

# 尿素和纤维素酶对厌氧发酵的影响

李 敏<sup>1,2</sup>, 李轶冰<sup>1,2</sup>, 杨改河<sup>1,2</sup>, 王晓娇<sup>1,2</sup>, 任广鑫<sup>1,2</sup>, 冯永忠<sup>1,2</sup>

(1 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100; 2 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**[摘 要]** **【目的】**研究尿素和纤维素酶对厌氧发酵产气效果的影响,为解决沼气发酵原料利用率低、实际沼气转化率和沼气产气量低等问题提供科学依据。**【方法】**以鸡粪和玉米秸秆(干物质(TS)质量比为 2:1)为原料,采用自行设计的可控性恒温厌氧发酵装置,控制 TS 质量分数为 8%,温度为(30±1)℃,在厌氧发酵的前期(装料时)、中期(正常发酵 15 d 时)和末期(正常发酵 30 d 时),分别添加尿素和纤维素酶,添加水平均设 5, 10, 15, 20 g/kg 4 个水平,进行为期 46 d 的厌氧发酵,研究尿素和纤维素酶不同添加时期及不同添加水平对厌氧发酵产气特性的影响。**【结果】**尿素和纤维素酶的 3 个不同添加时期对产气量均没有显著影响,各个时期添加均可促进厌氧发酵的进行,提高累积产气量。尿素的最佳添加量为 20 g/kg,前期、中期、末期添加 20 g/kg 尿素可使产气量较未加尿素的对照分别提高 23.3%, 18.3% 和 12.4%。纤维素酶的添加量对产气量没有显著影响,较好的添加方法为末期添加 10 g/kg,该法可使累积产气量较未加纤维素酶的对照提高 16.8%。**【结论】**添加尿素和纤维素酶均可促进厌氧发酵的进行,提高产气速率,添加尿素的效果更明显。

**[关键词]** 尿素;纤维素酶;厌氧发酵

**[中图分类号]** S216.4

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2010)02-0165-06

## Effect of urea and cellulose on anaerobic fermentation

LI Min<sup>1,2</sup>, LI Yi-bing<sup>1,2</sup>, YANG Gai-he<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-jiao<sup>1,2</sup>,

REN Guang-xin<sup>1,2</sup>, FENG Yong-zhong<sup>1,2</sup>

(1 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 The Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** **【Objective】** The research studies the effect of urea and cellulose on biogas yields, which provides a scientific basis for solving inadequate utilization of raw material in the methane fermentation the actual low rate of methane conversion and low methane biogas production, etc. **【Method】** A batch of experiments under the condition of 8% mass fraction of total solid were conducted in a self-manufactured anaerobic fermentation reactor at the temperature of (30±1)℃, with chicken feces and corn stalks (dry mass ratio of 2:1) as raw materials, adding 5, 10, 15 and 20 g/kg urea and cellulose in early (when loading), medium (normal fermentation by adding 15 days) and late period (30 days to join the normal fermentation); anaerobic fermentation was conducted for 46 days to study the effect of different adding time and levels of urea and cellulose on the anaerobic fermentation. **【Result】** The impact of urea and cellulose on biogas gas production showed no significant difference between different periods. Adding urea in the three different periods can promote the anaerobic fermentation, increase biogas production. The best amount of urea is 20

\* [收稿日期] 2009-09-08

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30700482); 国家科技支撑计划项目(2007BAD89B16); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2007C103); 西北农林科技大学生物质能源研究专项(07ZR050)

[作者简介] 李 敏(1986—), 女, 山西芮城人, 在读硕士, 主要从事生物质能源与循环农业技术研究。

E-mail: 232limin232@163.com

[通信作者] 李轶冰(1977—), 女, 河南鹤壁人, 讲师, 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

g/kg, in the early, middle, late period, compared with control, the biogas production can increase 23.3%, 18.3% and 12.4% respectively. There is no significant impact of cellulose on biogas production. The better cellulose condition is to add 10 g/kg in the late period. The cumulative biogas production volume is increased by 16.8% compared with control. 【Conclusion】 Added urea and cellulose all can promote anaerobic fermentation, increase biogas production. Add urea is better than cellulose on promoting biogas production, and a reasonable amount can increase gas production.

