

三种能源草厌氧发酵制备生物燃气初步研究*

牛红志^{1,2}, 李连华¹, 孔晓英^{1†}, 孙永明¹, 袁振宏¹, 周贤友^{1,2}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以华南地区生长的多年生草本植物象草、芒草和五节芒为原料, 采用序批式中温 ($35 \pm 1^\circ\text{C}$) 厌氧发酵工艺, 研究这三种能源草制备生物燃气的性能。结果表明: 象草、芒草和五节芒的最高日产气率分别为 31.33、24.84 和 19.51 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 原料产气率分别为 355.78、285.58 和 235.38 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$, 产甲烷率分别为 166.43、109.89 和 97.20 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$, 占理论产甲烷率的 33.83%、21.67% 和 19.48%, 象草的厌氧发酵性能优于芒草和五节芒的主要原因是象草中纤维素、半纤维素等易降解的有机物含量较高。修正的 Gompertz 方程拟合效果较好, 象草、芒草和五节芒的累积产气量分别为 344.81、290.11 和 279.01 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$, 延滞期分别为 5.96、0.71 和 0 d。

关键词: 能源草; 厌氧发酵; 生物燃气; 甲烷

中图分类号: TK6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.03.005

Study on Anaerobic Digestion Performance of Three Kinds of Perennial Energy Grasses from South China Area

Niu Hong-zhi^{1,2}, Li Lian-hua¹, Kong Xiao-ying¹, Sun Yong-ming¹,
Yuan Zhen-hong¹, Zhou Xian-you^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The three kinds of energy grasses: *Pennisetum purpureu*, *Miscanthus sinensis* and *Miscanthus floridulus* from the Southchina area were conducted for biogas by using batch anaerobic digestion technical process at mesophilic temperature ($35 \pm 1^\circ\text{C}$), in this paper. The experiment results showed that the three kinds of energy grasses had different anaerobic fermentation performances: the highest daily biogas production were 31.33, 24.84 and 19.51 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, the cumulative biogas production were 355.78, 285.58 and 235.38 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$, and the cumulative CH_4 production were 166.43, 109.89 and 97.20 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$, accounted for 33.83%, 21.67% and 19.48% of the theoretical CH_4 production, respectively. Biogas yield of *Pennisetum purpureu* was obviously higher than that of the others, which was mainly because it had higher content of easily biodegradable organics. Modified Gompertz equation could be used well to fit the anaerobic digestion process of energy grass producing biogas. The simulation results were that the cumulative biogas production of the three kinds of grasses were 344.81, 290.11 and 279.01 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$, and the delay times of anaerobic digestion tests were 5.96, 0.71 and 0 d.

Key words: energy grass; anaerobic digestion; biogas; methane

0 引言

随着化石能源的减少和生态环境的恶化, 可再生清洁能源的开发与利用日益受到重视, 尤其是生物质能。生物质能是绿色植物通过光合作用把 CO_2 和 H_2O 等无机物转化为有机物, 伴随着将太阳能转化为化学能而贮存生物体中的能量。生物质能具有

清洁、安全、可贮藏、可再生、可固碳等优点, 是应对能源和环境危机最理想的新能源之一^[1-3]。

我国华南地区气候以亚热带季风性气候为主, 多数地方年降水量为 1 400 ~ 2 000mm, 是一个高温多雨、四季常绿的热带-南亚热带区域, 具有丰富的生物质资源。生长在该地区的禾本科狼尾草属植物象草和芒属植物五节芒及芒草均为多年生纤维类草

* 收稿日期: 2015-03-11 修订日期: 2015-05-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2012AA101802); 中国科学院重点部署项目 (KGZD-EW-304-1); 中国科学院院地合作项目

