

生命周期评价与环境风险评价方法整合研究述评

Integrated research on lifecycle analysis and environmental risk evaluation methods

孙赵鑫 施晓清 杨建新 (中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘 要 作为重要的环境管理工具, 生命周期评价 (LCA) 和环境风险评价 (ERA) 具有各自的理论框架和方法体系, 但在实际应用中都存在一定的局限性, 将二者整合可弥补各自缺陷从而更好地为面向可持续发展的环境管理提供支撑。本文从 LCA 与 ERA 整合需求、整合方法、应用领域等方面对国内外相关研究进行了分析、总结与归纳, 得到以下结论: LCA 与 ERA 在方法论本身及支持环境决策等方面具有整合的必要性; 现有研究中有关 LCA 与 ERA 整合的探讨可分为评价方法的融合和评价结果的综合两类, 这两种方式各有优劣, 适用不同目的的研究; 此外, 当前将两种方法整合已经在一些具体领域得到应用, 但仍存在诸多问题与挑战, 为此展望了进一步研究的方向。

关键词 生命周期评价 (LCA); 环境风险评价 (ERA); 整合; 环境管理; 可持续发展

免责声明 本文仅代表作者个人观点, 与中国 21 世纪议程管理中心、中国可持续发展研究会及联合国均无关。

Disclaimer: This brief was submitted through the Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21), Ministry of Science and Technology, China, and the Chinese Society for Sustainable Development (CSSD). The views and opinions expressed are those of the author(s) and do not necessarily represent the views of, and should not be attributed to, the Secretariat of the United Nations, the ACCA21 or the CSSD. Online publication or dissemination does not imply endorsement by the United Nations. For further information, please contact Mr. Sun Xinzhang (sunxzh@acca21.org.cn)

利用环境管理工具对产品或服务的环境表现、健康影响及风险做出全面准确的评估是科学决策的前提与保证^[1]。生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 和环境风险评价 (Environmental Risk Assessment, ERA) 是目前广泛应用的环境管理工具。其中, LCA 是基于功能单位对产品、过程或活动等全生命周期潜在环境影响进行定量评估的工具^[2]; 而 ERA 是在一定时间和空间范围内考虑地理和气象特征、人口密度、化学临界值等计算污染物浓度的评价方法^[3]。这两种方法作为环境管理工具关注的焦点不同, LCA 主要用于对产品和服务等可能造成的各类型环境影响进行定量化评价, 从而有助于决策者选择环境影响较小的方案, 而 ERA 是以保障生态系统及人类的安全性为目的定量化风险存在与否及其大小。二者在环境管理中具有各自的优势与局限性, 国内外有学者以互补不足, 充分发挥两种方法各自优势为出发点提出应将 LCA 与 ERA 结合共同用于环境管理和决策。然而与国外研究相比, 国内的相关研究正处于初级阶段, 亟需借鉴国外的研究和实践经验。

本文从 LCA 与 ERA 整合需求、整合方法、应用领域等方面入手, 对国内外相关研究进行系统梳理, 总结不同整合方法的特点、适用性及其应用情况, 提出针对性的建议, 为进一步在整合方法和模型方面开展深入研究, 从而支持环境决策以实现可持续发展目标提供理论参考。

1 整合需求

大量学者从不同的角度提出了将两种工具结合起来共同用于决策的需求, 如 Fiksel^[4]从为产品设计选择支持工具角度, 提出将 LCA 和 ERA 结果结合以相互补充; Oslen 等^[5]认为两种工具的分析结果可以结合进行更全面的分析, 并提出了二者可能结合的方面: 用于物质流的分析、数据共享以及共同分析评价产品的使用和报废阶段; Cowell 等^[6]从为政策提供支持的角度提出将 RA 和 LCA 结合的必要性并分析了两种工具在提供决策支持上的不同角色和作用; Christensen 和 Oslen^[7]认为 LCA 和 ERA 在评价的地理边界、数据需求、污染排放情况等方面存在差异, 建议将两者结合开发一个新的工具; Udo de

