

黄娜,王洪涛,范辞冬,等. 2012. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 32(6): 1529-1536
Huang N, Wang H T, Fan C D, et al. 2012. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(6): 1529-1536

基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法

黄娜¹, 王洪涛^{1,*}, 范辞冬², 周杉财², 侯萍¹, 杨洁¹

1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065
2. 成都亿科环境科技有限公司, 成都 610065

收稿日期: 2011-12-19 修回日期: 2012-01-16 录用日期: 2012-02-16

摘要: 通过提出定量评估并控制 LCA 数据质量的系统化方法(称为 CLCD-Q 方法), 从 LCA 案例的原始数据和清单数据算法开始评估不确定度, 然后通过两次蒙特卡罗模拟, 先后得出单元过程清单数据及 LCA 结果的不确定度; 最后结合敏感度分析, 辨识出 LCA 模型中具有高不确定度和高敏感度的关键数据, 从而指出控制和改进数据质量的关键点. 结果发现, 上述方法可在 eBalance 软件和 CLCD 数据库中实现. 同时, 对中国电网电力生命周期的示例研究表明, 上述方法将传统的 LCA 数据质量评估延伸到了原始数据层面, 从而为数据收集过程中的原始数据与算法选择提供了直接的支持, 同时也可以针对数据质量不达标的 LCA 结果, 指出最有效的改进方向.

关键词: 生命周期评价; 数据质量评估; 数据质量控制; 不确定度分析; 敏感度分析; 蒙特卡罗模拟

文章编号: 0253-2468(2012)06-1529-08 中图分类号: X171 文献标识码: A

LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis

HUANG Na¹, WANG Hongtao^{1,*}, FAN Cidong², ZHOU Shancai², HOU Ping¹, YANG Jie¹

1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065
2. IKE Environmental Technology Co., Ltd., Chengdu 610065

Received 19 December 2011; received in revised form 16 January 2012; accepted 16 February 2012

Abstract: This paper presents a systematic approach, named as CLCD-Q method, to assess and control data quality of LCA studies. The method starts with the uncertainty assessment of raw data and mathematical relations based on pedigree matrix. Afterwards, the uncertainties of process data and LCA results can be derived from two Monte Carlo simulations. For each LCA result, key process data and raw data with high uncertainty and high sensitivity in LCA model can be identified, which indicates the "hot spot" for data quality improvement. CLCD-Q is supported by LCA software (eBalance) and CLCD database. The case study of Chinese grid power shows that this method can guide the selection of raw data and the mathematical relations with the uncertainty assessment extending on the raw data. It also provides a guide for efficient data quality improvement by revealing the most relevant data in the life cycle model.

Keywords: life cycle assessment; data quality assessment; data quality control; uncertainty analysis; sensitivity analysis; Monte Carlo simulation

1 引言 (Introduction)

生命周期评价 (Life cycle assessment, LCA) 作为系统化、量化评价产品综合环境影响的国际标准方法 (International Organisation for Standardization,

2006a; 2006b), 为相关的决策过程提供了一致的分析框架和环境数据支持, 已经在世界范围得到广泛的应用. 然而在 LCA 案例研究中, 数据收集、模型建立、方法选择等环节给 LCA 结果带来的不确定性, 降低了 LCA 的数据质量和结果的可信度, 严重制约

基金项目: "十一五" 科技支撑计划项目 (No. 2006BAC02A02); 国家高技术研究发展计划 (No. 2011AA060905)

Supported by the Key Technologies R&D Program of the "11th Five-year" Plans (No. 2006BAC02A02) and the National High-tech R&D Program of China (No. 2011AA060905)

作者简介: 黄娜 (1987—), 女, E-mail: huangna77@gmail.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: wanght@scu.edu.cn

Biography: HUANG Na (1987—), female, E-mail: huangna77@gmail.com; * Corresponding author, E-mail: wanght@scu.edu.cn

了 LCA 方法更深入的应用. 因此, 系统地、定量地评估 LCA 数据质量, 一方面可以帮助 LCA 案例研究者选择更可靠的数据来源、有针对性地改善数据质量, 另一方面也可以帮助决策者更好地理解 LCA 结果的可信度, 促进 LCA 的研究与应用.

