

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.020

甘蔗叶干法厌氧发酵正交试验*

焦静 王金丽 张劲 邓怡国 郑勇 王刚

(中国热带农业科学院农业机械研究所, 湛江 524091)

【摘要】 为确定甘蔗叶干法厌氧发酵的最佳工艺参数,选择堆沤方法、草粪质量比、发酵温度这3个关键因素进行正交试验,优化工艺参数。试验结果表明:甘蔗叶干法厌氧发酵最佳工艺条件为:自然堆沤、草粪质量比1、发酵温度38℃,验证最佳工艺条件下产气量为655.30 L。同时研究分析表明,猪粪对甘蔗叶干法厌氧发酵有较大影响,在猪粪量相对较少的情况下,提高发酵温度也能增加产气量;堆沤时添加绿秸灵和腐秆剂对甘蔗叶发酵没有效果。

关键词: 甘蔗叶 干法厌氧发酵 正交试验 产气量

中图分类号: S216.4; S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0110-04

Orthogonal Experiment of Sugarcane Leaves Dry Anaerobic Fermentation

Jiao Jing Wang Jinli Zhang Jin Deng Yiguo Zheng Yong Wang Gang

(Institute of Agricultural Machinery, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China)

Abstract

In order to determine the optimum technological parameters of dry anaerobic fermentation of sugarcane leaves, an orthogonal experiment was conducted with method of composting, grass-manure ratio and fermentation temperature as three key factors in the experiment. The maximum gas yield of 655.30 L was obtained with natural composting at optimum grass-manure ratio of 1 and optimum fermentation temperature of 38℃. The results also showed that pig manure had a great impact on the dry anaerobic fermentation of sugarcane leaves. When the amount of manure was relatively small, the increasing of the fermentation temperature could also improve the gas production. The adding of two agents, Green Straw Decomposition and Stalk Rot Agent, had no effect on fermentation of sugarcane leaves in composting.

Key words Sugarcane leaves, Dry anaerobic fermentation, Orthogonal experiment, Biogas yield

引言

甘蔗是我国主要的糖料作物,其种植面积占我国常年糖料种植面积85%以上,主要集中在广西、广东、海南及福建等省区。我国甘蔗种植面积为120万hm²,甘蔗叶总产量2700万t,是热带大宗的农业固体废弃物之一^[1-3]。目前,绝大多数甘蔗叶被就地焚烧,造成大量的资源浪费和生态环境污染。随着甘蔗种植规模的不断扩大,解决好甘蔗叶的利

用问题已经迫在眉睫。其途径之一是通过干法厌氧发酵技术处理甘蔗叶,可以生产出清洁能源,基本达到零排放,符合我国发展现代热带农业、提高经济效益、实现可持续发展和循环农业的需要。

目前,干法厌氧发酵原料多以牛粪、鸡粪、猪粪、玉米秸秆、稻草和生活垃圾为主^[4-10]。国内外已成功开发车库型、气袋型、干湿联合型、渗滤液储存桶型、MCT型等大型沼气干发酵系统,不仅消纳了大量的农业废弃物和生活垃圾,还创造了大量的清洁

收稿日期:2011-12-19 修回日期:2012-02-13

* 农业部948资助项目(2011-Z14)、农业部2011年农村能源综合建设资助项目(031)、农业部公益性(农业)行业科研专项资助项目(201203072)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国热带农业科学院院本级)资助项目(1630012011004)

作者简介:焦静,助理研究员,主要从事热带农业固体废弃物能源化利用研究,E-mail: eddweiss@163.com

通讯作者:王金丽,研究员,主要从事热带农业工程研究,E-mail: jinliw@tom.com

能源^[11]。农业部规划设计研究院以玉米秸秆和牛粪为原料,进行了干法厌氧发酵关键工艺参数优化研究,确定了在 30 d 的优化发酵周期内,采用中温发酵(35℃),较优的工艺参数组合为:草(玉米秸秆)粪(牛粪)质量比为 1:2、进料干物质质量分数为 20%、接种物的干物质占发酵原料干物质质量的 15%^[12]。

