

引用格式: 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.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.02

生命周期评价方法研究进展

翟一杰¹, 张天祚¹, 申晓旭¹, 马道天², 洪静兰¹

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 青岛 266237; 2. 山东大学威海蓝绿发展研究院, 威海 264209)

摘要: 生命周期评价方法因可针对产业活动的物质流、能量流及其环境效应进行系统地量化与优化, 已成为国际公认的进行环境管理、可持续发展评估和生态设计的必备工具。受制于尚未完善的生命周期清单和生命周期影响评价模型, 当前中国生命周期评价研究存在应用面狭窄、溯源困难、结论冲突、源头减量化难控制等诸多问题。针对上述问题, 本文指出基于过程的、快速的生命周期清单构建方法可实现“微观-中观-宏观-动态”多层次研究; 统一完整的、动态的、适用于中国国情、较高数据质量、可共享的本土化生命周期清单数据库构建仍需进一步推进; 生命周期影响评价模型的选用和修正对科学、精准的生命周期评价研究是十分必要的; 具有时空属性的生命周期影响评价模型亟需进一步提升。最后, 基于中国生命周期评价方法研究现状的梳理和分析结果, 本文对未来生命周期评价的研究方向进行了展望。

关键词: 生命周期评价; 生命周期清单; 生命周期影响评价; 动态化; 区域化

DOI: 10.18402/resci.2021.03.02

1 引言

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种对产品、工艺或活动的全过程, 包括原材料开采、产品生产、运输、使用、废弃物处置, 所消耗的资源以及污染物排放造成的潜在环境影响等进行量化的系统分析方法^[1]。其目的在于识别关键环节, 有效避免或减缓二次污染或污染转移, 实现源头优化管控, 进而开展科学、高效、系统的环境管理。

LCA方法始于20世纪70年代初, 最初被称为资源与环境状况分析。开始的标志是美国中西部资源研究所对可口可乐的产品包装展开的定量分析, 结果表明塑料瓶比玻璃瓶更为环境友好, 该研究结果使可口可乐公司转而使用塑料瓶包装^[2]。1990年, 国际环境毒理学与化学会(SETAC)首次提出了LCA的概念, 并后续多次召开学术讨论会, 对LCA理论和方法进行了探讨^[3]。1993年, 国际标准

化组织(International Standard Organization, ISO)开始起草ISO 14000环境管理系列标准, 并将LCA纳入该体系。1997年6月, ISO 14040标准《环境管理生命周期评价 原则与框架》正式颁布, 其中明确提出LCA的框架包括以下4个部分: 目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释(图1)^[4]。之后以其为总纲, 陆续发布了LCA系列标准; 截至2014年, 10项相关标准已全部公布^[5]。标准化的LCA方法作为一种科学的环境管理工具和量化的决策工具, 被广泛应用于清洁生产评估、产品设计和优化、政策制定等领域^[6,7]。中国从90年代起开展LCA相关研究, 于1998年全面引进ISO 14040系列标准, 将其转化为GB/T 24040系列国家标准^[8]。21世纪以来, 随着中国生态环保力度加大, 政府部门出台多项政策文件来推动LCA应用。工业和信息化部、科技部、财政部于2012年联合发布《关于加强工业节

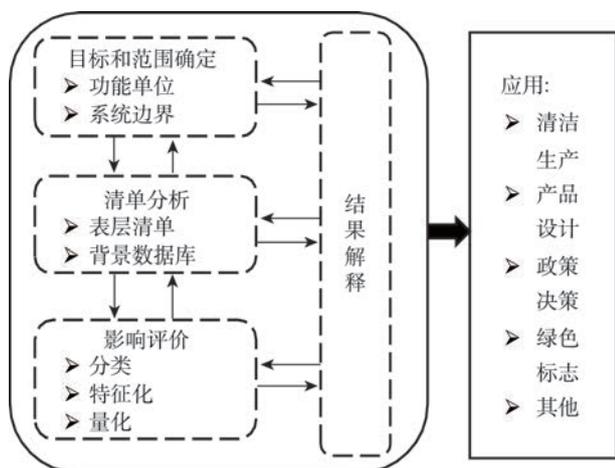
收稿日期: 2020-11-13 修订日期: 2021-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(71671105); 国家重点研发计划项目(2017YFF0206702)。

作者简介: 翟一杰, 女, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为生命周期评价。E-mail: zhaiyijie@mail.sdu.edu.cn

通讯作者: 洪静兰, 女, 辽宁抚顺人, 博士, 教授, 研究方向为生命周期评价。E-mail: hongjing@sdu.edu.cn

2021年3月

图1 生命周期评价框架图^[4]Figure 1 Framework of life cycle assessment^[4]

