

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.033

引用格式:刘师昊,邓征荣,刘政玲,等.添加不同比例废弃茶树枝叶对发酵全混合日粮有氧稳定性的影响[J].草地学报,2026,34(9):3496—3504

LIU Shi-hao, DENG Zheng-rong, LIU Zheng-ling, et al. Effects of Adding Different Proportions of Waste tea branches and leaves on Aerobic Stability of Fermented Total Mixed Ration[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (9) :3496—3504

添加不同比例废弃茶树枝叶对发酵全混合日粮 有氧稳定性的影响

刘师昊¹, 邓征荣¹, 刘政玲², 孙红¹, 郝俊¹, 郑玉龙¹, 杨富裕¹, 杨雪萍^{2*}, 谢艺潇^{1*}

(1. 贵州大学动物科学学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:本试验旨在探究废弃茶树枝叶替代全株玉米对发酵全混合日粮(Fermented total mixed ration FTMR)有氧稳定性的影响。以全混合日粮为基础,按干物质比例设置0%,10%,20%,30%和40%替代水平,分别记为T0、T10、T20、T30和T40。各处理样品装入真空青贮袋(35 cm×45 cm,每袋约400 g,每处理4个重复)发酵60 d后,于有氧暴露0,1,3,5,8和14 d测定温度、营养成分、发酵品质及微生物数量。结果表明,随着替代比例提高,FTMR粗蛋白含量整体增加,且可减缓有氧暴露过程中粗蛋白的下降。T10和T20处理升温较慢,其与环境温差低于2℃的持续时间显著延长($P<0.05$),有氧稳定性较好。T10处理在暴露过程中保持较低pH值、较高乳酸含量及较高V-score,发酵品质最佳;T40虽粗蛋白较高,但pH升高快且早期出现霉菌,品质较差。综上,适量添加(10%~20%)废弃茶树枝叶有助于提高FTMR有氧稳定性和发酵品质。

关键词:废弃茶树枝叶;发酵全混合日粮;有氧稳定性

中图分类号:S816.5+3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3496-09

Effects of Adding Different Proportions of Waste tea branches and leaves on Aerobic Stability of Fermented Total Mixed Ration

LIU Shi-hao¹, DENG Zheng-rong¹, LIU Zheng-ling², SUN Hong¹, HAO Jun¹, ZHENG Yu-long¹,
YANG Fu-yu¹, YANG Xue-ping^{2*}, XIE Yi-xiao^{1*}

(1. College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou Province 550025, China; 2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the effects of replacing whole-plant corn with waste tea branches and leaves on the aerobic stability of fermented total mixed ration (FTMR). Five treatments were prepared based on dry matter ratios: 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% substitution levels (T0, T10, T20, T30, and T40). The samples were vacuum-packed (35 cm×45 cm, approximately 400 g per bag, four replicates per treatment) and fermented for 60 days. After fermentation, aerobic exposure was conducted for 0, 1, 3, 5, 8, and 14 days to determine temperature, nutrient composition, fermentation quality, and microbial counts. The results showed that crude protein content increased with higher substitution levels, and the decline in crude protein during aerobic exposure was reduced. T10 and T20 exhibited slower temperature rise and maintained a temperature difference below 2℃ for a significantly longer duration ($P<0.05$), indicating better aerobic stability. T10 maintained lower pH, higher lactic acid content, and higher V-score during aerobic exposure, showing superior fermentation quality. In contrast, T40 had higher crude protein but showed rapid pH increase and early mold growth, indicating poorer quality. In conclusion, moderate inclusion (10%-20%) of waste tea branches

收稿日期:2025-05-06;修回日期:2025-07-29

基金项目:贵州大学自然科学专项(国家级领军人才)科研基金项目(贵大领军合字[2023]05);贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础QN[2025]076);贵州省牧草产业技术体系资助

作者简介:刘师昊(2000-),男,贵州贵阳人,布依族,硕士研究生,主要从事饲草料加工与贮藏方向研究,E-mail:liu992644489@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:1163844299@qq.com; xieyx1994@163.com

and leaves improves both aerobic stability and fermentation quality of FTMR.

Key words: Waste tea branches and leaves; Fermented total mixed ration; Aerobic stability

青贮是饲料保存的常用方法,青贮初期,好氧微生物会消耗饲料中残留的氧气形成厌氧环境;厌氧状态下,乳酸菌利用植物中的可溶性碳水化合物产生以乳酸为主的脂肪酸,降低饲料的 pH 值,抑制腐败菌及霉菌的活动^[1]。发酵全混合日粮(Fermented total mixed ration, FTMR)是将粗饲料、精料及功能性添加剂按营养需求均匀混合后进行发酵调制形成的一类饲料,其主要组成通常包括青贮玉米、秸秆、谷物类精料、蛋白饲料及预混料等原料,它根据动物的营养需求科学配方,常用于畜牧业作为反刍动物的饲料^[2]。已有研究表明,FTMR 不仅能够提高饲料适口性和营养均衡性,还可改善饲料保存性能并降低饲喂过程中精粗饲料分离现象^[3]。然而,随着有氧暴露的进行,FTMR 中乳酸等发酵产物被酵母等好氧微生物利用并氧化分解,同时蛋白质发生降解,进而引起干物质损失^[3]。

茶作为全球广泛消费的饮品,其种植与生产规模持续扩大,伴随产生大量废弃茶树枝叶,茶叶副产物的资源化利用问题愈发受到关注^[4-5]。已有研究表明,废弃茶树枝叶富含粗蛋白和水溶性碳水化合物等营养成分,具备作为饲料资源开发利用的潜力^[6]。同时,废弃茶树枝叶中富含多酚类物质,具有一定的抑菌活性,可调控微生物生长^[7]。近年来,茶叶副产物在畜禽饲料中的应用逐渐受到关注。熊吉等^[8]研究发现,在日粮中添加适量茶叶粉可提高鸡肉的抗氧化能力,并增强黄鸡免疫性能;徐瑞等^[9]报道,添加少量茶叶渣能够改善育肥猪的生长性能以及猪肉色泽和保水性。此外,Huang 等^[10]研究表明,茶多酚可改善青贮发酵品质,提高蛋白保存能力,增强抗氧化性能,并调控青贮细菌群落结构。因此,茶叶副产物不仅具有一定营养价值,还可能通过其活性成分改善饲料发酵品质和贮藏稳定性。

