

引用格式: 张冰倩, 高晗博, 田金平, 等. 面向双碳战略的前瞻性生命周期评价: 研究进展与方法框架[J]. 资源科学, 2023, 45(12): 2341-2357. [Zhang B Q, Gao H B, Tian J P, et al. Prospective life cycle assessment targeting the dual-carbon strategy: Progress review and methodological framework[J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2341-2357.] DOI: 10.18402/resci.2023.12.04

面向双碳战略的前瞻性生命周期评价 ——研究进展与方法框架

张冰倩¹, 高晗博¹, 田金平^{1,2}, 陈吕军^{1,2}

(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)

摘要:在“双碳”战略目标驱动下, 评价低碳、零碳、负碳新兴技术的潜在环境影响, 在技术发展的早期阶段从系统观视角对技术的开发提供决策参考, 对从源头上降低技术全生命周期的资源能源消耗和环境排放具有重要意义和实用价值。本文辨析比较了生命周期评价的相关概念, 综述了国内外前瞻性生命周期评价领域的研究进展, 运用文献计量学方法从研究趋势、研究对象、关键领域等方面深入分析了前瞻性生命周期评价方法的发展和应用现状。针对该方法面临的数据可用性不足、规模放大非线性、不确定性大、可比性低等挑战, 本文提出了前瞻性生命周期评价方法的综合框架。最后, 阐述了该方法在支撑中国双碳战略目标方面的重要作用, 并提出了未来的改进建议与应用展望, 以期为其在中国的本地化应用提供实用参考。在未来, 使用该方法进行技术比较和选择将促进降碳技术的创新与发展, 助力推动更低成本、更环境友好的新技术开发, 从而实现“双碳”目标。

关键词: 前瞻性生命周期评价; 新兴技术; 低碳技术; 零碳技术; 负碳技术; 生产成熟度; 技术成熟度; 规模放大

DOI: 10.18402/resci.2023.12.04

1 引言

2020年9月, 中国提出力争在2030年前实现碳达峰并于2060年前实现碳中和(以下简称“双碳”目标)。《科技支撑碳达峰碳中和实施方案》提出, 针对能源绿色低碳转型迫切需求, 需要加强基础性、原创性、颠覆性技术研究^[1]。实现碳达峰和碳中和需要科学技术的深刻变革。低碳、零碳、负碳新兴技术具有巨大的发展潜力和广阔的发展前景, 但其可能产生的潜在资源环境影响尚未被充分揭示。国务院《2030年前碳达峰行动方案》指出, 要降低全生命周期能耗和碳排放, 建立重点企业碳排放核算、报告、核查等标准, 探索建立重点产品全生命周期碳足迹标准^[2]。在此背景下, 使用生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)的方法, 定量化、系统化评价各种产品、服务、技术全生命周期的环境影响

响, 用于支撑宏观决策, 对于“双碳”战略具有重要意义。

近年来, 针对早期发展阶段的低碳、零碳、负碳等新兴技术进行环境影响评估以避免未来的锁定成本, 受到愈加广泛的关注^[3]。使用前瞻性生命周期评价方法(Prospective life cycle assessment, Prospective LCA), 在新兴技术商业化之前进行评估, 可帮助研发者从系统全局视角, 针对不同应用场景比选更加合适的技术路径, 以期在技术、经济和环境之间找到最佳平衡^[4]。目前, 国际上开展了大量的相关研究, 涉及纳米材料、新能源、电动汽车等新技术领域, 但是国内关于前瞻性生命周期评价方法的本地化应用研究仍然较少。

中国实现双碳目标面临着“三高一短”的挑战, 即: 高碳的能源结构, 高碳的产业结构, 工业化、城

收稿日期: 2023-03-24; 修订日期: 2023-10-22

基金项目: 黄河流域碳达峰范式与试点项目(2022-YRUC-01-0403); 国家自然科学基金项目(52170181)。

作者简介: 张冰倩, 女, 云南昆明人, 硕士生, 研究方向为产业生态学与新型污水处理厂生命周期评价。E-mail: zhangbq22@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 田金平, 男, 甘肃武威人, 研究员, 博士, 主要从事产业生态学、生态工业园区相关研究。E-mail: tianjp@tsinghua.edu.cn

镇化仍在中高速进程之中,实现碳达峰、碳中和时间短^[9],更需要建立适用于本地化活动水平和排放因子的前瞻性生命周期评价方法,以在低碳、零碳、负碳新兴技术商业化之前进行客观评估^[4]。基于此,本文将从前瞻性生命周期评价相关概念介绍展开,确定其研究对象。随后,分析该领域研究现状,剖析当前研究热点,并集成国内外现有研究成果,搭建前瞻性生命周期评价框架,识别本地化应用存在的主要挑战,以期为中国双碳领域新兴技术的发展决策提供方法支撑。

2 前瞻性LCA相关概念辨析

ISO 14040 提出,生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是“产品系统在其整个生命周期中的输入、输出和潜在环境影响的汇编和评估^[6]”,它是一种系统性的方法,可基于材料和能源投入和产出的清单数据,评估产品、过程或服务的生命周期环境影响,并解释最终结果以支持决策^[7]。LCA 主要包括4个步骤:目标与范围界定(Goal and scope definition, G&S)、生命周期清单建立(Life cycle inventory, LCI)、生命周期影响分析(Life cycle impact analysis, LCIA)和结果与解释(Interpretation)。

近年来,研究领域对不同类型的LCA进行了定义,并产生了很多新兴概念。本部分通过分析文献对目前研究领域的LCA方法进行总结(表1)。一些类型的LCA主要关注已有的较成熟的商业产品系统,例如归因性、回溯性和决策性生命周期评价,以此分析其直接或间接环境影响并支撑决策。而其他生命周期评价方法则应用于新兴的、尚未上市的产品或技术,例如归果性、动态、预期、事前与前瞻性生命周期评价。其中,预期、事前和前瞻性LCA的概念类似,通常被视为同一种生命周期评价方法的不同表述^[13],本文中将其统称为前瞻性LCA进行后续分析。

前瞻性LCA方法是使用LCA进行前瞻性评估的方法,该方法与其他LCA方法的主要区别在于被评价对象所处的阶段和LCA的实施步骤,它通常用于对处于未来情境下或规模放大后的新兴技术进行评价。其中,新兴技术(Emerging technologies)指仍处于开发阶段且尚未商业化的新技术^[7]。新兴技

术的发展遵循技术发展曲线,Arvidsson等^[14]的研究表明,在技术发展的早期阶段,对其进行改变和控制在可能性更高,但技术相关的知识却较少;而在开发的后期阶段,虽然技术知识增加,但改变技术的可能性降低且成本大幅上升,这意味着在早期阶段进行LCA研究可以对技术发展产生更大的作用。前瞻性LCA所评估技术的当前时间(t_0)处于技术形成阶段或早期增长阶段,需要在将来(t_t)技术处于发展阶段末期或者饱和阶段时进行建模,基于对技术扩散趋势和知识水平提升的模拟,研究新兴技术在未来的成本演进与渗透率变化趋势,并进一步量化相关的生命周期环境影响。

新兴技术的技术成熟度不同,会影响数据的可用性和质量,从而对新兴技术的前瞻性LCA结果产生重大影响^[15]。因此,前瞻性LCA有时会引入成熟度指标以评价量化未来技术的不同发展阶段。技术成熟度水平(Technology readiness level, TRL)和生产成熟度水平(Manufacturing readiness level, MRL)是技术开发过程成熟度的判断指标。TRL是一种定性扩展方法,分为TRL 1(概念验证)到TRL 9(商业规模技术)的9个等级。TRL量表最初由美国开发,是美国国家航空航天局(NASA)作为衡量太空部署技术准备情况的手段^[16],之后被学术界、工业界和政府广泛使用。MRL则是从制造角度评估技术的组件和子系统,共分为10个等级,低值代表实验室规模生产(技术形成阶段),高值代表大规模生产(技术发展阶段或饱和阶段)。一些美国政府机构和国家可再生能源实验室将TRL和MRL结合,跟踪新兴技术的生产阶段^[17]。

了解技术的TRL和MRL对于新兴技术的LCA非常重要,不同TRL和MRL的对应情况和LCA所面临的问题如表2所示。低TRL和MRL情况下,技术成熟度较低,新兴技术数据可用性有限,LCA结果不确定性较大。高TRL和MRL情况下则很难对工艺进行根本性的优化和更改。新兴技术的数据通常取自实验室规模(TRL 3~5或MRL 3~5)或中试规模(TRL 6~8或MRL 6~8)的技术材料^[4],但是大多数LCA只有在完全成熟的工艺(TRL 9或MRL 9~10)上才能被更好地评估。因此,在评估新兴技术在工业规模水平时的环境影响,或将新兴技术与已

表1 不同类型LCA的定义^[3,4,8-12]Table 1 Definitions of different types of life cycle assessment (LCA)^(3,4,8-12)

