

分段发酵制备壳粉-酒糟基鸭全价饲料工艺及特性研究

巫文轩, 林钟杭, 张在宝

(湖州学院, 浙江 湖州 313000)

摘要:稻壳与白酒糟都是粗纤维含量较高的农业副产品, 养殖人员将这类原料直接用于肉鸭饲喂工作时, 肉鸭对饲料养分的吸收效率会出现下降, 整体的养殖效果也难以达到预期水平; 目前行业大多采用单一菌种的方式发酵饲料原料, 这种处理方式存在较多不足, 原料内部的纤维成分无法被彻底分解, 发酵环境中也容易滋生各类杂菌, 多种功能菌种共同参与发酵反应时, 不同菌群的代谢过程还会互相干扰; 本次试验设计了三段式连续发酵处理流程, 整套流程主要包含纤维素复合酶原料预处理、黑曲霉与里氏木霉协同好氧固态发酵、多菌种混合厌氧发酵三个操作部分; 试验选取本地酒厂产出的干酒糟与稻壳粉作为基础发酵原料, 两种原料按照干物质一比一的比例进行混合, 试验人员逐步调整各个发酵阶段的工艺条件, 同时对发酵完成物料的各项营养指标进行全面检测。试验的相关检测结果表明, 工作人员在原料中添加 0.2% 的纤维素复合酶, 物料在 30℃ 恒温条件下保持三小时的酶解反应后, 底物内部可溶性还原糖的含量, 相比未处理的原始原料提升了 42.7%; 试验人员在好氧发酵阶段添加 2% 的真菌复合菌剂, 物料经过四天的持续发酵后, 粗纤维的整体降解幅度达到 31.6%, 物料表面会形成一层均匀且致密的菌丝薄膜; 在厌氧发酵阶段投入 2% 的复合益生菌, 物料经过三天的密封发酵处理后, 成品物料的 pH 值可以稳定保持在 4.2, 物料内部益生菌的活菌总量可以达到 1.2×10^9 CFU/g, 发酵体系内部会积累大量的小分子肽物质与有机酸成分。经过发酵处理后的物料, 按照干物质 30% 的比例与玉米、豆粕、碎米以及饲料专用预混料进行混合, 工作人员通过加工制粒得到成品饲料, 该饲料产品可以完全替代市场中常见的玉米-豆粕型肉鸭配合饲料; 整套饲料加工流程无需设置高温灭菌工序, 多种菌株在共同代谢的过程中, 可以形成两层抑菌防护结构, 能够有效抑制发酵全程的杂菌大量繁殖现象; 企业开展规模化生产工作时, 工作人员可以直接使用湿物料进行制粒处理, 能够省去单独烘干物料的操作步骤, 烘干工序产生的能源消耗可以降低 30% 以上; 本次试验总结出一套可以实际投入生产使用的完整加工工艺, 该工艺能够实现粗纤维农业副产品的饲料化利用与价值提升, 也能够减少肉鸭养殖行业对粮食类饲料原料的使用量。

关键词:多菌株分段固态发酵; 农副加工废弃物; 白酒糟; 稻壳粉; 肉鸭专用全价颗粒饲料; 粗纤维降解; 饲用活性益生菌

1.引言

我国肉鸭养殖规模、全年出栏总量长期排在全球首位, 饲料支出能占到肉鸭整体养殖成本的六成至七成。当前肉鸭标准化养殖所用日粮十分依赖玉米、大豆这类粮食原料, 国内大豆长期依靠大量进口, 养殖用粮与人争粮、争耕地的矛盾一年比一年突出^[1]。

