

鸡粪和玉米秸秆混合干发酵制微藻培养液膨胀特性分析

张坤^{1*#}, 王美茵¹, 于佳滢², 车鑫¹, 朱良卓¹, 王云慧¹

¹沈阳航空航天大学, 能源与环境学院, 辽宁 沈阳

²沈阳航空航天大学, 民用航空学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2023年3月13日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

摘要

为提高厌氧消化系统产沼气性能, 本实验通过研究在鸡粪中添加不同配比的玉米秸秆(0%、10%、20%)进行连续的厌氧发酵实验, 研究了不同配比的玉米秸秆对甲烷产率等常规参数变化的影响, 对其物料膨胀率、pH和VFAs变化趋势、产气特性进行分析得出最适合实际生产的物料组成。研究表明: 10%玉米秸秆添加组获得最大甲烷的容积产气量为227.66 ml/gVS, 较纯鸡粪实验组累计产甲烷量提高了18%, 且相较于20%玉米秸秆添加组拥有更低的污泥膨胀率。玉米秸秆的添加可明显提升鸡粪物料的甲烷含量和甲烷产率, 在鸡粪的发酵过程中添加少量秸秆有助于调节C/N, 调节微生物的营养结构以及防止氨抑制现象的产生, 提高产气效率。但是随着玉米秸秆添加量增高, 会使整个厌氧发酵周期变长, 降低了原料的利用率, 所以在实际工程应用中10%玉米秸秆添加量为最佳配比。

关键词

干式厌氧发酵, 混合发酵, 产气量, 污泥膨胀

Swelling Characteristics of Microalgae Culture Medium from Chicken Manure and Corn Straw Mixed by Dry Fermentation

Kun Zhang^{1*#}, Meiyin Wang¹, Jiaying Yu², Xin Che¹, Liangzhuo Zhu¹, Yunhui Wang¹

¹School of Energy and Environment, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

²Civil Aviation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: Mar. 13th, 2023; accepted: Apr. 18th, 2023; published: Apr. 25th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张坤, 王美茵, 于佳滢, 车鑫, 朱良卓, 王云慧. 鸡粪和玉米秸秆混合干发酵制微藻培养液膨胀特性分析[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(2): 405-413. DOI: 10.12677/aep.2023.132051

Abstract

In order to improve the biogas production performance of the anaerobic digestion system, this experiment conducted continuous anaerobic fermentation experiment by adding different proportions of corn straw (0%, 10%, 20%) to chicken manure, and studied the influence of different proportions of corn straw on the change of methane yield and other conventional parameters. The expansion rate, pH and VFAs variation trend, gas production characteristics of the material were analyzed to get the most suitable material composition for actual production. The results showed that the maximum soluble gas production of methane was 227.66 ml/gVS in the 10% corn straw group, which increased the cumulative methane production by 18% compared with that in the pure chicken manure group, and the sludge bulking rate was lower than that in the 20% corn straw group. The addition of corn straw can significantly increase the methane content and methane yield of chicken manure materials. Adding a small amount of corn straw in the fermentation process of chicken manure is helpful to regulate C/N, regulate the nutrient structure of microorganisms, prevent the occurrence of ammonia inhibition phenomenon, and improve the gas production efficiency. However, with the increase of corn straw addition, the whole anaerobic fermentation cycle will become longer and the utilization rate of raw materials will be reduced. Therefore, 10% corn straw addition is the best proportion in practical engineering application.

