

环境管理生命周期评价技术的基本范畴及其适用局限性浅析

曹烨, 邹振东, 邱国玉

北京大学深圳研究生院环境与能源学院; 深圳市太阳能与风能海水淡化关键技术工程实验室, 深圳 518055

摘要 生命周期评价法(LCA)在国际上广泛应用于工业企业部门、政府管理部门和服务行业,但其最突出的贡献是在环境管理方面的应用。LCA的技术框架分为确定目的与范围、生命周期清单分析、生命周期影响评价(LCIA)和结果解释4个部分,其方法可归纳为中点法和终点法。LCA存在数据获取、清单分配、边界选择、评价模型、时空限制以及结果不确定性等方面的局限性。为适应环境管理和评价技术本生的要求,LCA评价技术朝系统化方向发展。从不同侧面拓展了LCA的应用领域和回避LCA评价的局限性,使得LCA逐渐成为环境管理不可或缺的工具。

关键词 生命周期;影响评价;环境管理;可持续发展

生命周期分析法,也被称为生命周期评价法(life cycle assessment, LCA),是一种评价产品“从摇篮到坟墓”的所有环境影响及潜在环境影响的方法。它通常被用于评估一项产品或者工程系统在全生命周期过程中的环境影响,并借以寻求改善。LCA最早产生于1960年代末和1970年代初,经过40多年的研究和摸索,LCA日趋完善^[1]。

环境管理的内涵非常广泛,从包罗一切的愿景规划到具体的影响评价,从环境信息交流到报告等。生命周期评价最初被用于可口可乐包装瓶的环境影响评价,后来被广泛应用于工业产品的环境影响评价。生命周期分析法的

研究对象是从原材料的提取和加工,到产品/系统的生产制造、包装、市场推广、消费者使用、售后维护,一直到再使用和最终废弃的整个生命周期过程所产生的环境影响,ISO生命周期评价技术框如图1所示^[2]。

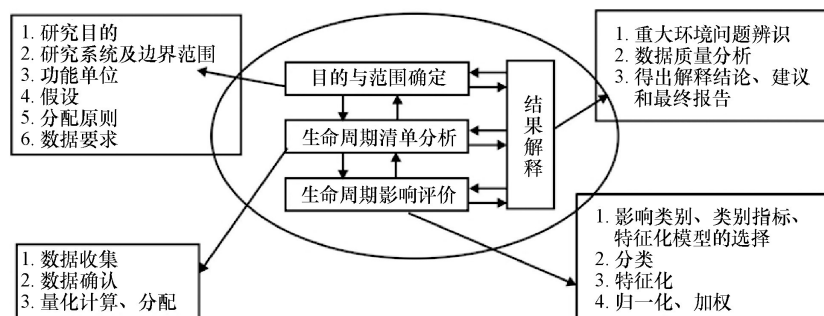


图1 ISO生命周期评价技术框

Fig. 1 Relationships between stages of life cycle analysis

收稿日期:2017-05-25;修回日期:2017-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(30972421);深圳市科技计划项目(JCYJ20170818090224745, JSGG20150813172407669, JCYJ20140417144423187, JCYJ20150331100418474)

作者简介:曹烨,高级工程师,研究方向为环境与能源信息工程,电子信箱:cykaiyang@163.com;邱国玉(通信作者),教授,研究方向为环境与能源信息工程、城市水文与生态水文,电子信箱:qiugy@pkus2.edu.cn

引用格式:曹烨,邹振东,邱国玉. 环境管理生命周期评价技术的基本范畴及其适用局限性浅析[J]. 科技导报, 2018, 36(8): 79-86; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.08.009

ISO 14001 体系或类似的环境管理体系中制定了系列评价模型评价、监测、证明、管理和保持环境行为,其中需要定量化管理,往往会用到 LCA,特备是在调研组织关注的过程、产品和服务方面,都会采用 LCA^[3]。环境管理文件中需要进行环境承诺或行为生命,如环境报告体系或一些倡议,往往需要通过 LCA 提供一些背景证明,如环境负荷、效益及环境改善情况等。广为流行“生态足迹法”及其想用的计算工具需要用到 LCA 数据,而提倡的工艺信息也需要来自 LCA 的结果。此外,在产品和技术的比较和改进,以及帮助制定和实施面向产品的政策、废物管理政策上都需要用到 LCA,如美国环保局在《清洁水法》中使用 LCA 完善工业洗涤污水指南^[4]。