能减排先进适用技术遴选、评估与推广工作的通知》^[9],提倡采用包括LCA在内的定量化技术评估工具,以提高评估结果的科学性。国务院印发的《中国制造2025》^[10]以及工业和信息化部印发的《工业绿色发展规划(2016—2020年)》^[11]均提出要“强化产品全生命周期绿色管理”。目前,中国LCA的应用研究已涉及多领域,包括金属冶炼^[12,13]、能源^[14,15]、废物处置^[16,17]、建筑^[18,19]和农业^[20,21]等,但在化工领域,尤其是精细化工方面的相关研究仍较为匮乏。此外,中国LCA应用研究多局限于微观层面,存在本土化LCA有效基础数据匮乏、同一对象评价结果一致性差、区域间差异以及技术演进应对性差等难题,进而导致应用面狭窄、溯源困难、结论冲突、源头减量化难控制等诸多问题。究其根源,中国在本土化生命周期清单(Life Cycle Inventory, LCI)数据库和生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)模型构建方面尚未完善。本文重点分析中国LCI和LCIA研究现状、存在问题及对策,并提出进一步完善方向,为推动中国LCA研究的发展提供参考。

2 生命周期清单和数据库的构建

LCI分析是对目标产品、过程或活动的整个生命周期中能源和原材料的投入量及排放量进行的收集和整理过程^[22]。根据方法学原理的不同,清单构建方法可分为基于过程、基于投入产出和混合清单构建方法^[23,24]。基于过程的方法是一种自下而上

的评价方法,具有针对性强、清单数据完善的特点。基于投入产出的方法则与之相反,是一种基于投入产出表、自上而下的清单构建方法。因该方法基于整个国民经济系统,采用该方法可有效提高清单数据的完整性^[23,25]。但由于投入产出表每隔几年发布一次,因此该方法受时间滞后性影响,且存在部门均质化假设^[23]。混合清单构建方法则综合了上述两种方法,该方法起步较晚,研究相对不成熟。基于过程的方法是最为传统的LCI构建方法,是SETAC和ISO所推荐的主流方法^[26,27],本文针对该方法展开详细论述。

2.1 基于过程的清单构建方法简述

基于过程的清单构建方法通常采用实地调查、现场监测或统计资料等途径开展投入和产出数据收集^[28]。在进行数据收集时,应注意从数据的来源可靠性、数据完整性、时间相关性、空间相关性、技术代表性和样本容量等方面对数据的质量进行把关,对质量较低的数据进行重新收集^[5]。该方法理论上需考虑系统边界内所有过程的直接与间接投入和产出数据,因而需要大量的人力和物力条件支持。在实际操作过程中,为减少工作量,通常对数据进行“取舍”处理,即排除对结果影响小于1%的部分,整体排除部分占比不得超过5%。

2.2 多层次、动态清单构建

基于过程的清单构建方法优势在于数据完整性较好,但数据的代表性、时效性、区域与技术适应性十分欠缺。为提高数据的代表性,也为迅速应对中国区域之间生产和环保技术的差异以及快速的工业化进程导致技术本身的迅速变化,山东大学洪静兰团队基于“关键节点及综合识别”的理念,采用“微观-中观-宏观-动态”递进方式,提出了基于过程的、快速的LCI构建方法。即采用基于过程的方法构建行业内典型生产工艺的LCI,运用LCA分析遴选出关键因子;针对所识别出的关键因子采用国家、区域或行业统计数据进行替代;并不断重复上述过程,直至无新的关键因子产生。在基于过程的方法构建传统的静态LCI基础上,结合地理信息技术与国家/区域/行业统计数据,采用此方法可科学、快速地实现中观层次(行业、园区、城市)和宏

观层次(区域、国家)动态LCI构建。目前上述方法已在焦炭生产^[29]、原生铝生产^[30]、湿法炼锌^[13]、粗钢生产^[31]、城市层次污染排放^[32]和国家层次生活垃圾处置^[33]等多层次和多领域得到应用。

2.3 清单数据库构建现状

LCA作为一种数据密集型方法,需要大量基础数据的支撑。在开展LCA研究时,通常针对实景流程(即表层清单)进行实地调研,而背景流程(即背景清单)则来自于LCI数据库^[7]。当前,欧美等发达国家相关研究机构已建立了较为成熟的数据库,包括瑞士的Ecoinvent数据库、德国PE公司的GaBi数据库、丹麦的LCA Food数据库、美国的USLCI数据库、英国的Boustead数据库等^[34]。这些数据库已内置于国际通用的LCA软件(如GaBi, SimaPro等),使得用户使用更为便捷。当前中国部分学者在开展LCA分析时,直接采用国外LCA基础数据量化、管理中国产业活动,会产生极大的误差。以电力结构为例,欧洲是以可再生能源为主^[35],而中国以煤电为主^[36],若采用欧洲的电力流程数据,则不符合中国实际国情。欧盟颁布的产业环境足迹指南中也明确指出直接采用其他地域的LCA数据开展对本地域产品的影响评价不符合数据质量要求^[37]。因此,构建符合中国国情、具有代表性、数据质量高、使用方便的本土化数据库是十分必要的。目前,在国家政策扶持下,中国诸多学者已在本土化清单数据库构建领域开展了一系列研究工作。例如,北京工业大学聂祚仁团队长期从事材料领域的LCA研究,并构建了材料环境协调性评价数据库(SinoCenter),目前该数据库所包含的基础数据总计12万余条,包括钢铁材料、建筑材料、高分子材料、电力清单和化石能源等在内的68类材料及过程清单^[38]。山东大学洪静兰团队依据ISO 14040系列标准构建了包含中国微观、中观和宏观清单数据在内的中国生命周期清单基础数据库(CPLCID),并基于泰勒系列展开的不确定分析进行了数据质量提升^[39];该数据库已涵盖中国重点工业行业典型产品(包括铜、金、铝、玻璃、塑料、造纸、氢氧化钠等)、主要农产品(包括小麦、玉米、水稻等)、能源生产(包括煤电、太阳能、天然气、地热等)、垃圾处置(包括下水

