

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.020

# 芦笋秸秆预处理与厌氧发酵制取沼气试验<sup>\*</sup>

孙辰 刘荣厚 覃国栋

(上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

**【摘要】** 为了促进芦笋秸秆原料沼气发酵系统的产气效果,利用 NaOH 在无流动水的条件下对芦笋秸秆进行了碱性化学预处理,并在小型沼气发酵装置上以不同预处理时间、粒径和 NaOH 溶液质量分数对芦笋秸秆木质纤维素的变化及产沼效果的影响进行了试验研究。结果表明,预处理时间 15~20 d 比不经预处理的试验组启动时间提早 10 d;芦笋秸秆粉碎和切割后,不经筛分的试验组比经过筛分后的试验组启动时间提早 5~15 d,发酵周期缩短 23 d;5% NaOH 处理的试验组比 NaOH 10% 处理和不使用 NaOH 处理的试验组总产气量分别高 453.82% 和 84.58%。综合比较,预处理时间 15~20 d、不经筛分和 5% NaOH 处理的条件下是较优的工艺条件,沼气发酵后其甲烷体积分数最高达 70%,pH 值大于 7.5,均在正常范围内。

**关键词:** 芦笋 秸秆 厌氧发酵 沼气 木质纤维素 碱处理

**中图分类号:** S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0094-06

## Experiments on Pretreatment and Anaerobic Digestion of Asparagus Stalk for Biogas Production

Sun Chen Liu Ronghou Qin Guodong

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

### Abstract

NaOH pretreatment of asparagus stalk without fluid water and its anaerobic digestion after pretreatment were performed in order to improve biogas production. Effects of pretreatment time, particle size and NaOH concentration on contents of cellulose, hemicellulose and lignin and yield of biogas were investigated in a bench scale anaerobic digester. Results showed that start-up time of test group with pretreatment time of 15~20 d was 10 d earlier than that of test group without pretreatment. After the asparagus stalk was crumbled and cut, the start-up time of test group without screening was 5~15 d earlier than that of groups with different particle size after screening. At the same time, the fermentation time was shortened by 23 d. Total biogas yield of test groups using 5% NaOH in pretreatment were 453.82% and 84.58% higher than groups with 10% and 0% NaOH in pretreatment, respectively. After integrated analysis of experimental results, the suitable NaOH pretreatment conditions were determined as follows: NaOH pretreatment of 15~20 d, no screening after crumbling and cutting and with NaOH concentration of 5%. Under this kind of pretreatment conditions, methane content of biogas during anaerobic digestion was above 70%, while pH value was above 7.5, which were located in normal range.

**Key words** Asparagus, Stalk, Anaerobic digestion, Biogas, Lignocellulose, NaOH pretreatment

收稿日期: 2009-12-11 修回日期: 2009-12-31

<sup>\*</sup> 上海市科委项目(07DZ12050)和上海市重大科技攻关项目(08DZ1900405)

作者简介: 孙辰, 硕士生, 主要从事农业废弃物沼气发酵技术研究, E-mail: sunbeammy@163.com

通讯作者: 刘荣厚, 教授, 博士生导师, 主要从事可再生能源与环境工程研究, E-mail: liurhou@sjtu.edu.cn

## 引言

芦笋生产过程中产生的生物质类废弃物主要有地下根状茎和地上茎秆。新鲜芦笋秸秆含水率80%以上,风干后其含水率10%~15%。大量秸秆废弃物随意堆放在田间道路旁,成为影响农户生产生活环境的废弃垃圾,其资源化利用问题迫在眉睫。

芦笋秸秆的主要成分为糖、蛋白质、脂肪、纤维素、半纤维素及木质素,具有相对较高的生物降解性。如果按照一般生活垃圾简单处理,不仅成本高,且在某种程度上是资源浪费<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。

