

生命周期影响评价(LCIA)方法综述

任 菁¹ 刘年丰¹

(1. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 生命周期评价是近年来环境科学研究的热点, 以全新的角度, 从产品的全过程考察其对环境的影响, 是一种更为科学的新理念和新方法, 并正以极快的速度拓展到社会生活的多个方面. 简要介绍了生命周期评价的定义与框架, 并阐述了其核心部分—生命周期影响评价的步骤与方法, 在此基础上重点对几种典型的影响评价方法作了论述与比较.

关键词: 生命周期评价; 生命周期影响评价; 典型评价方法

中图分类号: X828 文献标识码: A 文章编号: 1000—5730(2002)03—0083—04

1 生命周期影响评价

1.1 生命周期评价的定义

生命周期评价(life cycle assessment, 简称 LCA)出现于 60 年代末, 以可口可乐公司饮料包装评价为起始标志^[1]. 经过几十年的发展, 90 年代, 由国际环境毒理学与化学学会(SETAC)在生命周期评价国际研讨会上, 正式将生命周期评价定义为: LCA 是一种对产品、生产工艺以及活动对环境的压力进行评价的客观过程. 它通过对能量和物质利用以及由此而造成的环境废物排放进行辨识和量化来进行, 其目的在于评估能量和物质利用对环境的影响, 寻求改善环境影响的机会^[2]. 1993 年, 国际标准化组织环境管理技术委员会制定了 ISO 14000 环境管理系列标准, LCA 被纳入其中, 并将其定义为: LCA 是对产品或服务系统整个生命周期中与产品或服务系统功能直接相关的环境影响、物质和能源的投入产出进行汇集和测定的一套系统方法.

1.2 生命周期评价的技术框架

从 1997 年来, ISO 以 ISO 14040—生命周期评价—原则和框架为总纲, 颁布了有关 LCA 四个阶段的标准, 图 1 表明了这四个阶段内在的逻辑关系.

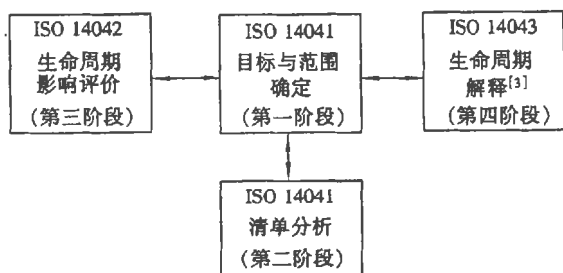


图 1 生命周期评价的技术框架^[4]

1.3 生命周期影响评价

生命周期影响评价(life cycle impact assessment, 简称 LCIA)是 LCA 的第三阶段, 也是其核心部分. 它对清单分析所识别的环境影响进行定性与定量的表征评价, 确定产品系统的物质能量交换对其外部环境, 主要是对生态系统及人体健康等方面的影响. LCIA 由定性分类、数据的特性化及加权赋值三个步骤组成^[5].

定性分类是在建立环境因子与影响类型对应联系的基础上, 对某一类型有一致或相似影响的排放物归类, 以探明影响因子作用的途径、污染物的贡献、影响强度和范围, 并确定分析评价对象. 在发达国家的 LCA 实例研究中, 大多采用了美国国家环保局(USEPA)定义的 8 种影响类别^[6]: 全球气候变化、平流层臭氧消耗、酸雨化、光化学烟雾、富营养化、人体毒性、生态毒性与资源消耗.

数据的特性化将影响因子对环境影响的强度或程度定量化, 归纳为相应指标, 其量化方法是当量因子法, 将贡献率最大的影响因子作为标准, 如全球变暖常以 CO₂ 为标准, 其余污染物按对 CO₂ 的当量进行折算, 把同类环境影响进行累加.

加权赋值对不同类型的环境影响进行加权、排序和赋值, 并归结为单一指标, 用以比较不同产品、工艺或活动. 加权方法目前多采用专家评分法和模型推算法, 如目标距离法, 距离目标值越近, 权越重.

LCIA 是 LCA 中难度最大的部分, 原因在于环境问题的复杂性及动态性. 要对产品涉及的所有环境影响做出全面、客观且科学的评价, 即使在理论上也是难以实现的. 至今进行 LCIA 的方法和科

学的基准体系仍在不断地发展之中,尚没有一种被广泛接受的方法^[7].

