

微生物发酵技术研究进展与应用综述

邓鑫, 张在宝, 林钟杭

(湖州学院, 浙江 湖州 313000)

摘要:微生物发酵是一类生物加工手段, 工作人员可以人为调控生产环境, 依靠微生物自身代谢能力, 把各类原料转化成经济价值更高的产物, 食品加工、饲料制作、生物环保、现代化生物制造行业都会将这项技术当作核心加工手段, 对比传统化工合成工艺, 微生物发酵生产条件温和, 碳排放更低, 产生的污染物更少, 能够适配加工的原料种类也更广, 最近几年, 微生物组学分析、发酵工艺改良、多菌种搭配发酵、发酵智能管控设备都有快速发展, 原料利用效率、产品产出量、整套生产流程的稳定程度都得到明显提升, 本文梳理微生物发酵的基础工作原理、市面上主流的发酵类型、当下发酵相关新技术的研究进展, 同时介绍这项技术在食品加工、饲料原料再利用、生物化工、农业废弃物料处理领域里的实际应用情况, 梳理现阶段发酵技术落地生产时存在的各类限制条件, 再对后续发酵生产朝着智能管控、精准操作、绿色低碳的发展方向做出梳理, 全文内容能够给微生物发酵相关课题研究、工厂工业化投产提供基础理论参考。

关键词: 微生物发酵; 多菌种协同发酵; 固态发酵; 废弃物资源化; 生物制造

1. 引言

微生物发酵是人类使用历史十分久远的生物技术, 传统酿酒、制醋、酱腌食品加工都会用到它, 现代规模化生产氨基酸、有机酸、益生菌制剂、生物蛋白产品同样离不开这项技术, 食品、农业、生物产业整体发展过程里, 发酵技术一直贯穿全程^[1], 国内推行双碳发展目标之后, 传统化工生产模式能耗高、污染重, 这类生产方式受到越来越多约束, 依托微生物代谢完成加工的绿色生物制造, 成为各行各业产业升级的主要路径^[2], 自然环境里天然微生物菌群代谢流程复杂, 自然发酵模式容易出现生产稳定性差, 杂菌污染概率高, 不同批次成品品质不统一等各类问题, 高通量测序、微生物筛选培育、发酵工艺优化相关技术慢慢成熟之后, 人工可控纯种发酵、复合菌种分段发酵、固态液态耦合发酵的新式加工模式, 逐步替换掉过去的自然发酵, 产品产量与成品品质都得到提升^[3], 农田产出的秸秆、酿酒剩下的酒糟、粮食加工产生的麸皮, 这类经济价值偏低的物料, 都能借助微生物发酵完成纤维降解、蛋白富集、有害物质脱除, 实现废弃物料的高值回收利用, 既能产生经济效益, 也能保护生态环境^[4], 本文整合近几年国内外相关核心研究成果, 梳理微生物发酵的各类加工模式、实际应用现状以及未来发展前景。

2. 微生物发酵基本原理与主要类型

2.1 发酵基本原理

微生物发酵的本质就是微生物维持自身生存的代谢活动, 工作人员调整好温度、pH 数值、溶氧含量等环境条件之后, 微生物会主动摄取培养基里的碳源、氮源、无机盐等营养物质, 依靠细胞内部自带的酶系统, 完成原料分解与能量代谢, 同步生成多种次生代谢产物^[5], 微生物在生长繁殖的全过程中, 会逐步分解淀粉、纤维素、蛋白质这类大分子原料, 把大分子物质转化成单糖、氨基酸、小分子有机酸等简单小分子物质, 菌体本身还会合成菌体蛋白、风味物质以及多种具备益生效果的代谢产物, 原料就能完成提质与转化加工^[6]。

2.2 常见发酵类型

2.2.1 液态深层发酵

液态发酵会选用液体培养基当作整套反应体系, 这套体系内部溶氧分布均匀, 物质传递交换效率更高, 发酵过程里的各项参数都方便工作人员人工调控, 液态发酵十分适配工厂大规模工业化生产, 氨基酸、有机酸、酶制

