

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(10):2136-2144  
Liu X L, Wang H T, Chen J, et al. 2010. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database of fundamental industries [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,30(10):2136-2144

## 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型

刘夏璐<sup>1</sup>,王洪涛<sup>1,\*</sup>,陈建<sup>2</sup>,何琴<sup>1</sup>,张浩<sup>1</sup>,姜睿<sup>1</sup>,陈雪雪<sup>1</sup>,侯萍<sup>1</sup>

1. 四川大学建筑与环境学院,成都 610065

2. 四川大学水利与水电学院,成都 610065

收稿日期:2010-03-10 修回日期:2010-04-29 录用日期:2010-07-02

**摘要:**缺乏完善的本地化 LCA(Life Cycle Assessment)数据库是国内广泛开展 LCA 研究与应用的主要障碍。本文总结提出了建立中国生命周期参考数据库(Chinese Reference Life Cycle Database, CLCD)的基本方法,包括环境影响类型与物质名录的选择、单元过程清单数据的收集与审核、生命周期清单数据的建模与计算、CLCD 数据库的建立等 4 个方面。按照上述方法,以电力、煤炭、燃油、运输等基础性产品为核心,初步建立了可扩展的中国基础工业系统的生命周期模型,收集了单元过程的全国平均清单数据,通过模型计算获得了这些基础性产品的生命周期清单数据,从而得到了 CLCD 基础数据库,为下一步扩展为更完善的 CLCD 数据库提供了方法与模型基础。

**关键词:**生命周期评价;清单数据;LCA 数据库;基础生命周期模型;中国生命周期参考数据库

文章编号:0253-2468(2010)10-2136-09 中图分类号:X32 文献标识码:A

## Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database

LIU Xialu<sup>1</sup>, WANG Hongtao<sup>1,\*</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, HE Qin<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, JIANG Rui<sup>1</sup>, CHEN Xuexue<sup>1</sup>, HOU Ping<sup>1</sup>

1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065

Received 10 March 2010; received in revised form 29 April 2010; accepted 2 July 2010

**Abstract:** The lack of a domestic life cycle assessment (LCA) database is recognized as the primary obstacle to the wide practice of LCA in China. In this paper, a four-step method toward the so-called Chinese reference life cycle database (CLCD) is proposed, including selection of life cycle impact categories and substance nomenclature, collection of inventory data sets for unit processes, development of life cycle inventory data sets, and development of CLCD database. Following this method, an expandable life cycle model of the fundamental industries in China was established, including fundamental products such as electricity, coal, fossil fuel and transportation. National averages inventory data of the unit processes were collected and life cycle inventory data were derived from the model, which constitute the CLCD Basic. The method and the model will provide a basis for further development of a more comprehensive CLCD database.

**Keywords:** LCA; inventory; LCA database; basic life cycle model; Chinese reference life cycle database (CLCD)

### 1 引言( Introduction)

生命周期评价(LCA)的分析与应用都十分依赖于数据库的支持,但中国目前尚未建立公开而完善的 LCA 数据库,在第一、第二届中国生命周期管理会议(<http://www.iscp.org.cn/conference>)的调查中,“数据库缺失”被认为是阻碍中国广泛开展 LCA 研究与应用的首要问题。为满足日益增多的中

国本地 LCA 个案研究需要,建立符合国际规范的中国 LCA 数据库成为非常紧迫的任务。国内一些单位一直致力于建立综合性的中国本地化 LCA 数据库(聂祚仁等,2009),中国标准化研究院和四川大学还参与了由欧盟研究总署发起的国际生命周期参考数据系统(International Reference Life Cycle Data System, ILCD)研究。

LCA 数据库主要由各种单元(生产)过程的清

基金项目:“十一五”科技支撑计划项目(No. 2006BAC02A02)

Supported by the Key Technologies R&D Program of the “11th Five-year” Plans(No. 2006BAC02A02)

作者简介:刘夏璐(1984—),女,E-mail:chloeliu21@gmail.com; \* 通讯作者(责任作者),E-mail:wanght@scu.edu.cn

Biography: LIU Xialu (1984—), female, E-mail: chloeliu21@gmail.com; \* Corresponding author, E-mail: wanght@scu.edu.cn

单数据和相应产品的生命周期清单数据构成。单元过程清单数据是在一个过程中生产单位数量产品所消耗的资源、原材料(含能源)及造成的环境排放数据(一般称为 gate-to-gate);通过追溯这些原材料的上游生产过程直至资源开采阶段,则可以得到这个产品从资源开采到产品出厂的生命周期模型,由此模型计算得到此产品相应的生命周期清单数据(一般称为 cradle-to-gate)。例如,国际上广泛使用的瑞士 Ecoinvent 数据库中同时提供了单元过程及其对应的生命周期清单数据(Frischknecht *et al.*, 2005),而在欧盟生命周期参考数据库(European Reference Life Cycle Database, ELCD)中只提供了生命周期清单数据(Joint Research Centre in European Commission, 2009a)。

目前,国外主要通过积累单元过程和生命周期清单数据的方式建立 LCA 数据库。ISO14040 和 14044 标准为上述建模和计算工作规定了各项基本原则与要求,也简要描述了单元过程数据的收集情况(International Organization for Standardization, 2006a; 2006b)。Frischknecht 等(2005)较详细地介绍了 Ecoinvent 数据库在单元过程数据收集中用以获得平均数据而采用的市场份额加权方法、在生命周期建模计算中采用的分配方法以及数据质量分析等方法。

