

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.031

引用格式:郭圣泽,杜晓波,张嘉烨,等.含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混合青贮品质的影响[J].草地学报,2026,34(9):3477—3485

GUO Sheng-ze, DU Xiao-bo, ZHANG Jia-ye, et al. Effects of Moisture Content and Mixing Ratio on Mixed Silage Quality of *Avena sativa* and *Sesbania cannabina*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3477—3485

含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混合青贮品质的影响

郭圣泽,杜晓波,张嘉烨,王偲萌,刘贵河*

(河北北方学院动物科技学院,河北张家口 075000)

摘要:为探讨含水量及混合比例对饲用燕麦(*Avena sativa*)+田菁(*Sesbania cannabina*)混合青贮品质的影响,本试验设3个含水量梯度(55%~60%,60%~65%,65%~70%)和7个混合比例(鲜重比,从100:0至0:100),真空青贮60 d后测定其营养品质和发酵品质指标,并用隶属函数法进行综合评价。结果表明:含水量、混合比例及其交互作用对青贮品质有显著影响($P<0.05$)。随着含水量升高,干物质、粗蛋白、水溶性碳水化合物含量降低,纤维、乳酸含量及相对牧草质量升高,pH值与丁酸含量先降后升,乙酸含量先升后降。在混合比例方面,燕麦单贮干物质含量最高,田菁单贮粗蛋白、水溶性碳水化合物、乳酸含量最高,混合比例为30:70(燕麦:田菁)时相对牧草质量相对最优,提高田菁比例可降低纤维含量,各处理pH值均低于4.2。综合评价表明,含水量为60%~65%、燕麦:田菁比例为30:70的混贮效果最佳;含水量为55%~60%田菁单贮,其品质亦表现优良。生产中推荐前者以实现营养均衡,若追求高营养与单一原料利用,可选用后者。

关键词:含水量;混合比例;燕麦;田菁;青贮品质

中图分类号:S816.53

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3477-09

Effects of Moisture Content and Mixing Ratio on Mixed Silage Quality of *Avena sativa* and *Sesbania cannabina*

GUO Sheng-ze, DU Xiao-bo, ZHANG Jia-ye, WANG Si-meng, LIU Gui-he*

(College of Animal Science and Technology, Hebei North University, Zhangjiakou, Hebei Province 075000, China)

Abstract: To explore the effects of moisture content and mixing ratio on the silage quality of *Avena sativa* and *Sesbania cannabina* mixed silage, this experiment was designed with three moisture content gradients (55%-60%, 60%-65%, 65%-70%) and seven mixing ratios (fresh weight ratio from 100:0 to 0:100). Samples were vacuum ensiled for 60 days, after which nutritional and fermentation quality indices were determined, and a comprehensive evaluation was conducted using the membership function method. The results showed that moisture content, mixing ratio, and their interaction had significant effects on silage quality ($P<0.05$). With the increase of moisture content, dry matter (DM), crude protein (CP) and water-soluble carbohydrates (WSC) decreased, while fiber content, lactic acid (LA) content and relative forage quality (RFQ) increased. pH and butyric acid (BA) decreased first and then increased, and acetic acid (AA) increased first and then decreased. Among the mixing ratios, *Avena sativa* silage had the highest DM content, *Sesbania cannabina* silage had the highest CP, WSC, and LA contents, and the 30:70 mixture (*Avena sativa*:*Sesbania cannabina*) exhibited the optimal RFQ. Higher *Sesbania cannabina* ratios resulted in lower fiber contents. The pH values of all treatments were below 4.2. Comprehensive evaluation revealed that the mixed silage with 60%

收稿日期:2025-12-09;修回日期:2026-01-13

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助

作者简介:郭圣泽(1992-),男,汉族,河北张家口人,硕士研究生,主要从事草产品加工方向研究,E-mail:315457385@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:guiheliu@sina.com

-65% moisture content and an *Avena sativa*-to-*Sesbania cannabina* ratio of 30:70 performed the best, and *Sesbania cannabina* silage with 55%-60% moisture content also showed excellent quality. The former can be recommended in production to achieve balanced nutrition, and the latter can be adopted for high nutrient value and single raw material utilization.

Key words: Moisture content; Mixing ratio; *Avena sativa*; *Sesbania cannabina*; Silage quality

饲用燕麦(*Avena sativa* L.)是我国牧草产业发展的三大核心饲草之一,具有抗旱、耐瘠薄、高产、适口性好等特点,富含可溶性碳水化合物和可溶性纤维^[1]。我国饲用燕麦种植历史悠久,种植面积达44.41万hm²,有冀晋蒙、青藏高原等5个主产区,在推动畜牧业高质量发展、奶业提质增效及提升畜产品质量安全中发挥关键作用^[2-3]。

燕麦的主要加工方式为调制青干草和青贮饲料。相较于调制干草,将新鲜燕麦草调制成青贮饲料,可更有效保存营养成分、减少损失,且适口性好、储存期长,能保障饲草均衡供应,避免晾晒、雨淋等自然条件导致的营养流失^[4]。燕麦粗蛋白含量偏低,单独青贮虽易成功,但难以满足家畜的高营养需求^[5]。豆科牧草粗蛋白含量丰富,但缓冲能值高、含水量高、可溶性糖含量低,单独青贮难度较大^[6]。将燕麦与豆科牧草混合青贮,可实现营养互补,改善青贮发酵品质^[7-8]。目前,燕麦与豆科牧草混贮研究主要集中在燕麦与紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)、毛苕子(*Vicia villosa* Roth.)等牧草上^[9-15],而关于燕麦与田菁(*Sesbania cannabina*)的混贮技术研究较为少见。已有研究表明,燕麦与豆科牧草混贮,可平衡饲料的能量与蛋白

质浓度,改善微生物群落结构与数量,进而促进发酵进程、提升发酵质量^[16-17]。田菁是一年生草本豆科植物,具有粗蛋白含量高、纤维含量低等优点,还富含氮、磷、钾和微量元素,饲用价值很高,同时也是改良盐碱地的优质绿肥^[18-22]。本研究以燕麦与田菁为原料,探讨二者混合比例、含水量对混合青贮品质的影响,旨在建立燕麦+田菁混贮加工技术体系,为生产实践提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验地点设在河北省张家口市察北管理区国家牧草产业技术体系张家口综合试验站(114°00'~118°15'E,41°10'~42°20'N)。该地区属于温带大陆性季风气候,无霜期短,冬季寒冷漫长,春秋两季短暂,降雨集中,昼夜温差大,日照充足。年降水量300~450 mm,7—9月降雨量占全年降雨量的68%。

