

能源草厌氧发酵产气性能与动力学分析

张毅^{1,2} 孔晓英^{1,3} 李连华^{1,4} 孙永明^{1,3} 杨立贵^{1,2} 袁振宏^{1,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
4. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

摘要: 选取象草和杂交狼尾草等5种能源草为发酵原料,采用中温批式厌氧消化工艺,研究能源草发酵前后理化特性变化和发酵产气性能,并对累积产气动力学分析。研究表明:不同能源草的发酵产气性能与原料特性之间有一定的关系,其产气率与木质素成负线性相关。杂交狼尾草由于刈割时生长时间较长,使得木质素质量分数(24.88%)较高,其产气性能较差,实际产甲烷率仅为理论产甲烷率的26.95%,而华南象草刈割时木质素质量分数(15.82%)较低,其产气性能较好,VS累积产气率为379.58 mL/g,VS产甲烷率为228.55 mL/g,生物燃气中甲烷体积分数为60.21%。对累积产气曲线拟合,发现采用修正 Gompertz 方程能较好模拟能源草发酵累积产气率的变化过程。该研究可对能源草的能源化开发利用提供参考。

关键词: 能源草; 厌氧发酵; 生物燃气; 产气性能; 动力学

中图分类号: S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0191-06

Biogas Production Performance and Dynamics of Anaerobic Digestion of Different Energy Grasses

Zhang Yi^{1,2} Kong Xiaoying^{1,3} Li Lianhua^{1,4} Sun Yongming^{1,3} Yang Ligui^{1,2} Yuan Zhenhong^{1,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
4. Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Energy grass, as the second generation of new energy crops, has a brightly development prospect. Five kinds of energy grasses were selected as the raw materials. Their physico-chemical characteristics were investigated together with the biogas production performances of anaerobic digestion in the process of laboratory scaled batch anaerobic fermentation at mesophilic temperature(35℃). And the dynamics of cumulative biogas production was analyzed. The results indicate that these energy grasses have good performances for the biogas production. But there are great differences in the relationship between the biogas production performances and the energy grass properties. The biogas yield and the lignin content are in a negative linear correlation, it means the lower is the lignin content of raw materials, the better is biogas production performance. The lignin content of *Hybrid Pennisetum* (24.88%) is higher for its long time growth, so it has a worse biogas production performance and the specific methane yield is only about 26.95% of the theoretical methane production. While the lignin content of *Pennisetum purpureum* cv. Huanan is lower, it has a better anaerobic digestion performance: the cumulative biogas yield, methane yield and methane content are 379.58 mL/g, 228.55 CH₄ mL/g and 60.21%, respectively. By fitting the cumulative gas production curve, it was concluded that the energy grass digestion process of cumulative biogas production could be appropriately described by the modified Gompertz equation. This study provides a reference for the development and utilization of different energy grasses.

Key words: energy grass; anaerobic digestion; biogas; gas production performance; dynamics

收稿日期: 2015-11-18 修回日期: 2016-01-10
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA101802)、中国科学院重点部署项目(KGZD-EW-304-1)、广东省科技计划项目(2015B020215011)和广州市科技计划项目(201508020098)
作者简介: 张毅(1990—),男,博士生,主要从事生物质能源生化转化研究,E-mail: zhangyi@ms.giec.ac.cn
通信作者: 孔晓英(1973—),女,研究员,主要从事生物质能源生化转化研究,E-mail: kongxy@ms.giec.ac.cn

引言

开发利用生物质能源不仅能减少化石燃料消耗和保护生态环境,同时也有利于推进经济社会的可持续发展。能源草本植物作为一种重要的生物质能源,具有光合转化效率高、生物量大、抗逆性强、适应性广和热值高等特点,正越来越受到各国的重视^[1-2]。

