

# 酸浆豆腐微生物多样性特征对品质影响的综述

岳元春, 魏 岸, 乌 兰, 任玄梦泽, 马长路\*

北京农业职业学院食品与生物工程学院, 北京

收稿日期: 2025年4月2日; 录用日期: 2025年5月5日; 发布日期: 2025年5月15日

## 摘要

本文综述了酸浆豆腐发酵过程中微生物多样性的作用及其研究进展。酸浆豆腐是一种传统发酵豆制品, 其独特的风味和质地主要归功于发酵过程中复杂的微生物群落。文章详细阐述了酸浆豆腐发酵的基本原理, 分析了发酵过程中细菌、酵母菌和霉菌等主要微生物类群的作用。同时, 探讨了微生物多样性对酸浆豆腐品质的影响, 包括风味物质形成、质地改善和营养价值提升等方面。最后, 总结了当前研究现状, 并展望了未来研究方向, 为酸浆豆腐的工业化生产和质量控制提供了理论依据。

## 关键词

酸浆豆腐, 微生物多样性, 风味物质, 营养价值

# Review on the Impact of Microbial Diversity Characteristics of Tofu Fermented with *Physalis alkekengi* on Quality

Yuanchun Yue, An Wei, Lan Wu, Xuanmengze Ren, Changlu Ma\*

College of Food and Bioengineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2025; accepted: May 5<sup>th</sup>, 2025; published: May 15<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This paper reviews the role of microbial diversity and research progress in the fermentation process of sour lees tofu. It is a traditional fermented soybean product, whose unique flavor and texture are primarily attributed to the complex microbial community involved in the fermentation process. The article elaborates on the fundamental principles of sour lees tofu fermentation and analyzes the roles of major microbial groups such as bacteria, yeasts, and molds during the fermentation

\*通讯作者。

process. Additionally, it explores the impact of microbial diversity on the quality of sour lees tofu, including the formation of flavor compounds, texture improvement, and enhancement of nutritional value. Finally, the paper summarizes the current research status and prospects for future research directions, providing a theoretical basis for the industrial production and quality control of sour lees tofu.

## Keywords

Sour Lees Tofu, Microbial Diversity, Flavor Compounds, Nutritional Value

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

酸浆豆腐是一种具有悠久历史的传统发酵豆制品，以其独特的风味和营养价值而广受欢迎。其制作过程中，微生物发酵是关键步骤，不仅决定了产品的最终品质，还赋予了酸浆豆腐特有的风味和质地[1]-[3]。近年来，随着分子生物学技术的进步，人们对酸浆豆腐发酵过程中微生物多样性的认识不断深入。研究微生物多样性在酸浆豆腐发酵过程中的作用，对于优化生产工艺、提高产品质量和开发新型发酵豆制品具有重要意义。本文旨在综述酸浆豆腐发酵过程中微生物多样性的作用，为相关研究和产业发展提供参考。

## 2. 酸浆豆腐发酵的基本原理

酸浆豆腐的制作过程主要包括豆浆制备、凝固和发酵三个阶段[4]。在发酵阶段，微生物利用豆浆中的营养物质进行生长代谢，产生各种酶类和代谢产物，从而改变豆浆的化学成分和物理性质。这一过程涉及复杂的微生物群落变化和多种生化反应[5]。

发酵过程中，微生物首先分解豆浆中的大分子物质，如蛋白质和碳水化合物，产生氨基酸、单糖等小分子物质；随后，这些小分子物质被进一步代谢，产生有机酸、醇类、酯类等风味物质[6]-[8]。同时，微生物产生的蛋白酶和脂肪酶等酶类也会影响豆腐的质地和口感[9]。整个发酵过程受到温度、pH值、氧气含量等多种因素的影响，这些因素共同决定了最终产品的品质[10]。