中文名称	英文名称	简称	定义	研究对象特点	时间维度	数据来源	辅助模型
归因性生命周期评价	Attributional LCA	ALCA	评估特定产品系统环境影响的评价方法	商业上现在存在或曾经存在的产品体系,侧重于产品体系引起的变化	过去/现在	标准 LCA 数据 ^(a)	—
回溯性生命周期评价	Backcasting LCA	BLCA	评估特定目标不同实现路径所带来的环境影响的评价方法	全球/区域/城市的可持续发展实现路径	过去/未来	—	线性规划单纯形算法
归果性生命周期评价	Consequential LCA	CLCA	评估决策(通常以产品供需变化表示)直接或间接产生的环境影响的评价方法	因决策而发生变化的商业产品体系,该产品系统可能受到市场或其他因素影响	未来	标准 LCA 数据	一般均衡模型;线性优化模型;综合评估模型
动态生命周期评价	Dynamic LCA	DLCA	在对产品进行生命周期评价时,考虑产品开发和生产过程、技术性能和背景系统等方面动态发展的评价方法	时间跨度内产品开发和生产过程、技术性能和背景系统等可能发生的变化	过去/现在/未来	标准 LCA 数据	拓扑结构
决策性生命周期评价	Decision LCA	DLCA	类似 CLCA,但决策信息通常以经济行为者之间的实际或者预期的财务和合同关系作为基础的评价方法	会因决策而发生变化的商业上存在的产品体系	未来	标准 LCA 数据	—
集成性生命周期评价	Integrated LCA	ILCA	该评价方法是 LCA 与其他建模方法(例如投入产出分析、能源情景建模、物质流分析等)的集成,用于评估大规模应用气候变化适应与缓解措施对环境和资源的影响	复合产品系统、能源系统和城市/区域环境影响等	未来	标准 LCA 数据, TI ^(b) , 背景数据, 投入产出分析	投入产出分析;综合评估模型
预期生命周期评价	Anticipatory LCA	NLCA	一种通过纳入前瞻性建模工具和多种社会视角的前瞻性评价工具	新兴技术	未来	标准 LCA 数据, TI, 实景数据, 背景数据	学习曲线、经验曲线、分子结构模型等
前瞻性生命周期评价	Prospective LCA	PLCA	对尚处于早期开发阶段的新兴技术在未来的某一阶段(如大规模应用后)建模,以模拟其可能产生的环境影响的评价方法	新兴技术	未来	标准 LCA 数据, TI, 实景数据, 背景数据	学习曲线、经验曲线、分子结构模型等
基于情景的生命周期评价	Scenario-based LCA	SLCA	基于不同情景分析建模的 LCA	新兴技术	动态过程,从过去到未来	标准 LCA 数据及基于情景的计算	生命周期建模语言
事前生命周期评价	Ex-ante LCA	—	在新技术商业化实施之前对其进行环境生命周期评估,以指导研发决策的评价方法	新兴技术	未来	标准 LCA 数据, TI, 实景数据, 背景数据	学习曲线、经验曲线、分子结构模型等

注:(a)标准 LCA 数据主要包括 ecoinvent、GaBi、ILCD 和 USDA 等的数据库^[9]。(b)TI 指技术改进 (Technological improvement),是指对关键能源和材料生产技术进行改进的假设值。

有工业规模的现有技术进行比较时,会存在数据可用性不足、规模放大非线性、不确定性大、可比性低等诸多挑战^[18]。

在此基础上,前瞻性 LCA 通常使用市场渗透率

(Market penetration level, MPL)进一步表征新兴技术占有的市场规模(图 1),评估其从规模生产开始到更加成熟的各阶段。MPL 分为 4 个等级:①发明和创新(Invention and innovation)等级, MPL 为 0%;

表2 TRL和MRL在LCA中的应用及挑战^[4,15,17-19]

Table 2 Application and challenges of technology readiness level (TRL) and manufacturing readiness level (MRL) in LCA^[4,15,17-19]

技术阶段	生产成熟度水平	对应关系	技术成熟度水平	LCA可用数据	LCA决策支撑	前瞻性LCA的挑战
概念发展	1 影响识别	→	探究基本原理	文献、专利或者其他参考资料	筛选(如原材料、能源结构等);基于热力学原理得到环境影响	库存数据有限;功能单元和系统边界难以确定
	2 确定概念	→	概念的形成			
	3 概念的验证	→	概念的验证	技术组件的实验室、规模数据	技术组件对环境的影响;筛选不同的技术组件	系统未集成;总体材料和能量平衡数据不可用
	4 实验室样品	→	实验室环境下组件或系统验证	集成系统实验室规模数据	基于质量和能源平衡计算,比较工艺备选方案	可比性、规模放大问题、数据和模型的不确定性
技术开发	5 相关环境下生产原型组件	→	相关环境下实验规模系统的验证	模拟数据	选择合适的替代方案进一步研究并和现有技术比较	
	6 相关环境下生产原型系统或子系统	→	相关环境下工程或中试规模系统的验证	中试规模数据		
工程开发	7 生产代表性环境下生产系统、子系统或组件	→	相关环境下全尺寸或相似系统的验证	全尺寸原型测试数据	随着技术成熟度的提高和工艺参数的优化,得到更新的环境影响评估数据;通过应用材料和能源的回收再利用,最大程度减少最终废物流	由于材料和能源效率的变化而导致的规模放大问题;数据和模型不确定性;通过分配、系统扩展或排除处理潜在的副产品
小规模生产	8 实现低速率生产	→	实际系统通过测试和论证完成并合格	小规模生产数据		
	9 实现全速率生产	→	在预期条件下进行实际系统操作	全速率生产数据		
大规模生产	10 大规模生产	—		大规模生产数据		

②利基市场商业化(Niche market commercialization)等级,MPL为(0%, 5%];③普遍扩散(Pervasive diffusion)等级,MPL为(5%, 50%];④饱和(Saturation)等级,MPL为(50%, 100%]。一方面,对于新兴技术而言,随着技术的发展MPL逐渐增大,基于规模效应和学习效应^[18,20],单位产出环境影响会减少。其中,规模效应是指通过尺寸缩放因子将产品

或技术的规模或容量与环境影响联系起来;学习效果则是将工业规模生产中所有学习和经验机制(例如,边学边做、生产规模化、生产协同作用)与环境影响相关联。使用学习曲线和经验曲线可以量化生产数量的增加和单位产品环境影响减少的关系。另一方面,一旦新技术进入市场,其MPL会决定整个市场组合中该技术对环境的影响程度^[18],也

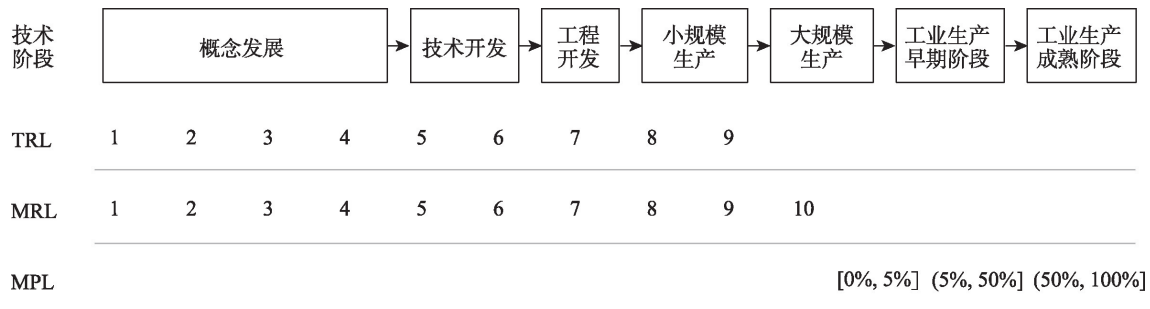


图1 技术开发的层次^[18,19]

Figure 1 Levels of technology development and mechanism^[18,19]

注:本图为作者整合相关文献形成。

2023年12月

会影响所研究技术上游或下游工艺的未来发展。例如,可再生能源被认为是比化石燃料更环保的能源替代品,未来电力结构中可再生能源比例的提升会影响下游新兴技术的评价结果。目前,部分研究将LCA与综合评估模型(IAM)相结合以解决背景系统电力变化的问题^[21]。

综上所述,新兴技术在不同发展阶段的环境影响具有差异性,因此,进行有针对性的前瞻性LCA对于研究和开发是必要的。但是现阶段前瞻性LCA的研究尚不充分,评估过程存在多重挑战,应用案例有限且框架不统一,需要进行系统的总结和梳理,以应用在中国新兴技术的未来评估。

3 前瞻性LCA国内外研究进展评述

3.1 基于文献计量学的研究现状及重点领域分析

目前,尽管将前瞻性LCA应用于与“双碳”目标相关的新兴技术的案例较多,但在文献检索中添加“双碳”作为关键词会限制所获取的文献数量,导致文献分析不充分,因此该部分主要使用上一节中确定的前瞻性LCA中、英文关键词,例如前瞻性LCA的不同表述、新兴技术等,进行文献检索。

