



移动扫码阅读

贾如月,胡术刚,耿姣. 湖州市餐厨垃圾产沼气发电生命周期分析[J].能源环境保护,2021,35(5):48-54.
JIA Ruyue, HU Shugang, GENG Jiao. Life cycle assessment of biogas power generation from kitchen waste in Huzhou City [J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(5): 48-54.

湖州市餐厨垃圾产沼气发电生命周期评价

贾如月,胡术刚*,耿 姣

(山东科技大学 安全与环境工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:为实现餐厨垃圾资源化利用,通过实验探究了湖州市餐厨垃圾的产气性能,采用生命周期评价(LCA)方法分析了湖州市餐厨垃圾产沼气发电和火力发电的环境影响。结果表明:餐厨垃圾具有良好的产气性能,产气量为 0.92 L/天;添加适当比例的污泥可促进产气,当餐厨垃圾与污泥比为 9:1 时,体系产气高峰期可提前 3~4 天;与火力发电相比,沼气发电具有更高的环境影响潜力值;环境影响潜力值由高到低依次为酸化(AP)、全球变暖(GWP)、人体健康(HTP)、富营养化(EP),酸化的环境减排能力比火力发电高 93.26%。

关键词:餐厨垃圾;产气量;产沼气发电;火力发电;生命周期评价

中图分类号:X705

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)05-0048-07

Life cycle assessment of biogas power generation from kitchen waste in Huzhou City

JIA Ruyue, HU Shugang*, GENG Jiao

(College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to realize the resource utilization of kitchen waste, the gas production performance of kitchen waste in Huzhou City was investigated through experiments. The life cycle assessment (LCA) method was used to analyze the environmental impact of biogas power generation from kitchen waste and thermal power generation in Huzhou City. The results show that kitchen waste has good gas production performance, with a gas production of 0.92 L/day. Adding appropriate proportion of sludge can promote gas production. When the ratio of kitchen waste to sludge is 9:1, gas production peak of the system will be arrived 3~4 days in advance. Compared with thermal power generation, biogas power generation has higher environmental impact potential. The environmental impact potential ranked from high to low is acidification potential (AP), global warming potential (GWP), human health potential (HTP), and eutrophication potential (EP). The environmental emission reduction capacity of acidification is 93.26% higher than that of thermal power generation.

Key Words: Kitchen waste; Gas production; Biogas power generation; Thermal power generation; Life cycle assessment

0 引 言

我国的电力结构至今还是以火力发电为

主^[1-2],化石能源的消耗不仅造成资源的耗竭还会带来严峻的环境问题^[3-5]。随着社会经济的快速发展及人们环保意识的不断增强,餐厨垃圾资源

收稿日期:2021-07-06;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:山东省重大科技创新工程项目:城镇有机固废高效制备生物燃气技术与装备及产业示范资助(2019JZZY020208)

第一作者简介:贾如月(1996-),女,山东德州人,在读硕士,主要从事固体废物资源化利用及环境管理与规划。E-mail:2038687563@qq.com

通讯作者简介:胡术刚(1970-),男,山东日照人,博士研究生,教授,主要从事固体废物处理处置及资源化研究。E-mail:husg8921@163.com

化的利用范围越来越广泛。餐厨垃圾厌氧消化^[6]产生的沼气可用于车用燃气^[7]、燃料电池^[8]、烹饪^[9-10]、发电等^[11]。餐厨垃圾产沼气发电无疑是一举两得的方式,既改善了餐厨垃圾堆积带来的环境问题也充分解决了传统火力发电的能源紧张问题。尽管餐厨垃圾产生的沼气为清洁能源^[12],但生产过程的复杂性以及厌氧工艺的不确定性都可能会对环境产生不利影响,采用生命周期评价方法(LCA)对全周期产沼气发电的环境影响进行分析评价是十分必要的。

