

李媛媛,葛晓华,王文静,等.技术生命周期评价进展及其在碳中和领域应用趋势分析[J].环境工程技术学报,2022,12(4):1048-1057.

LI Y Y, GE X H, WANG W J, et al. Progress of technology life cycle assessment and its application trends in carbon neutrality[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1048-1057.

技术生命周期评价进展及其在碳中和领域应用趋势分析

李媛媛¹, 葛晓华², 王文静¹, 王顺扬¹, 闫冠玉¹, 李华¹, 朱宇恩^{1*}

1. 山西大学环境与资源学院

2. 太原工业学院环境与安全工程系

摘要 技术生命周期评价可为技术改进、科学决策及碳中和提供方法支撑。利用 CiteSpace 软件研究了近 20 年技术生命周期评价研究特点、变化趋势、重点领域、演进路径及其在碳中和领域的研究进展。结果表明:技术生命周期评价相关文献出版量整体呈上升趋势,2006 年以后进入快速发展阶段;发文主要集中在工程学、生态学、环境科学、环境工程、其他理工学科、能源与燃料和绿色可持续发展技术等学科。生命周期评价的研究对象、评价方法及应用是近年来的研究热点,能源生产技术、碳足迹及废物处理技术是技术生命周期评价的研究重点,体系、模型、框架、不确定性等方面是评价方法完善要点,方法适用性开发和综合性评判成为后续发展方向,提高可持续、效能、决策支撑的有效性是提高生命周期评价技术应用的突破点。碳足迹的生命周期评价可用于指导碳中和目标的实现及路径选择,将其他评估方法与生命周期评估相结合正在成为一种趋势,可提升技术全面综合评估的准确性及有效性,为实现碳中和目标提供有效参考。

关键词 技术;生命周期评价;文献计量;碳中和;趋势

中图分类号: X820.3 文章编号: 1674-991X(2022)04-1048-10 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210265

Progress of technology life cycle assessment and its application trends in carbon neutrality

LI Yuanyuan¹, GE Xiaohua², WANG Wenjing¹, WANG Shunyang¹, YAN Guanyu¹, LI Hua¹, ZHU Yuen^{1*}

1. College of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University

2. Department of Environment and Safety Engineering, Taiyuan Institute of Technology

Abstract Technology life cycle assessment (TLCA) can provide methodological support for technological improvement, scientific decision-making and carbon neutrality. CiteSpace software was used to study the research characteristics, changing trends, key areas and evolution paths of TLCA and its research progresses in the field of carbon neutralization in recent 20 years. The results showed that the number of published literature related to TLCA was rising, and had entered a rapid development stage since 2006. The papers mainly focused on Engineering, Ecology, Environmental Science, Engineering Environmental, Science & Technology: Other Topics, Energy & Fuels, Green & Sustainable Science & Technology. The research object, evaluation method and application of TLCA were research hotspots in recent years. The energy production technology, carbon footprints and waste treatment technology were the research focus of TLCA. System, model, framework, uncertainty and other aspects were the key points to improve the evaluation method. Applicability development and comprehensive evaluation of methods became the follow-up development direction. Improving the effectiveness of sustainability, efficiency and decision support was the breakthrough to improve the application of TLCA. Carbon footprint LCA could be used to guide the realization and path selection of technology carbon neutralization goals. The combination of LCA system and other assessment methods was becoming a trend, which could improve the accuracy and effectiveness of comprehensive assessment of technology and provide an effective reference for achieving the goal of carbon neutrality.

Key words technology; life cycle assessment; bibliometrics; carbon neutrality; trend

收稿日期: 2021-06-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1803000); 2021 年度山西省政府重大决策咨询课题(ZB20211705)

作者简介: 李媛媛(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事温室气体排放核算与控制以及土壤污染治理与修复研究, 974608914@qq.com

* 责任作者: 朱宇恩(1976—), 男, 副教授, 博士, 主要从事温室气体排放核算与控制以及土壤污染治理与修复研究, zhuyuen@sxu.edu.cn

2020年习近平主席在第75届联合国大会宣布中国将力争于2030年前达到二氧化碳排放峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[1]。我国正处于经济上升期、排放达峰期,为实现碳达峰以及碳中和目标,通过技术的创新和进步减缓产品迭代速度以及过程排放是可行路径。技术发展是以提高生产效率和优化产品的适用性为前提的,但技术发展过程中存在反弹效应^[2-3]、隐性增加能源消耗以及污染排放等可能,如农业中化肥和农药的广泛使用在增产同时导致水质恶化、湖泊及河流的富营养化。此外许多产品在运行和使用阶段都是环境友好的,但产品(如页岩气)的生产可能会造成资源浪费与环境风险^[4-5]。

对技术展开综合评估可有效识别影响环境的关键过程和因素,为技术的管理及改进提供参考,该过程将多因素纳入考虑范畴,进而评估能源消耗、碳排放及其他环境危害,是碳中和技术路径可行性选择的有效方法。生命周期评价(LCA)是一种用于“编制和评价一个产品系统在其整个生命周期的输入、输出和潜在环境影响”的方法^[6]。LCA最早被用于包装产品的环境排出量和天然资源利用量定量分析,渐渐地因不同技术路线生产同一产品的生命周期评价结果存在差异,LCA被用于不同的技术路径的比较分析。对技术进行LCA评价是指对技术在其生命周期的各阶段的所有输入输出过程中的能源利用、资源消耗、污染排放进行科学准确的系统化定量评估及评价的方法,LCA已被用作评估各种技术和服务对环境影响的工具^[7]。全系统评价的特点使LCA成为用于技术进步的可持续性评价方法,也成为决策的重要工具^[8-9]。

目前已开展了众多基于LCA中系统边界的确定、影响评价类型和评价工具研发等研究,如果能梳理LCA在技术发展历程中的经纬脉络和特点,将更加有助于技术的全维度评判^[10],明晰在碳中和路径的应用有效性。文献计量学可以系统地分析某一研究领域的整体发展情况,把握该领域的研究热点与趋势^[11-12]。基于此,笔者利用CiteSpace软件对技术生命周期评价(TLCA)文献进行分析,讨论近20年TLCA研究特点、前沿变化趋势、关键过程,以及应用领域间的相互关系及演进路径,以期与技术及环境及碳中和的耦合关系剖析提供支持。

