

酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品凝胶品质及过熟味生成的影响

黄倩怡^{1,2} 李向红^{1,2} 李 双^{1,2} 马夏吟^{1,2} 刘冬敏^{1,2}
王发祥^{1,2} 刘永乐^{1,2} 吴金鸿³

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114; 3. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

摘要: [目的] 调控带鱼鱼糜制品的凝胶品质及过熟味生成。[方法] 以带鱼为原料制备鱼糜凝胶, 通过感官评价、微观结构、凝胶品质、水分含量及挥发性风味物质的变化, 探究酵母提取物添加和复热方式对带鱼鱼糜制品凝胶品质及过熟味生成的影响。[结果] 酵母提取物的添加显著促进了产品内部结构交联, 减少了孔洞数量, 增强了样品的凝胶强度、硬度、弹性等凝胶品质, 其中添加量为 1.00% 时凝胶品质最佳。冻融后微波复热使样品产生了更为致密的微观结构; 进一步分析样品中挥发性物质发现, 2-己烯醛、*d*₆-丙酮、2-壬酮、丙酸乙酯和丁酸乙酯是酵母提取物赋予新鲜带鱼鱼糜制品的主要风味物质; 庚醛、2-甲基戊醛、(*E*)-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、(*E,Z*)-2,6-壬二烯醛、2,3-丁二酮和 2-十一烷酮是复热后带鱼鱼糜制品中生成的主要过熟味组分(基于气味活性值 > 100), 微波复热产生的过熟味少于水煮复热组(基于气味活性值 > 1)。[结论] 微波复热结合添加 1.00% 酵母提取物能在一定程度上改善带鱼鱼糜制品凝胶品质, 抑制过熟味生成。

关键词: 带鱼; 鱼糜; 酵母提取物; 微波复热; 过熟味; 凝胶强度; 风味

Effects of yeast extract and reheating methods on gel properties and warmed-over flavor formation of hairtail surimi

HUANG Qianyi^{1,2} LI Xianghong^{1,2} LI Shuang^{1,2} MA Xiayin^{1,2} LIU Dongmin^{1,2}
WANG Faxiang^{1,2} LIU Yongle^{1,2} WU Jinhong³

(1. School of Food Science and Biological Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Aquatic Food Resources Processing, Changsha, Hunan 410114, China; 3. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: [Objective] To control the gel property and warmed-over flavor formation of hairtail surimi products. [Methods] Surimi gel is prepared using hairtail as the raw material. Then, by examining changes in sensory evaluation, microstructure, gel property, moisture content, and volatile flavor substances, this study investigates the effects of yeast extract addition and reheating methods on gel property and warmed-over flavor formation in hairtail surimi products. [Results] Yeast extract addition significantly promotes internal structural cross-linking and reduces the number of pores in the product, thereby enhancing the gel properties, including gel strength, hardness, and elasticity.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号:32472372); 宁波市重点研发计划项目(编号:2023Z122); 国家青年科学基金项目 C 类(编号:32502260)

通信作者: 李向红(1979—), 女, 长沙理工大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: xianghongli@csust.edu.cn

收稿日期: 2025-11-05 **改回日期:** 2026-04-30

引用格式: 黄倩怡, 李向红, 李双, 等. 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品凝胶品质及过熟味生成的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 19-31.

Citation: HUANG Qianyi, LI Xianghong, LI Shuang, et al. Effects of yeast extract and reheating methods on gel properties and warmed-over flavor formation of hairtail surimi[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 19-31.

Specifically, an optimal gel property is observed at a 1.00% addition level. Microwave reheating after freeze-thaw results in a denser microstructure. Furthermore, volatile substance analysis reveals that 2-hexenal, *d*₆-acetone, 2-nonanone, ethyl propionate, and ethyl butyrate are the main flavor substances imparted by the yeast extract to fresh hairtail surimi products. The primary warmed-over flavor components in hairtail surimi products formed after reheating are heptanal, 2-methylpentanal, (*E*)-2-octenal, 1-octen-3-ol, (*E*, *Z*)-2,6-nonadienal, 2,3-butanedione, and 2-undecanone (based on odor activity value > 100). Microwave reheating generates less warmed-over flavor than the water-boiling reheating groups (based on odor activity value > 1). **[Conclusion]** Microwave reheating combined with an addition of 1.00% yeast extract can improve the gel property and inhibit warmed-over flavor formation of hairtail surimi products.

Keywords: hairtail; surimi; yeast extract; microwave reheating; warmed-over flavor; gel strength; flavor

带鱼是中国主要的海产经济鱼类,资源丰富,年捕捞量约 110 万 t^[1];其营养丰富,富含蛋白质、DHA、EPA 等多不饱和脂肪酸,年销量呈现稳步增长趋势^[2-4]。目前市面上大批量小规格带鱼(体长≤20 cm 或体质量≤500 g)多用于制备冷冻鱼糜及其制品^[5],但带鱼鱼糜凝胶性能差^[6],冻藏过程中蛋白质和脂质氧化、降解,进一步导致鱼糜凝胶结构和风味劣变^[7-9]。因此,现有大部分研究聚焦于带鱼鱼糜凝胶性能的改善。例如 Chen 等^[10]采用 350 MPa/8 min 高静水压处理促进带鱼鱼糜凝胶中二硫键和离子键含量的增加,以增强其凝胶性能和网络结构的形成;Hu 等^[11]通过联合添加凝结多糖及转谷氨酰胺酶促使带鱼鱼糜肌肉蛋白中肌球蛋白重链的交联,从而形成更致密的凝胶基质,凝胶强度大幅提升;陈汉勇等^[12]指出混合带鱼和罗非鱼糜的凝胶强度较单独带鱼鱼糜有明显改善,罗非鱼糜中高活性的内源性转谷氨酰胺酶促进了鱼糜蛋白质之间的交联。

然而,鱼糜制品在冷冻过程中凝胶结构会劣变,同时鱼糜制品在冷冻贮藏以及随后的再加热过程中会产生腐臭味、氧化油味、鱼腥味及纸板味等令人不快的过熟味(WOF)^[13-14],例如鲢鱼鱼糜制品复热后会产生辛醛、壬醛、(*E*)-2-辛烯-1-醇、(*E*)-2-壬烯醛、庚醛、(*Z*,*Z*)-2,6-壬二烯醛等过熟味特征成分^[15]。过熟味显著影响产品风味和感官价值,进而影响其食用价值和可接受度^[16]。因此,部分研究着力于采用外源添加物来掩盖或抑制鱼糜制品中过熟味的产生^[17-21],紫苏叶与姜汁混合物^[18]及迷迭香提取物等天然抗氧化成分^[19]被证实对冷冻鲢鱼鱼糜产品及预制猪肉产品中过熟味生成有一定的抑制效果;同时有研究指出添加 1.00% 与 1.50% 酵母提取物不但有利于改善鱼糜制品异味及总体可接受性,同时能改善鱼糜制品凝胶特性^[20,22]及适用于配方优化^[23]。此外,冷冻鱼糜制品的复热方式也对其过熟味生成有影响。Bao 等^[21]研究表明,90 ℃下重新加热鲢鱼鱼糜产品能避免过熟味产生且不影响产品质构特性,但在 100 ℃及以上复热时易产生呋喃(过熟味主要组分)并破坏产品的凝胶结构;Zhai 等^[14]发现,微波复热处理对鱼糜制品中过熟味的形成贡献较小,而蒸煮复热则会诱导产生(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛(鱼腥味)、1-戊硫醇(腐臭异味)和 2-十一酮(油味)等气味

物质,显著降低了产品的感官品质,同时 6 次冻融循环后鱼糜制品内部结构严重损失且更大程度影响过熟味形成和发展。

迄今为止,带鱼鱼糜制品相关的研究主要集中于对其凝胶特性的改善,鲜少有研究针对复热对冷冻带鱼鱼糜制品风味的影响及酵母提取物对带鱼鱼糜制品过熟味影响。研究拟通过 6 次冻融循环模拟生产加工温度波动,同时从带鱼鱼糜制品冻融循环前后水分分布、微观结构及挥发性成分组成等方面,研究酵母提取物及复热方式对带鱼鱼糜制品凝胶品质及过熟味生成的影响,旨在为带鱼鱼糜制品的品质改良和食用品质改善提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

冷冻带鱼鱼糜:宁波飞日水产实业有限公司;

食盐:未加碘精制盐,雪天盐业集团股份有限公司;

大豆分离蛋白:山东万得福生物科技有限公司;

木薯淀粉:新乡良润全谷物食品有限公司;

转谷氨酰胺酶:120 U/g,江苏一鸣生物股份有限公司;