但对处于起步阶段的中国 LCA 数据库而言,还有一些更基本的方法问题需要解决。例如,与 LCA 数据库在中国的应用目标相关,如何选择数据库所针对的环境影响类型?数据库的建立需要很多研究者分工合作完成,需要从哪些方面保证数据库的一致性?面对成千上万的产品和生产过程,应该从哪里开始数据收集并逐步扩展?目前国内的数据研究中对此类问题的讨论较少(Gong *et al.*, 2006; Di *et al.*, 2007; 聂祚仁等, 2009)。

因此,本文在参考 LCA 标准、国外数据库工作,并考虑中国实际情况的基础上,总结提出建立中国 LCA 数据库的基本方法,并开展实际的数据收集、建模和计算工作,初步建立包含基础工业系统的中国生命周期参考数据库(CLCD),以便为下一步扩展为更完善的 CLCD 数据库提供方法和模型基础。

## 2 建立 CLCD 数据库的基本方法 (Method for development of CLCD)

### 2.1 环境影响类型的明确和清单物质名录的建立

建立数据库必须首先明确数据库所希望针对

的环境影响类型,由此确定数据收集过程中应包含的清单物质种类(即清单物质名录),从而保持清单数据收集范围的一致性。国外 LCA 数据库经过长期发展,涵盖的环境影响类型通常有数十种,清单物质的划分达到上千种,可以为中国的数据库提供参考,但照搬其清单物质范围,必然导致数据收集工作难度极大,因此,在起步阶段须有所侧重。

综合考虑国内外政策关注的重点,尤其是中国国民经济与社会发展规划纲要和环境保护规划中的相关政策目标,并兼顾中国清单数据的可获得性、特征化模型的适用性等因素,CLCD 数据库采用了如表 1 所示的清单物质名录、环境影响类型指标,其中,环境排放细分为排放到大气、水体和土壤 3 种类型。随着数据库的更新,这些影响类型和清单物质的范围可以逐步扩充。

表 1 CLCD 数据库涵盖的环境影响类型及清单物质

Table 1 Adopted impact categories and substances for CLCD

环境影响类型指标	清单物质名录
初级能源消耗	原煤、原油、天然气等一次化石能源
不可再生资源消耗	Fe、Mn、Cr、Cd、V、Ti、Si、Cu、Pb、Zn、Ni、Sn、Sb、W、Mo、Au、Ag、Mg、铝土矿、稀土矿、重晶石、黄铁矿、磷酸盐、碳酸钾、盐、芒硝、氟石、石墨、云母、高岭土等非能源矿产资源
水资源消耗	各种淡水消耗
全球暖化	CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O、CH <sub>4</sub> 、SF <sub>6</sub> 、HFCs(氟氯烃)、PFCs(全氟烃)等
酸化	SO <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> 、HCl、HF、H <sub>2</sub> S、HNO <sub>3</sub> 、NO <sub>2</sub> 、NO、NO <sub>x</sub> 、H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 等
化学需氧量	COD
富营养化	NH <sub>3</sub> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、HNO <sub>3</sub> 、N、NO <sub>2</sub> 、NO、NO <sub>x</sub> 、H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 、P、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、COD、硝酸盐、磷酸盐等
固体废物	各种固体废物
可吸入无机物	NH <sub>3</sub> 、CO、TSP、PM <sub>10</sub> 、PM <sub>2.5</sub> 、NO、NO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 、硫化物、SO <sub>2</sub> 、SO <sub>3</sub> 等

### 2.2 单元过程清单数据的收集与审核

产品的生命周期是由若干上下游单元过程连接而成,因此,单元过程是进行 LCA 数据收集的基本单元,也是构成 LCA 数据库的基本单元。以工业生产过程为例,单元过程清单数据的收集与审核可以划分为以下步骤。  
① 单元过程定义:首先选取单元过程的功能单位,对于生产过程而言,通常选取此单元过程的单位数量的产品;其次,从技术范围、系统边界、区域和时间等方面明确清单数据的代表性,即此单元过程及其清单数据应包含的工艺技术种类、工艺流程的起点与终点、样本数据代表的区域以及参考年份等;然后在上述数据库清单物质名

录范围内,根据典型工艺流程及技术资料,列出完整的资源、原材料、排放物质列表,以备下一步的数据收集,在列表中还可以记录各物质在工艺流程中产生的原因,以方便后续的数据审核与更新。②清单数据收集:对于国家 LCA 数据库而言,数据来源首选统计年鉴和行业报告等权威的出版物;其次,资源与原材料消耗数据可依据工艺技术资料(如配料表),环境排放数据可以采用物料平衡原理或采用排污系数进行计算,如果某些企业的工艺技术具有较好的代表性或较大的市场份额,也可采用个别企业的实测数据;此外,文献报告也是数据来源之一。为反映全国的平均水平,通常需要按照典型工艺类型和装置规模划分多个类别,分别收集清单数据后按照市场份额求得全国平均值。③清单数据记录:为帮助数据库用户判断并选择合适的数据,必须准确、透明地描述清单数据收集的过程与结果。ISO 为此制订了数据文档格式 ISO14048 (International Organization for Standardization, 2006c),常见的数据文档格式还有 Ecoinvent (Ecoinvent, 2010) 和 ILCD 格式 (Joint Research Centre in European Commission, 2009b)。对于数据收集者而言,还需要完整记录原始数据及数据来源、计算过程、假设与近似等信息,以便后续的数据审核与更新。④清单数据审核:清单数据收集结束后应进行内部或外部的独立审核,通常包括完整性检查(是否有数据遗漏)、准确性检查(例如采用不同数据来源或物质平衡验算等方式进行对比)、一致性检查(与整个数据库在统计口径、分配方法等方面是否一致)、数据文档检查(文档描述是否准确、透明)等。

