

NaOH 预处理花生壳厌氧发酵制取沼气的试验研究

邵艳秋^{1,2}, 邱凌^{2,3*}, 石勇^{2,4}, 罗涛^{2,4}, 邓媛方^{2,4}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部沼气西北分中心, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了探索花生壳厌氧发酵制取沼气的产气特性和潜力,利用 NaOH 在无流动水和常温的条件下,分别用质量分数为 2%、4%、6%、8%的 NaOH 溶液对花生壳进行了碱性化学预处理,在中温(35±1)℃、总固 TS 质量分数为 8%、pH 为 7.0~7.6 条件下,利用自行设计的厌氧发酵实验装置进行批量厌氧消化试验,研究 NaOH 预处理对花生壳厌氧发酵过程中产气量、pH 值和甲烷含量的影响规律。结果表明,4% NaOH 预处理下的花生壳的总产气量为 28 083 mL,比不使用 NaOH 和 8%NaOH 预处理的总产气量分别高 48.91%和 35.72%;甲烷含量最高超过 60%,且平均甲烷含量高于不处理、2%和 8%NaOH 预处理;pH 初期波动,13 d 后基本稳定在 7.2 左右。4%NaOH 预处理下的 TS 产气率、VS 产气率以及甲烷含量和不处理以及 8%NaOH 预处理下的差异性显著($P<0.05$),和其他两组试验之间的差异不显著($P>0.05$),表明 4 % NaOH 预处理是较优的工艺条件。

关键词:花生壳;氢氧化钠;厌氧发酵;沼气

中图分类号:X712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)03-0573-06

Experiments on Anaerobic Digestion of Peanut Shell for Biogas Production Under NaOH Pretreatment

SHAO Yan-qiu^{1,2}, QIU Ling^{2,3*}, SHI Yong^{2,4}, LUO Tao^{2,4}, DENG Yuan-fang^{2,4}

(1.College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.The Northwest Station of Biogas Products and Equipment Quality Test Center of the Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3.College of Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 4.College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The effect of NaOH pretreatments on characteristics of the biogas production of peanut shell was studied by experiment. In order to improve the biogas yield and potentiality, NaOH pretreatment of peanut shell without fluid water was performed at normal temperature in different mass fractions of sodium hydroxide solution, which were 2%, 4%, 6%, 8%. Simultaneously, another non-use NaOH pretreatment was performed under distilled water. After the pretreatment, a batch of experiments of peanut shell were conducted in a self-manufactured anaerobic fermentation reactor, under the condition of 8% mass fraction of total solid, (35±1)℃, pH value 7.0~7.6. The experiment was conducted to investigate the effect of sodium hydroxide pretreatment in different mass fractions on gas production, pH values, methane content during the process of anaerobic fermentation of peanut shell. The results showed that, the total gas production of peanut shell under 4% NaOH pretreatment was 28 083 mL, which was 48.91% and 35.72% higher than non-use of NaOH pretreatment and 8% NaOH pretreatment, respectively. In addition, the methane content under 4% NaOH pretreatment reached more than 60%, and the average methane content was higher than non-use NaOH pretreatment, 2% and 8%NaOH pretreatments. The pH value fluctuated in initial stage, after anaerobic digestion for 13 days, it stabilized at around 7.2. The differences of TS gas yield, VS gas yield and average methane content were significant between 4% NaOH and non-use NaOH pretreatment, 4% and 8% NaOH pretreatment($P<0.05$), respectively. By contrast, the differences were not significant between 4% and 2%NaOH pretreatment, 4% and 6% NaOH pretreatment ($P>0.05$), respectively. All the results indicated that 4% NaOH pretreatment was much better.

