



高智轩, 哈斯其其格, 王召明, 王一凡, 陈雪, 王磊, 陈肖, 孟嘉晖, 玉柱. 植物乳杆菌和中草药渣联用对甜高粱青贮品质及体外消化特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(10): 274-285.

GAO Zhixuan, HA SIQIQIGE, WANG Zhaoming, WANG Yifan, CHEN Xue, WANG Lei, Chen Xiao, MENG Jiahui, YU Zhu. Effects of interaction between *Lactobacillus plantarum* and Chinese herb residues on silage quality and *in vitro* digestion characteristics of sweet sorghum[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 274-285.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.21

## 植物乳杆菌和中草药渣联用对甜高粱青贮品质及 体外消化特性的影响

高智轩<sup>1</sup> 哈斯其其格<sup>2</sup> 王召明<sup>3</sup> 王一凡<sup>1</sup> 陈雪<sup>1</sup> 王磊<sup>1</sup>  
陈肖<sup>1</sup> 孟嘉晖<sup>1</sup> 玉柱<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学 草业科学与技术学院, 北京 100193;

2. 内蒙古自治区锡林郭勒盟镶黄旗林业草原事业发展中心, 内蒙古 锡林郭勒 013250;

3. 国家草业技术创新中心(筹), 呼和浩特 010070)

**摘 要** 为探究改善甜高粱青贮品质和体外消化特性的中草药渣与植物乳杆菌联用的最优组合及剂量, 以‘中科甜438’甜高粱作为试验材料, 在青贮过程中将0%(质量百分数)、0.5%、1.0%和1.5%的黄芪药渣(HQ)和丁香药渣(DX)单独添加, 或与 $1 \times 10^6$  CFU/g植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, LP)联用添加, 共设14个处理, 发酵30 d后对甜高粱青贮饲料的发酵品质、营养成分和体外消化特性指标进行测定。结果表明: 1) 1.5%丁香+植物乳杆菌处理(1.5%DX+LP)的乳酸和乙酸含量最高, 分别为6.57和3.89 g/100 g, 其氨态氮含量为1.95 g/100 g, 显著低于HQ各添加量与LP联用的处理( $P < 0.05$ ); 2) 与单独添加HQ、DX相比, 添加HQ、DX分别与LP联用处理可显著提高甜高粱的体外干物质消化率( $P < 0.05$ ), 其中1.5%DX+LP的体外干物质消化率最高, 为63.46%, 此外, 1.5%DX+LP的甜高粱体外粗蛋白质消化率为82.46%, 显著高于0.5%DX+LP和0.5%HQ+LP( $P < 0.05$ ), 1.5%DX+LP的甜高粱体外中性洗涤纤维消化率为56.54%, 显著高于HQ各添加量与LP联用的处理( $P < 0.05$ )。综上, 添加黄芪(HQ)和丁香(DX)药渣可促进甜高粱青贮饲料发酵, 显著提高青贮甜高粱的发酵品质和体外消化特性, 综合发酵品质、营养成分和体外消化特性, 各处理对甜高粱青贮饲料品质提升效果由高到低为丁香+植物乳杆菌(DX+LP) > 黄芪+植物乳杆菌(HQ+LP) > DX > HQ, 其中添加1.5%丁香+植物乳杆菌(1.5%DX+LP)对提高宁夏甜高粱青贮品质和体外消化特性的效果最佳。

**关键词** 甜高粱; 中草药渣; 植物乳杆菌; 青贮品质; 体外消化特性

中图分类号 S816.53

文章编号 1007-4333(2025)10-0274-12

文献标志码 A

## Effects of interaction between *Lactobacillus plantarum* and Chinese herb residues on silage quality and *in vitro* digestion characteristics of sweet sorghum

GAO Zhixuan<sup>1</sup>, HA SIQIQIGE<sup>2</sup>, WANG Zhaoming<sup>3</sup>, WANG Yifan<sup>1</sup>, CHEN Xue<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>,  
Chen Xiao<sup>1</sup>, MENG Jiahui<sup>1</sup>, YU Zhu<sup>1\*</sup>

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

2. Inner Mongolia Xilingol League Xianghuangqi Forestry and Grassland Business Development Centre,  
Xilingol League 013250, China;

3. National Center of Pratacultural Technology Innovation (Under Way), Hohhot 010070, China)

收稿日期: 2025-06-23

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2025ZY0062)

第一作者: 高智轩(ORCID:0009-0000-8505-5294), 硕士研究生, E-mail: 2084198447@qq.com

通讯作者: 玉柱(ORCID:0000-0003-3271-1272), 教授, 主要从事饲草加工贮藏与利用研究, E-mail: yuzhu33150@sina.com

**Abstract** To explore the optimal combination and dosage of Chinese herb residues combined with *Lactobacillus plantarum* to improve the quality of sweet sorghum silage and *in vitro* digestion characteristics of sweet sorghum, using ‘Zhongke Tian 438’ sweet sorghum as the test material, 0% (mass percentage), 0.5%, 1.0% and 1.5% of astragalus residue (HQ) and clove residue (DX) were added alone or in combination with  $1 \times 10^6$  CFU/g *Lactobacillus plantarum* (LP) in the silage process, and a total of 14 treatments were set up. The fermentation quality, nutrient composition and *in vitro* digestive characteristics indexes of sweet sorghum silage were determined after 30 d of fermentation. The results showed that: 1) The 1.5% clove plus *Lactobacillus plantarum* (1.5%DX+LP) treatment had the highest lactic acid and acetic acid contents of 6.57 and 3.89 g/100 g, respectively. Its ammoniacal nitrogen content was 1.95 g/100 g, which was significantly lower than that of each addition of HQ in combination with LP treatment ( $P < 0.05$ ), 2) Compared with the treatment of either HQ or DX alone, the addition of HQ or DX in combination with LP treatment significantly increased the *in vitro* dry matter digestibility ( $P < 0.05$ ), among which 1.5%DX+LP had the highest *in vitro* dry matter digestibility of 63.46%. In addition, the *in vitro* crude protein digestibility of 1.5%DX+LP was 82.46%, which was significantly higher than that of 0.5%DX+LP and 0.5%HQ+LP ( $P < 0.05$ ), and the *in vitro* neutral detergent fibers digestibility of 1.5%DX+LP was 56.54%, which was significantly higher than that of each addition of HQ in combination with LP treatment ( $P < 0.05$ ). In conclusion, adding astragalus (HQ) and clove (DX) herb residues promoted sweet sorghum silage fermentation and significantly improve the fermentation quality and *in vitro* digestive characteristics of sweet sorghum silage. The combined fermentation quality, nutrient composition and *in vitro* digestive characteristics, and the order of each treatment on the improvement of sweet sorghum silage quality and from high to low were clove plus *L. plantarum* (DX+LP) > astragalus plus *L. plantarum* (HQ+LP) > DX > HQ, of which the treatment of 1.5% clove plus *L. plantarum* (1.5%DX+LP) had the best effect on improving silage quality and *in vitro* digestive characteristics of sweet sorghum silage in Ningxia.

