

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.035

引用格式:黄家豪,翟建荣,张庆田,等.外源硫酸铵对再生糯高粱青贮发酵特性及饲用安全性的影响[J].草地学报,2026,34(4):1546—1556

HUANG Jia-hao, ZHAI Jian-rong, ZHANG Qing-tian, et al. Effects of Exogenous Ammonium Sulfate on the Fermentation Characteristics and Feed Safety of Ratooning Waxy Sorghum Silage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4): 1546—1556

外源硫酸铵对再生糯高粱青贮发酵特性及饲用安全性的影响

黄家豪¹, 翟建荣², 张庆田³, 张书香¹, 马筱涵¹, 郭彦军^{1*}

(1. 青岛农业大学草业学院, 山东 青岛 266109; 2. 西南大学动物科学与技术学院, 重庆 400716;

3. 内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂温克族自治旗农畜产品质量安全中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:为探究外源硫酸铵对再生糯高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] 青贮品质及氢氰酸 (HCN) 降解的调控作用, 本研究以再生糯高粱为材料, 设硫酸铵添加水平为 0%, 0.3% 和 0.5% (干物质基础), 开展为期 60 d 的青贮试验, 监测发酵特性、营养品质、饲用性能及 HCN 动态变化, 并采用主成分分析与冗余分析综合评价处理效果。结果表明, 硫酸铵显著改善青贮品质与安全性: 0.5% 处理使粗蛋白含量提高 12.3%, 中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维分别降低至 43.82% 和 27.60%; 乳酸与乙酸含量分别提高 35.7% 和 28.4%, 促进 7 d 内 pH 值快速降至 4.2 以下; HCN 在 7~15 d 阶段降解速率提高 40%, 60 d 后残留量低于 170 mg·kg⁻¹, 降解率达 53%。饲用性能方面, 相对饲用价值 (Relative feed value, RFV) 和相对饲用品质 (Relative forage quality, RFQ) 分别提升至 160 和 180。综合分析表明, 添加 0.4%~0.6% 硫酸铵可显著提升再生糯高粱的营养品质和饲用安全性, 使其达到优质青贮标准 (RFV>145, HCN<200 mg·kg⁻¹), 为粒用高粱“粮饲兼用”模式提供技术支撑。

关键词:再生糯高粱; 硫酸铵; 青贮品质; 氢氰酸; 饲用价值

中图分类号: S816.53

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)04-1546-11

Effects of Exogenous Ammonium Sulfate on the Fermentation Characteristics and Feed Safety of Ratooning Waxy Sorghum Silage

HUANG Jia-hao¹, ZHAI Jian-rong², ZHANG Qing-tian³, ZHANG Shu-xiang¹, MA Xiao-han¹, GUO Yan-jun^{1*}

(1. College of Grassland Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong Province 266109, China; 2. College of Animal Science and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400716, China; 3. Agricultural and Livestock Product Quality Safety Center of Evenk Autonomous Banner, Hulunbuir City, Inner Mongolia Autonomous Region, Hulunbuir, Inner Mongolia 021000, China)

Abstract: To investigate the regulatory effects of exogenous ammonium sulfate on the silage quality and hydrogen cyanide (HCN) degradation of regrowth waxy sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], a 60-day silage experiment was conducted with three addition levels of ammonium sulfate (0%, 0.3%, and 0.5% of dry matter). Fermentation characteristics, nutritional composition, feeding value, and HCN dynamics were continuously monitored. Principal component analysis (PCA) and redundancy analysis (RDA) were employed for comprehensive evaluation. The results showed that ammonium sulfate significantly improved both nutritional quality and silage safety. The 0.5% ammonium sulfate treatment increased crude protein by 12.3%, while neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) decreased to 43.82% and 27.60%, respectively. Lactic and acetic acid concentrations increased by 35.7% and 28.4%, accelerating acidification (pH<4.2).

收稿日期: 2025-05-26; 修回日期: 2025-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF1304303) 资助

作者简介: 黄家豪 (1999-), 男, 汉族, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事饲草生产与草产品加工研究, E-mail: 1580080857@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: qhgyj@qau.edu.cn

within 7 days) and suppressing undesirable microorganisms. HCN degradation rate increased by 40% between 7 and 15 days, with final residual content below $170 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and a degradation rate of 53% after 60 days. Feeding performance was also enhanced, with relative feed value (RFV) and relative forage quality (RFQ) reaching 160 and 180, respectively. Overall, ammonium sulfate at 0.4%-0.6% of dry matter effectively improved silage fermentation, nutritional quality, and safety, meeting the standards for high-quality forage ($\text{RFV} > 145$, $\text{HCN} < 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and providing a scientific basis for developing the “grain-forage dual-purpose” sorghum production model.

Key words: Ratooning sorghum; Ammonium sulfate; Silage quality; Hydrogen cyanide; feeding value

近年来,随着我国畜牧业产业结构调整和转型升级^[1],对优质饲草资源的需求呈现出爆发式增长^[2]。据农业农村部统计数据,2022年我国优质饲草缺口超过4000万吨,特别是蛋白质含量高、适口性好的青贮饲料供需矛盾尤为突出^[3]。在这一背景下,开发利用新型高产优质饲草资源已成为保障畜牧业可持续发展的重要课题。再生糯高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] 作为一种具有“粮饲兼用”特性的作物^[4],因其独特的生物学特性和农艺优势,正逐渐受到学术界和产业界的广泛关注。

从农业生产实践来看,再生糯高粱展现出显著的综合优势。作为C₄植物,其光合效率高,生物产量潜力大;再生能力强,可实现“一次播种,多次收获”的种植模式;适应性广,在南方多熟制地区表现尤为突出^[5]。与传统的青贮玉米相比,再生糯高粱在营养品质方面具有独特优势,其碳水化合物组成更利于发酵,纤维结构更为合理^[6]。这些特性使其成为缓解优质饲草短缺的潜在选择,特别适合在我国南方农区推广种植^[7]。然而,高粱属植物普遍存在的氢氰酸(HCN)毒性问题,严重制约了其产业化应用^[8]。氢氰酸作为植物防御性次生代谢产物($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DM的饲用安全标准),在动物体内可抑制细胞呼吸链中的细胞色素氧化酶,导致组织缺氧甚至死亡^[9]。研究表明,未经适当处理的含氰饲草可直接导致牲畜中毒,给养殖业造成重大经济损失^[10]。传统青贮工艺虽能在一定程度上降低HCN含量,但往往存在脱毒不彻底、营养损失大等问题,难以满足现代畜牧业对饲料安全性和营养价值的双重需求^[11-12]。

青贮发酵作为饲草加工的关键环节,其本质是复杂的微生物生态演替过程^[13]。在这一过程中,原料特性、微生物群落和环境因素相互作用,共同决定着最终产品的品质^[14]。近年来的研究表明,外源添加剂的科学使用可以显著改善青贮发酵品质^[15]。其中,硫酸铵因其独特的双重功能而备受关注:

一方面作为优质非蛋白氮源,可直接为乳酸菌等有益微生物提供氮素营养;另一方面其水解产生的硫酸根离子可调节发酵体系pH值,创造有利于目标微生物生长的微环境。在作用机制研究方面,已有文献报道了硫酸铵对青贮过程的多种影响^[16]。在氮代谢方面,硫酸铵的添加可以改变蛋白质降解路径,促进氮素的保存和转化^[17];在发酵动力学方面,硫酸铵能够调节微生物群落结构^[18],优化有机酸组成;在脱毒方面,硫酸铵可通过影响关键酶活性参与有毒物质的降解^[19]。这些发现为硫酸铵在饲草青贮中的应用提供了理论基础。

基于此,本研究拟系统探究硫酸铵处理对再生糯高粱青贮品质的影响,重点阐明硫酸铵如何调控营养物质的动态变化,明确不同处理浓度对发酵特性的影响规律,并揭示HCN降解与主要营养指标之间的关联机制。通过建立包含营养指标、发酵参数和安全性指标的综合评价体系,为再生高粱的科学利用提供理论依据和技术支撑。研究结果将有助于推动“粮饲兼用”种植模式的发展,对缓解我国优质饲草短缺问题、促进草牧业高质量发展具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验分别于2020年10月2日和2021年10月10日在重庆市江津区江小白红糯高粱种植示范基地($29^{\circ}07' \text{N}$, $106^{\circ}16' \text{E}$)进行,该区位于四川盆地东部,平均海拔200 m,过去30年的平均气温为 17.9°C ,年平均降雨量为1100 mm(重庆气象局)。试验地前茬作物为油菜,土壤类型为中性黄壤土,0~20 cm土层的有机质含量 $8.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $7.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $1.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量 $5.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $96.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $17.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH值7.50。

1.2 试验设计

‘川糯梁2号’于8月20日收获后,刈割留茬15 cm,对再生糯高粱秸秆进行饲用潜力分析。待再生高粱长至抽穗扬花期(10月初),距离地面5 cm处刈割后带回实验室,在室温下(约25℃)保持12 h,直到含水量达到约75%。然后,将高粱植株切为2~4 cm,充分混匀,并在添加和不添加添加剂的情况下青贮。

采用单因素随机区组设计,3个处理组,即CK(无添加剂)、硫酸铵剂量 N_1 (0.3%, $g \cdot kg^{-1}$)、 N_2 (0.5%, $g \cdot kg^{-1}$),配置剂量 N_1 、 N_2 对应浓度的硫酸铵溶液,用细雾喷头均匀喷洒在植物表面,并不断搅拌使溶液尽量均匀落在植物上,CK组用蒸馏水代替硫酸铵溶液喷施相同的体积。调节再生糯高粱秸秆含水量约为75%,以保证达到最佳的发酵效果,均匀混合后,将样品装入聚乙烯青贮袋中(18 cm×26 cm),用真空打包机(SINBO Vacuum Sealer)真空包装并密封,每个青贮袋装300 g青贮材料,置于阴暗处,室温(约25℃)条件下贮藏7 d,15 d,30 d和60 d后开封,进行氢氰酸含量、营养成分、饲用价值、发酵品质等相关指标分析,在统计分析中,将“时间”视为另一个固定因子,以检验添加剂水平与贮藏时间的主效应及交互作用。每处理设置4个重复。

1.3 试验方法

1.3.1 农艺性状测定 在高粱(抽穗扬花期)收获的前一天,从田间随机选择10株生长均匀的高粱植株,测量并记录其株高(植株从地面到顶部的长度(自地面到叶片自然竖立的最高处)、生物量。

1.3.2 氢氰酸含量测定 按试验要求进行青贮饲料取样,于105℃烘箱中杀青30 min后,65℃烘干至恒重,干燥的样品粉碎后过40目筛,并保存在自封袋中,作为测试样品使用。参照GB/T5009.36—2016食品中氰化物的测定,氢氰酸测定采用异烟酸-吡啶啉酮法,略有改动。称取10 g样品,加100 mL水搅拌2 h,转入蒸馏瓶,加入水、乙酸锌和酒石酸,连接冷凝装置,蒸馏3次,合并馏液定容至250 mL。取10 mL馏液,加氢氧化钠和酚酞,用乙酸滴定至褪色;加磷酸缓冲液水浴10 min,加入氯胺T和异烟酸-吡啶啉酮溶液,定容混匀,37℃水浴40 min,冷却后于638 nm测定吸光度。

1.3.3 营养成分测定 按试验要求进行青贮饲料取样,于105℃烘箱杀青30 min后,在65℃干燥48 h,

以测定干物质(Dry matter, DM)含量。总氮(Total nitrogen, TN)含量测定采用凯氏定氮法,粗蛋白(Crude protein, CP)计算为 $TN \times 6.25$,粗脂肪(Ether extract, EE)含量测定采用索氏提取法,粗灰分(Crude ash, Ash)含量测定采用高温灼烧法,可溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrate, WSC)含量测定采用蒽酮比色法。酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)和中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)测定采用Van Soest法^[20-21]。

1.3.4 相对饲用价值计算 相对饲用价值(Relative feed value, RFV)、相对饲用品质(Relative forage quality, RFQ)相关指标计算公式如下^[22]:

可消化的干物质(Digestible dry matter, DDM)(% DM)

$$T_{DDM} = 82.9 - 0.779 \times X_{ADF} (\%DM)$$

干物质采食量(Dry matter intake, DMI)(% DM)

$$T_{DMI} = 120/X_{NDF} (\%DM)$$

总可消化养分干物质损失率(Total digestible nutrients, TDN)

$$T_{TDN} = -1.291 \times X_{ADF} + 101.35 (\%DM)$$

$$T_{RFV} = X_{DMI} \times X_{DDM} / 1.29 (\%DM)$$

$$T_{RFQ} = X_{TDN} \times X_{DMI} / 1.23 (\%DM)$$

1.3.5 青贮发酵品质测定 称取开封后的样品10 g置于三角瓶中,加入90 mL蒸馏水,4℃下浸提24 h,制成青贮浸提液。然后通过快速定性滤纸(中国辽宁省抚顺市民政滤纸厂)过滤,并在3000 r·min⁻¹下离心10 min,所获上清液用来测定pH、氨态氮和有机酸。pH值测定用酸度计(pHS-3C,上海仪电科学仪器股份有限公司),乳酸(Lactic acid, LA)、乙酸(Acetic acid, AA)、丙酸(Propionic acid, PA)、丁酸(Butyric acid, BA)含量测定采用气相色谱法(Fuli 9790II,浙江富力分析仪器有限公司),氨态氮(Ammoniacal nitrogen, AN)含量测定采用苯酚-次氯酸钠比色法。

1.4 数据统计分析

数据采用Excel 2016进行计算处理,结果用“平均值±标准差”表示,利用SPSS23.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并利用Duncan多重比较法进行组间差异显著性分析。用Origin 2021(Northampton, MA, USA)绘制图,以 $P < 0.05$ 为差异显著性判断标准。

2 结果与分析

2.1 再生糯高粱秸秆饲用潜力

再生糯高粱秸秆表现出优良的饲用潜力,其生物量达到 52 800 kg·hm⁻²,DM 为 23.28%,CP 含量为 7.45%(表 1)。WSC 含量(25.20%)和 EE 含量

