

# 不同启动负荷下砀山酥梨果渣中 温厌氧消化产气效果研究

龚维政<sup>1</sup>, 董建国<sup>1</sup>, 刘伟伟<sup>1\*</sup>, 施亮<sup>1</sup>, 张娅萍<sup>1</sup>, 马欢<sup>2</sup>

(1. 安徽农业大学 工学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽农业大学 生命科学学院, 安徽 合肥 230036)

**摘要:** 为探寻砀山酥梨果渣无害化处理新途径, 采用中温  $38\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  发酵条件和批次恒温厌氧发酵技术, 分别研究了不同启动负荷 ( $54.05\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $60.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $66.67\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $72.85\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 条件下砀山梨果渣中温厌氧消化产气效果, 并对最优启动负荷下砀山梨果渣的产甲烷效果进行分析。研究表明: 启动负荷是影响厌氧消化过程的重要影响因素, 累积产甲烷量随着启动负荷的增加先升高后降低, 在启动负荷为  $60.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 系统运行稳定, 可获得实验原料的最高 TS 产甲烷率  $210.02\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  和最高 VS 产甲烷率  $214.34\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ , 实验组累积产气可达  $26800\text{ mL}$ , 平均日产气量  $1005\text{ mL}$ , 产气平均  $\text{CH}_4$  体积分数为  $65.17\%$ 。表明砀山酥梨果渣适合作为沼气工程厌氧发酵原料。

**关键词:** 砀山梨; 果渣; 厌氧消化; 原料产气率

中图分类号: S216.4; X712 文献标志码: A 文章编号: 1000-1166(2023)03-0027-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023030027

**Study on the Effect of Mesophilic Anaerobic Gas Production from Dangshan Pear Pomace Under Different Starting Loads / GONG Weizheng<sup>1</sup>, DONG Jianguo<sup>1</sup>, LIU Weiwei<sup>1\*</sup>, SHI Liang<sup>1</sup>, ZHANG Yaping<sup>1</sup>, MA Huan<sup>2</sup> / (1. Technology School of Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Life Sciences School of Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)**

**Abstract:** To explore a new way of harmless treatment of Dangshansu pear pomace, medium temperature ( $38 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fermentation conditions and batch constant temperature anaerobic fermentation technology were used to study different starting loads ( $54.05\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $60.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $66.67\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $72.85\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), the gas production effect of mesophilic anaerobic digestion of Dangshan pear pomace, and the methane production effect of Dangshan pear pomace under the optimal starting load was analyzed. The research results show that the start-up load is an important factor affecting the anaerobic digestion process. The cumulative methane production first increases and then decreases with the increase of the start-up load. When the start-up load is  $60.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , the system runs stably, and the experimental results can be obtained. The highest TS methane production rate of the raw material was  $210.02\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  and the highest VS methane production rate was  $214.34\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ . The cumulative gas production of the experimental group could reach  $26800\text{ mL}$ , the average daily gas production was  $1005\text{ mL}$ , and the average  $\text{CH}_4$  volume fraction was  $65.17\%$ . It shows that Dangshansu pear pomace is suitable as raw material for anaerobic fermentation in biogas engineering.

**Key words:** Dangshan pear; fruit dregs; anaerobic digestion; raw material gas production rate

梨被誉为百果之宗, 在我国种植面积仅次于苹果。素有“中国梨都”之称的安徽省砀山县酥梨栽培历史已有 2500 多年, 拥有世界上最大的连片梨园。砀山县作为全国水果生产十强县之一, 酥梨年产量达 100 万 t 规模, 占全国梨总产量的  $1/8$ <sup>[1-2]</sup>, 占安徽省水果总产量的近 40%。砀山酥梨除鲜

果方式消费外, 其加工产品众多, 如梨汁、梨膏、梨罐头、梨酒、梨多酚等<sup>[3]</sup>。据砀山县农业农村部门数据, 当地酥梨的年加工量约 90 万 t, 年产果蔬罐头及果汁饮料超 45 万 t, 年销售收入超 30 亿元, 浓缩梨清汁、梨浆汁等产品已占全球市场份额约 20%, 年出口创汇 5000 万美元。然而随着砀山梨深加工产

收稿日期: 2022-08-29 修回日期: 2022-09-21

项目来源: 国家自然科学基金项目(52175212); 安徽省重点研究与开发计划(202204c06020021); 安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2019A0180)。

