

产甲烷菌耐酸培养及其以餐厨为底物的产气特性

杨莉丽^{1,2} 赵明星^{1,2} 黄月^{1,2} 阮文权^{1,2,*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要 采用逐步提高厌氧发酵体系内丁酸盐浓度的方式,对产甲烷菌进行了适应性耐酸培养,随后将培养后的污泥接种餐厨垃圾进行高固态厌氧发酵,研究其以餐厨垃圾为底物的产甲烷特性。结果表明,进行耐丁酸培养的各个组的沼气及甲烷产量、最终 VFAs 浓度、SCOD 浓度基本和丁酸钠添加量呈正相关。其中丁酸钠添加量为 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的组的甲烷产量和沼气产量相对稳定且较大,最终分别为 229 mL 和 830 mL。其脱氢酶活性也相对较大,为 $126.74 \text{ TF } \mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot \text{h})^{-1}$;培养后污泥的 TS、VS 较培养前提高量最大,分别提高了 64.13% 和 67.31%,相比培养后的对照组也提高了 44.05% 和 66.07%。而产甲烷实验研究表明,经 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁酸钠培养后的污泥的产气情况最好,其累积甲烷、沼气产率及甲烷含量最大,分别为 $101.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{ TS}$ 、 $228.0 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \text{ TS}$ 和 44.7%,是对照组的 3.2、1.3 和 2.4 倍。

关键词 餐厨垃圾;高固态发酵;丁酸;耐酸;甲烷

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)11-6673-07 DOI 10.12030/j.cjee.201506159

Acid-tolerant cultivation of methanogen and its biogas generation characteristics from food wastes

YANG Lili^{1,2} ZHAO Mingxing^{1,2} HUANG Yue^{1,2} RUAN Wenquan^{1,2,*}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract Methanogens were cultivated to tolerate acids by gradually increasing the concentration of butyrate in an anaerobic digestion system. Subsequently, food wastes were inoculated with the cultured sludge to evaluate the characteristics of methane generation by the high-solids fermentation model. The results indicate that the biogas and methane yields, and final concentrations of VFAs and SCOD in different acid-tolerant cultured groups were all positively correlated with increasing concentration of sodium butyrate. Methane and biogas yields in the group dosed with $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ sodium butyrate were relatively stable and large, with ultimate values of 229 mL and 830 mL, respectively. Dehydrogenase activity was also relatively large, at $126.74 \text{ TF } \mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot \text{h})^{-1}$. The TS and VS contents of the sludge after cultivation increased 64.13% and 67.31% respectively, compared to the initial sludge, which also increased by 44.05% and 66.07% compared with the cultured control group. In the methane generation experiments, maximum cumulative methane yield ($101.8 \text{ mL} \cdot (\text{g TS})^{-1}$), biogas yield ($228.0 \text{ mL} \cdot (\text{g TS})^{-1}$), and methane content (44.7%) were achieved in the group dosed with $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ sodium butyrate, representing values of 3.2, 1.3, and 2.4 times those of the control group.

Key words food wastes; high solids anaerobic fermentation; butyric acid; acidity tolerance; methane

餐厨垃圾的厌氧发酵处理技术越来越受到关注。由于餐厨垃圾富含 80% ~ 97% 的易降解有机物^[1],在厌氧发酵处理过程中,尤其是高温高固态发酵时,水解酸化迅速,导致挥发性脂肪酸(VFAs)大量积累,反应体系 pH 值迅速下降,会使产甲烷菌活性受到严重抑制,反应体系运行效率下降甚至产

基金项目:江苏省科技支撑计划项目(BE2012615);江苏省自然科学基金项目(BK20130126)

