

菇渣干湿厌氧发酵对比与影响因素分析*

艾平 王殿龙 辛娅 窦子朋 张衍林

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 为提高蘑菇栽培废料菇渣的利用效率,以菇渣为发酵原料,进行了总固体质量分数(TS)为7%的湿式发酵和TS范围为16.5%~23.6%的干式发酵的厌氧消化实验。结果表明:湿发酵中当菇渣与菇脚质量比例为1:0和2:1时产气效果最佳,产气率分别为301.25 mL/g和300.60 mL/g;在35℃的中温干发酵中当接种率低于30%,TS高于19.1%时,反应不能正常启动;在TS为19.1%条件下,当采取55℃高温发酵时可实现顺利启动,产气率最高,为328.90 mL/g,45℃时产气率为112.40 mL/g。实验结果说明菇渣具有高产气潜力,干发酵时55℃高温发酵可避免启动酸化,且产气效率优于湿发酵。

关键词: 菇渣 厌氧发酵 接种率 甲烷

中图分类号: S216.4; X712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0130-06

Comparison of Wet and Dry Anaerobic Fermentation and Influencing Factors Analysis for Mushroom Residue

Ai Ping Wang Dianlong Xin Ya Dou Zipeng Zhang Yanlin

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

Abstract: In order to improve the utilization efficiency of mushroom cultivation waste, mushroom residue was used as raw material for fermentation to conduct anaerobic digestion experiments with wet fermentation of 7% TS mass fraction and dry fermentation of 16.5%~23.6% TS mass fraction. The results showed that the experimental groups at the ratio of 1:0 and 2:1 could gain better effect of gas production in wet fermentation, and the gas production rate were 301.25 mL/g and 300.60 mL/g respectively. The dry fermentation reaction could not be started at medium temperature of 35℃, the rate of inoculation less than 30% and the TS mass fraction higher than 19.1%. Under the TS mass fraction of 19.1% condition, the reaction could be started successfully and the highest gas production rate of 328.90 mL/g was got with high temperature of 55℃. The gas production rate was 112.40 mL/g at temperature of 45℃. The experimental results showed that mushroom residue had a high potential. The high temperature fermentation of 55℃ could avoid the acidification at dry fermentation, and the gas production rate was better than the rate of wet fermentation.

Key words: Mushroom residue Anaerobic fermentation Inoculation rate Methane

引言

我国生物质资源丰富,主要包括农作物秸秆和畜禽粪便^[1~2]。目前,生物质资源,如小麦秸秆、水稻秸秆、甘蔗渣、猪粪和牛粪等,已经成为生产沼气

或者乙醇的重要原料^[3~6]。蘑菇栽培废料菇渣也引起了广泛的关注,因为它不仅产量丰富、容易收集,而且含有丰富的木质纤维素。

我国是生产食用菌的大国,每年都会有大量废弃蘑菇料渣产生,2010年菇渣产量达到1320万t^[7]。由

收稿日期: 2013-06-05 修回日期: 2013-07-11

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(20130399)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013PY053、2011PY007)

作者简介: 艾平,副教授,博士,主要从事农业生物环境能源与农业系统工程研究, E-mail: aiping@mail.hzau.edu.cn

于技术条件的约束,这部分能源并没有得到有效利用,通常被燃烧或者丢弃^[8]。菇渣的适当处理,可以避免其产生的环境问题,而且,已有研究表明菇渣可以用来厌氧发酵制取沼气^[9-10]、氢气^[11-12]和乙醇^[13]。菇渣在厌氧发酵能源化的过程中,仍有其缺点,如发酵残余物的进一步处理。

厌氧发酵是一个复杂的过程,与预处理^[14]、温度^[15]、接种量、pH 值^[16]和底物质量分数等因素有关。为了优化产甲烷的过程,本文研究不同配比的废料对甲烷产量的影响及接种量和温度对菇渣厌氧发酵过程的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

菇渣来自武汉如意食用菌生物高科技有限公司,实验所用接种污泥取自正常运行的以猪粪为原料的户用沼气池。实验材料的总固体质量分数(TS)、挥发性固体质量分数(VS)以及木质纤维素组成等理化特性如表 1 所示。

