

# 底物浓度和接种率对稻秸沼气启动的影响

杜 静,常志州\*,叶小梅,钱玉婷

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心,南京 210014)

**摘 要** 采用室内模拟方法,在 35℃恒温条件下,研究底物浓度和接种率对稻秸沼气发酵启动的影响。结果表明,纯稻秸厌氧发酵时必须加大接种量。与 TS 为 12%和 20%的处理相比,TS 浓度为 16%产气速度为最佳,其产气启动快,发酵第 7 d 即达产气高峰,且甲烷含量达 50%的时间分别提前了 4 d(TS12%)和 1 d(TS20%),前 20 d 的平均容积产气率达 0.63 L·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>,分别提高 42.30%(TS20%)和 69.01%(TS12%)。总之,纯稻秸发酵时以 TS 为 16%的启动效果最佳,试验中的接种比例为稻秸 TS 量的 3 倍(TS 比)。

**关键词** 厌氧消化;稻秸;启动;底物浓度;接种率

中图分类号 S216.4 文献标志码 A 文章编号 1672-2043(2011)07-1456-04

## Effect of Substrate Concentration and Inoculums Ratio on the Start-up of Anaerobic Digestion of Rice Straw

DU Jing, CHANG Zhi-zhou\*, YE Xiao-mei, QIAN Yu-ting

(Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract** An experiment was conducted to investigate the effect of substrate concentration and inoculums ratio on the start-up of anaerobic digestion of rice straw at 35℃. The results indicated that the inoculums ratio should be increased when rice straw digested alone. Compared to 12% total solid loading(TSL) and 20% TSL, the initial 16% TSL was optimal for biogas-production. When the TSL was 16%, the biogas-production reached the peak at day 7, and the numbers of days reaching above 50% methane content were decreased 4 days and 1 days compared with 12% TSL and 20%TSL, respectively. When the TSL was 16%, the average volumetric biogas production was 0.63 L·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> during the initial 20 days, and the increase were 42.30% and 69.01% compared with 12% TSL and 20%TSL, respectively.

**Keywords** anaerobic digestion; crop straw; start-up stage; substrate concentration; inoculums ratio

农作物秸秆资源化利用技术是缓解当今我国面临的“粮食、能源、环境”三大危机的有效途径之一。厌氧发酵技术作为生物质能主要利用技术已广受关注<sup>[1]</sup>。厌氧发酵技术可分为湿式发酵<sup>[2]</sup>和干式发酵研究阶段<sup>[3]</sup>。传统的湿发酵技术,即将秸秆与人畜粪便、工业废水等有机物混合,在厌氧菌的作用下生成沼气。由于秸秆在湿式发酵中容易出现严重的漂浮结壳、分层等问题,大多避免加入秸秆等比重较轻且难降解的底物。而干发酵技术是以固体有机废弃物为原料(总固体含量在 20%以上)进行厌氧发酵<sup>[4]</sup>,它与湿发酵相比主要优点是节约用水,节省管理沼气池所需的工

时,池容产气率较高等<sup>[5]</sup>。据 1999 年 De BAERE 的调查,20 世纪 80 年代后建立的消化工艺多是干发酵工艺<sup>[6]</sup>。据 Shankaranand 等<sup>[7]</sup>研究发现干发酵与湿发酵之间存在很大差异,认为主要是由底物存在状态的差异引起的。在干发酵中底物是以不流动的固态存在,并且存在严重的异质性,尽管在发酵过程中存在渗液的渗漏,但这种渗漏仅发生在局部,各种中间代谢产物和微生物的交流受到严重限制,而湿发酵中的底物在发酵过程中被不断地搅拌混合,各种中间代谢产物和微生物在底物层中分布均匀。

对于发酵底物浓度的研究,前人集中于城市固体垃圾和畜禽粪便方面,而对于纯秸秆单独发酵适宜的浓度方面的研究甚少。因而本研究探索秸秆类原料厌氧发酵适宜的浓度将为秸秆资源化产业的发展起到很好的推动作用。为此,本文采用室内模拟方法,以稻秸为唯一原料,研究底物浓度和接种量对其厌氧发酵

收稿日期 2010-12-10

基金项目 江苏省农业自主创新项目(BM2008009),江苏省农业科学院基金项目(6110725)