在 LCA 方法的国际标准中 (International Organisation for Standardization, 2006b), 对数据质量做出了多方面的定性要求与建议, 包括时间跨度、地域范围、技术覆盖面和数据来源等, 但标准中并未提供量化的、针对 LCA 数据结果的质量评估方法. 随着 LCA 应用范围的扩大和重要性的提高, 对数据质量的关注也日益强烈, 许多基于 LCA 方法的标准 (BSI, 2008; WRI/WBCSD, 2011) 对数据质量做出了更明确的要求, 并建议使用不确定度来描述数据质量.

为提供可行的数据质量评估方法, 一些研究者 (Weidema *et al.*, 1996; Weidema, 1998) 提出了基于谱系矩阵的评分方法, 即从技术、时间、地域代表性和数据获得方式等方面评估数据质量, 并得出分级的数据质量指标 (Data quality indicator, DQI). 在一些 LCA 案例研究中 (PE International, 2010), 采用上述评分方法, 对各个单元过程的整体数据质量进行了笼统的评估; 而瑞士 Ecoinvent 数据库则对各单元过程中每一条清单数据的质量进行评估.

在此基础上, 研究者进一步提出将单元过程清单数据的 DQI 评分转化为以统计参数形式表示的不确定度 (Frischknecht *et al.*, 2007; Weidema *et al.*, 2011), 并且提出了诸如误差传递算法 (Heijungs, 1996)、区间算法 (Chevalier *et al.*, 1996)、随机模拟 (Maurice *et al.*, 2000) 和泰勒级数展开 (Ciroth *et al.*, 2004; Heijungs, 2010) 等方法, 计算单元过程清单数据的不确定度在 LCA 模型中的传递, 并最终得出 LCA 结果的不确定度. Ecoinvent 数据库采用上述方法, 给出了数据库中各条汇总清单数据结果的不确定度 (Weidema *et al.*, 2011), 这是目前唯一提供量化不确定度的国际主流数据库. 荷兰 SimaPro 软件提供了蒙特卡罗模拟 (Monte Carlo simulation, MC) 计算功能, 使得 LCA 用户可以将上述方法应用于 LCA 个案研究 (Hong *et al.*, 2010). 国内研究者也对 LCA 数据质量评估方法 (莫华等, 2003; 任丽娟等, 2010)、数据质量控制方法 (郑元等, 2003; 刘涛等, 2006) 和 LCA 数据质量案例研究 (钟流举等, 2007; 李劲等, 2011) 进行了初步的探讨.

然而, 以上方法及其在数据库和软件中的实现, 都是对数据收集过程中得到的单元过程清单数据结果进行“总体式”的不确定度评估, 并未追溯和评估更前端的原始数据 (来自企业、统计资料或文献的数据) 及清单数据算法 (将原始数据转化为单元过程清单数据的计算步骤, 以下简称为“算法”) 所造成的不确定度. 这种“总体式”的评估方法并未分别评估各原始数据的来源及代表性, 更不可能反映原始数据数值大小和具体算法对清单数据结果不确定度的影响, 因而严重依赖于评分者当时的主观判断. 尤其是在选择原始数据和算法时, “总体式”评估无明确的评分规则, 严重削弱了数据质量评估在数据收集过程中的意义.

因此, 本文通过提出更完整的 LCA 数据质量评估与控制方法, 从原始数据和算法开始评估不确定度; 然后通过两次蒙特卡罗模拟, 先后得到单元过程清单数据和 LCA 结果的不确定度. 同时, 结合敏感度分析, 辨识出 LCA 模型中具有高不确定度和高敏感度的关键单元过程清单数据和关键原始数据, 从而指出控制和改进数据质量的关键点. 最后, 以中国电网电力生命周期为例, 对上述方法的使用进行演示.

2 CLCD-Q 方法 (CLCD-Q method)

在 LCA 基本工作步骤的基础上, CLCD-Q 方法增加了数据质量评估与数据质量控制工作步骤, 形成了完整的 LCA 案例研究步骤 (图 1).

CLCD-Q 方法涉及的过程构成、单元过程的清单数据决定了 LCA 的结果, 因此, 也是决定 LCA 数据质量的主要原因. 从数据来源划分, 单元过程可分为实景过程和背景过程两类. 实景过程的清单数据来自对实际生产过程的调查, 即各种来自统计、测试和文献的原始数据, 经过相应的算法, 得出与此单元过程单位产出所对应的各输入和输出清单数据; 而背景过程的清单数据是直接从 LCA 数据库中选择 (通常都是生命周期汇总的生命周期清单分析 (LCI) 数据).