表 1 菇渣和接种污泥基本特性

Tab.1 Basic characteristics of mushroom residue

原料	TS /%	VS /%	纤维素质 量分数/%	半纤维素质 量分数/%	木质素质 量分数/%	发热量 /J·g ⁻¹
菇渣	83.30	90.10	35.34	17.70	6.12	15 808
菇脚	33.64	97.16	28.06	16.48	5.88	15 720
污泥	5.25	64.90				

1.2 方法

(1)实验设计

采用的发酵瓶为 1 L 蒸馏瓶,底物为菇渣,总固体质量为 100 g,初始 pH 值调节至 7.0。

湿发酵实验考虑菇渣和菇脚的配比因素,底物质量分数为 7%、按 TS 为 30% 接种污泥,采取中温(35±3)℃ 菇渣与菇脚的配比(质量比)设置为 1:0、0:1、1:1、2:1 和 1:2,探讨不同配比对菇渣厌氧发酵过程的影响。

干发酵实验考虑接种率和温度对菇渣厌氧发酵过程的影响。在 35℃ 条件下,采用 10%、20%、30% 和 40% 的接种率,此时对应的总固体质量分数分别为 23.6%、19.1%、17.5% 和 16.5%;在接种率为 20% 条件下,即总固体质量分数为 19.1% 时,采用 35℃、45℃ 和 55℃ 的温度水平。

(2)测试方法

气体体积采用排水法收集,气体成分采用 GC900C 型气相色谱仪测量,采用 TCD 检测器;COD 采用 CM-03 型 COD 测定仪测定;TS 和 VS 分别采用干燥法和灼烧法测定;木质纤维素采用

ANKOM A2000i 型全自动纤维分析仪测量;pH 值采用 FE-20 型 pH 计测量;热值采用 C2000IKA 量热仪测定。

2 结果与分析

2.1 菇渣与菇脚湿发酵

2.1.1 不同原料配比对气体产量的影响

在 35℃、底物质量分数 7% 条件下,反应器启动正常(图 1)。在菇渣与菇脚的质量比为 1:0 条件下,反应启动迅速,产气稳定阶段,沼气日均产气率稳定在 16.4 mL/(g·d),第 9 天达到产气高峰 21.6 mL/(g·d),总产气量达 30.13 L。在 0:1 条件下,产气稳定后,沼气日均产气率在 11.9 mL/(g·d),第 10 天达产气高峰 15.9 mL/(g·d),总产气量为 19.28 L。在 1:1 条件下,产气稳定后,沼气日均产气率稳定在 14.0 mL/(g·d),第 3 天达产气高峰 16.0 mL/(g·d),总产气量为 25.96 L。在 2:1 条件下,产气稳定后,沼气日均产气率稳定在 16.8 mL/(g·d),第 3 天达产气高峰 19.10 mL/(g·d),总产气量为 30.06 L。在 1:2 条件下,产气稳定后,沼气日均产气率稳定在 17.10 mL/(g·d),第 6 天达产气高峰 21.0 mL/(g·d),总产气量为 27.95 L。综上所述,在 35℃ 和 7% 底物质量分数条件下,不同配比对累积产气率有明显差异,菇渣的产气潜力高,适宜的配比为 1:0 和 2:1,所以在后面的干发酵实验中选用菇渣为干发酵的原料。

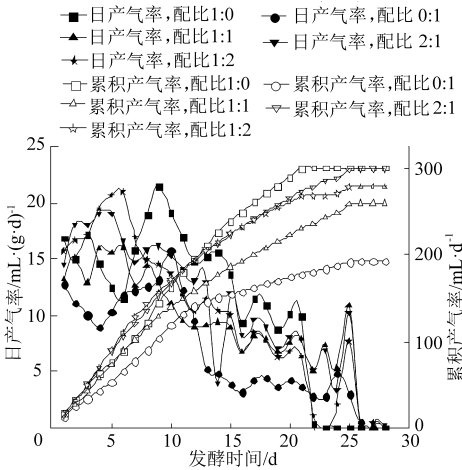


图 1 不同菇渣与菇脚配比对产气率影响曲线

Fig.1 Effect of different ratios of mushroom residue on biogas production

不同配比菇渣的总产气量有明显差别,表明菇渣的产气能力比菇脚高,而菇脚的添加,可以使产气高峰提前。在反应器启动阶段,在菇渣和菇脚质量比为 1:0、0:1、1:1、2:1 和 1:2 条件下,平均甲烷体积分

