

光照强度对猪粪、牛粪厌氧发酵的影响研究

尹冬雪^{1,3}, 刘娟娟^{2,3}, 季艳敏^{1,3}, 刘伟¹, 杨改河^{2,3}, 任广鑫^{2,3}, 冯永忠^{2,3}, 周小武⁴

(1.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学农学院, 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; 4.西北农林科技大学后勤服务中心, 陕西 杨凌 712100)

摘要:研究光照强度对猪粪、牛粪厌氧发酵的影响,为沼气池的改进、提高产气量提供参考。试验以猪粪、牛粪为发酵原料,设置0、6、12、24 h 4组光照梯度处理,在恒温35℃和料液总固体质量分数为8%的条件下进行厌氧发酵。结果显示,不同光照强度下同一发酵原料的产气量差别较大,猪粪、牛粪在12 h光照条件下的累积产气量分别是0 h光照条件下的(黑暗)1.80、2.34倍;相同的光照强度不同发酵原料产气量存在差别,0 h光照条件下(黑暗)猪粪的累积产气量为8 136 mL,牛粪的累积产气量为3 282.5 mL;光照条件改变发酵料液的理化性质,使累积产气量与发酵料液的碱度、挥发性脂肪酸(Volatile fatty acids, VFA)、pH值、氨态氮的相关性呈动态变化。

关键词:猪粪;牛粪;厌氧发酵;光照强度

中图分类号:S216.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0428-07

Study on Effect of Illumination Intensity on Pig Manure, Cow Dung' Anaerobic Fermentation

YIN Dong-xue^{1,3}, LIU Juan-juan^{2,3}, JI Yan-min^{1,3}, LIU Wei¹, YANG Gai-he^{2,3}, REN Guang-xin^{2,3}, FENG Yong-zhong^{2,3}, ZHOU Xiao-wu⁴

(1.College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 2.College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 3.Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shannxi Province, Yangling 712100, China; 4.Logistics Services of College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: The purpose of research on effect of illumination intensity on pig manure and cow dung' anaerobic fermentation is to provide theoretical basis for improving biogas yield and promoting innovation of biogas digester. The experiment, under 35℃, at 8% of total solid concentration of digestion material, with pig manure and cow dung as digestion material, was completed at different illumination intensity which rang was from 0 to 24 hours and with a gradient of 6 hours. Results indicated that there was a great deal difference in terms of the same fermentation materials' gas production under the different illumination intensity. Pig manure and cow dung' cumulative biogas yield, under 12 hours of light condition, were 1.80 and 2.34 times respectively as much as that of under dark condition. In addition, gas production of different fermentation material, at the same illumination intensity, was different. In the dark conditions, the cumulative gas production of pig manure was 8 136 mL, which was far much than that of cow dung, at 3 282.5 mL. Illumination conditions changed the physical and chemical characteristics of fermentation material, which led to the dynamic of relationship among cumulative biogas yield and total alkalinity, volatile fatty acids, pH, NH₃-N.

Keywords: pig manure; cow dung; anaerobic fermentation; illumination intensity

厌氧沼气发酵是畜禽粪便资源化利用的主要方式,国内外学者对厌氧沼气发酵特性的影响因素进行

了大量的研究和报道。王华、刘荣厚等^[1-2]研究了温度条件对厌氧发酵沼气产气特性的影响,潘云霞等^[3]研究了接种物浓度对厌氧发酵产气特性的影响,陈永生等^[4]研究了大中型沼气工程原料预处理工艺,刘刘等^[5]对沼气发酵过程混合搅拌进行了研究。但关于光照强度对厌氧沼气发酵的影响鲜有报道。

陕西省循环农业工程技术研究中心致力于沼气厌氧发酵特性的研究,试验过程中,发现放置于自然

收稿日期:2011-07-27

基金项目:陕西 13115 重大专项(2010ZDKG-06);农业部农村能源综合建设项目专项(2011-65);十二五国家科技支撑计划项目“混合原料高产生物燃气技术集成示范”(2011BAD15B03)

作者简介:尹冬雪(1984—),女,黑龙江讷河人,在读硕士,主要从事生物质能与循环农业技术研究。E-mail:milk2egg@163.com

* 通讯作者:杨改河 E-mail:ygh@nwsuaf.edu.cn

光下的玻璃发酵装置产气效果比较理想,在35℃恒温条件下,57 d的发酵期内猪粪、牛粪、小麦秸秆、玉米秸秆的累积产气量分别为686、2 847、8 139、10 386.5 mL。实际生产中,农村户用沼气池以及大中型沼气的发酵罐均不透光^[6-7],说明黑暗条件下也可进行厌氧沼气发酵,在35℃恒温条件下,将发酵装置进行遮光处理,57 d的发酵期内猪粪、牛粪、小麦秸秆、玉米秸秆的累积产气量分别为277、364、104、2 165 mL,说明光照对沼气发酵有显著性影响,但是否任何光照强度都能促进沼气的厌氧发酵还有待于进一步研究。

