

# 几种轻工业加工废弃物厌氧发酵制取生物燃气潜力研究\*

王 瑶<sup>1,2</sup>, 甄 峰<sup>1</sup>, 孙永明<sup>1</sup>, 孔晓英<sup>1</sup>, 袁振宏<sup>1†</sup>

(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)

**摘 要:** 本试验以典型的轻工业有机废弃物为原料, 采用中温批式发酵工艺进行了厌氧发酵制取生物燃气的研究。结果表明, 木薯淀粉渣、木薯秆、糖蜜酒精废水、肉食加工废水及果汁废水的产气率分别为 623.7 mL/gVS、208 mL/gVS、223.0 mL/gCOD、335.4 mL/gCOD 和 383.4 mL/gCOD, 产甲烷率分别为 355.1 mL/gVS、120.6 mL/gVS、94.7 mL/gCOD、187.2 mL/gCOD 和 136.1 mL/gCOD, 平均甲烷含量分别为 56.9%、58.0%、43.0%、55.8% 和 35.5%。这些典型的轻工业加工废弃物皆为生物燃气发酵的适用原料, 但是有各自的发酵产气特点, 可根据不同原料采用不同的预处理方法及发酵工艺, 以期取得更好的产气效果。

**关键词:** 生物燃气; 厌氧发酵; 原料特性; 轻工业有机废弃物

中图分类号: TK6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.01.012

## Study on Biogas Production of Typical Organic Wastes from Light Industries

WANG Yao<sup>1,2</sup>, ZHEN Feng<sup>1</sup>, SUN Yong-ming<sup>1</sup>, KONG Xiao-ying<sup>1</sup>, YUAN Zhen-hong<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Experiments have been conducted to study the fermentation characteristics and biogas potential of a few typical organic wastes from light industries. Results showed that the biogas yields of cassava dreg, cassava stem, molasses alcohol wastewater, meat processing wastewater and juice wastewater were 623.7 mL/gVS, 208 mL/gVS, 223.0 mL/gCOD, 335.4 mL/gCOD and 383.4 mL/gCOD respectively; the methane yields were 355.1 mL/gVS, 120.6 mL/gVS, 94.7 mL/gCOD, 187.2 mL/gCOD and 136.1 mL/gCOD respectively; the average methane content were 56.9%, 58.0%, 43.0%, 55.8% and 35.5% respectively. These typical organic waste from light industries are found suitable for biogas production. However, due to different characteristics of these substrates, various pretreatment and fermentation technologies should be adapted base on their characteristics therefore better performances can be obtained.

**Key words:** biogas; anaerobic digestion; feedstock characteristics; typical organic wastes from light industries

## 0 引 言

我国目前处在经济快速发展时期, 根据国民经济长远规划, 预计到 2020 年我国经济总量及工业总体新增产值将比 2000 年翻两番, 与此同时, 到 2020 年工业有机废弃物的排放总量也将是 2000 年的两倍<sup>[1]</sup>。工业有机废弃物具有排放集中、易于收集、利用率高的优点, 是一种适用于生物质能源生产的原料。作为生物质能源的重要组成部分, 生物燃气不仅本身具有低碳清洁的特性, 而且在其生产过程中

可对有机废弃物进行无害化和减量化处理, 从而达到资源回收和污染消除的双赢效果。生物燃气的规模化生产及利用对于缓解化石燃料紧缺、减少污染以及温室气体排放有重要意义, 因此受到越来越多的关注<sup>[2-3]</sup>。据近年来的数据统计, 我国工业排放废水 42.93 亿 t/a, 废渣 9.45 亿 t/a, 其沼气资源量约为 280.83 亿 m<sup>3</sup>; 我国主要轻工行业, 包括酒精、制糖、啤酒、黄酒、白酒、淀粉、味精、饮料和造纸等每年排放有机废水 17.57 亿 t, 废渣 4 322.75 万 t, 其沼气资源量约为 154.23 亿 m<sup>3</sup>, 占总资源量的 55%<sup>[4]</sup>。

\* 收稿日期: 2015-11-17

修订日期: 2015-12-22

基金项目: 国家科技支撑计划 (2013BAD22B03); 广州市科技计划项目 (201508020098)

