

# 发酵条件对典型木质纤维素原料产沼气影响实验\*

晏水平 高鑫 艾平 袁巧霞

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

**摘要:** 为探讨木质纤维素原料的厌氧发酵产沼气特性,选取玉米秸、稻秸、棉秸、油菜秸、中药渣、甘蔗渣和造纸渣等典型木质纤维素原料,研究了堆沤时间、初始 pH 值和接种率对其产沼气特性的影响,并且比较了多种原料在中温 ( $35 \pm 2$ ) $^{\circ}\text{C}$  和高温 ( $53 \pm 2$ ) $^{\circ}\text{C}$  条件下的产气特性。结果表明,棉秸、甘蔗渣不经堆沤无法启动发酵,堆沤时间为 7 d 时产气率最高;油菜秸不经堆沤即可启动,且产气率最高。各原料中,中温时稻秸产气能力最大 (352.56 mL/g),且高温时产气率仅增加 20.92%,因此可选取中温发酵模式;高温时青玉米秸产气能力最高 (480.00 mL/g),高温时产气率提高了 82.49%,适于采取高温发酵。中药渣和造纸渣在高温时产气率提升幅度显著。

**关键词:** 木质纤维素 沼气 堆沤 初始 pH 值 接种率

中图分类号: X705; S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)S2-0136-07

## Effect of Anaerobic Fermentation Conditions on Biogas Yields from Typical Lignocellulosic Materials

Yan Shuiping Gao Xin Ai Ping Yuan Qiaoxia

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to explore the biogas production characteristics of lignocellulosic feedstock, some typical materials including maize straw, rice straw, cotton straw, rape straw, herbal residue, bagasse and papermaking residue were chosen as substrates to analyze the effect of retting time, initial pH value and inoculation rate on their biogas productions. And the biogas production potential difference between mesophilic ( $(35 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ) and thermophilic fermentation ( $(53 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ ) was compared as well. The results indicated that cotton straw and bagasse could not be started successfully to produce biogas without retting, but could obtain the highest biogas production after 7 d retting operation. And rape straw could be fermented successfully and even gain the highest biogas production without any retting. Among all the raw materials, rice straw could gain the largest biogas production under the mesophilic fermentation condition (352.56 mL/g). And its biogas yield could only be increased by 20.92% when the fermentation status was changed from mesophilic to thermophilic condition, which meant that mesophilic fermentation might be suitable for rice straw. Under the thermophilic fermentation condition, the silage maize straw could gain the highest biogas yield (480.00 mL/g), which was 82.49% higher than the mesophilic fermentation. So the thermophilic fermentation might be perfect for silage maize straw. In addition, the biogas production could also be increased gigantically for herbal and papermaking residues when the thermophilic fermentation condition was adopted.

**Key words:** Lignocellulose Biogas Compost Initial pH value Inoculation rate

收稿日期: 2013-06-21 修回日期: 2013-07-10

\* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201303091)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011PY007、2013PY056)

作者简介: 晏水平,副教授,博士,主要从事沼气高值化利用和  $\text{CO}_2$  捕集技术等研究, E-mail: yanshp@mail.hzau.edu.cn

通讯作者: 艾平,副教授,博士,主要从事农业生物环境能源研究, E-mail: aiping@mail.hzau.edu.cn

## 引言

随着国家政策扶持和经费投入力度的加强,我国不同类型的沼气项目进展加快<sup>[1]</sup>,其中秸秆沼气已成为当前农村能源领域的开发热点之一。在秸秆沼气中,可选择木质纤维素类原料进行发酵,如作为我国主要秸秆种类的玉米秸<sup>[2-3]</sup>、油菜秸<sup>[4]</sup>、棉秸<sup>[5-6]</sup>和稻秸<sup>[7-8]</sup>,以及产量巨大的甘蔗渣<sup>[9-10]</sup>、中药渣、造纸废渣<sup>[11]</sup>等加工废渣。对这些木质纤维素类原料的发酵特性进行研究,有利于发酵原料的拓展。木质纤维素类原料在发酵前,往往利用物理手段、化学手段和生物方法等预处理手段破坏纤维素和木质素之间的连接,降低纤维素结晶度和聚合度,增加原料的疏松性和纤维素可及性,从而提高酶解效率。堆沤是一种常见的预处理方式<sup>[12-13]</sup>,主要利用微生物菌群对木质纤维素进行快速破坏和分解,但堆沤时间过长也会导致能量和营养的损失,因而需要探寻适宜