污泥、电子垃圾、危险废弃物、城市生活垃圾等)、道路运输等,数据库中大部分清单已完成了ISO 14040系列标准规定的国内外同行审阅^[34]。此外,中国科学院生态研究中心建立了中国LCA数据库(CAS-RCEES);四川大学王洪涛团队自主开发了中国生命周期参考数据库(CLCD)^[6];宝钢集团开发了含碳钢和不锈钢等主产品在内的生命周期数据库(Baosteel);同济大学建立了含基础能源、汽车替代燃料和运输数据在内的中国替代燃料生命周期数据库^[40]。中国已在LCI数据库构建方面取得了重要的成果,但受限于统一的技术指南和明确的发展路线的缺失^[7],目前尚未构建一个统一完整的、动态的、适用于中国国情、较高数据质量的本土化LCI数据库。因此,本土化清单数据库的建设仍然是目前中国LCA研究发展的重要方向之一。另外,受制于各种因素,各单位建立的LCI数据库很难共享,进而严重制约了LCA的推广应用。

3 生命周期影响评价的论述

LCIA是对LCI中汇编的资源消耗与污染排放展开的定性或定量的一个评估过程,是连接清单和影响的桥梁^[1]。目前尚有部分LCA研究是停留在清单层次^[41,42],未评估其所造成的潜在环境影响。Li等^[43]以多环芳烃为例对比了清单层次和影响层次分析结果的不同,结果显示在总的多环芳烃排放量中占比不到10%的苯并芘和苯并蒽对人体健康的影响则超过了整体健康负荷的85%。该研究结果表明基于影响层面提出的建议相较于基于清单层面的管理更为科学、合理。基于SETAC建立的框架,LCIA通常包括分类、特征化和量化3个步骤^[44],其核心公式如下所示:

$$LCIA_c = \sum_{i=1}^n CF_{ci} \times LCI_i \quad (1)$$

式中:LCIA、CF、LCI分别为生命周期影响、特征化影响因子、生命周期清单,下标*i*、*c*分别表示物质和影响类别。其中特征化影响因子通常取自于所选定的LCIA模型。

3.1 LCIA模型简述

LCIA模型通常分为两类,即问题导向型和损伤导向型^[5]。问题导向型模型是在中间点层次展开

2021年3月

的分析,将资源消耗和污染物排放转化为一系列的环境问题,该系列模型着眼于各类环境问题的影响机理,有助于识别特定环境问题,并且参数的不确定性较低^[45]。目前比较常用的问题导向型模型包括CML 2001^[46]、EDIP^[47]、ILCD^[48]、TRACI^[49]模型等。损伤导向型模型则包含中间点和终点两个层次,着眼于评估污染物排放和资源消耗对人体健康、生态破坏和资源耗竭造成的损伤。该系列模型更有助于环境决策,但参数的不确定性较高^[50]。目前较常用的损伤导向型模型包括Eco-indicator 99^[51]、LIME^[52]、ReCiPe 2008^[53]、ReCiPe 2016^[54]、IMPACT 2002+^[55]、IMPACT World+^[56]模型等。

3.2 LCIA 差异性结果的归因分析

在LCIA过程中,针对同一研究对象,选用不同模型,会存在结论冲突的问题,究其原因主要是LCI与LCIA模型特征化因子的不匹配、LCIA模型中特征化因子缺失。以Ecoinvent version 3数据库中的石油炼制流程(petroleum refinery operation RoW; ID: EI3ADUNI000061667503757)为例,采用SimPro 8.4计算软件,分别选择TRACI、CML、ReCiPe 2016和IMPACT World+模型展开分析。图2展示了引发健康负荷的关键物质,即对总影响的贡献率超过5%的物质。结果表明采用TRACI模型识别出的关键物质为排放到水体的锌、砷、铬、钡,以及排放

