

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.030

引用格式:苗童,孟翔,马琳,等.植物乳杆菌对两不同海拔地区三种燕麦品种青贮品质的影响[J].草地学报,2026,34(9):3464—3476

MIAO Tong, MENG Xiang, MA Lin, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* on Silage Quality of Different Oat Varieties at Two Altitudes[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3464—3476

植物乳杆菌对两海拔地区不同燕麦品种 青贮品质的影响

苗童^{1,2}, 孟翔², 马琳², 蒋庆雪², 刘青^{1*}

(1. 山西农业大学动物科学学院, 山西 太谷 030801; 2. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193)

摘要: 试验旨在探究添加植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, LP)对不同区域种植的饲用燕麦(*Avena sativa*)品种青贮品质的影响,为饲用燕麦新品种的推广与青贮加工技术的优化提供理论依据。本研究在青海和宁夏两地种植‘中畜燕1号’(新品系)、“青海甜燕麦”和“青引2号”三个品种,乳熟期收获后于同一环境下进行青贮,设置对照(蒸馏水)和LP处理,青贮周期为60 d,并对青贮样品进行感官评定及营养品质、发酵品质分析。结果表明:添加LP显著提升了青贮的感官评分和V-Score等级;营养品质分析显示,“中畜燕1号”燕麦青贮的粗蛋白(Crude protein, CP)和粗脂肪(Ether extract, EE)含量极显著高于其他品种($P<0.01$);发酵品质分析显示,不同地区对燕麦青贮的pH值(Potential of hydrogen, pH),乳酸(Lactic acid, LA),丁酸(Butyric acid, BA)和氨态氮:总氮(Ammonia nitrogen/Total nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}:\text{TN}$)含量均有极显著影响($P<0.01$),其中“中畜燕1号”的pH值和BA含量极显著低于其他品种($P<0.01$)。综合比较不同处理,添加植物乳杆菌更有助于改善燕麦青贮发酵品质,在供试的三个品种中,“中畜燕1号”在两地均表现良好,为最适青贮品种。

关键词: 饲用燕麦;青贮;植物乳杆菌;品质

中图分类号:S816.53

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3464-13

Effects of *Lactobacillus plantarum* on Silage Quality of Different Oat Varieties at Two Altitudes

MIAO Tong^{1,2}, MENG Xiang², MA Lin², JIANG Qin-xue², LIU Qing^{1*}

(1. College of Animal Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi Province 030801, China; 2. Institute of Animal Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the effect of *Lactobacillus plantarum* (LP) addition on the silage quality of forage oat (*Avena sativa*) varieties grown in different regions, thereby providing a theoretical basis for the promotion of new forage oat varieties and the optimization of silage processing techniques. Three oat varieties, ‘Zhongxuyan No. 1’ (a new strain), ‘Qinghai Sweet Oat’, and ‘Qingyin No. 2’, were grown in Qinghai and Ningxia. After harvesting at the milk stage, the oats were ensiled under identical conditions with either distilled water (control) or LP treatment for 60 days, after which the silage samples were subjected to sensory evaluation as well as nutritional and fermentation quality analyses. The results showed that LP addition significantly improved the sensory scores and V-Score grades. Nutritional analysis revealed that the crude protein (CP) and ether extract (EE) contents of ‘Zhongxuyan No. 1’ silage were significantly higher than those of the other varieties ($P<0.01$). Fermentation analysis demonstrated that region significantly affected pH (potential of hydrogen), lactic acid (LA), butyric acid (BA), and the $\text{NH}_3\text{-N}:\text{TN}$ (ammonia nitrogen:total nitrogen) ratio in oat silage ($P<0.01$), and the pH and BA contents of ‘Zhongxuyan No. 1’ were significantly lower than those of

收稿日期:2026-05-12;修回日期:2026-05-31

作者简介:苗童(1999-),男,汉族,河南信阳人,硕士研究生,主要从事动物营养与饲料科学研究,E-mail:409811712@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:liuqing_sxau@126.com

the other varieties ($P < 0.01$). A comprehensive comparison of treatments indicated that LP addition was more beneficial for improving silage fermentation quality. Among the three varieties tested, 'Zhongxuyan No. 1' performed well in both regions and was identified as the most suitable variety for silage.

Key words: *Avena sativa*; Silage; *Lactobacillus plantarum*; Quality

现代畜牧业的发展面临着饲料资源短缺与环境可持续性的双重挑战^[1]。如何平衡家畜生产需求和优质饲草稳定供应两者之间的关系显得至关重要。饲用燕麦(*Avena sativa* L.)属于禾本科、燕麦属的一年生饲草作物^[2],具有广泛的适应性和较高的营养价值,并且在抗寒、耐旱、耐贫瘠、耐盐碱等方面表现出优良特性,也是我国北方农牧交错区家畜冬春补饲的主要饲草来源之一^[3-4],在解决牧草供需不平衡,保障区域生态安全,促进畜牧业发展方面意义重大^[5-6]。不同饲用燕麦品种在不同种植地区会受海拔和气候条件影响,而表现出不同的环境适应性。因此,科学选择适应当地海拔与气候条件的饲用燕麦品种,是保障其在最佳生育期内积累充足干物质(Dry matter, DM)与可发酵糖分、达到适宜青贮收获期,进而获得高品质青贮饲料的基础。有研究表明,同一燕麦品种在不同生产环境下的产量、品质及附着微生物数量均有差异^[7]。青贮燕麦富含的碳水化合物,有益于改善奶牛瘤胃健康、提升生产性能^[8]。将饲用燕麦制备为青贮饲料不仅能改善适口性和提高安全性,还能有效提升资源利用效率,从而延长其保存时间,减少营养损失,实现对草料资源的跨季节均衡供应,这对于缓解北方地区冬春饲草短缺、保障畜牧业稳定生产具有关键作用。

目前,青贮饲料技术已在全球范围内广泛应用,为现代畜牧业提供稳定、可持续的优质饲料来源^[9]。青贮技术通过乳酸菌(*Lactic acid bacteria*)主导的厌氧发酵,将可溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrate, WSC)转化为乳酸(Lactic acid, LA),其发酵过程使pH(Potential of hydrogen, pH)值降低,可抑制腐败微生物,这是保存高水分饲料的重要方法^[10]。近年来,乳酸菌接种剂因其高效产酸特性被广泛用于青贮调控,其中植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, LP)作为一种同型发酵乳酸菌,能够快速产酸降低pH值,抑制腐败菌(*Putrefactive bacteria*)生长。研究表明,添加植物乳杆菌可降低乙酸(Acetic acid, AA)和氨态氮(Ammonia nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)浓度,显著提高燕麦青贮的乳酸含量,并通过增加乳杆菌属(*Lactobacillus*)丰度、减少魏

斯氏菌属(*Weissella*)等有害菌群改善发酵品质^[11]。因此,植物乳杆菌在牧草青贮发酵加工中的应用越来越广泛。

宁夏回族自治区(中纬度半干旱气候)与青海省(高海拔寒冷气候)虽然地理气候迥异,但畜牧业(牛、羊养殖)是两地的支柱产业和农牧民增收的重要途径。然而,两地共同面临的重大挑战是天然草场全年性载畜能力不足、秋冬季饲草料供应的不稳定,因此对优质人工饲草料,尤其是耐寒、耐旱型饲草作物的需求旺盛。饲用燕麦凭借高产优质、较强的抗寒、抗旱性以及耐贫瘠土壤的适应性,成为两省区人工饲草基地建设的主力军^[12-13]。宁夏地区昼夜温差大、降水集中,容易影响微生物组及青贮饲料的发酵质量;而青海高寒环境抑制乳酸菌代谢活性降低产酸能力,增加青贮时间延长、发酵不完全风险^[14-15]。因此,不同地理环境的气候差异影响青贮微生物群落动态及发酵效率。

目前,不同地区(青海/宁夏)燕麦青贮饲料品质影响的研究较少,本研究通过选取‘中畜燕1号’(新品系)、『青海甜燕麦』和『青引2号』3个品种在两地开展平行青贮试验,结合营养品质、发酵品质指标,并采用相关性分析、V-Score评价体系、主成分分析和隶属函数法进行综合评价,探究燕麦青贮在青海和宁夏两个地区青贮加工的发酵品质及营养品质的变化,为优良饲用燕麦品种在高原寒冷区(青海)和半干旱区(宁夏)的区域化推广及青贮技术应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验地概况

供试材料为三个燕麦品种[‘中畜燕1号’(新品系)、『青海甜燕麦』和『青引2号』],‘中畜燕1号’新品系由中国农业科学院北京畜牧兽医研究所牧草种质资源团队选育,‘青海甜燕麦』和『青引2号』由青海大学畜牧兽医科学院提供。试验地1:宁夏回族自治区固原市头营实验基地(36°10' N, 106°44' E),海拔1550 m,年平均气温7℃,年降雨量400 mm,无霜期155 d,属于大陆性季风气候。牧草试验田于