† 通信作者: 袁振宏, E-mail: yuanzh@ms.giec.ac.cn

因此，对轻工业加工有机废弃厌氧发酵特性及潜力研究具有重要意义。

本文以几种典型的轻工业加工有机废弃物（木薯淀粉渣、木薯秆、糖蜜酒精废水、肉类加工废水、果汁压榨废水）为原料，进行厌氧发酵制取生物燃气，研究其发酵过程特性，测定其发酵潜力，为其有效利用提供基础数据，并为其厌氧处理的工程应用提供理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 原料及接种物

实验所用木薯淀粉渣和木薯秆取自广西武鸣县安宁淀粉公司。目前武鸣县种植的主要木薯品种为华南 205，占到全县 80% 的种植面积，该品种产量为 2~3 t/亩，淀粉含量达 28%~30%。实验所用糖蜜酒精废水取自防城港上思县昌菱制糖有限公司；肉食品加工废水及果汁压榨废水分别取自广东省某熟食加工企业和果汁加工企业。

新鲜木薯秆取回后粉碎装袋与木薯淀粉渣，糖蜜酒精废水、肉食品加工废水、果汁压榨废水分别置于 4℃ 冰箱冷藏备用。实验所用接种污泥取自惠州博罗某养猪场正常运行的沼气工程发酵罐内，取回后于实验室中厌氧反应器内驯化 2 周以上，用 1 mm 的筛网进行过滤，取滤液作为接种物。

### 1.2 试验装置与设计

试验装置采用 2.5 L 的抽滤瓶作为厌氧发酵反应器（图 1）。木薯秆厌氧消化的初始有机负荷（以 VS 计）为 6%，木薯淀粉渣为 2%，糖蜜酒精废水为 0.9%；肉类加工废水、果汁压榨废水与接种物的体积比为 1:1。实验设置一个接种物空白，每个处理设置 2 个平行。发酵料液的总质量为 2 000 g，在木薯秆、木薯淀粉渣以及糖蜜酒精废水实验中，除去发酵原料，其余全部用接种物补充，由此可得木薯秆实验的接种率为 92.4%，木薯淀粉渣实验为 88.7%，糖蜜酒精废水实验为 90.8%；在果汁压榨废水及肉食品加工废水的实验中，接种率为 50%。由于木薯淀粉渣碳氮比较高，因此添加碳酸氢铵 11.1 g 将其物料碳氮比调节至 25。将物料及接种物装填入反应器后，向反应器中吹入氮气 1 min，以排尽反应器顶部空间的空气，保证厌氧环境。充氮结束后将反应器用橡胶塞密封并置于已设定温度的水浴锅内

进行中温（37±1℃）批式厌氧消化，试验进行至产气结束为止（产气量低于累积产气量的 0.5%）。每天手动摇匀发酵液 2 次，每天上午 9:00 测量产气量。每 2~3 d 进行气体成分的测定。

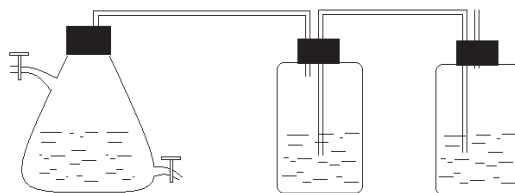


图 1 厌氧发酵装置

Fig. 1 Experiment setup

### 1.3 分析方法

TS、VS 采用烘干失重方法测定；C、H、N 和 S 含量采用 Vario EL 元素分析仪测定；产气量采用排饱和食盐水法测定<sup>[5]</sup>。气体成分采用岛津 GC-2014 型高效气相色谱测定：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。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原料特性分析

原料和接种物的特性如表 1、表 2 及表 3 所示。由表中数据可知，木薯秆与木薯渣固体含量较高，相比木薯秆，木薯渣中高水解系数的成分如糖类、淀粉含量较高，同时蛋白质含量较低，因此具有高达 77.7 的 C/N 值。对于厌氧发酵来说，较适宜的厌氧发酵 C/N 为 25~30，据此可知木薯淀粉渣的营养结构不合理，可能会导致发酵过程不稳定，发酵效率低下<sup>[6]</sup>。木薯秆中则含有较多的粗纤维，占总 TS 的 40% 以上。纤维素分子呈聚集态，纤维素所具有的结晶结构中其内链分子的全部羟基与非结晶区内链分子的部分羟基会形成很多氢键，导致纤维素极难溶解，因此降解性能较差<sup>[7]</sup>。糖蜜酒精废水作为有机废水比较特殊，其固体含量较高，因此进行了总固体 TS 的测定。由元素分析得知其中 S 含量较高，这是由于在酒精发酵过程中为了抑制杂菌的生长，发酵液需用硫酸调节 pH 值到 2~3，最终产生的废水中含有高浓度的  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[8]</sup>。表 3 显示，三种有机废水的 pH 值都较低，其中糖蜜酒精废水可低至 4.34。

