

生物炭复合载体对稻秸-猪粪混合厌氧发酵产甲烷的影响

花瑞林¹, 陈芳清¹, 黄永文², 刘杨赟², 黎泽玉³

(1.三峡大学 湖北省三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2.湖北省正江环保科技有限公司, 湖北 宜昌 443002; 3.湖北省宜昌市生态环境局水土污染防治管理中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 文章利用生物炭负载不同浓度的碳酸氢钠、腐植酸、吐温 20 等催化调节剂构建了生物炭复合载体, 并将各复合载体加入到稻秸-猪粪混合厌氧发酵系统中进行厌氧发酵。通过测定各处理的产气量、产甲烷量和秸秆木质纤维素的降解率, 揭示了生物炭复合载体对混合厌氧发酵产甲烷和秸秆降解的作用。研究表明: 生物炭复合载体能提高甲烷产气峰值并缩短甲烷产气峰值出现的时间; 生物炭复合载体可以显著提高厌氧发酵系统的累积产气量和累积甲烷产量, 其中以生物炭负载吐温 20 的效果最好, 其次为生物炭负载腐植酸和生物炭负载碳酸氢钠; 与对照组相比, 生物炭负载吐温 20 处理的产气量和甲烷产量分别提高了 23.18% 和 62.20%; 在各处理中, 秸秆的降解程度以生物炭负载吐温 20 处理最高, 其次为生物炭负载腐植酸、生物炭负载碳酸氢钠和对照组; 吐温 20、腐植酸和碳酸氢钠的最适负载浓度分别为 2.25、0.75、2.10 g/L。

关键词: 田间混合厌氧发酵; 催化调节剂; 生物炭; 复合载体; 甲烷

中图分类号: TK6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)02-0151-08

0 引言

水稻生产每年都会产生大量的水稻秸秆, 水稻秸秆的无害化利用一直是困扰中国以及世界其它产稻国的难题^[1]。水稻秸秆的利用方式包括作为农家燃料或牲畜饲料、堆肥还田、作为生物发酵基质等^[2], 这些利用方式存在污染环境、利用效率低、运输不便等问题, 为了克服上述问题, 人们研发了一种以水稻秸秆为基质在田间实地厌氧发酵产甲烷的“GET”技术^[3]。该技术开辟了一种水稻秸秆利用的新途径, 但由于水稻秸秆碳氮比失调, 相对较低的秸秆降解率一定程度上限制了该技术的推广应用。为此, 耿启明结合我国的农业生产实际, 对该技术进行了改进, 将水稻秸秆和农家肥混合后与农田土壤分层堆积成垄, 并通过膜覆盖和水淹创造无氧环境, 使水稻秸秆和农家肥进行厌氧发酵产甲烷, 然后用集气袋收集利用, 形成了水稻秸秆与农家肥混合田间实地厌氧发酵产甲烷的“BMF”技术^[4]。该技术通过改变发酵基质碳氮比和接种发酵母液, 提高了水稻秸秆的田间降解率和甲烷产率, 并为农家肥的利用

提供了一条新途径。

水稻秸秆田间厌氧发酵产甲烷主要是在冬季农闲季节进行, 由于时间短、温度低, 加快厌氧发酵进程和提高甲烷产率是 BMF 技术推广与应用的关键。基于 BMF 技术, 张行进一步开展了添加催化调节剂加快厌氧发酵进程的研究, 发现腐植酸、吐温 20 和碳酸氢钠等催化调节剂能通过改变反应的酸碱性和增加反应面积促进水稻秸秆的厌氧发酵进程, 提高甲烷产量^[5]。向玲发现, 生物炭具有孔隙发达、比表面积大等特征, 可用作催化调节剂的载体^[6]。

本研究以水稻秸秆、猪粪和水稻土模拟构建田间厌氧发酵系统, 利用生物炭负载不同浓度的碳酸氢钠、腐植酸和吐温 20 构建生物炭复合载体, 并将各生物炭复合载体加入到厌氧发酵系统中, 通过测定各处理的产气量、甲烷产量、甲烷含量、累积甲烷产量以及发酵前后的纤维素含量变化等, 揭示生物炭复合载体对水稻秸秆与猪粪混合厌氧发酵产甲烷的影响, 以期为 BMF 技术的优化和推广应用提供参考。

收稿日期: 2023-04-14。

基金项目: 湖北省科技创新专项重点项目(2016AHB014)。

通信作者: 陈芳清(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事水稻田生物甲烷生产利用及生态恢复的研究。E-mail: fqcchen@ctgu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用发酵基质(水稻秸秆和猪粪)和水稻田土壤均取自湖北省宜昌农科所,经自然风干后取回备用,其中水稻秸秆切成 3~5 cm 的小段。发酵基质的理化性质见表 1。

表 1 厌氧发酵基质的理化特性
Table 1 Chemical and physical characteristics of the substrates for the mixed anaerobic fermentation

