

生命周期评价研究演化路径与热点分析

——基于Web of Science文献计量的研究

○ 邓玉勇, 刘辉

(青岛科技大学 经济与管理学院, 山东 青岛 266061)

[摘要]当前, 生命周期评价广为应用, 但其研究繁杂且呈现碎片化特征, 研究主观性偏强。因此, 采用CiteSpace从主题脉络、知识演进、新兴热点三个方面, 对Web of Science数据库中2008—2019年有关生命周期评价的已有研究进行计量分析。由分析结果可知: 生命周期评价研究的主题脉络涵盖能源与资源、方法与模型、生态与环境、经济与产业四个知识域, 且研究主题趋向细化发展; 生命周期评价研究的知识演进可分为四个阶段, 生命周期评价的实际应用及其方法扩展的范围更广; 当前生命周期评价研究的新兴热点包括“循环经济”“废弃物管理”“储能”“社会生命周期评价”等主题。未来有关生命周期评价的研究可从研究方法和研究领域等方面进一步拓展。

[关键词]生命周期评价; 文献计量; 主题脉络; 知识演进; 新兴热点

[中图分类号] G353.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8372(2022)02-0043-07

DOI:10.16800/j.cnki.jqustss.2022.02.012

Evolution path and hotspot analysis of life cycle assessment

—a bibliometric analysis based on Web of Science

DENG Yu-yong, LIU Hui

(College of Economics and Management, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: At present, the research on life cycle assessment (LCA) is widely used, but its research is complicated and presents the characteristics of fragmentation, and the research is subjectivity. Therefore, CiteSpace was used to carry out bibliometric analysis of existing studies on LCA from 2008 to 2019 in Web of Science databases from three aspects of topic context, knowledge evolution and emerging hot spots. The conclusions are as follows: the research topic of LCA include four knowledge domains: energy and resources, methods and models, ecology and environment, economy and industry, and these topics tend to be refined; the knowledge evolution of LCA research can be divided into four stages, and the practical application of LCA and the expansion of its method are more extensive; the emerging hot spots of current LCA research include “circular economy” “waste management” “energy storage” and “social life cycle assessment”. Finally, the future alternative research directions are proposed.

Key words: life cycle assessment (LCA); bibliometric; topic context; knowledge evolution; emerging hot spot

一、引言

生命周期评价(LCA)自20世纪60年代末问世以来^[1], 已被企业、政府机构和其他组织广泛应用于诸多领域, 如工业制造、环境管理、军事系统、旅游业等。关于生命周期评价的文献很多, 其研究内容和主题不断变化并逐步深入。但是, 生命周期评价研

究的内容也呈现碎片化的特征, 加之相关综述性成果大多采用传统文献归纳法, 这些研究难以避免带有作者主观性和文献搜集片面性等不足。因此, 有必要对生命周期评价研究进行全面系统的整理分析, 凝练主题, 梳理脉络, 总结划分演进阶段, 进而发现研究前沿和提炼新兴热点, 以弥补传统文献归纳法

[基金项目] 山东省高等学校青创科技支撑计划(2019RWE003)

[收稿日期] 2021-11-01

[作者简介] 邓玉勇(1974-), 男, 山东聊城人, 青岛科技大学经济与管理学院副教授, 博士。

的不足。

文献计量法能在一定程度上克服文献归纳法的主观性,将大量繁杂、无序的文献信息转化为结构化、有秩序的知识体系,从而揭示科学知识发展的规律。目前,国内外采用文献计量法对生命周期评价研究进行可视化分析的文献主要集中于特定细分领域^[2-3],较少对生命周期评价整个领域的研究梳理,并且缺少对2015年以来生命周期评价主题脉络、知识演进以及新兴热点的归纳总结,而这恰恰是生命周期评价文献数量出现最多的一个时期。

本文拟将文献计量法与文献归纳法相结合对生命周期评价领域相关文献进行可视化分析,从宏观上把握生命周期评价研究的发展脉络和趋势,从微观上发现生命周期评价领域的前沿主题,进而探究生命周期评价研究的当前热点。在此基础上,发现当前研究不足并指明未来研究方向,为后续的研究提供参考。

