

DOI:10.13196/j.cims.2014.05.guoyan.1141.8.20140517

产品生命周期评价关键问题研究评述

郭焱¹, 刘红超¹, 郭彬²⁺

(1. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072; 2. 太原理工大学 经济管理学院, 山西 太原 030024)

摘要:针对产品生命周期评价中目标和范围定义阶段的归因生命周期评价和归果生命周期评价问题、功能单位定义和系统边界界定问题、清单分析阶段的数据质量和不确定性问题、清单分析方法的选择问题、清单数据的分配问题、影响评价阶段的评价方法选择问题,以及生命周期评价范围的拓宽和加深问题进行了理论梳理与分析,提出针对这些关键问题的主要解决办法。通过对这些问题的研究指出,未来的生命周期评价将沿着生命周期可持续评价的方向发展,它不仅考虑环境的影响,还将经济和社会的影响包括在内。在生命周期可持续性评价中仍然会出现新的关键问题,需要进一步研究和探讨。

关键词:生命周期评价;生命周期清单分析;生命周期影响评价;生命周期可持续评价

中图分类号:F062.4 文献标识码:A

Review of key issues on product life cycle assessment

GUO Yan¹, LIU Hong-chao¹, GUO Bin²⁺

(1. Department of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 30072, China;

2. School of Economics and Management, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the attributional Life Cycle Assessment (LCA) and consequential LCA of goal and scope definition level in LCA, the problems such as the functional unit and system boundary definition, the quality and uncertainty of the inventory data, the selection and allocation of inventory data analysis, the broaden and deepen the scope of LCA and the selection of varies impact assessment methods were analyzed. The main solving methods for these key problems were also proposed. Through the study for these problems, the conclusion and outlook showed that LCA would develop along the direction of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) in the future, which was not only accounted the environmental aspects, but also included the economic and society. The new key problems would be appeared in LCSA that needed further study and discussion.

Key words: life cycle assessment; life cycle inventory analysis; life cycle impact assessment; life cycle sustainability assessment

0 引言

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)在过去的30年已经显著发展,并且成为识别和量化产品或服务潜在环境负担的强有力工具。随着气候变化等一些环境问题的恶化,LCA越来越多地受到

人们的关注。1993年国际环境毒理学与化学学会(SETAC)首先提出了LCA的实践准则——生命周期评价指南“实践准则”^[1],并确定了LCA四个步骤的技术框架:目标和范围定义、清单分析、影响评价和改善分析。随后国际标准化组织(ISO)开始参与到LCA的研究中,并相继出台了一系列标准(如

收稿日期:2013-02-03;修订日期:2013-07-16。Received 03 Feb. 2013; accepted 16 July 2013.

基金项目:内燃机燃烧学国家重点实验室2010年开放基金资助项目(K2010-11);2012山西省软科学研究资助项目(2012041054-02)。Foundation items: Project supported by the 2010 Open Fund of State Key Laboratory of Engines, China (No. K2010-11), and the Program for Shanxi Provincial Soft Science Research, China (No. 2012041054-02).

ISO14040-14043) 来指导 LCA 的实施, 还将原来 SETAC 给出的四步骤模型进行了改进, 将其中的“改善分析”阶段替换为“解释”阶段。为了更好地实施 LCA 方法并规范实施细则, ISO 又将原来的 14040-14043 系列标准进行了修订, 形成了新的标准, 即 ISO14040(新) 和 ISO14044^[2-3], 这两个标准取代了旧标准, 成为现在唯一有效的标准, 并一直被人们采用。然而, ISO 的 LCA 技术框架也存在一些局限性, 例如它未详细规定 LCA, 未能对分配问题、影响评价方法的选择等做出明确的规定。由于 ISO 的 LCA 框架只是一个程序性框架, 对不同产品或技术的 LCA 方法的选择等技术细节方面的描述还不太完善, 而且 LCA 本身存在数据采集等一些系统内在的不确定性因素, 导致目前的 LCA 中仍然存在一些亟待解决的关键问题。本文通过梳理 LCA 在目标和范围定义、清单分析, 以及影响评价阶段关键问题的现在、过去和将来, 试图对该领域的研究者提供一定的帮助。

1 目标和范围定义阶段存在的关键问题

LCA 的目标和范围定义阶段主要定义评价系统的功能单位和界定系统边界, 并说明进行这项研究的目的, 以及应用方向和目标受众。因为目标和范围的确定会影响后续步骤中方法和数据的选择, 所以功能单位的定义、系统边界的界定以及归因 LCA (Attributional LCA, ALCA) 和归果 LCA (Consequential LCA, CLCA) 方法的选择成为此阶段的关键问题。下面将对这些问题进行详细阐述。