CLCD-Q 的数据质量评估采用了 Ecoinvent 的谱系矩阵和不确定度表示方法, 但与 Ecoinvent 直接对单元过程清单数据进行评估不同, CLCD-Q 延伸到对原始数据及算法进行评估. 其主要的思路是: LCA 结果的不确定度主要来自于原始数据和算法选择的环节, 分析这些环节中影响数据质量的不同

因素(如原始数据的各种代表性差异),每种因素均可划分为不同质量等级.对于 LCA 数据收集过程中的每一项原始数据,按照这些等级划分规则进行评

分(即 DQI 评分),然后将评分转换为选定统计分布类型下的、由标准偏差 σ 表示的不确定度.

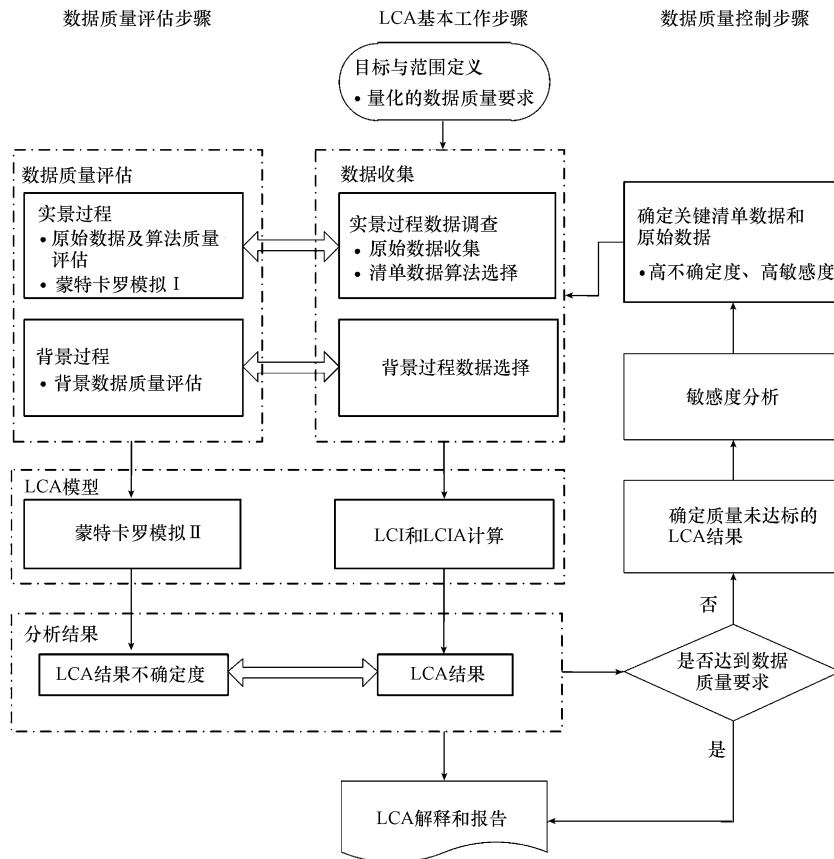


图 1 LCA 基本工作步骤与 CLCD-Q 工作步骤

Fig. 1 LCA basic steps and CLCD-Q procedures

在 LCA 数据收集,数据的统计分布类型(如正态分布、对数正态分布、均匀分布和三角分布等)可根据样本情况采用统计分析或专家判断的方法确定(任丽娟等,2010).当数据来自单一的文献报道或只有少量的样本时,通常选择对数正态分布.这种分布类型能很好地代表非负数和正偏态的测量值,满足了大多数 LCA 数据的特征(Huijbregts, 2003; Weidema *et al.*, 2011).

在实景过程清单数据计算和 LCA 模型计算过程中,数据不确定度会传播到计算结果上. CLCD-Q 方法采用了最常用的蒙特卡罗模拟计算不确定度的传播(Maurice *et al.*, 2000; Guido *et al.*, 2003).其基本原理是根据输入值的概率密度函数生成大量随机值,分别计算出相应的输出值;然后对多次的输出值进行统计得到其概率密度函数(朱仁本, 1987). CLCD-Q 方法中进行了两次蒙特卡罗模拟,

先后得到实景过程清单数据的不确定度(即蒙特卡罗模拟 I)和 LCA 结果的不确定度(即蒙特卡罗模拟 II).

CLCD-Q 数据质量控制过程的核心思想是从 LCA 模型数以千计的数据中找出具有高不确定度和高敏感度的关键原始数据和清单数据,从而可以有针对性地重新收集数据,有效地提高 LCA 数据质量(UNEP/SETAC, 2011).

