

网络出版时间:2020-04-17 16:27 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.10.009
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200417.1316.018.html

牛粪与玉米秸秆不同配比厌氧发酵的产气性能

李永平, 庞震鹏, 朱教宁, 汤 昀, 张晓晨

(山西省农业科学院 现代农业研究中心, 山西 太原 030031)

【摘 要】【目的】研究牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵的产气性能,为提高厌氧发酵产气效率提供依据。【方法】采用自制的 1 L 厌氧反应器,以牛粪和玉米秸秆为发酵原料,设置牛粪与玉米秸秆干物质质量比分别为 10:0(对照),8:2,6:4,4:6,2:8 和 0:10 共 6 个处理,在物料总干物质质量分数 8%、发酵温度 $(35\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 条件下进行厌氧发酵产气试验,分析不同产气指标的变化规律。【结果】在产气方面,牛粪与玉米秸秆按不同比例混合厌氧发酵的 4 个处理日产气量变化趋势为先快速升高后平稳下降,发酵第 2~3 天达到产气峰值,较对照提前 2~3 d;当牛粪与玉米秸秆的干物质质量比为 2:8 时,累积产气量、甲烷总产量及挥发性固体产甲烷量均高于其他处理,分别达 13 061.7 mL、6 911.4 mL 和 0.170 L/g,较单一牛粪发酵处理(对照)分别提高 52.47%,41.48%和 34.92%。在发酵系统稳定性方面,牛粪与玉米秸秆不同比例混合厌氧发酵的 4 个处理均在发酵第 5 天 pH 值达到最低,挥发性脂肪酸质量浓度达到最高,较对照提前 2 d 达到极值;发酵 5 d 时,牛粪与玉米秸秆干物质质量比为 2:8 的处理 pH 值低于其他处理,为 5.75,较对照降低了 7.70%;挥发性脂肪酸质量浓度高于其他处理,为 1 675.6 mg/L,较对照提高了 59.04%。【结论】牛粪与玉米秸秆混合厌氧发酵产气效果优于单一原料发酵,且二者干物质质量比为 2:8 时厌氧发酵具有较好的产气特性和发酵潜力。

【关键词】 牛粪;玉米秸秆;混合厌氧发酵;产气性能

【中图分类号】 S216.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)10-0073-09

Biogas production performance of anaerobic fermentation with different proportions of cattle manure and corn straw

LI Yongping, PANG Zhenpeng, ZHU Jiaoning, TANG Yun, ZHANG Xiaochen

(Research Center of Modern Agriculture, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: 【Objective】The biogas production characteristics of anaerobic fermentation of cattle manure and corn straw with different proportions were studied to provide basis for improving efficiency. 【Method】Experiments were conducted in self-made 1 L anaerobic reactor with cattle manure and corn straw (dry matter) ratios of 10:0 (the control treatment), 8:2, 6:4, 4:6, 2:8 and 0:10 under the condition of 8% dry matter quality fraction and $(35\pm 1)^{\circ}\text{C}$. Biogas characteristics during anaerobic digestion were tested. 【Result】The daily biogas production increased rapidly and then decreased steadily in four co-digestion treatments with cattle manure and corn straw, and the peak of biogas production was reached on the 2nd or 3rd day, which was 2 to 3 days earlier than the control treatment. When cattle manure and corn straw ratio was 2:8, the cumulative biogas production, total methane production and volatile solid methane production were higher than other treatments, reaching 13 061.7 mL, 6 911.4 mL and 0.170 L/g, which were

【收稿日期】 2019-10-11

【基金项目】 山西省农业科学院农业科技创新研究项目(YCX2018427, YCX2017D2106);山西省农业科学院科研创新团队培育项目(YGC2019TD07);山西省重点研发计划重点项目(201703D211022, 201803D221010-2)

【作者简介】 李永平(1979—),男,内蒙古察右中旗人,副研究员,博士,主要从事畜禽粪污无害化处理与资源化利用研究。

E-mail: woshiliyongping@163.com

52.47%, 41.48% and 34.92% higher than that of the control treatment. For fermentation system stability, the pH value and mass concentration of volatile fatty acid reached the valley and peak on the 5th day in four treatments with cattle manure and corn straw co-digestion, respectively, which was 2 days ahead the control treatment. The lowest pH value of 5.75 and highest volatile fatty acids mass concentration of 1 675.6 mg/L were abstained in the group of 2 : 8, which were 7.70% lower and 59.04% higher than the control treatment, respectively. 【Conclusion】 The effects of co-digestion of cattle manure and corn straw were better than that of single material. Higher biogas production efficiency and potential were abstained when cattle manure and corn straw dry matter ratio was 2 : 8.

Key words: cattle manure; corn straw; co-digestion; biogas production performance

2018 年山西省年产畜禽粪便 6 274.1 万 t,但综合利用率不足 75%;农作物秸秆年产 2 000 多万 t,利用率不足 78%^[1-2]。养殖场未经处理的畜禽粪便不仅形成恶臭气体影响周边居民生活质量,还含有较多病原微生物和重金属等有害物质污染耕地和水体;而长期以来作物秸秆处理方式简单粗放,多随意堆弃或大面积焚烧,造成周边大气环境污染问题,这种不合理的处理方式不仅造成了生态环境的恶化,还浪费了大量资源^[3-5]。