2024年4月8日种植,2024年7月2日收割。试验地2:在青海省西宁市大通回族土族自治县(101°80' N, 37°11' E),年平均气温0.8℃,海拔2620 m,无霜期80~90 d,年降雨量590 mm,属于大陆性高原气候。牧草试验田于2024年4月21日种植,2024年8月4日收割。试验均采用条播,小区面积为15 m²(5 m×3 m),区间间隔1 m,每小区播种10行,行距30 cm,播种深度为3~5 cm。试验期间均按照两地常规栽培管理办法进行管理。

1.2 试验设计

本试验采用3因素完全随机设计。设置3种处理因素,2种地区(青海试验点大陆性高原气候和宁夏试验点大陆性季风气候)、3个饲用燕麦品种(‘中畜燕1

号’‘青海甜燕麦’和‘青引2号’)和2种添加剂处理(植物乳杆菌和蒸馏水),共计12个处理,每个处理重复3次。在乳熟期刈割后于室内晾晒,直至燕麦含水量达到65%~70%后用于青贮加工试验。将晾晒好的饲用燕麦切割成小段(2~3 cm),茎叶混合均匀分层分装压实放入密封塑料罐(直径×瓶高:110 mm×138 mm)中青贮,植物乳杆菌添加剂为先牧1152,产品成分为植物乳杆菌菌粉,由科迪华农业科技有限公司提供。植物乳杆菌以1×10¹¹ cfu·mL⁻¹与无菌水按照1:500的比例进行稀释配比,根据每吨青贮饲料0.8 g的处理标准,均匀喷洒饲料表面,对照组使用等量的无菌水。将大约1200 g处理过的饲用燕麦放入密封塑料罐(直径×盖高:110 mm×138 mm)中,并压实密封,室温避光储存,发酵周期60 d。

表1 青贮前不同品种燕麦在不同地区的营养品质

Table 1 Nutritional quality of different oat varieties in different regions before silage

项目 Items	青海 Qinghai			宁夏 Ningxia		
	中畜燕1号 Zhongchu Yan No.1	青海甜燕麦 Qinghai Sweet Oats	青引2号 Qingyin No.2	中畜燕1号 Zhongchu Yan No.1	青海甜燕麦 Qinghai Sweet Oats	青引2号 Qingyin No.2
干物质 DM/(%FM)	30.90±2.84	29.30±2.70	35.84±2.82	28.78±1.13	29.44±4.19	34.08±1.29
粗蛋白 CP/(%DM)	8.68±0.10	8.38±0.48	9.50±0.46	8.98±0.35	6.25±0.05	7.27±0.13
粗脂肪 EE/(%DM)	2.37±0.07	2.15±0.04	2.54±0.04	3.78±0.05	2.03±0.05	2.36±0.04
酸性洗涤纤维 ADF/(%DM)	30.31±0.26	34.46±0.47	27.91±0.83	34.34±0.35	30.40±0.17	32.35±0.26
中性洗涤纤维 NDF/(%DM)	55.69±0.21	56.68±0.29	60.46±0.43	60.93±0.65	61.39±0.41	60.11±0.36
可溶性碳水化合物 WSC/(%DM)	7.18±0.07	8.00±0.59	7.96±0.62	7.58±0.07	7.64±0.09	7.05±0.06

1.3 测定指标及方法

1.3.1 感官品质的测定 采用德国农业协会饲料行业标准对燕麦青贮饲料进行感官评价,青贮完成后,按青贮组别取出青贮饲料,从结构、色泽和气味三方面进行鉴定^[16]。评价等级分为四等,分别为优良、尚好、中等、劣质。

1.3.2 发酵品质的测定 青贮样品浸提处理步骤如下:称取20 g混匀样品放入瓶中,加入180 mL的去离子水,在4℃下浸提24 h,经组织捣碎机处理1~2 min,取上清液依次经四层纱布和定性滤纸过滤,最终将滤液保存于-20℃冰箱,用来测定pH值,LA,AA,丙酸(Propionic acid,PA)和丁酸(Butyric acid,BA)。使用pH酸度计(雷磁-25型,上海仪电科学仪器股份有限公司)测定pH值。通过高效液相色谱法测定有机酸含量^[17]。使用水杨酸-次氯酸钠法测定NH₃-N的含量^[18]。

1.3.3 营养品质的测定 将青贮饲料于105℃高温杀青15 min,在65℃下干燥48 h测定DM含量。使用蒽酮-比色法测定WSC含量^[19]。使用凯氏定氮法测定粗蛋白(Crude protein,CP)含量^[20]。使用ANKOM2000i全自动纤维分析仪(北京安科博瑞科

技有限公司)测量中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber,NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber,ADF)含量^[21]。使用索氏抽提法测定粗脂肪(Ether extract,EE)的含量^[22]。

1.3.4 青贮发酵品质评定 选用V-Score评价体系,依据最终的评分情况,把混合青贮的品质划分成3个级别:低于60分为不良,60-80分(包含60分和80分)为尚可,80分以上为良好。各指标评分标准见表2^[23]。

1.4 综合评价

首先对各单项测定指标进行相关性分析,以确定各指标之间的相关性。通过主成分分析对这些指标数据进行降维和简化。然后使用隶属函数分析^[24],对燕麦青贮的不同处理组的各指标进行标准化。根据以下公式,计算各指标的隶属函数值,并计算出综合评价值。正相关采用公式(1)进行计算,负相关采用公式(2)进行计算:

正相关隶属函数:

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

负相关隶属函数:

表 2 V-Score 评价体系及评分标准

Table 2 V-score evaluation system and scoring criteria

指标 Item	得分 Score	计算式 Formula
氨态氮:总氮 (Ammonia nitrogen:Total nitrogen,NH ₃ -N:TN)/%	X _N : ≤5 5-10 10-20 >20	Y _N : =50 =60-2×X _N =80-4×X _N =0
乙酸+丙酸(占干物质)(Acetic acid+Propionic acid,AA+PA)/(%DM)	X _A : ≤0.2 0.2-1.5 >1.5	Y _A : =10 =(150-100×X _A)/13 =0
丁酸(占干物质)(Butyric acid,BA)/(%DM)	X _B : 0-0.5 >0.5	Y _B : =40-80×X _B =0
V-Score:Y=Y _N +Y _A +Y _B		

$$F_{ij}=1-(X_{ij}-X_{imin})/(X_{imax}-X_{imin}) \quad (2)$$
$$F=\sum W(X_i)/i$$

式中, F_{ij} 表示*i*处理*j*指标的隶属函数值; X_{ij} 表示*i*处理*j*指标的测定值; X_{imax} 和 X_{imin} 分别表示所有处理*j*指标的最大值和最小值, F 表示不同处理青贮各指标的综合评价价值。

1.5 数据分析

所有数据均以重复检验的平均值表示,采用 Excel 2010 进行数据处理并使用 SPSS 29.0.2.0 (IBM, Inc. ,Armonk,NY,USA)进行多因素方差分析(ANOVA)和多重比较。

2 结果与分析

2.1 燕麦青贮感官评价

通过感官评价可快速筛查发酵品质优劣,为后续营养分析和饲用安全性评估提供初步依据。如表 3 所示,所有处理均达到 II 级(尚好)。青海地区总分最高的处理是 LP 添加的‘中畜燕 1 号’,为 15.33 分;宁夏地区总分最高的处理是 LP 添加的‘中畜燕 1 号’和‘青引 2 号’,为 15.99 分。综上可得,在两个地区,‘中畜燕 1 号’青贮感官表现最好,添加 LP 有效提升了不同品种的青贮感官综合得分。

表 3 不同地区、品种及添加剂处理对燕麦青贮感官品质的影响

Table 3 Effects of region, variety, and additive treatments on sensory quality of oat silage