酵母提取物 FA73:安琪酵母股份有限公司。

1.1.2 仪器与设备

食品物性测定仪:TA-XT plus 型,英国 Stable Mico System 公司;

电子恒温水浴锅:DZKW-4 型,北京中兴伟业仪器有限公司;

微波炉:PC23C3 型,广东美的厨房电器制造有限公司;

流变仪:TA HR30 TA Instruments 型,美国 TA 公司;

电子鼻:PEN3.5 型,德国 AIRSENSE 公司;

GC-MS 气质联用仪:7890B GC-MS 型,美国 Agilent 公司;

低场核磁共振仪:NMI20-060H-I 型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;

色差仪:NH310+型,深圳市三恩时科技有限公司;

组织切片数字扫描仪:LG-S80 型,武汉塞维尔生物科

技术有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 带鱼鱼糜制品制备与复热 在前期研究的基础上,将带鱼鱼糜 100 g、6%大豆分离蛋白、9%木薯淀粉、2%食盐以及 30%水混合并斩拌 30 s,每 10 s 暂停以降低斩拌时所产生的热量;加入 3%转谷氨酰胺酶与酵母提取物(鱼糜质量的 0.50%,1.00%,1.50%)继续斩拌 30 s,后将混合物装入 2.5 cm×2.5 cm×2.5 cm 的正方体硅胶模具中,采取二段式加热法(45℃水浴 30 min,90℃水浴 20 min)制成鱼糜制品。加热后获得新鲜样品组样品;将新鲜样品使用自封袋进行密封后经 6 次冻融循环,根据前期试验摸索确定-20℃冻藏 12 h 后 4℃贮藏 12 h 为一次冻融循环。复热方式选择鱼糜制品消费过程中常用的水煮复热和微波复热,使样品中心温度达到 70℃,其中,水煮复热是将样品置于 90℃水浴复热 5 min,微波复热是选择微波功率 500 W 复热 25 s。Fresh-1~Fresh-4 分别代表新鲜样品组中未添加酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 0.50%酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 1.00%酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 1.50%酵母提取物的带鱼鱼糜制品;FT-B-1~FT-B-4 代表经 6 次冻融循环后并进行水煮复热处理的制品,分别是未添加酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 0.50%酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 1.00%酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 1.50%酵母提取物的带鱼鱼糜制品;FT-M-1~FT-M-4 代表经 6 次冻融循环后并进

行微波复热处理的制品,分别是未添加酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 0.50%酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 1.00%酵母提取物的带鱼鱼糜制品、添加 1.50%酵母提取物的带鱼鱼糜制品。

1.2.2 白度值测定 使用色差仪测量带鱼鱼糜制品表面色值^[22]。记录样品 L^* (亮度值)、 a^* (红绿值)和 b^* (蓝黄值),每组样品重复 6 次,取平均值。使用式(1)计算样品白度值。

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}, \quad (1)$$

式中:

W ——白度;

L^* ——亮度;

a^* ——红绿度;

b^* ——黄蓝度。

1.2.3 感官评价 根据高汉朴等^[24]的方法稍加修改。对不同组别鱼糜凝胶制品进行随机编号,10 名经过培训的小组成员(男 5 名,女 5 名,年龄 23~30 岁,均在鱼类加工和质量评估领域工作 1 年以上,并接受了描述词的系统培训)进行感官评估。评价内容包括外观、组织状态、气味 3 个方面,总分为 10 分。在感官评价过程中,感官评估员用纯净水漱口缓解感官疲劳,每完成一个样品评估后,间隔 5 min 以确保残留气味消散后再评估下一个样品。其中感官分析控制室温(25±1)℃,每个属性的最终得分为所有小组成员的平均评分。评价标准见表 1。

表 1 带鱼鱼糜制品感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for hairtail surimi products

评分	外观(占总得分 30%)	组织状态(占总得分 30%)	气味(占总得分 40%)
9~10	外表非常平整,光滑	断面密实,无大气孔,有许多微小且均匀的小气孔;中指力压,明显凹陷而不破裂,放手即可复原	具有浓郁鱼香味
7~8	外表较平整,有少许小凹坑	断面密实,无大气孔,有少量小气孔;中指力压,凹陷而不破裂,放手即可复原	具有鱼香味
5~6	外表较粗糙,有较多小凹坑	断面基本密实,无大气孔,有少量小气孔;中指力压,凹陷而不破裂,放手不能完全恢复原状	无鱼肉香味,有轻微异味
3~4	外表较粗糙,有较多大凹坑	切面较松软,有少量不均匀小孔;中指力压即裂	无鱼肉香味,有明显异味
1~2	外表很粗糙,凹坑很多且大	切面呈浆状,松软无密实感;中指轻压即破裂	无鱼肉香味,有浓郁异味

1.2.4 微观结构观察 参照江祥瑶等^[25]的方法稍加修改。使用无菌刀将样品切成 5 mm×5 mm×5 mm 的小块,用 4%的多聚甲醛固定 24 h,4℃避光保存。样品依次经脱水浸蜡、包埋切片,切片后通过苏木素—伊红(HE)染色及滴加中性树胶进行封片,使用组织切片数字扫描仪进行组织状态观察。

1.2.5 水分分布和核磁成像分析 新鲜组样品与复热组样品于(25±1)℃下平衡 30 min 后置于 60 mm 核磁共振管中,使用低场核磁共振仪(LF-NMR)测定样品的横向弛

豫时间(T_2)。参数设置:谱仪频率为 21 MHz,频谱宽度为 200 kHz,脉冲程序生成器为 1,等待时间为 4 s^[14]。

核磁成像数据使用自旋回波序列(重复时间为 2 s,回波时间为 23 ms)在 2.5 cm 高度扫描鱼糜凝胶样品,获得鱼糜凝胶的核磁成像(MRI)数据。使用自旋回波(SE)成像软件获得其磁共振图像,并使用伪彩色软件将灰度图像转换为彩色图像以可视化样品中水分分布。

1.2.6 质构分析(TPA)及凝胶强度分析 根据 Shen 等^[26]的方法稍加修改。将新鲜样品组与复热样品组于(25±

1) ℃平衡 30 min 后使用质构仪进行质构分析,探头为 P/36 R。测试参数:样品变形程度为 50%,测试前、中和后速度分别为 2, 1, 1 mm/s,提升距离 25.0 mm,触发力 0.049 N。压缩程序之间有 5 s 的暂停。在此过程中记录样品的硬度、弹性、咀嚼性、胶着度、黏聚性和回复性。

凝胶强度测定采用 P5/S 球形探头试验参数:测试前、中和后速度均为 1 mm/s,触发力 0.049 N,压缩距离 10 mm。在测试过程中记录样品的断裂力和断裂距离,按式(2)计算凝胶强度。

$$G = F \times d, \tag{2}$$

式中:

G ——凝胶强度, $N \cdot mm$;

F ——断裂力, N ;

d ——断裂距离, mm 。

1.2.7 风味测试

(1) 电子鼻测试:称取均匀搅碎的样品 1.50 g,置于 20 mL 顶空样品瓶中密封后进行测试。将顶空样品瓶放置于 45 ℃水浴锅中预热 3 min 随后进行电子鼻测试,设置采样时间 200 s,记录 10 个金属氧化物传感器的强度。传感器性能描述见表 2。

表 2 传感器性能描述

Table 2 Sensor performance specifications

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C 传感器	对芳香成分,苯类灵敏
2	W5S 传感器	灵敏度大,对氮氧化合物灵敏
3	W3C 传感器	对芳香成分,氨类灵敏
4	W6S 传感器	主要对氢化物有选择性
5	W5C 传感器	对短链烷烃芳香成分灵敏
6	W1S 传感器	对甲基类灵敏
7	W2S 传感器	对硫化物灵敏
8	W1W 传感器	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2S 传感器	对芳香成分、有机硫化物灵敏
10	W2W 检测器	对长链烷烃灵敏

(2) GC-MS 分析:参照 Zhai 等^[14]的方法测定带鱼鱼糜制品挥发性风味成分。取均匀搅碎的样品 3.00 g 置于顶空样品瓶(20 mL)中,加入内标环己酮(40 $\mu g/mL$, 5 μL)。使用 50/30 μm 纤维头(DVB/CAR/PDMS, Supelco Inc)萃取 20 min 后使用 GC-MS 和 DB 蜡柱(30 $m \times 0.250\ mm \times 0.25\ \mu m$)进行分析。离子源(EI)温度为 230 ℃,电离能量为 70 eV,MS 采用全扫描模式。柱温程序:以 5 ℃/min 的速率将柱温从 40 ℃升高至 220 ℃,然后以 20 ℃/min 的速率升高至 250 ℃,并保持 7.5 min。通过与 NIST 17 标准参考数据库比对,鉴定挥发性化合物并根据式(3)计算其质量分数,同时计算其气味活性值

