



陈肖,陈雪,哈斯其其格,杭盖,孟嘉晖,高智轩,王磊,玉柱.布氏乳杆菌对不同品种全株玉米青贮品质和有氧稳定性的影响[J].中国农业大学学报,2025,30(09):75-84.

CHEN Xiao, CHEN Xue, HASI Qiqige, HANG Gai, MENG Jiahui, GAO Zhixuan, WANG Lei, YU Zhu. Effect of adding *Lactobacillus buchneri* on the quality and aerobic stability of whole-plant corn silage of different varieties[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(09): 75-84.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.07

布氏乳杆菌对不同品种全株玉米青贮品质和有氧稳定性的影响

陈肖¹ 陈雪¹ 哈斯其其格² 杭盖¹ 孟嘉晖¹ 高智轩¹ 王磊¹ 玉柱^{1*}

(1. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193;

2. 内蒙古锡林郭勒盟镶黄旗林业草原事业发展中心, 内蒙古 镶黄旗 013250)

摘要 为测定不同玉米品种和添加剂对全株玉米青贮品质的影响,筛选适宜青贮的优质全株玉米品种,以‘雨禾2号’‘兴盛188’‘禾玉9566’‘先单405’4个玉米品种为原料,设置对照组(CK)、布氏乳杆菌添加组(LB)2个添加剂处理组,并采用主成分分析法进行综合评价。结果表明:各品种及添加剂处理间相比,‘雨禾2号’品种在添加布氏乳杆菌(*Lactobacillus buchneri*, LB)处理下乳酸(Lactic acid, LA)含量显著高于其他处理($P<0.05$)。各品种CK的干物质(Dry matter, DM)和淀粉(Starch, ST)含量显著低于LB处理($P<0.05$),各品种CK的中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)含量显著高于LB处理($P<0.05$)。同一品种不同添加剂处理间相比,CK的‘兴盛188’品种体外干物质消化率显著低于LB处理($P<0.05$),LB处理的‘先单405’品种体外中性洗涤纤维消化率(IVDMD)显著高于CK($P<0.05$)。全株玉米青贮饲料ADF、NDF与粗蛋白(CP)、ST含量呈显著正相关($P<0.05$),氨态氮($\text{NH}_3\text{-N}$)含量与pH、DM呈显著负相关($P<0.05$)。根据主成分分析获得的玉米青贮饲料质量得分从高到低依次是:‘雨禾2号’LB>‘先单405’LB>‘禾玉9566’CK>‘兴盛188’LB>‘禾玉9566’LB>‘先单405’CK>‘兴盛188’CK>‘雨禾2号’CK。综上,‘雨禾2号’品种添加布氏乳杆菌的全株玉米青贮品质最优,适宜在通辽地区推广应用。

关键词 布氏乳杆菌;青贮玉米品种;青贮;有氧稳定性

中图分类号 S816.53

文章编号 1007-4333(2025)09-0075-10

文献标志码 A

Effect of adding *Lactobacillus buchneri* on the quality and aerobic stability of whole-plant corn silage of different varieties

CHEN Xiao¹, CHEN Xue¹, HASI Qiqige², HANG Gai¹, MENG Jiahui¹, GAO Zhixuan¹,
WANG Lei¹, YU Zhu^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Forestry and Grassland Business Development Centre, Saihuang Banner, Xilingol League,

Inner Mongolia, Saihuang 013250, China)

Abstract To determine the effects of different corn varieties and additives on the quality of whole-plant corn silage and to screen for high-quality whole-plant corn varieties suitable for silage, the study used four corn varieties, namely ‘Yuhe2’, ‘Xingsheng188’, ‘Heyu9566’, and ‘Xiandan405’ as raw materials, and set up two additive treatment groups, namely the control group (CK) and a *Lactobacillus buchneri* (LB) group. Principal component

收稿日期: 2025-06-30

基金项目: 科左中旗国家现代农业产业园建设项目(ZG2020C0019);2023年国家草业技术创新中心(筹)重大创新平台建设专项(CCPTZX2023B07);饲用燕麦青贮加工及高效利用技术优化与示范项目(2025SZY0050)

第一作者: 陈肖(ORCID:0009-0006-1952-2193),硕士研究生,E-mail: SY20243243838@cau.edu.cn

通讯作者: 玉柱(ORCID:0000-0003-3271-1272),教授,博士生导师,主要从事饲草加工贮藏与利用方面的研究,E-mail: yuzhu33150@sina.com

analysis was employed for comprehensive evaluation. The results showed that compared with other varieties and additive treatments, the 'Yuhe2' variety had significantly higher lactic acid (LA) content under the *Lactobacillus buchneri* (LB) treatment ($P < 0.05$). The dry matter (DM) and starch (ST) contents in the CK group were significantly lower than those of the LB group ($P < 0.05$), while the neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) contents in the CK group were significantly higher than those of the LB group ($P < 0.05$). Compared with different different additives within the same variety, the lowest *in vitro* dry matter digestibility (IVDMD) content was significantly lower than that of LB treatment ($P < 0.05$) and the *in vitro* neutral detergent fiber digestibility (IVNDFD) of LB treated 'Xiandan405' variety was significantly higher than CK ($P < 0.05$). The ADF and NDF contents of whole-plant corn silage were significantly positively correlated with crude protein (CP) and ST content ($P < 0.05$), while the ammonium nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) content was significantly negatively correlated with pH and DM ($P < 0.05$). Based on principal component analysis, the quality scores of corn silage feed from highest to lowest were: 'Yuhe2' LB > 'Xiandan405' LB > 'Heyu9566' CK > 'Xingsheng188' LB > 'Heyu9566' LB > 'Xiandan405' CK > 'Xingsheng188' CK > 'Yuhe2' CK. In conclusion, the whole-plant corn silage quality of the 'Yuhe2' variety supplemented with *Lactobacillus buchneri* is the best and suitable for promotion and application in the Tongliao region.

