

# 厨余垃圾厌氧消化与微生物电解池耦合 产甲烷全生命周期评价

郭美欣<sup>1,2</sup>, 朱雨森<sup>1,2</sup>, 郭萌<sup>1,2</sup>, 李鸣晓<sup>3</sup>, 亓雪娇<sup>3</sup>, 贾璇<sup>1,2</sup>

(1. 北京工商大学, 国家环境保护食品链污染防治重点实验室, 北京 100048;

2. 中国轻工业清洁生产 and 资源综合利用重点实验室, 北京 100048;

3. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 厌氧消化(AD)是厨余垃圾清洁能源化的主流工艺,通过构建AD与微生物电解池(MEC)耦合工艺(AD-MEC),基于全生命周期评价(LCA)对比AD与AD-MEC耦合工艺处理厨余垃圾产甲烷的环境影响,解析各功能单元的环境影响贡献,并提出优化方案。结果表明,与传统AD工艺相比,新型AD-MEC耦合工艺在富营养化、气候变化、水资源消耗、酸化和初级能源消耗的环境影响潜值均低于AD工艺,削减比例分别为70.28%、39.53%、92.29%、49.68%和41.2%。贡献源解析发现,AD-MEC耦合工艺的预处理和污水处理单元为环境影响的主要贡献源,MEC和AD单元影响较小。基于此,对AD-MEC耦合工艺进行优化,将废水处理单元的出水回用至预处理单元,水资源消耗的环境影响潜值进一步削减61.48%。可见,采用AD-MEC耦合工艺进行厨余垃圾厌氧产沼,通过沼液的深度利用、沼气净化提质和废水回用,可有效减少厨余垃圾处理工艺对环境的影响和资源消耗,具有显著的经济效益和生态环境价值。

**关键词:** 厨余垃圾; 厌氧消化; 微生物电催化; 甲烷; 全生命周期评价; 贡献源解析

**中图分类号:** X705

**文献标志码:** A

## 0 引言

全球温室效应日益加剧,大幅释放有机废弃物能源化潜力,实现其对石化能源4%~7%的替代,是推进中国“碳达峰”战略实施、实现“减污降碳”协同的重大需求<sup>[1]</sup>。作为全球碳减排的动力站,中国沼气工程规模已居世界首位,然而厌氧能源化效率低、沼液处理难和沼气净化成本高的问题限制了沼气工程的快速发展。传统厌氧消化工艺(anaerobic digestion, AD)以水解酸化产甲烷途径为主,产酸发酵的热力学障碍难以突破,导致能源化效率不足50%,沼气中甲烷含量仅为50%~60%,CO<sub>2</sub>高达30%~40%。2010年, Morita等<sup>[2]</sup>首次发现产甲烷菌与产电菌之间存在“直接电子传递”现象,打破了半个世纪以来学者们对以氢气介导的“间接电子传递”产甲烷是厌氧发酵唯一途径的认知,通过外加低电压调控细胞NADH/NAD<sup>+</sup>平衡,可在非平衡条件下突破厌氧发酵的热力学障碍,实现CO<sub>2</sub>还原产甲烷。利用产电菌的胞外电子传递能力和电催化特性,实现化学能向氢气或甲烷等可再生能源转变的新工艺成为研究热点<sup>[3-4]</sup>。微生物电解池(microbial electrolysis cells, MEC)可利用产甲烷菌与产电菌的协同作用,在实现阴极还原CO<sub>2</sub>产甲烷和阳极氧化脱除硫化氢,同时MEC工艺还可进一步利用沼液中的有机质,达到

沼气提质净化和沼液深度资源化的目的<sup>[5]</sup>。Logan等<sup>[6]</sup>最早将AD与MEC工艺相耦合(AD-MEC),实现了酿酒废水的深度能源化利用。研究发现,AD-MEC可通过调节微生物群结构和促进电子转移来提高活性污泥的甲烷产率,当施加1.0 V电压时,AD-MEC的甲烷产率比AD提高了59.1%<sup>[7-8]</sup>。刘洪周等<sup>[9]</sup>研究发现AD与电化学方法相结合具有更强的抗酸化能力和能量转换效率,利用该工艺VFA的平均浓度比AD降低32.9%,能效提高53.25%。Hassanein等<sup>[10]</sup>探索了AD和AD-MEC耦合工艺在牛粪产能方面的应用,相较于AD工艺,AD-MEC耦合工艺的累积产气量增加了137.9%,电能回收效率最高可达170%。包红旭等<sup>[11]</sup>研究了AD-MEC耦合系统中采用超声波和碱预处理提高活性污泥产甲烷能力,结果显示AD-MEC耦合系统对污泥的利用速度更快,甲烷产率、速率及挥发性悬浮物(VSS)和总化学需氧量(TCOD)去除效率明显提高。

目前,学者们对AD产沼气工艺开展了全生命周期评价(life cycle assessment, LCA),但关于AD-MEC耦合工艺的环境影响暂无系统评价。潘发存<sup>[12]</sup>对餐厨垃圾资源化利用产沼气发电进行了LCA,结果表明餐厨垃圾生产沼气发电工艺的环境影响低于传统火力发电,具有良好的环境效益。刘航驿等<sup>[13]</sup>研究表明采用“厌氧发酵+酯化反应+阳光干化+