Keywords: peanut shell; sodium hydroxide; anaerobic; methane

收稿日期:2010-09-06

基金项目:国家科技支撑计划“沼气工程优化与标准化模式研究”(2007BAK31B01);国家农村沼气科技支撑体系试点项目“西北地区农村沼气科技创新与示范基地工程建设”(农计函 2010-120);西北农林科技大学推广专家支持计划项目“杨凌农村沼气与循环农业科技示范基地”(2007-4)

作者简介:邵艳秋(1985—),女,山东人,在读硕士,主要从事环境工程固体废弃物处理方面研究。E-mail:407930189@163.com

***通讯作者:**邱凌 E-mail:ql2871@126.com

花生,又名落花生,是重要食用植物油资源,在世界食用油资源中居第四位,占世界使用植物油年产量的 14%^[1]。陕西省大荔县是全省花生主要产地之一,全县花生种植面积达 1.33 万 hm² 以上,年总产 3 500~4 000 万 kg,占陕西省花生播种面积和产量的 25% 以上。大量花生壳作为废弃物随意堆放在田间道路两旁,自然堆沤发酵,散发有味气体,成为影响农户生产生活环境的废弃垃圾。如果将其简单按照一般生活垃圾的方式进行处理,不仅成本高,而且在某种程度上是资源浪费^[2]。因此,耗能低且进行能源回收利用的厌氧消化工艺则是处理这种农业废弃物的合理选择^[3]。

花生壳中含有大量的粗纤维素、木质素、半纤维素及可溶性碳水化合物等^[4],很难直接用来厌氧消化制取沼气。通过预处理可以破坏花生壳的物理化学结构,降解得到易于消化的产物,从而提高厌氧消化效率和产气量。常见的预处理方法有粉碎、汽爆、真菌、酶解和酸、碱处理等。Colleran 等^[5]对经过 NaOH 预处理的麦秸进行厌氧消化试验研究,发现经 NaOH 和氨水处理后,单位总固体(TS)产气量可提高 50%。杨懂艳等^[6]用 NaOH、氨水、尿素及 *Pleurotus florida* 对玉米秸分别进行预处理,发现 NaOH 预处理玉米秸的产气效果最好。目前碱处理主要使用 NaOH 溶液浸泡(也称“液态处理”),其处理效果很好,但液态碱液处理需要专门的预处理反应器,投资大,处理要求高,更重要的是,液态处理会产生残余碱液,需进行回收处理,若处理不好,会对环境造成严重的二次污染。

为解决此问题,本研究以 NaOH 为处理剂,在无流动水^[7-8]及常温条件下用不同质量分数的 NaOH 溶液对花生壳进行化学预处理。并在中温(35±1)℃,利用自行研制的厌氧试验发酵装置^[9]进行批量沼气发酵试验,探索不同质量分数的 NaOH 溶液对花生壳厌氧消化效率和产气量的影响,以期对花生壳等农业废弃物的沼气化利用提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

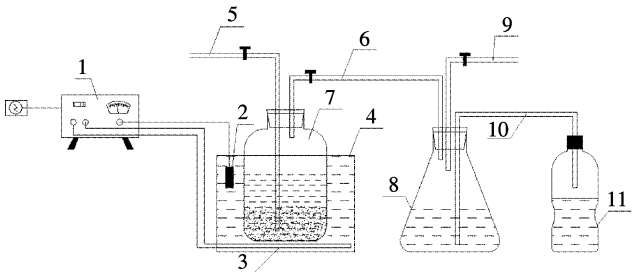
花生壳取自渭南大荔县,为自然风干状态,采集到实验室后经过粉碎机粉碎,花生壳样品粒径分布在 0.1~2.0 cm。启动接种物为西北农林科技大学高科种猪场鲜猪粪在 35℃时,加入猪场沼液,经 12 d 培养驯化获得,接种量为 20%,接种物 TS 为 10%。花生壳和接种原物理化特性如表 1 所示。

表 1 花生壳及接种物的理化特性
Table 1 The physical and chemical characteristics of peanut shell and inoculation

物料	总固体(TS)/%	挥发性固体(VS)/%	TOC/%	TN/%	pH
花生壳	91.94	91.20	42.86	0.91	-
接种物	10.00	62.62	3.19	0.20	7.40

1.2 试验装置

预处理试验装置为 2.5 L 塑料小桶,厌氧消化装置为农业部沼气西北分中心自主研发的室内沼气发酵试验装置。厌氧发酵装置主要由温控仪(WMZK-01 型,控制范围 10~100℃);传感器、地热线(800 W)、恒温水箱、发酵瓶、集气瓶、集水瓶等部分组成(图 1),各部分之间由橡皮塞、玻璃管和乳胶管相连,加凡士林密闭。地热线均匀分布于水箱底部,无交叉重叠,地热线间距 1 cm 左右,使水箱内传热均匀。发酵瓶为 2.5 L 的塑料小桶,集气瓶为 1 000 mL 锥形瓶。发酵瓶处设有发酵料液取样口和气体采样口,定期取样进行料液 pH 值和沼气体成分的测定。



