

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.031

引用格式:王先柳,王奕敏,刁小高,等.添加剂对柱花草青贮发酵品质、营养成分和体外瘤胃发酵的影响[J].草地学报,2026,34(3):1087—1093

WANG Xian-liu, WANG Yi-min, DIAO Xiao-gao, et al. Effects of Additives on Fermentation Quality, Nutrient Composition and *in Vitro* Rumen Fermentation of Stylo Silage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1087—1093

添加剂对柱花草青贮发酵品质、营养成分和体外瘤胃发酵的影响

王先柳¹, 王奕敏^{1,2}, 刁小高^{1,2}, 张微^{1,2}, 和立文^{1,2*}

(1. 中国农业大学动物科学技术学院/畜禽营养与饲养全国重点实验室, 北京 100193;

2. 中国农业大学三亚研究院, 海南 三亚 572024)

摘要:本试验旨在探究添加剂对柱花草(*Stylosanthes guianensis*)青贮发酵品质、营养成分和体外瘤胃发酵的影响。以新鲜柱花草制作实验室袋装青贮,分别添加1.00%的茶多酚(Tea polyphenol, TPP)、椰壳活性炭(Coconut shell activated carbon, CSAC)、木质素磺酸钙(Calcium lignosulfonate, CL),并设置无添加对照组(CK),室温发酵42 d后取样分析青贮发酵品质、营养成分及体外瘤胃发酵特性。结果显示,与CK组相比,添加TPP和CSAC显著降低($P < 0.05$)青贮pH值和体外瘤胃产气量,显著增加($P < 0.05$)可溶性碳水化合物、真蛋白、乳酸含量及Flieg's score综合评分,且TPP的添加显著降低($P < 0.05$)氨态氮含量及比例,但CSAC导致柱花草青贮酵母菌和霉菌数量偏高;添加CL显著增加($P < 0.01$)青贮乳酸菌数量、体外瘤胃发酵24 h净产气量和30 h干物质消化率,显著降低($P = 0.01$)青贮中性洗涤纤维含量。综上结果表明,三种添加剂对柱花草青贮质量均产生一定的影响,其中TPP的综合作用效果最好,添加1.00%的TPP可以减少青贮过程中柱花草蛋白质降解,增加乳酸含量,改善青贮发酵品质,提高柱花草青贮营养价值。

关键词:柱花草;发酵品质;营养成分;体外瘤胃发酵

中图分类号:S816.53

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1087-07

Effects of Additives on Fermentation Quality, Nutrient Composition and *in Vitro* Rumen Fermentation of Stylo Silage

WANG Xian-liu¹, WANG Yi-min^{1,2}, DIAO Xiao-gao^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, HE Li-wen^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition and Feeding, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Sanya Institute of China Agricultural University, Sanya, Hainan Province 572024, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effects of different additives on the fermentation quality, nutrient composition and *in vitro* fermentation of stylo silage. Fresh stylo was ensiled with addition of 1.00% tea polyphenols (TPP), coconut shell activated carbon (CSAC) or calcium lignosulfonate (CL), along with additive-free control group (CK). After 42 days fermentation at room temperature, fermentation quality, nutritional components and *in vitro* rumen fermentation were determined. The results showed that compared with the CK group, the addition of TPP and CSAC significantly reduced ($P < 0.05$) the silage pH value and *in vitro* rumen gas production, significantly increased ($P < 0.05$) soluble carbohydrate, true protein, lactic acid content and Flieg's score comprehensive score, and the addition of TPP significantly reduced ($P < 0.05$) ammonia nitrogen content and proportion, but CSAC led to a higher number of yeasts and molds in *Stylosanthes* silage. The addition of CL increased ($P < 0.01$) lactic acid bacteria population, *in vitro* rumen fermentation gas production and 30 h dry matter digestibility of the silage, and decreased ($P = 0.01$) its neutral deter-

收稿日期:2025-05-12;修回日期:2025-06-24

基金项目:三亚市2025年院地科技合作项目(SYND-TS-2025-08);海南省自然科学基金青年基金项目(323QN260)资助

作者简介:王先柳(2000-),女,汉族,云南保山人,硕士研究生,主要从事动物营养与饲料科学研究, E-mail: wangxianliu@cau.edu.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: helw@cau.edu.cn

gent fiber content. In conclusion, the results indicated that all the three additives had certain effects on the quality of stylo silage, with the comprehensive effects of tea polyphenols was superior. Adding 1.00% tea polyphenols could reduce protein degradation of stylo grass during ensiling fermentation, increase the lactic acid concentration, improve the silage fermentation quality and nutritional value.

