

人粪与不同原料比对厌氧发酵产气影响

秦佳佳^{1,3}, 李轶冰^{1,3}, 杨改河^{1,3}, 宋籽霖^{2,3}, 任广鑫^{1,3}, 冯永忠^{1,3}

(1.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为提高人畜粪便和农作物秸秆资源化有效利用提供科学依据,研究了人粪与各种不同原料混合发酵的产气效率。试验通过自行研究设计的可控性恒温发酵装置,以人粪、牛粪、鸡粪和玉米秆为消化原料,以常温厌氧发酵池的底物为接种物,在总固 TS 质量分数为 8%条件下,进行批量厌氧消化试验,研究人粪分别与牛粪、鸡粪和玉米秆按不同比例(干物质质量比为 1:1、2:1、3:1)混合发酵的产气速率、累积产气量的变化。结果表明,在 25℃恒温条件下,人粪与 3 种原料的混合发酵,均能正常产气,均能在厌氧发酵开始后的 5~14 d 达最大产气速率,在 30 d 左右各自的累积产气量均能达到总产气量的 87%~92%,其中人粪与牛粪的混合产气效率最好,各组物料的 3 种配比的平均累积产气量分别为 26 713、21 281 和 21 227 mL,各组物料的最优配比的最高产气速率分别为 1 500、1 260 和 1 100 mL·d⁻¹。在 25℃下,人粪与牛粪混合发酵的最优配比为 3:1,人粪与鸡粪的为 1:1 以及人粪与玉米秆的为 3:1,为人粪与不同原料配比的混合厌氧发酵提供了参考依据。

关键词:人粪;配比;厌氧发酵;产气速率;累积产气量

中图分类号:S216.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)03-0571-07

Effect of Ratios of Human Feces Mixed with Different Materials in Anaerobic Fermentation on Biogas Production

QIN Jia-jia^{1,3}, LI Yi-bing^{1,3}, YANG Gai-he^{1,3}, SONG Zi-lin^{2,3}, REN Guang-xin^{1,3}, FENG Yong-zhong^{1,3}

(1.College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,China; 2.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.The Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The research studies of the biogas production efficiency of human feces mixed with different materials in anaerobic fermentation. It is provide a scientific basis to improve the efficiency use of human feces and animal manure, crop stalks. A batch of experiments under the condition of 8% mass fraction of total solid were conducted in a self-manufactured anaerobic fermentation reactor, with human feces, cattle manure, chicken dung and corn straw as fermentation materials, and the substrate of constant temperature fermentation pool as inoculation substance. Experiment was conducted to investigate the biogas-production rate and the cumulative biogas yield of different ratios (dry matter quantity ratio of 1:1, 2:1, 3:1) of human feces mixed with chicken dung, cattle manure, and corn straw. Under 25℃ constant temperature conditions, human feces mixed with three materials can produce biogas normally, the largest biogas production rate starts at about 5~14 d of the anaerobic fermentation; the cumulative biogas yield production can reach the total gas production of about 87%~92% in about 30 days. The best biogas-producing efficiency was observed when human feces mixed with cow manure, the average cumulative biogas production of three kinds mixed groups were 26 713, 21 281 and 21 227 mL, respectively. The max daily biogas production of three best ratios in three kinds mixed groups were 1 500, 1 260 and 1 100 mL·d⁻¹, respectively. Under the temperature of 25℃, the ratio of 3:1 was the best ratio in the group of human feces with cattle manure, the ratio of 1:1 was the best ratio in the group of human feces with chicken dung, and the ratio of 3:1 is the best ratio in the group of human feces with corn straw. That is provided a reference for ratios of human feces mixed with different materials in anaerobic fermentation. Therefore, we should add proper amount of human feces, choose reasonable ratio according to different materials in

收稿日期:2009-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(30700482);国家科技支撑计划项目(2007BAD89B16);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2007C103);西北农林科技大学生物质能源研究专项(07ZR050)

作者简介:秦佳佳(1984—),女,陕西延安人,在读硕士,主要从事生物质能与循环农业技术研究。E-mail:plum1025@163.com

通讯作者:李轶冰 E-mail:liyibing@nwsuaf.edu.cn

the actual anaerobic fermentation process. This experiment was only conducted at the temperature of 25 °C, but the research about human feces mixed with different materials in anaerobic fermentation at the other temperatures required further study.