稻米加工、白酒酿造行业每年会产生千万吨级稻壳、酒糟粗纤维副产物, 这类原料木质纤维素含量高、粗蛋白品质一般, 还含有多种抗营养因子。直接投喂家禽会降低消化道养分吸收效率, 拖慢家禽生长速度; 绝大多数副产物采用露天焚烧、填埋方式处理, 既浪费可循环利用的生物资源, 还会同时带来大气、土壤双重污染^[2, 3]。白酒糟本身含有少量粗蛋白以及未完全分解的淀粉, 具备基础饲用价值, 但只经过一次简单发酵很难把内部营养充分释放, 已有不少学者围绕酒糟饲用价值做过综述总结^[4, 5, 6]。

微生物固态发酵是改善农林副产物饲用品质的主流处理手段^[7]。现有试验数据能够证实, 只用单一真菌发酵只能分解小部分粗纤维, 发酵产物里小分子营养物质含量偏低; 单纯乳酸菌发酵无法破开木质纤维素紧密结构; 多种微生物同步混合发酵时, 不同菌种对氧气、pH、营养底物的需求差别很大, 菌种之间互相争夺营养、代谢拮抗, 会破坏整个发酵体系稳定运行^[8]。除此之外, 湿热发酵环境很容易滋生黄曲霉、镰刀菌等产毒霉菌, 存在霉

作者简介:巫文轩(2005—), 男, 本科, 研究方向为制药工程

张在宝(1951—), 男, 教授, 博士, 研究方向为生物工程

林钟杭(2006—), 男, 本科, 研究方向为微生物发酵

通讯作者:巫文轩, 邮箱: 1480670481@qq.com

菌毒素超标的养殖安全隐患,限制了发酵饲料规模化生产推广^[9]。已有学者针对发酵工艺参数优化、生长猪饲喂效果完成系统性试验,为本研究分段发酵参数设计提供参考依据^[10]。

菌酶协同处理、分段连续发酵是最近几年发酵饲料领域的主流研究方向^[11]。操作逻辑是先靠酶解预处理打破纤维致密屏障,再分阶段接种生理特性各不相同的功能菌种,充分发挥每一类菌株的代谢优势,从源头规避菌种之间代谢竞争抑制的问题。已有试验证明,黑曲霉搭配里氏木霉共同发酵,能完整分泌全套纤维素降解酶系,高效分解木质纤维素,生成可溶性寡糖^[12,13];植物乳杆菌、枯草芽孢杆菌、酿酒酵母复合厌氧发酵可以快速产酸降低体系 pH,抑制杂菌繁殖,同时积累活性益生菌与多种消化酶^[14]。但目前现有研究大多只针对单一发酵阶段开展试验,把酶解预处理、真菌好氧降解、益生菌厌氧富集三段工艺串联起来,配套制粒直接生产肉鸭全价饲料的系统性试验依旧比较少见。

本试验以稻壳粉、干白酒糟混合物料作为发酵基底,搭建纤维素复合酶预处理—真菌好氧深度降解—益生菌厌氧功能强化三段式发酵体系,确定各阶段关键工艺参数与发酵终点判断标准,最后利用发酵产物调配肉鸭颗粒全价饲料。从营养提升幅度、杂菌防控效果、工业化生产适配性三个层面综合评估整套工艺应用价值,为农业副产物资源化利用、低成本肉鸭专用饲料开发提供理论支撑与可落地实操技术参考。

2.材料与方法

2.1 试验材料

发酵原料选用稻壳粉、干白酒糟,两类物料取自本地粮油加工厂与白酒生产企业,常规饲料原料包含玉米、豆粕、碎米、石粉、磷酸氢钙、食盐、复合维生素、微量元素预混料,全部物料均为市面流通的饲料级产品。

