

体外产气法评价不同青贮添加剂处理下汽爆玉米秸秆品质

高雪梅¹, 焦婷¹, 雷赵民², 赵生国², 李雄雄¹, 秦伟娜¹

(1. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学动物科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为评价不同青贮添加剂处理对汽爆玉米秸秆饲用价值的影响, 采用体外产气法并结合扫描电镜, 对比添加剂 Sila-max(MAX)、Sila-mix(MIX)、纤维活性菌(活性菌)以及空白(CK)处理的汽爆玉米秸秆微观结构、体外消化率及瘤胃发酵特性。结果表明: 添加剂组体外 48 h 累积产气量显著高于 CK 组 ($P < 0.05$); MAX 组体外干物质消化率(DMD)、中性洗涤纤维消化率(NDFD)最高, 分别达 51.59%、31.06%, MIX 组体外酸性洗涤纤维消化率(ADFD)最高, 达 31.50%, 不同处理间均无显著差异 ($P > 0.05$); MAX 组体外挥发性脂肪酸(TVFA)含量最高, 与其他处理组差异显著 ($P < 0.05$); 不同处理下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度、pH 均在瘤胃适宜的范围; MIX 组微生物蛋白(MCP)含量最高, 与 MAX 组无显著差异 ($P > 0.05$), 二者与其他处理组差异显著 ($P < 0.05$); 通过扫描电镜观察, 加入添加剂对秸秆纤维结构有明显破坏作用。综上, 不同添加剂对汽爆玉米秸秆的作用不同, 其中 MAX 处理的汽爆玉米秸秆产气效果较好, 可推广使用。

关键词:青贮添加剂; 汽爆玉米秸秆; 体外产气; 扫描电镜; 消化特性

中图分类号: S816.5⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2021)06-0030-07

DOI: 10.13817/j.cnki.cycp.2021.06.005



秸秆是我国重要的粗饲料资源, 2017 年, 我国农作物秸秆可收集资源量为 8.27 亿 t, 其中, 玉米、水稻、小麦三大粮食作物秸秆资源量分别为 37.2、19.1、14.7 亿 t, 合计占全国秸秆资源总量的 84.8%^[1]。玉米秸秆在我国秸秆资源中占很大比例, 但由于利用加工技术有限, 自身营养价值低, 常被丢弃或焚烧, 造成资源浪费, 带来环境污染等问题。

近年来, 随着牛羊养殖业的快速发展, 农民对粗饲料的需求不断增加, 粗饲料不足问题日益显现, 导致饲草原料价格攀升, 养殖成本增加, 养殖效益缩减^[2]。因此, 加大饲草料资源挖掘与开发, 改善秸秆利用加工手段, 对缓解饲草资源短缺、提高养殖效益、避免资源浪费具有重要意义。农作物秸秆具有纤维木质化程度高、粗蛋白(CP)含量低、养分消化率低、适口性较差等特点, 直接用于家畜饲喂效果较差^[3]。通过适当处理可提高秸秆降解率, 增加其 20% 的能量利用率, 对于缓解优质粗饲料紧缺的现状具有重要意义^[4-5]。蒸汽爆破技术是一种物理与化学相结合的加工技术, 能够破坏秸秆纤维结构, 显著降低半纤维素含量, 使粗蛋白、可溶性糖等营养成分含量升高^[6]。适当条件下汽爆处理能提高秸秆营养价值, 改善适口性, 提高消化率^[7], 汽爆后发酵处理可以保持秸秆营养品质, 增加利用率^[8]。

因此, 通过汽爆处理提高玉米秸秆营养品质, 再进

收稿日期: 2021-01-19; **修回日期:** 2021-02-18

基金项目: 玉米秸秆饲用化汽爆破壁发酵关键技术研究示范项目(20180408); 甘肃省现代草食畜产业技术体系(GARS-CS-4)农业部公益性行业(农业)科研专项(201003019, 201503134 和 201303059); 现代农业产业技术体系(CARS-40-09B)