1.1 功能单位的定义

功能单位是对所研究的产品系统服务性能的定量描述, 为了能够比较同一类型的不同产品, 需要选择一个具有可比性的功能单位。如果功能单位选择不当, 则可能得到不恰当的评价结果。Rebizer 等 (2004)^[4] 指出, 在 ALCA 的情况下定义功能单位时, 功能单位的大小不影响最终的评价结果, 因为在 ALCA 的情况下使用的是平均数据, 清单数据总是与功能单位呈线性关系; 而在 CLCA 的情况下, 功能单位的大小会影响最终的评价结果, 因为 CLCA 使用的是边际数据, 它考虑活动的变化对系统造成的影响。对于不同的产品类型, 其功能单位的定义方式也有所区别。一般情况下, 功能单位是以每单位的产出为基础来定义的, 但有些情况下功能单位也会以产出率来表示。周祖鹏 (2011) 指出, 功能单

位的选择应以单位信息量为依据, 以避免因功能单位选择不当而得出不客观的评价结果^[5]。

1.2 系统边界的界定

在 LCA 中, 系统边界的界定十分重要, 应该明确界定哪些过程包括在研究系统中, 这对评价结果有很大的影响。Guinée (2002) 将系统边界划分为三种类型: ①技术系统和环境之间的系统边界; ②主要过程和非主要过程之间的系统边界; ③研究中的技术系统和其他技术系统之间的系统边界^[6]。Finnveden 等 (2009)^[7] 关于这三种类型的系统边界的界定作了总结, 指出系统边界应该包括产品从“摇篮到坟墓”的整个生命周期过程, 不能多算也不能少算, 也就是说系统边界中的投入应该追溯到从大自然中发现的物质中, 例如可以把原油作为生命周期过程中的一项投入, 但是不能将柴油作为投入, 因为柴油是人们用一定生产工艺生产出来的物质; 同理, 生命周期过程中的产出也应该是最终不经过人类改变排放到大自然中的物质。Gaudreault (2010)^[8] 将系统边界的界定方法总结为两种, 即从摇篮到坟墓的方法 (即 ALCA 方法) 和系统扩张的方法 (即 CLCA 方法)。前者只将从摇篮到坟墓的全过程包括在 LCA 的系统边界内, 这种方法将系统边界截断在某一定程度, 从而引起数据分配问题的出现; 后者能够通过系统扩张将对环境有影响的所有过程都包括在内, 从而避免分配问题的出现。

1.3 归因 LCA 和归果 LCA 方法选择

考虑到 LCA 的研究目的不同, 尤其是在界定系统边界时确定哪些过程应该包括在研究的系统内, 对 LCA 的研究十分重要, Heintz (1992)^[9] 和 Weidema (1993)^[10] 等指出有两类不同的 LCA: ①描述一种产品系统与其环境的交换; ②描述一项特定的决策如何影响系统的环境交换。他们将这两类 LCA 称为回顾的 LCA 和展望的 LCA。到 2001 年, 正式将其称为 ALCA 和 CLCA^[11]。近年来, ALCA 和 CLCA 间的差异已经引起研究者的广泛关注, 其间的区别可以概括为以下三个方面:

(1) 关注的信息不同 ALCA 重点描述流入或流出产品生命周期或其子系统的、与环境有关的物质流和能量流的改变; CLCA 旨在描述对产品或技术选择等决策引起市场范围内的能源和环境的影响的变化情况。这里的环境影响包括直接影响和间接影响。ALCA 可以看作是一个静态的模型, 而 CLCA 则是一种动态的变化模型。

(2)数据的选择不同 ALCA 一般使用平均数据,它可以看成是一种线性模型,数据单位的大小对最终结果不会造成影响;CLCA 一般使用边际数据来衡量单位变化造成的环境负担。

(3)系统边界的选择不同 ALCA 在界定系统边界时应该将主要过程包括在系统模型中,它关注的是生命周期从摇篮到坟墓的全过程;CLCA 则包括受决策影响较大的过程,不管其是否在生命周期的系统边界内。ALCA 方法能够主观地确定一个完整的系统边界,因此会产生相应的数据分配问题(详见 3.2.2 节);CLCA 相当于是对系统边界的一个扩张,虽然在一定程度上可以避免出现分配问题,但是增加了系统内在的不确定性^[12]。

