

鸡粪与玉米秸秆混合发酵沼气产量影响因子研究

宋籽霖¹, 郭 燕¹, 杨改河^{2*}, 任广鑫², 冯永忠², 周小武³

(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; 3.西北农林科技大学后勤服务中心, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探索物料配比、发酵温度、初始发酵浓度与产气量之间的关系以及各因素的重要性,通过自行研究设计的可控性恒温发酵装置,以玉米秸秆和鸡粪混合物为原料,在 20、25、30、35、40 ℃下按不同干物质配比及初始发酵浓度分别进行厌氧发酵,分析不同物料配比、发酵温度、初始发酵浓度对发酵过程中 pH 值、累积产气量和 TS 产气量的影响,并对影响沼气发酵的各因子进行重要性排序。结果表明,物料配比、初始发酵浓度和发酵温度是影响产气量的重要因子,鸡粪与玉米秸秆 2:1、初始发酵浓度为 20%时沼气产量最大;发酵温度在 35 ℃左右时,各处理均能达到最优发酵效果;各因子对沼气产量影响的重要性依次为温度>初始发酵浓度>配比。因此,适当调整发酵温度以及初始发酵浓度将会有效提高沼气发酵利用效率。

关键词:鸡粪;玉米秸秆;沼气;厌氧发酵

中图分类号:S216.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)08-1624-06

Factors Affecting Biogas Yields of Manure–Straw Mixture

SONG Zi-lin¹, GUO Yan¹, YANG Gai-he^{2*}, REN Guang-xin², FENG Yong-zhong², ZHOU Xiao-wu³

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Logistics Services, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract:To study the importance of material mixture ratio, temperature, initial fermentation concentration, biogas production and also the relationship among them, a simulation experiment using self-designed constant-temperature anaerobic fermentation equipment was conducted in indoor conditions. In the present study, chicken manure and rice straw mixture with different ratio and initial concentration at 20 ℃, 25 ℃, 30 ℃, 35 ℃, 40 ℃ was used as the digestion material, aiming at investigating the biogas production of chicken manure and corn straw mixture, and analyzing the effect of material mixture ratio, initial fermentation concentration and the temperature on the pH value, cumulative biogas production and biogas yield of TS, and also sequencing their importance in the fermentation. The results showed that the mixture ratio, initial fermentation concentration and temperature affected the biogas production significantly. The highest biogas production was found at 2:1 of manure–corn straw when the initial fermentation concentration was 20%; and 35 ℃ was the best temperature for fermentation. The stepwise aggression showed that the importance of temperature, initial fermentation concentration, material mixture ratio on biogas production was ranked by an order: temperature>initial fermentation concentration>material mixture ratio. Therefore appropriate adjustment of temperature and initial fermentation concentration can increase the efficiency of biogas production.

Keywords:chicken manure; corn straw; biogas; anaerobic fermentation

粪便与秸秆混合发酵既能解决农村沼气池原料短缺问题,又能调节原料碳氮比,提高发酵效率。

收稿日期:2011-12-29

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD15B03);陕西省13115 重大专项(2010ZDKG-06);2012 农村能源综合建设专项

作者简介:宋籽霖,博士生,主要从事生物质能与循环农业技术研究。

E-mail:zilinsong2005@yahoo.com.cn

* 通讯作者:杨改河 E-mail:ygh@nwsuaf.edu.cn

Weiland^[1]指出,混合厌氧发酵将是厌氧消化技术的重要发展方向。而对于混合发酵的研究也进行了很多,包括对混合发酵原料配比的研究,对混合发酵温度的研究,对混合发酵 pH 范围的研究等。如楚莉莉、王晓娇等的研究表明,粪便与秸秆两两混合及 3 种混合发酵均能显著提高沼气产量^[2-3];马焕杰、Dar 等研究发现,将秸秆、落叶等与粪便混合发酵可有效提高沼气产量和甲烷含量^[4-5];李轶冰、郭欧燕等分别研究了温

度对粪便与秸秆混合发酵的影响,发现随着温度升高,发酵周期缩短,产气速率和产气量增大^[6-7];Boualagui, Connaughton, Stephen 等^[8-10]认为虽然最适宜沼气发酵的 pH 值范围是 7~7.8,但在其他因素适宜的情况下,料液 pH 值具有一定的自我调节能力。目前关于混合厌氧发酵的研究多集中在发酵影响因子的优化,对各因素的重要性程度较少报道,而影响沼气发酵的因素很多,了解各因素对产气效果的影响程度,对提高混合发酵效率有重要意义。

