

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.029

引用格式:杨鑫,罗崇玉,王晓丽,等.水分活度对豆渣型饲料有氧发酵品质的影响[J].草地学报,2026,34(1):313–322

YANG Xin, LUO Chong-yu, WANG Xiao-li, et al. Effects of Water Activity on Aerobic Fermentation Characteristics of Soybean Residue Type Feed[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):313–322

水分活度对豆渣型饲料有氧发酵品质的影响

杨鑫¹, 罗崇玉¹, 王晓丽¹, 王学凯^{2*}, 杨富裕^{1,2*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:本试验旨在探究不同水分活度(Water activity, Aw)下有氧发酵对豆渣型饲料发酵品质的影响,为豆渣型饲料生产工艺提供理论依据。通过微生物移植技术对原料底物与微生物进行重组,构建以水分活度为单一变量的豆渣型饲料,并设置低(Aw1=0.9868)、中(Aw2=0.9880)、高(Aw3=0.9912)3个水分活度处理组。在有氧条件下分别发酵12 h, 24 h, 36 h, 48 h及60 h后取样检测其微生物数量,营养成分和发酵品质。结果表明:Aw2组中可溶性碳水化合物含量相对较高($P<0.001$),且肠杆菌与酵母菌在此环境中适应性更强;Aw3组中粗蛋白含量、有机酸含量和乳酸菌数量相对较高($P<0.001$),同时霉菌与好氧菌的生长受到明显抑制;中、高水分活度条件下,微生物的代谢活动更为活跃,能够更高效地利用底物进行代谢。综上,中、高水分活度处理组(Aw2, Aw3)的豆渣饲料发酵品质更优,合理调控水分活度可有效提升其有氧发酵品质。

关键词:豆渣;水分活度;有氧发酵;饲料;发酵品质

中图分类号:S816.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0313-10

Effects of Water Activity on Aerobic Fermentation Characteristics of Soybean Residue Type Feed

YANG Xin¹, LUO Chong-yu¹, WANG Xiao-li¹, WANG Xue-kai^{2*}, YANG Fu-yu^{1,2*}

(1. Academy of Animal Science and Veterinary, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China;

2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Soybean residue, a primary by-product of soybean processing, can undergo aerobic fermentation to enhance its nutritional value and palatability. Water activity may emerge as a key determinant of the nutritional quality of soybean residue during aerobic fermentation. The aim of this experiment was to investigate the effects of aerobic fermentation on the fermentation quality of soybean residue feed under different water activities (Aw), providing a theoretical basis for the production process of soybean residue feed. A soybean residue feed material with water activity as a single variable was constructed by recombining the raw material substrate and microorganisms through microbial transplantation technology. Three water activity treatment groups were established: low (Aw1=0.9868), medium (Aw2=0.9880) and high (Aw3=0.9912). Microbial quantity, nutrient composition, and fermentation quality were analyzed after fermentation for 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, and 60 h under aerobic conditions. The results showed that the soluble carbohydrate content was higher in the Aw2 group ($P<0.001$), and Enterobacter and yeast showed greater adaptability. Crude protein content, organic acid content, and lactic acid bacteria quantity were higher in the Aw3 group ($P<0.001$), and the growth of mold and aerobic bacteria was significantly inhibited. Under medium and high water activity conditions, microbial metabolism was more active and utilized substrates more efficiently. In conclusion, the fermentation quality of soybean residue feed in the medium and high water activity treatment groups (Aw2 and Aw3) were superior, and the quality of aerobic fermentation could be effectively improved by reasonably adjusting water activity.

Key words: Soybean residue; Water activity; Aerobic fermentation; Feed; Fermentation characteristics

收稿日期:2025-02-28;修回日期:2025-04-06

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(32201473)资助

作者简介:杨鑫(1998-),男,汉族,河北邯郸人,博士,主要从事伺草料调制加工与利用研究, E-mail: yangxiaoxin1998@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: xkwang@cau.edu.cn; yfuyu@cau.edu.cn

豆渣是豆制品加工的主要副产物,我国年产量高达 280 万吨^[1]。豆渣蛋白含量高且具有丰富的营养价值,但其含水量较高(通常>80%),易腐败变质。相关研究表明有氧发酵处理豆渣可通过微生物代谢活动释放基质中的功能成分^[2],从而提高豆渣的营养价值和适口性。近年来,我国大豆等蛋白饲料资源高度依赖进口,成本受国际市场波动影响显著,因此深度开发豆渣等本土蛋白资源对推动畜牧业可持续发展具有重要意义^[3]。

水分活度(Aw)是表征食品中水分可利用性的关键指标,直接影响产品质量与安全性^[4]。在食品工业中,Aw 已被广泛应用于预测微生物生长对产品稳定性的影响^[5]。饲料领域长期以水分含量为关注重点,对 Aw 与饲料品质的关联研究较少。现有研究表明,当饲料中酶制剂的 Aw 降至 0.3 以下时,可有效抑制酶蛋白变性及微生物增殖,从而维持酶活稳定性^[6]。Aw 不仅反映饲料原料中微生物可利用水分的比例,在高温高湿条件下更是影响霉变的核心因素^[7]。Aw 通过调控饲料中微生物群落结构^[8]和发酵稳定性^[9],直接决定豆渣的资源化利用效率。因此,Aw 或是影响豆渣有氧发酵品质的关键因素^[10]。

由于饲料发酵过程涉及菌群动态、化学成分及环境因子的复杂互作,传统方法难以实现单一变量

控制。近年来,微生物移植技术的发展为解析发酵机制提供了新思路^[11],例如,青贮饲料研究中通过移植附生菌群实现了菌群变量的标准化,使研究者仅需关注目标变量对试验过程的影响。本研究采用微生物重组技术固定初始菌群,聚焦 Aw 与发酵时间的独立效应,旨在比较不同水分活度和发酵时间对豆渣型饲料有氧发酵的影响,以探明水分活度对发酵饲料品质的影响机制,为豆渣型饲料生产工艺提供理论基础,从而达到豆渣型饲料减少营养流失和长期保存的目的。

1 材料与方法

1.1 试验材料

豆渣(Bean dregs, BD)、棉籽粕(Cottonseed meal, CM)及大枣残次果(Low-grade jujube, LJ)均购自新疆某公司,其常规营养成分如表 1 所示。将上述原料按鲜重比例(BD:CM:LJ=75:20:5)混合均匀,配制成初始含水量为 60% 的豆渣型饲料(Soybean residue type feed, SF)。将原料分为两组:(1)菌群提取组:通过无菌生理盐水洗脱法提取饲料表面附生微生物;(2)灭菌底物组:经 121℃ 灭菌后,作为无菌发酵底物备用。

表 1 3 种原料及发酵饲料原料的营养成分

Table 1 Nutritional composition of three raw materials and fermented substrate materials