### 2.3 生命周期清单数据的建模与计算

在收集获得一个单元过程的清单数据后(即 gate-to-gate 数据),可以追溯此单元过程的上游原材料生产过程直至资源获取阶段,建立生命周期模型并汇总计算,从而得到此产品的生命周期清单数据(即 cradle-to-gate 数据)。

ISO14040 和 14044 标准为上述建模和计算工作规定了各项基本原则与要求 (International Organization for Standardization, 2006a; 2006b)。此外,在 ILCD 手册 (Joint Research Centre in European Commission, 2010) 等 LCA 指南中也有更详细的建议,本文不再赘述。

### 2.4 建立 CLCD 数据库的步骤

建立 LCA 数据库的主要工作就是收集并获得

各种常见原材料、能源、运输等产品(或服务)的单元过程和生命周期清单数据。但面对成千上万的产品和生产过程,应该从哪些产品开始数据收集,这是在开始建立数据库阶段面临的首要问题。

本文认为,从相互依存关系来看,存在着基础性产品和普通下游产品的区别。基础性产品相互依赖、互为上下游过程,共同构成了网状的基础工业系统,据此建立的基础生命周期模型是这些基础性产品共同的生命周期模型。而普通下游产品的生命周期是各不相同的树形结构,其生命周期模型和生命周期清单数据通常包含着基础性产品的贡献,但反之并不成立。因此,本文提出,在建立 CLCD 数据库时,应首先找出基础性产品并收集其单元过程清单数据,然后建立统一的基础生命周期模型,从而避免独立建立各基础性产品生命周期模型带来的数据不一致问题。由此模型可求解所有这些基础性产品的生命周期清单数据 (Heijungs *et al.*, 2002),从而得到 CLCD 基础数据库。之后,可以按照 2.1 节、2.2 节、2.3 节所述的方法与步骤,分工合作、逐步收集并获得其他普通下游产品的单元过程和生命周期清单数据,从而得到 CLCD 数据库。这是合作建立一个综合性中国 LCA 数据库的可行方法与途径。

## 3 基础生命周期模型与 CLCD 基础数据库 (Development of basic life cycle model and CLCD basic database)

### 3.1 中国基础工业系统生命周期模型

从一个典型基础性产品开始,通过追溯原材料生产过程,可以找出工业系统中的其它基础性产品,这是基础性产品的操作性定义,其结果主要由原材料数据收集的准确程度决定。由于电力是应用最广泛的能源产品,必然包含在基础工业系统及其生命周期模型中。因此,本研究从电力产品开始,逐步追溯其上游生产过程直至资源获取阶段,初步建立了包含煤炭等一次能源开采、电力和柴油等二次能源生产、公路和铁路等运输过程的中国基础工业系统的生命周期模型(图 1)。需要强调的是,如果从煤炭、燃油或运输这些产品开始追溯上游生产过程,在相同的数据收集准确程度下,仍然会得到完全一样的结果。所以,图 1 所示的模型并非只是电力的生命周期模型,而是代表基础工业系统的基础生命周期模型。

