

# 不同汽爆预处理对干玉米秸秆青贮效果的影响

贾晶霞, 梁宝忠, 王艳红, 赵永亮, 李建东

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

**摘要:** 为了扩大可用于青贮的玉米秸秆资源量, 通过借鉴青贮、黄贮和汽爆玉米秸秆加工技术的优点, 该文提出使用低强度汽爆对干黄玉米秸秆进行预处理, 改进玉米秸秆青贮效果的方法。通过低强度汽爆 (0.6~1.4 MPa, 5 min) 将玉米秸秆中的半纤维素适当降解为寡糖和单糖, 增加玉米秸秆中的可溶性糖含量。调节质量含水率为 70%, 然后使用塑料袋密闭汽爆预处理后的玉米秸秆进行青贮。通过检测青贮过程中 pH 值、有机酸含量、氨态氮占总氮的比例等参数, 并使用农业部青贮饲料质量评定标准对获得的青贮饲料进行评分。结果显示低强度汽爆 (1.0 MPa, 5 min) 预处理可有效的增加干黄玉米秸秆中的可溶性糖含量, 使饲料等级从“一般”到“优”。该方法可有效地增加可用于青贮的玉米秸秆资源量。

**关键词:** 秸秆, 爆破, 试验, 青贮

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.20.025

中图分类号: TS959.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-20-0192-07

贾晶霞, 梁宝忠, 王艳红, 等. 不同汽爆预处理对干玉米秸秆青贮效果的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 192-198.

Jia Jingxia, Liang Baozhong, Wang Yanhong, et al. Effect of steam explosion pretreatment on ensiling performance of dry corn stover[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 192-198. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

青贮饲料是将切碎的新鲜秸秆等植物原料, 通过微生物厌氧发酵处理, 在密闭无氧条件下制备的一种适口性好、消化率高和营养丰富的饲料。制作青贮饲料的主要目的是将生长旺盛期或刚刚收获子实体的青秸秆长期贮藏, 以供牲畜在冬春季饲料短缺时的饲喂, 是一种保证供应家畜青绿饲料的有效方法<sup>[1]</sup>。根据植物生理学的变化规律, 秸秆在收割后, 呼吸作用加强, 其中含有的易于消化的蛋白质、可溶性糖和维生素等营养成分逐渐下降, 粗纤维素比例增加, 剩余的组成结构复杂、坚韧, 对后续的加工和利用造成困难<sup>[2-4]</sup>。青贮使用的秸秆必须新鲜, 含水率在 60%~75%, 含水率过低时不能作业, 因此青贮必须在一定时期内进行<sup>[3,5]</sup>, 这就限制了可利用原料的采收范围, 难以实现大规模商业化的青贮。相对于青贮, 黄贮对原料的要求较低。粉碎的干秸秆调节含水量到一定范围, 外加菌剂和酶制剂, 在厌氧环境下, 通过发酵将原料中部分纤维

素、半纤维素转化为糖类。糖类经有机酸发酵转化为乳酸、乙酸和丙酸, 并抑制丁酸菌和霉菌等有害菌的繁殖, 最后达到与青贮相似的贮存效果<sup>[1]</sup>。虽然黄贮不受秸秆含水率限制, 一年四季都可以做, 但是黄贮对微生物菌剂有一定的要求, 需要合适用量的菌剂<sup>[6]</sup>、酶制剂<sup>[7-8]</sup>, 才能将玉米秸秆中的纤维素和半纤维素降解, 转化为产酸菌的发酵底物。有些情况下, 青贮过程中也会外加试剂以强化青贮效果<sup>[9-12]</sup>。

将秸秆等原料装入反应器中, 通入饱和蒸汽, 反应一段时间后, 快速打开阀门, 使物料从反应器内喷到收集罐中的技术, 称为蒸汽爆破<sup>[13]</sup> (汽爆或热喷)。汽爆是一种使秸秆变为更有价值饲料的加工技术<sup>[1,14]</sup>。物料在汽爆预处理过程中, 木质素部分降解, 纤维素分子结晶区得到破坏, 半纤维素部分降解为寡糖和单糖。“爆”的过程使秸秆中细胞壁结构被撕裂, 质地变得疏松<sup>[13]</sup>。

中国目前专门种植的青贮玉米面积逐渐增加, 2012 年达到  $2.083 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 但是相对于全国总的玉米种植面积  $3.353 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>, 还只占相对较少的比例。根据中国农业年鉴上玉米产量以及玉米和秸秆的质量比 (1:1.37) 推算<sup>[15-16]</sup>, 中国秸秆 2012 年产量约 2.6 亿 t。虽然从理论上说, 玉米秸秆可用于直燃发电<sup>[17]</sup>、沼气<sup>[18]</sup>、纤维素乙醇<sup>[19]</sup>等产品的原料, 但是其加工成本过高, 限制了其大规模应用。如果