试验材料为‘定燕2号’燕麦与田菁,均来自上述试验站种植基地。2025年9月4日燕麦、田菁同时刈割,燕麦处于乳熟期,田菁处于现蕾期。原料营养成分见表1。

表1 原料营养成分

Table 1 The chemical compositions of raw materials

原料 Raw material	干物质 Dry matter/ (%FM)	粗蛋白 Crude protein/ (%DM)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/ (%DM)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/ (%DM)	水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates/ (%DM)
‘定燕2号’燕麦 <i>Avena sativa</i>	29.31	7.70	33.30	57.13	14.20
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	21.48	13.00	29.80	40.57	6.70

1.2 试验设计及制作

试验采用双因素设计,原料含水量(A)设55%~60%(A₁)、60%~65%(A₂)、65%~70%(A₃)三个梯度,燕麦+田菁(鲜草质量百分比)混合比例(B)设燕麦:田菁=100:0(B₁,燕麦单贮)、70:30(B₂)、60:40(B₃)、50:50(B₄)、40:60(B₅)、30:70(B₆)、0:100(B₇,田菁单贮)七个水平,共21个组合,每个组合3次重复。

试验采用真空袋青贮方式。燕麦和田菁收获后适当晾晒,随时测定含水量,当含水量分别降至55%~60%,60%~65%,65%~70%后,用铡刀切

短切碎至3 cm左右,按上述不同混合比例充分混合原料,然后装入真空袋中压紧压实,每袋750 g,最后用真空封口机抽真空密封,置于室温下避光贮藏,60 d后开袋取样进行测定分析。

1.3 测定指标

1.3.1 营养品质指标 干物质(Dry matter, DM)含量采用烘干法测定^[23];粗蛋白(Crude protein, CP)含量采用凯氏定氮法测定^[24];酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)和中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)含量按照 Van Soest 的方

法进行测定^[25];水溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrates, WSC)含量采用高氯酸水解-萘酮-硫酸比色法测定^[26],并计算相对牧草质量(Relative forage quality, RFQ)^[27]。

1.3.2 发酵品质指标 乳酸(Lactic acid, LA)、乙酸(Acetic acid, AA)、丁酸(Butyric acid, BA)含量按照许庆方等的方法进行测定^[28];pH 值用 pH 计(PHS-3C 精密 pH 计)测定;氨态氮(NH₃-N)含量用苯酚-次氯酸钠比色法测定^[29],计算氨态氮/总氮(Ammonia nitrogen/Total nitrogen, AN/TN)。

1.4 数据的统计与分析

试验数据用 Excel 软件进行整理,用 SPSS 27.0 软件进行方差分析,采用 Duncan 氏法进行多重比较和显著性分析,结果用“平均值±标准差”表示,以 $P<0.05$ 作为差异显著性判断标准。

采用隶属函数法对不同处理组合青贮饲料营养和发酵品质指标进行综合分析,隶属函数计算公式为^[30]:

$$X_{ij}=(X-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin}) \quad (1)$$

$$X_{ij}=1-(X-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin}) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 表示某指标隶属函数值, X 为该指标测定值, X_{jmax} , X_{jmin} 分别为该指标的最大测定值和最小测定值。当测定指标与青贮品质呈正相关时用公式(1),当测定指标与青贮品质呈负相关时则用公式(2)。DM, CP, WSC, RFQ, LA, AA 与青贮品质呈正相关,ADF, NDF, pH, BA, AN/TN 与青贮品质呈负相关。

2 结果与分析

2.1 含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混合青贮营养品质的影响

由表 2 可知,含水量主效应下, A_1 , A_2 和 A_3 的

表 2 含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混贮营养品质的影响

Table 2 Effects of moisture content and mixing ratio on nutritional quality of *Avena sativa* and *Sesbania cannabina*