## 3. 酸浆豆腐发酵过程中的微生物多样性

### 3.1. 酸浆豆腐发酵过程中的细菌多样性

酸浆豆腐发酵过程中的微生物群落极其复杂，细菌是发酵过程中的主要微生物，其中以乳酸菌最为重要。乳酸菌通过发酵产生乳酸，降低pH值，抑制有害菌生长，同时贡献独特的风味。常见的乳酸菌包括乳酸杆菌属、乳酸球菌属等，如嗜酸乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、乳酸球菌等[11]。研究发现，在倨湾酸浆面的浆水中，乳酸杆菌相对含量达99.72%[12]。此外，明串珠菌属、不动杆菌属、泛菌属等也常被检测到。在甘薯酸浆自然发酵过程中，厚壁菌门和变形菌门的一些细菌，如明串珠菌属、不动杆菌属、*Reyranella*属、泛菌属等为主要菌群[13]。

### 3.2. 酸浆豆腐发酵过程中的真菌多样性

酸浆豆腐生态系统中常见的真菌有酵母菌，如酿酒酵母、比利牛斯酵母等。酵母菌在发酵过程中也

扮演着重要角色，它们主要参与酒精发酵和酯类物质的生成，为酸浆豆腐带来特有的香气[11]。常见的酵母菌包括酿酒酵母、毕赤酵母等。霉菌虽然在酸浆豆腐发酵过程中数量较少，但其产生的酶类对蛋白质和碳水化合物的分解有重要作用，有助于改善豆腐的质地和风味。常见的霉菌包括毛霉、根霉等[14]。在李璇等人对绿豆酸浆的研究中，还发现双足囊菌属、假丝酵母菌属和假囊酵母属等是绿豆酸浆中的优势真菌属[15]。

## 4. 酸浆中微生物多样性的影响因素及研究方法

### 4.1. 微生物多样性的影响因素

酸浆中微生物的种类和数量受多方面因素影响。

#### 4.1.1. 原料的影响

不同来源的酸浆，其原料不同，会影响微生物的初始群落结构[4]。以大豆为原料产生的酸浆和以甘薯为原料的酸浆，其微生物组成存在差异。此外，不同品种大豆的蛋白质、脂肪、碳水化合物等含量有差异，蛋白质丰富的大豆可为微生物提供更多氮源，利于微生物生长，可能增加微生物多样性[16]。大豆的储存条件和时间也有影响，储存不当受霉菌污染的大豆，会使酸浆豆腐微生物群落改变[17]。

#### 4.1.2. 环境因素

生产环境：生产车间的卫生状况、空气湿度和温度等影响显著。卫生差、湿度高、温度适宜的环境易使空气中微生物落入豆腐，增加酸浆中微生物的多样性[18]。此外，酸浆豆腐在4℃左右冷藏可抑制微生物生长，延长保质期，减少微生物多样性变化；常温储存，微生物易繁殖，多样性快速变化。若储存环境氧气含量高，好氧菌易生长；包装密封好，厌氧菌可能成为优势菌[19]。

#### 4.1.3. 制作工艺

浸泡时间和温度影响大豆微生物。浸泡时间长、温度高，微生物易繁殖，可能增加多样性，但也可能导致有害菌过度生长[20]。

磨浆与煮浆：磨浆时的卫生条件影响微生物，设备清洁不彻底会引入杂菌。煮浆温度和时间决定微生物存活数量，高温长时间煮浆可杀灭多数微生物，降低多样性；煮浆不彻底则会残留耐热菌[21]。

点浆：点浆温度和酸浆添加量影响微生物。温度适宜、酸浆量合适，利于乳酸菌等有益菌生长繁殖，形成特定微生物群落。

发酵与凝固：发酵过程中的温度和时间是至关重要的控制参数。研究表明，15℃~25℃的温度范围和8~12小时的发酵时长最有利于乳酸菌等有益微生物的生长繁殖，而温度或时间的偏差可能导致微生物群落结构失衡[22]。此外，发酵环境的湿度、pH值和盐度等参数也对微生物的生长代谢具有显著影响[23]。就酸浆发酵而言，最佳pH值区间为4.5~5.5。从微生物生态学角度来看，自然发酵的酸浆具有较高的微生物多样性，其菌群主要来源于环境中的自然接种，包含乳酸菌、酵母菌等多种功能菌群[24]。相比之下，人工控制条件下的发酵体系可通过接种特定发酵剂等方式，使微生物群落结构趋于简化，优势菌群更加突出。值得注意的是，酸浆的酸度水平和营养成分构成直接影响微生物群落的演替，适宜的酸性环境不仅促进乳酸菌的生长，还能有效抑制病原菌等有害微生物的繁殖[25]。

