

# 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用

肖汉雄 杨丹辉

**摘要** 生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是环境科学应用于环境规制构建和行业自律的重要成果。由发达国家主导开发的 LCA 体系旨在全面评价特定产品在其生命周期内产生的环境影响, 为政策制定和企业决策提供依据。随着资源环境约束增强, 生命周期评价体系及其应用对于加快落实绿色发展理念、推动中国工业绿色转型具有重要意义。LCA 方法在国内汽车、钢铁、建材、家用电器等行业中得到了日益广泛的应用, 但受制于数据支撑体系不完善等因素, 全生命周期环境影响评价 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) 方法的应用普遍存在方法陈旧、流程不完整等问题和障碍。为进一步提高绿色评估的科学性和规范性, 今后应加强企业界、行业协会和政府主管部门的数据共享, 共同推动 LCIA 方法及其技术参数的本土化改进和扩展, 引导企业基于自我评价的绿色转型, 促使其更好地服务于产品、工艺、技术的绿色数据库建设以及绿色标准的制定及实施。

**关键词** 生命周期评价 LCIA 环境规制 绿色发展

[中图分类号] F069.9 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2018) 01-0088-18

## 一、引言

工业生产是人类物质财富积累的主要来源, 但不可否认, 人类的工业化进程也对生态环境造成了不同程度的损害。进入 21 世纪, 大规模开发利用化石能源导致环境

**【基金项目】** 国家社会科学基金重大项目“稀有矿产资源开发利用的国家战略研究——基于工业化中后期产业转型升级的视角”(批准号: 15ZDA051); 中国社会科学院创新工程项目“中国工业绿色发展研究”(2016~2019年)。

**【作者简介】** 肖汉雄 (1991-), 中国社会科学院研究生院工业经济系博士研究生, 邮政编码: 102488; 杨丹辉 (1969-), 中国社会科学院工业经济研究所工业资源与环境研究室主任、研究员、博士生导师, 邮政编码: 100836, 本文通讯作者。

致谢: 感谢审稿专家匿名评审, 当然文责自负。

危机加剧，建立在化石能源基础上的传统工业文明陷入困境。国际金融危机发生后，以资源消耗和需求拉动为支撑的经济增长模式受到巨大冲击。深刻反思金融危机的成因，发达国家对经济过度虚拟化进行纠偏，重新审视工业部门在财富形成和积累中的重要作用，相继实施“再工业化”战略，意在以创新激发制造业活力，重振实体经济。近年来，发达国家重振实体经济的政策效果开始逐步释放，新一轮科技革命和工业革命蓬勃兴起，新科技新产业新商业模式为全球实体经济转型发展注入了新的活力。同时，在世界经济艰难复苏和深度调整的大背景下，发达国家实行“绿色新政”，试图通过发展绿色技术和绿色产业，发掘新的绿色增长点，将全球工业带入绿色转型的新路径，为重塑全球产业链、推动消费者行为变革提供持续动力，进而在实体经济领域新一轮国际竞争中占据制高点。

改革开放以来，中国工业化发展取得了举世瞩目的成就，已成为世界第一制造大国。然而，由于粗放型增长方式的长期影响，工业领域资源浪费、环境恶化、结构失衡等问题和矛盾仍十分突出。进入新常态之后，劳动力、能源、土地等生产要素价格不断攀升，中国以要素成本为核心的传统比较优势弱化，迫切需要加快培育国际竞争新优势，实现新旧动能转换。当前，中国工业仍具有广阔的市场空间，同时也面临工业4.0时代全球竞争的挑战。在新形势下，党的十八届五中全会提出了绿色发展的新理念，要求支持绿色清洁生产，推进传统制造业绿色改造，推动建立绿色低碳循环发展产业体系。《中国制造2025》也将绿色发展作为实现制造业由大转强的历史跨越目标的基本方针，进一步为中国工业转型明确了主攻方向。

受制于传统节能减排的技术路径和评价体系，不难观察到一个现象：市场上一些所谓“绿色产品”从全产业链来看或者从整个产品生命周期评估，未必节能环保，但生产企业却获得了政府各种资金补贴和政策扶持。即使在发达国家，这种产品、工艺或技术“环保不节能、节能却不环保”的现象和问题也曾长期普遍存在。<sup>①</sup>由于中国制造仍有大量产能被锁定在高污染、高排放、低附加值的环节上，即使个别产业、单一产品的绿色化或产业链部分环节实现绿色化，也很难改变工业整体的“褐色”特征和“灰色”面貌。就技术和市场组织方式变革的要求而言，工业绿色发展不是单个企业的孤立行为，而是渗透到产品生命周期的各个阶段，辐射从资源提取到生产、物流、消费，再到废弃物处置循环利用的产业价值链上每一个环节。而从消费者信息获取、绿色消费引导以及政府监管的角度出发，绿色技术、工艺和产品的认证则需要对全生命周期做出科学、系统的追踪和评价。为此，《工业绿色发展“十三五”规划》明确提出开展系统的绿色评估，加快建设覆盖工业产品全生命周期的绿色数据库。

产品全生命周期的绿色评估需要科学的方法做支撑。目前，绿色评估的理论基础研究、指标体系构建等方面仍存在不足，制约了评估结果的应用价值。近年来，在联

<sup>①</sup> 姑且将这种问题或现象称为“节能环保幻觉”。

联合国环境规划署、国际标准化组织、国际环境毒理学和化学协会等国际机构的大力推动下,运用产品生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA)开展环境影响和绿色发展评估取得了一系列引人瞩目的成果,不仅在行业自律的条件下为企业进行环境影响的自我评价提供了方法论,而且成为发达国家政府制定完善环境标准和产业政策的重要依据。

