杨博文, 李雄波, 王芳, 等. *Zygosaccharomyces rouxii* 强化发酵对罐式发酵豆瓣酱品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 326−334. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050170

YANG Bowen, LI Xiongbo, WANG Fang, et al. Contribution of *Zygosaccharomyces rouxii* Enhanced Fermentation to the Quality of Tank-fermented Broad Bean Chili Paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 326−334. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050170

· 分析检测 ·

Zygosaccharomyces rouxii 强化发酵对罐式发酵豆瓣酱品质的影响

杨博文[1,2], 李雄波[1,2,+], 王　芳[3], 闵　星[3], 李　婷[1,2], 周浩宇[3], 蒋四强[1,2],
范智义[1,2], 张其圣[1,2], 李　恒[4], 邓维琴[1,2,*]

（1.四川省食品发酵工业研究设计院有限公司, 四川成都 611130;
2.食品微生物四川省重点实验室, 四川成都 611130;
3.成都扬名食品有限公司, 四川成都 611136;
4.四川省固态酿造技术创新中心, 四川泸州 646000）

摘　要: 为提升罐式发酵豆瓣酱产品品质，本研究考察了接种 *Zygosaccharomyces rouxii*，对 35 ℃ 恒温罐式发酵豆瓣酱的甜瓣子发酵阶段和豆瓣酱后熟发酵阶段的理化指标、游离氨基酸及挥发性风味化合物的影响。结果表明，在甜瓣子发酵阶段，以不接种的罐式发酵甜瓣子为对照组，强化组的总酸含量和氨基酸态氮含量逐渐增加，分别达到 1.52 g/100 g 和 0.85 g/100 g，相较于对照组分别提高了 10.14% 和 8.97%，但还原糖含量相较更低，只有对照组的 53.78%；游离氨基酸总量比对照组高 23.40%，尤其是谷氨酸含量提高 30.14%；总挥发性物质含量达到 290.67 mg/kg，远高于对照组甜瓣子的 144.92 mg/kg，其中以 9-十八碳烯酸乙酯等酯类物质为主，乙醇等醇类次之；在辣椒醅发酵过程中，总酸、氨基酸态氮、还原糖和以脯氨酸为主的游离氨基酸含量呈下降趋势，挥发性物质以酯类、醇类物质为主；在豆瓣酱后熟发酵过程中，强化组的豆瓣酱在发酵前期还原糖含量较低，后趋于一致，总挥发性物质达到 644.23 mg/kg，增加了 17.73%，其余理化指标差异较小。通过感官评价和风味分析，强化组的豆瓣酱在醇香、酸香、花香和果香方面具有明显提升。综上所述，接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 对罐式发酵甜瓣子各项品质指标影响较大，而对后熟发酵阶段理化指标影响相对较小，但风味物质明显增加。本研究结果对于提升豆瓣酱罐式发酵工艺具有重要指导意义，可有效解决罐式发酵豆瓣酱风味单一、产品品质下降等问题。

关键词: 郫县豆瓣, 罐式发酵, 强化发酵, 鲁氏接合酵母, 挥发性风味物质, 游离氨基酸
中图分类号: TS264.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0326−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050170　　本文网刊:

Contribution of *Zygosaccharomyces rouxii* Enhanced Fermentation to the Quality of Tank-fermented Broad Bean Chili Paste

YANG Bowen[1,2], LI Xiongbo[1,2,+], WANG Fang[3], MIN Xing[3], LI Ting[1,2], ZHOU Haoyu[3], JIANG Siqiang[1,2], FAN Zhiyi[1,2], ZHANG Qisheng[1,2], LI Heng[4], DENG Weiqin[1,2,*]

（1.Sichuan Food Fermentation Industry Research and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 611130, China;
2.Food Microbiology Key Laboratory of Sichuan Provincial, Chengdu 611130, China;
3.Chengdu Yangming Food Co., Ltd., Chengdu 611136, China;
4.Solid-state Brewing Technology Innovation Center of Sichuan, Luzhou 646000, China）

收稿日期: 2025−05−19　　+并列第一作者
基金项目: 中央引导地方科技发展专项资助（2024ZYD0252）; 成渝地区双城经济圈固态酿造技术创新联盟开放课题。
作者简介: 杨博文（1998−）, 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 微生物发酵, E-mail: 18224463713@163.com。
李雄波（1993−）, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 传统发酵食品研究与开发, E-mail: li1129531722@163.com。
*** 通信作者:** 邓维琴（1990−）, 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 传统发酵食品研究与开发, E-mail: dengweiqin77@163.com。

Abstract: In order to enhance the product quality of tank-fermented broad bean chili paste, this study investigated the effects of inoculating *Zygosaccharomyces rouxii* on the physicochemical indexes, free amino acids and volatile flavor compounds during the fermentation process of broad bean paste and the fermentation process of broad bean chili paste at a constant temperature of 35 ℃. The results showed that during the fermentation process of broad bean paste, taking the broad bean paste without inoculation as the control group, the enhanced fermentation group showed higher total acid content and amino acid nitrogen content of 1.52 g/100 g and 0.85 g/100 g, respectively. It increased by 10.14% and 8.97% respectively. The content of reducing sugar was only 53.78% of the control group in enhanced fermentation group. The total free amino acids increased by 23.40% compared to the control group, especially glutamic acid content increased by 30.14%. Furthermore, the relative content of volatile substances reached 290.67 mg/kg, which was much higher than that of the control group at 144.92 mg/kg. The dominated flavor compounds were esters and alcohols. During the fermentation of chili paste, the content of total acid, amino acid nitrogen, reducing sugar and free amino acid mainly proline showed a decreasing trend. Volatile substances were mainly esters and alcohols. During the fermentation process of broad bean chili paste, the enhanced group had lower reducing sugar content in the early stage, then tended to be consistent. Total volatile contents reached 644.23 mg/kg, which increased 17.73% compared to control group. Through sensory evaluation and flavor analysis, the broad bean chili paste of the enhanced group had significant enhancement in mellow, sour, floral and fruity. In conclusion, inoculation with *Zygosaccharomyces rouxii* had a big influence on the quality indexes of tank-fermented broad bean paste, while the effect on broad bean chili paste fermentation of physicochemical indexes was relatively small. However, it led to a marked increase in flavor compounds. This study results have important instructive significance for improving the tank fermentation process of broad bean chili paste, which can effectively solve the problems of weak flavor and product quality degradation of tank-fermented broad bean chili paste.

