

Study on the Proliferation Law of Probiotics and Food Safety Risk Control in Fermented Food Processing

Xiaolei Han¹ Yingchao Mao^{1*} Jueqin Liang¹ Nina Mo² Biao Qiu³

1. Hunan Province Agricultural Products Processing and Quality Safety Research Institute, Changsha, Hunan, 410125, China

2. Hunan Miduoqi Food Co., Ltd., Yiyang, Hunan, 413100, China

3. Lianyuan Fengleyuan Agricultural Development Co., Ltd., Loudi, Hunan, 417100, China

Abstract

This study establishes a comprehensive “early risk prevention and control” system encompassing precise raw material management, intelligent fermentation monitoring, environmental pathogen detection, and HACCP implementation. Through systematic investigation of probiotic proliferation patterns during fermented food processing and corresponding food safety risk mitigation strategies, the research demonstrates that probiotics follow a characteristic growth curve comprising four distinct phases: the stationary phase, exponential growth phase, stable phase, and decline phase. Probiotic proliferation rates are primarily influenced by strain characteristics, fermentation substrate composition, and process parameters including temperature, pH, and oxygen levels. The findings indicate that optimizing carbon-to-nitrogen ratios, adding growth-promoting factors, and implementing staged pH and temperature controls can significantly enhance viable probiotic counts. These results not only provide theoretical support for achieving both high viable microbial counts and enhanced food safety in fermented products, but also offer practical technical solutions for industry implementation.

Keywords

fermented food; probiotics; proliferation dynamics; food safety; risk prevention and control

发酵食品加工中益生菌增殖规律及食品安全风险防控研究

韩晓磊¹ 毛颖超^{1*} 梁珏钦¹ 莫妮娜² 丘彪³

1. 湖南省农产品加工与质量安全研究所, 中国·湖南长沙 410125

2. 湖南米多奇食品有限公司, 中国·湖南益阳 413100

3. 涟源市丰乐园农业发展有限公司, 中国·湖南娄底 417100

摘要

本文搭建了一套“风险提前防控”的全程保障体系,具体包括原料精准管控、发酵过程智能化监控、环境病原菌监测,以及HACCP体系。通过系统研究发酵食品加工时益生菌的增殖规律,以及对应的食品安全风险防控方法,得出结论:益生菌在发酵过程中会遵循典型的生长曲线,也就是迟缓期、对数期、稳定期和衰亡期这四个阶段。它的增殖速度主要受菌种本身特性、发酵基质的成分,还有温度、pH值、氧含量这些工艺参数的共同影响。研究发现,通过优化碳氮源的比例、添加促进生长的因子,再分阶段控制pH值和温度,能明显提高益生菌的活菌数量。这不仅为发酵食品同时实现高活菌数和高安全性提供了理论支持,还给出了切实可行的技术方法。

关键词

发酵食品; 益生菌; 增殖动力学; 食品安全; 风险防控

1 引言

发酵食品是饮食文化里的重要部分,现在大家越来越看重它的健康价值,尤其是像含益生菌的发酵奶、泡菜、酵素这些产品。益生菌能调节肠道菌群平衡、增强免疫力、帮着吸收营养,对身体有不少好处。但在工业化生产中,怎么让益生菌在发酵时长得又多又活跃,同时还能有效控制潜在的食品安全风险,这已经成了制约这个行业高质量发展的核心技术难题。益生菌的生长繁殖不是孤立的,它和发酵原料里的营养成分、环境条件,还有复杂的微生物生态系统都密

切相关^[1]。不同的菌种(比如乳酸杆菌、双歧杆菌、酵母菌),在同样的发酵环境下,生长速度和规律可能完全不一样。

当前发酵食品行业,正处在从传统经验型生产,向现代科学化、智能化制造转型的关键阶段。深入研究益生菌在特定食品原料中的生长规律,据此搭建精准的过程控制和风险防控体系,这对提升产品品质、保障消费者安全、增强行业的国际竞争力都特别重要。这项研究,系统探讨益生菌在发酵食品加工中的生长规律及其影响因素,全面找出并分析加工全过程中的关键风险点,最后提出一套科学又高效的综