国外学者或相关开发主体通过发布应用指南或评价成果等方式,对LCA体系下各种方法及其测评工具的适用性应用方向给出了较为详尽的解读,并指出了不同方法的局限性(Steen, 1999; Goedkoop and Spriensma, 2001; Hertwich, 2014)。近期国外的一些应用研究则聚焦更为具体的评估对象,如Nitschelm等(2016)运用LCA方法分析了特定地区农业环境影响的空间差异。随着中国环境问题日益凸显,国内开展环境影响评估的成果逐渐增多。这类研究最早主要由从事环境科学研究的专业机构或行业协会主导开展。近几年,LCA应用成为国内环境科学或环境经济学位论文的重要选题之一,尤以测算某一类产品或工艺环境影响的应用性研究为主(高峰, 2008; 程璜鑫, 2013; 陈博, 2015)。其中,一些研究的结论对于产业政策的调整起到了一定的引导作用。如王宪恩等(2016)的研究发现,从全生命周期进行评估,再生钢铁与原生钢铁相比,具有较为显著的节能减排效果,由此提出国家应在电炉炼钢方面给予钢铁企业适当的财税扶持,并实行电价优惠或补贴,完善废钢回收加工体系,从而为国家加强废旧钢材回收再利用提供了实证依据,同时也就中国进入工业化后期,资源性产品消费总量达峰之后产业政策的重点由增量开发转为存量利用做出了探索。

本文梳理LCA方法的技术特征及其发展演进过程,分析该方法在中国的运用及面临的障碍,提出进一步完善LCA方法、强化其应用价值的思路和建议,为减少工业生产活动的环境影响,推进企业界、行业协会及各级政府加快绿色转型提供决策参考。

## 二、生命周期环境影响评价的研究框架与方法分类

### (一) 生命周期环境影响评价的理论依据及研究框架

尽管学者们及各个机构对LCA方法的表述存在差别,但对这一方法的理解逐渐趋同,即LCA方法是对某种特定产品(技术或工艺)在其生命周期内涉及的向自然环境中的排放以及资源和能源的消耗等带来的环境影响实施评估的工具。这里所指的生命周期涵盖原材料获取、生产、运输、使用、维护、回收及最终处理等每一个环节。

生命周期环境影响评价方法是产品生命周期理论在环境经济学领域的延展和应用。该方法的基本理念在于某一产品、工艺或技术在其生命周期的每一个阶段均会产生环境影响,而不同阶段环境影响的类型、规模以及治理成本和技术路线存在差别。要想客观、全面、动态地评价一种产品、工艺或技术的环境影响,就有必要对其生命

周期中每一环节产生的每一类环境影响进行追踪，并通过可量化、可比较、可加总的技术手段，测算出全生命周期的环境影响，并以此判断特定产品、技术的绿色化水平或环境友好程度，避免“节能环保幻觉”对产品开发者和生产者、政策制定者及消费者形成“绿色误导”。

LCA 的研究框架以对某一特定产品系统在其整个生命周期中与外界形成的物质和能量交换进行汇总和归纳为基础，定量评估该产品对自然环境的影响，进而提出减轻其环境负担、促进产品与环境实现友好和谐的建议。根据国际标准化组织发布的 ISO14040 标准，运用 LCA 方法一般要依次经过 4 个紧密相关的阶段，即目标和范围定义、清单分析、影响评价和结果解释。其中，生命周期环境影响评价（Life Cycle Impact Assessment, LCIA）阶段是 LCA 流程中的关键性步骤。这一阶段需要根据清单分析的结果，对产品的潜在环境影响做出定量评价。如图 1 所示，参照国际标准化组织确定的分析框架，LCIA 阶段又可分为影响类型、类型参数和特征化模型的选择，分类和特征化等必要环节，以及归一化、加权和数据质量分析等可选环节。

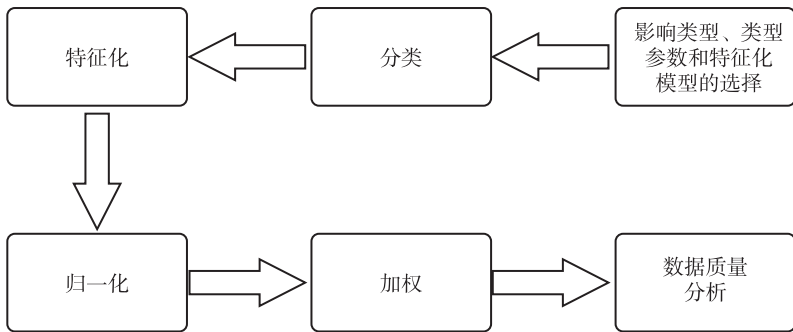


图 1 生命周期环境影响评价（LCIA）的基本步骤

资料来源：作者绘制。

### 1. 影响类型、类型参数及特征化模型的选择

影响类型的确定是 LCIA 分析的首个步骤。这一步骤应明确环境影响评估所要保护的最终目标，随后则要选定适当的类型参数，以对某一类型的影响做出量化描述。最后，选用合理的特征化模型作为评估工具。

### 2. 分类

这一步骤要对清单分析所得到的各种环境因子，即产品系统的输入输出流进行划分，建立起这些环境因子与一种或几种影响类型之间的联系。某一类环境因子可能造成多种环境影响，而一种影响往往也是多个环境因子共同作用的结果。因此，二者之间的因果链比较复杂，这无疑增加了分析和评估的难度。

### 3. 特征化

特征化环节是将每一类环境因子对特定环境影响类型的贡献进行定量分析，换算

成统一单位，并对结果进行合并。作为 LCIA 中理论性、科学性最强的阶段，特征化环节主要采取临界稀释体积法和当量因子法等方法，其中又以后者较为常用。当量因子法以对某种影响类型贡献最大的环境因子为基准，将其他环境因子造成的影响潜力按照各自的当量因子折算成基准环境因子的影响潜力，在单位一致的前提下进行加总。

#### 4. 归一化

归一化是指将经过特征化获得的各个影响类型的对应值，分别除以各自的归一化基准值，从而得到一个没有单位的量。每个影响类型的归一化基准值与这一环境影响类型的严重程度相关。经过这一步骤后，各种影响类型的相对水平具有了初步的可比性。同一影响类型的归一化基准值是否应随着空间变化而变化，目前仍有争议。一些机构和学者主张归一化基准值应在世界范围内保持一致，另有观点认为应随着区域变化而做出调整 (Huppel and Oers, 2011)。