Key words: Stylo; Fermentation quality; Nutritional component; *In vitro* rumen fermentation

柱花草(*Stylosanthes guianensis*)原产于南美洲,是一种热带多年生豆科草本植物,具有生长迅速、适应性强、粗蛋白(Crude protein, CP)含量高等特点,有“热带苜蓿”之称,是畜牧生产中的优质牧草^[1-2]。青贮是应对牧草季节性生产过剩与不足,保障饲草常年稳定供给的常用加工方式,但是柱花草可溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrate, WSC)含量低、表面附生乳酸菌数量少而缓冲能值高,自然青贮发酵品质不高,蛋白质降解较严重。大量研究表明,制作青贮时添加适宜的添加剂可以改变青贮发酵进程,改善青贮发酵品质及营养保存效果^[3-6]。

青贮添加剂种类很多,发挥作用的机制各异,添加剂应用要兼顾有效性和经济性,越来越多的副产物资源被用于青贮发酵品质提升。茶多酚(Tea polyphenols, TPP)是茶叶中的主要成分,是一类含有酚羟基结构的多元酚类混合物的总称,主要由黄酮类、花青素类、酚酸类、儿茶素类等物质组成,具有抗氧化、抗病毒、抗菌抑菌、调节糖脂代谢等生物学功能^[7]。TPP的多羟基结构使其具有结合蛋白质的能力,具备抑制青贮过程中蛋白质水解的潜力。Huang等^[8]在柱花草青贮中添加TPP,降低干物质损失和氨态氮(NH₃-N)含量,增加真蛋白(True protein, TP)含量,有助于青贮过程中养分保存,延缓蛋白降解。朱九刚等^[9]研究表明,TPP具有抑菌特性,能降低全株燕麦青贮过程中好氧菌、霉菌数量,并且能提高青贮有氧稳定性。椰壳活性炭(Coconut shell activated carbon, CSAC)是以优质椰子壳为原料,经一系列生产工艺精加工而成的活性炭产品,具有孔隙发达、吸附性能好、强度高、易再生、经济耐用等优点^[10-11]。活性炭因其优越的吸附能力而发挥多种功能,添加适量的活性炭可以改变土壤、堆肥发酵等生境中微生物菌群结构^[12-13]。木质素磺酸钙(Calcium lignosulphonate, CL)是一种多组分高分子聚合物阴离子表面活性剂,是亚硫酸盐法制浆的主要副产物,具有很强的分散性、粘结性、螯合性^[14-15],略有芳香气味,其1.00%水溶液的pH值为4~6。有研究指出,木质素磺酸盐能够增加豆类饲料的瘤胃不可降解蛋白比例,进而提高蛋白质

利用率,这可能与它们结合并沉淀蛋白质的能力有关^[16]。综上所述,这几种物质具有改善青贮发酵品质的潜力,但具体应用效果还不确定。

本试验以新鲜柱花草为原料进行实验室袋装青贮试验,分别添加1.00%的TPP、CSAC和CL,探究不同添加剂对柱花草青贮发酵品质、营养成分和体外瘤胃发酵的影响,以期对柱花草青贮品质提升提供技术参考,同时也促进副产物资源的开发利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用柱花草(CIAT 184)取自中国热带农业科学院品种资源研究所昌江试验基地(原料化学成分见表1),人工刈割后运至实验室,用铡刀切短至2 cm左右备用。试验用添加剂均为淘宝购买商品,TPP纯度≥98.00%;CSAC为纯炭粉末;CL纯度≥98.00%。

表1 柱花草青贮原料特性

Table 1 Characteristics of stylo silage raw materials

项目 Item	含量 Content
干物质(Dry matter, DM)/(%)FM	39.21±0.28
粗蛋白(Crude protein, CP)/(%)DM	9.63±0.26
真蛋白(True protein, TP)/(%)DM	7.26±0.26
非蛋白氮(Non-protein nitrogen, NPN)/(%)DM	2.36±0.11
中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)/(%)DM	59.72±1.04
酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)/(%)DM	37.44±2.66
酸性洗涤木质素(Acid detergent lignin, ADL)/(%)DM	8.82±1.20

注:FM为鲜物质;DM为干物质。下同

Note: FM stands for the fresh matter; DM stands for the dry matter. The same as below

1.2 试验设计

称取一定量切碎的新鲜柱花草,分别按鲜样比例1.00%添加TPP(TPP组)、CSAC(CSAC组)、CL(CL组)、蒸馏水(CK组),充分揉搓混匀后装入聚乙烯青贮袋(18×22 cm),每袋约200.00 g,每处理3个重复,抽真空密封,室温(25~30℃)贮存42 d后开袋取样,分析其青贮发酵品质、化学成分及体外瘤胃发酵特性。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 青贮发酵品质及微生物数目测定 开袋时,称取10.00 g青贮样品,加入90 mL蒸馏水,混合均匀后于4℃浸提24 h后过滤得到浸提液,用pH计(PHS-3C,上海雷磁)测定pH,参照苯酚-次氯酸钠比色法^[17]测定NH₃-N含量,采用高效液相色谱仪(岛津LC-14型,日本;色谱柱:Shim-pack GIST C18-AQ柱(250 mm×4.6 mm×5 μm),Shimadzu,日本;柱温50℃,流动相流速:0.7 ml·min⁻¹)测定有机酸含量^[18]。称取10.00 g样品加入90 mL灭菌生理盐水浸提,置于摇床上低速摇荡30 min,浸提液10×梯度稀释,分别用MRS琼脂培养基(30℃,48~72 h)、结晶紫中性红琼脂培养基(37℃,24 h)和孟加拉红培养基(30℃,48~72 h)培养乳酸菌、大肠杆菌、霉菌与酵母菌,通过平板计数法^[19]测定微生物数目。

