO₂排放量计算方法》。研究采用作业成本法,即基于“产品消耗作业,作业消耗资源”的核心分配原则,将“产品成本”转化为“油品能耗”,计算汽柴油产品在炼厂生产阶段的能耗量,进而通过炼厂碳排放因子计算产品碳排放量。利用Aspen PIMS线性优化软件对不同炼厂的实际生产情况进行建模,分析了不同炼油厂汽柴油的单位碳排放量的差异。

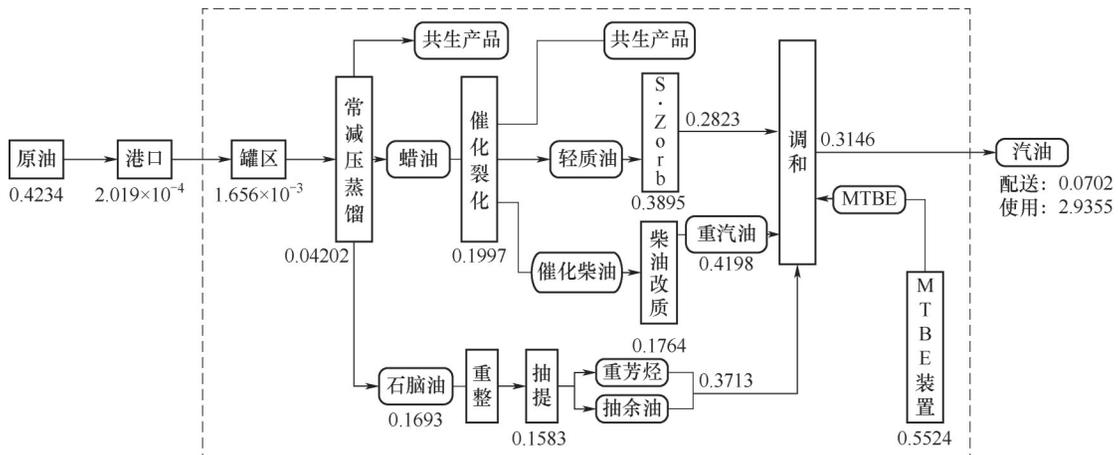


图7 汽油生产过程碳足迹(单位:t CO₂e/t)^[75]

Fig.7 Carbon footprint for gasoline production process(unit: t CO₂e/t)^[75]

两个研究团队从生命周期的不同角度研究了汽柴油产品的碳足迹。在排放因子的选择上,王陶等通过加权计算法获得原油的碳排放因子,而中国石油大学(北京)并未考虑排放因子的匹配性,直接参考其他报告以及方法中的排放因子。在分配问题上,前者没有涉及,而后者通过作业成本法和软件模拟对能耗进行分配。排放因子是量化温室气体排放量的重要参数,受活动类型、地理位置、时间变化和数据来源影响^[86],因此在进行碳足迹评价时要综合考虑多种因素,选择合适的排放因子,以保证结果的准确性。石化产品的碳足迹计算常涉及多个产品的环境负荷分配问题,在处理此类问题时要确保各个产品能够根据其实际贡献承担相应比例的环境影响,从而向决策者、企业和消费者提供更精准、更全面的环境信息。

2.2.2 航空煤油产品碳足迹评价 中石化炼化工程有限公司^[87]基于PAS 2050标准对某炼厂航煤产品进行了碳足迹评价。整个生产流程直接排放的CO₂采用物料平衡方法计算,一次能源的温室气体排放因子参考企业碳盘查报告数据,蒸汽、电、循环水等二次能耗工质的排放因子依据GB/T 50441—2007《石油化工设计能耗计算标准》折算为标准煤后按照相关能源品种计算。按照质量分配法对温室气体排放量进行分配,得到该企业航煤产品的碳足迹为298.132 kg CO₂e/t,如图8所示。

经分析得出,加氢裂化装置的能源消耗是航煤

生产过程中碳排放的主要来源,其次是原料带入排放。因此,研究提出优化加氢裂化工艺装置的蒸汽、电、循环水等二次能耗介质的减碳措施,以降低能源消耗。在该研究中,蒸汽、电、循环水的排放因子通过能量折算转化成煤,再根据煤的排放因子计算相应的碳排放,为行业的碳排放因子建立提供了思路借鉴。

值得关注的是,尽管汽柴油和航空煤油的加工工艺类似,但该案例评价产品结果与2.2.1节中王陶等测算的结果相差了1个数量级。这主要是因为两个案例的评价边界有所不同,其中王陶等不仅对汽油产品的生产阶段进行核算,还包括了产品运输以及使用阶段,而本小节分析的案例中仅对航煤产品生产阶段碳足迹进行分析。因此,在对石化产品进行碳足迹评价时,首先要根据评价目的、数据可得性等因素对系统边界进行明确,只有在边界相同时评价结果才有一定的可比性。

2.2.3 聚丙烯产品碳足迹评价 张楚珂等^[88]依据PAS 2050和ISO 14067标准,对3种聚丙烯产品的炼化一体化流程进行了生命周期碳排放分析。燃料排放因子选取依据各企业碳盘查报告;蒸汽、水、电力排放因子采用能量折算值。通过物料衡算法计算各生产环节的CO₂排放量,建立温室气体排放清单并对共生产品进行分配,通过对比不同技术路线的碳足迹掌握聚丙烯产品各个生产工艺的碳排放水平。