**Keywords** sweet sorghum; Chinese herb residues; *Lactobacillus plantarum*; silage quality; *in vitro* digestion characteristics

甜高粱(*Sorghum bicolor*)是禾本科高粱属的一年生作物,具有产量高、含糖量高等特点<sup>[1]</sup>,具备调制成青贮饲料的良好品质,是宁夏重要的饲草作物。因其有较高的纤维含量,直接青贮效果不佳<sup>[2]</sup>,需添加适宜的添加剂。已有研究表明,在甜高粱青贮饲料中添加植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, LP)、尿素、丙酸钙可有效降低酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维的含量<sup>[3]</sup>。目前青贮化学添加剂较为常用,其主要作用机制是抑制有害微生物的生长,降低其与乳酸菌对营养物质的竞争,为乳酸菌发酵活动提供更加充足的发酵底物<sup>[4]</sup>。然而在青贮饲料中过多使用化学添加剂或使用不当不仅会对家畜健康产生不良影响,同时也会对环境产生威胁<sup>[5]</sup>。因此,探究安全环保且能提高甜高粱青贮饲料品质的添加剂对畜牧业可持续发展具有重要意义。

近几年随着中草药产业的快速发展,在中药材生产和精细加工的过程中产生大量的副产物没有得到有效的利用<sup>[6]</sup>。中草药副产物来源天然、资源充足,与化学添加剂相比具有较低的获得成本和较

高的安全性<sup>[7]</sup>。将中草药副产物添加到青贮饲料中,不仅可以降低养殖成本还可以改善动物健康状况<sup>[5]</sup>。中草药药渣还具有较高的营养成分和活性物质,例如黄芪药渣含有粗蛋白和粗脂肪等营养成分<sup>[8]</sup>,并且其中含有的黄芪多糖等活性物质具有抗氧化等多种功能<sup>[9]</sup>,可作为青贮饲料添加剂使用。从丁香药渣中获得的丁香提取物能够抑制腐败真菌的生长繁殖,有助于青贮饲料的稳定发酵<sup>[10]</sup>。金丽娜等<sup>[11]</sup>研究发现,将黄芪药渣和全株玉米混合青贮后,可有效改善青贮饲料的发酵品质和营养成分。此外,将丁香、肉桂、陈皮等按照比例制备成复方中草药添加剂可改善青贮饲料的发酵品质和营养成分<sup>[12]</sup>。黄芪和丁香在牛羊饲料中已大量应用<sup>[13]</sup>,在荷斯坦牛日粮中添加丁香酚,表现出较好的抗炎和抗菌效果<sup>[14]</sup>;饲料中添加黄芪粉可以促进澳洲杂交公羔生长,改善肌肉嫩度和肉色,并改变公羔肌肉脂肪酸的组成<sup>[15]</sup>。目前关于中草药渣作为添加剂对甜高粱青贮饲料青贮品质和体外消化特性的研究尚未见报道。本试验设置黄芪药渣、丁香药渣和植物乳杆菌的不同组合和添加量,测定并

分析甜高粱青贮饲料的发酵品质、营养成分和体外消化特性,旨在探究可改善甜高粱青贮品质和体外消化特性的中草药渣与植物乳杆菌最优组合及添加量,以期中草药渣作为青贮饲料添加剂合理利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及试验地概况

试验材料为甜高粱,品种为‘中科甜438’,于2023年5月15日种植于宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区优质饲草高产高效栽培示范基地(106°05' E, 37°45' N, 海拔1316 m),该区域土壤沙化及盐渍化严重,属温带大陆性气候,常年干旱少雨,年平均降水量251 mm,年均温8.7℃,无霜期163 d,见图1。甜高粱生长期间,实施当地常规田间管理。

### 1.2 试验设计

于甜高粱乳熟期(2023年9月27日)留茬15 cm

收割,粉碎至1~2 cm后混匀。在甜高粱青贮时使用黄芪药渣(药用黄芪片加工时产生的粉末,HQ)、丁香药渣(药用丁香加工时产生的粉末,DX)和植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, LP)作为外源添加剂。分别添加甜高粱鲜重的0.5%(质量百分数,下同)HQ、1.0% HQ、1.5% HQ、0.5% DX、1.0% DX、1.5% DX、0.5% HQ+LP、1.0% HQ+LP、1.5% HQ+LP、0.5% DX+LP、1.0% DX+LP、1.5% DX+LP, LP以 $1 \times 10^6$  CFU/g的添加量添加,每个处理3个重复,将添加的HQ、DX和LP与甜高粱材料混匀后,装填于3 L发酵罐中(每罐喷洒的LP溶液为20 mL,不添加LP的处理组都以20 mL纯净水替代),压实密度为 $650 \text{ kg/m}^3$ 。室温贮藏30 d,青贮完成后,打开发酵罐并去除上、下层10 cm左右的青贮饲料,剩余青贮饲料混匀后测定青贮发酵品质、营养成分和体外消化特性等指标。

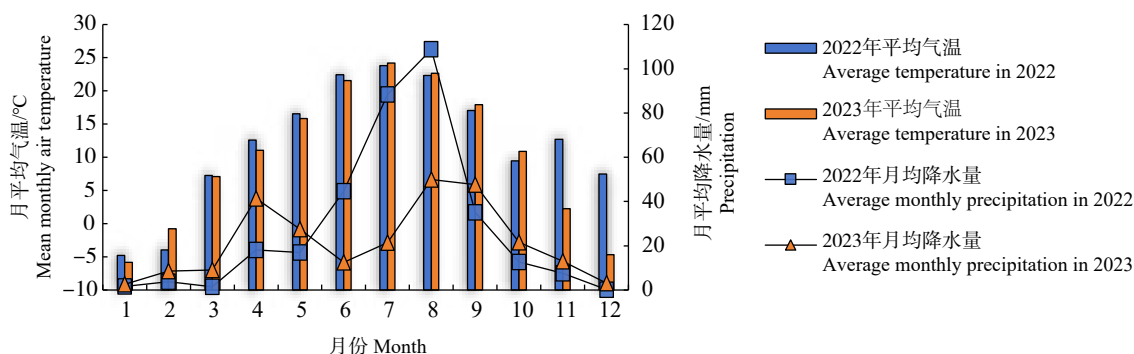


图1 2022—2023年试验区月均降水量及月平均气温

Fig. 1 Monthly precipitation and monthly average temperature in the pilot zone from 2022 to 2023

### 1.3 测定内容及方法

#### 1.3.1 发酵品质

甜高粱青贮开罐后将样品混匀取20 g样品,加入180 mL水,用榨汁机搅碎1 min,用4层纱布和定性滤纸过滤得到滤液,测定pH<sup>[3]</sup>,用苯酚-次氯酸钠比色法测氨态氮(NH<sub>3</sub>-N)含量<sup>[2]</sup>,用高效液相色谱法<sup>[16]</sup>测有机酸含量,其流动相为3 mmol/L HClO<sub>4</sub>,流速为1 mL/min,进样量设置为5 μL,柱温50℃,检测波长为210 nm,计算乳酸(lactic acid, LA)、乙酸(acetic acid, AA)、丙酸(propionic acid, PA)、丁酸(butyric acid, BA)的含量。

#### 1.3.2 营养成分

甜高粱青贮30 d后,取甜高粱青贮样100 g,放入烘箱65℃烘48 h,测定<sup>[16]</sup>其干物质含量(dry matter, DM)<sup>[16]</sup>;采用凯氏定氮法测定粗蛋白(crude protein, CP),采用蒽酮-硫酸比色法<sup>[2]</sup>可溶性碳水化合物(water-soluble carbohydrate, WSC)和淀粉(starch),采用Van Soest法<sup>[3]</sup>测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF),粗脂肪(ether extract, EE)利用索式法<sup>[16]</sup>测定。

#### 1.3.3 体外消化特性的测定

按照李雨嘉等<sup>[16]</sup>的方法测定体外消化特性,测

定 48 h 体外粗蛋白质消化率(IVCPD)、体外干物质消化率(IVDMD)以及体外中性洗涤纤维消化率(IVNDFD)。公式如下：

$$\text{IVCPD} = \frac{\text{CP} - \text{未消化CP}}{\text{CP}} \times 100\%$$

$$\text{IVDMD} = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\%$$

$$\text{IVNDFD} = (\text{NDF 含量} - \text{未消化NDF 含量}) / \text{NDF 含量} \times 100\%$$

式中:IVCPD 为体外粗蛋白消化率,%;CP 为粗蛋白含量,IVDMD 为体外干物质消化率,%;IVNDFD 为体外中性洗涤纤维消化率,%; $m_1, m_2$  分别为样品干物质含量和模拟瘤胃消化后未消化

干物质含量,g/100 g。

#### 1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 17.0 对数据进行统计分析和方差计算。结果以“平均值±标准差”表示,差异显著性采用 SPSS 17.0 进行分析, $P<0.05$  则差异显著。

