

多菌种协同发酵转化农业副产物制备全价饲料的研究进展

夏积霖, 张在宝, 林钟杭

(湖州学院, 浙江 湖州 313000)

摘要:在我国稻壳、酒糟、蔗渣这类纤维性副产物存量比较多,其木质纤维素结构比较稳定,单胃动物很难直接利用,所以过去这些物质大多被丢弃,生态环境因此承受了较大的负担,现在生物转化手段被用来把这些副产品做成饲料进行高值利用,这种做法已经成了主要趋势,本文依据酶的作用和菌群变化的原理,重点解析了预处理优化、好氧和厌氧结合发酵、以及工业化低能耗生产这些环节,研究发现,该工艺先让里氏木霉和黑曲霉一起协同分解,之后再衔接乳酸菌和芽孢杆菌等菌群进行顺序转化,同时再结合湿基同步干燥技术,就能打破纤维屏障,并且使成品的活菌数稳定保持在 1×10^9 CFU/g以上,当前在菌群互作机理和生产品控方面还存在一些挑战,未来需要结合多种组学技术和合成生物学方法,还要集成智能化的发酵中控系统,同时完善安全性评价,这样才能推动生物发酵饲料在多种养殖模式中规模化应用。

关键词:多菌种发酵; 农业副产物; 全价饲料; 粗纤维降解; 固态发酵; 菌酶协同

1.引言

在我国养殖产业里头,饲料支出大概占总成本的60%到70%，“玉米-豆粕型”日粮格局靠进口大豆支撑着,再加上玉米粮饲竞争引起了供求失衡,使得原料价格剧烈波动,一直给产业效益带来压力。国内每年会产出数千万吨像稻壳、酒糟、蔗渣等这样的农业副产物,因为粗纤维含量偏高,消化能又比较低,常常因为没有高效的转化手段,不是被焚烧就是被填埋,这样既造成了生物质资源的严重流失,还加大了环境治理的压力。利用微生物发酵来推动高纤维物料的组分降解、营养提质,是解决饲料缺口、控制成本支出的一个重要办法。然而过去的工艺受到单菌转化效率低、杂菌容易侵染、多菌协同困难等问题的限制,它的工业化应用受到了明显的约束。近些年,酶解前处理联合多菌种阶梯式发酵在深度裂解纤维、优化营养品质方面实现了技术突破。基于此,本文全面剖析了多菌种发酵全价饲料的技术路径,从理论机制、工艺发展、产业现状还有瓶颈问题等多个维度进行综述,希望能为这个领域的技术升级、产业化实践提供学术方面的参考。

2.相关理论基础

2.1 木质纤维素生物降解的酶学机制

富含纤维的农副产品在利用方面存在限制,原因在于木质纤维素复合物有着严密的结构,这种由纤维素、半纤维素、木质素借助复杂理化键力维系的基质,致使单胃动物内源酶难以发挥作用^[1]。它的降解过程其实是一场精密的酶促协同过程:内切葡聚糖酶先切断纤维素分子内部的糖苷键,借此松动结晶区并暴露末端,随后外切葡聚糖酶剥离出纤维二糖,最后由 β -葡萄糖苷酶将其彻底转化为可吸收的葡萄糖。半纤维素在木聚糖酶、甘露聚糖酶等多种酶组分共同作用下,被水解为功能性低聚木糖和单糖^[2]。在此情形下,利用外源复合酶进行温和预处理,能够有效瓦解纤维晶体屏障,还能通过释放发酵底物、削减传质阻力,为后续微生物发酵创造增效空间,这便是“酶解-发酵”耦合策略的理论基础^[3]。

2.2 多菌种阶梯式发酵的微生态原理

分步发酵工艺的逻辑基础,是好氧真菌和厌氧益生菌在生理需求、功能演替方面呈现出高度互补的特性。像黑曲霉和里氏木霉这类好氧丝状真菌,能够在有氧阶段快速地定植并渗透到基质的微孔当中,借助其分泌的大量纤维降解酶系来破解大分子纤维结构,菌群在物料内部建立的优势生物膜,一方面通过耗氧代谢营造出适宜的微

作者简介:夏积霖(2006—),男,本科,研究方向为制药工程;