目前,关于茶叶副产物在青贮中的研究多集中于茶渣或茶多酚添加,而关于新鲜废弃茶树枝叶用于 FTMR 体系的研究仍相对较少,尤其缺乏对其有氧暴露过程中营养品质、发酵品质及有氧稳定性的系统研究。因此,本研究以不同比例废弃茶树枝叶替代全株玉米,探讨其对 FTMR 有氧稳定性的影响,以期废弃茶树枝叶在青贮饲料中的高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 青贮饲料制作

试验所需全混合日粮(Total mixed ration, TMR)原料中的废弃茶树枝叶与全株玉米均于 2025 年 8 月 10 日采自贵州省遵义市凤冈县田坝村(28.11549°N, 107.58347°E),其中全株玉米处于蜡熟期,废弃茶树枝叶来源于茶树夏季修剪后的废弃枝叶。原料采集后,采用揉丝机(山东德牛机械有限公司)对其进行揉丝处理,处理后样品平均长度约为 1 cm。2% 预混料采购自河南大北农有限公司。TMR 的成分见表 1,分别加入 0%(T0 组),10%(T10 组),20%(T20 组),30%(T30 组),40%(T40 组)(以 Dry matter, DM 为基础)的新鲜废弃茶树枝叶替换全株玉米。室温条件下厌氧发酵,并于 60 d 开封。

表 1 TMR 的组成成分

Table 1 Ingredient composition of TMR					
成分 Component/(%DM)	T0	T10	T20	T30	T40
废弃茶树枝叶 Waste tea branches and leaves	0.00	10.00	20.00	30.00	40.00
全株玉米 Whole-plant corn	40.00	30.00	20.00	10.00	0.00
油菜秸秆 Rapeseed straw	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
玉米粉 Ground corn	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00
豆粕 Soybean meal	5.44	5.44	5.44	5.44	5.44
麸皮 Mill offals	9.58	9.58	9.58	9.58	9.58
棉粕 Cottonseed meal	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48
食盐 Common salt	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2% 预混料 2% Premix	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
总计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

注: T0~T40, 0~40% 的废弃茶树枝叶替换全株玉米; DM, 干物质

Note: T0-T40, 0-40% of the waste tea branches and leaves replace the whole plant corn; DM, dry matter

1.2 有氧稳定性试验设计

将切短的粗饲料按试验设计与精料混匀后装入 35 cm×45 cm 青贮袋中,每袋装约 400 g,每种 TMR 装 8 袋,共计 80(5×8×2)袋,压实用抽真空机抽真空后密封,置于室内避光处贮藏。经 60 d 发酵后,将相同处理的样品充分混合,并采用四分法取样 150 g 作为有氧暴露 0 d 的检测样品。剩余样品再次混合均匀后,平均分为两份,每份约 700 g,其中一份用于温度监测,另一份用于取样。将分好的两份样品分

别置于两个直径30 cm,高度20 cm,容量1.5 L的聚乙烯小桶中,用密封条和纱布封口并置于恒温储存室内;每个处理设置4个重复。在有氧暴露1,3,5,8,14 d时,采用四分法各取样150 g,用于发酵品质和营养品质的分析,同时检测另一聚乙烯小桶样品的温度,其中第14 d样品直接取自温度监测组。

1.3 营养品质测定

取不同有氧暴露天数的青贮样品称鲜重(Fresh matter, FM),将每个样品(150 g)分为2份,其中1份(140 g)置于烘箱中65℃烘干至恒重后称干重,粉碎成粉后通过425 μm筛网(40目)过筛,混合均匀装自封袋,置于阴凉处,用于测定营养成分。另1份(10 g)用于发酵品质测定。

DM含量用烘干法^[11]测定。粗蛋白(Crude protein, CP)与总氮(Total nitrogen, TN)含量按照凯氏定氮法^[11]利用维普德500全自动凯氏定氮仪(德国格哈特分析仪器有限公司)测定。酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)和中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)含量使用ANKOM公司,型号为2000的自动纤维分析仪,采用滤袋分析法^[12]进行测定。水溶性碳水化合物(Water-soluble carbohydrates, WSC)含量的测定采用蒽酮硫酸法^[13]。CP计算公式如下:

$$CP = TN \times 6.25$$

1.4 发酵品质测定

精准称取每个样品各10 g与90 mL灭菌水混合,储存于4℃冰箱中过夜,待样品中内容物被充分浸提后通过4层粗棉布过滤,在用离心机(上海安亭科学仪器厂,型号为CH210R)进行速度为3000 r·min⁻¹,持续时间为5 min的离心后收集滤液。使用pH计(上海仪电科学仪器股份有限公司,型号PHSJ-3F)测定pH。有机酸的含量通过高效液相色谱(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)分析,使用色谱柱为Shodex品牌(昭和电工株式会社),型号KC-811。HPLC的操作条件为柱温箱温度50℃,流动相为3 mmol·L⁻¹高氯酸盐溶液,流速为1.0 mL·min⁻¹,紫外光检测器波长210 nm,进样体积为5.0 μL。利用挥发性脂肪酸和氨态氮含量计算V-score评分^[14],以评估青贮质量。V-score计算公式如下:

$$V\text{-score} = A' + B' + C'$$

式中:A为NH₃-N/TN(%);当A≤5时,A'=

50;当5<A<10时,A'=60-2A;当10<A<20时,A'=80-4A。B为乙酸与丙酸含量之和(%);当B≤0.2时,B'=10;当0.2<B<1.5时,B'=(150-100B)/13。C为丁酸含量(%);当C=0时,C'=40;当0<C<0.5时,C'=40-80C。

根据V-Score评分标准,将青贮品质分为优级、良级和差级3个等级,其中81~100分为优级,60~80分为良级,60分以下为差级。

1.5 微生物数量测定

取收集的滤液进行梯度稀释,并采用平板涂布法测定乳酸菌、酵母菌、霉菌及肠菌的数量^[15]。所有微生物数量均以每克鲜样中的对数值(lg CFU·g⁻¹ FM)表示。

1.6 统计分析

数据整理和图表绘制使用Excel 2010软件完成。使用IBM SPSS Statistics 27软件进行双因素方差分析,后采用Duncan's法进行多重比较,显著性水平设定为P<0.05,极显著水平设定为P<0.001。数据采用平均值的方式表示。