参数	水稻秸秆	猪粪
总固体(TS)含量/%	73.23	22.35
挥发性固体(VS)含量/%	60.21	16.23
总氮(TN)含量/g·kg ⁻¹	4.32	17.26
总有机碳(TOC)含量/g·kg ⁻¹	362.00	230.26
总磷(TP)含量/g·kg ⁻¹	0.23	1.62
纤维素含量/%	21.25	
半纤维素含量/%	20.59	
木质素含量/%	15.71	

1.2 实验设计

利用自制的厌氧发酵装置(图 1)进行厌氧发酵实验。该装置包括 1 个 2 L 的发酵瓶和 1 个 1 L 的气体收集瓶及其相关的连通管道,每套装置为 1 个实验单元。每个发酵瓶中分别添加一定量的发酵基质(水稻秸秆和猪粪)、水稻田土壤(模拟稻田发酵的微生物与土壤环境)、无菌水和生物炭复合载体。

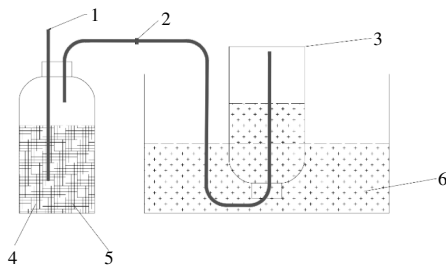


图 1 混合厌氧发酵实验装置

Fig.1 The experimental device for the mixed anaerobic fermentation

1-取液管;2-止水夹;3-甲烷收集器;4-厌氧发酵反应器;5-厌氧发酵基质;6-水箱

实验以河南立泽环保科技有限公司生产的竹质生物炭为载体,以碳酸氢钠(NA)、腐植酸(F)和吐温 20(T)溶液为负载物,通过浸泡 24 h 完全吸附的方式生成生物炭复合载体。每种催化调节剂根据以往实验研究分别设置 5 个浓度梯度^[9],同时设置不添加生物炭复合载体的对照组(CK),

每个处理重复 3 次。不同处理需要添加的各物质的量如表 2 所示。将各处理需要添加的物质装入发酵瓶中充分混合,然后将发酵瓶密封,放入 (35±1) °C 恒温气候箱中进行混合厌氧发酵实验,实验持续 90 d,期间定期检测产气量和甲烷含量。

表 2 生物炭复合载体厌氧发酵产甲烷实验设计
Table 2 Experimental design of anaerobic fermentation for methane production using biochar composite carriers

处理	载体竹炭用量/g	催化调节剂	负载浓度 g/L	秸秆 g	猪粪 g	土壤 g	水 mL
NA1			0.30	60	60	80	1 000
NA2			0.90	60	60	80	1 000
NA3	10	碳酸氢钠	1.50	60	60	80	1 000
NA4			2.10	60	60	80	1 000
NA5			2.70	60	60	80	1 000
F1			0.15	60	60	80	1 000
F2			0.35	60	60	80	1 000
F3	10	腐植酸	0.55	60	60	80	1 000
F4			0.75	60	60	80	1 000
F5			0.95	60	60	80	1 000
T1			0.25	60	60	80	1 000
T2			0.75	60	60	80	1 000
T3	10	吐温 20	1.25	60	60	80	1 000
T4			1.75	60	60	80	1 000
T5			2.25	60	60	80	1 000
CK				60	60	80	1 000

注:秸秆、猪粪和土壤均为干重。

1.3 实验指标的测定

在实验开始前分别取样测定发酵基质(水稻秸秆、猪粪)的 TOC, TN, TP, TS 和 VS 含量。其中,采用 K₂Cr₂O₇-外热源法测定 TOC 含量,采用 K1100 型全自动凯氏定氮仪测定 TN 含量,采用 Skalar San++ 型连续流动分析仪测定 TP 含量,采用干燥恒重法测定 TS 和 VS 含量。从实验开始,每 5 d 对各处理的产气量和甲烷含量进行测定,采用排水法测定产气量,采用 SP-7890 Plus 型气相色谱仪测定甲烷含量。在实验前和实验结束后分别取样测定秸秆和秸秆残渣的纤维素、半纤维素和木质素含量,测定方法分别为 72% 浓硫酸水解法、2 mol/L 盐酸水解法和浓硫酸法^[7,8]。利用以下公式分别计算纤维素、半纤维素和木质素的降解率:

$$X = \frac{A_1 - A_2(1 + B_1Y + C_1Z)}{A_1(1 - A_2)} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y = \frac{B_1 - B_2(1 + A_1 Y + C_1 Z)}{B_1(1 - B_2)} \times 100\% \quad (2)$$

$$Z = \frac{C_1 - C_2(1 + A_1 X + B_1 Y)}{C_1(1 - C_2)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: X, Y, Z 分别为纤维素、半纤维素和木质素的降解率, %; A_1 和 A_2 为降解前后的纤维素含量, %; B_1 和 B_2 为降解前后的半纤维素含量, %; C_1 和 C_2 为降解前后的木质素含量, %。