Keywords

Dry Anaerobic Fermentation, Mixed Fermentation, Gas Production Rate, Sludge Bulking

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源是各国经济发展与社会建设的重要基础,但随着世界范围内能源危机的日益加剧,生物质能受到了广泛关注与研究。厌氧发酵技术能够有效地利用大量的生物质资源,并产生 CH_4 这种清洁能源,从而能一定程度地缓解严峻的能源危机。我国畜禽粪便年产量约为 10.9 亿吨,农作物秸秆大约 9 亿吨[1]。因此,高效的处理农作物秸秆与畜禽粪便是我国亟待解决的重要环境问题,提高其综合利用率,不仅有利于解决环境污染问题,还能缓解目前严峻的能源危机,也是可持续发展的题中应有之义[2]。

我国沼气工程中,粪便、秸秆等单一物料湿法发酵较常见,但单一原料发酵易出现甲烷产量较低、体系酸败、某些元素抑制等问题[3]。混合厌氧发酵则将两种或两种以上原料按比例混合后作为发酵底物,不仅能解决单发酵体系不稳定的问题,而且还可促进微生物间协同作用[4],从而加速反应进程,提高甲烷产量。当前对于厌氧发酵技术的研究也大多集中于对混合厌氧发酵原料及产气特性方面,并已取得了很多成果。李家威发现在总固体浓度为 15% 的玉米秸秆厌氧发酵体系酸化临界点加入牛粪可有效防止体系酸化,其中粪秆比为 1:1 时效果最好,且使用牛粪将已酸化的玉米秸秆厌氧发酵体系中的固体替换 30% 可使其恢复至最佳产气效果[5]。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验原料

新鲜鸡粪:取自北票宏发食品有限公司旗下东官黄古屯肉鸡养殖基地,为成年白羽肉食鸡新鲜粪便;

秸秆：取自沈阳农村玉米秸秆，经过铡草机处理后长度 ≤ 2 mm；

污泥：取自沈阳市北部污水处理厂活性污泥脱水后含水率为 80% 的剩余污泥，取回后驯化 24 h；

四联 30 L 厌氧发酵在线监测反应器、小型厌氧消化罐、气体流量计、恒温水浴锅、多功能水质分析仪等。

2.2. 实验装置

本次实验采用序批式厌氧发酵方法，一次性投加物料发酵，发酵过程中不添加新物料，当发酵结束以后，排出残余物再重新投加新物料发酵，一般进料固体浓度在 15%~40% 之间。

序批式厌氧发酵是利用多个厌氧发酵反应器并联，按时间顺序间歇式运行，初始进料含固率大于 25% 的厌氧发酵产沼气过程，具有原料处理量大、容积产气率高、沼液排放量少等特点，并且操作简单、故障率低，易于处理纤维质含量高、难降解的农业固体废弃物，如作物秸秆、畜禽粪便。研究表明，对于处理高木质素和纤维素的物料，若在动力学速率低、存在水解限制时，序批式反应器比全混式连续反应器处理效率高。且序批式发酵水解程度更高，甲烷产量更大，投资连续式进料系统减少约 40% 且由于其设计简单、易于控制、对粗大的杂质适应能力强，投资少，适合于在发展中国家推广应用。

本次实验序批式厌氧发酵试验装置由温度控制器、反应设备、气体收集设备、排水收集设备和连接设备五部分组成(见图 1)。各个装置相连接组成贯通式密闭设备，这里反应设备、气体收集设备和排水收集设备的有效容积为 1 L。整个小型厌氧发酵生化反应器的气密性经过严格控制，保证其厌氧环境。

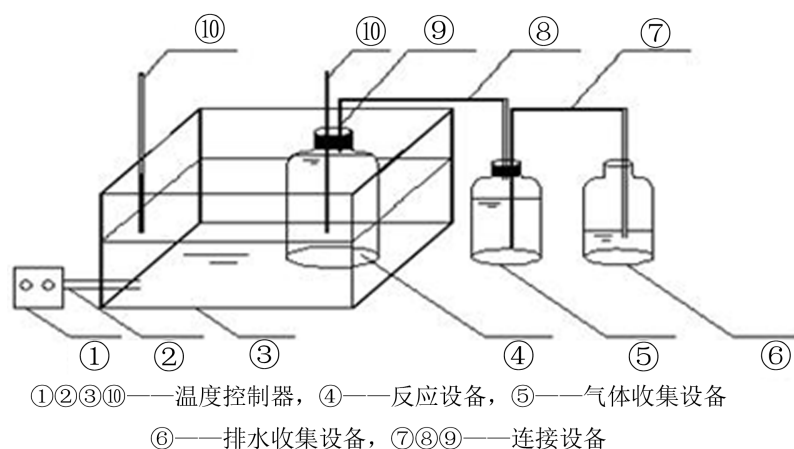


Figure 1. Diagram of sequencing batch anaerobic digestion experimental equipment
图 1. 序批式厌氧消化实验装置图

