

有机负荷率对厨余垃圾干式厌氧消化的影响

张栋, 邹锦林, 石广甫, 王艳明

上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092

摘要: 本文在工程规模下研究了有机负荷率(OLR)对厨余垃圾干式厌氧消化过程的影响。结果表明,当 OLR 低于 $6 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,系统运行稳定;当 OLR 升至 $6\sim 9 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,氨氮(特别是游离氨)积累导致产气率和甲烷浓度显著下降,系统进入抑制性伪稳态;而当 OLR 超过 $9 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 时,挥发性脂肪酸积累与 pH 下降加剧,系统无法稳定运行。本研究说明,在厨余垃圾干式厌氧消化的工程应用中,需严格控制有机负荷与游离氨浓度,以维持系统稳定性和处理效能。

关键词: 厨余垃圾; 有机负荷率; 氨氮

Effect of organic load rate on dry anaerobic digestion of kitchen waste

Zhang Dong, Zou Jinlin, Shi Guangfu, Wang Yanming

Shanghai Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., LTD., Shanghai 200092

Abstract: This study investigates the impact of organic load rate (OLR) on dry anaerobic digestion (DAD) of food waste at engineering-scale conditions. Results demonstrate that stable system operation occurs when OLR remains below $6 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. When OLR rises to $6\sim 9 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, ammonia nitrogen accumulation (particularly free ammonia) significantly reduces gas production and methane concentration, leading to the system entering a suppressed pseudo-steady state. Beyond $9 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, volatile fatty acid buildup and pH decline exacerbate operational instability, rendering the system unmanageable. The findings highlight the critical need for precise control of organic load and free ammonia concentrations during DAD implementation to ensure system stability and treatment efficiency.

Keywords: kitchen waste; organic load rate; ammonia nitrogen

引言

厨余垃圾是典型的城市有机废弃物。据估计,到 2022 年厨余垃圾量将达到 1.2 亿吨,占城市生活垃圾的 50%^[1]。厌氧消化利用厌氧菌分解生物质并产生沼气,因其对厨余垃圾出色的处理能力、高效率 and 较低能耗,已成为一项推荐技术^[2,3]。根据固体含量,厌氧消化分为干式厌氧消化($15\% < \text{TS} < 40\%$)和湿式厌氧消化($\text{TS} < 15\%$)^[4]。干式厌氧消化凭借反应器更小、水和能耗更低、污泥和废水产生量更少的优势,在处理厨余垃圾时设计流程更简单,应用更广泛^[5,6]。

有机负荷率(OLR)是干式厌氧消化系统的一个重要因素。适当提高 OLR 可以提高沼气产量和容积效率。但高 OLR 常因抑制性化合物、酸积累和对微生物的冲击而导致工艺失败^[7]。最佳 OLR 值受原料、温度、床层结构、规模等因素影响。Tampio 等人^[8]认为 OLR 应低于 $4 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 才能获得稳定性能,而 Nagao 等人^[9]在 $5\sim 10 \text{ kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 的高 OLR 下获得了稳定的处理结果。Duan 等人^[10]进一步证明最佳 OLR 值高度依赖于原料。由于厨余垃圾富含蛋白质且碳氮比高,这导致氨积累和工艺不稳定的高度关注。然而,与湿式厌氧消化相比,厨余垃圾的干式厌氧消化在中国近年才开始应用,目前的研究主要集中在实验室规模。在工程规模上,难以保证进料物料质量和数量的绝对稳定,也无法实现类似理想实验室条件的精细调控。因此,从实验室规模实验获得的生化指标需要在工业应用中得到进一步验证。

因此,本研究旨在工程规模项目中研究厨余垃圾的干式厌氧消化。通过监测各种生化指标探讨了 OLR 对系统的影响,为其他类似项目的稳定运行提供参考。

一、材料与方法

(一) 工程规模项目与进料物料

该工程规模项目采用湿式和干式厌氧消化的协同工艺。厨余垃圾经过破碎、分选和挤压联合预处理后，液相进入湿式厌氧消化系统，而固相则泵入干式厌氧消化系统。干式厌氧消化系统设计有两个卧式单轴搅拌干式厌氧罐，有效容积为 2250 m³。每个罐处理能力为 110 吨/天，运行水力停留时间为 22 天，回流比为 30%。干式厌氧消化罐底部配备热水伴热盘管用于加热厌氧系统。厌氧消化罐可在中温（35–45℃）和高温（50–55℃）下运行。

进料包括厨余垃圾、湿式厌氧消化沼渣和园林垃圾的特性如表 1 所示。厨余垃圾样品在实验期间的不同时间点采集。厨余垃圾进料的含水率、VS（挥发性固体）和 C/N 比分别为 69.0–75.6%、81.4–85.1% 和 13.3–19.1。厌氧消化系统的最佳进料 C/N 比约为 20–25。然而，厨余垃圾进料富含蛋白质，C/N 较低。

