

LCA 数据库专题竞赛

参赛报告

参赛小组信息：

LCA 数据集名称：基于太阳能-生物质耦合区域供热系统为建筑供应 1000 GJ 热量

小组成员：张丛光，肖胜权，成嘉，孙嘉明，韩建聪

指导老师：邱凌、穆瑞

大学/学院：西北农林科技大学/厦门大学

一、 技术代表性分类和目标代表性定义

本小组选择【建筑供热（1000GJ）】作为 LCA 研究的目标产品。

通过查阅资料，对“建筑供热（1000GJ）”的技术代表性进行了分类分析，并最终明确定义了本研究的目标代表性。

1、 建筑供热的技术代表性分类分析

(1) 技术代表性的基本分类与单元过程划分

表 1 建筑供热的技术代表性基本分类与单元过程划分

分类方法	分类结果与解释
1、按建筑与热源的距离分类	<p>两种建筑供热技术：</p> <ul style="list-style-type: none">• 分布式供热系统：将热源和散热设备合并成一个整体，分散设置在各个房间里的供热系统，包括火炉采暖、天然气供暖及电热采暖，如家用火炉、天然气壁挂炉、电暖器、电热膜等；• 集中供热系统：由远离采暖房间的热源、供热管道和房间内的散热设备等三部分组成的工程设施，其中把热量从热源输送到散热设备的物质叫热媒，热媒主要有热水、蒸汽和热空气。 <p>本表以下分类均基于集中供热系统工艺技术</p>
2、按能量来源种类分类	<p>按主要能量来源种类可分为：</p> <ul style="list-style-type: none">• 单一能源建筑供热系统和复合能源建筑供热系统，单一能源建筑供热系统仅使用一种能源，例如煤炭供热、天然气供热和燃煤供热等；• 复合能源建筑供热系统包括太阳能和电能联合供热，煤炭和太阳能联合供热以及太阳能和地热能联合供热等。 <p>本表以下分类均基于复合能源建筑供热系统（太阳能-生物质能）</p>

3、在数据调查范围中划分单元过程	建筑供热通常从供热系统建设开始到供热，再到系统废弃为止。从各种资料中分生产过程的数据可得性考虑，LCA模型中可以划分3个单元过程：系统建设、系统运行、系统废弃。
------------------	--

(2) 单元过程的技术代表性细分

表2 建筑供热（1000GJ）单元过程的技术代表性细分

单元过程 技术 代表性细分	系统建设	系统运行	系统废弃
(1) 产品规格型号	未区分	1000 GJ 热量 (混合能源), 未区分	未区分
(2) 原辅料类型	混凝土种类: • C30 • C50 • C15	混合原料种类: • 猪粪 • 牛粪 • 玉米秸秆	取决于需要回收处理的废弃原材料类型, 未区分
(3) 能耗类型	主要使用电力、煤炭和柴油, 未区分	主要使用电力和柴油, 未区分	柴油为主, 未区分
(4) 工艺设备类型	厌氧反应器种类: • CADT • CSTR • UBF • UASB 反射镜材料种类: • AI • Be • ULE	农用拖拉机、三轮车和普通中型货车为主, 未区分	未区分
(5) 生产规模类型	未区分	未区分	未区分
(6) 辅助工艺设备类型	未区分	辅助加热设备种类: • 容积式水加热器 • 导流型容积式水加热器 • 半容积式水加热器 • 板式换热器 • 半即热式水加热器	普通垃圾填埋场, 玻璃、钢铁回收, 未区分

2、目标代表性定义

(1) 选定技术代表性

从小组资料调研中可以发现，以沼气和太阳能作为主要能源的集中供热技术，尽管市场份额还不大，但具有较大的开发潜力和越来越大的市场普及率，是实现我国可再生能源发展战略的重要途径。因此建筑供热数据集开发的首选基本技术代表性。

除上述基本技术代表性外，主要功能模块的构成也是影响 LCA 结果的重要因素（因为系统由沼气子系统、太阳能子系统和附属工程组成，它们决定了系统的能源输出结构，尤其是太阳能供热占比尽可能高但同时要考虑太阳能模块的建设对环境的影响），因此各功能模块的构成对 LCA 结果有重要影响，需要细分。

考虑到系统的主要功能和实现这些功能的具体模块，本报告将系统划分了厌氧反应器、PTC 太阳能集热器、辅助加热设备等主要子模块。

厌氧反应器由密闭反应器、搅拌系统、加热系统以及固液气三相分离系统组成，其经济成本、负荷效率、处理效率、适用范围是选择的标准，按照资料给出了各种市售典型的厌氧反应器类型，得到了 LCA 技术代表性划分如表 3 所示。