因此,本文在厌氧消化理论和农村沼气发酵实践的基础上,以玉米秸秆和鸡粪混合物为发酵原料,采用批式厌氧发酵方式,研究温度、粪秆配比以及初始发酵浓度对沼气产量的影响,并在此基础上对各影响因子的重要性进行排序,以期为用户沼气的理论研究和实际应用提供参考。

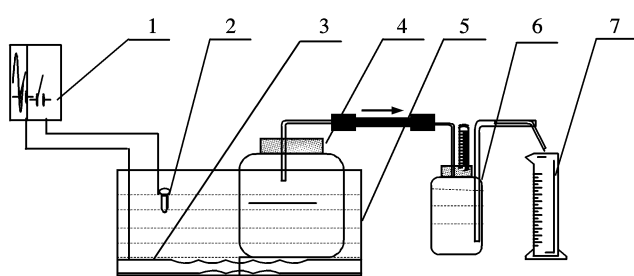
1 材料与方法

1.1 试验材料

风干玉米秸秆取自陕西杨凌沼气示范村——崔西沟,碳氮比为 51.3:1,干物质量为 82%,切碎至 3 cm 左右备用;鸡粪取自西北农林科技大学附近养鸡场,碳氮比为 9.7:1,干物质量为 28.7%;接种物为牛粪常温发酵的沼液,取自杨凌沼气示范村崔西沟,碳氮比为 26.3:1,干物质量为 7.82%。

1.2 试验装置

试验装置示意图见图 1,主要由发酵装置、集气装置及控温装置 3 部分组成,各装置间用玻璃管和橡胶管连接。选用 1000 mL 三角瓶作为集气瓶,用 10 号



1.温控箱;2.温度传感器;3.加热丝;4.发酵罐;
5.恒温水槽;6.集气瓶;7.量筒

1. Temperature controlling box; 2. Temperature sensor;
3. Heating wire; 4. Fermentor; 5. Water thermostat system;
6. Biogas-collecting bottle; 7. Measuring cylinder

图 1 可控性恒温厌氧发酵装置

Figure 1 Controllable and constant temperature anaerobic fermentation device

橡胶塞密封,2.5 L 塑料壶收集排出的水,然后用量筒进行测量。将准备好的发酵装置放置于恒温水槽内,水浴加热,温控仪与继电器显示和控制发酵温度,温度波动范围为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 试验方法

1.3.1 预处理

(1)秸秆预处理:将秸秆粉碎后置于 125 L 的塑料桶内,与体积分数 10% 左右沼液混匀后密闭堆沤,进行菌种的驯化和秸秆纤维结构的降解。

(2)沼液预处理:沼液与鲜牛粪以体积分数 10:1 混匀,密闭,室温下自然发酵($27\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

1.3.2 试验设计

试验以鸡粪和玉米秸秆混合物为原料进行发酵,在 5 L 塑料壶中装入总质量 2500 g 搅拌均匀的发酵料液,其中发酵原料 2000 g,接种物 500 g。分别设计粪秆干物质质量比 1:1、2:1、3:1 (R_1 、 R_2 、 R_3) 3 个配比处理(初始料液浓度为 8%)和 8%、12%、16%、20% (T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4) 4 个初始料液浓度处理(鸡粪与玉米秸秆干物质比 2:1),研究粪秆混合配比和初始发酵料液浓度对沼气产量的影响。每组处理做 3 次重复,以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为梯度,在 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行厌氧发酵。料液初始发酵浓度计算方法见公式(1)。

$$M_0 = \frac{\sum X_i m_i}{\sum X_i + W} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_0 为料液初始发酵浓度(%); X_i 为物料质量(g); m_i 为原料干物质百分比(%); W 为加水量(g)。

1.4 测定项目和方法

(1)干物质量(Total solid, TS)采用称重法测定,将样品放在($105\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)烘箱中烘至恒重,然后称质量。