作者简介: 龚维政(1998-), 男, 汉族, 安徽长丰人, 硕士, 主要研究方向为厌氧消化技术及其利用, E-mail: 1589192069gwz@stu.ahau.edu.cn

通信作者: 刘伟伟, E-mail: liuww@ahau.edu.cn

业的不断发展,其产生的大量酥梨加工果渣等废弃物无害化处理与资源化利用问题也日益凸显。梨渣约占鲜果重量的 40%~50%, 包含梨皮、核、瓢和果柄等,其营养成分主要为粗纤维、维生素、糖类及多酚类化合物<sup>[4-6]</sup>。尽管梨渣目前可开发用作饲料及堆肥原料,但产品品质不高,消化能力有限;同时梨渣还存在直接丢弃等现象,不仅造成了一定程度的环境污染,也是巨大的资源浪费。

厌氧消化技术可以实现各类有机废弃物的有效处置,在产生清洁可再生能源的同时,具有良好的综合收益,无害化处理彻底、资源化利用效益显著,同时也是实现节能减排、助力“双碳”战略目标实现的重要技术依托<sup>[7]</sup>。梨渣在果蔬废弃物中有机质和营养成分高,是厌氧消化的理想原料<sup>[8-9]</sup>。有机负荷是厌氧消化产甲烷过程的重要影响因素,为探究其对厌氧发酵过程的影响,国内外学者做了大量研究。如李敬<sup>[10]</sup>等通过分批式厌氧发酵研究了梨渣和猪粪在不同接种量、渣粪比等因素下厌氧消化产气性能的影响,结果表明梨渣在高有机负荷下厌氧发酵产气性能明显提高,接种量在 30%~40% 时厌氧发酵可顺利进行,但过高的有机负荷会使系统失稳酸化导致厌氧发酵失败;杨红男<sup>[11]</sup>等通过半连续发酵试验探究了不同有机负荷和温度下猪场粪污的产气性能,在 20℃~35℃ 的高有机负荷梯度下,会产生挥发性酸的积累导致原料产气率下降,在 10℃ 的高有机负荷梯度下逐渐导致厌氧发酵系统失稳;贺密密<sup>[12]</sup>等研究不同有机负荷下木瓜皮的产气情况,随着有机负荷提升,原料的 VS 产气率呈下降趋势,说明高有机负荷对厌氧消化反应有抑制作用;Chao Liu<sup>[13]</sup>等研究了中温条件下 OLR(有机负荷率)对餐厨垃圾厌氧消化的影响,当实验组的 OLR 为 7.5 gVS·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> 时甲烷产量迅速减少,且在实验第 40 天降为 0;王凤娇<sup>[14]</sup>等通过批次实验对皂角废水的最佳进料负荷进行了研究,结果发现负荷 7.5 g·L<sup>-1</sup> 的单位 COD 累积产甲烷量相比 10 g·L<sup>-1</sup> 高了近 30%,但是进料负荷由 10 g·L<sup>-1</sup> 提升至 12.5 g·L<sup>-1</sup> 时,累积产气量没有显著性差异;张彤<sup>[15]</sup>等研究了不同有机负荷下厨余垃圾中温厌氧消化特性,发现累积产气量随着有机负荷的增加先升高后降低。由此可见,高有机负荷在一定范围内会提升厌氧发酵产气效率,但是过高的有机负荷更易导致搅拌不均匀,热量分布不均,挥发性脂肪酸(VFAs)积累等现象,最终可能会使厌氧发酵系统产生不可逆转的失稳<sup>[16-20]</sup>。

目前针对砾山酥梨加工果渣厌氧消化过程的研究报道较少。本文采用中温 38℃ ± 1℃ 发酵条件、批量式发酵工艺,探究了不同启动负荷下酥梨果渣厌氧消化产沼气特性,以期为大中型沼气工程规模化处理酥梨加工废弃物提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

实验所用的梨渣来自安徽省砾山县某生物科技股份有限公司梨膏生产车间,为机械榨汁后梨渣新鲜废弃物。为方便运输和储存,将其进行了低温(65℃)烘干处理。经测定其作为发酵原料的主要理化性质见表 1。