项目 Item	含水量 Moisture content	混合比例 Mixing ratio							平均值 Average	P 值 P value		
		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇		含水量 Moisture content	混合比例 Mixing ratio	含水量×混合比例 Moisture content× Mixing ratio
干物质 DM/(%FM)	A ₁	42.00±0.60 ^{hA}	37.85±0.05 ^{hA}	39.00±0.50 ^{hA}	39.65±0.55 ^{hA}	39.65±0.05 ^{hA}	38.15±0.45 ^{hA}	38.00±0.20 ^{hA}	39.19±0.10 ^A	0.000	0.018	0.000
	A ₂	30.75±0.65 ^{hB}	32.90±0.10 ^{hB}	31.90±0.40 ^{hB}	31.95±0.05 ^{hB}	31.80±0.30 ^{hB}	33.40±0.40 ^{hB}	31.85±0.15 ^{hB}	32.08±0.10 ^B			
	A ₃	29.10±0.30 ^{hC}	30.45±0.25 ^{hC}	29.60±0.40 ^{hC}	29.35±0.05 ^{hC}	29.00±0.30 ^{hC}	28.75±0.15 ^{hC}	29.55±1.35 ^{hC}	29.40±0.10 ^C			
	平均值 Average	33.95±6.10 ^f	33.73±3.27 ^{ab}	33.50±4.26 ^{abc}	33.65±4.65 ^{ab}	33.48±4.79 ^{abc}	33.43±4.08 ^{bc}	33.13±3.85 ^c				
粗蛋白 CP/(%DM)	A ₁	9.00±0.10 ^{fA}	10.85±0.25 ^{dA}	10.70±0.30 ^{dA}	12.15±0.05 ^{hA}	12.25±0.35 ^{hA}	13.45±0.55 ^{hA}	15.20±0.20 ^{hA}	11.94±0.06 ^A	0.000	0.000	0.000
	A ₂	8.25±0.05 ^{hC}	10.45±0.25 ^{hB}	10.45±0.15 ^{hA}	10.55±0.25 ^{hC}	11.90±0.30 ^{hB}	12.25±0.25 ^{hB}	13.15±0.45 ^{hB}	11.00±0.06 ^B			
	A ₃	8.50±0.00 ^{hB}	10.25±0.05 ^{hB}	10.45±0.05 ^{hA}	11.45±0.45 ^{hB}	11.30±0.40 ^{hB}	11.65±0.25 ^{hB}	12.40±0.10 ^{hC}	10.86±0.06 ^B			
	平均值 Average	8.58±0.34 ^f	10.52±0.32 ^e	10.53±0.21 ^e	11.38±0.74 ^d	11.82±0.52 ^e	12.45±0.86 ^b	13.58±1.28 ^a				
酸性 洗涤纤维 ADF/ (%DM)	A ₁	39.60±0.50 ^{hB}	37.80±0.10 ^{hA}	37.50±0.40 ^{hA}	36.40±0.10 ^{hA}	37.15±1.05 ^{hB}	36.05±0.65 ^{hA}	34.10±1.00 ^{hB}	36.94±0.17 ^B	0.000	0.000	0.074
	A ₂	39.85±0.05 ^{hAB}	36.75±0.95 ^{hA}	38.40±1.40 ^{hA}	36.50±0.30 ^{hA}	36.75±1.05 ^{hA}	33.95±0.65 ^{hB}	33.40±0.60 ^{hB}	36.51±0.17 ^B			
	A ₃	40.85±0.85 ^{hA}	38.25±1.15 ^{hA}	38.45±1.15 ^{hA}	36.85±0.35 ^{hA}	38.60±0.60 ^{hA}	36.50±0.80 ^{hA}	35.95±0.85 ^{hA}	37.92±0.17 ^A			
	平均值 Average	40.10±0.76 ^f	37.60±1.00 ^b	38.12±1.04 ^b	36.58±0.31 ^c	37.50±1.16 ^b	35.50±1.33 ^d	34.48±1.35 ^c				
中性 洗涤纤维 NDF/ (%DM)	A ₁	64.22±0.82 ^{hA}	58.22±2.04 ^{hA}	57.53±0.38 ^{hA}	54.74±1.58 ^{hA}	51.19±2.12 ^{hA}	48.89±0.12 ^{hA}	43.57±1.48 ^{hA}	54.05±0.31 ^A	0.341	0.000	0.074
	A ₂	63.00±1.50 ^{hA}	56.23±0.77 ^{hA}	57.92±0.76 ^{hA}	56.83±0.02 ^{hA}	51.52±0.50 ^{hA}	50.68±2.29 ^{hA}	44.80±2.55 ^{hA}	54.42±0.31 ^A			
	A ₃	63.06±1.28 ^{hA}	58.23±0.18 ^{hA}	56.95±1.41 ^{hA}	54.76±1.04 ^{hA}	52.95±1.14 ^{hA}	52.49±2.28 ^{hA}	44.41±0.91 ^{hA}	54.69±0.31 ^A			
	平均值 Average	63.43±1.22 ^f	57.56±1.48 ^b	57.46±0.92 ^b	55.44±1.40 ^c	51.88±1.47 ^d	50.69±2.25 ^d	44.26±1.64 ^e				
水溶性 碳水化合物 WSC/ (%DM)	A ₁	4.15±0.15 ^{hA}	4.25±0.25 ^{hA}	4.40±0.10 ^{hA}	3.70±0.80 ^{hA}	5.15±0.35 ^{hA}	5.70±0.90 ^{hA}	5.35±0.75 ^{hA}	4.67±0.11 ^A	0.023	0.000	0.001
	A ₂	4.65±1.05 ^{hA}	3.45±0.55 ^{hB}	4.40±0.20 ^{hA}	4.05±0.35 ^{hA}	4.85±0.45 ^{hA}	4.35±0.25 ^{hB}	4.45±0.05 ^{hB}	4.31±0.11 ^B			
	A ₃	5.05±0.45 ^{hA}	3.75±0.15 ^{hAB}	3.35±0.15 ^{hB}	3.25±0.55 ^{hA}	5.00±0.40 ^{hA}	3.90±0.70 ^{hB}	5.55±0.05 ^{hA}	4.26±0.11 ^B			
	平均值 Average	4.62±0.70 ^f	3.82±0.47 ^b	4.05±0.54 ^b	3.67±0.62 ^b	5.00±0.37 ^c	4.65±1.00 ^a	5.12±0.63 ^a				
相对牧草 质量 RFQ	A ₁	137.00±4.00 ^{hA}	142.50±0.50 ^{hB}	137.50±2.50 ^{hA}	137.00±2.00 ^{hB}	122.00±3.00 ^{hB}	122.00±3.00 ^{hB}	126.50±3.50 ^{hA}	132.07±0.93 ^C	0.000	0.000	0.000
	A ₂	129.00±1.50 ^{hB}	151.50±1.50 ^{hA}	142.50±2.50 ^{hA}	140.50±1.50 ^{hAB}	138.00±5.00 ^{hA}	138.00±7.00 ^{hA}	134.50±9.50 ^{hA}	139.14±0.93 ^A			
	A ₃	135.00±1.00 ^{hA}	140.50±4.50 ^{hAB}	138.00±10.00 ^{hA}	144.00±2.00 ^{hA}	127.50±2.50 ^{hB}	138.50±0.50 ^{hA}	129.50±4.50 ^{hA}	136.14±0.93 ^B			
	平均值 Average	133.67±4.18 ^f	144.83±5.61 ^a	139.33±5.81 ^b	140.50±3.43 ^b	129.17±7.72 ^d	132.83±8.98 ^d	130.17±6.55 nd				

注: A_1 表示含水量 55%~60%, A_2 表示含水量 60%~65%, A_3 表示含水量 65%~70%;燕麦+田菁混合比例, B_1 表示 100:0, B_2 表示 70:30, B_3 表示 60:40, B_4 表示 50:50, B_5 表示 40:60, B_6 表示 30:70, B_7 表示 0:100。同行数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),同列数据不同大写字母表示在同一指标下差异显著($P<0.05$)。下表同

Note: A_1 , A_2 , and A_3 represent moisture contents of 55%-60%, 60%-65%, and 65%-70%, respectively. The oat to sesbania mixing ratios are denoted as B_1 (100:0), B_2 (70:30), B_3 (60:40), B_4 (50:50), B_5 (40:60), B_6 (30:70), and B_7 (0:100). Different lowercase letters in the same row means significant difference($P<0.05$), different uppercase letters in the same column means significant difference($P<0.05$). The same as below

DM, CP, WSC, ADF 含量及 RFQ 差异均显著 ($P < 0.05$), NDF 含量差异不显著。A₁ 的 DM 含量显著高于 A₂ 和 A₃ ($P < 0.05$), A₁, A₂, A₃ 三者间差异显著 ($P < 0.05$)。A₁ 的 CP, WSC 含量显著高于 A₂, A₃ ($P < 0.05$), A₂ 与 A₃ 间差异不显著。A₃ 的 ADF 含量显著高于 A₁ 和 A₂ ($P < 0.05$), A₁ 与 A₂ 间差异不显著。A₂ 的 RFQ 显著高于 A₃ ($P < 0.05$), A₃ 的 RFQ 显著高于 A₁ ($P < 0.05$)。混合比例主效应下, B₁ 的 DM 含量最高, B₁, B₂, B₃, B₄, B₅ 均显著高于 B₆, B₇ ($P < 0.05$)。B₇ 的 CP 含量显著高于其他混合比例 ($P < 0.05$), 其次是 B₆, B₅, B₄, B₃, B₂, B₁ 的 CP 含量最低。B₁ 的 ADF 含量显著高于其他混合比例 ($P < 0.05$), 其次是 B₃, B₂, B₅, B₄, B₆, B₇ 的 ADF 含量最低。NDF 含量与 ADF 变化规律相似, B₁ 的 NDF 含量显著高于其他混合比例 ($P < 0.05$), B₇ 的最低。WSC 含量, B₇ 的 WSC 含量最高, B₄ 的最低, B₇, B₅, B₆, B₁ 显著高于 B₂, B₃, B₄ ($P < 0.05$)。B₂ 的 RFQ 显著高于其他比例 ($P < 0.05$), 其次是 B₄, B₅ 的 RFQ 最小。含水量与混合比例的交互作用显著影响混贮饲料的 DM, CP, WSC 含量及 RFQ ($P < 0.05$), 两者交互作用对混贮饲料的 NDF, ADF 含量无显著影响。

