

# 生物炭对人粪厌氧发酵产沼气性能影响研究

程晓东, 张 頔, 赵胜楠, 孙浩翔, 赵叶明, 张东刚, 赵新颖, 王 鑫, 崔彦如\*  
(吉林省农业科学院农村能源与生态研究所, 长春 130033)

**摘要:** 为提高人粪无害化资源化利用效果, 本研究以人粪为厌氧发酵原料, 以猪粪发酵沼液为接种物, 对玉米秸秆、小麦秸秆、水稻秸秆生物炭分别在 5%、10%、20% 的添加比例时对厌氧发酵产甲烷含量、累积产气量等指标的影响进行研究。结果表明: 在 35 °C 恒温条件下厌氧发酵 40 d, 各处理组累积产气量最高依次为添加 10% 水稻秸秆生物炭 (C<sub>2</sub>) 组, 添加 10% 小麦秸秆生物炭 (B<sub>2</sub>) 组以及添加 20% 玉米秸秆生物炭 (A<sub>3</sub>) 组, 分别为 6 346 mL、5 044 mL、4 621 mL; 对照组以及处理组的粪大肠杆菌灭活率和蛔虫卵死亡率的结果均大于 99%, 达到了无害化处理的目的; 在处理组的厌氧发酵体系中检测到对产气效果具有明显积极影响的优势菌群 *Proteobacteria* 和 *Synergistetes*, 表明生物炭对人粪厌氧发酵产沼气具有积极作用。

**关键词:** 人粪; 生物炭; 厌氧发酵; 沼气; 累积产气量

中图分类号: S216.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2024)05-0092-08

## Influence of Biochar on Anaerobic Methane Production from Human Feces

CHENG Xiaodong, ZHANG Di, ZHAO Shengnan, SUN Haoxiang, ZHAO Yeming, ZHANG Donggang,  
ZHAO Xinying, WANG Xin, CUI Yanru\*

(Institute of Rural Energy and Ecology, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to enhance the harmless and resourceful utilization of human feces, this study utilized human feces as anaerobic fermentation substrate and pig manure fermentation liquid as inoculum. The effects of biochar derived from maize straw, wheat straw, and rice straw, added at proportions of 5%, 10% and 20%, were investigated on methane content and cumulative gas production during anaerobic fermentation. The results indicated that under constant temperature conditions of 35 °C for a fermentation period of 40 days, the highest cumulative gas production was observed in the group with 10% rice straw biochar (C<sub>2</sub>), followed by the group with 10% wheat straw biochar (B<sub>2</sub>), and the group with 20% maize straw biochar (A<sub>3</sub>), with respective values of 6346, 5044, 4621 mL, respectively. Both the control and treatment groups exhibited over 99% inactivation of fecal *Escherichia coli* and mortality of helminth eggs, achieving the objective of harmless treatment. In the anaerobic fermentation system of the biochar-treated groups, advantageous bacterial phyla, *Proteobacteria* and *Synergistetes* were detected, indicating a positive impact of biochar on anaerobic methane production from human feces.

**Key words:** Human feces; Biochar; Anaerobic fermentation; Methane; Cumulative gas production

随着人粪、农作物秸秆等有机废弃物产生量不断增加, 随之而来对生态环境产生的污染也越来越严重<sup>[1-2]</sup>。如今, “厕所革命”理念的不断深入和农村人居环境整治工作的持续推进, 人粪和农作物秸秆等有机废弃物的处理方式也得到改进。

人粪中所含有的氮、磷、钾等多种营养元素是一种良好的有机肥料资源<sup>[3]</sup>。由于缺乏恰当的管理, 未经过合适方法处理的人粪会带来病原体污染、臭气排放等不利于人类生产生活的问题<sup>[4]</sup>。采用厌氧发酵技术对人粪进行资源化处理, 在生产可再生能源和生产农用有机肥方面具有一定的优势, 并且可以减少化石燃料的使用和温室气体的排放, 减少环境污染, 同时带来一定的经济效益和社会效益<sup>[5]</sup>。

关于人粪厌氧发酵产沼气性能的研究较少<sup>[6]</sup>, 与动物粪便相比, 人粪的碳氮比相对较低, 单纯

收稿日期: 2023-12-18

基金项目: 吉林省农业科技创新工程项目 (CXGC2021TD017); 吉林省科技发展计划项目 (20210203122SF)

作者简介: 程晓东 (1968-), 男, 助理研究员, 主要从事农业废弃物能源化及资源化利用研究。

通信作者: 崔彦如, 女, 博士, 研究员, E-mail: nkycyr@163.com

用人粪进行厌氧发酵,发酵周期较长且容易出现氨氮抑制现象。已有研究表明,添加生物炭可以有效缩短产甲烷延滞期,吸附厌氧发酵过程的长链脂肪酸和氨氮等抑制物质,缓解氨氮抑制的问题,同时增加产甲烷菌和产乙酸细菌的共代谢作用<sup>[7-8]</sup>。将生物炭加入人粪发酵体系能够弥补单纯用人粪进行厌氧发酵的缺陷,进而提高沼气产量。不同原材料生物炭在理化性质和结构上存在差异,对厌氧发酵的影响机制也不相同。因此,以玉米秸秆、小麦秸秆、水稻秸秆生物炭为外源添加剂,对比添加不同原材料生物炭对人粪厌氧发酵产沼气性能的影响,以期为提高人粪厌氧发酵产沼气效果提供理论依据,并进一步提高固体废弃物资源化利用率。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

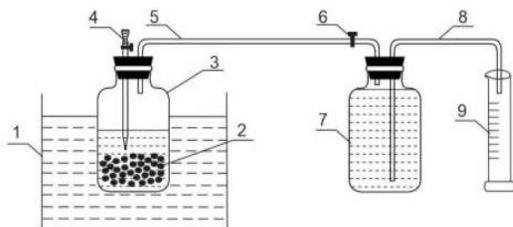
发酵原料人粪取自吉林省长春市净月区农户旱厕,玉米秸秆生物炭、小麦秸秆生物炭、水稻秸秆生物炭均购买于郑州金邦环保科技有限公司,接种物取自吉林省农业科学院沼气工程中试试验点猪粪厌氧发酵沼液(pH值为7.1)。人粪碳氮比为7.24,pH值为6.8,总固体含量(TS)为18.54%,挥发性固体含量(VS)为85.37%,生物炭理化性质见表1。