Keywords *Lactobacillus buchneri*; whole-plant corn varieties; silage; aerobic stability

近年来,随着全球畜牧业集约化发展以及我国“粮改饲”政策的推进,我国全株玉米青贮的产量不断增加。作为反刍动物重要的粗饲料来源,全株玉米青贮凭借着收获成本低、生产风险小和营养价值高等优点成为饲料生产中一种重要而普遍的饲料原料^[1]。全株玉米青贮不仅推动了优质畜产品生产,还减轻了秸秆处理的环境压力^[2]。欧美等国家早在20世纪70年代开始推广全株玉米青贮技术,同时更注重青贮发酵工艺的标准化,通过添加乳酸菌等微生物制剂优化发酵过程,降低营养损耗。与这些畜牧业发达国家相比,我国在收获机械、品种种质以及生产销售等方面均存在一定的差距^[3-4]。近年来,我国青贮玉米的种植面积不断增加,但如何调制更多高质量的全株玉米青贮饲料,以满足畜牧业的发展需求仍是亟需解决的问题^[5]。

全株玉米品种的选择注重品质,不同玉米品种在生长习性、土壤养分吸收能力及环境适应方面存在显著差异,并且会直接影响全株玉米青贮的营养成分^[6]。代友超等^[7]通过灰色关联度分析结果表明‘登海3721’最适合在临夏地区种植。李淑君等^[8]通过V-Score评分体系评分的方法,对4个青贮玉米品种的产量及青贮品质进行综合评价,筛选出‘渝青386’为重庆地区适宜种植的青贮玉米品种。

乳酸菌添加剂是一种常见的青贮添加剂,在青贮调制过程中添加乳酸菌有助于改善青贮饲料的发酵品质,提升适口性,减少干物质损失,从而提升青贮饲料的营养价值和保存效果^[9]。布氏乳杆菌

(*Lactobacillus buchneri*, LB)是一种异型发酵乳酸菌,可以将乳酸(Lactic acid, LA)发酵为具有抗真菌特性的乙酸(Acetic acid, AA)^[10]。Wang等^[11]研究表明,添加LB可以提升高湿玉米青贮饲料的发酵品质。全株玉米青贮饲料含有较高的可溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrate, WSC),较容易发生有氧腐败^[12-13]。接种LB可以促进AA的产生,通过抑制不良微生物活动提高青贮饲料的有氧稳定性^[14]。目前关于全株玉米不同品种和添加剂对青贮品质影响的研究较少。因此,本研究通过测定4个品种的全株玉米青贮饲料的发酵品质、营养成分、体外消化率和有氧稳定性,并使用主成分分析法,探究不同品种和布氏乳杆菌对全株玉米青贮品质的影响,以期为全株玉米的品种筛选和青贮品质的提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用青贮玉米取自内蒙古通辽市科尔沁左翼中旗国家现代农业产业园区,包括‘雨禾2号’‘兴盛188’‘禾玉9566’‘先单405’4个玉米品种。收获后进行青贮调制,设置添加剂处理:1)无添加剂(CK),添加等量蒸馏水;2)布氏乳杆菌添加组(LB),添加量为 1×10^6 CFU/g,由中国农业大学牧草生产与加工利用实验室提供。

1.2 青贮调制方法

青贮玉米于2021年9月20日(蜡熟期)收获,当

地气温1~14℃。玉米收获后粉碎切短至2~3 cm,施用添加剂充分混匀后装入3 L的青贮桶中密封,青贮密度为750 kg/m³,室温发酵200 d。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 发酵品质测定

打开青贮罐后随机取20 g青贮饲料,加入180 mL纯化水用榨汁机搅碎1 min,使用4层纱布过滤得到浸出液,用于测定青贮发酵品质,包括pH、有机酸和氨态氮(Ammonia nitrogen, NH₃-N)。pH采用METTLER TOLEDO型pH计测定;使用岛津高效液相色谱仪测定青贮材料中的有机酸如LA、AA、丙酸(PA)、丁酸(BA)含量^[15],色谱柱Shodex Rspak KC-8HIS-DVB gel1 Column 30 mm×8 mm,检测器为SPD-M10AVP,流动相为3 mmol/L高氯酸,流速为1 mL/min,检测波长为210 nm,进样量为5 L;采用苯酚-氯酸钠比色法测定NH₃-N的含量^[16]。

1.3.2 营养品质测定

从青贮饲料中随机取用150 g左右,使用烘箱烘干至恒重,温度为65℃,时间为48 h。采用AOAC方法^[17],用烘干后的重量减去烘干前的质量测定干物质(Dry matter, DM)的含量。将烘干后的青贮材料粉碎过1 mm筛。取青贮料烘干过筛样品采用AOAC方法^[17]测定淀粉(Starch, ST)含量;采用凯氏定氮法^[18]测定粗蛋白质(Crude protein, CP)含量;采用Van Soest法^[19]测定中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)含量。

1.3.3 体外干物质消化率的测定

采用王莹^[20]的方法测定体外干物质消化率(IVDMD)和中性洗涤纤维消化率(IVNDFD)。在发酵第45天时开罐取样,称取0.5 g烘干粉碎后的青贮饲料样品于纤维袋中(重复3次),放入DAISY II体外模拟培养箱消化罐中,加入1 330 mL A缓冲液(10 g/L磷酸二氢钾、0.5 g/L硫酸镁、0.5 g/L氯化钠、0.5 g/L氯化钙、0.5 g/L尿素)、266 mL B缓冲液(15 g/L碳酸钠、1 g/L硫化钠)和400 mL于晨饲前采集的配备有永久瘤胃瘘管的安格斯牛瘤胃液;往消化罐中持续通入二氧化碳(CO₂)至厌氧条件,盖好盖子后放入体外模拟培养箱;在39℃下培养48 h,取出样品并用蒸馏水将纤维袋冲洗干净后烘干,计算IVDMD和IVNDFD。

1.3.4 有氧稳定性的测定

取发酵200 d的全株玉米青贮饲料500 g装入塑料自封袋中保持松散,放置于室温(25℃),将MDL-1048A多通道数据记录仪的探头插入试样的中心,每隔0.5 h测量1次温度,记录温度变化。每个自封袋覆盖2层纱布,避免杂质污染和减少水分蒸发。

1.4 数据统计

在数据整理方面,使用Excel 2016软件对所测数据进行初步汇总,然后使用SPSS 25.0对数据进行双因素方差分析,采用Duncan法对不同添加剂处理和品种的全株玉米青贮饲料贮藏品质进行多重比较,以 $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著, $P>0.05$ 表示没有显著差异。

