

不同黄贮处理对玉米秸秆沼气发酵影响研究

肖开腾¹, 庄兆恒¹, 石艳春¹, 杨红男², 王智勇², 左定东², 肖友乾^{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: 针对秸秆收获的季节性与沼气发酵全年均衡性间的矛盾, 同时考虑秸秆难降解问题, 采用添加复合微生物菌剂以及调节含水率两种方法, 研究不同黄贮处理对玉米秸秆沼气发酵的影响。结果表明, 添加菌剂可以加速黄贮玉米秸秆酸化过程, 菌剂添加浓度为 0.5‰ 时更有利于玉米秸秆的长期黄贮保存, 使玉米秸秆在黄贮 6 个月后的产沼气潜力相对黄贮前提升 4.7% ~ 8.6%。在 50% ~ 70% 的含水率范围内, 含水率越低, 玉米秸秆黄贮品质越好。更为重要的是, 相对于添加菌剂, 控制较低的含水率可能更有利于以沼气化利用为目的的玉米秸秆长期黄贮。当含水率为 50% 时, 玉米秸秆黄贮 6 个月后的产沼气潜力相对黄贮前提升 29.2%。

关键词: 黄贮; 玉米秸秆; 沼气发酵; 含水率; 菌剂

中图分类号: S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)05-00434-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023050034

Study on Biogas Production Performance of Anaerobic Digestion of Corn Stalk under Different Yellow Silage Treatments / XIAO Kaiteng¹, ZHUANG Zhaoheng¹, SHI Yanchun¹, YANG Hongnan², WANG Zhiyong², ZUO Dingdong², XIAO Youqian^{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: Aiming at the contradiction between the seasonal harvest of straw and the annual equilibrium of anaerobic digestion, and considering the problem of difficult degradation of straw, the effects of different yellow silage treatments on anaerobic digestion of corn stalk were studied by adding complex microbial agent and adjusting water content. The results showed that the addition of microbial agent could accelerate the acidification process of corn stalk in yellow silage. When the addition concentration of microbial agent was 0.5‰, it was more conducive to the long-term storage of corn stalk by yellow silage, and the biogas production potential of corn stalk after 6 months in yellow storage was increased by 4.7% ~ 8.6% compared with that before yellow storage. In the range of 50% ~ 70% of moisture content, the lower the moisture content, the better the yellow silage quality of corn silage. More importantly, the control of lower moisture content may be more conducive to the long-term yellow silage of corn straw for biogas utilization than the addition of microbial agent. When the moisture content was 50%, the biogas production potential of corn stalk after 6 months of yellow silage was 29.2% higher than that before yellow silage.

Key words: yellow silage; corn stalk; anaerobic digestion; moisture content; microbial agent

我国是农业种植业大国, 每年会产生大量的秸秆。秸秆主要由纤维素类物质构成, 是一种可再生的生物质资源, 能够开发利用为肥料、饲料、能源等^[1]。秸秆的综合利用对农业可持续发展具有重要意义。今年 6 月, 农业农村部办公厅印发了《关于做好 2023 年农作物秸秆综合利用工作的通知》

(以下简称“通知”)。《通知》明确要推进秸秆离田利用, 推进生物菌剂应用, 加快秸秆青(黄)贮技术产业化, 有序发展以秸秆为原料的沼气工程等生物质能利用。沼气发酵是秸秆资源化的有效途径。

秸秆的产量与种植规律密切相关, 具有季节性, 这与沼气工程全年均衡性存在矛盾, 因而秸秆需要

收稿日期: 2023-08-14

项目来源: 中国广核集团“尖峰计划”科研项目; 四川省科技计划(2023JDRC0120); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610012017003_05102)。

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: 肖友乾, E-mail: 1714241102@qq.com

