

预制乌鳢鱼片的微波熟化工艺

胡澳^{1,2}, 郭兵兵^{1,2}, 章蔚^{1,2}, 汪兰², 陈胜², 石柳², 熊光权², 李玮^{1*}

(1. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430068) (2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北武汉 430064)

摘要: 该实验以预制乌鳢背部肌肉为研究对象, 分析其在 160、320、480、640 和 800 W 的微波功率加热处理下温度分布、熟化度、感官评分、质构及水分子分布的变化, 优化预制鱼片的微波熟化工艺参数。结果表明, 微波功率为 160、320、480、640 和 800 W 下鱼肉在 70~80 °C 之间鱼肉已完全熟化, 通过熟化度、感官评价确定不同微波功率由低到高相应的最佳熟化时间分别在 8、6、4、3 和 2 min, 其对应最小剪切力为 67.85、51.9、63.70、71.39、66.44 g。随着样品表面温度不断升高, 肌肉蛋白变性, 肌肉对水的束缚能力下降, 自由水比例不断升高, 鱼肉的剪切力整体呈先上升后下降的趋势。综合熟化度、感官评分、质构分析和水分子分布的结果, 640 W 处理 3 min, 鱼肉完全熟化, 剪切力最高, 其鱼肉嫩度最受欢迎, 感官评分最佳, 为预制乌鳢鱼片最适微波熟化参数。

关键词: 乌鳢; 微波熟化; 感官; 肌肉品质; 水分子分布

文章编号: 1673-9078(2024)03-182-190

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.3.0362

Microwave Curing Technology for Prefabricated *Channa argus* Fillets

HU Ao^{1,2}, GUO Bingbing^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Lan², CHEN Sheng², SHI Liu², XIONG Guangquan², LI Wei^{1*}

(1. School of Biological Engineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)
(2. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R. China, Wuhan 430064, China)

Abstract: In this study, the dorsal muscle of prefabricated *Channa argus* was used as the research object, and the changes in temperature distribution, degree of doneness, sensory score, texture and water molecule distribution in the muscle under microwave heating at 160, 320, 480, 640 or 800 W were analyzed. The microwave cooking process parameters of prefabricated fish fillets were optimized. The results showed that the fish flesh were fully done at 70~80 °C under the microwave power of 160, 320, 480, 640 or 800 W. Through the measurement of degree of doneness and sensory evaluation, the optimal cooking time at different microwave powers (from low to high) were at 8, 6, 4, 3 and 2 min, respectively, with the corresponding minimum shear force being 67.85, 51.9, 63.70, 71.39 and 66.44 g. With the steady increase of the sample surface's temperature, muscle protein denatured, the ability of muscle to bind water decreased, the proportion of free water continued to increase, and the shear force of fish flesh overall increased first then decreased. Based on the results of doneness

引文格式:

胡澳, 郭兵兵, 章蔚, 等. 预制乌鳢鱼片的微波熟化工艺[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 182-190.

HU Ao, GUO Bingbing, ZHANG Wei, et al. Microwave curing technology for prefabricated *Channa argus* fillets [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 182-190.

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2100904); 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-46); 湖北省农业科技创新中心重大科技研发专项 (2020-620-000-002-03); 湖北省重点研发计划 (2023BBB103)

作者简介: 胡澳 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工, E-mail: 13545153858@163.com

通讯作者: 李玮 (1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: wesleyi@163.com

degree, sensory score, texture analysis and water molecule distribution, the microwave treatment at 640 W for 3 min made the fish flesh fully cooked, the shear force the highest, the tenderness of the fish flesh the most popular, and the sensory score the highest. thereby being the most suitable microwave cooking parameters for prefabricated *Channa argus* fillets.