## 4.2. 酸浆中微生物的研究方法

### 4.2.1. 传统培养法

通过选择不同的培养基和培养条件，对酸浆中的微生物进行分离、培养和鉴定，但只能检测到可培养的微生物，会遗漏大量不可培养的微生物。

#### 4.2.2. 高通量测序技术

高通量测序技术(High-Throughput Sequencing, HTS)是近年来在微生物多样性研究中广泛应用的一种先进技术。它能够全面、快速地分析复杂微生物群落的结构和多样性，不受微生物可培养性的限制，从而揭示传统培养法无法检测到的微生物种类[26]。在酸浆豆腐发酵研究中，高通量测序技术已被用于深入解析发酵过程中的微生物群落动态变化。例如，通过对不同发酵阶段的酸浆样本进行 16S rRNA 基因测序，可以精确地鉴定出参与发酵的细菌种类及其相对丰度，揭示乳酸菌、酵母菌和其他微生物在发酵过程中的演替规律[11]。此外，宏基因组测序技术(Metagenomics)不仅可以鉴定微生物种类，还能分析其功能基因，帮助研究人员理解微生物在发酵过程中所发挥的具体代谢功能[8]。这些技术的应用为优化酸浆豆腐的发酵工艺提供了重要的理论依据。

#### 4.2.3. 代谢组学技术

代谢组学(Metabolomics)技术是一种系统研究生物体系中所有代谢物的科学方法，能够全面、动态地反映微生物代谢活动及其对发酵环境的影响。在酸浆豆腐发酵过程中，代谢组学技术可用于分析发酵过程中产生的各类代谢产物，如有机酸、醇类、酯类等风味物质，以及蛋白质、多糖等营养成分的变化[2]。通过气相色谱 - 质谱(GC-MS)、液相色谱 - 质谱(LC-MS)等分析手段，研究人员可以精确地鉴定和定量这些代谢物，从而揭示微生物代谢活动与酸浆豆腐品质之间的内在联系[7]。例如，陶祥婕等(2024)利用 GC-MS 分析了复合菌种发酵黄浆水中的挥发性风味物质，发现乳酸菌和酵母菌的协同发酵显著增加了挥发性风味物质的种类和含量，强化了酸浆豆腐的风味品质[27]。代谢组学技术的应用不仅有助于深入理解酸浆豆腐发酵的代谢机制，还为开发新型发酵剂和优化发酵工艺提供了有力支持。

### 5. 微生物多样性对酸浆豆腐品质的影响

微生物多样性对酸浆豆腐的品质有着深远的影响，微生物在酸浆发酵过程中相互作用，共同影响酸浆的品质。

#### 5.1. 微生物多样性对酸浆豆腐风味品质的影响

在风味物质形成方面，不同微生物通过各自的代谢途径产生多种有机酸、醇类、酯类等化合物，这些物质共同构成了酸浆豆腐独特的风味特征[28]。这是由于酸浆中的微生物菌群及其所分泌的酶系在发酵过程中共同作用，产生大量的挥发性风味物质。通过高通量测序技术揭示了乳酸菌和酵母菌在发酵过程中的优势地位，而代谢组学技术则进一步明确了这些微生物代谢产物的具体种类和含量。例如，乳酸菌发酵过程中产生的乳酸等有机酸赋予产品独特的酸味，同时还能抑制有害微生物的生长。酵母菌等真菌则可以产生醇类、酯类等风味物质，赋予酸浆丰富的香气。通过代谢组学分析，研究人员发现利用复合菌种发酵能够显著增加挥发性酸浆水中挥发性风味物质的含量，强化了酸浆的风味品质[27]。

#### 5.2. 微生物多样性对酸浆豆腐质地的影响

微生物多样性对酸浆豆腐的质地有显著影响。代谢组学技术揭示了微生物代谢产物对豆腐质地的影响机制。例如，某些微生物产生的胞外多糖能够改善豆腐的持水性和口感[29]。同时，微生物产生的蛋白酶可以水解大豆蛋白，改变豆腐的凝胶结构，使其质地更加细腻[23]。通过分析这些代谢产物的种类和含量，研究人员可以更好地理解微生物在酸浆豆腐质地形成中的作用，并为优化发酵工艺提供指导。