到空气的汞。采用CML模型识别出的关键物质为排放到水体的钡,排放到空气的镍、铬和苯;排放到水体的硒也有一定程度的影响。采用ReCiPe 2016模型识别出的关键物质为排放到水体的六价铬,排放到水体的锌和铬的影响次之。采用IMPACT World+模型识别出的关键物质为排放到空气的汞,排放到水体的六价铬、砷、钡和镉也有显著影响。导致上述差异性的原因分析如下:CML和ReCiPe 2016模型仅提供了六价铬和三价铬引发健康负荷的特征化因子,缺少铬的特征化因子,因而导致清单无法同LCIA模型相关联,引发LCIA结果偏差。上述问题常见于混物质,包括多环芳烃、铬、总氮等物质。此外,除CML模型外,剩余3种LCIA模型缺少硒对人体毒性影响的特征化因子。因此,在进行LCA方法应用时,LCIA模型的修正和选用十分关键。

3.3 本土化模型构建现状

当前主流LCIA模型除分析层次差异性外,还存在应用区域的不同,可分为欧洲模型(如CML 2001、ILCD、ReCiPe 2008)、美国模型(TRACI)、日本模型(LIME)和全球模型(ReCiPe 2016、IMPACT World+)(表1)。其中,毒性影响是一种局地性影响类别^[2],但不同区域的LCIA模型在毒性影响方面未呈现出区域性差异。在保证单位相同的前提下,选择TRACI、ILCD、USEtox和IMPACT World+模型进行分析(图3)。结果表明,尽管TRACI和ILCD模型分别是针对美国和欧洲区域的LCIA模型,但其毒性特征化因子与毒性影响模型USEtox 1.0版本具

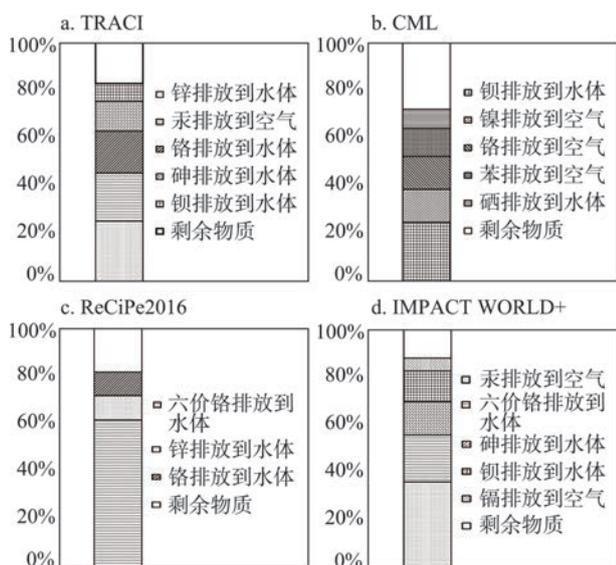


图2 人体毒性类别关键物质分析

Figure 2 Emissions of key substance of human toxicity

表1 生命周期影响评价模型汇总

Table 1 Summary of life cycle impact assessment models

模型名称	应用区域	中间点层次	终点层次
CML 2001	欧洲	是	否
EDIP	欧洲	是	否
ILCD	欧洲	是	否
TRACI	美国	是	否
Eco-indicator 99	欧洲	是	否
LIME	日本	是	是
ReCiPe 2008	欧洲	是	是
ReCiPe 2016	全球	是	是
IMPACT 2002+	欧洲	是	是
IMPACT World+	全球	是	是