利用能源草等纤维类植物厌氧发酵制备生物燃气是其转化成生物燃料最有前景的方式之一。目前,对能源草发酵产沼气的研究主要集中于草种原料筛选、预处理方法和产气性能方面。如对柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.)^[3]、互花米草 (*Spartina alterniflora* Loisel)^[4]、杂交狼尾草 (*Hybrid Pennisetum*)^[5]等能源草高效厌氧发酵产生物燃气的预处理方式进行了研究,并且发现不同时期刈割的柳枝稷、草庐 (*Phalaris arundinaceae* L.)、洋姜 (*Helianthus tuberosus*)和梯牧草 (*Phleum pratense*)等能源草对制备生物燃气的产量有较大的影响^[6],另外研究了柳枝稷^[3]、香根草 (*Vetiveria zizanioides*)^[7]、篁竹草 (*Herba Andrographitis*)^[8]等能源草厌氧发酵的产气性能,而以狼尾草属 (*Pennisetum* Rich) 能源草的报道主要集中在草种的种植和生长特性^[9-10],在厌氧发酵产气性能上研究较少。以象草和杂交狼尾草为代表的狼尾草属与其他禾本科植物相比,狼尾草属植物的产量更高,且对生长环境适应性更强^[11]。因此,本文选取巴西象草 (*Pennisetum purpureum*)、华南象草 (*Pennisetum purpureum* cv. Huanan)、矮象草 (*Pennisetum purpureum* cv. Mott)、台牧 B、杂交狼尾草为发酵原料,研究不同能源草的原料特性和发酵产气性能,并对能源草的厌氧发酵动力学性能进行分析,为筛选合适的能源草厌氧发酵原料提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验原料为多年生草本植物巴西象草、华南象草、矮象草、台牧 B、杂交狼尾草,均属狼尾草属,于 2014 年 8 月 19 日采自广州市增城宁西实验基地。刈割的鲜料被切割成 2 cm 左右,在粉碎机中粉碎成粉末状,装包置于 -20℃ 冰箱中保存。接种物为实验室长期驯化的厌氧发酵微生物混合菌群,总固体 (TS) 质量分数为 1.78%,挥发性固体 (VS) 质量分数为 1.15%。

1.2 实验装置及操作

实验装置见图 1。实验装置中的 2.5 L 玻璃反

应器,其侧壁上有 2 个出口,上出口为取气样口,下出口为取液样口,上出口处连接集气瓶,集气瓶后连通集液瓶。反应器置于 (35 ± 1)℃ 的水浴锅中。每个反应器加入 1 800 mL 接种物,发酵原料以 40 g 挥发性固体 (VS) 计,原料与接种物的 VS 质量比为 3.5:1,并添加 2.5% 的 NH_4HCO_3 作为缓冲剂和补充氮源。每组实验设置 2 个平行,另外设置空白对照组仅加入接种剂发酵。向反应器顶部充入高纯 N_2 以排除空气。当发酵液的 pH 值低于 6.50 时,加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节 pH 值在 7.20 左右。实验期间每天手动早晚搅拌 1 次,整个厌氧消化过程直至无气体产出为止,共运行 38 d。

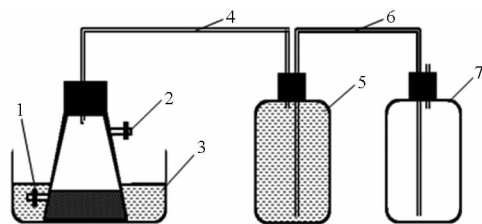


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental sketch of anaerobic digestion

1. 液样口 2. 气样口 3. 恒温水浴锅 4. 导气管 5. 集气瓶
6. 排水管 7. 集液瓶

1.3 测试和分析方法

TS 和 VS 分别采用 105℃ 干燥和 550℃ 煅烧法测定;不同能源草原料的 C、H、N 和 S 元素质量分数采用 Vario EL cube 元素分析仪 (德国 Elementar 公司) 测定;原料的热值 (Calorific value, CV) 由量热仪 C2000 (德国 IKA 公司) 测定;发酵液的 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);原料和发酵后的沼渣纤维素、半纤维素和木质素含量测定参考美国可再生能源实验室标准分析方法 (LAP, NREL);生物燃气中 CH_4 和 CO_2 等气体含量采用岛津 GC2014 型气相色谱测定, TCD 检测器, Porapak Q 色谱柱, 载气为 Ar, 柱箱和检测器温度分别为 50℃ 和 120℃, 测样时间 5 min。