1 数据与方法

1.1 数据来源

数据检索源为Web of Science核心数据库,文件记录内容包括作者、标题、来源出版物、摘要和引用

的参考文献。在高级检索的检索框内输入TS(主题)=[(“LCA” OR “life cycle analysis” OR “life cycle assessment”) AND (“technology*”)],共检索到2000—2019年发表的4395篇文献,检索时间为2020年8月9日。文献类型主要有文章(article)、综述(review)、社论材料(editorial material)、会议摘要(meeting abstract)、书籍章节(book chapter)等11种类型。文章(3811篇)是主要的文献出版类型,其次是评论(548篇)、社论材料(212篇)和其他类型的出版物。

1.2 分析方法

研究方法采用CiteSpace III软件,分析内容包括国家(country)、机构(institution)、学科分类(category)、期刊(journal)和关键词(keyword),时间划分(timing slicing)设置为2000—2019年,时间节点(years per slice)设为5年,术语来源(term source)依次勾选为标题(title)、摘要(abstract)、作者关键词(author keywords)、扩展关键词(keywords plus),阈值设置为top=50。

2 结果与分析

2.1 发文量

2000—2019年TLCA相关文献发文量如图1所示。从图1可以看出,2000年以来TLCA方面的发文量总体呈上升趋势,表明国内外学者对TLCA的关注度逐步提高。根据不同时期发文量的变化,可将发展历程划分为2个阶段:2000—2006年为研究起步阶段,仅有357篇文献被收录,占总发文量的8.12%;随着人们环保意识逐渐加强,LCA广泛应用于环境影响评价,其迎来了重大的发展机遇并进入快速发展阶段,2007—2019年发文量达到4038篇,占总发文量的91.88%。为提高LCA效率,国际

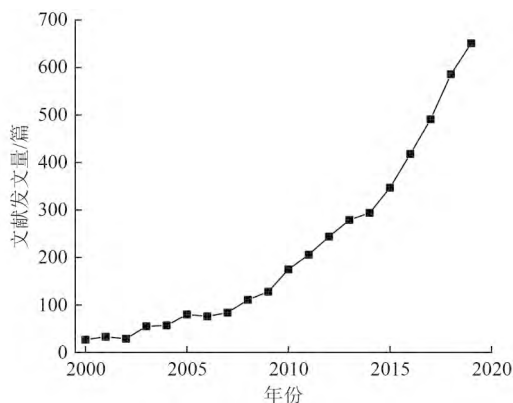


图1 2000—2019年TLCA相关文献历年发文量

Fig.1 Number of published literature in the TLCA field during 2000-2019

标准化组织(ISO)于 2006 年对 ISO 14040 系列标准进行了整合,将原先的 4 个标准合并为现在的 2 个标准,即 ISO 14040—2006《环境管理 生命周期评价原则和框架》和 ISO 14044—2006《环境管理 生命周期评价 要求和导则》。标准的整合统一引起了学者的广泛关注,也促进了 TLCA 的快速发展。

2.2 学科及期刊分布

频数是指文献在某计量指标中出现的文献数量,中心度表示该指标节点与其他节点间的关联性,中心度越高,该指标的关联性越强、重要性越大。

2000—2006 年 TLCA 研究主要集中于工程学(Engineering)学科(50% 以上),多数出现在机械工程、制造工程领域,这可能是因为 LCA 起源于对包装物的研究,用于改善产品的功能,故此阶段最主要的应用领域是工程领域。研究人员在本阶段研究的重点在于工业技术水平的提升和效率的提高,期望寻找效率更高的技术手段及最佳的节能方法^[13],故开始探索评估技术效能、经济影响的方法,从而为技术的改进提供参数依据。

2007—2019 年工程学(Engineering)领域的研究仍然占主体,且中心度高,研究对象与上一阶段基本相同。本阶段对于 TLCA 手段已经较为成熟,被应用于多种技术领域,包括运输^[14]、材料制备^[15]、新能源生产技术^[16-17]、建筑^[18]等。TLCA 与生态学(Ecology)、环境科学(Environmental Sciences)、环境工程(Engineering, Environmental)、其他理工学科(Science & Technology: Other Topics)、能源与燃料(Energy & Fuels)、绿色可持续发展技术(Green &

Sustainable Science & Technology)等环境、能源等领域学科的交叉联合逐渐增强。生态学的发文量仅次于工程学,显示环境对发展的制约及政府的重视是基于环境角度的 TLCA 增多的主因。能源与燃料学科的发量虽低于工程学,但其中心度最高(表 1),各行业节约成本、减少能耗的内在需求,成为能源与燃料学科中心度高的原因。工程学、能源与环境类学科的 LCA 评价虽有所差异,但存在紧密联系且交叉较多,核心围绕绿色可持续发展和减少能源消耗展开。

2000—2019 年 TLCA 研究领域发文量前 10 的期刊如表 2 所示。从表 2 可以看出,该领域文章主要发表在工程、环境、能源类期刊上。Journal

表 1 2000—2019 年 TLCA 领域发文量前 10 的学科类别
Table 1 Top 10 discipline categories in the TLCA field during 2000-2019

序号	学科类别	发文量/篇	中心度
1	Engineering	2 201	0.46
2	Ecology	1 682	0.05
3	Environmental Sciences	1 651	0.06
4	Engineering, Environmental	1 241	0.05
5	Science & Technology: Other Topics	1 147	0.07
6	Energy & Fuels	1 087	0.51
7	Green & Sustainable Science & Technology	1 048	0.05
8	Engineering, Chemical	438	0.22
9	Chemistry	308	0.02
10	Materials Science	262	0.15

表 2 2000—2019 年 TLCA 研究领域发文量前 10 的期刊
Table 2 Top 10 journals in the TLCA field during 2000-2019

序号	期刊名称	所属学科	发文量/篇	被引次数	中心度
1	Journal of Cleaner Production	Environmental Sciences & Ecology; Environmental Sciences; Engineering, Environmental	479	1 824	0.28
2	International Journal of Life Cycle Assessment	Environmental Sciences & Ecology; Environmental Sciences; Engineering, Environmental	229	1 451	0.15
3	Renewable Sustainable Energy Reviews	Engineering; Energy & Fuels	151	1 301	0.24
4	Applied Energy	Engineering; Energy & Fuels; Engineering, Chemical	146	1 141	0.05
5	Environmental Science & Technology	Environmental Sciences & Ecology; Engineering, Environmental; Environmental Sciences	117	1 507	0.75
6	Sustainability	Environmental Sciences & Ecology; Green & Sustainable Science & Technology; Environmental Sciences; Engineering, Environmental	106	261	0
7	Energy	Engineering; Energy & Fuels; Thermodynamics	100	1 230	0.27
8	Journal of Industrial Ecology	Environmental Sciences & Ecology; Green & Sustainable Science & Technology; Environmental Sciences; Engineering, Environmental	81	821	0.03
9	Resources Conservation And Recycling	Environmental Sciences & Ecology; Engineering, Environmental; Environmental Sciences	71	790	0.15
10	Energy Policy	Energy & Fuels; Environmental Sciences	62	1 071	0.33

of *Cleaner Production* (479 篇) 和 *International Journal of Life Cycle Assessment* (229 篇) 被引次数排序分别列于第 1 位和第 3 位, 并且中心度较高, 说明与其他期刊的关联性较强。此外, *Environmental Science & Technology* 期刊虽然发文量相对较少, 但被引次数仅次于 *Journal of Cleaner Production*, 且中心度最高。总的来说, 针对 TLCA 方面期刊主要涉及能源循环利用和绿色可持续发展。

