尹晨静, 张伟维, 赵峰, 等. 酵母发酵对大黄鱼脱腥工艺优化及品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 212−222. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030103
YIN Chenjing, ZHANG Weiwei, ZHAO Feng, et al. Effect of Yeast Fermentation on Deodorization Process Optimization and Quality of Large Yellow Croaker[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 212−222. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030103

·工艺技术·

酵母发酵对大黄鱼脱腥工艺优化及品质的影响

尹晨静[1], 张伟维[1], 赵　峰[2], 苏来金[1,*]
（1.温州大学生命与环境科学学院, 浙江省水环境与海洋生物资源保护重点实验室, 浙江温州 325035;
2.重庆三峡学院生物与食品工程学院, 重庆 404120）

摘　要: 为有效解决大黄鱼的腥味问题，本研究以高活性干酵母为发酵菌种，采用酵母发酵法对大黄鱼进行脱腥处理。通过单因素实验探究发酵温度、发酵时间及酵母添加量对产品感官评分和新鲜度的影响。随后，以感官评分为响应值，利用响应面法优化发酵工艺参数，进一步分析发酵前后大黄鱼的色差、pH、持水力、蒸煮损失、质构特性（硬度、弹性、咀嚼性、胶粘性）、游离氨基酸含量及挥发性风味化合物的变化。结果表明，最佳发酵工艺参数为：发酵温度 28 ℃，发酵时间 55 min，酵母添加量为 1.75%。在此条件下，发酵改善了大黄鱼的质构特性和色泽，将鱼肉的持水力提高了 4.14%，蒸煮损失降低了 3.11%。游离氨基酸分析显示，发酵后总游离氨基酸含量降低了 154.07 mg/100 g，其中鲜味、甜味和苦味氨基酸含量分别降低了 9.9、61.33 和 74.62 mg/100 g，而鲜味和甜味氨基酸比例提高了 4% 和 0.52%。通过固相微萃取-气相色谱-质谱（SPME/GC-MS）分析发现，与鱼腥味相关的壬醛、庚醛、戊醛和己醛的含量显著降低，而具有愉悦发酵风味的醇类、酮类和酯类的含量显著增加。综上所述，酵母发酵可以明显改善大黄鱼的风味和品质。本研究为大黄鱼发酵脱腥技术应用提供了理论依据。

关键词: 大黄鱼, 酵母发酵, 脱腥工艺, 质构特性, 游离氨基酸, 挥发性风味化合物
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0212−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030103　　本文网刊:

Effect of Yeast Fermentation on Deodorization Process Optimization and Quality of Large Yellow Croaker

YIN Chenjing[1], ZHANG Weiwei[1], ZHAO Feng[2], SU Laijin[1,*]
（1.College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Zhejiang Provincial Key Laboratory for Water Environment and Marine Biological Resources Protection, Wenzhou 325035, China;
2.College of Biological and Food Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404120, China）

Abstract: To address the fishy odor of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*), this study investigated deodorization via yeast fermentation using high-activity dry yeast as the fermentation strain. Single-factor experiments were conducted to evaluate the effects of fermentation temperature, fermentation time, and yeast dosage on sensory scores and product freshness. Subsequently, the fermentation parameters were optimized using response surface methodology, with sensory scores used as the response variable. Under the optimized conditions, differences in color, pH, water-holding capacity (WHC), cooking loss, textural properties (hardness, springiness, chewiness, and gumminess), free amino acid (FAA) composition, and volatile compounds in large yellow croaker before and after fermentation were further analyzed. The optimal fermentation conditions were determined to be a temperature of 28 ℃, duration of 55 min, and yeast addition level of 1.75%. Under these conditions, fermentation enhanced textural characteristics and color attributes, with WHC increasing

收稿日期: 2025−03−10
基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划（2023C04003）; 温州市科技特派员团队项目（X2023105）。
作者简介: 尹晨静（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 海洋生物资源开发及利用, E-mail: 18850637059@163.com。
*** 通信作者:** 苏来金（1982−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 海洋生物资源开发及利用, E-mail: sulaijin@163.com。

by 4.14% and cooking loss decreasing by 3.11%. FAA analysis showed that the total free amino acid content decreased by 154.07 mg/100 g after fermentation, with the umami, sweet, and bitter amino acid contents decreasing by 9.9, 61.33, and 74.62 mg/100 g, respectively, and the proportions of umami and sweet amino acids increasing by 4% and 0.52%, respectively. SPME/GC–MS analysis demonstrated a significant reduction in fishy aldehydes (nonanal, heptanal, pentanal, and hexanal) and a substantial increase in pleasant fermented aroma compounds (alcohols, ketones, and esters). In summary, yeast fermentation effectively improved the flavor profile and product quality of large yellow croaker. This study provides a theoretical basis for the application of fermentation-based deodorization technology in large yellow croaker processing.

Key words: large yellow croaker; yeast fermentation; deodorization process; texture properties; free amino acids; volatile flavor compounds

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)被誉为我国的“国鱼”，是我国东南沿海特有的中下层洄游性经济鱼类，位列“四大经济鱼类”之一[1]。其海水养殖规模庞大，肉质细嫩，富含蛋白质、维生素、DHA 和 EPA 多不饱和脂肪酸等营养物质，具有重要的食用和商业价值[2−3]。近年来，随着大黄鱼产量的逐年增加，商品化开发利用逐渐受到广泛关注[4]。然而，由于养殖模式和水域环境的影响，大黄鱼普遍存在腥味和土腥味等异味问题，影响了大黄鱼深加工的发展和消费者的接受度[5]。

目前，针对水产品脱腥的研究，已开发物理法、化学法、生物法及复合脱腥法等。其中，生物脱腥法以其天然环保，营养保留率高，安全性好等优势，逐渐成了近年来的研究热点，尤其符合绿色食品的发展[6−7]。酵母发酵法作为一种新兴的生物脱腥技术，因其绿色高效而备受关注。研究表明，酵母因其具有疏松的多孔结构能够吸附腥臭物质，并能以腥臭物质为底物转化为无臭成分，如将与腥味相关的醛类转化为相应的醇、酮类物质等，从而实现脱腥的目的[8−10]。然而，关于酵母发酵法在大黄鱼脱腥中的应用研究仍较为有限，其最佳工艺条件及对大黄鱼品质的影响尚需进一步探索。

因此，本研究以大黄鱼为原料，通过优化酵母发酵脱腥工艺条件，结合感官评价、质构特性分析、游离氨基酸组成分析及固相微萃取-气相色谱-质谱(SPME/GC-MS)等技术手段，系统研究酵母发酵对大黄鱼风味物质及品质特性的影响，旨在为大黄鱼脱腥加工工艺的开发提供理论依据，同时为其深加工产品的风味调控及品质提升提供技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

新鲜大黄鱼　购于浙江省温州市洞头海鲜市场，平均体重(1±0.2 kg/条)；高活性干酵母　安琪酵母股份有限公司；甲醇　分析纯，美国 Thermo 公司；甲酸、甲基叔丁基醚、正己烷、二氯甲烷色谱纯、正构烷烃　美国 Sigma 公司；氢氧化钠、浓盐酸、氨基酸标准品　色谱纯，国药集团化学试剂有限公司；以上其他试剂均为国产分析纯。