表 3 典型厌氧反应器规格分类表

序号	类型	经济成本	负荷率	处理效率	适用范围
1	（普通厌氧消化池）CADT	小	强	低	高浓度、高悬浮物的有机废水
2	完全混合厌氧反应器（CSTR）	小	弱	低	高 SS 含量的污泥处理、畜禽粪便的处理和沼气生产
3	厌氧滤器（AF）	大	强	高	SS 含量较低的有机废水
4	厌氧流化床反应器（AFBR）	大	强	高	SS 含量较低的有机废水
5	上流式厌氧污泥床（UASB）	大	强	高	SS 含量低、高浓度的有机废水
6	厌氧膨胀颗粒床反应器（EGSB）	大	强	高	SS 含量较少、浓度相对较低的有机废水
7	推流式反应器（PFR）	小	弱	低	高 SS 废水的处理，尤其适用于牛粪的厌氧消化
8	上流式污泥床-过滤器（UBF）	低	强	高	SS 含量较高、处理高浓度有机废水，质量浓度可达 10g/L
9	升流式厌氧固体反应器（USR）	小	较强	高	含固量很高的有机废水，物料含固率（Ts）可达到 12%

PTC 太阳能集热器的性能与反射镜的材料有很大的关系，反射镜材料越好，其转化效率越高，而密度、热导率、比热容、热应力是反射镜所必须考虑的物理性能指标，根据相关文献给出了几种常见反射镜材料的性能，得到了 LCA 技术代表性划分如表 4。

表 4 几种常见反射镜材料性能的比较

反射镜材料	密度 ρ (kg/m^3)	热导率 λ ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	比热容 C_p ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	热应力 $K^{\circ}(\alpha E)$ $^{-1}$ $\text{NW}\cdot\text{mN}^{-1}$
Al	2.71	156	879	101
Be	1.85	216	1925	63
材料*	2.95	172	670	194
ULE	2.21	1.31	766	1938

注：*为 CERAFO RM SiC

此外，换热器设备被广泛运用在太阳能热水系统中，其传热系数一直是参考的重要因素，按照资料给出了各种市售典型的换热器，得到了 LCA 技术代表性划分如表 5。

表 5 常见辅助加热设备设备

类型	传热系数 K $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$
容积式水加热器	380~410
导流型容积式水加热器	680~1500
半容积式水加热器	810~2500
半即热式水加热器	1600~2100
板式换热器	2000~3000

(2) 选定目标代表性

本 LCA 研究的目标代表性定义为：以 CSTR、UBF 为主的沼气系统和 PTC 太阳能集热系统作为主要能源为建筑区域供热（1000 GJ），且沼气子系统、太阳能子系统的各个主要功能模块能够实现这些功能。数据应代表中国 2014 基于试验或典型方案的测算水平。

☀️太阳能-生物质耦合区		目标与范围定义	生命周期模型	LCA结果	评审
模型名称：太阳能-生物质耦合区域供热系统(Item(s), 2014), 方案LCA-仅代表特定方案研究（基于设计方案/试验和背景数据库的测算），中国, 2014					
研究目标					
*产品名称：	太阳能-生物质耦合区域供热系统		产品类别：	集成供热系统	
规格型号：	2014		形状与形态：	单件/台/套	
*研究类型：	方案LCA-基于试验或典型方案的测算（用于新技术/典型离散产品或情景分析）		功能单位与基准流：	系统产出1000 GJ能量	
研究范围					
*系统边界：	生命周期-生产阶段（从资源开采到产品出厂）		实景过程范围：	系统建设、系统运行和系统废弃	
产地：	中国		*基准年：	2014	
工艺设备：	太阳能-生物质（沼气）耦合区域供热系统		生产规模：	大型（日产240立方米沼气）	
主要原料：	混凝土、钢材、防水材料、PPR、PE等管材、畜禽粪便		主要能耗：	电力、柴油	
取舍规则：	<ol style="list-style-type: none"> 普通物料重量<1%产品重量时，以及含稀贵或高纯成分的物料重量<0.1%产品重量时，可忽略该物料的上游生产数据；总共忽略的物料重量不超过5%； 低价值废物作为原料，如粉煤灰、矿渣、秸秆、生活垃圾等，可忽略其上游生产数据； 大多数情况下，生产设备、厂房、生活设施等可以忽略； 在选定环境影响类型范围内的已知排放数据不应忽略。 		数据质量评估：	CLCD方法	
			项目信息：	<ol style="list-style-type: none"> 项目名称 委托方 委托目的 潜在应用 	

