

不同温度条件下农作物秸秆产气效率研究

楚莉莉<sup>1,3</sup>, 杨改河<sup>2,3 \*</sup>, 张翠丽<sup>1,3</sup>, 任广鑫<sup>2,3</sup>, 冯永忠<sup>2,3</sup>

(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)

**摘 要:** 采用自行设计的可控性恒温发酵装置,选取了小麦秸秆、水稻秸秆和玉米秸秆 3 种单一原料为发酵原料,以 5 为一个步长,设定了 7 个恒定温度 10、15、20、25、30、35、40 下的发酵方案;试验结果表明 7 个温度梯度下,3 种原料均能正常发酵产生沼气,原料产气率随温度上升而上升;40 下的产气效率最好(小麦秸秆的峰值为 2 520.0 mL,干物质产气率为 187.1 mL/g,水稻秸秆的峰值为 2 100.0 mL,干物质产气率 195.0 mL/g,玉米秸秆的峰值为 2 395.0 mL,干物质产气率为 228.5 mL/g),10 下产气效率最差(小麦秸秆的峰值为 377.5 mL,干物质产气率为 20.1 mL/g,水稻秸秆的峰值为 305.0 mL,干物质产气率 17.2 mL/g,为玉米秸秆的峰值为 252.5 mL,干物质产气率为 15.0 mL/g)。

**关键词:** 秸秆;厌氧发酵;产气效率;发酵周期

**中图分类号:** S216.4;X382 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)02-0190-04

我国农村每年生产大量的农作物秸秆约 7 亿 t 左右<sup>[1]</sup>,除少量秸秆被作为牲畜饲料、农家肥和农村燃料外,大多数秸秆被堆放或直接焚烧,使生物质资源浪费巨大,造成了严重的环境污染问题。大量焚烧田间秸秆已影响了飞机起降、车辆行驶,造成空气质量下降,危害人类健康。有关秸秆的资源化利用已成为大家瞩目的问题,已有很多专家提出秸秆还田、秸秆气化等解决方法<sup>[2~4]</sup>,但这些解决方法的成本太高,推广效果不好。李燕红等研究了农作物秸秆的生物制氢技术<sup>[5]</sup>,探讨了小麦秸秆的产氢机理。徐琰等研究不同纤维素类生物质废弃物的产氢能力<sup>[6]</sup>,发现不同底物的产氢过程基本相似。李冬敏以汽爆秸秆为原料研究变温条件下的产氢过程<sup>[7]</sup>,发现变温可以提高产氢量。周俊虎等进行了影响秸秆发酵产氢因素的研究<sup>[8]</sup>,发现不同处理方法对秸秆产氢效果有显著影响。秸秆中含有较多的大分子物质,分解较慢,投入沼气池后易形成漂浮层影响产气效率,再加上出料困难,因此很少有人选用秸秆作为厌氧发酵产沼气的原料,关于此方面的研究报道也较少。因此本试验选小麦秸秆、水稻秸秆、玉米秸秆作为发酵的原料,以 5 为一个步长,设定了 7 个恒定温度 10、15、20、25、30、35、40 下的发酵方案,研究 3 种秸秆的产气情况,以期为解决农村秸秆焚烧污染环境以及能源短缺问题提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

1.1.1 发酵原料 试验材料为风干的小麦秸秆、水稻秸秆和玉米秸秆。将 50 kg 的小麦秸秆、水稻秸秆、玉米秸秆粉碎成长度为 2 cm 左右,装入 125 L 的塑料桶内加入 15 kg 的水和 10 kg 的沼液盖上塑料薄膜进行堆沤。堆沤时间为 15 d(各原料的干物质质量见表 1)。

表 1 发酵原料的碳氮比、干物质含量

Table 1 The C/N and TS of 7 fermented materials

项目 Item	小麦秸秆 Wheat straw	水稻秸秆 Rice straw	玉米秸秆 Corn stalk
碳氮比 C/N	30	23	23
发酵前干物质 TS(%) Before fermented	7.7	8.0	7.6

注:此碳氮比和干物质质量为堆沤后测得。

Note: The C/N ratio and TS was determined after compost maturity.

