

香蕉杆组分测定及其产沼气潜力的研究*

Determination of Banana Stalk Components and its Researches on the Biogas Potential

潘世优^{1,2}, 文川^{1,2}, 张平^{1,2}, 黎贞崇³, 韦宇拓^{1,2**}

PAN Shiyu^{1,2}, WEN Chuan^{1,2}, ZHANG Ping^{1,2}, LI Zhenchong³, WEI Yutuo^{1,2}

(1. 广西大学生命科学与技术学院, 广西南宁 530005; 2. 亚热带农业资源保护利用与利用国家重点实验, 广西南宁 530005; 3. 广西科学院, 广西南宁 530007)

(1. College of Life Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530005, China; 2. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-biore-sources, Nanning, Guangxi, 530005, China; 3. Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

摘要:【目的】测定香蕉杆中的纤维素、半纤维素和木质素组分, 并对其发酵产沼气的潜力进行研究, 以期为香蕉杆的资源化利用提供可靠的基础资料。【方法】分别采用改进后的硫酸-重铬酸钾氧化法、2 mol/L 盐酸水解法和 72% 浓硫酸法测定香蕉杆中纤维素、半纤维素和木质素的含量; 在 35℃ 恒温条件下进行厌氧发酵产沼气, 绘制不同原料产沼气过程变化曲线图。【结果】香蕉杆纤维素、半纤维素和木质素含量分别为 17. 47%、11%、6. 86%, 其厌氧发酵产沼气最高可达到 (155±3) mL/g TS。【结论】香蕉杆纤维含量较高, 可作为沼气发酵原料使用, 为香蕉杆的资源化利用提供有益参考。

关键词: 香蕉杆 纤维含量 组分测定 厌氧消化 沼气 潜力

中图分类号: S59 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2017)02-0206-06

Abstract: 【Objective】The components of cellulose, hemicellulose and lignin in banana stalk were determined and its fermentation to produce biogas potential was studied to provide reliable basic data for the utilization of banana stalk. 【Methods】Cellulose of banana stalk was measured by potassium dichromate oxidation titration. Hemicellulose was the hydrolysis of 2 mol/L HCl. The lignin was separated by acetate and hydrolyzed by 72% H₂SO₄. Under constant temperature of 35℃ in water bath, different raw materials were anaerobically fermented in the simple device. Then, the curve drawing of biogas processes in different raw materials was mapped. 【Results】The component of cellulose, hemicellulose and lignin in banana stalk were 17. 47%, 11% and 6. 86%, respectively. It presented that banana stalk was a good biomass raw material and its biogas production potential could reach to (155±3) mL/g TS. 【Conclusion】In view of highly lignocellulosic component, banana stalk could be used as a raw material for biogas production.

Biogas fermentation would provide a good reference for the research and development of the comprehensive utilization of vegetable waste.

Key words: banana stalk, lignocellulosic, component determination, anaerobic digestion, biogas, potential

收稿日期: 2016-12-08

作者简介: 潘世优(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事微生物生物技术研究。

* 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 14124004-3-4)资助。

** 通信作者: 韦宇拓(1971-), 男, 教授, 主要从事发酵与酶工程方面的研究, E-mail: weiyutuo@gxu. edu. cn.

0 引言

【研究意义】我国是香蕉生产大国^[1],但是在收获大量香蕉产品的同时也产生了大量的香蕉杆。据统计,每年收获 1 hm² 香蕉就会产生大约 100 t 的香蕉杆^[2],既造成巨大的生物资源浪费,又严重影响生态环境。香蕉杆等副产物含有丰富的营养和纤维^[3-4],可用于生物质能源的开发,这对改善农村生态环境、提高香蕉产值和增加蕉农收入等均具有重要的意义。