NH300 色差仪　广州三恩时科技有限公司；PHS-3E 型 pH 计　上海仪电科学仪器有限公司；TMS-PRO 质构仪　美国 Food Twchnology 公司；FSH-2A 均质机　常州市国旺仪器制造有限公司；JA2003 精密电子天平　上海浦春计量仪器有限公司；XFH-30MA 电热式压力蒸汽灭菌锅　浙江新丰医疗器械有限公司；Epoch 酶标仪　美国伯腾仪器有限公司；HH-M4 恒温水浴锅　江苏新春兰科学仪器有限公司；Research Plus 移液器　德国 Eppendorf 公司；H1850-R 高速台式冷冻离心机　湖南湘仪有限公司；Agilent 8890A 气相色谱仪、DB-Heavy Wax 色谱柱　美国 Agilent 公司；Rxi-5Sil MS 色谱柱　美国 Reste 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品预处理　对新鲜大黄鱼进行低温解冻处理，依次去除鳞片、头部及内脏组织(重点清除腹腔血块和黑色腹膜)，随后采用流水清洗，从背部流水线均匀剖成两片，去除脊椎骨，最后将处理后的鱼片置于滤网中沥干水分备用。

1.2.2　酵母发酵液的制备　分别称取高活性干酵母 2.5、5、7.5、10、12.5 g 与 250 mL 去离子水混合，配制酵母添加量为 1%、2%、3%、4%、5% 的酵母发酵液，恒温箱 37 ℃ 活化酵母 30 min。

1.2.3　单因素实验设计

1.2.3.1　酵母发酵温度对大黄鱼腥味的影响　准确称取大黄鱼鱼肉 150 g，料液比为 1∶1.5(g/mL)，选取酵母添加量为 3%，发酵时间为 90 min。以感官评价得分为指标，考察酵母发酵温度为 25、30、35、40、45 ℃ 对脱腥效果的影响，设置平行实验 3 次，取平均值。

1.2.3.2　酵母发酵时间对大黄鱼腥味的影响　准确称取大黄鱼鱼肉 150 g，料液比为 1∶1.5，选取酵母发酵温度为 35 ℃，酵母添加量为 3%。以感官评价得分为指标，考察酵母发酵时间 30、60、90、120、150 min 对脱腥效果的影响，设置平行实验 3 次，取平均值。

1.2.3.3　酵母添加量对大黄鱼腥味的影响　准确称取大黄鱼鱼肉 150 g，料液比为 1∶1.5，选取发酵温度为 35 ℃，发酵时间为 90 min。以感官评价得分为指标，考察酵母添加量 1%、2%、3%、4%、5% 对脱腥

效果的影响，设置平行实验 3 次，取平均值。

1.2.4 响应面试验设计 以酵母发酵温度（A），酵母发酵时间（B），酵母添加量（C）三个单因素为影响因素，每个因素设置三个水平，以感官评分为响应值来建立模型，试验因素及水平设计见表 1。

表 1 响应面试验设计的因素水平

Table 1 Factor and level design of response surface test

水平	因素		
	A酵母发酵温度（℃）	B酵母发酵时间（min）	C酵母添加量（%）
−1	28	45	1.5
0	30	60	2
1	32	75	2.5

1.2.5 感官评价的测定 对实验室成员进行感官评价培训，选择 10 名感官评定人员（5 名男性，5 名女性，年龄控制在 20~30 岁），对大黄鱼鱼肉样品进行感官评价，感官评价标准如表 2 所示。总分为加权平均分，按照“总分=组织状态评分×0.2+气味评分×0.4+光泽度评分×0.2+质地评分×0.2”计算。

表 2 酵母发酵对大黄鱼鱼肉品质影响感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for the effect of yeast fermentation on fish quality of large yellow croaker

评价指标	加权系数	标准	评分（分）
组织状态	0.2	肌肉纹理清晰，组织紧密，没有糜烂	16~20
		肌肉纹理清晰度略低，组织紧密，稍有糜烂	11~15
		肌肉纹理清晰度低，组织些许松散，糜烂较多	6~10
		纹理无法辨识，组织松散，大部分糜烂	0~5
气味	0.4	风味好，无腥味、酸味等不良气味	16~20
		风味较好，略有腥味、酸味等不良气味少	11~15
		风味较差，腥味、酸味等不良风味较重	6~10
		风味差，腥味、酸味等不良风味极重	0~5
色泽	0.2	色泽明亮，切面嫩白	16~20
		色泽稍暗，切面嫩白	11~15
		色泽较暗淡，切面发黄	6~10
		色泽暗淡不均，切面发黄	0~5
质地	0.2	鱼肉软硬适中，富有弹性	16~20
		鱼肉软硬一般，弹性一般	11~15
		鱼肉较硬或较软，弹性较差	6~10
		鱼肉很硬或很软，没有弹性	0~5

1.2.6 挥发性盐基氮值的测定 按照 GB 5009.228-2016 国家食品标准《食品中挥发性盐基氮的测定》方法测定酵母发酵大黄鱼鱼肉样品的挥发性盐基氮（Total Volatile Base Nitrogen，TVB-N）值。

1.2.7 酵母发酵对大黄鱼鱼肉理化性质的影响

1.2.7.1 色差值的测定 使用色差仪测定大黄鱼鱼肉样品的色差值。将处理后的大黄鱼鱼肉样品放入一个直径 4 cm、高 2 cm 的无盖透明圆柱体模具内，色差仪与待测物表面垂直放置，测量其背部肌肉的 L^*、a^*和 b^*的数值，并且按照公式（1）计算大黄鱼鱼肉白度值 Wh，每个样品进行 3 次平行测定，取平均值。

$$\mathrm{Wh}=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}} \qquad \text{式（1）}$$

式中：L^*代表的是酵母发酵大黄鱼鱼肉的亮度值；a^*代表酵母发酵大黄鱼鱼肉的红度值；b^*代表的是酵母发酵大黄鱼鱼肉的黄蓝值。

1.2.7.2 pH 的测定 按照 GB.237-2016《食品 pH 值的测定》测定酵母发酵大黄鱼鱼肉样品 pH。

1.2.7.3 持水力的测定 参考纪锡伟等[11] 的研究方法并稍作改动，称取 5 g 大黄鱼鱼肉块，记为 W_1；双层滤纸包好放入洁净的 50 mL 离心管中，在 4 ℃下，4500×g 离心 15 min。离心后将样品取出称重，记为 W_2，并且按照公式（2）计算大黄鱼鱼肉持水力，每个样品进行 3 次平行测定，取平均值。

$$\mathrm{WHC}(\%)=[1-(W_1-W_2)/W_1]\times 100 \qquad \text{式（2）}$$

式中：W_1 代表的是离心前大黄鱼鱼肉样品的称量重量，g；W_2 代表的是离心结束后大黄鱼鱼肉样品的称量重量，g。

1.2.7.4 蒸煮损失率（Cooking loss，CL）的测定 参考欧帅等[12] 的研究方法并稍作修改，称取约 3 g 鱼肉，利用双层滤纸吸干大黄鱼鱼肉表面水分后，称取质量记作 M_1，放入洁净干燥的 50 mL 离心管中，放入 85 ℃ 恒温水浴锅中水浴 15 min 后取出，吸干鱼肉表面水分，称取质量记为 M_2，并且按照公式（3）计算大黄鱼鱼肉蒸煮损失率，每个样品进行 3 次平行测定，取平均值。

$$\mathrm{CL}(\%)=\frac{M_1-M_2}{M_1}\times 100 \qquad \text{式（3）}$$

式中：M_1 代表的是蒸煮前大黄鱼鱼肉样品的称量重量，g；M_2 代表的是蒸煮后大黄鱼鱼肉样品的称量重量，g。

1.2.7.5 质构值的测定 参考卢涵等[13] 的研究方法并稍作修改。利用质构仪进行大黄鱼鱼肉质构测定，采用两次压缩的质构剖面分析模式，对大黄鱼鱼肉的硬度、弹性、咀嚼性、胶粘性进行分析。