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1100304)

通信作者: 贾璇(1982—),女,博士、副教授,主要从事有机废弃物能源化方面的研究。jiaxuan@btbu.edu.cn

填埋”工艺,水生生态毒性、非再生资源、陆地生态毒性等13个环境影响类型均优于“厌氧发酵+填埋”工艺,投资回收期更短、经济效益更佳。吴梦珂等<sup>[14]</sup>将细菌纤维素生产、蚯蚓堆肥和蚯蚓粪制备生物炭集成到餐厨垃圾厌氧消化工艺中并进行LCA,与AD工艺相比,温室气体和酸性气体的减少量分别增加了40.9%和130.0%,一次能源净输出增加了32.8%。Foley等<sup>[15]</sup>对比了AD、微生物燃料电池(microbial fuel cells, MFC)和MEC这3种工艺的LCA,发现相较于AD和MFC,MEC工艺具有更优的总净环境效益。张静怡等<sup>[16]</sup>利用LCA评估了MFC、MEC和微生物脱盐池(microbial desalination cells, MDC)的潜在环境影响,结果表明MEC的环境影响优于MFC和MDC,与传统废水处理方法AD相比,MEC的环境更友好。然而,AD-MEC耦合工艺应用的可行性和环境影响亟需量化与评估,通过辨识和量化产甲烷整个生命周期各阶段的能量和物质消耗以及环境排放,评价其对生态环境、人类健康和资源消耗领域的环境影响。

本文基于eFootprint构建厨余垃圾厌氧产沼评价模型,开展AD和AD-MEC工艺不同处理单元、处理模式的环境影响评价和贡献源解析。通过LCA,识别不同工艺的主要环境影响类型,评价造成环境影响的关键环节和污染排放,提出进一步优化方案,实现环境影响小、资源化效率高的绿色可持续发展目标,以期有机废弃物的高值资源化利用提供支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 研究工具

本文采用eFootprint软件系统建立沼气生命周期模型,并计算得到特征化结果。eFootprint软件系统支持全生命周期过程分析,并内置了中国生命周期基础数据库(CLCD)、欧盟ELCD数据库和瑞士Ecoinvent数据库。

### 1.2 功能单位

功能单位是一个产品系统所需统一计量输入输出的基准,所有物耗和能耗的计算分析都以功能单位作为参考基准<sup>[17]</sup>。目标定义是指对分析的目标和范围进行定义和界定<sup>[18]</sup>。本文采用AD和AD-MEC耦合工艺进行厨余垃圾厌氧资源化,以生产1000 m<sup>3</sup>沼气为功能单位,量化分析生产过程中的能量、物料投入和环境影响。

### 1.3 系统边界

生命周期评价的系统边界为评估过程设置框架<sup>[19]</sup>。本文的系统边界为生命周期-生产阶段,以厨余垃圾的预处理作为研究的开始,AD工艺主要包括厨余垃圾预处理(pretreatment, PT)、AD、沼气纯化(biogas purification, BP)、污水处理(sewage treatment, ST),AD-MEC耦合工艺主要包括PT、AD、MEC、ST整个过程,厨余垃圾厌氧产沼工艺流程如图1所示。系统输入包括物质和能量,输出包括油脂回收和污染物排放,从而实现厨余垃圾资源化过程中“从摇篮到大门”全过程环境问题的评价,系统边界如图2所示。