全生命周期评价(LCA)方法^[13]最早诞生于20世纪60年代,美国可口可乐公司对饮料的包装从原材料的获取直至废弃物处理进行了全过程的分析评价^[14]。作为评估产品、过程和活动在生命周期所有阶段的环境影响的一种国际化标准方法,生命周期评价方法包含四大部分^[7,15]:目标和范围定义、生命周期清单分析、生命周期影响评价和结果解释^[16-17]。近几年,生命周期评价在建筑垃圾^[18-19]、生活垃圾^[20]、电子废弃产品^[23]、工业废水^[24]、农业废弃物^[25-26]等方面都有不同层次的探究。叶小梅^[27]等对水葫芦厌氧产沼气发电的三个阶段进行环境影响评价,找出了对环境影响最大的阶段并提出建设性建议;吴文君^[28]等基于

生命周期评价方法对禽畜粪便沼气热电联供系统的不同工艺及不同阶段的效益进行了比较评价分析。

就餐厨垃圾资源化产气潜力方面,本文依托湖州市餐厨垃圾处理项目,将餐厨垃圾与残余污泥共消化^[29],探究最优的混合比例以达到较高的产气量。实验首先探究了餐厨垃圾与污泥不同配比混合的产气性能,然后对日产气与累积产气以及pH对产气性能的影响进行作图分析,之后就沼气发电带来的环境影响进行全周期的分析。基于生命周期评价模型,本探究选取了全球变暖(GWP)、酸化(AP)、富营养化(EP)、人体健康(HTP)四个影响类型,针对湖州餐厨垃圾产业化项目中沼气发电全生命周期的环境排放与同功能单位下的火力发电进行对比,以期对餐厨垃圾沼气工程提供理论指导。

1 实验部分

1.1 材料与方法

原料取自湖州项目现场收集的餐厨浆料、污泥,接种物取湖州项目禽畜粪便产生的沼液,接种前需将其在37℃下活化7天^[30],以上三种物料的特性分析见表1。

表1 物料特性分析

Table 1 Analysis of material characteristics

序号	项目	原料		接种物
		餐厨浆料	污泥	
1	含水量/%	96.47	69.68	99.35
2	总固体 TS/%	3.53	30.32	0.65
3	挥发性固 VS/%	82.60	42.95	43.05
4	pH	5.5	7.0	7.0

1.2 实验装置

实验采用的产甲烷潜力自动分析仪见图1,此套装置主要由发酵单元、净化单元、甲烷气体测定单元3部分组成。发酵单元:模拟CSTR批式厌氧发酵过程,整个厌氧发酵装置置于水浴锅中保持37℃恒温培养,同时进行定时搅拌,以使实验原料充分混合;沼气净化(脱除二氧化碳、硫化氢)单元:吸收液为3 mol/L NaOH溶液(80 mL),经过该单元后的气体基本为甲烷气体;甲烷气体测定单元:模拟化cell设计,微量气体流量精准化测量,内置芯片,软硬件一体化,对数据进行采集、分析及输出。

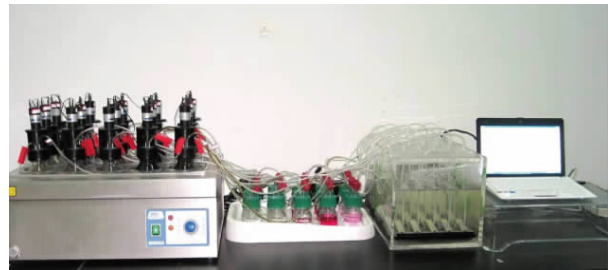


图1 实验装置图

Fig.1 Experimental device diagram

1.3 实验方法

为优化原料产气潜力,探究最优原料配比及pH条件,设置原料配比(餐厨浆料:污泥配料)分别为1:0(调节pH)、1:0(不调节pH)、9:1、

4 : 1、7 : 3、0 : 1 六组实验,其 VS 比分别为 1 : 0 (调节 pH)、1 : 0 (不调节 pH)、2 : 1、1 : 1、1 : 2、0 : 1。此外,餐厨浆料:污泥配料比 1 : 0 实验组中,方案一对 pH 进行了调节,方案二不调节 pH,未调节组的 pH 值为 5.5,调节组 pH 为 6.5。其余

各组体系 pH 均为 7,具体实验方案见表 2。实验装置置于恒温水浴锅中保持 37 ℃ 恒温发酵,每组设定 2 个平行,另外设定实验空白对照,以提高实验数据的准确性。

