

不同青贮添加剂对全株玉米青贮营养价值、 发酵品质和瘤胃降解率的影响

王亚芳^{1,2,3} 姜富贵^{2,3} 成海建^{2,3} 毛翠^{2,3} 安文娟^{2,3} 董徽^{2,3} 宋恩亮^{1,2,3*}

(1. 山东师范大学生命科学学院, 济南 250014; 2. 山东省农业科学院畜牧兽医研究所, 济南 250100;

3. 山东省畜禽疫病防治与繁育重点实验室, 济南 250100)

摘要: 本试验旨在研究不同青贮添加剂对全株玉米青贮营养价值、发酵品质和瘤胃降解率的影响。全株玉米青贮时分别添加不同青贮添加剂, 试验共设 5 个组, 分别为对照组(不添加任何青贮添加剂)、乳酸菌组(添加 5×10^5 CFU/g 乳酸菌制剂)、有机酸组(甲酸、乙酸和丙酸按照 7:1:2 的体积比进行混合, 添加量为 4 mL/kg)、有机酸盐组(苯甲酸钠和山梨酸钾按照 1:1 的质量比进行混合, 添加量为 2 g/kg)和纤维素酶组(添加 50 mg/kg 纤维素酶), 每组 4 个重复。青贮 45 d 后, 测定全株玉米青贮的营养成分、发酵品质和瘤胃降解率。结果表明: 1) 有机酸组的粗蛋白质含量显著高于其他各组 ($P < 0.05$), 有机酸盐组和纤维素酶组的中性洗涤纤维含量显著低于对照组 ($P < 0.05$), 有机酸盐组和纤维素酶组的相对饲喂价值和中性洗涤纤维性碳水化合物含量显著高于对照组 ($P < 0.05$), 乳酸菌组、有机酸组、有机酸盐组和纤维素酶组的有机酸和可溶性糖含量均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。2) 乳酸菌组和有机酸组的总可消化养分含量、消化能、代谢能、维持净能和增重净能显著高于对照组、有机酸盐组和纤维素酶组 ($P < 0.05$)。3) 乳酸菌组、有机酸盐组和纤维素酶组的 pH 显著低于对照组 ($P < 0.05$), 乳酸菌组、有机酸组、有机酸盐组和纤维素酶的乳酸含量显著高于对照组 ($P < 0.05$), 有机酸组和有机酸盐组的氨态氮/总氮 ($\text{NH}_3\text{-N/TN}$) 显著低于对照组 ($P < 0.05$), 有机酸组和纤维素酶组的发酵系数、费氏评分、24 h 干物质降解率和 24 h 中性洗涤纤维降解率显著高于对照组 ($P < 0.05$)。由此可见, 乳酸菌、有机酸、有机酸盐和纤维素酶对全株玉米青贮的营养成分含量、发酵品质和瘤胃降解率均有不同程度的提升作用。综合以上各项指标进行评价, 各组全株玉米青贮的综合营养价值从高到低依次为: 纤维素酶组 > 有机酸盐组 > 有机酸组 > 乳酸菌组 > 对照组。

关键词: 全株玉米青贮; 添加剂; 营养价值; 发酵品质; 瘤胃降解率

中图分类号: S816

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2020)06-2765-10

全株玉米青贮具有生物学产量高、营养价值高、适口性好、贮藏时间长等优点, 是反刍动物生产中重要的粗饲料来源^[1]。全株玉米青贮的制作质量直接关系到反刍动物的健康、生产性能以及养殖场的经济效益, 如何生产优质全株玉米青贮是养殖业普遍关注的问题^[2]。提升青贮饲料的发酵品质是生产优质全株玉米青贮的重要环节, 尽管青贮发酵是一个复杂的微生物活动和生物化学变化过程, 但可以在青贮过程中加入青贮添加剂进行调控, 青贮添加剂已被作为一种提升青贮饲料发酵品质、营养价值和动物适口性的有效手段^[3]。

收稿日期: 2020-01-09

基金项目: 现代农业(肉牛牦牛)产业技术体系专项资金(CARS-37)

作者简介: 王亚芳(1993—), 女, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 从事动物营养与黏膜免疫研究。E-mail: wangyafang6666@163.com

* 通信作者: 宋恩亮, 研究员, 硕士生导师, E-mail: enliangs@126.com

青贮饲料添加剂的种类较多,根据其功能可分为4类:发酵促进剂、发酵抑制剂、好氧性腐败菌抑制剂和营养性添加剂^[4]。国内外有关青贮添加剂的研究主要集中于乳酸菌复合制剂、纤维素酶、有机酸及其对应的盐类等。乳酸菌复合制剂综合了同型和异型发酵乳酸菌的优势,在发酵前期,同型发酵乳酸菌快速产生大量乳酸并降低青贮 pH,有效抑制有害菌的生长,进而降低干物质损失^[5];在发酵后期,异型发酵乳酸菌发酵产生的乙酸可提升青贮饲料有氧稳定性,防止二次发酵^[6]。纤维素酶一方面可水解植物细胞壁为单糖,增加乳酸菌发酵底物,另一方面可改变植物的纤维素结构并降低纤维含量,改善青贮饲料适口性的同时,提高其消化率^[7]。甲酸、乙酸及丙酸等有机酸能够直接酸化青贮饲料,迅速降低 pH,抑制好氧微生物的活力和不良微生物的生长,防止青贮饲料的腐败,有利于保存饲料营养价值^[8]。苯甲酸、山梨酸及其盐类可抑制青贮中梭菌和酵母菌的生长,降低 pH 及氨态氮和丁酸浓度,提升青贮发酵品质^[9]。尽管国内外有关青贮添加剂的研究已经十分广泛和深入,但多数研究只是针对