贮藏^[2]。秸秆的贮藏方式主要包括露天储存、覆盖储存、密封储存三种形式^[3]。露天储存和覆盖储存属于自然堆放式存储,是我国沼气工程中使用最为普遍的秸秆贮藏方式,但会造成较多的有机物损耗。在玉米秸秆自然堆放 45 d 的过程中,玉米秸秆的生物降解率随存储时间延长而下降,产甲烷潜力损失达 36.48%^[4]。黄贮属于密封式存储,是最有利于沼气发酵的贮藏方式,既可实现玉米秸秆的长期保存,又可以使玉米秸秆中的难降解物质提前降解,促进沼气发酵^[5-7]。在黄贮过程中,乳酸菌等有益菌将秸秆中的纤维素类物质分解转化为有利于微生物生长繁殖所需要的糖类物质,糖类物质进一步降解转化为乳酸和挥发性脂肪酸,使秸秆 pH 值降至 5.0 以下,从而抑制霉菌等有害菌的生长繁殖,达到保存秸秆营养的目的^[7-9]。微生物菌剂、物料水分、环境温度等是影响秸秆黄贮品质的重要因素。

目前,关于秸秆黄贮的研究与应用仍集中于牛、羊等反刍动物饲料行业,面向沼气工程应用的研究相对匮乏。本文采用添加复合微生物菌剂以及调节含水率两种方法,研究不同黄贮处理对玉米秸秆沼气发酵产气性能的影响,以期对秸秆沼气化利用的良性发展提供数据参考与理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

玉米秸秆购自河南正阳县众农草业有限公司,为玉米成熟收获后的干黄玉米秸秆;2 种复合微生物菌剂分别购自郑州好旺农生物科技有限公司(菌剂 1,粉剂,主要成分为乳酸菌、酵母菌、枯草芽孢杆菌等)、康源绿洲生物科技有限公司(菌剂 2,水剂,主要成分为植物乳杆菌、酵母菌等);沼气发酵接种污泥取自农业农村部成都沼气科学研究所。玉米秸秆及接种污泥理化特性如表 1 所示。

表 1 试验材料理化特性

指标	玉米秸秆	厌氧污泥
pH 值	6.18 ± 0.04	7.43 ± 0.04
TS/(鲜重,%)	88.3 ± 0.3	5.6 ± 0.1
VS/(鲜重,%)	80.3 ± 0.5	3.3 ± 0.1
VS/TS/(鲜重,%)	91.0 ± 0.0	58.9 ± 0.1
纤维/(干重,%)	34.7 ± 0.1	—
半纤维/(干重,%)	31.2 ± 0.0	—
木质/(干重,%)	6.3 ± 1.3	—

注:“—”表示未测定。

1.2 试验设计

1.2.1 黄贮试验

黄贮试验地点为四川省成都市双流某地,试验时间为 2022 年 11 月 28 日~2023 年 5 月 28 日。整个试验在室外修建的黄贮窖池内进行,不控制温度,即试验温度条件为环境温度。

试验设计如表 2 所示。试验前,将玉米秸秆粉碎至 1~3 cm,准备好各试验处理所需的水量,按照产品说明,使用红糖、水对菌剂进行活化或初步稀释处理。装窖时,每装填 15~20 cm 压实 1 次,逐层加水、逐层装填、逐层压实。

黄贮装置采用地上式、砖混结构的黄贮窖池。如图 1:窖池两侧及后侧设置厚 240 mm 的砖混墙体;两侧墙面以 45°坡面衔接;地面基层平整,碾压夯实,垫层为 100 mm 厚 C15 素砼,基础为 150 mm 厚 C25 素砼。装窖完成后的窖体中间高四周低,呈“馒头”状,顶部高出窖沿 400 mm;窖体用 2~3 层 0.15 mm 厚的聚乙烯耐老化棚膜覆盖密封;窖体顶部用轮胎或者沙袋、石块压实;棚膜与窖壁连接处使用黄泥封边;窖体中部设取样口。单个窖池总容积为 4.2 m³,可容纳 1.8~2.0 t 玉米秸秆,即装填密度为 428.6~476.2 kg·m⁻³。

表 2 黄贮试验设计

编号	试验组别	原料含水率/%	微生物菌剂	
			菌剂种类	菌剂添加量/%
MH1	不同菌剂处理	60	好旺农	0.1
MH2		60	好旺农	0.5
MK1		60	康源绿洲	0.5
MK2		60	康源绿洲	2
W1	不同含水率处理	50	—	—
W2		60	—	—
W3		70	—	—