表 2 实验方案表

Table 2 Experimental scheme table

实验方案	原料			接种 /g	体系总物料/g	体系 TS 含量/%	pH	VS 比	备注
	原料配比 (餐厨浆料:污泥)	餐厨浆料 /g	污泥 /g						
方案一	1 : 0	200	0	200	400	2.1	6.5	1 : 0	调节 pH
方案二	1 : 0	200	0	200	400	2.1	5.5	1 : 0	未调节 pH
方案三	9 : 1	180	20	200	400	3.4	7.0	2 : 1	/
方案四	4 : 1	160	40	200	400	4.8	7.0	1 : 1	/
方案五	7 : 3	140	60	200	400	5.8	7.0	1 : 2	/
方案六	0 : 1	0	60	340	400	5.1	7.0	0 : 1	/

1.4 评价方法

本文拟通过餐厨垃圾经过预分选、厌氧发酵产沼气、沼气净化以及最终沼气发电作为研究边界,采用全生命周期评价方法(LCA)对湖州市餐厨垃圾沼气发电产生的环境排放与火力发电进行比较。

1.4.1 系统边界与功能单位

湖州餐厨废弃物资源化利用项目日处理量为 400 t/d,日产沼气 $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,沼气发电效率为 $1.8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。该研究以日发电量为 $1\,000 \text{ kW} \cdot \text{h}$,即功能单位是 $1\,000 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的电量用于计算餐厨垃圾产沼气发电的输入与输出,同时火力发电也采用该功能单位,使得这两种不同的处理系统具有可比性。整个过程的系统边界图 2 所示。

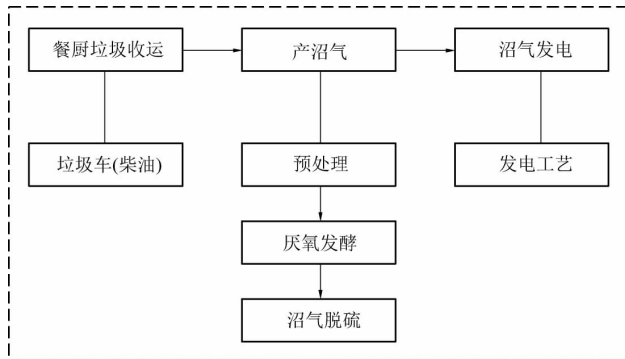


图 2 餐厨垃圾沼气发电的系统边界

Fig.2 System boundary of biogas power generation from kitchen waste

1.4.2 清单分析

本文大致将湖州市餐厨垃圾处理项目分为以

下三个阶段:①收运阶段,主要是垃圾收运车在运行时消耗柴油时排放的污染物;②产沼气阶段,包含了餐厨垃圾经预处理、厌氧发酵以及沼气脱硫净化三个主要流程,该阶段大部分依靠电力实施;③沼气发电阶段。此外,火力发电由原料开采及运输阶段和燃料发电阶段组成。为便于沼气发电与火力发电进行比较,规定餐厨垃圾产沼气发电中的①和②两部分为阶段 a,第③部分为阶段 b,同样火力发电的两部分定义为 a、b 两阶段。

1.4.3 影响评价模型

环境影响评价模型主要由以下四部分组成:特征化、标准化、加权和环境影响负荷。为探究污染物对环境的影响,本研究以全球变暖(GWP)、酸化(AP)、富营养化(EP)、人体健康(HTP)四个影响类型进行下一步的分析。依据排放清单,结合四种环境类型的计算方法和当量因子、归一化值、权重(见表 3)分别计算出环境影响潜值、标准后的环境潜值、加权后的影响潜值^[31-32],根据这些数据对沼气发电与火力发电做出对比分析。

2 结果讨论

2.1 餐厨垃圾产气性能的试验探究

2.1.1 日产气量变化

对不同配比实验组厌氧发酵日产气量进行分析,结果如图 3、图 4 所示。

由图 3 可知,配料比 1 : 0 (调节 pH 为 6.5) 实验组在培养期出现 3 个产气高峰期,但主要高峰期为培养后 8~22 天,日产气峰值为 0.92 L/天,出

