青贮预处理在秸秆厌氧消化中的应用研究进展

肖开腾[1],庄兆恒[1],石艳春[1],肖友乾[2],王智勇[2],左定东[2],杨红男[2*]
(1. 中广核环保产业有限公司,广东 深圳 518031; 2. 农业农村部成都沼气科学研究所,四川 成都 610041)

摘 要: 青贮预处理在秸秆厌氧消化中的应用目前已有一定的研究和实践经验。通过对已有研究的回顾,批判性地评述了青贮过程特征和青贮对秸秆厌氧消化的影响,揭示了青贮促进秸秆厌氧消化产气效率的作用机制;从原料总固体含量和粒度、添加剂的使用、青贮时间和压实度等方面总结了秸秆青贮过程控制策略,为进一步改进大规模应用提供理论指导。最后,介绍了青贮预处理农作物秸秆所面临的挑战和前景。

关键词: 青贮技术; 秸秆; 厌氧消化; 过程控制
中图分类号: S216.4; X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)06-0003-07
DOI:10.20022/j.cnki.1000-1166.2023060003

Research Progress of Application of Silage Pretreatment in Anaerobic Digestion of Straw / XIAO Kaiteng[1], ZHANG Zhaoheng[1], SHI Yanchun[1], XIAO Youqian[2], WANG Zhiyong[2], ZUO Dingdong[2], YANG Hongnan[2*] /

(1. **China General Nuclear Power Environmental Protection Industry Co Ltd, Shenzhen** 518031, **China**; 2. **Biogas Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu** 610041, **China**)

Abstract: The use of silage pretreatment in the anaerobic digestion of straw has been extensively studied and implemented. This article provided a review of the current research, analyzed the silage process and its impact on anaerobic digestion of straw, and uncovered the mechanisms that lead to increased methane production during this process. Furthermore, the article presented an overview of the control strategies that are employed during the silage process, such as the regulation of total solid content and particle size of raw materials, use of additives, silage time and compaction degree. This theoretical guidance helps in advancing large-scale application of silage pretreatment. Finally, the challenges and prospects of using this technique for agricultural straw were discussed.

Key words: ensiling technology; straw; anaerobic digestion; process control

我国每年生产约10亿吨农作物秸秆[1],以玉米秸秆、水稻秸秆和小麦秸秆为主。大量的农作物秸秆被闲置或直接焚烧,既浪费资源,又造成环境污染。为了减少污染,促进农作物秸秆的高效利用,农业农村部推出了“农作物秸秆利用十大模式”。在粮食主产区推广“秸秆-沼气-肥料”模式。厌氧消化作为该模式的核心过程,不仅可以以沼气的形式回收能量,还可以实现作物秸秆的间接还田,有助于保持土壤肥力,改善腐殖质和土壤-作物之间的养分循环[2-3]。

尽管有报道称秸秆生产沼气的潜力很大,但其作为厌氧消化原料的有效利用仍面临许多挑战[2,4-6]。由于秸秆主要由木质纤维素组成,高聚合物含量和致密性结构导致其生物消化率低,容易在厌氧消化器中形成浮层甚至结壳,出现沼气生产效率低等问题,一般需要在厌氧消化前对其进行预处理[7]。此外,由于秸秆收获的季节性和沼气工程每日所需原料的供应,需要对收获的秸秆进行长期有效的储存。

青贮是上个世纪以来广泛应用于牲畜饲料生产的一种方法,它在厌氧条件下利用微生物发酵来防止湿生物质进一步降解。通常将利用青贮技术贮存收割后的干(黄)秸秆也称之为黄贮[8]。与露天和干草储存相比,青贮已被证明是最大限度地保存秸秆生物质的最佳储存策略[9-10],且不受天气影响。而且秸秆经青贮后对其后续甲烷化的积极作用也证明了青贮是一种有效的低技术含量的秸秆预处理方法[11-14]。据报道,通过良好的青贮预处理,作物秸

收稿日期: 2023-06-18
项目来源: 中国广核集团“尖峰计划”科研项目
作者简介: 肖开腾(1985-),男,广东陆丰人,本科,主要从事生物质能源利用研究等工作,E-mail: keton2007@139.com
通信作者: 杨红男,E-mail: yanghongnan@caas.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

秆的甲烷产量可增加 20% ~35%[10,15]。在青贮过程中,厌氧微生物将底物(主要是水溶性碳水化合物(WSC))发酵成有机酸(尤其是乳酸),从而实现生物酸化和稳定储存[16],并改善酶水解[17]。基于青贮预处理的厌氧消化工艺已被应用于秸秆等木质纤维素类原料的处理中,青贮发酵促使秸秆组分中木质纤维素结构变疏散,提高纤维素保留率和可生化性,有利于后续能源化和资源化的利用[6,18-19]。