为分析基础设施建设的影响,模型中也包含了

全国水电站、火电站和电网建设过程,但未包含其他工厂建设、公路与铁路建设、车辆轮船等交通运输工具的生产、基础设施的废弃与拆除等过程。对

于尚未完成国内数据收集的单元过程,暂时使用 Ecoinvent 数据库中相应的生命周期数据代替(图 1 中虚线框所示)。

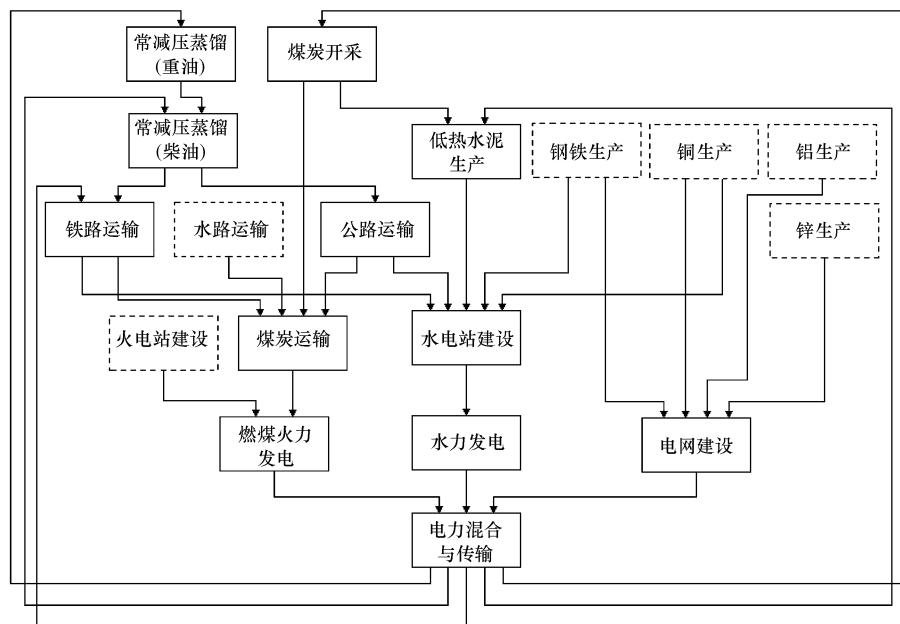


图 1 中国基础工业系统生命周期模型

Fig. 1 Basic life cycle model of Chinese fundamental industries

### 3.2 单元过程清单数据收集

按照 2.2 节所述的单元过程清单数据收集方法与步骤,收集了图 1 中多个单元过程 2007 年的全国平均清单数据。其中,原材料投入数据在有行业统计的情况下均通过年度总投入和年度总产出计算得到,否则按照技术参数计算得到;排放数据在可能的情况下均划分了主要的工艺技术类型以及装置规模,然后按市场份额和排放系数计算得到,但 CO<sub>2</sub> 排放均依照质量平衡计算得出。单元过程清单数据收集简述如下。

**3.2.1 电力混合与传输过程** 功能单位选取为传输 3.6MJ 市电(220V)至用户,系统边界从发电厂电力上网开始,经各级电网混合、变压与传输,直到转变为 220V 市电为止。投入数据包括燃煤电力和水力发电两类(约占全国总发电量的 98%,忽略了核电、风电等其它电力投入),考虑了全国电网传输损耗以及均摊的电网建设消耗。参考 Ecoinvent 数据库估计了电力传输过程中从变压器泄露的温室气体 SF<sub>6</sub>,未考虑其它环境排放(中华人民共和国国家统计局,2007)。

**3.2.2 燃煤火力发电** 功能单位选取为生产 3.6MJ 的电厂电力,系统边界从电煤进厂开始,经备

料、发电及主要污染治理过程,直到电厂电力上网为止。数据收集未考虑燃油、燃气等市场份额很小的燃料类型,只涵盖了粉煤炉和循环流化床两种主要的燃煤发电锅炉。

投入的原料包括经运输的原煤、新鲜水、石灰石及来自 Ecoinvent 数据库的电厂建设消耗,其中,燃煤消耗量按照电力统计年鉴只计入了发电用煤,未计入供热用煤。主要的排放包括 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、COD、颗粒物、烟尘、粉煤灰、炉渣、石膏等。以 SO<sub>2</sub> 排放的计算为例,将锅炉分为循环流化床和粉煤炉两类,并按装机容量分为 9 档,且细分不同 SO<sub>2</sub> 末端治理技术,查找上述组合的市场份额以及对应的排污系数 F,按式(1)可以计算全国平均生产 3.6MJ 燃煤电力所排放的 SO<sub>2</sub> 数量(国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室,2008;《中国电力年鉴》编辑委员会,2008)。

$$E = C \times \sum (S_i \times F_i) \quad (1)$$

式中, E 为生产 3.6MJ 燃煤火电时产生的 SO<sub>2</sub> 排放量(kg);C 为生产 3.6MJ 火电的原煤消耗量(kg); S<sub>i</sub> 为锅炉类型、装机容量及末端治理技术的第 i 种组合占全国装机总量的百分比,F<sub>i</sub> 为此种组合的排污系数(kg·kg<sup>-1</sup>, 以每 kg 燃煤排放的 SO<sub>2</sub> 计)。

**3.2.3 电煤运输** 功能单位选取为 1kg 电力用煤的全国平均运输周转量, 系统边界从电力用煤采出开始, 经铁路、水路、公路等运输方式, 运到电厂为止。假设电煤运输与全国的煤炭运输的构成相同, 根据统计年鉴(中华人民共和国国家统计局, 2008) 可以得到电煤铁路运输的年总周转量, 并假设经铁路运输的煤炭需要 50 km 的短途公路转运; 根据中国主要煤炭货运港口间的航线距离及年总运输量可以得到电煤水路运输的年总周转量; 假设其余电煤均经过 300 km 的公路运输。由以上运输量可得到全国单位电煤的平均铁路、水路和公路运输距离。

**3.2.4 煤炭开采** 功能单位选取为开采 1t 原煤产品, 系统边界为 1t 原煤从煤矿开采出的整个过程。数据收集涵盖了硬煤的矿井开采和露天开采两种开采工艺以及综采、普采、炮采 3 种采煤机械化水平。投入的资源和原材料包括原煤、电力、新鲜水、坑木, 主要的排放包括 CH<sub>4</sub>、废水、COD、石油类、煤矸石以及来自煤炭自然造成的 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 排放。

**3.2.5 公路运输** 功能单位选取为载重为 10t 的柴油货车在郊区公路上完成 1t·km 的运输量, 满载率假定为 60%。系统边界仅包含运行阶段, 不包含公路建设和车辆制造阶段。柴油消耗数据来自国家燃油限值(王维等, 2008), 并根据国内柴油成分和文献(马丽萍等, 2007) 中给出的计算模型估算了 CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物等主要排放。

**3.2.6 铁路运输** 功能单位选取为 1t·km 的铁路运输。系统边界仅包含运行阶段, 不包含铁路建设和火车制造阶段。数据收集涵盖电力机车和内燃机车两类, 其中, 电力和柴油消耗两种投入数据来自统计年鉴(中华人民共和国国家统计局, 2008), 内燃机车的排放数据参考我国柴油的成分与 Ecoinvent 中的同类机车数据进行估算。