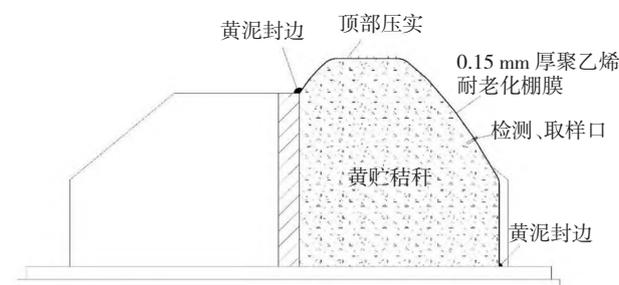
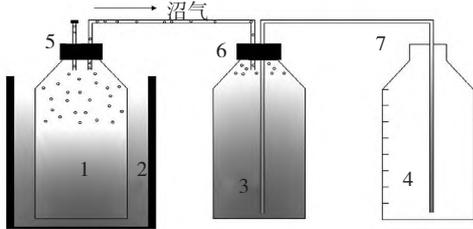


图 1 黄贮试验装置示意图

1.2.2 沼气发酵试验

沼气发酵试验分别以黄贮前、黄贮 3 个月、黄贮 6 个月的玉米秸秆为底物,以厌氧污泥为接种物,接

种比设置为 1:2, 即底物的量与接种物的量比值为 1:2(以 VS 计), 每个样品设置 3 个重复。试验前, 用剪刀将玉米秸秆样品剪碎至 1 cm 以下。试验时, 使用 500 mL 的玻璃瓶作为沼气发酵反应器, 有效容积为 400 mL, 底物与接种物混合均匀后的反应体系 TS 浓度为 5.5% ~ 6.5%。试验装置如图 2 所示, 采用传统排水集气法, 在恒温水浴锅中进行, 发酵温度设置为 $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。



1. 沼气发酵瓶; 2. 恒温水浴锅; 3. 排水集气瓶; 4. 集水瓶; 5. 气体采样口; 6. 导气管; 7. 排水管

图 2 沼气发酵试验装置示意图

1.3 检测方法

pH 值的检测频率为每月 1 次, 从图 1 取样口中取样, 为避免进入空气污染黄贮, 取样后迅速将取样点密封。测定时, 用剪刀将样品剪碎至 1 cm 以下, 以蒸馏水为浸提剂, 水: 秸秆 = 9:1, 使用破壁机将浸提样品破碎 1.5 min 后于转移入三角瓶中密封, 于室温静置 24 h 后用酸度计测定(中国上海雷磁, PHS-3E)。

木质纤维素、有机酸及 TS、VS 含量在黄贮试验结束后测定。其中, 纤维素、半纤维素、木质素采用范式洗涤法测定(以干重计)。有机酸测定样品前处理方法同 pH 值测定, 并在静置后于 $12000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速下离心 5 min, 然后取上清液测定, 乳酸采用高效液相色谱法测定(美国沃特世, Waters e2695), 乙酸、丙酸、丁酸采用气相色谱法测定(日本岛津, GC2030)。TS、VS 采用重量法测定, TS 采用 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干 8 h 至恒重, VS 采用 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 马弗炉煅烧 4 h 后称重。

产沼气潜力试验分别在黄贮前、黄贮 3 个月、黄贮 6 个月时进行, 取样方法同 pH 测试样品, 试验操作见 1.2.2。沼气日产量通过测定排水体积获得; 甲烷含量采用气相色谱法测得(中国北京北分瑞利, SP-2100A)。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对玉米秸秆黄贮品质的影响

2.1.1 pH 值

pH 值是评价黄贮品质的最重要指标之一, 通常认为, 黄贮后秸秆的 pH 值低于 5.00 时品质较好^[5]。本实验黄贮玉米秸秆的 pH 值变化如图 3 所示, 除 W3 外, 各处理下的玉米秸秆在黄贮 6 个月后 pH 值均小于 5.00, 说明黄贮效果良好。与文献报道相比^[2, 9-10], 本试验 pH 值下降速度较为缓慢, 这可能是因为本试验开始于 11 月底并于室外进行, 此时正值冬季, 环境温度较低, 影响了乳酸菌等功能微生物的活性^[8]。