1.3.2 青贮营养成分含量测定 青贮鲜样在105℃条件下烘干24 h至恒重,计算干物质(Dry matter, DM)含量;粉碎过1 mm筛,得到的粉样置于自封袋中避光保存,用于营养成分测定和体外瘤胃发酵试验。参照Van Soest等^[20]方法测定纤维组分包括中性洗涤纤维(Neutral detergent fibre, NDF)、酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)和酸性洗涤木质素(Acid detergent lignin, ADL),WSC采用蒽酮-硫酸比色法^[21]测定,CP采用凯氏定氮法测定^[22],TP是通过三氯乙酸溶液浸泡处理饲料后同样采用凯氏定氮法测定饲料残渣氮含量^[23],所用定氮仪型号为FOSS Kjeltac 8400全自动定氮仪,计算非蛋白氮(Non-protein nitrogen, NPN)、真蛋白比值(True protein ratio, TPR)和NH₃-N(以蛋白当量计算)比例(Ammonia nitrogen ratio, ANR)。

1.3.3 综合品质评分 参照以下公式对柱花草青贮综合品质进行评分^[24]。

$$S=220+(2\times\omega_{\text{DM}}-15)-40\times\text{pH}$$

其中,S表示青贮综合品质评分值, ω_{DM} 表示青贮的干物质含量(%),pH表示青贮浸提液的酸碱度。

1.3.4 体外瘤胃发酵特性 参照Menke等^[25]的方法,以青贮42 d的柱花草青贮为发酵底物,利用玻璃培养瓶进行体外瘤胃发酵试验。精确称取0.30 g青贮样品,无损转移至玻璃培养瓶中,晨饲3 h后经口腔采集海南黑山羊瘤胃液,4层纱布过滤后与缓冲液以1:2体积比混合,制成人工瘤胃培养液,39℃

水浴保温并持续通入CO₂;用分液器分别向所有培养瓶中注入30 mL人工瘤胃培养液,并向瓶中通入CO₂制成无氧环境,立即用橡胶内盖和塑料外盖密封培养瓶,迅速放入39℃恒温水浴摇床中培养。

培养24 h、30 h后分别取出培养瓶并用有刻度的玻璃针筒读取产气量,之后立即放在冰水浴中停止发酵,测定pH值,取上清液用于NH₃-N含量的测定,对培养液和底物进行抽滤,得到的滤纸和残渣在105℃烘箱中烘干后称重,用于样品干物质消化率的计算。

发酵 t 时间段累计净产气量(G , mL·g⁻¹ DM)的计算公式: $G_t=(V_1-V_0)/m_0$

其中 G_t 为发酵 t 时间段的累计净产气量, mL·g⁻¹ DM; V_1 为发酵 t 时间段产气量, mL; V_0 为发酵 t 时间段空白培养瓶平均产气量, mL; m_0 为样品初始重量, g。

干物质体外消化率(IVDMD, D)计算公式: $D\%=(m_0-m_1)/m_0\times 100\%$,其中 m_0 为样品初始重量, m_1 为残渣烘干后重量。

预测代谢能(E_M)计算公式: $E_M(\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1})=2.20+0.1357\times G+0.0057\times E_{\text{CP}}+0.000\ 285\ 9\times E_{\text{CP}}^2$,其中 G (mL·0.2 g⁻¹ DM)为24 h体外瘤胃累计净产气量, E_{CP} (g·kg⁻¹ DM)为CP含量。

1.4 数据处理与统计

用Excel软件对数据进行整理,用SPSS 26.0对整理的数据进行单因素方差分析,采用Duncan法进行多重比较,结果以“均值±标准差”表示, $P<0.05$ 时差异显著。

2 结果与分析

2.1 添加剂对柱花草青贮发酵的影响

添加剂(TPP, CSAC, CL)对柱花草青贮发酵品质和微生物数量的影响如表2所示。与CK组相比,添加剂组显著增加了柱花草青贮乳酸菌数量($P<0.01$)。TPP和CSAC显著提高乳酸含量和S值综合评分($P<0.01$),显著降低了pH值($P<0.01$)。此外,除CSAC组外,各组的酵母菌和霉菌数量均低于 1×10^4 cfu·g⁻¹ FM。

2.2 添加剂对柱花草青贮营养成分的影响

不同添加剂(TPP, CSAC, CL)对柱花草青贮

表 2 不同添加剂对柱花草青贮发酵品质和微生物数量的影响

Table 2 Effects of additives on fermentation quality and microbial population of stylo silage