2.3. 实验步骤

取 6 个序批式玻璃瓶，标号 P1~P6。将 P1~P3 装入 2 号罐出料，每个 1 KG，将 P4~P6 装入 3 号罐出料，每个 0.5 KG。随后在 P1~P3 中分别加入 10% 秸秆混合物料 0.05 kg、0.1 kg、0.2 kg，在 P4~P6 中分别加入 20% 秸秆混合物料 0.05 kg、0.1 kg、0.2 kg。混匀后铺平，连接水封罐保证密封，在玻璃瓶侧面用红色笔记录高度，保证 6 个罐体的水浴温度在 35℃，每 6 h 观察一次各罐体的膨胀高度(夜间延长至 12 h 观察)，破坏性实验共计进行 7 天。

2.4. 检测指标与方法

VFAs 和 pH 的变化与厌氧发酵过程中水解酸化速率、产甲烷菌的降解效率有很大的联系，当溶液中

pH 过低时会抑制厌氧发酵过程中的产甲烷菌的活性, 进一步抑制挥发性有机酸的生成, 降低甲烷产量。甲烷产气量也是表征厌氧消化系统的一个重要参数。氨氮的浓度直接影响整个厌氧消化系统。当氨氮浓度较低时, 对系统中的微生物繁殖有非常好的促进作用, 可以提高厌氧消化的稳定性, 但是当氨氮浓度超过一定范围时就会对微生物产生毒害作用, 抑制微生物的活性, 降低厌氧消化系统的甲烷产量。

甲烷产量采用 LML-1 型湿式气体流量计和 GT901 型甲烷气体检测仪进行测量; TS 含量采用重量法进行测定; COD 浓度采用重铬酸钾法进行测定; 氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)浓度采用纳氏试剂分光光度法进行测定; 挥发性脂肪酸(VFAs)浓度采用分光光度计比色法进行测定; pH 值采用 pH 计进行测定[6]。

3. 实验结果及分析

3.1. 物料膨胀实验(破坏性实验)结论

破坏性实验将物料按配比装入 P1~P6 六个序批式反应器后置于 37℃ 水浴锅内进行加热, P1~P6 初始高度为 78 mm, 83 mm, 108 mm, 80 mm, 96 mm, 120 mm。实验第一天膨胀较为明显, 从第二天开始膨胀高度逐渐变小, 甚至趋于稳定, 当实验进行至第五天时, P1~P6 六组实验均膨胀完毕, 其最终膨胀高度分别为 12 mm, 12 mm, 14 mm, 15 mm, 16 mm, 16 mm; 其膨胀率分别为 13.33%, 12.63%, 11.48%, 15.79%, 14.28%, 11.76%。P1~P6 膨胀率变化趋势如下图所示(见图 2)。

Figure 2. Change of expansion rate of materials with different proportions
图 2. 不同配比物料膨胀率变化