酶制剂为纤维素复合酶,内部含有纤维素酶、半纤维素酶、木聚糖酶,酶活数值 $\geq 20\ 000\ \text{U/g}$,采购自专业酶制剂生产企业。

试验菌种包含黑曲霉、里氏木霉、植物乳杆菌、酿酒酵母、枯草芽孢杆菌,全部属于食品、饲料专用工业菌株,采购自正规菌种保藏机构。

营养强化试剂为糖蜜、硫酸铵、磷酸二氢钾,全部达到分析纯标准。

2.2 主要仪器设备

试验用到的设备有恒温培养箱、立式压力蒸汽灭菌锅、pH 检测计、电子分析天平、高速粉碎机、电热恒温干燥箱、超净工作台、厌氧发酵罐、通风固态发酵装置、环模制粒机。

2.3 工艺流程与操作要点

2.3.1 原料预处理与酶解阶段

稻壳粉、干白酒糟按照 1:1 质量比例送入混合设备充分搅拌混匀,以混合干物料总重量作为计算基准,向物料中添加 0.1%~0.3%复合纤维素酶,同步补充 3%~5%糖蜜、0.5%~1%硫酸铵、0.2%~0.5%磷酸二氢钾作为微生物生长所需营养助剂,添加无菌清水调整物料含水率至 35%~45%,搅拌均匀后放置 $30\pm 2^\circ\text{C}$ 恒温环境完成 2~4 小时酶解,每间隔一小时人工翻拌一次物料,保障酶制剂和纤维底物充分接触,破坏木质纤维素致密结构,释放可以被微生物利用的还原糖,得到经过酶解预处理的物料。

2.3.2 好氧真菌发酵阶段

黑曲霉、里氏木霉按照活菌数量 1:1 配比制成好氧复合菌剂,接种量按照酶解物料干重的 2%计算,菌剂与底物充分拌匀后送入通风固态发酵装置,发酵温度控制在 $30\pm 2^\circ\text{C}$,设备持续通入空气提供氧气,发酵周期设置为 3~5 天,工作人员实时监测物料内部温度,调整通风量将料温峰值控制在 35°C 以内,物料表面均匀铺满白色菌丝、散发出醇厚发酵香气时,结束好氧发酵,得到初级发酵物料,两类真菌搭配的相关参数参考混合菌株固态发酵产酶优化相关研究成果^[15]。

2.3.3 厌氧益生菌发酵阶段

经过好氧发酵处理的物料不用进行高温灭菌,能够直接当作厌氧发酵基质,植物乳杆菌、酿酒酵母、枯草芽孢杆菌按照活菌数 1:2:2 配比制作厌氧复合菌剂,按照基质干重 1%~3%比例均匀拌入物料,送入密封发酵装置,排空装置内部空气后完全封闭, $30\pm 2^\circ\text{C}$ 恒温开展 2~4 天厌氧发酵,物料 pH 稳定下降至 4.5 以下,同时散发出柔和酸香与发酵果香时,终止厌氧发酵,得到成品发酵物料,多菌种复配厌氧发酵的操作方式参照复合益生菌发酵豆粕相关学位论文记载方案^[16]。

2.3.4 全价饲料配制与制粒

实验室小试操作中, 厌氧发酵物料放置 45℃ 低温烘箱烘干粉碎备用, 企业大规模工业化生产可以直接使用湿态发酵物料, 不用增设独立烘干工序, 日粮配方按照干物质配比设计, 发酵产物占 30%、玉米占 26%、豆粕占 26%、碎米占 13%、矿物维生素预混料占 5%, 全部原料经过混合机充分混匀后送入环模制粒设备, 制粒温度控制在 70℃ 左右, 冷却筛分后得到肉鸭专用颗粒全价饲料, 发酵原料添加比例参考非常规农业副产物应用于肉鸭日粮的相关研究^[17]。

2.4 检测指标与方法

水分含量采用 105℃ 烘干至恒重的方法测定, 粗蛋白含量采用凯氏定氮法检测, 粗纤维采用酸碱洗涤法测定, pH 数值依靠精密酸度计读取, 益生菌活菌总数采用平板梯度稀释计数法测定, 有机酸含量借助高效液相色谱仪定量检测, 霉菌、酵母菌总数量按照国标 GB 13092 规定方法检测, 全部检测操作遵循饲料常规营养成分分析行业规范^[18]。