#### 5. 加权

经过特征化和归一化之后，可以得出特定评估对象对每一种环境影响类型的影响汇总值。对每一种环境影响类型赋予特定的权重因子，并在此基础上对归一化得到的数值进行加权，即可得到综合的影响数值。通过这一步骤，决策者才可能衡量某一产品的总体环境影响。然而，从实践情况来看，加权是 LCIA 方法运用中争议最大的步骤。由于加权是在各种环境影响类型之间进行先验性的价值选择，因而，LCIA 的研究者和应用者对于如何进行加权甚至是否需要加权尚存较大分歧。反对者认为，没有客观标准的加权只会损害结果的可比性，在各种方法之间制造无谓的鸿沟；而支持者则坚称只有通过加权才能够得出真正可以理解的单一结果，从而对决策形成实质上的帮助，这也是环境政策和产业政策制定者相对比较容易接受的步骤和结果。

#### 6. 数据质量分析

数据质量要求是 ISO14040 标准提出的新范畴，出发点在于限定研究和应用中获取的数据来源及质量，使其必须满足研究目的和范围的要求。数据质量检验既要求对原始数据可靠性进行检验，也需要分析数据质量对评价结果的影响，如敏感性分析、不确定性分析等环节。通过开展数据质量分析这一选择性步骤，有助于进一步提高绿色评价的规范性。

### (二) 生命周期环境影响评价方法的分类

具体运用中，LCIA 方法在实施技术上可以有多种路径。目前，LCIA 主要依照加权方法、涵盖的影响类型等方式进行分类。不同实现路径导致评估结果的直观性和准确度存在差别。一般而言，结果较为准确的方法往往在技术上更为繁杂；反之，采用简便易行的评估体系，其结果通常主观性较强（见表 1）。这需要在实践中根据产品环境影响的复杂性、技术参数可获得性、数据支撑力、评估周期以及结果应用目的做出选择。

表1 LCIA 方法及其应用的分类

	方法	分类依据	特点
按照涵盖的影响类型分类	中间类型	将清单分析的结果归入约 10 个影响类型,包括温室效应、酸化、水体富营养化和人体毒性等细分类型	直观呈现经济活动的环境后果,所得结果较为准确,但相对繁杂
	终点类型	将清单分析的结果归入约 3~4 个影响类型,一般包括人类健康、生态系统健康和自然资源等主要类型	侧重于呈现经济活动的深远影响,所得参数的准确性相对比较差
按照加权方式分类	小组法 (Panel Methods, 也称专家法)	要求若干位专业研究人员和经济活动的利益相关者对各种环境影响类型的重要性进行评分,并对评分进行汇总,进而得出权重因子	可靠易行的常用方法,但主观性较强
	货币化法 (Monetisation Methods)	根据阻止某一类别环境影响所需的成本或者修复已造成影响所需的成本,来确定这一类别的权重因子	以货币作为统一量纲形成科学严谨的评价体系,但较为复杂
	目标距离法 (Distance-to-target Methods)	这一方法需要设定每种类型环境影响的目标水平,然后将这一目标水平与实际值比较。实际水平超出目标水平较多,意味着对这一影响做出修复更为迫切,赋予这一影响类型的权重也更大	能够与现实需要紧密结合,同样存在主观性较强的问题

资料来源：作者整理。

### 三、生命周期环境影响评价方法的演进及适用特点

#### (一) LCIA 体系开发的进展

20 世纪 80 年代末期至今, LCIA 方法及其应用已走过将近 30 年的历程。LCIA 家族不断壮大, 体系也日渐缜密。从 LCIA 的评估对象来看, 已经不再局限于测算特定产品对人类健康和自然资源的影响, 而更加注重生态系统的可持续性以及环境与社会的协调发展, 其干预的环境影响更具多样化、开放性、系统性和灵活性。从加权方式来看, 客观精准的货币化方法逐步取代较为主观的小组法, 成为主流范式。从开发者的国别构成来看, 这一评估体系的开发应用起初由北欧和西欧部分高度注重环境保护的发达国家主导, 目前已扩展到北美、亚洲和南美的发达国家乃至一些发展中国家。

再从开发主体来看,早期以大学和机构为主,近年来随着政府和企业界的广泛参与,开发和应用主体趋于多元化,研究内容也呈现扩大化和精确化的趋势,显示出 LCIA 方法不断增强的生命力和应用价值(见表2)。

表2 LCIA 方法体系构成及其开发进展

名称	Eco-Scarcity	EPS	Eco-Indicator	EDIP	TRACI/BEES/NOGIPA	ReCiPe	EXIOPOL
开发国家	瑞士	瑞典	荷兰	丹麦	美国	荷兰	意大利、荷兰及部分其他欧盟国家
初版完成时间(年)	1990	1994	1995	1997	2002/2007/2007	2008	2010
环境干涉种类	12类约400种	约200种	约400种	约3000种	约3000种	约3000种	不定,根据Ecosense方法进行地区特化
特征化因子	瑞士数据	全球范围数据,生物多样性部分为瑞典数据	欧洲范围数据,气候变化、臭氧层破坏和资源开采等部分全球数据	全球范围数据	北美数据,气候变化、臭氧层破坏等部分为全球数据	欧洲范围数据,气候变化、臭氧层破坏和资源开采等部分全球数据	欧盟范围数据
影响类型	终点类型(4种)	终点类型(5种)	终点类型(3种)	中间类型(9种)	中间类型(10种/12种/7种)	中间类型(18种)/终点类型(3种)	终点类型(3种)
加权方式	目标距离法	货币化法	小组法	目标距离法	小组法	小组法/货币化法	货币化法
折现	不考虑	无	有	不考虑	无	有	有

资料来源:作者整理。

## (二) 主要开发成果及其适用特点的比较

### 1. Eco-Scarcity

生态稀缺性方法(Eco-Scarcity)是一种终点类型方法,1990年在瑞士开发完成,并分别于1996年和2006年进行了两次改进(Frischknecht et al., 2006)。与其他方法明显不同的是,Eco-Scarcity方法建立在目标距离法的基础上,初版就非常注重与政府政策目标(瑞士政府的环境政策)的对接。由于目标距离法自身的性质,政策目标等因素需要根据国家或区域的变化而做出相应的调整。目前,荷兰、日本和比利时均已发展出本国的版本。

