

DOI: 10.19479/j.2095-719x.2405359

餐厨废弃物产气性能研究

魏和东, 常茹, 吴凡

(天津城建大学 能源与安全工程学院, 天津 300384)

摘要: 考察了餐厨垃圾在不同底物质量浓度、pH值、原料配比以及光照时间下的产气性能。结果表明: 底物质量浓度为10%, 适当控制pH值, 原料最佳配比方案为米饭:猪肉:生菜=38:32:30; 每日光照时间12h的条件下厌氧发酵产气性能最佳。本研究为厌氧发酵技术应用奠定理论基础。

关键词: 餐厨废弃物; 厌氧发酵; 底物质量浓度; 混料设计法; 光照时间

中图分类号: X799.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-719X(2024)05-0359-06

Research on Gas Production Performance of Kitchen Waste

WEI Hedong, CHANG Ru, WU Fan

(School of Energy and Safety Engineering, TCU, Tianjin 300384, China)

Abstract: In this paper, gas production performance of kitchen waste under different substrate concentrations, pH values, raw material ratios and light time are investigated. The results showed that: under the condition of the substrate concentration of 10%, appropriate control of pH value, the optimal raw material ratio of rice : pork : lettuce = 38 : 32 : 30, and the daily light time of 12h, the gas production by anaerobic fermentation demonstrated its best performance. This paper lays a theoretical foundation for the application of anaerobic fermentation technology.

Key words: kitchen waste; anaerobic fermentation; substrate mass concentration; mixture design method; light time

随着餐饮行业的快速发展,人们在饮食方面的消费投入越来越多,导致餐厨废弃物也与日俱增。在高温作用下,硫化氢、氨气等具有刺激性的气体释放出来,对人体健康和自然环境造成了极大影响,随着垃圾污染问题的日益严重,亟需良好的治理方式^[1]。

厌氧发酵技术是利用厌氧菌等微生物代谢功能将有机物迅速分解,并转变成为沼气,以此获得甲烷、氢气等清洁能源^[2],其剩余有机物沼渣、沼液可作为农业生产^[3]。影响厌氧发酵的因素主要包括接种物种类、原料成分、发酵温度、进料质量浓度、pH值以及碳氮比等^[4]。陈鹏辉等^[5]研究了10种常见的木质纤维素类废弃物在175℃、30min条件下水热预处理的效果,结果表明,苦瓜藤、猴菇渣和平菇渣因水热处理后纤维素得到大幅降解,其产甲烷性能分别提高51%、30%、29%。施付艳等^[6]研究了绿色木霉预处理协同外源氢对秸秆厌氧发酵产气性能的影响,结果表明,在预处理温度为36℃,时间为2d,初始料液比为1:1的绿色

木霉处理条件下,累积产甲烷量比未处理实验组提高了39%。朱佳琪等^[7]研究活性炭对秸秆和猪粪混合厌氧发酵产甲烷的影响,结果表明,添加适量活性炭能加快猪粪和水稻秸秆混合厌氧发酵的进程,提高秸秆的降解率和厌氧发酵系统甲烷的产率。Town等^[8]通过采用生物强化技术很大程度上减少了发酵系统中乙酸的积累,并将甲烷含量从0.2%提高到74.4%。Masebinu等^[9]采用两相半连续厌氧发酵技术研究果蔬废物最佳配比,结果表明,果蔬废物在2.2:2.8的比例下厌氧发酵工艺运行非常稳定,CH₄平均含量达57.58%。餐厨废弃物成分复杂多样,由于国内不同地方饮食结构不同,会导致餐厨废弃物性质发生变化^[10],因此,有必要对餐厨废弃物主要代表组分的发酵的性能进行研究。

本文旨在通过实验研究底物质量浓度和pH值等单一因素对发酵系统性能的影响,并通过预测最佳混合配比以及光照时间来探究厌氧发酵的产气性能,为其最佳发酵环境奠定理论基础。

