

我国生命周期评价理论研究对策浅析^{*}

徐常青¹ 陈 伟¹ 洪静兰^{* 1,2}

(1. 山东省水污染控制和资源再利用重点实验室, 山东大学环境科学与工程学院 济南 250100;
2. 山东大学气候变化和健康中心 山东 济南 250012)

摘 要 本文主要分析了我国生命周期评价在理论研究方面的现状, 针对当前我国生命周期评价理论研究的薄弱环节(不确定性分析、清单数据质量把关、生命周期环境影响评价模型构建等), 分别提出了利用泰勒系列展开模型进行全生命周期不确定性分析与数据质量把关相应对策; 并指出需要根据我国国情来构建生命周期环境影响评价模型的紧迫性。

关键词 生命周期评价 不确定性分析 数据质量 生命周期清单 生命周期环境影响评价模型

一、前 言

根据 ISO14040 的定义, 生命周期评价 (life-cycle assessment: LCA) 是指“对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价, 具体包括互相联系、不断重复进行的四个步骤: 目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释”^[1]。作为新的环境管理工具和预防性的环境保护手段, LCA 主要应用在通过确定和定量化研究能量和物质利用及废弃物的环境排放来评估一种产品、工序和生产活动造成的环境负载; 评价能源材料利用和废弃物排放的影响以及评价环境改善的方法。首先辨识和量化整个生命周期阶段中能量和物质的消耗以及环境释放, 然后评价这些消耗和释放对环境的影响, 最后辨识和评价减少这些影响的机会, 生命周期评价注重研究系统在气候变化、生态健康、人类健康和资源消耗领域内的环境影响。目前, LCA 技术在欧美日等发达国家应用较为普遍, 已成为环境认证、产品开发与规避贸易壁垒等的重要手段。然而, 在目前的 LCA 分析中, 很少有研究涉及到不确定性分析, 从而导致了难以科学界定研究案例的污染物减排潜力和明确污染物减排系数等诸多问题。此外, LCA 技术在我国的研究、应用等方面与发达国家相比还存在较大差距, 主要集中在生命周期清单与生命周期影响评价模型构建方面。

二、理论研究存在的问题及对策

(一) 不确定性分析

由于 LCA 研究存在着广泛的不确定性, 如数据的采集、系统边界设置及分布、模型等, 这些不确定因素将直接影响到其结论的正确性与可靠性。目前, 国内外尚无利用 LCA 基本函数演变法对整体 LCA 进行不确定性评价的报导。并且, 在众多 LCA 报导中^[2-4], 也很少有研究进行了不确定性解析。现存的少数 LCA 研究的不确定性评价方法主要有 3 类: ①采用多项指标来对数据质量进行表征, 如数据完整性、技术相关性、地理和时间代表性等^[5]; ②利用蒙特卡洛模型来对数据的不确定性进行模拟分析^[6]; ③将数据质量指标法和蒙特卡洛法结合, 进行集成分析^[7,8]。其中, 利用质量指标法和蒙特卡罗法结合计算的研究占主导地位。但是, 由于蒙特卡罗这项技术在 LCA 领域运行起来相当繁重、耗时, 尤其在对比多个流程间的区别时更为繁琐。并且局限于对生命周期清单进行分析, 很少涉及对整体 LCA (主要包括生命周期清单、生命周期

^{*} 感谢国家高科技研究发展计划项目 (863 项目, 编号 2012AA061705)、国家自然科学基金 (编号 41101554) 以及教育部留学归国人员启动基金 (编号 2011-1568) 的支持。

影响评价、系统边界等) 进行评价。另外, 蒙特卡罗这项技术难以评估各个参数对整体不确定性的贡献。作为蒙特卡罗技术的替代方法, Heijungs 等人^[9]发表了用矩阵相位法做不确定性分析理论。然而, 该研究在 LCA 案例分析及对比多个流程时, 具有相当的复杂性。Morgan and Henrion^[10]和 Citroth 等人^[11]发表了以 Taylor series expansions (泰勒系列展开) 为基础的不确定性分析理论。然而, 他们的研究既未解决如何评估各个参数对整体不确定性的贡献问题, 又未对 LCA 研究中至为关键的多个流程间的对比进行探讨。因此, 提出了通过以下途径构建 LCA 不确定分析模型。

