

# 生命周期评估方法

生命周期评估（Life Cycle Assessment，简称为 LCA）是一种评价产品、工艺或活动“摇篮到坟墓”即从资源开采到最终处理的整个生命周期环境影响的方法。它主要包括原材料的提取与制造，产品加工、运输、销售、使用、报废、回收和最终处置等过程。通过定量分析在这些过程中的环境影响、资源利用和生物健康，识别对以上影响类别贡献大的热点过程，并据此提出减轻或降低环境影响的可行方案<sup>1</sup>。LCA 一般包括四个部分：①确定目标和范围（Goal and Scope Definition，简称为 GSD）；②生命周期清单分析（Life Cycle Inventory Analysis，简称 LCI）；③生命周期影响评价（Life Cycle Impact Assessment，简称 LCIA）；④结果解释（Interpretation）。其中，前三个部分依次进行，最后一个部分贯穿于整个分析过程之中。这些步骤在 LCA 的相关导则或者教材中都有所涉及，这里仅对一些重要的概念进行说明：①系统边界（System Boundary，简称 SB），就是根据我们的研究目的设定的系统内部要素（比如各个过程）与系统外部之间的分界线。系统边界的设定主要是为了明确我们分析的范围，包括哪些内容以及不包括哪些内容。这是一个十分重要的假设，直接影响到我们的分析能否回答我们预设的问题，实现我们的研究目的，同时也决定了我们的研究结果与其他人的研究结果的可比性。②功能单位（Functional Unit，简称为 FU），指在 LCA 中作为参照的量化的产品性能，只有先定义好功能单位，才能对具有同样功能的不同产品来比较其生命周期环境影响。例如，要比较抽纸与烘干机的生命周期环境影响，首先二者之所以能够比较是因为它们具有同样的功能，即烘干手，那么我们可以定义其功能单位为烘干 1 双手（或者 10 双手，等等）。③基准流（Reference Flow，简称为 RF），指在给定的生产过程中用于实现功能单位需要消耗的产出量。还是以烘干手为例，抽纸与烘干机的基准流分别是烘干 1 双手（假设的功能单位）所需要的纸张数和热空气的体积。④单元过程（Unit Process，简称为 UP），指在 LCA 中用于收集数据进行分析的最基本的过程，将单元过程进行合并得到的过程就称为汇总过程（Aggregated Process，简称为 AP）。一般来说，一个过程只有

---

<sup>1</sup> 详见《产品生命周期评价方法手册》和《Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases》。

一个主产品，如果存在多个主产品时，就需要对这一个过程中的输入（Input）、输出（Output）和环境影响按照这多个产品进行分配（Allocation），从而得到多个单一主产品的过程，否则 LCA 的后续计算将无法实现。⑤基本流（Elementary Flow）指生产系统与环境系统之间发生的不需要人工处理时所发生的直接的物质交换。与基本流相对应的是中间流（Intermediate Flow），它包括产品流（Product Flow）和废物流（Waste Flow），二者的区别在于前者在产生之前需要人工处理才能被使用，后者在产生之后需要人工处理才能排放到环境。

从以上主要定义中的关键词“过程”和“流”可知，LCA 中的过程分析与流的计算是十分重要的内容，而这部分内容正好就是 LCI 的主要内容。LCI 首先将产品的生命周期划分成一个一个单元过程，然后再对这些单元过程中的各种输入（Input）、输出（Output）和排放（Emission）相关的数据进行收集，然后假设各个过程输入、输出和排放同等比例增加或者减少（线性假设），这样我们就可以对每个过程乘以一个规模因子（Scaling Factor），并根据物料守恒可以求解各个过程的规模因子，从而计算出每个过程的排放量，将全生命周期中各种污染物排放量进行汇总就可以得到该产品在其生命周期过程上的排放清单（Emission Inventory），这样我们就完成了清单分析。LCI 单元过程的一般分析框架如图 1 所示，根据图 1 我们可以对每个过程进行物料分析，从而可以构建每个过程物料清单（Material Inventory），这是 LCI 中关于数据收集与整理的步骤，也是最关键也是最耗时的步骤，其数据的可靠性直接决定了评估结果的有效性和参考价值，需要十分重视。需要说明的是，LCI 之所以称为清单分析，是因为它需要构建基于过程的物料清单，然后再据此计算基于生命周期的排放清单。