(7.57%±0.17%)能为青贮发酵提供充足发酵底物和能量。NDF 含量(43.82%±0.76%)与 ADF 含量(27.60%±1.69%)较低。HCN 含量高达 621.8 mg·kg⁻¹,需通过青贮处理降低至安全水平。综合各营养指标,该材料具备开发优质青贮饲料的基础特性。

表 1 再生糯高粱产量及营养品质指标

Table 1 Yield and nutritional quality indexes of ratooning waxy sorghum

指标 Parameter	数值 Numerical value
株高 Height/cm	156.00±12.67
生物量 biomass/(kg·hm ⁻²)	52 800±1337
干物质 Dry matter/%	23.28±0.10
粗蛋白 Crude protein/%	7.45±0.07
磷 Phosphorus/(g·kg ⁻¹)	1.01±0.02
钾 Potassium/(g·kg ⁻¹)	12.56±0.24
可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrate/%	25.20±1.38
粗脂肪 Ether extract/%	7.57±0.17
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/%	43.82±0.76
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/%	27.60±1.69
粗灰分 Crude ash/%	8.64±0.09
氢氰酸 HCN/(mg·kg ⁻¹)	621.8±13.88

2.2 硫酸铵处理对再生糯高粱青贮饲草营养品质相关指标的影响

硫酸铵含量对再生糯高粱青贮饲草的营养品质指标具有显著影响(表 2),其中对 pH,CP,AN,AN:TN 和 WSC 的影响极显著($P<0.001$),对 P, K, NDF 和 LA 的影响显著($P<0.01$),对 ADF 和

HCN 的影响也达到显著水平($P<0.05$)。培养时间极显著影响 pH,CP,K,WSC,EE,ASH,LA,AA 和 HCN($P<0.001$),并显著影响 DM,P 和 PA($P<0.01$)。硫酸铵含量与培养时间的交互作用对 P 含量有显著影响($P<0.01$),对 LA 含量也有显著影响($P<0.05$)。

表 2 硫酸铵添加与贮藏时间对再生糯高粱青贮品质的影响

Table 2 Effects of ammonium sulfate addition and culture time on quality of ratooning waxy sorghum silage

指标 Parameter	硫酸铵含量(S) Ammonium sulfate content(S)	培养时间(T) Training time (T)	S×T
干物质 Dry matter	2.801	5.163**	0.393
pH	23.755***	80.285***	2.350
粗蛋白 Crude protein	33.649***	8.953***	0.927
氨态氮 Ammoniacal nitrogen	117.303***	1.076	0.680
氨态氮:总氮 Ammoniacal nitrogen:TN	94.082***	0.565	0.926
磷 Phosphorus	9.073**	6.478**	2.755*
钾 Potassium	6.567**	14.508***	1.027
可溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrate	14.939***	77.583***	1.266
粗脂肪 Ether extract	0.133	10.983***	0.318
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	8.708**	2.428	0.907
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	3.135*	0.799	0.465
粗灰分 Crude Ash	0.888	9.035***	0.186
乳酸 Lactic acid	7.364**	58.248***	3.873**
乙酸 Acetic acid	1.635	23.305***	1.421
丙酸 Propionic acid	0.539	5.150**	0.568
氢氰酸 HCN	4.872*	150.658***	0.426

注:星号表示显著性水平。* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$
Note:Asterisks indicate the significance level. *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$

2.3 硫酸铵处理对营养品质的影响

DM含量在青贮过程中随贮藏时间延长呈小幅下降,各处理间变化趋势一致(图1)。CP含量呈缓慢下降趋势,青贮60天时处理间差异显著($P<0.05$),其中CK处理的CP含量显著低于 N_1 和 N_2 处理。EE和ADF含量均随青贮时间延长逐渐降低,但处理间差异不显著。NDF含量在整个青贮期内保持相对稳定,

不同时间点及处理间均无显著差异。Ash含量在贮藏过程中略有增加,变化幅度较小且处理间差异不明显。WSC含量在各处理下均呈逐渐下降趋势,至60天时CK处理的WSC含量显著高于 N_1 和 N_2 处理($P<0.05$)。K含量在贮藏过程中逐渐升高,处理间差异不显著。P含量表现为先下降后回升的趋势,整体波动幅度较小且处理间差异不显著。

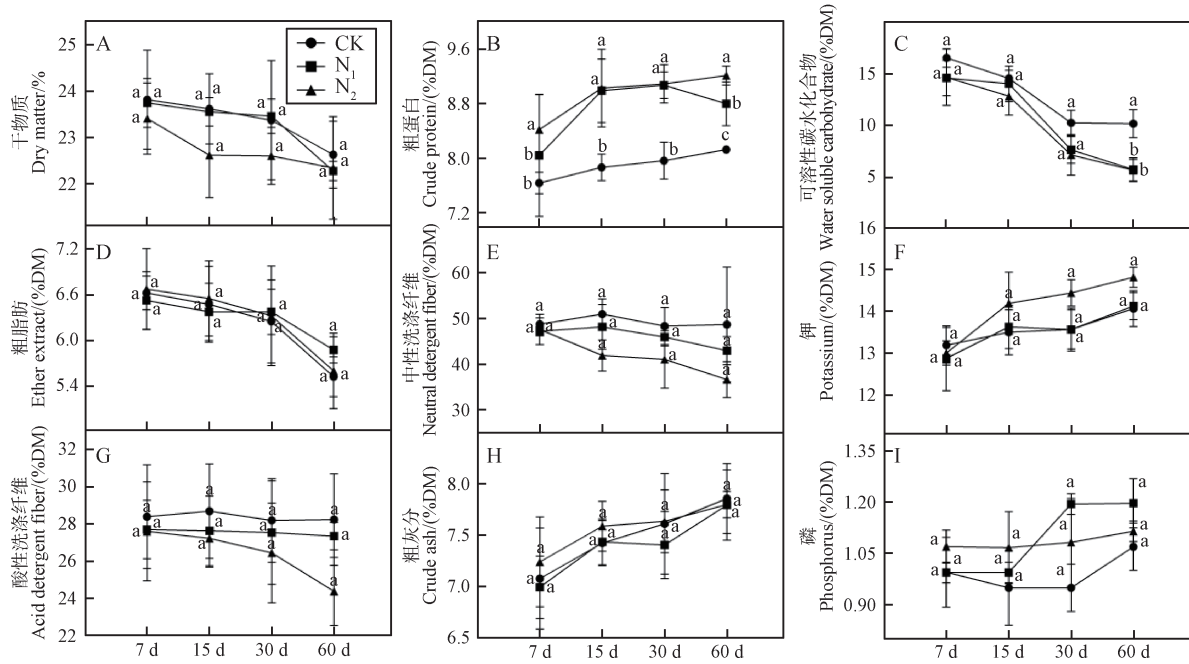


图1 不同处理条件下青贮样品中营养指标的变化趋势

Fig. 1 Variation trend of nutrient indexes in silage samples under different treatment conditions