作者简介 杜 静(1982—),男,四川眉山人,助理研究员,主要从事固体废弃物处理与资源化利用研究。E-mail: djj1982111@126.com

\* 通讯作者:常志州 E-mail: czhizhou@hotmail.com

启动的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 发酵原料

供试稻秸取自南京麒麟门泉水村, 铡碎成 5 cm 左右备用, 接种物取自江苏省农业科学院水葫芦厌氧发酵中试试验沼渣。物料的基本性状见表 1。

表 1 发酵物料基本性状

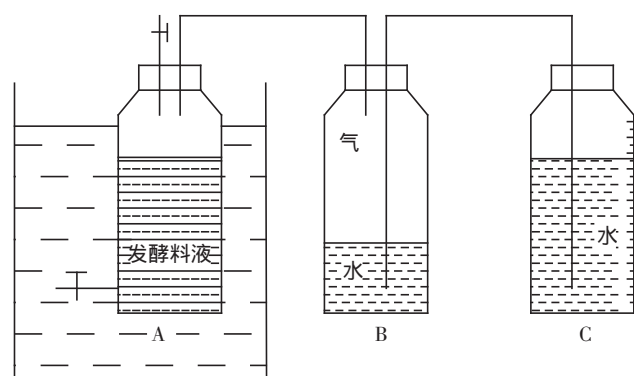
Table 1 Properties of fermentative materials

发酵原料	TS/%	VS/%	TOC/g·kg <sup>-1</sup>	K-N/g·kg <sup>-1</sup>
风干稻秸	84.40	72.75	460.5	4.50
接种物	4.55	1.38	—	—

注: TS 为总固体含量, VS 为挥发性固体含量, TOC 为总有机碳, K-N 为凯式氮。

### 1.2 试验装置

试验采用批式发酵方式, 发酵罐为 1 L 广口瓶, 橡胶塞密封, 采用排水集气法计量产气量, 并每日常时测定。



A 为 1 L 发酵罐, B 为排水瓶, 起储气作用, C 为标有刻度的 1 L 广口瓶, 起集水作用。发酵罐放入恒温水浴锅, 温度控制在  $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

图 1 发酵试验装置示意图

Figure 1 Sketch of the anaerobic digester

### 1.3 试验设计

试验设置 3 个发酵浓度(12%、16%、20%), 并通过添加不同接种量研究不同的发酵 TS 浓度对稻秸厌氧发酵产气的影响, 以找寻纯稻秸厌氧发酵最适宜的浓度。试验装罐时调节 pH 至 7.5 左右, 每个处理 2 个重复, 其装料情况见表 2。

### 1.4 测试项目及方法

总固体含量(TS)、挥发性固体含量(VS)采用沼气常规分析方法<sup>[8]</sup>, pH 值采用雷磁 pH-25 酸度计测定<sup>[8]</sup>, 有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法<sup>[8]</sup>, 全氮采用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮, 蒸馏定氮法<sup>[8]</sup>; 纤维素和半

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理	风干稻秸/g	接种量/g	尿素/g	加水量/mL	总 TS/%
1	118.48	100	3.04	672	12
2	118.48	300	3.04	569	12
3	118.48	100	3.04	449	16
4	118.48	300	3.04	326	16
5	118.48	100	3.04	315	20
6	118.48	300	3.04	180	20

纤维素采用范氏洗涤纤维分析法<sup>[9]</sup>, COD 采用消解仪快速消解分光光度计比色法(深圳昌鸿科技有限公司生产的 DIS-A 型数控多功能消解仪)<sup>[10]</sup>。