表1 生物炭理化性质

	有机碳含量/%	pH值	比表面积/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>
玉米秸秆生物炭	75	10.5~12	29.91
小麦秸秆生物炭	84	7~9	600
水稻秸秆生物炭	85	7~9	600

### 1.2 试验装置

试验装置(图1)由吉林省农业科学院农村能源与生态研究所沼气发酵实验室自行设计,主要



1.恒温水浴锅 2.厌氧发酵底物 3.发酵瓶  
4.沼气、沼液取接口 5.导气管 6.止逆阀  
7.集气瓶 8.导水管 9.量筒

图1 厌氧发酵装置示意图

由发酵装置、集气装置和集水装置组成,通过橡胶塞和玻璃胶密封,各装置之间由软管连接。发酵装置使用1 L广口瓶,集气装置为1 L广口瓶,集水装置为1 L玻璃量筒,将发酵装置连接后置于恒温水浴锅中,液体样品和气体样品在沼气、沼液取样口取样,用排水法计算产生沼气的量,装置连接处用玻璃胶和医用凡士林进行密封,防止漏气。

### 1.3 试验设计

每个发酵瓶中加入人粪215.75 g,有效容积为500 mL,接种沼液量为有效容积的20%,其余用蒸馏水补充,发酵底物总固体浓度为8%。将人粪以及接种沼液分别与玉米秸秆生物炭、小麦秸秆生物炭和水稻秸秆生物炭充分混合均匀作为发酵底物装于发酵瓶中,密封后置于恒温水浴锅中,温度设置为(35±1)°C(中温)进行厌氧发酵,厌氧发酵的时间周期为30~45 d,当产气量低于10%最大产气量时认为厌氧发酵结束。每天9:00检测产气量,每三天取沼液,检测发酵瓶中液体样品pH值。每两天收集气体样品测定沼气中的甲烷含量,确定甲烷产量。试验设计见表2。

表2 试验设计

组别	发酵原料	生物炭种类	生物炭添加量
CK组	人粪	—	—
A <sub>1</sub> 组	人粪	玉米秸秆	人粪TS的5%
A <sub>2</sub> 组	人粪	玉米秸秆	人粪TS的10%
A <sub>3</sub> 组	人粪	玉米秸秆	人粪TS的20%
B <sub>1</sub> 组	人粪	小麦秸秆	人粪TS的5%
B <sub>2</sub> 组	人粪	小麦秸秆	人粪TS的10%
B <sub>3</sub> 组	人粪	小麦秸秆	人粪TS的20%
C <sub>1</sub> 组	人粪	水稻秸秆	人粪TS的5%
C <sub>2</sub> 组	人粪	水稻秸秆	人粪TS的10%
C <sub>3</sub> 组	人粪	水稻秸秆	人粪TS的20%

### 1.4 测定指标及方法

取发酵试验过程中混合均匀的液体,分别用便携式pH计(SX-610)和凯氏定氮仪(KDY-9820)测定pH值和总氮含量(TN)。总固体含量(TS)用烘干失重量法,在105 °C烘干24 h测定;挥发性固体含量(VS)用马弗炉灼烧法,在550 °C灼烧2 h测定。总碳含量(TC)以VS(挥发性固体含量)按下式估算:C=0.47VS。采用排水法测定产气量。甲烷(CH<sub>4</sub>)含量利用气相色谱仪(岛津GC-2014C)测定。试验前后各取部分混合样品检测蛔虫卵数量(GB/T 19524.2—2004)和粪大肠杆菌群数量(HJ 347.2—2018),然后依据相应公式计

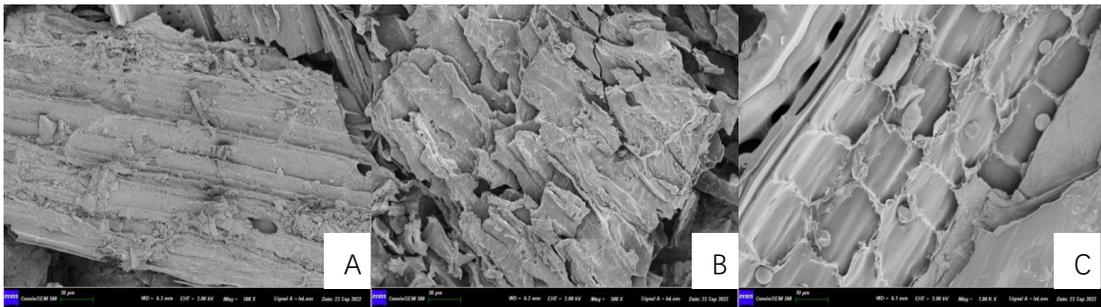
算蛔虫卵死亡率和粪大肠杆菌灭活率。采用16S rRNA 基因测序分析微生物群落结构。生物炭表面结构采用扫描电子显微镜(日立SU5000)观察。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭扫描电镜分析

不同的生物炭原料导致生物炭组成成分存在一定的差异,以玉米秸秆、小麦秸秆和水稻秸秆制备的生物炭扫描电镜图如图2所示。玉米秸秆生物炭呈现出较为明显的管状结构,骨架结构较

为突出,表面粗糙程度较为明显,同时孔道也比较规则,可以为微生物生存提供空间;小麦秸秆生物炭结构较为紧密,层状结构明显,充分增加其比表面积,从而提高吸附能力,减少有害物质抑制影响;水稻秸秆生物炭也呈现出较为明显的管状结构,相比于玉米秸秆生物炭,水稻秸秆生物炭孔数量明显增加,孔径大小规则,微孔分布均匀,同时表面的灰分含量较高,导致碳酸盐和硅酸盐含量较高,有利于吸附厌氧发酵过程中所产生的抑制物质<sup>[9-11]</sup>。