表 1 厌氧消化原料及接种物的特性

Table 1 Characteristics of substrates and inoculum

物化特性	TS (%)	VS (TS%)	[N] (TS%)	[C] (TS%)	[S] (TS%)	[H] (TS%)	C/N
接种物	2.59	30.81	—	—	—	—	—
木薯秆	23.80	94.10	1.66	44.43	0.36	6.47	26.80
木薯淀粉渣	19.60	90.40	0.51	39.69	0.31	6.10	77.70
糖蜜酒精废水	13.30	79.40	5.14	37.91	1.60	5.26	7.37

注：TS 为总固体；VS 为挥发性固体；C/N 为碳氮比，下同。

表 2 木薯加工废弃物原料特性

Table 2 Characteristics of substrates

	碳水化合物 (g/100gTS)	脂肪 (g/100gTS)	蛋白质 (g/100gTS)	总糖 (g/100gTS)	淀粉 (%TS)	粗纤维 (%TS)
木薯秆	82.00	1.66	10.30	9.84	23.90	43.20
木薯淀粉渣	74.20	0.50	4.33	12.7	35.40	21.10

表 3 有机废水类原料特性

Table 3 Characteristics of substrates

	pH	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	N-NH <sub>4</sub> (mg/L)
肉食品加工废水	5.72	11 030.00	5 450.00	1 250.00
果汁压榨废水	5.60	2 165.00	601.00	16.60
糖蜜酒精废水	4.34	138 000.00	—	181

## 2.2 原料厌氧发酵特性及产气潜力

### 2.2.1 木薯淀粉渣厌氧发酵

木薯淀粉渣在启动发酵的第 1 天迅速产气 (图 2), 但是在前 8 天, 甲烷含量较低, 均在 50% 以下 (图 3), 其原因除因瓶内含有大量充入氮气之外, 也可能是由于厌氧菌在此期间利用发酵液中易降解的有机质进行快速的生长繁殖, 因此代谢产生的 CO<sub>2</sub> 远高于 CH<sub>4</sub>, 还有一方面可能是由于反应器产酸过程导致<sup>[9-10]</sup>。从原料成分分析可以看出, 木薯淀粉渣含有较多易降解的成分——总糖和淀粉, 因此在发酵前期, 该类物质的迅速水解除除了生成 CO<sub>2</sub>, 还产生大量有机酸 (VFAs), 导致反应系统内 pH 值降低。由于产甲烷菌对 pH 比较敏感, 活性容易受到有机酸累积的抑制, 因此水解阶段气体中甲烷含量较低<sup>[7]</sup>。从日产气量曲线上得知, 第一个产气高峰过后出现低谷, 由于木薯淀粉渣中高水解系数的成分如淀粉等含量高, 因此该低谷可能是由于有机酸的抑制作用导致<sup>[11]</sup>。

