

付广青, 杜 静, 叶小梅, 等. 青贮水稻秸秆厌氧发酵产沼气特性[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 90-96.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.01.014

青贮水稻秸秆厌氧发酵产沼气特性

付广青, 杜 静, 叶小梅, 常志州

(农业部农村可再生能源开发利用华东科学观测实验站/江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/江苏省农业废弃物资源化工程技术研究中心, 江苏南京 210014)

摘要: 有效贮存新鲜水稻秸秆, 确保沼气工程周年运行的原料供应, 对于水稻秸秆厌氧发酵能源化利用技术持续健康发展极为重要。本研究以新鲜水稻秸秆及青贮后的水稻秸秆为原料, 研究了其在室内中温 $[(37\pm 2)^\circ\text{C}]$ 条件下厌氧发酵产沼气特性。结果表明, 水稻秸秆经青贮 30 d 后, 秸秆 pH 降低至 4.02, 纤维素与总碳含量分别降低了 6.39% 和 8.40%, 均达显著水平。厌氧发酵 30 d, 青贮水稻秸秆产气量(3 370 ml)比新鲜秸秆(2 754 ml)显著提高 22.36%。表明: 青贮作为一项新鲜稻秸贮存与预处理方法, 技术上是可行的, 可确保沼气工程周年运行的原料供应。

关键词: 水稻秸秆; 青贮; 预处理; 厌氧发酵

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)01-0090-07

Characterization of biogas production by anaerobic digestion of ensiled rice straw

FU Guang-qing, DU Jing, YE Xiao-mei, CHANG Zhi-zhou

(East China Scientific Observing and Experimental Station of Development and Utilization of Rural Renewable Energy/Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu Agricultural Waste Treatment and Recycle Engineering Research Center, Nanjing 210014, China)

Abstract: It is important to conserve fresh rice straw effectively for sustainable resource supply for year-round biogas production. In this study, experiments were carried out evaluate the impacts of ensiling pretreatment on biogas production of rice straw at medium temperature $[(37\pm 2)^\circ\text{C}]$. Results showed that, after 30 d ensiling, pH value of the rice straw significantly dropped to 4.02, cellulose content was significantly decreased by 6.39% and total carbon content was decreased by 8.40%, compared with un-ensiled rice straw. The anaerobically digested ensiled rice straw produced 3 370 ml biogas, 22.36% greater than fresh rice straw. Ensiling is technically feasible as a conservation and pretreatment measure for fresh rice straw biogas production.

Key words: rice straw; ensiling; pretreatment; anaerobic digestion

秸秆厌氧发酵产沼气是农作物秸秆资源化的最

有效途径之一^[1-2], 受到世界各国普遍重视^[3]。

秸秆主要成分为难以被微生物降解的木质纤维素类物质, 厌氧发酵时水解酸化缓慢、产气周期长、秸秆利用效率低, 因此限制了秸秆的能源化利用。此外, 作物秸秆收获的季节性与沼气工程周年运行间存在矛盾, 需对收获秸秆作长期有效贮存, 例如水稻秸秆, 收获时秸秆含水率通

收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(12)1102-4]

作者简介: 付广青(1984-), 女, 河北石家庄人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业废弃物资源化研究。(E-mail) fu_guangqing@126.com

