

接种比对餐厨垃圾中温厌氧消化的影响

房明^{1,3} 吴树彪^{2,3*} 张万钦^{1,3} 李伟^{2,3} 庞昌乐^{2,3} 董仁杰^{2,3}

(1. 中国农业大学 农学与生物技术学院,北京 100193;

2. 中国农业大学 工学院,北京 100083;

3. 农业部可再生能源清洁化利用技术重点实验室,北京 100083)

摘要 在(37±1)℃条件下采用批式厌氧消化试验方法,研究接种比(m (接种物): m (底物),按挥发性固体(VS)计)为1:1,2:1,3:1和4:1时去油和未去油餐厨垃圾的厌氧消化性能。结果表明:未去油和去油后餐厨垃圾发酵过程中,接种比为3:1时产气量最高,单位挥发性固体(VS)沼气累积产气量分别为951.2和851.4 mL/g,单位VS甲烷累积产气量分别为546.1和499.1 mL/g;接种比为1:1时,产气量最低,单位VS沼气累积产气量分别为831.5和730.3 mL/g,单位VS累积产甲烷量分别为524.1和425.8 mL/g。接种比为1:1时,未去油和去油后餐厨垃圾在厌氧消化初始阶段pH较低,且沼气日产气量和甲烷浓度也明显低于其他各组。未去油餐厨垃圾累积产气量比去油后餐厨垃圾累积产气量高12.6%。随着接种比逐渐提高(1:1~4:1),未去油和去油后餐厨垃圾发酵过程延滞期逐渐缩短;未去油餐厨垃圾在适宜接种比(2:1~4:1)范围内延滞期均高于去油餐厨垃圾。餐厨垃圾油脂含量较高,厌氧消化延滞期较长;提高接种比有利于缩短消化时间,提高反应器运行效率。

关键词 餐厨垃圾; 厌氧消化; 沼气; 接种比; 油脂; 动力学

中图分类号 S 216

文章编号 1007-4333(2014)01-0186-07

文献标志码 A

Influence of inoculum-substrate ratio on food waste mesothermal anaerobic digestion

FANG Ming^{1,3}, WU Shu-biao^{2,3*}, ZHANG Wan-qin^{1,3}, LI Wei^{2,3}, PANG Chang-le^{2,3}, DONG Ren-jie^{2,3}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Clean Renewable Energy Utilization Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract The influence of inoculum-substrate ratio (ISR) on the anaerobic digestion of food waste were studied. For this purpose, several batch reactor experiments were performed using food waste (FW) and de-oiling food waste (DOFW) as the substrate for ISRs in the range of 1:1-4:1, under the temperature of (37±1)℃. The results showed that the highest biogas yield and methane yield were 951.2, 546.1 for food waste, 851.4 and 499.1 mL/g for de-oiling food waste respectively at ISR of 3:1. The lowest biogas yield and methane yield were 831.5 and 524.1 mL/g for food waste and 730.3 and 425.8 mL/g for de-oiling food waste respectively at ISR of 1:1. In the startup phase, due to the low pH, the daily biogas and methane concentration of FW and DOFW at ISR of 1:1 were lower than the other ISRs. Cumulative biogas production of FW increased 12.6% than that of DOFW. With ISR increased, the lag phases of FW and DOFW were getting shorter. The lag phases of FW were longer than that of DOFW in the range of 2:1-4:1. The result indicated that increasing ISR is beneficial to shorten digestion time and improve the efficiency of the reactor. As the oil content of food waste increasing, the lag phases of anaerobic were becoming longer.

