

温度对畜禽粪便稻草混合干式厌氧发酵的影响

石利军^{1,2}, 班立桐^{1,2}, 刘惠芬^{1,2}, 郝建朝^{1,2}, 张伟玉^{1,3*}

(1.天津中日农村环境·资源合作研究中心, 天津 300384; 2.天津农学院农学系, 天津 300384; 3.天津农学院机电系, 天津 300384)

摘要:通过在畜禽粪便中添加稻草进行混合干式发酵来产生沼气,在发酵原料 C/N=28.3、TS=21.3%的条件下,研究了常温、中温(36℃)和高温(55℃)条件对畜禽粪便稻草混合干式厌氧发酵产沼气性能的影响。结果表明,常温组启动慢,日产气量少,不宜进行干式发酵;中、高温条件下干式发酵具有较好的产气效果,中温是较为合适的发酵温度。中温组和高温组的有机负荷率分别为 1.69 kg·m⁻³·d⁻¹ 和 1.89 kg·m⁻³·d⁻¹, TS 产气率分别为 0.237 m³·kg⁻¹ 和 0.208 m³·kg⁻¹, 池容产气率分别为 0.401 m³·m⁻³·d⁻¹ 和 0.393 m³·m⁻³·d⁻¹, 实验研究结果对于干式发酵的实际应用具有一定的指导意义。

关键词:干式厌氧发酵; 畜禽粪便; 稻草; 温度; 沼气

中图分类号: S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)04-0782-05

Effect of Different Temperature on Dry Anaerobic Digestion of Animal Manure and Straw

SHI Li-jun^{1,2}, BAN Li-tong^{1,2}, LIU Hui-fen^{1,2}, HAO Jian-chao^{1,2}, ZHANG Wei-yu^{1,3*}

(1. China-Japan Collaborative Research Center for the Rural Environment and Resource, Tianjin 300384, China; 2. Department of Agronomy, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. Department of Electromechanical Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Dry anaerobic digestion has advantage over wet anaerobic digestion by reducing the volume of the reactor, producing a more easily transportable fertilizers and high organic loading rates. Dry anaerobic digestion of animal manure and straw was conducted to produce biogas. Under the conditions of C/N=28.3 and TS=21.3%, three different temperature levels of room temperature, mesophilic temperature(36℃) and thermophilic temperature(55℃) were applied to investigate the effect of operation temperature on dry digestion. The result showed that dry digestion under room temperature started up slowly with low biogas production, so normal temperature was unfit for dry digestion. Dry digestion under 55℃ and 36℃ proceeded steadily with high biogas yield and mesophilic temperature was more suitable for dry digestion. The organic loading rates under 55℃ and 36℃ were 1.69 kg·m⁻³·d⁻¹ and 1.89 kg·m⁻³·d⁻¹ respectively with TS biogas production rates of 0.237 m³·kg⁻¹ and 0.208 m³·kg⁻¹, and volume biogas production rates of 0.401 m³·m⁻³·d⁻¹ and 0.393 m³·m⁻³·d⁻¹ respectively. These results could provide instructive meaning to the engineering application of dry anaerobic digestion.

Keywords: dry anaerobic digestion; animal manure; straw; temperature; biogas

干式发酵是指干物质含量大于 15%的发酵,由于干发酵干物质浓度高、含水量少,其有机负荷率(organic loading rates, 缩写为 OLR)可以高达 10 kg·m⁻³·d⁻¹, 高于湿式发酵的 2~4 kg·m⁻³·d⁻¹^[1], 因此干式发酵装置容积较小; 而且干式发酵几乎不产生发酵废液, 避免了二次污染; 同时发酵产物为固体有机肥, 便于