图 1 LCA 模型的目标代表性定义（eFootprint 截图）

另外，通过上述分析还可以注意到：除上述太阳能与生物质能耦合的能源技术代表性之外，还有一些技术因素会导致 LCA 结果显著变化，例如采用复杂性劣质钢架代替轻型钢架、用甲缩醛、掺水等汽油发动运输车辆等，其 LCA 结果将有显著不同，应该单独收集数据，开发独立的 LCA 数据集，但不在本次的 LCA 研究范围之内。

二、 LCA 数据集文档

数据集名称：基于太阳能-生物质耦合区域供热系统为建筑供应 1000 GJ 热量-中国-2014

1、系统功能与系统边界

系统功能与基准流：建筑供热，1000 GJ

LCA 研究类型：方案 LCA-基于试验或典型方案的测算

产地：中国

基准年：2014年

系统边界：从各种主要资源开采到热能产生为止（“从摇篮到大门”）

• **实景过程**：划分为系统建设、系统运行和系统废弃三个单元过程，包含主要生产工序、末端治理和原料运输（见图2）。

• **背景过程**：采用背景数据库，追溯了各种原料的上游生产过程直到资源开采为止。所涉及到的背景数据如下：全国平均火电-中国-2013；碳钢-中国-2014；焊接直缝钢管(碳钢)-中国-2013；平板玻璃-中国-2013；C30混凝土-中国-2013；热轧钢筋(碳钢)-中国-2013；炼钢生铁-中国-2013；热镀锌板卷(碳钢)-中国-2013；丙烯酸-中国-2013；聚氯乙烯-中国-2013；聚乙烯（高密度）-中国-2013；醋酸乙烯-中国-2013；铜精矿-中国-2013；银-中国-2013；硼砂-中国-2013；硅石-中国-2013；有机肥/农家肥-中国-2013；硅石-中国-2013；货车运输（2t/8t）-中国-2013等。

