DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.006

金枪鱼碎肉替代比例及微波联合加热方式对鱼糜蛋白棒品质与风味的影响

张文秀[1,2],余海霞[3*],张小军[2],余海涛[4],钟尚融[1,2],张展[1,2],许垄[1,2]
(1. 浙江海洋大学 食品与药学学院,浙江 舟山 316022;2. 浙江省海洋水产研究所,浙江 舟山 316021;3. 浙江大学 舟山海洋研究中心,浙江 舟山 316021;4. 浙江融创食品工业有限公司,浙江 舟山 316100)

摘　要:为提升金枪鱼碎肉在鱼糜制品中的高值化利用,该研究以金枪鱼碎肉替代传统鱼糜制备蛋白棒,设置20%、30%、40%、50%和60%的替代比例,根据质构、凝胶性能和色差等指标筛选最优替代比例。以最优替代比例为配方,通过微波3D打印成型并结合水浴(MW-S)、蒸汽(MW-Z)、低温烘烤(MW-D)和空气对流(MW-K)复合加热,通过质构分析、低场核磁共振、电子舌、气相色谱-离子迁移谱和扫描电子显微镜对产品品质与风味进行评价。结果表明,不同金枪鱼碎肉替代比例显著影响鱼糜蛋白棒的硬度和咀嚼性($P<0.05$)。替代比例为40%时,硬度为1 927.59 N、咀嚼性为1 646.09 N/mm,高于替代比例为60%的金枪鱼碎肉(1 109.02 N、1 036.28 N/mm)。替代比例为40%时,L^*值和白度值分别为69.68和66.62,质构与色泽综合表现最佳。不同复合加热方式显著影响样品水分状态、挥发性风味物质及微观结构,其中MW-K形成致密凝胶网络,持水性和鲜味突出、苦涩感较弱,MW-Z微观结构仅次于MW-K,整体风味协调性弱于MW-K;而MW-S和MW-D则表现出不同程度的结构疏松。综上,替代比例为40%的金枪鱼碎肉配合微波-空气对流复合加热为制备高品质鱼糜蛋白棒的优选工艺组合。

关键词:金枪鱼碎肉;鱼糜蛋白棒;替代比例;复合加热;质构特性;风味特性

Effects of Tuna Mince Substitution Ratio and Microwave Combined Heating on the Quality and Flavor of Surimi Protein Bars

ZHANG Wenxiu[1,2], YU Haixia[3*], ZHANG Xiaojun[2], YU Haitao[4], ZHONG Shangrong[1,2], ZHANG Zhan[1,2], XU Long[1,2]
(1. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China; 2. Marine Fisheries Research Institute of Zhejiang Province, Zhoushan 316021, Zhejiang, China; 3. Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China; 4. Zhejiang Retronx Foodstuff Industry Co., Ltd., Zhoushan 316100, Zhejiang, China)

Abstract: To promote the high-value utilization of tuna mince in surimi-based products, tuna mince was used to partially replace conventional surimi for preparing protein bars. Replacement levels of 20%, 30%, 40%, 50%, and 60% were designed, and texture, gel properties, and color parameters were compared to identify the optimal substitution ratio. Based on the optimized formulation, samples were fabricated by microwave-assisted 3D printing and subsequently subjected to combined heating treatments, including water bath heating (MW-S), steam heating (MW-Z), low-temperature baking (MW-D), and air convection heating (MW-K). Product quality and flavor characteristics were evaluated by texture analysis, low-field nuclear magnetic resonance, electronic tongue, gas chromatography-ion mobility spectrometry, and scanning electron microscopy. The results showed that different tuna mince substitution ratios significantly affected the hardness and chewiness of surimi protein bars ($P<0.05$). At the 40% substitution level, hardness and chewiness reached 1 927.59 N and 1 646.09 N/mm, respectively, both of which were higher than those of the 60% group (1 109.02 N and 1 036.28 N/mm). In addition, the L^* value and whiteness of the 40% group were 69.68 and 66.62, respectively, indicating the best overall performance in texture and color. Different combined heating methods markedly affected water distribution, volatile flavor compounds, and microstructure. Among them,

基金项目:浙江省"尖兵领雁+X"科技计划项目(2025C04023);舟山市关键和共性技术攻关项目(2025C03007)
作者简介:张文秀(1999—),女(汉),硕士研究生,研究方向:水产品加工与安全。
*通信作者:余海霞,高级工程师,硕士,研究方向:水产品保鲜与加工。

MW-K formed a dense gel network and exhibited good water-holding capacity, a more pronounced umami taste, and weaker bitter and astringent responses. MW-Z showed a microstructure inferior only to that of MW-K, although its overall flavor harmony remained weaker than that of MW-K. By contrast, MW-S and MW-D exhibited varying degrees of structural looseness. In conclusion, a 40% substitution ratio of tuna mince combined with microwave-air convection heating was considered the optimal processing combination for producing high-quality surimi protein bars.

Key words: tuna mince; surimi protein bars; substitution level; combined heating; texture properties; flavor characteristics

引文格式：
张文秀，余海霞，张小军，等. 金枪鱼碎肉替代比例及微波联合加热方式对鱼糜蛋白棒品质与风味的影响[J]. 食品研究与开发，2026，47(17)：43-51.
ZHANG Wenxiu, YU Haixia, ZHANG Xiaojun, et al. Effects of Tuna Mince Substitution Ratio and Microwave Combined Heating on the Quality and Flavor of Surimi Protein Bars[J]. Food Research and Development，2026，47(17)：43-51.