目前,一些综述评估了秸秆青贮对饲料生产等方面的影响,主要关注青贮饲料品质、口感等。然而,关于青贮发酵作为秸秆预处理手段的作用效果的信息有限。因此,本研究对青贮预处理对秸秆厌氧消化过程的影响和过程控制策略方面进行了总结,并对青贮预处理农作物秸秆所面临的挑战和发展前景进行展望。

1 青贮秸秆厌氧消化

图 1 为青贮秸秆厌氧消化生产沼气的工艺流程,包括辅料添加、装窖、压实、密封、青贮以及青贮饲料生产沼气等过程。其中,对青贮过程的调控是干物质损失和发酵产物生成的关键步骤。秸秆经青贮预处理后增强了木质纤维素消化率,进而提高了沼气产量。

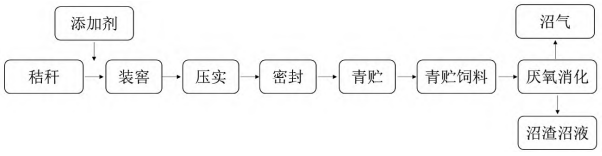


图 1 青贮秸秆厌氧消化流程

1.1 青贮过程特征

根据青贮过程中发生的主要生化和微生物转化过程,青贮分为好氧、厌氧、稳定和出料 4 个阶段[9]。每个阶段通过改变原料的性质直接或间接地影响沼气的生产[9,20]。在好氧阶段,秸秆装窖、压实和密封后,由于系统中仍然存在的部分氧气而发生有氧呼吸,呼吸消耗糖,产生 CO_2 和水,直到 O_2 几乎耗尽[21]。在厌氧阶段,厌氧和兼性厌氧微生物占优势,如乳酸菌、梭状芽孢杆菌和酵母菌,生成乳酸等有机酸,这些有机酸积累并将青贮料的 pH 值降低到 5.0 以下。在稳定阶段,青贮料密封,无空气渗入,pH 值和微生物活性保持在较低水平。在出料阶段,青贮体系再次暴露在空气中,这会导致最初存在于青贮饲料中的好氧微生物(如酵母和霉菌)代谢活跃,造成蛋白质过度降解、有毒物质产生和干物质损失[9]。

其中,厌氧阶段对青贮的质量起着决定性的作用,该阶段如果以同型乳酸菌为优势菌株,会产生大量 pH 值较低的乳酸(pKa 3.86),抑制其他微生物(主要是肠杆菌、梭状芽孢杆菌、酵母和霉菌)的生长,从而成功建立长期稳定的秸秆储存过程[10]。相反,如果异型乳酸菌占主导地位,由于乙醇和 CO_2 的产生,青贮体系的 pH 值下降相对缓慢,异型乳酸菌、酵母菌、丙酸菌、肠杆菌、梭状芽孢杆菌产生的乙酸、丙酸、丁酸、乙醇都伴随着一定的干物质(碳)损失。青贮发酵中干物质和能量损失量取决于优势微生物种类和发酵底物。表 1 总结了青贮发酵过程中的主要生化途径[10,22]以及相应的干物质和能量损失。可以发现,有些发酵反应不会造成干物质损失,底物仅仅转化为另一种产物,通常是乳酸,如同型乳酸发酵。然而,异型乳酸菌每消耗 1mol 葡萄糖产生 1 molCO_2,导致干物质损失 24.4%。此外,酵母菌、丙酸菌、肠杆菌和梭菌产生的乙酸、丙酸、丁酸和乙醇都伴随着一定的 CO_2 和 H_2 的生成,这意味着干物质损失。其中梭菌的丁酸发酵造成的干物质损失最大,干物质回收率不足一半(48.9%)。许多研究已证实,以乳酸发酵为主的青贮饲料的贮藏生物量损失最小[10,23-24]。与干物质损失不同,能量(CH_4)损失要小于干物质损失(见表 1),乳酸发酵和酵母菌发酵可实现能量的 100% 回收。这与通过实验得出的异型发酵乳酸菌主导的青贮通常比同型发酵乳酸菌主导的青贮具有更高的储存损失,但生物甲烷产量相似的结论是一致的[25]。对于酵母菌发酵,虽然干物质损失率高达 48.9%,但是能量损失很小。只有丙酸菌、肠杆菌和梭状芽胞杆菌在代谢过程中会造成 8.3% ~16.7% 的能量损失,但这仍然低于相应的干物质损失(25.6% ~51.1%)。