### 2 结果与分析

#### 2.1 甜高粱青贮饲料原料的营养成分

甜高粱青贮饲料原料,来源于宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区优质饲草高产高效栽培示范基地,具体营养成分见表 1。

表 1 甜高粱原料的营养成分含量

Table 1 Nutrient composition of sweet sorghum raw materials g/100 g

| 项目<br>Item                             | 含量<br>Content |
|----------------------------------------|---------------|
| 干物质 Dry matter                         | 25.35±0.75    |
| 粗蛋白质 Crude protein                     | 4.63±0.26     |
| 中性洗涤纤维<br>Neutral detergent fiber      | 57.78±1.56    |
| 酸性洗涤纤维<br>Acid detergent fiber         | 33.33±1.50    |
| 可溶性碳水化合物<br>Water-soluble carbohydrate | 10.04±1.22    |
| 淀粉 Starch                              | 3.25±0.42     |
| 粗脂肪 Ether extract                      | 2.71±0.80     |

#### 2.2 植物乳杆菌与中草药渣联用对甜高粱青贮饲料发酵品质的影响

由表 2 可知,青贮过程中,添加黄芪药渣(HQ)、丁香药渣(DX)和植物乳杆菌(LP)对青贮甜高粱的乙酸(AA)和丙酸含量(PA)具有显著交互效应( $P<0.05$ ),对 pH、乳酸(LA)和氨态氮含量( $\text{NH}_3\text{-N}$ )无显著的交互效应( $P>0.05$ );单独添加 HQ 或 DX 的处理中 pH、LA、AA、PA 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量均显著高于无添加对照(CK)( $P<0.05$ );单独添加 LP 对青贮甜高粱的 LA、AA、PA 含量均具有显著影响( $P<0.05$ ),对 pH 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量影响不显著( $P>0.05$ )。

不添加 LP 的处理中,1.0%DX 的 pH 最低,CK 的 pH 最高;1.5%HQ、1.0%DX 和 1.5%DX 的 LA 含量均显著高于其他处理( $P<0.05$ ),1.5%DX 的

LA 含量最高,1.5%DX 和 1.0%DX 的 LA 含量分别显著高于 1.5%HQ 和 1.0%HQ ( $P<0.05$ );1.0%DX 的 AA 含量显著高于 1.0%HQ ( $P<0.05$ );CK 和 0.5%HQ 检测出了 PA,其他处理均未检测出 PA;各处理均未检测出丁酸(BA);1.0%DX 和 1.5%DX 的  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量均显著低于 CK ( $P<0.05$ ),见表 2。

添加 LP 的处理中,添加 HQ 的各处理 pH 均低于添加等量 DX 的处理,添加 DX 的各处理 LA 含量均高于添加等量 HQ 的处理,但差异均不显著( $P>0.05$ ),CK 的 LA 含量最低;1.0%DX 和 1.5%DX 的 AA 含量均显著高于其余各处理( $P<0.05$ ),0.5%HQ 和 0.5%DX 的 AA 含量差异不显著( $P>0.05$ );除 CK,其余各处理均未检测出 PA;各处理均未检测出 BA;添加 HQ 处理的  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量均显

表2 植物乳杆菌与中草药渣联用处理甜高粱青贮饲料的发酵品质

Table 2 Fermentation quality of sweet sorghum silage treated with *Lactobacillus plantarum* in combination with Chinese herb residues

| 项目<br>Item                        | 处理 (C)<br>Treatment | 乳酸菌处理 (L)<br>Lactic acid bacteria treatment |                          | P      |        |        |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|
|                                   |                     | -LP                                         | +LP                      | C      | L      | C×L    |
|                                   |                     |                                             |                          |        |        |        |
| pH                                | 0.5% HQ             | 3.87±0.05 <sup>abA</sup>                    | 3.88±0.04 <sup>bcA</sup> | 0.034  | 0.287  | 0.075  |
|                                   | 1.0% HQ             | 3.90±0.05 <sup>abA</sup>                    | 3.84±0.05 <sup>cA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 1.5% HQ             | 3.87±0.03 <sup>abA</sup>                    | 3.87±0.02 <sup>bcA</sup> |        |        |        |
|                                   | 0.5% DX             | 3.87±0.03 <sup>abA</sup>                    | 3.91±0.02 <sup>abA</sup> |        |        |        |
|                                   | 1.0% DX             | 3.86±0.02 <sup>bA</sup>                     | 3.91±0.02 <sup>abA</sup> |        |        |        |
|                                   | 1.5% DX             | 3.88±0.05 <sup>abA</sup>                    | 3.95±0.01 <sup>aA</sup>  |        |        |        |
|                                   | CK                  | 3.94±0.05 <sup>aA</sup>                     | 3.93±0.05 <sup>abA</sup> |        |        |        |
| 乳酸/(g/100 g)<br>Lactic acid       | 0.5% HQ             | 4.74±0.38 <sup>cdB</sup>                    | 5.62±0.17 <sup>cdA</sup> | <0.001 | <0.001 | 0.226  |
|                                   | 1.0% HQ             | 5.07±0.12 <sup>cB</sup>                     | 5.95±0.08 <sup>bcA</sup> |        |        |        |
|                                   | 1.5% HQ             | 5.58±0.17 <sup>bbB</sup>                    | 6.32±0.09 <sup>abA</sup> |        |        |        |
|                                   | 0.5% DX             | 4.68±0.14 <sup>cdB</sup>                    | 5.72±0.35 <sup>cdA</sup> |        |        |        |
|                                   | 1.0% DX             | 5.95±0.50 <sup>abA</sup>                    | 6.20±0.36 <sup>abA</sup> |        |        |        |
|                                   | 1.5% DX             | 6.12±0.26 <sup>aA</sup>                     | 6.57±0.28 <sup>aA</sup>  |        |        |        |
|                                   | CK                  | 4.25±0.21 <sup>dB</sup>                     | 5.27±0.55 <sup>dA</sup>  |        |        |        |
| 乙酸/(g/100 g)<br>Acetic acid       | 0.5% HQ             | 2.44±0.17 <sup>bcA</sup>                    | 2.33±0.04 <sup>cA</sup>  | <0.001 | 0.002  | 0.020  |
|                                   | 1.0% HQ             | 2.24±0.16 <sup>cB</sup>                     | 2.48±0.02 <sup>cA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 1.5% HQ             | 2.29±0.16 <sup>bcB</sup>                    | 2.56±0.06 <sup>cA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 0.5% DX             | 2.49±0.05 <sup>bcA</sup>                    | 2.37±0.07 <sup>cA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 1.0% DX             | 2.52±0.11 <sup>bA</sup>                     | 3.30±0.78 <sup>bA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 1.5% DX             | 3.25±0.12 <sup>aB</sup>                     | 3.89±0.29 <sup>aA</sup>  |        |        |        |
|                                   | CK                  | 2.47±0.12 <sup>bcA</sup>                    | 2.53±0.03 <sup>cA</sup>  |        |        |        |
| 丙酸/(g/100 g)<br>Propionic acid    | 0.5% HQ             | 0.41±0.18 <sup>a</sup>                      | ND                       | <0.001 | 0.019  | <0.001 |
|                                   | 1.0% HQ             | ND                                          | ND                       |        |        |        |
|                                   | 1.5% HQ             | ND                                          | ND                       |        |        |        |
|                                   | 0.5% DX             | ND                                          | ND                       |        |        |        |
|                                   | 1.0% DX             | ND                                          | ND                       |        |        |        |
|                                   | 1.5% DX             | ND                                          | ND                       |        |        |        |
|                                   | CK                  | 0.46±0.17 <sup>aA</sup>                     | 0.47±0.13 <sup>aA</sup>  |        |        |        |
| 氨态氮/(g/100 g)<br>Ammonia nitrogen | 0.5% HQ             | 2.62±0.15 <sup>aA</sup>                     | 3.00±0.44 <sup>aA</sup>  | <0.001 | 0.288  | 0.058  |
|                                   | 1.0% HQ             | 2.60±0.03 <sup>abB</sup>                    | 3.04±0.20 <sup>aA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 1.5% HQ             | 2.73±0.09 <sup>aA</sup>                     | 2.93±0.24 <sup>aA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 0.5% DX             | 2.36±0.10 <sup>abA</sup>                    | 2.34±0.04 <sup>bcA</sup> |        |        |        |
|                                   | 1.0% DX             | 2.06±0.21 <sup>bA</sup>                     | 1.87±0.21 <sup>dA</sup>  |        |        |        |
|                                   | 1.5% DX             | 1.98±0.28 <sup>bA</sup>                     | 1.95±0.11 <sup>cdA</sup> |        |        |        |
|                                   | CK                  | 2.75±0.37 <sup>aA</sup>                     | 2.49±0.11 <sup>bA</sup>  |        |        |        |