项目 Item	干物质 Dry matter/ (g·kg ⁻¹ FW)	水溶性碳水化合物 Water soluble carbohydrates/ (g·kg ⁻¹ DM)	粗蛋白 Crude protein/ (g·kg ⁻¹ DM)	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/ (g·kg ⁻¹ DM)	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/ (g·kg ⁻¹ DM)
豆渣(BD)	199.00±11.30	3.32±1.30	239.72±0.91	396.04±18.66	235.88±11.73
棉籽粕(CM)	952.49±1.71	10.4±0.07	329.79±12.82	450.08±14.72	309.59±7.31
大枣残次果(LJ)	923.96±2.26	139.26±8.24	54.95±0.86	117.50±20.83	81.90±15.31
豆渣型饲料(SF)	405.81±2.13	4.10±0.15	321.78±3.82	443.04±8.25	305.65±5.08

注:FW,鲜重;DM,干物质。下同

Note:FW, Fresh weight; DM, Dry matter. The same as below

1.2 微生物菌液制备

根据 Mogodiniyai Kasmaei 等^[11]建立的洗脱方法(附生菌群回收率为 90%),称取 110 g 豆渣型饲料(相当于 100 g 原料的完整微生物负载量),加入 500 mL 灭菌生理盐水(0.85%)。将混合液置于 4℃ 摇床中,以 150 r·min⁻¹ 振荡均质 2 h 后,经 4 层灭菌纱布过滤收集滤液并于 4℃ 条件下以 12 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,弃上清后收集微生物沉淀物,用无菌生理盐水重悬并定容至 5 mL 备用。

1.3 不同水分活度原料制备

称取豆渣型饲料 35.0 g 于三角瓶中,共 99 瓶样品,封口膜封口后称重 m_1 ,原料经恒温干燥箱 121℃ 灭菌 45 min,随后转移至 65℃ 恒温干燥箱中烘 2 h,4 h,6 h 后取出称重 m_2 ,测算水分损失数据 $m_2 - m_1$ 。根据不同烘干时间水分损失量在超净工作台中分别加入等量水溶液(含附生微生物菌液)进行重组样品构建,得到含水量相同、水分活度不同的重组发酵饲料原料。

在每组中各控制取样3次,参照《T/HXCY 101-2025 饲草饲料水分活度测定技术规程》^[12],采用水分活度仪(AQUALAB-4TE型,美国)测定饲料样品的水分活度(A_w),测定前仪器使用标准盐溶液($A_w=0.920$ 、 1.000)校准,测定其 A_w 分别为

0.9868,0.9880,0.9912。

试验共设3组: A_{w1} (0.9868)、 A_{w2} (0.9880)组、 A_{w3} (0.9912);每组设5个时间点:12 h,24 h,36 h,48 h,60 h;每个时间点6个重复,共90个样品。 30°C 恒温培养箱下发酵60 h,隔12 h取一次样。

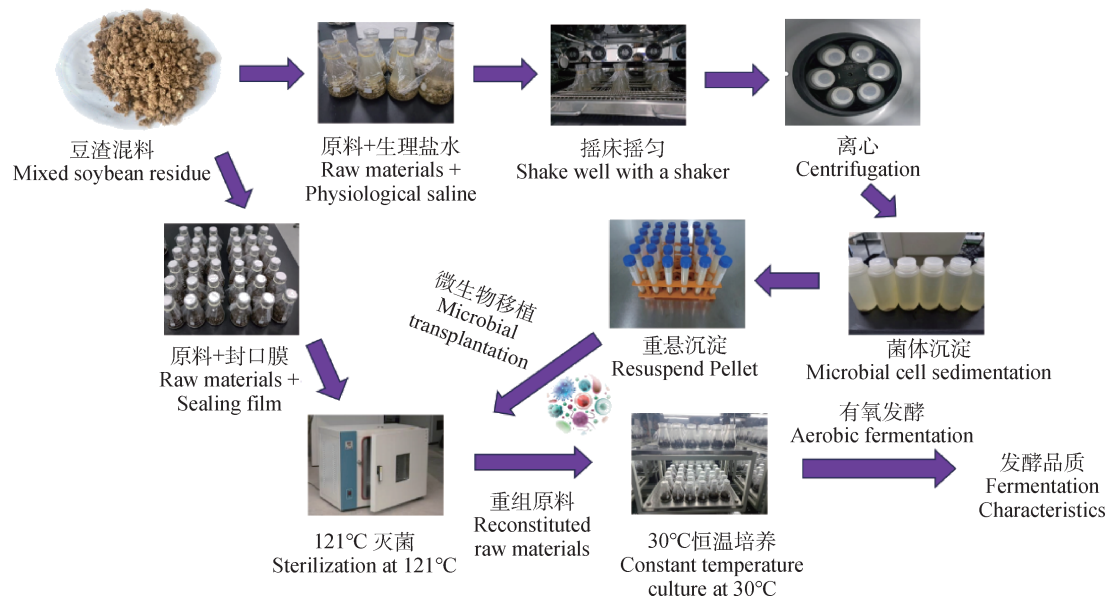


图1 不同水分活度豆渣型饲料制备流程图

Fig. 1 Flowchart for the preparation of soybean residue feed with different water activities

1.4 指标测定与分析方法

豆渣型发酵饲料混合均匀,称取5.0 g置于自封袋中,加入45 mL超纯水,于 4°C 冰箱浸提24 h,通过4层医用纱布和定性滤纸过滤,即为发酵饲料浸提液, -20°C 冷冻保存备用^[13]。浸提液用于测定pH值、铵态氮(Ammonium nitrogen, NH_4^+-N)、乳酸(Lactic acid, LA)、乙酸(Acetic acid, AA)、丙酸(Propionic acid, PA)和丁酸(Butyric acid, BA)含量。

称取20.0 g发酵饲料样品,置于 65°C 鼓风干燥箱(WGL-125B型,中国)中烘干至恒重,计算干物质含量(Dry matter, DM)。烘干样品用冷冻球磨机(Retsch-MM40型,德国)粉碎过1 mm筛,用于测定:粗蛋白(Crude protein, CP)、水溶性碳水化合物(Water soluble carbohydrates, WSC)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)等。

1.4.1 pH值测定 使用精密pH计(HANNA pH 211型,意大利)直接测定发酵饲料浸提液的pH值,测定前使用标准缓冲液(pH 4.01, 7.00)校准仪器^[13]。

1.4.2 有机酸含量的测定 取发酵饲料浸提液于

4°C 条件下以 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心15 min,上清液经 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后,采用高效液相色谱系统(Agilent 1260型,德国)进行有机酸分析。色谱条件: C_{18} 反相柱($4.6\times 250\text{ mm}$, $5\text{ }\mu\text{m}$),流动相为 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ H}_2\text{SO}_4$,流速 $0.5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,柱温 30°C ,检测波长 210 nm ^[14]。

1.4.3 营养成分测定 采用硫酸-蒽酮比色法测定WSC含量^[15],采用苯酚-次氯酸钠比色法测定 NH_4^+-N 含量^[16],采用杜马斯定氮仪(型号Rapid N exceed,德国)测定CP含量^[17],采用全自动纤维分析仪(型号ANKOM-2000i,美国)测定NDF和ADF含量^[18],结果以干物质基础表示。