**3.2.7 常减压蒸馏(柴油与重油)** 功能单位选取为炼制 1t 柴油(或重油)。系统边界仅包含从电脱盐开始到常减压蒸馏为止的石油炼制阶段, 未包含上游的石油开采和后续的石油炼制过程。数据收集考虑了国产和进口石油成分的差别, 考虑了不同装置规模的效率差别, 按照热容量及重量对各种炼制产品进行了分配。投入数据包括原油、电力、重油(燃烧供热)、新鲜水消耗, 排放数据包括 CO<sub>2</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、COD 等。(张建芳等, 2006)

**3.2.8 水力发电** 功能单位选取为生产 3.6MJ 的电厂电力, 系统边界仅包括水电站运行阶段, 直到

电厂电力上网为止。投入数据只包括均摊的水电站建设消耗。同时, 参考 Ecoinvent 数据库估算了由于水库淹没土地造成的额外 CH<sub>4</sub> 排放, 未考虑其它环境排放。

**3.2.9 水电站建设** 功能单位选取为可发电 3.6MJ 的水电站建设(按水电站总发电量均摊), 系统边界从原材料运输到水电站建成为止, 不包含水电站的废弃与拆除过程。数据收集调查了国内 700 多座蓄水式和径流式水电站的数据, 占全国水电站装机容量的 76.1%。按各水电站的设计发电量并假设 50 年的使用年限可估算各自的总发电量, 由此可计算均摊在单位发电量上水电站建设过程中所消耗的低热水泥、沙石、钢铁、铜等原材料以及运输量。然后将 700 多座样本水电站按装机容量划分为大型 ( $\geq 250\text{MW}$ )、中型 ( $50\text{MW} \leq \text{装机容量} < 250\text{MW}$ ) 和小型水电站 ( $< 50\text{MW}$ ), 按 3 种类型的市场份额量求得全国平均数据。

**3.2.10 低热水泥生产** 功能单位选取为生产 1t 大坝用低热水泥, 系统边界从原料粉磨、熟料煅烧到水泥磨制。投入数据包括煤耗、电耗以及石灰石、粘土、石膏、炉渣等原料, 数据来自文献报道的新型干法水泥生产数据以及常规配料规则(刘志江, 2005)。排放数据包括 CO<sub>2</sub>、COD、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CH<sub>4</sub>、颗粒物等主要排放。

**3.2.11 电网建设** 功能单位选取为传输 3.6MJ 电力的电网建设(按总传输电力均摊), 系统边界只包含电网建设的原材料消耗, 不包含电网的废弃与拆除过程。数据收集调查了国内各种电压的交流传输电网。按电网额定传输功率并假设 30 年的使用年限可估算各自的总输电量, 由此可计算均摊在单位输电量上、在电网建设过程中因电塔、传输电线、变电站和变压器使用所消耗的钢铁、铜、铝、锌等金属材料。

**3.2.12 其它过程** 模型中的钢铁、铜、铝、锌的生产及水路运输和火电站建设过程尚未完成国内数据的收集, 暂时使用 Ecoinvent 数据库中相应的生命周期数据代替, 这些数据均包含了从资源开采到产品出厂(或建成)的过程。

### 3.3 CLCD 基础数据库的获得

采用国内自主研发的通用 LCA 软件——eBalance, 从如图 1 所示的基础工业系统的生命周期模型中, 可以求解得到电网电力、火电、水电、煤炭、柴油、重油、公路运输、铁路运输等基础性产品

的生命周期清单数据结果,这些基础性产品的生命周期清单数据构成了 CLCD 的核心组成部分,称为

CLCD Basic. 限于篇幅,表 2 仅给出电网电力的主要清单物质数据.

表 2 中国电网电力生命周期清单(3.6MJ 的 220V 交流电至用户)

Table 2 Inventory table of grid power in China (3.6MJ, 220V AC to end user)

