

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.013

预处理促进玉米秸秆发酵试验

周淑霞¹, 张玉林², 张洪丽¹

(1. 山东交通学院 机械制造重点实验室, 济南 250023; 2. 山东绿能燃气实业有限责任公司, 山东 菏泽 274000)

摘要:微生物预处理可增加沼气的产量,但实验室培养菌种的成本较高,笔者采用堆放新鲜玉米秸秆的预处理法,对堆放厚度、堆放时间对微生物活性和浓度进行比较,并对堆放前后的化学成分测试比较。采用自行设计的可控性干式厌氧发酵装置,对预处理前后的玉米秸秆分别与牛粪、污泥作为接种物进行发酵,对玉米秸秆中纤维素变化及产沼气效果进行试验研究。试验结果表明:堆放 20 d 中层玉米秸秆酶活数值较高,且此玉米秸秆中纤维素、木质素、半纤维素的质量分数比未经处理的分别减少了 5.8%、16.8%和 5.7%,中温干式发酵实验中,玉米秸秆与牛粪质量为 1:1 混合发酵时,堆放预处理后累计产气量比未预处理前累计产气量高 24.4%;玉米秸秆与污泥质量为 1:1 混合发酵时,堆放预处理后累计产气量比未预处理前累计产气量高 23.27%。

关键词:干式厌氧发酵;预处理;降解;产气量

中图分类号:TK6

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)11-081-06

Experiments on the pretreatment of corn stover for biogas production based on dry fermentation

ZHOU Shuxia¹, ZHANG Yulin², ZHANG Hongli¹

(1. Key Laboratory of Mechanical Manufacture, Shan Dong Jiaotong University, Jinan 250023, China;
2. Shandong Green Energy Gas Industrial Co., Ltd., Heze, Shandong 274000, China)

Abstract: Microbial pretreatment can enhance biogas production from corn stover through solid-state anaerobic digestion, but the price of microbial strains is high. Stack-pretreatment is introduced to gain higher biogas production from corn stover through solid-state anaerobic digestion. The purpose is to find the effects of naturally microbial pretreatment on stalk lignin, cellulose and hemicellulose degradation, and biogas production. The result indicates that the corn straws which has been stack-pretreated for 20 days decreases of the content of the middle corn straws cellulose, hemi-cellulose and lignin by 5.8%, 16.8% and 5.7% respectively lower than those of untreated samples. The highest cumulative biogas yield for 60-day digestion is obtained in the group that the mass ratio of corn stover and cattle dung is 1:1, which is 24.4% higher than that of untreated corn stover mixed with cattle dung with the same mass ratio. When the mass ratio of corn stover and slug is 1:1, the cumulative biogas is 23.27% higher than that of untreated corn stover with slug.

Key words: solid-state anaerobic fermentation; stack-pretreated; degradation; biogas yield

收稿日期:2013-06-02

基金项目:山东交通学院自然科学基金资助项目(Z201317)

作者简介:周淑霞(1973-),山东交通学院讲师,主要从事生物质能开发及利用研究,(E-mail) zhoushx9414@126.com。

玉米秸秆通过微生物厌氧发酵制取沼气是实现农业废弃物资源化和减少其环境污染的重要途径^[1-4]。但是玉米秸秆作为主要发酵原料却存在着发酵启动时间长、产气率低、原料利用率低等问题。这主要是因为玉米秸秆的木质素、纤维素和半纤维素的含量较高,且不易降解^[5-7],使产甲烷菌难以获取小分子有机物,造成发酵效率低下,周期较长。玉米秸秆预处理目的是促进其中的木质素、纤维素和半纤维素部分或全部降解成小分子,成为产甲烷微生物的营养来源^[8-11]。