所以,与使用青贮饲料作为动物饲料不同,对青贮饲料用于厌氧消化产甲烷的储存要求可能没有那么严格,这是因为评价前者的一个重要因素是干物质摄入量,而在厌氧消化中,储存期间的能量保存是主要关注的问题。

1.2 青贮对秸秆厌氧消化的积极作用

对文献报道的农作物秸秆(玉米、小麦和水稻)青贮前后的生物产甲烷(沼气)潜力数据进行整理绘制箱线图,以评估青贮对秸秆厌氧消化的影响,结果如图 2 所示。中位数的比较表明,玉米秸秆、小麦秸秆和水稻秸秆青贮预处理后的生物产甲烷(沼气)潜力中位数分别为 272 ± 78 $NmL_{CH_4} \cdot g^{-1}VS$、238

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

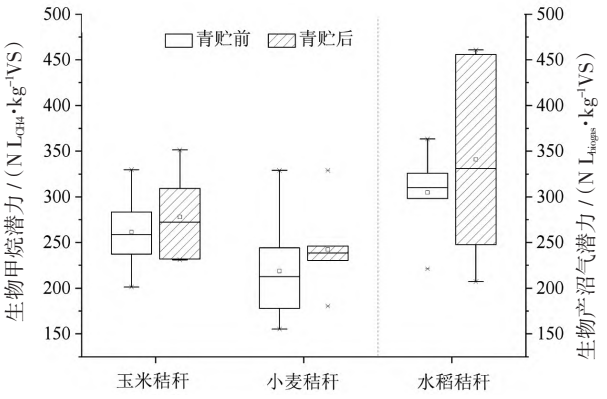
表 1 主要青贮发酵途径的干物质和能量损失[10]

生化途径	损失率(%)	
	干物质	能量
同型乳酸菌		
$C_6H_{12}O_6$(葡萄糖或果糖)→$2C_3H_6O_3$	0.0	0.0
$C_5h_{10}O_5$(木糖或阿拉伯糖)→$C_3H_6O_3+C_2H_4O_2$	0.0	0.0
异型乳酸菌		
$C_6H_{12}O_6$(葡萄糖)→$C_3H_6O_3+C_2H_6O+CO_2$	24.4	0.0
$C_6H_{12}O_6$(葡萄糖)+$2C_6H_{12}O_6$(果糖)+H_2O→$C_3H_6O_3+2C_6H_{14}O_6+C2H_4O_2+CO_2$	4.8	0.0
$3C_6H_{12}O_6$(果糖)+H_2O→$C_3H_6O_3+C_2H_4O_2+2C_6H_{14}O_6+CO_2$	4.8	0.0
$C_5H_{10}O_5$(木糖或阿拉伯糖)→$C_3H_6O_3+C_2H_4O_2$	0.0	0.0
酵母菌		
$C_6H_{12}O_6$(葡萄糖)→$2C_2H_6O+2CO_2$	48.9	0.0
丙酸菌		
$2C_3H_6O_3$→$C_2H_4O_2+C_3H_6O_2+CO_2+H_2$	25.6	8.3
肠杆菌		
$C_6H_{12}O_6$(葡萄糖)+H_2O→$C_2H_4O_2+C_2H_6O+2CO_2+2H_2$	41.1	16.7
梭状芽胞杆菌		
$C_6H_{12}O_6$(葡萄糖)→$C_4H_8O_2+2CO_2+2H_2$	51.1	16.7
$2C_3H_6O_3$→$C_4H_8O_2+2CO_2+2H_2$	51.1	16.7

注:将生化途径中生成的气态产物(CO_2和H_2)视为干物质损失,据此计算干物质损失率;根据生化途径中底物和产物的理论甲烷产量计算能量损失率。

±16 $NmL_{CH_4}\cdot g^{-1}VS$ 和 331±208 $NmL_{biogas}\cdot g^{-1}VS$,比青贮预处理前的 259±46 $NmL_{CH_4}\cdot g^{-1}VS$、213±66 $NmL_{CH_4}\cdot g^{-1}VS$ 和 341±28 $NmL_{biogas}\cdot g^{-1}VS$ 分别提升了 5.02%、11.7% 和 6.8%。但是独立样本 T 检验均发现,三种农作物秸秆青贮预处理前后甲烷(沼气)产量均存在统计学差异不显著,说明青贮对秸秆厌氧消化产沼气效率提升效果有限。

