

DOI:10.11686/cyxb2025299

http://cyxb.magtech.com.cn

洪海洋, 沙志行, 姜明明, 等. 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养成分、瘤胃发酵特性及体外降解率的影响. 草业学报, 2026, 35(6): 181-189.

HONG Hai-yang, SHA Zhi-hang, JIANG Ming-ming, *et al.* Synergistic effects of added maize steep liquor and lactic acid bacteria during fermentation on the nutritional value, rumen fermentation characteristics, and *in vitro* degradability of maize stover. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 181-189.

玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养成分、瘤胃发酵特性及体外降解率的影响

洪海洋^{1**}, 沙志行^{1**}, 姜明明², 苏晓龙¹, 任文义¹, 孔伟豪¹, 张力莉¹, 徐晓锋¹, 马玉林^{1*}

(1. 宁夏大学动物科技学院, 宁夏 银川 750021; 2. 黑龙江农业经济职业学院动物科技系, 黑龙江 牡丹江 157041)

摘要: 本试验旨在探究玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养成分、发酵品质、瘤胃发酵参数及体外降解率的影响。试验以玉米秸秆作为研究对象, 设置对照组(CON, 不做任何处理)、乳酸菌组(CL, 添加乳酸菌 1.0×10^{11} CFU·g⁻¹)、玉米浆组(CC, 添加5%玉米浆)和玉米浆与乳酸菌协同发酵组(CCL, 添加5%玉米浆和乳酸菌), 水分含量调整为65%, 每组设立4个重复, 厌氧发酵56 d后对其营养成分、体外瘤胃发酵特性、体外消化率进行分析。结果表明: 1) 各处理组粗蛋白含量显著高于CON组 ($P < 0.001$); 各处理组乙酸含量显著高于CON组 ($P < 0.001$), CL和CCL组的pH显著低于CON组 ($P < 0.05$)。2) 各处理组体外发酵产生的氨态氮浓度显著高于CON组 ($P < 0.05$), CCL组体外发酵产生的乙酸和总挥发性脂肪酸浓度显著高于CON组 ($P < 0.05$)。3) 各处理组的体外干物质降解率显著高于CON组 ($P < 0.001$), CC和CCL组的体外粗蛋白降解率显著高于CON组 ($P < 0.05$)。综上所述, 玉米浆与乳酸菌协同发酵有助于提高玉米秸秆的营养价值, 改善玉米秸秆的发酵品质, 提高营养物质的降解率。

关键词: 玉米秸秆; 玉米浆; 营养成分; 体外降解率

Synergistic effects of added maize steep liquor and lactic acid bacteria during fermentation on the nutritional value, rumen fermentation characteristics, and *in vitro* degradability of maize stover

HONG Hai-yang^{1**}, SHA Zhi-hang^{1**}, JIANG Ming-ming², SU Xiao-long¹, REN Wen-yi¹, KONG Wei-hao¹, ZHANG Li-li¹, XU Xiao-feng¹, MA Yu-lin^{1*}

1. College of Animal Science and Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Animal Science and Technology Department of Heilongjiang Vocational College of Agricultural Economy, Mudanjiang 157041, China

Abstract: This experiment aimed to investigate the synergistic effects of added maize steep liquor and lactic acid bacteria during fermentation on the nutritional composition, rumen fermentation characteristics, and *in vitro* degradability of maize stover. Maize stover was prepared with four different pretreatments based on dry matter: no pretreatment for the control treatment (CON); 1.0×10^{11} CFU·g⁻¹ lactic acid bacteria pretreatment for the CL treatment (CL); 5% maize steep liquor pretreatment for the CC group (CC); and a 5% CC+ lactic acid bacteria

收稿日期: 2025-07-17; 改回日期: 2025-09-15

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(SS2022C004)资助。

作者简介: 洪海洋(1999-), 男, 宁夏银川人, 在读硕士。E-mail: poi571277@163.com; 沙志行(2001-), 男, 山东聊城人, 在读硕士。E-mail: 17762074668@163.com。 **共同第一作者 These authors contributed equally to this work.

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: mayulin@nxu.edu.cn

treatment (CCL). Distilled water was added to the maize stover to adjust the moisture content to 65%, and each group had four replicates. The nutritional composition, *in vitro* rumen fermentation characteristics, and *in vitro* digestibility of the maize stover were analyzed after 56 days of anaerobic fermentation. Results showed that: 1) The crude protein and acetic acid contents in the CL, CC and CCL groups were significantly higher than in the CON group ($P < 0.001$), and the pH values in the CL and CCL groups were significantly lower than that in the CON group ($P < 0.05$). 2) Compared with the CON group, the *in vitro* fermentation ammonia nitrogen concentration in the CL, CC and CCL groups was significantly increased ($P < 0.05$), the acetic acid and the total volatile fatty acid concentration in the CCL group was significantly increased ($P < 0.05$). 3) Compared with the CON group, the *in vitro* dry matter degradability in the CL, CC and CCL groups were significantly higher than that in the CON group ($P < 0.001$), and the *in vitro* crude protein degradability in the CC and CCL groups were significantly higher than in the CON group ($P < 0.05$). In conclusion, the addition of synergistic fermentation of maize steep liquor and lactic acid bacteria enhanced the nutritional value of maize stover, improved its fermentation quality, and increased the degradability of nutrients.