(OAV),即浓度与气味阈值的比率, $OAV > 1$ 的物质被归类为气味活性物质。

$$C = \frac{A_1 \times m_2}{A_2 \times m_1}, \tag{3}$$

式中:

C ——挥发性物质含量, $\mu g/kg$;

A_1 ——待测挥发性物质的色谱峰面积;

m_2 ——内标质量, μg ;

A_2 ——内标色谱峰面积;

m_1 ——样品质量, kg 。

1.3 统计与分析

每个试验至少 3 次独立重复。采用 SPSS 软件对数据进行显著性差异分析($P < 0.05$ 表示具有显著性差异),结果以平均数 $\pm$ 标准差表示,采用 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品白度值的影响

图 1 和表 3 显示了不同处理条件下制品的色泽测定结果。随着酵母提取物的添加,新鲜带鱼鱼糜制品表面 b^* 值呈上升趋势,而 W 值变化不显著,表明酵母提取物的添加提升了新鲜带鱼鱼糜制品黄度,但对制品整体色泽的



第 1 列与第 4 列为未切开样品照片,其他列为样品切后截面照
图 1 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品外观状态及色泽变化的影响

Figure 1 Effects of yeast extract and reheating methods on the apparent state and color changes of hairtail surimi products

表3 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品色泽的影响[†]

Table 3 Effects of yeast extract and reheating methods on the color of hairtail surimi products

样品	L^*	a^*	b^*	W
Fresh-1	64.11±0.58 ^{Ab}	0.20±0.17 ^{Bc}	12.31±0.47 ^{Cb}	62.01±2.16 ^A
Fresh-2	65.57±0.43 ^{Aa}	0.47±0.10 ^{Ba}	13.27±0.30 ^{Ca}	63.10±0.45 ^A
Fresh-3	64.32±0.88 ^{Aa}	0.22±0.19 ^{Bc}	12.47±0.36 ^{Bb}	62.20±0.94 ^A
Fresh-4	64.23±1.46 ^{Ab}	0.37±0.17 ^{Cb}	12.61±0.38 ^{Cb}	62.06±1.69 ^A
FT-B-1	57.48±1.24 ^{Bb}	1.35±0.03 ^{Ab}	21.40±0.40 ^{Ab}	54.55±1.21 ^B
FT-B-2	56.81±0.85 ^{Cc}	1.64±0.07 ^{Aa}	22.54±0.03 ^{Aa}	54.51±0.51 ^B
FT-B-3	57.39±0.37 ^{Cb}	1.46±0.10 ^{Ab}	21.65±0.12 ^{Aa}	54.63±0.25 ^B
FT-B-4	59.00±0.23 ^{Ca}	1.79±0.03 ^{Aa}	22.82±0.23 ^{Aa}	54.70±0.69 ^B
FT-M-1	59.13±0.28 ^{Bb}	1.21±0.01 ^{Ac}	20.42±0.14 ^{Bb}	52.38±1.21 ^{Cab}
FT-M-2	59.12±0.21 ^{Bb}	1.77±0.25 ^{Aa}	21.81±0.19 ^{Ba}	51.26±0.75 ^{Cb}
FT-M-3	58.07±1.25 ^{Bb}	1.55±0.14 ^{Ab}	21.96±0.18 ^{Aa}	52.18±0.37 ^{Cab}
FT-M-4	60.11±0.12 ^{Ba}	1.37±0.13 ^{Bc}	20.82±0.04 ^{Bb}	53.04±0.29 ^{Ca}

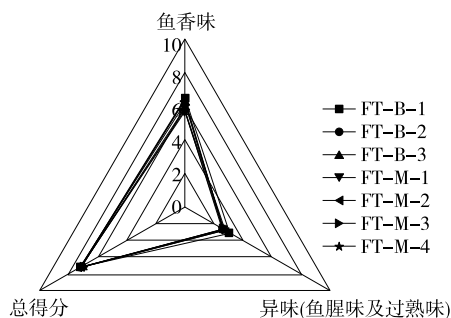
[†] 大写字母不同表示相同量酵母提取物下不同复热处理方式下的样品之间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示相同处理方式下添加不同量酵母提取物的样品之间差异显著($P<0.05$)。

影响较小。与新鲜样品相比,冻融后复热组均呈现 L^* 值下降, a^* 值及 b^* 值升高趋势,具体而言,微波复热组 L^* 值分别降低了7.77%(FT-M-1)、9.84%(FT-M-2)、9.72%(FT-M-3)、6.41%(FT-M-4)($P<0.05$);而水煮复热组 L^* 值分别降低了10.34%(FT-B-1)、13.36%(FT-B-2)、10.77%(FT-B-3)、8.14%(FT-B-4)($P<0.05$),表明冻融循环与复热处理加剧了蛋白氧化导致复热组亮度降低,与Xu等^[27]的研究结果一致。微波加热能使食品中介电物质尤其是水分子吸收高频电磁波后,通过旋转和振动生热导致食品内外同时受热,加热速度快、热效率高,但也存在局部过热效应^[28]。微波复热组 a^* 值和 b^* 值均高于水煮复热组,这主要是复热过程中鱼糜制品表面蛋白质、淀粉和水分等介电分子与微波相互作用,存在表面快速脱水形成硬壳并发生美拉德反应导致表面色泽变暗、变深;而水煮复热制品

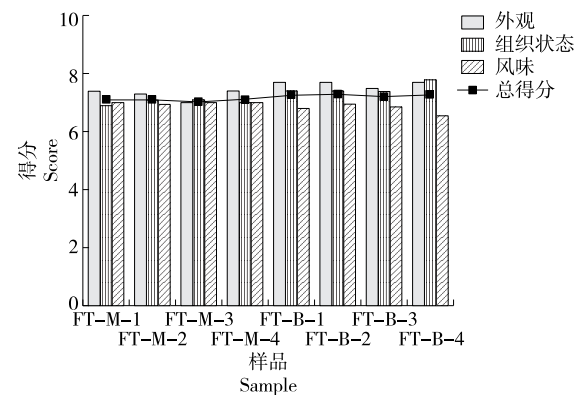
吸收水分使其表面反射增强, a^* 值、 b^* 值较低。

2.2 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品感官品质的影响

如图2(a)所示,水煮复热组中未添加酵母提取物样品的鱼香味得分(5.67)与总得分(6.80)低于微波复热组(6.44, 7.00),同时过熟味感知高于后者;而随着酵母提取物的添加过熟味感知均呈下降趋势(图2(a)),主要是微波引起制品内部极性分子间运动且促进制品蛋白降解、美拉德等反应,从而增强了产品风味,与杨菁等^[29]的研究结果一致;同时,酵母提取物本身含有的风味核苷酸,鲜味氨基酸及强香味物质在复热过程中被释放,共同促进了对鱼糜制品风味感知的改善。感官分析结果也显示酵母提取物最优添加量为1.00%,结合微波复热具有协同抑制过熟味感知的作用。



(a) 鱼香味与异味



(b) 外观、组织状态与风味

图2 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品感官品质的影响

Figure 2 Effects of yeast extract and reheating methods on the sensory quality of hairtail surimi products

2.3 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品微观结构的影响

新鲜样品组与复热样品组微观结构如图 3 所示。随酵母提取物的添加,新鲜样品组内部结构趋于均匀,大空隙及孔洞数量减少。Wu 等^[20]研究指出,酵母提取物中的带电氨基酸促进蛋白质结构的展开和疏水基团的暴露,阻止蛋白分子间的不当聚集,增强蛋白质与水分子之间的相互作用,因而酵母提取物的添加改善了带鱼鱼糜的凝胶网络结构。与新鲜样品组相比,经冻融与复热处理的制品内部均出现明显断裂及大孔洞,这主要是反复冻融过程中冰晶生长对样品内部结构的破坏。在复热过程中,微波复热易引发制品内部瞬时过热,导致蛋白质剧烈收缩,形成紧凑均匀的结构;而水煮复热依靠高温介质水将热量从样品外部传递至内部,传递速率相对较慢,从而形成相对疏松的微观结构。Luo 等^[30]指出,鱼糜凝胶的微观结构能够影响释放的气味化合物的数量。因此,微波复热形成的致密结构可能滞留部分风味物质,而水煮复热导致的疏松结构可能使风味物质逸散,两种复热方式下微观结构的改变一定程度上导致了两组样品风味感知的差异(图 2)。