2 结果与分析

2.1 全株玉米青贮有氧温度与pH的动态变化

有氧0~7 d环境温度稳定在25℃左右,随着全株玉米青贮有氧时间的增加,其内部温度先上升后趋于平稳(图1)。同一添加剂不同品种下,CK有氧0~3 d温度排序由高到低为‘禾玉9566’>‘雨禾2号’>‘先单405’>‘兴盛188’,LB有氧0~3 d温度排序由高到低为‘禾玉9566’>‘先单405’>‘兴盛188’>‘雨禾2号’。同一品种不同添加剂处理下,有氧1~3 d,‘兴盛188’的CK和LB温度同时超过环境温度2℃,‘雨禾2号’‘先单405’的LB有氧温度均低于CK,这意味着LB发生腐败时间晚于CK,有氧1 d‘禾玉9566’的CK超过环境温度2℃。

全株玉米青贮有氧0~3 d的pH稳定在3.8左右,各品种和添加剂均无显著差异($P>0.05$);有氧5~7 d,pH逐渐升高。CK有氧7 d,pH排序由高到低为‘雨禾2号’>‘兴盛188’>‘禾玉9566’>‘先单405’;LB有氧7 d,pH排序由高到低为‘雨禾2号’>‘兴盛188’>‘先单405’>‘禾玉9566’。

有氧暴露3 d后开始发生有氧腐败,有氧温度超过2℃,pH开始升高。有氧3 d时,‘兴盛188’‘先单405’的所有处理均未发生有氧腐败,‘雨禾2号’和‘禾玉9566’的LB处理未发生有氧腐败。

2.2 全株玉米青贮发酵品质的变化

由表1可知,本研究中全株玉米青贮pH<3.9,各处理间无显著性差异($P>0.05$)。各处理中,‘雨禾2号’品种在添加LB后LA含量最高,‘禾玉

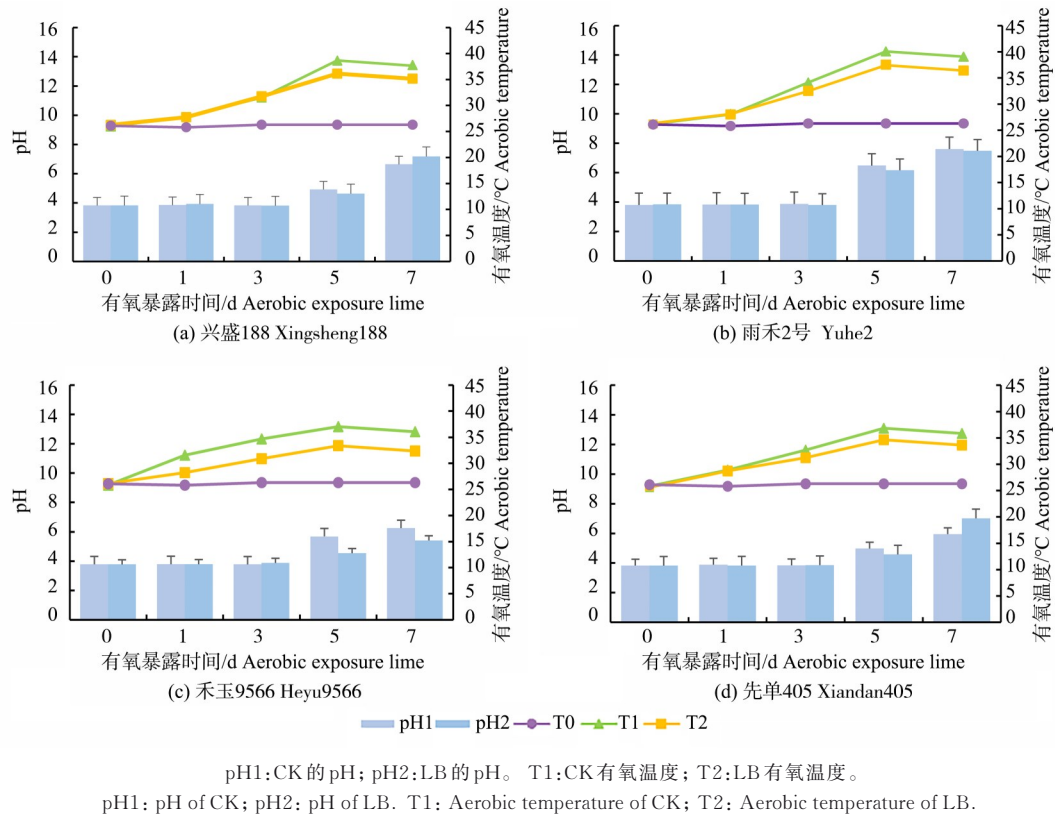


图1 全株玉米青贮有氧温度和pH的变化

Fig. 1 Changes in aerobic temperature and pH in whole corn silage

9566’的CK处理AA和NH₃-N含量最高。同一添加剂不同品种间比较发现,CK处理下‘禾玉9566’的LA、AA和NH₃-N含量显著高于‘兴盛188’‘雨禾2号’‘先单405’品种($P<0.05$),LB处理下‘雨禾2号’的LA含量显著高于‘兴盛188’‘禾玉9566’‘先单405’品种($P<0.05$)。同一品种不同添加剂处理对比发现,使用LB后‘兴盛188’‘雨禾2号’的LA、AA增加,NH₃-N下降。品种显著影响AA含量,添加剂对LA、AA和NH₃-N无显著性差异。品种和添加剂显著影响LA含量。

表1 不同品种和添加剂对全株玉米青贮发酵品质的影响					
Table 1 Effect of varieties and additives on the fermentation characteristics of whole corn silage					
处理 Treatment	品种 Variety	pH	乳酸/% Lactic acid	乙酸/% Acetic acid	氨态氮/%TN NH ₃ -N
CK	兴盛188	3.83±0.02a	4.23±0.27b	1.53±0.23b	5.57±0.64ab
	雨禾2号	3.81±0.02a	4.35±0.19b	1.80±0.13b	5.43±0.56b
	禾玉9566	3.78±0.03a	4.07±0.43b	3.82±0.35a	6.74±0.28a
	先单405	3.83±0.03a	3.94±0.65b	1.66±0.34b	4.88±0.33b
LB	兴盛188	3.83±0.02a	5.08±0.23b	2.15±0.17b	4.66±0.36b
	雨禾2号	3.85±0.01a	6.51±0.58a	2.17±0.25b	5.08±0.18b
	禾玉9566	3.77±0.03a	4.48±0.07b	2.25±0.23b	5.86±0.23ab
	先单405	3.82±0.03a	4.04±0.44b	1.57±0.12b	5.28±0.34b

注:同列数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著($P>0.05$),不同字母表示差异显著($P<0.05$)。表2和3同。
Note: In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$), while with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same as Table 2 and 3.

