

猪粪麦秆不同比例混合厌氧发酵特性试验*

楚莉莉¹ 李轶冰² 冯永忠² 杨改河² 任广鑫²

(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)

【摘要】以猪粪、麦秆为原料,研究了35℃下二者按不同比例混合对厌氧消化产沼气的影 响,分析了消化过程中日产气量、累积产气量、甲烷含量、原料去除率、pH 值以及氨态氮质量浓度的变化。结果表明,猪粪与麦秆配比(干物质质量比)1:1时产气量最大,为383.0 mL/g,是麦秆单独发酵产气量(231.8 mL/g)的1.6 倍;混合原料(猪粪和麦秆配比分别为1:1、2:1、3:1)的VS 去除率均在37% 以上,比麦秆提高12.0% ~ 26.9% ;添加猪粪可提高发酵液中氨态氮含量,较麦秆提高35.6% ~ 64.8% 。因此,合理调控粪秆混合厌氧发酵的比例,能提高秸秆的产气率和利用率。

关键词: 猪粪 麦秆 沼气 混合发酵

中图分类号: S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0100-05

Characteristics of Co-digestion of Pig Dung and Wheat Straw in Various Ratios

Chu Lili¹ Li Yibing² Feng Yongzhong² Yang Gaihe² Ren Guangxin²

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

Pig dung and wheat straw (the ratio of pig dung to wheat straw was 1:1, 2:1, 3:1) were used as fermentation materials. The experiments were carried out at 35℃. The biogas production rate, cumulative biogas yield, methane content, material reduction, pH value and NH₃-N content were tested. The results showed that the co-digestion of pig dung to wheat straw could increase the biogas yield and material reduction of wheat straw. The biogas production yield of 1:1 was highest (383.0 mL/g), which was 1.6 times of biogas production yield of wheat straw (231.8 mL/g). VS reductions of combination materials were 12.0% ~ 26.9% higher than wheat straw. Compared with wheat straw, the NH₃-N contents of combination materials increased by 35.6% ~ 64.8%. Reasonable co-digestion ratio of livestock dung and crop straw could increase the biogas production rate and utilization of crop straw.

Key words Pig dung, Wheat straw, Biogas, Co-digestion

引言

自20世纪80年代以来,我国畜牧业结构发生了巨大变化,已由过去的农村分散养殖变为集约化养殖且大多集中在城市附近,致使农村户用沼气池原料短缺^[1]。我国每年生产大量农作物秸秆,其中

稻秆、麦秆和玉米秆约占75%,其资源化利用已成为研究的热点问题^[2~3]。厌氧发酵生产沼气为秸秆资源化利用提供了有效途径。研究发现^[4~6],秸秆主要由纤维素组成,碳氮比较高,产气效率较低,调节碳氮比可有效提高秸秆的产气速率。粪便与秸秆混合发酵既能调节秸秆碳氮比,又能解决农村沼气

收稿日期: 2010-07-03 修回日期: 2010-08-05

* 国家自然科学基金资助项目(30700482)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD89B16)和陕西省13115重大科技计划资助项目(2009ZDKG-03,2010ZDKG-06)

作者简介: 楚莉莉,博士生,主要从事生物质能与循环农业技术研究,E-mail: chulili123@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 李轶冰,副教授,博士,主要从事生态农业与循环农业技术研究,E-mail: liyibing@nwsuaf.edu.cn

池原料短缺问题。Weiland^[7]指出,混合厌氧发酵以及优化混合原料组合将是厌氧消化技术的重要发展方向。关于混合厌氧发酵的研究多集中在牛粪、猪粪、鸡粪与稻秆、玉米秆的混合^[8~14],对猪粪与麦秆混合的研究却少有报道。

本文以猪粪和麦秆为原料,研究猪粪、麦秆及其不同比例混合在 35℃ 恒温条件下的厌氧发酵特性。

1 材料与方法

1.1 材料

(1) 秸秆预处理:将麦秆粉碎后,用沼液浸湿,充分搅拌后密闭放置 7 d,期间每 2 d 搅拌一次。在预处理过程中,秸秆有少量的气体产生,经测定其主要成分为 CO₂,产气量没有计入总产气量。