1 LCA 框架

1993 年,国际环境毒理学和化学学会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)在 LCA 国际研讨会上正式将生命周期评价方法定义为一种用来评价产品、工艺和行动相关的环境负荷的一个客观过程,它在能源与材料使用所产生的环境的排放过程中通过识别和量化其排放量,并评价其对环境的影响,评估和实施改善对环境的影响的机会^[5]。1997 年出台了 ISO14040《环境管理-LCA-原则与框架》,其中将 LCA 分为确定目标与范围、生命周期清单分析、生命周期影响评价(LCIA)和结果解释(图 1)。ISO 14040 将 SETAC 的 LCA 框架中的改善评价修改为结果解释。

LCA 的主要分析模型有以下几类,它们分别是:简化模型(simplified model)、过程模型(process model)、决策理论模型(decision-making theory model)和多目标优化模型(multi-objective optimization model)等^[6]。顾国刚等^[7]提出用生命周期法研究环境问题,给出生命周期法的研究内容及方法框架。

在进行 LCA 之前,需要先明确此次 LCA 分析的目标与研究对象,确定研究的基本框架与预期研究结果的意义及应用;然后是生命周期的清单分析,包括为实现特定的研究目标对所需数据的收集,是一份关于所研究系统的输入和输出的数据清单;LCIA 是 LCA 中最重要,也是最困难的环节,需要将前述步骤得到的各种排放物对现实环境的影响进行定性或定量评价,需要充分考虑产品系统的物质能量交换对生态系统和人体健康等外部环境的影响。解释阶段的主要内容是按照

第一阶段制定的目标,基于第二第三个阶段的核算结果,针对研究对象得出结论或提出建议。

各个阶段之间都有一定的相互联系,在分析过程中通常需要进行反复迭代,才能得出最终的结论^[8]。

2 LCIA 方法学

ISO 1404 对 SETAC 的方法做了补充,将分类、特征化和评价作为必选步骤,将归一化、分组、加权和数据质量评价作为可选步骤^[9-10]。目前,国际上的影响评价方法有 20 多种,根据研究目的差异基本可以划分为中间点法和终结点法,二者最大区别是考虑的环境影响类型指标不同。中间点法更关注数据之间的关系、图标和评论终结点法则不需要单独各个影响类型的环境影响,只需要得出易于决策者理解的分数,不同的影响评价结果类型代表不同的决定。

2.1 中间点法

中间点法就是对气候变化、酸化、富营养化等相关的环境影响进行评价。它更多的是着眼于环境影响因子和机理,对各种环境干扰因素采用当量因子转换进行数据标准化,因此也被称为面向问题的方法。目前主要的方法有环境设计工业产品(EDIP)、莱顿环境科学中心(CML2001)、环境优先战略(EPS)、用于加拿大特定计算的生命周期评价(LUCAS)以及减少和评估化学和其他环境的工具(TRACI)等方法^[2,11]。

EDIP 方法是丹麦技术大学和丹麦环保局以及丹麦的工业公司在 SETAC 分类方案基础上,于 1994—1997 年历经 4 年而研究出来的——EDIP97。EDIP 体系 97 体系分为环境影响和资源消耗两个部分。其中环境影响包括全球性、区域性、和局域性环境影响。资源消耗包括可再生和不可再生的资源消耗^[12]。

CML2001 方法是荷兰莱顿大学环境研究中心在 2001 年发表的一种根据 ISO 标准执行的生命周期评价方法。该方法将影响分为 3 个大类:材料和能源(非生物和生物资源)的消耗,污染(温室效应的加强、臭氧层耗竭、人类毒性、生态毒性、酸化等)和损害^[13]。

EPS 方法是 1990 年由瑞典环境问题研究所开发的综合 LCA 环境影响评价方法,其目的是用单一的指标来描述产品在生命周期各个阶段的能源和原材料消耗以及向环境中废弃物排放所造成的影响;包括了人类健康、生态系统生产能力、非生物矿产资源、生物多样性以及文化和审美价值 5 个保护目标。

TRACI方法是美国EPA于1996—2003年开发的适合美国的生命周期评价工具。该方法选择了臭氧层损耗、全球气候变暖、算话效应、富营养化、光化学烟雾、生态毒性、空气污染指标、致癌性、非致癌性、化石燃料燃烧10个中间点影响类型。

LUCAS方法是加拿大研究员在SETAC的帮助下根据EDIP2003、IMPACT2002+和TRACI 3种方法建立起来的适合在加拿大境内使用的方法,包括臭氧层空洞、酸化效应、光化学烟雾、水体富营养化、土壤富营养化、生态毒性(水体和陆地)、毒性、土地占用、不可再生资源消耗10种影响类型的特征化因子^[14]。