Key words anaerobic digestion; biogas; food waste; inoculum-substrate ratio; oil; kinetics

收稿日期: 2013-04-26

基金项目: 2012年公益性行业(农业)科研专项(201103039); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013QJ020)

第一作者: 房明, 硕士研究生, E-mail: fangmingale@126.com

通讯作者: 吴树彪, 讲师, 主要从事生物质能与低碳技术研究, E-mail: wushubiao@gmail.com

餐厨垃圾是城市生活有机垃圾的主要来源^[1]。餐厨垃圾的收集、处理已成为城市生活垃圾处理的难题,不当的处理会严重污染环境,对餐厨垃圾进行专门化管理已势在必行^[2]。

厌氧消化技术不仅能有效实现对餐厨垃圾的减量化,而且能获得清洁能源—沼气,已在国内外得到广泛应用^[3]。研究表明,接种物的数量和质量对于厌氧消化效果和运行稳定性非常重要^[4]。增加接种量可在一定程度上增加挥发性脂肪酸的转化速率,防止因挥发性脂肪酸的快速累积而导致不可逆转的“酸败”^[5-6]。Zhou 等^[7]研究了接种比对豆腐渣中温厌氧消化的影响,结果表明接种比小于 1 时,会造成挥发性脂肪酸的过量累积而抑制产气。Li 等^[8]通过研究油脂和餐厨垃圾的厌氧消化产气特性,发现油脂和餐厨垃圾的接种比为 1 和 2 时累积甲烷产量最高,且不同接种比的累积产气量差异明显,较低的接种比也会引发严重的酸化抑制。而 Zeng 等^[9]在对微囊藻中温厌氧消化的研究中,同样发现接种比对累积甲烷产量具有明显的影响。接种比是序批式厌氧消化过程的重要参数之一^[10],目前已有不少关于接种比的研究,然而接种比对餐厨垃圾厌氧消化

的影响仍不清晰^[11]。我国餐厨垃圾的厌氧消化特性与国外存在一定的差异,其油脂含量较高,油脂降解易产生长链脂肪酸抑制现象^[12]。国内关于餐厨垃圾厌氧消化接种比的研究较少。本研究拟以不同油脂含量餐厨垃圾为发酵底物,设定不同接种比例,探究接种比对新鲜餐厨垃圾和去油餐厨垃圾厌氧消化的影响,以期为我国餐厨垃圾厌氧消化提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

餐厨垃圾取自北京某高校食堂。收集的新鲜餐厨垃圾首先人工分选出其中的杂物,然后用豆浆机打碎,以保证发酵底物的均质性,搅拌均匀的餐厨垃圾置于 4 ℃ 冰箱贮存。餐厨垃圾去除油脂方式为:取餐厨垃圾 500 mL,加入自来水 500 mL,采用沸水加热餐厨垃圾 10 min,倒掉上层漂浮油脂^[13-14]。去除油脂的餐厨垃圾与未去油的新鲜餐厨垃圾的处理方式一样,先分选出其中的杂物后打碎置于 4 ℃ 冰箱贮存。餐厨垃圾、接种污泥理化性质见表 1。

表 1 餐厨垃圾与接种物的理化性质

Table 1 Basic characteristics of food waste and seeding sludge

材料 Materials	w (总固体)/% Total solid(TS)	w (挥发性固体)/% Volatile solid(VS)	w (油脂)/% ^① Oil content	pH
未去油餐厨垃圾 Food waste	19.53	17.95	28.30	4.74
去油餐厨垃圾 De-oiling food waste	13.08	12.29	11.42	5.03
接种物 Seeding sludge	7.55	4.57	—	7.32

注:①油脂在餐厨垃圾总固体中的质量分数。

Note:①Oil content in food waste base on total solid.

1.2 试验设计及方法

餐厨垃圾批式试验所用试验装置采用带有丁基胶塞的 250 mL 厌氧发酵瓶,有效发酵体积为 180 mL,接种污泥取自运行稳定的厌氧反应器。将不同餐厨垃圾及活性污泥分别搅拌均匀,接种污泥于接种前先进行中温驯化 2 周左右至不再产气。厌氧发酵瓶放置于恒温发酵室中,发酵温度(37±1)℃,使用史氏发酵管排饱和食盐水法测定沼气日产气量^[15],定期测定沼气产量、甲烷体积分数(φ (甲烷))