在提高沼气产量方面,国内外进行了研究^[12-16]。如:向沼气发酵系统中添加外源物(微生物、酶、营养物质)以提高产气量^[17-18]。添加尿素能调节碳氮比,沼气产量可提高8%~11%^[19]。吕淑霞等研究发现添加固体纤维素酶,甲烷产率可提高52.1%,添加液体纤维素酶可提高88.8%^[20]。以上的物理、化学方法虽然能提高沼气的产量,但是木质素、纤维素和半纤维素降解率较低。微生物预处理法具有环保无污染,使用条件温和等特点^[21-22],在快速有效降解木质纤维素类物质方面有巨大潜力,但是需要培养菌种,成本较高。因此,笔者采用新收获玉米秸秆露天堆放获取微生物,这种方法成本较低,适合普遍推广,有利于沼气产业化发展。

在发酵工艺方面,传统的湿法发酵工艺存在用水量较大,污水后续处理费用高,沼气池易存在浮渣、沉淀等问题。采用干式发酵方法^[23-24],将很大程度避免这些问题。干式发酵过程中固体有机物的含量在20%以上^[25]。与传统发酵对比,干式发酵具有^[26]固体发酵物含量高、沼液少、废渣含水量低、后续处理费用低的优势,且发酵过程稳定,无浮渣、沉淀等问题^[27]。

在收获玉米时节,大量的玉米秸秆无法及时处理,如直接焚烧,将造成大气污染^[28]。笔者采用以新收获的玉米秸秆为例,用堆放方法进行失效处理,同时获取微生物,采用干式厌氧发酵方法制取沼气。研究堆放厚度、时间对微生物及秸秆中木质素、纤维素和半纤维素,以及沼气产量和甲烷含量的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

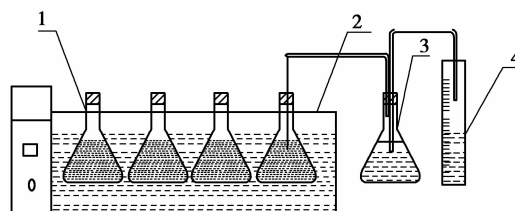
试验中采用山东鲁青有限公司于2010年8月在济南郊区收集的新鲜玉米秸秆。堆放方法:玉米秸秆堆成1 m³。玉米秸秆分共3层:表层是30 cm以上的部分;中层是30~60 cm之间的部分;下层是60 cm以下的部分。分别堆放10~30 d。

牛粪试验材料于2010年9月取自山东农科院养牛厂的新鲜牛粪,试验所用的污泥取自于趵突泉啤酒厂发酵后的脱水污泥。

1.2 试验方法和装置

首先对堆放10、20、30 d的玉米秸秆进行酶和化学成分测试,选择每层中酶活值较高的玉米秸秆作为发酵原料,进行干式厌氧发酵实验,测定沼气产量、甲烷含量等。分6组进行试验研究,6组试验发酵物总质量均为400 g,接种物分别为污泥和牛粪。其中I组表层玉米秸秆200 g与牛粪200 g;II组为中层玉米秸秆200 g与牛粪200 g;III组为下层玉米秸秆200 g与牛粪200 g;IV组为表层玉米秸秆200 g与污泥200 g;V为中层玉米秸秆200 g与污泥200 g;VI组为下层玉米秸秆200 g与污泥200 g。以尿素作为氮源,调节C/N至25:1,采用NaOH调节pH值至7.0±0.1%,总固体控制在30%±1.5%。

试验前,将不同原料、水和接种物按比例混合均匀,然后装入反应器。试验发酵装置用玻璃瓶加橡胶塞(见图1),总体积2 000 mL。试验期间,试验装置放入38℃恒温摇床中。将反应器放置在恒温摇床中,以排水法收集沼气,集气瓶中装满饱和食盐水以防止沼气中二氧化碳溶于水,每日查看量筒中的排水量以确定产气量。



