

不同温度低盐酱油发酵过程中微生物及品质的变化

史梅莓¹, 李雄波^{1,2}, 符怡³, 范智义^{1,2}, 李婷^{1,2}, 陈相杰^{1,2}, 黄学明³, 蒋四强^{1,2}, 张其圣^{1,2}, 王泽亮^{1,2,4},
李恒^{1,2,4}, 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. 合江县先市酿造食品有限公司, 四川泸州 646204) (4. 四川振兴产业技术研究院有限公司, 四川成都 610023)

摘要: 为了探究不同发酵温度对低盐酱油发酵过程中微生物及其产品品质的影响, 该文分别在 45、35、25 °C 及自然条件下发酵低盐酱油, 并对发酵过程中微生物数量、理化指标及成熟酱醪的品质指标进行了分析。结果表明, 发酵温度对低盐酱油发酵存在不同程度的影响。其中, 45 °C 高温发酵过程中酵母菌快速消亡; 而其它温度整个发酵过程中酵母菌数量始终处于较高数量水平 (6.00 lg CFU/g), 因而也导致不同温度发酵过程中微生物总数的显著差异。相对而言, 45 °C 高温发酵有利于提升发酵速度, 其还原糖含量 (2.52 g/100 g)、甜味氨基酸含量 (11.92 g·kg⁻¹) 要明显高于其它温度, 且生物胺含量 (78.88 mg·kg⁻¹) 更低。但 45 °C 发酵不利于低盐酱油中挥发性风味化合物的形成和积累, 尤其是酚类和酯类化合物; 而发酵温度越低越有利于酚类、酯类化合物等的积累。感官评价结果表明, 35 °C 发酵酱油感官品质最好, 其次是 45 °C 发酵酱油, 而 25 °C 和自然条件发酵酱油色泽和香气均较差。此外, 中低温 (35、25 °C 和常温) 条件下, 在发酵末期酱醪表面“产膜”严重。综上所述, 45 °C 能保证低盐酱油正常稀态发酵, 但其风味及色泽还存在不足。该研究结果可为今后低盐酱油发酵工艺优化与调控提供参考。

关键词: 发酵温度; 低盐酱油; 微生物; 风味

文章编号: 1673-9078(2026)02-96-104

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1660

Microbial Composition and Quality of Low-salt Soy Sauce during Fermentation at Different Temperatures

SHI Meimei¹, LI Xiongbo^{1,2}, FU Yi³, FAN Zhiyi^{1,2}, LI Ting^{1,2}, CHEN Xiangjie^{1,2}, HUANG Xueming³,
JIANG Siqiang^{1,2}, ZHANG Qisheng^{1,2}, WANG Zeliang^{1,2,4}, LI Heng^{1,2,4}, 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 Province, Chengdu 611130, China) (3. Hejiang Xianshi Brewing Food Co. Ltd., Luzhou 646204, China) (4. Sichuan Zhenxing Industrial Technology Research Institute Co. Ltd., Chengdu 610023, China)

Abstract: The effects of fermentation temperature on the microorganisms and product quality of low-salt soy sauce were investigated. In particular, low-salt soy sauce was fermented at 45 °C, 35 °C, 25 °C, and natural conditions for analyses of the microbial count, physicochemical indicators, and quality indicators of mature soy sauce mash during the fermentation process. Different temperatures had varying degrees of influence on the fermentation of low-salt soy sauce. Yeast cells underwent rapid death during high-temperature fermentation at 45 °C, while the yeast count remained relatively high (6.00 lg CFU/g) throughout the entire

引文格式:

史梅莓, 李雄波, 符怡, 等. 不同温度低盐酱油发酵过程中微生物及品质的变化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 96-104.

SHI Meimei, LI Xiongbo, FU Yi, et al. Microbial composition and quality of low-salt soy sauce during fermentation at different temperatures [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 96-104.

收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2025-01-07; 接受日期: 2025-01-08

基金项目: 成都市科技项目 (2023-YF09-00083-SN); 中央引导地方科技发展专项资助 (2024ZYD0252)

作者简介: 史梅莓 (1996-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品发酵, E-mail: 15881657280@163.com

通讯作者: 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

fermentation process at other temperatures. This resulted in significant differences in total microbial counts among temperatures. High-temperature fermentation at 45 °C improved the fermentation rate; however, the contents of reducing sugars (2.52 g/100 g) and sweet amino acids (11.92 g·kg⁻¹) were higher and the biogenic amine content (78.88 mg·kg⁻¹) was lower than those for fermentation at other temperatures. Fermentation at 45 °C was not conducive to the formation and accumulation of volatile flavor compounds in low-salt soy sauce, particularly phenolic and ester compounds, while a lower fermentation temperature was more favorable for the accumulation of phenols and esters. A sensory evaluation indicated that soy sauce fermented at 35 °C had the best sensory quality, followed by soy sauce fermented at 45 °C. Soy sauce fermented at 25 °C and under natural conditions had poorer color and aroma attributes. In addition, fermentation at medium-to-low temperatures (35 °C, 25 °C, and room temperature) led to significant film production on the surface of the soy sauce mash during the late stage of fermentation. In summary, fermentation at 45 °C ensured normal liquid-state fermentation of low-salt soy sauce; however, the flavor and color were less favorable. The results of this study can serve as reference for the optimization and control of the low-salt soy sauce fermentation process in the future.