通讯作者: 叶小梅, (E-mail) yexiaomei610@126.com

常在 50% 以上,如果采用晾晒风干后贮存,不仅费工费力且因换茬季节矛盾突出而无充裕时间或足够场地,这就阻碍了秸秆沼气工程周年稳定运行。

大量研究结果表明,秸秆预处理技术可以有效提高其产气量,缩短发酵时间^[4-6]。其中,将秸秆进行青贮处理不仅可解决秸秆的存储问题,还促进了秸秆厌氧发酵产气^[7-8]。Dewar 等^[9]研究发现,青贮时多年生黑麦草中半纤维素,可以被酶解酸化使青贮料 pH 下降到 4 左右,由此认为青贮可以作为一种预处理与贮存的廉价且有效的方法,用于产能源或生物精炼等目标的木质纤维类物料的预处理^[10]。青贮是指在厌氧条件下,利用乳酸菌将青贮料(秸秆)中的可溶性糖类降解成乳酸,降低青贮料的 pH,抑制青贮料中微生物的活动,从而使青贮料的营养物质得以保存的一项发酵技术^[11]。目前世界上每年约有 1.5×10^5 t 青贮玉米秸秆用于沼气生产与动物饲料^[12]。Pakarinen 等^[13]发现青贮后的大麻纤维和饲用玉米具有更高的甲烷产量,青贮蚕豆的甲烷产量却有所下降。Christiane 等^[14-15]研究了青贮过程、青贮添加剂和青贮周期对作物产甲烷性能的影响,结果表明不同的青贮技术均使其原料甲烷产量提高了 11% 以上。Morten Ambye-Jensen 等^[10]在获得较低干物质含量青绿生物质青贮可提高其纤维素的生物转化率结果后,认为青贮为生物预处理提供了新的视野。Beatriz 等^[16]也认为青贮是一种即可有效保存青绿生物质热值又可以保证其物料周年均衡供应的有效方法。

水稻在中国是第一大大粮食作物,其秸秆产生量仅次于玉米秸秆^[17],水稻收获时其含水量高达 50% 以上,水稻秸秆青贮作为饲料已有大量研究工作^[18],但将青贮技术用于水稻秸秆贮存与预处理并用于生产沼气还鲜见报道。

本研究以水稻秸秆为原料,分析了水稻秸秆青贮后的物质组成及损失,研究了其青贮预处理前后厌氧发酵产沼气特性变化,以期水稻秸秆的厌氧发酵预处理技术及秸秆沼气工程化应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

新鲜水稻秸秆采自江苏省农业科学院试验

田,经收割、脱粒、揉搓后立即装入样品袋,于 4 ℃ 下保存备用。试验时,总固体含量(TS)为 35.36%;

青贮水稻秸秆:收割脱粒并经揉搓后的水稻秸秆,添加乳酸菌制剂(1.6×10^5 CFU/g,添加比例为 0.01% 鲜稻草质量),然后立即压实打捆,用可拉伸塑料膜包裹后青贮发酵,30 d 后取出用于后续厌氧发酵试验,TS 为 40.31%;

猪粪取自江苏省农业科学院附近养殖场,TS 为 20.61%;厌氧发酵接种物为本研究室自行驯化的接种物,TS 为 0.93%,挥发性固体含量(VS)为 86.5%。

1.2 试验设计与试验方法

厌氧发酵试验采用批次发酵方式,厌氧反应器容积为 1.0 L,试验用容积为 0.6 L 左右。各处理组原料设置如下:T1,鲜水稻秸秆;T2,鲜水稻秸秆+猪粪;T3,青贮水稻秸秆;T4,青贮水稻秸秆+猪粪;T5,纯猪粪。发酵系统各处理中秸秆 TS 含量为 4.00%,T2、T4 处理中猪粪与水稻秸秆比例为 3:7 (质量比,干质量)。T5 添加纯猪粪的质量与 T2、T4 处理保持一致。每个处理组加入接种污泥 200 g,加入尿素调节各处理发酵原料 C/N 为 30:1,用蒸馏水补充至总质量均为 600 g。混匀后,通入氮气 2 min 以驱赶发酵罐内的空气。密封后,于 (37 ± 1) ℃ 下进行厌氧发酵试验,每个处理 3 个平行,取平均值进行分析。试验过程中,于试验第 0 d、1 d、3 d、6 d、12 d 和 18 d 取样,测定 VFAs(挥发性脂肪酸)含量。第 0 d、1 d、3 d、6 d、12 d、18 d、22 d、26 d、30 d 测定发酵液的 pH 值。每天测定产气量。试验开始第 1 周每天测定甲烷含量,此后每 2 d 测定 1 次。试验结束后测定水稻秸秆 TS 损失率。

