

鸡粪玉米秸秆混合厌氧发酵产气特性分析

汤 昀^{1,2}, 李永平^{1,2}, 庞震鹏^{1,2}, 朱教宁^{1,2}

(1.山西农业大学山西有机旱作农业研究院, 山西 太原 030031 2.山西省农业科学院现代农业研究中心, 山西 太原 030031)

摘要:通过探索鸡粪与玉米秸秆不同配混比例对厌氧发酵产气特性的影响,以期提高鸡粪发酵的产气效率。采用自行设计的 1 L 厌氧发生器,在中温(35 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 条件下,将鸡粪与玉米秸秆按照不同挥发性固体质量比 9:1、8:2、7:3、6:4、5:5 进行配混,以单一鸡粪发酵为对照,分析不同处理厌氧发酵的产气特性和料液特性。结果表明,鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵产气效率优于单一鸡粪发酵;当鸡粪与玉米秸秆配混比例为 6:4 时,日产气量、累积产气量、甲烷总产量、容积产气率及挥发性固体产气量均较高,分别为 802.54、12 933.23、7 757.06 mL 及 0.350 L/(L·d)和 0.474 L/g,分别较对照高 44.93%、159.62%、191.33%、159.26%和 160.44%,且发酵料液 pH 值变化相对平缓,说明发酵周期内系统相对稳定。以单一鸡粪为主的厌氧发酵生产沼气过程中,适当添加玉米秸秆可提高发酵效率和产气量,二者配混比例为 6:4 为玉米秸秆推荐添加量。不同原料混合厌氧发酵,可提升发酵效率和养殖场粪污处理速率,对改善生态环境和促进山西省养殖业、种植业可持续发展具有重要意义。

关键词:鸡粪;玉米秸秆;配比;沼气发酵

中图分类号:S141.4

文献标识码:A

文章编号:1002-2481(2020)07-1093-06

Analysis on Biogas Production Characteristics of Mixed Anaerobic Fermentation of Chicken Manure and Corn Straw

TANG Yun^{1,2}, LI Yongping^{1,2}, PANG Zhenpeng^{1,2}, ZHU Jiaoning^{1,2}

(1. Shanxi Academy of Organic Dryland Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China;

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

Abstract Biogas production characteristics of anaerobic fermentation of chicken manure and corn straw with different ratios were studied in this experiment to increase the efficiency of biogas production of chicken manure. The experiment was conducted in self-made 1 L anaerobic reactor of chicken manure and corn straw mixture with different ratios (9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, single chicken manure fermentation as the control group) based on volatile solid under the condition of $(35 \pm 1)^{\circ}\text{C}$. Biogas production and liquid characteristics were measured to determine the appropriate mixture ratio. The results showed that the biogas potential under co-digestion of chicken manure and corn straw performed better than single chicken manure. When the mixture ratio of chicken manure and corn straw was 6:4, the daily gas production, cumulative gas production, total methane production, volumetric gas production rate and volatile solid gas production were all higher, which were 802.54, 12 933.23, 7 757.06 mL and 0.350 L/(L·d), 0.474 L/g, respectively, was 44.93%, 159.62%, 191.33%, 159.26% and 160.44% higher than that of the control, respectively, and the pH value of fermentation broth was relatively flat, indicating that the system was relatively stable in the fermentation cycle. Therefore, appropriate addition of corn straw can significantly enhance the fermentation efficiency and biogas production of chicken manure as single fermentation material. When the ratio of the two is 6:4, it is recommended to add corn straw. Co-digestion with different raw material can improve the biogas fermentation efficiency and farm waste processing rate, which is of great significance to improve the ecological environment and promote the sustainable development of aquaculture and planting industry in Shanxi province.