通过观察六组实验膨胀率整体变化可以看出六组实验膨胀率均在 10% 以上, 膨胀较为明显。在 P1~P3 同一配比条件下, 添加不同质量的物料, 可以看出膨胀高度随着添加物料质量的增大而提高, 而膨胀率随着添加物料质量的提高而逐渐减小, 这是由于实验初始所添加的物料质量不同, 物料在罐内的初始高度有所差别, P3 物料初始高度较大, 所以通过计算的膨胀率较小。通过 P4~P6 膨胀结果同样可以看出, 膨胀高度会随添加物料质量的增大而提高, 而膨胀率会由于初始物料高度基数较大的原因而逐渐减小[7]。通过对比 P1 和 P4, P2 和 P5, P3 和 P6 不同物料配比条件下, 相同质量膨胀率变化, 可以看出 20% 秸秆组比 10% 秸秆组膨胀率高, 秸秆所占比例越高, 物料膨胀高度越大, 膨胀越为明显。所以在实际工业生产过程中, 必须留出 20% 及以上的容积去接纳物料的膨胀体积以及所产沼气体积来防止物料膨胀, 随着秸秆添加比例的增加所预留的有效容积也应增大。

3.2. VFAs 与 pH 相关性分析研究

厌氧发酵过程中 VFAs 和 pH 的变化情况是判定厌氧消化系统是否稳定运行的重要指标。VFAs 和 pH

的变化与厌氧发酵过程中水解酸化速率、产甲烷菌的降解效率息息相关[8]，当溶液中 pH 过低时会抑制厌氧发酵过程中的产甲烷菌的活性，进一步抑制挥发性有机酸的生成，降低甲烷产量[9]。因此维持厌氧发酵过程中 pH 值在一个稳定的范围内波动，对整个实验来说至关重要。实验中选取三组实验 0%、10%、20%，来探究不同的秸秆添加比例对厌氧发酵过程中 VFAs 和 pH 的变化影响。实验结果如下图所示(见图 3)，实验初期，由于大分子有机物的水解酸化作用，产生大量的氢离子，使得溶液中 pH 下降，伴随的是 VFAs 含量不断攀升达到高峰。对比三组实验可以看出 0%、10%、20% 秸秆添加组 VFAs 浓度在第 16 天、第 13 天和第 28 天达到峰值，其中 10% 实验组达到最高峰值 5.68 mg/mL，随后逐步下降到 2.32 mg/mL。可以看出在鸡粪中添加一定量的玉米秸秆改变 C/N 可以提高厌氧发酵反应初期有机物的水解酸化效率，提高原料的利用率，提高甲烷产量。在三组实验中，pH 变化均比较稳定最终维持在 7.0~8.0 之间，此时产甲烷古菌活性最高，产甲烷效果最好。

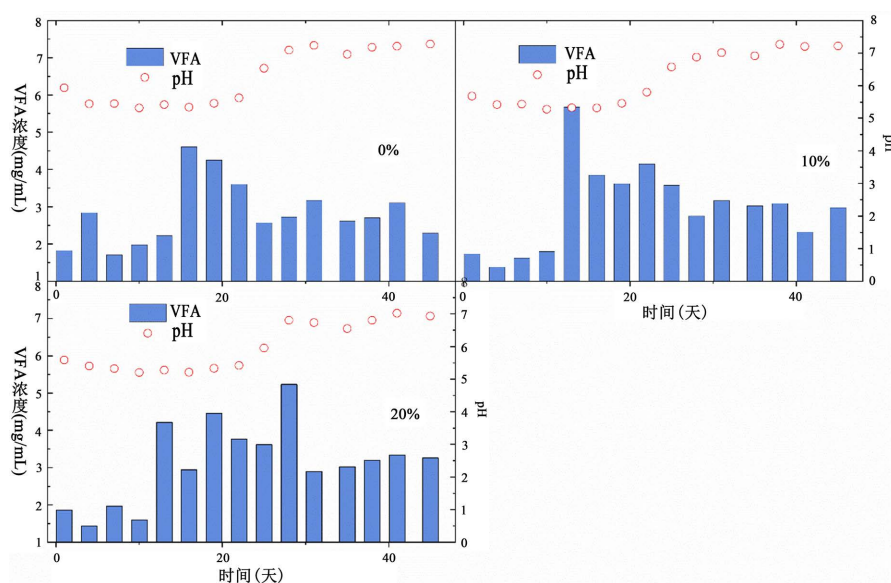


Figure 3. Changes of pH and VFA in cofermentation with different proportions
图 3. 不同配比共发酵中 pH 和 VFA 的变化