2.2 终结点法

终结点法是划分各种环境主题,对每一个和人类、自然环境和资源相关的主题造成的损害建模,又称为损害为主的评价方法。代表性方法有Eco-indicator95、Eco-indicator99、IMPACT2002+和ReCiPe 2008等方法^[15]。

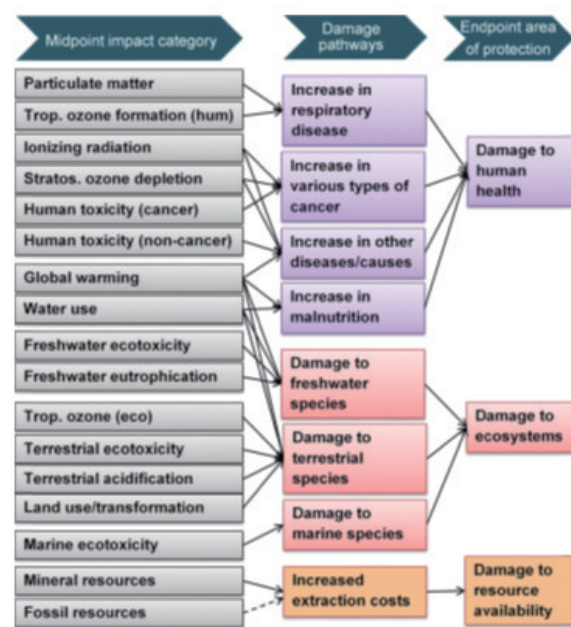
Eco-indicator95方法是由荷兰国家废弃物再利用研究中心(NOH)实施,由Pre咨询公司和CML等研究团体共同开发。该方法对日常使用的材料以及其生命周期(原材料生产、处理过程、运输、能耗、废弃物处理回收)做了研究,建立了100个生态指数因子。该方法的使用步骤包括确定生态指数计算的目的、确定研究的生命周期、材料和工艺过程的计算、填入表格和结果解释等5个部分。

Eco-indicator99方法是由Goedkoop等在Eco-indicator95基础上研究出来的。该方法考虑的影响类型主要有酸化、水体富营养化、生态毒性、土地占用、致癌物质、气候变化、电离辐射、臭氧层空洞、呼吸系统影响、化石燃料和矿物开采;包含了数据分类、特征化和标准化处理过程,得出生态指数分数,即某种产品造成的可见性环境负荷的严重程度,正直代表越大代表环境负荷越严重,负值则相反^[13]。

IMPACT2002+方法最初是由瑞士联邦技术研究所(EPFL)开发,目前由eointesys-生命周期系统更新。该方法将中间点法和终结点法相结合,将所有类型的生命周期清单结果通过14个中间点类型连接到4个终结点类型(人体健康、生态系统质量、气候变化和资源)。它提供了1500种不同生命周期清单结果的特征化因子^[16]。终结点标准化后的功能单位是(功能单位排放/(人·年))。

ReCiPe2008方法是由荷兰PRé咨询公司和莱顿大

学的CLM开发的一套通过模型将中间点法和终结点法相联系的方法,现在已发展到ReCiPe2016(图2)^[17]。以ECO-indicator99和CLM方法为基础^[13]。该方法的终结点影响类别是人体健康损害、生态系统多样性损害和资源使用损害,中间点的影响类型则分为18个,ReCiPe2016修改为17个。



虚线表示化石资源没有固定的中点到终点因素

图2 ReCiPe2016方法涵盖的影响类别及其与保护领域的关系

Fig. 2 Overview of the impact categories that are covered in the ReCiPe2016 method and their relation to the areas of protection

3 LCA的局限性

3.1 数据的获取

LCA需要大量的基础数据,一个充分的LCA项目涉及的数据条目往往成千上万。一个较完整的材料的LCA通常需要多达60多万条。而与此形成强烈对比的是,现实中相关的数据非常缺乏。数据需求和数据缺乏之间的矛盾一直困扰着人们,这也将继续成为LCA实际应用的一个主要障碍^[18]。研究人员经常依靠典型的生产工艺、全国平均水平、工艺的工程估计或专业判断来获取数据,这就可能导致结果的偏差。商业软件在某种程度上可以使这一问题变得容易些,但对于其中的数据是如何处理的却并没有表述清楚。