二、研究设计

(一) 研究方法

本文采用CiteSpace V软件,通过对生命周期评价进行关键词聚类分析(Cluster)、关键词共现分析(Co-occurrence analysis)和突显性检测(Burst detection),揭示国内外学者在生命周期评价领域研究实践的主题脉络、知识演进与新兴热点。

(二) 数据来源

选择Web of Science核心合集数据库作为检索源获取样本文献数据。检索条件为:主题="Life Cycle Assessment"或"LCA",文献类型="Article"和"Review",语种="English"。2006年国际标准ISO14040(新)和ISO14044的诞生在很大程度上弥补了过去研究的不足^[4],强有力地发展和协调了生命周期评价的应用,因此本文选择时间跨度为"2008—2019年"(检索时间为2020年6月27日)。鉴于初始检索得到的文献大多数集中于环境科学、绿色可持续科学技术以及能源燃料等领域,本文将文献类别限定于"Environment Sciences""Engineering Environmental""Green Sustainable Science Technology""Energy Fuels"四个类别。初始检索得到文献13236篇,然后按照被引频次降序排序,选择被引频次前3000的文献,作为本研究的数据源。

绘制2008—2019年生命周期评价研究文献数量的时间序列分布图(见图1)。由图1可以看出,

2008—2019年,生命周期评价研究年度发文量呈现不断增长的趋势,年度发文量的三次拟合函数曲线($y=-0.3051x^3+1852.1x^2-34.453x+219.19$)拟合程度好(曲线的拟合优度为0.9966),生命周期评价研究整体发展态势尚未达到峰值,仍旧处在增长阶段,相关研究成果稳定增加的趋势将继续保持一定时间,其应用领域依然广泛。



图1 2008—2019年生命周期评价研究文献分布图

三、生命周期评价研究的主题脉络

本文采用CiteSpace软件对检索遴选的3000篇文献的关键词进行聚类,由LLR(Log-Likelihood Ratio,对数似然比)算法识别出12个聚类以及每个聚类相对应的关键词。将聚类结果与其相关的关键词进行融合,总结得到生命周期评价研究的四个知识域分别为生态与环境、经济与产业、能源与资源、方法与模型(见图2)。



图2 2008—2019年生命周期评价研究的主题脉络

(一) 生态与环境

这一知识域涵盖了有关废弃物管理、温室气体排放、生物多样性、环境足迹等方面的综合研究。以改善生态环境作为出发点的生命周期评价研究,已经由单一工业产品的环境影响评价逐步扩展到涵盖农业等的各产业产品(包括产品系统、生产工艺、新技术)以及各类工程项目的可持续决策。Pfister等将水足迹引入生命周期评价,开发了可用于水密集型产品生命周期影响评价的方法,并进一步细化到月度用水量以提高其时间分辨率^[5]。Cherubini等通过生

物质燃烧的气候影响、废弃物处理方案评价等为生命周期评价提供了方法支撑^[6]。Baan等借助生物多样性破坏(BDP)因子,借助生命周期评价框架,在全球范围内首次粗略量化了土地利用对生物多样性的影响,为世界不同地区生物多样性影响的评价提供了思路 and 办法^[7]。

(二) 经济与产业

这一知识域涵盖了循环经济、绿色经济、产业运营系统、供应链、新能源产业等方面的研究。可持续发展的内涵要求经济增长与环境保护相辅相成,而生命周期评价作为可持续发展的支持工具,在平衡经济系统与环境生态系统的关系上,也发挥着重要的作用。Scheepens等基于生命周期评价的生态成本价值比(EVR)模型,利用生态效率价值创造和循环转换框架方法,分析了商业活动对环境潜在的负面影响^[8]。Huang等采用投入产出生命周期评价(EIO-LCA)模型识别可能对美国经济部门碳足迹造成重大影响的供应链上游排放源,帮助企业在供应链上寻找减排可能^[9]。Catherine等借助社会热点数据库(SHDB)对草莓酸奶供应链进行了社会生命周期评估(S-LCA),以便帮助企业完善社会责任^[10]。Wu等和Bauer等对能够推广的各类新能源汽车使用的能源消耗、环境绩效进行了生命周期评价,以期对政策制定有所裨益^[11-12]。

