

白酒糟与玉米油渣协同固态发酵工艺 优化及体外营养价值评定

张硕清¹, 汝昕潼¹, 穆永强¹, 郑思奇¹,
张遨然², 李建平¹, 单安山¹
(东北农业大学动物科学技术学院¹, 哈尔滨 150030)
(新希望六和股份有限公司², 成都 610023)

摘要:本研究采用蒸汽爆破预处理的白酒糟为主要原料、玉米油渣为辅料构建混菌固态发酵体系,旨在实现白酒糟资源的高效饲料化利用。首先以活菌数为主要指标确定白酒糟基料中玉米油渣的最适添加比例,随后在单因素基础上通过响应面实验进一步优化发酵工艺,并对发酵前后白酒糟基料的常规营养成分、氨基酸组分、霉菌毒素含量和营养物质体外消化率进行测定。结果表明:当发酵基料中玉米油渣的质量分数为40%时菌群密度最大;最佳发酵工艺为发酵时间6 d、温度28℃、水质量分数60%、接菌质量分数10%。在此工艺下,与发酵前相比,白酒糟基料的中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)质量分数分别降低22.25%和28.14% ($P < 0.01$),酸性洗涤木质素(ADL)质量分数降低6.82% ($P < 0.05$),粗蛋白质(CP)和还原糖质量分数分别提高12.27%和78.04% ($P < 0.01$)。总氨基酸质量分数增加17.92% ($P < 0.05$),霉菌毒素水平极显著降低($P < 0.01$)。此外,干物质、粗蛋白质、总能的消化率分别提高20.57%、42.01%和12.36% ($P < 0.01$)。协同利用白酒糟与玉米油渣进行固态发酵可有效改善其饲用品质。

关键词:白酒糟;玉米油渣;固态发酵工艺;响应面法;体外仿生消化法

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001299

中图分类号:S816;TS261.9 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0170-09

网络首发时间:2026-01-02 10:32:41

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251231.1558.010

Process optimization and *in vitro* nutritional value evaluation of solid-state co-fermentation of distiller's grains and corn oil residue

Zhang Shuoqing¹, Ru Xintong¹, Mu Yongqiang¹, Zheng Siqi¹, Zhang Aoran², Li Jianping¹, Shan Anshan¹
(College of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University, Haerbin 150030)
(New Hope Liuhe Group Co., Ltd.², Chengdu 610023)

Abstract: In this study, steam-exploded distiller's grains were used as the main raw material and corn oil residue as the supplementary material, a mixed-strain solid-state co-fermentation system were established to achieve efficient feed utilization of distiller's grains resources. First, the optimal proportion of corn oil residue in the distiller's grains substrate was determined with viable cell count as the key indicator. Subsequently, the fermentation process was further optimized via response surface methodology on the basis of single-factor experiments. In addition, the conventional nutritional components, amino acid composition, mycotoxin content, and *in vitro* nutrient digestibility of the substrate before and after fermentation were analyzed. The results showed that the highest microbial density was a-

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1300603)

收稿日期:2025-09-05

第一作者:张硕清,女,2002年出生,硕士,动物营养与饲料科学,zsq82012@163.com

通信作者:李建平,男,1977年出生,教授,非粮型饲料资源开发利用,ljpnau@163.com

chieved when the mass fraction of corn oil residue in the fermentation substrate was 40%. The optimal fermentation process parameters were as follows: fermentation time of 6 days, temperature of 28 °C, moisture content of 60%, and inoculation amount of 10%. Under these conditions, compared with those before fermentation, the mass fractions of neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) in the distiller's grains substrate decreased by 22.25% and 28.14% ($P < 0.01$), respectively; the mass fraction of acid detergent lignin (ADL) decreased by 6.82% ($P < 0.05$); the mass fractions of crude protein (CP) content and reducing sugar increased by 12.27% and 78.04% ($P < 0.01$), respectively. The total amino acid content increased by 17.92% ($P < 0.05$), and the mycotoxin level was extremely significantly reduced ($P < 0.01$). In addition, the digestibility of dry matter, crude protein, and gross energy was increased by 20.57%, 42.01%, and 12.36% ($P < 0.01$), respectively. In conclusion, the synergistic utilization of distiller's grains and corn oil residue via mixed-strain solid-state fermentation could effectively improve their feed quality.

Key words: distiller's grains; corn oil residue; solid-state fermentation technology; response surface methodology; *in vitro* bionic digestion technology

随着畜牧业快速发展,饲料粮需求大幅增长。开发和利用非常规饲料资源是缓解饲料供应压力的有效途径^[1]。白酒糟是中国白酒酿造业的副产物,年产量超2 000万t,富含粗蛋白质、氨基酸及多种功能活性物质^[2],极具饲料开发潜力。微生物发酵是提高白酒糟饲用价值的重要技术^[3],适量使用发酵白酒糟替代玉米、豆粕等常规饲料原料能够对猪的生产性能、免疫性能及肠道健康等产生积极影响^[4]。然而,在白酒糟的实际发酵应用中仍面临多重限制因素,白酒糟中稻壳比例高,其致密的木质纤维素结构限制了纤维素酶的可及性;酿造过程消耗了谷物中大量淀粉,导致白酒糟中有效能值不足,制约微生物的生长与代谢。因此,提高纤维素酶的可及性并改善发酵体系的营养平衡,为提升白酒糟发酵效率和产物品质的关键问题。