清单物质	总量/kg	清单物质	总量/kg	清单物质	总量/kg	清单物质	总量/kg
资源及原 原煤	$5.28 \times 10^{-1}$	Mg (in ore)	$4.04 \times 10^{-6}$	石灰石	$6.96 \times 10^{-3}$	P	$5.62 \times 10^{-7}$
材料投入 原油	$3.03 \times 10^{-3}$	Cu (in ore)	$7.99 \times 10^{-6}$	高炉煤渣	$1.15 \times 10^{-4}$	沸石	$2.20 \times 10^{-7}$
天然气	$1.30 \times 10^{-4}$	Mo (in ore)	$1.70 \times 10^{-7}$	粘土	$7.41 \times 10^{-5}$	高岭土	$3.45 \times 10^{-8}$
Fe (in ore)	$1.14 \times 10^{-3}$	Zn (in ore)	$5.25 \times 10^{-7}$	重晶石	$4.20 \times 10^{-5}$	高岭石	$2.03 \times 10^{-8}$
铝土矿	$2.21 \times 10^{-4}$	Pb (in ore)	$1.61 \times 10^{-8}$	NaCl	$1.58 \times 10^{-6}$	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$4.04 \times 10^{-8}$
Mn (in ore)	$2.70 \times 10^{-7}$	Sn (in ore)	$8.85 \times 10^{-10}$	KCl	$5.36 \times 10^{-6}$	滑石	$1.43 \times 10^{-9}$
Cr (in ore)	$3.20 \times 10^{-6}$	水	3.29	黄铁矿渣	$5.62 \times 10^{-6}$	木材	$1.05 \times 10^{-6}$
Ni (in ore)	$1.87 \times 10^{-5}$	沙石	$3.46 \times 10^{-3}$			绝缘油	$2.01 \times 10^{-5}$
环境排放 CO <sub>2</sub> (to air)	1.12	氨气(to air)	$1.86 \times 10^{-7}$	CH <sub>4</sub> (to air)	$2.54 \times 10^{-3}$	氨氮(to water)	$1.34 \times 10^{-8}$
SO <sub>2</sub> (to air)	$6.73 \times 10^{-3}$	氟化物(to air)	$1.84 \times 10^{-9}$	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$3.28 \times 10^{-7}$	磷(to water)	$1.17 \times 10^{-9}$
NO <sub>x</sub> (to air)	$2.79 \times 10^{-3}$	磷(to air)	$7.63 \times 10^{-11}$	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$1.78 \times 10^{-7}$	COD(to water)	$2.43 \times 10^{-3}$
CO(to air)	$5.11 \times 10^{-5}$	硝酸盐(to air)	$8.26 \times 10^{-12}$	NMVOC	$7.06 \times 10^{-6}$	废油(to water)	$9.68 \times 10^{-7}$
HCl(to air)	$8.77 \times 10^{-8}$	TSP(to air)	$1.49 \times 10^{-3}$	VOC	$1.75 \times 10^{-6}$	废水	1.2
SF <sub>6</sub> (to air)	$7.64 \times 10^{-8}$	PM <sub>2.5</sub> (to air)	$2.24 \times 10^{-6}$	废气	4.52	磷(to soil)	$1.99 \times 10^{-9}$
HF(to air)	$2.74 \times 10^{-8}$	PM <sub>2.5-10</sub> (to air)	$3.16 \times 10^{-5}$	磷酸盐(to water)	$5.00 \times 10^{-7}$	固体废弃物	$1.84 \times 10^{-1}$
H <sub>2</sub> S(to air)	$1.87 \times 10^{-8}$	PM <sub>10</sub> (to air)	$4.22 \times 10^{-6}$	硝酸盐(to water)	$1.70 \times 10^{-7}$		

注:in ore 表示以矿石中金属元素的含量计,而非矿石质量;to air, to water, to soil 分别表示排放到大气、水体、土壤中;TSP 为总颗粒物;NMVOC 为非甲烷可挥发性有机物;VOC 为挥发性有机物;木材、废气的单位为 m<sup>3</sup>.

CLCD Basic 已包含在可免费下载的 eBalance 软件中,可用于其它普通下游产品的生命周期建模、分析以及 LCA 数据库扩展.

#### 4 讨论(Discussion)

第 2 章中提出的清单数据获得方法以及第 3 章中建立的基础工业系统生命周期模型和得到的基础数据库 CLCD Basic,其目的在于为下一步扩展建立综合性的中国 LCA 数据库提供方法和模型基础. 其中,CLCD Basic 需要不断扩展,清单数据获得方法需要进一步完善与细化以形成统一的数据收集指南.一些值得注意的问题分析如下.

##### 4.1 CLCD Basic 数据库使用中的问题

目前,CLCD Basic 数据库的数据收集仅限于表 1 所列清单物质,因此,数据库只适用于对表 1 所列的环境影响类型进行分析. 其它如重金属、持久性有机污染物、放射性物质及其造成的人体毒性、生态毒性等不在目前数据库的范围之中,有待未来数

据库的扩展.

在数据库建立的初期,不可避免地存在数据缺失,需要逐步补充完善. 对于目前的基础模型而言,需要进一步补充的数据主要包括:基础模型中引用的国外数据需要用中国本地数据替换,石油开采、催化裂化等缺失的单元过程数据需要补充等. 尤其是随着数据的不断完善,可能会出现新的原材料消耗品种,从而需要在模型中增加更多的基础性产品及其生产过程.

目前的基础模型中,钢铁等金属的生产、水路运输、火电站建设等单元过程引用了国外数据库数据,由此带来的影响需要定量分析. 以电网电力的生命周期数据结果为例,上述过程对各种生命周期环境影响指标的贡献如表 3 所示. 由表 3 可见,除不可再生资源消耗外,这些过程对各影响类型的贡献均小于 1%. 由此可能造成的影响应该在 LCA 个案分析中根据数据质量要求进行进一步分析.

表 3 引用的国外 Ecoinvent 数据对中国电网电力数据的贡献

Table 3 Contribution of Ecoinvent data sets to Chinese grid power

单元过程	化石能源消耗贡献	不可再生资源消耗贡献	水资源消耗贡献	全球暖化贡献	酸化贡献	COD 贡献	富营养化贡献	固体废物贡献	可吸入无机物贡献
锌生产	0	5.46%	0	0	0	0	0	0	0
铝生产	0.02%	3.58%	0.20%	0.01%	0.01%	0.03%	0.03%	0	0.03%
铜生产	0	69.30%	0.03%	0	0.02%	0	0.01%	0	0.03%
钢铁生产	0.10%	4.30%	0.30%	0.06%	0.03%	0.06%	0.15%	0	0.09%
水路运输	0.54%	17.08%	0.55%	0.42%	0.53%	0.72%	1.86%	0	1.01%
火电站建设	0	0.28%	0	0	0	0	0	0	0

注:表 3 中部分指标的计算采用了下列特征化因子,其中,化石能源消耗指标采用了折标准煤系数(中华人民共和国国家统计局,2005),全球暖化的特征化因子参考文献(Forster *et al.*, 2007),可吸入无机物的特征化因子参考文献(Jolliet *et al.*, 2003),不可再生资源消耗、酸化、富营养化的特征化因子参考文献(Guinee *et al.*, 2002).

