

裹包青贮提高玉米秸秆 厌氧消化效率的实验研究

宋成军¹ 陈 羚² 齐 岳¹ 罗 娟¹ 赵学兰³ 田宜水¹ 赵立欣^{1*}

(1. 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;

2. 浙江农林大学暨阳学院, 诸暨 311800; 3. 天津生物工程职业技术学院, 天津 300074)

摘 要 秸秆是重要的沼气工程原料, 秸秆预处理对其后续厌氧消化效率影响巨大。采用田间裹包青贮方法, 设计3因素正交实验, 考察了秸秆含水率、压缩比和添加剂对玉米秸秆发酵时间和厌氧消化产沼气的影响。结果表明: 秸秆经过裹包青贮, 发酵总时间(total fermentation time, TFT)减少1~2 d, 累积产气量达到总产气量的90%所用时间(TFT_{90%})减少了40%~50%, 消化效率明显提高; 秸秆含水率对产气效果有明显影响, 随着含水率增加, 单位总固体(total solid, TS)累计产气量(cumulative biogas yields per TS, CBYT)和沼气日生产率(biogas yields rate average day, BYR)由高到低排序为: 35%~40%, 40%~45%, 30%~35%; 秸秆压缩比对产气效果有明显影响, 随着压缩比的增加, 其对 CBYT 和 BYR 的效应由高到低排序为: 185、143 与 138 kg/m³; 添加剂类型对产气效果亦有明显影响, 在不同添加剂处理下, 其对 CBYT 和 BYR 的效应由高到低排序为: 尿素处理 > 甲酸处理 > 无添加剂处理; 正交实验极差分析表明, 对 CBYT 和 BYR 的影响排序为: 含水率 > 压缩比 > 添加剂, 其田间裹包青贮进行厌氧发酵的优化组合为: 青贮秸秆含水率为 35%~40%, 压缩比为 185 kg/m³, 添加剂为营养型, 青贮 20 d, CBYT 和 BYR 达到最大, 分别为 646.57 mL/g 和 173.25 mL/(d·g)。

关键词 裹包青贮 玉米秸秆 厌氧消化 产气效率

中图分类号 X705 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)05-2660-07 DOI 10.12030/j.cjee.201412088

Round bale silage on anaerobic fermentation efficiency of corn straw

Song Chengjun¹ Chen Ling² Qi Yue¹ Luo Juan¹ Zhao Xuelan³ Tian Yishui¹ Zhao Lixin¹

(1. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residues (Ministry of Agriculture), Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agriculture Engineering, Beijing 100125, China; 2. Jiyang College of Zhejiang A&F University, Zhuji 311800, China; 3. Tianjin Vocational College of Bioengineering, Tianjin 300074, China)

Abstract Corn straw is an important raw material for biogas engineering. Different pretreatments of corn straw could have a great impact on the biogas fermentation performance. In this study, one orthogonal experiment for three-level factors was designed to study the effects of moisture content, compression rate, and three silaging additives (urea and formic acid) on both fermentation time and biogas production efficiency, such as total fermentation time (TFT), total fermentation time of 90% (TFT_{90%}), cumulative biogas yields per total solid (CBYT), and biogas yield rate average per day (BYR). The results are as follows: TFT diminished from 1 to 2 d and TFT_{90%} also decreased from 40% to 45% compared with TFT. Therefore, round bale silage of corn straw could markedly improve the biogas production efficiency. The moisture content of corn straw had a significant effect on biogas production efficiency; as the moisture content of corn straw increased, the effects of the moisture gradient on both CBYT and BYR were ranked as follows: 35% to 40%, 40% to 45%, 30% to 35%. The compression rate of corn straw had a marked effect on the production efficiency of biogas; as the compression ratio of corn straw increased, the effects of the compression ratio gradient on both CBYT and BYR were ranked as follows: 185 kg/m³ > 143 kg/m³ > 138 kg/m³. Silage additives clearly influenced the biogas production efficiency; the effects of additives on both CBYT and BYR were ranked as follows: urea > formic acid > no additives. The orthogonal experiment range analysis showed that the primary and secondary order of promoting effects of water content, compression ratio, and additives on CBYT and BYR were arranged as follows: water content > compression ratio > additive. The optimized combination was A₂B₃C₃; that is, the range of water content was from 35% to 40%, the straw compression ratio was 185 kg/m³, and through a round bale silaging pretreatment of corn straw for biogas production, the top-priority mix of moisture content and compression ratio was from 35% to 40% and 185 kg/m³ with the addition of a nutrient additive for anaerobic digestion. Both CBYT and BYR reached the maximum peak value and the respective values of both CBYT and BYR were 646.57 mL/g and 173.25 mL/(d·g) after straw silaging for 20 d.