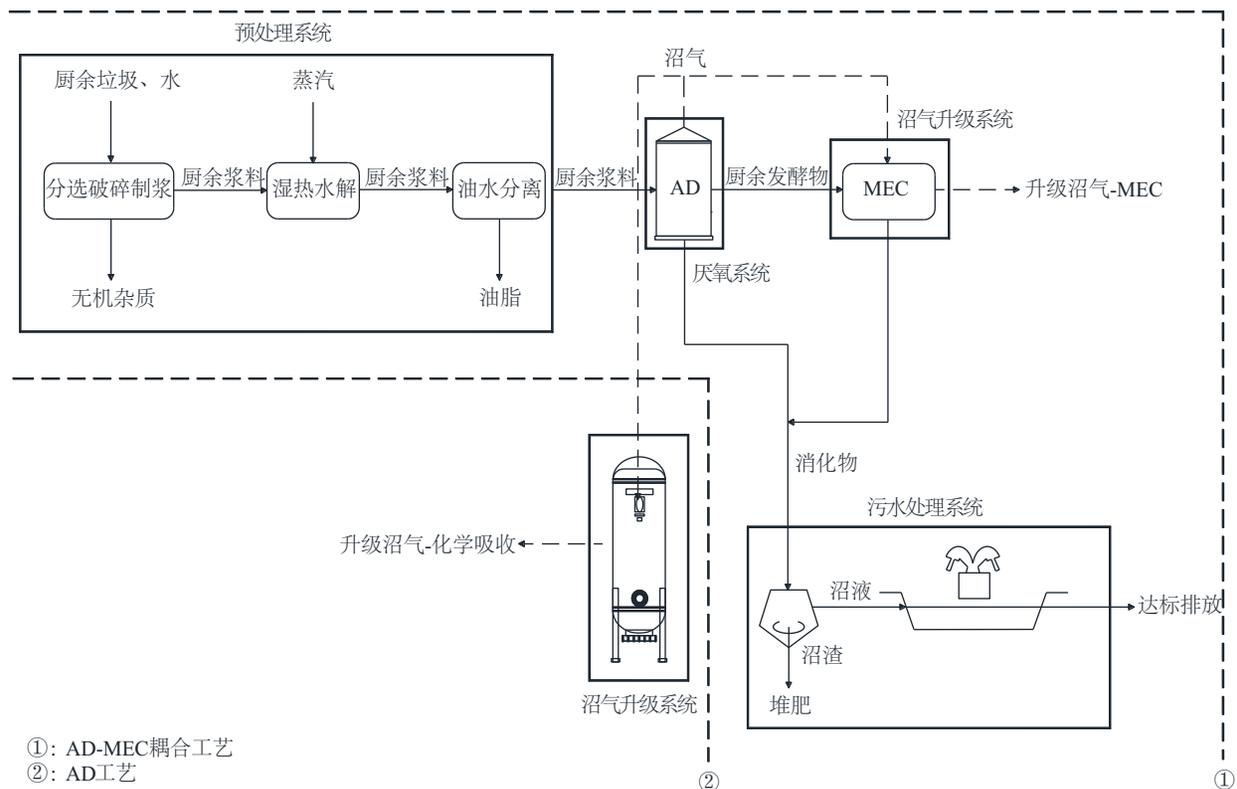


图1 厨余垃圾厌氧产沼工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of anaerobic biogas production process from kitchen waste

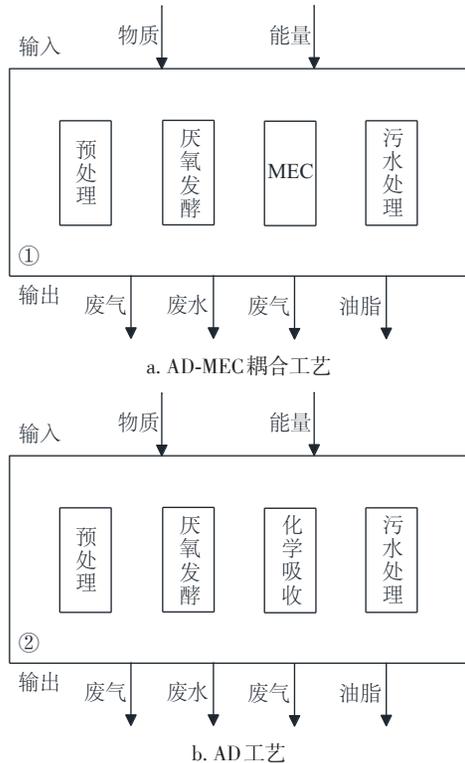


图2 AD和AD-MEC工艺系统边界

Fig. 2 System boundaries for AD-MEC and AD processes

#### 1.4 生命周期清单分析

生命周期清单分析(life cycle inventory, LCI)是汇总对产品生命周期中与功能单位相关的输入(资源)和输出(排放)<sup>[20]</sup>。

表1 厨余垃圾AD-MEC厌氧产沼清单数据

Table 1 Data list of biogas production AD-MEC process from food waste

过程	输入						输出					
	类别	物质	AD-MEC	AD	单位	数据来源	类别	物质	AD-MEC	AD	单位	数据来源
预处理	物料	厨余垃圾	15.41	15.41	t	企业报告	固废	无机杂质	0.092	0.092	t	企业报告
		水	7.3	7.3	t	企业报告						
	能源	蒸汽	2.37	2.37	t	企业报告	废水	油脂	0.38	0.38	t	企业报告
		电力	220.3	220.3	kWh	企业报告						
厌氧消化	能源	电力	6.7	6.7	kWh	文献[21]						
沼气升级	物质	水		147.56	m <sup>3</sup>	文献 [8, 22-23]						
		不锈钢		0.024	kg							
	脱硫剂		4.2	kg								
	能源	电力	1.39	300	kWh							
污水处理	能源	电力	240.39	801.32	kWh	文献[24]	废气	NH <sub>3</sub>		0.35	kg	
								H <sub>2</sub> S		0.015	kg	
							废水	SS		6.16	kg	文献[24]
								COD	1.54	7.71	kg	
		总氮		1.14	kg							

厨余垃圾 AD-MEC 耦合工艺的生命周期评价清单分析所需收集的数据是整个工艺过程中输入和输出的基础数据。本文中的数据主要来自数据库、文献、企业数据和部分理论计算,清单数据见表 1。