【前人研究进展】国外学者 Deivanai 等^[5]提取香蕉杆的纤维,测得香蕉杆纤维中的纤维素、半纤维素和木质素分别为 42%、14%、8.67%,但其并未直接以香蕉杆原料为样品进行测定。Khan 等^[6]对比了香蕉杆、香蕉皮、香蕉果肉和香蕉果实的产气潜力,其中香蕉杆产气能力最低,为 0.256 m³/kg VS。在国内,熊月林等^[7]指出香蕉茎纤维中纤维素、半纤维素和木质素总量可达 90%以上,具有广阔的开发前景。李坤等^[8]对香蕉茎的化学成分进行测定和分析,得出香蕉茎纤维的纤维素和综纤维素分别为 39.12% 和 72.72%,木素含量低,为 10.78%,这与 Jústiz-Smith 等^[9]研究的结果类似。【本研究切入点】香蕉杆纤维素、半纤维素和木质素含量丰富,可资源化利用;而其他农作物秸秆相比,香蕉杆厌氧发酵产沼气的研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】在前人研究基础上^[10-13],直接以香蕉杆原料为样品,测定香蕉杆纤维素、半纤维素和木质素的含量,并对其发酵产沼气的潜力进行研究,为香蕉杆的能源化利用提供有益参考。

1 材料与方 法

1.1 材料

(1) 发酵原料

香蕉杆来源于广西大学农学院果园,去除心蕊部分,取用新鲜部分压榨去汁,一部分剪碎成 5 mm×5 mm,用于厌氧发酵产沼气;另外一部分于 65℃ 烘箱烘干,粉碎,过 60 目筛,用于接种物的驯化和纤维素、半纤维素和木质素的测定。玉米秸秆、水稻秸秆采集于广西大学农学院实验田基地,均取用新鲜部分,剪碎成 5 mm×5 mm,用于厌氧发酵产沼气。

(2) 接种物

采取广西大学东校园碧云湖池塘底泥,取回后去除树叶等杂质,调节污泥浓度,分装置于 2.5 L 广口瓶,加入 15 g 香蕉杆粉末,用带孔橡胶塞封口,置于 35℃ 培养箱,每天摇瓶一次,驯化周期为 40 d。

(3) 试剂

重铬酸钾、浓硫酸、硝酸钙等试剂药品均为市售分析纯。

1.2 方法

1.2.1 香蕉杆纤维素、半纤维素和木质素的测定

(1) 纤维素

使用硫酸-重铬酸钾氧化法^[14]测定,具体测定步骤:称取约 0.06 g 香蕉杆粉末于磨口试管中,加入冰醋酸和硝酸混合液(V:V=2:1)5 mL,沸水浴 25 min,定期搅拌。取出,冷却后转移入离心管,12 000 r/min 离心 3 min,用蒸馏水洗涤沉淀,直至沉淀变为白色为止。加入 10 mL 0.1 mol/L 重铬酸钾溶液和 8 mL 浓硫酸,混匀,沸水浴 10 min。冷却后转至锥形瓶中,用适量蒸馏水冲洗,一并倒入锥形瓶中。溶液冷却后滴加 3 滴亚铁灵指示剂,用 0.2 mol/L 硫酸亚铁铵溶液滴定。另外单独滴定 10 mL 0.1 mol/L 重铬酸钾溶液和 8 mL 浓硫酸混合液作为空白试验。纤维素含量按下式计算:

$$\text{纤维素含量}(\%) = \frac{0.675k(a-b)}{n} \times 100\%$$

式中, k 为硫酸亚铁铵溶液的浓度, mol/L; a 为空白滴定所消耗硫酸亚铁铵溶液的体积, mL; b 为溶液所消耗硫酸亚铁铵溶液的体积, mL; n 为所称取香蕉杆粉末的质量, g。

