

LCA计算与分析

LCA Calculation & Analyses

王洪涛 Hongtao WANG

College of Architecture and Environment

Sichuan University

wanghongtao@outlook.com

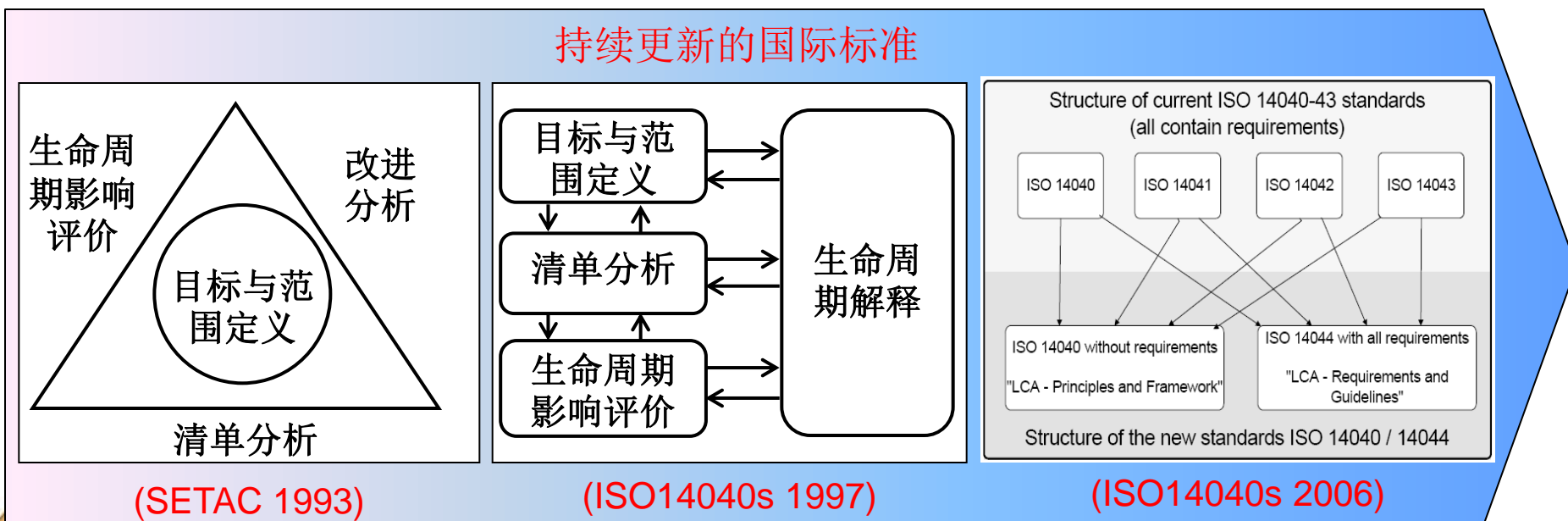
2001 – 2013



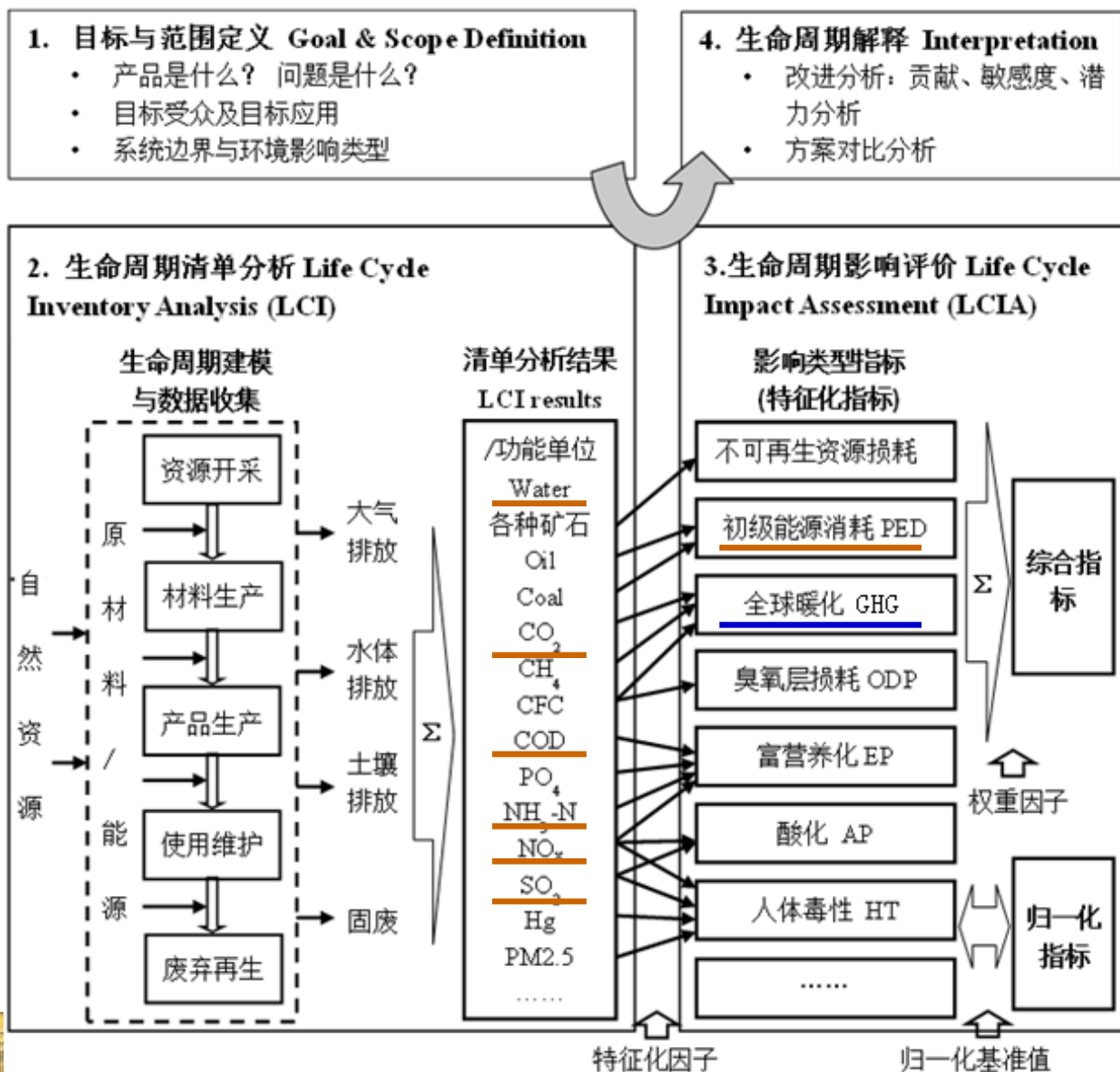
LCA方法框架

四个反复的步骤：

- 目标与范围定义 Goal and scope definition (G&S)
- 生命周期清单分析 Life Cycle Inventory Analysis (LCI)
- 生命周期影响评价 Life Cycle Impact Assessment (LCIA)
- 生命周期解释 Life Cycle Interpretation



LCA方法步骤及特点

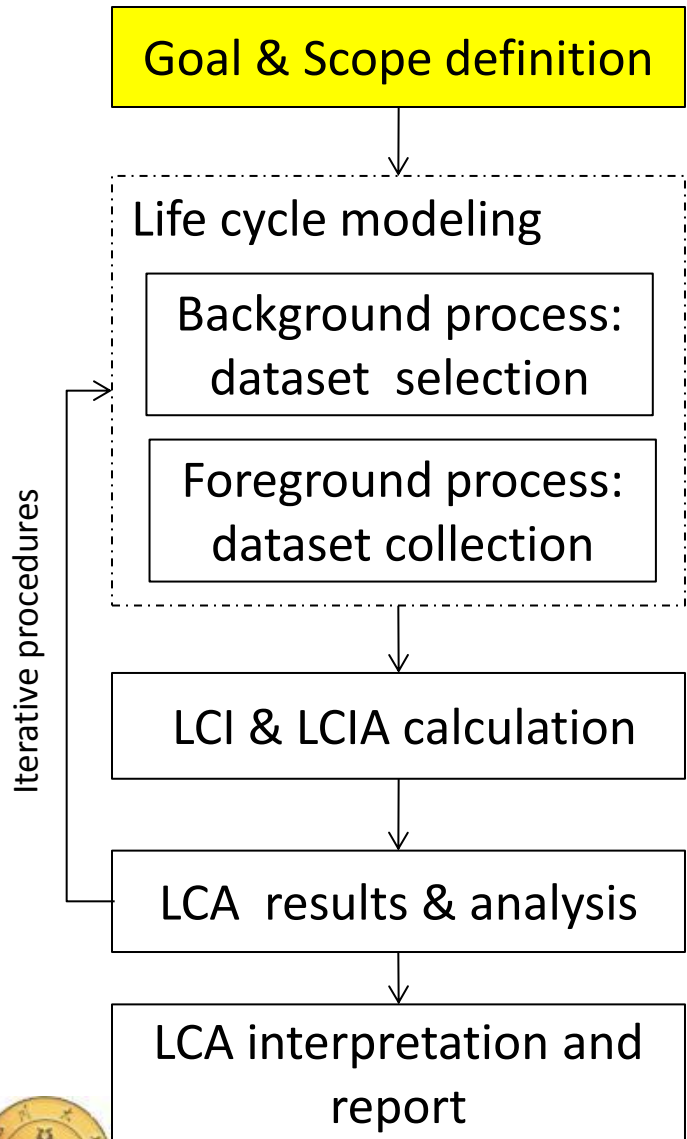


定量化、系统化评价各种产品/服务/技术所造成综合环境影响的**标准方法**

- **系统化**：涵盖多个生命周期阶段、涵盖各种资源环境问题
- **量化的**清单物质、影响类型、综合指标（如**产品碳足迹**、**节能减排**各种指标）
- **标准化**：ISO14040 及 GB24040 系列
- **普适性**：适用于各种产品和服务、各种技术/管理/政策决策过程的环境评价

LCA是**最佳的**评价方法框架（欧盟IPP）

Main steps of an LCA study



■ Goal definition: why LCA?

- What's the product?
- What questions to be answered?
- Who will be informed and for what purposes (intended applications)?

■ Scope definition

- System boundary:
 - Modeling rules, e.g. cut-off, allocation etc.
 - Therefore, which processes to be included or excluded
- Selected impact categories and LCIA methodologies
 - Which resources and emissions to be included or excluded
- Functional Unit & Reference Flow
-