收稿日期: 2013-07-15 修订日期: 2013-09-22

基金项目: 国家农业部农业科技成果转化资金项目 (03EFN211100010)

作者简介: 贾晶霞 (1977-), 女, 汉族, 河北武安人, 博士, 高级工程师, 主要从事农业机械与农产品开发研究。北京 中国农业机械化科学研究院中美美诺科技股份有限公司, 100083。

Email: jjjingxia@126.com

使用技术手段将更多原先不可青贮或者成本过高的玉米秸秆转化为具有相当营养价值的青贮饲料，可能带来巨大的经济和社会效益。

通过借鉴上述秸秆饲料加工技术各自的优势，本研究中，使用汽爆技术预处理干黄秸秆，然后利用青贮原理，不添加菌剂和酶制剂，依靠自然条件对汽爆秸秆进行厌氧贮存发酵，最终实现干黄玉米秸秆的“青贮”。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

玉米秸秆为 2012 年 10 月收获玉米后采收的秸秆，采收于河北省固安，品种为郑单 2016。自然风干后，粉碎到 3~5 cm 的长度，保存于密闭的塑料袋中。

### 1.2 试验仪器

试验型汽爆装置：物料处理腔容积为 5L，使用电加热蒸汽发生器供应高压蒸汽，蒸汽压力  $\leq 2.5$  MPa。

高效液相色谱仪：Agilent 1260，美国安捷伦科技有限公司。

pH 计，梅特勒 FE20-FiveEasy™ pH 计。

### 1.3 试验方法

玉米秸秆的汽爆预处理：将切碎的玉米秸秆加水，调节其质量含水率到 50%<sup>[13]</sup>，然后称取 1 kg 加入到汽爆反应器中进行预处理。预处理压力为 0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4 MPa，处理时间均为 5 min，处理完成后，快速打开反应器底部的球阀将其中的物料爆出，冷却后测定含水率，以及其中的组分和降解物含量<sup>[13]</sup>。

对汽爆和未汽爆的玉米秸秆进行青贮试验：将未汽爆预处理的样品调节其质量含水率为 70%，汽爆后的玉米秸秆根据测得的含水率加入不同的水分将其含水率也调节为 70%。样品各自装入塑料袋中，每袋约 5 kg。塑料袋抽真空密封，每种样品制作 20 份。所有青贮样品均在 15~25℃ 下避光保存。在第 5、15、30 和 60 d 打开塑料袋（每次 4 份），测定青贮过程中的参数变化。

### 1.4 分析方法

玉米秸秆的组分测定方法：样品在 60℃ 下干燥至恒质量，粉碎到粒径 2 mm 以下，用 20 倍 (v/m)、60℃ 的去离子水抽滤洗去样品中的可溶性成分。洗涤液定容后用 0.22  $\mu$ m 膜过滤后用高效液相测定其中的可溶性单糖含量。10 mL 洗涤液加入等体积的质量分数为 8% 的硫酸，在 121℃ 下水解 1 h，使用 Ba(OH)<sub>2</sub> 中和后使用 HPLC 测定其中可溶性单糖的含量。酸解后所测定的单糖包括原有的单糖和寡糖水解产生的单糖，反映预处理后样品中总糖的多

少。洗涤后的固体残渣，使用美国可再生能源实验室推荐的两步水解法测定其中结构性成分（纤维素、半纤维素和 Klason 木质素）的含量<sup>[20]</sup>。

青贮饲料 pH 值和有机酸含量测定方法：取青贮样品 10g 于 250 mL 的三角瓶中，加入 40 mL 的去离子水，摇床 150 r/min 振荡 10 min 后，将样品置于 50 mL 离心管中 5 000 r/min 离心 10 min，上清液用于 pH 值和有机酸的测定。

单糖、有机酸和糠醛的含量采用 HPLC 测定：安捷伦 1260 液相色谱仪，采用 RI 示差检测器和 DAD 检测器，色谱柱采用 BioRad Aminex HPX-87H(300×7.8 mm)，柱温 65℃，流动相为 0.005 mol 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，流速为 0.6 mL/min。

氨态氮 (volatile basic nitrogen, VBN) 和总氮 (total nitrogen, TN) 的含量测定：氨态氮的含量测定参考叶丽娟等<sup>[21]</sup>的方法；总氮测定采用凯氏定氮法。

青贮饲料的感官指标、各有机酸组成和氨态氮与总氮质量比的评定：农业部颁布的青贮饲料质量评定标准<sup>[1]</sup>。

### 1.5 统计分析

试验数据用 Minitab 16 软件进行方差及差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 汽爆条件对于玉米秸秆组成的影响