3.2 清单过程的分配问题

生命周期清单这一步骤中最终的限制性因素就是分配。有研究者将分配问题成为 LCA 最具争议的问题之一,也有人将其称为 LCA 古老的方法学问题之一。人们逐渐认识到没有一种方法能够单独满足解决所有问题的需要,而且普遍认为解决这一棘手问题的有效方法是细化单元过程或扩展系统边界以避免分配。但是,前者是一个主观性选择问题,取决于实践者的观点;而后者会使研究系统变得更为复杂,所需数据会大大增加,从而增加评价结果的不确定性^[19]。依照 ISO 的原则^[5,15],当细化单元过程或扩展系统边界仍然有分配问题存在时,需要按照物理的因果关系对环境负荷在产品或功能之间进行分配,但即使这样,仍然会产生显著不同的结果。

3.3 系统边界选择的主观性

在 LCA 的目标与范围定义中,确定系统边界至为关键。通常从 3 个方面定义系统边界:生命周期边界、地域和时间边界以及环境负荷边界。定义生命周期边界时,很难考虑真正意义上的生命周期全过程,其边界具有不完整性、不统一性。一些人认为,应围绕产业活动来划定评价边界,也有人认为自然过程也应包括在内,后者虽然更加全面,但大大增加了数据获取的难度。一般地,基础边界基本上局限在产品生命周期的阶段(原材料进厂到产品出厂),也被称为“厂门到厂门”的分析;能源边界包括了与能源生产相关的一些外部流;扩展边界包括了与产业系统直接相关的所有生命周期阶段和各种物质流和能量流;综合边界则将生物形成的自然过程和材料在填埋场的分解也包括在内。不同层次的边界选择在本质上并不存在对错之分,但所做的边界选择很可能对 LCA 结果产生很大的影响^[20-21]。

对于 LCA 到底应该详尽到什么程度,评价者还需决定是否应该对产品的非主要组分(如:塑料合成中使用的添加剂或在大型钢材装配线上使用的铜线)进行分析,以确定其环境影响。这时又需要我们主观判断。ISO 14040^[5]建议可以通过某些删减原则忽略这种原材料和零部件,这样可以简化 LCA 使之可操作性增强,但同时也增加了漏掉某些重要环境影响的风险。特别是服务行业的投入造成的环境影响并不能从质量和能量作出正确的判断。

3.4 评价方法的局限性

可以说将产品承担的负荷转换环境影响是 LCA 是

个步骤中最具挑战的一部,要求将正确的时间和地点的正确的负荷与正确的影响建立联系。ISO 14044 规定了 LCIA 阶段的 3 个必备要素(影响类型、类型参数和特征化模型的选择;分类;特征化)和 3 个可选要素(归一化;分组;加权)^[22],其中每个步骤都因为方法本身固有的特征增加了 LCA 的局限性^[23]。

选择中点或终点对于将 LCA 结果用于决策制定的可信性和相关性产生重要影响。通常中点类别相对得到更好的定义,模型结果比较可靠,终点类别则不太全面并且具有较大的不确定性。但是从决策制定相关性方面,中点类别不直接与政策关心的最终保护目标相关联,因而比较难解释。

在理想状况下,应该建立各种环境压力与生态环境和人体之间的关系,然后并不是所有与环境相关的信息都可以量化,或者说不是所有的清单数据都能进行定量影响评价。如生物性自然环境损害(利用野生动植物、生态系统)和非生物自然环境损害(景观退化、利用不可再生自然资源),要么终点影响类别缺少指标,要么类别指标未得到普遍认可。再比如环境排放对人体健康的影响,由于对致病机理不了解,仅停留在用数理统计描述剂量-反应关系上,而无法建立健康评价和预测模型^[24]。

3.5 地域和时间的限制

环境影响的特点之一是其因地域和时间不同而不同。有研究表明,使用具有明确地域特征变量的模型进行模拟,发现气象变化和当地环境的敏感性能够使欧洲各地区的酸化和富营养化影响差 3 个数量级。类似地,使用 EcoSense 模型模拟时,大气污染物对欧洲各国的人体健康和人工环境造成的损害因气象条件和人口分布不同而不同。垃圾渗滤液造成的地下水污染也因地质条件和地理位置的不同而差 4 个数量级^[25]。地区间的酸化情况的差异也可能是土壤缓冲能力不同所致。以人口密度作为参数的城市景观能够影响对大气污染物暴露效率的估计。