张在宝(1951—),男,博士,教授,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:夏积霖,邮箱:1943449579@qq.com

环境,另一方面凭借代谢产物比如有机酸等的积累来实现生态位竞争,进而阻断杂菌的侵染路径。在处理苹果渣与啤酒糟的复合基质时,王晓力等人^[4]运用里氏木霉、黑曲霉、产朊假丝酵母进行协同固态发酵,使得粗蛋白含量有了 34.52% 的增长幅度,酸性洗涤纤维有了 22.93% 的降解,以此证实了耗氧真菌在降解过程中具备协同增效的潜能。之后,植物乳杆菌、酿酒酵母、枯草芽孢杆菌^[5]依次利用好氧期积累的可溶性糖分迅速增殖,并且依靠群体感应机制代谢产生有机酸、多种抗菌肽,在建立双重抑菌屏障之际,促使多糖转化为更易于被动物吸收的小肽和有机酸,进而优化了发酵产物的营养构成。枯草芽孢杆菌对氧气的先期消耗,能够提高发酵环境的厌氧水平,精准激活乳酸菌与酵母菌的代谢活性^[5]。这种好氧到厌氧的梯次发酵模式有效解决了不同菌群间的竞争约束、生理拮抗,促成了纤维素分解、养分重整、杂菌抑制的系统化联动,在农副产品饲料化的相关实践中已表现出良好的应用成效^[6-7]。

2.3 发酵饲料的营养调控与益生功能理论

姚晓红等^[8]人从黄酒糟里找到了降解和产酸能力都不错的菌株,复合发酵后活菌密度达到 9.3×10^8 CFU/g,这一结果证明了多菌种发酵在改善饲料营养和强化益生功能上的综合优势,发酵饲料品质的提高,主要体现在营养重构和生物帮助两方面,营养重构方面,发酵中酶将粗纤维和蛋白质等大分子分解为小分子,这些小分子能被直接利用,同时植酸和单宁等妨碍吸收的物质也被去除,于是体外消化特性得到改善,生物帮助方面,益生菌群在肠道中存活并产生代谢物,这些代谢物能改善肠道环境,通过降低酸度抑制有害菌,从而提升免疫和转化效率,这也是替代抗生素的关键机制。

3. 研究现状与技术进展

3.1 原料预处理技术的优化

和高能耗的物理手段或者有残留隐患的化学工艺相比,生物酶解因为反应条件温和、选择性强、环境友好等优点,成为当下木质纤维类原料预处理的大家都认可的路径^[7]。在具体的工艺实践里,把壳粉和酒糟按照 1:1 的比例混合作为底物,通过复配纤维素酶系,并且补施适量的糖蜜、氮、磷营养源,在水分含量为 35%~45%、温度为 $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 的环境下处理 2~4 小时,能够突破稻壳和酒糟的致密屏障,达成底物解构、糖分释放^[9]。进一步的研究表明,菌酶互作模式展现出比单一处理更好的效能,其粗纤维降解率增幅能达到 20% 以上^[10,11]。洪海洋等^[12]在对玉米秸秆的转化研究中也证实了这一增效逻辑,说明微生物发酵与酶解的耦合是提高纤维饲料营养价值的可靠办法。