Key words: fermentation temperature; low-salt soy sauce; microorganism; flavor

酱油是我国传统的调味品，具有独特的酱香，红褐鲜艳的色泽，滋味鲜美，深受消费者喜爱。我国按照发酵工艺的不同，主要分为高盐稀态酱油和低盐固态酱油两种^[1]。高盐稀态酱油发酵温度低、风味品质好，高盐可以抑制腐败菌、致病菌的生长，但存在发酵时间长、原料利用率低等问题^[2]；低盐固态酱油采用高温发酵，发酵周期短，工艺简单，但其色泽暗淡、风味单一，且开放式的生产环境，更易受到腐败微生物的污染，影响产品品质^[3]。两种工艺发酵的酱油最终产品含盐量均较高，这与人们对低盐健康饮食的发展趋势不符。因此，生产低盐酱油成为酱油发展的新方向，稀态酱油减盐也成为目前的研究热点^[4]。

目前，酱油低盐发酵面临杂菌污染、风味变化等问题，盐分降低后，可能导致腐败菌、致病菌等生长，引起酱油腐败；同时，影响传统酱油优势微生物的生长代谢，导致风味品质发生变化^[5,6]。发酵温度是决定酱油风味品质的重要因素之一^[7,8]。大量研究人员进行控温发酵酱油，如尹文颖等^[9]研究表明在 35、25 °C 以及自然发酵中，25 °C 下发酵的高盐稀态酱油氨基酸态氮、赖氨酸等含量高出于其他组，其品质最好；于茜雅等^[10]将 37、30、15 °C 以及自然发酵的广式高盐稀态酱油原油进行对比，结果表明 30 °C 发酵有利于醇类、酯类、酚类等物质的形成，原油综合品质最佳。李心智等^[11]主要考察梯度升温的工艺（15~20~25~30 °C），对不同盐分稀态发酵酱油微生物变化和风味形成的影响，结果表明该工艺有利于限制低盐分（12%, *m/V*）发酵酱醪中酵母菌在前期的过快生长，最终提升低盐发酵原油的整体风味。

然而，目前多数研究发酵温度对高盐稀态发酵酱油品质的影响，关于温度对低盐稀态酱油发酵过程中微生物及产品品质的影响研究还相对较少。本研究采用控温发酵方式，分别在 45、35、25 °C 以及自然条件

下发酵低盐稀态酱醪（12%, *m/V*），探究不同发酵温度对酱油微生物及产品品质的影响，为后期的低盐酱油发酵与调控提供基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

发酵酱油所需要的曲料来自成都市温江区某酱油生产企业；氢氧化钠、甲醛、正己烷、三乙胺、乙腈均为色谱纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；17 种氨基酸标准品，美国 Sigma 公司；8 种生物胺标准品均为色谱纯，上海源叶生物科技集团股份有限公司；PCA 培养基、孟加拉红培养基，北京奥博星生物技术有限责任公司。

1.2 仪器与设备

PHSJ-3F pH 计，上海仪电科学仪器股份有限公司；VF-WAXms 色谱柱（60 m×0.25 mm, 0.25 μm），美国安捷伦公司；GCMS-TQ8040 气相色谱质谱联用仪，日本岛津仪器公司；Agilent 1260 Infinity II 高效液相色谱仪，美国安捷伦科技有限公司；Ultimate Amino Acid（4.6×250 mm, 5 μm）色谱柱，月旭科技（上海）股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 酱醪的制备与发酵

将酱油成曲和 15%（*m/V*）盐水按照质量比 1:2.5 进行混合，并调整最终酱醪含盐量为 12%（*m/V*），然后置于玻璃发酵罐中分别在 25、35、45 °C 以及自然条件下发酵 60 d。期间，定期搅拌养护，并于发酵第 0、7、15、30、40、60 天进行取样，随即进行微生物计数；剩余样品保藏于 -20 °C 冰箱中，留作后续理化分析。

1.3.2 微生物计数

将取得的酱醪样品用无菌生理盐水进行稀释至合适梯度,取 1.0 mL 稀释液至 PCA 培养基(添加质量分数为 5% NaCl),置于 37 ℃培养箱静置培养约 48 h,记录菌落总数;取 0.1 mL 稀释液涂布于孟加拉红培养基(添加质量分数为 5% NaCl),置于 30 ℃培养箱培养静置培 48~72 h,记录酵母菌数量;取 1.0 mL 稀释液至 MRS 培养基(添加质量分数为 5% NaCl),置于 37 ℃培养箱静置培养约 24 h,记录乳酸菌数量。

1.3.3 理化指标的测定

pH 值的测定按照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 的测定》;总酸的测定按照 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的 pH 计电位滴定法进行测定,pH 值 8.2 为滴定终点,总酸含量以乳酸计;氨基酸态氮的测定按照 GB 5009.235-2016《食品中氨基酸态氮的测定》的甲醛滴定法;还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法进行测定。

1.3.4 生物胺的测定

参考 GB 5009.2008-2016《食品中生物胺的测定》中的液相色谱法。准确称取酱醪样品 10 g 置于 50 mL 离心管中,按照调味品中生物胺的检测法进行样品提取和衍生。

1.3.5 游离氨基酸的测定

参考王泽亮等^[12]的方法并进行修改后测定。准确称取 5.0 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 蒸馏水,用涡旋仪混匀,超声提取 30 min(40 ℃,功率 100 W),然后以 8 000 r·min⁻¹离心 5 min,取上清液为待测样品。取 100 μL 待测样品置于 5 mL 离心管中,然后加入 200 μL 衍生试剂,涡旋混合 20 s 后放置 60 min。反应完成后加入 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,再次加入 1 mL 正己烷,涡旋混合 1 min 后静置 10 min,除去上层有机层,下层水层过 0.22 μm 水系过滤器后采用高效液相色谱仪进行分析。

液相条件:色谱柱为 Ultimate Amino Acid (4.6×

250 mm, 5 μm),流量 1 mL·min⁻¹,柱温 40 ℃,进样量 10 μL,检测波长为 254 nm。流动相 A:0.1 mol·L⁻¹醋酸钠(pH 值 6.5):乙腈=93:7;流动相 B:水:乙腈=20:80。