表 3 环境评价模型参数值
Table 3 Parameter values of environmental assessment model

影响类型	排放物	当量因子	归一化值	权重
全球变暖 GWP	CO ₂	1	8 700 kg CO ₂	0.24
	CO	2		
	CH ₄	25		
酸化 AP	SO ₂	1	35 kg SO ₂	0.159
	NO _x	0.7		
富营养化 EP	NO ₃ ⁻	1	59 kg NO ₃ ⁻	0.105
	NO _x	1.35		
人体健康 HTP	CO	1	9 100 kg CO	0.047
	NO _x	65		
	SO ₂	100		

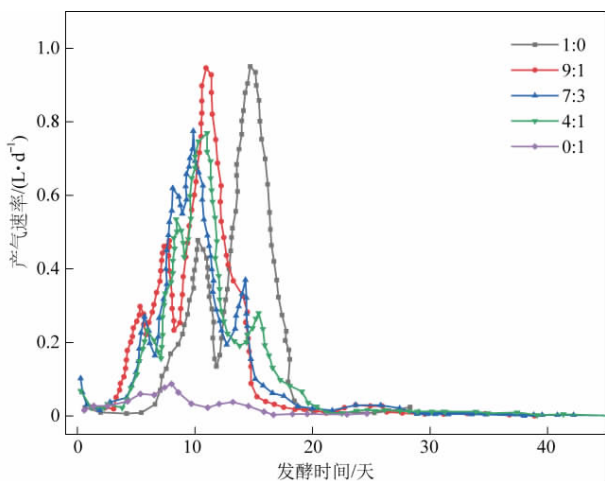


图 3 不同配比下的日产气变化

Fig.3 Variation of daily gas production at different ratios

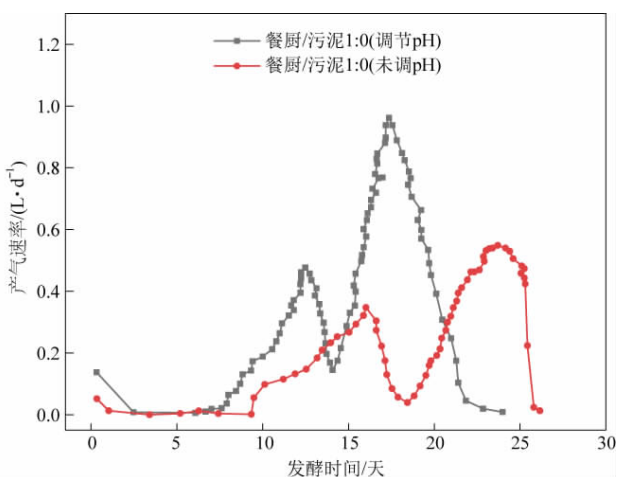


图 4 不同 pH 下的日产气变化

Fig4 Variation of daily gas production at different pH values

现在第 17 天,培养 23 天后停止产气。配料比为 9 : 1、7 : 3、4 : 1 的实验组日产气量变化趋势相似,配料比为 9 : 1 实验组主要高峰期出现在培养后 4~20 天,配料比为 4 : 1、7 : 3 实验组主要高峰

期出现在培养后 5~23 天,早于未添加污泥的实验组。配料比为 9 : 1、4 : 1、7 : 3 的实验组日产气峰值分别为 0.92、0.75、0.75 L/天,分别出现在第 13 天、12 天、11 天,培养 30 天后日产气量均不断减少,46 天后停止产气。配料比为 0 : 1 实验组(即污泥实验组)日产气量最低,在培养后第 9 天出现峰值,峰值为 0.09 L/天。可见,餐厨垃圾本身的产气率较高,这可能是因为餐厨垃圾中含有较多的有机物,这些有机物极易被微生物利用^[33]。污泥的添加可以促进餐厨浆料的分解,使其产气高峰期提前 3~4 天,但随着污泥所占比例的增加体系日产气峰值不断减少。

从图 4 可以看出,餐厨浆料/污泥配料比为 1 : 0 的实验组中,未调节 pH 组与调节 pH 组的日产气量变化趋势类似,也出现 3 个产气高峰期。但是与调节 pH 组相比,未调节 pH 组主要产气高峰期及日产气高值出现时间滞后,高峰期在培养后 10~25 天,日产高值出现在第 23 天,日产气峰值较低,为 0.52 L/天,整个厌氧发酵持续 26 天。

