

温度对秸秆厌氧消化产气量及发酵周期影响的研究

张翠丽^{1,3}, 杨改河^{2,3}, 卜东升⁴, 楚莉莉^{1,3}, 任广鑫^{2,3}, 冯永忠^{2,3}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 3.陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 4.新疆生产建设兵团农一师农业科学研究所, 新疆 阿拉尔 843300)

摘要:温度是影响沼气产气效率和发酵周期的主要生态因子,探索农作物秸秆产气量和发酵周期与发酵温度之间的关系,是解决农村户用沼气原料选择、确定最佳发酵温度和提高作物秸秆资源化利用的效率的关键;本试验通过自行研究设计的可控性恒温发酵装置,以麦秆、稻秆和玉米秆作为发酵原料,以常温厌氧发酵池的底物为接种物,在总固体(TS)质量分数为8%的条件下进行批量试验,在25~40℃温度范围内,每5℃设一个温度梯度,研究了不同发酵温度对产气速率、产气量及发酵时间的影响,并用SAS软件对各因素进行多元回归分析,建立了回归方程,得出各因素的最优值。结果表明,在一定的温度范围内,3种秸秆厌氧发酵的产气速率的峰值出现的时间和发酵周期是随着温度的升高而缩短,其峰值和产气量是随温度的升高而增加。

关键词:温度;秸秆;厌氧消化;发酵时间;数学模型

中图分类号:S216.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-2069-06

Effect of Temperature on Biogas Production and Fermentation Period Length from the Anaerobic Digestion of Crop Residue

ZHANG Cui-li^{1,3}, YANG Gai-he^{2,3}, BU Dong-sheng⁴, CHU Li-li^{1,3}, REN Guang-xin^{2,3}, FENG Yong-zhong^{2,3}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;2.College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3.The Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling 712100, China; 4.Institute of Agricultural Sciences of the First Agricultural Division, Production and Construction Corps in XinJiang, Alaer 843300, China)

Abstract: Temperature is one of the main factors influencing fermentation period length and biogas production efficiency from the anaerobic digestion of crop residue. An improved understanding of the influence of temperature on the anaerobic digestion process is important for making recommendations regarding the choice of fermentation material and digestion conditions for biogas production in rural areas. The overall effect would be an increase in the utilization efficiency of crop residue. The experiment was to study the influence of temperature on the biogas yield, biogas production rate, and the length of the fermentation period from three types of crop residue: wheat, rice, and corn. Anaerobic digestion tests were conducted in a controllable constant temperature fermentation device that we designed. A series of experiments were conducted with temperatures increasing in increments of 5℃ from 25~40℃. The total solid (TS) of the fermentation material was 8% wt. The substrate was inoculated with material from a household biogas pool. Multiple regression analysis of the data was conducted and regression equations were established using SAS software. Based on these results, optimal values for temperature and digestion time were determined to maximize biogas yield per unit dry matter. The results showed that the time to get maximum biogas production rate and the overall length of the fermentation period were shortened as temperature increased within a certain range for all three types of straw. In addition, maximum biogas production rate and biogas yield increased with temperature increasing.

Keywords: temperature; crop residue; anaerobic digestion; fermentation period; mathematical model

据统计,中国每年可生产约6亿多吨的作物秸秆,占总生物质能资源的一半^[1,2]。秸秆资源的综合利用,已引起社会的普遍关注。沼气发酵是提高作物秸秆资源化利用效率的可行途径。它不仅能解决农村的燃能和肥源问题,而且实现了农作物废弃物多层次资源化利用,已取得一定的成效^[3-5]。沼气发酵过程是一个复杂的物理化学反应过程,温度是影响沼气发酵的重要因素。早在20世纪30年代开始,Buswell等其他学者^[6-8]就厌氧微生物和产气条件之间的关系进行了系统研究,发现在厌氧发酵的过程中,温度对其影响尤为重要。理论上,10~60℃的范围内,沼气均能正常发酵产气。国内外就温度对厌氧发酵的影响已有相关研究^[9-20],但发酵温度对沼气产气量和原料发酵时间长短的影响没有确定的数据和纪录,很多地区根据理论值进行指导生产,结果造成人力、物力和财力的浪费。