1.4.4 微生物数量测定 称取5.0 g样品,加入45 mL无菌生理盐水(0.85%),混合均匀后吸取1 mL菌液用于微生物计数,对滤液进行梯度稀释,采用平板培养法对乳酸菌(Lactic acid bacteria, LAB)、酵母菌(Yeast, Y)、霉菌(Mold, M)、肠杆菌(Enterobacter, EC)及好氧菌(Aerobic bacteria, AB)的数量进行微生物计数^[19]。微生物数据以菌落形成单位(Colony forming unit, cfu)表示,并以饲料鲜重(FW)为基础。

1.5 数据处理

采用 SAS 9.3 (SAS Institute Inc. Cary, NC) 软件对试验数据进行双因素方差分析 (Two-way ANOVA), 结果表示为平均值和均值标准误 (Standard error, SEM), 并用 Tukey's 多重比较来分析数据平均值之间的差异 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同水分活度有氧发酵对豆渣型饲料常规营养成分含量的影响

不同水分活度豆渣型饲料发酵 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 60 h 后的常规营养成分变化如表 2 所示, 水分活度与发酵时长对 DM ($P=0.020$) 和 CP ($P < 0.001$) 含量存在显著交互效应。Aw3 组 DM 含量随发酵时长增加呈先降后升趋势: 发酵 24 h 时达最低值 ($462.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$), 60 h 时升至峰值 ($488.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$), 峰值显著高于其他处理组

($P=0.024$)。Aw1 与 Aw2 组 DM 含量随发酵时间增加无显著波动。Aw2 组和 Aw3 组中 CP 含量均随着发酵时长的增加呈递减趋势 ($P < 0.001$), 而 Aw1 组的粗蛋白 (CP) 含量随发酵时间增加呈现动态变化: 0~36 h 期间呈下降趋势, 至 48 h 出现小幅回升, 但 60 h 时再次降低。水分活度梯度对 WSC, NDF 和 ADF ($P < 0.001$) 含量影响显著。WSC 含量随水分活度的增加先增高后降低在 Aw2 组最高, 发酵时长对 WSC 含量无显著影响, 而 NDF 与 ADF 含量随水分活度的增加先降低后增高在 Aw2 组最低。发酵时长对 NDF ($P=0.001$) 和 ADF ($P < 0.001$) 含量有显著影响: Aw1 组中 NDF 和 ADF 含量随发酵时间的延长呈现出先降低后升高的趋势, 发酵 60 h 后 NDF 和 ADF 含量最高, Aw2 组 NDF 和 ADF 含量随发酵时间的变化呈现出波动趋势, 同样在发酵 60 h 后 NDF 和 ADF 含量最高, 而 Aw3 组样品中 NDF 和 ADF 含量随着发酵时长的增加无显著差异。

表 2 不同水分活度豆渣型饲料发酵过程中营养成分

Table 2 Nutrients in soybean residue type feed during fermentation with different water activities

项目 Item	发酵时长 Time	干物质 DM/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$)	水溶性碳水化合物 WSC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$)	粗蛋白 CP/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$)	中性洗涤纤维 NDF/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$)	酸性洗涤纤维 ADF/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$)
Aw1	12 h	445.25 ^{Ab}	2.26 ^{Ab}	296.20 ^{Aa}	454.66 ^{Aa}	300.90 ^{Ba}
	24 h	453.24 ^{Ab}	2.14 ^{Ab}	281.85 ^{Bb}	452.90 ^{Aa}	300.27 ^{Ba}
	36 h	445.33 ^{Ab}	1.91 ^{Ab}	265.01 ^{Cb}	463.13 ^{ABab}	308.40 ^{ABa}
	48 h	448.02 ^{Ab}	1.92 ^{Ab}	270.80 ^{Cb}	463.96 ^{Aa}	316.85 ^{ABa}
	60 h	452.32 ^{Ab}	2.17 ^{Ab}	267.77 ^{Cb}	471.37 ^{Aa}	324.51 ^{Aa}
Aw2	12 h	473.27 ^{Aa}	3.30 ^{Aa}	304.82 ^{Aa}	422.98 ^{ABb}	281.65 ^{Bb}
	24 h	469.66 ^{Aa}	2.91 ^{Aa}	295.66 ^{Ba}	420.47 ^{Bb}	280.42 ^{Ba}
	36 h	451.41 ^{Ab}	3.44 ^{Aa}	291.93 ^{BCa}	439.37 ^{ABb}	302.50 ^{ABa}
	48 h	450.55 ^{Ab}	3.01 ^{Aa}	284.73 ^{Ca}	433.36 ^{ABa}	291.33 ^{ABa}
	60 h	465.84 ^{Ab}	3.26 ^{Aa}	270.95 ^{Db}	458.34 ^{Aa}	316.06 ^{Aa}
Aw3	12 h	471.14 ^{ABa}	2.07 ^{Ab}	301.05 ^{Aa}	460.37 ^{Aa}	300.84 ^{Aa}
	24 h	462.34 ^{Bab}	1.89 ^{Ab}	291.13 ^{Ba}	458.66 ^{Aa}	303.27 ^{Aa}
	36 h	473.60 ^{ABa}	1.69 ^{Ac}	287.50 ^{BCa}	465.69 ^{Aa}	305.35 ^{Aa}
	48 h	469.46 ^{ABa}	1.71 ^{Ab}	284.17 ^{BCa}	460.58 ^{Aa}	314.55 ^{Aa}
	60 h	488.41 ^{Aa}	2.03 ^{Ab}	282.65 ^{Da}	466.68 ^{Aa}	318.27 ^{Aa}
标准误 SEM		1.81	0.07	1.33	2.47	1.93
P 值	A	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
P-value	T	0.024	0.051	<0.001	0.010	<0.001
	A×T	0.020	0.346	<0.001	0.731	0.516

注: Aw1、Aw2 和 Aw3 分别代表水分活度 0.9868, 0.9880 和 0.9912 的重组饲料样品。不同大写字母表示同一水分活度不同发酵时间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一发酵时间不同水分活度间差异显著 ($P < 0.05$), $P < 0.001$ 代表差异极显著。A, 水分活度; T, 发酵时长; A×T, 水分活度和发酵时长的交互作用。下同

Note: Aw1, Aw2 and Aw3 represent recombinant feed samples with water activity of 0.9868, 0.9880 and 0.9912, respectively. Different capital letters indicate that the same water activity has significant difference in different fermentation time ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate that the same fermentation time has significant difference in different water activity ($P < 0.05$). $P < 0.001$ indicates an extremely significant difference. A, water activity; T, fermentation time; A×T, interaction between water activity and fermentation time. The same as below