2.1.2 累积产气量变化

不同配比实验组厌氧发酵累积产气变化如图 5、图 6 所示。

图 5 表示厌氧发酵过程的累积产气量情况,整个发酵过程餐厨浆料:污泥配料比为 1 : 0(调节 pH)实验组持续时间较短,仅 23 天,配料比为 9 : 1、4 : 1、7 : 3、0 : 1 的实验组发酵时间相对较长,均在 45 天左右。总产气量表现为配料比 9 : 1 实验组(5.75 L) > 4 : 1 实验组(5.37 L) > 1 : 0(调节 pH)实验组(5.35 L) > 7 : 3 实验组(5.28 L) >

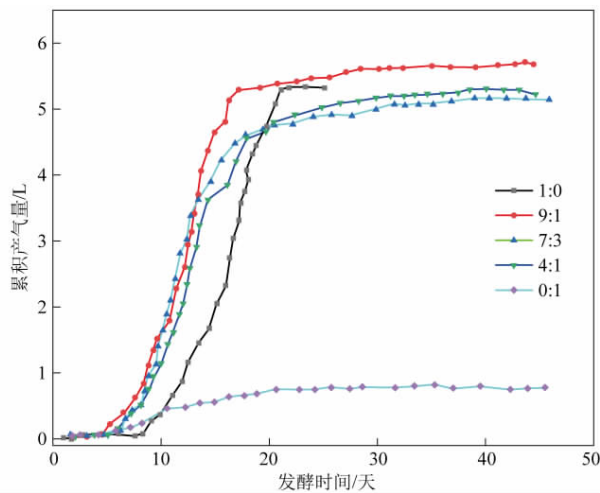


图 5 不同配比下的累计产气变化

Fig.5 Variation of cumulative gas production at different ratios

0 : 1 实验组 (0.89 L)。且在培养期内, 配料比为 1 : 0 (调节 pH)、9 : 1、4 : 1、7 : 3、0 : 1 的实验组分别在第 19、16、18、17、18 天累积产气量达到总产气量的 85%。由此可见, 污泥的添加可以使体系累积产气量达到总产气量 85% 的时间提前 1~3 天, 但随着污泥所占比例的增加, 体系总产气量不断减少。

图 6 可以看出, 餐厨浆料组将 pH 调节到 6.5

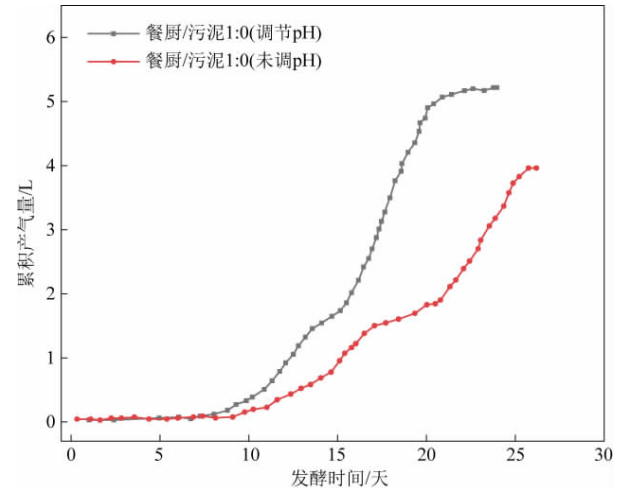


图 6 不同 pH 下的累计产气变化

Fig.6 Variation of cumulative gas production at different pH values

后发酵时间短于调节前, 调节 pH 后的时间为 23 天, 调节前为 26 天。总产气量调节 pH 实验组 (5.35 L) 大于未调节 pH 组 (4.07 L)。同时在整个培养期, 调节 pH 实验组在第 19 天累积产气量达到总产气量的 85%, 而未调节 pH 实验组相对较晚, 在第 24 天达到总产气量的 85%。

