DOI: 10.5846/stxb201511122290
王玉涛,王丰川, 洪静兰, 孙明星.中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析.生态学报,2016,36(22): - .
Wang Y T, Wang F C, Hong J L, Mingxing S.The development of life-cycle assessment theory research in China and analysis of countermeasures.Acta Ecologica Sinica,2016,36(22): - .

中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析

王玉涛[1] 王丰川[1] 洪静兰[2,*] 孙明星[1,2]
1 山东大学,生态学与生物多样性研究所,济南　250100
2 山东大学,山东省水污染控制和资源再利用重点实验室,环境科学与工程学院,济南　250100

摘要:主要分析了我国生命周期评价的理论与实践研究进展与数据库构建现状,针对当前我国生命周期评价理论与应用研究的关键薄弱环节即不确定性分析、本土化数据库构建、本土化生命周期环境影响评价模型构建,指出了利用泰勒系列展开模型进行符合我国产业链生产现状的精确、完整、具有代表性、具有时空动态特征的生命周期数据库构建的必要性;并指出需要根据我国国情(例如:环境、地理、人口、暴露等)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

The development of life-cycle assessment theory research in China and analysis of countermeasures

WANG Yutao[1], WANG Fengchuan[1], HONG Jinglan[2,*], SUN Mingxing[1,2]
1 *Institute of Ecology and Biodiversity, Shandong University, Shanda South Road* 27, *Jinan* 250100, *China*
2 *Shandong Provincial Key Laboratory of Water Pollution Control and Resource Reuse, School of environmental science and engineering, Shandong University, Shanda South Road* 27, *Jinan* 250100, *China*

Abstract: This paper presents a review of the development of theoretical research and the current condition of database construction for life cycle assessment (LCA) in China. Our goal was to determine the primary weaknesses of the current theory and application of LCA in China, including uncertainty analysis, local database construction, and local Life Cycle Impact Assessment (LCIA) model development. We point out the necessity of developing China's LCA database, which could accurately, completely, representatively, and spatially-temporally dynamically fit the status quo of China's industrial production chain using the Taylor Series Expansion model. We also stress the urgency of building local LCIA models, which could fit China's national conditions, such as environment, geography, population, and exposure, among others.

Key Words: life-cycle assessment; uncertainty analysis; data quality; life-cycle inventory; life-cycle environmental impact assessment model

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 4 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]”。作为一种全新的预防性环境保护策略与手段,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、过程或生产活动造成的环境负载;

基金项目:国家自然科学基金(71403145), 山东省自然科学基金 (ZR2015GZ004), 山东大学交叉创新基金(2015JC016), 以及中国节能减排有限公司合作基金(GJN-14-07)的支持
收稿日期:2015-11-12;　　**修订日期**:2016-05-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hongjing@ sdu.edu.cn

评价能源、原材料利用和废弃物排放的环境影响;通过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、评价这些消耗和释放对环境的影响、辨识与量化减少环境负荷的关键机会,进而探求改善环境的方法。

国际上对于 LCA 的研究已有近半个世纪的时间,最早可追溯到 20 世纪 60 年代末、70 年代初。LCA 研究开始的标志是 1969 年美国中西部资源研究所(MRI)对 Coca-Cola 公司的饮料包装瓶进行的评价研究,结果表明一次性塑料瓶与可回收玻璃瓶相比,前者对资源和环境的影响较小,环境友好性更好。借助类似研究,公司还决定以铝制材料的饮料罐来代替钢制饮料罐[2-3]。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。尽管如此,在当前 LCA 研究尚较少涉及到不确定性分析,从而导致了难以科学界定研究案例中污染物减排潜力、定量环境负荷不确定性、明确污染物减排系数、辨识环境友好途径等诸多问题。此外,LCA 技术在我国的研究、应用等方面与发达国家相比在生命周期清单数据库构建与生命周期影响评价模型构建方面还存在较大差距。