2.2 不同水分活度有氧发酵对豆渣型饲料发酵品质的影响

由表 3 可知,水分活度与发酵时长对 pH 值、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、LA、AA、PA 和 BA 含量存在显著交互效应($P<0.001$)。所有处理组(Aw1, Aw2, Aw3)的 pH 值均在发酵 60 h 时达到峰值,其中低水分活度组(Aw1)的 pH 值显著高于其他组($P<0.001$)。Aw1 与 Aw2 组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在发酵 48 h 时达最大值,随后下降;Aw3 组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量则在发酵 24 h 时达峰值,而后呈现“先降后升”趋势。Aw1 和 Aw3 组中 LA 含量随着发酵时长的增加先降低后升高,而

Aw2 组 LA 含量整体上升,除发酵 48 h LA 含量在高水分活度 Aw3 组中相对最高。所有处理组 AA 含量在发酵 12 h 均为最低,发酵前期(12~24 h)显著升高;Aw1 组和 Aw2 组发酵后期(36~60 h)AA 含量呈“先降后升”波动,而 Aw3 组发酵后期(36~60 h)AA 含量不断上升。各处理组在发酵前期(12~24 h)均检测到 PA,其中 Aw2 与 Aw3 组在 36 h 时仍可检出 PA,但在 48 h 和 60 h 时均未检出 PA。所有处理组在发酵 60 h 后均检出 BA,其中高水分活度组(Aw3)的 BA 含量显著高于其他组($P<0.001$)。

表 3 不同水分活度豆渣型饲料发酵品质
Table 3 Fermentation quality of soybean residue type feed with different water activitis

项目 Item	发酵时长 Time	pH 值	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$)	乳酸 LA/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$)	乙酸 AA/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$)	丙酸 PA/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$)	丁酸 BA/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DM}$)
Aw1	12 h	7.99 ^{BCa}	29.39 ^{Db}	10.37 ^{Bb}	17.58 ^{Ba}	3.98 ^{Bab}	7.86 ^{Ba}
	24 h	8.14 ^{ABa}	46.16 ^{Dc}	6.63 ^{Bb}	23.55 ^{ABa}	5.35 ^{Ab}	0.00 ^{Ca}
	36 h	7.86 ^{Ca}	123.74 ^{Ca}	8.39 ^{Bb}	29.97 ^{Aa}	0.00 ^{Cb}	0.00 ^{Ca}
	48 h	8.2 ^{Aa}	200.45 ^{Aa}	9.34 ^{Bb}	18.88 ^{Ba}	0.00 ^{Ca}	0.00 ^{Ca}
	60 h	8.35 ^{Aa}	168.45 ^{Ba}	17.55 ^{Aa}	22.95 ^{ABa}	0.00 ^{Ca}	11.37 ^{Ab}
Aw2	12 h	7.84 ^{Ba}	45.45 ^{Eb}	8.83 ^{Cb}	9.63 ^{Bb}	3.10 ^{Bb}	0.00 ^{Ba}
	24 h	7.78 ^{Bab}	83.24 ^{Db}	10.62 ^{BCb}	19.14 ^{Aa}	3.61 ^{Bc}	0.00 ^{Ba}
	36 h	7.25 ^{Cc}	131.91 ^{Ca}	9.98 ^{Cab}	16.88 ^{ABb}	8.96 ^{Aa}	0.00 ^{Ba}
	48 h	7.85 ^{Bb}	196.07 ^{Aa}	15.14 ^{ABa}	11.03 ^{Bb}	0.00 ^{Ca}	0.00 ^{Ba}
	60 h	8.16 ^{Ab}	162.08 ^{Ba}	16.55 ^{Aa}	19.30 ^{Aa}	0.00 ^{Ca}	11.16 ^{Ab}
Aw3	12 h	7.27 ^{Cb}	147.95 ^{Ba}	44.84 ^{Aa}	5.39 ^{Bc}	5.74 ^{Ba}	0.00 ^{Ba}
	24 h	7.58 ^{BCb}	197.66 ^{Aa}	22.87 ^{Ba}	24.37 ^{Aa}	7.28 ^{ABa}	0.00 ^{Ba}
	36 h	7.50 ^{Cb}	31.72 ^{Db}	13.87 ^{Ca}	9.50 ^{Bb}	8.33 ^{Aa}	0.00 ^{Ba}
	48 h	7.93 ^{ABb}	56.76 ^{Cb}	13.59 ^{Ca}	10.44 ^{Bb}	0.00 ^{Ca}	0.00 ^{Ba}
	60 h	8.00 ^{Ac}	162.46 ^{Ba}	17.28 ^{BCa}	21.14 ^{Aa}	0.00 ^{Ca}	15.88 ^{Aa}
标准误 SEM		0.04	6.68	1.00	0.83	0.37	0.57
P 值	A	<0.001	0.013	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
P-value	T	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A×T	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

2.3 不同水分活度有氧发酵对豆渣型微生物数量的影响

由表 4 可知,水分活度与发酵时长对 LAB、M、Y、EC 和 AB 数量均存在显著交互效应($P<0.001$)。Aw1 和 Aw3 组中 LAB 数量随着发酵时长的延长呈先降后升趋势,而 Aw2 组中无显著变化。发酵 12 h, LAB 数量随 Aw 升高而增加;而发酵 60 h 后, LAB 数量随 Aw 升高而减少。发酵 12 h, 24 h 和

60 h 后, M 数量随 Aw 升高无显著变化; 3 个水分活度组发酵 60 h 后, M 数量均为最低值。除 24 h 和 60 h 外, 中水分活度(Aw2)组的 Y 数量显著高于 Aw1 和 Aw3 组。低水分活度(Aw1)组样品中所有时间点 EC 数量均为最低。所有处理组中, AB 数量整体随发酵时间延长而上升, 并于 48 h 达到峰值。发酵 24 h 和 36 h 时, AB 数量随 Aw 升高呈下降趋势, 在 Aw3 组为最低值。

表 4 不同水分活度豆渣饲料发酵过程中微生物数量

Table 4 Microbial quantity in soybean residue type feed fermentation with different water activities