Key words: corn stover; corn steep liquor; nutritional composition; *in vitro* degradability

农作物秸秆是畜牧业发展过程中不可或缺的生物资源。据统计,我国农作物秸秆年产量约为7亿t,其中玉米(*Zea mays*)秸秆产量最多,约为3.01亿t^[1],是潜在的反刍动物粗饲料资源。然而,当前大部分农作物秸秆主要采用还田或焚烧的方式处理,这不仅造成了生物质资源的浪费,同时也对环境造成了污染,增加了环保压力^[2]。目前,我国秸秆饲料利用率较低,约18%^[3],而国外秸秆饲料化利用率高达80%^[4]。因此,急需提高秸秆的饲料化利用率,缓解“人畜争粮”的现象。然而秸秆饲料化利用率低的主要问题是粗纤维含量高、粗蛋白含量低,导致适口性差、营养物质降解率低^[5]。因此,有必要通过恰当的预处理方式来提升秸秆的营养成分。

目前玉米秸秆的预处理方式主要包括物理法、化学法以及微生物法^[6]。其中经过物理法处理的玉米秸秆化学成分基本不发生变化,只是在一定程度上改变了适口性^[7]。化学法是一种通过化学试剂处理玉米秸秆的方式,但往往成本较高,生产推广应用比较困难,还有可能导致秸秆饲料pH过高或过低,进而影响瘤胃内环境^[8]。而微生物预处理方式综合了物理处理法和化学处理法的优点,不仅可以提高饲料营养价值,还能提高饲料适口性,是目前应用最广泛的预处理技术^[9]。

乳酸菌是一种常用的微生物发酵饲料添加剂,在改善饲料发酵品质、营养成分、提高饲料降解率等方面发挥了重要作用^[10]。部分乳酸菌还具备产纤维素酶的能力,它们在发酵的同时分泌纤维素酶,作用于秸秆等纤维素丰富的材料,使之变得更为蓬松,易于动物消化^[11]。然而,直接利用乳酸菌发酵玉米秸秆时,由于玉米秸秆可溶性碳水化合物含量低,无法满足乳酸菌生长繁殖,因此玉米秸秆的发酵效果不太理想^[9]。为了解决这一问题,可以采用外源性添加糖蜜或者玉米浆等提高乳酸菌的生长和繁殖,进而改善发酵品质^[11]。玉米浆是玉米深加工过程中的副产物,含有丰富的蛋白质、糖类、维生素和矿物质等营养成分^[12],可以为乳酸菌提供丰富的营养源,从而提高饲料的营养品质。然而,目前关于玉米浆与乳酸菌协同发酵在秸秆预处理方面的应用尚缺乏基础数据。因此,本试验旨在探究玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养品质的改善作用,并通过这一创新方法可能为提高秸秆的饲料价值开辟新的途径,实现畜牧养殖中“节本增效”的目的。

1 材料与方法

1.1 试验材料

玉米秸秆从黑龙江省大庆市周边郊区收集,取样时间为2024年4月。乳酸菌由和美科盛生物技术有限公司提供,其活菌数 $> 1 \times 10^{11}$ CFU·g⁻¹。主要由植物乳杆菌(1×10^{11} CFU·g⁻¹)及布氏乳杆菌(5×10^{10} CFU·g⁻¹)组

成,每 1000 kg 发酵饲料添加乳酸菌至 1×10^{11} CFU·g⁻¹。玉米浆由黑龙江骏华生物科技有限公司提供,营养成分如表 1 所示。

1.2 试验设计

试验以玉米秸秆为研究对象,采用随机方式分成 4 个组别:对照组(CON,未做处理的玉米秸秆组),乳酸菌组(CL),玉米浆组(CC),玉米浆与乳酸菌协同发酵组(CCL:同时添加乳酸菌和玉米浆组),乳酸菌: 1×10^{11} CFU·g⁻¹,玉米浆:玉米秸秆干物质重量的 5%,每组设立 4 个重复,将玉米秸秆切碎至 1~2 cm 的小段后,调整水分含量至 65%,将样品装入 35 cm×25 cm 的呼吸发酵袋,每袋玉米秸秆重量均为 1 kg。随后将呼吸发酵袋抽至真空状态,在室温[(25±5)℃]下密封保存,发酵 56 d 后,对其营养成分、发酵品质、体外瘤胃发酵特性、体外消化率进行分析。

1.3 样品常规养分检测

取发酵后不同处理的样品,参照《饲料分析及饲料质量检测技术》^[13]采用 65℃烘干 48 h,粉碎至 0.425 mm 进行营养物质分析。参考 GB/T 6435-2014^[14]测定干物质(DM)含量;参考 GB/T 6432-2018^[15]测定粗蛋白(CP)含量,利用凯氏定氮仪(KDN-04A 型,北京海鑫瑞科技有限公司)测定;参考 GB/T 6438-2007^[15-16]测定粗灰分(Ash)含量。参照 Van Soest 等^[17]的方法测定中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量。