1.3 分析方法

TS 测定采用 105 ℃ 干燥恒重法;VS 测定采用 550 ℃ 灼烧恒重法;稻秆失重的测定:在整个发酵过程结束后,将发酵剩余物用清水反复冲洗,过 100 目筛留取发酵后的残余秸秆,最后置于干燥箱中干燥至恒质量。有机碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法^[19];全氮采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,凯氏定氮法^[20]。纤维素、半纤维素、木质素含量测定采用 VELPFIWE6 型纤维素测定仪并参照范式洗涤纤维分析法;发酵原料 pH 值采用雷磁 PHS-2F 型 pH 计测定;厌氧发酵液 pH 直接用上述 pH 计测定;VFA

各组分采用岛津 GC-2014 气相色谱仪测定,使用 StabilwaxDA 30 m×0.53 mm×0.25 m 型毛细管柱, FID 检测器,检测器温度为 240 ℃,进样器温度为 150 ℃,不分流,测定组分为乙醇、乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、异丁酸和异戊酸;沼气产量测定采用排水法;甲烷含量测定采用 GC-9890A 气相色谱仪, TDX-02B 色谱柱(4 mm×0.5 m),以氢气为载气,载气流量为 30 ml/min, TCD 检测器,柱温 100 ℃,检测器温度 120 ℃,进样量为 0.5 ml;甲烷含量采用外标法测定。

1.4 数据分析

各指标在青贮前后以及厌氧发酵前后的差异采用配对样品 *t* 检验。统计分析软件为 SPASS 16.0v.,置信水平为 95%($P<0.05$)。

表 1 青贮前后水稻秸秆理化性质的变化

Table 1 Changes of physico-chemical properties of rice straw before and after ensiling

水稻秸秆	TS(%)	pH	半纤维素(%)	纤维素(%)	木质素(%)	总氮(g/kg)	总碳(g/kg)
鲜水稻秸秆	35.36 ± 0.38	7.60 ± 0.18	27.46 ± 0.98	40.09 ± 0.21	7.46 ± 0.64	7.19 ± 0.88	521.69 ± 5.93
青贮水稻秸秆	40.31 ± 0.43**	4.02 ± 0.07**	27.35 ± 0.39	33.70 ± 0.27*	7.10 ± 0.53	9.01 ± 0.24	477.86 ± 7.94**

*表示差异显著($P<0.05$);**表示差异极显著($P<0.01$)。

2.2 青贮水稻秸秆厌氧发酵产沼气的特性

2.2.1 pH 及日产气量变化 不同处理厌氧消化过程中 pH 变化见图 1。由图 1 可知,在发酵前 3 d,各处理组 pH 值均下降, T3、T4 的降低幅度最大,即青贮预处理后秸秆 pH 的降低显著促进了厌氧发酵前期的酸化过程。厌氧发酵 3 d, T4、T3、T2、T1 和 T5 pH 值分别为 6.43、6.50、6.87、7.18 和 7.37。随后,各处理的 pH 值缓慢回升,并最终保持在一个相对稳定的水平。试验结束时,各处理的 pH 值约为 7.50~7.60,处理间相差不大。

新鲜水稻秸秆及其经过青贮后物料厌氧发酵 30 d 日产气量变化见图 2。如图 2 所示,厌氧发酵 1 d 后,各个处理产气量差异明显,其中, T1(新鲜水稻秸秆)与 T5(纯猪粪)产气量最低,而 T3(青贮水稻秸秆)最高,其次是 T4(青贮水稻秸秆+猪粪), T2(新鲜水稻秸秆+猪粪)最低,可见青贮水稻秸秆发酵启动快,但此后产气量降低,自第 4 d 后,再迅速恢复,在发酵第 8 d、第 9 d 达到高峰。青贮水稻秸秆与新鲜水稻秸秆相比,青贮水稻秸秆发酵前 10 d 日产气量均高于后者,此后,两者日产气量基本相同,