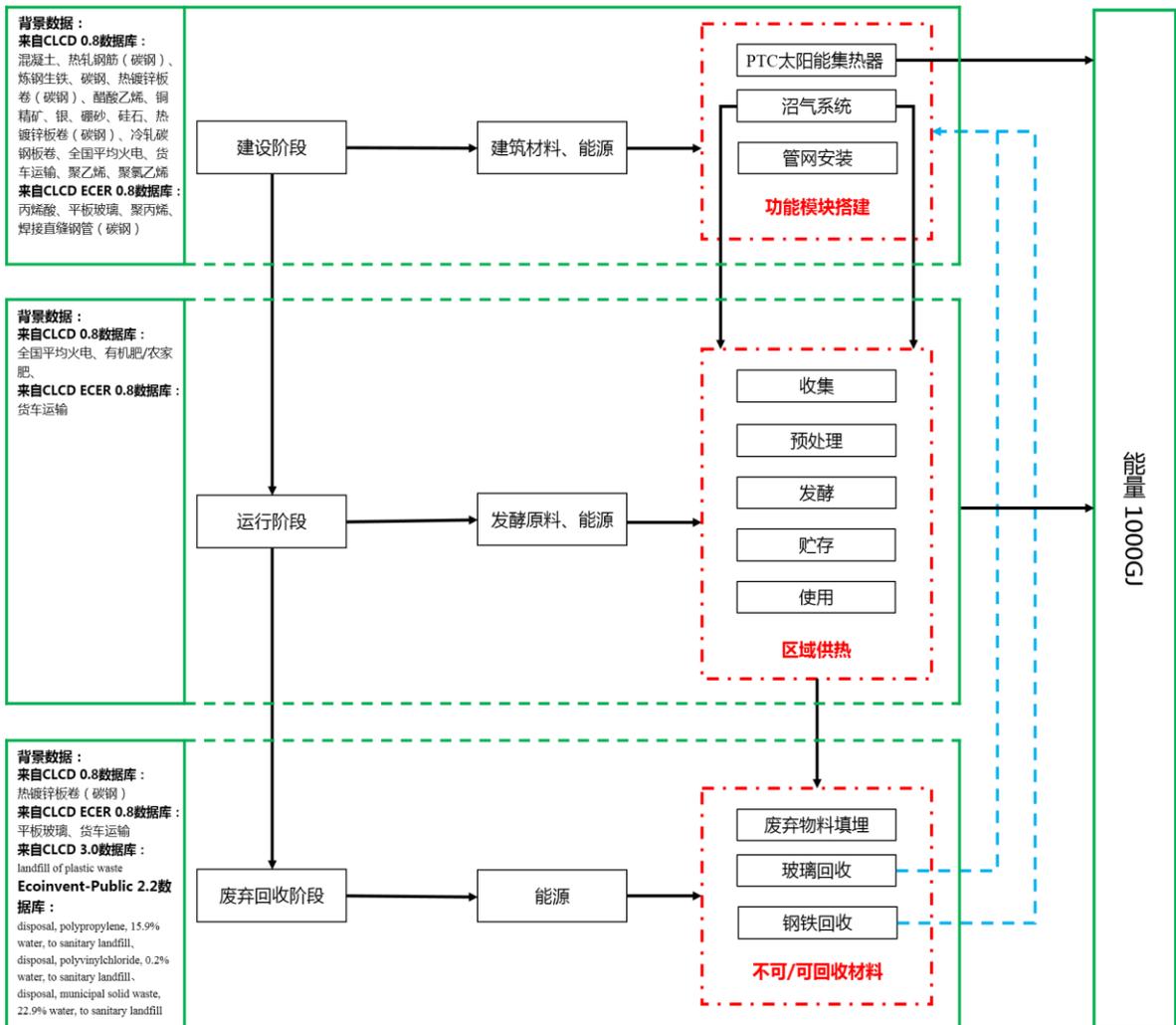


图2 太阳能-生物质耦合区域供热系统模型

2、实景过程数据代表性

产品种类与规格：建筑供热（1000 GJ，混合能源系统）

主要技术代表性：系统建设、系统运行和系统废弃、常规原料（混凝土、钢筋、PPR/PE/DN 等管材等）、常规能耗（柴油、煤炭、电力）

表 6 建筑供热系统实景过程数据代表性

过程名称	工艺设备与规模	主要消耗	主要排放
系统建设	露天开采	电力、煤炭、柴油	CO ₂ 、颗粒物、废气
系统运行	CSTR 与 UBF 双反应器，PTC 集热器	畜禽粪便、电力、柴油	CO ₂ 、废气、废水
系统废弃	材料回收和填埋	柴油	颗粒物、废气

主要数据来源：太阳能行业研究论文、沼气工程行业研究论文、工业源产排污系数手册（2010 修订）中册、能源工业大气污染物排放标准（GB4915-2013）、企业生产数据。模型包含了行业排放标准里所有的排放，并补充了来自文献资料统计的排放数据。

实景过程工艺流程图：

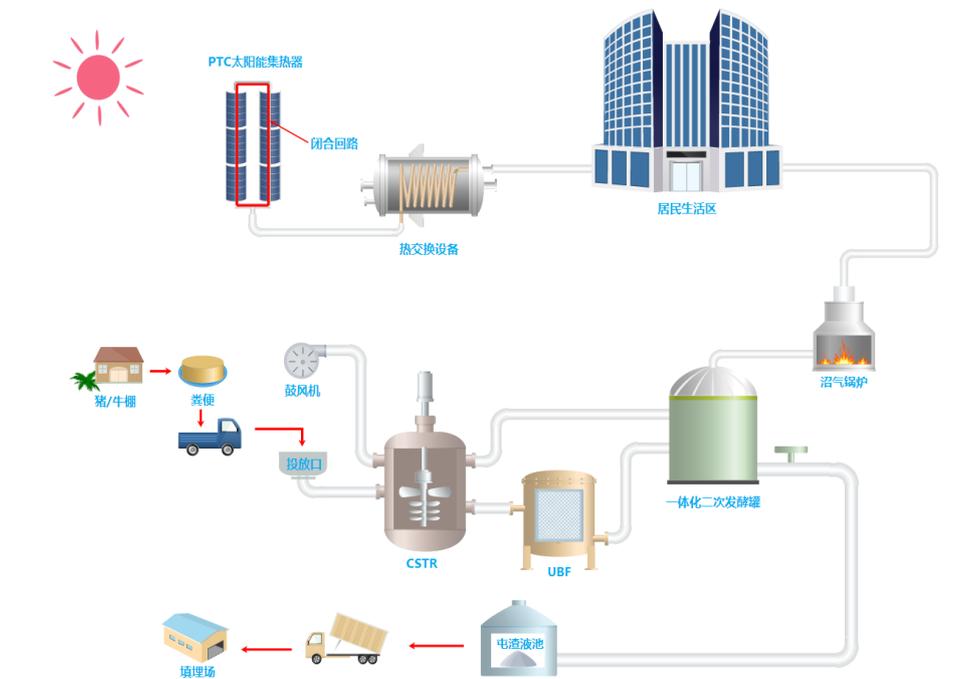


图 3 太阳能-生物质耦合区域供热系统工艺流程图

3、建模方法

副产品：无副产品，废弃发酵物料直接填埋

再生循环：无再生原料消耗，无废弃再生过程

取舍规则：符合 CLCD 取舍规则。EA 防水剂的质量小于建材总质量的 1%，因此视为零环境影响的原料，不追溯上游过程。

缺失过程：无

背景过程数据库：

表 7 建筑供热系统实景过程数据代表性

原料	数据来源
聚氯乙烯	CLCD-China 0.8.1
热镀锌钢管	CLCD-China 0.8.1
全国平均火电	CLCD-China 0.8.1
废料运输	CLCD-China 0.8.1
聚乙烯（高密度）	CLCD-China 0.8.1
焊接直缝钢管(碳钢)	CLCD-China-ECER 0.8.1
聚丙烯	CLCD-China-ECER 0.8.1
有机肥/农家肥	CLCD-China-ECER 0.8.1
货车运输	CLCD-China-ECER 0.8.1
平板玻璃	CLCD-China-ECER 0.8.1