Key words: *Channa argus*; microwave aging; sensory; muscle quality; water molecule distribution

乌鳢 (*Channa argus*) 属鲈形目, 又称乌鱼、黑鱼、蛇头鱼, 为肉食性鱼类, 在我国很多地区均有分布。因其生长迅速、适应性强、肉质细嫩、味道鲜美、肌间刺少、营养价值丰富等优点, 深受广大养殖用户和消费者的欢迎, 是我国重要的特色淡水经济鱼类之一^[1]。乌鳢肌肉中的脂肪含量仅为 0.88 g/100 g, 远低于大部分淡水鱼类; 其中二十二碳六烯酸 (DHA) 含量占脂肪酸总量的 3.65 g/100 g, 远高于鳊鱼、鲤鱼、鲫鱼、草鱼、鲢鱼等淡水鱼类; 其必需氨基酸含量丰富, 尤其是赖氨酸氨基酸评分 (AAS) 高达 1.41, 化学评分 (CS) 高达 1.08, 食用乌鳢可弥补日常膳食中赖氨酸的不足^[1,2]。乌鳢还含有丰富的人体必需微量元素, 如 Ca、Mg、K、Zn、Fe 等^[2]。此外, 乌鳢在我国古代就被发现拥有巨大的医用价值, 食用乌鳢可生肌活血、益气壮阳、祛寒祛瘀^[3]。在《神农本草经》中就被列为虫草上品, 享有“鱼中珍品”的美称^[4]。因此在中国以其为原料烹饪的菜肴数不胜数, 现在随着消费观念的改变和市场需求的推动, 预调理走进消费者的生活。

随着消费者习惯和观念的变化, 预制调理食品收到越来越多的关注。近年来许多新型辅助腌制技术不断发展, 例如脉冲电场腌制^[5]、超声腌制^[6]、真空腌制^[7]和超高压腌制等^[8]。其中, 超声辅助腌制通过热效应、空化效应、机械效应和化学效应, 破坏了肌纤维结构、加快了盐分在鱼肉中的渗入和分散的速率, 减少腌制肉的蒸煮损失, 增加保水性, 提高肉的嫩度, 从而改善肌肉品质^[9]。为了获得预制水产品的最佳熟化品质, 研究预制水产品的熟化过程, 确定适宜的熟化条件, 对消费者烹饪预调理制品提供有效的参考意见。微波加热技术, 凭借高效、节能、操作简单等特点, 已被广泛应用到家庭厨房的烹饪过程中。目前, 微波加热已广泛应用在肉类食品 (如牛肉、鸡肉、鱼块、羊肉、兔肉) 的研究中, 刘昱微在研究中发现微波加热能够显著影响牛肉的水分含量、色泽、嫩度^[10]; 韦婕妤^[11]在研究中发现微波处理对羊肉制品蛋白质的氧化程度有影响, 且这些影响在胃肠消化过程中会持续影响蛋白氧化, 进而影响蛋白消化性。通常情况下, 相较

于传统加热 (如煎炸、烤制等), 微波加热能溶解更多的胶原蛋白^[12]、减少煎炸类肉制品中 N-亚硝胺和多环芳烃生成^[13]、减少 N-ε-羧甲基赖氨酸的形成^[14]、减少肌原纤维蛋白的降解^[15]、减少 DNA 过度损伤^[16,17]等优点。本文以乌鳢背部肌肉为试验对象, 检测超声辅助腌制鱼片在微波功率 160、320、480、640 和 800 W 下的熟化过程, 探究腌制鱼片的微波熟化规律, 并结合感官评分, 确定最佳微波熟化条件。

1 材料与方法

1.1 原料

鲜活乌鳢 (*Channa argus*), 重约 3 kg, 购于湖北省武汉市白沙洲批发市场。食盐 (加碘), 湖北盐业集团有限公司生产。

1.2 仪器

KQ5200DE 数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; G80F23CN3L-C2 微波炉, 广东格兰仕有限公司; Testo 875 热成像仪, 德国 Testo 公司; MER-1520-13U3C 工业数字相机, 中国大恒集团有限公司; NMI20-025V 核磁共振分析仪, 苏州纽迈有限公司; TA.XT plus 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司。