自然风干的芦笋秸秆中木质纤维素含量较高,直接厌氧消化制取沼气有一定困难,通过预处理可以提高厌氧消化效率和产气量。因此,预处理是解决芦笋秸秆难以厌氧消化的有效手段。常见的预处理方法有粉碎、汽爆、真菌、酶解和酸、碱处理等。Ololade 发现使用 NaOH 作为处理剂能够提高秸秆的饲料消化性能<sup>[3]</sup>。Pavlostathis 等<sup>[4]</sup>对碱性预处理后的麦秸进行了厌氧消化试验,发现预处理可使甲烷产量提高100%。杨懂艳<sup>[5]</sup>等用 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。本文以 NaOH 为处理剂,在无流动水<sup>[5-6]</sup>及(25±1℃)恒温条件下对芦笋秸秆进行化学预处理。通过控制不同的 NaOH 预处理工艺参数,并在单相反应器<sup>[7]</sup>中进行批次沼气发酵试验,研究不同预处理条件对芦笋秸秆沼气发酵产气效果的影响,以期对芦笋秸秆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

芦笋秸秆取自上海市芦笋种植基地,为自然风干状态的地下根状茎,经过揉搓初次粉碎,再将大片段切至小于或等于2.5 cm,样品长度分布在0.1~2.5 cm。试验Ⅱ中再经筛分。接种污泥取自以猪粪为原料的沼气系统正常发酵的残余物。芦笋秸秆及接种污泥理化特性如表1所示(除pH值外,均为质量分数)。

### 1.2 试验装置

预处理是在2 L塑料桶中添加一定比例芦笋秸秆、NaOH试剂和蒸馏水,按照相应预处理时间进行。

厌氧发酵装置主要由水浴恒温振荡器(WHY-2型,江苏省金坛市金城国盛实验仪器厂)、发酵瓶、

集气瓶、集水瓶等部分组成(图1)。发酵瓶和集气瓶为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。每日通过排水集气法以集水瓶中收集到的饱和食盐水作为每日产气量,并通过量筒测定其体积<sup>[8]</sup>。

表1 芦笋秸秆及接种污泥理化特性

Tab.1 Physical and chemical characteristics of asparagus stalk and inoculation sludge

物料	芦笋秸秆	接种污泥
总固体(TS)质量分数/%	88.12	5.78
挥发性固体(VS)质量分数/%	80.10	63.62
总有机碳(TOC)质量分数/%	75.10	3.09
总氮(TN)质量分数/%	2.88	0.24
纤维素质量分数/%	18.22	
半纤维素质量分数/%	33.52	
木质素(ADL)质量分数/%	11.10	
pH值		8.13

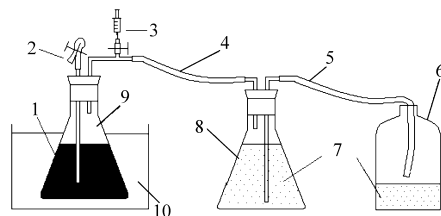


图1 厌氧发酵装置组成

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.发酵料液 2.取液口 3.取气口 4.导气管 5.导液管 6.集水瓶 7.饱和食盐水 8.集气瓶 9.发酵罐 10.水浴振荡器

### 1.3 试验设计

试验主要考察预处理时间(d),芦笋秸秆粒径(目)和NaOH溶液质量分数对沼气发酵产气效果的影响。各组试验预处理温度(25±1)℃;沼气发酵温度(35±1)℃,发酵液总固体含量为6%,振荡速度100 r/min;日产气量小于等于总产气量的1%视为发酵终止。只添加接种物的空白参比组因每日产气量非常少,仅在试验结束后,进行总产气量测定,并在最终统计时在各试验组总产气量中减去相应值。每个试验2个重复,试验结果按平均值处理。

试验组Ⅰ(预处理时间的影响):芦笋秸秆未经筛分,预处理NaOH溶液质量分数为6%(添加与秸秆同等质量,质量分数为6%NaOH溶液),预处理时间分为8个水平(表2),发酵时间为25 d。每6 d取一次液样和气样。

