

DOI: 10.11686/cyxb2024347

http://cyxb.magtech.com.cn

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. 草业学报, 2025, 34(6): 227-238.
KUANG Zong-yang, MU Lin, WEI Lan, 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. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 227-238.

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

匡宗洋¹, 穆麟¹, 魏岚¹, 郭阳¹, 胥贵¹, 陈瑶¹, 石雪云¹, 魏仲珊², 张志飞^{1*}

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南长沙410128; 2. 湖南德人牧业科技有限公司, 湖南常德415921)

摘要:本试验基于南方玉米和大豆带状间作栽培模式,旨在探究不同混合比例和乳酸菌添加对玉米和大豆混合青贮品质及有氧稳定性的影响。将全株玉米和大豆分别刈割,粉碎后按比例进行添加剂混合青贮,设计双因素完全随机试验,因素A为玉米与大豆质量混合比例,分别为1:0(A₁)、2:1(A₂)、1:1(A₃)、1:2(A₄)和0:1(A₅);因素B为乳酸菌添加类型,分别为:布氏乳杆菌(LB)、植物乳杆菌(LP)、不添加乳酸菌(L0)。发酵60 d后分析营养品质、发酵品质和有氧稳定性。结果表明:不同混合比例和乳酸菌添加对玉米-大豆混合青贮的粗蛋白(CP)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤木质素(ADL)、粗脂肪(EE)、粗灰分(Ash)含量、pH值、乳酸(LA)、乙酸(AA)、丙酸(PA)含量、氨态氮/总氮(NH₃-N/TN)及有氧稳定时长均有极显著的交互作用($P < 0.01$)。A₂和A₃混合处理组的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维(ADF)及乳酸含量显著优于其他3个混合处理组($P < 0.05$)。与L0组相比,LP组中除A₄混合处理组外,其他混合处理组的乳酸含量显著增加($P < 0.05$),粗灰分含量显著降低($P < 0.05$),除A₃混合处理组外,其他混合处理组的pH值显著降低($P < 0.05$);LB组中所有混合处理组的酸性洗涤木质素显著降低($P < 0.05$),A₁、A₂和A₃混合处理组的乙酸含量显著增加($P < 0.05$),同时有氧稳定时长增加。将各混合青贮处理组的11项核心指标进行灰色关联分析表明,所有处理组中加权关联度排名前三的为:A₂LP、A₃LB和A₁LP,青贮效果好。综上,建议南方地区全株玉米-大豆混合青贮中,全株大豆质量占比应小于等于全株玉米质量占比,并添加植物乳杆菌(LP)提高青贮发酵品质。

关键词:混合青贮;全株玉米;全株大豆;混合比例;乳酸菌

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

KUANG Zong-yang¹, MU Lin¹, WEI Lan¹, GUO Yang¹, XU Gui¹, CHEN Yao¹, SHI Xue-yun¹, WEI Zhong-shan², ZHANG Zhi-fei^{1*}

1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Deren Animal Husbandry Science and Technology Ltd., Changde 415921, China

Abstract: Maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*) are often grown with a strip intercropping cultivation mode in southern China. The aim of this study was to explore the effects of different mixture ratios and the addition of lactic acid bacteria on the quality and aerobic stability of mixed silage made from whole maize and soybean plants. Whole

收稿日期:2024-09-09;改回日期:2024-10-31

基金项目:湖南省中央引导地方科技发展资金项目(2024ZYQ085)资助。

作者简介:匡宗洋(2000-),男,湖南永州人,在读硕士。E-mail: 1060476966@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhangzf@hunau.edu.cn

plants of maize and soybean were harvested separately, crushed, and mixed at various proportions, and then additives were added before ensilage. A two-factor completely randomized experiment was conducted. Factor A was the ratio of maize to soybean (based on mass, in kg), with the following treatments 1:0 (A_1), 2:1 (A_2), 1:1 (A_3), 1:2 (A_4), and 0:1 (A_5). Factor B was the type of lactic acid bacteria added, with the following treatments: *Lactobacillus buchneri* (LB), *Lactobacillus plantarum* (LP), and no *Lactobacillus* (L0). After 60 days of fermentation, the nutritional quality, fermentation quality, and aerobic stability of the silages were analyzed. The results showed that the effect of the interaction between the mixing ratio and the addition of lactic acid bacteria was extremely significant ($P < 0.01$) for the contents of crude protein, neutral detergent fiber, acid detergent lignin, ether extract, and crude ash, the pH value, the contents of lactic acid, acetic acid, and propionic acid, the ammonia nitrogen/total nitrogen ratio ($\text{NH}_3\text{-N/TN}$), and the duration of aerobic stability of the maize-soybean mixed silages. The contents of neutral detergent fiber, acid detergent fiber, and lactic acid were significantly higher in the A_2 and A_3 mixed treatment groups than in the other three mixed treatment groups ($P < 0.05$). Compared with the L0 group, all treatments in the LP group, except for the A_4 mixed treatment group, had significantly higher lactic acid contents ($P < 0.05$) and significantly lower crude ash contents ($P < 0.05$). Except for the A_5 mixed treatment group, the other mixed treatment groups in the LP group had significantly lower pH values than those of the L0 group ($P < 0.05$). Compared with the L0 group, all the mixed treatment groups in the LB group had significantly lower acid detergent lignin contents ($P < 0.05$). The acetic acid content was significantly higher ($P < 0.05$) in the A_1 , A_2 , and A_3 mixed treatment groups than in the other groups, and the duration of aerobic stability was also longer. A grey relational analysis was conducted based on the 11 core indicators of each mixed silage treatment group. Among all the treatment groups, the top three in terms of a good ensilage effect as indicated by the weighted relational degrees were $A_2\text{LP}$, $A_3\text{LB}$, and $A_1\text{LP}$. In conclusion, when making silage from whole maize and soybean, the mass proportion of soybean should be less than or equal to that of maize, and *L. plantarum* should be added to improve the fermentation quality.

Key words: mixed silage; whole-plant maize; whole-plant soybean; mixing ratio; lactic acid bacteria

全株玉米 (*Zea mays*) 青贮饲料是指在玉米生长至乳熟后期至蜡熟期之间, 收获地上部植株, 经过一定时间的乳酸菌厌氧发酵加工而成的饲料, 是反刍动物重要的优质粗饲料来源。全株玉米青贮饲料不仅含有丰富的淀粉和可消化纤维, 还具有来源广, 制作成本低等优点^[1]。全株大豆 (*Glycine max*) 富含蛋白质, 可作为家畜粗蛋白饲料来源, 减少豆粕依赖^[2]。

自2022年以来, “大豆玉米带状复合种植技术”大面积示范推广, 该技术可提高单位面积亩产量, 与净作玉米相比, 玉米—大豆套作的土地当量比为1.16~1.72, 效益值可达7485.72~9297.12元·hm⁻²^[3]。当前, 玉米—大豆间作系统的研究主要侧重于间作种植比例对籽实产量等农艺性状的影响^[4]。南方地区“大豆玉米带状复合种植技术”近年来也有推广, 但常因天气、收割机械等原因, 大豆和玉米籽实收获不及时, 导致经济效益降低。在适宜时期收获全株玉米和全株大豆用于青贮是该技术在南方地区应用的可选模式之一。本研究拟从后端加工利用角度, 分析玉米—大豆适宜的混合青贮比例及适宜的乳酸菌添加类型, 为该技术在南方地区的推广提供技术参考。