1.3.6 挥发性风味物质的测定

参考范智义等^[13]的方法进行样品前处理和测定。样品处理和检测条件:取样品 2 g 和 5 μL 内标(4-甲基-2-戊醇甲醇溶液,质量浓度为 0.5 μg·mL⁻¹)加入 15 mL 顶空进样瓶中,混匀密封置于 60 ℃恒温槽中水浴加热平衡 20 min,将老化后的固相微萃取头插入到顶空进样瓶中吸附 30 min,于 250 ℃条件下解析 5 min,每个样品独立测定 3 次。

GC 条件:VF-WAXms 色谱柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm),不分流模式;总流量:50 mL·min⁻¹;载气:He;载气流量:1.0 mL·min⁻¹。升温程序:初始温度 50 ℃,保持 3 min,以 5 ℃·min⁻¹升温到 85 ℃,保持 1.5 min,以 10 ℃·min⁻¹升温到 100 ℃,保持 0.5 min,以 2.5 ℃·min⁻¹升温到 145 ℃,保持 0.5 min,以 2 ℃·min⁻¹升温到 175 ℃,保持 1.5 min,以 10 ℃·min⁻¹升温到 250 ℃。

MS 条件:电子离子源(EI),电子能量 70 eV,离子源温度:230 ℃;接口温度:250 ℃;检测器电压:0.1 kV;Scan 采集方式,扫描质量范围:*m/z* 35.00~350.00。

定性和定量分析:色谱峰对应的质谱与 NIST17、FFNSC1.3 谱库检索对比,保留匹配度大于 80% 的鉴定结果,得到各挥发性风味物质。采用 4-甲基-2-戊醇甲醇(0.5 μg·mL⁻¹)为内标进行半定量分析,响应值都设为 1,计算出各组分的质量浓度。

1.3.7 色泽与感官评价

1.3.7.1 色差的测定

采用色差仪进行测定,将发酵结束的样品进行过滤得到原油,取原油测定其亮度值 *L*^{*}、红度值 *a*^{*} 和黄度值 *b*^{*},每个样品测定 15 次,结果取平均值。

1.3.7.2 感官评价

参考 GB/T 18186-2000《酿造酱油》中感官评价方法,将发酵结束的酱醪进行过滤得到原油,邀请 20 名有感官评定经验的人员,分别对原油的色泽、香气、滋味、体态四个方面进行评价。

表 1 感官评分标准
Table 1 Sensory rating criteria

项目	4 分	3 分	2 分	1 分
色泽	鲜艳的深红褐色,有光泽	红褐色或棕褐色,有光泽	红褐色或棕褐色	棕褐色
香气	酱香浓郁,无不良气味	酱香较浓,无不良气味	有酱香,无不良气味	微有酱香,无不良气味
滋味	味鲜美,醇厚,咸味适口	味鲜美,咸味适口	味较鲜,咸味适口	鲜咸适口
体态	澄清,无漂浮物,无杂质	较澄清	少量悬浮物或杂质	悬浮物和杂质较多

1.4 数据处理

所有数据均以平均值 $\pm$ 标准差表示。采用 Excel 2019 进行数据统计分析, Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 温度对低盐酱油发酵过程中微生物数量的影响

酱油发酵是利用霉菌、乳酸菌、酵母菌等多种微生物的协同作用,共同促进了酱油的风味和品质的形成^[14,15]。不同温度条件下低盐酱油发酵过程中菌落总数、酵母菌数量和乳酸菌数量的变化情况如图 1 所示。由图 1 可知,在不同温度条件下,低盐酱油发酵过程中微生物数量存在显著差异。其中,不同温度发酵酱醪的起始菌落总数较高,均在 8.67 lg CFU/g 左右,但随着发酵进行,菌落总数均呈先快速下降后逐渐增加的变化趋势(图 1a)。这是由于盐水加入导致体系渗透压增加,不耐受的微生物逐渐失活,之后耐盐微生物成为优势微生物,并在中后期大量增殖所致。然而,酱醪在 45 °C 发酵过程中菌落总数远低于其他温度,尤其是发酵 30 d 后菌落总数相差 1.00 lg CFU/g 以上,表明高温抑制了酱油低盐发酵过程中微生物的过度繁殖。具体而言,主要是抑制了酵母菌的过度增殖,其在发酵第 7 d 后酵母菌便不能检出(图 1b),过高的温度可能会导致酵母菌死亡^[3];而其余温度条件下整个发酵过程中酵母菌始终保持在 6.00 lg CFU/g 的数量水平,但同时也导致了在发酵末期酱醪表面形成白膜(见图 1d),但未出现臭味,有研究表明鲁氏接合酵母、毕赤酵母等是酱醪中重要的产香微生物,但也是常见的产醭酵母,酱醪表面的白膜可能与其过度繁殖有关^[16]。随着发酵的进行,酱醪中乳酸菌数量均呈逐渐下降趋势(图 1c),可能是由于营养物质的消耗、有机酸、乙醇等物质的积累,抑制了乳酸菌的生长^[17]。其中 35 °C 发酵条件有利于减缓酱醪中乳酸菌数量下降。