质构仪参数：驻留时间 5 s，压力 100 N，距离 30 mm，形变量 20%，速度 60 mm/s，起始压力 1 N，间隔时间 5 s。

1.2.8 游离氨基酸含量的测定 参考 Li 等[14] 的研究方法并稍作修改。取适量大黄鱼鱼肉样本于 2 mL 离心管中，准确加入 600 μL 10% 甲酸甲醇溶液-水（1∶1，v/v），加入两颗钢珠，漩涡振荡 30 s。放入组织研磨器中，55 Hz 研磨 90 s。在 12000 r/min，4 ℃ 下离心 5 min。取适量上清液加入 10% 甲酸甲醇溶液-水（1∶1，v/v）稀释 10 倍，漩涡振荡 30 s。取上清液 100 μL，加入 20 ng/mL 的 Trp-d3 内标 100 μL，漩涡振荡 30 s，上清液过 0.22 μm 滤膜，过滤液加入到检测瓶中，静置待测。

1.2.9 挥发性成分的 SPME/GC-MS 的测定条件

参考 Sun 等[15]的研究方法并稍作修改。取适量样本于 15 mL 离心管中，适量液氮冷冻 5 min，将样本转移至打碎机中，打碎 3 min。SPME 萃取头在 270 ℃下，老化 10 min，取 1 g 样本于 20 mL 顶空进样瓶中，加入 10 μL 内标溶液于样品中，80 ℃，孵育 10 min；利用老化后的 SPME 萃取头，在 80 ℃下吸附样本 25 min，结束后，转移至 GC 进样口，250 ℃脱附 5 min，进样后，SPME 萃取头，270 ℃老化 10 min，取 10 μL 正构烷烃至 20 mL 顶空进样瓶中，孵育提取，进样。

气相色谱条件：高纯氦气作为载气，恒定流速为 1.0 mL/min。DB-Heavy Wax 色谱柱：初始温度为 50 ℃，保持 2 min，以 5 ℃/min 的速度升至 230 ℃，保持 5 min。Rxi-5Sil MS 色谱柱的升温程序高于 DB-Heavy Wax 色谱柱 5 ℃，调制器温度始终高于 Rxi-5Sil MS 色谱柱柱温 15 ℃，调制周期为 6.0 s。进样口温度为 250 ℃。

质谱条件：LECO Pegasus BT 4D 质谱检测器，质谱传输线温度为 250 ℃，离子源温度为 250 ℃，采集速率为 200 spectra/s，电子轰击源为 70 eV，质谱扫描范围为 m/z 35~550。

1.3　数据处理

本研究中所有实验均设置三次独立重复测定，数据经整理后以“平均值±标准偏差”形式表示。通过 SPSS 26.0 进行显著性分析，采用 Origin 2024b 软件作图，响应面试验结果用 Design-Expert 8.0.6 进行参数优化及方差分析。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果与分析

2.1.1　发酵温度对大黄鱼鱼肉感官品质及新鲜度的影响　在利用酵母发酵大黄鱼的过程中，酶和微生物的作用会导致蛋白质分解，生成氨及胺类等碱性含氮物质。TVB-N 值可以评价鱼肉的新鲜度，其含量越高，表明鱼肉腐败程度越高，品质越不新鲜[16]。如图 1 所示，随着酵母发酵温度的升高，大黄鱼感官评价得分呈现先上升后下降的趋势，TVB-N 值先下降后上升。当温度为 30 ℃时，感官评分显著升高至 15.3 分（P<0.05），TVB-N 含量最低。当发酵温度高于 35 ℃时，肌肉松散，产生了酸臭味，感官评分降低。因此，酵母发酵的最适温度在 25~35 ℃之间，温度过低，呼吸作用弱，活性降低，不利于酵母发酵；温度过高，会使酵母死亡，蛋白变异，产生异味[17]。综上所述，选择发酵温度 28、30、32 ℃进行响应面优化试验。

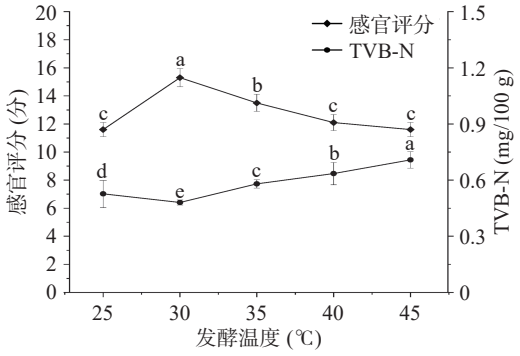


图 1　酵母发酵温度对大黄鱼鱼肉感官评价及新鲜度的影响

Fig.1　Effect of yeast fermentation temperature on sensory evaluation of large yellow croaker

注：不同小写字母表示不同处理组之间指标具有显著性差异（P<0.05），图 2~图 3 同。

2.1.2　发酵时间对大黄鱼鱼肉感官品质的影响　如图 2 所示，随着酵母发酵时间的延长，大黄鱼感官评价得分呈现先上升后缓慢下降的趋势，TVB-N 值先下降后上升。在 60 min 时，大黄鱼感官评分显著升高至 12.90 分（P<0.05），TVB-N 含量最低。在 30~60 min 内，腥味减弱，肌肉纹理清晰，感官评价得分逐渐升高。当发酵时间高于 90 min 时，大黄鱼鱼肉气味良好，但鱼肉组织松散，糜烂，降低了感官评分。原因可能是随着发酵时间的延长，酵母和其他微生物大量繁殖，降解蛋白质，肌肉间细胞结合力降低，导致鱼肉组织结构松弛，软化糜烂[18]。综上所述，选择发酵时间 45、60、75 min 进行响应面优化试验。

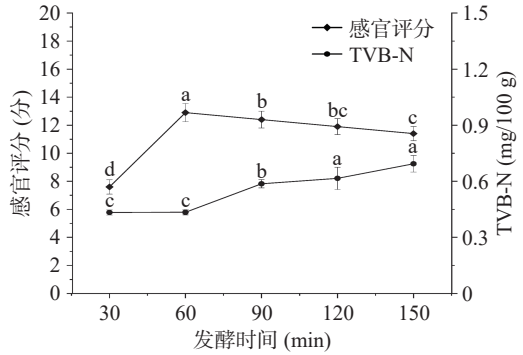


图 2　酵母发酵时间对大黄鱼鱼肉感官评价及新鲜度的影响

Fig.2　Effect of yeast fermentation time on sensory evaluation of large yellow croaker

2.1.3　酵母添加量对大黄鱼鱼肉感官品质的影响　如图 3 所示，随着酵母添加量的增加，大黄鱼感官评价得分呈现先上升后下降的趋势，TVB-N 值先下降

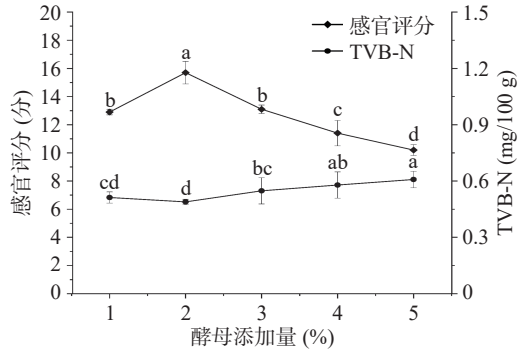


图 3　酵母添加量对大黄鱼鱼肉感官评价及新鲜度的影响

Fig.3　Effect of yeast supplementation on sensory evaluation of large yellow croaker