相对于调节含水率, 添加菌剂可以使玉米秸秆在黄贮过程中更快酸化, 这是因为乳酸菌、植物乳杆菌等有益微生物的代谢活动会产生大量乳酸, 使得原料 pH 值迅速降低, 这与相关研究结论一致^[11-12]。其中, MK2 的 pH 值下降最快, 在窖藏 2 个月后稳定在 4.80 左右; MH1、MH2、MK1 的 pH 值在窖藏 3 个月后降至 5.00 左右, 在窖藏 4 个月后稳定在 4.80 左右。在不同含水率处理中, W1 酸化最快, 在结束时 pH 值为 4.79, 而 W3 玉米秸秆在窖藏 6 个月后的 pH 值仍在 5.00 以上, 说明 50% ~ 60% 的含水率更有利于黄贮玉米秸秆酸化, 而当含水率达到 70% (W3) 时可能造成对玉米秸秆黄贮造成负面影响。含水率过高时, 可能造成玉米秸秆营养物质在黄贮过程中溶出, 并容易使玉米秸秆发生霉变。

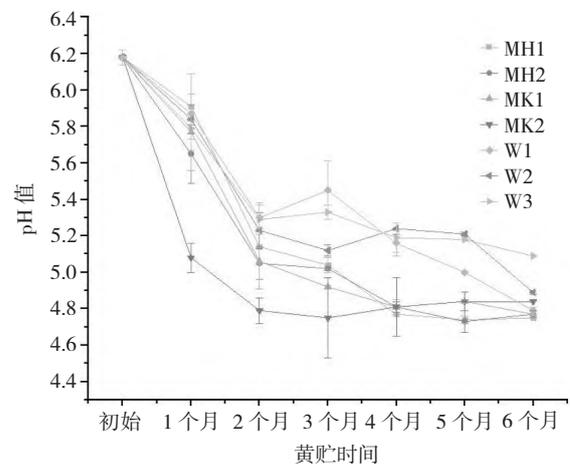


图 3 黄贮过程中玉米秸秆 pH 值变化情况

2.1.2 有机酸含量

试验结束时, 测定了各黄贮玉米秸秆的有机酸含量, 结果如表 3 所示。总体来讲, 菌剂处理组的有机酸含量高于不同含水率处理组, 说明菌剂的加入促进了秸秆有机组分向有机酸的转化, 有利于黄贮玉米秸秆酸化, 这与 pH 测定结果相一致。不同菌剂处理组中, MH2 有机酸含量最高, 总有机酸含量

是 MH1 的近 2 倍;MK1 有机酸含量高于 MK2。不同含水率处理组中,W1 有机酸含量最高,而 W2 与 W3 组的有机酸含量接近。在有机酸种类方面,以乳酸和乙酸为主,丙酸和丁酸含量较低。W3 中丁酸含量相对最高,而乳酸、乙酸含量相对最低,根据有机酸酸性强弱规律,这与 pH 值测定结果一致。

研究认为,在秸秆黄贮过程中乳酸是降低 pH 值的主要有机酸,通常以乳酸在总酸中比例最高为好,而丁酸的比例越低越好^[13-14]。本试验中,有机酸含量测定结果显示,MH1、MH2、MK1、MK2、W1、W2、W3 的乳酸占比分别为 25.3%、42.9%、28.2%、20.0%、20.1%、8.5%、5.0%,丁酸占比分别为 17.4%、10.6%、4.2%、2.5%、2.0%、13.3%、36.4%。若以有机酸组成情况为玉米秸秆黄贮品质判定标准,则添加菌剂处理的玉米秸秆黄贮品质优于未添加菌剂的处理组(60% 含水率条件下),MH2 的玉米秸秆黄贮效果最好,其次是 MK1,说明 0.5‰ 的菌剂添加浓度在本试验条件下是最优使用剂量。从含水率角度分析,在 50%~70% 含水率范围内,含水率越低、玉米秸秆黄贮品质越好。

表 3 玉米秸秆黄贮 6 个月后的有机酸浓度 (ppm)

编号	乳酸	乙酸	丙酸	丁酸	总酸
MH1	450 ± 0	907 ± 13	112 ± 13	309 ± 27	1777 ± 53
MH2	1475 ± 7	1400 ± 10	200 ± 2	365 ± 24	3440 ± 43
MK1	815 ± 7	1734 ± 26	223 ± 16	122 ± 18	2893 ± 67
MK2	400 ± 0	1443 ± 20	109 ± 20	51 ± 3	2003 ± 43
W1	490 ± 0	1633 ± 81	268 ± 4	49 ± 1	2439 ± 86
W2	120 ± 0	955 ± 12	156 ± 7	188 ± 14	1419 ± 33
W3	74 ± 0	726 ± 12	149 ± 0	543 ± 3	1492 ± 15