1. 单一流程的全生命周期不确定解析

利用 LCA 基本函数演变法^[12,13]对整体 LCA (生命周期清单、生命周期影响评价和系统边界等) 的不确定性进行解析。首先需根据各参数的输入及输出的变化值确定模型的相对敏感性 (S_i), 然后根据各参数的相应数据质量指标 (GSD_i^2), 利用泰勒系列衍生方程式 (1) 快速精确地推出生命周期清单的不确定性。随后利用 LCA 基本函数演变法^[12,13], 对生命周期清单、生命周期影响评价和系统边界间的误差传播形式进行解析, 构建针对整体 LCA 的简易且精确的不确定性解析数学模型, 并进一步找出各参数对整体不确定性的贡献形式。

$$(\ln GSD_0^2)^2 = S_1^2 (\ln GSD_1^2)^2 + S_2^2 (\ln GSD_2^2)^2 + S_n^2 (\ln GSD_n^2)^2 \quad (1)$$

2. 两个工艺流程间的不确定性解析

针对不同工艺流程 (流程 A 与流程 B) 间的 LCA 的不确定性解析对比, 将利用泰勒系列展开衍生方程 (式 2)^[12,13], 对流程 A/B < 1 的概率进行解析。

$$\begin{aligned} (\ln GSD_{A/B})^2 &= \sum_i^l S_{A,i}^2 (\ln GSD_{A,i})^2 + \sum_j^m \\ &= l + 1 S_{B,j}^2 (\ln GSD_{B,j})^2 + \sum_k^n \\ &= m + 1 (S_{A,k} - S_{B,k})^2 (\ln GSD_{A,k})^2 \end{aligned} \quad (2)$$

这里, $S_{A,i}$, $S_{B,i}$, $GSD_{A,i}$, 和 $S_{B,i}$, 分别为流程 A 和 B 的非相关单元的相对敏感性和相应数据质量指标, $S_{A,k}$ 和分 $S_{B,k}$, 别为流程 A 和 B 的相关单元的相对敏感性。 $GSD_{A,k}$ 为流程 A 和 B 的相关单元的相应数据质量指标。

然而该方法仅考虑气候变化和资源消耗对环境产生的影响, 并未探讨如何对整体 LCA (清单、影响评价模型、系统边界等) 的不确定性进行解析的问题。这一研究还有待进一步在扩展, 得出更为完善的不确定性分析模型。

(二) 生命周期数据库构建

虽然我国目前 LCA 的研究取得了重要的成果, 但还需要积累大量的研究案例, 生命周期清单构建方面还不够成熟, 没有建立持续的 LCA 数据库。由于 LCA 的研究工作主要是由高校和研究所完成, 企业的参与力度还不够, 因此也就导致我国 LCA 实践的主要问题为数据, 尤其是特定现场数据的缺乏。原始数据收集渠道不够明确, 导致无法对数据质量进行分析。另外, 对各行业各产品的 LCA, 需要确定统一的数据类型和标准, 使得结果能在不同层次上进行比较。这些实际的数据质量问题对于我国 LCA 研究的发展有着重要影响。综上所述, 我国生命周期清单的构建方面主要存在以下几个问题^[14]:

(1) LCA 中所做的选择和假定, 在某些程度上主观性较强, 如系统边界的选定、收集数据的渠道等;

(2) 数据完整性和精确度不高。构建一个完整生命周期清单需要大量数据, 很多研究者主要依赖统计年鉴、全国平均工艺水平的工程估计或专业判断来获取数据。这在很大程度上会导致最终结果的不准确, 从而得出错误的结论;

(3) 大多数 LCA 分析研究没有进行不确定性分析;