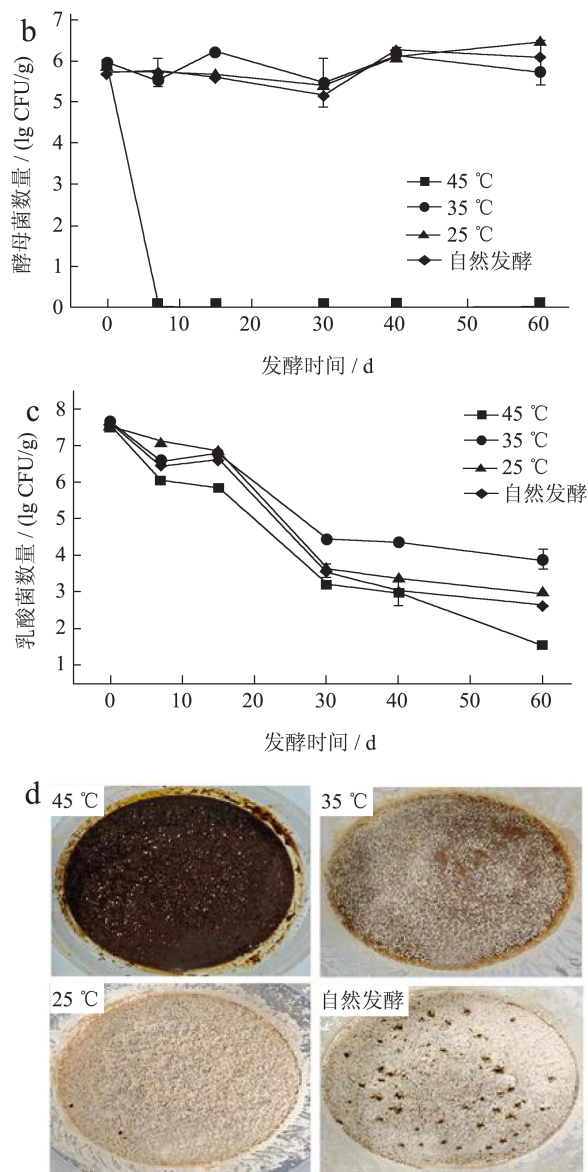
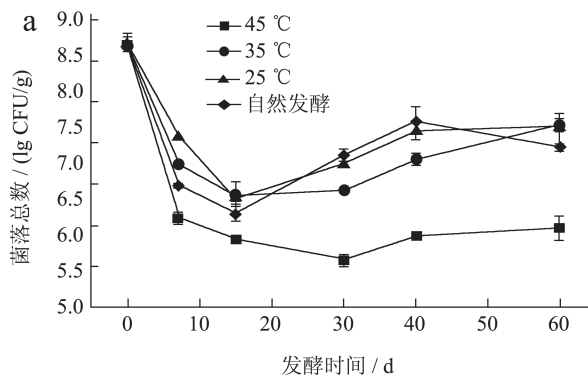


图 1 不同发酵温度下酱醪中菌落总数、酵母菌以及乳酸菌数量的变化

Fig.1 Changes in the total number of bacterial colonies, yeast, and lactic acid bacteria in soy sauce at different fermentation temperatures

2.2 温度对低盐酱油发酵过程中理化指标的影响

理化指标(pH 值、总酸、氨基酸态氮和还原糖)是反映酱油发酵品质及发酵状态的重要评价标准。对低盐酱油不同温度发酵过程中理化指标进行了跟踪,结果如图 2 所示。由图 2a 可知,低盐酱油发酵起始和结束时各温度间 pH 值差异均较小,分别在 5.6 和 4.6 左右,但发酵过程 pH 值变化情况存在一定差异。具体而言,45 °C 组整个发酵过程中 pH 值缓慢下降;而其余温度组发酵前 7 d pH 值迅速下降,之后趋于稳定。图 2b 显示,总酸与 pH 值变化情况一致,45 °C 组发酵

过程中总酸含量缓慢上升；而其余温度组发酵前 7 d 总酸含量迅速增加，之后趋于稳定。发酵结束时，4 组酱醪的总酸含量均由 0.50 g/100 g 左右上升至 1.50 g/100 g 左右。发酵初期，较高的 pH 值适宜乳酸菌生长繁殖，产生大量的有机酸，使体系的 pH 值快速下降，总酸增加^[10]。