收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2023-07-05

作者简介: 魏和东(1996—),男,河南焦作人,天津城建大学硕士生。

通讯作者: 常茹(1971—),女,副教授,博士,从事建筑节能与可再生能源应用研究。E-mail: nuan609@126.com

1 实验系统

1.1 实验材料

利用人工筛选方式将食堂泔水桶内垃圾进行收集,排除影响实验结果的物质后(如筷子、餐盒等),将餐厨废弃物进行归类.餐厨废弃物主要由淀粉、蛋白质、纤维素、油脂构成.选择米饭、猪肉、生菜、植物油分别代表以上四大类作为原材料.除植物油外,其它原材料用破碎机粉碎,经 105±5 °C 的烘箱烘至恒重后冷却至室温,利用电子天平对样品称重,所得重量与样品烘干前的质量比值即为实验材料 TS 含量.另取相同原材料放置于 600±10 °C 的马弗炉内灼烧大约 2.5 h,计算原材料灼烧前后的质量差值与原材料灼烧前质量的比值,即得到原材料 VS 含量,并将干燥物质密封保存待用.厌氧发酵的接种物来自于天津市市政污水处理厂中的污水污泥,其在常温条件下已进行充分发酵.各原料相关指标如表 1、表 2 所示.

表 1 各类餐厨废弃物的成分和性质

成分	样品	TS/%	VS/%
淀粉	米饭	41.6	40.92
蛋白质	猪肉	28.44	27.37
纤维素	生菜	9.26	7.83
油脂	植物油	100	100

表 2 接种污泥的相关指标

名称	TS/%	VS/%	pH 值
接种污泥	8.86	4.69	6.86

1.2 实验装置

实验采用批式厌氧发酵装置,如图 1 所示.将原材料通过人工填充方式置于发酵瓶中,实验开始前检测发酵容器气密性,温度计监测发酵瓶内温度;同时反应过程中定时搅拌原料,以保证容器内温度和原料分布均匀,利用排水法记录厌氧发酵产气数值.厌氧发酵装置自带取样口、温度计和搅拌棒,实验设备及主要参数如表 3 所示.

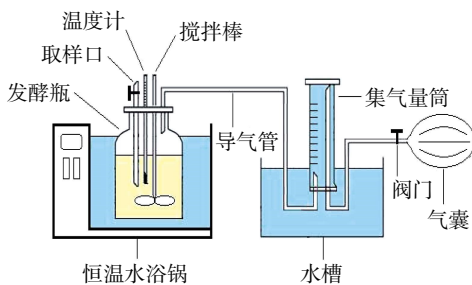


图 1 实验装置与设备示意

表 3 实验设备及主要参数

设备名称	参数及规格	数量	型号
数显恒温水浴锅	4 孔	2	HH-4
真空泵	—	1	SHZ-DIII
pH 计	0.00~14.00 pH	1	pH818
发酵瓶	500 mL	25	蜀牛
温度计	0~50 °C	25	—
电子天平	0.01~120 g	1	FB124
烧杯	500 mL	6	蜀牛
搅拌棒	φ10 mm × 300 mm	2	—
集气量筒	250 mL	25	pomex
水槽	605 mm × 425 mm × 110 mm	3	—
导气管	Φ6 mm	5	pomex

1.3 实验方案

厌氧发酵分为常温发酵、中温发酵和高温发酵.常温发酵温度随环境温度改变,甲烷产量不稳定,产气性能差,实际工程采用较少.中温发酵温度一般为 30~35 °C,甲烷产率高,甲烷产量平衡且稳定,因而被广泛采用于中大型沼气项目中.高温发酵温度一般为 50~55 °C,甲烷产率高,且停留时间短,但因能耗较高而未被广泛应用^[4].综上,本实验发酵温度均采用 39 °C.

1.3.1 底物质量浓度

本实验将四种原材料分别与接种污泥按照 1:1 质量比进行混合,并分别配制 6%,8%和 10%的 450 mL 发酵溶液,确定米饭、猪肉、生菜、植物油的发酵天数,得出产气量的变化规律.为保证结果的准确性,每种底物质量浓度各设置三组平行实验,取三组平行实验的平均值记录实验数据,探究底物质量浓度对厌氧发酵产气的影响.

1.3.2 pH 值

将米饭、猪肉和生菜分别与接种污泥按 1:1 质量比混合,并对三种原材料底物质量浓度均配制 10%的 450 mL 发酵溶液.使用纯碱将各个发酵溶液的 pH 值调节到 7.2,设置控制 pH 值和不控制 pH 值两组对照实验.对控制 pH 值的实验组每 2 d 进行 1 次调节 pH 值至 7.0 处理;对不控制 pH 值的实验组不做处理,实验过程累积产气量不再变化即为发酵天数,从而探究 pH 值对厌氧发酵的产气影响.