单一或2种添加剂进行研究,关于多种青贮添加剂比较的研究较少。因此,本研究在前人研究的基础上,探讨不同青贮添加剂(乳酸菌、有机酸、有机酸盐、纤维素酶)对全株玉米青贮营养价值、发酵品质和瘤胃降解率的影响,以期对青贮添加剂的合理选择和使用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

青贮原料为来自山东省阳信县河流镇蜡熟期刈割的全株玉米(登海605),全株玉米青贮前营养成分见表1。乳酸菌制剂主要成分为戊糖片球菌、屎肠球菌、植物乳杆菌和布氏乳杆菌,乳酸菌含量为 5×10^{10} CFU/g。甲酸、乙酸、丙酸、苯甲酸钠和山梨酸钾均为实验室用分析纯试剂,购自国药集团化学试剂有限公司。纤维素酶(绿色木酶,又称1,4- β -D-葡聚糖葡萄糖苷水解酶,活性为400 000 U/g)购自上海源叶生物科技有限公司。聚乙烯单向呼吸阀厌氧袋(22 cm \times 40 cm)购自平胜光实业有限公司。

表1 全株玉米青贮前营养成分(干物质基础)

Table 1 Nutrient composition of whole corn before silage (DM basis)

项目 Item	干物质 DM	粗蛋白质 CP	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF	可溶性碳水化合物 WSC	%
含量 Content	32.74	8.28	39.86	21.18	10.26	

1.2 试验设计

全株玉米用粉碎机切短至1~2 cm,混合均匀后备用。试验共设5个组,分别为对照组(不添加任何青贮添加剂)、乳酸菌组(添加 5×10^5 CFU/g 乳酸菌制剂)、有机酸组(甲酸、乙酸和丙酸按照7:1:2的体积比进行混合,添加量为4 mL/kg)、有机酸盐组(苯甲酸钠和山梨酸钾按照1:1的质量比进行混合,添加量为2 g/kg)和纤维素酶组(添加50 mg/kg 纤维素酶),添加剂的添加量均以青贮鲜重为基础,每组4个重复。各组混合均匀后,称取约1 kg 样品于聚乙烯厌氧袋中,真空密封,于室温避光发酵45 d后开袋取样,随后开展相关指标的测定。

1.3 指标测定

1.3.1 常规营养成分指标

全株玉米青贮前和开袋后分别取约500 g 样品,在65 °C 烘箱(DHG-9053A型)中烘干48 h,采用粉碎机(Tecator 1093,瑞典)粉碎至1 mm 待测。干物质(DM)、粗灰分(Ash)、粗蛋白质(CP)和粗脂肪(EE)含量参照AOAC(2005)^[10]方法进行测定,其中DM含量采用重量法测定,Ash含量采用灰化法测定,CP含量采用凯氏定氮法测定,EE含量采用索氏浸提法(乙醚浸出法)测定。钙(Ca)含量参照GB/T 6436—2018^[11],采用高锰酸钾法测定。磷(P)含量参照GB/T 6437—2018^[12],采用分光光度法测定。中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)和酸性洗涤木质素(ADL)含量参照Van Soest等^[13]的方法,采用

Ringbio 纤维分析仪 (R-2000, 英国) 测定。水溶性碳水化合物 (WSC) 含量参照蒽酮-硫酸比色法^[14], 采用分光光度计 (Alpha-1506, 上海) 进行测定。淀粉 (Starch) 含量采用高氯酸水解-蒽酮比色法^[15]测定。相对饲喂价值 (RFV) 根据公式^[16]进行计算:

$$\text{RFV} = \text{DMI}(\% \text{BW}) \times \text{DDM}(\% \text{DM}) / 1.29;$$

$$\text{DMI}(\% \text{BW}) = 120 / \text{NDF}(\% \text{DM});$$

$$\text{DDM}(\% \text{DM}) = 88.9 - 0.779 \times \text{ADF}(\% \text{DM}).$$

式中: DMI 为干物质采食量; BW 为体重; DDM 为可消化干物质。

1.3.2 碳水化合物组分指标

碳水化合物组分割分参照 NRC (2016)^[17]的方法, 各组分计算公式如下:

$$\text{总碳水化合物 (CHO, \% DM)} = 100 -$$

$$\text{CP}(\% \text{DM}) - \text{EE}(\% \text{DM}) -$$

$$\text{Ash}(\% \text{DM});$$

$$\text{非中性洗涤纤维性碳水化合物 (Non-NDF,}$$

$$\% \text{DM}) = 100 - \text{CP}(\% \text{DM}) - \text{NDF}(\% \text{DM}) -$$

$$\text{EE}(\% \text{DM}) - \text{Ash}(\% \text{DM});$$

$$\text{有机酸 (OA, \% DM)} = \text{乳酸}(\% \text{DM}) +$$

$$\text{乙酸}(\% \text{DM}) + \text{丙酸}(\% \text{DM}) +$$

$$\text{丁酸}(\% \text{DM}) + \text{其他有机酸}(\% \text{DM});$$

$$\text{不可利用纤维 (CC, \% DM)} =$$

$$\text{ADL}(\% \text{DM}) \times 2.4;$$

$$\text{可溶性糖 (CA, \% DM)} = \text{WSC}(\% \text{DM});$$

$$\text{淀粉 (CB}_1\text{, \% DM)} = \text{Starch}(\% \text{DM});$$

$$\text{中性洗涤可溶纤维 (CB}_2\text{, \% DM)} = \text{Non-NDF}(\% \text{DM}) - \text{OA}(\% \text{DM}) - \text{CA}(\% \text{DM}) -$$

$$\text{CB}_1(\% \text{DM});$$

$$\text{不可利用中性洗涤纤维 (CC, \% DM)} = 2.4 \times$$

$$\text{ADL}(\% \text{DM});$$

$$\text{可利用中性洗涤纤维 (CB}_3\text{, \% DM)} = \text{NDF}(\% \text{DM}) - \text{CC}(\% \text{DM}).$$