作者简介: 高雪梅(1995-), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生。

E-mail: gaoxm16@163.com

焦婷为通信作者。E-mail: jiaot@gsau.edu.cn

行厌氧发酵,既可以解决玉米秸秆品质低、适口性差、难以贮存等问题,又可以使玉米秸秆高效利用。本试验研究了不同青贮添加剂厌氧发酵对汽爆玉米秸秆纤维结构的影响,利用体外产气法测定了其体外产气量、降解率以及发酵特性,旨在筛选低质粗饲料的适宜处理方法,提高玉米秸秆的利用价值。

1 材料和方法

1.1 材料

试验所用汽爆原料为上一年堆垛玉米秸秆,汽爆前将水分调为 65%~70%,在汽爆腔压力 1.0 MPa、维压 10 min 下汽爆的玉米秸秆。

青贮添加剂宜生贮宝 Sila-Max(MAX)由美国瑞科动物营养公司提供,含纯化纤维素酶、淀粉、丙酸杆菌、淀粉酶,乳酸菌 $\geq 2 \times 10^{10}$ cfu/g,添加量为 0.002 5 kg/t;青贮添加剂 Sila-Mix(MIX)由美国瑞科动物营养公司提供,黑曲霉、硅酸钙,总钙含量 25%~29.5%,乳酸菌 $\geq 1.8 \times 10^6$ cfu/g,添加量为 1.000 kg/t;活性纤维菌在平凉灵台康庄牧业公司自购,含乳酸菌、纤维素分解菌、纤维素酶、淀粉,添加量为 0.500 0 kg/t;发酵桶为 20 L 圆形旋盖白色塑料桶。试验在甘肃灵台康庄牧业有限公司牛场进行。

1.2 样品制备与指标测定

1.2.1 样品制备 分别将 3 种添加剂(按添加量说明)与汽爆玉米秸秆混合,混匀后装桶压实密封,以不添加任何添加剂作为对照(CK)。每个处理装 3 桶,即 3 次重复,密度 600~650 kg/m³,置于室内发酵。发酵 60 d 后,开桶取样,去掉上部 3~4 cm 的样品,然后将桶内样品混匀后进行取样,用真空包装袋保存并带回实验室,在 105 ℃ 烘箱内烘干、粉碎备用。

1.2.2 营养指标测定 采用张英丽^[9]的方法测定粗蛋白、中洗洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)、酸性洗涤木质素(ADL)以及粗灰分(Ash)的含量。

1.3 体外产气试验

1.3.1 选择动物 选择 3 只体重(45±5) kg、安装永久性瘤胃瘘管的 1 岁健康公羊(小尾寒羊♂×本地北山羊♀的杂交 2 代),基础日粮组成及营养水平见表 1,分别于每天 8:00、17:00 准时饲喂,自由采食,提供充足饮水。

1.3.2 瘤胃发酵培养液制备 晨饲后 2 h 采集 3 只羊瘤胃液,用 4 层纱布过滤并混合均匀,立刻放入通有

二氧化碳(CO₂)的保温瓶(39 ℃热水预热)中迅速带回实验室。人工瘤胃液由 A 液、B 液、C 液、刃天青溶液和还原剂溶液组成,参考 Menke 等^[10]方法制备。瘤胃发酵培养液以人工瘤胃液与瘤胃液按 2:1 的比例混合制得。

表 1 试验饲料组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutritional level of the experiment diets (air drying basis)

配方组成	比例/%	营养水平	含量
全贮青贮玉米	72.96	DM/%	36.23
玉米	14.41	DE/(MJ·kg ⁻¹)	14.12
麸皮	4.00	CP/%	14.73
棉粕	3.86	ME/(MJ·kg ⁻¹)	11.58
菜粕	3.59	Ca/%	0.76
碳酸氢钙	0.31	P/%	0.65
石粉	0.31		
食盐	0.28		
1%的预混料	0.29		
总计	100.00		