因此,本试验研究了在35℃恒温条件下,不同光照强度(0、6、12、24 h)对猪粪、牛粪的厌氧发酵的影响,并同步探讨了厌氧沼气发酵过程中光照对料液碱度、VFA、pH值、氨态氮的影响,以期为提高沼气产量以及沼气池的改进提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

发酵原料猪粪、牛粪取自杨凌示范区催西沟养殖场,将取回的新鲜牛粪、猪粪装入塑料桶内,加盖密封堆沤7 d,堆沤期间每隔2 d搅拌一次^[8]。试验所用的接种物——沼液,来源于杨凌示范区催西沟农户家中使用正常的沼气池,采集时除去沼气池上层的悬浮物,采集中下层细腻均匀,无明显粪臭味,已经发酵腐熟的沼液,放于加盖密封的塑料桶中,迅速带回实验室。整个过程中应避免采集物接触空气。

1.2 试验装置

试验装置由发酵装置、集气装置及控温控光装置三部分组成。发酵装置:6号橡胶塞密封的1 000 mL三角瓶,橡胶塞上带有导气孔。集气装置:2个1 000 mL三角瓶连接而成。控温控光装置:ZPQ-280D智能气候培养箱,发酵装置与集气装置由橡胶管相连放置于ZPQ-280D智能气候培养箱内,设定培养箱发酵参数,温度为35℃,湿度为30%,光照等级为3级,光照时间分别设为0、6、12、24 h。

1.3 试验方案

试验设置参照表1,研究0、6、12、24 h光照时间

下猪粪、牛粪的产气情况,每组发酵原料按总固体(TS)质量分数为8%配置,其中A、B、C、D 4组为0、6、12、24 h光照条件下猪粪的厌氧发酵,a、b、c、d 4组为0、6、12、24 h光照条件下牛粪的厌氧发酵,每组设置2个重复。将猪粪、牛粪与水按比例混合均匀,然后在1 000 mL的三角瓶加入猪粪、牛粪发酵料液500 g,再加入200 g的接种物,置于35℃的气候培养箱中,发酵周期48 d。

1.4 测定项目及方法

(1)产气量:采用排水集气法^[9],待所产气体点燃呈淡蓝色火焰后,每天早上定时测量水的体积。

(2)总碱度:溴甲酚绿—甲基红指示剂滴定法。

(3)挥发性脂肪酸(VFA)含量:比色法测定。

(4)pH值:沼气分析仪测定。

(5)氨态氮:蒸馏滴定法测定。

1.5 数据分析方法

将试验所得数据采用Excel 2003整理,SPSS17.0分析。

2 结果与分析

2.1 不同光照强度下日产气量、累积产气量的变化

根据4种光照处理下的猪粪日产气量变化(图1)可知,猪粪C组的日产气量明显高于其他三组,A组的产气期较短,仅为24 d,分别在发酵的第13、17 d达到产气高峰,峰值分别为676、792 mL·d⁻¹,产气高峰过后日产气量迅速下降至零;B组的日产气量较少,最高日产气量仅为195 mL·d⁻¹,产气期仅维持8 d;C组的日产气量波动较大,总体趋势显示出现了3个产气高峰,分别为508.5、861、425.5 mL·d⁻¹,产气主要集中在1~45 d,前35 d产气量占总产气量的84.2%;D组发酵启动失败,在发酵周期内不产气。从图中可以看出,B、C两组的产气最高峰出现较晚,分别是发酵的第17 d和20 d,产气高峰过后,日产气量逐渐减少。

图2为不同光照时间下牛粪日产气量变化曲线,根据数据可知,a组出现的2次产气高峰分别是发酵的第11 d、第18 d,第一次产气高峰结束后迅速到达第二次产气高峰,这与同样处理水平下猪粪A组产气情况相一致;b组产气期仅维持11 d,最高日产气量为201.5 mL·d⁻¹;发酵过程中c组出现了三次产气高峰,三次的峰值依次增大,分别是286.5、292.5、387.5 mL·d⁻¹,整个发酵周期内,c组持续产气,是4组中产气效果最好的一组。D组产气高峰出现比其他三组晚10~13 d,日产气量最高达到514 mL·d⁻¹,产气高