地区 Region	品种 Variety	添加剂 Additive	气味 Odor		颜色 Colour		结构 Structure		综合分数 Composite score	
			描述 Describe	平均分 Average	描述 Describe	平均分 Average	描述 Describe	平均分 Average	总分 Total score	等级 Grade
青海 Qinghai	ZY1	LP	SE,SR	11.33	CI,CU	1.33	TF,TD	2.67	15.33	II 级
青海 Qinghai	ZY1	CK	SW,SE,SR	9.33	CU,CY	0.67	TF,TD	2.67	12.67	II 级
青海 Qinghai	QS	LP	SE,SR	10.33	CU	1.00	TF,TS	3.00	14.33	II 级
青海 Qinghai	QS	CK	SW,SE,SR	9.33	CU	1.00	TF,TS	3.00	13.33	II 级
青海 Qinghai	QY2	LP	SE,SR	10.33	CU	1.00	TF,TD	3.33	14.66	II 级
青海 Qinghai	QY2	CK	SW,SE,SR	9.33	CU,CY	0.67	TF,TD	2.67	12.67	II 级
宁夏 Ningxia	ZY1	LP	SE,SR	11.33	CI,CU	1.33	TF,TD	3.33	15.99	II 级
宁夏 Ningxia	ZY1	CK	SE,SR	10.33	CU	1.00	TF,TS	3.00	14.33	II 级
宁夏 Ningxia	QS	LP	SE,SR	10.33	CU	1.00	TF,TS	3.00	14.33	II 级
宁夏 Ningxia	QS	CK	SW,SE,SR	9.33	CI,CU	1.33	TF,TD	3.33	13.99	II 级
宁夏 Ningxia	QY2	LP	SE,SR	11.33	CI,CU	1.33	TF,TD	3.33	15.99	II 级
宁夏 Ningxia	QY2	CK	SE,SR	10.33	CU,CY	0.67	TF,TD	2.67	13.67	II 级

注:SQ 代表淡酸味;SW 代表丁酸味;SE 代表有弱芬香味;SR 代表面包香味;TA 代表茎叶腐烂;TS 代表霉菌污染;TD 代表茎叶结构差;TF 代表茎叶结构良好;CY 代表墨绿褐黄色;CU 代表淡褐黄色;CI 代表黄绿色;ZY1 代表‘中畜燕 1 号’;QS 代表‘青海甜燕麦’;QY2 代表‘青引 2 号’。下同

Note:SQ stands for light sour taste; SW stands for butyric acid taste; SE stands for weak fragrance; SR stands for bread flavor; TA stands for stem and leaf decay; TS stands for mold contamination; TD stands for poor stem and leaf structure; TF stands for good stem and leaf structure; CY stands for dark green and brown yellow; CU stands for light brown yellow; CI stands for yellow green;ZY1 stands for ‘zhongchuyan No. 1’; QS stands for ‘Qinghai sweet oat’; QY2 stands for ‘Qingyin 2’. The same as below

2.2 燕麦青贮的营养品质

青贮营养品质是指饲草经厌氧发酵后,在 DM,CP,纤维组分及有机酸含量等方面的综合表

现,可直接反映其营养价值、消化率及动物利用效率。不同地区多种饲用燕麦青贮后的营养品质见表 4。由表 4 可知,不同海拔高度对燕麦青贮饲料

的营养品质存在显著影响,该影响在DM和WSC含量上体现为宁夏地区极显著高于青海地区($P<0.01$),但两地区CP含量无显著差异。品种对燕麦青贮营养品质存在极显著影响,‘中畜燕1号’燕麦青贮饲料的CP和EE含量在所有参试品种中最高,品种差异达到极显著水平($P<0.01$);‘青引2号’的ADF含量显著低于其他品种($P<0.05$),且WSC含量也显著低于其他品种($P<0.05$),纤维消化率与可发酵底物水平更具优势。从添加剂方面看,LP的添加极显著增加了燕麦青贮饲料的CP和EE含量的整体水平($P<0.01$),同时极显著降低了ADF和NDF含量的整体水平($P<0.01$),有效提升了饲料的蛋白保存率,能量价值及纤维消化潜

力。其中,个别品种(如青海地区的‘青引2号’)在LP添加后EE含量略有下降,这可能与品种特性及地区环境互作有关。品种×添加剂两者交互作用对CP,EE,WSC,ADF和NDF含量具有显著影响($P<0.05$)或极显著影响($P<0.01$)。地区×添加剂交互作用对CP,ADF,NDF和WSC含量具有极显著影响($P<0.01$),对EE含量无显著影响。地区×品种两者交互作用对CP,EE,ADF,NDF和WSC含量均具有极显著影响($P<0.01$)。品种、添加剂和地区三者交互作用对DM外的所有品质指标均具有显著或极显著影响($P<0.05$),表明燕麦青贮的营养品质受多因素共同调控,存在复杂的互作效应。

表4 不同地区、品种及添加剂处理对燕麦青贮营养品质的影响

Table 4 Effects of region, variety, and additive treatments on the nutritional quality of oat silage

地区 Region	品种 Variety	干物质DM/(%FM)		粗蛋白CP/(%DM)		粗脂肪EE/(%DM)		酸性洗涤纤维ADF/(%DM)		中性洗涤纤维NDF/(%DM)		可溶性碳水化合物WSC/(%DM)	
		CK	LP	CK	LP	CK	LP	CK	LP	CK	LP	CK	LP
青海 Qinghai	ZY1	31.15±1.32 ^{Aa}	31.17±4.50 ^{Aa}	9.27±0.41 ^{Ba}	11.16±0.37 ^{Aa}	3.75±0.02 ^{Aa}	3.81±0.06 ^{Aa}	29.07±0.66 ^{Ab}	29.29±0.48 ^{Aa}	49.45±0.20 ^{Ab}	42.53±0.20 ^{Bb}	5.13±0.02 ^{Bc}	6.25±0.02 ^{Ab}
	QS	27.23±3.40 ^{Aa}	27.86±2.58 ^{Ab}	8.75±0.53 ^{Bb}	10.12±0.27 ^{Ab}	2.66±0.04 ^{Ab}	2.67±0.06 ^{Ab}	30.66±0.33 ^{Aa}	26.52±0.31 ^{Bb}	50.04±0.32 ^{Ab}	46.03±0.79 ^{Ba}	5.31±0.07 ^{Bb}	6.47±0.04 ^{Aa}
	QY2	30.47±1.33 ^{Aa}	24.68±5.31 ^{Bb}	9.92±0.27 ^{Aa}	10.35±0.32 ^{Ab}	3.10±0.07 ^{Ac}	2.79±0.09 ^{Bb}	23.15±0.37 ^{Ac}	20.83±0.38 ^{Bc}	54.19±0.34 ^{Aa}	47.72±0.21 ^{Ba}	5.37±0.05 ^{Ba}	6.08±0.04 ^{Ac}
宁夏 Ningxia	ZY1	33.36±1.24 ^{Aa}	30.79±2.80 ^{Aa}	9.79±0.47 ^{Ba}	12.46±0.31 ^{Aa}	3.64±0.03 ^{Aa}	3.56±0.03 ^{Ba}	27.51±0.27 ^{Ab}	25.54±0.38 ^{Bb}	55.66±0.27 ^{Aa}	46.44±0.38 ^{Ba}	5.28±0.08 ^{Ba}	6.36±0.04 ^{Aa}
	QS	28.85±2.14 ^{Aa}	25.70±2.59 ^{Aa}	8.03±0.66 ^{Bb}	9.42±0.44 ^{Ab}	2.94±0.05 ^{Ab}	2.11±0.06 ^{Bc}	24.53±0.31 ^{Ab}	20.49±0.41 ^{Bb}	49.62±0.20 ^{Ab}	43.46±0.20 ^{Bb}	5.08±0.08 ^{Bb}	6.38±0.04 ^{Aa}
	QY2	31.18±0.71 ^{Aa}	28.11±2.91 ^{Aa}	8.23±0.22 ^{Bb}	10.44±0.35 ^{Ac}	2.80±0.04 ^{Bc}	3.34±0.03 ^{Ab}	28.97±0.46 ^{Aa}	25.58±0.33 ^{Ba}	51.88±0.57 ^{Ac}	46.74±0.52 ^{Ba}	4.78±0.06 ^{Bc}	5.81±0.04 ^{Ab}
P值 P-value	df	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
区组 Granule	2	4.271	0.050	0.054	0.818	2.393	0.136	0.257	0.617	0.347	0.562	0.002	0.968
地区 Region	1	6.643	0.017	2.112	0.160	15.679	<0.001	70.216	<0.001	23.308	<0.001	80.846	<0.001
添加剂 Additive	1	1.009	0.326	146.048	<0.001	36.919	<0.001	362.348	<0.001	2261.476	<0.001	3961.451	<0.001
品种 Variety	2	7.708	0.003	45.117	<0.001	1532.805	<0.001	196.058	<0.001	153.919	<0.001	118.207	<0.001
地区×添加剂 Region×Additive	1	0.453	0.508	9.744	0.005	1.683	0.207	14.830	<0.001	15.340	<0.001	17.643	<0.001
地区×品种 Region×Variety	2	1.363	0.276	16.329	<0.001	35.622	<0.001	604.736	<0.001	275.97	<0.001	91.232	<0.001
添加剂×品种 Additive×Variety	2	0.560	0.579	5.120	0.014	94.455	<0.001	46.696	<0.001	45.913	<0.001	39.491	<0.001
地区×添加剂×品种 Region×Additive×Variety	4	1.232	0.310	3.448	0.049	226.747	<0.001	5.795	0.009	19.862	<0.001	9.790	<0.001