2.3 发文国家

频数是指文献在某计量指标中出现的文献数量, 中心度表示该指标节点与其他节点间的关联性强弱(由 CiteSpace 软件计算得出), 中心度越高, 该指标的关联性越强、重要性越大、影响力越强。图 2 为 2000—2019 年 TLCA 领域中主要发文国家的文献计量网络图谱, 同心圆不同颜色代表不同时间(深蓝色、浅蓝色、绿色、红色分别代表 2000—2004 年、2005—2009 年、2010—2014 年、2015—2019 年), 粗细代表发文频次。由图 2 可见, 美国发文量最多, 国际合作关系紧密, 但中心度低。中国虽然开始研究稍晚, 但近些年发文量激增, 目前发文量仅次于美国, 且与世界各国的合作交流联系增多, 但中心度较低(0.06), 还需进一步加强与其他国家及机构的交流和合作, 提高发文影响力和中心度。整体来看, 美国、英国等老牌经济发达体研究起步时间较早, 意大利虽然发文量远低于美国和中国, 但其中心度最高。

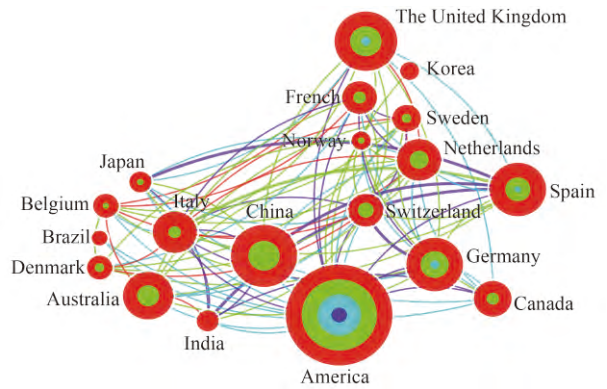


图 2 2000—2019 年 TLCA 领域中主要发文国家的文献计量网络图谱

Fig.2 Bibliometric network map of the major countries that issued articles in the TLCA field from 2000 to 2019

2.4 TLCA 研究热点

关键词是描述性词汇, 关键词分析可快速了解研究领域在一段时间内的研究主题、热点及其变化^[19-20]。选取最常引用的 300 个关键词中出现频次较高的前 50 个关键词(图 3), 目前的研究热点主要围绕 TLCA 的研究主题、TLCA 方法、TLCA 的应用 3 方面展开, 按照网络图谱中每个聚集圈中出现的高频关键词的研究热点进一步展开讨论。