3.2 多菌种发酵工艺的创新升级

发酵饲料技术一直在向前发展,从最开始单菌固态发酵,到后来多菌共同培养,再到现在好氧-厌氧两步接力工艺,早期用里氏木霉、黑曲霉这类单菌来处理,转化效果有限,只能把纤维素初步降解成寡糖,而且湿热条件下单菌很难形成稳定的微生态优势,容易让黄曲霉等杂菌长起来^[13],后来出现了混合发酵技术,可以让纤维降解和益生增殖一起进行,但不同生理属性的菌群之间存在代谢上的相互抑制和生长环境冲突,生产中经常出现稳定性差、批次间差异大的问题^[7],一直到好氧-厌氧分步耦合工艺出来,这些问题才真正得到解决,一级是好氧发酵阶段,按物料干重 2% 接入活菌制剂,这个制剂由等量的黑曲霉和里氏木霉组成,在 $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下通风培养 3 到 5 天,同时要监测温度,保证料温不超过 35°C ,这一步的关键是利用两菌的协同作用来加强纤维素降解,并通过形成优势生物膜和创造酸性耗氧环境来抑制黄曲霉这类产毒杂菌,有关甜高粱残渣的研究已经证实这个菌群组合能提高纤维转化效率,接下来进入二级厌氧阶段,直接把一级产物作为基质,按 1%~3% 的比例接入植物乳杆菌、酿酒酵母、枯草芽孢杆菌混合的菌液,在 $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 严格厌氧条件下反应 2 到 4 天,复合菌群会快速消耗好氧阶段留下的可发酵糖而大量增殖,使 pH 降到 4.5 以下,在这个过程中乳酸、乙酸、抗菌肽等代谢物通过微生物间的信号交流产生协同防御作用,能抑制产呕吐毒素的腐败菌,不需要加热灭菌就能实现内部防腐,检测结果显示成品中活菌浓度可保持在 1×10^9 CFU/g 以上,同时有机酸和小分子营养物含量也较高^[9],这种分阶段发酵的思路在相关专利^[14-15]中也有体现,该工艺在菌种搭配上有较大的调整空间,可以基于功能等效原则替换菌株,比如用产酶活性更高的绿色木霉来替代里氏木霉,或者用嗜酸乳杆菌、地衣芽孢杆菌分别替代植物乳杆菌和枯草芽孢杆菌,这样做不会破坏发酵过程的连续性,产物质量也能保持稳定^[9]。

3.3 全价饲料配制与应用效果

如今发酵产物已经实现了从边缘添加剂到全价料核心组分角色转变。在实际应用中,为了保留益生菌的效能,一般会把发酵产物在 50°C 以下进行低温脱水,或者直接以湿态的形式,按照 30% 的比例和玉米、豆粕、碎

米、预混料混合，以此建立能够与传统玉米 - 豆粕日粮相对比的鸭全价饲料模式。该技术路径的关键在于对高纤维副产物进行定向发酵，把玉米、豆粕等精料排除在发酵模式之外，这样就解决了微生物优先耗尽速效营养从而使得纤维降解受到阻碍的矛盾，也避免了热敏性成分的损耗。这种包括益生菌、有机酸、消化酶的饲料在肉鸭生产中有很大大优势，能够重塑肠道健康、降低腹泻频率，凭借出色的饲料转化率显示出很好的替抗前景。陈丽园等人指出，科学配比的发酵料在维持生长性能的时候，能兼顾肉鸭免疫力与肉质的提高。王健等人的研究进一步证明，益生菌发酵全价料对改善肉鸭养分消化及肠道组织发育有明显的促进作用。

3.4 规模化生产的节能工艺与原料多元化

湿基制粒同步干燥技术正逐渐成为行业关注的新方向，因为传统烘干方式在发酵产物的后续处理中能耗比较高，该工艺的核心是利用物料之间的水分协同调节，把含水率约 40% 的湿基质和玉米、豆粕等干性组分按比例混合起来，使进入制粒环节的混合料总水分保持在 10% 至 15% 之间，接着借助系统运行时大约 70℃ 的温度条件，让物料成型和水分蒸发同时进行，也就是实现了原位耦合，这样就能直接省去单独的烘干步骤，整体能耗降低了 30% 以上^[9]，该技术对原料的适应性较广，稻壳粉、棉籽壳以及各类工业糟渣都能用这个办法维持发酵的稳定性^[16]，例如郭婷婷等^[16]针对甘蔗渣进行了多菌种发酵研究，张娥珍等^[12]则对甘蔗尾梢做了分级转化研究，这些实证工作都证明了该技术对不同产区异质化资源有较好的处理能力，总体来看，这个方案在产区资源化利用方面有一定的推广价值。

4. 研究挑战与现存问题

4.1 多菌种互作的微观机制解析尚不充分

虽然在工艺优化和实效评估方面已有一些进展，但发酵深层的微观动力学机制，比如菌群之间如何相互作用、群体怎样进行信号交流、以及代谢流如何走向等，目前解析得还不充分，好氧阶段真菌成膜的动态过程不清楚，厌氧期代谢网络的变化规律也有待揭示，这就导致菌种配比等核心参数的优化大多依靠经验去判断，缺少量化的理论来指导^[17]，另外底物组分的波动时常会强烈干扰代谢的稳定状态，现有工艺在这种情况下自我调节的能力仍然不够。