1.4 样品发酵品质检测

称取 20 g 样品,加入 180 mL 蒸馏水,低温浸提 4 h 后用双层纱布过滤,然后用雷磁 pH S-3C 型 pH 计(上海仪天科学仪器有限公司)测定样品 pH。采用日本岛津 GC-2030 气相色谱仪测定乙酸浓度^[18]。

1.5 体外产气试验

1.5.1 试验动物饲养管理 试验动物的处理和护理均遵循宁夏大学科技伦理委员会的规定进行(批准文号: NXU-2024-145)。

选取 3 头健康,体重、胎次相近的中国荷斯坦奶牛为瘤胃液供体动物。晨饲前,使用瘤胃液采集管伸入试验动物的口腔中,沿着舌头将采集管送至咽喉部位并经过食道,当采集管的另一端能明显闻到瘤胃液的气味且试验动物的呼吸顺畅说明采集管已抵达瘤胃腹囊,采集瘤胃液。基础日粮组成及营养成分见表 2。

表 2 基础饲料组成及营养水平(干物质基础)

Table 2 Composition and nutrient levels of the basal diet (DM basis)

原料 Ingredient	含量 Content (%)	营养水平 Nutrient level	含量 Content
玉米青贮 Corn silage	45.06	净能 Net energy (NE, MJ·kg ⁻¹) ²⁾	5.94
苜蓿青贮 Alfalfa silage	4.12	粗蛋白质 Crude protein (CP, %)	11.69
啤酒糟 Brewer's grains	1.53	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %)	30.74
压片玉米 Pressed corn	22.50	钙 Ca (%)	0.67
苜蓿 Alfalfa	10.32	磷 P (%)	0.28
预混料 Premix ¹⁾	14.30		
甜菜颗粒 Beet granules	2.00		
小苏打 NaHCO ₃	0.17		
合计 Total	100.00		

¹⁾预混料为每 kg 饲料提供 The premix provided the following per kg of diets: VA 950 IU, VD 180 IU, VE 25 IU, Cu 10 mg, Fe 80 mg, Mn 20 mg, Zn 75 mg, I 1.0 mg, Se 0.6 mg。 ²⁾净能为计算值^[19],其余为实测值。NE was a calculated value^[19], while the others were measured values.

表 1 玉米浆营养组成表(干物质基础)

Table 1 Nutrient composition of corn steep liquor (DM basis)

项目 Item	养分含量 Nutrient content (%)
粗蛋白 Crude protein (CP)	43.0
粗灰分 Ash	17.0
水溶性碳水化合物 Water-soluble carbohydrates (WSC)	18.0
亚硫酸盐 Sulfites	0.2

1.5.2 瘤胃发酵培养液制备 收集足够的新鲜瘤胃液,将其使用4层纱布过滤后,装入已经预热且充有二氧化氮(NO_2)的保温瓶内带回实验室,用于配制后续混合液。人工瘤胃液按照Menke等^[20]方法配制,放入39.0℃水浴锅中持续通入二氧化碳(CO_2),使溶液褪至完全无色后备用。瘤胃液与人工瘤胃液按1:2的配比混匀后,配成瘤胃发酵培养液。

1.5.3 瘤胃体外发酵试验 准确称量9 g上述发酵后的玉米秸秆样品装入发酵袋(1000 mL,中国杭州安思科技有限公司)中^[21]。使用注射器抽取300 mL瘤胃发酵培养液注入发酵袋,空白袋仅加入瘤胃发酵培养液,排气后于39.0℃恒温水浴振荡锅中连续培养72 h,摇床频率为85 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ^[22]。

1.5.4 瘤胃发酵参数测定及方法 培养液发酵结束后,置于4℃环境终止发酵液微生物活动再进行测定。采用S220-K型酸度计(梅特勒托利多公司)测定pH。氨态氮($\text{NH}_3\text{-N}$)浓度测定采用苯酚一次氯酸钠比色法^[23]。微生物蛋白(MCP)浓度采用考马斯亮蓝法^[24-25]测定,乙酸、丙酸、丁酸和总挥发性脂肪酸(TVFA)浓度采用日本岛津GC-2030气相色谱仪测定^[26]。

1.5.5 体外消化率的测定 将发酵72 h的样品取出后离心,将剩余底物装入孔径为48 μm 、尺寸为8 cm×16 cm尼龙过滤袋,取出样品后,用冷水缓慢冲洗直至冲洗液澄清。尼龙袋洗净后,置于65℃干燥箱中烘干48 h,待其在室温下回潮24 h,再将每个尼龙袋单独装入自封袋中留存,以备后续检测使用。体外干物质降解率(IVDMD)、体外粗蛋白质降解率(IVCPD)、体外中性洗涤纤维降解率(IVNDFD)、体外酸性洗涤纤维降解率(IVNDFD)的计算公式如下:

$$\text{某营养物质降解率}(\%) = (\text{样品该营养物质含量} - \text{未消化该营养物质含量}) / \text{样品该营养物质含量} \times 100$$