作者简介: 邓鑫(2005—), 男, 本科, 研究方向为制药工程

张在宝(1951—), 男, 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: 邓鑫, 邮箱: 2024293239@zjhzu.edu.cn

剂这类标准化产品大多采用这套工艺制作，也是目前生物制药、精细化工行业使用最多的发酵工艺^[7]，这项工艺同时存在明显短板，生产阶段会消耗大量水资源，加工完成后会生成大量废水，企业后续处理废液的压力较大，同时固体原料在这套体系里的利用效率相对偏低。

2.2.2 固态发酵

固态发酵会依靠多孔固体物料当作发酵基质，物料整体含水量偏低，不需要投入大量溶剂，生产过程消耗的能源更少，秸秆、酒糟、麸皮这类农林副产物都适合用固态发酵处理，固态体系能够给微生物提供大量附着生长的位点，菌群生长代谢环境和自然发酵状态更加贴近，益生菌饲料、发酵调味品大多依靠固态发酵生产^[8]，传统固态发酵工艺存在明显缺陷，发酵物料内部温度、pH 分布不均匀，整套发酵流程的稳定程度相对较差。

2.2.3 多菌种协同分段发酵

单一菌种开展发酵时，自身代谢功能存在局限，很难同步完成纤维降解、蛋白富集、产酸抑菌等多项代谢工作，多菌种分段发酵会拆分不同发酵步骤，先利用好氧真菌分解物料里的纤维物质，再依靠厌氧益生菌完成产酸、抑制杂菌的工作，不同菌种之间形成功能互补，原料底物的降解效率能够明显提高，发酵产物自带的功能性也会进一步增强，这是当前发酵工艺领域关注度很高的研究方向^[9]。

2.3.3 厌氧益生菌发酵阶段

完成好氧发酵后的物料，不用经过高温灭菌操作，能够直接当作后续厌氧发酵的原料基质，本次实验选用植物乳杆菌、酿酒酵母、枯草芽孢杆菌三种菌种，按照活菌数量 1:2:2 的比例混合配制厌氧复合菌剂，再按照基质干重 1%~3% 的接种比例，把菌剂均匀拌入发酵物料内部，接种操作完成后，工作人员把物料转移到密封发酵装置，排空装置内部全部空气，保持装置完全密闭，在 $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的恒温环境下开展 2~4 天厌氧发酵，物料 pH 数值稳定下降到 4.5 以下，同时散发出柔和酸香与果酒香气时，就可以终止整套发酵流程，得到厌氧发酵成品，本次研究采用的多菌株复配厌氧发酵模式，参考了复合益生菌发酵豆粕相关学位论文里的实验方案^[16]。

3. 微生物发酵关键技术研究进展

3.1 菌种的筛选与复合菌系构建

发酵前期往物料里添加糖蜜与无机氮磷，能够给发酵初期的微生物提供可以快速吸收利用的速效碳源、氮源，避免菌种前期营养不足，出现生长速度缓慢、代谢反应滞后的问题^[19]，发酵工艺整体流程里，优良菌种的筛选、复合菌系的搭建，是提升整体发酵效率的核心环节，传统发酵只依靠自然菌群完成代谢，体系内部杂菌种类繁杂，发酵过程稳定性较差，现阶段的相关研究大多采用定向筛选的方式，挑选产量高、耐环境胁迫、降解能力强的功能菌株，搭配黑曲霉、里氏木霉、植物乳杆菌、枯草芽孢杆菌、酿酒酵母搭建完整复合菌系^[10]，不同菌种分别承担不同工作，各自完成纤维降解、产酸抑菌、产酶提质、优化成品风味等任务，多菌种协同发挥作用，可以弥补单一菌种代谢功能不足的问题，发酵体系的稳定程度明显提升，发酵成品的整体品质也会得到改善^[1]。