和 pH,试验持续 67 d。

以未去油新鲜餐厨垃圾(FW)和去油后餐厨垃圾(DOFW)为发酵原料,设定接种比(m (接种物): m (底物),按挥发性固体(VS)计)为 1:1、2:1、3:1和 4:1。发酵底物初始有机负荷(VS)均为 8 g/L,将新鲜餐厨垃圾和去油后餐厨垃圾分别根据不同接种比分别添加餐厨垃圾和驯化污泥,补充去离子水至有效容积为 180 mL,每个处理设置 3 个平行。新鲜餐厨垃圾按照接种比为 1:1、2:1、3:1

和 4 : 1 的标示为 FW1、FW2、FW3 和 FW4, 去油餐厨垃圾按照接种比标示为 DOFW1、DOFW2、DOFW3 和 DOFW4。为每个接种比设定 1 个空白对照, 只添加等量的接种污泥, 补充去离子水至有效容积为 180 mL, 每个处理设定 3 个平行。不同接种比的产气量均为去除空白对照后的产气量。

1.3 试验分析方法

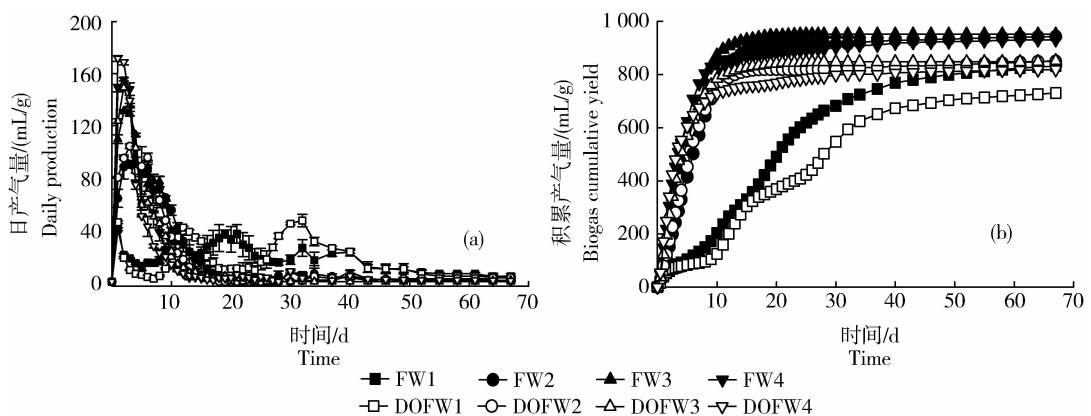
试验原料总固体(TS)、挥发性固体(VS)采用美国水和废水监测标准方法测定, pH 采用美国 Orion 3-Star pH 仪测定。粗脂肪含量采用北京杰瑞厂生产的蛇形索氏提取器测定。碳酸氢盐碱度(TIC)和挥发性有机酸(VFAs)含量采用两点滴定法^[16]。沼气成分采用北京北分瑞利分析仪器公司的 SP-2100 气相色谱测定, 测定条件: 热导检测器(TCD), 不锈钢填充柱(2 m×3 mm), 进样器、柱温箱和检测器温度分别为 120、80 和 150 °C, 载气为 N₂, 流速为 30 mL/min, 沼气标气为甲烷 59.7%, 二氧化碳 40.3%。采用 CurveExpert 软件和修正的 Gompertz 方程进行动力学分析。

