

红毛丹果皮沼气发酵试验研究及果皮回收利用分析

李映娟, 柳静, 杨红, 赵兴玲, 尹芳, 张无敌 (云南师范大学, 云南昆明 650092)

摘要 [目的] 获得红毛丹(*Nephelium lappaceum* L.) 果皮沼气发酵的相关参数及条件, 探讨其沼气发酵潜力。[方法] 30℃下, 采用全混合批量发酵对红毛丹果皮进行了实验室沼气发酵研究, 其中接种物分别为混合接种物及牛粪发酵料液接种物, 料液浓度分别为 6.15% 和 6.34%。[结果] 不同接种物对红毛丹果皮的沼气发酵特性影响较大。综合比较日产气量、总固体(TS)降解率、挥发性固体(VS)降解率、发酵时间等得出, 混合接种物对红毛丹果皮的发酵效率更高。就发酵体系中 C、N 二大营养物质的转化进行了讨论, 并就水果果皮的回收利用以实现资源最大化、能源可持续化及环境友好化的沼气工程综合开发利用效益模式进行了概述。[结论] 该研究可为红毛丹果皮的沼气能源化利用提供科学依据。

关键词 红毛丹果皮; 混合接种沼气发酵; 碳素、氮素转化; 果皮回收利用

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)33-12984-03

Study on the Biogas Fermentation of the Peel of *Nephelium lappaceum* L. And Its Fruit Peel Recycling Analysis

LI Ying-juan et al (Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092)

Abstract [Objective] The aim was to obtain the relation parameters and conditions of biogas fermentation of the peel of *Nephelium lappaceum* L., to discuss its biogas fermentation potential. [Method] The CSRT anaerobic batch fermentation was used to conduct on the laboratory biogas fermentation research with the fresh peel of *Nephelium lappaceum* L. as the raw material under 30℃, thereinto, two kinds of inoculums were mixed inoculum and cow dung fermentation slurry, and the fermentation liquid concentration were 6.15% and 6.34% respectively. [Result] Different inoculums had a significant influence on the biogas fermentation properties of the fresh peel of *Nephelium lappaceum* L.. Comprehensively considering the daily biogas production, TS degradation rate, VS degradation rate and fermentation time, the mixed inoculum had a better fermentation efficient on the fresh peel of *Nephelium lappaceum* L. rather than the cow dung fermentation sludge. Moreover, the two major nutrients C, N transformed in fermentation system was discussed, and summed up the synthetical development and utilization efficient model of environment-friendly biogas engineering that realized the resource maximization and energy sustaining through the recycling of the fruit peel. [Conclusion] The study provides a scientific basis for biogas energy use of the peel of *Nephelium lappaceum* L..

Key words The peel of *Nephelium lappaceum* L.; Mixed inoculum biogas fermentation; C and N transformation; Fruit peel recycling

红毛丹(*Nephelium lappaceum* L.) 是无患子科韶子属水果^[1], 果实甘甜, 气味清新, 鲜食、制作罐头及加工都可^[2]。红毛丹果皮的抗氧化及抗菌活性成分极高, 但常常被弃用^[3]。这不但造成了资源的浪费, 还污染了环境。沼气发酵技术可将资源回收利用、能源与环保有机结合起来, 形成显著的综合效益。因此, 笔者就红毛丹果皮的沼气能源化利用展开相关研究, 以期获得红毛丹果皮沼气发酵的相关参数及条件, 为红毛丹果皮的沼气能源化利用提供科学依据。

1 材料与与方法

1.1 发酵原料 新鲜红毛丹果皮, 总固体(TS)含量为 18.96%, 挥发性固体(VS)含量为 97.32%。

1.2 接种物 采用两种不同的接种物: ①牛粪沼气发酵后的料液, TS 含量为 8.90%, VS 含量为 76.83%, pH 为 8.0; ②多种原料发酵料液混合的混合接种物, TS 含量为 7.83%, VS 含量为 72.68%, pH 为 8.0。