1.4 数据分析

采用 Origin2021 软件对数据进行统计和初步分析, 分析不同生物炭复合载体对水稻秸秆与猪粪混合厌氧发酵过程的产气量、甲烷含量、甲烷日产量、累积甲烷产量等的影响, 并分别以生物炭复合载体类型和负载浓度为变量, 以甲烷产气性能(累积产气量和累积甲烷产量)和秸秆纤维素降解性能(纤维素、半纤维素和木质素降解率)为因变量, 采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析, 分析和比较生物炭复合载体的催化调节剂类型及其负载浓度对水稻秸秆与猪粪混合厌氧发酵系统产气性

能和秸秆降解的影响。

2 结果与分析

2.1 生物炭复合载体对混合厌氧发酵产甲烷进程的影响

生物炭复合载体对稻秸-猪粪混合厌氧发酵产气特性的影响(以同种调节剂不同处理水平的平均值计)如图 2 所示。从图 2 可以看出: 各处理的日产气量和甲烷日产量整体呈单峰曲线, 添加生物炭复合载体对混合厌氧发酵系统产甲烷峰值和峰值出现的时间有不同程度的影响; CK 和 F 处理的日产气量与甲烷日产量的峰值均出现在 20 d 左右, 而 T 处理和 NA 处理的日产气量与甲烷日产量的峰值均出现在 15 d 左右; F 处理的日产气量和甲烷日产量的峰值分别为 34.80 mL/g 和 18.66 mL/g, 分别较 CK 提高了 23.98% 和 43.43%; T 处理的日产气量和甲烷日产量的峰值分别较 CK 提高了 9.73% 和 48.31%; NA 处理的日产气量峰值较 CK 低了 3.24%, 甲烷日产量峰值较 CK 提

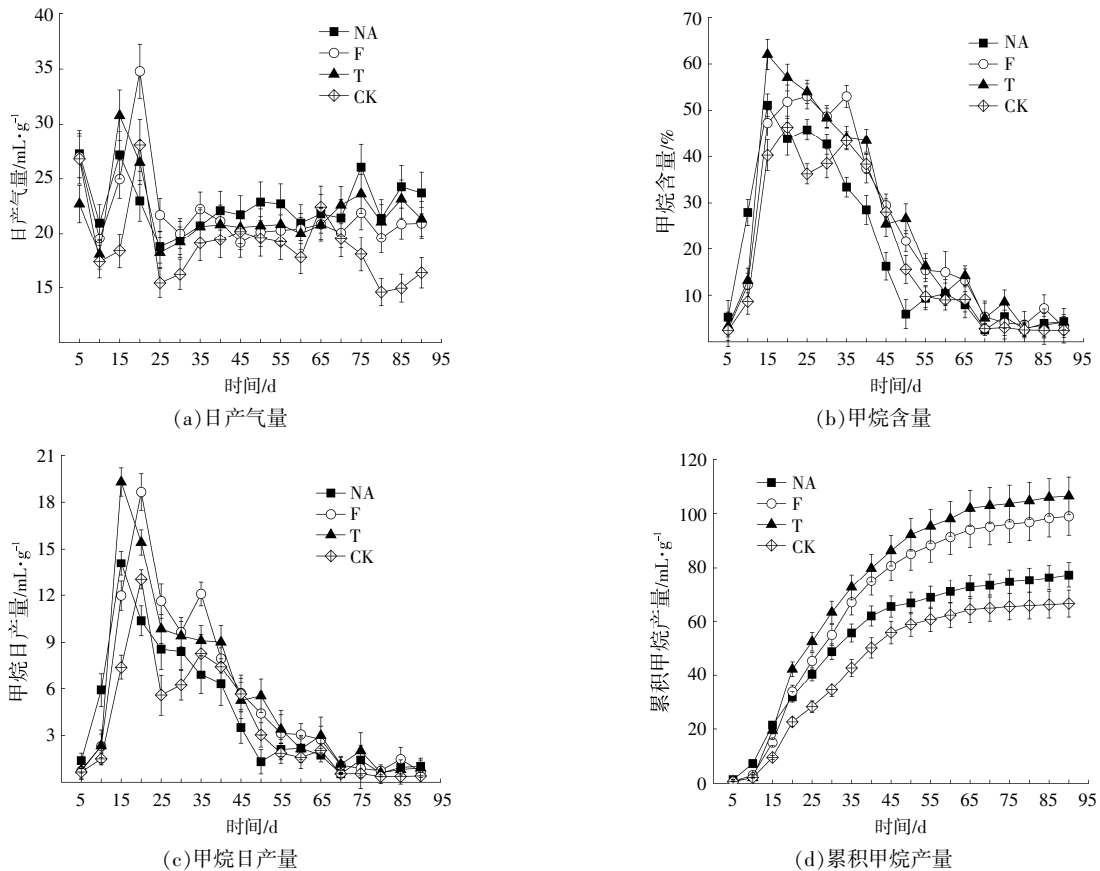


图 2 生物炭复合载体对稻秸-猪粪混合厌氧发酵产气特性的影响

Fig.2 Effect of biochar composite carrier on the gas production of the rice straw-pig manure mixed systems with the anaerobic fermentation process