表1 试验方案设置表
Table 1 Design of experiment

光照	0 h	6 h	12 h	24 h
猪粪	A	B	C	D
牛粪	a	b	c	d

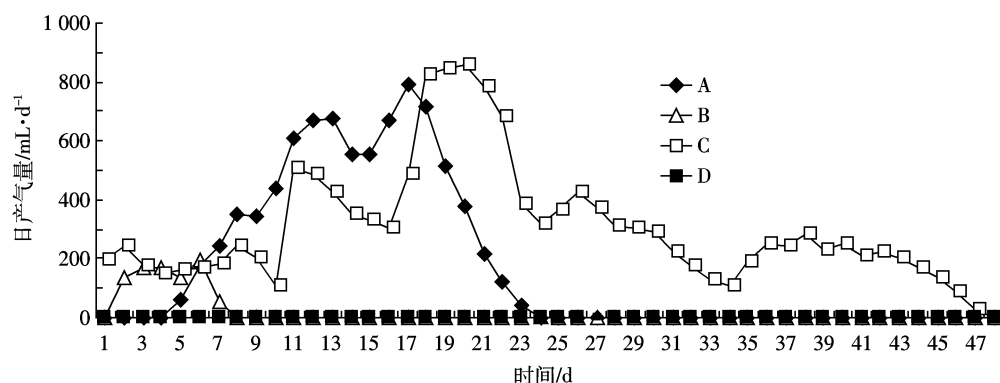


图 1 不同光照条件下猪粪的日产气量

Figure 1 Biogas production rate of pig manure at different illumination conditions

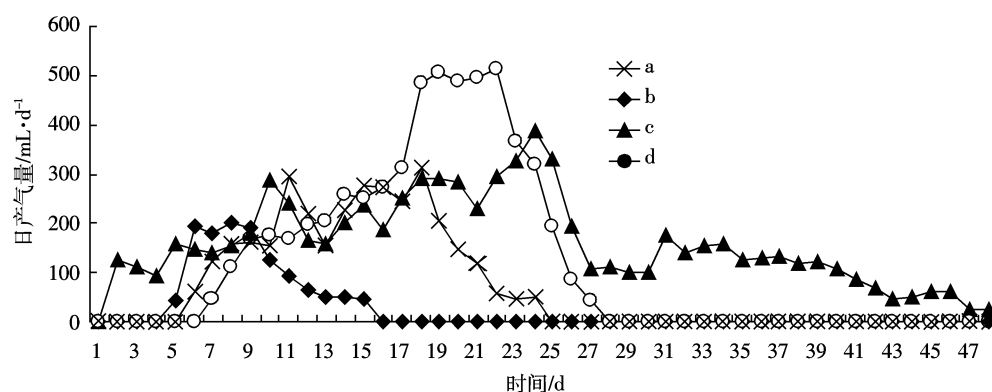


图 2 不同光照条件下牛粪的日产气量

Figure 2 Biogas production rate of cow dung at different illumination conditions

峰过后产气速率迅速下降,与同样处理水平下猪粪的D组情况不相同。

图3显示,35℃时,不同光照时间处理,猪粪累积产气量的顺序为C>A>B>D,牛粪累积产气量顺序为c>d>a>b。比较相同光照条件下猪粪与牛粪的累积产气量发现:12 h光照条件下累积产气量最高,猪粪

为14 618.5 mL、牛粪为7 680 mL;0 h光照下,猪粪的累积产气量是牛粪的2.47倍,为8 136 mL;6 h光照条件下牛粪的累积产气量是猪粪累积产气量的1.45倍,为1 244.5 mL;24 h光照条件下,猪粪不产气,牛粪的累积产气量为5 671.5 mL。

应用SPSS17.0分析4种光照条件下猪粪、牛粪的累积产气量,两组间比较发现:以猪粪为发酵原料的4组中,B与D组间的均值没有显著性($P=0.057>0.05$),其余各组间均有显著性;以牛粪为发酵原料的4组中,a与b($P=0.056>0.05$)、c与d($P=0.058>0.05$)组间均值没有显著性,其余各组间均有显著性。

2.2 发酵料液的碱度、VFA、pH值、氨态氮对不同光照强度的响应

2.2.1 不同光照强度下发酵料液碱度、VFA的变化

如图4、图5所示,二种发酵原料的碱度变化趋势不同,猪粪的碱度在6 994~9 264 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动,除猪粪D组的碱度先降低后升高外其余三组均为升高、降低、升高的变化趋势。与猪粪相比,牛粪碱度波动范围更广,为5 624~9 504 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。牛粪d组的

