

苹果渣与剩余污泥混合消化产氢性能研究

余美娟^{1,2}, 赵兴树³, 陈阳^{1,2}, 赵明星^{1,2}, 黄振兴^{1,2}, 阮文权^{*1,2}

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

3. 江苏春越低碳研究有限公司, 江苏 无锡 214122)

摘要: 以苹果渣和剩余污泥为消化底物, 在温度为 37 °C, 初始 pH 值为 8.0 的条件下进行批式厌氧消化产氢试验, 比较单独消化和混合消化的产气性能。结果表明, 苹果渣组和剩余污泥组单独厌氧消化时, H₂ 产量分别是 11.5 mL/gVS 和 8.6 mL/gVS, 混合厌氧消化时, 混合组的 H₂ 产量达到 16.9 mL/gVS, 比计算值提高了 68.16%。剩余污泥组的 pH 值最高, 苹果渣组中 SCOD 浓度最高, 混合组的 pH 值和 SCOD 浓度均介于两个单独消化组之间, 这是由于混合组能均衡两种有机底物的营养成分, 提高系统的缓冲能力。这说明混合消化不单单是两种有机物的简单叠加, 两者之间相互促进, 存在一定的协同作用, 混合消化能够提高产氢效率。另外在整个反应过程中, 苹果渣组脱氢酶的活性很低, 混合组高于苹果渣组, 混合组脱氢酶活性最大为 384 TFμg/(mL·h), 且基本维持在 340 TFμg/(mL·h) 左右。

关键词: 苹果渣; 剩余污泥; 混合消化; 氢气; 脱氢酶

中图分类号: X 703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1689(2017)08-0792-08

Hydrogen Production from Apple Waste and Excess Sludge by Anaerobic Co-Digestion

YU Meijuan^{1,2}, ZHAO Xingshu³, CHEN Yang^{1,2},

ZHAO Mingxing^{1,2}, HUANG Zhenxing^{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; 3. Jiangsu Chunyue Low Carbon Research Co.Ltd, Wuxi 214122, China)

Abstract: A batch experiment for hydrogen generation from apple waste and excess sludge by anaerobic digestion was conducted at the mesophilic temperature of 37 °C and with the initial pH of 8.0. Results showed that hydrogen yield was 11.5 mL/gVS and 8.6 mL/gVS with single-digestion of apple waste and excess sludge, respectively. The hydrogen yield of co-digestion group reached 16.9 mL/gVS, which was increased by 68.16% as compared with the calculated value of co-digestion group. The pH value of excess sludge group was the highest, while the SCOD of apple waste group was the highest. Values of pH and SCOD of co-digestion group were between those for two

收稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508230); 江苏省自然科学基金项目(BK20130126)。

* 通信作者: 阮文权(1966—), 男, 上海人, 工学博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事厌氧处理技术和废物资源化研究。

E-mail: wqruan@jiangnan.edu.cn

引用本文: 余美娟, 赵兴树, 陈阳, 等. 苹果渣与剩余污泥混合消化产氢性能研究[J]. 食品与生物技术学报, 2017, 36(08): 792-799.

single-digestion groups due to the well-balanced nutrients of two organic wastes, and the strong buffer capacity of the reactor system. These indicated that co-digestion was not just the simple sum of the two organic matters, and there was a certain synergic effect in the co-digestion process, which made the hydrogen production efficiency of co-digestion group enhanced. In addition, the dehydrogenase activity of co-digestion group was significantly higher than that of apple waste group during the whole process. The dehydrogenase activity of co-digestion group maintained around 340 $\text{TF}\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$, with a maximum value of 384 $\text{TF}\mu\text{g}/(\text{mL}\cdot\text{h})$.

Keywords: apple waste, excess sludge, anaerobic co-digestion, hydrogen, dehydrogenase enzyme

随着化石燃料的日益枯竭和环境问题的越发严重,可替代能源的开发变得尤为紧迫。氢气是一种具有巨大潜能的替代能源,其燃烧热值高,且在燃烧过程中不产生有害物质,是一种清洁能源^[1-2]。通过厌氧发酵方法获取氢气,由于其对经济、环境友好等特点,具有广阔的应用前景^[3-4]。以有机废弃物为原料进行厌氧发酵制氢是目前的研究热点之一。

在日常生活中,人们对水果的消费呈增长趋势,其中苹果是主要的消费水果之一,因此每年会产生大量的副产物苹果渣,苹果渣主要由果皮、果核和残余果肉等组成。目前苹果渣大部分被废弃,造成城市垃圾增多,并且由于苹果渣易腐烂变质,会引起严重的环境污染问题^[5]。研究结果表明苹果渣中含有大量的还原糖等物质,这些物质经过水解后可产生易降解的糖类,并在产氢菌的作用下产生氢气^[6]。然而苹果渣单独厌氧消化时,有机物质在水解酸化过程中容易大量转化为有机酸,导致 pH 急剧下降,抑制甚至终止产氢过程。

