

牛粪、鸡粪和稻秆混合的沼气发酵特性与工艺优化*

王晓娇 李轶冰 杨改河 李 敏 任广鑫 冯永忠

(西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 采用可控恒温厌氧发酵装置,选用牛粪、鸡粪、稻秆3种原料,按干物质比例0:2:1、0.4:1.6:1、0.8:1.2:1、1.2:0.8:1、1.6:0.4:1、2:0:1混合,研究了各配比在15℃、20℃、25℃、30℃下的厌氧发酵情况。结果表明:随温度升高,各配比产气速率和累积产气量均增大,15℃下发酵周期最长,其他温度对发酵周期影响无显著差异;不同配比下,累积产气量均呈先增大后减小的趋势,牛粪、鸡粪、稻秆3种原料混合的发酵效果显著好于牛粪与稻秆、鸡粪与稻秆2种原料混合的发酵效果,但配比对发酵周期无显著影响。通过模型预测,得到最优工艺组合,在发酵温度为30℃,牛粪、鸡粪与稻秆配比为1.22:0.78:1时,可获得最大累积产气量为28 308.7 mL。

关键词: 沼气发酵 牛粪 鸡粪 稻秆 温度 配比

中图分类号: S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)03-0104-05

Fermentation and Process Optimization of Mixed Cow Dung, Chicken Manure and Rice Straw for Biogas Production

Wang Xiaojiao Li Yibing Yang Gaihe Li Min Ren Guangxin Feng Yongzhong

(College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract

Fermentation of raw materials can be mixed to make up for deficiencies of the single fermentation and in different degrees to enhance the effect of fermentation of raw materials. This research was carried out in controllable constant-temperature fermentation equipment. Cow dung, chicken manure and rice straw were selected with the proportions of TS ratio(0:2:1,0.4:1.6:1,0.8:1.2:1,1.2:0.8:1,1.6:0.4:1,2:0:1) as raw materials, and biogas fermentation at temperatures of 15℃,20℃,25℃ and 30℃ was studied. The main conclusions were drawn as follows: the biogas production rate and cumulative biogas yield of each proportion rose with the increase of temperature; the fermentation period was longest at 15℃, but there were no difference among the other temperatures; the cumulative biogas yield was first increased and then decreased with the change of proportion, that was fermentation of a mixture of three types of raw materials——cow dung, chicken manure and rice straw, was significantly better than the effect of the mixture of cow dung and rice straw, as well as the mixture of chicken manure and rice straw, but no significant impact on the fermentation period. The model predicted, with the optimal combination of technology, the temperature of 30℃ and the TS ratio of cow dung, chicken manure and rice straw was respectively 1.22:0.78:1, the cumulative biogas yield was expected to reach maximum 28 308.7 mL.

Key words Biogas fermentation, Cow dung, Chicken manure, Rice straw, Temperature, Proportion

收稿日期: 2009-06-26 修回日期: 2009-08-17

* 国家自然科学基金资助项目(30700482)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD89B16)和西北农林科技大学生物质能源研究专项(07ZR050)

作者简介: 王晓娇, 硕士生, 主要从事生物质能与循环农业技术研究, E-mail: xjw1023@yeah.net

通讯作者: 李轶冰, 讲师, 博士, 主要从事生态农业与循环农业技术研究, E-mail: liyibing@nwsuaf.edu.cn

引言

近年来,沼气发酵技术发展迅速,已经成为提高农村畜禽粪便和农作物秸秆资源化利用的有效途径^[1-3]。单一原料发酵已得到深入细致的研究,并形成了较成熟的技术体系而应用于实际生产生活中^[4-7]。人畜粪便、农作物秸秆单独发酵时,粪便的发酵效果明显优于秸秆的发酵效果^[8],但人畜粪便含有较多的易分解化合物,发酵周期较短,而农作物秸秆含纤维素木质素多,发酵周期长^[9-10]。因而粪便和秸秆混合发酵,不仅可以弥补单一原料的发酵缺陷,还能解决秸秆在发酵时易浮料结壳的缺点,提高发酵效果^[11-12]。但目前混料研究局限于 2 种原料的混合,对 3 种及其以上混合原料的发酵研究报道还比较少见。

针对农村大型规模化养殖产业还未形成规模,农户家畜禽粪便种类多但单一数量少、秸秆利用率低的情况,真实地模拟农村户用沼气池投料杂、发酵效果受气温波动影响的现象,采用鸡粪、牛粪与稻秆 3 种原料混合进行发酵,系统研究混料配比以及温度对沼气发酵产气量、发酵周期的影响,并对试验处理进行优化,以期混料发酵的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 发酵原料、接种物及其预处理