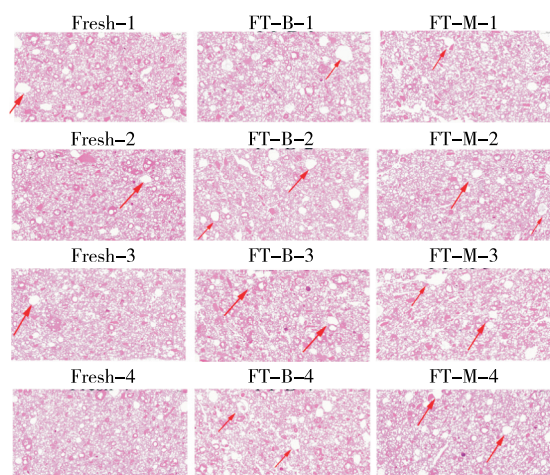


图 3 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品微观结构的影响

Figure 3 Effects of yeast extract and reheating methods on the microstructure of hairtail surimi products (7.3×)

2.4 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品水分分布的影响

如图 4(a)所示,相比新鲜组样品,冻融后水煮复热组水分含量增加($P<0.05$),微波复热组显著降低($P<0.05$),表明了水煮复热过程中外界介质水渗入制品内部,增加了样品含水量,而微波复热过程中制品表面水分损失及内部水分往外迁移导致整体水分减少。

如图 4(b)所示,不易流动水对应的弛豫峰为主要峰,新鲜样品组中其相对含量约 95%,较完整的凝胶网络结构限制了水分子自由运动的能力,而冻融复热样品中其相对含量有所下降(约 90%),与微观结构观察结果一致(图 3)。进一步分析弛豫峰面积[图 4(c)]发现,新鲜样品组中结合水比例随酵母提取物含量增加而上升($P<0.05$),主要是酵母提取物增强了制品水合能力及网络结构的持水力;冻融复热后,微波复热组结合水比例显著高于水煮复热组($P<0.05$),自由水比例低于水煮复热组,这是由于微波加热导致水分整体损失的同时微波能量也促进水分形态间转化;而水煮复热过程中因外界介质水的渗入与热能均匀吸收,其水分形态分布变化较小。张凯华等^[31]也发现,猪肉饼在微波复热中吸收微波能促进不同状态水分间相互转化。

如图 4(d)所示,随着酵母提取物的添加,新鲜样品组水信号强度逐渐增强,表明了制品内部结构与水分结合能力得到改善,与微观结构及水分分布结果一致。新鲜样品组和水煮复热组水分分布较为均匀,而微波复热组呈现中心区域红色信号相对较弱,四周增强的特征,表明了加热过程中热量诱导内部水分向外迁移并在表面蒸发,导致中心区域信号降低。

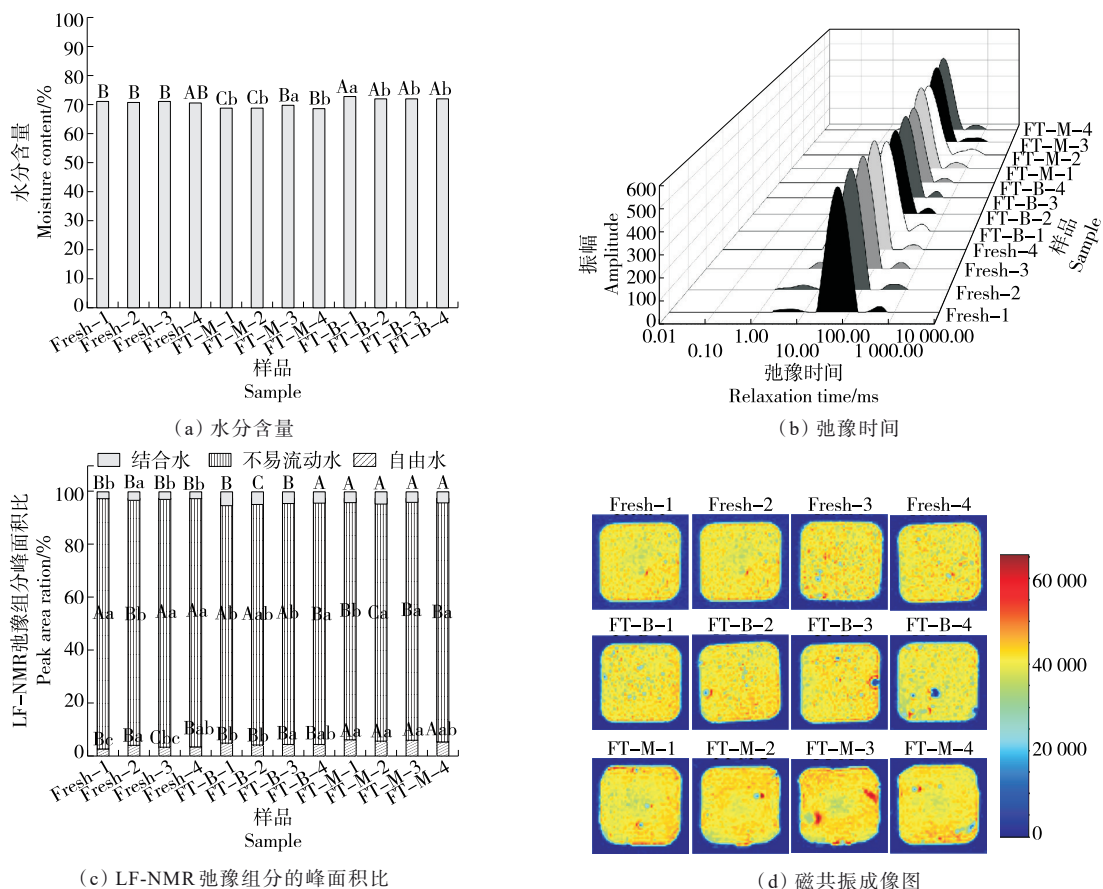
2.5 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品质构性质的影响

表 4 显示了酵母提取物的添加及不同复热方式对带鱼鱼糜制品质构特性的影响。新鲜样品中随着酵母提取物的添加,制品黏聚性、胶着度、咀嚼度、回复性呈现梯度上升;冻融后,微波复热组黏聚性、胶着度、咀嚼度、回复性均高于水煮复热组。结果表明,适宜的酵母提取物添加量(1.00%)结合微波复热有助于在冻融及复热过程中维持鱼糜制品较好的质构特性。

如表 5 所示,新鲜样品与冻融复热样品的断裂力和凝胶强度均随着酵母提取物的添加呈先上升后下降的趋势。新鲜样品组中凝胶强度随着酵母提取物的添加显著增强($P<0.05$),但酵母提取物添加量达到 1.50% 时,鱼糜制品的凝胶强度下降,可能是过量添加酵母提取物改变了蛋白质在凝胶形成阶段的溶解状态并且抑制蛋白聚集,从而导致制品凝胶强度下降。微波复热组的凝胶强度普遍高于水煮复热组,主要与微波处理过程中制品水分损失(如图 4(a)所示)及热效应引起凝胶内部结构收缩有关。

2.6 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品气味轮廓的影响

采用电子鼻并结合主成分分析(PCA)对带鱼鱼糜制品的气味特征进行分析。图 5(a)显示主成分 PC1 和 PC2 的贡献率分别为 75.30% 和 11.10%,综合贡献率为



大写字母不同表示相同量酵母提取物下不同复热处理方式下的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母不同表示相同处理方式下添加不同量酵母提取物的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品水分含量及水分分布的影响

Figure 4 Effects of yeast extract and reheating methods on the moisture content and distribution of hairtail surimi products

表4 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品质构特性的影响[†]

Table 4 Effects of yeast extract and reheating methods on texture properties of hairtail surimi products