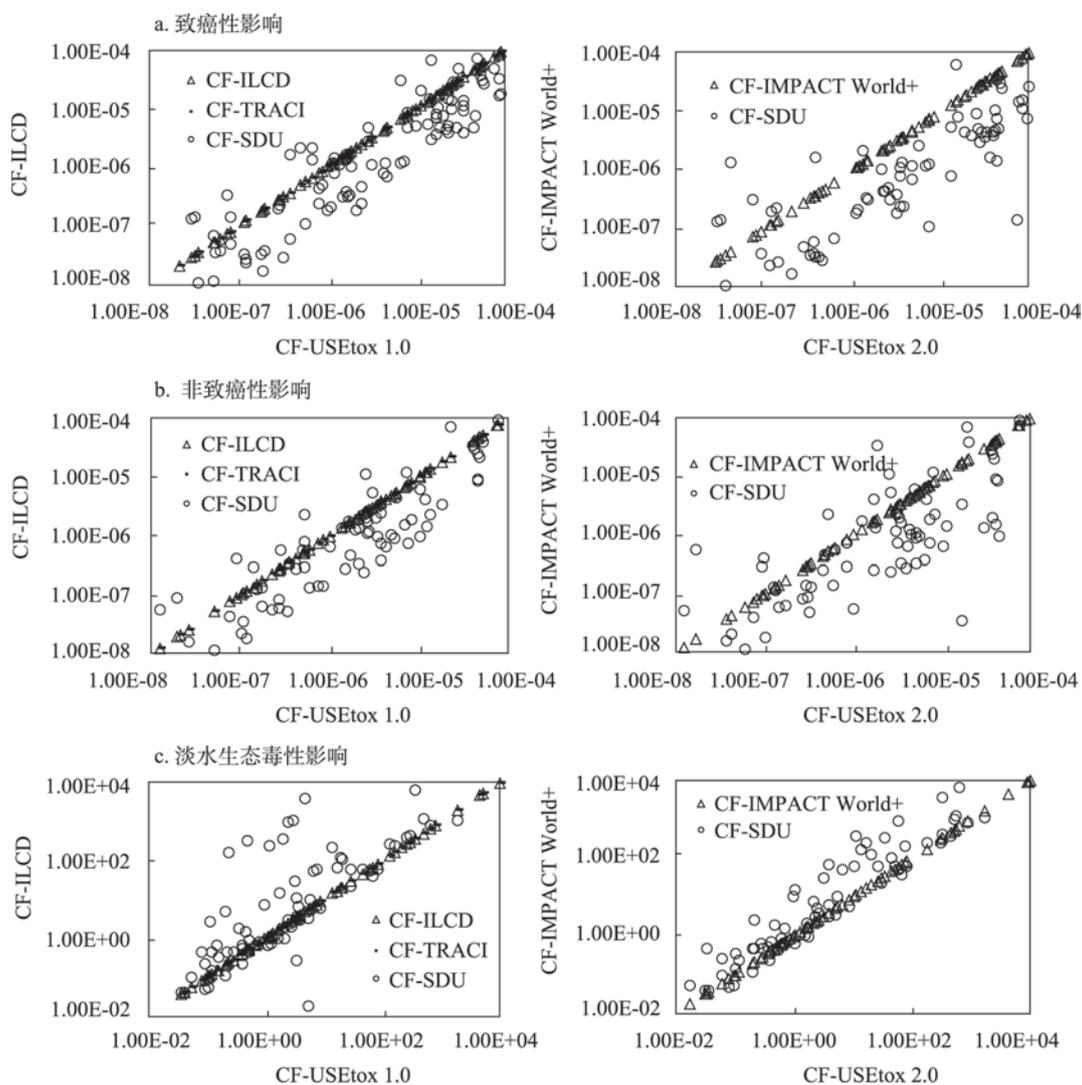


图3 不同模型在毒性类别对比分析结果

Figure 3 Comparative analysis results on toxicity categories by different models

注:CF-模型:代表模型在致癌性或非致癌性或淡水生态毒性影响类别的特征化因子。

有一致性。USEtox 模型是2008年由联合国环境规划署与SETAC共同推动开发,针对污染物迁移、转化、暴露和毒性效应进行模拟量化的模型^[57],可应用于洲际水平的分析,但存在洲际边界不明的问题。而IMPACT World+这一全球模型则同USEtox 2.0版本具有一致性。USEtox 2.0版本模型在1.0版本基础上进行了空间水平细节化,并考虑室内空气这一环境介质,并新增和更新了包括有机化合物电离、农药残留暴露、15种金属阳离子的淡水毒性等参数数据^[58]。但该版本模型仍存在洲际边界不明的问题。上述分析结果表明当前主流LCIA模型尚未考虑关键影响类别的区域化差异。前期研究结果

也表明直接采用上述模型开展中国产业活动的LCA研究,有可能过低或过高评估其潜在的环境影响^[59,60]。因此,为了更为科学、准确地量化中国各项产业活动所造成的环境影响,构建具有中国地域空间信息特征的本土化LCIA模型是十分必要的。目前,山东大学洪静兰团队已在本土化LCIA模型构建领域积累了一定的成果,即基于中国不同省份和直辖市的地理环境(如气温、降水量、风速、土地面积)、人口、饮食习惯(如肉类、鱼类、奶制品)、预期寿命、体重等要素的差异性,综合考虑多环境介质(如城市空气、农村空气、农业土壤、自然土壤、淡水、海洋),建立了包含3万余条特征化因子在内的

2021年3月

本土化模型(SDU模型)^[43,61]。本文将该模型同上述其他区域或者全球LCIA模型进行对比,结果显示出了明显的区域性差异(图3)。该模型已被应用于中国镍铁生产^[62]、钾肥生产^[63]、稀土回收^[64]、城市生活垃圾处置^[33]等领域的产业活动的潜在环境影响评估和分析。目前,除上述毒性影响类别外,该团队在基于非平衡、稳态、流动条件下的多介质模型分析污染物在多种环境介质的环境宿命基础上,已完成包括颗粒物形成、陆地酸化、水体富营养化、海洋富营养化和臭氧形成影响类别在内的本土化LCIA模型构建。最新版本的模型已被应用于地热供暖^[65]、城市尺度的污染排放^[32]所致环境影响评估领域。然而该模型目前仅考虑空间差异,尚未涵盖时间属性,有待进一步完善。

4 结论和展望

4.1 结论

本文针对生命周期评价的关键且亟待完善的两部分(LCI和LCIA)展开研究分析,得到以下结论:

(1)基于过程的LCI构建方法多集中于微观层次,存在数据的代表性、时效性、区域与技术适应性较差的弊端。为解决上述弊端,可基于“关键节点及综合识别”的观念,开展科学、快速、由下至上的中、宏观层次的清单构建。