合风险防控策略,为行业的规范发展和技术创新提供理论支持和实际操作指导。

2 益生菌在发酵食品中的增殖动力学规律

2.1 益生菌典型生长曲线与动力学模型

在发酵食品加工过程中,益生菌群的生长会遵循典型的微生物生长规律,主要分为四个连续阶段:迟缓期、对数生长期、稳定期和衰亡期。迟缓期的时候,益生菌刚进入新环境,需要适应,为后续快速分裂做准备。这个阶段的长短,主要看接种量多少、菌种活化得好不好,还有环境变化会不会对它造成冲击。等进入对数生长期,益生菌就会以最快的速度指数级增殖。这个阶段特别关键,直接决定了最后能有多少活菌,而且它持续的时间和增殖速度,也会影响整个发酵周期的长短和生产效率。到了稳定期,因为发酵基质里的营养物质快被消耗完了,加上益生菌代谢产生的有害物质越积越多,pH值也变了,所以新长出来的益生菌数量和死亡的数量差不多,达到了动态平衡。最后,环境条件越来越差,益生菌就进入了衰亡期,活菌数量开始慢慢下降^[2]。为了能精准预测和控制发酵过程,研究人员常会用数学模型来描述益生菌的生长规律,通过模型能算出不同时间点的菌体浓度,这样就能为优化发酵工艺参数提供理论支持。

2.2 影响益生菌增殖的关键因素

益生菌有多快的生长速度、能达到多少密度,是多种因素共同作用的结果,主要集中在三个方面:菌种本身、发酵用的基质、工艺条件。首先是菌种特性和它们之间的协同作用,这是内在的决定因素。不同属、不同种的益生菌,最适合它们生长的条件和代谢特点差别很大。比如乳酸杆菌一般比较耐酸,而双歧杆菌对氧气更敏感。实际生产中,经常会用多种菌种一起协同发酵,比如乳酸菌和酵母菌搭配的共生体系。就像开菲尔发酵时,酵母菌会利用乳酸菌代谢产生的氨基酸和肽类生长,同时还会产生维生素等生长因子反过来滋养乳酸菌,而且酵母菌消耗氧气后,能为乳酸菌和双歧

杆菌创造无氧环境——这种互相帮忙的共生关系,能明显促进整个益生菌群体的生长和代谢活性。然后是发酵基质的成分,这是益生菌生长的物质基础。碳源和氮源是构成益生菌细胞结构、提供能量的核心元素。比如做酸奶发酵时,乳清蛋白和酪蛋白的水解产物,会给乳酸菌提供容易吸收利用的氮源。如果在发酵基质里加一些特定的生长促进因子,像低聚糖(也就是益生元)、番茄汁提取物或者酵母浸膏,就能显著缩短益生菌的迟缓期,让最终的活菌密度更高。有研究显示,在乳酸杆菌的发酵液里加0.5%的酵母提取物,最终的活菌数能提升1-2个数量级。

工艺参数是调控益生菌增殖的外部关键手段。温度会直接影响益生菌体内酶的活性和代谢速度,每种益生菌都有自己最适合的生长温度范围(比如乳酸菌一般在37-42℃)。pH值也是个关键因素,发酵过程中益生菌会产生酸性物质,导致pH值下降,这又会反过来抑制它们自己生长。所以在高密度发酵时,常会采用分阶段调控pH的策略,比如在对数生长期后期,通过添加中和剂把pH值维持在适宜范围。对于专性厌氧的双歧杆菌来说,氧含量太关键了,全程保持无氧或者微氧环境,才能保证它们高效生长。另外,搅拌速度会影响营养物质的传递效率和对菌体的剪切力,也会间接影响益生菌的生长情况。