PT、AD、ST 单元数据均来自某企业工程实例。MEC 单元数据来自文献和部分理论计算。预处理单元主要包括分选、破碎、制浆、湿热水解和油水分离环节。厨余垃圾通过机械分选分选出无机杂质,分选后的厨余垃圾进入破碎单元进行破碎制浆,厨余浆料进入油水分离机分离出油脂,剩余浆料进入 AD 单元。AD 单元<sup>[21]</sup>采用完全混合式厌氧反应器,反应温度为(35±2)℃,厨余浆料经厌氧消化后产生的厨余发酵物进入 MEC 反应器。MEC 反应器采用单室 MEC,其清单数据包括输入(能源消耗)和输出(废水)两部分。能源消耗主要为电耗,外加电压 0.8 V 参考 Christy 等<sup>[22]</sup>采用实际沼气在 0.8 V 外加电压下开展的 MEC 沼气提纯研究。学者们对 MEC 工艺处理废水的最适外加电压进行了研究,也表明 0.8 V 外加电压可获得最佳的底物降解和能源消耗<sup>[8]</sup>。因此,综合经济成本,本文采用 0.8 V 外加电压,结合处理规模进行能源消耗的理论计算。废水的输出数据中化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)数据选取中试规模(1000 L)下连续运行的 MEC 处理酿酒厂发酵剩余液的 COD 去除率(70%)<sup>[23]</sup>。BP 单元包括脱硫和脱碳过程,其中脱硫过程采用氧化铁化学吸收法,脱碳过程采用环保和经济的高压水洗法。ST 单元包括固液分离与沼液处理环节,消化物经固液分离设备分离出沼渣和沼液。固液分离单元设备电力消耗为 7.47 kWh/t 物料,

沼渣用于后续堆肥。沼液采用“脱氮+生化处理(membrane bio-reactor, MBR)”工艺进行处理,沼液首先进入脱氮反应器去除大部分有机物及硝态氮,出水后进行高效 A/O 系统,出水经 MBR 去除剩余污染物达标后排放,出水水质达到《污水综合排放标准》,其中主要的污染物为悬浮物(suspended solids,SS)、COD 和总氮,浓度分别为 236、100 和 21 mg/L。沼液处理环节电力消耗为 44.53 kWh/t 物料。固液分离和沼液处理环节产生的臭气主要成分为 NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>S,其中 NH<sub>3</sub> 的排放浓度为 4.9 mg/m<sup>3</sup>,H<sub>2</sub>S 的排放浓度为 0.12 mg/m<sup>3</sup>[24]。

## 1.5 评价方法

### 1.5.1 数据分类

通过识别厨余垃圾 AD 和 AD-MEC 耦合工艺过程中各单元的输出因子,将它们产生的潜在环境影响进行分类,考虑的环境影响类别包括气候变化(GWP)、初级能源消耗(PED)、水资源消耗(WU)、酸化(AP)、富营养化(EP),具体分类情况见表 2。

表 2 环境影响类型指标

Table 2 Environmental impact index

环境影响类型指标	单位
气候变化(GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq
初级能源消耗(PED)	MJ
水资源消耗(WU)	kg
酸化(AP)	kg SO <sub>2</sub> eq
富营养化(EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq

### 1.5.2 特征化

由于不同物质对环境产生的影响类型可能相同,但其影响程度有所不同,特征化通过“当量因子”将每个环境影响类型中的不同物质进行量化,达到将不同物质对同一环境影响类型的贡献程度进行转化的目的[25-26]。特征化结果采用 eFootprint 软件系统中内置的当量因子,通过计算各环节的输

表 4 厨余垃圾 AD-MEC 和 AD 产沼气生命周期环境影响潜值结果

Table 4 Life cycle environmental impact potential results of AD-MEC and AD biogas production by using kitchen waste

环境影响类型	特征化		标准化		环境影响综合值	
	AD-MEC	AD	AD-MEC	AD	AD-MEC	AD
GWP	1.03×10 <sup>2</sup>	1.69×10 <sup>2</sup>	1.49×10 <sup>-2</sup>	2.46×10 <sup>-2</sup>	1.79×10 <sup>-3</sup>	2.96×10 <sup>-3</sup>
PED	1.22×10 <sup>3</sup>	2.07×10 <sup>3</sup>	4.71×10 <sup>-4</sup>	8.01×10 <sup>-4</sup>	5.18×10 <sup>-5</sup>	8.81×10 <sup>-5</sup>
WU	8.64×10 <sup>2</sup>	1.12×10 <sup>4</sup>	9.82×10 <sup>-3</sup>	1.22×10 <sup>-1</sup>	1.08×10 <sup>-3</sup>	1.40×10 <sup>-2</sup>
AP	4.05×10 <sup>-1</sup>	8.05×10 <sup>-1</sup>	7.76×10 <sup>-3</sup>	1.54×10 <sup>-2</sup>	9.31×10 <sup>-4</sup>	1.85×10 <sup>-3</sup>
EP	3.13×10 <sup>-2</sup>	1.05×10 <sup>-1</sup>	1.65×10 <sup>-2</sup>	5.54×10 <sup>-2</sup>	1.81×10 <sup>-3</sup>	6.09×10 <sup>-3</sup>

与 AD 工艺相比,AD-MEC 工艺环境影响综合值中 GWP、PED、WU、AP 和 EP 潜值均低于 AD 工艺,其中 WU 削减量最大,达到 92.29%。WU 反映整个工艺水资源消耗的环