运输和施用^[2]。

温度是影响干式发酵的主要因素之一, 在一定的温度范围(8~65℃)发酵微生物才能生长繁殖。根据微生物适应的温度范围, 厌氧发酵可以分为常温发酵、中温发酵和高温发酵 3 类。通常在一定的温度范围内, 温度越高, 发酵微生物生化反应速度越快, 产气速率也越快^[3]。不同温度下干式发酵的有机负荷率、TS 产气率和池容产气率也不相同, 目前此类文献报道较少。

国外开展干发酵研究工作较早, 并且已有工程化的应用^[4-5]。国内近年来也开始关注干式发酵, 目前多

收稿日期: 2010-10-18

基金项目: 天津市农业科技成果转化项目(10ZHNZNC03500)

作者简介: 石利军(1970—), 男, 山西大同人, 博士, 主要从事生物质能源工程研究。E-mail: shilj898@126.com

* 通讯作者: 张伟玉 E-mail: zhangweiyou01@yahoo.com.cn

处于研究阶段,多采用农作物秸秆作为发酵原料^[6-7]。由于秸秆 C/N 大,发酵时产生的挥发性脂肪酸(VFA)会抑制甲烷菌的活性。畜禽粪便含有较多的有机氮,有机氮的分解产物 NH_4^+-N 具有较强的缓冲能力^[8-9],可以减弱 VFA 所造成的 pH 下降,而且粪便和秸秆的混合发酵比粪便单一发酵产气量更高^[10]。

综上所述,本文根据畜禽粪便 C/N 较小的特点,通过在畜禽粪便中添加稻草进行混合干式发酵来产生沼气,研究温度对干式发酵产气性能的影响,考察不同温度下干式发酵的有机负荷率、TS 产气率和池容产气率,为干式发酵的工业应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 实验材料

发酵原料为猪粪、牛粪和鸡粪,同时加入稻草以调节 C/N,3 种粪便分别取自天津市西青区的大型养殖场。牛粪为风干样,呈棕褐色,含有较多的纤维,颗粒大小不均匀、味微臭,实验前将其粉碎为小于 5 mm 的颗粒;猪粪和鸡粪为鲜样,前者灰褐色、后者黄褐色,有明显臭味,首先将其风干,拣去毛发等杂物,并压碎成小于 5 mm 的颗粒。

稻草取自天津农学院实验田,已在试验田风干半年。实验前将稻草去掉带穗部分,剪为 3~5 cm 长并放入 FW80 型粉碎机中进行粉碎,粉碎后的稻草呈纤维状。接种污泥取自天津市咸阳路污水处理厂污泥浓缩池,颜色呈黑褐色,有较多杂质并有臭味,污泥含水量为 97.5%。实验前将该污泥放在 36 ℃ 的水浴中,并加入上述发酵原料驯化 1 周。

实验前对发酵原料和接种污泥的性质进行了分析,结果如表 1 所示。

表 1 发酵原料和接种污泥性质

Table 1 Main composition of animal manure, straw and incubation sludge

项目	TS/%	VS/%	TC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	C/N
猪粪	91.6	83.9	324.2	19.3	16.8
牛粪	87.4	55.3	265.3	21.3	12.4
鸡粪	92.9	82.2	383.7	45.4	8.45
稻草	94.5	90.5	495.0	6.46	76.6
接种污泥	2.88	69.4	352.0	30.6	11.5