2.4.1 TLCA 的主题热点

TLCA 的研究主题主要包括能源生产技术、碳足迹、废物管理技术。其中能源生产技术主要包括能源[energy(511)](括号中数字表示关键词出现

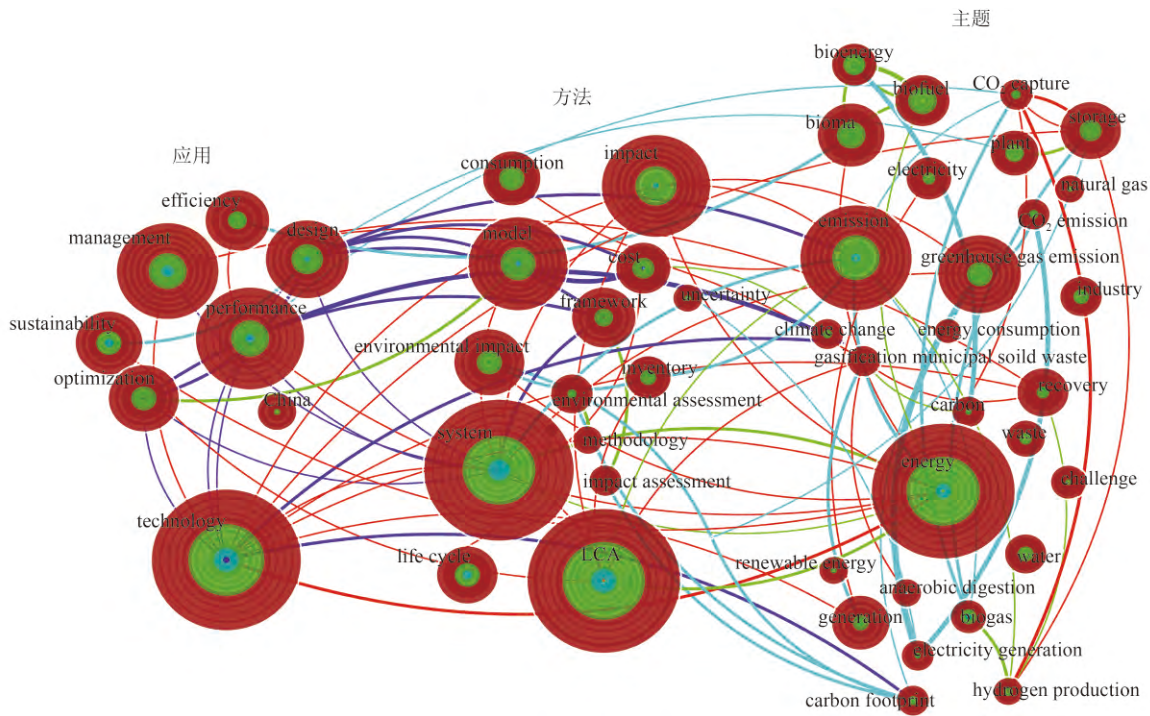


图 3 2000—2019 年 TLCA 领域关键词文献计量网络图谱

Fig.3 Bibliometric network map of keywords in the TLCA field from 2000 to 2019

频次), 生物质能源[bioma(186), biofuel(151), bioenergy(71), biogas(49)], 可再生能源[renewable energy(131)], 电能[electricity(91)], 水[water(74)], 天然气[natural gas(46)], 氢的生产技术[hydrogen production(46)], 厌氧消化[anaerobic digestion(99)], 气化城市固体废物[*gasification municipal solid waste*(53)]等。在全 LCA 中, 对可再生能源中的多种能量和物质输入消耗的忽略, 使绿色可再生能源的环境友好性存在争议, 因此全 LCA 对温室气体排放贡献率的因素逐步全面纳入并成为该主题热点。根据欧盟的可再生能源指令, 2020 年可再生能源在最终能源消费中的比例达到 20%^[21], 在该阶段和后续 20 年中绿色可再生能源的原料和技术等系统性因素将成为重点研究方向^[22]。碳足迹[carbon footprint(60)]主要包括排放[emission(328)]、温室气体排放[greenhouse emission(242)]、气候变化[climate change(95)]、CO₂ 排放[CO₂ emission(77)]、CO₂ 捕集[CO₂ capture(71)]和碳[carbon(49)]。国内外已广泛使用碳足迹来衡量各行业及各生产过程中的温室气体排放并作为制订相应减排方案的参考依据^[23]。2012 年 ISO 认定, 碳足迹是指产品由原料获取、制造、运输、销售、使用以及废气处理各阶段直接和间接产生的温室气体排放总量^[24]。碳足迹评价作为碳排放强度定量评价、温室气体管理的重要工具, 实现从生命周期视角的温室气体排放本质过程分析, 可为解决环境问题提供重大突破。废物管理技术包括垃圾[waste(79)]、城市固体废物[municipal solid waste(57)]。2019 年中国工业固体废物产生量为 44.1 亿 t, 仅有 52% 被综合利用^[25], 说明目前存在的回收方法回收率低下, 而开发和改进废物处理新技术可以减轻对环境造成的负担, 全 LCA 可实现对废物处理技术的全过程分析评估并剖析其环境影响^[26], 废物管理决策者可以依此更好地管理废物流。Christensen 等^[27]指出 LCA 为废物管理提供了一个更完整的分析视角, 有助于了解废物流及其潜在的环境影响, LCA 方法被广泛用于评估废物管理中的环境绩效^[6], 通过 LCA 将固体废物高价值利用是下一步的研究关键。

2.4.2 TLCA 方法热点

对于 LCA 方法方面, 该研究领域的前 10 个高频关键词可归纳为影响类型、评价体系 2 类。影响类型包括环境影响[impact(312)、environmental impact(307)、environmental assessment(88)、impact assessment(60)]和经济影响[life cycle(172)、cost(122)、consumption(116)], 此外, 影响类型还包括技术性

能、技术风险^[28]、技术成熟度^[29]、市场影响^[30]等。LCA 可用于评估技术的不同影响, 从而分析技术的可持续性, 从关键词出现频次可以看出大部分文献局限于通过环境影响对技术进行评估; 部分文献构建了环境、经济综合评价方法评价技术的全生命周期过程^[28,31-35], 得到了较为全面的评价结果, 成为技术可持续发展以及生产管理方的决策依据。近年来出现了 LCA 与其他影响评价方法相结合的评价模型^[36-37], 可同时评估新兴技术的社会、经济、能源、环境绩效, 评估手段工具的集成也减少了独立执行技术评估和生命周期评估时可能出现的功能单元、系统边界和假设之间的不一致^[38], 弥补了评估中在影响类型上的不足。评价体系包括体系[system(458)]、模型[model(227)]、框架[framework(131)]、不确定性[uncertainty(93)]、清单目录[inventory(84)]、方法[methodology(58)], 现有的 LCA 指南(ISO 14040 和 ISO 14044)技术评估体系较为成熟, 但是对于在研究和开发阶段新兴技术的评估还存在较大的挑战, 目前对于新兴技术的 LCA 仍处于摸索阶段。

2.4.3 TLCA 应用热点

近年来对于 TLCA 的应用主要体现在可持续性评价、效能评价以及决策 3 个方面。其中可持续性评价[sustainability(299)]过程综合考虑技术全生命周期中的环境、社会、经济影响, 将可持续思想融入对 TLCA 的全过程。近年来科研人员开始探索将多维度评估指标与全 LCA 结合形成新的可持续评价方法^[39]。Collotta 等^[40]使用生命周期可持续性评估(LCSA)工具对生物燃料进行全面影响评估。结果表明, 现有的 LCSA 研究虽开始考虑经济和社会可持续性因素, 但未涵盖生物燃料生产系统的全部方面, 也不完全符合 RSB(Roundtable on Sustainable Biomaterials)的全部标准, 今后 LCSA 应进一步扩大以解决可持续性的关键方面, 完善 RSB 框架来进行 LCA。赵娟等^[41]对多晶硅光伏组件的生产过程进行可持续性评价, 综合使用全 LCA 软件、全生命周期成本法、社会性指数评价法, 分析其环境、经济性和社会性影响, 为多晶硅光伏组件的可持续生产提供理论意见。技术效能评价[efficiency(136)]是技术可行的判定基础, 可以评判技术的发展状态以及大规模应用的可能性。王博^[42]将 VIKOR(Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno-Resenje)方法引入秸秆能源化利用技术评价领域, 结合模糊层次分析法, 进行了技术效能及成熟度评价, 并根据当地实际情况与需求设计因地制宜的能源化利用技术, 完成效能

评价的技术反馈和方向调整; Sorunmu 等^[29]在 LCA 中引入技术成熟度(TRL)方法对快速热解生物油升级进行了效能评价,评估了热解生物油提质方法的优点、综合指标和商业化潜力。全生命周期的决策评价包括执行[performance(323)]、管理[management(249)]、设计[design(215)]、选择[optimization(171)] 4 部分,是指 LCA 用来制定商业战略和采购决策(选择)、设计产品及生产过程(设计)、改进产品及生产过程(执行)、设定生态标签标准(管理)^[43]。Bohnes 等^[44]对 15 年中 65 个水产养殖系统进行 LCA,分析得到饲料生产是气候变化、酸化、能源消耗的关键因素,养殖过程是富营养化的关键因素,并依此决策出水产养殖系统的设计及优化方案。LCA 将通过 2 种方式应用于决策过程: 1) 依据将不利影响降到最低的原则,选择影响较小的技术; 2) 依据技术全生命周期所涉及的环境、成本等影响,优化所用材料及技术过程,以减少所选技术的环境影响。