**Key words:** urea; cellulose; anaerobic fermentation

我国是一个农业大国,有 9 亿人口生活在农村,农村人口的生产和生活都需要消耗大量的能源。我国农作物秸秆年产量约 7 亿 t<sup>[1]</sup>,占世界秸秆总产量的 20%~30%<sup>[2]</sup>,每年收获的秸秆扣除用于造纸、饲料、造肥还田及收集利用的部分外,可作为能源加以利用的约为 3.761 亿 t。随着农业结构的调整,我国畜牧业得到迅猛发展,规模集约化养殖所产生的畜禽粪便给环境带来了严重污染,这引起了人们的高度重视<sup>[3]</sup>。目前,利用厌氧发酵技术生产沼气,是合理利用农作物秸秆和治理畜牧业污染的有效措施之一,其不但能解决环境污染问题,而且还可以生产清洁能源。但是,在实际生产中存在着一些带有普遍性的问题有待解决,如沼气发酵原料得不到充分利用、实际沼气转化率和产气量低等。

在沼气发酵过程中,各阶段微生物有不同的营养需求,若能给各种微生物提供充足的营养,则可以使每个发酵阶段充分快速地进行,最终亦可有效提高沼气产量。有研究指出,以粪尿与作物秸秆作为发酵原料,当粪草质量比低于 2:1,而日常管理又无足够粪尿添加时,为提高产气量,在正常发酵 1~2 月后应适当添加氮素,调整碳氮比<sup>[4]</sup>。Malik 等<sup>[5]</sup>和 Bardiya 等<sup>[6]</sup>发现,添加尿素和磷酸氢二铵(DAP)能使产气量提高 8%~10%。吕淑霞等<sup>[7]</sup>研究表明,发酵物(以干物质(TS)计)中添加 3 g/kg 固体纤维素酶,可使甲烷产率提高 52.1%;而添加 30 U/kg 液体纤维素酶,甲烷产率的提高幅度可高达 88.80%。Rademacher 等<sup>[8]</sup>、Scheidat 等<sup>[9]</sup>和张无敌等<sup>[10]</sup>的研究也证明,添加多种酶可以提高厌氧消化速率。然而,目前的研究多局限于通过简单地添加尿素和纤维素酶来探讨其对产气量的影响,并没有系统地研究尿素和纤维素酶不同添加时期以及不同添加水平对厌氧发酵的影响。为此,本试验在前人研究的基础上,系统地研究了尿素和纤维素酶不同添加时期以及不同添加水平对厌氧发酵的影响,以期为提高沼气发酵原料利用率、实现沼气发酵的可控化提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 原 料

风干玉米秸秆,取自陕西杨凌沼气示范村——崔西沟;鸡粪,取自西北农林科技大学附近养鸡场;接种物,牛粪常温发酵的沼液。

玉米秸秆:将 50 kg 的玉米秸秆粉碎成长度为 2 cm 左右的小段,装入 125 L 的塑料桶内加入 15 kg 水和 10 kg 沼液,盖上塑料薄膜进行堆沤,5 d 后测得 TS 为 12.4%。鸡粪:鲜鸡粪装入 125 L 的塑料桶内,盖上塑料薄膜进行自然发酵,5 d 后测得 TS 为 37%。接种物:在 125 L 的塑料桶内加入 30 kg 牛粪,并加入 70 kg 沼液搅拌均匀,盖上塑料薄膜进行驯化,5 d 后测得接种物 TS 为 9.7%。

### 1.2 试验装置

本试验所用装置为自行设计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,塑料壶用橡胶塞密封,橡胶塞上设有出气口。集气装置由 1 000 mL 的三角瓶和 2.5 L 塑料壶(代替量筒)连接而成,三角瓶用橡胶塞密封。发酵装置和集气装置用橡胶管连接。将准备好的发酵装置放置于水槽内,用 1 000 W 电热丝加热,用智能温度控制仪(PC-1000)和继电器控制并显示发酵温度,温度波动范围为±1℃。本试验控制温度为(30±1)℃。

