

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.032

引用格式:余泓毅,张一桦,刘丽仙,等.不同比例饲用燕麦与红花茎叶混合青贮品质研究[J].草地学报,2026,34(3):1094—1105

YU Hong-yi, ZHANG Yi-hua, LIU Li-xian, et al. Study on Silage Quality of Forage Oats and Safflower Stems and Leaves in Different Mixing Ratios[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1094—1105

不同比例饲用燕麦与红花茎叶混合青贮品质研究

余泓毅¹, 张一桦¹, 刘丽仙², 李乔仙³, 李思源¹, 何胤茜¹, 边之懿¹, 赵志丽¹, 段新慧^{1*}

(1. 云南农业大学动物科学技术学院, 云南 昆明 650201; 2. 楚雄师范学院, 云南 楚雄 675099;

3. 云南省草地动物科学研究院, 云南 昆明 650212)

摘要:为了充分利用红花(*Carthamus tinctorius*)副产物,探讨不同比例饲用燕麦(*Avena sativa*)与红花茎叶混合青贮的最佳比例,本研究设计了6个处理,即燕麦与红花茎叶以鲜重混合,混合比例为10:0(CK)、9:1(H₁₀)、8:2(H₂₀)、7:3(H₃₀)、6:4(H₄₀)、5:5(H₅₀),每个处理设3组重复,装罐密封发酵60 d后,开罐取样,进行发酵品质、营养价值以及细菌群落结构测定。结果表明:试验组感官评定结果均在尚好及以上;CK组和H₁₀组pH值显著高于其他试验组($P<0.05$),各试验组之间氨态氮含量并无显著差异,H₃₀组乳酸、乙酸含量显著高于其他试验组($P<0.05$),且酸性洗涤纤维含量和中性洗涤纤维含量均是最低,酸性洗涤纤维含量各试验组之间差异不显著,CK组丙酸、丁酸含量显著高于其他试验组($P<0.05$);干物质含量和可溶性糖含量随着添加红花茎叶混合青贮比例增加而增加,而粗蛋白含量则反之。结合隶属函数法进行综合评价,最终得出H₃₀组青贮发酵品质最好;微生物方面,在细菌门水平上,各试验组优势菌群均为厚壁菌门(*Firmicutes*),在细菌属水平上,除H₄₀组优势菌群为未分类的叶绿体(unidentified-*Chloroplast*)外,其他试验组优势菌群均为魏斯氏菌属(*Weissella*)。综合分析结果表明,燕麦与红花茎叶的最佳混合比例为7:3,发酵品质和营养品质均得到了明显的改善。

关键词:燕麦;红花茎叶;混合青贮;发酵品质;营养成分;微生物

中图分类号:S816.53

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1094-12

Study on Silage Quality of Forage Oats and Safflower Stems and Leaves in Different Mixing Ratios

YU Hong-yi¹, ZHANG Yi-hua¹, LIU Li-xian², LI Qiao-xian³, LI Si-yuan¹, HE Yin-xi¹,

BIAN Zhi-yi¹, ZHAO Zhi-li¹, DUAN Xin-hui^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan Province 650201, China; 2. Chuxiong Normal University, Chuxiong, Yunnan Province 675099, China; 3. Research Institute of Grassland Animal Science, Kunming, Yunnan Province 650212, China)

Abstract: In order to fully utilize the by-products of safflower (*Carthamus tinctorius*) and explore the best ratio of mixing silage in different proportions with forage oats (*Avena sativa*) and safflower stems and leaves, six treatments were designed in this study. Oats and safflower stems and leaves were mixed with fresh weight, and the mixing ratios were 10:0 (CK), 9:1 (H₁₀), 8:2 (H₂₀), 7:3 (H₃₀), 6:4 (H₄₀) and 5:5 (H₅₀). Each treatment was repeated in three groups. After sealing and fermentation for 60 days, the samples were taken and analyzed. The fermentation quality, nutritional value and bacterial community structure were determined. The

收稿日期:2025-04-24;修回日期:2025-06-11

基金项目:乡村振兴科技专项-乡村振兴科技示范村:梁河县芒陇乡村振兴科技创新村(202404BU090032);云南省国际科技特派员项目(202303AK140008)资助

作者简介:余泓毅(2001-),男,汉族,湖南新化人,硕士研究生,主要从事饲草生产与草产品加工方向研究,E-mail:2636747781@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:duanxinhui76@126.com

results showed that the sensory evaluation results of the experimental group were still good or above. The pH values of CK group and H₁₀ group were significantly higher than those of other experimental groups ($P < 0.05$). There was no significant difference in ammonia nitrogen content among the experimental groups. The contents of lactic acid and acetic acid in H₃₀ group were significantly higher than those in other experimental groups ($P < 0.05$), and the contents of acid detergent fiber and neutral detergent fiber were the lowest. There was no significant difference in acid detergent fiber content among the experimental groups. The contents of propionic acid and butyric acid in CK group were significantly higher than those in other experimental groups ($P < 0.05$). The dry matter content and soluble sugar content increased with the increase of the proportion of mixed silage, while the crude protein content was decreased in the opposite direction. Combined with the comprehensive evaluation of the membership function method, it was concluded that the silage fermentation quality of the H₃₀ group was the best, in terms of microorganisms, at the phylum level, the dominant bacteria in each test group were *Firmicutes*. At the genus level, except for the unidentified-*Chloroplast* in the H₄₀ group, the dominant bacteria in the other test groups were *Weissella*. The results of comprehensive analysis showed that the optimal mixing ratio of oats and safflower stems and leaves was 7:3, and the fermentation quality and nutritional quality were significantly improved.

Key words: Oats; Safflower Stems and Leaves; Mixed Silage; Fermentation Quality; Nutritional Components; Microorganisms

随着畜牧业的快速发展,对于优质饲草的需求越来越高。红花(*Carthamus tinctorius*)作为一种传统中药材,是菊科的一种草本植物,主要分布在新疆、四川、云南等地^[1-2]。红花中含有多种化学成分,如黄酮类、生物碱类、多糖类等,这些成分具有抗氧化、抗炎、抗血栓、抗肿瘤等多种药理活性^[3]。有研究表明,在动物饲料中添加适量的红花,能够显著提高动物的生长性能。在羔羊基础日粮中添加红花籽替代玉米和豆粕,能够改善肉的品质和脂肪酸含量,而不损害生产性能和胴体性状^[4];在日粮中添加红花油,能够改善饲料利用率,使得肥猪增重效果良好,具有提高肉产品中不饱和脂肪酸含量,降低胆固醇含量,改善猪肉品质的作用^[5];在蛋鸡饲料中添加适量的红花黄色素,可提高蛋鸡的产蛋率和蛋重,降低料蛋比^[6]。这主要是因为红花中的部分代谢产物如淫羊藿次苷、4-乙基苯基硫酸盐等,能够促进动物的消化吸收,提高饲料利用率,为动物生长提供充足的营养物质。

混合青贮技术是指通过将两种及以上饲草原料按科学配比进行协同发酵处理的新型青贮工艺。该技术的研发背景源于某些单一原料在传统青贮过程中存在的发酵障碍问题,这类原料若单独青贮往往难以达到理想品质,必须借助添加剂的辅助和通过原料复配实现优化^[7]。目前我国具有非常丰富的秸秆和农副产品资源,且利用率较低,因此将新鲜牧草与秸秆和农副产品进行混合青贮研究是十分有必要的^[8]。Li等^[9]研究表明,在全株木薯与玉米秸秆的混合青贮研究中,3:7为最佳混贮比例,在