软件工具：采用亿科 eFootprint 系统，在线完成全部 LCA 工作，包括建模、计算分析、数据质量评估、LCA 结果发布。

4、LCA 结果分析

● 过程累积贡献分析

以气候变化(Climate Change, GWP)，初级能源消耗(Primary energy demand, PED)，酸化(Acidification, AP)，富营养化潜值(eutrophication, EP)，臭氧层消耗(Ozone depletion, ODP)，光化学臭氧合(Photochemical ozone formation, POFP)六个指标为例。过程累积贡献是指该过程直接贡献及其所有上游过程的贡献（即原料消耗所贡献）的累加值。由于过程通常是包含多条清单数据，所以过程贡献分析其实是多项清单数据灵敏度的累积。

表 8 太阳能-生物质耦合区域供热系统 LCA 结果

过程名称	GWP (kg CO2 eq)	PED (MJ)	AP (kg SO2 eq)	EP (kg PO43-eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	POFP (kg NMVOC eq)
系统整体	1.739E+4	2.164E+5	1.699	5.923E+4	121.864	9.034E+3
系统建设	2.409E+3	2.618E+4	1.682	1.048E+4	8.884	0.906
CSTR	202.324	2.279E+3	0.002	1.006E+3	0.698	0.077
UBF	205.384	2.324E+3	0.003	1.028E+3	0.71	0.078
一体化二次发酵罐	561.474	6.006E+3	0.003	2.572E+3	1.882	0.207
调节池	90.223	842.223	2.980E-4	326.907	0.277	0.033
太阳能	985.569	1.014E+4	1.671	4.299E+3	3.46	0.385
附属工程	363.533	4.587E+3	0.002	1.252E+3	1.856	0.126
系统运行	1.410E+4	1.788E+5	0.015	4.402E+4	108.965	9.033E+3
电	1.245E+4	1.542E+5	0.007	3.925E+4	65.678	4.282
柴油	1.623E+3	2.437E+4	0.009	3.162E+3	15.212	2.506
畜禽粪便	18.779	248.576	1.188E-5	1.613E+3	28.075	5.215
系统废弃	884.917	1.141E+4	0.002	4.726E+3	4.015	0.484
废弃管材填埋	33.472	385.749	1.311E-4	321.855	0.519	0.049
废料运输	769.261	9.460E+3	0.001	4.196E+3	2.666	0.263

在 eFootprint 平台中，由图 4 与表 8 所示的过程累积贡献分析结果，可以看到，系统在各个阶段的整体环境影响从大到小依次为运行阶段，建设阶段，废弃阶段，所有的评价指标均呈现出运行阶段 > 建设阶段 > 废弃回收阶段的规律，例如 GWP，三个阶段分别占总排放的 81.06%，13.85% 与 5.09%。这表明，系统为建筑物每提供 1000GJ 的热量，所造成的环境排放主要集中在运行阶段。