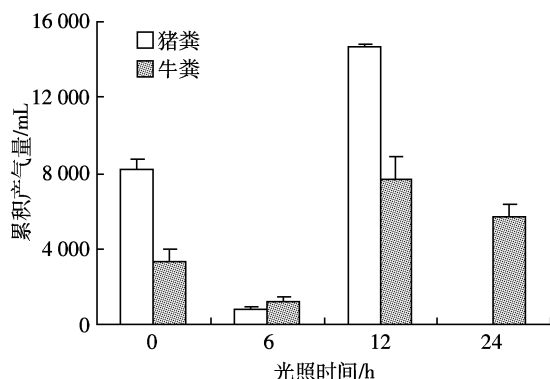


图 3 不同光照时间下猪粪、牛粪累积产气量

Figure 3 Cumulative gas production of pig manure and cow dung at different illumination conditions

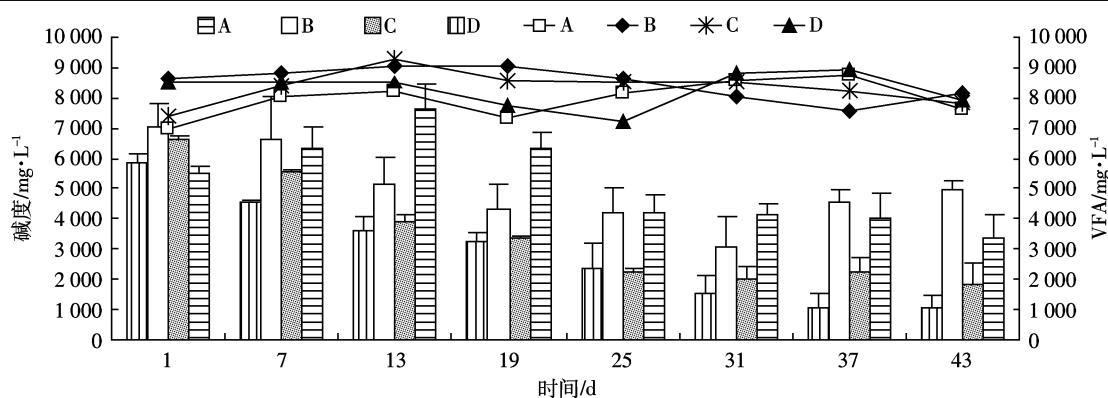


图4 不同光照时间下猪粪的碱度、VFA变化

Figure 4 Total alkalinity and VFA of pig manure at different illumination conditions

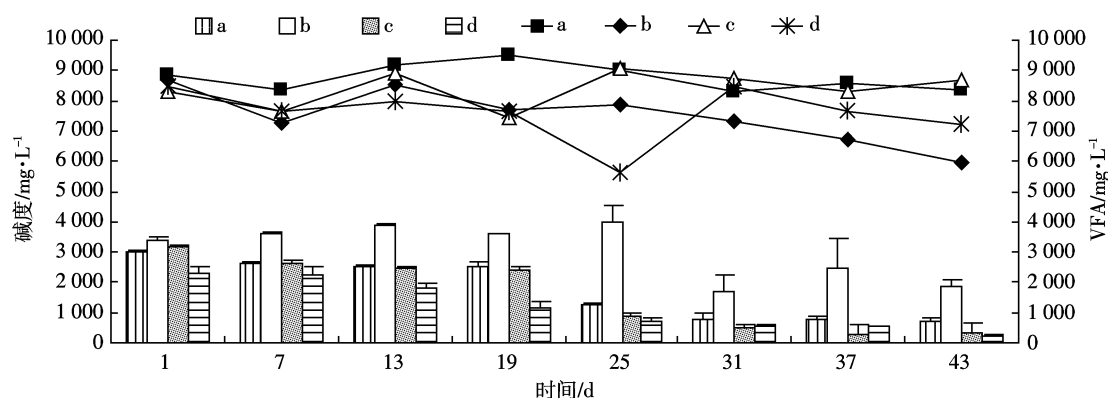


图5 不同处理下牛粪的碱度、VFA变化

Figure 5 Total alkalinity and VFA of cow dung at different illumination conditions

碱度波动比较剧烈,其余三组碱度变化趋势平缓,发酵的第25 d,牛粪d组的碱度迅速下降,降至 $5\,624\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其日产气量也下降为 194 mL ,说明由于碱度过低,使d组料液的缓冲能力降低,致使产气量下降。

由图4、图5可以看出,随着发酵的进行,VFA的总体变化趋势为逐渐降低,最后趋于稳定,这与厌氧发酵理论相吻合^[10]。发酵的初期,各组原料的VFA含量差别显著,猪粪的VFA含量远大于牛粪。在发酵第25 d,猪粪D组VFA含量达到峰值,呈现先升高再降低,最后趋于稳定的趋势。发酵结束后,各组原料VFA含量均不同程度地减少,变化最明显的为牛粪d组,VFA含量由起始的 $2\,279\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $206\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2.2 不同光照强度下pH、氨态氮的变化