2.1.3 TS、VS 及木质纤维素含量

试验结束时,测定了各黄贮玉米秸秆的 TS、VS 及纤维素、半纤维素、木质素含量,结果如表 4 所示。经过 6 个月的黄贮,不同处理条件下的玉米秸秆均有不同程度的有机物损失(以 VS/TS 比降低值计)。其中,MH1 有机物损失率最低,为 2.7%;W3 有机物损失率最高,为 6.2%;其余处理的有机物损失率为 4.3%~5.1%,差异较小。结果表明,在玉米秸秆黄贮过程中,添加菌剂能减少有机物损失,这有利于营养成分的保留,而当含水率达到 70% (W3) 时,可能因霉变等原因增加有机物的损耗,影响黄贮效果。

一般来讲,在黄贮过程中,玉米秸秆中的木质纤维素类物质会部分降解转化为更适合微生物吸收利

用的营养成分,使得木质纤维素含量降低。但在本试验中,黄贮过后,玉米秸秆的纤维素、木质素含量均有所上升,而半纤维素含量均有所下降。这可能是因为黄贮过程中,玉米秸秆中的纤维素和木质素难以被微生物分解,但是会发生凝聚和结晶现象,从而导致其含量的增加。半纤维素含量的下降说明,黄贮过程有利于玉米秸秆中半纤维素的降解^[15]。

表 4 玉米秸秆黄贮 6 个月后的木质纤维素及 TS、VS 含量 (%)

编号	TS	VS/TS	纤维素	半纤维素	木质素
MH1	33.9 ± 1.3	88.5 ± 1.1	42.4 ± 2.1	17.2 ± 4.0	8.5 ± 0.5
MH2	32.6 ± 2.0	87.1 ± 1.3	41.6 ± 0.2	29.9 ± 2.2	6.3 ± 0.0
MK1	31.9 ± 0.8	86.8 ± 2.1	43.4 ± 2.5	19.7 ± 2.1	7.9 ± 0.6
MK2	35.6 ± 2.0	86.5 ± 0.5	43.9 ± 0.1	16.7 ± 1.5	9.2 ± 0.3
W1	37.4 ± 0.8	86.4 ± 2.2	39.0 ± 2.0	22.7 ± 5.2	8.3 ± 0.4
W2	32.2 ± 0.8	86.6 ± 0.1	36.8 ± 0.3	24.4 ± 0.6	8.9 ± 0.4
W3	24.0 ± 1.0	85.4 ± 1.2	40.5 ± 0.9	28.3 ± 0.2	6.9 ± 0.3

2.2 不同黄贮处理及黄贮时间对玉米秸秆产沼气效率的影响

图 4、5 和图 7、8 分别展现了玉米秸秆黄贮 3 个月、黄贮 6 个月后的产沼气情况,包括每日沼气产量和累积沼气产量,表 5、图 6 对比了不同黄贮时间对玉米秸秆产沼气效率的影响。试验前,测定了原始秸秆即玉米秸秆黄贮前的产沼气潜力,原料产沼气潜力为 360 mL·g⁻¹TS,产气周期为 27 天,产气峰值出现在第 9 天,产气峰值为 36 mL·g⁻¹TS。

2.2.1 黄贮 3 个月

黄贮 3 个月后,玉米秸秆原料产沼气潜力除 MH1 相对原始秸秆有所上升外(提升效率为 9.7%),其余处理均与原始秸秆原料产沼气潜力基本持平,总体差异较小,但是产气周期有所延长、产气峰值出现时间提前了 6~7 d、产气峰值也有所提升。对比前述 pH 值变化情况(见 2.1.1),此时,黄贮玉米秸秆的 pH 值已经下降至 5.50 以下,说明玉米秸秆中已经有部分难降解有机物转化为更容易被沼气发酵微生物利用的有机酸,使得产气高峰出现更早,产气峰值也得到一定的增加。但是黄贮后的玉米秸秆产沼气潜力并未得到提升并且产气周期延长,其原因可能在于,虽然半纤维素降解产生的有机酸加速了前期产沼气速率,但是在发酵后期,仍保留于玉米秸秆中的难降解有机物,如纤维素结晶区和无法降解的木质素,在短期内较难降解^[15]。