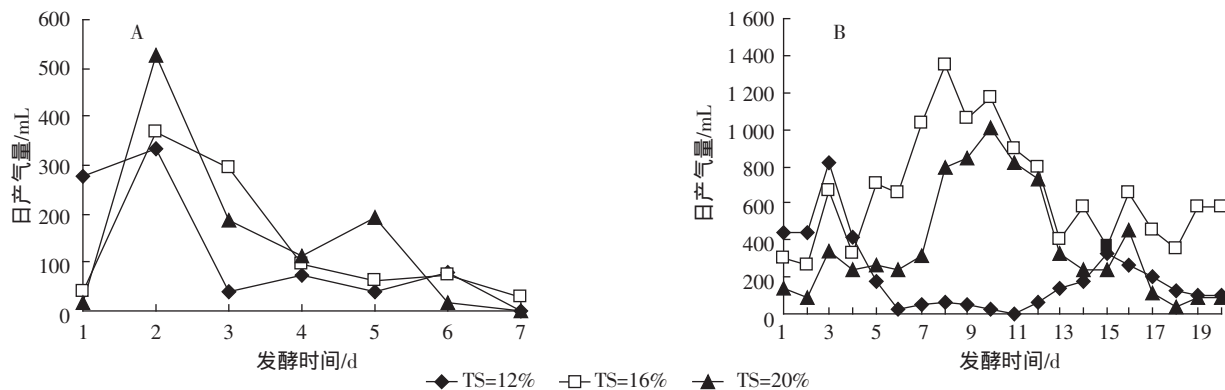
沼气成分分析: 采用 GC9890A/T 气相色谱仪, 热导检测器 TCD, 检测器温度  $120^\circ\text{C}$ , 进样器类型为平面流通阀, 分析柱 TDC-01 $\Phi$ 4 $\times$ 1 m, 柱温  $100^\circ\text{C}$ , 载气  $\text{H}_2$ , 流量  $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ; 定量管 1 mL, TCD 电流 100 mA, 标准气体:  $\text{N}_2$  中 42.4% $\text{CH}_4$ +28.4% $\text{CO}_2$ 。分析方法为外标法。

## 2 结果与分析

### 2.1 发酵浓度、接种量对稻秸厌氧发酵的影响

从图 2A 可以看出, 在接种量较小情况下, 各处理发酵初期的产气量均明显下降, 7 d 后几乎不产气, 拆罐后测定 pH 均处于 6.2 以下, 表明各处理都已酸化。当加大接种量至稻秸 TS 的 3 倍后, 各处理在前 3 d 产气均到达小高峰, 以 12% 处理为最高, 16% 处理次之, 随后 12% 处理长期处于低产气量, 可能原因是发酵物料明显分层后导致物料与接种物接触不充分。16% 处理日产气高峰出现于第 7 d, 高达 1 400 mL, 而 20% 处理出现于 10 d, 高达 1 000 mL, 随后均下降并逐渐趋于稳定。

从图 3 发酵 20 d 的累积产气量来看, 各处理间的差异明显, 处理 4(TS=16%)>处理 6(TS=20%)>处理 2(TS=12%), 其中 16% 处理前 20 d 的平均日产气量约为 600 mL 左右, 而 20% 处理仅接近 350 mL。从图 4A、B 中甲烷含量来看, 无论接种量大小如何, 各处理中甲烷含量最先达到 50% 水平的时间至少为 7 d。当接种量较小时, 随着 TS 浓度提高, 甲烷含量升高越慢, 可能是随着 TS 浓度提高, 使酸化速度明显高于产甲烷消耗挥发酸的速度, 从而造成酸中毒现象; 当加大接种量后, 16% 处理和 20% 处理分别于第 7 d 和第 8 d 甲烷含量超过 50%, 比 12% 处理提前 4 d, 随后 16% 处理和 12% 处理均稳定于 60% 左右, 而 20% 处理



(A)、(B)分别表示接种比例为 1 或 3 的产气情况,下同。

(A)、(B) are the biogas production of inoculums ratio of 1 and 3 ,the same below.