Ref: ISO-LCA



Main steps of an LCA study

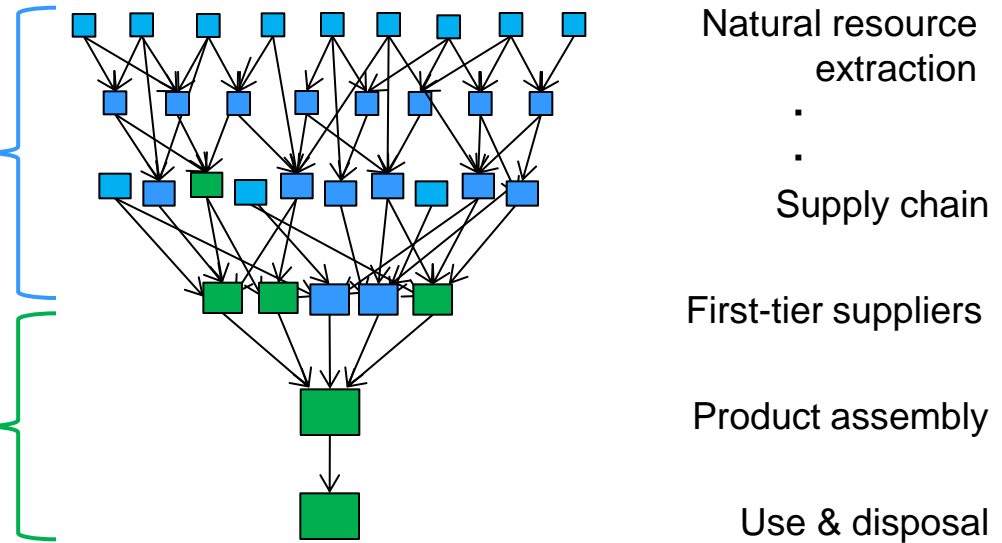
Goal & Scope definition

Life cycle modeling

Background process:
dataset selection

Foreground process:
dataset collection

■ Life cycle modeling and data collection: an alternating procedure 交替的过程



- **Modeling the upstream process tree:** keep tracing back how the material/energy was produced till the natural resource extraction (from cradle)
- **Modeling the downstream process tree:** keep tracing down how the product will be used and discarded (to grave)

Each **process** is quantified by a **dataset** (a set of inputs and outputs in proportion) derived from

- **Collecting data** from actual supply chain and statistics, and transforming the data into a dataset. (so-called foreground process and primary data)
- **or Selecting a dataset** from existing **databases** which represents a similar process. (so-called background process and secondary data)

Classification of process (terms)

Goal & Scope definition

Life cycle modeling

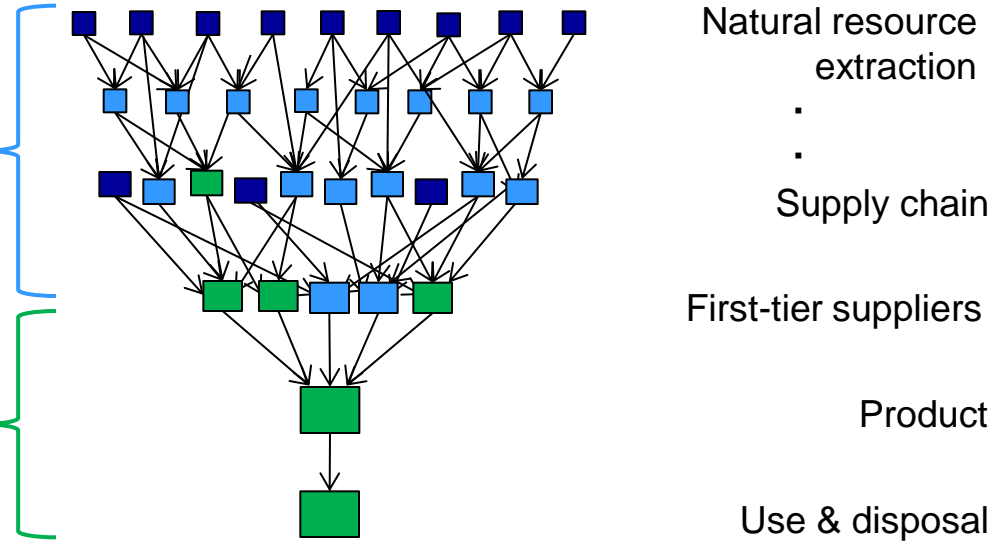
Background process:
dataset selection

Foreground process:
dataset collection

By different data sources

- **实景过程 Foreground process**
 - Collecting primary data from actual supply chain, normally with better data quality
- **背景过程 Background process**
 - Selecting secondary data from existing database for higher efficiency

■ Classification by data sources or by process boundary



By different process boundary

- **单元过程 Unit Process (gate-to-gate):** Man-made inputs remain in dataset. Further modeling the upstream process tree is needed.
- **汇总过程 Aggregated Process (cradle-to-gate):** All man-made inputs have been investigated and replaced by their resource use and emission. No more upstream modeling is needed.

LCA hierarchy and concepts

■ Product whole life cycle

● Product system

■ Process

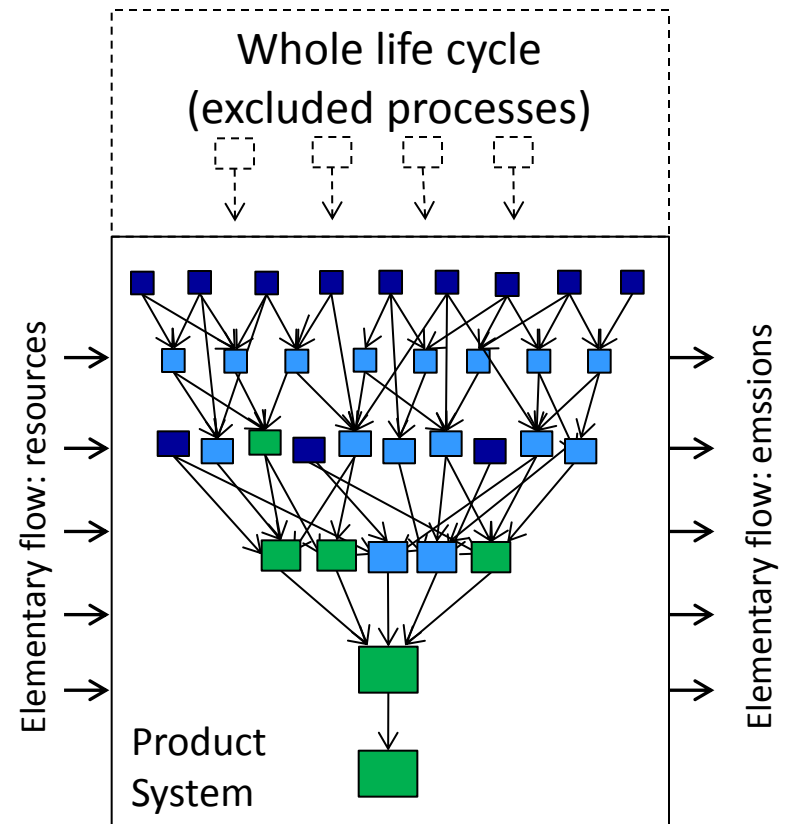
- By data sources: foreground process (primary data) ■ vs background process (secondary data from **databases**) ■ ■
- By process boundary: unit process (UP) ■ ■ vs aggregated process (AP) ■ ■