1. 干式厌氧发酵瓶;2. 恒温摇床;3. 集气瓶;4. 量筒

图1 可控干式发酵实验装置

1.3 试验设备和方法

试验进行60 d。试验前,分别对玉米秸秆、牛粪和污泥进行总固体(TS)、可挥发性固体(VS)的测试^[29]。试验材料的性质见表1。

TS测定:105℃干燥恒重法;VS测定:550℃灼烧恒重法^[30];沼气产量:排水法收集,每天定时查看试管排水量,确定沼气产量。

pH的测定^[31]:发酵液的pH值采用sartorius PB-1型智能pH计,每7天测定一次。

甲烷含量的测定^[32]:采用GC-2010ATF型气相色谱仪(shimadzu, Japan),TDX-02B色谱柱

($\phi 4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ m}$),以氢气为载气,载气流量为 40 mL/min ,TCD 检测器进行分析,柱温 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,检测器温度 $120 \text{ }^\circ\text{C}$,进气样量为 1 mL 。采用外标法测定样品中的甲烷含量。酶测定:采用上海浦元的 Alpha-28uv/vis 酶测试仪。木质素、纤维素、半纤维素含量的测定:参照王玉万系统分析法^[33]。碳含量的测定:重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法^[34]。

氮含量的测定:凯氏定氮法,GB/T 5009.5—2003^[35]。

表 1 秸秆、牛粪和污泥的主要参数

参数	玉米秸秆	牛粪(湿态)	污泥(湿态)
TS/%	92.45	72.60	62.50
VS/%	85.24	38.20	37.80
pH	7.22	7.36	7.42

2 结果与分析

玉米秸秆放置 20 d,秸秆的 3 层发生不同的变化。表层为失去水分较多的干秸秆;中层为颜色发白的秸秆,温度在 $51 \sim 53 \text{ }^\circ\text{C}$;下层为温度较高的秸秆,温度在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

2.1 酶活测试结果

在新鲜玉米秸秆堆放 10、20、30 d 的时间内,对玉米秸秆取样分析,检测酶数值,比较玉米秸秆中微生物成长情况。分别进行 CMC 酶、木聚糖酶、滤纸酶以及外切酶 4 种酶活测试,检测结果如表 2 所示。

表 2 预处理玉米秸秆酶结果

	CMC	木聚糖	滤纸	外切酶
10 d 中层秸秆	0.424	2.090	0.046	2.584
20 d 中层秸秆	0.542	2.151	0.079	2.179
30 d 中层秸秆	0.403	1.845	0.042	2.015
10 d 下层秸秆	0.139	1.263	0.156	0.009
20 d 下层秸秆	0.203	1.730	0.020	0.019
30 d 下层秸秆	0.120	1.068	0.109	0.005
20 d 表层秸秆	0.005	0.008	0.003	0.001
30 d 表层秸秆	0.006	0.009	0.003	0.001
未预处理玉米秸秆	0.005	0.008	0.003	0.001

由表 2 测试结果可见,堆放 20 d 的玉米秸秆酶活数值较高,中层秸秆的酶活数值均比底层秸秆的酶数值高,表明中层秸秆环境适宜微生物生存,因此

微生物繁殖较快。同时,表层秸秆与未预处理的玉米秸秆酶活数值基本相同,因此,由表层外观未变化和酶活数值比较结果,表层玉米秸秆与未预处理秸秆性质相同。

2.2 玉米秸秆预处理前后主要化学组分含量变化

将预处理的表层、中层、下层玉米秸秆与未预处理的玉米秸秆的化学成分进行比较,堆放预处理处理 20 d 后,进行玉米秸秆中主要化学组分的质量分数测定,结果如图 2 所示。