厌氧发酵是处理畜禽粪便、农作物秸秆等有机废弃物的主要方式之一,C/N 是影响厌氧发酵的核心因子^[6-7]。厌氧发酵过程中适宜的 C/N 为(25~30) : 1,如何快速高效地调节适宜的 C/N,简便实用的方法就是通过不同发酵原料的配比来实现。研究表明,单一发酵原料的产气效率明显差于混合原料,这是因为粪便中有机质含量低、N 含量高,产气速度虽快但经常会出现“氨氮抑制”现象;而秸秆中木质纤维素类物质含量高,纤维素受木质素包裹及本身结晶结构的影响不易降解,产气速度慢且周期长^[8-9]。将畜禽粪便与作物秸秆混合后发酵,不仅可以平衡发酵体系中的营养元素、调节料液的 pH 值和缓冲能力、优化发酵液的流变学性质,还可以有效减少氨氮对发酵的抑制作用^[10-16]。近年来有关牛粪和玉米秸秆混合厌氧发酵技术开始陆续有报道,如李轶冰等^[17]研究认为,将牛粪与玉米秸秆按质量比 3 : 1 混合具有较高的产气量;杨朝勇^[18]研究认为,牛粪与秸秆的质量比为 1 : 1 时产气率达 613.8

mL/g,高于其他处理;孙志岩^[19]认为,牛粪与玉米秸秆混合比为 0.43 : 1 时产气性能最佳;姜宗姗等^[20]认为,牛粪与玉米秸秆按 2 : 1 混合时甲烷效率达 271.9 mL/g;李军等^[21]研究表明,牛粪与玉米秸秆按 1 : 1 配比的产气量较单一牛粪高 73.60%。从上述研究结果看,牛粪与玉米秸秆配比大多数集中在(0.43~3) : 1,差别较大,仍未形成统一的配比标准,还不能满足指导生产的要求,而且对原料不同配比条件下产气性能差异的原因探究还不够深入,对发酵过程限速阶段的研究也较少。本研究利用自行研制的新型厌氧发酵装置,以牛粪和玉米秸秆为研究对象,通过分析不同产气指标的变化规律,对提升厌氧发酵产气效率的物料混配比例进行研究,以期为畜禽粪便和作物秸秆等废弃物的资源化利用提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

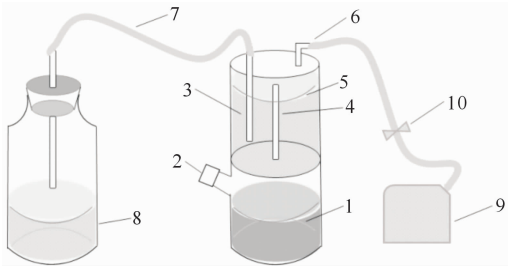
试验材料选择牛粪和玉米秸秆。牛粪取自山西省晋中市榆次区东阳镇奶牛养殖场,玉米秸秆取自山西省农业科学院东阳试验示范基地,去除杂草并粉碎成颗粒,过孔径 250 μm 筛并去除大颗粒后备用。接种物取自东阳试验示范基地沼气池内牛粪中温发酵 30 d 以上的反应物,取样当天完成特性分析和接种。发酵物料和接种物的特性数据见表 1,试验过程中不添加其他任何添加剂。

表 1 发酵物料和接种物的基本特性
Table 1 Characteristics of materials and inoculum

物料 Material	干物质含量/(g · kg ⁻¹) Dry matter content	挥发性固体含量/(g · kg ⁻¹) Volatile solid content	碳氮比 C/N ratio
牛粪 Cattle manure	269.0	838.1	12.39
玉米秸秆 Corn straw	907.7	899.8	43.17
接种物 Inoculum	62.0	531.9	—

1.2 试验装置

本研究采用自制的 1 L 厌氧发生器(图 1)进行厌氧发酵试验。装置是在常用发酵装置的基础上,将原料厌氧反应装置和排水集气装置合二为一形成一个整体,因此具有更高的气密性。该装置发酵容积为 1 L,材质为硼砂玻璃,瓶体由上、下两部分组成,下部为带有进料口的厌氧反应区,进料口用带有橡胶垫的螺纹瓶盖旋紧密封;上部为排水区,试验时内部注水,根据排水集气法原理,厌氧发酵区料液所产沼气经导气管进入排水区,随着排水区内压力的增大,将水经导水管逐渐压入集水瓶,集水瓶内水量的体积即为产气量。当需要测定沼气组分和含量时,打开止水夹,排水区内的气体就会进入集气袋内,然后将集气袋与沼气分析仪(或气相色谱仪)连接即可测定。



1. 厌氧发酵区;2. 进料口(取样口);3. 导水管;4. 导气管;5. 排水区;
6. 采气口;7. 橡胶软管;8. 集水瓶;9. 集气袋;10. 止水夹
1. Anaerobic fermentation area;2. Feed port (sampling port);
3. Water guide pipe;4. Air guide pipe;5. Drainage area;
6. Gas production port;7. Rubber hose;8. Water bottle;
9. Air bag;10. Water stop clamp

图 1 自制厌氧发生器示意图

Fig. 1 Diagram of self-made anaerobic generator

1.3 试验设计

按照牛粪与玉米秸秆干物质质量比设置 10 : 0 (T_1), 8 : 2 (T_2), 6 : 4 (T_3), 4 : 6 (T_4), 2 : 8 (T_5) 和 0 : 10 (T_6) 共 6 个处理,以单一牛粪发酵(T_1)为对照。物料总干物质质量分数 8%,接种量(以干物质质量计)30%,物料添加总量 650 g,反应温度控制在中温(35 ± 1) °C,不进行搅动或振动,发酵时间设为 40 d,每个处理设置 4 个重复,其中 1 个重复用于取样测定 pH 值及挥发性脂肪酸等指标。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 沼气日产气量和累积产气量 沼气日产气量采用排水法测定,每天 10:00 定时测定集水瓶内水的体积。累积产气量为每日产气量累加的总和。

1.4.2 甲烷含量 每 2 d 采集 1 次各处理产出的

沼气,采用安捷伦公司生产的 7890B 气相色谱仪对采集的沼气进行甲烷含量测定。测定时色谱条件为:色谱柱 HP-INNOWAX, $40 \sim 240$ °C, $60 \mu\text{m} \times 530 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,载气为氢气,流量 5 mL/min,压力 7.244 3 psi,平均线速度 35.701 cm/s,滞留时间 2.801 1 min;FID 检测器温度 300 °C,空气流量 400 mL/min,氢气燃气流量 30 mL/min,尾吹气流量 (N_2) 25 mL/min;TCD 检测器温度 250 °C,参比流量 40 mL/min,尾吹气流量(H_2) 2 mL/min。