2 结果与分析

2.1 青贮前后水稻秸秆理化性质变化

新鲜水稻秸秆青贮 30 d 后,水稻秸秆主要理化性质的变化如表 1 所示。由表 1 可以看出,青贮后水稻秸秆的 TS 含量相对于鲜水稻秸秆增加了 5 个百分点,可能是鲜水稻秸秆贮存中水分散失所致。秸秆 pH 降低至 4.02,表明青贮效果良好。经过青贮,水稻秸秆的半纤维素、纤维素、木质素的含量分别降低了 0.11、6.39 和 0.36 个百分点,其中,纤维素含量下降达显著水平($P<0.05$)。总氮含量增加,但未达显著水平($P>0.05$),总碳含量降低 8.40%($P<0.01$)。综上,水稻秸秆经过青贮后,干物质含量、总碳含量降低,部分半纤维、纤维素被降解。

表明水稻秸秆经青贮后,有利于其快速启动,且前期产气量高。T1、T2 和 T5 发酵日产气量变化趋势相似,在发酵 2 d 后日产气量达到一个小高峰,随后降低,在 7 d 后又达到第 2 个高峰。

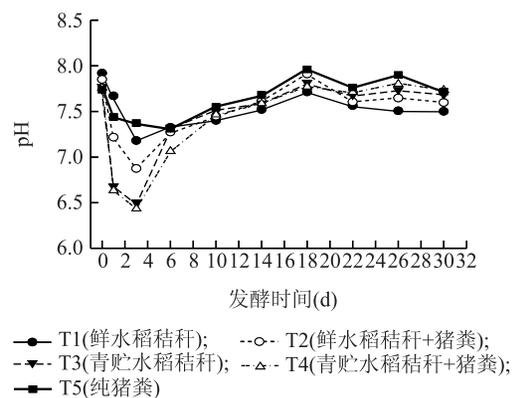
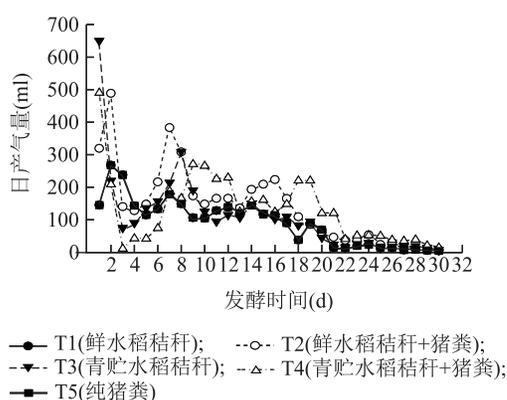


图 1 各处理发酵液中 pH 变化

Fig.1 The change of fermentation pH in different treatments

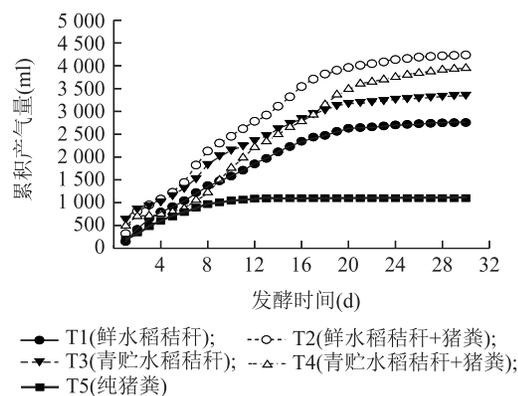
2.2.2 累积产气量及甲烷含量变化 图 3 所示为水稻秸秆各处理厌氧发酵 30 d 累积产气量的变化。由图 3 可以看出,厌氧发酵 30 d, T2 处理累积产气



数据均为扣除空白(接种物)后的净产气量。

图2 各处理水稻秸秆厌氧发酵日产气量

Fig.2 Daily biogas production of rice straw in different treatments



数据均为扣除空白(接种物)后的净产气量。

图3 各处理厌氧发酵累积产气量变化

Fig.3 Changes of cumulative biogas production of rice straw in different treatments