3. 结果与分析

3.1 酶解预处理对底物结构与营养的影响

稻壳与酒糟混合而成的原料, 在没有经过酶解处理的状态下, 整体纤维结构较为紧密, 微生物难以在原料内部附着和生长, 直接对该原料进行发酵处理, 粗纤维的降解效率只能达到 10% 以下; 试验人员在原料中加入 0.2% 的复合纤维素酶, 并且在恒温条件下处理三小时后, 物料内部的可溶性还原糖含量, 相比未处理的原始原料提升了 42.7%; 原料中的半纤维素和无定型纤维素都出现了部分水解现象, 物料整体的疏松程度得到提升, 这样的物料状态, 能够为后续真菌菌丝的附着生长、胞外酶的分泌过程提供有利条件; 本次试验得到的这一结果, 与油茶饼酶解耦合发酵的相关研究结果保持一致, 酶解预处理的操作方式, 能够有效提高微生物在后续发酵过程中的整体转化效率^[11]; 试验过程中同步添加的糖蜜与无机氮磷营养成分, 可以为初期生长的微生物提供容易吸收的碳源和氮源, 能够有效防止菌种因为营养供给不足, 出现生长代谢速度变慢的问题^[19]。

3.2 好氧发酵阶段纤维降解与抑菌屏障形成

试验物料经过四天持续的好氧发酵处理后, 物料表面能够均匀生长出白色菌丝, 菌丝整体连接在一起, 形成了质地紧密的生物薄膜; 试验检测的数据可以发现, 物料粗纤维含量从酶解处理前的 32.8% 下降至 22.4%, 物料粗纤维的整体降解率达到了 31.6%; 物料内部的中性洗涤纤维与酸性洗涤纤维含量, 也都出现了不同程度的下降; 黑曲霉和里氏木霉可以在发酵过程中, 共同分泌出纤维素酶、半纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶等多种降解酶, 多种酶类共同作用分解物料中的木质纤维素, 该菌种组合的降解效果, 明显优于单一菌种的发酵处理效果; 本试验观察到的各项变化规律, 与前人使用里氏木霉和黑曲霉混合发酵产酶的研究结果相符合^[12, 13]。

真菌在代谢过程中, 会产生有机酸和多种具有抑菌效果的活性物质, 这些物质可以构成发酵体系的第一层抑菌防护结构; 该防护结构可以抑制黄曲霉、寄生曲霉等有害产毒霉菌的孢子萌发和菌丝生长, 工艺过程不需要高温灭菌处理, 也可以降低外界杂菌污染物料的概率; 物料表面生长的菌丝生物膜可以占据物料表面空间, 结合微生物代谢产物带来的化学抑制效果, 能够为后续的厌氧发酵过程提供干净的原料环境; 这种物理防护结合化学抑菌的工作机制, 和现有发酵饲料杂菌防控的相关研究结论保持一致^[9]。

3.3 厌氧发酵阶段益生菌富集与双重抑菌体系

物料经过三天的厌氧发酵处理后, 体系 pH 值从初始的 6.2 下降并稳定在 4.2, 物料内部乳酸含量为 18.6 mg/g, 乙酸含量为 5.3 mg/g; 物料内部的活性益生菌总数量可以达到 1.2×10^9 CFU/g, 该数值符合高品质发酵饲料对活菌数量的行业标准; 植物乳杆菌可以在发酵过程中生成乳酸, 以此降低发酵体系的 pH 值, 枯草芽孢杆菌可以消耗体系内残留的氧气, 维持稳定的厌氧环境, 同时分泌多种消化酶, 酿酒酵母可以利用物料中的单糖物质, 生成风味成分与 B 族维生素; 三种菌种在发酵过程中功能互补、相互配合, 本次试验观察到的菌种作用规律, 和复合益生菌发酵饲料的现有研究结论基本相同^[8, 14]。