1.温控仪 2.传感器 3.地热线 4.恒温水箱 5.取样口 6.导气管
7.发酵瓶 8.集气瓶 9.取气口 10.导水管 11.集水瓶

图 1 厌氧发酵装置组成

Figure 1 The schematic diagram of the experimental setup

1.3 试验设计与数据分析方法

试验的整个过程分为预处理阶段和厌氧发酵产沼气阶段,两个阶段在同一个装置内进行。预处理阶段在常温厌氧条件下进行,塑料小桶用盖子密封。厌氧发酵产沼气阶段采用中温发酵,试验温度设为(35±1)℃。发酵装置固定在恒温水池中,池温由温控仪、传感器和地热线控制在恒定温度。

发酵料液总固质量分数为 8%(包括花生壳和接种物),每个发酵瓶中添加粉碎的花生壳 130.5 g,用 NaOH 对花生壳进行预处理,先将 NaOH 配成溶液,质量分数分别为 2%、4%、6%和 8%,然后往发酵瓶中添加 2 倍花生壳质量的不同质量分数的 NaOH 溶液 261 g,使花生壳处于湿润、无流动水的状态,同时添

加等量的蒸馏水作为不处理试验组,每个处理的NaOH固体用量分别为0、5.22、10.44、15.66、20.88 g。预处理时间为10 d,预处理之后,先加入1 000 g蒸馏水,用20%的乙酸将pH值调节至7.0~7.6,然后加入400 g的接种物,最后补充蒸馏水至发酵料液总质量为2 000 g。同时设置接种物的空白参比组作为对照,因日产气量非常少,仅在试验结束后,进行总产气量测定,并在最终统计时,各试验组总产气量减去相应值。试验按单因素5水平试验方法设计,每个试验重复3次,试验每4 d取1次液样,每2 d取1次气样,测定pH值和气体成分含量。试验结果按平均值处理,在Excel中作图,并利用DPS 7.05数据处理软件,按照随机区组单因素试验统计分析方法进行方差分析。

1.4 测定项目与方法

花生壳总固体浓度(TS)用烘干法(真空干燥箱中80℃下烘6 h);接种物总固体浓度(TS)用烘干法(真空干燥箱中105℃下烘6 h);VS测定用烘干法(马弗炉中600℃下烘1 h);pH值以及沼中所含甲烷和二氧化碳成分通过Gasboard23200P沼气分析仪测定;日产气量通过排水集气法在集水瓶中收集到的自来水,并用量筒测定其体积^[9]。总有机碳(TOC)用总有机碳分析仪(岛津TOC仪);总氮(TN)用凯式定氮法。TS产气率和VS产气率^[10],即单位原料干物质产气量和单位原料挥发性有机物产气量,可通过公式计算得出。

2 结果与分析

2.1 NaOH 预处理质量分数对花生壳沼气发酵产气量效果的影响

NaOH 预处理质量分数对沼气发酵产气量影响如图2所示。由图2可知,不同质量分数NaOH预处理对产气效果影响很大。整个发酵过程中,不处理试验组无典型的产气高峰,2%、4%、6%、8% NaOH 预处理都有两个产气高峰,2%NaOH 预处理第一个产气高峰出现在第4 d,峰值为1 485 mL,其余3组出现在第5 d,峰值依次为1 835、1 858、1 518 mL;所有预处理的第二个产气高峰都出现在第12 d,峰值依次为1 378、1 738、2 135、1 750、1 823 mL。不处理和2%NaOH 预处理的试验组分别于发酵第23 d出现不产气现象,但是4%NaOH 预处理不仅启动速度快,产气潜力也大,发酵第12 d日产气量最大值为2 135 mL,比不处理和8%NaOH 预处理分别高35.48%、14.64%。发酵第5 d,4%NaOH 预处理的累计产气量就高于其他预