Haes 等^[1]认为在工具的应用方面, 两者的目标相互补充, 建议从这个角度将两者结合使用。此外, Lim 等^[8]认为应将生命周期影响评价 (LCIA) 和 ERA 结合以填补各自存在的不足。

综上所述, 两种工具在环境管理过程中有各自的优势, 如从监管的角度来看, 与 ERA 相比 LCA 关注的角度更加全面, 此外, LCA 还可以对“问题转移”情况进行分析, 而 ERA 的优势在于它利用最坏的情况保证了生态系统及人体健康的安全, 它还可从多个层次出发进行评价, 既可以对单一来源的某一污染物排放相关情况进行评价, 也可以评价某地域范围内所包含污染源排放的某一物质的风险情况。

当两种方法单独使用时存在一定的局限性, 如单进行 LCA 分析, 只可以得出环境影响越小越好的结论; 此外, LCA 的结果很难保证排放涉及的各个地点的人体健康都得到保护; 另一方面, ERA 研究也存在局限, 如 ERA 的评价范围和边界较窄, 通常只关注一种化学物质对特定人群的影响, 可能造成风险转移的情况。而将 LCA 与 ERA 整合可以规避两种方法单独使用时的局限性, 如将 ERA 与 LCA 整合可以弥补 ERA 的评价范围和边界过窄的缺陷, 可以拓宽其评价的环境负面影响的范围避免风险转移情况的发生; 另外, 将二者整合还有助于解决针对 LCA 不同方面环境影响比较趋势不同需要权衡的问题, 从而

最终实现人类与生态系统全面健康的可持续发展^[9]。

2 整合方法

根据上文的阐述可知, 将 LCA 与 ERA 整合起来共同用于决策十分必要, 关于如何将 LCA 与 ERA 进行整合, 国内外相关研究成果提供了两种思路和方法: (1) 将两种方法充分融合, 保留其中一种方法的评价框架, 将另一种方法的评价结果纳入其框架中; (2) 利用两种方法针对相同的过程分别独立地进行评价, 再将结果对比或综合以得到全面的影响情况。本文将上述第一种整合思路称为评价方法的融合, 其特点是两种评价方法之间不是独立的、具有数据流或者具有共用的模型; 第二种思路称为评价结果的综合, 其特点是两种方法相互独立, 但评价对象相同或者有重叠的部分, 评价结果起到了相互补充的作用。

2.1 评价方法的融合

不少研究者从将 LCA 和 ERA 的方法融合的角度开展了研究, 可从这些研究中归纳出三种具体的方式进行融合: (1) 利用 ERA 的模型计算物质的毒性潜值, 将其用于 LCIA 的计算过程中; (2) 在原有的 LCA 框架和影响类别基础上, 利用 ERA 计算结果添加与风险相关的影响类别; (3) 从 ERA 的角度出发, 将生命周期思想纳入 ERA 框架中。具体研究情况如表 1 所示。

表 1 LCA 与 ERA 评价方法融合研究总结

融合方式	文献	研究方案
	Guinee 和 Heijungs ^[9]	首次在 LCIA 中引入风险评价的模型, 主要侧重于毒性影响的分析
将 ERA 计算得到的毒性潜值用于 LCIA 中	Assies 等 ^[10] 和 Nishioka 等 ^[11]	开发了考虑污染物质空间信息的 LCIA 方法
	Huijbregts 等 ^[12]	采用 ERA 的思路计算了 181 种毒性物质的毒性潜值, 用于 LCIA 特征化过程
	Hertwich 等 ^[13]	利用 ERA 计算的毒性潜力, 对 LCA 中人体健康毒性的影响特征化过程进行了优化
在 LCIA 中利用 ERA 计算结果添加与风险相关的影响类别	Khan 等 ^[14]	利用人体健康风险、生态风险、安全风险替代了一些 LCA 原有的环境影响类别
	Sonnemann 等 ^[15] 和 Bare 等 ^[16]	用基于污染扩散模型以及人口密度的风险评价替代了 LCA 中人类毒性影响类别
将生命周期思想纳入 ERA 框架	Christensen 等 ^[7] Kevin Fong-Rey Liu 等 ^[17]	从 ERA 的角度探讨 LCA 如何对风险评价项目提供决策支持 将 LCIA 的信息纳入 ERA 中, 产生了新的环境管理工具