汽爆前后玉米秸秆的化学组分变化见表 1。从表 1 中可以看出，汽爆预处理对于半纤维素的降解具有显著的作用。在本试验条件下，汽爆后固形物中半纤维素的含量从 16.23% 降低到了 7.82%，半纤维素的降解率超过了 50%。纤维素和木质素在此条件下降解从含量上看并不太明显，但是文献<sup>[22]</sup>报道，汽爆预处理会降低纤维素的结晶度和聚合度，这实际上也使纤维素更容易受到发酵过程中微生物所产生的纤维素酶的降解<sup>[23-24]</sup>。青贮成功的关键是原料中的糖含量足够乳酸菌的生长，通过汽爆预处理，可以看到秸秆中可溶性糖的含量从 17.51% 增加到了 25.77% (1.4 MPa, 5 min)，增幅达 47%，这为青贮过程中乳酸菌的生长提供了良好的碳源。随着汽爆强度的增加，秸秆中的乙酸含量逐渐增加，乙酸主要来源于半纤维素中乙酰基的降解。乙酸的产生是汽爆秸秆 pH 值降低的主要原因<sup>[25]</sup>。当汽爆条件为 1.4 MPa, 5 min 时，乙酸的产量为 2.12 g/100g 玉米秸秆。这约相当于玉米秸秆中乙酰基总量的 37%<sup>[26]</sup>。但是，也需要注意，随着汽爆强度的增加，玉米秸秆的颜色逐渐加深，气味也从玉米特有的香味，变的有点儿呛鼻<sup>[27]</sup>。这应该是汽爆过程中降解的木糖又进一步降解为糠醛等产品，这

会影响家畜对于饲料的采食。从表 1 可以看出, 糠醛的产量在处理压力超过 1.2 MPa 后迅速增加。根据文献报道, 糠醛来源于戊糖的脱水反应。而这个过程在 pH 值降低, 温度升高后更容易进行<sup>[28]</sup>。表 1 中还总结了汽爆预处理条件对玉米秸秆组分变化影响的差异显著性分析结果。除了预处理压力在 0.6 MPa 下, 玉米秸秆中的纤维素和半纤维素含量变化没有显著性差异外 ( $P>0.05$ ), 其他预处理条件均对组分产生显著性影响 ( $P<0.05$ ), 当预处理压力在 1.0 MPa 以上时, 影响极其显著 ( $P<0.01$ )。

表 1 玉米秸秆汽爆前后组成变化 (以干基计算)  
Table 1 Effect of steam explosion on corn stover composition (on a dry matter basis)

汽爆预处理条件 Parameters of steam explosion	固体 In solid			液体 In liquid			
	纤维素 Cellulose/%	半纤维素 Hemicellulose/%	Klason 木质素 Klason lignin/%	pH 值 pH value	乙酸 Acetic acid/%	糠醛 Furfural/%	可溶性糖 Soluble sugars/%
未汽爆 Raw material	22.02±1.11	16.23±0.88	10.67±0.28	7.09±0.02	0	0	17.51±0.85
0.6 MPa, 5min	23.01±0.24a	15.22±0.47a	12.35±0.85b	6.14±0.02c	0.15±0.01c	0.01±0.01c	19.58±0.49b
0.8 MPa, 5min	24.33±0.36b	13.65±0.96b	13.45±0.67c	6.01±0.12c	0.33±0.03c	0.02±0.01c	20.11±0.37c
1.0 MPa, 5min	26.28±0.58c	10.35±1.01c	13.99±1.24c	5.49±0.24c	0.38±0.04c	0.12±0.01c	22.08±1.24c
1.2 MPa, 5min	27.28±0.98c	11.11±0.38c	15.33±1.22c	5.02±0.05c	0.54±0.09c	0.38±0.02c	23.74±2.47c
1.4 MPa, 5min	30.66±2.14c	7.82±0.25c	16.66±2.01c	4.26±0.08c	1.12±0.14c	1.44±0.02c	25.77±0.58c

注: 数据后的字母 a 表示和对照差别不显著, b 表示差异显著 ( $P<0.05$ ), c 表示差异极显著 ( $P<0.01$ )

Note, letter a indicated that there were no significant difference between the data and control; b, there were significant difference ( $P < 0.05$ ); c, there were extremely significant difference ( $P < 0.01$ ).

