



何荣玉,张自强.生物预处理耦合湿法储存对玉米秸秆产沼气性能的影响[J].黑龙江农业科学,2023(9):80-86.

生物预处理耦合湿法储存对玉米秸秆产沼气性能的影响

何荣玉,张自强

(中节能绿碳环保有限公司,北京 100082)

摘要: 秸秆储存是确保秸秆沼气工程原料稳定供应的有效手段,预处理是提高秸秆沼气化利用效率的有效方法。为促进秸秆沼气化利用,以玉米秸秆为研究对象,在短期浸泡、长期厌氧两种湿法储存过程中,分别添加沼液、牛粪、菌剂进行生物预处理,对比分析玉米秸秆成分和沼气产气性能的变化。结果表明,生物预处理耦合湿法储存,能有效提高玉米秸秆产沼气性能。当短期浸泡预处理储存时,随储存时间推移,各试验组纤维素、半纤维素含量逐渐降低,TS产气率逐渐提升;其中菌剂组产沼气性能最佳,储存 20 d 后 TS 产气率最高,达 $492.6 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,比对照组高 18.78%。当长期厌氧预处理储存时,各试验组纤维素、半纤维素在储存前 60 d 降解较快、后期降解缓慢,TS 产气率呈现先升后降的趋势,其中菌剂组产沼气性能最佳,TS 产气率在第 60 天达到最高值 $522.1 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,较对照组增长 60.89%;而沼液组、牛粪组 TS 产气率分别从第 50 天、第 180 天后低于对照组。因此,在秸秆沼气工程运行过程中,可结合实际情况选择合适的预处理储存方式,提高秸秆 TS 产气率。

关键词: 玉米秸秆;湿法储存;生物预处理;产沼气性能

我国是农业大国,据统计农作物秸秆可收集资源量为 $8.27 \times 10^8 \text{ t}$,其中玉米、水稻、小麦三大

粮食作物秸秆资源量占全国秸秆资源总量的 84.8%,是中国农作物秸秆的主要来源^[1]。将秸秆进行沼气化利用,在厌氧条件下秸秆经微生物发酵产生沼气和有机肥料,不仅可以减少秸秆焚烧带来的环境污染问题,还能缓解能源危机、促进农业可持续发展,为我国实现“碳达峰、碳中和”目标贡献力量。

收稿日期:2023-04-07

基金项目:中国节能环保集团有限公司重大科技创新项目(cecep-zdkj-2019-003);中节能绿碳环保有限公司科技创新项目(1t-yf-2017-02)。

第一作者:何荣玉(1983—),女,博士,高级工程师,从事有机废弃物资源化利用研究。E-mail:954476439@qq.com。

Effects of Pruning Time and Height on Delayed Flowering of *Platycodon grandiflorum*

YANG Jiashuai, CUI Wenjie, JIANG Wen, LI Junjie, QUAN Xueli, WU Songquan

(Agricultural College, Yanbian University, Yanji 133000, China)

Abstract: In order to regulate the flowering period of *Platycodon grandiflorum*, two-year-old purple flower *P. grandiflorum* was used as experimental material to study the effects of pruning period and height on delayed flowering of *P. grandiflorum*. The results showed that after pruning at the final flowering stage, the *P. grandiflorum* no longer blooms. After pruning at other stages, the flowering period of *P. grandiflorum* was prolonged, and after pruning at the peak flowering stage, the flowering period was prolonged by up to 36 days; *P. grandiflorum* was no longer flowering after pruning at the end flowering stage, while the other pruning period prolonged ornamental days and the most extended days observed at pruning of florescence stage, reaching 36 days; The total flowering period of pruning at pre-bud stage and bud stage was the longest, which was 41 days; flowering for pruning height of 1/4 was first and flowering for pruning height of 1/2 was relatively late under the same pruning period. The pedicel length of pruning at pre-bud stage was significantly higher than that of control, the total number of flowers of pruning was smaller than that of control, the corolla diameter and petal length of pruning at bud, initial flowering and florescence stage were significantly higher than those of control, the petal width of pruning at initial flowering and florescence stage was significantly higher than that of control and there was no significant difference in floral traits between different pruning heights under the same pruning period. Compared to the pruning height, the pruning period is more conducive to extending the flowering period and increasing the size of the flowers.