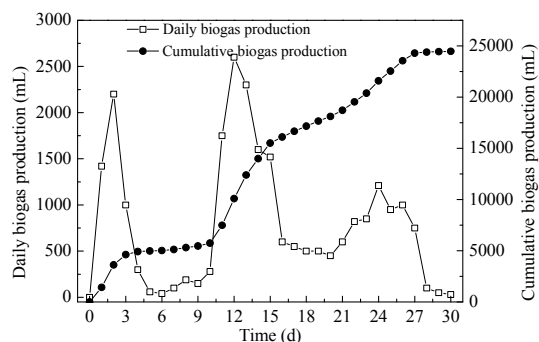


图 2 木薯淀粉渣日产气量及累积产气量

Fig. 2 Cumulative and daily biogas production of cassava dreg

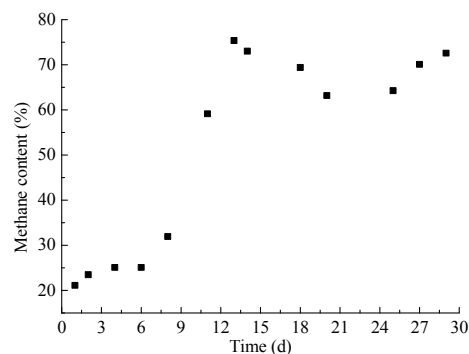


图 3 木薯淀粉渣发酵甲烷含量

Fig. 3 Methane content of cassava dreg

木薯淀粉渣在发酵启动 15 天的累计产气量占总产气量的 57.4%；达到产气总量 80%的时间为第 23 天。木薯淀粉渣的净累计产气量为 24 950.0 mL；其 TS 产气率为 537.3 mL/g, VS 产气率为 623.7 mL/g。木薯淀粉渣的发酵平均甲烷含量为 56.9%，甲烷产量为 14 205.5 mL，其 TS 产甲烷率为 305.9 mL/g, VS 产甲烷率为 355.1 mL/g。本实验所得木薯淀粉渣的产气率高于浦跃武等<sup>[10]</sup>获得的产气率和最高甲烷含量分别为 249.3 mL/gVS 和 48.2%，其原因可能是由于原料成分的不同，此外还与接种率及接种污泥类型有关。本实验中木薯淀粉渣反应器的接种率按该文献中的方法计算（接种物与发酵液 TS 之比）为 52.7%，而文献中的最优接种率为 70%。之所以在较低接种率的条件下能够实现较高的产气率，可能是由于本实验采用了全混式厌氧反应器（CSTR）中的絮状污泥作为接种物，而文献中则采用上流式厌氧污泥床反应器（UASB）中的颗粒污泥。厌氧颗粒污泥呈现规则或不规则的拟圆形粒状结构<sup>[12]</sup>，实际是厌氧微生物菌团<sup>[13]</sup>，对分散性良好的有机废水具有较高的处理效率，但是木薯淀粉渣属于固态原料，成分分析显示其总固体中超过 40%的部分为粗纤维，其分散性较差，因此絮状污泥更适用于木薯淀粉渣的发酵，由此得到了更高的产气率。

### 2.2.2 木薯杆厌氧发酵

与木薯淀粉渣相似，木薯杆原料成分分析显示其同样含有较多高水解系数的成分（总糖和淀粉），因而虽然反应器在第一天迅速产气，前 6 天甲烷含量都较低（图 5）。图 4 显示，在第一个产气高峰过后的低谷，对于木薯杆，主要原因是其含有水解速度较慢的纤维素类物质，因此在易降解物质基本消耗之后，产气量降至一个低点，此时占主导地位的是纤维素类物质的缓慢水解过程，然后又产生一个产气高峰<sup>[6]</sup>。此后的产气小高峰后，产气量在波动中呈下降趋势。

木薯杆在发酵启动 15 天的累计产气量占总产气量 69%；达到产气总量 80%的时间为第 18 天。木薯杆的净累计产气量为 24 960 mL；其 TS 产气率为 198.7 mL/g, VS 产气率为 208.0 mL/g。木薯杆发酵的平均甲烷含量为 58.0%，甲烷产量为 14 479.9 mL，其 TS 产甲烷率为 115.3 mL/g, VS 产甲烷率为 120.6 mL/g。本实验获得的产气率略低于陈智远等<sup>[14]</sup>报道的产气率（222.0 mL/gTS），基于相似的实验条件（发酵温

度，有机负荷，接种率，接种物来源），该差别可能是由于木薯杆原料的成分差异。ZHU 等<sup>[15]</sup>报道了经过淀粉提取和预处理（超声处理和碱处理）的木薯杆产气率仍然能够达到 153.3 mL/gTS，说明木薯杆经过适当的处理具有相当的生物燃气潜力。