注:A为玉米秸秆生物炭,B为小麦秸秆生物炭,C为水稻秸秆生物炭

图2 生物炭扫描电镜图

### 2.2 pH值变化分析

pH值是影响厌氧发酵的重要因素<sup>[12]</sup>,产甲烷菌对发酵体系酸碱环境的要求很高,酸性条件会导致厌氧发酵反应不能正常进行,甚至酸化。因此,发酵系统中的pH值至关重要<sup>[13]</sup>。在35℃试

验条件下,对照组及处理组pH值变化情况如图3所示。处理组由于添加了生物炭,体系中pH值相对高于对照组,在厌氧发酵第20天pH值基本维持在7.0左右,保证了发酵反应在中性环境下稳定运行。处理组发酵系统中pH值的变化,说明生物

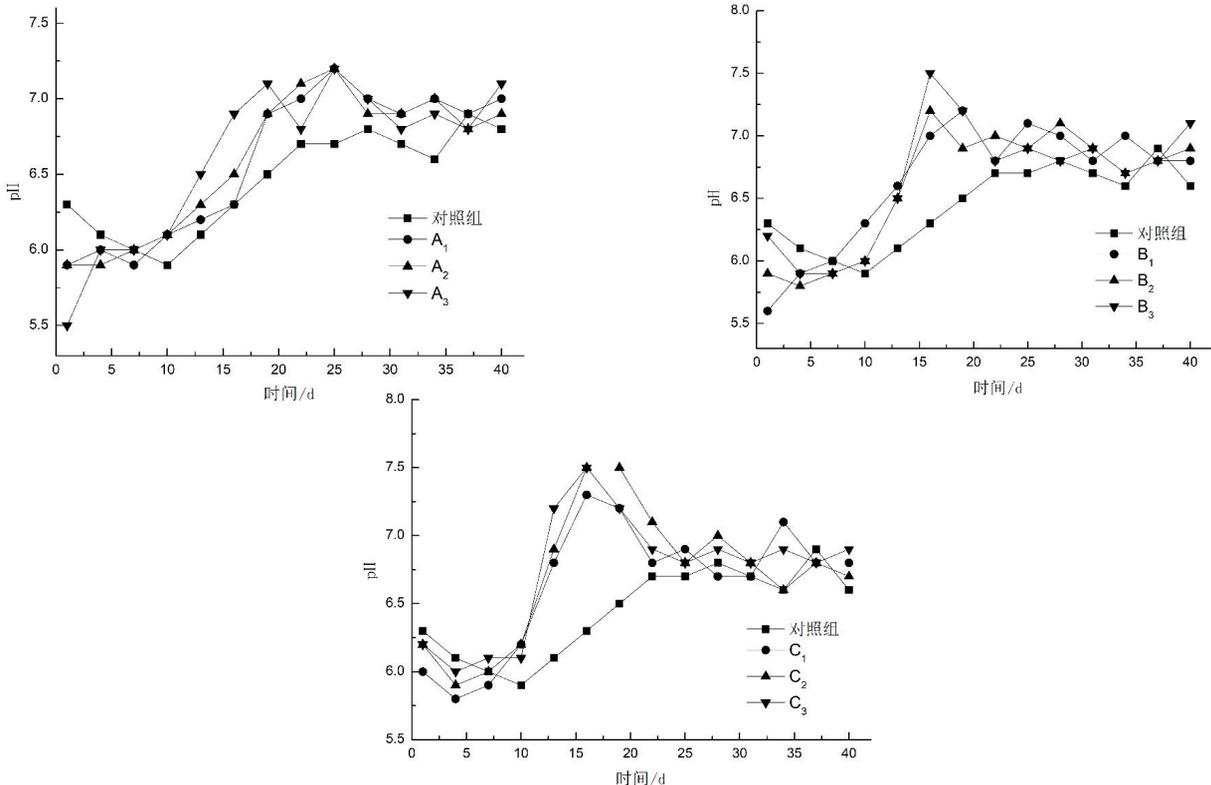


图3 添加三种生物炭对发酵体系pH值的影响

炭在一定程度上能调节厌氧发酵过程的酸碱平衡,有效抑制酸化过程进而提高产气量。在厌氧发酵的初期阶段,主要以产氢和产酸为主,因此会产生大量的挥发性脂肪酸,进而导致发酵系统pH值降低。随着反应的不断进行,挥发性脂肪酸不断被产甲烷菌利用生成甲烷气体,pH值则会维持在一个相对稳定的范围之内,发酵系统保持中性状态。

### 2.3 日产气量变化分析

由图4可知,添加玉米秸秆生物炭各处理组的产气量变化趋势相似。试验启动后,产气速率

迅速提高,对照组与A<sub>2</sub>组均在试验进行的第一天就达到日产气高峰,最高日产气量分别为1 100 mL和1 290 mL。A<sub>1</sub>组与A<sub>3</sub>组在试验进行第二天达到产气高峰,最高日产气量分别为1 085 mL和1 200 mL。试验进行6 d后,对照组和各处理组日产气量均维持在相对稳定的水平。厌氧发酵过程中,生物炭的加入可以改善体系的酸碱环境,对发酵系统的pH值起到一定的缓冲作用,试验进行15 d内,A<sub>3</sub>组产气速率明显高于A<sub>1</sub>组和A<sub>2</sub>组。