(三) 能源与资源

这一知识域涵盖了生物能源、能源效率、能源消费、土地利用等方面的研究。提高能源使用效率,寻找能源消耗替代品以解决能源紧缺问题越来越成为学者们关注的焦点^[13]。运用生命周期评价方法可以对能源资源利用、能源技术、能源供应系统等的可持续性进行定量分析,避免主观判断带来的错误,进而有效促进能源资源管理部门决策的科学化。Scharlemann等的研究认为来自农产品的生物燃料可能比传统燃料对环境的影响更大^[14],这一研究成果促使瑞士政府要求对所有非废物来源的生物燃料进行生命周期评价研究,以证明其在环境方面优于传统燃料。近期基于生命周期评价对氢能源生产问题的研究逐渐增多,如Bhandari等和Cetinkaya等认为,由可再生能源电力驱动的电解过程具有较低的全球变暖潜能值(GWP),其中风力电解最低^[15-16]。

(四) 方法与模型

这一知识域涵盖了生命周期清单、混合生命周期评价、物质流分析(MFA)、生命周期可持续性评

价(LCSA)、社会生命周期评价(S-LCA)等方面的综合研究。方法学的发展往往是由应用领域需求推动的,针对生命周期评价对象的不断扩展和日趋复杂化,生命周期评价方法体系也在不断地弥补自身缺陷,发展出新的形式。方法体系的扩展主要分为两种形式,一种是与其他学科的方法和模型相结合来解决实际问题,例如物质流分析(MFA)^[17]、地理信息系统(GIS)^[18]等;另一种是在自身框架基础上发展延伸,例如可持续性评价^[19]和社会生命周期评价^[20]。各种方法在分析和评价不同尺度的研究对象时各有利弊,在研究具体问题时往往需要通过综合使用以发挥各类方法的优势。

四、生命周期评价研究的知识演进

为了更好地展现生命周期评价相关主题或研究热点的时间分布及演化趋势,本文绘制了“Time Zone”时区视图可视化关键词共现网络(见图3)。图3显示了2008—2019年出现的关键词,所处的时间段代表这个关键词首次出现的时间。可将生命周期评价研究的知识演进大致分为四个阶段,为防止重叠,将共现频次最高的关键词“Life Cycle Assessment”进行隐藏并适当调整部分关键词的位置。

(一) 第一阶段: 2008—2010年

这一阶段聚集了绝大多数的高被引、高中心度的关键词,例如能源(energy)、环境影响(environmental impact)、系统(system)、排放(emission)、温室气体排放(greenhouse gas emission)、影响(impact)、可持续性(sustainability)、气候变化(climate change)、消耗(consumption)、框架(framework)等。首先,这些关键词作为生命周期评价研究领域的关键知识点,对后续文献的积累及其研究热点的变化奠定了理论基础。其次,应用实践多集中在能源消耗和环境影响问题上,说明在这一阶段生命周期评价仍被看作环境领域的强有力工具。在研究方法和范式上,学者们对基于研究目的和系统边界不同提出了两种方法——归因生命周期评价(ALCA)^[21]和归果生命周期评价(CLCA)^[22]以及这两种方法的比较^[23-24]进行了广泛的讨论。再次,基于清单分析的过程生命周期评价(PLCA)^[25]、投入产出生命周期评价(EIO-LCA)^[26]和混合生命周期评价(HLCA)^[27]三种方法也成为讨论的焦点,并开始探讨深化和扩大生命周期评价方法的潜在选择,以使其支持可持续发展的决策^[28]。