(2)总有机碳(C)含量用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ -外热源法测定^[11]。

(3)全氮(N)含量用凯氏定氮仪(KDN-08C)测定。

(4)pH 值采用智能 pH 计(pHS-3CT 型)测量。

(5)产气量:以排水集气法收集气体,待所产的气体能正常点燃呈淡蓝色火焰后,每日上午 09:00 定时用量筒测量水的体积。

(6)TS 产气量:总产气量与发酵原料干物质质量的比值。

2 结果与讨论

2.1 不同温度下原料配比对沼气产量的影响

不同配比粪秆混合能够改变发酵底物碳氮比、影响微生物活性,进而影响沼气产量。如图 2 所示,除了 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 R_2 与 R_3 累积产气量无明显差异但均高

于 R_1 外,同一温度下,处理 R_2 均高于其他配比处理,分别比处理 R_1 和 R_3 高 7%~112%和 5%~169%,在 20 °C 时 R_2 优势尤其显著。

各处理在不同温度下的累积产气量随着温度的上升,呈先升后降的趋势,处理 R_2 、 R_3 在 35 °C 和 40 °C 下无明显差异,但均高于其他温度,处理 R_2 在 40 °C 时达到最大累积产气量 33 255 mL,这与前人的研究结果相同^[12]。鸡粪与玉米秸秆 2:1 的处理,其碳氮比接近 25:1,属于最佳发酵理论值^[13],因为微生物发酵时,对碳的需求量是氮的 20~30 倍,所以合理配比有利于产酸阶段与产甲烷阶段菌群的生长平衡,可以促进沼气发酵^[14-15]。此外,温度是影响发酵的重要因素,因为适宜的发 酵温度将提高微生物活性及呼吸强度,从而促进 CO_2 的产生,而 CO_2 是甲烷生产的底物^[16]。

石利军等^[17]研究了温度对畜禽粪便与稻秸混合发酵的影响,结果发现,相对于常温 and 高温而言,36

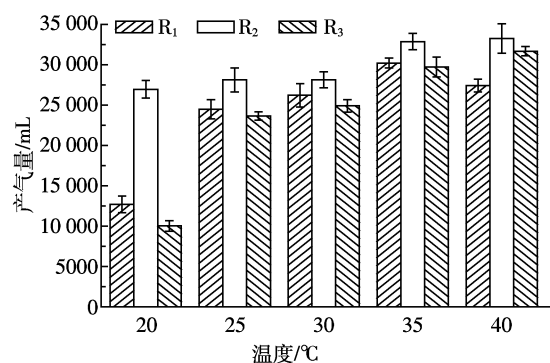


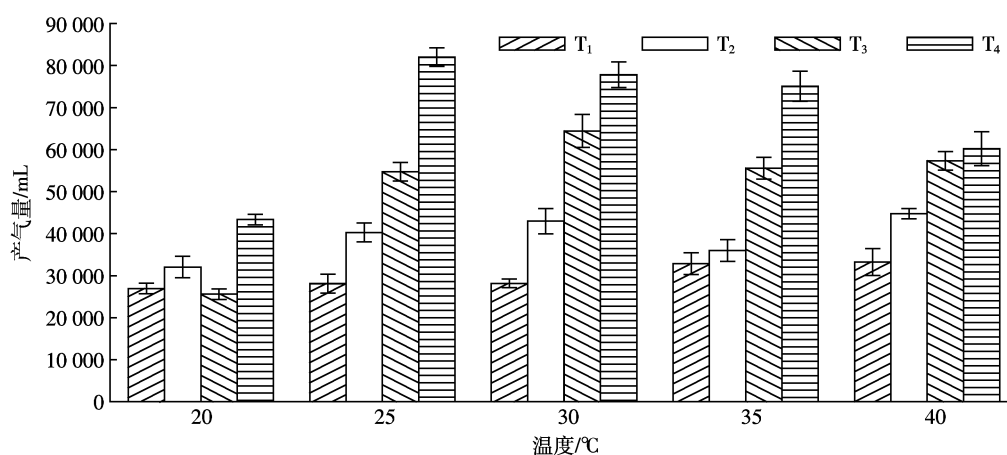
图 2 不同配比在各温度下的累积产气量

Figure 2 Cumulative biogas production of different material mixture ratio at different temperatures