注:同列数据肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$),小写字母表示同一地区内不同品种之间的显著差异,大写字母表示同一地区同一品种内添加剂处理(CK与LP)之间的显著差异。下同

Note: In the same column of data, different superscript letters denote significant differences ($P<0.05$). while the same letter or no letter indicates no significant differences ($P>0.05$). Lowercase letters indicate significant differences among varieties within the same region, while uppercase letters indicate significant differences between additive treatments (CK vs LP) within the same region and the same variety. The same as below

2.3 燕麦青贮的发酵品质

青贮发酵品质是指饲料在厌氧发酵过程中形成的pH值、有机酸(如LA,AA,BA)组成及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量等关键指标的综合表现,反映了发酵效率、稳定性及饲料卫生安全水平。不同地区饲用燕麦青贮的发酵品质见表5。由表5可知,海拔高低对燕麦

青贮饲料的pH,LA,BA和 $\text{NH}_3\text{-N}$:TN含量均有极显著影响($P<0.01$),对AA,PA含量无显著影响。不同品种间的青贮发酵品质存在显著差异,‘中畜燕1号’燕麦青贮饲料的pH值和BA含量最低,且BA含量极显著低于其他品种($P<0.01$),LA含量高于其他品种但无显著差异,发酵效率与卫生品质

在参试品种中表现最优。青海地区的‘青海甜燕麦’的NH₃-N:TN含量最低,极显著低于其他品种($P<0.01$)。从添加剂方面看,LP的添加显著增加了燕麦青贮饲料的LA含量($P<0.05$),同时极显著降低了pH,BA和NH₃-N:TN含量($P<0.01$),有效改善了青贮发酵效率与饲料安全性。品种×添加

剂两者交互作用对LA和NH₃-N:TN含量具有极显著影响($P<0.01$)。地区×添加剂两者交互作用对pH,LA和BA含量具有极显著影响($P<0.01$)。品种、添加剂和地区三者交互作用对燕麦青贮饲料的pH有极显著影响($P<0.01$),表明青贮发酵品质受多因素的综合调控。

表 5 不同地区、品种及添加剂处理对燕麦青贮发酵品质的影响

Table 5 Effects of region, variety, and additive treatments on fermentation quality of oat silage

地区 Region	品种 Variety	pH		乳酸LA/(%DM)		乙酸AA/(%DM)		丙酸PA/(%DM)		丁酸BA/(%DM)		氨态氮:总氮NH ₃ -N:TN/%	
		CK	LP	CK	LP	CK	LP	CK	LP	CK	LP	CK	LP
青海 Qinghai	ZY1	4.05±0.03 ^{Ab}	3.75±0.03 ^{Ba}	4.41±0.40 ^{Ba}	8.20±0.28 ^{Aa}	1.87±0.23 ^{Ab}	1.39±0.33 ^{Aa}	0.33±0.09 ^{Ab}	0.12±0.05 ^{Ba}	0.03±0.01 ^b	ND	5.09±0.11 ^{Ab}	3.23±0.29 ^{Bb}
	QS	4.56±0.04 ^{Aa}	3.78±0.09 ^{Ba}	4.55±0.41 ^{Ba}	7.54±0.31 ^{Aa}	2.51±0.22 ^{Aa}	1.68±0.07 ^{Ba}	0.48±0.07 ^{Aa}	0.15±0.03 ^{Ba}	0.13±0.02 ^{Aa}	0.03±0.01 ^{Ba}	3.23±0.38 ^{Ac}	2.21±0.19 ^{Bc}
	QY2	4.47±0.06 ^{Aa}	3.84±0.02 ^{Ba}	5.13±0.15 ^{Ba}	7.65±0.39 ^{Aa}	2.27±0.35 ^{Ab}	1.64±0.36 ^{Ba}	0.39±0.03 ^{Ab}	0.11±0.05 ^{Ba}	0.13±0.02 ^{Aa}	0.03±0.01 ^{Ba}	6.39±0.20 ^{Aa}	4.57±0.16 ^{Ba}
宁夏 Ningxia	ZY1	4.52±0.01 ^{Aa}	3.86±0.04 ^{Bb}	5.02±0.30 ^{Bb}	7.54±0.36 ^{Aa}	2.42±0.35 ^{Aa}	1.32±0.43 ^{Ba}	0.37±0.06 ^{Aa}	0.13±0.00 ^{Ba}	0.09±0.05 ^{Ab}	0.05±0.01 ^{Aa}	9.62±0.30 ^{Aa}	6.32±0.26 ^{Ba}
	QS	4.59±0.03 ^{Aa}	3.82±0.09 ^{Bb}	5.13±0.39 ^{Bb}	7.80±0.22 ^{Aa}	2.25±0.38 ^{Aa}	1.14±0.43 ^{Ba}	0.42±0.12 ^{Aa}	0.10±0.05 ^{Ba}	0.15±0.01 ^{Aa}	0.06±0.01 ^{Ba}	9.74±0.61 ^{Aa}	6.72±1.00 ^{Ba}
	QY2	4.34±0.04 ^{Ab}	4.03±0.04 ^{Ba}	6.57±0.26 ^{Ba}	7.65±0.37 ^{Aa}	2.27±0.36 ^{Aa}	1.54±0.22 ^{Ba}	0.37±0.06 ^{Aa}	0.10±0.03 ^{Ba}	0.14±0.02 ^{Ab}	0.05±0.01 ^{Ba}	9.72±0.27 ^{Aa}	6.32±0.37 ^{Ba}
P值 P-value	df	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
区组 Granule	2	0.002	0.967	4.343	0.048	3.331	0.081	0.109	0.745	0.055	0.817	0.089	0.768
地区 Region	1	51.860	<0.001	13.176	<0.001	0.435	0.516	0.435	0.491	44.829	<0.001	782.994	<0.001
添加剂 Additive	1	1271.918	<0.001	636.339	<0.001	61.829	0.336	61.829	0.108	184.476	0.001	289.212	0.001
品种 Variety	2	30.909	<0.001	9.549	<0.001	1.146	0.336	1.146	0.108	9.414	<0.001	27.217	<0.001
地区×添加剂 Region×Additive	1	0.042	0.839	24.375	<0.001	2.638	0.118	2.638	0.831	1.793	0.194	35.050	<0.001
地区×品种 Region×Variety	2	26.473	<0.001	4.451	0.023	3.154	0.062	3.154	0.288	10.219	<0.001	37.020	<0.001
添加剂×品种 Additive×Variety	2	37.682	<0.001	15.811	<0.001	0.645	0.534	0.645	0.153	30.804	<0.001	1.842	0.181
地区×添加剂×品种 Region×Additive× Variety	4	36.873	<0.001	2.918	0.074	0.577	0.569	0.577	0.893	1.162	0.331	0.384	0.685

2.4 燕麦青贮相关性分析

采用皮尔逊相关性分析法,对不同地区多种饲用燕麦青贮的营养品质和发酵品质相关的12个指标进行分析。由图1可知,燕麦青贮饲料的营养品质相关指标之间存在广泛且显著的相关性。在营养品质指标中,DM含量与CP含量和EE含量呈显著正相关($P<0.05$),CP含量与EE含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与NDF含量和WSC含量呈极显著负相关关系($P<0.01$);EE含量与ADF含量呈极显著正相关($P<0.01$);ADF含量与NDF含量呈极显著正相关($P<0.01$),与LA含量呈显著负相关($P<0.05$),ADF含量与WSC含量呈显著正相关关系($P<0.05$),NDF含量与WSC含量呈极显著正相关关系($P<0.01$)。发酵品质指标中,pH值与AA,PA,BA和NH₃-N:TN含量呈极显著

正相关关系($P<0.01$),与LA含量呈极显著负相关($P<0.01$);LA含量与AA,PA和BA含量呈极显著负相关关系($P<0.01$);AA含量与PA和BA含量呈极显著正相关($P<0.01$);PA含量与BA、NH₃-N:TN含量呈极显著正相关关系($P<0.01$);BA含量与NH₃-N:TN含量呈极显著正相关($P<0.01$)。营养品质与发酵品质指标间也存在显著关联,CP含量与LA含量呈极显著正相关($P<0.01$),与pH,AA,PA,BA含量呈极显著负相关($P<0.01$);DM含量与BA含量呈显著负相关($P<0.05$)。这些结果表明,燕麦青贮的营养品质与发酵品质指标间存在复杂的协同与拮抗关系,营养的组成特征会直接影响发酵过程中的有机酸生成、pH变化及蛋白保存效果,反之,发酵品质也会进一步影响青贮饲料的营养特性。