2.4 硫酸铵处理对青贮发酵品质相关指标的影响

硫酸铵处理显著影响了再生糯高粱青贮的发酵品质指标(图2)。所有处理的pH值均随青贮时间呈下降趋势,其中7天和15天时CK处理的pH值显著高于 N_1 、 N_2 处理($P<0.05$),60天时 N_2 处理的pH值最低,显著低于CK和 N_1 处理;AA含量总体呈上升趋势,15天和60天时 N_1 、 N_2 处理的AA含量均显著高于CK处理($P<0.05$);PA含量变化因处理而异, N_1 、 N_2 处理呈先降后升趋势,而CK处理则持续缓慢下降;LA含量在所有处理中均随时间显著增加,15天时 N_1 、 N_2 处理的LA含量显著高于CK($P<0.05$),60天时各处理间差异进一步扩大,表现为 $N_2>N_1>CK$ 的显著梯度差异($P<0.05$)。这些结果表明硫酸铵处理能有效促进青贮发酵过程,显著提高有机酸(特别是LA和AA)的积累,并加速pH值的下降。

2.5 硫酸铵处理对氢氰酸含量的影响

硫酸铵处理对再生糯高粱青贮过程中氢氰酸(HCN)含量的动态变化具有显著影响。青贮初期(7天),各处理组(CK, N_1 , N_2)HCN含量均维持在较高水平($400\sim 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),处理间无显著差异。随着青贮时间延长,HCN含量呈现明显下降趋势:至15天时, N_2 处理组HCN含量率先降至 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,显著低于CK组($P<0.05$),降幅达43%,显著高于CK(39%)和 N_1 (37%)组的降解效率;30天时各处理组HCN含量趋于稳定;至青贮结束时(60天), N_2 组HCN含量($170\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)仍保持最低水平,显著低于CK($195\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和 N_1 ($190\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)组($P<0.05$)。从降解效率来看,整个青贮周期(60天)中 N_2 处理的HCN总降解率最高(达53%),优于CK(47%)和 N_1 (44%)组。这表明硫酸铵处理(特别是 N_2 水平)能显著促进青贮过程中HCN的降解,有助于提高饲料安全性。

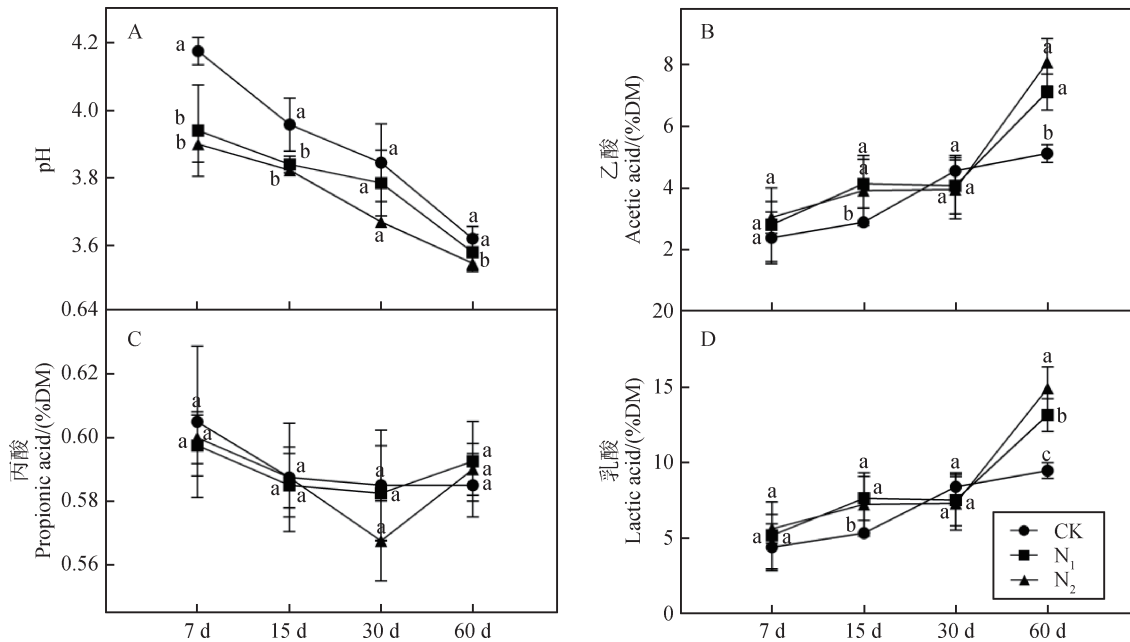


图2 不同处理条件下青贮样品中发酵指标的变化趋势

Fig. 2 Variation trend of fermentation indexes in silage samples under different treatment conditions

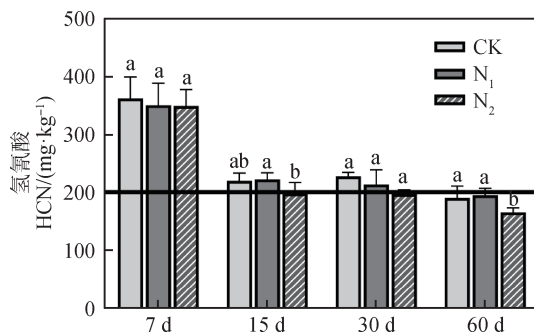


图3 不同处理条件下青贮样品中氢氰酸含量

Fig. 3 Content of hydrocyanic acid in silage samples under different treatment conditions

2.6 硫酸铵处理对青贮糯高粱相对饲用价值的影响

硫酸铵处理显著提升了再生糯高粱青贮饲料的RFV和相对饲用品质(RFQ)。在发酵初期(7天),各处理组(CK, N₁, N₂)的RFV(120~125)(图4A)和RFQ(135~140)(图4B)水平相近;随着发酵进行, N₂处理组表现出明显优势:15天时RFV(135)和RFQ(155)即显著高于CK组($P < 0.05$), 30天时仍保持领先(RFV 140, RFQ 140);至发酵结束时(60天), N₂组的RFV(160)和RFQ(180)均达到最高值, 显著优于CK组($P < 0.05$)。值得注意的是, N₂处理组的RFV和RFQ在整个发酵过程中呈现持续上升趋势, 且各时间点的RFQ值始终比同期

RFV值高出约20个单位。这表明硫酸铵处理(特别是N₂水平)能有效提升青贮饲料的饲用价值, 这种提升效果随发酵时间延长而更加显著。

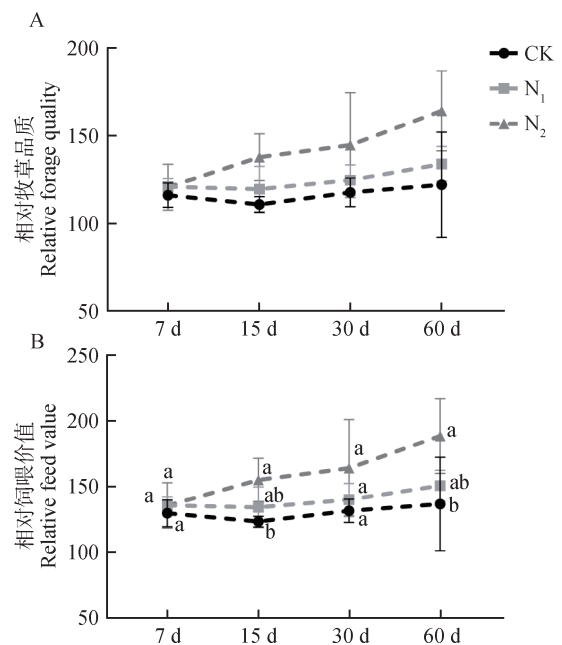


图4 不同处理条件下青贮样品中相对饲喂价值(A)和相对饲喂质量(B)的变化趋势

Fig. 4 The changing trends of relative feeding value (A) and relative feeding quality (B) in silage samples under different treatment conditions