### 1.3 试验方法

1.3.1 发酵液的配制 发酵原料的总量为 2 500 g,其中新鲜鸡粪 273 g、新鲜玉米秸秆 421 g、水 1 306 g、接种物 500 g。发酵原料总 TS 为 8%,鸡粪与玉米秸秆的 TS 质量比为 2:1。物料含量计算公式:

$$M_0 = \frac{\sum X_i m_i}{\sum X_i + W} \times 100\%。$$

式中: $M_0$  为物料含量(%), $X_i$  为物料质量(g), $m_i$  为干物质含量(%), $W$  为加水量(g)。

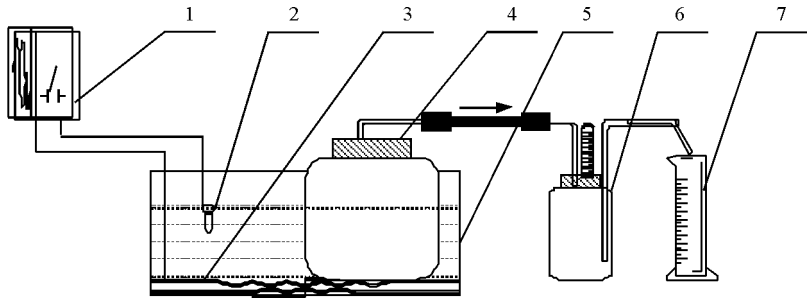


图 1 可控性恒温厌氧发酵装置

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

Fig.1 Controllable and constant temperature anaerobic fermentation device

1. Temperature controlling box;2. Temperature sensor;3. Heating wire;4. Fermentor;5. Water thermostat system;

6. Biogas-collecting bottle;7. Measuring cylinder

1.3.2 试验设计 试验组分别在厌氧发酵的前期(I组,装料时)、中期(II组,正常发酵 15 d 时)和末期(III组,正常发酵 30 d 时)添加不同量(分别为 5, 10,15 和 20 g/kg)的尿素和纤维素酶。尿素和纤维素酶添加量均以发酵原料的 TS 计。试验共 12 个处理,每个处理设 2 个重复。对照组按 1.3.1 节直接装料,不作特殊处理。

1.3.3 测试项目及方法 (1)TS。将装有发酵原料的铝盒放入 105 ℃烘箱内,烘至质量恒定后测定质量。TS 计算公式为:

$$TS=\frac{A}{B}\times 100\%。$$

式中:B、A 分别为样品烘干前、后的质量(g)。

(2)累积产气量。累积产气量指厌氧发酵过程中有机物产气的总量,是衡量厌氧发酵系统与工艺优劣的重要参数。累积产气量采用排水集气法测定,每日 9:00 用量筒测量 1 次水的体积,以确定日产气量(产气高峰期每日测 2 次,在当日 20:00 加测 1 次)。

(3)产气速率。产期速率指厌氧发酵条件下发酵原料产生沼气的速度,是衡量原料发酵分解好坏的主要指标之一,为日产气量与发酵时间的比值。

(4)干物质产气速率。干物质产气速率指单位干物质发酵原料的产气量,主要反映原料的产气潜力,为日产气量与原料干物质质量(本试验为 200 g)之比。

2 结果与分析

2.1 尿素添加时期对产气速率和累积产气量的影响

选用添加 20 g/kg 尿素的试验数据进行分析。试验持续 46 d,第 47 天时,各反应器的产气量均很小,试验结束。由图 2 可以看出,在发酵前期(发酵开始的前 3 d),各组的累积产气量差异不大,III组稍低;对照组产气速率在第 14 天达到最大值 2.02 L/d,I、II 和 III组产气速率分别在第 12,11 和 4 天达到最大值,其最大产气速率分别为 1.84,1.46 和 2.06 L/d。发酵进行到第 25 天以后,产气速率明显降低。整个试验过程中,I组的产气速度最快,累积产气量最大,达 33.265 L,较对照组(26.985 L)提高了 23.3%。