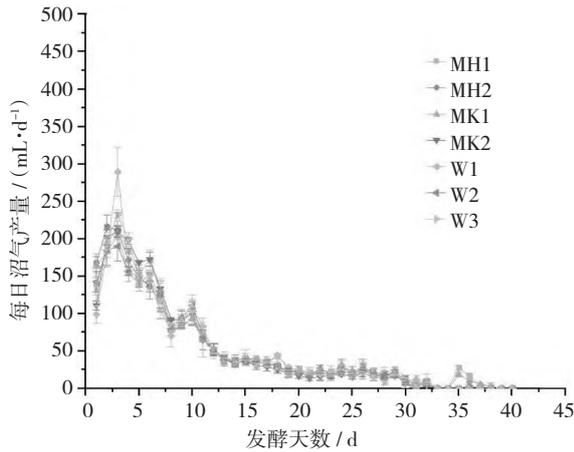


图4 玉米秸秆黄贮3个月后的每日沼气产量

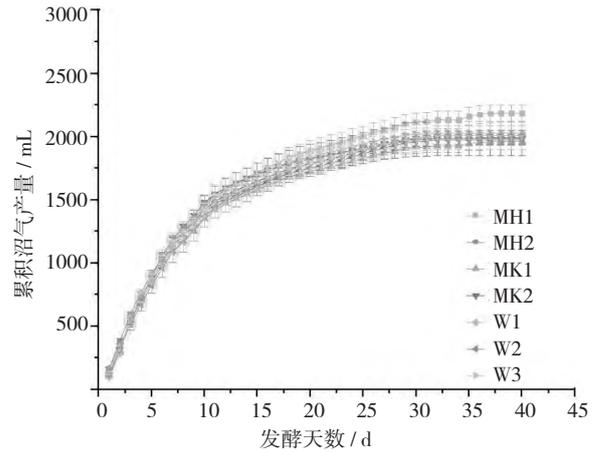


图5 玉米秸秆黄贮3个月后的累积沼气产量

表5 黄贮玉米秸秆产沼气情况

编号	产气周期(d) / 峰值时间(d) / 峰值(mL·g ⁻¹ TS)			平均甲烷含量/%		
	黄贮前	黄贮3个月	黄贮6个月	黄贮前	黄贮3个月	黄贮6个月
MH1	27/9/36	40/3/39	31/2/48	58.1 ± 2.3	59.0 ± 2.9	58.1 ± 4.7
MH2	27/9/36	40/2/39	31/3/53	58.1 ± 2.3	58.9 ± 3.0	58.7 ± 3.7
MK1	27/9/36	40/3/37	31/3/60	58.1 ± 2.3	58.9 ± 1.2	58.5 ± 4.2
MK2	27/9/36	40/3/37	31/4/40	58.1 ± 2.3	58.1 ± 4.0	60.3 ± 6.2
W1	27/9/36	40/3/52	31/3/72	58.1 ± 2.3	57.7 ± 2.0	58.6 ± 3.6
W2	27/9/36	40/3/34	31/3/50	58.1 ± 2.3	57.6 ± 3.9	60.3 ± 5.4
W3	27/9/36	40/3/40	31/3/59	58.1 ± 2.3	58.1 ± 3.0	57.8 ± 4.4

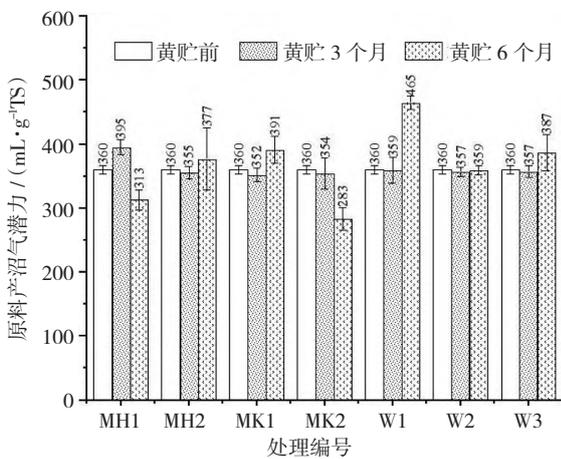


图6 不同黄贮时间的玉米秸秆原料产沼气潜力对比

2.2.2 黄贮6个月

黄贮6个月后,玉米秸秆产沼气周期相对黄贮3个月有所缩短,但相对原始秸秆仍延长了4天;产气峰值出现时间与黄贮3个月相一致;产气峰值相对于黄贮前、黄贮3个月均得到了提升。相对于黄贮3个月,黄贮后期春季气温的回升可能增强了窖池中微生物的代谢活性,促进了黄贮玉米秸秆的酸