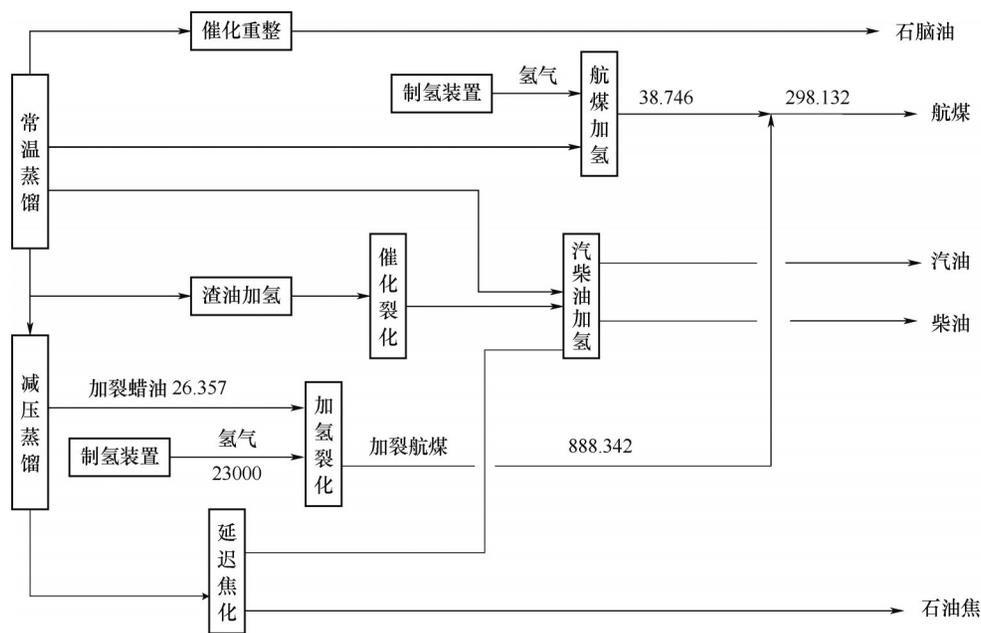


图8 航煤产品碳足迹(单位:kg CO₂e/t)^[87]

Fig.8 Product carbon footprint for aviation kerosene (unit: kg CO₂e/t)^[87]

王家等^[89]以SABIC公司报告的世界原油生产过程的温室气体排放系数为基准,对A企业生产的聚丙烯产品进行了碳足迹评价。燃料的排放因子来源于A企业碳盘查报告;各级蒸汽的排放因子按照焓值进行能量折算,再利用标准煤的碳排放因子进行计算;电力排放因子采用A企业所在区域电网电力排放因子。最终得出A企业聚丙烯产品的碳足迹为0.8542 t CO₂e/t。图9为该企业聚丙烯产品各个生产阶段的碳排放值。与同行业相比,A企业的碳排放系数处于较低水平,原因主要在于部分加工装置负荷偏低,导致能源利用效率不高。此外,企业部分氢气来源于能耗较高的连续重整装置,使得整体碳排放系数偏高。为此,针对A企业现有问题研究提出优化加工流程、提高能源利用效率的减碳策略。

两个团队都探讨了聚丙烯的碳足迹问题。张楚珂等的研究将不同标准的碳排放数据进行对比,提出虽然ISO 14067和PAS 2050两个标准在核算步骤上一致,但在系统边界的界定、截断误差和敏感性分析上存在差异,因此采用不同标准得到的碳排放数据不具备可比性。王家等^[89]则将研究结果与同行业平均碳排放结果进行对比,进而真实反映产品生产工艺碳排在行业中的水平。

2.2.4 对二甲苯产品碳足迹评价 中国石化^[90]基于PAS 2050标准,对华东某企业对二甲苯的生产加工过程进行了碳足迹评价。能源消耗量、加工量等生产数据来源于企业生产报表;电力排放因子来源于2019年度中国区域电网排放因子^[91];其他排放源的

排放因子来源于省级温室气体排放清单^[92]。根据《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)^[93]分析计算原油获取阶段和对二甲苯生产阶段的碳排放量,具体生产流程如图10所示,最终得到对二甲苯的碳足迹为1.2691 t CO₂e/t。该研究经分析得出,生产阶段是影响对二甲苯碳足迹的主要因素,其中芳烃联合装置的影响最大。对此提出了提高加热炉效率、优化燃料组成以及使用电加热炉替代燃料加热炉等减排措施。然而该研究只针对一种工艺计算对二甲苯的碳足迹,未与行业平均水平或其他工艺路线做对比,难以把握其生产工艺碳排放的相对水平。

2.2.5 结语 综上所述,虽然目前我国石化行业在碳足迹评价应用领域已经开展相关研究,但现有的评价活动仍以原料获取和生产制造环节为主,对下游应用及废弃处理环节尚未进行考虑。考虑到石化行业燃油型产品的碳排放大多集中在使用环节,而化工型产品则在废弃处理环节碳排放量较大,未来仍需进一步提高应用研究的全面性,将评价范围拓展至真正意义上的全生命周期范围。此外,目前石化行业生产环节数据多以装置为单元进行采集,而各单元之间还普遍存在物料及能量循环利用,并非单向流程,如何对不同产品进行科学的碳排放额分配也是制约该环节评价工作的关键问题之一,还需要结合石化行业的特点建立科学的碳排放分配机制。同时,目前评价活动大多采用ISO 14067和PAS 2050两个标准,虽然它们在核算步骤上一致,但在系统边界界定、截断误差要求和敏感性分析上

