

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.

生命周期影响评价方法及本地化研究进展

谢明辉¹, 满贺诚^{1*}, 段华波², 李雪迎¹, 薛婧³, 孙启宏¹, 廖凤娟¹, 武琛昊¹

1. 中国环境科学研究院

2. 深圳大学土木与交通工程学院

3. 兰州大学经济学院

摘要 为推动我国生命周期影响评价方法的构建, 采用文献梳理法对生命周期影响评价方法及本地化研究的现状与未来发展方向进行分析。首先回顾了生命周期评价的起源与发展, 探讨了生命周期评价在我国取得的进展与存在的不足; 其次对生命周期影响评价理论与方法进行了介绍, 并利用文献计量学方法分析了我国学者在生命周期评价时所使用的研究方法, 结果显示 77% 的研究均采用国外的影响评价方法; 最后梳理了我国生命周期影响评价方法的本地化研究进展, 分析了现阶段生命周期影响评价方法的 3 点不足, 包括所选取的指标及基准值亟须更新, 模型系统性和完整性需要加强, 模型深入研究有待展开, 并提出要探索构建适合我国国情的完整全面的生命周期影响评价方法以及相应的参数基准值, 从而提高我国生命周期评价结果的真实性、准确性, 为环境政策制定以及相关产业发展提供决策支持。

关键词 生命周期评价; 生命周期影响评价; 特征化因子; 中点法; 终点法

中图分类号: X82 文章编号: 1674-991X(2022)06-2148-09 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210544

Research progress on the life cycle impact assessment methods and their localization in China

XIE Minghui¹, MAN Hecheng^{1*}, DUAN Huabo², LI Xueying¹, XUE Jing³, SUN Qihong¹,
LIAO Fengjuan¹, WU Chenhao¹

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. School of Civil and Traffic Engineering, Shenzhen University

3. School of Economics, Lanzhou University

Abstract In order to promote the construction of life cycle impact assessment (LCIA) methods in China, the current situation and future development direction of LCIA methods and their localization research were analyzed by the literature review. Firstly, the origin and development of life cycle assessment (LCA) were reviewed, and the progress and shortcomings of LCA in China were discussed. Secondly, the theories and methods of LCIA were introduced, and the impact assessment methods used by Chinese scholars in LCA were analyzed using the bibliometric method. The results showed that 77% of the studies adopted foreign impact assessment methods. Finally, the localization research progress of LCIA methods in China were combed, and three deficiencies of LCIA methods at this stage were found, namely, the need to update the selected indicators and benchmark values, the need to strengthen the systematicness and integrity of the model, and the need to carry out the in-depth research of the model. It was proposed that complete and comprehensive LCIA methods and corresponding parameter benchmark values suitable for China's national conditions should be explored and built, so as to improve the authenticity and accuracy of China's LCA results and provide decision support for China's environmental policy-making and related industrial development.

Key words life cycle assessment; life cycle impact assessment; characterization factor; mid-point method; end-point method

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1502804)

作者简介: 谢明辉 (1981—), 男, 研究员, 博士, 主要从事生命周期评价研究, huibird82@163.com

* 通信作者: 满贺诚 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事生命周期评价研究, sxdxmhc@163.com

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)起源于20世纪60年代末美国可口可乐公司对饮料瓶的选择研究^[1]。1997年,国际标准化组织发布ISO 14040系列标准,对生命周期评价的定义、框架、步骤等进行了明确的界定。在此后的二三十年里,随着资源的愈发紧缺以及人们环保意识的提高,生命周期评价理论与实践有了较快发展,其核心部分——生命周期影响评价(life cycle impact assessment, LCIA)的本地化方法研究工作也在各国相继展开。经过探索,一些国家提出了基于本地区的生命周期影响评价方法准则,使生命周期评价在本国环境政策的制定中发挥了重要作用。在此基础上,各国也在探索世界范围内适用性更广泛的生命周期影响评价方法。

我国于1998年将ISO 14040标准体系转化为国家标准,即GB/T 24040系列标准^[2],使得生命周期评价更加规范。但是,在生命周期影响评价方法的本地化研究方面进展缓慢。笔者系统梳理了目前生命周期影响评价方法的国内外研究进展,并基于文献计量学对我国的生命周期影响评价方法学研究进行分析,以期建立适用于我国的生命周期影响评价方法提供支撑。

1 生命周期评价概述

生命周期评价是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价,主要包括目标和范围的确定、清单分析、影响评价、结果解释4个阶段^[3]。其中,生命周期影响评价是生命周期评价的核心部分,是根据清单分析阶段获取的数据进行量化评价,以便确定产品系统对外部环境的潜在影响程度,主要包括分类、特征化、标准化、加权等步骤。

生命周期评价在我国有了较快进展,主要体现在本地化数据库建设方面。进行生命周期评价的数据具有多样性和地域性特点,因此拥有高质量的本地化数据库是我国生命周期评价得以发展的一个重要前提。经过不懈努力,我国生命周期评价的数据库建设取得了较大进展。中国科学院杨建新团队先后对我国钢材、化石能源、省级火电的生命周期清单进行了分析,并在2012年建立了中国科学院的LCA数据库(CAS-RCEES)^[4]。四川大学王洪涛团队总结提出了建立中国LCA数据库的基本方法并开展实际的数据收集、建模和计算工作,联合亿科环境科技公司共同建立了包含煤炭、电力、运输等基础工业系统的中国生命周期参考数据库(CLCD)^[5]。北京工业大学的聂祚仁团队建立了中国材料环境负荷