注: HQ, 黄芪药渣; DX, 丁香药渣; LP, 植物乳杆菌。处理中的百分数为黄芪药渣、丁香药渣以甜高粱鲜重的质量百分数添加。小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ), 同行不同大写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ); ND, 未检测出。下同。

Note: HQ, astragalus residue; DX, clove residue; LP, Lactic acid bacteria. The percentage in the treatment is the mass percentage of astragalus residue and cloves residue added with the fresh weight of sweet sorghum. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ), and different uppercase letters within the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ); ND, not detected. The same below.

著高于 DX 和 CK ( $P < 0.05$ ), 1.0%DX 的  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量为最低, 见表 2。

### 2.3 植物乳杆菌与中草药渣联用对甜高粱青贮饲料营养成分的影响

由表 3 可知, 青贮过程中, 添加 HQ、DX 和 LP 对甜高粱青贮饲料各营养指标无显著的交互效应 ( $P > 0.05$ ); DX 和 HQ 对青贮饲料干物质 (DM)、粗蛋白质 (CP)、酸性洗涤纤维 (ADF)、可溶性碳水化合物 (WSC) 和淀粉 (starch) 含量均有显著影响 ( $P < 0.05$ ), LP 对 DM 含量有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 对其他指标影响不显著 ( $P > 0.05$ )。

在不添加 LP 处理中, 0.5%DX 的青贮饲料干物质含量显著低于 CK ( $P < 0.05$ ), 其余处理与 CK 无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 随着 HQ 添加量的增加, 青贮饲料的 CP 含量也逐渐增加, 添加 HQ 各处理的 CP 含量高

于添加等量 DX 的处理; 除添加 1.0%DX 处理的可溶性碳水化合物含量高于添加 1.0%HQ 的处理, 其余添加量 DX 处理的可溶性碳水化合物含量均低于等量添加的 HQ 处理; CK 的淀粉含量最高, 显著高于 1.0%DX 和 1.5%DX ( $P < 0.05$ ), 添加 DX 处理的淀粉含量均低于等量添加的 HQ 处理; HQ 和 DX 处理的粗脂肪含量差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。

在添加 LP 处理中, 添加 DX 的各处理干物质含量均低于添加等量的 HQ 处理, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 1.5%HQ 的 CP 含量均显著高于 1.0%HQ、0.5%HQ 和 CK, 3 个 DX 处理之间的 CP 含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 各 HQ、DX 处理的中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、淀粉和粗脂肪含量差异均不显著 ( $P > 0.05$ ); 1.5%HQ 和 1.5%DX 的 WSC 含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但低于其余处理, 见表 3。

表 3 植物乳杆菌与中草药渣联用处理的甜高粱青贮饲料的营养成分

Table 3 Nutrient composition of sweet sorghum silage treated with *Lactobacillus plantarum* in combination with Chinese herb residues

| 项目<br>Item                                  | 处理 (C)<br>Treatment | 乳酸菌处理 (L)<br>Lactic acid bacteria treatment |                            | <i>P</i> |        |       |
|---------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|----------------------------|----------|--------|-------|
|                                             |                     | -LP                                         | +LP                        | C        | L      | C×L   |
| 干物质/(g/100 g)<br>Dry matter                 | 0.5%HQ              | 27.23±0.38 <sup>abA</sup>                   | 26.83±0.51 <sup>abA</sup>  | <0.001   | <0.001 | 0.647 |
|                                             | 1.0%HQ              | 27.58±0.22 <sup>aA</sup>                    | 26.83±0.50 <sup>abA</sup>  |          |        |       |
|                                             | 1.5%HQ              | 27.33±0.62 <sup>abA</sup>                   | 27.08±0.04 <sup>aA</sup>   |          |        |       |
|                                             | 0.5%DX              | 26.30±0.29 <sup>cA</sup>                    | 26.21±0.12 <sup>cA</sup>   |          |        |       |
|                                             | 1.0%DX              | 26.74±0.32 <sup>bcA</sup>                   | 26.39±0.29 <sup>bcA</sup>  |          |        |       |
|                                             | 1.5%DX              | 27.40±0.10 <sup>abA</sup>                   | 26.72±0.24 <sup>abcA</sup> |          |        |       |
|                                             | CK                  | 27.03±0.39 <sup>abA</sup>                   | 26.62±0.08 <sup>abcA</sup> |          |        |       |
| 粗蛋白质/(g/100 g)<br>Crude protein             | 0.5%HQ              | 5.18±0.17 <sup>abA</sup>                    | 4.98±0.27 <sup>ba</sup>    | 0.005    | 0.828  | 0.701 |
|                                             | 1.0%HQ              | 5.24±0.16 <sup>abA</sup>                    | 4.96±0.40 <sup>ba</sup>    |          |        |       |
|                                             | 1.5%HQ              | 5.66±0.21 <sup>aA</sup>                     | 5.61±0.23 <sup>aA</sup>    |          |        |       |
|                                             | 0.5%DX              | 5.04±0.35 <sup>ba</sup>                     | 5.08±0.23 <sup>ba</sup>    |          |        |       |
|                                             | 1.0%DX              | 5.18±0.35 <sup>abA</sup>                    | 5.22±0.13 <sup>abA</sup>   |          |        |       |
|                                             | 1.5%DX              | 5.09±0.36 <sup>ba</sup>                     | 5.31±0.30 <sup>abA</sup>   |          |        |       |
|                                             | CK                  | 4.93±0.19 <sup>ba</sup>                     | 5.02±0.11 <sup>ba</sup>    |          |        |       |
| 中性洗涤纤维/(g/100 g)<br>Neutral detergent fiber | 0.5%HQ              | 61.67±0.80 <sup>aA</sup>                    | 60.74±0.87 <sup>aA</sup>   | 0.062    | 0.628  | 0.812 |
|                                             | 1.0%HQ              | 59.48±1.60 <sup>abA</sup>                   | 60.08±0.43 <sup>aA</sup>   |          |        |       |
|                                             | 1.5%HQ              | 59.28±0.60 <sup>abA</sup>                   | 58.30±1.13 <sup>aA</sup>   |          |        |       |
|                                             | 0.5%DX              | 57.34±1.82 <sup>ba</sup>                    | 59.50±1.83 <sup>aA</sup>   |          |        |       |
|                                             | 1.0%DX              | 58.37±1.61 <sup>ba</sup>                    | 58.81±4.35 <sup>aA</sup>   |          |        |       |
|                                             | 1.5%DX              | 57.90±1.93 <sup>ba</sup>                    | 58.05±1.33 <sup>aA</sup>   |          |        |       |