1.3.3 预测能值指标

总可消化养分 (TDN) 根据 Weiss 等^[18]的方法计算, 计算公式如下:

$$\text{TDN}(\%) = 0.98 \times (100 - \text{NDFn} - \text{CP} - \text{Ash} - \text{EE}) +$$

$$0.93 \times \text{CP} + 2.25 \times (\text{EE} - 1) + 0.75 \times (\text{NDFn} -$$

$$\text{ADL}) \times [1 - (\text{ADL} / \text{NDFn}) 0.667] - 7.$$

式中: NDFn 为无氮中性洗涤纤维 [NDFn = NDF - 中洗不溶蛋白 (NDICP)]; 各组分的单位均为 %DM。

消化能 (DE)、代谢能 (ME)、维持净能 (NE_m) 和增重净能 (NE_g) 参照 NRC (2016)^[17], 在 TDN 基础上进行计算, 公式如下:

$$\text{DE}(\text{MJ/kg}) = 0.044\ 09 \times \text{TDN}(\% \text{DM});$$

$$\text{ME}(\text{MJ/kg}) = 0.82 \times \text{DE}(\text{MJ/kg});$$

$$\text{NE}_m(\text{MJ/kg}) = 1.37 \times \text{ME}(\text{MJ/kg}) - 0.138 \times \text{ME}^2(\text{MJ/kg}) + 0.010\ 5 \times \text{ME}^3(\text{MJ/kg}) - 1.12;$$

$$\text{NE}_g(\text{MJ/kg}) = 1.42 \times \text{ME}(\text{MJ/kg}) - 0.174 \times \text{ME}^2(\text{MJ/kg}) + 0.012\ 2 \times \text{ME}^3(\text{MJ/kg}) - 1.65.$$

泌乳净能 (NE_L) 根据 Undersander^[19]的方法进行计算, 公式如下:

$$\text{NE}_L(\text{MJ/kg}) = [0.926\ 5 - (0.007\ 93 \times \text{ADF})] / 0.453\ 6.$$

1.3.4 发酵指标

称取 25 g 新鲜青贮样品, 置于榨汁机 (HR2027, 飞利浦) 中, 加入 250 mL 无菌蒸馏水, 间歇榨汁搅拌 5~6 次, 每次 5 s。用 4 层纱布过滤上清液至三角瓶中, 混匀, 立即使用 pH 计 (HANNA HI 9125, 意大利) 测定 pH, 随后使用 0.1 mol/L HCl 滴定至 pH 为 3.0, 然后用 0.1 mol/L NaOH 滴定至 pH 为 10.0, 缓冲力 (BC) 按照 pH 每变化 0.5 个单位所消耗 0.1 mol/L NaOH 的体积进行计算; 另取滤液于 -20 °C 冰箱保存, 用于后续测定挥发性脂肪酸 (VFA)、乳酸和氨态氮 (NH₃-N) 含量。VFA 含量采用气相色谱法^[20]测定; 乳酸含量采用对羟基联苯比色法^[21]测定; NH₃-N 含量采用苯酚-次氯酸钠比色法^[22]测定。参照王国良^[23]的方法计算发酵系数 (fermentation coefficient, FC) 和费氏评分 (Fleig score, FS), 公式如下:

$$\text{发酵系数} = \text{DM}(\%) + 8 \times \text{WSC}(\% \text{DM}) / \text{BC};$$

$$\text{费氏评分} = 220 + [2 \times \text{DM}(\%) - 15] - (40 \times \text{pH}).$$

1.3.5 瘤胃降解率指标

选用 3 头体况良好、体重 (550 ± 50) kg、安装永久性瘤胃瘘管的荷斯坦奶牛, 试验饲料组成 (DM 基础) 为: 玉米 24.1%、麸皮 12.3%、豆粕 11.6%、苜蓿 14.4%、羊草 11.2%、全株玉米青贮 24.4%、预混料 2%; 营养水平为: CP 15.03%、NDF 38.13%、ADF 20.15%、NE_L 6.49 MJ/kg, 每天于 06:00 和 18:00 进行饲喂, 全天自由饮水。采用尼龙袋法^[24]测定青贮饲料 24 和 48 h 的干物质降解率 (DMD) 和中性洗涤纤维降解率 (NDFD)。尼龙袋规格为 12 cm × 6 cm, 孔径为 50 μm, 称量 3 g 左

右青贮样品装入尼龙袋中,每个样品每个时间点每头牛设置 4 个重复,尼龙袋取出后,使用自来水冲洗干净,在 65 °C 烘箱中烘干 48 h,采用粉碎机粉碎至 1 mm,后续测定 DM 和 NDF 含量,计算降解率,公式如下:

$$\text{DMD}(\%) = [(\text{消化前样品 DM 含量} - \text{消化后样品 DM 含量}) / \text{消化前样品 DM 含量}] \times 100;$$

$$\text{NDFD}(\%) = [(\text{消化前样品 NDF 含量} - \text{消化后样品 NDF 含量}) / \text{消化前样品 NDF 含量}] \times 100。$$

1.3.6 营养价值综合评价

采用模糊数学隶属函数法^[25]对青贮营养价值进行综合评价,如果测定的指标与青贮的营养价值呈正相关,计算公式如下:

$$R(X_i) = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}。$$

如果为负相关,则用反隶属函数进行转换,计算公式如下:

$$R(X_i) = 1 - \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}。$$

式中: $R(X_i)$ 为指标测定值, X_{\min} 和 X_{\max} 分别为某一指标所有测定值中的最小值和最大值。

对所有指标隶属函数值进行相加,求其平均值,以平均值大小进行排名。

1.4 统计分析

数据使用 Excel 2013 进行汇总和整理,使用 SAS 9.1 软件中 GLM 过程进行方差分析和 Duncan 氏法多重比较检验,结果以最小二乘均值表示, $P < 0.05$ 为差异显著, $0.05 \leq P < 0.10$ 为存在趋势。