CLCA 在概念上更为复杂,它实质上是 LCA 方法与经济学模型的一种结合。CLCA 将经济学中的局部均衡模型等包括在内,通过考虑市场因素尤其是产品替代效应,分析当多产品系统发生边际变动时,系统能源和环境影响的变化情况。例如 Ekvall 等(2006)将简单的局部均衡模型与 LCA 模型相结合,分析了由电子业钎焊料禁令产生的间接环境影响^[13]。因为在该评价过程中缺乏切实可行的边际数据,使 CLCA 的应用受到限制,所以在评价过程中收集相应的边际数据是 CLCA 应用所要应对的主要挑战。虽然 ALCA 和 CLCA 之间有诸多区别,但是它们都作为一种 LCA 方法被普遍使用。例如 Thomassen(2008)同时运用 ALCA 和 CLCA 方法对牛奶的生产过程进行评价,但这两种方法的选择导致在总的定量结果、可理解程度和质量等方面均存在差异^[14]。他们指出,学者们应该进一步区分 ALCA 和 CLCA 的区别。此外,他们还建议不同领域的 LCA 从业者进行类似的案例研究,解决具体产品的 ALCA 和 CLCA 之间的差异。Zamagni(2012)建议使用情境模拟的方法来支持 CLCA,主要考虑技术变化、市场变化等情境因素,目的是使 CLCA 的决策更加适应外部环境变化,更具有科学性和可操作性。他们也指出,CLCA 的发展仍然存在一些改善的空间,例如:说明何时并且哪些市场信息是重要和必要的;理解情境建模在 CLCA 中的作用;开发一个程序来支持问题的构建,以更好地将问题和模型进行连接^[15]。目前国内还没有与 ALCA 和 CLCA 相关的研究。

2 清单分析中存在的 key 问题

生命周期清单分析(Life Cycle Inventory anal-

ysis, LCI)是对“从摇篮到坟墓”整个生命周期过程中的废物排放和资源消耗等进行量化。目前对 LCI 的研究已经比较成熟,LCI 需要许多数据,收集和编译清单数据可能是 LCA 中最耗时耗力的环节。这个阶段的关键问题是数据质量问题以及数据的不确定性问题、清单数据的分配问题、LCI 模型的选择问题。

2.1 清单数据的质量以及不确定性

清单数据质量在很大程度上决定了 LCA 结果的可靠性,随着 LCA 方法应用的增加,对 LCA 结果可靠性的要求也越来越高,因此所面临的任务是如何保证数据质量以及分析其不确定性。目前保障清单数据质量的方法主要有建立可靠的 LCI 数据库和开发相应的 LCA 软件两种。近年来,已经有很多国家建立了 LCI 数据库,这些数据经常需要与 LCA 软件结合。许多国家和国际的公开数据库已经发布,包括瑞典 SPINE@CPM 数据库、德国 PROBAS 数据库、日本 JEMAI 数据库、美国 NREL 数据库、澳大利亚 LCI 数据库、瑞士 Ecoinvent 数据库和欧洲生命周期文献数据库(European Reference Life-Cycle Database, ELCD)。美国阿贡实验室的 GREET 数据库为车用燃料的 LCA 提供了相应的数据支持。更多的数据库现正在全世界范围内开发,如巴西、加拿大、中国、德国、马来西亚、泰国等^[7]。对于 LCA 研究者来说,为了保证 LCI 的准确性,在进行数据分析时应该使用专用的 LCA 软件,LCA 研究者也致力于各种专用化的软件开发。郑秀君等(2013)总结了我国在清单数据库方面的发展,至今我国开发的 LCA 数据库有四川大学和亿科环境科技开发的 CLCD、中国科学院生态环境研究中心开发的 RCESS、同济大学开发的中国汽车替代燃料生命周期数据库、宝钢开发的 BaosteelLCA^[16]。除了用上述两种方法来保障清单数据的质量外,还有必要对所获得的数据进行不确定性分析,找出不确定性大的数据进行重点研究,从而保证清单分析结果的可靠性。目前 LCA 研究者已经开发了许多方法进行清单数据的不确定性分析,如高斯误差传播公式、蒙特卡罗模型、基于概率分布的随机模拟方法、区间方法、模糊逻辑方法等。黄娜等(2012)通过提出定量评估并控制 LCA 数据质量的系统化方法(CLCD-Q 方法),从 LCA 案例的原始数据和清单数据算法开始评估不确定度,通过两次蒙特卡罗模拟,得出单元过程清单数据及 LCA 结果