2 试验结果与分析

2.1 不同接种比餐厨垃圾厌氧消化日产气量

接种比相同时, 新鲜餐厨垃圾(FW)和去油餐

厨垃圾(DOFW)厌氧消化过程日产气量呈现较为相似的规律(图 1)。接种比为 1 : 1 的新鲜餐厨垃圾(FW1)和去油餐厨垃圾(DOFW1)处理组均在第 2 天出现第 1 个产期峰值, 分别为 40.4 和 45.7 mL/g, 之后产气量下降, 分别在第 5 和第 7 天下降至最低产气率, 去油餐厨垃圾(DOFW1)的日产气量比新鲜餐厨垃圾(FW1)下降更明显。新鲜餐厨垃圾(FW1)和去油餐厨垃圾(DOFW1)分别在第 5 和 7 天以后日产气量重新开始上升, 分别在第 11、22 天和第 13、28 天出现 2 个产气峰值, 均在第 40 天以后基本不再产气。接种比为 2 : 1、3 : 1 和 4 : 1 时, 新鲜餐厨垃圾(FW2、FW3、FW4)和去油餐厨垃圾(DOFW2、DOFW3、DOFW4)在第 3~4 天出现产气峰值, 分别为 90.3、131.1、155.6 mL/g 和 104.2、149.2、168.8 mL/g, 在第 13~19 天后基本不再产气。随着接种比的提高, 沼气日产气量峰值逐渐提高, 产气峰值到达时间提前。接种比相同时, 油脂含量较高的新鲜餐厨垃圾产气峰值值低于去油餐厨垃圾产气峰值, 且到达时间延迟。综上, 接种比较低(1 : 1), 餐厨垃圾厌氧消化沼气日产气在初始阶段受到抑制。提高接种比, 有利于产期峰值的提前, 产气持续周期的缩短。油脂含量较高的新鲜餐厨垃圾初始阶段产气速率低于去油餐厨垃圾。



FW1、FW2、FW3 和 FW4 表示接种比为 1 : 1、2 : 1、3 : 1 和 4 : 1, 未去油新鲜餐厨垃圾处理组; DOFW1、DOFW2、DOFW3、DOFW4 表示接种比为 1 : 1、2 : 1、3 : 1 和 4 : 1, 去油后餐厨垃圾处理组。下图同。

FW1, FW2, FW3 and FW4 means that the inoculum-substrate ratio is 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1 and 4 : 1 in the anaerobic digestion of fresh food waste. DOFW1, DOFW2, DOFW3 and DOFW4 means that the inoculum-substrate ratio is 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1 and 4 : 1 in the anaerobic digestion of de-oiling food waste. Same to the figures below.

图 1 不同接种比对餐厨垃圾(以单位挥发性固体计)沼气日产量(a)和累积产气量(b)的影响

Fig. 1 Daily biogas production and accumulated biogas yields of food waste at different inoculum-substrate ratios

不同接种比的餐厨垃圾厌氧消化的累积产气量不同。接种比为 3 : 1 时,新鲜餐厨垃圾的单位 VS 累积产气量为 951.2 mL/g,高于接种比为 1 : 1、2 : 1 和 4 : 1 的单位 VS 累积产气量,其产气量分别为 831.5、942.8 和 930.7 mL/g;在此接种比条件下,去油餐厨垃圾的单位 VS 累积产气量为 851.4 mL/g,高于接种比为 1 : 1、2 : 1 和 4 : 1 的累积产气量,依次为 730.3、849.5 和 818.5 mL/g (图 1)。新鲜餐厨垃圾和去油餐厨垃圾在接种比为 1 : 1 时累积产气量明显低于其他接种比的产气量,可能与初始阶段的产气抑制有关。Raposo F 等^[17]在研究接种比对葵花油饼厌氧消化影响批式试验中,设定接种比为 3~0.5,试验结果表明接种比为 3 时累积产气量最高,这与本试验结果基本一致。然而本试验设定接种比最高为 4 : 1,但该处理组累积产气量较低于接种比为 3 : 1 的处理组。新鲜餐厨垃圾 (FW) 在接种比为 1 : 1、2 : 1、3 : 1 和 4 : 1 时,累积产气率分别高出去油餐厨垃圾 (DOFW) 的累积产气量的 13.9%、11.0%、11.7% 和 13.7%,平均高出 12.6%。这是因为油脂的产气潜力高于糖类、蛋白质等其他有机质,在相同有机负荷下,富含油脂的餐厨垃圾在未产生抑制的条件下产气潜力高^[18]。

2.2 不同接种比餐厨垃圾厌氧消化甲烷体积分数的变化

接种比相同时,新鲜餐厨垃圾和去油餐厨垃圾厌氧消化甲烷体积分数(φ (甲烷))呈现相似的规律。接种比为 1 : 1 时,新鲜餐厨垃圾 (FW) 和去油餐厨垃圾 (DOFW) φ (甲烷) 分别在第 12、15 d 达到 50% 以上,之后维持在 50%~70% (图 2)。然而初始阶段(0~15 d)新鲜餐厨垃圾 (FW) φ (甲烷) 明显