厌氧发酵的反应过程, 能够在体系中形成第二层抑菌防护结构; 较低的 pH 环境, 结合细菌素、抑菌肽等微生物代谢产物, 可以抑制大肠杆菌、沙门氏菌、呕吐毒素产生菌等多种有害微生物的繁殖生长; 结合好氧发酵阶段形成的第一层抑菌屏障, 整套试验工艺构建出菌丝膜物理阻隔搭配有机酸化学抑菌的双重防控模式; 整套工艺全程不需要高温灭菌操作, 既可以减少生产过程的能源消耗, 也能够避免高温环境破坏物料内部的热敏性营养成分; 多种菌群协同抑菌的工作原理, 与微生物群落发酵酒糟抑菌的相关研究成果保持一致^[19]。

3.4 全价饲料产品特性与生产适配性

本试验将 30% 比例的发酵物料, 与常规饲料原料混合制成肉鸭颗粒饲料, 成品饲料粗蛋白含量为 16.8%, 粗纤维含量控制在 6.5% 以内; 饲料的各项营养指标, 能够满足肉鸭不同生长阶段的营养需求, 可以直接替代市面上常规的玉米豆粕型肉鸭专用饲料^[1,17]; 和所有原料统一混合发酵的传统工艺相比, 本次试验只对高纤维农业副产物进行分段发酵处理, 玉米、豆粕等优质蛋白原料不参与发酵反应; 该处理方式可以避免微生物优先消耗简单碳氮营养, 导致纤维降解效果变差的问题, 也能够减少优质蛋白原料被微生物分解浪费的情况; 本次试验的工艺设计思路, 与非常规饲料原料发酵优化的相关研究理念相契合^[20]。

在实际的工厂规模化生产中, 经过发酵的湿物料可以直接和各类干饲料原料混合制粒; 制粒设备 70℃ 的加工温度, 能够自动调节物料水分含量, 生产环节可以省去单独烘干物料的步骤, 生产过程的烘干能耗能够降低 30% 以上, 工厂的整体生产经济效益可以得到提升; 该湿料直接制粒的加工方式, 参考了两段式发酵农业废弃物饲料规模化生产的相关研究成果^[21]; 最终加工得到的饲料颗粒成型状态完整, 在水中不易松散, 饲料适口性较好, 能够满足大规模肉鸭养殖的使用要求。

4. 讨论

本次研究搭建的酶解-好氧-厌氧三段序贯发酵工艺, 核心设计思路是按照各类菌株生理特性分阶段接种, 让不同功能微生物在适配自身的环境中发挥代谢作用, 从源头解决多菌种同步发酵产生的种间拮抗问题^[8], 现有两步发酵相关试验大多省略前置酶解工序, 仅依靠微生物自身分泌酶分解纤维, 存在发酵周期长、纤维降解深度不足的问题, 本次试验在发酵前增设复合纤维素酶预处理步骤, 从底物结构层面打破木质纤维素屏障, 大幅提升后续微生物发酵降解效率与转化率^[11], 针对单阶段发酵优化、生长猪饲喂的前期完整试验, 能够为本次工艺各阶段参数设置提供完整参考依据^[10]。

真菌好氧发酵、益生菌厌氧发酵两个阶段分工清晰, 代谢过程前后衔接, 黑曲霉、里氏木霉负责分解大分子粗纤维, 将难以利用的多糖转化为微生物可吸收的可溶性还原糖^[15], 植物乳杆菌、酿酒酵母、枯草芽孢杆菌利用真菌降解生成的小分子底物快速增殖, 同步富集益生菌、有机酸、消化酶等功能性物质^[14], 这种“大分子降解—小分子转化—功能物质富集”的递进模式, 能够把稻壳、酒糟低值纤维原料转化为高活性发酵饲料, 完成原料品质升级^[7]。

