

木薯酒精废渣在不同温度条件下产沼气潜力研究

黄正恒, 吴凯, 赵兴玲, 王昌梅, 尹芳*, 张无敌* (云南师范大学能源与环境科学学院/太阳能研究所, 云南昆明 650500)

摘要 以木薯酒精废渣作为发酵原料, 研究木薯酒精废渣在室温和中温条件下的产沼气潜力。结果表明, 在室温(20℃)条件下发酵40 d, TS(总固体)、VS(挥发性固体)产沼气潜力分别为508.58和521.18 mL/g; 在中温37℃条件下发酵33 d, TS、VS产沼气潜力分别为593.26和607.96 mL/g。这表明在中温条件下的沼气发酵效果较好, 没有出现酸化现象, 累计产气量比室温组多6 760 mL, 产气速率增长较快, 是一种良好的沼气发酵原料。应用厌氧消化处理木薯酒精废渣, 不仅能减少废渣对环境的污染, 而且能为木薯酒精废渣提供一种新的资源化利用途径。

关键词 木薯酒精废渣; 不同温度厌氧消化; 产沼气潜力

中图分类号 S216.4 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)19-0215-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.19.056



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Biogas-producing Potential of Cassava Alcohol Waste under Different Temperature Conditions

HUANG Zheng-heng, WU Kai, ZHAO Xing-ling et al (School of Energy and Environment Science of Yunnan Normal University/Solar Energy Research Institute, Kunming, Yunnan 650500)

Abstract The biogas-producing potential of cassava alcohol waste were studied at room temperature and medium temperature. Cassava alcohol waste was used as the fermentation material to ferment for 40 days at room temperature (20℃). The results showed that the gas-producing potential of TS and VS was 508.58 and 521.18 mL/g, respectively. After fermentation at medium temperature of 37℃ for 33 days, the gas-producing potential of TS and VS was 593.26 and 607.96 mL/g, respectively. The results showed that the biogas fermentation under medium temperature had a good effect, without acidification. The cumulative gas production in medium temperature group was 6 760 mL more than that of the room temperature group, and the gas production rate increased rapidly. Therefore, cassava alcohol waste is a good raw material for biogas fermentation. Cassava alcohol waste was treated by using anaerobic digestion, which can not only reduce the pollution of waste residue to the environment, but also can provide a new resource utilization way for cassava alcohol waste.

Key words Cassava alcohol waste; Anaerobic digestion at different temperatures; Biogas-producing potential

木薯作为一种可利用的能源作物, 受到越来越多的学者关注, 它本身有较高的利用价值。不同的木薯利用模式会带来不同的收益, 很多酒精厂将木薯作为酒精发酵原料之一, 但如何处理酒精废渣是一个难题。由于木薯含有较高的淀粉含量, 在经过酒精发酵后的剩余物还含有大量有机物和营养物质, 70%以上为有机质, 主要有蛋白质、糖分、维生素、残糖、短纤维和氮磷钾等, 直接排放也会对环境造成污染^[1-2]。采用厌氧沼气发酵技术处理酒精废渣, 一方面可以防止废弃物的排放对环境造成的影响, 另一方面也可以利用微生物分解酒精废渣中含有的有机物, 经过沼气发酵后得到沼气能源, 可以回用到工厂生产中, 达到节能减排的效果。发酵完成后的沼渣可用作有机肥, 用于还田施肥, 不仅能有效治理环境污染, 而且能改良土壤性质, 有利于农作物生长, 从而实现酒精废渣的可持续利用, 为相关企业提升经济效益^[3]。笔者以木薯酒精废渣作为发酵原料, 研究木薯酒精废渣在室温和中温条件下的产沼气潜力。

1 材料与与方法

1.1 发酵原料和接种物 发酵原料: 木薯酒精废醪液(发酵后的副产物)经过固液分离后所得到的废渣(固体部分), 原料的总固体(TS)含量为26.61%, 挥发性固体(VS)含量为