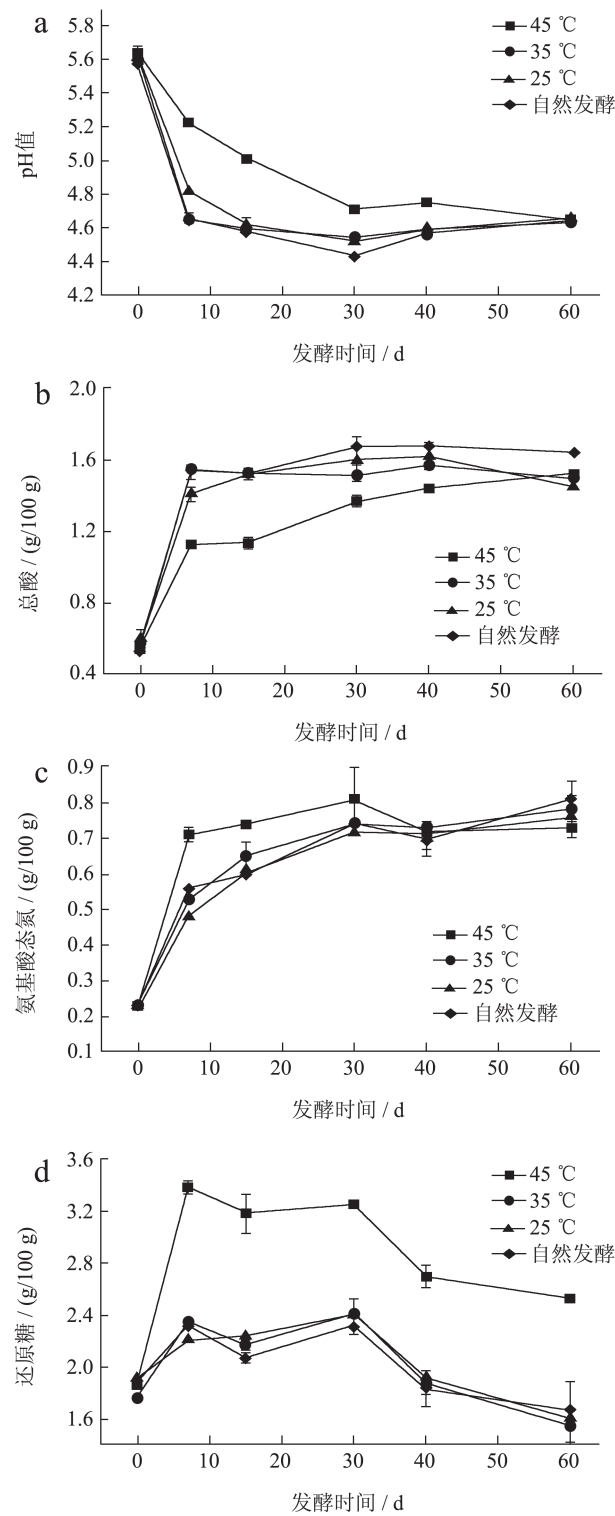


图 2 不同发酵温度下酱醪理化指标

Fig.2 Physical and chemical indicators of sauce mash at different fermentation temperatures

酱油中的氨基酸态氮含量是衡量其品质和鲜味的重要指标。发酵过程中，4 组低盐酱醪中氨基酸态氮含量均呈先快速上升后趋于稳定的变化趋势，发酵结束氨基酸态氮含量在 0.73~0.81 g/100 g 范围内 (图 2c)。发酵初期，微生物分泌的蛋白酶活力强，使蛋白质快速转化，氨基酸态氮增加，而后微生物代谢活动会消耗部分氨基酸并转化为风味物质，从而导致其含量略下降^[18]。还原糖含量变化情况如图 2d 所示，发酵过程中还原糖均呈先增加后逐渐下降的变化趋势。但是，45 °C 发酵过程中还原糖含量远远高于其余温度组；而其余温度组间还原糖含量差异较小。发酵结束时，45 °C 组酱醪还原糖含量为 2.52 g/100 g，其余温度组的还原糖含量在 1.45~1.66 g/100 g。发酵初期，原料被淀粉酶大量水解成葡萄糖等还原糖，温度越高，淀粉酶分解速度越快，因此，45 °C 组还原糖含量明显高于其他组。而后大量微生物利用还原糖生长代谢，使其被大量消耗^[19]。

2.3 温度对低盐发酵酱油中游离氨基酸的影响

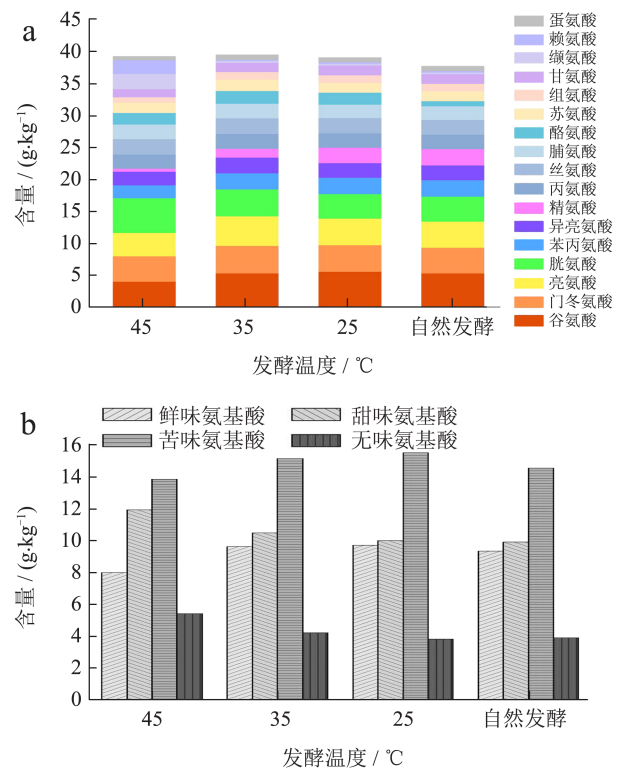


图 3 不同温度发酵结束时酱油游离氨基酸组成

Fig.3 Composition of free amino acids in soy sauce at the end of fermentation at different temperatures

对发酵结束的酱醪样品中 17 种游离氨基酸进行分析，结果如图 3 所示。发酵结束时，各组酱油中游离氨基酸总量相差不大，这主要是由于底物中蛋白质含量相当，而不同温度条件下发酵过程中蛋白质均基本水解完全^[11]。同时，也说明只要发酵时间够长，低温

条件不影响酱油发酵中游离氨基酸的形成。四组样品中均以苦味氨基酸含量最高,其次是甜味氨基酸、鲜味氨基酸,Liu等^[20]研究表明苦味是低盐酱油的特征味觉之一。发酵温度越高,越有利于甜味氨基酸的形成,降低苦味氨基酸含量,但同时也会降低鲜味氨基酸含量。高温(45℃)使得酱油中亮氨酸、精氨酸、组氨酸等苦味氨基酸明显低于其他组,可能是高温促进美拉德反应被消耗^[21]。谷氨酸是酱油鲜味的主要来源,随着发酵温度的升高,酱油中的谷氨酸含量降低,最低为4.02 g·kg⁻¹(45℃组),可能是高温使谷氨酰胺酶活性降低,谷氨酰胺转化为焦谷氨酸,从而影响谷氨酸的形成^[22]。

2.4 温度对低盐发酵酱油中生物胺的影响

生物胺是一种低分子量含氮有机化合物,主要通过各种微生物的酶促氨基酸脱羧形成,高水平的生物胺摄入会引起毒性反应,甚至威胁人类健康^[23]。有研究表明,减盐会引起酱油发酵过程中微生物群落的变化,导致生物胺的积累,增加食品安全风险^[24]。如图4所示,4组酱油中生物胺总含量在78.88~145.67 mg·kg⁻¹范围内,随着发酵温度的升高,生物胺的总含量降低。所有酱油样品中以酪胺、苯乙胺为主,Zhang等^[25]研究报告表明酱醅发酵期间,酪胺、苯乙胺是主要生物胺之一。其中,45℃组酪胺含量最低,但其苯乙胺含量高,未检出腐胺;而色胺和组胺仅在自然发酵酱油中检出。有研究表明,生物胺的形成与温度、微生物种类等因素有关系,导致各酱油中生物胺差异大^[26,27]。