在生命周期清单数据库开发构建方面,欧美日等发达国家相关研究单位已经开展了大量研究工作,并已取得重要成果。欧洲最早致力于产品清单数据库的开发,目前是拥有生命周期清单数据库最多的地区。其中,早期代表是由英国开发的 Boustead 数据库,其数据主要来源于产业领域的调研结果,数据信息覆盖 20 多个国家,国际通用性较高,目前已是世界上最大的生命周期清单数据库之一。此外,瑞士开发了 ETH-ESU 96、BUWAL 250、Ecoinvent 2000 三个数据库,荷兰开发了 Input-Output 95、IDEMAT 2000 两个数据库,瑞典开发了 SPINE@ CPM 数据库,丹麦开发了 LCA Food Database 数据库,上述都是欧洲较为成熟的生命周期清单数据库[4]。北美地区的数据库主要包括美国的 Input-Output 98、Franklin US LCI 98 和加拿大的 CRMD 等。澳大利亚则开发了 Australian LCI Database、National LCI Database 数据库。在亚洲地区,日本是最早开展 LCA 研究的国家,目前已构建起本国的 Input-Output 数据库。目前,印度、韩国、泰国等亚洲国家也在积极致力于构建本国的生命周期清单数据库[5]。在生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)方面,自 20 世纪 90 年代开始,多种 LCIA 评价方法相继发表[6],比较有代表性的有:荷兰的 CML 1992、Eco-indicator 95、Eco-indicator 99、CML 2baseline 2000,瑞士的 Ecopoint 1997、IMPACT2002+,瑞典的 EPS 2000,丹麦的 EDIP,美国环保署的“三步”模型[7]等。

1 中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析

1.1 国内 LCA 研究进展

与欧美等发达国家相比,国内关于 LCA 方面的研究起步较晚,大致开始于 20 世纪 90 年代。国内学者对 LCA 的研究主要集中在对 LCA 理论、方法的学习,以及直接运用 LCA 技术对特定产品与工艺的评价上。在上述研究中,产品生命周期清单数据收集的统计方法存在较大差异,严重阻碍我国本土生命周期清单数据库的构建,导致目前仍未构建起统一完整的中国生命周期清单数据库[8]。

虽然在 LCA 数据库构建方面存在巨大困难,但随着国家对资源环境问题重视程度的不断提高,逐渐加大了对 LCA 研究的科技扶持与资金投入的力度。在政府的良性引导与支持下,国内已有诸多学者在这方面开展了一系列研究工作,并积累了一定的成果,少数科研机构也自行构建了基于数据类型的生命周期清单数据库。

中国科学院生态环境研究中心的杨建新、王如松、刘晶茹[9]等对我国产品 LCIA 阶段的标准化与加权的方法、程序进行了讨论,研究确定了标准化基准应采用我国 1990 年人均环境影响的总潜值来表达,权重应采用我国 1990 年基准与 2000 年政府削减目标所估算基准间的比值来计算。此外,杨建新等人基于“欧盟—中国国际合作项目:工业初级产品生产过程生态持续性研究”统计了我国能源生产、利用方面的清单数据,并将结果纳入了 Boustead 软件中,此软件还整合了我国钢铁行业生产方面的清单数据。在整合过程中,开展了相关研究对清单数据的统计方法进行了统一,方便清单数据在该软件数据库中的整合[10]。这些工作为我国构

建统一的生命周期清单数据收集统计方法及生命周期清单数据库的开发奠定了良好基础。在前期长期工作积累基础上,2012 年中科院生态环境研究中心成功开发了中国 LCA 数据库(CAS-RCEES)。

四川大学的王洪涛[11]等总结提出了构建中国生命周期基础数据库(Chinese Life Cycle Database,CLCD)的基本方法,其中包括环境影响类型的选择、生命周期清单数据的收集、审核、建模、计算等方面,并与和亿科环境科技公司共同完成了 CLCD 的构建,并合作开发了 LCA 软件 eBalance,该软件可附带国际主流的 Ecoinvent 数据库和欧盟 ELCD 数据库,并兼容 Ecoinvent 的 EcoSpold 和 ELCD 的 ILCD 格式数据[12]。借助 CLCD 可以进行完整的 LCA 分析、产品碳足迹分析和节能减排评价,此外,CLCD 还包含我国本土化的节能减排权重因子、资源特征化因子、归一化基准值等参数,支持符合我国实际需要的 LCIA 计算与分析。