28.63%。第5天甲烷体积分数已达50%以上,之后稳定在56%左右,这表明发酵已经进入稳定阶段^[17],蘑菇废料的 比例对甲烷体积分数无明显影响。

2.1.2 综合产气率和能量转化效率对比

产气率如图2所示,随菇渣质量分数增高气率增高,1:0实验组气体产率最高,为301.25 mL/g;2:1实验组产气率次之,为300.60 mL/g;纯菇脚的0:1实验组气体产率最低,为192.80 mL/g。从甲烷产率分析,最高的分别为2:1实验组和1:0实验组,其甲烷产率分别为162.35 mL/g和157.19 mL/g,比纯菇脚的1:0实验组高出65.00%和59.83%。

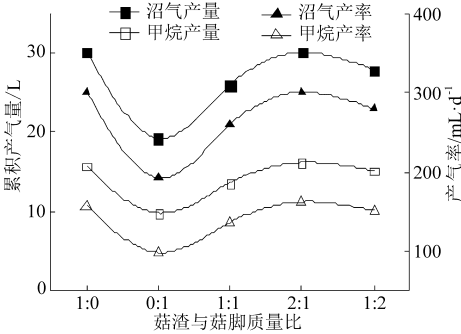


图2 产气量和产气率的对比曲线
Fig.2 Comparison curves of biogas production rate and yield

从能量转化效率(图3)上看,从大到小依次为2:1、1:0、1:2、1:1、0:1、2:1实验组能量转化效率最高,达35.35%,次之为1:0实验组,其能量转化效率为33.81%,分别高于0:1实验组65.99%和58.76%。因此,综合分析得产气效果最优的为纯菇渣1:0和菇渣菇脚质量比2:1实验组,两组产气率差别较小,且在2:1实验组中甲烷体积分制可小幅度提升;但若菇脚质量比例进一步增高时,即在菇渣菇脚质量比为1:1、1:2和0:1的实验组中,产气率随菇脚质量增加明显下降。根据实验结果,并考虑到实验中更宜于采取单一原料,因此在后续的干发酵实验中选择纯菇渣发酵。

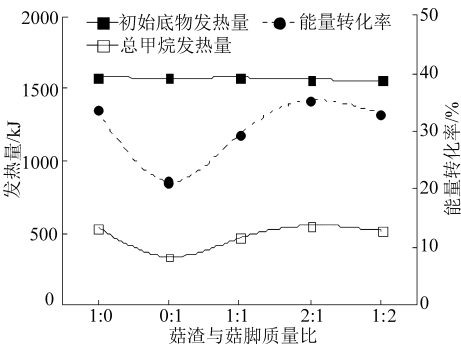


图3 能量转化率的对比曲线
Fig.3 Comparison curves of energy conversion efficiency

2.2 菇渣干发酵

2.2.1 接种率对菇渣干发酵的影响

接种率对厌氧发酵过程中产甲烷阶段的运行效果和稳定性十分重要^[18-19]。如果接种率过低,微生物数量不够,容易引起发酵启动时间延长,产甲烷速率降低,造成有机酸积累导致酸化,使厌氧消化进程停止;如果接种率过高,消化器的容积必然过大。适宜的接种物浓度有利于微生物的生长,加快消化进程,同时,接种率和底物质量分数也相互影响^[20-21]。

接种率为10%和20%的实验组相应的底物质量分数分别为23.6%和19.1%,两组实验均未能正常启动(图4)。启动初期,产气量迅速下降,pH值下降至5.4,由于发酵液严重酸化,对产气产生抑制,第3天总固体产气量低于3 mL/g,前期所产气体主要为CO₂,使用NaHCO₃调节pH值至7.0,产气量未能恢复至正常,可能由于产甲烷在酸化条件下失去活性^[10]。表明较低接种率易导致原料的酸化,不能够正常启动,这与李刚和程辉彩等研究结果类似^[10,22]。