据 Lindeijer^[8] 的研究,目前国际上比较有代表性的评价方法有 25 种,基本可分为环境问题法和目标距离法^[9].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来进行数据标准化分析,如瑞典的 EPS 方法,瑞士和荷兰的生态稀缺性方法以及丹麦的 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)之间的距离来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.国内,清华大学的席德立及彭小燕等^[10] 在影响分析中引入了我国现行的环境质量评价方法和手段;杨建新等^[11] 对丹麦的 EDIP 方法进行改进,另外,有利用简式生命周期矩阵和模糊层次分析法的报道^[12].

2 典型 LCIA 方法论述

2.1 贝尔实验室的定性法^[7]

该法将产品生命周期分为 5 个阶段:原材料加工、产品生产制作、包装运销、产品使用以及再生处置.相关环境问题归成 5 类:原材料选择、能源消耗、固体废料、废液排放和废气排放,由此构成一个 5×5 的矩阵.其中的元素评分为 0~4,0 表示影响极为严重,4 表示影响微弱,全部元素之和在 0~100 之间.评分由专家进行,最终指标称为产品的环境责任率 R ,则有

$$R = \sum_{j=0}^5 \sum_{i=0}^5 m_{i,j} / 100,$$

式中, $m_{i,j}$ 为矩阵元素值,其中 i 为产品的生命周期阶段数; j 为产品的环境问题数. R 以百分数表示,其值越大表明产品的环境性能越好.

2.2 柏林工业大学的半定量法^[13]

柏林工业大学的 Fleisher 教授等在 2000 年研究的 LCIA 方法,通过综合污染物对环境的影响程度和污染物的排放量,对产品的生命周期进行半定量的评价方法.该方法首先要确定排放特性的 ABC 评价等级和排放量的 XYZ 评价等级,其影响程度中, A 为严重,如致畸、致癌、致突的“三致”物质及毒性强的各类物质; B 为中等,如碳氧化物、硫氧化物等污染物; C 为影响较小,可忽略的污染物.排放量的 XYZ 分级根据是排放量低于总排放量的 25%,定义为 Z ;位于 25%~75%之间,定义为 Y ;大于 75%,则定义为 X .

每种排放物质都赋予其对大气、水体及土壤

三种环境介质的 ABC/XYZ 值.如果无法获得某种环境介质的排放数据,则其 ABC/XYZ 值由专家确定.对每种环境介质分别确定最严重的 ABC/XYZ 值(潜在环境影响最大的排放物质),其程度呈递减: $AX > AY = BX > AZ = BY > BZ > CX = CY = CZ$.根据生命周期的每个过程排放到大气、水体及土壤中 ABC/XYZ 值最高的物质进行分类,所有类别的值都通过表 1 的加权矩阵集中,得到最后的结论——名为 AX_{air} 当量的单值指标.在此矩阵中,大气污染物的权重值较高,由于污染物经常沉积到水体和土壤中,可能对其产生影响.

表 1 ABC/XYZ 值的加权矩阵

等级	排放到大气 中的物质			排放到水体和 土壤中的物质		
	$X_{气}$	$Y_{气}$	$Z_{气}$	X	Y	Z
A	3	1	1/3	1	1/3	1/9
B	1	1/3	1/9	1/3	1/9	0
C	0	0	0	0	0	0

例如,我国早点市场使用的餐具通常有四种: I 聚苯乙烯发泡餐具、II 高密度聚乙烯塑料餐具、II 纸餐具及 IV 集中式热力消毒餐具.这四种餐具全生命周期过程中排放到大气中的污染物质有:碳氧化物、硫氧化物、氮氧化物及碳氢化合物等;水污染物有生化需氧量、化学耗氧量、悬浮物及磷酸盐类等;土壤污染物有:淤渣及灰等^[14].根据前述分类及加权方法,这四种餐具的 ABC/XYZ 赋值及最终当量指标如表 2.

表 2 四种餐具 Fleisher LCIA 评价明细表

餐具	排放到大气中的物质	排放到水体中的物质	排放到土壤中的物质	最终指标 AX_{air}	评价
I	$BX\ BX$ $BZ\ BZ$	$BZ\ BY$ BY	$BZ\ BX$	17/9	一般
II	$BZ\ BX$ $BZ\ BZ$	$BZ\ BZ$ BX	$BZ\ BX$	18/9	较差
III	$BX\ BZ$ BZ	$BZ\ BY$ BZ	$BZ\ BX$	15/9	较好
IV	$BZ\ BZ$ $BZ\ BY$	$BZ\ BZ$ $BZ\ BY$	BX	10/9	最好

此方法已集成到 Fleisher 等人研制的 Euromat 软件中,并用于环境设计实例研究(航空用轻质容器材料的比较:铝与碳纤维增强环氧树脂).

