

DOI:10.11686/cyxb2024237

http://cyxb.magtech.com.cn

祁帅, 张艳丽, 万永杰, 等. 菌酶协同发酵豆秸对湖羊生长性能、血清指标和瘤胃微生物的影响. 草业学报, 2025, 34(5): 189—201.

QI Shuai, ZHANG Yan-li, WAN Yong-jie, et al. Effects of soybean straw co-fermented with a bacterium-enzyme mixture on the growth performance, serum indexes, and rumen microorganisms of Hu sheep. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 189—201.

菌酶协同发酵豆秸对湖羊生长性能、血清指标和瘤胃微生物的影响

祁帅¹, 张艳丽¹, 万永杰¹, 牛伟强², 张积鑫², 高雪³, 茆达干^{1*}

(1. 南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210095; 2. 启东瑞鹏牧业有限公司, 江苏 南通 226200; 3. 启东市农业技术推广中心, 江苏 南通 226200)

摘要: 本试验旨在探究菌酶协同发酵豆秸对湖羊生长性能、血清指标和瘤胃微生物的影响。48只4月龄健康湖羊公羔[(27.00±2.00) kg]随机分为4组($n=12$), 每组3个重复, 每个重复(栏)4只羊, 对照组饲喂基础日粮, 试验组1、2、3分别以33%、66%、100%的发酵豆秸替代饲料中原有的豆秸, 预饲期7 d, 正式期60 d。结果表明: 与对照组相比, 1~30 d和1~60 d试验2组的平均日采食量和料重比均显著降低($P<0.05$); 试验3组的血清白蛋白、谷丙转氨酶、高密度脂蛋白和总胆固醇含量均显著提高($P<0.05$); 试验2和3组的球蛋白含量均显著升高($P<0.05$); 试验各组的总蛋白和谷草转氨酶活性均显著提高($P<0.05$); 试验3组的超氧化物歧化酶活性显著提高($P<0.05$), 试验各组的过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性均显著提高($P<0.05$); 试验各组的免疫球蛋白A含量均显著提高($P<0.05$), 试验2和3组免疫球蛋白G和M含量均显著提高($P<0.05$); 试验2组粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维表观消化率均显著升高($P<0.05$); 试验2组的瘤胃异丁酸和氨态氮含量显著上升($P<0.05$), 戊酸含量显著下降($P<0.05$); 在门水平上, 试验2组瘤胃拟杆菌门丰度显著提升($P<0.05$), 厚壁菌门丰度显著下降($P<0.05$); 在属水平上, 试验2组普雷沃氏菌科UCG-001丰度显著提高($P<0.05$)。菌酶协同发酵豆秸提高了湖羊抗氧化能力、免疫力和养分表观消化率, 改善了湖羊瘤胃发酵和微生物结构组成, 为发酵豆秸在湖羊生产中的应用提供了科学依据。

关键词: 湖羊; 生长性能; 发酵豆秸; 菌酶协同; 瘤胃微生物

Effects of soybean straw co-fermented with a bacterium-enzyme mixture on the growth performance, serum indexes, and rumen microorganisms of Hu sheep

QI Shuai¹, ZHANG Yan-li¹, WAN Yong-jie¹, NIU Wei-qiang², ZHANG Ji-xin², GAO Xue³, MAO Da-gan^{1*}

1. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Qidong Ruipeng Animal Husbandry Co., Ltd., Nantong 226200, China; 3. Qidong Agricultural Technology Promotion Center, Nantong 226200, China

Abstract: We investigated the effects of soybean (*Glycine max*) straw co-fermented with a bacterium-enzyme mixture on the growth performance, serum indexes, and rumen microorganisms of Hu sheep. Forty-eight healthy male Hu lambs [(27.00±2.00) kg] aged 4 months were randomly assigned into four groups, with three replicates in each group and four lambs per replicate (stall). Lambs in the control group were fed with a basal diet (Group C), and those in the trial groups were fed with the basal diet with 33% (Group 1), 66% (Group 2), and 100% (Group 3) of the original soybean straw substituted with fermented soybean straw. The experimental period included 7 days

收稿日期: 2024-06-18; 改回日期: 2024-07-29

基金项目: 江苏现代农业产业技术体系建设专项资金(JATS [2023]478, JATS [2023]162)和启东市科技项目(现代农业)(2022-3)资助。

作者简介: 祁帅(2000—), 男, 山东曹县人, 硕士。E-mail: 2022805094@stu.njau.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: maodagan@njau.edu.cn

of pre-experiment and 60 days of formal experiment. The main results were as follows: Compared with Group C, Group 2 showed a significantly decreased average daily matter intake and feed-to-gain ratio during days 1–30 and 1–60 ($P < 0.05$). The serum contents of albumin, glutamic pyruvic transaminase, high density lipoprotein, and total cholesterol were significantly higher in Group 3 than in the control ($P < 0.05$). The globulin contents were significantly higher in Groups 2 and 3 ($P < 0.05$), and the total protein content and glutamic oxaloacetic transaminase activity were significantly higher in all trial groups ($P < 0.05$) than in the control. The activity of superoxide dismutase in serum was increased significantly in Group 3 ($P < 0.05$), and catalase and glutathione peroxidase activities in serum were increased significantly in all trial groups ($P < 0.05$) compared with the control. The serum immunoglobulin (Ig) A content was increased significantly in all trial groups ($P < 0.05$), and the serum IgG and IgM contents were increased significantly in Groups 2 and 3 ($P < 0.05$), compared with the control. Compared with the control, Group 2 significantly increased apparent digestibility of crude protein, acid detergent fiber and neutral detergent fiber ($P < 0.05$); significantly increased rumen isobutyric acid and ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) contents ($P < 0.05$); and significantly decreased valeric acid content ($P < 0.05$). In terms of the bacterial community in the rumen, at the phylum level, the abundance of rumen Bacteroidota was increased ($P < 0.05$), while that of Firmicutes was decreased ($P < 0.05$) in Group 2 compared with the control. At the genus level, the abundance of *Prevotellaceae_UCG-001* was significantly higher in Group 2 than in the control ($P < 0.05$). In conclusion, the addition of bacterium-enzyme co-fermented soybean straw to the diet can improve the antioxidant and immune capacity, nutrient apparent digestibility, the rumen environment, and the rumen microbial community structure of Hu sheep. These results provide a scientific basis for the application of fermented soybean straw in the production of Hu sheep.

Key words: Hu sheep; growth performance; fermented soybean straw; bacterium-enzyme synergy; rumen microorganisms

发展节粮型草食畜牧业是保障畜产品有效供给、缓解粮食供求矛盾、丰富居民膳食结构和助力乡村振兴的重要途径。肉羊产业是我国畜牧业的重要组成部分,饲料是影响肉羊产业经济效益的重要因素。豆秸作为我国重要的农作物秸秆之一,其产量随着大豆(*Glycine max*)种植面积的扩大而不断增加。然而大豆秸秆纤维素和木质素含量较高,直接饲喂动物效果较差。菌酶协同发酵通过结合发酵与酶解技术生产饲料,可有效破除秸秆饲料中的木质素—纤维素—半纤维素复合体结构,改善秸秆饲料的品质^[1]。这种混合发酵饲料与常规单一发酵或酶解饲料相比,具有更短的生产周期、更低的生产成本以及更高的营养价值等优点^[2],菌酶协同发酵饲料还可改善畜产品品质^[3]、提升饲料营养价值、增加利用效率、优化饲养成效、改善动物肠道环境、提高动物的疾病抵抗力^[4–5],实现了菌制剂与酶制剂协同使用的增效作用。