项目 Item	发酵时长 Time	乳酸菌 LAB/ (lg cfu·g ⁻¹ FW)	霉菌 M/ (lg cfu·g ⁻¹ FW)	酵母 Y/ (lg cfu·g ⁻¹ FW)	肠杆菌 EC/ (lg cfu·g ⁻¹ FW)	好氧菌 AB/ (lg cfu·g ⁻¹ FW)
Aw1	12 h	7.65 ^{Bc}	3.45 ^{Aa}	4.69 ^{Aa}	5.45 ^{Ab}	7.91 ^{Ca}
	24 h	7.56 ^{Bb}	3.60 ^{Aa}	3.73 ^{Bb}	4.76 ^{Bb}	8.36 ^{Ba}
	36 h	7.69 ^{Ba}	<2.00 ^{Bb}	3.45 ^{Bb}	4.76 ^{Bb}	8.60 ^{Aa}
	48 h	7.81 ^{Bb}	<2.00 ^{Bb}	<2.00 ^{Cb}	4.63 ^{Bb}	8.71 ^{Aa}
	60 h	8.51 ^{Aa}	<2.00 ^{Ba}	4.29 ^{Aa}	5.03 ^{ABb}	8.57 ^{Ab}
Aw2	12 h	8.03 ^{Ab}	3.73 ^{ABa}	5.04 ^{Aa}	7.16 ^{Aa}	7.99 ^{Ba}
	24 h	7.97 ^{Aa}	4.07 ^{Aa}	4.99 ^{Aa}	6.95 ^{Aa}	8.12 ^{Bb}
	36 h	7.77 ^{Aa}	3.69 ^{ABa}	4.11 ^{Ba}	5.18 ^{Ba}	8.53 ^{Aa}
	48 h	7.79 ^{Ab}	3.50 ^{Ba}	3.67 ^{Ca}	5.17 ^{Ba}	8.65 ^{Aa}
	60 h	8.10 ^{Ab}	<2.00 ^{Ca}	<2.00 ^{Db}	5.40 ^{Ba}	8.60 ^{Aa}
Aw3	12 h	8.31 ^{Aa}	3.60 ^{Ba}	4.73 ^{Ba}	7.10 ^{Aa}	8.15 ^{Ca}
	24 h	8.08 ^{ABa}	3.84 ^{Aa}	5.19 ^{Aa}	6.98 ^{Aa}	8.07 ^{Cb}
	36 h	7.79 ^{Ca}	4.17 ^{Aa}	3.90 ^{Ca}	5.39 ^{Ba}	8.28 ^{BCb}
	48 h	8.24 ^{ABa}	<2.00 ^{Cb}	<2.00 ^{Db}	5.01 ^{Bab}	8.59 ^{Aa}
	60 h	8.03 ^{BCb}	<2.00 ^{Ca}	<2.00 ^{Db}	5.18 ^{Bb}	8.42 ^{ABb}
标准误 SEM		0.03	0.20	0.21	0.10	0.03
P 值 P-value	A	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002
	T	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	A×T	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

3 讨论

3.1 不同水分活度对豆渣型饲料有氧发酵常规营养成分含量的影响

Aw3组DM含量在发酵后期(60 h)显著升高,可能与高水分活度下微生物代谢活性增强有关。在Aw较高时(Aw3=0.9912),微生物可利用的自由水充足,促进底物分解及代谢产物(如有机酸、胞外多糖)的积累,从而导致干物质含量上升^[20]。而Aw1与Aw2组DM无显著变化,可能与水分活度限制下微生物代谢速率较低有关^[21]。Aw2组和Aw3组中CP含量均随着发酵时长的增加呈递减趋势($P<0.001$),尤其是Aw1组(低水分活度)CP损失最显著,微生物将蛋白质通过酶解反应分解成小肽或氨基酸,作为其生长过程中的氮源,从而随着发酵时长的增加使CP含量不断降低^[22-23]。Aw1组中CP含量随发酵时间48 h出现小幅回升可能因为随着发酵时间的延长,微生物利用底物中的碳源和氮源合成自身菌体蛋白导致CP含量暂时升高^[24]。低Aw环境下(Aw1=0.9868),部分耐旱微生物(如芽孢杆菌)的蛋白酶活性未被完全抑制,持续分解蛋白质为氨态氮以满足自身氮需求^[24]。Aw2组WSC含量相对较高,而NDF与ADF含量相对较低,这一现象或与微生物的代谢偏好有关^[25]。在Aw2组中,微生物(如枯

草芽孢杆菌、酿酒酵母)可能优先通过戊糖磷酸途径(Pentose-phosphate pathway, PPP)代谢葡萄糖,而非传统糖酵解(Glycolytic pathway, EMP),PPP途径生成更多NADPH以应对氧化压力,同时减少糖类的快速消耗,导致WSC的积累^[26]。中等Aw可能为纤维素酶和半纤维素酶提供了最适活性条件,这些酶将大分子纤维(如NDF、ADF)降解为可溶性糖和寡糖,导致NDF与ADF含量相对较低^[27]。而随着发酵时间延长,Aw2组的NDF与ADF含量显著上升(60 h达峰值),可能随着发酵时间延长同型发酵菌(如植物乳杆菌)向异型发酵转化,消耗乳酸生成乙酸、乙醇及CO₂,导致pH值波动和微生物群落失衡^[28]。这种代谢切换可能加速部分菌群死亡,同时抑制纤维素分解菌活性,导致纤维降解不足而表现为含量的增加^[29]。与此相反,Aw3组的纤维含量随发酵时间的延长无显著变化,可能因高水分活度通过增强纤维降解菌的酶活性、优化菌群互作网络、维持代谢产物稳态,实现了纤维素降解速率与中间产物消耗速率的动态平衡,这种平衡使得NDF与ADF含量在发酵过程中无明显波动^[30-31]。Jiang等^[32-33]在黑米和谷物发酵中观察到的有氧发酵后纤维素和半纤维素含量下降不同,本研究发现Aw2组纤维含量随发酵时间上升,豆渣基质成分(如高蛋白、低木质素)可能改变了微生物对纤维的利用策略。

3.2 不同水分活度有氧发酵对豆渣型饲料发酵品质的影响

3个处理组中发酵原料的pH值均在发酵60 h达到最大值,这可能与微生物代谢过程中碱性物质(如氨类化合物)的分泌及酸性物质的消耗有关。田铁^[34]在研究混菌固态发酵对蚕豆营养品质的影响时发现pH值随发酵时间延长而下降,这一差异可能源于不同菌群组成(如产酸菌与产碱菌的比例)或底物特性的影响。与之相反,丁建莉等^[35]报道了蔬菜秸秆有氧发酵时pH值随发酵时间的延长呈上升趋势,与本研究结果一致。在发酵前期,高水分活度组(Aw3)的pH值显著低于其他组,可能是由于乳酸菌与大肠杆菌在高Aw环境下代谢活性增强,快速利用自由水降解底物并产生有机酸(如乳酸、乙酸)。陈亮等^[36]研究进一步支持这一机制:在平菇菌糠发酵中,高含水量(65%)处理组的pH值在39 d时最低,表明水分条件对产酸菌的活性具有正向调控作用。此外,Aw1和Aw2组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在发酵48 h达到峰值,而Aw3组在24 h即达最大值,说明高水分活度显著提升了微生物对蛋白质和氨基酸的降解效率^[37],这一现象可能与高Aw环境下蛋白酶活性增强及微生物氮代谢途径的激活有关。

LA可由多种细菌、酵母和丝状真菌产生^[38],本研究中除发酵48 h外均为Aw3组LA含量最高,可能是因为产LA微生物在高水分活度环境中生长更为活跃,高水分活度环境有助于产LA微生物的代谢活动从而产酸更多。例如,醋酸梭菌在高水分活度环境下,可更有效地利用葡萄糖进行代谢,产生乳酸、乙酸等酸性物质^[39]。所有处理组AA含量在发酵前期(12 h)均为最低值,随着发酵时间的增长(12~24 h),因微生物利用发酵底物不断生长代谢产生AA,导致其含量上升。岳清华等^[40]在研究发酵时间对面团中酵母代谢产物的影响时同样发现面团发酵过程中,AA含量随着发酵时间的延长而增加,然后在一定时间后出现下降。这一现象表明乙酸的生成与微生物的代谢活动密切相关。在发酵后期(36~60 h),不同Aw组的AA含量变化趋势不同:Aw1组和Aw2组:AA含量在发酵后期呈现“先降后升”的波动趋势,这可能是由于微生物代谢途径的调整和环境条件的变化,导致AA的生成和消耗交替进行^[41]。Aw3组:AA含量在发酵后期持续上升,这表明在高水分活度条件下,高Aw可抑制乳酸菌的竞争优势减少AA的消耗,同时促进产酸菌(如醋酸杆菌)