收稿日期:2015-06-24;修订日期:2015-08-04

作者简介:杨莉丽(1990—),女,硕士研究生,研究方向:固体废弃物厌氧生物处理。E-mail:Asharly@126.com

* 通讯联系人,E-mail: wqruan@jiangnan.edu.cn

气终止^[2,3]。

针对这一问题,国内外研究学者开展了相关研究。向反应体系中添加缓冲溶液被认为是一种有效的方法,可以中和发酵体系中产生的 VFAs,从而使体系 pH 维持在适宜范围,利于厌氧消化产甲烷。ABDULKARIM 等^[4]研究表明,在高温高固态厌氧发酵过程中,添加 NaHCO₃ 缓冲溶液可以有效地提高底物中有机组分的降解性能和沼气产量。GAO 等^[5]也研究发现,添加 1 000 mg · L⁻¹ 的 NaHCO₃ 缓冲溶液可以提高 33.3% 的厌氧消化性能和 48.5% 的甲烷产量。另一方面,调节体系适宜的碳氮比也能有效的减少 VFAs 抑制,从而提高甲烷产量。TIAN 等^[6]研究发现,在厌氧发酵过程中,当餐厨与猪粪总固体质量分数比为 1 : 1 时,体系碳氮比适宜,未出现 VFAs 的抑制,甲烷产量较高。不同于直接作用于发酵体系的调控技术,驯化和培养耐酸型产甲烷菌技术来提高厌氧发酵体系的产甲烷效率也是一种有效的方法。吴桂菊等^[7]、申嫒等^[8]采用逐级降低 pH 的方法对餐厨垃圾厌氧消化污泥进行了耐酸驯化培养,发现体系的最低 pH 耐受值可达到 4.0。用驯化后的污泥处理餐厨垃圾,在低 pH (4.5)、低碱度条件下仍能实现稳定的产甲烷过程。左剑恶等^[9]也通过逐级降低 pH 的方法,驯化和培养了在低 pH 值下也能保持较高产甲烷活性的耐酸产甲烷颗粒污泥。目前,研究者普遍采用逐级降低 pH 的方法来驯化和培养耐酸型产甲烷菌,而采用其他方法的研究较少。

餐厨垃圾厌氧发酵过程中,VFAs 的快速积累会使反应体系 pH 迅速下降,进而抑制产甲烷菌活性,降低产甲烷效率^[10-11]。本课题组前期研究发现,在高温高固态厌氧发酵过程中,快速积累的 VFAs 成份主要是乙酸和丁酸,而这两种酸中又以丁酸为主。因此,本研究从提高产甲烷菌对丁酸的耐受性能,进而提升其对 VFAs 的耐受能力的角度出发,来提高高固态厌氧发酵的产甲烷性能。但在驯化培养阶段,如直接用丁酸进行驯化,会使反应体系 pH 迅速降低,进而抑制产甲烷过程。为了使驯化过程更加稳定和高效,采用丁酸钠进行耐受驯化。

本研究对产甲烷菌进行梯度耐丁酸驯化培养,研究其对餐厨垃圾高固态厌氧发酵的产甲烷影响。通过测定产甲烷量、有机酸、脱氢酶等指标,探讨最佳的产甲烷菌耐酸驯化培养方式,可为规模化培养提供基础数据和理论依据。

1 材料与方

1.1 实验材料

接种产甲烷菌种为苏州某公司处理餐厨垃圾厌氧反应体系中的产甲烷污泥。接种污泥的 TS 和 VS 质量分数分别为 14.69% 和 7.17%。

餐厨垃圾取自江南大学食堂,其 TS 和 VS 质量分数分别为 25.04% 和 23.95%。接种污泥和餐厨垃圾的主要性质见表 1。

表 1 接种污泥和餐厨垃圾的主要性质
Table 1 Characteristics of anaerobic sludge and food wastes

指标	接种污泥	餐厨垃圾
总固体质量分数(TS)/%	14.69	25.04
挥发性固体(VS)/%	7.17	23.95
VS/TS/%	48.81	95.65
总碳/% TS	—	52.79
总氮/% TS	—	3.01
碳/氮(C/N)	—	17.54
总碳水化合物/% TS	—	42.23
粗蛋白质/% TS	—	21.91

1.2 实验装置及方法

实验选用有效容积为 500 mL 的血清瓶作为反应容器,并置于(55 ± 1) °C 的恒温水浴锅中进行产甲烷菌耐酸培养实验,采用排水法收集气体。实验装置参见文献[12]。

表 2 丁酸钠的添加量
Table 2 Addition of sodium butyrate/(g · L⁻¹)

实验组	第 0 天	第 2 天	第 4 天	第 6 天	第 8 天
A	0	0	0	0	0
B	4	4	4	4	4
C	4	6	6	6	6
D	4	6	8	8	8
E	4	6	8	10	10

反应瓶中初始加入 200 g 污泥,20 mL 营养液,成份见文献[13],1.5 g 葡萄糖和定量的丁酸钠(表 2),并用去离子水加至 500 mL。每 2 天添加 1.5 g 葡萄糖。培养 10 天后的污泥洗净后作为接种污泥,接种餐厨垃圾进行高温((55 ± 1) °C)高固态厌氧发酵。接种污泥和餐厨垃圾的 TS 比值为 1 : 1,反应体系的总固体质量分数为 15%,搅拌速度为 80 r · min⁻¹。初始 pH 调节为 8,反应过程中不调节 pH。经 0、4、6、8 和 10 g · L⁻¹ 的丁酸钠培养后的产甲烷

