

黄红辉, 王德汉, 罗子锋, 等. 有机负荷与回流比对餐厨垃圾两相厌氧消化的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(6): 47-53.

有机负荷与回流比对餐厨垃圾两相厌氧消化的影响

黄红辉¹, 王德汉¹, 罗子锋¹, 杨 洁¹, 尚卫辉²

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 广东华扬环保科技股份有限公司, 广东 肇庆 526300)

摘要:【目的】研究产甲烷相的有机负荷与沼液的不同回流比在餐厨垃圾两相厌氧消化过程中对产酸和产气的影响。【方法】以餐厨垃圾为原料, 采用两相厌氧消化工艺, 分别设置了不同的有机负荷与回流比, 考察两者对两相厌氧消化产酸和产气的影响。【结果】沼液回流可以提高产酸相的 pH, 促进餐厨垃圾酸化, 在产酸相有机负荷 (以挥发性固体物含量计, 下同) 为 11.33 g·L⁻¹·d⁻¹ 时, 回流比为 10%、30% 和 50% 处理的挥发性脂肪酸 (VFA) 质量浓度分别为 11 598.48、12 998.41 和 14 967.64 mg·L⁻¹, 比空白处理 (CK) 分别提高了 9.06%、22.23% 和 40.74%; 在沼液不回流时, 产甲烷相的最适有机负荷为 6.38 g·L⁻¹·d⁻¹, 当负荷提高至 8.50 g·L⁻¹·d⁻¹ 时, 系统出现了酸抑制现象, 而回流比为 50% 时, 可以提高系统的缓冲性, 维持系统的稳定; 回流比 50% 处理的平均负荷产气量 (以挥发性固体物含量计) 为 486.14 mL·g⁻¹, 比 CK、回流比 10% 和 30% 处理分别提高了 29.84%、20.80% 和 9.13%。【结论】餐厨垃圾两相厌氧消化过程中, 沼液不回流时, 产甲烷相的最适有机负荷为 6.38 g·L⁻¹·d⁻¹; 继续提高有机负荷, 系统会产生酸抑制现象; 当沼液回流比为 50% 时, 产甲烷相的最适有机负荷可以提高至 8.50 g·L⁻¹·d⁻¹, 系统可以保持稳定运行。

关键词: 餐厨垃圾; 两相厌氧消化; 有机负荷; 回流比
中图分类号: X799.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)06-0047-07

Effects of organic loading rate and reflux ratio on two-phase anaerobic digestion of food waste

HUANG Honghui¹, WANG Dehan¹, LUO Zifeng¹, YANG Jie¹, SHANG Weihui²

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Guangdong Huayang Environmental Protection Science and Technology Co., Ltd., Zhaoqing 526300, China)

Abstract: 【Objective】To examine the effects of different organic loading rate (OLR) and effluent recirculation rate on acid and gas productions during the two-phase anaerobic digestion of food waste. 【Method】The effects of acid and gas productions of the two-phase anaerobic digestion of food waste were investigated by setting different organic loading rate and reflux ratio. 【Result】Effluent recirculation significantly increased the pH of acidogenic reactor and accelerated the acidification of food waste. The concentrations of volatile fatty acid (VFA) in the acidogenic reactors were 11 598.48, 12 998.41 and 14 967.64 mg·L⁻¹, increased by 9.06%, 22.23% and 40.74% compared with CK when the recirculation rate was 10%, 30% and 50% at the 11.33 g·L⁻¹·d⁻¹ of OLR (based on volatile solid content, the same below), respectively. Under the condition of non-recirculation, the optimum OLR of methanogenic reactor was 6.38 g·L⁻¹·d⁻¹, but when it enhanced to 8.50 g·L⁻¹·d⁻¹, the system showed acid suppression phenomenon. The reflux ratio of 50% could help the system buffer and stabilize. The average methane production under the reflux ratio of 50% was 486.14 mL·g⁻¹

(based on volatile solid content), which was 29.84%, 20.80% and 9.13% higher than those under the reflux ratios of 0% (CK), 10% and 30%, respectively. 【Conclusion】 During the two-phase anaerobic digestion process of food waste, the optimum OLR of the methanogenic phase is $6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ when the biogas slurry is not refluxed, and the system will appear acid inhibition when the OLR continuously increases. The optimum OLR of methanogenic phase could be increased to $8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ when biogas reflux ratio is 50%.