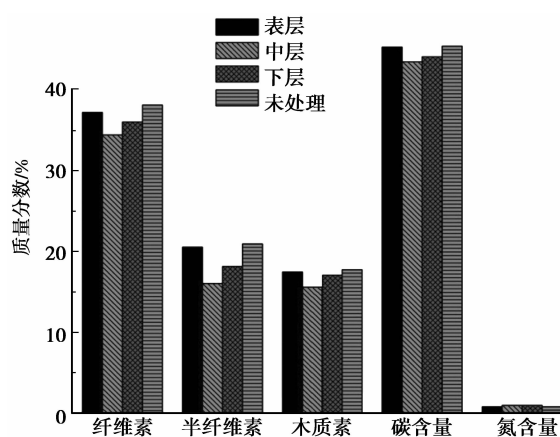


图 2 玉米秸秆预处理前后主要化学成分质量分数

由图 2 可见,玉米秸秆中所含纤维素、木质素、半纤维素的质量分数比未预处理的分别减少了 5.8% 、 16.8% 和 5.7% ,由图可见,表层玉米秸秆和化学成分与未预处理的玉米秸秆化学成分基本相同,与朱洪龙等^[35]不同白腐真菌处理的油菜秸秆研究结果:纤维素、木质素和半纤维素的降解率分别为 7% 、 22% 和 5% 比较,说明此试验研究采用的堆放预处理对纤维素、木质素、半纤维素的降解效果明显。另外,玉米秸秆经堆放预处理后,碳的质量分数从原来的 45.43% 降为 43.6% ,而氮的质量分数从 0.78% 升高至 0.97% ,从而玉米秸秆的 C/N 比例由 $58.2:1$ 降为 $44.9:1$ 。

2.3 不同预处理玉米秸秆的日产气量和累计产气量

取堆放处理 20 d 的玉米秸秆为原料,厌氧发酵 60 天的日产气量如图 3 所示。

由图 3 可见,日产气量的顺序为 $\text{II} > \text{V} > \text{I} > \text{IV} > \text{III} > \text{VI}$ 。I 组、II 组、III 组日产气量比较,II 组的日产气量高,且开始产气时间比 I 组早。由于 II 组发酵的玉米秸秆中微生物促进厌氧发酵的缘故。同样 IV 组与 V、VI 组比较,V 组的日产气较高,而且开始产气时间比 V 早。

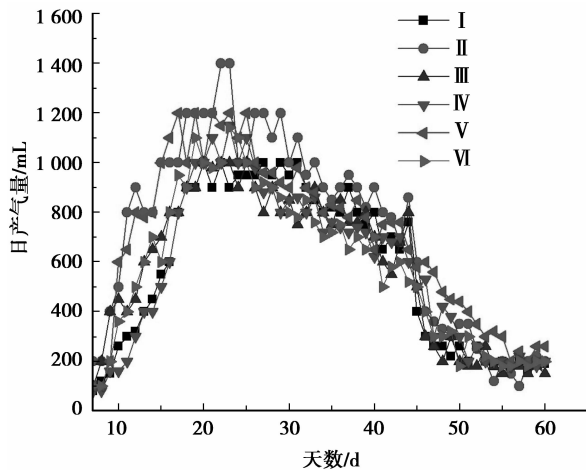


图 3 不同预处理条件秸秆的日产气量

图 4 是 6 组发酵物经过 60 d 厌氧发酵后的累计产气量。由图 4 可见, 累计产气量由高到低的顺序是 II > V > I > IV > III > VI, 中层玉米秸秆产气量明显增加。由于堆放预处理, 中层玉米秸秆中的微生物浓度高, 微生物促进秸秆发酵, 增加产气量。下层堆放玉米的产气量不明显, 这是因为在堆放过程中, 底层的温度较高, 容易腐烂, 造成营养成分流失。I 组的累计产气量 31 850 mL, II 组的累计产气量 39 620 mL, IV 组的累计产气量 31 030 mL, V 组的累计产气量 38 250 mL。II 组的累计产气量比 I 组的累计产气量高 24.4%; 比 IV 组的累计产气量高 27.7%; 比 V 组的累计产气量高 3.6%; V 组的累计产气量比 IV 组的累计量高 23.27%, 比 I 组的累计产气量高 20.1%。因此堆放 20 d 玉米秸秆与牛粪发酵的产气量最高, 高于未预处理的玉米秸秆与牛粪的混合的发酵产气量, 高于玉米秸秆与污泥的混合的发酵产气量, 因此堆放预处理既能有效处理玉米秸秆, 降低了预处理的成本, 又提高了产气量。