组分别标记为 A、B、C、D 和 E。

1.3 分析方法

TS、VS 和可溶性化学需氧量 (SCOD) 的测定根据《水和废水监测分析方法》^[14]。总氮和粗蛋白质的质量分数的测定采用凯氏定氮法^[15]。总碳的质量分数的测定采用总有机碳分析仪。碳水化合物测定采用苯酚-硫酸法^[16]。脱氢酶的测定采用紫外分光光度法^[17]。

甲烷含量的测定采用气相色谱仪,色谱柱尺寸为 $1\text{ m} \times 6\text{ mm}$, 填料为 5A 分子筛,柱温为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 气化温度和检测器温度均为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 载气为氩气,其流量为 $0.25\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

有机酸的测定采用高效液相色谱仪,色谱柱为 ZORBAX SB-Aq 柱 ($150\text{ mm} \times 4.6\text{ mm} \times 5\text{ }\mu\text{m}$), 柱温为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 紫外检测器波长为 210 nm , 流动相为 0.5% 的乙腈和 99.5% ($0.02\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 NaH_2PO_4 , 并用磷酸调节至 pH 为 2.0 , 流动相流速为 $1.0\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样量为 $20\text{ }\mu\text{L}$ 。

2 结果与讨论

2.1 产甲烷菌耐酸培养过程中沼气和甲烷产量的变化情况

产甲烷菌耐酸培养过程中沼气和甲烷产量的变化情况如图 1 所示。沼气和甲烷产量是指每 2 d 添加葡萄糖和丁酸钠前所测得的沼气和甲烷产量,即 2 d 产生的沼气和甲烷量。由图 1 可知,A 组培养过程中甲烷产量有所增加,但相对于其他组较为稳定。初始 2 d 较低,仅为 7 mL ,随后 2 d 迅速增加至 36 mL ,然后趋于稳定,最终为 53 mL ,但其产量仍远

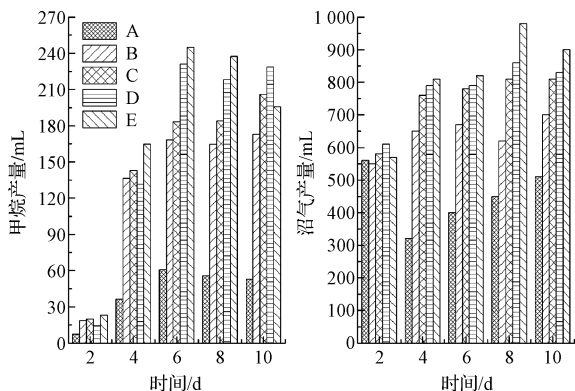


图 1 产甲烷菌耐酸培养过程中沼气和甲烷产量的变化情况

Fig. 1 Biogas and methane generation during acid-tolerant cultivation process of methanogen

低于其他组。而 A 组的沼气产量除初始的 2 d,其余每 2 d 都呈上升趋势,最终为 510 mL 。其他组的沼气和甲烷产量基本和丁酸钠添加量呈正相关。丁酸钠添加量越大,该组沼气和甲烷产量越高。最终 B 组的沼气和甲烷产量分别为 700 mL 和 173 mL , C 组的沼气和甲烷产量分别为 810 mL 和 206 mL , 而 D 组的沼气和甲烷产量较高且最为稳定,分别为 830 mL 和 229 mL 。E 组的沼气产量最高,为 900 mL ,但其甲烷产量却低于 D 组,仅为 196 mL ,这可能是因为其体系内高浓度的丁酸对产甲烷菌产生了毒害作用^[13],进而抑制了产甲烷效率。