1.4.3 甲烷总产量 甲烷总产量为每日甲烷产量的总和。每日甲烷产量为每日沼气产气量与当日所产沼气中甲烷含量的乘积,通过式(1)和式(2)计算。

$$V_n = S_n \times R_n. \quad (1)$$

$$\text{甲烷总产量} = V_1 + V_2 + \dots + V_n. \quad (2)$$

式中: V 为每日甲烷产量(mL), S 为每日沼气产气量(mL), R 为每日沼气中甲烷含量(%), n 为厌氧发酵天数。

挥发性固体产甲烷量(VS 产甲烷量):发酵物料中每 g 有机质所能产出的甲烷量,通过式(3)计算。

$$\text{VS 产甲烷量} = M_1 / M_0. \quad (3)$$

式中: M_1 为发酵期内所产甲烷总体积(mL), M_0 为物料中有机质总量(g)。

1.4.4 pH 值及挥发性脂肪酸(VFA) 每 2 d 从用于取样的发生器中用注射器吸取少量样液,采用 PHS-3C 型酸度计测定料液 pH 值;采用比色法测定料液挥发性脂肪酸质量浓度,测定结束后再用注射器将样液注射回发生器。

1.5 数据处理

试验数据采用 DPS 7.05 进行方差分析,图表采用 Excel 2010 进行标准化绘制。

2 结果与分析

2.1 牛粪与玉米秸秆不同对比对混合厌氧发酵日产气量的影响

采用相同的发酵装置,在 35 °C 条件下,各处理沼气产量高低取决于发酵物料的性质,若物料配比适宜、营养成分充足且均衡,有利于快速提升发酵料液中微生物的数量和活性,加快发酵物料水解速率,进而有效提高产气量。由图 2 可以看出,牛粪与玉米秸秆混合厌氧发酵总体上分为 1~13 d 和 13~40 d 两个阶段。第 1 阶段为产气高峰和产气量变化活跃阶段,每个处理日产气量变化极不稳定,表现异常活跃。其中 T_1 处理(单一牛粪)日产气量在第 6 天达到峰值,日产气量为 767.98 mL; T_2 — T_5 处理(牛

粪与玉米秸秆混配)日产气量峰值基本出现在第2~3天,分别为758.49,778.13,775.87和768.44 mL; T_6 (单一玉米秸秆)日产气量呈双峰曲线,峰值分别在第1天(773.88 mL)和第7天(548.38 mL)。在第1阶段,发酵料液中的微生物对物料快速水解并释放可供产甲烷菌利用的底物成分,使产甲烷菌具有较高的生化反应效率。第2阶段为日产气量稳定下降阶段,各处理日产气量基本上呈缓慢下降趋

势。整个发酵过程中, T_5 处理日产气量高于其他处理,且保持相对较高的态势; T_6 处理日产气量出现2次峰值,这可能与玉米秸秆吸水膨胀有关,即玉米秸秆作为单一发酵物料时,吸收较多水分,膨胀程度相对较大,发酵罐排水区空气排出量较大且速度较快,出现初次峰值;而牛粪与玉米秸秆混合发酵的处理和单一牛粪处理均出现1次峰值。

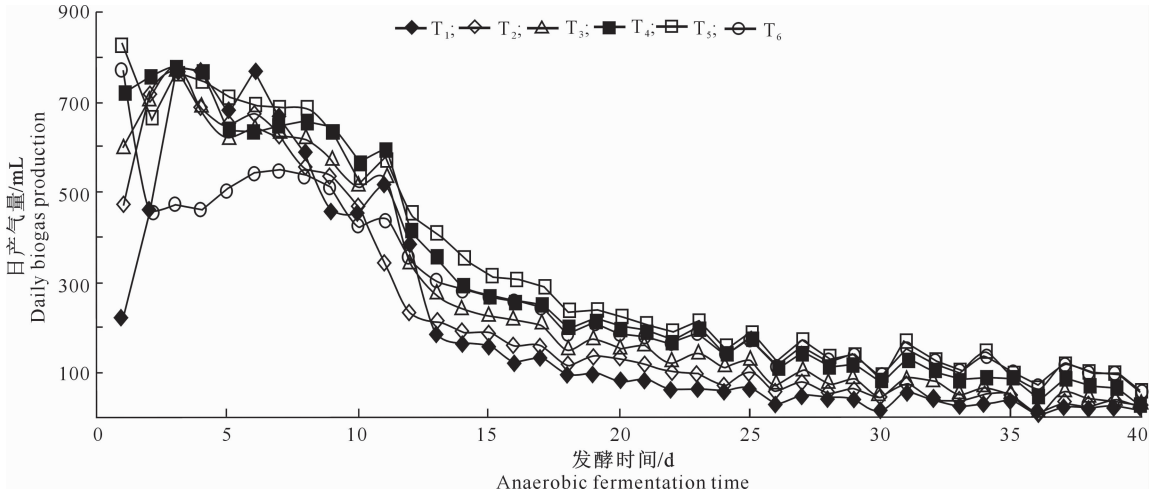


图 2 牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵的日产气量

Fig. 2 Daily biogas production of co-digestion of cattle manure and corn straw with different proportions

2.2 牛粪与玉米秸秆不同配比对混合厌氧发酵累积产气量的影响

由图 3 可知, T_5 处理的累积产气量增长明显优于其他处理,发酵第 15 天, T_5 处理累积产气量达到 9 056.1 mL;发酵第 40 天,各处理累积产气量差异较大,由高到低的顺序依次为 $T_5 > T_4 > T_6 > T_3 > T_2 > T_1$,其中 T_5 处理的累积产气量最高,达到

13 061.7 mL,分别较 T_1 、 T_6 处理提高 52.47% 和 24.30%。说明牛粪与玉米秸秆混合厌氧发酵的累积产气量优于单一发酵原料,且混合物料中随着玉米秸秆量的增加,产气量总体呈增加趋势,这可能与适宜配比混合物料的厌氧发酵有利于促进微生物增殖及代谢活动等有关。