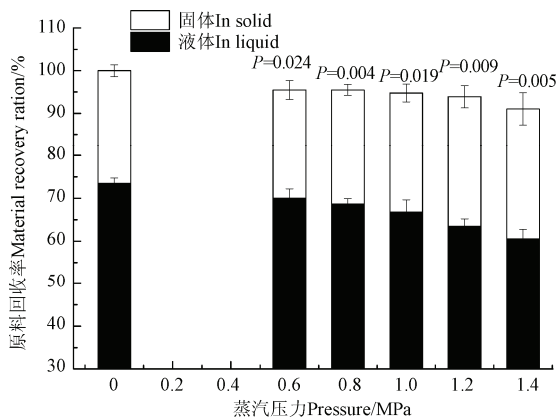


图 1 玉米秸秆汽爆预处理后的回收率  
(处理时间均为 5 min)

Fig.1 Recovery ratio of corn stover after steam explosion pretreatment (reaction time, 5 min)

## 2.2 汽爆预处理后青贮过程的变化

干玉米秸秆在汽爆预处理后青贮过程中 pH 值、有机酸和氨基氮含量的变化情况见图 2。从图 2 可以看出: 秸秆的 pH 值在青贮的前 15 d 下降速度比较快, 15 d 以后变化幅度较小。这可能和青贮玉米秸秆中微生物的生长相关, 在青贮的初期, 玉米秸秆中可溶性糖较为丰富, 为乳酸菌的繁殖提供了充足的底物。乳酸菌的快速生长产生大量乳酸, 造成 pH 值下降。随着 pH 值的下降, pH 值开始抑制乳酸菌自身的生长, 形成一个反馈抑制, 使青贮

图 1 总结了汽爆预处理后玉米秸秆的回收率。玉米秸秆中包括部分可溶性成分, 未处理前所占的比例为 26.55%, 剩余的部分为不溶的结构性成分, 主要是纤维素、半纤维素和木质素, 占总质量的 73.45%。随着处理强度的增加, 玉米秸秆中不溶性部分 (固体物) 回收率逐渐降低, 而可溶性部分的回收率逐渐增加, 但是不溶性部分减少大于可溶性部分的增加。这之间的差值为汽爆预处理过程中的原料损失部分。总的来看, 原料损失率在 4.52%~8.97% 之间。预处理压力越大, 损失越多 ( $P<0.024$ )。

饲料中的 pH 值逐渐到达一个稳定的状态。玉米秸秆汽爆强度较高时, 底物中的糖含量也较高, 有利于乳酸菌的生长, 但是汽爆强度过高所产生的糠醛等副产物也会对微生物造成危害。所以, 汽爆处理强度并非越高越好, 从 pH 值的变化来看, 1.0~1.2 MPa、5 min 的处理是较为适宜。这同将玉米秸秆预处理用作固体发酵的原料有类似的地方<sup>[29]</sup>, 实际上青贮就是厌氧固态发酵<sup>[30]</sup>。

汽爆预处理后玉米秸秆中的乙酸浓度有所上升, 这主要是汽爆过程使部分乙酰基溶解到玉米秸秆中。青贮过程中乙酸的含量也是逐渐上升, 这主要是产酸菌厌氧发酵的作用。通过分析数据可以看出, 当初始乙酸含量较高时, 后续的乙酸增加量反而较少。说明乙酸的存在可能会使青贮环境较快的达到稳定状态。

在生长的作物中, 75%~90%的氮是以蛋白氮的形式存在的。收割后, 植物中的蛋白质降解酶会将蛋白质水解为氨基酸, 在 24 h 内, 20%~25%的蛋白质被转化<sup>[31]</sup>。青贮饲料中蛋白质的降解与环境 pH 值密切相关, 当 pH 值小于 4.2 时, 蛋白质分解为氨基酸, 这些氨基酸较稳定, 并不造成损失。但当 pH 值大于 4.2 时, 由于腐败菌的活动, 氨基酸便分解成非蛋白氮 (氨、胺等), 造成蛋白质损失。氨态氮与总氮的质量比是衡量发酵品质的重要指标, 氨态氮与总氮的质量比例高, 则不良发酵比例

大，营养成分破坏严重，青贮品质和营养价值低<sup>[1]</sup>。从图 2 中可以看出汽爆预处理后青贮过程中氨态氮的比例均低于未处理的样品。60 日测定值中最低的是 5.03%，现对于未处理的 11.22%，降低了 55.17%。

比较预处理前后青贮玉米秸秆的参数差异显著性，除了 0.6~1.0 MPa 条件下的 pH 值为显著差异 ( $P<0.05$ ) 外其余参数的差异均为及其显著

( $P<0.01$ )。1.0 MPa 下（效果最好的预处理条件）预处理的青贮玉米秸秆参数和其他预处理条件下的参数相比，0.8 MPa 和 1.2 MPa 下的乙酸含量与 1.0 MPa 下的乙酸含量无显著性差异 ( $P>0.05$ )。1.0 和 1.2 MPa 的乙酸、乳酸和氨态氮占总氮比例也无显著性差异 ( $P>0.05$ )。这显示了预处理条件较为宽泛。