境影响,AD 工艺的 BP 单元脱碳过程水资源需求高,AD-MEC 耦合工艺沼气升级单元的 MEC 过程可同时实现沼气脱

### 1.5.3 标准化与加权评估

经特征化计算后得到各种物质对不同环境影响类型的贡献值,但难以比较不同环境影响类型对环境综合值的贡献,因此通过建立标准化基准,使不同环境影响类型之间具有可比性[27]。

加权评估是指根据各环境影响类型的贡献大小确定不同环境影响类型的影响权重,将各环境影响类型的环境影响潜值进行综合,得到一个可供比较的单一指标[27]。采用 2000 年世界人均环境影响潜值作为环境影响基准值进行标准化和加权评估计算。环境影响标准化基准值及权重见表 3。

表 3 2000 年世界人均环境影响潜值

Table 3 World per capita environmental impact potential in 2000

环境影响类型	标准化基准值/(人·a)	权重
GWP	6869	0.12
PED	2590457	0.11
WU	88003	0.11
AP	52.26	0.12
EP	1.9	0.11

### 1.5.4 不确定度分析

采用 CLCD 质量评估方法进行 LCA 评价,在 eFootprint 软件系统上完成对模型清单数据的不确定度评估,辨识出 LCA 模型中具有高不确定度的关键单元,进而改进数据质量,优化工艺。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环境影响潜值分析

AD 和 AD-MEC 工艺生产沼气的环境影响综合值特征化、标准化计算以及基于 CML2001 评价体系的加权评估后的环境影响综合值计算结果如表 4 所示。

境影响,AD 工艺的 BP 单元脱碳过程水资源需求高,AD-MEC 耦合工艺沼气升级单元的 MEC 过程可同时实现沼气脱硫脱碳,进一步降低沼气升级的水资源消耗量,最大程度节

约水资源,WU影响潜值仅为AD工艺的7.7%。EP反映富营养化的环境影响,AD工艺污水处理单元产生的NH<sub>3</sub>和总氮排放为主要贡献,AD-MEC耦合工艺通过对COD和氨氮进一步降解来降低ST单元的负荷,与AD工艺相比EP影响潜值削减70.28%,为 $1.81 \times 10^{-3}$ 。AP反映酸性气体排放过程的环境影响,与AD工艺相比,AD-MEC耦合工艺的MEC过程通过阳极硫氧化菌的脱硫性能减少酸性气体排放<sup>[28]</sup>,与AD工艺传统氧化铁化学吸收脱硫技术相比,AP影响潜值削减49.68%,为 $9.31 \times 10^{-4}$ 。付贤钟等<sup>[5]</sup>在MEC中实现了CO<sub>2</sub>还原与硫回收同时进行,模拟生物气提纯后甲烷含量达到98.3%,H<sub>2</sub>S被完全去除,同时获得纯元素硫颗粒,表明MEC在沼气净化、升级与硫回收等方面具有应用前景。PED反映整个工艺的能源消耗,AD-MEC耦合工艺通过产电菌的胞外电子传递和电催化能力提高了厨余垃圾的产甲烷潜力,在获得更高能源产量的同时减少了沼液处理和沼气纯化过程的能源消耗,因此与AD工艺相比,PED降低了41.2%,为 $5.18 \times 10^{-5}$ 。GWP反映温室气体排放过程的影响,与AD工艺相比,AD-MEC耦合工艺在CO<sub>2</sub>减排方面有显著贡献,GWP降低了39.53%,为 $1.79 \times 10^{-3}$ 。MEC过程的生物阴极可强化CO<sub>2</sub>还原产生甲烷途径,将粗沼气中30%~40%的CO<sub>2</sub>进一步转化为甲烷。刘传奇等<sup>[29]</sup>采用MEC工艺进行沼气提质,使沼气中甲烷含量提高到97.0%,CO<sub>2</sub>浓度降低至3%以下。综上,采用AD-MEC耦合工艺进行厨余垃圾高值资源化,各类环境影响潜值与AD工艺相比均有显著降低。

## 2.2 环境影响贡献源分析

基于厨余垃圾产沼生命周期的环境影响综合值分析,开展AD和AD-MEC耦合工艺各处理单元不同环境影响类型的贡献源解析。AD和AD-MEC耦合工艺各单元的环境贡献差异显著。如图3a所示,AD工艺的PT、BP和ST为环境影响的主要贡献源,AD单元影响较小。其中,PT单元是GWP和PED环境影响潜值的主要来源,占比分别为45.81%和43.71%。由于湿热水解预处理单元需要加水、加热,造成初级能源消耗量大,进而造成GWP影响较大,由于电力消耗为火力发电造成温室气体排放占比大。ST单元对EP的环境影响潜值贡献最大,为70.44%,这主要是由于污水处理单元输出到环境的SS、COD和总氮会带来富营养化风险。BP单元是WU环境影响潜值的主要来源,占比为91.49%。由于AD工艺采用传统化学吸收法进行沼气纯化,该方法水资源消耗量大,造成WU贡献率高。如图3b所示,AD-MEC耦合工艺的PT和ST为环境影响的主要贡献源,MEC和AD单元影响较小。AD-MEC耦合工艺的PT单元在各项环境影响潜值中占比均最高,是GWP、PED、WU和AP环境影响潜值的主要贡献源,贡献率占比分别为79.64%、78.24%、92.66%和73.54%。ST单元对GWP、PED、AP和EP的环境影响潜值贡献仅次于PT单元,贡献率占比分别为19.69%、21.05%、