利用甘蔗叶发酵产沼气还处于研究阶段。本文在对影响沼气产气效果的单因素试验分析基础上,综合堆沤方法、草粪质量比、发酵温度这 3 个因素进行正交试验,进一步优化工艺参数,以期确定适合甘蔗叶干法厌氧发酵的最佳工艺参数组合。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验原料:甘蔗叶,取自湛江市湖光农场甘蔗收获后的干黄叶,用粉碎机粉碎成 3~5 cm 的不规则小段,其总固体质量分数为 89.82%;猪粪,取自湛江市湖光农场个体养猪场的新鲜猪粪,其总固体质量分数为 24.78%。甘蔗叶和猪粪的主要成分如表 1 所示。

表 1 甘蔗叶和猪粪的主要成分质量分数

成分	水分	总碳	总氮	纤维	灰分
甘蔗叶	10.180	70.260	0.305	78.560	5.660
猪粪	75.220	13.860	0.630	12.630	22.650

接种物:甘蔗叶和猪粪混合后进行中温干法厌氧发酵富集而成,富集时间大于 2 个月,总固体质量分数为 5%。

复合菌剂:绿秸灵(北京合百意生态能源科技开发有限公司)、腐秆剂(广东佛山金葵子植物营养有限公司)。

其他材料:碳酸氢铵(含氮量 17%)。

1.2 试验方法

以发酵周期内的产气量和甲烷含量为指标,研究堆沤方法(因素 A)、草粪质量比(因素 B)以及发酵温度(因素 C)对发酵效果的影响。将甘蔗叶与猪粪按照 L₉(3⁴)正交试验因素水平表(表 2)中的草粪质量比配制发酵原料,每组原料中甘蔗叶的干物质质量为 1.5 kg。然后进行好氧堆沤,堆沤温度保持在 50~55℃,堆沤时间为 7 d。堆沤好的物料加入 30%的接种物,再加入碳酸氢铵调节碳氮比为 25,加适量水,控制进料干物质质量分数为 20%左右,搅拌均匀后装罐,调节温度至规定值进行厌氧发

酵,每组做 2 罐平行试验。发酵时间 40 d。发酵过程中,每天 17:00 准时打开放气阀门,记录流量计读数,每 2 d 测定 1 次甲烷体积分数。

表 2 正交试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	堆沤方法 A	草粪质量比 B	发酵温度 C/℃
1	自然堆沤	1:0	32
2	加甘蔗叶质量分数 0.2%的绿秸灵	1:1	35
3	加甘蔗叶质量分数 0.2%的腐秆剂	2:1	38

1.3 测试指标及方法

测试指标及方法如表 3 所示^[13]。

表 3 测试指标及测定方法

Tab.3 Indicate factors and measuring methods

测试指标	测定方法	检测仪器
总固体质量分数	105℃干燥法	干燥箱、电子天平
挥发性固体质量分数	550℃灼烧法	马弗炉、电子天平
总碳质量分数	K ₂ Cr ₂ O ₇ -外热源法	
总氮质量分数	凯式定氮法	全自动凯式定氮仪
累积产气量	每天记录	干式气体流量计
甲烷体积分数	每 2~3 d 测定	Biogas 沼气成分分析仪

1.4 试验装置

试验装置为中国热带农业科学院农业机械研究所制作的可控性水浴恒温厌氧发酵装置,罐内容积 44 L,装料体积 25 L。主要由罐体、加热保温系统和沼气计量系统组成,如图 1 所示。