的不确定度,结合敏感度分析辨识出 LCA 模型中具有高不确定度和高敏感度的关键数据,从而指出控制和改进数据质量的关键点^[17]。Hong 等(2010)采用泰勒级数展开式的方法评估生命周期清单分析和影响评价中的不确定性,得到的结果与使用蒙特卡洛模型得到的结果相似,但是这种方法在操作方面更为简单^[18]。朱立红(2012)结合多元线性回归模型与偏回归平方和理论,对生命周期输入清单数据的不确定性进行分析,并通过洗碗机生命周期清单数据对方法进行了验证。结果表明,将数据质量指标方法与回归分析方法结合应用到 LCA 中,可以很好地评定数据的不确定性和模型的可靠性^[19]。

2.2 清单数据的分配

在产品的生命周期过程中,输入和输出的产品往往不是单一的,而是包括一种或者多种副产品,此时需要进行数据分配。数据的分配问题是 LCA 中最具争议的问题之一,目前还没有统一的分配方法,主要有多输出、多输入、开环循环^[7]三种类型的数据分配方法,这些方法各有优劣。国际上常用的方法主要是 ISO 国际标准化组织给出的关于清单数据分配的三种方法:①只要有可能,就应该使用细分或者系统扩张的方法避免出现分配问题;②如果不能避免出现分配问题,则采用清单数据之间存在的物理(化学或者生物)关系的方法进行分配;③如果以上方法都不可行,则使用基于其他方法的分配手段,如经济价值、质量或能量^[2-3]。ISO 认为系统扩张方法能够避免出现分配问题,该方法将其中一种产品定义为主要产品,而其他产品则看作这种主要产品的副产品,这些副产品替代了原来在系统边界之外产出的市场产品。ISO 倾向于使用系统扩张的方法解决分配问题,许多研究者也赞同这种方法,但是也有一些研究者认为系统扩张中使用的数据来源不明,可能显著改变结果。Lundie 等(2007)发现,最后一种方法仍然是最常用的方法,他指出,系统扩张方法可能会出现新的分配问题,因此并不能消除分配问题。有一些研究者使用不止一种方法解决数据的分配问题^[20]。Hill 等(2006)使用经济方法解决主要产品的分配问题,同时使用基于能量的方法解决系统中副产品的分配问题^[21]。Beer 等(2007)在一个蔗糖乙醇系统中同时考虑经济方法和系统的扩张方法^[22]。Mendoza 等(2008)用多种分配方法研究生物电的生产链,指出在优先考虑一致性的情况下,基于物理关系的分配方法是首要选择,但是以

经济为基础或者系统扩张的办法更有效,尽管可能会受到数据不足的影响^[23]。周祖鹏(2011)指出数据分配方法有市场价格分配法、能量分配法和质量分配法等,这些实际上也是 ISO 给出的分配标准^[5]。近年来,随着 CLCA 方法的普及,数据分配问题又有了新的解决办法。在 CLCA 的情况下,由于系统边界不仅包括从摇篮到坟墓的整个生命周期过程,还将对环境有影响的所有变化过程都包括在所研究的系统中,因此使用 CLCA 方法可以扩张系统边界,避免由于系统边界划分导致的分配问题。

2.3 清单分析方法的选择

LCI 是 LCA 基本数据的一种表达和 LCA 的基础,也是其各过程中不确定性最大的部分,选择合适的 LCI 方法对清单结果有很重要的影响。目前的 LCI 方法有过程方法、经济输入输出方法,以及将这两种方法不同程度地结合后产生的混合方法。过程方法是 SETAC 推荐的方法,其出发点是为了对系统进行简化,根据所研究系统输入或输出的重量、体积或产品价格,确定比较重要的过程,将其包括在研究的边界之内。原则上,所排除的过程应该对 LCA 结果的影响不大,但是并不总能达到这样的目的。为了克服这个问题,Lave(1995)将经济系统中的输入输出方法引入 LCA 研究中。经济输入输出方法的建立和求解要经过两个阶段,首先根据某输出产品的需求变化求出引起相关输入产品变化的情况(以货币的形式表达),然后根据单位产品产生的环境负荷进行影响分析^[24]。I-O LCA 方法主要用于评估宏观层面的国家经济活动,如某些行业内的环境影响。然而,对于许多研究者来说,输入输出方法也不是一个完全理想的 LCA 方法。无论过程方法还是经济输入输出方法,都建立在输入和输出之间呈线性关系的假设之上,而大多数投入产出关系是非线性的,并且常用的这两种方法都有一定的局限性,因此产生了混合 LCA 方法,该方法结合了过程方法和经济输入输出方法的优势^[25]。Moriguchi 等(1993)最早提出了混合 LCA 方法的有用性,但是直到 20 世纪末、21 世纪初,这种方法才开始广泛使用^[26]。Moriguchi 等(1993)将过程 LCA 和投入产出 LCA 分析方法相结合,在主要过程使用过程 LCA 方法进行详细分析,而在远离主要过程的上游部分使用投入产出 LCA 方法进行分析。混合 LCI 方法有明显的优势,尤其是在系统的完整性方面,过程 LCI 方法将系统边界截断到某种程度,而基于 I-