本研究在厌氧发酵及农村沼气发酵的理论和实践基础上,将温度、产气量和发酵时间作为影响沼气发酵的主要因素,研究了不同发酵温度对不同秸秆厌氧发酵产气速率、产气量和发酵时间长短的影响,并用SAS软件对各影响因子进行多元回归分析,建立了回归方程,得出各影响因子的最优值;旨在为实现沼气发酵的可控化,解决农作物秸秆不合理利用造成的环境污染问题和提高农作物秸秆的资源化利用率,为制定农业环境污染源头治理的对策提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 发酵原料

发酵原料为麦秆、稻秆和玉米秆,采自西北农林科技大学附近沼气示范村(崔西沟)的农户家。将秸秆粉碎后放在125 L塑料桶内加水,预处理7 d,每隔2 d搅拌1次,以分解破坏秸秆的纤维木质素和表面蜡质层,提高原料利用率和产气效果。最后加水调至总固体(TS)为8%,碳氮比控制在(25~30):1,然后装瓶备用。

1.1.2 接种物

本试验所选用的接种物为常温厌氧发酵沼气的发酵底物。取自西北农林科技大学附近沼气示范村(崔西沟)的农户家。

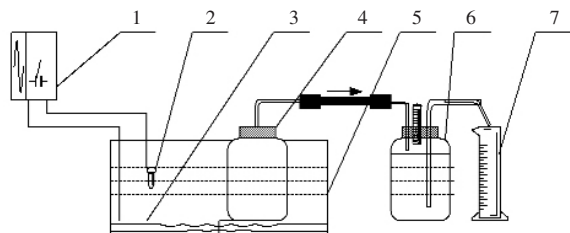
1.2 试验方案

采用4套发酵水槽同时进行试验。温度分别控制

在25、30、35、40℃。每组试验设两个重复,试验条件相同。每个发酵壶内装入经过预处理的发酵原料3 000 g,接种物500 g。在试验过程中,每个发酵壶均同时加料,同时开始。采用排水集气法,每日定时测量累积产气量。

1.3 试验装置

本试验所用试验装置为陕西省循环农业工程技术研究中心实验室自行设置的可控性恒温厌氧发酵装置,由发酵装置、集气装置及控温装置三部分组成,如图1。为了便于实际操作和节约成本,选用5 L塑料壶作为发酵瓶。塑料壶用适当大小的橡胶塞密封,橡胶塞上设有导气口。集气装置由1 000 mL三角瓶和2.5 L塑料壶连接而成。发酵装置和集气装置由橡胶管连接。将准备好的发酵装置放置于水槽内,每个恒温水槽内可装18个发酵壶(可同时做9个处理,2次重复)。4个恒温水槽同时开始进行试验,水浴加热,温控仪和继电器显示和控制发酵温度,温度波动范围为 ± 1 ℃。



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

图1 可控性恒温厌氧发酵装置

Figure 1 Controllable and constant temperature anaerobic fermentation device

1.4 分析项目及方法

- (1)总固体(TS):烘干法;
- (2)挥发性固体(VS):灼烧法;
- (3)气体成分:沼气体分析器 ZS-2 型;
- (4)碳氮比:C以VS估算($C=0.47VS$),N以凯氏测氮法测定。