样品	硬度/N	弹性	黏聚性	胶着度	咀嚼度/N	回复性
Fresh-1	22.01±0.43 ^{Cb}	0.89±0.01 ^A	0.37±0.03 ^{Bc}	835.54±92.17 ^{Bc}	7.29±0.86 ^{Bc}	0.15±0.01 ^{Bd}
Fresh-2	40.60±2.47 ^{Ba}	0.89±0.01 ^{AB}	0.43±0.04 ^{Bc}	1 763.36±221.66 ^{Bb}	15.18±2.02 ^{Bb}	0.21±0.02 ^{Bc}
Fresh-3	42.83±2.44 ^{Ca}	0.89±0.00 ^A	0.52±0.01 ^{Bb}	2 275.47±106.94 ^{Ca}	19.75±0.89 ^{Ca}	0.29±0.00 ^{Bb}
Fresh-4	42.37±8.13 ^{Ba}	0.89±0.02 ^A	0.60±0.09 ^{Ba}	2 624.80±816.09 ^{Ba}	22.80±7.34 ^{Aa}	0.32±0.07 ^{Aa}
FT-M-1	46.25±8.65 ^{Ab}	0.86±0.03 ^{Ba}	0.60±0.06 ^{Ac}	2 848.19±836.38 ^{Ab}	23.77±6.17 ^{Ac}	0.30±0.03 ^{Ab}
FT-M-2	44.08±3.85 ^{Ab}	0.85±0.02 ^{Ba}	0.60±0.04 ^{Ac}	2 697.54±370.83 ^{ABb}	22.60±3.15 ^{Ac}	0.29±0.03 ^{ABc}
FT-M-3	51.36±4.49 ^{Aa}	0.83±0.01 ^{Bab}	0.68±0.07 ^{Ab}	3 606.34±677.29 ^{Aa}	29.48±5.76 ^{Aa}	0.34±0.05 ^{Aa}
FT-M-4	50.25±2.45 ^{Aa}	0.82±0.01 ^{Cb}	0.64±0.02 ^{Aa}	3 304.41±251.88 ^{Aa}	26.43±2.21 ^{Ab}	0.31±0.01 ^{Ab}
FT-B-1	39.03±2.71 ^{Bbc}	0.88±0.01 ^{Ab}	0.54±0.06 ^{Ac}	2 164.92±282.67 ^{Ac}	18.59±2.21 ^{Ac}	0.28±0.02 ^{Ab}
FT-B-2	41.73±7.22 ^{Bb}	0.89±0.02 ^{Aa}	0.58±0.06 ^{Ab}	2 510.93±665.81 ^{Ab}	21.98±6.13 ^{Ab}	0.31±0.06 ^{Aa}
FT-B-3	45.17±7.98 ^{Ba}	0.89±0.02 ^{Aa}	0.61±0.07 ^{Aa}	2 840.56±825.24 ^{Ba}	24.80±7.74 ^{Ba}	0.32±0.05 ^{Aa}
FT-B-4	35.81±6.47 ^{Cc}	0.85±0.01 ^{Bb}	0.55±0.04 ^{Cc}	2 020.04±492.43 ^{Cc}	16.76±3.79 ^{Bc}	0.26±0.03 ^{Bb}

[†] 大写字母不同表示相同量酵母提取物下不同复热处理方式下的样品之间差异显著 ($P < 0.05$); 小写字母不同表示相同处理方式下添加不同量酵母提取物的样品之间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 5 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品凝胶强度的影响[†]

Table 5 Effects of yeast extract and reheating methods on gel strength of hairtail surimi products

样品	<i>F</i> /N	<i>d</i> /mm	<i>G</i> /(N·mm)
Fresh-1	1.74±0.09 ^{Bc}	5.98±0.62 ^{Aa}	10.24±4.02 ^{Bb}
Fresh-2	1.91±0.22 ^{Cb}	5.54±0.37 ^{Cb}	10.33±3.55 ^{Cb}
Fresh-3	2.30±0.10 ^a	4.64±0.17 ^{Bc}	10.67±0.80 ^{Ba}
Fresh-4	2.03±0.21 ^{Bb}	4.42±0.32 ^{Bc}	9.04±1.54 ^{Bc}
FT-M-1	2.42±0.05 ^{Ab}	5.83±0.07 ^{Ac}	14.12±0.25 ^{Ab}
FT-M-2	2.71±0.05 ^{Aa}	6.30±0.04 ^{Aa}	17.06±0.52 ^{Aa}
FT-M-3	2.42±0.06 ^b	6.05±0.10 ^{Ab}	14.62±0.31 ^{Ab}
FT-M-4	2.40±0.12 ^{Ab}	5.75±0.02 ^{Ac}	13.82±0.89 ^{Ab}
FT-B-1	2.33±0.16 ^{Aa}	5.48±0.31 ^{Bc}	12.80±1.77 ^{Ab}
FT-B-2	2.34±0.08 ^{Ba}	5.76±0.12 ^{Bb}	13.44±0.48 ^{Ba}
FT-B-3	2.37±0.31 ^a	6.04±0.51 ^{Aa}	14.44±3.35 ^{Aa}
FT-B-4	2.13±0.16 ^{Bb}	5.67±0.39 ^{Ab}	12.10±1.91 ^{ABb}

[†] 大写字母不同表示相同量酵母提取物下不同复热处理方式下的样品之间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示相同处理方式下添加不同量酵母提取物的样品之间差异显著($P<0.05$)。

86.40%,主成分 PC1 和 PC2 有效区分了不同处理组样品间的气味差异。新鲜样品组中,随着酵母提取物添加量的增加,样品在 PCA 图中距离逐渐增大,表明酵母提取物的添加改变了带鱼鱼糜制品的气味指纹;而复热组样品风味主要分布在图 5(a)左半部分,冻融后复热处理使得样品间风味发生显著变化。图 5(b)进一步显示,随着酵母提取物的添加,新鲜样品组差异主要集中于 W1W、W1S 及 W5S 3 个传感器,表明了酵母提取物的添加引起带鱼鱼糜制品中芳香成分、含硫化合物等关键风味成分的组成变化,而这些变化可能与抑制过熟味前体物质或自身风味物质形成有关。复热组与新鲜样品组间差异主

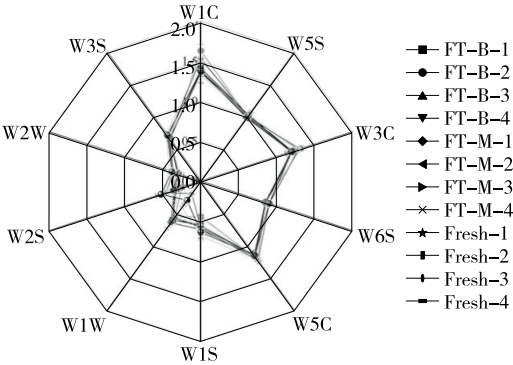
要在 W2S、W1W、W1C、W3C 4 个传感器,传感器间的差异反映了冻融复热处理后样品间醇类、硫化物、芳香成分及烷烃类物质的组成变化。

2.7 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品过熟味生成的影响

预熟制肉类及水产品在冻藏及复热过程中会产生腐臭味、氧化油味、鱼腥味及纸板味等过熟味,主要与低阈值的醛、醇、酮和含硫化合物有关^[32]。带鱼鱼糜制品的特征性挥发性风味如图 6 所示。新鲜带鱼鱼糜制品中鉴定出 32 种醛类、14 种醇类、31 种酮类、5 种呋喃类及 2 种吡嗪类,而酵母提取物的添加使新鲜带鱼鱼糜制品增加了 2 种醛类、18 种酮类、4 种脂类、1 种芳香类及 1 种烃类。在新鲜带鱼鱼糜制品中,醛类、醇类、酮类及呋喃类物质含量随着酵母提取物的添加呈先上升后下降的趋势,且在添加量为 1.00% 时达到最高值。冻融复热后,微波复热组中多数醛类、醇类及酮类物质含量高于水煮复热组($P<0.05$)。混合物体系中偶极矩较大的物质在微波场中更易响应微波能并分离^[31]。而醛类、醇类和酮类物质具有较大偶极矩,可能是这 3 类物质在微波复热过程中更易释放并被检测,而水煮复热过程中因水溶性风味物质溶出而损失。

值得注意的是,微波复热组中与鱼腥味、过熟味等有关庚醛、辛醛、(E)-2-辛烯醛及 2-甲基戊醛含量均低于水煮复热组;而 1-辛烯-3-醇及 2-戊基呋喃浓度随酵母提取物的添加呈先上升后下降的趋势($P<0.05$),且显著高于水煮复热组。Zhai 等^[14]和 An 等^[32]研究发现,1-辛烯-3-醇及 2-戊基呋喃是产生过熟味的主要物质,二者主要是亚油酸的氧化裂解产物。这可能与酵母提取物在加热过程中本身氨基酸参与风味反应有关,也可能是微波加热的不均匀性导致亚油酸氧化,而水煮复热过程中水分渗入稀释了这些气味物质。