鼓粒期收获的全株大豆, 其粗蛋白 (crude protein, CP) 含量较高, 从而导致缓冲能较高, 且可溶性碳水化合物 (water soluble carbohydrate, WSC) 含量较低, 因此单独青贮较难成功^[5]; 而青贮玉米中淀粉和可溶性碳水化合物含量较高, 蛋白质含量相对较低, 将青贮玉米和全株大豆进行混合青贮有望提高青贮发酵品质, 增加饲用价值^[6]。乳酸菌添加剂包括同型发酵乳酸菌和异型发酵乳酸菌。在青贮时添加同型发酵乳酸菌如植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*, LP) 可使乳酸快速积累, 降低pH值, 抑制不良微生物的生长, 减少营养物质的损失^[7]; 添

加异型发酵乳酸菌如布氏乳杆菌(*Lactobacillus buchneri*, LB)能产生具有抗真菌特性的乙酸,从而提高青贮饲料在有氧暴露条件下的稳定性^[8]。虽然已有研究涉及全株玉米和大豆混合比例和乳酸菌添加对青贮品质的影响,但在不同气候条件下(南方高温高湿环境)针对全株玉米—大豆混合青贮的系统性研究较少,尤其是对于如何平衡发酵品质和有氧稳定性以适应南方地区实际生产需求的研究存在不足。

本研究拟通过设置5个不同混合比例和2种不同类型乳酸菌添加剂进行双因素完全随机青贮试验,比较分析不同混合比例和不同类型乳酸菌添加剂对全株玉米和全株大豆混合青贮的营养品质、发酵品质、有氧稳定性的影响,旨在确定二者最佳青贮质量配比和适宜乳酸菌添加剂,实现发酵阶段品质优良且开包后能长时间稳定保存的全株玉米—大豆饲料生产,为南方地区带状复合种植模式下的全株玉米—大豆青贮饲料生产提供科学依据,进而推动南方地区畜牧业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于湖南省常德市西湖管理区(海拔32 m, 112°03'46" E, 29°07'04" N),典型的亚热带季风气候;年平均气温15~23℃,年降水量1200~1900 mm。前茬作物为油菜(*Brassica napus*)。该区域地势平坦,潮土,土质肥沃。

青贮玉米品种为“正大999”,行距60 cm,株距25 cm;大豆品种为“中黄13”,行距30 cm,株距25 cm;播种方式为穴播。以3行大豆2行玉米间作模式,同时播种。播种时间为2023年5月25日,收割时间为2023年8月29日,玉米处于蜡熟后期(乳线大于1/2),大豆为鼓粒末期(籽粒占90%以上,且部分偏黄)。青贮玉米留茬高度20 cm,大豆留茬高度10 cm,收割后粉碎至1~2 cm^[9-10],然后将青贮原料(全株玉米和全株大豆)按质量比例进行混合,并添加乳酸菌,原料化学成分见表1。布氏乳杆菌和植物乳杆菌购自台湾亚芯生物科技有限公司,活菌数 $>1.0 \times 10^{11}$ cfu·g⁻¹。

表1 青贮原料化学成分

Table 1 Chemical composition of ensilage materials

青贮材料 Ensilage materials	干物质 Dry matter (%FW)	粗蛋白 Crude protein (%DM)	可溶性碳水化合物 Water soluble carbo- hydrate (%DM)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (%DM)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%DM)	粗脂肪 Ether extract (%DM)	粗灰分 Crude ash (%DM)
全株玉米 Whole-plant maize	37.84±0.33	9.81±0.37	6.74±0.29	45.10±1.00	19.90±0.98	1.29±0.18	4.92±0.06
全株大豆 Whole-plant soybean	29.85±0.37	20.74±0.36	5.56±0.04	43.42±1.47	28.15±0.94	7.11±0.56	9.30±0.13

DM:干物质 Dry matter; FW:鲜重 Fresh weight; 下同 The same below.

1.2 试验设计

双因素完全随机试验设计:因素A为全株玉米和全株大豆质量混合比例,设5个水平:分别为1:0(A₁)、2:1(A₂)、1:1(A₃)、1:2(A₄)、0:1(A₅);因素B为乳酸菌添加类型,设3个水平:布氏乳杆菌组(LB)和植物乳杆菌组(LP),添加量均为 1.0×10^6 cfu·g⁻¹FW,不添加乳酸菌的等量水处理为对照组(L0)。共15个处理组,每个处理组5次重复。将切碎混匀的青贮原材料与相应的乳酸菌添加剂混匀,装入青贮袋中,每袋500 g,用封口机抽真空后封口,于室温下避光储存,青贮期为60 d^[11],于2023年10月28日开包进行青贮品质测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 营养品质分析 将新鲜青贮料在105℃杀青15 min后,在65℃条件下烘干至恒重,测定干物质(dry matter, DM)含量。采用凯氏定氮法测定CP含量^[12](TM8400型全自动凯氏定氮仪,丹麦FOSS公司),蒽酮—硫酸比色法测定WSC含量^[13],范氏(Van Soest)法测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)含量^[14](A220型半自动纤维分析仪,美

国ANKOM公司),浸提法测定粗脂肪(ether extract,EE)含量^[15](XT10型脂肪分析仪,美国ANKOM公司),灼烧法测定粗灰分(crude ash,Ash)含量^[16](LX3611型马弗炉,天津莱波特瑞公司)。

1.3.2 发酵品质分析 称取20 g充分混匀的青贮料加入180 mL去离子水,放入4 °C冰箱静置24 h,用4层纱布过滤后再用中速定性滤纸进行过滤,得到青贮饲料浸提液。利用PHS-3C型pH测试仪(上海仪电科仪公司)测定pH值,采用LC-20A型高效液相色谱仪(美国安捷伦公司)测定乳酸(lactic acid,LA)、乙酸(acetic acid,AA)、丙酸(propionic acid,PA)和丁酸(butyric acid,BA)含量^[17]。采用苯酚一次氯酸钠比色法测定氨态氮/总氮(ammonia-N/total-N,NH₃-N/TN)^[18]。

1.3.3 有氧稳定性分析 青贮袋开包后混合,取约600 g青贮材料置于塑料桶中,并使用干净的纱布盖住,减少微生物与杂质污染,并且防止青贮水分的快速流失。采用MDL-1048A高精度温度记录仪(上海天贺公司)测量并记录有氧暴露期间饲料内部温度的变化,与室温进行比较,当饲料内部温度高于环境温度2 °C时,青贮材料开始腐败变质,此时记录时间即为有氧稳定时长(h)^[19]。同时在有氧暴露后的3、6、9 d测定pH值,有氧暴露9 d后结束试验。