数据库(Sino-Center 2.0),该数据库包括12万余条基础数据,内容涵盖电力产品清单、化石能源产品清单、交通运输清单、钢铁材料清单、建筑材料清单等68类材料及过程清单^[6]。山东大学洪静兰团队开发了基于企业生产过程原始数据集合与不确定性分析基础上的中国生命周期清单基础数据库(CPLCID),该数据库涵盖了我国重点工业行业的典型产品、污水处置、城市生活垃圾、土壤生物修复等基础生命周期数据^[7]。虽然我国生命周期评价数据库建设取得了一定成果,但是由于没有统一的技术指南,目前还尚未建立起广泛适用、行业全覆盖、动态调整的生命周期评价数据库。此外,本地化生命周期影响评价方法的缺失也是制约我国生命周期评价进一步发展的重要因素。我国学者现阶段进行生命周期评价时主要采用国外的模型方法,如CML2001和Eco-indicator99。由于地域、气候、资源、文化等方面的差异,使用国外模型方法对我国产品进行生命周期评价并不能完全准确地反映我国产品生命周期过程中对环境的潜在影响。尤其在现阶段,我国愈发重视对产品环境影响的分析,建立起适用于我国国情的生命周期影响评价方法对生命周期评价的发展十分重要。为此,笔者重点对生命周期影响评价方法展开探讨。

2 生命周期影响评价方法

生命周期影响评价方法根据评价目的的差异分为中点法(mid-point)和终点法(end-point)2类。中点法也称为面向问题的方法,重点关注产品全生命周期排放物质对环境本身造成的潜在影响,其环境影响机理主要涉及排放到空气、水、土壤等介质中的物质在环境中的迁移转化规律。中点法将清单分析的结果分别归入气候变化、酸化、富营养化等环境影响类型中,以污染物当量来表征环境影响(如以CO₂当量来表征全球变暖影响),计算过程不确定性低,结果的科学性较高,主要的中点法有EDIP^[8]、CML2001^[8]、EPS^[9]、LUCAS^[10]、TRACI^[11]等。终点法是以损害评估为主的方法,更多地关注受体(如人体健康、生态系统、资源等)暴露于排放物质后所产生的综合环境损害,是进入20世纪以来生命周期影响评价方法研究的热点,终点法将清单分析的结果纳入到人体健康、生态系统、资源等类别中并对损害程度进行建模评估。由于该方法开展研究的时间较短,而且涉及环境科学、环境气象学、毒理学、流行病学等多学科交叉研究,因此评估结果的不确定性略高于中点法,但该方法未来影响评价方法发

展的趋势。当前主要的终点法有 Eco-indicator 99^[12]、IMPACT2002+^[13]、ReCiPe^[14]等。笔者选取了国外生命周期影响评价方法应用较多的 EDIP、CML (中点法)和 Eco-indicator99、ReCiPe(终点法)进行简要介绍。

EDIP 方法是丹麦技术大学、丹麦环境保护部以及丹麦的工业公司提出的一种中点法,包括 EDIP97 方法和 EDIP2003 方法。EDIP97 方法的影响类别包括环境影响和资源消耗,EDIP2003 方法在此基础上提出了新的特征化因子及标准化参数,主要包括酸化、水体富营养化、人体毒性、生态毒性等。虽然 EDIP 方法经过近 20 年的发展已较为成熟,得出的结果准确性较高,但是该方法也有局限性,如在标准化步骤中只考虑了过去年度的排放量,会导致标准化结果偏大。

CML 方法是荷兰莱顿大学环境研究中心在国际标准化组织发布的 ISO 14040 系列标准的基础上开发生命周期评价方法。该方法是面向问题的方法,是基于传统生命周期清单分析特征化和标准化的方法,影响类别主要分为材料和能源消耗(非生物资源消耗和生物资源消耗)、污染(温室效应的加强、臭氧层耗竭、人类毒性、生态毒性、酸化、其他)和损害 3 类。该方法的优点是可减少假设的数量和模型的复杂性。

Eco-indicator99 方法是荷兰 PRé 咨询公司在 Eco-indicator95 方法基础上改进的一种终点法,终点

损害类型主要分为人体健康损害、生态系统损害、资源耗竭。此外,该方法也可以提供中点评价结果,主要考虑的中点影响类型有致癌、呼吸系统影响、全球变暖、辐射、酸化、富营养化、生态毒性、土地占用、矿产资源、化石燃料等。

ReCiPe 方法是由荷兰 PRé 咨询公司和莱顿大学在 Eco-indicator99 和 CML 方法基础上开发出的中点法和终点法相结合的方法,可以通过模型同时提供中点法和终点法的结果,从而弥补了其各自的缺陷。该方法的终点损害类型主要分为人体健康损害、生态系统损害、资源耗竭,中点影响类型分为全球气候变暖、土壤酸化、水资源消耗等 18 个类别。