处理,2%NaOH 预处理略微低于6%NaOH 预处理,但在整个发酵过程中二者相差不大。4%NaOH 预处理总产气量28 083 mL,比不处理和8%NaOH 预处理分别高48.91%和35.72%。

2.2 NaOH 预处理质量分数对花生壳沼气发酵pH值的影响

不同NaOH 预处理质量分数对花生壳沼气发酵过程中pH值的变化如图3所示。由图3可以看出,不处理试验组其pH值在整个发酵过程中基本没有很大变化,基本在7.0和7.2之间波动。2%、4%、6% NaOH 预处理的实验组,pH先降至最低后缓慢上升,直至基本稳定,稳定后pH值大小顺序:4%>2%>6%。8% NaOH 预处理的pH降到最小6.35后,虽然也缓慢上升,但基本上都在6.8以下,系统酸化较严重。

2.3 NaOH 预处理质量分数对花生壳沼气发酵甲烷含量的影响

不同NaOH 预处理质量分数对发酵过程中甲烷含量的影响如图4所示。由于不处理和8%NaOH 预处理的两个试验组在第25 d停止产气,只列出前24 d各试验组的甲烷含量,其他试验组后面测得的甲烷含量基本在30%~40%。由图4可知,不同质量分数NaOH 预处理下甲烷含量随发酵时间的延长增加到一定程度后会出现下降趋势,甲烷含量基本上处于40%和50%之间。所有试验组气体中的甲烷平均含量均达到40%~51%(见表2),不处理、2%、4% NaOH 预处理的平均甲烷含量随着碱浓度增加而增加,4%NaOH 预处理的平均甲烷含量比不处理和8% NaOH 预处理高18.02%、6.85%。4%NaOH 预处理和6%NaOH 预处理的甲烷含量相比,两者相差不大。综合考虑到各方面因

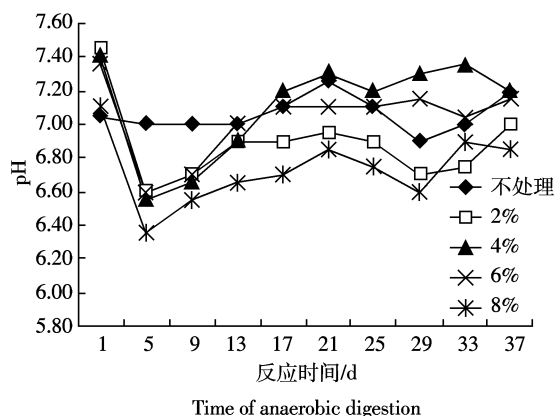
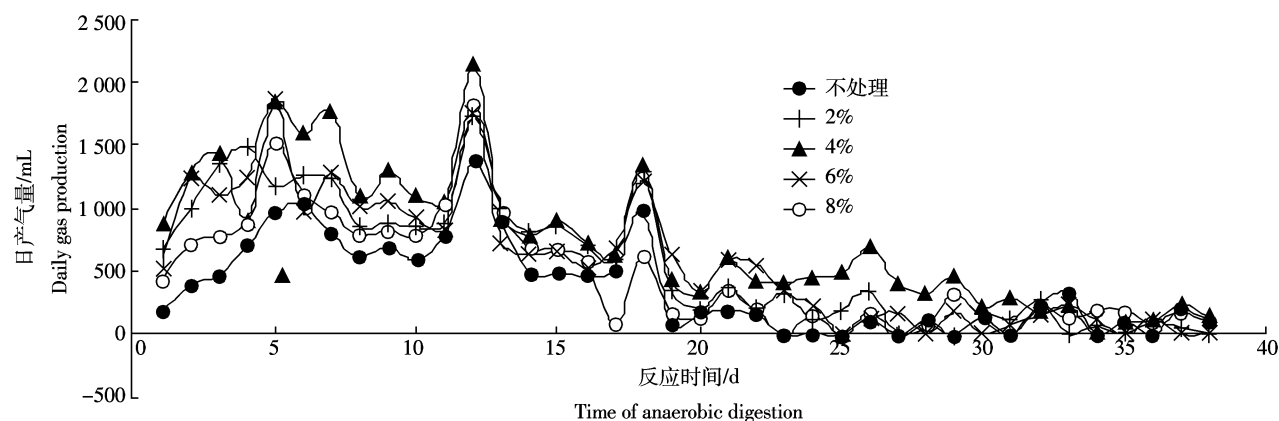