Keywords: *Platycodon grandiflorum*; pruning period; pruning height; flowering period; flower trait

由于秸秆收获具有季节性,因此必须妥善储存才能为秸秆沼气工程提供连续稳定的原料供应。根据储存原料含水率的不同,可分为干法储存和湿法储存。与干法储存相比,湿法储存的秸秆干物质损失较低,产甲烷潜力保存完备,既能有效保存营养物质和水分,还能克服火灾危险、品质下降等缺陷^[2]。同时,秸秆主要由木质素、纤维素、半纤维素 3 种成分组成,木质素将纤维素、半纤维素包裹,形成致密的结构,使得秸秆在沼气化利用过程中,难以被微生物直接降解利用。秸秆预处理通过改变秸秆物理化学性质,增加秸秆表面积,破坏纤维素、半纤维素和木质素之间的化学键,减少纤维素的结晶,从而提高秸秆的降解效率^[3]。常用的秸秆预处理方法有物理法,包括机械粉碎^[4-6]、蒸汽爆破^[7-8]、微波辐射^[9-10]等;化学法,包括酸处理^[11-12]、碱处理^[13-14]等;生物法,包括微生物处理^[15-16]、酶处理^[17-18]、沼液处理^[19-20]等。其中生物法预处理条件较为温和、能耗低,更加经济、环保^[21]。着眼工程应用,将秸秆储存与秸秆预处理进行耦合,在秸秆储存的同时实现秸秆预处理,既能达到预处理的效果,又能节约预处理时间,实现秸秆储存与预处理的一体化^[22]。

本文以玉米秸秆为研究对象,在短期浸泡、长期厌氧两种湿法储存过程中,分别添加沼液、牛粪、菌剂进行生物预处理,比较分析预处理前后玉米秸秆成分及沼气产气性能变化,以期对秸秆沼气化工程应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

玉米秸秆:取自中节能绿碳(宝泉岭农垦)环保有限公司生物天然气项目(以下简称宝泉岭项目)周边农场的玉米秸秆。其长度 5~10 cm,总固体(Total Solid, TS)48.12%,挥发性固体(Volatile Solid, VS)95.35%,木质素 6.82%,纤维素 32.68%,半纤维素 26.15%,还原性糖 13.75%。

沼液:取宝泉岭项目沼液,TS 3.15%,VS 57.75%。

牛粪:取宝泉岭项目周边养牛场牛粪,TS 22.12%,VS 61.88%,并用自来水调节 TS 至 3.15%备用。

菌剂:公司自有纤维素分解复合菌液。

接种物:取宝泉岭项目(该项目以玉米秸秆、牛粪为发酵原料,采取中温完全混合式厌氧发酵工艺)沼液离心后上清液,TS 0.45%,VS 53.21%。

1.2 秸秆预处理储存试验

1.2.1 短期浸泡预处理储存试验 取玉米秸秆放入 10 L 试验桶,按固液比 1:14 的比例分别添加沼液、牛粪、菌剂进行短期浸泡预处理储存 30 d,设置对照组(添加自来水),室温储存。于第 1 天、第 2 天、第 3 天、第 5 天、第 7 天、第 10 天、第 15 天、第 20 天、第 25 天、第 30 天取样,测定纤维素、半纤维素、还原糖含量。

1.2.2 长期厌氧预处理储存试验 将玉米秸秆粉碎至 2 cm 左右,取 300 g 粉碎后秸秆分别与沼液、牛粪、菌剂混合至含水率为 65%,抽真空密封储存至密封袋中,开展为期 360 d 的长期厌氧预处理储存试验,设置对照组(添加自来水),每个处理设置 30 个重复,室温储存。第 1 天至第 30 天每隔 5 d 取样,第 31 天至第 90 天每隔 10 d 取样,第 91 天至第 360 天每隔 30 d 取样,测定纤维素、半纤维素、还原糖含量。

1.3 产沼气性能试验

将上述不同预处理储存试验中不同时间段取出的玉米秸秆样品进行产沼气性能试验。取玉米秸秆样品装入有效发酵容积为 800 mL 自制厌氧发酵装置,加入体积比为 20%接种物,调节发酵料液 TS 为 5%、pH7.0,将厌氧发酵装置放入 37 °C 恒温培养箱进行批式厌氧发酵,产生的沼气由气体采样袋收集。设置 3 个重复,测定日产气量、CH₄、CO₂ 含量,待批式厌氧发酵结束后,测定料液 TS。