(2) 半纤维素

使用 2 mol/L 盐酸水解法测定,具体测定步骤如下:称取约 0.10 g 香蕉杆粉末于离心管中,加入 80% 硝酸钙溶液 10 mL,沸水浴 5 min,加入 10 mL 蒸馏水,冷却后 12 000 r/min 离心 5 min,弃上清,热蒸馏水洗涤沉淀 3 次。向离心管加入 2 mol/L 盐酸 10 mL,混匀,沸水浴 45 min,定期搅拌。冷却后离心,将溶液转至烧杯,用 2 mol/L NaOH 溶液中和至恰显红玫瑰色。用布氏漏斗抽滤,洗涤滤渣,留取滤液和洗涤液混匀后测体积。取适量待测样液,用 DNS 法^[15]测定 OD_{540} 。以不加样品为空白对照进行以上操作,对照葡萄糖标准曲线进行分析。半纤维素含量按下式计算:

$$\text{半纤维素含量}(\%) = \frac{m \times \frac{V_0}{V_1}}{n} \times 0.9 \times 100\%$$

式中, m 为查标准曲线得到的葡萄糖质量, mg; V_0 为滤液和洗涤液总体积, mL; V_1 为测定 OD_{540} 时所用待测液体积, mL; n 为所称取香蕉杆粉末的质量, g。

(3) 木质素

采用 72% 浓硫酸水解法测定,具体测定步骤如下:称取约 0.10 g 香蕉杆粉末于离心管中,加入 1%

冰醋酸 10 mL 浸泡 5 min,离心弃上清,用 5 mL 1% 冰醋酸洗涤沉淀。加入 5 mL 丙酮浸泡 5 min 后,洗涤沉淀。加 72% 硫酸 3 mL,搅匀,室温静置 16 h,使全部纤维素溶解。加 10 mL 蒸馏水,搅匀,沸水浴 5 min。再加 5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 10% BaCl₂ 溶液,摇匀,离心,去上清。用蒸馏水洗涤沉淀 2 次。再向冲洗过的木质素加入 10 mL 0.1 mol/L 重铬酸钾溶液和 8 mL 浓硫酸,沸水浴 10 min,定期搅拌。冷却后,溶液转至锥形瓶中,用蒸馏水冲洗离心管,将洗涤液一并倒入锥形瓶中。加入 3 滴试亚铁灵指示剂,用 0.2 mol/L 硫酸亚铁铵溶液滴定待测溶液。另外单独滴定 10 mL 0.1 mol/L 重铬酸钾溶液和 8 mL 浓硫酸混合液作为空白试验。木质素含量按下式计算:

$$\text{木质素含量}(\%) = \frac{0.433k(a-b)}{n} \times 100\%$$

式中, k 为硫酸亚铁铵溶液的浓度, mol/L; a 为空白滴定所消耗硫酸亚铁铵溶液的体积, mL; b 为溶液所消耗硫酸亚铁铵溶液的体积, mL; n 为所称取香蕉杆粉末的质量, g。

1.2.2 香蕉杆产沼气潜力试验

(1) 测定项目和方法

发酵原料和接种污泥总固体含量(TS)采用烘干称重法,即将样品放置在烘箱中干燥箱中于 105℃ 烘干至恒重;日产气量采用排水法来表征,即排水体积近似等于产气量;pH 值采用精密 pH 试纸测定。

(2) 试验设计

本试验采用自制厌氧发酵装置(图 1),每组试验装置都由一个反应瓶、一个集气瓶和一个排水计量瓶组成,反应瓶和集气瓶用胶皮管连接后密封,以保证良好的厌氧环境。实验组总发酵体积为 250 mL,同时设置空白参比组(不添加任何原料),发酵温度为 35℃,接种率(指接种污泥体积与发酵总体积之比, V/V)为 48%,基质含量(指发酵原料湿重与发酵总

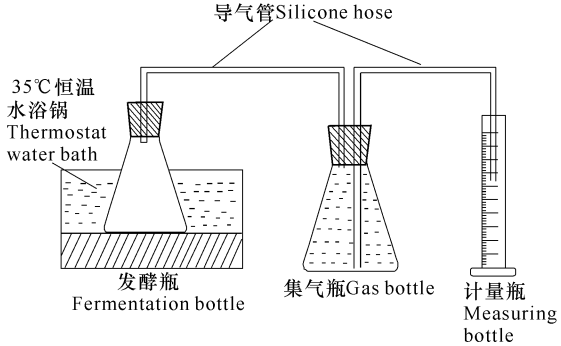


图 1 香蕉杆厌氧发酵产沼气实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of biogas production from anaerobically digested banana stalk