2 结果与分析

2.1 不同废弃茶树枝叶添加比例对FTMR有氧暴露过程中温度变化的影响

在有氧暴露过程中,各处理的温度差值均随时间延长而发生变化(图1)。不同处理间温度变化趋势存在差异,其中T10和T20处理温度上升相对较缓,T40处理温度上升较快,且温度差值较高(图1A)。各处理在有氧暴露过程中温度与环境温度差值低于2℃的持续时间存在显著差异(图1B)。T10和T20处理的持续时间显著高于T0,T30和T40处理(P<0.05),而T40处理的持续时间显著低于其他各处理(P<0.05)。

2.2 不同废弃茶树枝叶添加比例对FTMR有氧暴露过程中营养成分的影响

由表2可知,随着有氧暴露时间的延长,各处理FTMR的营养成分均发生变化,且废弃茶树枝叶添加比例和有氧暴露天数的交互作用均达到极显著水平(P<0.001)。T0处理的CP含量于有氧暴露初期出现显著下降(P<0.05)。添加废弃茶树枝叶

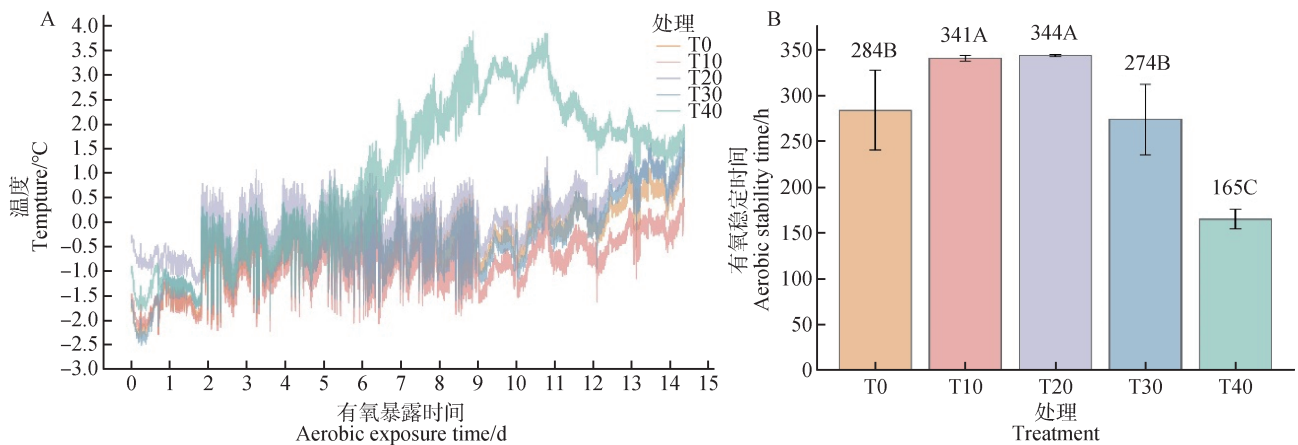


图1 不同废弃茶树枝叶添加量对FTMR温度变化的影响

Fig. 1 The effect of different amount of waste tea branches and leaves on the temperature change of FTMR

注:(A)不同处理的FTMR在有氧暴露过程中与室温差的变化;(B)不同处理的FTMR在有氧暴露过程中与室温差小于2°C的累计时间;数据右侧不含有相同大写字母表示不同茶叶添加比例处理差异显著($P < 0.05$),含有相同小写字母或无字母表示差异不显著($P > 0.05$);T0~T40, 0~40%的废弃茶树枝叶替换全株玉米

Note: (A) Changes in the temperature difference between FTMR and ambient temperature during aerobic exposure under different treatments; (B) Cumulative time during aerobic exposure when the temperature difference between FTMR and ambient temperature was less than 2°C under different treatments. Different uppercase letters on the right side of the data indicate significant differences among treatments with different tea branch and leaf addition ratios ($P < 0.05$), whereas the same lowercase letters or absence of letters indicate no significant difference ($P > 0.05$). T0-T40 represent 0-40% replacement of whole-plant corn with discarded tea tree branches and leaves, respectively

后,该变化趋势得到缓解,其中T10处理在整个暴露过程中变化不显著。随着废弃茶树枝叶添加比例增加,CP含量整体呈显著升高趋势($P < 0.05$),且T40处理在各时间点均显著高于其他处理。NDF在T0处理中随有氧暴露时间变化不显著,而添加废弃茶树枝叶后,各处理在不同时间点表现出不同程度的变化。0 d时,T0和T10处理显著高于其他处理($P < 0.05$);随着时间延长,各处理间差异逐渐减小,在3~8 d期间各处理间差异不显著;至14 d时,T40处理显著高于其他处理($P < 0.05$)。ADF整体变化趋势与NDF不同。除T40处理外,其余添加废弃茶树枝叶的处理在有氧暴露过程中变化不显著。与NDF类似,各处理间在3 d和5 d时差异不显著,而在14 d时,T40处理显著高于其他处理($P < 0.05$)。14 d时,添加废弃茶树枝叶的各处理WSC含量显著高于T0处理($P < 0.05$)。其中,T10处理在有氧暴露过程中WSC含量随时间呈上升趋势,其14 d时显著高于除8 d外的其他时间点。

2.3 不同废弃茶树枝叶添加比例对FTMR有氧暴露过程中发酵特性的影响

如表3所示,5~8 d时各处理pH显著升高;至

14 d时,T40处理仍处于较高水平,而T10处理显著低于其他处理($P < 0.05$)。乳酸含量随有氧暴露时间总体呈下降趋势,0 d时T10处理最高($P < 0.05$),T20和T40较低;随时间延长,各处理乳酸含量逐渐降低,至14 d时T10仍显著高于T0($P < 0.05$)。除T0处理外,乙酸含量在有氧暴露过程中整体变化幅度较小,但不同处理间在部分时间点存在显著差异。至14 d时,T0处理乙酸含量显著升高,显著高于T10和T20处理($P < 0.05$),而T10处理始终保持较稳定水平。随有氧暴露时间延长,丁酸含量总体呈显著升高趋势,0~3 d期间各处理含量较低且差异较小,5 d时均显著增加,至14 d时,T0,T10及T20处理显著高于其他处理($P < 0.05$)。氨态氮受处理和时间影响显著($P < 0.05$)。T40处理在大部分时段内保持较高水平的氨态氮占总氮比率,T0处理随有氧暴露时间呈上升趋势,而T10和T30处理总体则随有氧暴露时间呈下降趋势。在14 d时,T10和T30处理显著低于其他处理($P < 0.05$)。随着有氧暴露的进行,T10处理的V-score评分呈先升高后下降趋势,并于3 d达到峰值;T20处理在多个时间点保持较高水平;5~8 d期间各处理差异减小,而14 d时T30处理显著高于其他处理($P < 0.05$)。