(二) 第二阶段: 2011—2013年

这一阶段, 生物柴油生产(biodiesel production)、厌氧消耗(anaerobic consumption)、微藻(microalgae)、建筑物(building)、交通(transport)等成为热门研究方向。显然, 与生物质能源领域相关的很多问题成为学者研究的热点。生物质能源被称为自然界的第四大能源^[29], 开发可再生的生物质能源可以促进能源结构调整, 改善人类当前面临的能源困境。此外, 建筑业、交通业在全世界能源消耗和环境影响中占很大份额, 研究其能源消耗与环境排放对政府和相关组织决策的制定极其重要。在方法和范式上, 大多数研究将生命周期评价与其他领域的模型或方法相结合来解决更多实际问题。例如与物质流分析(MFA)^[17]和多准则决策^[30]相结合来研究废弃物管理; 与情景建模^[31]和模糊逻辑^[32]相结合研究动态系统建模和绿色产品设计。此外, 很多通用和专用生命周期评价软件和数据库被开发和广泛应用, 例如SimaPro和GaBi两大生命周期评价领先数据库的开发。

(三) 第三阶段: 2014—2016年

这一阶段, 学者们的研究热点逐渐演变为食物浪费(food waste)、优化(optimization)、能源消费

(energy consumption)以及足迹(footprint)等新的研究领域。随着生命周期评价研究对象的进一步复杂, 在政府政策的引导下, 理论结合现实问题的相关研究也越来越多, 如食品供应链^[33]、家庭消费环境影响^[34]等。在此阶段, 学者们普遍将生命周期评价与其他工具相结合来研究实际问题以获得更全面更有说服力的研究结论。频繁出现的数学模型有一般/部分均衡模型(CGE/PE)^[35]、蒙特卡洛模拟^[36]、数据包络分析(DEA)^[37]等。

(四) 第四阶段: 2017—2019年

这一阶段, 研究热点更新为储能(energy storage)、氢能源(hydrogen)、电动车(electric vehicle)等新的研究主题, 循环经济(circular economy)成为研究的核心。在全球碳减排压力与日俱增的背景下, 生命周期评价作为解决环境能源领域的综合评价工具理应与与时俱进, 不断调整, 以更加适应现代经济社会发展的需要。因此, 在方法上, 学者们开始运用一些新兴技术, 例如将大数据理论^[38]和人工智能技术^[39]与生命周期评价相结合来研究环境问题。此外, 对生命周期可持续性评价和社会生命周期评价的应用尝试开始增多, 而不仅仅是停留在其框架和理论模型的建立阶段。