(2) 猪粪预处理:猪粪密闭放置 7 d,期间每 2 d 搅拌一次。

(3) 接种物驯化:接种物由沼液和鲜牛粪按 4:1 混合均匀,密封驯化 7 d,期间每 2 d 搅拌一次。预处理后原料和接种物的理化特性如表 1 所示。

表 1 原料和接种物的基本性状

Tab.1 Basic characteristic of raw materials and inoculum

原料	碳质量 分数/%	氮质量 分数/%	碳氮比	干物质质量 分数/%	挥发性干物 质与干物质 比值/%
麦秆	31.6	0.9	35.1	10.8	84.3
猪粪	34.7	3.4	10.2	21.2	86.7
接种物	35.1	1.7	23.2	9.9	70.1

1.2 试验方案

试验设置 A、B、C、D、E 5 组,同时设置对照组。5 组发酵原料均按总固体(TS)质量分数为 8% 配置,其中 A 组为猪粪,B 组为麦秆,C、D、E 组分别为猪粪与麦秆配比(干物质质量)为 1:1、2:1、3:1 的混合原料,对照为 500 g 接种物。试验前,将不同原料、水按比例混合均匀,在 5 L 塑料壶里装入 2 000 g 混合后的发酵原料和 500 g 接种物,放入 35℃ 恒温水槽内。试验设 3 个重复。

1.3 测定指标及方法

(1) 干物质(TS):(105±5)℃ 的干燥箱中干燥至恒质量。挥发性干物质(VS):(560±2)℃ 马弗炉中干燥至恒质量。

(2) 总碳:K₂Cr₂O₇—外热源法测定^[15]。

(3) 总氮:凯氏定氮仪(KDN-08C)测定。

(4) 产气量:用液体置换计测定沼气产量。试验所指产气量均为试验组产气量减去对照组产气量。

(5) 气体成分:沼气气体成分分析仪(ZS-2 型)测定。

(6) pH 值:智能 pH 计(pHS-3CT 型)测定。

(7) 氨态氮:蒸馏滴定法测定^[15]。

2 结果与分析

2.1 产气状况分析

2.1.1 不同处理的日产气量

图 1 为各处理的日产气量变化。图中数据显示,各处理启动后日产气量快速增加。A 组日产气量波动较大,在 13 d 和 18 d 有 2 个产气高峰出现,峰值分别为 2 213、2 349 mL/d,产气主要集中在 12~19 d;B 组在 4 d 达到产气高峰,为 1 396 mL/d,产气主要集中在 2~11 d;C 组在 8 d 达到产气高峰,为 2 503 mL/d,产气主要集中在 2~11 d;D 组和 E 组在 5 d 达到产气高峰,峰值分别为 2 317、2 177 mL/d,其中 D 组产气主要集中在 2~15 d,E 组产气主要集中在 2~12 d。产气高峰过后,各组的日产气量逐步下降,35 d 后日产气量维持在较稳定的水平。B 组在发酵前期日产气量明显较低,A 组的产气高峰出现时间比其余 4 组晚 10~14 d。对照组的日产气量较小,平均为 15 mL/d,接种物对试验产气量的影响甚微。

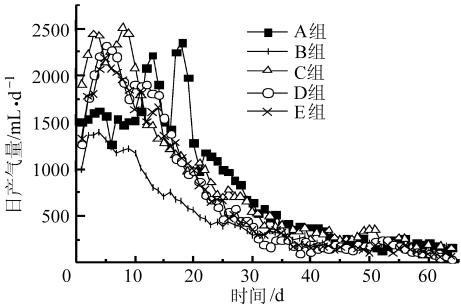


图 1 各处理的日产气量

Fig.1 Biogas production rates of different treatments

2.1.2 不同处理的累积产气量

图 2 为 5 组试验累积产气量变化。图中数据显示,A、B、C、D、E 组的最终累积产气量分别为 52.8、31.3、52.4、45.2、44.0 L,大小顺序为:A、C、B、E、D。C、D、E 组前 20 d 的累积产气量已占最终累积产气量的 65% 以上。在实际生产中,以产气量达到总产气量的 90% 以上即可认为消化基本完成^[16],5 组原料的完成厌氧发酵的时间分别为 40、47、41、34、35 d。