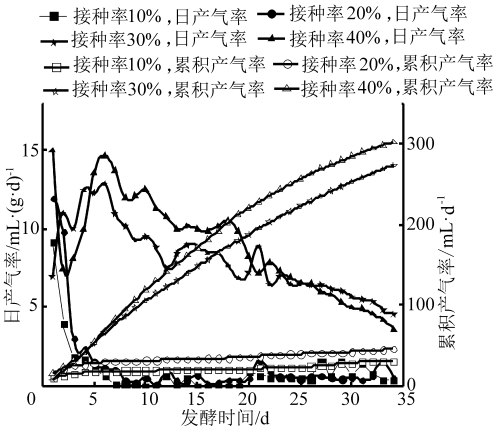


图4 不同接种率对菇渣产气率影响曲线
Fig.4 Effect of different inoculation ratio on biogas production of mushroom residue

接种率为30%和40%的实验组均可以正常启动,相应的底物质量分数分别为17.5%和16.5%。产气初期,日产气率呈现先下降后上升的趋势,因为发酵前期在产酸菌的作用下,pH值有所降低,使得日产气率下降。后期pH值恢复正常,日产气率迅速增加,第6天达到产气高峰12.9、14.7 mL/(g·d),总产气量分别为27.35 L和30.22 L,平均甲烷体积分数分别为66.63%和66.70%。可以看出,接种率越高,沼气产量越高,在30%和40%的接种率条件下,总固体产气率分别为273.50 mL/g和302.15 mL/g。

2.2.2 温度对菇渣干发酵的影响

温度是影响厌氧发酵过程的重要因素,对底物

的降解和甲烷产量有重要影响,不同发酵原料对温度的要求不同^[23]。李金平等^[24]研究表明,在高温条件下,甲烷菌活性高,可以及时消耗产酸阶段产生的脂肪酸,有效避免酸化;温度降低,产甲烷菌活性降低,产酸菌活性高,挥发性脂肪酸逐渐积累,酸化阶段变长。Li 等^[25]以稻秸为原料研究温度对干湿发酵的影响,结果表明对于湿发酵,高温比中温和常温总固体产气率分别提高 13.77%、34.59%;对于干发酵,中温比高温和常温总固体产气率分别提高 20.67%、23.56%。

为探寻提高发酵温度对干发酵加速启动的影响,根据 2.2.1 节结果,选取在中温条件下未能正常启动的接种率为 20% 条件下,分别设定 35℃、45℃ 和 55℃ 的 3 个发酵温度水平进行实验。

如图 5 所示,在 35℃ 条件下,由于底物质量分数高,启动前期产气量迅速下降,出现酸化现象,即使使用 NaHCO₃ 调节 pH 值至 7.0,也未能恢复产气效果,整个周期甲烷体积分数在 40% 以下。

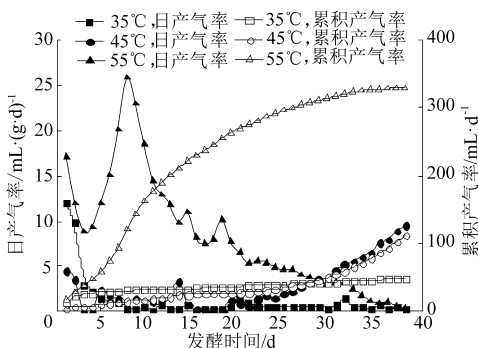


图 5 不同温度对菇渣产气率影响曲线
Fig.5 Effect of different temperatures on biogas production of mushroom residue

45℃ 条件下,前期的效果与 35℃ 类似,但在发酵第 12、13、19、21 天通过添加 NaHCO₃ 调解后,产气量略有提高,产气第 20 天以后逐渐恢复正常产气,平均日产气率 4.8 mL/(g·d),累积产气率 112.4 mL/g,甲烷体积分数也恢复至 50% 以上,但由于产酸阶段延长了 25 d,使得整个发酵周期延长。