近年来，随着海洋资源高值化利用的推进，金枪鱼加工副产物因其蛋白质含量高、氨基酸组成优良，逐渐被视为鱼糜制品的潜在替代原料。金枪鱼的肉质鲜美柔嫩，营养价值高，有着“海底黄金”的美称[1]，但是加工过程中会产生大量以碎肉为主的副产物，目前对金枪鱼碎肉的加工利用仍处在初级阶段，主要用于制成化肥、鱼粉等低价值产品或直接丢弃，造成资源浪费和环境污染[2]。然而，此类金枪鱼加工碎肉在前处理和冷冻贮藏过程中易发生肌原纤维蛋白结构破坏、可溶性降低、凝胶形成能力偏弱等问题，限制了其在传统鱼糜制品中的应用。为实现这类副产物的高值化利用，本研究以金枪鱼碎肉部分替代常规鱼糜为切入点，力求在尽量提高替代比例、充分利用金枪鱼资源的同时，保持产品所需的凝胶强度和弹性。

微波加热与传统加热的组合有望改善鱼糜凝胶品质并提升能效，而微波加热已被广泛用于优化鱼糜产品的凝胶质量[3]。经过高温加热（一般为 90 ℃）后，鱼糜凝胶形成了坚固的凝胶网络结构，良好的凝胶性能得以显现[4]。研究表明，鱼糜经过 0~40 ℃预热后，鱼糜凝胶的质地与直接高温加热相比有所改善[5-6]。一般认为，两段式加热凝胶的成胶能力明显高于一步加热凝胶[7]。因此，本研究在微波 3D 打印成型的基础上，结合水浴、蒸制、空气对流和低温烘烤等多种二次加热方式，系统比较不同加热条件下金枪鱼碎肉替代鱼糜蛋白棒的水分分布、质构特性、风味组成及微观结构，探讨加热方式优化对产品品质的调控作用，以期为低值金枪鱼副产物的高品质利用和新型鱼糜制品加工工艺提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金枪鱼碎肉、冷冻方头、绿鳍、带鱼、鳓鱼、铜盆鱼糜：浙江兴业集团有限公司；酒石酸、盐酸、三氯乙酸、无水乙醇、戊二醛、磷酸盐缓冲液（均为分析纯）：国药集团化学试剂有限公司；氢氯化钾、乙醇、氢氧化钠（均为分析纯）：上海易恩化学技术有限公司；白砂糖、鸡精：市售；酵母提取物、变性淀粉（均为食品级）：河南中臣生物科技有限公司；瓜尔豆胶（食品级）：北京瓜尔润科技股份有限公司；黄原胶（食品级）：新疆梅花氨基酸股份有限公司。

1.2 仪器与设备

食品微波 3D 打印机（XMO-3D）：南京先欧仪器制造有限公司；电子天平（SQP）：赛多利斯科技仪器有限公司；数显恒温水浴锅（HH-S11-6）：上海一恒科学仪器有限公司；真空包装机（DZQ/D2PQ）：盛世时代科技有限公司；质构仪（TA-XT plus）：安捷伦科技有限公司；真空冷冻干燥机（SCIENTZ-10N）：宁波新芝生物科技股份有限公司；色差仪（NR60CP）：广东三恩时科技有限公司；低场核磁共振分析仪（MesoMR23-060-I）：苏州纽迈分析仪器股份有限公司；扫描电子显微镜（Gemini SEM 360）：德国 ZEISS 公司；离心机（TGL-16M）：德国艾本德股份公司；电子舌（SA402B）：日本 Insent 公司；气相色谱-离子迁移谱联用仪（gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS, Flavour Spec 1H1-00053）：德国 G.A.S 公司；低温烘烤箱（C40）：海氏烘焙电器有限公司；搅拌机（SP67S）：苏泊尔股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

为研究金枪鱼碎肉梯度替换对鱼糜蛋白棒品质的影响，以预试验筛选得到的最佳微波打印参数（打印过程中同步微波加热，功率 4 W）为固定条件，设计金枪鱼碎肉对铜盆鱼糜的替代比例为 20%、30%、40%、50%

和 60%(其余配方与工艺保持一致),未替代样品作为对照。将铜盆鱼糜于 4 ℃解冻 12 h,置入搅拌机空擂 1 min;按鱼糜∶蛋清=3∶1(质量比)混合,加入鱼糜与蛋清总质量的 2% NaCl 盐擂 2 min;称取 0.4% 瓜尔胶、0.4% 黄原胶、12% 变性淀粉、2% 魔芋粉、6% 大豆分离蛋白,与冰水按 3∶1 体积比预水合后加入 0.8% 白砂糖,混合后继续斩拌 2 min;最后加入 1.6% 酵母提取物和 0.8% 鸡精,斩拌 1 min,制得打印原料。全过程温度低于 10 ℃,制备后 4 ℃冷藏备用。梯度组按目标替代比例以金枪鱼碎肉部分替代铜盆鱼糜,其余步骤相同。

采用食品微波 3D 打印设备,在打印过程中同步微波加热,功率设定为 4 W;其余设备参数按统一设定执行(喷嘴 1.0 mm、层高与路径一致),打印速度 100%,填充率 80%,打印完成后室温冷却定型并进入质构测试。

1.3.2 凝胶制备

根据金枪鱼碎肉梯度质构试验结果,选取 40% 金枪鱼碎肉替代比例作为复合加热试验的固定配方。将经微波 3D 打印成型的样品采用 4 种方式进行凝胶制备。具体操作如下:鱼糜样品按前述配方制备完成后,先以微波功率 4 W 进行 3D 打印,待测样品放入-80 ℃冷冻 12 h,置于高温蒸煮袋中分别加热,加热结束后,所有样品迅速冷却至室温,置于 4 ℃冷藏以备后续测定。加热方式如表 1 所示。

表 1 加热方式

Table 1 Heating method

加热方式	加热条件
复合水浴加热(MW-S)	90 ℃加热 40 min
复合蒸汽加热(MW-Z)	100 ℃蒸汽环境中加热 30 min
复合低温烘烤加热(MW-D)	60 ℃低温烘烤箱,持续烘烤 2h
复合空气对流加热(MW-K)	120 ℃空气对流 6 min,完成凝胶化

1.3.3 质构特性的测定

参考何晓彤[8]的方法并略作修改。将待测样品切成 3 cm×2 cm×1.2 cm 块状进行测试。选用 P/50 型号探头,触发力为 5.0 g,测量的前、中、后速度分别为 5、1、5 mm/s。进行 2 次压缩,压缩比例为 30%,时间间隔设定为 2 s,平行测量次数为 3 次。