适宜的酸碱度对沼气的产气数量和质量有重要影响^[11],李杰等研究表明,产甲烷细菌适宜的pH值范围为 $6.80\sim 7.80$,当pH值低于 6.70 时,甲烷菌活性受到抑制^[12]。图6显示,发酵初期各组原料的pH值在 $6.55\sim 6.90$ 之间波动,由于pH值过低,产甲烷菌活性

受到抑制,发酵初期产气量不高。随着发酵的进行,除了猪粪D组、牛粪b组外,其他组的pH值呈现先升高再降低,然后趋于平稳的趋势,产气量也逐渐升高。发酵的第7 d,牛粪b组的pH值升至 7.35 ,由于pH值过高引起游离 CO_2 浓度的下降,影响产甲烷细菌底物的供给,导致牛粪b组产气期仅为 10 d 。发酵的第13 d,猪粪D组的pH值降至 6.15 ,可能由于猪粪含脂肪酸、胆汁酸较多,含纤维素较少,本身易水解酸化,造成pH降低^[13]。发酵原料在产酸菌作用下,产生了一些挥发性脂肪酸,致使猪粪D组不产气;发酵末期,各组的pH值在 $6.80\sim 7.30$ 之间波动,比发酵初期的pH值有所升高。

图7为猪粪、牛粪厌氧发酵过程中氨态氮质量浓度的变化,数据显示,随着发酵的进行,除猪粪D组、牛粪d组的氨态氮质量浓度有下降的变化趋势,其余各组的氨态氮质量浓度变化趋势相似,呈现出先缓慢升高,后趋于平稳的趋势。在整个发酵周期内,猪粪B组的平均氨态氮质量浓度最低,为 $1\,661\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,牛粪

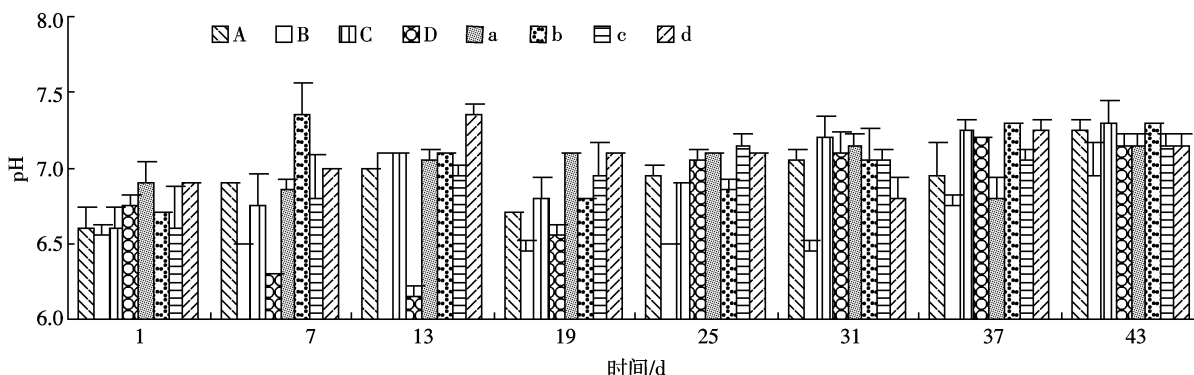


图6 不同光照条件下猪粪、牛粪的pH值变化曲线

Figure 6 Pig manure and cow dung' pH at different illumination conditions

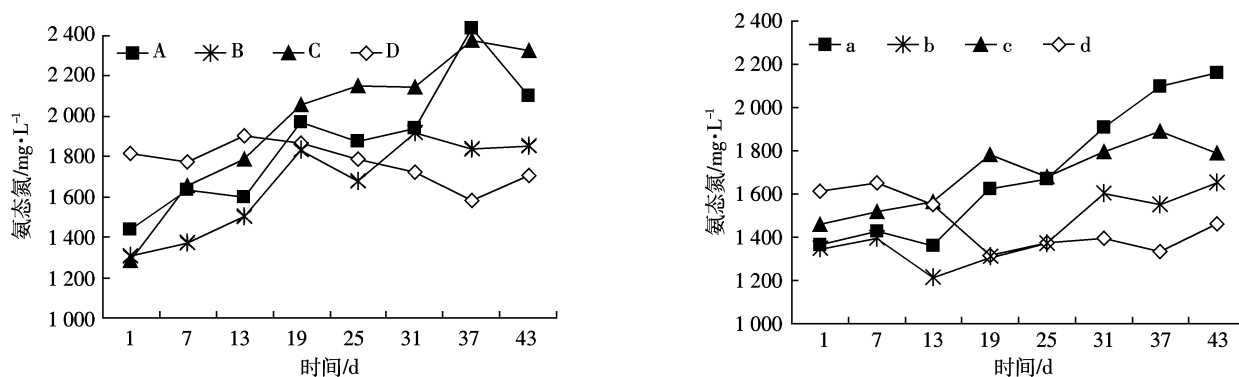


图7 不同光照条件下猪粪、牛粪的氨态氮质量浓度变化

Figure 7 Pig manure and cow dung' $\text{NH}_3\text{-N}$ at different illumination conditions