表 4 列出了本次实验各配料比体系及前期实验产气潜力。

表 4 原料产气潜力

Table 4 Gas production potential of raw materials

实验方案	配料比	培养时间/天	原料总产气量/L	单位原料产气率 / (m ³ · t ⁻¹)	单位原料 TS 产气率 / (m ³ · t ⁻¹)	单位原料 VS 产气率 / (m ³ · t ⁻¹)
方案一	1 : 0 (调节 pH)	23	5.35	26.75	757.79	917.42
方案二	1 : 0 (未调 pH)	26	4.07	20.37	577.05	698.61
方案三	9 : 1	43	5.75	28.76	463.12	732.32
方案四	4 : 1	46	5.37	26.83	301.81	543.31
方案五	7 : 3	46	5.28	26.39	228.29	443.90
方案六	0 : 1	46	0.89	14.80	48.81	113.65

从表 4 中可以看出, 不同配料比原料单位 TS 产气率差距较大, 表现为配料比 1 : 0 (调节 pH) 实验组 (757.79 m³/t TS) > 9 : 1 实验组 (463.12 m³/t TS) > 4 : 1 实验组 (301.81 m³/t TS) > 7 : 3 实验组 (228.29 m³/t TS) > 0 : 1 实验组 (48.81 m³/t TS)。由此可见, 随着污泥所占比例的增加, 体系产气潜力逐渐降低。

此外, pH 条件对餐厨厌氧发酵产气影响也较大。将 pH 调节到 6.5 的餐厨浆料实验组原料单位 TS 产气率 (757.79 m³/t TS) 大于未调节 pH 实验组 (575.05 m³/t TS)。这是因为 pH 值过低, 微

生物的生命代谢受到抑制, 导致餐厨浆料厌氧发酵产气量大大降低。工程上建议: 餐厨/污泥配料比为 1 : 0 的停留时间为 19 天, 餐厨/污泥配料比为 9 : 1 的停留时间为 16 天, 餐厨/污泥配料比为 4 : 1 的停留时间为 18 天, 餐厨/污泥配料比为 7 : 3 的停留时间为 17 天, 餐厨/污泥配料比为 0 : 1 的停留时间为 18 天。

2.2 餐厨垃圾产沼气发电与火力发电的环境排放对比

全生命周期沼气发电与火力发电的环境排放物对比数据如表 5 所示。

表 5 沼气发电与火力发电的环境排放比较

Table 5 Comparison of environmental emissions between biogas power generation and thermal power generation

项目		SO ₂	CO ₂	CO	NO _x	CH ₄	VOC
沼气发电	阶段 a	2.78E+00	2.37E+02	3.90E-01	3.80E-01	2.80E-01	4.00E-01
	阶段 b	2.09E-02	1.19E+02	2.90E-01	2.30E-01	/	2.30E-01
	全周期	2.80E+00	3.56E+02	6.80E-01	6.10E-01	2.80E-01	6.30E-01
火力发电	阶段 a	7.70E-01	0.05E+03	1.00E-02	2.80E-01	2.59E+00	1.20E+00
	阶段 b	9.16E+00	1.02E+03	1.54E+00	6.18E+00	1.00E-02	1.89E+00
	全周期	9.93E+00	1.07E+03	1.55E+00	6.46E+00	2.60E+00	3.09E+00

由表 5 可知,沼气经净化后发电的 SO₂ 排放主要集中在上游阶段,整个周期 SO₂ 排放量仅占火力发电的 28.20%; 沼气发电的 CO₂ 排放量主要集中在上游,这主要受垃圾车收运、生产柴油以及产沼气三个阶段的影响,在整个生命周期中,沼气发电 CO₂ 排放量只有火力发电的 33.25%; 沼气发电 CO 的排放量占到火力发电的 43.87%,两个阶段

几乎相等,但火力发电相差较大; NO_x 的排放量上,沼气发电仅占火力发电过程的 9.44%,远低于传统的火力发电排放; 沼气发电的全生命周期 VOC 的排放量占到火力发电的 20.39%。

该工程的环境影响潜值以及经标准化、加权赋值后的环境影响潜值如表 6 所示。

表 6 沼气发电与火力发电环境影响潜值

Table 6 Environmental impact potential of biogas power generation and thermal power generation