表 1 物料样品特性

Sample	C (%)	H (%)	N (%)	C/N	TS (%)	VS (%)
1#	41.22	5.85	3.10	13.32	24.32	85.14
2#	53.19	7.91	2.96	17.39	28.10	82.67
3#	56.92	8.46	2.98	19.50	30.74	84.50
4#	51.71	7.61	3.21	16.22	31.03	84.77
5#	46.62	6.69	2.88	16.31	24.72	81.45
平均值	49.93	7.30	3.03	16.55	27.78	84.11

(二) 实验

接种和驯化阶段为第 1 天至第 75 天。将 600 m³ 的中温湿式厌氧消化沼渣和浆液接种到干式厌氧消化罐中。干式厌氧消化罐在 53℃ 下运行。中温厌氧微生物逐渐适应高温厌氧环境。从第 18 天到第 63 天，总接种量梯度增加至 1260 m³，并在生化指标稳定后准备进料。从第 76 天到第 180 天，OLR 从 1.4 kgVS/(m³·d) 逐渐增加到 11.4 kgVS/(m³·d)，直至系统变得不稳定。整个过程中持续监测工艺的生化指标。

(三) 分析方法

沿厌氧消化罐长边设计了四个取样口，以便日常取样和分析生化指标。总固体（TS）和挥发性固体（VS）通过重量法测定 [16]。工业分析（元素分析）通过元素分析仪测量。样品经 0.45 μm 滤膜过滤后测定 pH、氨氮、挥发性脂肪酸（VFA）和碱度（ALK）。pH 使用多参数水质分析仪（YSI, USA）测量。COD 采用 HACH 消解比色法测定。氨氮和 VFA 浓度根据 CJ/T221-2005 标准方法测定 [17]。ALK 通过电位滴定法测定，滴定终点为 pH 4.4~4.5 [18]。气体浓度根据在线检测器（Awite10, Germany）确定，监测指标包括甲烷、硫化氢和二氧化碳的浓度。游离氨氮（FAN）浓度通过公式（1）计算：

$$FAN = TAN \times \left[1 + \frac{10^{-pH}}{10^{-(0.09018 + \frac{2729.92}{T})}} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中 TAN 是总氨氮浓度，T(K) 是温度（开尔文）。

二、结果与讨论

接种驯化阶段以及逐渐增加 OLR 至不稳定阶段的生化指标如图 1 所示。在接种驯化阶段，随着从第 18 天开始添加接种物，甲烷浓度从 45% 逐渐增加到 60% 直至稳定。此期间的氨浓度为 4000 mg/L，并随着接种物量的增加呈上升趋势。VFA 浓度为 3000–4000 mg/L，VFA/ALK 比值维持在较低值约 0.4。这些指标表明干式厌氧消化系统中的微生物已适应高温环境，可以开始进料进入下一阶段。

从第 75 天开始，系统的 OLR 逐渐增加。在低 OLR 时，甲烷浓度相对稳定。当 OLR 超过 6 kgVS/(m³·d) 时，甲烷浓度显著下降，产气率也下降。值得注意的是，产气率在 OLR 增加后立即显著下降。随后，产气率缓慢恢复至峰值约 0.6 m³/(kgVS·d)。然而，当 OLR 超过 6 kg/(m³·d) 时，恢复的产气率低于峰值，表明干式厌氧消化系统受到抑制。在第 135 天和第 146 天，随着 OLR 分别增加到 7 和 8 kgVS/(m³·d)，产气率急剧下降。当 OLR 增加到 11 kgVS/(m³·d) 时，产气率降至 0.3 m³/(kgVS·d) 且无法恢复，表明干式厌氧消化系统因负荷过高而趋于不稳定。与产气相比，氨浓度波动不显著，相对维持在约 4000 mg/L，并随 OLR 增加而略有上升。在低 OLR 时，VFA 浓度约为 5000 mg/L，而 VFA/ALK 比值稳定在约 0.5，pH 为 7.6–7.8。然而，当 OLR 进一步增加到 8 kgVS/(m³·d) 时，氨浓度超过 5000 mg/L，而 VFA/ALK 比值急剧上升至 1.5，同时 pH 降至 7.1，表明干式厌氧消化系统不稳定。