Key words chicken manure; corn straw; proportion; biogas fermentation

随着我国经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,规模化养殖业发展迅速^[1]。2015年我国鸡粪排放总量高达 3.93 亿 t^[1],2016年山西省畜禽

粪尿总排放量为 3 410.97 万 t,其中鸡粪占 16.6%,约 566.22 万 t^[2],成为亟待解决的农业废弃物之一,而且鸡粪中含有大量的致病菌^[3],采用厌氧发酵处

收稿日期:2019-12-04

基金项目:山西省农业科学院农业科技创新研究课题(YXC2020YQ19, YXC2018427);山西省农业科学院农业科技创新工程创新团队培育专项(YGC2019TD07);山西省重点研发计划项目(201803D221010-2)

作者简介:汤 昀(1987-),女,山西原平人,助理研究员,主要从事畜禽粪污无害化处理与资源化利用研究工作。李永平为通信作者。

理鸡粪既能回收能源又能保护环境,受到普遍欢迎^[4]。我国每年农作物秸秆的产生量约为 7 亿 t^[5],除了用于饲料、还田和造纸外,还有约 3.7 亿 t 秸秆未被利用^[6],利用率不足 55%。厌氧发酵可以通过厌氧微生物对农作物秸秆进行分解代谢,是秸秆利用的主要途径之一^[7]。厌氧消化系统符合国家农业供给侧结构性改革的政策,使农业废弃物变废为宝,促进农业的可持续发展^[8]。

在厌氧发酵中,碳氮比是影响厌氧发酵效率的核心因素,碳氮比在(25~30):1 时,发酵效率最高。畜禽粪便 C/N 低,发酵过程中易形成铵氮积累,影响发酵效率。而秸秆 C/N 高,但是秸秆中木质素含量较高,亲水基团较少,不溶于一般溶剂,不容易被微生物分解利用,使得厌氧发酵过程产气速度变慢^[9]。WEILAND^[10]研究认为,秸秆与粪便原料混合后发酵可以增加秸秆的降解量,提高发酵能力。张翠丽等^[11]对麦秆与粪便混合后的厌氧发酵进行了研究,结果表明,麦秆与牲畜粪便混合后与单一原料的产气效率相比有了显著提高。张娟^[12]研究了 35 °C 下猪粪、玉米秸秆与小麦秸秆的配比,结果表明,3 种不同原料的配比有着较高的总产气量和甲烷产量。白洁瑞等^[13]研究了不同温度条件下粪秆配比对沼气产量的影响,结果表明,35 °C 条件下,鸡粪与玉米秸秆为 2:1 的处理产气效果最佳。赵玲等^[14]在对秸秆与畜禽粪便混合厌氧发酵产沼气特性研究中发现,在 35 °C 条件下,玉米秸秆与鸡粪干物质质量比 1:2 为最佳组合,累积产气量高出单一秸秆组合 37.5%。现阶段的相关研究存在配混比例较为宽泛,处理设置较少,未形成统一的配混标准,难以满足指导生产的要求。

本试验在厌氧发酵的理论基础上,结合实际需求,选取玉米秸秆与鸡粪按照挥发性固体质量一定比例混合作为发酵原料,通过对其发酵后的日产气量、产气总量等指标的研究,以期找到一种最合适的玉米秸秆与鸡粪的混合比例,提高发酵效率和养殖场粪污处理速率,实现山西省养殖业、种植业的可持续发展。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本研究采用的发酵原料为玉米秸秆和新鲜鸡粪。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 0.25 mm 筛去除大颗粒后用于试验,鸡粪取自于山西省太谷县鸿昊

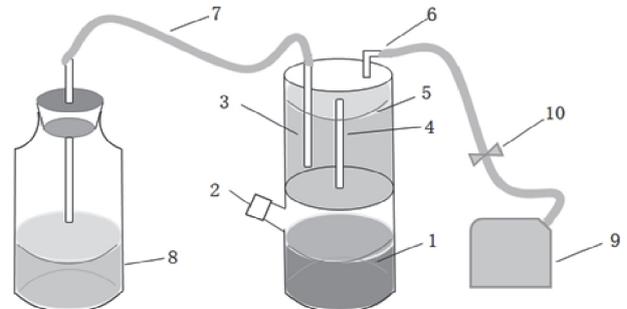
养殖场鲜鸡粪,接种物取自山西省农业科学院东阳试验示范基地沼气池内中温发酵 30 d 以上的反应物,并于取样当天完成特性分析和接种。发酵物料与接种物的特性如表 1 所示,试验过程中不添加其他任何添加剂。

表 1 鸡粪玉米秸秆混合厌氧发酵原料性质

试验材料	干物质(TS)含量/%	挥发性固体(VS)含量/%	C/N
鸡粪	37.27	22.75	15.84
玉米秸秆	89.94	84.37	43.17
接种物	5.47	3.71	