表 2 不同废弃茶树枝叶添加量对 FTMR 的营养成分影响

Table 2 The effects of different amounts of waste tea branches and leaves on the nutritional components of FTMR

项目 Item	有氧暴露天数 Days of aerobic exposure/ d	T0	T10	T20	T30	T40	均值 Mean	标准误 Standard error	P值 P value		
									A	D	A×D
干物质 Dry matter/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	586 ^{Dd}	618 ^{Cd}	625 ^{BCc}	631 ^{ABb}	635 ^{Ac}	619	0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	1	597 ^{Cd}	614 ^{Bd}	624 ^{ABc}	620 ^{ABb}	635 ^{Ac}	618				
	3	625 ^{Cc}	644 ^{Bc}	647 ^{Bb}	670 ^{Ab}	660 ^{Ab}	649				
	5	656 ^{Cb}	685 ^{ABb}	703 ^{Aa}	676 ^{Bb}	682 ^{Ba}	680				
	8	676 ^{Cab}	699 ^{ABab}	710 ^{Aa}	699 ^{ABa}	691 ^{BCa}	695				
	14	685 ^{ABa}	704 ^{ABa}	701 ^{ABa}	709 ^{Aa}	680 ^{Ba}	696				
	均值 Mean	637	661	668	668	664					
粗蛋白 Crude protein/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	136 ^{Da}	143 ^D	155 ^{Cb}	168 ^{Bb}	179 ^{Ab}	156	0.390	<0.001	<0.001	<0.001
	1	127 ^{Ehc}	140 ^D	154 ^{Cb}	169 ^{Bb}	175 ^{Abc}	153				
	3	126 ^{Dhc}	139 ^C	155 ^{Bb}	159 ^{ABb}	162 ^{Ad}	148				
	5	128 ^{Ehc}	140 ^D	151 ^{Cb}	167 ^{Bc}	176 ^{Abc}	153				
	8	125 ^{Ec}	138 ^D	147 ^{Cc}	157 ^{Bc}	167 ^{Acd}	147				
	14	131 ^{Eb}	142 ^D	160 ^{Ca}	174 ^{Ba}	194 ^{Aa}	160				
	均值 Mean	129	140	154	166	176					
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	272 ^A	284 ^{Abc}	256 ^{Bc}	254 ^{Bb}	258 ^{Bc}	263	0.021	0.001	<0.001	<0.001
	1	291 ^{AB}	306 ^{Aab}	301 ^{ABab}	287 ^{ABab}	283 ^{Bb}	294				
	3	312	313 ^a	286 ^{cd}	275 ^{ab}	295 ^b	297				
	5	285	296 ^{ab}	293 ^{bc}	277 ^{ab}	280 ^b	287				
	8	270	287 ^{abc}	278 ^d	274 ^{ab}	287 ^b	279				
	14	315 ^B	276 ^{Cc}	308 ^{Ba}	299 ^{BCa}	392 ^{Aa}	318				
	均值 Mean	292	295	285	278	300					
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	130 ^{BCab}	145 ^A	121 ^C	135 ^{AB}	142 ^{Ab}	135	0.019	<0.001	<0.001	<0.001
	1	140 ^{Bab}	152 ^A	149 ^{AB}	154 ^A	154 ^{Ab}	150				
	3	153 ^a	150	154	133	146 ^b	147				
	5	136 ^{ab}	145	150	144	149 ^b	145				
	8	122 ^{Bb}	145 ^B	137 ^{AB}	139 ^{AB}	154 ^{Bb}	140				
	14	146 ^{BCab}	137 ^C	155 ^{BC}	158 ^B	231 ^{Aa}	166				
	均值 Mean	139	146	145	144	163	147				
可溶性碳水化合物 Soluble carbohydrate/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	8.81 ^C	10.1 ^{BCbc}	11.9 ^{Bcd}	17.3 ^{Aa}	17.0 ^{Aab}	13.0	0.161	<0.001	<0.001	<0.001
	1	8.44 ^D	11.0 ^{Cabc}	13.0 ^{ABbc}	14.8 ^{A^Bab}	16.8 ^{Aab}	14.1				
	3	8.47 ^D	9.04 ^{Cc}	10.9 ^{Cd}	12.8 ^{Bb}	15.8 ^{Abc}	10.9				
	5	9.11 ^C	9.01 ^{BCc}	11.4 ^{Bcd}	14.8 ^{Aab}	16.3 ^{Aab}	12.0				
	8	9.75 ^C	11.7 ^{Cab}	15.9 ^{Ba}	14.9 ^{Bab}	18.8 ^{Aa}	14.0				
	14	9.46 ^B	12.7 ^{Aa}	14.0 ^{Aab}	15.0 ^{Aab}	14.0 ^{Ac}	13.1				
	均值 Mean	9.01	10.7	12.9	5.97	16.2					

注:同行数据肩标不含有相同大写字母表示相同有氧暴露天数下的不同处理差异显著($P<0.05$),同列数据肩标不含有相同小写字母表示处理下的不同有氧暴露天数差异显著($P<0.05$),含有相同写字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。T0~T40,0~40%的废弃茶树枝叶替换全株玉米。D,有氧暴露天数;A,废弃茶树枝叶添加量;A×D,有氧暴露天数与废弃茶树枝叶添加量的交互作用

Note: Values within the same column (different treatments at the same aerobic exposure day) with no common uppercase superscript letters differ significantly ($P<0.05$). Values within the same treatment (different aerobic exposure days at the same treatment) with no common lowercase superscript letters differ significantly ($P<0.05$). Values with the same or no superscript letters are not significantly different ($P>0.05$). T0-T40 represent the replacement of whole-plant corn with 0-40% waste tea branches and leaves, respectively. D, days of aerobic exposure; A, addition level of waste tea branches and leaves; A×D, interaction between addition level of waste tea branches and leaves and days of aerobic exposure

2.4 不同废弃茶树枝叶添加比例对 FTMR 有氧暴露过程中微生物的影响

由表 4 可知,乳酸菌数量总体呈先升高后降低的趋势,在 5~8 d 期间达到较高水平,不同添加比例间,T40 处理显著高于其他处理,T10 显著高于 T0

处理($P<0.05$)。在 0~1 d 期间,各处理间肠菌数量差异较为明显,其中 T10 与 T40 处理显著高于其他处理($P<0.05$),至 14 d 时,T20 处理显著高于部分处理,而 T30 处理显著低于其他处理($P<0.05$)。除 T40 外,各处理酵母菌均呈现先升高后降低的趋