后上升。在酵母添加量为 2% 时，感官评分显著升高至 15.70 分（P<0.05），TVB-N 含量最低。当酵母添加量小于 2% 时，组织紧密，纹理清晰，但腥味没有得到改善。当酵母添加量大于 3% 时，酵母味重，随着酵母添加量的增加，产生了酸臭和腐败的不良气味，感官评分降低。酵母添加量过低时，其细胞壁的多孔结构无法充分吸附三甲胺、含硫化合物等腥味小分子；同时，酵母单位时间内分泌的胞外酶总量不足，导致醛类等腥味物质无法被有效降解，从而降低脱腥效果[19]。酵母添加量过多时，过度发酵使有机酸积累，产生酸败的味道，带来不愉快气味[20]。综上所述，选择酵母添加量 1.5%、2%、2.5% 进行响应面优化试验。

2.2 酵母发酵大黄鱼脱腥的响应面试验结果与分析

2.2.1 响应面试验结果与回归模型方差分析 在大黄鱼脱腥单因素实验的基础上，选取酵母发酵温度（A）、酵母发酵时间（B）、酵母添加量（C）作为三个自变量，以感官评分为响应值，利用 Design-Expert 软件，使用 Box-Behnken 设计法对工艺条件参数进行优化，共设计 15 组试验，每组 3 个平行，取平均值。

实验设计及结果如表 3 所示，方差分析结果如表 4 所示。多元回归拟合结果表明，得到酵母发酵温度（A）、酵母发酵时间（B）、酵母添加量（C）的二次多项回归模型方程为：$Y=15.69-4.84A-1.18B-3.47C+0.74AB+5.20AC+1.58BC-9.37A^2-3.45B^2-10.49C^2$。

如表 4 所示，拟合方程一次项中 A、C 对酵母发酵大黄鱼的感官评分影响极显著（P<0.01），表明酵母添加量和酵母发酵温度对感官评分具有显著影响，而酵母发酵时间影响较小，这表明在适宜的时间范围内，酵母添加量和温度与感官评分成正比，酵母可以和大黄鱼中腥味物质反应，从而减少腥味。该模型显著（P=0.0034<0.01），失拟项不显著（F=3.98、P=0.21>0.05），说明模型可用于预测相关响应。决定系数 R^2=0.9671>0.90，表明实验值具有高精度的可靠性；校正决定系数 R^2_{Adj}=0.9077 和低变异系数 C.V.=8.42 表明所选因素对感官评分起作用。经过响应面模型验证表明，酵母发酵大黄鱼鱼肉脱腥的工艺参数为发酵温度 28 ℃、发酵时间 55 min，酵母添加量 1.75%，在此条件下进行 3 次验证试验，得到感官评分为 17.04±0.12 分，与预测值 17.15 分接近。因此，可用此模型对酵母发酵大黄鱼鱼肉脱腥工艺条件进行优化。

表 3 响应面试验设计和结果

Table 3 Design and results of response surface experimental

实验号	A	B	C	感官评分(分)
1	30	60	2	15.67
2	30	75	1.5	8.98
3	30	45	2.5	8.67
4	32	45	2	10.02
5	32	60	1.5	9.77
6	30	60	2	15.33
7	28	45	2	13.20
8	32	75	2	8.87
9	28	60	2.5	11.28
10	30	75	2.5	7.26
11	28	75	2	10.87
12	30	45	1.5	13.56
13	28	60	1.5	18.2
14	30	60	2	15.07
15	32	60	2.5	8.21

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance for the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	141.22	9	15.69	16.31	0.0034	**
A温度	29.95	1	29.95	31.13	0.0025	**
B时间	11.21	1	11.21	11.65	0.019	*
C浓度	24.12	1	24.12	25.06	0.0041	**
AB	0.3481	1	0.3481	0.3618	0.5738	
AC	4.33	1	4.33	4.5	0.0875	
BC	2.51	1	2.51	2.61	0.1671	
A^2	8.3	1	8.3	8.63	0.0324	*
B^2	43.87	1	43.87	45.59	0.0011	**
C^2	25.39	1	25.39	26.38	0.0037	**
残差	4.81	5	0.9623			
失拟项	4.12	3	1.37	3.98	0.2075	
纯误差	0.6909	2	0.3454			
总离差	146.03	14				
R^2	0.9671					
R^2_{Adj}	0.9077					
C.V.(%)	8.42					

注：**表示极显著（P<0.01）；*表示显著（P<0.05）。

2.3 酵母发酵脱腥前后大黄鱼理化性质结果分析

2.3.1 酵母发酵对大黄鱼鱼肉色差值的影响 色差值可用于测定样品表观的颜色，水产品色泽的变化可以反映其新鲜度[21]。如图 4 所示，与对照组 XF 相比，经过酵母发酵处理后的大黄鱼肉的 L^*值和 a^*值出现上升，白度值 Wh 上升了 3.84，b^*值下降了 6.28，并存在显著性差异（P<0.01）。一方面可能与鱼肉蛋白交联程度和表面的光学特性有关；在发酵过程中，大黄鱼蛋白质发生变性，导致了持水力的下降，水分从肌肉纤维中流失，使鱼肉的表面更加干燥，结构越

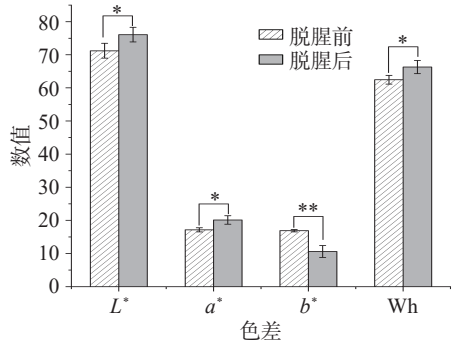


图 4 酵母发酵大黄鱼鱼肉的色差值

Fig.4 Color difference of yeast fermented large yellow croaker

注：*表示不同处理的大黄鱼鱼肉样本之间存在显著性差异（P<0.05），**表示不同处理的大黄鱼鱼肉样本之间存在极显著性差异（P<0.01），图 5~图 6 同。

致密的鱼肉反射光线会越强，展现出更高的亮度和 Wh值[22−23]。另一方面，酵母发酵促进了脂肪的氧化，生成的醛、酮类物质会改变鱼肉的颜色，脂肪的降解也会导致脂溶性色素的减少，导致颜色变浅[24]。

2.3.2　酵母发酵对大黄鱼鱼肉品质特性的影响　如图 5 所示，与对照组新鲜大黄鱼鱼肉相比，酵母发酵大黄鱼鱼肉 pH 降低为 6.91，显著低于对照组 7.23（P<0.05）。这一现象可能归因于在发酵过程中酵母及微生物代谢产生有机酸的积累[25]。有机酸的产生能够中和碱性物质，抑制挥发性盐基氮含量的大幅度上升，进一步维持了大黄鱼鱼肉的新鲜度，这也与单因素实验测定 TVB-N 的结果一致[26−27]。

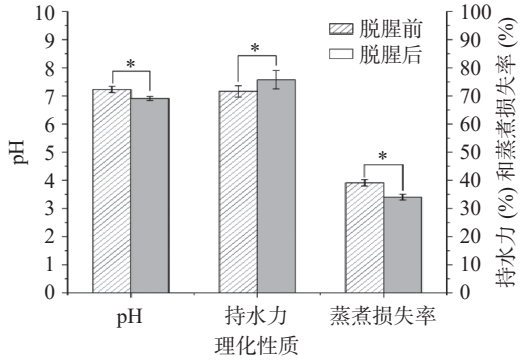


图 5　酵母发酵大黄鱼鱼肉的品质特性

Fig.5　Quality characteristics of yeast-fermented large yellow croaker

持水力和蒸煮损失率是表征肌肉保持水分能力的重要指标。持水力高且蒸煮损失率低的产品通常具有多汁、鲜嫩的口感；而持水力低且蒸煮损失率高的产品则往往水分流失多而质地坚硬、口感干涩[28−29]。如图 5 所示，酵母发酵后的大黄鱼鱼肉持水力上升了 4.14%，蒸煮损失率显著降低了 3.11%（P<0.05）。这一结果表明，酵母发酵能够有效提高大黄鱼鱼肉的持水力，降低了蒸煮损失率，有利于改善产品的质地和口感。