1.6 数据统计与分析

试验数据使用Excel 2016初步整理后,采用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),差异显著的指标采用Duncan's法进行多重比较检验。试验结果用平均值±标准差表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养成分的影响

如表3所示,与对照组相比,各处理组的粗蛋白质含量显著提高($P < 0.001$)。与对照组相比,CCL组Ash含量显著下降($P < 0.05$),DM和NDF含量在各组之间无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆发酵品质的影响

如表4所示,CCL组乙酸浓度显著高于其余各组($P < 0.001$),pH显著低于对照组($P < 0.05$)。

表3 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养成分含量的影响

Table 3 Effects of synergistic fermentation of corn steep liquor and lactic acid bacteria on nutrient content of corn stover

项目 Item	组别 Group				P值 P-value
	CON	CL	CC	CCL	
干物质 Dry matter (DM, %)	94.45±0.20	94.60±0.21	94.66±0.19	94.13±0.21	0.298
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %DM)	85.63±0.01	85.18±0.02	85.68±0.02	83.59±0.03	0.824
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %DM)	60.87±0.01ab	59.69±0.01ab	64.34±0.33a	55.30±0.17b	0.047
粗蛋白质 Crude protein (CP, %DM)	3.18±0.13c	4.34±0.18b	5.60±0.10a	5.99±0.25a	<0.001
粗灰分 Ash (%DM)	8.14±0.18a	7.47±0.26ab	7.37±0.39ab	6.65±0.16b	0.014

注:同行数据无字母或相同字母表示差异不显著($P > 0.05$),不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。CON:未做处理的玉米秸秆组 No pretreatment for control group。CL:乳酸菌组 1.0×10^{11} CFU·g⁻¹ lactic acid bacteria group。CC:玉米浆组 5% corn steep liquor group。CCL:玉米浆与乳酸菌协同发酵组 5% corn steep liquor + 1.0×10^{11} CFU·g⁻¹ lactic acid bacteria。下同。

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

表 4 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆发酵品质的影响

Table 4 Effects of synergistic fermentation of corn steep liquor and lactic acid bacteria on fermentation quality of corn stover

项目 Item	组别 Group				P 值 P-value
	CON	CL	CC	CCL	
乙酸 Acetic acid (AA, mmol·L ⁻¹)	4.37±0.09d	14.60±0.56b	6.17±0.85c	16.46±0.28a	<0.001
pH	4.41±0.15a	4.02±0.06bc	4.30±0.11ab	3.86±0.71c	0.011

2.3 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆体外瘤胃发酵参数的影响

如表 5 所示,各处理组发酵液中 NH₃-N 的浓度均显著高于对照组 ($P < 0.05$),其中 CCL 组最高;CCL 组乙酸浓度显著高于其余各组 ($P < 0.05$);CL 组丙酸、丁酸、总挥发性脂肪酸 (TVFA) 浓度显著低于对照组 ($P < 0.05$);CCL 组的 TVFA 浓度显著高于其余各组 ($P < 0.05$)。

表 5 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆体外发酵特性的影响

Table 5 Effects of synergistic fermentation of corn steep liquor and lactic acid bacteria on *in vitro* fermentation characteristics of corn stover

项目 Item	组别 Group				P 值 P-value
	CON	CL	CC	CCL	
pH	5.90±0.07	5.98±0.02	6.01±0.93	6.05±0.62	0.478
氨态氮 Ammonia nitrogen (NH ₃ -N, mg·dL ⁻¹)	11.07±0.13b	15.51±0.72a	14.79±0.49a	15.75±0.95a	0.003
微生物蛋白 Microbial protein (MCP, mg·mL ⁻¹)	0.23±0.03	0.22±0.02	0.34±0.04	0.26±0.02	0.081
乙酸 Acetic acid (AA, mmol·L ⁻¹)	45.52±0.83b	45.78±1.53b	45.49±0.19b	50.32±1.02a	0.025
丙酸 Propionic acid (PA, mmol·L ⁻¹)	24.06±1.27a	18.89±0.25b	23.10±0.86a	24.43±0.72a	0.003
丁酸 Butyric acid (BA, mmol·L ⁻¹)	7.79±0.29a	6.70±0.15b	7.91±0.05a	8.04±0.43a	0.027
总挥发性脂肪酸 Total volatile fatty acids (TVFA, mmol·L ⁻¹)	77.36±2.09b	71.37±1.76c	76.51±0.23b	82.79±0.30a	0.003

2.4 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆瘤胃体外营养物质降解率的影响

如表 6 所示,相比于对照组,各处理组显著提高了体外干物质的降解率 ($P < 0.001$)。CC 组和 CCL 组的体外粗蛋白质降解率显著高于对照组 ($P < 0.001$)。然而,体外 ADF 和体外 NDF 降解率在各组间无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 6 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆瘤胃营养物质降解率的影响

Table 6 Effects of synergistic fermentation of corn steep liquor and lactic acid bacteria on nutrient digestibility of corn stover (%)

项目 Item	组别 Group				P 值 P-value
	CON	CL	CC	CCL	
IVDMD	32.21±0.83c	38.36±0.63ab	40.08±0.08a	37.27±0.70b	<0.001
IVNDFD	17.55±2.10	20.76±4.60	19.92±10.91	20.98±11.57	0.786
IVADFD	18.73±2.78	21.92±4.31	20.98±1.29	12.12±4.70	0.131
IVCPD	8.48±1.79b	8.61±2.38b	38.30±5.07a	33.35±5.00a	<0.001

IVDMD: 体外干物质降解率 *In vitro* dry matter digestibility. IVNDFD: 体外中性洗涤纤维降解率 *In vitro* neutral detergent fiber digestibility.