青贮对秸秆厌氧消化有积极作用主要体现在增强木质纤维素生物消化率和青贮发酵产物加速甲烷生产两个方面。木质纤维素是秸秆中的主要碳底物,被认为是转化为葡萄糖残基的关键碳库。因此,提高木质纤维素的转化是实现秸秆高效利用的必要条件。青贮提高木质纤维素的生物消化率可能是甲烷总产量增加的关键原因[26]。许多研究已报道木质纤维素(特别是半纤维素)在青贮过程中被水解,从而提高了生物消化率以及后续的厌氧消化过程[5,27,28]。例如不同风干程度的玉米秸秆在青贮 45 d 后,木质纤维素平均含量从青贮开始时的 59.1% 增加至 68.0%,在青贮结束时(第 90 天),木质纤维素平均含量逐渐下降为 60.9%,但是仍然略高于初始值[29]。这一发现与 Yan[6] 等的研究一致,该研究报告了以 3‰乙酸作为添加剂,过度萎蔫的小麦秸秆青贮 60 d 后,纤维素和半纤维素含量分别增加 3.0% 和 4.1%。木质纤维素含量增加可能是由于微生物优先消耗了青贮原料的初始 WSC,从而提高了木质纤维素的相对含量。同时也表明,木质纤维素在青贮过程中得到了很好的保存。随着青贮时间延长,木质纤维素含量逐渐下降,这可能归因于在酸性条件下木质纤维素的酸基水解和微生物活动的协同作用。秸秆在产生的有机酸和低 pH 值(约 4.0)条件下长期浸泡,会破坏木质纤维素结构(结晶度和聚合度),形成一个更易于微生物活动和酶水解的区域,这将提高木质纤维素作为下游厌氧消化原料的生物消化率[30-32]。此外,随着青贮时间的延长,乳酸、乙酸、丁酸、乙醇等有机物质逐渐增加[10,33]。与不易水解的木质纤维素相比,这些青贮



注:箱线图根据文献[5,12,15,21,29,34-45]中报道的数据进行绘制。框的边缘表示第 25 和 75 百分位数,内部的实线表示中位数,突出的须对应最小值和最大值,框内的空心方块是均值。

图 2 不同农作物秸秆在青贮前后的生物产甲烷潜力变化

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发酵产物分子结构更小,有利于微生物的产甲烷代谢,加速厌氧消化过程的启动。

2 秸秆青贮过程控制

基于青贮提高秸秆厌氧消化沼气产量的机制,青贮策略可以通过协同加强酸基水解和生物降解来提高木质纤维素的生物消化率,从而最大限度地减少储存过程中的能量损失和提高生物甲烷产量。青贮过程控制是关键,控制因素主要包括秸秆的总固体含量和切碎长度、添加剂的使用、储存时间和压实度等。

2.1 总固体含量

切割后的秸秆被留在田间,1~2 d 后枯萎导致其木质纤维素等物质含量增高(总固体(TS)>80%)。较高的 TS 含量会延迟细菌的生长,限制青贮发酵,从而影响青贮的保存[9]。且高的 TS 含量会阻碍作物秸秆在青贮制作中的充分压实,导致青贮前期原料的好氧变质,或对贮藏稳定性造成负面影响[22]。然而,也有研究表明,即使在干物质含量高达 50% TS 的青贮材料中,乳酸菌的生长也会发生,但梭状芽孢杆菌的活性通常很小[46]。这是由于梭状芽孢杆菌需要潮湿的条件才能快速增殖,相反,乳酸菌(LAB)能够在很宽的 TS 范围内发酵生物质[16]。但是,另一方面,较低的干物质含量(TS 低于 2530%)导致青贮废水的形成和释放,同时伴随着额外的干物质和能量损失,且如处理不当,对地下水有潜在威胁。例如,1 吨新鲜基质在含水率为 95%时,将产生 500~600 L 渗滤液。而当湿度低于 70%时,几乎不会产生渗滤液[9]。因此,为了在青贮期间有效发酵,使青贮作物应含有水溶性碳水化合物(如蔗糖、果糖、葡萄糖),其干物质含量应在 60~80 $g \cdot kg^{-1}$ DM(干物质)范围。在此范围内含有水溶性碳水化合物的生物质将具有足够的易于获得的发酵底物,相应的对 pH 值降低的缓冲能力较低。适度的含水率和较低的 pH 值加上较长的储存时间导致木质纤维素材料的增溶和解聚,这对后续产甲烷过程有积极的影响。