Key words round bale silage; corn straw; anaerobic digestion; biogas production efficiency

中国是世界上秸秆资源最丰富的国家之一。利用农作物秸秆进行厌氧发酵产沼气, 是一条清洁高效的秸秆资源化利用途径。秸秆厌氧发酵技术作为生物质能主要利用技术已广受关注。2008 年以来, 党中央和国务院增加了对秸秆沼气的扶持力度。截

基金项目: 农业科技成果转化资金项目(2012GB23260547)

收稿日期: 2014-12-09; 修订日期: 2014-12-26

作者简介: 宋成军(1979—), 男, 高级工程师, 研究方向: 生态恢复与农业生物质生态化利用。

E-mail: songchengjun232@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: zhaolixin5092@gmail.com

至2012年,经农业部批复并建成秸秆沼气工程有47余处,分布于20多个省^[1]。从运行成功和在建的秸秆沼气示范点看,中国秸秆沼气工艺类型多样,根据反应器的类型及进出料方式,主要可分为完全混合式、一体化两相厌氧消化工艺、覆膜槽干式、自载体生物膜和红泥塑料式发酵工艺等^[1-2]。

秸秆中的有机成分以纤维素、半纤维素、木质素为主,其中,木质素包裹在纤维素和半纤维素的表面,可阻碍酶和微生物与纤维素、半纤维素的充分接触,因此,秸秆厌氧消化的限速步骤主要是纤维素和半纤维素的水解^[3]。为加速水解,缩短反应周期并提高秸秆的厌氧消化效率,可采用物理法(如汽爆、超生波处理等)^[4-5]、化学法(碱处理、酸处理等)^[6-7],以及生物法(投加酶制剂、抗菌素等)^[8-9]对秸秆类物料进行预处理。国内外很多学者研究表明,以上预处理方法具有不同的特性及工艺适应性,较大幅度提高了秸秆厌氧消化效率,但在实际工程中,采用以上预处理技术,还存在操作复杂、成本较高、占地较大等问题。

裹包青贮是一种提高秸秆可生化性的一种重要预处理方法,秸秆经青贮后可消化性能更好,更适合厌氧发酵产气的需要^[10]。经过裹包青贮的秸秆主要成分发生明显变化,木质素、纤维素含量均降低,结构疏松,扩大了纤维素、半纤维素与厌氧微生物的接触面,而粗蛋白、中性洗涤可溶物等易降解物质也相应提高,导致其消化率明显提高,产气量上升,保存时间延长^[11-12]。本研究设想在田间对玉米秸秆进行裹包青贮,选取秸秆含水率、压缩比和添加剂3个因素对秸秆厌氧消化效果进行分析与优化,试图在提高秸秆厌氧消化效率的同时,降低秸秆预处理成本及处理设施占地面积,为秸秆沼气工程运行提供高效率、低成本、易操作的预处理技术。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验用发酵原料为玉米秸秆,取自山东省泰安市肥城王庄镇农田,自然风干后,秸秆的含水率为39%~42%,总固体(total solid, TS)和挥发性固体(volatil solid, VS)质量分数分别为61%和54%。除去秸秆中的残留根系、泥土和塑料薄膜等杂质后使用。接种物为本实验室驯化后的活性污泥,原污泥取自常年运行的沼气工程——北京市大兴区留民营沼气工程。接种污泥的pH值为8.03,含水率为96.79%,TS为3.21%,VS为1.56%。

添加剂(尿素和甲酸)纯度为分析纯,尿素为颗粒结晶体,含氮量为46.67%,碳质量分数为20%,甲酸为无色透明液体,密度为1.22 g/mL。

1.2 实验因素

秸秆青贮过程和品质受含水率、青贮密度、添加剂类型、发酵温度、发酵原料等多种因素影响。针对玉米裹包青贮发酵特点,以减少青贮过程的秸秆原料损失,提高秸秆的厌氧消化性能为目标,结合实际条件,本实验选取3个主要因素:秸秆含水率、秸秆压缩比与青贮添加剂。

1.3 实验装置

本实验采用排水集气法计量产气量,采用橡皮塞封口的500 mL广口瓶作为发酵瓶,集气瓶和集水瓶的容积均为500 mL,在38~40℃的恒温水浴中进行发酵产气实验(图1)。

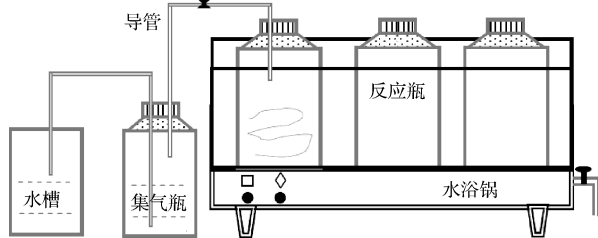


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Equipment for anaerobic digestion of corn stalk

1.4 实验方法

1.4.1 秸秆田间裹包青贮方法

为了检验秸秆含水率(A)、压缩比(B)和添加剂种类(C)3个关键因素对厌氧产气的主效应与相互作用,设计正交实验,每个因素布设3个水平(表1),选用 $L_9(3^4)$ 进行实验,共9组实验。含水率水平设置基于综合考虑秸秆收获的实际情况和秸秆青贮饲料制作过程对含水率的要求,考虑秸秆打捆机只有3个压缩密度,压缩比梯度设置3个水平,添加剂设置以其作用机制及成本而设。

