

引用格式: 詹梨苹, 赵锐, 祝仟, 等. 基于厨余垃圾发酵沼渣热解过程模拟的生命周期评价研究[J]. 中国测试, 2022, 48(10): 1-7.  
ZHAN Liping, ZHAO Rui, ZHU Qian, et al. Life cycle assessment based on pyrolysis process simulation of food waste fermentation  
residue[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(10): 1-7. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2022060158



# 基于厨余垃圾发酵沼渣热解过程模拟的 生命周期评价研究

詹梨苹<sup>1</sup>, 赵锐<sup>1</sup>, 祝仟<sup>1</sup>, 景凌云<sup>1</sup>, 蒋启帆<sup>1</sup>, 杨天学<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756;

2. 中国环境科学研究院固废分质利用与污染控制研究室, 北京 100012)

**摘要:** 该研究以城市厨余垃圾厌氧发酵沼渣为研究对象, 利用 Aspen Plus 软件建立沼渣热解的过程模型, 探究热解温度和气氛对沼渣热解产物的影响。在此基础上, 利用生命周期评价方法融合过程模拟结果, 对沼渣热解的环境影响和成本效益开展量化评价, 以期对沼渣热解工艺优化提供科学依据。结果表明: 沼渣热解生物炭产率模拟值与实验值的相对误差为 10.05%; 在 350 °C 至 500 °C 范围内, 生物炭产率随温度升高逐渐降低; 在 N<sub>2</sub> 气氛中通入 CO<sub>2</sub> 气体会降低生物炭产率。沼渣热解对全球变暖、环境酸化和富营养化的环境影响潜值分别为 1.810×10<sup>-2</sup>、1.520×10<sup>-2</sup> 和 6.100×10<sup>-4</sup>。沼渣热解的生命周期成本效益为-98 元/t, 说明其技术经济效益水平相对较低。

**关键词:** 沼渣; 热解; 过程模拟; Aspen Plus; 生命周期评价

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2022)10-0001-07

## Life cycle assessment based on pyrolysis process simulation of food waste fermentation residue

ZHAN Liping<sup>1</sup>, ZHAO Rui<sup>1</sup>, ZHU Qian<sup>1</sup>, JING Lingyun<sup>1</sup>, JIANG Qifan<sup>1</sup>, YANG Tianxue<sup>2</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Research Laboratory of Solid Waste Utilization and Pollution Control, Chinese

Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** This study develops a process simulation model of anaerobic fermentation residue pyrolysis by Aspen Plus software, to investigate the impact of pyrolysis temperature and injected gas on the product of pyrolysis. On such basis, the process simulation results are embedded into a life cycle assessment to quantify the environmental impact of the fermentation residue pyrolysis, as well as to evaluate the associated cost-benefit performance, thus providing insight into the optimization of the pyrolysis process. The results show that

收稿日期: 2022-06-22; 收到修改稿日期: 2022-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1905600); 四川省青年科技创新团队 (2022JDTD0005); 四川省区域合作项目 (2022YFQ0040); 四川循环经济研究中心课题资助 (XHJJ-2002, XHJJ-2005); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682021CX069, 2682021ZTPY088)

作者简介: 詹梨苹 (1995-), 女, 四川宜宾市人, 博士研究生, 专业方向为固体废物管理与处置。

通讯作者: 赵锐 (1983-), 男, 四川南充市人, 教授, 博士, 研究方向为固体废物管理与处置。

the relative error between the simulation value and the experimental value regarding the biochar production is 10.05%. In the range of 350 °C- 500 °C, the biochar production gradually decreases with the increase of temperature, whilst the injection of carbon dioxide to replace nitrogen reduces the biochar production. The pyrolysis of fermentation residue has the greatest environmental impact on global warming through the life cycle assessment, followed by the impact on environmental acidification and eutrophication. The values corresponding to their potential environmental impact are  $1.810 \times 10^{-2}$ ,  $1.520 \times 10^{-2}$  and  $6.100 \times 10^{-4}$ , respectively. The cost benefit related to the pyrolysis of fermentation residue is -98 yuan/t, indicating that its technical and economic benefits are at a low level.

**Keywords:** biogas residue; pyrolysis; processes simulation; Aspen Plus; life cycle assessment

## 0 引言

沼渣作为厌氧发酵残余物,因其产量大、有机含量高、营养元素丰富,具有较高的资源化潜力<sup>[1-2]</sup>。一般而言,沼渣的资源化利用途径主要包括饲料制备、直接还田、堆肥、热解等<sup>[3-6]</sup>。其中,热解可在惰性气氛和高温条件下将有机固废热分解为生物炭、热解气和生物油等多元化资源,被视为热化学转化中最可行的方式之一<sup>[7]</sup>。探究沼渣热解产物与关键影响因素之间的动态响应关系,量化热解全生命周期的环境和经济效益,可为沼渣热解技术规模化推广提供重要科学依据。