Key words: broad bean chili paste; tank fermentation; enhanced fermentation; *Zygosaccharomyces rouxii*; volatile flavour substances; free amino acids

郫县豆瓣传统制作技艺被列入第二批国家级非物质文化遗产名录。豆瓣酱凭借悠久的历史、鲜美的味道以及辣而不燥的独特风味，深受四川及周边地区民众喜爱，被誉为“川菜之魂”[1]。作为一种传统发酵调味品，郫县豆瓣的发酵过程包括蚕豆制曲、甜瓣子发酵、辣椒醅发酵，以及甜瓣子与辣椒醅混合后熟阶段[2−3]。然而，传统郫县豆瓣酱生产大多采用在发酵池或土缸开放式发酵的方式，容易受到生产环境污染，存在生产效率低、产品稳定性差、食品安全卫生难以保障等问题[4]。

近年来，众多学者开展了豆瓣酱酿造新工艺的研究与开发。Ding 等[4] 设计了一台可梯度控制温度的密闭发酵体系来制作郫县豆瓣酱，研究发现理化指标与传统开放式发酵的豆瓣酱接近，而挥发性物质总量明显增加，其风味特性和微生物组成也更为稳定。谢思等[5] 探究了不同发酵容器（玻璃发酵罐和晒缸）对豆瓣酱品质的影响，研究发现罐式发酵的样品总酸、还原糖、氨基酸态氮和游离氨基酸含量较低，但利于豆瓣酱水分和色价的保持。

罐式发酵能有效解决开放式发酵生产效率低和产品稳定性差等问题，但相对密闭的环境也会导致环境微生物参与发酵程度有限，成品存在关键呈味物质不足等问题[5−6]。为弥补罐式发酵的不足，强化发酵技术通过人工接种特定的微生物菌株，强化发酵过程，促进发酵效率、提高产品品质，已广泛应用于酱油、豆瓣以及黄酒等发酵食品的生产[7−8]。谭馨怡[9] 按照菌株生长特性和产酶能力筛选强化菌株，并应用于强化发酵豆瓣酱，结果发现氨基酸态氮、挥发性化合物和感官评分均明显提升。汪坤等[10] 研究发现接种嗜盐四联球菌和多变假丝酵母强化发酵的蚕豆酱中醇类和酯类等挥发性化合物含量明显提升。

由此可见，为解决现阶段豆瓣酱发酵工艺的不足，罐式发酵结合强化发酵技术制作豆瓣酱具有巨大潜力和广阔的应用前景，但目前两者结合研究的报道较少。基于此，本研究以团队前期从郫县豆瓣酱中筛选到的一株具有优秀产香能力的鲁氏接合酵母（*Zygosaccharomyces rouxii*）为强化发酵菌种[11−12]，考察强化发酵对豆瓣酱发酵过程中理化指标、游离氨基酸及挥发性风味物质的影响。旨在为豆瓣酱发酵工艺革新、产品品质提升提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

蚕豆曲、鲜辣椒　成都市郫都区某豆瓣酱大型生产企业提供；*Zygosaccharomyces rouxii*　本团队从郫县豆瓣酱中筛选，保藏于广东省微生物菌种保藏中心（保藏编号：CDMCC No.60616）；曲精　济宁玉园生物有限公司；醋酸钠、三乙胺、乙腈等色谱级试剂　天津市科密欧化学试剂有限公司；氨基酸标准品　美国 Sigma-Aldrich 公司；其他试剂均为分析纯。

ESJ200-4A 型分析天平　沈阳龙腾电子有限公司；GCMS-QP2010 气相色谱-质谱联用仪　日本岛津仪器公司；SPME 装置（50/30 μm, DVB/CAR/PDMS 萃取纤维）　美国 Supelco 公司；DB-WAX（60 m×0.25 mm, 0.25 μm）色谱柱、1260 Infinity II 高效液相色谱仪　美国安捷伦科技有限公司；Ultimate Amino Acid（4.6 mm×250 mm, 5 μm）色谱柱　月旭

科技(上海)股份有限公司; pHSJ-4F 型 pH 计　梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司; TGL-20bR 冷冻离心机　上海安亭科学仪器厂。

1.2　实验方法

1.2.1　郫县豆瓣制作工艺　参照李雄波等[1] 的制作工艺略有修改, 如图 1, 甜瓣子发酵按照蚕豆曲∶水∶盐=1∶1∶0.35(m/m/m)的比例混合均匀后装入密封发酵罐中在 35 ℃ 发酵 12 周, 并且每周搅拌一次; 其中强化组在发酵 3 周后按照 2%(V/W)的接种量接种鲁氏接合酵母(30 ℃ 培养 36 h, 活菌数约 8.0×10^7 CFU/mL), 其余条件对照组与强化组相同, 发酵期间前 6 周每周取样, 6~12 周每两周取样, 用于后续分析。辣椒醅制作是以干辣椒为原料, 清洗复水后剁碎, 按照复水后辣椒质量比 20% 的比例加盐, 装入密封发酵罐中进行盐渍发酵, 每周搅拌一次, 35 ℃ 发酵 14 周得到成熟椒醅, 取发酵前后的椒醅作为样品, 进行后续分析。最后将罐式发酵强化组和对照组甜瓣子分别与罐式发酵后的辣椒醅按 3:7 比例混合后, 置于密封发酵罐中 35 ℃ 条件下发酵 12 周, 每周搅拌一次, 制得豆瓣酱, 发酵期间前 6 周每周取样, 6~12 周每两周取样, 用于后续分析。

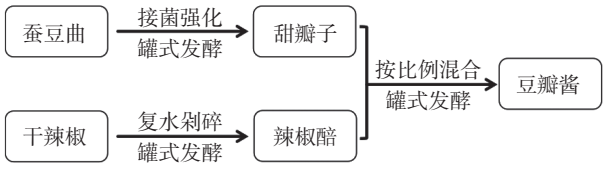


图 1　罐式发酵结合强化发酵技术制作豆瓣酱工艺路线

Fig.1　Tank fermentation combined with enhanced fermentation technology to produce broad bean chili paste process route

1.2.2　理化指标测定方法　氨基酸态氮按照 GB 5009.235- 2016《食品安全国家标准食品中氨基酸态氮的测定》中第一法酸度计法进行测定。总酸按照 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中第一法 pH 计电位滴定法进行测定。

还原糖测定采用 3,5-二硝基水杨酸法(DNS 法): 取一定量的样品放入研钵中, 研磨破碎, 称取 5 g 样品转移到 100 mL 的容量瓶中定容, 40 ℃ 水浴提取 30 min, 离心过滤, 作为待测液, 再配制葡萄糖标准溶液(0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mg/mL)。吸取待测液或标准溶液 2 mL, 加入 1.5 mL DNS 试剂, 放入沸水浴 5 min, 冷却至室温。在 540 nm 波长下用紫外可见光分光光度计测定吸光度, 并对照标准曲线(Y=0.7901X+0.0428, R^2=0.9992)进行分析[13]。

1.2.3　游离氨基酸含量的测定及分析方法　样品制备: 取不同发酵时间的甜瓣子、辣椒醅和豆瓣酱, 研磨破碎, 精确称取 1 g 上述破碎样品, 加入 9 mL 蒸馏水混合均匀, 30 ℃ 超声提取 30 min, 8000 r/min 离心 10 min, 取 100 μL 上清液或氨基酸标准品, 加入 200 μL 衍生试剂(乙腈∶三乙胺∶异硫氰酸苯酯=80∶10∶1, V/V/V), 混合均匀后静置 60 min, 再加入 2 mL 水和 1 mL 正己烷, 涡旋混合 1 min 后静置 10 min, 除去上层有机层后再次加入 1 mL 正己烷, 重复操作, 除去上层有机层, 水相过 0.22 μm 水系过滤膜后供液相分析[14]。