2.2 产甲烷菌耐酸培养过程中体系 pH、VFAs 和 SCOD 的变化情况

pH 值是评价厌氧发酵体系稳定性最重要的指标之一。pH 会影响产甲烷微生物的活性,进而影响甲烷产量^[18]。研究发现,厌氧发酵产甲烷微生物最适合的 pH 范围为 $6.5 \sim 8.2$,超出此范围,产甲烷微生物就会受到抑制,进而影响厌氧发酵甲烷产量^[19-20]。产甲烷菌耐酸培养过程中 pH 的变化情况如图 2 所示。由图 2 可知,在产甲烷菌耐酸培养过程中,pH 总体呈现下降趋势,且每组的初始 pH 都在 8.0 左右。培养 2 d 后,每组的 pH 都急剧下降,A 组下降到 7.0 ,B、C、D 和 E 组都下降到 6.6 左右。这表明初始的 2 d,体系内葡萄糖降解迅速,代谢生成的有机酸使 pH 迅速下降。随后,A 组 pH 波动比较稳定,始终维持在 6.9 左右,而其他组仍有所下降,最终分别稳定在 5.89 、 6.09 、 6.09 和 5.99 。由此可见,B、C、D 和 E 组的最终 pH 差异不大,且产甲烷菌活性并未受到完全抑制,表明厌氧发酵产甲烷仍能正常进行。

挥发性脂肪酸 (VFAs) 是厌氧发酵体系中有有机物水解酸化的重要产物,也是产甲烷菌产甲烷的底物,因此,VFAs 常被作为评价厌氧发酵体系微生物新陈代谢的重要指标^[21-22]。在厌氧发酵过程中,VFAs 的大量积累会使发酵体系 pH 显著降低,进而影响产甲烷活性^[23]。产甲烷菌耐酸培养过程中 VFAs 的变化情况如图 3 所示。由图 3 可知,在耐酸培养过程中,每组的 VFAs 都呈上升趋势,但 A 组上升的比较缓慢,其初始的 VFAs 浓度为 $39.8\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最终浓度也仅为 $2\,061.3\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而 B、C、D 和 E 组的初始 VFAs 浓度为 $4\,000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,最终的浓度分别达到了 $18\,267.3$ 、 $22\,938.0$ 、

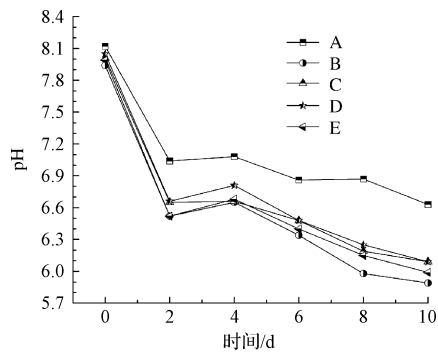


图 2 产甲烷菌耐酸培养过程中 pH 的变化情况
Fig.2 Changes of pH during acid-tolerant cultivation process of methanogen

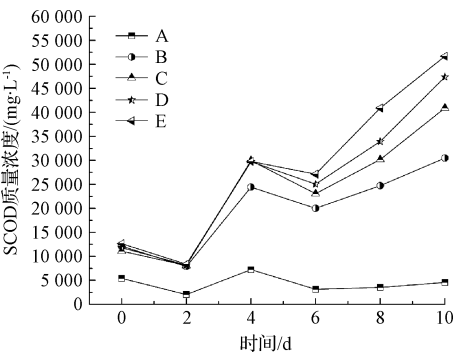


图 4 产甲烷菌耐酸培养过程中 SCOD 的变化情况
Fig.4 Changes of SCOD during acid-tolerant cultivation process of methanogen

25 815.4 和 30 225.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。A 组的 VFAs 浓度明显低于其他组,这可能是因为培养过程中,A 组并未添加丁酸钠。B、C、D 和 E 组的最终 VFAs 浓度与丁酸钠添加量呈正相关,丁酸钠添加量越大,体系内丁酸含量就越大,相应的 VFAs 浓度就会越高。

VFAs 的浓度也呈正相关。这表明,丁酸钠添加量越大,体系中发酵液 VFAs 浓度就会越高,进而使 SCOD 迅速增加。同时有机酸的积累和 pH 的下降 (图 2) 会抑制产甲烷菌的生长,使体系内的葡萄糖不能被进一步的降解,这也会使 SCOD 的浓度变大。

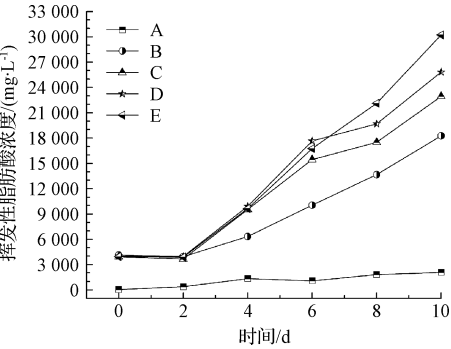


图 3 产甲烷菌耐酸培养过程中 VFAs 的变化情况
Fig.3 Changes of VFAs during acid-tolerant cultivation process of methanogen