1.4 分析方法

TS、VS 测定采用重量法^[23];pH 采用赛多利斯 PB-10 酸度计测定;纤维素和半纤维素含量测定采用范式洗涤纤维分析法^[24];还原糖采用蒽酮比色法^[25];产气量测定采用排水法测量;CH₄、CO₂ 含量采用山东鲁南 SP-6890 气相色谱仪进行测定。

1.5 数据分析

数据采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 进行处理分析及制图。

2 结果与分析

2.1 短期浸泡预处理储存

2.1.1 玉米秸秆成分变化 由图 1a 可知,3 组试验组纤维素和半纤维素含量随着储存时间延长而降低,但短时间的浸泡预处理并不会对纤维素类物质产生有效的影响,各试验组纤维素、半纤维素含量在 5 d 后开始明显下降;第 30 天沼液组、牛粪组、菌剂组纤维素和半纤维素含量分别为 45.45%、40.10% 和 37.97%,依次比对照组低 21.91%、31.10% 和 34.76%。

纤维素、半纤维素降解后产生糖类物质,因此

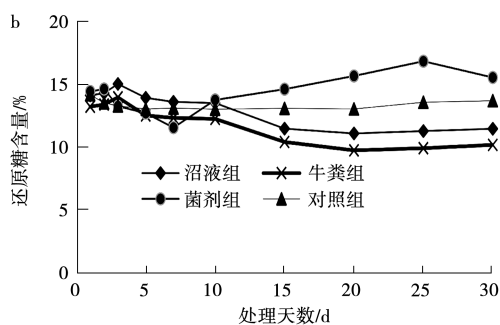
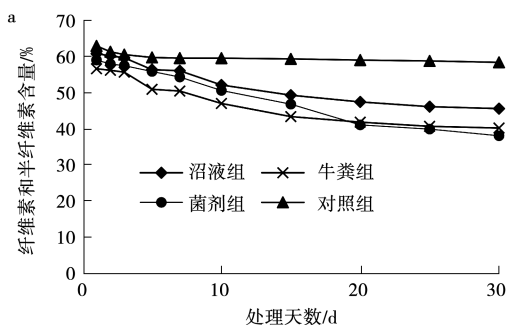


图 1 短期浸泡预处理储存后玉米秸秆成分变化

2.1.2 产气性能分析 由图 2a 可知,3 个试验组秸秆 TS 产气率整体上随储存天数增加而提高,储存 5 d 后 TS 产气率明显提高;其中菌剂组储存 20 d TS 产气率最高,达 $492.6 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,比对

照组提升 18.78%;沼液组储存 30 d TS 产气率最高,为 $481.5 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,比对照组提升 13.83%;牛粪组储存 25 d TS 产气率最高,为 $456.3 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,比对照组提升 9.03%。

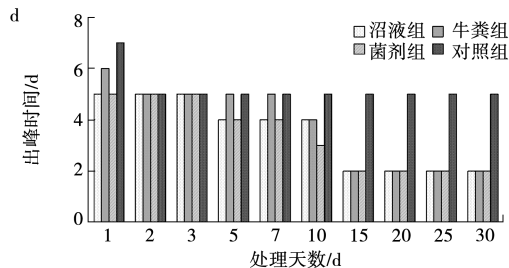
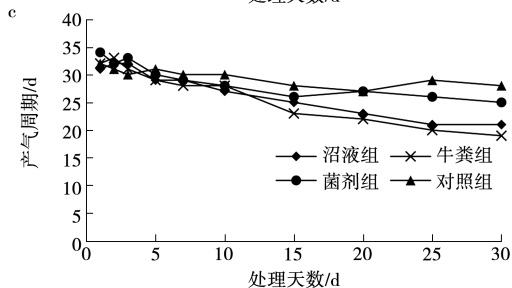
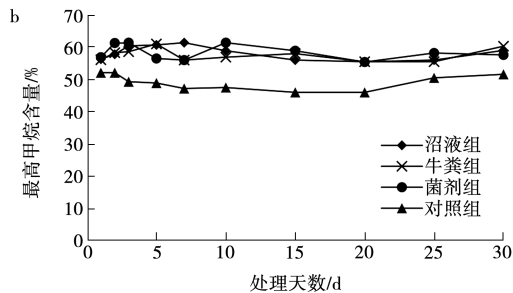
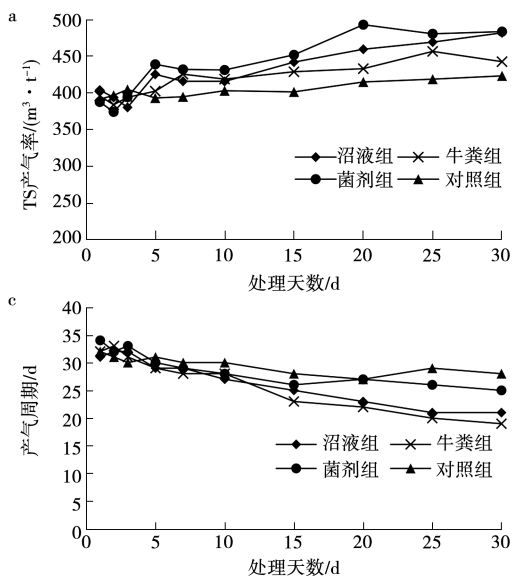