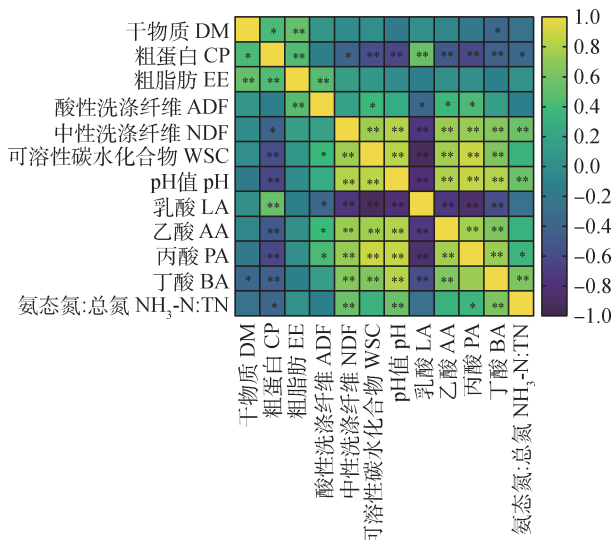


图 1 燕麦青贮的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of oat silage

注:*表示相关性显著($P<0.05$);**表示相关性极显著($P<0.01$)

Note:* means a significant level of correlation ($P<0.05$); ** means an extremely significant level of correlation ($P<0.01$)

2.5 燕麦青贮品质 V-Score 体系评价

不同地区多种饲用燕麦青贮的 V-Score 评价由表 6 可知,添加 LP 处理的 V-Score 评价均为良好;在对照中,除青海地区的‘中畜燕 1 号’V-Score 评价为良好外,其他对照评价均为尚可。在青海地区,V-Score 评分最高的是‘中畜燕 1 号’,为 90.00;在宁夏地区,‘青引 2 号’的 V-Score 评分最高,为 83.76,但‘中畜燕 1 号’的评分只比‘青引 2 号’低了 0.02,差距极小。

2.6 主成分分析

对燕麦青贮的营养品质和发酵品质共 12 个性状指标进行主成分分析。结果表明(表 7),前 3 个主成分的特征值分别为 6.987,2.351 和 1.107,均大于

1,且累积贡献率达到 87.042%(70%),说明这 3 个主成分能够保留原始指标 87.042% 的信息,可以较好地解释燕麦青贮的品质特征。其中,第一主成分(PC1)贡献率为 58.228%,第二主成分(PC2)贡献率为 19.590%,第三主成分(PC3)贡献率为 9.225%。从各主成分的特征向量来看,PC1 上 pH(0.962),PA(0.958),AA(0.939),BA(0.891)和 NDF(0.843)具有较高的正载荷,而 WSC(-0.929)和 LA(-0.857)具有较高的负载荷,说明 PC1 主要反映了青贮的发酵酸度与有机酸组成特征,可定义为“发酵酸度因子”。PC2 载荷最高的指标为 EE(0.921)和 DM(0.823),同时 ADF(0.569)也具有较高正载荷,表明 PC2 主要关联燕麦青贮的基础营养成分含量,可定义为“营养品质因子”。第三主成分 PC3 的贡献率为 9.225%,载荷最高的指标为氨态氮:总氮(Ammonia nitrogen: Total nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N:TN}$)(0.660),同时 ADF(-0.590)具有较高的负载荷,说明 PC3 主要反映青贮过程中的蛋白质降解程度,可定义为“蛋白质降解因子”。

可见,提取的 3 个主成分可有效综合 12 项指标的信息,全面表征燕麦青贮的发酵特性和品质、营养水平及蛋白质稳定性,为后续燕麦青贮品质的综合评价与等级划分提供了科学依据。

2.7 隶属函数分析

根据主成分分析及相关性分析结果,对不同处理的燕麦青贮各指标进行隶属函数值(F_{ij})和综合评价值(F)计算,综合评价值越高,说明燕麦青贮的发酵品质越高。根据主成分分析结果,对筛选出的 12 个指标进行隶属函数分析并排名。其中 DM,

表 6 不同地区、品种及添加剂处理下燕麦青贮的 V-Score 评分及等级

Table 6 V-Score and grade of oat silage under different regions, varieties, and additive treatments

地区 Region	品种 Variety	添加剂 Additive	氨态氮 $\text{NH}_3\text{-N}/\%$	乙酸+丙酸 $\text{AA+PA}/\%$	丁酸 $\text{BA}/\%$	评分 Score	评价 Evaluate
青海 Qinghai	中畜燕 1 号	LP	50.00	0.00	40.00	90.00	良好 Good
	Zhongchu Yan No.1	CK	49.82	0.00	37.60	87.42	良好 Good
	青海甜燕麦	LP	50.00	0.00	37.60	87.60	良好 Good
	Qinghai Sweet Oats	CK	50.00	0.00	29.60	79.60	尚可 Fair
	青引 2 号	LP	50.00	0.00	37.60	84.82	良好 Good
	Qingyin No.2	CK	47.22	0.00	29.60	79.60	尚可 Fair
宁夏 Ningxia	中畜燕 1 号	LP	47.36	0.38	36.00	83.74	良好 Good
	Zhongchu Yan No.1	CK	40.76	0.00	32.80	73.56	尚可 Fair
	青海甜燕麦	LP	46.56	2.00	35.20	83.76	良好 Good
	Qinghai Sweet Oats	CK	40.52	0.00	28.00	68.52	尚可 Fair
	青引 2 号	LP	47.36	0.00	36.00	83.36	良好 Good
	Qingyin No.2	CK	40.56	0.00	28.80	69.36	尚可 Fair

表 7 燕麦青贮 12 项品质指标的主成分分析特征值、贡献率及累积贡献率

Table 7 Eigenvalue, contribution rate, and cumulative contribution rate of principal components for the 12 quality indicators of oat silage

项目 Item	PC1	PC2	PC3
干物质 DM/(%FM)	−0.367	0.823	0.211
粗蛋白 CP/(%DM)	−0.765	0.414	0.273
酸性洗涤纤维 ADF/(%DM)	0.329	0.569	−0.590
中性洗涤纤维 NDF/(%DM)	0.843	0.219	0.300
可溶性碳水化合物 WSC/(%DM)	−0.929	−0.122	−0.015
pH	0.962	0.041	0.081
粗脂肪 EE/(%DM)	−0.063	0.921	0.233
氨态氮:总氮 NH ₃ -N:TN/%	0.574	−0.212	0.660
乳酸 LA/(%DM)	−0.857	−0.288	0.095
乙酸 AA/(%DM)	0.939	0.168	−0.103
丙酸 PA/(%DM)	0.958	0.142	−0.150
丁酸 BA/(%DM)	0.891	−0.298	0.105
特征值 Eigenvalue	6.987	2.351	1.107
贡献率 Contribution/%	58.228	19.590	9.225
累积贡献值 Cumulative contribution rate/%	58.228	77.818	87.042

CP, WSC, EE 和 LA 为正向指标, NDF, ADF, pH, AA, PA, BA 和 NH₃-N:TN 为负向指标。其中平均隶属函数值最高的处理是青海地区添加 LP 的‘中

畜燕 1 号’, 为 0.760; 其次是宁夏地区添加 LP 的‘中畜燕 1 号’, 为 0.718; 最低的是宁夏地区添加蒸馏水的‘青引 2 号’。

表 8 不同地区、品种及添加剂处理下燕麦青贮品质的隶属函数综合得分及排名

Table 8 Comprehensive membership function scores and ranking of oat silage quality under different regions, varieties, and additive treatments

地区 Region	品种 Variety	添加剂 Additive	干物质 DM/ (%FM)	粗蛋白 CP/ (%DM)	酸性洗涤 纤维 ADF/ (%DM)	中性洗涤 纤维 NDF/ (%DM)	可溶性 碳水化合物 WSC/(%DM)	pH	粗脂肪 EE/ (%DM)	氨态氮:总氮 NH ₃ -N:TN/%	乳酸 LA/ (%DM)	乙酸 AA/ (%DM)	丙酸 PA/ (%DM)	丁酸 BA/ (%DM)	均值 Average	排名 Ranking
青海 Qinghai	ZY1	LP	0.75	0.71	0.13	1.00	0.87	1.00	1.00	0.87	0.00	0.82	0.95	1.00	0.760	1
宁夏 Ningxia	ZY1	LP	0.70	1.00	0.50	0.70	0.93	0.88	0.85	0.45	0.17	0.87	0.92	0.64	0.718	2
青海 Qinghai	QY2	LP	0.00	0.52	0.97	0.60	0.77	0.90	0.40	0.69	0.15	0.65	0.96	0.82	0.618	3
青海 Qinghai	QS	LP	0.37	0.48	0.41	0.73	1.00	0.97	0.33	1.00	0.18	0.61	0.87	0.82	0.647	4
宁夏 Ningxia	QS	LP	0.12	0.31	1.00	0.93	0.94	0.92	0.00	0.40	0.11	1.00	1.00	0.61	0.612	5
宁夏 Ningxia	QY2	LP	0.40	0.55	0.50	0.68	0.62	0.67	0.72	0.45	0.15	0.71	1.00	0.66	0.592	6
青海 Qinghai	ZY1	CK	0.75	0.29	0.16	0.47	0.21	0.64	0.96	0.62	0.00	0.47	0.40	0.77	0.479	7
青海 Qinghai	QY2	CK	0.67	0.43	0.74	0.11	0.35	0.14	0.58	0.45	0.81	0.17	0.24	0.14	0.401	8
宁夏 Ningxia	ZY1	CK	1.00	0.41	0.31	0.00	0.30	0.09	0.90	0.02	0.84	0.06	0.28	0.39	0.376	9
青海 Qinghai	QS	CK	0.29	0.17	0.00	0.43	0.31	0.03	0.32	0.87	0.96	0.00	0.00	0.14	0.293	10
宁夏 Ningxia	QS	CK	0.48	0.00	0.60	0.46	0.18	0.00	0.49	0.00	0.81	0.18	0.15	0.00	0.277	11
宁夏 Ningxia	QY2	CK	0.75	0.05	0.17	0.29	0.00	0.29	0.40	0.00	0.43	0.17	0.30	0.02	0.238	12