试验组Ⅱ(芦笋秸秆粒径的影响):芦笋秸秆经过筛分,分为7个水平(表2),预处理NaOH质量分数为6%,发酵时间为23 d、34 d和56 d。每4 d取

一次液样和气样。

试验组Ⅲ(NaOH 预处理质量分数的影响):芦笋秸秆未经筛分,预处理 NaOH 质量分数分为 5 个水平(表 2),发酵时间为 30 d。每 5 d 取一次液样和气样。

#### 1.4 测定项目与方法

总固体(TS):干燥法(真空干燥箱中 105℃ 下干燥 4~6 h);挥发性固体(VS)测定:干燥法(马弗炉中 600℃ 下干燥 1 h);含水率:干燥法(真空干燥箱中 105℃ 下干燥 3~4 h);pH 值:通过 pH 计(PHS-3C)测定;气体成分:气相色谱仪(岛津 GC-14B)。总有机碳(TOC):总有机碳测定仪(耶拿 multi C/N 3000);总氮(TN):凯式总氮法;纤维素、半纤维素和木质素:Van Soest 中性、酸性纤维洗涤法<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 NaOH 预处理及其沼气发酵后木质纤维素的变化

芦笋秸秆 NaOH 预处理后及其沼气发酵后纤维素、半纤维素和木质素变化如表 2 所示。由表 2 可知,NaOH 预处理可以降低原料中纤维素、半纤维素

和木质素含量,而沼气发酵后由于大部分纤维素、半纤维素得到分解利用,木质素相对含量提高 150%~300%。这说明,在 NaOH 预处理中,由于碱的水解、皂化作用破坏了木质纤维素中的化学键,木质纤维素得到了一定程度的分解<sup>[10-11]</sup>。并且,纤维素的降解随着预处理时间的增加、粒径的减小和 NaOH 质量分数的增加而增加,木质素的降解则随着预处理时间的增长、粒径的增大和 NaOH 质量分数的增大而增加。同时,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。且随着预处理时间增加、粒径的减小和 NaOH 质量分数提高,纤维素和半纤维素在发酵中被利用的比例增加。

### 2.2 NaOH 预处理时间对沼气发酵产气效果影响

#### 2.2.1 产气量

不同 NaOH 预处理时间对沼气发酵产气量的影响如图 2 所示。由图 2 可知,预处理时间为 15 d 以上的试验组在发酵第 5 天开始进入产气高峰阶段,最高峰值达 1 565 mL/d,产气高峰于第 13 天结束后进入平稳的产气阶段。而 NaOH 预处理时间为 5 d

表 2 芦笋秸秆 NaOH 预处理及其沼气发酵后纤维素、半纤维素和木质素质量分数变化  
Tab.2 Cellulose, hemicellulose and lignin content after pretreatment and biogas fermentation %

试验项目	处理类别	预处理后			发酵后		
		半纤维素	纤维素	木质素	半纤维素	纤维素	木质素
预处理时间	35 d	5.12	27.90	8.63	8.57	32.11	31.78
	30 d	5.44	26.68	8.18	9.36	35.18	30.78
	25 d	5.66	28.06	8.34	9.59	34.75	29.77
	20 d	7.41	25.83	8.94	9.20	32.03	30.11
	15 d	9.61	28.46	9.29	11.65	30.00	29.49
	10 d	14.38	32.08	11.61	13.69	29.39	25.79
	5 d	15.97	30.82	11.47	14.59	30.37	24.77
	不处理	17.20	33.60	11.08	12.15	33.06	29.17
粒径	不经筛分	6.40	28.47	7.52	11.29	32.37	27.76
	小于 4 目	14.25	32.74	6.55	12.72	31.80	29.95
	4~6 目	13.37	33.46	6.72	15.10	33.93	28.36
	6~8 目	8.83	32.63	10.02	14.21	31.22	30.61
	8~12 目	17.12	28.61	9.60	10.75	31.16	28.17
	12~18 目	15.80	29.08	10.19	14.00	28.84	31.84
NaOH 质量分数	18~40 目	9.98	29.51	11.29	13.59	29.66	32.89
	不处理	12.92	37.38	12.36	12.91	30.11	29.07
	2.5%	7.17	18.65	11.71	11.40	29.40	36.27
	5.0%	3.94	24.92	7.31	8.17	34.59	33.98
	7.5%	3.26	27.60	6.72	2.69	27.10	33.78
10.0%	4.22	26.23	3.42	3.54	24.96	45.50	