图 2 短期浸泡预处理储存后玉米秸秆厌氧发酵产气性能分析

由图 2b 可知,3 个试验组最高甲烷含量在 55%~62% 之间,均高于对照组,3 组平均比对照组高 18.46%。说明经沼液、牛粪、菌剂浸泡预处理储存后能提高沼气中甲烷含量。

由图 2c 可知,3 组试验组的产气周期随储存天数的不同有着明显的变化。当浸泡预处理储存 1~3 d 时,各试验组产气周期基本在 31~33 d;当储存天数超过 15 d 后,各试验组的产气周期则随着储存时间的增加而缩短,第 30 天时,牛粪组、沼液组、菌剂组产气周期分别为 19,21 和 25 d,比对照组分别缩短 9,7 和 3 d。说明浸泡预处理能有效缩短产气周期,而且 TS 产气率越高的试验组,其产气周期更长,其中 TS 产气率最高的菌剂组其产气周期最长。

由图 2d 可知,3 组试验组出峰时间均随着储存时间的增加逐步提前,均优于对照组。当浸泡预处理 1~3 d 时,试验组出峰时间均为 5 d;处理 5 d 时,沼液组和菌剂组出峰时间提前至 4 d;从处理 15 d 开始,各试验组出峰时间均提前至 2 d,比对照组提前 3 d。说明浸泡预处理储存能缩短出峰时间,且不同预处理方式无明显差异。

2.2 长期厌氧预处理储存

2.2.1 玉米秸秆成分变化 由图 3a 可知,沼液组、牛粪组、菌剂组纤维素和半纤维素含量在储存前 60 d 随着储存天数的增加而急剧下降,第 60 天分别为 45.04%、41.38% 和 33.89%,比对照组低 26.56%、31.43% 和 42.59%;储存 120 d 后,3 个试验组纤维素、半纤维素含量下降缓慢,储存 360 d,沼液组、牛粪组、菌剂组的纤维素、半纤维素含量分别为 39.42%、36.26% 和 30.38%,比对照组低 25.97%、31.91% 和 42.95%。

由图 3b 可知,3 个试验组变化趋势相似,呈下降-上升-下降的趋势。前期,沼液组和牛粪组还原糖含量下降更快,牛粪组第 20 天最低,为 9.36%,比对照组低 33.05%;随后 3 个试验组还原糖含量升至最高,各组到达峰值的时间不同,其中菌剂组最快,第 60 天达到峰值,为 19.54%,其次为牛粪组,第 80 天达到峰值,为 18.33%,而沼液组第 120 天达到峰值,为 17.78%,3 个试验组还原糖含量峰值分别比对照组高 39.77%、31.12% 和 27.18%;之后 3 个试验组还原糖含量均下降,其中牛粪组下降最快,且从第 330 天开

始低于对照组,至第 360 天时比对照组低 7.85%,沼液组和菌剂组下降较慢,均高于对照组,第 360 天菌剂组更高,为 14.58%,比同期对照组高 41.28%。

