

辅料类型和混合比例对豆渣发酵参数及营养成分的影响

王家骏, 韦竣玲, 田晨丰, 邓 铭, 刘德武, 孙宝丽*, 郭勇庆*

(华南农业大学动物科学学院, 广东广州 510642)

摘 要: [目的]针对鲜豆渣水分过高难以直接发酵的问题, 研究干燥辅料类型及混合比例对豆渣发酵参数的影响, 筛选适宜的发酵工艺。[方法]选取木薯酒糟渣、玉米芯粉和水稻秸秆粉作为水分调节辅料, 设置3 个混合比例(92:8、84:16和76:24), 并以纯豆渣作为高水分对照组。所有组别均接种 1×10^7 CFU/g的植物乳杆菌, 发酵30 天后测定相关指标。[结果]玉米芯粉和水稻秸秆粉能有效降低物料水分, 提高发酵品质; 其中玉米芯粉组在84:16比例下乳酸含量最高, 感官品质优良。而在76:24的高辅料比例下, 玉米芯粉组出现局部霉变, 提示了物料压实度与水分的临界平衡点。木薯酒糟渣组因高灰分带来的强缓冲性及缺乏水溶性碳水化合物, 导致pH值显著高于其他组。[结论]玉米芯粉按84:16比例混合是优化豆渣发酵与营养保留的最佳工艺。

关键词: 豆渣; 发酵技术; 发酵参数; 营养价值

文章编号: 1671-4393(2026)06-0040-09

DOI:10.12377/1671-4393.26.06.05

Effects of Type and Mixing Ratio of Auxiliary Materials on Fermentation Parameters and Nutrient Composition of Soybean Residues

WANG Jiajun, WEI Junling, TIAN Chenfeng, DENG Ming, LIU Dewu, SUN Baoli*, GUO Yongqing*

(College of Animal Science, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong 510642)

Abstract: [Objective]Aiming at the problem that fresh soybean residues are difficult to ferment directly due to excessively high moisture content, this study was conducted to explore the effects of types and mixing ratios of

基金项目: 广东省现代农业产业技术体系牛羊创新团队-副首席岗位专家项目(粤农农函〔2025〕106号)

作者简介: 王家骏(2002-), 男, 广东梅州人, 在读硕士, 研究方向为动物健康养殖与安全生产、动物遗传育种与繁殖;

韦竣玲(2001-), 女, 贵州黔南布依族苗族自治州人, 硕士, 研究方向为动物健康养殖与安全生产;

田晨丰(2001-), 男, 山西晋城人, 硕士, 研究方向为动物健康养殖与安全生产;

邓 铭(1986-), 男, 湖南石门人, 土家族, 博士, 研究方向为动物健康养殖与安全生产、牧草种植与加工利用;

刘德武(1966-), 男, 安徽肥东人, 博士, 教授, 研究方向为动物遗传育种与繁殖、动物健康养殖与安全生产。

***通信作者:** 孙宝丽(1981-), 女, 河南许昌人, 博士, 教授, 研究方向为动物健康养殖与安全生产、营养与免疫、饲料资源开发利用等;

郭勇庆(1981-), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 研究方向为反刍动物营养与健康养殖。

dry auxiliary materials on the fermentation parameters of soybean residues, and to screen out suitable fermentation processes.[Method]Cassava distillers' grains, corn cob powder and rice straw powder were selected as moisture-regulating auxiliary materials.Three mixing ratios (92 : 8, 84 : 16 and 76 : 24) were set, with pure soybean residues as the high-moisture control group.All groups were inoculated with *Lactobacillus plantarum* at 1×10^7 CFU/g, and related indexes were determined after 30 days of fermentation.[Result]Corn cob powder and rice straw powder could effectively reduce the moisture content of materials and improve fermentation quality. Among them, the corn cob powder group had the highest lactic acid content and excellent sensory quality at the mixing ratio of 84:16.However, local mould growth occurred in the corn cob powder group at the high auxiliary material ratio of 76 : 24, indicating a critical equilibrium point between material compaction and moisture.Due to the strong buffering capacity caused by high ash content and the lack of water-soluble carbohydrates, the pH value of the cassava distillers' grains group was significantly higher than that of other groups.[Conclusion]Mixing soybean residues with corn cob powder at a ratio of 84 : 16 is the optimal process for optimizing soybean residue fermentation and nutrient retention.