上述生命周期影响评价方法不论是中点法还是终点法,都是基于特定区域开发生命周期影响评价模型,还没有一套完整的适用于世界范围的模型方法。为指导全球的环境影响评价指标选取和量化评估工作,联合国环境规划署环境生命周期影响评价指标全球指南项目组曾于 2016 年和 2019 年发布了 2 版 *Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators*^[15-16],第 1 版主要介绍了气候变化对人类健康的影响、细颗粒物对人类健康的影响、水短缺对人类健康的影响、土地利用对生物多样性的影响 4 个指标;第 2 版主要介绍了人类毒性、生态毒性、自然资源(矿产资源)、酸化和富营养化、土壤质量及其对生态系统的影响 5 个指标。表 1 介绍了上述指标的影响路径及评价模型。

表 1 生命周期影响评价指标介绍

Table 1 Introduction of life cycle impact assessment indicators

影响类别	影响路径	评价模型
气候变化	CO ₂ 等温室气体排放会增加大气对辐射的吸收,引起气温升高并带来短期和长期气候变化问题	短期:全球变暖潜值GWP100。长期:全球温度变化潜力GTP100 ^[17]
细颗粒物	PM _{2.5} 排放到空气中会被人体吸入,时间越久其在体内积聚越多,从而造成人体健康风险	USEtox模型 ^[18]
水短缺	家庭用水短缺会使人们摄入低质量不卫生的水,导致腹泻等传染病,影响人体健康;农业用水短缺会使农业与渔业产量减少,造成因粮食供应不足,进而导致人体营养不良	因果链模型 ^[19-22]
土地利用	土地利用变化通过改变土壤性质和植被覆盖率对物种与生态系统造成影响,进而影响生物多样性	潜在物种损失模型 ^[23-24]
人类毒性	产品的化学物质排放到环境中,通过空气、食物等途径对人类健康(癌症和非癌症)造成影响	USEtox模型 ^[25-27]
生态毒性	产品的化学物质排放到环境中,通过物种摄入及与其他物种相互作用,对生态系统造成损害	USEtox模型 ^[28-29]
陆地酸化	硫氧化物、氮氧化物等物质排放到空气中并反应生成酸化或氧化还原物质,沉积到陆地或植被表面,最终进入土壤,造成陆地系统的酸化	中点法:陆地酸化潜力模型 ^[30] 。终点法:陆地生态系统损害模型 ^[31]
富营养化(淡水)	限制性营养物质(如无机磷和氮化合物等)过量排放到水体中,导致浮游植物生长,溶解氧浓度降低,进而造成淡水的富营养化	中点法:淡水富营养化潜力 ^[32] (以磷当量计算)。终点法:磷对淡水生态系统的损害 ^[32]
富营养化(海水)	限制性营养物质(如无机磷和氮化合物等)过量排放到水体中,导致浮游植物生长,溶解氧浓度降低,进而造成海水的富营养化	中点法:海水富营养化潜力 ^[33] (以氮当量计算)。终点法:氮对海水生态系统的损害 ^[34]
矿产资源	由于人类活动造成在技术领域利用矿产资源(铜、石膏、沙等)为人类提供价值的潜力损失	损耗法 ^[35-36] 、未来努力法 ^[37-40] 、热力学核算法 ^[41-43] 、供应风险法 ^[44-46]
土壤质量	由于人类活动造成土地利用变化,使得土壤物理、化学、生物性质发生改变	土壤有机碳模型 ^[47] 、土壤侵蚀模型 ^[48] 、生物生产力模型 ^[49]

3 生命周期影响评价方法本地化研究进展

目前我国使用最多的本地化生命周期影响评价方法主要是杨建新等^[50]建立的中国产品生命周期影响评价方法(LCIA-Y)和王洪涛^[51]建立的节能减排综合评价方法(ECER)。

杨建新等^[50]在 2001 年以 EDIP 模型方法为基础,建立了包括环境影响类别选择、数据标准化、加权评估以及计算环境影响负荷 4 个步骤的生命周期影响评价方法。该方法标准化采用了 1990 年我国人均环境基准值,加权评估采用了 2000 年我国政府污染物削减目标确定权重,并通过环境影响负荷(EIL)指标来表征产品在整个生命周期中对环境压力的大小,具体计算方法如下:

$$EIL = \sum WP(j) = \sum WF(j) \times \frac{EP(j)}{ER(j)_{1990}} = \sum \left\{ \frac{ER(j)_{1990} \times EP(j)}{ER(j)_{2000}} \right\} \quad (1)$$

式中:WP(j)为加权后的各种环境影响潜值;WF(j)为资源的可供应期;ER(j)₁₉₉₀为 1990 年标准化基准值;ER(j)₂₀₀₀为 2000 年标准化基准值;EP(j)为产品系统对第 j 种潜在环境影响的贡献;Q(j)i为第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境的影响量;EF(j)i为第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境影响的当量因子。对于我国来说,j={全球变暖,臭氧层损耗,酸化,富营养化,光化学臭氧合成,固体废物,危险废物,烟灰尘}。该方法首次建立了我国的生命周期环境影响评价指标体系,探讨了各种环境影响的标准化基准值及权重的大小。但该方法所确定的基准值时间较久远,