2.1 目标与范围定义

在 LCA 的目标与范围定义中,首先需要明确陈述案例研究的目标代表性,包括产品与功能单位定义,技术类型、时间跨度、地域范围的代表性等,这是数据质量评估的基础.在 CLCD-Q 方法中还可以明确定义一个量化的、针对 LCA 结果的数据质量达标要求(用相对标准偏差 RSD 衡量),例如, LCA 结果的不确定度(RSD)应小于 10%,从而为数据质量

控制提供明确的目标。

2.2 实景过程数据质量评估

实景过程清单数据的不确定度包含 3 个部分,即基本不确定度 U_b 、代表性不确定度 U_r 和算法不确定度 U_a 。基本不确定度 (U_b) 是指由于测量的难易程度不同造成数据不确定度有差异,例如,在各种燃烧过程中,CO 数据的不确定度都大于 CO_2 ,本文采用了 Ecoinvent 数据库依据专家判断获得的基本不确定性对照表 (Weidema *et al.*, 2011); 代表性不确定度 (U_r) 是指由于原始数据的代表性不确定度 (U_0) 在算法上传播得到的不确定度; 算法不确定度 (U_a) 是指算法本身给单元过程清单数据带来的不确定度。

2.2.1 原始数据代表性不确定度评估 根据原始数据不确定度的来源,可以从 5 个方面评估其不确

定度。①来源可靠性,根据原始数据来源(如生产记录、监测报告、统计资料、文献等),从是否为二次数据、是否由职能部门定期统计等方面,划分质量等级;②样本完整性,指原始数据的统计代表性,如是否有充足的样本,数据的时间段是否合适等;③技术代表性,指原始数据的技术代表性(工艺、产品、原料等)与研究目标规定的技术代表性的差异;④年份代表性,指原始数据代表的年份与研究目标要求的基准年的间隔;⑤地理代表性,指原始数据所代表的区域与研究目标区域的生产条件和生产力水平(由自然地理的和社会环境决定)的差异程度。

以上 5 个指标涵盖了影响原始数据质量的主要因素。为便于今后与 Ecoinvent 数据库的合并使用,CLCD-Q 采用了与 Ecoinvent 基本一致的等级划分方式及对应的不确定度 $U_i(\sigma)$,具体如表 1 所示。

表 1 数据质量指标 (DQI) 及不确定度对照表
Table 1 Data quality indicators (DQI) and Uncertainty

指标	数据说明				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
来源可靠性 (U_1)	现场调查或测量得到的原始数据(0)	来自权威的、定期更新的数据(0.025)	来自于一般文献或专著的不定期更新数据(0.050)	基于文献或经验的推论,估计或假设(0.100)	无根据的估算与假设(0.200)
样本完整性 (U_2)	充足的样本,合适的期间(0)	代表数据来自稍小范围但期间合适(0.010)	代表数据来自合适的范围但期间稍短(0.025)	来自小范围和期间的代表数据或来自充足的范围和期间的数据(0.050)	未知和来自小范围与短期间的不足数据(0.100)
技术代表性 (U_3)	从被研究企业得到的数据(0)	技术、过程和原料相同,但企业不同(0.025)	技术相同,但过程和原料有差别(0.100)	技术不同,但产品相同(0.200)	数据缺失时,以类似产品的数据替代(0.350)
年份代表性 (U_4)	与时间无关或 3 年以内(0)	6 年以内(0.015)	10 年以内(0.050)	15 年以内(0.100)	数据年代未知或 15 年以上(0.200)
地理代表性 (U_5)	来自研究区域数据(0)	来自包含研究区域的较大区域范围的平均数据(0.005)	数据来自生产条件和生产力水平相似度高度的区域(0.010)	数据来自生产条件和生产力水平相似度中等的区域(0.025)	数据来自未知区域或生产条件和生产力水平完全不同的区域(0.050)