另一方面随着城市污水处理规模的不断扩大,污水处理厂的剩余污泥产量也在迅速上升,剩余污泥具有产量大,易腐败,有恶臭,含病原微生物及重金属等特点,如果处理不当,将会严重污染环境。厌氧消化是污泥处理的常用方法之一,它不仅可以实现污泥的减量化,还能获取氢气和甲烷等能源,很大程度上提高了污泥的资源和环境效益^[7]。但是由于污泥中大多数的有机质被微生物的细胞壁所包裹,很难被利用,这限制了污泥单独发酵的效率。

多底物的混合发酵由于能充分利用不同物料性质之间的互补性,平衡底物的营养成分,提高发酵稳定性,在厌氧消化产甲烷领域已得到较好的应用^[8-12],但是将混合底物进行产氢发酵的报道还较

少^[13-15]。厌氧发酵产氢主要是依靠反应器内产氢菌的代谢活动,其中温度和 pH 值是影响产氢菌活性的重要因素。任南琪^[16]等认为厌氧发酵产氢的最适温度为 35~38 ℃。李超^[17]等研究发现在初始 pH 值 8.0 的条件下,产氢效果最好。根据已有的研究成果,本次试验温度控制在 (37 ± 1) ℃,初始 pH 值为 8.0。

本文作者对苹果渣、剩余污泥单独消化和混合消化的产氢性能进行对比研究,对发酵过程中的溶解性化学需氧量(SCOD)浓度、碳水化合物浓度和脱氢酶活性等参数进行分析,为混合底物厌氧消化产氢气的实际应用提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

苹果渣,取自江南大学北区水果店,取样后用小型食品加工机粉碎;剩余污泥,取自无锡某污水处理厂;接种污泥,取自无锡某食品企业的废水厌氧产甲烷发酵罐。接种污泥经 121 ℃ 15 min 热处理后作为产氢污泥,产氢污泥经葡萄糖活化一周后用于实验。苹果渣的 TS、VS 质量分数分别为 14.35% 和 14.18%,剩余污泥的 TS、VS 质量分数分别为 7.69% 和 4.69%,接种污泥的 TS、VS 质量分数分别为 18.10% 和 12.33%。

1.2 实验装置与设计

设置 3 组实验,分别为苹果渣组、剩余污泥组、苹果渣和剩余污泥混合组,每个实验组重复 3 次。底物和接种污泥的 VS 质量比为 1:1,混合组中苹果渣和剩余污泥的 VS 质量比为 1:1,且每组底物的 VS 量均为 10 g,加一定水后各组的 pH 值均调至 8.0,实验方案如表 1 所示。反应装置为 500 mL 的血清瓶,气体采用排水法收集,反应温度为 (37 ± 1) ℃。

表 1 实验方案

Table 1 Experimental design

	苹果渣质量/g	剩余污泥质量/g	接种污泥质量/g	反应器中 TS 含量/%	温度/℃	初始 pH
苹果渣组	70.5	0	81.1	7	37	8.0
剩余污泥组	0	213.4	81.1	7	37	8.0
混合组	35.3	106.7	81.1	7	37	8.0

1.3 分析项目及方法

TS, VS, SCOD 和氨氮的测定根据国家水和废水监测分析方法^[18]。碳水化合物采用苯酚-硫酸法^[19]。氢气含量采用气相色谱法测定:GC-2014 型气相色谱仪;色谱柱(1 m×d6 mm, 5A 分子筛);柱温:50 ℃;气化温度:180 ℃;检测器温度:180 ℃,载气为氮气。有机酸采用高效液相色谱法测定:Dionex Ultimate 3000 型高效液相色谱仪;ZORBAX SB-Aq 色谱柱(150 mm×4.66 mm, 5 μm);流动相:体积分数 1%乙腈,体积分数 99% 0.02 mol/L NaH₂PO₄,调 pH 至 2 (磷酸调节);流速:1 mL/min;进样体积:20 μL;柱温:35 ℃;检测器:紫外检测器(210 nm)。脱氢酶活性采用 2-3-5-triphenyltetrazolium chloride (TTC) 比色法,脱氢酶催化底物使其还原反应后生成 TTCH₂-triphenyl-formazane (TF) 红色产物,根据 TF 颜色变化深浅测出对应的吸光度,得出脱氢酶活性值^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同组分产氢情况比较