2.2 秸秆粒度

一般认为较短的秸秆切碎长度有利于提高乳酸发酵产量以及后续甲烷化[9]。由于减小粒径可以增加秸秆的有效比表面积以及降低其聚合度和纤维素结晶度,增大了秸秆与水解酶的接触面积,有利于将碳水化合物聚合物转化为单体糖,从而更快更容易地进行 LAB 发酵。同时,较短的秸秆长度为微生物提供了更大的表面积来分解作物,从而促进了沼气的产生并减少了滞留时间。此外,秸秆的粒径大小与青贮体系的密度和氧含量直接相关。较小的粒径通过提高青贮密度和减少空气引入来减少青贮秸秆使用过程中的有氧变质风险。据报道,麦秸青贮时,粒径从 2.0 cm 减小至 0.2 cm,产甲烷潜力增加 26%(从 179 $mL_{CH_4} \cdot g^{-1}$VS 增加到 244 $mL_{CH_4} \cdot g^{-1}$VS)[12]。因此,较短的切割长度有利于秸秆储存和甲烷化。但是,对秸秆粒度的全面评估需要进一步考虑操作时的额外支出。

2.3 添加剂

添加剂通常用于调节青贮原料特性,主要包括化学抑制剂(如甲酸、硫酸)、生物发酵刺激剂(如 LAB)和非生物发酵刺激剂(如葡萄糖)[10,22]。化学抑制剂可以迅速将 pH 值降低到 4 以下,防止蛋白质和碳水化合物的损失,抑制有害细菌如梭菌的生长[47],此外,还可以提高青贮体系的有氧稳定性[25]。通过补充乳酸菌以及具有降解木质纤维素能力的纤维水解酶(如纤维素酶、木聚糖酶),直接增加有益菌数量或加速底物降解[4,30]。在青贮初期,同型发酵和异型发酵的 LAB 也可以作为添加剂来提高有机酸产量[12]。添加可编码内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶、β-葡萄糖苷酶或其他糖基水解酶的细菌,可以促进生物质解聚[48]。这反过来又加速了诸如水解、可溶性碳水化合物的产生和乳酸菌发酵等过程。糖的添加不仅能增加底物浓度,还能补偿青贮启动阶段由于不良微生物活动而导致的 WSC 损失[29]。虽然大多数添加剂已被证明可以减少青贮期间的干物质损失,但对厌氧储存后沼气生产的影响因情况而异。例如,在过度萎蔫玉米秸秆青贮过程中添加纤维素酶和葡萄糖,可将甲烷产率分别提高 23.7%和 19.2%[29],而在小麦秸秆青贮中添加纤维素酶,与不含添加剂的青贮相比,甲烷产率减少 5.7%[12]。

2.4 青贮时间

在实际操作中,贮存时间主要取决于作物秸秆的季节性和/或后续厌氧消化罐的特定进料要求,因此一般不考虑其对生物质保存的潜在影响。然而,许多研究已证明青贮时间对所得甲烷产量有实际影响。有研究报道[49],全株玉米贮藏 44 d 后,青贮玉米的生物产甲烷潜力(BMP)比原始玉米低 17%,但贮藏时间延长至 119 d 后,BMP 比原始玉米高 22%。同样,Herrmann[25]对全株玉米进行了 49 d 和 90 d 的青贮,发现青贮饲料的有机酸浓度随着贮

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

藏时间的延长而略有增加,且异型发酵的效果更为明显,乙酸含量显著增加,并观察到更长的青贮时间可将 BMP 平均提升 3.5%。随着时间的推移,BMP 的增加通常归因于植物细胞壁成分的生物可利用性提高,补偿了青贮前期干物质的损失。但是不当的青贮管理过程中,由于微生物作用、生物质变质或抑制化合物的形成导致部分纤维素的损失,从而降低沼气产量。在这种情况下,增加青贮时间会进一步加剧这种消极影响,例如,由于长期青贮导致的生物质变质造成高达 40% 的甲烷损失[9],此外,由于抑制化合物的形成,水稻秸秆青贮 34 d 后乙醇产量显著降低[50]。