图 2 发酵过程中日产气量的变化

Figure 2 Changes of daily biogas production during anaerobic digestion

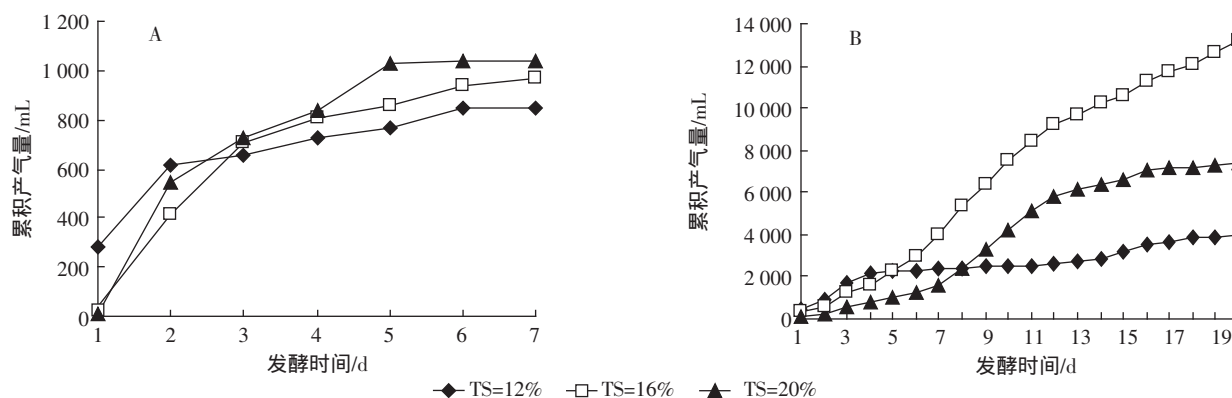


图 3 厌氧发酵过程中累积产气量的变化

Figure 3 Changes of cumulative biogas production during anaerobic digestion

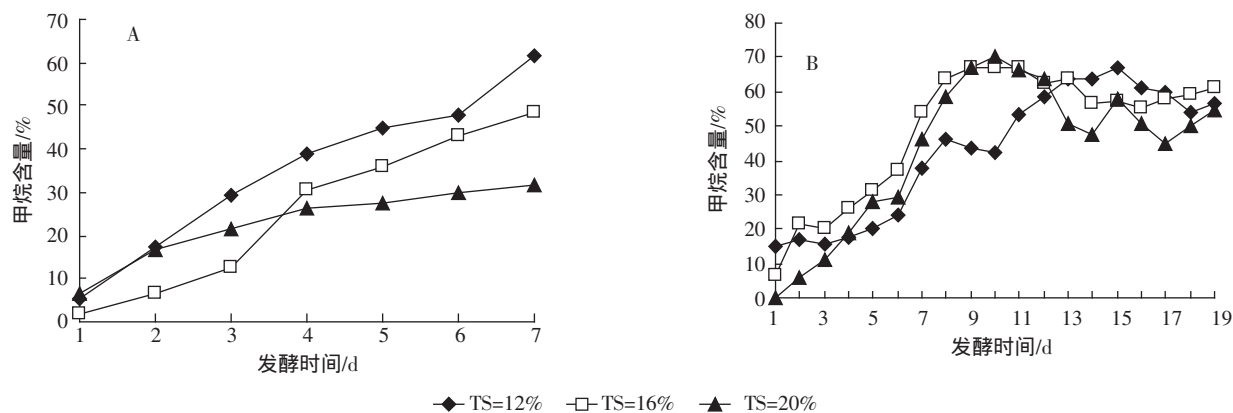


图 4 厌氧发酵过程中甲烷含量的变化

Figure 4 Changes of methane content during anaerobic digestion

在 50%附近波动。

总体上讲,纯稻秸厌氧发酵时必须加大接种量,并且发酵 TS 浓度以 16%为最佳,启动快,发酵第 7 d

即达产气高峰并且甲烷含量超过 50%,前 20 d 的平均日产气量为 600 mL 左右,产气速度明显加快,大大缩短了发酵周期。

表 3 厌氧发酵后各处理的运行数据

Table 3 Performance data for experiments during operation for experiments rations

处理	发酵后沼液				产气效果			
	pH	COD/mg·L <sup>-1</sup>	SCOD/mg·L <sup>-1</sup>	SCOD/COD	初始 VS/g	发酵残渣 VS/g	产气量/mL	单位原料 VS 产气率/mL
12%	7.87	20 683	9 693	0.47	90.33	26.00	4 018	62.46
16%	8.09	20 912	5 724	0.27		25.23	13 220	203.06
20%	8.42	44 342	16 103	0.36		23.75	7 380	110.84