■ Dataset

- From process standpoint: Inputs (materials, energy, resource) vs Outputs (product, emissions, waste)
- From product system standpoint: Elementary flows (resource & emissions) vs intermediate flows (materials/energy, waste)

one-to-one
relationship

A set of inputs and outputs in proportion (linear assumption) which quantifies the activity of a process



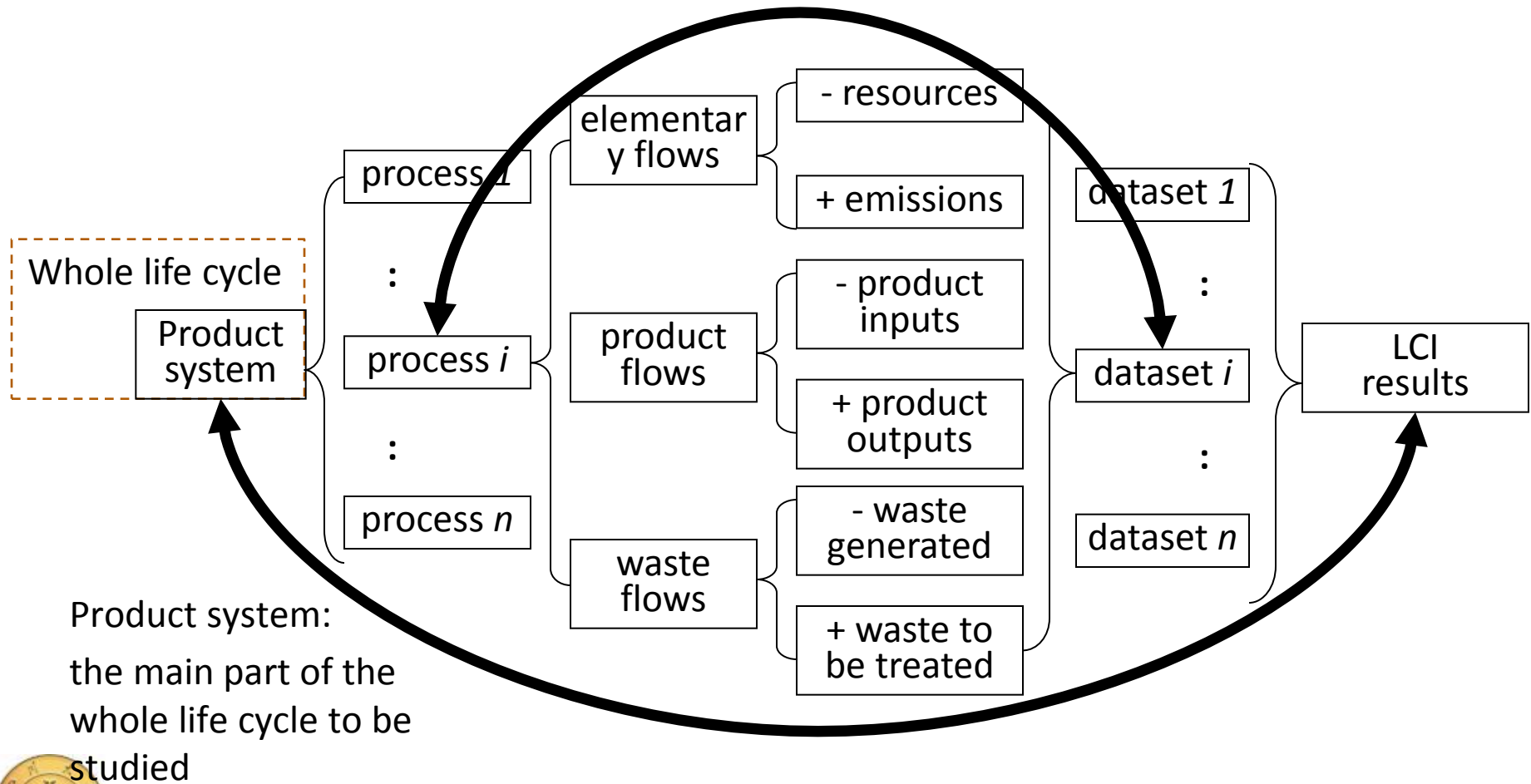
System Boundary:
between this product system
and the environment and
other product systems

Structure of life cycle inventory

Product system
consists of processes

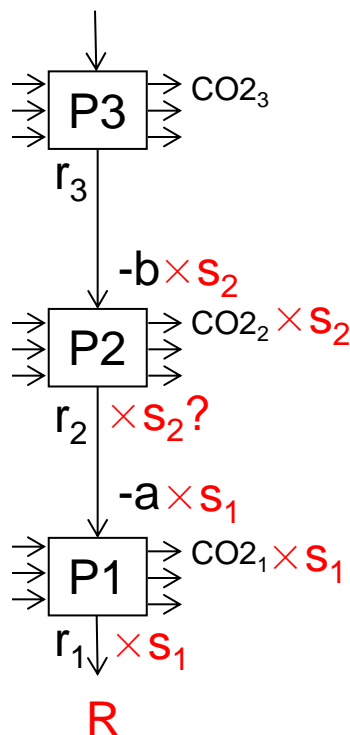
A dataset quantifies
the activity of a process