2.2 含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混合青贮发酵品质的影响

由表 3 可知, 含水量主效应下, A₁ 和 A₃ 的 pH 值显著高于 A₂ ($P < 0.05$), A₁ 与 A₃ 间差异不显著。A₂, A₃ 的 LA 含量显著高于 A₁ ($P < 0.05$), 两者间差异不显著。A₂ 的 AA 含量显著高于 A₃ ($P < 0.05$), A₁ 与 A₂, A₃ 均无显著差异。A₁, A₂, A₃ 三者间的丁酸含量差异显著 ($P < 0.05$)。三个含水量下的 AN/TN 差异不显著。混合比例主效应下, B₁ 的 pH 值显著高于 B₂, B₄, B₅ 和 B₇ ($P < 0.05$), B₁, B₃, B₆ 三者间差异不显著。B₅, B₇ 的 LA 含量显著高于其他比例 ($P < 0.05$), 且二者间差异不显著。不同混合比例的 AA 含量差异不显著, AA 含量 B₄ 最高, B₂ 次之, B₅ 最低。B₁, B₅ 的 BA 含量显著高于其他混合比例 ($P < 0.05$), B₄, B₆ 的 BA 含量较低, B₂, B₃, B₄, B₆, B₇ 间差异不显著。不同混合比例的 AN/TN 差异不显著, B₁ 的最高, B₇ 的最低。含水量与混合比例的交互作用显著影响混贮饲料的 pH 值和 LA, BA 含量 ($P < 0.05$), 两者交互作用对混贮饲料的 AA, AN/TN 无显著影响。

表 3 含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混合青贮发酵品质的影响

Table 3 Effects of moisture content and mixing ratio on fermentation quality of *Avena sativa* and *Sesbania cannabina*

项目 Item	含水量 Moisture content	混合比例 Mixing ratio							平均值 Average	P值		
		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇		含水量 Moisture content	混合比例 Mixing ratio	含水量×混合比例 Moisture content× Mixing ratio
pH pH value	A ₁	3.85±0.35 ^{ab}	3.90±0.10 ^{bcA}	4.45±0.25 ^{aA}	3.80±0.20 ^{aA}	3.80±0.10 ^{aA}	4.25±0.15 ^{abA}	3.75±0.25 ^{aA}	3.97±0.04 ^A	0.004	0.000	0.000
	A ₂	3.95±0.15 ^{ab}	3.90±0.00 ^{abA}	3.80±0.00 ^{abB}	3.70±0.20 ^{bcA}	3.55±0.05 ^{aA}	3.70±0.20 ^{bcB}	3.95±0.05 ^{aA}	3.79±0.04 ^B			
	A ₃	4.50±0.15 ^{aA}	3.75±0.25 ^{bcA}	3.70±0.10 ^{ab}	4.00±0.10 ^{abA}	3.70±0.20 ^{aA}	3.90±0.10 ^{bcB}	3.85±0.05 ^{bcA}	3.91±0.04 ^A			
	平均值 Average	4.10±0.36 ^a	3.85±0.15 ^{bc}	3.98±0.38 ^{ab}	3.83±0.20 ^{bc}	3.68±0.16 ^c	3.95±0.28 ^{ab}	3.85±0.16 ^{bc}				
乳酸 LA/(%DM)	A ₁	3.30±0.85 ^{abA}	5.58±0.07 ^{abA}	5.85±0.67 ^{abA}	5.82±0.57 ^{abA}	6.14±0.01 ^{abB}	4.21±0.12 ^{ab}	6.92±0.37 ^{aA}	5.40±0.13 ^B	0.000	0.000	0.001
	A ₂	4.46±0.51 ^{aA}	5.74±0.28 ^{cdA}	6.19±0.90 ^{cdA}	5.34±0.81 ^{deA}	7.26±0.84 ^{abA}	6.95±0.44 ^{abA}	7.52±0.67 ^{aA}	6.21±0.13 ^A			
	A ₃	3.45±0.24 ^{abA}	6.49±1.11 ^{bcA}	6.79±0.96 ^{abA}	5.62±0.15 ^{aA}	7.89±0.03 ^{aA}	7.04±0.72 ^{abA}	7.41±0.18 ^{abA}	6.38±0.13 ^A			
	平均值 Average	3.73±0.75 ^d	5.94±0.71 ^{bc}	6.28±0.85 ^b	5.59±0.54 ^c	7.10±0.87 ^a	6.07±1.46 ^{bc}	7.28±0.48 ^a				
乙酸 AA/(%DM)	A ₁	3.26±1.69 ^{aA}	2.23±0.55 ^{aA}	2.00±0.82 ^{aA}	2.29±0.89 ^{aA}	1.73±0.67 ^{aA}	2.08±0.87 ^{aA}	2.52±0.36 ^{aA}	2.30±0.19 ^{AB}	0.041	0.331	0.499
	A ₂	2.71±0.64 ^{abA}	2.44±0.53 ^{aA}	2.31±1.57 ^{aA}	2.89±0.90 ^{aA}	1.68±0.04 ^{aA}	2.76±1.02 ^{aA}	2.76±0.39 ^{aA}	2.51±0.19 ^A			
	A ₃	1.02±0.04 ^{ab}	2.51±1.15 ^{aA}	1.67±0.71 ^{aA}	2.71±0.69 ^{aA}	1.45±0.54 ^{aA}	2.03±1.66 ^{aA}	1.24±0.51 ^{ab}	1.80±0.19 ^B			
	平均值 Average	2.33±1.36 ^{ab}	2.39±0.70 ^{ab}	1.99±0.99 ^{ab}	2.63±0.77 ^a	1.62±0.45 ^b	2.29±1.12 ^{ab}	2.17±0.80 ^{ab}				
丁酸 BA/(%DM)	A ₁	0.32±0.02 ^{abB}	0.32±0.02 ^{abA}	0.29±0.04 ^{abA}	0.23±0.05 ^{bcA}	0.38±0.11 ^{aA}	0.23±0.13 ^{abA}	0.19±0.04 ^{abB}	0.28±0.02 ^B	0.000	0.000	0.000
	A ₂	0.28±0.12 ^{abB}	0.21±0.08 ^{abA}	0.16±0.12 ^{abA}	0.14±0.07 ^{abA}	0.29±0.13 ^{abA}	0.09±0.09 ^{abA}	0.10±0.10 ^{abB}	0.18±0.02 ^C			
	A ₃	1.18±0.16 ^{aA}	0.19±0.11 ^{bcA}	0.21±0.01 ^{bcA}	0.13±0.09 ^{aA}	0.36±0.03 ^{abA}	0.15±0.15 ^{aA}	0.28±0.04 ^{bcA}	0.36±0.02 ^A			
	平均值 Average	0.59±0.45 ^a	0.24±0.09 ^c	0.22±0.09 ^c	0.17±0.08 ^c	0.34±0.09 ^b	0.15±0.12 ^c	0.19±0.09 ^c				
氨态氮/总氮 AN/TN/%	A ₁	9.30±1.72 ^{ab}	9.32±0.59 ^{aA}	9.40±1.52 ^{aA}	9.22±0.21 ^{ab}	11.00±2.10 ^{aA}	8.79±3.93 ^{aA}	9.19±1.20 ^{abB}	9.46±0.33 ^B	0.093	0.330	0.056
	A ₂	10.06±0.18 ^{ab}	9.53±2.53 ^{aA}	10.26±1.78 ^{aA}	10.68±1.26 ^{abB}	8.88±0.60 ^{aA}	11.33±1.09 ^{aA}	10.57±1.20 ^{aA}	10.19±0.33 ^{AB}			
	A ₃	12.94±0.12 ^{aA}	10.49±0.98 ^{abA}	9.33±0.19 ^{cdA}	11.38±0.71 ^{abA}	10.49±1.05 ^{bcA}	11.03±1.95 ^{bcA}	7.67±0.79 ^{dB}	10.48±0.33 ^A			
	平均值 Average	10.77±1.88 ^a	9.78±1.49 ^a	9.66±1.25 ^a	10.43±1.20 ^a	10.13±1.54 ^a	10.38±2.56 ^a	9.14±1.56 ^a				