† 通信作者: 孔晓英, E-mail: kongxy@ms.giec.ac.cn

本植物^[4-7]，一方面能够高效利用太阳能固定 CO₂ 和 H₂O 等，具有生长速度快、纤维素含量高优点，适合作为禽畜饲料以及造纸、能源等工业领域的原料^[7,8]，另一方面其顽强的野外生长和抗逆能力，适宜在盐碱、山地、旱地等不适宜种植粮食作物的边际土地上推广种植^[8,9]，具有绿化环境、防风固沙、保持水土、生态修复等作用^[7,10]，很适合作为生物质能源原料。

厌氧发酵制备生物燃气是生物质资源能源化利用的重要途径之一^[11-13]，国外开展了较多以能源草为原料的厌氧发酵研究，国内相关研究主要集中在西南和华北地区，而具有能源草资源优势的华南地区研究报道偏少。因此本文选取了华南地区多年生能源草本植物作为研究对象，分析其厌氧发酵性能，为该地区能源草资源的开发利用提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验原料

实验原料是华南地区自然条件下生长的三种多年生草本植物——象草、芒草和五节芒。象草采自广东省广州市华南理工大学北校区，刈割于 2010 年 7 月 1 日；五节芒取自广州市增城区宁西，刈割于 2010 年 11 月 11 日；象草和五节芒刈割后，首先人工将原料切割成 2~3 cm 小段，之后用粉碎机粉碎约 1 min，放于 -20℃ 冰箱中保存。芒草来自广州市番禺地区，刈割于 2010 年 10 月 29 日，原料粉碎烘干后用于厌氧发酵性能研究。

1.2 实验装置及操作

实验装置采用有效容积为 1.5 L 的玻璃反应器，反应器侧壁上下各有 1 个取样口，上口为取气样口，下出口为取液样口，反应器顶部连接集气瓶，内装有饱和食盐水，集气瓶后连通集液瓶，通过排饱和食盐水法收集生物燃气。发酵采用中温发酵，通过水浴锅控制反应温度为 35 ± 1℃。反应器中加入的接种物量为 800 mL，象草和五节芒按发酵固体浓度为 5% 加入，芒草则按 3% 加入。实验中添加 2.5% 的 NH₄HCO₃ 作为缓冲剂和补充氮源。仅加入接种物的反应器为对照组。冲入高纯 N₂ 排出反应器顶部的空气，试验期间每天手动摇动反应器 2 次，当连续 5 天日产气率低于 1 Nml·(gVS_{added})⁻¹ 时结束实验。

1.3 分析测试方法

总固体含量 (Total solid, TS) 和挥发性固体含量

(Volatile solid, VS) 分别经 105℃ 烘干和 550℃ 煅烧后测定；C、N、S 和 H 含量采用 Vario EL 元素分析仪 (德国 elementar 公司) 测定；pH 值测定采用雷磁 pHS-3C 型 pH 计 (上海精科科学仪器有限公司雷磁仪器厂)。原料中的木质纤维素成分测定参考美国国家可再生能源实验室标准测定方法 (LAP, NREL)^[14]。

挥发酸的测定采用 HPLC，柱子为 Shodex KC-811，柱温为 50℃；流动相为 0.1% H₃PO₄，流速为 0.7 mL/min。分析前样品首先在 12 000 r/min 离心 15 min，离心后的样品再通过 0.2 μm 纤维素乙酸酯膜过滤后进样。

生物燃气的成分及含量采用 HP-6890 型高效气相色谱 (美国安捷伦仪器公司) 测定，TCD 检测器，载气为 Ar，进样口和检测器温度分别为 100℃ 和 150℃。柱箱采用程序升温，初始温度 40℃，保持 2 min，然后以 10℃/min 升到 80℃ 并保持 1 min。