Eco-Scarcity方法中,每种干涉对应的生态因子按照如下方式进行计算:

$$Ecofactor = EP * K * \frac{1}{F} * \left(\frac{F}{F_k}\right)^2 * C \quad (1)$$

其中,  $EP$  为生态点数, 即量纲;  $K$  为特征化因子;  $F$  为实际排放;  $F_k$  为目标排放,  $C$  为常数。Eco-Scarcity 方法的优势在于其计算机制中直接引入了政府政策目标, 能够使运用该方法的企业充分考虑自身产品与政策环境的兼容性。这一特点受到了瑞士企业的普遍好评。但由于其计算机制中默认各种环境影响干涉占有相同的权重, 因而, 这一方法未能真正解决加权问题。此外, Eco-Scarcity 方法也受到地理范围的限制, 其应用的扩展必须建立在版本改进的基础之上, 制约了该方法的进一步推广。

## 2. EPS

EPS (Environmental Priority Strategy) 方法, 即环境优先策略法, 属于终点类型的方法 (Steen, 1999)。该方法的开发始于 1989 年, 由沃尔沃公司、瑞典环境科学研究院 (Swedish Environmental Institute) 和瑞典工业联合会 (Swedish Federation of Industries) 共同承担, 先后形成了 EPS94、EPS96 和 EPS2000 三个版本。

EPS 列出了 5 种保护目标, 多于其他同类方法 (见表 3)。尽管 EPS 方法没有明确列出文化娱乐价值参数的计算机制, 但在 LCA 评价中引入文化与社会因素是十分新颖的尝试, 有可能成为未来 LCA 评价体系发展的重要方向。同时, 对于生态系统生产力的强调并将其列入保护目标, 也体现出该方法对于循环经济和可持续发展的独特理解。EPS 方法在加权环节采用的是支付意愿法, 首先计算出个人支付意愿, 再依照世界经合组织各国现有的人口规模加总。具体来说, 将各种环境影响类型参数, 对通过支付意愿法计算出的加权因子进行加权, 得出被评估产品的环境负荷指数 (Environmental Load Unit, ELU)。这一指数所反映出的特定产品的环境影响较为全面, 且便于比较。此外, EPS 提出了更为充分的数据不确定性分析思路, 将市场价格的波动、区域之间的差别以及运用条件价值评估法 (Contingent Valuation Method) 计算支付意愿所带来的不确定性纳入评估框架, 从而有效地增进了该方法的科学性。

表 3 EPS 方法的影响类型和保护目标

影响类型	保护目标
预期寿命, 严重疾病, 疾病, 严重干扰, 干扰	人类健康
农产品生产能力, 木材生产能力, 正离子容量, 水生产能力	生态系统生产力
物种灭绝	生物多样性
各种元素储量消耗, 化石燃料消耗, 矿产资源消耗	非生物资源储藏
文化娱乐活动	文化与娱乐价值

资料来源: 作者整理。

## 3. Eco-Indicator

Eco-Indicator 是由荷兰 Pre Consultants 公司开发的 LCIA 方法, 是“生态设计”理



念的产物 (Goedkoop and Spriensma, 2001)。该方法设计同为终点类型,其最新版本为 Eco-Indicator 99。Eco-Indicator 系列方法的开发目的在于弥补传统 LCA 评估体系对企业不够友好的缺点,将特定产品直接与环境挂钩,促使环境因素融入企业产品开发和设计过程之中。

Eco-Indicator 方法提供了 3 种加权方式,分别为个人主义、平等主义和等级主义,对 3 种影响类型赋予不同的权重 (见表 4)。相比之下,个人主义机制更强调人类健康,而平等主义机制更注重生态系统质量,介于二者之间的等级主义机制则是该方法的默认加权方式。此外,采用个人主义机制时,还应当调减评价的年限。一般来说,个人主义评价的时限为 20 年,其他评价机制的时限则可长达 1 个世纪之久。在已开发的 LCIA 方法中,Eco-Indicator 方法是一种重要的主流方法,在产品设计和政策分析领域应用较广,并为 ReCiPe 等后继方法提供了基础性框架,其根据不同价值观设计的加权方式更是影响深远。

表 4 Eco-Indicator 方法的加权机制

评价目标	个人主义	平等主义	等级主义
人类健康	0.55	0.3	0.3
生态系统破坏	0.25	0.5	0.4
资源消耗	0.2	0.2	0.3

资料来源:作者整理。

#### 4. EDIP

EDIP (Environmental Design of Industrial Products) 方法由丹麦技术大学在 20 世纪 90 年代开发,主要面向产品的开发和设计 (Guinée et al., 2004)。EDIP97 共列出了 9 种主要的环境影响类型,归入 3 个大类。EDIP03 在前一版本的基础上做了少许调整 (见表 5)。EDIP 属于中间类型方法。根据其设计机理,每种环境影响类型所获得的权重由其实际影响值与目标影响值之间的比率决定,目标影响值则可以通过政治决策或者计算环境承载能力确定。由于开发时间较早,缺乏及时的政策目标更新成为 EDIP 方法的主要缺点。此外,作为一种目标距离方法,EDIP 与不同地区实际需求的贴近度不够,使用者必须根据本国的环境和政策现实进行技术调整,在一定程度上增加了评估的工作量。

#### 5. TRACI、BEES 和 NOGEPa

TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts)、BEES (Building for Environment and Economic Sustainability) 和 NOGEPa (Netherlands Oil and Gas Exploration and Production Association) 是较为相仿的三种中间类型方法。其中,TRACI 是最基本的方法,2002 年由美国环保署完成开发,而 BEES 和 NOGEPa 两种建立在 TRACI 基础上的方法都在 2007 年开发完成,前者的目的在于为美国建筑业提供一套环境评价工具,而后者则旨在为 TRACI 补充加权机制,