2.3 全株玉米青贮营养成分的变化

群组间全株玉米青贮的 CP 含量无显著性差异 ($P>0.05$),品种显著影响 CP 含量(表 2)。[‘]兴盛 188[’]添加 LB 后 DM 含量在各处理中最高,[‘]兴盛 188[’]的 CK 处理 WSC 含量最高,[‘]禾玉 9566[’]添加 LB 后 ST 含量在各处理中最高。同一添加剂不同品种间对比营养成分发现,CK 中[‘]先单 405[’]的 DM 和 ST 含量高

于其他品种,[‘]兴盛 188[’]的 NDF 和 ADF 含量显著高于其他 3 个品种;LB 中 DM、NDF 和 ADF 含量显著高于[‘]雨禾 2 号[’] [‘]禾玉 9566[’] [‘]先单 405[’]品种。同一品种不同添加剂处理的营养成分中,CK 的各品种的 DM 和 ST 含量低于 LB 处理,CK 的各品种 NDF、ADF 高于 LB。品种之间的成分存在显著性差异,DM、WSC 和 ST 有显著性差异。

表 2 不同品种和添加剂对全株玉米青贮营养品质的影响
Table 2 Effect of varieties and additives on the nutritional quality of whole corn silage

处理 Treatment	品种 Variety	干物质/% Dry matter	粗蛋白质/% Crude protein	可溶性碳水化合物/% Water soluable carbohydrate	淀粉/% Starch	中性洗涤纤维/% Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维/% Acid detergent fiber
CK	兴盛 188	28.78±0.73cd	7.72±0.02a	0.99±0.05a	28.93±0.50d	44.26±1.32a	26.18±0.85a
	雨禾 2 号	29.58±0.70bcd	7.47±0.25a	0.69±0.02bc	31.61±0.51c	37.92±0.83bc	21.23±0.62cd
	禾玉 9566	27.93±0.68d	7.49±0.12a	0.71±0.01b	31.68±0.57c	41.34±0.55ab	23.31±0.74bc
	先单 405	31.58±0.59abc	7.62±0.09a	0.94±0.05a	33.38±0.34abc	39.66±1.24bc	20.68±0.74cd
LB	兴盛 188	34.18±1.98a	7.76±0.29a	0.80±0.03b	29.04±0.34d	43.69±0.65a	25.95±0.35ab
	雨禾 2 号	32.61±1.01ab	7.16±0.07a	0.69±0.05bc	32.58±0.91bc	36.25±1.94c	20.05±1.48d
	禾玉 9566	28.90±0.32cd	7.51±0.15a	0.58±0.01c	35.20±0.73a	39.28±0.93bc	21.00±0.88cd
	先单 405	32.62±0.89ab	7.30±0.23a	0.78±0.04b	34.42±0.70ab	36.73±1.52c	19.61±0.97d

由表 3 可知,IVDMD 和 IVNDFD 群组间存在显著性差异,CK 的[‘]兴盛 188[’]品种 IVDMD 含量最低,LB 的[‘]先单 405[’]品种 IVNDFD 含量最高。同一添加剂不同品种间对比体外消化率发现,LB 的[‘]先单 405[’]品种 IVDMD 和 IVNDFD

含量高于[‘]兴盛 188[’] [‘]雨禾 2 号[’] [‘]兴盛 188[’] [‘]禾玉 9566[’]品种。可能是因为青贮后无添加剂(CK)[‘]先单 405[’]品种的 IVDMD 高于其他 3 个品种,且品种间的 IVDMD 存在显著性差异 ($P<0.05$)。

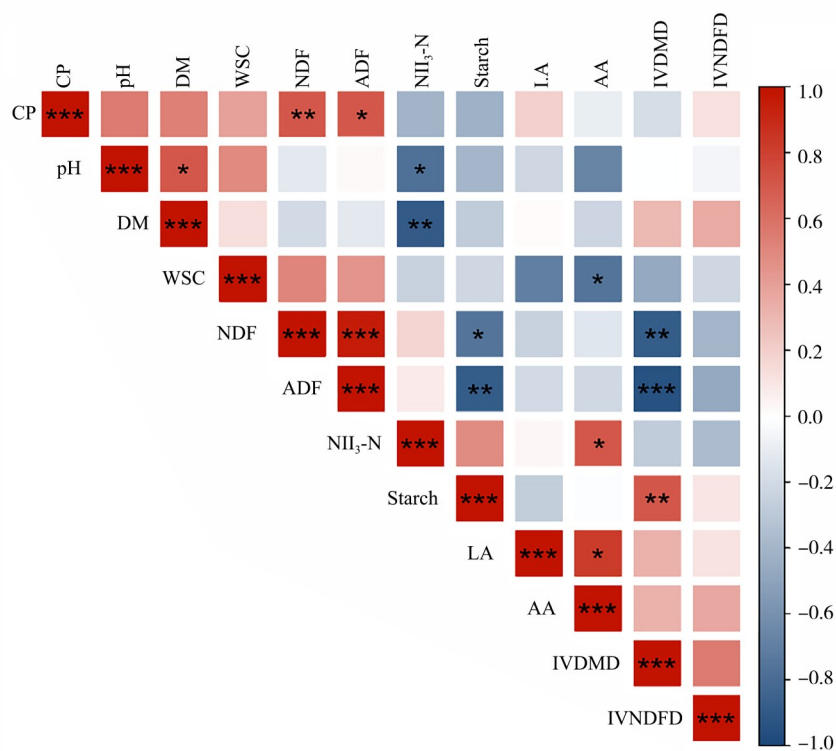
表 3 不同品种和添加剂对全株玉米青贮体外干物质消化率的影响
Table 3 Effect of varieties and additives on the *in vitro* digestibility of whole corn silage