液相色谱条件: 色谱柱: Ultimate Amino Acid (4.6 mm×250 mm, 5 μm); 流速: 1.0 mL/min; 柱温: 40 ℃; 进样量: 10 μL; 紫外检测器检测波长 254 nm, 流动相 A: 0.1 mol/L 醋酸钠溶液-乙腈(93∶7, V/V), 流动相 B: 乙腈-水(80∶20, V/V), 洗脱程序如表 1 所示。

表 1　游离氨基酸梯度洗脱程序

Table 1　Free amino acid gradient elution procedure

流动相	时间(min)								
	0	11	14	29	32	35	42	45	60
A(%)	100	93	85	66	30	0	0	100	100
B(%)	0	7	15	34	70	100	100	0	0

1.2.4　挥发性物质的测定及分析方法　参照李雄波等[1] 挥发性物质的测定方法略有修改, 对发酵终点的对照组甜瓣子、强化组甜瓣子、辣椒醅、对照组豆瓣酱和强化组豆瓣酱的挥发性物质进行测定及分析。

样品处理: 称取研磨后的样品 2.0 g 置于 15 mL 固相萃取瓶中, 60 ℃ 中预热 2 min 后, 将萃取头插入萃取瓶中留置 50 min, 之后插入气化室进样口 250 ℃ 解析 5 min。

GC-MS 参数: 载气为氦气, 流速 1 mL/min; 起始温度 50 ℃, 以 10 ℃/min 升至 85 ℃, 再以 5 ℃/min 升至 100 ℃, 以 2.5 ℃/min 升至 175 ℃, 最后以 10 ℃/min 升至 250 ℃; 质谱离子源温度 230 ℃; 接口温度 250 ℃; 质量扫描范围 35~350 amu; 检测器电压 0.1 kV; 扫描模式 scan。

定性定量分析: 将质谱数据在美国国家标准技术研究所(national institute of standards and technology, NIST)的 NIST17 数据库中进行检索, 根据相似度(SI)>80 来定性分析。根据样品(2.0 g)中的内标物 4-甲基-2-戊醇(5 μL, 浓度为 0.5 μg/mL)的峰面积值大小, 通过式(1)来定量分析。挥发性化合物含量计算如式(1)所示。

$$C_i = \frac{X_{stan}\times Y_i}{Y_{stan}\times m} \qquad 式(1)$$

式中, C_i 为各挥发性物质的含量, μg/g; X_{stan} 为内标物的含量, μg/g; Y_i 为各挥发性物质的峰面积; Y_{stan} 为内标物的峰面积; m 为样品质量, g。

相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV): 参照刘登勇等[15] 的方法, 将对样品风味贡献最大的组分的 ROAV 定义为 100, 其他化合物的 ROAV 计算如下式(2)所示。

$$ROAV \approx \frac{C_i\times T_{stan}\times 100}{C_{stan}\times T_i} \qquad 式(2)$$

式中, C_i 为各挥发性物质的含量, μg/g; T_i 为各

挥发性物质对应的感觉阈值，μg/kg；C_{stan} 为对试样总体风味贡献最大物质的含量，μg/g；T_{stan} 为对试样总体风味贡献最大物质相对应的感觉阈值，μg/kg；其中风味贡献最大物质由 OAV(C_i/T_i)大小确定。

1.2.5　感官评价　参照卢云浩等[16]的方法略有修改，选择 10 名(5 男，5 女)经过感官评定训练的人员组成评价小组，采用十点制(0 表示嗅闻不到，10 表示非常浓郁)对对照组豆瓣酱和强化组豆瓣酱的 8 种(醇香、酸香、花香、果香、焦糖香、烟熏香、酱香和辛辣味)主要香气特征进行感官评分。

1.3　数据处理

所有实验数据进行三次重复，结果采用平均值±标准差表示。用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较，$P<0.05$ 表明存在统计学上的差异，用不同的字母表示。部分数据采用 Origin2022b 进行绘图和拟合。

2　结果与分析

2.1　理化指标对比分析

理化指标是衡量豆瓣酱质量的核心关键指标，同时也是反映发酵进程是否正常的关键特征[17]。对豆瓣酱罐式发酵不同阶段的理化指标进行跟踪，结果如图 2 所示。在甜瓣子发酵阶段(图 2A)，强化组与对照组各项理化指标在接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 前期(0~3 周)通过单因素方差分析，无显著差异($P>0.05$)；但接种 *Zygosaccharomyces rouxii*(3 周后)总酸和还原糖含量差异较大，其中，强化组甜瓣子总酸含量始终高于对照组，发酵结束时分别为 1.52 g/100 g 和 1.38 g/100 g，与对照组相比，强化组的总酸含量显著增加($P<0.05$)了 10.14%。Zhang 等[18]研究也发现接种鲁氏结合酵母发酵橙汁，代谢生成大量有机酸，总酸含量也相应增加。接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 后(3 周后)，强化组甜瓣子的还原糖含量先保持平稳后大幅下降，由 3 周时的 6.23 g/100 g 下降至 8 周时的 3.78 g/100 g。然而，对照组甜瓣子的还原糖含量呈上升趋势，发酵 12 周时还原糖含量达到 9.65 g/100 g。推测其原因，一方面蚕豆曲中淀粉酶丰富，淀粉持续被水解为还原糖，另一方面由于接种的 *Zygosaccharomyces rouxii* 生长消耗了还原糖，造成强化组还原糖含量波动，并代谢产生有机酸等物质，这也是强化组总酸含量更高的原因[19−20]。汪坤等[10]对比了接菌强化蚕豆酱发酵的理化指标变化，发现接菌强化发酵的样品还原糖含量更低，与本研究一致。此外，强化组与对照组甜瓣子的氨基酸态氮含量差异较小，发酵结束时强化组甜瓣子的氨基酸态氮含量(0.85 g/100 g)仅略高于对照组(0.78 g/100 g)。

在辣椒醅发酵阶段(图 2B)，总酸、氨基酸态氮和还原糖含量均呈现显著下降($P<0.05$)，发酵 14 周分别降低了 40.28%、20.70% 和 67.13%，推测其原因可能是所有有机物被微生物利用。在后熟发酵阶段(图 2C)，强化组和对照组发酵过程中总酸和氨基酸态氮含量均略微增加，而还原糖含量小幅下降。发酵结束时，强化组和对照组的总酸含量分别为 0.72 g/100 g 和 0.71 g/100 g，氨基酸态氮含量分别为 0.38 g/100 g 和 0.37 g/100 g，还原糖含量分别为 0.96 g/100 g 和 1.06 g/100 g。整体而言，强化组和对照组的各项理化指标差异较小。通过单因素方差分析无显著性差异，分析其原因，与豆瓣酱中辣椒醅的添加量较大有关。成熟辣椒醅的总酸(0.36 g/100 g)、氨基酸态氮(0.10 g/100 g)和还原糖(0.99 g/100 g)含量均相对较低(图 2B)，这导致后熟发酵阶段添加大量辣椒醅后，强化组与对照组间理化指标差异小。谢思等[5]基于恒温玻璃发酵罐制作郫县豆瓣，研究发现总酸和氨基酸态氮含量逐渐增加，分别达到 0.75 g/100 g 和 0.20 g/100 g，而还原糖含量先升高后下降，最终为 2.0 g/100 g，与本研究实验结果接近。总之，接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 主要影响甜瓣子发