25.6%和33.88%,与AD工艺中ST单元对环境影响的贡献率规律一致。由于MEC单元对发酵剩余沼液的深度利用和沼气净化的贡献,使WU贡献率占比差异显著,AD工艺的WU贡献源主要为沼气纯化单元,AD-MEC耦合工艺的WU贡献源主要为PT单元。可见,增加了MEC单元的AD-MEC耦合工艺可削减各项环境影响指标对环境影响的贡献率。同时,PT单元的湿热水解预处理技术成为进一步减少温室气体排放和降低环境风险的关键。

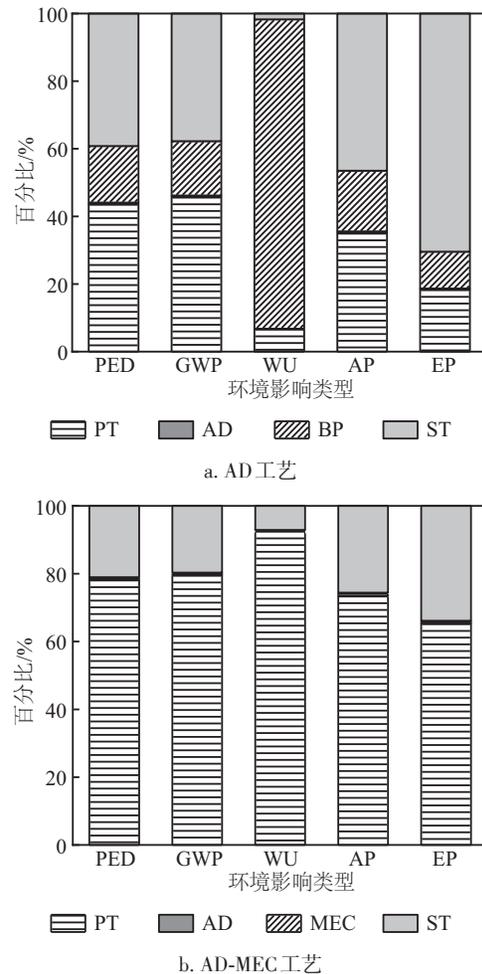


图3 厨余垃圾AD及AD-MEC工艺厌氧产沼环境影响贡献源分析

Fig. 3 Analysis of environmental impact contribution sources of AD or AD-MEC process for anaerobic biogas production from kitchen waste

湿热水解预处理是利用水热反应促进厨余垃圾的均质化,并有利于大分子物质降解和水油分离,是目前厨余垃圾沼气工程采用的主流预处理技术。然而该技术水资源和热能需求量大,导致WU和GWP环境影响潜值在AD-MEC中贡献率最高。通过提高余热回收和利用率可进一步降低环境影响潜值。此外,将沼液处理后的废水回用至湿热水解预处理单元,不仅提高了水资源利用率,还可有效解决二次污

染问题。基于此,本文对 AD 和 AD-MEC 工艺的用水方式进行优化,将 ST 单元处理后的废水全部回用到 PT 单元的水洗制浆环节,通过 LCA 得到 AD 和 AD-MEC 耦合工艺产沼气的 WU 环境影响类型的贡献率分别可削减 6.7%和 61.48%。结果表明,采用 AD-MEC 耦合工艺进行厨余垃圾厌氧产沼,改进废水回用工艺,可有效减少水资源消耗、改善工艺的生态环境和经济效益。

### 2.3 不确定度分析

数据质量评估结果见表 5,分析可知本文的主要环境影响类型的结果不确定度在 19.13%~34.53%之间。其中,结果不确定度最高的分别是 WU 和 PED,不确定度分别为 34.53%和 32.65%。对两项指标不确定度贡献最大的均是预处理单元,因此通过进一步采集、优化预处理单元数据,可进一步降低 LCA 结果的不确定度。

表 5 LCA 数据质量评估结果

Table 5 LCA data quality assessment results

环境影响类型	LCA 结果	结果不确定度/%	结果上下限 (95%置信区间)
GWP	$1.03 \times 10^2$	$\pm 30.78$	[71, 134]
PED	$1.22 \times 10^3$	$\pm 32.65$	$[8.22 \times 10^2, 1.62 \times 10^3]$
WU	$8.64 \times 10^2$	$\pm 34.53$	$[5.66 \times 10^2, 1.16 \times 10^3]$
AP	$4.38 \times 10^{-1}$	$\pm 19.83$	$[3.52 \times 10^{-1}, 5.25 \times 10^{-1}]$
EP	$4.63 \times 10^{-2}$	$\pm 19.13$	$[3.75 \times 10^{-2}, 5.52 \times 10^{-2}]$

## 3 结论

1)对比 AD 和 AD-MEC 耦合工艺的环境影响综合值,发现 AD-MEC 耦合工艺的 GWP、PED、WU、AP 和 EP 潜值均低于 AD 工艺。AD-MEC 耦合工艺的 PT 和 ST 为贡献率最大的单元。