1.4 数据处理

对于批式厌氧发酵产生物燃气过程,可采用修正 Gompertz 方程^[12]来模拟累积产气率曲线。

$$B = P \exp \left(- \exp \left(\frac{R_m e}{P} (k - t) + 1 \right) \right) \quad (1)$$

式中 B ——时间 t 的累积产气率, mL/g

P ——最大累积产气量, mL/g

R_m ——最大产气速率, mL/(d·g)

k ——延滞期时间, d

P 、 R_m 和 k 可通过发酵实验数据拟合得到。

采用 Origin Pro 9.0 软件进行绘图及数据拟合。

2 结果与讨论

2.1 能源草发酵前后的物化特性

实验所采用的多种能源草发酵前后的理化特性如表 1。从表可见 5 种能源草的理化特性差异较大。原料中 C 的质量分数为 42.64% ~ 45.72%, N 的质量分数为 0.53% ~ 0.81%, 杂交狼尾草 C 和 N 元素的含量要比象草类的低, C 和 N 元素质量分数分别为 42.64% 和 0.53%。原料的碳氮比为 53.80 ~ 84.67, 而一般适宜厌氧发酵的碳氮比在 20 ~ 30 之间, 因而在实验中加入 NH_4HCO_3 补充氮源。杂交狼尾草热值较高为 18.50 kJ/g, 这与其较高的总固体(TS)含量和可挥发性固体(VS)含量有关, 象草类热值相差较小, 为 17.01 ~ 17.43 kJ/g。杂交狼尾草 TS 质量分数为 36.72%, 比象草类的 TS 质量分数要高 20% ~ 30%。发酵前后能源草的理化特性有较大的差异: 发酵前原料中 VS 占 TS 百分比和纤维素、半纤维素、木质素的质量分数分别为 94.22% ~ 95.49%、40.71% ~ 45.01%、18.87% ~ 22.86% 和 15.82% ~ 24.88%, 其中不同草种之间木质素含量差异较大, 与能源草生长时间有关, 李连华等^[13]发现杂交狼尾草的木质素随着刈割时间的延长逐渐升高, 实验中杂交狼尾草的生长时间长于其它能源草, 因而其木质素含量最高为 24.88%。发酵后能源草 VS 占 TS 百分比以及纤维素、半纤维素、木质素质量分数分别为 62.46% ~ 80.01%、28.66% ~ 37.30%、17.05% ~ 19.47% 和 27.63% ~ 35.56%, VS 质量分数减少的原因主要是纤维素和

表 1 能源草发酵前后的理化特性

Tab.1 Characteristics of different energy grasses

理化特性	巴西象草	华南象草	矮象草	台牧 B	杂交狼尾草
C 质量分数/%	44.38	45.72	43.58	44.51	42.64
N 质量分数/%	0.70	0.54	0.81	0.58	0.53
碳氮比	63.40	84.67	53.80	76.74	80.45
热值/(kJ·g ⁻¹)	17.38	17.43	17.01	17.61	18.50
TS 质量分数/%	28.35	30.40	27.54	28.44	36.72
VS 质量分数/%	27.00	28.18	25.05	26.70	34.48
发酵前 VS 占 TS 百分比/%	94.22	95.49	94.23	95.23	95.00
发酵前纤维素质量分数/%	40.71	41.94	40.72	42.34	45.01
发酵前半纤维素质量分数/%	21.01	18.87	22.86	22.72	20.05
发酵前木质素质量分数/%	18.82	15.82	22.18	19.44	24.88
发酵后 VS 占 TS 百分比/%	68.31	62.46	72.57	69.49	80.01
发酵后纤维素质量分数/%	30.09	29.98	28.66	33.28	37.30
发酵后半纤维素质量分数/%	18.19	17.05	17.47	19.47	19.20
发酵后木质素质量分数/%	30.74	29.66	27.63	31.69	35.56

半纤维素易被厌氧发酵过程中微生物利用, 而难降解的木质素较少被利用, 因而纤维素和半纤维素含量减少, 木质素含量升高。根据数据可知, 能源草中木质素含量越高, 相应的 TS 中的 VS 被降解的越少, 如华南象草木质素质量分数较低为 15.82%, VS 被降解的最多 33.03%, 而杂交狼尾草的木质素质量分数较高为 24.88%, VS 被利用的最少为 14.99%。