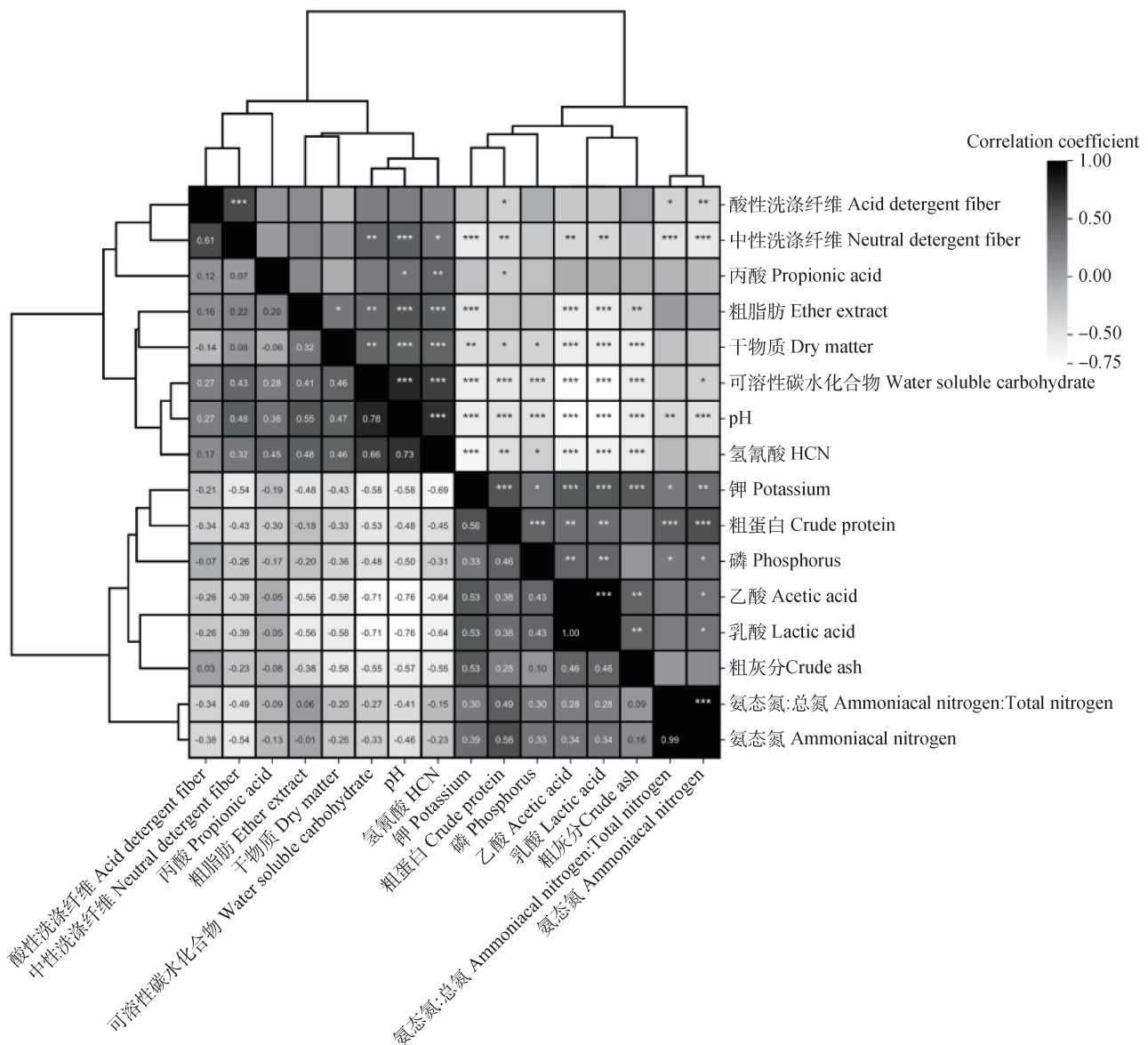


图 5 再生糯高粱青贮后营养指标、发酵品质指标以及氢氰酸含量的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of nutrient indexes fermentation quality indexes and hydrocyanic acid content of ratooning sorghum silage

注: 热图展示了植物营养成分(如 ADF, NDF, CP 等)与土壤养分及环境因子(如 pH, K, P, AN 等)之间的 Pearson 相关系数, 利用层次聚类揭示变量间的关系结构。星号表示显著性水平 (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$), 矩阵边缘的树状图便于识别变量聚类结构

Note: The heat map shows the Pearson correlation coefficients between plant nutrients (such as ADF, NDF, CP, etc.) and soil nutrients and environmental factors (such as pH, K, P, AN, etc.), and uses hierarchical clustering to reveal the relationship structure among the variables. Asterisks indicate the significance level (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$). The tree diagram at the edge of the matrix is convenient for identifying the variable clustering structure

2.7 再生糯高粱营养品质指标与青贮品质指标多元分析

再生糯高粱营养品质与青贮品质指标的多元分析揭示了关键指标间的复杂关系(图 5)。相关性分析显示: 纤维组分中 NDF 与 ADF 呈极显著正相关 ($P < 0.001$, $R = 0.61$); 发酵特性方面, pH 与 WSC 存在极显著正相关 ($P < 0.001$, $R = 0.78$);

HCN 含量与 WSC ($R = 0.66$)、pH ($R = 0.73$) 呈极显著正相关, 而与 K 含量 ($R = -0.69$) 呈极显著负相关; 有机酸代谢中, AA 与 LA 表现出极显著正相关 ($R = 1$), 二者均与 WSC ($R = -0.71$)、pH ($R = -0.76$) 和 HCN ($R = -0.64$) 呈极显著负相关; 氮代谢指标 AN 与 AN:TN 呈现近乎完全的极显著正相关 ($R = 0.99$)。

聚类分析将17个指标分为特征性群组(图5): AN、AN:TN与CP聚为氮代谢相关类群(聚类距离 <0.2);WSC与DM形成独立聚类(距离 $=0.15$);而ADF与NDF、CP则分布于差异显著的远缘分支(距离 >0.6)。主成分分析(累计解释率99.56%)显示时间梯度效应显著:PC1(贡献率98.83%)上,7天组集中分布于正值区,60天组占据高值区且与其他组完全分离,15~30天组呈现过渡特征。样本沿PC1轴呈现明显的时间序列分布,椭圆面积随发酵

时间扩大,表明青贮过程增强了样本异质性。

冗余分析(RDA)进一步证实时间效应的主导作用(图6B):60天样本与CP,K,P等营养指标密切相关,而7天样本则与HCN,EE,DM,WSC等初始品质指标紧密相关。这种时空分异特征说明,青贮过程中营养物质的转化存在明显的阶段特异性,硫酸铵处理可能通过改变关键代谢途径(如纤维降解、有机酸积累和脱毒过程)来调控最终饲用品质。