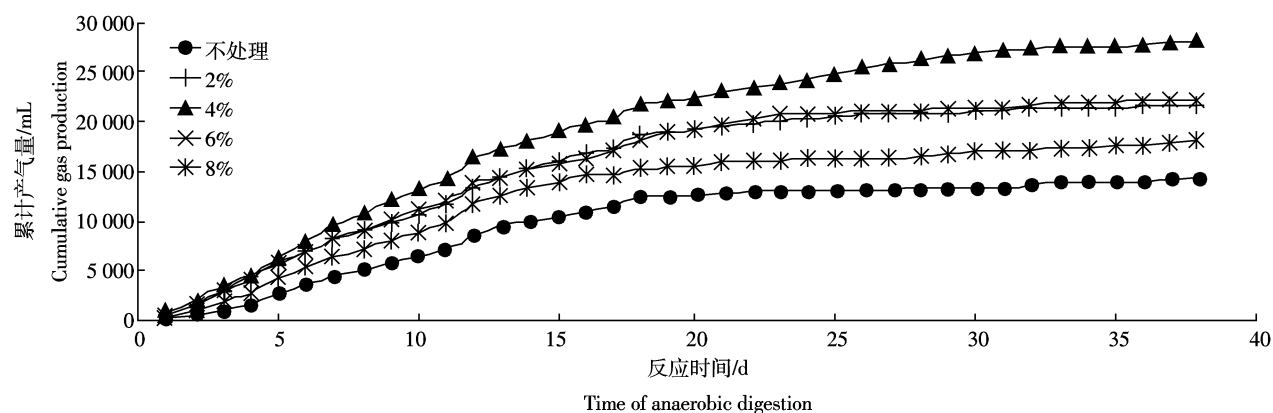
图3 不同质量分数NaOH 预处理对花生壳沼气发酵过程中pH值变化的影响

Figure 3 Effects of different mass fraction of NaOH pretreatment on pH value variation during anaerobic fermentation of peanut shell



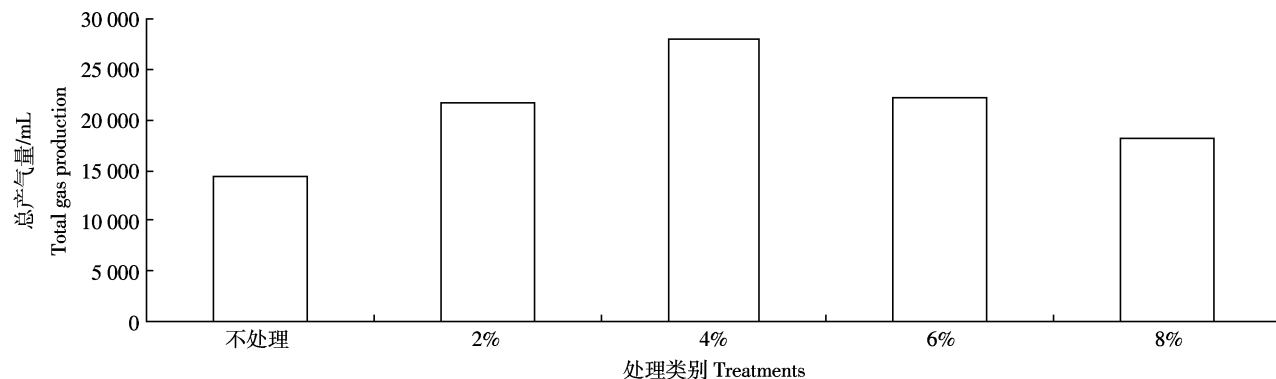
A. 日产气量随发酵时间变化

A. Variation of daily gas production with fermentation time



B. 累积产气量变化

B. Variation of accumulated gas production with fermentation time



C. 不同预处理下的总产气量

C. The total gas production of different pretreatments

图 2 不同质量分数 NaOH 预处理对花生壳沼气发酵产气量的影响

Figure 2 Effects of different mass fraction of NaOH pretreatment on biogas production of peanut shell

