

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.030

引用格式:王伟,赵牧其尔,王志军,等.添加剂对披碱草青贮发酵品质及微生物数量的影响[J].草地学报,2026,34(2):679—686

WANG Wei, ZHAO Muqier, WANG Zhijun, et al. Effects of Additives on Fermentation Quality and Microbial Quantity of *Elymus dahuricus* silage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):679—686

添加剂对披碱草青贮发酵品质及微生物数量的影响

王伟,赵牧其尔,王志军,格根图*

(内蒙古农业大学草业学院/农业农村部饲草栽培、加工与高效利用重点实验室/草地资源教育部重点实验室,
内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要:为探究不同添加剂对披碱草(*Elymus dahuricus*)青贮品质及微生物数量的影响,本研究以披碱草为原料,设置P₁组(无添加剂,添加等量蒸馏水)、P₂组(添加植物乳杆菌,添加量为 1×10^6 CFU·g⁻¹ FW)、P₃组(添加糖蜜,添加量为20 g·kg⁻¹ FW)、P₄组(添加布氏乳杆菌,添加量为 1×10^6 CFU·g⁻¹ FW)、P₅组(添加纤维素酶,添加量为50 U·g⁻¹ FW),青贮60天后,测定其营养价值、发酵品质及微生物数量。不同青贮添加剂对披碱草的可溶性碳水化合物、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和粗灰分含量均有显著影响($P<0.05$);添加剂显著降低了披碱草青贮饲料的pH值,乳酸含量显著提高($P<0.05$),丙酸含量显著降低($P<0.05$)。综合隶属函数分析表明,添加量为20 g·kg⁻¹ FW糖蜜时披碱草青贮品质最佳。

关键词:披碱草;添加剂;青贮品质;微生物数量

中图分类号:S816.5+3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0679-08

Effects of Additives on Fermentation Quality and Microbial Quantity of *Elymus dahuricus* silage

WANG Wei, ZHAO Muqier, WANG Zhi-jun, GE Gen-tu*

(College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University Key Laboratory of Forage Cultivation and the Processing and Highly Efficient Utilization of the Ministry of Agriculture/Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: To investigate the effects of different additives on the silage quality and microbial population of *Elymus dahuricus*, *Elymus dahuricus* was used as the raw material and herein and set up five treatment groups: P₁ (no additive, add the same amount of distilled water), P₂ (adding *Lactobacillus plantarum*, the addition amount was 1×10^6 CFU·g⁻¹ FW), P₃ (adding molasses, the addition amount was 20 g·kg⁻¹ FW), P₄ (adding *Lactobacillus buchneri*, the addition amount was 1×10^6 CFU·g⁻¹ FW), and P₅ (adding cellulase, the addition amount was 50 U·g⁻¹ FW). After 60 days of ensiling, the nutritional quality, fermentation characteristics, and microbial counts were determined. The results showed that different silage additives significantly affected the contents of water soluble carbohydrates (WSC), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), and crude ash in *Elymus dahuricus* silage ($P<0.05$). The additives significantly decreased the pH value of the silage and significantly increased the lactic acid content ($P<0.05$), while significantly reducing the propionic acid content ($P<0.05$). Comprehensive membership function analysis indicated that quality of *Elymus dahuricus* silage was the best when the addition amount was 20 g·kg⁻¹ FW molasses.

Key words: *Elymus dahuricus*; Additives; Silage quality; Microbial quantity

收稿日期:2025-04-02;修回日期:2025-07-06

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(CARS-34)资助

作者简介:王伟(1999-),男,汉族,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事饲草加工与利用方向研究, E-mail:2737217721@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:gegentu@163.com

披碱草(*Elymus dahuricus*)是禾本科披碱草属的多年生牧草,因其具有耐寒、耐旱、耐盐碱、抗风沙、适应性强、产量高和营养丰富等特性,在我国北方及高寒草地生态修复中广泛利用^[1-3]。披碱草返青早,叶量丰富,生长前期草质较好,其茎叶柔嫩且适口性优良,为各种家畜所喜食^[4-5]。然而,受季节性生长和气候条件限制,北方地区的饲草供应应具有显著的季节性与地域性局限。青贮技术通过厌氧发酵保存牧草营养,可有效缓解牧草供需矛盾,实现全年饲料均衡供应^[6-7]。但披碱草青贮常因原料含水量波动、水溶性碳水化合物不足及有害微生物活动等原因,导致其发酵进程滞缓、pH值偏高及氨态氮积累,从而造成蛋白质降解与营养物质流失严重,严重制约了披碱草青贮饲料的大规模应用^[8]。