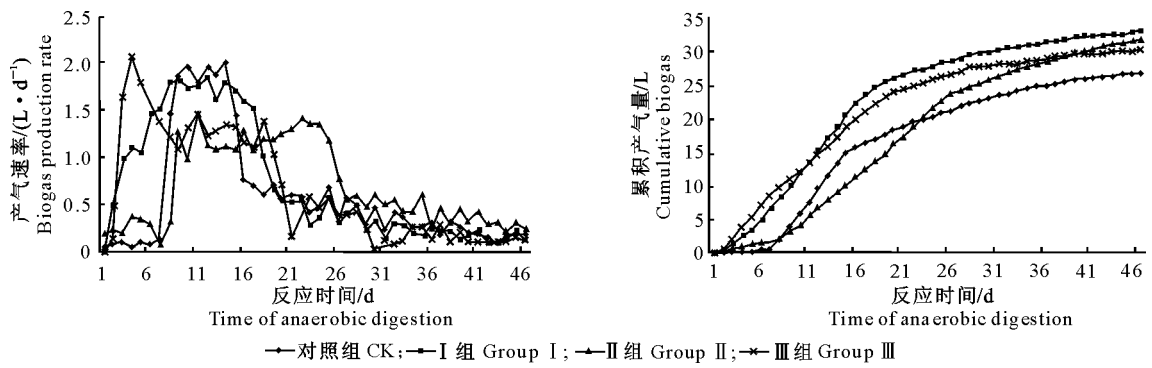


图 2 不同时期添加尿素(添加量 20 g/kg)对产气速率和累积产气量的影响

Fig.2 Biogas production rate and cumulative biogas of urea (amount;20 g/kg) at different time

由图 2 可以明显地看出,中期添加尿素处理(II组)在发酵的第 20~26 天产气速率明显高于其他

组;后期添加尿素处理(III组)的产气速率与对照组相比基本上没有改善作用。各处理的累积产气量大

小为：Ⅰ组>Ⅱ组>Ⅲ组>对照，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ组的累积产气量分别较对照提高 23.3%，18.3%和12.4%。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ组干物质产气速率分别为166.33,159.63和151.60 mL/g。方差分析结果表明，尿素 3 个不同添加时期对产气速率和累积产气量没有显著影响。添加 5,10 和 15 g/kg 尿素处理的数据分析结果与添加 20 g/kg 尿素处理的结果基本一致。

2.2 纤维素酶添加时期对产气速率和累积产气量的影响

选用添加 10 g/kg 纤维素酶的试验数据进行分析，结果见图 3。由图 3 可以看出，在发酵前期(发酵开始的前 3 d)，各组的累积产气量差异不大，Ⅰ组发酵启动最快而且初期产气量最大，主要是因为Ⅰ组在装料时便添加了纤维素酶，纤维素酶促进了玉

米秸秆纤维素的分解，有利于厌氧发酵的进行；对照组产气速率在第 14 天达到最大值 2.02 L/d，Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ组分别在第 6,14 和 18 天达到最大值，其最大产气速率分别为1.65,1.23 和 1.39 L/d。整个试验过程中，Ⅰ组发酵启动快；Ⅲ组在发酵进行 20 d 后产气速率明显高于其他组，累积产气量(31.520 L)也明显高于其他组，比对照(26.985 L)提高了 16.8%。各处理的累积产气量大小依次为：Ⅲ组>Ⅱ组>对照>Ⅰ组，Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ组累积产气量分别较对照提高 16.8%，0.6%和-0.8%；干物质产气速率分别为 157.60,135.73 和 133.83 mL/g。方差分析结果表明，纤维素酶 3 个不同添加时期对产气速率和累积产气量没有显著影响。纤维素酶其他 3 个添加水平的分析结果与此相似。