2 结果与讨论

2.1 温度对秸秆产气量的影响

2.1.1 温度对麦秆产气量影响的变化曲线图

图2和图3为麦秆在不同发酵温度下产气速率和累积产气量的变化曲线图。其他条件相同的情况下,以麦秆作为发酵原料,在反应初期,25℃时产气

速率在第 10 d 达到最大峰值为 $1\,550\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$; 发酵反应由于某些原因(装置的气密性或其他原因)只进行了 46 d, 最终累积产气量为 26.2 L 左右; 在前 30 d 和前 37 d 累积产气量分别约占总累积产气量的 78.7% 和 90%。30 °C 时产气速率在第 6 d 达到最大峰值为 $2\,200\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$; 经过 89 d 的发酵反应, 最终累积产气量为 47.9 L 左右; 前 30 d 和前 62 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 67.2% 和 90%。35 °C 时产气速率在第 4 d 达到最大峰值为 $2\,180\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$, 经过 86 d 的发酵反应, 最终累积产气量为 53.0 L 左右; 前 30 d 和前 64 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 68.7% 和 90%。40 °C 时产气速率在第 12 d 达到最大峰值为 $2\,620\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$; 发酵反应进行了 89 d, 最终累积产气量为 63.2 L 左右; 前 30 d 和前 59 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 73% 和 90%。由以上分析得知, 麦秆在 4 个温度试验组的累积产气量比较为:

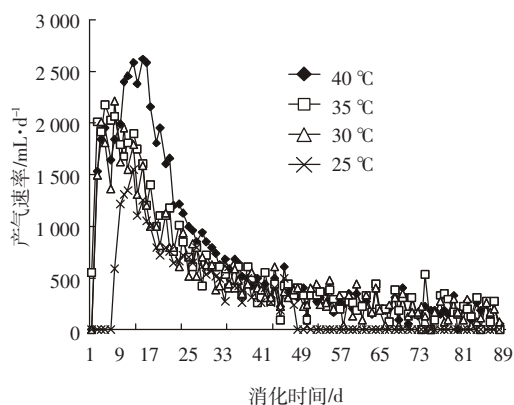


图 2 麦秆在不同发酵温度下的产气速率

Figure 2 Biogas production rate of wheat straw at different temperatures

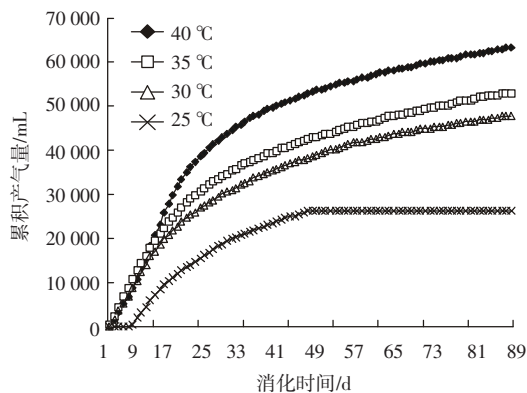


图 3 麦秆在不同发酵温度下的累积产气量

Figure 3 Cumulative biogas yield of wheat straw at different fermentation temperatures

$40\text{ }^{\circ}\text{C}>35\text{ }^{\circ}\text{C}>30\text{ }^{\circ}\text{C}>25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.2 温度对稻秆产气量影响的变化曲线图

图 4 和图 5 为稻秆在不同发酵温度下产气速率和累积产气量的变化曲线图。其他条件相同的情况下, 以稻秆作为发酵原料, 在反应初期, 25 °C 时产气速率在第 8 d 达到最大峰值为 $1\,380\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$; 发酵反应进行了 89 d, 最终累积产气量为 34.9 L 左右; 在前 30 d 和前 64 d 累积产气量分别约占总累积产气量的 64% 和 90%。30 °C 时产气速率在第 2 d 达到最大峰值为 $1\,980\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$; 经过 88 d 的发酵反应, 最终累积产气量为 39.3 L 左右; 前 30 d 和前 61 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 69.5% 和 90%。35 °C 时产气速率在第 4 d 达到最大峰值为 $2\,055\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$, 经过 87 d 的发酵反应, 最终累积产气量为 46.5 L 左右; 前 30 d 和前 62 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 70.6% 和 90%。40 °C 时产气速率在第 6 d 达到最大峰值为 $2\,260\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$; 发酵反应进行了 80 d, 最终累积产气量为 53.3 L 左右; 前 30 d 和前 57 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 73.6% 和 90%。由以上分析得知, 稻秆在 4 个温度试验组的累积产气量比较为:

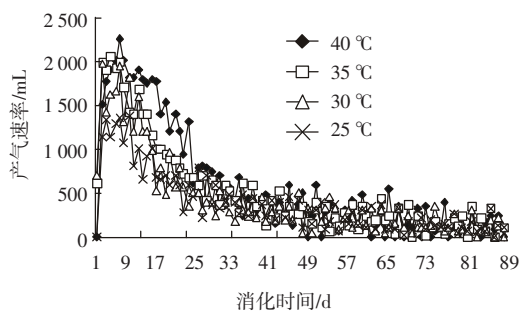


图 4 稻秆在不同发酵温度下的产气速率

Figure 4 Biogas production rate of rice straw at different temperature

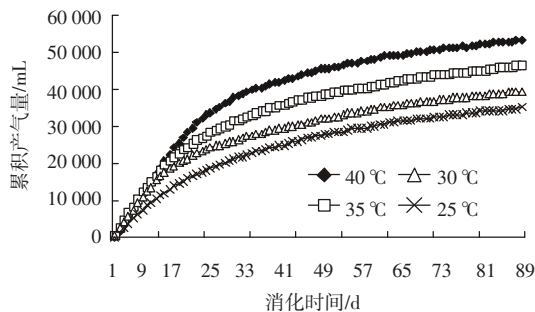


图 5 稻秆在不同发酵温度下的累积产气量

Figure 5 Cumulative biogas yield of rice straw at different temperature

40℃>35℃>30℃>25℃。

2.1.3 温度对玉米秆产气量影响的变化曲线图

图 6 和图 7 为玉米秆在不同发酵温度下产气速率和累积产气量的变化曲线图。其他条件相同的情况下,以玉米秆作为发酵原料,在反应初期,25℃时产气速率在第 6 d 达到最大峰值为 1 640 mL·d⁻¹;发酵反应进行了 81 d,最终累积产气量为 37.1 L 左右;在前 30 d 和前 67 d 累积产气量分别约占总累积产气量的 59.2%和 90%。30℃时产气速率在第 3 d 达到最大峰值为 2 500 mL·d⁻¹;经过 89 d 的发酵反应,最终累积产气量为 49.2 L 左右;前 30 d 和前 64 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 66.3%和 90%。35℃时产气速率在第 3 d 达到最大峰值为 2 620 mL·d⁻¹,经过 89 d 的发酵反应,最终累积产气量为 54.5 L 左右;前 30 d 和前 60 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 69.2%和 90%。40℃时产气速率在第 5 d 达到最大峰值为 2 450 mL·d⁻¹;发酵反应进行了 83 d,最终累积产气量为 62.4 L 左右;前 30 d 和前 59 d 的累积产气量分别约占总累积产气量的 70.5%和 90%。由以上分析得知,玉米秆在 4 个温度试验组的累积产气量较为:40℃>35℃>30℃>25℃。