2.1.3 甲烷体积分数分析

5 组试验所产气体中甲烷体积分数变化如图 3 所示。在发酵前 10 d,各组的甲烷体积分数均在 30% 以下,随着厌氧发酵的进行,各组所产气体中的

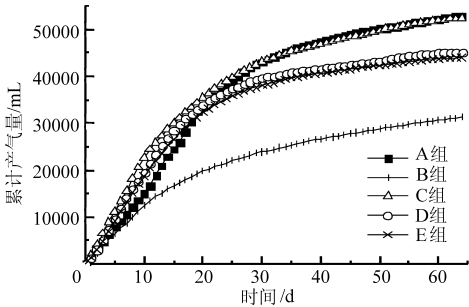


图 2 各处理的累积产气量

Fig. 2 Cumulative biogas yields of different treatments

甲烷体积分数呈明显升高趋势,20 d 后各组所产气体的甲烷体积分数都达到了 45% 以上,随后各组的甲烷体积分数在 45% ~ 62% 之间,变化比较稳定。厌氧发酵初期,B 组的甲烷体积分数在初期明显高于其他 4 组。

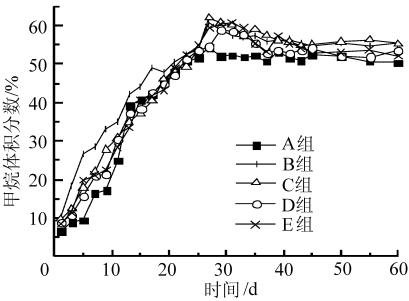


图 3 各处理所产沼气的甲烷体积分数

Fig. 3 Methane volume fraction of different treatments during anaerobic digestion

2.2 TS 和 VS 去除率

试验结束后,A、B、C、D、E 5 组试验的 TS、VS 去除率情况如图 4 所示。A、B、C、D、E 组 TS 去除率分别为 35.5%、24.7%、34.5%、30.4%、30.6%;VS 去除率分别为 45.9%、33.7%、42.7%、38.2%、37.7%,A 组的 TS、VS 去除率最高,TS 去除率比其余 4 组提高 2.8% ~ 43.7%,VS 去除率比其余 4 组高出 7.4% ~ 36.2%。混合原料的 TS、VS 去除率分别比麦秆高 22.9% ~ 39.8%、12.0% ~ 26.9%。

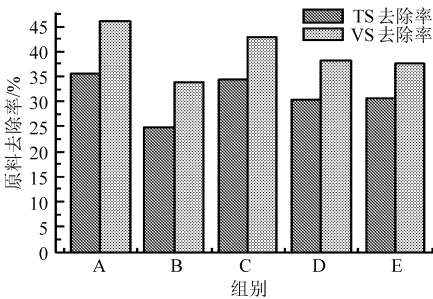


图 4 各处理的原料去除率

Fig. 4 Material reduction rates of different treatments

2.3 TS 和 VS 产气量

表 2 为不同原料的 TS 和 VS 产气量。A 组的 TS 产气量最大为 330.4 mL/g,分别比其余 4 组高

69.1%、0.9%、17.0%、20.0%。C 组的 VS 产气量最大为 383.0 mL/g,分别比其余 4 组高 0.5%、65.2%、16.5%、19.8%。猪粪麦秆混合发酵明显提高了秸秆的产气量。多重比较结果表明,A 组和 C 组的产气量与 B、D、E 组的产气量有显著差异,D、E 组产气量与 B 组的产气量有显著差异。

表 2 5 组不同发酵原料的 TS 和 VS 产气量

Tab.2 Biogas production yields of TS and VS under different treatments

原料	总产气量/mL	TS 产气量/mL·g ⁻¹	VS 产气量/mL·g ⁻¹
A 组	52 860 ^a	330.4 ^a	381.1 ^a
B 组	31 271 ^c	195.4 ^c	231.8 ^c
C 组	52 393 ^a	327.5 ^a	383.0 ^a
D 组	45 190 ^b	282.4 ^b	328.8 ^b
E 组	44 044 ^b	275.3 ^b	319.7 ^b