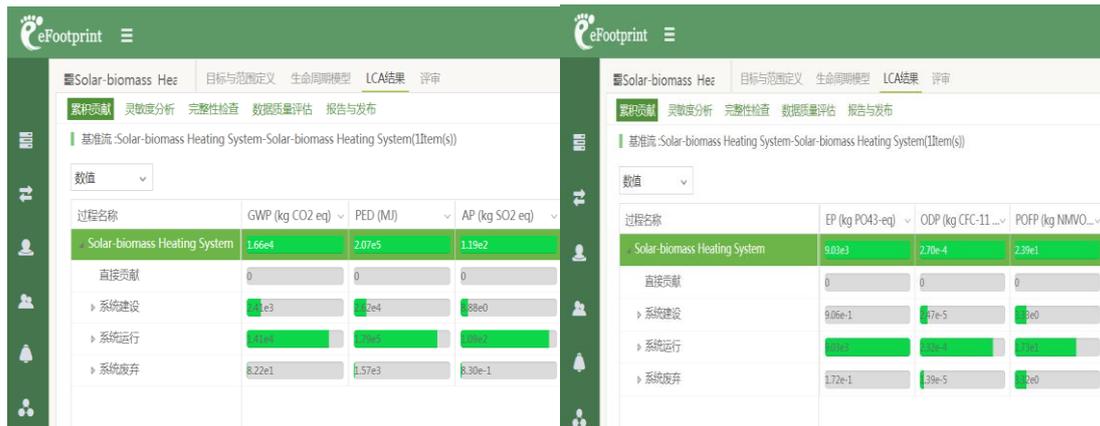


图 4 系统在不同阶段的累计贡献结果对比

根据图 5 的结果可以发现，在系统整个生命周期过程中，由能源资源利用造成的全球气候变暖影响中，电力和柴油是最主要的两个排放来源，其中电力所引起的全球气候变暖潜值占总 GWP 潜值的 71.62%，因此在未来的系统建设过程中，如果能对电力投入加以有效管理和控制，提高发电形式的清洁性，将有效减缓整个系统的环境影响。

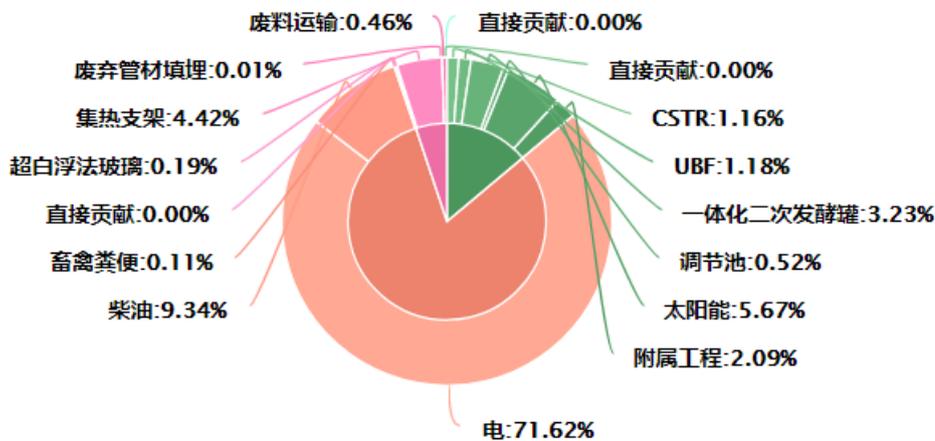


图 5 系统生命周期内各原材料与能耗的 GWP 影响占比

● 单个过程的贡献分析

以系统建设过程和全球气候变暖、初级能源消耗两个指标的柱状图和饼图为例。本研究中的太阳能-生物质耦合区域供热系统在设计之处，按照各自的功能分成六个模块，分别是 CSTR，UBF，调节池，一体化二次发酵罐，太阳能，附属工程。为了在未来的系统建设过程中，避免不必要的环境排放，优化系统功能结构，现将系统建设过程单独提取分析结果。

从下图可以看到，六个主要的功能模块中，太阳能的全球变暖影响潜势最强，占总排放的 40.92%，其次为一体化二次发酵罐（23.31%）、厌氧反应器（16.93%）以及附属工程（15.09%）。而太阳能环境排放的主要决

定因素是其集热器面积，因此在设计太阳能-生物质耦合区域供热系统时，尽管应尽可能提高太阳能这种可再生能源的占比，但同时也应考虑其集热器面积的增大所导致的环境问题。

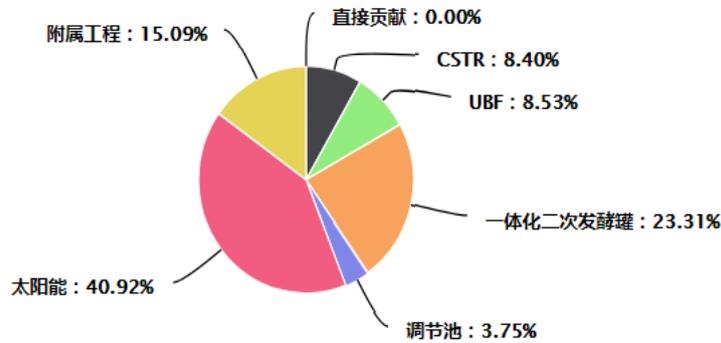


图 6 建设阶段系统各功能模块的 GWP 影响占比

图 7 也表明太阳能依然是影响最大的部分，PED 消耗量高达 10000 MJ，其次为一体化二次发酵罐和厌氧反应器模块，分别占总消耗的 22.93%和 8.7%。