IVADFD: 体外酸性洗涤纤维降解率 *In vitro* acid detergent fiber digestibility. IVCPD: 体外粗蛋白质降解率 *In vitro* crude protein digestibility.

3 讨论

3.1 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养成分的影响

CP 含量是评价秸秆饲料营养品质的重要指标,对于秸秆饲料而言,CP 含量的高低与营养品质呈正相关,即

CP含量越高,营养品质越高^[22]。在本试验中,CC和CCL组中CP含量均显著高于CON组,其中CCL组CP含量高于CC组,虽然差异不显著,但表明乳酸菌和玉米浆协同发酵具有进一步增加玉米秸秆CP含量的潜力,其原因可能是在发酵过程中微生物能够利用玉米浆中的氮源、碳源和纤维降解产生的糖类合成营养丰富的微生物菌体蛋白,从而提升了玉米秸秆的CP含量^[27-28]。添加乳酸菌的秸秆饲料经过发酵后ADF和NDF有降低效果^[29],然而,本研究中各处理的NDF与ADF含量相较于对照组无显著差异,其原因可能是黄贮原料中木质素和纤维素含量较高,乳酸菌难以对其进行有效降解利用,导致NDF与ADF含量差异不明显。陈远航等^[30]的研究中也发现,添加乳酸菌未能使秸秆饲料中NDF和ADF含量显著下降。此外,在本试验中,CCL组的粗灰分含量相较于对照组显著下降,这可能是因为在发酵过程中植物乳杆菌生长活跃,使酸度上升,pH下降^[31]。在酸性环境下,部分矿物质可能转换为挥发性或可分解的形态。

3.2 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆发酵品质的影响

乙酸是饲料发酵过程中产生的主要挥发性脂肪酸之一,其含量的增加通常表明发酵过程活跃,微生物活动强。乙酸含量可以直接或间接反映发酵饲料的品质,乙酸含量升高表明发酵饲料pH下降,可以抑制有害微生物增殖;同时,发酵饲料中乙酸含量升高,可能为反刍动物提供更多的能量^[32]。Okoye等^[33]研究发现,布氏乳杆菌处理玉米秸秆后,乙酸含量显著升高。在本试验中,CCL组的乙酸含量相较于其余各组显著升高。这表明玉米浆与乳酸菌协同发酵可以提高玉米秸秆的乙酸含量^[34]。这可能是因为玉米浆为乳酸菌发酵提供底物,促进乳酸菌发酵及乙酸的生成,使乙酸在发酵过程中大量积累^[35]。pH是衡量饲料发酵过程和质量的指标^[36],pH越低,酸度越大,发酵饲料越容易储存^[37]。谢文斌等^[38]研究发现,用布氏乳杆菌发酵玉米秸秆,可降低发酵液pH。在本试验中,CCL组pH显著低于其余各组,这与CCL组乙酸含量最高相一致,表明玉米浆与乳酸菌协同发酵玉米秸秆可以进一步提高玉米黄贮的品质。黄志鹏^[39]研究发现,布氏乳杆菌处理全株玉米后,乳酸含量升高,pH降低。王玉荣^[40]使用布氏乳杆菌和植物乳杆菌联合发酵水稻(*Oryza sativa*)秸秆后,发酵液pH降低,乳酸和乙酸含量升高。其原因可能是随着乳酸菌的生长发育,产生大量乳酸和乙酸,从而降低饲料pH^[41]。

3.3 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆体外瘤胃发酵参数的影响

pH是瘤胃主要的发酵参数之一,适宜的瘤胃pH为5.6~7.5^[42]。瘤胃适宜的pH可以使瘤胃内环境保持稳定,利于瘤胃内微生物的代谢活动,促进粗纤维的降解与消化,改善瘤胃发酵功能。本试验pH为5.78~6.18,表明玉米浆与乳酸菌协同发酵对瘤胃内环境的稳态有积极的作用。NH₃-N是瘤胃微生物分解氮的最终产物,可为菌体蛋白的合成提供底物^[43]。瘤胃微生物分解蛋白质与合成微生物蛋白的速度决定了NH₃-N的含量^[44]。本试验结果表明,各处理组NH₃-N浓度(10.81~17.61 mg·dL⁻¹)均在正常范围内(6~30 mg·dL⁻¹),且满足菌体蛋白合成的需要量(0.35~29.00 mg·dL⁻¹)^[45]。各处理组瘤胃发酵液中的NH₃-N浓度显著高于CON组,其中CCL组NH₃-N浓度最高,这说明,使用玉米浆与乳酸菌协同发酵玉米秸秆,存在提高瘤胃中NH₃-N浓度的潜力。其原因可能是乳酸菌和玉米浆的添加会进一步促进氮的释放,增强蛋白质的降解和NH₃-N的生成。