1.4 数据处理

用Excel 2021进行数据处理,结果以“均值±标准差(mean±standard deviation)”表示,SPSS 26.0进行皮尔逊相关性分析,并通过主体间效应检验进行双因素方差分析,采用邓肯极差法进行多重比较。用Origin 2022软件进行数据处理与图表制作。运用灰色关联度法^[20]对全株玉米—大豆混合青贮指标进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 全株玉米—大豆混合青贮主体间效应检验

由表2双因素方差分析结果可知,混合比例对所有指标均具有极显著影响($P<0.01$);除BA无显著影响($P>0.05$)外,添加乳酸菌对其他所有指标均具有显著性影响($P<0.05$);混合比例和添加乳酸菌对pH值、CP、NDF、EE、Ash、LA、AA、PA含量、NH₃-N/TN和有氧稳定时长均有极显著交互作用($P<0.01$);主效应线性相关性分析表明,DM、WSC和LA含量和全株大豆混合占比具有负线性相关关系($P<0.01$),pH值、CP、ADF、ADL、EE、Ash、AA、PA、BA含量、NH₃-N/TN及有氧稳定时长与全株大豆混合占比具有正线性相关关系($P<0.01$)。

2.2 全株玉米—大豆混合青贮营养品质分析

由表3可知,随着大豆混合占比增加,各处理组的DM和WSC含量逐渐降低;CP、EE、Ash含量显著增加($P<0.05$);NDF呈先降低后升高的趋势。A₁混合处理组中,LP组的DM含量显著高于L0和LB组($P<0.05$);与L0组相比,添加乳酸菌显著降低了青贮饲料中的NDF、ADF、ADL和Ash含量($P<0.05$)。A₂混合处理组中,LP组的NDF、ADF、ADL和Ash含量显著低于L0和LB组($P<0.05$);添加乳酸菌对CP含量无显著影响($P>0.05$)。A₃混合处理组中,LB组的CP含量均显著高于L0和LP组($P<0.05$),同时LP组的CP含量显著高于L0组($P<0.05$);添加乳酸菌对ADF含量无显著影响($P>0.05$)。A₄混合处理组中,LB组的CP和EE含量显著高于L0和LP组($P<0.05$);添加乳酸菌显著增加了青贮饲料中的CP和EE含量($P<0.05$),同时降低了ADL含量($P<0.05$);但对WSC和ADF含量无显著影响($P>0.05$)。A₅混合处理组中,LP组的NDF含量显著低于L0和LB组($P<0.05$),与L0组相比,添加乳酸菌显著降低了饲料中ADL含量($P<0.05$)。

2.3 全株玉米—大豆混合青贮发酵品质分析

由表4可知,随着大豆混合占比增加,各处理组的pH值显著上升($P<0.05$),LA含量呈先上升后下降的趋势,AA、PA含量和NH₃-N/TN呈逐渐上升的趋势。除A₅混合处理组外,其他所有混合处理组中LP组的pH值均显著低于L0组($P<0.05$),LB组的pH值显著高于L0组($P<0.05$)。除A₄混合处理组外,其他所有混合处理组中LP组的LA含量均显著高于L0组($P<0.05$);而在所有处理组中,LB组的LA值均显著低于L0组($P<0.05$)。A₁、A₂和A₃混合处理组中LB组的AA含量显著高于L0和LP组($P<0.05$)。与L0组相比,添加乳酸菌对PA、BA含量无显著影响($P>0.05$)。

表 2 全株玉米-大豆混合青贮饲料指标的主体间效应检验

Table 2 Inter-subject effect test of whole maize-soybean mixed silage indexes

项目 Item	指标 Index	显著性 Significance			大豆混合占比 Soybean mix proportion
		混合比例 Mixing ratio	乳酸菌剂 Lactic acid bacteria agent	交互作用 Interactions	相关性 Correlation#
营养品质 Nutrient quality	干物质 Dry matter (%FW)	**	**	NS	-0.862**
	粗蛋白 Crude protein (%DM)	**	*	**	0.986**
	可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrate (%DM)	**	**	NS	-0.863**
	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (%DM)	**	**	**	-0.024
	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%DM)	**	**	NS	0.804**
	酸性洗涤木质素 Acid detergent lignin (%DM)	**	**	**	0.781**
	粗脂肪 Ether extract (%DM)	**	**	**	0.988**
	粗灰分 Crude ash (%DM)	**	**	**	0.977**
发酵品质 Fermentation quality	pH 值 pH value	**	**	**	0.876**
	乳酸 Lactic acid (%DM)	**	**	**	-0.447**
	乙酸 Acetic acid (%DM)	**	**	**	0.715**
	丙酸 Propionic acid (%DM)	**	**	**	0.698**
	丁酸 Butyric acid (%DM)	**	NS	NS	0.488**
	氨态氮/总氮 Ammonia-N/total-N (%)	**	**	**	0.796**
有氧稳定时长 Aerobic stability time (h)	**	**	**	0.758**	

注：*表示在 0.05 水平上显著相关 ($P < 0.05$)，**表示在 0.01 水平上极显著相关 ($P < 0.01$)，NS 表示不显著 ($P > 0.05$)；#：全株大豆混合占比与各指标间的线性相关性；相关性分析结果： $r = 1$ 完全正相关， $r = -1$ 完全负相关， $0 < r < 1$ 正相关， $-1 < r < 0$ 负相关。

Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level ($P < 0.05$), ** indicates a extremely significant correlation at the 0.01 level ($P < 0.01$), NS indicates not significant ($P > 0.05$); #: The linear correlation between the mixed proportion of whole plant soybean and each index; Correlation analysis results: $r = 1$ indicates completely positive correlated, $r = -1$ indicates completely negatively correlated, $0 < r < 1$ indicates positively correlated, $-1 < r < 0$ indicates negatively correlated.

2.4 全株玉米-大豆混合青贮有氧稳定性

由图 1 可知,添加 LB 处理组中,除 A₁ 混合处理组在 168 h 时青贮料核心温度超过室温 2 °C 外,其他所有混合处理组均在有氧暴露 216 h 后青贮料核心温度仍没有超过室温 2 °C;而添加 LP 处理组中,A₁、A₂ 和 A₃ 混合处理组在有氧暴露 72~96 h 时青贮料核心温度超过室温 2 °C;未添加乳酸菌的处理组中,只有 A₄ 和 A₅ 混合处理组在有氧暴露 216 h 后青贮料核心温度仍没有超过室温 2 °C。

由图 2 可知,添加 LB 的所有处理组的 pH 值在有氧暴露 9 d 内变化不剧烈;添加 LP 处理组中,除 A₅ 处理组外,所有混合处理组在有氧暴露 3~6 d 时 pH 值迅速上升;未添加乳酸菌的处理组中,A₁ 和 A₂ 混合处理组在有氧暴露 3~6 d 时 pH 值迅速上升,A₃ 混合处理组在有氧暴露 6~9 d 时 pH 值迅速上升,A₄ 和 A₅ 混合处理组的 pH 值在有氧暴露 9 d 内变化不剧烈。结合图 1 和图 2 发现,当温度记录仪测到青贮料的温度差低于 2 °C 时,对应青贮料的 pH 值也未出现明显上升现象。

