

DOI:CNKI:61-1390/S.20111216.1116.003

网络出版时间:2011-12-16 11:16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111216.1116.003.html>

不同原料配比对餐饮废弃物高温厌氧发酵的影响

常国璋¹, 席新明¹, 郭康权^{1,2}, 杨秀生^{2,3}

(1 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 杨凌现代农业国际研究院, 陕西 杨凌 712100;

3 美国康涅狄格大学 农业与自然资源学院, 美国 康涅狄格州 06269-4087)

【摘要】 **【目的】**探索不同原料比对餐饮废弃物高温厌氧发酵的影响,为餐饮废弃物最大资源化利用提供理论依据。**【方法】**用环境监测布点法检测陕西杨凌餐饮废弃物的有机成分含量,根据检测结果,采用农业部西北沼气分中心自行设计的厌氧发酵装置,选取产气量和甲烷含量作为指标,于 55℃ 下考察不同原料比对餐饮废弃物厌氧发酵的影响。**【结果】**各处理组产气特征差异明显。发酵第 1~3 天,第 6 组($m(\text{米饭}) : m(\text{餐巾纸}) : m(\text{熟肉}) = 3 : 4 : 3$)累计产气量最高,为 5 410 mL,第 11 组最低,为 3 150 mL;发酵第 2 天,第 3 组($m(\text{米饭}) : m(\text{餐巾纸}) : m(\text{熟肉}) = 2 : 4 : 4$)甲烷含量最高,为 16.7%,第 29 组最低,为 1.3%。发酵总过程中第 10 组的累计产气量、产气率和稳定产气阶段甲烷含量最高,分别为 8 400 mL、140.94 mL/g 和 49.9%,表明餐饮废弃物高温厌氧的最佳原料配比为 $m(\text{米饭}) : m(\text{餐巾纸}) : m(\text{熟肉}) = 4 : 4 : 2$ 。**【结论】**确定了餐饮废弃物高温厌氧发酵中不同原料的最优配比,通过合理调控初始配比,可以实现对餐饮废弃物资源的最大化利用。

【关键词】 餐饮废弃物; 配比; 高温厌氧发酵; 产气特性

【中图分类号】 X799.3

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)01-0123-06

Effect of different proportions on the thermophilic anaerobic digestion of food waste

CHANG Guo-zhang¹, XI Xin-ming¹, GUO Kang-quan^{1,2}, YANG Xiu-sheng^{2,3}

(1 College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Yangling International Academy of Modern Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 College of Agriculture and Natural Resources, University of Connecticut, Connecticut 06269-4087, America)

Abstract: **【Objective】** The study explored the effect of different proportions of food waste on the thermophilic anaerobic digestion to determine optimal parameter for more utilization of food waste. **【Method】** The organic ingredients of food waste in Yangling of Shanxi were tested. According to the test, the experiment was conducted with self-manufactured anaerobic equipment from the northwest station of biogas products and equipment quality center of ministry of agriculture. Effect of different proportions of food waste on the thermophilic anaerobic digestion was studied through measuring CH_4 content and biogas production. **【Result】** Characteristics of biogas production in each group were significant. On the 1—3 days of the anaerobic digestion, the accumulative biogas production of group 6 ($m(\text{rice}) : m(\text{napkin}) : m(\text{meat}) = 3 : 4 : 3$) was the highest (5 410 mL), while group 11 was the lowest (3 150 mL). The CH_4 content of group 3 ($m(\text{rice}) : m(\text{napkin}) : m(\text{meat}) = 2 : 4 : 4$) was the highest (16.7%) and the group 29 was the lowest (1.3%). In all days of the anaerobic digestion, the total biogas production (8 400 mL), biogas pro-

* [收稿日期] 2011-08-01

[基金项目] 陕西杨凌现代农业国际研究院资助项目

[作者简介] 常国璋(1986—),男,山东章丘人,在读硕士,主要从事生物质能源研究。E-mail: changguozhang@nwsuaf.edu.cn

[通信作者] 席新明(1969—),男,陕西扶风人,副教授,在读博士,主要从事能源动力和智能化检测研究。

duction rate(140.94 mL/g) and CH₄ content(49.9%) of group 10 were the maximum,so proportion of $m(\text{rice}) : m(\text{napkin}) : m(\text{meat}) = 4 : 4 : 2$ is the best. 【Conclusion】 This study provided optimum parameters for thermophilic anaerobic digestion of food waste,and it demonstrated how to achieve more utilization of food waste.