(4) 用于评价环境影响的模型有一定局限性, 在很多特定条件下可行性不高。

针对以上几点问题, 需要通过以下途径构建生命周期清单。具体构建流程图见图 1。

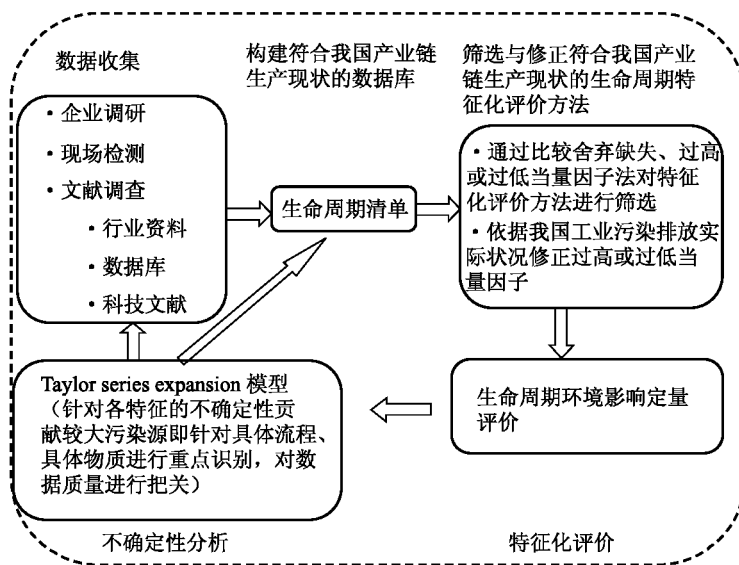


图 1 生命周期清单构建流程图

1. 原始数据收集

通过企业调研、现场检测、文献调查（主要包括行业资料、数据库、科技文献等）获得符合需求的相关数据。

2. 构建生命周期清单

依据我国典型处理工艺并集合其具有代表性的数据, 构建符合我国产业链生产现状的数据库。

3. 修正当量因子

筛选与修正符合我国产业链生产现状的生命周期特征化评价方法, 通过比较舍弃缺失、过高或过低当量因子法对评价方法进行筛选, 依据我国实际状况修正过高或过低当量因子。

4. 进行特征化评价

对生命周期环境影响进行定量评价。

5. 进行不确定性分析

利用 Taylor series expansion 模型, 针对各特征值的不确定性贡献较大的污染源即针对具体流程、具体物质进行重点识别, 对数据质量进行把关。如数据符合不确定性分析标准, 就将其加入到我国数据库（生命周期清单）中, 如果数据质量不合格, 就需要重新进行数据收集、数据筛选等工作。

目前, 上述清单构建方法已被应用于水泥^[15,16]、固体废弃物^[17]、污泥^[18]、造纸^[19]、电解铝^[20]等领域。

(三) 生命周期环境影响评价方法

当前, 缺乏在构建符合我国国情的各产品生命周期环境影响类别、特征化评价方法基础上进行的 LCA 解析。与臭氧层破坏、温室效应等相对统一且成熟的特征化模型不同, 生态毒性影响与人类健康损伤类别的特征化模型, 多是建立在欧美地区的动植物与人群暴露基础上进行的解析^[21-23], 在不同研究中统一性较差^[24-26]。Hong 等人^[24,25]前期的研究表明, 这些特征模型在我国 LCA 研究中的直接应用, 有可能过高或过低地评估我国产品对环境的影响。因此需依据

我国动植物与人群暴露状况进行定量解析。

但是，由于特征化评价所需的摄入率与潜在毒性评估所需资料极其庞大，如果针对全生命周期的每一个流程排放的污染物都进行计算，会极大地阻碍 LCA 在实际中的应用。因而，构建适合我国国情的产品生命周期环境影响特征化评价方法，研究产品生产活动对我国环境造成的损伤是十分必要的。