2.5 全株玉米-大豆混合青贮营养品质与发酵品质相关性分析

对 15 个全株玉米-大豆混合青贮处理组营养品质和发酵品质相关的 14 个指标进行皮尔逊相关性分析。由图 3 可知,青贮营养品质相关指标之间存在显著相关,DM 含量与 CP、ADF、ADL、EE、Ash 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与 WSC 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$);CP 含量与 ADF、ADL、EE、Ash 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),但与 NDF 含量之间无显著相关关系 ($P > 0.05$);WSC 含量与 ADF、ADL、EE、Ash 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。青贮发酵品质相关指标之间存在显著相关,pH 值与 LA 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与 NH₃-N/

表3 全株玉米-大豆混合青贮营养品质

Table 3 Nutritional quality of whole maize-soybean mixed silage

混合比例 Mixing ratio	乳酸菌剂 Lactic acid bacteria agent	干物质 Dry matter (%FW)	粗蛋白 Crude protein (%DM)	可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrate (%DM)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (%DM)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (%DM)	酸性洗涤木质素 Acid detergent lignin (%DM)	粗脂肪 Ether extract (%DM)	粗灰分 Crude ash (%DM)
A ₁	LB	33.99±0.42Ab	8.34±0.10Eb	1.42±0.14Aa	48.58±0.68Ab	23.49±1.90Cab	1.56±0.21Db	2.18±0.12Ea	4.50±0.02Eb
	LP	36.53±0.39Aa	8.57±0.22Eb	1.18±0.09Aa	48.21±1.27Ab	21.05±1.59Db	1.19±0.02Ec	1.25±0.10Eb	4.04±0.06Ec
	L0	34.49±0.63Ab	9.38±0.23Ea	1.43±0.13Aa	51.95±1.13Aa	24.89±0.39Ca	2.39±0.12Ea	2.27±0.04Ea	4.73±0.03Ea
A ₂	LB	32.63±0.47Bb	14.09±0.08Da	1.17±0.00Ba	49.57±1.67Aa	24.61±0.33Ca	2.51±0.10Cb	5.65±0.29Da	6.34±0.07Da
	LP	34.99±0.70Ba	13.91±0.75Da	1.06±0.02Ab	43.50±1.14Cb	21.43±0.33Db	1.96±0.06Dc	4.31±0.25Db	5.36±0.04Dc
	L0	33.90±1.10ABab	13.55±0.30Da	1.25±0.07Ba	49.73±2.05ABa	24.75±2.61Ca	3.33±0.52Da	4.80±0.05Db	5.63±0.03Db
A ₃	LB	32.03±0.66Bb	17.20±0.09Ca	0.95±0.07Ca	43.48±0.43Ba	23.37±1.13Ca	2.86±0.20BCb	6.97±0.53Ca	6.80±0.06Ca
	LP	34.24±0.83Ba	15.63±0.15Cb	0.92±0.04Ba	42.99±1.61Cb	24.45±1.17Ca	3.97±0.22Ca	6.56±0.19Ca	6.04±0.03Cc
	L0	33.56±0.74ABab	15.31±0.03Cc	0.90±0.04Ca	44.04±1.36Ca	23.92±0.82Ca	3.85±0.30Ca	6.68±0.20Ca	6.25±0.11Cb
A ₄	LB	31.86±0.72Bb	19.07±0.30Ba	0.89±0.07Ca	51.19±1.27Aa	28.25±1.61Ba	3.99±0.35Ab	8.19±0.16Ba	7.34±0.02Ba
	LP	32.46±0.31Ca	18.54±0.07Bb	0.85±0.05BCa	46.87±0.64ABb	27.55±0.19Ba	4.63±0.09Bb	7.63±0.17Bb	7.14±0.01Bb
	L0	32.13±1.06Ba	17.46±0.04Bc	0.84±0.04Ca	47.62±1.53Bb	29.89±0.60Ba	6.27±0.32Ba	7.24±0.01Bc	7.07±0.04Bc
A ₅	LB	28.69±0.10Cb	21.46±0.23Ab	0.83±0.02Ca	49.86±1.05Aa	32.48±1.75Aab	3.14±0.33Bc	11.41±0.17Aa	9.19±0.13Aab
	LP	29.37±0.13Da	21.89±0.08Aa	0.75±0.05Ca	45.30±0.97BCb	29.97±0.63Ab	6.38±0.18Ab	10.21±0.02Aa	9.03±0.02Ab
	L0	29.09±0.27Cab	21.65±0.08Aab	0.79±0.04Ca	51.81±0.52Aa	34.80±0.21Aa	8.60±0.13Aa	11.33±0.20Aa	9.36±0.05Aa

注：不同小写字母表示在同一混合比例下不同乳酸菌添加种类之间的差异显著 ($P < 0.05$)。不同大写字母表示在同一混合比例下不同混合比例之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different lactic acid bacteria addition under the same mixing ratio ($P < 0.05$). Different uppercase letters indicated significant difference among different mixing ratios under the same lactic acid bacteria addition ($P < 0.05$). The same below.

表 4 全株玉米-大豆混合青贮发酵品质

Table 4 Fermentation quality of whole maize-soybean mixed silage

混合比例 Mixing ratio	乳酸菌剂 Lactic acid bacteria agent	pH 值 pH value	乳酸 Lactic acid (%DM)	乙酸 Acetic acid (%DM)	丙酸 Propionic acid (%DM)	丁酸 Butyric acid (%DM)	氨态氮/总氮 Ammonia-N/total-N (%)
A ₁	LB	4.01±0.00Ea	5.02±0.41Ac	2.61±0.94Ba	ND	0.03±0.02Aa	8.65±0.31Ba
	LP	3.60±0.01Ec	10.42±0.14Ba	0.39±0.01Db	0.21±0.01Cb	ND	4.63±0.41Cb
	L0	3.75±0.01Eb	7.56±0.30Bb	1.04±0.28Cb	0.39±0.01Ba	ND	4.72±0.31Cb
A ₂	LB	4.27±0.00Da	3.22±0.47Bc	3.17±0.51ABa	0.14±0.02Ba	ND	8.40±0.15Ba
	LP	3.79±0.01Dc	14.94±1.18Aa	0.52±0.04Db	0.15±0.11Ca	ND	4.62±0.34Cb
	L0	3.93±0.01Db	9.97±0.57Ab	1.28±0.35Cb	0.30±0.01Ba	ND	5.24±0.55Cb
A ₃	LB	4.40±0.00Ca	4.83±0.60ABc	2.83±0.21Ba	0.14±0.01Bb	ND	8.42±0.62Ba
	LP	3.91±0.02Cc	14.60±6.88Aa	0.78±0.04Cc	1.26±0.22Ba	ND	6.87±0.15Ba
	L0	4.07±0.01Cb	10.31±0.51Ab	2.39±0.08Bb	0.29±0.02Bab	ND	7.07±0.93Ba
A ₄	LB	4.50±0.02Ba	5.32±1.44Ab	2.87±0.08Ba	0.15±0.01Bb	ND	8.90±0.57Ba
	LP	4.07±0.03Bc	10.03±0.94Ba	3.18±0.18Ba	ND	0.06±0.05Ba	7.38±0.31Bb
	L0	4.30±0.02Bb	10.10±0.66Aa	2.51±0.96Ba	0.30±0.05Ba	ND	7.90±0.06Bb
A ₅	LB	5.14±0.01Ac	1.09±0.04Cc	4.02±0.05Ab	1.72±0.09Aa	0.05±0.03Aa	15.62±0.32Aa
	LP	5.25±0.01Aa	1.59±0.03Ca	3.91±0.03Ab	1.91±0.34Aa	0.01±0.01Aa	12.52±0.15Ac
	L0	5.20±0.01Ab	1.31±0.11Cb	4.34±0.17Aa	1.79±0.10Aa	0.12±0.01Aa	13.62±0.33Ab

ND: 未检测到 Not detected.