原产于江浙沪地区的湖羊是世界著名的多胎绵羊品种,具有早期生长快、肉质鲜嫩、耐湿热和“软宝石”之美誉的羔皮特点,目前已成为我国南方地区乃至全国肉羊生产的最佳母本。因此,本试验以育肥湖羊为研究对象,从生长性能、血清指标、养分表观消化率、瘤胃发酵参数和微生物方面,探究菌酶协同发酵豆秸在湖羊生产中的应用效果,为菌酶协同发酵豆秸在湖羊生产中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间与试验动物

本试验于2023年3–5月在江苏省启东瑞鹏牧业有限公司开展。选取4月龄体重 $[(27.00 \pm 2.00) \text{ kg}]$ 和体况接近的健康湖羊公羔48只用于试验。

1.2 试验材料

豆秸由江苏省启东瑞鹏牧业有限公司提供。协同发酵所用绿色木霉(活菌数 2×10^{10} CFU \cdot g $^{-1}$)由广州市微元生物科技有限公司提供,戊糖片球菌(活菌数 2×10^{10} CFU \cdot g $^{-1}$)由陕西正禾药业生物工程有限公司提供,产朊假丝酵母(活菌数 2×10^{10} CFU \cdot g $^{-1}$)由深圳市星凯越生物科技有限公司提供,纤维素酶(活性10000 U \cdot g $^{-1}$)和木聚糖酶(活性30000 U \cdot g $^{-1}$)均由宁夏夏盛实业集团有限公司提供。菌液中各菌种含量为:绿色木霉:戊糖片球菌:产朊假丝酵母=2:1:1,菌液浓度 $\geq 10^7$ CFU \cdot mL $^{-1}$ 。将混合好的菌酶制剂添加到粉碎过后的豆秸中,之后加入水调节基质含水量为70%,混合均匀,菌液接种量为10%,纤维素酶添加量为0.01%,木聚糖酶添加量为0.03%,常温发酵20 d。发酵前后豆秸的粗蛋白含量分别为(8.55 \pm 0.15)%和(12.39 \pm 0.41)%,中性洗涤纤维含量分别为(74.96 \pm 0.36)%和(65.69 \pm 2.26)%,酸性洗涤纤维含量分别为(50.85 \pm 0.45)%和(46.83 \pm 2.20)%。

1.3 试验设计与饲养管理

试验基础饲料根据《肉羊营养需要量》^[6]配制,各组饲料配方见表1。

48只湖羊随机分为4组,每组3个重复,每个重复(栏)4只羊。对照组饲喂基础日粮,试验组1、2、3分别以33%、66%、100%比例的发酵豆秸替代饲料中原有豆秸。试验预饲期7 d,正式期60 d,试验期间每天早上8:00和下午3:00饲喂两次,自由采食和饮水。

1.4 样品的采集与指标测定

1.4.1 生长性能测定 试验期每次记录饲喂量并于饲喂前收集料槽中剩料,确定每只羊的干物质采食量(dry matter intake, DMI);试验开始(1 d)、中期(31 d)和结束(61 d)时分别称重、记录试验羊体质量(body weight, BW),计算平均日增重(average daily gain, ADG)、平均日采食量(average daily matter intake, ADMI)和料重比(feed to gain ratio, F/G)。

$$\text{平均日增重(ADG, g)} = (\text{末重} - \text{初重}) / \text{试验天数}$$

$$\text{平均日采食量(ADMI, g)} = (\text{供料干物质量} - \text{剩料干物质量}) / \text{试验天数}$$

$$\text{料重比(F/G)} = \text{平均日采食量} / \text{平均日增重}$$

1.4.2 血清指标测定 试验的61 d,在早晨饲喂前采血10 mL,3000 r \cdot min $^{-1}$ 离心15 min分离血清,-20℃保存。应用全自动生化分析仪(AU680,美国)测定总蛋白(total protein, TP)、白蛋白(albumin, ALB)、球蛋白(globulin, GLB)、葡萄糖(glucose, GLU)、高密度脂蛋白(high density lipoprotein, HDL)、低密度脂蛋白(low

表1 基础饲料组成及营养水平(风干物质基础)

Table 1 Basic ration composition and nutrient levels (air-dry basis)

项目 Items	发酵豆秸替代比例 Fermented soybean straw replacement ratio			
	0	33%	66%	100%
玉米 Corn (%)	25.3	25.3	25.3	25.3
麸皮 Bran (%)	13.3	13.3	13.3	13.3
豆粕 Soybean meal (%)	14.5	14.5	14.5	14.5
青贮玉米秸 Silage corn stalks (%)	4.3	4.3	4.3	4.3
豆秸 Soybean straw (%)	18.6	12.4	6.2	0
发酵豆秸 Fermented soybean straw (%)	0	6.2	12.4	18.6
木薯粉 Tapioca starch (%)	19	19	19	19
预混料 Premix (%)	3	3	3	3
小苏打 NaHCO ₃ (%)	1.4	1.4	1.4	1.4
食盐 NaCl (%)	0.6	0.6	0.6	0.6
合计 Total (%)	100	100	100	100
营养水平 Nutrient levels				
消化能 Digestible energy (DE, MJ \cdot kg $^{-1}$)	11.69	11.80	11.90	12.10
粗蛋白 Crude protein (CP, %)	14.85	15.10	15.34	15.59
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber (NDF, %)	49.61	48.94	48.28	47.61
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber (ADF, %)	39.76	38.27	36.77	35.26
钙 Ca (%)	0.55	0.55	0.55	0.55
磷 P (%)	0.69	0.69	0.69	0.69

注:预混料为每kg饲料提供:铁70 mg,铜10 mg,锰50 mg,锌50 mg,烟酸90 mg,泛酸100 mg,维生素A 7000 IU,维生素D 1000 IU,维生素E 100 IU。消化能、钙和磷为计算值,粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维为测定值。

Note: Premix for feed per kg: iron 70 mg, copper 10 mg, manganese 50 mg, zinc 50 mg, niacin acid 90 mg, pantothenic acid 100 mg, vitamin A 7000 IU, vitamin D 1000 IU, vitamin E 100 IU. Digestible energy (DE), Ca and P are calculated values, while crude protein, neutral detergent fiber and acid detergent fiber are measured values.

density lipoprotein, LDL)、总胆固醇(total cholesterol, TCHOL)和甘油三酯(triglyceride, TG)含量以及谷丙转氨酶(glutamic pyruvic transaminase, GPT)、谷草转氨酶(glutamic oxaloacetic transaminase, GOT)和碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, ALP)活性;应用抗氧化指标试剂盒(YH1202、YH1208、YH1267,南京奥青生物技术有限公司)分别测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-PX)活性;应用免疫指标试剂盒(ANG-E41039S、ANG-E337381S、ANG-E41044S,南京奥青生物技术有限公司)测定免疫球蛋白(immunoglobulin, Ig)A、G和M含量。

1.4.3 养分表观消化率测定 根据试验期各组育肥收益(体增重×活羊价格)和采食饲料成本,计算育肥净收益,确定试验2组为试验最佳组,因此选择试验2组与对照组,每组挑选接近平均体重的3只羊置于代谢笼中,每天收集50 g粪便加入10 mL 10%稀硫酸,同时采集饲料样,共收集3 d。饲料与粪便样品于65 °C干燥24 h,后于室温回潮24 h,再粉碎过0.63 mm筛,装入封口袋保存待测。饲料和粪样中干物质(dry matter, DM)和粗蛋白(crude protein, CP)含量参照张丽英^[7]的方法测定,中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)含量测定参照Van Soest等^[8]的方法。