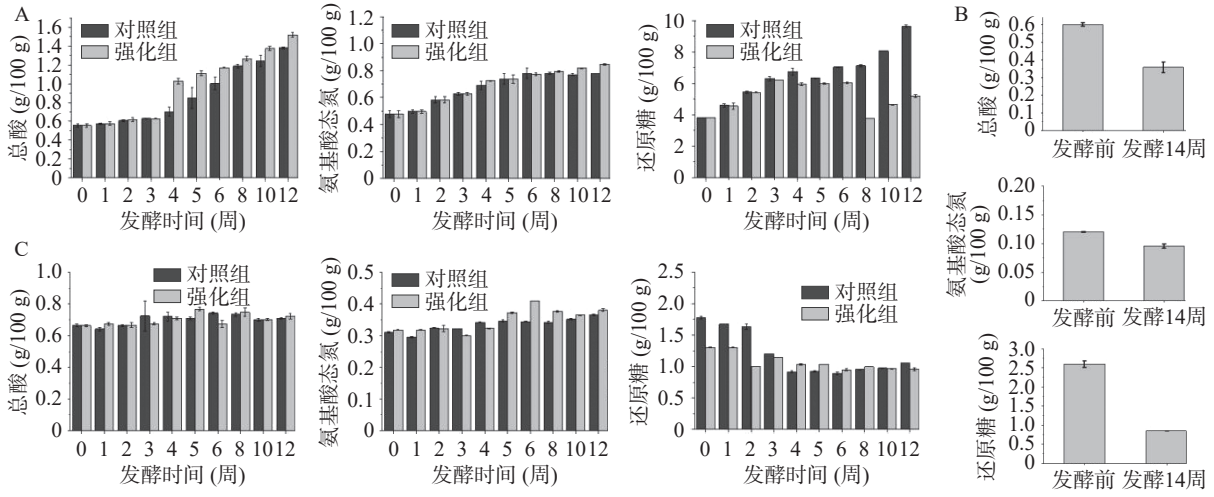


图 2　豆瓣酱不同发酵阶段理化指标变化

Fig.2　Changes of physicochemical indexes in different fermentation stages of broad bean chili paste

注：A 为甜瓣子发酵阶段；B 为辣椒醅发酵阶段；C 为豆瓣酱后熟发酵阶段；图 3 同。

酵阶段理化指标，使甜瓣子总酸和氨基酸态氮提升，而还原糖含量明显降低；而对后熟发酵阶段理化指标影响较小。

2.2 豆瓣酱制作过程游离氨基酸对比分析

游离氨基酸是豆瓣酱中重要的呈味物质及部分风味物质的前体物质，对豆瓣酱品质具有重要影响。本研究跟踪了豆瓣酱发酵全过程的游离氨基酸变化情况，结果如图 3 所示。甜瓣子发酵阶段（图 3A），强化组和对照组中游离氨基酸总含量均呈上升趋势，尤其是强化组发酵后期游离氨基酸含量大幅提升，从 5 周时的 36.03 g/kg 提高至发酵 12 周时的 49.16 g/kg。甜瓣子发酵结束时，通过单因素方差分析呈现显著增加（P<0.05），强化组的游离氨基酸总含量比对照组高 23.40%。甜瓣子发酵阶段是豆瓣酱中游离氨基酸形成并积累的关键阶段。从甜瓣子中游离氨基酸组成来看，谷氨酸、亮氨酸、门冬氨酸均是甜瓣子中主要的游离氨基酸，其中鲜味氨基酸谷氨酸含量最高。发酵过程中，强化组甜瓣子的谷氨酸含量从发酵初始时的 3.06 g/kg 增加到发酵结束时的 7.21 g/kg；而对照组的谷氨酸含量仅为 5.54 g/kg。由此可见，甜瓣子发酵结束时，强化组的谷氨酸含量比对照组高 30.14%。谷氨酸作为一种重要的天然鲜味物质，不仅可赋予食品独特鲜味和复杂口感，还是评价产品品质和发酵工艺水平的核心指标[21]。

在辣椒醅发酵阶段（图 2B），通过单因素方差分析，总游离氨基酸含量显著降低（P<0.05），发酵 14 周后下降至 5.05 g/kg，其中脯氨酸含量下降最为明显。在后熟发酵阶段（图 3C），强化组与对照组的游离氨基酸总含量均随着发酵的进行略微上升，分别从 17.28 g/kg 和 16.45 g/kg 上升至 20.57 g/kg 和 20.3 g/kg。同样地，后熟发酵阶段两组间游离氨基酸总含量差异相对较小，这是由于豆瓣酱中以辣椒醅为主，其中游离氨基酸含量较低。从氨基酸组成来看，谷氨酸、胱氨酸、亮氨酸、门冬氨酸、脯氨酸是主要游离氨基酸。Ding 等[4] 建立了一套豆瓣酱密闭发酵系统，试验同样发现游离氨基酸总量逐渐增加，其中天冬氨酸、谷氨酸、组氨酸和脯氨酸为豆瓣酱主要氨基酸。总之，强化发酵显著提升豆瓣酱甜瓣子发酵阶段的游离氨基酸总量，尤其是谷氨酸；而对后熟发酵阶段影响相对较小。

2.3 豆瓣酱制作过程挥发性物质分析

利用 HS-SPME 结合 GC-MS/MS 技术对豆瓣酱发酵各阶段终点样品的挥发性物质进行了分析。如图 4（A）所示，所有样品中共鉴定出 177 种挥发性物质，且绝大部分化合物在之前的研究中已有报道[1−2,22−23]，其中包括酯类 55 种、醇类 34 种、烃类 27 种、酮类 22 种、醛类 12 种等。此外，成熟甜瓣子、辣椒醅和豆瓣酱中分别鉴定出 82 种、104 种和 118 种挥发性物质。然而，强化组和对照组不同发酵