2.3.3　酵母发酵对大黄鱼鱼肉质构特性的影响　如图 6 所示，与对照组新鲜大黄鱼鱼肉相比，酵母发酵的大黄鱼鱼肉硬度增加了 1.34，这一现象可能归因

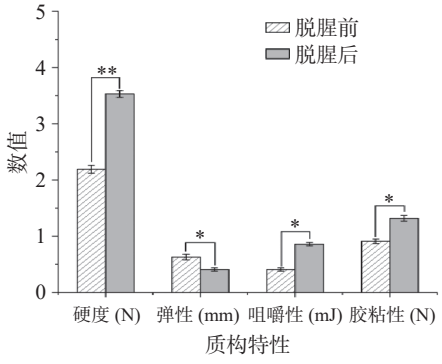


图 6　酵母发酵大黄鱼鱼肉的质构值

Fig.6　Texture values of yeast fermented large yellow croaker

于发酵过程中 pH 降低，酸性环境会导致大黄鱼鱼肉蛋白质发生变性，肌原纤维收缩，水分从肌肉纤维内部迁移到表面，使内部结构更加紧密，硬度增大[30]。此外，纪锡伟等[11] 认为发酵过程中蛋白质的酸变性和蛋白质凝固造成水分流失会导致鱼肉硬度的增加，弹性下降，胶粘性和咀嚼性上升。本研究中，酵母发酵大黄鱼鱼肉的弹性显著下降 0.21（P<0.05），而咀嚼性和胶粘性分别增加了 0.45 和 0.41，与 Dertli 等[31] 研究结果一致。综上所述，酵母发酵能够有效改善鱼肉的质构特性。

2.4　酵母发酵脱腥前后大黄鱼游离氨基酸含量变化结果分析

对常见的 16 种游离氨基酸进行了定量分析。游离氨基酸来源于蛋白质，由鱼肉本身内源性酶和微生物蛋白酶水解产生。这些游离氨基酸通常会赋予鱼肉甜味、苦味和鲜味[32−33]。如表 5 所示，甜味氨基酸是大黄鱼鱼肉中主要的呈味氨基酸，其含量最高的是甘氨酸，说明了甜味氨基酸在游离氨基酸中对大黄鱼鱼肉的滋味贡献较大。与对照组新鲜的大黄鱼鱼肉相比，酵母发酵后的大黄鱼鱼肉游离氨基酸总含量减少，尤其是赖氨酸，减少了 54.57 mg/100 g。原因可能是酵母在发酵过程中 pH 下降，影响游离氨基酸的稳定性和溶解度，导致含量下降，另一方面，酵母发

表 5　酵母发酵大黄鱼鱼肉的游离氨基酸含量

Table 5　Free amino acid contents of yeast-fermented large yellow croaker

氨基酸含量(mg/100 g)	呈味特征	处理方式	
		脱腥前	脱腥后
Asp(天冬氨酸)	鲜味/酸味	17.01±5.87^a	15.55±3.01^a
Glu(谷氨酸)	鲜味/酸味	54.26±7.81^a	45.82±4.58^b
鲜味氨基酸总量		71.27	61.37
Ala(丙氨酸)	甜味	28.65±3.38^a	20.37±2.70^b
Gly(甘氨酸)	甜味	407.3±26.07^a	359.22±21.64^b
Pro(脯氨酸)	甜味	11.06±2.58^a	8.20±0.93^b
Thr(苏氨酸)	甜味	6.42±1.14^a	5.54±0.28^b
Ser(丝氨酸)	甜味	16.19±2.57^a	14.96±0.87^a
甜味氨基酸总量		469.62	408.29
His(组氨酸)	苦味	4.52±0.74^a	4.61±0.59^a
Phe(苯丙氨酸)	苦味	23.64±3.97^a	20.05±1.65^b
Tyr(酪氨酸)	苦味	44.56±6.58^a	39.84±0.79^b
Ile(异亮氨酸)	苦味	25.45±5.61^a	20.99±1.78^a
Leu(亮氨酸)	苦味	35.18±6.87^a	27.81±1.61^b
Lys(赖氨酸)	苦味	92.73±3.09^a	38.16±5.60^b
苦味氨基酸总量		226.08	151.46
Val(缬氨酸)	甜味/苦味	35.93±4.89^a	30.24±0.62^b
Arg(精氨酸)	甜味/苦味	ND	ND
Met(蛋氨酸)	甜味苦味	19.11±4.86^a	16.58±0.58^a
游离氨基酸总量		822.01	667.94
鲜味氨基酸占总游离氨基酸比例(%)		8.67	9.19
甜味氨基酸占总游离氨基酸比例(%)		57.13	61.13
苦味氨基酸占总游离氨基酸比列(%)		27.50	22.68

注：表中“ND”表示未检出；同行不同小写字母表示不同处理的大黄鱼鱼肉样本之间存在显著差异（P<0.05），表6同。

酵将部分游离氨基酸转化为其他代谢产物，如一些高级醇、酯类等风味化合物，或利用部分氨基酸作为有机氮源进行酵母增殖，导致含量进一步降低[34]。赖氨酸是必需氨基酸，酵母自身无法合成，必须从外界获取。相比其他氨基酸，赖氨酸的降解速度更快，因为其代谢途径较为直接，且酵母对其需求较高。一些氨基酸（如谷氨酸、丙氨酸）可以通过酵母的代谢途径重新合成，因此其减少更为显著[35]。但是，在新鲜大黄鱼鱼肉中甜味氨基酸和鲜味氨基酸分别占游离氨基酸总量的 57.13% 和 8.67%，经过发酵后所占游离氨基酸总量的 61.13% 和 9.19%，分别增加了 4% 和 0.52%；苦味氨基酸由原来新鲜大黄鱼鱼肉中的 27.50% 下降至 22.68%，减少了 4.82%。因此，酵母发酵对大黄鱼鱼肉异味改善和风味的增强具有一定的积极作用。

2.5 酵母发酵脱腥前后大黄鱼挥发性成分变化结果分析

如表 6 所示，酵母发酵脱腥前后大黄鱼鱼肉中共检测出了 79 种挥发性风味化合物，包括 22 种醛类、19 种醇类、15 种酮类、20 种酯类以及 3 种其他类，发酵降低了大黄鱼鱼肉鱼腥味等不良气味，增加了脂肪味和肉香味，提高了风味品质，这也与 Zhou 等[36] 利用乳酸菌对鲭鱼发酵过程中调味质量及风味影响的研究结果一致。

发酵前的大黄鱼具有强烈的鱼腥味和油脂味等具有不良气味的挥发性醛类物质和其他风味物质，主要有壬醛、2-壬烯醛、丁醛、2-己烯醛、辛醛、庚醛、戊醛、己醛、异丁醛、1-辛烯-3-醇、甲基乙烯基

表 6 酵母发酵大黄鱼鱼肉主要挥发性风味物质对比

Table 6 Comparison of the main volatile flavor compounds in yeast fermented large yellow croaker