本文文献数据来源于Web of Science核心合集数据库,检索式为TS=(“anticipatory” OR “emerg* techn*” OR “ex-ante” OR “prospect*”) AND TS=(“LCA” OR “Life Cycle Assessment” OR “Lifecycle Assessment” OR “Life cycle Analysis”),检索时间为2023年1月10日(故后文2023年文献指该日期以前发表的文献)。排除与研究问题无关或重复的文献,一共获得889篇,发表年份为1994—2023年。将检索到的文献记录下载保存为纯文本文件,格式为“全纪录和引用的参考文献”。在CNKI数据库中以“(SU=‘事前’ or SU=‘前瞻性’ or SU=‘预期’ or SU=‘新兴技术’) and SU=‘生命周期评价’”为检索式进行检索,排除与研究问题无关的文献后,未得到相关文献。检索时间为2022年12月20日。

889篇文献的发表年份分布如图2所示,2020年以来该领域发表论文数量显著增长,已成为LCA领域的研究热点。

运用Citespace 6.0.R1软件,分析前瞻性生命周期评价相关文献的研究机构、主要作者、关键词等

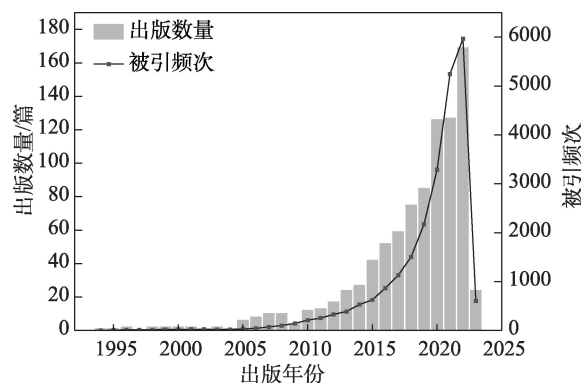


图2 1994—2023年国内外研究文献发表年度趋势

Figure 2 Annual trend of Chinese and international publications, 1994-2023

指标。以每年为1个时间切片;节点类型选取作者、国家、机构、关键词、参考文献和被引期刊等;阈值选择为“每切片的前50个节点”;采用Pathfinder、Pruning sliced networks、Pruning the merged network共同勾选的裁剪方法,生成相关图谱(图3)。

通过Citespace进行关键词突现分析可解释研究主题和热点。对1994—2023年该领域的关键词进行突现分析,结果见表3。“突现”指一个变量的值在短期内有非常大的波动。“突现关键词”是发现在一定时间内受到相关科学界特别关注的关键词的一种有效的分析方法,在分析研究前沿、预测研究趋势和挖掘热点方面具有重要的价值。“突现强度”是该关键词在领域内的重要性,关键词突现强度越大,即重要性越大^[22]。

文献计量分析得到以下结论:①目前,前瞻性LCA相关的研究机构主要分布在发达国家,例如美国(14.6%)、德国(7.6%)和英国(6.0%),中国发文量占5.6%,但近几年开始迅速发展;②被引用次数较多的期刊在该领域具有较大影响力,其中重要期刊如图3b所示;③关键词分析和突现结果表明,循环经济、碳排放、纳米材料、能源、汽车、环境影响等内容出现次数较多且主要在近几年突现,说明它们是近期新兴且活跃的主题。在众多关键词中,“能源”突现时间最早且和其他关键词联系紧密。能源消耗是环境污染、土地占用、气候变化等一系列问题的主要根源^[23,24],推动能源绿色低碳安全高效转型是现阶段中国助力双碳目标的重要举措^[1,25]。其中,高效利用可再生能源发电有助于减少76%的碳排

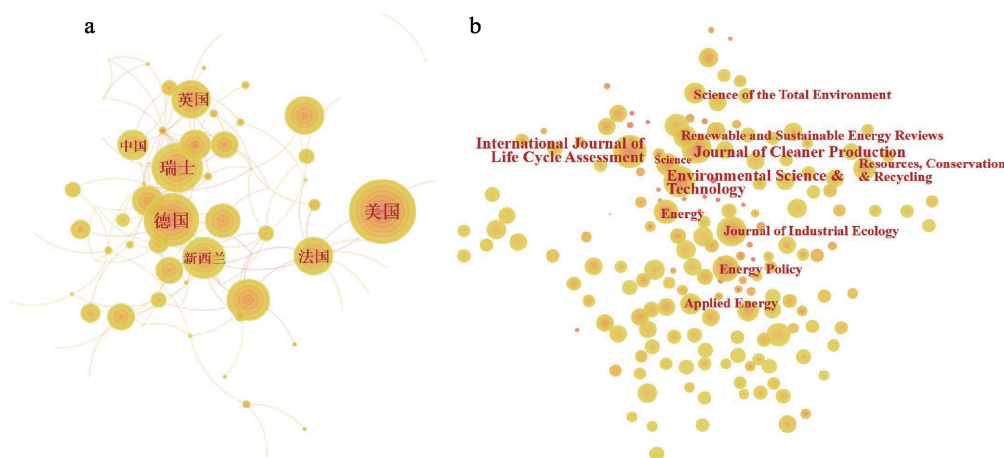


图3 国家协作图谱(a)和期刊共被引图谱(b)

Figure 3 National collaboration map (a) and journal co-citation map (b)

表3 1994—2023年间该领域出现的关键词突现分析结果

Table 3 Keyword burst analysis results, 1994-2023

关键词	突现强度	开始年份	结束年份	1994—2023年	
工程纳米材料	engineered nanomaterial	3.11	2010	2018	
生物燃料	biofuel	3.07	2011	2018	
排放	emission	4.68	2011	2014	
能源	energy	2.48	2011	2014	
乙醇	ethanol	3.58	2013	2017	
影响评估	impact assessment	3.50	2013	2015	
风险	risk	5.73	2014	2017	
纳米技术	nanotechnology	2.33	2014	2016	
暴露	exposure	3.66	2014	2015	
模型	model	4.34	2015	2017	
健康	health	2.26	2015	2016	
污水	waste water	2.58	2017	2020	
归果性LCA	consequential LCA	2.90	2017	2019	
综合	integration	2.82	2017	2018	
能源系统建立	energy systems modelling	2.81	2018	2020	
碳排放	CO ₂ emission	2.26	2018	2019	
工具	tool	2.62	2019	2020	
循环经济	circular economy	6.16	2020	2023	
前瞻性LCA	prospective life cycle assessment	2.80	2020	2023	
策略	strategy	2.91	2021	2023	
汽车	vehicle	2.51	2021	2023	

放^[26]。电动汽车的发展也有助于减少对化石燃料的依赖^[26,27]。然而,目前能源转型仍然存在成本较高、技术不完善等问题。因此,对相关领域新兴技术进行前瞻性LCA评估和碳排放估算^[28],从系统视角探究技术降碳效力和发展前景,有助于筛选可持续生

产、低碳、零碳、负碳的新兴技术,对指导新兴技术在双碳目标下的发展和支撑循环经济战略^[29]具有重要意义。除此之外,纳米材料在可再生能源、污染物监测、靶向医学和抗菌保护等领域得到广泛应用,但其潜在的环境和健康影响尚待长期跟踪和深

入解释^[30],使用前瞻性LCA有助于评估纳米技术在可持续发展方面的潜力和限制,并采取相应的措施来规避或减轻相应的环境和健康风险。

3.2 基于二维分析框架的前瞻性LCA文献筛选

根据第2章不同类型LCA的相关定义,分析检出889篇文献的题目、摘要和关键词,使用图4所示的二维分析框架对所有文献分类,并按以下4项原则进一步筛选文献:①前瞻性LCA用于评估新兴技术的系统综述;②指导研究者进行前瞻性LCA的方法文献;③使用LCA方法,进行前瞻性评估的案例研究,并涉及技术开发、技术学习或技术扩展;④前瞻性LCA与其他评估方法结合的应用。

筛选得到满足上述任一要求的文献共106篇,其中综述22篇,方法论16篇,应用案例68篇(图5)。通过对上述文献进行分析发现:目前,使用前瞻性LCA对能源、纳米材料、电动汽车、生物基材料等新兴技术进行评估已有一定的应用。但是,大部分文献仍然缺少前瞻性LCA框架中的部分关键步骤。例如,规模放大及背景数据的动态变化没有被

充分考虑,评估指标的选择存在差异性,结果不确定性没有被充分讨论等,说明前瞻性LCA研究尚未达到一致共识,缺少过程透明性和结果可对比性,导致结果可能存在偏差,从而影响决策。因此,需要统一规范前瞻性LCA研究方法,以对后续研究进行指导。基于此,后文主要回答以下问题:①如何进行前瞻性LCA的研究?②在双碳目标下,前瞻性LCA在中国可以有哪些应用?会面临哪些挑战?以及如何应对?