2.3 产甲烷菌耐酸培养过程中脱氢酶活性的变化

脱氢酶是一类催化物质进行氧化还原的酶,其活性可以表征厌氧发酵体系中污泥的活性,可以反映体系中微生物活性的变化和微生物对底物的降解能力^[25-27]。

产甲烷菌耐酸培养过程中脱氢酶活性的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知,在整个耐酸培养过程中,每组的脱氢酶活性都呈先增加后降低的趋势,其初始脱氢酶活性为 73 $\text{TF} \mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右。培养 4 d 后,脱氢酶活性达到最大值,分别为 154.57、116.13、121.32、126.74 和 110.75 $\text{TF} \mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot \text{h})^{-1}$ 。随后开始降低,最终的脱氢酶活性分别为 69.92、32.36、39.93、44.51 和 21.94 $\text{TF} \mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot \text{h})^{-1}$ 。由此可以发现,A 组的脱氢酶活性明显高于其他组,而其他组中,D 组的脱氢酶活性最高,E 组的脱氢酶活性最低。这表明,经 8 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁酸钠培养后的污泥活性较好,而经 10 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁酸钠培养后的污泥活性有明显的抑制。王永会等^[28]研究发现,餐厨垃圾与剩余污泥混合发酵比例 (VS) 为 1:1 时,脱氢酶活性高达 437.33 $\text{TF} \mu\text{g} \cdot (\text{mL} \cdot \text{h})^{-1}$,高于本实验的脱氢酶活性,这可能是因为其研究的是餐厨垃圾和剩余污泥的混合发酵,底物浓度较高,而本实验底物为葡萄糖,浓度较低,因此脱氢酶活性较低。

COD 是反映厌氧发酵体系中发酵液有机质含量高低的重要指标^[24]。产甲烷菌耐酸培养过程中 SCOD 的变化情况如图 4 所示。由图 4 可知,A 组的初始 SCOD 浓度为 5 408 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且其在整个耐酸培养过程中都比较稳定,波动范围为 2 040 ~ 7 232 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而 B、C、D 和 E 组的初始 SCOD 浓度为 12 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,耐酸培养过程中整体都呈上升趋势,最终的 SCOD 浓度分别为 30 480、40 880、47 360 和 51 680 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由此可见,B、C、D 和 E 组的最终 SCOD 浓度与丁酸钠添加量呈正相关。比较图 3 和图 4 也可以发现,SCOD 的浓度和

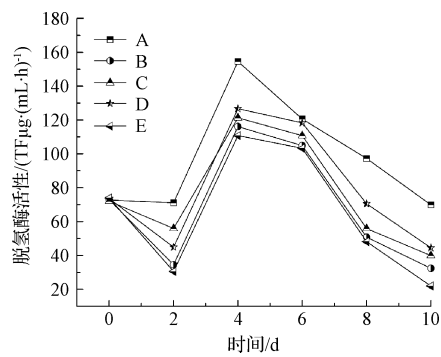


图 5 产甲烷菌耐酸培养过程中脱氢酶活性的变化情况
Fig.5 Changes of dehydrogenase activity during acid-tolerant cultivation process of methanogen

2.4 产甲烷菌耐酸培养前后污泥 TS、VS 的变化

产甲烷菌耐酸培养前后污泥 TS、VS 的变化如表 3 所示。

表 3 产甲烷菌耐酸培养前后污泥 TS、VS 的变化情况
Table 3 Changes of TS, VS contents of anaerobic sludge in each batch at beginning and end of acid-tolerant cultivation process of methanogen /%

组别	TS			VS		
	培养前	培养后	提高率	培养前	培养后	提高率
A	14.69	16.73	13.91	7.17	7.22	0.75
B	14.69	18.52	26.09	7.17	7.61	6.22
C	14.69	19.80	34.81	7.17	8.16	13.89
D	14.69	24.10	64.13	7.17	11.99	67.31
E	14.69	19.53	32.99	7.17	7.57	5.59

由表 3 可知,培养后污泥的 TS、VS 较培养前都有所增加,A、B、C、D 和 E 组的 TS 分别提高了 13.91%、26.09%、34.81%、64.13% 和 32.99%,VS 分别提高了 0.75%、6.22%、13.89%、67.31% 和 5.59%。这表明培养后的污泥中的微生物群体及其吸附的有机、无机物质有所增加,即活性污泥有所增加。而且 B、C、D 和 E 组的 TS、VS 都高于 A 组,TS 分别是 A 组的 1.11、1.18、1.44 和 1.17 倍,VS 分别是 A 组的 1.05、1.13、1.66 和 1.05 倍。由此可见,D 组的 TS 和 VS 最高,即经 8 g · L⁻¹ 的丁酸钠培养后的污泥的活性最好。