1.2 实验装置和方法

发酵装置如图 1 所示,主要由发酵瓶、集气瓶、集水瓶和气、水管路组成。发酵瓶由 500 mL 抽滤瓶制成,发酵瓶顶部由橡胶塞密封,橡胶塞上钻孔装有塑

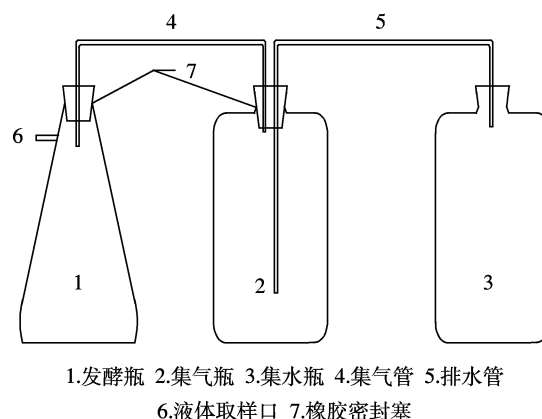


图 1 实验装置图

Figure 1 Schematic diagram of experimental equipment

料管收集发酵产生的沼气,发酵瓶侧上部有取样口用于对产生的渗滤液进行取样,整个发酵瓶全部密封以保证厌氧条件。

首先将畜禽粪便、稻草、接种污泥装入发酵瓶中,3 种粪便的数量都是 25.0 g,稻草和接种污泥分别为 25.0 g 和 150.0 mL,同时加入 200.0 mL 自来水,混合后发酵原料的 C/N=28.3、TS=21.3%。用橡胶塞密封使发酵瓶内形成厌氧环境,将其放在 3 种不同的温度环境中开始发酵。选择的发酵温度分别为室温、中温和高温,将发酵瓶直接置于室温环境中即为室温条件,中温和高温分别是将发酵瓶置于 (36±1)℃ 和 (55±1)℃ 的水浴锅中,每组温度设 2 个重复。

采用排水法测定沼气产生量,每日记录排出饱和食盐水的数量,以此确定产生的气体体积,同时记录水浴温度和室温。

1.3 分析指标和方法

发酵前后分别对发酵原料进行分析测定,同时定期对渗滤液进行分析测定,主要分析指标包括发酵原料的 TS、VS、TN、TC,渗滤液的 VFA、 NH_4^+-N 、碱度、pH,同时每日记录产生沼气的体积和发酵装置的温度(T)。TS 和 VS 分别采用烘干法和灼烧法,TN 用凯氏定氮法,TC 用重铬酸钾-稀释热法; NH_4^+-N 和 VFA 用蒸馏法,碱度采用酸碱滴定法,其他指标都采用标准方法分析测试^[11-12]。

根据上面分析指标,对干式发酵的相关产气指标进行计算,包括:有机负荷率,即单位反应器容积日平均发酵原料装填质量;TS 产气率,即单位原料干物质日平均沼气产生体积;池容产气率,即单位反应器容积日平均沼气产生体积。计算公式如下:

$$\text{有机负荷率} = \text{原料干重} / (\text{发酵天数} \times \text{反应器容积})$$

TS 产气率 = 累积产气量/原料干重

池容产气率 = 累积产气量/(发酵天数×反应器容积)

2 结果与分析

2.1 日产沼气量

3种温度条件下的日产气量变化如图2所示。其中常温组在整个发酵期间的温度范围为14~25℃,常温组最初半个月几乎不产气,整个发酵过程除第12d和17d产气较多外,其余天数产气很少,一般小于50 mL,40d后停止产气。

中温组和高温组产气相对较多,发酵当天即开始产气,第2d同时达到第一个产气高峰,日产气量分别为805 mL和1 041 mL。此后中温组又分别在第81d和第99d出现两个产气高峰,日产气量分别为540 mL和784 mL,到118d发酵完成,停止产气。和高温组相比,高温组第2个产气高峰出现较早(53d),产气量也较大(1 000 mL),此后日产气量波动较大,再没有出现明显的产气高峰,至106d发酵停止。

2.2 累积沼气产量

同一时期3种温度条件下的累积产气量如图3

所示。室温组沼气累积产量较少且增长缓慢,发酵40d时停止产气,累积沼气产量只有918.5 mL;高温组和中温组在发酵前44d累积产气量相差不大,此后高温组进入产气高峰期,累积产气量明显增大,在62d后产气量增幅变小,至108d产气结束后累积产气量达到20 849.5 mL;中温组由于产气高峰出现较晚,在60d后累积产气量才逐渐增大,发酵100d时累积产气量超过了高温组,当118d产气停止时累积沼气产量达到23 673 mL。