3.2 原料预处理耦合发酵技术

农林副产物内部存在木质素与纤维素互相交织的致密结构，整体结构稳定性强，微生物很难直接分解利用这类原料，工作人员采用酶解预处理、物理粉碎、适度湿热处理等手段，能够打破纤维之间的交联结构，释放大量微生物可直接利用的发酵碳源，后续发酵效率会大幅提升，发酵周期得到缩短，原料整体利用率同步上涨^[4]，这种预处理搭配发酵的耦合工艺，目前已经广泛投入秸秆饲料加工、酒糟资源化利用等相关研究工作。

3.3 发酵工艺智能化调控

传统发酵工艺大多依靠工作人员过往经验管控温湿度、通风条件、发酵时长，人为干预带来的影响很大，不同批次成品容易出现品质差距，现代智能化发酵系统能够实时监测物料 pH、温度、活菌数量、有机酸含量等多项关键指标，设备会根据发酵实时状态动态调整溶氧以及各类环境参数，发酵生产可以实现精细化、精准化管控，杂菌污染出现的概率有所降低，发酵产品的标准化程度、生产稳定程度同步提升^[9]。

本文搭建酶解 - 好氧 - 厌氧三段依次开展的发酵工艺，工艺核心创新点在于按照不同菌株的生理特点分阶段完成菌种接种，各类功能微生物都能处在适配自身生长的环境里，充分发挥自身代谢优势，从根源解决多菌种同步发酵时容易出现的菌种互相拮抗矛盾^[8]，现阶段大部分两步发酵试验都会省略前置酶解工序，只依靠微生物自身产出的酶系分解纤维，普遍存在发酵周期偏长、纤维降解不彻底的问题，本次工艺在正式发酵之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的致密屏障，后续微生物的降解效率、原料整体转化程度

都能得到提升^[11]，前人开展的单阶段发酵参数优化、生长猪饲喂试验相关研究，也给这套工艺各个环节的参数设定提供充足参考依据^[10]。

整套工艺把真菌好氧发酵、益生菌厌氧发酵拆分成两个独立环节，两个阶段分工清晰，代谢过程前后衔接，黑曲霉、里氏木霉主要负责分解物料内部粗大粗纤维物质，把难以利用的多糖结构转化成微生物可以直接吸收的可溶性还原糖^[15]，之后植物乳杆菌、枯草芽孢杆菌、酿酒酵母能够利用真菌降解产生的小分子底物快速增殖，同步积累益生菌、有机酸、消化酶等多种功能性成分^[14]，依靠“大分子降解—小分子转化—功能物质富集”的递进代谢模式，稻壳、酒糟这类低价值粗纤维农林副产物，能够转化成品质更高、活性物质含量更强的发酵饲料^[7]。

杂菌污染防控一直是发酵饲料工业化生产里难以处理的关键问题，传统工艺大多依靠高温灭菌抑制杂菌繁殖，不仅会增加能耗成本，高温环境还会破坏原料内部的有效营养成分，本次工艺搭建双重抑菌体系，依靠好氧阶段菌丝占位效应、抗菌代谢物，搭配厌氧阶段低 pH 环境、抑菌肽共同发挥抑菌作用，不需要高温灭菌，就能抑制产毒霉菌、腐败菌的生长繁殖，这套抑菌机制和复合菌群发酵酒糟相关研究得出的结论基本一致^[19]，能够给低成本、规模化发酵生产提供安全保障，白酒糟容易滋生杂菌的特性、酒糟资源化抑菌相关综述研究，也给本次试验的原料预处理方案提供充足理论支撑^[4, 5, 6]。