O 的方法只在上游系统边界比较完整。然而相比其他两种方法而言,混合分析方法对时间和资金的消耗大,当有足够的时间和资金支持时,混合分析方法无疑是最佳的选择。Davidsson 等(2012)也对过程方法、经济输入输出方法和混合方法进行了总结,指出混合方法结合了过程分析和输入输出分析的优势,但是人们仍然在过程方法的使用上有更高的一致性。由于混合分析方法在实证方面的应用还比较少,需要进一步研究^[27]。

3 生命周期影响评价中存在的 key 问题

生命周期影响评价(Life Cycle Impact Analysis, LCIA)正处于发展中,还没有普遍被接受的方法,是目前 LCA 中最有争议的部分,它主要对 LCI 中所识别的环境负荷进行定性或定量描述与评价。ISO 将影响评价的过程分为必要因素和可选因素,必要因素包括分类和特征化,可选因素包括标准化、分组和/或加权。分类是将清单分析中的数据归类到相应的环境影响类别的过程,特征化是使用特征化模型计算环境影响指标,量化是将特征化的结果进行归一化处理,并通过加权得到最终的环境影响值的过程。该阶段存在的 key 问题是 LCIA 方法的选择问题,以及影响评价范围的拓宽和加深问题。

3.1 生命周期影响评价方法的选择

由于环境问题的复杂性和动态性,很难得到一个被广泛接受的 LCIA 方法,LCIA 方法和科学的基准体系仍在不断发展中。Lindeijer(1996)认为国际上比较有代表性的影响评价方法有 25 种,基本分为环境问题法和目标距离法^[28]。前者着眼于环境影响因子和影响机理,对各种环境干扰因素采用当量因子转换进行数据标准化分析,如瑞典的产品设计的环境优先战略(Environmental Priority Strategies in Design Product, EPS)方法、瑞士和荷兰的生态稀缺性方法以及丹麦的工业产品环境设计(Environment Design of Industrial Products, EDIP)方法等;后者则着眼于影响后果,用某种环境效应的当前水平与目标水平(标准或容量)之间的距离表征某种环境效应的严重性,其代表方法是瑞士的临界体积法。目前,国际上通常将 LCIA 方法分为中点方法和端点方法两类。中点方法侧重于环境的影响类别及其作用机理,使用各种特征因素描述各种环境干扰因素的相对重要性;端点方法重点关注环境影响问题的因果关系,即损害类别(如图 1)。虽然目前

已经针对特征化方法做了很多相关的研究,但是仍然没有得出一致的方法进行影响评价。许多研究者得出的结论是:对于相同的清单数据,使用不同的影响评价方法可能会得出不同的影响评价结果。Michael 等(2013)推荐了 14 种类别的中点和端点水平的影响评价方法^[29]。在中点水平下推荐的特征化模型中,只有三种被归类为“满意”,另外 10 种被归类为“需要一定的改善”,还有一种方法由于普适性弱,在使用时需要非常谨慎。对于某些影响类别来说,推荐模型的分类水平因物质类型的不同而不同,在端点水平下,所推荐的模型只与三种影响类别有关。对于剩下那些影响类别,现有的方法不能很好地进行特征分类,其中最好的方法被认为是“过渡期”的方法,即目前这种方法并不推荐使用,但是能够为其进一步发展提供一定的基础。另外,有些研究者已经尝试将环境 LCA 与其他一些环境评价方法(如风险评价、多目标决策分析等)进行整合,得到了更好的环境评价结果。