LCA 是一种典型的静态而非动态的方法。工业和环境的动态变化影响着评价结果,忽略与时间变化相关的特征会降低 LCA 结果对环境的反应。污染物对生态环境及人体健康造成的影响与污染物的排放时间、排放速率及其随时间变化的环境过程有关。如光化学氧化剂、酸化、水体富营养化对生态系统造成的影响均随时间变化而不同。此外,产品生产、使用和废弃处置

的时间模式也会影响 LCA 结果的准确性。因此,由于缺乏历史数据和动态表达,传统 LCA 不能用于解释环境和工业系统的动态变化,静态的平均化处理也使得潜在的重要的工业瞬态变化得不到关注^[26-27]。

3.6 研究结果的不确定性

不确定性分析是判定数据变异性及其对最终结果造成影响的过程,既可用于清单数据也可用于影响评价指标,并且在决策制定过程中如何使用这些结果有很重要的影响,迄今为止,在这方面还欠缺深入的研究。互联网+带来的数据快速更新很难对某种产品或者活动作出很准确的结论。评价过程中总是无法避免一些必要的折中做法,如忽略催化剂和添加剂,不考虑硬件设备,忽略供应商的材料流等等^[28]。

LCA 的解释阶段结合不确定性分析和之前所做的假设评估清单分析和影响评价结果,为诸如是否选择推荐的产品或者改进工艺或服务决策提供科学依据^[29]。很少有 LCA 结果能明确地指出一种方案优于另一种,因为最终结果的不确定性会导致无法判断孰优孰劣。

4 技术进展

4.1 评价指标

由于在 ISO 标准中并未对评价模型以及影响类型的选择做出明确的规定,不同的选择往往会得到不一致的评价结果。因此,开发统一的评价方法显得势在必行。联合国环境规划署(UNEP)和环境毒理与化学学会(SETAC)提出了完善 LCIA 方法的路线图,促进环境中点损害 LCIA 框架和 USEtox 模型等的研究。USEtox 着重于人体健康和生态毒理性的特征化,是在现有模型基础上建立一个全新的评价方法,已被作为未来 LCIA 特征化因子确定方法的全球推荐基础^[30-31]。

LCA 领域新兴的指标涉及了水资源、土地资源和毒性等,已分别建立了 WULCA、LULCA 和 USEtox 模型。尤其是实际上可获得和可利用的总水量到 2030 年可能将无法得到满足,对水的评价的关注在可预见的未来将不会减少^[32]。此外生态系统管理也越来越受到公众、政府和产业的关注,但是在这方面研究还很缺乏。许多引起生物多样性变化的因素、如气候变化、污染和栖息地丧失,也都是 LCA 要解决的问题。

LCA 方法和 LCIA 影响类别的选择通常主要综合考虑适当性、可行性、稳固性和一致性等 4 各方面的需

求。常用的 5 个影响类别是:非生物性资源耗竭、全球变暖(100 年评价期)、酸化、富营养化和光化学烟雾生成。但各行业和政府却希望建立对于不同的利益相关者都可得、易用且易于交流的工作。

4.2 清单数据

清单数据的获得方法主要有 4 种:定性和半定量法、以数据可用性为导向的定量法、基于过程的定量法、基于投入产出(IO, Input-Output)法。实践证明,前两种方法具有较高的主观性、不可重复性。基于过程的定量法因其使用了更多的删减原则而使结果产生更高的潜在截断误差。虽然 IO-LCA 是目前被认为的一种更快捷、更全面的数据获取和补全方法,但也存在着不可避免的不确定性,比如大多数国家都缺乏适用的、均衡的、可以和经济数据关联的部门环境数据,或者没有考虑再生和再制造过程^[33-34]。

鉴于开展 LCA 所必需的潜在的高投资及满足其准确性的数据库的需要,建立合理、透明的数据获取及补全方法对增加 LCA 的可信度是非常必要的

4.3 归因性 LCA 和归果性 LCA

LCA 研究可分为归因性 LCA (Attributional LCA, ALCA)和后果性 LCA (Consequential LCA, CLCA)。ALCA 研究产品生命周期内的直接物流(即投资、材料、能源和排放),主要使用生命周期内每个单元过程的平均数据;而 CLCA 旨在描述对产品系统需求增加或减少而引起的物流的变化。

近年来,关于 ALCA 和 CLCA 的争论的一直没有停止过。Ekvall 等^[35]认为 CLCA 和 ALCA 都可以用于模拟未来、现在及过去的产品系统。Tillman^[23]则建议 CLCA 能更好的用于决策,只有当评价结果能有影响决策时,LCA 才会有吸引力并且有意义。Weidema^[24]认为 CLCA 对于大多数的决策状况都适用,除少数情况,如关于环境税的研究 ALCA 则更合适。