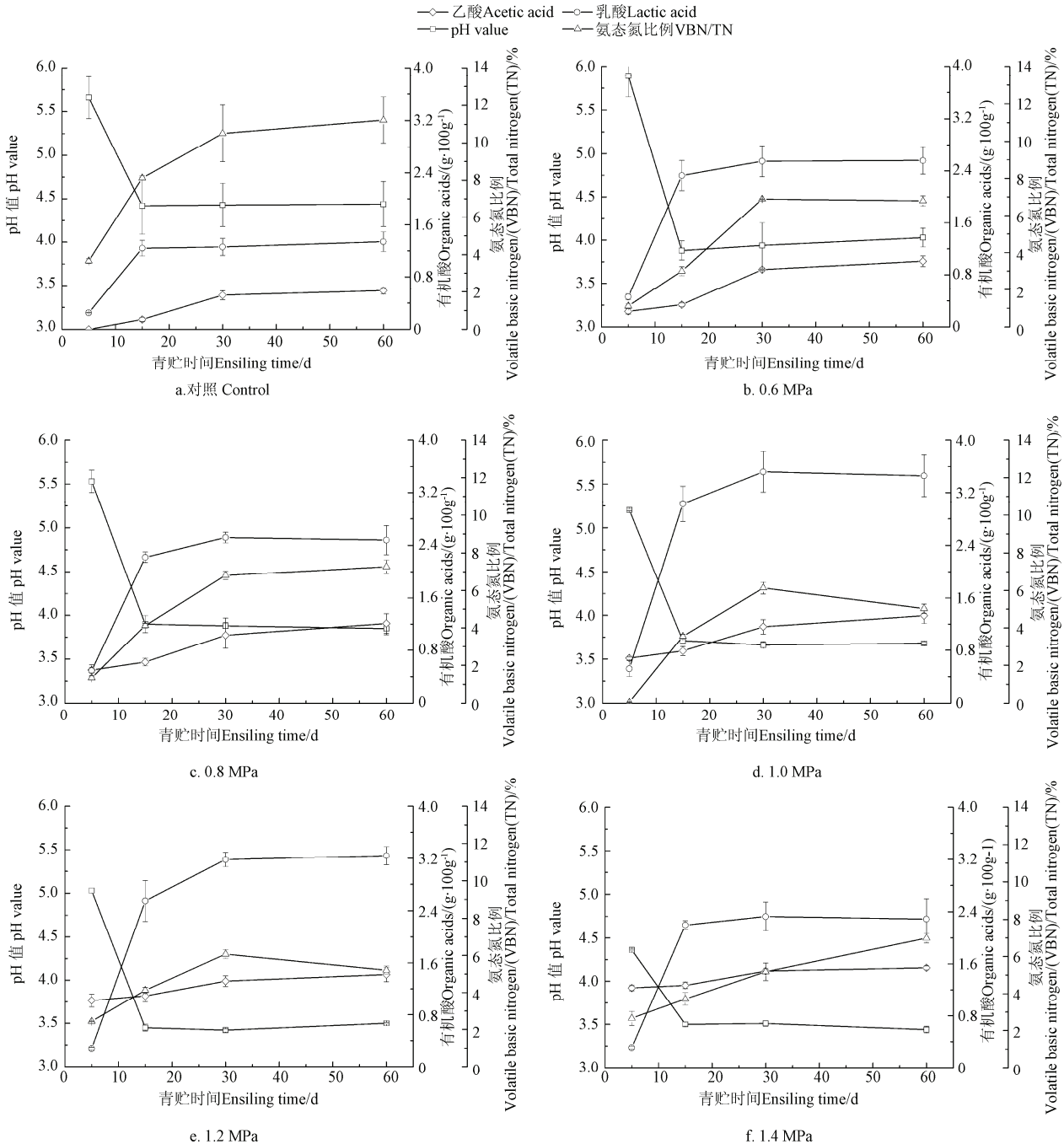


图 2 青贮过程中不同预处理压力下玉米秸秆中 pH 值，有机酸和氨态氮的变化  
 Fig.2 pH value, organic acids and volatile basic nitrogen (VBN)/total nitrogen (TN) during different pressure steam exploded corn stover ensiling

### 2.3 汽爆预处理青贮饲料的质量评价

不同预处理条件的玉米秸秆青贮到 6 个月后，

取出样品，采用农业部颁布的青贮饲料质量评定标准<sup>[1]</sup>进行饲料品质评价，评价结果见表 2。结果显

示, 选择合适的汽爆处理条件, 不添加酶制剂或菌剂直接青贮, 可有效改善青贮饲料的品质。结合表 1 中汽爆玉米秸秆的组分分析, 汽爆增加半纤维素的降解, 提高原料青贮前可溶性糖的含量应该是获得较好青贮效果的关键因素。汽爆预处理条件并非越强越好, 强度过高时, 虽然可溶性糖含量增加,

