

# 蚓粪促进玉米秸秆厌氧消化产气效果的研究

刘 慧<sup>1,2</sup>, 曹艳娟<sup>2</sup>, 邹星星<sup>3</sup>

(1.河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098; 2.河海大学水利水电学院, 南京 210098; 3.南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

**摘 要:**以玉米秸秆为试验研究对象,比较添加蚓粪后对秸秆厌氧消化产气特性的影响。在接种污泥比例为 20%、30%、50%时,添加适当蚓粪,使其在 35 ℃下中温厌氧消化,试验中研究产气量、pH 值和乙酸产生量等参数的变化趋势。结果表明,添加蚓粪后,各处理的产气量均显著增加,其中 50%接种污泥的处理累积产气量达 340 mL,增幅达 67.05%,添加蚓粪的物料发挥了最大的产气效果。试验过程中 pH 值相对稳定,乙酸累积量较低。蚓粪的添加抑制了酸的累积,使 pH 稳定在一定的范围。

**关键词:**玉米秸秆;蚓粪;厌氧发酵;沼气

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)11-2228-04

## Biogas Production Effect of Maize Stalk Anaerobic Digestion in Which Adding Earthworm Manure

LIU Hui<sup>1,2</sup>, CAO Yan-juan<sup>2</sup>, ZOU Xing-xing<sup>3</sup>

(1.Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3.State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** During the development and application of anaerobic fermentation, it is an important and difficult key to improve the biogas production. In the recent years, the additives have been mostly used. This experiment added the earthworm manure in the maize straw when the inoculation solution concentration was 20%, 30% and 50%. The digestion processes were conducted under the temperature of 35 ℃. During the process, pH and volatile fatty acid (VFA) – primarily acetic acid were monitored every 5 days, and the biogas production was surveyed at the same time. The results showed that, the biogas production of all treatments improved significantly. When the concentration of the inoculated liquid was 50%, adding earthworm manure could cause an increase of 67.05% in the amount of gas produced. Through the monitoring of the acetic acid and pH, we found that earthworm manure could prevent acid accumulation and buffer the decreasing of pH value so that pH is more stable in a certain range. The treatment of 50% had a great operating factor of maize straw. Therefore, adding the earthworm manure could be used as a new exploration direction during solid-state anaerobic digestion, besides, it is a good beginning to quest suitable proportion of maize straw and earthworm manure in order to improve the efficiency of resource utilization of crop straw.

**Keywords:** maize straw; earthworm manure; anaerobic fermentation; biogas

在生物质能源的开发利用中,农作物秸秆厌氧消化存在很多技术和管理上的障碍。大量研究表明,通过改善消化条件或采用预处理方法来提高厌氧消化效率<sup>[1-2]</sup>。此外,使用外源添加物对提高产气特性也有

一定效果<sup>[3]</sup>。

有研究表明,蚯蚓粪具有弱碱性,蚓粪中还富含细菌、放线菌和真菌<sup>[4-8]</sup>,这些微生物不仅使复杂物质矿化为植物易于吸收的有效物质,还合成一系列有生物活性的物质,如糖、氨基酸、维生素等。张彦<sup>[9]</sup>利用蚓粪作为添加剂,研究其在废水厌氧消化过程中的效果,证明蚓粪对厌氧发酵具有明显的促进作用。

本文将蚓粪作为外源添加物应用到玉米秸秆的厌氧消化中,通过观测在不同接种污泥量时添加蚓粪与未添加蚓粪时的产气特性,分析 pH 值和挥发性有

收稿日期:2010-04-23

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2009B09114);浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室开放基金(1061408125);河海大学引进人才启动基金(208440501106)

作者简介:刘 慧(1972—),女,山东龙口人,副教授,博士,主要从事土壤及水污染控制研究。E-mail:liuhui@hhu.edu.cn

机脂肪酸(VFA)的变化规律,探索添加蚓粪对玉米秸秆厌氧消化的影响,优化最佳污泥添加比例。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验所用原料主要为玉米秸秆、蚓粪和厌氧消化污泥接种液。其中玉米秸秆取自江苏省大丰市某农场,经晾晒后切碎(长度为 2.0 cm 左右)。蚓粪购于南京某蚯蚓养殖场。接种污泥取自前次厌氧消化试验的消化液,过纱布后于 35 ℃下保存待用。原料的成分组成见表 1。