Keywords: soybean residue; fermentation technology; fermentation parameters; nutritional value

豆渣是大豆加工为豆腐、腐竹等豆制品过程中产生的重要副产品, 富含膳食纤维、蛋白质及异黄酮、皂苷等生物活性成分, 具有较高的营养价值^[1]。然而, 豆渣直接用作饲料仍存在诸多限制。一方面, 其适口性较差, 尤其是其中的皂苷虽然具有一定的生理调节功能, 但高含量会产生明显的苦涩味, 影响动物采食^[2]; 另一方面, 豆渣含水量高、极易腐败变质, 同时还含有胰蛋白酶抑制因子等抗营养成分, 可能干扰动物的正常消化吸收。此外, 当前我国每年产生大量豆渣, 但资源化利用率偏低, 约有50%被直接填埋或焚烧处理, 既造成资源浪费, 也可释放温室气体, 带来环境污染, 不利于农业绿色低碳发展^[3]。

针对新鲜豆渣存在的不足, 发酵技术被认为是有效的保存方法。刘焱等^[4]通采用乳酸菌、酵母菌等复合菌种对豆渣进行厌氧发酵, 可分解抗营养因子并提高蛋白质消化率。Liu等^[5]通过复合菌种(枯草芽孢杆菌、嗜酸乳杆菌等)发酵豆渣与麦麸混合物(FBW), 降低抗营养因子, 提升营养价值; 并通过饲喂实验得出, 日粮中6%FBW为最佳添加比例, 可显著改善母猪的采食量、产奶量及仔猪生长, 优

化肠道健康。普宣宣等^[6]探索混贮工艺, 将豆渣、麦麸和玉米粉按鲜重8 : 1 : 1混合(水分65%), 添加复合菌剂(枯草芽孢杆菌、乳酸菌等)厌氧发酵30天, 获得pH值4.05、乳酸含量44.6 g/kg的高品质混贮饲料, 粗蛋白质含量由17.4%提升至19.0%, 为豆渣与其他饲料的协同利用提供了新思路。

本试验以豆渣资源化利用为目的, 探索水稻秸秆、木薯酒糟渣、玉米芯粉3种农副产物作为辅料对豆渣固态发酵参数及营养价值的调控作用。通过明确辅料类型与混合比例对发酵产物感官特性、发酵参数及营养组分的影响规律, 筛选较优发酵工艺, 为豆渣饲料化利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

豆渣取自学校附近市场, 为豆腐加工副产物。木薯酒糟渣和玉米芯粉购自临朐县华懋饲料有限公司, 为风干粉状。水稻秸秆取自清远山水稻种植基地, 为刈割后自然风干后的形态, 用凌鹰牌15B多功能粉碎机粉碎并过8目筛; 植物乳杆菌(ps-8)由内蒙古科拓生物公司提供, 以冷冻干燥工艺制成粉

末状制剂，含菌量为 1×10^{10} CFU/g。

1.2 试验设计

本试验采用双因素完全随机设计，因素A为辅料类型，设有木薯酒糟渣、玉米芯粉、水稻秸秆粉，因素B为豆渣与辅料的混合比例，设有92：8、84：16和76：24；设纯豆渣为对照组。总计10个处理组（3个辅料类型×3个混合比例，1个对照组），每个处理组共设3个重复，共30个聚乙烯发酵袋（20 cm×30 cm）。

各发酵原料的质量为300 g，称取各混合比例的豆渣和辅料于塑料盆中用手混合均匀，按照每克发酵原料接种 1×10^{10} CFU的标准，称取0.3 g含菌量为 1×10^{10} CFU/g的植物乳杆菌冻干粉，溶于约8 mL蒸馏水后，用小喷壶均匀喷洒在发酵原料表面，并再次用手充分混匀；对照组喷洒同等处理的菌液。随后将处理后的混合原料装入聚乙烯发酵袋中，用真空包装机抽真空并封口，置于25℃避光环境下进行厌氧发酵30天。

发酵结束后，开袋取样进行感官评定，并测定各项理化指标。每袋随机取5 g发酵样品于50 mL离心管中，加入45 mL去离子水，在4℃下浸提24 h后过滤，所获滤液用于pH值、氨态氮、乳酸等发酵参数分析。剩余样品在65℃下烘干48 h至恒重，冷却称重后粉碎过40目筛，密封保存，用于营养成分的测定。

1.3 样品采集和测定

1.3.1 感官评定

发酵结束后（第30天）进行开包感官评定。评定小组由5名经过培训的专业人员组成，采用盲测法对发酵豆渣的气味（5分）、色泽（5分）、质地（5分）和色泽均匀度（5分）进行评分，各项分数相加为总分（满分20分）。感官评定参考张明等^[7]设计的豆渣发酵成品感官评定标准。所得原始评分数据采用SPSS软件进行单因素方差分析，并以Duncan’s法进行多重比较，以评价不同处理间感官的显著性差异。

1.3.2 发酵参数测定

取发酵料浸提液用台式酸度计FE28-Meter测

量pH值。采用苯酚-次氯酸钠比色法测定氨态氮含量^[8]。使用气相色谱仪GC7980测定乙酸（Acetic acid, AA）、丙酸（propionic acid, PA）、丁酸（butyric acid, BA）含量^[9]。乳酸（lactic acid, LA）含量用对羟基联苯比色法测定^[10]。