实现利用单一参数对一种产品全生命周期的环境影响进行最终评价的设计目标。TRACI 和 BEES 分别列出了 10 余种影响类型（见表 6）。这 3 种方法虽然加权机制有差异，但均以小组法完成。例如 BEES 法并未给出具体的加权机制，仅提供了几组权重因子供使用者选择（Lippiatt, 2007）。这些权重因子组合由不同渠道获得，其中部分因子采用层次分析法，由美国环保署的专家评分，另一些权重因子则来自 BEES 开发团队组建的利益相关者小组的评分，这种评估的技术思路在一定程度上反映出利益博弈对美国环境规制确立的影响。

表 5 EDIP03 方法的环境干扰类型

环境干涉类型	中间影响类型
物质排放	全球变暖
	臭氧层消耗
	土壤酸化
	水体富营养化
	光化学烟雾
	人体毒性(3 个子类)
	生态毒性(3 个子类)
资源开采	资源消耗
工作环境	工作环境(7 个子类)

资料来源：作者整理。

表 6 TRACI 系列方法的影响类型

环境干涉类型	TRACI 确立标准	BEES 确立标准	NOGEPa 确立标准
物质排放	全球变暖	全球变暖	全球变暖
	臭氧层损耗	臭氧层损耗	臭氧层损耗
	酸化	酸化	酸化
	水体富营养化	水体富营养化	水体富营养化
	光化学烟雾	光化学烟雾	光化学烟雾
	人类健康(癌症)	人类健康	人类健康
	其他人类健康		
	人类健康标准的污染物	人类健康标准的污染物	
资源消耗	生态毒性	生态毒性	生态毒性
	化石能源消耗	化石能源消耗	
工作环境		饮用水	
		室内空气质量	
土地使用		居民迁徙	

资料来源：作者整理。

## 6. ReCiPe

ReCiPe 方法是 CML2001 (Centrum voor Milieukunde Leiden) 和 Eco-Indicator99 的结合,对中间法与终点法做出了融合尝试 (Goedkoop et al., 2009)。2000 年后,荷兰学术界着手编制新的 LCIA 方法,以对该国开发的上述两种重要 LCIA 方法进行调和。荷兰国家公共卫生与环境研究院、奈梅亨大学、莱顿大学和 Pre Consultants 等机构参与了该项研究。直至 2008 年,ReCiPe 方法的开发工作才基本完成。不同于 Eco-Indicator 系列方法只计算终点类型参数,ReCiPe 对中间和终点类型参数均进行计算,并提供了两组特征化因子,其中一组用于将清单分析结果转化为中间影响类型参数,另一组则将中间影响类型参数转化为终点影响类型参数。后一组参数受不同加权机制的影响而发生变化(见表 7)。在加权模块中,ReCiPe 给出了小组法、中间货币化法和终点货币化法等不同选择。表 8 则展示了终点货币化法的换算规则。与 Eco-Indicator 相仿,ReCiPe 采用终点货币化法的最终加总中仍保留了个人主义、等级主义和平等主义三种机制,影响年限从 20 年到 100 年不等。

表 7 ReCiPe 方法涵盖的影响类型

中间影响类型	终点影响类型
电离辐射、臭氧层消耗、人体毒性、光化学烟雾、其他特殊物质生成	人类健康
气候变化、土壤酸化、土壤生态毒性、淡水营养化、淡水生态毒性、海水营养化、海水生态毒性	生态系统质量
农地占用、城市土地占用、自然土地使用、化石能源消耗、矿产资源消耗、淡水消耗	资源

资料来源:作者整理。

ReCiPe 是 LCIA 方法演进的新进展之一。相比之前的方法,其在清单分析、分类等环节均做出了有价值的改进(见表 8)。而在环境影响的货币化计算中引入边际成本的因素,使其结果的科学性明显提高。不过,开发者也承认,环境成本的计算机制目前尚不完善,价格水平的选取也存有争议。因此,运用 ReCiPe 仍需审慎。

表 8 ReCiPe 方法的货币化规则

终点类型	指数	单位	权重因子	单位(最终)
人类健康	伤残调整生命年(DALY)	年	60000	美元/年
生态系统质量	潜在消失物种份额(PDF)	平方米·年	175000000	美元/年
资源	增加成本	美元	1	美元

资料来源:作者整理。

## 7. EXIOPOL

EXIOPOL 是在欧盟框架下由 37 个机构共同完成的最新成果，意大利马特艾基金会（Fondazione Eni Enrico Mattei）与荷兰应用科学研究组织（The Netherlands Organization For Applied Scientific Research）担任此项开发工作的牵头机构。这一成果完成于 2010 年，是较为新锐的 LCIA 方法（Hertwich, 2014）。该方法突破了 LCIA 研究往往将评估对象局限于一国内部的局限性，服务于整合各国环境政策的目标，打造覆盖欧盟的分析框架。

EXIOPOL 同样属于货币化方法，广泛使用各种量化手段估测环境成本。预防成本、损害成本、非市场价格、市场价格等诸多因素和方法都被纳入评估框架之中。另外，该方法附带了一套较为完整的折算机制，将未来的环境影响折算计入当期。相比 LCIA 体系中的其他方法，EXIOPOL 的框架具有高度复杂性，目前仍在不断发展中。一方面，其优点在于拓展了清单分析的深度及特征化程度，有效扩大了评估的地域范围；另一方面，作为繁杂的货币化方法，EXIOPOL 也存在估价机制不统一、对部分环境影响估值困难等传统的缺陷。

## 四、生命周期环境影响评价方法在中国的应用及存在的主要问题

由于环境保护意识长期淡薄、相关学科发展滞后、环境制度体系不健全，国内 LCIA 方法的开发应用较之国际先进水平存在明显差距。进入 21 世纪，随着环境形势日益严峻、环保法律法规逐步规范，加之公众环保意识不断提高，在产品设计、技术和工艺改进等环节中运用生命周期方法开展环境影响评价已不鲜见。近年来，国内学术界和企业界不仅在 LCIA 方法应用方面做出了具有开创性的尝试，在方法设计和改进上也取得了一定的进展（见表 9）。