低于去油餐厨垃圾 (DOFW),这与沼气日产气量规律一致(图 1)。在接种比为 2 : 1、3 : 1、4 : 1 时,新鲜餐厨垃圾 (FW2、FW3、FW4) 和去油餐厨垃圾 (DOFW2、DOFW3、DOFW4) 的 φ (甲烷) 分别在第 9、6、3 d 和 3、2、2 d 达到 50% 以上,之后维持在 50%~70%;表明在初始阶段油脂含量高的新鲜餐厨垃圾比去油餐厨垃圾厌氧消化的 φ (甲烷) 低且 φ (甲烷) 增加速度较慢,这可能是高含量的油脂水解产生的长链脂肪酸抑制了产甲烷菌的活性^[19]。厌氧消化过程可根据沼气中 φ (甲烷) 判断出在消化过程中占优势的菌群是产酸菌还是产甲烷菌,当产甲烷菌占优势时, φ (甲烷) 一般等于或者高于 50%^[20]。随着接种比的增加, φ (甲烷) 达到 50% 的时间缩短,说明接种比的增加有利于产甲烷过程的进行。接种比为 2 : 1、3 : 1 和 4 : 1 时,油脂含量高的新鲜餐厨垃圾 (FW) φ (甲烷) 上升速度低于去油餐厨垃圾 (DOFW),说明初始阶段油脂含量较高产甲烷菌活性较低。

接种比为 1 : 1、2 : 1、3 : 1 和 4 : 1 时,新鲜餐厨垃圾 (FW1、FW2、FW3、FW4) 和去油餐厨垃圾 (DOFW1、DOFW2、DOFW3、DOFW4) 单位 VS 累积甲烷产量分别为 524.1、532.2、546.1、538.0 mL/g 和 425.8、484.6、499.1、467.4 mL/g。由此可知,接种比为 3 : 1 时,新鲜餐厨垃圾 (FW) 和去油餐厨垃圾 (DOFW) 累积甲烷产量均高于其他接种比。接种比为 1 : 1 时,累积产甲烷量明显低于其他接种比,可能是因为较低生物接种量造成初始阶段的甲烷菌活性较低,产气受抑制有关。新鲜餐厨垃圾处理组的累积产甲烷量均高于去油后餐厨垃圾处理组,此结果与累积产气量基本一致。

2.3 不同接种比餐厨垃圾厌氧消化过程 pH 的变化

餐厨垃圾厌氧消化过程中 pH 变化见图 3。接种比为 1 : 1 的新鲜餐厨垃圾 (FW1) 和去油餐厨垃圾 (DOFW1) 在前 3~15 d 内,pH 均低于 6.5,且 FW1 的 pH 高于 DOFW1;在 15~24 d 内,pH 开始迅速上升,随后基本维持在 7.0~7.8。pH 变化可引起产甲烷菌生存和代谢途径的剧烈变化^[18],一般情况下反应器的 pH 应维持在 6.5~7.8^[21]。接种比为 2 : 1、3 : 1 和 4 : 1 的处理组 pH 变化基本在 6.5~7.8。而接种比为 1 : 1 的处理组初始阶段 pH 偏低,与日产气量和 φ (甲烷) 较低的规律一致,表明接种比较低,导致酸碱缓冲能力较弱,出现了初始阶段的酸化现象,从而导致产甲烷菌活性较低,产

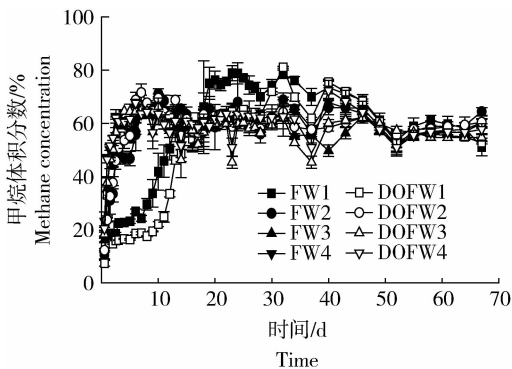


图 2 不同接种比餐厨垃圾 φ (甲烷) 的变化

Fig. 2 Methane concentration of food waste at different inoculum-substrate ratios