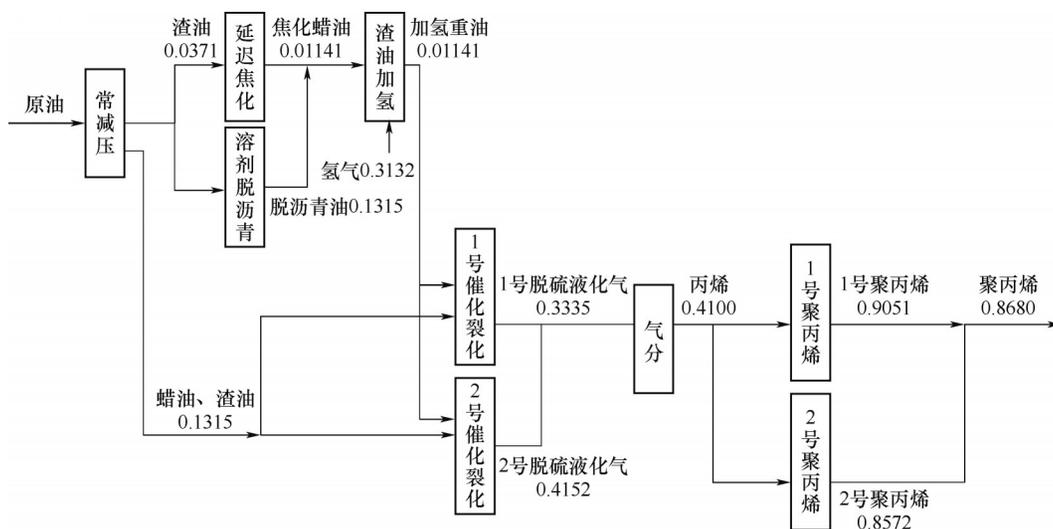
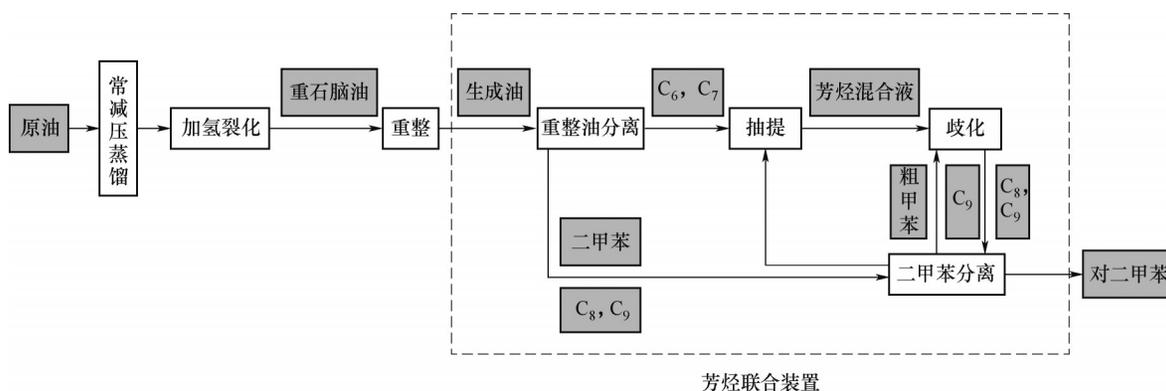


图9 A企业聚丙烯产品碳足迹(单位:t CO₂e/t)^[88]

Fig.9 Product carbon footprint for A ecorporate's polypropylene(unit: t CO₂e/t)^[88]

图 10 对二甲苯生产流程图^[90]Fig.10 Production process of paraxylene^[90]

均存在差异,遵循两个标准的碳排放数据不具备可比性,进一步增加了碳足迹评价的数据采集的难度。因此,未来还需通过制定行业统一的重点产品碳足迹核算标准、加强各企业之间的数据衔接、完善石化行业背景数据库等措施健全石化产品全生命周期的碳足迹数据链,为行业碳足迹评价的推广利用提供有力支撑。

3 存在问题

我国在产品生命周期碳足迹评价领域起步较晚,在标准体系建立、数据基础丰富、评价方法优化以及应用范围等方面仍有待完善。结合前文分析,在石化行业推进产品碳足迹评价面临的关键问题如下。

(1)重点产品碳足迹核算方法及标准在国际互认上仍需完善。国家层面的碳足迹量化标准和指南文件已于2024年10月1日正式实施,尽管该标准为石化行业重点产品建立全生命周期碳足迹核算方法及标准提供了指导参考,但其在石化行业的转化应用尚需时日,评价结果暂不具备与国际标准衔接及互认的基础。

(2)数据来源及质量难以保证。目前石化行业多以企业边界为核算边界,开展产品生命周期碳足迹评价不仅需要将数据采集范围拓展到上下游环节,在原料、生产及使用所在区域不完全重合时还涉及不同国家及地区间数据一致性问题。因此,数据采集难度及精度均存在较大的不确定性。

(3)方法使用门槛较高。在石化行业开展产品碳足迹评价是一个涉及能源、化工、环境以及信息技术等学科的系统性工程,对使用者专业知识水平要求较高。同时,整个评价过程涉及数据采集、分

析以及报告编写等环节,需要投入大量的人力及财力。

(4)本土数据库和评价工具建设薄弱。我国石化行业碳排放量大,工艺体系复杂,碳排放节点多、来源广(用电/热、燃料、物料等),现有的本土数据库多依赖文献值或统计值,数据精细度不够,难以支撑全生命周期、全工艺过程的碳足迹评估计算。目前的研究多依赖国外的评价工具,而国外的评价工具采用的方法和参照的标准不统一,不利于进行结果的交流和比较,而且使用时存在碳数据泄露隐患。