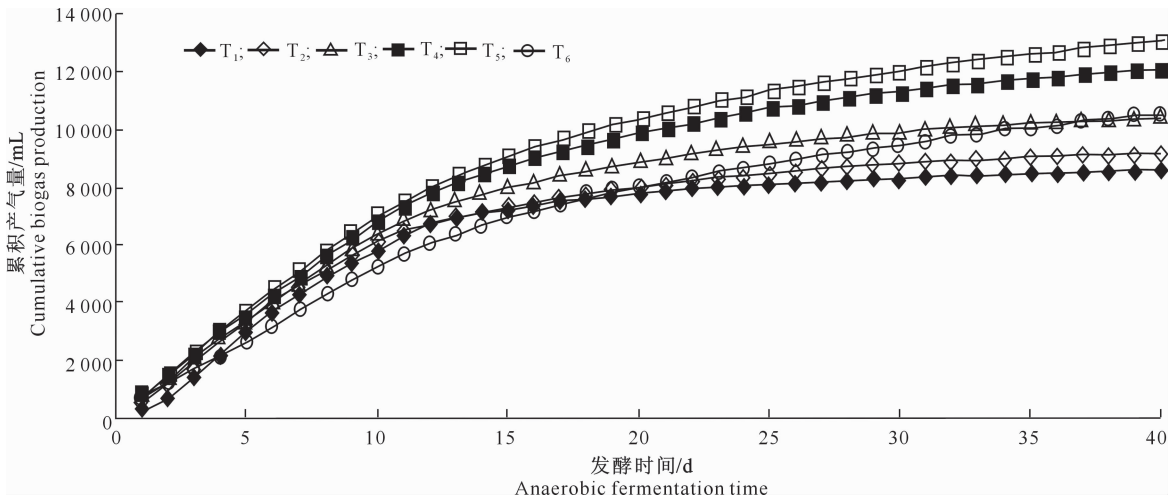


图 3 牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵的累积产气量

Fig. 3 Cumulative biogas production of co-digestion with cattle manure and corn straw with different

2.3 牛粪与玉米秸秆不同配比对混合厌氧发酵产气中甲烷含量的影响

由图 4 可知,各处理甲烷含量总体上随发酵时间推移呈先升后降并趋于稳定的趋势。在混合发酵 4 d 后甲烷含量均达到 50% 以上,可见各处理在混合发酵 4 d 后产甲烷菌进入活跃阶段,菌群数量进一步增多,能够迅速分解利用产酸阶段生成的乙酸

等底物并将其转化为甲烷。发酵第 10 d,各处理甲烷含量逐渐达到峰值(60% 以上),说明发酵 10 d 后产甲烷菌进入反应活跃期。发酵 30 d 后,各处理甲烷含量均维持在 50% 左右直至反应结束,这可能是由于物料中可利用的有机质虽然在不断减少,产气量也相对逐渐减少,但此时产甲烷菌已形成一个稳定的菌群,故生产甲烷的能力依然维持在较高水平。

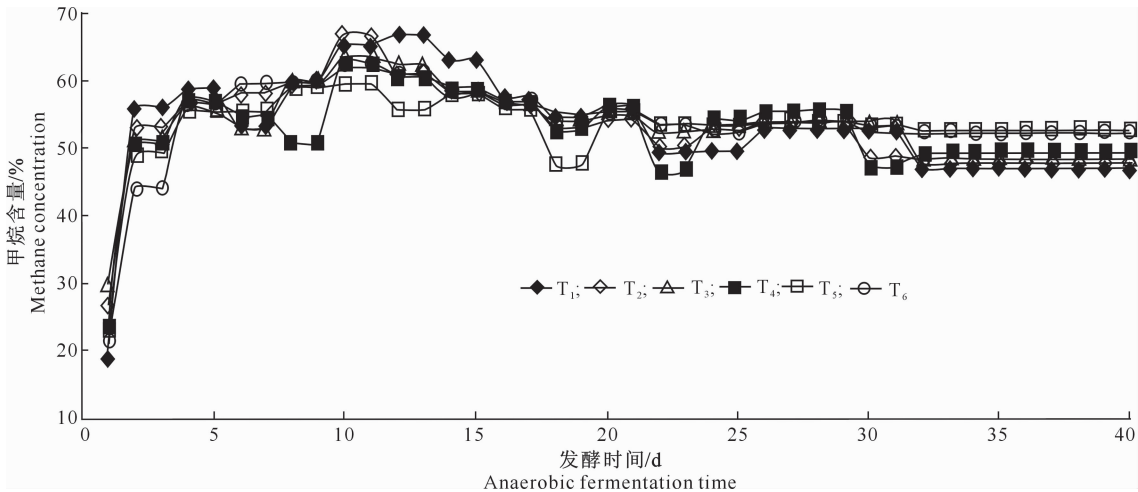


图 4 牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵的甲烷含量

Fig. 4 Methane concentration of co-digestion with cattle manure and corn straw with different proportions

2.4 牛粪与玉米秸秆不同配比对混合厌氧发酵甲烷产量的影响

甲烷总产量是整个发酵期内厌氧发酵所产沼气中甲烷气体的总量,是衡量发酵物料产气效果最直接的指标。由表 2 可知,各处理厌氧发酵产气中甲烷总产量均不相同,其中 T₅ 处理甲烷总产量最高,为 6 911.4 mL,较 T₁ 处理提高 41.48%,较 T₆ 处理提高 23.24%。牛粪与玉米秸秆混合厌氧发酵中除 T₂ 处理外,其余各处理的甲烷总产量整体上高于单一物料发酵,且随着物料中玉米秸秆比例的增加,甲烷总产量呈增加趋势,即 T₅ > T₄ > T₃ > T₂,且处理间差异显著 ($F = 67.768, P = 0.0001$)。说明以牛粪、玉米秸秆作为混合物料进行厌氧发酵时,增大玉米秸秆添加比例对提升甲烷总产量具有促进作用,原因可能是随着秸秆量的增加,物料中碳素含量增加,微生物利用碳素可生产较多的挥发性脂肪酸作为产甲烷菌的利用底物,且当 pH 维持在微生物生活相对适宜的范围时,发酵体系可产出较多的甲烷。