4 前瞻性LCA方法框架构建

使用ISO 14040中的标准LCA框架进行前瞻性评估时存在缺少原始数据、规模放大问题、不确定性和结果可比性问题等诸多挑战^[17,36]。因此,需要对原有的LCA框架进行方法改进,建立通用框架。本部分着重阐述前瞻性LCA评估的差异性,识别前瞻性LCA的主要挑战以及改进策略,以更好地适应技术研究和开发(图6)。

4.1 目标与范围界定

在界定前瞻性LCA目标和范围时,首先需要说

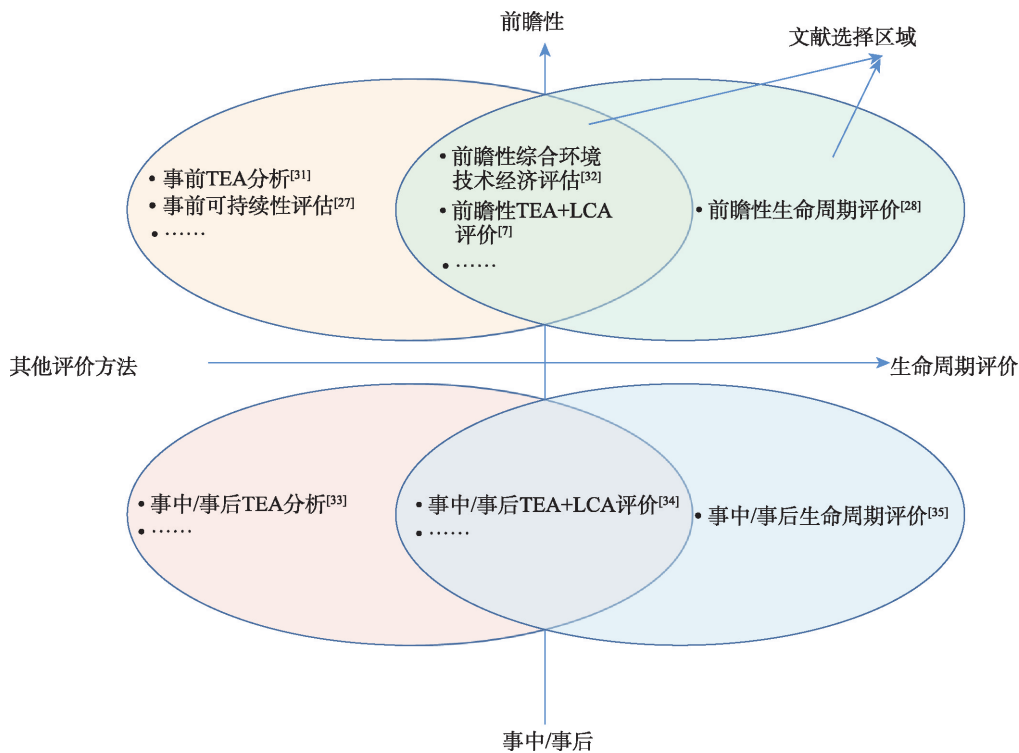


图4 检索文献主题的二维分析框架

Figure 4 Two-dimensional analysis framework of topics of publications

注:图中TEA为技术经济分析(Techno-Economic Analysis)。

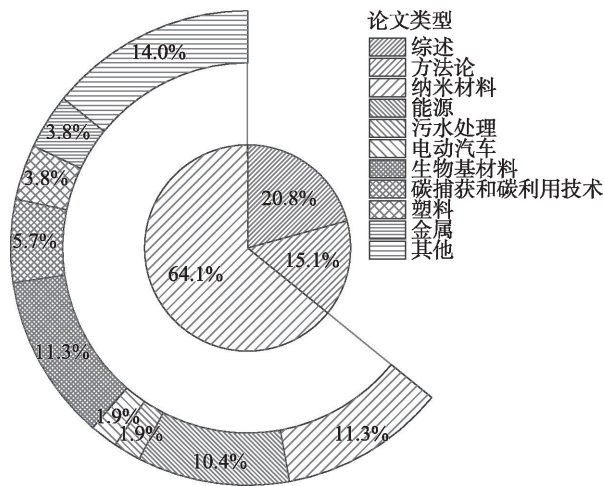


图5 筛选得到各类论文占比
Figure 5 Types of papers selected

明所评价的新兴技术可以在何时、何地、以何种成熟度运行^[9]。新兴技术评价的时间和地点会影响数据的选择和处理,从而对评价结果产生较大影响。前瞻性评估时间离当前时间越远,结果不确定性越大,技术在不同地区发展所产生的环境影响也存在较大差异。同时,确定研究技术的TRL、MRL和MPL有助于研究者清晰地确定该技术的发展阶段^[13]。在将新兴技术与现有技术进行比较时,不同技术评价

的时间以及成熟度须保持在相同发展阶段,以确保结果的可比性。除此之外,还应说明前瞻性LCA研究的具体原因。在目前已有的大部分前瞻性研究中,研究目标都被精确定义,这些研究集中于不同技术之间的对比^[37,38]、同一技术不同发展阶段的对比^[39]、技术规模放大之后的影响评价^[40]或识别新兴技术的热点环节^[41]等,为新兴技术的开发和应用提供指导。

由于新兴技术在未来的应用存在多种可能性,新兴技术在放大规模时系统的功能会增加或减少。因此,在高度不确定性的情况下,一种方法是定义多个功能单位^[42]或设置不同的预期情景^[38],以便评估新兴技术的变化。敏感性分析可以测试多个功能单位,以分析其对结果的影响,特别是对于依赖功能单位定义的影响。另一种方法是专注于研究特定功能,并提供广泛的技术替代方案^[14]。

除此之外,系统边界的选择会影响评价的结果和比较研究的结论^[17]。由于使用阶段、报废阶段、回收阶段和使用寿命的数据在技术发展早期是未知的,仅有少数研究是从摇篮到坟墓^[43,44],无法全面地评估产品在整个生命周期的环境影响。对于上述

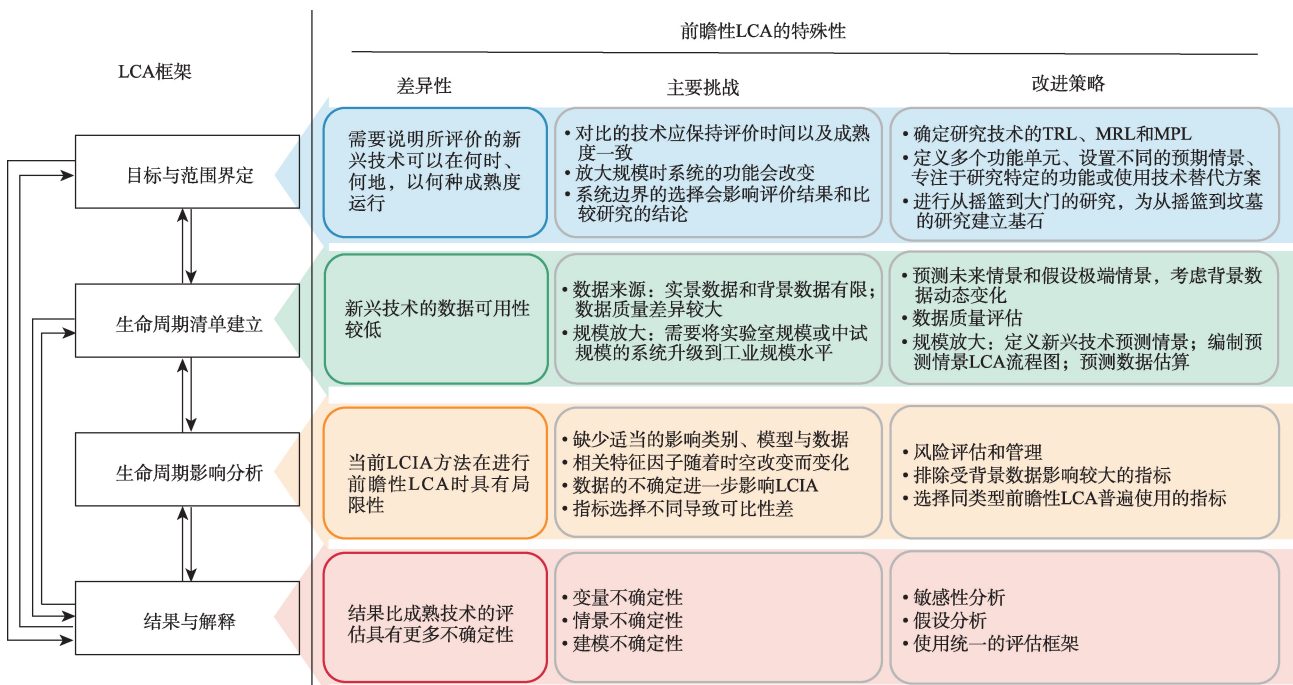


图6 前瞻性LCA框架

Figure 6 A framework of prospective LCA

2023年12月

问题, Arvidsson 等^[14]提出, 可以对具有许多潜在用途的新兴技术进行从摇篮到大门的研究, 确保结果的有效性, 为从摇篮到坟墓的研究建立基石。

4.2 生命周期清单建立

与现有技术相比, 新兴技术的数据可用性较低, 难以获得新兴技术在未来某个发展阶段的清单数据, 因此, 生命周期清单数据的收集是前瞻性 LCA 的一大挑战。该部分从前瞻性 LCA 的数据来源和规模放大两个部分, 介绍如何获取前瞻性 LCA 的生命周期清单以及存在的相关问题。