表3 (续)

| 项目<br>Item                                       | 处理 (C)<br>Treatment | 乳酸菌处理 (L)<br>Lactic acid bacteria treatment |                          | P     |       |       |
|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
|                                                  |                     | -LP                                         | +LP                      | C     | L     | C×L   |
| 酸性洗涤纤维/(g/100 g)<br>Acid detergent fiber         | CK                  | 59.96±1.39 <sup>abA</sup>                   | 60.51±2.73 <sup>aA</sup> | 0.041 | 0.625 | 0.815 |
|                                                  | 0.5%HQ              | 37.09±0.85 <sup>aA</sup>                    | 36.70±0.40 <sup>aA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 1.0%HQ              | 35.58±1.62 <sup>abA</sup>                   | 36.27±0.73 <sup>aA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 1.5%HQ              | 35.55±0.52 <sup>abA</sup>                   | 34.50±1.13 <sup>aA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 0.5%DX              | 33.47±1.24 <sup>bA</sup>                    | 35.03±2.05 <sup>aA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 1.0%DX              | 34.50±1.51 <sup>bA</sup>                    | 34.47±3.03 <sup>aA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 1.5%DX              | 34.20±1.46 <sup>bA</sup>                    | 34.37±1.34 <sup>aA</sup> |       |       |       |
| 可溶性碳水化合物/(g/100 g)<br>Water-soluble carbohydrate | CK                  | 34.98±1.39 <sup>abA</sup>                   | 35.63±1.51 <sup>aA</sup> | 0.012 | 0.140 | 0.776 |
|                                                  | 0.5%HQ              | 0.83±0.23 <sup>aA</sup>                     | 0.74±0.01 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.0%HQ              | 0.65±0.01 <sup>abA</sup>                    | 0.67±0.16 <sup>abA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 1.5%HQ              | 0.69±0.02 <sup>abA</sup>                    | 0.56±0.03 <sup>bbB</sup> |       |       |       |
|                                                  | 0.5%DX              | 0.70±0.04 <sup>abA</sup>                    | 0.63±0.03 <sup>abA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 1.0%DX              | 0.66±0.04 <sup>abA</sup>                    | 0.66±0.09 <sup>abA</sup> |       |       |       |
|                                                  | 1.5%DX              | 0.57±0.02 <sup>bA</sup>                     | 0.58±0.06 <sup>bA</sup>  |       |       |       |
| 淀粉/(g/100 g)<br>Starch                           | CK                  | 0.70±0.07 <sup>abA</sup>                    | 0.64±0.02 <sup>abA</sup> | 0.003 | 0.292 | 0.961 |
|                                                  | 0.5%HQ              | 4.11±0.64 <sup>abA</sup>                    | 3.98±0.23 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.0%HQ              | 4.30±0.45 <sup>aA</sup>                     | 4.00±1.01 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.5%HQ              | 4.22±0.30 <sup>abA</sup>                    | 4.04±0.75 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 0.5%DX              | 4.01±0.54 <sup>abA</sup>                    | 3.61±0.33 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.0%DX              | 3.52±0.18 <sup>bcA</sup>                    | 3.52±0.28 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.5%DX              | 3.22±0.11 <sup>cA</sup>                     | 3.36±0.14 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
| 粗脂肪/(g/100 g)<br>Ether extract                   | CK                  | 4.56±0.27 <sup>aA</sup>                     | 4.35±0.21 <sup>aA</sup>  | 0.205 | 0.068 | 0.788 |
|                                                  | 0.5%HQ              | 1.98±0.87 <sup>aA</sup>                     | 2.12±0.95 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.0%HQ              | 2.70±0.09 <sup>aA</sup>                     | 2.95±0.93 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.5%HQ              | 1.92±1.28 <sup>aA</sup>                     | 2.77±1.33 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 0.5%DX              | 2.49±1.30 <sup>aA</sup>                     | 3.20±0.60 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.0%DX              | 1.61±1.01 <sup>aA</sup>                     | 2.67±0.52 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | 1.5%DX              | 3.21±0.15 <sup>aA</sup>                     | 2.87±0.25 <sup>aA</sup>  |       |       |       |
|                                                  | CK                  | 2.66±0.48 <sup>aA</sup>                     | 3.40±0.34 <sup>aA</sup>  |       |       |       |

2.4 植物乳杆菌与中草药渣联用对甜高粱青贮饲料体外消化特性的影响

由表4可知,青贮过程中,添加HQ、DX和LP对青贮甜高粱的体外干物质消化率和体外中性洗涤纤维消化率均具有显著交互效应( $P<0.05$ ),对体外粗蛋白质消化率无显著的交互效应( $P>0.05$ )。

在不添加LP处理中,1.5%DX的青贮饲料体

外粗蛋白质消化率最高,显著高于CK和0.5%HQ( $P<0.05$ );此外,1.5%DX的体外干物质消化率最高,显著高于除1.0%DX以外的其余处理( $P<0.05$ );1.5%DX的体外中性洗涤纤维消化率最高,显著高于除1.0%DX以外的其余处理( $P<0.05$ )。

在添加LP处理中,1.5%DX的体外粗蛋白质消化率最高,显著高于CK、0.5%HQ和0.5%DX( $P<0.05$ )。体外粗蛋白质消化率随着HQ、DX添

加量的增加而上升。所有处理对青贮饲料体外干物质消化率均有显著影响( $P<0.05$ )。1.5%DX 的体外中性洗涤纤维消化率最高,显著高于添加 HQ 的各处理( $P<0.05$ )。随着 HQ、DX 的添加量增加,青贮饲料的体外中性洗涤纤维消化率也随之上升,与体外粗蛋白质消化率变化趋势一致,见表 4。

表 4 植物乳杆菌与中草药渣联用处理甜高粱青贮饲料的体外消化特性

Table 4 *In vitro* digestive characteristics of sweet sorghum silage treated with *Lactobacillus plantarum* in combination with Chinese herb residues

| 项目<br>Item            | 处理 (C)<br>Treatment | 乳酸菌处理 (L)<br>Lactic acid bacteria treatment |                           | P      |        |       |
|-----------------------|---------------------|---------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|-------|
|                       |                     | -LP                                         | +LP                       | C      | L      | C×L   |
|                       |                     |                                             |                           |        |        |       |
| 体外粗蛋白质消化率<br>IVCPD    | 0.5%HQ              | 73.51±0.64 <sup>cB</sup>                    | 76.64±1.25 <sup>bA</sup>  | <0.001 | 0.061  | 0.056 |
|                       | 1.0%HQ              | 75.60±0.43 <sup>abcB</sup>                  | 79.83±1.62 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | 1.5%HQ              | 80.81±1.68 <sup>abA</sup>                   | 80.72±1.16 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | 0.5%DX              | 79.83±3.31 <sup>abcA</sup>                  | 76.34±0.70 <sup>bA</sup>  |        |        |       |
|                       | 1.0%DX              | 80.59±0.68 <sup>abA</sup>                   | 81.11±0.31 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | 1.5%DX              | 81.70±0.52 <sup>aA</sup>                    | 82.46±0.44 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | CK                  | 72.45±6.23 <sup>cA</sup>                    | 76.74±2.91 <sup>bA</sup>  |        |        |       |
| 体外干物质消化率<br>IVDMD     | 0.5%HQ              | 48.65±0.35 <sup>cB</sup>                    | 55.88±1.26 <sup>cA</sup>  | <0.001 | <0.001 | 0.021 |
|                       | 1.0%HQ              | 51.65±0.93 <sup>bB</sup>                    | 59.92±1.17 <sup>bA</sup>  |        |        |       |
|                       | 1.5%HQ              | 52.51±1.35 <sup>bB</sup>                    | 62.54±1.19 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | 0.5%DX              | 49.40±0.39 <sup>cB</sup>                    | 57.17±0.70 <sup>cA</sup>  |        |        |       |
|                       | 1.0%DX              | 54.71±0.27 <sup>aB</sup>                    | 61.77±0.80 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | 1.5%DX              | 55.76±1.10 <sup>aB</sup>                    | 63.46±0.36 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | CK                  | 45.65±0.94 <sup>dB</sup>                    | 51.46±0.82 <sup>dA</sup>  |        |        |       |
| 体外中性洗涤纤维消化率<br>IVNDFD | 0.5%HQ              | 39.84±1.36 <sup>cB</sup>                    | 49.45±2.05 <sup>cA</sup>  | <0.001 | <0.001 | 0.007 |
|                       | 1.0%HQ              | 39.34±0.83 <sup>cB</sup>                    | 52.12±0.65 <sup>bcA</sup> |        |        |       |
|                       | 1.5%HQ              | 39.13±0.90 <sup>cB</sup>                    | 52.51±0.63 <sup>bcA</sup> |        |        |       |
|                       | 0.5%DX              | 45.39±1.20 <sup>bB</sup>                    | 53.45±2.47 <sup>abA</sup> |        |        |       |
|                       | 1.0%DX              | 49.82±2.89 <sup>abA</sup>                   | 55.97±1.69 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | 1.5%DX              | 52.76±1.79 <sup>aA</sup>                    | 56.54±2.52 <sup>aA</sup>  |        |        |       |
|                       | CK                  | 35.67±5.47 <sup>cA</sup>                    | 44.86±1.94 <sup>dA</sup>  |        |        |       |