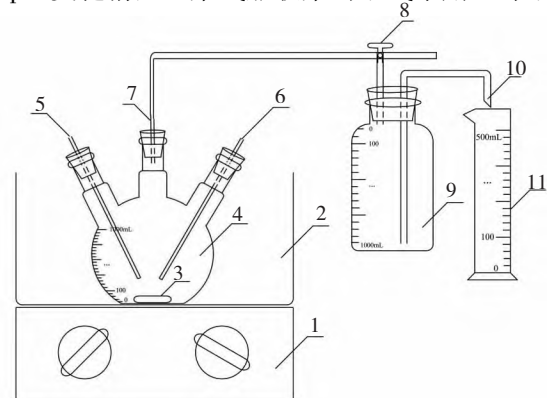
表 1 酥梨果渣主要理化特性 (%)

TS 含量	VS 含量	含水率	总糖	蛋白质
92.40 ± 0.12	97.99 ± 0.06	7.60 ± 0.12	12.35 ± 0.14	4.07 ± 0.18

实验选用的接种物来自安徽农业大学沼气工程技术实验室以腐烂水果、餐厨废弃物、猪粪等混合原料中温条件下自行培养的活性污泥,其 pH 值为 7.6,总固体(TS)含量为 12.07% ± 0.15%,挥发性固体(VS)含量为 61.56% ± 0.18%。

### 1.2 实验装置

实验采用图 1 所示的批次式厌氧消化装置<sup>[21]</sup>,该装置主要由磁力搅拌器、恒温水浴锅、厌氧发酵反应器、温度监测器、pH 值检测器、集气瓶等组成。通过排水法测定每日的沼气产气量,采用了磁力搅拌,避免了机械搅拌动态密封不严等常见问题,并通过了在线 pH 计( PHS-3E,上海仪电科学)连续监测发酵液 pH 变化情况。集气瓶收集的沼气采用红外沼气



1. 磁力搅拌器; 2. 恒温水浴锅; 3. 磁力搅拌子; 4. 厌氧发酵反应器; 5. 温度检测器; 6. pH 值检测器; 7. 生物气体导管; 8. 三通调节阀; 9. 集气瓶; 10. 排水管; 11. 量筒。

图 1 厌氧发酵实验装置

成分分析仪(Gasboard-3200, 武汉四方光电)测量, 每天定时测定沼气中甲烷( $\text{CH}_4$ )、二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )等气体的体积分数。

### 1.3 实验设计

研究将发酵温度设定为某大型生物燃气工程采

用的中温  $38^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , 共设 4 个实验组(A、B、C、D)和 1 个对照组(CK), 每组设 3 个平行, 实验结果取 3 次平行实验的平均值。各实验组发酵瓶内物料特性见表 2。

表 2 各实验组发酵物料特性

实验组	发酵原料量 g	接种物 (沼渣+沼液) mL	原料/接种物 TS	原料/接种物 VS	发酵液 TS 浓度 %	启动负荷 ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
A	80	1200+200	1:2.3	1:1.45	16.41	54.05
B	90	1200+200	1:2	1:1.28	16.92	60.4
C	100	1200+200	1:1.84	1:1.15	17.43	66.67
D	110	1200+200	1:1.66	1:1.04	17.92	72.85
对照组 CK	0	1200+200	—	—	12.07	—

### 1.4 实验过程及数据记录

实验采用一次性进料批量化发酵工艺, 发酵单体装置容积 2.0 L, 有效发酵容积约为 1.5 L, 每天定时搅拌 3 次, 根据发酵产气量, 每天定时记录 1~2 次产气数据。根据原料厌氧消化降解规律及实际产气效果。实验组 A、B、C 厌氧发酵产气实验共进行了 40 d, 实验组 D 由于有机负荷较高, 前期挥发性脂肪酸积累过多, 导致发酵周期变长, 厌氧发酵共进行了 54 d。CK 组因只接种了厌氧活性污泥, 发酵过程中几乎不产气, 可基本忽略接种物对本实验的影响。另外, 各实验组日产气量小于 100 mL 即认定发酵产气结束, 不纳入本实验的统计范围。

### 1.5 数据分析

实验共设 4 个实验组(A、B、C、D)和 1 个对照组(CK), 每组做 3 个平行, 实验结果取 3 次平行实验的平均值, 实验数据采用 IBM SPSS Statistic 进行单因素 ANOVA 检验, 并用 LSD 和 Duncan 检验各实验组间差异的显著性( $p \leq 0.05$ ), 作图使用 Origin 2019 和 GraphPad Prism 8 完成。