该比例下青贮饲料pH值和丁酸(Butyric acid, BA)含量显著降低,乳酸(Lactic acid, LA)含量增加,有害细菌的丰度降低,乳酸菌丰度增加,显著改善了青贮品质;谢华亮等^[10]研究表明,将饲料桑和红薯渣混合青贮后,充分发挥了饲料桑粗蛋白含量高,红薯渣纤维含量低、可溶性糖含量高的优点,两者互补,提高了青贮品质。

红花以花瓣入药,花瓣采集后,剩余的红花枝叶、茎秆等往往得不到充分利用,大部分作为农业废弃物被丢弃。为更好地利用红花茎叶废弃物,本研究选取与红花同期成熟的燕麦(*Avena sativa*)作为原材料进行混合青贮,探索不同混合比红花茎叶和燕麦混合青贮饲料品质,探索红花秸秆变废为宝途径,同时为非粮型饲料的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在云南农业大学草业实验室内完成,燕麦和红花茎叶于2024年4月26日采集于大理白族自治州巍山彝族回族自治县牛街乡(100.08° E, 25.03° N),收获时天气晴朗,其中燕麦品种为‘贝勒二号’,红花茎叶为采集红花后剩下的植株,经20目粉碎后的细糠。

1.2 试验设计

本试验采用单因素设计,共设计6个组别,其中对照组(CK)为单燕麦青贮,其余5组饲用燕麦与红

花茎叶比例分别为9:1,8:2,7:3,6:4,5:5,分别记为 H_{10} , H_{20} , H_{30} , H_{40} , H_{50} 。将燕麦收获后用秸秆揉丝机粉碎至2~3 cm,按照比例分别与红花茎叶混合,并控制水分在60%~70%,将原料混合后握在手中,即指缝中有水珠渗出但不下滴,这时原料的含水量较适宜,即将青贮饲料装入青贮发酵罐(容量2500 mL,顶新塑料制品加工厂),压实排净空气,密封发酵即可。每组设置3个重复,在发酵60 d后开罐取样测定相关数据。

1.3 测定指标

1.3.1 感官评定 青贮饲料从色泽、气味和结构等方面进行青贮质量感官评定,混合青贮饲料感官评价参照德国农业协会(DLG)评分标准^[11]。感官评定总分为20分,可分为优良(16~20分)、尚好(10~15分)、中等(5~9分)、腐败(0~4分)四个等级。

1.3.2 发酵品质测定 开罐后取10 g样品于烧杯内,加入90 mL无菌水后密封,于4℃冰箱中静置24 h,用4层纱布过滤后得到浸提液,用于发酵指标的测定。pH值使用pH计测定^[12];氨态氮($\text{NH}_3\text{-N}$)含量采用苯酚一次氯酸钠法测定^[13];LA、乙酸(Acetic acid, AA)、丙酸(Propionic acid, PA)、BA等有机酸含量采用液相色谱法测定^[14]。

1.3.3 营养品质测定 取发酵60 d后的青贮饲料,在烘箱中65℃烘至恒重,用于营养品质测定。采用65℃烘干法测定干物质(Dry matter, DM)含量^[15];粗蛋白(Crude protein, CP)含量使用凯氏定氮仪测定;中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)含量使用全自动纤维分析仪测定;可溶性糖(Water soluble carbohydrates, WSC)含量采用蒽酮—硫酸法测定^[16]。

1.3.4 综合价值评定 采用隶属函数法对混合青贮饲料发酵品质和营养成分进行综合分析^[17],以DM, CP, LA, AA为正向指标,采用公式(1)计算;ADF, NDF, PA, BA, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为负向指标,采用公式(2)计算,具体计算公式如下:

$$X_{ij} = (X - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (1)$$

$$X_{ij} = 1 - (X - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为指标隶属函数值, X 为指标测定值, $X_{j\max}$ 和 $X_{j\min}$ 分别为指标最大值和最小值。

1.3.5 细菌多样性测定 采用CTAB法提取样本的DNA。在1%的琼脂糖凝胶上检测DNA的浓度和纯度,根据浓度不同,用无菌水将DNA稀释至 $1 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 。采用V3~V4区引物[341F(5'-CCTAC-GGGNGGCWGCAG-3')和805R(5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3')]进行扩增。所有PCR混合液加入15 μL PhusionHigh-Fidelity PCR Master Mix、 $2 \times 10^{-5} \text{ cm}$ 引物和10 ng基因组DNA模板,在98℃下进行1 min的第一次变性,然后在98℃(10 s)、50℃(30 s)和72℃(30 s)下进行30次循环,最后在72℃下保持5 min。之后进行文库构建,构建好的文库经过Qubit和qPCR定量,文库合格后进行上机测序。由北京诺禾致源科技股份有限公司进行测定,并在illumina测序平台进行分析。

1.4 数据分析与统计

采用Excel整理数据,SPSS 26.0进行单因素方差分析,Origin作图,Duncan法进行多重比较。数据结果采用平均值±标准差来表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同比例燕麦与红花茎叶混合青贮饲料感官评价分析

由表1可知,不同比例燕麦和红花茎叶混合青贮饲料发酵后总体感官评定结果较好,其中,CK组评分最低,气味稍微带酸味,茎叶结构保持较差,评分为15分,等级为尚好;其余试验组感官评分等级均为优良,其中 H_{30} 组青贮效果最好,得分为20分。

2.2 不同比例燕麦与红花茎叶混合青贮饲料发酵品质分析

由表2可知,CK组和 H_{10} 组pH值显著高于其他试验组($P < 0.05$);各试验组之间 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量并无显著差异; H_{30} 组LA、AA含量显著高于其他试验组($P < 0.05$);CK组PA含量显著高于其他试验组($P < 0.05$),整体PA含量的变化与红花茎叶的比例变化没有明显的关系;BA含量随着红花茎叶比例的增加,呈现先减少后增加的趋势,在 H_{20} 组时含量最低,显著低于其他试验组($P < 0.05$)。

表 1 不同比例燕麦和红花茎叶混合青贮饲料感官评定结果

Table 1 Sensory evaluation results of mixed silage with different proportions of oats and Yunnan safflower bran

处理 Treatment	气味 Odor	质地结构 Texture structure	色泽 Color	评分 Scores	等级 Grade
CK	11	2	2	15	尚好
H ₁₀	12	2	2	16	优良
H ₂₀	13	4	2	19	优良
H ₃₀	14	4	2	20	优良
H ₄₀	13	4	2	19	优良
H ₅₀	12	3	2	18	优良

表 2 不同比例燕麦和红花茎叶混合青贮饲料发酵品质变化

Table 2 Fermentation quality changes of mixed silage with different proportions of oats and Yunnan safflower bran

处理 Treatment	pH	氨态氮 NH ₃ -H/(g·kg ⁻¹)	乳酸 (Lactic acid, LA)/ (g·kg ⁻¹)	乙酸 (Acetic acid, AA)/ (g·kg ⁻¹)	丙酸 (Propionic acid, PA)/ (g·kg ⁻¹)	丁酸 (Butyric acid, BA)/ (g·kg ⁻¹)
CK	5.35±0.12 ^a	0.72±0.31 ^a	11.37±0.04 ^e	5.93±0.02 ^e	1.55±0.01 ^a	6.19±0.03 ^a
H ₁₀	5.47±0.11 ^a	0.92±0.35 ^a	7.32±0.04 ^f	4.18±0.01 ^f	0.34±0.03 ^f	4.27±0.02 ^b
H ₂₀	4.55±0.08 ^b	0.62±0.05 ^a	13.48±0.02 ^d	6.20±0.01 ^d	0.68±0.01 ^e	1.58±0.01 ^f
H ₃₀	4.52±0.01 ^b	0.51±0.08 ^a	33.85±0.05 ^a	11.13±0.03 ^a	0.92±0.01 ^d	2.90±0.02 ^e
H ₄₀	4.53±0.03 ^b	0.70±0.24 ^a	26.00±0.09 ^b	9.25±0.04 ^b	1.18±0.01 ^b	3.22±0.01 ^d
H ₅₀	4.53±0.03 ^b	0.60±0.28 ^a	21.90±0.07 ^c	8.71±0.02 ^c	0.99±0.02 ^c	3.55±0.02 ^c