消化试验采用内源指示剂法^[9],以盐酸不溶灰分作为内源性指示剂。养分消化率计算公式如下:

$$\text{某养分表观消化率}(\%) = (A/C - B/D) / (A/C) \times 100$$

式中:A和B代表饲料和粪中同一种营养物质,C和D代表饲料和粪中指示剂。

1.4.4 瘤胃发酵参数测定 选择育肥收益较好的试验2组与对照组,每组随机取4只羊屠宰无菌采集瘤胃液,经4层纱布过滤后立即采用pH计(HANNA-HI2223,意大利)测定pH,随后分装于5 mL离心管中,置于干冰中保存带回实验室,-80 °C保存,用于瘤胃发酵参数和微生物的测定。其中,氨态氮浓度参照冯宗慈等^[10]改进的比色法,总挥发性脂肪酸(total volatile fatty acid, TVFA)浓度的测定参照秦为琳^[11]的方法。

1.4.5 瘤胃微生物多样性测定 瘤胃微生物16S rRNA测序由北京诺禾致源公司完成,采用CTAB法^[12]提取瘤胃液样本基因组DNA,扩增区域为16S rDNA基因的V3~V4区,引物对为338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'),扩增片段长度为480 bp。使用NEB Next[®]Ultra[™] II FS DNA PCR-free Library Prep Kit试剂盒(New England Biolabs)进行文库构建,构建好的文库经过Qubit和q-PCR定量,文库合格后,使用NovaSeq 6000进行PE 250上机测序。原始数据经特定条件过滤筛选得到特征表和特征序列,利用QIIME 2软件统计微生物群落的Alpha和Beta多样性。采用Blast进行序列比对,利用SILVA数据库对特征序列进行注释。

1.5 数据统计与分析

采用Excel 2016整理试验数据,结果以平均值±标准差表示。使用SPSS 22.0软件中单因素方差分析(one-way ANOVA),比较两组数据进行独立样本*t*检验,4组数据用Duncan氏进行多重比较检验, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 菌酶协同发酵豆秸对湖羊生长性能的影响

与对照组相比,试验各组的体重和平均日增重无显著差异($P > 0.05$,表2);试验2组1~30 d和1~60 d平均日采食量显著降低($P < 0.05$);各阶段试验2组的料重比均显著降低($P < 0.05$)。

2.2 菌酶协同发酵豆秸对湖羊血清生化指标的影响

试验3组的ALB、HDL、TCHOL含量和GPT活性均显著高于对照组($P < 0.05$,表3);试验2组和试验3组的GLB含量均显著升高($P < 0.05$);试验各组TP含量和GOT活性均显著提高($P < 0.05$);试验各组ALP活性、GLU、LDL和TG含量无显著变化($P > 0.05$)。

2.3 菌酶协同发酵豆秸对湖羊血清抗氧化指标的影响

与对照组相比,试验3组的SOD活性显著提高($P < 0.05$,表4),试验1、2和3组的CAT和GSH-PX活性均显著提高($P < 0.05$),且随着日粮中发酵豆秸替换比例的提高呈上升趋势。

表 2 菌酶协同发酵豆秸对湖羊生长性能的影响

Table 2 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on growth performance of Hu sheep

项目 Items	时间 Time (d)	对照组 Group C	试验 1 组 Group 1	试验 2 组 Group 2	试验 3 组 Group 3
体重 BW (kg)	1	27.66±1.35	27.66±1.32	28.33±1.31	28.06±1.28
	30	36.36±1.44	36.08±1.93	36.95±1.97	36.27±1.43
	60	43.35±2.52	43.23±2.25	44.55±2.48	43.41±2.21
平均日增重 ADG (g·d ⁻¹)	1~30	290.00±41.77	280.56±83.55	287.65±91.03	273.61±47.27
	31~60	233.06±70.02	238.41±77.80	253.33±79.56	238.06±57.10
平均日采食量 ADMI (g·d ⁻¹)	1~60	261.53±37.51	259.48±77.61	270.49±81.95	255.83±44.03
	1~30	1526.00±24.08ab	1469.48±67.32bc	1376.70±61.60c	1525.88±54.32a
	31~60	1614.17±29.60	1582.33±84.00	1578.22±84.41	1610.87±14.81
料重比 F/G	1~60	1570.09±20.90ab	1525.90±24.43bc	1477.46±70.05c	1568.38±24.86a
	1~30	5.26±0.08b	5.24±0.24b	4.79±0.21c	5.58±0.20a
	31~60	6.93±0.13a	6.64±0.35ab	6.23±0.33b	6.77±0.06a
	1~60	6.00±0.08ab	5.88±0.09b	5.46±0.26c	6.13±0.10a

BW: Body weight; ADG: Average daily gain; ADMI: Average daily matter intake; F/G: Feed to gain ratio. 同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。In the same row, different small letters mean significant difference ($P < 0.05$). The same below.

表 3 菌酶协同发酵豆秸对湖羊血清生化指标的影响

Table 3 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on serum biochemical indexes of Hu sheep

项目 Items	对照组 Group C	试验 1 组 Group 1	试验 2 组 Group 2	试验 3 组 Group 3
总蛋白 TP (g·L ⁻¹)	71.40±16.33c	84.26±10.64b	86.64±9.25b	95.31±13.95a
白蛋白 ALB (g·L ⁻¹)	27.67±5.40b	32.01±4.17ab	32.01±3.05ab	33.62±5.28a
球蛋白 GLB (g·L ⁻¹)	43.73±11.33b	52.24±7.47ab	54.63±7.92a	61.69±11.65a
谷丙转氨酶 GPT (U·L ⁻¹)	15.24±6.99b	20.80±4.09ab	20.09±2.82ab	23.28±8.66a
谷草转氨酶 GOT (U·L ⁻¹)	119.42±30.62b	154.57±30.30a	157.17±36.58a	160.34±44.26a
碱性磷酸酶 ALP (U·L ⁻¹)	323.13±83.92	309.94±65.83	313.54±82.41	375.11±137.68
葡萄糖 GLU (mmol·L ⁻¹)	4.22±0.68	4.25±0.75	4.35±0.95	4.51±0.89
高密度脂蛋白 HDL (mmol·L ⁻¹)	0.75±0.20b	0.92±0.09ab	0.90±0.13ab	1.04±0.25a
低密度脂蛋白 LDL (mmol·L ⁻¹)	1.20±0.27	1.19±0.31	1.29±0.28	1.32±0.29
总胆固醇 TCHOL (mmol·L ⁻¹)	1.50±0.45b	1.77±0.21ab	1.85±0.38ab	2.10±0.51a
甘油三酯 TG (mmol·L ⁻¹)	0.70±0.26	0.70±0.24	0.74±0.22	0.72±0.26

TP: Total protein; ALB: Albumin; GLB: Globulin; GPT: Glutamic pyruvic transaminase; GOT: Glutamic oxaloacetic transaminase; ALP: Alkaline phosphatase; GLU: Glucose; HDL: High density lipoprotein; LDL: Low density lipoprotein; TCHOL: Total cholesterol; TG: Triglyceride.

表 4 菌酶协同发酵豆秸对湖羊血清抗氧化指标的影响

Table 4 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on serum antioxidant indexes of Hu sheep (U·mL⁻¹)

项目 Items	对照组 Group C	试验 1 组 Group 1	试验 2 组 Group 2	试验 3 组 Group 3
超氧化物歧化酶 SOD	21.44±1.29b	23.59±2.15b	24.57±4.03b	28.24±4.77a
过氧化氢酶 CAT	2.17±0.17c	2.47±0.14b	3.12±0.14a	3.14±0.33a
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-PX	173.74±36.14d	202.81±25.34c	234.11±24.36b	264.61±6.25a

SOD: Superoxide dismutase; CAT: Catalase; GSH-PX: Glutathione peroxidase.