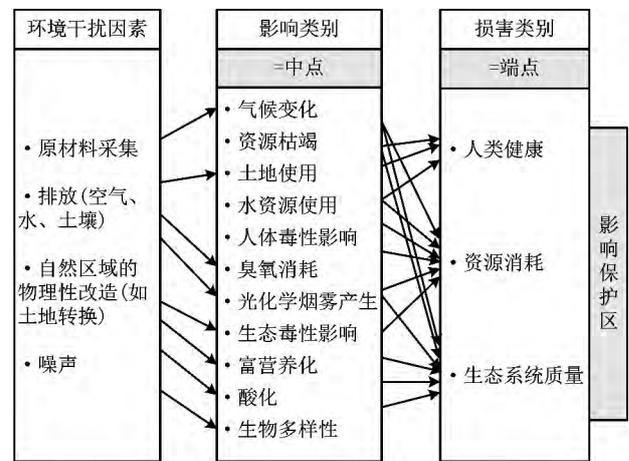


图1 生命周期影响评价中点、端点方法框架图

3.2 生命周期评价范围的拓宽和加深

传统的 LCIA 是一种静态的评价方法,该方法没有考虑时间和空间的动态变化指标,许多数据都使用全球范围内的数据,缺乏地域特征,从而导致不客观的影响评价。为了克服这一局限,Pennington 等(2004)指出目前的 LCIA 实践通常使用一般的时间和地点特征因素,但并不说明不考虑时间和空间动态变化的模型就是最优的模型^[30]。在建立同时考虑时间和空间的动态变化模型时还应该考虑到以下因素:①产生的废物、废气或者消耗资源所发生的时间和位置;②进入环境中的排放模式;③不同时间和空间条件下,受影响的环境的敏感度。Harish 等

(2010)提出将目前的评价方法加深,主要是提高其在不同情境下的可用性和可靠性,例如通过考虑它们在时间和空间方面的动态变化,将这种动态变化指标考虑在内。他还指出,为了加强 LCA 作为决策支持工具的有效性,有必要拓宽和加深 LCA 的目标和范围,通过将 LCA 与其他方法进行整合和联系就可以做到这一点。他们介绍了典型的程序性方法、分析方法、经济方法和社会方法,并试图将 LCA 与这些方法进行整合,以使其更好地发挥作用^[31]。Levasseur 等(2010)在传统 LCA 方法下考虑时间的动态变化因素,将动态 LCA 模型运用于温室气体排放的评价中,他们在动态 LCA 模型中将排放物的时间分布考虑在内,这样每一类排放物的清单结果是一个时间函数,而不是一个单一的数。因此运用动态 LCA 评价模型能够显著改善评价结果,提高评价结果的可靠性^[32]。顾国刚等(2012)研究了 LCA 中的时间差异和生命周期排放模式,引入生命周期平均排放速率函数,以连续排放的模式代替现有研究的脉冲排放模式,在此基础上运用一级衰减模型建立了 LCA 中的时间折扣计算方法。最后,以国内某企业生产的洗碗机产品进行实例研究,结果展示了 CO₂ 连续排放的变化情况^[33]。Rack 等(2013)认为 UNEP/SETAC(united nations environment program/society of environmental toxicology and chemistry)召开的生命周期倡议研讨会中,报告“LCIA——我们现在的位置,趋势以及未来”为生命周期评价的研究指明了方向。他们强调区域化特征因素的重要性,并且指出目前的影响评价应该向更广泛的可持续评价领域发展^[34]。

近年来,随着可持续发展概念的提出,人们逐渐认识到为了人类的协调可持续发展,有必要同时考虑环境、经济和社会三个层面的信息。而传统 LCA 仅限于对环境影响的评价,对社会和经济方面的因素没有做出完善的指导,因此越来越多的研究开始关注将 LCA 的范围由环境向社会和经济层面拓宽。邓超等(2008)研究了产品生命周期制造阶段中 LCA 与生命周期成本的整合与优化问题,在建立制造阶段整合评价模型的基础上,提出基于工艺约束的工艺方案优化模型,获得制造阶段的环境、经济和技术综合效益最优,并以实例验证了预期效果^[35]。Finkbeiner 等(2010)将马斯洛关于人类需求层次的金字塔进行了改善,提出生命周期可持续评价(Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA)

发展历程的金字塔,直观地展示了 LCA 从环境评价到可持续性评价的转变。同时也介绍了两个 LC-SA 模型,即“生命周期可持续评价三角模型(Life Cycle Sustainability Triangle, LCST)”和“生命周期可持续评价仪表盘模型(Life Cycle Sustainability Dashboard, LCSD)”^[36]。Guinée 等(2011)将未来十年看成是 LCA 可持续性分析的十年,在这十年内有望发展一个既考虑环境、社会、经济三个层面的因素,又能够解决产品、部门以及整个经济层面等不同水平问题的 LCSA 框架,并制定一套更为完整的机制。欧盟在 CALCAS 报告^[37]中已经为 LCSA 提出了一个框架,该框架拓宽和加深了 LCA 的范围,并考虑了可持续发展的三个维度(环境、经济和社会)的信息,它将原来 ISO-LCA 框架中的清单分析和影响评价阶段合成为一个中间建模过程,在建模过程中考虑了更多其他方面的指标(如社会、经济指标、宏观经济指标等)。LCSA 作为未来 LCA 的一个发展方向,已经越来越得到人们的重视,目前越来越多的研究者开始从理论和实证方面研究 LCA 的可持续性问题。

