

郫县豆瓣发酵微生物与风味物质的研究进展

洋 汶, 徐嘉悦, 杨沛树, 兰云贵, 彭思嘉, 赵 阳, 赵彬媛, 杨 东, 赵 靓, 廖小军

Research Progress on Fermentation Microorganisms and Flavor Compounds in Pixian Broad Bean Paste

YANG Wen, XU Jiayue, YANG Peishu, LAN Yungui, PENG Sijia, ZHAO Yang, ZHAO Binyuan, YANG Dong, ZHAO Liang, and LIAO Xiaojun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024100112>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同品种蚕豆原料对郫县豆瓣品质的影响研究

Effect of Different Cultivars of Broad Bean on the Quality of Pixian Broad Bean Chili Paste

食品工业科技. 2024, 45(9): 72-82 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060090>

郫县豆瓣关键滋味组分的鉴定

Identification of Key Taste Components of Pixian Broad Bean Paste

食品工业科技. 2023, 44(21): 358-366 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020235>

基于GC-MS分析不同郫县豆瓣对复合调味料挥发性风味的影响

Analysis of the Effect of Different Pixian Bean Paste on the Volatile Flavor of Compound Seasoning Based on GC-MS

食品工业科技. 2023, 44(15): 264-274 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070340>

7种米香型白酒小曲微生物群落与挥发性风味物质的相关性

Correlation between Microbial Community and Volatile Flavor Substances in Seven Rice-flavored Baijiu Xiaogu

食品工业科技. 2025, 46(7): 140-150 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050122>

传统发酵食品中微生物多样性与风味形成之间关系及机制的研究进展

Research Progress on Relationship and Mechanism between Microbial Diversity and Flavor Development in Traditional Fermented Foods

食品工业科技. 2021, 42(9): 412-419 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070365>

酱腌菜中微生物及与产品风味品质关系研究进展

Research Progress of Microorganisms in Pickles and Their Relationship with Flavor and Quality of Products

食品工业科技. 2022, 43(14): 475-483 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070300>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

洋汶, 徐嘉悦, 杨沛树, 等. 郫县豆瓣发酵微生物与风味物质的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 21–31. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100112

YANG Wen, XU Jiayue, YANG Peishu, et al. Research Progress on Fermentation Microorganisms and Flavor Compounds in Pixian Broad Bean Paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 21–31. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100112

· 特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康 (客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡) ·

郫县豆瓣发酵微生物与风味物质的研究进展

洋 汶^{1,2}, 徐嘉悦¹, 杨沛树^{1,2}, 兰云贵³, 彭思嘉¹, 赵 阳^{1,2}, 赵彬媛³, 杨 东¹, 赵 靛^{1,2,*}, 廖小军¹
(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 国家果蔬加工工程技术研究中心, 农业农村部果蔬加工
重点实验室, 食品非热加工北京市重点实验室, 北京 100083;
2. 四川成都中农大现代农业产业研究院, 四川成都 610047;
3. 四川省郫县豆瓣股份有限公司, 四川成都 611732)

摘 要: 郫县豆瓣是典型的川菜风味调味品, 以其独特的甜辣风味和鲜艳色泽广受消费者喜爱。随着食品科技和生物技术的飞速发展, 对郫县豆瓣的研究不断深入, 涉及制作工艺、微生物群落、风味物质和营养活性成分等方面。在制作工艺方面, 研究者们致力于在保留传统风味的同时, 引入密封发酵技术和智能设备, 以推动郫县豆瓣生产的自动化和现代化; 微生物研究集中于郫县豆瓣在不同发酵阶段的微生物组成, 特别是细菌和真菌的优势菌群, 以及关键微生物如米曲霉 (*Aspergillus oryzae*)、耐盐酵母和乳酸菌在发酵过程中的作用及其对风味的影响; 在风味物质方面, 研究者们运用电子鼻和气质联用技术 (GC-MS) 等方法, 分析了郫县豆瓣的风味物质, 并探讨了不同品牌、原料和发酵时长对风味物质的影响; 此外, 最新研究发现郫县豆瓣中还含有抗氧化肽和降血压肽, 这对郫县豆瓣的功能性食品开发和健康价值评估具有重要意义。本文旨在综述郫县豆瓣在以上领域的研究进展, 并建议未来的研究应聚焦于生产标准化、工艺智能化、菌株优化和营养价值的深入研究, 以促进郫县豆瓣产业的持续创新与发展。

关键词: 郫县豆瓣酱, 制作工艺, 微生物群落, 风味物质, 营养活性成分

中图分类号: TS264.24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0021-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100112

本文网刊:



Research Progress on Fermentation Microorganisms and Flavor Compounds in Pixian Broad Bean Paste

YANG Wen^{1,2}, XU Jiayue¹, YANG Peishu^{1,2}, LAN Yungui³, PENG Sijia¹, ZHAO Yang^{1,2}, ZHAO Binyuan³,
YANG Dong¹, ZHAO Liang^{1,2,*}, LIAO Xiaojun¹

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research Centre for Fruit and Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory for Food Non-thermal Processing, Beijing 100083, China;

2. China Agriculture University-Sichuan Advanced Agricultural & Industrial Institute, Chengdu 610047, China;

3. Sichuan Pixian Douban Co., Ltd., Chengdu 611732, China)

Abstract: Pixian broad bean paste (PBBP), a quintessential condiment of Sichuan cuisine, is widely cherished by consumers for its unique sweet and spicy taste, as well as its vibrant color. With the rapid advancement of food science and biotechnology, research on PBBP is constantly deepening, covering areas such as manufacturing processes, microbial communities, flavor compounds, and nutritional bioactive components. In terms of manufacturing, researchers are

收稿日期: 2024-10-14

基金项目: 四川成都中农大现代农业产业研究院建设省市农业补助专项资金资助项目; 中国农业大学 2115 人才工程资助。

作者简介: 洋汶 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: yw17746758723@163.com。

* 通信作者: 赵靛 (1987-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: zhaoliang1987@cau.edu.cn。

committed to preserving the traditional flavor while incorporating sealed fermentation techniques and intelligent equipment to promote the automation and modernization of PBBP production. Microbial studies focus on the composition of microorganisms at different fermentation stages, particularly the dominant bacterial and fungal populations, as well as the roles of key microorganisms such as *Aspergillus oryzae*, salt-tolerant yeasts and lactic acid bacteria in the fermentation process and their impact on flavor. In flavor compounds, methods such as electronic noses and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) have been employed to analyze the flavor compounds of PBBP, and the effects of different brands, raw materials, and fermentation durations on these compounds have been discussed. Moreover, recent studies have discovered the presence of antioxidant and antihypertensive peptides in PBBP, which have significant implications for the development of functional foods and the assessment of health values. This review aims to summarize the research progress in these areas and suggests that future research should concentrate on the standardization of production, intelligent processing, strain optimization, and in-depth nutritional research to foster continuous innovation and development in the PBBP industry.