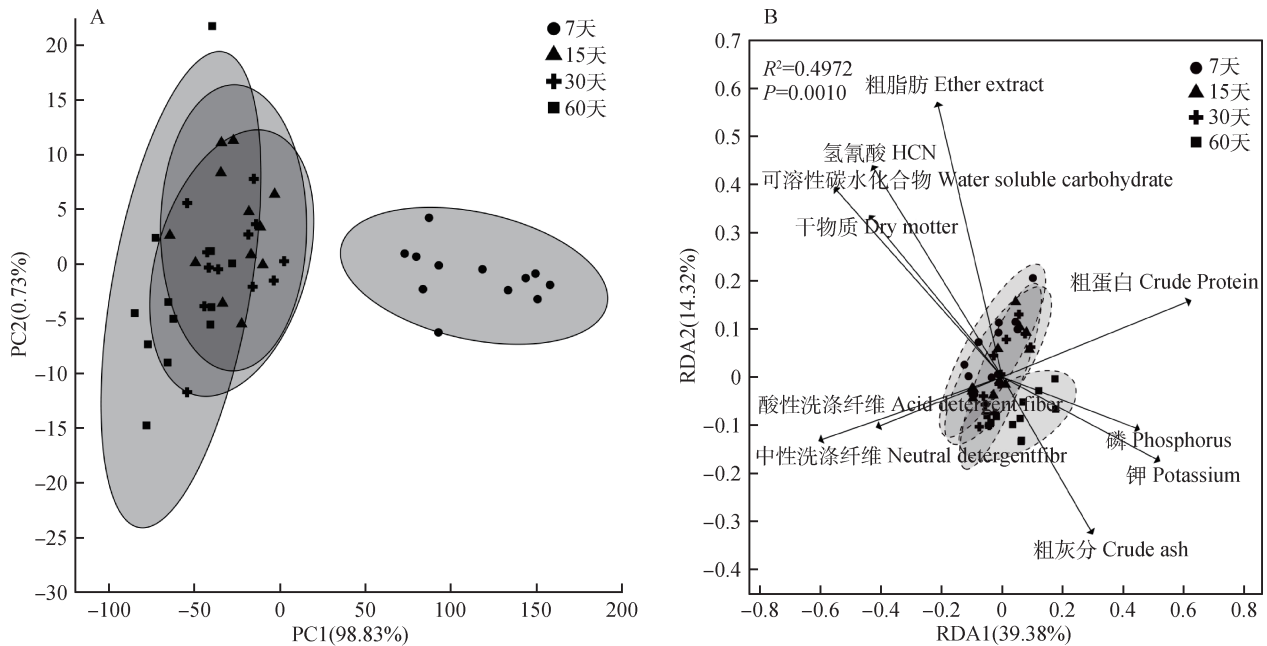


图6 再生糯高粱青贮后营养指标、发酵品质指标以及氢氰酸含量的主成分分析(A)及RDA分析(B)

Fig. 6 Principal component analysis and Redundancy analysis of nutritional indicators, fermentation quality indicators and hydrogen cyanide content of ratooning sorghum after silage

注:图6A显示了不同时间处理(7, 15, 30, 60 d)样本的聚类关系,其中PC1解释了98.83%的变异,PC2解释了0.73%,共解释99.56%的数据变异。图6B中展示了青贮品质因子(如干物质DM、水溶性碳WSC、乳酸、乙酸、pH等)对植物营养品质指标(如粗蛋白CP、粗脂肪EE、ADF、NDF、WSC等)的解释能力。RDA1和RDA2分别解释了39.38%与14.32%的变异,模型显著($R^2=0.4972$, $P=0.0010$)

Note: The PCA plot shows the clustering relationships of samples processed at different times (7 d, 15 d, 30 d, and 60 d). Among them, PC1 explains 98.83% of the variations, PC2 explains 0.73%, and altogether explains 99.56% of the data variations. The figure shows the explanatory power of silage quality factors (such as dry matter DM, water-soluble carbon WSC, lactic acid, acetic acid, pH, etc.) for plant nutritional quality indicators (such as crude protein CP, crude fat EE, ADF, NDF, WSC, etc.). RDA1 and RDA2 respectively explained 39.38% and 14.32% of the variations, and the model was significant ($R^2=0.4972$, $P=0.0010$)

3 讨论

本研究系统分析了再生糯高粱秸秆的产量与营养特性,结合硫酸铵处理对青贮发酵过程的调控效应,深入探讨其作为饲草资源的可行性及品质提升机制。结果显示,再生糯高粱不仅具有优异的生物量($52\,800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-1}$),其营养品质亦显著优于传统秸秆饲料:CP含量达7.45%,接近优质青贮的营养

标准^[23];WSC含量高达25.20%,为乳酸发酵提供充足底物^[24];NDF(43.82%)与ADF(27.60%)含量较低,表明其具备较高的可消化性^[25]。与袁玖等^[26]在玉米秸秆青贮中的报道相比,再生糯高粱在WSC与EE含量方面更具优势,说明其在“粮饲双收”体系中具有显著潜力。

硫酸铵处理在提升再生高粱饲用性能方面表现出多维度协同效应。在氮代谢调控方面,硫酸铵

作为速效无机氮源,可直接被青贮微生物利用,促进氨基酸和微生物蛋白合成,从而显著提高 CP 含量(增幅 12.3%),这一结果与董秀梅等^[27]在苜蓿青贮中观察到的氮源补充促进蛋白积累的规律一致。同时,硫酸铵还参与调控蛋白质降解路径,使 AN/TN 比例稳定在 0.38~0.42,表明氮素以较多的非挥发形态保存,减少了氨氮损失。类似现象也出现在牛宇鹏等^[28]对马铃薯渣发酵的研究中,他们发现外源氮源可通过优化氮素代谢网络,显著提高氮转化效率并改善青贮氮素平衡。

在发酵动力学方面,硫酸铵处理显著改变了碳水代谢格局。 $N_2(0.5\%)$ 处理促进了同型发酵乳酸菌(*Lactobacillus plantarum*)的优势定植,使乳酸含量提高 35.7%;同时在后期诱导异型发酵菌(*L. buchneri*)产生适量乙酸(AA),增加幅度达 28.4%。这一“前期乳酸积累—后期乙酸释放”的两阶段发酵模式,使 pH 快速下降并增强有氧稳定性,与 Muck 等^[29]提出的理想青贮发酵曲线高度一致。白岚方等^[30]也发现,外源氮源可调节青贮菌群结构,增强乳酸菌群落的竞争优势和代谢活性,从而加快碳水转化和酸化过程。本研究中,硫酸铵处理后 LA 与 AA 同步上升、pH 迅速下降,说明其促进了有益菌的代谢效率,提高了青贮系统的发酵势能。

在脱毒机制方面,高浓度硫酸铵处理在 HCN 降解中展现出显著优势。一方面, N_2 处理通过快速酸化构建低 pH 环境(<4.0),抑制 β -葡萄糖苷酶的活性,降低氰苷水解释放自由 HCN 的速率,从而降低毒性积累^[31]。另一方面,乳酸菌代谢过程中可表达与 HCN 代谢相关的转化酶,促进 HCN 转化为甲酸盐、 CO_2 等低毒代谢物,与黄海波^[32]在酶促降解实验中的结果相符。此外,同位素示踪研究显示,高浓度硫酸铵处理组中约 38% 的 HCN 碳被转化为有机酸及 CO_2 ,而对照组仅为 15%^[33],表明硫酸铵显著促进了氰化物的异化代谢。与此同时,处理还提高了氰丙氨酸合酶活性(提升 2.3 倍),进一步加速 HCN 向无毒氨基酸转化^[34]。综合来看,硫酸铵通过“低 pH 抑制+酶促转化”双机制促进 HCN 降解,显著提升青贮饲料的安全性。