3 讨论

3.1 植物乳杆菌对不同品种燕麦青贮饲料感官和 V-Score 评分的影响

青贮饲料的感官品质直接影响反刍动物适口性和采食量, V-Score 评分体系通过量化发酵指标为品质评价提供了科学依据。本研究结果表明, 添加植物乳杆菌明显提升了宁夏和青海两地燕麦青贮的感官评分与 V-Score 等级, 处理组(LP)的感官评分与 V-Score 等级均达“良好”, 优于对照组。其中‘中畜燕 1 号’在青海和宁夏两个不同地区青贮感官评价得分均为第一, 表现出较强的环境适应性。

在感官评价中, 处理组(LP)的气味均呈现“弱芬香味、面包香味”, 得分明显高于对照组(CK)的“丁酸味”或“弱芬香味”。这一差异归因于 LP 通过快速产酸(LA)抑制了 BA(如梭菌属)的活性, 减少了不良代谢产物的积累。此外, 处理组(LP)的色泽评分更高(如青海地区的‘中畜燕 1 号’略带白色和棕黄色; 宁夏地区的‘中畜燕 1 号’黄褐色带浅绿色), 表明菌剂添加延缓了氧化反应和叶绿素降解, 而对照组的“黄褐色”或“棕色”可能源于霉菌污染或过度发酵。结构评分方面, 处理组(LP)茎叶保持“柔软松散”, 而对照组出现“疏松”, 原因可能是发酵不完全, 未能充分软化纤维含量高的茎秆。

3.2 植物乳杆菌对不同品种燕麦青贮营养品质的影响

青贮过程中营养物质的保存是评价饲料价值的关键,CP含量是评估牧草作为动物蛋白质来源及青贮饲料营养品质的关键指标。本试验中,青海和宁夏两地添加LP的‘中畜燕1号’CP含量最高(11.16%和12.46%),显著高于‘青海甜燕麦’与‘青引2号’,这可能与品种自身的茎、叶特性有关,‘中畜燕1号’为中国农业科学院北京畜牧兽医研究所选育的燕麦新品系,该品系具有产草量高、品质好的特点,具有较优的叶茎比,导致其细胞壁结构疏松,纤维结构更易被乳酸菌分解,且茎叶水分分布均匀,有利于形成稳定厌氧环境,减少营养流失,因此更适合青贮。同时,添加LP明显促进了青贮发酵效率,为乳酸菌提供了充足的发酵底物,有助于提高燕麦青贮的CP含量。这一结果与植物乳杆菌通过竞争性抑制蛋白酶活性、减少蛋白质降解的机制相符。CP与EE呈极显著正相关($P<0.01$),而CP与NDF, WSC呈显著负相关($P<0.05$)。这与Kaur等、孙红梅等、魏孔涛等研究结果一致,印证了菌剂添加通过降低NDF和消耗WSC含量以提升蛋白质保存率的结果。ADF和NDF是反映饲料纤维品质的重要指标,NDF与WSC呈极显著正相关($P<0.01$),与董志晓等研究结果一致,表明原料纤维含量越高,可供青贮发酵的碳水化合物储备越丰富。ADF与动物消化率呈负相关,ADF含量越低,饲草消化率越高,饲用价值也越高;反之,ADF含量增加会减缓动物的消化和吸收速度。NDF和ADF是判断饲草品质优劣的重要营养指标。本试验中,宁夏地区LP添加的‘青海甜燕麦’ADF含量最低(20.49%),青海地区LP添加的‘中畜燕1号’NDF含量最低(42.53%),表明LP添加显著提升了燕麦青贮的营养品质。前人研究指出NDF和ADF含量降低不仅提升了饲草营养价值,还更有利于动物对饲草的消化吸收。WSC含量是确保青贮饲料发酵过程顺利进行的关键因素,影响着青贮过程中乳酸菌发酵的速率。两个地区的3种燕麦经LP处理的WSC含量高于CK(表4),普遍增加了0.7%以上。其中,‘中畜燕1号’经LP处理的WSC含量同步增加1%以上,这表明LP在青贮过程中有效利用了WSC,促进了LP的产生,从而降低了pH值,抑制了有害微生物的生长。这种高效的发酵过程不仅减少了营养物质的损失,还提高了青

贮效率。EE含量对青贮饲料的能量水平和质量有着直接影响。EE含量越高,其营养价值和饲料质量也相应更高。青海地区LP添加的‘中畜燕1号’EE含量最高(3.81%),显著高于其他品种,可能是其叶片WSC含量较高,且茎秆结构更易被微生物分解的特性,从物理条件上最大限度地减少了包括脂肪在内的各类营养物质的氧化与流失风险,从而有利于植物乳杆菌提高牧草的EE含量。

3.3 植物乳杆菌对不同地区燕麦青贮饲料发酵品质的影响

pH是衡量青贮发酵的核心指标,通常把pH在4.2以下的青贮饲料定义为优质青贮,4.2~4.5为中等青贮,高于4.5为劣质青贮。周天荣等研究发现植物乳杆菌的添加不仅减少了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的积累,还有效降低了环境pH值,抑制了有害微生物的增殖,与本研究结果一致。 $\text{NH}_3\text{-N}:\text{TN}$ 是衡量发酵品质的重要指标,反映出饲料在青贮过程中分解蛋白质和氨基酸的程度,其比值越大,分解程度就越大,青贮效果越差。发酵品质分析显示,青海地区燕麦青贮的 $\text{NH}_3\text{-N}:\text{TN}$ (4.12%)显著低于宁夏地区(8.07%)($P<0.01$),这一结果印证了青海地区的青贮效果优于宁夏地区。首先,种植地气候影响了原料的蛋白质组成和纤维结构。青海高寒环境下生长的燕麦,其细胞壁结构可能更为疏松,蛋白质与纤维的结合方式更易被乳酸菌分解,同时植物内源蛋白酶的活性在生长过程中已受到低温驯化,导致青贮时蛋白水解程度较低。其次,原料表面附着的微生物区系存在区域差异。长期适应高寒气候的燕麦植株表面可能富集了更耐低温的乳酸菌菌株,而梭菌、肠杆菌等腐败菌的丰度天然较低;相反,宁夏半干旱暖温区原料表面的微生物多样性更高,包含更多好氧菌和潜在腐败菌,这些微生物在青贮初期会与添加的LP竞争底物,并产生更多 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。此外,植物次生代谢产物的区域特异性也发挥了作用:高寒地区紫外线辐射强、昼夜温差大,可能诱导燕麦植株积累更多的酚类物质或抗菌肽,这些天然抑菌成分在青贮过程中能够协同抑制腐败菌的活性,减少蛋白质降解。谢云怡等研究指出,用不同地区材料进行青贮,其 $\text{NH}_3\text{-N}:\text{TN}$ 比值产生明显变化。前人研究证明,LP通过快速产酸降低pH,进而抑制有害代谢产物的积累,从图1可见,pH与LA呈极显著负相关($P<0.01$),而与AA,PA,BA及 $\text{NH}_3\text{-N}$:

TN呈极显著正相关($P<0.01$),进一步验证了这一结论。LA的积累是驱动pH下降的主要动力,而pH的降低又反过来影响微生物活性,调控LA的生成与稳定性;同时LA主导的快速酸化($\text{pH}<4.2$)抑制了腐败菌的产生。LP处理显著降低了燕麦青贮的pH值。本试验中,除宁夏地区的‘青引2号’外,两地其余处理经LP添加后pH均降至4.0以下,表明植物乳杆菌通过快速产酸主导了发酵进程,从而有效提升了燕麦青贮的发酵品质。然而,地区特性仍会影响发酵启动的完整性,青海地区整体pH下降效果略优于宁夏,可能与两地原料特性及初始微生物区系差异有关。在有机酸方面,LP处理显著提高了LA含量,最高可达8.20%,这得益于微生物定向调控、原料特性优化及发酵环境的协同作用。尤其是两地燕麦在WSC含量及组分上的差异,影响了LP同型发酵路径中“糖-酸转化”的效率,进而导致不同地区间LA积累速率出现区别,这一结果印证了定向微生物调控对青贮发酵路径的优化能力。同时,LP处理显著降低了AA,PA和BA的含量,其中AA,PA可低至1.14%,0.10%,BA甚至降低到0(表5),这进一步说明同型发酵路径能够有效减少副产物的积累,从而提高发酵品质。