和 10 d 的试验组没有形成典型的产气高峰。从累积产气量角度看, 经过 NaOH 预处理的试验组呈现典型的 S 型曲线增长<sup>[12]</sup>, 在增长初期, 预处理时间 15 d 以上的试验组曲线较 15 d 以下的试验组增长斜率大, 这说明 NaOH 预处理 15 d 以上可以提高芦笋秸秆沼气发酵系统的产气潜力和启动速度。而未经 NaOH 预处理的试验组, 产气高峰比预处理时间 15 d 以上的试验组滞后 10 d。

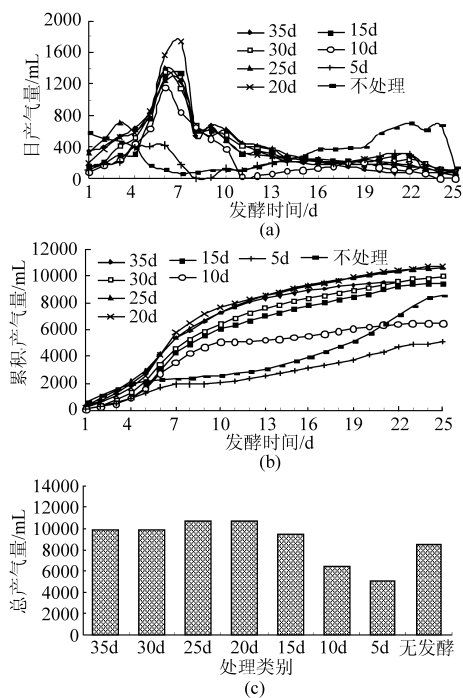


图 2 不同 NaOH 预处理时间对沼气发酵产气量的影响

Fig. 2 Effects of different NaOH pretreatment time on biogas yield

(a) 日产气量 (b) 累积产气量 (c) 总产气量

因此, NaOH 预处理可缩短芦笋秸秆沼气发酵的启动时间, 预处理时间 15 d 以上可提高产气量。综合考虑处理效果和处理时间成本, 预处理 15 ~ 20 d 为较佳选择。

### 2.2.2 甲烷体积分数

不同 NaOH 预处理时间试验组对沼气中甲烷体积分数的影响如图 3 所示。由图 3 可知, 预处理时间 15 d 以上的试验组在发酵第 7 天甲烷体积分数已达 50% ~ 70%, 这标志着沼气发酵进入平衡稳定阶段<sup>[13]</sup>, 而其他试验组在反应第 19 d 才达这一指标。由此可知, NaOH 预处理时间 15 d 以上的芦笋秸秆沼气发酵系统产甲烷菌群生长代谢旺盛, 产酸菌降解大分子物质形成的短链脂肪酸和 [H] 可以快速被嗜氢产乙酸菌和产甲烷菌等厌氧微生物利用, 生成最终产物 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>, 使系统健康运行<sup>[2]</sup>。

### 2.2.3 pH 值

不同 NaOH 预处理时间的芦笋秸秆在沼气发酵

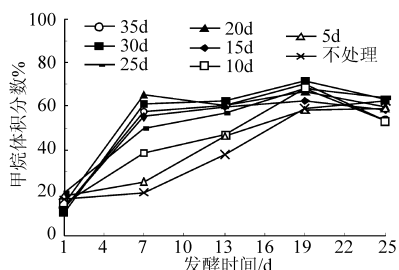


图 3 不同 NaOH 预处理时间对芦笋秸秆沼气发酵甲烷体积分数的影响

Fig. 3 Effects of pretreatment time on methane content during anaerobic digestion of asparagus stalk