挥发性脂肪酸以乙酸、丙酸、丁酸为主,为反刍动物机体提供70%~80%的能量^[46]。其含量及组成成分反映瘤胃微生物的活力及碳水化合物的可消化程度^[47]。在本试验中,与CON组相比,CCL组发酵液中的乙酸浓度和总挥发性脂肪酸浓度显著升高,丙酸和丁酸也有升高的趋势,这可能因为玉米浆富含可发酵的碳水化合物和蛋白质,这些成分为瘤胃微生物提供了丰富的营养,增强了总挥发性脂肪酸的生成。

3.4 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆瘤胃体外营养物质降解率的影响

秸秆饲料在瘤胃内的降解率可以反映秸秆饲料的品质及营养价值^[47],饲料的降解率越高,该饲料营养价值越高。本试验中,CL、CC和CCL组的玉米秸秆体外干物质降解率均显著高于CON组,表明添加乳酸菌和玉米浆协同发酵均可改善玉米秸秆的体外消化率。Cao等^[48]研究发现,添加乳酸菌组的DM含量损失较少,因此体外干物质降解率较高。粗蛋白的体外降解率反映了饲料中粗蛋白在瘤胃内的降解情况^[16]。本试验中,CC组和CCL组的粗蛋白体外降解率相较于CON组显著升高,这可能是因为玉米浆富含可发酵的碳水化合物和蛋白质,为微生物提供了丰富的营养。这些营养物质能够促进微生物的快速生长和代谢活动,从而提高蛋白质的降解效率。

4 结论

在本试验条件下,玉米浆与乳酸菌协同发酵能显著提高玉米秸秆粗蛋白含量和发酵品质,同时提高体外发酵产生的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度和挥发性脂肪酸浓度以及体外干物质降解率和体外粗蛋白降解率,其中玉米浆和乳酸菌协同发酵组效果最佳。

参考文献 References:

- [1] Ling J J, Li Y J, Chen G, *et al.* Research progress on resource utilization of rural straw. *Guangdong Chemical Industry*, 2024, 51(16): 98–101.
凌建菊, 李雅婕, 陈果, 等. 农村秸秆资源化利用研究进展. *广东化工*, 2024, 51(16): 98–101.
- [2] Guan Y, Chen G, Cheng Z, *et al.* Air pollutant emissions from straw open burning: A case study in Tianjin. *Atmospheric Environment*, 2017, 171: 155–164.
- [3] Zhu Q J, Liu W W, Yang P L, *et al.* Straw conversion technology and its application in animal husbandry in China. *China Feed*, 2024(13): 1–7.
朱旗军, 刘魏魏, 杨培龙, 等. 我国秸秆转化技术及其在畜牧业上的应用. *中国饲料*, 2024(13): 1–7.
- [4] Li H, Guo H B, Wei Y D. Analysis on the resource utilization of agricultural waste such as crop straw and edible fungus residue. *Modern Agricultural Research*, 2022, 28(5): 17–19.
李贺, 郭海滨, 魏雅冬. 农作物秸秆及食用菌菌渣等农业废弃物资源化利用现状分析. *现代农业研究*, 2022, 28(5): 17–19.
- [5] Cao X H, Zuo S S, Lin Y L, *et al.* Expansion improved the physical and chemical properties and *in vitro* rumen digestibility of buckwheat straw. *Animals*, 2024, 14(1): 2076–2615.
- [6] Meng F B, Wang D H, Zhang M. Effects of different pretreatment methods on biochar properties from pyrolysis of corn stover. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 98: 294–302.
- [7] Zhang B, Li H, Chen L, *et al.* Recent advances in the bioconversion of waste straw biomass with steam explosion technique: a comprehensive review. *Processes*, 2022, 10(10): 1959.
- [8] Liu X L, Yang Y C, Jiang S, *et al.* Analysis on the current situation of comprehensive utilization of corn straw in China and countermeasures and suggestions. *The Food Industry*, 2024, 45(7): 207–211.
刘晓龙, 杨跃臣, 姜铄, 等. 我国玉米秸秆的综合利用现状分析及对策建议. *食品工业*, 2024, 45(7): 207–211.
- [9] Tan J, Li Y, Tan X, *et al.* Advances in pretreatment of straw biomass for sugar production. *Frontiers in Chemistry*, 2021, 9: 696030.
- [10] Chen L, Wang Y, Li X, *et al.* Interaction between plants and epiphytic lactic acid bacteria that affect plant silage fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1164904.
- [11] Liu L. Screening of cellulase-engineered strains and co-fermentation of corn stover with lactic acid bacteria. Tarim: Tarim University, 2025.
刘兰. 纤维素酶工程菌的筛选及与乳酸菌联合发酵玉米秸秆的研究. 塔里木: 塔里木大学, 2025.
- [12] He Z W, Li P L, Sun K J, *et al.* Evaluation of nutritional value of fermented corn steep liquor and its effects on growth performance and serum biochemical indices of finishing pigs. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(12): 7668–7679.
何志伟, 李培丽, 孙开济, 等. 发酵玉米浆的营养价值评定及其对育肥猪生长性能和血清生化指标的影响. *动物营养学报*, 2023, 35(12): 7668–7679.
- [13] Zhang L Y. Feed analysis and feed quality testing technology (4th edition). Beijing: China Agricultural University Press, 2016.
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术(第4版). 北京: 中国农业大学出版社, 2016.
- [14] General Administration of Quality Supervision, Spectation and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Determination of moisture in feedstuffs: GB/T 6435-2014. Beijing: Standards Press of China, 2014.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中水分的测定: GB/T 6435-2014. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [15] State Administration for Market Regulation, China National Standardization Administration. Determination of crude protein in feeds-Kjeldahl method: GB/T 6432-2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中粗蛋白的测定凯氏定氮法: GB/T 6432-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.