蒸汽爆破(简称汽爆)能够通过高温高压及瞬时减压破坏物料结构,是一种高效的物理预处理技术^[5,6]。汽爆预处理能够有效破坏白酒糟纤维结构,降低纤维结晶度、增加无定形区及表面孔隙率,是预处理白酒糟的有效手段^[7]。玉米油渣是指玉米胚芽榨油后,对玉米油进行过滤时,被过滤器拦截下来的由极少部分胚芽、纤维细小碎片及磷脂等悬浮物组成的混合物,能值较高,但在实际生产中常被直接丢弃,不仅浪费资源,且会污染环境。如将其与白酒糟按适宜比例混合作为发酵底物,则可在改善微生物代谢环境的同时,提升发酵效率、改善产物营养价值。目前关于二者协同发酵的相关研究鲜见报道。本研究以汽爆白酒糟和玉米油渣为基料,构建混菌固态发酵体系、优化发酵参数,并结合单胃动物(猪)体外仿生消化法对发酵产物进行营养价值评定。本

研究旨在为白酒糟与玉米油渣的高效饲料化利用提供参考,以期在猪只饲养中实现替代部分玉米豆粕等常规饲料原料、降低饲料成本并提高养分利用效率的目标。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

白酒糟源于黑龙江省酒厂,通过蒸汽爆破(维压时间8 min、汽爆压强1.1 MPa、水质量分数60%)进行预处理,其粗蛋白质(CP)、粗脂肪(EE)、中性洗涤纤维(NDF)、酸性洗涤纤维(ADF)和酸性洗涤木质素(ADL)的质量分数分别为15.43%、4.33%、42.22%、33.60%、11.49%,总能(GE)为18.71 MJ/kg。玉米油渣源于黑龙江省生化公司,其CP、EE、NDF、ADF和ADL的质量分数分别26.67%、39.95%、19.33%、2.93%、1.47%,GE为27.56 MJ/kg。黑曲霉(*Aspergillus niger*, CGMCC 3.17612)购自中国微生物菌种保藏中心,产朊假丝酵母(*Candida utilis*)及枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)由黑龙江省微生物研究所馈赠。

浓硫酸、氢氧化钠、硼酸、无水硫酸铜、无水硫酸钠、丙酮、石油醚、无水碳酸氢钠、十二烷基硫酸钠等均为国产分析纯;α-淀粉酶(5 IU/mg,来自猪胰腺)、胃蛋白酶(3 200 IU/mg,来自猪胃黏膜)、胰蛋白酶(2 500 IU/mg,来自猪胰腺)、糜蛋白酶(1 000 IU/mg,来自牛胰腺)等均为生物试剂;PDA培养基、LB培养基、YPD培养基为生物试剂;黄曲霉毒素B₁(AFB₁)、呕吐毒素(DON)、赭曲霉毒素(OTA)、玉米赤霉烯酮(ZEN)试剂盒。

1.2 仪器与设备

FA2004分析天平、A2000i纤维仪、Kjetec™8400

全自动凯氏定氮仪、QTF-6000 氧弹式热量计、DHP-9162 电热恒温培养箱、L-8800 全自动氨基酸分析仪、N15156 高通量体外模拟消化系统等。

1.3 实验方法

1.3.1 菌种活化与扩培

取黑曲霉接种于 PDA 培养基, 25 °C 培养 3~5 d 后制成浓度为 1×10^8 CFU/mL 的孢子悬液, 备用。取产朊假丝酵母接种于 YPD 培养基中、枯草芽孢杆菌接种于 LB 培养基中, 置于摇床中培养 12 h, 调整浓度至 1×10^8 CFU/mL 作为种子液, 备用。

1.3.2 玉米油渣添加量的优化

在水质量分数 60% (水分质量/发酵基料总质量)、发酵温度 30 °C、发酵时间 5 d、接菌质量分数 10% (菌液体积/发酵基料总质量)、菌种比例 1:1:1 的条件下, 分别用质量分数为 10%、20%、30%、40%、50% 的玉米油渣替代汽爆白酒糟, 以发酵后活菌数为主要指标, NDF、ADF 和 CP 质量分数为次要指标, 对白酒糟基料进行优化。发酵基料置于锥形瓶中, 用可透气封口膜封口后在恒温培养箱中进行发酵, 每组 3 个重复。

1.3.3 单因素实验

固定初始发酵条件为: 500 mL 锥形瓶装入 100 g 优化后的白酒糟基料, 发酵时间 6 d、发酵温度 30 °C、水质量分数 60%、接菌质量分数 12%、接菌比例 $V(\text{黑曲霉}): V(\text{产朊假丝酵母}): V(\text{枯草芽孢杆菌})$ 1:1:1。分别研究发酵时间 (2、4、6、8、10 d)、发酵温度 (24、27、30、33、36 °C)、水质量分数 (30%、40%、50%、60%、70%)、接菌质量分数 (4%、8%、12%、16%、20%) 和接菌比例 $V(\text{黑曲霉}): V(\text{产朊假丝酵母}): V(\text{枯草芽孢杆菌})$ (1:2:1、1:1:2、1:1:1、2:1:1、2:1:2) 对发酵后白酒糟基料中 NDF 质量分数的影响。

1.3.4 响应面实验

基于单因素实验结果, 选取 4 个主要考察因素设置为自变量, 以发酵后白酒糟基料的 NDF 质量分数为响应值, 采用 Design Expert 10.0.7 设计响应面实验, 其余因素以单因素筛选的最佳水平添加, 以确定固态发酵白酒糟基料的最佳工艺参数。

1.3.5 体外仿生消化实验

发酵前后样品的营养物质消化率采用“高通量体外模拟消化系统”进行检测, 样品处理方法、缓冲液和模拟消化液的配制、运行参数等实验操作参照《单胃动物仿生消化系统操作手册》及相关文献 [8, 9]。仿生消化结束后无损失地回收消化残渣, 105 °C 烘至恒重, 每个处理 10 个重复。