处理 Treatment	品种 Variety	体外干物质消化率/% <i>in vitro</i> dry matter digestibility	中性洗涤纤维消化率/% <i>in vitro</i> neutral detergent fiber digestibility
CK	兴盛 188	51.83±1.75b	21.44±0.50b
	雨禾 2 号	57.72±1.07a	21.69±1.80b
	禾玉 9566	54.05±2.81ab	21.38±0.93b
	先单 405	58.96±1.73a	23.52±1.55b
LB	兴盛 188	54.21±1.26ab	23.88±2.29b
	雨禾 2 号	59.02±1.09a	22.33±0.98b
	禾玉 9566	59.19±0.94a	26.80±3.30ab
	先单 405	59.30±1.74a	29.97±1.19a

2.4 全株玉米青贮相关性分析

由图2可知, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 DM 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。NDF 与 ST 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 IVDMD 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。ADF 与 ST 呈极显著负相关

($P < 0.01$); ST 与 IVDMD 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), AA 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、LA 呈显著正相关 ($P < 0.05$), CP 与 ADF 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 NDF 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。NDF 与 ADF 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。



IVNDFD: 体外中性洗涤纤维消化率; $\text{NH}_3\text{-N}$: 氨态氮; ST: 淀粉; IVDMD: 体外干物质消化率; LA: 乳酸; AA: 乙酸; WSC: 可溶性碳水化合物; NDF: 中性洗涤纤维; ADF: 酸性洗涤纤维。*、** 和 *** 分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 。

IVNDFD: *in vitro* neutral detergent fiber digestibility; $\text{NH}_3\text{-N}$: Ammonia nitrogen; ST: Starch; IVDMD: *in vitro* dry matter digestibility; LA: Lactic acid; AA: Acetic acid; WSC: Water soluble carbohydrate; NDF: Detergent fiber; ADF: Acid detergent fiber。*、** and *** mean $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$, respectively.

图2 全株玉米青贮品质相关性热图

Fig. 2 Correlation between fermentation quality and nutrients of whole corn silage

2.5 全株玉米青贮品质主成分分析

2.5.1 主成分的标准化和贡献率

由表4可知, 本研究提取了3个特征值 > 1 的主成分, 累积贡献率达85.17%。第1主成分中 ADF、NDF、IVDMD、ST、CP、IVNDFD 和 WSC 载荷值较大, 分别为0.96、0.95、0.95、-0.88、0.83、-0.59 和 0.58, 第1主成分主要反映 NDF、ADF 和 IVDMD 含量的基本信息, 其指标可作为第1主成分代表性的评价指标。第2主成分中 WSC、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、pH、DM 和 AA 载荷值较大, 分别为0.52、-0.95、0.91、0.83 和 -0.74, 第3主成分中 IVNDFD 和 LA

载荷值较大, 分别为0.57 和 -0.82, 第3主成分主要反映 LA 含量的基本信息, 其指标可作为发酵指标、WSC 和 DM 代表性的评价指标。

2.5.2 全株玉米青贮综合评价模型综合分析

由表5可知, 第1主成分中‘先单405’CK 的得分较高, 第2主成分得分靠前的是‘兴盛188’CK, 第3主成分得分靠前的是‘先单405’CK。根据主成分综合得分不同品种和添加剂全株玉米青贮质量从高到低依次是: ‘雨禾2号’LB > ‘先单405’LB > ‘禾玉9566’CK > ‘兴盛188’LB > ‘禾玉9566’LB > ‘先单405’CK > ‘兴盛188’CK > ‘雨禾2号’CK。

表 4 全株玉米青贮主成分标准化

Table 4 Standardisation of the principal components of whole corn silage

指标 Index	主成分分析 Principal component analysis		
	y1	y2	y3
酸性洗涤纤维/% Acid detergent fiber	0.960	0.03	−0.07
中性洗涤纤维/% Neutral detergent fiber	0.950	−0.04	0.13
体外干物质消化率/% <i>in vitro</i> dry matter digestibility	−0.950	0.12	0.13
淀粉/% Starch	−0.880	−0.27	0.30
粗蛋白/% Crude protein	0.830	0.05	0.40
体外中性洗涤纤维消化率/% <i>in vitro</i> neutral detergent fiber digestibility	−0.590	0.09	0.57
可溶性糖/% Water soluble carbohydrate	0.580	0.52	0.36
氨态氮/% TN NH ₃ -N	0.100	−0.95	−0.09
pH	0.070	0.91	−0.23
干物质/% Dry matter	−0.240	0.83	−0.09
乙酸/% Acetic Acid	0.120	−0.74	−0.47
乳酸/% Lactic acid	−0.240	0.40	−0.82
特征值 Eigen value	2.240	1.87	1.30
贡献率/% Contribution rate	41.910	29.09	14.17
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	41.910	71.00	85.17

表 5 全株玉米青贮品质主成分分析综合得分

Table 5 Composite scores from principal component analysis of silage quality of whole corn silage

处理 Treatment	主成分得分 Principal component score			综合得分 Comprehensive score	排序 Ranking
	y1	y2	y3	y	
兴盛 188 CK	9.96	3.34	−37.02	−0.11	7
雨禾 2 号 CK	12.23	2.72	−37.68	0.57	8
禾玉 9566 CK	10.94	−5.62	−36.53	−2.24	3
先单 405 CK	13.18	−7.72	−35.80	−1.81	6
兴盛 188 LB	8.56	−1.77	−36.37	−2.10	4
雨禾 2 号 LB	10.09	−6.43	−40.74	−3.43	1
禾玉 9566 LB	11.88	−5.79	−37.79	−2.07	5
先单 405 LB	11.62	−7.07	−40.93	−3.00	2