1.3.4 凝胶强度的测定

用质构仪测定凝胶强度。热诱导凝胶处理后,在样品表面上使用 P/S 探针测试其凝胶强度。测试参数在韩蓉[9]的方法基础上改动如下:探针穿刺速度 1 mm/s,穿刺深度 5 mm,触发力 5 g,记录相关的凝胶强度指标。

1.3.5 色差的测定

样品色差通过色差仪测定,白度值计算公式如下。

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

式中:W 为白度值;L^* 为亮度值;a^* 为红度值;b^* 为黄度值。

1.3.6 水分分布的测定及成像

采用低场核磁共振分析仪(21 MHz)测定样品的横向弛豫时间(transverse relaxation time,T_2)。于直径 25 mm 磁体线圈中通过 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 序列进行弛豫测量。脉冲参数在 Liu 等[10]的方法基础上进行改动设置如下:波谱仪频率 21 MHz,光谱宽度 100 kHz,射频延迟时间 0.8 ms,90°脉冲宽度 9 μs,180°脉冲宽度 17.2 μs,等待时间 4 000 ms,时间回波 0.12 ms,回波数 9 000,扫描 4 次。

1.3.7 电子舌测定分析

根据辛光斌等[11]的方法并进行适当调整。称取 5.0 g 待测鱼糜样品与纯水按料液比 1∶10 (g/mL)混匀,进行均质处理,离心过滤取滤液 100 mL 用于电子舌检测。测试用液为参比溶液:30 mmol/L 氯化钾+0.3 mmol/L 酒石酸;负极清洗液:100 mmol/L 盐酸+30% 乙醇溶液;正极清洗液:10 mmol/L 氢氧化钾+100 mmol/L 氯化钾+30% 乙醇溶液。电子舌传感器与味觉值匹配信息见表 2。

表 2 电子舌传感器与味觉值匹配信息

Table 2 Correspondence between electronic tongue sensors and taste values

传感器	味觉	味觉信息	
		先味	回味
C00	酸性苦味	苦味	酸性苦味回味
AE1	涩味	涩味	涩味回味
CA0	酸味	酸味	无
CT0	咸味	咸味	无
AAE	鲜味	鲜味	丰富度

1.3.8 气相色谱-离子迁移谱联用仪(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)测定

根据王源渊等[12]的方法并进行适当调整。称取 2 g 待测鱼糜打印样品,置于 20 mL 的顶空瓶中,随后在 50 ℃的环境下孵育 20 min,完成后进行进样分析。借助 Reporter 插件针对谱图开展差异化剖析,其中涵盖三维谱图和二维俯视图的比对,同时运用 Gallery Plot 插件进行指纹图谱对比分析。

1.3.9 微观结构的测定

参考 Li 等[13]的方法,将蛋白棒制品切成 3 mm×3 mm×2 mm 片状,浸入含有 2.5% 戊二醛和 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH7.2)的混合溶液中 24 h 作固定处理。完成固定处理后,使用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液清洗样品 3 次,每次处理时间为 10 min。随后依次用

30%、50%、70%、90% 的乙醇溶液进行梯度脱水，每次处理时间为 15 min。最后样品用无水乙醇进行两次 15 min 的脱水处理。处理完成后，将样品置于真空冷冻干燥机中干燥 24 h，随后进行喷金处理，并通过扫描电子显微镜（scanning electron microscopy，SEM）观察以获取具有代表性的图像。

1.3.10　基本营养成分测定

水分含量参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行检测[14]；灰分含量参考 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的总灰分测定法进行检测[15]；粗脂肪含量参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法进行检测[16]；粗蛋白含量参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法进行检测[17]。

1.4　数据处理

每组试验进行 3 次重复，试验数据使用 Excel 2021 进行收集整理，所有数据以平均数±标准差的形式表示，采用 SPSS 进行方差分析，以及 Origin 进行图像绘制。

2　结果与分析

2.1　金枪鱼碎肉替代比例对鱼糜蛋白棒质构特性的影响

质构特性是评价鱼糜蛋白棒品质的重要指标之一，可在一定程度上反映蛋白凝胶网络的形成与稳定性[18]。金枪鱼碎肉替代比例对鱼糜蛋白棒质构特性的影响见表 3。

表 3　金枪鱼碎肉替代比例对鱼糜蛋白棒质构特性的影响

Table 3　Effect of tuna mince substitution ratio on textural properties of surimi protein bars

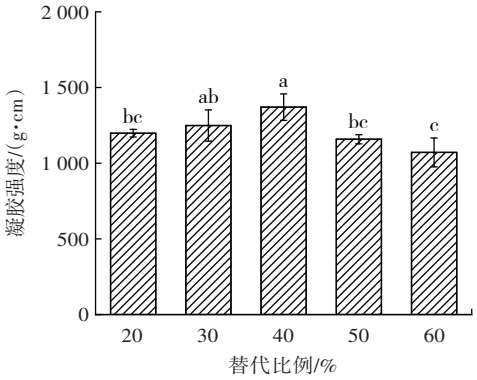
替代比例/%	硬度/N	弹性	内聚性	咀嚼性/(N/mm)	回复性
20	1 871.35±54.92^{a}	0.97±0.01^{a}	0.90±0.01^{a}	1 641.90±27.14^{a}	0.57±0.02^{a}
30	1 893.53±203.46^{a}	0.96±0.02^{a}	0.91±0.00^{a}	1 694.30±156.31^{a}	0.56±0.00^{a}
40	1 927.59±117.26^{a}	0.97±0.01^{a}	0.91±0.01^{a}	1 646.09±90.03^{a}	0.56±0.01^{a}
50	1 870.58±31.10^{a}	0.95±0.01^{a}	0.90±0.00^{a}	1 598.99±34.22^{a}	0.54±0.00^{b}
60	1 109.02±95.95^{b}	0.95±0.04^{a}	0.91±0.00^{a}	1 036.28±28.55^{b}	0.57±0.01^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