Key words: Pixian broad bean paste (PBBP); manufacturing process; microbial community; flavor compounds; nutritional bioactive components

郫县豆瓣,源自四川省成都市郫都区,是四川地理标志发酵食品,其传统酿造工艺被列入国家级非物质文化遗产保护项目^[1]。郫县豆瓣具有独特的发酵甜辣风味、鲜明的辣味、红褐色的色泽,是川菜核心调味品^[2],广泛应用于回锅肉、麻婆豆腐、水煮肉片等传统川菜的制作。随着川菜在全球的流行,郫县豆瓣的市场需求及价值不断增长,销售至中国、俄罗斯、日本、韩国等 80 多个国家和地区^[3]。2023 年,郫县豆瓣品牌价值已达到 661 亿元人民币,在调味品市场中具有显著的竞争力和发展潜力^[4]。

近年来,随着微生物组学、代谢组学等现代科学技术的发展,郫县豆瓣的研究呈现出多元化和深入化的趋势。研究领域从传统的发酵工艺优化扩展到了微生物群落多样性、风味物质、功能性成分剖析。Ding 等^[5]、谢思等^[6]和刘平等^[7]为郫县豆瓣设计了发酵罐和智能生产设备,为实现郫县豆瓣发酵工艺的智能化和现代化奠定了基础。现代技术如高通量测序和免培养法的应用,为解析豆瓣酱中复杂的微生物群落提供了新的视角^[8-9]。研究者们不仅阐明了发酵过程中微生物间的相互作用,还通过气相色谱-质谱联用技术等手段,揭示了乳杆菌属、葡萄球菌属、芽孢杆菌属、曲霉属等在塑造郫县豆瓣独特风味中的作用^[10-11],以及多肽、黄酮等对提升郫县豆瓣品质与

生物活性的显著贡献^[12-13]。

随着全球对传统发酵食品兴趣的增加,郫县豆瓣的市场潜力巨大,但其生产过程中的不稳定性、安全性问题以及营养价值的未充分挖掘仍是制约其发展的关键因素。通过深入研究,可以优化发酵工艺,提升产品品质,增强风味,并为传统发酵食品的现代化生产提供科学指导。此外,随着消费者对健康食品需求的增加,深入研究郫县豆瓣的生物活性成分,开发新型高生物活性产品,对于满足市场新需求、推动产业升级具有重要的应用价值。因此,本综述将为郫县豆瓣的科学研究和工业应用提供全面的参考,促进其在食品安全保障、风味品质提升及生物活性强化等方面的全面进步。

1 郫县豆瓣原料及制作工艺

郫县豆瓣是以蚕豆、红辣椒为主要原料,面粉和盐为辅料,通过微生物发酵形成的半固态调味品。蚕豆,亦称胡豆、佛豆或罗汉豆,其蛋白质含量极为丰富,高达 27.35%~35.71%^[14],是郫县豆瓣中主要的蛋白质来源。红辣椒,特别是色泽鲜艳、形态饱满的二荆条品种,为郫县豆瓣提供关键风味及鲜明的色泽。

根据 GB/T 20560-2006《地理标志产品郫县豆瓣》标准^[15],郫县豆瓣生产流程主要分为三个阶段:制酱醅(甜瓣子)、制椒醅(辣椒醅)和混合发酵

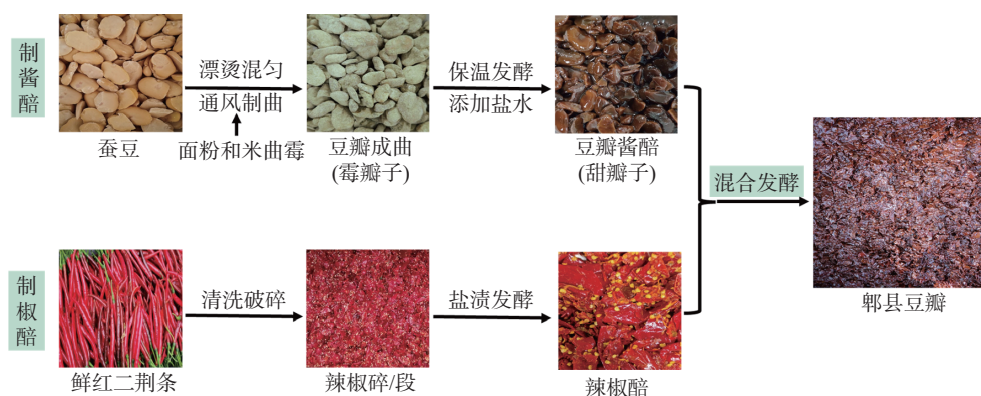


图 1 郫县豆瓣生产工艺流程图

Fig.1 Pixian broad bean paste production process flow diagram

(图 1)。a.制酱醅阶段包括制曲和保温发酵。经过脱壳、去杂的干蚕豆,浸泡蒸煮或在 95~100 ℃ 的水中漂烫冷却后,与面粉混合均匀,接入米曲霉,通风发酵至蚕豆长出黄霉,该阶段的蚕豆瓣通常被称为“霉瓣子”。在制曲过程中,米曲霉等微生物利用蚕豆瓣、面粉生长繁殖,发酵过程中微生物产生的酶促进豆瓣酱良好品质的形成^[16]。制曲后的霉瓣子被转入发酵池,加入一定浓度的盐水,在 30 ℃ 以上的温度条件下保温发酵。发酵过程中霉瓣子颜色和质地发生变化,最终转变为红褐色的“甜瓣子”。b.制椒醅阶段选用新鲜、无霉变、果实饱满、颜色鲜红的二荆条辣椒作为原料,经过挑选、去蒂、清洗后粉碎。粉碎后的辣椒按一定比例加入盐,充分拌匀后入池进行自然发酵。c.混合发酵过程是指将甜瓣子和辣椒醅按一定比例混合,加入食盐进行调配,混合发酵 3 个月及以上。混合发酵过程中需进行“晒,翻,露”操作,即白天暴晒蒸发水分,晚上调节湿度来保证发酵过程中曲霉生长及产酶,进而在发酵过程中维持酶、酸的含量稳定在一定范围内,最终保障产品的营养价值和品质^[17]。目前,不同企业在生产郫县豆瓣时所采用的工艺细节差异较大、缺乏标准的加工技术规程,因此产品批次质量及稳定性差异大。

传统郫县豆瓣的制作工艺在很大程度上依赖于气候条件和工匠的技艺,整个过程通常在开放环境中进行,存在生产易受外源性污染、产品质量难以控制、生产效率低等问题,为了解决这些问题,研究人员致力于在保持传统风味的基础上引入新技术与设备,推动郫县豆瓣的自动化和现代化生产^[16,18]。Ding 等^[5]的研究对比了密封罐发酵与传统开放式发酵的甜瓣子挥发性物质,发现密封发酵更有利于醇类、酯类等物质的生成,且所得的甜瓣子含有更丰富、浓度更高的芳香族挥发物,展现出更加浓郁的风味。此外,谢思等^[6]设计了 50 L 发酵罐的郫县豆瓣半封闭恒温发酵系统,将甜瓣子与辣椒醅按比例混合,在恒温 40 ℃ 条件下发酵 90 d。与传统发酵相比,恒温发酵产品在水分质量分数与色价上表现更佳,且能生成更多酯类物质,但在总酸、氨基酸态氮、还原糖质量分数及游离氨基酸含量方面表现欠佳^[19]。恒温发酵对真菌演替影响有所不同,对细菌的演替影响相对较小。该团队进一步调整了发酵参数,将发酵系统的恒温条件改进为梯度稳态温度场,此参数下得到的豆瓣在色泽、气味、质地和口感等方面更接近于传统郫县豆瓣^[16,20],这进一步改善了罐式发酵郫县豆瓣的风味品质^[21-22]。刘平等^[7]自主研发的“郫县豆瓣智能生产设备”配备了自动化操作界面和多种控制系统。与传统自然发酵相比,该设备在恒温 40 ℃ 下发酵 90 d 后所产豆瓣表现出多方面优势:含盐量较低、含水量和色价更高,总酸、有机酸和游离氨基酸含量升高,具有特征香气物质,进而缩短了发酵周期,提高了生产效率。智能化和现代化技术的发展和应

用将推动郫县豆瓣发酵工艺工业化,实现更高的标准化水平。

2 优势微生物

在郫县豆瓣的生产过程中,微生物的作用至关重要^[23],其风味、质量和营养成分的形成都离不开微生物。郫县豆瓣采用的是开放式发酵方式,自然环境中的微生物进入发酵体系,形成一个复杂且多样化的微生物群落,这不同于采用单一芽孢杆菌发酵的日本纳豆和韩国大酱^[24-26]。早期的研究方法主要依赖于传统的微生物学技术,包括培养基分离、显微镜观察和生化鉴定等。随着科技的发展,现代技术如高通量测序和免培养法为豆瓣酱中微生物的研究提供了更加全面和深入的分析手段,聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳技术(PCR-DGGE)可以细致地揭示微生物群落的微小差异。研究人员长期以来对郫县豆瓣的微生物进行了深入的研究,包括整个微生物群落的组成以及关键微生物个体的特征。