在所有复热制品中均检测到 21 种风味物质 $OAV>1$,包括丁醛、戊醛、己醛、庚醛、辛醛、2-甲基戊醛、2-己烯



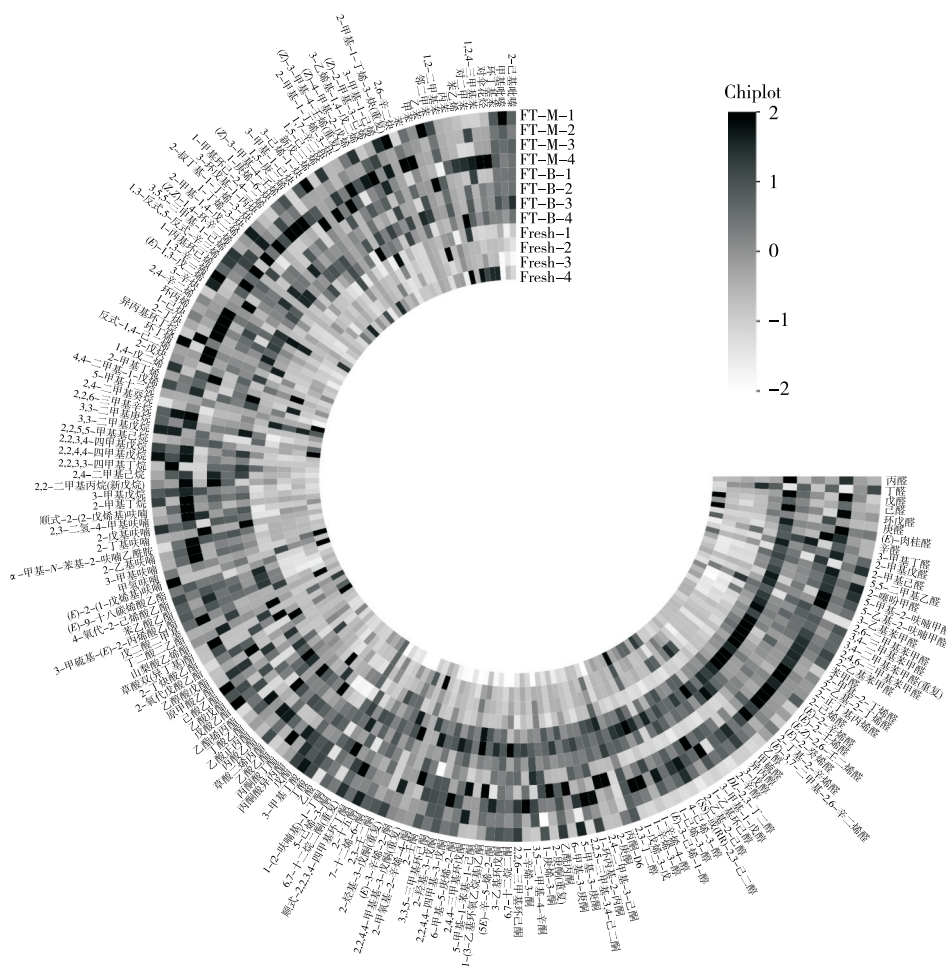


图6 酵母提取物与复热方式对带鱼鱼糜制品气味化合物浓度的影响

Figure 6 Effects of yeast extract and reheating methods on odor compound concentrations in hairtail surimi products

醛、(*E*)-2-辛烯醛、(*E,Z*)-2,6-壬二烯醛、2-丁基-2-辛烯醛、甲硫醇、苯甲醛、3-甲基-1-戊醇、1-辛烯-3-醇、2,3-丁二酮、2-庚酮、2-壬酮、2-十一烷酮、丙酸乙酯、戊酸乙酯和己酸乙酯(表6)。水煮复热组 OAV>1 的风味物质中与过熟味相关的有 13 种物质,包括丁醛、戊醛、庚醛、辛醛、2-甲基戊醛、2-己烯醛、(*E*)-2-辛烯醛、(*E*)-2-壬烯醛、(*E,Z*)-2,6-壬二烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、1-辛烯-3-醇、1-庚烯-3-酮和 2-十一烷酮;微波复热组中 OAV>1 中与过熟味相关的风味物质有 10 种,包括丁醛、戊醛、庚醛、辛醛、2-甲基戊醛、2-己烯醛、(*E*)-2-辛烯醛、(*E,Z*)-2,6-壬二烯醛、1-辛烯-3-醇和 2-十一烷酮。两组复热组制品中 1-辛烯-3-醇浓度最高,辛醛与 2-甲基呋喃次之。进一步分析表明,庚醛(油脂味、鱼腥味)、2-甲基戊醛(油脂味、青草味)、1-辛烯-3-醇(蘑菇味)、(*E*)-2-辛烯醛(油脂味、青草味)、(*E,Z*)-2,6-壬二烯醛(黄瓜味、油脂味)和 2-十一烷酮(油脂味、柑橘味、鱼腥味、橡胶味)对带鱼鱼糜制品总体过熟味贡献较大;以上 6 种物质浓度在两组复热组制品中随着酵母提取物

的添加均呈先上升后下降的趋势,且在酵母提取物添加量为 1.00% 时含量最低。

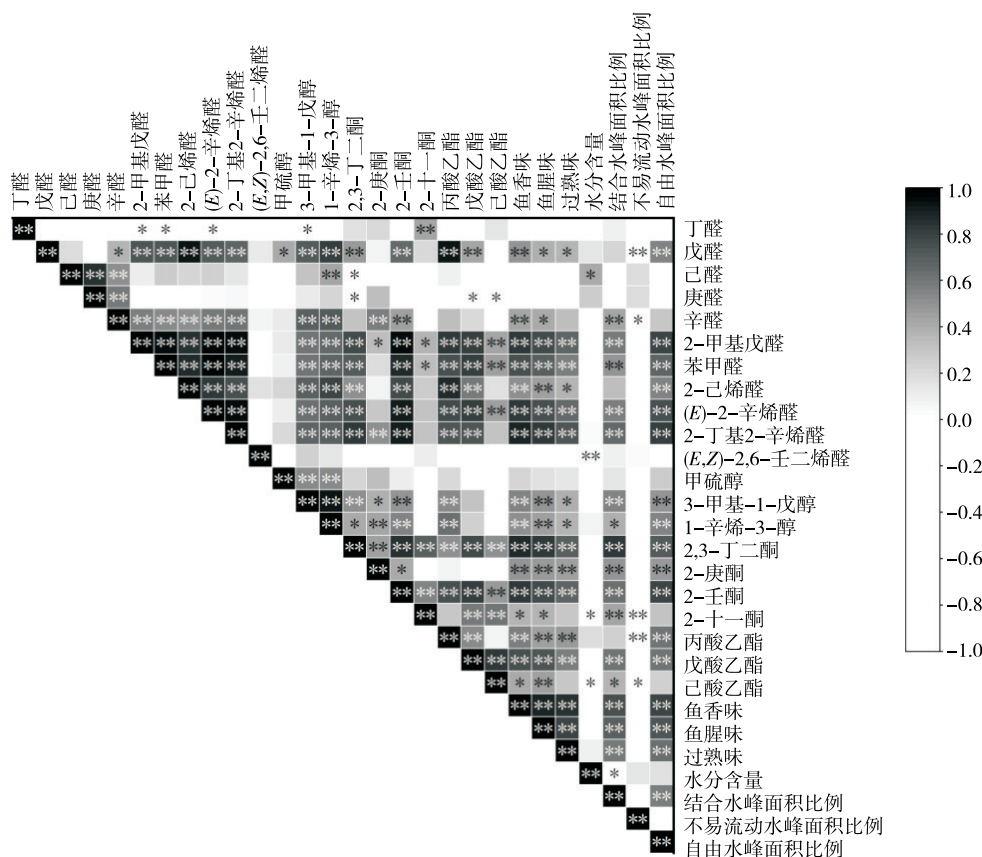
总的来说,水煮复热较微波复热更能促使带鱼鱼糜制品产生与过熟味相关的风味物质,这是由于水煮复热较长时间的加热促进了鱼糜制品中脂质降解和脂肪酸氧化等反应发生,同时水煮复热较为松散的结构易释放气味物质,与Bao等^[21]的研究结果一致;而微波复热较水煮复热产生了较少的过熟味组分,一方面由于微波复热诱导形成的致密结构捕获风味物质,另一方面也可能与短时微波复热(25 s)有关。张凯华等^[31]研究指出,在预制猪肉饼中微波复热产生自由基信号强度与微波复热时间成正比,长时微波复热(700 W 90 s)会促进脂质氧化。

2.8 带鱼鱼糜制品过熟味关键气味因子与水分含量及分布、感官风味间的相关性分析

采用 Spearman 相关分析对带鱼糜制品感官风味、水分含量及分布状态与 21 种过熟味气味因子进行相关性分析(图 7),凝胶强度因样本间数据变异较小,未满足相