3 讨论

3.1 温度对干式发酵的影响

从本实验得到的结果看,和中温组、高温组相比,常温组启动慢,日产气量也较少,且较早停止产气,表明常温条件不宜进行干式发酵。同时已有文献证明,10~20℃区间因不适合发酵微生物的生长而影响产气量,25~30℃区间产气量较为理想^[13]。目前,我国农村户用沼气池多采用常温发酵,为了避免冬天温度太低(特别是北方地区)影响发酵,一般将沼气池建成地下式结构,同时采取保温和增湿措施,以便达到较高

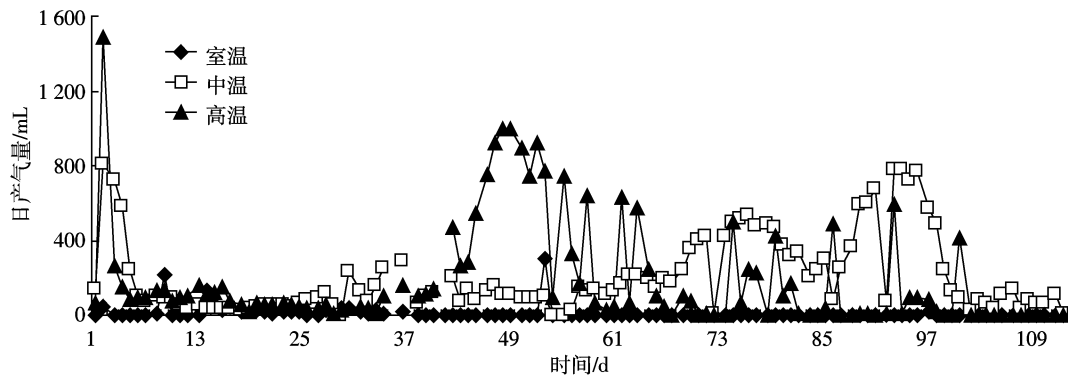


图2 不同温度条件下日产气量变化

Figure 2 Variations of daily biogas yield at different temperatures

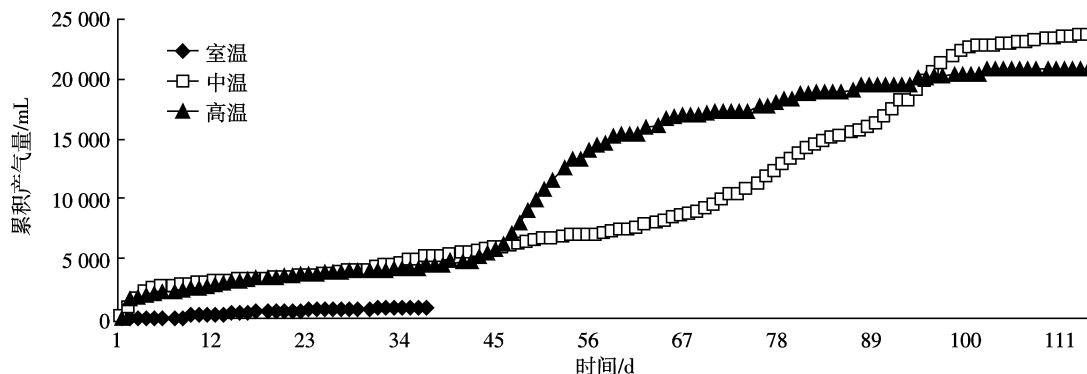


图3 不同温度条件下累积产气量变化

Figure 3 Variations of cumulative biogas yield at different temperatures

的产气率。

在本实验中,中高温条件下干式发酵具有较好的发酵效果。发酵当天即开始产气,且在第2 d达到首个产气高峰,分析原因是发酵原料特别是畜禽粪便中的易降解有机物快速发酵的结果。一般来说,高温条件下微生物具有更高的反应活性^[14]。但由于本实验的接种物为中温条件下驯化的厌氧污泥,在开始一段时间内高温组产气量并不比中温组高;此后高温微生物逐渐生长并适应环境,表现在高温组的第2个产气高峰期(53 d)明显早于中温组(81 d)。