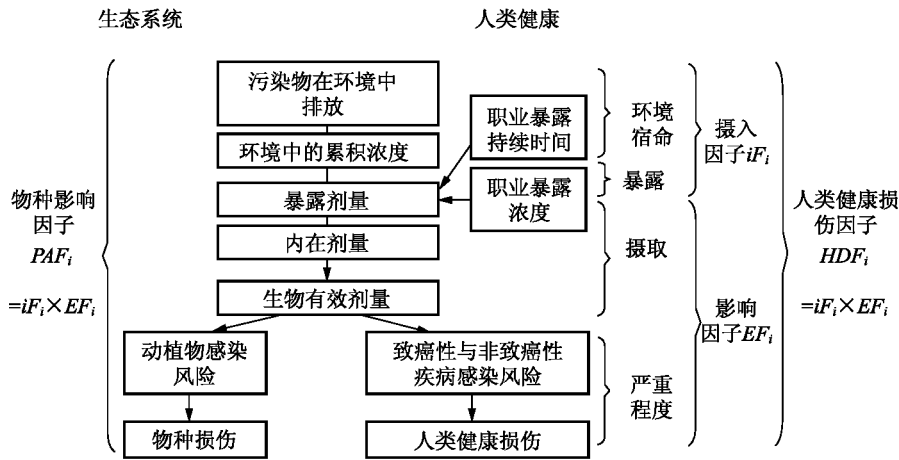


图2 潜在特征影响因子研究技术路线示意图

结合我国的环境条件、人均寿命、体重与各关键污染物的背景浓度，依据质量平衡原理，利用非平衡、稳态、流动条件下的多介质模型^[13]定量关键污染因子在大气、土壤、地表水、地下水等多个介质层的排放状况。然后解析各关键污染因子在所存在介质层中的平流、降解或界面质量交换迁移、转化与归趋，结合剂量-反应模型。按照图2所示的技术路线定量其生态系统破坏与人类健康损伤特征值，并进一步定量相应的特征影响当量值很有必要。

以金属汞在城市大气中排放为例，利用上述研究路线的计算结果表明，我国金属汞在城市大气中排放的生态系统和人类健康损伤当量因子与国际上广泛应用且同时以1,4-二氯苯为参照物的ReCiPe、CML、USESLCA模型^[27]有明显差别（表1），因而科学定量符合我国国情的关键污染物的潜在特征影响因子是十分必要的。

表1 不同模型中汞在城市大气中排放的潜在生态系统和人类健康损伤当量因子比较（假设1,4-DCB；1,4-二氯苯为参照物）

影响类别	单位	ReCiPe	CML	USESLCA	本研究
人体毒性	kg 1,4-DCB/kg _g 排出	5.18E+05	6.01E+03	1.22E+06	1.16E+06
癌症	kg 1,4-DCB/kg _g 排出	-	-	1.62E+06	1.78E+06
非癌症	kg 1,4-DCB/kg _g 排出	-	-	9.82E+05	7.85E+05
淡水	kg 1,4-DCB/kg _g 排出	3.29	317	11.4	6.52
海水	kg 1,4-DCB/kg _g 排出	593	1.20E+06	7.17E+04	5.61E+04
陆地	kg 1,4-DCB/kg _g 排出	102	2.83E+04	1.70E+03	1.80E+03

三、结论和展望

虽然 LCA 技术目前在不确定性分析、清单构建、影响评价模型构建等方面存在一些问题，

但是各国的研究者正在致力于改善这些不足之处。LCA 的发展需要各国研究者共同合作, 开发一些新的方法和模型, 努力让 LCA 技术更加完善。目前 LCA 技术正在成为绿色设计、绿色制造、清洁生产、循环经济、制定政府政策、可持续发展教育和工艺改进实施的有生命力和发展前途的重要工具。相信随着实践经验的不断积累, 其应用领域和重要性会进一步拓宽和加强, 应用前景会更加广阔。