Keywords: human feces; ratio; anaerobic digestion; the rate of biogas production; the cumulative biogas production

人类的生存与发展始终伴随着大量的有机废弃物的产生,随着人们生活水平的提高和农业生产的发展,有机废弃物——人粪、农作物秸秆、牲畜粪便的排放量日益增加,对环境的污染也日益严重。厌氧消化是处理有机废弃物的有效途径,它不仅能解决燃料短缺问题^[1-2],而且实现了有机废弃物无害化处理及多层次资源化利用^[3-5]。

长期以来以人粪单独作为沼气的发酵原料,一直发酵效果不好。冯书涛等^[6]进行了纯人粪沼气发酵试验的研究,表明由于纯人粪的碳氮比是 2.9:1,而沼气发酵的最适碳氮比是(25~30):1,所以纯人粪沼气的产气率较低。张翠丽等^[7]研究了在 20 °C、25 °C、30 °C、40 °C 单一人粪的发酵产气情况,指出人粪的厌氧消化的最优消化温度是在 25.1 °C,表明其适合作为低温地区的消化原料。Weiland 提出混合厌氧发酵以及优化混合原料组合将是厌氧消化技术的重要发展方向^[8-9],但是目前有关人粪与禽畜粪便、秸秆混合发酵的系统研究在国内外却罕见报道。因此,把人粪、禽畜粪便、作物秸秆进行混合发酵具有积极的意义,不仅能弥补人粪作为单一原料的碳氮比不适宜发酵的缺陷,改良原料结构和调节原料营养,还能在不同程度上提高原料利用率及发酵效果,提高产气潜力,促进农村沼气事业的发展。

本文基于前人研究及农村沼气发酵的理论和实践,对比研究在 25 °C 人粪与不同的原料配比的发酵情况,旨在找出人粪与不同原料发酵的最优的发酵配比,为解决农村能源短缺、提高人畜粪便和作物秸秆的资源化利用率和实现沼气发酵的可控化提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验原料

发酵原料为人粪、牛粪、鸡粪和风干的玉米秆,接种物是用鲜重比为 5:1 的沼液和牛粪混合装桶密封驯化得到的,驯化时间为 6 d。发酵原料和接种物均取自西北农林科技大学附近的沼气示范村——崔西沟。

人粪采用新鲜原料,不进行预处理。其他原料进行预处理,将玉米秸秆粉碎成长度为 2 cm 左右,放在 125 L 塑料桶内加入适量的水和沼液,密封堆沤,堆沤

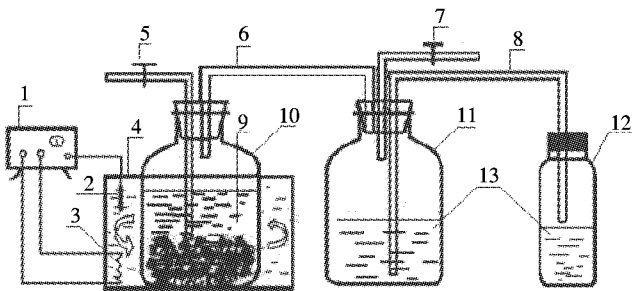
时间为 6 d,每隔 2 d 搅拌 1 次,以破坏玉米秸秆的纤维木质素和表面蜡质层。将鸡粪、牛粪直接放入 125 L 塑料桶,进行密闭堆沤,也每隔 2 d 搅拌 1 次,以加速粪便中有机质的分解和降解,堆沤时间为 6 d,各原料的成分见表 1。

表 1 发酵原料的碳氮比、干物质含量
Table 1 The C/N and TS of fermented materials

项目 Item	碳氮比 C/N	干物质含量/g·kg ⁻¹ Fermented
人粪 Human feces	2.88	20.5
鸡粪 Chicken feces	10.76	1.1
牛粪 Cattle manure	23.0	3.2
玉米秆 Corn straw	25.0	3.3

1.2 试验装置

本试验所用装置为陕西省循环农业工程技术研究中心实验室自行设计加工的可控型恒温厌氧发酵装置,装置见图 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链接。本研究的发酵罐为 5 L 塑料壶,集气瓶为 1 000 mL 的三角瓶,用 2.5 L 塑料壶代替图 1 中的集水瓶以收集排出的水,然后用量筒进行测量。将准备好的发酵装置放置于恒温水槽内,水浴加热,通过温控仪和继电器显示和控制发酵温度,温度波动范围±1 °C。



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.发酵液 10.发酵瓶 11.集气瓶 12.集水瓶 13.水