2.2 厌氧发酵产气性能分析

能源草的日产沼气量随厌氧发酵时间的变化如图 2 所示, 可见不同能源草发酵产气的总体趋势大致相同。开始发酵第 2 天出现产气高峰, 这主要是微生物将原料中易利用的成分被快速降解, 根据气象色谱分析产生气体的成分, 发现其中 CH_4 体积分数低于 10%, 而 CO_2 约为 50%, 这与此时系统中发酵型细菌占优势有关。第 2 天杂交狼尾草的日产气高峰较低, 仅为其它能源草日产气高峰的 1/3, 这可能与它具有较高含量的难降解木质纤维素有关, 影响了原料的水解速率。当发酵过程进行到第 3 天时, 测量发酵液的 pH 值发现其低于 6.50, 挥发酸出现了积累, 导致日产气量降低, 在第 5 天到第 7 天其日产气量均低于 500 mL。在发酵过程进行到第 7 天加入适量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节发酵液的 pH 值为 7.20 左右, 各反应器才开始正常产气。在反应进行到第 7 天到第 15 天, 此阶段进入产甲烷的旺盛期, 根据气象色谱测得生物燃气中的 CH_4 体积分数均高于 50%。华南象草和杂交狼尾草在第 10 天达到产气高峰, 日产气量分别为 1 155 mL 和 950 mL; 巴西象草、矮象草和台牧 B 在第 12 天的时候达到产气高峰, 最大日产气量分别为 1 825 mL、1 300 mL 和 1 400 mL。在经过产气高峰后, 各反应器发酵产气量逐渐减少, 最后趋于稳定直至产气停止。

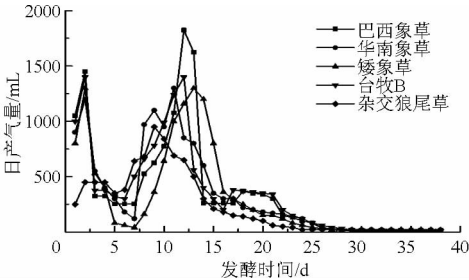


图 2 能源草厌氧发酵过程中的日产气量

Fig.2 Daily biogas production of anaerobic digestion of different energy grasses

能源草厌氧发酵过程的累积产气率见图 3, 巴西象草、华南象草、矮象草、台牧 B 和杂交狼尾草的 VS 产气率分别为 316.79、379.58、308.55、314.76、211.76 mL/g, VS 产甲烷率分别为 150.82、228.55、

162.76、172.74、113.46 mL/g,相应的甲烷体积分数为47.16%、60.21%、52.75%、54.88%和53.58%。原料中木质素含量的高低对发酵产气量非常关键^[14],主要原因是原料中难降解木质素阻碍了微生物大量利用有机物,从而影响了原料的发酵产气性能。能源草产气率差异可能与原料刈割时所处的生长期有关,随着作物生长阶段的延长,其所含有木质素和半纤维素增加而粗蛋白和粗脂肪降低,相比于发酵刈割时间较短的杂交狼尾草^[15],本实验中杂交狼尾草由于生长时间较长,其木质素质量分数较高(24.88%),原料中只有小部分的有机物被利用,而其主要成分木质纤维素被降解的较少,因而使得杂交狼尾草的累积产气率和产甲烷率较低。华南象草因其较低的木质素质量分数(15.82%),其累积产气率和产甲烷率最高。通过对能源草的发酵产气率和木质素拟合,发现线性方程 $y = 638.5 - 16.42x$ 能准确地反映产气率与木质素之间的关系,其中 y 和 x 分别为能源草的产气率和木质素质量分数, $R^2 = 0.845$,草料中木质素含量越高,相应的累积产气率越低,这与TRIOLO等^[16]研究能源作物发酵产气率与木质素之间的关系相一致。