具体过程如下:分别取原秸秆放置在阴凉通风处风干,含水率分别达到30%~35%和35%~40%时即准备开始裹包青贮;此外,另取原秸秆铺放在防水布上,均匀喷撒自来水使含水率达到40%~45%,添加剂的种类和质量分数见表1,混匀以后防水布覆盖2~3 h,保证试剂和水分被充分吸收。通过专用打捆机捆扎,缠绕4层聚乙烯拉伸膜密封后堆垛保存。每一处理分4个贮存时间,每次3个重复,每一处理需要12个堆垛(20 kg/堆垛),共108堆垛。为防止冻结,在底部和周围盖上防水布,经实

测秸秆堆垛环境温度为 25 ~ 30 ℃。

表 1 影响因素水平
Table 1 Influence factors and level

水平	含水率 (%)	压缩比 (kg/m ³)	添加剂	
			种类	质量分数(%)
1	30 ~ 35	138	空白 CK	0
2	35 ~ 40	143	甲酸	1
3	40 ~ 45	185	尿素	1

1.4.2 秸秆厌氧发酵方法

秸秆田间裹包青贮实验启动后,分别在青贮开始后第 15、32、47 和 61 天采样,将采集的秸秆和厌氧活性污泥按照 10 g: 100 mL 混合,搅拌均匀后装入 500 mL 发酵瓶内,3 次重复,密封完毕后,反应器温度保持在 38 ~ 40 ℃ 下进行中温厌氧发酵。采用排水集气法,每日定时测量累积产气量。

1.5 计算和分析方法

待所产的气体甲烷质量分数大于 50% 后开始记录数据,每天下午 16:00 点定时测量,扣除对照组中污泥的产气量,即可得到日产气量,日产气量之和为累积产气量。从记录第 1 天到物料连续 3 d 不产气为止所用时间为发酵总时间 (total fermentation time, TFT),累积产气量达到总产气量的 90% 以上即可以认为发酵完成,所用时间即为发酵周期 (total fermentation time, TFT_{90%})。

干物质含量:105 ℃ 下烘干,采用称重法,测量 TS。单位 TS 累计产气量 (cumulative biogas yields per TS, CBYT) 为发酵料液 (秸秆和污泥混合物) 的累积产气量 (mL) 除以发酵料液中的干物质质量 (g)。沼气日产率 (biogas yields rate average day, BYR) 为单位 TS 累计产气量与发酵周期 (TFT_{90%}) 的比值。甲烷含量采用 GA2000/PLUS 沼气分析仪测定。

1.6 验证实验

如果正交实验结果得出的优化组合不在 9 组正交实验中,则对该组合产气效果进行实验验证。青贮、厌氧发酵及测试仪器与 1.4 和 1.5 相同。

2 结果与讨论

2.1 青贮对秸秆厌氧消化时间的影响

TFT 和 TFT_{90%} 可以直接反映出物料完成厌氧消化所需要的时间,是表征物料厌氧消化性能的重要指标。从图 2(a) 可以看出,第 1 ~ 9 组实验中,打捆后未青贮的秸秆直接厌氧消化, TFT 为 14 ~ 15 d,而分别经过 10、20、30 和 40 d 青贮期后, TFT 减少了 1 ~ 2 d,减少不明显。如图 2(b) 所示,第 1 ~ 9 组实

验中,打捆后未青贮的秸秆直接进行厌氧消化, TFT_{90%} 为 6 ~ 8 d,经过 10、20、30 和 40 d 青贮后, TFT_{90%} 分别为 6 ~ 8、7 ~ 8、6 ~ 8 和 6 ~ 7 d,与 TFT 相比,减少了约 40% ~ 50%。可见,裹包青贮明显减少了厌氧消化周期。周玮等^[13] 也发现,青贮秸秆的发酵启动时间快, TFT_{90%} (5 d) 比 TFT (8 d) 减少 3 d,这与本实验中的结果基本一致。

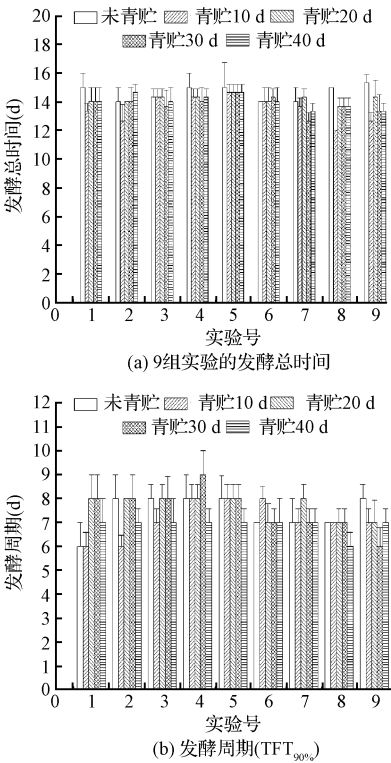


图 2 裹包青贮对秸秆厌氧消化时间的影响
Fig. 2 Effect of round bale silage on TFT and TFT_{90%} during anaerobic digestion process of straw stalks