2.2 温度对秸秆厌氧消化发酵周期的影响

厌氧消化发酵周期的长短意味着在相同时间内

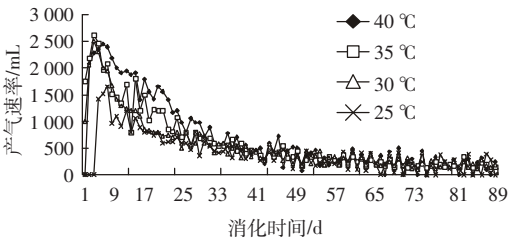


图 6 玉米秆在不同发酵温度下的产气速率

Figure 6 Biogas production rate of corn straw at different temperature

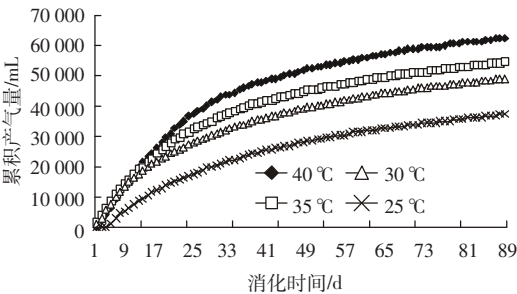


图 7 玉米秆在不同发酵温度下的累积产气量

Figure 7 Cumulative biogas yield of corn straw at different temperature

消化处理秸秆废弃物的多少,可以直接反映厌氧消化的反应效率,在实际生产中具有重要的生态和经济意义。一般在实际生产中,以产气量达到总产气量的 90%以上即可认为发酵基本完成^[9]。由图 2、图 4 和图 6 可知,麦秆、稻秆和玉米秆在不同发酵温度下的厌氧发酵过程中其产气速率均经历了多个波峰,且随着温度的不同,各波峰出现的时间和峰值的大小均有差异。其中,麦秆在 25、30、35 和 40℃时的产气速率分别在第 10、3、2 和 4 d 依次达到各自的第 1 个峰值 1 550、2 010、2 030 和 1 960 mL·d⁻¹。稻秆在 25、30、35 和 40℃时的产气速率分别在第 3、2、2 和 6 d 依次达到各自的第 1 个峰值 1 340、1 980、1 995 和 2 260 mL·d⁻¹。

玉米秆在 25、30、35 和 40℃时的产气速率分别在第 6、3、3 和 5 d 依次达到各自的第 1 个峰值 1 640、2 500、2 620 和 2 450 mL·d⁻¹。由 2.1.1、2.1.2 和 2.1.3 的分析结果可以得出,麦秆、稻秆和玉米秆在 4 个温度组下产气量达到总产气量的 90%时所需的时间是随着温度的升高而缩短的。由以上分析得出,3 种发酵原料的产气速率的峰值出现的时间和发酵周期在一定温度范围内是随着温度的升高而缩短,其峰值和产气量是随温度的升高而增加。

2.3 不同温度下不同秸秆的干物质累积产气量

表 1 为不同发酵温度下不同秸秆厌氧消化的干物质累积产气量。由表显示,3 种发酵原料的干物质累积产气量与温度成正相关,均随温度的升高而升高。稻秆的干物质累积产气量在 4 个温度组下均明显小于其他 2 种发酵原料的干物质累积产气量。

表 1 不同发酵温度条件下的干物质累积产气量

Table 1 Cumulative biogas yield per unit dry matter from anaerobic digestion at different fermentation temperatures

温度/℃	麦秆/mL·g ⁻¹ TS	稻秆/mL·g ⁻¹ TS	玉米秆/mL·g ⁻¹ TS
25	109.21	145.56	154.71
30	199.38	163.65	204.88
35	220.85	193.60	227.27
40	263.19	221.87	260.10

2.4 模型的建立

用 SAS 软件对各影响因子进行多元回归分析,利用 REG(Regression)过程进行多项式回归,需要在数据步中进行变量转换,但与 GLM (General Linear Model)过程相比,可以比较方便的进行变量选择,但其对响应面稳定点的分析不足^[20]。故利用 RSREG

(Response Surface Regression) 过程进行多项式回归, 得出 3 种秸秆厌氧消化累积产气量($f_{(T,d)}$)与发酵温度(x_T)和发酵时间(x_d)的函数表达式如(表 2)。

3 种秸秆厌氧消化回归方程模型中的一次项、二次项和交叉项均达到显著水平($P<0.05$);其中麦秆的交叉项、稻秆的一次项及交叉项和玉米秆的一次项均达到极显著水平($P<0.01$);从逐步回归的方差分析结果看,回归模型达到显著水平。

通过 RSREG 过程寻找最优响应曲面的稳定点,从而得出发酵温度(x_T)和发酵时间(x_d)的最优值及可望获得的最大累积产气量($f_{\max}$)如表 3。

表 3 各影响因子的最优值及对应最大干物质累积产气量
Table 3 Optimal temperature and digestion time for anaerobic digestion of different types of crop residue and the corresponding biogas yield per unit dry matter

秸秆	$x_T/^{\circ}\text{C}$	x_d/d	$f_{\max}/\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$
麦秆	61.7	98	347.84
稻秆	56	100	267.59
玉米秆	52.5	106	287.28