目前,针对沼渣的热解研究主要基于热解实验,但因沼渣热解过程复杂,测试成本较高,难以对热解过程影响因素、过程环境影响等进行有效评估<sup>[8]</sup>。过程模拟刚好可以弥补上述问题,通过模拟软件完整建立整个反应流程,可有效降低实验成本,还可根据模拟结果对流程进行实时优化<sup>[9-10]</sup>。Aspen Plus 作为常用的流程模拟软件,因操作简单、适用性强,且能利用内置的反应单元模块对复杂物理化学过程进行模拟,已被应用于有机固废热解的过程模拟中<sup>[11-12]</sup>。例如, Kabir 等<sup>[13]</sup>和 Adeniyi 等<sup>[14]</sup>基于生物质热解原理,借助 Aspen Plus 分别模拟了温度、生物质组分和原料粒径等不同控制条件下的农林废弃物热解制备生物油过程,模拟结果与实验结果具有较高的一致性。同时, Adeniyi 等<sup>[15]</sup>和 AlNouss 等<sup>[16]</sup>基于 Aspen Plus 开发了果蔬废物热解的过程模型,预测了茎、叶和果皮等不同废物组合产生的热解生物炭和产气量。此外,相关研究表明,基于 Aspen Plus 的过程模拟还可为热解技术工艺评价其潜在的环境影响和经济效益提供边界划分和数据支撑<sup>[17-18]</sup>。Sajid 等<sup>[19]</sup>在麻风树油和废弃食用油热解过程模拟的基础上,利用生命周期评价方法 (LCA)

对二者环境影响进行了对比分析。Han 等<sup>[20]</sup>基于 Aspen Plus 分别对生物质传统热解系统和资源节约型热解系统进行了建模,并基于 LCA 比较了两个系统的环境影响。Khan 等<sup>[21]</sup>利用 Aspen Plus 的模拟结果,驱动生命周期成本分析,对有机固废热解制备生物油过程开展了技术经济评估。Liu 等<sup>[8]</sup>在 Aspen Plus 所建热解模型的基础上,分别对稻草和甘蔗热解制备生物炭的经济成本进行了比较。

上述研究为本文提供了重要的方法借鉴,但针对沼渣热解的过程分析还鲜有报道。特别是随着全球气候变化加剧,废物资源循环利用已成为推动实现碳达峰、碳中和目标的重要环节<sup>[22]</sup>。沼渣热解技术可将废物转化为再生能源,通过研究其过程工艺的环境和经济效益,对探索能源替代、缓解气候危机具有重要的科学意义。本研究拟采用 Aspen Plus 软件建立沼渣典型的热解过程反应模型,探究沼渣热解产物在不同温度和气氛条件下的变化规律,利用生命周期评价方法对沼渣热解过程的环境影响和经济效益展开分析,以为沼渣热解工艺开发和优化提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 沼渣热解过程模拟

本研究以餐厨垃圾厌氧发酵后的沼渣为研究对象,根据热解工艺的基本原理,将沼渣热解工艺简化为干燥、热解和产物分离 3 个主要环节<sup>[23]</sup>。利用 Aspen Plus 软件对沼渣热解过程进行模拟,并使用实验数据验证所建模型的合理性。原料成分、粒径、热解温度、热解气氛和催化剂等因素会不同程度地影响热解产物的产量<sup>[24-25]</sup>。本文根据 Aspen Plus 软件对运行参数的可调控性,以及明确实验原材料的情况下,重点探究热解温度和气氛条件对热解生物炭产率的影响规律。整个热解过程遵循热化

学平衡、物料平衡以及相平衡。由于热解过程非常复杂, 涉及的工艺参数和反应较多, 为简化 Aspen Plus 建模过程, 本文做出如下假设:

- 1) 所有反应遵循吉布斯自由能最小化原理。
- 2) 管道首端与末端压力相等, 管道压力损耗为 0。
- 3) 热解焦油产量忽略不计, 焦油组成元素除 C 外全部转化为气态。
- 4) 设定灰分为状态稳定, 不发生反应, 不参与热解过程。
- 5) 原料热解反应完全且快速达到平衡状态, 所

有模块均为稳定反应状态。

利用 Aspen Plus 中单元反应模块构建模拟流程, 如图 1 所示。其中, 沼渣 (BR) 和  $N_2$  进入 Dryer 模块, 在此受热发生脱水反应被干燥; 产生的废水 (WET-AIR) 通过上口排放, 干燥物料 (DRY-BR) 进入 RYield 模块发生受热分解反应; 被完全分解的物质 (INBURNER) 进入 RGibbs 模块中利用吉布斯自由能原理进行模拟重组; 模拟重组所得产物 (PRODUCTS) 根据物流线输入至 Ssplit 分流器, 在该模块中发生气固分离, 最终得到固态产物生物炭 (BIOCHAR) 和气态产物 (GAS)。