表 3 不同废弃茶树枝叶添加量对 FTMR 的发酵特性影响

Table 3 The effects of different amounts of waste tea branches and leaves on the fermentation characteristics of FTMR

项目 Item	有氧暴露天数 Days of aerobic exposure/d	T0	T10	T20	T30	T40	均值 Mean	标准误差 Standard error	P 值 P value		
									A	D	A×D
pH	0	4.05 ^{Cb}	4.10 ^{Cb}	4.14 ^{BCb}	4.20 ^{Bc}	4.54 ^{Ad}	4.21	0.041	0.001	<0.001	<0.001
	1	4.14 ^{Bb}	4.17 ^{Bb}	4.21 ^B	4.22 ^{Bc}	4.54 ^{Ad}	4.25				
	3	4.14 ^{Cb}	4.20 ^{BCb}	4.18 ^{BCb}	4.24 ^{Bc}	4.70 ^{Ad}	4.29				
	5	4.91 ^{Bb}	6.13 ^{Aa}	5.65 ^{ABa}	4.63 ^{Bbc}	5.23 ^{ABc}	5.31				
	8	5.94 ^{ABa}	6.52 ^{Aa}	5.36 ^{Ba}	5.14 ^{Bab}	5.72 ^{ABb}	5.74				
	14	6.02 ^{ABa}	4.24 ^{Cb}	5.67 ^{ABa}	5.31 ^{Ba}	6.47 ^{Aa}	5.54				
	均值 Mean	4.87	4.89	4.87	4.62	5.20					
	乳酸 Lactic acid/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	21.8 ^{ABa}	24.4 ^{Aa}	13.5 ^{Ba}	17.8 ^{ABa}	12.9 ^{Ba}				
1	12.2 ^{Bb}	12.0 ^{Bb}	11.5 ^{Bab}	16.4 ^{Aab}	10.7 ^{Babc}	12.6					
3	12.6 ^{Bb}	11.9 ^{Bb}	9.83 ^{Bbc}	19.4 ^{Aa}	12.3 ^{Bab}	13.2					
5	10.5 ^{ABb}	6.38 ^{Bb}	9.66 ^{ABbc}	13.7 ^{ABab}	9.65 ^{ABbc}	9.98					
8	10.3 ^b	8.69 ^b	7.80 ^c	10.0 ^c	9.97 ^{abc}	9.35					
14	8.02 ^{Bb}	11.0 ^{Ab}	10.0 ^{ABbc}	10.8 ^{ABc}	8.74 ^{ABc}	9.72					
均值 Mean	12.6	12.4	10.4	14.9	10.8						
乙酸 Acetic acid/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	6.25 ^b	5.69	5.93	6.15	6.00 ^{ab}	5.00	0.051	0.005	<0.001	<0.001
1	5.15 ^{Bab}	5.45 ^B	5.98 ^A	6.09 ^A	6.19 ^{Aab}	4.98					
3	5.32 ^{ab}	5.23	5.85	6.27	6.21 ^{ab}	5.31					
5	4.65 ^{Bc}	5.49 ^A	5.83 ^A	5.63 ^A	5.83 ^{Aab}	5.40					
8	5.76 ^b	5.44	5.67	5.70	5.28 ^b	5.97					
14	8.65 ^{Aa}	5.67 ^{BC}	5.23 ^C	6.31 ^{BC}	6.55 ^{Ba}	7.73					
均值 Mean	5.83	5.49	5.75	6.02	6.05						
丙酸 Propionic acid/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	0.600 ^{BCbc}	0.565 ^{Cb}	0.719 ^{Aa}	0.587 ^{BCb}	0.649 ^{AB}	0.624				
1	0.636 ^{abc}	0.723 ^a	0.711 ^a	0.697 ^a	0.721	0.698					
3	0.589 ^c	0.569 ^b	0.571 ^c	0.590 ^b	0.667	0.597					
5	0.671 ^{abc}	0.671 ^a	0.665 ^{ab}	0.667 ^{ab}	0.647	0.664					
8	0.684 ^{ABab}	0.698 ^{ABa}	0.703 ^{Aab}	0.689 ^{ABa}	0.646 ^B	0.684					
14	0.717 ^{Aa}	0.695 ^{ABa}	0.640 ^{Bb}	0.647 ^{Bab}	0.711 ^A	0.682					
均值 Mean	0.651	0.657	0.668	0.644	0.671						
丁酸 Butyric acid/ (g·kg ⁻¹ DM)	0	0.073 ^{ABc}	0.065 ^{Bc}	0.081 ^{ABc}	0.114 ^{Ab}	0.109 ^{ABb}	0.088	0.007	0.016	<0.001	<0.001
1	0.140 ^{ABbc}	0.068 ^{Cc}	0.156 ^{Ab}	0.138 ^{ABb}	0.114 ^{Bb}	0.123					
3	0.053 ^{Bc}	0.084 ^{Bc}	0.086 ^{Bc}	0.153 ^{ABb}	0.210 ^{Ab}	0.117					
5	0.311 ^b	0.228 ^a	0.264 ^a	0.272 ^a	0.333 ^a	0.282					
8	0.216 ^{Abc}	0.170 ^{Bb}	0.178 ^{ABb}	0.167 ^{Bb}	0.160 ^{Bb}	0.178					
14	0.535 ^{Aa}	0.246 ^{Ba}	0.239 ^{Ba}	0.157 ^{Bb}	0.140 ^{Bb}	0.263					
均值 Mean	0.222	0.146	0.172	0.169	0.174						
氨态氮 Ammoniacal nitrogen/ (g·kg ⁻¹ TN)	0	154 ^{BCb}	190 ^{ABa}	114 ^{Cb}	167 ^{Bab}	224 ^{Aa}	170				
1	154 ^{ABb}	162 ^{Ab}	102 ^{Bb}	168 ^{Aab}	145 ^{ABb}	146					
3	123 ^{ABCc}	76 ^{Cc}	96 ^{BCb}	168 ^{ABab}	174 ^{Aab}	127					
5	157 ^{ABb}	101 ^{Cd}	134 ^{BCab}	200 ^{Aa}	132 ^{BCb}	145					
8	121 ^c	129 ^c	129 ^{ab}	119 ^{bc}	148 ^b	129					
14	191 ^{Aa}	124 ^{Bc}	196 ^{Aa}	87.0 ^{Bc}	180 ^{Aab}	155					
均值 Mean	150	131	128	151	167						
V-score 评分 V-score/分	0	64.2 ^{ABb}	50.0 ^{BCd}	77.2 ^{Aab}	58.1 ^{BCc}	45.7 ^{Cb}	59.1	0.925	<0.001	<0.001	<0.001
1	64.6 ^{ABb}	60.1 ^{Bd}	81.8 ^{Aa}	56.9 ^{Bc}	61.5 ^{ABab}	65.0					
3	77.1 ^{ABa}	89.8 ^{Aa}	85.1 ^{Aa}	65.9 ^{BCbc}	55.0 ^{Cab}	74.6					
5	62.5 ^{BCb}	84.4 ^{Ab}	71 ^{ABab}	50.8 ^{Cc}	72.3 ^{ABa}	68.2					
8	77.0 ^a	75.4 ^c	73.8 ^{ab}	77.2 ^{ab}	66.0 ^{ab}	73.9					
14	50.7 ^{Cc}	74.9 ^{Bc}	55.5 ^{Cb}	88.0 ^{Aa}	52.7 ^{Cab}	64.4					
均值 Mean	66.0	72.4	74.1	66.2	58.9						