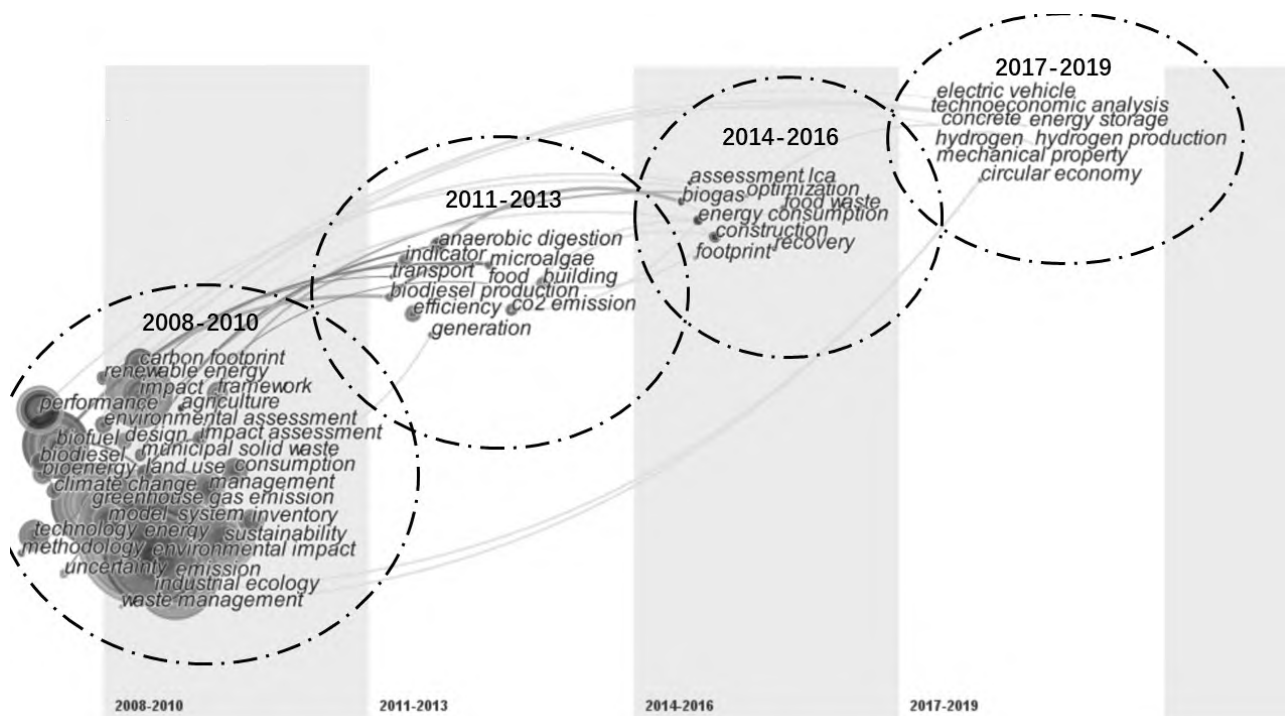


图3 2008—2019年生命周期评价(LCA)研究的知识演进

总体来看, 2008—2019年生命周期评价研究的知识演进可以归结为由生命周期评价的框架、能源问题和环境污染问题逐渐转变为具体细分领域单一主题的延伸和深入研究, 以及不同研究领域的交叉探讨。研究方法则不断扩展延伸, 扩大生命周期评价的适用范围, 且与各领域的方法广泛结合, 从而解决从不同研究目的出发的各类问题, 研究重点逐渐从理论层面转向实践层面。如今, 根据研究和评价目的的不同, 对生命周期评价概念、模型、方法及其组合的开发和研究仍然是开放的。

五、生命周期评价研究的新兴热点

关键词和引文突显提供了特定关键字、引文与出现频率激增相关联的证据, 关键词突显表明一个潜在的话题已经或正在成为研究人员在特定时期的关注对象, 引文的突显表明科学界已经或正在特别关注文章潜在贡献的可能性^[40]。因此, 突显性检测可显示高度活跃的研究领域、新兴的趋势和转瞬即逝的潮流^[41]。为探索生命周期评价研究近几年的新兴热点, 本文对初始下载数据记录中2015—2019年5年的文献关键词和引文进行突显性检测, 如表1列出突显强度前5位。

从关键词突显性检测结果来看, 5个关键词“循环经济(circular economy)”“优化(optimization)”“废弃物管理(waste management)”“储能(energy storage)”“发电(plant)”“工业生态学(industrial ecology)”都从2017—2019年持续突显, 其中“循环经济(circular economy)”的突显强度最为显著, 是2017—2019年间最为活跃的研究前沿。从引文突显性检测结

果来看, “电转气技术(P2G)”“社会生命周期评价(S-LCA)”“制氢(hydrogen production)”“城市固体废弃物管理(municipal solid waste management)”“生物质热解(pyrolysis of biomass)”的经典文章从2017年开始持续突显, 且“电转气技术(P2G)”的文章突显强度最高。“建筑物生命周期评价”和“食品生命周期评价”的文章只在2016—2017两年内持续突显。关键词和引文突显性检测的结果均反映了近年来生命周期评价领域比较受关注的问题。