项目 Item	CK	TPP	CSAC	CL	SEM	P-value
pH 值 pH value	4.73±0.08 ^a	4.25±0.05 ^b	4.20±0.16 ^b	4.72±0.07 ^a	0.08	<0.01
乳酸 LA/(%DM)	0.34±0.41 ^b	3.04±1.32 ^a	4.39±0.59 ^a	1.04±0.55 ^b	0.65	<0.01
乙酸 AA/(%DM)	3.16±0.31	1.80±0.34	2.99±0.68	3.23±1.16	0.58	0.12
乳酸菌 LAB(log ₁₀ cfu·g ⁻¹ FM)	6.76±0.02 ^b	7.16±0.07 ^a	7.08±0.16 ^a	7.12±0.06 ^a	0.08	<0.01
酵母菌 Yeast(log ₁₀ cfu·g ⁻¹ FM)	<4	<4	5.87	<4	—	—
霉菌 Mould(log ₁₀ cfu·g ⁻¹ FM)	<4	<4	5.28	<4	—	—
青贮综合品质评分 S	89.36±1.20 ^b	115.63±4.61 ^a	114.35±8.02 ^a	92.68±2.06 ^b	3.90	<0.01

注:CK,对照组;TPP,茶多酚组;CSAC,椰壳活性炭组;CL,木质素磺酸钙组;LA,lactic acid,乳酸;AA,acetic acid,乙酸;LAB,lactic acid bacteria,乳酸菌。“—”表示梯度稀释测定到10⁻⁴,平板计数时未观察到菌落。同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同

Note: CK, control group; TPP, tea polyphenol group; CSAC, coconut shell activated carbon group; CL, calcium lignosulfonate group; LA, lactic acid; AA, acetic acid; LAB, lactic acid bacteria. Same row with different lowercase letters showed significant differences (P<0.05). The same below. “—” indicated that the gradient dilution was measured to 10⁻⁴, and no colonies have been observed during plate counting. The same as below

营养成分的影响如表3所示。与CK组相比,TPP 含量(P<0.05)显著减少;CSAC组WSC,TP,组的DM(P<0.05),WSC,CP,TP含量显著增加 ADL含量显著增加(P<0.01),CL组NDF含量显著降低(P<0.05)。

表 3 不同添加剂对柱花草青贮营养成分的影响

Table 3 Effects of different additives on nutrient components of stylo silage

项目 Item	CK	TPP	CSAC	CL	SEM	P-value
干物质 DM/(%FM)	36.85±1.05 ^b	40.25±1.65 ^a	38.61±1.14 ^{ab}	38.17±0.30 ^{ab}	0.93	0.04
可溶性碳水化合物 WSC/(%DM)	0.66±0.15 ^b	1.72±0.47 ^a	1.53±0.09 ^a	0.61±0.30 ^b	0.24	<0.01
粗蛋白 CP/(%DM)	10.38±0.16 ^b	11.65±0.10 ^a	10.58±0.35 ^b	10.38±0.07 ^b	0.16	<0.01
真蛋白 TP/(%DM)	7.92±0.10 ^b	8.58±0.10 ^a	8.40±0.44 ^a	7.75±0.11 ^b	0.20	<0.01
非蛋白氮 NPN/(%DM)	2.46±0.03 ^b	3.06±0.07 ^a	2.19±0.41 ^b	2.63±0.16 ^b	0.18	<0.01
氨态氮 NH ₃ -N/(%DM)	0.14±0.01 ^a	0.10±0.01 ^b	0.13±0.01 ^a	0.13±0.01 ^a	0.01	<0.01
真蛋白比例 TPR/(%CP)	76.30±0.42 ^{ab}	73.70±0.51 ^b	79.35±3.74 ^a	74.70±1.45 ^b	1.66	0.04
氨态氮比例 ANR/(%CP)	8.24±0.038 ^a	5.46±0.65 ^b	7.47±0.14 ^a	7.60±0.45 ^a	0.36	<0.01
中性洗涤纤维 NDF/(%DM)	58.33±2.84 ^a	52.91±3.23 ^{bc}	56.59±0.99 ^{ab}	50.87±0.31 ^c	1.81	0.01
酸性洗涤纤维 ADF/(%DM)	35.78±2.91 ^{ab}	34.48±4.50 ^b	40.81±0.96 ^a	33.17±1.39 ^b	2.29	0.04
酸性洗涤木质素 ADL/(%DM)	8.01±0.83 ^b	8.58±1.78 ^b	11.04±0.63 ^a	7.68±0.78 ^b	0.90	0.02

2.3 添加剂对柱花草青贮体外瘤胃发酵的影响 组显著降低(P<0.01)G₂₄,显著提高(P<0.01)pH₂₄,NH₃-N₂₄,且TPP组显著提高(P<0.01)青贮预测代谢能;CL显著提高G₂₄,pH₂₄,NH₃-N₂₄及D₃₀(P≤0.01)。

表 4 不同添加剂对柱花草青贮体外瘤胃发酵的影响

Table 4 Effects of different additives on *in vitro* rumen fermentation of stylo silage