过程中 pH 值随发酵时间的变化如图 4 所示。由于各组发酵料液在沼气发酵开始前使用 30% 的乙酸将各系统 pH 值调节至 7.2 ~ 7.8, 试验可见, 预处理 15 d 以上的试验组可以有效克服系统酸化<sup>[2,13]</sup>, 使系统 pH 值保持基本稳定。而预处理 15 d 以下和没有进行预处理的试验组会在发酵初期出现明显的 pH 值下降。

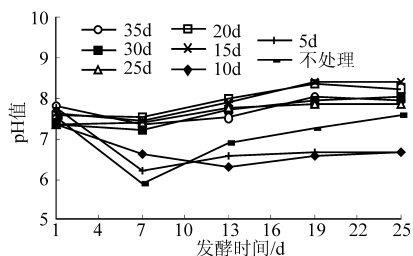


图 4 不同 NaOH 预处理时间的芦笋秸秆在沼气发酵过程中 pH 值随发酵时间的变化曲线

Fig. 4 pH value variation during anaerobic digestion using asparagus stalk at different NaOH pretreatment time

## 2.3 芦笋秸秆粒径对沼气发酵产气效果影响

### 2.3.1 产气量

芦笋秸秆粒径对沼气发酵产气量的影响如图 5 所示。由图 5a 可知, 未经筛分和粒径为 8 ~ 12 目的试验组在发酵的第 10 ~ 22 天形成产气高峰, 最大日产气量分别达到 880 mL/d 和 839 mL/d。其中不经筛分的试验组于发酵第 23 天结束, 8 ~ 12 目的试验组于第 34 天结束, 两者累积产气量呈典型 S 型增长。而其余各试验组发酵过程在 10 ~ 15 d 内中止。且粒径越大, 发酵中停滞时间越长。

由日产气量和 pH 值数据可知, 经过筛分的秸秆中除 8 ~ 12 目外均出现系统酸化, 产气中间停止。但粒径小的组比粒径大的组更容易从酸化中恢复过来, 这是因为小的粒径可以增加微生物吸附面积有利于其增殖<sup>[14]</sup>。

由此可知, 不经筛分的芦笋秸秆可避免发酵酸化。这是因为不经筛分的秸秆避免了结构单一, 可提供更多类型的附着点, 形成多种微环境或微观生

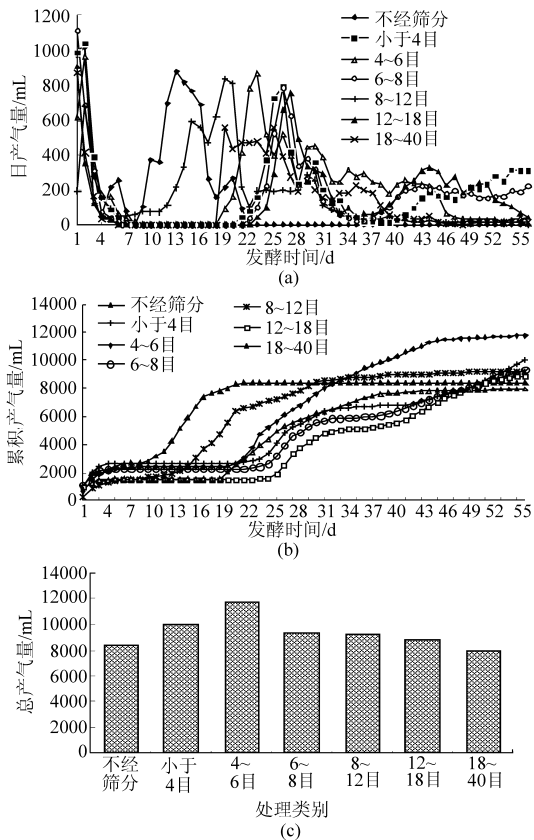


图5 芦笋秸秆粒径对沼气发酵产气量的影响

Fig. 5 Effects of particle size of asparagus stalk on biogas yield

(a) 日产气量 (b) 累积产气量 (c) 总产气量

态位<sup>[15]</sup>,从而增加各类型微生物增殖机会,多种代谢途径的保留可帮助系统渡过酸化。因此,通过粉碎、切割将芦笋秸秆长度控制在2.5 cm以下,已对产气潜力的提高和纤维的降解<sup>[16]</sup>产生了足够的促进作用,不需更过细筛分。