发酵原料为牛粪、鸡粪、稻秆,均取自杨凌示范区催西沟养殖场及农户家。稻秆粉碎成长度 2 cm 左右,加水 and 沼液浸湿,装入塑料桶内密封堆沤。将新鲜牛粪、新鲜鸡粪直接装入塑料桶内,密封堆沤。堆沤的材料每隔 2 d 搅拌一次,堆沤时间为 5~7 d。

接种物是用鲜重比为 5:1 的沼液和牛粪混合装桶密封常温驯化得到,驯化时间为 6~9 d。

1.2 试验装置

试验装置为陕西省循环农业工程技术研究中心实验室自行设置的可控恒温厌氧发酵装置(图 1)。主要由发酵装置、集气装置及控温装置 3 部分组成,各装置间用玻璃管和橡胶管连接。选用 5 L 塑料壶作为发酵瓶,集气装置由 1 000 mL 的三角瓶和 1 000 mL 的量筒连接而成。将准备好的发酵装置放置于水槽内,用 1 000 W 电热丝水浴加热,智能温度控制仪(PC-1000)和继电器控制显示发酵温度,温度波动范围为±1℃。

1.3 试验设计

发酵原料为牛粪、鸡粪和稻秆,试验设 6 个配比组,即原料干物质比例分别为 0:2:1、0.4:1.6:1、0.8:1.2:1、1.2:0.8:1、1.6:0.4:1、2:0:1,6 个配比

组合分别记为 R1、R2、R3、R4、R5、R6。按总固体质量分数为 8% 配置发酵料液,在 5 L 的塑料壶里分别装入搅拌均匀的发酵料液 2 000 g,再加入 500 g 的接种物。试验在 4 个恒定温度 15℃、20℃、25℃、30℃ 下进行,每组试验设两个重复。在试验过程中,同时加料,同时开始。采用排水集气法,每天定时测量产气量。

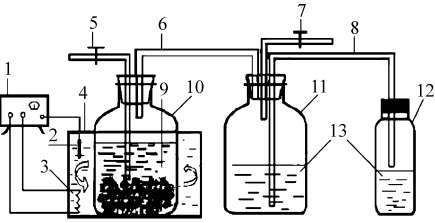


图 1 可控恒温厌氧发酵装置
Fig. 1 Anaerobic fermentation device with controlled and constant temperature

1. 温控仪 2. 传感器 3. 电热丝 4. 恒温水槽 5. 取样口
6. 导气管 7. 取气口 8. 导水管 9. 发酵料液 10. 发酵瓶
11. 集气瓶 12. 集水瓶 13. 水

2 结果与分析

2.1 不同温度下牛鸡粪和稻秆混合的厌氧发酵

15℃、20℃、25℃、30℃ 下,各配比的混合原料都能在较短时间内启动发酵并正常产气。发酵初期,各组产气速率相差不大,随发酵进行,除 15℃ 下各组产气速率变化不明显外,其余 3 个温度下的各组产气速率均经历先增大后减小的过程,但不同组间产气高峰出现时间及峰值存在差别。

由图 2 可以看出,在 15℃ 恒温条件下,R1、R2 最早出现产气高峰(正常产气后的第 4 天),峰值分别为 560 mL/d 和 660 mL/d。R3、R4、R5 均在第 10 天达到各自的产气高峰,峰值分别为 500、785、435 mL/d。R6 的峰值出现最晚,在第 13 天才达到产气高峰,峰值为 460 mL/d。各组在 55 d 的发酵过程中产气速率变化趋势比较平缓,产气峰值不明显,主要产气期集中在第 1~14 天,其平均累积产气量占总累积产气量的 40.2%;产气峰值过后,各组产气量都呈缓慢波动下降趋势,但下降速率差别表现不明显。

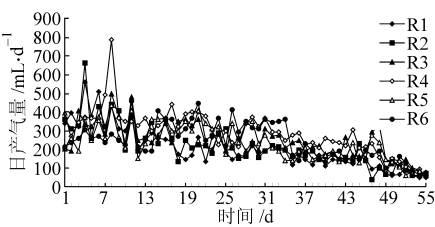


图 2 15℃ 下混合发酵产气速率的变化曲线
Fig. 2 Biogas production rate of raw materials with different proportions at temperature of 15℃