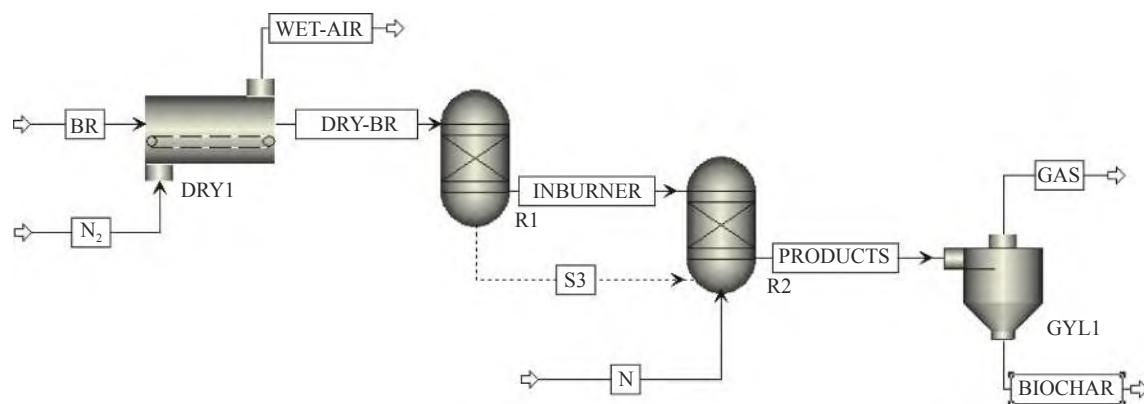


图 1 沼渣低温热解模拟流程

由于沼渣属于 Aspen Plus 数据库中的非常规物质, 需根据其工业分析和元素分析数值, 进一步转化为软件可识别的常规组分<sup>[26]</sup>。本文沼渣热解过程模拟所采用的数据来源于团队所做实验研究, 其工业分析和元素分析如表 1 所示<sup>[27]</sup>。

表 1 沼渣的工业分析与元素分析

工业分析/%				元素分析/%				
水分	固定碳	挥发分	灰分	C	H	O	N	S
0.51	3.85	51.42	44.22	25.81	3.64	26.14	2.99	0.57

## 1.2 生命周期评估

本研究利用 LCA 量化沼渣热解过程的环境影响, 识别主要环境影响的贡献环节。根据 ISO 14040: 2006 定义的基本原则, 整个生命周期评估过程包括目标和范围定义、生命周期清单分析、生命周期影响评估和数据解释 4 个部分<sup>[28]</sup>。

### 1.2.1 目标与范围定义

本文生命周期评价目标是对沼渣热解过程的物质、能量输入以及污染物排放产生的环境影响进行

评价, 评价范围包括沼渣从产生后被收集运输, 在热解工艺中发生干燥、热解, 到产物分离的整个过程, 对应的生命周期边界见图 2。假设餐厨垃圾在厌氧消化前已经过分选, 沼渣产生之后即刻进入系统边界。本研究中生命周期评价的功能单位为 1 t 沼渣。

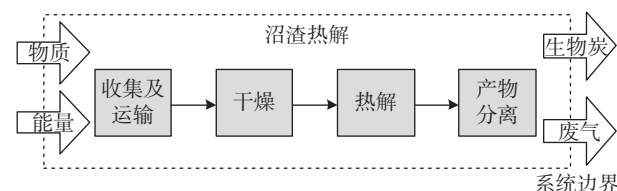


图 2 沼渣热解过程的系统边界

### 1.2.2 生命周期清单分析

清单分析的核心是建立以功能单位表达的目标系统的输入和输出<sup>[29]</sup>。沼渣热解各环节的排放清单见表 2。其中, 收集及运输环节的环境排放为消耗燃油产生的间接排放, 本文考虑采用 5 t 载重运输车, 油耗为 5 km/L, 燃油类型为柴油, 运输距离设定为 10 km, 根据 eBalance 自带的中国生命周期基础数据库所提供的生命周期清单数据计算得出该环



节的环境影响;干燥和热解环节的环境排放为消耗电能产生的间接排放,根据1.1节中热解工艺过程设置的具体参数,结合eBalance内置的CLCD数据库所提供的生命周期清单数据可核算其对应的环境影响;产物分离环节主要是热解产生的生物炭和不凝性气体,其中生物炭可作为资源被回收,实际的环境排放为热解产生的废气,对应的排放量由Aspen Plus模拟得出。

表2 沼渣热解的环境排放清单(基于1t沼渣)

排放物	收集及运输	干燥	热解	产物分离	合计
CO <sub>2</sub>	1.38	2.21×10 <sup>1</sup>	7.25×10 <sup>1</sup>	2.47×10 <sup>1</sup>	1.21×10 <sup>2</sup>
NH <sub>3</sub>	4.46×10 <sup>-6</sup>	1.11×10 <sup>-4</sup>	3.64×10 <sup>-4</sup>	-	4.79×10 <sup>-4</sup>
NO <sub>x</sub>	6.97×10 <sup>-3</sup>	6.18×10 <sup>-2</sup>	2.02×10 <sup>-1</sup>	-	2.71×10 <sup>-1</sup>
SO <sub>2</sub>	1.95×10 <sup>-3</sup>	7.21×10 <sup>-2</sup>	2.36×10 <sup>-1</sup>	-	3.10×10 <sup>-1</sup>
CH <sub>4</sub>	1.13×10 <sup>-2</sup>	6.26×10 <sup>-2</sup>	2.04×10 <sup>-1</sup>	1.17	1.45
CO	6.82×10 <sup>-3</sup>	3.81×10 <sup>-3</sup>	1.25×10 <sup>-2</sup>	6.07	6.09
HCL	2.20×10 <sup>-5</sup>	6.09×10 <sup>-3</sup>	1.99×10 <sup>-2</sup>	-	2.60×10 <sup>-2</sup>
HF	2.76×10 <sup>-6</sup>	7.62×10 <sup>-4</sup>	2.49×10 <sup>-3</sup>	-	3.26×10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub> S	3.58×10 <sup>-6</sup>	2.18×10 <sup>-4</sup>	7.14×10 <sup>-4</sup>	-	9.36×10 <sup>-4</sup>
COD	9.63×10 <sup>-4</sup>	8.78×10 <sup>-4</sup>	2.87×10 <sup>-3</sup>	-	4.71×10 <sup>-3</sup>
N <sub>2</sub> O	8.36×10 <sup>-5</sup>	3.34×10 <sup>-4</sup>	1.09×10 <sup>-3</sup>	-	1.51×10 <sup>-3</sup>