杂菌污染是发酵饲料工业化生产的核心难题, 传统工艺大多依靠高温灭菌抑制杂菌, 灭菌工序能耗偏高, 高温还会破坏原料内部营养, 本次工艺依托好氧阶段菌丝膜占位、抗菌代谢物, 厌氧阶段低 pH、抑菌肽双层抑菌作用, 不开高温灭菌也能抑制产毒霉菌、腐败菌生长, 相关结论和合成微生物群落发酵酒糟抑菌研究保持一致^[19], 白酒糟本身容易滋生各类杂菌, 酒糟资源化、发酵抑菌方向的综述文献, 能够为本试验原料预处理方案提供理论支撑^[4, 5, 6]。

本次研究还存在后续深挖拓展的空间, 第一, 不同产地、不同加工工艺产出的稻壳、酒糟组分存在较大差异, 后续可以针对各类农业副产物建立专属酶解、发酵参数数据库^[3], 第二, 发酵全过程微生物群落演变规律、代谢调控网络, 可以借助高通量测序、代谢组学技术进一步解析, 第三, 这款发酵饲料实际饲喂后, 对肉鸭生长性能、肠道屏障健康、屠宰肉质的影响, 需要开展规模化动物饲养试验系统验证^[1,17], 第四, 水产行业成熟发酵饲料加工工艺, 能够为整套工艺优化提供多元参考思路^[23], 第五, 甘蔗渣、棕榈仁粕等同类粗纤维副产物发酵技术, 可以拓宽本工艺的应用场景^[24, 25]。

5. 结论

本次试验构建出酶解预处理、真菌好氧降解、益生菌厌氧富集相结合的三段式多菌株发酵技术, 研究人员利用该工艺研制出以稻壳粉和酒糟为原料的肉鸭专用颗粒全价饲料, 本试验所得的主要研究结果可总结为以下内容: 工作人员可借助复合纤维素酶的预处理手段, 破坏高纤维原料内部的紧密结构, 微生物在后续发酵过程中的转化利用效率也会得到提升, 该处理步骤是提升各类农业副产物纤维降解程度的重要前期步骤^[11]; 研究人员将黑曲霉与里氏木霉的活菌数量配比设置为 1:1, 两种菌种共同参与好氧发酵反应, 原料中的粗纤维成分可以被有效分解, 发酵体系能够同时产生菌丝生物膜和多种抑菌物质, 体系第一层的杂菌抑制防护结构由此形成^[12]; 试验按照 1:2:2 的活菌比例混合植物乳杆菌、酿酒酵母与枯草芽孢杆菌, 混合菌种开展厌氧发酵处理后, 物料内部的益生菌和有机酸含量会快速积累, 体系第二层的化学抑菌结构能够成功建立, 整套加工流程不需要设置高温灭菌步骤, 技术全程都可以有效控制杂菌滋生和污染现象的发生^[14]; 目前已有的众多研究资料均可表明, 白酒糟可以作为发酵底物投入试验使用, 该原料拥有不错的饲用开发价值与发酵适配能力^[4, 5, 6]。

本试验将发酵处理后的物料, 以 30% 的添加比例和玉米、豆粕等常规饲料原料进行混合制粒, 加工完成的肉

鸭全价饲料拥有较为均衡的营养组成,该饲料可以完全替换养殖行业常用的玉米、豆粕基础日粮;规模化的工业生产工作可以直接采用湿料制粒的加工方式,该生产方式能够节约加工能耗,有效降低整体的生产投入成本^[21];本研究使用的整套发酵工艺,能够大批量处理稻壳、白酒糟等农业生产剩余物料,农业废弃物焚烧和填埋造成的环境破坏可以得到有效缓解,饲料行业粮食原料供应不足的现状也能得到一定改善,该工艺拥有不错的经济价值和生态价值,适合各类饲料生产企业进行大规模推广使用^[2,3];本次试验采用的菌酶分段协同发酵方式,具备较为广泛的适用范围,工作人员对工艺参数做出适当调整后,该技术还可以应用于生猪养殖、水产养殖等多个领域,国内现有的生猪发酵饲料、水产发酵饲料相关研究成果,都可以证明该工艺拥有良好的推广和升级空间^[10,16,23];后续的相关研究工作,能够利用高通量测序技术,深入分析发酵体系内部菌群结构的动态变化规律^[22];国内非粮原料菌酶协同发酵的相关研究成果,也为本试验工艺的改良和创新设计提供了充足的理论参考依据^[7]。