Key words: food waste; proportion; thermophilic anaerobic digestion; producing biogas characteristics

近年来我国餐饮业迅猛发展,由于浪费等方面的原因,餐饮废弃物的产量与日俱增。据统计,2010年大连市日产餐饮废弃物 830 t^[1],上海、广州等大城市 2005 年餐饮废弃物的日均产量已突破 1 000 t^[2]。如此庞大的餐饮废弃物产生量,逐渐成为了环境保护的巨大负担。

对餐饮废弃物传统的处置方式有粉碎排放法、填埋法、焚烧法等^[3],这些方法存在易腐败,容易产生温室气体、渗滤液,且一次性投资过大等缺点。目前我国对餐饮废弃物的处理方式以资源化利用为主,包括肥料化法、饲料化法、能源化法等^[4]。其中,肥料化法包括好氧堆肥法^[5]和厌氧消化法,能源化法包括生物制氢法、乳酸发酵法、合成聚乳酸法^[6]、制取燃料乙醇法^[7]、厌氧消化法等。综合而言,厌氧消化法既可以产生沼气和有机肥料作为能源和资源,又符合清洁发展机制(CDM)要求,有着广阔的应用前景。传统的厌氧消化法一般采用中温(35℃)发酵,高温(55℃)发酵因受限于热源而应用不广,但高温发酵具有有机物降解彻底、产气迅速、沼渣中有害病菌含量低等特点^[8],在日益重视环境保护和食品安全的社会背景下,其具有中温发酵无可比拟的优势,所以近年来逐渐成为厌氧消化领域研究的热点。不同的有机质组分有着不同的厌氧发酵特性,为探索原料配比差异性对厌氧发酵产气的影响,本试验以米饭模拟淀粉、餐巾纸模拟纤维素、熟肉模拟蛋白质,研究不同原料比对餐饮废弃物高温厌氧发酵产气的影响,探求特定条件下的最优发酵原料配比,现将研究结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试原料 本试验材料取自陕西杨凌西北农林科技大学南苑餐厅和好又多超市,为米饭、熟肉和餐巾纸,将组合好的发酵原料用小型搅拌机粉碎,置于 4℃冰箱备用。接种物取自杨凌姚安中学沼气生态工程,于 55℃下每天添加餐饮废弃物 100 g 驯化 10 d^[9],测定最终总固体量(TS)含量为 100 g/kg。

1.1.2 主要仪器 温度传感器(RA-45)和温控仪(WMZK-01),上海华辰医用仪表有限公司生产;沼气分析仪(Gasboard23200p),武汉四方光电有限公司生产;分析天平(FA1604S),上海天平仪器厂生产;电热鼓风干燥箱(WG-71),天津泰斯特仪器有限公司生产;小型搅拌机(HR2004),Philips 公司生产。

1.2 试验装置

本试验装置为农业部沼气西北分中心自行设计的厌氧发酵装置,主要分为加热系统和产气系统 2 部分,其中加热系统采用加热线加热,用连有温度传感器的温控仪控制发酵反应器的温度;产气系统采用塑料壶作为发酵反应器,壶口用旋塞密封,旋塞上面接有带导管的取样口和排气口。用锥形瓶作为集气瓶,瓶口用旋塞密封,旋塞上面接有带导管的入气口、取样口和排水口;用锥形瓶作为集水瓶,各导管处均以乳胶管连接(图 1)。