发酵结束后,高温组和中温组的累积产气量分别为20 849.5 mL和23 673 mL,高温组并没有表现出明显的优势。其原因在于:对于畜禽粪便的厌氧发酵来说,高温条件下粪便中的有机氮更容易转化为氨氮,而高浓度的氨氮会对甲烷细菌产生抑制作用,造成厌氧发酵生化反应动力学常数的降低^[15]。由于高温发酵需要消耗较多的能源进行加热,中温条件即(36±1)℃是较为合适的发酵温度。

3.2 干式发酵的有机负荷率、TS产气率和容积产气率

一般来说,干式发酵的有机负荷率较高,高的有机负荷率意味着同样的装填负荷下反应器的体积更小,这在工程上可以减少投资费用。本实验条件下,中温组和高温组发酵分别持续了118 d和106 d,可以计算得到其有机负荷率分别为 $1.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在相同的进料成分和负荷下,有机负荷率和发酵持续时间有关,如果以产气量达到最终产气量的80%为基准,则两种温度条件下的有机负荷率可以进一步提高,分别为 $2.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,达到90%产气量时分别为 $1.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $2.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,具体结果如表2所示。工程应用中可以根据实际情况选择不同的有机负荷率(即发酵持续时间)。

表2 不同产气量时的有机负荷率

Table 2 Organic loading rates at different biogas yield

项目	有机负荷率/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$		
	80%产气量	90%产气量	100%产气量
中温组	2.04	1.98	1.69
高温组	2.90	2.35	1.89

此外,还可以看出,高温组的有机负荷率较中温组高,其原因在于高温条件下微生物生化反应速度较快,产气速率较快。另一方面,和湿式发酵相比,干式发酵的有机负荷率相对较高,前者的有机负荷率一般

小于 $2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[16-17]。

TS产气率也称TS产气潜力(单位 $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$),是表示发酵原料产气能力的指标,其大小和原料成分、发酵条件有关。根据文献[1]的数据,碳水化合物、粗蛋白、粗脂肪的理论产气率分别为 0.8 、 $0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实际上受各种因素的影响,特别是原料成分降解性的影响(如木质素很难被降解),不同发酵原料(如秸秆、粪便等)的实际TS产气率远远小于理论值。在中温发酵条件下,猪粪、牛粪的实际产气量占理论产气量的70%左右,稻草占40%左右^[18]。本实验中温组和高温组发酵结束后的累积产气量分别为23 673 mL和20 849.5 mL,可以计算得到其TS产气率分别为 $0.237 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.208 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,此数值和相关文献报道的结果近似^[19-20]。

对于厌氧发酵产沼气来说,反应器的容积产气率(也称池容产气率,单位 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)是反映发酵装置容积利用效率的指标。对于一座 8 m^3 的户用沼气池,日均沼气体积 1.05 m^3 ,则其池容产气率为 $0.132 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[18]。本实验中温组和高温组的池容产气率分别为 $0.401 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.393 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,和相关文献^[17]报道的数值相当,高于现在普遍使用的户用沼气池,说明干式发酵具有良好的推广应用前景。

4 结论

常温组启动慢,日产气量少,不宜进行干式发酵;中高温条件下干式发酵具有较好的发酵效果,发酵结束后两者的累积产气量相差不多,由于高温发酵需要消耗较多的能源进行加热,中温条件是较为合适的发酵温度。

本实验条件下,中温组和高温组的有机负荷率分别为 $1.69 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,TS产气率分别为 $0.237 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.208 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,池容产气率分别为 $0.401 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.393 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,以上数据可以为干式发酵的实际应用提供参考。

参考文献:

- [1] Weiland P. Biogas production: Current state and perspectives[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2009, 85(4): 849-860.
- [2] Ahn H K, Smith M C, Kondrad S L, et al. Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switchgrass-animal manure mixtures[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2009, 160(4): 965-975.
- [3] 张希衡. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- ZHANG Xi-heng. Anaerobic biological treatment of wastewater[M]. Bei-

- jing: China Environmental Science Industry Press, 1995.
- [4] Akunna J C, Abdullahi Y A, Stewart N A. Anaerobic digestion of municipal solid wastes containing variable proportions of waste types[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(8): 143-149.
- [5] Heiermann M, Linke B, Look R, et al. Biogas from renewable resources through dry anaerobic digestion[J]. *Landtechnik*, 2007, 62: 14-15.
- [6] 边义, 刘庆玉, 李金洋. 玉米秸秆干发酵制取沼气的试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 440-442.
BIAN Yi, LIU Qing-yu, LI Jin-yang. Experimental investigation of making biogas from dry fermented corn stalk[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, 38(3): 440-442.
- [7] 何荣玉, 闫志英, 刘晓凤, 等. 秸秆干发酵沼气增产研究[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 583-585.
HE Rong-yu, YAN Zhi-ying, LIU Xiao-feng, et al. Enhancement of biogas production by dry fermentation with straws[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2007, 13(4): 583-585.
- [8] Li R, Chen S, Li X. Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2009, 160(2): 643-654.
- [9] 杜静, 常志州, 王世梅, 等. 不同底物沼气干发酵启动阶段的产酸特征研究[J]. 江苏农业科学, 2008(1): 225-227.
DU Jing, CHANG Zhi-zhou, WANG Shi-mei, et al. Study on acidifying characteristics in start-up phase of dry-fermentation with different substrate[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008(1): 225-227.
- [10] 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 dungs and wheat straw[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1817-1822.
- [11] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
HE Yan-ling. Anaerobic biological treatment of wastewater[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1998.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业大学出版社, 2005.
BAO Shi-dan. Soil agriculturalization analysis[M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2005.
- [13] 裴占江, 王大慰, 张楠, 等. 温度对甲烷菌群发酵性能的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2009(5): 128-129.
PEI Zhan-jiang, WANG Da-wei, ZHANG Nan, et al. Effect of temperature on the efficiency of methanogenic bacteria[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009(5): 128-129.
- [14] Converti A, Delborghi A, Zilli M, et al. Anaerobic digestion of the vegetable fraction of municipal refuses: Mesophilic versus thermophilic conditions[J]. *Bioprocess Engineering*, 1999, 21: 371-376.
- [15] Sanchez E, Borja R, weiland P, et al. Effect of temperature and pH on the kinetics of methane production, organic nitrogen and phosphorus removal in the batch anaerobic digestion process of cattle manure[J]. *Bioprocess Engineering*, 2000, 22: 247-252.
- [16] 孙丽丽, 符征鸽. 玉米秸麦秸中高温沼气发酵产气潜力及特性的研究[J]. 中国沼气, 2008, 26(6): 13-16.
SUN Li-li, FU Zheng-ge. Biogas potential and characteristics of medium or high temperature biogas fermentation with corn and wheat straw[J]. *China Biogas*, 2008, 26(6): 13-16.
- [17] Karim K, Hoffmann R, Al-Dahhan M H. Digestion of sand-laden manure slurry in an upflow anaerobic solids removal (UASR) digester[J]. *Biodegradation*, 2008, 19: 21-26.
- [18] 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
ZHANG Quan-guo. Biogas technology and its application[M]. 2nd edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [19] 朱洪光, 陈小华, 唐集兴. 以互米花为原料生产沼气的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(5): 201-204.
- [20] Goksel N, Demirel, Shulin Chen. Anaerobic digestion of dairy manure in a hybrid reactor with biogas recirculation[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2005, 21: 1509-1514.