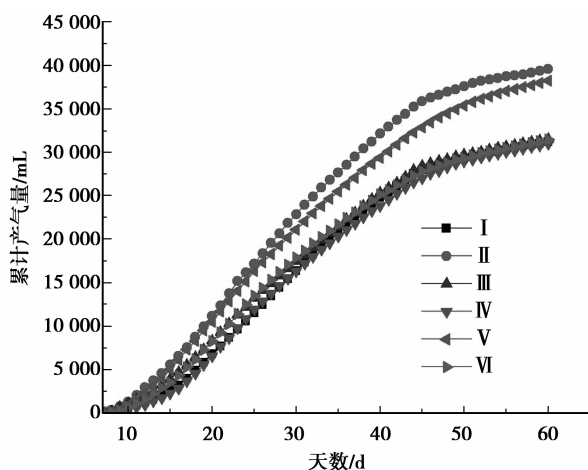


图 4 不同预处理条件秸秆的累计产气量

2.4 沼气中甲烷的含量

沼气是几种气体的混合物, 主要成分是甲烷和二氧化碳, 还有少量的氮气、氧气、氢气、氨水和硫化氢等气体。其中甲烷含量对沼气的品质影响较大, 甲烷含量越高, 沼气燃烧值、热值越高、性能越好。实验过程中, 每天测反应器内的甲烷体积分数, 甲烷体积分数稳定后, 每 3 天测定一次。测试结果如图 5 所示。

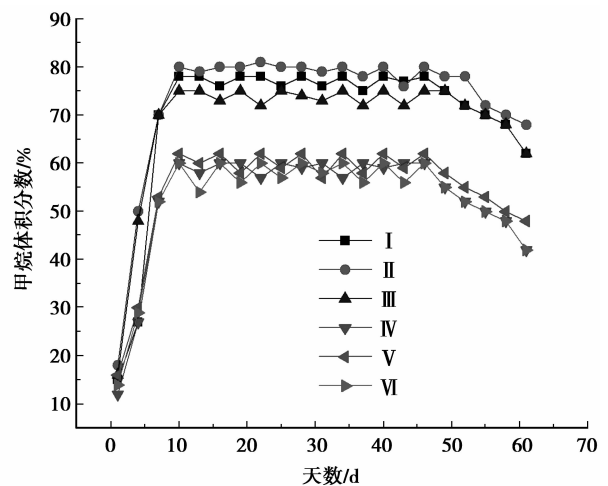


图 5 沼气中的甲烷的体积含量

由图 5 可见, 在启动初期, 由于气体中混有空气, 因此甲烷的体积分数低, 10 d 后, 集气瓶中空气排空, 甲烷体积分数上升到稳定状态。在发酵初期, 与牛粪混合的 I 组、II 组和 III 组的甲烷体积分数明显高于与污泥混合的 IV 组、V 组和 VI 组。IV 组、V 组和 VI 组集气瓶中甲烷体积分数在 55%~60% 之间, I 组、II 组和 III 组集气瓶中甲烷体积分数在 75%~80% 之间。玉米秸秆与牛粪混合产气提高沼气中甲烷含量。这与文献[5]添加牛粪能增加沼气中甲烷含量研究结果一致。

2.5 不同预处理玉米秸秆的 pH 变化

适宜的酸碱度是沼气微生物生长的必要条件, 通常沼气池中的产甲烷细菌适宜的 pH 值范围为 6.5~7.8。发酵过程中检测 pH 值的数值, 结果如图 6 所示。

由图 6 可见, 玉米秸秆干式发酵的 pH 值一直在动态变化中, pH 值在 6.4~7.6 之间。II 组的 pH 值高于 I 组、III 组, 这与 II 组的日产气量与累计产气量高于 I 组、III 组一致的。V 组的 pH 值较高于 IV 组、VI 组, 这与 V 组日产气量和累计产气量高于 IV 组、VI 组符合的。