97.58%, 这部分物质含有丰富的有机物, 可作为沼气厌氧消化的原料。

接种物: 取自云南师范大学(云南省沼气工程技术研究中心)长期驯化的厌氧活性污泥, 经前期试验测定可知接种物TS含量为9.02%, VS含量为58.08%。

原料和接种物混合后加入到厌氧反应器中, 加入自来水到反应器的标准刻度线, 此时搅拌均匀后发酵料液的有效体积为7 L。

1.2 试验装置 试验装置为实验室自行设计的批量式厌氧反应器, 反应器呈圆柱体构造, 有效容积为7 L, 使用有机玻璃材质制造而成。反应器外部设有一个保温层, 保温层下部设有进水口, 保温层上部设有出水口, 外部放置一个中温水浴桶, 用温控仪控制水温, 通过蠕动泵将中温水抽到保温层, 直到中温水全部灌满保温层, 保温层进出水口分别连接上PVC软管, 软管的另外一端置于中温水中, 使得保温层的外置水浴得到循环, 同时也能保证反应器处于一个中温状态。反应器顶部通过PVC软管连接到湿式流量计, 可以每天定期通过湿式流量计记录数值, 即日产气量; 湿式流量计另外一端连接集气柜, 用来收集反应器中接种物和原料共同作用下产生的气体, 每隔3 d测定甲烷含量。

1.3 方法

1.3.1 试验方法。 在进行厌氧反应器处理木薯酒精废渣试验前, 认真检查反应器的内外结构, 检查是否存在缺陷, 依次进行全局、局部检漏工作, 确保反应器无任何漏水漏气现象, 达到一个完全无氧的环境。用自来水清洗后, 采用往反应器内部注水的方法, 测量出反应器的有效容积为7 L, 加入接种

基金项目 国家自然科学基金项目(51366015); 云南省沼气工程技术研究中心资助项目。

作者简介 黄正恒(1996—), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 研究方向: 生物质能与环境工程。*通信作者: 尹芳, 教授, 从事生物质能与环境工程教学与科研; 张无敌, 研究员, 从事生物质能与环境工程教学与科研。

收稿日期 2020-01-07

物的量为反应器容积的40% (2.8 L);称取木薯酒精废渣300 g作为发酵原料,将接种物与原料一起加入反应器中,并加自来水至7 L,搅拌均匀后密封,开始发酵。

试验设计采用同样型号批量式厌氧反应器装置,同一批原料和同一批接种物采用全混合批量式发酵方法,完成2组试验。一组在室温(20 ℃)条件下运行,不采取外部加热装置;另外一组在中温条件下进行,采用温控仪和加热管,将温度控制在(37±1) ℃。其余所有参数设置均相同,唯一改变的就是厌氧发酵的温度。通过检测日产气量,甲烷含量的变化来分析木薯酒精废渣在不同温度下的沼气发酵潜力。

1.3.2 测定指标及方法。

1.3.2.1 日产气量的测定。反应器顶部连接一台湿式流量计,用于记录每天的产气量,湿式流量计的另外一端连接气柜,用于收集产生的气体。

1.3.2.2 甲烷含量的测定。使用福利公司生产的GC9790II型气相色谱仪测定沼气中的甲烷含量,色谱仪配备TDX-01型不锈钢填充柱。色谱条件:柱箱温度105 ℃;检测器温度140 ℃;进样器温度110 ℃;载气为氮气,流速30 mL/min。

1.3.2.3 总固体(TS)含量的测定。将样品放在(105±5) ℃的电热恒温烘箱中烘干至恒重,并根据公式计算样品的总固体含量^[4]。

1.3.2.4 挥发性固体(VS)含量的测定。将“1.3.2.3”中烘干的样品放入到马弗炉中,在(550±20) ℃条件下灼烧2 h,计算出样品中VS含量^[4]。