体积之比, W/V)为 8%,初始 pH 值为 7.0。试验运行周期为 20 d,每天摇瓶一次,每次 10 min;每天测一次产气量。试验结束后,综合试验数据进行产气指标分析。

2 结果与分析

2.1 发酵原料组分分析

测得接种污泥的总固体含量(TS)为 8.95%。香蕉杆、玉米秸秆和水稻秸秆的总固体含量(TS)分别为 13.96%、18.87%和 24.23%(表 1),说明香蕉杆的含水率明显高与其它两种秸秆,因此对香蕉杆进行压榨后较易进行沼气发酵实验。与其它两种原料相比,香蕉杆纤维素、半纤维素和木质素较低,分别为 17.47%、11%和 6.81%。有研究表明香蕉杆中脂质、蛋白等营养成分含量较高^[16],这可能是其木质纤维素成分较其他秸秆低的原因。

表 1 发酵原料组分组成

Table 1 Composition of different straw materials

发酵原料 Straw materials	TS (%)	纤维素 Cellulose (%)	半纤维素 Hemicellulose (%)	木质素 Lignin (%)
香蕉杆 Banana straw	13.96	17.47	11	6.81
玉米秸秆 Corn straw	15.87	41.16 ^[17]	28.13 ^[17]	8.72 ^[17]
水稻秸秆 Rice straw	19.23	34.78 ^[18]	28.63 ^[18]	9.96 ^[18]

2.2 香蕉杆厌氧发酵结果

从图 2 中可以看出,不管发酵体积是 250 mL 还是 500 mL,香蕉杆发酵产沼气的变化趋势是一致的,说明体积对产气潜力的影响不大,所以采用 250 mL 发酵体积来研究香蕉杆产沼气潜力。在 250 mL 发酵体积中,香蕉杆产气率达到(155±3) mL/g TS,前 10 d 产气比率达到 93%(表 2)。

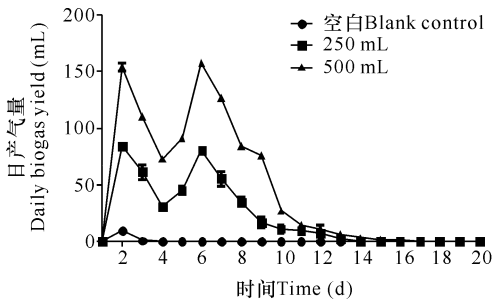


图 2 香蕉杆发酵产沼气的变化曲线

Fig. 2 The curves of biogas production from banana stalk anaerobic digestion

表 2 香蕉杆发酵产沼气结果

Table 2 The results of biogas production from banana stalk anaerobic digestion

总发酵体积 The total volume (mL)	实际产气量 The actual gas production (mL)	前 10 d 产气比率 The gas ratio before 10 d (%)	产气率 TS gas rate (mL/g TS)
250	432±8	93	155±3
500	918±7	93	164±2

2.3 不同原料厌氧发酵结果对比分析

在一个发酵周期内,香蕉杆、玉米秸秆和稻草发酵产沼气趋势基本一致,说明不同秸秆原料对产气趋势影响不大(图 3)。另外如图 4 所示,香蕉杆、玉米秸秆和稻草 3 种原料的产气率分别为(150±2) mL/g TS、(163±2) mL/g TS、(170±2) mL/g TS。因此,与后两者相比,香蕉杆原料的产沼气潜力存在一定的差距。