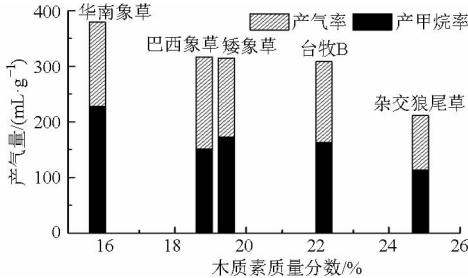


图3 能源草发酵的产气率和产甲烷率
Fig.3 Cumulative biogas yield and methane yield of anaerobic digestion of different energy grasses

2.3 能源草理论产甲烷潜力

理论产甲烷潜力(TMP)指原料在标准状态下完全降解所能获得的最大甲烷体积,可通过Buswell方程^[17]计算。本实验可根据原料中C、H、O和N的元素分析得出各能源草的 $C_nH_aO_bN_c$,见表2。可知华南象草理论VS产甲烷潜力最高为464 mL/g,杂交狼尾草理论VS产甲烷潜力最低为421 mL/g,前者比后者的TMP高10%,而巴西象草、矮象草和台牧B的理论产甲烷潜力差异较小。能源草厌氧发酵的实际产甲烷率远低于理论产甲烷潜力,其生物降解率处于26.95%~49.26%之间,这主要是因为

在厌氧发酵过程中,微生物由于自身的生长代谢会消耗部分有机物,另外原料中存在的情性有机物不能被微生物降解利用^[14],如能源草中富含微生物难以降解的木质素类有机物,造成发酵速率缓慢,原料

利用效率不高。华南象草因含有较低的难降解木质素,易被微生物利用的有机物更多,其生物降解率较高为49.26%,而杂交狼尾草含有较高的木质素,原料中大部分有机物未被降解利用,因而生物降解率较低,仅为26.95%。因此,有必要针对能源草等高含量木质素类原料,采用合适的预处理方式,增加原料的可降解利用性,提高能源草厌氧发酵产气性能的研究。

表2 能源草的理论产甲烷潜力及厌氧发酵性能
Tab.2 Theoretical methane potential and anaerobic digestion performance of different energy grasses

能源草	$C_nH_aO_bN_c$	理论 VS 产	实际 VS 产	生物
		甲烷潜力/ ($mL \cdot g^{-1}$)	甲烷率/ ($mL \cdot g^{-1}$)	降解率/%
巴西象草	$C_{73.97}H_{121.18}O_{53.75}N$	456	150.82	33.07
华南象草	$C_{98.78}H_{157.91}O_{69.82}N$	464	228.55	49.26
矮象草	$C_{62.77}H_{107.25}O_{46.98}N$	450	162.76	36.17
台牧B	$C_{89.53}H_{148.33}O_{66.31}N$	452	172.74	38.22
杂交狼尾草	$C_{93.86}H_{155.90}O_{75.75}N$	421	113.46	26.95

2.4 累积产气曲线拟合

目前,有关生物质厌氧发酵产甲烷过程的动力学研究,一般遵循一级反应动力学方程。如CHYNOWETH等^[18]提出以生物质和废水为原料的厌氧发酵产甲烷模型,LUNA-DELRISCO等^[19]通过修正Chynoweth的方程建立了拟合系数较高的多种有机废弃物产甲烷模型,但是,这些模型与本实验中能源草实际厌氧发酵过程存在较大的偏差,而采用修正的Gompertz方程^[12]能较好地预测厌氧发酵产气特性。能源草厌氧消化的累积产气曲线经修正Gompertz方程拟合后见图4,模型参数见表3, R^2 均大于0.99,能准确反映能源草厌氧发酵过程中的延滞期和累积产气率的变化。厌氧发酵延滞期的长短与反应初期原料中易被微生物消化利用的物质有关,矮象草的延滞期最长为6.22 d,其它原料的延滞期为0~0.72 d。拟合曲线的累积VS产气率最高和最低的分别为华南象草(378.21 mL/g)和杂交狼尾草(210.31 mL/g),与巴西象草(379.58 mL/g)和杂交狼尾草(211.76 mL/g)的实际累积产气率非常接近。在最大日产气速率上,杂交狼尾草最慢为8.86 mL/(d·g),而巴西象草最快达到29.87 mL/(d·g),这与实验过程中的日产气量的变化基本一样。