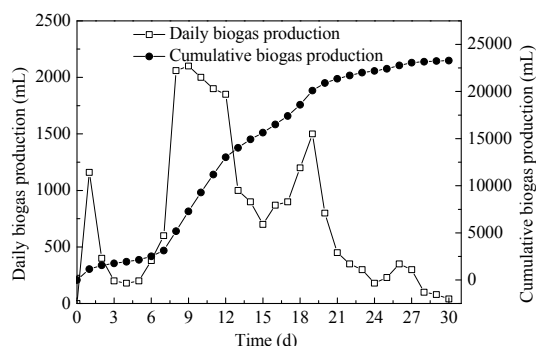


图 4 木薯杆日产气量及累积产气量

Fig. 4 Cumulative and daily biogas production of cassava stem

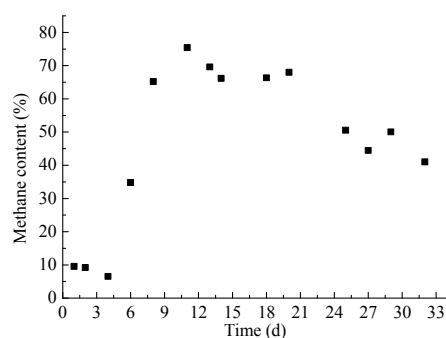


图 5 木薯杆发酵甲烷含量

Fig. 5 Methane content of cassava stem

### 2.2.3 糖蜜酒精废水厌氧发酵

糖蜜酒精废水中含有大量极易降解的糖分物质，因此在发酵第一天迅速产气（图 6），首日产气量达 1 280 mL，之后维持在 400 mL 以下；气体中的甲烷含量在前 8 天都低于 50%。第二个产气小高峰开始于第 18 天，于第 20 日达到日产气高峰为 420 mL，之后开始降低至产气停止。除废水中部分有机物所需水解时间较长外，第二个产气小高峰经过较长时间出现的原因可能是由于糖蜜酒精废水中所含高浓度  $\text{SO}_4^{2-}$  的抑制作用<sup>[16]</sup>。 $\text{SO}_4^{2-}$  的抑制作用主要体现在两个方面：（1）发酵液中硫酸盐还原菌（SRB）与产甲烷菌（MPB）会产生竞争作用；（2） $\text{SO}_4^{2-}$  经 SRB 还原生成  $\text{H}_2\text{S}$ ，高浓度  $\text{H}_2\text{S}$  对产甲烷菌有毒性抑制作用<sup>[17]</sup>。随着发酵的进行， $\text{SO}_4^{2-}$  经 SRB 还原生成  $\text{H}_2\text{S}$ ，浓度逐渐降低；部分  $\text{H}_2\text{S}$  会随产生的  $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}_2$  离开发酵液，从而降低  $\text{H}_2\text{S}$  的浓度，其抑制作用逐渐减弱，开始出现第二次产甲烷阶段。

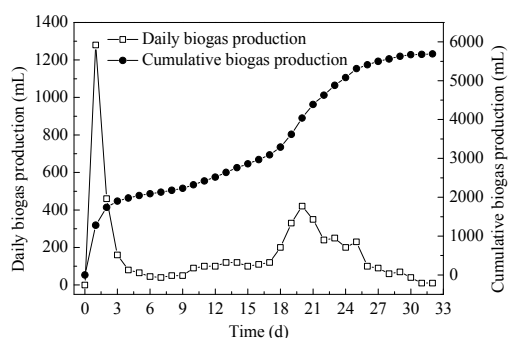


图 6 糖蜜酒精废水日产气量及累积产气量

Fig. 6 Cumulative and daily biogas production of molasses alcohol wastewater

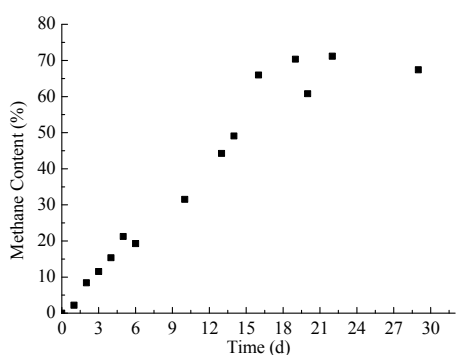


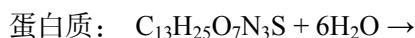
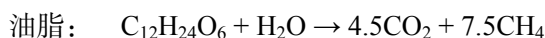
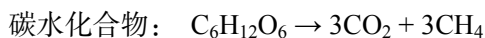
图 7 糖蜜酒精废水发酵甲烷含量

Fig. 7 Methane content of molasses alcohol wastewater

糖蜜酒精废水在发酵启动 15 天的累计产气量占总产气量的 50.3%；达产气总量 80%的时间为第 22 天。糖蜜酒精废水的净累计产气量为 5 690.0 mL；其产气率为 223.0 mL/gCOD；平均甲烷含量为 43.0%，甲烷产量为 2 447.0 mL，产甲烷率为 94.7 mL/gCOD。洗萍等<sup>[18]</sup>实验分析了糖蜜酒精废水的生化产甲烷潜力（Biochemical methane production, BMP），未经营养比例调节的反应器产甲烷潜力为 43.6 mL/gCOD，经过营养比例调节的最佳产甲烷率为 74.1 mL/gCOD。该差距可能是由接种率的差异造成的，本实验的接种率为 90.8%，而文献中实验的接种率仅为 37.5%。