现在已经不能反映影响评价的实际情况。此外,该方法所选取的环境影响类别也需根据我国现阶段生态环境保护的实际情况进行调整。

王洪涛^[51]在“十二五”时期根据国家节能减排政策目标,建立了一种面向政策目标的节能减排综合评价指标。该综合指标包括了“十二五”中规定的主要约束性指标,即初级能耗、工业用水量、CO₂排放量、SO₂排放量、COD 排放量、NO_x排放量、氨氮排放量 7 项指标,为了具有可比性,将政策目标统一换算为“十二五”期间 GDP 的减少率,并以 2010 年相应指标的消耗或排放总量作为全国基准参考值。具体计算方法如下:

$$ECER = \sum_{i=1}^7 \frac{A_i}{T_i \times N_i} \times P_i \quad (2)$$

式中:ECER 为节能减排综合评价指标;A_i为评价指标;T_i为可比的节能减排政策目标;N_i为 2010 年对应指标的全国基准值;P_i为各项政策目标的权重。该方法通过去除量纲实现可比的途径,将生命周期评价和节能减排的政策目标结合起来评估节能减排的效果,但是模型的评价指标较单一,且标准值较陈旧。

为了更广泛地研究我国学者在进行生命周期影响评价时所采用的方法,基于文献计量学以“生命周期评价”为检索关键词,通过中国知网对国内发表的中文期刊进行计量分析,检索时间为首次出现以“生命周期评价”作为关键词的 1995 年,至 2020 年结束,共检索出 827 条结果,各年份发表文献数量及趋势如图 1 所示。

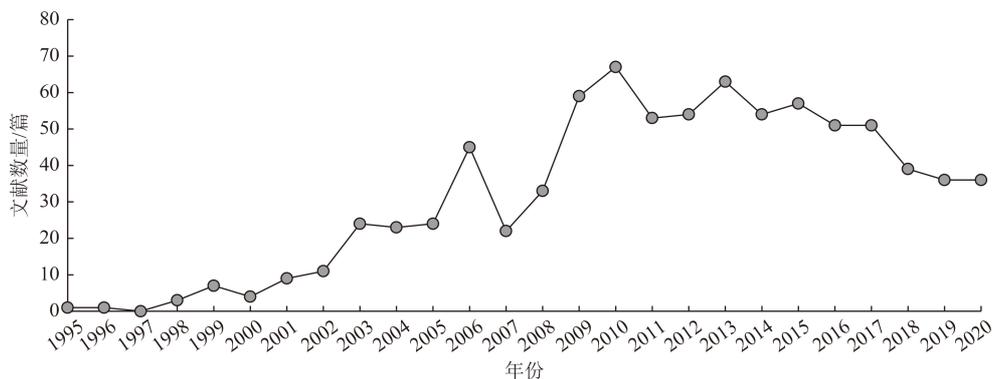


图 1 以生命周期评价为关键词的各年份发表文献数量

Fig.1 Number of published literatures in each year with the key words of life cycle assessment

通过对检索出的 827 篇文献进行关键词分析,按关键词出现频数由高到低排列,前 10 名的关键词分别为生命周期评价、LCA、环境影响、生命周期、环境影响评价、环境负荷、清单分析、生命周期评价

方法、生命周期评价(LCA)和碳足迹,相应各关键词出现频数如图 2 所示。

从图 2 中可见,在检索出的 827 篇文献中,以生命周期评价方法为关键词发表的论文数量并不多,

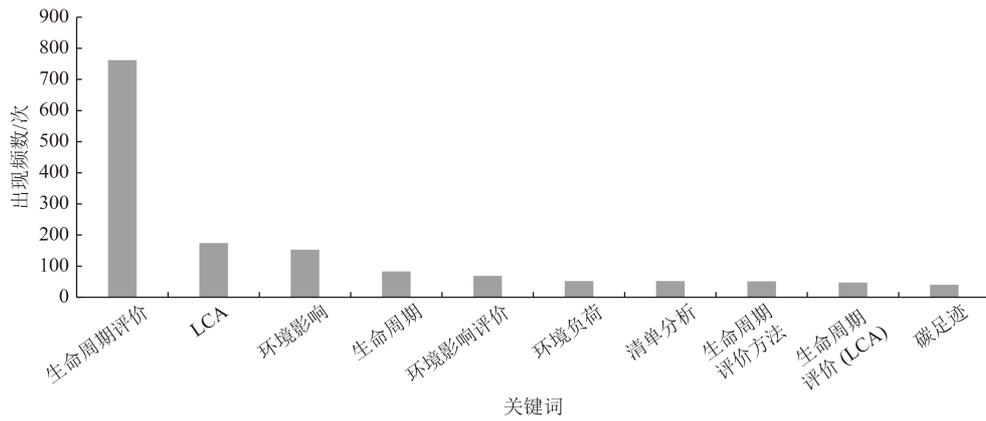


图 2 检索出的文献关键词出现频数

Fig.2 Frequency chart of key words in retrieved literature

表明我国学者目前仍较多开展生命周期评价应用研究,对影响评价方法的本地化研究较少。

进一步对检索出的 827 篇文献进行筛选,文中明确使用影响评价方法开展生命周期评价的有 243 篇,其中使用国外方法的共 186 篇,占比为 77%,使用国内方法的有 57 篇,占比为 23%(图 3)。从图 3 还可以看出,目前我国学者在生命周期影响评价过程中使用的国外方法以 CML 和 Eco-indicator99 方法为主,分别为 54 和 41 篇,合计占国外方法的 51%;国内方法以 LCIA-Y 和 ECER 为主,分别是 34 和 17 篇,合计占国内方法的 90%。由此可见,目前我国学者在进行生命周期影响评价时主要采用国外方法,采用国内方法的较少。