由图 3 可看出,在 20℃ 恒温条件下,R1 最早出现产气高峰(正常产气后第 7 天),峰值为 820 mL/d。R2、R3、R4 和 R6 分别在第 10、11、15、12 天达到各自的产气高峰,峰值分别为 920、940、960 和 930 mL/d。R5 的峰值来的最晚,在第 16 天达到产气高峰,峰值为 1 050 mL/d。各组在 55 d 的发酵过程中产气速率变化趋势显著,产气峰值明显,主要产气期集中在第 4 ~ 19 天,其平均累积产气量占总累积产气量的 60.6%。产气峰值过后,各组产气量都呈明显的下降趋势,以 R6 下降速率最快。

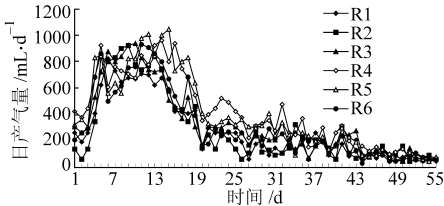


图 3 20℃ 下混合发酵产气速率的变化曲线
Fig. 3 Biogas production rate of raw materials with different proportions at temperature of 20℃

由图 4 可看出,在 25℃ 恒温条件下,R2 最早出现产气高峰(正常产气后第 6 天),峰值为 1 055 mL/d。R3、R4 和 R5 均在第 7 天达到各自的产气高峰,峰值分别为 1 360、1 220 和 1 250 mL/d。R6 在第 11 天达到产气高峰,峰值为 910 mL/d。R1 的峰值出现最晚,在第 13 天达到产气高峰,峰值为 955 mL/d。各组在 55 d 的发酵过程中产气速率变化趋势显著,产气峰值明显,主要产气期集中在第 3 ~ 19 天,其平均累积产气量占总累积产气量的 61.8%。产气峰值过后,各组产气量都呈下降趋势,以 R2 下降速率最快。

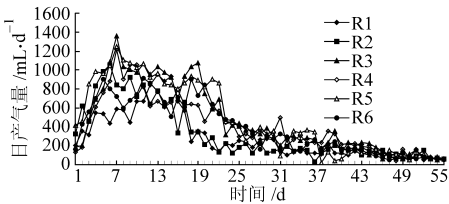


图 4 25℃ 下混合发酵产气速率的变化曲线
Fig. 4 Biogas production rate of raw materials with different proportions at temperature of 25℃

由图 5 可以看出,在 30℃ 恒温条件下,R1、R2、R3、R4 和 R6 均在正常产气后的第 11 天达到各自的产气高峰,峰值分别为 1 195、1 285、1 615、1 345 和 1 145 mL/d。R5 的峰值出现最晚,在正常产气后的第 13 天达到产气高峰,峰值为 1 175 mL/d。各组在 55 d 的发酵过程中产气速率变化趋势显著,产气峰值明显,主要产气期集中在第 5 ~ 21 天,其平均累积产气量占总累积产气量的 52.6%。产气峰值过后,各组产气量都呈下降趋势,以 R6 下降速率最快。

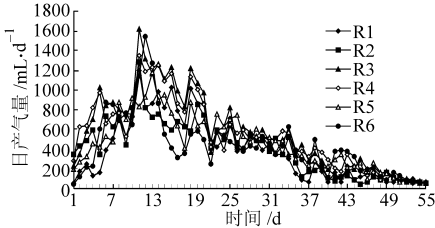


图 5 30℃ 下混合发酵产气速率的变化曲线
Fig. 5 Biogas production rate and cumulative biogas yield of three types of raw materials with different proportions at temperature of 30℃

产气高峰出现的时间表明,在同一温度下(图 2 ~ 5),随牛粪干物质比例的增加,产气高峰出现的时间越晚,但高峰值无明显规律;随温度升高,各配比产气峰值均呈不同程度的升高趋势,其中,30℃ 与 15℃ 相比,各配比峰值分别增加 348%、195%、325%、171%、270%、249%,说明升高温度可显著增大产气速率,但产气高峰的出现时间并不与温度升高表现出一致性的关系。

2.2 发酵周期与发酵温度、原料配比的关系

厌氧消化发酵周期意味着在相同时间内消化处理废弃物的量,直接反映了厌氧消化效率。一般在实际生产中,以产气量达到总产气量的 90% 以上即可认为发酵基本完成,为一个发酵周期^[13]。由图 6 可知,15℃、20℃、25℃、30℃ 下,随牛粪干物质比例的增加,各配比的发酵周期无明显的趋势性变化;各配比在 15℃ 下所需发酵周期均显著大于其他温度,除 R2、R3 随温度升高,发酵周期缩短外,其余各组随温度变化并没有表现出明显的规律。对试验数据进行方差分析表明,原料比对发酵周期无显著影响;温度对发酵周期有显著影响,经多重分析,15℃ 与 20℃、25℃、30℃ 间有显著差异($p < 0.05$),其他温度间无显著差异,其原因可能是由于厌氧消化是一个复杂的生物化学过程,在这个过程中影响厌氧消化速率快慢的因素不仅是温度,而是与配比等多因素同时作用,相互影响。