1.3 试验设计 设 2 个试验组和 2 个对照组。2 个试验组分别以牛粪发酵后的料液和混合接种物为接种物启动试验, 每个试验组设置 3 个平行试验。料液浓度为 6%, 接种量为 30%, 总有效容积为 500 ml。向以牛粪为接种物的 3 个平行试验组中分别加入 120 ml 牛粪发酵料液接种物, 向以混合接种物为接种物的 3 个平行试验组中分别加入 120 ml 混合接

种物, 再向 2 个试验组的 3 个平行试验中加入 71.27 g 切碎的红毛丹果皮, 最后补水至 400 ml。2 个对照组也分别设置 3 个平行试验, 分别向 3 个平行试验中加入 120 ml 牛粪发酵料液接种物, 向另 3 个平行试验中加入 120 ml 混合接种物, 并补水至 400 ml。

1.4 试验装置 采用实验室自制的恒温水浴装置, 控制水温 30℃±2℃, 沼气发酵的试验装置见图 1。该装置由厌氧发酵系统(厌氧发酵瓶、排水集气瓶及体积计量瓶)和温控系统等组成。在厌氧发酵系统中, 厌氧发酵瓶为广口瓶(500 ml), 用带玻璃导管的橡皮塞封口; 排水集气瓶为下口三角瓶(500 ml), 用带玻璃三通管的橡皮塞封口; 体积计量瓶为自制的 500 ml 广口瓶; 厌氧发酵瓶、排水集气瓶和体积计量瓶通过 Φ=8 mm 的乳胶管连接。温控系统由水槽、电热管、循环水泵、交流接触器、热电偶等组成。

1.5 分析项目及方法

1.5.1 产气量。 利用排水集气法, 发酵瓶中每天产生的沼气把集气瓶中的水压入计量瓶中, 通过计量瓶上的刻度标记读取水的体积, 即每天的产气量。记录对照组和试验组 3 个平行每天的产气量, 以试验组每天的平均产气量减去对照组每天的平均产气量即可得到试验组每天的净产气量。

1.5.2 pH。 采用精密 pH 试纸, 测定发酵前后发酵液的 pH。

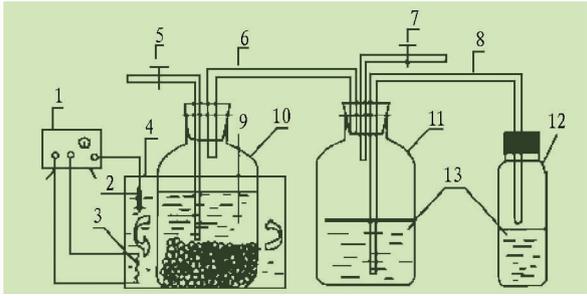
1.5.3 TS 含量。 将样品在 105℃±2℃ 的烘箱中烘干至恒重, 计算样品除水分后干物质重量占样品总重量的质量分数^[4]。

1.5.4 VS 含量。 将测定过 TS 的样品在马弗炉中 550℃±20℃ 下烧至恒重, 所得固体为灰分, 将干物质含量减去灰分, 即得

基金项目 云南省教育厅基金项目(2013Y437); 国家自然科学基金项目(51366015); 云南省科技条件平台建设项目(2010DH012)。

作者简介 李映娟(1989-), 女, 云南大理人, 硕士研究生, 研究方向: 农村生物环境与能源工程。

收稿日期 2013-10-20



注:1. 温控仪;2. 传感器;3. 电热丝;4. 恒温水槽;5. 取样口;6. 导气管;7. 取气口;8. 导水管;9. 发酵料液;10. 发酵瓶;11. 集气瓶;12. 集水瓶;13. 水。