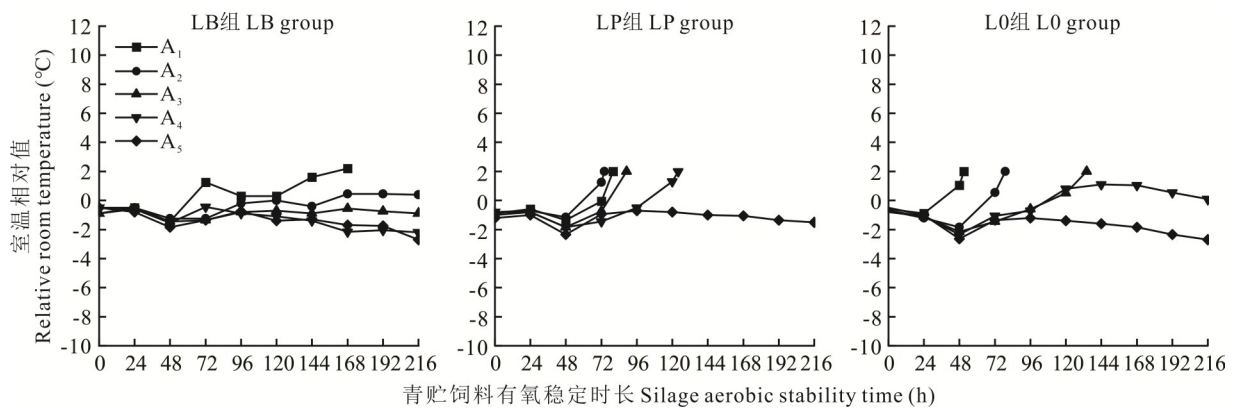


图 1 青贮饲料有氧稳定时长

Fig. 1 Silage aerobic stability time

TN、AA、PA、BA 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；LA 含量与 $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 、AA、PA、BA 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)；AA 含量与 $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 、PA、BA 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；PA 含量与 $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 、BA 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

青贮营养品质与发酵品质相关指标之间显著相关,DM 含量除与 LA 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)之外,与其他发酵品质相关指标均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)；CP 含量与 pH 值、 $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 、AA、PA、BA 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)；WSC 含量与 pH 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与 LA、BA 含量无显著相关关系 ($P > 0.05$)；ADF、EE、ADL 和 Ash 含量均与 pH 值、 $\text{NH}_3\text{-N/TN}$ 、AA、PA、BA 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 LA 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

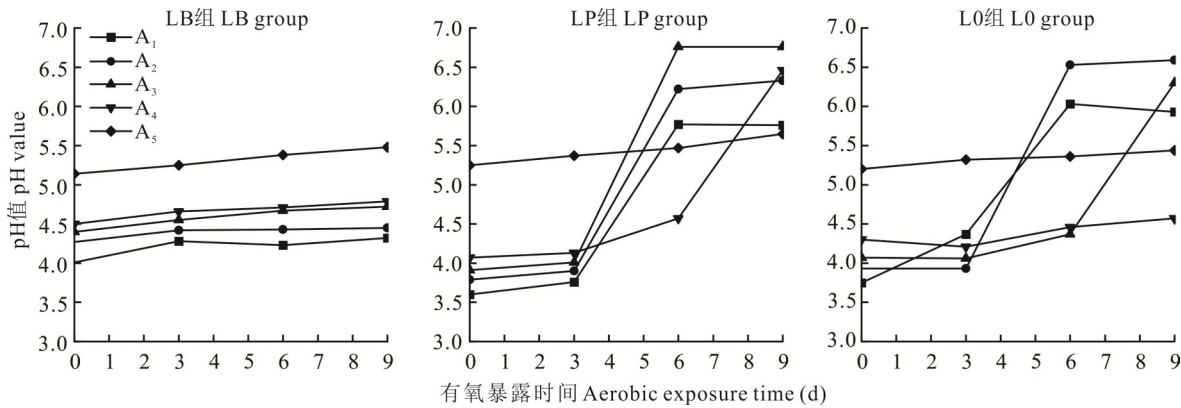


图2 青贮饲料有氧暴露期间 pH 值变化

Fig. 2 pH changes of silage during aerobic exposure

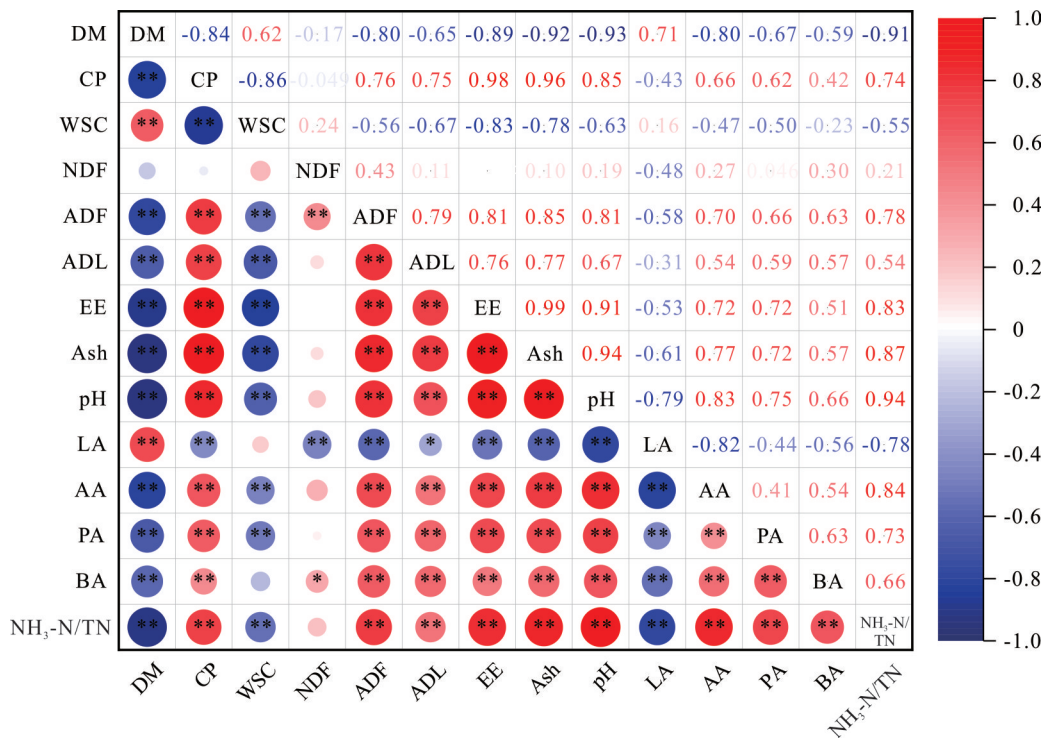


图3 全株玉米-大豆青贮营养品质与发酵品质相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis between the nutrient quality and fermentation quality of whole maize-soybean silage