2.3 不同处理青贮饲料发酵品质的综合价值评价及排序

由于各处理对青贮各项指标的影响效果不一致,因此,采用隶属函数法对营养品质和发酵品质的 11 项指标进行综合评价。结果显示(表 4),A₁B₇ 组合隶属函数平均值最高(0.70),其次为 A₂B₇

(0.63)、A₂B₆(0.61)组合,A₃B₁组合隶属函数平均值最低(0.18)。综合价值排序为:A₁B₇>A₂B₇>A₂B₆>A₃B₇>A₂B₅>A₁B₄>A₁B₆>A₁B₅>A₁B₂>A₂B₂>A₂B₄>A₃B₆>A₂B₃>A₁B₃>A₃B₅>A₃B₂>A₃B₄>A₃B₃>A₁B₁>A₂B₁>A₃B₁。

表 4 饲用燕麦+田菁混合青贮隶属函数分析及综合价值排序

Table 4 Membership function analysis and comprehensive value ranking of *Avena sativa* and *Sesbania cannabina* silage

组别 Group	干物质 DM	粗蛋白 CP	酸性洗涤 纤维 ADF	中性洗涤 纤维 NDF	水溶性碳水 化合物 WSC	相对牧草质量 RFQ	pH	乳酸 LA	乙酸 AA	丁酸 BA	氨态氮/总氮 AN/TN	平均值 Average	排序 Sort
A ₁ B ₁	0.96	0.11	0.24	0.04	0.37	0.53	0.71	0.15	0.63	0.76	0.46	0.45	19
A ₁ B ₂	0.67	0.37	0.44	0.30	0.40	0.69	0.67	0.55	0.41	0.76	0.46	0.52	9
A ₁ B ₃	0.75	0.35	0.47	0.33	0.44	0.54	0.21	0.59	0.36	0.78	0.45	0.48	14
A ₁ B ₄	0.80	0.55	0.60	0.45	0.26	0.53	0.75	0.59	0.42	0.83	0.47	0.57	6
A ₁ B ₅	0.80	0.56	0.51	0.60	0.63	0.09	0.75	0.64	0.30	0.72	0.25	0.53	8
A ₁ B ₆	0.69	0.73	0.63	0.70	0.77	0.09	0.38	0.31	0.37	0.83	0.52	0.55	7
A ₁ B ₇	0.68	0.97	0.85	0.94	0.68	0.22	0.79	0.78	0.47	0.86	0.47	0.70	1
A ₂ B ₁	0.18	0.01	0.21	0.09	0.50	0.29	0.63	0.35	0.51	0.79	0.37	0.36	20
A ₂ B ₂	0.33	0.31	0.56	0.38	0.19	0.96	0.67	0.57	0.45	0.85	0.43	0.52	10
A ₂ B ₃	0.26	0.31	0.37	0.31	0.44	0.69	0.75	0.65	0.42	0.88	0.34	0.49	13
A ₂ B ₄	0.26	0.33	0.58	0.36	0.35	0.63	0.83	0.50	0.55	0.90	0.29	0.51	11
A ₂ B ₅	0.25	0.51	0.56	0.59	0.55	0.56	0.96	0.84	0.28	0.79	0.51	0.58	5
A ₂ B ₆	0.36	0.56	0.87	0.63	0.42	0.56	0.83	0.79	0.52	0.94	0.21	0.61	3
A ₂ B ₇	0.25	0.69	0.93	0.88	0.45	0.46	0.63	0.88	0.52	0.93	0.31	0.63	2
A ₃ B ₁	0.06	0.04	0.10	0.09	0.60	0.47	0.17	0.17	0.14	0.12	0.02	0.18	21
A ₃ B ₂	0.16	0.28	0.39	0.30	0.27	0.63	0.79	0.71	0.47	0.86	0.32	0.47	16
A ₃ B ₃	0.10	0.31	0.37	0.35	0.17	0.56	0.83	0.76	0.28	0.85	0.46	0.46	18
A ₃ B ₄	0.08	0.45	0.54	0.45	0.14	0.74	0.58	0.55	0.51	0.90	0.21	0.47	17
A ₃ B ₅	0.06	0.43	0.35	0.53	0.59	0.25	0.83	0.95	0.23	0.73	0.32	0.48	15
A ₃ B ₆	0.04	0.48	0.58	0.55	0.31	0.57	0.67	0.80	0.36	0.89	0.25	0.50	12
A ₃ B ₇	0.09	0.58	0.65	0.90	0.73	0.31	0.71	0.87	0.19	0.79	0.66	0.59	4

3 讨论

3.1 含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混合青贮营养品质的影响

原料的含水量、WSC 是保证青贮过程中乳酸菌正常繁殖的重要条件,一般要求 WSC≥10% (DM%)^[31-32]。本试验中,燕麦、田菁刈割时鲜草含水量分别为 70.69%,78.52%,均处于较高水平,直接青贮易出现排汁、糖分稀释等问题,不利于乳酸菌发酵,还可能促进丁酸菌增殖导致青贮腐败^[10,33]。田菁原料的 WSC 含量为 6.70%,燕麦原料的 WSC 含量为 14.20%,二者混合可为乳酸菌发酵提供更多的底物。同时合理比例混合能抑制有害微生物增殖,优化发酵过程^[34]。因此,探讨不同含水量、不同混合比例对燕麦+田菁混贮的影响尤为重要。