3.3. 甲烷产气量分析

Figure 4. Variation of daily methane production during anaerobic digestion
图 4. 厌氧消化过程中甲烷日产量变化

甲烷产气量是表征厌氧消化系统的一个重要参数,可以用来评估厌氧消化系统的效率,以及厌氧消化系统的稳定性[10]。对比三组实验可知(见图4),实验第一天产气均较高达到10 mL/gVS左右,随后实验开始进入漫长的停滞期,原因是污泥的活性较差,污泥中的微生物需要适应环境,随着反应的进行,各组实验在25天左右达到产期高峰,其中10%玉米秸秆添加量的实验组甲烷日产量最大为16.03 mL/gVS,其次是0%和20%秸秆添加组,最高甲烷日产气量分别为13.75 mL/gVS和9.46 mL/gVS。

图5为三组实验厌氧消化过程中累计甲烷产量变化(见图5),可以看出三组实验前期产甲烷量不高,曲线变化比较平缓,随着反应的进行甲烷产气量逐步增多并最后趋于平缓。其中10%玉米秸秆添加组表现出色,实验初期到结束甲烷产量均高于其他两组实验,20%玉米秸秆添加组的甲烷产量在实验后期反超0%玉米秸秆添加组,分析原因是由于过量添加玉米秸秆导致原料中木质素等难降解的有机物增多,延长了厌氧发酵系统的酸化时间,使得实验后期甲烷产量较高于其他两组实验。三组实验0%、10%、20%玉米秸秆添加量最终的甲烷累计产量为185.69 mL·gVS⁻¹、227.66 mL·gVS⁻¹、196.80 mL·gVS⁻¹,甲烷浓度分别为57.22%、61.12%、52.62%。实验表明在鸡粪中添加少量玉米秸秆可以有效的提高厌氧发酵系统中甲烷的产量,但是过量添加玉米秸秆由于木质素含量较高,难以降解,反而会影响厌氧消化系统的甲烷产量,而且玉米秸秆的添加可以提高原料中的C/N,进而提高厌氧消化过程中微生物活性,提高厌氧消化系统中微生物降解有机质的水解速率和产甲烷速率,最终提高累积甲烷产量。

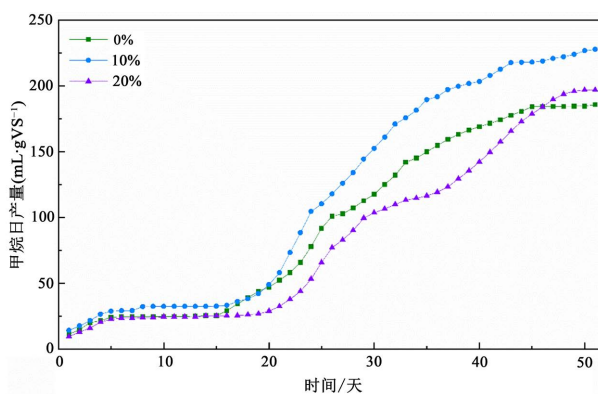


Figure 5. Variation of cumulative methane production in anaerobic digestion
图5. 厌氧消化累积甲烷产量变化