的持续增殖而持续产生AA^[42]。在本研究中,所有处理组在发酵前期均检测到PA,且其含量随着发酵时长的增长而上升。这可能是因为发酵前期,环境中的底物和氧气较为充足,丙酸杆菌可以进行有氧呼吸并大量繁殖,从而产生较多的PA^[43]。发酵后期,由于其他有氧菌的竞争及发酵底物的消耗,丙酸杆菌的繁殖受到抑制,因此PA的生成减少^[44]。样品在有氧发酵60 h后检测BA,且在高水分活度组中值最大。可能是高水分活度条件下随着发酵时间的延长,因氧气梯度耗竭与菌体自耗氧行为逐步诱导局部厌氧环境,从而触发丁酸梭菌等微生物的代谢活动,BA是主要的代谢产物之一^[45]。综上,水分活度对发酵过程中pH值和代谢产物的变化有显著影响,高水分活度条件微生物的代谢活动更为活跃,能够更高效地利用底物进行代谢。

3.3 不同水分活度有氧发酵对豆渣型饲料微生物数量的影响

Aw1和Aw3组中乳酸菌(LAB)数量随发酵时间延长呈现先降低后升高的趋势,这可能与LAB对发酵环境的适应性增强有关。随着发酵进程的推进,LAB可能通过代谢调控逐步适应环境,并利用底物中的营养物质实现快速增殖^[46]。值得注意的是,在发酵初期(12 h),较高水分活度组(Aw3)的LAB数量显著高于低水分活度组(Aw1)($P<0.05$),这可能是由于高水分活度环境更有利于LAB对营养物质的吸收和利用^[37]。而发酵后期(60 h)高水分活度组(Aw3)的LAB数量反而低于低水分活度组(Aw1),推测原因包括:(1)有氧发酵过程中氧气的消耗导致微环境改变^[41];(2)代谢产物(如乳酸、乙酸)的积累对LAB产生反馈抑制^[47];(3)高水分活度条件下营养物质的竞争加剧^[48]。

所有水分活度组(Aw1, Aw2和Aw3)中M, Y和EC数量随均随发酵时间延长显著下降($P<0.001$)。发酵体系中碳源、氮源等关键营养物质的逐步耗尽,导致微生物生长受限导致数量减少^[49];也可能为LAB等优势菌群产生的细菌素、有机酸等抗菌物质对竞争性微生物的抑制作用^[50]。发酵12 h、24 h和60 h后,M数量随Aw升高无显著变化,可能细菌(如乳酸菌、芽孢杆菌)的代谢速率导致氧气和可溶性碳源的快速消耗,而霉菌作为严格好氧菌,可能因氧分压降低而生长受限,与Aw升高的正向效应形成动态平衡^[51]。3个水分活度组发酵60 h时

M数量为最低值,发酵过程中微生物群落存在动态演替,发酵60 h时糖化酶活性可能达到峰值使还原糖含量显著增加,可能促进酵母菌和乳酸菌的增殖,进一步挤压霉菌的生存空间^[52]。中水分活度组(Aw2)的Y和EC数量相对较高,推测原因可能为中等水分条件既可维持细胞膜通透性,又避免过度渗透压胁迫^[53]。AB数量在所有水分活度组中均随发酵时间延长呈上升趋势,可能是由于有氧条件下AB的代谢能力提高所致^[44]。而在发酵24 h和36 h时,AB数量随Aw升高呈下降趋势,Aw3组的AB数量相对较低,高水分活度可能通过以下途径抑制AB生长:(1)水分填充基质孔隙导致氧气扩散受阻^[54];(2)游离水增加引起营养物质稀释效应^[55];(3)竞争菌群代谢产物的协同抑制^[56]。

4 结论

综上所述,水分活度和发酵时长对豆渣型饲料有氧发酵的营养价值,发酵品质和微生物数量均有显著影响,中(Aw=0.9880)高(Aw=0.9912)水分活度处理组(Aw2,Aw3)中微生物对发酵底物的利用效率更高,发酵品质相对较好。因此在生产实践中,可将豆渣型饲料自由水含量相应调高进行固态发酵。

参考文献

- [1] 孟维民,高雅鑫,胡森,等. 豆渣的高值化利用:生物转化途径[J]. 食品科学,2024,45(22):280-290
MENG W M, GAO Y X, HU M, et al. High-value utilization of okara: biotransformation pathways[J]. Food Science, 2024, 45(22):280-290
- [2] 杨航,宋福超,王诗涛,等. 固态发酵平菇-青稞秸秆菌糠饲料化利用研究[J]. 草地学报,2025,33(4):1289-1298
YANG H, SONG F C, WANG S T, et al. Research on the utilization of solid-state fermented oyster mushroom-highland barley straw fungus-bran as feed [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4):1289-1298
- [3] 韩帅琪,蒋娟,胡张涛,等. 杂交构树青贮饲料在畜禽生产中的应用[J]. 家畜生态学报,2023,44(11):77-80
HAN S Q, JIANG J, HU Z T, et al. Application of hybrid *Broussonetia Papyrifera* silage in livestock and poultry production [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2023, 44(11):77-80
- [4] MARTINS G E, CASINI C, DA COSTA J P, et al. Correlation between water activity (aw) and microbial epiphytic communities associated with grapes berries [J]. OENO One, 2020, 54(1):49-61
- [5] 杨晓莉,李辉,许华玉,等. 药品微生物控制中水分活度测定的应用前景[J]. 中国药业,2018,27(23):1-4
- [6] 邓君明,张曦,郭荣富. 影响饲用酶制剂应用效果的因素[J]. 广东饲料,2003,12(1):32-35
DENG J M, ZHANG X, GUO R F. Factors affecting the application effect of feed enzyme preparation [J]. Guangdong Feed, 2003, 12(1):32-35
- [7] 庞彦芳,冯定远,温刘发. 包装方式、水分活度等对颗粒料发霉的影响[J]. 饲料研究,2000,23(8):36-37
PANG Y F, FENG D Y, WEN L F. Effects of packaging methods and water activity on moldiness of granular materials [J]. Feed Research, 2000, 23(8):36-37
- [8] PENG Q, ZHENG H, YU H F, et al. Environmental factors drive the succession of microbial community structure during wheat Qu fermentation [J]. Food Bioscience, 2023, 56:103169
- [9] 成玉梁,夏秀华,钱和,等. 水分活度对碧螺春绿茶贮存稳定性的影响[J]. 食品与生物技术学报,2012,31(7):759-765
CHENG Y L, XIA X H, QIAN H, et al. The effect of water activity on stability of green tea during storage [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2012, 31(7):759-765
- [10] 魏金涛,齐德生,张妮娅,等. 饲料水分活度及其应用[J]. 中国饲料,2007(1):35-37
WEI J T, QI D S, ZHANG N Y, et al. The water activity and its application in feed [J]. China Feed, 2007(1):35-37
- [11] MOGODINIYAI KASMAEI K, DICKSVED J, SPÖRNDLY R, et al. Separating the effects of forage source and field microbiota on silage fermentation quality and aerobic stability [J]. Grassland Forage Science, 2016, 72(2):281-289
- [12] 中国农业大学,四川农业大学,贵州大学,等. T/HXCY 101-2025 饲草饲料水分活度测定技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,2025:3-4
China Agricultural University, Sichuan Agricultural University, Guizhou University, et al. T/HXCY 101-2025 Code of practice for determining water activity in forage and feed [S]. Beijing: China Standards Press, 2025: 3-4
- [13] 张永根,薛世崇,李洋,等. 固态发酵豆渣生产反刍动物饲料工艺条件研究[J]. 东北农业大学学报,2016,47(5):76-82
ZHANG Y G, XUE S C, LI Y, et al. Study on fermentation process of ruminant feed in soybean dregs by solid-state fermentation [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(5):76-82
- [14] YANG L L, YUAN X J, LI J F, et al. Dynamics of microbial community and fermentation quality during ensiling of sterile and nonsterile alfalfa with or without *Lactobacillus plantarum* inoculant [J]. Bioresource Technology, 2019, 275:280-287
- [15] 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
- [16] BRODERICK G A, KANG, J H. Automated simultaneous determination of ammonia and total amino acids in ruminal fluid and *in vitro* media [J]. Journal of Dairy Science, 1980, 63(1):64-75