1.3.2.5 pH的测定。使用pHS-3C型pH计测定发酵前后料液的pH变化。

2 结果与分析

2.1 发酵前后料液分析 试验前后分别计算和检测了发酵料液的TS含量、VS含量和pH,室温条件和中温条件下的2组木薯酒精废渣沼气发酵的料液指标变化如表1所示。室温条件下的TS降解率和VS降解率分别为11.92%和10.26%;中温条件下TS降解率和VS降解率分别为17.18%和15.97%,中温组TS和VS降解率均高于室温组,这与实际过程中的产气规律相符。

表1 发酵前后料液的TS含量、VS含量和pH的变化

Table 1 Changes of TS content, VS content and pH of material liquid before and after fermentation

组别 Group	发酵前 Before fermentation			发酵后 After fermentation		
	TS含量 TS content %	VS含量 VS content %	pH	TS含量 TS content %	VS含量 VS content %	pH
室温组 Room temperature group	4.78	72.97	6.5	4.21	65.47	7.5
中温组 Medium temperature group	4.83	72.63	6.5	4.00	61.03	7.5

2.2 产气情况分析

2.2.1 室温下木薯酒精废渣产气情况。木薯酒精废渣在室温条件下的产气时间为40 d,日产气量和甲烷含量如图1所

示。从图1可以看出,木薯酒精废渣试验启动较快,第1天日产气量达到800 mL,第2天日产气量达到发酵前10 d的一个小高峰,此后开始下降,同时测定了发酵第5天的pH, pH仅为5.5,发酵体系出现酸化问题,但仍然产气,故不采取任何措施,让其继续发酵,反应体系中的微生物具有自我调节作用。经过发酵体系的自我恢复,第18天日产气量大幅度上升, pH为6.5,恢复到正常发酵水平,未出现酸化现象,反应器运行逐渐稳定,由于在室温条件下,温度变化较为明显,且属于低温发酵状态,日产气量上下浮动较大,受外界环境温度变化的影响,产甲烷菌的代谢受到影响,在反应中期阶段日产气量较高,第26天日产气量最高,达到3 440 mL;甲烷含量随着发酵时间的延长而逐渐升高,第34天甲烷含量达到最高值(65.63%),平均甲烷含量为47.08%。

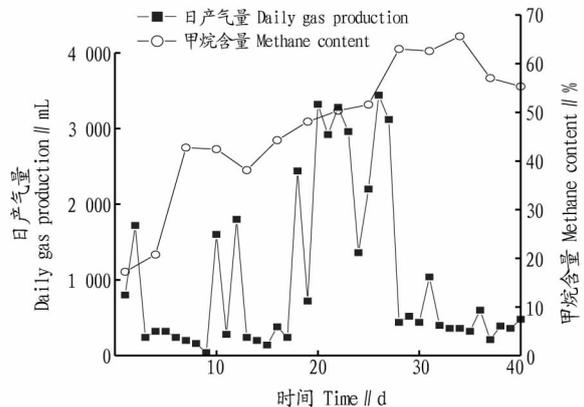


图1 室温下木薯酒精废渣的日产气量和甲烷含量变化

Fig. 1 Daily gas production and methane content changes of cassava alcohol waste at room temperature

2.2.2 中温下木薯酒精废渣产气情况。木薯酒精废渣在中温条件下的产气时间为33 d,日产气量和甲烷含量如图2所示。从图2可以看出,木薯酒精废渣在中温条件下发酵日产气量和甲烷含量基本上符合沼气发酵规律,试验开始时日产气量较低,甲烷含量也较低,随后逐渐增加,达到产气高峰后又逐渐下降,由于该组试验是在中温37 ℃条件下进行的,对整个发酵体系来说,外部环境相对稳定,受外部环境干扰性降低,产甲烷菌在中温发酵条件下会更加活跃,代谢更强,发酵周期比室温组更短,中温组在整个发酵过程中并未出现反应器明显酸化问题,发酵过程符合沼气发酵的一般规律,日产气量在第9天达到峰值,最高达到6 480 mL,甲烷含量在第13天达到最高值(65.28%),平均甲烷含量为54.19%。这些现象表明产甲烷菌生长良好,微生物代谢活跃,发酵周期缩短。