参考文献

- [1] 王明霞,林水中,张言召.生物发酵饲料对肉鸭生长性能、肠道形态结构和肠道屏障基因表达的影响[J].中国饲料,2024,(18):73-76.
- [2] 全国畜牧总站.白酒糟湿粉碎发酵饲料化利用技术[R].2025.
- [3] 吴树坤,穆敏敏,杨磊.白酒糟资源化技术及其应用研究进展[J].中国酿造,2024,43(12):28-32
- [4] 发酵白酒糟在饲料中的应用[EB/OL].搜狐网,2025.
- [5] 翟研求索"酿酒酵母发酵白酒糟"的价值[EB/OL]. 山东省饲料工业有限公司, 2025.
- [6] 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.动物营养学报.2025,37(5):2822-2836.
- [7] X R Deng, K Chen, D H Jiang, L M Lu.Advancements in synergistic fermentation of probiotics and enzymes for non-grain feed raw materials[J].Animal Research and One Health.2024.
- [8] Chen J, Mou L, Wang L, et al. Mixed *Bacillus subtilis* and *Lactiplantibacillus plantarum*-fermented feed improves gut microbiota and immunity of Bamei piglet. Front. Microbiol.2024.15:1442373.
- [9] 盛海,张倩,刘超齐等.复合益生菌发酵饲料对大肠杆菌的抑制作用.饲料工业,2025, 46(23):31-34.
- [10] 日粮固态发酵工艺优化及其对生长猪生长性能与肠道功能的影响[EB/OL].生物通,2026.
- [11] Zhen X X. 复合微生物剂与纤维素对油茶饼发酵品质及营养特性的影响 [J].Oil Crop Science,2025,10(4):286-293.
- [12] 高星星,潘丽军,杨培周等.里氏木霉与黑曲霉混合发酵产纤维素酶的条件优化 [J]. 食品科学,2012,33(19):193-198.
- [13] Wang S Y, Jiang B L, Zhou X, Chen J H, Li W J, et al. Study of a High-Yield Cellulase System Created by Heavy-Ion Irradiation-Induced Mutagenesis of *Aspergillus niger* and Mixed Fermentation with *Trichoderma reesei*. PLOS ONE.2015.10(12):e0144233.
- [14] Chen J, Wu G, Pang H, et al. Effect of Mixed *Lactiplantibacillus plantarum*- and *Bacillus subtilis*-Fermented Feed on Growth, Immunity, and Intestinal Health of Weaner Pigs. Fermentation.2023,9(12):1005.
- [15] 宋娜娜,宋向阳,欧阳嘉等.里氏木霉与黑曲霉混合发酵产纤维素酶及其水解特性[J].生物加工过程,2010,8(5):1672-3678.
- [16] 武一帆.复合益生菌液态发酵饲料对猪生长性能、肉品质和肠道健康的影响[D].山西:山西农业大学,2022.
- [17] 张碧成,王玉龙,于怀华等.发酵饲料对樱桃谷肉鸭生长性能和肠道结构的影响[J].饲料博览,2023,(4):59-63.
- [18] 李英英,丁立人,朱平华等.复合菌株固态发酵对大豆皮营养价值的影响[J].动物营养学报, 2022,34(6):4041-4049.
- [19] 合成微生物群落固态发酵技术转化白酒糟粕为高蛋白饲料的创新研究[EB/OL].生物通, 2025.
- [20] 程彦茗,范阳,毛胜勇等.稻壳粉发酵饲料生产工艺参数优化及其营养成分变化[J]. 畜牧与兽医,2023,55(9):30-36.
- [21] Zhang S, Huang Z, Li Q, et al. Two-stage solid-state fermentation to increase the nutrient value of corn processing waste and explore its efficacy as a feed protein source[J].Food Chemistry: X,2024,23101656-101656.
- [22] 邹峰余,贾冰玉,郑华等.固态发酵改善棉籽粕品质的研究[J].水生生物学报,2024,48(3): 405-412.
- [23] 李正中,刘波,邵鹏,朱爱民.发酵饲料在水产养殖中的研究进展[J].动物营养学报.2024, 36(8):4847-4860.
- [24] Liu Y C, Y Wang. Pretreatment of Palm Kernel Cake by Enzyme-Bacteria and Its Effects on Growth Performance in Broilers. Animals,2025,15,116.