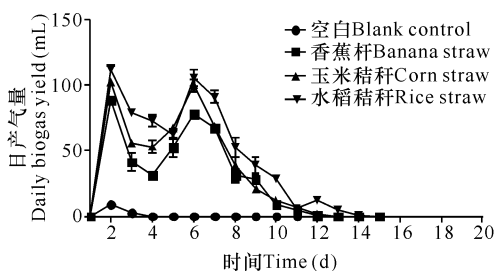


图 3 不同原料发酵产沼气的变化曲线

Fig. 3 The curves of daily biogas production at different time

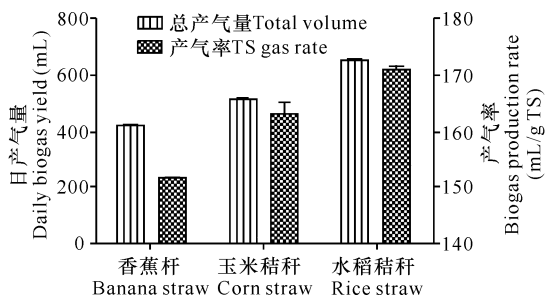


图 4 不同原料产沼气结果对比

Fig. 4 The comparison of biogas production at different feed

3 讨论

木质纤维素素的测定方法很多,除本研究所采用方法外,还有 Van Soest 法^[19]、NREL 法^[20]、红外光谱定量分析法^[21]等, Van Soest 法一般耗时 2~3 d, NREL 法需要 HPLC 设备,红外光谱定量分析法对实验条件要求亦较高,在普通化学实验室使用有困难。本研究采用硫酸-重铬酸钾氧化法、2 mol/L 盐酸水解法和 72% 浓硫酸法测定木质纤维素成分,并

加以改进,具有耗时短、不需要昂贵仪器和复杂操作的优点,在一般具有化学分析条件的实验室都可使用。经测定,香蕉杆纤维素、半纤维素和木质素含量分别为 17.47%、11%、6.86%,纤维相对含量达 35.15%,因此香蕉杆在能源化、材料化、生态化等方面拥着巨大的应用潜力。本研究所测定结果与 Deivanai 等^[5]所测结果(42%、14%、8.67%)存在差异,这是由于他们先采用物理化学方法提取了香蕉杆的纤维后,再测定香蕉杆纤维的纤维素、半纤维素和木质素的相对含量。而本研究所用香蕉杆原料只进行了干燥、粉碎等简单处理,未进行脱脂、去糖、去蛋白等操作,而脂质、糖类物质对测定结果存在一定的干扰,故本研究测得香蕉杆纤维素、半纤维素和木质素的相对含量较低。若在不需要了解原料中纤维素、半纤维素和木质素绝对含量的话,即只需进行对比性研究时,本研究所采用的测定方法可以放心使用。

沼气发酵是多菌群相互作用的非线性复杂系统,主要涉及水解产酸菌、产氢乙酸菌、产甲烷菌这 3 类微生物相互作用^[22]。根据本研究产气曲线趋势,可判断香蕉杆发酵产沼气符合一般厌氧发酵过程^[23]。在发酵的初期,水解微生物分泌酶类把香蕉杆中的高分子物质(碳水化合物、蛋白质、脂质)降解成易被利用的小分子有机物(单糖、氨基酸),并且由于机械压榨使原料的有机物更易渗入发酵液,有利于各种厌氧微生物的生长发育,因此在发酵的前 3 d 大量产气。在第 3~5 天,产酸细菌利用水解产物的单体生成挥发性酸(丙酮酸、乙酸等),产气量降低,并伴随着菌群的生长。在发酵第 6 天时达到产气高峰,此时产甲烷菌最为活跃,主要把乙酸、甲酸(或氢气)转化成甲烷。一个发酵周期内,产气主要集中在前 10 d,在第 12 天以后,由于原料基本消耗殆尽,产气量明显变少;第 15 天以后,发酵停止,发酵液处于静止状态,较发酵前澄清。因此合理利用产气曲线来指导沼气发酵有重要意义。