添加小麦秸秆生物炭各处理组对沼气日产气

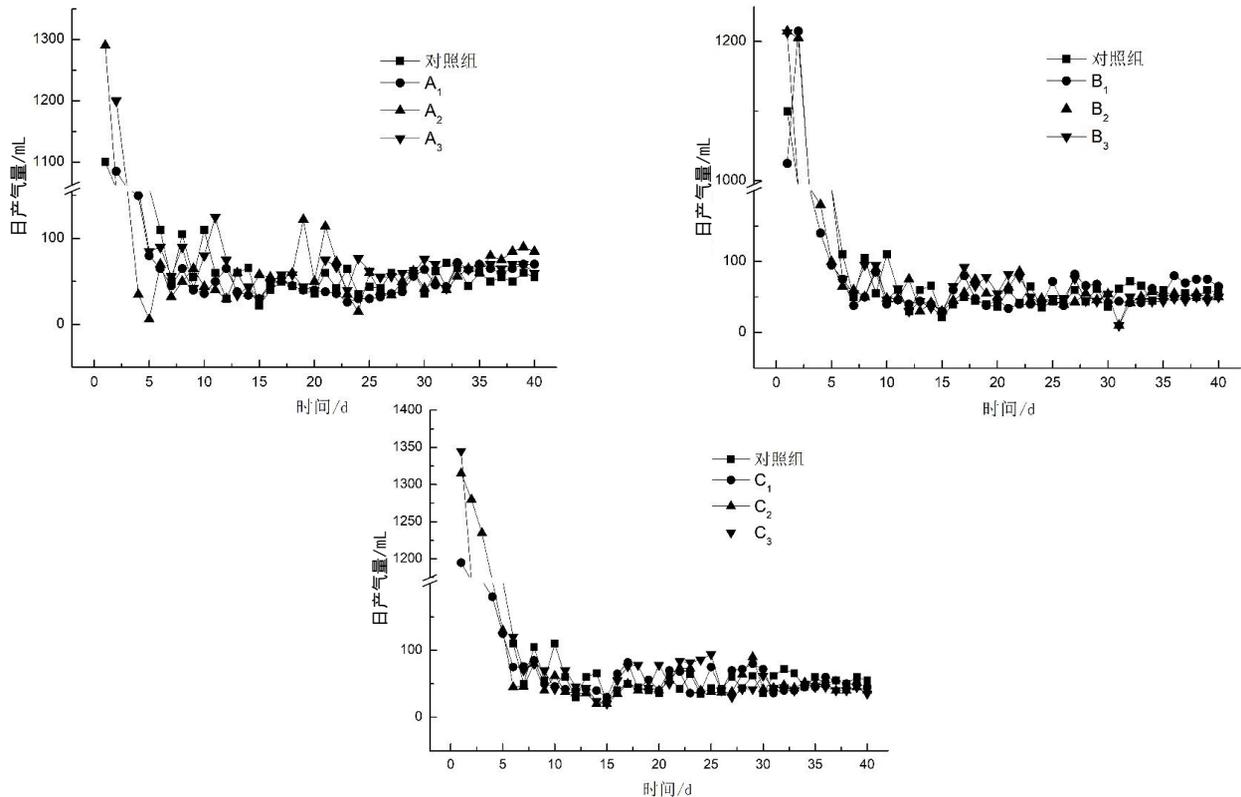


图4 添加三种生物炭对发酵体系日产气量的影响

量的影响不同。试验启动后,除B<sub>1</sub>组在第二天达到产气高峰1 215 mL外,其他处理组均在试验启动第一天就达到产气高峰,B<sub>2</sub>组和B<sub>3</sub>组最高日产气量分别为1 215 mL和1 213 mL。在发酵前25 d内,B<sub>2</sub>组和B<sub>3</sub>组沼气产量均高于B<sub>1</sub>组和CK组,在发酵后期,B<sub>1</sub>组和CK组产气量则略高于B<sub>2</sub>组和B<sub>3</sub>组。

添加水稻秸秆生物炭对人粪厌氧发酵日产气量的影响从总体上看,发酵试验启动后,C<sub>2</sub>组产气效果较好,发酵前三天的日产气量均维持在较高水平,日产气量分别为1 315 mL、1 280 mL和1 235 mL。C<sub>1</sub>组和C<sub>3</sub>组均在第一天就达到产气高峰,最高日产气量分别为1 195 mL和1 345 mL。

### 2.4 累积产气量变化分析

累积产气量是评价产气效果的一个重要指

标。由图5可知,添加玉米秸秆生物炭A<sub>3</sub>组累积产气量(5 429 mL)明显高于A<sub>1</sub>组(4 519 mL)、A<sub>2</sub>组(4 621 mL)和CK组(4 574 mL)。添加小麦秸秆生物炭和水稻秸秆生物炭各处理组的累积产气量均高于对照组。B<sub>2</sub>组累积产气量(5 044 mL)略高于B<sub>3</sub>组(4 906 mL)和B<sub>1</sub>组(4 939 mL);C<sub>2</sub>组累积产气量(6 346 mL)则明显高于C<sub>3</sub>组(5 248 mL)和C<sub>1</sub>组(4 563 mL)。生物炭表面存在的官能团、无机离子等在提高厌氧发酵产气量方面具有一定的积极作用,进一步优化产气效果。

生物炭一方面能够缓冲发酵体系的酸碱环境,减少抑制性物质的含量,保持发酵体系的稳定性,对提高产气量具有促进作用。另一方面,生物炭可以为厌氧发酵体系中的微生物提供有利的生存环境,促进微生物的生长<sup>[14]</sup>。这主要是由