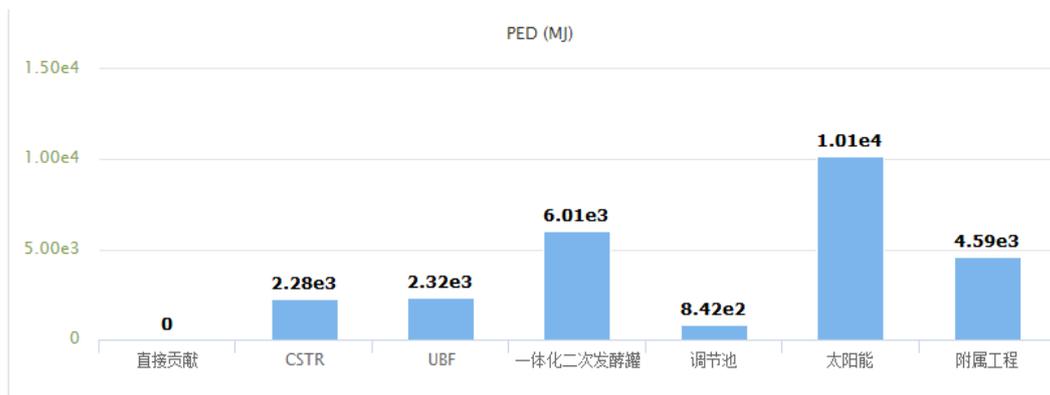


图 7 建设阶段各功能模块的初级能源消耗

● 清单数据灵敏度分析

实景过程的各项消耗与排放对 LCA 结果的贡献率（即灵敏度），由此排序可以识别重要的消耗排放。清单数据灵敏度是指清单数据单位变化率引起的相应指标变化率。通过分析清单数据对各指标的灵敏度，并配合改进潜力评估，从而辨识最有效的改进点。表中罗列了 GWP (kg CO₂ eq) 灵敏度 > 0.5% 的清单数据。在以 1000 GJ 热量的功能单位下，太阳能-生物质耦合区域供热系统的清单数据灵敏度分析结果如表 9 所示：

表 9 清单数据的灵敏度分析结果

清单名称	所属过程	上游数据类型	GWP (kg CO ₂ eq)
混凝土	CSTR	背景 AP	0.54%
系统运行	太阳能-生物质耦合区域供热系统	实景 UP	81.0%
系统建设	太阳能-生物质耦合区域供热系统	实景 UP	13.8%
系统废弃回收	太阳能-生物质耦合区域供热系统	实景 UP	5.08%
混凝土	UBF	背景 AP	0.54%
电	附属工程	背景 AP	1.80%
桩	太阳能	实景 UP	5.30%
集热支架	系统废弃回收	背景 AP	4.42%
太阳能	系统建设	实景 UP	5.66%
一体化二次发酵罐	系统建设	实景 UP	3.22%
附属工程	系统建设	实景 UP	2.09%
UBF	系统建设	实景 UP	1.18%
CSTR	系统建设	实景 UP	1.16%
调节池	系统建设	实景 UP	0.51%
电	系统运行	背景 AP	71.6%
柴油	系统运行	背景 AP	9.33%
混凝土	一体化二次发酵罐	背景 AP	1.74%
钢筋	一体化二次发酵罐	背景 AP	1.32%
混凝土	桩	背景 AP	3.24%
钢板	桩	背景 AP	1.82%

5、CLCD 数据质量评估

- **识别重要数据：**eFootprint 计算每一项消耗或排放对各项 LCA 指标的灵敏度，然后按其最大的灵敏度排序。



图 8 供热系统 LCA 指标的灵敏度排序

- **不确定度评估：**eF/CLCD 系统采用谱系矩阵评估主要消耗和排放（灵敏度>1%）的不确定度，以及主要消耗连接的背景数据的匹配不确定度。本系统的不确定度评估结果如图 8 所示。