2.2 含水率对秸秆厌氧产气效果的影响

如图 3(a) 所示,预处理后的秸秆未青贮, CBYT 由高到低排序为: 35% ~ 40%, 40% ~ 45%, 30% ~ 35%, 差异显著。在 35% ~ 40% 条件下, CBYT 最高, 较 30% ~ 35% 条件下增加了 67%。在青贮 10、20、30 和 40 d 时间下, CBYT 由高到低排序为: 35% ~ 40%, 40% ~ 45%, 30% ~ 35%, 均是 35% ~ 40% 的含水率时产气效果最优, 差异显著。在 35% ~ 40% 条件下: 青贮 10、20、30 与 40 d, CBYT 较 30% ~ 35% 处理分别显著增加了 109%、57%、72% 与 61%。

如图 3(b) 所示,预处理后的秸秆未青贮, BYR 由高到低排序为: 35% ~ 40%, 40% ~ 45%, 30% ~ 35%, 在 35% ~ 40% 条件下, BYR 最高较 30% ~ 35% 条件下增加了 13%, 差异显著; 青贮 10 d, BYR

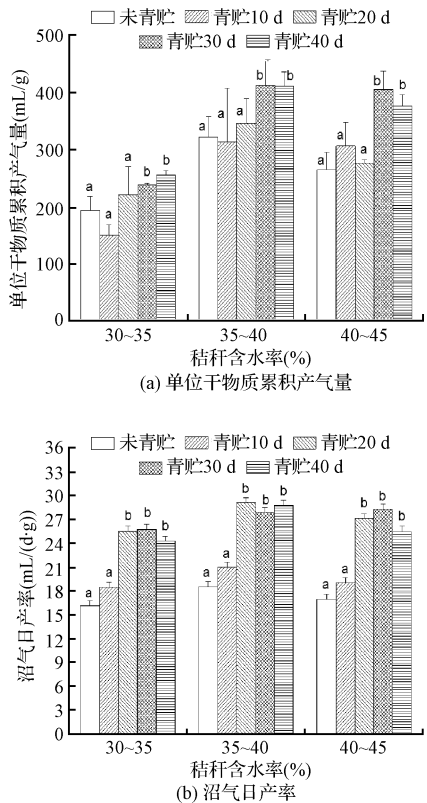


图 3 含水率对秸秆累积产气量和沼气日产率的影响
Fig. 3 Effect of moisture content on cumulative biogas production and biogas yields rate during anaerobic digestion process of straw

由高到低排序为:35% ~ 40% ,40% ~ 45% ,30% ~ 35% ,在 35% ~ 40% 条件下,BYR 最高较 30% ~ 35% 处理增加了 13% ,差异显著;青贮 20 d,BYR 由高到低排序为:35% ~ 40% ,40% ~ 45% ,30% ~ 35% ,在 35% ~ 40% 条件下,BYR 最高较 30% ~ 35% 处理增加了 14% ,差异显著;青贮 30 d,BYR 由高到低排序为:40% ~ 45% ,35% ~ 40% ,30 ~ 35% ,在 40% ~ 45% 条件下,BYR 最高较 30% ~ 35% 处理增加了 10% ;青贮 40 d,BYR 由高到低排序为:35% ~ 40% ,40% ~ 45% ,30% ~ 35% ,在 35% ~ 40% 条件下,BYR 最高较 30% ~ 35% 处理增加了 18% ,差异显著。

以上表明,适当的含水率可以较大幅度提高秸秆的可生化性和产气效率。其原因在于,植物细胞自身代谢和微生物活动受到含水率的强烈影响,青贮初期,物料含水率较低时,可在短时间内形成厌氧环境,植物细胞的渗透压较高,对腐生菌和乳酸菌造成一定的生理干燥状态,使微生物的生长繁殖受到一定限制,有效保留干物质,提高了物料厌氧消化产气效率。陈娥英等^[14]发现,象草在青贮过程中,较低的含水率可以增加其干物质回收率。