Key words: food waste; two-phase anaerobic digestion; organic loading rate; reflux ratio

据统计,我国每年餐厨垃圾产量约为 9 000 万 t^[1],由于餐厨垃圾富含有机物,含水率高、易生化降解,容易散发恶臭^[2-4],厌氧消化技术能在处理废物的同时回收能源,被广泛用于餐厨垃圾处理^[5],且两相厌氧消化工艺是其中具代表性的一项工艺。两相厌氧消化工艺通过人为分离的方式将产酸菌和产甲烷菌分开培养,保证了产酸菌和产甲烷菌的生长和代谢均达到最佳状态^[6-7],其产气性能和抗冲击负荷的能力都要优于单相厌氧消化工艺^[8]。当产甲烷相进料负荷较高时,产酸相中产生的挥发性脂肪酸在产甲烷相中不能及时被产甲烷菌代谢,会引起酸抑制,导致甲烷相系统运行失败^[9]。郭燕锋^[10]等研究了有机负荷对餐厨垃圾单相厌氧发酵的影响,结果表明,在常温下有机负荷控制在 $3.89\sim6.49\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,可达到较高的原料产甲烷率和稳定的产甲烷过程。然而夏元亮等^[11]则发现,当有机负荷提高至 $3.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,沼气产量及产气率下降,厌氧消化过程受到抑制。吕琛等^[12]研究了果蔬和餐厨垃圾混合进行两相厌氧消化特性,结果表明,当进料负荷(以挥发性固体物含量计,下同)为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,甲烷相的日产气量迅速下降,厌氧发酵因进料负荷过高而导致失败。在两相厌氧消化工艺运行中,餐厨垃圾经过预处理(打浆)后,需要加水稀释,然后进入产酸相,用水量较大,增加了生产成本和后续沼液处理成本^[13]。为了降低运行成本,同时为厌氧系统提供具有活性的菌群,可以将产甲烷相的沼液作为过程水回流至产酸相,调整浆液的总固体含量。郝丽萍等^[14]研究了回流对蔬菜花卉类废物两相厌氧消化的影响,结果表明,回流可以缓冲 pH 和发酵产物浓度的迅速变化,有利于水解的稳定运行和提高

水解环境中的微生物量。王星等^[15]研究了消化液回流比与有机负荷对餐厨垃圾厌氧消化的影响,结果表明,系统在较低负荷运行时,回流比的提高使系统的产气率有明显的增加,当 OLR 为 9.93、14.90 和 $19.86\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,回流比从 0 提高到 60%,可使各消化系统的产气率分别从 108.45、112.70 和 $119.14\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 提高到 136.29、133.14 和 $124.65\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。目前国内对餐厨垃圾的沼液回流研究文献较少^[16-17],尤其是不同有机负荷和回流比对餐厨垃圾两相厌氧消化特性的影响研究更少^[18],从而限制了该工艺在工程上的应用。本文以餐厨垃圾为原料,设置不同有机负荷和回流比,考察两者对甲烷产率和两相厌氧消化特性的影响,从而探索餐厨垃圾两相厌氧消化有机负荷和回流的最优参数,为餐厨垃圾沼气工程高效运行和过程控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

餐厨垃圾:取自华南农业大学莘园饭堂,人工去除骨头、筷子、塑料袋等杂物,机械打浆,于冰柜(4℃)中保存,其理化性质如表 1 所示。

接种液:以佛山市瀚蓝环保餐厨垃圾处理厂的两相厌氧消化工艺中的产甲烷罐出水作为接种液,将取得的接种液放置在(35±1)℃水浴锅中,培养至产气不再增加后使用,目的是消除接种液中原有底物对试验造成的误差,其理化性质如表 1 所示。

1.2 试验装置

试验共设置 4 组装置,每组装置由产酸相和产甲烷相组成,产酸相和产甲烷相均放置在恒温培养箱(35℃)中,如图 1 所示。反应器由大口瓶、吸收

表 1 原料特性
Table 1 Characters of raw materials

原料	pH	w ¹⁾ /%					
		TS	VS	OM	TN	P ₂ O ₅	K ₂ O
餐厨垃圾	6.82	21.31	17.01	83.92	3.23	1.95	0.43
接种液	7.45	2.37	2.07				