序号	物质	风味描述	含量(μg/kg)	
			脱腥前	脱腥后
醛类				
1	2-庚烯醛	刺激性气味	–	–
2	2,4-辛二烯醛	草本味	1.82±0.57^{a}	0.84±0.57^{a}
3	十三醛	油脂味	1.68±0.48^{a}	0.68±0.46^{b}
4	2-壬烯醛	油腻味，陈腐味	2.58±0.76^{a}	1.55±0.33^{b}
5	2,4-己二烯醛	辛辣味	0.53±0.35^{a}	0.86±0.57^{a}
6	十二烷醛	脂肪味	1.16±1.55^{a}	1.21±0.29^{a}
7	癸醛	柑橘香，蜡香	7.68±2.43^{a}	2.14±1.43^{b}
8	2-辛烯醛	坚果味，脂肪味	5.31±2.44^{a}	2.97±1.53^{a}
9	丁醛	刺激性气味	14.80±6.35^{a}	4.73±2.42^{a}
10	十四烷醛	桃子香	5.14±0.71^{a}	3.67±0.62^{a}
11	3-(甲硫基)丙醛	煮土豆味	6.46±0.96^{a}	4.35±0.69^{b}
12	顺式-4-庚烯醛	青草香，油脂香	30.20±19.25^{a}	10.48±7.39^{a}
13	2-己烯醛	鱼腥味	13.22±8.81^{a}	7.68±5.51^{a}
14	十八烷醛		–	5.87±3.91
15	丙醛	水果味	40.70±9.89^{a}	22.38±16.68^{a}
16	壬醛	脂肪味，鱼腥味	135.83±41.96^{a}	32.18±10.57^{b}
17	辛醛	油脂味，肥皂味	85.82±35.66^{a}	34.96±16.35^{a}
18	庚醛	鱼腥味	149.58±58.22^{a}	29.64±15.39^{b}
19	戊醛	刺激性臭味	169.90±18.62^{a}	91.20±54.68^{a}
20	2-甲基丁醛	可可味，杏仁味	151.14±37.92^{a}	120.34±18.49^{a}
21	异丁醛	刺激性气味	61.96±41.29^{b}	253.62±45.72^{a}
22	己醛	鱼腥味	574.36±364.92^{a}	212.81±51.12^{b}
醇类				
1	烯丙醇	芥末味	2.60±0.18^{a}	1.72±1.15^{a}
2	2-戊醇	醚香	2.87±1.91^{a}	1.06±1.42^{a}
3	1-己烯-3-醇	绿叶清香	4.86±0.72^{a}	1.41±1.87^{b}
4	反式-2-己烯-1-醇	水果味	0.38±0.51^{b}	0.79±1.05^{b}
5	3-甲基-1-戊醇		–	0.86±0.30
6	2-戊烯-1-醇		39.91±31.55^{a}	32.71±39.19^{a}
7	2-庚醇	蘑菇味，水果味	3.12±0.28^{a}	3.57±1.11^{a}
8	1-丁醇	甜味，麦芽香	16.27±2.98^{a}	13.01±1.62^{a}
9	1-辛醇	刺激性气味	36.18±9.47^{a}	29.66±3.56^{a}
10	顺式-2-戊烯-1-醇		64.74±43.16^{a}	17.50±11.67^{a}
11	丙醇	水果味，香草味	8.20±1.34^{b}	44.93±4.01^{a}
12	1-戊醇		128.92±4.10^{a}	113.64±57.96^{a}

续表 6

序号	物质	风味描述	含量（μg/kg）	
			脱腥前	脱腥后
13	1-戊烯-3-醇		389.50±27.92[a]	202.14±125.17[a]
14	1-庚醇	芳香味	103.05±33.22[a]	126.92±29.15[a]
15	2-乙基己醇	玫瑰香，香草味	230.24±54.25[b]	193.95±4.72[b]
16	1-辛烯-3-醇	蘑菇味，土腥味	493.00±157.57[a]	326.36±185.45[a]
17	1-己醇	塑料味	431.02±128.34[a]	553.90±212.92[a]
18	叔丁醇	甜酒味	620.18±112.72[a]	715.19±194.70[a]
19	异丁醇	青草味	3.55±0.09[b]	685.34±45.71[a]
酮类				
1	3-戊烯-2-酮		1.35±0.24	–
2	2-己酮	甜味	0.97±1.29	–
3	环己酮	刺鼻的甜味	2.15±1.11[a]	0.20±0.17[a]
4	2-癸酮		2.27±1.37[a]	0.68±0.29[b]
5	3-庚酮		1.48±0.24[a]	2.53±1.86[a]
6	2,3-己二酮		11.37±1.54[a]	7.69±6.01[a]
7	乙酰氧丙酮		8.56±0.27[a]	4.00±2.67[b]
8	2-辛酮	蘑菇香	12.53±5.02[a]	6.16±2.44[a]
9	2-戊酮	甲油胶味	–	4.34±2.89
10	2-壬酮	牛奶香，甜香	12.19±5.16[a]	11.07±3.72[a]
11	2,3-戊二酮	奶油香	80.03±77.53[a]	186.51±104.06[a]
12	甲基乙烯基酮	刺鼻的辛辣味	81.28±51.44[a]	31.44±33.33[a]
13	2,3-丁二酮	奶油香	22.20±14.80[a]	30.71±30.92[a]
14	2-十一烷酮	柑橘味	16.72±5.21[a]	14.24±4.08[a]
15	2-庚酮	蘑菇味	49.74±19.42[a]	32.35±10.79[a]
酯类				
1	己酸S-甲基酯		0.37±0.49	–
2	异戊酸乙酯	苹果味	0.85±0.14[a]	0.46±0.31[a]
3	甲基丙烯酸甲酯	刺鼻的塑料味	1.08±0.28[a]	0.21±0.28[a]
4	2-甲基戊酸甲酯		25.08±10.87[a]	–
5	庚酸乙酯	水果味	0.25±0.16[a]	0.27±0.18[a]
6	十一碳烯酸乙酯		0.19±0.25[a]	0.58±0.39[a]
7	壬酸乙酯	水果味	0.78±0.03[a]	0.64±0.14[b]
8	癸酸乙酯	白兰地香	0.89±0.18[a]	1.39±0.50[a]
9	惕各酸乙酯		1.25±0.35[a]	2.18±0.95[a]
10	丁酸乙酯	水果味	4.54±0.53[b]	5.79±0.08[a]
11	乙酸丁酯	甜味，香蕉味	6.78±0.89[a]	6.66±0.91[a]
12	十二烷酸乙酯	甜味，蜡质香	4.49±0.63[a]	5.55±1.09[a]
13	丙酸乙酯	香蕉味	7.39±0.20[a]	8.14±1.30[a]
14	乳酸乙酯	有点脂肪酸味	23.88±7.90[a]	14.48±6.48[b]
15	异丁酸乙酯	草莓味	–	10.34±2.13
16	9-十八碳烯酸，乙酯		17.00±0.98[a]	23.27±2.28[a]
17	甲酸乙酯	芳香味	39.59±2.67[a]	37.20±3.09[a]
18	十四酸乙酯	甜味，蜡质香	45.63±4.84[a]	68.94±18.62[a]
19	棕榈酸乙酯	蜡质香	117.48±10.93[a]	164.05±31.95[a]
20	乙酸乙酯	水果味，甜味	164.57±37.08[b]	265.83±28.95[a]
其他				
1	月桂烯	天竺葵味	1.30±0.34[a]	1.98±0.65[a]
2	芳樟醇	铃兰香气	8.30±1.49[a]	8.89±2.26[a]
3	柠檬烯	柠檬香，柑橘香	27.25±18.16[a]	21.80±14.54[a]