4 结束语

本文主要针对 LCA 中目标和范围定义、清单分析和影响评价阶段存在的关键问题进行分析。在目标和范围定义阶段,功能单位的定义遵循可比性原则。系统边界的划分对三方面进行权衡,即技术系统和环境之间的系统边界、主要过程和非主要过程之间的系统边界,以及研究中的技术系统和其他技术系统之间的系统边界。目前有关系统边界的界定主要有 ALCA 和 CLCA 两种方法,ALCA 方法将系统边界截断在某一程度,导致了数据分配问题;CLCA 方法则在一定程度上可以避免由于系统边界的划分而导致的数据分配问题,但对数据要求比较高,同时也增加了系统内在的不确定性。因此,为了提高 LCA 中目标和范围定义的合理性,有必要将 ALCA 和 CLCA 方法进行整合,这是下一步要研究的问题。在清单分析阶段,关于清单数据的质量和不确定性,研究者主要通过建立数据库、开发 LCA 软件和使用高斯误差传播公式、蒙特卡罗模型、泰勒级数展开式等模型方法来评估生命周期清单分析和影响评价中的不确定性。清单数据的分配可通过系统扩张方法,物理、化学或者生物关系分配方法,以及使用基于其他方法的分配手段,如经济价值、质量

或者能量等来实施。清单分析方法的选择主要在过程分析方法、经济投入产出分析方法和混合分析方法三者间展开。过程分析方法在使用上有更高的一致性,目前仍然是主流;混合分析方法有待进一步开发与实证检验。在生命周期影响评价阶段,生命周期影响评价方法在20世纪90年代被划分为环境问题法和目标距离法,而在21世纪中点方法和端点方法被使用,对于不同的评价目标要求会有不同的方法与之匹配。另外,LCA方法与其他环境评价方法(如风险评价、多目标决策分析等)相结合,也是进一步提升评价效果的发展途径。LCA方法的拓宽和加深,主要由不考虑时间和空间的静态评价方法向考虑时间和空间指标的动态评价方法转变,从传统的只考虑环境影响的LCA向考虑环境、经济和社会三个维度信息的更广泛的可持续性LCA分析转变。毫无疑问,LCA与其他环境影响评价方法的结合,以及与时间、空间的动态结合和与环境、经济与社会指标的有机结合,是未来可持续发展的要求。因此,生命周期可持续性评价仍然是未来一段时期的研究方向,在生命周期可持续性评价中仍然会出现新的关键问题,需要进一步研究和探讨。

参考文献:

- [1] SETAC. A technical frame framework for life cycle assessment[R]. Brussels, Belgium; SETAC, 1993.
- [2] International Standard Organisation (ISO). ISO14040 Environmental management—life cycle assessment; principles and framework[S]. Geneva, Switzerland; ISO, 2006.
- [3] International Standard Organisation (ISO). ISO14044 Environmental management—life cycle assessment; requirements and guidelines[S]. Geneva, Switzerland; ISO, 2006.
- [4] REBITZER G, EKVAL T, FRISCHKNECHT R, et al. Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 701-720.
- [5] ZHOU Zupeng, LIU Fuyun. Several issues should be considered in life cycle assessment of product[J]. *Manufacturing Automation*, 2011, 33(3): 78-79, 107 (in Chinese). [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.]
- [6] GUINÉE J B, GORRÉE M, HEIJUNGS R, et al. Life cycle assessment; operational guide to the ISO standards[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2002, 7(5): 311-313.
- [7] FINNVEDEN G, MICHAEL Z, HAUSCHILD, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1): 1-21.
- [8] HARRISON G P, MACLEAN E J, KARAMANLIS S, et al. Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(7): 3622-3631.
- [9] HEINTZ B, BAISNÉE P F. System boundaries[R]//Life Assessment. Brussels, Belgium; SETAC, 1992: 35-52.
- [10] WEIDEMA B P. Development of a method for product life cycle assessment with special references to food products(summary)[D]. Lyngby, Denmark; Technical University of Denmark, 1993.
- [11] CURRAN M A, MANN M, NORRIS G. Report on the international workshop on electricity data for life cycle inventories[EB/OL]. [2013-04-17]. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1001NRO.pdf>.
- [12] EKVAL T, TILLMAN A M, MOLANDER S. Normative ethics and methodology for life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(13/14): 1225-1234.
- [13] EKVAL T, ANDRAE A. Attributional and consequential environmental assessment of the shift to lead-free solders[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006, 11(5): 344-353.
- [14] 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.
- [15] ZAMAGNI A, GUINÉE J, HEIJUNGS R, et al. Lights and shadows in consequential LCA[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(7): 904-918.
- [16] ZHENG XiuJun, HU Bin. Domestic literature review and the la test overseas research progress of life cycle assessment[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2013, 30(6): 155-160 (in Chinese). [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.]
- [17] 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 (in Chinese). [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.]
- [18] HONG Jinglan, SHAKED Shanna, 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.
- [19] ZHU Lihong, LIU Guangfu. Analysis of the uncertainty of life cycle inventor[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2012, 35(7): 870-873 (in Chinese). [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.]
- [20] LUNDIE S, CIROTH A, HUPPES G. Inventory methods in LCA; towards consistency and improvement[EB/OL]. [2013-04-17]. <http://lcinitiative.unep.fr/includes/file.asp?site=cinit&file=1DBE10DB-888A-4891-9C52-102966464F8D>.
- [21] HILL J, NELSON E, TILMAN D, et al. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and eth-