注:括号中为各级对应的不确定度。

当原始数据各不确定度因素相互独立时,合并其不确定度 (U_i) 到原始数据总体的代表性不确定度 (U_0) 的算法如公式 (1) 所示 (IPCC, 2006; Weidema *et al.*, 2004; Weidema *et al.*, 2011)。

$$U_0 = \sqrt{\sum_i^5 U_i^2} \quad (1)$$

由以上方法得到所有原始数据的代表性不确定度后,进行蒙特卡罗模拟 I 可得到单元过程清单

数据的代表性不确定度 U_r 。

2.2.2 算法的不确定度评估 算法的不确定度取决于其合理性。对 LCA 数据收集过程中常见的算法进行分类,并规定其不确定度如表 2 所示。实景过程清单数据最终的不确定度 ($U_{\text{foreground}}$) 可依据公式 (2) 得到。

$$U_{\text{foreground}} = \sqrt{U_b^2 + U_r^2 + U_a^2} \quad (2)$$

表 2 清单数据算法的不确定度
Table 2 Uncertainty of mathematical relations (algorithm)

算法	说明	不确定度
直接获取算法	直接得到获得的原始数据作为清单数据	0
总量算法	研究范围内(产出/污染物排放)总量/研究范围内产出总量	0
平衡算法	根据已知实测数据,通过各种物料、元素或能量的平衡计算得到	0.025
(半)经验算法	根据工程实际经验获得的算法(经验公式),或者理论公式的经验修正(半经验公式)得到的数据	0.050
理论算法	基于化学反应方程式、产品设计方案等,未经过经验修正获得的数据	0.100

2.3 背景过程数据质量评估

背景过程数据的不确定度($U_{\text{background}}$)包含两个部分:数据库中经评估得到的清单数据的不确定度(U'),以及背景过程目标代表性与 LCA 案例研究目标代表性之间的差异造成的代表性不确定度(U_i) (根据表 1 中后 3 个 DQI 指标评估). 其不确定度的计算公式如下:

$$U_{\text{background}} = \sqrt{U'^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2} \quad (3)$$

2.4 LCA 结果的不确定度计算

数据收集结束后,将收集到的实景过程和背景过程清单数据汇总计算可得到 LCI 结果,再经特征化、归一化和加权可得到各项生命周期影响评估(LCIA)结果,统称为 LCA 结果. 当所有过程清单数据的不确定度已确定,通过蒙特卡罗模拟 II 就可以得到各项 LCA 结果的不确定度.

2.5 质量未达标的 LCA 结果判断

得到各项 LCA 结果的不确定度后,依据目标与范围定义阶段确定的数据质量达标要求,可判断质量未达标的 LCA 结果. 本文采用 RSD 来判断,大于 RSD 达标要求的即为未达标的 LCA 结果.

2.6 关键清单数据和原始数据分析

确定未达标的 LCA 结果后,下一步是从 LCA 模型成百上千的过程清单数据和原始数据中,找出对 LCA 结果不确定度影响最大的那些关键数据,以便有目标地寻找更好的数据来源,更快速更有效地改进 LCA 结果的数据质量.

过程清单数据和原始数据对 LCA 结果不确定度的影响,取决于自身的不确定度和对结果的敏感度. 显然,如果自身的不确定度和敏感度越高,对结果不确定度的影响就越大,其可能的改进潜力就更大. 简而言之,关键数据就是具有高不确定度和高敏感度的数据.

敏感度分析(Sensitivity analysis, SA)是定量分析数学模型输入变量对输出结果影响程度的方法.

在此处,敏感度定义为:

$$S_{mn} = (\Delta O_m / O_m) / (\Delta I_n / I_n) \quad (4)$$

式中, O_m 为第 m 种未达标的 LCA 结果指标值, I_n 为第 n 种过程清单数据值(或原始数据值). 当 I_n 变化时, O_m 也相应地变化, S_{mn} 即为 I_n 对 O_m 的敏感度.

由于是采用蒙特卡罗模拟方法,所以难以解析地表达数据不确定度和敏感度对结果不确定度的影响,但在实际改进数据质量时,其实也并不需要知道十分准确的影响程度排序,而只需要知道哪些数据的影响较大即可. 因此,人为定义一个影响度判据 A , 计算过程如公式(5)所示.

$$A = S_{mn} \times \text{RSD} = S_{mn} \times \sqrt{e^{U^2} - 1} \quad (5)$$

A 值越大,此数据对结果不确定度的影响就越大. 当然,这些关键数据是否能找到更好的数据来源,替换后是否能使结果的数据质量达标,只能根据实际情况和效果判断.

2.7 LCA 解释与报告

根据研究目标和范围对 LCA 研究的结果做出解释并形成报告,包括基于 LCI 和 LCIA 结果识别重大问题、敏感性和一致性检查、数据质量评价等. 尤其是数据质量方面,CLCD-Q 方法可详细记录 LCA 数据收集过程中原始数据、清单数据算法等的的数据质量信息,并定量地描述整个 LCA 结果的数据质量;也可根据关键清单数据分析,有针对性的提出数据质量改进意见.