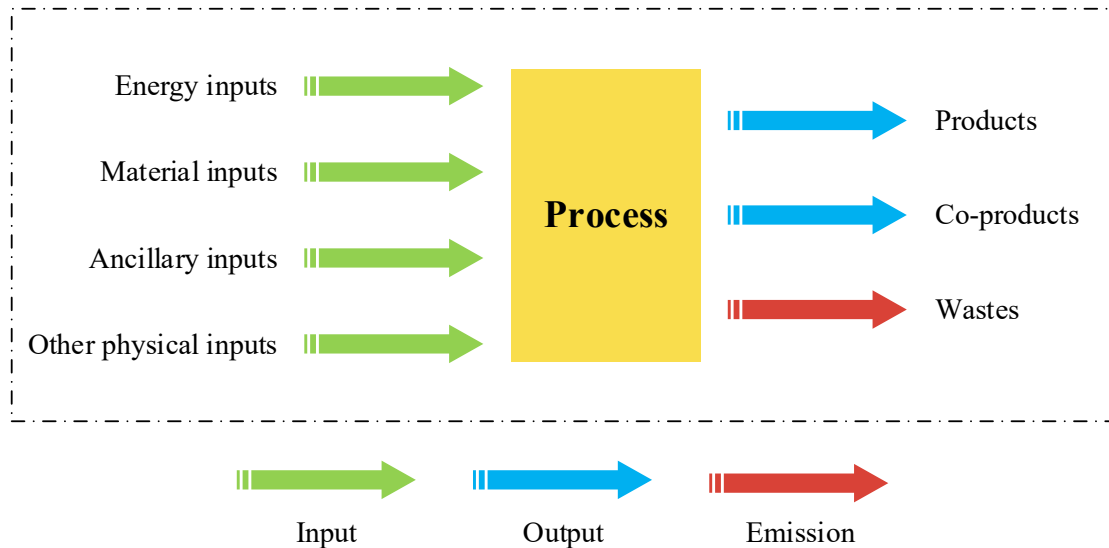


图 1 LCI 单元过程分析框架

为了说明 LCI 的计算过程，我们借鉴了《Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology》中的一个关于烤面包机的例子（图 2）。这个例子研究的对象是烤面包机的生命周期  $\text{CO}_2$  的排放量，涉及包括原材料钢铁（Steel）和蒸汽（Steam）的生产、烤面包机的生产、烤面包机的使用以及报废后的处置 4 个环节 5 个单元过程。根据图 2 中给的数据，我们可以构建烤面包机生命周期中各个过程的物料清单，并且将清单中的每一项进行输入（I）-输出（O）-排放（E）的标识。同时为了加以区别，我们将输入的数据写成负数的形式，整理后的结果如表 1 所示。根据前面的知识，我们知道表 1 实际上是一种长表格的形式，这种形式比较适合于我们整理和存储数据。在明确了研究内容与系统边界后，一项重要的工作就是确定我们研究的功能单位。在烤面包机的例子中，我们的功能单位是什么呢？其实功能单位取决于我们研究对象的功能，那么烤面包机的功能是什么呢？毫无疑问，当然是烤面包了。由于我们现在的视角是生命周期的视角，所以我们除了关心烤面包机烤面包外还关心烤面包机报废的事情，那么我们购买一台烤面包机其实就是购买了它从刚开始使用到报废时为我们烤面包的服务，那么我们就可以假定我们研究的功能单位是 1 台烤面包机在其生命周期内为我们提供的服务。当然，这个定义比较抽象，需要将其等效地转化成为我们分析框架中的某种产品的产出量。这里我们假设 1 台烤面包机在其生命周期内能够烤 1000 片面包，那么这里的 1000 片面包就是功能单位的等效表达了，也就是我们前面