2.5 耐酸产甲烷菌以餐厨垃圾为底物的高固态厌氧发酵产甲烷情况

耐酸培养后的产甲烷污泥接种餐厨垃圾进行高固态厌氧发酵实验,其累积沼气、甲烷产率及甲烷含量的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知,A 组的累

积甲烷、沼气产率和甲烷含量分别为 31.6 mL · (g TS)⁻¹, 169.3 mL · (g TS)⁻¹ 和 18.7%,而 B、C、D 和 E 组的累积沼气、甲烷产率和甲烷含量均高于 A 组。这可能是因为 A 组的厌氧污泥仅仅进行了高温培养,而其他组的厌氧污泥不仅进行了高温培养,而且进行了耐酸培养,对反应体系高 VFAs、低 pH 的环境有一定的适应性,所以在产气方面优于 A 组。B、C、D 和 E 组的累积甲烷产率分别为 73.2、86.4、101.8 和 50.8 mL · (g TS)⁻¹,累积沼气产率分别为 204.4、219.0、228.0 和 199.2 mL · (g TS)⁻¹,甲烷含量分别为 35.8%、39.5%、44.7% 和 25.5%。GAO 等^[5] 研究表明,添加 NaHCO₃ 缓冲溶液可以提高厌氧发酵体系的缓冲性能,进而提高产甲烷效率。但该研究也发现,当体系负荷较高时,添加 NaHCO₃ 缓冲溶液并未提高体系的产甲烷效率,累积甲烷产率仅为 50 mL · (g TS)⁻¹ 左右,均低于本实验进行耐酸培养的各个组分。这表明,将产甲烷污泥耐酸培养后进行餐厨垃圾高固态厌氧发酵具有一定的优越性。

经 8 g · L⁻¹ 的丁酸钠培养后,污泥的产气情况最好,其累积甲烷、沼气产率及甲烷含量最大,分别是对照组的 3.2、1.3 和 2.4 倍。而经 10 g · L⁻¹ 的丁酸钠培养后的污泥的累积甲烷、沼气产率及甲烷含量仅是对照组的 1.6、1.2 和 1.4 倍。这表明,经 8 g · L⁻¹ 的丁酸钠培养后,产甲烷菌耐酸效果最好,其厌氧污泥活性最好,而经 10 g · L⁻¹ 的丁酸钠培养后,产甲烷菌耐酸效果有所降低,其厌氧污泥活性也有一定的抑制。这可能是因为低浓度的丁酸钠培养可以提高产甲烷菌的耐酸性能,而高质量浓度的丁酸钠培养会对产甲烷菌产生抑制效应。

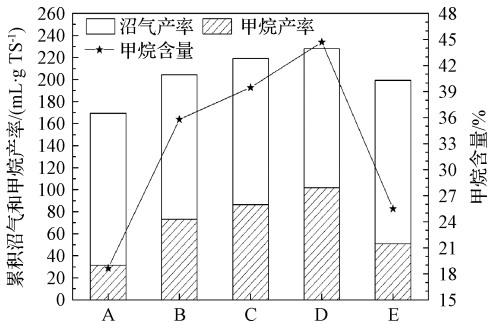


图 6 高固态厌氧发酵过程中累积沼气、甲烷产率及甲烷含量的变化情况
Fig.6 Cumulative biogas, methane yields and methane content during high solids digestion process from food wastes

3 结 论

1) 经过 10 d 的适应性耐酸培养, 获得了不同程度耐丁酸的产甲烷菌。在耐酸培养过程中, pH 总体上呈下降趋势, 但最终趋于平稳, 均在 6.0 左右。各个组的沼气及甲烷产量、最终 VFAs 浓度、SCOD 浓度基本和丁酸钠添加量呈正相关。

2) 耐酸培养过程中各个组的脱氢酶活性都呈先增加后降低的趋势。培养后的污泥的 TS 和 VS 较培养前都有所增加, 经 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁酸钠培养后的污泥的 TS 和 VS 最高, 分别增加了 64.13% 和 67.31%, 且是对照组的 1.44 倍和 1.66 倍。