近年来,相关研究表明青贮添加剂通过调控微生物群落结构与代谢路径,成为优化青贮发酵的有效策略^[9]。外源添加剂可通过调节微生物群落结构、抑制有害菌增殖、促进乳酸发酵或补充营养底物等方式改善青贮品质^[10]。乳酸菌通过厌氧发酵将原料中的水溶性碳水化合物转化为乳酸和其他有机酸,从而快速降低青贮pH值,抑制腐败菌等的生长^[11]。纤维素酶可分解植物细胞壁释放可发酵底物,从而促进乳酸生成,减少纤维素含量并加速青贮发酵进程^[12];糖蜜富含可溶性糖,能直接为乳酸菌提供发酵底物,改善发酵环境,减少蛋白质降解,从而提高青贮饲料的营养保留率^[13]。不同添加剂的作用效果受牧草种类、环境条件和配比参数的显著影响,而针对披碱草青贮的系统研究仍待深入。

本研究以乳熟期披碱草为原料,通过添加植物乳杆菌、布氏乳杆菌、纤维素酶和糖蜜,系统探究青贮添加剂对青贮饲料营养品质、发酵品质及微生物数量的影响,为披碱草在北方地区规模化生产中提供科学理论依据,同时推动披碱草资源的高效利用与畜牧业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验材料种植于内蒙古自治区呼和浩特市土默特左旗,内蒙古农业大学科技园区内(40°31'17"N, 111°23'46"E)。披碱草于2024年7月10刈割,留茬4cm。青贮添加剂分别为植物乳杆菌(P₂组, *Lacto-*

bacillus plantarum,添加量为 1×10^6 CFU·g⁻¹ FW)和糖蜜(P₃组, molasses,添加量为20 g·kg⁻¹/FW),布氏乳杆菌(P₄组, *Lactobacillus buchneri*,添加量为 1×10^6 CFU·g⁻¹ FW),纤维素酶(P₅组, cellulase,添加量为50 U·g⁻¹ FW),每个处理3个重复。植物乳杆菌购自山东中科嘉亿生物工程有限公司,纤维素酶购自上海麦克林生化科技股份有限公司,布氏乳杆菌购自江苏绿科生物技术有限公司,糖蜜购自聊城市茂丰商贸有限公司。

将青贮原料晾晒至含水量在50%左右,然后切到1~2 cm和添加剂(溶于30 mL蒸馏水中)混合均匀后真空压缩,进行半干青贮,60 d后开袋测定。

表1 青贮前披碱草的营养成分

Table 1 Nutritional Composition of *Elymus dahuricus* Before Ensiling

项目 Item	含量 Content
干物质 DM/(%FW)	50.66±0.50
粗蛋白质 CP/(%DM)	10.14±0.22
水溶性碳水化合物 WSC/(%DM)	6.69±0.56
中性洗涤纤维 NDF/(%DM)	63.04±2.53
酸性洗涤纤维 ADF/(%DM)	36.02±1.93
脂肪 EE/(%DM)	3.25±0.55
粗灰分 Ash/(%DM)	4.26±0.50

1.2 指标测定

1.2.1 营养品质 样品先在105℃的烘箱内杀青15 min,然后在65℃的烘箱内烘干至恒重后粉碎。采用烘干法测定干物质(Dry matter, DM)含量^[14];采用GB/T 6438-2007中的方法测定粗灰分含量后;采用凯式定氮法测定粗蛋白质(Crude protein, CP)含量;使用ANKOM2000i型纤维仪测定酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)和中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)含量^[15];采用蒽酮-硫酸比色法测定水溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrate, WSC)含量^[16];使用ANKOM(XT15i)自动脂肪分析仪测定粗脂肪(Ether extract, EE)含量^[17]。

1.2.2 发酵品质 取20 g开袋后样品,与180 mL无菌水混合,拍打式无菌均质器(拓赫机电科技有限公司, JX-5)拍打2 min后,于4℃冰箱浸提24 h后经双层无菌纱布过滤后用pH计测定pH值,用孔径0.22 μm的尼龙微孔滤膜过滤浸提液,使用高效液相色谱仪其系统为Waters 2695-2489(紫外),测定乳酸(Lactic acid, LA)、乙酸(Acetic acid, AA)、丙酸(Propionic acid, PA)以及丁酸(Butyric acid, BA)含量,

分离有机酸采用的色谱柱:Rspak系列,KC811柱,8 mm×300 mm,流动相 3 mmol·L⁻¹ 优级纯高氯酸,流速为 1 mL·min⁻¹,柱温为 40℃,检测波长为 210 nm,进样量 5μL^[18],采用苯酚-次氯酸钠比色法测定氨态氮(Ammonia nitrogen,NH₃-H)含量^[19]。

1.2.3 微生物计数 用样品处理时制备的菌液,测定微生物数量。乳酸菌使用 MRS 培养基培养;酵母菌和霉菌使用 PDA 培养基培养;好气性细菌使用 NA 培养基培养;用平板计数法对微生物进行计数^[20]。