对比分析关键词和引文的突显结果发现, “废弃物管理(waste management)”和“电转气(P2G)技术”是两次检测共同出现的高频主题。废弃物处理不当引发的环境污染、经济损失和社会危害已经被很多文献所报道^[6, 42-43]。Cherubini等人认为, 建立可负担的、有效的和真正可持续的废物管理系统是可持续发展的基石^[24], 因此, 辨识废弃物生命周期中的关键节点, 开展面向全过程的生命周期评价是废弃物回收处理行业可持续发展的现实需求。而电转气技术(P2G)作为新能源领域的关键新兴技术, 被视为一种长期、广域的储能形式^[44], 同时也包含制氢技术的一种重要思路, 正受到能源界的广泛关注。由此可见, 生命周期评价研究近期的新兴热点主题主要与循环经济背景下的能源利用以及环境管理相关, 其他突显关键词“优化(optimization)”“储能(energy storage)”“工业生态学(industrial ecology)”也体现了这一点。此外, “社会生命周期评价(S-LCA)”作为生命周期可持续评价的重要维度, 其出现频率的激增验证了生命周期评价方法论发展的不断完善和深入。

表1 生命周期评价(LCA)研究近期的关键词突显和引文突显

关键词突显	强度	时间	引文突显	强度	时间
circular economy	6.0451	2017—2019年	Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review	3.8273	2017—2019年
optimization	5.7069	2017—2019年	Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment	3.4394	2016—2017年
waste management	5.3690	2017—2019年	Application challenges for the social Life Cycle Assessment of fertilizers within life cycle sustainability assessment	3.1264	2017—2019年
energy storage	4.0203	2017—2019年	Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review	3.1264	2017—2019年
plant	3.0116	2017—2019年	A review of life cycle assessment (LCA) on some food products	2.2813	2016—2017年

六、结论与展望

(一) 研究结论

近十几年来, 有关生命周期评价的研究热度一

直处于上升的态势, 并且呈现出发展速度不断加快的趋势, 研究主题也趋向细化发展。生命周期评价是一个多学科交叉、综合性较强的研究主题, 其内

涵与实践随着社会变迁与相关利益群体间博弈而不断增添新的内容,实际应用路径与方法也需根据各地的实际情况反复探索、循序渐进。本文以Web of Science核心合集数据库收录的2008—2019年的被引频次前3000篇文献为数据源,采用CiteSpace可视化分析软件,从整体主题脉络、知识演进、新兴热点对生命周期评价领域的研究进行了总结和分析,由此得出如下结论:

1. 2008—2019年的生命周期评价研究的主题脉络主要涵盖了生态与环境、能源与资源、经济与产业、方法与模型四大领域。生态与环境、能源与资源这两大知识域涵盖了生命周期评价的大多数应用实践,而应用的发展与方法的不断完善相辅相成,而方法与模型的完善也促进了经济与产业的研究发展。

2. 2008—2019年的生命周期评价研究的知识演进可以归结为四个阶段,由生命周期评价的框架、能源问题和环境污染问题逐渐转变为具体细分领域单一主题的延伸和深入研究,以及不同研究领域的交叉探讨。研究方法上则与各领域的方法广泛结合从而解决以不同研究目的出发的各类问题,研究重点逐渐从理论层面转向应用实践层面。

3. 2017—2019年的生命周期评价研究热点主要有循环经济、优化、废弃物管理、储能、电转气技术、工业生态学、社会生命周期评价、制氢、生物质热解等,近期的新兴热点主题主要与循环经济背景下的能源利用以及环境管理相关,社会生命周期评价研究也开始大规模增多。

(二) 未来展望

经过几十年的发展,生命周期评价在实践上取得了重大的进展,其理论上的很多缺陷也逐渐被改善,成为一个极具发展前途和成熟的有力工具。本文认为,未来研究可从下述几个方面进行拓展。

第一,研究方法方面。首先,生命周期评价研究方法将更加强调学科之间的融合创新。尽管生命周期评价研究的应用实践与其他学科的管理决策支持方法或技术相结合的研究^[30-32, 35-39]已经有很多,但多为定量研究,定性研究不多,下一步可考虑与定性方法(例如质性研究)相结合来研究实际问题,以进行更加综合性的可持续发展研究。其次,根据研究者的需求类型以及应用领域特点进行标准化方法的开发。最后,生命周期可持续性评价和社会生命周期评价的研究正处于起步阶段,国内外缺乏对两者理论框架的案例研究^[45],未来的研究者可在生命周期可持续评价和