项目 Item	CK	TPP	CSAC	CL	SEM	P-value
24 h 累计净产气量 G ₂₄ (mL·g ⁻¹ DM)	77.14±4.10 ^b	64.31±1.40 ^c	65.99±0.47 ^c	81.95±1.14 ^a	1.84	<0.01
24 h pH 值 pH ₂₄ value	6.51±0.01 ^b	6.59±0.02 ^a	6.58±0.04 ^a	6.56±0.01 ^a	0.02	<0.01
24 h 氨态氮 NH ₃ -N ₂₄ /(%DM)	0.41±0.03 ^b	1.00±0.20 ^a	0.86±0.22 ^a	0.87±0.03 ^a	0.12	<0.01
30 h 干物质消化率 D ₃₀ /(%)	36.57±0.11 ^b	35.24±0.62 ^b	36.08±1.84 ^b	40.53±2.35 ^a	1.25	0.01
预测代谢能 E _M /(MJ·kg ⁻¹)	7.96±0.14 ^{bc}	8.49±0.06 ^a	7.80±0.23 ^c	8.09±0.07 ^b	0.12	<0.01

3 讨论与分析

3.1 添加剂对柱花草青贮发酵品质和微生物的影响

pH 值是衡量青贮优劣简单有效的指标^[26],主要取决于乳酸的生成量及其内在缓冲能力^[27]。

豆科植物相较于禾本科植物其含糖量低,缓冲能较高,青贮 pH 值较高,一般在 4.0~5.6^[28]。在本试验中,相较于CK组(pH=4.73),TPP组(pH=4.25)和CSAC组(pH=4.20)降低了pH,这与乳酸含量增加结果一致,可能与TPP的抑菌特性(抑制青贮发酵过程中的好氧性细菌和梭菌等有害菌^[8-9,29])以

及CSAC改善微生物菌群结构(如改善有益微生物群落结构^[13])等特性有关,调节了柱花草青贮的微生物种类及数量,使乳酸菌等有益微生物占据主导地位,产生乳酸等有机酸,降低pH值,提升原料的饲用价值,提高青贮综合品质评分,改善柱花草青贮品质。相关研究表明,在青贮中添加茶渣可有效促进乳酸发酵,降低pH值,抑制有害微生物繁殖和蛋白降解,改善青贮发酵品质^[30-31]。此外,CK组乙酸含量要高于乳酸含量,这可能与异型乳酸菌活跃有关,有研究表明,在青贮中添加异型乳酸菌使青贮乳酸含量降低,乙酸含量显著提高^[32-33]。

3.2 添加剂对柱花草青贮营养成分的影响

植物细胞的呼吸作用和微生物活动会导致青贮过程中的干物质损失,与CK组相比,TPP能够保留更多干物质,这与周俊华等^[34]在罗汉果渣青贮中添加TPP也提高了干物质含量一致,说明TPP可能会减少青贮过程中营养物质的损失。青贮过程中植物蛋白降解是一个普遍存在且不容忽视的现象。部分蛋白质在植物蛋白水解酶的作用下会被降解成非蛋白氮,如游离氨基酸、寡肽和二肽等水解产物,这些水解产物在微生物作用下进一步脱氨产生酰胺、胺和氨等产物^[35],而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量和ANR是评价豆科牧草青贮蛋白质保存效果的关键指标,其值越低表明蛋白质降解损失越少^[27]。在本试验中,各组ANR均在10.00%以下,表明整体发酵尚可,但TPP组ANR(5.46%)显著低于CK组(8.24%)及其他处理组,这与TPP组 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量最低结果一致,这一突出效果主要归因于TPP的两方面特性:(1)其多酚羟基结构具有强大的蛋白质结合能力,能够形成复合物减少植物蛋白酶解^[7-8];(2)其抑菌活性(特别是对蛋白水解菌和脱氨菌)有效抑制了微生物驱动的蛋白分解过程^[8-9]。相比之下,CSAC和CL组在抑制蛋白质降解方面效果不如TPP显著。

CSAC的添加显著提高了青贮的WSC、TP含量和S值,表明其在一定程度上改善了养分保存和发酵品质,其发达的孔隙结构和吸附特性可能有助于吸附青贮过程中某些物质,优化了发酵微环境^[36],进而改善发酵品质。Bai等^[37]在甜高粱(*Sorghum bicolor* 'Dochna')青贮中添加牦牛粪活性炭后与增加了CP、乳酸和WSC含量,改善了青贮品质。然而,CSAC组在抑制蛋白质降解的关键指标($\text{NH}_3\text{-N}$ 含量及ANR)上与CK组相比并未表现出