在本次实验中,苹果渣组、剩余污泥组以及混合组的氢气产量分别为 11.5、8.6 mL/gVS 和 16.9 mL/gVS (见表 2)。马晓珂等^[21]研究发现,苹果渣在固态条件下厌氧发酵最大产氢量为 16.47 mL/gTS,在液态条件下为 19.29 mL/gTS^[22]。代东梁等^[23]研究发现,剩余污泥在常温, pH 值为 6.5 的条件下产氢量为 6.88 mL/gVS。本研究的产氢量与上述结论较相近。混合组的氢气产量比苹果渣组和剩余污泥组的氢气产量分别提高 47% 和 106%。这可能是混合底物之间产生了酸碱中和,物料平衡等效应,促进了底物的转化率,提高了产氢效率。

厌氧产甲烷和产氢过程均是微生物利用底物在厌氧条件下的产气反应,因此为了评价混合消化的协同作用对发酵产氢性能的影响,按照李荣平等^[24]提出的根据混合底物的比例计算混合消化所得甲烷量的方法,计算混合消化的氢气量情况,即根

据单独消化时苹果渣和剩余污泥的实际氢气产量以及混合消化中苹果渣和剩余污泥的比例,计算混合消化所得到的氢气量。3 组的产气情况如表 2 所示。

表 2 实际及计算氢气产量

Table 2 Measured and calculated hydrogen yields

	苹果渣组	剩余污泥组	混合组
氢气产量实际值/(mL/gVS)	11.5	8.6	16.90
氢气产量计算值/(mL/gVS)	11.5	8.6	10.05
氢气产量提高值/%	0	0	68.16

根据上述方法计算得到混合组的实际氢气产量比计算值高出 6.85 mL/gVS,提高了 68.16%。这表明苹果渣和剩余污泥混合消化不仅仅是两种有机物的简单叠加,两者之间存在协同作用。一方面剩余污泥具有较强的缓冲能力,有助于维持适宜的 pH 值;另一方面苹果渣和剩余污泥的混合物中营养物质得到均衡化,提高了产气效率。

2.2 厌氧消化过程中 pH 和有机酸浓度变化

pH 值会影响厌氧微生物对营养物质的吸收和消化过程中酶活性等,从而影响厌氧发酵效率。图 1 为厌氧消化过程中 pH 的变化情况。

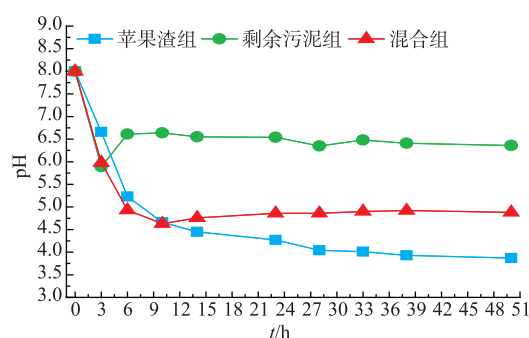


图 1 厌氧消化过程中 pH 的变化情况

Fig. 1 Change of pH during anaerobic digestion

由图可知,各组的 pH 都呈下降趋势,苹果渣组、剩余污泥组以及混合组由初始的 8.0 分别降到 3.87、6.36 和 4.88。这是因为厌氧消化过程中,反应

底物中的有机质水解后生成有机酸,有机酸使体系的 pH 值下降。其中苹果渣组下降趋势最明显,这主要是因为苹果渣中含有丰富的易降解有机物质,在水解酸化阶段能快速分解,产生大量的有机酸,导致 pH 急剧下降,体系反应 3 h 后 pH 降为 4.7,最终维持在 3.9 左右。剩余污泥单独厌氧消化时由于底物中的有机物质降解缓慢,反应 3 h 后 pH 降至 5.89,但随着反应的进行,剩余污泥中氨氮浓度升高,中和部分酸性物质,pH 略微上升,最终维持在 6.4 左右。混合组的 pH 值最终维持在 4.9 左右,介于两个单独厌氧消化组的 pH 值之间。27 h 之后 3 组的 pH 值基本保持不变,这说明 3 组反应体系的酸碱度对有机酸有了足够的缓冲能力。研究发现,产氢发酵的最佳 pH 值的范围是 4.5~6.0^[25-26],而 3 组中只有混合组的 pH 值在这个范围内最适合产氢发酵,而苹果渣组的 pH 值过低,抑制甚至终止了产氢过程。合适的 pH 值可以促进产氢过程,而苹果渣和剩余污泥混合消化能够维持一个较好 pH 值范围,这也是混合组氢气产量较高的原因之一。