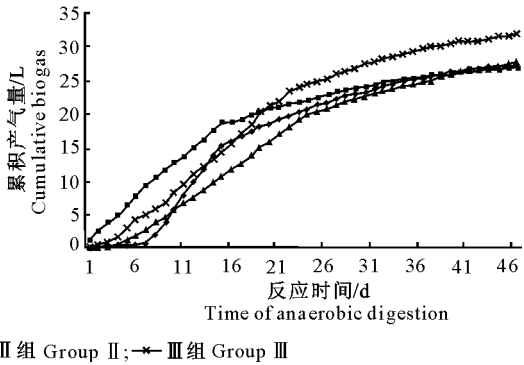
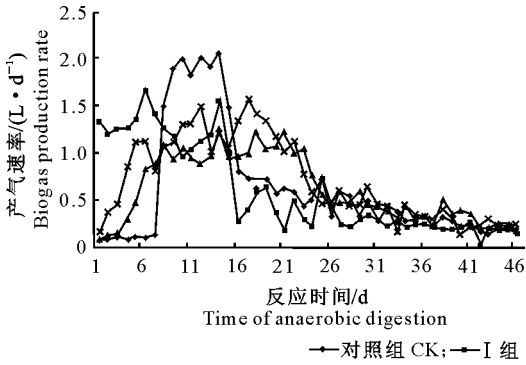


图 3 不同时期添加纤维素酶(添加量 10 g/kg)对产气速率和累积产气量的影响

Fig. 3 Biogas production rate and cumulative biogas of cellulose (amount:10 g/kg) at different time

2.3 尿素添加水平对产气速率和累积产气量的影响

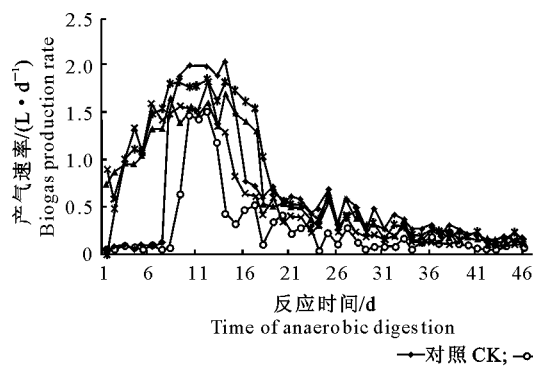
选用发酵前期添加尿素的处理进行分析。由图 4 可以看出，在发酵初期(发酵开始的前 9 d)，除添加 5 g/kg 尿素的处理外，其余各处理组的产气速率明显大于对照组。对照组产气速率在第 14 天达到最大值 2.02 L/d，添加 5,10,15 和 20 g/kg 尿素的处理分别在第 12,14,12 和 12 天达到最大值，其最大产气速率分别为 1.50,1.69,1.82 和 1.84 L/d。发酵末期，各处理组日产气量均低于对照组，这主要是因为各处理组在装料时添加了尿素，为厌氧发酵提供了氮源，有利于厌氧发酵的进行，因此各处理组均具有发酵启动快、发酵初期产气速率较大的特征；当发酵持续到末期时，料液中的碳源和氮源消耗较对照组多，因而末期对照组日产气量大于处理组。在整个试验过程中，对照组的产气速率峰值最高，处理组(除添加 5 g/kg 外)发酵启动较快，产气高峰持续时间较长。添加 20 g/kg 尿素处理的累积产气量(33.265 L)较对照(26.985 L)提高了 23.3%。尿

素 4 个不同添加水平的累积产气量大小依次为：添加 20 g/kg 处理>添加 10 g/kg处理>添加 15 g/kg 处理>对照>添加 5 g/kg处理，添加 20,10,15 和 5 g/kg尿素的累积产气量分别较对照提高 23.3%，15.1%，1.1%和-52.2%；干物质产气速率分别为 166.33,155.28,136.38 和 64.53 mL/g。方差分析结果表明，发酵前期尿素添加量对产气速率和累积产气量有显著影响。发酵中期尿素添加量对产气速率和累积产气量的影响与前期相似；发酵后期尿素添加量对上述 2 个指标没有显著影响。