2 结果

2.1 不同青贮添加剂对全株玉米青贮营养成分的影响

由表 2 可以看出,不同青贮添加剂对全株玉米青贮的 DM、ADF、ADL、EE、Ca 和 P 含量无显著影响($P > 0.05$)。有机酸组的 CP 含量显著高于其他各组($P < 0.05$),较对照组提高了 8.33%。有机酸盐组和纤维素酶组的 NDF 含量显著低于其他各组($P < 0.05$)。有机酸盐组的 Ash 含量显著高于有机酸组和纤维素酶组($P < 0.05$)。有机酸盐组和纤维素酶组的 RFV 显著高于对照组($P < 0.05$)。

表 2 不同青贮添加剂对全株玉米青贮营养成分的影响(干物质基础)

Table 2 Effects of different silage additives on nutrient composition of whole corn silage (DM basis)

项目 Items	组别 Groups					SEM	P 值 P-value
	对照 Control	乳酸菌 <i>Lactobacillus</i>	有机酸 Organic acid	有机酸盐 Organic acid salt	纤维素酶 Cellulase		
干物质 DM/%	30.80	31.53	31.08	30.95	30.44	0.18	0.432
粗蛋白质 CP/%	8.16 ^b	8.23 ^b	8.84 ^a	8.23 ^b	8.35 ^b	0.07	0.001
中性洗涤纤维 NDF/%	35.14 ^a	34.28 ^a	34.28 ^a	32.98 ^b	33.21 ^b	0.22	0.002
酸性洗涤纤维 ADF/%	20.67	19.94	20.64	20.52	21.04	0.16	0.320
酸性洗涤木质素 ADL/%	1.66	1.51	1.50	1.41	1.26	0.08	0.715
粗脂肪 EE/%	4.00	4.27	4.09	4.23	4.13	0.14	0.821
粗灰分 Ash/%	4.40 ^{ab}	4.37 ^{ab}	4.21 ^b	4.46 ^a	4.24 ^b	0.05	0.060
钙 Ca/%	0.47	0.47	0.49	0.47	0.48	0.01	0.996
磷 P/%	0.38	0.38	0.36	0.37	0.37	0.01	0.919
相对饲喂价值 RFV	192.83 ^c	199.13 ^{abc}	197.63 ^{bc}	205.81 ^a	203.19 ^{ab}	1.37	0.010

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),相同或无字母表示差异不显著($P > 0.05$)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P < 0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P > 0.05$). The same as below.

2.2 不同青贮添加剂对全株玉米青贮碳水化合物组分含量的影响

由表 3 可以看出,不同青贮添加剂对全株玉

米青贮的 CHO、CB1、CB2、CB3 和 CC 含量无显著影响($P > 0.05$)。有机酸盐组和纤维素酶组的 Non-NDF 含量显著高于对照组($P < 0.05$),较对照

组分别增加了 3.75% 和 3.66%。乳酸菌组、有机酸组、有机酸盐组和纤维素酶组的 OA 和 CA 含量均

显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其中乳酸菌组的 OA 和 CA 含量最高。

表 3 不同青贮添加剂对全株玉米青贮碳水化合物组分含量的影响(干物质基础)

Table 3 Effects of different silage additives on carbohydrate component contents of whole corn silage (DM basis)

项目 Items	组别 Groups					SEM	P 值 P-value
	对照 Control	乳酸菌 <i>Lactobacillus</i>	有机酸 Organic acid	有机酸盐 Organic acid salt	纤维素酶 Cellulase		
总碳水化合物 CHO	83.44	83.62	82.86	83.08	83.27	0.18	0.705
非中性洗涤纤维性碳水化合物 Non-NDF	48.30 ^b	49.34 ^{ab}	48.58 ^{ab}	50.11 ^a	50.07 ^a	0.35	0.052
有机酸 OA	5.60 ^c	8.21 ^a	6.99 ^b	7.66 ^{ab}	7.64 ^{ab}	0.25	0.002
可溶性糖 CA	5.37 ^b	6.74 ^a	6.40 ^a	6.46 ^a	6.65 ^a	0.25	0.068
淀粉 CB ₁	30.84	28.59	29.49	28.17	28.37	0.39	0.174
中性洗涤可溶纤维 CB ₂	6.49	5.29	5.70	7.81	7.40	0.72	0.531
可利用中性洗涤纤维 CB ₃	31.16	30.67	30.70	29.60	30.18	0.27	0.450
不可利用纤维 CC	3.98	3.62	3.58	3.38	3.03	0.20	0.715

2.3 不同青贮添加剂对全株玉米青贮预测能值的影响

由表 4 可以看出, 乳酸菌组和有机酸组的 TDN 含量显著高于对照组、有机酸盐组和纤维素

酶组 ($P < 0.05$), 乳酸菌组和有机酸组的 DE、ME、NE_m 和 NE_g 均显著高于对照组、有机酸盐组和纤维素酶组 ($P < 0.05$)。不同青贮添加剂对全株玉米青贮的 NE_L 无显著影响 ($P > 0.05$)。

表 4 不同青贮添加剂对全株玉米青贮预测能值的影响(干物质基础)

Table 4 Effects of different silage additives on prediction energy of whole corn silage (DM basis)