1.4 测定指标及方法

CP 质量分数的测定参照 GB/T 6432—2018《饲料中粗蛋白的测定》中凯氏定氮法进行; EE 质量分数的测定参照 GB/T 6433—2025《饲料中粗脂肪的测定》中索氏提取法进行; 粗灰分 (Ash) 质量分数的测定参照 GB/T 6438—2007《饲料中粗灰分的测定》进行。NDF、ADF 和 ADL 质量分数的测定参照 Van Soest 等^[10]的方法进行; 总能参照 GB/T 45104—2024《饲料总能的测定》, 使用氧弹式热量计测定; 还原糖参照宣丽等^[11]的方法, 采用 3,5-二硝基水杨酸法 (DNS) 测定; 菌落计数参照 GB 4789.15—2016《食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》中平板计数法和 GB/T 34224—2017《生物产品中功能性微生物检测》中枯草芽孢杆菌检验程序进行。霉菌毒素水平采用试剂盒进行检测。氨基酸质量分数参照 GB/T 18246—2019《饲料中氨基酸的测定》, 使用全自动氨基酸分析仪测定。体外干物质消化率、体外粗蛋白质消化率和体外总能消化率的计算公式为:

$$Y_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_3 = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Y_1 为体外干物质消化率/%; m_1 为消化前样品干物质质量/g; m_2 为未消化残渣干物质质量/g; Y_2 为体外粗蛋白质消化率/%; W_1 为消化前样品粗蛋白质质量分数/%; W_2 为消化后残渣粗蛋白质质量分数/%; Y_3 为体外总能消化率/%; E_1 为消化前样品总能/MJ; E_2 为未消化残渣总能/MJ。

1.5 数据分析

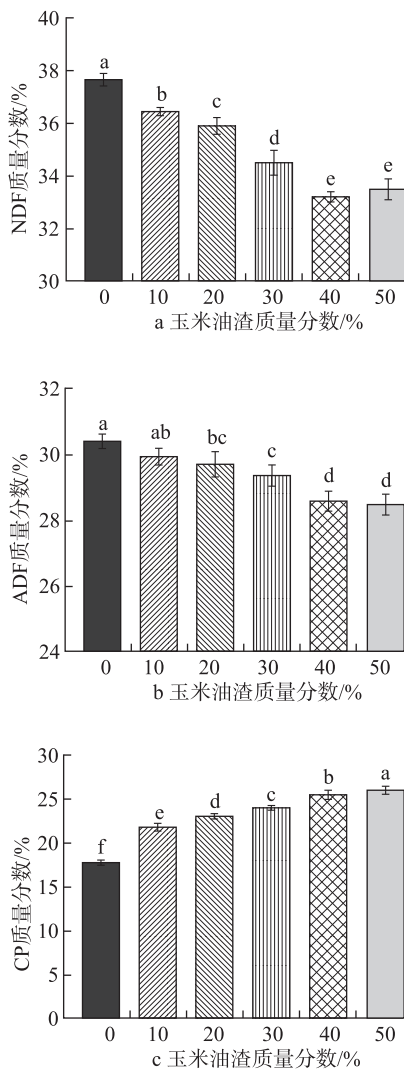
使用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析, Duncan 法进行组间多重比较。实验结果用“平均数 ± 标准差”表示, $P > 0.05$ 表示无显著性差异, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 玉米油渣添加量对发酵白酒糟基料中营养成分和活菌数的影响

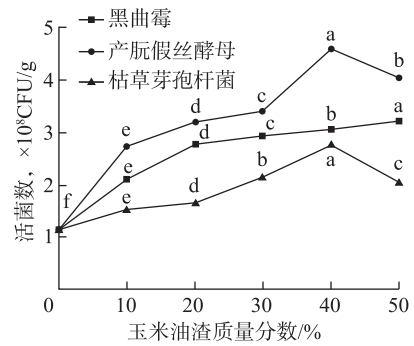
在白酒酿造过程中, 谷物中的淀粉等碳源被大量消耗用于生产酒精。因此, 在白酒糟发酵时需添加辅助物提供外源碳源以提高微生物的生长代谢活性。本研究以玉米油渣作为辅助物, 由图 1 可见, 随着玉米油渣添加量的提高, 发酵基料中纤维组分逐

渐降低, NDF 质量分数在 40% 添加量时最低, CP 质量分数显著升高 ($P < 0.05$), 发酵体系的营养结构有所改善, 这主要与玉米油渣和白酒糟本身的营养特性有关, 与陈煜等^[12]的研究结果一致。由图 2 可见, 玉米油渣的加入使得白酒糟基料中活菌数显著增多, 且随着添加量的变化总体呈现先升高后降低的趋势。活菌数的增加表明玉米油渣的加入为微生物提供了可利用碳源, 从而促进其生长与代谢^[13]。当油渣质量分数超过 40% 时, 黑曲霉和枯草芽孢杆菌的活菌数开始下降, 这可能是由于过量的油脂在基质中积聚, 形成疏水性屏障, 抑制了菌体对水分和氧气的获取, 进而降低了菌群活性^[14]。综合考虑, 确定添加玉米油渣的最佳质量分数为 40%。



注: 柱形标有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 余同。

图 1 不同玉米油渣添加量对发酵白酒糟基料中 NDF、ADF 和 CP 质量分数的影响



注: 同一折线上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$), 余同。

图 2 不同玉米油渣添加量对发酵白酒糟基料中活菌数的影响

2.2 单因素实验

2.2.1 发酵时间对白酒糟基料中 NDF 质量分数的影响

发酵时间直接关系到微生物的生长周期以及代谢产物的积累。由图 3 可见, 在 2~6 d 时, 白酒糟基料中 NDF 质量分数随着发酵时间的延长逐渐降低, 当发酵进行到第 6 天时 NDF 质量分数最低, 为 31.19%, 且 4~6 d 时的下降幅度高于 2~4 d, 这主要是因为发酵过程中, 发酵微生物首先需适应发酵环境, 而后形成协同共生作用^[15]; 第 6 天之后, 随着发酵时间继续延长, NDF 质量分数无显著性差异, 可能是由于发酵时间过长, 菌株进入衰亡期, 纤维降解趋于稳定^[16]。因此, 选择发酵时间 4~8 d 进行后续优化实验。