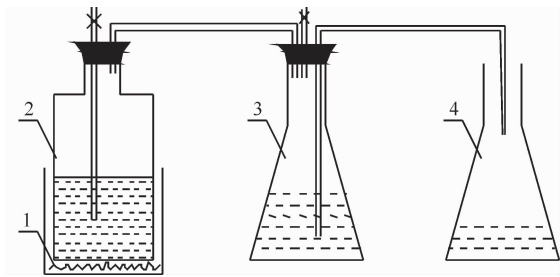


图 1 厌氧发酵装置示意图

1. 加热装置;2. 反应器;3 集气瓶;4. 集水瓶

Fig. 1 Schematic diagram of anaerobic digestion

1. Heating equipment;2. Bioreactor;

3. Gas collecting bottle;4. Water collecting bottle

1.3 试验方案

根据对陕西杨凌餐饮废弃物干物质的检测分析,确定发酵原料的不同配比为影响因素。检测过程采用功能区布点法和网格布点法,确定杨凌区玉皇宫酒店、小四川炒菜馆、和合川菜馆和西北农林科技大学第四学生餐厅为采样点,连续采样 1 周。根据检测结果,本试验对米饭、餐巾纸和熟肉的含量分别取 9,5 和 6 个水平,进行组合设计,共计 29 个处理,其中原料质量为 100 g,接种率为 50%,料液含

水率为 92.1%^[10],具体设计和参数(TS 和挥发性固体(VS)含量)如表 1 所示。每处理设 2 个重复。当每个处理连续 2 d 的累计产气量低于总产气量的 10%或产气处理组数占总组数的比例小于 20%时,试验停止。

表 1 不同原料配比对餐饮废弃物高温厌氧发酵影响的试验方案

Table 1 Design of effect of different proportions on the thermophilic anaerobic digestion of food waste

处理编号 Number	发酵原料 Raw material			发酵料液 Raw material and inoculums	
	$m(\text{米饭}):m(\text{餐巾纸}):$ $m(\text{熟肉})m(\text{rice}):$ $m(\text{napkin}):m(\text{meat})$	TS/(g·kg ⁻¹) Total solid	VS/(g·kg ⁻¹) Volatile solid	料液总质量/g Quality of raw material and inoculums	加水量/g Additional water
1	1:4:5	565	514	842	642
2	2:3:5	520	473	785	585
3	2:4:4	582	530	863	663
4	3:2:5	475	432	728	528
5	3:3:5	537	489	806	606
6	3:4:3	599	545	885	685
7	4:1:5	410	373	645	445
8	4:2:4	472	430	724	524
9	4:3:3	534	486	802	602
10	4:4:2	596	542	881	681
11	5:0:5	385	350	614	414
12	5:1:4	447	407	692	492
13	5:2:3	509	463	771	571
14	5:3:2	571	520	849	649
15	5:4:1	633	576	928	728
16	6:0:4	402	366	635	435
17	6:1:3	464	422	714	514
18	6:2:2	526	479	792	592
19	6:3:1	588	535	871	671
20	6:4:0	650	592	949	749
21	7:0:3	419	381	657	457
22	7:1:2	481	438	735	535
23	7:2:1	543	494	814	614
24	7:3:0	605	551	892	692
25	8:0:2	436	397	678	478
26	8:1:1	498	453	757	557
27	8:2:0	560	510	835	635
28	9:0:1	453	412	700	500
29	9:1:0	515	469	778	578

1.4 测定项目及方法

甲烷含量(体积分数)采用沼气分析仪测定,产气量采用排水法测定^[11]。产气率=总产气量/总固体质量,其中总固体质量采用烘干法测定。

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 及 MATLAB 软件分析。

2 结果与分析

2.1 不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵产气特征的影响

2.1.1 日产气量 图 2A 表明,餐饮废弃物不同原料配比处理的日产气量变化规律基本一致,均呈现先迅速升高后剧烈下降,然后稳定,再减少的趋势。发酵第 1~3 天,各处理组处于水解和产酸阶

段,日产气高峰值均在第 1 天出现,然后急剧下降,在第 3 天有 27 个处理组日产气量到达低谷,第 14、15 组延迟 1 d 到达。大部分处理组的日产气量在低谷后开始回升,于发酵第 4~8 天达到稳定状态,为 350~550 mL;日产气量在第 9 天开始回落,部分处理组在第 9~11 天出现了第 2 个稳定产气阶段,日产气量维持在 100~300 mL。发酵第 8 天,第 14 组停止产气,第 9~11 天共计 7 个处理组停止产气,第 12 天共计 18 个组停止产气,占全部处理组的 62%,第 13 天只有 6 个组产气,日产气量均低于 70 mL。