1.3 原料预处理

将新鲜乌鳢以击头方式宰杀后, 去除头尾、内脏并用流水洗净, 去除鱼皮, 取背部肌肉, 将其切分成 3 cm×3 cm×1.5 cm 的鱼块, 然后按照食盐质量浓度 4 g/mL, 固液比 1:4, 恒温 (24±1) °C, 超声频率 40 kHz, 超声功率 200 W, 超声时间 60 min, 进行超声辅助预制。

1.4 实验设计

本文主要确定超声辅助腌制后的乌鳢鱼片的最佳微波熟化条件。首先通过测定腌制乌鳢鱼片在微波功率 160、320、480、640 和 800 W 下的温度分布, 判断其熟化终点。然后通过监测腌制乌鳢鱼片在微波功率 160、320、480、640 和 800 W 下的熟化过程,

确定其相应的最佳熟化时间。最后通过对比腌制乌鳢鱼片在微波功率 160、320、480、640 和 800 W 下相应的最佳熟化时间下的感官评分, 得到最终的最佳熟化条件。

1.5 实验指标的测定

1.5.1 温度分布的测定

样品鱼肉在微波功率 160、320、480、640 和 800 W 下加热结束 5 s 内, 立即使用热成像仪对其温度分布进行测定, 每个功率取 3 块样品鱼肉作为平行。

1.5.2 外观观察

样品鱼肉温度与室温平衡后, 将其表面水分擦干并置于摄像头下, 统一光源, 使用工业数码相机采集其外观照片。

1.5.3 熟化度感官评定

参考《食品感官评价》^[18]中分析型感官评价方法并加以修改。通过对样品鱼肉进行外观观察或品尝, 来评判其是否已经完全熟化。评定人员由 30 名专业人士组成, 其中男生 13 名, 女生 17 名, 年龄主要分布在 20~40 岁。

1.5.4 水分子分布的测定

将样品鱼肉放入核磁管内, 待其温度与环境温度达到平衡, 将其放入核磁共振分析仪中, 进行 T2 信号采集及磁共振成像 (Magnetic Resonance Imaging, MRI) 测定。其中, T2 信号采集采用 CPMG 序列, 相关参数为: PRG=1, NS=4, TW=3 000 ms, TE=0.5 ms, NECH=7 000。成像测定采用 MSE 序列, 相关参数为: Slice Width=4.5 mm, Slice Gap=0.5 mm, TE=20 ms, TR=1 000 ms, Averages=4。

1.5.5 鱼肉剪切力的测定

将样品鱼肉置于质构仪探头下进行剪切力测试。测试前、测试中、测试后速度分别为 5、1、5 mm/s, 测试距离为 3 cm, 穿刺深度为 1 cm。

1.5.6 喜好度感官评定

参考《食品感官评价》^[18]中嗜好型感官评价方法并加以修改。通过对不同的样品组进行外观观察和品尝, 依据个人喜好程度对其分别进行打分 (喜好度由低到高分别对应 1~5 分)。评定人员由 30 名专

业人士组成, 其中男生 13 名, 女生 17 名, 年龄主要分布在 20~40 岁, 试验时间为下午 3:30~4:00。

1.6 数据处理

以上所有指标均至少测定 3 个平行样品。实验数据处理使用 Excel, 显著性分析 ($P<0.05$) 使用 SPSS 20.0, 图型绘制使用 GraphPad Prism 5.0。