3 讨 论

3.1 植物乳杆菌与中草药渣联用对甜高粱青贮饲料发酵品质的影响

在青贮过程中,pH 是保证青贮发酵稳定状态的重要因素<sup>[17]</sup>。刘建民等<sup>[18]</sup>研究认为,青贮饲料的 pH 低于 4.2 为优质。本试验中,无添加对照(CK)的 pH<4.2,表明其发酵品质为优质。在添加黄芪(HQ)和丁香(DX)药渣的所有处理 pH 仍维持在 4.2 以下,表明 HQ、DX 的使用并未对发酵品质产生负面影响。有机酸含量同样也是影响青贮饲料品

质的重要指标<sup>[19]</sup>。乳酸菌会利用可溶性碳水化合物,生成乳酸(LA)和乙酸(AA)等代谢物质<sup>[20]</sup>。本试验中,添加 HQ、DX 的各处理均可显著提高甜高粱青贮饲料中的 LA 含量,且随着添加量增加,LA 含量也随之升高,说明 HQ 和 DX 都可以促进 LA 的生成。这可能是因为 HQ 和 DX 含有较多的多糖<sup>[13]</sup>,为乳酸菌提供了充足的碳源,促进了植物乳杆菌(LP)的生长繁殖。优质的青贮饲料含有较多 LA 及少量 AA、丙酸(PA)和丁酸(BA)。除 CK 和 0.5%HQ 处理外,其余各处理均未检测到 PA 和 BA<sup>[21]</sup>,这一结果表明,HQ 和 DX 可能具有抑制有害

微生物生长的作用<sup>[22]</sup>。DX与LP联用后可显著提高青贮甜高粱的LA含量,表明DX抑制其他菌群繁殖的同时,并未对LP的活性产生抑制作用。HQ处理未对青贮甜高粱中AA含量产生显著影响,而添加1.5%DX可显著提高AA含量。这表明HQ和DX在作用方式上可能存在差异。孙茜等<sup>[23]</sup>分析发现,DX可能在发酵过程中促进了异型发酵,从而导致AA含量的增加。范龙泉等<sup>[24]</sup>研究发现,在泡菜发酵中添加HQ能够提升总酸的含量。因此,推测在甜高粱青贮发酵中HQ通过促进LP繁殖从而提高LA产量,降低发酵环境的pH,从而抑制有害杂菌的繁殖。这与牟明生<sup>[25]</sup>研究结果一致。添加1.0%DX和1.5%DX后氨态氮(NH<sub>3</sub>-N)含量显著降低( $P<0.05$ ),随着DX添加量的增加NH<sub>3</sub>-N含量呈现降低趋势,这也证实了DX对杂菌的抑制具有显著效果<sup>[26]</sup>,从而减少蛋白质和氨基酸分解。而添加HQ后NH<sub>3</sub>-N含量并未显著降低,这可能是添加量不够导致的。本研究结果显示,DX高添加量(1.5%)与LP联用可以取得良好的发酵效果。

DX在抑制杂菌和保护蛋白质方面表现出优势,HQ在提供发酵底物方面具有潜在价值。本试验中HQ抑制蛋白质分解效果欠佳,可能与甜高粱的高糖环境以及HQ添加量不足有关。未来研究可以通过调整HQ的添加量,进一步验证其对发酵效果的影响。

### 3.2 植物乳杆菌与中草药渣联用对甜高粱青贮饲料营养成分的影响

黄芪药渣(HQ)、丁香药渣(DX)与植物乳杆菌(LP)联用对甜高粱青贮饲料营养成分各项指标均无显著交互效应(表3)。这一结果可能是因为2种中草药渣的作用机制相互独立:HQ和DX通过其活性成分(如黄芪多糖、丁香酚)直接调控微生物群落和底物代谢<sup>[14,22]</sup>,而LP主要通过加速酸化进程抑制有害菌发挥作用<sup>[20]</sup>。冉航等<sup>[27]</sup>研究发现,添加1.5%HQ能够增加反刍动物瘤胃中有益微生物种群的丰富度。在本试验中,1.5%HQ+LP的可溶性碳水化合物含量最低,说明高添加量HQ可能会增加乳酸菌的相对丰度,增加对可溶性碳水化合物的利用。只添加HQ的粗蛋白质(CP)含量高于未添加对照(CK)和只添加DX的各处理,可能与HQ富集含氮化合物能够促进蛋白质合成有关<sup>[28]</sup>。中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量过

高会直接影响消化率和适口性<sup>[29]</sup>。HQ处理对纤维含量无显著影响,可能是因为中草药本身就具有较高的纤维素含量<sup>[30]</sup>,所以低添加量HQ反而增加了NDF和ADF的含量。与刘桃桃等<sup>[31]</sup>研究结果相比,本试验中CP含量较低,可能是因为宁夏地区气候和地理环境的原因,所以其营养成分较低。

### 3.3 植物乳杆菌与中草药渣联用对甜高粱青贮饲料体外消化特性的影响

体外干物质消化率(IVDMD)是衡量饲草营养价值的关键指标之一,亦是确保反刍动物饲料营养价值得以实现的基础,受采食量、饲料在瘤胃内的停留时间、瘤胃微生物的活性以及微生物对饲料的利用效率等因素影响<sup>[32]</sup>。一般干物质的消化率越高,饲料中营养物质的可利用程度就越大<sup>[33]</sup>。本试验中,1.5%DX+LP具有最高的IVDMD,这可能是因为在该处理下青贮饲料中具有较多的粗蛋白质(CP)含量,木质化程度较低,所以具有较高的IVDMD<sup>[34]</sup>。周小栋<sup>[32]</sup>认为,体外粗蛋白质消化率与CP含量呈正相关,体外中性洗涤纤维消化率(IVNDFD)与中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量均呈负相关。本试验中1.5%HQ和1.5%DX处理均具有较高的CP含量,其体外粗蛋白消化率也较高;同时1.5%DX和1.5%DX+LP具有较低的中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量,所以其IVNDFD较高。此外,与未添加植物乳杆菌(LP)相比,外源添加LP处理的体外中性洗涤纤维消化率上升,说明添加LP能够增加青贮饲料的消化率,这与布沙热木·阿布力孜<sup>[35]</sup>研究结果一致。

## 4 结 论

添加黄芪药渣(HQ)和丁香药渣(DX)能够促进甜高粱青贮饲料发酵,改善甜高粱青贮饲料青贮品质和体外消化特性,综合青贮品质和体外消化特性,各处理对甜高粱青贮饲料品质提升效果由高到低为丁香+植物乳杆菌(DX+LP)>黄芪+植物乳杆菌(HQ+LP)>DX>HQ,其中1.5%DX+LP的乳酸(LA)和乙酸(AA)含量最高,分别为6.57和3.89 g/100 g,氨态氮(NH<sub>3</sub>-N)含量显著低于添加HQ+LP的各处理和未添加对照(CK);与此同时,1.5%DX+LP的体外干物质消化率、体外粗蛋白质消化率和体外中性洗涤纤维消化率均最高,分别为63.46%,82.46%,56.54%。因此,在宁夏地区进