图1 红毛丹果皮沼气发酵装置

挥发分重量,将挥发分重量除以干物质重量即得 VS 含量^[4]。

2 结果与分析

2.1 产气情况分析 每天定时记录试验组和对照组的产气量,并以3个平行试验的平均值为当天的产气量,作日产气量与发酵时间的相关性曲线,结果见图2。从图2可以看出,牛粪接种物对照组和混合接种物对照组在整个试验过程中均未产气,故不作相关产气分析。以混合接种物启动的试验组发酵第1天产气150 ml,但不能点燃,这是因为刚启动时发酵瓶内有残存的空气不利于厌氧微生物的快速繁殖,所产甲烷较少而CO₂偏多所致。从第2天开始所产沼气便能点燃,焰色呈淡蓝色。发酵第5天出现一个产气次高峰,随后产气量稍降低后又逐渐升高,沼气微生物逐渐适应原料基质。随着发酵的进行发酵细菌创造了严格的厌氧环境,厌氧微生物逐渐增加,酶活力渐渐增强,到第14天出现产气高峰,产气220 ml。随后产气量逐渐下降,随着发酵的进行,发酵原料的消耗,酶活力下降,同时发酵产生的物质也会抑制厌氧微生物的活性等,从而引起日产气量的下降。从发酵开始到第21天,日产气量均>100 ml,占总发酵时间的57%。第22~29天日产气量均>50 ml,占总发酵时间的22%左右,从发酵开始到第29天,日产气量>50 ml的时间占总发酵时间的78%。

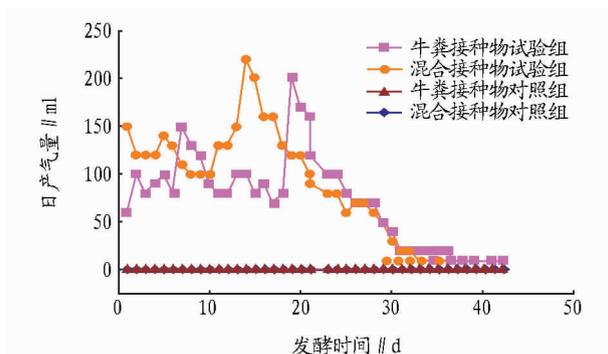


图2 日产气量与发酵时间的相关性曲线

以牛粪发酵液为接种物的试验组发酵第1天产气60 ml,但不能点燃。随着发酵的进行,厌氧发酵微生物逐渐适应原料基质,产气量逐渐增加,到第7天出现次高峰,产气150 ml。随后产气量下降后又逐渐上升,这时沼气发酵微生物活性逐渐增强,各种酶活力较高,到第19天产气达到最大

值200 ml。随着原料的消耗及酶活力的下降等,产气量逐渐降低。发酵42 d中,产气量≥100 ml的有13 d,占总发酵时间的31%左右;产气量≥50 ml且≤100 ml的有16 d,占总发酵时间的38%左右。

从图2还可以看出,混合接种物试验组的日产气量总体高于牛粪发酵液接种物试验组,发酵时间短于牛粪发酵液接种物试验组5 d,产气次高峰和产气高峰明显早于牛粪发酵液接种物试验组。这主要是由于2个试验组采用不同的接种物造成的。混合接种物的接种物来源较广,其中富集了多种不同原料发酵后的料液,微生物种类、微生物活性、酶种类和酶活性都高于牛粪发酵液中的接种物,因此处理原料时混合接种物试验组中的微生物能快速适应原料基质并发挥出降解活性。而牛粪发酵液接种物微生物种类、酶种类相较于混合接种物较为单一,处理原料时微生物对原料的适应期及酶活性的提高期相对于混合接种物较长。从日产气量来看,混合接种物处理红毛丹果皮的发酵效率高于牛粪发酵液接种物处理,因此在红毛丹果皮发酵试验中,混合接种物更适合来启动并降解红毛丹果皮中的有机质,以便实现红毛丹果皮的资源化、能源化利用。