2.1 微生物组成

2.1.1 细菌 郫县豆瓣中的细菌群落不同发酵阶段的组成和数量变化是发酵过程的重要组成部分,各个发酵阶段的主要细菌种类如表 1 所示。在制曲阶段,植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)为优势菌;在保温发酵阶段,四联球菌属(*Micrococcus tetragenus*)、乳杆菌属(*Lactobacillus*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、链球菌属(*Streptococcus*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)、魏斯氏菌属(*Weissella*)、乳球菌属(*Lactococcus*)为优势菌;制椒醅阶段中四联球菌属、乳杆菌属、芽孢杆菌属、假单胞菌属为优势菌;混合发酵阶段中四联球菌属、乳杆菌属、芽孢杆菌属、假单胞菌属、片球菌属(*Pediococcus*)为优势菌。其中,四联球菌属、葡萄球菌属和芽孢杆菌属主要负责蛋白质和淀粉的分解;乳杆菌属通过产生有机酸降低发酵环境的 pH,从而抑制有害微生物的生长,促进有益微生物的繁殖,同时与酵母产生的酒精形成酯类物,有助于郫县豆瓣的成熟和风味形成。

赵红宇等^[8]研究揭示了郫县豆瓣发酵过程中,细菌群落从门到属水平表现出广泛的多样性,反映了其微生物生态系统的复杂性。关统伟等^[27-28]详细分析了发酵过程中的细菌群落,并确认了芽孢杆菌属的高丰度,同时首次揭示了片球菌和棒状杆菌的优势地位。张琦等^[29]研究发现木糖葡萄球菌全程参与发酵,而植物乳植杆菌主要参与制曲与保温发酵阶段,融合魏斯氏菌与乳酸乳球菌在保温发酵期显著增加。张小凤等^[30]发现保温发酵过程中细菌多样性呈现先增加后减少的趋势,其中乳杆菌属等四个菌属对发酵过程和产品质量影响显著。Li 等^[31]聚焦保温发酵阶段,发现四联球菌属和乳杆菌属等六大菌属在风味形成中起关键作用。Yu 等^[32]强调了三个发酵阶

表 1 郫县豆瓣生产过程中各阶段的优势微生物

Table 1 Advantageous microorganisms in each stage of the production process of Pixian broad bean paste

微生物类型	发酵阶段	优势菌属/种	鉴定方法	参考文献
细菌	制曲	植物乳植杆菌	PCR-DGGE	[29]
		植物乳植杆菌、融合魏斯氏菌、乳酸乳球菌	PCR-DGGE	[29]
		四联球菌属、乳杆菌属、葡萄球菌属、不动杆菌属、假单胞菌属、链球菌属	高通量测序	[31]
	保温发酵	乳杆菌属、明串珠菌属、四联球菌属、芽孢杆菌属	高通量测序	[30]
		四联球菌属、乳杆菌属、假单胞菌属	高通量测序	[32]
		芽孢杆菌属	高通量测序	[37]
	制椒醅	四联球菌属、乳杆菌属、芽孢杆菌属、假单胞菌属	高通量测序	[32]
		芽孢杆菌属、葡萄球菌属、大洋芽孢杆菌属	高通量测序	[37]
		那慕尔乳杆菌	PCR-DGGE	[29]
	混合发酵	四联球菌属、乳杆菌属、芽孢杆菌属、假单胞菌属、片球菌属	高通量测序	[32]
		芽孢杆菌属、嗜盐单胞菌属	PCR-DGGE	[34]
		芽孢杆菌属	高通量测序	[37]
	发酵全程	葡萄球菌属	PCR-DGGE	[29]
		葡萄球菌属、魏斯氏菌属、片球菌属、乳杆菌属、棒状杆菌属、芽孢杆菌属	高通量测序	[28]
真菌	制曲	米曲霉、鲁氏淀粉霉、米根霉	PCR-DGGE	[33]
	保温发酵	米曲霉、异常毕赤酵母、汉逊德巴利酵母	PCR-DGGE	[33]
		假丝酵母属、接合酵母属	高通量测序	[37]
	制椒醅	假丝酵母属、接合酵母属、曲霉属	高通量测序	[37]
		假丝酵母属、威克汉姆酵母属、毕赤酵母属	PCR-DGGE	[34]
	混合发酵	假丝酵母属、曲霉属、鲁氏酵母属、柯达酵母菌属	PCR-DGGE	[35]
		接合酵母属、曲霉属	高通量测序	[36]
		假丝酵母属、接合酵母属	高通量测序	[37]

注: 表格及全文中提到“乳杆菌属”均为未实行最新分类标准前的定义。

段中细菌群落的相似性,并指出了各阶段特有的细菌属,例如甜瓣子中的考克斯菌属(*Kocuria*)和辣椒醅的变形杆菌属(*Proteus*),为郫县豆瓣的微生物多样性研究增添了新的维度。郫县豆瓣的发酵是一个涉及多种细菌协同作用的复杂过程,不同发酵阶段的菌群变化对最终产品的品质和风味产生重要影响。

2.1.2 真菌 在郫县豆瓣的发酵过程中,主要的真菌群落包括曲霉属(*Aspergillus*)、假丝酵母属(*Candida*)、接合酵母属(*Zygosaccharomyces*)等(表 1)。尽管真菌种类和数量在郫县豆瓣的发酵过程中不及细菌丰富,但其动态变化对风味的形成具有显著影响。在制曲阶段,霉菌能够分泌出多种酶,如蛋白酶、肽酶、淀粉酶和糖化酶等,这些酶将原料中的蛋白质分解成多肽及氨基酸,同时将淀粉转化为三糖、双糖、葡萄糖等。这些转化产物是豆瓣独特风味形成的前体物质,也为后续微生物的生长提供了必要条件。保温发酵阶段,酵母开始将糖发酵成乙醇和二氧化碳。乙醇参与酯类的合成,并可以被氧化成有机酸,对豆瓣酱风味的形成起着重要作用。然而,发酵过程中也可能存在一些对豆瓣酱品质产生不良影响的真菌,如毛霉和青霉可能导致霉臭味,产毒黄曲和寄生曲霉可能产生有害的黄曲霉毒素 B₁[33]。

汪先丁等[33]利用 PCR-DGGE 技术,追踪了自然发酵过程中真菌群落的演替,观察到制曲阶段真菌多样性较高,而进入保温发酵阶段后则有所减少。在制曲时,米曲霉、鲁氏淀粉霉(*Amylomyces rouxii*)及

米根霉(*Rhizopus oryzae*)占主导;在制酱醅初期,米曲霉与异常毕赤酵母(*Pichia anomala*)、汉逊德巴利酵母(*Debaryomyces hansenii*)成为主导菌群。董丹等[34]揭示了发酵时间对郫县豆瓣真菌群落的影响,研究发现混合发酵 5 个月的郫县豆瓣中,假丝酵母属与威克汉姆酵母属(*Wickerhamomyces*)占据优势;而发酵至 10 个月时,毕赤酵母属(*Pichia pastoris*)占据主导地位。朱永清等[35]利用 PCR-DGGE 技术分析了不同品牌郫县豆瓣的真菌群落结构,揭示了不同品牌间真菌群落的共性和特异性,其中占优势的真菌种群是假丝酵母属、曲霉属、鲁氏酵母属(*Zygosaccharomyces rouxii*)、柯达酵母菌属(*Kodamaea*),并且曲霉属中的黄曲霉占比最高,这表明郫县豆瓣容易受到黄曲霉的污染。赵红宇等[9]则通过高通量测序技术深入探究了混合发酵过程中真菌群落的复杂变化,发现随着发酵时间的推移,格孢菌科与黑霉科丰度逐渐降低,而酵母科、类酵母科及毕赤酵母科则呈现先增后减的趋势。Zhang 等[36]的研究指出,在郫县豆瓣的混合发酵过程中,真菌群落组成在属水平上出现显著波动,接合酵母属和曲霉菌属是发酵过程中的主要菌属,且接合酵母属的相对丰度随发酵时间延长而增加,而曲霉菌属的丰度则逐渐减少。Lu 等[37]的研究强调了不同发酵阶段真菌群落的特异性,其中保温和混合发酵阶段主要由假丝酵母属和接合酵母属构成,而制椒醅阶段曲霉属的数量有所增加。这些研究揭示了,在制曲阶段,霉菌是主要的真菌,其中包