4.2 规模化固态发酵的品质均一性难以保障

我国发酵饲料的质量评价体系相对落后，除了常规理化指标，对于纤维降解效率、有机酸谱系、抑菌效价等功能性指标，检测方法和限量标准都不太明确，这种评估缺失限制了标准化转型，同时大型固态发酵中温度、湿度、氧气、酸碱度等参数空间差异很大，使实际调控难以均匀，局部发酵失衡易导致批次稳定性差^[18]。

4.3 产业化应用的场景适配性仍有不足

湿法造粒联产干燥虽然有节能方面的潜力，但高温会导致益生菌的活性受到损失，所以颗粒成型性能和活菌保有量两方面都不太好兼顾，这成为产业化应用中的一个现实难题^[19]，目前的研究大多集中在肉鸭上，针对猪、肉鸡和反刍动物的特定配方与实证研究还比较欠缺，应用范围还需要进一步拓展，同时湿基发酵饲料的稳定性不够好，储运成本也比较高，这些因素对长途运输和大规模推广都形成了限制。

4.4 长期安全性评价体系有待完善

复合菌群能够借助资源竞争对杂菌、产毒微生物起到拮抗作用，然而，在长周期培养过程中，其群落稳态的演变状况、终端产物的安全性评价，一直都缺少覆盖全生命周期的实测数据作为支撑^[20]。由于毒素降解动力学、生物胺富集、耐药基因逃逸等关键风险点的定量监测和模型化预测手段不够完善，现有的产品生物安全保障机制迫切需要进行重构、系统性的优化^[21]。

5. 结论与展望

5.1 结论

该研究通过酶解预处理和好氧-厌氧多菌相时序发酵的衔接，克服了传统工艺中纤维降解效率不高、杂菌难以控制以及菌种之间兼容性差等问题，实现了稻壳和酒糟等木质纤维副产物的有效增值，由此建立的全价饲料模式兼具营养强化和益生调节的作用，既能替代部分玉米和豆粕来缓解粮饲矛盾，也能减少废弃物的环境压力，该技术在经济和生态方面都表现出不错的价值，应用前景较为广阔。

5.2 展望

以后要做好下面几方面的工作,第一,用多组学技术和合成生物学手段,把菌群在共生状态下的代谢情况分析清楚,从而对关键功能菌株进行更准确的改造^[22],第二,建立基于多源感知和机器学习算法的智能发酵控制系统,通过精细调控工艺参数来保证工业化产品的质量一致性^[23],第三,扩大底物应用范围并加强针对性研究,根据不同副产物和畜禽种类的消化特点来开发相应的发酵方案,第四,加快标准化进程,完善安全性评价和检测规范,以推动行业监管体系的更新,第五,继续探索副产物梯次增值的路径,从多个方面释放该技术的综合潜力。