1.3.3 体外产气量的测定 准确称取秸秆 1.000 g 放置于尼龙袋中,封口,置于 250 mL 产气罐中,在 39 ℃下预热 30 min,再加入 150 mL 瘤胃培养液,持续通入 CO₂ 约 30 s,再将产气瓶放置于 39 ℃的恒温振荡水浴摇床中。每个发酵底物做 3 次重复。采用 ANKOM RFS 体外产气系统(美国 ANKOM technology corporation)自动检测消化反应产生的气体,通过无线传输,在计算机的电子表格中自动记录气压变化,用“理想气体方程”在标准状况“S. T. P”下转换成气体体积(mL)。

计算公式为: $V_x = V_j \times P_{psi} \times 0.068\ 004\ 084$

式中: V_x 为 39 ℃ 产气量(mL); V_j 为产气罐顶部空间体积(mL); P_{psi} 为系统自动记录的压强(kPa)。

1.3.4 体外发酵指标测定 待 48 h 体外发酵完成,迅速将产气罐置于冷水中终止发酵,取出尼龙袋,用蒸馏水冲干净后,放置于 105 ℃ 烘箱中,烘干、恒重,用于测定干物质消化率(DMD)、中性洗涤纤维消化率(NDFD)、酸性洗涤纤维消化率(ADFD);

消化率计算公式为: $A = 100 \times (B - C) / B$

式中:A 为待测秸秆消化率(%);B 为样品中待测秸秆中某成分含量(%);C 为残渣中待测秸秆该成分含量(%)。

将发酵液收集,用 pH S-3C 酸度计测定发酵液 pH; $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度用比色法测定^[12];挥发性脂肪酸(VFA)用气相色谱法测定^[13],气相色谱仪型号为岛津 GC-2010;微生物蛋白(MCP)用嘌呤法测定^[13]。

1.4 扫描电镜分析

挑选出不同处理下的新鲜秸秆组织,采用扫描电镜(S-3400N)观察不同处理下组织的变化^[14]。

1.5 数据统计与分析

采用 Excel 2016 计算试验数据后,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因子方差分析,结果以平均值±平均标准误差表示,进行 Duncan 多重比较,以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

0.05 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同添加剂处理前后汽爆玉米秸秆的营养成分变化

汽爆玉米秸秆 CP、ADL 含量在发酵前后无显著差异($P > 0.05$);发酵处理后汽爆玉米秸秆 NDF、ADF 含量显著降低($P < 0.05$);灰分含量 MIX 组最高,与 CK、MAX、活性菌组无显著差异($P > 0.05$),但 CK、MIX 组显著高于汽爆未发酵秸秆($P < 0.05$) (表 2)。

表 2 不同添加剂发酵处理前后汽爆玉米秸秆的营养成分

Table 2 Nutrient composition of steam-exploded corn straw before and after

fermentation with different additives

干物质基础, %

营养成分	汽爆未发酵秸秆	CK	MIX	MAX	活性菌
CP	9.41±0.01 ^a	9.99±0.26 ^a	9.82±0.10 ^a	9.84±0.14 ^a	9.82±0.23 ^a
NDF	77.61±0.07 ^a	63.86±0.59 ^b	63.42±0.35 ^b	63.90±0.40 ^b	62.33±0.92 ^b
ADF	59.69±0.05 ^a	50.44±0.08 ^b	50.70±0.15 ^b	51.04±0.31 ^b	51.26±0.51 ^b
ADL	10.06±0.02 ^a	10.18±0.11 ^a	10.36±0.17 ^a	10.21±0.14 ^a	10.25±0.05 ^a
Ash	5.43±0.02 ^b	6.32±0.15 ^a	6.40±0.44 ^a	5.85±0.21 ^{ab}	6.13±0.11 ^{ab}

注:表中同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同

2.2 不同添加剂处理后玉米秸秆体外产气量变化

不同添加剂处理后,汽爆玉米秸秆产气量随着时间的增加而升高,在前 12 h 内产气速率较高;12 h 后,随着时间的增加,MAX 组、MIX 组和活性菌组产气量仍在持续上升,而 CK 组产气量明显下降,曲线趋于平缓;48 h 时,累计产气量由大到小为活性菌组 > MAX 组 > MIX 组 > CK 组(图 1)。