3 讨 论

3.1 品种和添加剂对全株玉米青贮发酵品质的影响

pH 是衡量青贮发酵品质的重要指标，一般 pH<4.2 的青贮饲料认定为质量良好，pH 在 3.9 以下的认定为质量优等^[21]。本研究中，各处理的 pH

均在 3.9 以下，发酵品质较优。青贮过程中 pH 下降的主要原因是有机酸的产生，LA 通常在青贮饲料中含量最高，乳酸菌可以通过厌氧发酵产生 LA，其活力是青贮饲料中其他种类有机酸的 10~12 倍，因此它对发酵过程中 pH 下降的贡献最大^[21]。本研究中，添加剂对 LA、AA 和 NH₃-N 含量无显著性影

响,所以在全株玉米青贮中添加LB会略微改善其发酵品质但无显著影响。Okoye等^[22]研究表明,优质青贮饲料中的乳酸浓度为总DM的2%~4%。本研究中,所有处理的LA含量均在3.94%以上,这可能是因为全株玉米本身富含丰富的WSC,发酵底物充足,同时玉米的缓冲能值较低,较易进行青贮发酵,所以LA含量高。在青贮过程中,NH₃-N含量的升高主要是有害微生物增殖以及蛋白质降解的结果^[23],一般良好的青贮饲料NH₃-N含量不会超过10%~15%^[24]。本研究中各处理的NH₃-N含量都在7%以下,证明这4种玉米品种的蛋白质降解较少。

3.2 品种和添加剂对全株玉米青贮营养成分的影响

在生产高质量青贮饲料的过程中,如何减少DM损失是一项亟需解决的问题。研究表明,在玉米青贮中添加乳酸菌可以有效降低DM损失^[25]。在本研究中,添加LB的各处理DM显著高于CK,这与杨琪等^[26]的研究结果一致。添加乳酸菌可以促进非结构性碳水化合物如WSC的降解^[27],并产生有机酸,保证青贮饲料发酵过程顺利进行,青贮过程中WSC含量的降低属于正常现象。王磊等^[28]研究表明,添加LB显著降低了青贮饲料中WSC的含量,这与本研究的结果一致。在本研究中,添加LB后的全株玉米青贮的ST含量显著高于CK,‘禾玉9566’LB的ST含量在各处理中最高,说明添加LB可以很好地保存青贮饲料中的营养物质,这与韩芙蓉等^[29]的研究结果一致。同时,在本研究的相关性分析中,ST含量与ADF、NDF呈显著负相关,这与陈雪等^[30]的研究一致。

3.3 品种和添加剂对全株玉米青贮纤维含量和体外消化率的影响

本研究中,添加LB可以显著降低全株玉米青贮饲料NDF以及ADF的含量,这与Rossi等^[31]研究结果一致。研究表明,青贮过程中产生的有机酸可以水解植物的可消化细胞壁部分,使青贮饲料中NDF和ADF含量降低^[32],说明添加LB可以很好地降低青贮饲料中NDF和ADF含量。IVDMD和IVNDFD是反映青贮饲料饲用价值的重要指标,在本研究中,LB和CK处理‘先单405’品种IVDMD和IVNDFD含量高于‘兴盛188’‘雨禾2号’和‘禾玉9566’品种,这是因为玉米品种直接影响植株产量,并在一定程度上决定收获和发酵过程中的营养物质损失。不同品种的全株玉米在营养组分上的

差异会进一步影响其青贮发酵品质及最终的营养价值^[2]。

3.4 品种和添加剂对全株玉米青贮有氧稳定性的影响

有氧稳定性是反映牧草青贮品质的一项重要指标。大量关于青贮饲料有氧稳定性的研究结果表明,酵母菌将LA作为底物引发青贮饲料的有氧变质,添加LB可降低青贮饲料中酵母菌的数量,同时将LA缓慢地转化为AA、丙二醇和乙醇等,使pH降低,并且可显著提高青贮饲料的有氧稳定性^[31,33-34]。在青贮饲料暴露于有氧环境后,好氧微生物以WSC或LA作为底物快速增殖,使pH和温度上升^[35]。在本研究中,有氧0~3d全株玉米青贮的pH稳定在3.8左右;有氧5~7d,pH逐渐升高。不同品种之间的有氧温度变化差异较大,有氧1~3dLB组‘雨禾2号’‘先单405’‘禾玉9566’品种的有氧温度均低于CK组,添加LB可以很好地减缓有氧温度的上升,这与匡宗洋等^[36]的研究结果一致。本研究各处理的有氧稳定性保持在3d左右,说明该批青贮品质较好,这与张洪瑞等^[6]的研究结果一致。

3.5 基于全株玉米青贮品质的主成分分析

主成分分析是一种常用的多变量统计分析方法,这种方法可以减少信息冗余,提高后续综合评价模型的准确性与稳定性,并且在青贮饲料的研究中经常用于比较筛选优良的品种和综合性状评价^[8,37]。本研究中,根据主成分分析结果选出的12个指标,与评价青贮饲料质量的主要常规指标一致。将这些指标综合为3个主成分,保留了原有指标85.17%的信息,能较好地反映所有的指标。第1主成分中‘先单405’CK的得分较高,说明该添加剂下相应品种的NDF、ADF含量较高,IVDMD含量较低;第2主成分得分靠前的是‘兴盛188’CK,该添加剂和相应品种下WSC、pH和DM较高,NH₃-N和AA含量较低;第3主成分得分靠前的是‘先单405’CK,说明IVNDFD较高,LA含量较低。‘雨禾2号’LB的得分最高,说明该品种在添加LB后的发酵和营养品质良好。同时‘禾玉9566’CK排名第3,可能是添加剂的效果受到了玉米品种的影响。