Dataset consists of
inputs & outputs



③ 生命周期清单计算

- 指定产品系统的总产品及数量，即**基准流R(Reference flow)**
- 调整各过程的比例系数s (scaling factor = 下游消耗量与上游产出之比)，使得上游产品产出 \equiv 下游原料投入



- 过程系数 $s_1 = R/r_1$, $s_2 = (R \cdot a)/(r_1 \cdot r_2)$, $s_3 = (R \cdot a \cdot b)/(r_1 \cdot r_2 \cdot r_3)$,
- 线性假设：可见任何LCA结果都与基准流R成正比。

- **LCI results** = 调整比例后各过程dataset之和，结果是

- 基准流R被保留下来，即系统总产出
- 中间产品被抵消：上游产品产出 \equiv 下游原料投入
- 资源投入和环境排放(elementary flow)被累加：

$$\text{如 } \text{CO2}_{\text{LC}} = s_1 \cdot \text{CO2}_1 + s_2 \cdot \text{CO2}_2 + s_3 \cdot \text{CO2}_3 + \dots$$

- **上述计算规则的实质**：中间产品被替换为生产这些中间产品的生命周期过程的资源消耗与环境排放

- 由此，生命周期各阶段的资源消耗与环境排放被累加在一起，资源和环境问题在各生命周期阶段的转移被显现出来。
- 由此，可评价原料消耗、节材或原材料替换的影响。
- 如果过程系数取值大于或小于上述规则确定的值，意味着.....？
- 如果LCI结果中留有原料消耗（系统外投入），意味着.....？



生命周期影响评价LCIA

① 特征化指标(Normalization)

■ 存在的问题

- 清单物质指标太多，而且并非我们关心的环境问题本身（如资源能源消耗、温室效应、酸化、富营养化、人体毒性、生态毒性等等）

■ LCIA方法开发：（研究自然过程，与具体产品无关）

方法开发步骤	示例一	示例二
1. 选择一种环境影响类型	全球暖化	酸化
2. 找出相关清单物质	各种温室气体（GHG）	各种酸性物质排放
3. 建立环境影响模型（因果链）	辐射升温模型（mid-point） /升温损害模型（end-point）	大气输运（mid-point）/沉 降/损害模型（end-point）
4. 选择一个效果参数	IPCC方法采用辐射增强效果 （mid-point）	CML方法采用电离出H ⁺ 数 量（mid-point）
5. 选择一种基准物质	以1kg CO ₂ 为基准物质	以1kg SO ₂ 为基准物质
6. 得出各清单物质的特征化因子（当量因子，折算因子）	各温室气体的当量值	各酸性物质的当量

■ LCA案例研究：引用LCIA方法得出的特征化因子，合并同类清单物质

- 特征化指标如 $GWP = cf_1 * CO_{2LC} + cf_2 * CH_{4LC} + cf_3 * N_2O_{LC} + cf_4 * CFC_{LC} + \dots$



生命周期影响评价LCIA

② 归一化指标(Normalization)

■ 存在的问题

➤ 当存在多个清单物质指标、或特征化指标时，哪个指标更重要？

■ 归一化指标：帮助判断主要影响类别/类型

归一化清单物质指标 = m_i^{LC} / N_i

归一化特征化指标 = $\sum m_i^{LC} \times cf_i / \sum N_i \times cf_i$

➤ 归一化基准值 N_i 通常选取全国年总发生量

➤ 归一化指标无量纲，可以帮助辨识产品的主要影响类型



生命周期影响评价LCIA

② 归一化指标(Normalization)

■ 归一化分析示例：

- 1) 产品LCA指标：假设生产1吨水泥的生命周期能耗是500kg标煤，生命周期SO₂排放是0.2kg。尽管这两个数字相差2500倍，但我们无法判断哪种影响类型是水泥生命周期的主要影响类型。
- 2) 归一化基准值：假设全国的能耗是50亿吨标煤，全国SO₂排放是2000万吨，两个数字相差250倍。
- 3) 产品LCA归一化指标：1吨水泥的能耗归一化是 10^{-10} （1的负10次方），SO₂是 10^{-11} ，所以生产1吨水泥的能耗占全国的比例高于SO₂的比例一个数量级。
 - 但是否由此可得出“水泥生命周期的能耗是比SO₂更重要的影响类型”？
 - 与某行业的重点污染物分析是什么关系？（在产品LCA模型中，什么代表着一个行业？）



生命周期影响评价LCIA

③ 综合指标

■ 存在的问题

- 当存在多个指标时，各指标常常相互冲突，使得LCA对比分析无明确结论 (inconclusive)。为进一步合并指标，最直接的方法是用权重因子衡量不同指标的“相对环境影响或损害”的大小。

■ 综合指标 = 多种指标加权求和

$$\text{overall score} = w_1 * \text{GWP} / N_{\text{GWP}} + w_2 * \text{AP} / N_{\text{AP}} + w_3 * \text{NP} / N_{\text{NP}} + \dots$$

- 权重因子w：常采用专家调查(panel method)，或调查普通受访者的环境损害支付意愿(willingness-to-pay)，或目标距离法(distance-to-target)，都是基于对环境损害主观判断的加权算法

■ 加权前为什么要归一化？

- 特征化因子和权重因子都是当量因子，用于合并指标。前者试图基于科学依据（但也很难完全基于科学依据），后者则直接依据主观价值判断。因此，ISO-LCA规定加权算法是可选的步骤，非必须。
- 节能减排综合指标ECER：依据政策目标的加权算法