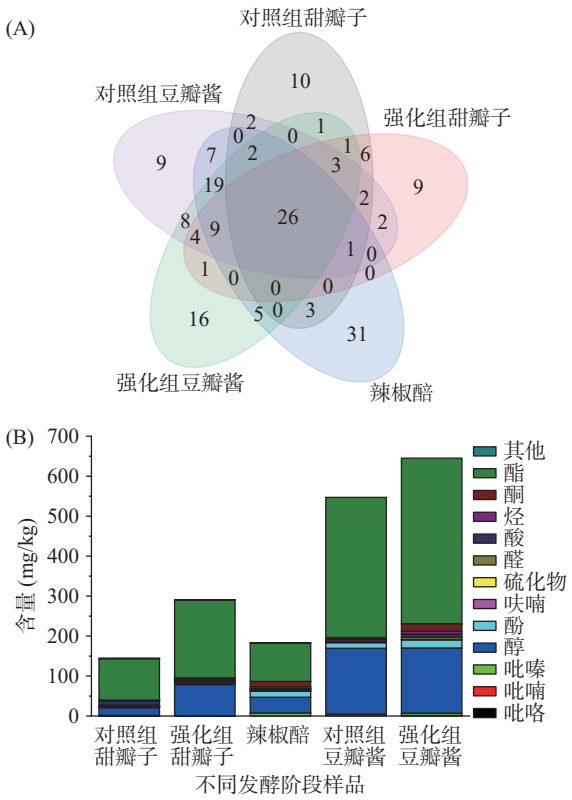


图 4 不同发酵阶段豆瓣酱挥发性物质种类与含量

Fig.4 Types and contents of volatile substances in different fermentation stages of broad bean chili paste

注：A 为挥发性物质数量韦恩图；B 为挥发性物质含量。

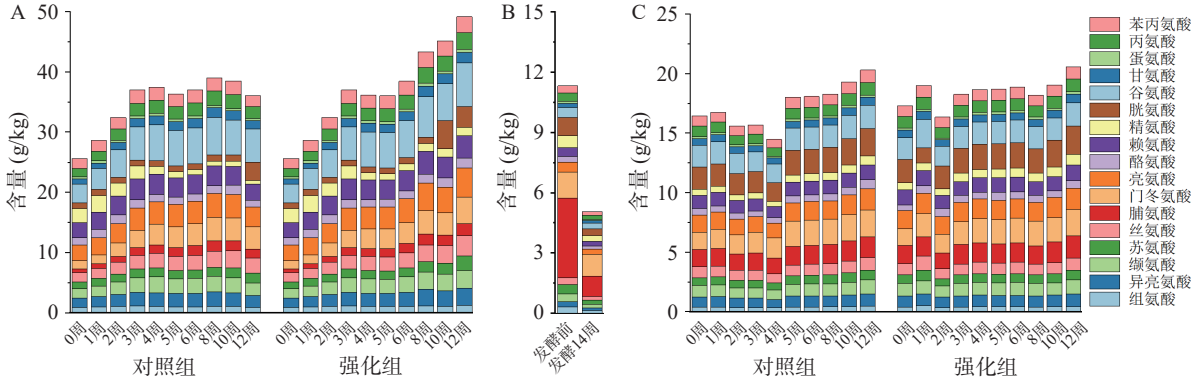


图 3 豆瓣酱不同发酵阶段游离氨基酸变化

Fig.3 Changes of free amino acid in different fermentation stages of broad bean chili paste

阶段样品中挥发性物质种类和含量均存在不同程度差异。相较于对照组，接种强化发酵的甜瓣子共鉴定出 64 种共有挥发性物质，增加了 7 种挥发性物质；接种强化发酵的豆瓣酱共鉴定出 95 种共有挥发性物质。

由图 4(B)可知，强化组甜瓣子中挥发性物质总含量达 290.67 mg/kg，远高于对照组甜瓣子的 144.92 mg/kg，其中，强化组甜瓣子中醇类化合物和酯类化合物分别增加 312.04% 和 88.55%。相关研究也表明，鲁氏接合酵母可代谢醇类化合物，赋予醇香、花香和果香，并且醇类作为酯类化合物的前体物质也影响着酯类化合物的生成[24−25]。辣椒醅中挥发性物质以酯类为主，占比高达 52.64%；其次是醇类化合物，占比 21.42%。在豆瓣酱样品中，强化组豆瓣酱的挥发性化合物总含量高于对照组豆瓣酱，总挥发性物质达到 644.23 mg/kg，增加了 17.73%，且主要是酯类化合物含量差异较大。酯类物质是一种重要的挥发性风味物质，通常具有花果香和甜香等令人愉悦的气味。酯类化合物在两组豆瓣酱样品中占比均大于 60%，是豆瓣酱中主要的挥发性物质种类[26]。

由图 5 可知，不同阶段各样品的主要挥发性风味物质含量和占比也存在明显差异。在甜瓣子发酵过程中，对照组甜瓣子中十六酸甲酯是含量最高的挥发性物质，达到 21.16 mg/kg，占比 18.6%，赋予样品脂肪香；强化组的甜瓣子乙醇含量最高，达到 54.79 mg/kg，占比 18.8%，赋予样品醇香，9-十八碳烯酸乙酯和棕榈酸乙酯等酯类物质次之[27−28]。辣椒醅中挥发性物质分布较为均匀，棕榈酸乙酯(36.98 mg/kg)等酯类和醇类含量较高。在豆瓣酱中，强化组和对照组的豆瓣酱主要挥发性物质含量较为一致，均是乙醇含量最高，分别达到 106.94 mg/kg 和 93.02 mg/kg，十四酸乙酯、棕榈酸乙酯、十二酸乙酯次之，这四种物质占挥发性物质总含量一半以上。在强化发酵的豆瓣酱中苯乙醇含量达到 47.67 mg/kg，相较于对照组(22.44 mg/kg)增加了 112.43%。苯乙醇作为郫县豆瓣特征香气成分之一，由酵母菌经 Strecker 代谢途径产生醛以后还原形成，具有特殊的甜香、玫瑰花香[26]。范智义等[2] 对郫县豆瓣酱及其原料和半成品的挥发性成分进行分析，研究发现发酵后辣椒醅和甜瓣子中的挥发性成分明显增加，其中甜瓣子以苯乙醇、1-辛烯-3-醇、苯乙醛等为主，辣椒醅以芳樟醇、苯乙醇和吡嗪类物质为主，而在豆瓣酱中酯类物质质量分数和占比明显增加，主要包括月桂酸乙酯、苯乙醇、芳樟醇等。总而言之，接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 主要增加了甜瓣子发酵阶段的乙醇含量；后熟发酵阶段主要挥发性物质含量差异较小，需进一步分析物质对风味的贡献。