1.3.3 原料配比

通过混料设计法^[12-13]研究原材料在不同混合比下厌氧发酵的产气性能,利用 Design 模块得到不同原材料各个混合比例并进行混合,将混合后得到的实验材料与接种污泥按照 1:1 的质量比配置底物质量浓度为 10%的 450 mL 发酵溶液,确定发酵天数,以此得到

实验响应值. 根据实验结果, 对相关参数进行优化设置, 获得最优结果预测值, 并通过实验对预测值验证.

1.3.4 光照时间

将原材料按最优配比混合, 分别选取不同的光照时间分析产气量的变化规律. 实验光照设备与实验装置如图 2 和图 3 所示. 照明设备使用的是仿太阳光灯, 灯珠数量按照暖白: 白光: 红光: 红外线: 紫外线为 110: 36: 50: 2: 2 的比例配置. 对无光照的实验组, 采用黑色胶带对发酵容器进行遮光处理.



图 2 光照设备



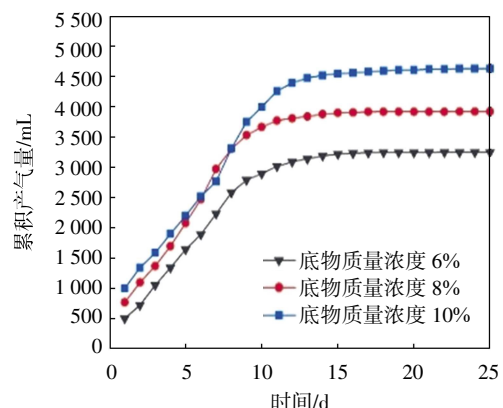
图 3 实验装置

2 结果与分析

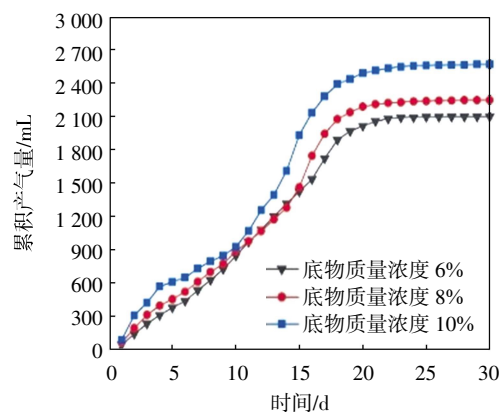
2.1 底物质量浓度对厌氧发酵产气性能的影响

四种原材料不同底物质量浓度下批量厌氧发酵累积产气量如图 4 所示. 从中可以看出, 米饭累积产气量以先快后慢的趋势呈现, 产气量高峰集中在前期和中期, 在第 20 d 累积产气量达到最大值, 底物质量浓度为 6%, 8%, 10% 的米饭累积产气量依次为 3 250, 3 924, 4 636 mL, 彼此之间差距较为明显. 这是由于在发酵初始阶段淀粉中大量碳水化合物快速水解, 并产生一定量的 CO_2 . 猪肉累积产气量曲线呈现出“S”形, 产气量集中在发酵中期, 在第 25 d 累积产气量达到最大, 底物质量浓度为 6%, 8%, 10% 的猪肉累积产气量依次为 2 096, 2 246, 2 569 mL. 这是因为蛋白质不如淀粉水解程度高, 所以出现产气峰值的时间相对较晚, 产气总量也相对较少. 生菜在各质量浓度之间累积产气量差距明显, 且发酵时间较短, 在第 17 d 累积产气量达到最大值, 底物质量浓度为 6%, 8%, 10% 的生菜累积

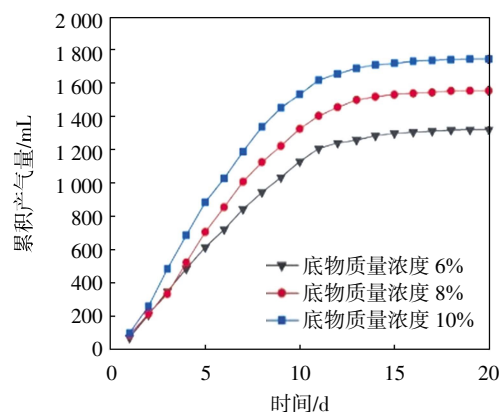
产气量依次为 1 326, 1 562, 1 754 mL. 这是因为前期发酵阶段产生了少量的酸, 而弱酸环境会使纤维素等物质进行二次水解反应. 不同底物质量浓度的植物油累积产气规律与猪肉相似, 在第 33 d 累积产气量达到最高, 底物质量浓度为 6%, 8%, 10% 的植物油累积产气量依次为 3 196, 3 418, 3 630 mL. 但植物油在发酵前期存在 3~5 d 的发酵延滞期, 由于油脂能够吸附在微生物细胞膜表面, 阻碍微生物彼此协同的作用, 因此限制了油脂水解速率, 抑制了油脂发酵产气效果. 但四种原材料在 39 °C 恒温发酵条件下, 底物质量浓度