## 2 结果与分析

图 2 为各实验组日产气量变化图, 图 3 为各实验组累积产气量变化图, 图 4 为各实验组总产气量对比图。

### 2.1 各实验组日产气及累积产气变化

图 2 的实验结果表明, 除实验组 D 外, 其余各组的日产气量均呈现先快速上升后逐渐下降的基本规律, 各组均在发酵的第 5 天左右出现第 1 个产气峰值, B、C 组日产气峰值分别为 4500 mL 和 4600 mL, 水平相当; A 组的产气峰值仅为 3000 mL, 在同样的发酵条件下, B 组相比 A 组发酵原料增加了

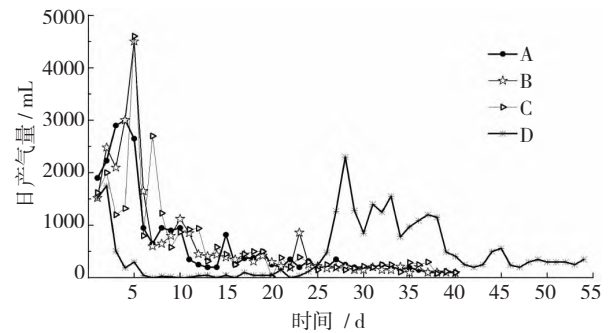


图 2 各实验组日产气量变化图

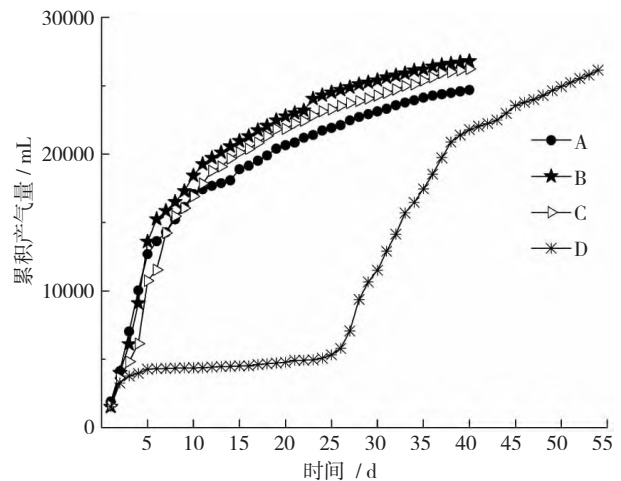


图 3 各实验组累积产气量变化图

12.5%, 但产气峰值增加了 50%, 累积产气量也显著提高(经 LSD 检验得  $P = 2.9919e^{-7} < 0.05$ )。说明在一定范围内启动负荷增加, 产气量也不断增加, 这是因为在相同的条件下, B 组可以水解出更多的有机酸供产甲烷菌繁殖代谢产成沼气。当实验原料添加至 110 g 时, 厌氧发酵体系出现了酸化现象, 在前 25 d 几乎不产气, 厌氧发酵实验前期不产气是因

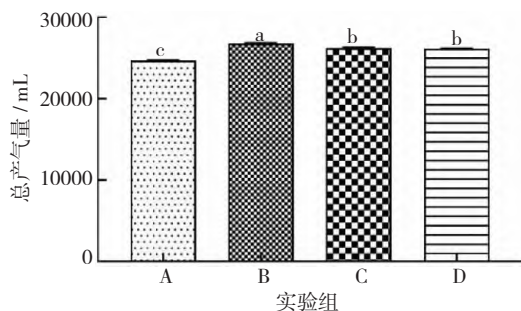


图4 各实验组总产气量对比图

为过高的启动负荷打破了厌氧发酵系统中产甲烷菌群与产酸菌群的代谢平衡,水解产酸效率大于产甲烷菌耗酸速率,从而造成挥发酸的过度积累,导致产甲烷过程不能正常进行<sup>[22-25]</sup>。由于本实验是批次实验,在没有连续进料的情况下,厌氧发酵体系具有一定的调节能力,实验组 D 经 26 天厌氧发酵实验才启动成功,系统产甲烷能力恢复正常,产气主要集中在 26 d~40 d 间,在发酵的第 28 天出现产气高峰,峰值为 2300 mL·d<sup>-1</sup>,累积产气量为 26140 mL。