### 1.2.3 生命周期影响评估

根据生命周期清单分析可知,沼渣热解过程的主要环境排放物为CO、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>等,而环境影响类型是各排放因子的综合作用结果。因此,本文重点关注的环境影响类型主要包括全球变暖、环境酸化和富营养化3个方面,分别使用CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>当量来量化3种类型的环境影响潜值<sup>[30]</sup>。各环境影响类型清单物质及参照物质如表3所示,本研究使用eBalance软件建立沼渣热解生命周期评估模型,确定热解过程各类环境影响潜值。

表3 各类环境影响指标的特性与信息

环境影响类型	主要清单物质	参照物质
全球变暖潜值	CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O、CH <sub>4</sub> 、CO、NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>
环境酸化	SO <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> 、HCL、H <sub>2</sub> S、NO <sub>x</sub> 、HF	SO <sub>2</sub>
富营养化	NO <sub>x</sub> 、NH <sub>3</sub> 、COD、N <sub>2</sub> O	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 模拟结果

为验证模型有效性,本研究在Aspen Plus软件

中设置的模拟参数输入数据与实验参数保持一致:进料速度为10000 kg/h,空气温度为25℃,N<sub>2</sub>流量为50000 kg/h,流程压力均为101 kPa,热解温度为500℃。模拟结果与实验结果如表4所示,可以发现沼渣热解生物炭产率模拟值与实验值之间的相对误差仅为10.05%。模拟结果相对较低,可能的原因在于实验研究中添加了CaO、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>等添加剂,金属离子黏附在生物质表面,会改变生物质本身的空隙结构,导致其升温速率降低,从而对热解过程中的传热和传质产生影响<sup>[31]</sup>。相关研究表明,在相同热解条件下,添加催化剂能够显著提升热解产物焦炭的产量<sup>[32-33]</sup>。但本研究在Aspen Plus建模时,已假设热解反应过程快速达到平衡状态,反应温度保持不变,未考虑添加剂以及温度停留时间对沼渣热解过程的影响。

表4 沼渣热解模拟结果与实验结果

项目	实验值	模拟值	误差
热解终温	500℃	500℃	-
热解压力	101 kPa	101 kPa	-
生物炭产率	57.26%	47.21%	10.05%

### 2.2 温度对沼渣热解生物炭产率的影响

温度作为热解过程最关键的变量,对热解产物的产率和品质具有显著影响<sup>[34]</sup>。颜蓓蓓等<sup>[35]</sup>的研究表明,热解炭的制备温度一般在300~500℃。为进一步探究热解温度对沼渣生物炭产率的影响,本研究选择350~500℃进行模拟研究。在Aspen Plus软件中对热解反应器中的温度进行设置,从350℃开始,每隔10℃设置一个温度,直到500℃。

图3是沼渣生物炭产率在350~500℃范围内的变化趋势。随着热解温度的升高,生物炭产率逐渐降低,从350℃的53.08%下降到500℃的47.21%,这与Choi等<sup>[36]</sup>的研究结论一致。出现此趋势是由于温度升高,原料中的有机物逐渐分解气化,初始分解产生的炭发生二次分解,导致生物炭的产率不断降低<sup>[37]</sup>。王菁等<sup>[38]</sup>在利用生物质热解制备生物炭时也发现,350℃时生物炭产率最高,为54.06%,略高于本研究模拟结果。这可能是因为生物质中纤维素和木质素等成分含量较高,其往往具有更高的热解产物量<sup>[39]</sup>。