1)TS(总固体物)及VS(挥发性固体物)的含量以湿基计,OM(有机质)、TN(总氮)、P₂O₅、K₂O含量均以干基计

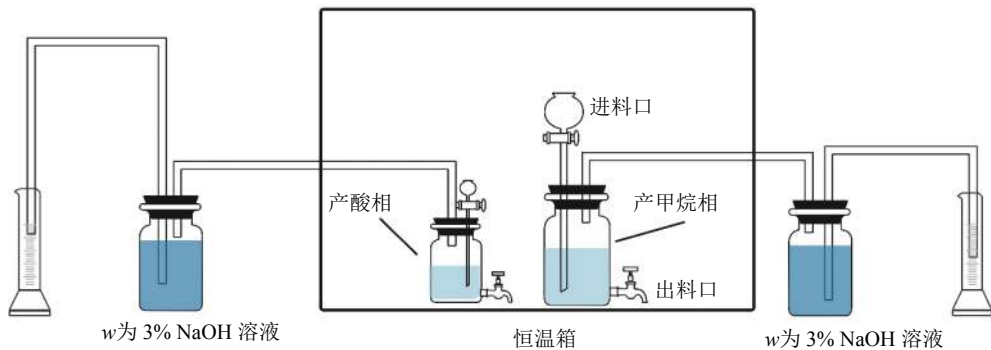


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

瓶、量筒、胶塞及乳胶软管连接组成, 顶部设置有漏斗状进料口, 进料玻璃管插到沼液液面以下, 以保证进料时保持良好厌氧状态, 底部设置出料口, 产酸相有效容积 0.3 L, 产甲烷相有效容积 0.4 L。收集软管通过培养箱排气孔穿出, 连接箱外的吸收瓶, 消化过程产生的气体经乳胶软管进入吸收瓶, 同时将等体积的质量分数为 3% 的 NaOH 溶液压入量筒, 其中 CO₂、H₂S 等酸性气体和水蒸气易溶于碱液, 即经过吸收瓶后, 排入量筒的液体体积即为所产甲烷气体体积^[19]。

1.3 试验设计

试验的产酸相的有机负荷设置为 11.33 g·L⁻¹·d⁻¹, 产甲烷相的有机负荷设置 4 个水平, 分别为 2.13、4.25、6.38 和 8.50 g·L⁻¹·d⁻¹, 回流比^[17](每日回流产甲烷相沼液体积/每日产酸相进料体积) 分别设为 0、10%、30% 和 50%, 即产甲烷相出水回流至产酸相中, 分别记为 CK、T1、T2 和 T3, 具体如表 2 所示。在产酸相中分别加入 150 g 餐厨垃圾、50 g 接种液、100 g 蒸馏水, 控制总固体物 (TS) 质量分数为 10% 左右; 在产甲烷相中装入 300 g 接种液和 100 g 蒸馏水。产酸相厌氧消化 3 d 后, 开始进出料。每天早上 08:00, 手动摇晃反应器, 将产甲烷相的发酵液混匀, 按有机负荷对应进料体积出料, 并取对应体积的产酸相发酵液进入到产甲烷相中。随后按有机负

荷取相应量的餐厨垃圾, 加蒸馏水和对应的产甲烷相发酵液稀释至出料体积, 加入到产酸相中, 具体发酵液回流体积按照设置的回流比计算。产酸相和产甲烷相第 1 次进料后通氮气 1 min, 以保持厌氧环境。每天检测产酸相和产甲烷相的 pH、产气量、挥发性脂肪酸 (VFA)、氨氮和化学需氧量 (COD)。

1.4 分析方法

日产气量测定采用排水集气法, 每日收集并记录体积; pH 采用奥豪斯 3100/F 型 pH 计测定; VFA 含量测定采用分光光度法^[20]; 氨氮含量测定采用纳氏试剂分光光度法; COD 测定采用快速密闭消解法^[21]。试验所得数据应用 SPSS 软件进行分析, 应用 Origin 9.0 做图。

2 结果与分析

2.1 回流对产酸相的影响

pH 是厌氧消化过程中的重要参数, 产酸菌对酸碱度的适应范围较广, 一般在 4.5~8.0 之间^[22]。如图 2 所示, 产酸相启动后开始进出料和回流, 在整个试验过程中, 各处理的 pH 波动较大, 但整体的 pH 趋势为: T3>T2>T1>CK。这是因为沼液呈微碱性, 回流后补充了碱度和厌氧微生物进入产酸相,