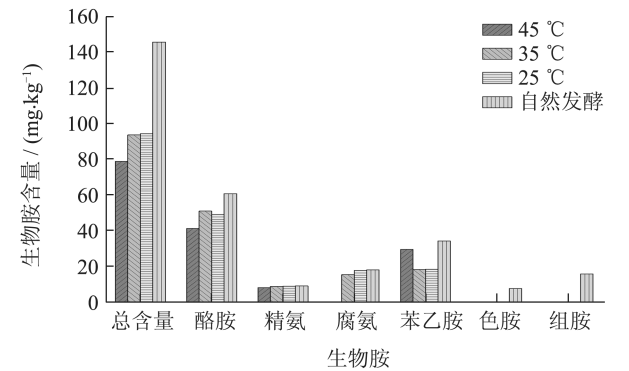


图4 不同温度发酵结束时酱油生物胺含量
Fig.4 Content of biogenic amines in soy sauce at the end of fermentation at different temperatures

2.5 温度对低盐发酵酱油中挥发性风味物质的影响

通过顶空固相微萃取-气质联用分析酱油样品中挥发性风味物质,其种类数量及含量如图5所示,4组酱油样品共检测出挥发性风味物质135种,包括酯类32种、醇类21种、醛类18种、酮类17种、烃类

13种、酸类7种、呋喃类7种、酚类6种、吡嗪类5种、其他9种。由图5b可以看出,主要以酚类、酯类以及醇类为主,各温度间酱油挥发性风味物质差异明显;45℃高温有利于酱油中醛类、酸类、酮类、吡嗪类等挥发性风味物质的形成;35℃组酱油中醇类物质丰富;25℃低温有利于酚类、酯类、呋喃类等物质的形成。

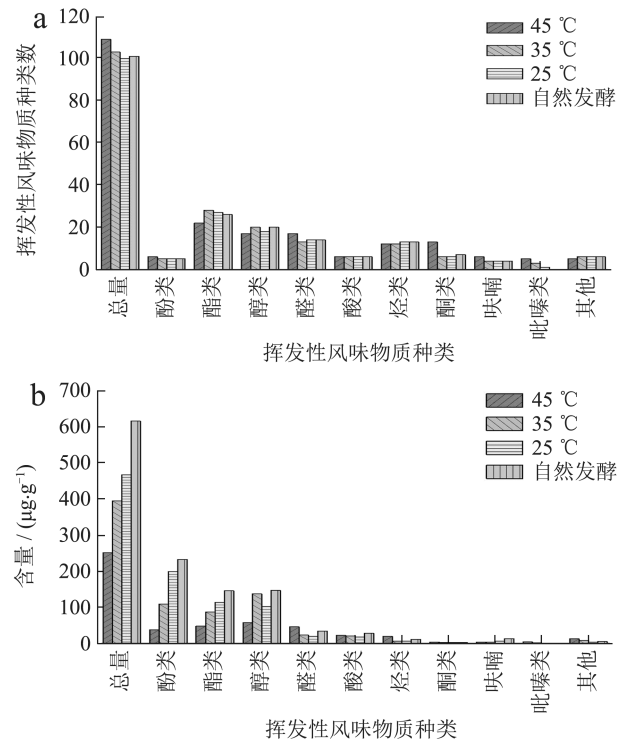


图5 不同温度发酵结束时酱油挥发性风味物质种类与数量及含量
Fig.5 Types and contents of volatile flavor compounds in soy sauce at the end of fermentation at different temperatures

为探究4种酱油挥发性风味成分的差异性,对样品检出且分类的9大类挥发性风味成分进行聚类分析,结果以热图形式展示,如图6所示。酚类物质在酱油中种类数量少,但其含量高,尤其是在自然发酵酱油中,4-乙烯基愈创木酚、4-乙基愈创木酚、4-乙基苯酚等多种酚类物质处于较高水平,这些物质是酱油中重要的呈味物质,具有烟熏味、丁香、辛香和果香^[28,29]。25℃组中4-乙烯基愈创木酚含量仅次于自然发酵组,达138.89 μg·g⁻¹,而45℃组和35℃组仅分别含有40.08、1.11 μg·g⁻¹。相关研究报道,假丝酵母、球拟酵母等多种耐盐酵母菌与酱油的风味密切相关,这些菌可产生4-乙基愈创木酚、4-乙基苯酚等酱油特征香气成分^[30-32]。45℃组酚类含量最低,检出少量独有的4-甲基苯酚,该物质可以赋予酱油花香、果香。酯类物质是酱油中最丰富的挥发性风味成分,各组酱油中酯类物质差异明显(图6b)。棕榈酸乙酯、十六酸甲酯、亚油酸乙酯、亚油酸甲酯是4组酱油中共有