### 2.3 气氛对沼渣热解生物炭产率的影响

除热解温度之外,气氛也是影响热解过程的重

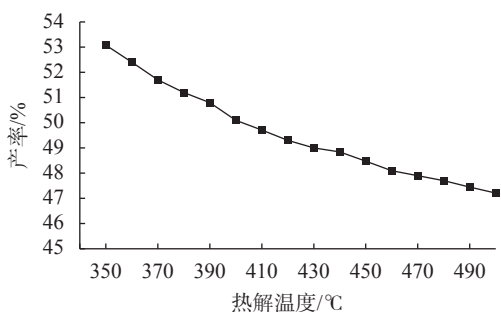


图 3 生物炭产率随温度变化趋势

要因素之一<sup>[40]</sup>。本研究在 N<sub>2</sub> 气氛的基础上, 通入另一种常用的反应气氛 CO<sub>2</sub>, 探究其对沼渣生物炭产率的影响。设定反映模型的温度为 500 °C, CO<sub>2</sub> 在混合气氛中的占比从 0 逐渐增加到 1, 增长梯度为 0.1。图 4 是沼渣生物炭产率随 CO<sub>2</sub> 体积分数的变化趋势。从图中可以发现, 随着 CO<sub>2</sub> 体积分数的不断增大, 生物炭的产率逐渐下降, 由纯 N<sub>2</sub> 气氛下的 47.21% 降至纯 CO<sub>2</sub> 气氛下的 46.35%。这是由于在纯 N<sub>2</sub> 气氛中加入 CO<sub>2</sub> 推动了热解初始阶段的脱水脱气反应, 有助于热解气化反应的进行, 减少了生物炭的产生量<sup>[41]</sup>。王思怡等<sup>[42]</sup> 和贾里等<sup>[43]</sup> 通过热解实验也证实, 与 Ar 和 N<sub>2</sub> 相比, 在 CO<sub>2</sub> 气氛下物质热解气化效率更高。较热解温度而言, 气氛

对热解产物收率影响更小, 这与刘雨豪等<sup>[41]</sup> 的研究结果一致。

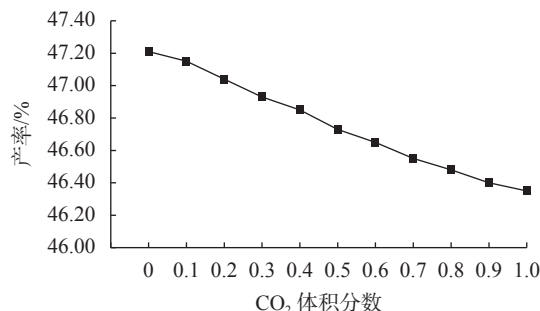


图 4 生物炭产率随 CO<sub>2</sub> 体积分数变化趋势

### 2.4 生命周期环境影响评价结果

为统一各环境影响类型间的量纲, 便于比较相对大小, 本文根据 1990 年世界人均环境影响作为基准值<sup>[44]</sup>, 对所有环境影响类型进行标准化, 结果如表 5 所示。可以看出, 沼渣热解全生命周期对全球变暖的贡献最大, 其次是环境酸化, 富营养化最小。沼渣热解主要的 4 个环节中, 收集及运输、干燥和热解均对环境酸化相对贡献最大, 其次是全球变暖和富营养化, 产物分离环节因环境排放物仅有 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 CO, 故本研究只考虑了对全球变暖的贡献。

表 5 沼渣热解环境影响潜值

沼渣热解各环节	全球变暖			环境酸化			富营养化		
	影响潜值	基准值	标准化后潜值	影响潜值	基准值	标准化后潜值	影响潜值	基准值	标准化后潜值
收集及运输	1.690	8700	1.940×10 <sup>-4</sup>	0.007	35	2.000×10 <sup>-4</sup>	0.001	59	1.690×10 <sup>-5</sup>
干燥	23.800	8700	2.740×10 <sup>-3</sup>	0.123	35	3.510×10 <sup>-3</sup>	0.008	59	1.360×10 <sup>-4</sup>
热解	77.900	8700	8.950×10 <sup>-3</sup>	0.401	35	1.150×10 <sup>-2</sup>	0.027	59	4.580×10 <sup>-4</sup>
产物分离	53.900	8700	6.200×10 <sup>-3</sup>	-	35	-	-	59	-
合计	157.300	8700	1.810×10 <sup>-2</sup>	0.531	35	1.520×10 <sup>-2</sup>	0.036	59	6.100×10 <sup>-4</sup>

图 5 是沼渣热解各环节环境影响潜值分别在全局变暖、环境酸化和富营养化指标中所占比例。对于全球变暖, 热解环节的贡献度最大, 占比为 49.53%, 其次为产物分离环节、干燥环节、收集及运输环节, 贡献度分别为 34.27%、15.13%、1.07%; 对于环境酸化, 热解环节贡献占比高达 75.52%; 对于富营养化, 热解环节依然贡献较大, 占比为 75.00%。这也是由于热解环节本身是核心单元环节, 热解装置需消耗电能以满足热解炉稳定运行, 故在整个系统中产生的能耗最大。

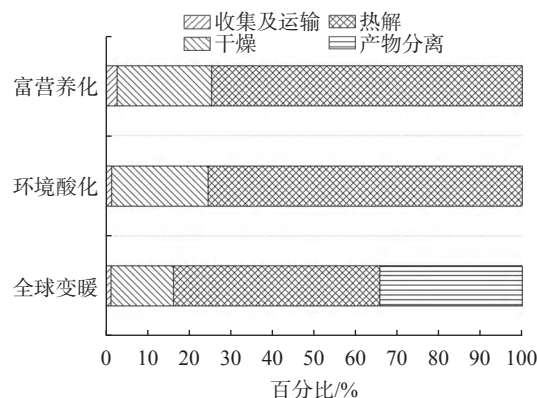


图 5 沼渣热解各环节的环境影响贡献

## 2.5 讨论

为进一步评估沼渣热解制备生物炭的技术经济效益,本研究以某生活垃圾热解企业为例,对沼渣热解过程的成本效益展开分析。通过实地调研获取企业的运营基本信息,结合模型模拟结果,测算得到沼渣热解成本和收益,结果如表6所示。热解工艺投入成本主要包括投资成本、材料成本、维修成本、人工成本、能源成本和折旧成本,产出收益包括政府补贴和产品收益。图6为热解投入成本和产出收益构成情况。从图6(a)可以看出,热解工艺投入