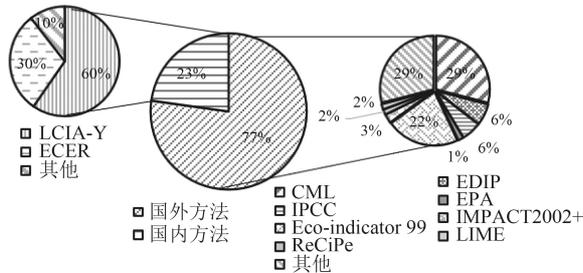


图 3 我国学者使用的生命周期影响评价方法分类

Fig.3 Classification chart of life cycle impact assessment methods used by Chinese scholars

对使用国内方法的文献深入研究发现,从时间维度看,2011 年前我国学者使用的国内影响评价方法以 LCIA-Y 为主,之后由于 ECER 方法参数较新,多以 ECER 方法为主。采用 LCIA-Y 方法的 34 篇文献中,有 3 篇出自该方法研究团队,自用率占比为 9%,其余 31 篇出自国内其他学者,占比为 91%,说明该模型影响较大,并已在一定程度上推广使用;采用 ECER 方法的 17 篇文献中,有 6 篇出自该方法研究团队,自用率占比为 35%,其余 11 篇文献中都较多采用 eBalance 软件中的缺省特征化因子。整体来

看,虽然近年来我国学者使用本地化影响评价方法的文献数量有所增加,但是本地化影响评价方法的研究仍未取得较大进展,需要加快推进。

此外,也有国内学者对单一或多个影响类别的评价模型开展了本地化研究工作^[52-53]。杨冬璐等^[54]基于水足迹分析法建立了铅酸电池和造纸行业的废水生命周期影响评价模型,在影响评价方法中针对致癌性影响、非致癌性影响、淡水生态毒性、水体富营养化和水稀缺性 5 个影响类别,综合考虑我国省际平均气温、土地和水域面积、风速、土壤类型、人口数量和食物摄入量等指标对方法进行修正。

侯萍等^[55]基于 CML 方法中的非生物资源消耗 (ADP) 因子,通过引入中国的资源自给率修正,得出了非生物资源消耗因子 (CADP) 及其指标;张培等^[56]也对 ADP 进行了类似上述方法的本地化修正,特征化时将基准物质改为铁当量,从而建立了钢铁产品生命周期影响评价方法。学者们对 ADP 模型的改进考虑了资源和能源的稀缺度,可以使量化结果更加符合中国国情,为研究我国资源和能源消耗的影响评价提供了方法支撑。

苏向东等^[57]提出了综合比例系数法,对有色金属材料生命周期环境影响进行量化。其计算公式如下:

$$ELV_{\alpha} = \sum W_j \times I_{aj} \quad (3)$$

$$W_j = \sum K_i \times P_i \quad (4)$$

$$I_{aj} = \frac{|OD|}{|OF_m|} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{e_{im}} \right)^2} \quad (5)$$

式中: ELV_{α} 为材料的环境负荷值; OD 为坐标空间中原点 to 集合 D 点的距离; OF_m 为坐标空间中原点 to 集合点 F 的距离; W_j 为第 j 个环境要素的环境负荷比例系数; K_i 为第 j 个环境要素中第 i 个单因子的相对环境负荷; P_i 为第 j 个环境要素中第 i 个单因子占总量的百分比; I_{aj} 为综合环境负荷指数; C_i 为制备单

位产量材料时第 i 个单因子的实际消耗量; e_{im} 为制备单位产量材料时第 i 个单因子国家或行业规定或现有的最低投入量。该方法的优点是计算简便,既考虑到主要因子的作用,也不会忽略次要因子的作用。其不足之处在于只能应用于有色金属行业,适用面较窄。

上述方法都是基于中点法的生命周期影响评价方法的本地化研究,而针对基于终点法生命周期影响评价方法的本地化研究还相对较少。Chen 等^[58]研究发现,应用国外生命周期影响评价模型时,由于模型特征化因子与我国实际情况不同而产生较大误差,因此以我国大气中混合污染物多环芳烃的排放对人体健康损害为例,对适用于我国的人体健康类别的特征化因子和基准值进行了探索。此外,其研究团队提出了基于关键因子筛选的简易本土化的生命周期影响评价模型,并且首次证实了在污染物环境浓度较低条件下,当前国际通用的人体健康毒性生命周期影响评价理论将不再具有适用性^[59]。Chen 的研究团队采用毒理学试验方法对特征化因子进行了本地化研究,提高了 LCA 方法在我国的适用性,但是其研究成果主要聚焦在单一终点破坏类别。