1.3 数据处理与统计分析

使用 Excel 2021 对数据进行初步处理,采用 SPSS 27 软件进行单因素方差分析,平均值间差异显著性用 Duncan 法进行多重比较。采用隶属函数法综合评价披碱草青贮饲料品质^[21]。

$$W(Y_i)=(Y_i-Y_{\min})/(Y_{\max}-Y_{\min}) \quad (1)$$

$$W(Y_i)=1-(Y_i-Y_{\min})/(Y_{\max}-Y_{\min}) \quad (2)$$

$$F=\sum W(Y_i)/i。$$

式中 $W(Y_i)$:某指标的隶属函数值, Y_i :该指标的测定值, $Y_{\max}$:不同处理组间该指标的最大值,

$Y_{\min}$:不同处理组间该指标的最小值。其中 DM、CP、WSC、EE 和 LA 为正相关指标,使用公式(1);NDF、ADF、Ash、pH 值、AN/TN、AA 和 PA 为负相关指标,使用公式(2)。F 表示不同添加剂青贮的平均隶属函数值。

2 结果与分析

2.1 添加剂对披碱草青贮营养品质的影响

表 2 为不同青贮添加剂对披碱草青贮营养品质的影响。青贮添加剂对披碱草青贮的 WSC、NDF、ADF 和 Ash 含量有显著性影响($P<0.05$),对 DM、CP 和 EE 含量无显著性影响。由表 2 可知,5 组披碱草青贮的 DM 和 CP 含量之间无显著性差异; P_2 组的 WSC 含量显著高于 P_3 、 P_4 和 P_5 组($P<0.05$),与 P_1 组之间无显著性差异; P_1 组的 NDF 含量显著高于其它处理组($P<0.05$); P_1 组的 ADF 含量显著高于其它处理组($P<0.05$);各组披碱草青贮之间 EE 含量均无显著性差异; P_3 组的 Ash 含量显著高于 P_1 、 P_2 和 P_4 组($P<0.05$),与 P_5 组之间无显著性差异。

表 2 不同添加剂对披碱草青贮营养品质的影响

Table 2 Effect of different additives on the nutritive quality of *Elymus dahuricus* silage

处理 Treatment	干物质 DM/ (%FW)	粗蛋白质 CP/ (%DM)	可溶性碳水化合 WSC/(%DM)	中性洗涤纤维 NDF/(%DM)	酸性洗涤纤维 ADF/(%DM)	粗脂肪 EE/ (%DM)	粗灰分 Ash/ (%DM)
P_1	49.47±0.27 ^a	8.59±0.13 ^a	5.00±0.39 ^{ab}	64.84±0.90 ^a	33.90±1.19 ^b	2.51±0.31 ^a	3.41±0.41 ^c
P_2	49.28±0.15 ^a	8.48±0.16 ^a	5.29±0.26 ^a	61.75±2.06 ^b	32.87±0.71 ^b	2.37±0.16 ^a	3.86±0.10 ^{bc}
P_3	49.60±1.19 ^a	8.78±0.30 ^a	4.50±0.41 ^b	61.55±0.66 ^b	35.14±0.25 ^a	2.40±0.48 ^a	4.44±0.33 ^a
P_4	49.87±0.58 ^a	8.59±0.17 ^a	2.99±0.26 ^c	62.25±1.43 ^b	33.63±0.59 ^b	2.36±0.52 ^a	3.72±0.06 ^c
P_5	49.93±0.72 ^a	8.67±0.30 ^a	3.26±0.32 ^c	61.77±0.39 ^b	33.78±0.49 ^b	2.18±0.59 ^a	4.23±0.21 ^{ab}
添加剂 Additive	0.757	0.588	0.000	0.044	0.037	0.922	0.005

注:同一列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。 P_1 ,对照组; P_2 ,植物乳杆菌组; P_3 ,糖蜜组; P_4 ,布氏乳杆菌组; P_5 ,纤维素酶组。下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). P_1 , Control Group; P_2 , Lactobacillus plantarum Group; P_3 , Molasses Group; P_4 , Lactobacillus buchneri Group; P_5 , Cellulase Group. The same ad below

2.2 添加剂对披碱草青贮发酵品质的影响

青贮添加剂对 pH 值、AN/TN、LA、AA 含量有显著性影响($P<0.05$),对 PA 含量无显著性影响(表 3)。

其中, P_1 组 pH 值均显著高于其它处理组($P<0.05$),为 5.50; P_1 组和 P_2 组的 AN/TN 含量显著高于 P_3 、 P_4 和 P_5 组($P<0.05$),但 P_1 和 P_2 组之间无显著性差异; P_2 组的 LA 含量显著高于 P_1 、 P_4 和 P_5 组($P<0.05$),与 P_3 组之间无显著性差异; P_4 组的 AA 含量显著高于其它处理组($P<0.05$); P_1 组的 PA 含量显著高于 P_4 和 P_5 组,与 P_2 和 P_3 组之间无显著性差异; P_3 组未检测出 BA。