社会生命周期评价的理论建模方面多做探讨。

第二,研究领域方面。随着国家“碳达峰/碳中和”目标的提出,围绕这一目标,追求低排放、环境友好、清洁和更可持续的新能源领域的生命周期评价研究将具有重要的战略意义。

第三,研究数据来源方面。采用文献计量的方法,可以通过文献特征和被引数据的定量分析比较全面和清楚地把握十几年来生命周期评价研究的现状、前沿和热点,为关注此领域的学者和政府、企业的决策者提供一定的参考和建议。然而,本研究只选取了WOS数据库,没有涉及国内期刊的文献,且只选取了文章(Article)和综述(Review)为研究对象,研究数据总量有限。在未来的研究中,可以考虑对国内外生命周期评价的研究做一比较,并尝试扩大检索的数据库,优化数据筛选标准,以不断提升研究质量。

[参考文献]

- [1] LIU G, DANIEL B MÜLLER. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 35: 108-117.
- [2] HOU Q, MAO G, ZHAO L, et al. Mapping the scientific research on life cycle assessment: a bibliometric analysis[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(4): 541-555.
- [3] CHEN H, YANG Y, YANG Y, et al. A bibliometric investigation of life cycle assessment research in the web of science databases[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(10): 1674-1685.
- [4] EHRENFELD J R. The importance of LCAs: warts and all[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 1(2): 41-49.
- [5] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S, et al. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(11): 4098-4104.
- [6] CHERUBINI F, PETERS G P, BERNTSEN T, et al. CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming[J]. *GCB Bioenergy*, 2011, 3(5): 413-426.
- [7] BAAN L D, ALKEMADE R, KOELLNER T. Land use impacts on biodiversity in LCA: a global approach[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(6): 1216-1230.
- [8] SCHEEPENS A E, VOGTLANDER J G, BREZET J C, et al. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems case: making water tourism more sustainable[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 257-268.
- [9] HUANG Y A, WEBER C L, MATTHEWS H S. Categorization of scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(22): 8509-8515.
- [10] CATHERINE B N, AULISIO C D, GREGORY N. Identifying social impacts in product supply chains: overview and application of the social hotspot database[J]. *Sustainability*, 2012, 4(9): 1946-