高了 8.15%。

从图 2 还可以看出:NA 和 T 处理的甲烷含量均在 15 d 左右出现峰值,CK 处理的甲烷含量峰值出现在 20 d 左右,而 F 处理的甲烷含量峰值出现在 25 d 左右;T 处理的甲烷含量峰值为 62.04%,较 CK 提高了 33.85%;F 和 NA 处理的甲烷含量峰值分别较 CK 提高了 14.46%和 10.33%。由于各处理产气量和甲烷含量的不同,使得各处理的累积甲烷产量出现较大差异,整体为 T>F>NA>CK。

2.2 生物炭复合载体对混合厌氧发酵产气量和甲烷产量的影响

生物炭负载催化调节剂对累积产气量和累积甲烷产量的影响如图 3 所示。从图 3(a)可以看出:生物炭复合载体对稻秸与猪粪混合厌氧发酵产甲烷具有显著的促进作用($P<0.05$);与 CK 相比,T,F 和 NA 处理的累积产气量分别增加了 23.18%,15.21%和 18.38%,累积甲烷产量分别增加了 62.20%,48.70%和 16.04%。

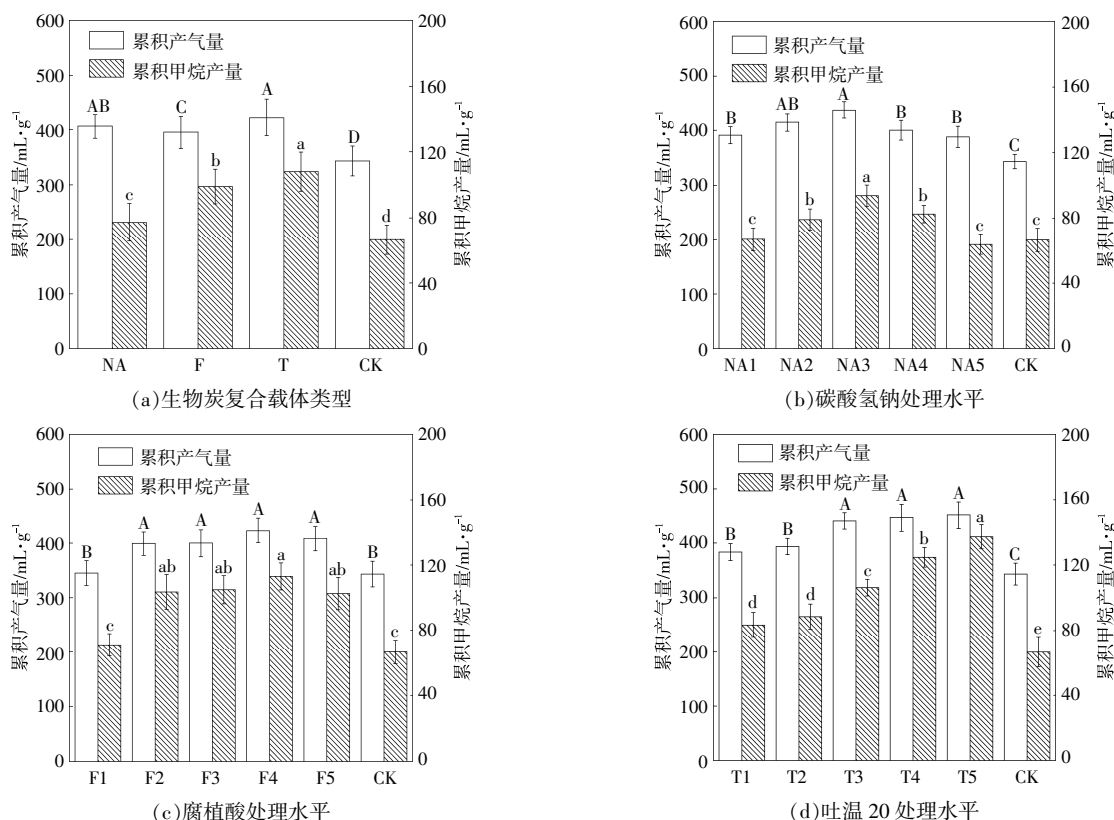


图 3 生物炭负载催化调节剂对累积产气量和累积甲烷产量的影响

Fig.3 Effects of biochar loaded catalytic regulators on the cumulative gas production and cumulative methane production in rice straw anaerobic fermentation systems

