有机负荷对餐厨垃圾厌氧消化性能影响及动力学分析

赵婉情,阳 红*,刘海鑫,黄 飚,孙春江,易卫华,刘 军 (中船重工环境工程有限公司,湖北武汉 430000)

摘 要:为探究有机负荷对餐厨垃圾厌氧消化系统的影响,在 50 L 全混合式厌氧消化反应器(CSTR)进行进料负荷从 0.72 增至 3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹的梯度实验。同时采用 Modified Gompertz 模型研究不同进料负荷(1、2、3、4、5 kgVS·m⁻³d⁻¹)产甲烷动力学特性,开展生化产甲烷潜力(BMP)试验。结果表明,日产气量和挥发性脂肪酸(VFA) 随着负荷的增加而波动上升,而吨 VS 产气量和碱度则随之下降;在负荷 3.15 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段,VFA 为 2000 mg·L⁻¹左右,酸碱比在 0.13 左右,容积产气率在 2.25 L·L⁻¹左右,系统稳定性强且厌氧消化效率高,此负荷为最佳负荷。BMP 试验显示 Modified Gompertz 模型适合描述餐厨垃圾厌氧消化过程,最大产甲烷量和最高产甲烷率均随着负荷的增加而提高。

关键词:餐厨垃圾;厌氧消化;进料负荷;产甲烷动力学

中图分类号: S216.4; X705 文献标志码: A 文章编号:1000-1166(2023)04-0026-05 DOI:10.20022/j.enki.1000-1166.2023040026

Effect of Organic Loading Rate on Process Performance of Food Waste and its Kinetic Analysis / ZHAO Wanqing, YANG Hong^{*}, LIU Haixin, HANG Biao, SUN Chunjiang, YI Weihua, LIU Jun / (China State Shipbuilding Corporation Environmental Engineering Co Ltd, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to investigate the effect of organic load rate on the anaerobic digestion system of food waste, a gradient experiment was conducted in a 50 L fully mixed anaerobic digestion reactor (CSTR) to increase the feed load from 0.72 to 3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹. At the same time, the Modified Gompertz model was used to study the methane production dynamics of different feed loads $(1,2,3,4,5 \text{ kgVS} \cdot \text{m}^{-3} \text{d}^{-1})$ were studied, and the biochemical methane production potential (BMP) test was carried out. The results showed that the daily gas production and volatile fatty acid (VFA) increased with the increase of load, while the gas production and alkalinity of VS per ton decreased with the increase of load. At the load stage of 3.15 kgVS·m⁻³d⁻¹, the VFA is about 2000 mg·L⁻¹, the acid-base ratio is about 0.13, and the volumetric gas production rate is about 2.25 L·L⁻¹. The system has strong stability and high anaerobic digestion efficiency, and this load is the best load. The BMP test showed that Modified Gompertz model is suitable for describing the anaerobic digestion process of restaurant kitchen waste. The maximum methane production and maximum methane production rate both increase with the increase of load.

Key words: food waste; anaerobic digestion; organic load rate; kinetics of methane production

在碳减排、碳中和的背景下,固体废物的减量 化、资源化和无害化已成为未来垃圾处理的首要原 则。我国生活垃圾清运量逐年增加,2020年增至 2.35亿吨^[1],其中餐厨垃圾占比达50%甚至更 高^[2-3]。若不对餐厨垃圾进行妥善处理,会造成资 源浪费甚至是污染周围环境。与堆肥等工艺相比, 厌氧消化具有适应性强、对环境的影响较小、处理基 质范围广等优势^[4],生产的沼渣可用作生物肥料且 具有高能量回收潜力,是处理餐厨垃圾重要途径之一。

餐厨垃圾与污泥和动物粪便的共消化已成为普 遍方式,但单独处理餐厨垃圾往往是比较困难 的^[5],主要原因是餐厨垃圾中含有的高蛋白导致氨 抑制,进而导致挥发性脂肪酸(VFA)的积累影响反 应^[6]。为了实现厌氧消化稳定运行,有机负荷通常 较低,Banks^[7]等研究的最适负荷为 2.25 kgVS·m⁻³