2.3 压缩比对秸秆厌氧产气效果的影响

图 4(a) 显示,青贮 10 d,压缩比为 185 kg/m³ 的 CBYT 最高,为 138 kg/m³ 时的 CBYT 最低,CBYT 较后者增加了 17% ;青贮 20 d,压缩比为 185 kg/m³ 的 CBYT 最高,为 143 kg/m³ 时的 CBYT 最低,CBYT 较后者增加了 11% ;青贮 30 d,压缩比为 185 kg/m³ 的 CBYT 最高,为 143 kg/m³ 时的 CBYT 最低,CBYT 较后者增加了 11% ;青贮 40 d,压缩比为 185 kg/m³ 的 CBYT 最大,达到 395.40 mL/g,为 138 kg/m³ 时的 CBYT 最小,仅为 305.44 mL/g, CBYT 较后者显著增加了 29%。预处理后的秸秆未青贮,压缩比为 143 kg/m³ 的 CBYT 最高,为 138 kg/m³ 时的 CBYT 最低,CBYT 较后者增加了 29%。秸秆经过裹包青贮,无论时间长短,CBYT 均以高密度处理下最高,低密度处理下最小。

图 4(b) 显示,青贮 10 d,压缩比为 185 kg/m³ 的 BYR 最高,为 143 kg/m³ 时的 BYR 最低,BYR 较后者增加了 17% ;青贮 20 d,压缩比为 185 kg/m³ 的 BYR 最高,为 143 kg/m³ 时的 BYR 最低,BYR 较后者增加了 10% ;青贮 30 d,压缩比为 185 kg/m³ 的 BYR 最高,为 143 kg/m³ 时的 BYR 最低,BYR 较后者

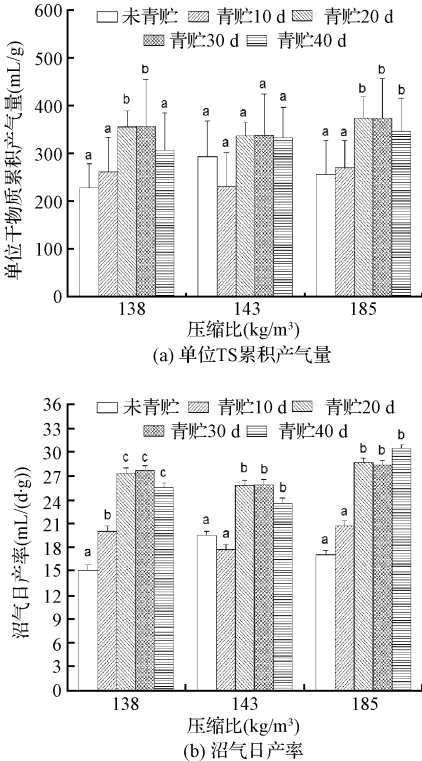


图 4 压缩比对秸秆单位 TS 累积产气量和沼气日产率的影响
Fig. 4 Effect of compression rate on CBYT and BYR during anaerobic digestion process of straw

者增加了 10%；青贮 40 d，压缩比为 185 kg/m³ 的 BYR 最高，为 143 kg/m³ 时的 BYR 最低，BYR 较后者显著增加了 29%。预处理后的秸秆未青贮，压缩比为 143 kg/m³ 的 BYR 最高，为 138 kg/m³ 时的 BYR 最低，BYR 较后者增加了 29%。秸秆经过裹包青贮，无论时间长短，BYR 均以高密度处理下最高，中密度处理下最小。

压缩比是秸秆自然堆放体积与打捆后体积比，用来描述物料打捆压缩的紧实程度，是决定裹包青贮质量的关键因素^[15-16]。青贮过程需要厌氧环境，密实度高的青贮料对创造厌氧环境有持久效果，高压缩比处理下，秸秆密度高于其他 2 种密度的处理，青贮质量最优，单位 TS 累积产气量和沼气日产率最高，这与其他研究结果一致^[17]。

2.4 添加剂对秸秆厌氧产气效果的影响

如图 5(a) 所示，预处理后秸秆未青贮，在不同添加剂处理下，添加尿素，CBYT 较对照处理增加了 12%，增加不明显；青贮 10 d，添加尿素，CBYT 较对照处理增加了 10%，增加不明显；青贮 20 d，添加尿素，CBYT 较对照处理明显增加了 14%；青贮 30 d，添加甲酸，CBYT 较对照处理增加了 10%；青贮 40 d，添加尿素，CBYT 较对照处理增加了 5%，增加不

明显。由图 5(b) 可以看出，预处理后的秸秆未青贮，不同添加剂处理下，BYR 排序为：尿素处理 > 甲酸处理 > 无添加剂处理。尿素处理下，BYR 最高，较对照显著增加了 15%；青贮 10 d，BYR 排序为：尿素处理 > 甲酸处理 > 无添加剂处理，在尿素处理下，BYR 最高，较对照处理明显增加了 13%；青贮 20 d，BYR 排序为：尿素处理 > 甲酸处理 > 无添加剂处理，尿素处理下，BYR 最高，较对照处理明显增加了 14%；青贮 30 d，BYR 排序为：甲酸处理 > 尿素处理 > 无添加剂处理，在甲酸处理下，BYR 最高，较对照处理增加了 10%，增加不显著；青贮 40 d，BYR 排序为：尿素处理 > 甲酸处理 > 无添加剂处理，尿素处理下，BYR 最高，较对照处理显著增加了 14%。