2.1.2 累计产气量 累计产气量是衡量一个发酵系统效率的重要参数。图 2B 表明,不同配比发酵原料处理的累计产气量存在明显差异。发酵第 1~

3 天,第 6 组的累计产气量最高,第 3 天达到 5 410 mL;第 11 组最低,第 3 天为 3 150 mL,两者相差 2 260 mL。发酵总过程中,第 6 组和第 10 组的累计产气量均高于 8 000 mL,第 11 组和第 26 组均低于 5 000 mL,其余处理组大部分集中于 5 000~7 000 mL,所有处理组的累计产气量均值为 6 262 mL,VS

质量均值为 46.99 g,得到本试验各处理组的平均 VS 产气量为 0.134 L/g。其中,第 10 组累计产气量最大,为 8 400 mL,其 VS 产气量为 0.155 L/g;第 11 组累计产气量最小,为 4 415 mL,其 VS 产气量为 0.126 L/g。

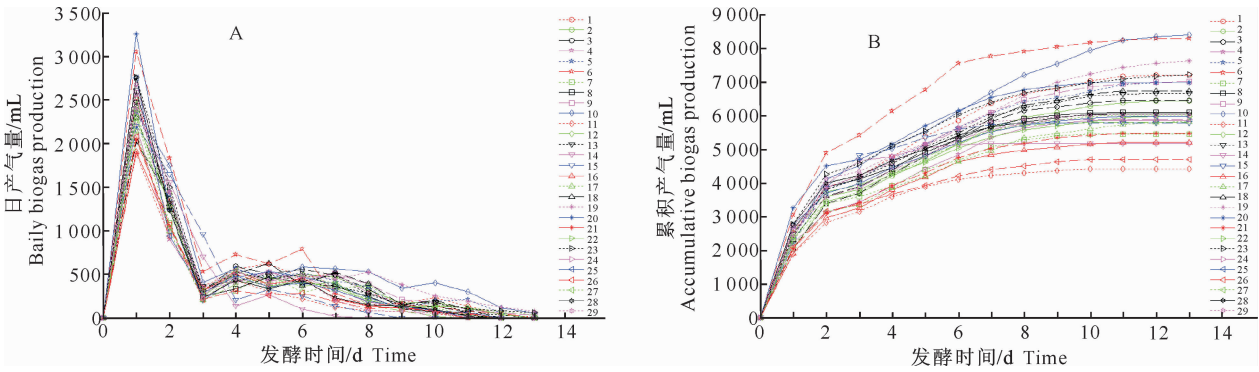


图 2 不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵中日产气量(A)和累计产气量(B)的影响

Fig.2 Effect of different raw material proportions on daily biogas production (A) and cumulative biogas production (B) in anaerobic digestion of food waste

2.1.3 产气率 单位质量 TS 下的总产气量即为发酵原料的产气率。图 3 表明,不同原料配比下餐饮废弃物厌氧发酵的产气率存在差异。全部处理组中,第 10 组产气率最大,达 140.94 mL/g;第 14 组最小,为 90.37 mL/g,两者相差 50.57 mL/g。在产气率低于 100 mL/g 的 4 个处理组中,第 14 组在试验第 7 天停止产气,第 15 组在第 8 天停止产气,第

24 组在第 9 天停止产气,第 26 组在第 10 天停止产气,均未能持续较长的产气时间。

2.2 不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵中甲烷含量的影响

不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵中甲烷含量的影响见图 4。

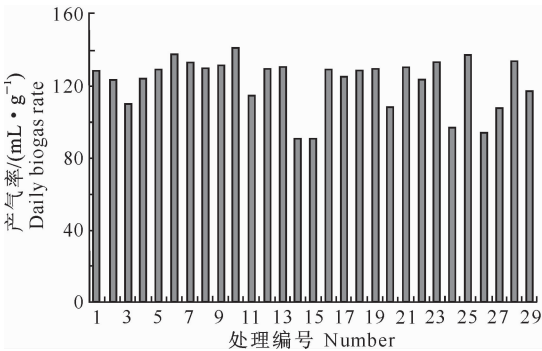


图 3 不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵中产气率的影响

Fig.3 Effect of different raw material proportions on biogas production rate in anaerobic digestion of food waste