素,本试验中,4% NaOH 预处理是比较合适的。

2.4 不同质量分数 NaOH 预处理花生壳厌氧消化产气指标比较

不同质量分数 NaOH 预处理花生壳厌氧发酵的 TS 产气率、VS 产气率和平均甲烷含量见表 2。不同质

量分数 NaOH 预处理下花生壳厌氧消化的 TS 产气率和 VS 产气率相比,4%NaOH 预处理要高于其他预处理。无论是 TS 产气率、VS 产气率还是平均甲烷含量,4%NaOH 预处理和不处理以及 8%NaOH 预处理之间的差异性显著 ($P<0.05$),和其他两组试验之间差异不

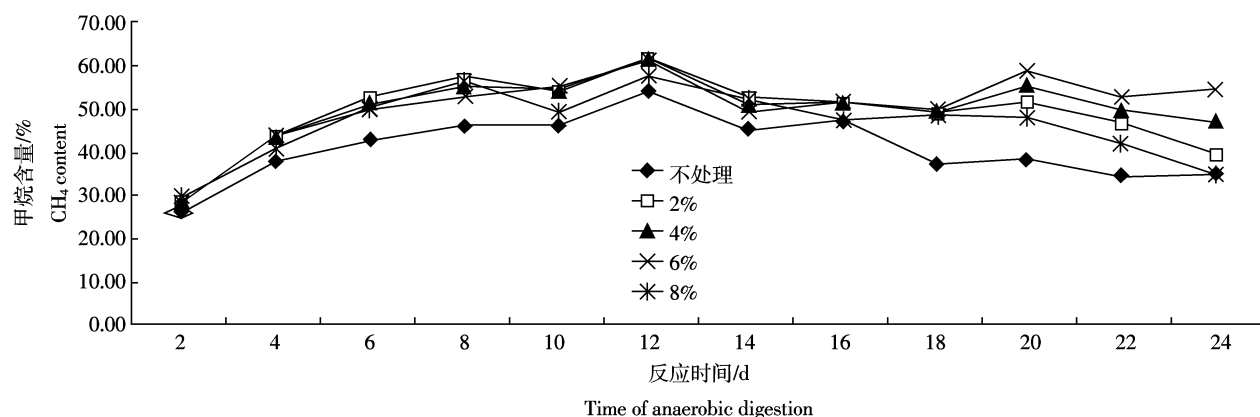


图4 不同质量分数 NaOH 预处理对发酵过程中甲烷含量的影响

Figure 4 Effects of different mass fraction of NaOH pretreatment on methane content during anaerobic fermentation of peanut shell

表2 发酵原料的产气指标

Table 2 The biogas production index of the raw materials

试验组	不处理	2%	4%	6%	8%
TS 产气率/mL·g ⁻¹	119.6b	180.4a	234.0a	184.2a	150.4b
VS 产气率/mL·g ⁻¹	120.6b	181.8a	236.0a	185.7a	151.7b
平均甲烷含量/%	40.94b	49.12a	49.94a	50.74a	46.51b

注:同行不同字母表示在1%水平上差异显著。

Note: Values followed by a different letters with in each line are significantly difference at 5% probability level

显著($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 NaOH 溶液的质量分数对产气效率的影响

试验结果表明,在适宜的范围内,NaOH 溶液的质量分数越大,产气效率就会越高,超过这个范围,产气效率反而会下降。这是由于经过 NaOH 预处理的花生壳,在一定程度上被 NaOH 破坏了纤维素-半纤维素-木质素的结晶构造,疏松其网状连接键,暴露出纤维素和半纤维素,并使纤维素的晶区变小,改善其超分子结构,使基质更易被微生物水解^[12-16],缩短厌氧消化时间,增强消化率。吴江等^[17]采用 NaOH 溶液对稻草进行浸泡预处理,发现稻草厌氧消化产气量提高了 38%~119%。Ghosh 等^[18]发现,在室温条件下添加 1% 浓度的氢氧化钠溶液对麦秸进行处理后,麦秸的可生物降解性能得到了明显提高。