有机酸是厌氧发酵的重要产物,有机酸会在反应体系中累积,使体系的 pH 降低,从而对产氢菌有抑制作用,因此当有机酸的浓度积累到一定浓度时,会抑制厌氧消化反应,从而使产氢过程停止。厌氧消化过程中有机酸的产生主要来自于糖类物质的代谢过程,而氢气的产生伴随着有机酸的积累,因此有机酸含量的变化可以间接反映有机物质的变化情况以及氢气的产生情况。

厌氧消化过程中各组有机酸的变化情况见图 2。

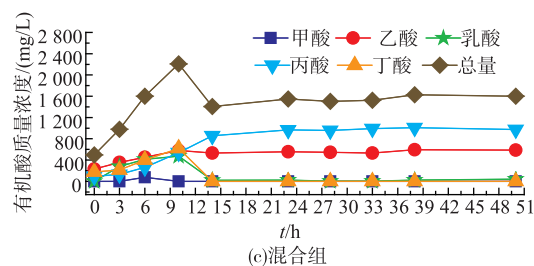
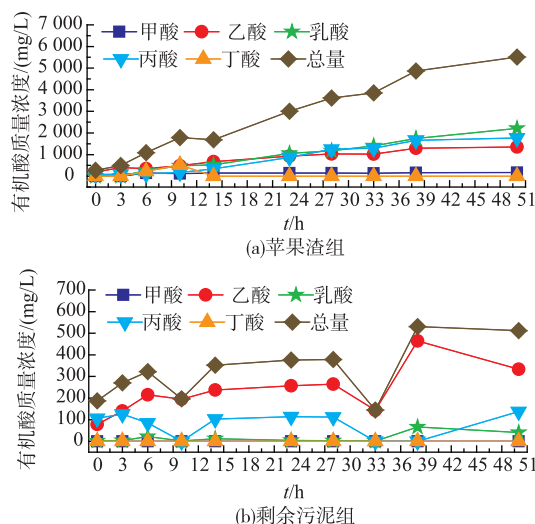


图 2 厌氧消化过程中有机酸的变化情况

Fig. 2 Concentrations of organic acids during anaerobic digestion

由图 2 可知,前 6 h 3 组中有机酸总量都快速增加,氢气的产量较大,糖类物质的降解快。苹果渣组在 15 h 后基本呈直线性增长,最终总有机酸质量浓度为 5 515 mg/L; 剩余污泥组 6 h 后呈波动性增长,最终总有机酸质量浓度为 512.2 mg/L,比初始量提高了 173.7%,相对于苹果渣组和混合组有机酸的质量浓度,剩余污泥组有机酸的质量浓度较低;混合组在 10~14 h 内总量下降,之后保持缓慢增长,混合组有机酸在第 10 h 达到最大值 2 208.8 mg/L,最终质量浓度为 1 601.3 mg/L,比初始时增加了 221.9%。在反应后期,3 组有机酸总量都增加减缓,说明随着反应的进行,可降解物质减少,代谢缓慢,氢气的产生量变少甚至停止。

从有机酸组分变化趋势分析,苹果渣组反应初期水解酸化产生了甲酸、乙酸、乳酸、丙酸、丁酸,整个反应过程中甲酸的质量浓度一直都很低,维持在 121~173 mg/L,丁酸质量浓度在 0~10 h 内增加,最大值为 517 mg/L,从第 10 小时开始下降,到第 14 小时基本降为 0,而乙酸、乳酸、丙酸的含量一直都在增加,最终质量浓度分别为 1 357.1、2 216.7 mg/L 和 1 767.9 mg/L; 剩余污泥组整个反应过程中主要产生了乙酸和丙酸,基本没有甲酸和丁酸生成,乳酸质量浓度很低,未超过 70 mg/L,反应结束时,乙酸和丙酸的质量浓度分别为 333.4 mg/L 和 137.6 mg/L; 混合组中前 10 h 乙酸、乳酸、丙酸、丁酸质量浓度快速增加,之后乳酸和丁酸的质量浓度下降,而乙酸和丙酸的质量浓度增加缓慢,最终乙酸和丙酸的质量浓度分别为 586.5 mg/L 和 975.4 mg/L。反应结束后,3 组中丙酸和乙酸的质量浓度均较高,丁酸质量浓度很少。