3.4. 甲烷日产量与氨氮浓度变化关系分析

氨氮在厌氧发酵系统中主要以NH₃、NH₄⁺形式表现,氨氮的浓度直接影响整个厌氧消化系统。当氨氮浓度较低时,对系统中的微生物繁殖有非常好的促进作用,可以提高厌氧消化的稳定性,但是当氨氮浓度超过一定范围时就会对微生物产生毒害作用,抑制微生物的活性,降低厌氧消化系统的甲烷产量。因此,控制消化液中氨氮浓度对提高厌氧消化效率和累积甲烷产量至关重要。三组实验甲烷日产量与氨氮浓度变化关系下图所示(见图6),对比三组实验可得氨氮浓度的变化整体呈现先上升后下降的变化趋势,实验初期原料中大量蛋白质等大分子物质被水解酸化,导致消化液中氨氮浓度升高,随着反应的进行厌氧消化系统中生物丰度增加,大量氨氮被生物利用参与自身代谢。随着氨氮浓度的降低,甲烷产量也逐渐提升,可以看出甲烷日产量随氨氮浓度的变化而变化。在三组0%、10%、20%玉米秸秆添加量实验中氨氮浓度分别在第22天、第13天和第16天达到峰值,分别为813.65 mg·L⁻¹、762.85 mg·L⁻¹和727.16 mg·L⁻¹,且在本次实验中三组实验氨氮最高浓度均低于900 mg·L⁻¹,说明氨氮浓度并不会对厌氧消化反应产生明显的抑制作用。实验结果表明在厌氧消化系统中添加玉米秸秆可以有效缩短氨氮达到峰值的时间,让微

生物快速繁殖增加整个系统的生物丰度，提高厌氧消化反应的速率。

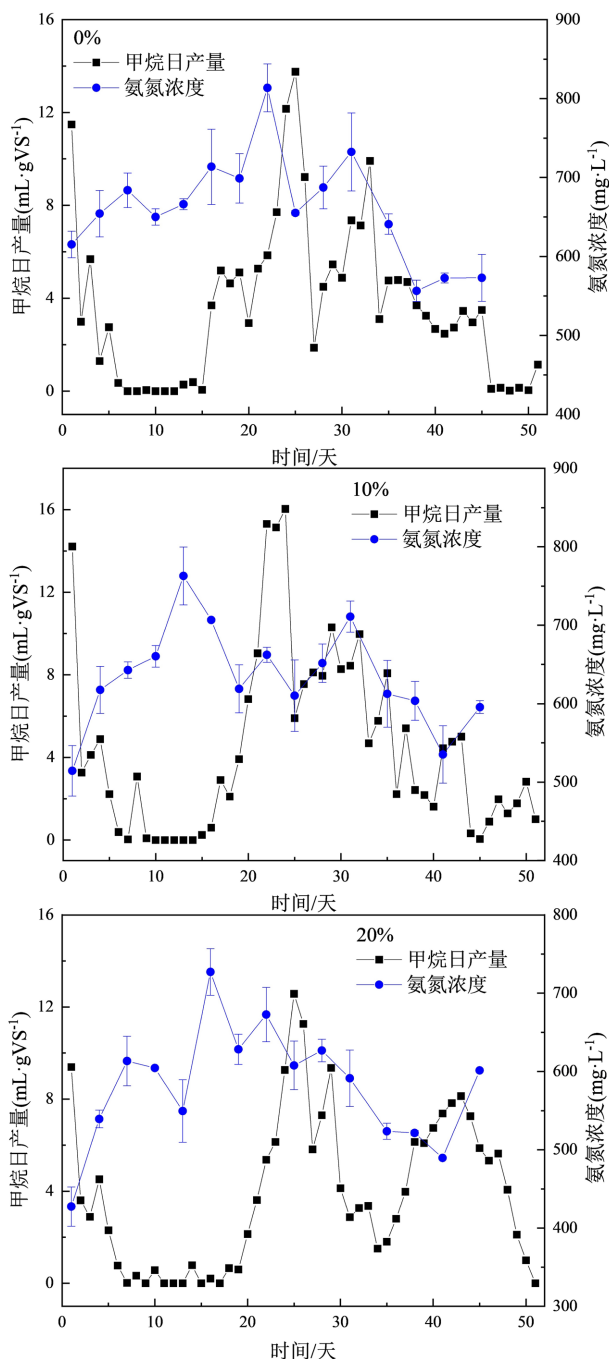


Figure 6. Relationship between biogas yield and ammonia nitrogen concentration in anaerobic digestion process