2.3 产气速率分析 木薯酒精废渣在室温和中温条件下的累计产气量比较如图3所示。从图3可以看出,在前8 d室温条件下产气速率要高于中温,室温组初期启动时间较快,从第8天起中温组产气速率大幅度上升,与室温组形成明显对比,其原因是在37 ℃既处于产甲烷菌高活性温度,也在产氢菌高活性区间,在二者的协同作用下,会加快有机质降解转化为甲烷的速率^[5],在发酵第14天室温组产气速率为

20.10%, 中温组产气速率为 64.53%, 约为室温组产气速率的 3.2 倍。在中温 37 °C 条件下发酵, 具有发酵速率快、发酵周期短等优点, 但与室温组相比中温组存在发酵过程中能耗大、运行成本高等问题。

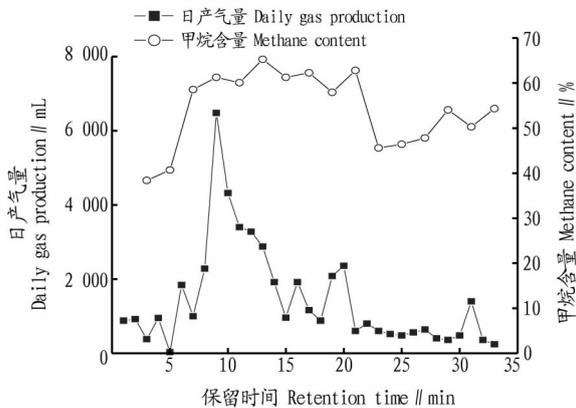


图 2 中温 37 °C 条件下木薯酒精废渣的日产气量和甲烷含量变化

Fig. 2 Daily gas production and methane content changes of cassava alcohol waste at medium temperature of 37 °C

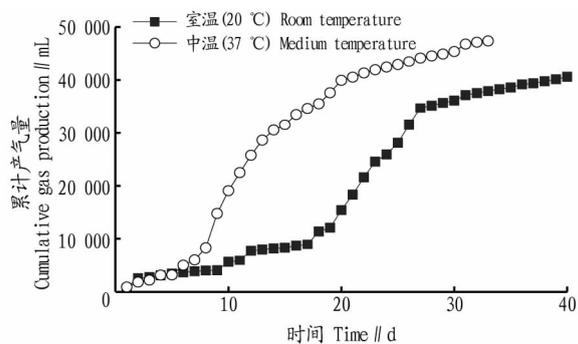


图 3 室温与中温状态下累计产气量的比较

Fig. 3 Comparison of cumulative gas production at room temperature and medium temperature

2.4 产气潜力分析 在室温条件下和中温条件下的累计产气量随发酵时间的变化如表 2 所示。由表 2 可知, 室温条件下木薯酒精废渣经过沼气发酵的累计产气量为 40 600 mL, 发酵时间为 40 d, 中温条件下木薯酒精废渣的沼气发酵累计产气量为 47 360 mL, 发酵时间为 33 d。由此可以计算出在室温条件下木薯酒精废渣的 TS 产气率为 508.58 mL/g, VS 产气率为 521.18 mL/g; 在中温 37 °C 条件下木薯酒精废渣的 TS 产气率为 593.26 mL/g, VS 产气率为 607.96 mL/g。由此可见, 在中温条件下木薯酒精废渣的 TS 产气率和 VS 产气率均高于室温条件。

2.5 不同原料产沼气潜力比较 根据木薯酒精废渣的 TS 和 VS 数据, 经计算得到其产沼气潜力。为了客观评价木薯酒精废渣的产沼气潜力, 对其产沼气潜力与其他发酵原料进行对比, 结果见表 3。从表 3 可以看出, 木薯酒精废渣的 TS 产沼气潜力高于大多数原料, 相较于波斯菊秸秆, TS 产气率高出 2 倍。木薯酒精废渣中含有大量的有机物, 中温 37 °C 条件下容易被微生物分解代谢, 发酵周期缩短 7 d, 在未来工程应用发展中具有一定的研究意义。