的原料堆沤时间。此外,发酵启动期的初始 pH 值<sup>[14]</sup>、接种率<sup>[5,15-16]</sup>和发酵温度也是影响原料发酵效果的重要参数。

本文选取玉米秸、稻秸、棉秸、油菜秸、中药渣、甘蔗渣和造纸渣等典型木质纤维素作为发酵原料进行批式厌氧发酵,研究堆沤预处理时间、初始 pH 值、接种率等启动条件和发酵温度对原料发酵过程及产气特性的影响,初步筛选出较优的发酵条件,为实际沼气工程采用多种木质纤维素原料进行沼气生产提供一定的参考和依据<sup>[17-22]</sup>。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 发酵原料

发酵原料来源及特性参数如表 1 所示。实验前,秸秆类原料采用同一型号粉碎机粉碎至粒径约为 3 cm,中药渣、甘蔗渣、造纸渣因获取时粒径小于 3 cm,因而无需粉碎。

表 1 原料来源及特性

Tab.1 Sources and characteristics of fermentation materials

原料	来源	可挥发性有机物质量分数/%	纤维素质量分数/%	半纤维素质量分数/%	木质素质量分数/%
青玉米秸	华中农业大学实验田	94.81	37.58	21.58	19.02
黄玉米秸	华中农业大学实验田	93.20	37.58	21.58	18.38
新疆棉秸	新疆喀什某农庄	93.17	47.11	24.12	22.15
湖北棉秸	湖北黄梅县某农场	86.25	44.26	17.42	22.71
稻秸	华中农业大学实验田	82.47	36.33	27.22	9.35
油菜秸	华中农业大学实验田	91.87	40.95	19.66	19.82
中药渣	湖北黄梅中药制造厂	95.09	39.65	20.31	16.86
甘蔗渣	海南某制糖厂	93.15	12.50	18.70	21.33
造纸渣	河南某芦苇造纸厂	62.03	10.51	21.17	21.17

#### 1.1.2 接种物

实验所用菌种接种物以猪粪为原料,接种污泥为原始菌种驯化培养获得,猪粪取自华中农业大学种猪场,接种污泥取自华中农业大学校内工科实验基地稳定运行的户用沼气池。污泥总固体质量分数(TS)为 5.25%,挥发性固体质量分数(VS)为 64.9%。

中温菌种和高温菌种分别在(35±2)℃和(53±2)℃条件下,以猪粪为原料按照标准操作方法连续驯化 50 d 获得。

## 1.2 仪器及方法

### 1.2.1 实验器材

主要仪器包括 GC900C 型气相色谱仪、FE20 型实验室 pH 计(梅特勒-托利多仪器上海有限公司)、CM-03 型 COD 测定仪(北京双晖京承电子产品有限公司)、全自动纤维分析仪(ANKOM2000i 型)、万

分之一天平、干燥箱、马弗炉和高速离心机等。

### 1.2.2 实验装置与指标测试方法

原料厌氧发酵中,采用有效工作容积为 1 000 mL 的玻璃瓶作为发酵反应装置,实验系统详见文献[23]。

发酵中气体成分的甲烷含量采用 GC900C 型气相色谱仪测量,使用 TCD 检测器进行测试,日产气量用排水法测量,含水率、TS 采用标准灼烧恒重法测定,VS 的测定用标准灼烧法测量<sup>[23]</sup>,COD 采用重铬酸钾法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆沤及初始条件的影响

#### 2.1.1 堆沤时间的影响

堆沤时间设置 0 d、7 d、14 d 和 21 d 4 个水平,每堆沤实验组均取 200 g 原料进行厌氧发酵,发酵温

度为  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 接种物为中温菌种, 干物质接种率均为 30%。同时, 也设置相同量的接种物作为空白对照组进行发酵实验。

以堆沤 21 d 为例探讨堆沤过程中原料的含水率、pH 值和 VS 的变化规律。在堆沤过程中, 原料的含水率随堆沤时间的变化较小, 可保持在 80% 左右; 原料的 pH 值在堆沤第 2 天下降到最低点 6.0, 然后开始回升, 并在第 4 天时回到最高点 (约 7.2), 然后一直保持在约 7.2 状态; VS 在堆沤前 14 d 变化不大, 但从第 14 天后开始下降。