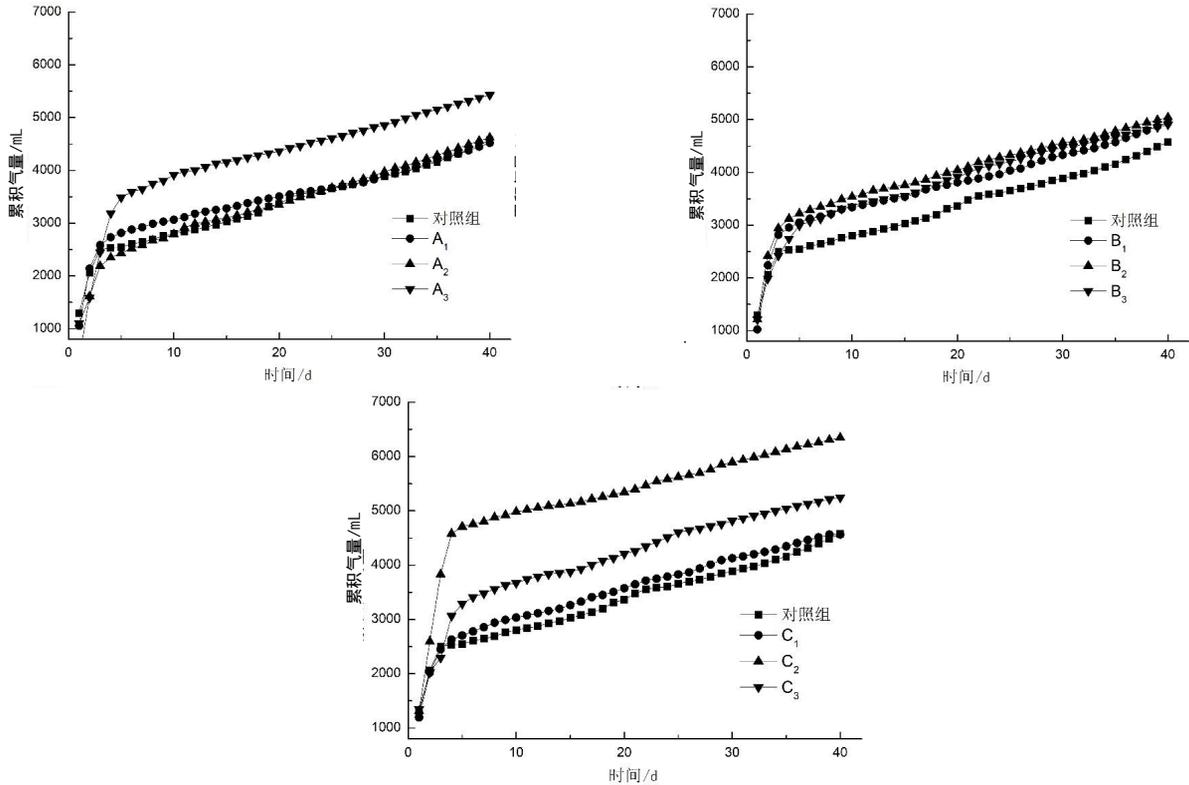


图5 添加三种生物炭对发酵体系累积产气量的影响

于生物炭丰富的微孔结构和高比表面积所具有的优势,为微生物提供了良好的栖息地,同时还能作为微生物生长提供碳源、能源和矿物营养<sup>[15]</sup>。对照组未添加生物炭,厌氧发酵体系环境酸碱不平衡,对产气效果具有抑制作用。不同原材料制备的生物炭理化性质不同,与玉米秸秆和小麦秸秆生物炭相比,水稻秸秆生物炭中碳酸盐和硅酸盐含量较高,缓冲能力更强,有利于维持厌氧发酵体系的稳定<sup>[16-18]</sup>。

## 2.5 产甲烷含量变化分析

沼气中甲烷含量的高低决定着沼气的品质,由图6可知,对照组与处理组甲烷含量变化趋势存在差异。在发酵前期,对照组产甲烷含量高于各处理组,可能是由于人粪原料中易降解成分较多,前期产气效果明显。随着发酵反应的进行,对照组发酵体系进一步酸化,对产甲烷菌生长繁殖产生一定抑制作用,导致产甲烷菌的数量或活性不断降低<sup>[19]</sup>。生物炭的添加可以改变体系的酸碱环境,对产甲烷过程具有促进作用。因此,处理组的甲烷含量明显高于对照组。随着反应的进行,产甲烷菌得到富集,甲烷含量也呈现出上升的趋势,达到峰值后维持在相对稳定的水平。A<sub>3</sub>组甲烷含量峰值在厌氧发酵第32天出现,达到34.80%,较对照组甲烷含量峰值晚20 d,但是甲烷含量提高75.90%;B<sub>2</sub>组的甲烷含量峰值在厌氧发

酵第40天出现,达到20.90%,较对照组甲烷含量峰值提高5.60%;C<sub>2</sub>组的甲烷含量峰值在厌氧发酵第30天出现,达到25.78%,较对照组最高甲烷含量提高30.30%。从产甲烷效果来看,玉米秸秆生物炭对人粪厌氧发酵产甲烷的积极影响作用最大,玉米秸秆生物炭的孔隙结构发达,骨架结构明显,能够吸收周围环境中的可溶性有机物和其他气体成分,为微生物的生长提供充足的碳源,提高微生物的分解速率和繁殖能力,进而促进甲烷的生成<sup>[20]</sup>。

## 2.6 无害化处理效果分析

粪大肠杆菌灭活率和蛔虫卵死亡率是评价粪便无害化处理效果的重要指标<sup>[21]</sup>,由表3可知,厌氧发酵后对照组和处理组的粪大肠杆菌灭活率和蛔虫卵死亡率均大于99%,表明厌氧发酵过程有利于人粪的无害化处理,同时通过添加不同种类和比例生物炭对粪大肠杆菌灭活率和蛔虫卵死亡率没有显著影响<sup>[22]</sup>。

## 2.7 微生物群落结构变化分析

为了探究厌氧发酵过程中微生物群落结构变化,在厌氧发酵试验结束后选取产气效果较好的A<sub>3</sub>组、B<sub>1</sub>组、C<sub>2</sub>组以及未添加生物炭的对照组,利用微生物高通量测序分析样品中细菌群落结构,结果如图7、图8所示。