李雪迎等^[60]构建了适用于我国的终点损害类别的生命周期影响评价模型,核算了人体健康、生态系统和资源 3 个终点损害类别的人均基准值。该模型选取了致癌作用、细颗粒物形成、气候变化、水资源消耗、光化学臭氧形成、生态毒性、酸化、富营养化、土地利用、矿产资源、化石燃料共 11 个环境影响类别,通过查阅文献获得上述环境影响类别下污染物(或资源、能源)的损害因子,以我国为基准区域,以 2017 年为基准年,核算出我国人体健康、生态系统和资源 3 个终点损害类别的人均基准值分别为 0.019 DALY(disability adjusted life years, 伤残调整寿命年)、 6.08×10^{-5} species、2 467.42 MJ。李雪迎等的研究成果补充和完善了我国生命周期影响评价的理论方法,提升了 LCA 在我国应用时的科学性和合理性,但是其研究主要聚焦在人均基准值方面,并未对特征化因子进行本地化探索。

4 生命周期影响评价方法本地化研究的不足及对策

现阶段,我国学者进行生命周期影响评价时所使用的的方法仍以国外方法为主,本地化的生命周期影响评价方法研究起步较晚。在对我国学者提出的本地化生命周期影响评价方法进行详细梳理后,总

结出以下三点不足并提出相应对策。

(1)我国已有的生命周期影响评价模型所选取的指标及基准值亟须更新。其中,杨建新等结合我国国情建立的以 1990 年为基准值的影响评价模型在现阶段已经无法客观真实地反映生命周期评价的结果;王洪涛建立的影响评价模型中的节能减排权重因子虽然已经被纳入我国的生命周期评价软件 eBalance 中并得到了商业化应用,但是其模型指标主要是基于“十二五”的减排目标,受此限制,在“十二五”后的研究中并未得到学者们的持续使用与关注。因此,针对现阶段突出的环境问题,丰富评价指标并更新其基准值对提升我国生命周期影响评价结果的科学性、准确性至关重要。

(2)需尽快建立系统完整的可被广泛使用的本地化生命周期影响评价模型。在 *Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators* 中建议研究机构和人员加强协调,在总体框架的指导下系统地建立和完善影响评价指标,并确保影响评价指标的透明性。在我国,Chen 的研究团队采用毒理学试验方法得到了本地化的特征化因子,但其研究主要聚焦在人体健康影响类别方面;李雪迎等对不同终点类别的基准值进行了本地化研究,但是特征化因子仍然参考 Eco-indicator99 和 ReCiPe 方法中的成果,并未对各影响类别的特征化因子进行本地化研究。考虑到系统完整的本地化生命周期影响评价模型的建立需要跨专业、跨学科的大量基础性研究工作,今后国内各研究机构和学者需要加强合作,建立统一的生命周期影响评价流程,将各研究领域的成果整合到一起,尽快建立起覆盖全面、参数完善、基准统一的本地化生命周期影响评价模型。

(3)生命周期影响评价模型的深入研究较少。目前我国学者对本地化生命周期影响评价的研究多集中于环境影响分类表征及基准值的确定上,对影响评价前沿性研究较少。如在影响评价指标完善方面, *Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators* 中建议未来要研究开发基于不同时间和空间尺度的生态系统服务指标,将生态脆弱性和生态系统服务功能多样性等纳入到指标中,以便对相应损害进行量化。再者如环境影响权重因子确定方面,货币化方法由于更易于人们理解和交流,能将产品生命周期的潜在环境影响与经济成本密切地联系起来,近年来在国外已有较多的研究^[61-63],但我国生命周期影响评价货币化的研究较少。陈娴等^[64]对我国光伏组件的生命周期环境影响

进行了货币化核算,但是货币化所用参数是基于欧洲的数据,由于其对人体健康和生态质量的支付意愿远高于我国实际水平,影响了评价结果的真实性和合理性。因此,在各级科研项目设置中,要加强对本地化生命周期影响评价深入研究课题的设置,鼓励相关领域科研人员开展生命周期影响评价方法的前沿性研究。

5 结语与展望

通过分析生命周期评价在我国的发展及所面临的问题,以及国内外生命周期影响评价方法的研究进展,可以看出我国生命周期评价研究虽然起步较晚,但是发展迅速,已经建立起了部分行业的本地化数据库和一些单一影响类别的生命周期影响评价方法。但由于缺乏完整类别的广泛适用的生命周期影响评价本地化方法,导致我国生命周期评价所发挥的作用仍有局限。当前对生命周期影响评价方法的研究已经成为各国、各地区生命周期评价研究的热点,在未来的研究中,我国科研机构 and 学者之间要加强合作,努力探索构建完整全面的适合我国国情的生命周期影响评价方法以及相应的参数基准值,使我国生命周期评价结果更加真实、准确。在此基础上,要加强生命周期环境影响评价方法的前沿研究,如生命周期环境影响货币化权重研究,建立起我国的支付意愿数据库,使生命周期环境影响货币化值更符合本国实际,从而为深入打好污染防治攻坚战提供精准支撑,为我国环境经济政策制定以及相关产业发展提供决策依据。