2.3 不同添加剂处理对汽爆玉米秸秆体外消化率的影响

与 CK 组相比,不同添加剂发酵处理后,汽爆玉米秸秆 DMD、NDFD、ADFD 均无显著差异($P > 0.05$) (表 3)。

2.4 不同添加剂处理对汽爆玉米秸秆体外发酵挥发性脂肪酸的影响

MAX 组、MIX 组乙酸含量差异不显著($P > 0.05$),二者显著高于 CK 组、活性菌组($P < 0.05$);MAX 组丙酸、总挥发性脂肪酸含量显著高于其他处理组($P < 0.05$);异丁酸、丁酸、异戊酸、戊酸含量在 MAX 组、MIX 组和 CK 组间无显著差异($P > 0.05$);活性菌组各挥发性脂肪酸含量最低,除丁酸外,其余指标与 CK 组无显著差异($P > 0.05$) (表 4)。

2.5 不同添加剂处理对汽爆玉米秸秆体外发酵 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、pH、MCP 的影响

不同添加剂处理下 pH、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度无显著差异,MAX、MIX 组 MCP 含量显著高于 CK 组、活性菌组($P < 0.05$) (表 5)。

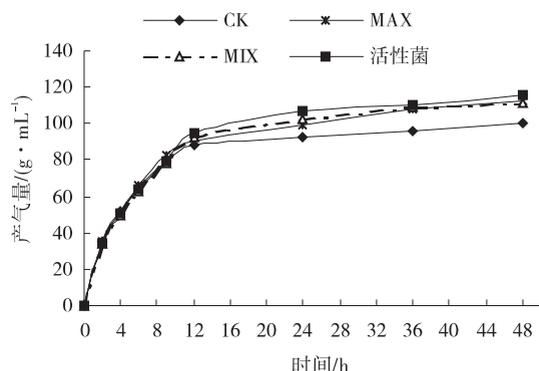


图 1 不同添加剂处理下汽爆玉米秸秆体外产气量

Fig. 1 Gas production curve of in vitro fermentation of steam-exploded straw with different additives

表 3 不同添加剂处理下汽爆玉米秸秆体外消化率

Table 3 Digestibility of steam-exploded straw with different additives

%

项目	CK	活性菌	MIX	MAX
DMD	51.35±1.14 ^a	50.76±0.25 ^a	51.05±0.68 ^a	51.59±1.55 ^a
NDFD	28.71±1.81 ^a	28.48±1.09 ^a	30.78±1.26 ^a	31.06±2.59 ^a
ADFD	28.49±1.70 ^a	30.21±1.71 ^a	31.50±1.27 ^a	30.95±2.76 ^a

表 4 不同添加剂对汽爆玉米秸秆体外发酵挥发性脂肪酸含量

Table 4 Effects of different additives on volatile fatty acids produced from *in vitro* fermentation

of steam-exploded straw

mmol·L⁻¹

项目	CK	活性菌	MIX	MAX
乙酸	70.54±0.56 ^b	68.61±0.15 ^b	72.97±0.73 ^a	75.21±1.09 ^a
丙酸	46.12±0.39 ^b	45.00±0.08 ^b	46.63±0.53 ^b	51.24±1.09 ^a
异丁酸	2.97±0.06 ^a	2.88±0.05 ^a	2.94±0.03 ^a	3.11±0.16 ^a
丁酸	19.36±0.16 ^a	18.55±0.12 ^b	19.29±0.16 ^a	19.71±0.34 ^a
异戊酸	6.06±0.08 ^{ab}	5.76±0.11 ^b	6.00±0.03 ^{ab}	6.36±0.19 ^a
戊酸	5.66±0.05 ^{ab}	5.50±0.06 ^b	5.79±0.09 ^a	5.79±0.07 ^a
总挥发性脂肪酸	150.72±1.09 ^{bc}	146.30±0.10 ^c	153.62±1.36 ^b	161.43±2.12 ^a