参 考 文 献

- [1] ISO (International Organization for Standardization), Environmental Management – Life – cycle assessment – General Principles and Framework. ISO 14040, Geneva, Switzerland. 2006a.
- [2] Hong, J., Hong, J., Otaki, M., Olivier, J., Environmental and Economic Life – cycle assessment for Sewage Sludge Treatment Processes in Japan [J]. Waste Manage, 2009, 29: 696 – 703.
- [3] Houillon, G., Jolliet, O., Life – cycle assessment for the Treatment of Wastewater Urban Sludge: Energy and Global Warming Analysis [J]. J Cleaner Prod, 2005, 13: 287 – 299.
- [4] 韩进光, 郑承军, 王毅, 西安市北石桥污水处理工程 LCA 研究 [J]. 给水排水, 2009, 35: 214 – 217.
- [5] Anna E Bjorklund. Survey of approaches to improve reliability in LCA [J]. LCA Methodology, 2012, 7: 64 – 72.
- [6] Tan R. Using fuzzy numbers to propagate uncertainty in matrix – based LCI [J]. Life Cycle Assess, 2008, 13: 585 – 592.
- [7] Mo Hua, Zhang Tianzhu. Data quality assessment of life cycle inventory analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16, 55—58.
- [8] May J. R., Brennan D. J., Application of data quality assessment methods to an LCA of electricity generation [J]. Life Cycle Assess, 2003, 8, 215 – 225.
- [9] Heijungs, R. The Use of Matrix Perturbation Theory for Addressing Sensitivity and Uncertainty Issues in LCA. Proceedings of The Fifth International Conference on EcoBalance – Practical tools and thoughtful principles for sustainability. The Society of Non – Traditional Technology, Tokyo, Japan. 2002.
- [10] Morgan, M., Henrion, M., Uncertainty: A Guide Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, England. 1990.
- [11] Citroth, A., Fleischer, G., Steinbach, J., Uncertainty Calculation in LCA – a Combined Model of Simulation and Approximation. Int J LCA, 2004, 9 (4): 216 – 226.
- [12] Hong J., Shaked, S., Rosenbaum, R., Jolliet, O., Analytical Uncertainty Propagation in Life Cycle Inventory and Impact Assessment: Application to an Automobile Front Panel. Int J LCA, 2010, 15: 499 – 510.
- [13] Mackay D., Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach [M]. Second edition, CRC Press. 2001.
- [14] 王寿兵, 杨建新. LCA 方法及其进展. 上海环境科学, 1998, 35: 7 – 10.
- [15] Hong J., Li X., Environmental assessment of sewage sludge as secondary raw material in cement production – A case study in China [J]. Waste Management, 2011, 31: 1364 – 1371.
- [16] Hong J., Li X., Environmental and Uncertainty Assessment: hazardous industry waste as aggregate in cement production [J]. Advanced materials research, 2011, 160: 373 – 378.
- [17] Hong J., Li X., Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China [J]. Waste Management. 2010, 30: 2362 – 2369.
- [18] Hong J., Hong J., Otaki M., Olivier J., Environmental and economic life cycle assessment for sewage sludge treatment processes in Japan [J]. Waste Management, 2009, 29: 696 – 703.
- [19] Hong J., Li X., Environmental assessment of recycled printing and writing paper: A case study in China [J]. Waste Management, 2010, 32: 264 – 270.
- [20] Hong J., Jing Z., Hong J., Xu X., Environmental and economic life cycle assessment of aluminum – silicon alloys production: A case study in China [J]. Journal of cleaner production, 2012, 24: 11 – 19.
- [21] Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitze G., Rosenbaum R., IMPACT2002 + : A

- New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int J LCA*, 2003, 8: 324 – 330.
- [22] Goedkoop M. J. , Heijungs R. , Huijbregts M. , De S. A. , Struijs J. , Van Z. R. , 2009. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the mid – point and the end – point level. *ReCiPe*: First edition. [http: //www. lcia – recipe. net](http://www.lcia-recipe.net)
- [23] Bare, J. C. , Norris, G. A. , Pennington, D. W. and McKone, T. , TRACI – The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *J. Ind. Ecol.*, 2003, 6: 56 – 68.
- [24] Hong J. , Jolliet O, 2008. Improving the Life Cycle Human Toxicity Assessment of Aluminium and Metal – based Products. SETAC North America 29th Annual Meeting, Tampa, Florida, USA. Nov.
- [25] Hong J. , Li X. , Improving Life Cycle Human Toxicity Assessment in Pre – training Electrolytic Aluminum Industry for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons [J]. *Adv Mater Res*, 2011, 160: 247 – 251.
- [26] Hong J. , Li X. , Life Cycle Human Toxicity Assessment in Coke Industry for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons [J]. *Environmental pollution and public health*. 2011.
- [27] Available from: [http: //www. ecovane. net/#/simapro/4556758105](http://www.ecovane.net/#/simapro/4556758105)