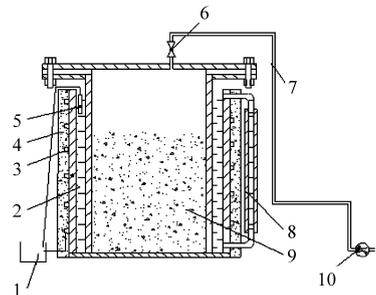


图 1 厌氧发酵装置原理图

Fig.1 Anaerobic fermentation device

1. 温度控制仪
2. 水
3. 加热器
4. 保温材料
5. 温度传感器
6. 排气阀
7. 胶管
8. 透明橡胶管
9. 发酵原料
10. 流量计

2 结果与分析

2.1 正交试验

正交试验结果如表 4 所示。由表 4 极差可知,各因素对甘蔗叶干法厌氧发酵影响的大小依次为

B、A、C,即草粪质量比影响最大,其次是堆沤方法,最后是发酵温度。因素最优水平组合为 $A_1B_2C_3$,即甘蔗叶干法厌氧发酵的最佳工艺条件为:自然堆沤、草粪质量比1、发酵温度 38°C 。

按以上最佳条件进行了验证试验,发酵40 d,总产气量为655.30 L,比正交试验中的最高产气量580.60 L提高了74.70 L。

表4 正交试验安排与结果

Tab.4 Results of orthogonal test

序号	因素				总产气量 /L
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	70.20
2	1	2	2	2	548.01
3	1	3	3	3	580.60
4	2	1	2	3	83.03
5	2	2	3	1	336.90
6	2	3	1	2	221.20
7	3	1	3	2	216.00
8	3	2	1	3	314.70
9	3	3	2	1	267.44
K_1	1 198.81	369.23	606.10	674.54	
K_2	641.13	1 199.61	898.48	985.21	
K_3	798.14	1 069.24	1 133.50	978.33	
k_1	399.60	123.08	202.03	224.85	
k_2	213.71	399.87	299.49	328.40	
k_3	266.05	356.41	377.83	326.11	
R	185.89	276.79	175.80	103.55	

2.2 产气量分析

各试验组日产气量如图2所示。从图2中可以看出,除了试验1和试验4以外,其他试验组均有产气高峰出现,其中试验3的启动速度最快,在发酵第11天就达到日产气量最高值26.20 L。试验1、4和7的总产气量是9组试验中最少的3组,其中试验1、4的日产气量始终在5 L以下,可见在甘蔗叶干法厌氧发酵中猪粪对产气量影响很大。由于甘蔗叶原料的结构非常疏松,不利于介质的传递,而猪粪的结构较为致密,在甘蔗叶中加入猪粪等细碎的原料,可以改善原料间的接触面,增强介质传递,有利于厌氧微生物对原料的充分利用,同时添加猪粪进行发酵在营养调节方面也能起到一定作用,从而增大产气量。

根据日产气量数据进行逐日累加计算,获得9组试验的逐日累积产气量,结果如图3所示。累积产气量的变化直接表征了产甲烷菌的活性,可以反映厌氧发酵系统的运行情况。从图3可以看出,不同试验组其累积产气量曲线有很大差异。试验3