图 4 表明,不同处理组在餐饮废弃物厌氧发酵过程中甲烷含量的变化趋势基本一致,呈现出先迅速增加后趋于稳定的趋势。发酵第 2 天,第 3 组的甲烷含量最高,达到 16.7%,说明第 3 组的启动效率最高。发酵第 5 天,各处理的甲烷含量大多超过

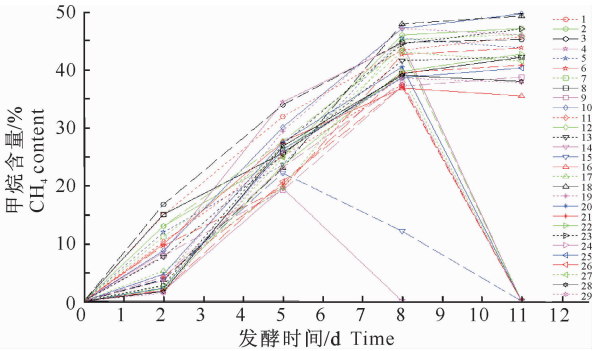


图 4 不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵中甲烷含量的影响

Fig.4 Effect of different raw material proportions on CH₄ content in anaerobic digestion of food waste

20%,其中第 4 组最高,为 34.5%。对比发酵第 8 天与第 11 天的试验数据,可知各处理组在第 8 天已处于稳定产气阶段,共计 18 个处理组的甲烷含量超过 40%,第 11 天时第 10 组的甲烷含量最大,达到 49.9%,已达到正常使用的标准^[11]。

3 讨 论

3.1 不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵产气特征的影响

餐饮废弃物的组成受地方性差异明显,但有机物干物质成分类似,均由淀粉、纤维素、脂肪和蛋白质组成。本试验在对陕西杨凌餐饮废弃物中有机物含量的检测分析中发现,脂肪类物质的含量随着就餐规格的提高而降低,且总体含量较低,因此不将其作为试验的影响因素。

本研究中,由于发酵原料种类相同,故所有处理组的产气规律基本一致。全部处理组的日产气量高峰均在第 1 天出现,说明餐饮废弃物水解性强,固体组分易被微生物利用,而较高的产气量可有效增加发酵原料与菌种的混合度,提高发酵作用的启动效率。第 4~8 天随着产甲烷菌对营养物质的利用,各处理组进入稳定产气阶段,之后随着营养物质的减少及酸化和氨氮抑制作用影响,各处理组的日产气量逐渐减少至停止产气。

在 TS 含量(79 g/kg)一致的条件下,各处理组产气量存在差异的原因有:①不同原料配比餐饮废弃物的 C/N 差异。C/N 是影响厌氧菌活性的重要参数。一般认为,适合厌氧发酵的 C/N 为(20~30):1^[12]。本研究中,第 10 组的 C/N(24.5:1)在合适的范围之内。②不同的原料配比催发了不同的发酵启动速度,适宜的启动速度既可以保证产甲烷菌利用营养物质的效率,又可以抑制餐饮废弃物厌氧发酵过程中易发生的酸化作用^[13]。③淀粉、纤维素和蛋白质的产气特性存在差异。李东等^[14]研究指出,淀粉含量超过 50% 的餐饮废弃物易于水解和酸化。本试验结果显示,水解和酸化阶段的产气量随着米饭含量的增加而增大。熟肉是各发酵系统氮素的主要来源,所以易被微生物利用。相对于米饭和熟肉,餐巾纸的水解速率较慢,纤维素酶水解成为限速步骤^[15],所以导致厌氧发酵启动较慢。随着发酵的进行,餐巾纸逐渐水解,可以为发酵菌的中后期生长提供碳源。以餐巾纸为单因素,考察发酵总产气量(y)与餐巾纸含量(x)的关系,得到 $y = 44.142x + 5350.7$,相关系数 $R^2 = 0.9506$,证明总产气量与餐巾纸的含量呈明显的正相关关系。因此,在实际餐饮废弃物厌氧发酵中,建议在合适的负荷比和现实条件下,按第 10 组成分配比添加适量的秸秆、菜叶等纤维素废弃物,以达到增加产气量的目的。