总体而言,硫酸铵处理在 60 天青贮期内显著提升了再生高粱的营养价值与饲用安全性。RFV 达 160,RFQ 提升至 180,HCN 含量控制在 $170\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,形成“高蛋白—低纤维—低毒性”的理想饲料

特性。值得特别指出的是,硫酸铵处理存在明显的剂量效应。当添加量超过 0.5%(干基)后,尽管蛋白含量仍有所提升,但发酵品质开始下降,表现为 LA:AA 降低、酵母菌数量上升。因此,实际应用中需精确控制施用浓度,最适宜区间可能位于 0.4%~0.6%(干基)之间。该结果与李志强等^[35]在苜蓿青贮中的研究发现一致,提示硫酸铵的适宜添加范围可能具有跨物种适应性。从农业系统视角分析,再生高粱作为饲草资源的开发利用具有多重综合效益:(1)显著提升土地利用效率,延长青绿饲料供应周期,籽粒收获 2~3 周后即可刈割利用;(2)降低生产投入,依托现有种植体系实现无缝衔接。因此,该“粮饲兼用”模式在我国农牧交错带地区具有广泛推广潜力,对于构建粮经饲协调发展的绿色种植结构具有重要现实意义。

4 结论

本研究证实,粒用高粱再生后作为青贮饲料具有显著可行性,其生物量达 $52\,800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-1}$,粗蛋白(7.45%)、可溶性碳水化合物(25.20%)等关键指标均优于传统青贮原料。外源硫酸铵处理通过三重协同机制显著提升饲用价值:(1)氮代谢调控方面,作为非蛋白氮源促进微生物蛋白合成,使粗蛋白含量提高 12.3%;(2)发酵优化方面,加速 pH 下降并塑造理想菌群结构,乳酸产量增加 35.7%;(3)安全脱毒方面,通过低 pH 抑制和代谢途径转化,使氢氰酸降解速率提高 40%,含量降至安全水平。研究建立的 0.4%~0.6% 干基硫酸铵添加方案,可使再生高粱青贮达到相对饲用价值 160、相对饲用价值 180 的优质标准,成功实现“高蛋白—低纤维—低毒性”的品质目标,未来将对不同添加剂剂量组合的长期青贮效果进行验证,以及在实际生产条件下的应用潜力评估,为粒用高粱“粮饲双收”模式提供了可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 吴玉鑫,夏西强,张寅. 青贮饲料原料种植规模对肉羊养殖成本效率的影响[J]. 饲料研究,2025,48(9):175-178
WU Y X, XIA X Q, ZHANG Y. The impact of the planting scale of silage feed raw materials on the cost efficiency of meat sheep farming[J]. Feed research, 2025, 48(9): 175-178
- [2] 张俊华,肖海峰. 中国畜牧养殖资源环境压力:时空分异特征及其与畜牧产出水平的耦合协调关系[J]. 中国农业大学学报,2025,30(1):276-292

- ZHANG J H, XIAO H F. Environmental pressure on China's livestock breeding resources: spatial-temporal divergence characteristics and coupling coordination relationship with livestock output levels [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(1): 276-292
- [3] 焦宏,杨瑞雪. 草牧业如何助力新时代“黄河大合唱”[N]. *农民日报*,2024-11-15(8)
- JIAO H, YANG R X. How pastoral agriculture can contribute to the “Yellow River Symphony” in the New Era [N]. *Farmers' Daily*,2024-11-15 (8)
- [4] 曾宪琪,再生糯高粱丰产栽培技术集成应用与酿酒品质研究[S]. 重庆市,重庆市农业科学院,2010-12-30
- ZENG X Q. Integrated application of high-yield cultivation techniques for recycled sweet sorghum and research on wine quality [S]. Chongqing, Chongqing Academy of Agricultural Sciences,2010-12-30
- [5] 汤兰. 再生高粱留桩高度对二季产量的影响探讨[J]. *南方农业*,2010,4(1):49-50
- TNAG L. Study on the impact of retaining stem height of recycled sorghum on the yield of two crops [J]. *Southern Agriculture*,,2010,4(1):49-50
- [6] 张伟金,唐影,袁海艳,等. 浙东再生糯高粱优质高产栽培技术[J]. *上海农业科技*,2020(2):44-45
- ZHANG W J, TANG Y, YUAN H Y, et al. Cultivation techniques for high-quality and high-yield recycled glutinous sorghum in Zhejiang east region [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*,2020(2):44-45
- [7] 丁国祥,赵甘霖. 四川酿酒高粱生产现状与发展方略[J]. *食品与发酵科技*,2009,45(3):3-4
- DING G X, ZHAO G L. The current situation and development strategy of sorghum production for brewing in sichuan Province [J]. *Food and Fermentation Technology*, 2009, 45 (3):3-4
- [8] 张苏江,董志国,杨金宝. 饲用甜高粱的栽培与利用[J]. *畜牧兽医杂志*,2000(2):31-33
- ZHANG S J, DONG Z G, YANG J B. The cultivation and utilization of forage sweet sorghum [J]. *Journal of Veterinary Medicine*,2000(2):31-33
- [9] GIBB M C, CARBERY J T, CARTER R G, et al. Hydrocyanic acid poisoning of cattle associated with Sudax grass [J]. 1974;22(7):127
- [10] 王军亮. 新疆放牧草地毒害草种属多样性与综合防控措施研究[D]. 扬州:扬州大学,2020:53
- WANG J L. Research on the diversity of poisonous grass species in Pasturelands of Xinjiang and comprehensive control measures[D]. Yangzhou: Yangzhou University,2020:53
- [11] 郭芳珠,王曙阳,许富强,等. 甘蔗梢青贮及饲喂效果的研究进展[J]. *饲料研究*,2024,47(2):172-176
- GUO F Z, WANG S Y, XU F Q, et al. Research progress on silage production and feeding effects of sugarcane shoots [J]. *Feed research*,2024,47(2):172-176
- [12] 李博,莫日根别力格,乌云嘎,等. 阿拉善左旗天然草原有毒植物分布及危害调查[J]. *草地学报*,2025,33(4):1267-1273
- LI B, MO R G B L G, WU Y G, et al. Investigation on the distribution and hazards of toxic plants in the natural grasslands of Left Banner, Alashan League [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025,33(4):1267-1273
- [13] WANG Y, CHEN X, WANG C, et al. The bacterial community and fermentation quality of mulberry (*Morus alba*) leaf silage with or without *Lactobacillus casei* and sucrose [J]. *Bioresource Technology*,2019,293:122059
- [14] CHEN M M, LIU Q H, XIN G R, et al. Characteristics of lactic acid bacteria isolates and their inoculating effects on the silage fermentation at high temperature [J]. *Letters in Applied Microbiology*,2013,56(1):71-78
- [15] GUAN H, YAN Y, LI X, et al. Microbial communities and natural fermentation of corn silages prepared with farm bunker-silo in Southwest China [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265:282-290
- [16] 刘自平,周帅,刘莎莎. 新型免标记荧光“turn off-on”纳米传感器用于 β -葡萄糖苷酶活性检测 [C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会,中国土壤学会土壤化学专业委员会. 2019年中国土壤学会土壤环境专业委员会、土壤化学专业委员会联合学术研讨会论文摘要集. 东北师范大学地理科学学院;东北师范大学长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室;吉林大学地球探测科学与技术学院,2019:100
- LIU Z P, ZHOU S, LIU S S. The novel non-labeled fluorescence “turn off-on” nano-sensor is used for the detection of β -glucosidase activity [C] // China Soil Society - Soil Environment Professional Committee, China Soil Society-Soil Chemistry Professional Committee. 2019 Joint Academic Symposium Abstract Collection of China Soil Society - Soil Environment Professional Committee and Soil Chemistry Professional Committee. College of Geography Sciences, Northeast Normal University; Northeast Normal University Changbai Mountain Geographical Process and Ecological Security Key Laboratory; College of Geophysical Exploration Science and Technology, Jilin University,2019:100
- [17] 姚槐应,何振立,黄昌勇. 提高氮肥利用效率的微生物量机制探讨[J]. *农业环境保护*,1999(2):7-9,28,49
- YAO K Y, HE Z Y, HUANG C Y. A study on the microbial mechanism for improving nitrogen fertilizer utilization efficiency [J]. *Agricultural Environmental Protection*, 1999 (2) : 7-9, 28,49
- [18] 周丽. 米尔贝霉素单组分高产菌株选育及发酵放大研究[D]. 杭州:浙江大学,2020:35
- ZHOU L. Selection and fermentation scale-up study of a single-component high-yield strain of milbemycin [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2020:35
- [19] 翟建荣. 外源黑曲霉添加对青贮再生糯高粱生氰糖苷含量及青贮品质的影响[D]. 重庆:西南大学,2023:48
- ZHAI J R. The influence of exogenous *Aspergillus niger* addition on the cyanogenic glycoside content and the quality of silage-renewed sweet sorghum [D]. Chongqing: Southwest