注：表中“–”表示未检出；挥发性风味化合物的气味描述来源于Perflavory 信息系统；同行不同小写字母表示数据差异显著，$P<0.05$。

酮、1-辛醇、甲基丙烯酸甲酯等[37]。利用酵母发酵后与鱼腥味相关的醛类含量减少，生成的醇类、酮类及酯类物质含量增加，原因可能是醛类被还原为醇或氧化为酸，同时作为底物被消耗。糖和氨基酸代谢提供前体物质，酯化反应和氧化还原平衡推动产物积累，为大黄鱼鱼肉带来其他更多的风味[38]。

醛类物质是水产品腥味的主要来源之一。酵母发酵后，大黄鱼中总醛类物质含量显著下降（$P<0.05$），与鱼腥味相关的壬醛、庚醛和己醛降幅尤为明显，这三者是大黄鱼鱼肉中的特征腥味物质来源[39]。上述结果表明，酵母发酵可有效脱除大黄鱼鱼肉中的关键腥味组分。

醇类物质是酵母发酵大黄鱼鱼肉的主要风味成分。如表 6 所示，在醇类物质中，1-庚醇、丙醇、叔丁醇和异丁醇含量较高。异丁醇是由酵母代谢过程中缬氨酸通过 Ehrlich 途径分解产生，具有青草和水果香气。酵母代谢过程中酵母以醛类为底物生成醇类，导致与腥味相关的醛类物质减少，醇类物质含量增加[40]，同时将一些苦味氨基酸（如缬氨酸、亮氨酸）转化为令人愉快的风味化合物（如异丁醇），进一步优化了大黄鱼鱼肉的风味[41]。

酮类物质具有脂肪味、蘑菇味，对腥味有增强作用[42]。经过酵母发酵后，酮类化合物含量有所下降，具有刺激性气味的甲基乙烯基酮含量下降的最多，并提高了具有奶油甜香的 2,3-丁二酮和 2,3-戊二酮含量，对大黄鱼鱼肉的风味改善具有积极作用。

酵母发酵大黄鱼中酯类物质含量较高的包括棕榈酸乙酯、乙酸乙酯、甲酸乙酯、乳酸乙酯等。在酵母发酵大黄鱼鱼肉过程中，由酵母通过代谢产生的乙酰辅酶 A 会和一些醇类反应进一步生成酯类化合物，赋予大黄鱼清香味[43]。因此，酵母发酵通过酯类与醇、酮的协同作用，丰富了大黄鱼整体气味轮廓，促进形成令人愉快的风味。

3 结论

本研究通过酵母发酵法对大黄鱼进行脱腥工艺优化，确定了最佳发酵条件为：发酵时间为 55 min，发酵温度为 28 ℃，酵母添加量为 1.75%。在此优化条件下，发酵后的大黄鱼鱼肉感官评分为 17.04 分，持水力提高了 4.14%，蒸煮损失降低了 3.11%。并且发酵还改善了鱼肉的质构特性和色泽。此外，总游离氨基酸含量下降了 154.07 mg/100 g，苦味游离氨基酸含量下降 74.62 mg/100 g，甜味和鲜味氨基酸比例增加了 4% 和 0.52%，对呈味有重要的影响。挥发性成分分析显示，与鱼腥味相关的壬醛、庚醛、戊醛和己醛的含量显著降低（$P<0.05$）。综上所述，酵母发酵技术能够有效改善大黄鱼的腥味问题，并提升其风味和品质，为大黄鱼的开发利用及产业化提供理论依据。然而，酵母发酵过程中对蛋白质和脂质的变化影响机制有待进一步研究。

© 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] 饶从稳, 何亮银, 林志灯, 等. 大黄鱼的营养成分及其加工进展研究[J]. 食品科技, 2023, 48(12): 113−118. [RAO C W, HE L Y, LIN Z D, et al. Research on nutritional composition and processing progress of *Larimichthys crocea*[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(12): 113−118.]

[2] 毛俊龙. 茶黄素对大黄鱼贮藏过程中品质特性的影响作用[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021. [MAO J L. Effect of theaflavin on quality characteristic of Large Yellow Croaker during storage [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.]

[3] 马园, 郭全友, 郑尧, 等. 不同品种养殖大黄鱼肌肉结构及蛋白组成分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 316−323. [MA Y, GUO Q Y, ZHENG Y, et al. Analysis of the muscle structure and protein composition of different varieties of cultured large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 316−323.]

[4] 张艳霞, 谢成民, 周纷, 等. 两种养殖模式大黄鱼肌肉营养价值评价及主体风味物质差异性分析[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 220−227. [ZHANG Y X, XIE C M, ZHOU F, et al. Evaluation of muscle nutritional value and differences in main flavor substances of *Pseudosciaena crocea* in two cultivation modes[J]. Food Science, 2020, 41(8): 220−227.]

[5] 杨倩倩, 邱杨, 余以刚, 等. 养殖大黄鱼脱脂脱腥处理前后挥发性成分的变化[J]. 食品科学, 2012, 33(14): 206−210. [YANG Q Q, QIU Y, YU Y G, et al. Volatile component analysis in fresh and defatted deodorized *Pseudosciaena crocea*[J]. Food Science, 2012, 33(14): 206−210.]

[6] 黄磊, 孙纪录, 张彩璇, 等. 淡水鱼腥味物质检测及脱腥技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(4): 209−216. [HUANG L, SUN J L, ZHANG C X, et al. Research progress in fishy substance detection and deodorization of freshwater fish[J]. Food Research and Development, 2024, 45(4): 209−216.]

[7] 杨凯, 张森, 胡乐, 等. 脱腥剂在我国鱼类脱腥处理中的研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(8): 217−220. [YANG K, ZHANG M, HU L, et al. Research progress of deodorization agent in fish deodorization treatment in China[J]. Food Industry, 2018, 39(8): 217−220.]

[8] 付湘晋, 许时婴, KIM J. 酸碱法提取鲢鱼蛋白脱腥及酵母脱腥机理[J]. 食品与生物技术学报, 2009(1): 57−62. [FU X J, XU S Y, KIM J. Removing the fishy flavor of silver carp protein by yeast fermentation and the mechanism[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2009(1): 57−62.]

[9] LIU Y, HUANG Y Z, WANG Z M, et al. Recent advances in fishy odour in aquatic fish products, from formation to control[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(10): 4959−4969.

[10] GAO R C, LI X, LIU H J, et al. Optimization of removal of off-odor in mullet (*Channa argus*) head soup by yeast using response surface methodology and variations of volatile components during fermentation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(11): e15920.

[11] 纪锡伟, 卢涵, 张香美, 等. 植物乳杆菌及模仿葡萄球菌对发酵鱼肉糜质构及持水力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(6): 249−256. [JI X W, LU H, ZHANG X M, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus simulans* on texture and water-holding capacity of fermented common carp (*Cyprinus carpio*) mince[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(6): 249−256.]