- anol biofuels[C]//Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Washington, D. C. , PNAS, 2006, 103(30): 11206-11210.
- [22] BEER T, GRANT T. Life-cycle analysis of emissions from fuel ethanol and blends in Australian heavy and light vehicles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(8/9): 833-837.
- [23] GUINEE J B, HEIJUNGS R, VAN DER VOET E. A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2009, 14(4): 328-339.
- [24] LAVE L B, COBRAS-FLORES E, HENDRICKSON C, et al. Using input-output analysis to estimate economy wide discharges[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29(9): 420-426.
- [25] SUH S. Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model [J]. *Ecological Economics*, 2004, 48(4): 451-467.
- [26] MORIGUCHI Y, KONDO Y, SHIMIZU H. Analyzing the life cycle impact of cars; the case of CO₂ [J]. *Industry and Environment*, 1993, 16(1/2): 42-45.
- [27] DAVIDSSON S, HÖÖK M, WALL G. A review of life cycle assessments on wind energy systems[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(6): 729-742.
- [28] DE HAES H A U, JOLLIET O, FINNVEDEN G, et al. Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1999, 4(2): 66-74.
- [29] HAUSCHILD M Z, GOEDKOOP M, GUINÉE J, et al. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(3): 683-697.
- [30] PENNINGTON D W, POTTING J, FINNVEDEN G, et al. Life cycle assessment part 2: current impact assessment practice [J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 721-739.
- [31] 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.
- [32] LEVASSEUR A, LESAGE P, MARGNI M, et al. Considering time in LCA dynamic LCA and its application to global warming impact assessments[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(8): 3169-3174.
- [33] GU Guogang, LIU Guangfu, ZHANG Lei. Research on temporal discounting for life cycle assessment[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(1): 193-195 (in Chinese). [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.]
- [34] RACK M, VALDIVIA S, SONNEMANN G. Life cycle impact assessment—where we are, trends, and next steps: a late report from a UNEP/SETAC life cycle initiative workshop and a few updates from recent developments[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(7): 1413-1420.
- [35] DENG Chao, WANG Liqin, WU Jun. Integration evaluation & optimization of LCA & LCC based on process constraints [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(8): 1646-1651 (in Chinese). [邓超, 王丽琴, 吴军. 基于工艺约束的生命周期评价与生命周期成本综合评价与优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(8): 1646-1651.]
- [36] FINKBEINER M, SCHAU E, LEHMANN A L, et al. Towards life cycle sustainability assessment [EB/OL]. [2013-04-17]. http://www.unep.org/pdf/UNEP_LifecycleInit_Dec_FINAL.pdf.
- [37] CALCAS Co-ordination action for innovation in life-cycle analysis for sustainability website [EB/OL]. (2010-07-01) [2013-04-17]. <http://www.calcasproject.net/>.

作者简介:

郭焱(1963—),女,山西朔州人,副教授,硕士生导师,博士生联合导师,研究方向:产品生命周期理论、产品可持续发展评价模型等, E-mail: guoyan@tju.edu.cn;

刘红超(1987—),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向:产品生命周期评价理论与应用;

郭彬(1970—),男,山西太原人,副教授,硕士生导师,研究方向:节能减排与循环经济等,通信作者, E-mail: guobin@tyut.edu.cn.