Aissani 等 ^[18]	提出生命周期风险评价 (LCRA) 的新方法
王志伟、刘志军、王婷、田成方、薛晋洁、孙翔等 ^[19-24]	提出了对风险监管的方法模型
林亲铁等 ^[25]	对污染物的全生命周期建立了环境风险评价模型
王健等 ^[26]	基于 LCA 中的清单数据, 提出了其全生命周期环境风险评价模型

由表 1 可以看出, 从方法融合的角度探讨 LCA 与 ERA 整合的相关研究已经有了初步的进展, 国外的研究涉及到了三种结合方式, 而国内的研究主要集中在第三种结合方式。此外, 最初的研究都集中于第一种结合方式, 主要是在 LCIA 方法框架下的局部结合, 而后逐渐向第二、第三种结合方式扩展, 这两种方式实现了风险和影响综合考虑的思路结合, 视野更加广。然而当前的研究仍存在着一些问题, 首先, 上述三种方式都没有实现既涵盖多种影响类别又考虑具体的时空信息和环境承载能力, 其次, LCA 和 ERA 的假设条件不一样, 因此将两种方法整合过程中增加了评价结果的不确定性; 另外, 上述方法并未充分发挥两种方法各自的优势, 只是利用其中一种评价方法的某些模型和数据对另一种评价方法进行完善。

2.2 评价结果的综合

近年来, 大量的学者提倡将 LCA 与 ERA 的评价结果进行综合以实现更加全面的环境管理和决策, 这些学者主要通过以下三种方式进行处理: (1) 针对相同的过程分别进行 LCA 和 ERA, 然后采用一定的方式综合两种评价

的结果; (2) 先利用 LCA 对某产品或服务的全生命周期过程进行评价, 筛选出环境影响较大的过程和污染物, 再针对筛选出的过程及物质进行 ERA; (3) 对两个可选方案进行 LCA 后呈现出各影响类型比较趋势有所差别, 利用 ERA 对 LCA 评价结果进行权衡。

针对上述三种方式, 分别有一些研究可供参考, 如表 2 所示。可以看出, 在结果综合方面多为国外的研究, 国内还未有所涉及。总结这些研究成果可知, 与将 LCA 和 ERA 两种方法进行融合相比, 从结果出发实现整合的方式具有以下优势: 充分发挥了两种工具的特点, 评价结果是相互补充的, 而且可以解决 LCA 表征不同毒性影响的环境影响类别结果呈现差异时难以权衡的问题, 此外通过 LCA 筛选出需要进行风险评价的物质及其排放路径, 可以减少 ERA 中数据收集方面的工作量。但此方法在应用时也有些难题尚待解决, 如量化基准的转换问题、结果难以整合以及如何降低不确定性等。

表 2 LCA 与 ERA 评价结果综合研究总结

综合方式	文献	研究方案
	Lim 等 ^[8]	根据相同的清单分别进行 LCIA 和 ERA, 找出共同以及各自得到的危害比较大的污染物质
第一种方式	Mattila 等 ^[27]	将 LCIA 中毒性影响类别的评价结果与 ERA 结果中交叉重叠的部分相互补充分析
	Linkov 等 ^[28]	分别利用 LCA 和 ERA 针对相同的系统进行评价, 并采用多目标决策 (MCDM) 的方法对结果进行整合
	Owens ^[29]	提出先利用 LCA 识别主要的健康和环境问题, 再利用 ERA 进行具体的风险分析
第二种方式	Tirutá-Barna 等 ^[30]	提出 LCA 可以作为生态风险评价 (EcoRA) 的子集, 为 EcoRA 筛选需要进行风险分析的生命周期阶段
第三种方式	Carpente 等 ^[31]	利用 ERA 对 LCIA 都得到的不同环境影响结果进行权衡