乳酸菌是青贮过程中的主要发酵菌，青贮添加剂可以增强乳酸菌的发酵作用，使物料 pH 值在短期内下降，迅速遏制有害微生物种群的增殖活动，最大限度地保存营养物质。甲酸能够在短期内使物料的 pH 值下降，形成酸性环境，遏制有害细菌生理活动，促进乳酸菌增殖，减少营养物质损失。农作物秸秆碳氮比范围在 40 ~ 70 之间^[18]，超出适宜的发酵范围，会影响微生物的繁殖和生长^[19]。添加尿素至少有 2 个途径提高厌氧效率，在青贮阶段促进乳酸菌繁殖，减少物质流失，产气阶段促进厌氧菌繁殖，加速秸秆的降解效率，显著改善秸秆的产气特性^[20-21]。王阳等^[9]实验表明，玉米秸秆添加尿素将碳氮比从 46 : 1 降低到 35 : 1，产气量提高了 4%。

2.5 3 因素对秸秆厌氧消化产气效果的综合影响

正交实验极差分析结果见表 2 和表 3。表 2 表明，含水率、压缩比与添加剂 3 个因素对 CBYT 的影

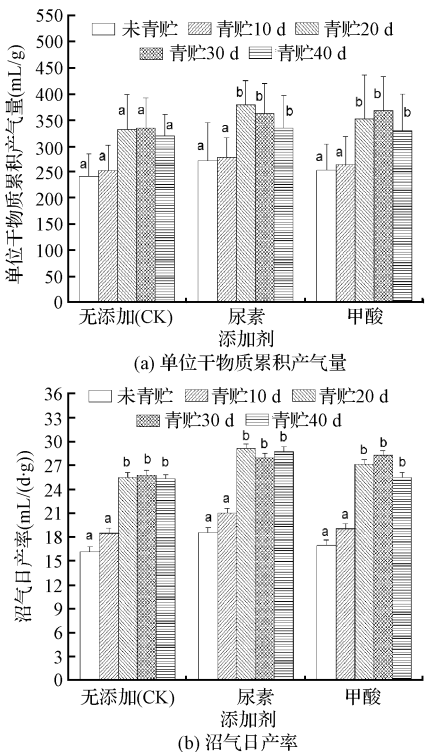


图 5 添加剂对秸秆单位 TS 累积产气量和沼气日产率的影响

Fig. 5 Effect of silage additives on CBYT and BYR during anaerobic digestion process of straw

表 2 基于 CBYT 的 3 因素综合影响极差分析
Table 2 Range analysis of comprehensive influences of three factors based on CBYT

实验序号	(A) 含水率 (%)	(B) 压缩比 (kg/m ³)	(C) 添加剂 (%)	CBYT (mL/g)
1	1	1	1	301.92
2	1	2	2	351.80
3	1	3	3	390.07
4	2	1	2	385.20
5	2	2	3	384.32
6	2	3	1	546.57
7	3	1	3	229.22
8	3	2	1	261.12
9	3	3	2	249.55
K ₁	1 043.78	916.33	1 003.61	
K ₂	1 316.09	997.24	986.55	
K ₃	739.90	1 186.20	1 109.61	
极差	192.07	89.96	41.02	

表 3 基于 BYR 的 3 因素综合影响极差分析

Table 3 Range analysis of comprehensive influences of three factors based on BYR

实验 序号	(A) 含水率 (%)	(B) 压缩比 (kg/m ³)	(C) 添加剂 (%)	BYR (mL/(d·g))
1	1	1	1	68.08
2	1	2	2	79.33
3	1	3	3	87.96
4	2	1	2	86.86
5	2	2	3	86.67
6	2	3	1	123.25
7	3	1	3	51.69
8	3	2	1	58.88
9	3	3	2	56.27
K ₁	235.37	206.63	226.32	
K ₂	296.78	224.88	222.47	
K ₃	166.85	267.49	250.22	
极差	43.31	20.29	9.25	

响排序为:含水率>压缩比>添加剂,其优水平组合为 A₂B₃C₃(表 2)。表 3 表明,含水率、压缩比与添加剂 3 个因素对 BYR 的影响排序为:含水率>压缩比>添加剂。单位干物质累积产气量与沼气日产率为反映厌氧发酵效率的 2 个主要指标,由此来看,3 个因素重要性排列为:含水率>压缩比>添加剂,优化水平组合为 A₂B₃C₃,即 35%~40% 的秸秆含水率,185 kg/m³ 的秸秆压缩比与添加尿素处理。

2.6 验证分析

秸秆含水率、压缩比与添加剂 3 因素对玉米秸秆厌氧消化效率的正交实验分析得到的最佳组合条件为 A₂B₃C₃,即 35%~40% 的秸秆含水率,185 kg/m³ 的秸秆压缩比与添加尿素处理。因为 A₂B₃C₃ 组合不在正交实验组合中,所以对该组合进行了实验验证。通过对该组合重复 5 次验证实验,单位干物质累积产气量的平均值为 646.57 mL/g,显著高于 9 组实验中 CBYT。沼气日产率的平均值为 173.25 mL/(d·g),显著高于 9 组实验中 BYR。