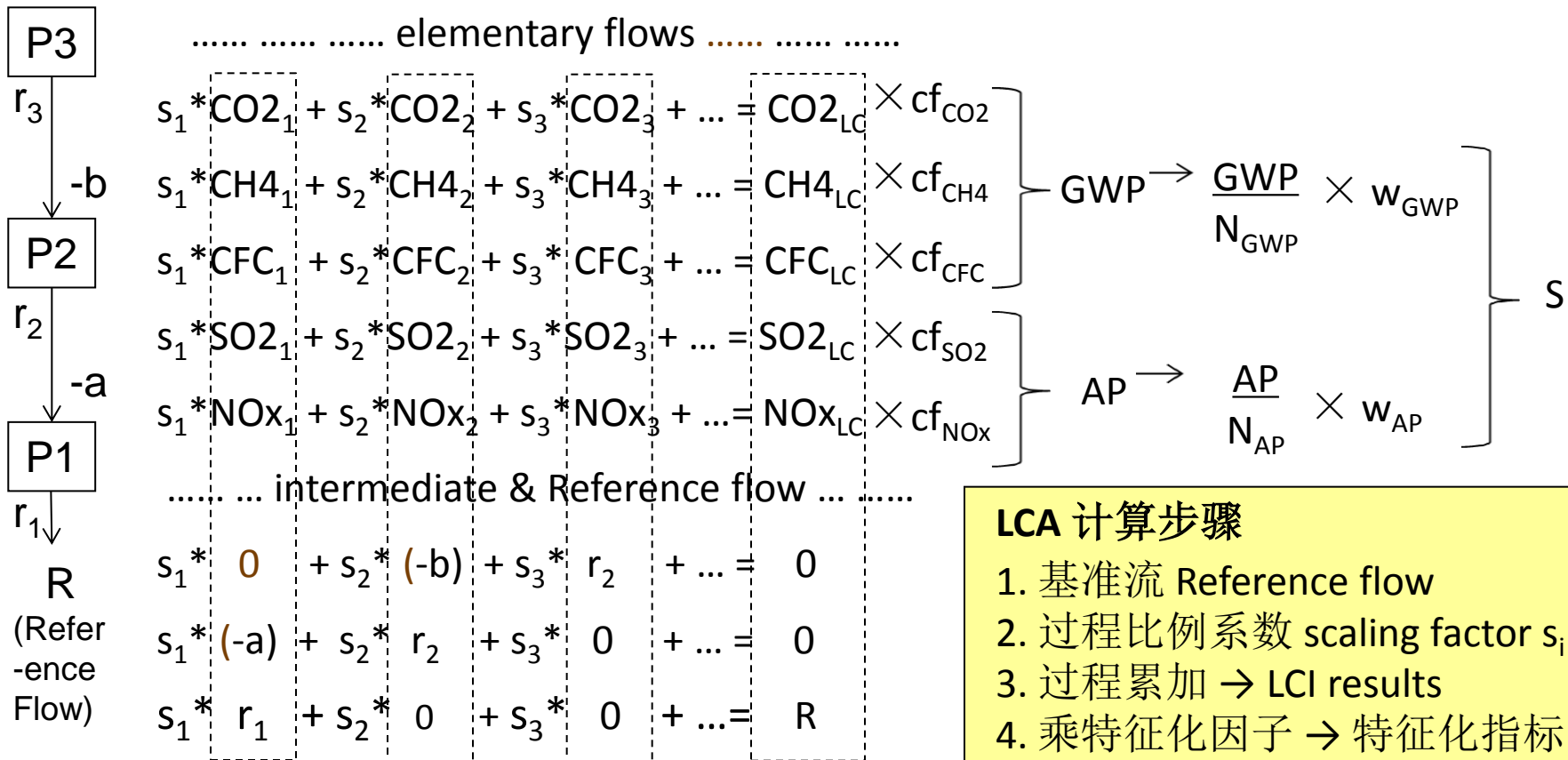


LCA计算步骤汇总

思考题：此计算过程的矩阵表示？

建模与
数据收
集完成
后

产品生命周期系统				LCA 计算结果					
过程 1	过程 2	过程 3	...	LCI 结 果	特征化 因子	特征化 指标	归一化 指标	权重因 子	综合指 标



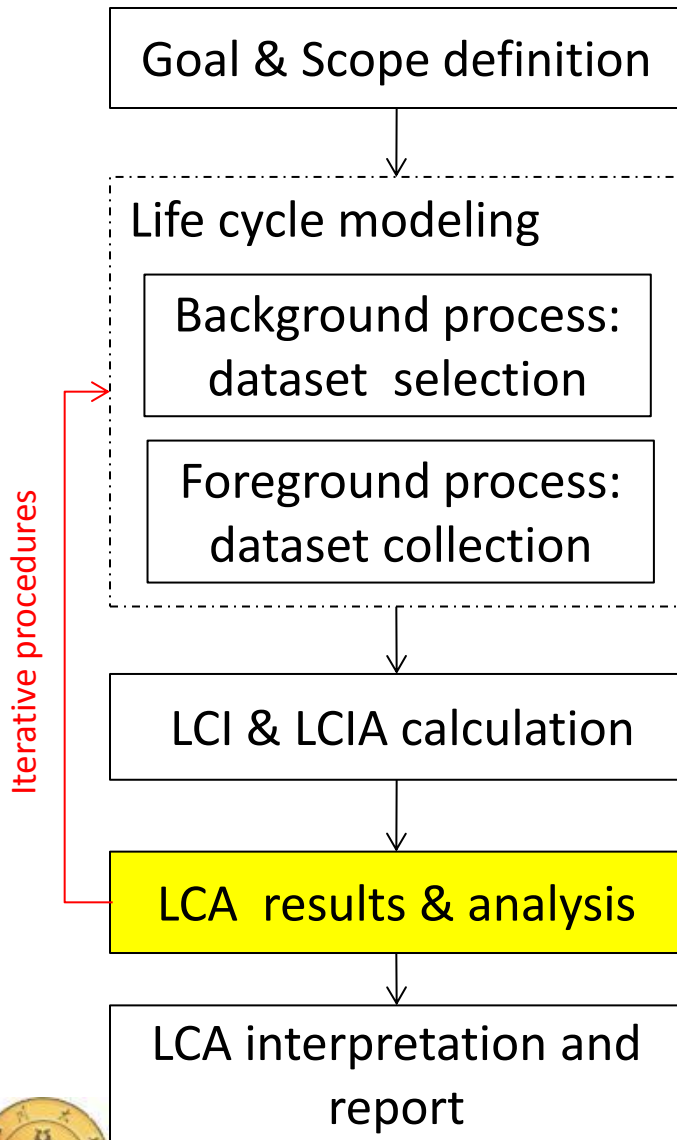
求解： $s_1 = R/r_1$; $s_2 = (R*a)/(r_1*r_2)$;
 $s_3 = (R*a*b)/(r_1*r_2*r_3)$; ...