[25] 柴修杰. 发酵甘蔗渣对肉鸭生长性能、血清生化指标及肠道形态的影响[J]. 中国饲料, 2024, (6): 64-67.

Research on the process and characteristics of preparing shell powder-distiller's grains based duck complete feed by segmented fermentation

WU WENXUAN, LIN ZHONGHANG, ZHANG ZAIBAO

Huzhou College, Zhejiang, Huzhou

Abstract: Agricultural waste materials such as rice husks and distillers' grains contain a high level of crude fiber; when these unprocessed materials are used to feed meat ducks, the nutrient absorption efficiency of ducks will decrease, and the overall feeding effect cannot reach the standard of normal breeding production. Most current feed production processes rely on single microbial strain fermentation, and this processing method has obvious defects; the crude fiber components inside raw materials cannot be fully broken down, unwanted bacteria easily grow during fermentation, and different microbial strains will interfere with one another when fermented together. In this study, a continuous fermentation method with three processing stages was adopted, the overall operation includes raw material treatment using compound cellulase, aerobic solid-state fermentation with *Aspergillus niger* and *Trichoderma reesei*, and anaerobic fermentation using mixed beneficial bacteria. Dry distillers' grains obtained from local factories were blended evenly with rice husk powder at a dry weight ratio of 1:1 to prepare the fermentation medium, the experimental conditions of each stage were adjusted step by step, and various nutritional indicators of fermented products were tested and recorded. Experimental detection results demonstrate that raw materials treated with 0.2% compound cellulase at a constant temperature of 30 °C for three hours showed a 42.7% increase in soluble reducing sugar content compared with untreated samples; after four days of aerobic culture with 2% fungal compound agents, the crude fiber degradation rate of materials reached 31.6%, and an even and dense layer of mycelium formed on the material surface; after three days of sealed anaerobic culture with 2% mixed probiotics, the final fermentation products maintained a stable pH value of 4.2, the viable microbial quantity reached 1.2×10^9 CFU/g, and large amounts of small peptides and organic substances were produced inside the fermentation system. Fermented products were mixed with corn, soybean meal, broken rice and commercial feed additives with a dry mass proportion of 30% to produce duck pellet feed, the newly prepared feed can completely replace traditional corn and soybean based duck feed used in breeding farms. High-temperature sterilization is not required throughout the whole production process, the cooperative metabolic reaction of different bacteria forms two protective antibacterial structures, which can effectively control the mass growth of harmful bacteria during fermentation. In large-scale industrial production, wet fermented materials can be directly used for pellet processing, the separate drying procedure can be skipped, and the energy consumption required for material drying can be reduced by over 30%. This experiment summarizes a complete and practical production process, the technique improves the utilization value of coarse fiber agricultural waste in feed processing, and it also lowers the usage amount of grain raw materials in meat duck breeding industry.

Keywords: multi-strain staged solid-state fermentation; agricultural by-products; distillers' grains; rice husk powder; full-value pellet feed for meat ducks; crude fiber decomposition; active probiotics for feed