2.4.4 TLCA 在中国的研究进展

我国 1995 年开始出现关于 LCA 的文章,主要是介绍 LCA 的应用、局限性、未来展望^[45]。21 世纪初开始出现运用 LCA 方法对技术进行评价的文献,如杨健等^[46]运用生命周期分析筛选水处理工艺路线,查京民等^[47]利用 LCA 对建筑材料生产过程进行分析。研究人员渐渐发现国外引进的 LCA 方法不适用于我国,因此许多学者开始探索适合我国的 LCA 方法,包括 LCA 所需的标准化数据以及权重确定的方法^[48]、LCA 数据库^[49-50]、LCA 模型等,此类研究对 LCA 在我国的发展与完善起到了至关重要的作用,就此 LCA 开始在我国各领域应用并起到显著作用。我国 TLCA 的应用热点集中于绿色技术、高新技术等领域。目前关于我国 TLCA 存在的问题仍旧是研究结果的不足、数据库的不完整以及评价方法的不成熟。

2.5 TLCA 在碳中和领域的研究进展

气候问题引起了全球广泛关注,实现碳达峰、碳中和已成为人类共同目标,而实现碳中和需要计算产品及技术的碳足迹,建立低碳体系。LCA 法成为碳排放源清查与数据搜集及碳排放核算过程分析的典型工具^[51]。

2000—2019 年发表的 TLCA 中关于碳中和(carbon neutrality)的相关文献共计 829 篇。发文量的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出,碳中和领域发文量变化与技术范畴 LCA 发文量变化总体一致,2000—2007 年处于发展阶段,自 2008 年以来碳足迹研究已经进入上升阶段,主要是由于 2008 年以来,

LCA 体系方法及数据库发展已见成熟,用 LCA 分析技术碳排放热点可为优化技术过程、规划低碳发展提供技术支持,对绿色发展具有指导意义;另一方面,随着《京都议定书》履约期限的逐渐临近,气候变化问题得到全球广泛关注,2008 年联合国开发计划署(UNDP)发布了《2007—2008 年人类发展报告》,呼吁 21 世纪应对气候变化的国际解决方案^[52],探索低碳经济模式和低碳生活方式实现全球可持续发展迅速成为研究人员关注的热点。

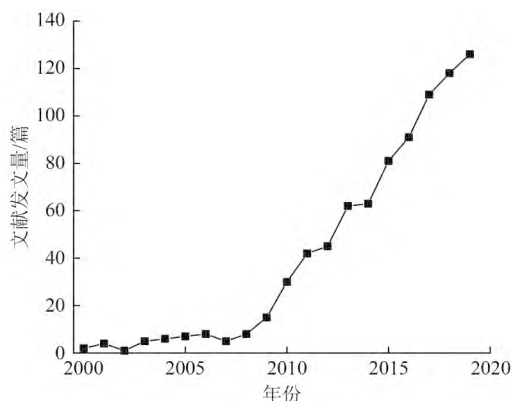


图 4 2000—2019 年 TLCA 碳中和领域相关文献历年发文量

Fig.4 Number of documents published in the field of carbon neutrality related to the TLCA field during 2000-2019

时间线图谱可以清楚地展示文献的更新及相互影响。本文对 829 篇文献进行聚类时间线分析,共形成 6 个聚类(图 5),这些聚类可以分为 2 个大类: 1) 技术方面,包括风力发电技术(wind electricity generation technologies)、二氧化碳捕集技术(ccs technologies)、电动汽车生产技术(electric vehicle)、综合能源利用技术(integrated energy)、生物炼制技术(biorefinery concept); 2) 分析方面,包括成本分析(cost result)。其中,技术方面中综合能源利用技术聚类出现的最早,且关注度持续保持、研究方向呈现多元化发展;其次是风力发电技术,近年来其关注度呈现降低趋势;二氧化碳捕集技术最早出现在 2005 年,随着时间的增加越来越受研究人员的关注;生物炼制聚类出现较晚,且文献发文量较少,主题网络初步形成。成本分析首次出现在 2009 年 Zini 等^[53]对太阳能生产氢气过程中的 CO₂ 和污染物排放进行严格和完整的经济分析,使政府能够设计出更好的激励措施,并推动此类技术在现实生活中的应用,LCA 与成本分析相结合是目前及将来发展的趋势。基于碳中和的技术 LCA 逐步发展且技术领域逐渐拓宽,2000 年以来评价方法逐渐发展为 2007 年以后应用于不同技术领域提供了理论支撑,