注:同行数据肩标不含有相同大写字母表示相同有氧暴露天数下的不同处理差异显著($P<0.05$),同列数据肩标不含有相同小写字母表示处理下的不同有氧暴露天数差异显著($P<0.05$),含有相同写字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。T0~T40,0~40%的废弃茶树枝叶替换全株玉米。D,有氧暴露天数;A,废弃茶树枝叶添加量;A×D,有氧暴露天数与废弃茶树枝叶添加量的交互作用

Note: Values within the same column (different treatments at the same aerobic exposure day) with no common uppercase superscript letters differ significantly ($P<0.05$). Values within the same treatment (different aerobic exposure days at the same treatment) with no common lowercase superscript letters differ significantly ($P<0.05$). Values with the same or no superscript letters are not significantly different ($P>0.05$). T0-T40 represent the replacement of whole-plant corn with 0-40% waste tea branches and leaves, respectively. D, days of aerobic exposure; A, addition level of waste tea branches and leaves; A×D, interaction between addition level of waste tea branches and leaves and days of aerobic exposure

势。霉菌在 0 d 时未检测到,但随着有氧暴露时间 T40 处理检测到霉菌;在 5~14 d 期间,各处理均检测延长,霉菌逐渐出现并显著增加,在 1 d 和 3 d 时,仅测到霉菌。

表 4 不同废弃茶树枝叶添加量对 FTMR 的微生物影响

Table 4 The microbial effects of different amounts of waste tea branches and leaves on FTMR.

项目 Item	有氧暴露天数 Days of aerobic exposure/ d	T0	T10	T20	T30	T40	均值 Mean	标准误 Standard error	P 值 P value		
									A	D	A×D
乳酸菌 Lactic acid bacteria/ (lg CFU·g ⁻¹ FM)	0	4.68	5.35	4.33	4.94	6.23	5.10 ^c	0.076	<0.001	<0.001	0.087
	1	3.11	4.50	3.14	4.78	6.52	4.41 ^d				
	3	5.30	6.15	5.96	5.43	6.74	5.92 ^b				
	5	6.57	7.02	7.37	6.50	7.43	6.98 ^a				
	8	6.16	6.51	6.69	6.65	7.13	6.63 ^a				
	14	5.85	5.78	5.50	5.63	6.65	5.88 ^b				
	均值 Mean	5.28 ^C	5.88 ^B	5.50 ^{BC}	5.66 ^{BC}	6.79 ^A					
肠菌 Enterobacter/ (lg CFU·g ⁻¹ FM)	0	2.91 ^{Bc}	4.9 ^{Ab}	3.23 ^{Bc}	3.26 ^{Bc}	5.35 ^{Ac}	3.93	0.051	0.001	<0.001	<0.001
	1	2.81 ^{Cc}	3.48 ^{Bc}	3.38 ^{Bc}	3.36 ^{Bc}	6.68 ^{Ab}	3.94				
	3	5.64 ^{Ba}	5.82 ^{Ba}	5.67 ^{Bb}	5.44 ^{Bb}	7.10 ^{Ab}	5.93				
	5	6.96 ^{ABa}	6.64 ^{Ba}	7.22 ^{ABa}	6.98 ^{ABa}	7.32 ^{Ab}	7.02				
	8	6.76 ^{ABa}	6.17 ^{Ba}	7.74 ^{Aa}	7.03 ^{ABa}	7.72 ^{Aa}	7.08				
	14	6.84 ^{ABb}	6.1 ^{Ba}	7.14 ^{Aa}	5.04 ^{Cb}	6.29 ^{ABbc}	6.28				
	均值 Mean	5.32	5.52	5.73	5.18	6.76					
酵母菌 Yeasts/ (lg CFU·g ⁻¹ FM)	0	2.93 ^{Bc}	4.85 ^{Ac}	2.75 ^{Bd}	4.33 ^{Ac}	1.19 ^{Cb}	3.21	0.066	0.372	<0.001	<0.001
	1	2.57 ^{Bc}	3.33 ^{Bd}	3.33 ^{Bd}	3.37 ^{Bd}	4.97 ^{Aa}	3.51				
	3	6.64 ^a	5.95 ^b	6.05 ^b	5.14 ^{bc}	4.85 ^a	5.73				
	5	6.46 ^{Ba}	6.52 ^{Ba}	6.31 ^{Bb}	6.50 ^{Ba}	7.16 ^{Aa}	6.59				
	8	6.38 ^{BCa}	6.06 ^{Cab}	7.13 ^{Aa}	7.09 ^{Aa}	6.97 ^{ABa}	6.73				
	14	4.75 ^{Bb}	4.85 ^{Bc}	4.87 ^{Bc}	5.54 ^{Bb}	6.33 ^{Aa}	5.27				
	均值 Mean	4.96	5.26	5.07	5.33	5.20					
霉菌 Fungus/ (lg CFU·g ⁻¹ FM)	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.081	0.735	<0.001	<0.001
	1	ND	ND	ND	ND	4.14 ^{Aa}	0.827				
	3	ND	ND	ND	ND	4.88 ^{Aa}	0.976				
	5	5.10 ^{Ab}	6.37 ^{Aa}	6.48 ^{Aa}	6.36 ^{Aa}	2.29 ^{Bab}	5.32				
	8	4.54 ^{Ab}	4.64 ^{Ac}	4.52 ^{Ac}	5.34 ^{Ab}	2.21 ^{Bab}	4.25				
	14	5.71 ^{Aa}	5.52 ^{Ab}	5.47 ^{Ab}	5.52 ^{Ab}	2.02 ^{Bab}	4.85				
	均值 Mean	2.56	2.76	2.74	2.87	2.61					