4 结 论

本研究中,添加布氏乳杆菌的‘雨禾2号’品种青贮质量最好,布氏乳杆菌的添加能有效改善全株玉米青贮饲料的发酵和营养品质。综合评价得出,‘雨禾

2号’适宜在通辽地区作为青贮玉米推广种植。

参考文献 References

- [1] 郭勇庆,曹志军,李胜利,杨军香,姚琨,杨敦启.全株玉米青贮生产与品质评定关键技术:高成本玉米时代牛场技术与管理策略之一[J].中国畜牧杂志,2012,48(18):39-44
Guo Y Q, Cao Z J, Li S L, Yang J X, Yao K, Yang D Q. Key technology of whole-plant corn silage production and quality evaluation: One of the technology and management strategies of cattle farm in high-cost corn age [J]. *Chinese Journal of Animal Science* 2012, 48(18): 39-44 (in Chinese)
- [2] 和立文.全株玉米青贮品质评价及其对肉牛育肥性能和牛肉品质的影响[D].北京:中国农业大学,2017
He L W. Evaluation of whole-plant corn silage quality and its impact on beef cattle fattening performance and beef quality[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [3] 丁光省.我国青贮玉米发展现状及发展方向[J].中国乳业,2018(4):2-8
Ding G S. Present situation and development direction of silage corn in China [J]. *China Dairy Industry*, 2018(4): 2-8 (in Chinese)
- [4] 谢立荣,张国庭,托乎提·阿及德,帕热哈提江·吾甫尔,韩雪松,苏玲玲,肖海震.全株青贮玉米在草食家畜中的研究与应用[J].农业开发与装备,2019(5):105
Xie L R, Zhang G T, Tohtu A, Pazhehatjiang W, Han X S, Su L L, Xiao H Z. Research and application of whole plant silage corn in herbivorous livestock[J]. *Agricultural Development & Equipment*, 2019(5): 105 (in Chinese)
- [5] Ferraretto L F, Shaver R D, Luck B D. Silage review: Recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5): 3937-3951
- [6] 张洪瑞,陈雪,王一凡,吉方财,王磊,包锦泽,孙志强,玉柱.品种和有机肥对全株玉米青贮品质、消化特性及有氧稳定性的影响[J].饲料研究,2024,47(3):107-111
Zhang H R, Chen X, Wang Y F, Ji F C, Wang L, Bao J Z, Sun Z Q, Yu Z. Effect of variety and organic fertilizer on quality, digestibility characteristics, and aerobic stability of whole-plant corn silage[J]. *Feed Research*, 2024, 47(3): 107-111 (in Chinese)
- [7] 代友超,马越,徐美玲,房华,王瑛,贾莉,史金平,雷赵民.玉米品种和发酵剂对全株玉米青贮营养品质的影响[J].动物营养学报,2024,36(1):658-671
Dai Y C, Ma Y, Xu M L, Fang H, Wang Y, Jia L, Shi J P, Lei Z M. Effects of maize variety and starter culture on nutritional quality of whole maize silage [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(1): 658-671 (in Chinese)
- [8] 李淑君,袁亮,祁志云,杨华,付忠军.不同青贮玉米品种产量和青贮品质的综合评价[J].南方农业学报,2023,54(7):2092-2100
Li S J, Yuan L, Qi Z Y, Yang H, Fu Z J. Comprehensive evaluation on yield and silage quality of different silage corn varieties[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2023, 54(7): 2092-2100 (in Chinese)
- [9] 陶莲,孙启忠,玉柱,云鹏.乳酸菌添加剂对全株玉米和苜蓿青贮品质的影响[J].中国奶牛,2009(2):13-16
Tao L, Sun Q Z, Yu Z, Yun P. Effect of LAB additives on the quality of whole crop corn and alfalfa silages[J]. *Chinese Dairy Cattle*, 2009(2): 13-16 (in Chinese)
- [10] Driehuis F, Oude Elferink S J W H, Van Wikselaar P G. Fermentation characteristics and aerobic stability of grass silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*, with or without homofermentative lactic acid bacteria [J]. *Grass and Forage Science*, 2001, 56(4): 330-343
- [11] Wang L, Bao J Z, Zhuo X L, Li Y Q, Zhan W Y, Xie Y X, Wu Z, Yu Z. Effects of *Lentilactobacillus buchneri* and chemical additives on fermentation profile, chemical composition, and nutrient digestibility of high-moisture corn silage[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2023, 10: 1296392
- [12] 梁宇成,王文博,原现军,蔡欣宇,齐博康,鲍宇红.接种乳酸菌对全株玉米青贮饲料有氧稳定性和霉菌毒素含量的影响[J].动物营养学报,2024,36(11):7383-7393
Liang Y C, Wang W B, Yuan X J, Cai X Y, Qi B K, Bao Y H. Effects of inoculation with lactic acid bacteria on aerobic stability and mycotoxin contents in whole-plant corn silages [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(11): 7383-7393 (in Chinese)
- [13] 张庆.饲草青贮用乳酸菌的筛选及作用机理[D].北京:中国农业大学,2016
Zhang Q. Studies on screening, mechanism of action of lactic acid bacteria for forage ensiling[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [14] Ferraretto L F, Crump P M, Shaver R D. Effect of ensiling time and exogenous protease addition to whole-plant corn silage of various hybrids, maturities, and chop lengths on nitrogen fractions and ruminal *in vitro* starch digestibility[J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(12): 8869-8881
- [15] 许庆方,玉柱,韩建国,白春生,薛艳林,荀桂荣.高效液相色谱法测定紫花苜蓿青贮中的有机酸[J].草原与草坪,2007,27(2):63-65,67
Xu Q F, Yu Z, Han J G, Bai C S, Xue Y L, Xun G R. Determining organic acid in alfalfa silage by HPLC[J]. *Grassland and Turf*, 2007, 27(2): 63-65, 67 (in Chinese)
- [16] Broderick G A, Kang J H. Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and *in vitro* Media[J]. *Journal of Dairy Science*, 1980, 63(1): 64-75
- [17] Horwitz W. Official methods of analysis of AOAC International[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1995, 6(11):382
- [18] 乔艳辉,高秀芬,王洪涛,张冉,刘磊.玉米裹包湿贮技术及其应用前景[J].现代农村科技,2019(6):105-107
Qiao Y H, Gao X F, Wang H T, Zhang R, Liu L. Wet storage technology of corn silage and its application prospect [J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2019(6): 105-107 (in Chinese)
- [19] 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
- [20] 王莹.内蒙古荒漠草原主要植物营养成分含量、体外消化及产气特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019
Wang Y. In Study on nutrient content, *in vitro* digestion and gas production characteristics of main plants in Inner Mongolia Desert Steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [21] Shao T, Zhang Z X, Shimojo M, Wang T, Masuda Y. Comparison of fermentation characteristics of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum Lam*) and guineagrass (*Panicum maximum Jacq*) during the early stage of ensiling [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2005, 18(12): 1727-1734
- [22] Okoye C O, Wang Y, Gao L, Wu Y, Li X, Sun J, Jiang J. The performance of lactic acid bacteria in silage production: A review of modern biotechnology for silage improvement[J]. *Microbiological Research*, 2023, 266: 127212
- [23] Kung L, Shaver R D, Grant R J, Schmidt R J. Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages[J]. *Journal of dairy Science*, 2018, 101(5): 4020-4033
- [24] Yuan X J, Yang X, Wang W B, Li J F, Dong Z H, Zhao J, Shao T. The effects of natamycin and hexanoic acid on the bacterial community, mycotoxins concentrations, fermentation profiles, and aerobic stability of high moisture whole-crop corn silage [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2022, 286: 115250
- [25] Kleinschmit D H, Kung L. The effects of *Lactobacillus buchneri* 40788 and *Pediococcus pentosaceus* R1094 on the fermentation of corn silage[J]. *Journal*