1.3.3 营养成分测定

采用65℃恒温下烘48 h后再以105℃烘4 h左右至恒重测定干物质（Dry Matter, DM）含量。粗灰分（Ash）测定采用《GB/T 6438—2007饲料中粗灰分的测定》。样品中CP的含量用石墨消解仪SH420F和海能凯氏定氮仪K9840测定^[11]。用范氏洗涤纤维分析法测定样品中性洗涤纤维（Neutral Detergent Fiber, NDF）含量和酸性洗涤纤维（Acid Detergent Fiber, ADF）含量^[12]。采用硫酸-蒽酮比色法测定样品中水溶性碳水化合物（Water-soluble Carbohydrates, WSC）含量^[13]。干物质损失率（Dry Matter Loss, DML）计算公式为：

$$DML(\%) = \frac{\text{发酵前总干物质质量} - \text{发酵后干物质质量}}{\text{发酵前干物质质量}} \times 100\%$$

1.4 数据统计分析

用Excel作数据的收集与统计，随后导入SPSS 27.0软件中，分析主效应辅料类型或混合比例时，与对照组一起对发酵样品的营养成分、发酵参数进行单因素方差分析；以邓肯方法进行多重比较，显著性水平为 $P < 0.05$ 。分析辅料类型和混合比例交互效应时，若数据符合正态分布和方差齐性就用双因素方差分析，不符合则用双因素非参数方差分析^[14]。

2 结果与分析

2.1 原豆渣及辅料营养成分

由表1可知，豆渣的DM含量最低（16.60%），3种辅料的DM含量均为90%左右。木薯酒糟渣的CP含量最高，达到23.48%，而水稻秸秆粉和玉米芯粉的CP含量仅为3.03%和2.40%。水稻秸秆粉和玉米芯粉均有较高的NDF和ADF。木薯酒糟渣的

表 1 原豆渣及辅料营养成分（干物质基础，%）

Table 1 Nutrient Composition of Raw Soybean Residues and Auxiliary Materials (Dry Matter Basis, %)				
项目	豆渣	玉米芯粉	水稻秸秆粉	木薯酒糟渣
DM	16.60	92.89	93.77	89.79
CP	11.81	2.40	3.03	23.48
NDF	44.77	76.34	77.30	58.38
ADF	28.63	47.95	44.26	37.79
WSC	1.13	2.04	3.54	0.31
Ash	3.48	3.02	9.83	15.63

WSC含量极低，仅为0.31%，而粗灰分含量较高，达15.63%。

2.2 发酵豆渣的感官评定结果

本试验中，豆渣因添加了其他辅料而在色泽上表现出豆渣本身的黄白与辅料颜色的混合色。水稻秸秆粉和玉米芯粉本身呈金黄色和黄白色，与豆渣混合后整体呈黄白色，而木薯酒糟渣原本呈棕褐色，与豆渣混合后整体呈黄褐色。发酵过后，豆渣组有些许酸味；水稻秸秆粉组伴有豆渣伴随水稻秸秆的清香味；木薯酒糟渣组均存在气味刺鼻和些许板结成团问题，且较发酵前颜色偏褐色问题，感官评分都不高，肉眼却没有发现明显霉变表现；玉米芯粉组在92：8、84：16两各比例下都能闻到豆渣混着玉米芯的清香味，不过在92：8比例下有板结成团问题，而玉米芯粉76：24组发现局部发黑霉变，在

霉变处有些许腐败异味。此外，在产气量方面，木薯酒糟渣76：24组发酵后出现了严重的鼓包现象，其他试验组均为少量产气。

对豆渣混合发酵后的感官评定见表2。各处理组的感官表现差异显著（ $P<0.05$ ）。玉米芯粉的84：16组总分最高（18.90分），其在气味、色泽和质地等各项指标上均表现出显著优势。而玉米芯粉76：24组总分仅为5.90分，各项评分均显著低于其他组，这与其出现的局部发霉及酸败气味直接相关。这再次证明，水分过低且物料疏松会破坏厌氧环境，导致感官品质下跌。

2.3 辅料类型和混合比例对发酵参数的影响

在对挥发酸的检测中，只有对照组、木薯酒糟渣组检测到丙酸，只有木薯酒糟渣组、豆渣+玉米芯粉76：24组检测到丁酸。辅料类型和混合比例对豆渣发酵参数的影响见表3。辅料类型对发酵产物的pH值、乳酸含量、乙酸含量、丙酸和丁酸含量有极显著影响（ $P<0.01$ ），对氨态氮含量无显著影响（ $P>0.05$ ）；混合比例对乙酸含量有显著影响（ $P<0.05$ ），对pH值、氨态氮、乳酸、丙酸、丁酸含量无显著影响（ $P>0.05$ ）。辅料类型和混合比例交互作用对pH值、氨态氮、乙酸、丙酸、丁酸含量有极显著影响（ $P<0.01$ ）。当辅料分别为木薯酒糟渣和玉米芯粉时pH值最高和最低，都与对照组pH