3) 产甲烷菌耐酸培养可以促进餐厨垃圾高固态厌氧发酵产甲烷。经 $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁酸钠培养后的污泥的累积甲烷、沼气产率及甲烷含量最大, 分别为 $101.8 \text{ mL} \cdot (\text{g TS})^{-1}$ 、 $228.0 \text{ mL} \cdot (\text{g TS})^{-1}$ 和 44.7%, 是对照组的 3.2、1.3 和 2.4 倍。

参 考 文 献

- [1] BRYANT M. P. Microbial methane production-theoretical aspects. *Journal of Animal Science*, **1979**, 48 (1): 193-201
- [2] 彭绪亚, 贾传兴, 潘坚, 等. 餐厨垃圾单相厌氧消化系统酸化预警指标. *土木建筑与环境工程*, **2011**, 33(4): 146-150
PENG Xuya, JIA Chuanxing, PAN Jian, et al. Early-warning indicators of acidification in the single-phase anaerobic digestion process for food wastes. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, **2011**, 33(4): 146-150 (in Chinese)
- [3] KLEYBÖCKER A., LIEBRICH M., VERSTRAETE W., et al. Early warning indicators for process failure due to organic overloading by rapeseed oil in one-stage continuously stirred tank reactor, sewage sludge and waste digesters. *Bioresource Technology*, **2012**, 123: 534-541
- [4] ABDULKARIM B. I., ABDULLAHI M. E. Effect of buffer (NaHCO_3) and waste type in high solid thermophilic anaerobic digestion. *International Journal of ChemTech Research*, **2010**, 2(2): 980-984
- [5] GAO Shumei, HUANG Yue, YANG Lili, et al. Evaluation the anaerobic digestion performance of solid residual kitchen waste by NaHCO_3 buffering. *Energy Conversion and Management*, **2015**, 93: 166-174
- [6] TIAN Hailin, DUAN Na, LIN Cong, et al. Anaerobic co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **2015**, 120(1): 51-57
- [7] 吴桂菊, 邸玉翠, 申嫒, 等. 厌氧消化污泥的耐酸驯化培养. *三峡环境与生态*, **2013**, 35(2): 45-48
WU Guiju, DI Yucui, SHEN Yuan, et al. Acid domestication of anaerobic digestion sludge. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, **2013**, 35(2): 45-48 (in Chinese)
- [8] 申嫒, 邸玉翠, 吴桂菊, 等. 耐酸厌氧消化污泥处理餐厨垃圾. *环境工程学报*, **2014**, 8(2): 692-696
SHEN Yuan, DI Yucui, WU Guiju, et al. Treatment of kitchen wastes using acid-tolerant anaerobic digestion sludge. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2014**, 8(2): 692-696 (in Chinese)
- [9] 左剑恶, 凌雪峰, 顾夏声. 酸性条件下耐酸产甲烷颗粒污泥的培养及特性. *微生物学通报*, **2004**, 31(5): 65-70
ZUO Jian'e, LING Xuefeng, GU Xiasheng. A study on cultivation of acid-tolerant methanogenic granular sludge under low pH values and its characteristics. *Microbiology China*, **2004**, 31(5): 65-70 (in Chinese)
- [10] CHEN Xiang, YAN Wei, SHENG Kuichuan, et al. Comparison of high-solids to liquid anaerobic co-digestion of food waste and green waste. *Bioresource Technology*, **2014**, 154: 215-221
- [11] ZHANG Cunsheng, XIAO Gang, PENG Liyu, et al. The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, **2013**, 129: 170-176
- [12] 赵明星, 严群, 阮文权, 等. pH 调控对厨余物厌氧发酵产沼气的影响. *生物加工过程*, **2008**, 6(4): 45-49
ZHAO Mingxing, YAN Qun, RUAN Wenquan, et al. The influence of pH adjustment on biogas production from kitchen wastes by anaerobic fermentation. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, **2008**, 6(4): 45-49 (in Chinese)
- [13] 黄振兴, 严群, 阮文权, 等. 有机酸胁迫下厌氧污泥产氢效果. *微生物学通报*, **2010**, 37(4): 529-533
HUANG Zhenxing, YAN Qun, RUAN Wenquan, et al. Effect of organic acids stress on biohydrogen production by anaerobic granular sludge. *Microbiology China*, **2010**, 37(4): 529-533 (in Chinese)
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [15] HALL N. G., SCHÖNFELDT H. C. Total nitrogen vs. amino-acid profile as indicator of protein content of beef. *Food Chemistry*, **2013**, 140(3): 608-612
- [16] AQUINO S. F., STUCKEY D. C. Soluble microbial products formation in anaerobic chemostats in the presence