注:表中同一列数值中,不同上标表示均值间差异显著(P<0.05)

2.4 pH 值和氨态氮的变化

图 5 为厌氧发酵过程中 pH 值的变化。图中数据显示,A、D、E 组的 pH 值先升高后趋于稳定。B 组和 C 组的 pH 值先降低后升高,最后保持稳定。在发酵初期,各组的 pH 值相差较大,其中 A 组的 pH 值最低为 6.59,B 组的 pH 值最高为 6.80。11 d 时,B 组和 C 组的 pH 值降到最低,分别为 6.65 和 6.70。此后,随着厌氧发酵的进行,各组的 pH 值缓慢上升,在 21 d 时各组的 pH 值达到 7 以上。发酵后期,A、C、D、E 组的 pH 值在 7.10 左右波动,B 组的 pH 值在 7.30 左右波动。

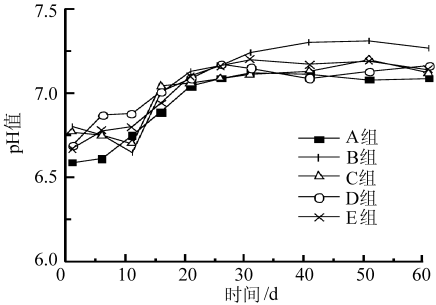


图 5 发酵过程中各处理的 pH 值变化曲线

Fig. 5 Changes of pH value during anaerobic digestion

图 6 为厌氧发酵过程中氨态氮质量浓度的变化。图中数据显示,5 组的氨态氮质量浓度变化趋势相似,均为先升高,后趋于稳定。5 组的氨态氮质量浓度分别从试验开始时的 365.3、199.0、223.6、242.8 和 280.9 mg/L,变为试验结束时的 453.6、297.1、389.1、386.0 和 474.2 mg/L,分别比开始时提高 24.1%、49.2%、74.0%、58.95%、68.8%。在整个发酵过程中,B 组的氨态氮质量浓度最低。

5 组试验的平均氨态氮质量浓度分别为：439.6、275.1、374.7、373.0、453.5 mg/L。混合原料的氨态氮质量浓度比麦秆高 35.6%~64.8%。

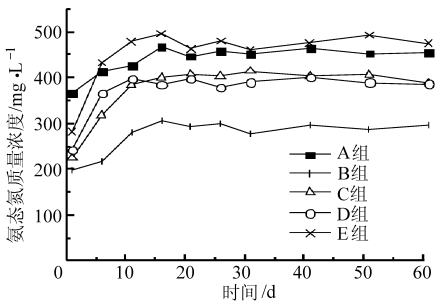


图 6 发酵过程中各处理的氨态氮变化曲线
Fig. 6 Changes of NH₃-N during anaerobic digestion

3 讨论

3.1 原料与产气量的关系

试验结果表明,麦秆和混合发酵的产气高峰出现时间比猪粪提前 10~14 d,猪粪和混合原料的产气峰值比麦秆高出 320~1 100 mL/d,产气周期缩短 6~13 d。这可能是因为预处理过程分解了麦秆中部分大分子物质,为甲烷菌的生长繁殖创造了良好条件,使秸秆和混合原料的产气高峰时间提前。但由于秸秆主要是由纤维素(31%~40%)、半纤维素(35%~48%)、木质素(11%~25%)组成^[17],高白茹^[18]等研究表明,堆肥前后稻秸中纤维素、木质素质量分数变化不大,半纤维素降解率为 12%,说明预处理过程只分解大分子物质的一小部分,仍然不适合作为厌氧发酵原料,而粪便含有大量小分子物质,在发酵过程中易被微生物分解利用,因此粪秆混合发酵提高了发酵前期的产气速率,缩短秸秆单独发酵的产气周期。刘战广^[9]等研究表明,不同粪草比的混合干发酵大大缩短了产气周期,提高了前期产气速率,本试验结果与之相似。