c组的平均氨态氮质量浓度最高,为 $2\,059\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。发酵结束后,各组的氨态氮质量浓度比发酵前均有所升高,其中,变化最明显的为猪粪C组,较发酵前提高了180.9%,变化最小的为猪粪D组,提高了90.7%,比较猪粪的累积产气量发现,猪粪C组的累积产气量最高,为 $14\,618.5\text{ mL}$,猪粪D组的累积产气量最低,与氨态氮质量浓度变化规律一致,说明随着产气量的增加,发酵料液中的氨态氮质量浓度随之升高,发酵结束后沼液因含有丰富的氨态氮可被用作沼肥再次使用。

3 讨论

3.1 光照强度对猪粪、牛粪的日产气量、累积产气量的影响

图1、图2说明,不同光照条件下猪粪、牛粪的日产气量差别较大。发酵初期,不同光照条件下各组料液的日产气量较低,可能由于在发酵启动阶段,装置中有较多的空气,不利于厌氧微生物的快速繁殖,料液中的微生物数量少,各种酶活力较低,从而影响了原料中大分子聚合物的降解。随着发酵的进行,日产

气量呈上升趋势,并逐渐达到产气高峰,这可能是由于随着好氧微生物及兼性菌对装置中氧气的消耗,为原料中厌氧微生物创造了越来越严格的厌氧环境,使得沼气发酵微生物数量逐渐增多,酶活力上升,原料可以满足微生物的营养要求,可能不同原料的厌氧发酵对光照时间的响应机制不同,所以导致各组料液达到产气峰值的时间、产气量不同。日产气量达到高峰后下降的原因可能是某些酶的活力开始下降,并且发酵过程中产生了某些物质抑制微生物的活动,从而使产气量下降。

图3显示同一种发酵原料在不同光照条件下的累积产气量差别很大,不同的发酵原料在相同光照条件下产气量不同,造成累积产气量不同的原因可能是,不同的光照时间改变了发酵料液的理化性质,使产甲烷菌的活性不同。当光照条件相同时,由于不同的发酵原料含有的底物及产甲烷菌种类不同,产甲烷菌对光照的适应性存在差异,导致累积产气量有所差别。比较黑暗条件(0小时光照)与有光条件(12小时光照)的累积产气量发现,黑暗条件下猪粪、牛粪的厌

氧发酵可以进行,与实际生产中不透光沼气池可进行厌氧发酵相符,但产气效果表明,黑暗条件下,猪粪、牛粪的累积产量分别为 8 136、3 282.5 mL,12 小时光照条件下,猪粪、牛粪的累积产量分别为 14 618.5、7 680 mL,后者分别是前者的 1.80、2.34 倍,充分说明适宜的光照对提高沼气产量,促进沼气发展具有重要意义。

3.2 光照强度对发酵料液碱度、VFA、pH、氨态氮变化的影响

发酵过程中,料液碱度对发酵过程中出现的过酸过碱物质,能起到一定的缓冲作用^[14],在一定范围内,碱度越高,发酵液的缓冲能力越强,防止发酵料液酸化的能力越强。VFA 是甲烷菌利用的主要中间产物,通过对挥发酸的监测可以了解有机物质的降解进程及甲烷菌的活跃程度^[15]。相关研究表明^[16],当总碱度在 3 000~8 500 mg·kg⁻¹ 且与 VFA 含量之比在 2:1 以上时,沼气发酵产气比较稳定。经计算,除猪粪 D 组的总碱度与 VFA 之比为 1.60,小于 2:1 外,其余 7 组总碱度与 VFA 的比值均大于 2:1,其中牛粪 d 组的比值达到 6.37,说明猪粪 D 组的发酵液的缓冲能力较弱,牛粪 d 组的发酵液的缓冲能力较强,这可能是造成猪粪 B、D 组沼气产量较低的原因^[17]。张彤等^[18]研究显示,VFA 的积累会导致 pH 值的下降,使甲烷菌活性被抑制,甚至使甲烷菌死亡,导致产气停止。本试验进一步论证了该反应规律,得出累积产气量与 VFA 呈负相关,与 pH 值呈正相关。