1.1.2 原料的预处理 接种物是通过常年进行厌氧发酵的沼气池中的发酵底物进行驯化得到,发酵底物取自西北农林科技大学附近沼气示范村(崔西沟)。在 125 L 的塑料桶内加入 30 kg 的牛粪并加入 70 kg 的沼液搅拌均匀,盖上塑料薄膜进行驯化,驯化时间为 15 d,接种物的干物质质量为 10.8%。脲酶是一种高度专性的酶,能酶促尿素的水解,脲酶

收稿日期:2007-08-03;修改日期:2007-10-29  
基金项目:农业科技成果转化项目(05EFN217100423);国家科技支撑计划(2006BAD17B01-01);国家自然科学基金(30700482)  
作者简介:楚莉莉(1981—),女,河南郑州人,在读硕士,研究方向为生态农业技术集成研究。E-mail:chulilimouse@163.com。  
\*通讯作者:杨改河(1957—),男,陕西耀县人,教授,博士生导师,主要从事生态农业与循环农业技术研究。E-mail:ygh@nwsuaf.edu.cn。

活性可以表征接种物氮素状况,测得接种物的脲酶活性为 0.967 mg/(g·37℃·24h)。

1.2 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,主要由发酵装置、集气装置及控温装置 3 部分组成如图 1 所示。选用 5 L 塑料壶作为发酵瓶,塑

料壶用 6 号的橡胶塞密封,橡胶塞上设有导气口。集气装置由 1 000 mL 的三角瓶和 1 000 mL 的量筒连接而成,三角瓶用 8 号橡胶塞密封。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,设 2 个重复。用 1 000 W 地热丝加热,智能温度控制仪(PC-1000)和继电器控制和显示发酵温度,温度波动范围为 ±1℃。

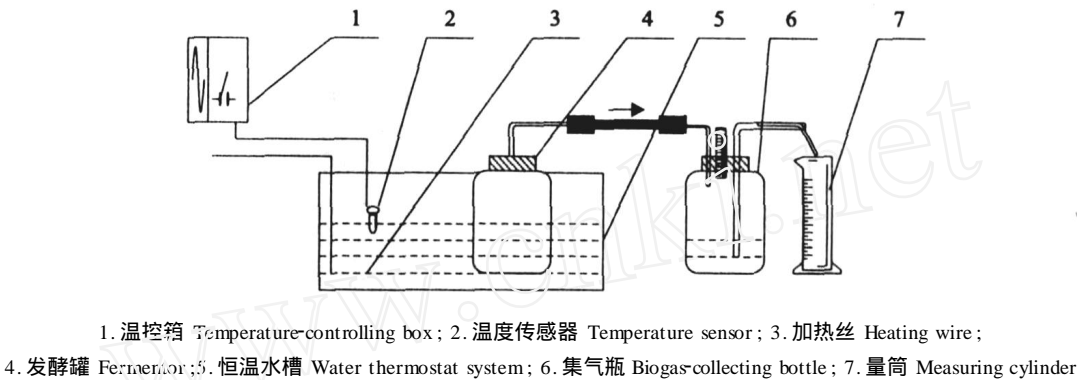


图 1 可控性恒温厌氧发酵装置

Fig. 1 Controllable constant-temperature fermenting equipment

1.3 试验方案

发酵原料的总固体浓度为 8%,在 5 L 塑料壶里装入 3 000 g 搅拌均匀的发酵原料(按照表 2 的配比)和 500 g 的接种物。设置 7 个恒定温度 10℃、15℃、20℃、25℃、30℃、35℃、40℃。

表 2 发酵料液的配制表

Table 2 The quantity of materials and water of fermenting liquid

发酵原料 Materials	原料量(g) Materials quantity	水量(g) Water quantity
小麦秸秆堆沤物 Composted wheat straw	2935	65
水稻秸秆堆沤物 Composted rice straw	2840	160
玉米秸秆堆沤物 Composted corn straw	2985	15