#### 2.2.4 肉食品加工废水及果汁压榨废水厌氧发酵

肉食品加工废水厌氧消化时间较短，发酵总时间为 16 天（图 8）。产气高峰在前 9 天结束，之后维持较低水平。在本实验生物燃气中甲烷含量最高可达 78%（图 9），主要原因是其中的油脂含量较高<sup>[19]</sup>。理论上，碳水化合物，油脂及蛋白质产甲烷公式如下<sup>[6]</sup>：



由于生物燃气中存在一些残余硫化物以及部分的  $\text{CO}_2$  与  $\text{NH}_3$  呈结合状态，一般情况下生物燃气成分为  $\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 71 : 29$ <sup>[6]</sup>。由公式可知，基于油脂的生物燃气中甲烷含量较其他两种原料高，因此本实验中的甲烷含量超过了 71% 的平均水平。

对于果汁压榨废水，其气体成分中甲烷含量总体较低，最高为 44.9%（图 11）。该现象同样可用上述原理解释。由于果汁压榨废水中碳水化合物（糖类）的含量较高，从理论产甲烷公式中可知，碳水化合物的理论甲烷含量只有 50% 左右，因此本实验中所产甲烷含量总体水平较低。在产气方面，果汁压榨废水在发酵第 9 天结束产气，发酵时间较短（图 10）。除了有机负荷较低原因外，废水中高水解系数的糖类含量较高，因此在发酵初始便能够迅速达到产气高峰。

肉食品加工废水和果汁压榨废水在发酵启动第 5 天和第 3 天的累计产气量分别占总产气量 53.8% 和 63.8%；达到产气总量 80% 的时间分别为第 8 天和第 4 天。肉食品加工废水和果汁压榨废水的净累计产气量分别为 3 700 mL 和 830 mL；其产气率分别为 335.4 mL/gCOD 和 383.4 mL/gCOD；平均甲烷含量分别为 55.8% 和 35.5%，甲烷产量分别为 2 064.8 mL 及 294.7 mL，产甲烷率分别为 187.2 mL/gCOD 和 136.1 mL/gCOD。李海滨等<sup>[1]</sup>总结了我国不同工业废水的生物燃气产气率，肉食品加工废水（屠宰）的产气率为 350 mL/gCOD，与本实验结果相似。目前文献中对果汁废水厌氧发酵的报道，主要针对处理效果指标如 COD 的去除等，少有关于其生物燃气潜力的分析。

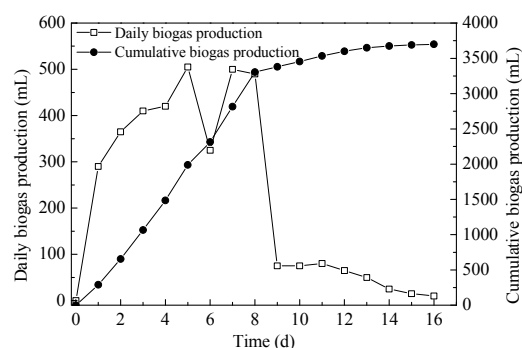


图 8 肉食品加工废水日产气量及累积产气量

Fig. 8 Cumulative and daily biogas production of meat process wastewater

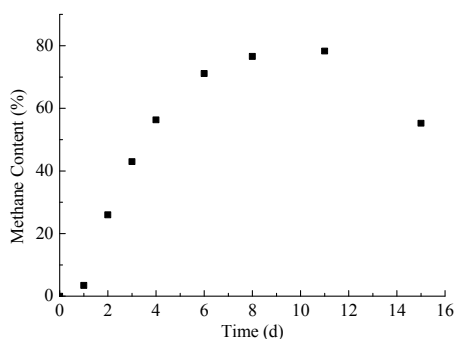


图 9 肉食品加工废水发酵甲烷含量  
Fig. 9 Methane content of meat process wastewater

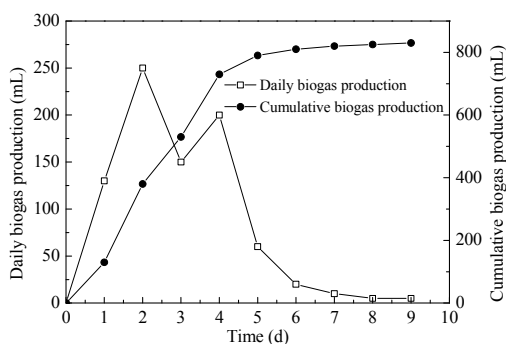


图 10 果汁废水日产气量及累积产气量  
Fig. 10 Cumulative and daily biogas production of juice wastewater