(a) 米饭



(b) 猪肉



(c) 生菜

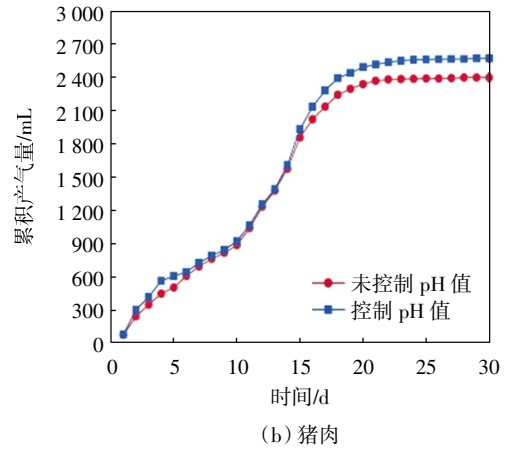
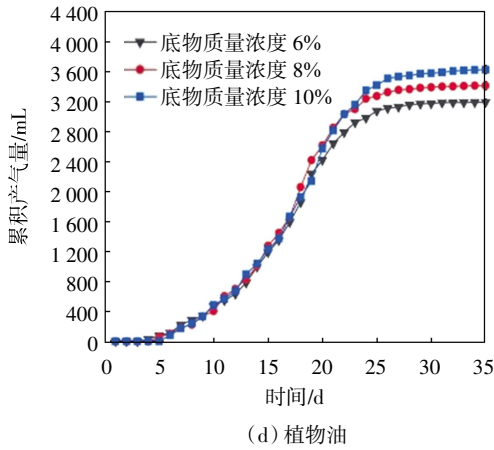


图4 四种原材料不同底物质量浓度下累积产气量变化

均为 10%时取得最佳产气性能,累积产气量由高到低依次为米饭、植物油、猪肉、生菜。

2.2 pH 值调节对厌氧发酵产气性能的影响

不同 pH 值的三种原材料累积产气量如图 5 所示. 米饭在控制 pH 值实验组的产气性能始终优于未控制 pH 值实验组,且产气总量数据差距较为明显,累积产气量峰值在第 20 d,分别为 4 072,4 636 mL. 猪肉在发酵中期控制 pH 值和未控制 pH 值的产气效果几乎相等,发酵前期产气量几乎相等,直至 15 d 后才出现微弱差距,这说明 pH 值变化对猪肉发酵产气情况影响较小. 生菜在发酵前期实验组发酵效果几乎一致,发酵中后期控制 pH 值的产气量逐渐高于未控制 pH 值实验组,在第 18 d 累积产气量分别 1610,1754 mL. 虽然纤维素类的水解过程会使发酵溶液产生一定的酸化,但发酵溶液 pH 值的变化并不会对纤维素类餐厨废弃物的产气性能造成较大影响. 综上,控制 pH 值和未控制 pH 值实验组的累积产气量曲线趋势一致,但控制 pH 值的产气性能相对优于未控制 pH 值的实验组.