- of toxic compounds. *Water Research*, **2004**, 38 (2): 255-266
- [17] 尹军, 周春生. TTC—脱氢酶活性常温萃取测定法及应用. *中国给水排水*, **1995**, 11(4): 16-19
YIN Jun, ZHOU Chunsheng. Normal temperature extraction method for the examination of TTC-dehydrogenase activity and its application. *China Water & Wastewater*, **1995**, 11(4): 16-19 (in Chinese)
- [18] LIU Cunfang, YUAN Xingzhong, ZENG Guangming, et al. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, **2008**, 99(4): 882-888
- [19] LEE D. H., BEHERA S. K., KIM J. W., et al. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study. *Waste Management*, **2009**, 29(2): 876-882
- [20] LIU Guangqing, LIU Xiaoying, LI Yeqing, et al. Influence of pH adjustment and inoculum on anaerobic digestion of kitchen waste for biogas producing. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, **2011**, 5(3): 390-395
- [21] 高树梅, 赵明星, 许之扬, 等. 餐厨垃圾固渣厌氧发酵产甲烷潜力及 Logistic 动力学研究. *安全与环境学报*, **2015**, 15(1): 263-268
GAO Shumei, ZHAO Mingxing, XU Zhiyang, et al. Study on the methane potential and Logistic kinetics of the solid residual kitchen waste via the anaerobic digestion. *Journal of Safety and Environment*, **2015**, 15(1): 263-268 (in Chinese)
- [22] 马磊, 王德汉, 曾彩明. 餐厨垃圾的干式厌氧消化处理技术初探. *中国沼气*, **2007**, 25(1): 27-30
MA Lei, WANG Dehan, ZENG Caiming. Dry anaerobic digestion process for treating food waste. *China Biogas*, **2007**, 25(1): 27-30 (in Chinese)
- [23] 许之扬, 周慧敏, 赵明星, 等. 挥发性有机酸对餐厨垃圾产沼气过程中胞外多聚物影响研究. *食品与生物技术学报*, **2014**, 33(10): 1044-1049
XU Zhiyang, ZHOU Huimin, ZHOU Mingxing, et al. Effects of volatile fatty acids on extracellular polymeric substances (EPS) during the biogas process from food wastes. *Journal of Food Science and Biotechnology*, **2014**, 33(10): 1044-1049 (in Chinese)
- [24] 张存胜. 厌氧发酵技术处理餐厨垃圾产沼气的研究. 北京: 北京化工大学博士学位论文, **2013**
ZHANG Cunsheng. Biogas production from anaerobic digestion of food waste. Beijing: Doctor Dissertation of Beijing University of Chemical Technology, **2013** (in Chinese)
- [25] 孟影, 张光生, 王爱杰, 等. 生物产氢过程中厌氧污泥耐酸响应的生物化学机制. *食品与生物技术学报*, **2012**, 31(3): 307-312
MENG Ying, ZHANG Guangsheng, WANG Aijie, et al. Acid tolerance response of anaerobic sludge with butyric acid stress during the enhanced biohydrogen process. *Journal of Food Science and Biotechnology*, **2012**, 31(3): 307-312 (in Chinese)
- [26] 唐宁, 柴立元, 闵小波, 等. 厌氧污泥体系脱氢酶活性表征细菌数的研究. *微生物学杂志*, **2005**, 25(2): 31-34
TANG Ning, CHAI Liyuan, MIN Xiaobo, et al. Characteristic bacterial number of anaerobic activated sludge with dehydrogenase activity as indicator. *Journal of Microbiology*, **2005**, 25(2): 31-34 (in Chinese)
- [27] 张洪宾, 谷洁, 孙薇, 等. 不同原料配比对厌氧发酵过程中产气量 VFA 和脱氢酶活性的影响. *农业环境科学学报*, **2012**, 31(2): 422-427
ZHANG Hongbin, GU Jie, SUN Wei, et al. Effects of different rations of materials on biogas production, VFA and the activity of dehydrogenase during anaerobic process. *Journal of Agro-Environment Science*, **2012**, 31(2): 422-427 (in Chinese)
- [28] 王永会, 赵明星, 阮文权. 餐厨垃圾与剩余污泥混合消化产沼气协同效应. *环境工程学报*, **2014**, 8(6): 2536-2542
WANG Yonghui, ZHAO Mingxing, RUAN Wenquan. Synergistic effect of anaerobic co-digestion of food waste and excess sludge. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2014**, 8(6): 2536-2542 (in Chinese)