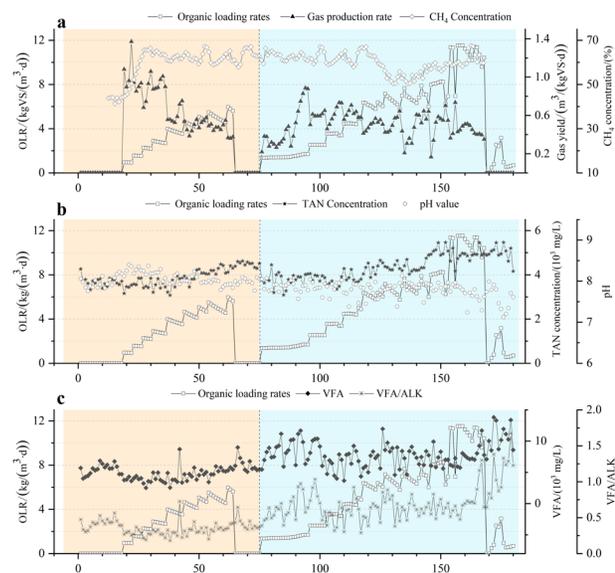


图 1. 接种驯化阶段及逐渐增加 OLR 至不稳定阶段的生化指标。a: 产气量和甲烷浓度；b: 氨浓度和 pH 值；c: VFA 浓度和 VFA/ALK 比值。

总体而言，工程规模的干式厌氧消化系统在 OLR 低于 6 kgVS/(m³·d) 时能保持稳定。当 OLR 增加到 6–9 kgVS/(m³·d) 时，产气率和甲烷浓度显著下降，但生化指标相对稳定。在此阶段，升高的氨浓度抑制了消化过程。氨氮抑制消化过程主要有两种途径：包括有氨氮对甲烷菌活性的直接抑制，以及游离氨引起的微生物细胞质子失衡和钾缺乏。游离氨（FAN）是关键抑制

剂,其浓度主要依赖于 pH 的降低。氨氮增加引起的系统不稳定导致 VFA 积累,进而引起 pH 下降,随后游离氨浓度也随之降低。这种相互作用最终导致干式厌氧消化系统进入“抑制性伪稳态”,即该状态下过程稳定运行但甲烷产率较低。当 OLR 超过 9 kgVS/(m³·d) 时,氨氮浓度和 VFA/ALK 比值急剧上升,厌氧消化系统无法稳定运行。

工程规模项目的运行指标受到进料特性波动和干式厌氧消化系统分布不均的影响。生化指标的波动远大于实验室或中试实验报道的结果。并且,当厌氧消化系统稳定运行时,这些指标处于相对较高的水平。例如,稳定运行时的氨氮浓度为 4000 mg/L,但有报道称当氨氮大于 1500 mg/L 时,消化过程会受到抑制。原

因可能是由于进料 C/N 比较低,在高氨氮环境下驯化的微生物在许多超过原始抑制浓度的条件下仍能保持其活性。

三、结论

在工程规模反应器中评估了有机负荷率(OLR)对厨余垃圾干式厌氧消化的影响。结果表明,干式厌氧消化系统在 OLR 低于 6 kgVS/(m³·d) 时可稳定运行。系统在 6~9 kgVS/(m³·d) 时受到氨氮特别是游离氨的抑制,产气率和甲烷浓度显著下降。因此,在工程规模厨余垃圾干式厌氧反应器中,如何有效控制有机负荷和游离氨水平是整个工程运行成败的关键。

参考文献

- [1] 陈文昊,袁辉洲,柯水洲,等.厨余垃圾资源化处置方式的碳补偿与能源回收潜力对比分析[J].环境工程,2023,41(7):37-44.
- [2] 邓俊.餐厨垃圾无害化处理与资源化利用现状及发展趋势[J].环境工程技术学报,2019,9(6):637-642.
- [3] 李欢,周颖君,刘建国,等.我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略[J].环境工程学报,2021,15(7):2398-2408.
- [4] 马磊,王德汉, and 曾彩明."餐厨垃圾的干式厌氧消化处理技术初探."中国沼气 25.1(2007):27-30.
- [5] 黄燕冰.餐厨垃圾高温干式厌氧消化工艺研究[D].北京工商大学,2015.
- [6] 辛梓弘,韩岗亭,刁伟霞.城市餐厨垃圾的资源化利用路径研究[J].四川环境,2023,42(04):344-350.
- [7] Mu L, Zhang L, Zhu K, Ma J, and Li A (2018) Semi-continuous anaerobic digestion of extruded OFMSW: Process performance and energetics evaluation. *Bioresour Technol* 247:103-115.
- [8] Tampio E, Ervasti S, Paavola T, Heaven S, Banks C, and Rintala J (2014) Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste. *Waste Manage (Oxford)* 34:370-377.
- [9] Nagao N, Tajima N, Kawai M, Niwa C, Kurosawa N, Matsuyama T, Yusoff F M, and Toda T (2012) Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresour Technol* 118:210-218.
- [10] Duan N, Dong B, Wu B, and Dai X (2012) High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: Feasibility study. *Bioresour Technol* 104:150-156.