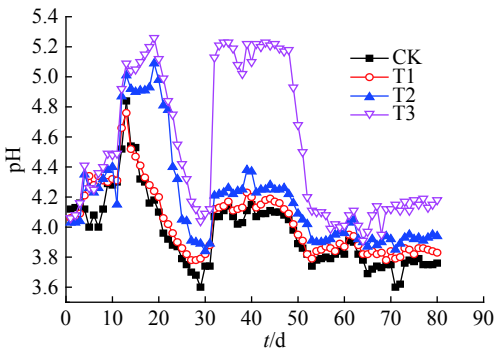


图 2 回流比对产酸相 pH 的影响

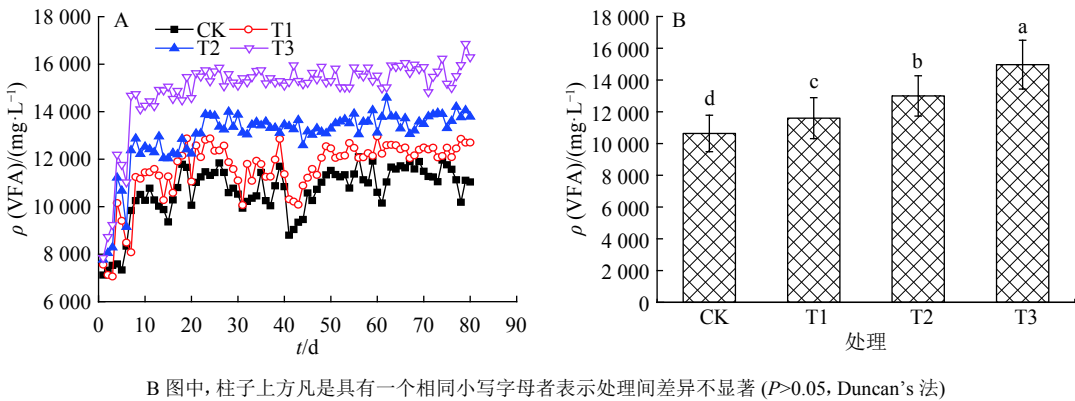
Fig. 2 Effect of effluent recirculation on pH in acidogenic reactor

表 2 两相厌氧消化工艺运行参数		产甲烷相有机负荷/(g·L ⁻¹ ·d ⁻¹)			
处理	回流比/%	1~20 d	21~40 d	41~60 d	61~80 d
CK	0	2.13	4.25	6.38	8.50
T1	10	2.13	4.25	6.38	8.50
T2	30	2.13	4.25	6.38	8.50
T3	50	2.13	4.25	6.38	8.50

增强了系统的缓冲能力。虽然 T1~T3 处理回流了部分沼液到产酸相中,但产甲烷菌最佳生长条件是 pH6.8~7.4^[23],酸性条件下,抑制了产甲烷菌的活性,但有利于产酸菌的生长代谢。最后,CK、T1、T2 和 T3 的 pH 分别基本稳定在 3.6、3.8、3.9 和 4.1 左右,说明在有机负荷为 11.33 g·L⁻¹·d⁻¹ 条件下,沼液的回流对餐厨垃圾产酸相的 pH 变化有一定的缓冲作用,且随着回流量的增加,缓冲能力增强。

VFA 是厌氧消化过程中大分子有机物水解酸化的产物,同时也是产甲烷菌所利用的底物,其浓度反映了厌氧消化系统酸化进行的程度^[13]。如图 3A

所示,在产酸相启动阶段过后,各处理的 VFA 浓度都迅速上升,并在第 7 天达到稳定,整个试验阶段,CK、T1、T2 和 T3 的 VFA 平均质量浓度分别为 10 634.41、11 598.48、12 998.41 和 14 967.64 mg·L⁻¹,如图 3B 所示,T1、T2 和 T3 处理的 VFA 质量浓度与 CK 差异达到显著水平,T1、T2 和 T3 处理的 VFA 质量浓度分别比 CK 提高了 9.06%、22.23% 和 40.74%,说明产甲烷相的沼液回流对餐厨垃圾产酸相的酸化有明显的促进作用,提高 VFA 的产量,但回流比较低时则不明显。



B 图中,柱子上方凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 3 回流比对产酸相挥发性脂肪酸 (VFA) 质量浓度的影响

Fig. 3 Effect of effluent recirculation on mass concentration of volatile fatty acid (VFA) in acidogenic reactor

2.2 有机负荷与回流对产甲烷相的影响

2.2.1 有机负荷与回流对产甲烷相产气量的影响

图 4 为有机负荷与回流对产甲烷相消化过程中产气量的影响。第 1~20 天,产甲烷相的有机负荷较低 (2.13 g·L⁻¹·d⁻¹),进入产甲烷相的消化液较少,系统有机碳源不足,而微生物利用碳源进行细胞增长,导致各处理的平均日产气量均较低,CK、T1、T2 和 T3 的平均日产气量分别为 353.84、358.68、359.10 和 360.11 mL,不同的回流比对产气量的影响并不明显;第 21~40 天,各处理的产气量随着有

机负荷的提高 (4.25 g·L⁻¹·d⁻¹) 而提高,CK~T3 处理的平均日产气量分别为 721.50、735.35、765.05 和 731.85 mL,可以看出 T2 处理 (回流比 30%) 的日产气量略高于其他处理;第 41~60 天,产甲烷相的有机负荷提高至 6.38 g·L⁻¹·d⁻¹,此阶段 CK~T3 各处理的日产气量分别为 1 149.15、1 194.45、1 199.1 和 1 211.6 mL, T1、T2 和 T3 处理的产气量分别比 CK 提高了 3.94%、4.34% 和 5.43%,可以看出产气量随着回流比的提高而有一定的提高;第 61~80 天,产甲烷相的有机负荷为 8.50 g·L⁻¹·d⁻¹,CK 和 T1 产甲烷相的日产气量呈现先提高后下降的趋势,而 T2 和 T3 的日产气量则较稳定,并未出现明显的下降趋势,CK~T3 各处理的平均日产气量分别为 1 260.20、1 360.25、1 504.60 和 1 645.70 mL, T1、T2 和 T3 分别比 CK 提高了 7.94%、19.39% 和 30.58%,回流对产甲烷相的日产气量影响差异明显。整个试验过程中,CK、T1、T2 和 T3 的累积产气量分别为 69.11、72.91、76.31 和 77.58 L, T1、T2、T3 比 CK 分别提高了 5.49%、10.40% 和 12.25%,产甲烷相的产气量随有机负荷的提高而提高,在高有机负荷条件下 (8.50 g·L⁻¹·d⁻¹),回流可以维持系统的