- [17] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 杜马斯燃烧法测定饲料原料中总氮含量及粗蛋白质的计算: GB/T 24318-2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009:2-3
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Determination of total nitrogen content in animal feeding stuffs by combustion according to the Dumas principle and calculation of the crude protein content: GB/T 24318-2009[S]. Beijing: China Standards Press,2009:2-3
- [18] 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
- [19] 杨鑫. 海拔梯度对高山嵩草和燕麦叶际微生物及其发酵特性的影响研究[D]. 南京:南京农业大学,2022:11
YANG X. Effects of altitude gradient on phyllosphere microbes and their fermentation characteristics of *Kobresia pygmaea* and *Avena sativa* L. [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2022:11
- [20] 茹素龙,赵永龙,王紫薇,等. 产胞外多糖菌株的分离鉴定及其功能研究[J]. 微生物学报,2023,63(11):4315-4329
RU S L, ZHAO Y L, WANG Z W, et al. Isolation, identification, and functional characterization of exopolysaccharide-producing strains [J]. Acta Microbiologica Sinica,2023,63(11):4315-4329
- [21] PELEG M. Models of the water activity effect on microbial growth rate and initiation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2022,106(4):1375-1382
- [22] ZHANG L, LEI Q Y, CHENG Y L, et al. Study on the removal of cadmium in rice using microbial fermentation method [J]. Journal of Food Science,2017,82(6):1467-1474
- [23] 张竞一,洪滨,张珊,等. 发酵对糙米营养品质影响及其在米制产品中的应用研究进展[J]. 食品科学,2025,46(6):320-329
ZHANG J Y, HONG B, ZHANG S, et al. Research progress in the effect of fermentation on the nutritional quality of brown rice and its application in rice products[J]. Food Science,2025, 46(6):320-329
- [24] 李群华,徐雪,沈晓晖,等. 不同发酵时间对益生菌发酵饲料营养成分和品质的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医,2020(3):23-26
LI Q H, XU X, SHEN X H, et al. Effects of different fermentation time on nutrient composition and quality of probiotics fermented feed[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine,2020(3):23-26
- [25] 卢培利,杨涵,丁阿强,等. 碳源与氮源限制下细菌代谢调节研究进展[J]. 微生物学报,2023,63(3):946-962
LU P L, YANG H, DING A Q, et al. Metabolic regulation of bacteria with limited carbon and nitrogen sources [J]. Acta Microbiologica Sinica,2023,63(3):946-962
- [26] 刘豪栋,杨映津,林高节,等. 酵母与乳酸菌的相互作用模式及其在发酵食品中的应用研究进展[J]. 食品科学,2022,43(9):268-274
LIU H D, YANG Y J, LIN G J, et al. Recent progress in understanding the interaction patterns between yeast and lactic acid bacteria and their applications in fermented foods[J]. Food science,2022,43(9):268-274
- [27] ZHAN Q, THAKUR K, FENG J Y, et al. LC-MS based metabolomics analysis of okara fermented by *Bacillus subtilis* DC-15: insights into nutritional and functional profile[J]. Food Chemistry, 2023,413:135656
- [28] 罗文,王晓力,朱新强,等. 固态发酵豆渣和苹果渣复合蛋白饲料的研究[J]. 粮食与饲料工业,2017(2):44-48
LUO W, WANG X L, ZHU X Q, et al. Production of compound protein feed stuff from bean dregs and apple pomace by solid-state fermentation [J]. Cereal and Feed Industry,2017(2):44-48
- [29] 余汝华,赵丽华,莫放,等. 玉米秸秆青贮饲料中NDF与ADF含量变化规律的研究[J]. 饲料工业,2003,24(10):19-20
YU R H, ZHAO L H, MO F, et al. Study on the variation laws of NDF and ADF contents in corn stalk silage [J]. Feed Industry,2003,24(10):19-20
- [30] 张根,陈宝锐,陈涛,等. 农作物秸秆木质纤维素生物降解酶及降解菌的研究进展[J]. 农学学报,2023,13(2):24-32
ZHANG G, CHEN B R, CHEN T, et al. Research progress on enzymes and microorganisms for biodegradation of lignocelluloses from crop straw [J]. Journal of Agriculture, 2023, 13(2):24-32
- [31] 王雪洋,韩淑敏,李雁冰,等. 不同添加剂对豆渣型发酵饲料发酵品质及有氧稳定性的影响[J]. 中国饲料,2020(15):116-119
WANG X Y, HAN S M, LI Y B, et al. Effects of different additives on fermentation quality and aerobic stability of soybean milk fermented feed[J]. China Feed,2020(15):116-119
- [32] JIANG G H, BAI X S, WU Z G, et al. Modification of ginseng insoluble dietary fiber through alkaline hydrogen peroxide treatment and its impact on structure, physicochemical and functional properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021,150:111956
- [33] GUAN Y T, XIE C Y, ZHANG R, et al. Characterization and the cholesterol-lowering effect of dietary fiber from fermented black rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Food and Function, 2023,14(13):6128-6141
- [34] 田铁. 微生物固态发酵对蚕豆营养品质及抗氧化活性的影响 [D]. 武汉:武汉轻工大学,2022:46
TIAN T. Effects of microbial solid-state fermentation on nutritional quality and antioxidant activity of broad bean [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University,2022:46
- [35] 丁建莉,魏丹,金梁,等. 基于宏转录组研究蔬菜秸秆发酵体系细菌群落[J]. 农业环境科学学报,2020,39(11):2653-2660
DING J L, WEID, JIN L, et al. Bacterial community of vegetable straw fermentation system based on metatranscriptomics[J]. Journal of Agro-Environment Science,2020,39(11):2653-2660
- [36] 陈亮,王克勤,齐慧,等. 水分含量对平菇菌糠堆肥发酵的影响[J]. 中国农业科技导报,2024,26(10):226-233
CHEN L, WANG K Q, QI H, et al. Effect of moisture content on composting with spent substrate of *Pleurotus ostreatus* [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(10):226-233