影响类型		沼气发电			火力发电		
		阶段 a	阶段 b	全周期	阶段 a	阶段 b	全周期
EP (kgNO ₃ /1 000 kWh)	影响潜值	5.10E-01	3.10E-01	8.20E-01	3.80E-01	8.34E+00	8.72E+00
	标准化潜值	8.64E-03	5.25E-03	1.40E-02	6.40E-03	1.40E-01	1.50E-01
	加权后潜值	9.07E-04	5.51E-03	1.46E-03	6.76E-04	1.50E-03	1.50E-03
HTP (kgCO/1 000 kWh)	影响潜值	3.03E+02	1.73E+01	3.20E+02	9.52E+01	1.32E+03	1.41E+03
	标准化潜值	3.00E-02	1.90E-03	3.10E-02	1.00E-02	1.40E-01	1.50E-01
	加权后潜值	1.41E-03	8.93E-05	1.50E-03	4.70E-04	6.58E-03	7.05E-03
GWP (kg CO ₂ /1 000 kWh)	影响潜值	2.45E+02	1.19E+02	3.64E+02	1.15E+02	1.02E+03	1.14E+03
	标准化潜值	2.80E-02	1.37E-02	4.20E-02	1.30E-02	1.20E-01	1.30E-01
	加权后潜值	6.72E-03	3.29E-03	1.00E-02	3.21E-03	2.90E-02	3.20E-02
AP (kg SO ₂ /1 000 kWh)	影响潜值	3.05E+00	1.80E-01	3.23E+00	9.70E-01	1.35E+01	1.45E+01
	标准化潜值	8.70E-02	5.14E-03	9.20E-02	2.80E-02	3.90E-01	4.10E-01
	加权后潜值	1.40E-03	8.17E-04	1.50E-02	4.45E-03	6.20E-02	6.60E-02

由表 6 可见,餐厨垃圾产沼气发电与传统的火力发电相比,全周期都呈现较高的环境影响潜值,其中酸化的环境减排能力最高,比火力发电高达 93.26%,其次是全球变暖减排 89.97% 和人体健康减排了 78.72%,表明餐厨垃圾资源化产沼气发电具有非常高的环境潜值。

3 结 论

(1) 由实验结果得知,餐厨垃圾本身的产气量很高,日产气量可达 0.92 L/天,适当比例污泥的添加会促进产气发生,当餐厨垃圾与污泥比为 9:

1 时促进效果最好,可使体系产气高峰期提前 3~4 天。

(2) 基于生命周期评价方法,餐厨垃圾产沼气发电全生命周期的污染物排放量都明显低于传统的火力发电,经标准赋值后,环境影响潜值由高到低依次是酸化(AP)、全球变暖(GWP)、人体健康(HTP)、富营养化(EP),其中酸化(AP)具有最高的环境减排能力,比火力发电高 93.26%。

参考文献

- [1] 张树伟. 碳税对我国电力结构演变的影响——基于 CSGM 模型的模拟 [J]. 能源技术经济, 2011, 23 (3): 11-15.