注:A,B,C,D 表示累积产气量的差异水平;a,b,c,d,e 表示累积甲烷产量的差异水平; $P<0.05$ 。

从图 3 可以看出,在各处理中,不同浓度催化调节剂的处理效应有显著差异。在 T 处理中,各处理水平的累积产气量和累积甲烷产量均显著高于 CK,并以 T5 处理的累积产气量和累积甲烷产量最高,分别比 CK 提高了 31.37%和 105.98%;在 NA 处理中,各处理水平的累积产气量和累积甲烷产量均显著高于 CK,并以 NA3 处理的累积产气量和累积甲烷产量最高,分别比 CK 提高了 27.51%和 40.85%,但 NA1,NA2,NA4 和 NA5 处理的累积产气量差异不显著,NA1,NA5 处理和

CK 的累积甲烷产量差异不显著;在 F 处理中,F2,F3,F4 和 F5 处理的累积产气量与累积甲烷产量均显著高于 CK,并以 F4 处理的累积产气量和累积甲烷产量最高,分别比 CK 提高了 23.46%和 69.75%,但 F1 处理的累积产气量与累积甲烷产量与 CK 无显著差异。

2.3 生物炭复合载体对混合厌氧发酵秸秆降解的影响

生物炭复合载体对稻秸降解的影响见表 3。由表 3 可以看出:生物炭复合载体对稻秸的降解

表3 生物炭复合载体对稻秸降解的影响
Table 3 Effect of biochar composite carrier on straw degradation

处理	纤维素		半纤维素		木质素	
	含量/%	降解率/%	含量/%	降解率/%	含量/%	降解率/%
NA1	13.42±1.94 ^{ab}	35.67±10.48 ^{ab}	13.95±0.42 ^a	28.73±1.05 ^d	11.08±1.20 ^a	22.44±1.07 ^a
NA2	12.94±0.42 ^{ab}	35.70±2.19 ^{ab}	10.46±0.14 ^c	48.88±0.92 ^b	11.00±0.42 ^a	19.80±3.18 ^{ab}
NA3	11.31±0.43 ^b	44.59±2.75 ^a	9.73±0.21 ^d	51.96±1.29 ^a	10.94±0.32 ^a	18.32±2.96 ^{ab}
NA4	13.94±0.46 ^a	32.78±2.03 ^{ab}	13.18±0.57 ^b	34.61±2.81 ^c	11.99±0.25 ^a	14.68±1.21 ^b
NA5	14.94±0.75 ^a	27.99±4.49 ^b	14.37±0.05 ^a	28.37±0.42 ^d	12.06±0.07 ^a	16.13±1.32 ^b
F1	13.36±0.13 ^a	36.66±1.12 ^b	14.65±0.05 ^a	24.37±0.74 ^c	11.15±0.55 ^a	22.44±1.66 ^b
F2	12.83±0.08 ^a	39.61±0.03 ^a	14.65±0.15 ^a	23.84±1.75 ^c	11.09±0.79 ^a	22.50±0.92 ^b
F3	12.50±0.17 ^{ab}	41.27±0.48 ^a	14.46±0.15 ^a	24.71±0.47 ^c	11.04±0.89 ^a	22.47±1.82 ^b
F4	11.78±0.59 ^b	40.98±0.56 ^a	9.04±0.19 ^c	55.67±1.26 ^a	10.30±0.31 ^a	23.65±1.11 ^b
F5	12.94±0.79 ^a	34.73±1.43 ^c	10.25±0.49 ^b	49.42±2.81 ^b	10.00±0.43 ^a	27.97±2.92 ^a
T1	13.44±0.10 ^a	33.31±0.65 ^c	11.27±0.19 ^a	44.58±1.25 ^c	10.95±0.09 ^a	21.30±0.83 ^b
T2	12.33±0.17 ^b	39.27±0.59 ^b	10.68±0.25 ^b	47.12±1.10 ^b	10.81±0.46 ^b	21.05±0.98 ^b
T3	11.50±0.08 ^c	43.48±0.97 ^a	10.24±0.08 ^c	48.88±0.77 ^b	10.45±0.76 ^{ab}	23.05±1.37 ^b
T4	11.17±0.08 ^d	44.84±0.53 ^a	10.18±0.09 ^c	48.59±0.54 ^b	9.78±0.24 ^b	28.36±2.00 ^a
T5	11.00±0.22 ^d	44.78±1.37 ^a	8.65±0.16 ^d	57.06±0.99 ^a	9.64±0.05 ^b	28.32±0.56 ^a
NA 均值	13.31±1.50 ^B	35.29±7.25 ^A	12.34±1.97 ^A	38.62±10.44 ^{AB}	11.41±0.72 ^{AB}	18.23±3.34 ^B
F 均值	12.68±0.67 ^{AB}	38.57±2.76 ^A	12.61±2.55 ^A	35.99±14.53 ^B	10.71±0.72 ^{BC}	23.73±2.70 ^A
T 均值	11.89±0.94 ^C	41.13±4.63 ^A	10.21±0.91 ^B	49.21±4.41 ^A	10.33±0.65 ^C	24.35±3.58 ^A
CK	14.92±0.08 ^A	27.67±0.70 ^B	14.36±0.11 ^A	27.99±0.77 ^B	11.59±0.26 ^A	19.95±2.13 ^B