料液浓度计算公式:  $M_0 = \frac{X_i m_i}{X_i + W}$

式中,  $M_0$  为料液浓度(%) ;  $X_i$  为物料重量(g) ;  $m_i$  为总固体含量(TS, %) ;  $W$  为所需增加水量(g)。

1.4 测定项目及方法

- (1) 干物质含量(TS):采用烘干法。计算方法如公式所示:  $TS = \frac{A}{B} \times 100\%$ 。式中,  $A$  为样品烘干后的重量(g) ;  $B$  为样品鲜重(g)。
- (2) 脲酶活性:采用苯酚钠比色法。
- (3) 碳氮比:碳以 VS(挥发性干物质含量) 估算  $C = 0.47VS$ ,氮以凯氏定氮法测定。

(4) 产气量:待所产的气体能正常点燃后,开始记录数据,每天早上 9 点定时测量。

(5) 干物质产气率: mL/g,计算方法如公式所示:干物质产气率 =  $\frac{A}{B}$ ,式中,  $A$  为各发酵料液的总产气量(mL) ;  $B$  为各发酵料液中干物质质量(g)。

2 结果与分析

2.1 3 种秸秆的产气速率分析

在发酵产甲烷的过程中,3 种秸秆在 7 个温度梯度的产气速率如图 2、3、4、5、6、7、8 所示。

从图 2、3、4、5、6、7 可以看出在 40℃、35℃、30℃、25℃、20℃、15℃ 的恒温发酵条件下,3 种秸秆厌氧发酵启动快,均能在较短的时间内开始正常产气,这与发酵原料的碳氮比有关,前人研究结果表明,原料的碳氮比以 20~30:1 搭配比较适宜<sup>[9~11]</sup>,从表 1 得知麦秆、稻秆、玉米秆的碳氮比在 20~30:1 之间。小麦秸秆、水稻秸秆、玉米秸秆均在正常产气后的较短时间内达到产气高峰。不同温度条件下个原料的峰值不同:从 40℃ 到 15℃,小麦秸秆的峰值分别为 2 520.0、2 093.3、1 926.7、1 403.3、745.0、410.0 mL;水稻秸秆的峰值为 2 100.0、1 995.0、1 746.7、1 266.7、875.0、555.0 mL;玉米秸秆的峰值为 2 395.0、2 425.0、2 289.3、1 525.0、402.5、580.0 mL。3 种秸秆的日产气变化曲线基本相似,产气高峰过后产气速率急剧下降,但在 20℃ 和 15℃ 下,3 种秸秆产气速率变化波动较大。