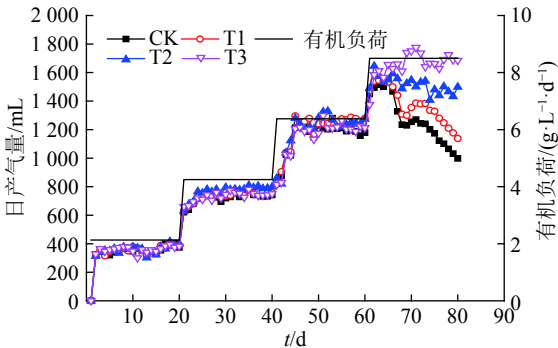


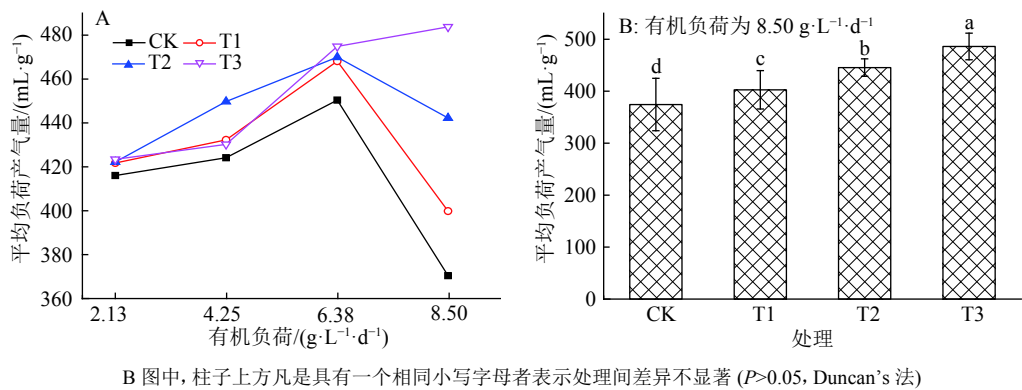
图 4 有机负荷和回流对产甲烷相产气量的影响

Fig. 4 Effects of organic loading rate and effluent recirculation on biogas production in methanogenic reactor

稳定, 且 50%回流比的效果最明显。

图 5A 为不同处理的产甲烷相在不同有机负荷下的平均负荷产气量的变化, 负荷产气量可以有效地反映出系统内微生物对有机物的利用程度^[24]。由图 5A 可以看出, 在中低负荷条件下 ($2.13\sim6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), CK~T3 各处理的平均负荷产气量 (以挥发性固体物含量计, 下同) 随着负荷的提高而提高, 但差异并不明显, 分别从 416.03 、 421.72 、 422.22 和 $423.41\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 提高至为 450.38 、 468.13 、 469.95 和 $474.85\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$; 第 61~80 天, 产甲烷相的有机负荷提高至 $8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 可以看出 CK 和 T1 处理的平均负荷产气量呈迅速下降趋势, 而 T2 处理的下降幅度较低, T3 处理的平均负荷产气量随负荷的提高而提高。这是因为在高有机负荷条件下, 一方面, 产甲烷菌不能及时将进入产甲烷相的 VFA 转化成沼气, 造成有机酸大量累积, 抑制了产甲烷菌的活性; 另一方面, 水力停留时间减少, 菌体流失较多, 而产甲烷菌繁殖速度

较慢, 导致系统的消化能力下降。沼液回流与餐厨垃圾混合后, 不仅减少了进料对系统局部的冲击^[16], 而且补充产甲烷菌进入产甲烷相, 提高了系统的消化能力, 因此回流比为 50% 时, 产甲烷相能抵抗高有机负荷的冲击, 保持系统的稳定。如图 5B 所示, 在产甲烷相的有机负荷为 $8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 时, CK、T1、T2 和 T3 的平均负荷产气量分别为 374.41 、 402.70 、 445.46 和 $486.14\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, T3 处理明显高于其他处理, 且差异显著, 较 CK、T1 和 T2 分别提高了 29.84% 、 20.80% 和 9.13% 。综合产气量和负荷产气量的变化, 产甲烷相在低有机负荷时, 产气量低, 产甲烷菌活性不高; 高有机负荷又容易造成 VFA 累积, 产气量下降; 在不回流或者回流比较低 (10%) 的情况下, 产甲烷相的最适有机负荷为 $6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 在回流比为 50% 的条件下, 产甲烷相的最适有机负荷可以提高至 $8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。