但糠醛含量也增加, 糠醛使饲料的气味产生不悦的味道, 同时颜色变暗, 从而使评分降低。从发酵结果来看, 处理过程中产生的抑制物也对发酵有所影响。在使用的所有条件中, 1.0 MPa、5 min 是效果最好的。这样的预处理条件相对于为了纤维素乙醇生产所用的预处理条件来看是比较低的<sup>[32]</sup>。

表 2 青贮饲料质量评价项目、标准和评分结果  
Table 2 Silage quality evaluation items, standard and scoring results

预处理条件 Parameters of steam explosion	pH 值 (25 分) pH value (25 points)	含水率 (20 分) Moisture/% (20 points)	气味 (25 分) Odor (25 points)	色泽 (20 分) Color (20 points)	质地 (10 分) Texture (10 points)	总分 (100 分) Total points (100 points)
未汽爆 Raw material	4.21±0.02(8)	74.6±4.2(20)	刺鼻酸味(8) Pungent sour (8)	中间(7) Middle (7)	中间(7) Middle (7)	50(一般) 50 (General)
0.6MPa, 5 min	4.01±0.20(17)	75.3±3.1(20)	淡酸味(17) Light sour (17)	褐黄色(13) Brown (13)	中间(7) Middle (7)	74(良好) 74 (Good)
0.8 MPa, 5 min	3.85±0.12(17)	76.7±2.7(13)	淡酸味(17) Light sour (17)	褐黄色(13) Brown (13)	中间(7) Middle (7)	67(良好) 67 (Good)
1.0 MPa, 5 min	3.66±0.24(25)	77.4±1.2(13)	甘酸香味(25) Sweet and sour (25)	褐黄色(13) Brown (13)	中间(7) Middle (7)	83(优) 83 (Excellent)
1.2 MPa, 5 min	3.45±0.03(25)	76.5±3.6(13)	甘酸香味(25) Sweet and sour (25)	中间(7) Middle (7)	中间(7) Middle (7)	77(优) 77 (Excellent)
1.4 MPa, 5 min	3.42±0.04(25)	77.9±2.5(13)	刺鼻酸味(8) Pungent sour (8)	暗褐色(0) Dun (0)	中间(7) Middle (7)	53(一般) 53 (General)

注: 青贮 6 个月后进行评分。

Note: Quality evaluation was carried out after 6 months ensiling.

### 3 结论

为了延长玉米秸秆青贮的可操作时间, 增加青贮的可利用原料, 在本研究中, 通过借鉴青贮、黄贮和汽爆预处理秸秆制作饲料加工技术的优点, 提出了首先低强度汽爆预处理干黄玉米秸秆, 然后不添加酶制剂和菌剂直接厌氧贮存制备干黄玉米秸秆青贮饲料的技术。结果显示, 1.0 MPa, 5 min 汽爆预处理的玉米秸秆制备的青贮饲料品质优良, 可望为扩大玉米秸秆的青贮操作时间和原料利用范围提供良好的解决方案。

#### [参考文献]

- [1] 邢廷铤. 农作物秸秆饲料加工与应用[M]. 北京: 金盾出版社, 2008.
- [2] 余汝华, 莫放, 赵丽华, 等. 凋萎时间对青玉米秸秆青贮饲料营养成分的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 13-17.  
Yu Ruhua, Mo Fang, Zhao Lihua, et al. Effect of wilting on chemical and physical characteristics of silage with corn stalk[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(6): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [3] 余汝华, 莫放, 赵丽华, 等. 刈割时间对青贮玉米秸秆饲料营养成分的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 10-13.  
Yu Ruhua, Mo Fang, Zhao Lihua, et al. Effect of maturity of corn stalk on the chemical characteristics and nutritive value of silage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(6): 10-13. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孙优善. 玉米秸秆保质贮存及水热反应处理提高可生化性方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

- [5] 崔卫东, 董朝霞, 张建国, 等. 不同收割时间对甜玉米秸秆的营养价值和青贮发酵品质的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 208-213.  
Cui Weidong, Dong Zhaoxia, Zhang Jianguo, et al. The nutrient components and ensilage fermentation quality of sweet corn stalks harvested at different times[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(6): 208-213. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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, 39(2): 112-115.  
Wang Fushen, Ma Junxiao, Ren Hongwei, et al. The potential of using a lactic acid bacteria inoculant with cellulase for ensiling of yellowing corn straw[J]. Journal Of Shandong University: Natural Science, 2004, 39(2): 112-115. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨永明, 黄晓彤, 卢德勋, 等. 黄贮玉米秸中添加纤维复合酶对纤维物质降解率的影响[J]. 饲料与畜牧, 2008(1): 38-39.
- [8] 薛艳林, 白春生, 玉柱, 等. 乳酸菌和纤维素酶制剂对小麦秸黄贮饲料品质的影响[J]. 中国饲料, 2007, 15: 38-40.  
Xue Yanlin, Bai Chunsheng, Yu Zhu, et al. Effects of Lactobacillus and cellulase preparation on the quality of wheat straw silage[J]. China Feed, 2007(15): 38-40. (in Chinese with English abstract)
- [9] 席兴军, 韩鲁佳, 原慎一郎, 等. 添加乳酸菌和纤维素酶对玉米秸秆青贮饲料品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(2): 21-24.  
Xi Xingjun, Han Lujia, HARA Shinichiro, et al. Effects of lactobacillus and cellulase on the quality of corn stover silage[J]. Journal Of China Agricultural University, 2003, 8(2): 21-24. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘贤, 韩鲁佳, 原慎一郎, 等. 不同添加剂对全株玉米和青玉米秸青贮饲料质量的影响[J]. 农业工程学报,