°C 是最为合适的发酵温度,这与本试验结果一致。

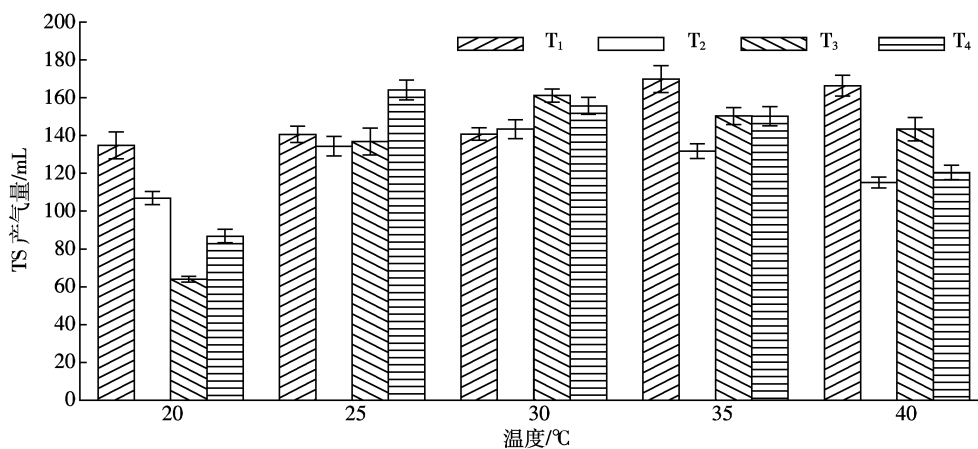
2.2 不同温度下初始发酵浓度对沼气产量的影响

沼气发酵料液浓度,指发酵料液中发酵物质的质量分数^[18]。由图 3a 可以看出,在各个试验温度下,累积



a. 温度对累积产气量的影响

a. Effect of temperature on cumulative biogas production



b. 温度对 TS 产气量的影响

b. Effect of temperature on biogas production efficiency

图 3 不同浓度处理在各温度下的产气效果

Figure 3 Effect of total solid concentration on biogas production at different temperatures

产气量随着初始发酵浓度的增大而增加,变化情况在各个温度下基本类似,处理 T_4 在各个温度下累积产气量均最高,在20、25、30、35、40℃下,产气量分别为43 390、82 010、77 815、75 075、60 200 mL。

如图3b,研究各温度下不同处理的TS产气量发现:在20、35、40℃时处理 T_1 的TS产气量最大,25℃时处理 T_4 的TS产气量最大,30℃下 T_3 、 T_4 差异不明显,但都显著高于其他处理($P<0.05$)。各处理在5个温度下的TS产气量平均值依次为 $T_1>T_4>T_3>T_2$,经多重比较分析,差异显著($P<0.05$)。常规发酵的初始发酵浓度一般为8%~10%^[19-21],本试验8%料液(处理 T_1)TS产气量最高也证明了该浓度可充分发挥发酵原料的产气潜力。很多试验表明初始发酵浓度为20%可有效提高池容产气率和池容效率^[22],但在本试验中20%料液在各温度下的平均TS产气量均略低于8%发酵料液,这主要是由于高浓度发酵需要较多接种物(30%以上)^[4],本试验接种物浓度为20%,接种物量不足引起有机酸聚集,产酸与产甲烷菌阶段失衡,导致发酵受阻。在实际操作中,高浓度发酵料液常需要循环接种以提高产气量^[23]。但在25、30℃时,TS产气量随温度呈升高趋势,与常规认识不符,这可能由于接种物预处理是在27℃左右自然发酵,菌群经过驯化,在温度条件接近时接种,能更好地发挥微生物活性。

2.3 不同处理 pH 值的动态变化

微生物的生长、繁殖要求发酵原料的酸碱度保持中性或微偏碱性,过酸过碱都会影响其活性,进而影响产气效果^[24-25]。分析本试验结果发现,各个处理发酵

料液 pH 值变化情况在5个温度下类似,如图4所示,以35℃为例,整个沼气发酵过程中,各处理 pH 值均处在动态变化中。各处理产气速率达到峰值时, pH 值通常在6.5左右,而整个发酵中除 T_4 外(图4b),其他料液 pH 值都在6.2~7.6的范围内。pH 值的动态变化,主要由于在发酵过程中产酸相与产甲烷相呈动态平衡变化:在发酵初期,由于接种物量充足,产酸菌活动旺盛,有机酸大量产生,引起了发酵液 pH 值的下降;而产甲烷菌利用底物中的有机酸,发酵产生沼气,这个时期产气量会出现一个峰值,而 pH 值却由于有机酸的减少而上升^[26]。处理 T_4 在发酵11 d时 pH 降至5.92,对照其产气速率曲线可以看出该阶段也是日产气量在产气峰值后的一个下降期。这主要是由于 T_4 料液浓度较高,而接种物量不足容易引起发酵液酸化。