注:表中各指标均根据样品鲜重计算;同列数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Note: The indicators in the table were calculated based on the fresh weight of the samples. The same column data with different lowercase letters showed significant difference ($P<0.05$). The same as below

2.3 不同比例燕麦与红花茎叶混合青贮饲料营养成分分析组合

由表 3 可知,DM 的含量随着红花茎叶比例增加总体呈现增加的趋势,CK 组 DM 含量显著低于其他试验组($P<0.05$);随着红花茎叶比例的增加,CP 含量变化总体呈现下降的趋势,H₄₀组、H₅₀

组 CP 含量显著低于其他试验组($P<0.05$);各试验组之间 ADF 含量没有显著差异;CK 组和 H₁₀ 组 NDF 含量显著高于其他试验组($P<0.05$);随着红花茎叶比例的增加,WSC 含量呈现增加的趋势,H₅₀ 组 WSC 含量显著高于其他试验组($P<0.05$)。

表 3 不同比例燕麦和红花茎叶混合青贮饲料营养成分变化

Table 3 Nutrient composition changes of mixed silage with different proportions of oats and Yunnan safflower bran

处理 Treatment	干物质 (Dry matter, DM)	粗蛋白 (Crude protein, CP)	酸性洗涤纤维 (Acid detergent fiber, ADF)	中性洗涤纤维 (Neutral detergent fiber, NDF)	可溶性糖 (Water soluble carbohydrates, WSC)
CK	32.32±0.03 ^c	8.39±0.64 ^a	38.13±1.34 ^a	61.55±1.64 ^a	0.55±0.06 ^d
H ₁₀	32.54±0.03 ^b	8.34±0.34 ^a	38.01±1.66 ^a	60.80±0.57 ^a	0.72±0.20 ^d
H ₂₀	32.85±0.03 ^a	8.04±0.34 ^a	37.11±0.69 ^a	58.35±0.69 ^b	1.35±0.15 ^c
H ₃₀	32.83±0.05 ^a	7.76±0.50 ^a	36.21±1.23 ^a	57.17±0.54 ^b	1.58±0.09 ^b
H ₄₀	32.89±0.06 ^a	6.50±0.35 ^b	38.15±0.76 ^a	57.70±0.57 ^b	1.77±0.04 ^{ab}
H ₅₀	32.97±0.23 ^a	6.55±0.11 ^b	36.87±1.06 ^a	57.93±0.28 ^b	1.81±0.07 ^a

注:表中各指标均根据样品干重计算,单位为%

Note: Each index in the table is calculated according to the dry weight of the sample, and the unit is %

2.4 综合价值评定与排序

如表 4 所示, H₃₀ 组得分最高, 而 CK 组得分最低; 总体得分排序为: H₃₀ 组>H₅₀ 组>H₂₀ 组>H₄₀ 组>H₁₀ 组>CK 组。

2.5 不同比例燕麦与红花茎叶混合青贮饲料细菌多样性分析

2.5.1 Alpha 多样性分析 由表 5 可知, 各处理组覆盖度均大于 0.99, 表明结果可以准确反映青贮

表 4 青贮饲料综合价值评定及排名

Table 4 Comprehensive value evaluation and ranking of silage

项目 Items	CK	H ₁₀	H ₂₀	H ₃₀	H ₄₀	H ₅₀
pH	0.13	0.00	0.97	1.00	0.99	0.99
氨态氮 NH ₃ -N	0.49	0.00	0.73	1.00	0.54	0.78
乳酸 LA	0.15	0.00	0.23	1.00	0.70	0.55
乙酸 AA	0.25	0.00	0.29	1.00	0.73	0.65
丙酸 PA	0.00	1.00	0.72	0.52	0.31	0.46
丁酸 BA	0.00	0.42	1.00	0.71	0.64	0.57
干物质 DM	0.00	0.34	0.82	0.78	0.88	1.00
粗蛋白 CP	1.00	0.97	0.81	0.67	0.00	0.03
酸性洗涤纤维 ADF	0.01	0.07	0.54	1.00	0.00	0.66
中性洗涤纤维 NDF	0.00	0.17	0.73	1.00	0.88	0.83
可溶性糖 WSC	0.00	0.13	0.63	0.82	0.97	1.00
总隶属度 Average value	2.03	3.10	7.47	9.50	6.64	7.52
排序 Rank	6	5	3	1	4	2

饲料细菌群落特征。H₃₀组物种丰富度指数和Chao1指数最低,说明该试验组细菌物种丰富度最低,而H₅₀组Chao1指数最高,表明该试验组细菌物种

丰富度最高。CK组香农指数最高,表明其物种多样性最高,而在添加红花茎叶混合青贮后,青贮饲料细菌多样性会降低。

表 5 不同比例燕麦和红花茎叶混合青贮饲料细菌多样性指数

Table 5 Bacteria diversity index of mixed silage with different proportions of oat and Yunnan safflower bran

处理 Treatment	物种丰富度指数 Observed species index	Chao1 指数 Chao 1 index	香农指数 Shannon index	辛普森指数 Simpson index	覆盖度 Coverage
CK	259	263.105	4.691	0.912	1.00
H ₁₀	257	258.800	4.557	0.866	1.00
H ₂₀	215	217.647	4.380	0.877	1.00
H ₃₀	184	185.120	4.033	0.872	1.00
H ₄₀	321	331.929	3.996	0.847	1.00
H ₅₀	422	426.125	4.465	0.887	1.00

2.5.2 不同比例燕麦与红花茎叶混合青贮饲料细菌微生物在门水平上的分布 由图1可知,各试验组在门水平上丰度排名前三的菌群分别为厚壁菌门(Firmicutes)、变形菌门(Proteobacteria)和蓝藻菌门(Cyanobacteria),其中厚壁菌门为优势菌群。H₅₀组厚壁菌门丰度最高;H₂₀组厚壁菌门丰度最低,但变形菌门丰度最高;H₄₀组蓝藻菌门丰度最高,达到33.18%。

2.5.3 不同比例燕麦与红花茎叶混合青贮饲料细菌微生物在属水平上的分布 由图2可知,混合青贮饲料在属水平上检测到排名前十的菌群分别是魏斯氏菌属(*Weissella*)、肠球菌属(*Enterococcus*)、果实乳杆菌属(*Fructilactobacillus*)、乳杆菌属(*Lactobacillus*)、未分类的叶绿体属(unidentified-*Chloroplast*)、植物乳杆菌属(*Lactiplantibacillus*)、促生乳杆菌属(*Levilactobacillus*)、肠杆菌属

(*Enterobacter*)、伴生乳杆菌属(*Companilactobacillus*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)等。其中,魏斯氏菌属在CK组、H₁₀组、H₂₀组、H₃₀组和H₅₀组丰度最高,且为优势菌属;H₄₀组中未分类的叶绿体丰度最高,为该试验组优势菌属。