不同堆沤时间后, 原料的厌氧发酵特性参数如表 2 所示。当原料不经过堆沤而直接进入厌氧发酵阶段时, 仅油菜秸可顺利启动, 产期周期为 50 d, 总固体产气率可达  $291.95 \text{ mL/g}$ , 甲烷平均体积分数为 56.34%, 但棉秸和甘蔗渣的产气量却在产气初期一直快速下降, 发酵分别在第 5 天和第 7 天时停止, 与空白对照组的产气变化规律相同, 表明产气主要是由接种物发酵所致, 亦说明未堆沤棉秸和甘蔗渣并不能直接用于发酵, 主要原因在于棉秸和甘蔗渣的木质素含量较高 (如表 1 所示), 不易直接发酵<sup>[24-25]</sup>。

但棉秸、甘蔗渣经过堆沤处理后可正常发酵, 如表 2 所示。同时, 堆沤处理还可缩短启动后达到产

气高峰的时间, 有利于缩短启动时间<sup>[26-27]</sup>。如与堆沤处理 7 d 情形相比, 堆沤 14 d 的棉秸、甘蔗渣和油菜秸达到产气高峰的时间将会分别提前 0 d、1 d 和 2 d, 堆沤 21 d 的提前时间分别为 2 d、1 d 和 5 d。值得注意的是, 堆沤处理并不能增加沼气产量, 相反总固体产气率会随堆沤时间增加而下降, 且棉秸受堆沤时间影响最大。其主要原因在于堆沤处理过程中有机质将会发生损耗, 堆沤时间越长, 有机质损失越大。如果单从总固体产气率指标来考虑, 油菜秸不堆沤, 棉秸和甘蔗渣堆沤时间选择 7 d 为宜。

表 2 还显示随着堆沤时间延长, 沼气的品质 (以甲烷平均体积分数来表征) 会出现先升高后下降的趋势。因此, 在对堆沤时间进行择优时, 除了考虑总固体产气率外, 还应该考虑甲烷体积分数。在此, 以单位总固体的甲烷产率来作为评判指标对堆沤时间进行对比, 如表 2 所示。显然, 当堆沤时间从 7 d 上升到 14 d 时, 棉秸和甘蔗渣的单位总固体甲烷产率变化不大, 但增加到 21 d 时, 总固体甲烷产率大幅下降, 因此两者的堆沤时间应选择 7 ~ 14 d。同时, 考虑到前处理时间问题, 较优的堆沤时间可确定为 7 d。而对于油菜秸而言, 随着堆沤时间的增加, 单位总固体甲烷产率呈下降趋势, 无需采取堆沤预处理。

表 2 堆沤时间对棉秸、油菜秸和甘蔗渣产气特性的影响

Tab. 2 Effect of retting time on biogas production characteristics of corn straw, rape straw and bagasse

堆沤时间/d	产沼气特性参数	棉秸	油菜秸	甘蔗渣
0	甲烷平均体积分数/%	—	56.34	—
	单固体产气率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	—	291.95	—
	单固体甲烷产率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	—	164.48	—
7	甲烷平均体积分数/%	56.58	56.43	59.51
	单固体产气率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	268.41	273.28	261.71
	单固体甲烷产率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	151.87	154.21	155.74
14	甲烷平均体积分数/%	63.41	63.03	63.51
	单固体产气率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	248.82	244.45	256.71
	单固体甲烷产率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	157.78	154.08	163.03
21	甲烷平均体积分数/%	60.96	59.87	55.34
	单固体产气率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	112.34	204.39	254.89
	单固体甲烷产率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	68.48	122.37	141.06

### 2.1.2 原料初始 pH 值的影响

以甘蔗渣为原料研究初始 pH 值对产气性能影响。甘蔗渣加入接种物后, 利用 HCl 和 NaOH 溶液调节发酵初始 pH 值至  $6.0 \pm 0.1$ 、 $7.0 \pm 0.1$ 、 $7.8 \pm 0.1$ 、 $8.5 \pm 0.1$  等 4 个水平。每个实验组均采用 200 g 堆沤 7 d 的甘蔗渣 (TS 为 14.7%) 进行发酵, 干物质接种率为 30%, TS 为 3.84%, 发酵温度设定为  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 每个水平设置 2 个重复实验, 取平均值进行数据分析。pH 值影响如图 1 和表 3 所示。