醇类物质是酱油中主要挥发性成分之一，由图 6c 可知，乙醇、苯乙醇以及异戊醇是各组酱油中主要的醇类物质，其中乙醇主要是发酵过程中酵母菌代谢产生，苯乙醇具有花香香气，被认为是酱油的关键气味活性物质^[34]。自然发酵组醇类物质最为丰富，其次是 35℃组，包括 1-辛烯-3-醇、2,3-丁二醇、呋喃甲醇等多种醇类。酱油中醛酮类等物质主要通过美拉德反应生成。如图 6d、6g 所示，45℃组含有大量的醛酮类物质，包括苯乙醛、2-甲基丁醛、3-甲硫基丙醛、3-羟基-2-丁酮、苯基丙酮、1-羟基-2-丁酮等，这些物质不仅可以赋予酱油独特的香气，还可以在酵母菌的作用下进一步生成酚类等物质^[10]。如图 6e 所示，酸类物质主要以乙酸为主，乙酸具有刺激性气味，适量的乙酸可以调和酱油的风味，以自然发酵酱油中含量最高，其次是 45℃组。35℃组以辛酸、2-甲基丙酸、壬酸、3-甲基丁酸等含量较高，这些物质可以增强酱油香气。酱油中烃类物质含量整体较低（图 6f），其香气阈值较高，对酱油的风味贡献有限。大多数呋喃类物质具有焦糖、果香香气，2-戊基呋喃、2-丙酰呋喃、2,5-二乙基四氢呋喃是 45℃组中特有的物质（图 6h）。吡嗪类化合物主要使酱油具有坚果、烘焙和烘烤等香气，这类物质在 45℃组中最为丰富（图 6i）。

2.6 感官品质分析

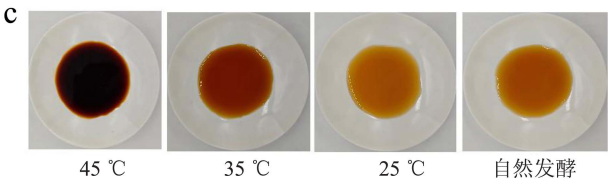
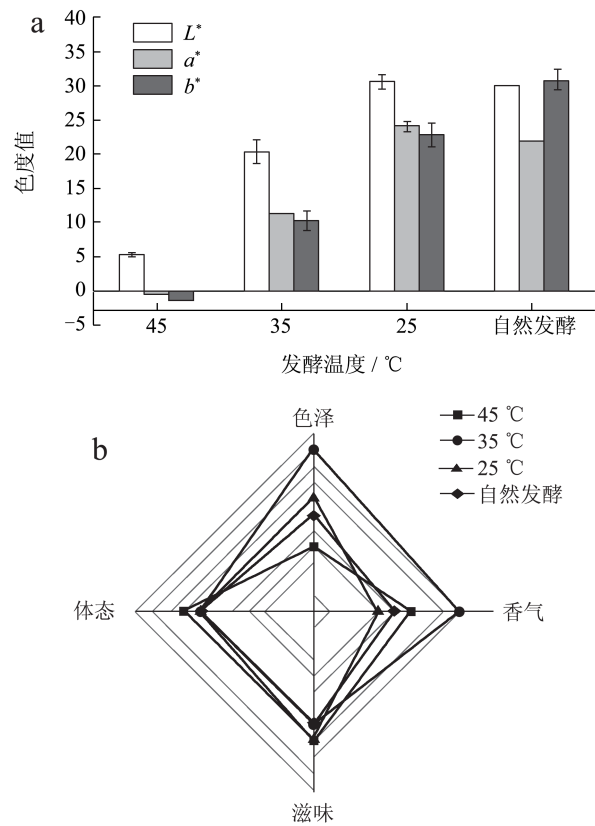


图 7 酱油色泽和感官评价结果

Fig.7 Soy sauce color and sensory evaluation results

色泽、香气和滋味等感官品质能够直接反映酱油品质。 L^* 值代表样品的亮度， a^* 、 b^* 值分别表示红绿度、黄蓝度，可以反映酱油的色泽情况。成品酱油色差值结果如图 7a 所示，随着发酵温度的升高，酱油的 L^* 值、 a^* 、 b^* 值越小，表明发酵温度越高，酱油颜色越黑、色泽越暗。感官评价结果显示（图 7b），不同温度发酵的低盐酱油主要在色泽和香气评分上差异较大。45℃发酵的酱油呈棕黑色，导致其色泽得分最低；具有较浓郁的烟熏味、焦糖味以及酱香，但整体香气较为单一。35℃发酵的酱油其色泽和香气得分最高，色泽呈鲜艳的深红褐色，且酱香、酒香、酸香和花果香协调，整体风味较好。然而，25℃组和自然发酵酱油呈浅红棕色，酱香风味较弱，而花果香、酒香较浓郁。

3 结论

本研究探讨了发酵温度对低盐酱油发酵过程中微生物数量、理化指标及成熟酱醪品质的影响。结果表明，45℃高温条件下低盐酱油能够正常发酵；而中低温（35、25℃和常温）条件对低盐发酵过程中产膜酵母菌等微生物抑制作用较弱，导致其酱醪表面“产膜”严重。此外，45℃高温发酵速度更快，有利于发酵前期氨基酸态氮、还原糖的形成；同时，成熟酱醪中甜味氨基酸的含量更高，生物胺的含量更低。但值得注意的是，中低温（35、25℃和常温）更有利于酱醪中挥发性风味物质的形成与积累，尤其酚类、酯类等化合物。发酵温度越低，酱醪中酚类化合物和酯类化合物含量越高。感官分析结果显示，45℃高温发酵的酱油原油色泽过深、香气较为单一；25℃和自然条件发酵的酱油原油色泽和香气均较差；而 35℃发酵的酱油原油整体感官品质最好，其呈鲜艳的深红褐色，酱香、酒香、酸香和花果香协调。因此，未来可通过功能微生物强化发酵等手段调控低盐发酵过程的微生物菌群，进而实现低盐酱油的中低温发酵，以提升产品品质。

参考文献

[1] 梁小玲,张巧苑,李洁珠.酱油酿造工艺分析[J].现代食品,2022,28(8):65-67.