1.4 数据分析和计算

1.4.1 累积产气量曲线拟合

厌氧发酵过程是厌氧微生物生长的过程，微生物典型生长曲线包括延滞期、对数期、稳定期和衰退期，而累积产气量不存在衰退期，故可用修正 Gompertz 方程^[13,15]式 (1) 来模拟累积产气曲线。

$$y = P \times \exp \left\{ -\exp \left[\frac{Rm \times e}{P} (k - x) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中， x 为发酵时间，d； y 为前 x 天的累积产气量，Nml·(gVS_{added})⁻¹； P 为最高产气量，Nml·(gVS_{added})⁻¹； Rm 为最高日产气率，Nml·(gVS_{added})⁻¹·d⁻¹； k 为延滞期，d； P 、 Rm 、 k 可由厌氧发酵实验数据拟合得到。

1.4.2 数据处理

采用 Origin Pro 9.0 进行绘图和曲线拟合。

2 结果与讨论

2.1 原料特性

原料的总固体和挥发性固体含量见表 1，象草的 TS 含量约为 15.16%，而芒草和五节芒的 TS 含量接近，为 53.86% ~ 55.38%，这主要与原料的生长时期有关。象草刈割时期为 7 月份，此时雨水和光照充足，象草处于生长旺盛期，故含水率高；而芒草和五节芒的刈割时期分别为 10 月底和 11 月中旬，两种植物处于花果期，部分茎叶已枯萎，故干

物质含量相对较高。草本植物不同生长时期的含水量变化显著，荻在北京地区7~12月的含水量分别为68.5%、55%、53%、45%、10%和7%^[16]，柳枝稷、荻、芦竹和杂交狼尾草在7月份的含水量可达到70%~76%以上，之后逐渐降低^[17]。

原料中纤维素、半纤维素和木质素含量见表1，象草中纤维素和半纤维素成分含量高，而木质素成分低；芒草和五节芒中纤维素和半纤维素总含量有所下降，而木质素含量却明显上升，尤其是芒草的木质素含量达到24.47%。生物质中的纤维素、半纤维素和木质素含量也会因生长阶段不同而发生变化。荻的纤维素含量在苗期、孕穗至开花期和生

育后期分别为20%~25%、30%以上和45%^[18]。杂交狼尾草中的纤维素和半纤维素的质量分数随着刈割时间的延长先增加后稍有降低，其中纤维素质量分数由28.02%升高至37.11%，半纤维素含量增加了25.47%，木质素的质量分数显著增加，从15.22%增加到22.87%^[19]。

象草、五节芒和芒草的C含量在40.94%~45.08%之间，生长期越长C含量相对越高。象草和芒草的N含量接近，但五节芒的N含量较低，为0.206%，因此五节芒C/N较高，达到167.57。象草、芒草、五节芒的热值分别为16.57、17.13、17.50 kJ·g⁻¹，与已发表文献[4,11,18]中生物质原料的热值一致。

表1 三种能源草原料的理化特性

Table 1 Characteristics of three kinds of perennial plants

Characteristics	Species			
	<i>Pennisetum purpureum</i>	<i>Miscanthus sinensis</i>	<i>Miscanthus floridulus</i>	
TS (%)	15.16	55.38	53.86	
VS (%)	12.81	52.09	50.74	
Calorific value (kJ/kg)	16566.2	17497.4	17128.5	
Elemental constituent	C (%)	40.94	44.65	45.08
	N (%)	0.74	0.889	0.269
	S (%)	1.09	0.12	0.11
	H (%)	5.87	7.39	7.06
	O (%)	35.86	41.16	41.54
	C/N	55.55	50.22	167.57
	Lignocellulose constituent (%)			
Cellulose	29.27	26.55	26.52	
Hemicellulose	26.61	28.42	22.16	
Lignin	17.99	19.34	24.47	