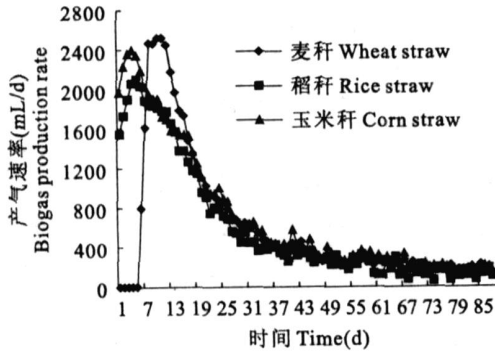


图 2 40℃ 三种秸秆产气速率变化

Fig. 2 The biogas production rate of 3 straws at 40℃

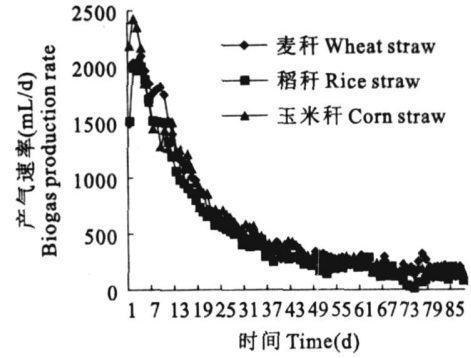


图 3 35℃ 三种秸秆产气速率变化

Fig. 3 The biogas production rate of 3 straws at 35℃

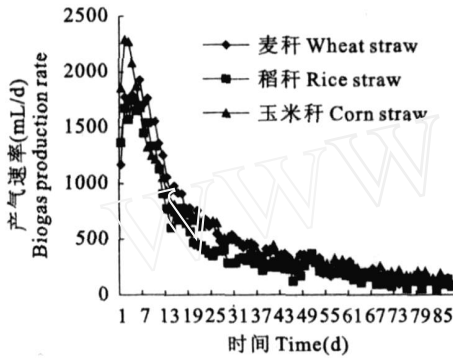


图 4 30℃ 三种秸秆产气速率变化

Fig. 4 The biogas production rate of 3 straws at 30℃

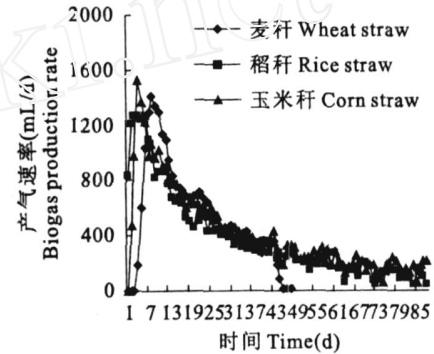


图 5 25℃ 三种秸秆产气速率变化

Fig. 5 The biogas production rate of 3 straws at 25℃

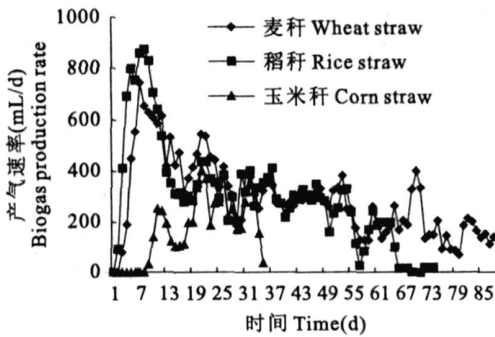


图 6 20℃ 三种秸秆产气速率变化

Fig. 6 The biogas production rate of 3 straws at 20℃

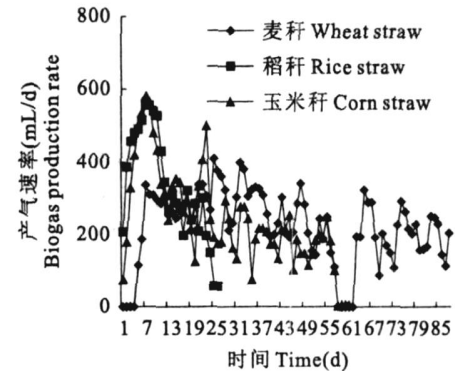


图 7 15℃ 三种秸秆产气速率变化

Fig. 7 The biogas production rate of 3 straws at 15℃

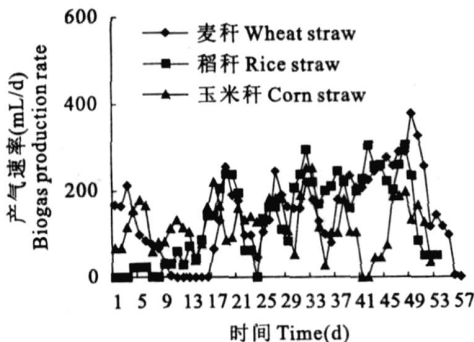


图 8 10℃ 三种秸秆产气速率变化

Fig. 8 The biogas production rate of 3 straws at 10℃

秸秆中含有较多的高分子物质如纤维素、半纤维素、果胶和木质素等,这些物质的分解比较慢,但秸秆经过预处理,使这些复杂的高分子有机物质在此过程中被降解成简单的小分子物质,为甲烷菌提供适宜的环境和原料,提高了产气速度和产气速率,使产气高峰提前出现<sup>[9-11]</sup>。

从图 8 可以看出在 10℃ 的恒温发酵条件下,3 种秸秆的厌氧发酵产气速率波动较大,小麦秸秆产气速率最大值为 377.5 mL;水稻秸秆产气速率最大值为 305.0 mL;玉米秸秆产气速率最大值 252.5 mL。3 种秸秆的产气速率明显低于其它温度,这是