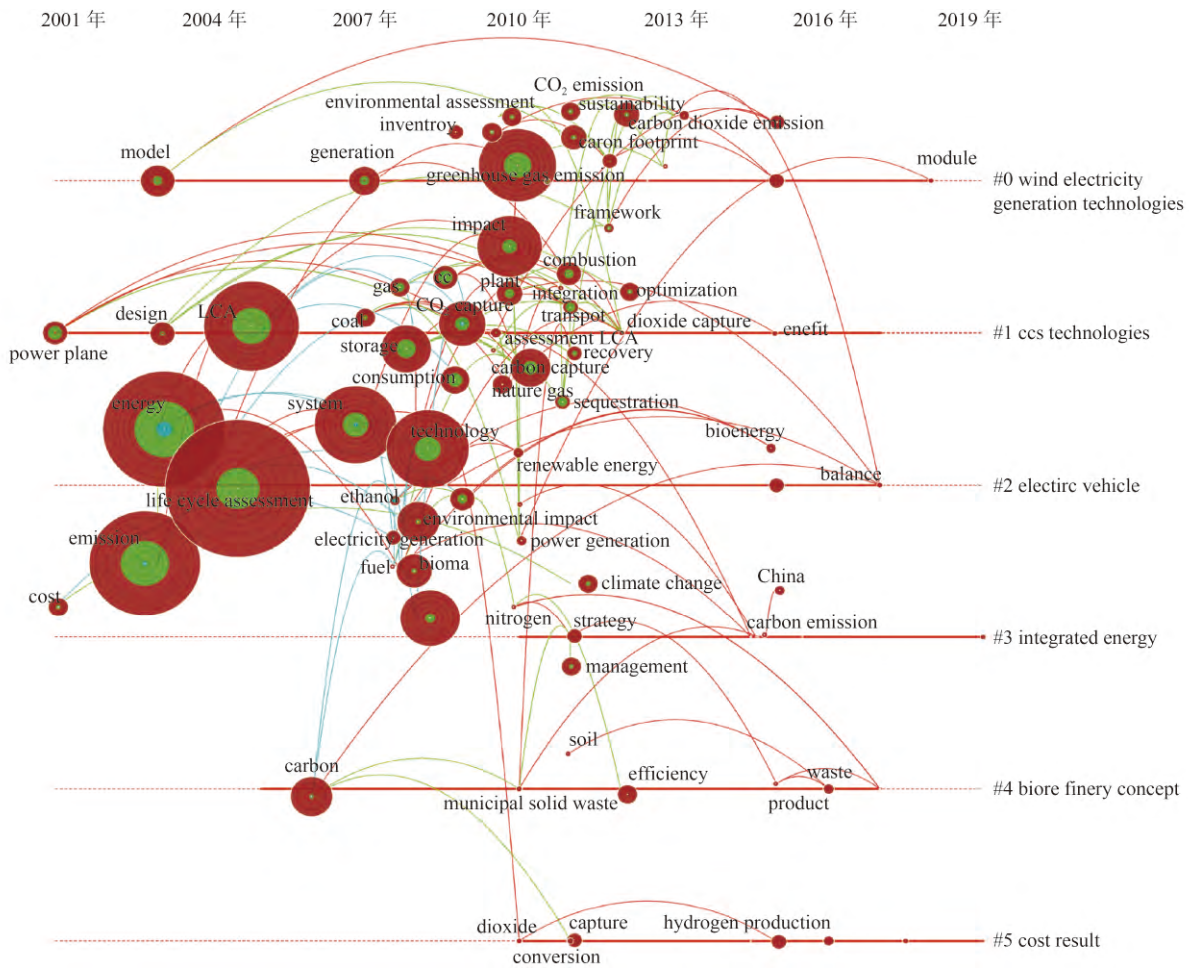


图 5 2000—2019 年 TLCA 领域碳足迹文献关键词聚类时间线视图

Fig.5 Clustering time line view of key words of carbon footprint literature in the TLCA field from 2000 to 2019

这些应用为近几年新兴技术进行 LCA 提供了数据支撑。TLCA 领域的碳足迹研究在研究方向上发生了漂移, 现已出现多元化和跨学科趋势, 另外一些话题与经济、政治等融合在一起, 对未来的热点有一定的启发意义。

随着 TLCA 的发展和关注点的演变, 近 20 年来, 在碳中和领域研究热点也在发生变化。最早对碳中和进行研究的是 Nakajima 等^[54], 其通过 LCA 评价饮料罐材料的回收效果, 但影响力较低。此后, Aycaguer 等^[55] 对将二氧化碳注入老化的油田 (EOR 过程) 进行 LCA 评价, 发现 EOR 过程产生二氧化碳会被储层中的二氧化碳储存所抵消, 虽然研究主要是基于石油的采收率, 但过程实现了碳中和, 在碳中和领域影响力较高。Lenzen 等^[56] 对风力涡轮机碳排放的生命周期发现, 不同国别和不同的生产利用回收方式, 会极大影响生命周期评判结果, 提出了通过评估方法的标准化形成投入产出技术综合化评判方法, 使评价结果更客观地用于技术比选。2002 年, 研究人员开始针对碳排放进行 LCA 评价,

目的是控制温室气体的排放。Weitz 等^[57] 采用 LCA 方法, 跟踪美国城市生活垃圾管理 25 年来温室气体排放的变化, 结果表明随着循环利用、堆肥、燃烧和垃圾填埋与天然气回收、控制和利用等措施的实施, 潜在的温室气体排放显著减少, 从而减轻了环境负担; Berg 等^[58] 对比了芬兰和瑞典森林活动产生的温室气体, 为森林活动实现碳中和、LCA 提供有效参数依据。2003—2008 年, 基于不同燃料角度的碳排放平衡研究进入研究热点区。引用率较高的文献有: Gustavsson 等^[59] 采用 LCA 成本分析方法研究生物质燃料的热电联产和冷凝发电中二氧化碳减排成本, 结果表明使用生物质燃料可推进碳中和, 为电力生产技术中材料比选和投资方向提供数据支撑; Corti 等^[60] 发现与传统燃料使用相比, 利用生物质产能对二氧化碳减排贡献突出, 使用生物质能与传统燃料最大的差别就是生物质产能过程中产生的二氧化碳可以与生物质在光合作用中吸收的二氧化碳所抵消; Meier 等^[61] 对电力工业燃料特别是天然气燃料进行了纳入上游过程的 LCA, 认为上游过程的因素会

导致全生命周期的评价错误,进而导致低碳策略的选择失败。

2010年以来基于 TLCA 的碳中和逐渐进入多指标融合评判阶段,力求在碳排放评估中纳入多种影响因素,给出综合性评价指标。如 van der Giesen 等^[62]比较了不同代半导体在全生命周期对环境对人类健康的影响,选择了全球变暖、水资源使用、光化学氧化剂的形成、酸化、富营养化、人体健康等指标进行综合评价,并促进了半导体材料更高效的利用能源及减缓全球变暖趋势。Bonou 等^[63]对欧洲风力发电向电网上网 1 kW·h 的电力影响进行评估时,考虑了环境(包含温室气体排放)、人体健康、自然资源 3 个维度指标,将温室效应作为其中的一个指标综合考虑,结果表明运营阶段影响仅占整个周期的 1%,因此建议全 LCA 应扩展至概念和产品开发以及供应链管理等阶段。2012 年, Cucek 等^[64]讨论了评判 LCA 的指标,包括生命周期成本分析、环境可持续性指数、生态足迹等,指出在评估及决策过程中要综合考虑环境、经济以及社会因素。

近年来研究人员开始探索将 LCA 与多种方法相结合,形成综合性归一化多目标评估方法,以有效支撑碳中和决策系统。如 Lopes 等^[65]将物质流分析(MFA)与 LCA 联合评估巴塞罗那自治大学的环境输入与输出,宏观层面的分析使用 MFA,微观层面的分析使用 LCA,2 种评价方法均表明对环境影响最大的是气候变化潜值,并指出新建的环境研究学院可以促进大学环境的可持续性。Sorunmu 等^[29]综合环境和经济等多指标,将 LCA 与技术经济分析(TEA)、层次分析法(AHP)及理想点法(TOPSIS)相结合,分析了多种二氧化碳分离以及捕集技术,最终从不同利益相关者的角度确定了煤粉电厂最佳二氧化碳捕集技术。在未来研究中,从不同利益方出发、多维度影响分析、多方法综合,并给出归一化评价结果,提升结果的决策支撑性,将是 LCA 方法在碳排放及碳中和领域的主要研究方向。