在工程上厌氧发酵周期定义为从厌氧发酵开始产气到累积产气量达到总产气 90% 的阶段<sup>[26]</sup>。由图 3 可知,实验组 A、B、C 的厌氧发酵周期分别为 28 d、24 d 和 27 d(实验组 D 出现酸化现象故不在讨论范围之内),由图 4 可知由于发酵原料量的差异,实验组 B、C 的累积产气量均显著高于实验组 A(经 LSD 检验得  $P_{AB} = 2.9919e^{-7} < 0.05$ ,  $P_{AC} = 0.000003 < 0.05$ ),综合厌氧发酵周期,获得 B 组和 C 组的日均产气量分别为 1005 mL·d<sup>-1</sup> 和 874.33 mL·d<sup>-1</sup>,实验组 C 比实验组 B 的发酵底物多 10 g,但是累积产气量,日均产气量均低于 B 组,这说明 B 组厌氧发酵消化过程对原料的利用率高于 C 组,可能是因为实验组 C 中厌氧发酵微生物对底物的分解利用已接近饱和状态,厌氧发酵体系已产生挥发酸积累现象,但是 VFAs 未达到抑制浓度<sup>[19]</sup>,若再增加启动负荷就会产生实验组 D 的酸化现象。

## 2.2 各实验组产 CH<sub>4</sub> 情况

图 5 为各实验组日产气中 CH<sub>4</sub> 含量变化。综合图 5 中数据与图 2 各实验组日产气变化数据,可获得图 6 所示各实验组日产 CH<sub>4</sub> 量变化图,进而可获得图 7 各实验组产 CH<sub>4</sub> 总量图。

对比图 6 和图 2 的实验结果可以看出,各实验组的日产气量和日产甲烷量变化规律基本相同,同样在第 5 天处出现第 1 个产甲烷高峰,前期甲烷含量处于较低水平是因为水解产酸阶段在产甲烷阶段之前,产氢产乙酸菌需要将水解得到的各种水溶性

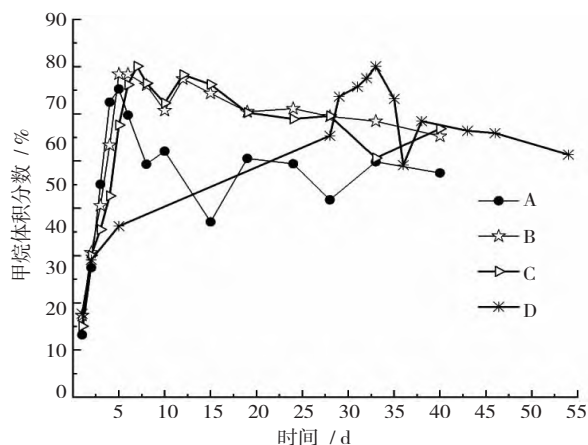
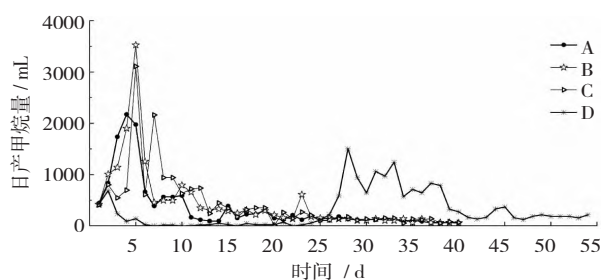
图5 各实验组 CH<sub>4</sub> 含量变化图