LCA 计算步骤

1. 基准流 Reference flow
2. 过程比例系数 scaling factor s_i
3. 过程累加 \rightarrow LCI results
4. 乘特征化因子 \rightarrow 特征化指标
5. 除归一化基准值 \rightarrow 归一化指标
6. 乘权重因子 \rightarrow 综合指标



Main steps of an LCA study



Life cycle modeling and data collection: an iterative procedures for quality and efficient LCA work

- Build a 'complete' model with any approximate data available quickly
- Identify key inventory data (flows) with high sensitivity and high uncertainty

$$\text{Sensitivity}_{ij} = \frac{\Delta \text{Index}_i / \text{Index}_i}{\Delta \text{Inventory}_j / \text{Inventory}_j}$$

- Re-do key data collection by e.g.
 - 1) collecting primary data rather than secondary data, or
 - 2) selecting another existing dataset of better representativeness
- Repeat above two steps till LCA results fulfill the quality requirements as in goal & scope definition



生命周期解释 = 结果分析+结论+建议+检查

生命周期分析

1. 贡献分析

分析各指标的构成结构，从而辨识问题出现的主要环节和原因。

2. 敏感度分析

分析清单数据 $Inventory_j$ 对各指标 $Index_i$ 的灵敏度（=清单数据单位变化率引起的指标变化率），配合改进潜力估计，从而辨识最有效的改进点。

- 若 $Y = a \times b + c \times d \times e + f \times g$ ，推导各变量的敏感度，并总结规律
- 问题：贡献分析、敏感度分析、改进潜力分析之间的联系与区别？

3. 方案对比分析

如存在多种可选方案，可建立多个模型对比分析。

- 管理改进、技术改进、结构调整等具体措施，通常会引起多个变量的变化
- 基于情景分析，也可进行对比分析。
- 如果分析全行业改进潜力，还需考虑市场占有率。

4. 效益分析

LCA提供了最佳的产品环境评价指标，可与经济成本、社会效益等因素进行综合的环境效益分析



有关LCA概念的提示

- 范围定义：主要是包含的过程、包含的资源环境类型
- 建模：向上游追溯 Cradle-to-gate，向下游追溯 Cradle-to-gravel
- 输入：常见的资源投入？地下水、河水、自来水、海水、空气、太阳能是资源吗？生产资料与基础设施（可算可不算）；劳动力投入不算（无直接因果关系）；
- 输出：产品输出；待处理废物是输出吗？噪音可以算吗？
- 每个过程process的I/O构成一个dataset，通常基于单位产出，满足线性假设
- 数据来源：实景数据（原始数据收集），背景数据（从数据库选择）
- 过程累加得到LCI results。但存在两个问题：数据太多；并非直接关心的环境问题
- LCIA方法研究：类型-物质-模型-效果指标-基准物质-因子
- LCA案例引用上述因子，目的是汇总指标
- 特征化基于科学依据，权重基于主观判断
- 生命周期解释 = 结果分析+结论+建议+检查
- 产品碳足迹是LCA的一部分



作业

- 画出LCA的清单数据结构(第8页)、计算步骤(第14页)
- 思考题：贡献分析、敏感度分析、改进潜力分析的对比
- 思考题：以矩阵形式表达LCA计算与分析步骤
- 手工完成电力模型的LCA计算(见下页)，并与excel和eBalance中的示例进行对比



电力系统生命周期建模与分析练习

- 根据给出的5个过程数据集（练习用，非完整数据），构造生命周期模型，计算1kWh电力的LCI和LCIA
- 在Excel表格中完成计算与分析，准确理解各计算步骤
- 在eBalance中演练生命周期建模、计算与分析，并扩展系统模型。