4.2.1 数据来源

清单数据可以划分为实景数据和背景数据。实景数据是来自生产者或供应商的主要数据和来自供应商和下游用户或客户的次要数据, 用于产品系统的某些过程, 受研究中决策的直接影响。背景数据则是平均市场消费组合, 可以采用来自第三方数据提供商的通用数据, 受到实景系统中采取措施的间接影响。如果数据质量比直接供应商或下游运营商提供的主要或次要数据更好, 那么它们也可作为实景数据^[17,45]。在研究中可以通过在流程图中使用不同的颜色区分实景数据和背景数据。对于大多数 LCA, 实景数据和背景数据都是当前数据。但在前瞻性 LCA 中, 需要考虑到未来技术的发展及供应链上其他产品或服务的发展, 原始数据非常有限。

确定实景数据有两种策略: 预测未来情景和假设极端情景。情景设置的数据来源为文献^[46]、专利^[47]、专家访谈^[48]、Ecoinvent 数据库^[49-51]、实验室和试点工厂结果^[52]等。情景设置可以通过动态物质流分析^[44]、技术学习曲线^[18]、定量过程模拟^[53]、经验设计计算^[54,55]等方式进行。考虑到前瞻性 LCA 数据的缺失, 同一项研究中可以采用多种数据来源和预测方式。

背景数据通常会随着时间的推移而改变, 所以需要注意新兴技术在未来发展时背景数据的变化, 同时避免实景数据和背景数据的时间不匹配。背景数据的确定可以采用和实景数据一样的策略。即使很多研究阐述了背景数据对前瞻性 LCA 结果的影响^[13,17,36], 考虑背景数据动态变化的研究却仍然较少。Cossutta 等^[52]分别对 3 种不同的石墨烯生产方法进行实验室规模和模拟商业规模的 LCA 评价,

并考虑了商业规模石墨烯生产的电力输入主要来自可再生能源的情景。在该情景中, 由于电化学剥离和 CVD 石墨烯生产路线所产生的环境影响受电力影响比较大, 更改电力系统后其环境影响大幅降低。获取背景数据最常用的方法是利用综合评估模型(Integrated assessment model, IAM)中的情景设置^[56], 通过建立软链接将未来能源组合中的预期效率收益或者技术分布转移到 LCI 数据库中。当数据无法获取时, 可以通过神经网络合成数据进行估计^[57]。目前, 已有研究对背景数据进行了补充。如 Gibon 等^[58]使用 Ecoinvent 数据库、国际能源署的能源情景和 NEEDS 数据库中的行业预期库存生成了“THEMIS”建模框架(时间框架到 2050 年), 并建立了覆盖世界 9 个地区的综合混合生命周期评估模型; Sacchi 等^[59]考虑了 5 个主要能源密集型部门的预期变化, 将 IAM 预期场景集成到 LCI 数据库中, 并提出了将数据导出到不同 LCA 软件的方法。

实景数据和背景数据来源的多样性和不确定性导致数据质量差异较大。因此, 需要在使用数据前对其质量进行评估。在前瞻性 LCA 案例中, 数据质量指数和谱系矩阵常被用来讨论数据质量问题。由于传统的谱系矩阵仅适用于非前瞻性的数据, Thonemann 等^[13]提出了一种修改后的谱系矩阵, 共包含 5 个指标: 可靠性、完整性、时间相关性、地理相关性和技术相关性。指标由低到高设置 5 个值, 最终确定的数值可以通过蒙特卡罗模拟进行不确定性分析, 这种方法为数据质量的分析提供了一个可行的方式。

4.2.2 规模放大

在前瞻性 LCA 中, 新兴技术的系统规格和数据通常来自实验室和中试工厂, 这些数据与工业规模的数据存在很大不同^[60]。规模化意味着物理尺寸的扩大, 从而导致生产能力的增加^[61]。将实验室规模或中试规模的系统升级到工业规模的系统, 可以解决工业规模数据缺失的问题。Tsoy 等^[4]通过对 18 个前瞻性 LCA 案例进行总结, 提出了规模放大的关键特征和方法原则, 并开发了一个决策树为前瞻性 LCA 的规模放大提供建议。其中, 大多数研究将技术从实验室规模放大到了工业规模, 并估计了能源和材料的投入产出。

规模放大框架由3个主要步骤组成:①定义新兴技术预测情景。结合技术专业知识和假设未来新兴技术规模放大后的工艺流程图和工艺操作条件;②编制预测情景LCA流程图。根据工艺流程图绘制LCA流程图,定义功能单位、系统边界、单元过程等;③预测数据估算。

规模放大数据估算的方法主要包括过程模拟、手动计算、分子结构模型和近似替代。①过程模拟。使用模拟软件和数据库进行估计,将实验室规模和中试规模的数据输入到软件中,通过过程模拟计算得到能量流、物流和基本流。这种方法一般在化工领域应用较多,主要使用的软件包括Aspen Plus^[48,62-64]、ChemCAD^[47]、Chemkin^[65]、Fluent^[65]等。例如,Winter等^[66]在制造生物基苯胺的中试规模数据的基础上,使用Aspen Plus模拟计算得到了在工业规模制造过程所需的能源和材料数据,并进一步进行了前瞻性LCA评估。②手动计算。主要借助数学方程、物理方程、化学计量关系、比例因子等进行计算,通过实验室规模数据或中试规模数据进行缩放来估计更大规模的物质流和基本流动,或者结合学习曲线和经验曲线对未来情景进行模拟^[18,67]。考虑规模效应和学习效应时,计算会相对复杂。如有学者观察到在CIGS光伏板生产规模放大过程中,随着设备规模的放大,所消耗的能源和材料需要使用指数级尺寸缩放比率进行计算,而非简单的线性放大^[18]。③分子结构模型。基于神经网络的模型,使用化学品的分子结构计算关键的LCI数据^[68],常用于估计催化剂生产的资源消耗和环境影响^[63]。④近似替代。使用与新兴技术规模放大后高度相似的现有技术的信息来得到近似数据,可以通过LCI数据库、文献和专家咨询得到相关信息。该方法主要被应用于体外干细胞培养^[69]、金属回收^[70,71]、纳米材料^[72]、能源利用^[73]、生物基材料^[74]等领域。

4.3 生命周期影响分析

生命周期影响评价分析(LCIA)可以将清单数据量化为环境影响并进行比较,是LCA的重要组成部分。但在进行前瞻性LCA时,目前的LCIA方法具有一定局限性。首先,与现有技术相比,前瞻性LCA缺少适当的影响类别和足够的模型与数据,许多潜在的环境影响难以评价,从而掩盖新兴技术的

真实环境绩效。例如,虽然有研究针对纳米材料进行前瞻性LCA,但由于纳米技术的特性尚不清楚,其环境影响无法评估^[59]。其次,与新兴技术有关的经验不足导致难以确定环境影响评价的相关特征因子是否会随着时间和地理范围产生变化^[9],对评价结果造成影响。

此外,实景数据和背景数据的不确定也会进一步影响LCIA的结果。中点指标有助于识别特定环境问题,参数不确定性较低。终点指标着眼于评估技术对人体健康、生态破坏和资源耗竭产生的影响,参数不确定性较高^[75]。在所分析的12篇生物基材料的前瞻性LCA研究中,8篇采用了中点指标进行评价^[47,48,53,66,76-79]。此外,Arvidsson等^[80]在对石墨烯生产过程进行前瞻性评估时选择了能源使用、水足迹、人类毒性和生态毒性4个影响类别,而LCA中一些更常见的指标,例如全球变暖潜势(GWP)和酸化潜势(AP),没有被考虑在内。这是因为这些影响并非主要来自实景系统,相反,它们主要来自于背景系统中的电力和热力的生产和运输,而其在未来的变化仍未可知,因此在进行LCIA时,该研究没有对这些指标进行考虑,并认为是提高结果的准确性和可靠性的一种方法。但事实上,在使用评价模型对所选择的影响类别进行计算时,它们同样会受到常规指标的影响,例如,在人类毒性和生态毒性的计算过程中会考虑全球变暖的影响。此外,由于仅考虑了生产过程的部分影响,这样的方式无法对新兴技术进行全面的影响评价,也难以作为技术比选的依据。因此,在进行指标选择时,也应尽可能考虑到同类型前瞻性LCA普遍使用的指标,以提高结果的可比性。

在处理相同类型的影响时,可以采用不同的表征因素进行风险评估和管理,包括多种环境影响类别,并避免负担转移^[13],以更加全面地评估新兴技术的潜在风险。如Zackrisson等^[81]结合化学风险评估(CRA)对LCIA结果进行补充,以识别结构电池的环境热点,并对环境破坏性较小的替代方案进行修改设计。但由于数据的可用性有限,环境影响的确定仍然受到限制。