气量降低。增加接种量可提高厌氧消化体系对于有机酸的缓冲能力,有效改善厌氧消化过程的稳定性,为产酸和产甲烷提供适宜的 pH 环境。

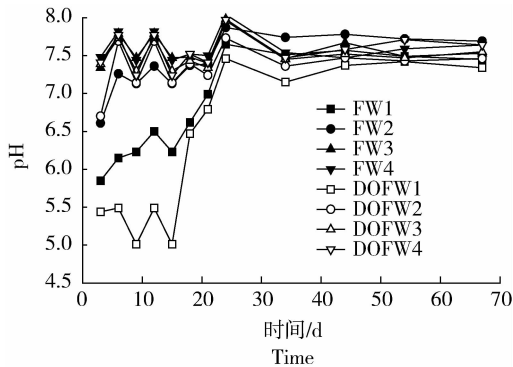


图3 厌氧消化过程中 pH 的变化

Fig. 3 Curves of pH during anaerobic digestion

2.4 不同接种比餐厨垃圾厌氧消化总固体和挥发性固体的去除效果

图4示出不同接种比餐厨垃圾厌氧消化总固体(TS)和挥发性固体(VS)的去除情况。餐厨垃圾厌氧消化生物降解率基本为80%~90%,而接种比为1:1的新鲜餐厨垃圾(FW1)和去油餐厨垃圾(DOFW1)的TS降解率较低,分别为73.94%和73.53%,该试验结果与Liu^[22]的试验结果相似。Liu在研究水热预处理对于城市有机废弃物的影响中测定,未进行处理的餐厨垃圾VS去除率为87.5%,与该试验结果一致。不同接种率各处理组的TS、VS去除率均较高,单因素方差分析得知各处

理组之间的TS、VS去除率无明显差异($P>0.05$),这可能是由于发酵时间较长(67 d),不同处理组间厌氧降解较为彻底的缘故。

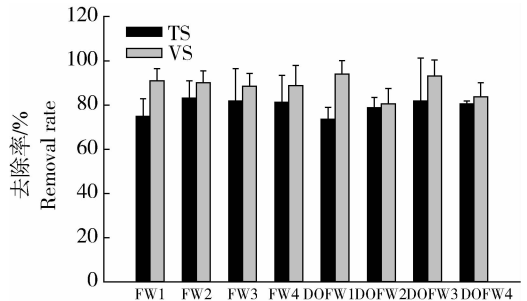


图4 总固体(TS)和挥发性固体(VS)的去除率

Fig. 4 The removal rate of total solid (TS) and volatile solid (VS)

2.5 不同接种比餐厨垃圾厌氧消化动力学分析

对于批式厌氧消化产甲烷过程,在一定程度上甲烷产量是微生物生长的一个函数,Lay^[23]指出有机物的降解过程可采用修正的Gompertz方程预测:

$$M(t) = M_{max} \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{max} e}{M_{max}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

式中: $M(t)$ 为t时刻单位VS甲烷的累积产量,mL/g; M_{max} 为最终单位VS甲烷产量,mL/g; R_{max} 为最大单位VS甲烷产率,mL/g·d; λ 为延滞期,d;t为试验持续的时间,d。