定义中的基准流。下面的任务就是参照这个基准流来确定各个过程的生产规模。为了计算生产规模，我们需要将表 1 转化成过程与产品及排放交叉的表格<sup>2</sup>（表 2）。这样除去表头外的前面 5 行就是各个产品的输入量和输出量，第 6 行就是生产过程中的 CO<sub>2</sub> 排放量；第 2~6 列分别是 5 个生产过程，最后一列就是基准流。每个生产过程都有一个规模因子，分别假设为 S<sub>1</sub>~S<sub>5</sub>（见表 2 最后一行）。如果我们假设第 j 个过程中第 i 个产品的量为 X<sub>ij</sub>（对应前面的 5 行×5 列），该产品的最终产量为 Y<sub>i</sub>（对应基准流那一列），那么根据物料守恒，我们有 S<sub>1</sub>X<sub>i1</sub> + S<sub>2</sub>X<sub>i2</sub> + S<sub>3</sub>X<sub>i3</sub> + S<sub>4</sub>X<sub>i4</sub> + S<sub>5</sub>X<sub>i5</sub> = Y<sub>i</sub> (i=1,...,5)。这样，我们通过解方程就可以求出 S<sub>1</sub>~S<sub>5</sub>（见表 2 最后一行）。设每个过程中排放的 CO<sub>2</sub> 量分别为 Z<sub>1</sub>~Z<sub>5</sub>（见表 2 第 6 行），那么全生命周期的 CO<sub>2</sub> 排放量就是 S<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> + S<sub>2</sub>Z<sub>2</sub> + S<sub>3</sub>Z<sub>3</sub> + S<sub>4</sub>Z<sub>4</sub> + S<sub>5</sub>Z<sub>5</sub>，计算的结果就是 6.5kg。这个就是 CO<sub>2</sub> 的排放清单。到这里为止，我们 LCI 的计算工作就完成了。我们也能够比较发现在蒸汽生产和烤面包机生产过程中的 CO<sub>2</sub> 排放量是最大的，因此这两个过程就是热点过程。

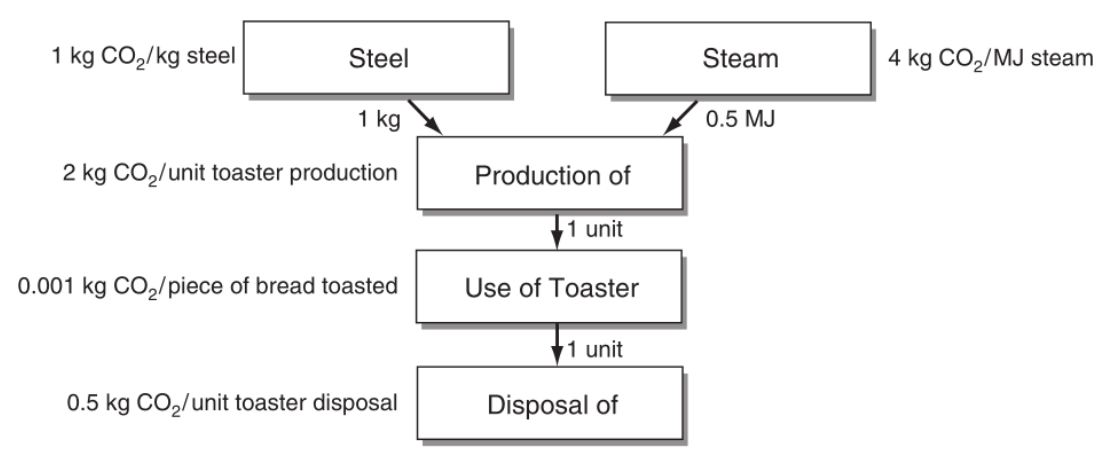


图 2 烤面包机的 LCI

表 1 烤面包机物料清单

Process	Inventory	IOE	Unit	Data
Steel production	Steel	O	kg	1
	CO <sub>2</sub>	E	kg	1

<sup>2</sup> 实际上就是将长表转化为宽表的过程，如果某些数据没有，就用 0 来代替。

Steam production	Steam	O	MJ	1
	CO <sub>2</sub>	E	kg	4
Toaster production	Steel	I	kg	-1
	Steam	I	MJ	-0.5
	Toaster	O	1 unit	1
	CO <sub>2</sub>	E	kg	2
Bread toasting	Toaster	I	1 unit	-1
	Bread toasted	O	piece	1000
	Toaster disposed	O	1 unit	1
	CO <sub>2</sub>	E	kg	1
Toaster disposal	Toaster disposed	I	1 unit	-1
	CO <sub>2</sub>	E	kg	0.5