1.2 试验装置

试验采用山西省农业科学院现代农业研究中心沼气技术实验室自制 1 L 小型厌氧发酵发生器,发生器由上、下 2 个部分组成,下部为厌氧发酵区,上部为注水区。发酵物料通过进料口进入到下部的厌氧发酵区,发酵后产生的沼气经导气管进入到上部的注水区,使注水区的压力逐渐增大,当压力达到一定程度时水经橡胶软管流入集水瓶内,通过称质量测定产气量,当测定沼气组分及含量时,将止水夹打开,气体进入到集气袋。厌氧发生器如图 1 所示。



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

图1 自制混合厌氧发酵1 L发生器

1.3 试验方法

将玉米秸秆与鸡粪按照不同挥发性固体质量(VS)比混合进行厌氧发酵试验,试验采用自制 1 L 厌氧发生器,物料浓度均为 8%,接种量 30%,物料总量 650 g,调节 pH 值至 7.0,反应温度控制在中温(35±1)°C,厌氧发酵试验周期 42 d。各处理具体如表 2 所示。

表 2 处理设置

处理	鸡粪:玉米秸秆(VS比)	C/N
CK	10:0	10.0
M1	9:1	14.3
M2	8:2	18.6
M3	7:3	22.9
M4	6:4	27.2
M5	5:5	31.5

1.4 测定指标及方法

1.4.1 干物质(TS)测定 将鸡粪和玉米秸秆、接种物取样置于恒温鼓风干燥箱中,设置温度为105℃,烘干水分,采用差重法计算干物质质量,发酵前的物料和反应后的混合物都要进行测定。

1.4.2 挥发性固体量(VS)测定 将烘干后的样品于600℃马弗炉中进行高温灼烧,去除有机成分,得到灰分,采用差重法计算挥发性有机物固体质量。

1.4.3 日产气量和累积产气量测定 日产气量采用排水法测定,每天10:00定时测定集水瓶中排出水的体积。累积产气量为每日产气量总和。

1.4.4 产气性能指标测定 产气性能指标包括干物质产气量(TS产气量)、干物质产甲烷量(TS产甲烷量)、挥发性固体产气量(VS产气量)及挥发性固体产甲烷量(VS产甲烷量)等指标。

$$TS \text{ 产气量} = M_1/M_0 \quad (1)$$

$$TS \text{ 产甲烷量} = M_2/M_0 \quad (2)$$

$$VS \text{ 产气量} = M_1/M_3 \quad (3)$$

$$VS \text{ 产甲烷量} = M_2/M_3 \quad (4)$$

式中, M_1 为发酵期内总产气量 (mL); M_0 为物料中干物质总量 (g); M_2 为发酵期内产甲烷总体积 (mL); M_3 为物料中有机质的总量 (g)。

1.4.5 酸碱度(pH)测定 每2d从用于取样的发生器中吸取少量样液,采用PHS-3C型酸度计测定pH值,测定结束后再用注射器将样液注射回发生器。

1.4.6 沼气组分测定 使用铝箔气体采样袋收集每日各处理产生的气体,采用安捷伦7980B气相色谱仪对气体成分进行测定。色谱条件:色谱柱HP-INNOWAX,40~240℃,60μm×530μm×1μm,载气为氢气,流量5mL/min,压力7.2443psi,平均线速度35.701cm/s,滞留时间2.8011min;FID检测器:温度300℃,空气流量400mL/min,氢气燃气流量30mL/min,尾吹气流量(N₂)25mL/min;TCD检测器:温度250℃,参比流量40mL/min,尾吹气流量(H₂)2mL/min。

1.5 数据处理

原始数据采用Microsoft Excel 2010及SPSS 17.0软件进行标准化图表编辑及分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵对日产气量的影响