量最高达4 234 ml,其次是T4处理,为3 945 ml,再次是T3处理,为3 370 ml,T1处理为2 754 ml,T5处理最低,为1 101 ml。比较T2处理和T1处理,猪粪添加有利于提高水稻秸秆产气潜力,这与高白茹等^[21]、鲍习峰等^[22]的研究结果一致。T3处理与T1处理相比,不仅前期产气快,且产气量显著高于后者,表明水稻秸秆青贮可实现秸秆有效贮存,且还有利于前期厌氧发酵快速启动。青贮水稻秸秆混合猪粪对其产气特性影响较为复杂,添加猪粪前期并未能有效促进青贮水稻秸秆的产气速率,后期则显著促进产气,对照图1发现,青贮水稻秸秆混合猪粪厌氧发酵前期发酵液发生了酸化现象,其pH已低于6.5,而厌氧发酵产沼气最适宜的pH值为7.0左右,因此,较低的pH影响了产甲烷速率。因此,当以青贮水稻秸秆为主要发酵底物时,猪粪混合适宜比例还有待进一步试验研究。

各处理沼气中甲烷含量如图4所示,除T5处理外,各处理组在厌氧发酵进行5d后,沼气中甲烷百分含量达到约50%以上,并持续到发酵第14d,其中T2、T3、T4处理甲烷百分含量分别为57.84%、56.63%和54.67%,显著高于T1(48.78%)。厌氧发酵进行14d以后,各处理甲烷百分含量不同程度降低。表明,与新鲜水稻秸秆相比,青贮水稻秸秆作为发酵底物不仅可以提高产气量,而且可以提高沼气品质,同时青贮水稻秸秆与猪粪混合发酵也利于提高厌氧发酵产物中甲烷含量。

2.3 厌氧发酵过程中有机酸的变化

有机酸来自于有机物的水解酸化产物,原料中

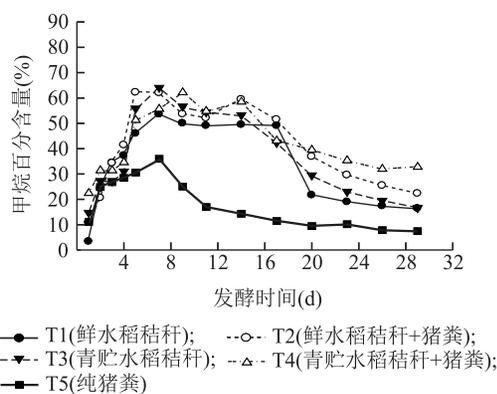


图4 各处理沼气中甲烷含量变化

Fig.4 Changes of methane content in biogas produced in different treatments

易分解有机物含量越高水解酸化的速率越高,有机酸积累量越高。而有机酸组分则主要取决于发酵原料的特性。各处理水稻秸秆厌氧发酵过程中发酵液挥发性有机酸含量的变化见图5。由图5可见,挥发性脂肪酸主要由乙酸、丙酸和丁酸组成。由图5A可以看出各处理发酵过程中总有机酸(TVFA)含量变化趋势基本相似,均为发酵前3d迅速增加并达到最大值,有机酸含量由高到低依次为T4、T3、T2、T1和T5处理,分别达到16 532.45 mg/L、14 822.57 mg/L、10 918.37 mg/L、5 954.16 mg/L和2 423.70 mg/L,之后逐渐降低。青贮水稻秸秆较未青贮水稻秸秆累积更高的挥发性有机酸,表明前者在厌氧发酵过程中比后者更易水解,水稻秸秆青贮有促进水稻秸秆水解的作用,同样猪粪混合发酵也具有促进