表 5 不同添加剂处理下汽爆玉米秸秆体外发酵 NH₃-N、pH 值、MCP 含量Table 5 Effects of additives on NH₃-N, pH and MCP produced from *in vitro* fermentation of

steam-exploded corn straw

项目	CK	活性菌	MIX	MAX
微生物蛋白 MCP/(mg·mL ⁻¹)	14.68±0.73 ^b	15.48±1.18 ^b	19.91±0.01 ^a	19.53±1.25 ^a
pH 值	6.46±0.01 ^a	6.44±0.01 ^a	6.44±0.02 ^a	6.47±0.01 ^a
氨态氮 NH ₃ -N/(mg·100mL ⁻¹)	5.60±0.18 ^a	5.41±0.06 ^a	5.31±0.10 ^a	5.35±0.08 ^a

2.6 不同添加剂处理对汽爆玉米秸秆纤维结构的影响

由不同处理下汽爆玉米秸秆在扫描电镜下的超微结构可以看出,CK 组(图 2-A)秸秆皮外层结构完整,表皮毛排布整齐;活性菌组(图 2-B)表面粗糙、膨松,表皮毛部分脱落,出现孔洞、裂痕,有大量附着物;MAX 组(图 2-C)秸秆皮外层结构发生变化,表皮毛部分脱落,表面粗糙,出现孔洞和大量附着物;MIX 组(图 2-D)秸秆皮外层结构出现裂痕、孔洞,表面粗糙,表皮毛脱落,有大量附着物。

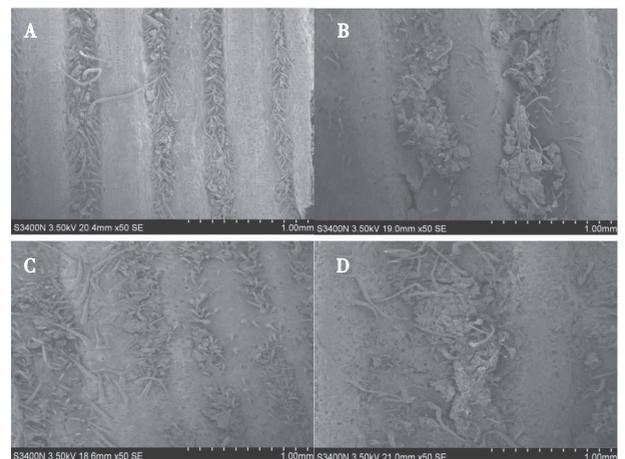


图 2 不同添加剂处理下汽爆玉米秸秆纤维结构变化

Fig. 2 Change of fiber structure of steam-exploded straw treated with different additives

注:A为CK组、B为MIX组、C为MAX组、D为活性菌组

3 讨论

3.1 不同添加剂对汽爆玉米秸秆营养品质的影响

添加剂能够改善秸秆营养品质,其作用效果与添加剂类别、作用原料等有很大的关系。大量研究证实,

添加乳酸菌对于青贮饲料营养成分的影响有限^[15-16]。本试验得出相似结论,不同添加剂处理下的汽爆玉米秸秆 CP、NDF、ADF、ADL 和 Ash 的含量与 CK 无显著差异,这是由于添加剂均为乳酸菌添加剂,汽爆玉米秸秆自身营养价值低所致。

3.2 不同添加剂对汽爆玉米秸秆产气量的影响

体外产气量可以在某种程度上反映饲料在反刍动物瘤胃中的降解特性^[17]。通常,饲料中可发酵有机物含量越高,体外产气量越大。本试验中,MAX 组、MIX 组及活性菌组 48 h 累积产气量高于 CK 组,说明 MAX、MIX 以及活性菌处理能够增加秸秆可发酵有机物,提高产气量。

3.3 不同添加剂对汽爆玉米秸秆消化率的影响

粗饲料的干物质消化率可反映其在动物体内消化的难易程度,是影响干物质采食量的重要因素^[18]。瘤胃中 NDF 和 ADF 降解率的大小,反映了饲料被降解的难易程度,提高饲料 NDFD 和 ADFD 可增加干物质采食量和生产性能^[19-20]。秸秆消化率与 NDF、ADF 含量具有相关性^[21]。本试验中不同添加剂处理后的汽爆玉米秸秆纤维含量与 CK 组无明显差异,这与孙文君等^[22]在稻草上的研究结果相似,是由乳酸菌制剂对不同发酵原料的作用效果不同导致^[23],从体外 DMD、NDFD、ADFD 来看,不同处理亦无显著差异,此结果与秸秆营养状况相一致。