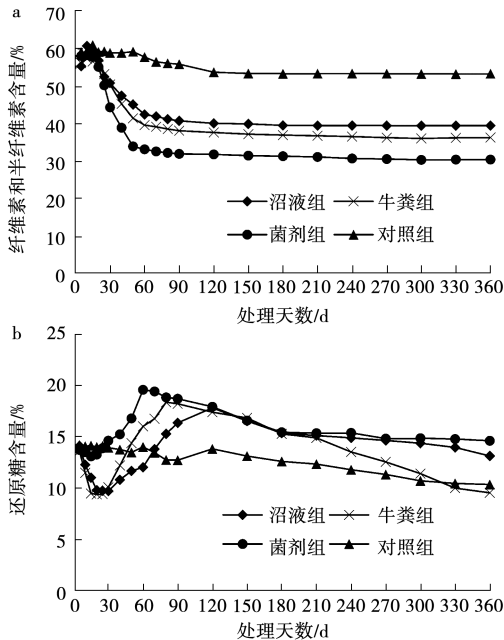


图 3 长期厌氧预处理储存后玉米秸秆成分变化

2.2.2 产气性能分析 由图 4a 和图 4b 可知,各试验组随着储存时间的推移,TS 产气率呈现先升后降的趋势。其中沼液组在前 50 d TS 产气率略高于对照组,平均提高 5.03%,随后 TS 产气率低于对照组,储存 360 d 时,比对照组低 31.15%;牛粪组在储存 20 d 后 TS 产气率开始明显提升,储存 60 d 达到最高值,为 $496.7 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,较对照组增长 53.07%,随后产气率逐渐下降,储存 180 d 后低于对照组,至第 360 天比对照组低 15.20%;菌剂组 TS 产气率也在储存 20 d 后有明显的增加,在储存 60 d 后达到最高值 $522.1 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$,较对照组增长 60.89%,随后产气率逐渐下降,但仍高于对照组,储存 360 d 后菌剂组 TS 产气率仅比对照组高 0.07%。

由图 4c 可知,各试验组最高甲烷含量没有明显差异,均在 50%~60% 之间。各试验组产气周期在储存前期无明显差别,后期随着处理时间的增加而缩短,与 TS 产气率逐渐降低的表现一致(图 4d)。