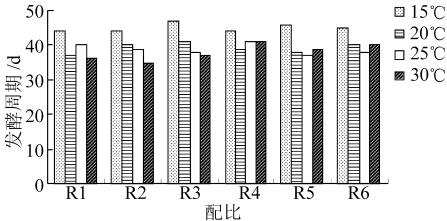


图 6 各配比在不同温度下发酵周期的变化
Fig. 6 Fermentation cycle changes at different temperatures of different proportions

2.3 累积产气量与发酵温度、原料配比的关系

由图 7 可以看出,除 R5 在 30℃ 下的累积产气量低于 25℃ 外,其他配比的累积产气量随温度升高

均呈显著增大趋势。多重分析结果表明,所有配比在各个温度下的累积产气量间均有显著差异($p < 0.05$),说明温度越高,发酵效果越好。由图8可以看出,除25℃下R4较R3的累积产气量下降外,其他温度下,随牛粪占干物质比例的增加,累积产气量呈先增大后减小的趋势。多重分析结果表明,所有温度下各配比间的累积产气量均有显著差异($p < 0.05$),15℃下R3、R4的累积产气量均显著大于R1、R6,20℃、25℃、30℃下R3、R4、R5的累积产气量均显著大于R1、R6,各温度下的最高累积产气量对应的配分别为R4、R4、R5、R3,说明2种粪便与秸秆适当比例的混合发酵效果较单一粪便与秸秆的混合发酵效果有显著提高。其原因可能是由于3种原料混合后,原料发酵特性得到相互补充,从而有利于厌氧微生物的生长和消化。

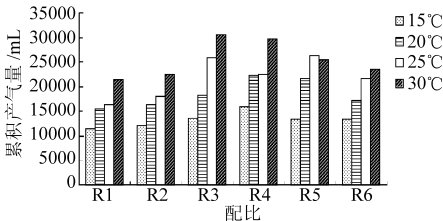


图7 各配比在不同温度下的累积产气量
Fig. 7 Cumulative biogas yield at different temperatures of different proportions

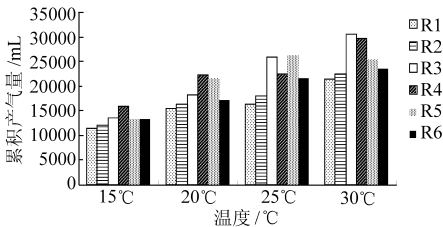


图8 不同温度下各配比的累积产气量

Fig. 8 Cumulative gas yield of different proportions at different temperatures

2.4 模型的建立

本试验设计中,2种粪便总量与稻秆的干物质比例恒为2:1,为便于数学模型建立,将牛粪、鸡粪、稻秆干物质的比例0:2:1、0.4:1.6:1、0.8:1.2:1、1.2:0.8:1、1.6:0.4:1、2:0:1分别转化为牛粪占总粪便干物质比例0、20%、40%、60%、80%、100%。利用SAS软件对各处理组发酵的累积产气量 $f_{R,T}$ 与原料配比(即牛粪占总粪便干物质比例 x_R)和发酵温度(x_T)进行多项式回归^[14],得到回归方程

$$f_{R,T} = -2\,918.20 + 128.36x_R + 1\,004.33x_T - 1.13x_R^2 + 1.45x_Rx_T - 5.76x_T^2$$

从多项式回归的方差分析结果看,回归模型均达到极显著水平($p < 0.001$),模型的确定系数为0.9343,表明该模型可以用于试验真实值的分析和预测。由发酵温度和原料配比的交互作用对累积产气量的影响响应曲面(图9)可以看出,随着温度的升高,各个配比的累积产气量呈增大趋势;随牛粪占总粪便干物质比例的增加,各温度下累积产气量均呈现先增大后减小的趋势,这与实际的试验结果是一致的。