3.4 燕麦青贮品质综合评价

主成分分析作为一种常用的多元统计方法,在农业科学研究中广泛应用,其核心在于通过降维将多个相关指标转化为少数几个相互独立的综合指标,从而简化数据结构并揭示其内在规律。隶属函数分析则是通过构建隶属函数将各指标的实测值转化为[0,1]范围内的隶属度,从而实现对模糊概念的有效度量。在实际农业系统评价中,单一分析方法往往难以全面反映研究对象的多维特性,因此将主成分分析与隶属函数分析相结合,已成为综合评价青贮饲料营养和发酵品质等方面的有效手段。本试验根据主成分分析及相关性分析结果挑选出的12个指标,与评价青贮饲料质量的主要常规指标一致,隶属函数评价结果显示,青海地区LP添加的‘中畜燕1号’处理平均隶属函数值大于其他处理,说明LP可以明显改善青贮饲料质量,因此,选择‘中畜燕1号’并配套LP青贮技术,是在高寒地区获得高品质青贮饲料、有效缓解饲草季节性短缺、提升畜牧业生产效益的可靠技术方案。

4 结论

本研究对燕麦青贮进行了感官评价、营养品质与发酵品质分析、V-Score评分、相关性分析、主成分分析及隶属函数综合评价。添加植物乳杆菌明显提升了宁夏和青海两地燕麦青贮的感官评分与V-Score等级;青海和宁夏两地添加植物乳杆菌的‘中畜燕1号’粗蛋白含量最高(11.16%和12.46%),显著高于‘青海甜燕麦’与‘青引2号’;青海地区燕麦青贮的氨态氮:总氮(4.12%)显著低于宁夏地区(8.07%)。根据主成分分析及相关性分析结果,对挑选出的12个指标进行隶属函数综合评价。结果显示,平均隶属函数值最高的处理是青海地区添加植物乳杆菌的‘中畜燕1号’,其次是宁夏地区添加植物乳杆菌的‘中畜燕1号’。因此,选择‘中畜燕1号’并配套LP青贮技术,是在两地区获得高品质青贮饲料、有效缓解饲草季节性短缺、提升畜牧业生产效益的可靠技术方案。未来将进一步围绕乳杆菌的添加量和品类进行筛选研究,明确饲用燕麦品种尤其是‘中畜燕1号’在两地区的最佳青贮模式,为燕麦新品种的推广和应用提供理论基础和生产指导。

参考文献

- [1] HERRERO M, WIRSENIUS S, HENDERSON B, et al. Livestock and the environment: what have we learned in the past decade? [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2015, 40: 177-202
- [2] 柴继宽, 赵桂琴, 琚泽亮. 添加不同乳酸菌对燕麦低温青贮发酵的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(3): 923-928
CHAI J K, ZHAO G Q, JU Z L. Effects of adding different lactic acid bacteria on oat silage fermentation at low temperatures [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(3): 923-928
- [3] 关皓, 许多, 李海萍, 等. 高寒地区17个燕麦品种营养品质及瘤胃降解特性研究[J]. *草业学报*, 2024, 33(9): 185-198
GUAN H, XU D, LI H P, et al. A study of nutritional quality and rumen degradation characteristics of 17 oat varieties in high cold regions [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(9): 185-198
- [4] GIRIJA A, CANALES F J, HADDADIB S, et al. Metabolomic approaches suggest two mechanisms of drought response post anthesis in Mediterranean oat (*Avena sativa* L.) cultivars [J]. *Physiologia Plantarum*, 2025, 177(2): e70181
- [5] 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
- [6] 侯龙鱼, 朱泽义, 杨杰, 等. 我国饲草用燕麦现状、问题和潜力[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2019, 45(3): 248-253
- HOU L Y, ZHU Z Y, YANG J, et al. Current status, problems and potentials of forage oat in China[J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2019, 45(3): 248-253
- [7] HOWARTH C J, MARTINEZ-MARTIN P M J, COWAN A A, et al. Genotype and environment affect the grain quality and yield of winter oats (*Avena sativa* L.) [J]. Foods, 2021, 10(10): 2356
- [8] RÄISÄNEN S E, SIGURDARDÓTTIR Þ H, HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU A, et al. Ruminant methane emission and lactational performance of cows fed rapeseed cake and oats on a grass silage-based diet[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(9): 6732-6741
- [9] WILKINSON J M, LEE M R F, RIVERO M J, et al. Some challenges and opportunities for grazing dairy cows on temperate pastures[J]. Grass and Forage Science, 2020, 75(1): 1-17
- [10] ZHAO C, WANG L H, MA G M, et al. Cellulase interacts with lactic acid bacteria to affect fermentation quality, microbial community, and ruminal degradability in mixed silage of soybean residue and corn stover[J]. Animals, 2021, 11(2): 334
- [11] ZHOU T, LEI X C, LUO Y M, et al. High temperatures and antibacterial plant additives change the fermentation quality, free amino acids and lactic acid bacteria fermentation type in *Cara-gana korshinskii* silage [J]. BMC Microbiology, 2025, 25(1): 437
- [12] 宫玉涛, 王先霞. 民族地区土地利用助推绿色高质量发展研究—以宁夏回族自治区为例[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版), 2025, 46(5): 196-206
- GONG Y T, WANG X X. Land use in ethnic regions as a driver of green and high-quality development: a case study of the Ningxia Hui autonomous region[J]. Journal of Southwest University for Nationalities, 2025, 46(5): 196-206
- [13] 龙木措. 青海海晏县牛羊产业发展现状、存在的问题及建议[J]. 养殖与饲料, 2018, 17(8): 121-122
- LONG M C. Present situation, existing problems and suggestions of cattle and sheep industry in Haiyan county, Qinghai Province [J]. Animals Breeding and Feed, 2018, 17(8): 121-122
- [14] BERNARDES T F, DANIEL J L P, ADESOGAN A T, et al. Silage review: unique challenges of silages made in hot and cold regions[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5): 4001-4019
- [15] HU W, SCHMIDT R J, MCDONELL E E, et al. The effect of *Lactobacillus buchneri* 40788 or *Lactobacillus plantarum* MTD-1 on the fermentation and aerobic stability of corn silages ensiled at two dry matter contents[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(8): 3907-3914
- [16] 贾镇宁. 添加物质和混合时间对苜蓿青贮品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021: 12
- JIA Z N. Effects of additives and mixing time on the quality of alfalfa silage [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021: 12
- [17] CASELLA I G, GATTA M. Determination of aliphatic organic acids by high-performance liquid chromatography with pulsed electrochemical detection [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(1): 23-28
- [18] BRODERICK G A, KANG J H. Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and in vitro media 1[J]. Journal of Dairy Science, 1980, 63(1): 64-75
- [19] MURPHY R P. A method for the extraction of plant samples and the determination of total soluble carbohydrates[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1958, 9(11): 714-717
- [20] 董宇, 蔡宏宇, 马艳, 等. 甘草茎叶与黑麦草混合青贮品质评价及体外发酵参数的研究[J]. 中国草地学报, 2023, 45(6): 126-133
- DONG Y, CAI H Y, MA Y, et al. Quality evaluation and in vitro fermentation assessment of mixed silage with stems and leaves of licorice and ryegrass[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(6): 126-133
- [21] 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
- [22] 熊熠, 钟惠昌, 张春晓, 等. 饲料中添加裂壶藻粕对仿刺参生长、免疫及消化的影响[J]. 水生生物学报, 2025, 49(9): 140-149
- XIONG Y, ZHONG H C, ZHANG C X, et al. Dietary supplementation with Schizochytrium meal on the growth, immunity, and digestion of *Apostichopus japonicus* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025, 49(9): 140-149
- [23] CHEN S W, WAN C, MA Y J, et al. Study on the quality of mixed silage of rapeseed with alfalfa or *Myriophyllum* [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(5): 3884
- [24] 王伟, 奇明嘎, 王志军, 等. 不同添加剂及混合比例对全株玉米与饲用小黑麦混合青贮品质的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(9): 3077-3087
- WANG W, JI M G, WANG Z J, et al. Effects of different additives and mixing ratios on the quality of mixed silage of whole-plant corn with forage Triticale[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(9): 3077-3087
- [25] XIE Y X, XU S Y, LI W Q, et al. Effects of the application of *Lactobacillus plantarum* inoculant and potassium sorbate on the fermentation quality, in vitro digestibility and aerobic stability of total mixed ration silage based on alfalfa silage[J]. Animals, 2020, 10(12): 2229
- [26] SUN Y, SUN Q L, TANG Y M, et al. Integrated microbiology and metabolomic analysis reveal the improvement of rice straw silage quality by inoculation of *Lactobacillus brevis* [J]. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 2023, 16(1): 184
- [27] 张洁. 不同水溶性碳水化合物含量甘蔗尾青贮品质调控的研