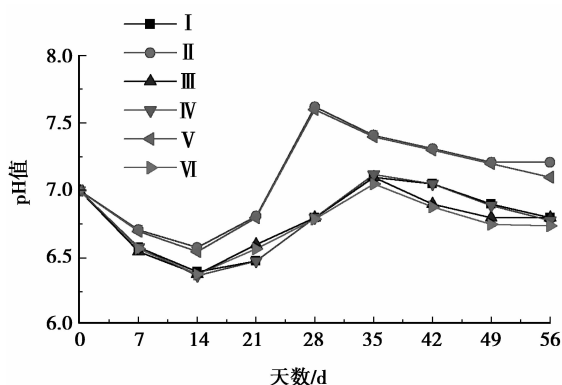


图 6 不同预处理条件秸秆的 PH 变化图

3 结 论

实验以新收获玉米秸秆为原料,采用中温干式发酵方法,总固体含量 30%左右,采用堆放预处理法,堆放厚度、堆放时间对玉米秸秆的主要化学成分影响进行测试分析,并用自制厌氧发酵装置对此预处理秸秆和不同接种物混合发酵,对沼气的产气量进行试验研究。

1)酶测试结果表明:堆放 20 d 的中层玉米秸秆酶数值均高于底层和表层秸秆的酶数值,表明中层秸秆环境适宜微生物生存,因此微生物繁殖较快。

2)堆放 20 d 的玉米秸秆中纤维素、木质素、半纤维素的质量分数比未经预处理的分别减少了 5.8%、16.8%和 5.7%。

3)堆放 20 d 后的玉米秸秆与牛粪混合的累计产气量比未预处理的玉米秸秆与牛粪混合发酵的累计产气量高 24.4%;比堆放 20 d 的玉米秸秆与污泥混合发酵的累计产气量高 3.6%;比未预处理的玉米秸秆与污泥混合发酵的累计产气量高 27.7%;堆放 20 d 的玉米秸秆与污泥混合的累计产气量比未预处理的玉米秸秆与污泥混合发酵的累计产气量高 23.27%。

4)实验通过堆放预处理的新鲜玉米秸秆干式发酵制取沼气,既能有效的处理玉米秸秆,减少大气污染,又提供了有利于提高沼气产量的预处理方法。

参考文献:

- [1] 赵志刚,程可可,张建安,等. 木质纤维素可再生生物质资源预处理技术的研究进展[J]. 现代化工, 2006, 26(Sup2): 39-42.
ZHAO Zhigang, CHENG Keke, ZHANG Jianan, et al. Advances in pretreatment technology of lignocellulose renewable biomass[J]. Modern Chemical Industry, 2006, 26(Sup2): 39-42.
- [2] 陈玲,赵立欣,董保成,等. 中国秸秆沼气工程发展现状与趋势[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 145-148.
CHEN Ling, ZHAO Lixin, DONG Baocheng, et al. The status and trends of the development of biogas plants for crop straws in China[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3): 145-148.
- [3] 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.
- [4] Zhang L X, Yang Z F, Chen B, et al. Rural energy in China: Pattern and Policy[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2813-2823.
- [5] 程序. 中国农业有机废弃物利用中的创新和存在的问题[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5):1-6.
CHENG Xu. Innovative approach to utilizing agro-organic wastes and Chinese ecological agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(5): 1-6.
- [6] 孙振钧. 中国生物质产业及其发展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5):1-5.
SUN Zhenjun. Biomass industry and its developmental trends in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(5): 1-5.
- [7] 胡明秀. 农业废弃物资源化综合利用途径探讨[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(4): 757-767.
HU Mingxiu. Approaches to comprehensive utilization of agricultural wastes [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2004, 32(4): 757-767.
- [8] Huang L M. Financing rural renewable energy: A comparison between China and India[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (5): 1096-1103.
- [9] Wang X H, Li J F. Influence of using household biogas digesters on household energy consumption in rural areas: A case study in Lianshui county in China[J]. Renewable and Sustainable Energy, 2005, 9 (2): 229-236.
- [10] Pobeheim H, Munk B, Lindorfer H, et al. Impact of nickel and cobalt on biogas production and process stability during semi-continuous anaerobic fermentation of a model substrate for maize silage [J]. Water Research, 2011, 45(2): 781-787.
- [11] Ojumu T V, Ogunkunle O A. Production of glucose from lignocellulosic under extremely low acid and high