2.2 厌氧发酵性能

2.2.1 发酵液 pH 和 VFA 变化

厌氧消化过程中发酵液 pH 变化见图1，发酵初期象草、五节芒和芒草发酵系统的 pH 逐渐下降，并分别在第4、3和5 d时降至最低，随后发酵液的 pH 缓慢上升，到发酵后期 pH 稳定在7.9~8.17。芒草和五节芒发酵液中挥发酸成分变化见图2，发酵初期原料迅速降解并生成乙酸、丙酸、异丁酸、戊酸和乳酸等挥发性有机酸，且有机酸的产生速率远大于消耗速率，有机酸浓度不断上升。发酵3~5 d时，芒草和五节芒发酵液中总挥发酸含量达到最高分别为7399 mg·L⁻¹和6693 mg·L⁻¹，其中乙酸和丙酸

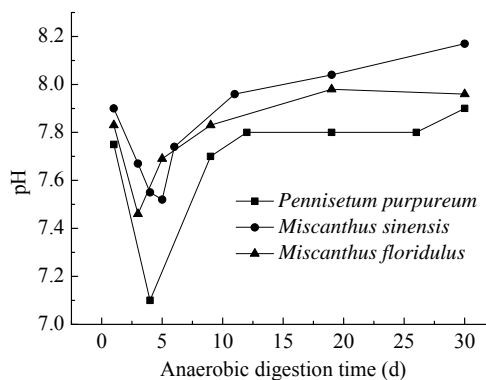


图1 三种能源草发酵过程发酵液 pH 的变化

Fig. 1 The variation of pH value during the anaerobic digestion process

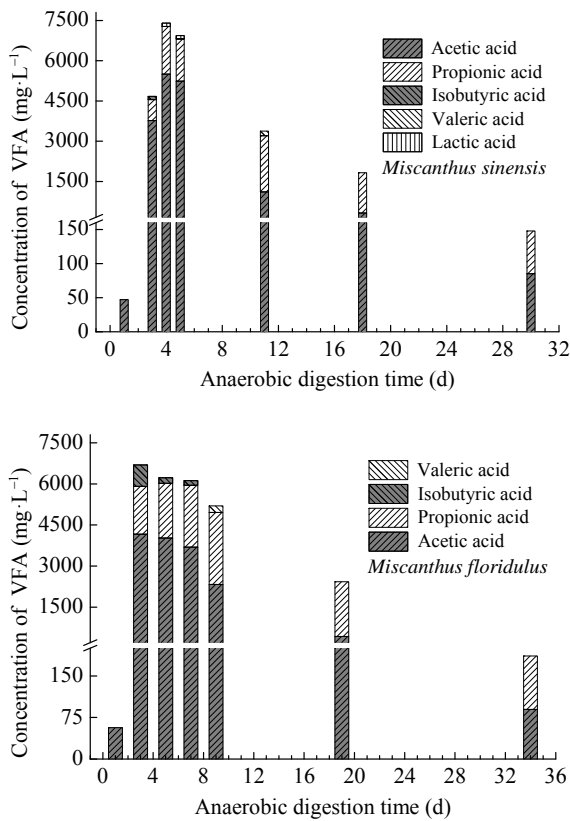


图2 芒草和五节芒发酵液中VFA的变化
Fig. 2 VFA during the digestion process of *Miscanthus sinensis* and *Miscanthus floridulus*

含量占总挥发酸含量的 88.30% ~ 98.39%，挥发酸的大量积累是导致发酵液 pH 降低的主要原因。随着产甲烷微生物大量生长，挥发酸物质逐渐被消耗，至发酵结束时仅剩乙酸和丙酸且含量均在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。可见，乙酸和丙酸是整个厌氧发酵过程中重要的中间代谢物。