通信作者:阳 红, E-mail:yanghong813@126.com

收稿日期: 2022-11-10 修回日期: 2023-01-17

项目来源:武汉市科技计划项目(2020020602012146)

作者简介: 赵婉情(1995-), 女, 硕士, 研究方向为有机废弃物资源化利用, E-mail: 15927166289@163. com

d⁻¹,曹秀芹^[8]等研究餐厨垃圾湿式厌氧消化最佳有 机负荷为2.94 kgVS·m⁻³d⁻¹。因此,需调控系统参 数,在系统稳定运行的前提下提高最佳有机负荷。

本研究在混合式厌氧消化反应器(CSTR)中进 行有机负荷的梯度实验,通过分析反应器日产气量、 吨 VS 产气量、VFA、碱度等性能参数,探讨不同负荷 对消化系统运行的影响并确定最佳有机负荷;开展 批次生化产甲烷潜力(BMP)试验研究不同负荷的 产甲烷动力学特性,以期能促进中小型餐厨垃圾厌 氧消化工程的快速推广。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

餐厨垃圾取自食堂餐厅,进行人工筛选,手工分 拣出骨头、鱼刺,放入粉碎机粉碎,调整含固率至 18%左右。粉碎后的餐厨垃圾密封保存于4℃条件 下。使用时,提前从冰箱中取出,放置室温下自然解 冻。消化液取自余江鹰潭餐厨垃圾处理厂的餐厨垃 圾消化液,基本性质为 VFA 浓度为 800 mg·L⁻¹,pH 值为7.8。 1.2 试验装置

本试验装置如图 1 所示,装置为容积 50 L 的 CSTR,其中有效厌氧消化容积为 40 L,高径比为 1:1,材质为有机玻璃。装置外侧设有水浴层夹层, 通过与水浴锅连接,控制消化温度 38 ℃左右,内部 设置潜水搅拌器。由于餐厨垃圾浆料比较粘稠,采 用进料筒进行定量进料,同时设置电动推杆,实现自 动定时定量进料。

1.3 试验方法

本试验厌氧反应器持续运行145 d,运行阶段期 间有机负荷从0.72 kgVS·m⁻³d⁻¹逐步提高至3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹,其负荷提高过程为0.72、0.88、1.32、 1.83、2.67、3.15、3.39、3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹,各负荷 运行时间不等。期间检测消化液 pH 值、总碱度(以 CaCO₃ 计)、氨氮、VFA,并通过流量计和沼气分析仪 监测沼气产量和沼气成分,所有指标都实时汇总到 高效厌氧消化工艺失稳预警和稳定调节系统内。

1.4 分析方法

试验过程涉及到的检测项目与分析方法见表

表 1	检测项目.	与分析方法

1 .

检测指标	检测方法	仪器	厂家
TS	105℃烘干重量法	电热鼓风干燥箱	上海森信实验仪器有限公司
VS	600℃灼烧减重法	箱式电阻炉	天津天泰仪器有限公司
pH 值	玻璃电极法	pH 计	雷磁 PHS – 25
氨氮	比色法	紫外光度分光计	上海美谱达仪器有限公司
VFA	比色法	紫外光度分光计	上海美谱达仪器有限公司
碱度	指示剂滴定法	酸式滴定管	



图 1 反应器装置和进料装置图

1.5 厌氧消化产甲烷动力学特性研究

本试验使用 Modified Gompertz(MG)产甲烷模型探究厌氧消化过程中有机物降解和产甲烷机制。模型的方程式如公式(1)所示,不同有机负荷的最大产甲烷潜力、最大产甲烷日产量和迟滞期等三项

动力学参数可以通过生化产甲烷潜力(BMP)实验数据结合 origin 软件拟合计算出来。

$$P = P_{max} \times exp[-exp(\frac{R_{max} \times e}{P_{max}}(\lambda - t) + 1)](1)$$

式中: p 为累计甲烷产量, mL·g⁻¹VS; P_{max}为最

大产甲烷潜力,mL·g⁻¹VS; R_{max} 为最大甲烷日产量, mL·g⁻¹VSd⁻¹; λ 为产甲烷迟滞期,d; t 为发酵时 间,d; e 为欧拉常数,2.718。