由表 3 可知，随着金枪鱼碎肉替代比例的提高，蛋白棒硬度呈先上升后下降的趋势，金枪鱼碎肉替代比例为 20%、30% 和 40% 鱼糜蛋白棒的硬度整体处于较高水平。当替代比例增加至 50% 时硬度略有回落，而 60% 的替代比例则显著下降至 1 109.02 N（$P<0.05$），说明过高替代比例会削弱蛋白凝胶网络的支撑能力。咀嚼性与硬度变化基本一致，替代比例为 20%~40% 时咀嚼性稳定在 1 641.90~1 694.30 N/mm 的范围内，替代比例为 50% 时略有降低，替代比例为 60% 时咀嚼性显著降至 1 036.28 N/mm，表明样品韧性和咀嚼快感明显减弱。弹性和内聚性整体波动较小，分别维持在 0.95~0.97 和 0.90~0.91，仅 60% 的替代比例弹性略低；回复性在 0.54~0.57 之间变化，替代比例为 50% 时最低，在受压恢复过程中结构受损较为明显。综合各质构指标，40% 的替代比例在保证较高硬度和咀嚼性的同时兼顾了良好的弹性与结构稳定性，可视为本试验条件下较为适宜的金枪鱼碎肉替代比例。

2.2　金枪鱼碎肉替代比例对鱼糜蛋白棒凝胶强度的影响

凝胶强度是评价鱼糜制品凝胶形成能力和结构稳定性的重要指标。金枪鱼碎肉替代比例对鱼糜蛋白棒凝胶强度的影响见图 1。



不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 1　金枪鱼碎肉替代比例对凝胶强度的影响

Fig.1　Effect of tuna mince substitution ratio on gel strength

由图 1 可以看出，随着替代比例由 20% 升至 40%，凝胶强度逐渐增加，均保持在较高水平，其中替代比例为 40% 时达到最高（1 370.31 g·cm），与 50% 和 60% 的替代比例差异显著（$P<0.05$）；当替代比例继续提高至 50% 和 60% 时，凝胶强度明显下降，最低值为 1 071.17 g·cm。说明适宜的金枪鱼碎肉替代比例有利于肌原纤维蛋白充分盐溶，并在加热过程中通过疏水相互作用和二硫键等共同作用形成较为连续致密的三维凝胶网络；而过高替代比例则可能削弱蛋白分子间的有效交联，导致凝胶网络稳定性下降，从而使凝胶强度降低[19-20]。综合来看，40% 替代比例下样品凝胶强度表现较优，可作为后续复合加热试验的适宜替代比例。

2.3　金枪鱼碎肉替代比例对凝胶色泽的影响

采用 CIE-Lab 体系评价不同替代比例对金枪鱼碎肉蛋白棒色泽的影响，结果见表 4。

表 4　金枪鱼碎肉替代比例对鱼糜蛋白棒色泽的影响

Table 4　Effect of tuna mince substitution ratio on color parameters of surimi protein bars

替代比例/%	L^*值	a^*值	b^*值	白度值
20	69.47±2.09[a]	4.47±0.40[a]	12.77±0.22[c]	66.61±1.92[a]
30	70.06±0.30[a]	2.95±0.26[b]	16.26±1.22[a]	65.81±0.63[ab]
40	69.68±0.81[a]	1.70±0.08[c]	13.84±0.46[bc]	66.62±0.76[a]
50	65.91±2.86[b]	1.35±0.04[c]	14.36±0.44[b]	62.98±2.64[bc]
60	65.64±2.22[b]	1.50±0.27[c]	15.95±0.78[a]	62.09±2.04[c]

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

由表 4 可知，替代比例为 20%、30% 和 40% 时，L^*值分别为 69.47、70.06 和 69.68，差异不显著（$P>0.05$），当替代比例提高至 50% 和 60% 时，L^*值分别降至 65.91 和 65.64，显著低于替代比例为 20%、30% 和 40%（$P<0.05$），表明较高替代比例会降低样品亮度，使鱼糜蛋白棒样品颜色变暗。白度值的变化趋势与 L^*值基本一致。a^*值随替代比例的提高而持续下降，并在 40% 后趋于平稳，红度被有效削弱；b^*值在不同替代比例中呈波动变化，其中替代比例为 30% 和 60% 时较高，分别为 16.26 和 15.95，替代比例为 20% 时最低，为 12.77，替代比例为 40% 时为 13.84，处于中间水平，说明替代比例变化对样品黄度具有一定调节作用，但未呈现单调变化趋势。综上，替代比例为 40% 的样品在保持较高亮度和白度的同时，红度和黄度适中、色泽均匀自然，与前述质构结果相结合，可视为本试验条件下较为理想的替代比例。

2.4　不同复合加热方式对鱼糜蛋白棒水分状态及空间分布的影响

为明确不同复合加热方式对 40% 替代比例鱼糜蛋白棒内部水分状态及空间分布的影响，采用低场核磁共振（low-field nuclear magnetic resonance，LF-NMR）和磁共振成像对各处理样品的横向弛豫时间（T_2）分布及成像特征进行分析，结果见图 2 和图 3。

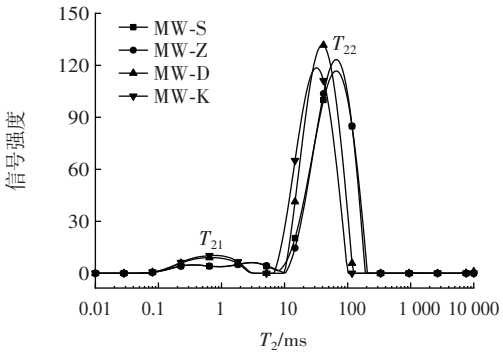


图 2　不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒的 T_2 分布

Fig.2　T_2 distribution of surimi protein bars under different combined heating methods

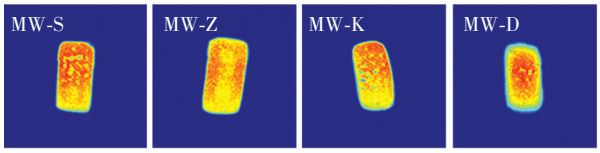


图 3　不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒的核磁共振成像伪彩图

Fig.3　Pseudocolor magnetic resonance images of surimi protein bars under different combined heating methods