黄惠珠^[19]研究显示,沼液中含有速效氮、磷、钾等大量营养元素和多种微量营养元素,含氨态氮为 200~600 mg·kg⁻¹,因此对不同光照条件下氨态氮质量浓度变化的监测对评价沼肥中无机态氮的含量具有重要意义^[20]。如图 7,发酵结束后各组原料的氨态氮质量浓度比发酵前均有所提高,其中变化最明显的为猪粪 C 组,较发酵前提高了 180.9%,说明发酵结束后,沼液可被作为优质的有机肥料再次利用。

利用 SPSS17.0 对不同光照条件下的猪粪、牛粪的产气量与碱度、VFA、pH 值、氨态氮回归分析得出,8 组发酵料液的产气量在不相同光照条件下与各项指标的相关性不同,与 VFA 呈负相关,与 pH 值呈正相关;除牛粪 d 组外,其余 6 组累积产气量与氨态氮的质量浓度变化呈正相关;猪粪 A、C 组,牛粪 c 组与碱度呈正相关,猪粪 B 组,牛粪 a、b、d 组与碱度变化呈负相关。除猪粪 B 组外,其他 6 组的累积产气量与 VFA 的相关性最大,牛粪 d 组的累积产气量与 VFA 达到极显著负相关,相关系数为 -0.985,说明累积产

气量随着 VFA 含量的减少而增加,这与楚莉莉等^[21]试验结果一致。

4 结论

猪粪、牛粪在不同光照强度下的累积产气量分别为 C>A>B>D、c>d>a>b,猪粪、牛粪在相同光照条件下累积产气量分别为 A>a、B<b、C>c、D<d,说明不同的光照强度下,同种发酵原料的累积产气量差异较大;相同光照强度下,不同发酵原料的累积产气量存在差异。从实际生产出发,与黑暗条件(沼气池)相比,12 h 光照下,猪粪、牛粪的累积产气量均达到最高,但前者是后者的 1.90 倍,可见给予沼气池适当的光照,并根据光照条件选择产气效果较好的发酵原料可能促进沼气的厌氧发酵,因此本试验为沼气池的改进、促进沼气增产提供了参考。

利用 SPSS17.0 回归分析得出,不同光照条件下,猪粪、牛粪的产气量与碱度、VFA、pH 值、氨态氮的相关性呈动态变化(由于猪粪 D 组不产气,不对其做相关性分析)。比较日产气量及累积产气量相对较高的发酵料液发现,这些制约因素的影响系数随光照条件的改变而改变,猪粪、牛粪的产气量与 VFA 呈负相关,与 pH 值呈正相关,碱度与猪粪 B 组呈负相关,与猪粪 C 组呈正相关,氨态氮与牛粪 c 组呈正相关,与牛粪 d 组呈负相关。

参考文献:

- [1] 王 华,杨 光,等. 温度对沼气菌群产气能力的影响及菌群变化的研究[J]. 西北农业学报, 2008, 17(5): 294-297.
WANG Hua, YANG Guang. The Effect of temperature on biogas Production capability and the change of microbial community[J]. *Acta Agricultrae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008, 17(5): 294-297.
- [2] 刘荣厚,郝元元,等. 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): 32-36.
LIU Rong-hou, HAO Yuan-yuan, et al. Effect of temperature on biogas yield and property during anaerobic fermentation process of pig dung[J]. *Renewable Energy Resources*, 2006(5): 32-36.
- [3] 潘云霞,李文哲. 接种物浓度对厌氧发酵产气特性影响的研究[J]. 农业机械研究, 2006, 1(1): 188-192.
PAN Yun-xia, LI Wen-zhe. Effect of inoculum concentrations on biogas yield and property[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, 1(1): 188-192.
- [4] 陈永生,朱德文,等. 大中型沼气工程原料预处理工艺及装备技术[J]. 中国农机化, 2010(6): 73-78.
CHEN Yong-sheng, ZHU De-wen, et al. Materials pretreatment process and equipment technology of the large and medium-sized biogas projects[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2010(6): 73-78.