2.4 菌酶协同发酵豆秸对湖羊血清免疫指标的影响

与对照组相比,试验1、2和3组的免疫球蛋白A(immunoglobulin A, IgA)含量均显著提高($P<0.05$,表5),试验2和3组免疫球蛋白G(immunoglobulin G, IgG)和免疫球蛋白M(immunoglobulin M, IgM)含量均显著提高($P<0.05$),且随日粮中发酵豆秸替换比例的提高呈上升趋势。

表5 菌酶协同发酵豆秸对湖羊血清免疫指标的影响

Table 5 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on serum immune indexes of Hu sheep ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)

项目 Items	对照组 Group C	试验1组 Group 1	试验2组 Group 2	试验3组 Group 3
免疫球蛋白A IgA	15.25±0.78d	17.28±0.55c	18.63±0.71b	19.64±1.37a
免疫球蛋白G IgG	127.47±10.26c	131.90±8.99c	147.88±6.71b	162.80±8.17a
免疫球蛋白M IgM	5.87±0.62c	5.68±0.62c	7.20±0.62b	8.31±1.10a

IgA: Immunoglobulin A; IgG: Immunoglobulin G; IgM: Immunoglobulin M.

2.5 菌酶协同发酵豆秸对湖羊养分表观消化率的影响

与对照组相比,试验2组的CP、NDF和ADF表观消化率均显著升高($P<0.05$,表6)。

表6 菌酶协同发酵豆秸对湖羊养分表观消化率的影响

Table 6 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on nutrient apparent digestibility of Hu sheep (%)

项目 Items	对照组 Group C	试验2组 Group 2	P值 P-value
粗蛋白表观消化率 ADCP	54.00±0.17b	62.52±0.76a	0.039
中性洗涤纤维表观消化率 ADNDF	59.06±1.66b	64.94±0.10a	0.020
酸性洗涤纤维表观消化率 ADADF	51.34±4.00b	61.02±1.07a	0.049

ADCP: Apparent digestibility of crude protein; ADNDF: Apparent digestibility of neutral detergent fiber; ADADF: Apparent digestibility of acid detergent fiber.

2.6 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃发酵参数的影响

与对照组相比,试验2组的异丁酸和氨态氮含量显著上升($P<0.05$,表7),戊酸含量显著下降($P<0.05$),乙酸、丙酸和TVFA含量分别提高了7.01%、18.33%、5.98%,但差异不显著($P>0.05$)。两组pH间无显著差异($P>0.05$)。

表7 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃发酵参数的影响

Table 7 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on rumen fermentation parameters of Hu sheep

项目 Items	对照组 Group C	试验2组 Group 2	P值 P-value
乙酸 Acetic acid ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	210.74±94.51	225.51±39.32	0.151
丙酸 Propionic acid ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	67.12±33.36	79.42±16.44	0.287
异丁酸 Isobutyric acid ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	12.58±6.50b	12.82±1.46a	0.008
丁酸 Butyric acid ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	32.37±15.05	27.43±5.46	0.251
戊酸 Valeric acid ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	4.97±2.41a	4.48±0.72b	0.008
总挥发性脂肪酸 (TVFA, $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	348.11±156.16	368.91±62.40	0.177
pH	6.21±0.12	6.32±0.05	0.895
氨态氮 $\text{NH}_3\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{dL}^{-1}$)	10.55±0.64b	14.31±1.12a	0.041

TVFA: Total volatile fatty acids; $\text{NH}_3\text{-N}$: Ammonia nitrogen.

2.7 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃微生物的影响

2.7.1 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃微生物多样性的影响

分析对照组和试验 2 组的瘤胃微生物发现, 两组菌群组成的操作分类单元 (operational taxonomic units, OTU) 存在差异: 两组共产生 4965 个 OTUs, 其中 1025 个为共有 OTUs, 对照组有 2029 个独有 OTUs, 试验 2 组有 1911 个独有 OTUs (图 1)。Alpha 多样性分析结果表明: 两组的 Observed_otus 指数、Shannon、Simpson、Chao1 和 Goods_coverage 指数均无显著差异 ($P > 0.05$, 表 8)。主坐标分析 (principal co-ordinates analysis, PCoA) 显示各组具有较好的生物学重复, PCoA1 能解释 21.69% 的差异性, PCoA2 能解释 17.30% 的差异性, 两组内样本均相对集中, 说明组内微生物群落结构均相差较小; 两组间样本点距离较近, 说明两组菌群组成差异不大 (图 2)。

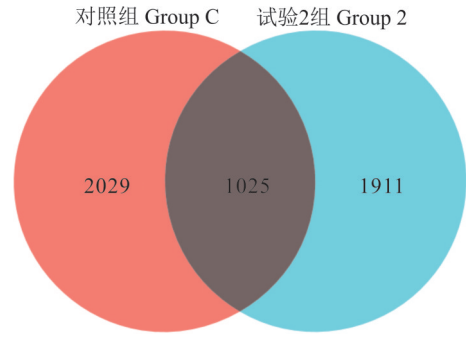


图 1 湖羊瘤胃微生物 Venn 图

Fig. 1 Venn diagram of rumen microorganisms in Hu sheep

表 8 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃微生物 Alpha 多样性的影响

Table 8 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on rumen microbial alpha diversity of Hu sheep

项目 Items	对照组 Group C	试验 2 组 Group 2	P 值 P-value
Observed_otus 指数 Observed_otus index	1098.75 ± 107.19	1040.25 ± 177.25	0.486
Shannon 指数 Shannon index	8.40 ± 0.22	7.93 ± 0.67	0.343
Simpson 指数 Simpson index	0.9913 ± 0.0021	0.9750 ± 0.0278	0.486
Chao1 指数 Chao1 index	1132.78 ± 133.81	1090.50 ± 231.75	0.686
Goods_coverage 指数 Goods_coverage index	0.9980 ± 0.0014	0.9970 ± 0.0022	0.686

2.7.2 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃微生物组成结构的影响

两组在门水平上的主要微生物菌群有拟杆菌门 (Bacteroidota)、厚壁菌门 (Firmicutes)、螺旋体门 (Spirochaetota)、广古菌门 (Euryarchaeota)、弯曲杆菌门 (Campylobacterota)、疣微菌门 (Verrucomicrobiota)、变形菌门 (Proteobacteria)、纤维杆菌门 (Fibrobacterota) 和蓝藻菌门 (Cyanobacteria) 等, 其中厚壁菌门和拟杆菌门为优势菌门。与对照组相比, 试验 2 组瘤胃拟杆菌门的相对丰度显著上升, 厚壁菌门的相对丰度显著下降 ($P < 0.05$, 表 9)。

两组在属水平上的主要微生物菌群有普雷沃氏菌属 (*Prevotella*)、理研菌科 RC9 肠群 (*Rikenellaceae_RC9_gut_group*)、甲烷短杆菌属 (*Methanobrevibacter*)、解琥珀酸属 (*Succiniclasticum*)、瘤胃菌科 UCG-002 (*Ruminococcaceae_UCG-002*)、产乙酸糖发酵菌属 (*Saccharofermentans*)、克里斯滕森菌科 R-7 群 (*Christensenellaceae_R-7_group*)、丁酸弧菌属