2.4 纤维素酶添加水平对产气速率和累积产气量的影响

选用发酵末期添加纤维素酶的处理进行分析。由图 5 可以看出，在发酵的初期(发酵开始的 9 d 内)，各处理组的产气速率明显大于对照组。对照组产气速率在第 14 天达到最大值 2.02 L/d，添加 5,10,15 和 20 g/kg 纤维素酶的处理分别在第 6,17,6 和 19 天达到最大值，其最大产气速率分别为 1.34,1.55,1.40 和 1.25 L/d。发酵末期，除添加 5 g/kg

纤维素酶的处理外,其他处理累积产气量均高于对照组,这主要是因为各处理组在正常发酵 30 d 时向发酵料液中添加了纤维素酶,促进了秸秆中纤维素的降解,有利于厌氧发酵的进行。在整个试验过程中,对照组的产气速率峰值最高,处理组发酵速度较对照组快,添加 10 g/kg 纤维素酶处理的累积产气量 (31.52 L) 比对照 (26.985 L) 提高了 16.8%。纤维素酶 4 个不同添加水平的累积产气量大小依次为:



10 g/kg 处理 > 5 g/kg 处理 > 15 g/kg 处理 > 对照 > 20 g/kg 处理, 添加 10, 5, 15, 20 g/kg 纤维素酶处理的累积产气量分别比对照提高 16.8%, 0.9%, 0.5% 和 -8.8%, 其干物质产气速率分别为 157.60, 136.18, 135.55 和 123.08 mL/g。方差分析结果表明, 发酵末期纤维素酶添加量对产气速率和累积产气量没有显著影响。前期与中期纤维素酶添加水平对产气速率和累积产气量也没有显著影响。

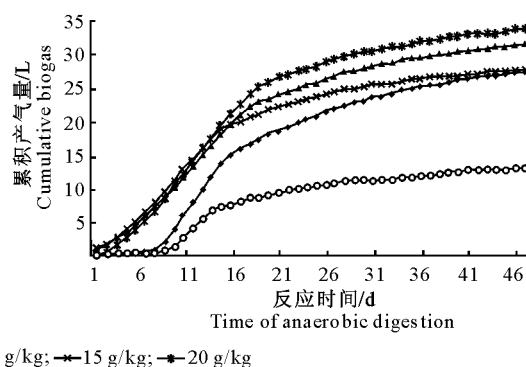


图 4 发酵前期尿素添加量对产气速率和累积产气量的影响

Fig. 4 Effect of urea amounts on biogas production rate and cumulative biogas in early stage

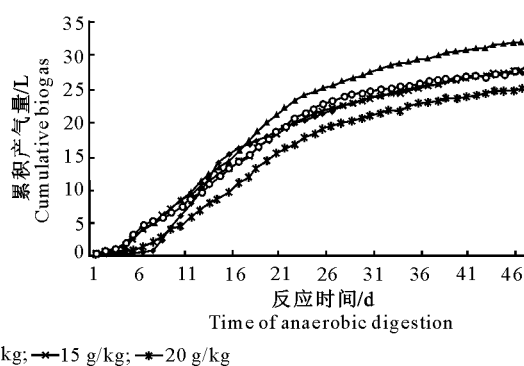
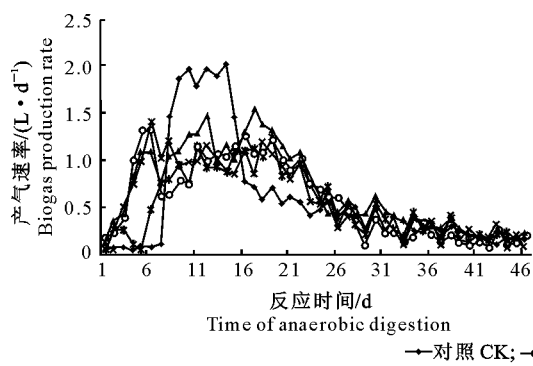