行甜高粱青贮饲料发酵过程中,添加甜高粱鲜重 1.5% 的丁香药渣和植物乳杆菌改善甜高粱青贮品质和体外消化特性效果最佳。

## 参考文献 References

- [1] 阿依古丽·艾买尔, 王娇, 艾买尔江·吾斯曼, 陈立强, 张苏江. 甜高粱与苜蓿混合青贮过程 pH 和主要微生物变化规律的研究[J]. 塔里木大学学报, 2018, 30(4): 20-27
- Ayiguli·Aimaier, Wang J, Aimaierjiang·Wusiman, Chen L Q, Zhang S J. Study on the change of pH and main microorganisms during the process of mixed silages made sweet sorghum and alfalfa [J]. *Journal of Tarim University*, 2018, 30(4): 20-27 (in Chinese)
- [2] 冯涛, 唐海洋, 杨文祥, 同琳静, 石丽娜, 牛欣祎, 沈益新. 甜高粱凋萎青贮和混合青贮对发酵品质及营养成分保存效果的影响[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(2): 352-357
- Feng T, Tang H Y, Yang W X, Tong L J, Shi L N, Niu X Y, Shen Y X. Effects of wilting and mixing straws on fermentation quality and nutrients preservation of sweet sorghum silage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2019, 42(2): 352-357 (in Chinese)
- [3] 邱桂俐, 高艳玲, 张抒, 韩树鑫, 王鹏, 王建丽, 庄旭, 吴建忠, 范国权. 不同添加剂对饲用甜高粱青贮品质的影响[J]. 现代畜牧科技, 2025, 12(6): 80-85
- Di G L, Gao Y L, Zhang S, Han S X, Wang P, Wang J L, Zhuang X, Wu J Z, Fan G Q. Effects of different additives on the silage quality of forage sweet sorghum[J]. *Modern Animal Husbandry Science and Technology*, 2025, 12(6): 80-85 (in Chinese)
- [4] 黄秀文, 范雪, 唐明欢, 马壮, 张可欣, 马健. 青贮添加剂对牧草青贮品质影响的研究进展[J]. 饲料工业, 2023, 44(17): 81-85
- Huang X W, Fan X, Tang M H, Ma Z, Zhang K X, Ma J. Research progress of effects of additives on the quality of forage grass silage[J]. *Feed Industry*, 2023, 44(17): 81-85 (in Chinese)
- [5] 孙蓉, 李茂, 陈桂武, 字学娟, 王凯. 裸花紫珠成分探讨及在青贮中的应用潜力分析[J]. 饲料工业, 2024, 45(21): 47-51
- Sun R, Li M, Chen G W, Zi X J, Wang K. Discussion on components of *Callicarpa nudiflora* and analysis of the application potential in silage[J]. *Feed Industry*, 2024, 45(21): 47-51 (in Chinese)
- [6] 段金庵, 唐志书, 吴启南, 宿树兰, 郭盛, 严辉, 钱大玮. 中药资源产业化过程循环利用适宜技术体系创建及其推广应用[J]. 中国现代中药, 2019, 21(1): 20-28
- Duan J A, Tang Z S, Wu Q N, Su S L, Guo S, Yan H, Qian D W. Establishment of technical system for resource recycling utilization during industrialization process of Chinese medicinal materials and its application[J]. *Modern Chinese Medicine*, 2019, 21(1): 20-28 (in Chinese)
- [7] 王雁. 中草药型添加剂对紫花苜蓿青贮品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012
- Wang Y. Effect of Chinese herbal additives on the quality of *Medicago sativa* silage[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [8] 韩昌权, 王恩花, 高明, 张琳, 李良群, 杨礼寿, 邓廷飞, 葛丽娟, 张富林, 严艳芳, 杨小生, 潘雄. 黄芪药渣对贵州黑山羊生长性能、免疫功能和肉品质的影响[J]. 中国饲料, 2022, 24(13): 72-77
- Han C Q, Wang E H, Gao M, Zhang L, Li L Q, Yang L S, Deng T F, Ge L J, Zhang F L, Yan Y F, Yang X S, Pan X. Effects of *Astragalus mongholicus* Bunge residue on growth performance, carcass characteristics, immune, and meat quality of Guizhou black goats[J]. *China Feed*, 2022, 24(13): 72-77 (in Chinese)
- [9] 陈辉, 肖定福. 黄芪多糖的生物学功能及其在畜禽生产中的应用[J]. 饲料研究, 2017, 20(18): 4-7, 14
- Chen H, Xiao D F. Biological function of *Astragalus* polysaccharide and its application in livestock and poultry production[J]. *Feed Research*, 2017, 20(18): 4-7, 14 (in Chinese)
- [10] 曾志红, 陈玲苗, 黄秋蓉. 丁香提取物对枝孢霉菌的抑菌效果及抑菌机理[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(1): 77-81
- Zeng Z H, Chen L M, Huang Q R. Study on the antibacterial effect of clove extract on *Cladosporium* and its mechanism [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(1): 77-81 (in Chinese)
- [11] 金丽娜, 蒋苏苏, 敬淑燕, 何建文, 张慧君. 黄芪药渣与全株玉米混合青贮对饲料感官、发酵品质及营养成分的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 630-636
- Jin L N, Jiang S S, Jing S Y, He J W, Zhang H J. Effects of adding *Astragalus bunge* residue on the sensory evaluation, fermentation quality, and nutritive value of whole-crop corn silage[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(2): 630-636 (in Chinese)
- [12] 舒健虹, 王子苑, 刘晓霞, 罗维, 王小利. 中草药添加剂对不同比例的多花黑麦草与紫花苜蓿混贮品质的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, 33(6): 20-27
- Shu J H, Wang Z Y, Liu X X, Luo W, Wang X L. Effects of Chinese herbs additives on silage quality of different proportions of multiflora ryegrass and alfalfa [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University*, 2021, 33(6): 20-27 (in Chinese)
- [13] 李正碧. 中草药饲料添加剂在肉牛养殖中的应用[J]. 当代畜牧, 2024, 45(11): 53-54
- Li Z B. Application of Chinese herbal medicine feed additives in beef cattle breeding[J]. *Contemporary Animal Husbandry*, 2024, 45(11): 53-54 (in Chinese)
- [14] 王显峰, 白金英, 范琳琳. 丁香酚对荷斯坦牛生产性能、抗炎功能和肠道菌群的影响[J]. 中国饲料, 2025, 1(8): 17-20
- Wang X F, Bai J Y, Fan L L. Impact of eugenol on production performance, anti-inflammatory function, and gut microbiota of Holstein dairy cows[J]. *China Feed*, 2025, 1(8): 17-20 (in Chinese)
- [15] 朱声鑫, 郎侠, 刘婷, 冉航, 雒瑞瑞, 徐建凤, 韩晓霞, 顾强文, 郑琛, 王彩莲. 饲料中添加不同水平黄芪粉对太湖杂交公羔生长性能、屠宰性能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(5): 3163-3179
- Zhu S X, Lang X, Liu T, Ran H, Luo R R, Xu J F, Han X X, Gu Q W, Zheng C, Wang C L. Effects of different dietary levels of *Astragalus membranaceus* powder on growth performance, slaughter performance and meat quality of Australian-hu crossbred male lambs[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(5): 3163-3179 (in Chinese)
- [16] 李雨嘉, 吉方财, 秦子阳, 郝迎辰, 王召明, 王磊, 孙志强, 玉柱. 全株玉米与大豆混合比例对青贮品质和体外消化特性的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(1): 627-636
- Li Y J, Ji F C, Qin Z Y, Hao Y C, Wang Z M, Wang L, Sun Z Q, Yu Z. Effects of whole-plant corn and soybean mixture ratios on silage quality and digestion characteristics *in vitro*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(1): 627-636 (in Chinese)