显著优势,其酵母菌和霉菌数量相对较高,表明对蛋白质水解的抑制效果有限,且可能存在一定的有氧稳定性风险。

青贮过程中乳酸菌等微生物能够将纤维素等成分转化为WSC进行利用。添加TPP处理后,柱花草青贮NDF含量减少,ADF含量无明显差异,可能是促进了微生物对半纤维素的利用,产生WSC,且消耗速率低于释放速率造成了WSC暂时性的积累。本试验中,CSAC组酸性洗涤木质素显著升高可能是由于活性炭与蛋白质结合导致了假木质素的产生,也可能与活性炭在纤维测定过程中未被溶解有关。CL组显著减少了NDF含量可能与CL作为阴离子表面活性剂有效提高了纤维原料的酶解特性,促进了酶促水解有关^[38]。

3.3 添加剂对柱花草青贮体外瘤胃发酵的影响

体外产气法是一种评定反刍动物饲料营养价值非常有效的方法,产气量可以在一定程度上反映饲料在瘤胃中降解利用情况,产气量越多说明饲料可发酵利用性越强,但它同时受到饲料营养成分组成和结构的影响。在本试验中,添加剂处理组净产气量低于对照组,可能是添加剂处理促进了青贮过程中底物发酵产生乳酸、乙酸等有机酸,导致最终的青贮可发酵产气组分含量减少。瘤胃pH是综合评定反刍动物瘤胃内环境及发酵水平的重要指标之一,合理范围为5.5~7.5^[39],过高或过低均会影响日粮养分消化,本试验各组的pH值均在此范围内。添加剂处理组的pH比对照组高可能是添加剂抑制了瘤胃微生物的活动,具体原因有待进一步探究。

干物质消化率能够反映饲料在发酵体系中被瘤胃微生物降解的程度,主要包括蛋白质、纤维等的消化^[40]。本研究结果表明,发酵30h时TPP、CSAC的干物质消化率与对照组无显著差异,而CL组显著高于其余组别。TPP和活性炭与蛋白质之间的相互作用可能影响蛋白质的消化过程。体外实验表明,当TPP含量超过 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,牛奶的蛋白质消化率显著下降^[41]。虽然TPP和蛋白质结合可以影响蛋白质的消化和微生物活性,但这种结合并非总是永久性的,结合的程度也受到多种因素的影响,如pH值、温度和离子强度^[42]。CL组显著提高了干物质消化率可能是CL促进纤维的酶解特性^[38],进而促进瘤胃微生物对柱花草青贮纤维的消化利用,具体原因有待进一步探究。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是瘤胃

微生物合成菌体蛋白的重要原料,其浓度直接反映了瘤胃内含氮物质降解和微生物蛋白合成之间的平衡,维持适宜的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度对于瘤胃的正常发酵至关重要^[43]。24 h时,TPP、CSAC组 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量均提高,可能是能量不足,微生物消化利用氮变少,也可能与TPP、CSAC更多的保留了柱花草青贮蛋白含量有关,使瘤胃微生物有更多可利用的蛋白来源,使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量增加。

4 结论

添加1.00%的茶多酚、椰壳活性炭均可促进柱花草青贮乳酸发酵,提高青贮质量综合评分,同时茶多酚还可以抑制蛋白质降解,降低体外瘤胃产气量,提高青贮预测代谢能值,但添加椰壳活性炭导致柱花草青贮酵母菌和霉菌数量偏高,而添加1.00%木质素磺酸钙对青贮发酵作用不明显。综上,在本试验条件下,添加1.00%茶多酚对柱花草青贮品质改善效果较好。