2.2 累计产气量及产气速率分析 将图2的数据进行整理,按每10 d进行一次产气量累计,并将累计产气量除以总产气量得到混合接种物试验组和牛粪发酵液接种物试验组产气速率,结果见表1。

从表1可以看出,混合接种物试验组总产气量为3 490 ml;前20 d产气速率增加较快,第20~30天产气速率增长缓慢;第30天以后产气速率趋于平缓;到第20天,产气达到总产气量的77.65%,第21天,产气达到总产气量的80%以上,到第25天产气量达到总产气量的90%以上。牛粪发酵液接种物试验组总产气量为3 090 ml;前25 d产气速率增长较快,第25~30天产气速率增长缓慢,第30天以后产气速率趋于平缓;第25天产气量达到总产气量的80%以上。

从表1还可以看出,混合接种物试验组的总产气量高于牛粪发酵液接种物试验组,产气量达到总产气量一定百分数的发酵时间早于牛粪发酵液接种物试验组,整个发酵进程早于牛粪发酵液接种物试验组。因此,混合接种物处理红毛丹果皮的发酵效率高于牛粪发酵液接种物处理。

表1 试验组累计产气量与产气速率

发酵时间/d	混合接种物试验组		牛粪发酵液接种物试验组	
	累计产气量/ml	产气速率/%	累计产气量/ml	产气速率/%
5	650	18.62	430	13.92
10	1 190	34.10	1 000	32.36
15	2 020	57.88	1 440	46.60
20	2 710	77.65	2 050	66.34
25	3 120	89.40	2 610	84.47
30	3 400	97.42	2 910	94.17
35	3 470	99.43	3 010	97.41
40	3 490	100.00	3 070	99.35
45			3 090	100.00

2.3 发酵前及发酵后料液的 TS、VS 分析 从表 2 可以看出,试验组的 TS、VS 含量在发酵前后均发生较大改变。混合接种物试验组的 TS 降解率为 28.23%,VS 降解率为 6.61%。牛粪发酵液接种物试验组的 TS 降解率为 21.14%,VS 降解率为 4.13%。这说明在发酵过程中原料被消耗并产生了沼气。2 组的 pH 在发酵前后变化不大。相比于牛粪发酵液接种物试验组来说,混合接种物试验组的 TS、VS 利用率更高,这与日产气量、累计产气量和产气速率的分析结果一致。

表 2 试验组发酵前后料液的 TS、VS 含量及 pH 变化

组别	发酵前			发酵后		
	TS//%	VS//%	pH	TS//%	VS//%	pH
混合接种物试验组	6.15	89.11	8.0	4.41	83.22	8.0
牛粪发酵液接种物试验组	6.34	88.96	7.5	5.00	85.29	7.5

2.4 产气潜力分析 从表 3 可以看出,2 试验组的 TS、VS 产气潜力都较高,都大于 200 ml/g,表明以这 2 种接种物与红毛丹果皮全混合发酵都很好。相比于牛粪发酵液接种物,混合接种物与红毛丹果皮试验组的 TS、VS 和原料产气量都较高,因此红毛丹果皮的发酵选择微生物种类较为丰富的混合接种物更合适,产气潜力更好。

表 3 试验组产沼气潜力 ml/g

组别	TS 产气率	VS 产气率	原料产气率
混合接种物试验组	258	265	49
牛粪发酵液接种物试验组	228	234	43

2.5 各种水果果皮的产沼气潜力比较 为了进一步评价红毛丹果皮的产气潜力,对发酵温度 30℃左右的各类水果果皮的发酵原料的发酵时间及 TS、VS 产气率进行了统计,结果见表 4。从表 4 可以看出,几种水果果皮的产气效率都较高。