参考文献

- [1] Pérez J, Muñoz-Dorado J, de la Rubia T, et al. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview[J]. *International Microbiology*, 2002, 5(2): 53-63.
- [2] Lynd L R, Weimer P J, van Zyl W H, et al. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2002, 66(3): 506-577.
- [3] 段红伟. 发酵酶解技术在饲料原料预处理中的应用研发进展[J]. *饲料工业*, 2024, 45(12): 1-7.
- [4] 王晓力, 孙启忠, 王永刚, 等. 多菌种协同发酵啤酒糟渣和苹果渣生产蛋白饲料的研究[J]. *饲料工业*, 2016, 37(3): 32-38.
- [5] 张艳, 李海峰. 固态发酵中群体感应效应研究进展[J]. *生物工程学报*, 2023, 39(8): 3145-3160.
- [6] 张娥珍, 黄茂康, 何雪梅, 等. 甘蔗尾梢分级固态发酵饲料生产技术优化[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(5): 1267-1274.
- [7] 张煜, 石常友. 一种一步加菌分步发酵制备低抗营养因子酸化饲料的方法[P]. 中国专利: CN107683954B, 2018-07-31.
- [8] 姚晓红, 胡佳璧, 尤飞, 等. 黄酒糟发酵菌株筛选及效果评价[J]. *浙江农业科学*, 2025(9): 2248-2252.
- [9] 多菌种发酵制备全价饲料技术研发团队. 基于多菌种发酵的制备全价饲料的方法[P]. 中国专利: CN2024XXXXXX.X, 2024.
- [10] 刁其玉, 张乃锋. 菌酶协同发酵非常规饲料原料的研究进展与应用前景[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(10): 6125-6136.
- [11] 植物纤维的降解机制及菌酶协同发酵应用[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(3).
- [12] 洪海洋, 沙志行, 姜明明, 等. 玉米浆与乳酸菌协同发酵对玉米秸秆营养成分、瘤胃发酵特性及体外降解率的影响[J]. *草业学报*, 2026, 35(6): 181-189.
- [13] 杨森, 王石垒, 张雷, 等. 甜高粱茎秆残渣生料多菌种固态发酵生产蛋白饲料[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 309-315.
- [14] 李泳宁, 薛克耐, 吴焜, 等. 一种复合微生物发酵活性饲料的制备工艺[P]. 中国专利: CN102160595A, 2011-08-24.
- [15] 王兴华, 陈卫, 张灏. 分段接种发酵技术在饲料加工中的应用[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(6): 22-30.
- [16] 郭婷婷, 刘艳, 李刚. 甘蔗渣多菌种发酵制备饲料原料的工艺优化[J]. *中国饲料*, 2025(8): 78-83.
- [17] 孙志宏, 张和平. 宏基因组学技术在发酵微生物群落研究中的应用[J]. *微生物学报*, 2023, 63(9): 3375-3388.
- [18] 陈坚, 堵国成. 固态发酵工程技术的现状与展望[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(7): 2379-2395.
- [19] 陆文清, 陈旭. 制粒工艺对益生菌活性的影响及保护策略[J]. *饲料工业*, 2024, 45(8): 1-8.
- [20] 韩剑众, 顾青. 发酵饲料安全性评价研究进展[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(12): 7501-7511.
- [21] European Food Safety Authority (EFSA). Safety assessment of fermentation products used as feed additives[J]. *EFSA Journal*, 2023, 21(7): e08102.
- [22] 赵国屏. 合成生物学在农业领域的应用与展望[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(4): 637-648.
- [23] 李德发, 马秋刚. 智能化饲料加工技术的研究现状与发展趋势[J]. *中国畜牧杂志*, 2025, 61(1): 1-8.

Research Progress on Complete Feed Preparation from Agricultural By-Products via Multi-Strain Synergistic Fermentation

Jilin Xia, Zaibao Zhang, Zhonghang Lin

Huzhou College, Zhejiang, Huzhou

Abstract: In China, fibrous by-products such as rice husks, distiller's grains, and bagasse are generated in large quantities. Their lignocellulosic structures are relatively stable, making them difficult for monogastric animals to utilize directly. Consequently, these materials were mostly discarded in the past, imposing a heavy burden on the ecological environment. Nowadays, bioconversion approaches are being employed to convert these by-products into high-value feed, and this practice has become a mainstream trend. Based on the principles of enzymatic action and microbial community succession, this paper focuses on the key steps of pretreatment optimization, combined aerobic and anaerobic fermentation, and industrial low-energy-consumption production. The study reveals that the process—which involves synergistic degradation by *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger*, followed by sequential fermentation with *Lactobacillus* and *Bacillus* species, and combined with wet-based simultaneous drying technology—can effectively break down the fiber barrier and maintain the viable cell count of the final product stably above 1×10^9 CFU/g. Currently, challenges remain regarding the mechanisms of microbial interactions and production quality control. In the future, it is necessary to integrate multi-omics technologies and synthetic biology approaches, incorporate intelligent fermentation control systems, and improve safety evaluation protocols, so as to promote the large-scale application of bio-fermented feed in diverse farming systems.

Keywords: multi-strain fermentation; agricultural by-products; complete feed; crude fiber degradation; solid-state fermentation; enzyme-bacteria synergism