参考文献

- [1] 邹璇,王成,陈晓阳,等.桉叶油和迷迭香油对柱花草青贮品质的影响[J].中国草地学报,2022,44(2):89-97
ZOU X, WANG C, CHEN X Y, et al. Effects of eucalyptus oil and rosemary oil on silage quality of stylo[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(2): 89-97
- [2] 潘俊歆,李雪枫,龙仕和,等.柱花草耐高温优质乳酸菌的筛选及其青贮发酵品质的改善效果[J].草业科学,2024,41(2):468-479
PAN J X, LI X F, LONG S H, et al. Screening of high quality thermotolerant lactic acid bacteria in stylo and the improving effect on fermentation quality of its silage[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(2): 468-479
- [3] 赵牧其尔,包健,王志军,等.不同乳酸菌添加剂对天然草地牧草青贮饲料青贮品质的影响[J].动物营养学报,2024,36(5):3352-3362
ZHAO M Q E, BAO J, WANG Z J, et al. Effects of different lactic acid bacteria additives on silage quality of natural pasture grass silage[J]. Chinese journal of animal nutrition, 2024, 36(5): 3352-3362
- [4] 李旭业,董扬,尤海洋,等.不同类型添加剂对玉米秸秆青贮品质的影响[J].饲料研究,2024,47(5):99-103
LI X Y, DONG Y, YOU H Y, et al. Effects of different types of additives on quality of corn straw silage[J]. Feed Research, 2024, 47(5): 99-103
- [5] 王焱,郭田心,陈丹丹,等.绿原酸对柱花草青贮品质、蛋白降解和细菌群落及相互关系的影响[J].草地学报,2025,33(1):317-326
WANG Y, GUO T X, CHEN D D, et al. The effects of chlorogenic acid on the quality, protein degradation, bacterial community, and their interrelationships of *stylosanthes silage*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 317-326
- [6] 黄佩珊,张超,陈丹丹,等.辣木叶提取物对柱花草和象草青贮品质的影响[J].草地学报,2023,31(7):2194-2202
HUANG P S, ZHANG C, CHEN D D, et al. Effect of leaf extracts of *moringa oleracea* on the quality of *stylosanthes guianensis* and *pennisetum purpureum* silages[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(7): 2194-2202
- [7] 吴航,许婧.茶多酚的生物学功能及其在动物生产中的应用[J].饲料研究,2024,47(6):165-168
WU H, XU J. Biological functions of tea polyphenols and their application in animal production[J]. Feed Research, 2024, 47(6): 165-168
- [8] HUANG Y C, QIU C C, WANG Y M, et al. Effect of tea polyphenols on the fermentation quality, protein preservation, antioxidant capacity and bacterial community of stylo silage[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 993750
- [9] 朱九刚,张健,邵涛,等.添加剂对全株燕麦青贮饲料发酵品质和有氧稳定性的影响[J].草地学报,2020,28(6):1756-1761
ZHU J G, ZHANG J, SHAO T, et al. The effects of additives on fermentation quality and aerobic stability of whole-plant oat silage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(6): 1756-1761
- [10] 张仕鹏,朱锦华,谢小燕,等.椰壳活性炭基三元复合光催化剂的合成及降解可溶性污染物性能[J].南昌大学学报(工科版),2024,46(3):285-291
ZHANG S P, ZHU J H, XIE X Y, et al. Synthesis of activated coconut shell carbon based ternary composite and investigation on its photocatalytic performance for soluble pollutants[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology Edition), 2024, 46(3): 285-291
- [11] 张力钊,周自坚,陈志莉,等.铁/银双金属改性椰壳活性炭对水中As(Ⅲ)的去除研究[J].环境污染与防治,2024,46(7):947-952
ZHANG L Z, ZHOU Z J, CHEN Z L, et al. Study on the removal of As(Ⅲ) from water by modified coconut shell activated carbon loaded with iron/silver bimetal[J]. Environmental Pollution & Control, 2024, 46(7): 947-952
- [12] SANCHEZ-MONEDERO M A, CAYUELA M L, ROIG A, et al. Role of biochar as an additive in organic waste composting[J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 1155-1164
- [13] ZHOU Y W, KURADE M B, SIROHI R, et al. Biochar as functional amendment for antibiotic resistant microbial community survival during hen manure composting[J]. Bioresource Technology, 2023, 385: 129393
- [14] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, KIM S. Soil stabilization with bioenergy coproduct[J]. Transportation Research Record, 2010, 2186(1): 130-137
- [15] 孙阳军,胡文乐,张世旭.木质素磺酸钙改良黄土对垃圾渗滤液的过滤和防渗机理研究[J].水资源与水工程学报,2025,36(1):183-190
SUN Y J, HU W L, ZHANG S X. Filtration and anti-seepage mechanism of calcium lignosulfonate-modified loess for landfill leachate[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2025, 36(1): 183-190
- [16] KILLERBY M A, ALMEIDA S T R, HOLLANDSWORTH R, et al. Effect of chemical and biological preservatives and ensiling stage on the dry matter loss, nutritional value, microbial counts, and ruminal in vitro gas production kinetics of wet brewer's grain silage[J]. Journal of Animal Science, 2022, 100(5): skac095
- [17] 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
- [18] 柳俊超,姜俊芳,宋雪梅,等.青贮饲料中主要有机酸的高效