成本中投资成本、折旧成本和能源成本占比较大,分别为28.15%、26.75%和24.72%,对应成本值分别为86.76元/t、82.42元/t和76.18元/t。产出收益中政府补贴和产品收益占比分别为71.37%和28.63%(图6(b))。由沼渣热解成本和收益可知,其经济效益为-98元/t,表明沼渣热解制备生物炭在边际收益上不具备优势。可能原因在于热解装置的成本整体较高,且后续的维护和折旧费用也处于较高水平<sup>[21]</sup>。此外,沼渣热解产品的下游利用途径尚单一,仅考虑了沼渣生物炭作为土壤改良剂的收益。

表6 沼渣热解工艺成本和收益

材料成本	维修成本	人工成本	能源成本	折旧成本	投资成本	政府补贴	产品收益
0.66	13.88	48.26	76.18	82.42	86.76	150	60.16

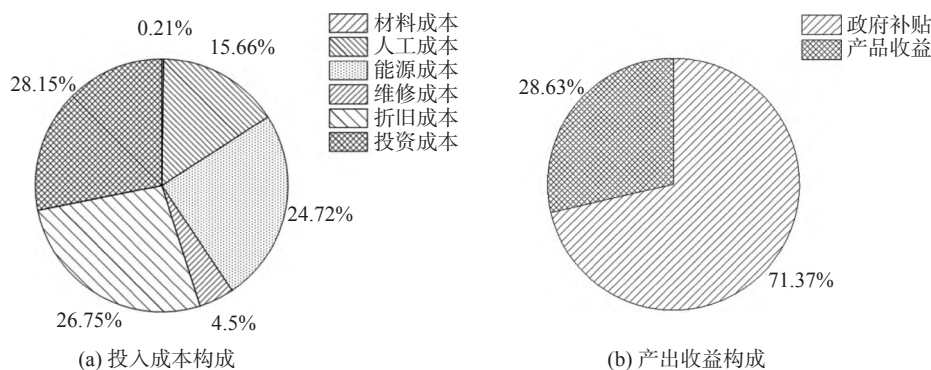


图6 沼渣热解工艺成本和收益构成情况

为推动沼渣热解工艺规模化应用,除提升补贴政策的支持力度外,还应重点考虑优化现有技术和装置,提升热解工艺设备的自动化,减少成本投入的同时降低能耗。其次,应结合热解产物产率对影响条件的响应规律,优化工艺运行参数,以增加产物产量。此外,应逐渐将热解产品由单一生物炭向热解气、生物油等多元高附加值再生资源转化,拓展热解产物利用途径,以提升沼渣热解的产品收益。

## 3 结束语

本研究基于 Aspen Plus 对餐厨垃圾厌氧发酵沼渣进行了热解模拟研究,建立了热解过程反应模型,并重点探究了热解产物在温度和气氛变化下的演变规律,在此基础上利用生命周期评价方法量化了沼渣热解各环节的环境影响。得出如下主要结论:

1) 沼渣热解模拟生物炭产率与实验研究结果具有较高的一致性。在 350~500 °C 热解温度范围

内,沼渣生物炭产率随温度升高而逐渐降低,从 350 °C 的 53.08% 下降到 500 °C 的 47.21%;在 N<sub>2</sub> 气氛中通入不可燃气体 CO<sub>2</sub> 会降低热解生物炭产率,由 N<sub>2</sub> 气氛下的 47.21% 降至 CO<sub>2</sub> 气氛下的 46.35%。

2) 沼渣热解全生命周期对全球变暖的贡献最大,其次是环境酸化和富营养化;各环节对 3 种环境影响类型的贡献度差异较大,其中全球变暖环境影响潜值占比排序为:热解>产物分离>干燥>收集及运输,环境酸化和富营养化环境影响潜值排序均为:热解>干燥>收集及运输。

3) 按功能单位 1 t 测算,沼渣热解生命周期经济效益为-98 元,技术经济效益处于较低水平。其中,投入成本中占比较大的是投资成本,为 86.76 元/t,其次是折旧成本和能源成本,分别为 82.42 元/t 和 76.18 元/t。

受限于实验数据的可获性以及软件参数的可控性,本文对沼渣热解影响因素的考虑还不够充分。



后续研究将持续完善实验设计, 补充相关影响因素的梯度实验, 揭示沼渣的热解机理, 通过实验数据优化 Aspen Plus 建模, 尝试细化过程单元的反应机制, 以提升模型的适应性和有效性。此外, 沼渣的资源化利用途径较多, 本文开展的生命周期分析仅关注了热解自身的环境影响和成本效益, 缺乏与其他资源化路径的对比。后续研究将探索挖掘沼渣热解技术的节能减排潜力, 同时拓展多种典型资源化技术生命周期建模, 对比分析各自在技术、环境和经济的特点, 以期选择合适的资源化路径提供参考。