B 图中, 柱子上方凡是具有一个相同小写字母者表示处理间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 5 不同处理的产甲烷相负荷产气量的变化

Fig. 5 Effects of different treatments on biogas productions

2.2.2 有机负荷与回流对产甲烷相稳定性的影响

VFA 和氨氮既为微生物的生长提供碳源和氮源, 又作为产甲烷相的缓冲剂, 调节 pH, 维持微生物生长的生理环境, 因此是表征厌氧消化系统稳定性的重要指标^[25]。图 6 为不同处理的产甲烷相在不同负荷条件下的消化液 VFA 质量浓度的变化。在中低负荷条件下 ($2.13\sim6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), 各处理的 VFA 质量浓度随着负荷的提高从 $360\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐提高至 $900\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 系统运行良好; 在高负荷时 ($8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), CK 和 T1 的 VFA 质量浓度迅速上升, 且远超产甲烷相正常运行 VFA 的上限质量浓度 $3\text{ }000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[26], 同时日产气量和负荷产气量也开始下降 (图 4、图 5), 系统已经出现酸抑制现象; 而 T2 处理随有机负荷的提高, VFA 质量浓度也上升至 $2\text{ }600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 接近酸抑制浓度, 系统稳定性一般; T3 处理的 VFA 质量浓度稳定在 $2\text{ }000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

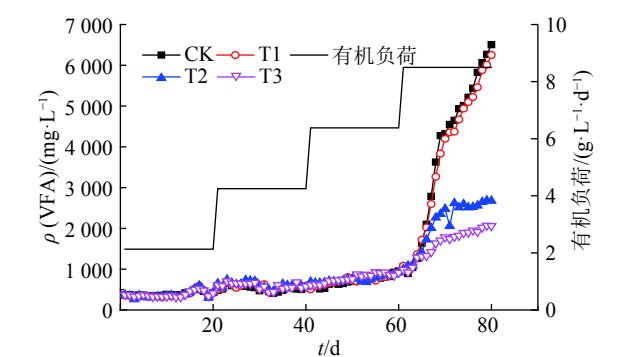


图 6 产甲烷相消化液挥发性脂肪酸 (VFA) 质量浓度的变化
Fig. 6 The mass concentration of volatile fatty acid (VFA) in methanogenic reactor

左右, 系统稳定性较好。

如图 7 所示, 在中低负荷条件下 ($2.13\sim6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), 各处理的氨氮质量浓度随着负荷的提高, 从 $1\text{ }100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 而逐渐提高至 $1\text{ }500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

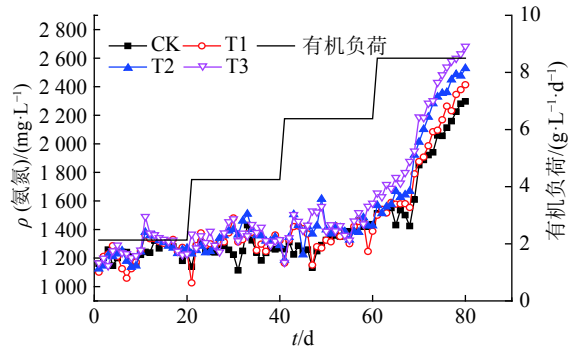


图 7 产甲烷相消化液氨氮质量浓度的变化

Fig. 7 The mass concentration of ammonia nitrogen in methanogenic reactor

左右,这是因为餐厨垃圾中含有大量的蛋白质,厌氧消化过程中,蛋白质水解为氨基酸,并进一步被转化为氨氮,但厌氧消化对氨氮去除效率并不高,因此系统在长时间的运行过程中,氨氮逐渐累积。在高负荷时 ($8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),各处理的氨氮质量浓度迅速上升,且上升速度 $\text{T3} > \text{T2} > \text{T1} > \text{CK}$,CK~T3 各处理的氨氮分别上升至 $2\,297.14$ 、 $2\,413.77$ 、 $2\,528.55$ 和 $2\,682.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但一般认为,氨氮质量浓度不超过 $1\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,不会对厌氧消化过程有明显的抑制作用,超过 $3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 才会产生抑制作用^[27-28]。可以看出,在高有机负荷下,产甲烷相的氨氮含量随回流比的增大而上升,但试验全程的氨氮含量未达到抑制上限,未发生氨氮抑制现象。