- [5] 刘 刈, 王智勇, 等. 沼气发酵过程混合搅拌研究进展[J]. 中国沼气, 2009, 27(3):26-33.
LIU Yi, WANG Zhi-yong, et al. Research progress of mixing and stirring process in biogas fermentation[J]. *China Biogas*, 2009, 27(3):26-33.
- [6] 王敬堂, 王 华. 浅谈商品化沼气池建设[J]. 中国沼气, 2011, 29(2):43-45.
WANG Jing-tang, WANG Hua. Discuss on commercial biogas digester[J]. *China Biogas*, 2011, 29(2):43-45.
- [7] 张继元, 张衍林. 大中型沼气池抗裂设计与构造[J]. 可再生能源, 2003(5):28-29.
ZHANG Ji-yuan, ZHANG Yan-lin. Design and structure of anticrack in large size and medium size biogas digester[J]. *Renewable Energy Resources*, 2003(5):28-29.
- [8] 杨 浩, 邓良伟, 刘 刈, 等. 搅拌对厌氧消化产沼气的综述影响[J]. 中国沼气, 2010, 28(4):3-9.
YANG Hao, DENG Liang-wei, LIU Yi, et al. A review on effects of stirring on biogas production of anaerobic digestion[J]. *China Biogas*, 2010, 28(4):3-9.
- [9] 宋籽霖, 李铁冰, 杨改河, 等. 温度及总固体浓度对粪秆混合发酵产气特性的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7):260-265.
SONG Zi-lin, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Effect of total solid concentration and temperature on biogas yields of mixture of chicken manure and corn straw[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7):260-265.
- [10] 吴满昌, 孙可伟, 李如燕, 等. 不同反应温度的城市生活垃圾厌氧发酵研究[J]. 化学与生物工程, 2005, 22(9):28-30.
WU Man-chang, SUN Ke-wei, LI Ru-yan, et al. Study on performance of anaerobic digestion for treating municipal solid waste at different temperature[J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2005, 22(9):28-30.
- [11] 白洁瑞, 李铁冰, 杨改河, 等. 不同温度条件粪秆结构配比及尿素、纤维素酶对沼气产气量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2):188-193.
BAI Jie-rui, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Effects of ratios of manure and straw, urea and cellulose on biogas yields at different temperatures[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2):188-193.
- [12] 李 杰, 李文哲, 许洪伟, 等. 牛粪湿发厌氧消化规律及载体影响的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3):186-191.
LI Jie, LI Wen-zhe, XU Hong-wei, et al. Rules of anaerobic digestion of cow manure by wet method and the effect of carriers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(3):186-191.
- [13] 刘德江, 高桂丽, 朱妍梅, 等. 猪粪、牛粪、羊粪沼气发酵比较试验[J]. 塔里木大学学报, 2005, 17(4):10-12.
LIU De-jiang, GAO Gui-li, ZHU Yan-mei, et al. The comparison experiment of biogas fermentation with pig dung, cow dung, sheep dung[J]. *Journal of Tarim University*, 2005, 17(4):10-12.
- [14] 楚莉莉, 李铁冰, 杨改河, 等. 猪粪麦秆不同比例混合厌氧发酵特性试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4):100-104.
CHU Li-li, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Characteristics of co-digestion of pig dung and wheat straw in various ratios[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4):100-104.
- [15] 许传珍, 孙春宝. 5点pH值滴定法测定VFA方法的研究[J]. 市政技术, 2007, 25(1):54-57.
XU Chuan-zhen, SUN Chun-bao. Research of measuring VFA by titration of pH value in 5 points[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2007, 25(1):54-57.
- [16] 中国科学院成都生物研究所. 沼气发酵常规分析[M]. 北京:北京科学技术出版社, 1984:17-51.
Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences. Basic analysis of anaerobic fermentation[M]. Beijing:Beijing Science and Technology Press, 1984:17-51.
- [17] Murto M, Björnsson L, Mattiasson B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(2):101-107.
- [18] 张 彤, 李 伟, 李文静, 等. 粪秆结构配比厌氧发酵中pH、VFA与产气效果的关系[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12):2425-2430.
ZHANG Tong, LI Wei, LI Wen-jing, et al. The relationship among pH, VFA and biogas production in anaerobic fermentation of mixed manure and straw with different ratios [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12):2425-2430.
- [19] 黄惠珠. 沼肥营养成分与污染物分析研究[J]. 福建农业学报, 2010, 25(1):86-89.
HUANG Hui-zhu. Composition of and contaminants in anaerobic fermentation residues[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 25(1):86-89.
- [20] 张全国, 杨群发, 李随亮, 等. 猪粪沼液中氨态氮含量的影响因素实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):114-116.
ZHANG Quan-guo, YANG Qun-fa, LI Sui-liang, et al. Influence of fermentation conditions on the content of ammonia nitrogen in anaerobic fermentation slurry[J]. *Transactions of the CASE*, 2005, 21(6):114-116.
- [21] 楚莉莉, 李铁冰, 杨改河, 等. 沼液预处理对小麦秸秆厌氧发酵产气特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1):247-251.
CHU Li-li, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Effect of biogas slurry pretreatment on biogas production characteristics of anaerobic fermentation of wheat straw[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1):247-251.