3 结论与展望

3.1 结论

(1) TLCA 研究文献发文量整体呈上升趋势,2006 年以后进入快速发展阶段,发文主要集中在工程学、生态学、环境科学、环境工程和绿色可持续发展技术等学科。

(2) 研究热点聚集于 TLCA 的主题、评价方法、应用类别 3 个方面,新旧能源特别是新能源技术、碳减排碳捕集相关的碳足迹领域以及废物处理技术为

关注热点。TLCA 方法的完善研究集中于清单、模型、框架、不确定性等方面,新技术领域的适用性开发和指标的综合性评判是发展方向。TLCA 在技术可持续性评价、效能评价以及决策支撑等方向的应用较为热门。

(3) TLCA 关于碳中和领域的针对性专一应用评价手段不足。但在石油开采、生物质燃料使用等方面已开展碳中和初步研究。TLCA 作为一种碳减排评价的有效方法,手段从单一指标演变为多指标综合评价。

3.2 展望

(1) TLCA 评价领域中,技术在综合影响高占比环节的重点分析、技术过程物料全涵盖和主产品的剖析式分析、新型材料产品关键技术的可行性决策是 LCA 体系发展重点,其中绿色可再生能源、新型材料、废物回收利用、减排工艺技术等方面需予以足够的重视。

(2) 研究方法需注重多元化和综合化发展,将环境、经济、效能等多元化影响结合进行综合性评估和指标简化合并是未来的技术全生命周期方法研究热点,评价体系的系统性优化设计和全方位因素纳入将成为方法完善的重点。

(3) 评价对象的可持续性评判将更加聚焦,其中 TLCA 效能评判和评价结果的决策支撑作用成为 LCA 的有效应用及推广关键一环,也是碳排放和碳中和领域应用中评估模型符合度及评价指标适用性、专一性检验的核心因素。

参考文献

- [1] 黄晶. 中国2060年实现碳中和目标亟需强化科技支撑[J]. 可持续发展经济导刊, 2020(10): 15-16.
HUANG J. China's goal of carbon neutrality by 2060 needs to be reinforced by science and technology[J]. China Sustainability Tribune, 2020(10): 15-16.
- [2] GHISETTI C, QUATRARO F. Green technologies and environmental productivity: a cross-sectoral analysis of direct and indirect effects in Italian regions[J]. Ecological Economics, 2017, 132: 1-13.
- [3] BRÄNNLUND R, GHALWASH T, NORDSTRÖM J. Increased energy efficiency and the rebound effect: effects on consumption and emissions[J]. Energy Economics, 2007, 29(1): 1-17.
- [4] BROOKES L. The greenhouse effect: the fallacies in the energy efficiency solution[J]. Energy Policy, 1990, 18(2): 199-201.
- [5] CHANG Y A, HUANG R Z, RIES R J, et al. Life-cycle comparison of greenhouse gas emissions and water consumption for coal and shale gas fired power generation in China[J]. Energy, 2015, 86: 335-343.
- [6] International Organization for Standardization. Environmental management: life cycle assessment: principles and framework:

- ISO 14040[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [7] 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, 317: 128247.
- [8] CHANG Y A, HUANG R Z, RIES R J, et al. Shale-to-well energy use and air pollutant emissions of shale gas production in China[J]. *Applied Energy*, 2014, 125: 147-157.
- [9] WU J Z, KONG L L, WANG L H, et al. Life cycle assessment of a co-firing power generation system in China[J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2016, 10(2): 129-136.
- [10] 王曰芬. 文献计量法与内容分析法的综合研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [11] 陈香, 李卫民, 刘勤. 基于文献计量的近30年国内外土壤微生物研究分析[J]. *土壤学报*, 2020, 57(6): 1458-1470.
- CHEN X, LI W M, LIU Q. Bibliometric-based analysis of researches on soil microbes at home and abroad in the past 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(6): 1458-1470.
- [12] 张媛, 张艳杰, 朱静, 等. 基于文献计量的湿地构建前沿进展[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 107-113.
- ZHANG Y, ZHANG Y J, ZHU J, et al. A bibliometric analysis of the frontier progress in wetland construction[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 107-113.
- [13] BOHN D, ROY-AIKINS J A. On appraising alternative power plant investment proposals: part 1. economic model[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2000, 214(6): 541-551.
- [14] NAHLIK M J, KAEHR A T, CHESTER M V, et al. Goods movement life cycle assessment for greenhouse gas reduction goals[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(2): 317-328.
- [15] KULCZYCKA J, LELEK Ł, LEWANDOWSKA A, et al. Environmental impacts of energy-efficient pyrometallurgical copper smelting technologies: the consequences of technological changes from 2010 to 2050[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(2): 304-316.
- [16] BERGESEN J D, TÄHKÄMÖ L, GIBON T, et al. Potential long-term global environmental implications of efficient light-source technologies[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(2): 263-275.
- [17] CUBI E, ZIBIN N F, THOMPSON S J, et al. Sustainability of rooftop technologies in cold climates: comparative life cycle assessment of white roofs, green roofs, and photovoltaic panels[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(2): 249-262.
- [18] BEUCKER S, BERGESEN J D, GIBON T. Building energy management systems: global potentials and environmental implications of deployment[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(2): 223-233.
- [19] YU D J, XU Z S, PEDRYCZ W, et al. Information sciences 1968-2016: a retrospective analysis with text mining and bibliometric[J]. *Information Sciences*, 2017, 418/419: 619-634.
- [20] GARVEY T, MOORE E A, BABBITT C W, et al. Comparing ecotoxicity risks for nanomaterial production and release under uncertainty[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2019, 21(2): 229-242.
- [21] BIYIK E, ARAZ M, HEPBASLI A, et al. A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2017, 20(3): 833-858.
- [22] GÓRALCZYK M. Life-cycle assessment in the renewable energy sector[J]. *Applied Energy*, 2003, 75(3/4): 205-211.
- [23] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 2003, 46(3): 351-365.
- [24] 衡丽君. 生物质定向热解制多元醇燃料过程模拟及全生命周期碳足迹研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [25] 李金惠, 刘丽丽, 许晓芳. 2019年固体废物处理利用行业发展评述及展望[J]. *中国环保产业*, 2020(3): 15-18.
- LI J H, LIU L L, XU X F. Review and prospect of the development of solid waste treatment and utilization industry in 2019[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2020(3): 15-18.
- [26] MARIA F D, SAETTA S, LEONARDI D. Life cycle assessment of a PPV plant applied to an existing SUW management system[J]. *International Journal of Energy Research*, 2003, 27(5): 481-494.
- [27] CHRISTENSEN T H, DAMGAARD A, LEVIS J, et al. Application of LCA modelling in integrated waste management[J]. *Waste Management*, 2020, 118: 313-322.
- [28] WENTKER M, GREENWOOD M, ASABA M C, et al. A raw material criticality and environmental impact assessment of state-of-the-art and post-lithium-ion cathode technologies[J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 26: 101022.
- [29] SORUNMU Y, BILLEN P, SPATARI S. A review of thermochemical upgrading of pyrolysis bio-oil: techno-economic analysis, life cycle assessment, and technology readiness[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, 12(1): 4-18.
- [30] CHAUVY R, MEUNIER N, THOMAS D, et al. Selecting emerging CO₂ utilization products for short- to mid-term deployment[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 662-680.
- [31] OH J, JUNG D, OH S H, et al. Design, simulation and feasibility study of a combined CO₂ mineralization and brackish water desalination process[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 34: 446-464.
- [32] ROY M, MOHANTY K. A comprehensive review on microalgal harvesting strategies: current status and future prospects[J]. *Algal Research*, 2019, 44: 101683.
- [33] ZHANG Y, KANG H, HOU H C, et al. Improved design for textile production process based on life cycle assessment[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2018, 20(6): 1355-1365.
- [34] KANNAN R, LEONG K C, OSMAN R, et al. Life cycle energy, emissions and cost inventory of power generation technologies in Singapore[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(4): 702-715.
- [35] WOLDT W E, DVORAK B I, DAHAB M F. Application of fuzzy set theory to industrial pollution prevention: production system modeling and life cycle assessment[J]. *Soft Computing*, 2003, 7(6): 419-433.
- [36] RASHEED R, KHAN N, YASAR A, et al. Design and cost-benefit analysis of a novel anaerobic industrial bioenergy plant in Pakistan[J]. *Renewable Energy*, 2016, 90: 242-247.
- [37] CORONA B, SAN MIGUEL G. Life cycle sustainability analysis