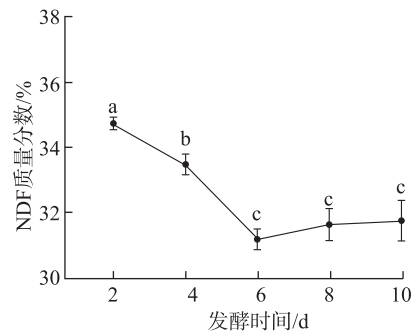


图 3 发酵时间对 NDF 质量分数的影响

2.2.2 发酵温度对白酒糟基料中 NDF 质量分数的影响

温度是影响发酵效率的另一关键因素, 且因微生物种类不同而有所差异。由图 4 可见, 当温度控制在 27 °C 时, 菌株对白酒糟基料中 NDF 的降解效果最佳, 此时 NDF 质量分数为 32.68%。而在 27~36 °C 间, 随着温度继续提高, NDF 质量分数逐渐上升。这可能与黑曲霉(纤维素降解菌)的最适生长温度有

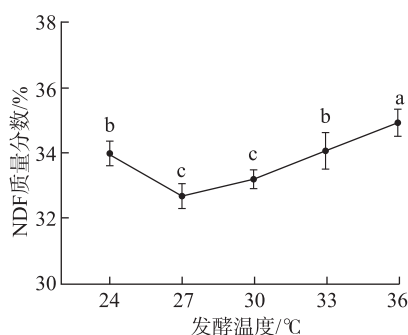


图4 发酵温度对 NDF 质量分数的影响

关,过高的温度会抑制菌株活性,影响酶的分泌与稳定性^[17]。因此,选择发酵温度 24 ~ 30 °C 进行后续优化实验。

2.2.3 含水量对白酒糟基料中 NDF 质量分数的影响

固态发酵是指在无明显游离水的固体基质上进行的微生物发酵过程,水质量分数一般在 70% 以下。由图 5 可见,水质量分数在 30% ~ 60% 之间时,随着含水量的增加,NDF 质量分数逐渐下降,在水质量分数 60% 时出现最低值 32.18%。当水质量分数为 70% 时,NDF 质量分数轻微上升,与水质量分数 60% 处理组相比无显著性差异。这主要是因为,在固态发酵体系中,低含水量会降低微生物胞外酶的稳定性与溶解度,而高含水量会降低基质的孔隙率,抑制氧气、热量及营养物质的传递,从而影响微生物的代谢^[18]。因此,选择水质量分数 50% ~ 70% 进行后续优化实验。

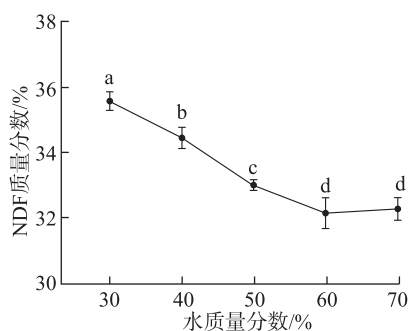


图5 水质量分数对 NDF 质量分数的影响

2.2.4 接菌量对白酒糟基料中 NDF 质量分数的影响

接菌量是决定发酵基质中生物量与酶产量的重要因素。由图 6 可见,随着接菌量的增加,发酵基料的 NDF 质量分数呈现先降低后逐渐趋于平稳的趋势。接菌质量分数在 12% 时,NDF 质量分数最低,为

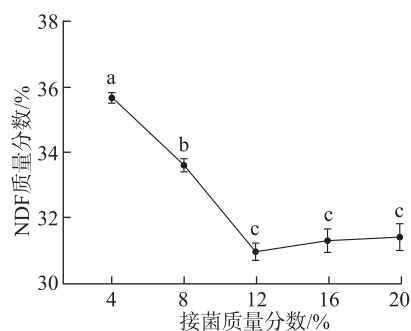


图6 接菌质量分数对 NDF 质量分数的影响

30.96%。为满足菌株繁殖需求并避免生物量过度密集造成的竞争压力,选择接菌质量分数 8% ~ 16% 进行后续优化实验。

2.2.5 接菌比例对白酒糟基料中 NDF 质量分数的影响

在复合菌株的发酵过程中,菌株的协同作用对发酵效果的影响至关重要。由图 7 可见,当 V(黑曲霉):V(产朊假丝酵母):V(枯草芽孢杆菌)为 2:1:1 时,NDF 质量分数最低,为 32.29%。因此,确定接菌比例为 2:1:1 进行后续优化实验。

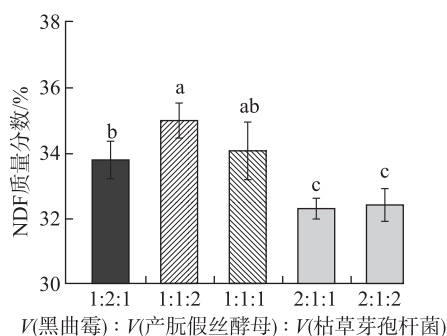


图7 接菌比例对 NDF 质量分数的影响

2.3 响应面实验

2.3.1 响应面回归模型建立及方差分析

根据单因素分析结果,选择发酵时间、发酵温度、水质量分数、接菌质量分数 4 个因素进行后续响应面实验。实验的因素及水平设计如表 1,实验结果如表 2。

表1 实验因素水平及编码

因素	-1	0	+1
A:发酵时间/d	4	6	8
B:发酵温度/°C	24	27	30
C:水质量分数/%	50	60	70
D:接菌质量分数/%	8	12	16