由图 2 可知，4 组样品的 T_2分布均呈现 T_{21}（结合水）和 T_{22}（流动水）双峰特征，表明体系中主要存在紧束缚水与流动水两类水分状态[21-22]。MW-K 样品在短弛豫时间区间（T_{21}）的峰面积最大，而 T_{22}峰位置适中且较窄，说明其凝胶网络既能有效束缚水分，又保留一定流动性，有利于形成多汁而不渗水的质构。相较之下，MW-D 和 MW-S 的 T_2主峰明显左移且更尖锐，表明凝胶过于致密、水分被过度束缚，可能导致口感偏硬；MW-Z 样品则在长弛豫时间区域出现更宽的 T_{22}峰，说明体系中易迁移水分比例较高，水分稳定性相对较差。由图 3 可知，MW-K 样品截面信号分布均匀、连续，无明显表层“亮环”或内部信号减弱，其余处理则不同程度表现出边缘增强或中心减弱。综上，不同复合加热方式显著影响鱼糜凝胶的水分状态和空间分布，这一趋势与 Zhang 等[23]和 Lv 等[24]的研究基本一致，并进一步证明 MW-K 是本研究条件下保持蛋白棒水分稳定性和凝胶品质的优选工艺。

2.5　不同复合加热方式对鱼糜蛋白棒风味特征的影响

电子舌雷达图及主成分分析（principal component analysis，PCA）见图 4。

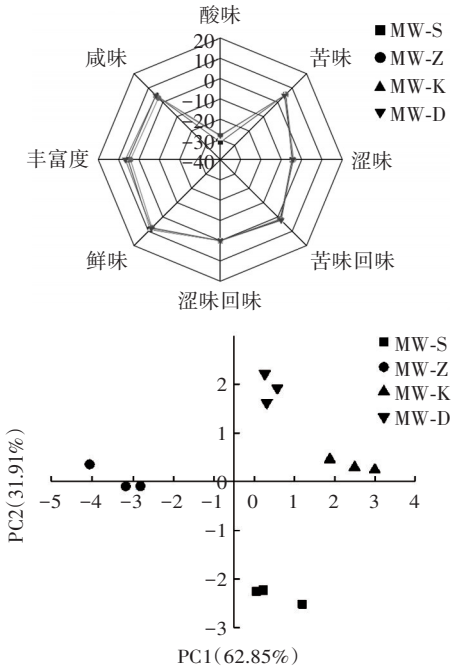


图 4　不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒电子舌雷达图及 PCA

Fig.4　Electronic tongue radar charts and PCA of surimi protein bars under different combined heating methods

由图 4 可知，不同复合加热方式处理后，鱼糜蛋白棒样品在酸味、苦味、涩味、鲜味、咸味及丰富度等味觉维度上均表现出一定差异。总体来看，MW-K 样品在鲜味、咸味、丰富度及回味相关维度上的响应较高，说明其整体滋味较为饱满、协调；MW-S 样品苦味响应较高，鲜味也保持在较高水平，且酸味响应较低；MW-Z 样品在鲜味、咸味和丰富度等维度上的响应整体较低，表现为整体味觉强度偏弱；MW-D 样品酸味响应最高，丰富度和回味处于中等偏高水平。电子舌主成分分析结果进一步表明，4 组样品在 PC1 和 PC2 平面中能够较好区分，且组内重复点聚集较好，说明不同复合加热方式对鱼糜蛋白棒整体味觉轮廓具有显著影响。综合雷达图与 PCA 结果可知，MW-K 样品在保持较高鲜味、咸味和丰富度的同时，负向味觉响应相对较弱，整体风味协调性较好。该趋势与 LF-NMR 显示的持水性差异及后述 GC-IMS 中烘烤香、焦香相关挥发物的变化基本一致[25]。

2.6 不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒的挥发性风味化合物分析

不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒 GC-IMS 差异化图谱见图 5。

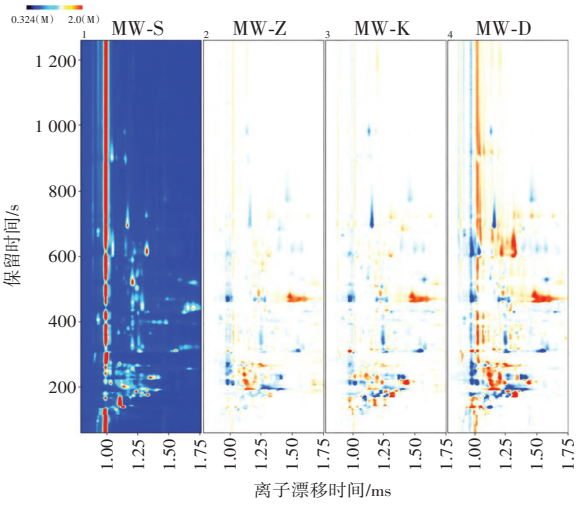


图 5 不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒 GC-IMS 差异化图谱

Fig.5 Differential GC-IMS spectra of surimi protein bars under different combined heating methods

由图 5 可知，在 40% 替代比例下，为阐明不同复合加热方式造成的风味差异，采用 GC-IMS 对鱼糜蛋白棒挥发性化合物进行分析。综合结果可知，不同处理在各主要峰的峰位、峰面积和信号强度上差异明显，表明不同加热方式下的化合物种类数量显著增加[26]。总体来看，MW-K 和 MW-D 样品的斑块区中，多数醛类、醇类及部分酮类信号较强，如戊醛、己醛、辛醛以及 1-辛烯-3-醇、2-庚酮等，这些脂质氧化和氨基酸降解产物通常赋予制品柔和、干净的脂香及轻微烘烤香，说明干热复合加热促进脂质氧化和美拉德反应，更易形成烘烤、坚果及轻微焦香等特征气味[27]。与此同时，MW-S 和 MW-Z（湿热为主）样品中与鱼腥和初级脂肪氧化相关的部分 C_6~C_8 醛醇相对更为突出，而部分烘烤香物质的响应较弱，表明加热介质和传热方式对挥发性成分的生成具有显著调控作用[28-29]。