3 案例分析(Case study)

为支持 CLCD-Q 方法的实际应用,eBalance 软件开发了相应的质量评估和分析功能,中国生命周期基础数据库(CLCD)也按照上述评估方法,给出了所有过程清单数据的不确定度. 因此,用户可以在 eBalance 软件中使用 CLCD 和 Ecoinvent 数据库进行 LCA 案例研究,并按照 CLCD-Q 方法进行数据质量评估与控制.

下文以中国电网电力的 LCA 为例,对比分析了采用不同数据来源时,数据质量的评估及对 LCA 结果和数据质量的影响,并简要演示了判定关键数据的方法.

3.1 中国电网电力生命周期模型

中国电网电力 LCA 的功能单位选取为生产和传输 3.6 MJ 市电 (220 V) 至用户,时间、地理和技术的目标代表性为:代表 2009 年中国电网内各种主要发电技术的平均.系统边界包含原煤开采与运输、燃煤火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、电力混合与传输及基础设施建设等,其简化的生命周期模型如图 2 所示.其中,对结果影响较小的过程采用了 Ecoinvent 数据 (用虚线框表示),其他数据均为来自国内统计资料和文献,其数据获得方式见文献(刘夏璐等,2010)说明.因本示例中数据来自单一的文献报道,故假设数据均服从对数正态分布.

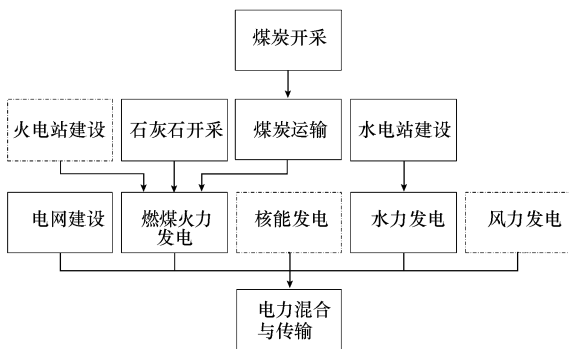


图 2 中国电网电力生命周期模型

Fig. 2 Life cycle model of Chinese grid power

3.2 不同数据来源的质量评估及其对结果和不确定度的影响

在保持上述模型所有数据和质量评估相同的情况下,为进行对比分析演示,燃煤火力发电过程

中的煤炭投入量选择了两种数据来源.一种是采用 Ecoinvent 2.2 数据库中的中国电力数据,其数据来自 1999 年山东某电厂的数据.按照表 1 的规则,DQI 评分为(3,4,3,3,1),由公式(1)计算得出不确定度(U_0)为 0.132;根据表 2 的分类为“直接获取法”,故无算法不确定度;最后依据公式(2)计算得出煤炭投入量的不确定度为 0.135.另一种来源采用中国电力企业联合会(中电联)公布的 2009 年中国电力统计数据,采用总煤炭用量、总发电量和电厂自用率等作为原始数据,其 DQI 评分均为(2,1,1,1,1),由公式(1)计算得出不确定度(U_0)为 0.025;清单算法为“总量算法”,无算法不确定度;最后由公式(2)计算得出煤炭投入量的不确定度为 0.043.

两种情况下,电网电力的生命周期全球暖化指标(Global warming potential, GWP)结果和不确定度如表 3 所示.从表 3 可见,由于 Ecoinvent 数据的样本、年份、技术代表性等都与目标代表性有较大差距,所以其质量评分差,并严重影响到结果的不确定度,而采用国内统计数据,质量有明显的改善.

表 3 3.6 MJ 电网电力的全球暖化指标及不确定度

Table 3 GWP and uncertainty of 3.6 MJ grid power

数据来源	GWP/kg	RSD	上下限值
Ecoinvent 数据	0.893	21.75%	[-34.11%, +49.39%]
中电联数据	0.958	6.36%	[-11.72%, +13.54%]

注:GWP 以 CO₂ 当量计;上下限值取 95% 置信区间.

事实上,无论数据来源和代表性差异的大小,CLCD-Q 方法总是可以得出各自的不确定度,从而帮助研究者在不同数据来源中进行选择.