括米曲霉、米根霉等;在保温发酵、制椒醅和混合发酵阶段,假丝酵母和接合酵母等酵母为优势菌。郫县豆瓣发酵过程中真菌群落结构的动态变化与发酵阶段、时间和环境条件紧密相关,对产品风味和安全性具有重要影响;此外,这些菌群也可能与产品的原料有关,原料自身携带的微生物菌群不同,在发酵过程中也会影响优势真菌的菌群结构。

2.2 关键微生物

在深入探讨郫县豆瓣中微生物作用时,除微生物群落分析外,对关键微生物的个体研究也不可或缺。探究发酵过程中优势菌群的特性,进一步开展接种发酵来提升郫县豆瓣的风味与品质。

米曲霉是制曲阶段的关键微生物,能高效分泌淀粉酶与蛋白酶,促进大分子蛋白质降解为蛋白胨、多肽及多种氨基酸,从而极大丰富了豆瓣酱的营养成分与风味前体。目前豆瓣酱企业在制曲环节中普遍使用酱油发酵的米曲霉菌株(沪酿 3.042),但考虑到豆瓣酱与酱油工艺的差异,此类菌株的适用性尚存疑。针对豆瓣酱专用米曲霉的系统筛选工作有限,李从虎等^[38]从自然发酵的霉瓣子中筛选出一株具有高活力中性蛋白酶和 α -淀粉酶的米曲霉菌株---*A. oryzae* SZP17。邓维琴等^[39]的研究证明了自然发酵源霉菌 PCSM001 与 PCSM002 在产蛋白酶能力上的优越性,其制曲效果和成品口感均优于传统沪酿 3.042 菌株。市售曲精中米曲霉多以中性蛋白酶为主,郫县豆瓣发酵初期 pH 的急剧下降(至约 4.5)会抑制中性和碱性蛋白酶活性,从而影响蛋白质降解与最终风味^[40]。为此,研究者开始探索复合菌剂的应用策略。李峰等^[41]通过使用 ddQ-125 和 jcQ-93 菌种混合菌剂,显著提升了霉瓣子的综合酶活力与酶系平衡,促进了氨基酸态氮与还原糖的生成,为缩短发酵周期与规模化生产提供了技术支撑。Tang 等^[42]通过优化米曲霉 QM-6 与黑曲霉 QH-3 混合菌剂的接种条件,增强了酸性及中性蛋白酶活性。此外,亢乐等^[43]设计了一种包含米曲霉 LBM 30007、LBM 30008 及沪酿 3.042 的三菌株复合菌剂,该菌剂在提升水解酶活力、氨基酸态氮及鲜味氨基酸浓度方面表现出色,进一步验证了复合菌剂在豆瓣酱发酵中的潜力。

郫县豆瓣保温发酵和混合发酵阶段特征为高盐低氧环境,在此条件下,尽管霉菌受到抑制,其酶系仍能有效地催化反应,而酵母和乳酸菌则迅速增殖,成为主导微生物群^[11]。酵母与乳酸菌产生的代谢副产物,结合淀粉与蛋白质的水解产物,不仅塑造了豆瓣酱的独特风味,并有效抑制了杂菌生长,促进真菌毒素的降解。为优化传统发酵食品风味,常采用接种强化发酵微生物酵母菌、乳酸菌等的策略。胡廷等^[44]研究表明,在保温发酵阶段接种从甜瓣子中筛选的鲁氏接合酵母,能显著提升豆瓣酱的风味复杂度,丰富整体风味。刘超兰等^[45]在混合发酵阶段引入耐盐乳酸菌与耐盐酵母,不仅缩短了陈酿周期,还增强了杂

菌抑制的能力,并提高了酯化作用,改善了风味。张大凤等^[46]混合发酵阶段接种了复合菌剂(酿酒酵母、产朊假丝酵母、植物乳植杆菌及耐盐四联球菌),有效缩短了生产周期,并显著提高了豆瓣酱中的氨基氮含量和挥发性香气成分。此外,芽孢杆菌在豆瓣酱发酵过程中也起着重要作用;董丹等^[47]从不同发酵阶段的甜瓣子中筛选出了一株具有高淀粉酶活性的蜡样芽孢杆菌, Lu 等^[48]通过接种解淀粉芽孢杆菌,显著增加了豆瓣酱中的酸类、含硫化合物及吡嗪类风味物质,代谢组学与转录组学分析进一步揭示了解淀粉芽孢杆菌在盐胁迫下的转录调控机制及其对香气生成的影响,为豆瓣酱发酵工艺的优化提供了科学依据^[49]。以上的研究表明,在郫县豆瓣的保温发酵阶段接种鲁氏接合酵母能提升风味复杂度;在混合发酵阶段接种包含酵母和乳酸菌等的混合菌剂,不仅可以缩短生产周期还可以改善产品的风味。综上所述,通过接种特定的微生物,可以有效优化郫县豆瓣的发酵过程,提高产品质量,增强风味,并为传统发酵食品的现代化生产提供了科学指导。

3 关键风味物质

郫县豆瓣风味是评价豆瓣酱品质的重要因素,其风味物质包括非挥发性和挥发性两大类。两类风味物质共同作用,赋予了豆瓣酱独特的香气和口感,决定了产品的风味特征和整体质量。这些风味物质既有来源于原料(蚕豆与辣椒)自身、也包括发酵过程中米曲霉、耐盐微生物(如酵母、乳酸菌)的代谢物,以及通过非酶化学反应生成的化合物^[50]。此外,这些风味物质的变化也与郫县豆瓣发酵过程中微生物群落的演替密切相关。

在风味分析领域,气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术、液相色谱-质谱联用(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)技术、电子鼻和电子舌技术因其高灵敏度和高分辨率广泛应用于郫县豆瓣风味的研究^[51-54],如黄湛^[55]通过电子鼻及固相微萃取结合气-质联用(SPME-GC-MS)技术研究了 10 种不同品牌的一级传统郫县豆瓣的风味特征。贾洪锋等^[56-57]利用电子鼻和电子舌有效区分不同豆瓣酱的风味差异。此外由于单一组学技术难以全面解析郫县豆瓣风味体系的复杂性,构建豆瓣酱风味代谢图谱需依托多技术、多组学联合应用的策略,以实现风味成分的全面解析与精准表征^[58]。

3.1 非挥发性风味物质

非挥发性风味物质主要包括多肽、氨基酸、有机酸、脂肪酸等难挥发或不挥发的大分子物质(图 2),这些化合物共同塑造了郫县豆瓣独特的风味轮廓。

游离氨基酸,作为郫县豆瓣的核心呈味成分,赋予了豆瓣酱鲜、苦、甜等多重味觉体验。蚕豆作为关键原料,其蛋白质含量高达 27.35%~35.71%^[14],在郫县豆瓣发酵过程中,经微生物与酶促作用逐步降解为

中共检测出 70 种挥发性成分, 仅有 9 种为共有, 这表明不同品种的蚕豆对挥发性风味物质的影响不同^[14]。发酵过程挥发性风味物质变化丰富, 随着发酵时间从 2 个月延长至 8 个月, 甜瓣子中的挥发性风味物质逐渐增加, 共检测到 148 种物质, 以酯类、醇类、酸类及酚类为主, 但仅 34 种成分在各阶段均被检出^[76]。Lu 等^[77]研究表明, 混合发酵阶段是风味物质积累的关键阶段, 其中(E)-2-壬烯醛、壬烯醛、3-甲基-1-丁醇等 13 种关键化合物在此阶段积累, 而这些风味物质主要来自辣椒原料, 蚕豆原料仅贡献 1-辛烯-3-醇。此外也有研究表明郫县豆瓣中挥发性风味成分呈现先增加后减少的趋势, 制曲阶段对挥发性成分贡献小, 而制酱醅阶段则是挥发性成分积累的主要时期, 研究还指出椒醅在混合发酵前期对风味物质的贡献较大, 但后期过多椒醅会使部分挥发性物质浓度降低^[52]。