为进一步比较不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒挥发性风味物质的整体差异，采用 GC-IMS 对样品进行二维和三维谱图分析，结果见图 6。

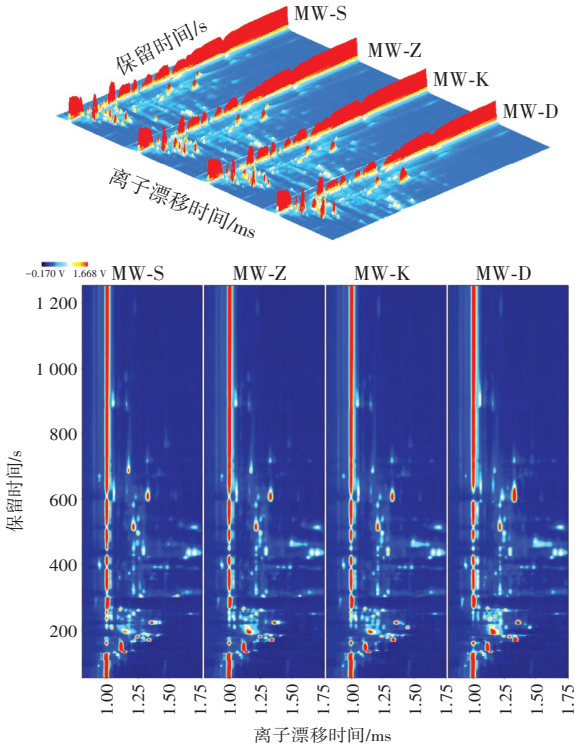


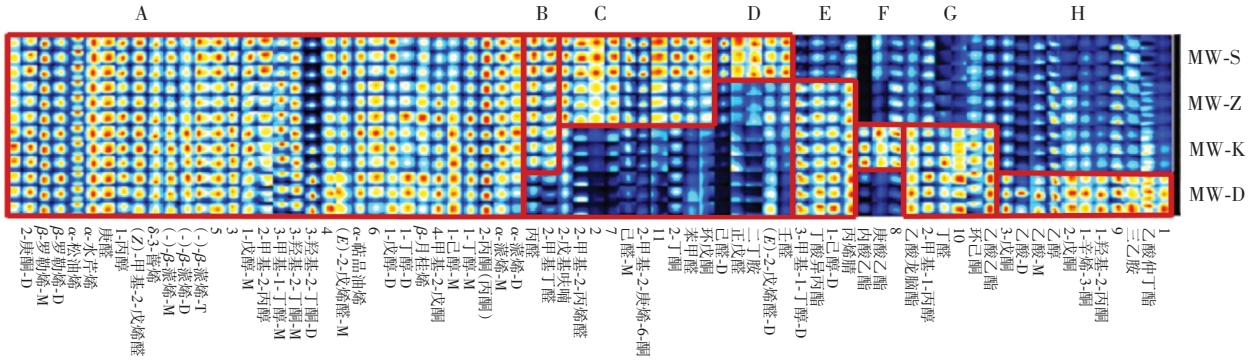
图 6 不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒 GC-IMS 二维和三维图谱

Fig.6 Two-dimensional and three-dimensional GC-IMS spectra of surimi protein bars under different combined heating methods

由图 6 可知，湿热为主的 MW-S 和 MW-Z 样品中鱼腥和脂肪氧化相关醛酮占比较高，整体气味偏腥、略具刺激性；而干热为主的 MW-K 则更富集果香、脂香及烘烤香相关关键挥发物，MW-D 次之，与前述电子舌分析趋势相一致，也与 Chen 等[30]关于复合加热优化鱼糜制品风味的研究基本吻合。

在二维和三维谱图分析的基础上，进一步构建 GC-IMS 指纹图谱，以直观比较不同加热方式下挥发性化合物的种类和信号强度差异，结果见图 7。

由图 7 可知，经检测共识别出 74 种挥发性化合物，主要包括醇类、酮类、醛类、酯类、酸类、萜烯类以及含氮化合物等多种类型。加热过程中通过美拉德反应会产生一系列丰富的化合物，如酯类、醛类、酮类和杂环类化合物等[31]。其中，醇类物质为主要组分，共检出 18 种，它们在食品中通常来源于氨基酸或脂质的还原



A 框为不同复合加热方式处理鱼糜蛋白棒样品共有挥发性有机物的特征峰区域；B 框为 MW-S、MW-Z 和 MW-K 样品中信号强度较高的挥发性有机物特征区域；C 框为 MW-S 和 MW-Z 样品中信号强度较高的挥发性有机物特征区域；D 框为 MW-S 样品中特征信号较强的挥发性有机物区域；E 框为 MW-Z、MW-K 和 MW-D 样品中信号强度较高的挥发性有机物特征区域；F 框为 MW-K 样品中特征信号较强的挥发性有机物区域；G 框为 MW-K 和 MW-D 样品中信号强度较高的挥发性有机物特征区域；H 框为 MW-D 样品中特征信号较强的挥发性有机物区域。1~9 为谱库检索未能定性的挥发性信号峰。

图 7　不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒的 GC-IMS 指纹图谱

Fig.7　GC-IMS fingerprint spectra of surimi protein bars under different combined heating methods

反应，对样品的甜香与果香具有显著贡献；酮类化合物共检出 15 种，多由脂肪酸氧化或氨基酸脱羧产生，赋予产品奶香与烘焙香气；醛类物质检测到 12 种，具有较低的气味阈值，是形成产品脂肪香、焦糖香及轻微青草气的重要组分；此外还检测到 7 种酯类化合物，其具有花果香特征；萜烯类与烃类物质共 10 种，赋予样品草本与松木气息；同时，部分样品中检测到含氮化合物，这些成分可能来源于蛋白质热降解或美拉德反应副产物。