55℃ 条件下,完全可以实现正常启动,但随之 pH 值逐渐下降至 6.5,产气量同时下降,在没有进行任何调节措施的情况下,产气量通过自行调节缓慢恢复,6 d 后 pH 值恢复至 7.5。正常产气后,产气量逐渐增加,在第 8 天达产气高峰 25.8 mL/(g·d),产气稳定期的平均气体产量为 15.3 mL/(g·d),55℃ 条件下的总产气量为 32.89 L,前 20 d 产气量达总产气量的 80% 以上,累积产气率为 328.90 mL/g。55℃ 条件下产气稳定后甲烷体积分数稳定在 65% 左右,甲烷产率为 200.34 mL/g。

通过对不同温度的发酵实验进行比较可知,高

温发酵有利于提高产甲烷菌种的活性,迅速消耗产酸阶段产生的挥发酸,有效地避免酸化现象^[26],能满足菇渣高浓度的发酵要求,这与 Li^[12] 和李金平等^[24] 的研究结果类似。

2.3 干湿发酵特性对比

2.3.1 木质纤维素的降解

发酵残余物的木质纤维素含量如表 2 所示。对于湿发酵,可以看出,经过发酵后的纤维素质量分数均大幅降低,降解率高达 50% 以上,纤维素降解率最大的为 1:0 和 2:1 实验组,分别为 61.21% 和 58.04%,0:1 实验组纤维素降解率最低(38.88%),说明菇脚中的纤维素相对于菇渣不易降解,可能是菇脚结构紧密,微生物不易利用所致。

表 2 发酵残余物的木质纤维素含量
Tab.2 Lignocelluloses content of fermentation residue

类型	组别	发酵	纤维素质量 分数/%	半纤维素质 量分数/%	木质素质 量分数/%
湿发酵	1:0	前	35.34	17.70	6.12
		后	13.71	14.35	14.68
	0:1	前	28.06	16.48	5.88
		后	17.12	16.05	8.82
	1:1	前	31.70	17.09	6.00
		后	15.02	15.92	11.80
	2:1	前	32.91	17.29	17.29
		后	13.81	14.48	14.43
	1:2	前	30.49	16.89	16.89
		后	14.35	15.01	13.47
干发酵	30%	前	35.34	17.70	6.12
		后	14.42	15.67	15.01
	40%	后	13.67	14.33	14.54
	55℃	后	13.39	14.26	15.08

半纤维素的降解率较低,其降解效果明显低于纤维素,说明微生物主要利用蘑菇栽培废料中的纤维素。半纤维素降解率最大的为 1:0 和 2:1 实验组,分别为 18.93% 和 16.25%,0:1 实验组的半纤维素降解率为 2.61%,为所有实验组中降解率最小的一组。对于干发酵,发酵前后纤维素降解率达 60%,但各组实验中纤维素降解率相差不大,接种率为 40% 实验组和 55℃ 实验组,半纤维素的降解率比接种率为 30% 实验组高 40%,表明提高接种率和温度都有利于半纤维素的降解。木质素不能被微生物消化,其质量分数的增加可能是由于纤维素和半纤维素质量分数的变化所引起的。

由上述分析可知,在蘑菇栽培废料发酵过程中,微生物对纤维素的降解起主要作用,但不同条件下,纤维素降解率相差不大,降解范围为 12.07% ~ 16.64%。进一步从挥发性固体降解率和挥发性固

体产气率两指标评价不同比例、接种率和温度对发酵的影响可知,湿发酵 2:1 实验组挥发性固体降解率和挥发性固体产气率为最高,分别为 16.64%、325.15 mL/g。干发酵接种率为 40% 实验组比 30% 实验组,挥发性固体降解率和产气率都明显升高,表明接种率的提高,有利于提高底物的利用效率,这与马磊等的研究结果相同^[19]。从图 5 中可以看出,高温(55℃)干发酵实验组尽管挥发性固体降解率不是最高,但挥发性固体产气率为所有实验组中最高,达365.04 mL/g,表明高温条件有利于提高菌种活性,提高木质纤维的降解。

2.3.2 修正的 Gompertz 模型

采用修正 Gompertz 模型来描述累积产甲烷过程,其中: $H(t)$ 为 t 时刻的累积甲烷产量(L), P 为甲烷产量的潜力(L), R_m 为最大产甲烷速率(L/d),

t_m 为获得最大产甲烷速率的时间, λ 为延迟时间(d), t 为发酵时间(d)