表 6 酵母提取物与复热方式对带鱼糜制品气味化合物的 OAV 值影响

化合物	Effects of yeast extract and reheating methods on the OAV values of odor compounds in hairtail surimi products											
	Fresh-1	Fresh-2	Fresh-3	Fresh-4	FT-B-1	FT-B-2	FT-B-3	FT-B-4	FT-M-1	FT-M-2	FT-M-3	FT-M-4
丙醛	4.26	5.24	18.71	11.59	21.50	171.35	0.00	40.89	15.33	107.88	25.67	10.65
丁醛	49.28	124.13	122.87	217.38	176.29	41.38	175.79	74.54	172.01	30.68	125.91	194.15
戊醛	38.86	342.03	389.43	460.16	629.10	2 246.10	1 257.44	803.94	216.69	2 184.98	836.81	90.82
己醛	93.42	15.11	10.57	13.96	32.89	48.48	34.28	14.65	21.04	44.50	19.94	16.04
庚醛	3 950.94	426.06	294.82	305.61	1 431.86	1 267.01	712.17	243.75	2 207.08	837.04	374.50	353.00
辛醛	202.82	63.45	60.25	24.73	84.47	213.97	107.39	82.38	304.56	262.74	119.82	89.78
2-甲基戊醛	1 959.27	1 480.19	1 819.10	1 507.16	4 989.77	8 564.91	4 714.12	5 722.30	5 338.66	8 468.66	4 400.84	6 168.71
苯甲醛	69.90	37.22	45.64	57.96	84.81	147.65	95.11	83.78	82.36	136.19	94.04	116.56
2-己烯醛	0.00	2.04	2.46	1.64	9.36	54.92	11.58	9.36	4.45	52.82	14.00	13.41
(E)-2-辛烯醛	623.20	357.45	362.09	403.02	867.16	1 395.06	966.15	898.12	899.50	1 401.58	842.41	1 137.17
(E)-2-壬烯醛	1 253.35	882.18	862.89	0.00	4 510.31	14 424.29	3 808.44	6 778.07	4 793.08	14 931.98	3 888.82	0.00
(E,Z)-2,6-壬二烯醛	77.51	54.00	58.99	52.63	257.34	1 495.48	324.10	360.07	246.82	1 342.91	366.31	331.17
(E)-2-癸烯醛	263.64	204.58	307.52	206.70	1 130.63	4 838.02	1 262.09	1 877.11	1 158.31	5 349.97	1435.57	0.00
2-丁基-2-辛烯醛	12.84	8.75	10.41	11.96	20.65	27.43	21.46	19.59	23.05	25.64	19.50	20.58
甲硫醇	0.00	1 206.48	3 401.48	10.15	1 500.08	2 061.95	3 724.73	44.23	1 706.37	2 002.76	2 087.86	23.35
3-甲基-1-戊醇	2 498.43	1 341.29	1 375.64	6.58	4 068.36	5 922.43	5 835.45	86.69	5 543.16	11576.36	7103.00	184.43
(E)-3-己烯-1-醇	1.59	1.03	0.80	0.01	3.35	5.59	3.83	0.05	2.54	5.98	4.20	0.00
1-辛烯-3-醇	93 958.57	53 833.85	53 395.42	184.91	145 487.02	262 730.53	167 703.75	1 552.80	147 578.71	294 466.55	144 924.51	1 866.68
1-戊烯-3-醇	0.19	0.25	0.24	0.00	0.75	1.30	1.02	0.00	0.43	1.74	0.83	0.00
2,3-丁二酮	5.51	2 267.12	2 104.94	3 600.90	4 531.59	5 695.88	5 947.41	4 841.32	6 590.50	6 502.88	6 126.40	6 440.80
d ₆ -丙酮	0.00	2.85	1.91	3.27	4.60	3.47	4.08	0.99	0.18	0.00	0.30	2.65
2-庚酮	0.60	0.00	8.78	0.55	58.33	37.34	33.94	2.16	104.64	16.53	11.70	1.48
5-甲基-3-庚酮	0.00	4.28	4.94	6.29	7.20	11.04	7.96	10.32	4.50	13.20	0.00	14.12
2-庚酮	0.03	1.24	1.32	0.02	5.24	4.73	3.80	1.08	10.20	3.33	1.07	0.19
1-庚烯-3-酮	36.02	5 264.60	7 404.95	7 478.42	6 899.99	8 401.80	7 080.47	9 942.72	10 400.14	7 723.70	0.00	10 031.51
1-辛烯-3-酮	1 479.73	153 191.97	125 144.72	0.00	156 283.06	844 043.60	269 764.41	0.00	535 933.48	1 503 739.02	139 547.26	0.00
2-壬酮	0.09	12.74	15.27	18.60	48.42	81.04	34.99	47.22	54.07	66.98	37.79	61.15
2-十一酮	3.31	769.38	567.17	1 104.88	691.65	850.64	735.81	886.17	741.66	897.67	831.59	1 269.53
戊酸	1.22	0.72	0.42	1.03	0.00	0.87	1.39	1.62	1.79	2.19	2.40	2.21
乙酸乙酯	0.26	0.71	0.00	1.85	0.51	1.01	0.85	1.26	0.26	1.07	0.39	0.16
丙酸乙酯	0.00	1.99	5.57	6.58	11.03	30.82	13.93	22.24	5.02	29.09	7.77	5.24
丁酸乙酯	0.00	44.84	49.21	98.06	84.70	211.49	172.18	0.00	36.89	233.32	163.45	44.77
戊酸乙酯	0.00	4.40	4.59	0.00	14.21	30.95	17.63	29.58	14.24	35.50	29.87	49.59
己酸乙酯	0.09	30.11	25.34	0.00	1.78	61.14	48.32	91.01	42.22	60.79	75.78	275.12
苯乙酸乙酯	0.56	0.29	0.29	0.34	1.23	1.87	1.01	1.56	1.36	2.02	0.93	1.52
2-丁基呋喃	2.77	17.49	28.08	0.53	0.05	707.17	44.39	50.36	635.46	78.79	58.71	39.43
2-戊基呋喃	419.02	1 640.68	1 745.96	0.00	0.04	2 574.57	2 936.52	3 027.59	298.79	3 290.17	2 792.64	3 816.71
乙基苯	2.34	1.17	1.38	2.62	1.49	2.22	1.90	6.06	1.63	1.96	1.71	6.70
苯乙烯	97.30	17.85	21.61	5.85	63.40	68.66	62.86	12.71	86.97	0.00	21.74	15.58



**表示在 $P < 0.01$ 水平显著; *表示在 $P < 0.05$ 水平显著

图7 过熟味关键气味因子与水分含量及分布、感官风味间的相关性

Figure 7 Correlation of warmed-over flavor (WOF) compounds with moisture content and distribution, and sensory flavor

相关性分析的基本变异性要求,故未将其纳入相关性分析。过熟味感知与2-甲基戊醛、苯甲醛、(E)-2-辛烯醛、2-丁基-2-辛烯醛、2,3-丁二酮、2-庚酮、2-壬酮、丙酸乙酯、戊酸乙酯呈极显著正相关($P < 0.01$),与戊醛、2-己烯醛、3-甲基-1-戊醇、1-辛烯-3-醇呈显著正相关($P < 0.05$),表明以上13种因子是驱动过熟味感知的主要因子。己醛与水分含量呈显著正相关($P < 0.05$),而2-十一酮、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、己酸乙酯与水分含量呈显著负相关($P < 0.05$),其余过熟味风味因子与水分含量相关性不显著,表明水分含量对过熟味因子生成影响有限。结合水相对峰面积比、自由水相对峰面积比均与2-甲基戊醛、苯甲醛、(E)-2-辛烯醛、2-丁基-2-辛烯醛、3-甲基-1-戊醇、2,3-丁二酮、2-庚酮、2-壬酮、戊酸乙酯呈极显著正相关($P < 0.01$),不易流动水相对峰面积比与这9种过熟味因子呈极显著负相关($P < 0.01$),同时以上9种因子与过熟味感知极显著正相关因子高度重叠,表明水分分布直接影响过熟味生成,主要归因于不易流动水与致密内部结构一方面有效阻隔氧气与脂质底物接触,另一方面束缚大部分过熟味因子(疏水性的醛、酮类)的迁移与释放。

3 结论

酵母提取物的添加有效促进了带鱼鱼糜制品内部结构交联、孔洞减少,增强了样品的凝胶强度、硬度、弹性等凝胶品质,其中添加量为1.00%时鱼糜制品凝胶品质最佳;冻融后微波复热使样品产生了致密微观结构,从而表现出比水煮复热组更高的凝胶强度;微波复热结合添加1.00%酵母提取物在保持带鱼鱼糜制品感官品质和抑制过熟味方面优于水煮复热。挥发性风味物质研究表明酵母提取物的添加使新鲜带鱼鱼糜制品中新增了2-己烯醛、 d_6 -丙酮、2-壬酮、丙酸乙酯和丁酸乙酯;基于气味活性值 >100 计算表明,冷冻复热后带鱼鱼糜制品中庚醛、2-甲基戊醛、(E)-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、2,3-丁二酮和2-十一烷酮是其过熟味产生的主要组分;鱼糜制品中添加酵母提取物后经冷冻及微波复热产生的过熟味少于水煮复热组(基于气味活性值 >1)。酵母提取物的添加在一定程度上提高了带鱼鱼糜制品凝胶强度,以及抑制了产品中部分过熟味特征风味物质的产生。下一阶段将通过配方优化及其他外源添加物进一步