- [37] 赵君哲. 食品的水分活度与微生物菌群[J]. 肉类工业, 2014(7):51-54
ZHAO J Z. Water activity and microbial groups in foods[J]. Meat Industry, 2014(7):51-54
- [38] 崔艺燕, 王超普, 邓盾, 等. 不同菌种有氧发酵对柑橘渣营养价值的影响[J]. 动物营养学报, 2022, 34(3):2030-2040
CUI Y Y, WANG C P, DENF D, et al. The influence of aerobic fermentation of different strains on the nutritional value of citrus residue [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(3):2030-2040
- [39] 王泽宇, 范红叶, 刘灵秀, 等. 醋酸梭菌在异养和自养条件下的乙酸生成与代谢特性[J]. 微生物学通报, 2024, 51(8):2819-2830
WANG Z Y, FAN H Y, LIU L X, et al. Acetate production and metabolic characteristics of clostridium aceticum under heterotrophic and autotrophic conditions [J]. Chinese Journal of Microbiology, 2024, 51(8):2819-2830
- [40] 岳清华, 刘翀, 李利民, 等. 发酵时间和方式对面团中酵母代谢产物的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8):27-33
YUE Q H, LIU C, LI L M, et al. Effect of fermentation time and method on yeast metabolites in dough[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(8):27-33
- [41] TAHIR M, WANG T W, ZHANG J Q, et al. Compound lactic acid bacteria enhance the aerobic stability of *Sesbania cannabina* and corn mixed silage [J]. BMC Microbiology, 2025, 25(1):68
- [42] DU Y Y, ZHENG T T, ZHONG R B, et al. Changes in the chemical properties and metabolite profiling of fish sauce prepared from underutilized large yellow croaker roes during fermentation at different temperatures[J]. Food Research International, 2024, 179:114030
- [43] 嵇晨, 周溯, 韩晓华, 等. 臭豆腐发酵过程中丙酸形成的机制[J]. 中国食品学报, 2023, 23(5):352-361
JI C, ZHOU S, HAN X H, et al. The mechanisms of propionic acid formation in the fermentation of stinky tofu[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(5):352-361
- [44] 周斐然, 张苏江, 王明, 等. 甜高粱青贮有氧暴露的稳定性及微生物变化的研究[J]. 草业学报, 2017, 26(4):106-112
ZHOU F R, ZHANG S J, WANG M, et al. S Aerobic stability and microbial populations in sweet sorghum silages during aerobic exposure [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(4):106-112
- [45] 任文鑫, 崔迎, 夏天. 水分活度的测量及其对微生物生长影响的研究综述[J]. 饮食保健, 2017, 4(25):370-371
REN W X, CUI Y, XIA T. A review of the measurement of water activity and its impact on microbial growth [J]. Diet Health, 2017, 4(25):370-371
- [46] 万学瑞, 豆思远, 李玉, 等. 复合乳酸菌对全株玉米青贮及有氧暴露后微生物及饲料品质的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(11):83-90
WAN X R, DOU S Y, LI Y, et al. Effect of lactic acid bacteria preparations on microbial population counts and silage quality in maize silage during fermentation and on aerobic exposure [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11):83-90
- [47] KUMAR M, KUMAR A, NAGPAL R, et al. Cancer-preventing attributes of probiotics: An update [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2010, 61(5):473-496
- [48] 周丽君, 杨苗苗, 魏春艳, 等. 唾液乳杆菌的抗氧胁迫能力及有氧发酵条件[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22):98-105
ZHOU L J, YANG M M, WEI C Y, et al. Anti-oxygen stress ability of *Lactobacillus salivarius* and optimization of its aerobic fermentation conditions [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22):98-105
- [49] 王旭哲, 贾舒安, 张凡凡, 等. 紧实度对青贮玉米有氧稳定期发酵品质、微生物数量的效应研究[J]. 草业学报, 2017, 26(9):156-166
WANG X Z, JIA S A, ZHANG F F, et al. Fermentation quality and microbial quantity during aerobic storage of corn silage [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(9):156-166
- [50] 黄峰, 张露, 周波, 等. 青贮微生物及其对青贮饲料有氧稳定性影响的研究进展[J]. 动物营养学报, 2019, 31(1):82-89
HUANG F, ZHANG L, ZHOU B, et al. Research progress in silage microorganisms and its effect on silage aerobic stability [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(1):82-89
- [51] PASCHALIS A, BONETTI S, FATICHI S. Controls of ecophysiological grassland dynamics in agrivoltaic systems [J]. Earth's Future, 2025, 13(3):2024EF005183
- [52] 管瑛. 雅致放射毛霉 DCY-1 固态发酵豆渣的营养及功能性研究[D]. 南京:南京农业大学, 2016:23
GUAN Y. Effects on nutrition and bio-functionality of okara by solid-state fermentation with *actinomucor elegans* DCY-1 [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016:23
- [53] 郑淑芳. 营养因素和环境因素对酵母菌生长的影响[J]. 山西食品工业, 1995, (4):26-29
ZHENG S F. The effects of nutritional factors and environmental factors on yeast growth [J]. Shanxi Food Industry, 1995, (4):26-29
- [54] 冯亮, 袁春燕, 杨超, 等. 好氧反硝化生物脱氮技术的研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(10):3342-3354
FENG L, YUAN C Y, YANG C, et al. Research progress in nitrogen removal by aerobic denitrification [J]. Microbiology China, 2020, 47(10):3342-3354
- [55] DING Y C, HE W J, DAI W L, et al. Quality and flavor development of solid-state fermented surimi with *Actinomucor elegans*: a perspective on the impacts of carbon and nitrogen sources [J]. Food Chemistry, 2024, 447:139053
- [56] 李辉, 马仕洪, 王似锦, 等. 基于水分活度的非无菌中药制剂微生物控制策略研究[J]. 中国现代应用药学, 2022, 39(1):55-60
LI H, MA S H, WANG S J, et al. Study on microbiological control strategy of non-sterile traditional Chinese medicine preparation based on water activity [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2022, 39(1):55-60