注:同行数据肩标不含有相同大写字母表示相同有氧暴露天数下的不同处理差异显著($P < 0.05$),同列数据肩标不含有相同小写字母表示处理下的不同有氧暴露天数差异显著($P < 0.05$),含有相同写字母或无字母表示差异不显著($P > 0.05$)。T0~T40,0~40%的废弃茶树枝叶替换全株玉米。D,有氧暴露天数;A,废弃茶树枝叶添加量;A×D,有氧暴露天数与废弃茶树枝叶添加量的交互作用;ND,没有检测到数据

Note: Values within the same column (different treatments at the same aerobic exposure day) with no common uppercase superscript letters differ significantly ($P < 0.05$). Values within the same treatment (different aerobic exposure days at the same treatment) with no common lowercase superscript letters differ significantly ($P < 0.05$). Values with the same or no superscript letters are not significantly different ($P > 0.05$). T0~T40 represent the replacement of whole-plant corn with 0~40% waste tea branches and leaves, respectively. D, days of aerobic exposure; A, addition level of waste tea branches and leaves; A×D, interaction between addition level of waste tea branches and leaves and days of aerobic exposure; ND, no data detected

3 讨论

本研究中,添加废弃茶树枝叶后,FTMR 的有氧稳定性和发酵品质均得到一定改善,尤其是 T10 处理在有氧暴露过程中表现出较低的 pH、较高的乳酸含量以及较高的 V-score 评分。这与 Huang 等^[10]关于茶多酚改善柱花草青贮发酵品质和蛋白保存能力的研究结果相一致,其研究表明,茶多酚能够

通过调控青贮微生物群落结构、促进乳酸菌生长并抑制有害微生物繁殖,从而改善青贮发酵品质。本研究结果说明,废弃茶树枝叶中的活性成分同样可能对 FTMR 发酵体系产生调控作用。

在蛋白质变化方面,未添加废弃茶树枝叶的 T0 处理在有氧暴露过程中 CP 含量显著下降,而添加废弃茶树枝叶后该趋势明显减缓。这一结果可能与茶树枝叶中富含的多酚类物质有关。已有研究

表明,植物多酚能够与蛋白质形成稳定复合物,从而降低蛋白质溶解性并抑制蛋白酶活性,进而延缓蛋白质降解过程^[16]。而T20、T30和T40处理的CP含量也因此更加难以降解,随着有氧暴露的进行,其他易降解物质逐渐减少,由此使得高比例废弃茶树枝叶添加处理的CP浓度在表观上出现了增长。同时,随着废弃茶树枝叶添加比例的增加,体系中CP含量整体升高,这与茶树枝叶本身较高的蛋白含量相关^[16]。

NDF和ADF在不同阶段表现出明显不同的变化规律。于有氧暴露初期(0~1 d),体系仍基本保持厌氧发酵结束时的结构状态,好氧微生物尚未大量繁殖,营养组分变化有限,此时处理间差异主要来源于原料组成差异,使得T0处理NDF较高,而添加废弃茶树枝叶的处理ADF偏高^[17]。茶树枝叶中富含较高比例的细胞壁结构物质,随着其添加比例的增加,显著地拉高了处理组的ADF含量^[6];在3~5 d阶段,体系进入过渡期,各处理变化趋势不一致。一方面,残留乳酸对部分结构较松散的半纤维素具有一定水解作用,可能导致NDF表观下降^[18];另一方面,酵母菌的等好氧微生物开始快速消耗WSC和有机酸,使得难降解的纤维成分在总干物质中的相对比例上升^[19]。在有氧暴露后期(8~14 d),T40处理的NDF和ADF显著高于其他处理,这一现象更可能与原料组成及降解顺序有关。茶树枝叶富含木质化程度较高的细胞壁组分,其结构性碳水化合物较难被进一步降解^[19];同时,有氧条件下水溶性碳水化合物、有机酸及部分可溶性含氮物质被优先消耗,导致纤维组分在干物质中的相对比例升高^[17,19]。

WSC作为青贮体系中最易利用的碳源,在有氧暴露过程中通常被酵母菌和好氧细菌快速消耗^[1,18]。T10处理在有氧暴露过程中WSC含量未出现下降,反而呈上升趋势。这可能与其较高乳酸水平对好氧微生物的抑制作用有关^[20],同时乳酸在一定条件下可参与半纤维素的水解过程,持续释放可溶性糖类物质^[19],使得WSC的含量得到了增加。

随着有氧暴露时间的延长,不同处理组在面对有氧胁迫时表现出了截然不同的抵抗力。试验中,不同处理的酵母菌数量均在有氧暴露后得到了增加,这可能是因为饲料内的乳酸与WSC会逐渐被酵母菌消耗,使得酵母菌的微生物数量上升^[20]。在此作用下,各处理的pH值随有氧暴露时间延长总体呈上升趋势,并因此促进了霉菌的生长^[21]。然而,在绝大多数