#### 5.3. 微生物多样性对酸浆豆腐营养品质的影响

酸浆豆腐的营养品质也与微生物多样性密切相关。发酵过程中，微生物不仅增加了产品中 B 族维生

素的含量，还通过分解抗营养因子，提高了蛋白质和矿物质的生物利用率。乳酸菌发酵可以提高酸浆中的有机酸含量，增加其生物活性。此外，微生物在发酵过程中还可以分解大豆中的抗营养因子(ANF)，提高豆腐的营养价值[30]。

总之，酸浆发酵过程中的微生物多样性是一个复杂的研究领域，深入研究微生物多样性及其与酸浆品质的关系，对于优化酸浆发酵工艺、开发新型发酵产品具有重要意义。

## 6. 总结

酸浆豆腐发酵过程中的微生物多样性对产品品质的形成起着关键作用。不同微生物类群通过复杂的代谢网络相互作用，共同决定了酸浆豆腐的风味、质地和营养价值。深入研究微生物多样性及其功能，对于优化酸浆豆腐生产工艺、提高产品质量具有重要意义。未来研究应着重于以下几个方面：利用现代分子生物学技术全面解析发酵过程中的微生物群落结构；阐明关键微生物的功能及其相互作用机制；开发基于微生物调控的品质控制技术；探索新型发酵菌种的筛选和应用。这些研究将为酸浆豆腐的工业化生产和产品创新提供科学依据，推动传统发酵豆制品产业的可持续发展。

## 基金项目

北京市教育委员会科技计划一般项目(KM202412448002)；北京农业职业学院首席专家团队项目(XYTD-22-04)；全国轻工职业教育教学指导委员会课题项目(QGJY2024014)。

## 参考文献

- [1] 李小凤, 蓝莹儿, 蒋丽婷, 等. 豆腐黄浆水资源综合利用研究进展[J]. 中国酿造, 2021, 40(10): 7-11.
- [2] 高若珊, 孙亚东, 张光, 等. 酸浆豆腐研究进展[J]. 大豆科技, 2020(1): 32-37.
- [3] Huang, F., Wang, T., Zhang, J., Tahir, M., Sun, J., Liu, Y., et al. (2023) Exploring the Bacterial Community Succession and Metabolic Profiles of *Lonicera japonica* Thunb. Residues during Anaerobic Fermentation. *Bioresource Technology*, **367**, Article 128264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128264>
- [4] Zheng, L., Regenstein, J.M., Teng, F. and Li, Y. (2020) Tofu Products: A Review of Their Raw Materials, Processing Conditions, and Packaging. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **19**, 3683-3714. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12640>
- [5] Guan, Z., Zhang, J., Zhang, S., He, Y., Li, Y., Regenstein, J.M., et al. (2023) Effect of Coagulant and Treatment Conditions on the Gelation and Textural Properties of Acidic Whey Tofu. *Foods*, **12**, Article 918. <https://doi.org/10.3390/foods12050918>
- [6] 胡欣欣, 蒋立文, 刘嘉, 等. 黄浆水酸化过程中有机酸的变化研究[J]. 农产品加工, 2011(3): 74-77.
- [7] Cao, Z., Green-Johnson, J.M., Buckley, N.D. and Lin, Q. (2019) Bioactivity of Soy-Based Fermented Foods: A Review. *Biotechnology Advances*, **37**, 223-238. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.12.001>
- [8] Xu, Y., Ye, Q., Zhang, H., Yu, Y., Li, X., Zhang, Z., et al. (2019) Naturally Fermented Acid Slurry of Soy Whey: High-Throughput Sequencing-Based Characterization of Microbial Flora and Mechanism of Tofu Coagulation. *Frontiers in Microbiology*, **10**, Article 1088. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01088>
- [9] 张志衡, 陈振家, 王晓闻, 等. 基于酸浆量变化的豆腐蛋白沉淀机理研究[J]. 大豆科学, 2022, 41(3): 345-351.
- [10] Huang, Z., He, W., Zhao, L., Liu, H. and Zhou, X. (2021) Processing Technology Optimization for Tofu Curded by Fermented Yellow Whey Using Response Surface Methodology. *Food Science & Nutrition*, **9**, 3701-3711. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2331>
- [11] Fei, Y., Li, L., Chen, L., Zheng, Y. and Yu, B. (2018) High-Throughput Sequencing and Culture-Based Approaches to Analyze Microbial Diversity Associated with Chemical Changes in Naturally Fermented Tofu Whey, a Traditional Chinese Tofu-Coagulant. *Food Microbiology*, **76**, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.04.004>
- [12] 周书楠, 席修璞, 董蕴, 等. 琥珀酸浆面浆水细菌多样性评价[J]. 中国酿造, 2018, 37(1): 49-53.
- [13] 吴企禾. 自然发酵甘薯酸浆细菌动态规律解析及乳酸菌絮凝性研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.