由图 4e 可知,各试验组出峰时间整体随处理时间推移而逐渐提前。

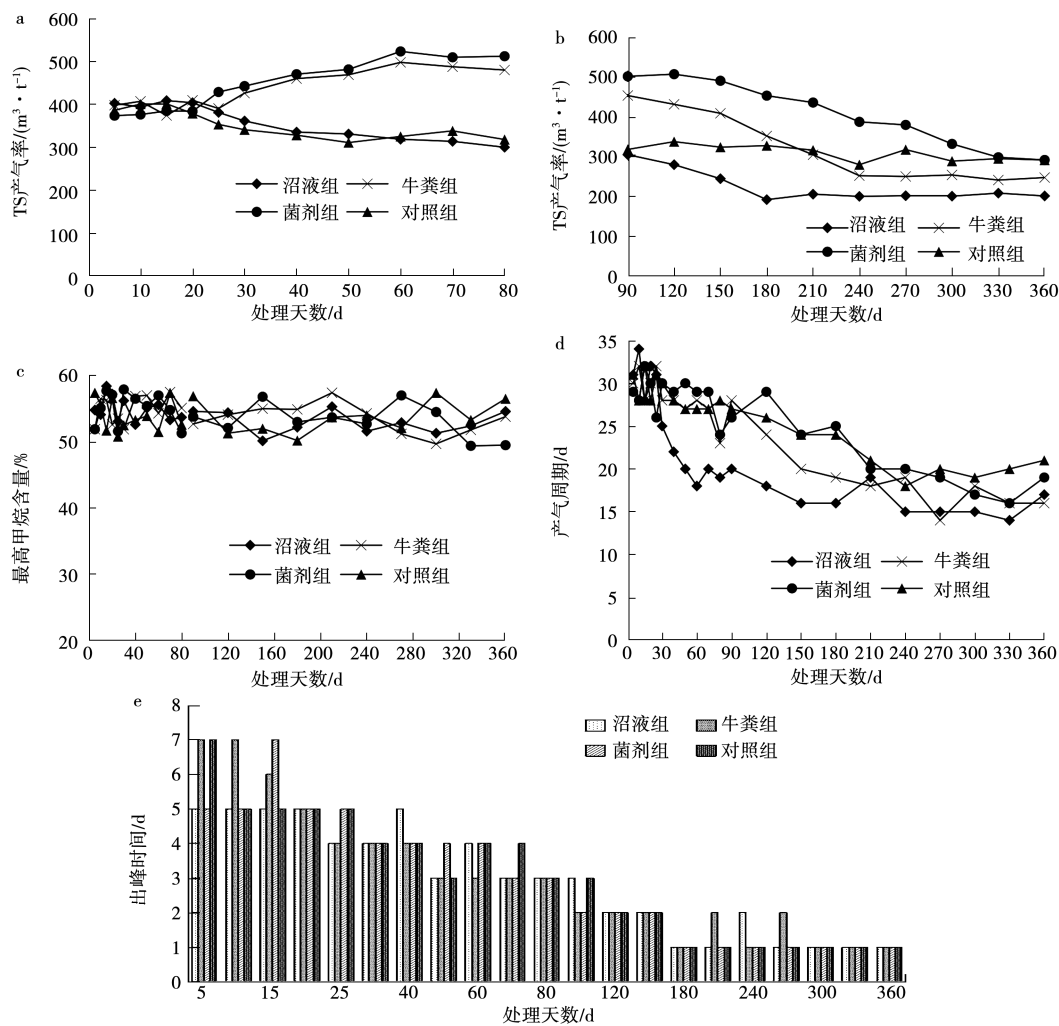


图 4 长期厌氧预处理储存后玉米秸秆厌氧发酵产气性能

3 讨论

当短期浸泡预处理储存时,沼液组、牛粪组、菌剂组的纤维素、半纤维素含量随着储存时间延长而降低,第 30 天菌剂组纤维素、半纤维素含量最低,为 37.97%。说明沼液、牛粪、菌剂预处理均能对玉米秸秆中纤维素、半纤维素进行降解,并且时间越长,降解程度越大。这是由于秸秆中纤维素是由 D-葡萄糖基通过糖苷键连接聚合而成的多糖,半纤维素是由 2 种或 2 种以上糖基通过糖苷键而形成的侧链或支链结构的非均一高聚糖,这 2 种成分结构相对简单,易被细菌利用^[26];而沼液、牛粪、菌剂中均含有纤维素分解微生物,能有效降解秸秆中纤维素、半纤维素成分,并且菌剂中所含纤维素分解微生物数量最多,因此降解效果最好。沼液组和牛粪组还原糖含量前期增加,随后逐步下降,均低于对照组;而菌剂组还原

糖含量呈现下降-增加-下降的规律,第 30 天时下降至 15.49%,但仍比对照组高 13.40%。推测原因为还原糖除了是纤维素、半纤维素降解后的产物,同时也是微生物优先利用的碳源^[27];发酵液中还原糖含量取决于微生物降解纤维素、半纤维素产生的糖类物质积累和消耗的速率,其中沼液组和牛粪组中微生物种类较为丰富,消耗还原糖的速率大于产生降解纤维素、半纤维素生成还原性糖的速率,而菌剂中主要含有纤维素分解微生物,能较快降解秸秆中纤维素、半纤维素生成还原糖并累积,并高于沼液组和牛粪组。各试验组 TS 产气率随储存天数增加而提高,其中菌剂组储存 20 d TS 产气率最高,达 492.6 m³·t⁻¹,比对照组提升 18.78%。分析原因为玉米秸秆经过菌剂、沼液、牛粪浸泡预处理后,致密结构遭到了一定程度的破坏,且随着储存天数的增加,纤维素和半纤维素不断降解产生糖类物质,更易被厌氧发酵微