表 4 不同水果果皮发酵原料的产气潜力

发酵原料	发酵时间 d	TS 产气率 ml/g	TS 产气率的倍 数(红毛丹果皮/ 其他水果果皮)	文献
西番莲果皮	28	867	0.30	[5]
香蕉皮	31	752	0.34	[6]
西瓜皮	92	669	0.38	[7]
菠萝皮	23	568	0.45	[8]
葡萄皮	35	1 510	0.17	[9]
菠萝蜜果皮	53	239	1.08	[10]

除了菠萝蜜果皮和西瓜皮外几种果皮的发酵产气时间都较短,红毛丹果皮的 TS 产气率小于西番莲果皮、香蕉皮、西瓜皮、菠萝皮和葡萄皮,甚至还不到这些果皮 TS 产气率的 50%,却大于菠萝蜜果皮的 TS 产气率。这可能是由于西番莲果皮、香蕉皮、西瓜皮、菠萝皮和葡萄皮中的单糖、多糖等易于水解的有机物较多,大部分有机物在水解性细菌的作用

下水解成产甲烷菌的底物,故产气较多,TS 产气率大。而红毛丹果皮和菠萝蜜果皮中难于水解的有机物较多,因此水解有机物并产沼气所需时间相对较长,产气相对较少。但总体来说,红毛丹果皮的 TS 产气率还是不错的,是一种好的沼气发酵原料。

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 原料转化利用分析。红毛丹果皮的厌氧消化过程中,果皮中的碳、氮等营养物质会被释放出来,转移到沼气和沼液中,成为可再被利用的营养物质,特别是氮素和磷素大部分转化成速效氮和速效磷,对沼气发酵上清液的再利用产生了极大的影响。

(1)碳素转化。红毛丹果皮中富含糖类、纤维素、木质素、色素、果胶质等碳水化合物。根据沼气发酵的 3 阶段理论,这些化合物在水解性细菌的水解作用下成为水溶性小分子化合物。这一过程实际上是将营养物质从红毛丹果皮中转移到了发酵液中。当然,并不是所有的营养物质都能转移到沼液中,一些难降解的物质留在了沼渣中,这部分物质很难再被利用。沼气发酵的酸化阶段进一步将这些水溶性有机物降解成一些短链的脂肪酸、醇、氢气和二氧化碳等。可以看出,红毛丹果皮中一部分的碳水化合物通过水解和产酸阶段转化成气态形式(CO₂),其余的则以水溶性形态存在沼气发酵液中。随后,产甲烷菌利用这些小分子底物产生甲烷和二氧化碳。这样,水溶性的碳素大部分转移到了沼气当中,其余的留在了发酵液中。红毛丹果壳中酚类、苷类和甾醇含量较多,这些化合物在发酵过程中能被水解菌破坏并被产甲烷菌利用生成沼气,但是红毛丹果皮的 VS 产气率不是很高,这就说明,在碳素流向过程中,很大一部分的碳素还是留在了沼渣中。在红毛丹果皮的沼气发酵试验中,料液的 pH 在发酵前后没有明显的变化,这主要取决于料液系统中缓冲体系碳酸盐和 NH₄⁺ 的调节。

(2)氮素的转化。沼气发酵系统中的氮来源于脂肪类化合物和蛋白质,它在沼气发酵原料中占一定的比例,但是在红毛丹果皮中的含量一般不高。首先,这些大分子的化合物经水解、酸化和产甲烷阶段的发酵作用形成沼气,并释放出氮营养物质,特别是在氨基酸的发酵过程中,氨基酸在厌氧微生物的作用下能脱氨。因此在发酵过程中,料液的 NH₄⁺-N 的含量逐渐增加。但在正常运行的沼气发酵系统中氨浓度不会累积上升,这主要是由于料液系统中存在着碳酸盐-NH₄⁺ 的缓冲体系,而且在一定条件下,大部分的硝酸态氮可以形成氮气释放出来,所以在沼气中也含有一部分 N₂,这就说明在沼气发酵过程中可能存在厌氧氨氧化的过程。而其余未被转化的氮则留在了沼液中,可被进一步利用。