2.5 秸秆压块

作物秸秆压块(即将秸秆原料压缩成所需的形状和较小的体积)是农作物秸秆管理利用中重要的操作之一[51-52]。在压块过程中,使用压块机将作物秸秆压实并致密化。秸秆压块除了增加青贮期间的高容重允许更大的存储容量从而降低成本外,先压块后青贮也是减少秸秆质量损失以提高沼气产量的有利方法[5]。当青贮密度从 160 kgTS·m^{-3} 增加到 350 kgTS·m^{-3},在青贮 180 d 后,TS 损失从 20.2% 降低到 10.0%[9]。以 1∶6 的压块比(压块后的体积与初始体积之比)青贮 7 d 的稻草累计沼气产量最高,达到 314 L·kg^{-1}VS。1∶6 压块秸秆青贮 10 个月后的最大沼气产量比未压块秸秆青贮 7 d 高 17.7%[5]。秸秆压块提高沼气产量的原因,一方面是在生物质压块过程中,由于压块系统中施加的压力使生物质温度升高,达到 170 ℃~200 ℃,促进了木质素熔化[52];另一方面,生物质压块产生高密度青贮降低了秸秆孔隙率,减少了空气量,减慢了青贮中的氧气流动,从而减少因有氧破坏导致的生物质损失[9]。尽管秸秆压块形成的高青贮密度对后续沼气生产有正向作用,但是由于需要重型压实设备或延长压实时间,这会导致高能耗。因此,必须进行经济分析,以评估秸秆压块程度对青贮过程、沼气生产和储存成本的影响。

3 挑战和展望

一定的研究和工程实践已证明,青贮预处理可以降低秸秆储存中的碳损失,提高秸秆的可消化性,从而提高生物质能源的产量。因此,青贮已成为保存木质纤维素生物质用于沼气生产的主流技术。然而,一些挑战阻碍了青贮预处理在秸秆厌氧消化中的应用和发展,特别是青贮过程的优化(如含水量,压实度和添加剂等)。一些降低碳损失的控制策略仍然存在一定的问题,例如,在青贮过程中添加硫酸、盐酸等化学抑制剂,虽然可以快速降低 pH 值,提高秸秆的可降解性,但处理后的青贮发酵产物中可能存在一定的毒性成分(如糠醛和各种木质素相关的酚类物质)对厌氧消化过程产生抑制[53]。而采用添加微生物菌剂、发酵刺激剂等方式,虽然不会产生毒性物质,但处理过程相对较慢,且微生物的活性易受环境因素的影响。通过机械压实、切碎、研磨等方式,使秸秆更易于消化和发酵,但其能耗较大。因此,在未来,青贮预处理在秸秆厌氧消化中的应用前景可作为生物质能源开发的重点领域之一,需要在降解效率、过程优化、易用性和经济可行性性等方面进行深入研究。

4 结论

通过大量的青贮秸秆用于沼气生产相关文献分析,可以得出以下结论:

(1)与使用青贮饲料作为动物饲料不同,在厌氧消化中,青贮质量的评价主要关注储存期间的能量保存;

(2)提高甲烷产量的机制主要是青贮过程中通过酸基水解和生物降解提高了木质纤维素的生物消化率;

(3)可通过适度的总固体含量、较短的秸秆粒度、添加剂的使用和较高的压实度等措施实现更高的沼气产量;

(4)为促进青贮预处理在秸秆厌氧消化中的应用和发展,未来需要在技术优化和经济可行性等方面进行深入研究。

参考文献:

[1]]胡昊驰,王富贵,朱孔艳,. 两种秸秆还田年限及施磷水平对玉米根系生长和产量的影响[J]. 作物杂志:1-10.

[2] YU Q, LIU R, LI K, et al. A review of crop straw pretreatment methods for biogas production by anaerobic digestion in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 107: 51-58.

[3] ANDRÉ L, PAUSS A, RIBEIRO T. Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles[J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 1027-1037.

[4] GUAN R, LI X, WACHEMO A C, et al. Enhancing anaerobic digestion performance and degradation of lignocellulosic components of rice straw by combined biological and chemical pretreatment[J]. Science of The Total Envi-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ronment, 2018, 637 – 638: 9 – 17.

[5] AI P, ZHANG X, RAN Y, et al. Biomass briquetting reduces the energy loss during long-term ensiling and enhances anaerobic digestion: A case study on rice straw [J]. Bioresource Technology, 2019, 292: 121912.

[6] YAN J, SUN Y, KANG Y, et al. An innovative strategy to enhance the ensiling quality and methane production of excessively wilted wheat straw: Using acetic acid or hetero-fermentative lactic acid bacterial community as additives [J]. Waste Management, 2022, 149: 11 – 20.

[7] SCHUMACHER B, WEDWITSCHKA H, HOFMANN J, et al. Disintegration in the biogas sector-Technologies and effects [J]. Bioresource Technology, 2014, 168: 2 – 6.

[8] 靳红燕，颜廷山，李黎杰. 中国秸秆沼气工程技术难点分析及建议 [J]. 现代农业科技，2021，No. 788(06): 163 – 165 + 175.

[9] TEIXEIRA FRANCO R, BUFFIÈRE P, BAYARD R. Ensiling for biogas production: Critical parameters. A review [J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 94: 94 – 104.