图 1 可控性恒温厌氧发酵装置

Figure 1 Controllable and constant temperature anaerobic fermentation device

1.3 试验设计

发酵液液的总固体浓度为 8%, 恒温水槽温度控制在 25 °C 下,将人粪分别与牛粪、鸡粪、玉米秆混合,

按照干物质质量的比,各设3个配比,为1:1、2:1和3:1,每组配比重复2次,每个塑料壶内装入经过预处理的发酵原料2 kg、接种物500 g。发酵料液的配制如表2。

表2 发酵料液的配制表

Table 2 Quantity of materials and water of fermented liquid

发酵原料配比	牛粪/鸡粪/		
	人粪/g	玉米秆/g	水/g
人粪与牛粪 1:1	890	788	322
人粪与牛粪 2:1	1186	525	289
人粪与牛粪 3:1	1335	394	271
人粪与鸡粪 1:1	890	247	863
人粪与鸡粪 2:1	1186	165	649
人粪与鸡粪 3:1	1335	124	541
人粪与玉米秆 1:1	890	759	351
人粪与玉米秆 2:1	1186	506	308
人粪与玉米秆 3:1	1335	380	285

1.4 测定项目及方法

(1)干物质含量(TS):采用烘干法,计算方法如公式所示: $TS=A/B\times 100\%$

式中: A 为样品烘干后的重量,g; B 为样品鲜重,g。

(2)碳氮比:氮以凯氏定氮法测定^[10],碳以 VS (挥发性干物质含量)按下式估算: $C=0.47VS$

(3)产气量:待所产的气体能正常点燃后,采用排水法,开始记录数据,每日上午9:00定时测量。

2 结果与分析

2.1 人粪与牛粪混合厌氧发酵产气情况

由图2可以看出,人粪与牛粪3个配比的产气速率变化的曲线基本相似,产气高峰过后,产气速率开始下降。在人粪和牛粪1:1的情况下,25℃时产气速率在第7 d达到最大值(1 200 mL·d⁻¹),出现产气量在1 000 mL以上的有7 d,其产气高峰持续了13 d左

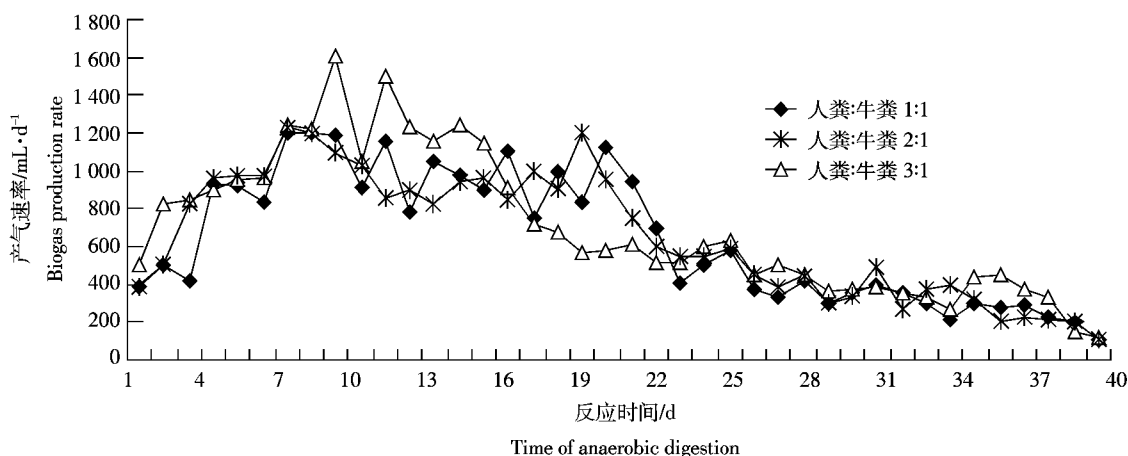


图2 人粪与牛粪不同配比厌氧发酵产气速率变化

Figure 2 Biogas production rate of different ratios of human feces and cattle dung