在细菌门水平上,对照组的优势菌门主要为

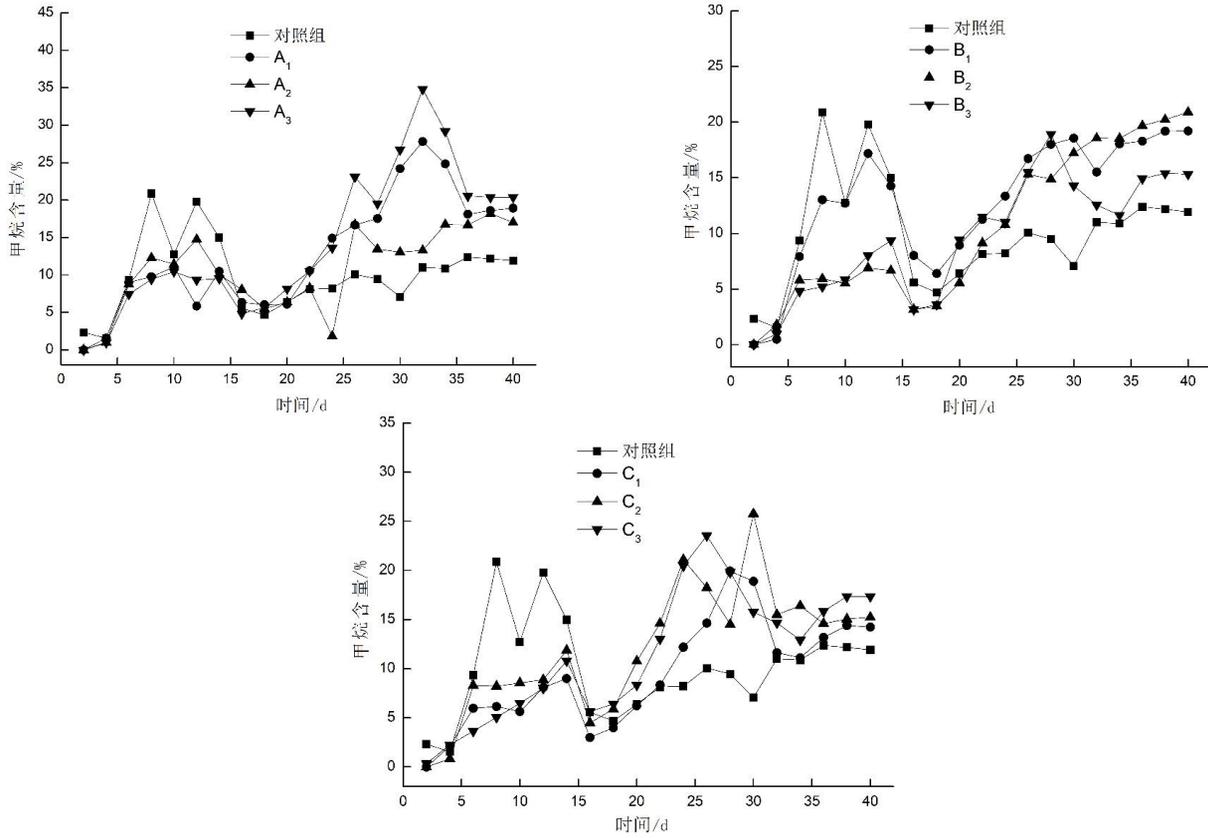


图6 添加三种生物炭对发酵体系甲烷含量的影响

表3 粪便无害化处理效果

组别	粪大肠杆菌数量 /MPN·100 mL <sup>-1</sup>	粪大肠杆菌 灭活率/%	蛔虫卵数量 /个·10 g <sup>-1</sup>	蛔虫卵 死亡率/%
对照组	3	>99	3	>99
A <sub>1</sub> 组	4	>99	5	>99
A <sub>2</sub> 组	<2	>99	2	>99
A <sub>3</sub> 组	3	>99	4	>99
B <sub>1</sub> 组	<2	>99	3	>99
B <sub>2</sub> 组	5	>99	7	>99
B <sub>3</sub> 组	3	>99	2	>99
C <sub>1</sub> 组	<2	>99	4	>99
C <sub>2</sub> 组	<2	>99	8	>99
C <sub>3</sub> 组	<2	>99	6	>99

*Firmicutes* (81.97%) 和 *Actinobacteria* (16.38%), A<sub>3</sub>组的优势菌门主要为 *Firmicutes* (76.58%)、*Proteobacteria* (9.60%) 和 *Synergistetes* (8.70%), B<sub>1</sub>组的优势菌门主要为 *Firmicutes* (80.11%)、*Synergistetes* (7.36%)、*Proteobacteria* (5.77%) 和 *Actinobacteria* (4.92%), C<sub>2</sub>组的优势菌门主要为 *Firmicutes* (75.60%)、*Proteobacteria* (9.31%)、*Synergistetes* (7.57%)。添加生物炭的处理组 *Proteobacteria* 和 *Synergistetes* 相对丰度明显增加,表明 *Proteobacteria* 和 *Synergistetes* 对产气效果有积极的影响作用。C<sub>2</sub>组 *Bacteroidetes* 的相对丰度相

较于其他处理组和对照组高,表明其可能在该体系的厌氧发酵过程中也发挥着重要作用<sup>[23]</sup>。

为了进一步比较样本间的物种组成差异,对 A<sub>3</sub>组、B<sub>1</sub>组、C<sub>2</sub>组以及对照组进行物种组成聚类分析,形成物种相对丰度分布组成热图(如图9所示)。

CK组的 *Subdoligranulum*、*Erysipelotrichaceae\_UCG-003*、*Blautia*、*Bifidobacterium*、*Clostridium\_sensu\_stricto\_1* 菌属相对丰度较高; A<sub>3</sub>组的 *Clostridium\_sensu\_stricto\_1*、*Romboutsia*、*Ralstonia*、*Subdoligranulum*、*Erysipelotrichaceae\_UCG-003* 菌属相对丰度较高; B<sub>1</sub>组的 *Romboutsia*、*Clostridium\_sensu\_stricto\_1*、*Ralstonia*、*Pyramidobacter*、*Intestinibacter* 菌属相对丰度较高; C<sub>2</sub>组的 *Clostridium\_sensu\_stricto\_1*、*Romboutsia*、*Sporanaerobacter*、*Ralstonia*、*Ruminococcaceae\_UCG-002* 菌属相对丰度较高<sup>[24]</sup>。不同物种间的相对丰度对于一个微生物系统来说是非常重要的概念, A<sub>3</sub>组、B<sub>1</sub>组、C<sub>2</sub>组以及对照组中均出现的 *Clostridium\_sensu\_stricto\_1* 属于梭状芽孢杆菌属,在厌氧环境下具有一定的竞争能力和适应能力。另外,在三个处理组中占较大比例的 *Romboutsia* 和 *Ralstonia* 分别属于罗姆布茨菌属和罗尔斯通菌属,通过消化大分子碳水化合物产生丁酸等短链脂肪酸为产甲烷阶段提供底物<sup>[25]</sup>。