Searchinger 等^[27]研究了常规汽油和玉米乙醇生命周期温室气体排放,使用 ALCA 得到的玉米乙醇温室气体排放比常规汽油低 20%;而使用 CLCA 却发现由于政策激励作用,玉米乙醇产量的增加将使玉米淀粉的预期需求量增加,进而引起玉米、大豆及其他谷物价格上涨,最终导致土地利用发生改变而使玉米乙醇的温室气体排放比汽油高 47%。这正是 ALCA 和 CLCA 的主要差别。

但是,开展 LCA 应该使用哪一种模式并没有对错

之分,两者都有各自的效用,其区别在于如何定义系统边界和研究目标。在目前的CLCA研究中,很少有研究者说明为何采用CLCA而不是ALCA^[36,37]。

4.4 生命周期成本法

生命周期成本法(life cycle cost, LCC)最早被美国国防部用于评估核算军工产品的成本,现在它已经逐渐发展成为从另一个角度定义和衡量可持续发展的概念和工具。如Reich^[38]将整合了LCC的LCA应用于市政工程的废弃物管理系统。每个生命周期阶段相关的输入和输出都应该包含在成本计算内(图3)^[2,39-41]。

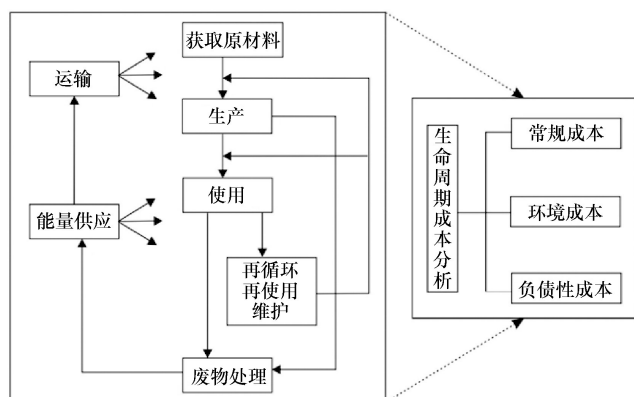


图3 生命周期成本评价系统

Fig. 3 Life cycle cost evaluation system

如果将LCC和LCA分离,将可能限制LCA作为决策支持工具的实用性;产品生命周期内的经济性和环境表现之间的关系以及所需的权衡将表现得不够明^[39]。

4.5 生命周期可持续性评价

生命周期可持续性评价(life cycle sustainability assessment, LCSA)对产品在其生命周期内的所产生的的环境、社会以及经济的负面影响和效益进行评估,并且展示如何将评估结果用于决策过程。Klöpper^[42]首先提出将环境生命周期评价(E-LCA)、生命周期成本(LCC)和社会生命周期评价(S-LCA)整合形成LCSA的思想,即 $LCSA=E-LCA+LCC+S-LCA$,其内涵是对产品可持续性表现的评价应通过实施3个生命周期技术来实现。UNEP/SETAC^[30-31]推荐了整合LCA、LCC和S-LCA的每个步骤和做法,标志着LCA正逐步与经济模型和社会学理论相互融合,发展成为面向可持续的评价工具。

LCSA的目标和范围定义要明确说明目的、边界和目标受众;系统边界应当包括所有与其中至少一个生命周期技术相关的单元过程;清单数据因其搜集层面不同而具有不同的特征,如LCA和LCC多使用定量数

据,而在S-LCA中半定量和定性数据也常被用到^[43]。LCSA的总体目标是为产品系统提供整合评估,其结果应在目标与范围定义的基础上以组合的方式进行解释,有助于阐明是否在经济效益与环境和社会负荷之间存在权衡;哪个生命周期阶段和影响类别是关键因素;研究的产品是否是社会和环境友好。所有研究结果都需要对数据质量和不确定性进行核对,ISO 14040/44要求的所有方面(敏感性、完整性、一致性等)也都适用于LCSA。

5 结论

生命周期分析法是一种评价产品“从摇篮到坟墓”的所有环境影响及潜在环境影响的方法。LCA在国际上广泛应用于工业企业部门、政府管理部门和服务行业,但其最突出的贡献是在环境管理方面的应用。LCA的技术框架分为确定目的与范围、清单分析、影响评价和结果解释4个部分。LCA方法可分为中间点法和终节点法,前者主要有EDPI、CML2001、EPS、TRACI和LUCAS等,后者主要有Eco-indicator95、Eco-indicator99、IMPACT 2002+和ReCiPe2008等方法,这些方法均在不断的完善和发展。LCA在数据的获取、清单过程的分配问题、系统边界选择的主观性、评价方法、地域和时间的限制、研究结果的不确定性等方面存在一定局限性。LCA目前的技术进展主要体现在评价指标、清单数据、ALCA和CLCA、LCC,以及LCSA等诸多方面。经过几十年的研究和摸索,LCA正日趋完善。