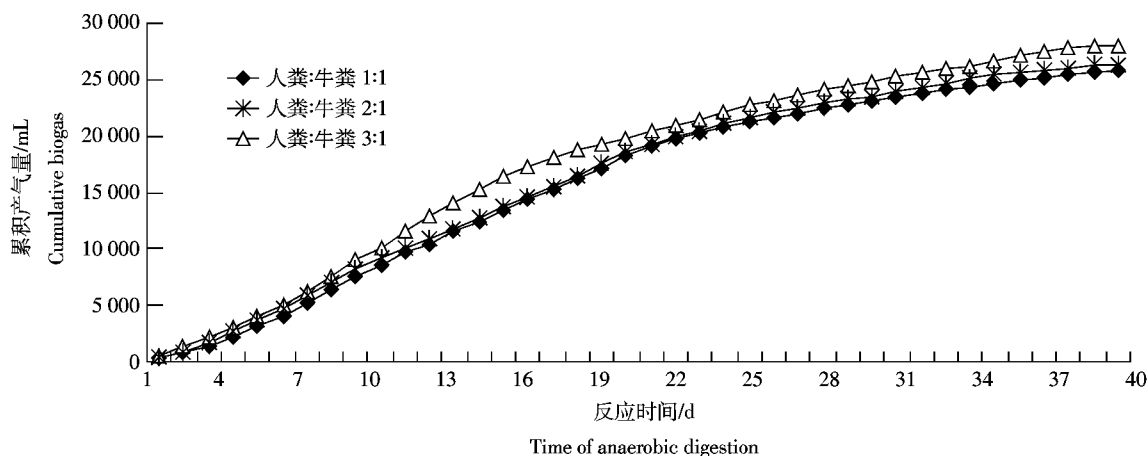


图3 人粪与牛粪不同配比累积产气量的变化

Figure 3 Cumulative biogas yield of different ratios of human feces and cattle dung

右,累积产气量为 25 750 mL,前 30 d 的产气量占总产气量的 89.7%左右。人粪与牛粪 2:1 的产气速率在第 7 d 达到最大值 ($1\,230\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$),出现产气量在 1 000 mL 以上的有 5 d,在第 5 d 出现了产气的高峰,产气高峰持续了 14 d 左右,累积产气量为 26 355 mL,前 30 d 的产气量占总产气量的 89.3%左右。人粪与牛粪 3:1 的产气速率在第 9 d 达到最大值 ($1\,610\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$),出现产气量在 1 000 mL 以上的有 9 d,在第 5 d 开始出现高峰期,持续了 15 d 左右,累积产气量为 28 035 mL,前 30 d 的产气量占总产气量的 88.7%左右。

由图 3 知,25 ℃时,人粪与牛粪配比的厌氧发酵累积产气量的大小依次为 3:1>2:1>1:1,3 个配比的平均累积产气量为 26 713 mL。就 3 个配比间的差异而言,经方差分析 $P>0.05$,表明人粪与牛粪的 3 个配比之间无明显的差异。在 3 个配比中,随着人粪比重的增加,累积产气量是增加的。

2.2 人粪与鸡粪混合厌氧发酵产气的情况

由图 4 可以看出,人粪与鸡粪 3 个配比的产气速率变化曲线基本相似,产气高峰过后产气速率开始下降,其中人粪与鸡粪 3:1 下降最快。25 ℃时,在人粪和鸡粪 1:1 的情况下,在第 5 d 开始出现产气高峰,其产气速率在第 7 d 时达到最大值 ($1\,260\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$),出现产气量在 1 000 mL 以上的有 9 d,其产气高峰时期持续了 15 d 左右,累积产气量为 24 490 mL,前 30 d 的产气量占总产气量的 89.5%左右。在人粪和鸡粪为 2:1 的情况下,在第 5 d 开始出现产气高峰,其产气速率在第 8 d 时达到最大值 ($1\,250\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$),出现产气量在 1 000 mL 以上的有 6 d,其产气高峰时期持续了 13 d 左右,累积产气量为 22 328 mL,前 30 d 的产气量占总产气量的 88.4%左右。在人粪和鸡粪 3:1 的情况下,在第 5 d 开始出现产气高峰,其产气速率在第 7 d 时达到最大值 ($1\,110\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$),出现产气量在 1 000 mL