4.4 结果解释与应用

前瞻性LCA的结果可以视为在特定假设下可

2023年12月

能产生的影响,而非最终产生的实际影响。在使用前瞻性LCA评估未来技术时,其结果比成熟技术的评估具有更多的不确定性。决策者需要了解LCA的这些不确定性对于结果的影响,以便作出最终的决策^[17]。

LCA不确定性可以分为3种:变量不确定性、情景不确定性和建模不确定性^[82]。这3种不确定性同样出现在前瞻性LCA当中。变量不确定性是指输入数据的不确定性。情景不确定性为情景选择不同导致的不确定性,包括功能单位、时空选择和系统边界等的不确定性。建模不确定性主要来自于LCA中使用的不同数学模型导致的结果差异,其中包括生命周期影响评价选择的指标和特征因子不同所引起的差异^[83]。建模不确定性可以通过使用统一的评估框架进行解决,该部分主要对变量不确定性和情景不确定性进行讨论。

变量不确定性可以使用敏感性分析进行判断。①敏感性分析最基本的形式为贡献分析,评估不同过程或生命周期阶段对最终指标的影响。②其次为评估模型中基础变量的影响,通过对每个变量设置相同的分布(例如 $\pm 10\%$),并执行大量迭代来识别对输出指标影响最大的变量^[32]。蒙特卡罗分析可以用于分析数据传播的不确定性以及结果分布。③全局敏感性分析(Global sensitivity analysis, GSA)可以评估LCA输出的结果对整个输入空间的敏感性,以增强对模型结构的理解,并且确保LCA结果的可靠性和可信度^[84]。但是,传统的敏感性分析适用于在掌握变量大致分布范围或函数形式的条件下识别和解决热点,以改善特定技术的环境性能。当面临前瞻性LCA高变量不确定性的情况时,很难从新技术的评价结果中得出结论,甚至可能会对决策产生误导。④对于新技术的比较研究,Ravikumar等^[85]选择了矩独立敏感性分析方法,考虑了高阶相互作用,提供了变量不确定性贡献的定量度量,该方法适用于涉及相关的输入变量,以及输入和输出之间存在非线性和非单调关系的情景,避免了外部归一化和基准技术引入的偏差,可以更好地为新技术的技术决策提供信息。⑤除此之外,对于解释阶段,目标和范围定义中指定的数据质量指数(例如谱系矩阵结果)也可用于敏感性分析。

基于谱系矩阵变量的不确定性因子,可以用于输出指标的不确定性分析^[86]。

情景不确定性可以通过假设分析来判断。在假设分析中,可以评估多种情况,以确定最佳工艺条件,找到一个或多个变量的最佳值。当存在多个输出目标时,可以通过多目标优化的方法确定包含所有最佳情景和工艺的帕累托边界,并使用它进行最终决策^[32]。除了假设情景带来的不确定性,在前瞻性LCA当中,产品系统的外部因素,例如市场,也会对新兴技术产生影响,这可以通过与经济模型(如一般均衡模型)结合进行判断^[87]。目前前瞻性LCA的研究中,仅有所评价技术当前TRL、MRL、MPL的取值对结果不确定性产生影响大小的定性讨论,定量研究还需进行进一步总结和分析。

5 双碳目标下中国前瞻性LCA研究建议

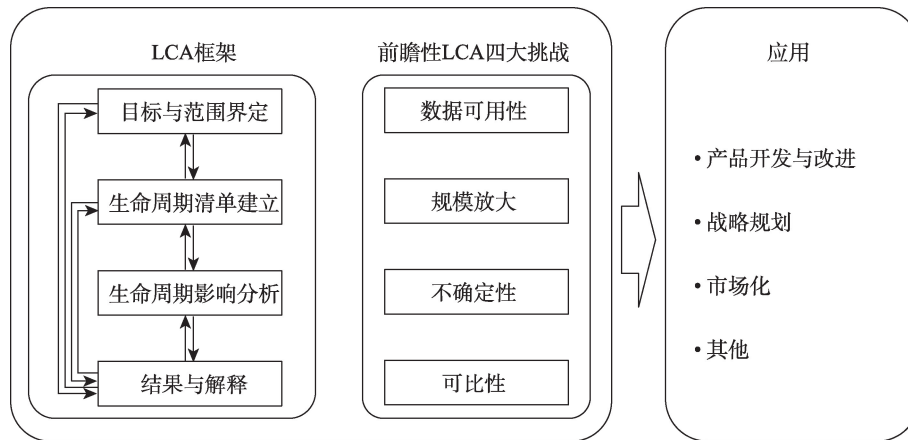
在“双碳”背景下,使用前瞻性LCA对低碳、零碳、负碳新兴技术进行比选,明确未来技术发展方向非常重要。目前,国内前瞻性LCA研究仍然较少,主要面临着数据可用性不足、规模放大非线性、不确定性大、可比性低等挑战(图7)。基于此,本文提出中国前瞻性LCA研究建议如下。

(1)建立国内高时空分辨率、本地化生命周期清单数据及相应排放水平数据库

面对碳关税及碳标签等新的绿色贸易壁垒,需要构建本地化高时空分辨率的生命周期清单及相应的排放水平数据库,充分体现中国产业分布格局、资源禀赋异质性和产品系统技术规模差异性,提高数据代表性、时效性和技术适应性^[75,89],以降低使用替代数据或平均数据导致的中国产品碳足迹精度、准度与实际技术水平偏离的问题,提高中国数据可用性。

(2)立足中国产业体系确定新兴技术规模放大的学习率和经验率

针对双碳重点领域重点产品,自上而下统筹,发挥行业专家和行业协会的优势,分析产品从小试、中试到规模化生产过程中产品规模和资源能源投入、环境排放之间的定量关系,并基于对技术扩散趋势和知识水平提升的模拟,研究新兴技术在未

图7 LCA框架与前瞻性LCA四大挑战^[18,88]Figure 7 LCA framework and four challenges of prospective LCA^[18,88]

来的成本演进与渗透率变化趋势,建立规模放大的学习率和经验率参数。进一步,结合综合评价矩阵、灰色关联分析、模拟分析等定量定性方法,提高相应产品技术TRL、MRL、MPL的准确度和科学性,揭示新兴技术在不同发展路径下的环境影响和碳排放,以支撑管理决策。

(3)建立中国大宗原料及能源技术碳排放背景数据的动态更新机制

建立统一规范的重点行业产品的大宗原材料、半成品和成品前瞻性生命周期评价方法,清晰表述排放因子核算范围。充分考虑供应链上下游工艺的变化,加强分省、分区域、分产品的动态排放因子新方法学在清单编制中的应用。在中国电气化率、绿氢需求和其他能源需求大幅增加、能源结构持续优化的背景下^[24],使用综合评估模型将中国省级或市级未来能源组合的数据整合到LCI中,以减少LCA结果与实际情况的偏差和不确定性,辅助双碳领域决策。

(4)加强与国际上前瞻性LCA研究方法及未来标准的衔接

充分研判当前欧盟及其他发达国家或地区正在推行的产品碳足迹标准等新要求,面向《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》要求,一方面,聚焦太阳能电池、锂电池、电动载人汽车“新三样”双碳产业优势领域;另一方面,着力电力、钢铁、电解铝、水泥、石灰、平板玻璃、炼油、乙烯、合成氨、电石、甲醇及现代煤化工等行业和产

品,根据低碳、零碳产业技术发展趋势,推动适用性好、成熟度高的方法逐步形成国家标准。加强前瞻性LCA领域的国际交流,积极参与相关国际标准制定,与国际标准衔接,提高结果可比性,并逐步扩展至其他行业产品和服务类产品。

目前,全球已有超过120个国家和地区提出了碳中和目标,而超过半数的碳中和关键技术尚未成熟。面对碳中和驱动的新一轮竞争,技术体系、降碳新技术和标准体系会成为新的竞争制高点。前瞻性LCA提供了一种系统性的方法评价新兴技术未来潜在的环境影响,将成为重要的支撑工具。在“双碳”战略目标下,使用前瞻性LCA评估低碳、零碳、负碳新技术,可指导相关标准和规定的制定与修订,助力降碳技术创新发展,并从系统视角统筹产品与供应链减污降碳,避免环境污染负担转移,以更低成本与环境友好路径实现“双碳”目标。

参考文献(References):

- [1] 中国政府网. 科技部等九部门关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030年)》的通知[EB/OL]. (2022-06-24) [2023-03-12]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm. [Chinese Government Network. Notice from the Ministry of Science and Technology and Eight Other Departments on Issuing the Implementation Plan for Technological Support for Peak Carbon Emissions and Carbon Neutrality(2022-2030)[EB/OL]. (2022-06-24) [2023-03-12]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm.]