图 5 发酵末期纤维素酶添加量对产气速率和累积产气量的影响

Fig. 5 Effect of cellulase amounts on biogas production rate and cumulative biogas in late stage

### 3 结论与讨论

1) 发酵底物为鸡粪与玉米秸秆的混合物时,在发酵过程中添加尿素可促进原料分解,提高产气量。C、N 是沼气发酵微生物生长必需的 2 种营养元素,且微生物对这 2 种元素的吸收存在着一定的比例关系,通常沼气发酵启动时较适宜的 C/N 值为 10:1~30:1<sup>[11]</sup>。添加尿素可以增加氮素,为厌氧发酵提供营养物质并调节原料的 C/N 值,从而提高产气量。

2) 尿素的 3 个不同添加时期对产气量没有显著影响,各个时期添加均可促进厌氧发酵的进行,提高产气量。前期、中期、末期添加 20 g/kg 尿素产气量分别比对照提高 23.3%, 18.3% 和 12.4%。尿素的

不同添加水平对累积产气量有显著影响,前期添加 5, 10, 15 和 20 g/kg 尿素处理的累积产气量分别比对照提高 -52.2%, 15.1%, 1.1% 和 23.3%。前期添加 5 g/kg 尿素处理的累积产气量反而低于对照,其原因可能是尿素水解释放出氨态氮,其与挥发性脂肪酸(VFA)、pH 共同作用<sup>[12]</sup>,导致系统处于“抑制的稳定状态”,在此状态下,系统可以稳定运行,但产气量很低。

3) 纤维素酶的 3 个不同添加时期对产气量没有显著影响,同时不同添加水平之间也没有显著差异。前期、中期、末期添加 10 g/kg 纤维素酶处理的累积产气量分别比对照提高 -0.8%, 0.6% 和 16.8%。末期添加 5, 10, 15, 20 g/kg 纤维素酶处理的累积产气量分别比对照提高 0.9%, 16.8%, 0.5% 和

—8.8%。无论在哪个时期添加纤维素酶,效果均不是很明显,其原因可能是纤维素酶的最适反应条件为 50℃、pH 值 4.5,当 pH 值为 7.5 时,酶活性几乎全部丧失<sup>[13]</sup>,当温度为 40℃ 时酶活性下降 15%<sup>[7]</sup>,而本试验发酵温度控制在(30±1)℃,发酵料液的 pH 值维持在 7.0 左右,均不是纤维素酶的最佳反应条件,因此直接将纤维素酶加入厌氧反应器会造成纤维素酶活力下降。较好的办法是在发酵前用纤维素酶对秸秆进行预处理,预处理的条件应尽量符合纤维素酶的最佳反应条件。

4)纤维素酶较佳的添加条件为末期添加 10 g/kg,当添加量增加到 20 g/kg 时,累积产气量反而下降并低于对照,与文献[7,10,14]的结果不一致。推测其原因可能是,大剂量纤维素酶的加入使得厌氧发酵过程中的水解速度大于甲烷产生速度,水解生成的小分子物质来不及被后续微生物利用,在发酵系统中发生积累,从而在一定程度上抑制了产甲烷菌的代谢活动<sup>[15]</sup>,导致产气量下降。

5)研究选用鸡粪与玉米秸秆以 2:1 的质量比混合而成的发酵原料,在发酵前期添加 20 g/kg 尿素时累积产气量可达 33 265 mL,干物质产气速率可达 166.33 mL/g。由于选用的原料单一,鸡粪的理论 C/N 为 10.76:1,玉米秸秆的理论 C/N 为 53:1,可估算出鸡粪和玉米秸秆以 2:1 混合配制的发酵原料的理论 C/N 为 25:1 左右。原料本身的 C/N 已经比较理想,添加尿素仍可以提高产气量,推测对于本身 C/N 较大的原料,添加尿素可更大程度地提高产气量。