VS 产甲烷量是体现发酵物料产气潜力优劣的主要指标之一。VS 产甲烷量越高,表明物料中单位质量有机质发酵产生的甲烷气体量越多,VS 产甲烷量更能表明物料单位质量有机成分发酵并最终转化为甲烷的效率,较产气量等指标更具说服力。由表

2 可知,牛粪与玉米秸秆混合各处理(T₃、T₄ 和 T₅) 的 VS 产甲烷量均高于单一发酵物料处理,其中 T₅ 处理 VS 产甲烷量高达 0.170 L/g,分别较 T₁、T₆ 处理高 34.92% 和 24.09%,说明当牛粪与玉米秸秆干物质质量配比为 2 : 8 时,发酵物料具有较高的发酵潜力,相比其他处理更适宜作为厌氧发酵的混配物料。

表 2 牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵的甲烷产量

Table 2 Methane production of co-digestion with cattle manure and corn straw with different proportions

处理 Treatment	甲烷总产量/mL Total methane production	VS 产甲烷量/(L · g ⁻¹) VS methane production
T ₁	4 884.9 ± 195.45	0.126 ± 0.005
T ₂	5 082.7 ± 153.52	0.130 ± 0.004
T ₃	5 652.5 ± 70.10	0.142 ± 0.002
T ₄	6 392.4 ± 198.02	0.159 ± 0.005
T ₅	6 911.4 ± 214.92	0.170 ± 0.005
T ₆	5 608.0 ± 80.48	0.137 ± 0.002

2.5 牛粪与玉米秸秆不同配比对混合厌氧发酵中 pH 值及挥发性脂肪酸的影响

2.5.1 pH 值 发酵过程中适宜的 pH 值环境对厌氧发酵系统的稳定性起关键作用^[22-24]。发酵初期,水解微生物将物料有机质中的蛋白、还原性糖等成分分解,释放脂肪酸及醇类物质,其中包括产甲烷菌

的主要反应底物乙酸,因此系统的 pH 值在较短时间内会快速降低,导致发酵系统出现酸化现象。若嗜乙酸产甲烷菌数量较多,料液中乙酸等酸性物质即被快速利用消耗,系统的 pH 值便会逐渐升高,厌氧发酵环境的酸碱度就会恢复至适宜范围。若发酵周期内 pH 值只降不升,表明发酵环境出现料液“酸化”现象,微生物活性降低,造成系统产气缓慢甚至停滞。由图 5 可知,各处理起始 pH 值均为 7,除 T₁ 和 T₆ 处理外,其他各处理 pH 值均在发酵第 5 天达到最低,其中 T₅ 处理 pH 值最低,为 5.75,较对照 6.23 降低了 7.70%,说明 T₅ 处理发酵系统在水解酸化阶段释放的挥发性脂肪酸较多,水解菌群较为活跃;T₁ 和 T₆ 处理的 pH 值最低点均出现在发酵第 7 天。在发酵第 6~7 天,除 T₁ 和 T₆ 处理 pH 值仍在降低外,其他处理 pH 值均显著上升,原因可能

是单一秸秆处理中木质纤维含量多,水解过程缓慢且耗时长;而单一牛粪处理中碳素含量低,养分组成不利于水解菌的快速增殖,导致水解过程缓慢,挥发性脂肪酸及醇类物质产生的速率较低。T₂—T₅ 处理 pH 值在发酵第 7~13 天快速升高,发酵 15 d 后 pH 值趋于平缓,稳定在 6.5 左右;T₁ 和 T₆ 处理的 pH 值从发酵第 7 天开始逐渐升高,至发酵第 15 天趋于稳定。整体来看,牛粪与玉米秸秆混合处理在经过水解阶段时 pH 值降低幅度虽然较大,但随即迅速升高,表明发酵系统内产甲烷菌能够快速消耗水解阶段的代谢产物如乙酸等,适宜配比的牛粪与玉米秸秆混合厌氧发酵有助于提升产甲烷菌的生化反应及代谢活性,使发酵系统的酸碱度较快恢复到适宜范围,而适宜的 pH 值环境又进一步促进了微生物的增殖,从而使发酵系统稳定并良性运转。

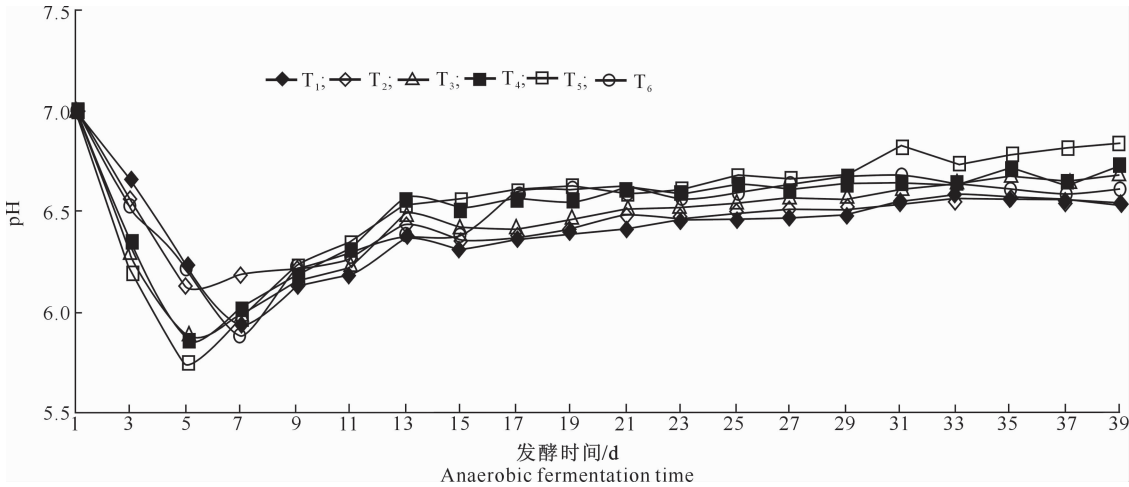


图 5 牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵的 pH 值变化

Fig. 5 Changes of pH value in co-digestion with cattle manure and corn straw with different proportions