很多 LCA 个案的数据并不包含基础设施建设.采用类似表 3 中的分析方法,也可以定量计算电网电力的生命周期数据中,水电站、火电站、电网等基础设施建设的总体贡献.计算结果显示,除不可再生资源消耗外,这些过程对各影响类型的贡献也均小于 1%.

#### 4.2 判断数据收集的重点

通常单元过程中的各项数据只有一部分对生命周期数据结果有明显影响,因此,在数据收集和更新时需要判断重点数据,以便在必要时采用不同数据收集方法或物质平衡验算等方式,确认重点数据的准确性.为判断重点数据,可计算生命周期环

境影响指标对单元过程中各项清单数据的敏感度,即二者的变化率之比,如式(2)所示:

$$S_{ij} = (\Delta B_i / B_i) / (\Delta I_j / I_j) \quad (2)$$

式中, $B_i$  为第  $i$  种生命周期环境影响指标值, $I_j$  为第  $j$  种清单数据值.当  $I_j$  变化  $\Delta I_j$  时, $B_i$  相应地变化  $\Delta B_i$ , $S_{ij}$  即为  $B_i$  对  $I_j$  的敏感度.

仍以电网电力产出为例,根据式(2)可以计算模型中任一单元过程的任一清单数据(原材料投入或环境排放)对各项环境影响指标的敏感度.例如,在燃煤火力发电、水力发电、电网建设、电力混合与传输 4 个单元过程中,对各项环境影响指标的敏感度大于 0.1 的清单数据如表 4 所示.

表 4 电力系统清单数据的敏感度分析

Table 4 Sensitivity analysis of the inventory of the electricity system

单元过程	化石能源消耗	不可再生资源消耗	水资源消耗	全球暖化	酸化	COD	富营养化	固体废物	可吸入无机物
电力混合与传输	火电投入 (1.00)	电网建设投入 (0.79)	火电投入 (0.99)	火电投入 (1.00)	火电投入 (1.00)	火电投入 (1.00)	火电投入 (1.00)	火电投入 (1.00)	火电投入 (1.00)
	火电投入 (0.18)								
燃煤火力发电	煤炭投入 (1.00)	煤炭投入 (0.18)	新鲜水投入 (0.93)	CO <sub>2</sub> 排放 (0.80)	SO <sub>2</sub> 排放 (0.61)	COD 排放 (0.98)	NO <sub>x</sub> 排放 (0.83)	固废 (0.75)	SO <sub>2</sub> (0.47)
				煤炭投入 (0.21)	NO <sub>x</sub> 排放 (0.21)	COD 排放 (0.13)	煤炭投入 (0.26)	NO <sub>2</sub> (0.38)	
				煤炭投入 (0.19)			煤炭投入 (0.16)	煤炭投入 (0.16)	
水力发电									
电网建设		铜投入 (0.66)							

注:括号中给出的是敏感度大于 0.1 的数据.

表 4 指出了上述 4 个单元过程中对各种环境指标影响最大的清单数据,即最敏感的数据.在数据收集过程中,这些清单数据是收集的重点,应尽量

准确.例如,在燃煤火力发电过程中,对于全球暖化指标而言,燃烧过程排放的 CO<sub>2</sub> 是最敏感的数据(敏感度为 0.8,即当其变化 1% 时,电网电力生命周期

总的全球暖化指标将变化 0.8%). 从表 4 可以看出, 几乎主要的敏感数据均来自燃煤火力发电过程. 与之相反, 水力发电过程所有的原材料投入和排放数据对各种环境指标的敏感度均小于 0.1, 故在表 4 中未出现. 电网建设过程仅因铜的消耗而对不可再生资源消耗指标敏感. 上述 3 个过程的产出投入到电力混合与传输过程, 因此, 在电力混合与传输过程中几乎只有火电投入数据是最敏感的, 即中国电网电力的环境影响主要来自火力发电.

## 5 结论(Conclusions)

1) 中国生命周期参考数据库目标涵盖的清单物质对应着 9 种重要的环境影响类型指标, 即初级能源消耗、不可再生资源消耗、水资源消耗、全球暖化、酸化、化学需氧量、富营养化、固体废物以及可吸入无机物, 可以基本满足中国近期的 LCA 研究与应用的需要.

2) 按照本文提出的基础性产品定义, 确定了电力、煤炭、燃油、运输等一系列基础性产品, 由此构建了基础工业系统的生命周期模型, 并得到了 CLCD 基础数据库. 结果表明, 通过划分基础性产品和普通下游产品, 可以在数据库建设的初期指出数据收集工作重点, 明确数据库发展的总体方向.

3) 本文总结提出了统一的清单数据收集范围和数据获得方法, 并建立了统一的基础生命周期模型, 这些方法和基础模型有利于保持 CLCD 数据库的内在一致性, 也为 CLCD 数据库的扩展提供了方法和模型基础.

4) 以电网电力为例的分析表明, 在保证生命周期完整性的前提下, 除不可再生资源消耗外, 目前的 CLCD 基础数据库已实现了本地化. 下一步将完善和细化相关工作流程, 制订出统一的数据库工作指南, 并逐步扩展基础模型和数据库的范围.

5) 上述结果表明, 本文提出的方法和模型具有很好的一致性和可扩展性, 便于多个研究者分工合作, 是建立综合性 LCA 数据库的可行方法与途径.