3.3 微生物演替对风味物质的影响

郫县豆瓣的风味与其微生物群落密切相关, 这些微生物群落影响着游离氨基酸、有机酸和挥发性风味物质等关键风味成分。研究发现, 郫县豆瓣主要风味物质的变化与微生物群落的演替过程息息相关, 且二者之间存在明显的相关性: 在制酱醅阶段, 米曲霉在真菌中占据主导地位, 通过其分泌的酶系(包括蛋白酶、肽酶和淀粉酶等)能有效分解蚕豆中的蛋白质和复杂碳水化合物, 转化为多肽、氨基酸和葡萄糖等小分子, 为豆瓣酱提供丰富的风味前体, 并为后续微生物活动奠定基础^[78-79]; 在细菌群体中, 克雷伯氏菌属、葡萄球菌属、乳杆菌属和四联球菌属与总酸和 pH 之间具有较高的相关性, 而氨基酸态氮和还原糖与四联球菌属、明串珠菌属和乳杆菌属之间呈现出较强的相关性^[11]。在制椒醅阶段, 总酸与 pH 显著关联于乳杆菌属与葡萄球菌属, 还原糖则展现出与乳杆菌属及不可培养细菌间较强的相关性; 至于氨基酸态氮的动态变化, 则与乳杆菌属、克雷伯氏菌属及葡萄球菌属的群落构成存在高度的关联性^[11]。进入混合发酵期后, 环境条件转变为高盐低氧, 这抑制了霉菌的增殖, 但霉菌遗留的酶活仍在持续发挥作用; 在这一阶段, 芽孢杆菌属、乳杆菌属和酵母菌属等微生物开始占据主导地位^[11], 并展现各自的独特功能。芽孢杆菌属表现出强大的淀粉降解能力, 并且与具有浓郁酱油香味的 3-(甲硫基)丙醛密切相关^[23,79]; 酵母菌属则将糖类转化为乙醇与二氧化碳, 乙醇不仅参与风味酯类的构建, 还能进一步氧化生成有机酸; 乳杆菌属和明串珠菌属的增加能够促进柠檬酸等有机酸的生成^[36], 这不仅影响了郫县豆瓣的风味, 还降低了发酵体系的 pH, 抑制了有害微生物的生长, 促进了有益菌群的增殖, 并与酵母菌属产生的乙醇反应生成风味酯类; 明串珠菌属与 2,5-二甲基吡嗪、2,3,5,6-四甲基吡嗪呈正相关, 志贺氏杆菌与异戊醇、丝氨酸、天冬酰胺、谷氨酸和天冬氨酸呈正相关^[23]。这些微生物

的协同作用推动了豆瓣酱的发酵成熟, 并形成了其独特的风味。

4 生物活性成分

发酵豆制品经微生物作用后, 展现出显著的抗氧化、降血压、降胆固醇、调节血糖及抗癌等生物活性。豆豉^[80]、腐乳^[81]、味噌^[82]等发酵豆制品, 均已被证实具有优越的抗氧化性能。郫县豆瓣作为传统调味品具有一定的生物活性, 在抗氧化等功能方面展现出潜力, 但对于郫县豆瓣中抗氧化活性成分的深入研究尚不充分, 有待进一步的探索和发掘。

袁旭等^[13]对市售的 10 种郫县豆瓣进行研究, 发现它们具有较高的抗氧化性, 且黄酮和多酚为主要的抗氧化物质。此外, 对混合发酵期 8 个不同时间节点的郫县豆瓣的抗氧化性进行检测, 结果表明抗氧化活性随着发酵时间的延长呈先增加后降低的趋势, 这与黄酮等多酚含量变化一致, 同时这也表明长时间的发酵不利于保持郫县豆瓣的抗氧化性^[17]。

郫县豆瓣作为高蛋白发酵食品, 富含多肽成分。这些多肽不仅丰富了豆瓣酱的风味特征, 还具备重要的生物活性, 但目前对这方面的研究还相对有限。李铭洋^[83]从郫县豆瓣中鉴定出 RGLSK、NKGPR、DNLLN 和 TPCPPQ 等新型生物活性肽, 其中 RGLSK 与 TPCPPQ 分别展现出强大的血管紧张素转换酶(ACE)抑制活性和抗氧化活性; Lin 等^[84]又在郫县豆瓣中发现了 VSRRFIYYL、SPAIPLP 等 7 个抗氧化肽, 并阐明了这些肽的抗氧化机制(表 2)。综上所述, 现有研究揭示了郫县豆瓣在 ACE 抑制活性和抗氧化活性方面的潜力, 其 ACE 抑制活性主要归功于生物活性肽的贡献, 而抗氧化性能则与多酚、黄酮及特定抗氧化肽紧密相关。这些发现为郫县豆瓣在健康、功能提升及高附加值应用方面奠定了科学基础。

表 2 郫县豆瓣中的生物活性肽

Table 2 Active peptide in Pixian broad bean paste

样品来源	多肽序列	活性	参考文献
四川省成都市 某郫县豆瓣公司	RGLSK	ACE抑制活性、抗氧化性	[83]
	NKGPR	ACE抑制活性、抗氧化性	
	DNLLN	ACE抑制活性、抗氧化性	
	TPCPPQ	ACE抑制活性、抗氧化性	
	VSRRFIYYL	抗氧化性	[84]
	SPAIPLP	抗氧化性	
	PVPPPGG	抗氧化性	
	KKDGYWWAKFK	抗氧化性	
	LAWY	抗氧化性	
	LGFMQF	抗氧化性	
	LPGCP	抗氧化性	

5 结论与展望

本文综述了郫县豆瓣的加工工艺, 重点探讨了生产过程中微生物群落的变化、豆瓣酱的风味特征及其生物活性。随着社会的发展, 消费者对调味品

质的要求日益提高,市场对精细化和标准化的需求不断增长。未来的研究应聚焦于生产标准化、工艺智能化、菌株优化和生物活性的深入研究,以促进郫县豆瓣产业的持续创新与发展。

a.制定标准。郫县豆瓣的标准化建设尚需完善,现有的标准体系仅包括四份文件,其中一份为国家推荐性标准,其余为行业或团体标准,缺少豆瓣酱生产技术规程标准。为提升产品质量一致性和市场竞争力,需完善豆瓣酱标准体系,规范生产流程,减少质量波动,推动行业规范化、专业化发展,确保产品安全、可靠、品质稳定。

b.筛选专用酿造菌株,创制自动化与智能化的生产工艺。传统自然发酵的郫县豆瓣受天气和人工操作影响较大,开放式发酵也容易引入污染。此外,企业仍然依赖于传统的接种方法,使用纯种米曲霉沪酿3.042作为主要的发酵菌株进行接种发酵。因此,为满足高品质产品需求,需系统深入研究菌株,筛选和优化适合郫县豆瓣生产的菌株,探索菌株间的协同发酵作用,以及研究新型菌株在提升风味、营养价值和安全性方面的潜力。郫县豆瓣的加工工艺需要逐步实现智能化和自动化,如密封发酵和智能设备发酵,以提高产品质量和产量,促进产业的升级和现代化,满足市场需求。