采用修正的Gompertz方程对不同接种比餐厨垃圾厌氧消化过程进行拟合的参数见表2。接种比

表2 修正Gompertz方程的模型参数和可生物降解度

Table 2 Model parameters of modified Gompertz equation and biodegradability

底物 Substrate	处理组 Treatment group	接种比 Inoculum-substrate ratios	拟合指数 R^2 Fit index	最大甲烷产生速率 $R_m/(mL/g \cdot d)$ Maximum rate of methane produced	延滞期 λ/d Lag phase	T_{80}/d ^① Digestion time	累积甲烷产量(67 d) Accumulated biogas yields		
							预测值/ (mL/g) Predicted value	测定值/ (mL/g) Measured value	差异比/% Diversity ratio
新鲜餐厨垃圾 Food waste	FW1	1:1	0.995	28.1	11.5	30	533.9	524.1	1.9
	FW2	2:1	0.993	50.9	5.2	10	525.6	532.2	1.2
	FW3	3:1	0.992	51.4	2.7	8	546.6	546.1	0.1
	FW4	4:1	0.994	52.0	1.3	7	532.0	538.0	1.1
去油餐厨垃圾 De-oil food waste	DOFW1	1:1	0.989	17.8	12.3	31	436.1	425.8	2.4
	DOFW2	2:1	0.994	53.1	4.5	9	484.5	484.6	0.0
	DOFW3	3:1	0.997	47.7	1.8	8	489.0	499.1	2.0
	DOFW4	4:1	0.994	45.4	0.5	7	453.2	467.4	3.0

注:① T_{80} ,甲烷产气量达到总产气量80%时所用的时间。Note: T_{80} , means the time needed to yield 80% of cumulative methane.

为 1:1 的鲜餐厨垃圾 (FW1) 和去油餐厨垃圾 (DOFW1) 最大甲烷产生速率 R_{\max} 明显低于其他接种比, 与图 1 和图 2 所示鲜餐厨垃圾 (FW1) 和去油餐厨垃圾 (DOFW1) 产气峰值较低和 φ (甲烷) 上升较慢的规律相似。随着接种比的提高, 新鲜餐厨垃圾和去油餐厨垃圾的延滞期不断缩短, 分别由 11.5 d 降至 1.3 d 和 12.3 d 降至 0.5 d。由此说明, 接种比的提高可以缩短延滞期, 有利于产气峰值提前^[5]。油脂含量较高的新鲜餐厨垃圾 (FW2、FW3、FW4) 的延滞期分别高于去油餐厨垃圾 (DOFW2、DOFW3、DOFW4), 这可能是由于新鲜餐厨垃圾 (FW) 的油脂含量高于去油餐厨垃圾 (DOFW) (表 1), 油脂降解速率相对较低造成的^[18]。然而鲜餐厨垃圾 (FW1) 的延滞期却低于去油餐厨垃圾 (DOFW1), 这有可能是初始阶段去油餐厨垃圾 (DOFW1) 的 pH 明显低于新鲜餐厨垃圾 (FW1), 酸化现象更严重的原因。

消化时间 (T_{80})^[24-25] 即反应器的累积产气率达到总产气量的 80% 时所需要的时间, 是衡量消化性能和生物降解速率的重要参数。缩短消化时间意味着在同等时间内能够处理更多的餐厨垃圾并产生更多的沼气, 而无需多余的投入, 从而提高反应器的工作效率和经济性。接种比为 1:1 时, 消化时间是其他接种比的 3 倍以上, 随着接种比的增大, 消化时间缩短。因而适宜的接种比有利于缩短消化时间, 提高生物降解速率。

方程理论值与试验测定值的累积甲烷产量相差不大 (0~3%), 说明经过 67 d 的厌氧消化, 餐厨垃圾生物降解较充分。 R^2 均在 0.98 以上, 说明修正的 Gompertz 方程能对新鲜餐厨垃圾 (FW) 和去油餐厨垃圾 (DOFW) 厌氧消化过程进行较好的拟合。

3 结 论

1) 未去油新鲜餐厨垃圾和去油后餐厨垃圾均在接种比为 3:1 时取得最大产气量, 单位 VS 累积沼气产气量分别为 951.2 和 851.4 mL/g, 单位 VS 累积产甲烷量为 546.1 和 499.1 mL/g; 接种比为 1:1 时, 2 种餐厨垃圾厌氧消化初始阶段 pH 均偏低, 出现明显酸化, 沼气日产气量和甲烷体积分数低于高接种比 (2:1~4:1)。

2) 新鲜餐厨垃圾相比去油餐厨垃圾具有较高的产气量, 然而初始阶段 φ (甲烷) 上升较慢, 产气峰值较低, 延滞期延长。接种比为 1:1、2:1、3:1 和 4:1 时, 新鲜餐厨垃圾累积产气量比去油餐厨垃圾分别高 13.9%、11.0%、11.7% 和 13.7%, 平均提高了 12.6%。