2.3 代谢产物与增殖的反馈调节

益生菌在生长繁殖的时候,会不断产生代谢产物,这些产物反过来又会影响它们自己的生长^[3]。比如乳酸菌会把糖类转化成乳酸,导致周围环境的pH值快速下降,等pH值低于乳酸菌能承受的下限,它们的生长就会受到强烈抑制。还有些菌株在特定条件下会产生细菌素这类抗菌物质,虽然能抑制杂菌生长,但也可能影响同一个体系里其他菌种的生长。再比如酒精发酵时,酵母菌产生的乙醇积累到一定浓度,就会对酵母菌自身产生毒性,让发酵过程停止。所以,通过实时监测这些关键代谢产物的浓度,并且及时调控,是让益生菌一直高效生长繁殖的重要方法。

3 发酵食品加工中的主要食品安全风险

3.1 生物性风险

生物性风险是发酵食品里最常见,而且危害也最大的安全问题。杂菌污染主要来自原料、生产设备或者周围环境。比如发酵乳制品里要是混入了霉菌、酵母菌,它们不仅会抢益生菌的营养和生存空间,抑制益生菌生长,产生的代谢产物还可能让产品出现怪味,最后导致产品腐败变质。

更严重的是致病菌污染。虽然发酵环境的低pH值(也就是偏酸)和益生菌产生的抗菌物质,能抑制不少致病菌,但有些耐酸的致病菌,比如大肠杆菌O157:H7、单核细胞增生李斯特菌,可能在发酵刚开始的时候,或者后期污染阶段存活下来并繁殖。尤其是如果发酵失败,导致pH值没降到位,这种风险会大大增加。

【基金项目】国家农业优势特色产业集群项目“湘南‘供粤港澳’蔬菜优势特色产业集群建设”(2025年度);2025年娄底市科技计划科技特派员项目“一种基于传统腌制手法制作的健康酱腌菜及新型增味抑菌技术研究与应”;湖南省2025年度国家“基层科普行动计划”项目“‘从餐桌到课堂’构建具有湖湘特色的食育科普模式与路径探究”(项目编号:kxcbkt2025018)。

【作者简介】韩晓磊(1987-),男,中国湖南长沙人,硕士,助理研究员,从事农产品加工及贮藏保鲜研究。

【通讯作者】毛颖超(1987-),女,中国湖南长沙人,硕士,助理研究员,从事食品精深加工及质量安全等研究。

3.2 化学性风险

化学性风险主要分两类：一类是发酵过程中有害代谢产物越积越多，另一类是外部带进来的化学污染有害代谢产物，这里面生物胺是大家最关注的。它是微生物把游离氨基酸分解后产生的，像发酵香肠、鱼露、奶酪这些产品里经常会有。能产生大量生物胺的大多是杂菌，比如某些片球菌、乳杆菌或者肠球菌。要是吃多了生物胺（尤其是组胺和酪胺），可能会出现头痛、心跳快、呕吐这些过敏中毒的反应。还有乙醛，它是酸奶里特有的风味物质，但如果积累得太多，对人体可能也有潜在危害。

3.3 物理性风险与过程失控风险

物理性风险主要就是指加工过程中可能混进产品里的异物，比如玻璃碎片、金属屑、塑料渣这些。这通常和设备老化、管理不到位有关系，另外发酵过程没控制好本身也是个大风险^[4]。要是发酵温度没控制好，或者菌种活力不够，可能会导致发酵变慢甚至发酵失败，产品达不到预期的低pH值（也就是不够酸），这样就给致病菌繁殖留了机会。还有后发酵环节，比如包装、储存的时候温度没控制好，也会让益生菌产气太多，导致产品质地变样，甚至让腐败菌再次生长，出现包装鼓胀（也就是常说的“胖听”）这类质量问题，同时还带着安全风险。

4 基于风险前移理念的综合防控体系构建

4.1 原料精准管控与菌种管理

食品安全风险防控得从源头抓起。首先得建立严格的原料供应商审核制度和入厂检验标准，不管是乳、肉、蔬菜这些主料，还是辅料、食品添加剂，都要做全面的安全指标检测，重点查微生物总数、致病菌、农药残留和重金属这些关键项。至于发酵用的菌种，要实行“菌种准入”管理——只选那些经过全面安全性评估（包括有没有毒力因子、会不会有耐药基因转移的风险等）、符合公认安全地位（GRAS）或者国家相关标准的工业发酵剂。同时还要制定规范的菌种活化和扩培流程，保证接种的时候菌种活力足，这样才能让它快速占据生长优势，压制住杂菌。