### 2.3.2 甲烷体积分数

粒径对芦笋秸秆沼气发酵甲烷体积分数的影响如图6所示。不经筛分和8~12目筛分在发酵第9天体积分数分别达66.16%和57.15%,其余各组分别在第17天及以后才出现产甲烷高峰,这与日产气量变化趋势一致。

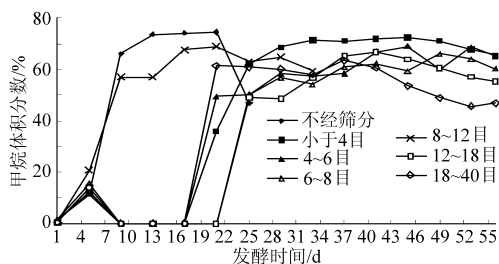


图6 粒径对芦笋秸秆沼气发酵甲烷体积分数影响曲线

Fig. 6 Effect of particle size on methane content during anaerobic digestion of asparagus stalk

### 2.3.3 pH值

不同粒径的芦笋秸秆在沼气发酵过程中pH值随发酵时间的变化如图7所示。各组发酵液在沼气发酵开始前用30%的乙酸将pH值调节至7.2~7.8。试验结果表明,除不经筛分和8~12目筛分之外,其他各处理试验组都出现不同程度的pH值下降。这表明不经筛分的芦笋秸秆在发酵过程中具有较强的抵御系统酸化的缓冲能力。

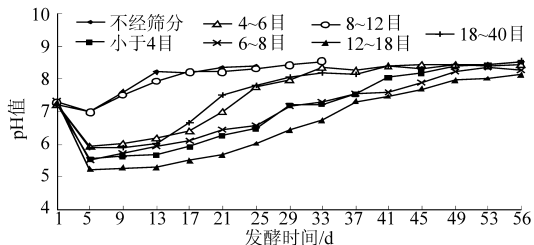


图7 不同粒径芦笋秸秆沼气发酵过程中pH值变化曲线

Fig. 7 pH value variation during anaerobic digestion using asparagus stalk with different particle size

## 2.4 NaOH预处理质量分数对沼气发酵产气效果影响

### 2.4.1 产气量

NaOH溶液质量分数对沼气发酵产气量影响如图8所示。由图8可知,高质量分数处理组(10%和7.5%)分别于发酵第10天和第15天终止产气。但5%处理的试验组启动速度快,产气潜力大,发酵第3天最大日产气量值达1269 mL,比10%处理的试验组高30.07%;总产气量12833 mL,比10%处理和无处理的试验组分别高435.82%和84.58%。这是因为高质量分数的NaOH会影响产甲烷菌的生长代谢<sup>[13]</sup>,而低质量分数不能有效破坏秸秆的物理化学结构。

### 2.4.2 甲烷体积分数

不同NaOH质量分数对发酵过程中甲烷体积分数的影响如图9所示。由图9可知,NaOH质量分数小于7.5%各试验组(0、2.5%、5%)气体中的甲烷体积分数均达到40%~80%。本试验中,NaOH质量分数为5%是比较合适的。

### 2.4.3 pH值

不同NaOH质量分数预处理芦笋秸秆沼气发酵过程中pH值的变化如图10所示。由图10可以看出,NaOH质量分数7.5%和10%的试验组其pH值分别在发酵第5天和第10天以后低于6.50,系统酸化,停止产气。