2.3 添加剂对披碱草青贮微生物数量的影响

表 4 为不同添加剂对披碱草青贮微生物组成的影响。青贮添加剂对乳酸菌数量有显著性影响($P<0.05$),对酵母菌和好氧性细菌数量无显著性影响。

由表 4 可知, P_2 组乳酸菌数量显著高于其它处理组($P<0.05$);各处理组的酵母菌数量无显著性差异,其中 P_5 组最高为 2.50 lgCFU·g⁻¹FM;各处理组霉菌均未检测到; P_1 组的好氧性细菌数量显著高于 P_2 和 P_3 组($P<0.05$),与 P_4 和 P_5 组无显著性差异。

表 3 不同添加剂对披碱草青贮发酵品质的影响

Table 3 Effect of different additives on the fermentation quality of *Elymus dahuricus* silage

处理 Treatment	pH 值	氨态氮/总氮 AN/TN/%	乳酸 LA/%FM	乙酸 AA/%FM	丙酸 PA/%FM	丁酸 BA/%FM
P ₁	5.50±1.08 ^a	1.00±0.25 ^a	3.07±0.03 ^c	0.32±0.03 ^b	0.21±0.01 ^a	0.15±0.02 ^a
P ₂	3.88±0.07 ^b	1.20±0.05 ^a	4.40±0.13 ^a	0.30±0.02 ^b	0.16±0.01 ^{ab}	0.08±0.03 ^b
P ₃	4.39±0.11 ^b	0.59±0.06 ^b	3.99±0.85 ^{ab}	0.25±0.02 ^c	0.14±0.03 ^{ab}	ND
P ₄	4.38±0.08 ^b	0.54±0.15 ^b	3.40±0.41 ^{bc}	0.39±0.01 ^a	0.12±0.05 ^b	0.11±0.03 ^{ab}
P ₅	4.47±0.06 ^b	0.70±0.12 ^b	3.32±0.44 ^{bc}	0.33±0.06 ^b	0.13±0.06 ^b	0.11±0.03 ^{ab}
添加剂 Additive	0.026	0.001	0.033	0.004	0.077	0.001

注:ND为未检测到
Note:ND is not detected

表 4 不同添加剂对披碱草青贮微生物数量的影响

Table 4 Effects of different additives on microbial count in *Elymus dahuricus* silage 单位:lgCFU·g⁻¹ FM

处理 Treatment	乳酸菌 Lactic acid bacteria	酵母菌 Yeasts	霉菌 Mold	好氧性细菌 Aerobic bacteria
P ₁	4.37±0.18 ^c	2.42±0.18 ^a	ND	6.35±0.16 ^a
P ₂	5.78±0.11 ^a	2.30±0.23 ^a	ND	5.92±0.26 ^b
P ₃	4.93±0.08 ^b	2.45±0.11 ^a	ND	6.05±0.06 ^b
P ₄	4.77±0.18 ^b	2.33±0.10 ^a	ND	6.12±0.07 ^{ab}
P ₅	4.36±0.16 ^c	2.50±0.15 ^a	ND	6.18±0.06 ^{ab}
添加剂 Additive	0.000	0.556		0.584

2.4 隶属函数综合评价

采用隶属函数法对披碱草青贮品质进行综合评价,平均隶属函数越大,其品质越好。由表 5 可知,P₃

组>P₂组>P₄组>P₅组>P₁组,P₁组的平均隶属函数综合评价值最低,为 0.41,P₃组的平均隶属函数综合评价值最高,为 0.66,综合青贮品质 P₃组最好。

表 5 披碱草青贮品质的隶属函数值

表 5 Membership function value of *Elymus dahuricus* silage quality

处理 Treatment	CP	DM	NDF	ADF	WSC	ASH	EE	pH 值	AN/TN	LA	AA	PA	F	排名 Rank
P ₁	0.36	0.29	0.00	0.55	0.87	1.00	1.00	0.00	0.30	0.00	0.56	0.00	0.41	5
P ₂	0.00	0.00	0.94	1.00	1.00	0.57	0.56	1.00	0.00	1.00	0.67	0.58	0.61	2
P ₃	1.00	0.50	1.00	0.00	0.66	0.00	0.68	0.68	0.92	0.69	1.00	0.76	0.66	1
P ₄	0.37	0.91	0.78	0.66	0.00	0.70	0.56	0.69	1.00	0.25	0.00	1.00	0.58	3
P ₅	0.65	1.00	0.93	0.60	0.11	0.21	0.00	0.64	0.75	0.19	0.50	0.98	0.55	4