挥发性物质对风味的贡献，取决于物质的含量和对应的风味阈值，因此 ROAV 越大，贡献越突出，其值大于 1 的物质被认为对整体风味具有重要影响[1]。

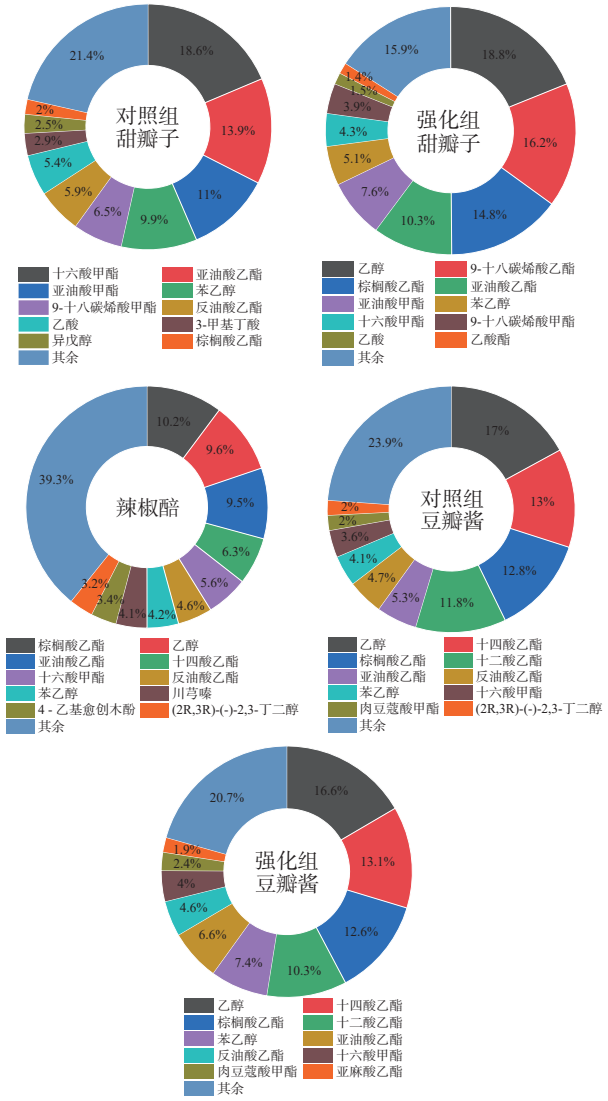


图 5　不同发酵阶段豆瓣酱主要挥发性物质及相对比例

Fig.5　Main volatile substances and relative proportionsin different fermentation stages of broad bean chili paste

由表 2 可知，从不同发酵阶段的豆瓣酱样品中共筛选到 52 种 ROAV 大于 1 的关键风味物质(酯类 20 种、醇类 7 种、醛类 6 种、酮类 5 种，其余 14 种)，其中对照组甜瓣子 33 种、强化组甜瓣子 31 种、辣椒醅 12 种、强化组豆瓣酱 23 种、对照组豆瓣酱 8 种。从挥发性物质数量来看，甜瓣子中的挥发性物质较为丰富，辣椒醅中相对较少；而强化组的豆瓣酱挥发性物质种类远远多于对照组，可以认为其整体风味更加丰富。不仅如此，强化组的豆瓣酱中豆瓣酱代表性风味物质 4-乙基愈创木酚的 ROAV 也更高，表明其对整体风味贡献也更大。

为进一步比较各样品关键风味物质含量差异，不同发酵阶段豆瓣酱主要风味物质含量聚类热图见图 6。虽然对照组甜瓣子与强化组甜瓣子聚为一类，对照组豆瓣酱与强化组豆瓣酱聚为一类，但在具体物质上仍存在明显不同。相较于对照组，强化组的甜瓣子中 9-十八碳烯酸乙酯、顺-6-十八碳烯酸甲酯和 9-十六碳烯酸乙酯含量较高，赋予甜瓣子水果香。强化

表 2 不同发酵阶段豆瓣酱关键风味物质

Table 2 Key flavor substances in different fermentation stages of broad bean chili paste

序号	化合物	阈值(μg/kg)[1−2,9−12,23]	风味特征[1−2,9−12,23]	ROAV				
				强化甜瓣子	对照甜瓣子	辣椒醅	强化豆瓣酱	对照豆瓣酱
1	(E,E)-2,4-庚二烯醛	2	油脂氧化味	–	–	4.24	–	–
2	2-甲氧基苯酚	10	烟熏味、焦香	–	–	0.44	1.02	0.21
3	2-壬烯醛	4	青草、脂肪氧化味	–	5.9	0.47	–	–
4	2-乙酰基吡咯	10	坚果味、烤肉香	10.17	15.54	–	–	0.27
5	3-甲基-丁醛	5	水果香	–	12.28	–	–	–
6	3-甲基丁酸	20	奶酪香	–	36.85	–	0.32	–
7	3-甲硫基丙醇	1	烤肉香	72.01	100	–	–	–
8	3-烯丙基-6-甲氧基苯酚	10	辛辣味	26.46	29.84	–	0.36	0.06
9	4-羟基-5-甲基-3(2H)-呋喃酮	50	焦糖、坚果味	0.55	1.2	–	–	–
10	4-乙基苯酚	5	烟熏味	–	–	5.45	13.61	2.01
11	4-乙基愈创木酚	1	烟熏味	–	–	88.54	100	27.86
12	4-乙烯基愈创木酚	2	辛辣味	–	–	0.84	4.44	0.75
13	5-甲基-2-苯基-2-己烯醛	10	花香、水果香	–	3.04	–	–	0.31
14	9-十八碳烯酸甲酯	200	蜡质味、水果香	13.21	8.16	–	–	–
15	9-十八碳烯酸乙酯	300	水果香	36.49	1.12	0.03	0.09	0.06
16	9-十六碳烯酸乙酯	200	蜡质味、水果香	2.92	–	–	–	0.02
17	*α*-松油醇	10	松木香	3.48	3.34	0.52	1.09	0.21
18	*β*-大马酮	0.5	水果香、花香	–	–	4.33	6.05	0.96
19	*β*-乙基苯乙基乙醇	50	花香	1.39	–	–	0.25	–
20	*β*-紫罗兰酮	0.2	花香、木质香	–	–	100	–	100
21	*β*-紫罗兰酮-5,6-环氧化物	1	木质香、树脂香	–	–	4.4	–	2.45
22	苯甲醛	50	杏仁味、苦味	4.02	5.96	0.08	0.08	0.09
23	苯乙醇	100	玫瑰香	34.56	24.86	0.58	5.15	0.51
24	苯乙醛	5	花香、蜂蜜味	–	38.76	–	–	–
25	苯乙酸乙酯	10	蜂蜜味	23.31	–	0.25	1.34	0.32
26	苄腈	50	杏仁味、苦味	1.48	5.11	–	–	–
27	二氢-*β*-紫罗兰酮	0.3	木质香、花香	–	–	3.18	4.46	1.05
28	反油酸乙酯	300	水果香	–	4.95	0.21	1.06	0.2
29	呋喃甲醇	100	焦糖、坚果味	2.61	3.88	–	0.26	0.04
30	茴香醚	5	茴香	–	–	–	2.47	0.37
31	己酸乙酯	10	菠萝香	26.24	4.85	0.99	1.83	0.18
32	壬醛	1	脂肪氧化味	70.7	26.55	3.44	4.93	0.37
33	壬酸	20	奶酪香	–	1.76	0.04	–	–
34	肉豆蔻酸甲酯	200	蜡质味、水果香	0.6	1.14	0.14	0.82	0.13
35	十二酸乙酯	100	水果香	1.62	–	0.41	7.11	1.49
36	十四酸乙酯	100	水果香	7.28	–	0.88	9.06	1.64
37	十五酸乙酯	200	蜡质香、水果香	3.39	–	–	0.16	0.03
38	水杨酸甲酯	10	冬青、薄荷香	–	–	0.97	1.27	–
39	顺-6-十八碳烯酸甲酯	200	蜡质香、水果香	3.54	–	–	–	–
40	四氢芳樟醇	50	木质香、花香	1.14	2.75	0.21	0.22	0.04
41	香叶基丙酮	10	花香、水果香	3.07	3.44	2.36	2.12	0.69
42	辛酸乙酯	20	水果香	1.61	–	0.17	0.25	0.1
43	亚麻酸甲酯	100	蜡质味	0.96	1.91	0.06	0.23	0.05
44	亚麻酸乙酯	100	蜡质味	6.04	1.91	0.3	1.31	0.14
45	亚油酸甲酯	100	蜡质味	51.65	27.84	0.29	1.09	0.24
46	亚油酸乙酯	100	蜡质味	69.36	35.16	1.31	4.57	0.67
47	椰子醛	1	椰子香	92.3	82.76	2.04	5.37	0.85
48	乙酸	500	酸味	2.04	2.72	0.03	0.03	0.03
49	乙酸苯乙酯	10	花香、水果香	10.01	8.07	–	1.77	–
50	异戊醇	500	水果香	1.74	1.26	0.03	0.26	0.01
51	硬脂酸乙酯	100	蜡质味	5.66	1.96	–	0.49	–
52	棕榈酸乙酯	100	蜡质味	100	4.94	1.42	8.72	1.63