- temperature in batch process, auto-hydrolysis approach[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2005, 5(1): 15-17.
- [12] Martinez A T, Speranza M, Ruiz-Duenas F J, et al. Biodegradation of lignocellulosics: Microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin[J]. *Int Microbiol*, 2005, 8(3): 195-204.
- [13] Kato S, Haruta S, Cui Z J, et al. Effective cellulose degradation by a mixed-culture system composed of a cellulolytic *Clostridium* and aerobic non-cellulolytic bacteria [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 51(1):133-142.
- [14] Scherr K E, Lundaa T, Klose V, et al. Changes in bacterial communities from anaerobic digesters during pet-roleum hydrocarbon degradation [J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, 157(4): 564-572.
- [15] 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(2): 10-12.
LIU Dejiang, GAO Guili, ZHU Yanmei, et al. The comparison experiment of biogas fermentation with pig dung, cow dung, sheep dung [J]. *Journal of Tarim University*, 2005, 17(2): 11-12.
- [16] 何荣玉, 刘晓风, 袁月祥, 等. 沼气发酵外源添加物的研究进展[J]. *中国沼气*, 2007, 25(5): 8-10, 31.
HE Rongyu, LIU Xiaofeng, YUAN Yuexiang, et al. Review on enhancing biogas production by additives[J]. *China Biogas*, 2007, 25(5): 8-10, 31.
- [17] Wang Y L, Dentel S K. The effect of high speed mixing and polymer dosing rates on the geometric and rheological characteristics of conditioned anaerobic digested sludge[J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 6041-6052.
- [18] Ho L, Ho G. Mitigating ammonia inhibition of thermophilic-anaerobic treatment of digested piggery wastewater: Use of pH reduction, zeolite, biomass and humic acid [J]. *Water Research*, 2012, 46(14): 4339-4350.
- [19] Jiang J Q, Zhao Q L, Zhang J N, et al. Electricity generation from bio-treatment of sewage sludge With microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(23): 5808-5812.
- [20] 吕淑霞, 陈祖洁. 纤维素酶应用于酒精废水厌氧消化中的研究[J]. *中国沼气*, 1994, 12(1): 1-5.
Lü Shuxia, CHEN Zujie. The Study on cellulase used in anaerobic digestion of distillery waste water [J]. *China Biogas*, 1994, 12(1): 1-5.
- [21] 万楚筠, 黄凤洪, 刘睿, 等. 微生物预处理油菜秸秆对提高沼气产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 267-271.
WAN Chuyun, HUANG Fenghong, LIU Rui, et al. Effect on increasing biogas production using rape straw by microbiological pretreatment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 267-271.
- [22] Bolzonella D, Innocenti L, Pavan P, et al. Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(2): 123-129.
- [23] Montero B, Garcia-Morales J L, Sales D, et al. Evolution of microorganisms in thermophilic-dry anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(8): 3233-3243.
- [24] Pang Y, Liu Y, Li X, et al. Improving biodegradability and biogas production of corn stover through sodium hydroxide solid state pretreatment[J]. *Energy Fuels*, 2008, 22(4): 2761-2766.
- [25] Mata-Alvarez J, Macq S, Llabrqs P. Anaerobic digestion of organic solid wastes: An overview of research achievements and perspectives[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 74(1): 3-16.
- [26] 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, 25(4): 196-200.
LIU Zhanguang, ZHU Hongguang, WANG Biao, et al. Effect of ratios of manure to crop on dry anaerobic digestion for biogas production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(4): 196-200.
- [27] De Baere L. Partial stream digestion of residual municipal solid waste [J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(7): 1073-1077.
- [28] Zhang X L, Wang R S, Huo M L, et al. A study of the role played by renewable energies in China ' s sustainable energy supply[J]. *Energy*, 2010, 35(11): 4392-4399.
- [29] 黄茜, 黄凤, 洪江, 等. 木质素降解菌的筛选及混合菌发酵降解秸秆的研究 [J]. *中国生物工程杂志*, 2008, 28(2): 66-70.
HUANG Qian, HUANG Feng, HONG Jiang, et al. The selection of lignin-degrading fungus and the straw fermentation by mixed strains [J]. *China Biotechnology*, 2008, 28(2): 66-70.
- [30] Hoban D J, Van den berg L. Effect of iron on conversion of acetic acid to methane during methanogenic fermentations [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1979, 47(1): 153-159.
- [31] Zhang L, Jahng Deokjin. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements[J]. *Waste Management*, 2012, 32(8): 1509-1515.

- Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 285-289.
- [18] Davidson E A. Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(1): 95-102.
- [19] Andersen A J, Petersen S O. Effects of C and N availability and soil-water potential interactions on N₂O evolution and PLFA composition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(8): 1726-1733.
- [20] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [21] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764.
ZOU Jianwen, HUANG Yao, ZONG Lianggang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(6): 758-764.
- [22] 郎漫, 李平, 张小川. 土地利用方式和培养温度对土壤氮转化及温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2670-2676.
LANG Man, LI Pin, ZHANG Xiaochuan. Effects of land use type and incubation temperature on soil nitrogen transformation and greenhouse gas emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2670-2676.
- [23] Holtan-Artwig L, Dorsh P, Bakken L. Low temperature control of soil denitrifying communities: kinetics of N₂O production and reduction[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1797-1806.
- [24] 梁东丽, 吴庆强, 李生秀, 等. 旱地反硝化作用和 N₂O 排放影响因子的研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35(12): 93-98.
LIANG Dongli, WU Qingqiang, LI Shengxiu, et al. Influential factors for denitrification and N₂O emission in dry land soil [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(12): 93-98.
- [25] Baggs E, Stevenson M, Pihlatie M, et al. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertiliser under zero and conventional tillage[J]. Plant and Soil, 2003, 254(2): 361-370.

(编辑 郑洁)

~~~~~

(上接第 86 页)

- [32] Gurung A, Van Ginkel S W, Kang W C, et al. Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: A lab-scale study [J]. Energy, 2012, 43(1): 396-401.
- [33] 王玉万, 徐文玉. 木质纤维素固体基质发酵物中半纤维素、纤维素和木质素的定量分析程序[J]. 微生物学通报, 1987, 14(2): 82-84.  
WANG Yuwan, XU Wenyu. Quantitative analysis program of lignocellulose solid substrate fermentations of hemicellulose, cellulose and lignin[J]. Microbiology, 1987, 14(2): 82-84.
- [34] 刘昌岭, 朱志刚, 贺行良, 等. 重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法快速测定海洋沉积物中有机碳[J]. 岩矿测试, 2007, 26(3): 205-208.  
LIU Changling, ZHU Zhigang, HE Xingliang, et al. Rapid determination of organic carbon in marine sediment samples by potassium dichromate oxidation-ferrous sulphatetrimetry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2007, 6(3): 205-208.
- [35] 朱洪龙, 王力生, 蔡海莹, 等. 两种白腐菌降解油菜秸秆效果的研究[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(8): 33-35.  
ZHU Honglong, WANG Lisheng, CAI Haiying, et al. Effects of two kinds of white-rot fungi on degradation of rape straw [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(8): 33-35.

(编辑 郑洁)