3.2 碳氮比与产气量的关系

Hansen^[19]等人的研究表明,沼气发酵细菌的碳需求是氮需求量的 20~30 倍,厌氧发酵的最佳碳氮比在 20~30 之间。微生物发酵时,需要充足的碳源和氮源,贫氮农作物秸秆与富氮粪便合理配比能提高沼气产量^[6]。麦秆经过预处理后,碳氮比下降到 35.1(表 1),本试验选用猪粪与麦秆配比为 1:1、2:1、3:1,计算其碳氮比分别为 22.7、18.4、16.4。猪粪与麦秆配比为 1:1 的碳氮比在 20~30 之间。

试验结果表明,猪粪与麦秆配比为 1:1 时产气量为 383.0 mL/g,VS 去除率为 42.7%,与猪粪单独发酵的产气量(381.1 mL/g)和去除率(45.9%)无显著差异。3 种混合原料的 VS 产气量和去除率与麦秆单独发酵相比有显著差异,这说明粪秆混合发酵可以调节秸秆的碳氮比,提高秸秆的产气量和利用率。

3.3 原料对甲烷的影响

沼气是一种混合气体,主要成分是甲烷和 CO₂,甲烷体积分数越高,沼气品质越高。发酵原料不同,所产气体的甲烷体积分数也不同。麦秆所产气体的甲烷体积分数在发酵初期明显高于其他原料,且麦秆在预处理过程中已经开始产气(主要成分为 CO₂),这说明麦秆在预处理过程中完成了产气初期,因此麦秆在发酵初期所产气体的甲烷体积分数高于其余 4 种原料。Zhang 等^[20]研究发现稻秆沼气的甲烷体积分数为 48.9%~51.3%,本试验测定结果 41%~47%,与之相差不大。

3.4 pH 值和氨态氮对厌氧发酵的影响

适宜的酸碱度是沼气微生物生长的必要条件。试验结果显示,在发酵初期各组原料的 pH 值较低,平均为 6.74。这是由于原料在预处理过程中,产生大量有机酸,使发酵液 pH 值较低。李杰^[21]等研究表明,甲烷菌的适宜 pH 值为 6.8~7.8, pH 值低于 6.7 时,甲烷菌活性受到抑制。猪粪刚开始产气时 pH 值仅为 6.59,甲烷菌活性被抑制,日产气量较低,之后随着有机酸被转化,使 pH 值回升,日产气量上升,导致猪粪的产气高峰出现时间比其余 4 组晚 10~14 d。

麦秆的 VS 产气量比其余 4 组的 VS 产气量低 37.9%~65.2%,这可能是秸秆原料氮素质量分数较低(0.9%)引起的,麦秆发酵料液中的氨态氮质量浓度平均仅为 275.1 mg/L,也反映了麦秆原料氮素有效营养不足。

4 结论

(1)将猪粪与麦秆混合进行厌氧发酵,可调节发酵原料的碳氮比,使猪粪的产气高峰出现时间提前,麦秆的发酵周期缩短、发酵料液的氨态氮含量提高。

(2)3 种混合原料中,猪粪与麦秆配比为 1:1 的混合原料产气特性最佳,VS 产气量为 383.0 mL/g,VS 去除率为 42.7%。

参 考 文 献

1 黄爱霞,邹晓庭.集约化畜禽养殖污染的现状及解决方法[J].甘肃畜牧兽医,2006,36(2):42~44.
2 李轶冰,杨改河,楚莉莉,等.中国农村户用沼气主要发酵原料资源量的估算[J].资源科学,2009,31(2):231~237.
Li Yibing, Yang Gaihe, Chu Lili, et al. Estimation of resource extent of dominant feedstock for household biogas in rural areas