### （一）国内相关研究的进展

#### 1. 对特定产品环境影响的评估

运用 LCIA 方法测定某种特定产品的全周期环境影响，是生命周期评价最为完整的形式和典型应用。目前，国内运用 LCIA 方法对产品进行全生命周期环境影响测定的文献逐渐增加，总体应用水平有所提高。这类研究从环境影响的角度评价某种产品的性能，或对不同产品的环境影响进行比较，进而对企业的生产决策以及政府部门相关政策的制定起到支撑作用。其中，汽车、建材等技术资料特别是行业参数可获得性相对较高、数据系统性强的行业，同时也是面临节能减排压力较大的行业，成为这类研究的重点领域（陈红等，2004；赵春芝，2005；李书华，2014；施晓清等，2015）。

#### 2. 针对特定工艺流程和原料环境影响的分析测定

对生产产品的特定工艺流程及特定原料进行环境影响测评，是 LCIA 方法在国内应用最为广泛的领域。相对于特定产品的全生命周期影响分析，这类分析涉及的范围

更为聚焦,数据门槛相对较低,因而在相关研究中率先发展,其目的在于探寻在产品生产中特定技术路线所产生的环境后果,评估特定工艺方法和原料在产品生产流程中呈现的环境友好性,并为企业等生产活动的参与者选择环境技术路线提供参考。此类研究的评估对象以钢铁、能源等产品差异性较小的流程工业为主,并呈现向复杂产品的生产工艺延伸的趋势(王红,2012;沈毅,2015)。

### 3. 废弃物处置方式环境影响的评估

国内对不同废弃物处理方式及其环境影响的评估,虽然成果总量相对较少,但却具有突出的理论和现实意义。目前,国内外 LCIA 的研究和应用成果偏重于产品的生产和使用环节,而废弃物回收环节由于资料缺乏、流程不够规范等原因,在生命周期评估中经常被忽略。对废弃物的处置方式进行测评,能够有效地填补这一应用空白(田菲,2011;尹建锋,2014)。受制于数据的可获得性,现阶段这类研究以家电等电子消费品为主,其评估结果对制定完善相关产业的排放标准、推动再循环技术研发、发展再生循环产业具有重要的参考价值。

表9 国内应用 LCIA 方法的研究进展

类型	文献作者	发表时间	方法	评估对象	主要结论
特定产品	陈红	2004年	Ecopoint97、EDIP97	聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯和聚氯乙烯	两种方法分别可得出聚氯乙烯和聚苯乙烯的环境负荷最高
	赵春芝	2005年	Eco-Indicator99	铝塑板和单铝板	铝塑板相对于单铝板更加环境友好,两种产品环境影响主要集中在温室效应和酸化效应
	徐小宁	2013年	CML2001	复合硅酸盐水泥	环境影响主要集中在温室效应方面,其次是酸化效应,煅烧环节的影响最为严重
	程璜鑫	2013年	EDIP03	畜禽养殖	原料生产环节的环境影响最为突出,环境酸化和温室气体排放是畜禽养殖企业主要的环境影响
	李书华	2014年	GREET (汽车生命周期评价软件)	电动汽车	清洁电力能使电动汽车发挥较好的减排效益,而传统化石能源并不能明显提升效益
	杨丹辉等	2014年	EPS	稀有矿产资源利用	在稀有矿产中,铂族金属开发利用的环境影响较大,石墨的环境影响最小
	施晓清等	2015年	Eco-Indicator99、CML2001	电动出租车和传统燃油出租车	电动汽车能明显减少碳排放,促进电力生产的清洁化将有助于减轻环境负荷
	陈博	2015年	IMPACT2002+	锂离子电池	锂离子电池的环境影响主要集中在生产和使用环节,三元锂离子电池的环境影响最高

续表

类型	文献作者	发表时间	方法	评估对象	主要结论
特定工艺流程	王红	2012年	EDIP97、EDIP03	燃煤电厂烟气脱硫	石灰石石膏湿法和循环悬浮式半干法都能较好地控制环境影响,二者分别在控制能耗和排放、降低原材料消耗方面较有优势
	沈毅	2015年	自创方法	煤制油	直接液化技术相对间接液化技术在环境影响方面具有优势,终端消费环节能效提升和减排的空间较大
	王俏丽	2015年	Eco-Indicator99、IPCC 2007 GWP	秸秆制沼气	秸秆制沼气能够明显降低环境影响,但会带来比较明显的温室气体排放问题
	王宪恩等	2016年	自创方法	废钢再利用	再生钢铁能达到较好的节能减排效果,但总成本有所上升
特定废弃物处置方式	李璐等	2009年	Eco-Indicator99	废弃农药	水泥窑共处置的环境影响明显小于焚烧炉处置,只有资源消耗方面较高
	龚志起等	2011年	自创方法	废弃混凝土	填埋处理的环境影响最大,基础填料较小,再生骨料则有利于环境改善
	田菲	2011年	自创方法	废弃荧光灯	卫生填埋的环境影响较小,回收在人体健康和生态毒性方面的影响比较严重
	尹建锋	2014年	Eco-Indicator99	废弃手机	废弃手机的回收和资源化能显著缓解有毒有害物质排放到环境中的生态危害

资料来源：作者整理。

## (二) 研究的局限性以及 LCIA 方法在中国应用的主要障碍

尽管 LCIA 方法在国内的应用经历了从无到有、快速发展的过程,并展现出日益广阔的应用前景,但相关研究仍存在诸多问题和缺陷。一是现有研究采用的 LCIA 方法普遍较为陈旧,大部分评估基于旧方法、旧版本开展,鲜见运用 ReCiPe 等新推出的方法以及 EPS 等工具下货币化新方法的高质量成果;二是由于各行业研发、生产、物流、消费、废弃物处置等环节的数据统计体系建设普遍滞后,部分环节管理不规范、不联通,致使环境影响评估难以覆盖整个生命周期,动态化的追踪研究更是几乎不具备理论构建和实操条件。目前,国内相当一部分 LCIA 研究成果的评估对象不完整,一些研究没有将产品废弃、回收处置等环节纳入评估框架,而另一些成果则未对产品的运输、销售环节做出评价,损害了研究的完整性和精确性;三是相关研究视野偏窄,往往未能与产业经济学、技术经济学、管理学等学科很好地结合,评价成果转化为可行的政策措施的渠道尚不畅通,阻碍了 LCIA 方法充分发挥其应用价值。