2.3 厌氧消化过程中 SCOD 和氨氮质量浓度的变化

在厌氧消化的水解酸化阶段,底物中不溶性物

质先被水解为可溶性物质,如可溶性碳水化合物等,这些可溶性物质在微生物的作用下发酵产生有机酸、 H_2 、 CO_2 等,因此反应器中 SCOD 会发生变化。图 3 为厌氧消化过程中 SCOD 的变化情况,由图可知各组的 SCOD 质量浓度的变化趋势基本相同,都是先上升后下降直至趋于稳定。在反应初期,SCOD 质量浓度急剧上升,这主要是因为一方面在微生物的作用下 3 组中不溶性物质逐渐降解为可溶性物质,另一方面是由于苹果渣被破碎,有部分物质溶于水,这样的苹果渣更易于水解。随着 SCOD 质量浓度的升高,微生物大量繁殖,在微生物的作用下,将这些可溶性物质转变为有机酸、 H_2 和 CO_2 , SCOD 质量浓度逐渐降低。研究表明苹果渣组的 SCOD 质量浓度明显高于其它 2 组,剩余污泥组 SCOD 质量浓度最低,剩余污泥组 SCOD 质量浓度的范围是 2 320~8 000 mg/L,苹果渣组 SCOD 质量浓度在第 6 小时达到最大,为 32 400 mg/L,最终维持在 25 000 mg/L 左右,混合组 SCOD 质量浓度的范围是 4 800~21 600 mg/L,这是因为苹果渣中含有大量易降解物质,容易水解产生有机质,而剩余污泥中虽然含有大量的有机物质,但是被微生物的细胞壁所包裹,很难降解,混合组均衡了这两者之间的营养物质。混合组中 SCOD 的质量浓度比剩余污泥组高,为微生物提供了充足的营养物质,促进产氢过程。产氢结束后,苹果渣组 SCOD 的质量浓度为 26 400 mg/L,仍然较高,可被再利用,如后续产甲烷等。

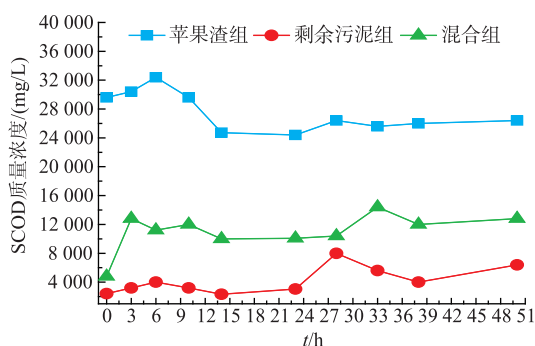


图 3 厌氧消化过程中 SCOD 质量浓度的变化情况

Fig. 3 Change of SCOD concentration during anaerobic digestion

在厌氧消化过程中,反应器内绝大多数的氮都转化为消化液中的氨氮,液态氨会影响反应体系的 pH 值,所以 NH_3 的存在对厌氧过程非常重要。一方

面氨氮浓度过高对细菌有强烈的抑制作用;另一方面,氨态氮又是微生物的营养源,因为细菌可利用氨态氮作为其氮源进行生长繁殖^[27-28]。适当的氨浓度还可以增加消化液的碱度,这就会对厌氧消化过程中容易出现的酸化现象起到一定的缓冲作用。

图 4 为厌氧消化过程中各组氨氮质量浓度的变化情况。

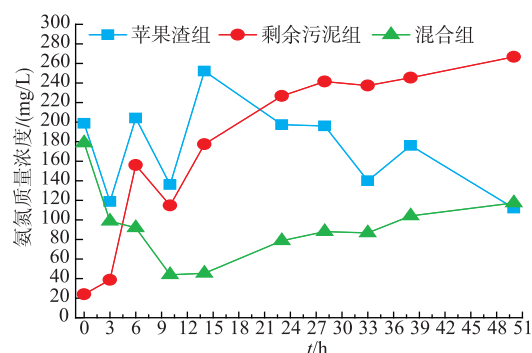


图 4 厌氧消化过程中氨氮质量浓度的变化情况

Fig. 4 Change of NH_3-N concentration during anaerobic digestion

从图 4 可知苹果渣组的氨氮质量浓度呈先上升后下降的趋势,由于蛋白质以及含氮有机物的降解,反应体系中氨氮质量浓度升高,在第 14 小时达到最大值 252 mg/L,结合图 2 和 3 可知,苹果渣组中有机酸的质量浓度很高,氨氮能对有机酸产生中和作用,缓解 pH 降低。剩余污泥组的氨氮质量浓度呈上升趋势,由 38 mg/L 上升到 266 mg/L。水解酸化阶段产生了氨氮,但是由于在反应过程中,污泥产率小,只有少数的氨用于细胞增殖,而大部分的氨以氨氮的形式存在于消化液中,反应体系中氨氮浓度持续升高。混合组的氨氮质量浓度呈先下降后上升的趋势,前 10 h 由 178 mg/L 降至 44 mg/L,后从 44 mg/L 上升至 117 mg/L。总体而言,混合组中氨氮的质量浓度比另外两个单独厌氧消化组都要低,降低了发生氨氮抑制现象的风险。