鸡粪与玉米秸秆的不同配比下碳氮比不同,不同的碳氮比可以影响微生物的活性,进而影响沼气

产量。由图2可知,各处理日产气量的整体趋势大致相同,均为先升高,达到峰值之后逐渐回落趋于平缓。配比后的处理产气高峰期都有所提前,其中,M4处理达到产气高峰的时间最早,为6d,而CK到达产气高峰的时间最长,为12d。由此可知,合理的原料配比可以缩短达到产气高峰的时间。达到产气高峰时,M4处理的日产气量最高,为802.54mL,较单一原料处理CK产气量(553.73mL)提高44.93%。因此,将玉米秸秆与鸡粪进行合理配混后发酵,不仅可以提高日产气量,还可使产气高峰提前6d左右。

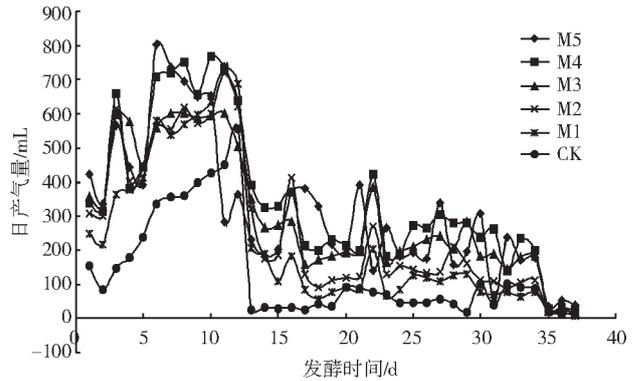


图2 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵日产气量比较

2.2 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵对累积产气量的影响

厌氧发酵时,适宜的碳氮比在(25~30):1^[14],所以,合理的配比原料有利于产酸与产甲烷阶段菌群的生长平衡,以促进沼气发酵^[15]。累积产气量是指发酵系统在发酵周期内日产气量总和。从图3可以看出,各处理的累积产气量趋势基本一致,均为先上升后趋于平缓。随着发酵天数的增加,各处理的沼气累积量均呈现稳定上升后趋于平稳的趋势。累积产气量最大的为M4处理,为12933.23mL,比CK提高了159.62%。由此可知,鸡粪和玉米秸秆不同配比碳氮比不同,适宜的碳氮比可促进厌氧发酵,提高产气效率。

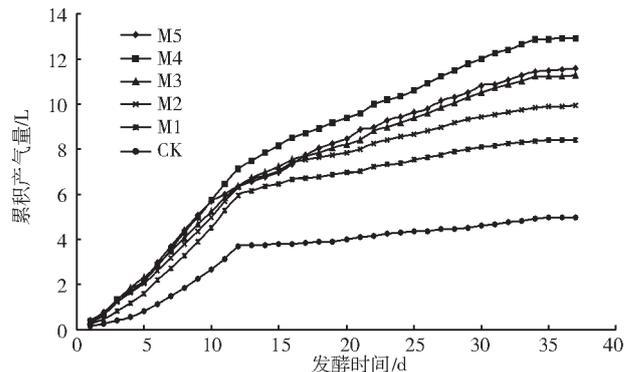


图3 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵累积产气量比较

2.3 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵对甲烷含量及甲烷总产量的影响

厌氧发酵系统中每日产出沼气中的甲烷所占比例被称之为甲烷含量,这一指标的高低决定产气效果的好坏,甲烷含量越高,产气效果越好^[16]。由图 4 可知,甲烷含量随着发酵天数的增加呈现先升高后趋于平缓的规律。适当增加玉米秸秆含量既可以缩短到达产甲烷高峰的时间,也可以提高沼气中甲烷含量。M4 处理的甲烷含量在第 9 d 达到峰值,含量为 62.52%,较单一鸡粪提前 8 d,CK 处理在发酵的第 17 天产甲烷含量达到峰值(55.86%),M4 处理最高甲烷含量比 CK 提高 11.92%。这可能与 M4 处理的 C/N 更适合产甲烷菌的代谢活性有关。