2.5.4 不同比例燕麦与红花茎叶混合青贮饲料细菌群落与青贮品质关联性分析 如图3所示,果实乳杆菌属与DM呈显著正相关,与CP呈显著负相关($P<0.05$);未分类的叶绿体与WSC呈极显著正相关,与CP呈极显著负相关($P<0.01$),同时与DM呈显著正相关,与NDF呈显著负相关($P<0.05$);植物乳杆菌属与pH、NH₃-N、BA呈显著正相关,与LA、AA呈显著负相关($P<0.05$);肠杆菌属与CP呈显著正相关,与DM呈显著负相关($P<0.05$),同时与WSC呈极显著负相关($P<0.01$)。

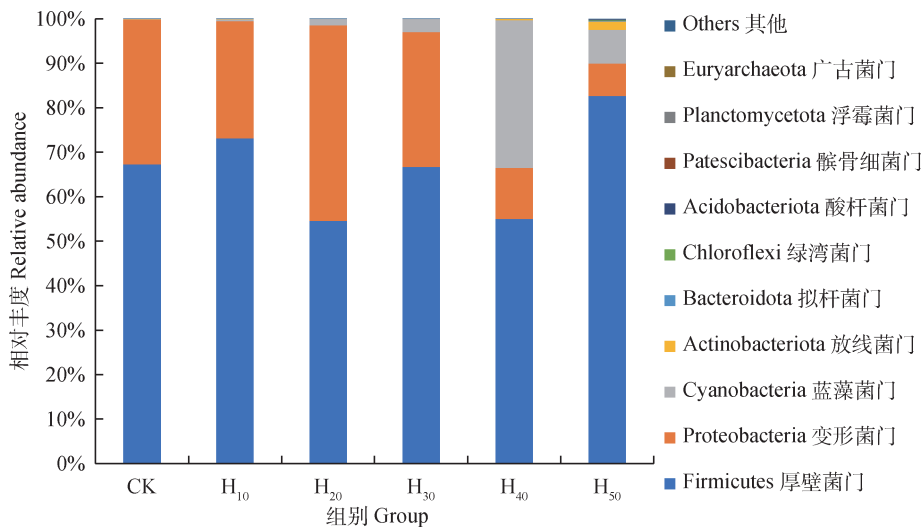


图 1 混合青贮饲料细菌微生物在门水平上的分布

Fig. 1 The distribution of bacteria in mixed silage at phylum level

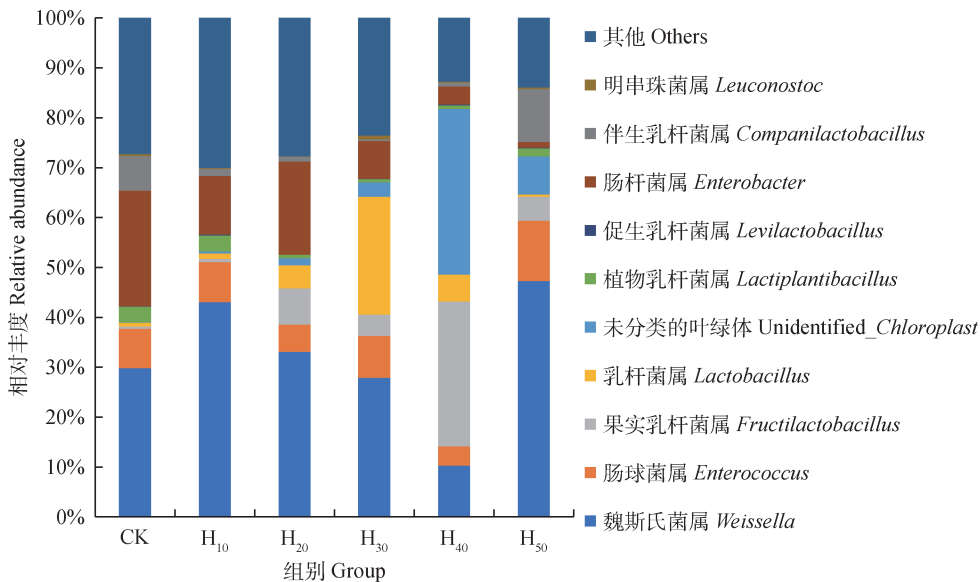


图 2 混合青贮饲料细菌在属水平上的分布

Fig. 2 Distribution of bacteria in mixed silage at the genus level

3 讨论

3.1 不同比例对燕麦与红花茎叶混合青贮饲料感官品质的影响

感官评价是指通过人的嗅觉、视觉以及触觉对饲料的颜色、气味、水分含量等进行综合评价^[18]。发酵品质好的青贮饲料一般具有酸香味^[19]且茎叶结构良好,色泽呈淡褐色。本研究分为一个对照组(CK)和五个处理组,其中五个处理组感官评价均为优良,CK组感官评价结果为尚好,表明燕麦与红花茎叶混合青贮的感官评价结果优于单燕麦青贮,混合青贮后品质有所提升,这与蔺红玲等^[20]研究结果

相似。燕麦本身含水量高,单独青贮不易成功,容易腐败且营养保存较差^[21],因此在添加了红花茎叶后,有效改善了上述问题,感官品质也得到改善。本试验中感官评价最高的组为H₃₀组。

3.2 不同比例对燕麦与红花茎叶混合青贮饲料发酵品质的影响

优质的青贮饲料应该含有较高的LA,较低的BA,NH₃-N含量以及合适的pH值^[22]。青贮饲料在发酵过程中会产生有机酸,并且有机酸的种类和浓度含量都能直接影响青贮饲料的品质^[23]。pH值能明显反映出青贮饲料的发酵品质,优质青贮饲料pH

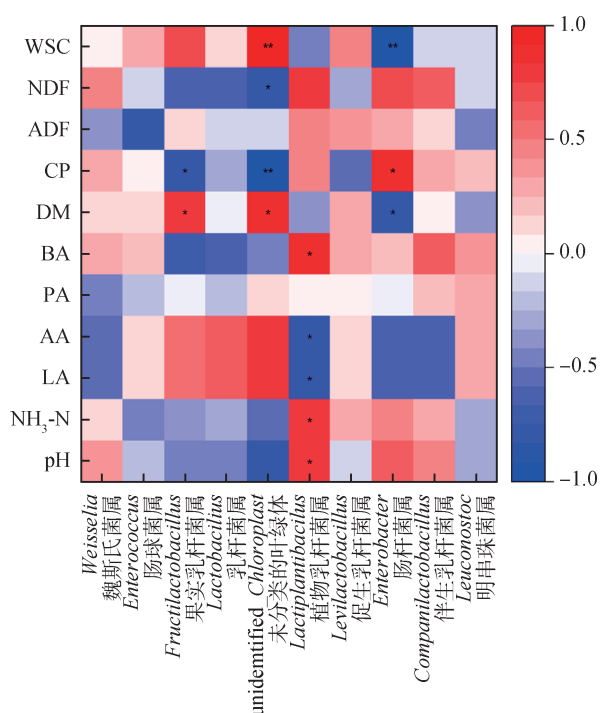


图3 混合青贮饲料细菌群落和青贮品质之间 Spearman 相关性分析热图

Fig. 3 Spearman correlation analysis heatmap between bacterial community and silage quality of mixed silage

注:横坐标代表属水平丰度排名前10的菌群,纵坐标代表青贮品质相关指标,红色代表正相关,蓝色代表负相关,星号代表显著性;*代表具有显著相关性($P < 0.05$);**代表具有极显著相关性($P < 0.01$)

Note: The abscissa represents the top 10 flora in the horizontal abundance, the ordinate represents the silage quality related index, the red represents the positive correlation, the blue represents the negative correlation, and the asterisk represents the significance, * represents a significant correlation ($P < 0.05$); ** represents a very significant correlation ($P < 0.01$)