2023年12月

- [2] 中国政府网. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知(国发[2021]23号)[EB/OL]. (2021-10-26) [2023-03-07]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm. [Chinese Government Network. State Council Notice on Issuing the Action Plan for Peak Carbon Emissions by 2030 (State Council Document [2021] No.23)[EB/OL]. (2021-10-26) [2023-03-07]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.]
- [3] Wender B A, Foley R W, Hottle T A, et al. Anticipatory life-cycle assessment for responsible research and innovation[J]. *Journal of Responsible Innovation*, 2014, 1(2): 1-8.
- [4] Tsoy N, Steubing B, van der Giesen C, et al. Upscaling methods used in ex ante life cycle assessment of emerging technologies: A review[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, 25: 1680-1692.
- [5] 清华大学环境学院. 贺克斌: 中国碳中和面临“三高一短”挑战, 需要“五碳并举”实现双碳目标[N/OL]. (2023-02-16) [2023-03-12]. <https://www.env.tsinghua.edu.cn/info/1129/7987.htm>. [School of Environment, Tsinghua University. He Kebin: China's Carbon Neutrality Faces Three Highs and One Short Challenge, Requires Five Carbon Simultaneity to Achieve Dual Carbon Goals [N/OL]. (2023-02-16) [2023-03-12]. <https://www.env.tsinghua.edu.cn/info/1129/7987.htm>.]
- [6] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040 Environmental Management Life Cycle Assessment General Principles and Framework[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [7] Weyand S, Kawajiri K, Mortan C, et al. Scheme for generating up-scaling scenarios of emerging functional materials based energy technologies in prospective LCA (UpFunMatLCA)[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2023, 27(3): 676-692.
- [8] Guinée J B, Cucurachi S, Henriksson P J G, et al. Digesting the alphabet soup of LCA[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, DOI: 10.1007/s11367-018-1478-0.
- [9] van der Giesen C, Cucurachi S, Guinée J, et al. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120904.
- [10] Sohn J, Kalbar P, Goldstein B, et al. Defining temporally dynamic life cycle assessment: A review[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2020, 16(3): 314-323.
- [11] Pehnt M. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(1): 55-71.
- [12] Silva D A. Life Cycle Engineering and Management of Products: Theory and Practice[M]. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [13] Thonemann N, Schulte A, Maga D. How to conduct prospective life cycle assessment for emerging technologies? A systematic review and methodological guidance[J]. *Sustainability*, 2020, DOI: 10.3390/su12031192.
- [14] Arvidsson R, Tillman A-M, Sandén B A, et al. Environmental assessment of emerging technologies: Recommendations for prospective LCA[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(6): 1286-1294.
- [15] Mahmud R, Moni S M, High K, et al. Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment for sustainable process design: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128247.
- [16] Raffaini P, Manfredi L. Endorobotics[M]. London: Academic Press, 2022.
- [17] Moni S M, Mahmud R, High K, et al. Life cycle assessment of emerging technologies: A review[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, DOI: 10.1111/jiec.12965.
- [18] van der Hulst M K, Huijbregts M A J, van Loon N, et al. A systematic approach to assess the environmental impact of emerging technologies: A case study for the GHG footprint of CIGS solar photovoltaic laminate[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, DOI: 10.1111/jiec.13027.
- [19] Gavankar S, Suh S, Keller A A. The role of scale and technology maturity in life cycle assessment of emerging technologies: A case study on carbon nanotubes[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2015, 19(1): 51-60.
- [20] Grübler A, Nakićenović N, Victor D G. Dynamics of energy technologies and global change[J]. *Energy Policy*, 1999, 27(5): 247-280.
- [21] Cox B, Mutel C L, Bauer C, et al. Uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(8): 4989-4995.
- [22] 程结晶, 丁慢慢, 朱彦君. 国外信息管理领域知识流的新兴趋势及可视化分析[J]. *现代情报*, 2017, 37(4): 170-177. [Cheng J J, Ding M M, Zhu Y J. Research on emerging trends and visualization of knowledge flow in foreign information management field[J]. *Journal of Modern Information*, 2017, 37(4): 170-177.]
- [23] 张智慧, 王媛, 柴立和, 等. 城市垃圾与污水污泥能源化处置方案对比: 基于两种生命周期影响评价方法[J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 860-870. [Zhang Z H, Wang Y, Chai L H, et al. Comparison of energy-based disposal schemes for municipal solid waste and sewage sludge: Based on two life cycle assessment methods[J]. *Resources Science*, 2022, 44(4): 860-870.]
- [24] Qiu S, Lei T, Wu J T, et al. Energy demand and supply planning of China through 2060[J]. *Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2021.121193.
- [25] 许鸿伟, 汪鹏, 任松彦, 等. 双碳目标下电力系统转型对产业部门影响评估: 以粤港澳大湾区为例[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1435-1445. [Xu H W, Wang P, Ren S Y, et al. Impact assess-

- ment of power system transition on industrial sectors under dual carbon targets: Take the Greater Bay Area as an example[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1435–1445.]
- [26] Hemeida M G, Hemeida A M, Senjyu T, et al. Renewable energy resources technologies and life cycle assessment: Review[J]. *Energies*, 2022, DOI: 10.3390/en15249417.
- [27] Onat N C, Kucukvar M. A systematic review on sustainability assessment of electric vehicles: Knowledge gaps and future perspectives[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, DOI: 10.1016/j.eiar.2022.106867.
- [28] Caramazana P, Dunne P, Gimeno-Fabra M, et al. A review of the environmental impact of nanomaterial synthesis using continuous flow hydrothermal synthesis[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2018, 12: 57–62.
- [29] Kravchenko M, Pigosso D Ca, Mcaloon T C. Towards the ex-ante sustainability screening of circular economy initiatives in manufacturing companies: Consolidation of leading sustainability-related performance indicators[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118318.
- [30] Glisovic S, Pesic D, Stojiljkovic E, et al. Emerging technologies and safety concerns: A condensed review of environmental life cycle risks in the nano-world[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2017, 14: 2301–2320.
- [31] Zhao X, Yao G L, Tyner W E. Quantifying breakeven price distributions in stochastic techno-economic analysis[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 318–326.
- [32] Thomassen G, Dael M V, Passel S V, et al. How to assess the potential of emerging green technologies? Towards a prospective environmental and techno-economic assessment framework[J]. *Green Chemistry*, 2019, 21(18): 4868–4886.
- [33] Huang Z, Grim G, Schaidle J, et al. Using waste CO₂ to increase ethanol production from corn ethanol biorefineries: Techno-economic analysis[J]. *Applied Energy*, 2020, DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115964.
- [34] Bacatelo M, Capucha F, Ferrão P, et al. Selection of a CO₂ capture technology for the cement industry: An integrated TEA and LCA methodological framework[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2023, DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102375.
- [35] Blanco C F, Cucurachi S, Guinée J B, et al. Assessing the sustainability of emerging technologies: A probabilistic LCA method applied to advanced photovoltaics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120968.
- [36] Adrianto L R, van der Hulst M K, Tokaya J P, et al. How can LCA include prospective elements to assess emerging technologies and system transitions? The 76th LCA Discussion Forum on Life Cycle Assessment, 19 November 2020[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021, 26(8): 1–4.
- [37] Cossutta M, McKechnie J, Pickering S J. A comparative LCA of different graphene production routes[J]. *Green Chemistry*, 2017, 19(24): 5874–5884.
- [38] Wickerts S, Arvidsson R, Sandén B A, et al. Prospective life-cycle modeling of quantum dot nanoparticles for use in photon upconversion devices[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(14): 5187–5195.
- [39] Arvidsson R, Molander S. Prospective life cycle assessment of epitaxial graphene production at different manufacturing scales and maturity: Prospective LCA of epitaxial graphene[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, DOI: 10.1111/jiec.12526.
- [40] Piccinno F, Hischier R, Seeger S, et al. Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: Application of the life cycle assessment scale-up framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 174: 283–295.
- [41] Sun Y, Bai S, Wang X, et al. Prospective life cycle assessment for the electrochemical oxidation wastewater treatment process: From laboratory to industrial scale[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(3): 1456–1466.
- [42] Hischier R, Salieri B, Pini M. Most important factors of variability and uncertainty in an LCA study of nanomaterials: Findings from a case study with nano titanium dioxide[J]. *NanoImpact*, 2017, 7: 17–26.
- [43] Kaddoura M, Tivander J, Molander S. Life cycle assessment of electricity generation from an array of subsea tidal kite prototypes [J]. *Energies*, 2020, DOI: 10.3390/en13020456.
- [44] Li C, Mogollón J M, Tukker A, et al. Environmental impacts of global offshore wind energy development until 2040[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(16): 11567–11577.
- [45] European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment[M]. Ispra: Publications Office, 2010.
- [46] Cuéllar-Franca R M, García-Gutiérrez P, Taylor S F R, et al. A novel methodology for assessing the environmental sustainability of ionic liquids used for CO₂ capture[J]. *Faraday Discussions*, 2016, 192: 283–301.
- [47] Thomassen G, van Dael M, van Passel S. The potential of microalgae biorefineries in Belgium and India: An environmental techno-economic assessment[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 271–280.
- [48] Zuiderveen E A R, Ansovini D, Gruter G-J M, et al. Ex-ante life cycle assessment of polyethylenefuranoate (PEF) from bio-based monomers synthesized via a novel electrochemical process[J]. *Cleaner Environmental Systems*, 2021, DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100036.
- [49] Wender B A, Foley R W, Prado-Lopez V, et al. Illustrating antici-