c.开发新型高生物活性的郫县豆瓣产品。随着消费者对食品需求的多元化升级,食品的营养价值与健康效益成为郫县豆瓣创新的新趋势。目前,豆瓣酱工艺改良主要集中于减盐技术,而活性肽、黄酮等生物活性成分的挖掘相对滞后。因此,我国需深入研究豆瓣酱的肽组成成分的形成机制、动态变化过程,建立多肽功能评估体系,开发创新技术工艺,以推动产业高质量发展,引领行业进入新阶段。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 曾雪晴.豆瓣酱发酵过程中生物胺及理化指标的变化研究[D].重庆:西南大学,2020. [ZENG X Q. Changes of biogenic amines and physicochemical indexes of chili-horsebean paste during fermentation[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.]
- [2] ZHU Y, HUANG J, ZHANG Z, et al. Geography and similarity of regional cuisines in China[J]. Plos One, 2013, 8(11): e79161.
- [3] 蒋浩然,李莹.“川菜之魂”郫县豆瓣的品牌之路[J].中国品牌,2019(5): 70-72. [JIANG H R, LI Y. "Soul of Sichuan cuisine" Pixian Douban brand road[J]. China Brand, 2019(5): 70-72.]
- [4] 高万鹏,徐良:十年创新赋能郫县豆瓣[J].中国品牌,2024(6): 74-75. [GAO W P. Xu Liang: Ten years of innovation empowering Pixian Douban[J]. China Brand, 2024(6): 74-75.]
- [5] DING W, LIU Y, PENG C, et al. Characterization of volatile compounds between industrial closed fermentation and traditional open fermentation Doubanjiang-meju[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(8): 2067-2077.
- [6] 谢思,赵晓燕,杨舒郁,等.郫县豆瓣自然与恒温后熟发酵工艺对比分析[J].食品科学,2020,41(10): 138-144. [XIE S, ZHAO X Y, YANG S Y, et al. Comparative analysis of natural and thermostatic post-fermentation processes for Pixian broad-bean paste[J]. Food Science, 2020, 41(10): 138-144.]
- [7] 刘平,王雪梅,向琴,等.郫县豆瓣智能后发酵工艺优化及品质分析[J].食品科学,2020,41(22): 166-176. [LIU P, WANG X M, XIANG Q, et al. Optimization of intelligent post-fermentation and quality analysis of Pixian broad-bean paste[J]. Food Science, 2020, 41(22): 166-176.]
- [8] 赵红宇,徐炜楨,杨国华,等.基于高通量测序的郫县豆瓣后发酵期细菌多样性研究[J].食品科学,2017,38(10): 117-122. [ZHAO H Y, XU W Z, YANG G H, et al. Bacterial community analysis of pixian soybean paste during postfermentation by high-throughput sequencing[J]. Food Science, 2017, 38(10): 117-122.]
- [9] 赵红宇,徐炜楨,杨国华,等.基于高通量测序的郫县豆瓣后发酵期真菌演替变化分析[J].食品科学,2017,38(16): 51-56. [ZHAO H Y, XU W Z, YANG G H, et al. Fungal community analysis by high-throughput sequencing in Pixian soybean paste during post-fermentation[J]. Food Science, 2017, 38(16): 51-56.]
- [10] LIU P, XIANG Q, SUN W, et al. Correlation between microbial communities and key flavors during post-fermentation of Pixian broad bean paste[J]. Food Research International, 2020, 137: 109513.
- [11] 于松峰.传统豆瓣辣椒酱发酵过程细菌群落演替及其与风味物质变化的对应分析[D].天津:天津科技大学,2021. [YU S F. The analysis of bacterial community succession and the correspondence of flavor compounds change during the fermentation process of traditional broad bean paste with chili[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.]
- [12] LI M, FAN W, XU Y. Identification of angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitory and antioxidant peptides derived from Pixian broad bean paste[J]. LWT, 2021, 151: 112221.
- [13] 袁旭,伍小宇,李伟丽,等.郫县豆瓣的营养、多酚含量与抗氧化活性评价[J].食品与发酵工业,2018,44(9): 270-274. [YUAN X, WU X Y, LI W L, et al. Evaluation of nutrition, polyphenols and their antioxidant activities in Pixian bean paste[J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(9): 270-274.]
- [14] 陈相杰.不同品种蚕豆发酵郫县豆瓣甜瓣子品质差异探究[D].雅安:四川农业大学,2021. [CHEN X J. Study on quality difference of broad bean mash of Pixian bean paste fermented by different varieties of broad bean[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2021.]
- [15] 兰林彬,郭宪荣,杨友刚,等.地理标志产品 郫县豆瓣[Z].北京:中国标准出版社,2017(2017). [LAN L B, GUO X R, YANG Y G, et al. Geographical indication product Pixian bean paste[Z]. Beijing: China Standard Press, 2017(2017).]
- [16] DING W, YE X, ZHAO X, et al. Fermentation characteristics of Pixian broad bean paste in closed system of gradient steady-state temperature field[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131560.
- [17] 古丽.郫县豆瓣重金属及感官、抗氧化研究[D].成都:西华大学,2022. [GU L. Analysis of heavy metals and antioxidant in Pixian soybean paste combine with electronic-nose and electronic-tongue[D]. Chengdu: Xihua University, 2022.]
- [18] 孙文佳,吴茜,张任虎,等.郫县豆瓣工艺技术研究现状与产业发展探讨[J].中国酿造,2022,41(12): 22-25. [SUN W J, WU X, ZHANG R H, et al. Research status and industrial development of Pixian broad bean paste technology[J]. China Brewing, 2022, 41(12): 22-25.]