项目 Items	组别 Groups					SEM	P 值 P-value
	对照 Control	乳酸菌 <i>Lactobacillus</i>	有机酸 Organic acid	有机酸盐 Organic acid salt	纤维素酶 Cellulase		
总可消化养分 TDN/%	76.07 ^c	77.48 ^b	78.34 ^a	76.48 ^c	76.19 ^c	0.23	<0.001
消化能 DE/(MJ/kg)	14.03 ^c	14.29 ^b	14.45 ^a	14.11 ^c	14.06 ^c	0.04	<0.001
代谢能 ME/(MJ/kg)	11.51 ^c	11.72 ^b	11.85 ^a	11.56 ^c	11.52 ^c	0.03	<0.001
维持净能 NE _m /(MJ/kg)	7.62 ^c	7.81 ^b	7.92 ^a	7.68 ^c	7.64 ^c	0.02	<0.001
增重净能 NE _g /(MJ/kg)	4.99 ^c	5.15 ^b	5.24 ^a	5.04 ^c	5.01 ^c	0.02	<0.001
泌乳净能 NE _L /(MJ/kg)	7.03	7.09	7.04	7.05	7.01	0.01	0.320

2.4 不同青贮添加剂对全株玉米青贮发酵参数的影响

由表 5 可以看出, 乳酸菌组、有机酸盐组和纤维素酶组的 pH 显著低于对照组 ($P < 0.05$), 乳酸菌组、有机酸组、有机酸盐组和纤维素酶组的乳酸含量显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其中, 乳酸菌组的 pH 最低, 乳酸含量最高。有机酸组的丙酸含量显

著高于其他各组 ($P < 0.05$)。有机酸组和有机酸盐组的氨态氮/总氮 (NH₃-N/TN) 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。有机酸组、有机酸盐组和纤维素酶组的发酵系数显著高于对照组 ($P < 0.05$)。乳酸菌组、有机酸盐组和纤维素酶组的费氏评分高于对照组 ($P < 0.05$)。不同青贮添加剂对全株玉米青贮的乙酸和丁酸含量无显著影响 ($P > 0.05$)。

表 5 不同青贮添加剂对全株玉米青贮发酵参数的影响(干物质基础)

Table 5 Effects of different silage additives on fermentation parameters of whole corn silage(DM basis)

项目 Items	组别 Groups					SEM	P 值 P-value
	对照 Control	乳酸菌 <i>Lactobacillus</i>	有机酸 Organic acid	有机酸盐 Organic acid salt	纤维素酶 Cellulase		
pH	3.51 ^a	3.39 ^b	3.45 ^{ab}	3.40 ^b	3.40 ^b	0.01	0.031
乳酸 Lactic acid/(mg/g)	44.44 ^c	68.78 ^a	55.86 ^b	63.91 ^{ab}	62.53 ^{ab}	2.39	0.002
乙酸 Acetate/(mg/g)	11.49	13.08	12.67	12.58	13.80	0.58	0.822
丙酸 Propionate/(mg/g)	0.07 ^b	0.12 ^b	1.33 ^a	0.14 ^b	0.10 ^b	0.12	<0.001
丁酸 Butyrate/(mg/g)	0.01	0.02	0.08	0.01	0.01	0.01	0.167
氨态氮/总氮 NH ₃ -N/TN/%	3.64 ^a	3.15 ^{abc}	2.79 ^{bc}	2.63 ^c	3.21 ^{ab}	0.10	0.006
发酵系数 Fermentation coefficient	45.85 ^b	48.52 ^{ab}	50.98 ^a	52.11 ^a	52.14 ^a	0.76	0.112
费氏评分 Fleig score	126.19 ^b	132.37 ^a	129.06 ^{ab}	132.79 ^a	132.79 ^a	0.91	0.060

2.5 不同青贮添加剂对全株玉米青贮瘤胃降解率的影响

由表 6 可以看出,有机酸盐组的 DMD_{24h} 和 NDFD_{24h} 显著高于对照组 ($P<0.05$),纤维素酶组

的 DMD_{24h}、NDFD_{24h} 和 DMD_{48h} 显著高于对照组 ($P<0.05$)。不同青贮添加剂对全株玉米青贮的 NDFD_{48h} 无显著影响 ($P>0.05$)。

表 6 不同青贮添加剂对全株玉米青贮瘤胃降解率的影响(干物质基础)

Table 6 Effects of different silage additives on rumen degradability of whole corn silage(DM basis)

项目 Items	组别 Groups					SEM	P 值 P-value
	对照 Control	乳酸菌 <i>Lactobacillus</i>	有机酸 Organic acid	有机酸盐 Organic acid salt	纤维素酶 Cellulase		
24 h 干物质降解率 DMD _{24h}	65.46 ^c	66.14 ^{abc}	65.80 ^{bc}	66.79 ^{ab}	67.21 ^a	0.21	0.040
48 h 干物质降解率 DMD _{48h}	72.08 ^b	72.24 ^b	72.11 ^b	72.22 ^b	74.72 ^a	0.34	0.033
24 h 中性洗涤纤维降解率 NDFD _{24h}	29.86 ^b	30.65 ^{ab}	30.58 ^{ab}	30.97 ^a	31.28 ^a	0.16	0.056
48 h 中性洗涤纤维降解率 NDFD _{48h}	46.68	46.93	46.79	47.09	47.31	0.12	0.528

2.6 不同青贮添加剂处理的全株玉米青贮的营养价值综合评价

将各组有显著差异的 15 个指标进行隶属函数分析,其中 CP、RFV、Non-NDF、CB₁、TDN、乳酸、发酵系数、费氏评分、DMD_{24h}、DMD_{48h} 和 NDF_{24h} 为正相关指标,NDF、Ash、pH 和 NH₃-N/TN 为负相关指标。依据 15 个指标的平均隶属函数值进行排序,数值越大则综合营养价值越高,综合营养价值从高到低为:纤维素酶组>有机酸盐组>有机酸组>乳酸菌组>对照组。

3 讨论

3.1 不同青贮添加剂对全株玉米青贮营养成分的影响

本试验中,乳酸菌组的常规营养成分与对照组无显著差异,与孙贵宾等^[26]和李金俐等^[27]的研究结果一致,而尉小强等^[28]添加植物乳杆菌显著降低了全株玉米青贮的 NDF 和 ADF 含量,不同研究采用的乳酸菌种类和浓度不同可能是结果存在分歧的原因。本试验中,有机酸组的 CP 和 WSC 含量较对照组显著增加,与和张晴晴等^[29]分别在天然牧草和燕麦青贮中添加甲酸的结果一致,原因可能是有机酸直接酸化青贮饲料,抑制了腐败