北京工业大学则在材料生命周期评价(材料环境协调性评价,MLCA)方面进行了长期研究并进行了数据库平台的建设。1998 年,国家“九五”高新技术研究计划(863 计划)支持了首项“材料的环境协调性评价研究”课题,由北京工业大学联合清华大学、等国内多所高等院校等联合承担,与国内多个重要材料企业合作,对我国水泥、钢铁、铝、陶瓷、建筑涂料、工程塑料等 7 类面广量大的典型基础性材料进行了较为全面的环境协调性评价(生命周期评价)研究,并初步获得了这些基础材料的环境负荷数据[13-14]。2001 年,北京工业大学等 6 所大学又联合承担了国家“十五”863 计划的“材料环境协调性评价技术及其应用”项目,将 MLCA 的研究延伸至整个材料领域。目前,经过 10 多年的不断努力,北京工业大学已经编制了较为完整的中国电力、化石能源、交通运输行业的生命周期数据清单,此外还汇整了我国钢铁、铝、陶瓷、建筑材料、工程塑料、联接材料、高分子材料和有色金属等典型材料的 70 多个数据集,总计约 10 万条环境负荷数据,成立了我国材料环境协调性评价中心(Chinese Center For Material Life Cycle Assessment),开发构建了中国材料生命周期清单数据库(Sino-Center)[15-16]。

以上分析可以看出,我国学者已经在 LCA 数据库建设方面取得了显著进展,然而,当前的 LCA 研究多是以国家统计数据或个别企业统计数据为基础,结合各污染物的排污系数、去除效率、物质代谢平均值等进行的计算,未对各工艺、原料与能源构成、废弃物处置与资源化利用的原始数据进行收集、集合。因此,这些研究难以精确地反映目标产品的生产过程、数据质量(准确性、完整性、可用性、一致性、代表性等);难以明确其全生命周期过程中主要微观变量与宏观环境影响间的量化关系,进而难以把握问题发生的关键环节并揭示污染减排机制。为有效地解决这一难题,山东大学洪静兰等人开发了基于企业生产过程的原始数据集合与不确定性分析基础上的中国生命周期清单基础数据库(Chinese Process-based Life Cycle Inventory Database, CPLCID)[17],分别提出了采用基于单元流程与统计数据的区域混合生命周期清单构建法[18]、基于泰勒系列展开模型的 LCA 基本函数演变法[19-20]对数据的代表性与准确性进行了提升。CPLCID 数据库中涵盖了我国重点工业行业的典型产品(煤电、铝、铅、锌、铜、玻璃、水泥、造纸、化肥、太阳能、炼焦、钢铁、化纤、生物柴油、蒸汽、乙烯、糠醛、氯化钠、氢氧化钠、氯气、石灰石、卤水开采等)、污水处置、下水污泥、城市生活垃圾、电子垃圾、钻井固废、危废处置、餐厨垃圾、道路运输、秸秆资源化利用、土壤生物修复等基础生命周期数据。该数据库中大部分清单都已经过国际同行评定,并发表在本领域国际权威的 SCI 收录期刊上[17]。

除上述 4 套数据库外,同济大学开发了中国汽车替代燃料生命周期数据库,包含总能源、不可再生资源、化石能源消耗、主要温室气体及多种汽车尾气涉及的酸化、光化学烟雾、毒性和气溶胶等污染物质排放的生命周期清单数据。此外,宝钢集团开发了宝钢产品 LCA 数据库(Baosteel LCA 3.0),包含宝钢 6 大类不锈钢产品、95 大类碳钢产品、14 类能源产品 6 年的 LCA 数据以及 8 大类环境影响指标和 144 类 LCI 因子[21]。

1.2　理论与实践研究存在的问题及对策

1.2.1　不确定性分析

不确定性分析是开展环境影响评价的关键环节。由于 LCA 研究在数据的采集、系统边界设置及清单分配、环境影响评价等方面存在着广泛的不确定性,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,在世界范围内 LCA 研究中很少涉及不确定性解析。现存的少数 LCA 研究的不确定性评价方法多采用