注:a,b,c,d表示NA,F和T处理组内差异水平;A,B,C表示NA,F和T处理组间差异水平; $P<0.05$ 。

有着显著的促进作用;各处理以T处理的降解效果最好,其次为F处理、NA处理和CK;CK的纤维素、半纤维素和木质素的降解率分别为27.67%、27.99%和19.95%;T处理的纤维素、半纤维素和木质素的降解率分别为41.13%、49.21%和24.35%,分别比CK提高了48.64%、75.81%和22.06%,比F处理提高了6.64%、36.73%和2.61%,比NA处理提高了16.55%、27.42%和33.57%;在T处理中,以T5处理的降解效果最好,其纤维素、半纤维素和木质素的降解率分别比CK提高了61.84%、103.85%和41.95%;在F处理中,以F4处理的降解效果最好,其纤维素、半纤维素和木质素的降解率分别比CK提高了48.10%、98.89%和18.55%;在NA处理中,以NA3处理的降解效果最好,其纤维素和半纤维素的降解率分别比CK提高了61.15%和85.65%。

3 讨论

3.1 生物炭复合载体对秸秆厌氧发酵进程的影响

秸秆厌氧发酵产甲烷过程包括水解酸化、产氢产乙酸和产甲烷3个阶段。由于发酵基质成分的不同以及发酵微生物系统的差异,厌氧发酵系

统在产气峰值和峰值出现时间上有较大的变化^[9,10]。催化调节剂的添加能改善厌氧发酵系统的环境,促进厌氧发酵进程^[11]。生物炭复合载体主要是通过生物炭丰富的微孔对生化反应空间的增加以及催化调节剂对厌氧发酵生化反应环境和生化反应的改变来促进厌氧发酵进程^[12,13]。在本研究中,生物炭复合载体的添加有效促进了厌氧发酵进程。其中,T处理和NA处理的产气峰值出现时间比对照提早了5d左右,其产气峰值也较对照有显著增加。F处理的产气峰值出现时间虽没有提前,但其产气峰值却比对照有显著增加。究其原因,T处理所负载的吐温20是一种表面活性剂,它除了可以增加生化反应面积外,还可以与金属离子形成络合物,从而改善细胞的通透性,提高微生物细胞的代谢性能^[14]。NA处理所负载的碳酸氢钠能够调节厌氧发酵系统的pH值,增强厌氧发酵系统的缓冲能力,产甲烷菌适宜在碱性条件下生长,碳酸氢钠可以缓解有机酸积累对产甲烷菌生长的抑制作用,从而促进甲烷的生产^[15]。因此,T处理和F处理能够促进秸秆厌氧发酵进程,提高其产气峰值,并促成产气峰值尽早出现。F处理所

负载的腐植酸是一种有机酸,能增强厌氧发酵系统的酸环境,它本身含有的水解菌和酸化菌也能促进秸秆的分解^[16]。F处理能有效促进秸秆降解为单糖、氨基酸、脂肪酸等产物,但由于酸环境对于后期产甲烷菌的生长和代谢有一定的抑制作用,因此,其对产气峰值出现的时间没有促进作用,但是能够提高产气峰值。

3.2 生物炭复合载体对厌氧发酵秸秆降解和甲烷产量的影响

秸秆的纤维素、半纤维素和木质素可通过水解和酸化作用降解为单糖、氨基酸、脂肪酸等化合物,能为产氢产乙酸菌和产甲烷菌的生长与代谢提供充足的底物。木质纤维素的降解由内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和葡萄糖苷酶组成的纤维素酶系统催化完成。在其复杂的生化反应过程中,纤维二糖和葡萄糖浓度对纤维素酶的作用存在反馈调节机制^[17]。通过添加一些催化调节剂可以保证纤维素酶的稳定性,促进木质纤维素的降解^[18]。生物炭可以加速乙酰菌与产甲烷菌群落之间的电子传递,促进甲烷的生成^[19]。本研究利用生物炭负载吐温 20、碳酸氢钠和腐植酸等催化调节剂来促进厌氧发酵秸秆的降解,3种处理对于秸秆纤维素、半纤维素和木质素的降解均有显著的促进作用。在3种处理中,以T处理的降解效果最好,其次为F处理和NA处理。T处理所负载的吐温 20为一种非离子表面活性剂,其在增加反应面积的基础上,还能阻止木质素对纤维素酶的吸附,提高酶水解的速度^[20]。F处理所负载的腐植酸含有丰富的醌和酮基,能增强电子转移能力,从而促进纤维素降解的酶促反应^[21]。NA处理所负载的碳酸氢钠的Na⁺能够渗透纤维素,增大水解酶与木质纤维素的接触面积,改变纤维的结构和形态,从而增加秸秆的降解率^[22]。