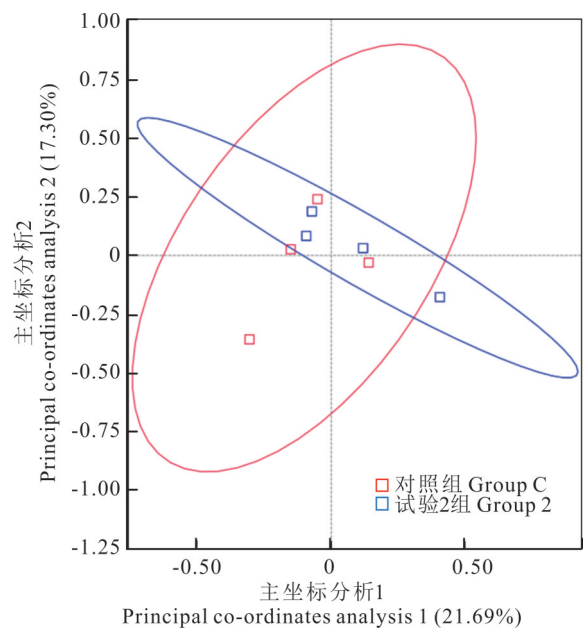


图 2 基于非加权 Unifrac 距离的主坐标分析

Fig. 2 Principal co-ordinates analysis based on unweighted Unifrac distance

(*Butyrivibrio*)、瘤胃菌科 NK4A214 群 (*Ruminococcaceae_NK4A214_group*) 和普雷沃氏菌科 UCG-001 (*Prevotellaceae_UCG-001*)。与对照组相比,试验 2 组普雷沃氏菌科 UCG-001 的相对丰度显著提高 ($P < 0.05$, 表 10), 其余菌属两组之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 9 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃微生物在门水平上的影响

Table 9 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on rumen microorganisms in Hu sheep at phylum level

项目 Items	对照组 Group C	试验 2 组 Group 2	P 值 P-value
拟杆菌门 Bacteroidota	0.4551±0.1948b	0.6279±0.0470a	0.047
厚壁菌门 Firmicutes	0.4006±0.1553a	0.2610±0.0158b	0.029
螺旋体门 Spirochaetota	0.0039±0.0028	0.0041±0.0009	1.000
广古菌门 Euryarchaeota	0.0602±0.0401	0.0434±0.0232	0.686
弯曲杆菌门 Campylobacterota	0.0001±0.0001	0.0001±0.0001	1.000
疣微菌门 Verrucomicrobiota	0.0050±0.0051	0.0036±0.0022	1.000
变形菌门 Proteobacteria	0.0008±0.0003	0.0002±0.0002	0.057
纤维杆菌门 Fibrobacterota	0.0040±0.0043	0.0030±0.0009	0.886
蓝藻菌门 Cyanobacteria	0.0004±0.0005	0.0012±0.0011	0.200
其他 Others	0.0472±0.0067	0.0365±0.0115	0.343
未知菌 Unidentified_bacteria	0.0228±0.0156	0.0190±0.0227	0.686

表 10 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃微生物在属水平上的影响

Table 10 Effects of soybean straw by bacterium-enzyme co-fermentation on rumen microorganisms of Hu sheep at genus level

项目 Items	对照组 Group C	试验 2 组 Group 2	P 值 P-value
普雷沃氏菌属 <i>Prevotella</i>	0.1706±0.1320	0.2001±0.0846	1.000
理研菌科 RC9 肠群 <i>Rikenellaceae_RC9_gut_group</i>	0.1036±0.0391	0.1760±0.1062	0.200
甲烷短杆菌属 <i>Methanobrevibacter</i>	0.0598±0.0395	0.0431±0.0230	0.686
解琥珀酸属 <i>Succiniclasticum</i>	0.0464±0.0129	0.0541±0.0269	1.000
瘤胃菌科 UCG-002 <i>Ruminococcaceae_UCG-002</i>	0.0384±0.0413	0.0090±0.0015	1.000
产乙酸糖发酵菌属 <i>Saccharofermentans</i>	0.0250±0.0238	0.0090±0.0029	0.200
克里斯滕森菌科 R-7 <i>Christensenellaceae_R-7_group</i>	0.0169±0.0209	0.0070±0.0022	1.000
丁酸弧菌属 <i>Butyrivibrio</i>	0.0145±0.0220	0.0013±0.0005	0.114
瘤胃菌科 NK4A214 <i>Ruminococcaceae_NK4A214_group</i>	0.0147±0.0203	0.0036±0.0007	0.486
普雷沃氏菌科 UCG-001 <i>Prevotellaceae_UCG-001</i>	0.0117±0.0070b	0.0294±0.0080a	0.029
其他 Others	0.4985±0.0303	0.4674±0.0829	0.343

3 讨论

3.1 菌酶协同发酵豆秸对湖羊生长性能的影响

采食量、日增重和料重比与养殖效益密切相关。Kim 等^[13]研究发现菌酶协同发酵全混合日粮可提高肉牛采食量和日增重。周闯^[14]研究发现,添加 10%~30% 的菌酶协同发酵油菜 (*Brassica napus*) 秸秆提高了山羊的采食量和日增重,而 20% 组的料重比降低,苏晓月等^[15]研究发现添加 5%~15% 复合益生菌发酵饲料提高了肉羊的平均日增重,而韩颖洁^[16]研究发现添加不同比例的微生物发酵秸秆并未影响小尾寒羊的日增重和料肉比。本试验发酵秸秆并未显著影响湖羊体重和平均日增重,66% 发酵豆秸组试验全期的采食量降低,其原因可能是本试验

设计的日粮能值较高,且发酵豆秸含有更多的水分,不同比例发酵豆秸导致全混合饲料含水量不同,造成饲料体积相等而质量不等,导致试验2组采食干物质量较低。研究表明,绿色木霉作为一种高效纤维素降解菌,能够向细胞外分泌多种木质纤维素降解酶和细胞壁水解酶,将秸秆中复杂的多聚糖分解为便于利用的单糖^[17]。纤维素酶在分解秸秆纤维素的同时,可降低食糜黏度和内源性消化酶不足的影响^[18]。木聚糖酶在木聚糖主链的降解中具有重要作用,可促进反刍动物日粮利用率^[19]。产朊假丝酵母富含蛋白质和氨基酸,其细胞壁含有的甘露聚糖和葡聚糖可促进动物肠道健康^[20]。本试验中66%发酵豆秸组各阶段的料重比均为最低,可能是由于菌酶协同发酵豆秸的蛋白含量升高和纤维含量下降,同时含有更多的有助于消化吸收的消化酶、氨基酸和活性肽等物质,提高了湖羊对养分的消化吸收能力即饲料的转化效率。

3.2 菌酶协同发酵豆秸对湖羊血清指标的影响

血清生化指标可反映动物机体代谢、营养物质的吸收与利用效率^[21]。转氨酶在动物体内参与氨基酸代谢,动物体内蛋白质代谢增强或肝脏功能受损时GOT和GPT水平会增加^[22]。苏晓月等^[15]研究发现复合益生菌发酵饲料提高了肉羊血清TP和ALB含量,周闯^[14]研究发现菌酶协同发酵油菜秸秆提高了山羊TP、ALT和TCHOL含量。本试验中发酵豆秸组血清TP、GLB、ALB、TCHOL和HDL含量和GOT、GPT活性提高与以上研究结果基本一致,说明发酵豆秸能促进氨基酸和脂质代谢水平、提高蛋白合成和免疫水平。