- [19] DING W, ZHAO X, XIE S, et al. Dynamics and correlation of microbial community and flavor in Pixian Douban fermented with closed process of constant temperature[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(10): 4142–4153.
- [20] DING W, LIU Y, ZHAO X, et al. Characterization of volatile compounds of Pixian Douban fermented in closed system of gradient steady-state temperature field[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(6): 2862–2876.
- [21] LIU Y, ZHANG Y, SHI Y, et al. Flavor quality evaluation of Pixian Douban fermented in the closed system of multi-scale temperature and flow fields[J]. *LWT*, 2022, 163: 113598.
- [22] YE X, LIU Y, PENG C, et al. Contribution of microbial communities to flavors of Pixian Douban fermented in the closed system of multi-scale temperature and flow fields[J]. *LWT*, 2023, 173: 114188.
- [23] LIN H, BI X, ZHOU B, et al. Microbial communities succession and flavor substances changes during Pixian broad-bean paste fermentation[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101053.
- [24] ALLWOOD J G, WAKELING L T, BEAN D C. Fermentation and the microbial community of Japanese koji and miso: A review[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(6): 2194–2207.
- [25] KWON D Y, CHUNG K R, JANG D J. The history and science of Chongjukjang, a Korean fermented soybean product[J]. *Journal of Ethnic Foods*, 2019, 6(1): 5.
- [26] 郑鹏飞. 郫县豆瓣蚕豆醅组合发酵菌剂的理性构建及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHENG P F. Rational construction and application of the combined starter of Pixian Douban broad bean meju[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [27] 关统伟, 王鹏昊, 邓奥宇, 等. 郫县豆瓣发酵过程可培养细菌多样性及其演化分析[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(4): 22–27. [GUAN T W, WANG P H, DANG A Y, et al. Phylogenetic diversity and change of culture-dependent bacteria of Pixian bean paste during fermentation processes[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(4): 22–27.]
- [28] 关统伟, 向慧平, 王鹏昊, 等. 基于高通量测序的郫县豆瓣不同发酵期细菌群落结构及其动态演替[J]. *食品科学*, 2018, 39(4): 106–111. [GUAN T W, XIANG H P, WANG P H, et al. Dynamic succession of bacterial community structure during fermentation process of Pixian bean paste analyzed by high throughput sequencing[J]. *Food Science*, 2018, 39(4): 106–111.]
- [29] 张琦, 汪先丁, 杨虎, 等. 郫县豆瓣自然发酵过程中细菌群落结构的变化[J]. *食品与发酵科技*, 2010, 46(6): 16–18, 35. [ZHANG Q, WANG X D, YANG H, et al. Chang of bacterial community of Pixian bean paste during fermentation processes[J]. *Food and Fermentation Technology*, 2010, 46(6): 16–18, 35.]
- [30] 张小凤, 胡涛, 于松峰, 等. 甜瓣子发酵过程细菌菌群与发酵过程的对应关系分析[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(10): 159–164. [ZHANG X F, HU T, YU S F, et al. Corresponding relations analysis between bacterial community and Tian-banzi fermentation process[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(10): 159–164.]
- [31] LI Z, RUI J, LI X, et al. Bacterial community succession and metabolite changes during Doubanjiang-meju fermentation, a Chinese traditional fermented broad bean (*Vicia faba* L.) paste[J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 534–542.
- [32] YU S, SONG J, HU T, et al. Unraveling the core functional bacteria and their succession throughout three fermentation stages of broad bean paste with chili[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(4): 874–885.
- [33] 汪先丁, 刘敏, 高鹏, 等. 郫县豆瓣自然发酵过程中真菌群落的演替及黄曲霉毒素 B1 的消长[J]. *食品科学*, 2012, 33(11): 142–146. [WANG X D, LIU M, GAO P, et al. Succession of fungal microflora and change of aflatoxin B1 during fermentation of Pixian horsebean paste[J]. *Food Science*, 2012, 33(11): 142–146.]
- [34] 董丹, 关统伟, 赵辉平, 等. 两个不同发酵时期豆瓣中微生物多样性的差异对比[J]. *中国酿造*, 2014, 33(11): 55–58. [DONG D, GUAN T W, ZHAO H P, et al. Differences in microbial diversity at two different fermentation stages of soybean paste[J]. *China Brewing*, 2014, 33(11): 55–58.]
- [35] 朱永清, 李治华, 李华佳, 等. 基于 PCR-DGGE 分析不同品牌郫县豆瓣酱真菌多样性[J]. *食品科学*, 2017, 38(2): 104–108. [ZHU Y Q, LI Z H, LI H J, et al. Analysis of fungal diversity of different commercial brands of Pixian broad bean paste using PCR-DGGE method[J]. *Food Science*, 2017, 38(2): 104–108.]
- [36] ZHANG L, CHE Z, XU W, et al. Dynamics of physicochemical factors and microbial communities during ripening fermentation of Pixian Doubanjiang, a typical condiment in Chinese cuisine[J]. *Food Microbiology*, 2020, 86: 103342.
- [37] LU Y, TAN X, LÜ Y, et al. Physicochemical properties and microbial community dynamics during Chinese horse bean-chili-paste fermentation, revealed by culture-dependent and culture-independent approaches[J]. *Food Microbiology*, 2020, 85: 103309.
- [38] 李从虎, 郑佳, 谢菲, 等. 郫县豆瓣曲霉的筛选、分子鉴定及其酶学性质的研究[J]. *中国酿造*, 2010(5): 30–34. [LI C H, ZHENG J, XIE F, et al. Screening, molecular classification of *Aspergillus* in Pixian horse-bean and its enzymatic characteristics[J]. *China Brewing*, 2010(5): 30–34.]
- [39] 邓维琴, 陈功, 张其圣, 等. 传统郫县豆瓣酱中高产蛋白酶曲霉的筛选及应用[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(9): 2272–2281. [DENG W Q, CHEN G, ZHANG Q S, et al. Screening and application of high yield protease fungus from traditional fermented Pixian broad bean paste[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(9): 2272–2281.]
- [40] 陈丽. 传统发酵豆酱制品菌群动态分析及功能菌的筛选[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2009. [CHEN L. Dynamic analysis of flora and screening of functional bacteria in traditional fermented soybean paste products[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2009.]
- [41] 李峰, 赵萍, 周昌豹, 等. 郫县豆瓣高酶活米曲霉选育鉴定及复合菌制曲改善酶系组成研究——郫县豆瓣复合菌制曲改善酶系组成研究[J]. *中国酿造*, 2012, 31(12): 30–32. [LI F, ZHAO P, ZHOU C B, et al. Pixian soybean paste compound bacteria starter-making improve enzyme system composition research[J]. *China Brewing*, 2012, 31(12): 30–32.]
- [42] TANG J, CHEN T, HU Q, et al. Improved protease activity of Pixian broad bean paste with cocultivation of *Aspergillus oryzae* QM-6 and *Aspergillus niger* QH-3[J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2020, 44: 33–40.
- [43] 亢乐, 张丽杰, 徐岩. 优质米曲霉筛选及复合菌剂构建提升郫县豆瓣蚕豆曲品质[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(22): 18–25. [KANG L, ZHANG L J, XU Y. Generation of high-quality *Aspergillus oryzae* and thus mixed strains to improve the character of broad bean meju of Pixian Douban[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(22): 18–25.]
- [44] 胡廷, 范智义, 张其圣, 等. 酵母菌强化发酵郫县豆瓣甜瓣子的研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(7): 76–80, 85. [HU T, FAN Z Y, ZHANG Q S, et al. Study on the enhanced fermentation of Pixian