在中温条件下,本研究中香蕉杆发酵产沼气潜力为(155±3) mL/g TS,与稻草和玉米秸秆沼气发酵潜力相比较低,这主要是由于香蕉杆自身特殊结构造成的。虽然香蕉杆具有一般秸秆的普遍特征即木质纤维素含量高,但其也有自身特殊之处,即其含水量高。硬度大和自身含有较高的抑制微生物生长的物质——单宁^[24-25],因此限制了沼气发酵效果。本研究在发酵前对香蕉杆原料进行压榨,优点主要有 3 点:其一,可一定程度防止发酵过程中原料上浮,充分利用发酵空间,降低香蕉杆原料的单宁含量;其二,机械压榨破坏纤维质底物中木质素、纤维素和半纤维素组

成的复杂包裹结构,促进底物与微生物及酶的接触,进而促进底物的水解和发酵,并最终改善底物的沼气发酵性能;其三,从经济角度考虑,可降低原料运输成本和效率,如果香蕉秆含水量从90%降到70%时,其运输重量会减少80%。然而,机械压榨会造成部分有机物的流失,从而降低甲烷产率^[26]。

4 结论

本研究结果表明,利用香蕉秆发酵产沼气是可行的,但由于受到原料预处理、接种物、基质含量以及碳氮比等因素^[27-29]以及发酵装置的限制,目前产气量还很低。在接下来的工作中,将主要着力于发酵条件的优化和发酵装置的改进,以期通过开发一种高效、快速、环保的工艺技术来获得更高的产气率和原料降解率。

参考文献:

[1] FAO. 联合国粮食及农业组织数据库[EB/OL]. [2016-12-06]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
FAO. FAOSTAT, Online statistical service of the Food and Agriculture Organization (FAO)[EB/OL]. [2016-12-06]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.

[2] ZHANG C M, LI J H, LIU C, et al. Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 149: 353-358.

[3] MOHAPATRA D, MISHRA S, SUTAR N. Banana and its by-product utilisation: An overview[J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2010, 69(5): 323-329.

[4] 樊小林. 香蕉营养与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 214-215.
FAN X L. Banana nutrition and fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 214-215.

[5] DEIVANAI K, KASTURI R. Batch biomethanation of banana trash and coir pith[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 52(1): 93-94.

[6] KHAN M T, BRULÉ M, MAURER C, et al. Batch anaerobic digestion of banana waste-energy potential and modelling of methane production kinetics[J]. *Agricultural Engineering International: The CIGR e-Journal*, 2016, 18(1): 110-128.

[7] 熊月林, 崔运花. 香蕉纤维的研究现状及其开发应用前景[J]. *纺织学报*, 2007, 28(9): 122-124.
XIONG Y L, CUI Y H. Research status of banana fiber and its prospect of development and application[J]. *Journal of Textile Research*, 2007, 28(9): 122-124.

[8] 李坤, 付时雨, 周雪松, 等. 香蕉茎的化学成分及其微观形态分析[J]. *中国造纸学报*, 2009, 24(4): 11-14.

LI K, FU S Y, ZHOU X S, et al. Chemical analysis and microscope observation of banana stem[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2009, 24(4): 11-14.

[9] J ÚSTIZ-SMITH N G, VIRGO G J, BUCHANAN V E. Potential of Jamaican banana, coconut coir and bagasse fibres as composite materials[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(9): 1273-1278.

[10] 陈洪章. 纤维素生物技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 251-252.
CHEN H Z. *Biotechnology of lignocellulose*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 251-252.

[11] KOCH K, LÜBKEN M, GEHRING T, et al. Biogas from grass silage - measurements and modeling with ADM1[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(21): 8158-8165.

[12] 李春光, 周伟铎, 田魏, 等. 甘蔗渣纤维素提取及木质素与半纤维素脱除工艺探讨[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(4): 316-320.
LI C G, ZHOU W D, TIAN W, et al. Study on extraction of cellulose and removal of hemicelluloses and lignin from bagasse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(4): 316-320.