在产氢产乙酸菌和产甲烷菌的作用下,木质纤维素降解后所形成的单糖、氨基酸、脂肪酸等化合物会进一步转化为甲烷。单糖等底物的含量在一定程度上决定了甲烷产量的高低^[23]。在本研究中,由于生物炭复合载体促进了稻秸的降解,增加了厌氧发酵系统单糖等底物以及挥发性脂肪酸(VFAs)等中间产物的含量,为产氢产乙酸菌和产甲烷菌的代谢提供了更为丰富的物质基础,也就增加了甲烷的产量。由于催化调节剂的作用机制

不同,不同催化调节剂的最适负载浓度有较大差异。碳酸氢钠在低浓度(0.3~1.5 g/L)时可以促进甲烷的产生,但是随着负载浓度升高,甲烷的产生开始受到抑制,这是因为Na⁺对利用丙酸的微生物的抑制作用比利用乙酸的微生物更大,导致丙酸积累,抑制了甲烷生产^[22]。而腐植酸到达一定浓度之后会降低产甲烷菌的活性,从而导致甲烷产量降低,因此,其浓度也不能太高^[24]。由于吐温 20是通过增加反应的总面积来促进厌氧发酵的,其在一定浓度范围内均能促进秸秆降解和甲烷的产生,但是超过一定浓度后,其增强效应不再明显。

本研究选用竹质生物炭负载不同的催化调节剂制成生物炭复合载体,将它们添加到稻秸与猪粪混合厌氧发酵系统以促进厌氧发酵进程,提高甲烷产量。在3种催化调节剂中,吐温 20、腐植酸和碳酸氢钠的最适负载浓度分别为2.25、0.75、2.10 g/L。研究中所利用的催化调节剂用量不高,且经济实惠,具有实地生产的经济性和可行性,在促进秸秆降解的同时提高了甲烷产量,研究结果可为BMF技术的改进和推广应用提供参考。

4 结论

①稻秸与猪粪混合厌氧发酵的日产气量和甲烷日产量总体呈单峰曲线,生物炭复合载体可促进稻秸与猪粪混合厌氧发酵进程,T处理和NA处理能提高产气峰值和促进产气峰值提早出现,F处理能够提高产气峰值,但对产气峰值出现的时间没有促进作用。

②生物炭复合载体能够促进水稻秸秆的降解,各处理的纤维素、半纤维素和木质素的降解率均显著高于CK,其中以T处理的降解效果最好,其纤维素、半纤维素和木质素的降解率分别比CK提高了48.64%、75.81%和22.06%。

③生物炭复合载体能显著提高稻秸与猪粪混合厌氧发酵系统的累积产气量和累积甲烷产量,其中,T处理的累积甲烷产量最高,其次为F处理和NA处理,它们的累积甲烷产量分别比CK增加了62.20%、48.70%和16.04%。T、F和NA处理的催化调节剂最适负载浓度分别为2.25、0.75、2.10 g/L。

参考文献:

[1] Sun Z, Hu R, Hong Y. Does yield gap still matter?