经典的蒙特卡罗模型进行分析。然而,该模型在 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,并且多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、生命周期影响评价、系统边界等)进行评价,并且难以评估各个参数对整体不确定性的贡献。洪静兰等人依据泰勒系列展开模型提出了基于对数分布的生命周期基本函数演变法[19-20],对 LCA 的不确定性进行了分析,并构建了如下针对单一与多个流程的不确定解析模型:

$$(\ln \mathrm{GSD}_0^2)^2 = S_2^1 (\ln \mathrm{GSD}_2^1)^2 + S_2^2 (\ln \mathrm{GSD}_2^2)^2 + \ldots S_n^2 (\ln \mathrm{GSD}_n^2)^2 \quad (1)$$

$$(\ln \mathrm{GSD}_{A/B})^2 = \sum_i^l S_{A_I}^2 (\ln \mathrm{GSD}_{A_{x_i}})^2 + \sum_{j=l+1}^m S_{B_j}^2 (\ln \mathrm{GSD}_{B_{x_j}})^2 + \sum_{k=m+1}^n (S_{A_k} - S_{B_k})^2 (\ln \mathrm{GSD}_{x_k})^2 \quad (2)$$

这里 S_i 和 GSD_i^2 分别为流程或物质的敏感性和数据质量指标; S_{A_i},S_{B_j},GSD_{A_i} 和 GSD_{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 S_{B_k} 分别为流程 A 和 B 的相关单元的相对敏感性。GSD_{xk} 为流程 A 和 B 的相关单元的相应数据质量指标。

该模型(式 1)可快速且精确的识别各流程、物质对整体环境负荷的不确定性贡献值,可有效地针对整体 LCA 进行评价(式 1),可迅速且精确地对多个流程间的环境负荷大小进行对比(式 2),解决了经典的蒙特卡罗不确定分析模型在生命周期评价领域的局限性(即繁琐性、覆盖面缺失性、关键因子识别困难性),进而可客观、科学地做出正确的节能减排评估、建议及指南。该研究成果已得到国内外的广泛引用与认可,并且 UNEP(联合国环境规划署)-SETAC(环境毒理化学学会)-生命周期共创(Life Cycle Initiative)的技术评审委员会主席、Ecoinvent 数据库顾问、欧盟 LCA 顾问 Heijungs R.认为该模型提出的对数分布设想对 LCA 不确定分析研究方法学具有开创性意义[22]。

1.2.2 中国生命周期评价数据库构建

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、动态的 LCA 数据库。由于当前我国 LCA 研究工作主要是由相关高校和研究院所完成,企业参与力度不够,导致数据问题成为我国 LCA 发展实践的主要问题,尤其是针对特定现场的相关数据较为缺乏。此外,原始数据收集渠道不够明确,导致难以对数据质量进行分析。另外,对各行业各产品的 LCA,需要建立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[23]:

(1)LCA 开展过程中所做的选择和假定方面存在一定程度的主观性,例如系统边界的选定、收集数据的渠道选择等;

(2)数据完整性和精确度不高。构建一个完整的生命周期清单需要大量数据支持,当前研究中不少学者主要依赖统计年鉴数据、全国平均工艺水平的工程估计或专业判断等来获取数据,这在很大程度上会导致最终结果的不准确,从而降低了结论的可靠性;

(3)当前大多数清单分析研究缺乏不确定性分析。并且部分学者将数据敏感性分析与不确定性分析混为一谈;

(4)现有清单数据库缺乏时空特征。

针对以上几点问题,需要通过以下途径构建生命周期清单:

(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)构建本土化区域生命周期环境影响评价模型,并对采集的原始数据进行初步的 LCA 评估,进而识别关键因子。