3.2 不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵中甲烷含量的影响

不同原料配比的餐饮废弃物厌氧发酵过程中甲烷含量变化趋势一致,但数值差异明显,可能主要由原料 C/N 差异性所致。C/N 过大,系统容易出现酸化现象,导致发酵过程受到抑制;C/N 过小,系统容易出现氨中毒现象而抑制发酵作用。蒋建国等^[16]研究证明,氨氮质量浓度超过 1 700 mg/L 时,发酵会受到明显的抑制。

对比本研究中甲烷含量与日产气量曲线可以得出,所有处理组的甲烷含量峰值与日产气量第一、第二峰值出现时间均有差异,主要由餐饮废弃物易水解的特性所致,也与发酵中后期出现的酸化作用有关,提高接种率或调节发酵液的 pH 值可能会在稳定产气阶段产生新的产气高峰。

分析第 3 组的甲烷含量曲线得出,在一个封闭的餐饮废弃物厌氧发酵系统中,适量的氮素可以有效提高发酵的启动速度。因此,按第 3 组成分配比向餐饮废弃物中添加尿素等高氮素物质^[17],可以有效提高发酵系统的启动效率。

4 结 论

1) 不同原料配比的餐饮废弃物高温厌氧发酵试验中,第 10 组的累计产气量最大,为 8 400 mL;第 11 组最小,为 4 415 mL,极差为 3 985 mL。第 10 组的产气率最大,为 140.94 mL/g;第 11 组最小,为 90.37 mL/g,产气率极差为 50.57 mL/g。发酵第 11 天,第 10 组的甲烷含量最高,为 49.9%,明显高于其他处理组。说明不同原料配比对餐饮废弃物厌氧发酵产气特性影响显著。

2) 在水解与酸化阶段,第 6 组处理累计产气量最高,第 3 天为 5 410 mL,说明第 6 组固体组分易于水解,酸化阶段处理时间短。第 10 组处理累计产气量(8 400 mL)、产气率(140.94 mL/g)和稳定产气阶段甲烷含量(49.9%)均最高,表明第 10 组为餐饮废弃物高温厌氧发酵最佳处理组合,即 $m(\text{米饭}):m(\text{餐巾纸}):m(\text{熟肉})=4:4:2$ 为餐饮废弃物厌氧发酵的最佳配比。

[参考文献]

- [1] 孙胜慧. 大连市拟建设餐厨垃圾处理工 [EB/OL]. 2011-01-27. <http://www.cn-hw.net/html/china/201101/22312.html>.
Sun S H. Treatment for kitchen waste will be projected in Dalian [EB/OL]. 2011-01-27. <http://www.cn-hw.net/html/>

china/201101/22312.html. (in Chinese)

[2] 王 星,王德汉,李俊飞,等.餐厨垃圾的厌氧消化技术现状分析 [J]. 中国沼气,2006,24(2):35-39.
Wang X,Wang D H,Li J F,et al. Analysis to the present status of anaerobic digestion technology of kitchen waste [J]. China Biogas,2006,24(2):35-39. (in Chinese)

[3] 崔亚伟,陈金发.厨余垃圾的资源化现状及前景展望 [J]. 中国资源综合利用,2006,24(10):31-32.
Cui Y W,Chen J F. Resource recycling present status and prospects of kitchen waste [J]. China Resources Comprehensive Utilization,2006,24(10):31-32. (in Chinese)

[4] 汪群慧,马鸿志,王旭明,等.厨余垃圾的资源化技术 [J]. 现代化工,2004,24(7):56-59.
Wang Q H,Ma H Z,Wang X M,et al. Resource recycling technology of food wastes [J]. Modern Chemical Industry,2004,24(7):56-59. (in Chinese)

[5] 邹德勋,汪群慧,隋克俭,等.餐厨垃圾与菌糠混合好氧堆肥效果 [J]. 农业工程学报,2009,25(11):269-273.
Zou D X,Wang Q H,Sui K J,et al. Aerobic composting effect of kitchen garbage and spent mushroom substrate [J]. Transactions of the CSAE,2009,25(11):269-273. (in Chinese)

[6] Shirai K,Guerrero I,Huerta S,et al. Effect of initial glucose concentration and inoculation level of lactic acid bacteria in shrimp waste ensilation [J]. Enzyme and Microbial Technology,2001,28:446-452.