但超过适宜的范围,继续加大碱用量效果反而不佳。沼气发酵中主要被利用的 C 源来自于纤维素和半纤维素,木质素的利用受到一定限制^[19]。欧阳嘉等^[20]发现,碱用量对玉米秸秆组分变化的影响,反映出预处理中碱用量的增加不会带来纤维素的损失,可以有

效移除木质素,有利于纤维素的后续分解,但会促进半纤维素溶出,最终造成半纤维素损失。而且,NaOH 在提高花生壳厌氧分解效率和产气量的同时,Na⁺也会产生一定的阻抑作用。Na⁺浓度对于微生物细胞维持正常的渗透压具有重要意义,若 Na⁺浓度较高,将影响微生物细胞对营养物质的吸收,从而影响微生物的酶活性^[17]。在本研究中,6%和 8%NaOH 预处理由于外加较多的 Na⁺进入消化体系,对甲烷菌产生了一定的抑制作用,使得甲烷菌的活性降低,反应的中间产物未能全部还原为甲烷^[21]。

3.2 NaOH 溶液的质量分数对 pH 值的影响

试验结果显示,发酵料液 pH 值在发酵过程中呈动态变化。除不处理的试验组外,其他 4 组的 pH 在第 5 d 达到最低值后缓慢上升,直至达到基本稳定。这是由于沼气发酵前期,微生物厌氧发酵降解花生壳产生大量有机酸,使发酵液 pH 值明显下降;之后随着氨化细菌增多,产生的氨中和部分酸,更主要的是有机酸被转化,使得 pH 值回升^[22]。但 8%NaOH 预处理由于体系中加入较多的 Na⁺,对甲烷菌产生了一定的抑制作用,从而阻止甲烷菌对有机酸的转化作用,造成有机酸的累积,pH 值较低。

4 结论

(1)4%NaOH 预处理试验组不仅启动速度快,产气潜力也大,总产气量 28 083 mL,比不处理和 8% NaOH 预处理的试验组分别高出 48.91%和 35.72%。

(2)不处理试验组其 pH 值在整个发酵过程中基本没有很大变化,2%、4%、6%NaOH 预处理的 pH 值先降至最低后缓慢上升,直至基本稳定,8%NaOH 预处理的系统酸化较严重。

(3)不同质量分数 NaOH 预处理下,甲烷含量随发酵时间的延长增加到一定程度后会出现下降趋势,4%NaOH 预处理的平均甲烷含量比不处理和 8%NaOH 预处理的高 18.02%、6.85%。

(4)4%NaOH 预处理下 TS 产气率、VS 产气率以及甲烷含量和不处理以及 8%NaOH 预处理下的差异性显著($P<0.05$),和其他两组试验之间的差异则不显著($P>0.05$)。

参考文献:

- [1] 曹凯光. 花生资源的综合开发利用[J]. 食品科技, 2002(1):15-17.
CAO Kai-guang. Comprehensive development and utilization of peanuts [J]. *Food Science and Technology*, 2002(1):15-17.
- [2] 李明妹, 姚开, 贾冬英, 等. 花生功能成分及其综合利用[J]. 中国油脂, 2004, 29(9):13-15.
LI Ming-shu, YAO Kai, JIA Dong-ying, et al. The functional components and comprehensive utilization of peanuts[J]. *China Oil*, 2004, 29(9):13-15.
- [3] Nallathambi Gunaseelan V. Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1997, 13:83-114.
- [4] Wall Judy D. Bioenergy[M]. Washington DC: ASM Press, 2008:179-191.
- [5] Collieran E, Barry M, Wikie A. The application of the anaerobic filter design to biogas production from solid and liquid agricultural wastes[C]// Proceedings of the Symposium on Energy from Biomass and Wastes VI. Chicago, USA, 1982: 443-482.
- [6] YANG Dong-yan, LI Xiu-jin, GAO Zhi-jian, et al. Improving biogas production of corn stalk through chemical and biological pretreatment: A preliminary comparison study [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(5):209-213.
- [7] LUO Qing-ming, LI Xiu-jin, ZHU Bao-ning, et al. Anaerobic biogasification of NaOH-treated corn stalk[J]. *Transactions of CSAE*, 2005, 21(2):111-115.
- [8] ZHANG Rui-hong, ZHANG Zhi-qin. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 68:235-245.
- [9] 邱凌, 卢旭珍, 王兰英, 等. 日光温室生产废弃物厌氧发酵特性初探[J]. 中国沼气, 2005, 23(2):30-32.
QIU Ling, LU Xu-zhen, WANG Lan-ying, et al. Study on anaerobic digestion character of vegetable waste from greenhouse[J]. *China Biogas*, 2005, 23(2):30-32.
- [10] 刘荣厚, 王远远, 孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(09):116-121.
LIU Rong-hou, WANG Yuan-yuan, SUN Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves[J]. *Transactions of the CSAM*, 2009, 40(09):116-121.
- [11] 朱洪光, 陈小华, 唐集兴. 以互花米草为原料生产沼气的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 5(23):201-204
ZHU Hong-guang, CHEN Xiao-hua, TANG Ji-xing. Pilot study on employing *Spartina alterniflora* as material for producing biogas by biogasification[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5):201-204.
- [12] 何艳峰, 李秀金, 方文杰, 等. 氢氧化钠固态预处理对稻草中木素结构特性的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3):534-539.
HE Yan-feng, LI Xiu-jin, FANG Wen-jie, et al. Effect of solid state pretreatment with sodium hydroxide on the lignin structure of rice straw [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3):534-539.
- [13] 康佳丽, 李秀金, 朱保宁, 等. NaOH 固态化学预处理对麦秸沼气发酵效率的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5):1973-1976.
KANG Jia-li, LI Xiu-jin, ZHU Bao-ning, et al. Effect of solid state pretreatment with sodium hydroxide on biogasification efficiency of wheat straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1973-1976.
- [14] 李湘, 魏秀英, 董仁杰. 秸秆微生物降解过程中不同预处理方法的比较研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1):110-116.
LI Xiang, WEI Xiu-ying, DONG Ren-jie. A study of degradation efficiency of corn straw pretreated with different methods[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(1):110-116.
- [15] 张木明, 徐振林, 张兴秀, 等. 预处理对稻草秸秆纤维素酶解产糖及纤维素木质素含量的影响[J]. 农产品加工学刊, 2006, 58(3):4-6.
ZHANG Mu-ming, XU Zhen-lin, ZHANG Xing-xiu, et al. Effects of pretreatments on the enzymatic hydrolysis and the content of cellulose and lignin of rice straw[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2006, 58(3):4-6.
- [16] 许宪松, 周玉杰, 张建安, 等. 微波预处理稻壳对纤维素酶固态发酵的影响[J]. 可再生能源, 2006, 128(4):21-25.
XU Xian-song, ZHOU Yu-jie, ZHANG Jian-an, et al. Effects of microwave pretreated rice hull on cellulase production by solid state fermentation[J]. *Renewable Energy*, 2006, 128(4):21-25.
- [17] 吴江, 徐龙君, 谢金连. 碱浸泡预处理对固体有机物厌氧消化的影响研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2):252-255.
WU Jiang, XU Long-jun, XIE Jin-lian. The effect of alkali-pretreatment on anaerobic digestion of solid organic waste[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(2):252-255.
- [18] Ghosh S, Vieitez E R, Liu T. Biogasification of solid wastes by two phase anaerobic digestion[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1999, 16:299-309.
- [19] 孙辰, 刘荣厚, 覃国栋. 芦笋秸秆预处理与厌氧发酵制取沼气试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8):94-99.
SUN Chen, LIU Rong-hou, QIN Guo-dong. Experiments on pretreatment and anaerobic digestion of asparagus stalk for biogas production [J]. *Transactions of the CSAM*, 2010, 41(8):94-99.
- [20] 欧阳嘉, 李鑫, 董郑伟, 等. 碱法-酶法处理玉米秸秆的制糖工艺研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(3):1-5.
OUYANG Jia, LI Xin, DONG Zheng-wei, et al. Study on preparation of sugar by alkali pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stalk[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2010, 34(3):1-5.
- [21] Kim I S. Effect of particle size and sodium ion concentration on anaerobic thermophilic food waste digestion[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(13):67-73.
- [22] 姚向军, 田宜水. 生物质能资源清洁转化利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
YAO Xiang-jun, TIAN Yi-shui. Biomass clean transformation and utilization technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.