采用上述单因素分析方法对实验数据进行分析,可以直观看出,含水率、压缩比与添加剂 3 个因素对 CBYT 的影响排序为:含水率>压缩比>添加剂,对 BYR 的影响排序为:含水率>压缩比>添加剂。最适水平依次为:35%~40%、185 kg/m³ 与添加尿素。由此可见,单因素分析与正交实验极差分析结果相一致,表明了 A₂B₃C₃ 组合具有较高的厌氧消化效率。

3 结 论

(1) 秸秆裹包青贮明显缩短了厌氧消化时间,

TFT_{90%} 与 TFT 相比,发酵周期减少幅度为 40%~50%,明显减少了消化时间,田间裹包青贮明显提高了秸秆的厌氧消化效率。

(2) 随着秸秆含水率增加,其对 CBYT 和 BYR 的效应由高到低排序为:35%~40%,40%~45%,30%~35%。秸秆含水率对 CBYT 与 BYR 的单因素分析表明,裹包青贮秸秆以 35%~40% 的含水率较优。

(3) 随着秸秆压缩比的增加,其效应由高到低排序为:185 kg/m³,143 kg/m³,138 kg/m³。高压缩比秸秆裹包青贮 20 d 后,CBYT 达到最大值(372.20 mL/g),BYR 达到最大值 28.63 mL/(d·g)。

(4) 添加剂处理后,CBYT 和 BYR 均增加,且以尿素处理最优,甲酸处理居中,无添加处理产气最少。降低秸秆碳氮比的添加剂处理效果优于抑制剂,秸秆添加尿素裹包青贮 20 d 后,CBYT 达到最大值,BYR 达到最大值,CBYT 和 BYR 分别较未青贮添加甲酸的秸秆增加了 49% 和 72%。

(5) 正交实验的极差分析表明,含水率、压缩比与添加剂对 CBYT 和 BYR 的影响主次排序为:含水率>压缩比>添加剂,其优水平组合为 A₂B₃C₃,即 35%~40% 的秸秆含水率,185 kg/m³ 的秸秆压缩比与添加尿素处理,该条件下,CBYT 和 BYR 达到最大,分别为 646.57 mL/g 和 173.25 mL/(d·g),与单因素分析结果一致。

参 考 文 献

[1] 崔文文,梁军锋,杜连柱,等. 中国规模化秸秆沼气工程现状及存在问题. 中国农学通报, 2013, 29(11): 121-125

Cui Wenwen, Liang Junfeng, Du Lianzhu, et al. The current situation and problems of the large-scale biogas plants for straw in China. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(11): 121-125(in Chinese)

[2] 董保成,陈玲,张玉华,等. 猪粪对秸秆一体化两相厌氧产气的影响. 农业工程学报, 2011, 27(S): 48-52

Dong Baocheng, Chen Ling, Zhang Yuhua, et al. Effect of pig manure addition on biogas production of combined two-phase anaerobic digestion. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S): 48-52(in Chinese)

[3] 卞永存,寇巍,李世密,等. 农作物秸秆两相厌氧发酵工艺研究进展. 可再生能源, 2009, 27(5): 61-65

Bian Yongcun, Kou Wei, Li Shimi, et al. Study on the status of two-phase anaerobic fermentation for crop straws. Renewable Energy, 2009, 27(5): 61-65(in Chinese)