2.2.2 生物燃气产气变化

三种能源草厌氧发酵日产气变化情况见图3。五节芒产气最快，加料后第1 d就达到日产气高峰，为 $24.84 \text{ Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，第3 ~ 28 d 日产气率稳定在 $5 \sim 12 \text{ Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ；芒草加料后在第3 d达到日产气高峰，为 $19.51 \text{ Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，第4 ~ 26 d 日产气率稳定在 $7 \sim 12 \text{ Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。象草在进料后的前6 d内未检测到明显气体产生，在第7 d达到产气高峰，为 $31.33 \text{ Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，之后日产气率逐渐下降。能源草厌氧发酵过程中日产气率与发酵液 pH 和 VFA 含量随发酵时间的变化显著相关。发酵初期，能源草原料在产酸微生物的作用下快速降解产生挥发酸物质，挥发酸的产生速度远大于消耗速度，引起 pH 下降，不利于产 CH_4

微生物的生存，日产 CH_4 率很低；在挥发酸物质的产生与消耗平衡点后，发酵液 pH 开始上升， CH_4 微生物开始大量繁殖，日产 CH_4 率也上升；到厌氧消化后期，挥发酸的浓度低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，发酵系统的 pH 稳定在 8 左右，产气基本停止。

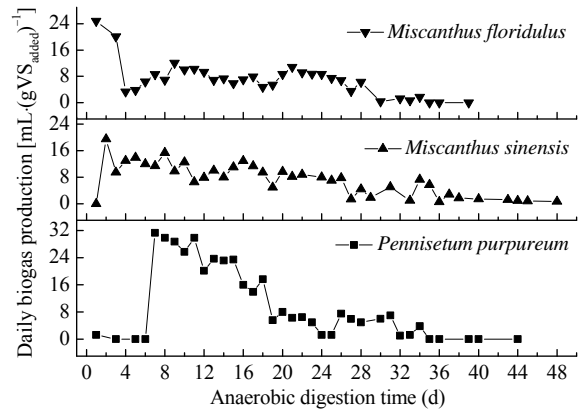


图3 三种能源草发酵的日产气率变化
Fig. 3 Daily biogas production of energy grasses

三种能源草厌氧发酵累积产气情况见图4，象草、芒草和五节芒的厌氧发酵的生物燃气产气率分别为 355.78 、 285.58 和 $235.38 \text{ Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$ ，产 CH_4 率为 166.43 、 109.89 和 $97.20 \text{ Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$ ，生物燃气中 CH_4 最高含量分别为 58%、48% 和 53%。三种原料的厌氧发酵性能差异主要与原料的刈割时间有关^[19,20]。象草刈割时正处于生长旺期，雨水、光照、温度条件适宜，原料中纤维素和半纤维素等易发酵产气的有机物含量高。芒草和五节芒刈割时处于花果期，原料中木质素等难降解发酵的有机物含量高。木质素降解需要氧环境，且木质素会影响纤维素和半纤维素的降解。因此，生长旺

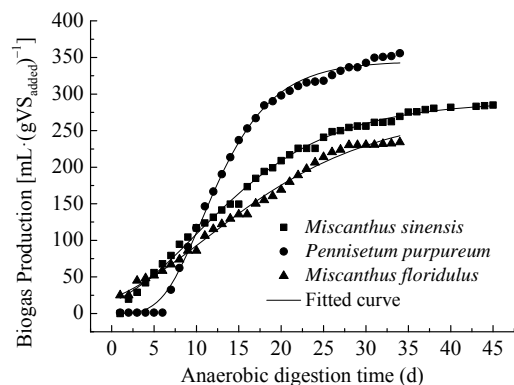
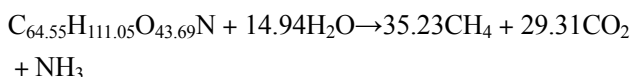


图4 能源草厌氧发酵的累积产气率及其拟合曲线
Fig. 4 Cumulative biogas productions and fit curves of modified Gompertz equation

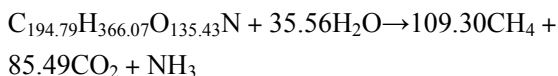
盛时期的能源草更适合作为厌氧发酵制备生物燃气的原料。

理论产 CH_4 能力指在标准状态下原料完全降解所获得的最大甲烷体积，可通过 Buswell^[21] 方程计算。本实验通过原料中的 C、H、O 和 N 元素含量（见表 1）分析得到原料中有机物近似化学式 $\text{C}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_c$ ，从而计算象草、五节芒和芒草理论产甲烷能力的方程如下。