抗氧化酶可反映动物对应激条件的氧化还原平衡。SOD可将过氧化物分解为水并阻碍细胞损伤^[23],CAT可将过氧化氢还原成水,GSH-PX可通过其还原性巯基进行自由基的清除和有害物质的转化^[24]。Ig是体液免疫产生的抵抗病原体或有害微生物侵害的抗体^[25]。IgA主要分布于黏膜表面,通过中和或降低附着程度保护黏膜表面免受细菌、病毒和毒素侵害^[26];IgG是血清中含量最高的蛋白质之一,在抗原结合、免疫复合物形成、补体激活和效应细胞触发等方面发挥作用^[27];IgM在免疫应答早期产生,与抗原的相互作用可增强体液免疫^[28]。苏晓月等^[15]研究发现复合益生菌发酵饲料提高了肉羊血清SOD、IgA和IgG水平,陈柯等^[29]研究发现微生物发酵秸秆能提高山羊SOD、CAT、GSH-PX、IgG和IgM水平,周闯^[14]研究发现菌酶协同发酵油菜秸秆提高了山羊血清SOD、GSH-PX和CAT活性,本试验中不同比例的发酵豆秸替代提高了湖羊血清SOD、CAT、GSH-PX、IgA、IgG和IgM水平,与以上研究结果基本一致,且随替代比例的提高呈上升趋势,说明添加发酵豆秸可提高湖羊抗氧化能力,这可能是由于发酵采用的产朊假丝酵母能合成谷胱甘肽^[30],激活肠道酶促抗氧化系统,增强肠道黏膜完整性^[31],抑制病原菌的定殖^[32],戊糖片球菌细胞壁含有的肽聚糖和脂磷壁酸具有免疫活性,可调节机体免疫功能^[33-34]。

3.3 菌酶协同发酵豆秸对湖羊瘤胃微生物的影响

瘤胃是反刍动物拥有的独特消化系统,其复杂的微生物群落受到饲养环境、饲料成分和营养水平等多种因素的影响,其中细菌约占瘤胃微生物总数的95%^[35]。Alpha多样性是衡量微生物菌群丰富度和物种多样性的指标^[36]。Goods_coverage指数指微生物覆盖率,本试验中Goods_coverage指数平均高于99%,证明未检出的物种所占比例较低,测序结果能真实反映瘤胃细菌丰富度和物种多样性,且发酵豆秸并未改变瘤胃细菌的多样性。

反刍动物瘤胃微生物在门水平上的优势菌群为拟杆菌门和厚壁菌门^[37]。拟杆菌门能水解植物细胞壁中的可溶性和水合碳水化合物,合成挥发性脂肪酸^[38]。厚壁菌门含多种可降解纤维的细菌如梭菌和芽孢杆菌等^[39]。本试验中两组瘤胃优势菌门均为拟杆菌门和厚壁菌门,发酵豆秸组瘤胃拟杆菌门丰度上升,厚壁菌门丰度下降,这与Guo等^[40]的全株玉米(*Zea mays*)加菌青贮提高绵羊瘤胃拟杆菌门丰度,降低厚壁菌门丰度的结果一致,与叶以哲等^[41]和黄海玲^[42]的发酵花生(*Arachis hypogaea*)秸秆降低湖羊和山羊肠道厚壁菌门丰度的结果基本一致。厚壁菌门丰度降低可能是因为发酵豆秸纤维含量更低,且含有可消化纤维的酶和细菌协助纤维的降解消化,同时由于拟杆菌门相对丰度的增加,使得厚壁菌门相对丰度降低。本研究湖羊瘤胃微生物优势菌属为普雷沃氏菌和理研菌科RC9肠群。普雷沃氏菌属在木聚糖、淀粉、果胶、蛋白质和肽等的消化代谢和协同纤维素降解中发挥重要作用^[43]。张雪娇等^[44]研究表明普雷沃氏菌科UCG-001在协助纤维降解菌降解纤维等方面发挥积极作用。王锦等^[45]研究发现饲料添加柠条(*Caragana korshinskii*)发酵饲料可提高宁夏滩羊瘤胃普雷沃氏菌科UCG-001丰度,

本试验中发酵豆秸组普雷沃氏菌科 UCG-001 相对丰度提高与其一致。说明发酵秸秆可以促进日粮纤维的降解,改善瘤胃微生物菌群结构。

瘤胃可通过微生物附着、发酵产物生成和食物降解实现食物的利用。瘤胃微生物参与日粮蛋白质的消化代谢,介导氨的生成,同时产生的氨也会反馈调节瘤胃功能^[46]。瘤胃 NH₃-N 是蛋白质代谢的中间产物,也是微生物合成菌体蛋白的底物^[47],其适宜浓度为 0.35~29.00 mg·dL⁻¹。挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFA)是瘤胃微生物分解发酵饲料纤维素的产物^[48]。周闯^[14]研究发现菌酶协同发酵油菜秸秆提高了山羊瘤胃 NH₃-N、TVFA 水平以及 CP、NDF 和 ADF 表观消化率,赖安强等^[49]研究表明菌酶协同发酵甘蔗(*Saccharum officinarum*)渣提高了肉牛瘤胃 NH₃-N、TVFA 水平以及 CP 和 NDF 的消化率,王晓飞等^[50]研究发现饲料中添加膨化秸秆微生物发酵饲料可提高杜寒杂交羊瘤胃 NH₃-N 浓度,金宏等^[51]在湖羊饲料中添加不同比例的发 酵饲料,结果高比例组湖羊瘤胃 TVFA 提高,乙酸和丙酸含量有一定的增长,Kyawt 等^[52]研究发现,饲喂生物发酵稻秸提高了绵羊瘤胃普雷沃氏菌相对丰度、丙酸产量、NDF 和 ADF 消化率,Guo 等^[40]研究发现绵羊瘤胃普雷沃氏菌属为最优势属,全株玉米加菌青贮提高了挥发性脂肪酸浓度。本试验中发酵豆秸组瘤胃 NH₃-N 浓度上升,说明蛋白更易被动物消化吸收,异丁酸含量上升,戊酸含量下降,乙酸、丙酸和总挥发性脂肪酸含量有一定程度的提高,CP、NDF 和 ADF 表观消化率提高,与以上研究结果基本一致,说明添加发酵豆秸提高瘤胃内消化酶和微生物菌群的活性,促进了秸秆细胞壁纤维结构降解和瘤胃蛋白质降解,改善了瘤胃发酵,从而使养分表观消化率提高。

4 结论

在湖羊日粮中以 66% 的菌酶协同发酵豆秸替代原有豆秸可以改善瘤胃发酵和微生物组成,提高养分的表观消化率,增强湖羊机体的抗氧化性能和免疫力,降低湖羊料重比,进而可提高养殖效益。

参考文献 References:

- [1] Tao L, Feng W X, Wang Y R, *et al.* Effects of microecological agents on the fermentation quality, nutrition composition and *in situ* ruminal degradability of corn stalk silage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(9): 152–160.
陶莲, 冯文晓, 王玉荣, 等. 微生态制剂对玉米秸秆青贮发酵品质、营养成分及瘤胃降解率的影响. *草业学报*, 2016, 25(9): 152–160.
- [2] Ke W C, Ding W R, Xu D M, *et al.* Effects of addition of malic or citric acids on fermentation quality and chemical characteristics of alfalfa silage. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(11): 8958–8966.
- [3] Zhang Y, Huang X Y, Chen X Z, *et al.* Effects of fermented *Hypsizygus marmoreus* mushroom residue on slaughter performance and mutton quality of goats. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 195–205.
张耀, 黄小云, 陈鑫珠, 等. 海鲜菇菌糠发酵饲料对山羊屠宰性能及肉品质的影响. *草业学报*, 2022, 31(9): 195–205.
- [4] Guo J, Xie Y, Yu Z, *et al.* Effect of *Lactobacillus plantarum* expressing multifunctional glycoside hydrolases on the characteristics of alfalfa silage. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(19): 7983–7995.
- [5] Jiang C Y, Wu Y H, Wang T Y, *et al.* The screening of symbiotic strain of producing energy feeds with potato residues by solid-state fermentation. *Feed Industry*, 2012, 33(11): 37–39.
江成英, 吴耘红, 王拓一, 等. 固态发酵马铃薯渣生产能量饲料共生菌株的筛选. *饲料工业*, 2012, 33(11): 37–39.
- [6] Animal Husbandry. Nutrient requirements of meat-type sheep and goat: NY/T 816-2021. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
全国畜牧业标准化技术委员会. 肉羊营养需要量: NY/T 816-2021. 北京: 中国农业出版社, 2022.
- [7] Zhang L Y. Feed analysis and feed quality testing technology. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- [8] Van Soest P J, Robe Rtson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 1991, 74(10): 3583–3597.
- [9] Zhang C, Li J, Wang Y P, *et al.* Comparison of determination of dietary nutrient digestibility by different endogenous indicator methods and total feces collection method for goat. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(7): 3274–3281.
张晨, 李静, 王云鹏, 等. 全收粪法与不同内源指示剂法测定山羊饲料中养分消化率的比较. *动物营养学报*, 2020, 32(7): 3274–3281.

- [10] Feng Z C, Gao M. Improvement of a colorimetric method for determination of ammonia nitrogen in rumen fluid. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2010, 31(Z1): 37.
冯宗慈, 高民. 通过比色测定瘤胃液氨氮含量方法的改进. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(Z1): 37.
- [11] Qin W L. Determination of rumen volatile fatty acids by means of gas chromatography. *Journal of Nanjing Agricultural College*, 1982(4): 110–116.
秦为琳. 应用气相色谱测定瘤胃挥发性脂肪酸方法的研究改进. *南京农学院学报*, 1982(4): 110–116.
- [12] Zhao R J, Yan H Y, Tan Y P, *et al.* CTAB method for extracting animal DNA. *Science and Technology of West China*, 2011, 10(21): 7–8.
赵瑞杰, 严海燕, 谭艳平, 等. CTAB法提取动物DNA. *中国西部科技*, 2011, 10(21): 7–8.
- [13] Kim T I, Mayakrishnan V, Lim D H, *et al.* Effect of fermented total mixed rations on the growth performance, carcass and meat quality characteristics of Hanwoo steers. *Animal Science Journal*, 2017, 89(3): 606–615.
- [14] Zhou C. Optimization of fermentation conditions in rape straw and its effects on growth performances and rumen fermentation. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.
周闯. 油菜秸秆发酵条件优化及对山羊生长性能、瘤胃发酵的影响. 南京: 南京农业大学, 2021.
- [15] Su X Y, Shen Y A, Wang Y P. Effects of compound probiotic fermented feed on growth performance, nutrient apparent digestibility, fecal microbial flora, and serum indexes of mutton sheep. *Feed Research*, 2024, 47(4): 13–17.
苏晓月, 沈亚安, 王艳萍. 复合益生菌发酵饲料对肉羊生长性能、养分表观消化率、粪便微生物菌群和血清指标的影响. *饲料研究*, 2024, 47(4): 13–17.
- [16] Han Y J. Effects of microbial fermentation of straw on production performance and nutrients apparent digestibility for mutton sheep. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015.
韩颖洁. 微生物发酵秸秆对肉羊生产性能和营养物质表观消化率的影响. 保定: 河北农业大学, 2015.
- [17] Ahuja V, Bhatt A K. *Trichoderma viride* (MTCC 800): a potential candidate for agri-horti waste utilization by solid state fermentation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018, 15(12): 2679–2684.
- [18] Yang Z K, Yin Y J, Xu W W, *et al.* Enzymatic properties of cellulase and its application in livestock and poultry production. *Chinese Journal of Animal Science*, 2024, 60(5): 88–93.
阳治康, 殷运菊, 徐伟伟, 等. 纤维素酶的酶学特性及在畜禽生产中的应用研究进展. *中国畜牧杂志*, 2024, 60(5): 88–93.
- [19] Liu W, Yu F M, Ma Q P, *et al.* Application of xylanase in silage and ruminant diet. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 331–339.
刘伟, 于凤民, 马千鹏, 等. 木聚糖酶在青贮及反刍动物日粮中的应用. *草地学报*, 2024, 32(1): 331–339.
- [20] Kieliszek M, Kot A M, Bzducha-Wróbel A, *et al.* Biotechnological use of *Candida* yeasts in the food industry: A review. *Fungal Biology Reviews*, 2017, 31(4): 185–198.
- [21] Zhou H, Wang C, Ye J, *et al.* Effects of dietary supplementation of fermented *Ginkgo biloba* L. residues on growth performance, nutrient digestibility, serum biochemical parameters and immune function in weaned piglets. *Animal Science Journal*, 2015, 86(8): 790–799.
- [22] Huang J, Han Y Z, Pan S L, *et al.* Effects of different energy and protein levels on growth performance, serum biochemical indexes and economic benefits of porcupine. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2021, 53(5): 31–36.
黄晶, 韩云珍, 潘书磊, 等. 不同能量和蛋白质水平日粮对豪猪生长性能、血清生化指标及经济效益的影响. *畜牧与兽医*, 2021, 53(5): 31–36.
- [23] Guo Y X, Li H B, Lin Y T, *et al.* Effects of partial substitution of peanut vine by semi-dry ammoniated wheat straw silage on lactation performance, nutrient digestibility and serum indices of Laoshan dairy goats. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(5): 3154–3163.
郭艺璇, 李海滨, 林英庭, 等. 半干氨贮麦秸替代部分花生秧对崂山奶山羊产奶性能、养分消化率以及血清指标的影响. *动物营养学报*, 2023, 35(5): 3154–3163.
- [24] Huo X, Wang A L, Yang J M. Antioxidant effects of sulfur-containing amino acids. *Bulletin of Biology*, 2006, 41(4): 3–4.
霍湘, 王安利, 杨建梅. 含硫氨基酸的抗氧化作用. *生物学通报*, 2006, 41(4): 3–4.
- [25] Lu J, Zhang X, Liu Y, *et al.* Effect of fermented corn-soybean meal on serum immunity, the expression of genes related to gut immunity, gut microbiota, and bacterial metabolites in grower-finisher pigs. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 2620.
- [26] Bu Y, Zheng N, Wang J Q, *et al.* Research progress on immunoglobulin regulating gastrointestinal health and microbial function

in animals. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2022, 49(10): 3800–3808.

卜莹, 郑楠, 王加启, 等. 免疫球蛋白调控动物胃肠道健康及微生物功能的研究进展. *中国畜牧兽医*, 2022, 49(10): 3800–3808.