- [16] Yuan G H. Effect of dietary P, SMS levels on production performance, gastrointestinal morphology and rumen environment of Hu sheep. Tarim: Tarim University, 2023.
袁国宏. 平菇菌糠添加比例对湖羊生产性能、胃肠道组织形态和瘤胃内环境的影响. 塔里木: 塔里木大学, 2023.
- [17] 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. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583–3597.
- [18] Jin G, Zhang Y Q, Wang D C, *et al.* Study on the combined effects of corn stalk silage, corn stalk and mulberry leaf silage *in vitro* fermentation. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2024, 66(5): 86–91.
靳光, 张元庆, 王栋才, 等. 玉米秸秆青贮、玉米秸秆、桑叶青贮三种饲料体外发酵组合效应研究. *黑龙江畜牧兽医*, 2024, 66(5): 86–91.
- [19] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Nutrient requirements of dairy cattle: Eighth revised edition. Washington (DC): National Academies Press (US), 2021.
- [20] Menke K H, Steingass H. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 1988, 28: 7–55.
- [21] Sha Z H, Hong H Y, Jiang M M, *et al.* Effects of urea and corn steep liquor composite pretreatment on the nutrient composition and rumen fermentation characteristics of corn straw. *Chinese Journal of Animal Science*, 2025, 61(2): 281–286.
沙志行, 洪海洋, 姜明明, 等. 尿素和玉米浆复合预处理对玉米秸秆营养成分和瘤胃发酵特性的影响. *中国畜牧杂志*, 2025, 61(2): 281–286.
- [22] Angeletti F G S, Mariotti M, Tozzi B, *et al.* Herbage and silage quality improved more by mixing barley and faba bean than by n fertilization or stage of harvest. *Agronomy*, 2022, 12(8): 1790.
- [23] Feng Z C, Gao M. Improvement of the method for measuring ammonia nitrogen content in rumen fluid by colorimetry. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, 6: 37.
冯宗慈, 高民. 通过比色测定瘤胃液氨氮含量方法的改进. *畜牧与饲料科学*, 2010, 6: 37.
- [24] Makkar H P, Sharma O P, Dawra R K, *et al.* Simple determination of microbial protein in rumen liquor. *Journal of Dairy Science*, 1982, 65(11): 2170–2173.
- [25] Chaney A L, Marbach E P. Modified reagents for determination of urea and ammonia. *Clinical Chemistry*, 1962, 2: 130–132.
- [26] Guo Y F. Effects of functional oligosaccharides from different sources on rumen fermentation and microbial diversity *in vitro*. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
郭芸芳. 体外法研究不同来源功能性寡糖对奶牛瘤胃发酵及菌群多样性的影响. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [27] Wang Y, Wu J, Lyu M, *et al.* Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 612285.
- [28] Yang Y, Yuan C Q, Dou J, *et al.* Recombinant expression of *glpK* and *glpD* genes improves the accumulation of shikimic acid in *E. coli* grown on glycerol. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2014, 30(12): 3263–3272.
- [29] Zhang J L, Gao X H, Liang X J. Effects of additives such as cellulase and lactic acid bacteria on nutritional value and fermentation quality of quinoa straw. *China Feed*, 2024, 34(21): 155–161.
张俊丽, 高旭红, 梁小军. 纤维素酶、乳酸菌等添加剂对藜麦秸秆营养价值与发酵品质的影响. *中国饲料*, 2024, 34(21): 155–161.
- [30] Chen Y H, Cheng M J, Li H Q, *et al.* Effects of different additives on nutritional quality and palatability of rice straw yellow stored feed. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(11): 3646–3653.
陈远航, 程明军, 李洪泉, 等. 不同添加剂对水稻秸秆黄贮饲料营养品质及适口性的影响. *草地学报*, 2024, 32(11): 3646–3653.
- [31] Arriola K G, Vyas D, Kim D, *et al.* Effect of *Lactobacillus hilgardii*, *Lactobacillus buchneri*, or their combination on the fermentation and nutritive value of sorghum silage and corn silage. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(9): 9664–9675.
- [32] Gomes A L M, Jacovaci F A, Bolson D C, *et al.* Effects of light wilting and heterolactic inoculant on the formation of volatile organic compounds, fermentative losses and aerobic stability of oat silage. *Animal Feed Science and Technology*, 2019, 43(247): 194–198.
- [33] Okoye C O, Wu Y, Wang Y, *et al.* Fermentation profile, aerobic stability, and microbial community dynamics of corn straw ensiled with *Lactobacillus buchneri* PC-C1 and *Lactobacillus plantarum* PC1-1. *Microbiology Research*, 2023, 29(270): 127329.
- [34] Liu W, Li Q Y, Yao M L, *et al.* Effect of various ratios of complex additives on silage quality of fresh corn stover. *Modern*