[7] 陈小翠,张增强,吴浩豪,等.餐饮废物制取燃料乙醇发酵条件研究 [J]. 环境科学学报,2010,30(3):556-564.
Chen X C,Zhang Z Q,Wu H H,et al. Optimization of fermentation conditions for ethanol production from restaurant waste [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2010,30(3):556-564. (in Chinese)

[8] 马 磊,王德汉,谢锡龙,等.餐厨垃圾的高温厌氧消化处理研究 [J]. 环境工程学报,2009,3(8):1509-1512.
Ma L,Wang D H,Xie X L,et al. Study on treatment of food waste by thermophilic anaerobic digestion [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2009,3(8):1509-1512. (in Chinese)

[9] 马 磊,王德汉,杨文杰,等.餐厨垃圾高温厌氧消化接种物的驯化研究 [J]. 农业工程学报,2007,23(6):203-207.
Ma L,Wang D H,Yang W J,et al. Domestication of inoculums in treating food waste by thermophilic anaerobic digestion [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(6):203-207. (in Chinese)

[10] 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):1677-1682.
Wang Y C,Yuan Q X,Xie J H,et al. Characteristic studies on anaerobic fermentation for kitchen waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2009,3(9):1677-1682. (in Chinese)

[11] 罗 涛,邱 凌,石 勇,等.添加聚合草对猪粪中温厌氧发酵的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(4):177-181.
Luo T,Qiu L,Shi Y,et al. Effect of comfrey on mesophilic anaerobic digestion of swine feces [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat Sci Ed,2011,39(4):177-181. (in Chinese)

[12] 楚莉莉,李铁冰,冯永忠,等.猪粪麦秆不同比例混合厌氧发酵特性试验 [J]. 农业机械学报,2011,42(4):100-103.
Chu L L,Li Y B,Feng Y Z,et al. Characteristics of pig dung and wheat straw in various ratios [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):100-103. (in Chinese)

[13] 邱 凌.庭园沼气高效生产与利用 [M]. 北京:科学技术文献出版社,2008:223-224.
Qiu L. High-efficiency production and use of family-size methane tanks [M]. Beijing: Science and Technology Literature Publishing House,2008:223-224. (in Chinese)

[14] 李 东,孙永明,袁振宏,等.原料比例和 pH 值对厨余垃圾和废纸联合厌氧消化的影响 [J]. 过程工程学报,2009,9(1):53-58.
Li D,Sun Y M,Yuan Z H,et al. Influences of feedstock proportion and pH value on anaerobic co-digestion of kitchen waste and waste paper [J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2009,9(1):53-58. (in Chinese)

[15] Lynd L R,Weimer P J, Van Zyl W H,et al. Microbial cellulose utilization; Fundamentals and biotechnology [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews,2002,66(3):506-577.

[16] 蒋建国,王 岩,隋继超,等.厨余垃圾高固体厌氧消化处理中氨氮浓度变化及其影响 [J]. 中国环境科学,2007,27(6):721-726.
Jiang J G,Wang Y,Sui J C,et al. Variations of the ammonia concentration of high solid anaerobic digestion technology for organic waste [J]. China Environmental Science,2007,27(6):721-726. (in Chinese)

[17] 李 敏,李铁冰,杨改河,等.尿素和纤维素酶对厌氧发酵的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(2):165-170.
Li M,Li Y B,Yang G H,et al. Effect of urea and cellulose on anaerobic fermentation [J]. Journal of Northwest A&F University:Nat Sci Ed,2010,38(2):165-170. (in Chinese)