- [2] 张禄庆. 从数据看我国电力结构调整的形势 [J]. 中国核工业, 2007 (4): 19-23.
- [3] 时家林. 加快我国电力结构调整的思考 [J]. 能源, 2016 (1): 25-29.
- [4] 林雨, 韩磊, 张龙. 浅谈我国电力结构的调整与可持续发展 [J]. 现代经济信息, 2017 (9): 360.
- [5] 晓春. 我国电力结构不合理矛盾依然突出 [J]. 广西电业, 2008 (4): 6.
- [6] 陈丽, 刘兰英, 向奕锦. 餐厨垃圾废水与垃圾渗滤液混合处理的可行性及处理规模确定实例 [J]. 能源环境保护, 2018, 32 (1): 47-50.
- [7] Woon K S, Lo I M C, Chiu S L H, et al. Environmental assessment of food waste valorization in producing biogas for various types of energy use based on LCA approach [J]. Waste Management, 2016, 50: 290-299.
- [8] Bakonyi P, Koók L, Keller E, et al. Development of bioelectrochemical systems using various biogas fermenter effluents as inocula and municipal waste liquor as adapting substrate [J]. Bioresource Technology, 2018, 259: 75-82.
- [9] Mohammed M, Egyir I S, Donkor A K, et al. Feasibility study for biogas integration into waste treatment plants in Ghana [J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2017, 26 (3): 695-703.
- [10] Clemens H, Bailis R, Nyambane A, et al. Africa biogas partnership program: A review of clean cooking implementation through market development in East Africa [J]. Energy for Sustainable Development, 2018, 46: 23-31.
- [11] 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: 84.
- [12] 王发生, 王霞琴. 一种餐厨废水高温厌氧发酵沼气脱水工艺设计 [J]. 能源与节能, 2021 (2): 109-111.
- [13] 杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望 [J]. 环境科学进展, 1998 (2): 22-29.
- [14] 高唱. 基于 LCA 的再生混凝土环境影响评价研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020: 81.
- [15] Ruiz D, San Miguel G, Corona B, et al. Environmental and economic analysis of power generation in a thermophilic biogas plant [J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1418-1428.
- [16] 周骏贵, 胡启龙, 吕佩娟, 等. 新型墙体材料产品全生命周期评价方法综述 [J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2011 (6): 50-54.
- [17] 徐文娟. 更加精确的生命周期评价方法——区域生命周期评价 [J]. 能源研究与管理, 2021 (1): 42-49.
- [18] Nuria B, Carmen L. Inclusion of prevention scenarios in LCA of construction waste management [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2019, 24 (3): 2-7.
- [19] Huanyu W, Huabo D, Jiayuan W, et al. Quantification of carbon emission of construction waste by using streamlined LCA: A case study of Shenzhen, China [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2015, 17 (4): 637-645.
- [20] 蔡叶娟. 基于 LCA 的城市生活垃圾管理模式研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 70.
- [21] 龚大国, 孙冬, 谢明, 等. 城市生活垃圾焚烧和综合处理模式的 LCA 比较 [J]. 环境卫生工程, 2008 (4): 52-55.
- [22] 雷永佳, 姚景, 赵飞, 等. 成都市生活垃圾两种处理方式的生命周期环境影响评价 [J]. 安全与环境工程, 2014, 21 (4): 75-79.
- [23] Ester G, Belarmino A, Sebastian L, et al. Visualisation of LCA environmental impacts of electrical and electronic products using multidimensional scaling [J]. International Journal of Product Lifecycle Management, 2009, 4 (1/2/3): 16.
- [24] Ramin Z, Jafar N, Mohammad A A, et al. Application integrated fuzzy TOPSIS based on LCA results and the nearest weighted approximation of FNAs for industrial waste management—aluminum industry: Arak—Iran [J]. Indian Journal of Science and Technology, 2016, 9 (2): 2.
- [25] 刘德江, 张晓宏, 饶晓娟. 不同农作物秸秆干发酵产沼气对比试验 [J]. 中国沼气, 2015, 33 (4): 54-56.
- [26] 庞震鹏, 李永平, 朱教宁, 等. 猪粪玉米秸秆不同干物质厌氧发酵产气及稳定性研究 [J]. 安全与环境学报, 2019, 19 (5): 1767-1775.
- [27] 叶小梅, 常志州, 杜静, 等. 水葫芦能源利用的生命周期环境影响评价 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (12): 2450-2456.
- [28] 吴文君. 运行生命周期内禽畜养殖沼气热电联产系统综合效益能值分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018: 66.
- [29] 张天益, 王琬, 吕沿霖, 等. 餐厨垃圾厌氧消化性能提高研究进展 [J]. 应用化工, 2021, 50 (4): 1087-1093.
- [30] Pei Z L J S. High-solid anaerobic co-digestion of food waste and rice straw for biogas production [J]. The Journal of Northeast Agricultural University, 2014, 21 (4): 61-66.
- [31] 陈豫, 胡伟, 杨改河, 等. 户用沼气池生命周期环境影响及经济效益评价 [J]. 农机化研究, 2012, 34 (9): 227-232.
- [32] 吴媛媛, 常旭宁, 张佳维. 基于 LCA 方法的秸秆沼气发电和制备生物天然气的环境排放评价 [J]. 中国沼气, 2020, 38 (1): 59-65.
- [33] Han W, Zhao Y, Chen H. Study on biogas production of joint anaerobic digestion with excess sludge and kitchen waste [J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 35: 756-762.