- [2] 李艳军,许静,谢丰,等.不同工艺及原料酱油风味特征研究进展[J].食品与发酵工业,2025,51(8):367-378.
- [3] 朱莉,许长华.酱油关键风味物质及其功能与发酵工艺研究进展[J].食品与发酵工业,2018,44(6):287-292.
- [4] 张智宏,陈嘉琳,黄鑫,等.酱油的历史及原酿造酱油发展趋势[J].现代食品科技,2023,39(12):302-309.
- [5] LIU H, YANG S J, LIU J, et al. Effect of salt concentration on Chinese soy sauce fermentation and characteristics [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102825.
- [6] DEVANTHI P, GKATZIONIS K. Soy sauce fermentation: Microorganisms, aroma formation, and process modification [J]. Food Res Int, 2019, 120: 364-374.
- [7] HOANG N X, FERNG S, B C T, et al. Optimizing the initial moromi fermentation conditions to improve the quality of soy sauce [J]. Food Science and Technology, 2016, 74: 242-250.
- [8] FENG Y, XIE Z, HUANG M, et al. Decoding temperature-driven microbial community changes and flavor regulation mechanism during winter fermentation of soy sauce [J]. Food Res Int, 2024, 177: 113756.
- [9] 尹文颖,崔春,陈玲,等.发酵温度对高盐稀态酱油原油品质的影响[J].食品工业科技,2014,35(2):154-157.
- [10] 于茜雅,鲁赛,吴昌正,等.温度对广式高盐稀态酱油原油品质的影响[J].食品科学,2023,44(22):55-63.
- [11] 李心智,刘希,徐新玉,等.梯度升温发酵工艺对不同盐分稀态发酵酱油微生物变化和风味形成的影响[J].食品工业科技,2024, 45(9):106-114.
- [12] 王泽亮,符怡,李恒,等.四川传统酿造酱油风味品质特点解析[J].中国调味品,2024,49(3):169-174.
- [13] 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.
- [14] 王阿利,王子谦,魏梓晴,等.酱油酿造中微生物群落演替及其空间异质性研究[J].中国食品学报,2022,22(12):257-266.
- [15] FENG Y, WU W, CHEN T, et al. Exploring the core functional microbiota related with flavor compounds in fermented soy sauce from different sources [J]. Food Res Int, 2023, 173: 113456.
- [16] 吴浪涛,房峻,吴新,等.酱油变质微生物因素及乳酸菌在防腐中的应用[J].中国酿造,2021,40(7):22-27.
- [17] 赖理智,李艳军,李荔.乳酸菌在酱油发酵过程中的影响及其研究进展[J].食品安全导刊, 2022,32:163-166.
- [18] 阮志强,董玺梅,蒋雪薇,等.高盐稀态酱油发酵优势真菌与风味物质相关性分析[J].食品科学,2022,43(10):172-179.
- [19] 庄婉菁,覃旋,刘晓艳,等.高盐稀态酱油酿造过程中理化指标的动态变化研究[J].农产品加工,2019,17:66-68.
- [20] LIU H, CHEN X, LU J, et al. Evaluation of the differences between low-salt solid-state fermented soy sauce and high-salt diluted-state fermented soy sauce in China: from taste-active compounds and aroma-active compounds to sensory characteristics [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 12: 22-5142.
- [21] RU L, JUN H, WU X, et al. Effect of raw material and starters on the metabolite constituents and microbial community diversity of fermented soy sauce [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(13): 5687-5695.
- [22] 周尚庭,李沛,郭辉.谷氨酰胺酶和酵母抽提物对无添加酱油的品质提升研究[J].中国调味品,2016,41(5):45-50.
- [23] 何一龙,刘晓艳,钱敏,等.发酵酱油中生物胺的产生及其控制研究进展[J].中国酿造,2020,39(9):37-41.
- [24] HU G, CHEN J, DU G, et al. Moromi mash dysbiosis triggered by salt reduction is relevant to quality and aroma changes of soy sauce [J]. Food Chemistry, 2023, 406: 135064.
- [25] ZHANG L, XIONG S, DU T, et al. Exploring the core microorganisms and mechanisms responsible for biogenic amines production during soy sauce fermentation [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104236.
- [26] WANG Y, HU M, LI X Y, et al. Insights into the biogenic amine-generating microbes during two different types of soy sauce fermentation as revealed by metagenome-assembled genomes [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(3): 123-134.
- [27] ZHOU K, ZHANG X, HUANG G D, et al. Formation of biogenic amines in soy sauce and reduction via simple phytochemical addition [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 176: 114542.
- [28] 郭明威.产生酱油关键香气物质4-乙基愈创木酚的微生物和发酵工艺研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [29] GAO L, LIU T, AN X, et al. Analysis of volatile flavor compounds influencing Chinese-type soy sauces using GC-MS combined with HS-SPME and discrimination with electronic nose [J]. J Food Sci Technol, 2017, 54(1): 130-143.
- [30] QI Q, HUANG J, ZHOU R Q, et al. Characterizing microbial community and metabolites of Cantonese soy sauce [J]. Food Bioscience, 2021, 40(5): 100872.
- [31] ZHANG L, ZHANG L, XU Y. Effects of *Tetragenococcus halophilus* and *Candida versatilis* on the production of aroma-active and umami-taste compounds during soy sauce fermentation [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2020, 100(6): 2782-2790.
- [32] QI W, FAN Z, WANG C, et al. Non-targeted metabolomic reveals the effect of salt stress on global metabolite of halotolerant yeast *Candida versatilis* and principal component analysis [J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2014, 41(10): 1553-1562.
- [33] CHEN X C, MENG F B, TIAN H L, et al. Dynamic changes in metabolomics and flavoromics during industrial scale fermentation of Chinese traditional soy sauce [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103940.
- [34] GAO X, HAN X, TANG Y, et al. Exploring changes in key aroma-active compounds of soy sauce due to different fermentation processes [J]. Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106393.