2 结果与讨论

2.1 不同微波功率下最佳熟化时间的确定

2.1.1 预制乌鳢片在不同微波功率下温度变化

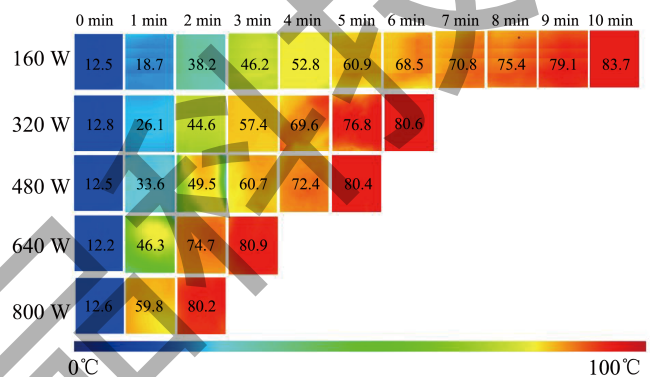


图 1 预制乌鳢鱼片在不同微波功率下的温度变化

Fig.1 Temperature-time curves of prefabricated *Channa argus* fillets under different microwave powers

根据中心终点温度的不同, 肉制品的熟制程度可以被划分为不同的等级。一般而言, 当肉制品中心温度为 70~80 °C 时, 可以判断食物完全熟化^[19], 因此本实验将样品表面中心温度达到 80 °C 作为初步判断鱼肉全熟的条件。如图 1 所示, 随着微波时间的延长, 超声辅助腌制后的乌鳢鱼片在不用微波功率下的表面中心温度分布整体颜色均由蓝色逐渐变红, 表明表面温度的不断升高。同时, 微波功率为 160、320、480、640 和 800 W 下的样品熟化时间分别被初步确定为 10、6、5、3 和 2 min。另外, 从图中可以观察到, 除了未加热及达到熟化终止温度的样品, 其他样品表面温度分布都不均匀, 且中心区域的温度略高于其他区域, 这表明微波加热仍存在热不均匀问题。

微波加热不同于传导加热, 主要通过交变电场使食物内部的极性分子摩擦碰撞从而产生热能, 这使得微波加热后的样品内部中心温度通常显著高于

表面中心温度^[20]，然而温度达到 75 ℃时，蛋白会完全变性，这说明鱼肉表面中心温度达到 80 ℃时，鱼肉可能存在过度熟化^[21]。为了确定不同功率下相应的最佳熟化时间，预制后的乌鳢鱼片在微波熟化过程中的品质变化被进一步观察。

2.1.2 外观

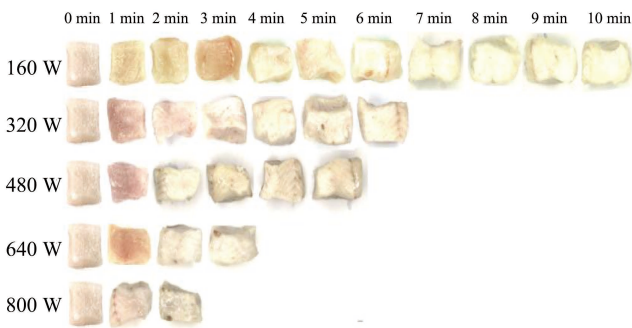


图 2 预制乌鳢鱼片在微波熟化过程中的外观变化

Fig.2 Changes of visual appearance of prefabricated *Channa argus* fillets during microwave cooking process

超声辅助腌制后的乌鳢鱼片在微波熟化过程中的外观变化如图 2 所示。未加热的鱼肉样品表面附着黏液，具有黏稠感且泛有光泽。随着微波时间的延长，样品鱼肉的表面光泽逐渐消失，鱼肉的顏色先变为暗黄色，然后转变为暗红色，最后变白。但在较高的微波功率下，由于样品鱼肉内部的能量更高，熟化更快，所以只能观察到部分颜色变化过程。另外，随着微波时间的延长，肌肉由一开始的榻软状逐渐固化，且横向肌肉发生了明显收缩，这可能是由于肌肉蛋白质不断变性聚合，肌原纤维结构硬化导致的。就外观而言，当鱼肉发生了明显固化，且颜色变白时，一般可以认为鱼肉基本完全熟化。由此可以观察到在较低的微波功率下，样品鱼肉存在较长的熟化过程，这表明 2.1.1 中确定的微波时间可能会导致部分样品鱼肉的过度熟化。