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

$$t_m = \lambda + \frac{P}{R_m e} \quad (2)$$

修正的 Gompertz 模型主要是用来拟合最大甲烷产率、累积甲烷产率和延迟时间。通过对式(1)求导令结果为零,可以得到最大的甲烷产率,所以最大甲烷产率的时间也能通过式(2)得到。 P 、 R_m 和 λ 是通过拟合得到的,这样就可以通过式(2)计算得到 t_m ,其中 λ 可作为评价启动快慢的重要指标。拟合分析结果见表 3,可以看出,湿发酵中 2:1 实验组不仅甲烷产率高,而且延迟时间也比其他实验组短,干发酵中 55℃ 实验组甲烷产气率最高。

表 3 修正 Gompertz 的模型参数
Tab.3 Parameters of modified Gompertz model

组别	甲烷产率/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	P 拟合值/L	P 实际值/L	R_m 拟合值/ $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$	R_m 实际值/ $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$	t_m/d	λ/d	R^2	
湿发酵	1:0	157.19	16.66	15.72	1.01	1.14	8.11	2.04	0.996 0
	0:1	98.34	9.86	9.83	0.70	0.87	7.43	2.28	0.996 1
	1:1	136.21	14.79	13.62	0.72	0.84	8.92	1.32	0.994 9
	2:1	162.35	17.02	16.24	0.93	1.10	7.89	1.18	0.996 2
	1:2	151.49	15.43	15.15	1.02	1.25	6.94	1.35	0.997 0
干发酵	30%	164.45	19.20	16.45	0.63	0.73	13.55	2.31	0.996 3
	40%	181.54	19.96	18.15	0.78	0.88	12.30	2.86	0.997 6
	55℃	200.34	19.93	20.03	1.05	1.59	9.40	2.45	0.995 7

3 结论

(1)以菇渣及菇脚为发酵原料,35℃ 中温发酵条件下,底物质量分数为 7% 的湿发酵中,当菇渣和菇脚采用不同配比时,产气率和甲烷体积分数有明显差异,产气效果最优的为纯菇渣 1:0 和菇渣菇脚质量比 2:1 实验组,产气率分别为 301.25 mL/g 和 300.60 mL/g,菇脚配比进一步提高时,产气率随之下降。

(2)菇渣中温 35℃ 干发酵时,接种率越高,产气

效果越好,高浓度启动,容易出现酸化。当接种率低于 30%,高于 19.1% 时发生酸化,未能正常启动,接种率为 30% 和 40% 时单固体产气率分别为 273.50 mL/g 和 302.15 mL/g。

(3)提高发酵温度有利于有机酸的分解转化和提高菌种的活性,可以有效避免酸化,在接种率为 20% 时,菇渣干发酵采用 55℃ 高温可顺利启动,产气率达 328.90 mL/g,采用 45℃ 温度时产气率为 112.40 mL/g。菇渣具有高产气潜力,且 55℃ 高温发酵时产气效率优于湿发酵。

参 考 文 献

1 吴创之,周肇秋,阴秀丽,等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报,2009,40(1):91~99.
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqiu, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91~99. (in Chinese)

2 王久臣,戴林,田宜水,等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报,2007,23(9):276~282.
Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 276~282. (in Chinese)

3 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.

4 王金丽,焦静,张劲,等. 甘蔗叶干法厌氧发酵工艺研究[J]. 农业机械学报,2011,42(3):109~114.
Wang Jinli, Jiao Jing, Zhang Jin, et al. Sugarcane leaves dry anaerobic fermentation [J]. Transactions of the Chinese Society for

Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 109 ~ 114. (in Chinese)

5 Wang Y Y, Zhang Y L, Meng L, et al. Hydrogen-methane production from swine manure: effect of pretreatment and VFAs accumulation on gas yield [J]. Biomass Bioenergy, 2009, 33(9): 1 131 ~ 1 138.

6 刘荣厚,王远远,孙辰,等. 蔬菜废弃物厌氧发酵制取沼气的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):209 ~ 213.
Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen, et al. Experimental study on biogas production from vegetable waste by anaerobic fermentation [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 209 ~ 213. (in Chinese)

7 刁清清,毛碧增. 蘑菇渣处理现状及在农业生产上的应用[J]. 浙江农业科学,2012(12):1 710 ~ 1 712.