- [4] 胡斌, 张亮亮, 胡青平. 超声波预处理玉米秸秆的条件优化. 西北农业学报, **2012**, 21(2): 153-156
Hu Bin, Zhang Liangliang, Hu Qingping. Optimization of ultrasonic pretreatment for corn straw. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, **2012**, 21(2): 153-156 (in Chinese)
- [5] 徐桂转, 范帅尧, 王新锋, 等. 汽爆预处理青玉米秸秆厌氧发酵特性. 农业工程学报, **2012**, 28(13): 205-210
Xu Guizhuan, Fan Shuaiyao, Wang Xinfeng, et al. Anaerobic fermentation characteristic of green corn straw pretreated by steam explosion. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **2012**, 28(13): 205-210 (in Chinese)
- [6] 覃国栋, 刘荣厚, 孙辰. NaOH 预处理对水稻秸秆沼气发酵的影响. 农业工程学报, **2011**, 27(增刊1): 59-63
Qin Guodong, Liu Ronghou, Sun Chen. Effects of different concentrations of NaOH pretreatment on anaerobic digestion of rice straw for biogas production. *Transactions of the CSAE*, **2011**, 27(Supp. 1): 59-63 (in Chinese)
- [7] 徐龙君, 安丽娜, 农丽薇, 等. 稀盐酸预处理对稻草厌氧消化的影响. 环境工程学报, **2011**, 5(3): 671-674
Xu Longjun, An Lina, Nong Liwei, et al. Effect of pretreatment of dilute hydrochloric acid on anaerobic digestion of rice straw. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2011**, 5(3): 671-674 (in Chinese)
- [8] 袁旭峰, 高瑞芳, 李培培, 等. 复合菌系 MC1 预处理对玉米秸秆厌氧发酵产甲烷效率的提高. 农业工程学报, **2011**, 27(9): 266-270
Yuan Xufeng, Gao Ruifang, Li Peipei, et al. Improvement of anaerobic biogasification efficiency by pretreatment of corn straw with composite microbial system of MC1. *Transactions of the CSAE*, **2011**, 27(9): 266-270 (in Chinese)
- [9] 王阳, 林聪, 侯锦, 等. 添加菌体蛋白和尿素对玉米秸秆厌氧发酵的影响. 农业工程学报, **2011**, 27(增刊1): 74-78
Wang Yang, Lin Cong, Hou Jin, et al. Effects of bacterial protein and urea addition on straw anaerobic fermentation. *Transactions of the CSAE*, **2011**, 27(Supp. 1): 74-78 (in Chinese)
- [10] Clarkson W. W., Xiao W. Bench-scale anaerobic bio-conversion of newsprint and office paper. *Water Science and Technology*, **2000**, 41(3): 93-100
- [11] Xiao Bing, Sun Xiaofeng, Sun Runcang. Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw. *Polymer Degradation and Stability*, **2011**, 94(2): 307-319
- [12] 赵政, 李旭. 乳酸菌和纤维素酶对早稻秸秆青贮饲料品质的实验. 饲料工业, **2010**, 31(17): 24-25
Zhao Zheng, Li Xu. Experiment of lactobacillus and cellulase on the quality of early indica rice stover silage. *Feed Industry*, **2010**, 31(17): 24-25 (in Chinese)
- [13] 周玮, 董保成, 齐岳. 不同处理秸秆中温厌氧发酵的产气效果. 中国沼气, **2010**, 28(3): 22-24
Zhou Wei, Dong Baocheng, Qi Yue. The gas productions of different treated straw under mesophilic and anaerobic condition. *China Biogas*, **2010**, 28(3): 22-24 (in Chinese)
- [14] 陈娥英, 庄益芬, 张文昌. 添加剂、含水率对象草青贮品质的影响. 中国草地学报, **2007**, 29(5): 84-88
Chen Eying, Zhuang Yifen, Zhang Wenchang. The effects of additives, moisture content of material on quality of Napier grass silage. *Chinese Journal of Grassland*, **2007**, 29(5): 84-88 (in Chinese)
- [15] CMP Information Ltd. The Latest fixed chamber balers on offer. *Farmers Guardian*, Apr. 8, **2005**: 72
- [16] CMP Information Ltd. Machinery focus is on baled silage. *Farmers Guardian*, May 16, **2003**: 16
- [17] 王丹, 杨中平. 全株玉米秸秆压缩打捆袋装青贮技术的研究. 湖北农业科学, **2010**, 49(1): 177-179
Wang Dan, Yang Zhongping. Research on technique for compressed packaged silage of whole-plant corn stalk. *Hubei Agricultural Sciences*, **2010**, 49(1): 177-179 (in Chinese)
- [18] 陈兴丽, 周建斌, 刘建亮, 等. 不同施肥处理对玉米秸秆碳氮比及其矿化特性的影响. 应用生态学报, **2009**, 20(2): 314-319
Chen Xingli, Zhou Jianbin, Liu Jianliang, et al. Effects of fertilization on carbon/nitrogen ratio of maize straw and its mineralization in soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **2009**, 20(2): 314-319 (in Chinese)
- [19] 陈斯, 熊承永. 再谈秸秆沼气发酵的碳氮比. 中国沼气, **2009**, 27(2): 38-39
Chen Si, Xiong Chengyong. Discuss again on carbon/nitrogen ratio of straw stalk anaerobic fermentation. *China Biogas*, **2009**, 27(2): 38-39 (in Chinese)
- [20] 蒋建国, 姜志颖, 赵振振, 等. 添加污泥饼补充氮源的农作物秸秆高固体厌氧消化启动研究. 环境科学, **2009**, 30(1): 297-301
Jiang Jianguo, Lou Zhiying, Zhao Zhenzhen, et al. Start-up of high solid anaerobic digestion process for treating straw with sludge cake as nitrogen additive. *Environmental Science*, **2009**, 30(1): 297-301 (in Chinese)
- [21] 张昌爱, 刘英, 黄萌, 等. 秸秆原料 C/N 比调节对沼气产气状况的影响. 山东农业科学, **2010**(1): 67-70
Zhang Chang'ai, Liu Ying, Huang Meng, et al. Effect of C/N adjustment of corn stalk on methane production. *Shandong Agricultural Sciences*, **2010**(1): 67-70 (in Chinese)