[12] 欧帅, 赵峰, 邹朝阳, 等. 不同冻结方式对大菱鲆鱼片冻藏过程中品质变化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 188−195. [OU S, ZHAO F, ZOU C Y, et al. Effects of different freezing methods on quality changes during the frozen storage of

turbot fillets[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 188−195.]
[13] 卢涵, 张香美, 彭澎, 等. 混合发酵剂对发酵香肠脂肪酸败和蛋白质氧化的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(9): 1552−1560. [LU H, ZHANG X M, PENG P, et al. Effects of mixed culture starters on the fat rancidity and protein oxidation of fermented sausage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(9): 1552−1560.]
[14] LI H, GENG W, HARUNA S A, et al. Identification of characteristic volatiles and metabolomic pathway during pork storage using HS-SPME-GC/MS coupled with multivariate analysis[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131431.
[15] SUN C X, WANG R, WANG T Y, et al. Primary evaluation of nine volatile N-nitrosamines in raw red meat from Tianjin, China, by HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125945.
[16] TAHIR H E, HASHIM S B H, KOMLA M G, et al. Smart films fabricated from natural pigments for measurement of total volatiles basic nitrogen (TVB-N) content of meat for freshness evaluation: A systematic review[J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133674.
[17] 周强, 刘蒙佳, 张健丽, 等. 明虾下脚料酵母发酵法脱腥工艺优化[J]. 中国调味品, 2019, 44(7): 5−7,13. [ZHOU Q, LIU M J, ZHANG J L, et al. Optimization of deodorization process of prawn residues by yeast fermentation method[J]. China Condiment, 2019, 44(7): 5−7,13.]
[18] 汤兴宇, 王浩东, 吴念, 等. 食盐对传统发酵肉成熟过程中微生物菌群、理化性质及盐溶性蛋白特性的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(10): 1−7. [TANG X Y, WANG H D, WU N, et al. Effect of salt on microbial flora, physicochemical properties and salt-soluble protein characteristics of traditional fermented meat during fermentation[J]. Meat Research, 2020, 34(10): 1−7.]
[19] 罗进, 马玉琴, 余群力, 等. 牛肝不同脱腥方法比较及腥味物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(22): 78−85. [LUO J, MA Y Q, YU Q L, et al. Comparison of different deodorization methods for bovine liver and analysis of off-stances[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(22): 78−85.]
[20] 张瑞元, 朱翊凡, 曾杜文, 等. 利用酵母菌生产有机酸的研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(6): 2231−2247. [ZHANG R Y, ZHU Y F, ZENG D W, et al. Advances on the production of organic acids by yeast[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(6): 2231−2247.]
[21] 陈晓梅. 超高压处理对鲮鱼肉品质及其凝胶特性的研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2020. [CHEN X M. Effect of ultra-high pressure treatment on quality and gel properties of *Cirrhinus molitorella*[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2020.]
[22] 刘燕, 张曼纳, 卢娜霖, 等. 不同贮藏条件下熟制裸斑鱼的品质变化[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 225−233. [LIU Y, ZHANG M N, LU N L, et al. Quality analysis of cooked naked carp under different storage conditions[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9): 225−233.]
[23] 张晶晶, 王锡昌, 施文正. 白姑鱼和小黄鱼肉中挥发性风味物质的鉴定[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 206−213. [ZHANG J J, WANG X C, SHI W Z. Identification of volatile compounds in white croaker and small yellow croaker[J]. Food Science, 2019, 40(14): 206−213.]
[24] LIU D S, LIANG L, XIA W S, et al. Biochemical and physical changes of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets stored at −3 and 0 ℃[J]. Food Chemistry, 2013, 140(1-2): 105−114.
[25] 陈俊宏, 王洋, 李芹, 等. 乳酸菌发酵工艺对肉糜理化性质及品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(6): 5−10. [CHEN J H, WANG Y, LI Q, et al. Effect of lactic bacteria fermentation process on the physicochemical properties and quality of minced meat[J]. China Condiment, 2021, 46(6): 5−10.]
[26] ZHANG Y L, HU P, XIE Y Y, et al. Co-fermentation with *Lactobacillus curvatus* LAB26 and *Pediococcus pentosaceus* SWU73571 for improving quality and safety of sour meat[J]. Meat Science, 2020, 170: 108240.
[27] 李松林, 钱心睿, 张艺彤, 等. 发酵过程中乌鳢鱼糜的品质特征变化[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 203−210. [LI S L, QIAN X R, ZHANG Y T, et al. Changes in quality characteristics of snakehead surimi during fermentation[J]. Food Science, 2024, 45(2): 203−210.]
[28] SOUISSI N, JRIDI M, NASRI R, et al. Effects of the edible cuttlefish gelatin on textural, sensorial and physicochemical quality of octopus sausage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 18−24.
[29] 张楠楠, 蓝蔚青, 黄夏, 等. 迷迭香复配液对大黄鱼冰藏品质及水分迁移的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 247−253. [ZHANG N N, LAN W Q, HUANG X, et al. Effect of rosemary extract and ε-polylysine blend on the quality and moisture migration of large yellow croaker during ice storage[J]. Food Science, 2019, 40(7): 247−253.]
[30] YU D, FENG M Q, SUN J, et al. Protein degradation and peptide formation with antioxidant activity in pork protein extracts inoculated with *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus simulans*[J]. Meat Science, 2020, 160: 107958.
[31] DERTLI E, YILMAZ M T, TATLISU N B, et al. Effects of in situ exopolysaccharide production and fermentation conditions on physicochemical, microbiological, textural and microstructural properties of Turkish-type fermented sausage (Sucuk)[J]. Meat Science, 2016, 121: 156−165.
[32] 颜孙安, 林香信, 林虬. 不同养殖模式大黄鱼肌肉的游离氨基酸含量及组成分析[J]. 福建分析测试, 2013, 22(5): 10−13. [YAN S A, LIN X X, LIN Q. Analysis of free amino acid content and composition in muscle of *Pseudosciaena crocea* (*Richardson*) different aquaculture models[J]. Fujian Analysis & Testing, 2013, 22(5): 10−13.]
[33] 柴利, 贺稚非, 廖林, 等. 不同发酵剂对兔肉脯食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 30−37. [CHAI L, HE Z F, LIAO L, et al. Effect of different starters on the edible quality of dried rabbit meat slice[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(4): 30−37.]
[34] 奚宽鹏. 小麦面筋蛋白酶解物作为啤酒酵母氮源的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [XI K P. Study of wheat gluten protein hydrolysates as the nitrogen source of brew's yeast[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
[35] 吴涵, 施文正, 王逸鑫, 等. 腌制对鱼肉风味物质及理化性质影响研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 285−291,297. [WU H, SHI W Z, WANG Y X, et al. Effect of salting on the flavor and physicochem meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(2): 285−291,297.]
[36] ZHOU Y Q, WU S M, PENG Y L, et al. Effect of lactic acid bacteria on mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) seasoning quality and flavor during fermentation[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100971.
[37] DAI W T, HE S Y, HUANG L S, et al. Strategies to reduce fishy odor in aquatic products: Focusing on formation mechanism and mitigation means[J]. Food Chemistry, 2024, 138625.

［38］ 宋仪, 燕建辉, 张梅超, 等. 酵母发酵脱腥对黄鳝鱼鱼白风味特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(16): 9−17. ［SONG Y, YAN J H, ZHANG M C, et al. Effects of deodorization methods by yeast fermentation on flavor characteristics of *Seriola aureovittata* milt[J]. Food Research and Development, 2023, 44(16): 9−17.］

［39］ MU H, WEI Z H, YI L N, et al. Effects of low dietary fish meal on the volatile compounds in muscle of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Aquaculture Research, 2017: 5179−5191.

［40］ XU Y X, JIANG Z D, DU X P, et al. The identification of biotransformation pathways for removing fishy malodor from Bangia fusco purpurea using fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Chemistry, 2022, 380: 132103.

［41］ 陈玉香, 叶汶坤, 何冬萍, 等. 酵母菌对红曲黄酒风味物质形成的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(7): 218−224. ［CHEN Y X, YE W K, HE D P, et al. The influence of yeast strains on the flavour compounds of Hong Qu glutinous rice wine[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(7): 218−224.］

［42］ SUN L G, LÜ J X, LIU Y, et al. Effects of combined carnosine and ultra-high pressure on the inhibition of fishy off-odor of snakehead fillets and the possible mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133615.

［43］ HU K, JIN G J, MEI W C, et al. Increase of medium-chain fatty acid ethyl ester content in mixed *H. uvarum/S.* cerevisiae fermentation leads to wine fruity aroma enhancement[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 495−501.