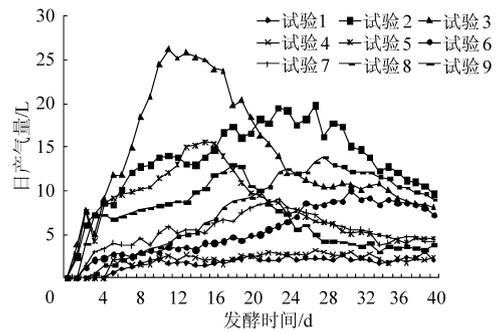


图2 各处理组日产气量随发酵时间的变化

Fig.2 Changes of daily biogas production of different treatments

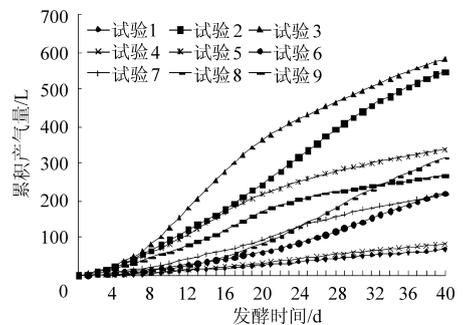


图3 各处理组累积产气量随发酵时间的变化

Fig.3 Changes of cumulative biogas production of different treatments

的累积产气量最大,为580.60 L,试验1的累积产气量最小,为70.20 L,两者相差8倍以上。试验2、3的累积产气量明显高于其他组,说明在自然堆沤条件下,添加适量猪粪,并且保持发酵温度不低于 35°C ,也能达到很好的产气效果。同时也说明对一般秸秆沼气发酵有促进作用的绿秸灵和腐秆剂并不适用于甘蔗叶发酵,其产气效果没有自然堆沤条件下的好。

对图3中产气量最多的试验2、3用SAS软件将累积产气量数据拟合为logistic回归方程,然后用Matlab软件依据拐点定义编程对其求拐点。试验2的产气拐点在第22天,试验3的产气拐点在第16天,比试验2前移了6 d,说明试验3的产气周期缩短了,表明在猪粪添加量相对较少的情况下,提高发酵温度可以缩短产气周期,也能增加产气量。

2.3 甲烷含量分析

从图4可以看出,试验1、4和7在40 d的发酵时间内所产气体的甲烷体积分数缓慢上升,最高值分别为33.60%、42.60%和53.80%,沼气质量较差,对应产气量也最少,说明甘蔗叶单独发酵效果比甘蔗叶和猪粪混合发酵要差。试验6的甲烷体积分数也上升缓慢,这可能是由于发酵温度低和猪粪量不足所致。试验3的甲烷体积分数最快达到60%以上,但在达到最高值之后降幅较大,可能是因为产

气启动速度快,在发酵前期就消耗了大量的营养物质,在没有添加新料的情况下,产生沼气的营养物质不足,导致甲烷体积分数下降较快。其他添加了猪粪的几组甲烷体积分数也上升迅速,最高甲烷体积分数均在60%以上,且在达到最高值之后有一个稳定期,沼气质量较好,再次说明猪粪是影响甘蔗叶发酵的一个重要因素,与之前进行的单因素试验结果一致^[14]。

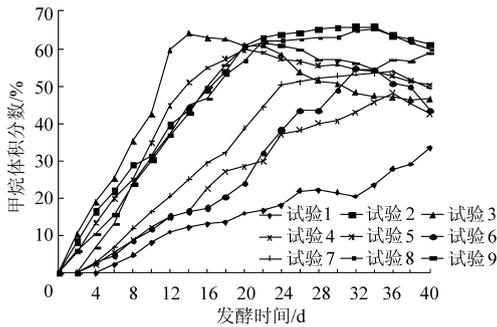


图4 各处理组甲烷体积分数随发酵时间的变化

Fig. 4 Changes of methane content of different treatments

3 结论

(1)根据正交试验和验证试验结果,确定甘蔗叶干法厌氧发酵的最佳工艺条件为:自然堆沤、草粪质量比1、发酵温度38℃,最佳工艺条件下1.5 kg甘蔗叶干物质在40 d的发酵时间内产气量为655.30 L。

(2)猪粪是影响甘蔗叶干法厌氧发酵的重要因素,添加猪粪发酵,不仅能提高产气量,还能获得较高的甲烷含量,沼气质量好。在猪粪添加量相对较少的情况下,提高发酵温度可以缩短产气周期,也能增加产气量。