- an broad bean by yeast[J]. *China Seasoning*, 2020, 45(7): 76–80, 85.]
- [45] 刘超兰, 黄著, 彭熙敏, 等. 乳酸菌和酵母共培养技术缩短郫县豆瓣酱陈酿期的应用研究[J]. *中国酿造*, 2009(3): 105–109. [LIU C L, HUANG Z, PENG X M, et al. Reduction of ripening period of Pixian bean chili pastes by coculturing of salt-tolerance *Lactobacillus* and yeasts[J]. *China Brewing*, 2009(3): 105–109.]
- [46] 张大凤, 邹艳玲, 李明元. 郫县豆瓣生产用复合微生物菌剂的研制[J]. *中国调味品*, 2012, 37(7): 62–64, 68. [ZHANG D F, ZOU Y L, LI M Y. Development of compound microorganism bacterium agent using in the production of Pixian bean paste[J]. *China Condiment*, 2012, 37(7): 62–64, 68.]
- [47] 董丹, 陈燕, 关统伟, 等. 豆瓣发酵过程中淀粉酶高产菌株的筛选及其酶活力的测定[J]. *中国酿造*, 2015, 34(2): 68–71. [DONG D, CHEN Y, GUAN T W, et al. Screening of high yield amylase-producing strains from fermented soybean paste and the enzyme activity determination[J]. *China Brewing*, 2015, 34(2): 68–71.]
- [48] LU Y, YANG L, YANG G, et al. Bio-augmented effect of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Candida versatilis* on microbial community and flavor metabolites during Chinese horse bean-chili-paste fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 351: 109262.
- [49] LIN H, LIAO S, ZHOU Z, et al. Investigation into the potential mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens* in the fermentation of broad bean paste by metabolomics and transcriptomics[J]. *Food Research International*, 2024, 183: 114202.
- [50] 余浪, 阙建全. 传统豆瓣的研究进展[J]. *中国调味品*, 2008(5): 26–31. [YU L, KAN J Q. The research progress on traditional broad-bean sauce[J]. *China Condiment*, 2008(5): 26–31.]
- [51] 李伟丽, 袁旭, 刘玉淑, 等. 郫县豆瓣酱风味成分的全二维气相色谱-飞行时间质谱分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(6): 261–265. [LI W L, YUAN X, LIU Y S, et al. Comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry analysis of flavor components in Pixian bean paste[J]. *Food Science*, 2019, 40(6): 261–265.]
- [52] 林洪斌, 毕小鹏, 方佳兴, 等. 郫县豆瓣挥发性物质变化规律及特征香气物质形成机理[J]. *食品科学*, 2020, 41(2): 259–266. [LIN H B, BI X P, FANG J X, et al. Pattern of variations in volatile substances and formation mechanism of characteristic aroma substances in Pixian broad-bean paste[J]. *Food Science*, 2020, 41(2): 259–266.]
- [53] 刘平, 黄湛, 车振明, 等. 采用同时蒸馏萃取-气质联用技术分析不同等级传统郫县豆瓣中挥发性风味物质[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(4): 65–71, 75. [LIU P, HUANG Z, CHE Z M, et al. Analysis of flavor components from the different grade traditional Pixian bean pastes by simultaneous distillation-extraction and GC-MS[J]. *Journal of Xihua University·Natural Science*, 2014, 33(4): 65–71, 75.]
- [54] 冯军, 陈海涛, 黄明泉, 等. 不同品牌郫县豆瓣酱挥发性成分的比较研究[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(3): 17–22. [FENG J, CHEN H T, HUANG M Q, et al. Comparative study on volatile components of Pixian bean paste from different brands[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2010, 28(3): 17–22.]
- [55] 黄湛. 郫县豆瓣特征香气的鉴定及其形成规律研究[D]. 成都: 西华大学, 2016. [HUANG Z. Identification and formation of characteristic aroma compounds from Pixian soybean paste[D]. Chengdu: Xihua University, 2016.]
- [56] 贾洪锋, 何江红, 袁新宇, 等. 电子鼻在不同豆瓣产品识别中的应用[J]. *食品科学*, 2011, 32(12): 178–182. [JIA H F, HE J H, YUAN X Y, et al. Quality analysis of Sichuan hot bean sauce using electronic nose[J]. *Food Science*, 2011, 32(12): 178–182.]
- [57] 贾洪锋, 周凌洁, 张森, 等. 电子舌在豆瓣区分识别中的应用[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(4): 177–179, 183. [JIA H F, ZHOU L J, ZHANG M. Application of electronic tongue on Douban discrimination[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(4): 177–179, 183.]
- [58] 邓威, 韩蓬慧, 王美淇, 等. 传统豆酱微生物群落演替及风味物质变化的研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(2): 213–220. [DENG W, HAN F H, WANG M Q, et al. Research progress of microbial community succession and flavor substance changes of traditional soybean paste[J]. *China Condiment*, 2023, 48(2): 213–220.]
- [59] LIN H, YU X, FANG J, et al. Flavor compounds in Pixian broad-bean paste: Non-volatile organic acids and amino acids[J]. *Molecules*, 2018, 23(6): 1299.
- [60] LIU PING, QIN XIANG, GONG CHEN. Consumer preference of Chinese traditional fermented fava pastes[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 2469–2490.
- [61] RHYU M R, KIM E Y. Umami taste characteristics of water extract of Doenjang, a Korean soybean paste: Low-molecular acidic peptides may be a possible clue to the taste[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 1210–1215.
- [62] YANG D, LI C, LI L, et al. Taste mechanism of umami peptides from Chinese traditional fermented fish (Chouguiyu) based on molecular docking using umami receptor T1R1/T1R3[J]. *Food Chemistry*, 2022, 389: 133019.
- [63] ZHUANG M, LIN L, ZHAO M, et al. Sequence, taste and umami-enhancing effect of the peptides separated from soy sauce[J]. *Food Chemistry*, 2016, 206: 174–181.
- [64] LI W, LIU Y, YE Y, et al. Chemical profiling and metabolic mechanism of Pixian Doubanjiang, a famous condiment in Chinese cuisine[J]. *LWT*, 2021, 145: 111274.
- [65] ZHAO J, LIAO S, BI X, et al. Isolation, identification and characterization of taste peptides from fermented broad bean paste[J]. *Food & Function*, 2022, 13(16): 8730–8740.
- [66] ZHAO J, LIAO S, HAN J, et al. Revealing the secret of umami taste of peptides derived from fermented broad bean paste[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(11): 4706–4716.
- [67] ZHAO J, XIE Y, XIANG Y, et al. Taste mechanism of umami molecules from fermented broad bean paste based on in silico analysis and peptidomics[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(16): 9317–9329.
- [68] KONG Y, ZHANG L L, ZHANG Y Y, et al. Evaluation of non-volatile taste components in commercial soy sauces[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1854–1866.
- [69] SHRUTI S, TAE B C, HAE-KYONG P, et al. Determination of non-volatile and volatile organic acids in Korean traditional fermented soybean paste (Doenjang)[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48: 2005–2010.
- [70] 熊骏. 云南传统发酵豆豉由来乳酸菌中主要有机酸的分析及其抑菌效果研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012. [XIONG J. Analysis of major organic acids from lactic acid bacteria isolated from Yunnan traditional fermented Douchi and study on bacteriostasis[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.]

- [71] 曾艳. 郫县豆瓣与红油郫县豆瓣理化风味与微生物差异性分析[D]. 成都: 西华大学, 2023. [ZENG Y. Physicochemical, flavor and microbial composition dynamic changes of traditional and commercial Pixian Doubanjiang[D]. Chengdu: Xihua University, 2023.]
- [72] 冉玉琴, 陈雨, 彭杰, 等. 郫县豆瓣后发酵过程中脂肪和脂肪酸代谢变化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 203–207, 212. [RAN Y Q, CHEN Y, PENG J, et al. Changes of fat and fatty acid metabolism in post-fermentation process of Pixian soybean paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(10): 203–207, 212.]
- [73] ZHANG G F, YIN X L, LI Y F, et al. Multivariate analysis on the evolution of flavor-related chemical contents during three-years ripening of Pixian Doubanjiang[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 106: 104219.
- [74] 蒋四强, 李雄波, 邓维琴, 等. 不同品种蚕豆发酵甜瓣子非挥发性风味物质对比分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 264–272. [JIANG S Q, LI X B, DENG W Q, et al. Comparative analysis of non-volatile flavor substances in fermented broad bean paste-meju from different broad bean cultivars[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 264–272.]
- [75] 王雪梅, 孙文佳, 李亚隆, 等. 不同产地鲜辣椒发酵郫县豆瓣的品质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 213–221. [WANG X M, SUN W J, LI Y L, et al. Quality analysis of Pixian broad-bean pastes made with fresh hot peppers from different producing areas[J]. Food Science, 2020, 41(10): 213–221.]
- [76] 董丹, 王猛, 车振明, 等. 甜瓣子发酵不同时期挥发性风味物质组成分析[J]. 中国酿造, 2015, 34(6): 139–144. [DONG D, WANG M, CHE Z M, et al. Analysis of volatile flavor components from different periods of sweet soybean paste[J]. China Brewing, 2015, 34(6): 139–144.]
- [77] LU Y, CHI Y, LÜ Y, et al. Evolution of the volatile flavor compounds of Chinese horse bean-chili-paste[J]. LWT, 2019, 102: 131–135.
- [78] MOJSOV K D. *Aspergillus* enzymes for food industries[M]. GUPTA V K, ed.//New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. Amsterdam: Elsevier, 2016: 215–222.
- [79] ZHAO G, HOU L, YAO Y, et al. Comparative proteome analysis of *Aspergillus oryzae* 3.042 and *A. oryzae* 100-8 strains: Towards the production of different soy sauce flavors[J]. Journal of Proteomics, 2012, 75(13): 3914–3924.
- [80] XU L, DU B, XU B. A systematic, comparative study on the beneficial health components and antioxidant activities of commercially fermented soy products marketed in China[J]. Food Chemistry, 2015, 174: 202–213.
- [81] HUANG Y H, LAI Y J, CHOU C C. Fermentation temperature affects the antioxidant activity of the enzyme-ripened sufu, an oriental traditional fermented product of soybean[J]. Journal of Bio-science and Bioengineering, 2011, 112(1): 49–53.
- [82] EL-SHENAWY N S, ABU Z A, AMIN G A. Preparation of different types of miso with mixture of starters and their effects on endogenous antioxidant of liver and kidney of mice[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2012, 96(1): 102–110.
- [83] 李铭洋. 郫县豆瓣酱 ACE 抑制肽和抗氧化肽的鉴定与活性机理探究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [LI M Y. Identification and active mechanism of ACE inhibitory and antioxidant peptides in Pixian broad bean paste[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [84] LIN H, ZHAO J, XIE Y, et al. Identification and molecular mechanisms of novel antioxidant peptides from fermented broad bean paste: A combined in silico and in vitro study[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139297.