**致谢(Acknowledgement):** 本文部分工作得到了联合国环境规划署(UNEP)及国际环境毒理与化学学会(SETAC)Life Cycle Initiative 工作组的支持, 成都亿科环境科技、荷兰 PRe Consultants 和瑞士 Ecoinvent 为项目研究提供了免费的 LCA 软件和数据库, 在此一并表示感谢.

**责任作者简介:** 王洪涛(1970—), 男, 硕士, 副教授, 主要从

事 LCA 及其在产品生态设计、III 型环境声明、产品碳足迹、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):

- Di X, Nie Z, Yuan B, et al. 2007. Life cycle inventory for electricity generation in China[J]. Int J LCA, 12 (4): 217—224
- Ecoinvent. 2010. EcoSpold v2 Data Format [OL]. 2009-12-20. <http://www.ecoinvent.org/database/ecospold-data-format/ecospold-v2/>
- Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H, et al. 2005. The ecoinvent database: Overview and methodological framework[J]. Int J LCA, 10(3): 3—9
- Forster P V, Ramaswamy P, Artaxo T, et al. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 212—213
- Gong X, Nie Z, Wang Z, et al. 2006. Research and development of Chinese LCA database and LCA Software[J]. Rare Metal, 25(6)(Supplement 2):101—104
- Guinee J B, Gorree M, Heijungs R, et al., 2002. Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 185—187; 344—350
- 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 2008. 第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册[OL]. 2009-11-01. <http://cpsc.sepa.gov.cn>
- State Council Leading Group Office of the First National Pollution Census. 2008. National census of industrial pollution coefficient Handbook [OL]. 2009-11-01. <http://cpsc.sepa.gov.cn> (in Chinese)
- Heijungs R, Suh S. 2002. The Computational Structure of Life Cycle Assessment[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- International Organization for Standardization. 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
- International Organization for Standardization. 2006c. ISO 14048. Environmental management-Life cycle assessment-Data documentation format [S]. Geneva: International Organization for Standardization
- Joint Research Centre in European Commission. 2009a. ELCD core database version II [OL]. 2009-12-27. <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>
- Joint Research Centre in European Commission. 2009b. Developer Support(data set format and data set editor)[OL]. 2009-12-27. <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/developerPage.vm>

- Joint Research Centre in European Commission 2010. International Reference Life Cycle Data System ( ILCD ) Handbook-General Guide for Life Cycle Assessment-Detailed Guidance [ OL ]. 2010-01- 27. [http://let.jrc.ec.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12\\_March2010.pdf](http://let.jrc.ec.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12_March2010.pdf)
- Jolliet O, Margni M, Charles R, et al. 2003. IMPACT 2002 + : A new life cycle impact assessment methodology [ J ]. Int J LCA, 8 ( 6 ): 324—330
- 刘志江. 2005. 新型干法水泥技术 [ M ]. 北京: 中国建材工业出版社
- Liu Z J. 2005. New Dry Process of Cement [ M ]. Beijing: China Building Material Industry Press (in Chinese)
- 马丽萍. 2007. 材料生命周期评价基础之道路交通运输本地化研究 [ D ]. 北京: 北京工业大学
- Ma L P. 2007. Material basis of life cycle assessment study of the localization of the road traffic transport [ D ]. Beijing: Beijing University of Technology (in Chinese)
- 聂祚仁, 高峰, 陈文娟, 等. 2009. 材料生命周期的评价研究 [ J ]. 材料导报, 23(3): 1—6
- Nie Z R, Gao F, Chen W J, et al. 2009. Research of materials life cycle assessment [ J ]. Materials Magazine, 23(3): 1—6 ( in Chinese )
- 王维, 刘莉, 张学利, 等. 2008. JT 719-2008. 营运货车燃料消耗量限制及测量方法 [ S ]. 北京: 中华人民共和国交通运输部
- Wang W, Liu L, Zhang X L, et al. 2008. JT 719-2008. Operating vehicle fuel consumption limit and measurement method [ S ]. Beijing: The People's Republic of China Ministry of Transport ( in Chinese )
- 张建芳, 山红红, 涂永善. 2006. 炼油工艺基础知识 ( 第 2 版 ) [ M ]. 北京: 中国石化出版社. 58—65
- Zhang J F, Shan H H, Tu Y S. 2006. Fundamental Knowledge of Oil Refining Method ( 2<sup>nd</sup> Edition ) [ M ]. Beijing: China Petrochemistry Press. 58—65 ( in Chinese )
- 《中国电力年鉴》编辑委员会. 2008. 2007 年中国电力年鉴 [ M ]. 北京: 中国电力出版社. 246
- Compiling Commission of China Electricity Year Book. 2008. 2007 China Electricity Yearbook [ M ]. Beijing: China Electricity Press. 246 ( in Chinese )
- 中华人民共和国国家统计局. 2008. 2007 中国统计年鉴 [ M ]. 北京: 中国统计出版社. 246; 623
- National Bureau of Statistics of China. 2008. 2007 China Statistical Yearbook [ M ]. Beijing: China Statistical Press. 246; 623 ( in Chinese )
- 中华人民共和国国家统计局. 2005. 中国能源统计年鉴 2005 [ M ]. 北京: 中国统计出版社
- National Bureau of Statistics of China. 2005. China Energy Statistical Yearbook 2005 [ M ]. Beijing: China Statistical Press ( in Chinese )