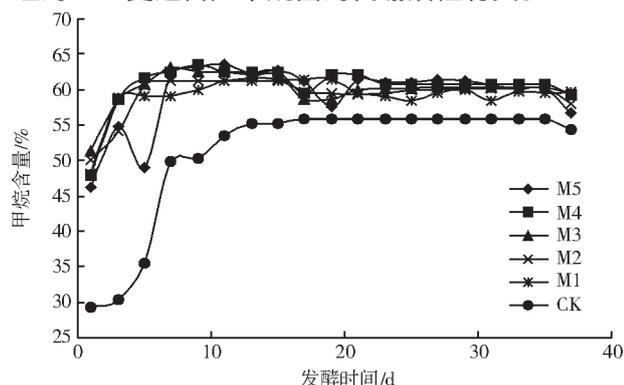


图4 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵的甲烷含量比较

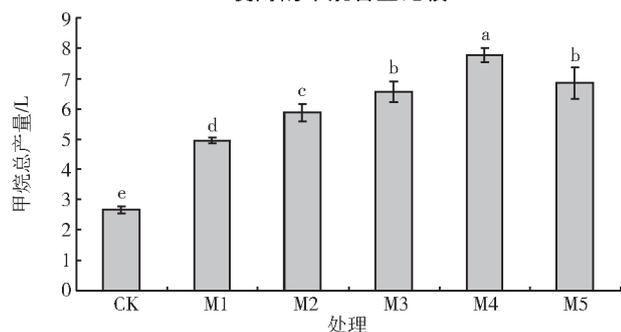


图5 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵的甲烷总产量比较

产甲烷总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。从图 5 可以看出,各处理厌氧发酵产甲烷总量均不相同,其中 M4 处理的甲烷总产量较高,为 7 757.06 mL,与 CK 相比,提高 191.33%。鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵处理中产甲烷总量整体上高于单一物料发酵,且随着物料中玉米秸秆含量的增加,甲烷总产量呈先升高后降低趋势,说明以鸡粪、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产甲烷总量具有促进作用,原因可能是 C/N 在 30 以下时,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有机酸作为产甲烷菌的利用底物,且当 pH 维持在微生物相对适宜的范围内时,发酵体系可产出较多的甲烷。

2.4 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵对发酵系统 pH 值的影响

由图 6 可知,不同处理在厌氧发酵过程中 pH 值的变化规律基本一致,呈先下降后上升最后趋于平缓的趋势。这种 pH 的动态变化,主要是由在厌氧发酵的过程中,产甲烷相与产酸相的动态平衡决定。发酵初期,接种物充足,产酸菌活跃,产生大量有机酸,使得 pH 值下降,随后产甲烷菌利用产生的有机酸,生产甲烷,产气量达到峰值,由于有机酸被利用, pH 值随之上升,这与覃国栋等^[17]的研究结果一致。本试验结果表明, pH 值的波动范围在 1.0 之内,发酵系统中料液的 pH 值波动小,发酵系统稳定,这与艾平等^[18]的研究结果一致。由试验结果还可以看出,投料的配比 C/N 越高,料液的 pH 值越低,这与李淑兰等^[19]的研究结果一致。

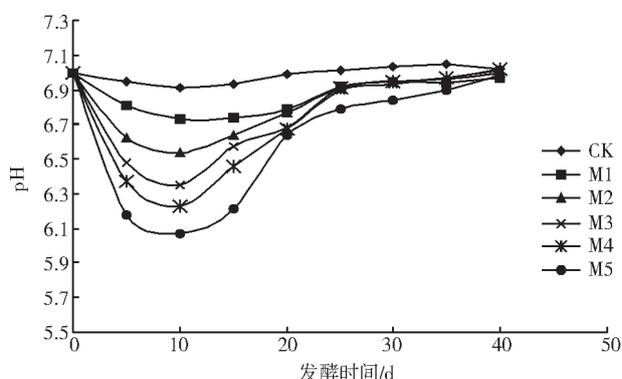


图6 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵时pH的变化

2.5 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵对产气性能指标的影响

厌氧发酵系统产气效果的优劣由该系统产气性能指标的高低来衡量。发酵系统中物料的产气效率主要由容积产气量和容积产甲烷量 2 个指标体现。单位质量干物质被利用产生沼气和甲烷含量由 TS 产气量和 TS 产甲烷量来表示,而且这 2 个指标的量与产气性能之间呈现正相关关系。VS 产气量和 VS 产甲烷量是表示厌氧发酵系统中发酵物料产气潜力的指标,该指标值越大,表示单位质量的该物料有机质成分产气量与产甲烷量越多,即产气潜力越大。由表 3 可知,鸡粪与玉米秸秆混合后各项产气性能指标均高于 CK 的产气性能指标。其中, M4 处理的各项指标均显著高于其他处理,该处理的容积产气率和容积产甲烷率分别为 0.350、