- 1965.
- [11] WU Y, YANG Z, LIN B, et al. Energy consumption and CO₂ emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China[J]. *Energy Policy*, 2012, 48: 537–550.
- [12] BAUER C, HOFER J, ALTHAUS H J, et al. The environmental performance of current and future passenger vehicles: life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework[J]. *Applied Energy*, 2015, 157 (1): 871–883.
- [13] SHI J, SI H, WU G, et al. Critical factors to achieve dockless bike-sharing sustainability in China: a stakeholder-oriented network perspective[J]. *Sustainability*, 2018, 10 (6): 2090.
- [14] SCHARLEMANN J, LAURANCE W F. How green are biofuels? [J]. *Science*, 2008, 319 (5859): 43–44.
- [15] BHANDARI R, TRUDEWIND C A, ZAPP P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 85 (dec. 15): 151–163.
- [16] CETINKAYA E, DINCER I, NATERER G F. Life cycle assessment of various hydrogen production methods[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37 (3): 2071–2080.
- [17] WÄGER P A, HISCHIER R, EUGSTER M. Environmental impacts of the Swiss collection and recovery systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE): a follow-up[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409 (10): 1746–1756.
- [18] BLENGINI G A, GARBARINO E. Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18 (10–11): 1021–1030.
- [19] KLOEPFFER W. Life cycle sustainability assessment of products[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (2): 89–95.
- [20] JØRGENSEN A, LE BOCQ A, NAZARKINA L et al. Methodologies for social life cycle assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (2): 96–103.
- [21] COLIN JURY, ENRICO BENETTO, DANIEL KOSTER, et al. Life cycle assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2010, 34 (1): 54–66.
- [22] DALGAARD R, SCHMIDT J H, HALBERG N, et al. LCA of soybean meal[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (3): 240–254.
- [23] THOMASSEN M A, DALGAARD R, HEIJUNGS R, et al. Attributional and consequential LCA of milk production[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13 (4): 339–349.
- [24] REHL T, LANSCHKE J, MULLER J, Et al. Life cycle assessment of energy generation from biogas: Attributional vs. consequential approach[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16 (6): 3766–3775.
- [25] ZHANG Q H, WANG X C, XIONG J Q, et al. Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project: case study of Xi'an, China[J]. *Bioresour Technology*, 2010, 101 (5): 1421–1425.
- [26] CHANG Y, RIES R, WANG Y, et al. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input – output LCA model[J]. *Energy Policy*, 2010, 38 (11): 6597–6603.
- [27] MEISTERLING K W, SAMARAS C, SCHWEIZER V, et al. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17 (2): 222–230.
- [28] JESWANI H K, AZAPAGIC A, SCHEPELMANN P, et al. Options for broadening and deepening the LCA approaches[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18 (2): 120–127.
- [29] 丁声俊. 生物能源: 开拓低碳经济之新路 [J]. *国家行政学院学报*, 2010 (3): 28–32.
- [30] PIRES A, CHANG N, MARTINHO G, et al. An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setúbal Peninsula, Portugal[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2011, 56 (1): 7–21.
- [31] MILLER S A, MOYSEY S, SHARP B E, et al. A stochastic approach to model dynamic systems in life cycle assessment[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17 (3): 352–362.
- [32] CHAN H K, WANG X, WHITE G R, et al. An extended Fuzzy-AHP approach for the evaluation of green product designs[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2013, 60 (2): 327–339.
- [33] NOTARNICOLA B, SALA S, ANTON A, et al. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: a review of the challenges[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 399–409.
- [34] IVANOVA D, STADLER K, STEEN-OLSEN K, et al. Environmental impact assessment of household consumption[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20 (3): 526–536.
- [35] IGOS E, RUGANI B, REGE S, et al. Combination of equilibrium models and hybrid life cycle: input-output analysis to predict the environmental impacts of energy policy scenarios[J]. *Applied Energy*, 2015: 234–245.
- [36] PHILIP N, ECKELMAN M J, JAAK J P. Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis[J]. *Plos One*, 2014, 9 (7): e101298.
- [37] EGILMEZ G, KUCUKVAR M, TATARI O. Sustainability assessment of U. S. manufacturing sectors: an economic input output-based frontier approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 53: 91–102.
- [38] GU F, MA B, GUO J, et al. Internet of things and big data as potential solutions to the problems in waste electrical and electronic equipment management: an exploratory study[J]. *Waste Management*, 2017: 434–448.
- [39] KAAB A, SHARIFI M, MOBLI H, et al. Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production[J]. *Science of the Total Environment*, 2019. 664: 1005–1019.
- [40] LI X, WU P, SHEN G Q, et al. Mapping the knowledge domains of Building Information Modeling (BIM): a bibliometric approach[J]. *Automation in Construction*, 2017, 84: 195–206.
- [41] POLLACK J, ADLER D. Emergent trends and passing fads in project management research: a scientometric analysis of changes in the field[J]. *International Journal of Project Management*, 2015, 33 (1): 236–248.
- [42] KACPRZAK M, NECZAJ E, FIJAKOWSKI K, et al. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development[J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 39–46.
- [43] YEHEYIS M, HEWAGE K, ALAM M S, et al. An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2013, 15 (1): 81–91.
- [44] BELDERBOS A, DELARUE E, D'HAESELEER W. Possible role of power-to-gas in future energy systems[C]. *Lisbon: IEEE 12th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2015: 1–5.
- [45] LOZANOVSKI A, WHITEHOUSE N, KO N, et al. Sustainability assessment of fuel cell buses in public transport[J]. *Sustainability*, 2018, 10 (5): 1480.

[责任编辑 张桂霞]