菌和梭菌等有害微生物的活动,同时降低了青贮发酵早期植物自身呼吸作用对 CP 和 WSC 的消耗,有效保留了营养物质^[29]。有机酸盐组和纤维素酶组的 NDF 和 ADF 含量较对照组显著降低,而 Non-NDF 含量显著增加,由于有机酸盐和纤维素酶对植物细胞壁有降解作用,尤其是对半纤维素和纤维素的降解,进而提高了非结构性碳水化合物的含量^[30]。RFV 是评定粗饲料营养价值的重要指标,其主要基于粗饲料中 NDF 和 ADF 含量进行估算,NDF 和 ADF 含量越低,粗饲料品质越

好^[31]。因此,有机酸盐组和纤维素酶组的高 RFV 与其低 NDF 含量直接相关。TDN 是饲料有效能值的一种表现形式,比较全面的综合了饲料的 NDF、CP、Ash、ADL 和 EE 等指标^[32]。但李悦铭等^[33]发现,添加不同浓度的甲丙混合酸对全株小麦青贮的能量指标无显著影响。不同研究间采用的青贮原料种类以及测定能值的方法不同可能是结果存在分歧的原因。由于 DE、ME、NE_m 和 NE_g 均是在 TDN 的基础上计算而来,因此各能值指标的变化规律与 TDN 相似。

表 7 不同青贮添加剂处理的全株玉米青贮的营养价值综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of nutritional value of whole corn silage treated with different silage additives

项目 Items	组别 Groups				
	对照 Control	乳酸菌 <i>Lactobacillus</i>	有机酸 Organic acid	有机酸盐 Organic acid salt	纤维素酶 Cellulase
粗蛋白质 CP	0.21	0.26	0.77	0.26	0.37
中性洗涤纤维 NDF	0.29	0.50	0.50	0.83	0.78
粗灰分 Ash	0.27	0.32	0.64	0.16	0.59
相对饲喂价值 RFV	0.30	0.56	0.50	0.83	0.72
非中性洗涤纤维性碳水化合物 Non-NDF	0.29	0.42	0.36	0.70	0.69
淀粉 CB ₁	0.80	0.37	0.54	0.29	0.33
总可消化养分 TDN	0.19	0.58	0.81	0.30	0.22
pH	0.13	0.64	0.38	0.60	0.60
乳酸 Lactic acid	0.01	0.66	0.31	0.53	0.49
发酵系数 FC	0.13	0.34	0.53	0.62	0.61
氨态氮/总氮 NH ₃ -N/TN	0.10	0.40	0.62	0.72	0.36
费氏评分 FS	0.22	0.66	0.42	0.68	0.68
24 h 干物质降解率 DMD _{24 h}	0.10	0.30	0.20	0.49	0.61
48 h 干物质降解率 DMD _{48 h}	0.19	0.22	0.19	0.21	0.66
24 h 中性洗涤纤维降解率 NDF _{24 h}	0.07	0.42	0.39	0.56	0.69
综合营养价值 Comprehensive nutritional value	0.22	0.44	0.48	0.52	0.56
排名 Ranking	5	4	3	2	1

3.2 不同青贮添加剂对全株玉米青贮发酵品质的影响

青贮 pH、乳酸含量和 NH₃-N/TN 是衡量青贮饲料发酵品质的重要指标。优质青贮饲料的 pH 应在 4.2 以下^[34],NH₃-N/TN 低于 10%^[35],乳酸含量在 4%~6%^[36]。本试验中,对照组青贮的各项指标均达到优质青贮饲料的要求,表明全株玉米青贮是一种较易获得高品质青贮饲料的原料,主要与其高 WSC 含量和附生乳酸菌数量较大有关。尽管如此,本试验添加不同青贮添加剂均可进一步提升青贮饲料的发酵品质,不同程度地提

升了乳酸含量,降低了 pH 和 NH₃-N/TN,其中,乳酸菌组提升乳酸含量的能力强于有机酸组,原因主要与二者调控青贮发酵的模式不同有关,乳酸菌作为青贮发酵促进剂,增加了乳酸菌的数量,进而促进 WSC 被乳酸菌利用而产生大量的乳酸,而有机酸作为青贮发酵抑制剂,直接酸化青贮饲料来抑制有害微生物的活动,保留饲料营养价值和改善发酵品质的同时,会对乳酸菌的活动造成影响^[33]。李悦铭等^[33]在小麦青贮中添加不同浓度的甲丙混合酸,随着甲丙混合酸浓度的增加,乳酸含量显著线性降低。而薛春胜等^[37]在苜蓿青贮中

添加甲酸显著提升了青贮乳酸含量。因此,应用有机酸作为青贮添加剂,使用前应根据饲草的属性筛选出适宜的添加量。 $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 是反映青贮过程中蛋白质降解程度的指标,其含量直接影响饲料的适口性和营养价值, $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 越高则表明蛋白氮降解越多,青贮发酵品质越差。本试验中,有机酸盐组和有机酸组的 $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 较对照组显著降低,与 Da Silva 等^[38] 的结果一致,表明有机酸及其盐对青贮饲料蛋白质具有较强的保护能力。费氏评分作为评估青贮饲料质量优劣的标准之一^[23],主要由青贮 DM 和 pH 计算得出,由于各组的 DM 含量无显著差异,因此,本研究中费氏评分的变化规律与 pH 一致。