[13] 唐国涛, 邢沙沙, 黄榕彬, 等. 脂麻秆中纤维素与半纤维素的含量测定[J]. *作物研究*, 2012, 26(1): 53-55.
TANG G T, XING S S, HUANG R B, et al. Determination of content of cellulose and hemicellulose in stem of *Sesamum indicum* L[J]. *Crop Research*, 2012, 26(1): 53-55.

[14] 张涛, 张静, 耿可聪. 用重铬酸钾标定硫酸亚铁铵滴定液[J]. *河北化工*, 2008, 31(8): 76, 78.
ZHANG T, ZHANG J, GENG K C. Improvement on determination of aluminium oxide content in catalyze crackin catalyst[J]. *Chemical Industry in Hebei*, 2008, 31(8): 76, 78.

[15] 魏群. 基础生物化学实验[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 86-89.
WEI Q. *Basic biochemistry experiment*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2009: 86-89.

[16] CORDEIRO N, BELGACEM M N, TORRES I C, et al. Chemical composition and pulping of banana pseudo-stems[J]. *Industrial Crops and Products*, 2004, 19(2): 147-154.

[17] SAMBUSITI C, MONLAU F, FICARA E, et al. A comparison of different pre-treatments to increase methane production from two agricultural substrates[J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 62-70.

[18] 罗立娜, 李文哲, 徐名汉, 等. 预处理方式对水稻秸秆厌氧发酵产气特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11): 152-156.

- LUO L N, LI W Z, XU M H, et al. Effect of pretreatment methods on anaerobic fermentation characteristics from rice straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 152-156.
- [19] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3583-3597.
- [20] 张红漫, 郑荣平, 陈敬文, 等. NREL 法测定木质纤维素原料组分的含量[J]. 分析实验室, 2010, 29(11): 15-18. ZHANG H M, ZHENG R P, CHEN J W, et al. Investigation on the determination of lignocellulosics components by NREL method[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2010, 29(11): 15-18.
- [21] 杜娟, 安东, 夏田, 等. 近红外光谱技术检测植物木质素纤维素研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(12): 3207-3211. DU J, AN D, XIA T, et al. The research progress in determining lignocellulosic content by near infrared reflectance spectroscopy technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(12): 3207-3211.
- [22] BRYANT M P. Microbial methane production-theoretical aspects[J]. Journal of Animal Science, 1979, 48(1): 193-201.
- [23] BATSTONE D J, KELLER J, ANGELIDAKI I, et al. The IWA anaerobic digestion model No 1 (ADM1) [J]. Water Science and Technology, 2002, 45(10): 65-73.
- [24] KOUGIAS P G, TREU L, CAMPANARO S, et al. Dynamic functional characterization and phylogenetic changes due to Long Chain Fatty Acids pulses in biogas reactors[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28810.
- [25] WANG C F, MUHAMMAD A U R, LIU Z Y, et al. Effects of ensiling time on banana pseudo-stem silage chemical composition, fermentation and in Sacco rumen degradation[J]. The Journal of Animal & Plant Sciences, 2016, 26(2): 339-346.
- [26] ZHANG C M, BI S L, ZHAO M X, et al. Biogas production performance of different components from banana stems[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(8): 6425-6429.
- [27] 裴培, 张成明, 李纪红, 等. 物理法处理对香蕉秸秆沼气发酵能力影响分析[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(1): 8-13. PEI P, ZHANG C M, LI J H, et al. The influence of physical treatment on biogas production potential of banana pseudo stem[J]. Food and Fermentation industries, 2014, 40(1): 8-13.
- [28] HUA B B, DAI J L, LIU B, et al. Pretreatment of non-sterile, rotted silage maize straw by the microbial community MC1 increases biogas production [J]. Bioresource Technology, 2016, 216: 699-705.
- [29] WU X, YAO W Y, ZHU J, et al. Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(11): 4042-4047.

(责任编辑:米慧芝)