3 讨论

3.1 不同添加剂对披碱草青贮饲料营养品质的影响

青贮技术的核心是在于通过构建密闭厌氧环境,促使乳酸菌主导的发酵过程^[22]。本试验结果表明,不同添加剂对披碱草青贮饲料的营养品质具有显著影响。DM 在不同添加剂处理组中未表现出显著差异,各组 DM 含量均稳定在一定范围内,这一结果可能与试验中原料初始含水量为 50% 左右有关,且添加剂的作用更多体现在发酵调控而非水分控制。本研究中,P₃组 CP 含量较高,这可能是糖蜜通过提供可溶性糖作为乳酸菌发酵底物,加速乳酸生成,降低 pH 值,抑制蛋白质降解菌活动间接减少

CP 损失,与肖慎华等^[23]关于糖蜜抑制蛋白质降解的研究结论一致。WSC 含量直接影响青贮饲料的发酵效率和营养保存率^[24]。本研究表明,P₄组和 P₅组的 WSC 含量显著低于其他处理组,这可能与 P₄组的布氏乳杆菌更依赖 WSC 作为主要碳源,导致底物快速消耗,P₅组虽能分解纤维提供可溶性糖,但是其可能被微生物迅速利用,导致 WSC 含量降低^[25];P₁组的 WSC 含量显著低于 P₂组但高于其它处理组,这是因为自然发酵过程中底物利用效率较低。

NDF 和 ADF 是评价青贮饲料纤维化程度的重要指标^[26]。本试验中,P₁组的 NDF 含量最高,显著高于其他处理组,表明添加剂的引入通过促进纤维分解改善了饲料适口性,其中 P₅组的 NDF 含量较

低,证实其通过分解纤维素和半纤维素释放可溶性糖,间接降低了纤维残留,这与Wang等^[27]的研究相同,添加纤维素酶能显著降低发酵过程中NDF的含量。然而,P₃组的ADF含量显著高于其他组,可能因高强度乳酸发酵抑制了纤维分解菌的活性,导致木质素等难降解组分残留增加^[28];这一现象表明单一添加剂对纤维组分的调控可能存在局限性,需结合复合添加剂优化。P₃组的Ash含量显著高于其他组,可能是由于糖蜜本身含有较高矿物质成分,或微生物代谢活动导致矿物质残留增加。LP组和LB组的Ash含量较低,表明乳酸菌添加剂对灰分积累的直接影响较小,其营养保留更依赖于发酵过程的稳定性。

3.2 不同添加剂对披碱草青贮饲料发酵品质的影响

青贮发酵品质的核心评价指标包括pH值、有机酸组成及AN/TN等,这些指标直接反映发酵稳定性^[29]。在青贮发酵过程中,pH值的动态演变过程直接决定着微生物代谢路径与底物保存效率,理想青贮表现为LA的快速富集与pH值的梯度式下降,酸化有效抑制腐败微生物活性^[30]。在本研究中,P₁组的pH值显著高于其他处理组,而P₂组的pH值最低,表明LP通过快速启动同型乳酸发酵,高效利用WSC生成LA,迅速酸化环境,抑制腐败菌与有害微生物的活性,这与前人研究一致,植物乳杆菌作为同型发酵菌种,可通过优先占据生态位和快速产酸优化发酵进程^[31];相比之下,P₃组通过提供外源可溶性糖,促进天然乳酸菌增殖,其pH值虽高于P₂组,但仍显著低于P₁组,表明糖蜜通过补充底物间接加速了乳酸发酵;P₄组与P₅组的pH值介于P₂与P₃组之间,可能与其代谢特性或纤维分解效率有关。本研究表明,P₁组与P₂组的AN/TN值较高,而P₃、P₄和P₅组显著降低;P₄组AN/TN值最低,表明布氏乳杆菌通过促进乳酸菌主导的快速发酵,抑制了蛋白质分解菌的活性,减少了蛋白质降解产物的积累;P₂组虽显著降低pH值,但其AN/TN值未显著低于P₁组,这可能与其快速消耗WSC后底物不足,导致部分蛋白质被分解有关^[32]。P₂组的乳酸含量最高,与其同型发酵特性相符;而P₄组的AA含量显著高于其他组,这是由于布氏乳杆菌具有异型发酵能力,将部分底物转化为乙酸;PA在各处理组中含量较低且差异不显著,可能与丙酸菌受低pH

抑制有关。P₃组未检出BA,表明糖蜜有效抑制了丁酸菌的生长,避免BA对青贮品质的负面影响。

3.3 不同添加剂对披碱草青贮饲料微生物数量的影响

青贮过程中微生物群落的动态变化是决定发酵进程和饲料稳定性的关键因素^[33]。本研究发现,添加剂的类型显著影响披碱草青贮中乳酸菌和好氧性细菌的丰度,而对酵母菌和霉菌的抑制效果普遍较好。P₂组的显著提高了青贮中乳酸菌数量,这是由于植物乳杆菌作为同型发酵菌的直接优势,其快速代谢WSC产酸,迅速占据生态位并抑制竞争性微生物的增殖。P₃组通过补充外源糖分促进原生乳酸菌的增殖,其乳酸菌数量虽低于P₂组,但显著高于P₁组,表明底物补充对乳酸菌群落的扩增具有间接促进作用。值得注意的是,P₄组的添加未表现出与植物乳杆菌同等的优势,其乳酸菌数量仅略高于P₁组,可能与布氏乳杆菌的代谢特性或菌株适应性有关^[34]。