LCIA 方法的应用成果中出现上述问题在很大程度上是由于中国缺少生命周期影响评估的原创性方法和模型,导致关键技术参数的设定偏离生产实际,直接影响评估

结果的质量。归根结底,这种应用现状反映出环境技术经济分析及其成果对中国环境规制制定和实施的支撑力有限,同时也是现行绿色标准及认证体系对企业自律缺乏有效激励和约束的结果。

应该看到,20世纪80年代到90年代中期,国内环境影响评估及相关研究一度比较活跃,推出了一批与中国经济体系较为契合、有影响的成果(过孝民、张慧勤,1990;夏光、赵毅红,1995)。但随着中国工业化进程加速,产业体系日益庞大,经济活动及其环境影响更趋复杂多样,开展环境影响评价特别是全生命周期评价所需的投入明显增大,单个学者很难通过实地调查和现场试验实现对多个技术参数的连续性获取。从发达国家开发LCA体系的经验来看,相关开发和应用工作往往需要政府、企业、学术机构等多部门有效协同。然而,由于主管部门和企业重视程度不够,加之体制障碍,导致跨学科、长周期的联合开发投入严重不足。目前,中国环境影响评估技术手段的开发明显滞后于绿色发展的需要,绿色GDP核算、气候变化、自然资源资产负债表编制等领域的研究同样存在类似的情况和问题。正是由于缺少基于中国样本开发的方法和模型以及由中国经济运行得出的技术参数,国内学者开展碳排放峰值测算、碳足迹、污染损害等方面的研究不得不借用发达国家既有的方法和模型,而这些研究工具基本都是建立在发达经济体的经济运行机理之上,运用这些模型得出的定量结果往往与中国经济实际不相符。在这种条件下,后续对模型结果及参数的人工修正则成为此类研究的必备“工序”,而这势必进一步制约研究成果的应用价值。

同时,由于“节能环保幻觉”存在,在现行绿色产品和技术标准体系下获得认证的企业尽管其产品或技术有可能仅在部分环节做到节能环保,但却获取了政府各种节能环保补贴或奖励,这类企业不具备从全生命周期评估的角度对其产品、工艺或技术的环境友好性进行自主评价的意愿。再从中国工业绿色发展的整体水平来看,除了政策激励力度不够等因素之外,相当一部分企业尚不掌握自主开展环境影响评价的技术能力,而随着中国经济进入新常态,劳动力、能源、融资、环保等成本压力攀升,一些传统行业遭遇转型升级瓶颈,行业之间和行业内部微观主体分化加剧,也在一定程度上抑制了企业应用环境影响评价方法、开发绿色产品和技术的决策。

值得注意的是,国内一些学者开始尝试采用自创方法评估特定产品、工艺和技术生命周期的环境影响(龚志起等,2011;田菲,2011),为探索开发适应中国产业发展阶段、技术水平、环境规制等条件的评估方法做出了有益尝试,但这类方法还比较简单,在完善评估的内在机制等方面需要持续努力。

## 五、结论与展望

通过对国内外相关研究的梳理和分析发现,过去30多年来,发达国家主导了产品生命周期环境影响评价方法的开发及应用。作为一种策略性工具,LCA的应用可以拓展到环境发布、环境核算甚至消费决策的研究之中。尽管评估体系不断细

化,且应用领域日益拓展,但作为关键步骤的 LCIA 方法在实施技术上及其政策对接机制等方面仍有改进的空间。中国是世界第一制造大国,拥有完整的产业体系。为落实绿色发展理念,加快工业绿色转型进程,一方面,LCIA 的广泛应用有助于中国推动绿色产品、工艺、技术的认证以及绿色技术路线的甄选,为国内企业开展环境影响自我评价提供方法和依据;另一方面,迫切需要加快生命周期环境影响评价的理论研究和原创方法实践,从而为世界范围内 LCIA 的持续创新提供丰富而扎实的中国样本和案例。

第一,企业界、行业协会、学术界以及政府主管部门等应建立开放的联动机制。社会各界应加强信息沟通和数据共享,推进更加科学、完整、精确的生命周期研究,合力开发中国原创的生命周期环境影响评价方法,提高评估结果的应用价值,带动技术、工艺、产品在全产业链上实现真正意义上的绿色化,做到全生命周期节能与环保的兼容。

第二,建立完善符合中国工业发展实际情况的评价体系。由于历史原因,现行大部分 LCIA 方法由欧洲国家的研究机构所开发。其他国家包括中国独立构建自身评价体系的尝试,都要在很大程度上依赖发达国家的评价技术体系。然而,根植于发达国家产业体系和技术路线的评估方法,在特征化和归一化因子确定、权重和加权机制选择、影响机制和分类等诸多方面存在一定的局限性,对于中国在赶超式和压缩式工业化道路下形成的后发性和二元性特征突出、庞大而复杂的工业体系及其多样化的环境损害并不完全适用。因此,有必要对 LCIA 方法的技术参数、加权方式做出全面系统的本土化调整和修正。

第三,拓展分析边界,扩充环境影响的类型。现有生命周期影响评价方法比较注重测算有形的排放和资源消耗,而对于噪声、振动等污染估计不足。虽然实现这些无形环境影响与传统环境影响因素的相互折算仍有困难,但将更具多样性的环境影响类型纳入评估体系之中,能够进一步提升科学性和政策针对性,这也是国际上公认的 LCIA 发展方向。