化,提高了易降解有机物的比例,加快了后续沼气发酵速率,但是不同黄贮玉米秸秆间的原料产沼气潜力差异较大。

不同菌剂处理组中,MH1、MK2的产沼气潜力相对原始玉米秸秆下降了13.1%、21.4%,而MH2、MK1相对上升了4.7%、8.6%,这与前述MH2、MK1的有机酸含量检测结果相一致(见2.1.2),说明0.5‰的菌剂使用量不仅可以改进玉米秸秆黄贮效果,还能在一定程度上提升原料产沼气潜力。然而,MK2虽然pH值下降最快,在窖藏2个月后即稳定在4.80左右,有机酸测定结果也显示其黄贮效果较好,但是原料产沼气潜力却是最低的。这可能是因为在黄贮过程中出现了二次发酵,导致了生物质变质和抑制性物质产生的情况,恶化了玉米秸秆黄贮效果,使得沼气产率降低。有研究认为,虽然酵母菌可以改善青贮效果,但酵母菌也是青贮饲料二次发酵的主要原因^[16]。MK2使用的菌剂主要由植物乳杆菌、酵母菌等微生物组成,且添加浓度最高(2‰),这一方面促进了前期黄贮玉米秸秆的快速

酸化,但也可能引发二次发酵,造成后期玉米秸秆黄贮效果和产沼气潜力降低。

不同含水率处理组中,W1 的原料产沼气潜力相对原始玉米秸秆提升了 29.2%,产气效率相对 W2、W3 最好,这与 pH 值、有机酸含量的测定结果相一致。这说明保持较低的含水率(50%)更有利于玉米秸秆黄贮及黄贮后产沼气,这打破了文献报道的秸秆黄贮适宜含水率为 65% 左右的常规认知^[8, 10, 15]。此外,W1 的原料产沼气潜力也优于菌剂处理组,W3 的黄贮效果虽相对最差,但原料产沼气潜力却有 7.5% 的提升。结果表明,玉米秸秆黄贮品质与后续黄贮玉米秸秆产沼气效率可能存在不一致情况,在判定黄贮秸秆是否适宜用于沼气发酵时,需要结合黄贮常规指标测定结果与产沼气潜力试验综合评价。

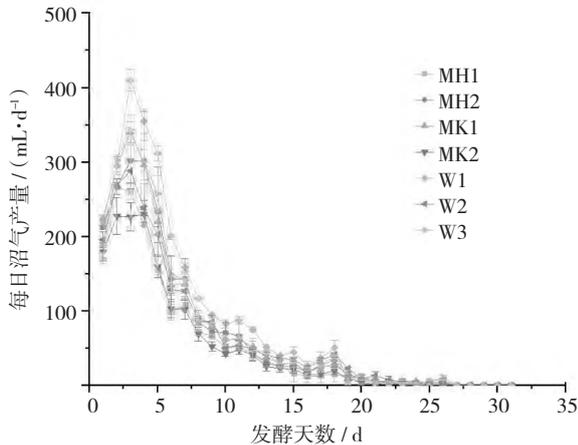


图7 玉米秸秆黄贮6个月后的每日沼气产量

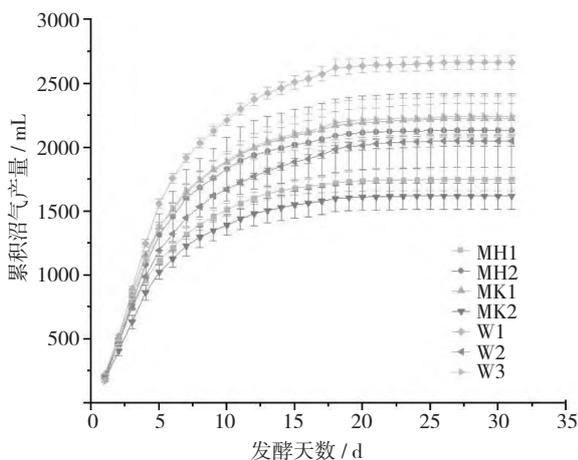


图8 玉米秸秆黄贮6个月后的累积沼气产量

3 结论

本文在环境温度条件下,开展了为期6个月的

玉米秸秆黄贮中试规模试验,探究了不同黄贮处理(包括添加菌剂、调节含水率)对玉米秸秆沼气发酵性能的影响,对平衡玉米秸秆的沼气化利用与收获季节性的矛盾问题具有重要参考意义。试验得出主要结论如下:

(1)添加菌剂可以使玉米秸秆在黄贮过程中更快酸化,黄贮后的玉米秸秆 pH 值更低、有机酸含量更高,0.5‰的菌剂添加浓度更有利于玉米秸秆酸化,黄贮效果更好;在 50%~70% 含水率范围内,含水率越低,玉米秸秆黄贮品质越好。

(2)0.5‰的菌剂添加浓度更有利于玉米秸秆的长期黄贮保存和沼气化利用;保持 50% 左右的含水率更有利于玉米秸秆长期黄贮后产沼气,这打破了文献报道的秸秆黄贮适宜含水率为 65% 左右的常规认知,但需要更多的实例数据加以论证并探究对于其他类型秸秆的适用性。

(3)玉米秸秆黄贮品质与后续黄贮玉米秸秆产沼气效率可能存在不一致情况,在判定黄贮秸秆是否适宜用于沼气发酵时,需要结合黄贮常规指标测定结果与产沼气潜力试验综合评价。

参考文献:

- [1] YUCHUN S, YINGXIN X, SHUSHENG W. Lignin degradation by *Coprinus comatus* in corn stalk[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 200:116906.
- [2] 崔宪,张乐平,孙辉,等.碳氮比对干黄秸秆贮存及后续甲烷产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(23):250-257.
- [3] 李建新. 秸秆资源的收储运模式及生物质燃料化利用分析[J]. *农机使用与维修*, 2022(05):24-26.
- [4] 袁玲莉,刘研萍,袁彧,等. 存储时间对玉米秸秆理化性状及产甲烷潜力的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13):210-217.
- [5] 马广英,张文举,徐清华,等. 秸秆黄贮优化方案及其对小麦、玉米、油菜秸秆处理的影响[J]. *中国草食动物科学*, 2014, 34(02):24-27.
- [6] 苏小红,王欣,王玉鹏,等. 亚硫酸氢盐预处理对黄贮玉米秸秆产甲烷潜力影响研究[J]. *中国沼气*, 2022, 40(03):50-57.
- [7] 杨大盛,汪水平,韩雪峰,等. 乳酸菌和烷基多糖苷对玉米秸秆黄贮品质及其体外发酵特性影响研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(05):109-120.
- [8] 马广英. 作物秸秆黄贮效果研究[D]. 石河子:石河子大学, 2014.
- [9] 刘海燕,王秀飞,王彦靖,等. 菊芋粉对玉米秸秆黄贮

- 效果的影响[J]. 饲料研究, 2022,45(18):102-104.
- [10] 毕升阁. 黄贮玉米秸秆厌氧发酵产沼气工艺研究[D]. 南阳:南阳师范学院, 2020.
- [11] 陈卫锋, 徐升运, 秦涛, 等. 玉米秸秆黄贮工艺研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(18):151-154.
- [12] 王富生, 马俊孝, 任红卫, 等. 微生物青贮剂在玉米秸秆黄贮中的作用[J]. 山东大学学报(理学版), 2004(02):112-115.
- [13] 白冰, 赵晶, 朴春香, 等. 不同发酵处理对玉米秸秆黄贮品质的影响[J]. 延边大学农学学报, 2017,39(04):62-67.
- [14] 谢华德, 李苗苗, 靳思玉, 等. 乳酸菌对低温下玉米秸秆黄贮发酵品质及有氧稳定性的影响[J]. 中国饲料, 2019(07):33-38.
- [15] 苏小红, 范超, 王欣, 等. 黄贮预处理干玉米秸秆厌氧发酵产气特性研究[J]. 中国沼气, 2020,38(06):30-36.
- [16] 杨艳, 夏宗群, 顾瑶, 等. 不同发酵剂对花生秸秆微贮品质的影响研究[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2022(06):46-49.