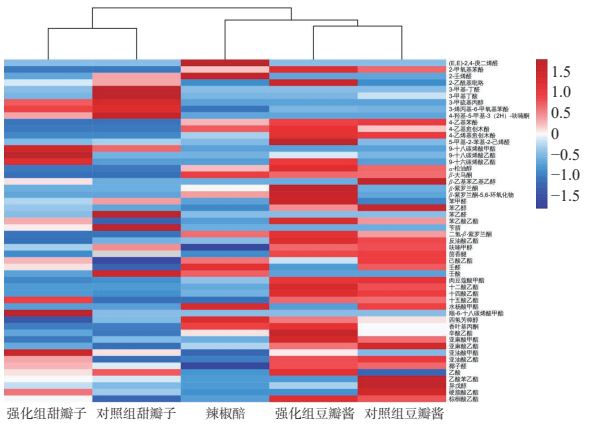


图 6　不同发酵阶段豆瓣酱关键风味物质聚类分析热图

Fig.6　Heat map of cluster analysis of key flavor substances in different fermentation stages of broad bean chili paste

组的豆瓣酱中乙酸、辛酸乙酯、*β*-紫罗兰酮、*β*-紫罗兰酮-5,6-环氧化物、苯甲醛、5-甲基-2-苯基-2-己烯醛、2-乙酰基吡咯含量较高，赋予豆瓣酱花香、水果香和酸味。

2.4　豆瓣酱感官评价

食品感官评价是利用人的感觉器官（如眼、鼻、口等）对食品的色、香、味、形、质地等进行评价的方法，能最直观地反映食品的特征和差异[29−30]。通过建立的感官评价小组，对最终强化组和对照组豆瓣酱产品香气特征进行感官评分，结果见图 7。整体来看，豆瓣酱在醇香、酱香和辛辣味方面评分大于 5，较为浓郁，其余五种香气特征评分较低，对豆瓣酱整体香气特征贡献较弱。强化组的豆瓣酱在醇香、酸香、花香和果香具有明显提升，其中花香和果香增加最为显著，分别增加了 50.0% 和 41.2%。卢云浩等[16] 采用同样的方法评价了辣椒醅、甜瓣子和豆瓣酱，研究发现辣椒醅发酵后，醇香、酸香和果香显著性增强，辛辣刺激味明显减弱；甜瓣子中酱香和醇香突出；在豆瓣酱中辛辣刺激风味进一步减弱，而其他香气特征均有不同程度的增强，各类香气浓郁且均衡。

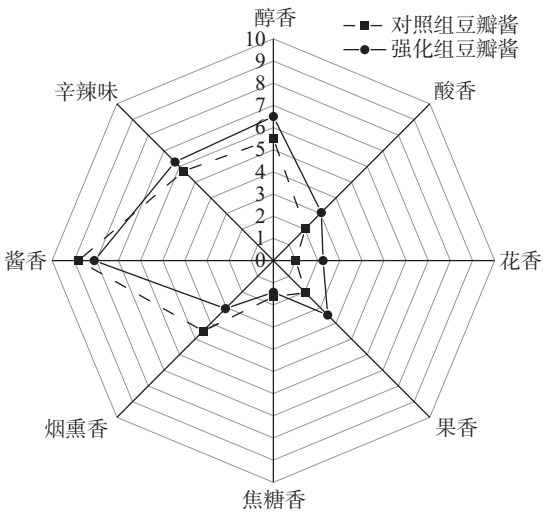


图 7　豆瓣酱感官评价

Fig.7　Sensory evaluation of broad bean chili paste

3　结论

本研究考察了接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 对豆瓣酱罐式发酵过程中理化指标、游离氨基酸和挥发性风味物质的影响。结果表明，在甜瓣子发酵阶段，强化组甜瓣子总酸含量（1.52 g/100 g）远高于对照组（1.38 g/100 g）；而还原糖含量则更低，仅为 5.19 g/100 g。接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 有助于提升甜瓣子的鲜味，强化组甜瓣子的游离氨基酸总量比对照组高 23.40%，尤其是谷氨酸含量提高 30.14%。此外，强化组甜瓣子的挥发性化合物总量（290.67 mg/kg）也远高于对照组（144.92 mg/kg），其中醇类和酯类化合物含量差异明显。在后熟发酵阶段，由于豆瓣酱添加了大量辣椒醅，导致强化组和对照组各项品质指标差异较小。但是，相对于对照组，强化组豆瓣酱中挥发性酯类化合物含量更高，产品风味更佳。通过感官评价和风味分析，强化组的豆瓣酱在醇香、酸香、花香、果香方面具有明显提升。基于此，接种 *Zygosaccharomyces rouxii* 对罐式发酵甜瓣子各项品质指标影响较大，而对后熟发酵阶段理化指标影响相对较小，但风味物质明显增加。后续可进一步筛选适用于强化发酵豆瓣酱的菌株，复配后强化发酵，并且明确传统土坛发酵、罐式发酵、罐式强化发酵，三者之间的差异。本研究结果对于提升豆瓣酱罐式发酵工艺具有重要指导意义，可有效解决罐式发酵豆瓣酱挥发性风味物质含量不足，传统发酵机械化程度低等问题。

© The Author(s) 2026. 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] 李雄波, 范智义, 王泽亮, 等. 不同品种蚕豆原料对郫县豆瓣品质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 72−82. [LI Xiongbo, FAN Zhiyi, WANG Zeliang, et al. Effect of different cultivars of broad bean on the quality of Pixian broad bean chili paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 72−82.]

[2] 范智义, 邓维琴, 王泽亮, 等. 郫县豆瓣酱及其原料、半成品挥发性成分分析[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(6): 164−172. [FAN Zhiyi, DENG Weiqin, WANG Zeliang, et al. Analysis of volatile compound profiles in Pixian broad bean-chili paste, its ingredients and semi-finished products[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(6): 164−172.]