图 6. 厌氧消化过程中沼气产率与氨氮浓度变化关系

3.5. 秸秆降解前后电镜分析

通过下图(见图 7)为实验前后秸秆降解情况的变化，可以明显看出实验前秸秆的表面结构十分完整，实验后秸秆大部分表面结构呈现破碎状，秸秆中的纤维素和木质素在整个水力停留时间内明显得到了有

效的降解，从而也可以看出在实验后期微生物活性较高，厌氧发酵速率较为稳定[11]。

综上所述可以看出，少量秸秆的添加能够提高厌氧发酵的产气效率，待实验后期产气达到稳定后，10%秸秆添加组产气量略高于20%秸秆添加组，而且10%秸秆添加组实验后期VFAs变化更加稳定，COD降解速率相对较高，同时由于实验装置的进料方式为上进下出，20%的秸秆添加量会使秸秆膨胀现象严重，导致出料困难，推荐实验中10%秸秆添加量为最佳配比。

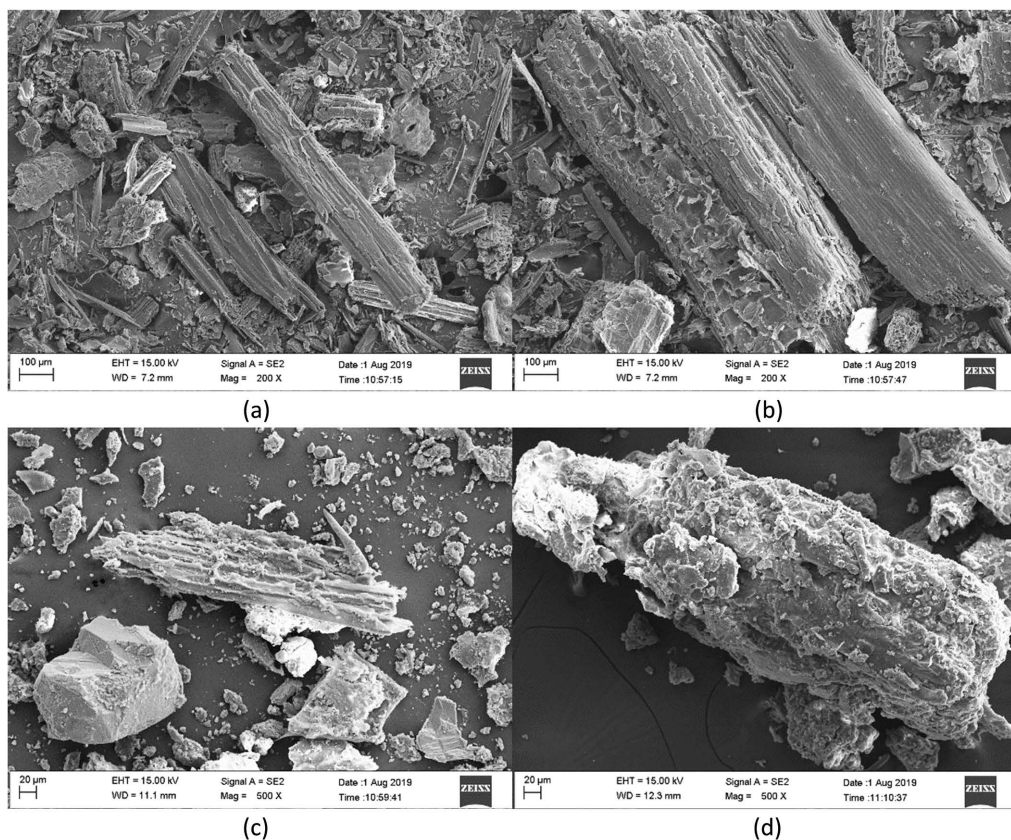


Figure 7. Automation professional practice teaching system diagram. (a) and (b) are electron microscopic images of straw surface structure before the experiment; (c) electron microscopic image of straw surface structure after 10% straw addition group experiment; (d) electron microscopic image of straw surface structure after 20% straw addition group experiment