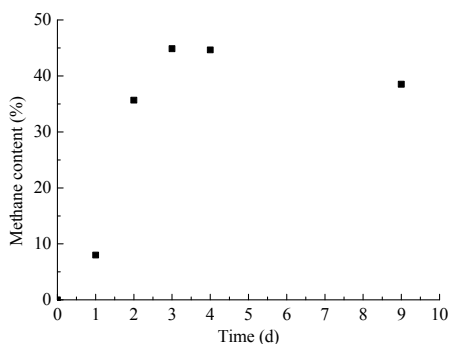


图 11 果汁废水发酵甲烷含量  
Fig. 11 Methane content of juice wastewater

### 2.3 产气效率评价

发酵原料的产气潜力可通过元素分析获得的理论甲烷产率来评价，但由于难降解成分、抑制发酵成分的存在，实际甲烷产率通常远低于理论值。此外，厌氧发酵过程受到很多因素的影响，如在不同接种物、原料粒径、营养条件等的条件下获得的甲烷产率也存在差异<sup>[20]</sup>。本实验分析了木薯淀粉渣、木薯杆以及糖蜜酒精废水的理论甲烷产率、实际甲烷产率、理论沼气产率、实际沼气产率、理论甲烷平均浓度和实际甲烷平均体积分数（表 4）。

本实验中木薯淀粉渣、木薯杆和糖蜜酒精废水的理论甲烷含量低于实际含量，除了上文所提到的残余硫化物以及部分的 CO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub> 呈结合状态，还有可能是由于部分 CO<sub>2</sub> 溶解在发酵液中，提高了产气中甲烷的浓度。从表 4 中可知，木薯淀粉渣产气效果最好，主要是由于该原料中易降解成分的含量较高，但是同样基于这个原因，木薯淀粉渣在厌氧发酵中极易酸化，营养结构（C/N）不合理，未经调节的发酵可能造成产气率低下；而对于木薯杆，难以降解的纤维含量较高，因此实际产气率只有理论值的 21.5%；糖蜜酒精废水则是由于存在对厌氧发酵有显著抑制作用的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，因此同样的获得较低的实际产气率。因此，为了提高木薯淀粉渣及木薯杆的产气率，可考虑采用混合发酵的方法。李东等<sup>[9]</sup>利用鸡粪与稻草的混合发酵实验表明，混合厌氧消化的产气效果优于两种物料的单独厌氧消化。其原因除了营养结构的优化外，禽畜粪便本身含有的大量微生物，能够加快纤维类物质的水解；而秸秆在发酵过程中可作为降解性填料，利于厌氧菌胶团的形成，增强了厌氧微生物种群之间的协同作用，从而获得更好的产气效果<sup>[21]</sup>。糖蜜酒精废水则需要进行 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等物质的脱除，避免对厌氧发酵菌群的抑制作用<sup>[17]</sup>。

表 4 不同原料厌氧消化的甲烷产率、沼气产率和平均甲烷浓度  
Table 4 Methane and biogas yield, average methane contents of different substrates

原料	有机负荷 [% (VS 计)]	C/N	甲烷			沼气			甲烷平均体积分数	
			理论产率 (mL/gVS)	实际产率 (mL/gVS)	实际产率/ 理论产率	理论产率 (mL/gVS)	实际产率 (mL/gVS)	实际产率/ 理论产率	理论 (%)	实际 (%)
木薯淀粉渣	2.0	25.0	412.8	355.1	86.0	855.9	623.7	72.9	48.2	56.9
木薯杆	6.0	26.8	514.8	120.6	23.4	967.0	208.0	21.5	53.2	58.0
糖蜜酒精废水	0.9	7.37	518.2	94.7	18.3	997.3	223.0	22.4	52.0	43.0