[10] SUN H, CUI X, LI R, et al. Ensiling process for efficient biogas production from lignocellulosic substrates: Methods, mechanisms, and measures [J]. Bioresource Technology, 2021, 342: 125928.

[11] WEIDE T, BAQUERO C D, SCHOMAKER M, et al. Effects of enzyme addition on biogas and methane yields in the batch anaerobic digestion of agricultural waste (silage, straw, and animal manure) [J]. Biomass and Bioenergy, 2020, 132: 105442.

[12] GALLEGOS D, WEDWITSCHKA H, MOELLER L, et al. Effect of particle size reduction and ensiling fermentation on biogas formation and silage quality of wheat straw [J]. Bioresource Technology, 2017, 245: 216 – 224.

[13] ESSIEN D, RICHARD T L. Ensiled Wet Storage Accelerates Pretreatment for Bioconversion of Corn Stover [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2018, 6. DOI: 10.3389/fbioe.2018.00195.

[14] TABATABAEI M, AGHBASHLO M, VALIJANIAN E, et al. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 2: Mainstream and downstream strategies [J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1392 – 1407.

[15] SUN H, CUI X, STINNER W, et al. Synergetic effect of combined ensiling of freshly harvested and excessively wilted maize stover for efficient biogas production [J]. Bioresource Technology, 2019, 285: 121338.

[16] MCDONALD P, HENDERSON A R, HERON S J E. The biochemistry of silage [M]. Marlow: Chalcombe Publications, 1991: 340 pp.

[17] LI L, WANG D, YANG X. Study on round rice straw bale wrapping silage technology and facilities [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(4): 88 – 95.

[18] CAI Y, ZHENG Z, SCHÄFER F, et al. A review about pretreatment of lignocellulosic biomass in anaerobic digestion: Achievement and challenge in Germany and China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 299: 126885.

[19] BASINAS P, RUSÍN J, CHAMRÁDOVÁ K, et al. Fungal pretreatment parameters for improving methane generation from anaerobic digestion of corn silage [J]. Bioresource Technology, 2022, 345: 126526.

[20] KALAP. The required characteristics of ensiled crops used as a feedstock for biogas production: a review [J]. Journal of Agrobiology, 2011, 28(2): 85 – 96.

[21] HERRMANN C, HEIERMANN M, IDLER C. Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(8): 5153 – 5161.

[22] Villa R, Ortega Rodriguez L, Fenech C, et al. Ensiling for anaerobic digestion: A review of key considerations to maximise methane yields [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110401.

[23] Franco R T, Buffière P, Bayard R. Co-ensiling of cattle manure before biogas production: Effects of fermentation stimulants and inhibitors on biomass and methane preservation [J]. Renewable Energy, 2018, 121: 315 – 323.

[24] Haag N L, Steinbrenner J, Demmig C, et al. Influence on lactic acid content in maize silage variations by manganese supplementation [J]. Industrial Crops and Products, 2016, 79: 146 – 151.

[25] Herrmann C, Idler C, Heiermann M. Improving aerobic stability and biogas production of maize silage using silage additives [J]. Bioresource Technology, 2015, 197: 393 – 403.

[26] Chiumenti A, Pezzuolo A, Boscaro D, et al. Exploitation of Mowed Grass from Green Areas by Means of Anaerobic Digestion: Effects of Grass Conservation Methods (Drying and Ensiling) on Biogas and Biomethane Yield [J]. Energies, 2019, 12(17): 3244.

[27] Li M, Zi X, Zhou H, et al. Effects of sucrose, glucose, molasses and cellulase on fermentation quality and in vitro gas production of king grass silage [J]. Animal Feed Science and Technology, 2014, 197: 206 – 212.

[28] Ni K, Wang F, Zhu B, et al. Effects of lactic acid bacteria and molasses additives on the microbial community and fermentation quality of soybean silage [J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 706 – 715.

[29] Guo J, Cui X, Sun H, et al. Effect of glucose and cellulase addition on wet-storage of excessively wilted maize stover and biogas production [J]. Bioresource Technology, 2018, 259: 198 – 206.

[30] Tanjore D, Richard T L, Marshall M N. Experimental

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

methods for laboratory-scale ensilage of lignocellulosic biomass [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 47: 125 – 133.

[31] Ren H, Feng Y, Liu T, et al. Effects of different simulated seasonal temperatures on the fermentation characteristics and microbial community diversities of the maize straw and cabbage waste co-ensiling system [J]. Science of The Total Environment, 2020, 708: 135113.