0.210 L/(L·d) ,分别较 CK 提高了 1.59、1.92 倍。M4 处理的 TS 产气量和 TS 产甲烷量分别为 0.336、0.201 L/g ,分别较 CK 提高了 2.03、2.35 倍。VS 产气量及 VS 产甲烷量仍然是 M4 处理最大 ,分别为 0.474、0.284 L/g ,分别较 CK 提高了 1.60、1.90 倍。

由此可见 ,对鸡粪和玉米秸秆配比后进行混合发酵既可以提升产气速率 ,还可以增加发酵物料的产气潜力 ,且适宜的配比可以大幅提高厌氧系统中物料的产气性能。此结论与张彬等^[20]的研究结果一致。

表 3 不同配比鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵产气性能指标比较

处理	容积产气率/(L(L·d))	TS 产气量/(L/g)	VS 产气量/(L/g)	容积产甲烷率/(L(L·d))	TS 产甲烷量/(L/g)	VS 产甲烷量/(L/g)
CK	0.135± 0.006e	0.111± 0.005e	0.182± 0.008e	0.072± 0.003e	0.060± 0.003f	0.098± 0.004e
M1	0.228± 0.005d	0.196± 0.004d	0.308± 0.006d	0.134± 0.003d	0.115± 0.002e	0.181± 0.004d
M2	0.268± 0.013c	0.239± 0.012c	0.364± 0.018c	0.159± 0.008c	0.141± 0.007d	0.215± 0.011c
M3	0.295± 0.015b	0.273± 0.013b	0.400± 0.020b	0.177± 0.009b	0.163± 0.008c	0.240± 0.012b
M4	0.350± 0.015a	0.336± 0.014a	0.474± 0.020a	0.210± 0.007a	0.201± 0.006a	0.284± 0.009a
M5	0.312± 0.026b	0.313± 0.026a	0.423± 0.035b	0.185± 0.014b	0.186± 0.014b	0.251± 0.019b

注:表中数据为平均值± 标准差 ,同列数据后不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

3 结论与讨论

本试验中的单一鸡粪发酵产气效果并不理想 ,可能是由于鸡粪的碳氮比不合适 ,加入一定比例的玉米秸秆后 ,可以提高发酵体系中有机碳的含量 ,这样可以保证发酵系统中微生物的长期营养需求^[21]。而高浓度的玉米秸秆会导致发酵体系酸化 ,将鸡粪以适当比例投入高浓度秸秆发酵体系中可以降低系统酸化的概率 ,使得发酵体系可以稳定产气。由此可以得出 ,鸡粪和玉米秸秆配混后进行厌氧发酵 ,较单一鸡粪可显著提升产气量 ,混合厌氧发酵在产气方面比单一物料更具优势。周莎等^[22]研究发现 ,鸡粪与麦秆的混合比例在一定范围内时 ,发酵体系表现出明显的产气优势 ;超过这一范围时 ,厌氧发酵系统产气优势消失。这与本试验的研究结果一致。

挥发性固体量(VS)比值对鸡粪与玉米秸秆混合厌氧发酵产气性能方面具有显著影响 ,综合累积产气量、产甲烷总量及容积产气率、TS 产气量等指标 ,鸡粪 :玉米秸秆(VS 比)=6 : 4 时 ,具有较好的产气性能和发酵潜力 ,累积产气量、容积产气率、TS 产气量及 VS 产气量均高于其他处理 ,分别达 12 933.23 mL、0.350 L/(L·d)、0.336 L/g 和 0.474 L/g ,与单一鸡粪处理(CK)相比 ,分别提高了 159.62%、159.26%、202.70%和 160.44%。发酵过程甲烷含量稳定 ,平均甲烷含量达 60.48% ,与单一鸡粪处理(CK)相比 ,提高了 9.32%。由此可知 ,鸡粪 :玉米秸秆(VS 比)=6 : 4 为最佳配比组合。

参考文献:

[1] 刘茹飞 ,陈刚 ,王明超 ,等. 我国典型禽畜粪便资源化技术研究

[J]. 再生资源与循环经济 ,2017 ,10(3) :37-40.
 [2] 李丹阳 ,孙少泽 ,马若男 ,等. 山西省畜禽粪污年产生量估算及环境效应[J]. 农业资源与环境学报 ,2019 ,36(4) :480-486.
 [3] 潘君廷 ,马俊怡 ,邱凌 ,等. 生物炭介导鸡粪厌氧消化性能研究[J]. 中国环境科学 ,2016 ,36(9) :2716-2721.
 [4] 韩鲁佳 ,闫巧娟 ,刘向阳 ,等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报 ,2002 ,18(3) :87-91.
 [5] 张雪松 ,朱建良. 秸秆的利用与深加工 [J]. 化工时刊 ,2004 ,18(5) :1-5.
 [6] 边炳鑫 ,赵由才. 农业固体废物的处理与综合利用[M]. 北京 :化学工业出版社 ,2005 :6-7.
 [7] 四川省生物研究所. 沼气(资料汇报) .第 2 集[M]. 重庆 :科学技术文献出版社重庆分社 ,1977.
 [8] 毕婷婷 ,胡涵 ,尹芳 ,等. 我国农业供给侧结构性改革之关键——厌氧消化技术[J]. 天津农业科学 ,2018 ,24(11) :21-24.
 [9] 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 ,36(5) :88-91.
 [10] WEILAND P. Anaerobic waste digestion in Germany- status and recent developments[J]. Biodegradation ,2000 ,11(6) :415-421.
 [11] 张翠丽 ,李轶冰 ,卜东升 ,等. 牲畜粪便与麦秆混合厌氧发酵的产气量、发酵时间及最优温度[J]. 应用生态学报 ,2008 ,19(8) :1817-1822.
 [12] 张娟. 不同原料配比产气效果及沼液中产甲烷菌群落结构研究[D]. 兰州 :兰州大学 ,2012.
 [13] 白洁瑞 ,李轶冰 ,郭欧燕 ,等. 不同温度条件粪秆结构配比及尿素、纤维素酶对沼气产量的影响 [J]. 农业工程学报 ,2009 ,2(15) :188-193.
 [14] 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.
 [15] BARDIYA N ,GAUR A C. Effects of carbon and nitrogen ratio on rice straw biomethanation [J]. Journal of Rural Energy ,1997 ,4(1/4) :1-16.
 [16] 庞震鹏 ,李永平 ,朱教宁 ,等. 温度对牛粪与番茄秸秆厌氧发酵产气的影响[J]. 山西农业科学 ,2018 ,46(8) :1338-1343.
 [17] 覃国栋 ,刘荣厚 ,孙辰. NaOH 预处理对水稻秸秆沼气发酵的

(下转第 1134 页)

垃圾或猪粪对黑水虻幼虫生长存在显著影响,餐厨垃圾与秸秆混合较猪粪更促进黑水虻幼虫体质量的增加。已有研究表明,应用猪粪饲喂的黑水虻幼虫脂肪含量为 28%,而用富含油脂的食物残渣饲喂幼虫脂肪含量则为 42%~49%^[14-15]。代发文等^[2]报道餐厨垃圾浆料优于猪粪饲喂的黑水虻幼虫干物质转化率。餐厨垃圾的油脂、盐分、有机质等含量较高,例如,油脂平均含量为 3%,局部地区含量达 8%,含盐量在 1.5%~3.6%^[16-17]。猪粪中含水较多,有机质和养分含量较低,发热量低。餐厨垃圾与猪粪中油脂、有机质等含量的差异是否为影响黑水虻转化效率的主要因素还需要进一步研究。

本试验发现秸秆与餐厨垃圾体积比为 1:1 混合时,有利于黑水虻幼虫体质量增加,具体原因尚不明确。秸秆主要成分是纤维素、半纤维素和木质素等,经过菌剂处理后秸秆中木质素含量减少,可能增加了适口性。另外,秸秆中含有的粗蛋白、矿物质、维生素等可能弥补餐厨垃圾中营养成分的不足,有利于黑水虻幼虫的生长。添加一定比例的秸秆颗粒,增大了餐厨垃圾的空隙,可能便于虫体呼吸、移动,从而提高虫体的运动能力,增加取食量和转化率。本研究初步探索了利用秸秆废弃物饲喂黑水虻幼虫的可行性,对成本因素考虑不足。若进行推广应用,还需对餐厨垃圾收集运输、秸秆发酵等成本进行综合核算,以探寻具有市场竞争力的技术体系。