表 2 豆渣混合发酵的感官评定

Table 2 Sensory Evaluation of Mixed Fermented Soybean Residues

单位：分

Unit: score

辅料类型	混合比例 (豆渣：辅料)	指标				总分
		色泽	色泽均匀度	质地	气味	
豆渣	100：0	3.50±0.25 ^b	3.50±0.20 ^b	3.20±0.15 ^b	3.60±0.15 ^b	13.80±0.75 ^b
	92：8	4.80±0.15 ^a	4.70±0.10 ^a	4.50±0.15 ^a	4.75±0.10 ^a	18.75±0.50 ^a
玉米芯粉	84：16	4.75±0.20 ^a	4.75±0.10 ^a	4.60±0.15 ^a	4.80±0.10 ^a	18.90±0.55 ^a
	76：24	2.00±0.50 ^d	1.20±0.30 ^d	1.50±0.45 ^d	1.20±0.50 ^d	5.90±1.75 ^d
水稻秸秆粉	92：8	4.50±0.20 ^a	4.50±0.20 ^a	4.30±0.20 ^a	4.50±0.15 ^a	17.80±0.75 ^a
	84：16	4.50±0.25 ^a	4.45±0.15 ^a	4.30±0.15 ^a	4.40±0.20 ^a	17.65±0.75 ^a
	76：24	4.20±0.30 ^a	4.10±0.25 ^a	4.00±0.25 ^a	4.20±0.25 ^a	16.50±1.05 ^a
木薯酒糟渣	92：8	3.50±0.20 ^b	3.30±0.15 ^b	3.00±0.20 ^b	3.20±0.20 ^b	13.00±0.75 ^b
	84：16	3.50±0.15 ^b	3.30±0.25 ^b	3.00±0.25 ^b	3.20±0.15 ^b	13.00±0.80 ^b
	76：24	3.00±0.40 ^c	3.30±0.35 ^b	2.50±0.40 ^c	2.50±0.30 ^c	10.50±1.45 ^c

注：同列数据肩标有不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）

表 3 辅料类型和混合比例对豆渣发酵参数的影响							单位: g/kg DM
Table 3 Effects of Auxiliary Material Type and Mixing Ratio on Fermentation Parameters of Soybean Residues							Unit: g/kg DM
处理	项目	pH 值	氨态氮	乳酸	乙酸	丙酸	丁酸
辅料类型	豆渣	4.23±0.03 ^b	0.66±0.00	13.36±1.33 ^a	16.68±0.80 ^a	7.11±6.18 ^a	-
	玉米芯粉	3.64±0.04 ^c	0.59±0.11	15.96±6.28 ^b	17.33±1.11 ^d	-	0.44±0.96 ^b
	水稻秸秆粉	3.83±0.17 ^c	0.47±0.07	14.01±2.19 ^b	11.96±2.48 ^b	-	-
	木薯酒糟渣	5.09±0.49 ^a	0.45±0.19	8.03±2.59 ^a	15.49±1.13 ^c	4.91±6.56 ^a	10.84±6.56 ^a
混合比例	100 : 0	4.23±0.03	0.66±0.00	13.36±1.33	16.68±0.80 ^a	7.11±6.18	-
	92 : 8	4.09±0.43	0.52±0.19	15.01±3.89	20.03±2.25 ^b	0.84±2.49	1.17±7.78
	84 : 16	4.17±0.75	0.44±0.07	13.21±6.90	14.37±3.19 ^b	2.00±3.01	4.03±6.46
	76 : 24	4.31±0.94	0.37±0.15	10.80±4.68	12.02±2.45 ^b	1.78±2.69	5.02±6.76
混合比例	辅料类型	<0.001	0.710	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	混合比例	0.106	0.842	0.378	0.020	0.363	0.232
	辅料类型 × 混合比例	0.004	<0.001	0.288	<0.001	<0.001	<0.001

注：同列数据后标有的不同小写字母表示相同处理不同项目间差异显著（ $P<0.05$ ）。“-”表示未检出

值有显著差异（ $P<0.05$ ）；当辅料为玉米芯粉时，乳酸含量和乙酸含量最高，分别为15.96 g/kg DM和17.33 g/kg DM，乳酸含量显著高于木薯酒糟渣组和纯豆渣的对照组（ $P<0.05$ ），而与水稻秸秆粉组差异不显著（ $P>0.05$ ），乙酸含量显著高于其他辅料类型（ $P<0.05$ ）。随着辅料在混合发酵中占比的升高，pH值、氨态氮含量有上升趋势，但不显著（ $P>0.05$ ）。

2.4 辅料类型和混合比例对豆渣发酵营养成分的影响

鉴于玉米芯粉76：24组在感官评定中出现局部发霉现象，该组后续营养成分测定仅作为极端比例下的参考数据，取样时严格避开了霉变部位（取中层未变质部分），旨在对比分析发酵失败对养分损耗的影响。

发酵后豆渣+玉米芯粉76：24组出现霉变，干物质损失较多，营养成分测定采样的是豆渣+玉米芯粉76：24组未发霉部分。发酵后各组的干物质损失率如表4所示。豆渣和水稻秸秆粉在84：16的比例下干物质损失率最低，为2.09%，而豆渣与玉米芯粉在76：24比例下干物质损失率最高，达11.20%。