表 1 厌氧消化原料的基本特性

Table 1 The basic properties of anaerobic digestion raw materials

| 物料   | C/%   | H/%  | N/%  | C/N   | TS/%  | VS(占 TS)/% |
|------|-------|------|------|-------|-------|------------|
| 玉米秸秆 | 39.43 | 5.02 | 1.71 | 23.06 | 89.41 | 90.13      |
| 蚓粪   | 17.45 | 2.53 | 1.58 | 11.04 | 36.41 | 41.31      |
| 污泥   | 31.24 | 4.27 | 3.86 | 8.09  | 8.09  | 60.57      |

### 1.2 试验设计

试验采用批式发酵方式进行,采用 1 000 mL 广口瓶作为厌氧反应器,固液混合物总重为 700 g。秸秆与蚓粪中的 TS 在混合物中的质量浓度均为 6%,质量分别为 45 g 和 115 g。试验共分为 8 组,其中 4 组添加蚓粪。整个试验发酵周期 45 d,分别在发酵第 1、5、10、16、23、30、37、45 d 取样,每组两个平行,取平均值进行分析,具体设计见表 2。

表 2 不同接种液浓度下玉米秸秆厌氧发酵试验设计

Table 2 Experimental design of maize straw digestion with different inoculation concentration

| 试验组 | 污泥浓度/% | 接种液/g | 玉米秸秆/g | 蚓粪/g | 水/g |
|-----|--------|-------|--------|------|-----|
| E1  | 100    | 700   | 0      | 0    | 0   |
| E2  | 20     | 140   | 45     | 0    | 515 |
| E3  | 35     | 245   | 45     | 0    | 410 |
| E4  | 50     | 350   | 45     | 0    | 305 |
| E5  | 100    | 585   | 0      | 115  | 0   |
| E6  | 20     | 140   | 45     | 115  | 400 |
| E7  | 35     | 245   | 45     | 115  | 295 |
| E8  | 50     | 350   | 45     | 115  | 190 |

### 1.3 试验方法

试验开始时,向反应器内充入氮气 2 min 以驱赶反应器内的空气,用橡胶塞密封,并将其放入培养箱内,设定培养箱内温度为 35 ℃。本试验以排水(饱和 NaCl 溶液)集气法收集气体,每日测定产气量;消化液

的 pH 值用精密 pH 计测定(MICROCOMPUTERpH/mV/Ion/TEMP METER6219);消化液用离心机在 4 ℃恒温下,以 12 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 20 min 后,取上清液,根据发酵程度用去离子水稀释一定倍数,用微孔滤膜(0.22 μm)过滤,滤后测定 TOC;根据 TOC 测定结果重新稀释一定倍数,过滤,做气相色谱分析,用于测定乙酸、丙酸和丁酸(GC-2014)。色谱参数如下:载气为 N<sub>2</sub>,流速 40 mL·min<sup>-1</sup>,H<sub>2</sub> 流速为 30 mL·min<sup>-1</sup>,空气流速为 400 mL·min<sup>-1</sup>;气化室温度 200 ℃,检测器温度 220 ℃,柱温采用持续升温,155 ℃保持 4 min,然后以 5 ℃·min<sup>-1</sup> 的升温速率升至 195 ℃,保持 4 min,进样量 2 μL。

## 2 结果与分析

### 2.1 厌氧发酵的产气特性对比分析

图 1 为在未添加蚓粪和添加蚓粪时,不同污泥接种比例玉米秸秆厌氧消化日产气量变化图。由图可知,未添加蚓粪时,对照几乎不产气,20%接种污泥处理在 3 d 时产气量急剧下降,6 d 达到最低点,之后又开始回升,在 12 d 和 15 d 形成峰值,之后逐渐降低,直到产气结束。接种污泥浓度为 35%和 50%处理的产气变化较相似,35%产气量略高于 50%,E1、E2、E3 处理的累积产气量分别为 263、278、204 mL。35%累积产气最大。添