### 参考文献

- [1] ZHENG Y H, WEI J G, LI J, et al. Anaerobic fermentation technology increases biomass energy use efficiency in crop residue utilization and biogas production[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(7): 4588-4596.
- [2] 杜婷婷, 云斯宁, 朱江, 等. 生物质废弃物厌氧发酵的研究进展[J]. *中国沼气*, 2016, 34(2): 46-52.
- [3] ZHANG M Q, SHI A P, AJMAL M, et al. Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting[J/OL]. *Biomass Conversion and Biorefinery*: 1-24. (2021-03-16). <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01438-5>.
- [4] 王富全, 孙家宾, 赵永康, 等. 沼肥还田对小麦和油菜产量、品质及土壤改良的影响[J]. *中国沼气*, 2015, 33(6): 98-101.
- [5] 许文江, 章明清, 洪翠云, 等. 城市沼渣堆肥工艺及其施肥技术的优化[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 325-329.
- [6] 王琬丽, 孙锴, 黄群星, 等. 无机灰分对餐厨沼渣中有机质热解特性的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(9): 1652-1659.
- [7] PAN J, GAO B, WANG S, et al. Waste-to-resources: green preparation of magnetic biogas residues-based biochar for effective heavy metal removals[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 140283.
- [8] LIU Y, YANG X, ZHANG J, et al. Process simulation of preparing biochar by biomass pyrolysis via Aspen Plus and its economic evaluation[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2022, 13: 2609-2622.
- [9] 张梦轩, 刘洪辰, 王敏, 等. 化工过程的智能混合建模方法及应用[J]. *化工进展*, 2021, 40(4): 1765-1776.
- [10] 赵锐, 赵丽萍, 陈静芳, 等. 基于 BP 神经网络的垃圾渗滤液输运管道结垢趋势预测[J]. *中国测试*, 2022, 48(7): 1-7.
- [11] ROSHA P, KUMAR S, IBRAHIM H. Sensitivity analysis of biomass pyrolysis for renewable fuel production using Aspen Plus[J]. *Energy*, 2022, 247: 123545.
- [12] 范洪刚, 袁浩然, 林镇荣, 等. 可燃固体废弃物热解气化技术及工程化模拟研究进展[J]. *新能源进展*, 2017, 5(3): 204-211.
- [13] KABIR M J, CHOWDHURY A A, RASUL M G. Pyrolysis of municipal green waste: a modelling, simulation and experimental analysis[J]. *Energies*, 2015, 8(8): 7522-7541.
- [14] ADENIYI A G, IGHALO J O. Aspen Plus predictive simulation of soft and hard wood pyrolysis for bio-energy recovery[J]. *International Journal of Environment and Waste Management*, 2020, 26(2): 234-244.
- [15] ADENIYI A G, IGHALO J O, AMOSA M K. Modelling and simulation of banana (*Musa spp.*) waste pyrolysis for bio-oil production[J]. *Biofuels*, 2021, 12(7): 879-883.
- [16] ALNOUSS A, PARTHASARATHY P, MACKEY H R, et al. Pyrolysis study of different fruit wastes using an Aspen Plus model[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 4.
- [17] MORALES-MENDOZA L F, AZZARO-PANTEL C. Bridging LCA data gaps by use of process simulation for energy generation[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017, 19(5): 1535-1546.
- [18] CORONA A, AMBYE-JENSEN M, VEGA G C, et al. Techno-environmental assessment of the green biorefinery concept: Combining process simulation and life cycle assessment at an early design stage[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 100-111.
- [19] SAJID Z, KHAN F, ZHANG Y. Process simulation and life cycle analysis of biodiesel production[J]. *Renewable Energy*, 2016, 85: 945-952.
- [20] HAN D, YANG X, LI R, et al. Environmental impact comparison of typical and resource-efficient biomass fast pyrolysis systems based on LCA and Aspen Plus simulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 254-267.
- [21] KHAN M S A, GRIQUI N, HALOUANI K, et al. Techno-economic analysis of production of bio-oil from catalytic pyrolysis of olive mill wastewater sludge with two different cooling mechanisms[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 13: 100170.
- [22] 魏文栋, 陈竹君, 耿涌, 等. 循环经济助推碳中和的路径和对策建议[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(9): 1030-1038.
- [23] 贾懿曼, 张顺利, 舒新前, 等. 城市固体废弃物热解研究现状[J]. *可再生能源*, 2012, 30(12): 71-76.
- [24] 刘壮, 田宜水, 马大朝, 等. 生物质热解的典型影响因素及技术研究进展[J]. *可再生能源*, 2021, 39(10): 1279-1286.
- [25] 仇利, 姚宗路, 赵立欣, 等. 生物质热解制备高品质生物油研究进展[J]. *化工进展*, 2020, 40(1): 139-150.
- [26] 赵坤, 肖军, 沈来宏, 等. 生物质热解制油系统性能分析[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(11): 1962-1967.
- [27] 焦宇欣. 添加剂对沼渣热解制备生物炭特性影响及制备工艺改进研究[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2021.
- [28] 李恒威, 叶建军, 魏道江. 基于生命周期评价的生态绿屋形式比较测试研究[J]. *中国测试*, 2012, 38(3): 98-100.