所有处理组均未检出霉菌,表明低pH值有效抑制了霉菌的活性^[35]。P₁组的好氧性细菌数量显著高于P₂和P₃组,这是由于P₂组和P₃组通过快速产酸降低pH值,抑制了好氧菌的数量;而P₄组和P₅组的好氧菌数量与P₁组无显著差异,可能与纤维分解产物或异型发酵代谢产物未能完全抑制好氧菌活性有关。相比之下,P₅组虽通过分解纤维释放可发酵糖,但其对微生物群落的调控作用较弱,可能因释放的糖分被快速消耗,未能持续支持乳酸菌的竞争优势^[36]。P₄组的异型发酵特性可能削弱了其对乳酸菌群落的单一主导能力,导致其微生物调控效果介于同型发酵菌与底物添加剂之间^[37]。青贮饲料的有氧稳定性与酵母菌和好氧性细菌的残留量密切相关^[38]。尽管本试验中所有处理组的酵母菌数量较低且未检测到霉菌,但P₅组较高的酵母菌数量可能暗示其有氧稳定性相对较弱,而P₂组通过增加乳酸菌数量,构建了更为稳定的厌氧发酵环境,为长期贮藏提供了保障。

4 结论

4种添加剂对披碱草青贮发酵品质以及微生物数量都有不同程度的改善。使用糖蜜作添加剂青贮效果最佳,但单一添加剂对发酵品质的调控存在局限

性。未来研究可探索复合添加剂的协同效应,结合菌酶的双重优势,进一步提升发酵效率与营养保存率。

参考文献

- [1] 杨娟弟,祁娟,贾燕伟,等. 10个披碱草属野生植物材料生产性能综合评价[J]. 草原与草坪,2022,42(5):54-61
YANG J D, QI J, JIA Y W, et al. Comprehensive evaluation of productivity performance of ten wild *Elymus* accessions [J]. Grassland and Turf, 2022, 42(5): 54-61
- [2] 苏志刚,龙建廷,高国荣,等. 低温和干旱胁迫对4种披碱草属种子萌发的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医,2024(14):88-94
SU Z G, LONG J T, GAO G R, et al. Effects of low temperature and drought stress on seed germination of four *Elymus L.* species [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2024(14): 88-94
- [3] 何永涛,胡宇,段慧荣,等. 披碱草属4个牧草品种苗期抗寒性综合评价[J]. 草业科学,2024,41(10):2377-2388
HE Y T, HU Y, DUAN H R, et al. Comprehensive evaluation of cold resistance of four *Elymus* forage varieties at the seedling stage [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(10): 2377-2388
- [4] 谢乐乐,王晓丽,周选博,等. 三江源区“黑土山”退化草地5种披碱草属牧草适应性研究[J]. 草地学报,2023,31(10):3094-3102
XIE L L, WANG X L, ZHOU X B, et al. Study on the Adaptability of Five Forage Grass Species in the Degraded Grassland in “Black Soil Hill” in the Three Rivers Headwaters region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(10): 3094-3102
- [5] 何永涛,胡宇,段慧荣,等. 披碱草属4个牧草品种苗期抗旱性综合评价[J]. 中国草地学报,2023,45(1):77-87
HE Y T, HU Y, DUAN H R, et al. Comprehensive Evaluation of drought resistance of four *Elymus* varieties at seedling stage [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(1): 77-87
- [6] DING Z T, BAI J, XU D M, et al. Microbial community dynamics and natural fermentation profiles of ensiled alpine grass *elymus nutans* prepared from different regions of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Frontiers in Microbiology, 2020 (11): 855
- [7] LIU Y C, LI Y Y, LU Q, et al. Effects of lactic acid bacteria additives on the quality, volatile chemicals and microbial community of *leymus chinensis* silage during aerobic exposure [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 938153
- [8] 王莹,玉柱. 不同添加剂对披碱草青贮发酵品质的影响[J]. 中国奶牛,2010(7):21-25
WANG Y, YU Z. Effect of different additives on quality of *Elymus dahuricus* turcz silage [J]. China Dairy Cattle, 2010(7): 21-25
- [9] YU H R, HU R C, JIA Y S, et al. Novel mechanistic understanding that *Lactiplantibacillus plantarum* is more capable of improving the ensiling performance of wheat straw silage than xylanase by driving certain key metabolites [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2024(11): 155
- [10] ZHANG J Y, MA H X, GUO Q, et al. Modulation of the microbial community and the fermentation characteristics of wrapped natural grass silage inoculated with composite bacteria [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2025(12): 50
- [11] Du S, XU L J, JIANG C, et al. Novel strategy to understand the bacteria-enzyme synergy action regulates the ensiling performance of wheat straw silage by multi-omics analysis [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025 (289): 138864
- [12] 包健,赵牧其尔,王志军,等. 青贮添加剂和青贮时间对饲用谷子青贮品质的影响[J]. 中国草地学报,2023,45(5):88-95
BAO J, ZHAO M Q E, WANG Z J, et al. Effect of Silage Additives and Ensiling Duration on Forage Millet Silage Quality [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(5): 88-95
- [13] 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
- [14] 贾玉山,玉柱,李存福. 草产品质量检测学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2011:23-40
JIA Y S, YU Z, LI C F. Forage Product Quality Testing [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 23-40
- [15] AIB V P B. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-Starch polysaccharides in relation to animal [J]. Nutrition, 1991(74): 3583-3597
- [16] 高文婧,罗雪宁,张佳俊,等. 不同添加菌剂对油菜与水稻秸秆混合青贮发酵品质的影响[J]. 中国草地学报,2025,47(1):141-148
GAO W J, LUO X N, ZHANG J J, et al. Effects of different bacterial additives on the fermentation quality of mixed silage of oilseed rape and rice straw [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(1): 141-148
- [17] 匡宗洋,穆麟,魏岚,等. 不同混合比例和乳酸菌添加对全株玉米和大豆混合青贮品质及有氧稳定性的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(6): 227-238
KUANG Z Y, MU L, WEI L, et al. Effects of different mixture ratios and lactic acid bacteria on the quality and aerobic stability of mixed silage made from whole maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*) plants [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2025,