研究 1、2、3、4、5 kgVS·m⁻³d⁻¹负荷下餐厨垃圾 厌氧消化产甲烷动力学特性。BMP 实验是指通过 测试获取单位原料在特定的厌氧消化条件下最大可 能产生的甲烷产量。BMP 厌氧消化装置由厌氧消 化瓶、NaOH 溶液瓶和量筒组成,将400 mL 消化液 装入500 mL 的厌氧消化瓶和不同量原料后充分摇 匀,用氦气吹扫5 min 置换顶部空气,随即密封后浸 置于数显恒温水浴锅中进行中温(36±1)℃批式厌 氧消化。甲烷气体的收集采用 NaOH 溶液(浓度 5%)排水集气法,保证厌氧消化过程中产生的 CO₂、 H₂S 等酸性气体能被 NaOH 溶液吸收,排出的 NaOH 溶液体积即产甲烷量。在 BMP 实验只检测甲烷产 量以及厌氧消化反应前后的样品的理化性质,如 pH 值、VFA、氨氮、碱度等理化指标。

2 结果与讨论

2.1 产气量变化与分析

日产气量和甲烷含量随时间和有机负荷变化如 图 2 所示。在整个厌氧消化期间,两者均波动变化, 变化趋势为随有机负荷的提高日产气量波动上升, 而甲烷含量随有机负荷的提高波动下降。有机负荷 从 0.72 kgVS·m⁻³d⁻¹升至 1.83 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段 日产气量变化较大,从 6.18 L 升至 70 L 左右;而有 机负荷从 3.15 升至 3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹运行阶段日 产气量变化较小,在 80~110 L 波动变化,第 121 天 日产气量达到峰值 120.86 L。

甲烷含量除去第1天68.6%外,其余均在53% ~63%内小幅度变化。甲烷含量随有机负荷每一阶 段的提高而小幅度下降,但会出现突然上升5%左 右的情况,例如第47天、99天、127天甲烷含量增 加,同时日产气量下降,可能是由于周末期间进料略 微减少导致的。有机负荷从0.72升至1.83 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段的平均甲烷含量比3.15升至 3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段的高4%,2.67 kgVS·m⁻³d⁻¹阶 段的平均甲烷含量与整个厌氧消化运行的持平。可 能是厌氧消化中产酸菌和产甲烷菌维持平衡时系统 运行良好,而继续提高负荷时,水解酸化阶段快而产 甲烷阶段慢,两类菌群平衡被打破,造成二氧化碳含





图 2 不同有机负荷下日产气量和甲烷含量变化图

2.2 容积产气率与吨 VS 产气量变化与分析

吨 VS 产气量和容积产气率随时间和有机负荷 变化如图 3 所示。有机负荷从 0.72 升至 1.83 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段吨 VS 产气量和容积产气率均随 着负荷的提高而波动上升,负荷提高至 2.67 kgVS·m⁻³ d⁻¹后,容积产气率总体仍波动上升,但吨 VS 产气 量波动下降。因为吨 VS 产气量不仅与产气量有 关,也与进料量有关,当负荷从 1.83 升至 2.67 kgVS ·m⁻³d⁻¹时进料量从 400 g 增加至 600 g,提高了 50%,但平均产气量从 59 L 提高至 69 L 左右,仅提 高了 17%。因此吨 VS 产气量随有机负荷的提高而 降低。

吨 VS 产气量在负荷 0.72 kgVS·m⁻³d⁻¹升至 1.83 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段在 800 m³·t⁻¹VS 上下波动, 2.67 升至 3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段在 650 m³·t⁻¹VS 上下波动。容积产气率在负荷 0.72 升至 0.88 kgVS ·m⁻³d⁻¹阶段低于 1 L·L⁻¹,在负荷 1.32 升至 2.67 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段处于 1 ~2 L·L⁻¹,与郭晓慧^[9]等 反应器在负荷 2.5 kgVS·m⁻³d⁻¹下容积甲烷产率 为 1.0L·L⁻¹的研究结果相似;在负荷升至 3.15