因为 ,厌氧发酵的温度低 ,菌种的活性弱。产气后期产气速率有所上升可能是因为菌种已经适应了低温环境 ,活性增强。

从上述的 3 种秸秆在不同温度条件下的产气速率可以看出 ,随着温度的降低 ,各原料的产气速率也随之下降。

2.2 3 种秸秆的产气效率、发酵周期比较

产气效率通过干物质产气率来反应 ,通过对 7 个温度梯度 3 种秸秆的干物质产气率进行分析 (见表 3)可以看出 :3 种秸秆中的干物质产气率均随着温度的上升而上升 ,小麦秸秆和水稻秸秆在 40 ℃ 时干物质产气率最大分别为 187.1 mL/g 和 195.0

mL/g ,10 ℃ 时的干物质产气率最低分别为 20.1 mL/g 和 17.2 mL/g。玉米秸秆的干物质产气率在 40 ℃ 时最大为 228.5 mL/g ,而 20 ℃ 时的干物质产气率最低为 14.1 mL/g ,这是因为 20 ℃ 的恒温发酵条件下玉米秸秆的发酵周期仅为 27 d ,总产气量低于在其它恒温发酵条件下的玉米秸秆。从表中可以看出 :3 种秸秆在 7 个温度梯度下的干物质产气率相差不大 (20 ℃ 下的玉米秸秆除外) ,在 40 ℃、35 ℃、30 ℃ 和 25 ℃ 恒温发酵条件下 ,玉米秸秆的干物质产气率最大 ,而在 20 ℃、15 ℃ 和 10 ℃ 的恒温发酵条件下 ,小麦秸秆的干物质产气量最大。

表 3 7 个温度梯度下 3 种秸秆的干物质产气率表  
Table 3 The rate of TS of 3 straws at 7 different temperature

项目 Item		40	35	30	25	20	15	10
干物质产气率 (mL/g) Rate of TS	小麦秸秆 Wheat straw	187.1	188.0	169.1	93.6	61.7	47.6	20.1
	水稻秸秆 Rice straw	195.0	163.7	138.7	122.7	53.0	20.8	17.2
	玉米秸秆 Corn straw	228.5	194.8	174.6	132.2	14.1	34.8	15.0
发酵周期 Fermentation period	小麦秸秆 Wheat straw	83	88	88	63	86	84	57
	水稻秸秆 Rice straw	88	88	88	87	73	26	50
	玉米秸秆 Corn straw	88	88	88	71	27	61	52

从发酵周期来看 ,3 种原料的发酵周期持续时间较长 ,均超过 50 d ,变化不明显 (20 ℃ 下的玉米秸秆和 15 ℃ 下的水稻秸秆除外)。玉米秸秆和水稻秸秆的发酵过程突然停止 ,可能是因为低温条件下菌种的活性降低 ,不产甲烷菌而又产生了大量的有机酸 ,使发酵罐内 pH 值下降 ,抑制了产甲烷菌的活性 ,使发酵提前停止<sup>[9~11]</sup>。

3 结论与讨论

1) 小麦秸秆、水稻秸秆和玉米秸秆经过 15 d 的堆沤 ,在 10、15、20、25、30、35 ℃ 和 40 ℃ 的恒温条件下均能在较短时间内开始产气。在 25 ℃ ~ 40 ℃ 较高温度范围内 ,玉米秸秆的产气效率明显高于其他两种秸秆 ,但在 10 ~ 20 ℃ 较低温度范围内 ,小麦秸秆的产气效率高于其他两种秸秆。从干物质产气率和发酵周期来看 ,3 种秸秆的产气率基本上都随温度的上升而上升 ,发酵周期变化不明显 ,但堆沤时间的长短还需进一步研究。

2) 研究是在理想的恒温条件下的厌氧发酵 ,这与农村户用沼气池的变温发酵的产气结果有一定的差别 ,但在理论上揭示了发酵原料的产气规律 ,为秸秆资源化利用提供了理论依据 ,对净化环境、解决秸

秆焚烧具有一定的促进作用。

参 考 文 献 :

[1] 张雪松,朱建良. 秸秆的利用与深加工[J]. 化工时刊,2004,(5):1—5.