3.1.2 水果果皮资源化利用。沼气发酵液中含有丰富的营养物质,沼气发酵不仅要实现环境污染的预防和治理,还要实现资源能源的最大化利用,这就涉及到水果果皮的沼气发酵综合利用的问题。表 5 是全国历年水果生产情况。2000 ~

3.5 t/h。整机设计采用 2 个电动机分别驱动,其中电机 I 用于驱动去叶装置、输送辊和卷压机构,选用 Y180L-8 型电机,额定功率为 11 kW,满载转速为 730 r/min;电机 II 用于驱动刮瓢机构,选用 Y132S1-2 型电机,额定功率为 5.5 kW,满载转速为 2 900 r/min。

(3) 对该机关键部件的技术参数进行了选择,为主要零部件的设计提供参考依据。

(4) 对该机的压辊机构、搓叶机构、刮瓢刀轴等重要部件进行了设计,其中压辊机构的橡胶层表面开有直线型沟槽,能够增大抓取力;为了使搓叶机构具有搓叶功能,搓叶机构的上下搓叶带之间有一定的线速差,线速比为 1.1;刮瓢刀轴的刀轴本体采用圆缺状型式,便于安装刀具。

参考文献

[1] 邱红. 我国农作物秸秆的利用现状及特点[J]. 农机使用与维修, 2009, 1(2): 5-6.

- [2] 秸秆产量 2010 分析[EB/OL]. <http://www.cumarket.com.cn/hgii/2010-8-31/14250035.html>.
- [3] 严妍. 农作物秸秆综合利用方法浅析[J]. 污染防治技术, 2010, 23(4): 3-5.
- [4] 段海燕, 贺小翠, 尚大军. 我国秸秆人造板工业的发展现状及前景展望[J]. 农机化研究, 2009, 5(5): 18-22.
- [5] 柴民杰, 李裔, 李金民. 我国秸秆的利用现状及发展趋势分析[J]. 硅谷, 2009, 19(3): 158.
- [6] 胡伟. 精打细算之玉米秸秆皮瓢分离利用技术[J]. 当代农机, 2007, 3(4): 40.
- [7] 朱新华. 米秸秆茎叶分离装置的设计与试验[J]. 西北农林科技大学学报, 2012, 40(3): 230.
- [8] 朱新华. 玉米秸秆茎叶分离特性研究及其分离机研制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 44.
- [9] 高梦祥. 玉米秸秆茎叶分离机理试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001: 10.
- [10] 夏放. 玉米小型联合收割机摘穗器摘辊参数设计[J]. 农机与食品机械, 1997(4): 5.
- [11] 刘丽玲. 玉米秸秆皮瓢叶分离试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011: 19.

(上接第 12986 页)

2011 年我国水果总产从 6 225.10 万 t 到 22 768.20 万 t 逐年增加,特别是 2003 年我国水果总产及单产增加迅猛,水果产业结构稳定。我国生产的水果,除部分用于鲜食外,还有部分用于产品加工生产罐头、果酱、果脯、饮料等,所产生的果皮、果渣及果核等废弃物的回收利用长期受到政府及企业的忽视,不仅造成资源浪费还污染环境,而且与现代社会和谐发展、可持续发展的理念格格不入。因此,加大水果废弃物的资源化应用既可以增加水果的附加价值,又可以对环境保护及其产生的污染的治理产生一定的生态效益。

表 5 全国历年水果生产情况

年度	总产//万 t	单产//t/hm ²
2011	22 768.20	19.24
2010	21 401.40	18.54
2009	20 395.50	18.31
2008	19 220.20	17.91
2007	18 136.30	17.32
2006	17 102.00	16.89
2005	16 120.10	16.06
2004	15 340.90	15.71
2003	14 517.40	15.38
2002	6 952.00	7.64
2001	6 658.00	7.36
2000	6 225.10	6.97