2023年12月

- patory life cycle assessment for emerging photovoltaic technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(18): 10531–10538.
- [50] Mann S A, De Wild-Scholten M J, Fthenakis V M, et al. The energy payback time of advanced crystalline silicon PV modules in 2020: A prospective study[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2014, 22(11): 1180–1194.
- [51] Louwen A, van Sark W G J H M, Schropp R E I, et al. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy payback time of current and prospective silicon heterojunction solar cell designs[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2015, 23(10): 1406–1428.
- [52] Cossutta M, Vretenar V, Centeno T A, et al. A comparative life cycle assessment of graphene and activated carbon in a supercapacitor application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118468.
- [53] Brunklaus B, Rex E, Carlsson E, et al. The future of Swedish food waste: An environmental assessment of existing and prospective valorization techniques[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 1–10.
- [54] Caduff M, Huijbregts M A J, Althaus H-J, et al. Wind power electricity: The bigger the turbine, the greener the electricity?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 4725–4733.
- [55] Delpierre M, Quist J, Mertens J, et al. Assessing the environmental impacts of wind-based hydrogen production in the Netherlands using ex-ante LCA and scenarios analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126866.
- [56] Steubing B, de Koning D. Making the use of scenarios in LCA easier: The superstructure approach[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021, 26(11): 2248–2262.
- [57] Cucurachi S, van der Giesen C, Guinée J. Ex-ante LCA of emerging technologies[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 69: 463–468.
- [58] Gibon T, Wood R, Arvesen A, et al. A methodology for integrated, multiregional life cycle assessment scenarios under large-scale technological change[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(18): 11218–11226.
- [59] Sacchi R, Terlouw T, Siala K, et al. Prospective environmental impact assessment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, DOI: 10.1016/j.rser.2022.112311.
- [60] Piccinno F, Hischier R, Seeger S, et al. From laboratory to industrial scale: A scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 1085–1097.
- [61] Takata S, Umeda Y. *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*[M]. Tokyo: Springer London, 2007.
- [62] Fernández-Dacosta C, Posada J A, Kleerebezem R, et al. Microbial community-based polyhydroxyalkanoates (PHAs) production from wastewater: Techno-economic analysis and ex-ante environmental assessment[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 185: 368–377.
- [63] Mazzoni R, Cesari C, Zanotti V, et al. Catalytic bio-refining of ethanol from wine waste to butanol and higher alcohols: Modeling the life cycle assessment and process design[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b02959.
- [64] Khojasteh Salkuyeh Y, Saville B A, Maclean H L. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(30): 18894–18909.
- [65] Rinaldi C, Masoni P, Salvati F, et al. Life cycle assessment of innovative technology for energy production from automotive shredder residue[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2015, 11(3): 435–444.
- [66] Winter B, Meys R, Bardow A. Towards aromatics from biomass: Prospective life cycle assessment of bio-based aniline[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125818.
- [67] Thomassen G, van Passel S, Dewulf J. A review on learning effects in prospective technology assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, DOI: 10.1016/j.rser.2020.109937.
- [68] Wernet G, Papadokonstantakis S, Hellweg S, et al. Bridging data gaps in environmental assessments: Modeling impacts of fine and basic chemical production[J]. *Green Chemistry*, 2009, DOI: 10.1039/b905558d.
- [69] Mattick C S, Landis A E, Allenby B R, et al. Anticipatory life cycle analysis of in vitro biomass cultivation for cultured meat production in the united states[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(19): 11941–11949.
- [70] Villares M, Işildar A, Mendoza Beltran A, et al. Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 129: 315–328.
- [71] Schulze R, Abbasalizadeh A, Bulach W, et al. An ex-ante LCA study of rare earth extraction from NdFeB magnet scrap using molten salt electrolysis[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2018, 4: 493–505.
- [72] Simon B, Bachtin K, Kiliç A, et al. Proposal of a framework for scale-up life cycle inventory: A case of nanofibers for lithium iron phosphate cathode applications[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2016, 12(3): 465–477.
- [73] Muñoz I, Portillo F, Rosiek S, et al. Prospective environmental and

- economic assessment of solar-assisted thermal energy recovery from wastewater through a sequencing batch biofilter granular reactor[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1300–1309.
- [74] Sampaio A P C, de Su M, de Sousa F M, Castro A L A, et al. Life cycle assessment from early development stages: The case of gelatin extracted from tilapia residues[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22: 767–783.
- [75] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 446–455. [Zhai Y J, Zhang T Z, Shen X X, et al. Development of life cycle assessment method[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 446–455.]
- [76] González-García S, Morales P C, Gullon B. Estimating the environmental impacts of a brewery waste-based biorefinery: Bio-ethanol and xylooligosaccharides joint production case study[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 123: 331–340.
- [77] González-García S, Argiz L, Miguez P, et al. Exploring the production of bio-succinic acid from apple pomace using an environmental approach[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 350: 982–991.
- [78] Aryapratama R, Janssen M. Prospective life cycle assessment of bio-based adipic acid production from forest residues[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 434–443.
- [79] Karka P, Papadokostantakis S, Hungerbuhler K, et al. Computer Aided Chemical Engineering: 12th International Symposium on Process Systems Engineering & 25th European Symposium of Computer Aided Process Engineering[M]. Copenhagen: Elsevier, 2015.
- [80] Arvidsson R, Kushnir D, Sandén B A, et al. Prospective life cycle assessment of graphene production by ultrasonication and chemical reduction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(8): 4529–4536.
- [81] Zackrisson M, Jonsson C, Johannisson W, et al. Prospective life cycle assessment of a structural battery[J]. *Sustainability*, 2019, DOI: 10.3390/su11205679.
- [82] Huijbregts M A J, Gilijamse W, Ragas A M J, et al. Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment: A case study comparing two insulation options for a dutch one-family dwelling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(11): 2600–2608.
- [83] Bamber N, Turner I, Arulnathan V, et al. Comparing sources and analysis of uncertainty in consequential and attributional life cycle assessment: Review of current practice and recommendations[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2020, 25(1): 168–180.
- [84] Lacirignola M, Blanc P, Girard R, et al. LCA of emerging technologies: Addressing high uncertainty on inputs’ variability when performing global sensitivity analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 268–280.
- [85] Ravikumar D, Seager T P, Cucurachi S, et al. Novel method of sensitivity analysis improves the prioritization of research in anticipatory life cycle assessment of emerging technologies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(11): 6534–6543.
- [86] Ciroth A, Muller S, Weidema B, et al. Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21: 1338–1348.
- [87] Bergerson J A, Brandt A, Cresko J, et al. Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 24(1): 11–25.
- [88] Guinée J B, Heijungs R, Huppes G, et al. Life cycle assessment: Past, present, and future[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(1): 90–96.
- [89] 谢明辉, 满贺诚, 段华波, 等. 生命周期影响评价方法及本地化研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6): 2148–2156. [Xie M H, Man H C, Duan H B, et al. Research progress on the life cycle impact assessment methods and their localization in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(6): 2148–2156.]

Prospective life cycle assessment targeting the dual-carbon strategy: Progress review and methodological framework

ZHANG Bingqian¹, GAO Hanbo¹, TIAN Jinping^{1,2}, CHEN Lyujun^{1,2}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Center for Ecological Civilization, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to achieve the “dual carbon” goals, it is of great significance to evaluate the potential environmental impact of emerging technologies and make decisions in the early stages of technological development to reduce energy consumption and environmental impact throughout the entire life cycle of these technologies. Life cycle assessment can analyze the potential environmental impact of a product or service throughout its life cycle. Prospective life cycle assessment has been proposed to evaluate emerging technologies that are uncommercialized. This study analyzed relevant definitions of life cycle assessment, reviewed articles on prospective life cycle assessment both in China and internationally, and used bibliometric methods to explore the status of prospective life cycle assessment research in terms of research trends, objects, and key fields. Considering the four challenges associated with the method, including low comparability, nonlinear scale amplification, limited data availability, and high uncertainty, a comprehensive framework for prospective life cycle assessment has been proposed. This article also discussed the difficulties and challenges of using prospective life cycle assessment in research in China and provides suggestions for future improvement and application prospects. This study provides a reference for the localization application of the method in China, help the development of carbon reduction technology innovation, and coordinate pollution reduction. It can also help us identify product and supply chain hotspots from a systematic perspective, adopt targeted adjustments, avoid the transfer of environmental pollution burden, and achieve the “dual carbon” goals with a lower cost and environmentally friendly path.

Key words: prospective life cycle assessment; emerging technology; low-carbon technology; zero-carbon technology; negative-carbon technology; manufacturing readiness level; technology readiness level; scale-up