(下转第 15 页)

- 86(12-13): 1781-8.
- [17] RYU J, LEE M Y, SONG M G, et al. Highly selective removal of Hg(II) ions from aqueous solution using thiol-modified porous polyaminal-networked polymer[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020: 250.
- [18] XIU Z, SHENG W. Voltametric behavior of Noradrenaline at 2-Mercaptoethanol self-assembled monolayer modified gold electrode and its analytical application[J]. *Sensors*, 2003, 3(3): 61-68.
- [19] CHAI L, LI Q, ZHU Y, et al. Synthesis of thiol-functionalized spent grain as a novel adsorbent for divalent metal ions[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(15): 6269-72.
- [20] MATUANA L M, BALATINECZ J J, SODHI N S. Surface characterization of esterified cellulosic fibers by XPS and FTIR spectroscopy[J]. *Wood Science and Technology*, 2001, 35(3): 191-201.
- [21] 陈翠苹. 水中亚硝酸类污染物的吸附去除与作用机制 [J]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [22] LI J, CAO L, YUAN Y, et al. Comparative study for microcystin-LR sorption onto biochars produced from various plant- and animal-wastes at different pyrolysis temperatures: Influencing mechanisms of biochar properties[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 247: 794-803.
- [23] SUN J, GU X, DONG Q, et al. Durable flame-retardant finishing for polyamide 66 fabrics by surface hydroxymethylation and crosslinking[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2013, 24(1): 10-4.
- [24] PHAM C V, ECK M, KRUEGER M. Thiol functionalized reduced graphene oxide as a base material for novel graphene-nanoparticle hybrid composites[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 231: 146-54.
- [25] 曹秀芹, 李志强, 程琳. 粉末活性炭与单壁碳纳米管对水中多氯联苯的吸附[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(5): 130-136.

(编辑:莫婕)

(上接第 7 页)

- [29] ZHAO R, XU Y, WEN X, et al. Carbon footprint assessment for a local branded pure milk product: a lifecycle based approach[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 38: 98-105.
- [30] 陈冰, 封静, 黄文雄, 等. 应用生命周期模型评价餐厨垃圾处理技术[J]. *环境工程学报*, 2011, 5(8): 1857-1862.
- [31] 谭洪, 王树荣, 骆仲泱, 等. 金属盐对生物质热解特性影响试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2005(5): 742-744.
- [32] 王树荣, 廖艳芬, 骆仲泱, 等. 氯化钾催化纤维素热裂解动力学研究[J]. *太阳能学报*, 2005(4): 452-457.
- [33] 王新运, 万新军, 吴凤义. 生物质催化热解特性和动力学研究[J]. *应用化工*, 2010, 39(3): 377-379.
- [34] 于博阳, 尹丽洁, 路明强, 等. 温度对生物质热解过程中传热特性的影响[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(12): 3054-3059.
- [35] 颜蓓蓓, 杨学忠, 侯林桐, 等. 村镇生活垃圾热解处理技术综述 [J]. *中国环境科学*, 42(8): 3755-3769.
- [36] CHOI M K, PARK H C, CHOI H S. Comprehensive evaluation of various pyrolysis reaction mechanisms for pyrolysis process simulation[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2018, 130: 19-35.
- [37] AFIF R A, ANAYAH S S, PFEIFER C. Batch pyrolysis of cotton stalks for evaluation of biochar energy potential[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 2250-2258.
- [38] 王菁, 蔡佳校, 张柯, 等. 不同组成纤维素热解炭的燃烧行为分析[J]. *烟草科技*, 2017, 50(7): 76-81.
- [39] PANG Y X, YAN Y, FOO D C Y, et al. The influence of lignocellulose on biomass pyrolysis product distribution and economics via steady state process simulation[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 158: 104968.
- [40] CHO D W, KWON G, OK Y S, et al. Reduction of bromate by cobalt-impregnated biochar fabricated via pyrolysis of lignin using CO<sub>2</sub> as a reaction medium[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(15): 13142-13150.
- [41] 刘雨豪, 李爱军, 陈郭石. 垃圾低温热解的特性模拟及过程优化[J]. *应用能源技术*, 2019(5): 1-6.
- [42] 王思怡, 李月慧, 葛玉洁, 等. NTP-DBD 气化城市污泥及其模型化合物: 气氛对产物分布及特性的影响[J]. *化工进展*, 2022, 41(4): 2150-2160.
- [43] 贾里, 郭晋荣, 王彦霖, 等. 不同气氛条件下生物焦的热解路径及脱汞机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(6): 2011-2022.
- [44] 胡志锋, 马晓茜, 梁增英. 广州市生活垃圾处理工艺的生命周期评价[J]. *可再生能源*, 2012, 30(1): 106-112.

(编辑:谭玉龙)