2.3 荷兰的“环境效应”法^[15]

该法认为评价产品的环境问题应从考虑消耗和排放对环境产生的具体效果入手,将其与伴随人类活动的各种“环境干预”关联,根据两者的关系来客观地判断产品的环境性能,这是在影响分

析的定量方法中迄今为止最完整的一种方法。

这种方法将影响分析分为“分类”和“评价”两步, 分类指归纳出产品生命周期涉及的所有环境问题, 已确认了 3 类 18 种环境问题明细表。这三类环境问题是: 消耗型, 包括从环境中摄取某种物质资源的所有问题; 污染型, 包括向环境排放污染物的所有问题; 破坏型, 包括所有引起环境结构变化的问题。在定量评价 3 类 18 种环境效应时, 引用了分类系数的概念, 分类系数是指假设环境效应与环境干预之间存在线性关系的系数。目前, 对这 18 种环境效应大部分都有了计算分类系数的方法。

通过分类, 产品的生命周期对环境的影响可用 10~20 个效应评分来表示, 并进一步进行综合性的评价。目前有两类评价方法: 定性多准则评价和定量多准则评价。定性评价通常由专家进行, 并对产品进行排序, 确定对环境的相对影响。定量评价通过专家评分对各项效应加权, 得到环境评价指数 M , 即

$$M = \sum_{i=1}^m u r_i,$$

式中, u_i 为各效应评分; r_i 为相应的加权系数。

由于至今尚无公认的加权系数值, 致使定量评价达不到彻底定量化的要求。

2.4 日本的生态管理 NETS 法^[14]

瑞典环境研究所于 1992 年在环境优先战略 EPS 法(Environment Priority Strategy) 中提出了环境负荷值(ELV, Environment Load Value) 的概念。根据为保持当前生活水平而必须征收的税率, EPS 规定标准值为 100(ELV/人), 此值可用于计算化石燃料消耗引起的环境负荷。

日本的 Seizo Kato 等人在瑞典 EPS 法的基础上发展了 NETS 法, 主要用于自然资源消耗和全球变暖的影响评价, 可给出环境负荷的精确数值公式为

$$EdL = \sum_{i=1}^n (Lfi \times Xi)(NETS);$$
$$Lfi = \frac{ALi \times \gamma_i}{Pi},$$

式中, EdL 为环境负荷值, 或任意工业过程的全生命周期造成的环境总负荷值; Lfi 为基本的环境负荷因子; Xi 为整个过程的第 i 个子过程中输入原料或输出污染物的数量; Pi 为考虑了地球承载力的与输入、输出有关的测定量, 如化石燃料储备及 CO_2 排放等。 ALi 为地球可承受的绝对负荷值; γ_i 为第 i 种过程的权重因子。

EdL 用量化的环境负荷标准 NETS 表示, 其值规定为一个人生存时所能承受的最大负荷, 即为 100NETS。根据这些 NETS 值, 就可从全球角度来量化评估任何工业活动造成的负荷, 总生态负荷值为生命周期中所有过程的基本负荷值的总和。

Seizo Kato 等人用此方法做了发电厂的化石燃料消耗和全球变暖的 NETS 评价。

化石燃料消耗的 NETS 评价时, 假设以当前速度消耗原油、天然气等不可再生资源至其可采储量消耗完毕, 则可将地球最大承载力的绝对负荷值视为 5.9×10^{11} (NETS), 即前述规定的 100 (NETS/人) 与全球人口 5.9×10^9 人的乘积。

例如, 原油的 Lfi 值就是用原油的可采储量来估计的, $P_{oil} = 1.4 \times 10^{11}$ (t), 则

$$Lfi_{oil} = \frac{5.9 \times 10^{11} (NETS)}{1.4 \times 10^{11} (t)} = 4.2 (NETS/t).$$

此结果意为, 如消耗 1 t 原油, 则此工业活动在原油消耗方面带来的环境负荷值为 $Lfi_{oil} = 4.2$ (NETS/t)。参考文献[15] 中列出了各种自然资源消耗的 NETS 值和瑞典 EPS 法估计的环境负荷值 (ELV), 可作为参考。

关于 CO_2 排放导致全球变暖的 NETS 值, 可认为: 如果在 1997 年京都会议规定的标准上继续排放 2.1×10^{10} (t) CO_2 , 则 100 年内全球温度就会在 1997 年的基础上升高 2~3℃。在此基础上, 评估环境负荷的方法为

$$Lfi_{CO_2} = \frac{5.9 \times 10^{11} (NETS)}{2.1 \times 10^{10} (t/y) \times 100(y)} = 2.8 \times 10^{-1} (NETS/t)$$