[2] 杨治平,周怀平,李红梅,等. 旱地玉米秸秆还田秋施肥的增产培肥效应[J]. 干旱地区农业研究,1999,17(4):10—15.

[3] 王旭东,于天富,陈多仁,等. 玉米秸秆腐解过程物质组成及胡敏酸的动态变化. 物质组成的动态变化[J]. 干旱地区农业研究,2001,19(3):78—82.

[4] 石磊,赵由才,柴晓利. 我国农作物秸秆的综合利用技术进展[J]. 中国沼气,2005,23(2):11—18.

[5] 李燕红,林钰,杏艳,等. 农作物秸秆废弃物厌氧发酵生物制氢的研究[J]. 环境科学与技术,2006,29(11):8—9.

[6] 徐琰,张茂林,杏艳,等. 纤维素类生物质厌氧发酵产氢的研究[J]. 化学研究,2005,16(2):6—8.

[7] 李冬敏,陈洪章. 变温调控对汽爆秸秆发酵产氢的影响[J]. 生物质化学工程,2007,41(3):11—14.

[8] 周俊虎,戚峰,程军,等. 秸秆发酵产氢的影响因素研究[J]. 环境科学,2007,28(5):1153—1157.

[9] 周孟津,张榕林,蔺金印. 沼气实用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005. 1—15.

[10] 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005. 29—85.

[11] 农业部人事劳动司. 沼气生产工[M]. 北京:中国农业出版社,2004. 67—77.

Study on sustainable development of Ningxia based on the ecological footprint analysis method

DU Ling-tong<sup>1,2,3</sup>, GAO Gui-ying<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qian-jin<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Research Center for Western Development, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. International Joint Research Institute of Ningxia University, China & Shimane University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract :** Ecological footprint analysis is a new method for measuring regional economic sustainable development. The ecological footprint and ecological capacity of Ningxia Hui Autonomous Region in 1980, 1985, 1990, 1995 and 1998 ~ 2005 are calculated using this method. The results show that the ecological footprint per capita increased from 0.61 hm<sup>2</sup> to 2.39 hm<sup>2</sup> except the period of 1990 ~ 1995 in which it reduced. The pasture, fossil energy land and arable land are the main parts of ecological footprint. The ecological capacity per capita is reduced year by year from 1.22 hm<sup>2</sup> to 0.76 hm<sup>2</sup>. The arable land and pasture are the main parts of ecological capacity. Before 1995, the ecological capacity was higher than the ecological footprint and the economic development was sustainable. But, the ecological deficit arose in 1995. The results show that the economic developing model of Ningxia is not sustainable after 1995.

**Key words :** ecological footprints; ecological capacity; sustainable development; ecological deficit; Ningxia

(上接第 193 页)

The biogas production efficiency of crop straws at different temperature

CHU Li-li<sup>1,3</sup>, YANG Gai-he<sup>2,3</sup>, ZHANG Cui-li<sup>1,3</sup>, REN Guang-xin<sup>2,3</sup>, FENG Yong-zhong<sup>2,3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract :** The research adapted controllable constant-temperature fermented equipment designed by ourselves, and selected wheat straw, rice straw and corn straw for fermented materials, chose 5 as a step-length and did the study of biogas fermentation at the temperature of 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40. The results showed that 3 kinds of raw materials can all produce biogas normally at 7 temperature grades, the biogas production efficiency increased as the temperature increased. The biogas production efficiency was the best at 40 (the max value of wheat straw biogas production was 2 520.0 mL, the rate of TS was 187.1 mL/g; the max value of rice straw biogas production was 21 000.0 mL, the rate of TS was 195.0 mL/g; the max value of corn straw biogas production was 2 395.0 mL, the rate of TS was 228.5 mL/g;), while the biogas production efficiency was the worst at 10 (the max value of wheat straw biogas production was 377.5 mL, the rate of TS was 20.1 mL/g; the max value of rice straw biogas production was 305.0 mL, the rate of TS was 17.2 mL/g; the max value of corn straw biogas production was 252.5 mL, the rate of TS was 15.0 mL/g;).

**Key words :** straw; anaerobic fermentation; biogas production efficiency; fermentation period