(5)应用研究不够全面。目前应用于石化行业的碳足迹评价主要集中在大宗化学品上(如石油、汽柴油、聚丙烯),而对于其上游的原料开采和下游的精细化学品的碳足迹评价涉及较少,导致重点产品开展包括使用处理环节的全生命周期碳足迹评价存在困难。特别是在我国原油重质化程度不断增加的背景下,重质油领域的碳足迹直接评价工作显得尤为不足。重质油的生产 and 加工流程较为复杂^[94],涉及多个环节,增加了碳足迹评估的难度^[95],同时在缺乏行业标准及政策推动的情况下该领域碳足迹相关评价工作略显滞后^[96]。此外,大多数评价研究多依赖单一企业或炼厂的数据源进行,导致样本代表性不足,结果难以全面反映整个行业的情况。

4 展 望

在全球“脱碳”进程加速的背景下,碳足迹将成为衡量企业及产品环境责任的关键指标。对于石化行业而言,开展产品全生命周期碳足迹评价不仅是推动行业绿色转型及应对国际贸易新壁垒的必

要准备,也是促进行业实现“碳达峰”“碳中和”目标的重要途径。结合我国石化行业目前开展产品全生命周期碳足迹评价的现状与不足,未来可重点围绕深化全生命周期评估、夯实基础支撑体系、推动产业链协同减排以及完善国际交流对话机制等方面进一步完善相关工作,加速推进碳足迹评价在行业内的推广应用。

(1)深化全生命周期碳足迹评估。在石化行业碳足迹评价研究中,应更加注重全生命周期的考量,确保评估结果的全面性和准确性。通过制定统一的数据采集标准和要求建立行业上下游数据互认机制,提高不同研究结果的可比性。同时,拓展碳足迹核算的应用领域,涵盖石化行业更多产品,为形成全面的碳足迹管理体系提供数据支撑。在对数据库进行拓展时,可借助“构效关系”,建立从“结构分区”到“性能分区”的新关联^[97-98],为该过程进行数智化赋能。例如目前在重质油领域,已经有学者引入先进的机器学习算法^[99-100],初步开发出可以预测和评估重质油“性能分区”的模型。未来可进一步深化相关工作,通过从重质油分子结构中提取特征可以更精确地评估重质油从生产到消费的全生命周期碳排放,为石化行业的低碳发展提供坚实的科学支持。

(2)夯实碳足迹基础支撑体系。石化行业需加快建立健全重点产品的碳足迹核算标准体系,确保评价工作的规范性和统一性。同时,加强数据基础建设,建立完善的产品碳足迹因子数据库及标识认证、信息披露制度,提升数据质量和可靠性。此外,还应注重人才培养和数据安全保护,为碳足迹评价工作提供坚实的人才和技术保障。

(3)推动产业链协同减排。石化行业应强化上下游企业间的技术合作与经验共享,推动产业链碳足迹精准化核算与应用。通过联合研究和技术攻关解决产品全生命周期碳足迹评价中的技术难题,促进产业链整体减排效果的提升。同时,加强与贸易、财政、金融等政策的衔接,拓展碳足迹核算的应用场景,丰富低碳产品的市场供给,引导消费者选择更加环保的产品。

(4)完善国际交流对话机制。面对全球碳足迹核算评价标准多元化趋势,石化行业应主动加强国际交流对话,积极参与国际碳足迹标准制定工作。通过推动构建有利于我国的国际碳足迹核算评价方法、标识认证规则和数据体系,提升我国在全球

碳足迹标准制定中的话语权和影响力。

参考文献

- [1] 秦云,肖风劲,於琰,等.碳中和评估与预测预估方法研究进展[J].中国环境管理,2024,16(1):63-72.
Qin Y, Xiao F J, Yu L, et al. Advances in the methodologies on carbon neutrality assessment, prediction and projection[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2024, 16(1): 63-72.
- [2] 符大海,王妍,张莹.国际贸易中的碳壁垒:发展趋势、影响及中国对策[J].国际贸易,2024(4):25-35.
Fu D H, Wang Y, Zhang Y. Carbon barriers in international trade: development trends, impacts, and China's countermeasures[J]. Intertrade, 2024(4): 25-35.
- [3] 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.
- [4] 田涛,王之茵,杜永鑫.原油输送过程碳足迹核算与评价研究[J].中外能源,2020,25(6):83-89.
Tian T, Wang Z Y, Du Y X. Carbon footprint calculation and evaluation of crude oil transportation process[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(6): 83-89.
- [5] 田涛,姜晔,王子健.成品油管道输送过程碳足迹核算方法[J].油气储运,2021,40(6):715-720.
Tian T, Jiang Y, Wang Z J. Carbon footprint accounting method for pipeline transportation of refined oil products[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(6): 715-720.
- [6] 万子岸,张振莉,王正元,等.炼化一体化型企业产品碳足迹核算研究[J].现代化工,2024,44(9):13-16.
Wan Z A, Zhang Z L, Wang Z Y, et al. Carbon footprint accounting of products in integrated refining and chemical enterprises[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(9): 13-16.
- [7] 田涛,姜晔,李远.石油化工行业产品碳足迹评价研究现状及应用展望[J].石油石化绿色低碳,2021,6(1):66-72.
Tian T, Jiang Y, Li Y. Research and application status of carbon footprint assessment of petrochemical products[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2021, 6(1): 66-72.
- [8] Matušík J, Kočí V. What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 285: 124833.
- [9] Fang K, Heijungs R, de Snoo G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: overview of a footprint family[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 508-518.
- [10] Barker T, Bashmakov I, Bernstein L, et al. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the IPCC: technical summary[M]//Climate Change 2007: Mitigation contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2009: 27-93.
- [11] Čuček L, Klemeš J J, Varbanov P S, et al. Significance of environmental footprints for evaluating sustainability and security of development[J]. Clean Technologies and Environmental Policy,