3.4 不同添加剂处理对汽爆玉米秸秆发酵特性的影响

反刍动物瘤胃环境随饲料的组成及自身条件的变化而变化,瘤胃内 pH、NH₃-N 浓度、VFA 含量等,可以反映瘤胃内部的环境状况及饲料在瘤胃内的发酵程度和模式^[24]。

VFA 是反刍动物瘤胃微生物维持和生长的主要能量来源,通过日粮中碳水化合物的降解产生^[25]。反刍动物瘤胃中 VFA 包括乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸、戊酸、异戊酸,其中丙酸是反刍动物体内内源葡萄糖合成的前体物质,乙酸是反刍动物代谢所需能量的主要来源,发酵液中的丙酸含量增加、乙酸/丙酸的降低均有利于葡萄糖的合成和能量的利用^[26]。本试验中,MAX 组乙酸、丙酸、丁酸含量最高,且总挥发性脂肪酸含量显著高于其他处理组,说明 MAX 组秸秆碳水化合物发酵较为完全,消化代谢速率相对较高。这是由于 MAX 中含有纯化纤维素酶和乳酸菌,在厌氧发

酵过程中对纤维进行了分解,使秸秆结构疏松多孔,增加了瘤胃微生物可利用底物和可附着比表面积。

适宜的 pH 环境是瘤胃微生物正常生长的必要条件,S. Calsamiglia 等^[27]研究发现,瘤胃 pH 值为 5.5~7.5,可保证瘤胃微生物的生长。本试验各处理 pH 值在 6.44~6.47,给瘤胃微生物的生长繁殖提供了良好的环境。

NH₃-N 含量是衡量瘤胃氮代谢的重要指标,能间接反映瘤胃微生物利用 NH₃-N 合成微生物蛋白和微生物分解饲料中蛋白质生成 NH₃-N 的平衡情况^[28]。瘤胃液中 NH₃-N 浓度过高或过低都不利于瘤胃微生物的生长繁殖,进而影响家畜对营养的吸收利用。因此,适宜的 NH₃-N 浓度是保证瘤胃微生物正常生长活动的关键,生长所需最佳的 NH₃-N 浓度在 5~30 mg/100 mL^[29]。本试验中,不同添加剂处理下,瘤胃液 NH₃-N 浓度均在适宜微生物生长的范围内,MIX 组、MAX 组浓度显著高于 CK 组,说明 MIX 组、MAX 组秸秆中可以利用蛋白含量较高。

瘤胃中主要蛋白供给是微生物蛋白。微生物蛋白浓度可反映瘤胃微生物利用 NH₃-N 的能力,也侧面反映微生物的种群大小^[30]。本试验中,MAX 组、MIX 组 MCP 含量显著高于 CK 组、活性菌组,说明 MAX、MIX 添加剂处理下秸秆瘤胃微生物菌群较大。MCP 的合成效率主要受日粮中蛋白的组成及水平、碳水化合物的含量和种类、碳水化合物和蛋白质降解的同步性等多重因素的影响^[31],可以推断 MAX 组、MIX 组秸秆与瘤胃微生物反应更充分,更利用反刍动物吸收。

3.5 不同添加剂处理对汽爆玉米秸秆纤维结构的影响

扫描电镜(SEM)是表征样品表面的有力工具,表面粗糙度反映不同处理对木质纤维结构的破坏程度^[32]。本试验中,与 CK 组对比发现,添加剂发酵处理后的秸秆结构明显出现孔洞、组织脱落破损,并增加大量附着物,这与焦有宙等^[33]研究结果相似,这是由于这几种添加剂中不仅含有乳酸菌,还含有能够促使纤维降解的物质:MAX 中含有纤维素酶,它能使植物细胞壁分解产生糖,增加乳酸发酵底物;活性菌中含有纤维素分解菌,能产生纤维素酶对植物细胞壁进行破坏^[34-35]。