生物利用产生沼气;其中菌剂组纤维素、半纤维素降解率最高且还原糖含量最高,因而其 TS 产气率亦最高。

当长期厌氧预处理储存时,3 个试验组纤维素、半纤维素含量在储存前 60 d 降解较快,其中菌剂组由于所含纤维素分解微生物数量最多,纤维素、半纤维素降解效果最好,第 60 天纤维素、半纤维素含量为 33.89%;后续降解较慢,至第 360 天,菌剂组为 30.38%。这是由于纤维素、半纤维素降解微生物多为好氧微生物,而储存秸秆的密封袋中残留氧气随着时间推移逐渐消耗,从而降解速率下降。同时,对比短期浸泡预处理与长期厌氧预处理对玉米秸秆纤维素、半纤维素的降解效果,发现在相同储存时间下,前者降解效果更好,这与两种储存环境中氧气含量相关,前者氧气含量更高,更利于纤维素、半纤维素降解微生物生存,从而降解效果更好。3 个试验组还原糖含量变化趋势相似,呈下降-上升-下降的趋势。前期,沼液组和牛粪组还原糖含量下降更快,牛粪组第 20 天最低,为 9.36%,比对照组低 33.05%;随后菌剂组还原糖含量第 60 天达到峰值,为 19.54%,比对照组高 39.77%;之后牛粪组还原糖含量下降最快,菌剂组下降较慢,第 360 天下降至 14.58%,比同期对照组高 41.28%。分析原因可能由于沼液组和牛粪组中微生物种类较为丰富,在储存前期消耗还原糖的速率大于降解纤维素、半纤维素产生还原性糖的速率,使得两组还原糖含量下降较快;而菌剂组主要含有纤维素降解微生物,前期能较快速度降解秸秆中纤维素、半纤维素成分并积累还原糖,使得菌剂组还原糖含量最快达到峰值;但是随着密封袋中残留氧气逐渐消耗,纤维素、半纤维素降解缓慢,储存后期 3 组试验组还原糖含量逐渐下降,而菌剂组中纤维素分解微生物在厌氧环境中消耗还原糖的速率更慢,所以菌剂组还原糖含量在 3 组试验组中最高。各试验组储存前期 TS 产气率升高,与纤维素、半纤维素含量下降、还原糖含量增加的变化趋势一致;在储存后期,3 个试验组 TS 产气率下降,沼液组下降最快,菌剂组下降最慢;且后期 3 组试验组的密封袋逐渐出现胀袋现象,其中沼液组最为明显,其次为牛粪组,抽取密封袋中的气体检测发现,气体主要成分为 80% 左右的 CO_2 和 3% 左右的 CH_4 ,说明 3 组试验组在储存过程中发生了产甲烷反应,推测这是造成经过长时间储存后各试验组 TS 产气率下降的主要原因。同时由于沼液中

含有更为丰富的产甲烷菌、牛粪中也存在一定的产甲烷菌,使得沼液组产甲烷反应进程最快,从而造成了沼液组 TS 产气率下降最快、最先低于对照组,以及牛粪组 TS 产气率下降速度次之,最终也低于对照组。

然而,本研究中关于挥发性有机酸、秸秆压实密度、秸秆含水率等参数对预处理效果的影响并未涉及,同时储存过程中微生物种群的变化情况也未考虑,这些将在后续的工作中进一步深入研究。

4 结论

将短期浸泡、长期厌氧两种湿法储存方式与沼液、牛粪、菌剂 3 种预处理方式耦合,能有效提高玉米秸秆产沼气性能,其中短期浸泡预处理储存时间宜超过 5 d;长期厌氧预处理储存时,沼液预处理不宜超过 50 d,牛粪预处理不宜超过 180 d,菌剂预处理可达 360 d,且牛粪预处理和菌剂预处理最佳储存时间均为 60 d。在秸秆沼气工程运行过程中,可结合实际情况选择合适的预处理储存方式,提高秸秆 TS 产气率,从而提升工程经济效益。

参考文献:

- [1] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报,2019,35(22): 132-140.
- [2] HILLION M L, MOSCOVIZ R, TRABLY E, et al. Co-ensiling as a new technique for long-term storage of agro-industrial waste with low sugar content prior to anaerobic digestion [J]. Waste Manage, 2018, 71: 147-155.
- [3] 才金玲,王乃可,王娟,等. 水稻秸秆预处理技术研究进展[J]. 中国稻米, 2023, 29(3): 24-27.
- [4] 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.
- [5] 郝宏志,袁海荣, WACHEMO A C, 等. 不同粒径稻草的漂浮特性和厌氧发酵产气性能研究[J]. 中国沼气, 2019, 37(4): 53-59.
- [6] 熊霞. 粉碎预处理对秸秆沼气发酵浮渣形成的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [7] 廖澄,魏丹丹,刘健峰,等. 蒸汽爆破玉米秸秆厌氧消化产气特性研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 12-16.
- [8] KALDIS F, CYSNEIROS D, DAY J, et al. Anaerobic digestion of steam-exploded wheat straw and co-digestion strategies for enhanced biogas production[J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8284.
- [9] 冯磊,李润东, RANINGER B, 等. 微波预处理对秸秆厌氧消化影响的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(8): 1503-1508.
- [10] KAINTHOLA J, SHARIQ M, KALAMDHAD A S, et al. Kalamdhad enhanced methane potential of rice straw with