(3)在堆沤过程中添加绿秸灵和腐秆剂,产气效果并没有得到改善,说明这两种常用的秸秆发酵复合菌剂并不适合用于甘蔗叶发酵,需要根据甘蔗叶特性,研发专用的发酵菌剂。

参 考 文 献

- 郑勇,王金丽,李明,等. 热带农业废弃物资源利用现状与分析——甘蔗废弃物综合利用[J]. 广东农业科学, 2011, 38(1):15~18,26.
Zheng Yong, Wang Jinli, Li Ming, et al. Present situation and analysis on utilization of tropical agricultural wastes resources: complex use of sugarcane wastes[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(1):15~18, 26. (in Chinese)
- 焦静,王金丽,邓怡国,等. 热带农业废弃物资源及沼气利用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(30):13 350~13 351, 13 405.
Jiao Jing, Wang Jinli, Deng Yiguo, et al. Tropical agricultural waste resources and the use of biogas[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(30):13 350~13 351, 13 405. (in Chinese)
- 焦静,王金丽,邓怡国,等. 草粪比对甘蔗叶干法厌氧发酵产气效果的影响[J]. 广东农业科学, 2010, 37(1):51~54.
Jiao Jing, Wang Jinli, Deng Yiguo, et al. Effect of ratios of manure to straw on sugarcane leaves dry anaerobic fermentation for biogas production[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(1):51~54. (in Chinese)
- 李世密,魏雅洁,张晓建,等. 秸秆类木质纤维素原料厌氧发酵产沼气研究[J]. 可再生能源, 2008, 26(1):51~54.
Li Shimi, Wei Yajie, Zhang Xiaojian, et al. Research on the biogas production from lignocellulosic material[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1):51~54. (in Chinese)
- 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 Jingxia, Jiang Yang, He Guangshe, et al. Research on dry anaerobic fermentation by agricultural refuse[J]. Renewable Energy Resources, 2004, 22(2):40~41. (in Chinese)
- 李想,赵立欣,韩捷,等. 农业废弃物资源化利用新方向——沼气干发酵技术[J]. 中国沼气, 2006, 24(4):23~27.
Li Xiang, Zhao Lixin, Han Jie, et al. The new direction of agricultural residues utilization in China: biogas dry fermentation technology[J]. China Biogas, 2006, 24(4):23~27. (in Chinese)
- 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 Qingyu, Li Jinyang. Experimental investigation of making biogas from dry fermented corn stalk[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(3):440~442. (in Chinese)
- 叶小梅,常志州. 有机固体废弃物干法厌氧发酵技术研究综述[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2):76~79,96.
Ye Xiaomei, Chang Zhizhou. State of arts and perspective of dry anaerobic digestion of organic solid waste[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(2):76~79,96. (in Chinese)
- 沈伯雄,梁材,周元驰,等. 生活垃圾厌氧发酵制沼气研究[J]. 环境卫生工程, 2006, 14(3):24~27.
Shen Boxiong, Liang Cai, Zhou Yuanchi, et al. Study on producing methane with domestic waste anaerobic fermentation[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, 14(3):24~27. (in Chinese)