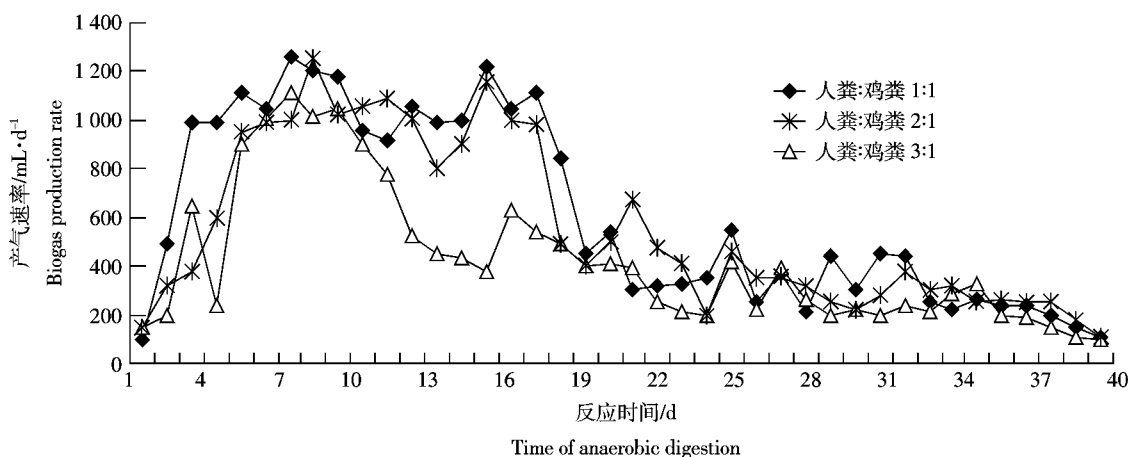


图 4 人粪与鸡粪不同配比产气速率的变化

Figure 4 Biogas production rate of different ratios of human feces and chicken dung

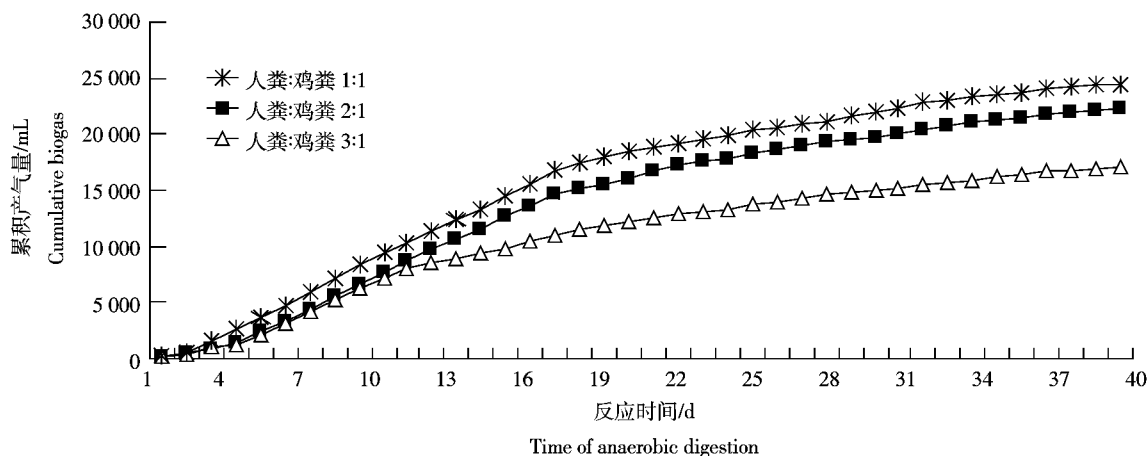


图 5 人粪与鸡粪不同配比累积产气量的变化

Figure 5 Cumulative biogas yield of different ratios of human feces and chicken dung

以上的只有4 d,其产气高峰时期持续了10 d左右,累积产气量为17 025 mL,前30 d的产气量占总产气量的88.2%左右。

由图5知,25℃时,人粪与鸡粪配比的厌氧发酵总的累积产气量的大小依次为1:1>2:1>3:1,3个配比的平均累积产气量为21 281 mL。就3个配比间的差异而言,经方差分析 $P<0.05$,说明人粪与鸡粪的3个配比之间有显著的差异。在人粪与鸡粪混合发酵时,人粪与鸡粪1:1产气最好,且产气高峰持续时间最长,其累积产气量是2:1的1.1倍,是3:1的1.4倍。在3个配比中,随着人粪比重的增加,累积产气量则是减少的。

2.3 人粪与玉米秆混合厌氧发酵产气的情况

由图6可以看出,人粪与玉米秆3个配比的产气速率变化的曲线基本相似,产气高峰过后,产气速率开始下降。在人粪和玉米秆1:1的情况下,在第5 d开

始出现产气高峰,其产气速率在第9 d时达到最大值(1 225 mL·d⁻¹),出现产气量在1 000 mL以上的有6 d,其产气高峰时期持续了10 d左右,累积产气量为17 845 mL,前30 d的产气量占累积产气量的92.3%左右。在人粪和玉米秆2:1的情况下,在第5 d开始出现产气高峰,其产气速率在第12 d时达到最大值(1 175 mL·d⁻¹),出现产气量在1 000 mL以上的有5 d,其产气高峰时期持续了13 d左右,累积产气量为21 960 mL,前30 d的产气量占总产气量的89.8%左右。在人粪和玉米秆3:1的情况下,在第5 d开始出现产气高峰,其产气速率在第15 d时达到最大值(1 100 mL·d⁻¹),出现产气量在1 000 mL以上的只有4 d,其产气高峰时期持续了15 d左右,累积产气量为23 875 mL,前30 d的产气量占总产气量的88.3%左右。