- 2015, **17**(8): 2125–2141.
- [12] Unfccc U. Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount[R]. eSocialSciences, 2009.
- [13] Wright L A, Kemp S, Williams I. ‘Carbon footprinting’: towards a universally accepted definition[J]. Carbon Management, 2011, **2**(1): 61–72.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境管理 生命周期评价 要求与指南: GB/T 24044—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines: GB/T 24044—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [15] Jolliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, **8**(6): 324–330.
- [16] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, **26**(1): 1–11.
- Guo J P. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, **26**(1): 1–11.
- [17] Bhagwati B, Ahamad K U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling[J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2019, **19**(1): 155–166.
- [18] Farjana S H, Parvez Mahmud M A, Huda N. Life cycle assessment of solar process heating system integrated in mining process[M]// Life Cycle Assessment for Sustainable Mining. Amsterdam: Elsevier, 2021: 141–168.
- [19] 聂克蜜. 铜硫矿山采选过程生命周期评价与污染防治分析[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- Nie K M. Environmental impact and pollution prevention of mining and beneficiation process of copper sulphate mine based on life cycle assessment[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [20] Wu Y, Su D Z. Review of life cycle impact assessment (LCIA) methods and inventory databases[M]//Sustainable Product Development. Cham: Springer International Publishing, 2020: 39–55.
- [21] Vinodh S, Prasanna M, Selvan K E. Evaluation of sustainability using an integrated approach at process and product level: a case study[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2013, **6**(2): 131–141.
- [22] Huijbregts M A J, Steinmann Z J N, Elshout P M F, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, **22**(2): 138–147.
- [23] 段宁, 程胜高. 生命周期评价方法体系及其对比分析[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(32): 13923–13925, 14049.
- Duan N, Cheng S G. Outline and contrast analysis of life cycle assessment methodologies[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, **36**(32): 13923–13925, 14049.
- [24] 张楠, 杨柳, 罗智星. 建筑全生命周期碳足迹评价标准发展历程及趋势研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, **51**(4): 569–577.
- Zhang N, Yang L, Luo Z X. Carbon emission assessment standards for building life cycle: research status, development and potential trends[J]. Journal of Xi’an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, **51**(4): 569–577.
- [25] 国家发展和改革委员会. 中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[S]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2013.
- National Development and Reform Commission. Greenhouse Gas Emissions Accounting Methods and Reporting Guidelines for Chemical Production Enterprises in China (Trial) [S]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2013.
- [26] 王子健, 李佳涵, 车景华, 等. 石化行业碳足迹计算方法及优化分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2022, **7**(2): 22–28.
- Wang Z J, Li J H, Che J H, et al. Petrochemical carbon footprint calculation method and optimization analysis[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2022, **7**(2): 22–28.
- [27] Moretti C, Moro A, Edwards R, et al. Analysis of standard and innovative methods for allocating upstream and refinery GHG emissions to oil products[J]. Applied Energy, 2017, **206**: 372–381.
- [28] Gao T, Liu Q, Wang J P. A comparative study of carbon footprint and assessment standards[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2014, **9**(3): 237–243.
- [29] 曾文革, 高颖. 碳中和时代共同但有区别的责任原则新样态及其规则完善[J]. 理论月刊, 2023(2): 134–143.
- Zeng W G, Gao Y. The new form of the principle of common but differentiated responsibilities and the improvement of its rules in the carbon neutral era[J]. Theory Monthly, 2023(2): 134–143.
- [30] Callahan W, Fava S A J, Wickwire S, et al. Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard: GHG protocol[S]. Washington: World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2011.
- [31] Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services (British Standard): PAS 2050: 2011[S]. British Standards Institution (BSI), 2011.
- [32] Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification: ISO 14067: 2018[S]. International Organization for Standardization (ISO), 2018.
- [33] 杨楠楠. 日本建立产品碳足迹体系的经验及启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, **22**(S2): 161–165.
- Yang N N. TS Q 0010 and the illuminating experience of establishing carbon footprint system in Japan[J]. China Population Resources and Environment, 2012, **22**(S2): 161–165.
- [34] 中华人民共和国生态环境部. 《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》答记者问[EB/OL]. [2024–09–23]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbf/202409/t20240910_1085481.shtml.
- Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. Questions and Answers on the “Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines”[EB/OL]. [2024–09–23]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/zbf/202409/t20240910_1085481.shtml.
- [35] 白伟荣, 王震, 吕佳. 碳足迹核算的国际标准概述与解析[J]. 生态学报, 2014, **34**(24): 7486–7493.
- Bai W R, Wang Z, Lyu J. Summary and analysis of international standards on carbon footprint accounting[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(24): 7486–7493.
- [36] Liu T T, Wang Q W, Su B. A review of carbon labeling: standards, implementation, and impact[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **53**: 68–79.