图 8 为不同处理的产甲烷相的消化液 COD 变化情况。在低中有机负荷条件下 ($2.13\sim6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),产甲烷菌能迅速将有机物转化为甲烷,保持系统的稳定,此时各处理的产甲烷相 COD 均比较低,稳定在 $2\,000\sim3\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,CK~T3 各处理的平均 COD 去除率分别为 90.31% 、 90.49% 、 91.62% 和 90.50% ;在高负荷时 ($8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),CK 和 T1 产甲烷相的 COD 迅速上升,而 T2 和 T3 的 COD 缓慢上升,CK~T3 各处理的 COD 平均为 $5\,478.76$ 、 $4\,842.97$ 、

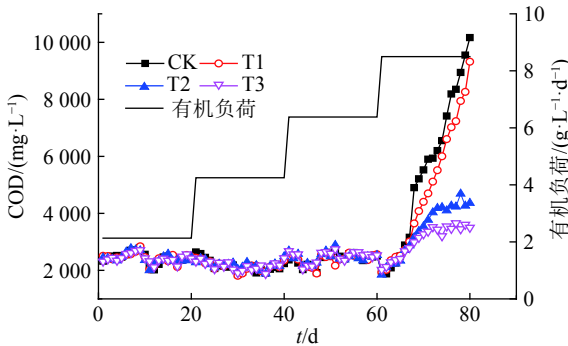


图 8 产甲烷相消化液化学需氧量 (COD) 的变化

Fig. 8 The chemical oxygen demand (COD) in methanogenic reactor

$3\,426.17$ 和 $3\,040.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,各处理的平均 COD 去除率分别下降至 78.40% 、 81.67% 、 87.35% 和 89.32% 。这是因为高有机负荷时,CK 和 T1 处理的产甲烷相不能将小分子有机物及时转化为甲烷,使有机物累积,但适当的回流可以提高系统的缓冲能力,维持系统的产气效率。

3 讨论与结论

有机负荷,即反应器在厌氧消化过程中单位时间单位容积内所消化的挥发性有机物量,它反映了消化底物和微生物的关系,是影响厌氧消化工艺运行的关键因素。Pavan 等^[29]对蔬菜水果的单相与两相厌氧消化进行了研究,结果表明,单相发酵在有机负荷为 $3.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 时发生酸抑制,而两相厌氧消化的有机负荷提高至 $7.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$,未产生酸抑制;钟起隆等^[30]研究发现餐厨垃圾产酸相的 OLR 为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,VFA 含量平均为 $55\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,产甲烷相的有机负荷为 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,原料产气率为 $2.3\text{ L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, CH_4 含量在 $65\%\sim70\%$ 之间,系统运行良好;张妍等^[31]对餐厨垃圾两相厌氧消化工艺进行了研究,结果表明,产甲烷相在有机负荷为 4.33 、 5.45 、 7.33 、 7.40 、 10.85 和 $11.40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 时均顺利运行,沼气平均产率为 $463\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,COD 平均去除率可达 85% 。在本研究中,产甲烷相在有机负荷为 $2.13\sim6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,均保持稳定运行,与以上结果一致;但当产甲烷相有机负荷提高至 $8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 时,系统出现酸抑制现象。

有研究表明,沼液回流可以提高单相和两相厌氧消化系统的产气量和产气效率^[16-17],且可以提高产酸相的缓冲性能^[32],但回流量过高时,容易造成系统氨氮和丙酸累积^[33];董晓莹^[34]研究回流对蔬菜废弃物两相厌氧消化系统的影响,结果发现 25% 的沼液回流比对两相厌氧系统的影响效果最佳。而在本研究中,沼液回流在产甲烷相的有机负荷为 $2.13\sim6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 条件下,对产甲烷相的产气效果及缓冲作用并不明显;但在高负荷的条件下 ($8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$),沼液回流比为 $30\%\sim50\%$ 时,显著地提高了产甲烷相的产气量与缓冲能力,维持了产甲烷菌的适宜生长环境。因此将餐厨垃圾两相厌氧消化中产甲烷相的沼液作为过程水回流至产酸相,既可以减少后续的沼液处理负荷和处理成本,又可以促进两相厌氧消化的产酸量和产气量,提高经济效益。但沼液长期回流对产酸菌、产甲烷菌的影响仍有待研究。

综上所述,餐厨垃圾两相厌氧消化过程中,沼液不回流时,产甲烷相的最适有机负荷为 $6.38\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,

继续提高有机负荷, 系统会产生酸抑制现象; 当沼液回流比为 50% 时, 产甲烷相的最适有机负荷可以提高至 $8.50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 系统可以保持稳定运行。

参考文献:

[1] ZHANG C S, SU H J, BAEYENS J, et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2014, 38: 383-392.

[2] 唐嘉陵, 王晓昌, 蒲云辉, 等. 餐厨垃圾酸性发酵及其产物为碳源的脱氮特性[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1426-1433.

[3] 张玉静, 蒋建国, 王佳明. pH 值对餐厨垃圾厌氧发酵产挥发性脂肪酸的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4): 680-684.