图 9 系统清单数据不确定性评估结果

- **LCA 结果的不确定度：**最终得到每项 LCA 指标结果的不确定度，如下图。用户可以根据不确定度结果，补充收集数据，迭代改进。

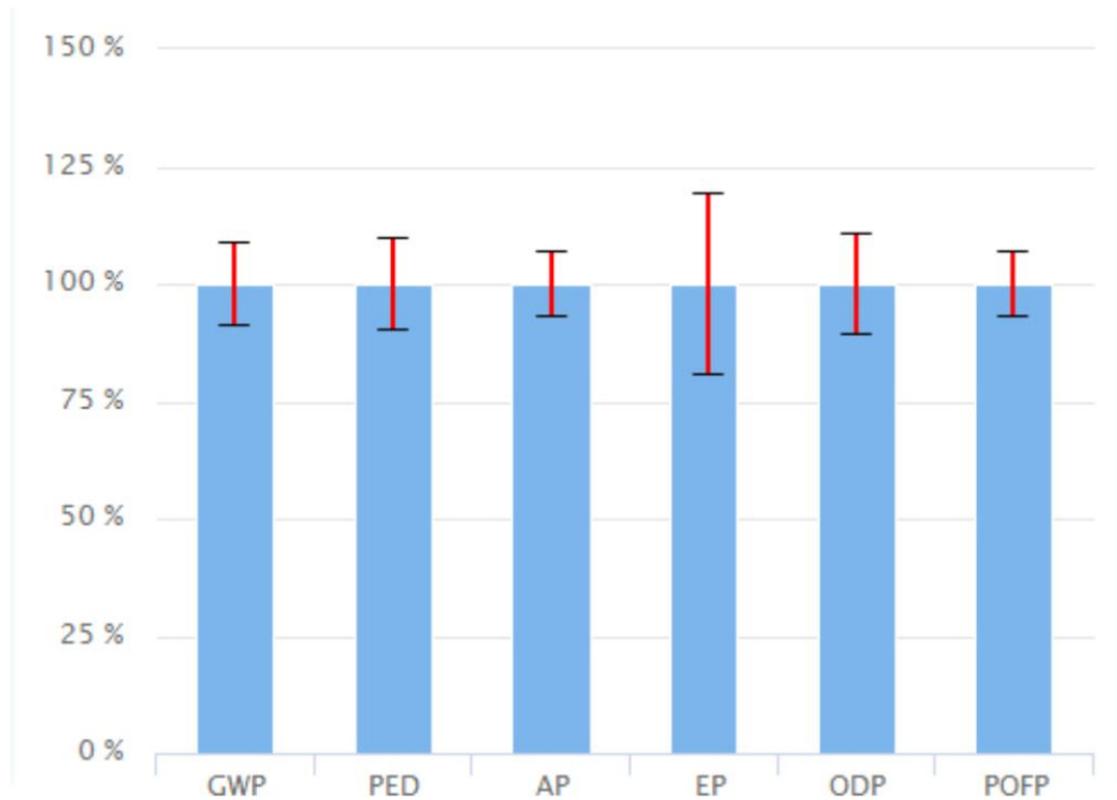


图 10 供热系统 LCA 的不确定度结果 (百分比)

由此可见，富营养化在太阳能-生物质耦合区域供热系统的 LCA 不确定度结果中是最高的一项，占总不确定度的 19.34%，其 95%置信区间为 [7.29E+3, 1.08E+4]，其次是臭氧层消耗（占比 10.87%）以及初级能源消耗（占比 9.56%）。

表 10 供热系统 LCA 数据质量评估结果

指标名称	缩写 (单位)	LCA 结果	结果不确定度	结果上下限 (95%置信区间)
富营养化潜值	EP (kg PO ₄ ³⁻ eq)	9.03E+3	±19.34%	[7.29E+3, 1.08E+4]
初级能源消耗	PED (MJ)	2.16E+5	±9.56%	[1.96E+5, 2.37E+5]
酸化	AP (kg SO ₂ eq)	1.22E+2	±6.83%	[1.14E+2, 1.30E+2]
臭氧层消耗	ODP (kg CFC-11 eq)	2.79E-4	±10.87%	[2.49E-4, 3.09E-4]
气候变化	GWP (kg CO ₂ eq)	1.74E+4	±8.88%	[1.58E+4, 1.89E+4]
光化学臭氧合成	POFP (kg NMVOC eq)	2.52E+1	±6.71%	[2.35E+1, 2.69E+1]

6、数据集适用范围

- 本研究选取的中国某西部太阳能-生物质耦合区域供热系统（2014年）原料消耗均来自中国市场，因此绝大多数情况下建设、运行等阶段所使用的原料均可采用本数据集所建立的 LCA 模型。
- 但由于各材料的 LCA 模型结果受成分组成及配比、工艺类型、用途等影响；且研究仅代表某一特殊供热系统供应热能，不一定具备全国范围的普遍适用性；研究数据的选择受到地域、时间等问题的影响。本数据集文档仅作为参考数据，不具有代表性。
- 本研究系统模型建设过程中，为了突出主要结构及过程的环境影响评价，对系统模型作出一定假设（如在运行及废弃阶段假设水资源处于物质守恒状态），并忽略部分难以获取的数据（如：EA 防水剂、防腐保护层的原材料消耗），因此本研究的少量数据不具有“基于特定试验或观测”的数据高质量要求。
- 本数据集是针对某一特定复合能源系统（依托农业部可再生能源开发利用西部科学观测实验站基地建设的太阳能-生物质耦合区域供热系统）开展的 LCA，因此更适用于以太阳能和生物质能联合供能的农村建筑，且不同能源的占比具有灵活性，建筑供热在我国能源结构中的意义重大，随着我国新能源战略的逐步实施，这一能源供应模式将具有越来越广泛的适用范围和应用前景。