青贮饲料 CP 含量越高、RFQ 值越大则表明青贮饲料营养价值越高;ADF 和 NDF 是影响饲料适

口性和消化率的重要指标,NDF,ADF 含量越高,家畜的干物质采食量、消化率越低^[35]。本研究结果表明,随含水量升高,DM,CP,WSC 含量下降,ADF 含量显著增加,NDF 含量增加不显著,RFQ 呈先升高后下降趋势,含水量 60%~65% 时 RFQ 最高。赵牧其尔等^[36]研究发现,籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)厌氧发酵后,低水分处理组的 DM,CP 含量显著高于高水分处理组;程志泽等^[37]研究了高中低三个含水量对辣椒(*Capsicum annuum* L.)青贮的影响,结果发现随含水量的下降,DM,CP 含量升高,NDF,ADF 含量下降,WSC 含量升高,中水分的 RFV 最高,低水分的 RFV 最低。本研究与上述研究结果基本一致,说明适宜含水量(60%~65%)能平衡营养成分保留与发酵效率。

混合比例方面,随田菁比例的增加,DM 含量下降,CP 含量上升,ADF,NDF 含量显著下降,这与郭金桂等^[38]、葛剑等^[39]、白瑞等^[40]的研究结果一致,说

明豆科牧草比例的增加,提高了混贮饲料的营养价值,相较于燕麦单贮,混合青贮的营养成分更加均衡。随田菁比例的增加,WSC含量呈先下降后上升趋势, B_5 、 B_6 、 B_7 的WSC含量较高,说明适宜的豆科牧草比例能提供更丰富的WSC以促进乳酸菌发酵。RFQ随田菁比例的增加呈先升高后下降趋势, B_2 的RFQ最高,其次是 B_3 、 B_4 ,王子苑等^[13]的研究也表明,禾本科与豆科牧草存在最优混合比例,过高或过低的豆科比例均可能影响饲用价值。

3.2 含水量、混合比例对饲用燕麦+田菁混合青贮发酵品质的影响

pH值是反映青贮发酵品质的重要指标之一,本试验中几乎所有处理pH值均 <4.2 ,表明发酵整体良好。随含水量的升高,pH基本呈下降趋势,与琚泽亮等^[41]、高雨等^[42]的研究一致,可能因适宜含水量利于乳酸菌增殖产酸,高含水量则可能导致底物稀释或有害菌滋生。LA是优质青贮的主要有机酸,AA可提升青贮稳定性,BA则是腐败发酵的标志产物。本试验中,LA含量随含水量的升高呈显著上升趋势,该结果与琚泽亮等^[41]在燕麦和箭筈豌豆的青贮试验、高雨等^[42]高湿玉米籽粒的研究一致;AA含量随含水量的升高先升高后下降,60%~65%的AA含量最高,65%~70%的AA含量最低,65%~70%高含水量时糖分不足限制AA生成,而只有在60%~65%含水量条件下,乳酸菌会利用乳酸产生更多乙酸;BA含量随含水量的升高先降后升,表现为60%~65%含水量组的BA含量 $<55\%$ ~60%含水量组 $<65\%$ ~70%含水量组,说明适宜含水量可抑制梭菌活性,高含水量则为其繁殖创造条件,与前人研究一致^[42-43]。AN/TN也是衡量青贮饲料品质优劣的重要指标,本试验中,随含水量的升高,AN/TN上升,可能是低含水量抑制了引起蛋白分解产生氨态氮的主要微生物如梭菌等的活性,与前人研究一致^[41]。

随田菁比例的增加,pH值呈显著下降趋势,可能是因为田菁的高蛋白特性调节了发酵体系缓冲能力,或其含有的生物活性物质促进乳酸菌生长;LA含量基本呈上升趋势,与琚泽亮等^[41]、武涛等^[44]的研究一致, B_5 、 B_7 的LA含量均值较高, B_1 的最低,这可能是由于乳酸菌在发酵过程中更为活跃,抑制了其他有机酸的生成。AA含量变化不显著,其中 B_4 的AA含量最高, B_5 的AA含量最低。随田菁比

例的增加,BA含量显著下降, B_1 的BA含量最高, B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_6 、 B_7 的BA含量较低。这与部分研究中的豆科比例升高导致BA含量上升的结果不一致^[38-39,44],原因可能和所用豆科牧草种类不同,田菁纤维含量低、可溶性蛋白比例适宜,且可能含抑制梭菌的活性成分,而非单纯依赖缓冲能值影响发酵。AN/TN变化不显著,高田菁添加比例(B_4 、 B_5 、 B_6)的AN/TN稍高于低田菁添加比例(B_2 、 B_3),与前人研究结果^[10-11,38,45-46]基本一致; B_1 、 B_7 的变化规律与白瑞等^[40]的研究结果一致。说明田菁单贮或混贮时,蛋白质降解程度可控,未出现过度腐败。

3.3 田菁单贮成功的原因分析

本研究中,田菁单贮获得了成功, A_1B_7 组合(含水量55%~60%,田菁单贮)综合价值最高,突破了常规青贮中因豆科牧草WSC含量低、缓冲能高而难以单贮成功的局限,分析其原因,可能主要在于原料特性、水分调控及工艺条件的协同作用。尽管田菁WSC含量(6.70% DM)偏低,但高于其他难以单贮的豆科牧草(如紫花苜蓿WSC含量通常仅2.35%~5.00%^[47-48]),且试验中通过将含水量控制在55%~60%(A_1),有效避免了汁液流失,提高了底物浓度,同时抑制了丁酸菌增殖,解决了传统豆科牧草单贮底物不足、有害菌易滋生的难题。另外,田菁可能含有黄酮或多酚类抑菌物质,且高蛋白特性优化了发酵缓冲能力,降低了AN/TN和BA含量。此外,本研究采用了真空袋青贮方式进行青贮,原料压得紧实,空气排得干净,密封性好,加上适宜的切碎长度,结合低水分环境,加速了厌氧环境的形成,促使乳酸菌快速产酸,最终实现优质单贮。综上所述,田菁在适度低水分条件下可实现成功单贮,这为其作为一种高蛋白豆科饲草的单独加工利用提供了新可能。

4 结论

在本研究条件下,燕麦单贮、田菁单贮及二者混合青贮均能获得发酵品质良好的青贮饲料。隶属函数法综合评价结果表明,在燕麦+田菁混贮组合中, A_2B_6 组合(含水量60%~65%、燕麦:田菁=30:70)表现最佳,营养更均衡。田菁单贮的最优条件为含水量55%~60%(A_1B_7)。生产中可按需选择青贮方案:若追求高营养与单一原料利用,可采用田菁单贮(含水量55%~60%);若兼顾营养均