利用软件 Design Expert 10.0.7 对响应面实验结果进行回归拟合分析,拟得响应值与因素之间的多

元二次回归方程为:

$$Y = 29.25 - 0.90A - 1.47B - 0.60C - 1.12D + 0.95AB - 0.63AC - 0.61AD + 0.22BC + 0.21BD + 0.87CD + 1.42A^2 + 1.97B^2 + 1.69C^2 + 2.34D^2$$

式中: Y 为 NDF 质量分数/%; A 为发酵时间/d; B 为发酵温度/°C; C 为水质量分数/%; D 为接菌质量分数/%。

表2 响应面实验设计及结果

实验编号	A	B	C	D	NDF/%
1	0	+1	0	-1	32.83
2	+1	0	+1	0	29.34
3	0	+1	-1	0	31.39
4	0	0	0	0	27.94
5	-1	0	+1	0	32.72
6	0	-1	0	-1	35.88
7	+1	0	0	+1	30.76
8	0	0	-1	-1	35.91
9	0	+1	0	+1	31.39
10	-1	-1	0	0	36.14
11	0	-1	+1	0	34.00
12	+1	0	-1	0	33.01
13	0	+1	+1	0	31.11
14	0	0	+1	+1	32.64
15	+1	-1	0	0	32.24
16	-1	+1	0	0	31.40
17	0	0	0	0	29.96
18	+1	0	0	-1	34.03
19	-1	0	-1	0	33.89
20	0	0	0	0	29.72
21	0	0	+1	-1	33.70
22	-1	0	0	+1	33.21
23	-1	0	0	-1	34.05
24	0	0	0	0	29.02
25	0	-1	-1	0	35.17
26	+1	+1	0	0	31.28
27	0	0	0	0	29.63
28	0	-1	0	+1	33.61
29	0	0	-1	+1	31.39

模型方差分析结果由表3可见,回归模型的 $F = 19.78$ 、 $P < 0.01$, 变异失拟项 $P = 0.79$, 说明拟合模型极显著, 失拟检验不显著; 决定系数 $R^2 = 0.9519$, 表明此回归模型拟合程度良好; 变异系数 $CV = 2.08\%$, 说明实验数据的离散程度较小。表明模型能充分反映实际情况, 可对响应值进行预测。发酵因素 A 、 B 、 C 、 D 均对 NDF 质量分数的影响极显著 ($P < 0.01$), 其影响顺序为 $B > D > A > C$, 交互项 AB 、 CD 对 NDF 含量的影响显著 ($P < 0.05$), 二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

通过分析各因素对 NDF 质量分数交互影响可知, 随着时间和温度的增加, NDF 质量分数呈现先下

降后上升的趋势, 说明发酵白酒糟基料的 NDF 质量分数对温度和时间变化的敏感性较高, 二者之间交互作用显著。同理分析其他各因素间的交互作用, 结果与方差分析结果一致。

表3 回归模型方差分析表

变异源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	125.45	14	8.96	19.78	<0.01	**
A	9.63	1	9.63	21.26	<0.01	**
B	25.93	1	25.93	57.24	<0.01	**
C	4.38	1	4.38	9.67	<0.01	**
D	14.96	1	14.96	33.03	<0.01	**
AB	3.57	1	3.57	7.89	0.01	*
AC	1.56	1	1.56	3.45	0.08	
AD	1.48	1	1.48	3.26	0.09	
BC	0.20	1	0.20	0.44	0.52	
BD	0.17	1	0.17	0.38	0.54	
CD	2.99	1	2.99	6.61	0.02	*
A ²	13.07	1	13.07	28.86	<0.01	**
B ²	25.07	1	25.07	55.34	<0.01	**
C ²	18.63	1	18.63	41.12	<0.01	**
D ²	35.39	1	35.39	78.13	<0.01	**
残差	6.34	14	0.45			
失拟值	3.70	10	0.37	0.56	0.79	
纯误差	2.64	4	0.66			
总离差	131.79	28				
决定系数						
$R^2 = 0.9519$						
校正决定系数						
$R_{adj}^2 = 0.9038$						
变异系数						
$CV = 2.08\%$						

注: ** 为极显著 ($P < 0.01$); * 为显著 ($P < 0.05$)。

2.3.2 发酵参数优化及模型验证

为验证模型的有效性, 根据响应面实验所得的各因素最优值调整实际发酵工艺参数为: 发酵时间 6 d, 发酵温度 28 °C, 水质量分数 60%, 接菌质量分数 10%, 其余因素: 接菌比例 V (黑曲霉): V (产朊假丝酵母): V (枯草芽孢杆菌) 为 2: 1: 1, 在此条件下进行 3 组平行验证实验, 测得发酵白酒糟基料中 NDF 质量分数为 28.97%, 与模型预测值(28.73%) 相对偏差为 0.84%, 表明回归模型拟合程度较好。

2.4 发酵白酒糟基料体外营养价值评定

2.4.1 发酵前、后白酒糟基料营养成分分析

微生物发酵主要是利用微生物产生的酶系统将原料中的大分子物质(如纤维素、蛋白质等)转化为更易消化吸收的化合物或其他具有特定功能的代谢产物^[19]。由表4可见, 经发酵后白酒糟基料中纤维含量均有明显改善, 其中 NDF 和 ADF 质量分数分别降低 22.25%、28.14% ($P < 0.01$), ADL 质量分数降低 6.82% ($P < 0.05$), 且降解效果优于阿拉腾珠拉等^[20]的研究结果, 这可能是由于汽爆增加了底物的孔隙率, 改善了纤维素分解菌的定殖条件^[21], 更有利于