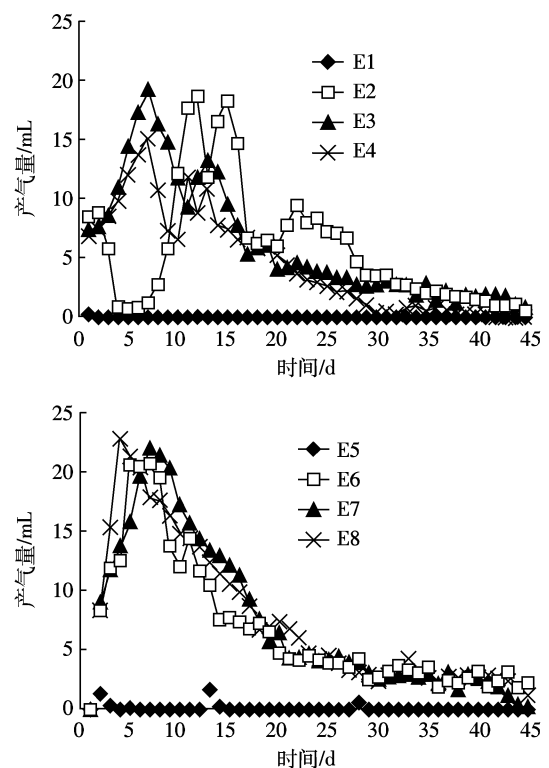


图 1 日产气量的变化

Figure 1 Daily biogas production yield during anaerobic digestion

加蚓粪后,空白对照仍不产气,其余 3 个处理曲线趋势相似,E6 和 E7 处理日产气量峰值均出现在 6 d,E8 出现在 3 d。3 种处理累积产气量以 50%为最大,达 340 mL。

通过对比发现,添加蚓粪的厌氧消化过程日产气变化趋势稳定,且较未添加过蚓粪的处理累积产气量均有提高,其中 50%接种污泥处理增幅达 67.05%。

## 2.2 发酵过程中 pH 的变化规律分析

在厌氧消化过程中,产甲烷微生物的最适 pH 是 6.8~7.5,当  $\text{pH} < 6$  或  $\text{pH} > 8$  时,沼气发酵受到抑制,食乙酸产气甲烷微生物代谢缓慢,当酸化速度>甲烷化速度时,容易造成酸累积,导致 pH 下降,影响产气正常进行,严重时停止产气。因此,分析 pH 变化规律有助于掌握装置的运行状况,提高产气效果。

图 2 为未添加蚓粪与添加蚓粪组 pH 变化曲线图。20%接种污泥处理均在 5 d 时 pH 达到最低点,随后回升趋于稳定,可以判断 5 d 时厌氧消化可能发生酸化。而添加蚓粪处理在整个变化过程中,pH 始终略高于未添加处理。pH 在 30 d 后均趋于中性。在添加蚓粪后,pH 稳定性较强,未出现酸化迹象。

## 2.3 发酵过程中 VFA 的变化规律分析

VFA(挥发性有机脂肪酸)是厌氧消化过程中一个

重要的监测指标,其中包括乙酸、丙酸、丁酸,乙酸是极为重要的一个中间代谢产物,以乙酸为底物的甲烷合成占自然界甲烷合成的 60%以上<sup>[9]</sup>。食乙酸产甲烷微生物代谢过程缓慢,如果乙酸在消化过程中过度积累,会造成酸化,pH 会下降,对产甲烷过程起到抑制作用。

本试验中同时监测了丙酸和丁酸含量,但两者含量最高值在未添加蚓粪时均低于  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,添加蚓粪后均低于  $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,相对于乙酸来说,含量较低。在此不作分析。

图 3 为乙酸含量的变化曲线图。未添加蚓粪组对照产酸<50%接种污泥<35%接种污泥<20%接种污泥,由最初约  $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐增加,均在 5 d 时乙酸产量达到峰值。其中 20%接种污泥处理产酸最多,增幅达 266%。此时 pH 低于 6,出现酸化,几乎不产气。随着消化过程的进行,甲烷化速度超过酸化速度,乙酸含量下降,到 16 d 后均为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右。

添加蚓粪后,3 种处理同样于 5 d 达到峰值,但峰值均小于  $230 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,随后回落。在消化过程即将结束时,乙酸量出现增加趋势,这是因为试验结束时,产甲烷菌的活性降低,对乙酸的利用率下降以致低于产乙酸菌的产酸率造成的。消化过程中,乙酸的累积量均较低。