2.4 厌氧消化过程中碳水化合物质量浓度的变化

根据 3 组厌氧消化过程中溶解性碳水化合物的变化情况(见图 5),苹果渣组的碳水化合物的质量浓度呈持续下降的趋势,苹果渣组的碳水化合物质量浓度由初始的 14 543.1 mg/L 降到 3 100 mg/L,这是因为产氢微生物利用可溶的碳水化合物产生氢气。但是最终碳水化合物质量浓度还维持较高,这主要是因为反应体系 pH 值太低,抑制了产氢过

程。混合组的碳水化合物的质量浓度呈先下降后趋于稳定的趋势,混合组的碳水化合物质量浓度由初始的 6 095.2 mg/L 降到第 14 小时的 254.6 mg/L,微生物一开始利用可溶的碳水化合物产生氢气,可溶的碳水化合物质量浓度降低,之后碳水化合物的质量浓度基本保持不变。剩余污泥组中碳水化合物的质量浓度变化不大,一直处于较低的水平,约 200 mg/L,这表明剩余污泥中可溶性碳水化合物的质量浓度很少,剩余污泥中虽然有大量的有机物质,但是很难被降解。整个过程中,苹果渣组中碳水化合物质量浓度明显高于其它 2 组,为厌氧发酵产氢提供了足够的碳源,混合组均衡了苹果渣和剩余污泥的营养物质,能为微生物提供充足的养分,促进氢气的产生。

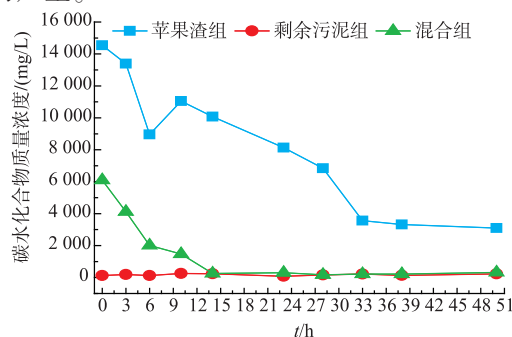


图 5 厌氧消化过程中碳水化合物的变化情况

Fig. 5 Change of carbohydrate concentration during anaerobic digestion

2.5 产氢过程中脱氢酶的变化

脱氢酶的催化作用会引起生物体内许多氧化还原反应,而脱氢酶作为一种胞内酶与细胞内的氧化磷酸化过程紧密相关^[29]。活性污泥中脱氢酶的活性受营养物浓度影响,在处理过程中营养物浓度的降低会导致活性污泥中脱氢酶活性的降低。图 6 为厌氧消化过程脱氢酶活性的变化。

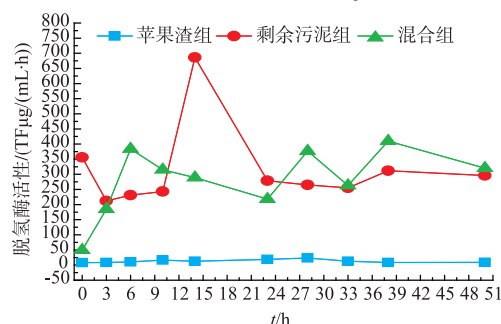


图 6 产氢过程中脱氢酶活性的变化情况

Fig. 6 Change of dehydrogenase activity during hydrogen generation process

由图 6 可知,苹果渣组脱氢酶活性变化不大,一直处于较低水平。剩余污泥组脱氢酶活性总体上呈先上升后下降的趋势,厌氧环境下由于微生物的生长繁殖,脱氢酶活性提高,第 14 小时左右上升到最大,为 686 TFμg/(mL·h),随后由于体系中底物的消耗,不能提供足够的营养物质给发酵微生物,因此脱氢酶活性开始下降,最终降为 296 TFμg/(mL·h)。混合组脱氢酶活性呈先上升后下降的趋势,一开始厌氧微生物大量生长繁殖,脱氢酶活性增大,到第 6 小时左右上升到最大值,为 384 TFμg/(mL·h),随着反应的进行,底物不断被消耗,脱氢酶活性开始下降,最终降为 320 TFμg/(mL·h)。