(3)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。

(4)采用基于单元流程与统计数据的区域混合生命周期清单构建法[18],构建符合我国产业链生产现状的具有时空特征的区域 LCI 数据库。

1.2.3　生命周期环境影响评价

生命周期环境影响评价(LCIA)模型中需要涉及到大量的地域信息,目前,欧美日等国家与地区先后建立了具有地域信息特征的 LCIA 模型,但我国在此方面研究十分匮乏。洪静兰等人在研究中已经证实了采用来自其它国家地区的 LCIA 模型对我国产业活动环境负荷进行评价会产生较大的误差[24],尤其是针对生态毒性影响与人类健康损伤影响类别,其主要原因是由于生态毒性影响与人类健康损伤影响类别的特征化因子多是建立在欧美地区的环境与空间特征与人群暴露信息基础上进行的定量分析[25],而这些信息与我国实际情况具有较大差距造成了较大误差。因此,为有效地评价我国产业活动引发的环境负荷,构建具有我国地域空间信息特征的 LCIA 模型是十分必要的。目前,国内已有部分学者针对本土化 LCIA 模型构建领域,开展了一系列研究工作,并积累了一定的成果。

通过结合我国各省与直辖市中的环境、地理、人口、与食品摄入条件,依据质量平衡原理,以混合污染物多环芳烃(PAHs)在我国大气中的排放对人群健康损伤为例,洪静兰等利用非平衡、稳态、流动条件下的多介质模型定量 PAHs 在大气、土壤、水体等多个介质层的环境宿命的基础上,结合暴露评价、剂量-反应模型、分子生物学实验,按照图 1 所示的技术路线定量了我国各省与直辖市的 LCIA 评价用的生态与人类健康毒性特征值,具有很强的应用意义。此外,Li 等人[26]在针对我国 PAHs 大气污染的关键因子对人体肺细胞的 DNA 损伤实验中发现,当 PAHs 排放环境浓度较低时出现了 DNA 修复现象,该研究结果首次对当前世界范围内通用的生态与人类健康毒性影响生命周期评估理论在污染物环境浓度较低条件下的非适用性问题进行了报道。此外,Chen 等人针对当前国内外 LCIA 模型匮乏的地区,提出了基于关键因子筛选的简易本土化 LCIA 影响评价模型[24],然而该模型仅考虑了人类与生态毒性评价影响类别,即未探讨如何对全部具有地域信息的 LCIA 模型进行解析的问题,也未针对上述 LCIA 评价模型进行不确定性分析。因此,本土化 LCIA 模型构建还有待于进一步深入,得出更为完善的我国 LCIA 评价模型。

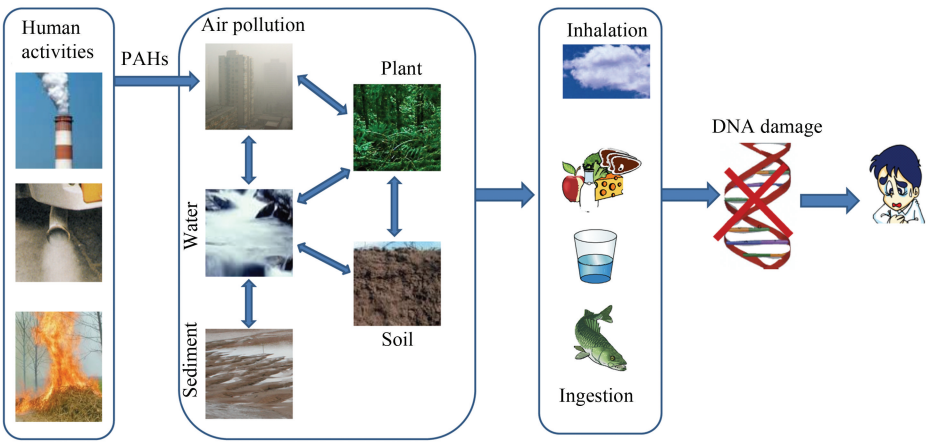

图 1　LCIA 健康毒性评价研究技术路线图(以 PAHs 人为大气排放为例)

Fig.1　The technical roadmap of LCIA health and toxicity assessment research (a case of human-induced PAHs)

2　结论和展望

我国关于 LCA 的研究起步较晚,LCA 技术在我国的研究、应用等方面与发达国家相比存在较大差距,突出表现在生命周期清单与生命周期影响评价模型构建方面。近年来,随着国家对资源环境问题重视程度的不断提高,在政府的良性引导与支持下,国内诸多学者在这方面开展了一系列研究工作,并积累了一定的成果,目前我国相关科研机构已成功开发了 5 套较为成熟的 LCA 数据库,这为未来构建国家尺度统一完整的中国

生命周期数据库奠定了良好基础。

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极具发展前途的有力工具。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(References):

[1] ISO (International Organization for Standardization). ISO 14040 Environmental Management-Life Cycle Assessment-General Principles and Framework. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.