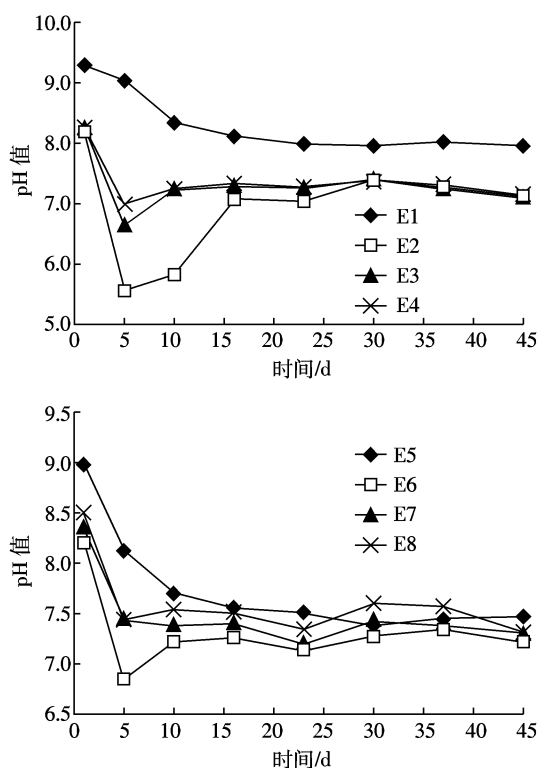


图 2 消化过程中 pH 变化

Figure 2 pH yield during anaerobic digestion

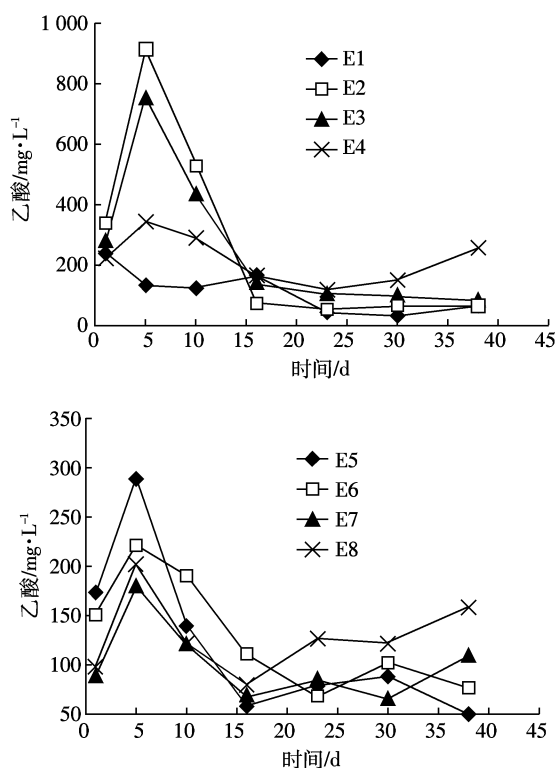


图 3 消化过程中乙酸的变化

Figure 3 Changes of acetic acid during anaerobic digestion

### 3 讨论

由试验结果可得出,添加蚓粪后,促进了产甲烷微生物的正常代谢活动,改善了产气特性,与张彦<sup>[9]</sup>的废水处理的研究一致<sup>[11]</sup>,进一步证明了蚓粪在厌氧消化中具有促进作用。本试验中,相对于未添加蚓粪的处理,添加蚓粪后的20%污泥比例的处理未出现酸化现象,pH变化稳定,产气量也明显增加。这是因为蚓粪中性偏碱性,有助于调节发酵液的pH值,抑制酸的累积。

50%污泥比例的处理在未添加蚓粪时产气低于35%处理,但添加蚓粪后高于35%的处理,且增加幅度较大。这是因为接种物量对于固态厌氧消化具有一定影响<sup>[12]</sup>,接种物量大时,产甲烷菌种易于富集,而添加蚓粪后,补充了N、P、K以及一些微量元素<sup>[9]</sup>,而这些无机营养元素是产甲烷菌厌氧消化过程中必要的营养成分<sup>[13]</sup>,极大地促进了产甲烷菌的活性,增加了产气效率,提高了产气量。该结果可以说明,蚓粪的添加使得污泥的有效利用率得到了提高,这为寻找合适的污泥配比、最大限度地利用原料提供了依据。

### 4 结论

(1)在玉米秸秆的厌氧消化中,添加蚓粪有助于抑制酸的累积,减弱pH的降低速度,使pH值更稳定,为产甲烷过程创造良好的条件。

(2)20%接种污泥处理,添加蚓粪后,有效地抑制了酸化,提高了产气特性。

(3)不同浓度接种液试验在发酵过程中,pH较稳定,产气时间也较集中,酸累积较少,接种污泥比例为50%时,添加蚓粪其产气量增加了67.05%。因此,添加相同TS比例的蚓粪极大地发挥了接种污泥的作用,以后通过进一步研究可以探讨污泥和玉米秸秆的最佳比例,以期找到最节省物料的方案。