- [37] Wu P, Low S P, Xia B, et al. Achieving transparency in carbon labelling for construction materials—lessons from current assessment standards and carbon labels[J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, **44**: 11–25.
- [38] Lemi L D M, LaBelle M C. Development or environmental jeopardy: the carbon footprint of hotels in juba South Sudan[J]. *American Journal of Climate Change*, 2022, **11**(1): 1–21.
- [39] Robinson O J, Tewkesbury A, Kemp S, et al. Towards a universal carbon footprint standard: a case study of carbon management at universities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **172**: 4435–4455.
- [40] Lao W L, Duan X F, Li X L. Comparison on greenhouse gas footprint of three types of oriented strand board manufacturing process in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(32): 78793–78801.
- [41] Wu P, Xia B, Wang X Y. The contribution of ISO 14067 to the evolution of global greenhouse gas standards—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **47**: 142–150.
- [42] 张亮. 在IEC制定适用于电子电气产品生命周期评价的产品种类规则国际标准的可行性研究[J]. *电器工业*, 2021(1): 45–52. Zhang L. Feasibility study on establishing international standard of product category rules applicable to life cycle assessment of electronic and electrical products in IEC[J]. *China Electrical Equipment Industry*, 2021(1): 45–52.
- [43] 邓明君, 胡双利, 罗文兵. 面向产品环境足迹标示的我国产品类别规则制定制度研究[J]. *中国科技论坛*, 2014(10): 41–47. Deng M J, Hu S L, Luo W B. Product category rule-making system for product environmental footprint labeling[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2014(10): 41–47.
- [44] 赵赛雨, 侯楠楠, 王安, 等. 欧盟“绿色新政”纺织品相关内容分析及我国纺织工业的应对策略[J]. *印染*, 2024, **50**(5): 83–88. Zhao S Y, Hou N N, Wang A, et al. Analysis on the content related to textiles of “European Green Deal” and China’s textile industry’s countermeasures[J]. *China Dyeing and Finishing*, 2024, **50**(5): 83–88.
- [45] 邱诒耿, 孟凡亮, 胡其越. 国内外产品碳足迹核算方法发展现状综述——基于产品种类规则[J]. *科技经济市场*, 2023(8): 119–121. Qiu Y G, Meng F L, Hu Q Y. Review on the development of accounting methods of product carbon footprint at home and abroad—based on product category rules[J]. *Science & Technology Economy Market*, 2023(8): 119–121.
- [46] 田涛, 许德刚, 于航, 等. 石化产品碳足迹种类规则标准化研究[J]. *石油石化绿色低碳*, 2024, **9**(2): 19–24. Tian T, Xu D G, Yu H, et al. Standardization of carbon footprint category rules for petrochemical products[J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2024, **9**(2): 19–24.
- [47] 中国化工信息中心有限公司. 中心化信牵头立项化工行业碳足迹团体标准[EB/OL]. [2024–09–23]. <https://www.cncic.cn/c/2023-12-05/728057.shtml> China Chemical Information Center Co. Ltd. Group standard for carbon footprint in the chemical industry led by the center[EB/OL]. [2024–09–23]. <https://www.cncic.cn/c/2023-12-05/728057.shtml>.
- [48] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 温室气体产品碳足迹量化要求和指南: GB/T 24067—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification: GB/T 24067—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [49] 王赛赛, 吴雄英, 丁雪梅. 三种LCA核算软件对印花布碳足迹核算的比较[J]. *印染*, 2014, **40**(18): 41–44. Wang S S, Wu X Y, Ding X M. Comparison of the industrial carbon footprint of printed fabrics using three LCA accounting software[J]. *Dyeing & Finishing*, 2014, **40**(18): 41–44.
- [50] Movassagh Incheboroun B, Asadollahfardi G, Delnavaz M. Life cycle assessment of anaerobic–anoxic–oxic and extended aeration of the activated sludge treatment system for urban wastewater treatment: a case study in Iran[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2024, DOI:10.1007/s10668–024–04846–5.
- [51] 许立杰, 陈秉楠, 吴薇群. 产品碳排放数据库标准化建设浅析[J]. *中国标准化*, 2023(5): 68–72, 82. Xu L J, Chen B N, Wu W Q. Analysis of the standardization of product carbon emission databases[J]. *China Standardization*, 2023 (5): 68–72, 82.
- [52] Eskafi M, Sigurdarson S, Brynjarsson B, et al. Icelandic-type berm breakwater: a nature-based structure with a low carbon footprint[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2024, **150**(1): 05023003.
- [53] Afizah Asman N S. Environmental impact evaluation on interlocking compressed earth brick using life cycle assessment[J]. *International Journal of GEOMATE*, 2023, **25**(111): 9–15.
- [54] 平旭彤. 浅析生命周期评价软件eBalance的使用[J]. *科技创新与应用*, 2015(23): 27–28. Ping X T. Analysis on the use of life cycle assessment software eBalance[J]. *Technology Innovation and Application*, 2015(23): 27–28.
- [55] 王伟哈, 刘涛, 刘颖昊. 钢铁产品生命周期数据库研究与开发[J]. *世界科技研究与发展*, 2015, **37**(5): 564–569. Wang W H, Liu T, Liu Y H. Research and development of life cycle database of steel industry products[J]. *World Sci-tech R & D*, 2015, **37**(5): 564–569.
- [56] 刘含笑, 吴黎明, 林青阳, 等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J]. *化工进展*, 2023, **42**(5): 2201–2218. Liu H X, Wu L M, Lin Q Y, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, **42**(5): 2201–2218.
- [57] Shi S Q, Yin J H. Global research on carbon footprint: a scientometric review[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, **89**: 106571.
- [58] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, **4**(2): 121–130.
- [59] Wackernagel M, Lewan L, Hansson C B. Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint. Application in Sweden and subregions[J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 1999, **28**(7): 604–612.
- [60] Weidema B P, Thrane M, Christensen P, et al. Carbon footprint[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, **12**(1): 3–6.
- [61] United Nations Environment Programme. Common carbon metric for measuring energy use and GHG emissions from building operations[EB/M]. [2024–09–23]. <http://wedocs.unep.org/handle/>