8 时连辉,张志国,刘登民,等. 菇渣和泥炭基质理化特性比较及其调节[J]. 农业工程学报,2008,24(4):199 ~ 203.
Shi Lianhui, Zhang Zhiguo, Liu Dengmin, et al. Comparison of physiochemical properties between spent mushroom compostand peat substrate and adjustment [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 199 ~ 203. (in Chinese)

9 李亚冰,张丽萍,史延茂,等. 利用菌糠厌氧发酵生产沼气初步研究[J]. 江苏农业科学,2009(1): 306 ~ 308.

10 李刚,郭前辉,张全国. 蘑菇栽培废料的厌氧发酵研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(9):3 624 ~ 3 626.

11 Lay C H, Sung I, Kumar G, et al. Optimizing biohydrogen production from mushroom cultivation waste using anaerobic mixed cultures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37:16 473 ~ 16 478.

12 Li Y C, Wu S Y, Chu C Y, et al. Hydrogen production from mushroom farm waste with a two-step acid hydrolysis process [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(21):14 245 ~ 14 251.

13 Lee J W, Koo B W, Choi J W, et al. Evaluation of waste mushroom logs as a potential biomass resource for the production of bioethanol [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8):2 736 ~ 2 741.

14 Hendriks A, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 10 ~ 18.

15 刘荣厚,王远远,孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. 农业机械学报,2009,40(9):116 ~ 121.
Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 116 ~ 121. (in Chinese)

16 任南琪,王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

17 周孟津,张榕林,蔺金印. 沼气使用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2003.

18 王延昌,袁巧霞,谢景欢,等. 餐厨垃圾厌氧发酵特性的研究[J]. 环境工程学报,2009,3(9):1 677 ~ 1 682.
Wang Yanchang, Yuan Qiaoxia, Xie Jinghuan, et al. Characteristic studies on anaerobic fermentation for kitchen waste [J]. Chinese Journal Environmental Engineering, 2009, 3(9): 1 677 ~ 1 682. (in Chinese)

19 马磊,王德汉,谢锡龙,等. 接种量对餐厨垃圾高温厌氧消化的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(12):178 ~ 182.
Ma Lei, Wang Dehan, Xie Xilong, et al. Influence of inoculum on thermophilic anaerobic digestion of food waste [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 178 ~ 182. (in Chinese)

20 Forster-Carneiro T, Prez M, Romero L. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 6 994 ~ 7 002.

21 Lopes W S, Leite V D, Prasad S. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste [J]. Bioresource Technology, 2004, 94(3): 261 ~ 266.

22 程辉彩,张丽萍,崔冠慧,等. 平菇菌糠发酵生产沼气技术研究[J]. 中国食用菌,2010,29(5): 46 ~ 49.
Cheng Huicai, Zhang Liping, Cui Guanhui, et al. Study on the fermentation technology of residue pleurotus [J]. Edible Fungi of China, 2010, 29(5): 46 ~ 49. (in Chinese)

23 Bouallagui H, Haouari O, Touhami Y, et al. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste [J]. Process Biochemistry, 2004, 39(12): 2 143 ~ 2 148.

24 李金平,柏建华,李珍. 不同恒温条件厌氧发酵的沼气成分研究[J]. 中国沼气,2010,28(6):20 ~ 23.
Li Jinping, Bai Jianhua, Li Zhen. Influence of temperature on biogas composition of thermostatic anerobic fermentation [J]. China Biogas, 2010, 28(6):20 ~ 23. (in Chinese)

25 Lianhua L, Dong L, Yongming S, et al. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(13): 7 261 ~ 7 266.

26 李继红,杨世关,郑正,等. 玉米秸秆与土豆混合厌氧发酵试验研究[J]. 太阳能学报,2008,29(10):1 308 ~ 1 312.
Li Jihong, Yang Shiguan, Zheng Zheng, et al. Anaerobic batch co-digestion of cornstalk and potato [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(10): 1 308 ~ 1 312. (in Chinese)