3.3 不同青贮添加剂对全株玉米青贮瘤胃降解率的影响

青贮饲料的 DM 和 NDF 瘤胃降解率是影响反刍动物干物质采食量(DMI)的重要因素^[39]。目前,有关青贮添加剂对青贮饲料瘤胃 DMD 和 NDFD 影响的结果存在分歧,本试验中,有机酸盐组和纤维素酶组的 $\text{DMD}_{24\text{h}}$ 和 $\text{NDFD}_{24\text{h}}$ 较对照组显著增加,且纤维素酶组最高,而乳酸菌组和有机酸组的 DMD 和 NDFD 与对照组无显著差异。但刘帅等^[39] 添加乳酸菌提高了全株玉米青贮 DM 和 NDF 的有效降解率。苗树君等^[40] 和万江春等^[41] 研究表明,添加乳酸菌分别提高了玉米秸秆和棉花秸秆的 NDFD。李悦铭等^[33] 研究表明,添加甲丙混合酸增加了小麦青贮的 DMD 和 NDFD。通过分析发现,青贮饲料 DMD 和 NDFD 与其 NDF 含量密切相关,以上研究中,青贮添加剂提升 DMD 和 NDFD 的同时,NDF 含量均显著降低。相比之下,纤维素酶对 DMD 和 NDFD 的影响研究结果较为一致。万江春等^[41] 研究发现,添加纤维素酶分别增加了玉米秸秆和草原天然牧草青贮的 NDFD,与本试验结果一致,主要原因是纤维素酶可水解植物细胞壁为单糖,改变其纤维素结构并降低纤维含量^[7]。因此,添加纤维素酶是提升青贮饲料营养物质消化率的有效手段。

4 结论

乳酸菌、有机酸、有机酸盐和纤维素酶对全株玉米青贮的营养成分含量、发酵品质和瘤胃降解率均有不同程度的提升作用,各组全株玉米青贮的综合营养价值从高到低依次为:纤维素酶组>有

机酸盐组>有机酸组>乳酸菌组>对照组。

参考文献:

- [1] 赵亚星,张兴夫,敖长金,等.全株玉米青贮在反刍动物生产中的应用与发展前景[J].饲料工业,2019,40(2):12-15.
- [2] 姜富贵,成海建,刘栋,等.不同收获期对全株玉米青贮营养价值、发酵品质和瘤胃降解率的影响[J].动物营养学报,2019,31(6):2807-2815.
- [3] HENDERSON N. Silage additives [J]. Animal Feed Science and Technology, 1993, 45(1):35-56.
- [4] 张秀芬.饲草饲料加工与贮藏[M].北京:中国农业出版社,1992.
- [5] REICH L J, KUNG Jr L. Effects of combining *Lactobacillus buchneri* 40788 with various lactic acid bacteria on the fermentation and aerobic stability of corn silage [J]. Animal Feed Science and Technology, 2010, 159(3/4):105-109.
- [6] 吕文龙,刁其玉,闫贵龙.布氏乳杆菌对青玉米秸青贮发酵品质和有氧稳定性的影响[J].草业学报,2011,20(3):143-148.
- [7] JACOBS J L, MCALLAN A B. Enzymes as silage additives. 1. Silage quality, digestion, digestibility and performance in growing cattle [J]. Grass and Forage Science, 1991, 46(1):63-73.
- [8] 陈勇,刘月,吴鑫,等.甲酸在青贮饲料中的应用研究[J].现代畜牧兽医,2018(1):15-19.
- [9] KELES G, DEMIRCI U. The effect of homofermentative and heterofermentative lactic acid bacteria on conservation characteristics of baled triticale-Hungarian vetch silage and lamb performance [J]. Animal Feed Science and Technology, 2011, 164(1/2):21-28.
- [10] AOAC. Official methods of analysis of AOAC [S]. 18th ed. Arlington, VA, USA: Association of Analytical Chemists, 2005.
- [11] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 6436—2018 饲料中钙的测定[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 6437—2018 饲料中总磷的测定 分光光度法[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [13] VAN SOEST P J, ROBERTSON J B, LEWIS B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10):3583-3597.
- [14] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al.

- Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, 28(3):350-356.
- [15] 郭冬生.反刍动物日粮组合效应对瘤胃发酵和可利用粗蛋白的影响研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业大学,2004.
- [16] ROHWEDER D A, BARNES R F, JORGENSEN N. Proposed hay grading standards based on laboratory analyses for evaluating quality[J]. *Journal of Animal Science*, 1978, 47(3):747-759.
- [17] NRC. Nutrient requirements of beef cattle[S]. 8th ed. Washington, D.C.: National Academy Press, 2016.
- [18] WEISS W P, CONRAD H R, PIERRE N R S. A theoretically-based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1992, 39(1/2):95-110.
- [19] UNDERSANDER D J, MERTENS D R, THIEX N J. Forage analyses procedures[M]. Omaha, NE: National Forage Testing Association (USA), 1993.
- [20] 姜芳, 王佳堃, 刘建新. 内标法同时测定挥发性脂肪酸和乳酸的方法探究[J]. *中国畜牧杂志*, 2009, 45(21):73-76.
- [21] BARKER S B, SUMMERSON W H. The colorimetric determination of lactic acid in biological material[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1941, 138(2):535-554.
- [22] BRODERICK G A, KANG J H. Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and *in vitro* media[J]. *Journal of Dairy Science*, 1980, 63(1):64-75.
- [23] 王国良. 不同类型全株玉米青贮营养价值评定[D]. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [24] 冯仰廉. 反刍动物营养学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [25] 孙红, 于应文, 马向丽, 等. 黔西北岩溶区九种灌木综合营养价值评价[J]. *草业学报*, 2014, 23(5):99-106.
- [26] 孙贵宾, 常娟, 尹清强, 等. 纤维素酶和复合益生菌对全株玉米青贮品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(11):4738-4745.
- [27] 李金俐, 董起飞, 杨国义, 等. 不同添加剂对全株玉米青贮的影响[J]. *中国草食动物科学*, 2018, 38(4):33-36.
- [28] 尉小强, 罗仕伟, 哈志刚, 等. 添加乳酸菌和有机酸制剂对全株玉米青贮品质、微生物数量和有氧稳定性的影响[J]. *草学*, 2018(增刊):63-68.
- [29] 张晴晴, 梁庆伟, 杨秀芳, 等. 添加有机酸对燕麦青贮发酵和营养品质的影响[J]. *饲料研究*, 2019, 42(4):84-86.
- [30] HRISTOV A N. Effect of a commercial enzyme preparation on alfalfa silage fermentation and protein degradability[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1993, 42(3/4):273-282.
- [31] MOORE J E, KUNKLE W E. Evaluation of equations for estimating voluntary intake of forages and forage-based diets[J]. *Journal of Animal Science*, 1999(Suppl.1):204.
- [32] 王菲. 肉牛饲料有效能值预测模型的建立与评价[D]. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [33] 李悦铭, 陈勇, 孟庆翔, 等. 不同浓度甲酸丙酸混合添加剂对全株小麦青贮品质的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(8):77-84.
- [34] SHAO T, ZHANG Z X, SHIMOJO M, et al. Comparison of fermentation characteristics of italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) and guineagrass (*Panicum maximum* Jacq.) during the early stage of ensiling[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2005, 18(12):1727-1734.
- [35] MCDONALD P, EDWARDS R A, GREENHALGH J E D, et al. *Animal nutrition*[M]. 6th ed. Gosport: Pearson Education, 2002.
- [36] WANG Y X, MCALLISTER T A, XU Z J, et al. Effects of proanthocyanidins, dehulling and removal of pericarp on digestion of barley grain by ruminal microorganisms[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(6):929-938.
- [37] 薛春胜, 刘瑞生, 徐建峰, 等. 不同添加剂对陇东紫花苜蓿青贮品质的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(2):456-462.
- [38] DA SILVA T C, SMITH M L, BARNARD A M, et al. The effect of a chemical additive on the fermentation and aerobic stability of high-moisture corn[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(12):8904-8912.
- [39] 刘帅, 郑健, 姜鑫, 等. 鼠李糖乳杆菌对全株玉米青贮品质及瘤胃降解率的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(7):111-116.
- [40] 苗树君, 马慧. 不同生物制剂处理去穗玉米秸青贮对奶牛营养价值的影响[J]. *中国牛业科学*, 2008, 34(5):27-30.
- [41] 万江春, 于辉, 张延辉, 等. 纤维素酶及乳酸菌对棉花秸秆青贮饲料发酵品质及体外消化率的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(4):106-111.

Effects of Different Silage Additives on Nutritional Value, Fermentation Quality and Rumen Degradability of Whole Corn Silage

WANG Yafang^{1,2,3} JIANG Fugui^{2,3} CHENG Haijian^{2,3} MAO Cui^{2,3}

AN Wenjuan^{2,3} DONG Hui^{2,3} SONG Enliang^{1,2,3*}

(1. College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. Institute of Animal Science and Veterinary Medicine, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 3. Shandong Key Lab of Animal Disease Control and Breeding, Jinan 250100, China)

Abstract: This experiment was conducted to evaluate effects of different silage additives on nutritional value, fermentation quality and rumen degradability of whole corn silage. When whole corn ensiling, different silage additives were added, there were 5 groups in the experiment, which were control group (without any silage additives), *Lactobacillus* group (supplemented 5×10^5 CFU/g *Lactobacillus* preparation), organic acid group (formic acid, acetic acid and propionic acid were mixed in a volume ratio of 7:1:2, the additive amount was 4 mL/kg), organic acid salt group (sodium benzoate and potassium sorbate were mixed in a weight ratio of 1:1, the additive amount was 2 g/kg) and cellulose group (supplemented 50 mg/kg cellulose), each group contained 4 replicates. After 45 days of fermentation, the nutrient content, fermentation quality and rumen degradability of whole corn silage were measured. The results showed as follows: 1) the crude protein content of organic acid group was significantly higher than that of other groups ($P < 0.05$), the neutral detergent fiber content of organic acid salt group and cellulase group was significantly lower than that of the control group ($P < 0.05$), the relative feeding value and non-neutral detergent fiber content of organic acid salt group and cellulase group were significantly higher than those of the control group ($P < 0.05$), and the contents of organic acids and soluble sugars of *Lactobacillus* group, organic acid group, organic acid salt group and cellulase group were significantly higher than those of the control group ($P < 0.05$). 2) The total digestible nutrient contents, digestive energy, metabolic energy, maintenance net energy and weight gain net energy of *Lactobacillus* group and organic acid group were significantly higher than those of control group, organic acid salt group and cellulase group ($P < 0.05$). 3) The pH of *Lactobacillus* group, organic acid salt group and cellulase group was significantly lower than that of the control group ($P < 0.05$), the lactic acid content of *Lactobacillus* group, organic acid group, organic acid salt group and cellulase group was significantly higher than that of the control group ($P < 0.05$), the ammonia nitrogen/total nitrogen of organic acid group and organic acid salt group was significantly lower than that of the control group ($P < 0.05$), and the fermentation coefficient, Fleig score, 24 h dry matter degradability and 24 h neutral detergent fiber degradability of organic acid group and cellulase group were significantly higher than those of the control group ($P < 0.05$). In conclusion, *Lactobacillus*, organic acid, organic acid salt and cellulase had varying degrees of promote effects on nutrient content, fermentation quality and rumen degradability of whole corn silage. Comprehensive evaluation of the above indicators, the comprehensive nutritional value of whole corn silage in each group from high to low is: cellulase group > organic acid salt group > organic acid group > *Lactobacillus* group > control group. [Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(6):2765-2774]

Key words: whole corn silage; additives; nutritional value; fermentation quality; rumen degradability