[4] 黄丽丽, 张妍, 商细彬, 等. 餐厨垃圾两相厌氧发酵工艺恶臭排放特征[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 252-256.

[5] 李蕾, 何琴, 马垚, 等. 厌氧消化过程稳定性与微生物群落的相关性[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(11): 3397-3404.

[6] FEZZANI B, BEN CHEIKH R. Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101(6): 1628-1634.

[7] GRIMBERG S J, HILDERBRANDT D, KINNUNEN M, et al. Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase pilot scale digester-assessment of variable loadings on system performance[J]. *Bioresour Technol*, 2015, 178(2): 226-229.

[8] NATHAO C, SIRISUKPOKA U, PISUTPAISAL N. Production of hydrogen and methane by one and two stage fermentation of food waste[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2013, 38(35): 15764-15769.

[9] 梅冰, 彭绪亚. 餐厨垃圾厌氧消化系统过程监控参数的分析[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(21): 43-46.

[10] 郭燕锋, 孔晓英, 刘婉玉, 等. 有机负荷对厨余垃圾常温厌氧发酵产甲烷的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊1): 96-100.

[11] 夏元亮, 刘程, 吕丹, 等. 有机负荷对餐厨单相厌氧消化产甲烷的影响[J]. *环境卫生工程*, 2014, 22(6): 66-68.

[12] 吕琛, 袁海荣, 王奎升, 等. 果蔬垃圾与餐厨垃圾混合厌氧消化产气性能[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊1): 91-95.

[13] 卢艳娟, 尤宇嘉. 沼液回流对厌氧沼气工程的影响[J]. *中国沼气*, 2015, 33(3): 66-68.

[14] 郝丽萍, 吕凡, 何晶晶, 等. 甲烷化出水循环量对固体废物厌氧水解的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2637-2642.

[15] 王星, 王德汉, 张玉帅, 等. 消化液回流比与有机负荷率对餐厨垃圾厌氧消化的影响[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(10): 748-752.

[16] 王馨仪, 郭建斌, 吴树彪, 等. 发酵液回流对餐厨垃圾厌

氧消化的影响[J]. *环境工程*, 2012, 30(5): 77-82.

[17] 李秀金, 陈雪, 左小宇, 等. 回流对餐厨垃圾和稻草混合两相厌氧消化的影响[J]. *中国沼气*, 2015, 33(3): 32-37.

[18] GOTTARDO M, MICOLUCCI F, BOLZONELLA D, et al. Pilot scale fermentation coupled with anaerobic digestion of food waste: Effect of dynamic digestate recirculation[J]. *Renew Energy*, 2017, 114(7): 455-463.

[19] 马磊, 王德汉, 谢锡龙, 等. 接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 178-182.

[20] 中国科学院成都生物研究所《沼气发酵常规分析》编写组. 沼气发酵常规分析[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1984.

[21] 魏复盛, 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[22] 周孟津, 张榕林. 沼气实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[23] CHEN Y, CHENG J J, CREAMER K S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review[J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(10): 4044-4064.

[24] 王龙, 邹德勋, 刘研萍, 等. 进料负荷对中试规模餐厨和果蔬混合厌氧消化的影响[J]. *中国沼气*, 2014, 32(1): 37-42.

[25] 李政伟, 尹小波, 王星, 等. 餐厨垃圾高温中试两相厌氧发酵的稳定性[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(11): 6662-6668.

[26] 吴婉娥, 葛红光, 张克峰. 废水生物处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[27] KARTHIKEYAN O P, VISVANATHAN C. Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: A review[J]. *Rev Environ Sci Bio*, 2013, 12(3): 257-284.

[28] OMIL F, MÉNDEZ R, LEMA J M. Anaerobic treatment of saline wastewaters under high sulphide and ammonia conten[J]. *Bioresour Technol*, 1995, 54(3): 269-278.

[29] PAVAN P, BATTISTONI P, CECCHI F, et al. Two-phase anaerobic digestion of source-sorted OFMSW: Performance and kinetic study[J]. *Water Sci Technol*, 2000, 41(3): 111-118.

[30] 钟起隆, 李秀金, 李兵, 等. 餐厨垃圾 SBMR-ASBR 两相厌氧消化产气性能研究[J]. *可再生能源*, 2012, 30(10): 47-51.

[31] 张妍, 黄丽丽, 商细彬, 等. 不同有机负荷下餐厨垃圾两相连续式厌氧消化特征研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(9): 115-118.

[32] 左壮. 蔬菜废弃物厌氧消化产酸特性及回流调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.

[33] 杜倩, 李文哲, 姜海涛, 等. 消化液回用对牛粪两相厌氧消化的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2011, 42(2): 33-38.

[34] 董晓莹. 蔬菜废弃物两相厌氧消化工艺产沼气试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.

【责任编辑 李晓卉】