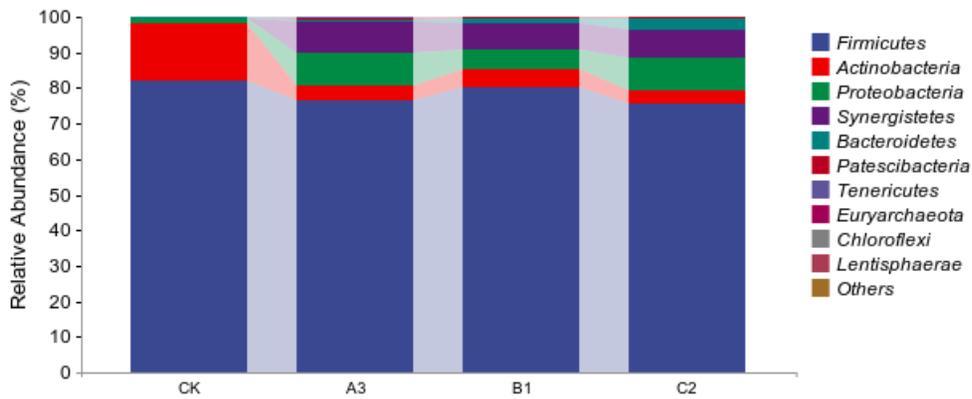


图7 细菌菌落门水平分类学组成分析

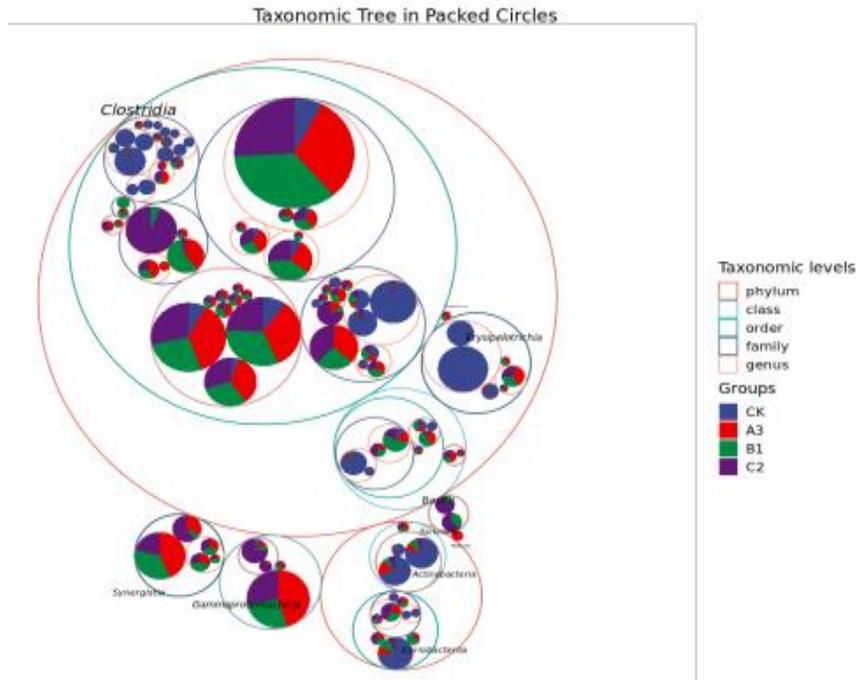


图8 分类等级树组成分析

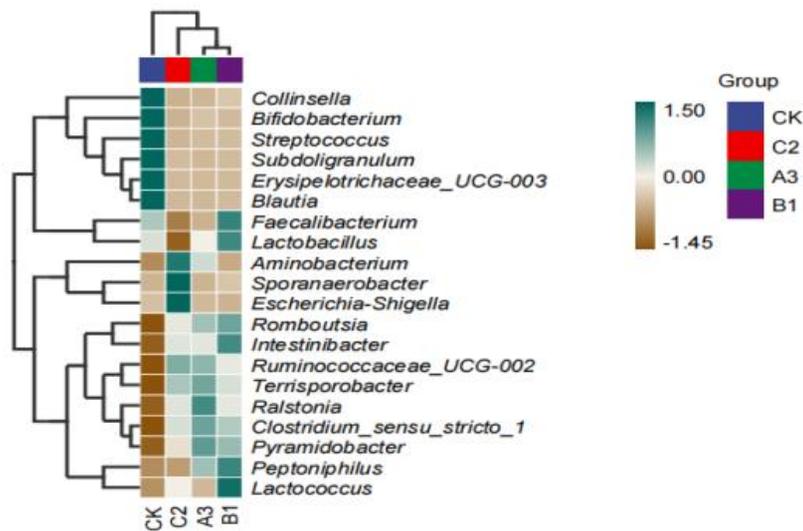


图9 菌属相对丰度分布组成热图

### 3 结论

添加生物炭处理组和未添加生物炭对照组的

pH值变化情况表明,处理组在发酵中期之后,pH值基本稳定在7.0左右,偏高于对照组。适宜的生物炭添加比例有利于沼气的生成,同时可以促进产沼气

量和产甲烷含量的提高。在整个厌氧发酵周期,各处理组累积产气量最高依次为C<sub>2</sub>组、B<sub>2</sub>组、A<sub>3</sub>组,分别为6 346 mL、5 044 mL、4 621 mL;TS产气率依次为158.65 mL/g、126.10 mL/g、115.53 mL/g;A<sub>3</sub>组的产甲烷含量最高,达到34.80%。