Bouallagui 研究发现^[8],随着发酵的进行, pH 值在后期有所升高,本研究发现了相似的结果,即 pH 值在发酵21 d后逐渐恢复,这说明微生物逐渐适应了发酵环境,并在其生长、繁殖的过程中调整了 pH 值,使其更适合自身生长。这也表明,一方面沼气发酵需要严格的酸碱度,另一方面,在一定的酸碱范围以及严格的厌氧条件下,通过产酸菌与产甲烷菌的生长活动,产酸相与产甲烷相的进行速率会逐渐达到平衡,这在一定程度上可以调整发酵液 pH 值。

2.4 不同因素对沼气产量影响的重要性分析

依照试验结果,将粪秆配比、温度和初始发酵浓度分别作为自变量 x_1 、 x_2 、 x_3 ,将TS产气量作为因变量 y ,对 y 进行正态分布检验后,用SPSS进行逐步回归

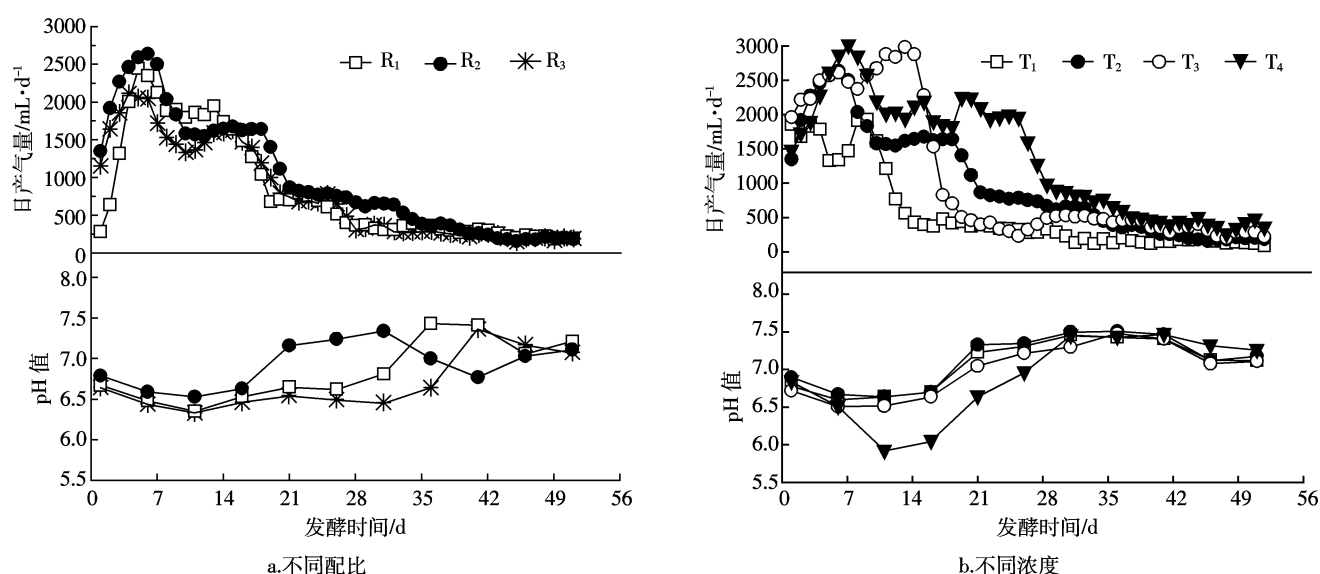


图4 不同处理产气速率与pH值变化

Figure 4 Change in pH values and biogas production rate of different treatments

分析,筛选出对沼气产量影响最为显著的因子,并对影响因子重要性进行排序。

表 2 表明随着自变量被逐步引入回归方程,自变量与因变量 y 之间的相关系数 R 和决定系数 R^2 在逐渐增大,这表明引入的自变量对产气量的作用在增加,而在表 2 中粪秆配比(x_1)作为对产气量影响相对最弱的因素被筛除。

表 2 逐步回归模型输出结果				
Table 2 Result of stepwise regression				
Model	R	R^2	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0.807a	0.651	0.647	21.535
2	0.916b	0.839	0.814	23.827