表 2 室温和中温条件下的累计产气量变化

Table 2 Changes of cumulative gas production at room temperature and medium temperature

发酵时间 Fermentation time//d	累计产气量 Cumulative gas production//mL		占总产气量的比例 Proportion in total gas production//%	
	室温 Room temperature	中温 Medium temperature	室温 Room temperature	中温 Medium temperature
5	3 400	3 160	8.37	6.67
10	5 640	19 080	13.89	40.29
15	8 300	31 520	20.44	66.55
20	15 400	39 920	37.93	84.29
25	28 120	42 920	69.26	90.63
30	36 080	45 360	88.87	95.78
33	37 880	47 360	93.30	100
40	40 600	—	100	—

表 3 各种原料的产沼气潜力比较

Table 3 The gas-producing potential of various kinds of raw materials

序号 No.	发酵原料 Fermented raw materials	发酵时间 Ferme- ntation time//d	发酵温度 Ferm- entation tempe- rature °C	TS 产 气率 TS gas production rate mL/g	数据来源 Data sources
1	木薯酒精废渣	40	20	508	该研究
2	木薯酒精废渣	33	37	593	该研究
3	甜高粱秸秆酒糟	32	55	509	于萌萌等 ^[3] 研究
4	木瓜皮	60	35	309	贺密密等 ^[6] 研究
5	柚子皮	38	30	647	张少朋等 ^[7] 研究
6	勿忘我花杆	36	30	359	吉喜燕等 ^[8] 研究
7	非洲菊秸秆	41	30	468	杨红等 ^[9] 研究
8	药渣	26	36	601	纪钧麟等 ^[10] 研究
9	薇甘菊	32	30	511	张莉娟等 ^[11] 研究
10	玫瑰秸秆	44	30	305	杨红等 ^[12] 研究
11	滇池蓝藻	29	35	255	张建鸿等 ^[13] 研究
12	废弃大白菜浆	40	30	291	吉喜燕等 ^[14] 研究
13	金银草	61	30	654	郭成等 ^[15] 研究
14	菠萝皮	23	25	574	查国君等 ^[16] 研究
15	波斯菊秸秆	33	30	289	赵振兴等 ^[17] 研究
16	玉米秸秆	45	35	492	孙丽丽等 ^[18] 研究

3 结论

(1) 在木薯酒精废渣的整个发酵过程中, 室温组前期出现了产气较低的情况, 排出外界温度影响的问题, 反应器内部可能出现轻微酸化问题, 不做任何处理, 发酵体系能够很快恢复, 中温组的产气符合沼气厌氧发酵的一般规律, 期间没有出现酸化问题, 表明用木薯酒精废渣作为沼气厌氧发酵的原料是可行的, 在处理酒精废渣的同时还能产生可供利用的能源, 且能源利用率较高。

(2) 以木薯酒精废渣作为发酵原料, 分别在室温条件下和中温 37 °C 条件下进行试验。结果表明, 室温组木薯酒精废渣的 TS 产气率和 VS 产气率分别为 508.58 和 521.18 mL/g; 中温组木薯酒精废渣的 TS 产气率和 VS 产气率分别为

(下转第 221 页)

表 1 不同起垄高度马铃薯产量和水分利用效率的变化

Table 1 Yield and water use efficiency changes of potato at different ridge height

处理 Treatment	产量 Yield kg/hm ²	商品薯率 Marketable tuber per- centage/%	耗水量 Water cons- umption mm	水分利用效率 Water use efficiency kg/(hm ² ·mm)
平作 Traditional planting(CK)	33 587 b	90.3 b	384.0 b	87.5 b
起垄 12.5 cm Ridge height 12.5 cm	34 525 b	92.2 ab	391.8 a	88.1 b
起垄 25.0 cm Ridge height 25.0 cm	38 691 a	93.1 a	390.8 a	99.0 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different small letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level