由图7知,25℃时,人粪与玉米秆配比的厌氧发酵总的累积产气量的大小依次为3:1>2:1>1:1,3个配

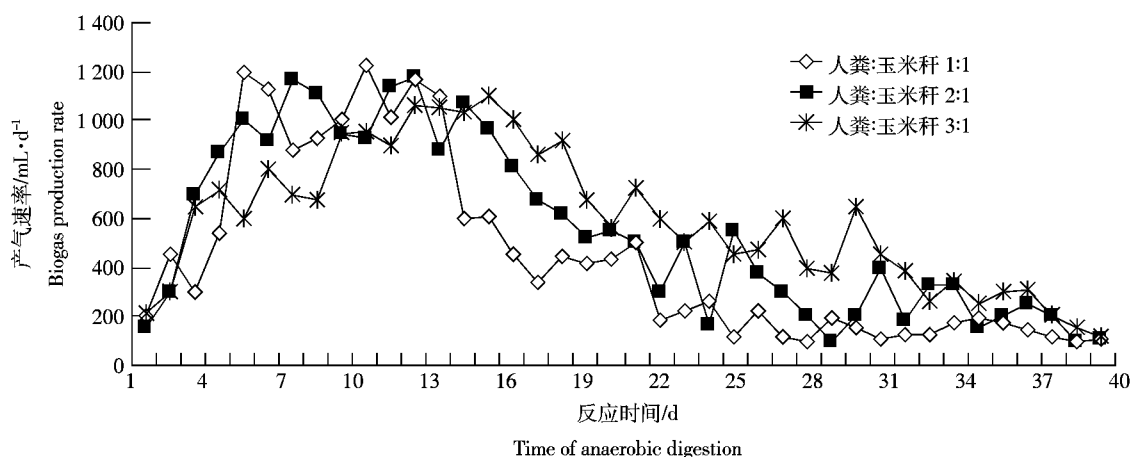


图6 人粪与玉米秆不同配比产气速率的变化

Figure 6 Biogas production rate of different ratios of human feces and corn straw

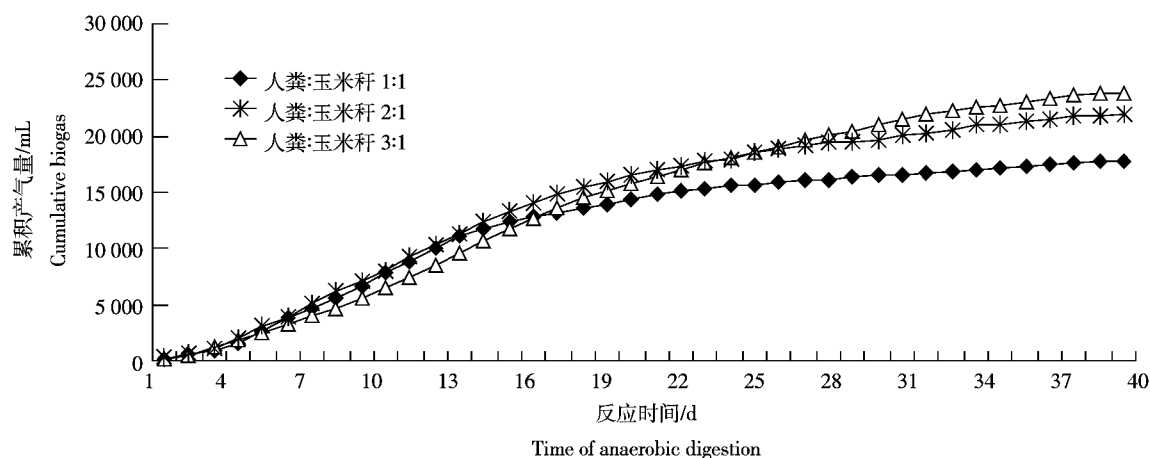


图7 人粪与玉米秆不同配比累积产气量的变化

Figure 7 Cumulative biogas yield of different ratios of human feces and corn straw