表 2 烤面包机“过程-产品-排放”与规模因子

Product	Process					Reference flow
	Steel production	Steam production	Toaster production	Bread toasting	Toaster disposal	
Steel	1	0	-1	0	0	0
Steam	0	1	-0.5	0	0	0
Toaster	0	0	1	-1	0	0
Bread toasted	0	0	0	1000	0	1000
Toaster disposed	0	0	0	1	-1	0
CO <sub>2</sub>	1	4	2	1	0.5	
Scaling factor	S <sub>1</sub> =1	S <sub>2</sub> =0.5	S <sub>3</sub> =1	S <sub>4</sub> =1	S <sub>5</sub> =1	

LCA 的另一个重要步骤就是 LCIA，LCIA 就是评估排放到环境中的这些物

质会造成资源消耗、生态健康以及人类健康的影响。实现 LCIA 一般包括三个步骤：分类、特征化和量化。分类（Classification）就是将 LCI 中的相关数据分配到不同环境影响类型的过程，这些数据通常是 LCI 中的基本流数据。同一个基本流可能对应不同的环境影响类型；同一个环境影响类型也可能对应多种基本流。可见，分类的过程就是构建环境影响网络的过程。特征化（Characterization）就是将同一个环境影响类别中的不同物质的环境效应按照一定规则转化为同一参照物质的环境效应的过程，通常用当量的形式进行转换。比如各种温室气体的效应量都可以转化为 CO<sub>2</sub> 当量的形式。量化（Valuation）就是确定不同环境影响类型相对贡献大小从而使得不同环境影响类型可以进行比较。通过量化的手段可以实现对总的环境影响的评估，以及确定不同的环境影响对该影响的贡献，从而识别出产生主要环境影响的过程。

表 3 电力系统简化生命周期物料清单

Process	Inventory	IOE	Unit	Data
电力混合	电网电力	O	kWh	1
	火电	I	kWh	-0.914
	水电	I	kWh	-0.161
火力发电	火电	O	kWh	1
	原煤	I	kg	-0.5
	公路运输量	I	tkm	-0.1
	SO <sub>2</sub>	E	g	5.68
	NO <sub>x</sub>	E	g	2.87
	CO <sub>2</sub>	E	g	891
水力发电	水电	O	kWh	1
	CH <sub>4</sub>	E	g	0.286
采煤	原煤	O	kg	1
	煤矿石	I	kg	-1.09
	SO <sub>2</sub>	E	g	3
	CO <sub>2</sub>	E	g	330

	CH <sub>4</sub>	E	g	5.12
	公路运输量	O	tkm	1
	柴油	I	g	-37.63
公路运输	SO <sub>2</sub>	E	g	0.09
	NO <sub>x</sub>	E	g	1.6
	CO <sub>2</sub>	E	g	118
	CH <sub>4</sub>	E	g	0.004

表 4 LCIA 相关数据

影响类型	污染物	特征化因子	归一化基准值	单位	权重因子
温室效应 (GWP)	CO <sub>2</sub>	1	$1 \times 10^{-13}$	kgCO <sub>2</sub> -eq	1
	CH <sub>4</sub>	25			
酸化指数 (AP)	NO <sub>x</sub>	0.7	$1 \times 10^{-10}$	kgSO <sub>2</sub> -eq	1.5
	SO <sub>2</sub>	1			

表 3 和表 4 是关于电力系统生命周期评估的一个简化的例子。其中，表 3 给出电力系统 5 个过程生命周期物料清单。在表 3 最后一列的数值中，负值表示投入的原材料的量，正值表示产出的产品或者排放的污染物的量。如果假定功能单位为 1kWh 的电网电力，那么采用前面 LCI 的分析方法很容易计算出生产 1kWh 的电网电力在其生命周期过程中需要消耗煤矿石、柴油分别为 0.498kg、3.44g，同时会排放 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 的量分别为 976.0g、2.39g、6.57g、2.77g。