[3] 徐培, 范文教, 孙俊秀, 等. 甜瓣子发酵品质的研究现状[J]. 中国调味品, 2022, 47(10): 206−209,220. [XU Pei, FAN Wenjiao, SUN Junxiu, et al. Research status of the fermentation quality of sweet beans[J]. China Condiment, 2022, 47(10): 206−209,220.]

[4] DING Wenwu, YE Xiaoqing, ZHAO Xiaoyan, et al. Fermentation characteristics of Pixian broad bean paste in closed system of gradient steady-state temperature field[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131560.

[5] 谢思, 赵晓燕, 吴晓霞, 等. 不同发酵模式下郫县豆瓣后发酵过程动力学模型的建立与分析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(5): 263−271. [XIE Si, ZHAO Xiaoyan, WU Xiaoxia, et al. Establish-

ment and analysis of kinetic models for post-fermentation processes of Pixian broad-bean paste under different fermentation modes[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(5): 263−271.]
[6] 黄留瑶. 酱油罐式发酵与池式发酵关键组分与过程特性的对比研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. [HUANG Liuyao. Comparative study of key components and process characteristics of soy sauce tank fermentation and pool fermentation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]
[7] 邓维琴, 李雄波, 张其圣, 等. 一株强化发酵甜瓣子的乳酸片球菌特性及应用效果评价[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 153−159. [DENG Weiqin, LI Xiongbo, ZHANG Qisheng, et al. The characteristics and application of a *Pediococcus acidilactici* for improving broad bean mash fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(4): 153−159.]
[8] XU Min, WANG Xingbin, XU Zedong, et al. Aroma quality characterization for Pixian broad bean paste fermentation by electronic nose combined with machine learning methods[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(5): 3363−3377.
[9] 谭馨怡. 关键发酵工艺和功能菌株强化对郫县豆瓣品质的影响[D]. 成都: 四川大学, 2021. [TAN Xinyi. Effects of key fermentation technology and strengthening of functional strains on the quality of Pixian watercress[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.]
[10] 汪坤, 卢云浩, 程杰. 嗜盐四联球菌与多变假丝酵母强化发酵对蚕豆酱风味品质的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(12): 60−66. [WANG Kun, LU Yunhao, CHENG Jie. Effect of enhanced fermentation by *Tetragenococcus halophilus* and *Candida versatilis* on flavor quality of broad bean paste[J]. China Condiment, 2024, 49(12): 60−66.]
[11] 范智义, 李恒, 张其圣, 等. 郫县豆瓣生香酵母的筛选及生长特性[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(9): 76−83. [FAN Zhiyi, LI Heng, ZHANG Qisheng, et al. Screening of aroma-producing yeast from Pixian broadbean paste and optimization of its growth condition[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(9): 76−83.]
[12] 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 Ting, FAN Zhiyi, ZHANG Qisheng, et al. Study on enhanced fermentation of sweet beans of Pixian broad bean paste by yeast[J]. China Condiment, 2020, 45(7): 76−80,85.]
[13] NASSOUROU M A, NOUBISSIÉ T J B, NJINTANG Y N, et al. Diallel analyses of soluble sugar content in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.)[J]. The Crop Journal, 2017, 5(6): 553−559.
[14] LIU Wenhan, PU Xilei, SUN Jinkui, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* on functional characteristics and flavor profile of fermented walnut milk[J]. LWT, 2022, 160: 113254.
[15] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.]
[16] 卢云浩, 何强. 郫县豆瓣特征挥发性物质演变及其香型特性研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(4): 326−335. [LU Yunhao, HE Qiang. Studies on evolution of the odor-active volatile compounds of Pixian-douban and its aroma characteristics[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(4): 326−335.]
[17] 黄婷. 镇江香醋酿造微生物功能解析及酿醋人工菌群构建[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [HUANG Ting. Functional analysis of microbial community of Zhenjiang aromatic vinegar and construction of a defined starter for acitic acid production[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[18] ZHANG Hongjian, LIU Shuaiguang, MA Zewei, et al. Effectively enhancing the physiological activity and sensory quality of whole calamondin puree via yeast fermentation[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(22): 11984.
[19] KEMP B, PLANTE J, INGLIS D L. Nutrient addition to low pH base wines (L. cv. Riesling) during yeast acclimatization for sparkling wine: Its influence on yeast cell growth, sugar consumption and nitrogen usage[J]. Beverages, 2020, 6(1): 10.
[20] 蒋四强, 邓维琴, 何素蓉, 等. 红曲霉制曲对黄豆酱理化指标和感官评价的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(8): 150−157. [JIANG Siqiang, DENG Weiqin, HE Surong, et al. Effects of *Monascus koji*-making on the physical and chemical indicators and sensory evaluation of soybean paste[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 150−157.]
[21] 霍巧娟. 代谢工程改造酿酒酵母合成谷氨酸的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023. [HUO Qiaojuan. Study on the production of glutamic acid by *Saccharomyces cerevisiae* modified by metabolic engineering[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023.]
[22] 郑容, 何旭峰, 熊双, 等. 不同品种辣椒自然发酵过程中品质变化研究[J]. 中国酿造, 2024, 43(3): 243−249. [ZHENG Rong, HE Xufeng, XIONG Shuang, et al. Quality changes of different varieties of pepper during natural fermentation process[J]. China Brewing, 2024, 43(3): 243−249.]
[23] 蒋四强, 邓维琴, 范智义, 等. 烘瓣子和阴瓣子发酵过程中风味品质的对比分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(4): 277−286. [JIANG Siqiang, DENG Weiqin, FAN Zhiyi, et al. Comparative analysis of flavor quality during the fermentation of dried petals and raw petals[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 277−286.]
[24] WANG Xueli, LIU Xueting, SUN Chunmei, et al. Effect of temperature on the quality and microbial community during Daocai fermentation[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101827.
[25] van der SLUIS C, RAHARDJO Y S P, SMIT B A, et al. Concomitant extracellular accumulation of alpha-keto acids and higher alcohols by *Zygosaccharomyces rouxii*[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2002, 93(2): 117−124.
[26] 刘平, 翟刚, 陈功, 等. 郫县豆瓣特征香气物质的研究鉴定[J]. 中国酿造, 2015, 34(1): 27−32. [LIU Ping, ZHAI Gang, CHEN Gong, et al. Research and identification of characteristic flavor compounds from Pixian soybean pastes[J]. China Brewing, 2015, 34(1): 27−32.]
[27] DACHERY B, HERNANDES K C, VERAS F F, et al. Effect of *Aspergillus carbonarius* on ochratoxin a levels, volatile profile and antioxidant activity of the grapes and respective wines[J]. Food Research International, 2019, 126: 108687.
[28] YUAN Hui, XU Lijing, CHANG Mingchang, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds, nutritional constituents, and antioxidant activities of *Clitocybe squamulosa*[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1017014.
[29] GREEN-PETERSEN D, NIELSEN J, HYLDIG G. A model for communication of sensory quality in the seafood processing chain[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(5): 443−447.
[30] SUN Meng, MA Julin, CAI Zhixiang, et al. Sensory determination of peach and nectarine germplasms with instrumental analysis[J]. Foods, 2023, 12(24): 4444.