4 结论

通过体外产气法研究发现,不同青贮添加剂处理

能够改善汽爆玉米秸秆产气量与瘤胃发酵特性,其中,MAX组表现较好;通过扫描电镜发现,不同添加剂对秸秆结构的破坏利用程度不同,但破坏程度均明显大于CK组。综上,MAX组各方面表现最佳,适宜推广利用。

参考文献:

- [1] 丛宏斌,姚宗路,赵立欣,等. 中国农作物秸秆资源分布及其产业体系与利用路径[J]. 农业工程学报,2019,35(22):132-140.
- [2] 葛翠翠,李昊,冯帆,等. 柠条利用方式对宁夏育肥滩羊体外消化及发酵参数的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(6):144-147.
- [3] 刘培剑,曹玉芳,朱风华,等. 不同厌氧碱化处理对鲜麦秸营养成分、超微结构和体外发酵参数的影响[J]. 动物营养学报,2018,30(8):3229-3238.
- [4] 左志,祁有鹏,董巧霞,等. 复合秸秆颗粒替代玉米青贮饲料对肉牛肌脂肪和脂肪和脂肪酸的影响[J]. 草原与草坪,2021,41(1):103-112.
- [5] Chaudhry A S, Miller E L. The effect of sodium hydroxide and alkaline hydrogen peroxide on chemical composition of wheat straw and voluntary intake, growth and digesta kinetics in store lambs[J]. Animal Feed Science and Technology, 1996, 60(1/2): 69-86.
- [6] 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.
- [7] 冉福,雷赵民,焦婷,等. 汽爆处理对玉米-小麦型混合秸秆营养品质的影响[J]. 草业科学,2019,36(3):878-887.
- [8] 高雪梅,焦婷,雷赵民,等. 添加剂对汽爆玉米秸秆养分和发酵特性的影响[J]. 草地学报,2020,28(4):1129-1135.
- [9] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京:中国农业大学出版社,2003:46-75
- [10] Menke K H, Raab L, Salewski A, et al. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor in vitro[J]. J Agric Sci, 1979, 93(1): 2171-2172.
- [11] 冯宗慈,高民. 通过比色测定瘤胃液氨氮含量方法的改进[J]. 内蒙古畜牧科学. 1993(4):40-41.
- [12] 王加启. 反刍动物营养学研究方法[M]. 北京:现代教育出版社,2011.
- [13] 布同良. 体外产气法评定青贮玉米、羊草和苜蓿草之间的组合效应[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [14] 焦婷,吴建平,肖元明,等. 一种扫描电镜的样品制备方法:CN106018027A[P]. 2016-10-12.
- [15] Zhang Q, Zhao M, Wang X, et al. Ensiling alfalfa with whole crop corn improves the silage quality and in vitro digestibility of the silage mixtures[J]. Grassland Science, 2017, 63(4): 211-217.
- [16] Zhang Q, Li X, Zhao M, et al. Lactic acid bacteria strains for enhancing the fermentation quality and aerobic stability of *Leymus chinensis* silage[J]. Grass Forage Science, 2016, 71(3): 472-481.
- [17] 毛建红,富丽霞,周艳,等. 体外法与半体内法评价不同酶菌制剂处理后玉米秸秆主要成分降解率的比较试验[J]. 饲料工业,2017,38(24):40-46.
- [18] 李茂,字学娟,白昌军,等. 不同生长高度王草瘤胃降解特性研究[J]. 畜牧兽医学报,2015,46(10):1806-1815.
- [19] 吕家华. 纤维素酶对纤维素纤维的作用[D]. 上海:东华大学,2003.
- [20] Qing Q, Zhou L, Guo Q, et al. Mild alkaline presoaking and organ solve pretreatment of corn stover and their impacts on corn stover composition, structure, and digestibility[J]. Bioresource Technology, 2017, 233: 284-290.
- [21] 邓卫东,席冬梅,毛华明. 云南省反刍家畜主要饲料营养价值评价[J]. 黄牛杂志,2002,28(1):23-27.
- [22] 孙文君,马向丽,毕玉芬,等. 乳酸菌与纤维素酶在青贮中的应用研究[J]. 草学,2017(6):12-15+20.
- [23] 赵苗苗,玉柱. 添加乳酸菌及纤维素酶对象草青贮品质的改善效果[J]. 草地学报,2015,23(1):205-210.
- [24] REDDY N M, REDDY G V N, REDDY M R. Effect of fodder based complete diets on the rumen fermentation pattern in cross bred bulls[J]. Indian Journal of Animal Nutrition, 1993, 10(1): 7-12.
- [25] 唐德富,袁玖,王彦乾,等. 玉米芯与苜蓿、精料配比对饲料粮组合效应的影响[J]. 草业学报,2019,28(6):137-147.
- [26] 刘颖,郝力壮,刘书杰. 体外产气法评定蒸汽压片玉米对牦牛体外瘤胃发酵参数及甲烷产量的影响[J]. 动物营养学报,2020,32(8):3917-3926.
- [27] Calsamiglia S, FERRET A, Dewant M. Effects of PH And PH fluctuations on microbial fermentation and nutrient flow from a dual continuous culture system[J]. J Dairy Sci, 2002, 85(3): 574.
- [28] 赵广永. 反刍动物营养[M]. 北京:中国农业大学出版社,2012:37-38.
- [29] 霍路曼,曹玉凤,高艳霞,等. 饲料能量水平对荷斯坦育成牛生长性能和瘤胃发酵的影响[J]. 畜牧兽医学报,