(2)国内学者在LCI数据库方面已开展了卓有成效的工作,但尚未构建一个统一完整的、动态的、适用于中国国情、较高数据质量的本土化LCI数据库,且数据库的“共享性”仍需进一步提升。

(3)尽管当前LCIA模型众多,但因LCI与LCIA模型特征化因子的不匹配、LCIA模型中特征化因子缺失,会导致不同LCIA模型结果冲突。因此在开展LCA研究分析时,有必要进行LCIA模型的修正。

(4)中国本土化LCIA模型构建已积累了一定的成果,同全球或其他区域LCIA模型对比呈现出明显的区域性差异,但具有时、空属性的本土化LCIA模型仍需进一步完善。

4.2 展望

基于现有研究和亟待解决的问题,中国LCA研

究可从以下几个方面进一步发展:

(1)加强企业、学术界和政府部门的信息沟通、数据融合。LCA相关研究和应用工作需政府、企业、学术界等多部门的有效协同,这既可进一步完善中国本土化生产工艺的清单数据库,又可使LCA方法更好地服务于产品、工艺的绿色升级和政策的合理制定,使LCA从相对广泛的理论研究转向为具体的实际应用。

(2)建立统一的数据质量规则。LCI构建过程中存在着一定程度的主观性,进而影响结果的准确性和可靠性。因此,建立统一的数据质量规则势在必行。此外,需基于LCA不确定分析与量化模型,对误差进行溯源,探查数据异常。

(3)进一步完善本土化LCI数据库与LCIA模型。为科学、准确地评估中国产业污染现状,针对性地提出切实有效的解决措施提供数据与方法支撑,后续研究需在时间、空间维度上进一步完善本土化LCI数据库和LCIA模型。

(4)基于大数据技术提高清单数据的可得性。LCA研究依赖于庞大的基础数据统计,而考虑到具有时、空特征的清单收集将会是一项繁重的工作,大数据技术可快速提高清单数据获取和处理速度。未来应将LCA同大数据技术相结合,以实现不同行业数据快速获取、挖掘和处理。

参考文献(References):

- [1] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040 Environmental Management Life Cycle Assessment General Principles and Framework[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [2] Darnay A, Nuss G. Environmental Impacts of Coca-Cola Beverage Containers[R]. Kansas City: Midwest Research Institute for Coca-Cola USA, 1971.
- [3] 杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望[J]. 环境科学进展, 1998, 6(2): 3-5. [Yang J X, Wang R S. Retrospect and prospect of life cycle assessment[J]. Advances in Environmental Science, 1998, 6(2): 3-5.]
- [4] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14040 Environmental Management Life Cycle Assessment General Principles and Framework[S]. Geneva: ISO, 1997.
- [5] 马道天. 我国水足迹量化模型构建与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020. [Ma X T. Construction and Application of Water Foot-

- print Impact Quantitative Model in China[D]. Jinan: Shandong University, 2020.]
- [6] 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.]
- [7] 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.]
- [8] 中华人民共和国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 24040–1999)[EB/OL]. (1999–03–02) [2020–11–13]. <https://www.doc88.com/p-0929124618953.html>. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 24040–1999 Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Frameworks(GB/T 24040–1999)[EB/OL]. (1999–03–02) [2020–11–13]. <https://www.doc88.com/p-0929124618953.html>.]
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 三部门联合发布加强工业节能减排先进适用技术遴选 评估与推广工作的通知[EB/OL]. (2012–09–19) [2020–11–13]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2020/art_37e905284b31401786133437eb120aaf.html. [Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Notice of Three Departments on Strengthening the Selection, Evaluation and Promotion of Advanced Applicable Technologies for Industrial Energy Conservation and Emission Reduction[EB/OL]. (2012–09–19) [2020–11–13]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2020/art_37e905284b31401786133437eb120aaf.html.]
- [10] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL]. (2015–05–08) [2020–11–13]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm. [The State Council of the People's Republic of China. Notice of the State Council on Printing Made in China 2025[EB/OL]. (2015–05–08) [2020–11–13]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.]
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于印发《工业绿色发展规划(2016–2020年)》的通知[EB/OL]. (2016–06–30) [2020–11–13]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/zh/art/2020/art_5f9aec0cd5584b37999c837cfa10a411.html. [Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Notice of Ministry of Industry and Information Technology on Printing Industrial Green Development Plan (2016–2020)[EB/OL]. (2016–06–30) [2020–11–13]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/zh/art/2020/art_5f9aec0cd5584b37999c837cfa10a411.html.]
- [12] Yang Y, Guo Y Q, Zhu W S, et al. Environmental impact assessment of China's primary aluminum based on life cycle assessment [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29 (8): 1784–1792.
- [13] 亓聪聪. 我国湿法冶锌制备生命周期评价[D]. 济南: 山东大学, 2018. [Qi C C. Life Cycle Assessment of the Hydrometallurgical Zinc Production in China[D]. Jinan: Shandong University, 2018.]
- [14] 赵若楠, 董莉, 白璐, 等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751–2757. [Zhao R N, Dong L, Bai L, et al. Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry[J]. China Environmental Science, 2020, 40(6): 2751–2757.]
- [15] Wang J M, Wang R G, Zhu Y C, et al. Life cycle assessment and environmental cost accounting of coal-fired power generation in China[J]. Energy Policy, 2018, 115: 374–384.
- [16] 郝敏, 陈伟强, 马梓洁, 等. 2000–2015年中国铜废碎料贸易及效益风险分析[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1515–1526. [Hao M, Chen W Q, Ma Z J, et al. Benefits and risks of China's copper waste and scrap trade during 2000–2015[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1515–1526.]
- [17] 赵迪, 宋小龙, 杨东, 等. 电子废弃物回收处理系统环境绩效评估方法及应用[J]. 生态经济, 2020, 36(5): 182–187. [Zhao D, Song X L, Yang D, et al. Environmental performance evaluation method and application of e-waste recycling system[J]. Ecological Economy, 2020, 36(5): 182–187.]
- [18] 高宇, 李政道, 张慧, 等. 基于LCA的装配式建筑建造全过程的碳排放分析[J]. 工程管理学报, 2018, 32(2): 30–34. [Gao Y, Li Z D, Zhang H, et al. A carbon emission analysis model for prefabricated construction based on LCA[J]. Journal of Engineering Management, 2018, 32(2): 30–34.]
- [19] 杨希宁. 基于BIM的建筑改造项目生命周期环境影响评价研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018. [Yang X N. BIM-Based Life Cycle Environmental Impact Assessment of the Building Retrofit Project [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.]
- [20] 宋博, 穆月英. 设施蔬菜生产系统碳足迹研究: 以北京市为例 [J]. 资源科学, 2015, 37(1): 175–183. [Song B, Mu Y Y. The carbon footprint of facility vegetable production systems in Beijing[J]. Resources Science, 2015, 37(1): 175–183.]
- [21] 王钰乔, 濮超, 赵鑫, 等. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1800–1811. [Wang Y Q, Pu C, Zhao X, et al. Historical dynamics and future trends of carbon footprint of wheat and maize in China[J]. Resources Science, 2018, 40 (9): 1800–1811.]