- 20.500.11822/7922.
- [62] 毛显强, 曾桢, 邢有凯, 等. 从理念到行动: 温室气体与局地污染物减排的协同效益与协同控制研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 255-267.
Mao X Q, Zeng A, Xing Y K, et al. From concept to action: a review of research on co-benefits and co-control of greenhouse gases and local air pollutants reductions[J]. Climate Change Research, 2021, 17(3): 255-267.
- [63] Di Bari R, Horn R, Bruhn S, et al. Buildings LCA and digitalization: Designers' toolbox based on a survey[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1078(1): 012092.
- [64] Zhang A, Zhong R Y, Farooque M, et al. Blockchain-based life cycle assessment: an implementation framework and system architecture[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 152: 104512.
- [65] 罗光荣, 高健. 煤化工与石油化工的协调发展路径探究[J]. 山西化工, 2023, 43(6): 128-129, 143.
Luo G R, Gao J. Exploring the coordinated development path of coal chemical industry and petrochemical industry[J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(6): 128-129, 143.
- [66] 徐晨光, 张燕, 杨彦, 等. 数字石化化工与碳安全[J]. 化工进展, 2024, 43(10): 5339-5352.
Xu C G, Zhang Y, Yang Y, et al. Digital petrochemical & chemical industry and carbon security[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(10): 5339-5352.
- [67] 王少梅. 石油化工企业节能减排的现状与对策研究[J]. 石化技术, 2022, 29(1): 212-213.
Wang S M. Present situation and countermeasures of energy saving and emission reduction in petrochemical enterprises[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(1): 212-213.
- [68] 李赫, 徐蒙. 石油化工装置设计中的能源优化与节能减排研究[J]. 石化技术, 2024, 31(7): 57-59.
Li H, Xu M. Research on energy optimization, energy saving and emission reduction in petrochemical plant design[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(7): 57-59.
- [69] 贾睿, 孟蕾. 国内石油公司碳资产管理的实践及建议[J]. 商业会计, 2015(12): 7-9.
Jia R, Meng L. Practice and suggestions on carbon asset management of domestic oil companies[J]. Commercial Accounting, 2015(12): 7-9.
- [70] 卢黎歌, 李华飞. 开全面建设社会主义现代化国家新篇章 谋二〇三五年远景目标: 十九届五中全会《建议》的整体性解读[J]. 探索, 2021(1): 1-15.
Lu L G, Li H F. Open a new chapter in building a socialist country in an all-round way and seek long-range goals for 2035—an overall interpretation of the "proposals" of the fifth plenary session of the 19th central committee of the CPC[J]. Probe, 2021(1): 1-15.
- [71] 乔晓楠, 彭李政. 碳达峰、碳中和与中国经济绿色低碳发展[J]. 中国特色社会主义研究, 2021, 12(4): 43-56.
Qiao X N, Peng L Z. Carbon emission peak, carbon neutrality and green and low-carbon development of China's economy[J]. Studies on Socialism with Chinese Characteristics, 2021, 12(4): 43-56.
- [72] 杨铎. "双碳"目标下我国石油企业减排降碳路径分析[J]. 石化技术, 2022, 29(4): 177-178.
Yang D. Analysis on the path of emission reduction and carbon reduction of Chinese petroleum enterprises under the goal of "double carbon"[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(4): 177-178.
- [73] 王之茵. 石化产品碳足迹管理[J]. 企业管理, 2024(9): 108-111.
Wang Z Y. Carbon footprint management of petrochemical products[J]. Enterprise Management, 2024(9): 108-111.
- [74] 葛富民. 低碳经济背景下我国石油石化行业发展研究[J]. 环渤海经济瞭望, 2024(7): 67-70.
Ge F M. Research on the development of China's petroleum and petrochemical industry under the background of low-carbon economy[J]. Economic Outlook the Bohai Sea, 2024(7): 67-70.
- [75] 余虹钢, 曾桃, 夏堃, 等. 石油化工企业节能减排现状与对策研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(9): 206-208.
Yu H G, Zeng T, Xia K, et al. Status quo and countermeasures of energy saving and emission reduction in petrochemical enterprises[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(9): 206-208.
- [76] 陈文学, 田雨露, 齐黎明. 油气开采行业碳排放核算标准研究[J]. 国际石油经济, 2023, 31(6): 70-80.
Chen W X, Tian Y L, Qi L M. Research on carbon emission accounting standard of oil and gas exploitation industry[J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(6): 70-80.
- [77] 吕晓东, 肖冰, 赵睿, 等. 2018年世界和中国石化工业综述及2019年展望[J]. 国际石油经济, 2019, 27(5): 31-39.
Lyu X D, Xiao B, Zhao R, et al. 2018 review and 2019 outlook of global and China's petrochemical industry[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(5): 31-39.
- [78] 梁龙. A石化公司发展战略研究[D]. 成都: 西南民族大学, 2020.
Liang L. Development strategic research of petrochemical company A[D]. Chengdu: Southwest Minzu University, 2020.
- [79] 黄巍. 大型现代煤化工项目风险分析与管理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
Huang W. Study on risk analysis and management of large modern coal chemical project[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2010.
- [80] 陈群胜. 循环经济与工业发展模式转型研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
Chen Q S. Research on circular economy and transformation of industrial development mode[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.
- [81] 申少华, 彭青松, 刘爱华, 等. 大学生校外实践教育基地工作现状及建设思路研究[J]. 广东化工, 2014, 41(18): 191-192.
Shen S H, Peng Q S, Liu A H, et al. The current situation and construction idea study on outside school practice education base to college student[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(18): 191-192.
- [82] 张磊. 原油管道碳减排研究[J]. 石油化工建设, 2022, 44(1): 31-33.
Zhang L. Study on carbon emission reduction of crude oil pipeline[J]. Petroleum and Chemical Construction, 2022, 44(1): 31-33.
- [83] 王陶, 张志智, 孙潇磊. 汽油产品碳足迹研究[J]. 当代化工, 2020, 49(7): 1428-1432, 1436.
Wang T, Zhang Z Z, Sun X L. Study on carbon footprint of gasoline products[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(7): 1428-1432, 1436.
- [84] 程冬茹. 汽柴油全生命周期碳排放计算[D]. 北京: 中国石油大