研究中,红毛丹、西番莲、香蕉、西瓜、菠萝、葡萄、菠萝蜜几种水果果皮的产沼气潜力较高,发酵后料液中的碳、氮等营养物质较为丰富,所以水果果皮的沼气发酵综合利用具有巨大潜力,其工程应用能形成可行的循环经济产业链。水果运入加工厂后果肉分离,果肉进行深加工,果皮、果渣、果核等废弃物在工厂内或工厂附近的沼气发酵罐内进行沼气发酵,产生的沼气进行电能或热能转化以供给果肉深加工用能,而产生的沼液沼渣可用于农业种植或是畜牧业的饲料加工等。以沼气工程为纽带,整个循环产业链实现了资源最大化、能源最大化、环境友好型的综合效益。

3.2 结论 以红毛丹果皮为发酵原料,在 30 ℃ 下进行批量

式厌氧发酵试验,混合接种物发酵时间为 37 d,共产气 3 490 ml,到第 21 天时,产气累积量达到了总产气量的 80% 以上,产气主要集中在前 30 d,TS 产气率为 258 ml/g,TS 降解率为 28.23%,VS 降解率为 6.61%。以牛粪发酵液为接种物来进行红毛丹果皮的沼气发酵历时 43 d,共产气 3 090 ml,到第 25 天产气累积量达到了总产气量的 80% 以上,产气主要集中在前 30 d,TS 产气率为 228 ml/g,TS 降解率为 21.14%,VS 降解率为 4.13%。总体来说,2 种接种物对红毛丹果皮的沼气发酵特性都较好,但相比于牛粪发酵液接种物来说,混合接种物使红毛丹果皮的沼气发酵效率更好。

基于红毛丹果皮的沼气发酵潜力研究,比较了几种不同的水果果皮的沼气发酵潜力,一些富含糖分等易于水解的有机物的水果果皮的发酵效率很高,这在一定程度上为水果果皮资源化回收利用提供了可行性,且能实现能源与环境的可持续生态和谐发展模式。

参考文献

- [1] WALL M M. Ascorbic acid and mineral composition of longan (*Dimocarpus longan*), lychee (*Litchi chinensis*) and rambutan (*Nephelium lappaceum*) cultivars grown in Hawaii [J]. *J Food Compos Anal*, 2006, 19(6/7): 655-663.
- [2] ONG P K C, ACREE T E, LAVIN E H. Characterization of volatiles in rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* L.) [J]. *J Agric Food Chem*, 1998, 46(2): 611-615.
- [3] PALANISAMY U, MING C H, MASILAMANI T, et al. Rind of the rambutan, *Nephelium lappaceum*, a potential source of natural anti-oxidants [J]. *J Food Chem*, 2008, 109(1): 54-63.
- [4] 张无敌, 宋洪川, 尹芳, 等. 沼气发酵与综合利用[M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 2004: 104-106.
- [5] 李永波, 郭德芳, 张建鸿, 等. 西番莲果皮发酵产沼气潜力的实验研究[J]. 云南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 33(3): 12-16.
- [6] 朱海春, 刘世清, 尹芳, 等. 香蕉皮沼气发酵的实验研究[J]. 农业与技术, 2007, 27(4): 74-79.
- [7] 陈丽琼, 尹芳, 官会林, 等. 西瓜皮发酵产沼气潜力的研究[J]. 农业与技术, 2005, 25(4): 75-78.
- [8] 姜国君, 张无敌, 尹芳, 等. 菠萝皮厌氧发酵产沼气的研究[J]. 能源工程, 2007(1): 41-43.
- [9] 柳静, 张无敌, 尹芳, 等. 葡萄皮渣的沼气发酵潜力研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 11939-11940.
- [10] 阮越强, 刘丽春, 郭德芳, 等. 菠萝蜜废弃物沼气发酵的实验研究[J]. 云南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 33(3): 22-25.