值应该低于4.2^[24]。本试验中,所有试验组pH值均在4.2以上,CK组和H₁₀组pH值更是达到5.35和5.47,显著高于其他试验组($P < 0.05$),说明该两组发酵水平较差,可能是由于燕麦原料表面附着的乳酸菌群落不够多难以维持发酵^[4],难以达到低pH值的环境,导致青贮发酵品质降低^[25],也有可能是燕麦原料结构较松散,密封发酵时氧气未能完全排净,使得好氧细菌发酵导致pH值下降较慢。而添加适量红花茎叶混合青贮后,pH值显著降低($P < 0.05$),达到4.52~4.55,发酵品质明显改善。适当比例的红花茎叶的加入改善了青贮原料表面微生物附着环境,同时红花茎叶在装罐时能填入燕麦空隙中,排净空气,极大提升了发酵品质。NH₃-N含量是评判青贮饲料品质的重要指标,一般来说,NH₃-N含量占比越小,青贮饲料的发酵品质越

好^[26],NH₃-N含量越高意味着发酵过程中肠杆菌等有害细菌含量越高^[27-28],不利于青贮品质提升。本次研究结果表明,虽然各试验组之间NH₃-N含量无显著差异,但相比较H₃₀组NH₃-N含量最低,发酵品质好,同时也表明H₃₀组青贮饲料中氨基酸与蛋白质含量被分解较少,能被家畜所吸收的蛋白质含量多。LA是有机酸中含量最高,酸性最强的组分^[29],其含量越高,越有利于青贮品质的提升。适量的AA和PA能有效提高青贮品质,提高青贮饲料有氧稳定性^[30-31]。AA的主要作用是降低青贮饲料的pH值,从而抑制腐败微生物的产生,减少营养物质的损失^[32]。PA是丙酸杆菌、丙酸梭菌等产物,但同时也能抑制酵母菌和霉菌的发酵^[33]。BA含量作为青贮质量评判的指标之一,通常是由一些腐败细菌所产生的,优质青贮饲料中应当不含或少含丁酸^[34-35]。本研究中,H₃₀组LA,AA含量显著高于其他试验组($P < 0.05$),可能与H₃₀组前期pH下降快,乳杆菌丰度最高有关。而随着红花茎叶混合比例的继续提高,LA和AA的含量逐渐降低,表明合适的混合比例有利于乳酸菌的发酵,提高青贮发酵品质。CK组PA和BA含量显著高于其他试验组($P < 0.05$),表明燕麦单独青贮发酵品质较差,好氧细菌和有害细菌如梭状芽孢杆菌属细菌大量发酵,抑制了LA产生,使得pH难以下降,无法抑制BA活性,因此引发养分损失,产生大量BA^[36]。添加红花茎叶后,BA含量显著降低,青贮品质得到提升。

3.3 不同比例对燕麦与红花茎叶混合青贮饲料营养成分的影响

青贮饲料最主要的营养成分指标包括DM,CP,ADF,NDF和WSC。CP含量是反映青贮饲料营养价值的重要指标^[37]。本研究中,随着红花茎叶混合比例的增加,CP含量总体呈现降低趋势,可能是由于燕麦原料中CP含量较高,而红花茎叶原料中CP含量较低,这与魏岚等人^[38]的研究结果相似。该研究结果表明,在紫花苜蓿中添加统糠进行混合青贮,随着统糠添加比例增加,混合青贮粗蛋白含量随之降低。ADF和NDF含量对草食动物饲草消化率有着显著影响^[39],一般来说,过高的纤维会影响草食动物对饲草的消化利用^[24],其含量越低,家畜饲草消化率越高,饲用价值越大^[40]。在本研究中,各试验组ADF含量并无显著差异,NDF含量CK组和H₁₀组显著高于其他试验组($P < 0.05$),但

总体差距不大,其中H₃₀组 ADF 和 NDF 含量最低,分别为 36.21 %和 57.17 %,但总体含量偏高,可能是由于燕麦原料和红花茎叶原料的 ADF 和 NDF 含量相似。而 H₃₀组 ADF 和 NDF 含量低可能是因为该试验组 LA 含量高,乳酸菌能产生降解植物细胞壁的阿魏酸酯酶,从而使得混合青贮饲料中纤维含量降低^[41]。DM 和 WSC 均是影响青贮发酵的主要因素^[42],青贮过程中 DM 和 WSC 的降解均不利于青贮饲料 pH 的下降^[43]。DM 是评价青贮饲料营养水平的重要指标之一,因为青贮过程中乳酸菌生长发酵的营养物质均来自于青贮原料本身^[44],因此青贮饲料中 pH 值和 LA 含量都与 DM 含量有着联系。乳酸菌可以快速累积 LA 从而降低 pH,抑制有害细菌和腐败细菌生长,使青贮发酵快速进入稳定期,减少干物质损失量^[45]。本研究中,DM 含量随着红花茎叶比例的增加而增加,而 DM 含量越高,代表青贮品质越好^[46],表明添加红花茎叶混合青贮后,青贮品质提升。WSC 在青贮过程中作为发酵底物参与微生物活动^[47]。较高的 WSC 可以促进乳酸菌生长繁殖^[48],作为发酵底物产生 LA,抑制有害微生物的生长,降低 pH^[49]。因此,WSC 是青贮品质评定最重要的营养指标。本研究结果表明,WSC 含量随着红花茎叶混合比例增加而增加,说明红花茎叶原料 WSC 含量高于燕麦原料,而燕麦作为禾本科牧草,本身 WSC 含量高^[50],添加红花茎叶混合青贮后,青贮品质能够得到进一步提高。

3.4 不同比例对燕麦与红花茎叶混合青贮饲料细菌多样性的影响

香农指数和辛普森指数反映了物种的多样性,Chao1 指数和物种丰富度指数反映了物种的丰富度^[51]。本研究结果显示,H₄₀组物种多样性最低,H₃₀组物种丰富度最低,H₅₀组物种多样性最高,CK 组物种丰富度最高。青贮是一个微生物群落演变的过程,一般将微生物群落多样性降低作为青贮发酵成功的标志^[52],因此 H₃₀组和 H₄₀组细菌群落多样性较低,发酵较为成功,可能是由于 pH 下降较快,抑制了大量有害微生物,而 CK 组细菌多样性较高,发酵品质较差。

混合青贮能改善微生物群落结构,提高青贮品质。本研究结果表明,各试验组在属水平上的优势菌群为厚壁菌门,其次是变形菌门,这与 Si 等^[53]研究结果相似。厚壁菌门多为革兰氏阳性菌,主要能

产生支原体菌群、芽孢,可降解淀粉、纤维等化合物^[54],对于青贮发酵来说是有利的。而变形菌门中包含多种致病菌,会与乳酸菌争夺 WSC,降低青贮品质,对家畜健康产生危害^[55-56]。在本研究结果中,H₅₀组厚壁菌门的丰度最高,达到 82.71%,而 H₂₀组变形菌门丰度最高,达到 43.95%,可能是由于 H₅₀组在装罐时密封较好,而厚壁菌门在厌氧环境中生长较好,会迅速取代变形菌门,是厌氧环境中重要的酸性水解微生物^[57],使得 H₅₀组中厚壁菌门丰度高,而变形菌门丰度低,H₂₀组同理。除此之外,H₄₀组中出现了大量蓝藻菌门,达到 33.18%,远远高于其他试验组,He 等^[58]在研究中同样发现大量蓝藻菌门,并且成为了青贮发酵优势菌群。蓝藻菌门作为一种光合作用菌门,在生物技术和制药方面被广泛应用^[59],但在青贮方面研究较少。Meixner 等^[60]研究表明,蓝藻菌能产生碳水化合物,这可能是 H₄₀组 WSC 含量与 H₅₀组差异不显著的原因。本研究结果也证实了这一点,未分类的叶绿体属于蓝藻菌门,它与 WSC 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 DM 呈显著正相关($P < 0.05$),说明蓝藻菌门对青贮发酵品质的提升有一定的益处,具体还需要后续研究确定。