从图 1 和表 3 可看出, 随着初始 pH 值的增加, 沼气净产量 (总产气量与接种物产气量之差) 呈现先上升后下降的趋势, 且在 pH 值为 7.8 时达到最大 ( $9279 \text{ mL}$ ); 而甲烷总产量则随着 pH 值增加而逐步上升, 并在 pH 值为 8.5 时达到最高 ( $5500 \text{ mL}$ )。可见, 甘蔗渣弱碱性启动有利于提高沼气和甲烷产量, 主要原因在于弱碱性启动状态可缓冲木质纤维素类高碳类原料在发酵初期易产生的挥发酸积累, 有利于快速进入产甲烷阶段及在产甲烷阶段稳定运

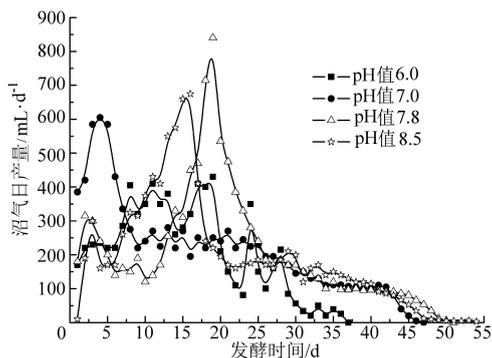


图1 不同初始 pH 值的甘蔗渣沼气日产量曲线

Fig. 1 Biogas daily production curves of bagasse at different initial pH values

表3 初始 pH 值对甘蔗渣的产气率影响

Tab. 3 Effect of initial pH value on biogas yield of bagasse

初始 pH 值	产气周期 /d	净产气量 /mL	原料干基 质量/g	总固体产率 /mL·g <sup>-1</sup>	可挥发性固体产气率 /mL·g <sup>-1</sup>	甲烷平均体积 分数/%	甲烷总产量 /mL
6.0	36	7 092	29.4	241.22	281.67	54.55	3 869
7.0	46	9 018	29.4	306.73	358.17	59.48	5 364
7.8	50	9 279	29.4	315.61	368.53	58.00	5 382
8.5	54	8 939	29.4	304.05	355.03	61.53	5 500

图2显示了在不同干物质接种率下,甘蔗渣的沼气日产量变化情况。当接种率超过30%时,日产气量差别较小,且达到产气高峰时间均为4 d,发酵启动快速,且从第7天开始即进入平稳产气期。但当接种率为10%时,到达产气高峰时间延迟为8 d,说明启动缓慢,且平稳产气期的产气量仅为其他水平的25%左右,表明接种率为10%时启动发酵期的菌种数量不足,导致产气偏低。

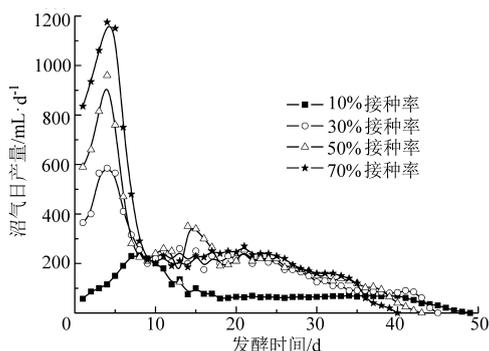


图2 不同接种率条件下的甘蔗渣沼气日产量曲线

Fig. 2 Biogas daily production curves of bagasse at different inoculation rates

对于固定容积的发酵罐而言,接种率越高,意味着发酵原料体积将会越少,即发酵罐有效利用容积越低。因此,在产气量相近的30%、50%和70%水平中,实际应选择30%的干物质接种率为宜。另外,若从单位有效发酵容积(mL)的总甲烷产量角度分析,当接种率分别为10%、30%、50%和70%时,甲烷产量分别为5.65 mL、11.12 mL、9.78 mL和

行。在较优初始 pH 值选择上,虽然 pH 值为 8.5 时可获得最高的甲烷产量,但其总固体产气率要低于 pH 值为 7.8 时的总固体产气率,综合考虑选择 7 ~ 7.8 为较优的初始 pH 值范围。

### 2.1.3 接种率的影响

选取甘蔗渣为发酵原料,pH 值为  $7.8 \pm 0.1$ ,其他参数设置如 2.1.2 节,干物质接种率设置为 10%、30%、50%、70% 等 4 个水平。实验中,向装好相同原料的发酵罐中分别加入 TS 为 3% 的接种物,通过控制接种物的体积来控制干物质接种率,接种后各水平下的有效发酵体积依次为 400、500、700 和 900 mL。