## 3 结论

(1) 采用NaOH经过一定时间的预处理才可抵消 $\text{Na}^+$ 对发酵的抑制作用,NaOH溶液质量分数过

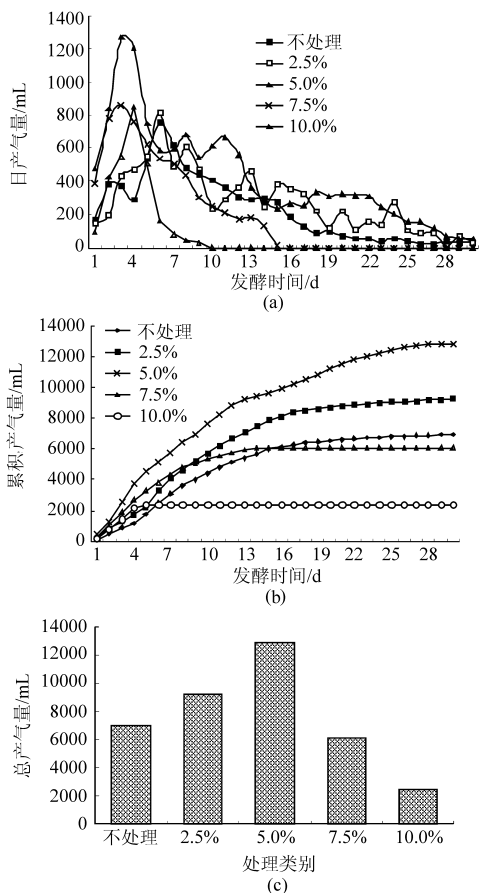


图 8 不同 NaOH 质量分数预处理对沼气发酵产气量影响

Fig.8 Effects of NaOH pretreatment concentration of asparagus stalk on biogas yield

(a) 日产气量 (b) 累积产气量 (c) 总产气量

高或过低都会影响芦笋秸秆沼气发酵产气效果。试验中,质量分数为 5% 的 NaOH 经 15 ~ 20 d 预处理是较佳的工艺参数。

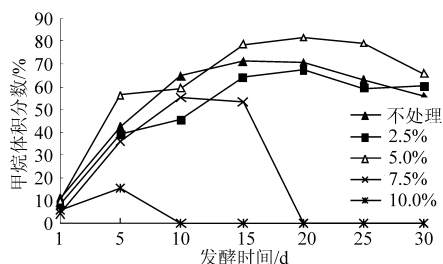


图 9 不同 NaOH 质量分数预处理对发酵过程中甲烷体积分数的影响曲线

Fig.9 Effects of NaOH concentration in pretreatment on methane content during anaerobic digestion of asparagus stalk

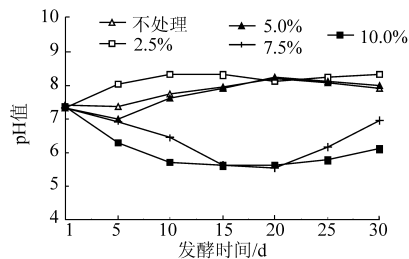


图 10 不同 NaOH 质量分数预处理芦笋秸秆沼气发酵过程中 pH 值的变化曲线

Fig.10 pH value variation during anaerobic digestion using asparagus stalk at different NaOH concentration

(2) 芦笋秸秆经过粉碎切割使其长度小于 2.5 cm 时对沼气发酵具有促进作用可有效增加系统的缓冲能力, 抵御酸化, 缩短发酵周期, 提高启动速度和产气量。

(3) 与自然风干芦笋秸秆原料相比, NaOH 预处理可以降低原料中纤维素、半纤维素和木质素质量分数, 而沼气发酵后大部分纤维素、半纤维素得到分解, 木质素质量分数大大提高。