- [14] 尚雪娇, 马磊, 余海忠, 等. 基于 MISEQ 测序技术的锯湾酸浆面浆水真菌多样性评价[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 158-163.
- [15] 李璇, 李中雨, 舒林焱, 等. 洛阳传统绿豆酸浆工艺优化及发酵特性分析[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(6): 76-85.
- [16] Wang, S., Wang, X., Miao, J. and Tian, Y. (2018) Tofu Whey Wastewater Is a Promising Basal Medium for Microalgae Culture. *Bioresource Technology*, **253**, 79-84. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.012>
- [17] 杨春华, 于森, 齐文, 等. 酸浆豆腐直投式发酵剂制备和储存条件优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 560-566.
- [18] Nicole, M., Caimeng, Z., Eric, K. and Yufei, H. (2014) Salt and Acid-Induced Soft Tofu-Type Gels: Rheology, Structure and Fractal Analysis of Viscoelastic Properties as a Function of Coagulant Concentration. *International Journal of Food Engineering*, **10**, 595-611. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0108>
- [19] Stanojević, S.P., Kostić, A.Ž., Milinčić, D.D., Stanojević, A.B. and Pešić, M.B. (2023) Composition of Proteins in Fresh Whey as Waste in Tofu Processing. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, **58**, 10-20. <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2162300>
- [20] 程江华, 唐勇峰, 徐雅芫, 等. 快速制浆对豆浆加工过程中微生物影响研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(3): 30-33.
- [21] 高越, 杨雪飞, 郑志, 等. 不同凝固方式制备豆腐的特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(10): 118-126.
- [22] Shen, X., Xu, Y., Yin, L., Cheng, J., Yin, D., Zhao, R., et al. (2022) Tofu Whey Wastewater as a Beneficial Supplement to Poultry Farming: Improving Production Performance and Protecting against *Salmonella* Infection. *Foods*, **12**, Article 79. <https://doi.org/10.3390/foods12010079>
- [23] 张志衡, 陈振家, 李玉娥, 等. 不同酸浆添加量制备的豆腐凝胶特性比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 161-170.
- [24] Wu, H., Dong, J., Dai, Y., Liu, X., Zhou, J. and Xia, X. (2021) Effects of Lactic Acid Bacteria Fermented Yellow Whey on the Protein Coagulation and Isoflavones Distribution in Soymilk. *Food Chemistry*, **334**, Article 127484. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127484>
- [25] Azi, F., Li, Z., Xu, P. and Dong, M. (2022) Transcriptomic Analysis Reveals the Antibacterial Mechanism of Phenolic Compounds from Kefir Fermented Soy Whey against *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria Monocytogenes*. *International Journal of Food Microbiology*, **383**, Article 109953. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109953>
- [26] 范鑫诺, 李海阳, 郑毅恒, 等. 洛阳传统绿豆酸浆细菌群落组成分析和功能预测[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 369-379.
- [27] 陶祥婕, 胡萍. 复合菌种发酵黄浆水的风味品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 308-316.
- [28] Liu, W., Chen, M., Duo, L., Wang, J., Guo, S., Sun, H., et al. (2020) Characterization of Potentially Probiotic Lactic Acid Bacteria and Bifidobacteria Isolated from Human Colostrum. *Journal of Dairy Science*, **103**, 4013-4025. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17602>
- [29] 李涵, 李佳颖, 刘娜, 等. 基于 GC-O-MS 技术的植物肉风味特征及像真性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 247-258.
- [30] 郭小雨, 李梦丽, 张涛. 百香果发酵型果酒制备及其风味品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 290-299.