辅料类型和混合比例对豆渣发酵营养成分的影响见表5。辅料类型和混合比例对发酵后的DM含量均为极显著影响（ $P<0.01$ ）。其中添加辅料

后DM含量都显著高于纯豆渣组（ $P<0.05$ ）。随着辅料的比 例增加，DM含量显著增加（ $P<0.05$ ）。辅料类型和混合比例交互作用对DM有极显著影响（ $P<0.01$ ）。辅料类型对NDF含量存在极显著影响（ $P<0.01$ ），对ADF含量无显著影响（ $P>0.05$ ）。木薯酒糟渣组和玉米芯粉组NDF含量显著低于水稻秸秆粉组（ $P<0.05$ ）。添加了辅料的组别NDF含量均显著高于纯豆渣组（ $P<0.05$ ）。混合比例对NDF和ADF含量有极显著影响（ $P<0.01$ ），二者均随着辅料的占比升高而显著升高（ $P<0.05$ ），这是由于三种辅料的NDF、ADF含量都高于豆渣。辅料类型和混合比例交互作用对NDF、ADF含量无显著影响（ $P>0.05$ ）。

辅料类型对WSC含量有极显著影响（ $P<0.01$ ），水稻秸秆粉组和玉米芯粉组的WSC含量显著高于木薯酒糟渣和纯豆渣组（ $P<0.05$ ）。混合比例对WSC

表 4 干物质损失率 (%)			
Table 4 Dry Matter Loss Rate (%)			
辅料类型	DML		
	92 : 8	84 : 16	76 : 24
豆渣 + 水稻秸秆粉	7.84±2.16	2.09±0.37	5.57±0.82
豆渣 + 木薯酒糟渣	8.97±1.36	7.92±1.29	4.64±0.64
豆渣 + 玉米芯粉	4.73±1.24	4.39±1.44	11.20±1.31

的影响也极显著 ($P<0.01$)，84：16组显著高于纯豆渣组 ($P<0.05$)，三种混合比例间无显著差异 ($P>0.05$)。辅料类型和混合比例交互作用对WSC含量没有显著影响 ($P>0.05$)。辅料类型对CP含量有极显著影响 ($P<0.01$)，木薯酒糟渣组CP含量显著高于其他处理组；纯豆渣组CP含量显著高于玉米芯粉组和水稻秸秆粉组 ($P<0.05$)。而发酵后CP含量在不同混合比例间差异不显著 ($P>0.05$)。辅料类型和混合比例交互作用对CP含量有极显著影响 ($P<0.01$)。辅料类型对粗灰分含量有极显著影响 ($P<0.01$)，木薯酒糟渣组显著高于其他组 ($P<0.05$)；水稻秸秆粉组显著低于木薯酒糟渣组 ($P<0.05$)，显著高于玉米芯粉组和纯豆渣组 ($P<0.05$)。混合比例对粗灰分含量的影响也极显著 ($P<0.01$)，随着辅料的比例增加，粗灰分含量显著升高 ($P<0.05$)。辅料类型和混合比例交互作用对粗灰分含量有极显著影响 ($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 辅料类型和混合比例对发酵豆渣感官评定的影响

为了评估发酵产品的感官品质，首先要进行感官评分。本试验中纯豆渣组有些许酸味，这是由于植物乳杆菌ps-8未能及时将产生的酸通过酶酯化反

应生成酯类等物质，这与Qiu等^[15]研究一致。木薯酒糟渣组3个比例下和玉米芯粉92：8组出现了板结现象，板结的出现会使发酵体系中空气流通受阻而使发酵中断^[16]。

在本研究中木薯酒糟渣76：24组出现了袋体膨胀、异味加重等情况，严重影响发酵产品的感官品质与贮藏稳定性。在酸化速率缓慢、pH值长期维持在4.5以上时，兼性厌氧杂菌及腐败菌易活跃代谢并产气鼓包，是发酵异常的重要诱因之一^[17]。木薯酒糟渣组的pH值为5.09，乳酸含量为2.36 mmol/L，可见其乳酸菌产酸能力较弱，未能迅速将环境pH值降至4.0以下，导致发酵环境酸化不充分。这是由于木薯酒糟渣其辅料本身WSC含量较低，尤其在76：24这一高辅料比例时下，乳酸菌在发酵初期碳源供应受限，产酸效率下降，同时灰分含量高、增加了缓冲能力，进一步减缓了酸化过程，导致无法有效抑制丙酸菌、丁酸菌等产气微生物及腐败微生物的繁殖。

而玉米芯粉76：24组则出现局部发霉现象。当发酵物料未充分压实或包装密封性差时，空气残留易形成真菌生长“热点”，最终诱发表面霉变^[18]。黑梦琴等^[19]也提出原料含水量水较少也会使原料难以压实，有害微生物能在局部氧气区生长繁殖，不