图6 各实验组日产甲烷量变化图

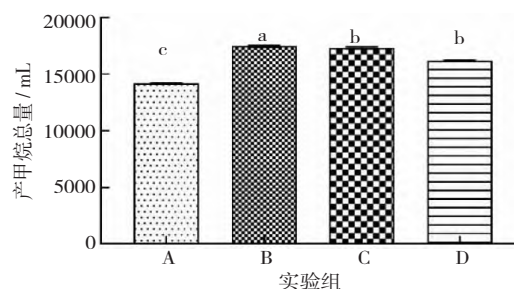


图7 各实验组产甲烷总量变化图

产物进一步经微生物降解形成产甲烷细菌的底物,产氢产乙酸菌代谢速度较产甲烷菌快且产酸阶段生成 CO<sub>2</sub>,所以前期 CO<sub>2</sub> 的含量相对较高而 CH<sub>4</sub> 含量较低。之后实验组 A、B、C 进入产甲烷阶段,实验组 A 由于发酵底物不足无法提供足量的消化底物所以甲烷含量偏低,而 B 组和 C 组的甲烷含量相对稳定,B 组于第 6 天达到峰值 78.42%,C 组于第 7 天达到峰值 80.07%,之后 B 组和 C 组的甲烷含量保持在 65%~75%。实验组 D 由于前期酸化,在 26 d 后才进入产甲烷阶段,在第 33 天达到峰值 80.05%,随后稳定在 65% 左右。图 7 为实验各组产甲烷总量变化图,对各组产甲烷量总量进行比较分析,实验组 B 和 C 在甲烷总产量上要显著优于 A 组和 D 组,且实验组 B 和实验组 C 在甲烷总产量上没有显著性



差异(经 LSD 检验得  $P = 0.167966 > 0.05$ )。

2.3 各实验组 pH 值变化和分析

不同启动负荷对梨渣厌氧发酵 pH 值的影响见图 8,除实验组 D 外,各实验组厌氧发酵过程中的 pH 值均呈现出先降低再升高后稳定的趋势,前期 pH 值降低是由于厌氧发酵第一步是水解产酸阶段,在这一阶段首先发酵细菌产生胞外水解酶将大分子有机聚合物水解成较小分子的水溶性化合物,然后产氢产乙酸菌将各种水溶性产物进一步生物降解成产甲烷菌可利用的有机酸以及二氧化碳,之后产甲烷菌将有机酸分解转化成甲烷,所以在第 8 天之后各组的 pH 值又恢复到 7 左右,产酸和产甲烷阶段达到相对平衡。结合图 5、6 可知,在第 8 天之后每天的产甲烷含量在 65% ~ 70% 且产气量稳定,符合厌氧消化的基本规律<sup>[27]</sup>,而实验组 D 因发酵初始时厌氧发酵体系启动负荷较高,导致第一阶段产生的挥发性脂肪酸积累,产生“酸中毒”现象,pH 值最低值达到 5.9,在第 26 天 pH 值才开始回升,之后厌氧发酵系统 pH 值逐步恢复至正常水平,这说明高启动负荷下厌氧发酵系统会出现酸化现象,且若不进行人为干涉需要较长时间才能恢复,由此可见高启动负荷不利于厌氧发酵效率及系统稳定性<sup>[28]</sup>。

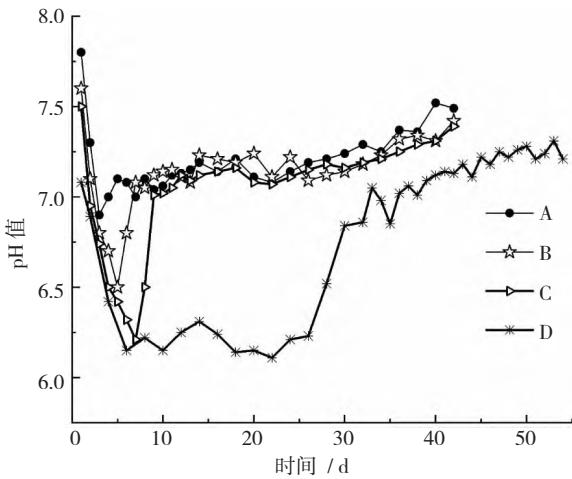


图 8 实验各组 pH 值变化图

2.4 各实验组产甲烷参数

表 3 启动负荷对原料产甲烷率的影响

实验组	产甲烷总量 mL	TS 产甲烷率 (mL·g <sup>-1</sup> )	VS 产甲烷率 (mL·g <sup>-1</sup> )
A	14152.91 ± 61.37 c	191.47 ± 0.83 b	195.40 ± 0.85 b
B	17464.83 ± 71.07 a	210.02 ± 0.85 a	214.34 ± 0.87 a
C	17315.92 ± 84.99 a	187.41 ± 0.92 c	191.26 ± 0.94 c
D	16179.88 ± 57.04 b	159.20 ± 0.56 d	162.46 ± 0.57 d