注 COD :化学需氧量 SCOD :可溶性的化学需氧量 ;上述产气量仅为发酵 20 d 的累计产气量。

## 2.2 发酵物料前后性状分析

从表 3 可以看出 ,各处理发酵的 pH 都处于 8 左右 ,表明加大接种量后 ,各发酵处理均没有出现酸化现象。从 SCOD/COD 的比值来看 ,以 16% 处理为最低 ,12% 处理为最高 ,表明 16% 处理中甲烷菌活性好 ,导致其对可利用物质的转化率高 ,这也与各处理的产气量情况相吻合。另外 ,从发酵 20 d 后的原料 VS 产气率来看 ,16% 处理高达 203.06 mL·g<sup>-1</sup>VS ,已达常规稻秸发酵产气潜力(350 mL·g<sup>-1</sup>VS)的 60% ,进一步表明采用适宜的发酵 TS 浓度可以大大提高产气潜力 ,也可以缩短发酵周期。

## 3 结论

纯稻秸厌氧发酵时必须加大接种量 ,且本实验中 TS16% 处理的产气效果明显优于 TS12% 和 TS 20% 处理 ,其启动快 ,发酵第 7 d 即达产气高峰并且甲烷含量超过 50% ,前 20 d 的平均容积产气率达 0.6 L·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> ,产气速度明显高于目前常用的湿式和干式发酵。

## 4 展望

未来开展纯稻秸厌氧发酵技术的研究趋势明显 ,特别是结合稻秸机械打捆技术 ,研发简单、方便和适宜的发酵装备以及工艺调控措施研究 ,如果能克服稻秸自身特点实现其连续进出料问题 ,将大大推进稻秸能源化产业的发展 ;

对于稻秸类纤维素原料来说 ,水解产酸阶段仍然是限制环节 ,考虑木质纤维素的降解过程以及进出料的难度 ,可以开展好氧酸化+厌氧产甲烷方面的深入研究 ,特别是可以加强预处理措施以及接种产酸菌群 ,并尽可能实现产酸和产气的分离 ,进而实现稻秸能源化利用技术集成创新。

## 参考文献 :

- [1] 卞永存,寇 巍,李世密,等. 农作物秸秆两相厌氧发酵工艺研究进展[J]. 可再生能源, 2009, 27(5) :61-65.  
BIAN Yong-cun, KOU Wei, LI Shi-mi, et al. Study on the status of two-phase anaerobic fermentation for crop straws [J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(5) :61-65.
- [2] 熊承永,李 健,朱 辉. 户用沼气池的秸秆利用新方法[J]. 中国沼气, 2004, 22(2) :48-49.  
XIONG Chen-yong, LI Jian, ZHU Hui. The new methods of using straw with biogas plants[J]. *China Biogas*, 2004, 22(2) :48-49.
- [3] Walter J Wujcik. Anaerobic dry fermentation[J]. *Biotechnology & Bio-engineering*, 1980( 10) :43-65.
- [4] 曲静霞,姜 洋,何光设,等. 农业废弃物干法厌氧发酵技术的研究[J]. 可再生能源, 2004, 22(2) :40-41.  
QU Jing-xia, JIANG Yang, HE Guang-she, et al. Research on dry anaerobic fermentation by agricultural refuse[J]. *Renewable Energy*, 2004, 22(2) :40-41.
- [5] 边 义,刘庆玉,李金洋. 玉米秸秆干发酵制取沼气的试验 [J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3) :440-442.  
BIAN Yi, LIU Qing-yu, LI Jin-yang. Experimental investigation of making biogas from dry fermented corn stalk[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(3) :440-442.
- [6] Ayalon O, Avnimelech Y, Shechter M. Solid waste treatment as a high-priority and low-cost alternative for greenhouse gas mitigation[J]. *Environmental Management*, 2001, 27(5) :697-704.
- [7] Shankaranand V S, Ramesh M V, Lonsane B K. Idiosyncrasies of solid-state fermentation systems in the biosynthesis of metabolites by some bacterial and fungal cultures[J]. *Process Biochemistry*, 1992, 27 :33-36.
- [8] 中科院成都微生物研究所. 沼气常规分析方法[M]. 北京 :科学出版社, 1979 :17-21.  
Chengdu Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences. Bio-gas conventional methods [M]. Beijing :Science Press, 1979 :17-21.
- [9] Van Soest. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. VI. Determination of cell-wall constituents[J]. *JAOAC*, 1967 :50-55.
- [10] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第 3 版. 北京 :中国环境科学出版社, 1989.  
State Environmental Protection Administration, Water and waste-water monitoring analysis method[M]. 3rd edition. Beijing :China Environment Science Press, 1989.