3.3 关键数据分析

表 4 为 GWP 指标对应的关键清单数据.通过分

表 4 GWP 指标对应的关键清单数据分析

Table 4 Critical inventory data analysis of GWP

单元过程-清单物质	采用 Ecoinvent 数据的模型			采用中电联数据的模型		
	S_{mn}	RSD	A	S_{mn}	RSD	A
燃煤火力发电-煤炭投入	1.01	13.52%	0.136	0.94	4.33%	0.041
燃煤火力发电-CO ₂ 排放	0.93	13.52%	0.125	0.92	6.98%	0.064
电力混合与传输-火电投入	1.00	1.07%	0.011	1.00	1.06%	0.011
煤炭开采-CH ₄ 排放	0.04	21.75%	0.009	0.06	21.75%	0.013
煤炭运输-公路运输投入	0.01	33.53%	0.003	0.00	33.53%	0.001
煤炭运输-原煤投入	0.06	4.31%	0.002	0.08	4.31%	0.003
煤炭开采-电力投入	0.01	7.45%	0.001	0.01	7.45%	0.001
煤炭开采-CO ₂ 排放	0.01	8.98%	0.001	0.01	8.98%	0.001
煤炭运输-铁路运输投入	0.00	36.50%	0.001	0.00	36.50%	0.001
燃煤火力发电-N ₂ O 排放	0.00	23.98%	0.000	0.00	21.05%	0.000

析 LCA 模型中所有过程清单数据对 GWP 结果的敏感度(S_{mn})及其不确定度(RSD),可以判定对 LCA 结果质量影响靠前的关键清单数据(限于篇幅,仅给出前十位的关键清单数据)。

表 4 显示,燃煤火力发电过程的煤炭投入是最关键的清单数据之一,因此,其数据来源和数据质量改变时,可以对结果的数据质量产生明显的影响(如表 3 所示)。此过程的另一关键清单数据是 CO₂ 排放,但由于其是基于煤炭投入和排放因子计算得到,在没有更好的排放因子选择时,也只能依赖煤炭投入的数据质量改进。从表 4 还可以看出,一个 LCA 模型中有成百上千条数据,但 A 值差距很大,因此,通常只有很少的一些数据对结果的不确定度会有明显影响。这说明数据质量改进必须要找出关键数据,明确改进的重点。

4 结论(Conclusions)

1) 研究表明,将不确定度评估延伸到原始数据和算法环节不仅可行,而且十分必要。如此才能为数据源选择制订出明确和一致的规范,从而有效减少数据收集过程中的随意性。

2) 基于不确定度和敏感度分析的数据质量改进方法,可以明确判定数据质量的改进重点,为达到 LCA 结果的质量要求,指出了最有效的途径。

3) 由于在统计分布类型、DQI 评分转换等环节存在人为假设,此类方法得出的不确定度并不具有真正的统计含义,但仍可为分析 LCA 结果,得出合理的 LCA 结论等提供可信度方面的参考。

责任作者简介:王洪涛(1970—),男,硕士,副教授,主要从事 LCA 及其在产品环境声明、产品碳足迹、产品生态设计、节能减排技术评价、清洁生产等领域的应用研究。

参考文献(References):

British Standards Institution (BSI). 2008. PAS 2050. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services [S]. British; DEFRA

Chevalier J L, Le Teno J F. 1996. Life cycle analysis with ill-defined data and its application to building products [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 1 (2): 90-96

Ciroth A, Fleischer G, Steinbach J. 2004. Uncertainty calculation in life cycle assessments; a combined model of simulation and approximation [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 9 (4): 216-226

Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H J, et al. 2007. Overview and methodology [R]. Ecoinvent report No. 1. Dubendorf; Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 42-47

Guido W, Marta S. 2003. Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator [J]. *Journal of Cleaner Production*, 11: 279-292

Heijungs R. 1996. Identification of key issues for further investigation in improving the reliability of life cycle assessments [J]. *Journal of Cleaner Production*, 4(3/4): 159-166

Heijungs R. 2010. Sensitivity coefficients for matrix-based LCA [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 15(5): 511-520

Hong J L, Shanna S, Ralph K R, et al. 2010. Analytical uncertainty propagation in life cycle inventory and impact assessment: application to an automobile front panel [J]. *Int J Life Cycle Assess*, 15(5): 499-510

Huijbregts M, Giligamse W, Ragas A D, et al. 2003. Evaluating uncertainty in environmental life cycle assessment. A case study comparing two insulation options for Dutch one-family dwelling [J]. *Environ Sci Technol*, 37: 2600-2608

International Organisation for Standardisation. 2006a. ISO 14040. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework [S]. Geneva; International Organization for Standardization