参考文献

- [1] 白璐,孙启宏,乔琦.生命周期评价在国内的研究进展评述[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(5): 2553-2555.
BAI L, SUN Q H, QIAO Q. Review of research progresses of life cycle assessment in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(5): 2553-2555.
- [2] 马雪,王洪涛.生命周期评价在国内的研究与应用进展分析[J]. *化学工程与装备*, 2015(2): 164-166.
- [3] 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 原则与框架: GB/T 24040—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 杨建新,刘炳江.中国钢材生命周期清单分析[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(4): 519-522.
YANG J X, LIU B J. Life cycle inventory of steel products in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4): 519-522.
- [5] 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.
- [6] 李小青,龚先政,聂祚仁,等.中国材料生命周期评价数据模型及数据库开发[J]. *中国材料进展*, 2016, 35(3): 171-178.
LI X Q, GONG X Z, NIE Z R, et al. Data model and database development for materials life cycle assessment in China[J]. *Materials China*, 2016, 35(3): 171-178.
- [7] 王玉涛,王丰川,洪静兰,等.中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7179-7184.
WANG Y T, WANG F C, HONG J L, et al. The development of life cycle assessment theory research in China and analysis of countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7179-7184.
- [8] DREYER L C, NIEMANN A L, HAUSCHILD M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(4): 191-200.
- [9] STEM B. A systematic approach to environmental strategies in product development (EPS), Version 2000: general system characteristics, models and data of the default methods[R]. Chalmers University of Technology, Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems, 1999.
- [10] TOFFOLETTO L, BULLE C, GODIN J, et al. LUCAS: a new LCIA method used for a Canadian-specific context[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(2): 93-102.
- [11] BARE J. TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, 13(5): 687-696.
- [12] GOEDKOOOP M, SPRIENSMA R. The Eco-Indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment[J]. *Methodology Report*, 1999, 11(1): 95.
- [13] 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.
- [14] OWSIANIAK M, LAURENT A, BJØRN A, et al. IMPACT 2002+, ReCiPe 2008 and ILCD's recommended practice for characterization modelling in life cycle impact assessment: a case study-based comparison[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(5): 1007-1021.
- [15] VERONES F, HENDERSON A D, LAURENT A, et al. Global guidance for life cycle impact assessment indicators (volume 1)[M]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2016.
- [16] FRISCHKNECHT R, JOLLIET O. Global guidance for life cycle impact assessment indicators (volume 2)[M]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2019.
- [17] SHINE K P, FUGLESTVEDT J S, HAILEMARIAM K, et al. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases[J]. *Climatic Change*, 2005, 68(3): 281-302.
- [18] BENNETT D H, MCKONE T E, EVANS J S, et al. Defining

- intake fraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(9): 207A-211A.
- [19] FANTKE P, JOLLIET O, EVANS J S, et al. Health effects of fine particulate matter in life cycle impact assessment: findings from the Basel Guidance Workshop[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(2): 276-288.
- [20] MOTOSHITA M, ITSUBO N, INABA A. Development of impact factors on damage to health by infectious diseases caused by domestic water scarcity[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(1): 65-73.
- [21] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(11): 4098-4104.
- [22] MOTOSHITA M, ONO Y, PFISTER S, et al. Consistent characterisation factors at midpoint and endpoint relevant to agricultural water scarcity arising from freshwater consumption[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23(12): 2276-2287.
- [23] CURRAN M, MAIA de SOUZA D, ANTÓN A, et al. How well does LCA model land use impacts on biodiversity: a comparison with approaches from ecology and conservation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(6): 2782-2795.
- [24] CHAUDHARY A, VERONES F, de BAAN L, et al. Quantifying land use impacts on biodiversity: combining species-area models and vulnerability indicators[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16): 9987-9995.
- [25] ROSENBAUM R K, BACHMANN T M, GOLD L S, et al. USEtox: the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13(7): 532-546.
- [26] FANTKE P, ERNSTOFF A S, HUANG L, et al. Coupled near-field and far-field exposure assessment framework for chemicals in consumer products[J]. *Environment International*, 2016, 94: 508-518.
- [27] JOLLIET O, ERNSTOFF A S, CSISZAR S A, et al. Defining product intake fraction to quantify and compare exposure to consumer products[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(15): 8924-8931.
- [28] JOLLIET O, ROSENBAUM R, MCKONE T E, et al. Establishing a framework for life cycle toxicity assessment. findings of the Lausanne review workshop[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(3): 209-212.
- [29] ROSENBAUM R K, MARGNI M, JOLLIET O. A flexible matrix algebra framework for the multimedia multipathway modeling of emission to impacts[J]. *Environment International*, 2007, 33(5): 624-634.
- [30] ROY P O, HUIJBREGTS M, DESCHÈNES L, et al. Spatially-differentiated atmospheric source-receptor relationships for nitrogen oxides, sulfur oxides and ammonia emissions at the global scale for life cycle impact assessment[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 62: 74-81.
- [31] AZEVEDO L B, van ZELM R, ELSHOUT P M F, et al. Species richness-phosphorus relationships for lakes and streams worldwide[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(12): 1304-1314.
- [32] HELMES R J K, HUIJBREGTS M A J, HENDERSON A D, et al. Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(5): 646-654.
- [33] MAYORGA E, SEITZINGER S P, HARRISON J A, et al. Global nutrient export from WaterSheds 2 (NEWS 2): model development and implementation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25(7): 837-853.
- [34] COSME N, MAYORGA E, HAUSCHILD M Z. Spatially explicit fate factors of waterborne nitrogen emissions at the global scale[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23(6): 1286-1296.
- [35] GUINÉE J B, HEIJUNGS R. A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1995, 14(5): 917-925.
- [36] SCHNEIDER L, BERGER M, FINKBEINER M. The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2011, 16(9): 929-936.
- [37] VIEIRA M D M, GOEDKOOP M J, STORM P, et al. Ore grade decrease as life cycle impact indicator for metal scarcity: the case of copper[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(23): 12772-12778.
- [38] SWART P, DEWULF J. Quantifying the impacts of primary metal resource use in life cycle assessment based on recent mining data[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 73: 180-187.
- [39] WEIDEMA B P. Using the budget constraint to monetarise impact assessment results[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(6): 1591-1598.
- [40] VIEIRA M, PONSIOEN T, GOEDKOOP M, et al. Surplus cost potential as a life cycle impact indicator for metal extraction[J]. *Resources*, 2016, 5(1): 2.
- [41] DEWULF J, BÖSCH M E, de MEESTER B, et al. Cumulative exergy extraction from the natural environment (CEENE): a comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(24): 8477-8483.
- [42] BÖSCH M E, HELLWEG S, HUIJBREGTS M A J, et al. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to theecoinvent database[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(3): 181-190.
- [43] RUGANI B, HUIJBREGTS M A J, MUTEL C, et al. Solar energy demand (SED) of commodity life cycles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(12): 5426-5433.
- [44] GEMECHU E D, HELBIG C, SONNEMANN G, et al. Import-