- Evidence from rice production in China [J].*Food Security*,2022,14(3):829-840.
- [2] Goodman B A. Utilization of waste straw and husks from rice production;A review[J].*Journal of Bioresources and Bioproducts*,2020,5(3):143-162.
- [3] Chiaki H, Tatsuga H, Hiroto T. GET system: Establishment of renewable energy biomethane, production system from rice straw in fallow paddy field [J].*Bioindustry*,2012,29:13-22.
- [4] 耿启明,黄永文,陈芳清.GET技术应用中农家肥与水稻秸秆混合发酵对土壤肥力的影响 [J]. *河南农业科学*,2019,48(7):68-73.
- [5] 张行,陈芳清,秦凯,等.添加剂对水稻秸秆实地混合厌氧发酵产甲烷系统的作用 [J]. *生物资源*,2020,42(3):327-334.
- [6] 向玲,李立松,李新,等.炭基催化剂比表面积,孔径与硫容关系研究[J].*四川环境*,2014,33(1):18-21.
- [7] 刘侠,温俊峰,焦玉荣,等.废弃果核壳中纤维素,半纤维素和木质素含量的测定[J].*榆林学院学报*,2022,32(2):6-9.
- [8] 熊素敏,左秀凤,朱永义.稻壳中纤维素,半纤维素和木质素的测定[J].*粮食与饲料工业*,2005(8):40-41.
- [9] Dai X,Hua Y,Dai L,et al. Particle size reduction of rice straw enhances methane production under anaerobic digestion [J].*Bioresource Technology*,2019,293:122043.
- [10] 何宇,甄峰,李金平,等.构树与不同生物质废弃物混合厌氧发酵产气性能研究 [J]. *可再生能源*,2020,38(8):1006-1013.
- [11] 李丹妮,张克强,梁军锋,等.三种添加剂对猪粪厌氧干发酵的影响 [J]. *农业环境科学学报*,2019,38(8):1777-1785.
- [12] Luo C, Lu F, Shao L, et al. Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes [J].*Water Research*,2015,68:710-718.
- [13] Wu P,Li L,Jiang J,et al. Effects of fermentative and non-fermentative additives on silage quality and anaerobic digestion performance of *Pennisetum purpureum* [J].*Bioresource Technology*,2020,297:122425.
- [14] 王永泽,杨立,张婷,等.金属离子及表面活性剂对秸秆发酵产沼气的的影响 [J]. *可再生能源*,2010,28(2):30-32.
- [15] Lee J,Hwang S. Single and combined inhibition of *Methanosaeta concilii* by ammonia, sodium ion and hydrogen sulfide[J].*Bioresource Technology*,2019,281:401-411.
- [16] Li J,Hao X,van Loosdrecht M C,et al. Effect of humic acids on batch anaerobic digestion of excess sludge[J].*Water Research*,2019,155:431-443.
- [17] Kang Y-R,Su Y,Wang J,et al. Effects of different pretreatment methods on biogas production and microbial community in anaerobic digestion of wheat straw[J].*Environmental Science and Pollution Research*,2021,28(37):51772-51785.
- [18] Tian Y,Zhang H,Zheng L,et al. Effect of Zn addition on the Cd-containing anaerobic fermentation process: Biodegradation and microbial communities [J].*International Journal of Environmental Research and Public Health*,2019,16(16):2998.
- [19] Chen S,Rotaru A-E,Shrestha P M,et al. Promoting interspecies electron transfer with biochar [J].*Scientific Reports*,2014,4(1):1-7.
- [20] Alkasrawi M,Eriksson T,Börjesson J,et al. The effect of Tween-20 on simultaneous saccharification and fermentation of softwood to ethanol [J].*Enzyme and Microbial Technology*,2003,33(1):71-78.
- [21] Cervantes F J, Van Der Velde S,Lettinga G,et al. Competition between methanogenesis and quinone respiration for ecologically important substrates in anaerobic consortia [J].*FEMS Microbiology Ecology*,2000,34(2):161-171.
- [22] Valença R B,dos Santos L A,Firmino A L B,et al. Influence of sodium bicarbonate (NaHCO_3) on the methane generation potential of organic food waste[J].*Journal of Cleaner Production*,2021,317:128390.
- [23] Achinas S,Achinas V,Euerverink G J W. A technological overview of biogas production from biowaste [J].*Engineering*,2017,3(3):299-307.
- [24] Wang X,Muhmood A,Lyu T,et al. Mechanisms of genuine humic acid evolution and its dynamic interaction with methane production in anaerobic digestion processes [J].*Chemical Engineering Journal*,2021,408:127322.

Effect of biochar composite carrier on methane production from the mixed anaerobic fermentation of rice straw–pig manure

Hua Ruilin¹, Chen Fangqing¹, Huang Yongwen², Liu Yangyun², Li Zeyu³

(1.Hubei International Scientific and Technological Cooperation Center of Ecological Conservation and Management in Three Gorges Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.Hubei Zhengjiang Environmental Science and Technology Co.,Ltd., Yichang 443002, China; 3.Yichang Water and Soil Pollution Prevention and Management Center, Bureau of Ecology and Environment, Yichang 443002, China)

Abstract: In this paper, biochar composite carrier was constructed by using biochar loaded with different concentrations of sodium bicarbonate, humic acid, Tween 20 and other catalytic regulators, and each composite carrier was added to the rice stub–pig manure mixed anaerobic fermentation system for anaerobic fermentation. By measuring the gas production, methane production and the degradation rate of straw lignocellulose of each treatment, the role of biochar composite carrier on methane production in mixed anaerobic fermentation and straw degradation was revealed. The results show that the biochar composite carrier can increase the peak value of methane production and shorten the time of peak value of methane production. Biochar composite carriers can significantly increase the cumulative gas production and the cumulative methane production of anaerobic fermentation systems, with the best effect of biochar–loaded Tween 20, followed by biochar–loaded humic acid and biochar–loaded sodium bicarbonate. Compared with the control group, the gas production and the methane production of biochar loaded Tween 20 treatment increased by 23.18% and 62.20% , respectively. In each treatment, the degradation degree of straw was the highest in biochar loaded Tween 20 treatment, followed by biochar–loaded humic acid, biochar –loaded sodium bicarbonate and control group. The optimal loading concentrations of Tween 20, humic acid and sodium bicarbonate were 2.25, 0.75, 2.10 g/L, respectively.

Keywords: field mixed anaerobic fermentation; catalytic regulator; biochar; composite carrier; methane