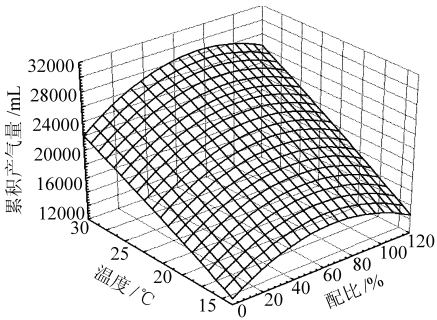


图9 发酵温度与原料配比对累积产气量的交互作用响应曲面

Fig. 9 Response surface of the interaction of cumulative biogas yield by temperature and proportion

通过RSREG过程寻找响应曲面的最优稳定点,得出发酵温度 x_T 为30℃,牛粪占总粪便干物质比例 x_R 为61%,即牛粪、鸡粪与稻秆配比为1.22:0.78:1时,可望获得最大累积产气量28 308.7 mL。

3 结束语

研究表明,温度和原料配比对发酵效果有显著影响,主要体现为累积产气量的差异。随温度升高,各配比累积产气量相应增大。本试验的温度设计范围与其数学模型得出的最优发酵温度相符合,发酵最优温度为30℃。原料配比对累积产气量也有显著的影响,牛粪、鸡粪、稻秆3种原料在一定比例下混合后发酵效果显著好于牛粪与稻秆、鸡粪与稻秆2种原料混合的发酵效果,原料混合发酵是提高沼气发酵效果的有效方法。通过模型预测得出,发酵温度为30℃,牛粪、鸡粪与稻秆配比为1.22:0.78:1时,可望获得最大累积产气量28 308.7 mL。

参 考 文 献

1 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报,2005,21(8):169~173.
Sun Yongming, Li Guoxue, Zhang Fudao, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 169~173. (in Chinese)

- 2 王革华,田雅林. 新农村建设与生物质能发展战略[J]. 农业工程学报,2006,22(增刊1):1~3.
Wang Gehua, Tian Yalin. New village and biomass energy development strategy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(Sup.1):1~3. (in Chinese)
- 3 刘聿太. 沼气发酵微生物及厌氧技术[M]. 北京:科学出版社,1990.
- 4 王忠江,李文哲,石铁,等. 温度和料液浓度对牛粪高浓度厌氧水解酸化的影响[J]. 农业工程学报, 2008,24(11):212~216.
Wang Zhongjiang, Li Wenzhe, Shi Tie, et al. Effects of temperature and liquor concentration on the high-concentration anaerobic hydrolysis and acid genesis of dairy manure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11): 212~216. (in Chinese)
- 5 陈小华,朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J]. 农业工程学报,2007,23(3):279~283.
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3):279~283. (in Chinese)
- 6 刘荣厚,郝元元,武丽娟. 温度条件对猪粪厌氧发酵沼气产气特性的影响[J]. 可再生能源,2006(5):32~35.
Liu Ronghou, Hao Yuanyuan, Wu Lijuan. Effect of temperature on biogas yield and property during anaerobic fermentation process of pig dung[J]. Renewable Energy, 2006(5):32~35. (in Chinese)
- 7 陶扑,张无敌,宋洪川,等. 沼气发酵综合利用的现状和发展趋势[J]. 能源工程,2001(5):9~11.
- 8 张翠丽,杨改河,卜东升,等. 温度对秸秆厌氧消化产气量及发酵周期影响的研究[J]. 农业环境科学学报,2008, 27(5):2 069~2 074.
Zhang Cuili, Yang Gaihe, Bo Dongsheng, et al. Effect of temperature on biogas production and fermentation period length from the anaerobic digestion of crop residue [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 2 069~2 074. (in Chinese)
- 9 Skoulou V, Zabaletou A. Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2007,11(8):1 698~1 719.
- 10 Al-Masri M R. Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes[J]. Bioresource Technology, 2001, 77(1):97~100.
- 11 张记市,张雷,王华. 城市有机生活垃圾厌氧发酵处理研究[J]. 生态环境,2005,14(3):321~324.
Zhang Jishi, Zhang Lei, Wang Hua. Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste [J]. Ecological Environment, 2005, 14(3):321~324. (in Chinese)
- 12 熊承永,李健,黄利宏. 户用沼气池秸秆利用浅析[J]. 可再生能源,2003(3):44~45.
Xiong Chengyong, Li Jian, Huang Lihong. Simple analyse on straw utilization for household biogas digester[J]. Renewable Energy, 2003(3):44~45. (in Chinese)
- 13 Kettunen R H, Rintala J A. The effect of low temperature (5~20℃) and adaptation on the methanogenic activity of biomass [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1997, 48(4):570~576.
- 14 胡小平,王长发. SAS 基础及统计实例教程[M]. 西安:西安地图出版社,2001.