- [17] 陈浩, 高万顺, 王旭哲, 马春辉. 不同品种田菁与青贮玉米混贮的养分及发酵品质[J]. 草地学报, 2025, 44(11): 1-11  
Chen H, Gao W S, Wang X Z, Ma C H. Nutrients and fermentation quality of different varieties of field cyanosis and silage maize [J]. *Journal of Grassland Science*, 2025, 44(11): 1-11 (in Chinese)
- [18] 刘建民, 胡梦洁, 毕力格, 卢娜, 罗俊杰, 唐佳新, 何立超, 郎宇, 张健, 肖燕子. 不同混合比例紫花苜蓿和燕麦的青贮品质分析[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(4): 284-288  
Liu J M, Hu M J, Bi L G, Lu N, Luo J J, Tang J X, He L C, Lang Y, Zhang J, Xiao Y Z. Analysis on silage quality of alfalfa and oat with different mixing proportions [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2025, 61(4): 284-288 (in Chinese)
- [19] 王萍, 韦带莲, 刘媛. 复合有机酸对杂交狼尾草青贮品质、有氧稳定性及微生物数量的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(20): 115-118  
Wang P, Wei D L, Liu Y. Effects of composite organic acids on silage quality, aerobic stability and microbial population of hybrid *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng [J]. *Feed Research*, 2024, 47(20): 115-118 (in Chinese)
- [20] 王思然, 刘蓓一, 田吉鹏, 程云辉, 许能祥, 张文洁, 王欣, 丁成龙. 复合乳酸菌添加剂对低温环境下意大利黑麦草青贮发酵品质的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(5): 159-170  
Wang S R, Liu B Y, Tian J P, Cheng Y H, Xu N X, Zhang W J, Wang X, Ding C L. Improvement in the fermentation quality of Italian ryegrass silage by ensiling with combined lactic acid bacteria inoculants at low temperature [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(5): 159-170 (in Chinese)
- [21] 毛翠, 刘方圆, 宋恩亮, 王亚芳, 王永军, 战翔, 李原, 成海建, 姜富贵. 不同乳酸菌添加量和发酵时间对全株玉米青贮营养价值及发酵品质的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(10): 172-181  
Mao C, Liu F Y, Song E L, Wang Y F, Wang Y J, Zhan X, Li Y, Cheng H J, Jiang F G. Effects of different lactic acid bacteria inoculant level and ensiling time on nutritional value and fermentation quality of whole-crop maize silage [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 172-181 (in Chinese)
- [22] 姚淑敏, 池振明, 段效辉. 黄芪提取物对细菌抑制作用的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(8): 90-93  
Yao S M, Chi Z M, Duan X H. Study on antimicrobial action of extract of *Astragalus membranaceus* bge [J]. *Food Science*, 2006, 27(8): 90-93 (in Chinese)
- [23] 孙茜, 徐圣君, 曾贤桂, 张焕祯, 白志辉. 动物青贮饲料添加剂的研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(27): 158-164  
Sun Q, Xu S J, Zeng X G, Zhang H Z, Bai Z H. Animal silage additives: Research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(27): 158-164 (in Chinese)
- [24] 范龙泉, 孟月, 贺玉荣. 添加黄芪、山楂对乳酸菌发酵泡菜品质和安全的的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(8): 39-44  
Fan L Q, Meng Y, He Y R. Effect of the adding of *Astragalus membranaceus* and hawthorn on the quality and safety of lactic acid bacteria fermented kimchi [J]. *China Condiment*, 2024, 49(8): 39-44 (in Chinese)
- [25] 牟明生. 黄芩与乳酸菌对肉鸡生长性能和盲肠微生物菌群影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009  
Mou M S. Effects of *Scutellaria baicalensis* Georgi and lactic acid bacteria on growth performance and intestinal microflora in broilers [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [26] 孙长花, 于智勇, 丁娟芳, 刘妮婷. 丁香提取物抑菌作用及稳定性研究[J]. 生物学杂志, 2021, 38(1): 61-65  
Sun C H, Yu Z Y, Ding J F, Liu N T. Study on bacteriostasis and stability of clove extract [J]. *Journal of Biology*, 2021, 38(1): 61-65 (in Chinese)
- [27] 冉航, 朱声鑫, 刘婷, 徐建风, 王静, 安俐婧, 潘发明, 张蕙, 王新基, 徐国延, 郑琛. 黄芪多糖粉对湖羊瘤胃体外发酵参数和微生物区系的影响[J]. 动物营养学报, 2025, 37(3): 1880-1892  
Ran H, Zhu S X, Liu T, Xu J F, Wang J, An L J, Pan F M, Zhang H, Wang X J, Xu G Y, Zheng C. Effects of *Astragalus polysaccharide* powder on in rumen fermentation parameters and microflora of hu sheep *in vitro* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(3): 1880-1892 (in Chinese)
- [28] 姜辉, 顾胜龙, 张玉婷, 凡畅. 黄芪化学成分和药理作用研究进展[J]. 安徽中医药大学学报, 2020, 39(5): 93-96  
Jiang H, Gu S L, Zhang Y T, Fan C. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Astragalus membranaceus* [J]. *Journal of Anhui University of Traditional Chinese Medicine*, 2020, 39(5): 93-96 (in Chinese)
- [29] 王一帆, 卓兴良, 王磊, 张洪瑞, 陈雪, 吉方财, 玉柱. 收割时间与加工方式对天然牧草产品品质和体外消化率的影响[J]. 草业学报, 2024, 33(6): 145-154  
Wang Y F, Zhuo X L, Wang L, Zhang H R, Chen X, Ji F C, Yu Z. Effect of harvest period and processing method on the quality and *in vitro* digestibility of native grass products [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 145-154 (in Chinese)
- [30] 袁明贵, 向蓉, 彭新宇, 余丹妮, 舒柄垚, 邓森荣, 吴裕红, 徐志宏. 中药渣固态发酵生产功能饲料的研究现状[J]. 中国酿造, 2020, 39(3): 17-20  
Yuan M G, Xiang R, Peng X Y, Yu D N, Shu B Y, Deng S R, Wu Y H, Xu Z H. Progress on production of functional feed by solid-state fermentation of traditional Chinese medicine residues [J]. *China Brewing*, 2020, 39(3): 17-20 (in Chinese)
- [31] 刘桃桃, 杨燕燕, 李秋凤, 曹玉凤, 王昆, 王明亚, 李建国, 高艳霞. 青贮处理对两品种甜高粱营养成分及瘤胃降解率的影响[J]. 饲料研究, 2022, 45(1): 93-99  
Liu T T, Yang Y Y, Li Q F, Cao Y F, Wang K, Wang M Y, Li J G, Gao Y X. Effect of silage treatment on nutrient content and rumen degradation rate of two sweet sorghum varieties [J]. *Feed Research*, 2022, 45(1): 93-99 (in Chinese)
- [32] 周小栋. 甘草多糖对苜蓿青贮品质、抗氧化活性及体外瘤胃发酵特性的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2024  
Zhou X D. Effects of *Glycyrrhiza* polysaccharides on alfalfa silage quality, antioxidant activity and rumen fermentation characteristics *in vitro* [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024 (in Chinese)
- [33] 梁琼, 周明旭, 罗皎兰, 李美珍, 曾俊. 水分含量对桂闽引象草青贮品质及体外消化率的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(24): 113-117  
Liang Q, Zhou M X, Luo J L, Li M Z, Zeng J. Effect of moisture content on silage quality and *in vitro* digestibility of Guimin elephant grass from Guangxi and Fujian [J]. *Feed Research*, 2024, 47(24): 113-117 (in Chinese)
- [34] 陈雪, 张洪瑞, 王一帆, 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)

乌鲁木齐：新疆大学，2018

Busharemu·Abulizi. Effect of mixed bacteria addition on fermentation quality and digestibility of silage[D]. Urumqi:Xinjiang University, 2018 (in Chinese)

[35] 布沙热木·阿布力孜. 混合菌添加对青贮饲料发酵品质及消化率的影响[D].

责任编辑：吕晓梅



**第一作者简介：**高智轩，中国农业大学草业科学与技术学院饲草加工与利用专业硕士研究生。参与饲用燕麦青贮加工及高效利用技术优化与示范项目(2025ZY0062)。2022—2023年获国家励志奖学金。



**通讯作者简介：**玉柱，博士，中国农业大学草业科学与技术学院教授、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。国家牧草产业技术体系岗位科学家、国家草原保护建设综合示范区专家，农业农村部牧草工程技术研究中心副主任，中国草学会草产品加工专业委员会副主任委员。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。