3 结论

(1)不同能源草品种的原料特性差异较大,与草种和其生长时间有关,其中杂交狼尾草由于刈割时生长时间较长,其TS、VS、热值和木质素含量均比

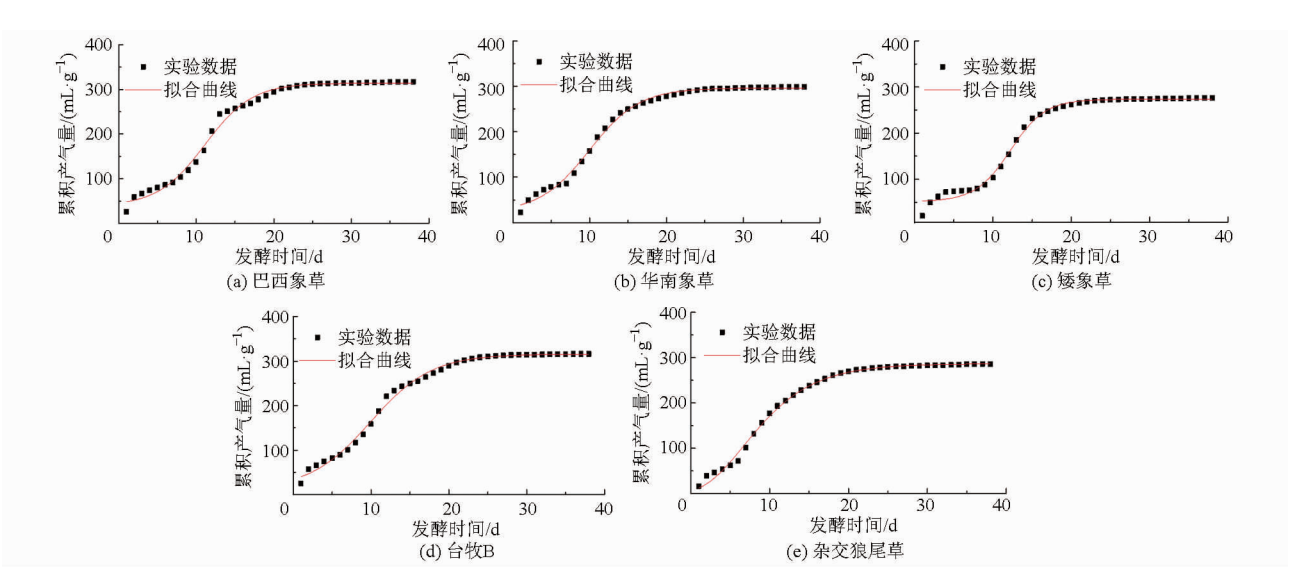


图 4 不同能源草厌氧消化过程的实际累积产气量与修正 Gompertz 方程拟合曲线

Fig. 4 Cumulative biogas production and modified Gompertz equation fit curves for different energy grasses

表 3 修正 Gompertz 方程的模型参数

能源草	$P/(mL \cdot g^{-1})$	$R_m/(mL \cdot d^{-1} \cdot g^{-1})$	k/d	R^2
巴西象草	313.98	23.95	0.72	0.992
华南象草	378.21	29.87	0.17	0.995
矮象草	305.80	11.25	6.22	0.992
台牧 B	314.10	13.63	0.06	0.995
杂交狼尾草	210.31	8.86	0	0.998

象草类草种高,并且其发酵前后的理化特性变化较小。

(2)5 种能源草在实验室中温批式厌氧发酵条

件下,均具有良好的发酵产气性能。能源草的发酵产气性能与原料特性之间有较大关系,其产气率与原料中木质素呈负线性相关。杂交狼尾草由于刈割时生长时间较长,使得木质素质量分数(24.88%)较高,其产气性能较差,实际产甲烷率仅为理论产甲烷率的 26.95%,而华南象草因生长时间较短而具有较低的木质素质量分数(15.82%),其 VS 累积产气率和 VS 产甲烷率分别为 379.58、228.55 mL/g。

(3)对累积产气曲线拟合,发现采用修正 Gompertz 方程能较好模拟能源草中温批式厌氧发酵累积产气率的变化过程。

参 考 文 献

1 高瑞芳,张建国. 能源草研究进展[J]. 草原与草坪, 2013,33(1): 89-96.
GAO Ruifang,ZHANG Jianguo. Research process in bioenergy grasses[J]. Grassland and Turf, 2013,33(1): 89-96. (in Chinese)

2 LEWANDOWSKI I, SCURLOCK J M O, LINDVALL E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe[J]. Biomass & Bioenergy, 2003, 25(4): 335-361.