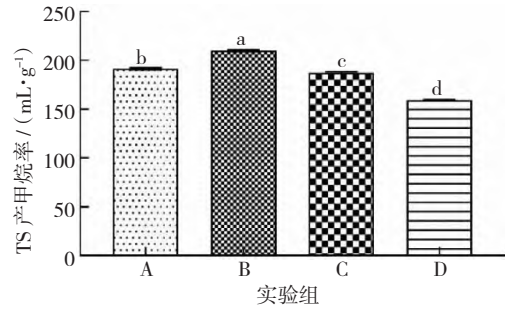


图 9 各实验组 TS 产甲烷率

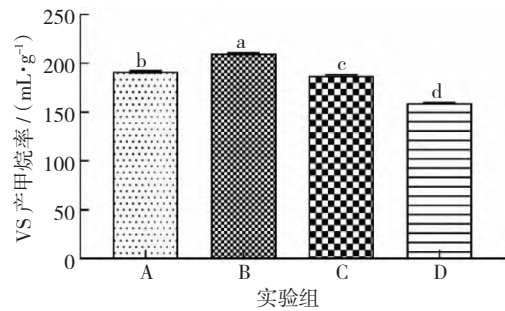


图 10 各实验组 VS 产甲烷率

厌氧发酵技术是沼气工程的基础,提高沼气中的甲烷含量是使沼气高值利用的必要步骤<sup>[29]</sup>,原料产甲烷率是衡量沼气工程利用效率的一个重要指标,原料产甲烷率是指单位原料在一定条件下的产甲烷量,同一原料在不同温度、底物添加量、水力滞留时间等条件下的原料产甲烷率会有所差异<sup>[6]</sup>。通过实验各组产甲烷总量数据,结合发酵原料 TS 和 VS 数据,可计算出各组 TS 和 VS 的产甲烷率,表 3 为各个实验组的产甲烷参数,从表 3 的统计结果可以看出,实验组 B 的产甲烷总量、TS 产甲烷率和 VS 产甲烷率均为各组的最高水平,且 TS 产甲烷率(经 LSD 检验得  $P_{AB} = 1.989e^{-7} < 0.05$ 、 $P_{CB} = 4.2256e^{-8} < 0.05$ 、 $P_{DB} = 6.8715e^{-11} < 0.05$ )和 VS 产甲烷率(经 LSD 检验得  $P_{AB} = 1.989e^{-7} < 0.05$ 、 $P_{CB} = 4.2256e^{-8} < 0.05$ 、 $P_{DB} = 6.8715e^{-11} < 0.05$ )均显著高于实验组 A、C、D,在相同的实验条件下,实验组 C 发酵原料量较 B 组多 11.11%,但是 TS 产甲烷率和 VS 产甲烷率较实验组 B 分别降低了 12.06% 和 12.07%,可见实验组 B 的原料利用率最高。

3 结论

(1) 中温 38℃ ± 1℃ 条件下,可进行正常厌氧发酵的各实验组产气规律基本一致,日产气及产 CH<sub>4</sub> 峰值均出现在第 5 天。但在启动负荷为 60.4 g·L<sup>-1</sup> 的实验组具有设计水平内最为稳定、高效的产气效

果,可作为最优的有机负荷选择。

(2) 以上最佳启动负荷条件下,实验组累积产气达 26800 mL,平均日产气量 1005 mL·d<sup>-1</sup>,产气平均 CH<sub>4</sub> 体积分数为 65.17%,TS 和 VS 产甲烷率分别达到 210.02 mL·g<sup>-1</sup> 和 214.34 mL·g<sup>-1</sup>。砀山酥梨果渣适合作为沼气工程厌氧发酵的原料,具有良好的厌氧发酵产气能力。