- of China[J]. Resources Science, 2009, 31(2): 231 ~ 237. (in Chinese)
- 3 陈小华,朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 279 ~ 283.
Chen Xiaohua, Zhu Hongguang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 279 ~ 283. (in Chinese)
- 4 张望,李秀金,庞云芝,等. 稻草中温干式厌氧发酵产甲烷的中试研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 2 075 ~ 2 079.
Zhang Wang, Li XiuJin, Pang Yunzhi, et al. A pilot study on mesophilic dry anaerobic digestion of rice straw[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 2 075 ~ 2 079. (in Chinese)
- 5 南艳艳,邹华,严群,等. 秸秆厌氧发酵产沼气的初步研究[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 27(6): 64 ~ 68.
Nan Yanyan, Zou Hua, Yan Qun, et al. Elemental study on the biogas anaerobic fermentation with crops straw[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2007, 27(6): 64 ~ 68. (in Chinese)
- 6 宁桂兴,申欢,文一波,等. 秸秆厌氧消化试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1 279 ~ 1 283.
Ning Guixing, Shen Huan, Wen Yibo, et al. Study on anaerobic digestion of straw stalk[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1 279 ~ 1 283. (in Chinese)
- 7 Weiland P. Anaerobic waste digestion in Germany-Status and recent developments[J]. Biodegradation, 2000, 11(6): 415 ~ 421.
- 8 陈广银,郑正,邹星星,等. 稻草与猪粪混合厌氧消化特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 185 ~ 188.
Chen Guangyin, Zheng Zheng, Zou Xingxing, et al. Anaerobic co-digestion of rice straw and swine feces[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 185 ~ 188. (in Chinese)
- 9 刘战广,朱洪光,王彪,等. 粪草比对于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. (in Chinese)
- 10 Hills D J, Roberts D W. Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues[J]. Agricultural Wastes, 1981, 3(3): 179 ~ 189.
- 11 Lehtomäki A, Huttunen S, Rinjala J A. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: effect of crop to manure ratio[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2007, 51(3): 591 ~ 609.
- 12 李铁冰,张翠丽,杨改河,等. 温度对粪便与玉米秸秆混合厌氧消化产生特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(1): 66 ~ 72.
Li Yibing, Zhang Cuili, Yang Gaihe, et al. Effect of temperature on the characteristics of anaerobic digestion of mixture of dung and crop straw[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2009, 37(1): 66 ~ 72. (in Chinese)
- 13 郭欧燕,李铁冰,白洁瑞,等. 温度对鸡粪与秸秆混合原料厌氧发酵产气特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(6): 138 ~ 143.
Guo Ouyan, Li Yibing, Bai Jierui, et al. Effect of temperature on gasification characteristics of mixture of chicken feces and crop residue[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2009, 37(6): 138 ~ 143. (in Chinese)
- 14 王晓娇,李铁冰,杨改河,等. 牛粪、鸡粪和稻秆混合的沼气发酵特性与工艺优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 104 ~ 108.
Wang Xiaojiao, Li Yibing, Yang Gaihe, et al. Fermentation and process optimization of mixed cow dung, chicken manure and rice straw for biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 104 ~ 108. (in Chinese)
- 15 中国科学院成都生物研究所《厌氧发酵常规分析》编写组. 厌氧发酵常规分析[M]. 北京:科学出版社, 1984.
- 16 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 Manchang, Sun Kewei, Li Ruyan, et al. Study on performance of anaerobic digestion for treating municipal solid waste at different temperature[J]. Chemistry & Bioengineering, 2005, 22(9): 28 ~ 30. (in Chinese)
- 17 高洁,汤烈贵. 纤维素科学[M]. 北京:科学出版社, 1999.
- 18 高白茹,常志州,叶小梅,等. 堆肥预处理对稻秸厌氧发酵产气量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 251 ~ 256.
Gao Bairu, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei, et al. Effect of compost pre-treatment on biogas production from rice straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 251 ~ 256. (in Chinese)
- 19 Hansen R C, Keener H M, Hoitink H A J. Poultry manure composting: design guidelines for ammonia[C] // ASAE Meeting Presentation Paper No89-4075, 1989.
- 20 Zhang Ruihong, Zhang Zhiqin. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system[J]. Bioresource Technology, 1999, 68(3): 235 ~ 245.
- 21 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 Wenzhe, Xu Hongwei, 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. (in Chinese)