- 学(北京), 2016.
- Cheng D R. Calculation of carbon emission of gasoline and diesel in the whole life cycle[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2016.
- [85] 孟宪玲, 李希宏. 石油化工生产企业 CO₂排放量计算方法: SH/T 5000—2011[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2011.
- Meng X L, Li X H. The calculation method of CO₂ emissions in petrochemical production: SH/T 5000—2011[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2011.
- [86] Li X, Li X, Sun L R, et al. Discussion on key issues of carbon footprint accounting for wool products[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, **445**: 141336.
- [87] 田涛, 朱明璋, 姜晔. 石化产品碳足迹评价研究与实践[J]. 油气与新能源, 2022, **34**(5): 100–108.
- Tian T, Zhu M Z, Jiang Y. Evaluation research and practice of the petrochemical product carbon footprint[J]. Petroleum and New Energy, 2022, **34**(5): 100–108.
- [88] 张楚珂, 田涛, 王之茵, 等. 聚丙烯产品碳足迹核算及对比研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2021, **6**(6): 17–23.
- Zhang C K, Tian T, Wang Z Y, et al. The study of carbon footprint calculation and comparison of polypropylene product[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2021, **6**(6): 17–23.
- [89] 王家, 崔欣, 匡巍巍. 聚丙烯产品碳足迹核算及对比研究[J]. 中外能源, 2023, **28**(6): 84–88.
- Wang J, Cui X, Kuang W W. Carbon footprint calculation and comparative study of polypropylene products[J]. Sino-Global Energy, 2023, **28**(6): 84–88.
- [90] 陈广卫, 张志智. 对二甲苯产品的碳足迹与减排措施[J]. 化工环保, 2021, **41**(6): 774–778.
- Chen G W, Zhang Z Z. Carbon footprint and emission reduction measures of *p*-xylene products[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2021, **41**(6): 774–778.
- [91] 詹咏, 黄嘉良, 罗伟, 等. 上海市试点小区湿垃圾源头减量前后垃圾处理处置全链条碳足迹分析[J]. 环境工程学报, 2020, **14**(4): 1075–1083.
- Zhan Y, Huang J L, Luo W, et al. Full chain carbon footprint analysis of garbage disposal process before and after food waste *in situ* reduction treatment in Shanghai pilot communities[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(4): 1075–1083.
- [92] 白卫国, 庄贵阳, 朱守先. 中国城市温室气体清单研究进展与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, **23**(1): 63–68.
- Bai W G, Zhuang G Y, Zhu S X. Progresses and prospects of municipal greenhouse gas inventory research in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, **23**(1): 63–68.
- [93] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 综合能耗计算通则: GB/T 2589—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. General rules for calculation of the comprehensive energy consumption: GB/T 2589—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [94] Chai M J, Chai L W, Nourozieh H, et al. A technical, economic, and environmental assessment on dimethyl ether (DME) as a renewable solvent from carbon dioxide utilization (CCU) for heavy oil recovery: a real field in surmont, Canada as case study[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, **482**: 148936.
- [95] Masnadi M S, El-Houjeiri H M, Schunack D, et al. Global carbon intensity of crude oil production[J]. Science, 2018, **361**(6405): 851–853.
- [96] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(4): 696–708.
- Zhang Q F, Fang K, Xu M, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(4): 696–708.
- [97] Dong C L, Hu W Y, Wang Y H, et al. Double-bond equivalence linear equations for structural interpretation of fossil hydrocarbons[J]. Fuel, 2023, **332**: 126206.
- [98] Zhang Y F, Han Y H, Wu J X, et al. Comprehensive composition, structure, and size characterization for thiophene compounds in petroleum using ultrahigh-resolution mass spectrometry and trapped ion mobility spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2021, **93**(12): 5089–5097.
- [99] Tropsha A, Isayev O, Varnek A, et al. Integrating QSAR modelling and deep learning in drug discovery: the emergence of deep QSAR[J]. Nature Reviews. Drug Discovery, 2024, **23**(2): 141–155.
- [100] Tripathi S, Trigunait R. Achieving sustainable practices: environmental sustainability and semi-supervised learning for carbon footprint reduction[J]. Environment, Development and Sustainability, 2024, DOI:10.1007/s10668-024-05578-2.