生长的熟土层,大雨后有利于排水防涝。同时,起垄协调了土壤水热条件等物理性状,促进农作物生长,增加农作物产量^[12-13]。前人研究表明,起垄促进马铃薯植株、根系生长,增加了单窝薯重、商品薯率,提高了马铃薯产量^[14-16]。该研究结果表明起垄显著降低了 0~20 cm 土层土壤容重,降低了 0~20 cm 土壤水分,但对深层土壤水分含量的影响较小,起垄 25.0、12.5 cm 的 0~100 cm 平均土壤贮水量较平作降低 8.0% 和 5.9%。温度对块茎生长有很大影响,在马铃薯块茎形成期、增长期,如土壤温度过高,块茎停止生长,种性变劣,退化严重^[17]。该研究结果表明,马铃薯块茎增长期,起垄降低地温,起垄 25.0 cm 的日平均地温均值较平作降低了 0.55℃。随着起垄高度的增加,马铃薯产量及商品薯率呈上升趋势,起垄 25.0 cm 的马铃薯产量较平作、起垄 12.5 cm 分别增加 15.2% 和 12.1%,商品薯率较平作、起垄 12.5 cm 分别增加 2.8 个百分点和 0.9 个百分点。这与前人研究结果^[14-15] 基本一致。起垄 25.0 cm 改善了田间通风受光及土壤散热面积,降低土壤温度,使得土壤疏松通气,有利于马铃薯块茎的形成及膨大。起垄 25.0 cm 后,马铃薯生育期耗水量有所增加,但马铃薯增产幅度大,水分利用效率显著高于其他处理,

(上接第 217 页)

593.26 和 607.96 mL/g,表明在中温条件下更利于木薯酒精废渣的厌氧消化,产甲烷菌活跃于中温环境中。

(3) 在中温 37℃ 条件下,木薯酒精废渣的发酵时间为 33 d,比室温条件下的发酵时间缩短了 7 d,在实际工程应用中可以节省时间成本,但中温环境中加入的能耗需要进一步计算,以达到实际应用中的利益最大化。

参考文献

- [1] 徐晓伟,尹芳,徐锐,等.酒精废液中温沼气发酵的研究[J].酿酒科技,2009(10):95-97.
- [2] 李泉临,曹军.利用沼气技术综合治理酒精厂废液[J].能源工程,2001(3):24-26.
- [3] 于萌萌,吕志凤,田开艳,等.以酒糟为原料的沼气发酵条件研究[J].中国沼气,2018,36(3):67-71.
- [4] 张无敌,宋洪川,尹芳,等.沼气发酵与综合利用[M].昆明:云南科技出版社,2003.
- [5] 周丹丹.混合原料批次恒温厌氧发酵动力学过程研究[D].兰州:兰州理工大学,2014.
- [6] 贺密密,裴娟,李国庆,等.中温条件下不同有机负荷木瓜皮的产气潜力和动力学研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2019,39(6):18-22.