- microwave assisted pretreatment and its kinetic analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232 (15):188-196.
- [11] PENG J J, ABOMOHRA A E F, ELSAYED M, et al. Compositional changes of rice straw fibers after pretreatment with diluted acetic acid: towards enhanced biomethane production[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230 (1):775-782.
- [12] 梁仲燕. 不同酸预处理对水稻秸秆厌氧消化产沼气的影响[J]. 广东化工, 2018, 45(28):41-43.
- [13] 王超, 刘金明, 王春圻. 玉米秸秆碱性预处理技术研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2022, 34(2):23-31.
- [14] 王禹霄飞, 孙云博, 曲威. 温和湿热条件下碱预处理对玉米秸秆厌氧发酵的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5):236-243.
- [15] 蒋帅. 秸秆厌氧发酵过程中白腐真菌预处理对产甲烷的影响[D]. 成都:西南交通大学, 2020.
- [16] 黄开明, 赵立欣, 冯晶, 等. 复合微生物预处理玉米秸秆提高其厌氧消化产甲烷性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16):184-189.
- [17] ZHAO X, ZHENG Z, CAI Y, et al. Accelerated biomethane production from lignocellulosic biomass: pretreated by mixed enzymes secreted by *Trichoderma viride* and *Aspergillus* sp. [J]. Bioresource Technology, 2020, 309:123378.
- [18] 赵肖玲, 郑泽慧, 蔡亚凡, 等. 哈茨木霉和黑曲霉粗酶液预处理改善秸秆产甲烷性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):219-226.
- [19] 魏域芳, 李秀金, 袁海荣. 沼液预处理玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产气性能的研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(1):39-46.
- [20] 孟艳, 汪微, 蒯全财, 等. 沼液预处理对蔬菜秸秆厌氧消化性能的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(9):188-196.
- [21] ZHONG W, ZHANG Z, LUO Y, et al. Effect of biological pretreatment in enhancing corn straw biogas production [J]. Bioresource Technology, 2011, 102:11177-11182.
- [22] 马慧娟, 陈广银, 杜静, 等. 预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(8):3280-3285.
- [23] WANG L, ZHANG K, XU Y, et al. High-solid pretreatment of corn stover using urea for enzymatic saccharification [J]. Bioresource Technology, 2018, 259:83-90.
- [24] 王金主, 王元秀, 李峰, 等. 玉米秸秆中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J]. 山东食品发酵, 2010(3):44-47.
- [25] 丁雪梅, 张晓娟, 赵云, 等. 蒽酮比色法测定可溶性糖含量的试验方法改进[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2014(23):230-233.
- [26] 张晓琰, 彭学, 政井英司. 木质素芳香族化合物降解菌 *Sphingobium* sp. 的研究进展[J]. 微生物学报, 2014, 4(8):854-867.
- [27] 范华. 秸秆保存方法和时间对营养价值的影响[D]. 太谷:山西农业大学, 2001.

Effects of Biological Pretreatment Coupled with Wet Storage on Biogas Production of Corn Straw

HE Rongyu, ZHANG Ziqiang

(CECEP Green Carbon Environment Protection, Beijing 100082, China)

Abstract: Straw storage is an effective means to ensure the stable supply of raw materials for crop straw biogas plant, and pretreatment is a common method to improve the biogas production of straw. In order to promote the biogas utilization of straw, this paper took corn straw as the research object, and added biogas slurry, cow dung and microorganism agent respectively for biological pretreatment during the two wet storage processes of short-term soaking and long-term anaerobic, and compared and analyzed the changes in the composition and the biogas production performance of corn straw. The results showed that biological pretreatment coupled with wet storage could effectively improve biogas production performance of corn straw. In the short-term soaking pretreatment storage, the content of cellulose and hemicellulose gradually decreased, and the biogas production rate of total solids gradually increased with the storage time. The biogas production of the microorganism agent group was the best, and the biogas production rate of total solids was the highest after 20 days of storage, reaching $492.6 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, which was 18.78% higher than that in the control group. In the long-term anaerobic pretreatment storage, the cellulose and hemicellulose of each test groups were degraded rapidly on the first 60 days and slowly later, and the biogas production rate of total solids of each test groups showed a trend of rising first and then decreasing. The biogas production of the microorganism agent group was the best, and the biogas production rate of total solids reached the highest value of $522.1 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ on 60 days of storage, which increased by 60.89% compared with the control group. However, the biogas production rate of total solids of biogas slurry group and cow dung group was lower than that of control group from 50 and 180 days of storage, respectively. Therefore, during the operation of straw biogas projects, appropriate pre-treatment and storage methods can be selected based on the actual situation to improve the gas production rate of straw TS.

Keywords: corn straw; wet storage; biological pretreatment; biogas production