- based indicator for the geopolitical supply risk of raw materials in life cycle sustainability assessments[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(1): 154-165.
- [45] SCHNEIDER L, BERGER M, SCHÜLER-HAINSCHE E, et al. The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(3): 601-610.
- [46] BACH V, BERGER M, HENBLER M, et al. Integrated method to assess resource efficiency: ESSENZ[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 137: 118-130.
- [47] BRANDÃO M, CANALS L M. Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(6): 1243-1252.
- [48] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. RUSLE: revised universal soil loss equation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1): 30-33.
- [49] NÚÑEZ M, ANTÓN A, MUÑOZ P, et al. Inclusion of soil erosion impacts in life cycle assessment on a global scale: application to energy crops in Spain[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(4): 755-767.
- [50] 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.
- [51] 王洪涛. 通往节能减排目标的新途径: 生命周期节能减排评价方法[J]. *高科技与产业化*, 2011(08): 49-53.
- [52] 谢明辉, 阮久莉, 白璐, 等. 太阳能级多晶硅生命周期环境影响评价[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(2): 291-296.
- XIE M H, RUAN J L, BAI L, et al. Environmental impacts of solar grade polysilicon based on Life Cycle Assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(2): 291-296.
- [53] 谢明辉, 阮久莉, 乔琦, 等. 基于生命周期评价的多晶硅片环境影响研究[J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(1): 72-77.
- XIE M H, RUAN J L, QIAO Q, et al. Research on environmental impacts of multi-silicon wafer based on Life Cycle Assessment[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(1): 72-77.
- [54] 杨冬璐, 马道天, 洪静兰. 基于生命周期评价的造纸废水的水足迹[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2019, 49(3): 114-119.
- YANG D L, MA X T, HONG J L. Life cycle assessment-based water footprint analysis of paper making wastewater[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2019, 49(3): 114-119.
- [55] 侯萍, 王洪涛, 朱永光, 等. 中国资源能源稀缺度因子及其在生命周期评价中的应用[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1572-1579.
- HOU P, WANG H T, ZHU Y G, et al. Chinese scarcity factors of resources/energy and their application in life cycle assessment[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(9): 1572-1579.
- [56] 张培, 田长生, 黄志甲. 钢铁产品生命周期影响评价方法[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(1): 84-88.
- ZHANG P, TIAN C S, HUANG Z J. Life cycle impact assessment method for iron and steel products[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2007, 24(1): 84-88.
- [57] 苏向东, 王天民, 何力, 等. 有色金属材料的环境负荷定量评价模型[J]. *环境科学学报*, 2002, 22(1): 98-102.
- SU X D, WANG T M, HE L, et al. Quantitative LCA study on non-ferrous metallic materials[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(1): 98-102.
- [58] CHEN W, ZHANG F F, HONG J L, et al. Life cycle toxicity assessment on deep-brine well drilling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 326-332.
- [59] LI X Z, YANG Y, XU X, et al. Air pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons generated by human activities and their health effects in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1360-1367.
- [60] 李雪迎, 白璐, 杨庆榜, 等. 我国终点型生命周期影响评价模型及基准值初步研究[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(11): 2778-2786.
- LI X Y, BAI L, YANG Q B, et al. Preliminary study on endpoint life cycle impact assessment model and normalisation value in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(11): 2778-2786.
- [61] PIZZOL M, WEIDEMA B, BRANDÃO M, et al. Monetary valuation in life cycle assessment: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 170-179.
- [62] DONG Y, HAUSCHILD M, SØRUP H, et al. Evaluating the monetary values of greenhouse gases emissions in life cycle impact assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 538-549.
- [63] HUYSEGOMS L, ROUSSEAU S, CAPPUYNS V. Friends or foes: monetized life cycle assessment and cost-benefit analysis of the site remediation of a former gas plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 258-271.
- [64] 陈娴, 黄蓓佳, 王翔宇, 等. 太阳能光伏组件环境成本的货币化核算研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2019, 58(1): 120-126.
- CHEN X, HUANG B J, WANG X Y, et al. Research on monetary accounting of environmental cost of solar PV[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2019, 58(1): 120-126. □