这对干旱缺水的旱作农业区具有重要意义。因此,用马铃薯播种机起底宽 80 cm、顶宽 30 cm、垄高 25 cm 的梯形垄的种植方式机械化程度高,有利于马铃薯产量及商品薯率的增加,可大面积示范推广。但在马铃薯发芽期,由于降雨稀少,土壤表层含水率降低,马铃薯出苗时间有所推迟,因此在马铃薯播种后出苗前的保墒措施还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 山西省统计局.山西省统计年鉴-2017[EB/OL]. [2019-09-30]. http://www.stats-sx.gov.cn/tjsj/tjnj/nj2017/indexch.htm.
- [2] 何万春,谭伟军,王娟,等.半干旱区不同种植模式对覆膜马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].中国马铃薯,2019,33(2):77-83.
- [3] 王友生,王多尧.不同覆盖种植模式对马铃薯土壤温度、水分及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):59-64.
- [4] 李继明,潘丽娟,李成德,等.旱作区马铃薯不同覆盖材料栽培模式试验[J].中国马铃薯,2019,33(4):203-210.
- [5] 池吉平.山西忻州市冷凉山区马铃薯高产种植技术[J].农业工程技术,2018,38(23):50-51.
- [6] 韩彦龙,王娟玲,刘恩科,等.马铃薯高垄宽行机械化种植技术规程:DB 14/T 945—2014[S].太原:山西省质量技术监督局,2014.
- [7] 侯贤清,牛有文,吴文利,等.不同降雨年型下种植密度对旱作马铃薯生长、水分利用效率及产量的影响[J].作物学报,2018,44(10):1560-1569.
- [8] 吕文河,马子竣,李莹,等.马铃薯 4x-4x 和 4x-2x 杂种后代高世代选系总产和商品薯产量比较[J].东北农业大学学报,2014,45(10):1-9.
- [9] 薛俊武,任稳江,严昌荣.覆膜和垄作对黄土高原马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2014,35(1):74-79.
- [10] 石彦琴,陈源泉,隋鹏,等.农田土壤紧实的发生、影响及其改良[J].生态学杂志,2010,29(10):2057-2064.
- [11] 吕薇,李军,岳志芳,等.轮耕对渭北旱塬麦田土壤有机质和全氮含量的影响[J].中国农业科学,2015,48(16):3186-3200.
- [12] 陈志权,曾玉清,吕泽林,等.不同田块类型垄作栽培对水稻农艺性状及产量的影响[J].耕作与栽培,2014(6):17-18,24.
- [13] 刘剑金,刘子仪,叶娟,等.不同起垄高度对烟草生长发育的影响[J].湖南农业科学,2019(1):8-11.
- [14] 孙小娟.山区坡地马铃薯不同起垄方式对土壤水分蓄积和产量的效果[J].中国马铃薯,2018,32(2):81-85.
- [15] 彭慧元,邓安平,雷尊国.不同起垄方式对马铃薯产量及经济性状的影响研究[J].江西农业学报,2012,24(7):42-43,56.
- [16] 叶旭刚.脱毒马铃薯费乌瑞它在修文县适宜种植方式与密度的研究[J].耕作与栽培,2015(1):16-17,3.
- [17] 位东斌,东先旺.作物栽培学[M].北京:中国农业大学出版社,2001:246-247.
- [7] 张少朋,陈玉保,肖庆超,等.柚子皮发酵产沼气潜力的试验研究[J].中国沼气,2016,34(5):47-49.
- [8] 吉喜燕,林卫东,张无敌,等.勿忘我花秆发酵产沼气潜力的试验研究[J].新能源进展,2014(5):358-363.
- [9] 杨红,尹芳,张无敌,等.非洲菊秸秆产沼气潜力的试验研究[J].安徽农业科学,2012,40(34):16756-16757,16877.
- [10] 纪钧麟,杨智明,尹芳,等.菌体制药渣发酵产沼气实验研究[J].中国沼气,2019,37(5):27-33.
- [11] 张莉娟,季梅,张无敌,等.干燥薇甘菊在不同温度下厌氧消化产气潜力的研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2015,35(3):14-19.
- [12] 杨红,尹芳,张无敌,等.玫瑰秸秆产沼气潜力的试验研究[J].湖北农业科学,2013,52(17):4086-4089.
- [13] 张建鸿,杨红,郭德芳,等.不同温度下滇池蓝藻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):17-21.
- [14] 吉喜燕,肖志海,林卫东,等.废弃大白菜厌氧消化产甲烷的实验研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2015,35(3):10-13.
- [15] 郭成,虞波,陈丽辉,等.金银草发酵产沼气研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2016,36(3):12-16.
- [16] 查国君,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.
- [17] 赵振兴,王昌梅,张无敌,等.波斯菊秸秆发酵产气潜力研究[J].湖北农业科学,2019,58(8):60-63.
- [18] 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.