#### 参考文献:

- [1] 李连华, 马隆龙, 袁振宏. 农作物秸秆的厌氧消化试验研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 335-338.  
LI Lian-hua, MA Long-long, YUAN Zhen-hong. Study on anaerobic digestion of straw stalk [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 335-338.
- [2] 庞云芝, 李秀金, 罗庆明. 温度和化学预处理对玉米秸秆厌氧消化产气量的影响 [J]. 生物加工过程, 2005, 3(1): 37-41.  
PANG Yun-zhi, LI Xiu-jin, LUO Qing-ming. Effect of temperature and chemical pretreatment on anaerobic biogasification of corn stalk [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2005, 3(1): 37-41.

- [3] 何荣玉, 刘晓风, 袁月祥. 沼气发酵外源添加物的研究进展 [J]. 中国沼气, 2007, 25(5): 8-10.  
HE Rong-yu, LIU Xiao-feng, YUAN Yue-xiang. Review on enhancing biogas production by additives [J]. *China Biogas*, 2007, 25(5): 8-10.
- [4] 蔡玉琪, 蔡树美, 倪圣亚. 蚯蚓对秸秆-污泥混合物的消解转化效果 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1284-1287.  
CAI Yu-qi, CAI Shu-mei, NI Sheng-ya. Efficiency of using earthworms to assimilate and transform straw-sludge mixture [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1284-1287.
- [5] 崔玉珍, 牛明芬. 蚯蚓粪对土壤培肥作用及草莓产量和品质的影响 [J]. 土壤通报, 1998, 29(4): 156-157.  
CUI Yu-zheng, NIU Ming-fen. The role of earthworm manure on soil fertility and yield and quality of strawberries [J]. *土壤通报*, 1998, 29(4): 156-157.
- [6] 胡佩, 刘德辉, 胡锋, 等. 蚓粪中的植物激素及其对绿豆插条不定根发生的促进作用 [J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1211-1214.  
HU Pei, LIU De-hui, HU Feng, et al. Plant hormones in earthworm casts and their promotion on adventitious root formation of mung bean cutting [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1211-1214.
- [7] Edwards C A. Utilization of earthworm composts as plant growth medium [C]//Tomati U, Grappelli A, eds. International Symposium on Agricultural and Environmental Prospects in Earthworm. Rome. Italy. 1983: 57-62.
- [8] Tomati U A, et al. Fertility factors in earthworm [C]//Proc. Int. Symp. A-gric. Environ. ed. Prospects in Earthworm Farming. Roma: Ministrodella Ricerca Scientifica Technologia. 1983.
- [9] 张彦. 蚓粪促进厌氧发酵效果的试验研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.  
ZHANG Yan. Experimental study on the effects of vermicompost supplementation on anaerobic fermentation [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006.
- [10] 林代炎, 林新坚, 杨菁, 等. 产甲烷菌在厌氧消化中的应用研究进展 [J]. 福建农业学报, 2008, 23(1): 106-110.  
LIN Dai-yan, LIN Xin-jian, YANG Jing, et al. Advance in utilization of methanobacteria for anaerobic digestion studies [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 23(1): 106-110.
- [11] 张彦, 杨世关, 张百良. 蚓粪对厌氧发酵影响的初步研究 [J]. 中国沼气, 2006, 24(2): 8-10.  
ZHANG Yan, YANG Shi-guan, ZHANG Bai-liang. Study on the effects of vermicompost supplementation on anaerobic fermentation [J]. *China Biogas*, 2006, 24(2): 8-10.
- [12] 张爱军, 陈洪章, 李佐虎. 有机固体废物固态厌氧消化处理的研究现状与进展 [J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 52-54.  
ZHANG Ai-jun, CHEN Hong-zhang, LI Zuo-hu. The present situation and progress of study of solid-state anaerobic digestion of organic solid wastes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(5): 52-54.
- [13] 李亚新. 厌氧消化过程中甲烷菌的无机营养需求 [J]. 中国沼气, 1996, 14(1): 1-4.  
LI Ya-xin. Mineral nutrients requirement of methanogens for anaerobic digestion [J]. *China Biogas*, 1996, 14(1): 1-4.