3 应用领域

当前, 将 LCA 与 ERA 整合进行综合评价的研究已经在国内外的一些领域有所应用, 国外的研究或是服务于

政府决策或是为企业管理提供支持, 而国内主要用于对建设工程项目提供理论支撑, 具体情况如表 3 所示。

表 3 LCA 与 ERA 整合应用研究总结

研究目的	文献	应用领域	解决的问题
国外研究	Socolof 和 Geibigi ^[32]	印刷线路板的焊料的评价	从保护环境与保障人体健康出发, 选择更好的材料、产品与行为。
	Carpenter ^[31]	道路建设材料的选择	
	Benetto 等 ^[33]	评价美国家庭住房距离增加前后的环境生态综合影响情况	
	Nishioka 等 ^[11]	比较分析汽油和氢燃料的环境影响	
国内研究	Assies 等 ^[10]	尿素生产工序的综合评价	从经济性、环保性出发改善产品生产过程
	Khan 等 ^[14]	对涂料的生产过程进行分析	
	Askham 等 ^[34]	用于世界最大的塑料处理厂	
国内研究	Kevin Fong-Rey Liu 等 ^[35]	纳米工程材料	保障了建设工程项目全生命周期的安全
	Grieger 等	高速公路工程项目	
	王志伟等 ^[19]	船舶和海洋平台工程项目	
	刘志军等 ^[20]	风电项目投资风险的评价	
	李峰等 ^[37]	评价汽车研发项目风险	
	薛晋洁等 ^[23]		

由当前国内外的应用情况可得, 当前国内的应用领域较为有限, 只针对建筑工程项目进行, 而且多是以 ERA 为核心, 将生命周期理念引入其中, 而相较而言, 国外的应用领域更广, 研究对象涉及到多种产品和行为, 且结合方式更加多样, 或是结果的结合或是方法的结合, 其一些实践经验值得参考与借鉴。但还存在以下问题: 首先, 各应用研究的整合方式各异, 大多开发了新的模型方法, 统一性和规范性较差; 其次, 大部分研究在应用过程中未提出方法的优缺点及其适用性, 难以开展广泛的应用; 最后, 当前将二者整合用于实际研究的应用范围较小, 需要扩展其应用领域, 以便为更多方面的决策提供支持。

4 结论与建议

4.1 结论

本文通过对 LCA 和 ERA 整合相关研究的分析、归纳与总结, 得出如下结论:

(1) LCA 和 ERA 都是环境管理与决策的重要工具, 将二者整合可以弥补 ERA 的评价范围和边界过窄的缺陷, 有助于解决针对 LCA 不同方面环境影响比较趋势不同需

要权衡的问题, 从而最终实现人类与生态系统全面健康的可持续发展。

(2) 将 LCA 和 ERA 整合可归纳为 LCA 和 ERA 方法的融合与 LCA 和 ERA 结果的综合两种方式, 前者需要建立新的模型, 后者只需将各自的评价结果进行综合, 研究者可从各自的研究目的出发选择适合的整合方式。

(3) LCA 与 ERA 整合方法已在一些领域得以应用, 但还存在应用的方法统一性和规范性较差、适用性不明晰等问题, 因此, 还需进行进一步的研究以拓展方法应用的领域。

4.2 建议

本研究基于国内外学者开展的关于 LCA 和 ERA 整合方面的研究与实践对将二者整合的方法及应用进行了综述与评析, 根据上述论述, 从整合方法和应用两方面提出以下几点建议:

(1) 根据当前的两种整合方式(评价方法融合和评价结果综合)各自的特点, 有针对性地选择适合相应研究目的的具体结合方式, 其中整合方法结合带来的评价基础转换、降低不确定性等是要重点解决的问题。

(2) 在将 LCA 和 ERA 结果综合的方式中, 由于时空尺度需一致, 建议在研究其整合的具体方法时关注尺度转换及影响分类等问题。

(3) 除了当前国外已提出的整合方式外, 我国可以提出更多种适合不同研究目的和特点的整合方式, 如从 LCA 的评价结果出发, 建立基于 LCIA 结果的 ERA 模型, 或者开发出将 LCA 和 ERA 模型相结合的工具等。此外, 针对不同的方法, 应标明方法的优劣势及适用性。

(4) 在结合方法的应用方面, 我国应该将 LCA 和 ERA 整合广泛的应用于实际的决策当中, 一方面可为政府政策的制定提出科学的理论依据和方法支撑; 另一方面也可为生产企业工艺的选择提供支持, 在功能相同的不同工艺间选择更加“绿色”的方案。

参考文献

[1] Udo De Haes H A, Sleeswijk A W, Heijungs R. Similarities, Differences and Synergisms Between HERA and LCA—An Analysis at Three Levels[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2006, 12(3): 431-449.

[2] 李兴福, 徐鹤. 基于 GaBi 软件的钢材生命周期评价[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(6): 15-18.

[3] Wegener Sleeswijk A, Heijungs R. GLOBOX: A spatially differentiated global fate, intake and effect model for toxicity assessment in LCA[J]. Sci Total Environ, 2010, 408(14): 2817-32.

[4] Fiksel J. Design for Environment: A Guide to Sustainable Product Development: Eco-Efficient Product Development: Eco-Efficient Product Development[M]. McGraw Hill Professional, 2009: 32-41.

[5] Olsen S I, Christensen F M, Hauschild M, et al. Life cycle impact assessment and risk assessment of chemicals—a methodological

comparison[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2001, 21(4): 385-404.

[6] Cowell S J, Fairman R, Lofstedt R E. Use of risk assessment and life cycle assessment in decision making: a common policy research agenda[J]. Risk Analysis, 2002, 22(5): 879-894.

[7] Christensen F M, Olsen S I. The potential role of life cycle assessment in regulation of chemicals in the European Union[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2004, 9(5): 327-332.

[8] Lim S-R, Lam C W, Schoenung J M. Priority screening of toxic chemicals and industry sectors in the US toxics release inventory: A comparison of the life cycle impact-based and risk-based assessment tools developed by US EPA[J]. Journal of environmental management, 2011, 92(9): 2235-2240.

[9] Guinee J, Heijungs R. A proposal for the classification of toxic substances within the framework of life cycle assessment of products[J]. Chemosphere, 1993, 26(10): 1925-1944.

[10] Assies J A. A risk-based approach to life-cycle impact assessment[J]. Journal of hazardous materials, 1998, 61(1): 23-29.

[11] Nishioka Y, Levy J, Norris G A, et al. A Risk-Based Approach to Health Impact Assessment for Input-Output Analysis, Part 1: Methodology (7 pp)[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2005, 10(3): 193-199.

[12] Huijbregts M A, Thissen U, Guinée J, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects

- model USES - LCA[J]. Chemosphere, 2000, 41(4): 541-573.
- [13] Hertwich E G, Mateles S F, Pease W S, et al. Human toxicity potentials for life-cycle assessment and toxics release inventory risk screening[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, 20(4): 928-939.
- [14] Khan F, Sadiq R, Husain T. GreenPro-I: A methodology for risk-based process plant design considering life cycle assessment[J]. J Environ Model Softw, 2002, 17(1): 669-692.
- [15] Sonnemann G, Castells F, Schuhmacher M, et al. Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2004, 9(3): 206-207.
- [16] Bare J C. Risk Assessment and Life-Cycle Impact Assessment (LCIA) for Human Health Cancerous and Noncancerous Emissions: Integrated and Complementary with Consistency within the USEPA[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2006, 12(3): 493-509.
- [17] Liu K F-R, Ko C-Y, Fan C, et al. Combining risk assessment, life cycle assessment, and multi-criteria decision analysis to estimate environmental aspects in environmental management system[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(7): 845-862.
- [18] Aissani L, Jabouille F, Bourgois J, et al. A new methodology for risk evaluation taking into account the whole life cycle (LCRA): Validation with case study[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2012, 90(4): 295-303.
- [19] 王志玮, 蔡贞秀, 等. 基于全生命周期的高速公路工程项目风险识别与模糊综合评价应用研究[J]. 项目管理技术, 2012, 12: 46-51.
- [20] 刘志军. 基于全生命周期的机舱火灾风险评估与控制模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [21] 王婷, 田秉晖, 等. 基于全生命周期的生物质能水资源扰动风险评价——以油菜籽生物柴油为例[J]. 可再生能源, 2013, 02: 84-89.
- [22] 田成方. 基于生命周期的 ERP 项目风险评价研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2009.
- [23] 薛晋洁. 基于生命周期的汽车研发项目风险评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [24] 孙翔, 肖芸, 等. 基于生命周期分析的餐厨垃圾肥料化利用环境风险评价研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 08: 33-38.
- [25] 林亲铁, 李适宇, 等. 基于生命周期分析的致癌排放物人体健康风险评价[J]. 化工环保, 2004, 05: 367-372.
- [26] 王健, 常青, 田秉晖, 等. 油菜籽制生物柴油生命周期的化学污染物排放风险评价[J]. 生物质化学工程, 2013, 03:17-22.
- [27] Mattila T, Verta M, Seppälä J. Comparing priority setting in integrated hazardous substance assessment and in life cycle impact assessment[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16(8): 788-794.
- [28] Linkov I, Seager T P. Coupling multi-criteria decision analysis, life-cycle assessment, and risk assessment for emerging threats[J]. Environmental science & technology, 2011, 45(12): 5068-5074.
- [29] Owens J. Life - Cycle Assessment in Relation to Risk Assessment: An Evolving Perspective[J]. Risk Analysis, 1997, 17(3): 359-365.

[30] Tiruta-Barna L, Benetto E, Perrodin Y. Environmental impact and risk assessment of mineral wastes reuse strategies: Review and critical analysis of approaches and applications[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(4): 351-379.

[31] Carpenter A C, Gardner K H, Fopiano J, et al. Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction[J].

Waste Manag, 2007, 27(10): 1458-64.

[32] Socolof M L, Geibig J R. Evaluating Human and Ecological Impacts of a Product Life Cycle: The Complementary Roles of Life-Cycle Assessment and Risk Assessment[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2006, 12(3): 510-527.

[33] Benetto E, Tiruta-Barna L, Perrodin Y. Combining lifecycle and risk assessments of mineral waste reuse scenarios for decision making support[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2007, 27(3): 266-285.

[34] Askham C, Gade A L, Hanssen O J. Linking chemical risk information with life cycle assessment in product development[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 51: 196-204.

[35] Liu K F-R, Ko C-Y, Fan C, et al. Incorporating the LCIA concept into fuzzy risk assessment as a tool for environmental impact assessment[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 27(4): 849-866.

[36] Grieger K D, Laurent A, Miseljic M, et al. Analysis of current research addressing complementary use of life-cycle assessment and risk assessment for engineered nanomaterials:

have lessons been learned from previous experience with chemicals?[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(7).

[37] 李峰, 刘正超, 等. 基于全寿命周期理论的风电项目投资风险评价模型[J]. 华东电力, 2012, (4): 531-535.

作者简介: 孙赵鑫, 硕士生, 主要研究方向为城市与产业生态学。联系地址: 北京市海淀区双清路 18 号, 邮编 100085, 电子邮箱: szx001014@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (71173208, 71373259)