处理的霉菌数量处于未检出状态时,T40处理却在1 d和3 d时检测到了高丰度的霉菌,这可能是因为其较高的WSC含量及pH促进了霉菌繁育^[22]。

乙酸主要由异型发酵乳酸菌产生,其能够抑制酵母和霉菌生长,从而提高青贮有氧稳定性^[23]。研究中,T0处理随有氧暴露时间增加乙酸含量产生了显著的变化波动,这可能说明T0处理的FTMR在有氧暴露期间发生了更强烈的杂菌代谢活动和二次发酵过程。而T10、T20和T30处理始终维持稳态,说明其发酵体系在有氧暴露过程中保持了较稳定的微生物代谢状态。值得注意的是,T40在0 d时便拥有较高的氨态氮占总氮比率,这与其高水平pH的结果相符。而根据Haiyu等^[24]研究发现,将废弃茶叶单独青贮也产生了生成高水平氨态氮占总氮比率的现象。因此推测T40处理的茶枝叶成为了青贮的主导底物,使得体系从玉米发酵转向茶枝叶主导发酵。T0与T20的氨态氮占总氮比率随着时间的增长均呈现上升趋势。随有氧暴露时间延长,乳酸被持续消耗,体系pH值升高,原有酸抑制逐渐减弱,促进了耐酸性较差的腐败菌(如肠菌)数量的增加,这加剧了蛋白质水解和脱氨过程,进而导致氨态氮逐步积累^[25]。本研究中,T0和T20处理由于缺乏抑制作用,蛋白降解程度较高,而T10处理氨态氮上升幅度较缓,这可能是因为适量的废弃茶树枝叶维持了更低的酸性环境,从而削减了肠菌等腐败微生物的数量^[9],并且延缓了CP的降解^[10]。因此,T10处理在有氧暴露过程中依然保持了较高的V-score评分,并表现出了较优的有氧稳定性。

4 结论

将废弃茶树枝叶作为非常规饲料原料引入FTMR中,其对体系有氧稳定性的影响呈现出复杂的剂量依赖。综合来看,添加10%的废弃茶树枝叶能为FTMR提供较好的有氧稳定性,并在多数时间点维持较高的V-score评分,该结果为实现茶叶副产品的资源化利用提供了理论依据。因此,后续研究可结合微生物群落结构、茶多酚等活性成分变化,进一步阐明废弃茶树枝叶改善FTMR有氧稳定性的作用机制,同时,也可通过动物饲喂试验验证其对反刍动物生产性能、瘤胃发酵和营养利用效率的影响。

参考文献

- [1] KUNG L, 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
- [2] SCHINGOETHE D J. A 100-Year Review: total mixed ration feeding of dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(12):10143-10150
- [3] 梁龙飞,王飞,董祥,等. ‘热研4号’王草替代紫花苜蓿对TMR发酵品质及有氧稳定性的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(3):703-711
- [4] WANG Z, AHAMD W, ZHU A F, et al. Recent advances review in tea waste: High-value applications, processing technology, and value-added products[J]. *Science of the Total Environment*, 2024(946):174225
- [5] GUO S S, KUMAR A M, WANG Y F, et al. Current understanding in conversion and application of tea waste biomass: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2021(338):12553
- [6] LEI X C, NA B B, ZHOU T, et al. Effects of dried tea residues of different processing techniques on the nutritional parameters, fermentation quality, and bacterial structure of silage alfalfa[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(5):889
- [7] YANG Y, ZHANG T. Antimicrobial activities of tea polyphenol on phytopathogens: A review[J]. *Molecules*, 2019, 24(4):816
- [8] 熊吉. 日粮中添加茶叶粉对彭县黄鸡生长性能、肌肉品质及血液生化指标影响的研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2018:35
- XIONG J. Effects of dietary tea powder supplementation on growth performances, carcass and meat traits, and serum biochemical indices of Pengxian yellow chicken[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2018:35
- [9] XU R, WANG G Q, WU B C, et al. Effect of tea residue on performance and pork quality of finishing pigs[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2017(5):73-75, 286
- [10] 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 *styro* silage[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13:993750
- [11] 韩雅珊. 食品化学试验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 1993:2-42
- HAN Y S. Guidance of food chemistry experiment[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993: 2-42
- [12] 孙娟娟,阿拉木斯,白春生,等. 青贮饲料质量检测实用手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2017:14-30
- SUN J J, ALAMUSI, BAI C S, et al. Practical manual for silage feed quality detection[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2017:14-30
- [13] 宁开桂. 实用饲料分析手册[M]. 北京:中国农业出版社, 1993:84-91
- NING K G. Practical feed analysis manual[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993:84-91
- [14] OHMOMO S, TANAKA O, KITAMOTO, et al. Silage and microbial performance, old story but new problems[J]. *Journal of Agricultural Research Quarterly*, 2002, 36(2):59-71
- [15] 黄乃馨,李雪枫,展小霞,等. 含水量对柱花草青贮品质和微生物群落动态的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(8):2648-2658
- HUANG N X, LI X F, ZHAN X X, et al. Effects of moisture content on the fermentation quality and microbial community diversity of stylo silage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(8): 2648-2658
- [16] 徐梦婷,郝艳宾,齐建勋,等. 多酚与蛋白相互作用对蛋白特性影响研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(10):224-229
- XU M T, HAO Y B, QI J X, et al. Interactions between food polyphenols and proteins and their effects on protein characteristics[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(10):224-229
- [17] TABACCO E, RIGHI F, QUARANTELLI A, et al. Dry matter and nutritional losses during aerobic deterioration of corn and sorghum silages as influenced by different lactic acid bacteria inocula[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(3): 1409-1419
- [18] MUCK R E, NADEAU E M G, MCALLISTER T A, et al. Silage review: recent advances and future uses of silage additives[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5):3980-4000
- [19] BORREANI G, TABACCO E, SCHMIDT R J, et al. Silage review: factors affecting dry matter and quality losses in silages[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5):3952-3979
- [20] SCHMIDT R J, KUNG L J R. The effects of *Lactobacillus* Buchneri with or without a homolactic bacterium on the fermentation and aerobic stability of corn silages made at different locations[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(4):1616-1624
- [21] LIANG X Y, SHAO T, LIU H P, et al. Isolation, identification and spoilage capability of specific spoilage organisms on silage during aerobic deterioration[J]. *Fermentation*, 2026, 12(1):47
- [22] OGUNADE I M, MARTINEZ-TUPPIA C, QUEIROZ O C M, et al. Silage review: mycotoxins in silage: occurrence, effects, prevention, and mitigation[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5):4034-4059
- [23] 王伟,赵牧其尔,王志军,等. 添加剂对披碱草青贮发酵品质及微生物数量的影响[J]. *草地学报*, 2026, 34(2):679-686
- WANG W, ZHAO M, WANG Z J, et al. Effects of additives on fermentation quality and microbial quantity of *Elymus dahuricus* silage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2026, 34(2):679-686
- [24] LIN H Y, LIN S Q, AWASTHI M K, et al. Exploring the bacterial community and fermentation characteristics during silage fermentation of abandoned fresh tea leaves[J]. *Chemosphere*, 2021(283):131234
- [25] WANG C, ZHENG M Y, WU S, et al. Effects of Gallic acid on fermentation parameters, protein fraction, and bacterial community of whole plant soybean silage[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021(12):662966