注:a 包括发酵温度;b 包括发酵温度和初始发酵浓度

由表 3 可知,自变量 x_2 、 x_3 对 y 的直接作用分别为: $P_{2y}=0.858\ 2$, $P_{3y}=0.297\ 7$,显著性检验结果表明 x_2 、 x_3 的偏回归系数显著性均小于 0.01,说明自变量与因变量之间存在极显著性差异,有统计学意义。因此,从各因子对产气量的作用可以看出,温度对于产气量的影响最大,初始发酵浓度次之,配比影响最小。粪秆配比主要通过调整原料碳氮比提高沼气产量,而通常认为最适合发酵的碳氮比为 25:1~30:1,但也有研究表明单一原料发酵的人类粪(碳氮比约为 2.9:1)、小麦秸秆(碳氮比约为 70:1)也能正常产气^[27-28],这也与本试验结果吻合,即碳氮比对沼气产量的影响相对较小。而表 2 中反映出因子 x_2 、 x_3 的决定系数 $R^2=0.839$,则剩余因子($\sqrt{1-R^2}$)为 0.401,该值较大,表明还有其他一些影响较大的因素没有考虑在内,如 pH 值、接种物浓度、碳氮比、秸秆预处理程度等。因此,对沼气产量影响因素的全面分析还有待进一步研究。

3 结论

(1)以鸡粪玉米秸秆混合物为原料在 20、25、30、35、40℃下进行沼气发酵,鸡粪与玉米秸秆配比为 2:1,初始发酵浓度为 20%的发酵料液累积产气量最大,而

8%发酵料液平均 TS 产气量最高。

(2)粪秆配比、发酵温度、初始发酵浓度对沼气产量影响重要性的排序为温度>初始发酵浓度>粪秆配比。因此,适当调整发酵温度以及初始发酵浓度将会有效提高沼气发酵利用效率。

参考文献:

[1] Weiland P. Anaerobic waste digestion in Germany—Status and recent developments[J]. *Biodegradation*, 2001, 11(6):415–421.

[2] 楚莉莉,李轶冰,杨改河,等.猪粪麦秆不同比例混合厌氧发酵特性试验[J].*农业机械学报*, 2011, 42(4):100–104.

CHU Li-li, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Characteristics of codigestion of pig dung and wheat straw in various ratios[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4):100–104.

[3] 王晓娇,李轶冰,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 Xiao-jiao, LI Yi-bing, YANG Gai-he, 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.

[4] 马传杰,花日茂,郭亮.接种量对牛粪厌氧干发酵的影响[J].*家畜生态学报*, 2008, 29(5):81–84.

MA Chuan-jie, HUA Ri-mao, GUO Liang. Effect of inoculation concentration on dry anaerobic fermentation[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2008, 29(5):81–84.

[5] Dar H G, Tandon S M. Biogas production from pretreated wheat straw, lantana residue, apple and peach leaf litter with cattle dung[J]. *Biol Wastes*, 1989, 21: 75–83.

[6] 李轶冰,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 Yi-bing, ZHANG Cui-li, YANG Gai-he, 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: Natural Science Edition*, 2009, 37(1):66–72.

[7] 郭欧燕,李轶冰,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)*[J]. 2009, 37(6):137–144.

GUO Ou-yan, LI Yi-bing, BAI Jie-rui, et al. Effect of temperature on

表 3 回归系数输出结果						
Table 3 Result of regression coefficients						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		
		B	Std. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constant)	75.699 2	10.172 5		6.544 7	0.022 4
	发酵温度	425.455 4	70.650 7	0.858 2	7.856 6	0.000 1
2	(Constant)	25.767 7	8.295 3		1.656 9	0.004 7
	发酵温度	392.535 4	37.835 8	0.773 9	7.102 5	0.000 0
	初始发酵浓度	6.816 2	0.557 2	0.297 7	2.115 7	0.001 5