#### 参考文献:

- [1] 张延斌,常纪莘,朱世友. 砀山酥梨品牌竞争力分析 [J]. 中国果树,2021(08): 91-95.
- [2] 吴海洋. 消费升级背景下中国水果产业状况研究 [J]. 科技经济市场,2022(1): 10-13,19.
- [3] 张绍铃,谢智华. 我国梨产业发展现状、趋势、存在问题与对策建议 [J]. 果树学报,2019,36(8): 1067-1072.
- [4] 曾荣妹,刘昕,蔡倪. 刺梨果渣的加工性能研究及综合利用 [J]. 食品工业,2018,39(12): 230-234.
- [5] 王振杰,冉冉,王彩虹,等. 梨渣膳食纤维研究进展 [J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版),2020,37(03): 30-35.
- [6] 王艳飞,徐锐,史珊,等. 蔬菜废弃物厌氧发酵制沼气的工艺条件研究 [J]. 可再生能源,2019,37(08): 1107-1112.
- [7] 霍丽丽,赵立欣,姚宗路,等. 农业生物质能温室气体减排潜力 [J]. 农业工程学报,2021,37(22): 179-187.
- [8] Ma X, Yuan H, Wang H, et al. Coproduction of bacterial cellulose and pear vinegar by fermentation of pear peel and pomace [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2021: 1-14.
- [9] 樊静丽,李佳,晏水平,等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析 [J]. 热力发电,2021,50(01): 7-17.
- [10] 李敬,赵士豪,马同锁,等. 梨渣与猪粪混合厌氧消化产气试验研究 [J]. 可再生能源,2015,33(05): 753-759.
- [11] 杨红男,邓良伟. 不同温度和有机负荷下猪场粪污沼气发酵产气性能 [J]. 中国沼气,2016,34(03): 36-43.
- [12] 贺密密,郑盼,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(06): 18-22.
- [13] Liu C, Wang W, Anwar N, et al. Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of food waste under mesophilic and thermophilic conditions [J]. *Energy Fuels*, 2017, 31(3): 2976-2984.
- [14] 王凤娇,徐银鸿,李秀金,等. 皂脚酸化废水的批式厌氧消化处理效果及最佳进料负荷研究 [J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2016,43(06): 63-70.
- [15] 张彤,张立秋,封莉,等. 含固率和有机负荷对厨余垃圾厌氧消化性能及沼渣特性的影响 [J]. 环境科学研究, 2022: DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.06.01.
- [16] 刘雨秋,陈东雨,李金洋,等. 温度和 pH 值对猪粪与玉米秸秆混合厌氧发酵影响的试验研究 [J]. 可再生能源,2014,32(06): 860-865.
- [17] 周曼,邓良伟,杨红男,等. 鸡粪中温干式沼气发酵启动阶段温度变化对产气性能的影响 [J]. 农业环境科学学报,2018,37(08): 1785-1792.
- [18] 刘青荣,李深,晁亮亮,等. 不同环境温度下沼气工程厌氧罐内料温研究 [J]. 中国沼气,2016,34(05): 67-72.
- [19] Kinyua M N, Cunningham J, Ergas S J. Effect of solids retention time on the bioavailability of organic carbon in anaerobically digested swine waste [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 162: 14-20.
- [20] Velmurugan B, Arathy E C, Hemalatha R, et al. Anaerobic co-digestion of fruit and vegetable wastes and primary sewage sludge. [J]. *Journal of Environmental Science Engineering*, 2010, 52(1): 19-22.
- [21] 刘伟伟,马欢,杨智良,等. 一种厌氧发酵实验装置 [P]. 中国专利: CN203715641U, 2014-07-16.
- [22] 杨红男,邓良伟. 不同温度和有机负荷下猪场粪污沼气发酵产气性能 [J]. 中国沼气,2016,34(03): 36-43.
- [23] 张庆芳,杨林海,陈吉祥,等. 餐厨垃圾厌氧发酵连续运行中有机负荷对其他参数的影响研究 [J]. 中国沼气,2014,32(03): 27-31.
- [24] Elsayed M, Diab A, Soliman M. Methane production from anaerobic co-digestion of sludge with fruit and vegetable wastes: effect of mixing ratio and inoculum type [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020(11): 989-998.
- [25] Badshah M, Lam D M, Liu J, et al. Use of an Automatic Methane Potential Test System for evaluating the biomethane potential of sugarcane bagasse after different treatments [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 262-269.
- [26] 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(06): 20-23+55.
- [27] 刘伟伟,姚建铭,陈祥松,等. 餐厨废弃物复合酶解预处理条件优化 [J]. 安徽农业大学学报,2016,43(01): 123-127.
- [28] 魏芳,马欢,刘伟伟,等. 超市生物质废弃物混合原料厌氧消化实验研究 [J]. 中国沼气,2018,36(06): 36-40.
- [29] 谢炎东,蒋心茹,闫志英,等. 果蔬废弃物与剩余污泥协同厌氧消化特性研究 [J]. 可再生能源,2022, 40(01): 8-14.