[32] Amnuaycheewa P, Hengaroonprasan R, Rattanaporn K, et al. Enhancing enzymatic hydrolysis and biogas production from rice straw by pretreatment with organic acids [J]. Industrial Crops and Products, 2016, 87: 247 – 254.

[33] Zhao J, Dong Z, Li J, et al. Ensiling as pretreatment of rice straw: The effect ofhemicellulase and Lactobacillus plantarum on hemicellulose degradation and cellulose conversion [J]. Bioresource Technology, 2018, 266: 158 – 165.

[34] 王振旗，张 敏，沈根祥. 不同黄贮预处理对水稻秸秆干法厌氧发酵特性的影响 [J]. 农业环境科学学报，2021, 40(04): 894 – 901.

[35] SHETTY D J, KSHIRSAGAR P, TAPADIA-MAHESHWARI S, et al. Alkali pretreatment at ambient temperature: A promising method to enhance biomethanation of rice straw [J]. Bioresource Technology, 2017, 226: 80 – 88.

[36] 周奕博，焦有宙，贺 超. 秸秆为主混合原料厌氧发酵高效制取沼气分析 [J]. 现代牧业，2017, 1(04): 24 – 32.

[37] HE Y, PANG Y, LIU Y, et al. Physicochemical Characterization of Rice Straw Pretreated with Sodium Hydroxide in the Solid State for Enhancing Biogas Production [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(4): 2775 – 2781.

[38] 闫 晶，陆冰圆，席华悦，. 外源添加剂对黄贮小麦秸秆产甲烷潜力及微生物群落的影响 [J]. 农业工程学报，2020, 36(15): 252 – 260.

[39] LARSEN S U, HJORT-GREGERSEN K, VAZIFEHKHORAN A H, et al. Co-ensiling of straw with sugar beet leaves increases the methane yield from straw [J]. Bioresource Technology, 2017, 245: 106 – 115.

[40] THOMSEN S T, LONDOÑO J E G, AMBYE-JENSEN M, et al. Combination of ensiling and fungal delignification as effective wheat straw pretreatment [J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 16.

[41] 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 Management, 2018, 71: 147 – 155.

[42] VANVLIERBERGHE C, CARRERE H, BENET N, et al. Co-ensiling and field wilting investigated as preparation methods for the ensiling of a wet harvested catch crop for biomethane production [J]. Renewable Energy, 2022, 195: 1230 – 1237.

[43] SUN H, CUI X, STINNER W, et al. Ensiling excessively wilted maize stover with biogas slurry: Effects on storage performance and subsequent biogas potential [J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123042.

[44] MENARDO S, BALSARI P, TABACCO E, et al. Effect of Conservation Time and the Addition of Lactic Acid Bacteria on the Biogas and Methane Production of Corn Stalk Silage [J]. BioEnergy Research, 2015, 8(4): 1810 – 1823.

[45] CUI X, SUN H, SOBHI M, et al. Butyric Acid Fermentation during Ensiling of Wilted Maize Stover for Efficient Methane Production [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(17): 6713 – 6721.

[46] BORREANI G, TABACCO E, SCHMIDT R J, et al. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 3952 – 3979.

[47] MUCK R E, NADEAU E M G, MCALLISTER T A, et al. Silage review: Recent advances and future uses of silage additives [J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 3980 – 4000.

[48] PENG X F, WILKEN S, LANKIEWICZ T S, et al. Genomic and functional analyses of fungal and bacterial consortia that enable lignocellulose breakdown in goat gut microbiomes [J]. Nature Microbiology, 2021, 6(4): 499 – 511.

[49] NEUREITER M, DOS SANTOS J T P, LOPEZ C P, et al. Effect of silage preparation on methane yields from whole crop maize silages [J]. Proceedings of the 4th International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, 2005, 1: 109 – 115.

[50] SHINOZAKI Y, KITAMOTO H K. Ethanol production from ensiled rice straw and whole-crop silage by the simultaneous enzymatic saccharification and fermentation process [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2011, 111(3): 320 – 325.

[51] WANG Y, WU K, SUN Y. Effects of raw material particle size on the briquetting process of ricestraw [J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 91(1): 153 – 162.

[52] GANGIL S, BHARGAV V K. Influences of binderless briquetting stresses on intrinsic bioconstituents of rice straw based solid biofuel [J]. Renewable Energy, 2019, 133: 462 – 469.

[53] NOWICKA A, ZIELIÑSKI M, DEBOWSKI M, et al. Progress in the Production of Biogas from Maize Silage after Acid-Heat Pretreatment [J]. Energies, 2021, 14(23): 8018.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net