图 3 不同有机负荷下吨 VS 产气量和容积产气率变化图

kgVS·m⁻³d⁻¹后的阶段处于 2~2.5 L·L⁻¹,这比史 绪川^[10]等在负荷 3.7 kgVS·m⁻³d⁻¹时最高容积产 气率 3.51 L·L⁻¹的研究结果低,可能是后期反应器 出现 VFA 积累,系统变得不太稳定,产气并没随着 负荷增加而增多。

2.3 VFA 和碱度变化与分析

VFA 是厌氧消化过程生成甲烷的中间产物,它 们的积累是对整个系统性能有显着影响的参数之 一^[11]。VFA 和碱度随时间和有机负荷变化如图 4 所示,两者变化趋势相反,VFA 随负荷的提高波动 上升,碱度随负荷的提高波动下降,且 VFA 上升幅 度比碱度下降幅度大。VFA 在负荷 0.72 升至 1.32 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段低于 1000 mg·L⁻¹,在负荷 1.83 升至 3.15 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段处于 1000 ~2000 mg·L⁻¹, 在负荷 3.39 kgVS·m⁻³d⁻¹后的阶段逐渐升至 4000 mg·L⁻¹。碱度在 13000 ~15000 mg·L⁻¹上下波动,负荷 2.67 kgVS·m⁻³d⁻¹前在 14500 mg·L⁻¹上下波动,而 负荷升至 2.67 kgVS·m⁻³d⁻¹后的阶段碱度明显下 降,降至 13500 mg·L⁻¹左右。

当进料负荷超过 3.15 kgVS·m⁻³d⁻¹之后,碱度 随之出现较大波动下降的变化,系统内碱度的缓冲 作用下降,导致系统消化运行不稳定,VFA 持续上升。LI^[12]等认为 VFA 小于 3000 mg·L⁻¹且酸碱比 在 0.10~0.35 范围内时系统运行稳定。在负荷 3.15 kgVS·m⁻³d⁻¹阶段,系统内 VFA 在 2000 mg·L⁻¹左右波动,酸碱比在 0.1~0.15,说明此负荷 是最佳运行负荷。





2.4 不同负荷单位累积甲烷产量的动力学分析 将各负荷累计产甲烷曲线采用 Origin 2019 进 行非线性曲线拟合,拟合结果如图 5,所得参数见表 2,其中系列 1、2、3、4、5 代表负荷 1、2、3、4、5 kgVS· m⁻³d⁻¹。由图 5 可知,5 个负荷下厌氧消化 SMP 累 积产量随着负荷的升高而提高并且未出现酸化抑制 现象,有机负荷从 1 kgVS·m⁻³d⁻¹增加至 5 kgVS·m⁻³d⁻¹时,最大产甲烷量升高 59.87%。反应初期不同负荷的甲烷产量累积量相对较小且差距不大,在第6天后产甲烷量开始有较大的区别,反应第15天后产甲烷能力均下降,日产甲烷量下降。可继续增加有机负荷研究厌氧消化系统不致酸化的最优有机负荷。

由表 2 可知修正后的 R² 均大于 0.994,说明 MG 模型可以很好描述不同负荷下餐厨垃圾厌氧消 化产甲烷过程。表 2 可知随负荷的增加,最大产甲 烷量和最高产甲烷率均增加,与周慧敏^[13]等最高产 甲烷率先减少后增加的结论不同,可能是因为周慧 敏等的研究所选定的负荷较大,最低负荷达到 8.93 kgVS·m⁻³d⁻¹,本试验中选取的 5 个负荷均小于其 研究的最低值;而与 Dinh^[14]等的结论相同,可能是 因为 Dinh 等的研究负荷与本试验均较小,说明不同 的负荷范围下系统的动力学参数变化规律不同。5 个负荷均存在不同程度的延滞期,负荷为 5 kgVS· m⁻³d⁻¹延滞期最高,为 2.3 天。



图 5 不同有机负荷下产甲烷数据及 GM 模型拟合效果

3 结论

(1)50 L 厌氧消化系统的进料负荷逐步增加至 3.86 kgVS·m⁻³d⁻¹仍运行正常,日产气量、容积产 气率和 VFA 随着负荷的增加而波动上升,其中容积 产气率最后在 2.5 L·L⁻¹左右波动,VFA 升至 4000 mg·L⁻¹;而吨 VS 产气量和碱度下降,其中吨 VS 产 气量从运行开始的 1000 降至 650 m³·t⁻¹VS。