- 液相色谱分离分析[J]. 畜牧与兽医, 2015, 47(10): 47-52
- LIU J C, JIANG J F, SONG X M, et al. High-performance liquid chromatography separation and analysis of major organic acids in silage feed[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2015, 47(10): 47-52
- [19] 王成, 王益, 周玮, 等. 植物乳杆菌和含水量对辣木叶青贮品质和单宁含量的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(6): 109-118
- WANG C, WANG Y, ZHOU W, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* (LP) and moisture on feed quality and tannin content of *Moringa oleifera* leaf silage[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(6): 109-118
- [20] 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
- [21] MCDONALD P, HENDERSON A R. Determination of water-soluble carbohydrates in grass[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1964, 15(6): 395
- [22] 张丽英. 饲料分析及质量检测技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2016: 53-58
- ZHANG L Y. Feed analysis and quality testing technology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2016: 53-58
- [23] LICITRA G, HERNANDEZ T M, VAN SOEST P J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds[J]. Animal Feed Science and Technology, 1996, 57(4): 347-358
- [24] HE L W, LI S, WANG C, et al. Effects of vanillic acid on dynamic fermentation parameter, nitrogen distribution, bacterial community, and enzymatic hydrolysis of stylo silage[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 690801
- [25] 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 invitro[J]. Journal of Agricultural Science, 1979, 93(1): 217-222
- [26] NI K K, WANG X K, LU Y, et al. Exploring the silage quality of alfalfa ensiled with the residues of astragalus and hawthorn[J]. Bioresource Technology, 2020, 297: 122249
- [27] KUNG L J, SHAVER R D, GRANT R J, et al. Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 4020-4033
- [28] FENG Q X, SHI W J, CHEN S Q, et al. Addition of organic acids and lactobacillus acidophilus to the leguminous forage *Chamaecrista rotundifolia* improved the quality and decreased harmful bacteria of the silage[J]. Animals (Basel), 2022, 12(17): 2260
- [29] LI J, FENG C M, JIN J Y, et al. Current understanding on antibacterial mechanisms and research progress of tea polyphenols as a supplementary disinfectant for drinking water[J]. Journal of Water and Health, 2022, 20(11): 1611-1628
- [30] 那彬彬. 茶渣添加对紫花苜蓿和甜高粱营养品质和微生物多样性的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023: 3-4
- NA B B. The effect of tea residue addition on the nutritional quality and microbial diversity of alfalfa and sweet sorghum[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023: 3-4
- [31] KONDO M, KITA K, YOKOTA H O. Evaluation of fermentation characteristics and nutritive value of green tea waste ensiled with byproducts mixture for ruminants[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2006, 19(4): 533-540
- [32] 寇江涛, 张甲雄. 同/异型乳酸菌添加对水稻秸秆青贮饲料营养价值的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3980-3987
- KOU J T, ZHANG J X. Effects of adding homo-and heterofermentative lactic acid bacteria on nutritional value of rice straw silage feed[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12): 3980-3987.
- [33] 韩芙蓉, 田贵丰, 李积友, 等. 异质发酵型乳酸菌对全株玉米青贮饲料品质和饲用效果的影响[J]. 中国饲料, 2023(18): 73-78
- HAN F R, TIAN G F, LI J Y, et al. Effects of heterofermentative lactic acid bacteria on the product quality and animal performance of whole crop corn silage[J]. China Feed, 2023(18): 73-78
- [34] 周俊华, 周晓倩, 肖正中, 等. 添加剂及原料间隙对罗汉果渣青贮品质的影响[J]. 饲料工业, 2023, 44(8): 46-51
- ZHOU J H, ZHOU X Q, XIAO Z Z, et al. Effects of Additives and Granularity on Silage Quality of Siraitia grosvenorii Pomace Silage[J]. Feed Industry, 2023, 44(8): 46-51
- [35] LI X, TIAN J, ZHANG Q, et al. Effects of mixing red clover with alfalfa at different ratios on dynamics of proteolysis and protease activities during ensiling[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(10): 8954-8964
- [36] IGALAVITHANA A D, MANDAL S, NIAZI N K, et al. Advances and future directions of biochar characterization methods and applications[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2017, 47(23): 2275-2330
- [37] BAI Y F, RAFIQ M K, LI S S, et al. Biochar from pyrolyzed Tibetan Yak dung as a novel additive in ensiling sweet sorghum: An alternate to the hazardous use of Yak dung as a fuel in the home[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123647
- [38] SHU F, JIANG B, YUAN Y F, et al. Biological activities and emerging roles of lignin and lignin-based products horizontal line a review[J]. Biomacromolecules, 2021, 22(12): 4905-4918
- [39] 金亚倩, 赵俊星, 刘文忠, 等. 酿酒葡萄皮渣对绵羊瘤胃代谢及发育的影响[J]. 畜牧兽医学报, 2017, 48(9): 1683-1693
- JIN Y Q, ZHAO J X, LIU W Z, et al. Effect of dietary wine grape pomace supplementation on rumen metabolism and development in lambs[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2017, 48(9): 1683-1693
- [40] 魏曼丽. 黄芪桔秆对肉牛瘤胃体外发酵参数、干物质消化率和微生物区系的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古民族大学, 2023: 20
- WEI M L. Effects of *Astragalus Membranaceus* straw on rumen fermentation parameters, dry matter digestibility and microflora of beef cattle *in vitro* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Minzu University, 2023: 20
- [41] 杜淑霞, 欧仕益, 贝惠玲, 等. 茶多酚与牛奶蛋白互作对蛋白质离体消化率的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(2): 76-79
- DU S X, OU S Y, BEI H L, et al. Effects of tea polyphenols on *in vitro* protein digestibility in milk tea[J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(2): 76-79
- [42] YANG J, ZHAO Y J, SHAN B S, et al. Study on the interaction and functional properties of *Dolichos lablab* L. protein-tea polyphenols complexes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 250: 126006
- [43] 杜瑞平, 张乐欢, 宋利文, 等. 不同种类人工牧草体外瘤胃降解和发酵特性的研究[J]. 饲料工业, 2023, 44(12): 55-61
- DU R P, ZHANG L H, SONG L W, et al. Study on rumen degradation and fermentation characteristics of different forage species *in vitro*[J]. Feed Industry, 2023, 44(12): 55-61