衡,更推荐燕麦:田菁=30:70的混贮方案,含水量控制在60%~65%。

参考文献

- [1] 刘伟,贾玉山,格根图,等. 燕麦青贮研究进展[J]. 草地学报, 2022,30(12):3175-3183
LIU W, JIA Y S, GE G T, et al. Research advance of oat silage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022,30(12):3175-3183
- [2] 徐丽君,韩春燕,李建忠,等. 刍议我国燕麦产业发展新动态、面临新挑战及新对策[J]. 草地学报, 2024,32(12):3661-3669
XU L J, HAN C Y, LI J Z, et al. New trends, challenges and countermeasures of oat industry in China [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024,32(12):3661-3669
- [3] 周青平,胡晓炜,汪辉,等. 燕麦在维护国家粮食安全中的重要作用[J]. 草业学报, 2024,33(10):171-182
ZHOU Q P, HU X W, WANG H, et al. The important role of oat in reinforcing the foundation of food security[J]. Acta Prata-culturae Sinica, 2024,33(10):171-182
- [4] 王伟,格根图,周天荣,等. 添加乳酸菌菌剂对天然草地牧草青贮品质的影响[J]. 草学, 2018(4):7-11,41
WANG W, GE G T, ZHOU T R, et al. The effect on silage quality of natural grassland forage by adding *Lactobacillus* [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2018(4):7-11,41
- [5] 徐双鹏,赵永琦,董晓慧,等. 乳酸菌添加剂对高寒牧区燕麦与箭筈豌豆混合青贮品质及酶活性的影响[J]. 草地学报, 2025,33(8):2694-2702
XU S P, ZHAO Y Q, DONG X H, et al. Effects of lactic acid bacteria additives on silage quality and enzyme activity of mixed oats and vetch in Alpine pastures [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(8):2694-2702
- [6] 麻天丽,李小梅,钟怡豪,等. 川西北高原全株玉米与不同豆科牧草混贮品质研究[J]. 草地学报, 2024,32(9):2999-3005
MA T L, LI X M, ZHONG Y H, et al. Study on the silage quality of mixed whole plant maize and different legume forage in the northwest plateau area of Sichuan Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024,32(9):2999-3005
- [7] 张磊,陈思凡,黄国锋,等. 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 F, et al. Research development and prospect of mixed silage[J]. Feed Research, 2021, 44(6):151-153
- [8] 付志慧,格根图,贾玉山,等. 添加剂对黑麦草青贮品质及微生物数量的影响[J]. 草地学报, 2022,30(5):1296-1301
FU Z H, GE G T, JIA Y S, et al. Effects of additives on silage quality and microorganism counts of ryegrass [J]. Acta Agres-tia Sinica, 2022,30(5):1296-1301
- [9] 王晓春,韩鹏,汪伟,等. 紫花苜蓿与饲用燕麦混合青贮研究[J]. 现代畜牧科技, 2024(4):74-76
WANG X C, HAN P, WANG W, et al. Study on mixed silage of alfalfa and forage oats [J]. Modern Animal Husbandry Science & Technology, 2024(4):74-76
- [10] 刘建民,胡梦洁,毕力格,等. 不同混合比例紫花苜蓿和燕麦的青贮品质分析[J]. 中国畜牧杂志, 2025,61(4):284-288
LIU J M, HU M J, BI L G, et al. Analysis on silage quality of alfalfa and oat with different mixing proportions [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2025,61(4):284-288
- [11] 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
- [12] 辛亚芬. 燕麦箭筈豌豆混播对生物产量和青贮品质的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2023:22-32
XIN Y F. Effect of mixed sowing of oat, and common vetch on biological yield and silage quality [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023:22-32
- [13] 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
- [14] 文兴金,杨继芝,李小梅,等. 成都平原燕麦与箭筈豌豆不同混播模式对青贮品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2025,43(2):341-349
WEN X J, YANG J Z, LI X M, et al. The effect of different mixed sowing modes of oats and common vetch on silage quality in Chengdu Plain [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2025,43(2):341-349
- [15] 朱欣,张佳玉,李龙兴,等. 不同添加剂对燕麦与光叶紫花苜蓿混贮品质及微生物群落的影响[J]. 饲料工业, 2025,46(12):94-100
ZHU X, ZHANG J Y, LI L X, et al. Effects of different additives on mixed silage quality and microbial community of *Avena sativa* and *Vicia villosa* [J]. Feed Industry, 2025, 46(12):94-100
- [16] ANIL, PARK, PHIPPS, et al. Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK [J]. Grass and Forage Science, 1998,53(4):301-317
- [17] 刘悦,字学娟,陈婷,等. 饲草青贮微生物多样性研究进展及对策[J]. 动物营养学报, 2021,33(11):6084-6092
LIU Y, ZI X J, CHEN T, et al. Research progress and countermeasure on microbial diversity of forage silage [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021,33(11):6084-6092
- [18] 陈浩,高万顺,王旭哲,等. 不同品种田菁与青贮玉米混贮的养分及发酵品质[J]. 草地学报, 2025,33(8):2713-2720
CHEN H, GAO W S, WANG X Z, et al. Nutrients and fermentation quality of different varieties of *Sesbania cannabina* and *Zea mays* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(8):2713-2720
- [19] 律泽,苏澳,胡芳雨,等. 田菁对农田氯噻磺隆去除及土壤微生物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2024,43(9):2750-2757
LYU Z, SU A, HU F Y, et al. Effects of *Sesbania* on chlorimur-