3 JACKOWIAK D, FRIGON J C, RIBEIRO T, et al. Enhancing solubilisation and methane production kinetic of switchgrass by microwave pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 3535-3540.

4 邹星星,郑正,杨世关,等. 汽爆预处理对互花米草厌氧发酵产气特性的影响[J]. 中国环境科学, 2009,29(10): 1117-1120.
ZOU Xingxing, ZHENG Zheng, YANG Shiguan, et al. Effect of steam explosion pretreatment on biogas production characteristics of anaerobic fermentation of *Spartina Alterniflora*[J]. China Environmental Science, 2009,29(10): 1117-1120. (in Chinese)

5 LI L H, KONG X Y, YANG F Y, et al. Biogas production potential and kinetics of microwave and conventional thermal pretreatment of grass[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2012, 166(5): 1183-1191.

6 LEHTOMAKI A, VIINIKAINEN T A, RINTALA J A. Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production[J]. Biomass & Bioenergy, 2008, 32(6): 541-550.

7 胡晓明,张建萍,张无敌,等. 香根草中温发酵产沼气的试验研究[J]. 科技信息, 2008(27): 8-9.
HU Xiaoming, ZHANG Jianping, ZHANG Wudi, et al. Experimental study on mesophilic biogas fermentation with *Vetiveria zizanioides*[J]. Science & Technology Information, 2008(27): 8-9. (in Chinese)

8 罗艳,郑正,杨世关,等. 皇竹草厌氧发酵产沼气特性[J]. 环境化学, 2010,29(2): 258-261.
LUO Yan, ZHENG Zheng, YANG Shiguan, et al. Study on the fermentation characteristics of *Herba Andrographitis* [J]. Environmental Chemistry, 2010,29(2): 258-261. (in Chinese)

9 TAKARA D, KHANAL S K. Characterizing compositional changes of *Napier* grass at different stages of growth for biofuel and biobased products potential[J]. Bioresource Technology, 2015, 188: 103 – 108.

10 DEL RIO J C, PRINSEN P, RENCORET J, et al. Structural characterization of the lignin in the cortex and pith of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) stems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(14): 3619 – 3634.

11 张蕴薇,杨富裕,孙永明. 生物质能源工程——能源草概论[M]. 北京:化学工业出版社, 2014.

12 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.

13 李连华,孙永明,孔晓英,等. 刈割时间对杂交狼尾草成分及厌氧发酵性能影响试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 155 – 161.

LI Lianhua, SUN Yongming, KONG Xiaoying, et al. Effect of growth stages on performance of anaerobic digestion and physico-chemical properties of *Pennisetum Hybrid*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 155 – 161. (in Chinese)

14 AMON T, AMON B, KRYVORUCHKO V, et al. Biogas production from maize and dairy cattle manure—influence of biomass composition on the methane yield[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, 118(1–4): 173 – 182.

15 李连华,孙永明,袁振宏,等. 能源草单独厌氧发酵产气性能研究[J]. 中国沼气, 2014,32(1): 18 – 22.

LI Lianhua, SUN Yongming, YUAN Zhenhong, et al. Mono-digestion of different energy grass and biogas production[J]. China Biogas, 2014,32(1): 18 – 22. (in Chinese)

16 TRIOLO J M, SOMMER S G, MOLLER H B, et al. A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: influence of lignin concentration on methane production potential[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(20): 9395 – 9402.

17 BUSWEI A M, MUEIER H F. Mechanics of methane fermentation[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1952, 44(3): 550 – 552.

18 CHYNOWETH D P, TURICK C E, OWENS J M, et al. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks[J]. Biomass & Bioenergy, 1993, 5(1): 95 – 111.

19 LUNA-DELRISCO M, NORMAK A, ORUPOLD K. Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia[J]. Agronomy Research, 2011, 9(1–2): 331 – 342.