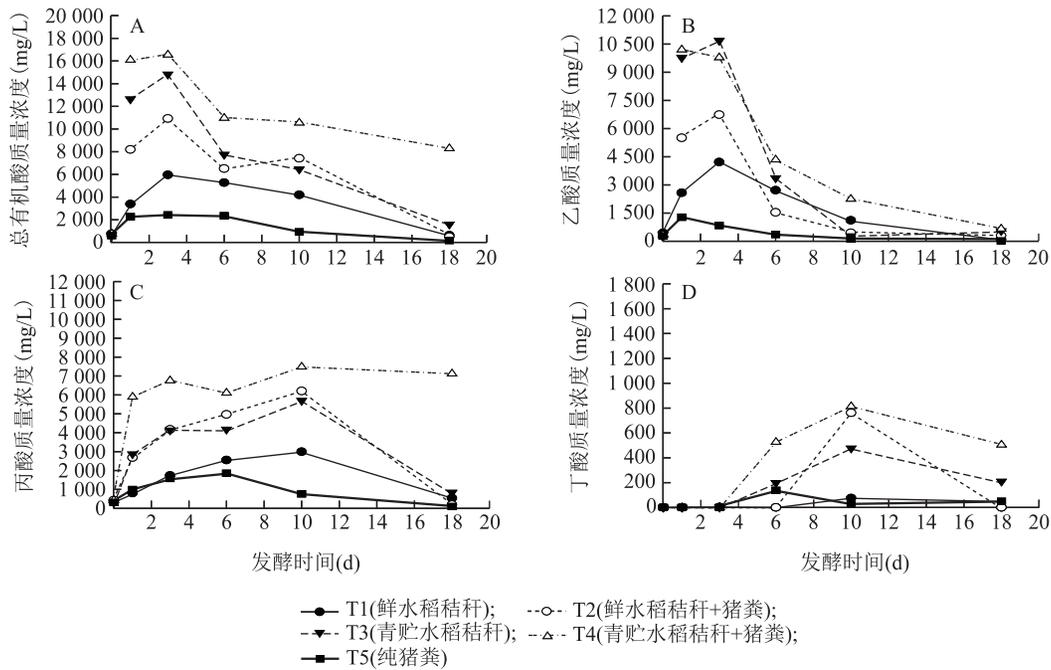


图5 厌氧发酵过程中有机酸含量的变化

Fig.5 Changes of VFAs content during anaerobic digestion

水稻秸秆水解的作用。

消化过程中乙酸、丙酸和丁酸的变化如图 5B、图 5C、图 5D 所示。各处理水稻秸秆(除 T5 外)厌氧发酵过程以乙酸发酵型为主。厌氧发酵 3 d, 处理 T4、T3、T2 和 T1 乙酸质量浓度分别达到 9 782 mg/L、10 686 mg/L、6 742 mg/L 和 4 217 mg/L, 各处理表现出相同的趋势(图 5B), 即随着厌氧发酵推进, 乙酸含量呈明显下降趋势; 丁酸含量与乙酸含量变化趋势相同, 但发酵过程中各处理间丙酸含量并未表现出相同的趋势, 其中 T4 处理, 丙酸含量呈现出稳定增加之势, 其浓度达到 6 000 mg/L 以上(图 5C)。通常乙酸可直接被产甲烷菌利用, 而丙酸首先由产氢产乙酸菌转化为乙酸和氢气, 然后才能被产甲烷菌利用。许多研究结果表明, 厌氧发酵系统中, 产氢产乙酸菌可能对有毒物质或环境因素变化更加敏感^[23-24], 相比较乙酸、丁酸, 丙酸更不易被产甲烷菌所利用转化, 此外, 丙酸的积累反过来又可能会对产甲烷菌造成抑制作用。Barber 等^[25]指出当丙酸浓度为 1 500~2 220 mg/L 时, 产甲烷菌的数量随丙酸浓度的上升而呈二级指数下降。Hyun 等^[26]研究丙酸浓度对产甲烷菌的毒性时, 发现中性条件下丙酸浓度为 5 000 mg/L 时甲烷产量降低到正常状态下的 22%~38%, 随着 pH 值的下降, 其抑制作

用增强。结合图 1 发酵液 pH 值变化, 可初步解释 T4 累积产气量低于 T2 的原因, 至于 T4 处理中丙酸累积的原因, 还有待进一步研究。

2.4 厌氧发酵前后秸秆物质降解变化

各处理经过 30 d 的厌氧发酵后, 其 TS 及半纤维素、纤维素降解情况如表 2 所示。T1(鲜水稻秸秆)、T2(鲜水稻秸秆+猪粪)、T3(青贮水稻秸秆)和 T4(青贮水稻秸秆+猪粪)处理 TS 的降解率分别为 61.67%、57.79%、70.42% 和 66.25%。可以看出, 青贮预处理提高了水稻秸秆 TS 的降解能力, 同样, 青贮水稻秸秆经过厌氧发酵后, 半纤维素和纤维素的降解率达到 81.03% 和 82.22%, 分别高于鲜水稻