参考文献(References)

- [1] Environmental Protection Agency. Defining life cycle assessment (LCA)[EB/OL]. [2017-10-10]. <http://www.gdrc.org/uem/lca/lcdefine.html>. 2012.
- [2] 陈莎, 刘尊文. 生命周期评价与III型环境标志认证[M]. 北京: 中国质检出版社, 2014: 1-289.
Chen Sha, Liu Zunwen. Life cycle assessment and III-type environmental symbol authentication[M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2014: 1-289.
- [3] 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 Xiujun, Hu Bin. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30(6): 155-160.
- [4] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity[J]. PNAS, 2012, 109(9): 3232-3237.
- [5] International Organization for Standardization. ISO 14040 environmental management—life cycle assessment—general princi-

- ples and framework[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [6] 郭焱, 刘红超, 郭彬. 产品生命周期评价关键问题研究评述[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5): 1141-1158.
Guo Yan, Liu Hongchao, Guo Bin. Review of key issues on product life cycle assessment[J]. Computer Integrated Manufacturing systems, 2014, 20(5): 1141-1158.
 - [7] 顾国刚, 刘光复, 张磊. 生命周期评价中的时间折扣研究[J]. 机械设计与制造, 2012(1): 193-195.
Gu Guogang, Liu Guangfu, Zhang Lei. Research on temporal discounting for life cycle assessment[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(1): 193-195.
 - [8] Fava J, Consoli F, Denson R, et al. A conceptual framework for life-cycle impact assessment[A]. Workshop Report, Society for Environmental Toxicology and Chemistry and SETAC Foundation for Environmental Education, Inc, Pensacola, FL, 1993.
 - [9] Pensacola F L. Evolution and development of the conceptual framework and methodology of life-cycle impact assessment [M]. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1998.
 - [10] Jensen A A, Hoffman L, Moller B T, et al. Life cycle assessment- A guide to approaches, experiences and information sources[R]. Environmental Issues Series No.6. Copenhagen: European Environmental Agency, 1997.
 - [11] 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 Yutao, Wang Fengchuan, Hong Jinglan, 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.
 - [12] Owens J W. Life-cycle assessment in relation to risk assessment: an evolving perspective[J]. Risk Analysis, 1997, 17(3): 359-365
 - [13] Dreyer L C, Niemann A L, Hauschild M Z. Comparison of three different LCIA method: EDPI97, CML2001 and eco-indicator99: Does it matter which you choose[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(4): 191-200.
 - [14] 联合国环境规划署(UNEP). 全球LCA数据库指导原则与中国技术指南[C]. 北京: 中国LCA数据库建设与路线图研讨会资料, 2012.
United Nations Environment Programme. Global LCA database guiding principles and Chinese technical guide [C]. Beijing: China LCA database construction and roadmap Symposium, 2012.
 - [15] Guinée J B. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standard[S]. Amsterdam. Kluwer Academic Publishers, 2001.
 - [16] 周仲凡. 产品的生命周期设计指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 1-337.
Zhou Zhongfan. Life cycle design guide for products[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006: 1-337.
 - [17] Huijbregts M, Steinmann Z, Elshout P, et al. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22: 138-147.
 - [18] 周祖鹏, 刘夫云. 产品生命周期评价中值得注意的几个问题[J]. 制造业自动化, 2011, 33(3): 78-79, 107.
Zhou Zupeng, Liu Fuyun. Several issues should be considered in life cycle assessment of product[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(3): 78-79, 107.
 - [19] Cucurachi S, Heijungs R. Characterization factors for life cycle impact assessment of sound emissions[J]. Science of the Total Environment. 2014, 468-469: 280-291
 - [20] Heijungs R, Lenzen M. Error propagation methods for LCA-a comparison[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(7): 1445-1461.
 - [21] 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(1): 2136-2144.
Liu Xialu, Wang Hongtao, Chen Jian, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(1): 2136-2144.
 - [22] International Organization for Standardization. ISO 14044 Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines[M]. Geneva: ISO, 2006.
 - [23] Tillman A M. Significance of decision-making for LCA methodology[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(1): 113-123.
 - [24] Weidema B P, Ekvall T, Heijungs R. Guidelines for application of deepened and broadened LCA[R]. Paris: The Italian National Agency on new Technologies, Energy and the Environment, 2009.
 - [25] 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: 4309-4314.
 - [26] 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 Hua, Zhang Tianzhu. Data quality assessment of life cycle inventory analysis[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(5): 55-58.
 - [27] Searchinger T, Heimlich R, Houghton R A, et al. Use of US cropland for biofuels increases greenhouse gases through emission from land-use change[J]. Science, 2008, 319(5867): 1238-1240.
 - [28] 黄娜, 王洪涛, 王辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的LCA数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529-1536.
Huang Na, Wang Hongtao, Wang Cidong, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(6): 1529-1536.
 - [29] 刘涛, 黄志甲. 生命周期清单不确定性分析的主要数据选择[J]. 安徽工业大学学报, 2006, 23(1): 91-95.
Liu Tao, Huang Zhijia. Selection for key data in uncertainty analysis of life cycle inventory[J]. Journal of Anhui University