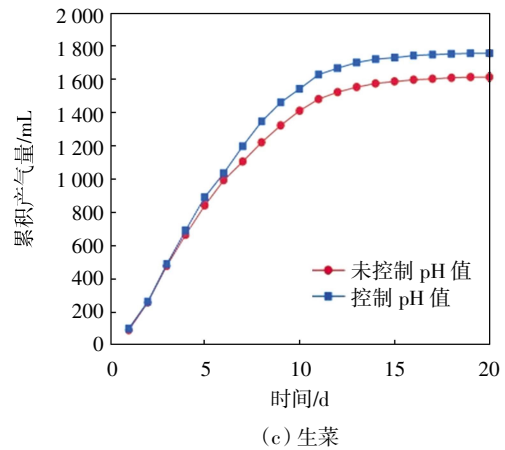


图5 不同 pH 值下三种原材料累积产气量变化

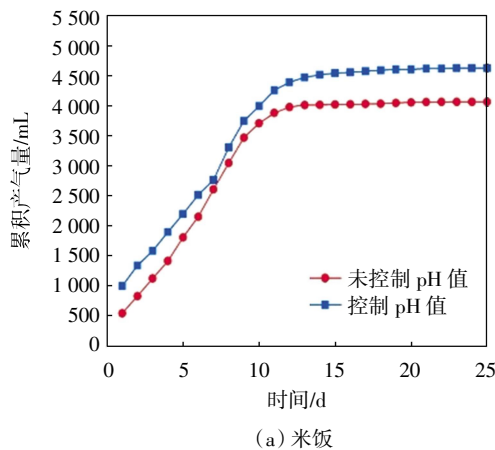
2.3 气体点燃实验

气体点燃实验如图 6 所示,米饭厌氧发酵中所产气体的火焰长度较长,呈现半透明状的橙红色. 猪肉经厌氧发酵所得气体的火焰呈现半透明状的青蓝色. 生菜在厌氧发酵环境下所得气体火焰长度短小,呈现半透明状的橙红色. 而植物油经厌氧发酵所得气体的火焰短促有力,并呈现蓝白色. 根据甲烷完全燃烧时火焰呈现淡蓝色,火力旺盛^[4],由颜色对比分析可知四类餐厨废弃物经厌氧发酵所产甲烷含量由高到低依次为:植物油>猪肉>米饭>生菜.

2.4 基于混料设计法的餐厨废弃物厌氧发酵产气性能分析

2.4.1 最佳配比实验

选取米饭、猪肉、生菜在厌氧发酵中产气性能较优的三种物质,由于植物油在实际餐厨废弃物所占比例较小,发酵过程存在较长延滞期,因此不选择作为混料成分. 通过混料设计法研究三种物质按不同混合配比发酵的产气性能,使用模拟软件 Design-Expert 建立连续变量曲线模型,构建响应曲面图,以期获得最



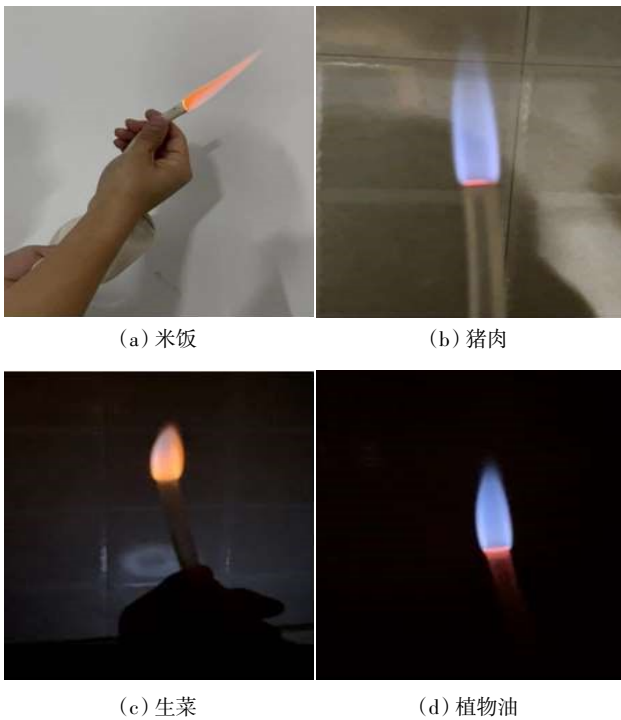


图 6 四种原材料厌氧发酵产气点燃情况

佳混合比例. 本实验通过 Design 模块中单纯形质心法得到三种原材料的不同混合比例, 由此将米饭、猪肉、生菜按其含量多少进行优化, 实验响应值如表 4 所示.