- gasification characteristics of mixture of chicken feces and crop residue [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2009, 37(6): 137–144.
- [8] Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, et al. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste[J]. *Process Biochemistry*, 2004, 39(12): 2143–2148.
- [9] Connaughton S, Collins G O, Flaherty V. Development of microbial community structure and activity in a high-rate anaerobic bioreactor at 18°C [J]. *Water Resource*, 2006, 40(5): 1009–1017.
- [10] Stephen R H, Frederick G P. Recent development in hydrogen management during anaerobic biological wastewater treatment[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1986, 28(3): 585–602.
- [11] 中国科学院成都生物研究所. 厌氧发酵常规分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Science. Routine analysis of anaerobic fermentation[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [12] 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): 1279–1283.
- NING Gui-xing, SHEN Huan, WEN Yi-bo, et al. Study on anaerobic digestion of straw stalk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1279–1283.
- [13] Hansen R C, Keener H M, Houtink H A J. Poultry manure composting: Design guidelines for ammonia[C]. ASAE Meeting Presentation Paper No. 89–4075, 1989.
- [14] Bardiya N, Gaur A C. Effects of carbon and nitrogen ratio on rice straw biomethanation[J]. *Journal of Rural Energy*, 1997, 4(1–4): 1–16.
- [15] Fry L J Merrill. Methane digesters for fuel gas and fertilizer[M]. Santa Cruz: Newsletter No. 3, New Alchemy Institute, CA. 1973.
- [16] 樊美婷, 刘 科, 刘建禹. 高寒地区沼气工业化生产配套加热系统的初步设计[J]. 农机化研究, 2008(3): 105–107.
- FAN Mei-ting, LIU Ke, LIU Jian-yu. Preliminary design of industrial production in alpine regions gas heating system supporting[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(3): 105–107.
- [17] 石利军, 班立桐, 刘惠芬, 等. 温度对畜禽粪便稻草混合干式厌氧发酵的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 782–786.
- SHI Li-jun, BAN Li-tong, LIU Hui-fen, et al. Effect of different temperature on dry anaerobic digestion of animal manure and straw [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 782–786.
- [18] 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- ZHANG Quan-guo. Biogas technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [19] 白洁瑞, 李轶冰, 郭欧燕, 等. 不同温度条件粪秆结构配比及尿素、纤维酶对沼气产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 188–193.
- BAI Jie-rui, LI Yi-bing, GUO Ou-yan, et al. Effects of ratios of manure and straw, urea and cellulose on biogas yields at different temperatures[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2): 188–193.
- [20] 张翠丽, 杨改河, 任广鑫, 等. 温度对4种不同粪便厌氧消化产气效率及消化时间的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 209–212.
- ZHANG Cui-li, YANG Gai-he, REN Guang-xin, et al. Effects of temperature on biogas production efficiency and fermentation time of four manures[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(7): 209–212.
- [21] 林 聪. 沼气技术理论与工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 34–35.
- LIN Cong. Theory and engineering of biogas technology[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2006: 34–35.
- [22] 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): 2075–2079.
- ZHANG Wang, LI Xiu-jin, PANG Yun-zhi, et al. A pilot study on mesophilic dry anaerobic digestion of rice straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 2075–2079.
- [23] 李 冬, 马隆龙, 袁震宏. 华南地区稻秸常温干式厌氧发酵试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 176–179.
- LI Dong, MA Long-long, YUAN Zhen-hong. Experimental study on dry anaerobic digestion of rice straw at ambient temperature in South China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12): 176–179.
- [24] 成晓杰, 仇天雷, 王 敏, 等. 低温沼气发酵微生物区系的筛选及其宏基因组文库构建[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30(11): 50–55.
- CHENG Xiao-jie, QIU Tian-lei, WANG Min, et al. Screening of microbial community in biogas fermentation under low temperature and construction of its metagenome library[J]. *China Biotechnology*, 2010, 30(11): 50–55.
- [25] Handsman J. Metagenomics: Application of genomics to uncultured microorganism[J]. *Microbial Mol Biol Rev*, 2004, 68(4): 669–685.
- [26] 覃国栋, 刘荣厚, 孙 辰. NaOH 预处理对水稻秸秆沼气发酵的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 59–63.
- QIN Guo-dong, LIU Rong-hou, SUN Chen. Effects of different concentrations of NaOH pretreatment on anaerobic digestion of rice straw for biogas production[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Suppl 1): 59–63.
- [27] 秦佳佳, 李轶冰, 杨改河, 等. 人粪与不同原料配比对厌氧发酵产气影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 571–577.
- QIN Jia-jia, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Effect of ratios of human feces mixed with different materials in anaerobic fermentation on biogas production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 571–577.
- [28] 宋籽霖, 李轶冰, 杨改河, 等. 总固体质量分数对玉米和小麦秸秆中温发酵产气效果的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(12): 81–86.
- SONG Zi-lin, LI Yi-bing, YANG Gai-he, et al. Effect of total solid concentration on straw biogas production at moderate temperature[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(12): 81–86.