- 2004, 20(4): 246—249.
- Liu Xian, Han Lujia, HARA Shinichiro, et al. Effects of different additives on the quality of whole-plant corn and green corn stover silage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(4): 246—249. (in Chinese with English abstract)
- [11] 席兴军, 韩鲁佳, 原慎一郎, 等. 添加己酸和盐酸对玉米秸秆青贮饲料质量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 54—60.
- Xi Xingjun, Han Lujia, HARA Shin-ichiro, et al. Effects of hydrochloric acid and caproic acid on quality of corn stover silage[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(6): 54—60. (in Chinese with English abstract)
- [12] 朱玉环, 廉美娜, 郭旭生. 藏嵩草绿汁发酵液提高苜蓿青贮发酵品质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 199—206.
- Zhu Yuhuan, Lian Meina, Guo Xusheng. Improve fermentation quality of alfalfa silage by addition of fermented juice prepared from Kobresia littledalei[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 199—206. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈洪章, 刘丽英. 蒸汽爆碎技术原理及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [14] 刘东波, 王秀然, 陈珊, 等. 蒸汽爆破处理的玉米秸秆饲料饲用安全性的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(6): 657—660.
- Liu Dongbo, Wang Xiuran, Chen Shan, et al. Safety of autoclaved corn stalk[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(6): 657—660. (in Chinese with English abstract)
- [15] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87—91.
- Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(3): 87—91. (in Chinese with English abstract)
- [16] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴: 2012[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [17] 陈丽欢, 李毅念, 丁为民, 等. 基于作业成本法的秸秆直燃发电物流成本分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 199—203.
- Chen Lihuan, Li Yinian, Ding Weiming, et al. Analysis on straw logistics cost of direct-fired power generation using activity-based costing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 199—203. (in Chinese with English abstract)
- [18] Pia-Maria Bondesson, Mats Galbe, Guido Zacchi. Ethanol and biogas production after steam pretreatment of corn stover with or without the addition of sulphuric acid[J]. Biotechnology for biofuels, 2013, 6(1): 11.
- [19] Badal C Saha, Tsuyoshi Yoshida, Michael A Cotta, et al. Hydrothermal pretreatment and enzymatic saccharification of corn stover for efficient ethanol production[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 44(1): 367—372.
- [20] Li Hongqiang, Xu Jian. A new correction method for determination on carbohydrates in lignocellulosic biomass[J]. Bioresource technology, 2013, 138(1): 373—376.
- [21] 叶丽娟, 李强国. 氨态氮测定方法的研究[J]. 衡阳师范学院学报, 2002, 23(3): 45—49.
- Ye Lijuan, Li Qiangguo. Study on the Method of Determination of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ [J]. Journal of Hengyang Normal University, 2002, 23(3): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [22] Enikő Varga, Kati Réczey, Guido Zacchi. Optimization of steam pretreatment of corn stover to enhance enzymatic digestibility[J]. Applied biochemistry and biotechnology, 2004, 114(1/3): 509—523.
- [23] 赖智乐, 常春, 马晓建, 等. 汽爆玉米秸秆同步糖化发酵产乙醇的工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 250—254.
- Lai Zhile, Chang Chun, Ma Xiaojian, et al. Process optimization of ethanol production from steam exploded corn stalk by simultaneous saccharification and fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 250—254. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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[J]. 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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 205—210. (in Chinese with English abstract)
- [25] Samyar Zabihi, Roozbeh Alinia, Feridun Esmaeilzadeh, et al. Pretreatment of wheat straw using steam, steam/acetic acid and steam/ethanol and its enzymatic hydrolysis for sugar production[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(3): 288—297.
- [26] Xiaowen Chen, Joseph Shekero, Rick Elander, et al. Improved xylan hydrolysis of corn stover by deacetylation with high solids dilute acid pretreatment[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 51(1): 70—76.
- [27] 邱盼盼, 任天宝, 王凤芹, 等. 木质纤维原料蒸汽爆破-生物联合预处理及其生物脱毒研究进展[J]. 生物质化学工程, 2013(2): 23—28.
- Qiu Panpan, Ren Tianbao, Wang Fengqin, et al. Research progress on steam explosion-biological pretreatment of the lignocellulose and simultaneous bio-detoxification[J]. Biomass Chemical Engineering, 2013, 47(2): 23—28. (in Chinese with English abstract)
- [28] Ajit Singh Mamman, Jong-Min Lee, Yeong-Cheol Kim, et al. Furfural: Hemicellulose/xylo-derived biochemical[J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2008, 2(5): 438—454.
- [29] Hongqiang Li, Hongzhang Chen. Detoxification of steam-exploded corn straw produced by an industrial-scale reactor[J]. Process Biochemistry, 2008, 43(12): 1447—1451.
- [30] Hongzhang Chen. Modern Solid State Fermentation[M]. Springer Netherlands, 2013.
- [31] 张大伟. 乳酸菌的分离鉴定及其在玉米秸秆青贮中的应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- Zhang Dawei. The Separation and Identification of Lactic Acid Bacteria Strains and Their Application in corn Stover Silage[D]. Zhenzhou: Zhenzhou university, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [32] Lu Yifeng, Wang Yonghong, Xu Guoqian, et al. Influence of high solid concentration on enzymatic hydrolysis and fermentation of steam-exploded corn stover biomass[J]. Appl Biochem Biotech, 2010, 160(2): 360—369.