纤维素酶与纤维素的结合。同时,发酵后还原糖质量分数提升 78.04% ($P < 0.01$),这也进一步证明了基质中的纤维组分被有效降解,释放出更多可发酵糖类。CP 质量分数升高 12.27% ($P < 0.01$),这主要是因为发酵过程中微生物利用发酵基料中的碳水化合物进行增殖,导致部分干物质被分解转化为气体或代谢产物而损失,从而使 CP 质量分数相对提升^[22, 23]。EE 质量分数较发酵前无显著变化 ($P > 0.05$)。

表 4 发酵前、后白酒糟基料中营养成分变化(干物质基础)

项目	发酵前白酒糟基料	发酵后白酒糟基料	变化率/%	P 值
CP/%	26.16 ± 0.14	29.37 ± 0.34 **	+12.27	<0.01
EE/%	18.35 ± 0.25	18.63 ± 0.49	+1.53	0.08
Ash/%	10.73 ± 0.04	10.91 ± 0.09	+1.68	0.49
NDF/%	37.26 ± 0.39	28.97 ± 0.28 **	-22.25	<0.01
ADF/%	31.95 ± 0.26	22.96 ± 0.43 **	-28.14	<0.01
ADL/%	10.70 ± 0.40	9.97 ± 0.21 *	-6.82	0.047
还原糖 /mg/g	235.00 ± 4.40	418.40 ± 6.90 **	+78.04	<0.01
GE/MJ/kg	22.87 ± 0.03	22.01 ± 0.04	-3.76	0.09

注:同行数据肩标 * 为差异显著 ($P < 0.05$), ** 为差异极显著 ($P < 0.01$),下同。

2.4.2 发酵前、后白酒糟基料氨基酸组分分析

白酒糟基料发酵前后氨基酸组成及质量分数由表 5 可见,共检测出 17 种氨基酸,除异亮氨酸和脯氨酸,其余氨基酸质量分数均显著提升 ($P < 0.05$),总氨基酸质量分数从发酵前的 14.90% 显著增加至 17.57% ($P < 0.05$),与张玉诚等^[24]的研究结果基本一致,这可能与微生物生物量的积累以及微生物分泌的蛋白酶对底物蛋白的水解作用有关。

表 5 发酵前、后白酒糟基料中氨基酸组分的变化(干物质基础,单位/%)

项目	发酵前白酒糟基料	发酵后白酒糟基料	变化率/%	P 值
精氨酸	0.73 ± 0.06	0.87 ± 0.04 *	+19.18	0.03
组氨酸	0.39 ± 0.03	0.46 ± 0.02 *	+17.95	0.03
异亮氨酸	0.65 ± 0.04	0.74 ± 0.03	+13.85	0.05
亮氨酸	1.68 ± 0.03	1.91 ± 0.02 *	+13.69	0.03
赖氨酸	0.57 ± 0.05	0.70 ± 0.03 *	+22.81	0.01
蛋氨酸	0.16 ± 0.02	0.19 ± 0.03 *	+18.75	0.02
苯丙氨酸	0.76 ± 0.06	0.92 ± 0.06 *	+21.05	0.02
缬氨酸	0.95 ± 0.07	1.09 ± 0.05 *	+14.74	0.04
苏氨酸	0.70 ± 0.05	0.91 ± 0.04 **	+30.00	<0.01
半胱氨酸	0.14 ± 0.06	0.16 ± 0.00 **	+14.29	<0.01
酪氨酸	0.47 ± 0.03	0.58 ± 0.03 **	+23.40	<0.01
天冬氨酸	0.89 ± 0.06	1.11 ± 0.04 **	+24.72	<0.01
丝氨酸	0.45 ± 0.03	0.59 ± 0.02 **	+31.11	<0.01
谷氨酸	2.21 ± 0.03	2.51 ± 0.09 *	+13.57	0.04
脯氨酸	1.44 ± 0.02	1.62 ± 0.44	+12.50	0.14
甘氨酸	2.10 ± 0.02	2.54 ± 0.09 *	+20.95	0.02
丙氨酸	1.78 ± 0.03	2.04 ± 0.08 *	+14.61	0.03
总氨基酸/%	14.90 ± 0.98	17.57 ± 0.70 *	+17.92	0.02

2.4.3 发酵前、后白酒糟基料霉菌毒素含量分析

霉菌毒素是由丝状真菌在生长繁殖过程中产生的次级代谢产物,具有较强的毒性和致病性。由表 6 可见,经发酵后白酒糟基料中 4 种霉菌毒素水平均极显著降低 ($P < 0.01$),降解率在 22.05%~56.70%,且均符合 GB 13078—2017《饲料卫生标准》。这主要归因于菌株的生物脱毒作用。有研究表明,黑曲霉、枯草芽孢杆菌和酵母菌均具有降解霉菌毒素的潜力,它们可以通过分泌特定的酶、活性物质或通过吸附作用减少其含量^[25-27],但是关于具体的降解机制仍需进一步研究。

表 6 发酵前、后白酒糟基料中霉菌毒素含量的变化(干物质基础)

项目/ $\mu\text{g}/\text{kg}$	发酵前白酒糟基料	发酵后白酒糟基料	变化率/%	P 值
AFB ₁	16.95 ± 0.25	7.34 ± 0.15 **	-56.70	<0.01
DON	17.99 ± 0.05	10.96 ± 0.05 **	-39.08	<0.01
OTA	18.82 ± 0.03	13.32 ± 0.03 **	-29.22	<0.01
ZEN	632.70 ± 3.90	493.20 ± 6.30 **	-22.05	<0.01