2)AD-MEC 耦合工艺通过沼液的深度利用和沼气净化提质,有效减少了 BP、ST 单元对 WU、EP 和 AP 指标的环境贡献率,削减率分别达到 92.29%、70.28%和 49.68%。其中,MEC 单元的各类环境影响类型的贡献率均为最低。表明 AD-MEC 耦合工艺是一种低能耗、高能源回收率的厨余垃圾资源化工艺。

3)考虑到工艺的环境影响和经济性,对 AD-MEC 耦合工艺进行优化,将 ST 单元处理后的废水全部回用到 PT 单元的水洗制浆环节,WU 潜值可进一步削减 61.48%,可有效减少水资源消耗对环境的影响。

### [参考文献]

[1] WANG J, FENG L, PALMER P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 586(7831): 720-723.

[2] MORITA M, MALVANKAR N S, FRANKS A E, et al. Potential for direct interspecies electron transfer in methanogenic wastewater digester aggregates [J]. Nature, 2011, 2(4): e00159-e00111.

[3] WEGENER G, KRUKENBERG V, RIEDEL D, et al. Intercellular wiring enables electron transfer between methanotrophic archaea and bacteria [J]. Nature, 2015, 526(7574): 587-590.

[4] MCGLYNN S E, CHADWICK G L, KEMPES C P, et al. Single cell activity reveals direct electron transfer in methanotrophic consortia [J]. Nature, 2015, 526(7574): 531-535.

[5] FU X Z, LI J, PAN X R, et al. A single microbial electrochemical system for CO<sub>2</sub> reduction and simultaneous biogas purification, upgrading and sulfur recovery [J]. Bioresource technology, 2020, 297: 122448.

[6] LOGAN B E, RABAHEY K. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies [J]. Science, 2012, 337(6095): 686-690.

[7] YU Z, LIU W Z, SHI Y J, et al. Microbial electrolysis enhanced bioconversion of waste sludge lysate for hydrogen production compared with anaerobic digestion [J]. Science of the total environment, 2021, 767: 144344.

[8] WANG H, LIU Y, DU H X, et al. Exploring the effect of voltage on biogas production performance and the methanogenic pathway of microbial electrosynthesis [J]. Biochemical engineering journal, 2021, 171: 108028.

[9] LIU H Z, ZHANG Y R, YANG S X, et al. Introducing electrolysis to enhance anaerobic digestion resistance to acidification [J]. Bioprocess and biosystems engineering, 2022, 45(3): 515-525.

[10] HASSANEIN A, WITARSA F, LANSING S, et al. Bioelectrochemical enhancement of hydrogen and methane production in a combined anaerobic digester (AD) and microbial electrolysis cell (MEC) from dairy manure [J]. Sustainability, 2020, 12(20): 8491.

[11] BAO H X, YANG H, ZHANG H, et al. Improving methane productivity of waste activated sludge by ultrasound and alkali pretreatment in microbial electrolysis cell and anaerobic digestion coupled system [J]. Environmental research, 2020, 180: 108863.

[12] 潘发存. 餐厨垃圾资源化利用产沼气发电的生命周期评价[D]. 南宁: 广西大学, 2018.

PAN F C. Life cycle assessment of the utilization of kitchen waste to produce biogas for power generation [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.

[13] 刘航驿, 颜蓓蓓, 林法伟, 等. 生命周期视角下 2 种餐厨垃圾资源化处理方案的对比分析 [J]. 环境工程, 2021, 39(9): 169-175.