- 34(6):227-238
- [18] 梁小玉,季杨,胡远彬,等. 菊苣与杂交象草混合比例和添加剂对混贮品质的影响[J]. 草业科学,2025,42(1):225-234
LIANG X Y,JI Y, HU Y B, et al. Effects of mixing ratio and additives on the mixed silage quality of chicory and hybrid elephant grass[J]. Pratacultural Science,2025,42(1):225-234
- [19] 李双明,张力,闫云峰,等. 纤维素分解菌与同质型乳酸菌联合接种对青贮玉米发酵品质、有氧稳定性、酶活性和瘤胃降解率的影响[J]. 动物营养学报,2024,36(11):7185-7195
LI S M,ZHANG L,YAN Y F, et al. Effects of co-inoculation of cellulose decomposition bacteria and homogenous lactic acid bacteria on fermentation quality, aerobic stability, enzyme activity and ruminal degrad ability of silage maize[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2024,36(11):7185-7195
- [20] 尤思涵,都帅,周忠义,等. 高丹草与黑麦草适宜混贮比例研究[J]. 草地学报,2021,29(4):821-827
YOU S H,DU S,ZHOU Z Y, et al. Mixed Silage of sorghum hybrid sudan grass and perennial ryegrass with different proportions[J]. Acta Agrestia Sinica,2021,29(4):821-827
- [21] 马学军,左愈臻,刘瑞刚,等. 20个青贮玉米品种在陇东南地区的生产性能和营养价值评价[J]. 草地学报,2024,32(8):2620-2629
MA X J,ZUO Y Z,LIU R G, et al. Evaluation of productive performance and nutritional value of 20 silage maize varieties in Southeastern Gansu[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(8): 2620-2629
- [22] 杨富裕. 青贮微生物-饲料发酵过程中永恒的话题[J]. 生物技术通报,2021,37(9):1-2
YANG F Y. Silage Microorganisms: An eternal topic in the feed fermentati on process[J]. Biotechnology Bulletin,2021,37(9):1-2
- [23] 肖慎华,原现军,董志浩,等. 添加乳酸菌制剂和糖蜜对箭筈豌豆和苇状羊茅混合青贮发酵品质的影响[J]. 南京农业大学学报,2016,39(6):1017-1022
XIAO S H,YUAN X J,DONG Z H, et al. Effects of inoculant and molasses additives on fermentation quality of mixed silages of tall fescue *Festuca arundinacea* Schreb.) and common vetch(*Vicia sativa* L.) [J]. Journal of Nanjing Agricultural Univer-sity,2016,39(6):1017-1022
- [24] 胡远彬,梁小玉,易军,等. 混合比例和添加剂对象草和全株玉米混合青贮品质的影响[J]. 草业科学,2022,39(4):778-786
HU Y B,LIANG X Y,YI J, et al. Effects of mixing ratio and additives on the quality of Napier grass and whole-plant corn mixed silage[J]. Pratacultural Science,2022,39(4):778-786
- [25] 庄益芬,张文昌,陈鑫珠,等. 绿汁发酵液、纤维素酶及其混合物对水葫芦青贮品质的影响[J]. 中国农学通报,2008(5):35-38
ZHUANG Y F,ZHANG W C,CHEN X Z, et al. Effect of fermented green juice, cellulase and mixture on quality of water hyacinth silage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008(5): 35-38
- [26] 路桂聪,许辉,王永雄,等. 不同添加物和密度对杂交狼尾草青贮效果的影响[J]. 草业科学,2021,38(11):2191-2199
LU G C,XU H,YU Y X, et al. Effects of different additives and densities on silage quality of hybrid Pennisetum[J]. Prata-cultural Science,2021,38(11):2191-2199.
- [27] WANG Q D,WANG R X,WANG C Y, et al. Effects of cellulase and *Lactobacillus plantarum* on fermentation quality, chemical composition, and microbial community of mixed silage of whole-plant corn and peanut vines[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology,2022,194(6):2465-2480
- [28] 任海伟,刘菲菲,王莉,等. 纤维素酶对于玉米秸秆/白菜废弃物混贮品质的影响及细菌群落解析[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(5):1097-1106
REN H W,LIU F F,WANG L, et al. Effects of cellulase on the mixed silage quality of dried maize straw and cabbage waste and an analysis of its bacterial community[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2018,24(5):1097-1106
- [29] 吴长荣,代胜,梁龙飞,等. 不同添加剂对构树青贮饲料发酵品质和蛋白质降解的影响[J]. 草业学报,2021,30(10):169-179
WU C R,DAI S,LIANG L F, et al. Effects of different additives on fermentation quality and protein degradation of *Broussonetia papyrifera* silage[J]. Acta Prataculturae Sinica,2021,30(10):169-179
- [30] 珠拉,王志军,包健,等. 不同耐低温乳酸菌添加剂对天然牧草青贮品质的影响[J]. 草地学报,2024,32(11):3610-3618
ZHU L,WANG Z J,BAO J, et al. Effects of different low-temperature tolerant lactic acid bacteria additives on natural pasture silage fermentation [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(11): 3610-3618
- [31] 杨琪,苏嘉琪,张思琦,等. 2种乳酸菌添加剂对全株玉米青贮品质及其微生物区系的影响[J]. 动物营养学报,2025,37(04):2772-2787
YANG Q,SU J Q,ZHANG S Q, et al. Effects of two lactic acid bacteria additives on quality and microflora of whole plant corn silage[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(4):2772-2787
- [32] 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 planta-*