3) 修正的 Gompertz 方程能较好的拟合新鲜餐厨垃圾和去油餐厨垃圾的产甲烷过程, R^2 均在 0.98 以上。随着接种比的提高, 新鲜餐厨垃圾和去油餐厨垃圾的延滞期和消化时间 (T_{80}) 逐渐缩短; 接种比为 2:1~4:1 时, 去油餐厨垃圾延滞期明显低于新鲜餐厨垃圾。因而提高接种比和去除油脂可有效缩短产甲烷菌累积周期, 提高产气速度, 从而提高餐厨垃圾厌氧消化的产气和生物降解效率。

参 考 文 献

- [1] 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, 10(28): 748-752
- [2] 王延昌, 袁巧霞, 谢景欢, 等. 餐厨垃圾厌氧发酵特性的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 9(3): 1677-1682
- [3] Banks C J, Zhang Yue, Jiang Ying, et al. Trace element requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations[J]. Bioresource Technology, 2012, 104(1): 127-135
- [4] 李东, 孙永明, 袁振宏. 原料比例和 pH 值对厨余垃圾和废纸联合厌氧消化的影响[J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 54-58
- [5] 马磊, 王德汉, 谢锡龙. 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
- [6] Kalyuzhnyi S, Veeken A, Hamelers B. Two-particle model of anaerobic solid-state fermentation [J]. Water Science and Technology, 2000, 41(3): 43-50
- [7] Zhou Yulin, Zhang Zhenya, Nakamoto Tomoko. Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions [J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(7): 3251-3256
- [8] Li Chenxi, Champagne P, Anderson B C. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(20): 9471-9480
- [9] Zeng Shujuan, Yuan Xianzheng, Shi Xiaoshuang, et al. Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of *Microcystis spp* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1-3): 89-93
- [10] Chudoba P, Capdeville B, Chudoba J. Explanation of biological meaning of the S(o)/X(o) ratio in batch cultivation [J]. Water

- Science and Technology, 1992, 26(3): 743-751
- [11] Raposo F, De la Rubia M A, Fernández-Cegri V, et al. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(1): 861-877
- [12] 李东, 孙永明, 袁振宏, 等. 有机垃圾组分中温厌氧消化产甲烷动力学研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 385-390
- [13] 饶玲华. 餐厨垃圾厌氧发酵产沼气规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011
- [14] 郭涛. 城市餐厨垃圾加工研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2009
- [15] Rincón B, Banks C J, Heaven S. Biochemical methane potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L): Influence of growth stage and storage practice[J]. Bioresour Technology, 2010, 101(2): 8179-8184
- [16] Rieger C, Weiland P. Prozesssrtungen frühzeitig erkennen[J]. Biogas Journal, 2006(4): 18-20
- [17] Raposo F, Borja R, Martin M. Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 149(1-3): 70-77
- [18] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社环境科学与工程出版中心, 2004
- [19] Kafle Gopi Krishna, Sang Hun Kim, Kyung Sung. Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics[J]. Bioresource Technology, 2013, 127(1): 326-336
- [20] 李荣平, 刘研萍, 李秀金. 厨余和牛粪混合厌氧发酵产气性能试验研究[J]. 可再生能源, 2008, 26(2): 64-68
- [21] 张波, 蔡伟民, 何晶晶. pH调节方法对厨余垃圾两相厌氧消化中水解和酸化过程的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(1): 45-49
- [22] Liu Xiao, Wang Wei, Gao Xingbao, et al. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste[J]. Waste Management, 2012, 32(2): 249-255
- [23] Lay J, Li Y, Noike T. Interaction between homoactogens and methanogens in lake sediments[J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1998, 86(5): 467-471
- [24] Palmowski L M, Müller J A. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion[J]. Water Science and Technology, 2000, 41(3): 155-162
- [25] Zheng Mingxia, Li Xiujin, Li Laiqing, et al. Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21): 5140-5145

责任编辑: 刘迎春