表 5 辅料类型和混合比例对豆渣发酵营养成分的影响（干物质基础，%）

Table 5 Effects of Auxiliary Material Type and Mixing Ratio on Nutrient Composition of Fermented Soybean Residues (Dry Matter Basis, %)							
处理	项目	DM	NDF	ADF	WSC	CP	Ash
辅料类型	豆渣	15.05±0.15 ^b	38.14±1.34 ^c	27.94±0.88	0.33±0.09 ^b	10.83±1.98 ^b	3.75±0.09 ^c
	水稻秸秆粉	27.84±5.15 ^a	53.60±3.75 ^a	34.75±1.83	0.89±0.29 ^a	7.27±1.68 ^c	7.72±0.89 ^b
	木薯酒糟渣	26.66±5.47 ^a	47.38±1.98 ^b	32.92±1.56	0.24±0.32 ^b	17.67±1.98 ^a	10.28±2.10 ^a
	玉米芯粉	27.06±4.28 ^a	56.63±8.87 ^{ab}	34.84±5.39	1.12±0.20 ^a	7.21±1.17 ^c	3.89±0.66 ^c
混合比例	100：0	15.05±0.15 ^d	38.14±1.34 ^c	27.94±0.88 ^b	0.33±0.09 ^b	10.83±1.98	3.75±0.09 ^b
	92：8	21.32±0.84 ^c	46.87±2.33 ^b	30.97±3.11 ^b	0.57±0.38 ^{a^b}	11.05±3.19	6.35±1.38 ^a
	84：16	27.55±1.04 ^b	54.61±5.64 ^a	34.87±1.61 ^a	0.88±0.42 ^a	10.65±5.79	7.54±3.21 ^a
	76：24	32.69±1.01 ^a	56.12±7.35 ^a	36.66±2.50 ^a	0.80±0.48 ^{ab}	10.45±6.78	8.03±3.88 ^a
P 值	辅料类型	0.003	<0.001	0.194	<0.001	<0.001	<0.001
	混合比例	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.197	<0.001
	辅料类型 × 混合比例	<0.001	0.165	0.299	0.272	<0.001	<0.001

注：同列数据后标有的不同小写字母表示相同处理不同项目间差异显著 ($P<0.05$)。以上指标测定以干物质为基础

能形成较低且稳定的酸性环境，最终使饲料发霉。玉米芯粉本身物理结构疏松，颗粒粗大、空隙多，具有较强的吸水性，在混合比例为76：24时，其占比进一步提高，原料水分进一步降低导致整个发酵产品的压实性明显下降，压实度不足会造成袋体中残氧无法完全排出，形成局部好氧区，有利于霉菌生长。丁酸的检出也证实了该组存在杂菌竞争。

3.2 辅料类型和混合比例对发酵参数的影响

3.2.1 辅料类型对发酵参数的影响

优质的发酵原料具有低的缓冲能值和适宜的含水量，水分过高时，易引起丁酸发酵和腐败，因此，控制好原料的含水量，可以提高青贮饲料的发酵品质^[20]。pH值是反映发酵品质好坏的重要指标之一，优质发酵饲料的pH值一般低于4.2^[21]。本次试验中，各处理的发酵原料DM都控制在35%以下，豆渣和水稻秸秆粉、玉米芯粉混合青贮的pH值都较低，发酵品质良好，但木薯酒糟渣组的pH值却偏高，甚至远高于对照组，这一原因可能与木薯酒糟渣高灰分（15.63%）相关。灰分中的矿物质如钙、磷具有缓冲作用，导致pH值下降受限，而且灰分中的矿物质还对乳酸菌生长起到积极作用，增强乳酸菌的产酸能力^[22]。但这一原因又与木薯酒糟渣组中检出丁酸，发酵品质较差，且乳酸含量较低这一结果相矛盾。所以其高pH值的主要原因是木薯酒糟渣WSC含量极低（0.31%），乳酸菌需要足够的WSC作为碳源进行快速发酵产酸，WSC的缺乏导致乳酸菌增殖受限，乳酸生成量减少^[23]。此外，木薯酒糟渣的CP含量过高可能氮源过剩，使氨态氮含量提高，其弱碱性也是其阻止pH值进一步下降的原因^[24]。

而氨态氮含量揭示了微生物分解蛋白质的程度，氨态氮含量越高，蛋白质分解越多，发酵品质越不好^[25]。辅料类型对氨态氮含量影响不显著，木薯酒糟渣组的氨态氮含量与玉米芯粉组相差无几，相比起水稻秸秆粉组氨态氮含量相对较少，相比起纯豆渣组略高。

乙酸可抑制酵母菌、霉菌等有害菌的生长和繁殖，减少有害菌对底物的消耗，以此提供更好的环

境给乳杆菌发酵，因此乙酸和乳酸含量越高、越不容易发生霉变^[26]。丙酸同样有促使乳酸菌生长繁殖、产生更多乳酸，改善发酵品质的效果^[27]。而丁酸是腐败菌的代谢产物，丁酸的存在可以反映发酵品质较差^[28]。玉米芯粉组的乙酸含量显著高于其他组，未检测出丙酸，但在76：24比例下检测出少量丁酸，这点与该处理下局部发霉现象相符。