- rum* on fermentation quality and microbial diversity of caragana silage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 45(2): 113-120
- [33] 黄峰, 张露, 周波, 等. 青贮微生物及其对青贮饲料有氧稳定性影响的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(1): 82-89
HUANG F, ZHANG L, ZHOU B, et al. Research process in silage microorganism and its effect on silage aerobic stability[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(1): 82-89
- [34] 唐振华, 杨承剑, 李孟伟, 等. 植物乳杆菌、布氏乳杆菌对甘蔗尾青贮品质及有氧稳定性的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2018, 45(7): 1824-1832
TANG Z H, YANG C J, LI M W, et al. Effect of applying *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus buchneri* on quality and aerobic stability of sugarcane tops silage[J]. *Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2018, 45(7): 1824-1832
- [35] 王昊然, 高凤芹, 薛艳林, 等. 不同乳酸菌添加剂对燕麦青贮品质和微生物多样性的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 82-90
WANG H R, GAO F Q, XUE Y L, et al. Effects of different lactic acid bacteria additives on the quality and microbial diversity of oat silage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 46(11): 82-90
- [36] 贾冬文, 曹阳. 优质安全青贮饲料用添加剂研究进展[J]. *饲料工业*, 2024, 45(12): 53-58
JIA D W, CAO Y. Research progress of additives for high quality and safe silage[J]. *Feed Industry*, 2024, 45(12): 53-58
- [37] 李杨, 杨燕, 王振南, 等. 乳酸菌在畜禽营养与饲料中的应用[J]. *饲料工业*, 2024, 45(5): 16-22
LI Y, YANG Y, WANG Z N, et al. Application of lactic acid bacteria in livestock and poultry nutrition and feed [J]. *Feed Industry*, 2024, 45(5): 16-22
- [38] 王啸林, 冯冠智, 张城瑞, 等. 乳酸菌和纤维素酶对马铃薯渣与玉米秸秆混合青贮发酵品质、有氧稳定性和体外发酵参数的影响[J]. *中国畜牧杂志*, 2022, 58(4): 201-207
WANG X L, FENG G Z, ZHANG C R, et al. Effects of lactic acid bacteria and cellulase on fermentation quality, aerobic stability and in vitro fermentation parameters of potato residue and corn straw mixed silage with different proportion [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2022, 58(4): 201-207

(责任编辑 彭露茜)