## Effect of steam explosion pretreatment on ensiling performance of dry corn stover

Jia Jingxia, Liang Baozhong, Wang Yanhong, Zhao Yongliang, Li Jiandong

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Ensiling is an important crop straw feed processing method. It can not only effectively improve the nutritional value of crop straws, but also increase the storage time. Currently the corn and silage corn cultivated areas are  $3.35 \times 10^7$  and  $2.083 \times 10^6$  hm<sup>2</sup> in China. The corn stover (CS) annual production is about 260 million tons. However, due to the requirements of the moisture content and freshness, only the un-harvested or newly harvested CS can be used as ensiling. This limits the operation time of ensiling and the scope of CS. In order to expand the available range of CS and reduce the unnecessary use of additives, the advantages of three straw feed processing methods of silage, microbial silage and steam explosion were studied. On these bases, the feasibility of improving dry CS ensiling performance by steam-explosion pretreatment was tested in this work.

First, the dry CS was cut into 3-5 cm, adjusted the moisture content to 50% (w/w) and pretreated under different intensities (0.8-1.4 MPa, 5 min) in a 5 L steam explosion reactor. The steam-exploded CS was water-washed to remove the soluble fraction. Then the structural components of cellulose, hemicellulose and Klason lignin in the solid residual and the soluble sugar, acetic acid and furfural in the water-washed liquor were determined according to the two-step quantitative hydrolysis method recommended by National Renewable Energy Laboratory (NREL). Based on these data, the material recovery ratio was calculated to evaluate the efficiency of steam explosion pretreatment.

Then, the pretreated and un-pretreated CS samples were used in ensiling experiments. In addition to water, any microbial inoculants and enzyme was not used. The samples including control samples were added tap water according to the real moisture content and adjusted the final moisture content to 70% (w/w). Each 5 kg sample was loaded in a sealed plastic bag and ensiled in 15-25°C. Throughout the experiment, silage feed pH value, organic acids and volatile basic nitrogen (VBN)/total nitrogen were determined from the periodic sampling (5, 15, 30 and 60 d). After six months ensiling, the silages were scored according to the Silage Quality Assessment Criteria issued by the Chinese Ministry of Agriculture.

The results showed that the steam explosion pretreatment could degrade the hemicellulose in CS and increase the oligosaccharides and monosaccharides content in CS. According to the pretreatment intensity, the soluble sugars content in the CS increased from 17.51% to 19.58%-25.77%. At the same time, the pH value of raw materials decreased from 7.09 to 6.14-4.26. The saccharide produced during the pretreatment played a positive role to lactic acid bacteria growth in the ensiling. The silage pH value, the proportion of VBN/total nitrogen decreased significantly, and the feed quality was improved. The pretreated CS from the optimum conditions (1.0 MPa and 5 min) increased its final score from 50 (normal) to 83 (excellent). The results also showed that higher pretreatment intensity could not only increase the soluble sugar content, but also the furfural content in the pretreated CS. When the pretreated steam pressure was higher than 1.0 MPa, the furfural production increased significantly. Furfural made the pretreated CS smelled pungent, also affected the microorganisms growth. So, for the final quality of silage, the suitable steam explosion pretreatment intensity choice was very important.

Low intensity steam explosion pretreatment made the dry CS obtaining a good ensiling performance, and which expanding the ensiling substrates range.

**Key words:** straw, explosions, experiments, ensile

(责任编辑: 秦学敏)