表 4 实验响应值

实验组号	混料比例因子			单位物质产气量/(mL·g ⁻¹)
	米饭(A)	猪肉(B)	生菜(C)	
1	1	0	0	375.2
2	0	1	0	298.8
3	0	0	1	316.4
4	0.5	0.5	0	347.1
5	0.5	0	0.5	343.3
6	0	0.5	0.5	318.5
7	0.33	0.33	0.33	506.4
8	0.67	0.17	0.17	461.2
9	0.17	0.67	0.17	414.4
10	0.17	0.17	0.67	398.7
11	1	0	0	380.5
12	0	1	0	294.1
13	0	0	1	323.9
14	0.5	0.5	0	362.8

由表 4 可知, 当三种原材料单独发酵时, 单位物质产气量由大到小排列顺序为: 米饭、生菜、猪肉. 单位物质产气量依次为: 380.5, 323.9, 298.8 mL/g. 米饭、猪肉和生菜的质量达到 1:1:1 时, 单位物质产气量达到最大值 506.4 mL/g.

Model GrapHs 模块中显示的三种混料因子不同配比结果对单位物质产气量影响的等值线和响应曲面如图 7、图 8 所示.

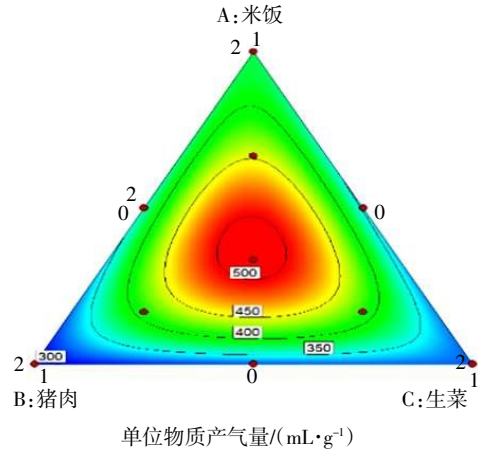


图 7 等值线

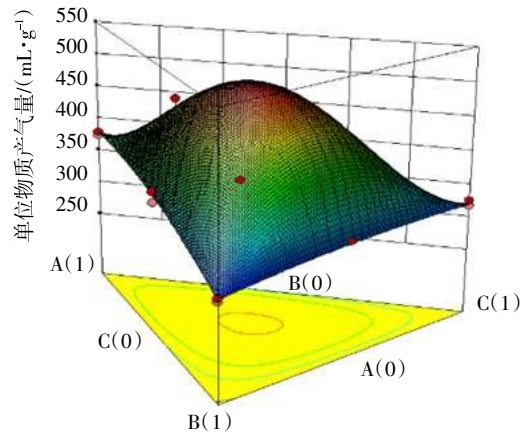


图 8 响应曲面

由图 7 与图 8 可知, 米饭和猪肉组合与生菜和猪肉组合的实验材料, 其交互作用明显强于米饭和生菜组合, 且三种物质两两混合或者共同混合发酵得到的单位物质产气量均高于单一物质按照混合比例求得的数值, 这表明不同成分混合具有一定的协同作用. 由此分析, 米饭、猪肉和生菜混合产气过程中对发酵系统起到稀释作用, 为微生物提供了丰富的营养物质, 降低了有害物质的质量浓度. 同时, 混合发酵表现出了更好的稳定性, 由于猪肉降解速率低于其它成分, 因此会消耗米饭、生菜降解过程中产生的挥发性脂肪酸, 使整个系统挥发性脂肪酸维持稳定. 米饭、猪肉和生菜的餐厨废弃物按适当比例混合对厌氧发酵产气性能具有重要影响.

2.4.2 最佳配比优化预测

根据 Optimization 功能, 对混料设计实验最优情

况进行预测分析,设定米饭、猪肉、生菜的混合因子比例范围在0—1区间,比例总和为1.设置单位物质产气量作为响应值目标,得到预测最优情况质量比为38:32:30,单位物质产气量最大预测值为508.3 mL/g.

对软件预测的最优情况进行实验验证,将三种原材料按38:32:30的质量比进行混合,将混合后得到的实验材料与接种污泥按1:1质量比配置10%的450 mL发酵溶液,并设置六组平行实验,持续30 d发酵,实验结果如图9所示.当米饭、猪肉、生菜按38:32:30质量比混合,各个实验组的单位物质产气量与预测结果相对误差较小.