由于本试验未对发酵过程中乳酸菌的动态消长进行计数，木薯酒糟组中丁酸的检出提示了该组可能存在杂菌竞争，未来研究需进一步从微生物组学角度进行印证。

3.2.2 豆渣和辅料混合比例对豆渣发酵参数的影响

混合比例仅对乙酸含量有显著影响，但仅表现为各辅料组与纯豆渣之间的差异，各辅料类型组之间并没有显著差异。所以豆渣与辅料混合发酵主要通过辅料类型来实现对发酵参数的影响。尽管混合比例对发酵后pH值影响不显著，但仍可见增加豆渣的添加比例可以稍微降低青贮饲料的pH值，这可能是因为豆渣占比的增加，灰分干扰减弱，也使pH值略有下降。但纯豆渣组的pH值反而高于豆渣与辅料混合比例为92：8、84：16组，这可能是由于这两个比例下添加辅料后辅料中WSC等有益于乳酸积累和pH值下降的成分作用大于灰分等不利于pH值下降等成分。

豆渣和辅料混合比例为84：16时乳酸含量最高，这得益于玉米芯粉84：16组的发酵品质较好，拉高84：16整体的乳酸含量，而玉米芯粉76：24组因为丁酸发酵和发霉现象导致乳酸含量较低使76：24组低于84：16组。

3.3 辅料类型和混合比例对营养成分的影响

3.3.1 辅料类型对营养成分的影响

辅料类型通过其原料化学成分影响发酵产物的营养成分。本试验中，豆渣与辅料混合组发酵原料的DM含量控制在22.7%~35.12%，纯豆渣的干物质含量为16.6%，较符合发酵原料的理想干物质含量在35%以下的标准^[29]。试验结果表明，木薯酒糟渣组具有显著较高的粗蛋白含量（17.67%），显著高于其

他辅料类型的组别，这主要归因于木薯酒糟渣原料中较高的蛋白质含量。

日粮中NDF和ADF含量过高时，会降低其适口性和消化率降低，但纤维含量适宜时能够能使反刍动物保持较高的采食量及消化率^[30]。NDF可以被反刍动物瘤胃微生物发酵成挥发性脂肪酸被自身利用，但ADF则难以被消化，饲料的ADF越低越好^[31]。而NDF出于其来源的差异、饲料原料等因素的限制，不同含量对于反刍动物的营养生理作用效果也不尽相同^[32]。在NDF和ADF含量方面，玉米芯粉组的纤维含量最高，NDF为56.63%，ADF为34.84%，这表明玉米芯粉组有较高纤维供给潜力，但需警惕由高ADF含量带来的消化不良。相比之下，纯豆渣组的NDF和ADF含量最低，分别为38.14%和26.66%，纤维含量低的原因也限制了其作为反刍动物饲料的使用。

WSC含量在不同辅料类型组间也表现出显著差异，这种差异也是出于发酵原料的差异。玉米芯粉组的高WSC为乳酸菌提供了充足的碳源支持，但残留量仍是最高，为1.12%。而木薯酒糟渣组的残留WSC含量最低，为0.24%，这是由于木薯酒糟渣的WSC含量本身就低，限制了其发酵潜力。

3.3.2 豆渣和辅料的混合比例对营养成分的影响

在CP方面，混合比例对CP影响不显著，这是由于随着辅料占比的增加，木薯酒糟渣组CP呈上升趋势，而玉米芯粉和水稻秸秆粉组应下降趋势，辅料间的相互抵消使CP在混合比例中没有显著差异。

NDF和ADF含量随辅料占比提高显著上升。这是由于辅料原料的纤维含量高于豆渣。尽管高纤维含量可为反刍动物提供结构性刺激，但ADF含量显著增加可能降低饲料的可消化性，需通过后续加工或酶解处理优化纤维利用率。