## [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,2004,18(5):1-5.  
Zhang X S, Zhu J L. The utility and further processing of straws [J]. Chemical Industry Times, 2004, 18(5): 1-5. (in Chinese)
- [2] 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 W, Li X J, Pang Y Z, et al. A pilot study on mesophilic dry anaerobic digestion of rice straw [J]. Journal of Ager-environment Science, 2008, 27(5): 2075-2079. (in Chinese)
- [3] 钱午巧,包武,陈彪,等. 利用厌氧发酵技术综合治理畜牧业污染的探讨 [J]. 福建能源开发与节约,2003(3):51.  
Qian W Q, Bao W, Chen B, et al. A discussion on controlling husbandry pollution by anaerobic fermentation techonlogy [J]. Fujian Energy Development and Conservation, 2003(3): 51. (in Chinese)
- [4] 邱凌,杨松甫,郭士英. 沼气发酵与综合利用 [M]. 陕西杨凌:天则出版社,1990:31.  
Qiu L, Yang S F, Guo S Y. Fermentation and utilization of methane [M]. Yangling, Shaanxi: Days of the Press, 1990: 31. (in Chinese)
- [5] Malik R K, Singh R, Tauro P. Effect of inorganic supplementation on biogas production [J]. Biol Wastes, 1987, 21(2): 139-142.
- [6] Bardiya N, Gaur A C. Effects of carbon and nitrogen ratio on rice straw biomethanation [J]. J Rural Energy, 1997, 4(1/4): 1-16.
- [7] 吕淑霞,陈祖洁. 纤维素酶应用于酒精糟废水厌氧消化中的研究 [J]. 中国沼气,1994,12(1):1-5.  
Lü S X, Chen Z J. Research of cellulose used in anaerobic digestion of wastewater alcohol [J]. China Biogas, 1994, 12(1): 1-5. (in Chinese)
- [8] Redemacher H, Zobel T, Pascik I, et al. Enzyme-supported digestion of municipal sludges at the waste water treatment plant Aachen-Soers [C]//Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. Barcelona: Mata-Alvarez J, 1999: 356-360.
- [9] Scheidat B, Kasche V, Sekoulov I. Primary sludge hydrolysis under addition of hydrolytic enzymes [C]//Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. Barcelona: Mata-Alvarez J, 1999: 161-168.
- [10] 张无敌,宋洪川,李建昌,等. 水解酶提高猪粪沼气发酵产气率 [J]. 太阳能学报,2002,23(5):674-677.  
Zhang W D, Song H C, Li J C, et al. Increasing biogas of yield pig dung with hydrolase [J]. Actaenergie Solaris Sinica, 2002, 23(5): 674-677. (in Chinese)
- [11] 何荣玉,刘晓风,袁月祥,等. 沼气发酵外源添加物的研究进展 [J]. 中国沼气,2007,25(5):8-10.  
He R Y, Liu X F, Yuan Y X, et al. Review on enhancing biogas production by additives [J]. China Biogas, 2007, 25(5): 8-10. (in Chinese)
- [12] 张波,徐剑波,蔡伟民. 有机废物厌氧消化过程中氨氮的抑制性影响 [J]. 中国沼气,2003,21(3):26-29.  
Zhang B, Xu J B, Cai W M. Review on the ammonis inhibition for anaerobic digestion [J]. China Biogas, 2003, 21(3): 26-29. (in Chinese)
- [13] 谭占仙. 研究 pH 值、温度对纤维素酶活力的影响 [J]. 黑龙江科技信息,2009(6):10.  
Tan Z X. Study on pH, temperature on cellulose activity [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2009(6): 10. (in Chinese)
- [14] Attar Y, Mhetre S T, Shawale M D. Biogas production enhancement by cellulytic strains of actinomycetes [J]. Biogas Forum I, 1998, 72: 11-15.
- [15] Chyi Y T, Dague R R. Effects of particulate size in anaerobic acidogenesis using cellulose as a sole carbon source [J]. Water Environ Res, 1994, 66: 670-678.