2.5.2 挥发性脂肪酸 挥发性脂肪酸(VFA)是厌氧发酵过程的中间产物,是嗜乙酸产甲烷菌生产甲烷的反应底物^[25]。发酵前期 VFA 质量浓度升高,表明水解微生物能够迅速利用物料中的有机质;VFA 质量浓度升高至峰值后即会出现降低,此时嗜乙酸产甲烷菌利用 VFA 产甲烷的速率大于水解菌产酸的速率,进入产甲烷活跃阶段;若 VFA 质量浓度一直升高,系统内的稳定环境被打破,出现“酸累积”现象,系统 pH 值降低,嗜乙酸产甲烷菌的活性受到抑制,沼气产量下降。由图 6 可知,牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵过程中,VFA 质量浓度均呈现先升高后下降的趋势,除 T₁ 和 T₆ 处理外,其他处理 VFA 质量浓度均在第 5 天达到最高值,其中 T₅ 处理的 VFA 质量浓度值在各处理中最高,为 1 675.6 mg/L,较对照 1 053.6 mg/L 提高了

59.04%,这与 pH 值的变化规律基本相符。在发酵起始阶段,水解微生物在适宜的环境下快速分解有机质,产生较多的挥发性脂肪酸,说明牛粪与玉米秸秆混合厌氧发酵体系在 1~5 d 内能够迅速启动产酸阶段。T₁ 和 T₆ 处理在发酵第 7 天 VFA 达到最大值,其中 T₁ 的 VFA 峰值低于混合发酵处理。各处理 VFA 质量浓度在发酵第 7~11 天呈明显下降趋势,表明发酵 7 d 后嗜乙酸产甲烷菌开始逐渐活跃并快速分解利用 VFA,反应进入产甲烷活跃阶段,且 T₅ 处理的可利用底物浓度高于其他处理。结合 pH 值变化,发酵 7 d 后体系 pH 值开始逐渐升高,最终大于 6.5,产甲烷菌在适宜的环境中进一步迅速生长繁殖,有机酸利用速度进一步加快。发酵 25 d 后,各处理的 VFA 质量浓度开始趋于稳定,维持在 800 mg/L 左右,厌氧发酵体系的产酸和耗酸

逐渐达到平衡状态,进入均衡产气阶段。综合分析认为,混合发酵各处理组均未出现系统产酸异常现象,发酵过程运行稳定。

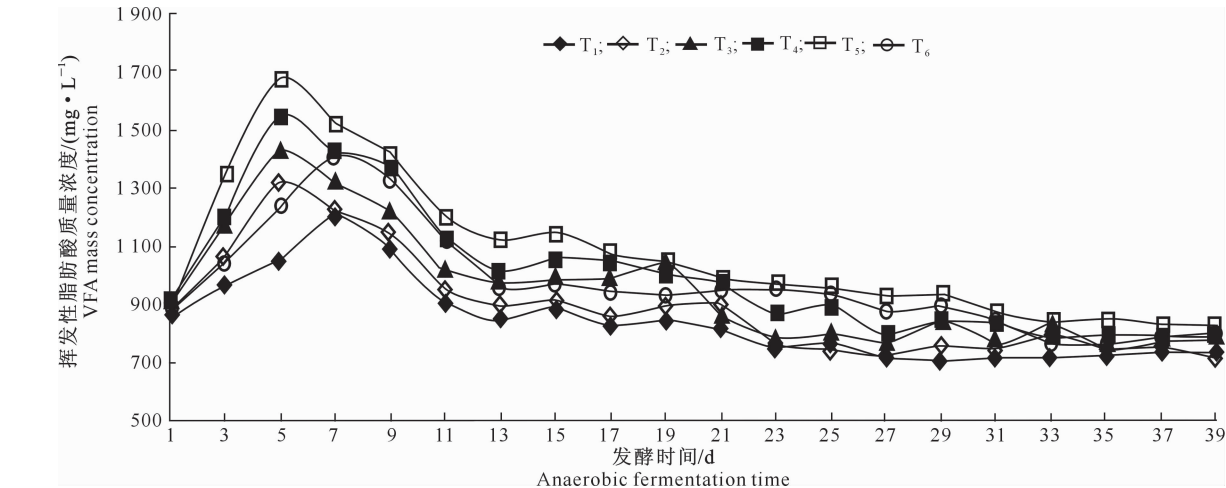


图 6 牛粪与玉米秸秆不同配比混合厌氧发酵 VFA 质量浓度的变化
Fig. 6 Changes of VFA in co-digestion with cattle manure and corn straw with different proportions

3 讨 论

3.1 厌氧发生装置改进的目的及效果

笔者通过查阅文献资料发现,多数研究中关于混合厌氧发酵的试验装置都存在厌氧发酵区和排水区分离的情况^[26-30],这就使得整个发酵装置的连接处较多,如图 7 所示。用于封口的橡胶塞与锥形瓶由于材质不同,不能完全结合,其连接处经笔者用凡士林、玻璃胶等多种黏合剂粘合后均存在不同程度的漏气现象,或者在试验过程中,特别是产气高峰期漏气尤为明显,这在很大程度上影响试验结果的准确性。

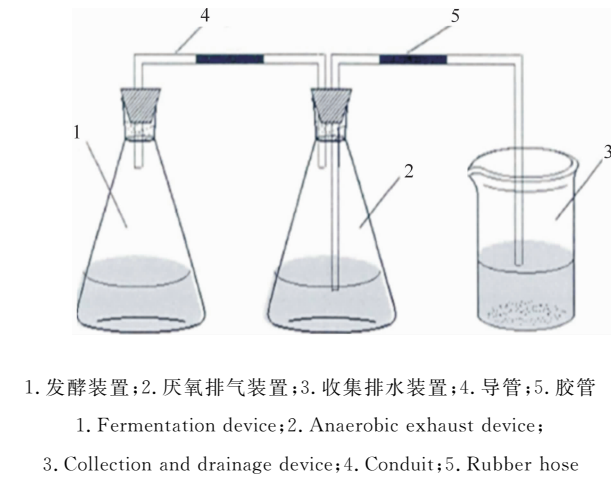


图 7 常见厌氧发生器^[26-30]