在整个反应过程中,混合组脱氢酶活性明显大于苹果渣单独厌氧消化组,这是因为剩余污泥中含有大量蛋白质,根据赵明星等^[30]的研究,加入蛋白质会提高脱氢酶的活性。与剩余污泥组相比,混合组脱氢酶活性更为稳定,这可能是因为混合组中苹果渣的加入补充了营养物质。剩余污泥组高于苹果渣组,这可能是由剩余污泥中残留有一些微生物引起的。总体上看,混合组脱氢酶活性最好,最有利于氢气产生。

3 结语

在本次试验中,苹果渣、剩余污泥及其混合物的氢气产率分别是 11.5、8.6 mL/gVS 和 16.9 mL/gVS,将苹果渣和剩余污泥混合消化,可以提高厌氧消化效率。在厌氧消化过程中,3 组的 pH 值在反应初期都急剧下降,最终苹果渣组、剩余污泥组以及混合组的 pH 分别是 3.87、6.36 和 4.88。另外这 3 组有机酸的质量浓度分别是 5 515、512.2 mg/L 和 1 601.3 mg/L,主要成分均为乙酸和丙酸,丁酸质量浓度很低。反应结束后,这 3 组中乙酸和丙酸的质量浓度分别是 1 357.1 mg/L 和 1 767.9 mg/L、333.4 mg/L 和 137.6 mg、5 86.5 mg/L 和 975.4 mg/L。剩余污泥组中氨氮质量浓度一直呈上升趋势,苹果渣组先上升后下降,而混合组是先下降后上升,且整个过程中氨氮的质量浓度均比其它两组的低,降低了氨氮抑制风险。混合组的脱氢酶活性明显高于苹果渣组,且整体上混合组比剩余污泥组更为稳定。混合组脱氢酶活性的最大值是 384 TFμg/(mL·h)。

参考文献:

- [1] KAPDAN I K, KARGI F. Bio-hydrogen production from waste materials[J]. **Enzyme and Microbial Technology**, 2006, 38(5): 569-582.
- [2] SUN Lihong, TAO Huchun. A review of biohydrogen production [J]. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, 2014, 30(36): 161-167. (in Chinese)
- [3] ZHANG Shufang, PAN Chunmei, FAN Yaoting, et al. Conversion of corn cob into biohydrogen by anaerobic fermentation[J]. **Chinese Journal of Biotechnology**, 2008, 24(6): 1085-1090. (in Chinese)
- [4] WANG Jianhua, DU Guangming, LIU Ruiyuan, et al. Study of hydrogen production with cotton stalk by anaerobic fermentation [J]. **Journal of China Agricultural University**, 2014, 19(1): 180-185. (in Chinese)
- [5] 李智. 葡萄糖和苹果渣厌氧发酵生物制氢的研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- [6] FENG X Q, WANG H, WANG Yu, et al. Biohydrogen production from apple pomace by anaerobic fermentation with river sludge [J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2010, 35(7): 3058-3064.
- [7] CAI Mulin, LIU Junxin. Factors of effecting hydrogen production from anaerobic fermentation of excess sewage sludge [J]. **Environmental Science**, 2005, 26(2): 98-101. (in Chinese)
- [8] EL-MASHAD H M, ZHANG R H. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste [J]. **Bioresource Technology**, 2010, 101(11): 4021-4028.
- [9] MURTO M, BJORNSSON L, MATTIASSON B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure[J]. **Journal of Environmental Management**, 2004, 70(2): 101-107.
- [10] PANICHNUMSIN P, NOPHARATANA A, AHRING B, et al. Pawnee Chairasert. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure[J]. **Biomass and Bioenergy**, 2010, 34(8): 1117-1124.
- [11] ZHAO Yunfei, LIU Xiaoling, LI Shizhong, et al. Characteristics of high-solids anaerobic co-fermentation for converting food waste and excess sludge to biogas [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2011, 27(10): 255-260. (in Chinese)
- [12] LI Jihong, YANG Shiguan, ZHENG Zheng, et al. Characteristics of acidification fermentation and biogas production for co-digestion of spartina alterniflora and potato[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2011, 27(6): 262-268. (in Chinese)
- [13] SREELAOR C, PLANGKLANG P, IMAI T, et al. Co-digestion of food waste and sludge for hydrogen production by anaerobic mixed cultures: statistical key factors optimization [J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2011, 36(21): 14227-14237.
- [14] KIM S, HAN S, SHIN H. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge[J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2004, 29(15): 1607-1616.
- [15] LIU Shuang, LI Wenzhe. Characteristics of hydrogen production from anaerobic co-fermentation of pig manure and potato pulp [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)**, 2012, 28(16): 197-202. (in Chinese)
- [16] 任南琪, 王爱杰, 等. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 第1版. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [17] LI Chao, LI Xingang, SUI Hong. Evaluation and optimization of key operational parameters for anaerobic fermentation biohydrogen production dark[J]. **Chemical Industry and Engineering**, 2014, 31(1): 57-62. (in Chinese)
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 105-220.
- [19] AQUINO S F, STUCKEY D C. Soluble microbial products formation in anaerobic chemostats in the presence of toxic compounds [J]. **Water Research**, 2004, 38(2): 255-266.
- [20] FENG H, HU L, MAHMOOD Q, et al. Effects of temperature and feed strength on a carrier anaerobic baffled reactor treating dilute wastewater[J]. **Desalination**, 2009, 239(1-3): 111-121.
- [21] MA Xiaoke, WANG Zhenbin, CHEN Keping, et al. Study on biohydrogen production from apple residue by solid-state anaerobic fermentation[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2012, 33(13): 181-183, 200. (in Chinese)
- [22] MA Xiaoke, WANG Zhenbin, CHEN Keping, et al. Biohydrogen production from apple residue by liquid-state anaerobic fermentation[J]. **Food & Machinery**, 2011, 27(6): 237-240. (in Chinese)