2.7　不同复合加热方式对鱼糜蛋白棒微观结构的影响

不同复合加热方式可能影响鱼糜蛋白棒的凝胶网络结构，进而改变其质构和持水特性，微观结构观察结果见图 8。

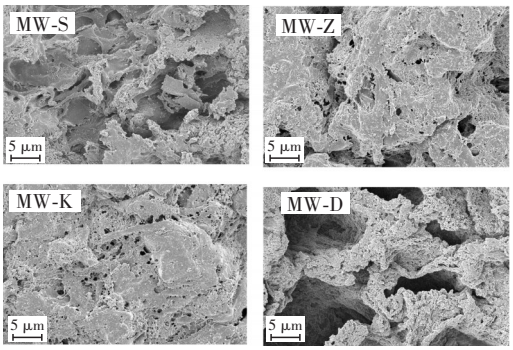


图 8　不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒的微观结构

Fig.8　Microstructure of surimi protein bars under different combined heating methods

由图 8 可知，MW-K 呈连续、致密的海绵状网状结构，孔隙细小且分布均匀，几乎无明显裂缝，说明本条件下肌原纤维蛋白能够充分变性展开，并通过二硫键、氢键等相互作用形成稳定的三维凝胶网络，有利于水分的束缚与保留。MW-D 样品网络结构最为疏松，局部可见较明显的塌陷孔洞和片层断裂，孔径较大且分布不均，表明在加热过程中外层蛋白过快硬化、内部水分迁移受阻，从而引起整体结构塌陷；MW-S 和 MW-Z 样品的微观结构亦出现不同程度的粗大空隙和孔壁破碎现象，网络连续性较弱，但整体破坏程度低于 MW-D。综合来看，MW-K 形成的均匀致密网状结构最有利于提高凝胶强度和持水性。

2.8　基本营养成分分析

基本营养成分可反映不同复合加热方式对鱼糜蛋白棒营养组成的影响，结果见表 5。

表 5　不同复合加热方式下鱼糜蛋白棒的基本营养成分

Table 5　Basic nutritional components of surimi protein bars under different combined heating methods

加热方式	水分含量/%	粗蛋白含量/(g/100 g)	粗脂肪含量/(g/100 g)	灰分含量/(g/100 g)
MW-Z	65.10±0.50[a]	23.63±1.39[b]	3.17±0.07[b]	2.23±0.01[b]
MW-S	65.60±1.48[a]	24.22±1.28[ab]	3.62±0.15[a]	2.54±0.11[a]
MW-K	61.80±0.65[b]	26.60±1.26[a]	2.85±0.04[c]	1.93±0.12[c]
MW-D	54.70±0.37[c]	26.03±1.54[a]	2.82±0.18[c]	2.01±0.06[b]

注：同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

由表 5 可知，不同复合加热方式下蛋白棒的水分、粗蛋白、粗脂肪含量和灰分含量。MW-S 和 MW-Z 的水分含量均在 65% 左右，显著高于 MW-K（61.80%）和 MW-D（54.70%）（$P<0.05$）。MW-K 组粗蛋白含量最高（26.6 g/100 g），粗脂肪含量较低（2.85 g/100 g），灰分含量也略低于其他处理。综合水分、粗蛋白、粗脂肪含量和灰分含量，在本研究金枪鱼替代体系下，MW-K 所得样品在保持适宜水分的同时，更能体现高蛋白、低脂肪蛋白棒的营养特征。

3 结论

本研究以金枪鱼加工碎肉在鱼糜蛋白棒中的高值化利用为目标，构建了“原料替代比例筛选—复合加热方式优化—多技术表征品质与风味”的一体化评价体系。结果表明，40% 替代比例硬度和咀嚼性总体处于较高水平，60% 替代比例则出现质构显著劣化与色泽变暗。综合质构、色差及凝胶性结果可知，40% 为较优替代比例，可在基本保持产品质构与外观品质的同时提高金枪鱼碎肉蛋白资源的利用程度。在 40% 替代比例下，不同复合加热方式进一步显著调控水分状态、风味特征及微观结构，其中 MW-K 可形成致密均匀的凝胶网络，持水性和风味突出，鲜味增强且苦涩感较低，MW-D 在部分风味相关特征上与 MW-K 较为接近，但在水分稳定性和微观结构方面不及 MW-K；而 MW-S 和 MW-Z 易导致网络疏松、结构塌陷及风味劣化。LF-NMR、电子舌、GC-IMS 与扫描电子显微镜等多技术表征结果具有良好一致性，表明加热方式可能通过调控蛋白质热变性速率、水分迁移行为、脂质氧化以及美拉德反应程度来重塑产品质构与风味。综合各项指标，推荐采用 40% 替代比例的金枪鱼碎肉并配合 MW-K 加热，可获得结构均匀致密、鲜味突出且风味纯净的鱼糜蛋白棒，为金枪鱼加工副产物在海洋食品中的工艺利用提供参考。

参考文献：

[1] 蔡静, 钟凤, 梁惠, 等 . 深海鱼的营养密码——金枪鱼[J]. 中国食品安全, 2025(8): 73-74.
CAI Jing, ZHONG Feng, LIANG Hui, et al. Nutritional code of deep-sea fish—Tuna[J]. China Food Safety, 2025(8): 73-74.

[2] XUE J, XU F J, LU W B, et al. Development and characterization of gelatin peptides and peptide-calcium chelates from tuna processing by-products of skins and bones[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142122.

[3] LUO X Y, XIAO S T, RUAN Q F, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131260.

[4] JIA Ru, JIANG Q, KANDA M, et al. Effects of heating processes on changes in ice crystal formation, water holding capacity, and physical properties of surimi gels during frozen storage[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 254-265.

[5] YU Y, TANG M, DAI H J, et al. Dominating roles of protein conformation and water migration in fish muscle quality: The effect of freshness and heating process[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132881.

[6] FENG X, ZHU H K, YU Y, et al. Effect of microwave extraction temperatures on the gelling, foaming and emulsifying characteristics of Bigeye Tuna (*Thunnus obesus*) fish skin gelatin[J]. Food Bioscience, 2025, 65: 106095.

[7] NÚÑEZ-FLORES R, CANDO D, BORDERÍAS A J, et al. Importance of salt and temperature in myosin polymerization during surimi gelation[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 1226-1234.