- applied to an innovative configuration of concentrated solar power[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(8): 1444-1460.
- [38] MONI S M, MAHMUD R, HIGH K, et al. Life cycle assessment of emerging technologies: a review[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 24(1): 52-63.
- [39] ONG M S, CHANG M Y, FOONG M J, et al. An integrated approach for sustainability assessment with hybrid AHP-LCA-PI techniques for chitosan-based TiO₂ nanotubes production[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2020, 21: 170-181.
- [40] COLLOTTA M, CHAMPAGNE P, TOMASONI G, et al. Critical indicators of sustainability for biofuels: an analysis through a life cycle sustainability assessment perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 115: 109358.
- [41] 赵娟, 黄蓓佳, 柴径阳, 等. 多晶硅光伏组件生产可持续性评价[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(10): 1554-1559.
ZHAO J, HUANG B J, CHAI J Y, et al. Sustainability assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules production[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(10): 1554-1559.
- [42] 王博. 秸秆能源化利用技术的综合评价研究: 基于模糊层次分析-VIKOR模型和生命周期可持续性评价[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [43] ANSHASSI M, TOWNSEND T G. Reviewing the underlying assumptions in waste LCA models to identify impacts on waste management decision making[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313: 127913.
- [44] BOHNES F A, HAUSCHILD M Z, SCHLUNDT J, et al. Life cycle assessments of aquaculture systems: a critical review of reported findings with recommendations for policy and system development[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2019, 11(4): 1061-1079.
- [45] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. *科技进步与对策*, 2013, 30(6): 155-160.
ZHENG X J, HU B. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2013, 30(6): 155-160.
- [46] 杨健, 陆雍森, 施鼎方. 运用生命周期分析(LCA)评估和选择废水处理工艺[J]. *工业用水与废水*, 2000, 31(3): 4-6.
YANG J A, LU Y S, SHI D F. Application of life-cycle analysis (LCA) in evaluation and selection of wastewater treatment processes[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2000, 31(3): 4-6.
- [47] 查京民, 张剑. 应用LCA评价建筑工程对环境的影响[J]. *环境科学动态*, 2001, 26(3): 11-15.
- [48] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(2): 234-237.
YANG J X, WANG R S, LIU J R. Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(2): 234-237.
- [49] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136-2144.
LIU X L, WANG H T, CHEN J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [50] 莫华, 张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(5): 55-58.
MO H, ZHANG T Z. Data quality assessment of life cycle inventory analysis[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(5): 55-58.
- [51] RIDOUTT B, FANTKE P, PFISTER S, et al. Making sense of the minefield of footprint indicators[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(5): 2601-2603.
- [52] YANG E, OMAR MOHAMED H, PARK S G, et al. A review on self-sustainable microbial electrolysis cells for electro-biohydrogen production via coupling with carbon-neutral renewable energy technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124363.
- [53] ZINI G, TARTARINI P. Hybrid systems for solar hydrogen: a selection of case-studies[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(13): 2585-2595.
- [54] NAKAJIMA K, INO H, HALADA K. Life cycle assessment of beverage cans[J]. *日本金屬學會誌*, 2000, 64(8): 591-596.
- [55] AYCAGUER A C, LEV-ON M, WINER A M. Reducing carbon dioxide emissions with enhanced oil recovery projects: a life cycle assessment approach[J]. *Energy & Fuels*, 2001, 15(2): 303-308.
- [56] LENZEN M, MUNKSGAARD J. Energy and CO₂ life-cycle analyses of wind turbines: review and applications[J]. *Renewable Energy*, 2002, 26(3): 339-362.
- [57] WEITZ K A, THORNELOE S A, NISHTALA S R, et al. The impact of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in the United States[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2002, 52(9): 1000-1011.
- [58] BERG S, KARJALAINEN T. Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden[J]. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2003, 76(3): 271-284.
- [59] GUSTAVSSON L, MADLENER R. CO₂ mitigation costs of large-scale bioenergy technologies in competitive electricity markets[J]. *Energy*, 2003, 28(14): 1405-1425.
- [60] CORTI A, LOMBARDI L. Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO₂ emissions: performance analysis and life cycle assessment (LCA)[J]. *Energy*, 2004, 29(12/13/14/15): 2109-2124.
- [61] MEIER P J, WILSON P P H, KULCINSKI G L, et al. US electric industry response to carbon constraint: a life-cycle assessment of supply side alternatives[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(9): 1099-1108.
- [62] 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, 259: 120904.
- [63] BONOU A, LAURENT A, OLSEN S I. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy—from theory to application[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 327-337.
- [64] ČUČEK L, KLEMEŠ J J, KRAVANJA Z. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 34: 9-20.
- [65] LOPES SILVA D A, de OLIVEIRA J A, SAAVEDRA Y M B, et al. Combined MFA and LCA approach to evaluate the metabolism of service polygons: a case study on a university campus[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 94: 157-168. ⊕