4 结论

玉米芯粉可作为豆渣发酵辅料的最优选择，水稻秸秆为第二选择。随着辅料的占比增加，营养成分得到有效提高，但高辅料占比易出现鼓包和发

霉现象，因此选定84：16为较佳混合比例。在豆渣与玉米芯粉按84：16比例混合时，能较好优化发酵参数与保留营养成分，为豆渣饲料化利用提供可行方案。

参考文献

- [1] Vong W C, Liu S. Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 52: 139-147.
- [2] Nagano T, Arai Y, Yano H, et al. Improved physicochemical and functional properties of okara, a soybean residue, by nanocellulose technologies for food development—A review[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 105964.
- [3] Rahman M M, Mat K, Ishigaki G, et al. A review of okara (soybean curd residue) utilization as animal feed: Nutritive value and animal performance aspects[J]. Animal Science Journal, 2021, 92 (1): e13594.
- [4] 刘焯, 王红兵, 陈世文, 等. 发酵豆渣混合饲料养猪方法探究[J]. 农家参谋, 2024 (20): 53-55.
- [5] Liu J, Wang K, Zhao L, et al. Investigation of supplementation with a combination of fermented bean dregs and wheat bran for improving the growth performance of the sow[J]. Journal of Animal Science and Technology, 2024, 66 (2): 295-309.
- [6] 普宣宣, 王荣, 张秀敏, 等. 豆渣混贮对青年期奶牛生长性能、营养物质表观消化率、瘤胃发酵及甲烷排放的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36 (3): 1724-1733.
- [7] 张明, 王燕, 欧阳梦云. 模糊数学感官评价法优化豆渣发酵工艺[J]. 中国酿造, 2015, 34 (9): 75-78.
- [8] Broderick G A, Kang J H. Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and in vitro media[J]. Journal of Dairy Science, 1980, 63 (1): 64-75.
- [9] Erwin E S, Marco G J, Emery E M. Volatile fatty acid analyses of blood and rumen fluid by gas chromatography[J]. Journal of Dairy Science, 1961, 44 (9): 1768-1771.
- [10] Madrid J, Martínez-Teruel A, Hernández F, et al. A comparative study on the determination of lactic acid in silage juice by colorimetric, high-performance liquid chromatography and enzymatic methods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79 (12): 1722-1726.
- [11] 丁立人. 凯氏定氮仪测定饲料中粗蛋白含量误差因素分析[J]. 农业与技术, 2018, 38 (21): 17-19.
- [12] 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.
- [13] Arthur Thomas T. An automated procedure for the determination of soluble carbohydrates in herbage[J]. Journal of the science of food and agriculture, 1977, 28 (7) : 639-642.
- [14] 申希平, 祁海萍, 刘小宁, 等. 两因素非参数方差分析在SPSS中的实现[J]. 中国卫生统计, 2013, 30 (6) : 913-914.
- [15] Qiu Y, Ye S, Huang X, et al. Fermentation with a multi-strain to enhance the flavor of HongJun Tofu, a Chinese fermented okara food[J]. Food Science & Technology, 2023, 189: 115495.
- [16] 杨劲松. 残次红枣发酵饲料工艺参数的优化及其对母羊育羔性能的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [17] 刘丽娜, 王文亮, 徐同成, 等. 乳酸菌发酵对泡菜质量的影响[J]. 山东农业科学, 2010 (1) : 86-89.
- [18] 王向阳, 杨佳航, 金龙. 防腐剂和酸味剂对发酵萝卜保藏作用的影响[J]. 中国调味品, 2017, 42 (2) : 53-56.
- [19] 黑梦琴, 曹正宇, 王志远, 等. 添加复合乳酸菌和糖蜜对不同水分含量苜蓿青贮品质的影响[J]. 草地学报, 2024, 32 (5) : 1601-1609.
- [20] Blajman J E, Pérez R B, Vinderola C G, et al. A meta-analysis on the effectiveness of homofermentative and heterofermentative lactic acid bacteria for corn silage[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 125 (6) : 1655-1669.
- [21] Du S, You S, Jiang X, et al. Evaluating the fermentation characteristics, bacterial community, and predicted functional profiles of native grass ensiled with different additives[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13.
- [22] 韩雨茜, 党雪文, 郭鸽, 等. 谷物基质对东北黏豆包质构及化学性质的影响[J]. 食品工业, 2019, 40 (3) : 168-172.
- [23] 翟静娟, 曹威荣. 复合微生物制剂对高粱秸秆发酵品质及其瘤胃降解特性的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46 (21) : 109-113.
- [24] Kung L, Shaver R D, Grant R J, et al. Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101 (5) : 4020-4033.
- [25] 覃方铨, 赵桂琴, 焦婷, 等. 不同添加剂对青贮燕麦品质的影响[J]. 草原与草坪, 2014, 34 (1) : 38-43.
- [26] 赵金鹏, 赵杰, 李君凤, 等. 不同添加剂对水稻秸秆青贮发酵品质和结构性碳水化合物组分的影响[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42 (1) : 152-159.
- [27] 杨波, 李龙兴, 甘小波, 等. 不同微生物及化学物添加剂对多花黑麦草青贮发酵品质的影响[J]. 贵州畜牧兽医, 2024, 48 (5) : 26-29.
- [28] 侯金丽. 青贮玉米秸秆营养成分和发酵品质的检测技术研究[J]. 中国饲料, 2024 (12) : 61-64.
- [29] 郭田心, 阮诗诗, 郭香, 等. 不同复合菌酶添加对中药渣青贮饲料的营养价值及发酵品质的影响[J]. 草业学报, 2024, 33 (10) : 194-202.
- [30] Zhong H, Zhou J, Abdelrahman M, et al. The effect of Lignin composition on ruminal fiber fractions degradation from different Roughage sources in Water Buffalo (Bubalus bubalis) [J]. Agriculture, 2021, 11 (10) : 1015.
- [31] 欧阳佳良, 戚如鑫, 陈逸飞, 等. 不同青贮添加剂组合对稻秸青贮品质的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55 (9) : 81-85.
- [32] 刘大森, 唐柯楠, 郑飞, 等. NDF对反刍动物的作用及影响其瘤胃降解率因素分析[J]. 饲料工业, 2018, 39 (10) : 1-5.