这套工艺还有不少可以深入完善的研究空间，第一，不同产地、不同加工方式产出的稻壳、酒糟，物料组分特性存在较大差异，后续研究可以针对性搭建各类农林副产物专属的酶解、发酵参数数据库^[3]，第二，发酵全程微生物群落的演替规律、代谢网络调控机制，能够搭配高通量测序、代谢组学技术开展更细致的解析工作，第三，这套工艺制备的发酵饲料，对肉鸭生长性能、肠道健康、屠宰肉质产生的实际效果，还需要开展规模化动物饲喂试验完成系统验证^[1, 17]，除此之外，水产行业成熟的发酵饲料加工技术，能够给这套工艺的优化改良提供更多思路^[23]，甘蔗渣、棕榈仁粕等同类粗纤维副产物的发酵相关研究，也可以拓宽这套工艺的实际应用场景^[24, 25]。

4. 微生物发酵技术的主要应用领域

4.1 传统食品酿造工艺

食醋、酱油、白酒、腐乳等各类传统发酵食品，核心制作工艺都是微生物发酵，已有相关研究证实，发酵体系内部乳酸菌、酵母菌、霉菌的菌群动态变化过程，会直接影响成品食品的风味、香气、储存保质期，对比传统自然发酵，可控发酵技术能够改善传统食品风味不均、杂味偏重的问题，发酵食品的安全性、品质稳定程度都会明显提升^{[1][3]}。

4.2 农业副产物资源化与发酵饲料生产

秸秆、酒糟、麦麸这类常见农业副产物，经过微生物发酵处理之后，物料内部粗纤维结构被充分降解，小分子蛋白、益生菌大量富集，原料里的抗营养因子数量大幅减少，物料整体适口性、消化利用率得到明显改善^[6]，发酵饲料可以替代玉米、豆粕这类常规粮食原料，养殖生产的成本能够有效降低，饲料内部含有的益生菌、有机酸成分，还能维护畜禽肠道健康，减少畜禽腹泻问题的出现，是绿色生态养殖里十分重要的技术手段^[10]。

4.3 生物化工与功能性产物合成

依靠微生物发酵技术，乳酸、甘油、氨基酸、工业酶制剂等高附加值产品可以实现工业化批量生产，对比传统化学合成方法，微生物发酵反应条件温和，成品纯度更高，生产过程绿色环保，产生的污染更少，是当下绿色生物制造领域重点发展的路径^{[7][8]}，光学纯乳酸、生物基甘油等优质发酵产物，目前正在新型材料、医药、精细化工等多个行业投入使用。

4.4 生态环保应用

微生物发酵能够完成有机固废无害化、减量化、资源化处理，微生物代谢过程可以降解有机污染物，稳定物料内部有机质，减少废弃物堆积带来的环境污染，助力农业循环经济稳步发展^[4]。

5. 当前技术存在的问题

微生物发酵技术近几年发展速度较快，但实际工业化落地生产时依旧存在不少发展瓶颈^{[2][9]}，第一，多菌种复合发酵过程里的菌群互作机制，目前还没有被研究人员完整阐明，实际生产过程容易出现菌群结构失衡，发酵效果不稳定，情况严重时会造成发酵失败，第二，固态发酵体系普遍存在传质、传热不均匀的情况，大批量规模化生产时整体稳定程度不足，第三，高精度、智能化的高端发酵设备采购造价偏高，大量中小型企业没有充足资金完成设备升级与智能化改造，第四，整个行业还没有形成完善的发酵产物标准化评价体系，市面上同类产

品品质差距较大，整体质量参差不齐。

6.发展趋势展望

未来微生物发酵技术的整体发展方向，会朝着精准化、智能化、绿色化、复合化持续推进，第一，依托宏基因组、代谢组学等多组学技术，研究人员能够完整解析多菌种之间的互作调控机制，定向搭建发酵效率高、运行稳定的复合发酵菌系，第二，预处理耦合分段发酵的新式工艺会逐步普及，各类低值农林副产物的利用潜力能够进一步挖掘，原料转化效率持续提升，第三，智能监测、自动化调控发酵设备大范围投入使用之后，发酵生产能够摆脱人工经验带来的局限，实现真正意义上的工业化、标准化量产，第四，发酵产物能够投入使用的场景会持续拓宽，生物基材料、微生物蛋白以及各类功能性发酵产品会陆续开发，持续推动绿色生物产业高质量发展^{[5][10]}。