[2] Hunt R G, Franklin W E, Hunt R G. LCA-How it came about-personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1996, 1(1): 4-7.

[3] Memorial In B, Curran M A. Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles. New York: CRC Press, 1994: 6-7.

[4] PRe. Consultants. LCA data in SimaPro. [2009-02-03]. http://www.pre.nl/simapro/inventory_databases.htm.

[5] Curran M A, Notten P. Summary of global life cycle inventory data resources. [2009-02-03]. http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/pdfs/summary_of_globallci_data_resources.pdf.

[6] Goedkoop M, Oele M, Effting S. Simapro database manual methods library. Netherland: PRe. Consultants. 2004. [2009-02-03]. http://www.pre.nl/simapro/impact_assessment_methods.htm.

[7] U.S. Environmental Protection Agency. Life-Cycle Impact Assessment: A Conceptual Framework, Key Issues, and Summary of Existing Methods, EPA/452/R-95/002. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1995.

[8] 张建普. 电冰箱全生命周期环境影响评价研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

[9] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究. 环境科学学报, 2001, 21(2): 234-237.

[10] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用. 徐成, 王如松, 译. 北京: 气象出版社, 2002.

[11] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 何琴, 张浩, 姜睿, 陈雪雪, 侯萍. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.

[12] 成都亿科环境科技有限公司网站. http://www.ike-global.com/

[13] 左铁镛, 聂祚仁, 狄向华, 李贵奇. 中国材料环境协调性评价研究进展. 材料导报, 2001, 15(6): 1-3

[14] Nie Z R, Di X H, Li G Q, Zuo T Y. Material life cycle assessment in China. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2001, 6(1): 47-48

[15] 聂祚仁, 高峰, 陈文娟, 龚先政, 王志宏, 左铁镛. 材料生命周期的评价研究. 材料导报, 2009, 23(13): 1-6.

[16] 龚先政, 聂祚仁, 王志宏, 高峰, 陈文娟, 左铁镛. 中国材料生命周期分析数据库开发及应用. 中国材料进展, 2011, 30(8): 1-7.

[17] 山东大学环境科学与工程学院洪静兰教授介绍 http://www.huanke.sdu.edu.cn/showszdw.php? articleid=1831

[18] Hong J L, Zhang F F, Xu C Q, Xu X, Li X Z. Evaluation of life cycle inventory at macro level: a case study of mechanical coke production in China. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(6): 751-764.

[19] Hong J L. Uncertainty propagation in life cycle assessment of biodiesel versus diesel: global warming and non-renewable energy. Bioresource Technology, 2012, 113: 3-7.

[20] Hong J L, Shaked S, Rosenbaum R K, Jolliet O. Analytical uncertainty propagation in life cycle inventory and impact assessment: application to an automobile front panel. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(5): 499-510.

[21] 孙锌, 张鹏, 范亚丽. 中国汽车生命周期数据库建设的理论研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 427-430.

[22] Heijungs R, Lenzen M. Error propagation methods for LCA—a comparison. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(7): 1445-1461.

[23] 王寿兵, 杨建新, 胡聃. 生命周期评价方法及其进展. 上海环境科学, 1998, 17(11): 7-10.

[24] Chen W, Zhang F F, Hong J L, Shi W X, Feng S T, Tan X F, Geng Y. Life cycle toxicity assessment on deep-brine well drilling. Journal of Cleaner Production, 2015, 112: 326-332.

[25] Rosenbaum R K, Bachmann T M, Gold L S, Huijbregts M A J, Jolliet O, Juraske R, Koehler A, Larsen H F, MacLeod M, Margni M, McKone T E, Payet J, Schuhmacher M, Van De Meent D, HauschildShow M Z. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13: 532-546.

[26] Li X Z, Yang Y, Xu X, Xu C Q, Hong J L. Air pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons generated by human activities and their health effects in China. Journal of Cleaner Production, 2015, 112: 1360-1367.