Fig. 7 Common anaerobic generators^[26-30]

本研究采用自制的 1 L 厌氧发生器,将发酵区和排水区连为一体,发酵装置下部的厌氧发酵区与

上部的注水区无缝连接,发酵区仅由一支导气管通向注水区,极大减少了两区的连接口数量,进料口处使用带有橡胶圈的螺纹瓶盖旋紧密封,杜绝了漏气现象的发生;在厌氧发酵时可将多个装置同时放入同一个水浴摇床内,通过设置发酵温度和摇动频次控制厌氧发酵的运行环境。经过多次气密性试验验证,该装置可确保厌氧发酵区产生的沼气不泄漏,试验数据及分析结果更具科学性。

3.2 混物料厌氧发酵的产气性能优势

本研究中牛粪与玉米秸秆按适宜比例混合厌氧发酵,无论是累积产气量、甲烷总产量,还是 VS 产气量,均比牛粪或玉米秸秆单一物料高出 20% 以上,说明适宜配比的混物料厌氧发酵较单一物料发酵在产气方面更具优势。原因可能是玉米秸秆中含有较少氮素,厌氧发酵中微生物在生长繁殖过程中因缺乏氮素致使活力大大降低,且在发酵过程中极易形成酸累积^[8],造成厌氧发酵中各类生化反应放缓甚至停滞;而加入一定量的牛粪后,增加了发酵物料中的氮源,使得物料中有机质的碳氮比例得到调整;而进一步调整牛粪与玉米秸秆的混配比例后,发酵物料的碳氮比被调整到一个较适宜微生物增殖和进行生化反应的状态,使微生物的生长繁殖速度和利用底物反应产气的速度均得到进一步提升,由此表现出较高的产气速率和产气量。赵源亮^[31]探究了牛粪与玉米秸秆在恒温 and 变温条件下的厌氧发酵产气情况,认为混合发酵的效果要优于单一牛粪发酵的效果,恒温下高出 41.47%;赵玲等^[11]研究表明,牛粪与玉米秸秆、大豆秸秆等不同类型秸秆厌氧

发酵,产气效果显著优于单一物料组,物料混配比例的调节是提高厌氧发酵效果的前提。本研究中牛粪与玉米秸秆干物质质量配比为 2:8 时,混合物料厌氧发酵的累积产气量较单一牛粪发酵高 52.47%,甲烷总产量比单一牛粪发酵高 41.48%,表明混合物料发酵比单一物料发酵更有利于产气,这与赵源亮^[31]的研究结论一致。

4 结 论

1)牛粪与玉米秸秆混合物料厌氧发酵的产气效果优于牛粪或玉米秸秆单一物料发酵。牛粪与玉米秸秆干物质质量配比为 2:8 时,日产气量峰值出现的时间早于其他处理。

2)结合日产气量、甲烷含量的变化情况来判断发酵期内牛粪与玉米秸秆配比与发酵阶段的关系:第 1~13 d 为产气高峰和产气量变化活跃阶段,第 13~40 d 为产气量稳定下降阶段。

3)在物料总干物质质量分数 8%、发酵温度 (35±1)℃ 条件下,当牛粪与玉米秸秆干物质质量配比为 2:8 时,累积产气量、甲烷总产量及 VS 产甲烷量均最高,分别为 13 061.7 mL、6 911.4 mL 及 0.170 L/g,分别较牛粪或玉米秸秆单一发酵物料提高 52.47% 和 24.30%,41.48% 和 23.24%,34.92% 和 24.09%。

[参考文献]

- [1] 孟祥海. 中国畜牧业环境污染防治问题研究 [D]. 武汉:华中农业大学,2014.
Meng X H. Study on prevention and control of environmental pollution in China's livestock industry [D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2014.
- [2] Basset-Mens C, Van Der Werf H M G. Scenario-based environmental assessment of farming systems; the case of pig production in France [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005(105):127-144.
- [3] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, energy, and transformity; H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems [J]. *Ecological Modeling*, 2004, 10: 201-213.
- [4] Committee on Climate Change. Building a low-carbon: the UK's contribution to tackling climate change [R]. The First Report of the Committee on Climate Change. London, UK: The Stationary Office, 2008:463-467.
- [5] Druckman A, Bradley P, Papathanasopoulou E, et al. Measuring progress towards carbon reduction in the UK [J]. *Ecological Economics*, 2007, 66(4): 594-604.
- [6] 孟祥林. 循环农业与“循环链”构建:经典案例、存在问题与发展选择 [J]. *河北科技大学学报(社会科学版)*, 2014, 14(2): 15-21.
- [7] Meng X L. Circular agriculture and the construction of circular chain: classical cases, existing problems and development choices [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology(Social Sciences)*, 2014, 14(2): 15-21.
- [8] Hamed M, Elmashad, Zhang R H. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste [J]. *Bioresource Technology Bioresource Technology*, 2010, 101(11): 4021-4028.
- [9] 赵肖玲. 产纤维素酶菌株筛选优化及对秸秆厌氧发酵的促进机制 [D]. 北京:中国农业大学,2018.
Zhao X L. Screening and optimization of cellulase-producing strains and promoting mechanism for anaerobic fermentation of straw [D]. Beijing:China Agricultural University,2018.
- [10] 刘 睿, 万楚筠, 黄 茜, 等. 秸秆预处理技术存在的问题与发展前景 [J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(5): 88-91.
Liu R, Wan C Y, Huang Q, et al. Problems and prospects of straw pretreatment technology [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 32(5): 88-91.
- [11] 邢 杰. 不同牲畜粪便与小麦秸秆混合厌氧发酵特性研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
Xing J. Study on the characteristics of anaerobic fermentation of different livestock manure and wheat straw [D]. Yangling, Shaanxi:Northwest A&F University,2014.
- [12] 赵 玲, 王 聪, 田萌萌, 等. 秸秆与畜禽粪便混合厌氧发酵产沼气特性研究 [J]. *中国沼气*, 2015, 33(5): 32-37.
Zhao L, Wang C, Tian M M, et al. Study on the characteristics of biogas production by anaerobic fermentation of straw and animal manure [J]. *China Biogas*, 2015, 33(5): 32-37.
- [13] Nepstad D C, Stickler C M, Almeida O T. Globalization of the Amazon soy and beef industries: opportunities for conservation [J]. *Conservation Biology*, 2006, 20(6): 1595-1603.
- [14] Parawira W, Murto M, Zvanya R, et al. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves [J]. *Renewable Energy*, 2004, 29: 1811-1823.
- [15] Murto M, Björnsson L, Mattiasson B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure [J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70: 101-107.
- [16] Fountoulakis M S, Drakopoulou S T, Terzakis S, et al. Potential for methane production from typical mediterranean agro-industrial [J]. *Biomass Bioenergy*, 2008, 32: 155-161.
- [17] Wu X, Yao W Y, Zhu J, et al. Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 4042-4047.
- [18] 李轶冰, 张翠丽, 杨改河, 等. 温度对粪便与玉米秸秆混合厌氧消化产生特性的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(1): 66-72.
Li Y B, Zhang C L, Yang G H, et al. Effects of temperature on the anaerobic digestion of feces and corn straw [J]. *Journal of*