### 3 结 论

实验研究了典型的轻工业加工废弃物在中温条件下(38℃)的生物燃气生产潜力。实验表明,这些轻工加工废弃物皆为生物燃气生产的适用原料,其中木薯淀粉渣由于其产气率高,易降解物质含量高,尤其适合进行厌氧发酵,但是其与木薯秆都存在营养结构不合理的问题,因此在用作发酵原料时可以考虑混合发酵。对于糖蜜酒精废水来说,需要解决发酵抑制物的问题,以期获得更好的发酵效果。肉类加工废水也是较好的厌氧发酵原料,而果汁废水由于其 COD 较低可考虑与高浓度有机废水进行混合发酵,以获得更高的产气率。

#### 参考文献:

- [1] 李海滨,袁振宏,马晓茜. 现代生物质能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 169-173. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2005.08.037.
- [3] 刘晓风,袁月祥,闫志英. 生物燃气技术及工程的发展现状[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 924-930.
- [4] 轻工业环境保护研究所. 中丹可再生能源发展项目, 中国沼气工程产业发展研究[R]. 北京: 轻工业环境保护研究所, 2011.
- [5] IGONI A H, ABOWEI M F N, AVOTAMUNO J M, et al. Effect of total solids concentration of municipal solid waste in anaerobic batch digestion on the biogas produced[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2007, 5(2): 333-337.
- [6] DEUBLEIN D, STEINHAUSER A. Biogas from waste and renewable resources: An introduction[M]. 2nd ed. Wiley-VCH, 2010.
- [7] 何永梅,王艳锦,肖烈,等. 木质纤维原料厌氧发酵工艺研究进展[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 55-60. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2009.05.013.
- [8] 肖红霞. 糖蜜酒精厌氧出水强化预处理技术研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- [9] 李东,叶景清,甄峰,等. 稻草与鸡粪配比对混合厌氧消化产气率的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 232-238. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.02.032.
- [10] 浦跃武,刘坚. 木薯渣厌氧发酵制取沼气的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(29): 14308-14310.
- [11] PIND P F, ANGELIDAKI I, AHRING B K, et al. Monitoring and control of anaerobic reactors[M]// AHRING B K, AHRING B K, ANGELIDAKI I, et al. Biomethanation II. Berlin Heidelberg: Springer, 2003: 135-182.
- [12] 农业部厌氧微生物重点开放实验室. 产甲烷菌及其研究方法[M]. 成都: 成都电子科技大学出版社, 1997.
- [13] 刘美霞. 厌氧活性污泥和厌氧颗粒污泥中温条件下吸附性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [14] 陈智远,姚建刚. 秸秆厌氧干发酵产沼气的研究[J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2009(10): 24-26. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5404-C.2009.10.006.
- [15] ZHU W B, LESTANDER T A, ÖRBERG H, et al. Cassava stems: a new resource to increase food and fuel production[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2015, 7(1): 72-83. DOI: 10.1111/gcbb.12112.
- [16] HILTON M G, ARCHER D B. Anaerobic digestion of a sulfate-rich molasses wastewater: inhibition of hydrogen sulfide production[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1988, 31(8): 885-888. DOI: 10.1002/bit.260310817.
- [17] 左剑恶,胡纪萃. 含硫酸盐有机废水的厌氧生物处理[J]. 环境科学, 1991, 12(3): 67-71, 49.
- [18] 洗萍,韦旭,叶凡,等. 糖蜜酒精废液厌氧生物降解性能的 BMP 分析[J]. 生物技术, 2005, 15(5): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1004-311X.2005.05.030.
- [19] 孙波,王芑,武首香,等. 肉类加工废水处理技术研究进展[J]. 天津科技, 2015, 42(7): 82-85. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8945.2015.07.032.
- [20] 李东,孙永明,袁振宏,等. 可生物降解城市生活垃圾厌氧消化基础及工艺研究进展[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 374-380. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2009.03.019.
- [21] SVENSSON L M, BJÖRNSSON L, MATTIASSON B. Enhancing performance in anaerobic high-solids stratified bed digesters by straw bed implementation[J]. Bioresource technology, 2007, 98(1): 46-52. DOI:10.1016/j.biortech.2005.11.023.

#### 作者简介:

王 瑶 (1986-), 女, 硕士, 助理研究员, 从事生物质厌氧转化研究。

袁振宏 (1953-), 男, 博士, 研究员, 主要从事生物质能研究。