厌氧发酵试验结束后,对处理组和对照组的粪大肠杆菌灭活率和蛔虫卵死亡率进行计算,所得到的结果均大于99%。结果表明,厌氧发酵过程有利于人粪的无害化处理,添加不同种类和比例的生物炭对粪大肠杆菌灭活率和蛔虫卵死亡率没有显著差异。

微生物高通量测序结果表明,生物炭的添加改变了厌氧发酵系统的微生物群落结构,其中*Proteobacteria*和*Synergistetes*对产气效果的积极影响较为明显,在厌氧发酵体系中起到优势菌群的作用。另外,*Romboutsia*和*Ralstonia*分别属于罗姆布茨菌属和罗尔斯通菌属,为产甲烷阶段提供底物,在A<sub>3</sub>组、B<sub>1</sub>组、C<sub>2</sub>组中占据较大比例,提高了对人粪厌氧发酵有积极作用菌属的相对丰度。

## 4 讨 论

在整个发酵系统中,添加生物炭是否存在为系统持续不断提供碳源的过程,能够被产甲烷菌在利用酸的同时所结合,进而生成甲烷气体同时维持系统酸碱平衡,其作用机制有待进一步研究考证。本试验设计为人粪厌氧发酵产沼气,接种物为中试试验点猪粪沼液,各处理组以及对照组的累积产气量和产甲烷含量效果显著。后续考虑使用人粪厌氧发酵沼液替代猪粪沼液进行发酵试验,研究分析发酵结果,进而与本试验结果进行对比。

### 参考文献:

- [ 1 ] 王健,隋斌,程红胜,等.我国不同区域农业废弃物厌氧消化及资源化技术模式构建及其评价研究[J].中国沼气,2021,39(4):3-11.
- [ 2 ] 秦佳佳.人粪与不同原料配比对厌氧发酵产气影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [ 3 ] 杜静,沈礼晨,奚永兰,等.人粪与不同废弃物混合厌氧发酵的效果[J].浙江农业科学,2020,61(12):2644-2648.
- [ 4 ] 路杨,隋丽,周佳玲,等.生猪养殖粪污与秸秆混合还田对吉林省土壤肥力与玉米产量的影响[J].东北农业科学,2022,47(4):48-51.
- [ 5 ] 张玉海,涂岳,陈苏,等.我国畜禽粪便肥料化利用现状与发展趋势[J].东北农业科学,2019,44(5):53-57.
- [ 6 ] Song Z L, Qin J J, Yang G H, et al. Effect of Human Excreta Mixture on Biogas Production[J]. Advanced Materials Research, 2011, 347-353: 2570-2575.
- [ 7 ] 冯晶,荆勇,赵立欣,等.生物炭强化有机废弃物厌氧发酵技术研究[J].农业工程学报,2019,35(12):256-264.
- [ 8 ] 杨计,徐锐,徐继伟,等.生物炭促进厌氧消化相关机理机制的研究进展[J].广东化工,2022,49(2):181,186-188.
- [ 9 ] 张璐,贾丽,陆文龙,等.不同碳化温度下玉米秸秆生物炭的结构性质及其对氮磷的吸附特性[J].吉林大学学报(理学版),2015,53(4):802-808.
- [ 10 ] 常西亮,胡雪菲,蒋煜峰,等.不同温度下小麦秸秆生物炭的制备及表征[J].环境科学与技术,2017,40(4):24-29.
- [ 11 ] 荆勇.木质生物炭对秸秆厌氧发酵性能的影响研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [ 12 ] Padma, Priya, Ravi, et al. Effects of target pH-value on organic acids and methane production in two-stage anaerobic digestion of vegetable waste[J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 96-102.
- [ 13 ] Li L, Xu J, Wang H, et al. Study of the performance of biogas production by mixed fermentation of cow dung, deer manure, and mushroom fungus[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8: 466-475.
- [ 14 ] 宇文超岁,李倩,陈荣,等.生物炭对严重酸积累的甲烷发酵系统快速恢复的促进效果[J].环境工程,2018,36(12):155-159,170.
- [ 15 ] Shen Y, Linville J L, Leon I D, et al. Towards a sustainable paradigm of waste-to-energy process: Enhanced anaerobic digestion of sludge with woody biochar[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 1054-1064.
- [ 16 ] Linville J L, Shen Y W, Leon I D, et al. In-situ biogas upgrading during anaerobic digestion of food waste amended with walnut shell biochar at bench scale[J]. Waste Management & Research, 2017, 35(6): 669-679.
- [ 17 ] Xu J, Mustafa A M, Lin H, et al. Effect of hydrochar on anaerobic digestion of dead pig carcass after hydrothermal pretreatment [J]. Waste Management, 2018, 78: 849-856.
- [ 18 ] Gomez X, Meredith W, Fernandez C, et al. Evaluating the effect of biochar addition on the anaerobic digestion of swine manure: application of py-gc/ms [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25(25): 600-611.
- [ 19 ] Merlino G, Rizzi A, Schievano A, et al. Microbial community structure and dynamics in two-stage vs single-stage thermophilic anaerobic digestion of mixed swine slurry and market bio-waste[J]. Water Research, 2013, 47(6): 1983-1995.
- [ 20 ] 赵鹏翔,朱建军,王强,等.生物炭对强化有机废弃物厌氧发酵效果的技术研究[J].化工设计通讯,2022,48(1):126-128.
- [ 21 ] 邵宗体,熊孟韬,冯锡光,等.云南省洱源县血吸虫病流行区农村卫生厕所现状及粪便无害化效果分析[J].中国血吸虫病防治杂志,2015,27(4):348-352.
- [ 22 ] 黄东旭.不同饮食方式下肠道菌群结构及粪便脂肪酸的关系[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [ 23 ] 李喜凤.稻壳炭与有机肥配施对苹果园土壤有机炭组分及微生物活性的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [ 24 ] 韩光明.生物炭对不同类型土壤理化性质和微生物多样性的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [ 25 ] 钟立强,王海晓,王明华,等.不同饵料对大口黑鲈生长性能和肠道微生物的影响[J].水生生物学报,2022,46(11):1609-1617.

(责任编辑:王 昱)