参 考 文 献

- 1 V Nallathambi Gunaseelan. Anaerobic digestion of biomass for methane production; a review [J]. Biomass and Bioenergy, 1997, 13(1~2): 83~114.
- 2 Judy D Wall. Bioenergy[M]. Washington DC: ASM Press, 2008: 179~191.
- 3 Ololade B G, Mowat D N, Winch J E. Effect of processing methods on the in vitro digestibility of sodium hydroxide treated roughages[J]. Can J. Anim. Sci., 1970, 50(3): 657~662.
- 4 Pavlostathis S G, Gossett J M. Alkaline treatment of wheat straw for increasing anaerobic biodegradability [J]. Biotechnol. Bioeng., 1985, 27(3): 334~344.
- 5 杨懂艳, 李秀金, 高志坚, 等. 化学与生物预处理对玉米秸生物气产量影响的初步比较研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 209~213.
- 6 罗庆明, 李秀金, 朱保守, 等. NaOH 处理玉米秸秆厌氧生物气化工化试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 111~115.
- 7 Ruihong Zhang, Zhiqin Zhang. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system [J]. Bioresource Technology, 1999, 68(3): 235~245.

- 30 Monzon M E, Biasi B, Mitcham E J, et al. Effect of radio frequency heating on the quality of 'Fuyu' persimmon fruit as a treatment for control of the Mexican fruit fly[J]. Hort Science, 2007, 42(1): 125 ~ 129.
  - 31 Monzon M E, Biasi B, Simpson T L, et al. Effect of radio frequency heating as a potential quarantine treatment on the quality of 'Bing' sweet cherry fruit and mortality of codling moth larvae[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 40(2): 197 ~ 203.
  - 32 Ikediala J N, Hansen J D, Tang J, et al. Development of a saline water immersion technique with RF energy as a postharvest treatment against codling moth in cherries[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 24(2): 209 ~ 221.
  - 33 Wang S, Ikediala J N, Tang J, et al. Radio frequency treatments to control codling moth in in-shell walnuts[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 22(1): 29 ~ 38.
  - 34 Wang S, Monzon M, Johnson J A, et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts I: heating uniformity and energy efficiency[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(2): 240 ~ 246.
  - 35 Wang S, Monzon M, Johnson J A, et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts II: insect mortality and product quality[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(2): 247 ~ 253.
  - 36 Wang S, Tang J, Cavalieri R P, et al. Differential heating of insects in dried nuts and fruits associated with radio frequency and microwave treatments[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4): 1175 ~ 1182.
  - 37 Wang S, Tang J, Johnson J A, et al. Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in in-shell walnuts[J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 26(3): 265 ~ 273.
  - 38 Wang S, Tang J, Sun T, et al. Considerations in design of commercial radio frequency treatments for postharvest pest control in in-shell walnuts[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 304 ~ 312.
  - 39 Wang S, Yue J, Tang J, et al. Mathematical modelling of heating uniformity for in-shell walnuts subjected to radio frequency treatments with intermittent stirrings[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 35(1): 97 ~ 107.
  - 40 Wang S, Tang J. Radio frequency heating: a potential method for post-harvest pest control in nuts and dry products[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(10): 1169 ~ 1174.
  - 41 Mitcham E J, Veltman R H, Feng X, et al. Application of radio frequency treatments to control insects in in-shell walnuts [J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 33(1): 93 ~ 100.
  - 42 Kilcast D. Food irradiation: current problems and future potential [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1995, 36(3): 279 ~ 296.
- 

(上接第99页)

- 8 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(9): 116 ~ 121.  
Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 116 ~ 121. (in Chinese)
- 9 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术 [M]. 3版. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 70 ~ 74.
- 10 Xiao B, Sun X F, Sun RunCang. Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 74(2): 307 ~ 319.
- 11 Hendriks A T W M, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 10 ~ 18.
- 12 Heijnen J J, Mulder A, Enger W, et al. Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in waste-water treatment[J]. The Chemical Engineering Journal, 1989, 41(3): B37 ~ B50.
- 13 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, 2003.
- 14 Yadvika, Santosh, Sreekrishnan T R, et al. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review[J]. Bioresource Technology, 2004, 95(1): 1 ~ 10.
- 15 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 3版. 北京: 北京师范大学出版社, 2003.
- 16 Anthony Mshandete, Lovisa Björnsson, Amelia K Kivaisi, et al. Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste [J]. Renewable Energy, 2006, 31(14): 2385 ~ 2392.