比的平均累积产气量为 21 227 mL。就 3 个配比间的差异而言,经方差分析 $P<0.05$,说明人粪与玉米秆的 3 个配比之间产气也有差异。在人粪与玉米秆混合发酵时,人粪与玉米秆 3:1 是产气是最好的,且产气高峰持续时间最长,其累积产气量是 2:1 的 1.1 倍,1:1 的 1.3 倍。在 3 个配比中,随着人粪比重的增加,累积产气量是增加的。

2.4 人粪与不同原料配比的厌氧发酵累积产气量的比较

由图 8 可以得知,25 ℃时,人粪与各种原料的配比中,产气情况最好的是人粪与牛粪 3:1 配比,其累积产气量最高,为 28 035 mL,而人粪与鸡粪 3:1 配比产气最低,为 17 025 mL,仅是人粪与牛粪 3:1 配比累积产气量的 61%。在人粪与 3 种不同原料的混合发酵中,产气情况最好的是人粪与牛粪混合,其平均累积产气量为 26 713 mL,是人粪与鸡粪混合平均累积产气量(21 281 mL)的 1.25 倍,是人粪与玉米秆混合平均累积产气量(21 227 mL)的 1.26 倍,而人粪与鸡粪和人粪与玉米秆混合发酵产气情况的差别不大,这可能与发酵原料的碳氮比有关。由于人粪的碳氮比是 2.9:1,其单一发酵的产气率较低^[11-13],而当人粪与各个原料混合发酵时,由于牛粪中富含大量的粗纤维、粗蛋白、粗脂肪,而鸡粪中含氮高,氮氮含量高^[14],玉米秸秆本身的碳氮也比较高、速效养分含量较低^[15],当与人粪混合后,可能使得各种物料的特性改变了,从而混合后都能很好地发酵。而人粪和牛粪混合发酵最好,是由于人粪与牛粪的产气特性相互之间得到了很好的补充,混合后的原料的碳氮比得到了较好调节,更有利于增加系统中微生物的种类和数量,因而发酵效果最好,不仅累积产气量大,而且产气高峰持续时间长。

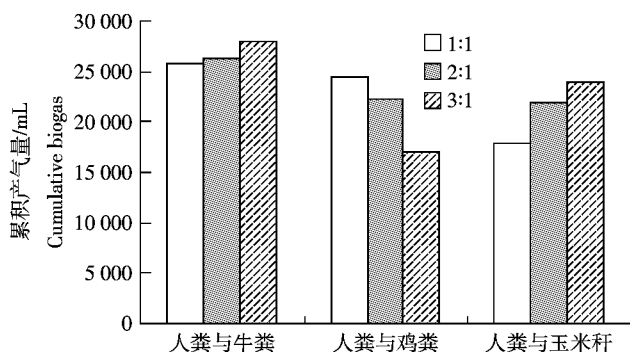


图 8 人粪与不同原料配比累积产气量的比较

Figure 8 Cumulative biogas yield of different proportions of human feces and different materials

就人粪与 3 种不同原料的 9 个配比之间产气情况的差异而言,经方差分析($P<0.01$)看出各个配比之间有极显著差异存在。这表明在沼气发酵中,各组不同原料的对比对累积产气量是有显著影响的,并且由图 2~7 可知各组不同原料的日产气变化曲线基本类似,都有高峰,而后下降至产气结束。这主要是和甲烷菌与产酸菌的活性和密度有关。当系统中产酸菌的产酸的速度与甲烷菌利用有机酸的速度达到平衡时,产气速率就会提高,反之,则产气速率就会下降^[6]。综合分析表明,在 25 ℃时,人粪与牛粪混合发酵效果最好,且人粪与牛粪 3:1 是最有利于厌氧消化产沼气。

3 结论与讨论

(1)在 25 ℃下,人粪与不同原料混合均能产气,且启动速度都较快,均能在较短时间出现产气高峰,并且日产气变化曲线基本类似。在产气高峰过后,产气速率迅速下降,随后通常会再出现若干个小高峰,直至产气结束。

(2)在人粪与 3 种不同原料混合发酵中,各组发酵效果均良好,其中人粪与牛粪发酵效果最好,其平均累积产气量分别是人粪与鸡粪的 1.25 倍,是人粪与玉米秆的 1.26 倍。