图 7. 自动化专业实践教学体系图。(a) (b)为实验前的秸秆表面结构电镜图；(c)为10%秸秆添加组实验后秸秆表面结构电镜图；(d)为20%秸秆添加组实验后秸秆表面结构电镜图

4. 结论

玉米秸秆的适量添加可明显提升鸡粪物料的甲烷含量和甲烷产率，在鸡粪的发酵过程中添加少量秸秆有助于调节C/N，进而调节微生物的营养结构以及防止氨抑制现象的产生，提高厌氧消化系统中微生物降解有机质的水解速率和产甲烷速率，最终提高累积甲烷产量；可以提高厌氧发酵反应初期有机物的水解酸化效率，提高原料的利用率，且pH稳定在7.0~8.0之间，产甲烷古菌活性最高，产甲烷效果最好；也可以有效缩短氨氮达到峰值的时间，让微生物快速繁殖增加整个系统的生物丰度，提高厌氧消化反应的速率。

但是玉米秸秆的添加量应该控制在一定范围内，秸秆所占比例越高，物料膨胀高度越大，膨胀越为明显，所以在实际工业生产过程中，必须留出20%及以上的容积来防止物料膨胀，随着秸秆添加比例的

增加所预留的有效容积也应增大。由于本次实验采用伴热带加热方式,设备内原料维持在 $(35 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,未达到最适中温消化温度 37°C 。后续工程中应根据实际情况适当改进原料加热的方式及加热参数设定。

基金项目

沈阳航空航天大学 2022 年大学生创新创业训练计划项目:不同 N/P 比对沼液培养微藻体系中的各项物质含量的影响研究(Z202210143061)。

参考文献

- [1] 林海. 规模养殖场无法规避的重要课题: 畜禽养殖废弃物资源化利用[J]. 北方牧业, 2017(15): 13-14.
- [2] 刘娜, 张树礼. 北方地区畜禽养殖粪污治理技术研究进展[J]. 环境与发展, 2014(4): 124-129.
- [3] 李金平, 崔维栋, 黄娟娟, 等. 多元混合物料协同厌氧消化产甲烷性能研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(3): 58-63.
- [4] Li, Y., Xu, F., Li, Y., *et al.* (2018) Reactor Performance and Energy Analysis of Solid State Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure with Corn Stover and Tomato Sesidues. *Wasted Management*, **73**, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.041>
- [5] 李家威. 玉米秸秆高负荷沼气发酵体系建立及酸化再平衡研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
- [6] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] Franzmann, P.D., Liu, Y., Balkwill, D.L., *et al.* (1997) *Methanogenium frigidum* sp. nov. a Psychrophilic, H_2 -Using Methanogen from Ace Lake, Antarctica. *International Journal of Systematic Bacteriology*, **47**, 1068-1072. <https://doi.org/10.1099/00207713-47-4-1068>
- [8] Mahdy, A., Bi, S., Song, Y., Qiao, W. and Dong, R. (2020) Overcome Inhibition of Anaerobic Digestion of Chicken Manure under Ammonia-Stressed Condition by Lowering the Organic Loading Rate. *Bioresource Technology Reports*, **9**, 100359. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100359>
- [9] Elefsiniotis, P. and Wareham, D.G. (2007) Utilization Patterns of Volatile Fatty Acids in the Denitrification Reaction. *Enzyme & Microbial Technology*, **41**, 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.12.006>
- [10] Zhao, Y.B., Sun, F.R., Yu, J.D., Cai, Y.F., Luo, X.S., Cui, Z.J., Hu, Y.G. and Wang, X.F. (2018) Co-Digestion of Oat Straw and Cow Manure during Anaerobic Digestion: Stimulative and Inhibitory Effects on Fermentation. *Bioresource Technology*, **269**, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.040>
- [11] Kung, C.C. and Mu, J.E. (2019) Prospect of China's Renewable Energy Development from Pyrolysis and Biochar Applications under Climate Change. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **114**, 109343. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109343>