*表示在0.05水平上显著相关($P < 0.05$), **表示在0.01水平上极显著相关($P < 0.01$);红色圆圈表示正相关($0 < r < 1$),蓝色圆圈表示负相关($-1 < r < 0$);DM:干物质,CP:粗蛋白,WSC:可溶性碳水化合物,NDF:中性洗涤纤维,ADF:酸性洗涤纤维,ADL:酸性洗涤木质素,EE:粗脂肪,Ash:粗灰分,LA:乳酸,AA:乙酸,PA:丙酸,BA:丁酸,NH₃-N/TN:氨态氮/总氮。* indicates a significant correlation at the 0.05 level ($P < 0.05$), ** indicates a very significant correlation at the 0.01 level ($P < 0.01$); The red circles represent positive correlations ($0 < r < 1$), while the blue circles represent negative correlations ($-1 < r < 0$); DM: Dry matter, CP: Crude protein, WSC: Water soluble carbohydrate, NDF: Neutral detergent fiber, ADF: Acid detergent fiber, ADL: Acid detergent lignin, EE: Ether extract, Ash: Crude ash, LA: Lactic acid, AA: Acetic acid, PA: Propionic acid, BA: Butyric acid, NH₃-N/TN: Ammonia-N/total-N.

2.6 灰色关联法综合分析

为全面准确评价混合比例和添加乳酸菌对玉米-大豆青贮品质的影响,参考表2双因素方差分析结果,除DM、WSC、ADF和BA这4个指标无显著交互作用外,混合比例和添加乳酸菌对其他指标均存在显著或极显著交互作用,因此选择pH值、CP、NDF、ADL、EE、Ash、LA、AA、PA含量、NH₃-N/TN和有氧稳定时长这11个指标进行灰色关联法分析。

采用判断矩阵法,通过公式计算各指标对应的权重值,赋予各指标权重: $\omega(\text{CP})=0.0927$, $\omega(\text{NDF})=0.0878$, $\omega(\text{ADL})=0.0455$, $\omega(\text{Ash})=0.0884$, $\omega(\text{EE})=0.0932$, $\omega(\text{pH})=0.0953$, $\omega(\text{NH}_3\text{-N/TN})=0.1044$, $\omega(\text{LA})=0.0836$, $\omega(\text{AA})=0.0879$, $\omega(\text{PA})=0.1122$, $\omega(\text{有氧稳定时长})=0.1090$ 。再通过灰色关联分析法对15个处理组的青贮综合品质进行分析,加权排名结果(表5)表明,所有处理组中综合品质排名前三的为: $A_2\text{LP}$ 、 $A_3\text{LB}$ 和 $A_1\text{LP}$,加权关联度分别为0.683、0.670和0.649。

3 讨论

3.1 混合比例对玉米—大豆混合青贮质量的影响

本研究表明,不同全株玉米和大豆原料质量比例对混合青贮发酵品质有着显著影响。青贮过程中,青贮原料的DM含量是影响青贮发酵品质的重要因素之一,青贮原料的DM含量适宜范围为30%~40%^[21]。本试验中,除大豆单独青贮组(A_5)外,其他混合处理组的DM含量均在青贮生产的理想范围之内^[22],这可能也是导致 A_5 处理组在添加乳酸菌后青贮质量仍旧较差的原因之一。

pH值、有机酸和氨态氮含量是评估青贮发酵品质的重要指标^[23]。根据Kung等^[24]的研究,全株玉米原料的DM含量在30%~40%时,青贮饲料的pH值在3.7~4.0;全株大豆原料的DM含量在30%~35%时,青贮饲料的pH值在4.3~4.5,本试验中,除了大豆单独青贮组(A_5)外,其他混合处理组的pH值均在其预测范围内。随着大豆在青贮料中所占比例增加,青贮饲料的pH值逐渐上升,这可能是由于大豆原料的WSC含量少,缓冲能高,导致青贮过程中pH值的降低速度慢^[25]。青贮饲料pH值较高可能导致在青贮过程中,青贮饲料的营养物质受到其他不良微生物的降解而损失,影响青贮的发酵质量;但是青贮饲料pH值不能完全反映发酵过程中产生有机酸量、种类及乳酸菌活跃程度,pH值主要受青贮原料缓冲能的影响^[26],大豆缓冲能高,因此当玉米与大豆混合青贮时,需要产生更多的酸才能达到与单一玉米青贮相同的pH值。本试验中观察到,大豆混合占比 $\leq 50\%$ 处理组(A_2 、 A_3)的pH值高于玉米单独青贮组(A_1),但同时LA含量也高于玉米单独青贮组(A_1),Jahanzad等^[27]也在御谷(*Pennisetum glaucum*)和大豆混合青贮试验中观察到含有大豆混合青贮处理组的LA产量更高,说明当大豆混合占比 $\leq 50\%$ 时,其青贮发酵过程中乳酸菌发酵活动比玉米单独青贮更活跃。同时本试验观察到大豆混合占比 $\leq 50\%$ 处理组(A_2 、 A_3)的LA含量显著高于其他处理组(A_4 、 A_5),同时NDF、ADF显著低于其他处理组(A_1 、 A_4 、 A_5),说明在全株玉米—大豆混合青贮中,虽然LA的积累对青贮pH影响不明显,但促进了青贮饲料中纤维的降解(可能为酸解过程)。NH₃-N/TN可以反映青贮的蛋白水解过程,发酵效果良好青贮饲料中NH₃-N/TN应不超过10%^[28]。本试验发现,除大豆单独青贮组(A_5)外,所有混合处理组的NH₃-N/TN均低于10%,说明不良发酵发生少。Parra等^[29]进行玉米—大豆混合青贮的研究结果表明,在玉米青贮中添加大豆进行混合青贮可促进青贮饲料中的异型乳酸菌发酵,提高青贮饲料中的AA含量。AA具有很强的抗真菌特性,青贮料的AA含量升高可提高青贮饲料的有氧稳定性^[30],本试验中发现随着大豆混合占比增多,青贮饲料中AA含量存在上升的趋势,同时青贮饲料的有氧稳定时长增加,且减少了有氧暴露期间的pH值变化。与玉米单独青贮(A_1)相比,混合青贮组的有氧稳定效果更好,说明将全株玉米和大豆进行混合青贮可延缓青贮饲料在有氧暴露阶段的腐败,减少青贮饲料营养成分的损失。可见在全株玉米—大豆混合青贮中,大豆混合 $\leq 50\%$ 时发酵效果较好,在一定程度上呈现出诸