8.86 mL,30% 接种率最高,也说明最佳接种率应为 30%。

## 2.2 不同原料中温和高温发酵特性

通常沼气工程在中温和高温发酵时分别采用  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$  和  $(53 \pm 2)^\circ\text{C}$  作为最佳温度范围,温度增加可显著提高降解速率,理论上每增加  $10^\circ\text{C}$ ,反应速度增加 2 ~ 3 倍。但由于木质纤维素原料结构复杂,不同特性的原料采用高温发酵时其相较于中温发酵的产气量提升幅度存在一定差异,会直接影响到工程实际中发酵温度的选择。

为研究典型木质纤维素原料的中温和高温发酵特性,选取了不同来源的玉米秸、棉秸、稻秸等多种秸秆以及中药渣、甘蔗渣、造纸渣等加工残渣,共有 9 种发酵原料。中温和高温发酵温度分别设置为  $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$  和  $(53 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,接种物采用驯化得到的中温菌种和高温菌种。除油菜秸质量为 150 g 外,其他发酵原料均为 200 g,干物质接种率均为 30%,有效发酵容积 800 mL,初始 pH 值为  $7.1 \pm 0.1$ 。依据堆沤实验结果,棉秸、甘蔗渣堆沤 7 d,中药渣、造纸渣和油菜秸不堆沤,其他堆沤 3 d 处理。

不同发酵温度下,各原料的产气特性如图 3、4 和表 4 所示。由图 3 和图 4 可知,无论何种发酵温度,各组原料均存在一个明显的产气高峰区段,且中温发酵产气高峰集中在第 5 ~ 12 天,高温发酵集中在第 2 ~ 6 天,说明高温发酵启动更快。

从表 4 可知,发酵温度的升高有利于产气性能

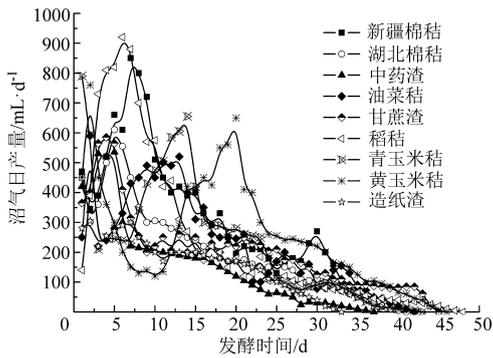


图3 不同原料中温发酵沼气日产量曲线

Fig.3 Biogas production by different materials under mesophilic fermentation condition

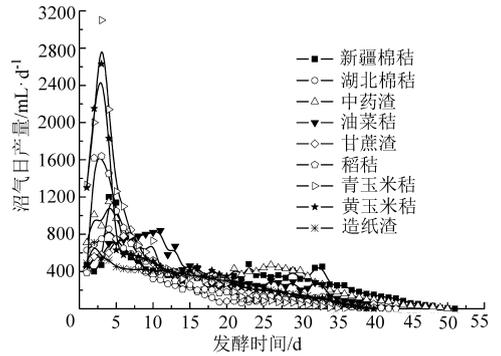


图4 不同原料高温发酵沼气日产量曲线

Fig.4 Biogas production by different materials under thermophilic fermentation condition

表4 不同原料在中温和高温发酵的产气特性

Tab.4 Characteristics of biogas production in mesophilic and thermophilic fermentation conditions

原料	高峰时间/d		发酵周期/d		总产气量/mL		甲烷平均体积分数/%		总固体产气率/mL·g <sup>-1</sup>		可挥发性固体产气率/mL·g <sup>-1</sup>	
	中温	高温	中温	高温	中温	高温	中温	高温	中温	高温	中温	高温
青玉米秸	14	3	43	36	9 995	18 240	55.69	58.11	263.03	480.00	277.43	506.28
黄玉米秸	20	3	46	40	11 365	17 820	54.62	58.87	273.20	428.37	293.13	459.62
新疆棉秸	7	4	39	50	11 995	16 410	58.85	60.11	243.80	333.54	261.67	357.99
湖北棉秸	5	4	41	42	8 358	9 627	59.55	59.75	237.44	273.49	275.29	317.09
稻秸	6	3	48	43	11 000	13 301	57.41	58.52	352.56	426.31	427.50	516.93
油菜秸	13	11	42	42	9 621	15 155	59.83	60.64	267.25	420.97	290.90	458.22
中药渣	5	4	37	49	5 893	17 570	59.14	62.25	103.75	309.33	109.11	325.30
甘蔗渣	4	7	45	41	9 216	11 590	59.83	64.19	260.34	327.40	279.48	351.48
造纸渣	2	2	33	39	5 460	11 200	59.09	59.82	105.41	216.22	169.93	348.57