- Animal Husbandry Science & Technology, 2024, 51(8): 80–83.
- 刘文, 李青莹, 姚美玲, 等. 不同比例复合添加剂对鲜食玉米秸青贮品质的影响. 现代畜牧科技, 2024, 51(8): 80–83.
- [35] Cheng J L, Lin J S. Effects of combining *Lactobacillus buchneri* with various lactic acid bacteria on the fermentation, dry matter recovery and nutritive value of corn silage. China Feed, 2018, 28(20): 17–21.
- 成娟丽, 林金水. 布氏乳杆菌与不同乳酸菌联用对玉米青贮发酵、干物质回收率和营养价值的影响. 中国饲料, 2018, 28(20): 17–21.
- [36] Bujňák L, Maska Ová I, Vajda V. Determination of buffering capacity of selected fermented feedstuffs and the effect of dietary acid-base status on ruminal fluid pH. Acta Veterinaria Brno, 2011, 80(3): 269–273.
- [37] Müller C E, Pauly T M, Udén P. Storage of small bale silage and haylage-influence of storage period on fermentation variables and microbial composition. Grass and Forage Science, 2007, 62(3): 274–283.
- [38] Xie W B, Chen J J, Tian B, et al. Effect of *Lactobacillus brucei* on quality and *in vitro* digestibility of corn straw silage. Feed Research, 2022, 45(21): 122–126.
- 谢文斌, 陈娟娟, 田斌, 等. 布氏乳杆菌对玉米秸秆青贮品质和体外消化率的影响. 饲料研究, 2022, 45(21): 122–126.
- [39] Huang Z P. Effect of feeding whole-plant corn silage inoculated with *Lactobacillus plantarum* or *Lactobacillus buchneri* on growth performance and rumen microflora of lambs. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- 黄志鹏. 饲喂添加植物乳杆菌和布氏乳杆菌的全株玉米青贮对羔羊生长性能及瘤胃菌群的影响. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [40] Wang Y R. Effects of different microbial ecological preparations on microstructure and *in-situ* ruminal degradability of rice straw. Tarim: Tarim University, 2017.
- 王玉荣. 不同微生态制剂对稻秸分子结构及瘤胃降解特性的影响. 塔里木: 塔里木大学, 2017.
- [41] Ma Y L, Chen X, Xiao J X, et al. The effects of ammonification and micro storage on the nutritional components and *in vitro* digestibility of rice straw. Chinese Journal of Animal Science, 2020, 56(11): 157–161.
- 马玉林, 陈旭, 肖鉴鑫, 等. 氨化和微贮对水稻秸秆营养成分和体外消化率的影响. 中国畜牧杂志, 2020, 56(11): 157–161.
- [42] Dijkstra J, Gastelen V S, Dieho K, et al. Review: Rumen sensors: Data and interpretation for key rumen metabolic processes. Animal, 2020, 14(S1): s176–s186.
- [43] Wang Z, Li X, Zhang L, et al. Effect of oregano oil and cobalt lactate on sheep *in vitro* digestibility, fermentation characteristics and rumen microbial community. Animals, 2022, 12(1): 14.
- [44] Li H B, Yu Y. Effects of *Lactobacillus plantarum* addition on silage quality and *in vitro* rumen fermentation characteristics of rice straw. Feed Research, 2024, 47(13): 21–26.
- 李浩博, 喻研. 植物乳杆菌添加量对水稻秸秆青贮品质和体外瘤胃发酵特性的影响. 饲料研究, 2024, 47(13): 21–26.
- [45] Owens F N, Bergen W G. Nitrogen metabolism of ruminant animals: historical perspective, current understanding and future implications. Journal of Animal Science, 1983, 57(suppl_2): 498–518.
- [46] Santschi D E, Berthiaume R, Matte J J, et al. Fate of supplementary b-vitamins in the gastrointestinal tract of dairy cows. Journal of Dairy Science, 2005, 88(6): 2043–2054.
- [47] Zou S Y, Chen D, Tang Q Y, et al. Effects of silage time on quality and *in vitro* rumen fermentation characteristics of first season ratoon rice whole silage. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(7): 3282–3290.
- 邹诗雨, 陈东, 唐启源, 等. 青贮时间对再生稻头季全株青贮品质和体外瘤胃发酵特性的影响. 动物营养学报, 2020, 32(7): 3282–3290.
- [48] Cao Y, Cai Y, Takahashi T, et al. Effect of lactic acid bacteria inoculant and beet pulp addition on fermentation characteristics and *in vitro* ruminal digestion of vegetable residue silage. Journal of Dairy Science, 2011, 94(8): 3902–3912.