- University, 2023:48
- [20] 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
- [21] 王志军, 包健, 丁霞, 等. 品种和生育期对紫花苜蓿的生产性能、营养品质和矿物质元素的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47 (10):105-112
- WANG Z J, BAO J, DING X, et al. The effects of variety and growth period on the production performance, nutritional quality and mineral elements of alfalfa[J]. Feed research, 2024, 47(10):105-112
- [22] WANG S, ZHANG G, ZHAO J, et al. Fermentation quality, aerobic stability and in vitro gas production kinetics and digestibility in total mixed ration silage treated with lactic acid bacteria inoculants and antimicrobial additives [J]. Italian Journal of Animal Science, 2023, 22(1):430-441
- [23] 施晞. 乳牛场玉米秸秆调制裹包青贮技术的实践和体会[J]. 福建畜牧兽医, 2022, 44(5):85-88
- SHI X. Practical experience and insights on the corn straw pelleting and wrapping silage technology for dairy farms [J]. Fujian Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2022, 44 (5):85-88
- [24] 田吉鹏, 程云辉, 韦青, 等. 菌酶复合添加剂对花生秸混合青贮饲料品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(12):88-92
- TIAN J P, CHENG Y H, WEI Q, et al. The effects of enzyme-enriched composite additive on the quality of peanut straw mixed silage feed [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(12):88-92
- [25] 宋利学. 苜蓿和奶牛种养结合生态循环模式技术研究[J]. 基层农技推广, 2017, 5(5):54-56
- SONG L X. Research on the ecological circular model technology of combining alfalfa and dairy cattle farming [J]. Primary agricultural technology extension, 2017, 5(5):54-56
- [26] 袁玖. 绿豆衣、大蒜皮、茄子皮与玉米秸秆青贮料、精料间饲料组合效应研究[J]. 草业学报, 2025, 34(9):173-184
- YANG J. Research on the feed combination effects among mung bean skin, garlic skin, eggplant skin and corn stalk silage and concentrate [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34 (9): 173-184
- [27] 董秀梅. 基于绿色低碳的肉牛高效养殖技术发展策略[J]. 中国畜牧业, 2024, (18):77-78
- DONG X M. Development strategy for green and low-carbon efficient beef cattle breeding technology [J]. Chinese livestock industry, 2024, (18):77-78
- [28] 牛宇鹏, 李超, 李世英, 等. 马铃薯薯渣和青稞秸秆固态发酵饲料的工艺研究[J]. 现代畜牧科技, 2025, (2):90-92
- NIU Y P, LI C, LI S Y, ET AL. Research on the solid fermentation feed production process using potato peel and barley straw[J]. Modern Livestock Technology, 2025, (2):90-92
- [29] MUCK R E, NADEAU E M G, MCALLISTER T A, et al. Silage review: Recent advances and future uses of silage additives[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(5):3980-4000
- [30] 白岚方. 施氮水平对青贮玉米根系空间微生物组成及氮素利用影响机制的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2021:54
- BAI L F. Study on the mechanism of nitrogen application levels on spatial microbial composition and nitrogen utilization in silage maize roots[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021:54
- [31] BHALLA T C, ASIF M, SMITA K. Purification and characterization of cyanogenic β -glucosidase from wild apricot (*Prunus armeniaca* L.) [J]. Process Biochemistry, 2017, 58:320-325
- [32] 黄海波, 王永亮, 李步豪, 等. 夏威夷果青皮发酵菌株的筛选及其对发酵后饲用价值的改善作用[J]. 动物营养学报, 2024, 36(2):1292-1302
- HUANG H B, WANG Y L, LI B H, ET AL. Screening of fermentation strains of the green-skinned Hawaiian nuts and their improvement effect on the feed value after fermentation [J]. Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(2):1292-1302
- [33] FERNANDEZ R F, DOLGHIH E, KUNZ D A. Enzymatic assimilation of cyanide via pterin-dependent oxygenolytic cleavage to ammonia and formate in *Pseudomonas fluorescens* NCIMB 11764 [J]. Applied and environmental microbiology, 2004, 70(1):121-128
- [34] SHARMA M, AKHTER Y, CHATTERJEE S. A review on remediation of cyanide containing industrial wastes using biological systems with special reference to enzymatic degradation [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2019, 35(5):70
- [35] 李志强, 李长才, 玉柱, 等. 苜蓿青贮部分替代玉米青贮对泌乳奶牛生产性能的影响[C]//中国畜牧业协会. 第六届(2015)中国苜蓿发展大会暨国际苜蓿会议论文汇编. 中国农业大学草地研究所; 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 2015:112-117
- LI Z Q, LI C C, Y Z, ET AL. The Impact of Partial Replacement of Corn Silage with Alfalfa Silage on the Production Performance of Lactating Dairy Cows [C]//China Animal Husbandry Association. Proceedings of the 6th (2015) China Alfalfa Development Conference and International Alfalfa Conference. Institute of Grassland, China Agricultural University; Institute of Agricultural Resources and Environment, Hebei Academy of Agricultural Sciences, 2015:112-117

(责任编辑 付 宸)