表5 不同混合比例和乳酸菌添加剂组的关联度及排名

Table 5 Correlation and ranking of different mixing ratios and lactic acid bacteria additive groups

混合比例 Mixing ratio	乳酸菌剂 Lactic acid bacteria agent	加权关联度 Weighted correlation degree	加权排名 Weighted ranking
A_1	LB	0.595	10
	LP	0.649	3
	L0	0.555	12
A_2	LB	0.618	8
	LP	0.683	1
	L0	0.570	11
A_3	LB	0.670	2
	LP	0.632	4
	L0	0.631	5
A_4	LB	0.597	9
	LP	0.621	7
	L0	0.625	6
A_5	LB	0.516	15
	LP	0.540	13
	L0	0.521	14

多优势。

3.2 添加乳酸菌对玉米—大豆混合青贮质量的影响

添加乳酸菌可以促进发酵和提高青贮饲料品质,增加有氧稳定性^[31]。青贮发酵过程中DM含量的损失主要源于细胞的呼吸作用和有害微生物发酵,添加同型外源乳酸菌可迅速降低青贮饲料的pH值,提高LA含量,抑制细胞的呼吸作用和有害微生物发酵,降低青贮DM损失量^[32]。本研究结果发现,在大部分混合处理组中,添加LP可显著降低青贮饲料的pH值,提高DM含量;而添加LB会导致青贮饲料的pH值升高,对DM含量无显著影响,这与Bai等^[33]的研究结果一致。同时本研究结果表明,除A₄混合处理组外,添加LP可以显著提升青贮饲料的LA含量,降低NDF含量,这可能是由于LP在发酵初期进行同型乳酸菌发酵,在LP的作用下,每消耗一分子葡萄糖可生成两分子LA,促进了混合青贮饲料中LA的积累,并通过酸解促进了纤维的降解^[34]。因此今后在全株玉米—大豆混合青贮中,可以考虑添加LP来提高混合青贮的发酵质量。

布氏乳杆菌可以将LA缓慢地转化为AA和1,2-丙二醇,适度的AA可以抑制酵母菌和霉菌的繁殖,从而提高有氧稳定性^[35]。本研究结果表明,添加LB可以提高青贮料开包后的有氧稳定时长(≥ 168 h)、减缓有氧暴露pH变化,而LP组的有氧稳定特征与L0组相似。本研究还发现添加LB的所有混合处理组的AA含量均 $> 2\%$,且当其他处理组的AA含量 $> 2\%$ 时,也表现出较好的有氧稳定性(> 120 h),Jonas等^[36]的研究结果也表明,在全株玉米青贮中,当青贮饲料的AA含量 $> 2\%$ 时,其有氧稳定性好。

综上,在全株玉米—大豆混合青贮中添加LP和LB各有其优势,在提升青贮发酵质量和降低纤维含量方面,可优先考虑添加LP;在提高有氧稳定性方面,则可选择添加LB。因此在实际生产中可根据实际需求选择不同乳酸菌添加以提高混合青贮的整体品质。今后也可以考虑将两种乳酸菌制剂结合使用,以充分发挥它们各自的优势,进一步提高混合青贮的品质。

4 结论

全株玉米和大豆混合比例以及不同类型的乳酸菌添加剂对青贮饲料的主要营养品质和发酵品质相关指标均有显著或极显著影响($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),二者互作效应明显;DM、CP、WSC、ADF、ADL、EE、Ash含量、pH值、LA、AA、PA、BA含量、NH₃-N/TN及有氧稳定时长这14个指标和全株大豆混合占比具有显著线性相关关系($P < 0.01$)。添加植物乳杆菌(LP)可提高全株玉米—大豆混合青贮饲料发酵品质,添加布氏乳杆菌(LB)可提高青贮开包后的有氧稳定时长。综合11项指标并通过灰色关联分析法得出,在全株玉米—大豆混合青贮中,全株大豆质量占比应 \leq 全株玉米质量占比。因此建议在南方地区全株玉米—大豆混合青贮中,全株大豆质量占比应 \leq 全株玉米质量占比,并添加植物乳杆菌(LP)提高青贮发酵品质。

参考文献 References:

- [1] Duan J X. Construction of silage maize and amaranth planting patterns and quality evaluation of mixed forage. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.
段佳鑫. 青贮玉米和籽粒苋种植模式构建及混贮饲草品质评价. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [2] Zeng T R, Wu Y S, Xin Y F, *et al.* Silage quality and output of different maize-soybean strip intercropping patterns. *Fermentation*, 2022, 8(4): 174.
- [3] Fu L D, Ji L Z, Fan H. Yield and benefit analysis of different soybean varieties under the combined planting model of soybean and maize strip. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(23): 21–23.
付立冬, 季林章, 范辉. 大豆玉米带状复合种植模式下不同大豆品种产量及效益分析. *现代农业科技*, 2023(23): 21–23.
- [4] Yuan X T, Wang T, Luo K, *et al.* Effects of bandwidth and plant spacing on biomass accumulation and allocation and yield formation in strip intercropping soybean. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(1): 161–171.
袁晓婷, 王甜, 罗凯, 等. 带宽和株距对带状间作大豆物质积累分配及产量形成的影响. *作物学报*, 2024, 50(1): 161–171.
- [5] Gao C, Chen P, Du Q, *et al.* Effects of sowing date and density on stem, leaf growth, and yield formation in strip intercropping soybean. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(11): 3090–3099.
高超, 陈平, 杜青, 等. 播期、密度对带状间作大豆茎叶生长及产量形成的影响. *作物学报*, 2023, 49(11): 3090–3099.