第四,进一步推动生命周期环境影响评价与经济学、管理学的交叉融合。政策落地是环境影响评价方法应用的主要目标。以欧洲国家为例,在开发应用 LCIA 方法过程中,往往有政府部门参与,方法设计也比较重视与政策导向的兼容性及其结果的可判读性。现阶段,国内的研究成果尚未充分发挥政策指导作用。为此,应促进政府、产业界和学术界在 LCIA 方法开发应用过程中的协同合作,实现跨界知识交流,打通生命周期环境影响评价结果转化的渠道,使其更好地服务于产品、工艺、技术绿色数据库的建设以及绿色标准的制定与实施。

## 参考文献

陈博(2015):《基于生命周期评价的锂离子电池材料合成分析与环境性分析》,北京:北京理工大学硕士学位论文。

陈红、郝维昌、石凤等(2004):《几种典型高分子材料的生命周期评价》,《环境科学学报》第3期,第545~549页。

程璜鑫(2013):《基于生命周期理论的畜禽养殖跨介质污染防治技术评估》,北京:中国地质



大学(北京)博士学位论文。

高峰(2008):《生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用》,北京:北京工业大学博士学位论文。

龚志起、丁锐、陈柏昆(2011):《废弃混凝土处理方式的环境影响比较》,《工程管理学报》第3期,第266~270页。

过孝民、张慧勤(1990):《公元2000年中国环境预测与对策研究》,北京:清华大学出版社。

李璐、黄启飞、闫大海等(2010):《基于生命周期评价EI99法的水泥窑共处置废弃农药分析》,《环境科学学报》第7期,第1527~1536页。

李书华(2014):《电动汽车全生命周期分析及环境效益评价》,长春:吉林大学博士学位论文。

沈毅(2015):《典型煤制油技术全生命周期评估的对比与分析》,北京:华北电力大学硕士学位论文。

施晓清、孙赵鑫、李笑诺等(2015):《北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究》,《环境科学》第3期,第1105~1116页。

田菲(2011):《基于生命周期评价法的废弃荧光灯安全处置评价研究》,杭州:杭州电子科技大学硕士学位论文。

王红(2012):《燃煤电厂烟气脱硫工艺生命周期评估》,杭州:浙江大学硕士学位论文。

王俏丽(2015):《秸秆制沼气过程生命周期评价及其敏感性分析》,杭州:浙江大学硕士学位论文。

王宪恩、栾天阳、陈英姿(2016):《基于LCA的废旧资源循环利用节能减排效果评估模式与方法研究——以吉林省某钢铁企业为例》,《中国人口·资源与环境》第10期,第69~77页。

夏光、赵毅红(1995):《中国环境污染损失的经济计量与研究》,《管理世界》第6期,第198~205页。

徐小宁(2013):《中国水泥工业的生命周期评价》,大连:大连理工大学硕士学位论文。

杨丹辉、渠慎宁、李鹏飞(2014):《稀有矿产资源开发利用的环境影响分析》,《中国人口·资源与环境》第S3期,第230~234页。

尹建锋(2014):《废弃手机资源化的生命周期评价》,天津:南开大学博士学位论文。

赵春芝(2005):《铝塑板与单铝板的LCA研究》,北京:中国建筑材料科学研究院硕士学位论文。

Frischknecht, R., R. Steiner and B. Arthur, et al. (2006), "Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version", [http://www.lcaforum.ch/Portals/0/DF\\_Archive/DF30/DF30\\_k6\\_Frischknecht.pdf](http://www.lcaforum.ch/Portals/0/DF_Archive/DF30/DF30_k6_Frischknecht.pdf) [2017-07-04].

Goedkoop, M. J. and R. Spriensma (2001), "The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment", *VROM Zoetermeer*, Nr. 1999/36A/B, pp. 352-360.

Goedkoop, M., R. Heijungs and M. A. J. Huijbregts (2009), "Recipe 2008", *Minds & Machines*, (4), pp. 595-599.

Guinée, J. B., A. D. Koning and D. W. Pennington (2004), "Bringing Science and Pragmatism Together A Tiered Approach for Modeling Toxicological Impacts in LCA", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9 (5), pp. 320-326.

Hertwich, F. G. (2014), "Harmonising National Input-output Tables for Consumption-based Accounting-experiences from EXIOPOL", *Economic Systems Research*, 26 (4), pp. 387-409.

Huppes, G. and L. V. Oers (2011), “Background Review of Existing Weighting Approaches in Life Cycle Impact Assessment (LCIA)”, *JRC Report*.

Lippiatt, B. C. (2007), *BEES 4.0. Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide*, Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology.

Nitschelm, L., J. Aubin and M. S. Corson (2016), “Spatial differentiation in Life Cycle Assessment LCA Applied to An Agricultural Territory: Current Practices and Method Development”, *Journal of Cleaner Production*, 112 (4), pp. 2472 – 2484.

Steen, B. (1999), *A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS) Version 2000 – Models and Data of the Default Method*, Sweden: Chalmers University of Technology.

## Methods and Applications of Environmental Impact Assessment Based on Product Life Cycle: A Review

XIAO Han-xiong<sup>1</sup>, YANG Dan-hui<sup>2</sup>

(1. Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China;

2. Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100836, China)

**Abstract:** As an important achievement of environmental science that applies to environmental regulation and industry self-discipline, developed countries introduced the Life Cycle Assessment (LCA) method system to comprehensively evaluate the environmental impacts of specific product in the whole life cycle in order to provide valuable references for policy making and business decision-making. With the increase of resource and environmental constraints, the application of life cycle assessment method system is significant in accelerating the implementation of green development concept as well as in promoting China’s industrial green transformation. The LCA method has been widely used in domestic automobile, steel, building materials, household appliances and other industries. However, due to a lack of data supporting system and some other factors, the application of the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method still has general problems and obstacles such as obsolete methods and incomplete processes, etc. In order to further improve the scientific normalization of the green assessment, it calls for business communities, industry associations and government in collaboration to enhance data-sharing and promote the localization and expansion of the LCIA method and its technical parameters, in order to guide the enterprises’ green transformation based on self-assessment and better support the establishment and implementation of green product and technology database and standard system for the product, manufacturing and technology in China in the future.

**Key Words:** life cycle assessment; LCIA; environmental regulation; green development