(3)25 ℃下各组物料的最优产气配比分别为人粪与牛粪 3:1、人粪与鸡粪 1:1、人粪与玉米秆 3:1。在人粪与牛粪的混合发酵中,累积产气量由大到小依次为人粪与牛粪 3:1、人粪与牛粪 2:1、人粪与牛粪 1:1,累积产气量是随着人粪比重的增加而增大的;在人粪与玉米秆的混合发酵中,累积产气量也是随着人粪的比重的增加而增大,而在人粪与鸡粪的混合发酵中,累积产气量是随着人粪比重的增大而减少。因此,在实际的发酵过程中,应根据不同的原料的产气特性,选择适宜的配比。

(4)本试验选取恒温 25 ℃下,对人粪与各组物料的混合发酵产气情况进行比较,对于在其他温度下人粪与各组物料发酵产气的情况则需进一步研究。

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 Yong-min, LI Guo-xue, ZHANG Fu-dao, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China[J]. Transactions of the CSA E, 2005, 21(8): 169-173.
- [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 1): 1-3.

- WANG Ge-hua, TIAN Ya-li. New village and biomass energy development strategy[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Suppl 1): 1-3.
- [3] 高增月, 杨仁全, 程存仁, 等. 规模化养猪场粪污综合处理的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 198-200.
- GAO Zeng-yue, YANG Ren-quan, CHENG Cun-ren, et al. Test study on integrated treatment of manure and wastewater for large scale pig farm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 198-200.
- [4] 于海滨. 畜禽养殖业沼气发电前景广阔[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增1): 58-60.
- YU Hai-bing. Broad prospect of power generation from biogas on livestock farms[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Suppl 1): 58-60.
- [5] 马林, 王方浩, 马文奇, 等. 中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 170-174.
- MA Lin, WANG Fang-hao, MA Wen-qi, et al. Assessments of the production of animal manure and its contribution to eutrophication in Northeast China from middle and long period[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(8): 170-174.
- [6] 冯书涛, 白辛夫, 常栋, 等. 纯人粪沼气发酵试验研究[J]. 甘肃农业科技, 1993, 1.
- FENG Shu-tao, BAI Xin-fu, CHANG Dong, et al. The study of pure human feces fermentation experimental[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 1993, 1.
- [7] 张翠丽, 杨改河, 任广鑫, 等. 温度对4种不同粪便厌氧消化产气速率及消化时间的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 209-212.
- ZHANG Cui-li, YANG Gai-he, REN Guang-xin, et al. Effects of temperature on biogas production efficiency and fermentation time for anaerobic digestion of four manures[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(7): 209-212.
- [8] 刘战广, 朱洪光, 王彪, 等. 粪草比对干式厌氧发酵产沼气效果的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 26(4): 196-200.
- LIU Zhan-guang, ZHU Hong-guang, WANG Biao, et al. Effect of ratios of manure to crop straw on dry anaerobic digestion for biogas production[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 26(4): 196-200.
- [9] Weiland P. Anaerobic waste digestion in Germany—status and recent developments[J]. *Biodegradation*, 2000, 11(6): 415-421.
- [10] 楚丽丽, 杨改河, 张翠丽, 等. 不同温度条件下农作物秸秆产气效率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 190-193.
- CHU Li-li, YANG Gai-he, ZHANG Cui-li, et al. The biogas production efficiency of crop straws at different temperature[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(3): 190-193.
- [11] 王士芬, 夏群. 城市粪便处理技术及方法[J]. 环境卫生工程, 2000, 3.
- WANG Shi-fang, XIA Qiu. Technology and means of urban night soil treatment[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2000, 3.
- [12] 周孟津, 张榕林, 蔺金印. 沼气实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-15.
- ZHOU Meng-jin, ZHANG Rong-lin, LIN Jin-yin. Operative biogas technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-15.
- [13] 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 29-85.
- ZHANG Quan-guo. Biogas technology and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 29-85.
- [14] 张克强, 高怀友. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- ZHANG Ke-qiang, GAO Huai-you. Processing and handling the pollution caused by livestock and poultry industry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [15] 张翠丽, 李轶冰, 卜东升, 等. 牲畜粪便与麦秆混合厌氧发酵的产气量、发酵时间及最优温度[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1817-1822.
- ZHANG Cui-li, LI Yi-bing, BU Dong-sheng, et al. Biogas yield and its relations with the duration and temperature of mixed anaerobic fermentation of livestock dung and wheat straw[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1817-1822.
- [16] 王丽丽, 王忠江, 梁俊爽, 等. 20-30℃牛粪厌氧发酵产气特性的实验[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(6): 791-795.
- WANG Li-li, WANG Zhong-jiang, LIANG Jun-shuang, et al. Study on anaerobic fermentation of dairy cattle manure at 20-30℃[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2006, 37(6): 791-795.