- [6] Sui H M J L. Effects of different mixing ratios on silage quality, aerobic stability, microbial diversity and rumen degradation characteristics of whole plant corn with whole plant soybean. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University, 2023.
隋胡木吉勒. 不同混合比例对全株玉米与全株大豆混合青贮品质、有氧稳定性、微生物多样性及瘤胃降解特性的影响. 通辽: 内蒙古民族大学, 2023.
- [7] Li R R, Zheng M H, Cui X Y, *et al.* Screening of lactic acid bacteria and its effect on fermentation characteristics of alfalfa silage. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(11): 69–75, 104.
李荣荣, 郑猛虎, 崔欣雨, 等. 优良乳酸菌的筛选及对苜蓿青贮发酵品质的影响. 中国草地学报, 2021, 43(11): 69–75, 104.
- [8] Xu D M, Ding W R, Ke W C, *et al.* Modulation of metabolome and bacterial community in whole crop corn silage by inoculating homofermentative *Lactobacillus plantarum* and heterofermentative *Lactobacillus buchneri*. Frontiers in Microbiology, 2018(9): 3299.
- [9] Cui B, Wang J T, Zhang X F, *et al.* Effects of the quality of whole corn silage and its evaluation method. China Feed, 2022(7): 116–121.
崔彪, 王继彤, 张晓峰, 等. 影响全株玉米青贮饲料质量的因素及质量评价方法. 中国饲料, 2022(7): 116–121.
- [10] Thompson S J, Jenny K, Silva L S, *et al.* Forage mass and nutritive value of grain- and forage-type soybean cultivars managed under different row spacings and clipping heights. Agronomy, 2023, 13(2): 487.
- [11] Li X L. Biomass yield and fermentation quality of silage corn and soybean grown in strip intercropping system. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.
李小铃. 青贮玉米与大豆带状间作对生物产量及发酵品质的影响. 成都: 四川农业大学, 2023.
- [12] Xiao Z M, Fan X, Ma D X, *et al.* Determination of crude protein in feed, GB/T 6432-2018. Beijing: China Standard Press, 2018.
肖志明, 樊霞, 马东霞, 等. 饲料中粗蛋白的测定, GB/T 6432-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [13] Thomas T A. An automated procedure for the determination of soluble carbohydrates in herbage. Journal of Food Science, 1977(28): 639–642.
- [14] Zhang L Y. Feed analysis and feed quality detection technology. Beijing: China Agriculture University Press, 2007.
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Determination of crude fat in feeds, GB/T 6433-2006. Beijing: Standard Press of China, 2006.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料中粗脂肪的测定, GB/T 6433-2006. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [16] Wu R X, Yang L, He Y F, *et al.* Determination of crude ash content in feed, GB/T 6438-2007. Beijing: China Standard Press, 2007.
武润仙, 杨林, 何一帆, 等. 饲料中粗灰分的测定, GB/T 6438-2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] Xu Q F, Yu Z, Han J G, *et al.* Determining organic acid in alfalfa silage by HPLC. Grassland and Turf, 2007, 2(17): 63–65, 67.
许庆方, 玉柱, 韩建国, 等. 高效液相色谱法测定紫花苜蓿青贮中的有机酸. 草原与草坪, 2007, 2(17): 63–65, 67.
- [18] Lin L F. Effects of add sorbic acid and ethanol on the fermentation quality of alfalfa and white clover silages. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
林丽芳. 添加山梨酸、乙醇对紫花苜蓿和白三叶发酵品质的影响. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [19] Li H P, Guan H, Jia Z F, *et al.* Screening of antifreeze-thawed lactic acid bacteria and their effects on oat silage fermentation quality and aerobic stability. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(12): 158–170.
李海萍, 关皓, 贾志锋, 等. 抗冻融乳酸菌的筛选及其对燕麦青贮品质和有氧稳定性的影响. 草业学报, 2022, 31(12): 158–170.
- [20] Meng Y, Tian W Z, Wen P F, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of wheat varieties based on synergy of different developmental stages. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(2): 570–582.
孟雨, 田文仲, 温鹏飞, 等. 基于不同发育阶段协同的小麦品种抗旱性综合评判. 作物学报, 2023, 49(2): 570–582.
- [21] Yan Y H, Li J L, Guo X S, *et al.* A study on fermentation quality of Italian ryegrass and soybean straw mixed silage. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(4): 94–99.
闫艳红, 李君临, 郭旭生, 等. 多花黑麦草与大豆秸秆混合青贮发酵品质的研究. 草业学报, 2014, 23(4): 94–99.

- [22] Chen P F, Bai S Q, Yang F Y, *et al.* Effects of additives and moisture on fermentation quality of smooth vetch silage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(2): 80–86.
陈鹏飞, 白史且, 杨富裕, 等. 添加剂和水分对光叶紫花苜蓿青贮品质的影响. *草业学报*, 2013, 22(2): 80–86.
- [23] Sa R L. Effects of lactic acid bacteria on fermentation quality, aerobic stability and microbial diversity of whole corn and soybean mixed silage. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University, 2023.
萨如拉. 乳酸菌对全株玉米大豆混合青贮发酵品质、有氧稳定性及微生物多样性的影响. 通辽: 内蒙古民族大学, 2023.
- [24] Kung L, Shaver R, Grant R, *et al.* Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5): 4020–4033.
- [25] Chen Y. Effects of soybean variety and sowing date on yield and quality of mixed silage with soybean-maize strip intercropping. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.
陈阳. 大豆品种及播期对大豆玉米带状间作混合青贮产量及品质的影响. 成都: 四川农业大学, 2023.
- [26] Costa A C M, Jara G E S, Orrico M J A, *et al.* Fermentative parameters and chemical composition of mixed silages from corn-*Crotalaria* intercropping. *Animal Feed Science and Technology*, 2023(305): 115779.
- [27] Jahanzad E, Sadeghpour A, Hashemi M, *et al.* Silage fermentation profile, chemical composition and economic evaluation of millet and soya bean grown in monocultures and as intercrops. *Grass and Forage Science*, 2016, 71(4): 584–594.
- [28] Zhan J Q, Chen D D, Guo T X, *et al.* Effects of different additives on silage quality of Chinese medicinal residue. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(12): 3851–3857.
詹佳琦, 陈丹丹, 郭田心, 等. 不同添加剂对中药渣青贮品质的影响. *草地学报*, 2023, 31(12): 3851–3857.
- [29] Parra C, Bolson D, Jacovaci F, *et al.* Influence of soybean-crop proportion on the conservation of maize-soybean bi-crop silage. *Animal Feed Science and Technology*, 2019(257): 114295.
- [30] Zeng T, Li X L, Guan H, *et al.* Dynamic microbial diversity and fermentation quality of the mixed silage of corn and soybean grown in strip intercropping system. *Bioresource Technology*, 2020(313): 123655.
- [31] Nascimento C M A, Gomes O P, Paula V S D, *et al.* Fermentative profile and lactic acid bacterial dynamics in non-wilted and wilted alfalfa silage in tropical conditions. *Molecular Biology Reports*, 2018, 46(1): 451–460.
- [32] Muck R E, Nadeau E M G, McAllister T A, *et al.* Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5): 3980–4000.
- [33] Bai J, Ding Z T, Su R N, *et al.* Storage temperature is more effective than lactic acid bacteria inoculations in manipulating fermentation and bacterial community diversity, co-occurrence and functionality of the whole-plant corn silage. *Microbiology Spectrum*, 2022, 10(2): 10122.
- [34] Xu J Z, Ma J F, Sa R L, *et al.* Effects of lactic acid bacteria inoculants on the nutrient composition, fermentation quality, and microbial diversity of whole-plant soybean-corn mixed silage. *Frontiers in Microbiology*, 2024(15): 1347293.
- [35] Érica S D B, Martinele D C, Mauro E S, *et al.* The effects of *Lactobacillus hilgardii* 4785 and *Lactobacillus buchneri* 40788 on the microbiome, fermentation, and aerobic stability of corn silage ensiled for various times. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(10): 10678–10698.
- [36] Jonas J, Vilma V, Rafael C D A, *et al.* Influence of ensiling timing and inoculation on whole plant maize silagefermentation and aerobic stability (preliminary research). *Plants*, 2024, 13(20): 2894.