- Northwest A&F University(Natural Science Edition),2009,37(1):66-72.
- [18] 杨朝勇.典型固体废弃物混合厌氧发酵比例优化及机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- Yang C Y. Proportion optimization and mechanism of anaerobic fermentation of typical solid waste mixture [D]. Harbin: Harbin University of Technology,2016.
- [19] 孙志岩.牛粪和玉米秸秆混合厌氧消化产气性能研究[D].北京:北京建筑大学,2016.
- Sun Z Y. Study on gas production performance of mixed anaerobic digestion of cattle manure and corn straw [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2016.
- [20] 姜宗姗,平佳芄,郭延凯,等.牛粪与玉米秸秆配比对混合厌氧发酵速率的影响[J].河北科技大学学报,2016,37(4):396-405.
- Jiang Z S,Ping J P,Guo Y K,et al. The effect of the ratio of cow dung to corn straw on the rate of anaerobic fermentation [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2016,37(4):396-405.
- [21] 李 军,韩冰阳,张曦彤.低温下玉米秸秆与牛粪混合厌氧发酵产气特性研究[J].环境工程,2017,35(10):125-129.
- Li J,Han B Y,Zhang X T. Study on gas production characteristics of anaerobic fermentation of corn straw and cattle manure at low temperature [J]. Environmental Engineering,2017,35(10):125-129.
- [22] 吕景花,李婉婷,万芸菲,等.不同 pH 条件下剩余污泥厌氧发酵过程中溶出物的释放[J].环境工程学报,2019,13(6):1400-1409.
- Lü J H,Li W T,Wan Y F,et al. Release of leachate during anaerobic fermentation of excess sludge at different pH [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2019,13(6):1400-1409.
- [23] 袁雨珍,肖利平,刘传平,等. pH 对餐厨垃圾厌氧发酵产氢过程的影响[J].生态环境学报,2017,26(4):687-692.
- Yuan Y Z,Xiao L P,Liu C P,et al. Effects of pH on anaerobic fermentation of kitchen waste [J]. Ecology and Environmental Sciences,2017,26(4):687-692.
- [24] 张 彤.温度和 pH 值调控对厌氧发酵产甲烷影响的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- Zhang T. Effects of temperature and pH on methane production by anaerobic fermentation [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2017.
- [25] 吴清莲.餐厨垃圾厌氧发酵产挥发性脂肪酸的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- Wu Q L. Study on the production of volatile fatty acids from kitchen waste by anaerobic fermentation [D]. Harbin: Harbin Industrial University,2015.
- [26] 刘金力,洪秀杰,白 岩,等.响应面法优化餐厨垃圾和牛粪混合两相厌氧发酵酸化条件[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1786-1793.
- Liu J L,Hong X J,Bai Y,et al. Response surface methodology for optimizing acidification conditions of mixed two-phase anaerobic fermentation of kitchen waste and cattle manure [J]. Journal of Agro-Environment Science,2019,38(8):1786-1793.
- [27] 丁绍兰,蒋术林,董凌霄,等.预处理对麦秆厌氧发酵产气特性的影响[J].陕西科技大学学报,2019,37(4):17-22.
- Ding S L,Jiang S L,Dong L X,et al. Effects of pretreatment on gas production characteristics of wheat straw anaerobic fermentation [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology,2019,37(4):17-22.
- [28] 李 桃,王纪坤,黄宇钊,等.响应面法优化香蕉秸秆与猪粪混合厌氧发酵工艺研究[J].环境污染与防治,2019,41(1):41-45,49.
- Li T,Wang J K,Huang Y Z,et al. Study on optimization of anaerobic fermentation of banana straw and pig manure by response surface methodology [J]. Environmental Pollution & Control,2019,41(1):41-45,49.
- [29] 黄欣磊.牛粪与芦荟皮废弃物厌氧共发酵的实验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- Huang X L. Experimental study on anaerobic co-fermentation of cow dung and aloe skin waste [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2017.
- [30] 刘琬瑜.牛粪联合玉米秸秆混合厌氧发酵的因子优化[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
- Liu W Y. Factors optimization of anaerobic fermentation of cattle manure and corn straw [D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2017.
- [31] 赵源亮.玉米秸秆和牛粪混合厌氧发酵工艺优化研究[D].郑州:河南农业大学,2011.
- Zhao Y L. Optimization of anaerobic fermentation of corn stalk and cow dung [D]. Zhengzhou:Henan Agricultural University,2011.