2021年3月

- [22] 中华人民共和国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 目的与范围的确定和清单分析(GB/T 24041-2000)[EB/OL]. (2000-02-01) [2020-11-13]. <https://www.doc88.com/p-1092907348559.html>. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 24041-2000 Environmental Management Life Cycle Assessment Goal and Scope Definition and Inventory Analysis(GB/T 24041-2000)[EB/OL]. (2000-02-01) [2020-11-13]. <https://www.doc88.com/p-1092907348559.html>.]
- [23] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述: 兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242. [Wang C B, Zhang L X, Pang M Y. A review on hybrid life cycle assessment: Development and application[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1232-1242.]
- [24] Mattila T J, Pakarinen S, Sokka L. Quantifying the total environmental impacts of an industrial symbiosis: A comparison of process-, hybrid and input-output life cycle assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(11): 4309-4314.
- [25] 田成诗, 张诗雅. 中国行业供应链碳足迹的来源分解分析: 基于投入产出的生命周期评价模型[J]. 环境经济研究, 2019, 4(2): 58-75. [Tian C S, Zhang S Y. Source decomposition analysis of carbon footprint in China's industry supply chain: Based on IO-LCA[J]. Journal of Environmental Economics, 2019, 4(2): 58-75.]
- [26] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14041 Environmental Management Life Cycle Assessment Goal and Scope Definition and Inventory Analysis[S]. Geneva: ISO, 1998.
- [27] SETAC. Evolution and Development of the Conceptual Framework and Methodology of Life-Cycle Impact Assessment[M]. Pensacola: SETAC Press, 1998.
- [28] Zhai P, Williams E. Dynamic hybrid life cycle assessment of energy and carbon of multicrystalline silicon photovoltaic systems[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(20): 7950-7955.
- [29] Hong J L, Zhang F F, Xu C Q, et al. Evaluation of life cycle inventory at macro level: A case study of mechanical coke production in China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(6): 751-764.
- [30] Zhang Y L, Sun M X, Hong J L, et al. Environmental footprint of aluminum production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 1242-1251.
- [31] Ma X T, Ye L P, Qi C C, et al. Life cycle assessment and water footprint evaluation of crude steel production: A case study in China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 224: 10-18.
- [32] Zhai Y J, Ma X T, Gao F, et al. Is energy the key to pursuing clean air and water at the city level? A case study of Jinan City, China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110353.
- [33] Hong J L, Chen Y L, Wang M, et al. Intensification of municipal solid waste disposal in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 168-176.
- [34] 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.]
- [35] Agora Energiewende. The European Power Sector in 2019: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition[R]. Berlin: Agora Energiewende, 2020.
- [36] 中华人民共和国统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Energy Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.]
- [37] European Commission. Product Environmental Footprint[N/OL]. (2012-07-17) [2021-01-26]. <http://ec.europa.eu/environment/archives/eussd/pdf/footprint/PEF%20methodology%20final%20draft.pdf>.
- [38] 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.]
- [39] Hong J L, Shaked S, Rosenbaum R K, et al. Analytical uncertainty propagation in life cycle inventory and impact assessment: Application to an automobile front panel[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(5): 499-510.
- [40] 孙铎, 张鹏, 范亚丽. 中国汽车生命周期数据库建设的理论研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S3): 427-430. [Sun X, Zhang P, Fan Y L. The theoretical study of the construction of Chinese automobile life cycle database[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S3): 427-430.]
- [41] Yang J H, Chang Y, Zhang L X, et al. The life-cycle energy and environmental emissions of a typical offshore wind farm in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180: 316-324.
- [42] Yin R S, Hu S H, Yang Y. Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227: 960-971.
- [43] 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.
- [44] Mobin T. The Environmental Management Handbook[M]. London:

- Great Britain Pitman Publishing, 1994.
- [45] Dong Y H, Ng S T. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe: A study of commercial buildings in Hong Kong[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(7): 1409–1423.
- [46] Guinée J B. Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2001, 7(5): 311–313.
- [47] Wenzel H, Hauschild M Z, Alting L. Environmental Assessment of Products: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2000.
- [48] Europe Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook: General Guide for Life Cycle Assessment Detailed Guidance[M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- [49] 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.
- [50] Kägi T, Dinkel F, Frischknecht R, et al. Session “Midpoint, endpoint or single score for decision-making?”: SETAC Europe 25th Annual Meeting, May 5th, 2015[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(1): 129–132.
- [51] Goedkoop M J, Hofstetter P, Müller-Wenk R, et al. The Eco-indicator 98 explained[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, 3(6): 352–360.
- [52] Itsubo N, Inaba A. A new LCIA method: LIME has been completed [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(5): 305–305.
- [53] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, et al. ReCiPe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level[R/OL]. (2009–01–06) [2020–11–13]. https://www.researchgate.net/profile/Mark-Goedkoop/publication/230770853_Recipe_2008/links/09e4150dc068ff22e9000000/Recipe-2008.pdf.
- [54] Huijbregts M A J, Steinmann Z J N, Elshout P M F, et al. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(2): 138–147.
- [55] 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: 324–324.
- [56] Bulle C, Margni M, Patouillard L, et al. IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(9): 1653–1674.
- [57] 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.
- [58] Fantke P, Bijster M, Guignard C, et al. USEtox® 2.0 User Manual (Version 2)[R/OL]. (2015–08–31) [2020–11–13]. https://www.usetox.org/sites/default/files/support-tutorials/USEtox_Manual.pdf.
- [59] Hong J L, Chen W, Wang Y T, et al. Life cycle assessment of caustic soda production: A case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 66: 113–120.
- [60] Xu C Q, Hong J L, Ren Y X, et al. Approaches for controlling air pollutants and their environmental impacts generated from coal-based electricity generation in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(16): 12384–12395.
- [61] Zhang Y L, Sun M X, Hong J L, et al. Environmental footprint of aluminum production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 1242–1251.
- [62] Ma X T, Yang D L, Zhai Y J, et al. Cost-combined life cycle assessment of ferronickel production[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(10): 1840–1850.
- [63] Chen W, Geng Y, Hong J L, et al. Life cycle assessment of potash fertilizer production in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 138: 238–245.
- [64] Yang D L, Gao S, Hong J L, et al. Life cycle assessment of rare earths recovery from waste fluorescent powders: A case study in China[J]. *Waste Management*, 2019, 99: 60–70.
- [65] Zhang R R, Wang G L, Shen X X, et al. Is geothermal heating environmentally superior than coal fired heating in China?[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110014.

Development of life cycle assessment method

ZHAI Yijie¹, ZHANG Tianzuo¹, SHEN Xiaoxu¹, MA Xiaotian², HONG Jinglan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China;

2. Institute of Blue and Green Development, Shandong University, Weihai 264209, China)

Abstract: Life cycle assessment (LCA) can be used to systematically quantify and optimize industrial activities' material flow, energy flow, and environmental impacts. This method has become an internationally recognized tool for environmental management, sustainable development assessment, and ecological design. However, due to imperfect life cycle inventory databases and life cycle impact assessment models, current Chinese LCA researches faces several issues, such as narrow applications, low traceability, conflicting conclusions, and difficulty in controlling source reduction. To solve these problems, this study pointed out that the process-based and rapid life cycle inventory construction method could contribute to conducting LCA research at the micro, meso, and macro levels. Further promotion of the construction of a unified, complete, dynamic, regional, and sharable life cycle inventory database with high data quality is necessary. The selection and revision of the life cycle impact assessment model is imperative to conduct highly scientific and accurate LCA research. Furthermore, the life cycle impact assessment model with spatial and temporal attributes should be improved. On the basis of the review and analysis of the current situation of the research on LCA method in China, this study projected the future directions of Chinese LCA research.

Key words: life cycle assessment; life cycle inventory; life cycle impact assessment; dynamic; regional