注:回归结果中最大干物质累积产气量($f_{\max}$)= $(f_{(T,d)}) / 240 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$ (240 g 为试验中原料的干物质量)。

从表 3 可以看出,麦秆发酵所需的最佳温度最高,分别比稻秆和玉米秆高出 5.7 $^{\circ}\text{C}$ 和 9.2 $^{\circ}\text{C}$;玉米秆发酵时间最长,稻秆和玉米秆发酵所需天数仅相差 2 d;麦秆的每克干物质累积产气量比稻秆的每克干物质累积产气量高出 80.25 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}\text{TS}$,3 种秸秆作为发酵原料的比较为:麦秆>玉米秆>稻秆。由回归分析结果得出,影响麦秆、稻秆和玉米秆厌氧发酵的温度、发酵时间的最优值均超过本实验范围,仍需要进一步试验验证。

3 结论

本试验在完全模拟农村户用沼气发酵的过程中,研究了温度对不同秸秆产气量,发酵速率和发酵时间的影响,从试验结果可见:

(1)由 SAS 软件对各影响因素进行多元回归分析结果得出 3 种秸秆作为发酵原料的比较为:麦秆>玉米秆>稻秆,这与试验结果相吻合。

(2)由试验结果得知 3 种秸秆在 4 个温度组下均能正常产气。在一定的温度范围内,3 种秸秆厌氧发酵的产气速率的峰值出现的时间和发酵周期是随着温度的升高而缩短,其峰值和产气量是随温度的升高而增加。

(3)由回归分析结果得出,影响麦秆、稻秆和玉米秆厌氧发酵的温度、发酵时间的最优值均超过本实验范围,仍需要进一步试验验证。

参考文献:

[1] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等.中国农作物秸秆资源及其利用现状[J].农业工程学报,2002,18(3):87-91.
HAN Lu-jia, YAN Qiao-juan, LIU Xiang-yang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(3): 87-91.

[2] 管小冬.农作物秸秆资源利用浅析[J].农业工程学报,2006,22(增 1): 104-106.
GUAN Xiao-dong. Analysis of crop stalk utilization [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Supp1):104-106.

[3] 邓良伟,谭小琴,李 建,等.利用秸秆堆肥过程处理猪场废水的研究[J].农业工程学报,2004,20(6):255-259.
DENG Liang-wei, TAN Xiao-qing, LI Jian, et al. Treatment and reuse of piggery waste water [J].*Transactions of the CSAE*, 2004, 20 (6):255-259.

[4] 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 Xiao-hua, ZHU Hong-guang. Research progress and prospect on producing biogas from crop straws[J].*Transactions of the CSAE*, 2007, 23 (3):279-283.

[5] 熊承永,李 健,黄利宏.户用沼气池秸秆利用浅析[J].可再生能源,2003,3(109):44-45.
XIONG Cheng-yong, LI Jian, HUANG Li-hong. Simple analysis on straw utilization for household biogas digester [J]. *Renew Able Energy*, 2003, 3(109):44-46.

[6] Buswell A M, Hatfield W D. Laboratory studies of sludge digestion[C]// Miller T L. Anaerobic Fermentations. Urbana: State of Illinois Department of Registration and Education,1936. 25-32.

[7] Angellidaki I, Arhing B K. Anaerobic digestion of manure at different

表 2 不同秸秆厌氧消化的回归方程
Table 2 Regression equations for biogas yield from different types of crop residue

秸秆	回归方程	离回归标准误/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	复相关系数
麦秆	$f_{(T,d)}=4\ 465.11x_T+333.42x_d+16.10x_Tx_d-53.26x_T^2-5.07x_d^2-70\ 593.87$	185.66	0.969 4
稻秆	$f_{(T,d)}=-118.78x_T+515.49x_d+5.66x_Tx_d-14.48x_T^2-3.92x_d^2-18\ 581$	83.18	0.988 8
玉米秆	$f_{(T,d)}=4\ 065.29x_T+614.31x_d+7.46x_Tx_d-46.25x_T^2-4.73x_d^2-70\ 489$	108.59	0.994 9

ammonia loads: effect of temperature[J].*Water Research*, 1994, 28:727–731.