- ronethyl removal and soil microbial community in farmland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(9): 2750-2757
- [20] 王路遥, 江应松, 曹晓凤, 等. 田菁不同部位营养价值、分子结构特性和体外瘤胃降解率研究[J]. 动物营养学报, 2024, 36(5): 3386-3400
- WANG L Y, JIANG Y S, CAO X F, et al. Study on nutritional value, molecular structure characteristics and in vitro rumen degradation rate in different parts of *Sesbania cannabina* [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(5): 3386-3400
- [21] BUNMA S, BALSLEV H. A review of the economic botany of *Sesbania* (Leguminosae) [J]. The Botanical Review, 2019, 85(3): 185-251
- [22] 朱赵林, 王乾坤, 毛新琪, 等. 不同植物促生菌对田菁种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2023(15): 146-149
- ZHU Z L, WANG Q K, MAO X Q, et al. Effects of different plant growth-promoting bacteria on seed germination and seedling growth of *Sesbania* [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(15): 146-149
- [23] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 3版. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 49-75
- ZHANG L Y. Feed analysis and quality testing technology[M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural University Press, 2007: 49-75
- [24] AOAC. Official Methods of Analysis [M]. 15th edition. Arlington: Association of Official Analytical Chemists, 1990: 70-83
- [25] 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
- [26] OWENS V N, ALBRECHT K A, MUCK R E, et al. Protein degradation and fermentation characteristics of red clover and alfalfa silage harvested with varying levels of total nonstructural carbohydrates [J]. Crop Science, 1999, 39(6): 1873-1880
- [27] 李志强. 燕麦干草质量评价[J]. 中国奶牛, 2013(19): 1-3
- LI Z Q. Quality evaluation of oat hay [J]. China Dairy Cattle, 2013(19): 1-3
- [28] 许庆方, 周禾, 玉柱, 等. 贮藏期和添加绿汁发酵液对袋装苜蓿青贮的影响[J]. 草地学报, 2006, 14(2): 129-133, 146
- XU Q F, ZHOU H, YU Z, et al. The effect of different storage time and dilution previous fermented juice on bagged alfalfa silage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(2): 129-133, 146
- [29] WEATHERBURN M W. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia [J]. Analytical Chemistry, 1967, 39(8): 971-974
- [30] 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 H Y, ZHANG Y H, LIU L X, et al. Study on silage quality of forage oat mixed with safflower stems and leaves at different ratios [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3): 1094-1105
- [31] 闫星全, 贾玉山, 格根图, 等. 原料含水量及添加剂种类对青贮苜蓿品质的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(6): 1861-1866
- YAN X Q, JIA Y S, GE G T, et al. Effect of raw material moisture content and additive type on silage quality of alfalfa [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(6): 1861-1866
- [32] NI K K, WANG F F, ZHU B G, et al. Effects of lactic acid bacteria and molasses additives on the microbial community and fermentation quality of soybean silage [J]. Bioresource Technology, 2017, 238: 706-715
- [33] 李真真, 白春生, 余奕东, 等. 水分含量及添加剂对苜蓿青贮品质及CNCPS蛋白组分的影响[J]. 中国奶牛, 2016(11): 1-6
- LI Z Z, BAI C S, YU Y D, et al. Effects of moisture and additives on the fermentation quality and CNCPS protein fractions of alfalfa silage [J]. China Dairy Cattle, 2016(11): 1-6
- [34] BRODERICK G A, WALGENBACH R P, STERRENBURG E. Performance of lactating dairy cows fed alfalfa or red clover silage as the sole forage 1 [J]. Journal of Dairy Science, 2000, 83(7): 1543-1551
- [35] 卓兴良, 王磊, 玉柱. 基于主成分分析和隶属函数法评价乳酸菌添加剂和收获时期对天然牧草青贮质量的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(7): 4719-4729
- ZHUO X L, WANG L, YU Z. Effects of lactic acid bacteria additives and harvest periods on quality of natural forage silage based on principal component analysis and membership function analysis [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(7): 4719-4729
- [36] 赵牧其尔, 包健, 王志军, 等. 含水量和添加剂对籽粒苋青贮特性、微生物数量及群落多样性的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(5): 61-70
- ZHAO M Q E, BAO J, WANG Z J, et al. Effect of water content and additives on silage characteristics, microbial population and community diversity of amaranth [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(5): 61-70
- [37] 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秆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·Dawuti, Aibibula·Yimamu, 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
- [38] 郭金桂, 宋灵峰, 玉柱, 等. 混合比例对紫花苜蓿与燕麦混贮品质的动态影响[J]. 中国草地学报, 2018, 40(1): 73-79
- GUO J G, SONG L F, YU Z, et al. The dynamic influence of mix ratio on quality of mixed alfalfa and oat silage [J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(1): 73-79
- [39] 葛剑, 杨翠军, 刘贵河, 等. 添加剂和混合比例对裸燕麦和紫花苜蓿混贮品质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(6): 116-124
- GE J, YANG C J, LIU G H, et al. Effects of additives and crop ratio on quality of mixed naked oat (*Avena nuda*) and alfalfa (*Medicago sativa*) silage [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2015, 24(6): 116-124
- [40] 白瑞, 关皓, 胡晓炜, 等. 混播比例及乳酸菌剂对四川农区燕麦/箭筈豌豆混合青贮品质的影响[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 473-481

- BAI R, GUAN H, HU X W, et al. Effects of mixed sowing ratio and lactic acid bacteria on the quality of oat/common vetch mixed silage in Sichuan agricultural areas [J]. *Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition)*, 2024, 50(5): 473-481
- [41] 据泽亮, 赵桂琴, 覃方铨, 等. 含水量对燕麦及燕麦+箭筈豌豆裹包青贮品质的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(7): 1426-1433
- JU Z L, ZHAO G Q, QIN F C, et al. Effect of different moisture contents on fermentation quality of baling silage of monoculture oat and oat and common vetch mixture [J]. *Pratacul-tural Science*, 2016, 33(7): 1426-1433
- [42] 高雨, 姚康雨, 翟美艳, 等. 不同含水量和压实密度对高湿玉米籽粒青贮营养成分、发酵品质及微生物多样性的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(10): 3455-3468
- GAO Y, YAO K Y, ZHAI M Y, et al. Effects of different moisture contents and compaction densities on the nutritional composition, fermentation quality, and microbial diversity of high-moisture corn grain silage [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(10): 3455-3468
- [43] 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
- [44] 武涛, 宋福超, 曹文侠, 等. 不同套种行数比对紫花苜蓿/玉米混合青贮品质的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(6): 1961-1971
- WU T, SONG F C, CAO W X, et al. Effects of different interplant-ing row ratio on silage quality of alfalfa/corn mixed silage [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(6): 1961-1971
- [45] 李蕾蕾, 花登峰, 郑兴卫, 等. 含水量和混播比例对青南牧区燕麦-箭筈豌豆/毛苕子混播青贮品质的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(7): 166-174
- LI L L, HUA D F, ZHENG X W, et al. Effects of moisture content and sowing-mix ratio on the quality of baled oat and common vetch/hairy vetch silage mixtures in the pastoral area of southern Qinghai [J]. *Acta Prataculurae Sinica*, 2018, 27(7): 166-174
- [46] 张珈敏, 关皓, 李海萍, 等. 混播比例及乳酸菌剂对燕麦-饲用豌豆发酵 TMR 品质及瘤胃降解特性的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(1): 169-181
- ZHANG J M, GUAN H, LI H P, et al. Effects of oat: feed pea sowing ratio and lactic acid bacteria addition on crop silage fermentation and ruminal degradation characteristics of the resulting total mixed ration [J]. *Acta Prataculurae Sinica*, 2024, 33(1): 169-181
- [47] 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
- [48] 陈荀, 寇文慧, 刘洋, 等. 不同添加剂对紫花苜蓿和燕麦混合青贮品质及维生素含量的影响[J]. *饲料研究*, 2025, 48(8): 117-121
- CHEN X, KOU W H, LIU Y, et al. Effects of different additives on quality and vitamin content of alfalfa and oat mixed silage [J]. *Feed Research*, 2025, 48(8): 117-121

(责任编辑 闵芝智)