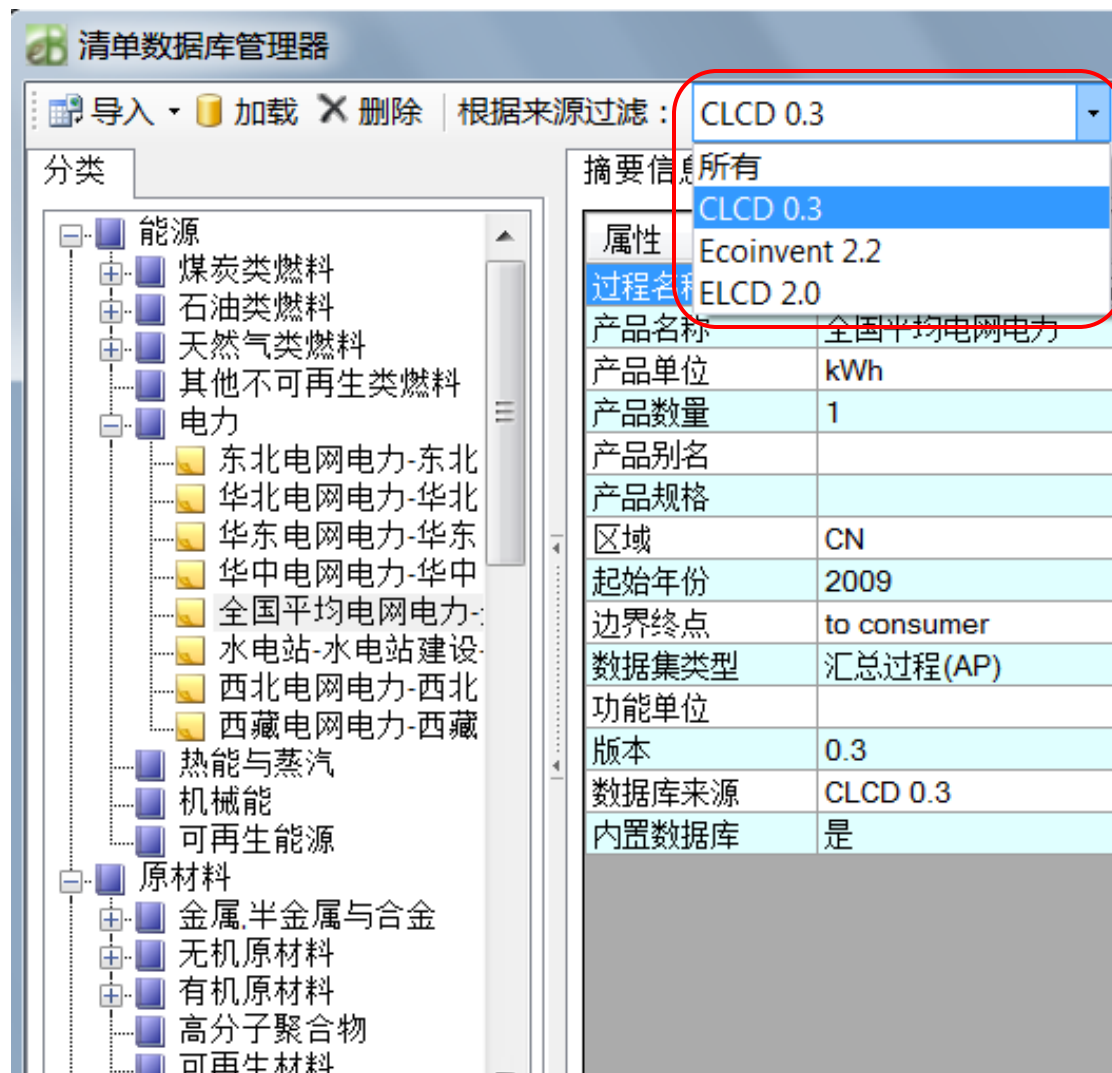
环境影响类型	物质	特征化因子	归一化基准值 kg	单位	权重因子
温室效应 (GWP100)	CO2	1.0	1.0E+13	kg CO2 eq/kg	1.0
	CH4	25.0			
酸化 (AP)	NOx	0.7	1.0E+10	kg SO2 eq/kg	1.5
	SO2	1.0			

过程	清单物质名称	PIO	单位	清单数据
电力混合	电网电力	P	kWh	1
	火电	I	kWh	-0.914
	水电	I	kWh	-0.161
火力发电	火电	P	kWh	1
	动力煤	I	kg	-0.5
	公路运输量	I	tkm	-0.1
	SO2	O	g	5.68
	NOx	O	g	2.87
	CO2	O	g	891
水力发电	水电	P	kWh	1
	CH4	O	g	0.286
煤炭开采	动力煤	P	kg	1
	硬煤资源	I	kg	1.09
	SO2	O	g	3
	CO2	O	g	330
	CH4	O	g	5.12
公路运输	公路运输量	P	tkm	1
	柴油	I	g	37.63
	SO2	O	g	0.09
	NOx	O	g	1.6
	CO2	O	g	118
	CH4	O	g	0.004

LCA软件(eBalance)与数据库

- 2010年9月19日正式发布
- 含数据库
 - CLCD
 - Ecoinvent
 - ELCD
- 国内首个、目前唯一可公开获得的LCA软件与数据库
- 为国内LCA研究提供支持
- 超过1000位用户下载

免费下载
www.itke.com.cn



eBalance下载

- 下载地址: <http://www.itke.com.cn>
- 激活码 (川大教学用) :
3f04aba0e0c691e5427ff79667b06b150268d8ac
 - 需要先安装微软.net运行环境
- eBalance各版本功能对照表

http://www.itke.com.cn/index.php?_m=mod_article&_a=article_content&article_id=113



补充说明：eBalance功能一览

1. 目标与范围定义：填写项目描述

2. 建模与数据收集

2.1 生命周期建模

- 构造流程图，或树形模型

2.2 实景过程清单数据收集

- 添加清单条目(物质名录管理器)
- 原始数据与算法记录
- 完整性和平衡检查，质量评估*

2.3 背景过程清单数据选择

- 从数据库管理器或清单文件导入
- CLCD,Ecoinvent,ELCD三个数据库

2.4 特殊的建模功能

- 多数据组
- 多功能系统的分配或替代
- 废弃物处置
- 过程标签区分国内外*
- 原料的运输*

3. 计算条件

- 单计算方案：设置一个基准流
- 多计算方案：多基准流、多数据组、多分配方法、不同标签
- 指标选择：从LCIA指标管理器选择特征化、归一化和加权综合指标（ECER）
- 敏感度计算

4. 结果与分析

- 单方案：即时图表的贡献分析、敏感度分析
- 多方案：自定义图表对比分析
- 参数分析
- 关键数据与识别分析

5. 结果输出：

- 输出到清单数据库、清单文件 (*.inv)、或excel文件
- LCA报告