的改善。与中温发酵对比,高温发酵条件下,青玉米秸的总产气量增加约 82.49%、黄玉米秸增加 56.80%、新疆棉秸提高 36.81%、湖北棉秸提高 15.18%、稻秸上升 20.92%、油菜秸上升 57.52%、甘蔗渣上升 25.76%、中药渣和造纸渣增加 198.15% 和 105.13%。这说明,与其他发酵原料相比,中药渣和造纸渣高温发酵条件下产气性能更优异,更适合于高温发酵。

中温和高温发酵时,甲烷体积分数均在第 3 天达到 50% 以上,然后维持在 60% 左右。但表 4 显示,总体上,高温发酵条件下甲烷平均体积分数均高于中温发酵情形,说明对于木质纤维素类原料而言,高温发酵时不仅提高了原料产气能力,且沼气品质同时有所增加。

值得注意的是,在 9 种原料中,高温发酵时青玉米秸能获得最高的总固体产气率和可挥发性固体产气率,分别为 480.00 mL/g 和 506.28 mL/g,且高温时产气能力较之中温提升较大,因而其更适合采用高温发酵条件。同时,中温发酵条件下,稻秸可获得最高的总固体和可挥发性固体产气率,分别为 352.56 mL/g 和 427.50 mL/g,主要是因为稻秸木质素含量最低,中温条件下也可得到很好的分解。另

外,当处于高温发酵情形时,稻秸的总固体和可挥发性固体产气率也仅提高约 21%,因此,稻秸更适合于中温发酵。

### 3 结论

(1)棉秸和甘蔗渣不经堆沤无法顺利启动发酵,且在堆沤 7 d 时产气率最高;油菜秸不经堆沤即可顺利启动发酵,且产气率最高;甘蔗渣最优初始 pH 值为 7.0 ~ 7.8,较优的总固体接种率为 30%。

(2)相对于中温发酵而言,9 种木质纤维素类原料的高温发酵产气特性得到了较大幅度的提高,青玉米秸、黄玉米秸、新疆棉秸、湖北棉秸、稻秸、油菜秸、甘蔗渣、中药渣和造纸渣的单位总固体产气率分别增加了 82.49%、56.80%、36.81%、15.18%、20.92%、57.52%、25.76%、198.15% 和 105.13%,且中药渣和造纸渣更适合于高温发酵。

(3)中温发酵时,总固体产气能力最大的是稻秸(352.56 mL/g),说明其采用中温发酵即可获得较好的发酵效果。高温发酵时,总固体产气能力最大的是青玉米秸(480.00 mL/g),说明其适于采用高温发酵。