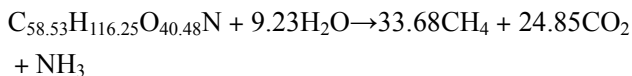
象草：



五节芒：



芒草：



根据方程可计算出象草、芒草和五节芒的理论产甲烷率分别为 492、507 和 499 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$ 。这三种能源草厌氧发酵过程的产 CH_4 率分别占理论

产 CH_4 的 33.83%、21.67% 和 19.48%。实际产甲烷率低的主要原因有两方面：一方面厌氧发酵过程中微生物的生长代谢会消耗掉一部分有机物，这部分有机物不能转化为 CH_4 ；另一方面与原料特性有关，原料中易降解转化为 CH_4 的有机物如纤维素和半纤维素等含量高，而木质素等难降解或阻止易降解有机物降解的有机物含量低，因此象草的产 CH_4 率占理论的比例高于芒草和五节芒。筛选高效的产 CH_4 微生物和对原料预处理是提高生物质产 CH_4 的重要途径^[22-24]。

2.2.3 产气曲线拟合

三种能源草厌氧消化过程的累积产气率变化经修正 Gompertz 方程拟合后见图 4，相应的模型参数见表 2。利用修正的 Gompertz 方程对实验数据拟合的效果较好，*R*-Square 均大于 0.99，该方程准确反映了三种能源草序批式中温厌氧发酵过程中延滞期和累积产气量的变化。根据拟合结果，象草、芒草和五节芒的累积产气量分别为 344.81、290.11 和 279.01 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$ ，最大日产气量分别为 27.39、11.67 和 8.87 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，厌氧发酵延滞期分别为 5.96、0.71 和 0 d，这与实验结果吻合，修正 Gompertz 方程能够准确地模拟能源草的厌氧发酵产气过程。

表 2 修正 Gompertz 方程的模型参数

Table 2 Model parameters of modified Gompertz equation

Energy grasses	<i>P</i> [$\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$]	<i>Rm</i> [$\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$]	<i>k</i> (d)	<i>R</i> -Square
<i>Miscanthus sinensis</i>	290.11	11.67	0.71	0.996
<i>Pennisetum purpureum</i>	344.81	27.39	5.96	0.997
<i>Miscanthus floridulus</i>	279.01	8.87	0	0.994

3 结 论

能源草的含水率及木质纤维素含量随生长期不同而变化。生长期越长，水分、纤维素和半纤维素含量相对越低，而木质素含量相对升高。

能源草厌氧发酵过程中，日产气率、发酵液 pH 和 VFA 三者变化显著相关。挥发酸含量高导致 pH 低，抑制产 CH_4 微生物生长，进而导致产 CH_4 率低。乙酸和丙酸是厌氧发酵过程重要的中间代谢物。

象草、芒草和五节芒的生物燃气累积产气率分别为 355.78、285.58 和 235.38 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$ ，产 CH_4 率为 166.43、109.89 和 97.20 $\text{Nml} \cdot (\text{gVS}_{\text{added}})^{-1}$ 。

象草的厌氧发酵性能优于芒草和五节芒的主要原因是原料中纤维素、半纤维素等易降解的有机物含量较高，难降解发酵的木质素含量低。木质纤维素含量可作为筛选制备生物燃气的能源草的重要标准。

修正的 Gompertz 方程能够准确模拟序批式中温厌氧发酵工艺中能源草的延滞期和累积产气量等指标。实际 CH_4 产率占理论值比例低，提高能源草厌氧发酵产气效率还有巨大空间，需进一步深入研究。

参考文献：

- [1] 曾汉元, 张伍佰, 刘光华, 等. 中国热带和亚热带地区能源草资源调查与初步筛选[J]. 中国农学通报, 2013, 29(20): 135-141.