- of Technology (Natural Science), 2006, 23(1): 91–95.
- [30] Andrews E S, Barthel L P, Benoit C, et al. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products[R]. Research Gate. 2009.
- [31] Munguia N, Alvarer C R, Perezrk et al. Towards a life cycle sustainability assessment[J]. Sustainability, 2010, 2(10), 3309–3322.
- [32] 徐长春, 黄晶, Ridoutt B G, 等. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 873–880.
- Xu Changchun, Huang Jing, Ridoutt B G, et al. LCA-based product water footprinting and a case study[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(5): 873–880.
- [33] 计军平, 刘磊, 马晓明. 基于EIO-LCA模型的中国部门温室气体排放结构研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 741–749.
- Ji Junping, Liu Lei, Ma Xiaoming. Greenhouse gas emissions by Chinese economy: An assessment based on EIO-LCA model[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(4): 741–749.
- [34] Baral A, Bakshi B R. Emergy analysis using US economic input-output models with applications to life cycles of gasoline and corn ethanol[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(15): 1807–1818.
- [35] Ekvall T, Andrae A. Attributional and consequential environmental assessment of the shift to lead-free solders [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(5): 344–353.
- [36] 任丽娟, 陈莎, 张菁菁, 等. 生命周期评价清单中的不确定性分析[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(1): 118–120.
- Ren Lijuan, Chen Sha, Zhang Jingjing, et al. Uncertainty analysis in the inventory of the life cycle assessment[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(1): 118–120.
- [37] 朱立红, 刘光复. 生命周期清单的不确定性分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2012, 35(7): 870–873.
- Zhu Lihong, Liu Guangfu. Analysis of the uncertainty of life cycle inventory[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2012, 35(7): 870–873.
- [38] Norris G A. Integrating life cycle cost analysis and LCA[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2001, 6(2): 118–120.
- [39] Hunkeler D, Rebitzer G. Life cycle costing—paving the road to sustainable development[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(2): 109–110.
- [40] 邓楠圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- Deng Nansheng, Wang Xiaobing. Life cycle assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2003.
- [41] 冷如波. 产品生命周期3E+S评价与决策分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- Leng Rubo. Study on product life cycle 3E+S assessment and methodology of decision analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [42] Klöpffer W. Life cycle sustainability assessment of products [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(2): 89–95.
- [43] Dreyer L C, Hauschild M Z, Schierbeck J. A framework for social life impact assessment[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(2): 88–97.

Life cycle assessment and environmental management: Methodology, limitations, and technical progress

CAO Ye, ZOU Zhendong, QIU Guoyu

Shenzhen Engineering Laboratory for Water Desalination with Renewable Energy; Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract Life cycle assessment (LCA) method has been widely used in many fields since its birth, but the most prominent contribution is its application to environmental management. The technical framework of LCA can be divided into four parts: target and scope, list analysis, impact assessment (LCIA) and result interpretation. The methods of LCIA can be summed up as midpoint method and end point method. LCA has limitations in such as data acquisition, inventory allocation, boundary selection, evaluation models, temporal and spatial constraints, and uncertainty of results. In order to adapt to the requirements of environmental management and evaluation technology, LCA evaluation technology is being developed towards a systematic direction. LCA has so far expanded its application field and avoided its limitation in evaluation, which makes it become an indispensable tool for environmental management.

Keywords life cycle; impact assessment; environmental management; sustainable development ●



(责任编辑 祝叶华)