- 2019,50(2):332-342.
- [30] 黄雅莉,邹彩霞,韦升菊,等. 体外产气法研究半胱胺对水牛瘤胃发酵参数和甲烷产量的影响[J]. 动物营养学报,2014,26(1):126-133.
- [31] 邵丽玮,刘泽,王亚男,等. 体外法比较谷草和燕麦草的营养价值[J]. 今日畜牧兽医,2020,36(3):4-7.
- [32] 李萍. 木质纤维素预处理及其降解机制的研究[D]. 北京:北京化工大学,2017.
- [33] 焦有宙,高赞,李刚,等. 不同土著菌及其复合菌对玉米秸秆降解的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(23):201-207.
- [34] 陈鑫珠,张文昌,张建国,等. 纤维素酶对象草玉米秸秆混合青贮品质的影响[J]. 家畜生态学报,2012,32(6):46-50.
- [35] 张凡凡. 纤维素分解菌与乳酸菌协同作用提高玉米青贮品质研究[D]. 石河子:石河子大学,2017.

Quality evaluation on steam-exploded corn straw fermented with different additives by in vitro gas production

GAO Xue-mei¹, JIAO Ting¹, LEI Zhao-min², ZHAO Sheng-guo²,
LI Xiong-xiong¹, QIN Wei-na¹

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecology System, Ministry of Education, Sino-U. S. Centers for Grazing land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China; 2. College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the effects of different additives on the feeding value of steam-exploded corn straw. The microstructure, in vitro digestibility and rumen fermentation characteristics of steam-exploded corn straw, treated with different additives including Sila-max(MAX), Sila-mix(MIX) and Fiber active bacteria(Active bacteria) together with without any additives as the blank(CK), were analyzed using SEM and in vitro gas production method. The results showed that the cumulative gas production at 48 hours in all additive treatments were significantly greater than in CK ($P < 0.05$). DMD and NDFD in MAX group were the greatest, reaching 51.59% and 31.06% respectively. ADFD in MIX group was 31.50%, but did not differ between CK and other group. TVFA in MAX group were significantly higher than that in the other groups ($P < 0.05$). $\text{NH}_3\text{-N}$ and pH were in normal range of rumen for all treatments. MCP content in MIX group was the greatest and did not differ significantly from that in MAX group, while significantly differed from that in the other treatments ($P < 0.05$). SEM results showed that additives could obviously damage the structure of straw fiber. In conclusion, different additives had different effects on steam exploded corn straw. Sila-max(MAX) treatment had better gas production and fermentation parameters, which could be used widely in silage practice.

Key words: silage additives; steam-exploded corn straw; in vitro gas production; scanning electron microscopy; digestion characteristics