7.结论

微生物发酵同时具备传统工艺底蕴与现代科技优势，属于绿色生物技术，在食品加工、农业废弃物资源化、生物制造、生态环保等多个领域，都有着无法替代的应用优势，多菌种协同发酵、原料预处理耦合发酵、智能化精准发酵等新兴技术，有效解决了传统发酵稳定性不足、原料利用率偏低、产品品质参差不齐等多项痛点，随着现代生物技术、智能发酵装备持续迭代升级，微生物发酵能够完成各类低值农林副产物的高值转化，会变成助力农业循环经济、推动绿色生物制造产业高质量发展的核心支撑技术，整体研究与工业化应用前景十分广阔。

参考文献

- [1] 刘稼鑫,叶晓婷,余永建,等.传统食醋发酵区系中微生物群落及相互作用关系研究进展[J].食品科学,2023,44(17):225-233.
- [2] 陈焕春,何启伟.微生物发酵饲料研发与产业化应用进展[J].中国畜牧杂志,2020,56(03):1-8.
- [3] 肖冬光,赵树欣,陈叶福,等.白酒生产技术[M].3版.北京:化学工业出版社,2023.
- [4] 刘玉兰,冯艳忠.纤维素酶预处理对秸秆纤维结构及微生物发酵效率的影响[J].饲料工业,2022,43(11):45-51.
- [5] 裴斐,杜逸飞,孙磊,等.固态发酵对麸皮抗氧化特性及全麦面包感官品质的提升作用[J].食品科学,2022,43(06):212-220.
- [6] 王景,张宏福,卢庆福.酒糟乳酸菌厌氧发酵工艺优化及其饲喂肉鸭效果[J].动物营养学报,2021,33(07):3962-3971.
- [7] 张和平,徐程.乳酸菌、酵母、芽孢杆菌复合发酵饲料的益生功能研究[J].中国微生态学杂志,2023,35(02):156-162.
- [8] 佚名.微生物固态发酵麦麸的营养品质及其资源化利用的研究进展[J].食品与发酵工业,2024,50(04):337-343.
- [9] 谯仕彦.发酵饲料在畜禽养殖中的应用与发展趋势[J].饲料博览,2024(01):1-7.
- [10] 李爱科,张艳.黑曲霉与里氏木霉复合发酵秸秆产纤维降解酶的研究[J].微生物学报,2022,62(05):1872-1883.

Research Progress and Application Review of Microbial Fermentation Technology

DENG XIN, ZHANG ZAIBAO, LIN ZHONGHANG

Huzhou College, Zhejiang, Huzhou

Abstract: Microbial fermentation is a biotechnological method which makes use of the intrinsic metabolic properties of microorganisms to transform raw materials into valuable products under artificially regulated environments. It is an important technique in modern bioprocessing, food processing, feed production and bio-environmental protection. Compared with the conventional chemical synthesis, microbial fermentation possesses remarkable advantages like gentle reaction conditions, small carbon emission, less pollution and wide range of substrate exploitation. With the swift progress of microbiome research, fermentation process optimization, co-fermentation of multiple species and intelligent fermentation control techniques, the substrate efficiency, product quantity and production stability of microbial fermentation have been greatly enhanced. This paper presents an overall description of the basic principles, major types of fermentation and significant technological progress in microbial fermentation, reviews its present applications in the food industry, utilization of feed resources, biochemical industry and agricultural waste disposal, discusses the present limitations of fermentation techniques and predicts the future direction of intelligent, accurate and environmentally friendly fermentation. The results provide theoretical basis for the advanced study and industrial implementation of microbial fermentation technology.

Keywords: Microbial fermentation; multi-species synergy; solid-state fermentation; resource utilization; bioproduction