[8] Ahring B K, Ibrahim A A, Mladenovska Z. Effect of temperature increase from 55 °C to 65 °C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure [J]. *Water Research*, 2001, 35: 2446–2452

[9] 刘荣厚,郝元元,武丽娟.温度条件对猪粪厌氧发酵沼气产气特性的影响[J].可再生资源,2006,5(129):32–35.

LIU Rong-hou, HAO Yuan-yuan, WU Li-juan. Effect of temperature on biogas yield and property during anaerobic fermentation process of pig dung[J]. *Renew Able Energy*, 2006, 5(129):32–35.

[10] 周富强,谭建纯. 厌氧消化时间对养猪场废水处理效果的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊): 179–181.

ZHOU Fu-qiang, TAN Jian-chun. Effect on the time of anaerobic digestion for the piggery easte eater treatment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006,25(supp):179–181.

[11] 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,2005,9:28–30.

WU Man-chang, SUN Ke-wei, LI Ru-yan, et al. Study on performance of anaerobic digestion for treating municipal soil waste at different temperature [J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2005,9:28–30.

[12] 庞云芝,李秀金,罗庆明. 温度和化学预处理对玉米秸厌氧消化产气量的影响[J].生物加工过程, 2005,3(1):37–41.

PANG Yun-zhi, LI Xiu-jin, LUO Qing-ming. Effect of temperature and chemical pretreatment on anaerobic biogas if ication of corn stalk [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2005, 3(1):37–41.

[13] 王丽丽,王忠江,梁俊爽,等.20 °C~30 °C牛粪厌氧发酵产气特性的试验[J].东北农业学报,2006,37(6):791–795.

WANG Li-li, WANG Zhong-jiang, LIANG Jun-shuang, et al. Study on anaerobic fermentation of dairy cattle manure at 20 °C~30 °C [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2006, 37(6):791–795.

[14] 李连华,马隆龙,袁振宏,等.农作物秸秆的厌氧消化试验研究[J].农业环境科学学报,2007,26(1):335–338.

LI Lian-hua, MA Long-long, YUAN Zhen-hong, et al. Study on anaerobic digestion of straw stalk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):791–795.

[15] Santha H,Sung S.Valuable by-products recovery from cattle wastes using temperature-phased anaerobic digestion process[C]//Hanze M. WEFs Biosolids Specialty Conference. Verona: Lago Orta Press, 2001. 120–136.

[16] Kettunen R H, Rintala J A. The effect of low temperature (5~20°C) and adaptation on the methanogenic activity of biomass [J].*Appl Microbiol Biotechnol*,1997,48:570–576.

[17] Angellidaki I, Arhing B K. Anaerobic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature[J]. *Water Research*,1994,28:727–731.

[18] Ahring B K, Ibrahim A A, Mladenovska Z. Effect of temperature increase from 55 °C to 65 °C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure[J]. *Water Research*,2001,35:2446–2452.

[19] 邱 凌,杨改河,毕于运.中国西部发展农村沼气的条件与对策研究[J].干旱地区农业研究,2005, 23(3):200–204.

QIU Ling, YANG Gai-he, BI Yu-yun. Study on the optimal selective culture medium in populusx euramericana ‘Neva’ transformation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3):200–204.

[20] 四川省生物研究所.沼气(资料汇报)[G](第二集).重庆:科学技术文献出版社重庆分社, 1977.

Biological Institute in Sichuan Province. Biogas (data reporting)[G] (the second). Scientific and Technical Documents Publishing House Chongqing Branch,1977.

[21] 胡小平,王长发.SAS 基础及统计实例教程[M].西安:西安地图出版社,2001.

HU Xiao-ping, WANG Chang-fa. SAS basis and examples of statistical directory[M]. Xi’ An: Xi’an Cartographic Publishing House, 2001.