- [2] Antizar-Ladislao B, Turrion-Gomez J L. Second-generation biofuels and local bioenergy systems[J]. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofr*. 2008, 2(5): 455-469.
- [3] 高瑞芳, 张建国. 能源草研究进展[J]. *草原与草坪*, 2013, 33(1): 89-96.
- [4] Oldenburg S, Westphal L, Körner I. Energy recovery of grass biomass[J]. *Biomass to Biofuels*, 2014: 1.
- [5] 邱崇洋, 杨炯超, 郭和蓉, 等. 8 种狼尾草属植物的生长性状比较分析[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(6): 97-101.
- [6] 曾祥艳. 生物新燃料——芒草的开发利用[J]. *广西热带农业*, 2007, 112(5): 37-38.
- [7] 萧运峰, 高洁. 五节芒的生产性状及饲用价值的研究[J]. *草业与畜牧*, 1997(1): 20-24.
- [8] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 纤维素类能源草在京郊地区的经济效益与生态价值评价[J]. *草业学报*, 2011, (6): 12-17.
- [9] Wunsch K, Gruber S, Claupein W. Profitability analysis of cropping systems for biogas production on marginal sites in southwestern Germany[J]. *Renewable Energy*, 2012, 45: 213-220.
- [10] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J]. *中国草地学报*, 2012, 34(1): 59-64.
- [11] Korres N E, Thamsiriroj T, Smyth B M, et al. *Grass Biomethane for Agriculture and Energy*[M]. 2011.
- [12] Abu-Dahrieh J, Orozco A, Groom E, et al. Batch and continuous biogas production from grass silage liquor[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(23): 10922-10928.
- [13] Benbelkacem H, Bayard R, Abdelhay A, et al. Effect of leachate injection modes on municipal solid waste degradation in anaerobic bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5206-5212.
- [14] Gao Y S, Xu J L, Zhang Y, et al. Effects of different pretreatment methods on chemical composition of sugarcane bagasse and enzymatic hydrolysis[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 144: 396-400.
- [15] Donoso-Bravo A, Perez-Elvira S I, Fdz-Polanco F. Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests. Evaluation of pre-treatment processes[J]. *Chem Eng J*, 2010, 160(2): 607-614.
- [16] 范希峰, 侯新村, 左海涛, 等. 三种草本能源植物在北京地区的产量和品质特性[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(16): 3316-3322.
- [17] 范希峰, 侯新村, 朱毅, 等. 杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J]. *中国草地学报*, 2012, 34(1): 48-52.
- [18] 范希峰, 左海涛, 侯新村, 等. 芒和荻作为草本能源植物的潜力分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 381-387.
- [19] 李连华, 孙永明, 孔晓英, 等. 刈割时间对杂交狼尾草的成分及厌氧发酵性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 155-161.
- [20] Prochnow A, Heiermann M, Plochl M, et al. Bioenergy from permanent grassland-A review: 1. Biogas[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 4931-4944.
- [21] Buswell A M, Mueller HF. Mechanics of methane fermentation[J]. *Journal of Industrial Engineering Chemistry*, 1952, 44: 550-552.
- [22] 袁旭峰, 高瑞芳, 李培培, 等. 复核菌系 MC1 预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷效率的提高[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 266-270.
- [23] 罗娟, 张玉华, 陈羚, 等. CaO 预处理提高玉米秸秆厌氧消化产沼气性能[J]. *农业工程学报*, 2013(15): 192-199.
- [24] 张冰. 污泥中产甲烷细菌多样性及产甲烷效能的优化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.

作者简介:

牛红志 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事生物质能源生化转化技术研究。

孔晓英 (1973-), 女, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事生物质能源生化转化和微生物燃料电池研究。