- of Dairy Science*, 2006, 89(10): 3999-4004
- [26] 杨琪, 苏嘉琪, 张思琦, 岳嘉豪, 邹郑欣, 辛杭书. 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(4): 2772-2787
- Yang Q, Su J Q, Zhang S Q, Yue J H, Zou Z X, Xin H S. 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 (in Chinese)
- [27] Zhao J, Dong Z H, Li J F, Chen L, Bai Y F, Jia Y S, Shao T. Effects of lactic acid bacteria and molasses on fermentation dynamics, structural and nonstructural carbohydrate composition and *in vitro* ruminal fermentation of rice straw silage[J]. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 2019, 32(6): 783-791
- [28] 王磊, 包锦泽, 田逢博, 徐生阳, 谢芝潇, 冯雪莹, 吴哲, 玉柱. 布氏乳杆菌对高湿玉米青贮饲料品质的影响[J]. *饲料工业*, 2022, 43(2): 35-39
- Wang L, Bao J Z, Tian F B, Xu S Y, Xie Y X, Feng X Y, Wu Z, Yu Z. Effects of adding *Lactobacillus buchneri* on ensiling quality of high moisture corn[J]. *Feed Industry*, 2022, 43(2): 35-39 (in Chinese)
- [29] 韩芙蓉, 田贵丰, 李积友, 袁勇, 潘晓荣, 王建伟. 异质发酵型乳酸菌对全株玉米青贮饲料品质和饲用效果的影响[J]. *中国饲料*, 2023(18): 73-78
- Han F R, Tian G F, Li J Y, Yuan Y, Pan X R, Wang J W. Effects of heterofermentative lactic acid bacteria on the product quality and animal performance of whole crop corn silage[J]. *China Feed*, 2023(18): 73-78 (in Chinese)
- [30] 陈雪, 张洪瑞, 王一凡, 吉方财, 王磊, 包锦泽, 卓兴良, 贾婷婷, 玉柱. 通辽地区种植密度和添加剂对4个品种全株玉米青贮后发酵品质、营养成分和体外消化率的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(3): 1977-1986
- Chen X, Zhang H R, Wang Y F, Ji F C, Wang L, Bao J Z, Zhuo X L, Jia T T, Yu Z. Effects of planting density and additives on fermentation quality, nutrients and *in vitro* digestibility of four varieties of whole corn silage in Tongliao area[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(3): 1977-1986 (in Chinese)
- [31] Rossi L G, Andrade M E B, Rabelo C H S, Siqueira G R, Vicente E F, Silva W L, Silva M M, Reis R A. Flint corn silage management: Influence of maturity stage, inoculation with *Lentilactobacillus buchneri*, and storage time on fermentation pattern, aerobic stability, and nutritional characteristics[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1223717
- [32] Larsen S U, Hjort-Gregersen K, Vazifekhoran A H, Triolo J M. Co-ensiling of straw with sugar beet leaves increases the methane yield from straw[J]. *Bioresource technology*, 2017, 245: 106-115
- [33] Da Silva N C, Dos Santos J P, Ávila C L S, Evangelista A R, Casagrande D R, Bernardes T F. Evaluation of the effects of two *Lactobacillus buchneri* strains and sodium benzoate on the characteristics of corn silage in a hot-climate environment[J]. *Grassland Science*, 2014, 60(3): 169-177
- [34] Borreani G, Tabacco E, Schmidt R J, Holmes B. J, Muck R E. Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages[J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(5): 3952-3979
- [35] Shan G L, Maack C, Buescher W, Glenz G, Milimonka A, Deeken H, Grantz D A, Wang Y, Sun Y R. Multi-sensor measurement of O₂, CO₂ and reheating in *Triticale silage*: An extended approach from aerobic stability to aerobic microbial respiration[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 207: 1-11
- [36] 匡宗洋, 穆麟, 魏岚, 郭阳, 胥贵, 陈瑶, 石雪云, 魏仲珊, 张志飞. 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, Guo Y, Xu G, Chen Y, Shi X Y, Wei Z S, Zhang Z F. 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 Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 227-238 (in Chinese)
- [37] 任丽娟, 赵连生, 陈雅坤, 王建平, 卜登攀. 基于主成分分析和聚类分析方法综合评价东北地区不同品种全株玉米青贮饲料的青贮品质[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(8): 3856-3868
- Ren L J, Zhao L S, Chen Y K, Wang J P, Bu D P. Comprehensive evaluation of silage quality of whole corn silage for different varieties in Northeast China based on principal component analysis and cluster analysis [J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(8): 3856-3868 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 陈肖, 硕士研究生, 主要从事饲草加工与利用研究。工作期间参与制定团体标准1个, 以第一作者发表学术论文1篇。



通讯作者简介: 玉柱, 教授, 博士生导师。主要从事饲草加工贮藏与利用方面的研究, 侧重于饲草青贮技术研发与产品研制的相关内容。主持国家或省部级课题10余项, 获得省部级科技成果奖21项, 制定国家、行业地方、地方和团体标准30项, 授权专利7项。主编或参编出版著作25部, 其中主(副)编14部。发表科研论文250余篇, 其中SCI收录40余篇。