2.4.4 发酵前、后白酒糟基料营养物质的体外消化率分析

体外仿生化率是评估饲料或饲料原料消化性能的重要指标,反映了饲料中营养物质在消化过程中的可利用性^[28]。张慧等^[29]利用黑曲霉、枯草芽孢杆菌和嗜酸乳杆菌发酵白酒糟,通过体外消化实验发现与发酵前相比干物质消化率和粗蛋白质消化率分别提高了 11.43%、11.31%。由表 7 可见,本实验结果同样表明,发酵处理极显著提高了发酵白酒糟基料的体外干物质消化率、粗蛋白质消化率和总能消化率 ($P < 0.01$),且提升效果更优,分别提高了 20.57%、42.01% 和 12.36%。这主要是因为相较于普通的微生物发酵,汽爆协同混菌发酵能够更有效降低纤维聚合度、破坏纤维氢键结构、增加纤维比表面积,从而增强消化酶对营养物质的可及性^[7, 30],同时蛋白质、氨基酸等成分经微生物发酵得到进一步改善,更有利于提升养分和能量的消化利用率。

表 7 发酵前、后白酒糟基料中养分和能量的体外消化率

项目/%	发酵前白酒糟基料	发酵后白酒糟基料	变化率/%	P 值
干物质消化率	44.20 ± 0.04	53.29 ± 0.06 **	+20.57	<0.01
粗蛋白质消化率	32.06 ± 0.09	45.53 ± 0.04 **	+42.01	<0.01
总能消化率	53.32 ± 0.11	59.91 ± 0.03 **	+12.36	<0.01

3 结论

本研究以汽爆白酒糟和玉米油渣为发酵基料,

构建混菌固态发酵体系,确定最佳工艺参数为:发酵时间6 d、温度28℃、水质量分数60%、接菌质量分数10%、 $V(\text{黑曲霉}):V(\text{产阮假丝酵母}):V(\text{枯草芽孢杆菌})$ 为2:1:1。在此条件下,发酵产物的营养成分明显改善;霉菌毒素水平极显著降低;干物质、粗蛋白质和总能的体外消化率均极显著提升,表明协同利用白酒糟和玉米油渣进行固态发酵有助于改善这2种副产物的营养品质及饲用潜力。

参考文献

- [1] 道日娜,赵唯,白胡木吉力图,等. 畜牧饲料资源开发与可持续利用研究进展[J]. 畜牧业环境,2025,(4):24-25
Dao R, Zhao W, Baihumu J, et al. Research advances in the development and sustainable utilization of livestock feed resources[J]. Animal Industry and Environment, 2025(4): 24-25
- [2] 张飞,程润喜,李钢平,等. 白酒糟类原料营养解析及质量影响因素[J]. 中国饲料,2024,(21):162-167
Zhang F, Cheng R, Li G, et al. Nutritional analysis and quality influencing factors of Baijiu distiller's grains[J]. China Feed, 2024, (21):162-167
- [3] 郭素环,周碧君,文明,等. 白酒糟发酵菌种组合的筛选[J]. 饲料工业,2012,33(15):17-21
Guo S, Zhou B, Wen M, et al. Screening of microbial consortia for fermentation of distillers' grains[J]. Feed Industry, 2012, 33(15):17-21
- [4] 陈宝,范志勇,王丽,等. 白酒糟和发酵白酒糟的营养价值及其在猪生产中的应用研究进展[J]. 动物营养学报,2025,37(5):2822-2836
Chen B, Fan Z, Wang L, et al. Research progress on nutritional value of distiller's grains and fermented distiller's grains and their application in pig production[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(5):2822-2836
- [5] Bu Y, Wang L, Chen H. Recalcitrant structure analysis of the enzymatic residues in corn stover pretreated with steam explosion[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119772
- [6] Yu Y, Wu J, Ren X, et al. Steam explosion of lignocellulosic biomass for multiple advanced bioenergy processes: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 154:111871
- [7] 汝昕潼,张硕清,李文强,等. 白酒糟蒸汽爆破工艺优化及蒸汽爆破白酒糟体外营养价值评定[J]. 动物营养学报,2025,37(7):4876-4888
Ru X, Zhang S, Li W, et al. Optimization of steam explosion process for distiller's grains and in vitro nutritional value assessment[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(7):4876-4888
- [8] 赵峰,王钰明,张虎,等. 一种生长猪胃-小肠-大肠仿生消化方法及对饲料有效能值估测的应用:CN202110598619.7 [P]. 2021-09-03
- [9] 陈亮,张宏福,高理想,等. 仿生法评定饲料干物质消化率的影响因素[J]. 中国农业科学,2013,46(15):3199-3205
Chen L, Zhang H, Gao L, et al. Factors affecting the measure of the *in vitro* dry matter digestibility of feeds using simulative digestion system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15):3199-3205
- [10] 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
- [11] 宣丽,权志中. 米糠粕中非淀粉多糖体外酶解工艺研究[J]. 饲料研究,2024,47(20):69-74
Xuan L, Quan Z. Study on enzymatic hydrolysis process of non-starch polysaccharides of rice bran meal *in vitro* [J]. Feed Research, 2024, 47(20):69-74
- [12] 陈煜,韦艳群,李顺豪,等. 不同比例花生秧、玉米粉对浓香型白酒糟厌氧发酵营养价值的影响[J]. 动物营养学报,2023,35(4):2690-2701
Chen Y, Wei Y, Li S, et al. Effects of different proportions of peanut seedlings and corn flour on nutritional value in anaerobic fermentation of highly flavored type Baijiu distiller's grains[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(4):2690-2701
- [13] Elisashvili V, Kachlishvili E, Asatiani M D. Efficient production of lignin-modifying enzymes and phenolics removal in submerged fermentation of olive mill by-products by white-rot basidiomycetes [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 134:39-47
- [14] 高振,马英群,刘雨,等. 餐饮废油作为碳源用于微生物油脂生产:促进还是抑制? [J]. 环境卫生工程,2023,31(2):125
Gao Z, Ma Y, Liu Y, et al. Waste cooking oil used as carbon source for microbial lipid production: promoter or inhibitor? [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2023, 31(2):125
- [15] 肖家乐,冯志华,张祖朔,等. 羽毛杆菌酶协同固态发酵最佳工艺研究[J]. 动物营养学报,2025,37(1):648-657
Xiao J, Feng Z, Zhang Z, et al. Research on the best technology of solid state fermentation for feather powder through bacteria-enzyme coordination[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2025, 37(1):648-657
- [16] 李小瑛,文芳,李先腾,等. 沙棘原浆粟酒裂殖酵母降酸工艺优化及品质评价[J/OL]. 食品与发酵工业,2025:

- 1-11. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043394>
- Li X, Wen F, Li X, et al. Optimization of acid-reducing fermentation process and quality analysis of sea buckthorn pulp by *Schizosaccharomyces pombe* [J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, 2025; 1-11. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043394>
- [17] 陈玉香, 张雯, 蔡琪琪, 等. 发酵温度对异常维克汉姆酵母产挥发性风味物质的影响[J]. 2016(9):122-128
Chen Y, Zhang W, Cai Q, et al. Effect of fermentation temperature on volatile flavor compounds produced by *Wickerhamomyces anomalus* [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016(9):122-128
- [18] Ezeilo U R, Lee C T, Huyop F, et al. Raw oil palm frond leaves as cost-effective substrate for cellulase and xylanase productions by *Trichoderma asperellum* UC1 under solid-state fermentation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243:206-217
- [19] 秦宇珍, 邓向飞, 江天瑞, 等. 瘤胃微生物在木质纤维素生物质资源可再生生物转化中的应用研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(1):57-64
Qin Y, Deng X, Jiang T, et al. Research progress on the application of rumen microorganisms in the renewable biotransformation of lignocellulosic biomass resources [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(1):57-64
- [20] 阿拉腾珠拉, 郭春华, 刘华南, 等. 微生态白酒糟饲料发酵条件的优化[J]. *生物学通报*, 2016, 51(10):48-52
A La Teng Z L, Guo C, Liu H, et al. Optimization of fermentation conditions for microbial-ecological distiller's grains feed [J]. *Bulletin of Biology*, 2016, 51(10):48-52
- [21] 聂德超, 张卓, 赵琛, 等. 蒸汽爆破技术在玉米秸秆饲料化利用中的研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2021, 48(12):4488-4496
Nie D, Zhang Z, Zhao C, et al. Research progress on steam explosion technology in feed utilization of corn straw [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2021, 48(12):4488-4496
- [22] 冯冠智, 吕静仪, 王啸林, 等. 不同比例玉米秸秆和湿玉米纤维饲料替代苜蓿的发酵全混合日粮营养价值的评定[J]. *中国畜牧杂志*, 2022, 58(5):179-184
Feng G, Lyu J, Wang X, et al. Evaluation of nutritional value of fermented total mixed rations with substituting different ratios of corn straw and wet corn fiber feed for alfalfa [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2022, 58(5):179-184
- [23] 吴正可, 刘国华, 李阳, 等. 混菌固态发酵菜籽粕工艺优化[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(24):4603-4612
Wu Z, Liu G, Li Y, et al. Optimization of solid state fermentation for rapeseed meal with mixed strains [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(24):4603-4612
- [24] 张玉诚, 薛白, 达勒措, 等. 混菌固态发酵白酒糟开发为蛋白质饲料的条件优化及营养价值评定[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(11):3711-3720
Zhang Y, Xue B, Da L, et al. Distillers grains: optimization of mixed bacterial solid-state fermentation conditions to produce protein feed and nutrient value analysis [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(11):3711-3720
- [25] 姚有莉, 吴国芳, 加曲才让, 等. 霉菌毒素的危害及生物降解策略[J]. *家畜生态学报*, 2024, 45(11):1-6
Yao Y, Wu G, Jia Q, et al. Harm and biodegradation strategy of mycotoxins [J]. *Acta Ecologica Animalis Domastici*, 2024, 45(11):1-6
- [26] 王晓璐, 罗会颖, 姚斌, 等. 饲料霉菌毒素的生物降解研究进展[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(10):6152-6159
Wang X, Luo H, Yao B, et al. Advances in research on biodegradation of mycotoxins in feed [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2022, 34(10):6152-6159
- [27] Adegoke T V, Yang B, Xing F, et al. Microbial enzymes involved in the biotransformation of major mycotoxins [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(1):35-51
- [28] 王钰明, 赵峰, 张虎, 等. 仿生消化法评定猪饲料营养价值的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(5):1324-1331
Wang Y, Zhao F, Zhang H, et al. Advance on the development of bionic digestion method to evaluate the nutritional value of feed for pig [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(5):1324-1331
- [29] 张慧, 魏来, 刘正亚, 等. 发酵白酒糟营养价值的评定及其对育肥猪生长性能的影响[J]. *中国饲料*, 2019(3):41-45
Zhang H, Wei L, Liu Z, et al. The evaluation of nutritive value of fermented liquor and its effect on the growth performance of fatten pig [J]. *China Feed*, 2019(3):41-45
- [30] 杨代毅, 樊杨, 屠焰, 等. 不同处理对油菜秸秆养分、纤维结构和硫苷含量的影响[J]. *生物技术通报*, 2024, 40(6):172-179
Yang D, Fan Y, Tu Y, et al. Effects of different treatments on the nutrients, fiber structure, and glucosinolate contents in rapeseed straw [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2024, 40(6):172-179.