表 2 厌氧发酵前后秸秆 TS、半纤维素、纤维素质量变化

Table 2 Mass Changes of TS, hemicellulose and cellulose of rice straw before and after anaerobic digestion

处 理	TS(g)	半纤维素(g)	纤维素(g)
发酵前 鲜秸秆	24.00 ± 0	6.59 ± 0.40	9.62 ± 0.09
发酵后 鲜秸秆	9.20 ± 0.57	2.19 ± 0.15	3.65 ± 0.17
鲜秸秆+猪粪	10.13 ± 0.21	2.91 ± 0.28	3.27 ± 0.36
青贮秸秆	7.10 ± 0.10	1.25 ± 0.42	1.71 ± 0.19
青贮秸秆+猪粪	8.10 ± 0.98	2.23 ± 0.61	3.28 ± 0.65

秸秆 15.00% 和 20.00%, 可见青贮预处理后水稻秸秆的厌氧发酵有效提高了消化过程中微生物对半纤维素及纤维素的利用率, 这与前人的研究结果一致^[7-9]。

3 讨论

青贮是以新鲜的牧草、饲料作物等为原料, 利用乳酸菌等厌氧微生物发酵, 将青绿饲料中的可溶性碳水化合物转化成乳酸等有机酸, 使原料的 pH 值降低到 4 左右, 从而有效抑制不良微生物的生长繁殖, 获得能够长期保存、降低营养物质损失的贮存方法^[27-29], 目前青贮技术已被广泛用于食草动物青绿饲料贮存。水稻作为中国重要农作物, 其秸秆年资源量高达 $1.8 \times 10^8 \text{ t}^{[17]}$ 。水稻收获时其秸秆含水量高达 50% 以上, 并且在中国稻麦轮作区, 由于水稻收获与小麦播种季节矛盾较突出, 无充裕时间可供水稻秸秆风干, 造成水稻秸秆易腐烂变质影响其后续利用。许能祥等^[30]利用青贮技术, 对新鲜水稻秸秆进行青贮, 有效防止了水稻秸秆腐烂且提高了稻草饲喂消化率。近年, 广泛用于饲草领域的青贮技术被用于能源作物的贮存, 特别是玉米秸秆青贮能源化利用已有大量文献报道^[13-15, 31], 且被广泛应用于沼气工程。

本研究尝试将青贮技术应用于新鲜水稻秸秆跨季贮存, 使之用于厌氧发酵产沼气, 结果表明: 新鲜水稻秸秆经 30 d 青贮预处理后, 与新鲜水稻秸秆相比, pH、总碳含量及纤维素含量显著降低, 有利于后续厌氧发酵的进行; 青贮缩短了水稻秸秆厌氧发酵启动时间, 促进水稻秸秆生物转化, 与未青贮水稻秸秆相比, 甲烷含量提高 7.85%, 累积产气量提高 22.36%。青贮作为一项新鲜水稻秸秆贮存与预处理方法, 技术上是可行的。

参考文献:

- [1] LI L H, LI D, SUN Y M, et al. Effect of temperature and solid concentration on anaerobic digestion of rice straw in South China [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35 (13): 7261-7266.
- [2] CUI Z F, SHI J, LI Y B. Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (20): 9432-9437.
- [3] LIANG C Y, FU Q X, XU M G, et al. Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 44: 824-834.
- [4] 高白茹, 常志州, 叶小梅, 等. 堆肥预处理对稻秸厌氧发酵产气量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26 (5): 251-254.
- [5] 方文杰, 李秀金, 何艳峰, 等. 化学与堆沤预处理对稻草厌氧消化产气量影响的机理研究 [J]. *可再生能源*, 2007, 25 (4): 21-24.
- [6] 孙辰, 刘荣厚, 覃国栋. 芦笋秸秆预处理与厌氧发酵制取沼气试验 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41 (8): 94-99, 120.
- [7] CANAM T, TOWN J R, TSANG A, et al. Biological pretreatment with a cellobiose dehydrogenase-deficient strain of *trametes versicolor* enhances the biofuel potential of canola straw [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (21): 10020-10027.
- [8] ZHONG W Z, ZHANG Z Z, LUO Y J, et al. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (24): 11177-11182.
- [9] DEWAR WA, MCDONALD P, WHITTENBURY R. The hydrolysis of grass hemicelluloses during ensilage [J]. *J Sci Food Agric*, 1963, 14: 411-417.
- [10] MORTEN AMBYE-JENSEN A, KATJA S JOHANSEN B, THOMAS DIDION C, et al. Ensiling as biological pretreatment of grass (*Festulolium Hykor*): the effect of composition, dry matter, and inocula on cellulose convertibility [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 58: 303-312.
- [11] MCDONALD P, HENDERSON A R, HERON S J E. *The Biochemistry of Silage* [M]. Marlow: Chalcombe Publications, 1991: 184-236.
- [12] JACOPO B, ALESSANDRA F. The environmental burdens of maize silage production: influence of different ensiling techniques [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2015, 204: 88-98.
- [13] PAKARINEN A, MAIJALA P, JAAKKOLA S, et al. Evaluation of preservation methods for improving biogas production and enzymatic conversion yields of annual crops [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2011, 4 (20): 1-13.
- [14] CHRISTIANE H, MONIKA H, CHRISTINE I. Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102: 5153-5161.
- [15] CHRISTIANE H, MONIKA H, CHRISTINE I. Prochnow particle size reduction during harvesting of crop feedstock for biogas production I: effects on ensiling process and methane yields [J]. *Bioenerg Res*, 2012, 5: 926-936.
- [16] BEATRIZ MOLINUEVO-SALCES, SØREN U LARSEN, BIRGITTE K. AHRING, et al. Biogas production from catch crops: increased yield by combined harvest of catch crops and straw and preservation by ensiling [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 79: 3-11.
- [17] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算 [J]. *农业工程学报*, 2009, 5 (12): 211-216.
- [18] 王彦苏, 张一凡, 严振亚, 等. 水稻秸秆青贮饲料中可培养微生物多样性分析及优势乳酸菌的分离鉴定 [J]. *草地学报*, 2014, 22 (3): 586-592.

- [19] NY525-2002. 有机肥料[S].
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-69.
- [21] 高白茹, 常志州, 叶小梅, 等. 外源无机添加物对稻秸厌氧消化性能的影响[J]. 中国沼气, 2011, 29(1): 11-15.
- [22] 鲍习峰, 叶小梅, 陈广银, 等. 麦秸与奶牛场废水高固体混合厌氧发酵产甲烷研究[J]. 环境化学, 2012, 31(9): 1387-1392.
- [23] CHEN Y, CHENG J J, CREAMER K S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 4044-4064.
- [24] 王忠江, 李文哲, 王丽丽, 等. 温度波动对牛粪高浓度水解酸化特性的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 199-203.
- [25] BARBER W P, STUCKEY D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review [J]. *Wat Res*, 1999, 33 (7): 1559-1578.
- [26] HYUN S H, YOUNG J C, KIM I S. Inhibition kinetics for propionate degradation using propionate enriched mixed cultures [J]. *War Sci Tech*, 1998, 38(89): 443-451.
- [27] LIU J J, LIU X P, REN J W, et al. The effects of fermentation and adsorption using lactic acid bacteria culture broth on the feed quality of rice straw [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(3): 503-513.
- [28] 杨志刚, 沈益新. 纤维素酶制剂在青贮饲料中的应用[J]. 畜牧与兽医, 2002, 34(9): 37-39.
- [29] 许留兴, 彭 凯, 赵丽丽. 稻草青贮乳酸菌菌种的筛选[J]. 广东农业科学, 2014(14): 86-90.
- [30] 许能祥, 丁成龙, 顾洪如, 等. 添加乳酸菌和米糠对水稻秸秆青贮品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(6): 1308-1312.
- [31] 任海伟, 姚兴泉, 李金平, 等. 青贮玉米秸秆与牛粪混合厌氧消化产气性能的试验研究[J]. 中国沼气, 2015, 33(1): 28-32.

(责任编辑: 陈海霞)