## 参 考 文 献

- 1 Jiang X, Sommer S G, Christensen K V, et al. A review of the biogas industry in China[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(10): 6 073 ~ 6 081.
- 2 孙丽丽, 符征鸽. 玉米秸麦秸中高温沼气发酵产气潜力及特性的研究[J]. *中国沼气*, 2008, 26(6): 13 ~ 16.  
Sun Lili, Fu Zhengge. Biogas potential and characteristic of medium or high temperature biogas fermentation with corn and wheat straw[J]. *China Biogas*, 2008, 26(6): 13 ~ 16. (in Chinese)
- 3 刘德江. 玉米秸秆与牛粪混合原料的沼气发酵试验[J]. *中国沼气*, 2009, 27(4): 13 ~ 15.  
Liu Dejiang. Experiment on biogas fermentation with different proportion of corn straw mixed with cow dung[J]. *China Biogas*, 2009, 27(4): 13 ~ 15. (in Chinese)
- 4 万楚筠, 黄凤洪, 刘睿, 等. 微生物预处理油菜秸秆对提高沼气产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 267 ~ 271.  
Wan Chujun, Huang Fenghong, Liu Rui, et al. Effect on increasing biogas production using rape straw by microbiological pretreatment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 267 ~ 271. (in Chinese)
- 5 Adl M, Sheng K C, Gharibi A. Technical assessment of bioenergy recovery from cotton stalks through anaerobic digestion process and the effects of inexpensive pre-treatments[J]. *Applied Energy*, 2012, 93: 251 ~ 260.
- 6 李艳宾, 张琴, 李为, 等. 接种量及物料配比对棉秆沼气发酵的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(1): 194 ~ 199.  
Li Yanbin, Zhang Qin, Li Wei, et al. Effect of inoculation quantity and material proportion on biogas fermentation of cotton stalk [J]. *ACTA Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(1): 194 ~ 199. (in Chinese)
- 7 艾平, 张衍林, 盛凯, 等. 稻秸厌氧发酵产沼气预处理[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 266 ~ 271.  
Ai Ping, Zhang Yanlin, Sheng Kai, et al. Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of rice straw [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 266 ~ 271. (in Chinese)
- 8 高白茹, 常志州, 叶小梅, 等. 堆肥预处理对稻秸厌氧发酵产气量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 251 ~ 256.  
Gao Bairu, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei, et al. Effect of compost pre-treatment on biogas production from rice straw [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 251 ~ 256. (in Chinese)
- 9 王允圃, 李积华, 刘玉环, 等. 甘蔗渣综合利用技术的最新进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(16): 370 ~ 375.  
Wang Yunpu, Li Jihua, Liu Yuhuan, et al. Comprehensive utilization of bagasse: state of the art[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(16): 370 ~ 375. (in Chinese)
- 10 Shelke S K, Chhabra A, Puniya A K, et al. *In vitro* degradation of sugarcane bagasse based ruminant rations using anaerobic fungi [J]. *Annals of Microbiology*, 2009, 59(3): 415 ~ 418.
- 11 常静. 造纸污泥的处理及资源化利用[J]. *中国资源综合利用*, 2006, 24(12): 25 ~ 27.  
Chang Jing. The treatment and comprehensive utilization of the waste sludge of paper making [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2006, 24(12): 25 ~ 27. (in Chinese)
- 12 Chanakya H N, Sreesha M. Anaerobic retting of banana and arecanut wastes in a plug flow digester for recovery of fiber, biogas and compost [J]. *Energy for Sustainable Development*, 2012, 16(2): 231 ~ 235.
- 13 李湘, 魏秀英, 董仁杰. 秸秆微生物降解过程中不同预处理方法的比较研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(增刊 1): 110 ~ 116.  
Li Xiang, Wei Xiuying, Dong Renjie. A study of degradation efficiency of corn straw pretreated with different methods [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Supp. 1): 110 ~ 116. (in Chinese)
- 14 赵洪, 邓功成, 高礼安, 等. pH 值对沼气产气量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(19): 8 216 ~ 8 217, 8 330  
Zhao Hong, Deng Gongcheng, Gao Li'an, et al. Research on the effect of pH for biogas production [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2008, 36(19): 8 216 ~ 8 217, 8 330. (in Chinese)
- 15 Alvira P, Negro M J, Ballesteros M, et al. Effect of pretreatment severity on xylan solubility and enzymatic breakdown of the remaining cellulose from wheat straw[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(10): 2 034 ~ 2 042.
- 16 王延昌, 袁巧霞, 谢景欢, 等. 食品废弃物风干处理后厌氧消化特性研究[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(4): 105 ~ 109.  
Wang Yanchang, Yuan Qiaoxia, Xie Jinghuan, et al. Anaerobic digestion characteristics for air-dried food waste[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 105 ~ 109. (in Chinese)
- 17 倪圣亚, 臧宜萍, 邓晔, 等. 秸秆沼气技术研究与展望[J]. *江苏农业科学*, 2010(3): 458 ~ 459.  
Ni Shengya, Zang Yiping, Deng Ye, et al. The research and application perspective of straw biogas technology [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010(3): 458 ~ 459. (in Chinese)
- 18 Lu Y, Lai Q H, Zhang C, et al. Characteristics of hydrogen and methane production from cornstalks by augmented two-or three-stage anaerobic fermentation process[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(12): 2 889 ~ 2 895.
- 19 白娜, 梅自力, 符征鸽, 等. 三种秸秆在不同温度下发酵产气特性研究[J]. *中国沼气*, 2011, 29(1): 16 ~ 20.  
Bai Na, Mei Zili, Fu Zhengge, et al. The effects of temperature on anaerobic digestion of three different straws for biogas production[J]. *China Biogas*, 2011, 29(1): 16 ~ 20. (in Chinese)
- 20 周玮, 董保成, 齐岳. 不同处理秸秆中温厌氧发酵的产气效果[J]. *中国沼气*, 2010, 28(3): 22 ~ 24.