International Organization for Standardization. 2006b. ISO 14044. Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines [S]. Geneva; International Organization for Standardization

IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 1 general guidance and reporting. Chapter 3 uncertainties [R]. Hayama; Institute for Global Environmental Strategies. 27-30

李劲,王华. 2011. 基于 LCA 的城市生活垃圾回收处理系统不确定性分析 [J]. *上海环境科学*, 30(2): 47-50

Li J, Wang H. 2011. An uncertainty analysis in the life cycle assessment of municipal solid waste recycling and treatment system [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 30(2): 47-50 (in Chinese)

刘涛,黄志甲. 2006. 生命周期清单不确定性分析的主要数据选择 [J]. *安徽工业大学学报*, 23(1): 91-95

Liu T, Huang Z J. 2006. Selection for key data in uncertainty analysis of life cycle inventory [J]. *J of Anhui University of Technology*, 23 (1): 91-95 (in Chinese)

刘夏璐,王洪涛,陈建,等. 2010. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. *环境科学学报*, 30(1): 2136-2144

Liu X L, Wang H T, Chen J, et al. 2010. Inventory method and basic life cycle model for Chinese LCA database [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(1): 2136-2144 (in Chinese)

Maurice B, Frischknecht R, Coehlo S V, et al. 2000. Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plants [J]. *J Cleaner Prod*, 8(2): 95-108

莫华,张天柱. 2003. 生命周期清单分析的数据质量评价 [J]. *环境科学研究*, 16(5): 55-58

Mo H, Zhang T Z. 2003. Data quality assessment of life cycle inventory analysis [J]. *Research of Environmental Sciences*, 16(5): 55-58 (in Chinese)

- PE International. 2010. Life cycle assessment of different shoe packaging design for PUMA [R]. America: PE International. 26-44
- 任丽娟, 陈莎, 张菁菁, 等. 2010. 生命周期评价清单中的不确定性分析[J]. 安全与环境学报, 10(1):118-120
- Ren L J, Chen S, Zhang J J, *et al.* 2010. Uncertainty analysis in the inventory of the life cycle assessment [J]. Journal of Safety and Environment, 10(1):118-120 (in Chinese)
- United Nation Environment Programme (UNEP), Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). 2011. UNEP/STEAC Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases[M]. Shonan: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. 53-65
- Weidema B P, Bauer C, Hischer R, *et al.* 2011. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. [R]. Ecoinvent Report 1 St. Gallen: The Ecoinvent Centre. 76-84
- Weidema B P, Cappellaro F, Carlson R, *et al.* 2004. Procedural guideline for collection, treatment, and quality documentation of LCA data [R]. Rome: Italian National Agency for New Technologies, Energy and Environment. 29-39
- Weidema B P, Wesnaes M S. 1996. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators [J]. J Clean Prod, 4(3/4):167-174
- Weidema B P. 1998. LCA data quality-multi-user test of data quality matrix for product life cycle inventory data [J]. Int J LCA, 3(5): 259-265
- WRI/WBCSD. 2011. Greenhouse gas protocol product life cycle accounting and reporting standard [S]. America: WRI/WBCSD
- 郑元, 张天柱. 2003. 不确定数据条件下的生命周期评价及其应用[J]. 重庆环境科学, 25(6):18-20
- Zheng Y, Zhang T Z. 2003. Life Cycle Assessment under data uncertainty and its application [J]. Chongqing Environmental Sciences, 25(6):18-20 (in Chinese)
- 中国电力企业联合会. 2010. 中电联发布2009年全国电力工业年度统计数据 [OL]. 2010-07-16. <http://tj.cec.org.cn/tongji/niandushuju/2010-11-17/160.html>
- China Electricity Council. 2010. Electric power industry statistics by China electricity council national 2009 [OL]. 2010-07-16. <http://tj.cec.org.cn/tongji/niandushuju/2010-11-17/160.html> (in Chinese)
- 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 2007. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. 环境科学研究, 20(4):15-20
- Zhong L J, Zheng J Y, Louie Peter, *et al.* 2007. Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: Methodology and case study [J]. Research of Environmental Science, 20(4):15-20 (in Chinese)
- 朱仁本. 1987. 蒙特卡罗方法引论[M]. 济南: 山东大学出版社. 49-54
- Zhu R B. 1987. Introduction to Monte Carlo Method [M]. Jinan: Shandong University Press. 49-54 (in Chinese)