参考文献:

- [1] 杨定,张婷婷,李竹,等.中国水虻总科志[M].北京:中国农业大学出版社,2014.
- [2] 代发文,葛远凯,梁伟才,等.黑水虻处理餐厨垃圾浆料的生产性能及其幼虫生长发育规律研究[J].养猪,2017(6):73-75.
- [3] 陈海洪,张磊,张国生,等.黑水虻处理新鲜猪粪效果初探[J].江西畜牧兽医杂志,2018(4):25-28.
- [4] 陈兆强,廖菲,孙铮.黑水虻幼虫在不同比例牛粪与麸皮混合基质中生长规律的研究[J].热带农业工程,2018,42(2):7-10.
- [5] NGUYEN TTX,TOMBERLIN J K. Ability of black soldier fly

(Diptera:Stratiomyidae) larvae to recycle food waste [J]. Environmental Entomology, 2015, 44:406-410.

- [6] DIENER S,SOLANO NMS. Biological treatment of municipal organic waste using black soldier fly larvae [J]. Waste Biomass Valorization, 2011, 2(4):357-363.
- [7] ERICKSON M C,ISLAM M. Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* Serovar enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly [J]. Journal of Food Protection, 2004, 67:685-690.
- [8] LI Q,ZHENG L. Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera:Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production [J]. Waste Manage, 2011, 31:1316-1320.
- [9] LALANDER C H,FIDIELAND J. High waste-to-biomass conversion and efficient *Salmonella* spp. reduction using black soldier fly for waste recycling [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35:261-271.
- [10] FINKE M. Complete nutrient content of four species of feeder insects[J]. Zoo Biology, 2013, 32:27-36.
- [11] VAN H,VAN I,KLUNDER H et al. Edible insects future prospects for food and feed security[R]. Expert consultation meeting on assessing the potential of insects as food and feed in assuring food security. Rome:Food and Agriculture Organization, 2013.
- [12] PARK K,CHOI Y. Nutritional value of black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera:Stratiomyidae) as a feed supplement for fish[J]. Journal of Sericultural and Entomological Science, 2013, 51:95-98.
- [13] 柴志强,朱彦光.黑水虻在餐厨垃圾处理中的应用[J].科技展望,2016(26):321.
- [14] NEWTON L,SHEPPARD C,WATSON D et al. Using the black soldier fly *Hermetia illucens* as a value-added tool for the management of swine manure. In:Report of the animal and poultry waste management center [D]. Raleigh:North Carolina State University, 2005.
- [15] BARRY T. Evaluation of the economic, social and biological feasibility of bioconverting food wastes with the black soldier fly (*Hermetia illucens*) [D]. Denton:University of North Texas, 2004.
- [16] 沈超青.广州市餐厨垃圾的资源化利用研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [17] 孟勤宪.成都市餐厨垃圾处置方式优化选择研究[D].成都:西南交通大学,2010.

(责任编辑:安清秀)

(上接第 1097 页)

影响[J].农业工程学报,2011,27(Z1):59-63.

- [18] 艾平,张衍林,盛凯,等.稻秸厌氧发酵产沼气预处理[J].农业工程学报,2010,26(7):266-271.
- [19] 李淑兰,刘萍,梅自力.中高温条件下不同碳氮比对鸡粪原料厌氧发酵产气特性的影响[J].中国沼气,2018,36(5):73-76.
- [20] 张彬,蒋滔,高立洪,等.猪粪与玉米秸秆混合中温发酵产气效果[J].环境工程学报,2014,8(11):4991-4997.

- [21] CHU L L,FENG Y Z,LI Y B et al. Characteristics of anaerobic digestion of pig dung, wheat straw combination in various ratios [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2011, 39(2):185-190.

- [22] 周莎,王晓娇,张彤,等.鸡粪与麦秆混合厌氧发酵环境中各因子响应关系研究[J].环境科学学报,2016,36(3):932-939.

(责任编辑:李素娟)