- [27] Vidarsson G, Dekkers G, Rispens T. IgG subclasses and allotypes: from structure to effector functions. *Frontiers in Immunology*, 2014, 5: 520.
- [28] Keyt B A, Baliga R, Sinclair A M, *et al.* Structure, function, and therapeutic use of IgM antibodies. *Antibodies*, 2020, 9(4): 53.
- [29] Chen K, Chen H, Liu D J. Effects of fermented feed on goat production performance. *China Feed*, 2018(2): 25–29.
陈柯, 陈华, 刘大军. 微生物发酵秸秆对山羊生产性能的影响及其机理研究. *中国饲料*, 2018(2): 25–29.
- [30] Xiang S W, Zheng L, Zhu L B, *et al.* Fermentation process of *Candida utilis* for selenium-enriched and production of glutathione. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(1): 165–168, 174.
项驯文, 郑蕾, 朱龙宝, 等. 产阮假丝酵母富硒及产谷胱甘肽的培养工艺. *食品工业科技*, 2017, 38(1): 165–168, 174.
- [31] Gong L, Wang B, Mei X, *et al.* Effects of three probiotic *Bacillus* on growth performance, digestive enzyme activities, antioxidative capacity, serum immunity, and biochemical parameters in broilers. *Animal Science Journal*, 2018, 89(11): 1561–1571.
- [32] Jang S, Lee D, Jang I S, *et al.* The culture of *Pediococcus pentosaceus* T1 inhibits *Listeria* proliferation in salmon fillets and controls maturation of kimchi. *Food Technology Biotechnology*, 2015, 53(1): 29–37.
- [33] Cao Z, Pan H, Tong H, *et al.* *In vitro* evaluation of probiotic potential of *Pediococcus pentosaceus* L1 isolated from paocai—a Chinese fermented vegetable. *Annals of Microbiology*, 2015, 66(3): 963–971.
- [34] Jiang S, Cai L, Lv L, *et al.* *Pediococcus pentosaceus*, a future additive or probiotic candidate. *Microbial Cell Factories*, 2021, 20(1): 45.
- [35] Xing B S, Han Y, Cao S, *et al.* Cosubstrate strategy for enhancing lignocellulose degradation during rumen fermentation *in vitro*: Characteristics and microorganism composition. *Chemosphere*, 2020, 250: 126104.
- [36] Jiang N, Li X W, Zhang N, *et al.* Effect of different dietary energy and protein levels on rumen fermentation parameters and rumen microflora in growing yaks. *China Herbivore Science*, 2024, 44(2): 18–26.
姜南, 李学威, 张楠, 等. 日粮不同能量和蛋白质水平对生长期牦牛瘤胃发酵参数及瘤胃菌群的影响. *中国草食动物科学*, 2024, 44(2): 18–26.
- [37] Lee J E, Lee S, Sung J, *et al.* Analysis of human and animal fecal microbiota for microbial source tracking. *The ISME Journal*, 2011, 5(2): 362–365.
- [38] Li M, Zhou M, Adamowicz E, *et al.* Characterization of bovine ruminal epithelial bacterial communities using 16S rRNA sequencing, PCR–DGGE, and qRT–PCR analysis. *Studies of Veterinary Microbiology*, 2012, 155(1): 72–80.
- [39] Hook S E, Steele M A, Northwood K S, *et al.* Impact of subacute ruminal acidosis (SARA) adaptation and recovery on the density and diversity of bacteria in the rumen of dairy cows. *Studies of FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 78(2): 275–284.
- [40] Guo W, Guo X J, Xu L N, *et al.* Effect of whole-plant corn silage treated with lignocellulose-degrading bacteria on growth performance, rumen fermentation, and rumen microflora in sheep. *Animal*, 2022, 16(7): 100576.
- [41] Ye Y Z, Xia Z Q, Lou Y W, *et al.* Effect of microbial fermentation feed on fattening performance, microflora communities of Huyang sheep. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(4): 881–890.
叶以哲, 夏宗群, 娄佑武, 等. 微生物发酵秸秆日粮对湖羊育肥性能及其肠道微生物群落结构的影响. *江西农业大学学报*, 2021, 43(4): 881–890.
- [42] Huang H L. Effects of microbial fermentation of peanut straw feed on intestinal microflora and preliminary application of meat goat. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.
黄海玲. 微生物发酵花生秸秆对肉山羊肠道微生物群落结构的影响及初步应用. 南昌: 江西农业大学, 2020.
- [43] Avgustin G, Wallace R J, Flint H J. Phenotypic diversity among ruminal isolates of *Prevotella ruminicola*: proposal of *Prevotella brevis* sp. nov., *Prevotella bryantii* sp. nov., and *Prevotella albensis* sp. nov. and redefinition of *Prevotella ruminicola*. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1997, 47(2): 284–288.
- [44] Zhang X J, Wang L Z. Effects of dietary neutral detergent fibre level on structure and composition of rumen bacteria in goats. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(4): 1377–1386.
张雪娇, 王立志. 饲料中性洗涤纤维水平对山羊瘤胃细菌结构及组成的影响. *动物营养学报*, 2018, 30(4): 1377–1386.
- [45] Wang J, Zhang L Q, Wang W L, *et al.* Effects of caragana fermented feed on growth performance and rumen flora of *Ningxia Tan* sheep. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(2): 1035–1045.

- 王锦, 张连全, 王文亮, 等. 柠条发酵饲料对宁夏滩羊生长性能及瘤胃微生物区系的影响. *动物营养学报*, 2023, 35(2): 1035–1045.
- [46] Xu Y X, Li Z P, Shen J S, *et al.* Microbe-mediated ruminal ammonia production in ruminants and its impacts on rumen function. *Acta Microbiologica Sinica*, 2019, 59(5): 781–788.
徐诣轩, 李志鹏, 申军士, 等. 微生物介导反刍动物瘤胃氨生成及其对瘤胃功能的影响. *微生物学报*, 2019, 59(5): 781–788.
- [47] Wang H R, Qin T, Wang C. Effects of artemisinin on the rumen fermentation and microbial nitrogen recycling rate in goats. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(24): 4904–4914.
王洪荣, 秦韬, 王超. 青蒿素对山羊瘤胃发酵和微生物氮素微循环的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(24): 4904–4914.
- [48] Yang C T, Diao Q Y, Si B W, *et al.* Absorption and regulation of volatile fatty acids in the ruminal epithelium. *Chinese Journal of Animal Science*, 2015, 51(7): 78–83.
杨春涛, 刁其玉, 司丙文, 等. 挥发性脂肪酸在反刍动物瘤胃上皮吸收转运及调节作用. *中国畜牧杂志*, 2015, 51(7): 78–83.
- [49] Lai A Q, Jin Y D, Chen B L, *et al.* Effects of fermented sugarcane bagasse on growth performance, nutrient apparent digestibility, rumen fermentation characteristics and rumen microflora of beef cattle. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(3): 1685–1697.
赖安强, 金亚东, 陈彬龙, 等. 发酵甘蔗渣对肉牛生长性能、养分表观消化率、瘤胃发酵特性和瘤胃菌群的影响. *动物营养学报*, 2024, 36(3): 1685–1697.
- [50] Wang X F, Gao Y, Tian F, *et al.* Effects of microbial fermented expanded straw feed on growth performance and gastrointestinal tract development of Dorper and Thin-tailed Han crossbred sheep. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2022, 43(2): 28–34.
王晓飞, 高源, 田丰, 等. 膨化秸秆微生物发酵饲料对杜寒杂交肉羊生长性能和胃肠道发育的影响. *畜牧与饲料科学*, 2022, 43(2): 28–34.
- [51] Jin H, Bai Y, Deng M Y, *et al.* Effects of fermented feed on production performance, nutrient apparent digestibility, rumen fermentation characteristics and meat quality of fattening Hu sheep. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2024, 47(1): 151–156.
金宏, 柏杨, 邓孟云, 等. 发酵饲料对育肥湖羊生产性能、养分表观消化率、瘤胃发酵特性及肉品质的影响. *南京农业大学学报*, 2024, 47(1): 151–156.
- [52] Kyawt Y Y, Aung M, Xu Y, *et al.* Dynamic changes of rumen microbiota and serum metabolome revealed increases in meat quality and growth performances of sheep fed bio-fermented rice straw. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2024, 15(1): 34.