此结果意义同上。由于除 CO_2 外, 还有多种温室气体, 可用全球变暖潜值 GWP_i 的量来估计其 Lfi 值, 详细方法见参考文献[15] 。

根据以上方法, 可计算出各种资源消耗和温室气体的 NETS 值。由于其单位统一, 可以很方便地加和, 对每一生产过程或产品, 都能得到最终的 NETS 值。此值越小, 生产过程或产品对产品的影响就越小。Seizo Kato 用此方法对日本某企业购买商业用电和自行发电做了对比评价, 取得了较好的效果。

3 比较与结论

以上四种影响评价的方法中, 贝尔实验室的方法较为简单, 但结果完全根据专家评价的结论得出, 主观性太强, 不具有广泛的适用性。柏林工业大学的 ABC/ XYZ 方法对数据的精度和一致性

要求不高,适应面较广,且最后可得出一个单值评价指标,在综合考虑各方面的影响时,使用此方法较为方便.荷兰的“环境效应法”较为系统、完整,但对清单数据要求较高,需要大量全面、准确的排放数据.日本的 NETS 法较为简便,评价效果也很直观,但适用面较窄,一般来说只适用于化石燃料消耗较高,温室气体排放较多的生产过程或产品,如果用于其他类型产品,还需进一步完善.

不论使用哪种方法,都必须要有明细的清单分析表.以上方法的清单分析都是在工业部门详细的污染排放数据库的基础上建立起来的,与我国目前实际的污染排放水平差距较大,因此现在当务之急是组织各工业部门对具体产品或生产过程进行调查和分析,建立完整的 LCA 数据库,为下一步进行影响评价打下坚实的基础.

参 考 文 献

- [1] 山本良一. 环境材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
- [2] SETAC. Streamlining Environmental Life Cycle Assessment [R]. Pensacola, 1997.
- [3] ISO/DIS 14040/ISO TC 207, International Organization of Standardization, Environmental Management-Life Cycle Assessment, 1998.
- [4] A. A. Burgess, D. J. Brennan. Application of life cycle assessment to chemical processes[J]. Chemical Engineering Science, 2001, (2): 589—604.
- [5] Mobin. T. and others. The environmental management handbook[M]. London: Great Britain Pitman Publishing, 1994.
- [6] Mary Ann Curran. Life cycle assessment: an international experience[J]. Environmental Progress, 1999, (2): 65—71.
- [7] 钱 易,唐孝炎. 环境保护与可持续发展[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [8] Lindeijer E. Normalization and valuation[A]. SETAC. Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment[C]. Brussels, 1996.
- [9] Magnus Bengtsson, Bengt Steen. Weighting in LCA—approaches and applications[J]. Environmental Progress, 2000, 19(2): 101—109.
- [10] 席德立,彭小燕. LCA 环境影响分析新探[J]. 环境科学, 1997, 18(6): 76—80.
- [11] 杨建新等. 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.
- [12] 辛志伟,郭连城. 应用简式生命周期矩阵评价环境标志产品[J]. 环境保护, 1999, (6): 23—25.
- [13] G. Fleisher and others. A semi-quantitative method for the impact assessment of emissions within a simplified life cycle assessment[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2000, (5): 1—8.
- [14] 孙旭军. 四种餐具的生命周期评价研究[D]. 武汉: 武汉大学资源与环境学院, 2001.
- [15] Goedkoop, M., R. Spriensma. The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment (Preliminary Internet version)[R]. Leiden University: The Netherlands Center for Environmental Science, 1999.
- [16] Seizo Kato and others. Life cycle assessment estimation for eco-management of co-generation systems[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2001, 123(3): 15—20.

Summary of the Method Research of Life Cycle Impact Assessment(LCIA)

REN Wei LIU Nian-feng¹

(1. College of Envir. Sci. & Eng., HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: Life cycle assessment is a hot-point in recent research of environment science. Being an advanced concept and method, it evaluates the influence to environment by a product's whole process and has infiltrated various respect of social life with great speed. The definition and frame of life cycle assessment is introduced briefly. The core part—life cycle impact assessment, as well as its step and method are discussed. On the basis of the above, several typical methods of impact assessment have been focused to be discussed and compared.

Key words: life cycle assessment; life cycle impact assessment; typical method for impact