- 究[D]. 南宁:广西大学,2022:6
- ZHANG J. Study on silage quality regulation of sugarcane tops with different water-soluble carbohydrate content [D]. Nan-ning:Guangxi University,2022:6
- [28] 宋琦,王茜. 不同微生物添加剂对构树青贮感官评分、营养成分、发酵品质及有氧稳定性的影响[J]. 饲料研究,2025,48(8):122-126
- SONG Q,WANG X. Effects of different microbial additives on sensory score, nutritional components, fermentation quality, and aerobic stability of *Broussonetia papyrifera* silage [J]. Feed Research,2025,48(8):122-126
- [29] KAUR H, OBEROI H K, GANAPATHY K N, et al. Effect of popping and malting processing techniques on physiochemical, antinutrients and antioxidant properties of millets flour[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(9):2370-2384
- [30] 孙红梅,曹连宾,郝力壮,等. 牦牛常用粗饲料营养价值评价及甲烷生成量[J]. 西北农业学报,2015,24(3):48-52
- SUN H M, CAO L B, HAO L Z, et al. Research on the nutrition value and methane emission of common forages for yaks [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2015, 24(3):48-52
- [31] 魏孔涛,张春平,俞旸,等. 环青海湖共和盆地不同燕麦品种的产量、营养价值及对土壤理化性质的影响[J]. 草业学报, 2026, 35(1):107-118
- WEI K T, ZHANG C P, YU Y, et al. Yield performance, nutritional quality, and soil physicochemical responses of oat (*Avena sativa*) cultivars in the Qinghai Lake-Gonghe Basin region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1):107-118
- [32] 董志晓,苟文龙,刘英杰,等. 15份饲用燕麦品种在凉山地区的生产性能和营养价值评价[J]. 草业科学, 2024, 41(11):2651-2663
- DONG Z X, GOU W L, LIU Y J, et al. Evaluation of production performance and nutritional value of 15 feed barley varieties in the Liangshan Region [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(11):2651-2663
- [33] ZHAO Y Y, LIU D P, CHEN Y L, et al. Enhancing alfalfa and sorghum silage quality using agricultural wastes: fermentation dynamics, microbial communities, and functional insights [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1):728
- [34] ZHONG H M, ZHOU J Y, ABDELRAHMAN M, et al. The effect of lignin composition on ruminal fiber fractions degradation from different roughage sources in water buffalo (*Bubalus bubalis*) [J]. Agriculture, 2021, 11(10):1015
- [35] 丁霞,肖燕子,孙林,等. 苜蓿与羊草混合比例对青贮饲草品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 38(1):155-160
- DING X, XIAO Y Z, SUN L, et al. Effect of mixed *Medicago sativa* and *Leymus chinensis* with different ratios on quality of silages [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(1):155-160
- [36] 王德贵,董永梅,呼延美静,等. 川西北农牧交错区9个秋播饲用燕麦生产性能综合评价[J]. 草地学报, 2025, 33(6):1878-1885
- WANG D G, DONG Y M, HUYAN M J, et al. Comprehensive evaluation of production performance of 9 autumn sowing oat varieties in agro-pastoral ecotone areas of northwest Sichuan [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(6):1878-1885
- [37] SUN Y X, LIU M J, BAI B C, et al. Effect of enzyme preparation and extrusion puffing treatment on sorghum straw silage fermentation [J]. Scientific Reports, 2024, 14:25237
- [38] 王思伟,刘婷婷,李魁英,等. 燕麦青贮替代燕麦干草和羊草对奶牛生产性能及血清生化指标的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46(6):10-14
- WANG S W, LIU T T, LI K Y, et al. Effect of oat silage replacing oat hay and *Leymus chinensis* on production performance and serum biochemical indices of dairy cows [J]. Feed Research, 2023, 46(6):10-14
- [39] DEMIREL M, YILMAZ İ, DENİZ S, et al. Effect of addition of urea or urea plus molasses to different corn silages harvested at dough stage on silage quality and digestible dry matter yield [J]. Journal of Applied Animal Research, 2003, 24(1):7-16
- [40] 李青璞,白建海,姚拓,等. 微生物菌剂与氮肥配施对紫花苜蓿生长及土壤性质的影响[J]. 草地学报, 2023, 32(1):314-321
- LI Q P, BAI J H, YAO T, et al. Effects of the combined application of microbial inoculant and nitrogen fertilizer reduction on the growth, and soil physicochemical properties of alfalfa in Hexi area [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(1):314-321
- [41] LUO C Y, NI C C, DONG Q M, et al. Contribution and regulation of *Ustilago maydis* in carbohydrate metabolism during maize silage fermentation [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2025, 12(1):78
- [42] 穆园园,孔德慧,曹阳,等. 植物乳杆菌 AS98 对苜蓿青贮品质、微生物及叶绿醇含量的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(10):3477-3484
- MU Y Y, KONG D H, CAO Y, et al. Effects of lactiplantibacillus plantarum AS98 on alfalfa silage quality, microorganisms and phytol content [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(10):3477-3484
- [43] TANG Y, LU G R, ZHAO H X, et al. Effect of distillery spent wash utilization on maize silage fermentation and in vitro methane production [J]. Animals, 2025, 15(21):3146
- [44] 周天荣,原庆琳,石朋祥,等. 不同乳酸菌添加剂对羊草青贮发酵品质的影响[J]. 饲料研究, 2025, 48(9):124-128
- ZHOU T R, YUAN Q L, SHI P X, et al. Effects of different lactic acid bacteria additives on fermentation quality of *Leymus chinensis* silage [J]. Feed Research, 2025, 48(9):124-128
- [45] UMAÑA R, STAPLES C R, BATES D B, et al. Effects of a microbial inoculant and (or) sugarcane molasses on the fermentation, aerobic stability, and digestibility of bermudagrass ensiled at two moisture contents [J]. Journal of Animal Science, 1991, 69(11):4588-4601
- [46] 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
- [47] HE C, LI Q, XIAO H D, et al. Effects of mixing ratio and lactic acid bacteria preparation on the quality of whole-plant quinoa and whole-plant corn or Stevia Powder mixed silage[J]. Microorganisms, 2025, 13(1):78
- [48] 赵桂琴, 琚泽亮, 柴继宽. 海拔和品种对燕麦营养品质及表面附着微生物的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(11):147-157
ZHAO G Q, JU Z L, CHAI J K. Effects of altitude and variety on nutrient levels and epiphytes of oats[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(11):147-157
- [49] 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
- [50] GU R J, UNIVERSITY Y A, GAO B, et al. Plant-derived antimicrobial peptides: mechanism of action, safety and integrated applications[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(43):27161-27176
- [51] 谢云怡, 赵勐, 张学. 基于主成分分析评价 2024 年不同地区全株玉米青贮的综合品质[J]. 饲料研究, 2025, 48(15):124-129
XIE Y Y, ZHAO M, ZHANG X. Evaluation of whole-plant corn silage comprehensive quality in different regions in 2024 based on principal component analysis [J]. Feed Research, 2025, 48(15):124-129
- [52] 代林, 怀志芳, 王宝维, 等. 1 株植物乳杆菌的分离鉴定、生物学特性和安全性研究[J]. 中国畜牧兽医, 2025, 52(7):3070-3083
DAI L, HUAI Z F, WANG B W, et al. Isolation, identification and biological properties and safety of a lactiplantibacillus plantarum strain [J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 52(7):3070-3083
- [53] 刘温, 陈雅坤, 赵连生, 等. 基于主成分和隶属度函数分析评价不同混播比例的燕麦和豌豆混合青贮的发酵品质[J]. 中国饲料, 2023, (17):111-117
LIU W, CHEN Y K, ZHAO L S, et al. Evaluation of the fermentation quality of oat and pea mixed silage with different mixing proportion based on principal component analysis and membership function analysis [J]. China Feed, 2023 (17): 111-117
- [54] EDITORIAL E. Retraction: cluster and principle component analyses of maize accessions under normal and water stress condition, published in Journal of Agricultural Sciences, 2015, vol. 60, issue 1, pp. 33-48[J]. Journal of Agricultural Sciences, Belgrade, 2016, 61(3):303-304

(责任编辑 付 宸)