改善带鱼鱼糜制品的品质。

参考文献

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 39-41.
Fisheries and Fisheries Administration of the Ministry of Agriculture. China fishery statistics yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 39-41.
- [2] 揭珍, 徐大伦, 杨文鸽. 新鲜带鱼营养成分及风味物质的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(11): 1 201-1 205.
JIE Z, XU D L, YANG W G. Analysis of nutritional and flavor components in the fresh *Trichiurus lepturus* muscle[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(11): 1 201-1 205.
- [3] 马明珠, 周宇芳, 缪文华, 等. 傅里叶变换红外光谱法鉴别不同产地带鱼[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 6 932-6 938.
MA M Z, ZHOU Y F, MIAO W H, et al. Identification of *Trichiurus haumela* from different origins by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(21): 6 932-6 938.
- [4] DENG H Y, GUO X X, ZHANG R H, et al. Effects of cinnamon essential oil Pickering emulsion on the quality of refrigerated Hairtail (*Trichiurus haumela*) [J]. Food Research International, 2025, 209: 116311.
- [5] 吕梁玉, 官爱艳, 张单阳, 等. 电子束辐照对带鱼鱼糜及其热诱导凝胶挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 77-83.
LÜ L Y, GUAN A Y, ZHANG D Y, et al. Effects of electron beam irradiation on the volatile flavor components of hairtail surimi and its thermally induced gel[J]. Food Science, 2016, 37 (18): 77-83.
- [6] 王丽丽, 杨文鸽, 徐大伦, 等. 不同淀粉对带鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1 379-1 385.
WANG L L, YANG W G, XU D L, et al. Effect of different starches on the gel properties of hairtail surimi[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(7): 1 379-1 385.
- [7] 白雯璐. 带鱼冻藏过程中品质变化规律及其鱼糜凝胶特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 17-34.
BAI W L. Study on quality change of frozen hairtail and its surimi gel properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 17-34.
- [8] LI F F, WANG B, KONG B H, et al. Decreased gelling properties of protein in mirror carp (*Cyprinus carpio*) are due to protein aggregation and structure deterioration when subjected to freeze-thaw cycles[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105223.
- [9] CALANCHE J, TOMAS A, MARTINEZ S, et al. Relation of quality and sensory perception with changes in free amino acids of thawed seabream (*Sparus aurata*) [J]. Food Research International, 2019, 119: 126-134.
- [10] CHEN Y T, XU A Q, YANG R, et al. Chemical interactions and rheological properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) surimi: effects of chopping and pressure[J]. Food Bioscience, 2020, 38: 100781.
- [11] HU Y Q, LIU W J, YUAN C H, et al. Enhancement of the gelation properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) muscle protein with curdlan and transglutaminase[J]. Food Chemistry, 2015, 176: 115-122.
- [12] 陈汉勇, 李汴生, 阮征, 等. 三种冷冻鱼糜制备的混合鱼糜凝胶特性研究[J]. 农产品加工(学刊), 2014(15): 20-23.
CHEN H Y, LI B S, RUAN Z, et al. Gel properties of three kinds of blended surimi[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(15): 20-23.
- [13] LIU J M, DENG S Y, WANG J F, et al. Comparison and elucidation of the changes in the key odorants of precooked stewed beef during cooking-refrigeration-reheating[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101654.
- [14] ZHAI Y Y, HUANG Q Y, TIAN M L, et al. Elucidation of formation and development of warmed-over flavor in precooked surimi products as affected by reheating methods [J]. Food Chemistry, 2025, 480: 143859.
- [15] 杨姣. 鱼糜凝胶过熟味形成机制及其改善途径研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 55-77.
YANG J. Study on the formation mechanism of warmed-over flavor of surimi gel and its improvement approach[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 55-77.
- [16] CHEN J X, ZHANG Y X, REN Y, et al. The formation mechanism and control strategies of warmed-over flavor in prepared dishes: a comprehensive review and future perspectives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153: 104746.
- [17] JAYATHILAKAN K, SHARMA G K, RADHAKRISHNA K, et al. Antioxidant potential of synthetic and natural antioxidants and its effect on warmed-over-flavour in different species of meat[J]. Food Chemistry, 2007, 105(3): 908-916.
- [18] DANG M Q, LI W R, YOU J, et al. Perilla juice and ginger juice reduced warmed-over flavor (WOF) in surimi gels: due to the inhibition of the formation of the WOF compounds and the masking of the WOF[J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139739.
- [19] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 香辛料精油对预制猪肉饼复热过熟味的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 449-456.
ZHANG K H, ZANG M W, ZHANG Z Q, et al. Effect of spicy essential oils on reheating warmed-over flavor of precooked pork patties[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 449-456.
- [20] WU D, XIONG J, LI P, et al. Dual enhancement effects of different yeast extract on gel properties and saltiness perception of low-salt surimi gel from silver carp[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109925.
- [21] BAO L X, YANG R Z, DIAO D, et al. Reheating-induced gel

- properties change and flavor evolution of surimi-based seafood: effects and mechanisms[J]. Food Chemistry, 2025, 464(Pt 1): 141466.
- [22] 刘钰琪, 陈澄, 陈周, 等. 酵母提取物对鱼糜凝胶品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(5): 1-6.
LIU Y Q, CHEN C, CHEN Z, et al. Effect of yeast extract on properties of surimi gel[J]. Meat Research, 2019, 33(5): 1-6.
- [23] 张茜, 熊善柏, 黄琪琳, 等. 酵母抽提物替代味精的主料配方优化及其对传统鱼糕品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(11): 12-17, 26.
ZHANG Q, XIONG S B, HUANG Q L, et al. Formula optimization of main ingredients of yeast extract instead of monosodium glutamate and its effect on the quality of traditional fish cake[J]. China Condiment, 2021, 46(11): 12-17, 26.
- [24] 高汉朴, 苏兆新, 刘婷, 等. 转谷氨酰胺酶添加量及暂存条件对传统鱼糕品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 121-128.
GAO H P, SU Z X, LIU T, et al. Effects of transglutaminase addition amount and temporary storage conditions on the quality of traditional fish cake[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 121-128.
- [25] 江祥瑞, 戴新佳, 何斌, 等. 抗冻/抗氧化双效肽对不漂洗鱼糜冻藏品质的调控[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 297-305.
JIANG X Y, DAI X J, HE B, et al. Regulatory effect of dual-functional peptides with antifreeze and antioxidant activity on the quality of unwashed silver carp surimi[J]. Food Science, 2025, 46(20): 297-305.
- [26] SHEN Z W, TIAN M L, WANG F X, et al. Enhancing freeze-thaw stability and flavor in surimi products: impact of virgin coconut oil and fish oil incorporation[J]. Food Bioscience, 2024, 57: 103515.
- [27] XU Y, HU Y, LAN H, et al. Comparative analysis of quality and flavor profiles in raw and pre-cooked large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) meat post freezing and reheating[J]. Food Chemistry, 2025, 464(Pt 3): 141865.
- [28] 张柔佳, 王易芬, 栾东磊. 微波加工过程中食品温度分布规律及其均匀性研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 270-278.
ZHANG J R, WANG Y F, LUAN D L. A review of temperature distribution and heating uniformity of food during microwave thermal processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(4): 270-278.
- [29] 杨菁, 郑万源, 仪淑敏, 等. 复热方式对车前子壳粉—未漂洗鱼糜凝胶薄饼品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(12): 2-8.
YANG J, ZHENG W Y, YI S M, et al. Effects of different reheating methods on the quality characteristics of psyllium husk powder-unrinsed surimi gel pancakes[J]. Food & Machinery, 2024, 40(12): 2-8.
- [30] LUO X Y, HUANG K, NIU Y X, et al. Effects of freezing methods on physicochemical properties, protein/fat oxidation and odor characteristics of surimi gels with different cross-linking degrees[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137268.
- [31] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 微波复热时间对预制猪肉饼过熟味、脂肪氧化和水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 50-56.
ZHANG K H, ZANG M W, ZHANG Z Q, et al. Effect of microwave reheating time on warmed-over flavor, lipid oxidation and water distribution in precooked pork patties[J]. Food Science, 2020, 41(9): 50-56.
- [32] AN Y Q, WEN L, LI W R, et al. Insight into the evolution of aroma compounds during thermal processing of surimi gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131762.