(2)通过实验数据分析发现,当有机负荷为 3.15 kgVS·m⁻³d⁻¹时,餐厨垃圾厌氧消化系统中运 行效果最佳,VFA 在 2000 mg·L⁻¹左右波动,酸碱比 在 0.1~0.15,日产气量在 80~100 L,容积产气率 在 2~2.25 L·L⁻¹,系统达到最优运行状态。

表2 不同有机负荷下拟合参数

名称	系列1	系列 2	系列 3	系列 4	系列 5				
$P_{max}/(mL \cdot g^{-1}VS)$	236.02847 ± 4.83852	260.63939 ± 2.69746	286.24559 ± 2.96111	331.41036 ± 2.41438	395.37066 ± 3.37031				
$R_{max}/(mL \cdot g^{-1}VSd^{-1})$	17.48496 ± 0.66881	20.46176 ± 0.3988	22.54523 ± 0.45643	26.87333 ± 0.36963	30.74203 ± 0.4404				
λ∕d	0.78963 ± 0.23283	1.59268 ±0.11201	1.33336 ± 0.11674	2.08869 ± 0.07659	2.36625 ± 0.08162				
\mathbb{R}^2	0.99435	0.99861	0.99847	0.99933	0.99927				

(3) 开展有机负荷 1、2、3、4、5 kgVS·m⁻³d⁻¹的 BMP 试验, MG 模型适合描述厨垃圾厌氧消化过程, 每个负荷均存在延滞期, 且最大产甲烷量和最高产 甲烷率均随着负荷的增加而提高。

参考文献:

- [1] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:国家统计局, 2021.
- [2] 谭业琴, 俞钟陆, 魏孔忠. "双碳"背景下中国餐厨垃
 坂处理现状及趋势[J]. 能源与节能, 2022, 04:63 65.
- [3] 董越勇, 邹道安, 刘银秀, 等. 我国城市生活垃圾特点 及其处理技术浅析—以杭州市为例[J]. 浙江农业学 报, 2016, 28(6):1055-1060.
- [4] Jandir P B, Ronan C C, Sandra I M, et al. Effects of temperature, proportion and organic loading rate on the performance of anaerobic digestion of food waste [J]. Biotechnology Reports, 2020, 27:e00503.
- [5] Zhang L, Jahng D. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized bytrace elements [J]. Waste Manage, 2012, 32:1509-1515.
- [6] Banks C J, Zhang Y, Jiang Y, et al. Trace element requirements forstable food waste digestion at elevated ammonia concentrations [J]. Bioresource Technology, 2012, 104:127-135.
- [7] Banks C J, Chesshire M, Heaven S, et al. Anaerobic di-

gestion of sourcesegregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance [J]. Bioresource Technology, 2011,102:612 - 620.

- [8] 曹秀芹,袁海光,丁浩,等.餐厨垃圾湿式厌氧消化 最优有机负荷及失稳指标[J].环境工程学报,2018, 12(7):2123-2131.
- [9] 郭晓慧. 餐厨垃圾厌氧消化产甲烷工艺特性及其微生物学机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014:55-87.
- [10] 史绪川, 左剑恶, 阎 中,等. 新型两相一体厌氧消化反应器处理餐厨垃圾中试研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9):3447 - 3454.
- [11] LI L, HE Q, WEI Y, et al. Early warning indicators for monitoring the process failure of anaerobic digestion system of food waste[J]. Bioresource Technology, 2014, 171: 491-494.
- [12] 盛迎雪,曹秀芹,张达飞,等.猪粪干式厌氧消化系统
 稳定性及其耐氨氮机制分析[J].中国沼气,2017,35
 (3):39-43.
- [13] 周慧敏,姜珺秋,王 琨,等.有机负荷和进料频率对高 含固厨余垃圾厌氧消化系统性能的影响[J].环境科 学学报,2020,40(10):3639-3650.
- [14] Dinh Duc N, Chang S W, Jeong S Y, et al. Dry thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of food waste:Performance evaluation, modified Gompertz model analysis, and energy balance [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 128: 203 - 210.