- LIU H Y, YAN B B, LIN F W, et al. Comparative analysis of two kinds of food waste recycling schemes from the perspective of LCA [J]. *Environmental engineering*, 2021, 39(9): 169-175.
- [14] WU M K, HU J G, SHEN F, et al. Conceptually integrating a multi-product strategy for the valorization of kitchen waste towards a more sustainable management [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 306: 127292.
- [15] FOLEY J M, ROZENDAL R A, HERTLE C K, et al. Life cycle assessment of high-rate anaerobic treatment, microbial fuel cells, and microbial electrolysis cells [J]. *Environmental science & technology*, 2010, 44(9): 3629-3637.
- [16] ZHANG J Y, YUAN H Y, ABU-REESH I M, et al. Life cycle environmental impact comparison of bioelectrochemical systems for wastewater treatment [J]. *Procedia CIRP*, 2019, 80: 382-388.
- [17] 王欣. 基于改进LCA的污泥处置环境影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
WANG X. Environmental impact analysis of sludge disposal based on improved LCA [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [18] 宋雨田, 王雪强, 毕胜山, 等. 燃料电池公共汽车氢能利用系统评价[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(3): 651-658.  
SONG Y T, WANG X Q, BI S S, et al. Assessment of fuel cell bus hydrogen energy system [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2018, 39(3): 651-658.
- [19] SOLEYMANI A T, GRZESIK K, RÖDL A, et al. Life cycle assessment of bioethanol production: a review of feedstock, technology and methodology [J]. *Energies*, 2021, 14(10): 2939-2939.
- [20] 刘蔚, 毛开伟, 张廷军, 等. 生命周期评价体系的开发及其在生物质资源化领域的应用进展[J]. *环境工程*, 2019, 37: 384-388.  
LIU W, MAO K W, ZHANG T J, et al. Development of life cycle assessment and application in biomass resource recovery [J]. *Environmental engineering*, 2019, 37: 384-388.
- [21] 夏芳芳, 谭婧, 周洋, 等. 杭州天子岭餐厨垃圾厌氧消化沼气项目案例研究[J]. *中国沼气*, 2018, 36(2): 75-80.  
XIA F F, TAN J, ZHOU Y, et al. Case study of hangzhou tianziling food waste anaerobic digestion project [J]. *China biogas*, 2018, 36(2): 75-80.
- [22] DYKSTRA C M, CHENG C, PAVLOSTATHIS S G, et al. Comparison of carbon dioxide with anaerobic digester biogas as a methanogenic biocathode feedstock [J]. *Environmental science & technology*, 2020, 54(4): 8949-8957.
- [23] CUSICK R D, BRYAN B, PARKER D, et al. Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater [J]. *Applied microbiology and biotechnology*, 2011, 89(6): 2053-2063.
- [24] 汪涛. 餐厨垃圾厌氧消化处理全过程综合评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.  
WANG T. Study on comprehensive assessment of whole process for food waste anaerobic digestion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [25] 操家顺, 赵嘉楠, 操乾, 等. 基于生命周期评价的两种城市生活垃圾处理模式对比[J]. *环境保护科学*, 2019, 45(6): 92-100.  
CAO J S, ZHAO J N, CAO Q, et al. Comparison of two disposal modes of municipal solid waste based on life cycle assessment [J]. *Environmental protection science*, 2019, 45(6): 92-100.
- [26] 赵秀娟, 贾俊龙, 王倩, 等. 碳中和背景下生命周期评价方法在烧结工序的应用[J]. *河北冶金*, 2021(7): 78-84.  
ZHAO X J, JIA J L, WANG Q, et al. Application of life cycle assessment in the sintering process under the background of carbon neutrality [J]. *Hebei metallurgy*, 2021(7): 78-84.
- [27] 衣瑞建, 张万钦, 周捷, 等. 基于LCA方法沼渣沼液生产利用过程的环境影响分析[J]. *可再生能源*, 2015, 33(2): 301-307.  
YI R J, ZHANG W Q, ZHOU J, et al. Environmental impact analysis on the production and utilization of digestate based on LCA method [J]. *Renewable energy resources*, 2015, 33(2): 301-307.
- [28] ZHANG T, BAIN T S, BARLETT M A, et al. Sulfur oxidation to sulfate coupled with electron transfer to electrodes by *Desulfuromonas* strain TZ1 [J]. *Microbiology*, 2014, 160(Pt1): 123-129.
- [29] LIU C Q, XIAO J W, LI H Y, et al. High efficiency in-situ biogas upgrading in a bioelectrochemical system with low energy input [J]. *Water research*, 2021, 197: 117055.

## LIFE CYCLE ASSESSMENT OF COUPLING PROCESS OF ANAEROBIC DIGESTION AND MICROBIAL ELECTROLYSIS CELLS FOR METHANE PRODUCTION FROM FOODWASTE

Guo Meixin<sup>1,2</sup>, Zhu Yusen<sup>1,2</sup>, Guo Meng<sup>1,2</sup>, Li Mingxiao<sup>3</sup>, Qi Xuejiao<sup>3</sup>, Jia Xuan<sup>1,2</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Food Chain Pollution Control, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Key Laboratory of Cleaner Production and Integrated Resource Utilization of China National Light Industry, Beijing 100048, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Anaerobic digestion (AD) is the mainstream process for clean energy utilization of food waste. By constructing a coupled process (AD-MEC) of AD and microbial electrolysis cells (MEC), the environmental impacts of AD and AD-MEC, which produced methane by treating food waste, were compared based on whole life cycle assessment (LCA). The environmental impact contribution of each functional unit was analyzed, and an optimization scheme was proposed. The results showed that compared with the traditional AD process, the potential environmental impacts of the new AD-MEC were lower than those of the AD in terms of eutrophication, climate change, water consumption, acidification and primary energy consumption, with reduction ratios of 70.28%, 39.53%, 92.29%, 49.68% and 41.2% respectively. The analysis of the contributing sources revealed that the pretreatment and wastewater treatment units of the coupled AD-MEC process were the main contributors to the environmental impact, with the MEC and AD units having a smaller impact. Based on the result, the coupled AD-MEC was optimized and the effluent from the wastewater treatment unit was reused in the pre-treatment unit. The potential environmental impact of water consumption was further reduced by 61.48%. Therefore, the AD-MEC coupled process for biogas production from food waste has significant economic and ecological value by effectively reducing the environmental impact and resource consumption of the food waste treatment process through the in-depth utilization of the biogas slurry, the purification and quality of the biogas and the reuse of the wastewater.

**Keywords:** food waste; anaerobic digestion; microbial electrocatalysis; methane; whole life cycle assessment; contribution source analysis