- [23] DAI Dongliang, HAN Xiangkui, LI Guang, et al. Analysis on influencing factors of hydrogen and acid production from anaerobic fermentation of sludge[J]. **China Water & Wastewater**, 2014, 15: 11-13. (in Chinese)
- [24] LI Rongping, LIU Yanping, LI Xiujin. Biogasification performance of anaerobic co-digestion of kitchen residues and cattle manure[J]. **Renewable energy resources**, 2008, 26(2): 64-68. (in Chinese)
- [25] FANG H H P, LIU Hong. Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture [J]. **Bioresource Technology**, 2002, 82: 87-93.
- [26] ZHAO Q B, YU H Q. Fermentative H₂ production in an upflow anaerobic sludge blanket reactor at various pH values [J]. **Bioresource Technology**, 2007, 99: 1353-1358.
- [27] CAO Xianyan, ZHAO Youcai, YUAN Yuyu, et al. The influence of ammonia on bio-hydrogen production from food waste [J]. **Acta Energetica Solaris Sinica**, 2008, 29(6): 751-755. (in Chinese)
- [28] WIEGANT W M, ZEEMAN G. The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock wastes [J]. **Agricultural Wastes**, 1986, 16: 243-253.
- [29] GARCIA C, HERNANDEZ T, COSTA F. Potential use of dehydrogenase activity as an index of microbial activity in degraded soils [J]. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, 1997, 28(1-2): 123-134.
- [30] ZHAO Mingxing, WU Hui, TAO Zhiping, et al. Influence of protein concentration on anaerobic digestion from food wastes [J]. **Journal of Safety and Environment**, 2013(5): 26-30. (in Chinese)

会 议 消 息

会议名称(中文): 第九届全国微生物资源学术暨国家微生物资源共享服务平台运行服务研讨会

所属学科: 动植物微生物学、生物物理学、生物化学及分子生物学、细胞生物学

开始日期: 2017-09-21 结束日期: 2017-09-24

所在城市: 山东省 泰安市

主办单位: 中国微生物学会微生物资源专业委员会、国家微生物资源共享服务平台

承办单位: 山东农业大学、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、山东大学、山东微生物学会、山东省科学技术协会、泰安市科学技术协会

联系人: 林榕珊 156-6447-9599、王建宇 151-6987-7671

E-MAIL: ncmr2017@caas.ac.cn、ncmr2017@vip.163.com

会议网站: <http://csm.im.ac.cn/templates/team/introduction.aspx?nodeid=9&page=ContentPage&contentid=4863>

会议背景介绍: 为进一步加强微生物资源领域学术交流, 全面推进我国微生物资源研究并发挥其在中国微生物组研究计划中的积极作用, 更好地服务于国家生物产业发展战略需求, 促进微生物资源学科发展。由中国微生物学会微生物资源专业委员会、国家微生物资源共享服务平台主办, 山东农业大学、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、山东大学、山东微生物学会、山东省科学技术协会、泰安市科学技术协会等单位共同承办的第九届全国微生物资源学术暨国家微生物资源共享服务平台运行服务研讨会将于 2017 年 9 月 21-24 日在山东省泰安市召开。

此次会议将为与会代表提供一个学术交流、成果展示及项目合作的平台。大会将特邀两院院士及国内外著名专家学者到会交流, 就国家积极推动中国微生物组研究计划的大背景下, 重点对微生物资源的发掘与利用、微生物资源与生物产业、微生物资源与生态等议题展开讨论。热忱欢迎微生物资源领域的同行莅临大会, 齐聚一堂, 共襄微生物资源领域盛事。