- Zhou Wei, Dong Baocheng, Qi Yue. The biogas production of different treated straw under mesophilic and anaerobic condition[J]. China Biogas, 2010, 28(3): 22 ~ 24. (in Chinese)
- 21 Quintero M, Castro L, Ortiz C, et al. Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate; fique's bagasse as an example [J]. Bioresource Technology, 2012, 108(3): 8 ~ 13.
- 22 Baserba M G, Angelidaki I, Karakashev D. Effect of continuous oleate addition on microbial communities involved in anaerobic digestion process[J]. Bioresource Technology, 2012, 106(2): 74 ~ 81.
- 23 高鑫, 晏水平, 贺清尧, 等. 温度和搅拌对甘蔗渣厌氧发酵[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(增刊2): 40 ~ 46.
- Gao Xin, Yan Shuiping, He Qingyao, et al. Effect of temperature and stirring on biogas production by anaerobic fermentation with bagasse[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40 (Supp. 2): 40 ~ 46. (in Chinese)
- 24 Taherzadeh M J, Karimi K. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production; a review [J]. International Journal of Molecular Science, 2008, 9(9): 1 621 ~ 1 651.
- 25 Kaparaju P, Serrano M, Thomsen A B, et al. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(9): 2 562 ~ 2 568.
- 26 吕黄珍, 韩鲁佳, 杨增玲. 猪粪麦秸反应器好氧堆肥工艺参数优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 101 ~ 105.
- Lü Huangzhen, Han Lujia, Yang Zengling. Optimization of aerobic composting parameters on pig slurry-wheat straw reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 101 ~ 105. (in Chinese)
- 27 袁巧霞, 田纯英, 陈钢, 等. 调理料对猪粪耗氧堆肥特性的影响试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 108 ~ 114.
- Yuan Qiaoxia, Tian Chunyan, Chen Gang, et al. Effects of different materials addition on the aerobic composting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 108 ~ 114. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 129 页)

- 6 Keller F A, Hamilton J E, Nguyen Q A. Microbial pretreatment of biomass[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2003, 105(1 ~ 3): 27 ~ 41.
- 7 Lee J. Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol[J]. Journal of Biotechnology, 1997, 56(1): 1 ~ 24.
- 8 Yu H, Guo G, Zhang X, et al. The effect of biological pretreatment with the selective white-rot fungus *Echinodontium taxodii* on enzymatic hydrolysis of softwoods and hardwoods[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21): 5 170 ~ 5 175.
- 9 Yu J, Zhang J, He J, et al. Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(2): 903 ~ 908.
- 10 Taniguchi M, Suzuki H, Watanabe D, et al. Evaluation of pretreatment with *Pleurotus ostreatus* for enzymatic hydrolysis of rice straw[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, 100(6): 637 ~ 643.
- 11 Shrestha P, Rasmussen M, Khanal S K, et al. Solid-substrate fermentation of corn fiber by *Phanerochaete chrysosporium* and subsequent fermentation of hydrolysate into ethanol [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(11): 3 918 ~ 3 924.
- 12 Bak J S, Ko J K, Choi I G, et al. Fungal pretreatment of lignocellulose by *Phanerochaete chrysosporium* to produce ethanol from rice straw [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 104(3): 471 ~ 482.
- 13 Shi J, Sharma-Shivappa R R, Chinn M, et al. Effect of microbial pretreatment on enzymatic hydrolysis and fermentation of cotton stalks for ethanol production[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(1): 88 ~ 96.
- 14 Xu C, Ma F, Zhang X, et al. Biological pretreatment of corn stover by *Irpex lacteus* for enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(20): 10 893 ~ 10 898.
- 15 Wan C, Li Y. Microbial delignification of corn stover by *Ceriporiopsis subvermispota* for improving cellulose digestibility[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2010, 47(1): 31 ~ 36.
- 16 Pandey K, Pitman A. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2003, 52(3): 151 ~ 160.
- 17 刘震东, 李文哲, 刘爽, 等. 高效木质纤维素分解菌复合系的发酵特性[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(8): 105 ~ 109.
- Liu Zhendong, Li Wenzhe, Liu Shuang, et al. Characteristic of an efficient microbial system with cellulose degradation bacteria [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2009, 40(8): 105 ~ 109. (in Chinese)
- 18 Lee D H, Behera S K, Kim J W, et al. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities; a lab-scale study[J]. Waste Management, 2009, 29(2): 876 ~ 882.