4.2 发酵过程的精准控制与智能化监控。

生产过程中要保证发酵食品的品质的一致性和安全性，核心是基于对益生菌生长规律的深入了解，对发酵过程进行精准控制。具体来说，就是在发酵罐里装上线传感器，实时监测pH值、温度、溶解氧、氧化还原电位这些关键参数，然后把监测到的数据传到中央控制系统。系统会按照预先设定好的优化工艺曲线，自动调节夹套温度、搅拌速度、酸碱泵这些设备，确保发酵过程一直处在最佳状态。

4.3 环境病原菌监控与 HACCP 体系应用

生产环境的卫生情况，是防止产品二次污染的关键。首先得制定常态化的环境病原菌监控计划，定期对车间空气、设备表面、工作人员的手部这些关键位置采样检测，重

点盯着李斯特菌、沙门氏菌这类难清除的致病菌^[5]。同时，要全面推行“危害分析与关键控制点（HACCP）”体系。具体来说，就是对发酵食品加工的整个流程做系统性的危害分析，确定原料验收、发酵、巴氏杀菌（如果有这个环节的话）、包装这些关键控制点（CCP），然后明确每个控制点的关键限值、监控流程、出现问题后的纠偏措施，还有验证程序。这样就能形成一套预防性的、有书面文件记录的安全管理体系，确保所有潜在的风险都能被控制住。

4.4 可追溯体系与持续改进

发酵过程需要建立一套从原料到成品的全链条可追溯体系。一旦发生食品安全问题，能快速锁定有问题的产品批次、查出问题根源，然后精准召回相关产品，把损失和不良影响降到最低。另外，风险防控体系不是一成不变的，得是动态循环、持续改进的。企业要定期评估防控措施有没有效果，结合产品抽检结果、客户投诉情况、新出台的法规标准，还有行业里的预警信息，不断更新和完善自己的风险防控方案，这样才能适应内外部环境的变化。

5 结论

本文系统研究了发酵食品加工过程中益生菌的生长规律，还有相关的食品安全风险，同时也搭建了对应的综合防控体系。得出结论如下：益生菌的生长繁殖有特定的规律，会受到菌种本身、发酵基质和工艺参数的复杂影响，通过多方面的优化调整，能明显提高它的活菌数量和活性。发酵食品的安全风险挺多样的，既有潜在性又会动态变化，得从生物性、化学性、物理性这多个维度去识别和评估。以“风险提前防控、预防为主”为核心思路，把原料管控、过程精准控制、环境监控和 HACCP 体系结合起来的综合防控策略，是让发酵食品既保证高品质又兼具高安全性的必经之路。

参考文献

- [1] 李莉峰,邱晗,叶春苗. 乳酸菌在食品加工中的应用进展 [J]. 农产品加工, 2025, (09): 99-101. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2025.09.021.
- [2] 付勋,聂青玉,张艳,等. 科教融汇视域下“发酵食品加工与检测”课程改革实践探索 [J]. 农产品加工, 2024, (09): 123-126. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2024.09.025.
- [3] 刘畅,裴晋红,穆秀丽,等. 基于双相动力学分析靶向药物联合应用对肝癌细胞SNU-387增殖的影响及其作用机制 [J]. 中国生物制品学杂志, 2021, 34 (10): 1184-1190. DOI:10.13200/j.cnki.cjb.003446.
- [4] 袁震,高齐圣. 舆情数据驱动的食品质量安全风险评估研究 [J/OL]. 复杂系统与复杂性科学, 1-9[2025-11-23]. <https://link.cnki.net/urlid/37.1402.N.20251121.1344.002>.
- [5] 胡淑青,林莉,徐强,等. 斯洛伐克农食产品技术性贸易措施体系研究 [J/OL]. 标准科学, 1-11[2025-11-23]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5811.T.20251117.1055.041>.