在属水平上,除 H₄₀组优势菌群为未分类的叶绿体外,其他试验组优势菌群均为魏斯氏菌属。魏斯氏菌属属于乳杆菌,除此之外,肠球菌属、果实乳杆菌属、乳杆菌属、植物乳杆菌属、促生乳杆菌属、伴生乳杆菌属均属于乳杆菌,为厚壁菌门类。乳杆菌可以防止青贮饲料腐化^[61],同时能够通过磷酸戊糖酮解和异化代谢途径,利用青贮饲料中的 WSC 降低 pH 值,提高 LA 含量,从而抑制有害菌的生长^[62]。大多数研究都表明,青贮发酵到后期,乳杆菌都会成为主要优势菌群。魏斯氏菌属作为优势菌群,在青贮过程中能发挥巨大作用。有研究表明,魏斯氏菌属对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有明显抑制作用,并作为细胞素和胞外多糖的生产者表现出益生菌的特性^[63]。除魏斯氏菌属外,果实乳杆菌属在 H₄₀组丰度达到 28.99%,乳杆菌属在 H₃₀组丰度达到 23.54%,均为该试验组的优势菌属之一。肠杆菌会利用青贮饲料中的 CP 和 WSC,产生 BA 等不良发酵物,抑制乳酸菌的生长^[64]。本研究结果表明,CK 组肠杆菌属细菌丰度较高,达到 23.24%,远高于其他试验组,这可能是 CK 组 BA 含量显著高于其他试验组($P < 0.05$),青贮品质较差的原因。同时,本研究结果还表明,肠杆菌属与 WSC 呈极显

著负相关($P < 0.01$),与 DM 含量呈显著负相关($P < 0.05$),肠杆菌利用了青贮中的 WSC 产生不良发酵物,同时增加了青贮饲料的干物质损失率,不利于青贮发酵,证实了以上观点。

4 结论

将燕麦与红花茎叶混合青贮,能够有效改善青贮品质。本研究从感官评价、发酵品质、营养价值以及微生物等多方面来看,通过隶属函数法进行分析,可以得出燕麦与红花茎叶的最佳配比为 7:3。

参考文献

- [1] ZHOU X D, TANG L Y, XU Y L, et al. Towards a better understanding of medicinal uses of *Carthamus tinctorius* L. in traditional Chinese medicine: a phytochemical and pharmacological review[J]. J Ethnopharmacol, 2014, 151(1): 27-43
- [2] 陈梦, 赵丕文, 孙艳玲, 等. 红花及其主要成分的药理作用研究进展[J]. 环球中医药, 2012, 5(7): 556-560
CHEN M, ZHAO P W, SUN Y L, et al. Advances in pharmacological function of *Carthamus tinctorius* and its essential constituents [J]. Global Traditional Chinese Medicine, 2012, 5(7): 556-560
- [3] 张喜妹, 肖江鸿, 王玉, 等. 中药红花的化学成分及色素提取工艺研究进展[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(7): 1725-1740
ZHANG X M, XIAO J H, WANG Y, et al. Research progress in chemical constituents and pigment extraction process of *Carthami Flos* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 49(7): 1725-1740
- [4] FERRERO F, PIANO S, TABACCO E, et al. Effects of conservation period and *Lactobacillus hilgardii* inoculum on the fermentation profile and aerobic stability of whole corn and sorghum silages[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2530-2540
- [5] 金文吉, 耿春银, 严昌国, 等. 日粮中添加红花油对生长育肥猪生产性能和胴体品质的影响[J]. 延边大学农学报, 2011, 33(4): 262-266
JIN W J, GENG C Y, YAN C G, et al. Effect of safflower oil on growth performance and meat quality in finishing pigs [J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2011, 33(4): 262-266
- [6] 王中华, 赵香菊. 红花黄色素对蛋鸡产蛋性能的影响[J]. 中国家禽, 2012, 34(16): 63, 66
WANG Z H, ZHAO X J. Effects of safflower yellow pigment on laying performance of laying hens [J]. China Poultry, 2012, 34(16): 63, 66
- [7] 张磊, 陈思凡, 黄国东. 混合青贮研究进展及前景[J]. 饲料研究, 2021, 44(6): 151-153
ZHANG L, CHEN S F, HUANG G D. Research progress and prospect of mixed silage [J]. 2021, 44(6): 151-153
- [8] 熊聪. 添加剂对稻秸和麦麸混合青贮效果研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021: 1-2
XIONG C. Study on the effect of additives on mixed silage of rice straw and wheat bran 2021 [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021: 1-2
- [9] LI M, ZI X J, SUN R, et al. Co-ensiling whole-plant cassava with corn stalk for excellent silage production: fermentation characteristics, bacterial community, function profile, and microbial ecological network features [J]. Agronomy (Basel), 2024, 14(3): 501
- [10] 谢华亮, 吴丽娟, 连海, 等. 饲料桑和红薯渣混合微贮对发酵品质、营养成分及微生物菌群的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(2): 250-255
XIE H L, WU L J, LIAN H, et al. Effects of mixed micro-storage of feed mulberry and sweet potato residue on fermentation quality, nutrient composition and microbial flora [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2025, 61(2): 250-255
- [11] 乃比·阿不来提, 阿曼姑·艾麦尔艾力, 艾比布拉·伊马木. 添加核桃青皮对苜蓿青贮品质及 CNCPS 蛋白组分的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(1): 289-294
NABI A B L T, AMANGU A M E A L, ABIBULA Y M M, et al. Effects of adding walnut green husk on alfalfa silage quality and CNCPS protein fractions [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 289-294
- [12] 许能祥, 梁朔玮, 张文洁, 等. 全株小麦青贮适宜收获期及青贮添加剂配比技术的研究[J]. 中国草地学报, 2024, 46(4): 43-51
XU N X, LIANG S W, ZHANG W J, et al. Optimizing harvest timing and silage additive ratio for improved whole wheat silage quality [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(4): 43-51
- [13] 程志泽, 伊斯拉依·达吾提, 艾比布拉·伊马木, 等. 不同含水量和添加剂对辣椒秸青贮品质及营养价值的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(10): 2435-2449
CHENG Z Z, YISILAYI D W T, AIBIBULA Y M M, et al. Effects of different moisture content and additives on the quality and nutritional value of pepper straw silage [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(10): 2435-2449
- [14] 陆永祥, 严显明, 周朝相, 等. 不同添加剂对高水分全株玉米青贮饲料发酵品质和细菌群落的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(4): 842-847
LU Y X, YAN X M, ZHOU C X, et al. Effects of different additives on fermentation quality and bacterial community of high-moisture whole-plant corn silage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(4): 842-847
- [15] 包文龙, 郑成忠, 张腾薇, 等. 施氮量对全株大麦生产性能及青贮品质的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(10): 3167-3173
BAO W L, ZHENG C Z, ZHANG T W, et al. Effects of nitrogen application rate on production performance and silage quality of whole plant barley [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(10): 3167-3173
- [16] 孙娟娟, 王国良, 阿拉木斯, 等. 苜蓿方捆袋贮饲料品质评价[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2592-2599