- 2 朱俊晨,叶心华. 多孔聚酯材料固定化黑曲霉产糖化酶条件的研究[J]. 江苏食品与发酵,2001(2):1~5.
Zhu Junchen, Ye Xinhua. Studies on immobilization of aspergillus niger for repeated batch production of glucoamylase[J]. Jiangsu Food & Fermentation, 2001(2):1~5. (in Chinese)
- 3 黎卫强. 糖化酶在食品工业中的应用研究进展[J]. 沿海企业与科技,2010(4):65~67.
- 4 高振鹏,岳田利,袁亚宏,等. 超声波强化有机溶剂提取石榴籽油的工艺优化[J]. 农业机械学报,2008,39(5):77~80.
Gao Zhenpeng, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Technology optimization on extracting pomegranate seed oil using organic solvent assisted by ultrasound[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5):77~80. (in Chinese)
- 5 高振鹏,岳田利,袁亚宏,等. 苹果汁中展青霉素的超声波降解[J]. 农业机械学报,2009,40(9):139~143.
Gao Zhenpeng, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Ultrasonic degradation of patulin in apple juice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):139~143. (in Chinese)
- 6 肖琼,姚春才,勇强,等. 玉米秸秆超声辅助酶水解[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2007,31(4):85~88.
Xiao Qiong, Yao Chuncai, Yong Qiang, et al. Study on ultrasound assisted enzymatic hydrolysis of corn stover[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2007,31(4):85~88. (in Chinese)
- 7 覃益民,唐江涛,魏远安,等. 超声波对 β -果糖基转移酶催化活性的影响[J]. 食品与机械,2007,23(5):23~25.
Qin Yimin, Tang Jiangtao, Wei Yuanan, et al. Effect of ultrasound on catalytic activity of β -fructosyl transferase[J]. Food and Machinery, 2007, 23(5):23~25. (in Chinese)
- 8 陈小丽,黄卓烈,巫光宏,等. 超声波对淀粉酶催化活性的影响[J]. 华南农业大学学报,2005,26(1):76~79.
Chen Xiaoli, Huang Zhuolie, Wu Guanghong, et al. Effect of ultrasound on catalytic activity of amylase[J]. Journal of South China Agricultural University, 2005,26(1):76~79. (in Chinese)
- 9 梁春虹,黄惠华. 超声波场致效应对酶的影响[J]. 食品与机械,2007,23(2):133~136.
Liang Chunhong, Huang Huihua. A review on effects of ultrasound treatment on enzymes[J]. Food and Machinery, 2007, 23(2):133~136. (in Chinese)
- 10 高大维,陈满香,梁斌,等. 超声波催化糖化酶水解淀粉的初步研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,1994,22(1):70~74.
Gao Dawei, Chen Manxiang, Liang Hong, et al. Study on the acceleration effect of ultrasound on the hydrolyzation of starch with glucoamylase[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 1994, 22(1):70~74. (in Chinese)
- 11 Ertugay M F, Yuksel Y, Sengul M. The effect of ultrasound on lactoperoxidase and alkaline phosphatase enzymes from milk[J]. Milchwissenschaft-milk Science International, 2003, 58(11~12):593~595.
- 12 Raviyan P, Zhang Z, Feng H. Ultrasonication for tomato pectinmethylesterase inactivation: effect of cavitation intensity and temperature on inactivation[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 70(2):189~196.
- 13 Zhong M T, Ming X W, Su P W, et al. Effects of ultrasound and additives on the function and structure of trypsin[J]. Ultrasonic Sonochemistry, 2004, 11(6):399~404.
- 14 GB/T 5009.7—2003 食品中还原糖的测定[S]. 2003.

~~~~~

(上接第 113 页)

- 10 张庆椿,徐玉玲. 鸡粪厌氧消化接种物对沼气产气率的影响[J]. 环境导报,1998(2):17~19.  
Zhang Qingchun, Xu Yuling. The effect of inocula on the gas production rate in the progress of anaerobic fermentation through chicken dung[J]. Environment Herald, 1998(2):17~19. (in Chinese)
- 11 Walter J W. Anaerobic dry fermentation [J]. Biotechnology & Bioengineering Symp, 1980(10):43~65.
- 12 李想. 农业废弃物干法厌氧发酵关键参数优化研究[D]. 北京:中国农业科学院,2007.  
Li Xiang. The optimized study on the pivotal parameters of agriculture residues dry anaerobic fermentation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese)
- 13 蒋建国,姜志颖,赵振振,等. 添加污泥饼补充氮源的农作物秸秆高固体厌氧消化启动研究[J]. 环境科学,2009,30(1):297~301.  
Jiang Jianguo, Lou Zhiying, Zhao Zhenzhen, et al. Start-up of high solid anaerobic digestion process for treating straw with sludge cake as nitrogen additive[J]. Environmental Science, 2009, 30(1):297~301. (in Chinese)
- 14 王金丽,焦静,张劲,等. 甘蔗叶干法厌氧发酵工艺研究[J]. 农业机械学报,2011,42(3):109~114.  
Wang Jinli, Jiao Jing, Zhang Jin, et al. Research on sugarcane leaves dry anaerobic fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3):109~114. (in Chinese)