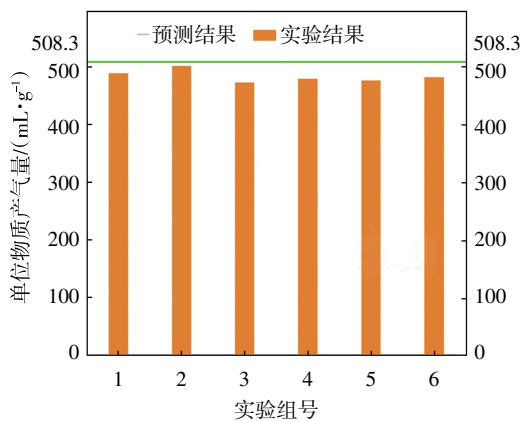


图9 单位物质产气量的预测结果与实际结果对比分析

2.5 光照时间对餐厨废弃物厌氧发酵产气性能的影响

将米饭、猪肉和生菜按38:32:30的质量比混合,并与接种污泥按1:1的质量比配置成底物质量浓度为10%的450 mL发酵溶液,进行30 d发酵实验.光照时间对餐厨废弃物厌氧发酵累积产气量影响情况如图10所示.实验采用的光照时间分别为每日光照0, 6, 12, 24 h, 每个实验组累积产气量变化规律相同,均呈先上升后平稳的趋势;产气高峰都集中在前期与中期,每个实验组累积产气量顺序由大到小依次为12 h > 6 h > 24 h > 0 h, 且光照12 h下累积产气

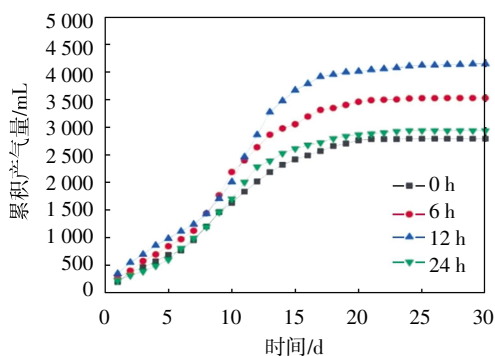


图10 不同光照条件下厌氧发酵累积产气量变化情况

量达到4 146 mL,光照24 h与光照0 h的累积产气量接近.这是由于厌氧发酵过程中光合菌落生长量随光照时间的延长而逐步上升,光合菌落的生长消耗大量的养分,导致产甲烷菌落生长发育所需营养量不足,抑制了产甲烷菌落生长的活力,从而产气量下降.每日光照0 h与光照12 h实验组相比,后者产气性能明显增强,且约为前者1.48倍,表明适当的光照条件有利于提高餐厨废弃物资源化的应用效果.

3 结论

本文采用厌氧发酵技术对餐厨废弃物进行无害化处理,为提升该系统性能,通过实验分析发酵系统的影响因素,由实验研究得到如下结论.

(1)餐厨废弃物批式厌氧发酵条件下,厌氧发酵系统在39℃时最佳发酵质量浓度为10%.同时适当调节pH值,有利于提升发酵系统的产气效果.

(2)根据气体点燃的火焰颜色对比可知,甲烷含量由多到少顺序依次为植物油、猪肉、米饭、生菜.

(3)混料设计实验表明,当米饭、猪肉和生菜的质量比约为38:32:30时,单位物质产气量达到最大,有利于提升产气性能.

(4)通过光照条件对餐厨废弃物厌氧发酵性能的影响分析可知,每日光照12 h实验材料累积产气量最高.因此,增加光照条件可以提升厌氧发酵系统的产气性能,为促进厌氧发酵技术的应用提供新的途径.

参考文献:

- [1] 张丽军.城市餐厨垃圾特点及处理技术分析[J].环境与发展,2017,29(5):232-234.
- [2] VRIEZE J D, PINTO A J, SLOAN W T, et al. The active microbial community more accurately reflects the anaerobic digestion process: 16S rRNA (gene) sequencing as a predictive tool[J]. Microbiome, 2018, 6: 1-13.
- [3] 陈明波,汪玉璋.以沼气技术为纽带的循环农业模式探析[J].农业与技术,2019,39(1):61-62.
- [4] 岑承志,陈 砺,严宗诚,等.沼气发酵技术发展及应用现状[J].广东化工,2009,36(6):78-79.
- [5] 陈鹏辉,郭建斌,李 芳,等.水热预处理对木质纤维素类废弃物厌氧发酵产甲烷及能量平衡的影响[J].可再生能源,2022,40(10):1279-1287.
- [6] 施付艳,苏小红,王 欣,等.绿色木霉预处理协同外源氢对秸秆厌氧发酵产气性能提升的影响[J].中国沼气,2023,41(1):47-52.

(下转第377页)