- SUN J J, WANG G L, A L M S, et al. Evaluation of the quality of rectangular bale alfalfa silage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13):2592-2599
- [17] 周赓, 张娟, 刘一佳, 等. 丙酸对杂交狼尾草青贮品质及微生物区系的影响[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(8):5404-5417
- ZHOU Y, ZHANG J, LIU Y J, et al. Effects of propionic acid on silage quality and microbial community of Hybrid *Pennis-etum* silage[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(8):5404-5417
- [18] 唐文浩, 张养东, 郑楠, 等. 苜蓿青贮品质评价研究进展[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(7):4165-4173
- TANG W H, ZHANG Y D, ZHENG N, et al. Research progress on quality evaluation of alfalfa silage [J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(7):4165-4173
- [19] 郑立文. 酶制剂对玉米苜蓿混合青贮品质及微生物多样性的影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023:49-50
- ZHENG L W. Effects of enzyme preparation on quality and microbial diversity of mixed silage of corn and alfalfa[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023:49-50
- [20] 蔺红玲, 周汉林, 董荣书, 等. 砂仁茎叶和‘热研4号’王草混合青贮对其营养成分及发酵品质的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(12):3633-3638
- LIN H L, ZHOU H L, DONG R S, et al. Effects of mixed silage of ‘Reyan No. 4’ with *Amomum villosum* stem and leaf on its nutritional components and fermentation quality[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(12):3633-3638
- [21] 宋超然, 贾玉山, 王志军, 等. 玉米秸秆、苜蓿和燕麦添加比例对青贮饲料品质的影响[J]. *饲料研究*, 2024, 47(23):125-133
- SONG C R, JIA Y S, WANG Z J, et al. Effects of adding corn straw, alfalfa, and oat in different proportions on silage quality[J]. *Feed Research*, 2024, 47(23):125-133
- [22] FILYA I. The effect of *Lactobacillus buchneri* and *Lactobacillus plantarum* on the fermentation, aerobic stability, and ruminal degradability of low dry matter corn and sorghum silages[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(11):3575-3581
- [23] WANG M S, FRANCO M, CAI Y M, et al. Dynamics of fermentation profile and bacterial community of silage prepared with alfalfa, whole-plant corn and their mixture[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 270:114702
- [24] 张霞, 焦婷, 马淑敏, 等. 甜叶菊秆与玉米秸秆混合青贮品质和体外瘤胃发酵特性[J]. *草业科学*, 2023, 40(2):539-550
- ZHANG X, JIAO T, MA S M, et al. Silage quality and in vitro rumen fermentation characteristics of stevia and corn stalks[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(2):539-550
- [25] 张鸣珠, 黄媛, 吴长荣, 等. 青贮原料表面微生物研究进展[J]. *中国饲料*, 2022, (19):1-8
- ZHANG M Z, HUANG Y, WU Z R, et al. Research progress on epiphytic microorganisms of silage materials [J]. *China Feed*, 2022, (19):1-8
- [26] 冀红芹, 孟令楠, 于明, 等. 青贮饲料的质量评价[J]. *现代畜牧兽医*, 2021(6):92-96
- Ji H Q, MENG L N, YU M, et al. Quality evaluation of silages[J]. *Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2021(6):92-96
- [27] ALOBA T A, COREA E E, MENDOZA M, et al. Effects of ensiling length and storage temperature on the nutritive value and fibre-bound protein of three tropical legumes ensiled alone or combined with sorghum[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2022, 283:115172
- [28] 柯强, 王斌, 王腾飞, 等. 混播比例对拉巴豆/青贮玉米混合青贮发酵质量及有氧稳定性的影响[J]. *草原与草坪*, 2024, 44(1):131-137
- KE Q, WANG B, WANG T F, et al. Effect of mixed sowing ratio on the fermentation quality and aerobic stability of mixed silage of laba bean and silage maize[J]. *Grassland and Turf*, 2024, 44(1):131-137
- [29] 苏嘉琪, 辛杭书, 张广宁, 等. 国内外青贮饲料原料来源、品质评价及影响因素的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(12):7585-7594
- SU J Q, XIN H S, ZHANG G N, et al. Research progress on sources, quality evaluation and influencing factors of silages feed at home and abroad[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(12):7585-7594
- [30] 凌文卿, 张磊, 李珏, 等. 布氏乳杆菌和不同糖类联用对紫花苜蓿青贮营养成分、发酵品质、瘤胃降解率及有氧稳定性的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(7):122-134
- LING W Q, ZHANG L, LI J, et al. Effects of *Lentilactobacillus buchneri* combined with different sugars on nutrient composition, fermentation quality, rumen degradation rate, and aerobic stability of alfalfa silage[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2023, 32(7):122-134
- [31] 高巧仙, 朱万清, 李晓梅, 等. 添加纤维素酶和布氏乳杆菌对葡萄渣全混合日粮发酵品质及有氧稳定性的影响[J]. *中国饲料*, 2022(13):28-33
- GAO Q X, ZHU W Q, LI X M, et al. Effects of adding cellulase and *Lactobacillus buchneri* on fermentation quality and aerobic stability of total mixed diets containing grape pomace[J]. *China Feed*, 2022, (13):28-33
- [32] 胡梦洁, 肖燕子, 姜超, 等. 添加剂对紫花苜蓿和高丹草混合青贮品质及维生素含量的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(5):1642-1649
- HU M J, XIAO Y Z, JIANG C, et al. Effects of additives on the quality and vitamin content of mixed alfalfa and gaodan grass silage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5):1642-1649
- [33] HASHEMZADEH C F, KHORVASH M, GHORBANI G R, et al. Interactive effects of molasses by homofermentative and heterofermentative inoculants on fermentation quality, nitrogen fractionation, nutritive value and aerobic stability of wilted alfalfa (*Medicago sativa* L.) silage [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2014, 98(2):290-299
- [34] 代友超, 马越, 徐美玲, 等. 玉米品种和发酵剂对全株玉米青贮营养品质的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(1):658-671
- DAI Y C, MA Y, XU M L, et al. Effects of maize variety and starter culture on nutritional quality of whole maize silage [J].

- Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(1):658-671
- [35] 蒋媛媛, 田逢博, 字学娟, 等. 添加乳酸菌和糖蜜对王草青贮饲料发酵品质的影响[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(10):67-70
JIANG Y Y, TIAN F B, ZI X J, et al. Effect of lactic acid bacteria and molasses on fermentation quality of king grass silage[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2022, 43(10):67-70
- [36] SZYMANOWSKA-POWALOWSKA D, ORCZYK D, LEJA K. Biotechnological potential of *Clostridium butyricum* bacteria[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2014, 45(3):892-901
- [37] 韩学琴, 李莲红, 罗会英, 等. 辣木与高丹草混合青贮效果的研究[J]. 草业科学, 2024, 41(7):1747-1756
HAN X Q, LI L H, LUO H Y, et al. Effect of *Moringa oleifera* mixed with *Sorghum bicolor* × *S. sudanese* hybrids[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(7):1747-1756
- [38] 魏岚, 汪雅婷, 穆麟, 等. 添加比例及青贮天数对统糠和紫花苜蓿混合青贮品质的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(5):71-81
WEI L, WANG Y T, MU L, et al. Effects of addition ratio and ensiling days on the silage quality of mixed chaff and alfalfa[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(5):71-81
- [39] 郑立文, 田健帆, 杨蔚, 等. 品种和生育期对玉米青贮发酵品质的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(4):1105-1114
ZHENG L W, TIAN J F, YANG Y, et al. Effect of cultivar and growth stage on fermentation quality of maize silage[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(4):1105-1114
- [40] 张秀丽, 刁其玉, 王铁程, 等. 日粮中性洗涤纤维水平对犊牛肠道抗氧化能力的影响[J]. 饲料工业, 2023, 44(14):72-80
ZHANG X L, DIAO Q Y, WANG Y C, et al. Effects of dietary neutral detergent fiber level on intestinal antioxidant capacity of calves[J]. Feed Industry, 2023, 44(14):72-80
- [41] 王昊然. 乳酸菌和三种中药添加剂对燕麦青贮品质、微生物群落结构及代谢物的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023: 19-20
WANG H R. Effects of lactic acid bacteria and three traditional Chinese medicine additives on oat silage quality, microbial community structure and metabolites[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023:19-20
- [42] SILVA V P, ORCID O G P, ORCID E S L, et al. Selection of lactic acid bacteria from alfalfa silage and its effects as inoculant on silage fermentation[J]. Agriculture, 2020, 10(11):518
- [43] 陈鑫珠, 林平冬, 岳稳, 等. 不同添加剂对蚕豆秸秆青贮品质及微生物多样性的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(4):164-174
CHEN X Z, LIN P D, YUE W, et al. Effects of various additives on the quality and microbial diversity of broad bean straw silage[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2025, 34(4):164-174
- [44] 邓宗澳. 不同添加剂组合使用对甘蔗梢玉米秸秆混合青贮品质的影响[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023:36-37
DENG Z A. Effects of different additive combinations on the quality of mixed silage of sugarcane tip corn straw[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023:36-37
- [45] 吴丽娟, 欧翔, 连海, 等. 4种添加剂对饲料桑与脐橙渣混贮品质及微生物多样性的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(7):1736-1746
WU L J, OU X, LIAN H, et al. Effects of compound additives on the quality and microbial diversity of mulberry and navel orange residue mixed silage[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(7):1736-1746
- [46] 张亚格, 字学娟, 李茂, 等. 有机酸对柱花草青贮品质和营养成分的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(5):1609-1614
ZHANG Y G, ZI X J, LI M, et al. Effects of organic acids on quality and nutrient composition of *Stylosanthes guianensis* Silage[J]. 2016, 28(5):1609-1614
- [47] 王林, 孙启忠, 张慧杰. 苜蓿与玉米混贮质量研究[J]. 草业学报, 2011, 20(4):202-209
WANG L, SUN Q Z, ZHANG H J. A study on quality of mixed silage of alfalfa and corn[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2011, 20(4):202-209
- [48] 王晓娜, 孙国君, 孙建政, 等. 2种苜蓿混合青贮饲料品质比较研究[J]. 动物营养学报, 2023, 35(2):1112-1122
WANG X N, SUN G J, SUN J Z, et al. Comparison study on quality of two kinds of alfalfa mixed Silages[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(2):1112-1122
- [49] 马宇莎, 高凤芹, 苏亚拉图, 等. 全株玉米与紫花苜蓿或向日葵秸秆混贮效果研究[J]. 中国草地学报, 2022, 44(6):85-90
MA Y S, GAO F Q, SU Y L T, et al. Study on Silage Effect of whole plant corn mixed with alfalfa or sunflower straw[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(6):85-90
- [50] 王子苑, 舒健虹, 陈光吉, 等. 不同比例和发酵时间对燕麦、光叶紫花苜蓿混合青贮品质的影响[J]. 中国饲料, 2024, (3):143-148
WANG Z Y, SHU J H, CHEN G J, et al. Effects of different mixture ratio and fermentation time on silage quality of *Avena sativa* and *Vicia villosa*[J]. China Feed, 2024, (3):143-148
- [51] 王昊然, 蒋恒, 刘斌, 等. 添加玉米粉对盐碱地和非盐碱地紫花苜蓿青贮品质和微生物多样性的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(7):110-119
WANG H R, JIANG H, LIU B, et al. Effects of corn flour addition on the quality alfalfa silage and microbial diversity in saline-alkali and non-saline-alkali lands[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(7):110-119
- [52] 张娟, 史文娇, 韩雪林, 等. 苹果酸和嗜酸乳杆菌对圆叶决明青贮品质及微生物多样性的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(12):6941-6952
ZHANG J, SHI W J, HAN X L, et al. Effects of malic acid and lactobacillus acidophilus on quality and microbial diversity of *chamaecrista rotundifolia* silage[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(12):6941-6952
- [53] SI Q, WANG Z J, LIU W, et al. Influence of cellulase or Lactiplantibacillus plantarum on the ensiling performance and bacterial community in mixed silage of alfalfa and leymus chinensis[J]. Microorganisms, 2023, 11(2):426
- [54] 王佳楚函, 朱欣, 樊雪莹, 等. 不同比例花生秧与茅台酒糟混合青贮对饲料养分含量、发酵品质及微生物群落的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(6):247-252
WANG J C H, ZHU X, FAN X Y, et al. Effects of different

- proportions of mixed silage of peanut vine and Maotai distiller's grains on feed nutrient content, fermentation quality and microbial community [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2024, 60(6):247-252
- [55] 陶莲,刁其玉. 利用MiSeq高通量测序技术分析风干处理及青贮发酵对玉米秸秆菌群构成及丰度的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(Sup1):94-103
- TAO L, DIAO Q Y. Effects of ensiling and natural drying on composition and abundance of bacterium of corn stalk analyzed by miseq sequencing technology [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(Sup1):94-103
- [56] 巨纪,魏曼琳,于萍,等. 植物乳杆菌对柠条青贮发酵品质和微生物多样性的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(2):113-120
- JU J, WEI M L, YU P, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* on fermentation quality and microbial diversity of caragana silage [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(2):113-120
- [57] WANG S, SUN Y, ZHAO J, et al. Assessment of inoculating various epiphytic microbiota on fermentative profile and microbial community dynamics in sterile Italian ryegrass [J]. Journal of applied microbiology, 2020, 129(3):509-520
- [58] HE L W, LV H J, XING Y Q, et al. Intrinsic tannins affect ensiling characteristics and proteolysis of *Neolamarckia cadamba* leaf silage by largely altering bacterial community [J]. Bioresource technology, 2020, 311:123496-123496
- [59] DMITRY A. Cyanobacteria: omics and manipulation [M]. Caister Academic Press, 2017
- [60] MEIXNER K, KOVALCIK A, SYKACEK E, et al. Cyanobacteria Biorefinery-Production of poly (3-hydroxybutyrate) with *Synechocystis salina* and utilisation of residual biomass [J]. J Biotechnol, 2018, 265:46-53
- [61] 程志泽,伊斯拉依·达吾提,万江春,等. 不同添加剂对辣椒秸秆青贮品质及细菌多样性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(7):2330-2336
- CHENG Z Z, YISILAYI D W T, WAN J C, et al. Effects of different additives on the quality and bacterial diversity of pepper straw silage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7):2330-2336
- [62] 武伟,赵红玉,唐云梦,等. 添加短乳杆菌对紫花苜蓿半干青贮品质及微生物群落组成的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(2):328-333
- WU Y, ZHAO H Y, TANG Y M, et al. Effects of *Lactobacillus brevis* supplementation on the quality and microbial community composition of alfalfa semi-dry silage [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2024, 60(2):328-333
- [63] PABARI K, PITHVA S, KOTHARI C, et al. Evaluation of probiotic properties and prebiotic utilization potential of *Weissella paramesenteroides* isolated from fruits [J]. Probiotics Anti-microb Proteins, 2020, 12(3):1126-1138
- [64] 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

(责任编辑 付 宸)