[8] 何晓彤 . 即食红鱼片及红烧红鱼干预制菜加工工艺及流通品质特性的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023.
HE Xiaotong. Study on the processing and distribution quality characteristics of instant *Lutjanus sanguineus* and braised dried *Lutjanus sanguineus* pre - made products[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2023.

[9] 韩蓉 . 白鲢鱼糜混合体系的 3D 打印及热诱导凝胶工艺研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
HAN Rong. Research on 3D printing and thermally-induced gelation of silver carp surimi system[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.

[10] LIU Y, SUN Q X, WEI S, et al. LF-NMR as a tool for predicting the 3D printability of surimi-starch systems[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131727.

[11] 辛光斌, 许玉娟, 李聪, 等 . 基于 GC-MS、电子鼻和电子舌分析火腿肠贮藏期间的风味变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 295-306.
XIN Guangbin, XU Yujuan, LI Cong, et al. Exploration of the evolution of flavor profiles in ham sausage during storage based on GC-MS, electronic nose and electronic tongue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 295-306.

[12] 王源渊, 张正雨, 祁立波, 等 . 基于 GC-IMS 结合多元统计分析方法分析迷迭香提取物对鲐鱼脱腥效果的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 187-197.
WANG Yuanyuan, ZHANG Zhengyu, QI Libo, et al. Effect of rosemary extract on deodorization of mackerel based on GC-IMS combined with multivariate statistical analysis method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 187-197.

[13] LI L L, ZHANG G Y, ZHENG Y, et al. Effects of ultrasound-assisted curing on the quality and microstructure of low-sodium beef jerky[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 106679.

[14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of moisture in food: GB 5009.3—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of ash content in food: GB 5009.4—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会 . 国家食品药品监督管理总局 . 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of fat in food: GB 5009.6—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局 . 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of protein in food: GB 5009.5—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[18] CHEN M T, YANG L F, WANG J, et al. Towards healthier surimi: Quality and nutritional benefits of flaxseed gum as a fat replacer in grass carp surimi gels[J]. Food Chemistry, 2025, 492: 145570.

[19] ZHANG C, CHEN L, LU M X, et al. Effect of cellulose on gel prop-

erties of heat-induced low-salt surimi gels: Physicochemical characteristics, water distribution and microstructure[J]. Food Chemistry, 2023, 19: 100820.

[20] 昝博文, 彭丛粤, 白婷, 等 . 不同加热方式对牛肉品质和挥发性风味的影响[J]. 肉类研究, 2025, 39(8): 24-33.
ZAN Bowen, PENG Congyue, BAI Ting, et al. Effects of different heating methods on beef quality and volatile flavor[J]. Meat Research, 2025, 39(8): 24-33.

[21] XU C C, CHEN G Y, CHEN S J, et al. Effect of linoleic acid-induced oxidation on the water retention of golden pompano: Myoglobin and myofibrillar protein oxidation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 192: 115719.

[22] LIANG Y W, JIANG M Y, YIN C X, et al. Coordinated improvement of frozen shrimp surimi gel quality by soybean protein isolate and transglutaminase: The role of building a bridge[J]. Food Research International, 2025, 221: 117515.

[23] ZHANG M N, XU Y S, JIANG Q X, et al. Effects of three edible mushroom polysaccharides on the freeze-thaw stability of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels: Water retention, gel quality, and structural properties[J]. Food Chemistry, 2025, 492: 145524.

[24] LV Y Y, WANG X Q, HAO R Y, et al. The effects of cooking methods on gel properties, lipid quality, and flavor of surimi gels fortified with Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil as high internal phase emulsions[J]. Foods, 2024, 13(24):4070.

[25] 安玥琦, 阮秋凤, 张学振, 等 . 6 种淡、海水鱼糜制品的滋味特征及其指纹图谱的建立[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 231-239.
AN Yueqi, RUAN Qiufeng, ZHANG Xuezhen, et al. Taste characteristics and fingerprinting of surimi products made from three species of freshwater fish and three species of marine fish[J]. Food Science, 2023, 44(10): 231-239.

[26] YANG X B, CHEN Q H, LIU S C, et al. Characterization of the effect of different cooking methods on volatile compounds in fish cakes using a combination of GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2024, 22: 101291.

[27] NIE S, LI L H, WANG Y Q, et al. Discrimination and characterization of volatile organic compound fingerprints during sea bass (*Lateolabrax* japonicas) fermentation by combining GC-IMS and GC-MS[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102048.

[28] 鞠澄辉, 张曼曼, 冯媛, 等 . 花生仁不同热处理对花生油风味影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(9): 116-122.
JU Chenghui, ZHANG Manman, FENG Yuan, et al. Influence of different heat treatment of peanut kernels on the flavor of peanut oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(9): 116-122.

[29] ZHANG Q, DING Y C, GU S Q, et al. Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 137: 109339.

[30] CHEN T Y, LI C S, HUANG H, et al. Identification of key physicochemical properties and volatile flavor compounds for the sensory formation of roasted tilapia[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140636.

[31] WANG X W, CUI H P, ZHANG X M, et al. Rapid preparation of the Amadori rearrangement product of glutamic acid - xylose through intermittent microwave heating and its browning formation potential in microwave thermal processing[J]. Food Research International, 2024, 181: 114075.

加工编辑:李文欣
收稿日期:2025-11-25

(上接第 15 页)

logical foundations[J]. Chinese Journal of Arteriosclerosis, 2026, 34(4): 375-384.

[18] KATTOOR A J, KANURI S H, MEHTA J L. Role of ox-LDL and LOX-1 in atherogenesis[J]. Current Medicinal Chemistry, 2019, 26(9): 1693-1700.

[19] LUNDBERG J O, WEITZBERG E. Nitric oxide signaling in health and disease[J]. Cell, 2022, 185(16): 2853-2878.

[20] BRYAN N S. Nitric oxide deficiency is a primary driver of hypertension[J]. Biochemical Pharmacology, 2022, 206: 115325.

[21] CYR A R, HUCKABY L V, SHIVA S S, et al. Nitric oxide and endothelial dysfunction[J]. Critical Care Clinics, 2020, 36(2): 307-321.

责任编辑:王艳
收稿日期:2026-03-05