2.1.3 熟化度

超声辅助腌制后的乌鳢鱼片在不同微波功率下的熟化度评定如图 3 所示。其中，纵坐标代表认定样品鱼肉已完全熟化的人数占总参与人数的比例。当人数占比达到 100%，即可认定此时的样品鱼肉已基本完全熟化。因此，微波功率为 160、320、480、640 和 800 W 下的样品熟化时间分别

被确定为 8、5、4、3 和 2 min。这进一步表明 2.1.1 中确定的微波时间可能会导致部分样品鱼肉的过度熟化。

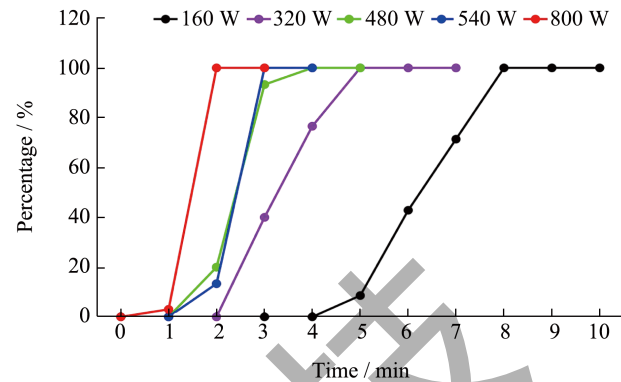


图 3 预制乌鳢鱼片在不同微波功率下的熟化度评定

Fig.3 Evaluation of cooking degree of prefabricated *Channa argus* fillets under different microwave powers

2.1.4 水分子分布

超声辅助预制后的乌鳢鱼片在微波熟化过程中的水分分布变化如表 1 所示。随着微波时间的延长，微波功率为 160 W 下的 T_{21} (结合水) 和 T_{22} (不易流动水) 在 2 min 内显著上升然后显著下降，而其他微波功率下的 T_{21} 和 T_{22} 均在 1 min 内显著上升然后显著下降。微波功率为 160、320 和 800 W 下的 T_{23} (自由水) 均显著下降；微波功率为 480 W 下的 T_{23} 在 1 min 内显著下降然后显著上升，当微波时间达到 3 min 时，再次显著下降；微波功率为 640 W 下的 T_{23} 在 1 min 内显著下降然后显著上升。就峰比例而言，随着微波时间的延长，微波功率为 160 W 下的 P_{21} (结合水百分含量) 显著下降； P_{22} (不易流动水百分含量) 在 2 min 内显著上升然后显著下降； P_{23} (自由水百分含量) 在 1 min 内显著下降然后显著上升，当微波时间达到 8 min 时，再次显著下降。微波功率为 320 W 下 P_{21} 在 3 min 内显著下降然后显著上升； P_{22} 显著下降； P_{23} 显著上升。微波功率为 480 W 下 P_{21} 和 P_{22} 均先显著下降再显著上升，而 P_{23} 则先显著上升再显著下降。但 P_{21} 最值对应的微波时间为 2 min，而 P_{22} 和 P_{23} 最值相应的微波时间为 4 min。微波功率为 640 W 和 800 W 下的 P_{22} 均显著下降， P_{23} 均显著上升。但微波功率为 640 W 下的 P_{21} 显著下降，而微波功率为 800 W 下的 P_{21} 在 1 min 内显著下降然后显著上升。

表 1 预制乌鳢鱼片在微波熟化过程中的水分子分布变化

Table 1 Changes of water distribution of prefabricated *Channa argus* fillets during microwave cooking process

功率/W	时间/min	T ₂ /ms			P ₂ /%		
		T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	P ₂₁	P ₂₂	P ₂₃
160	0	0.78±0.07 ^{ab}	43.29±0.00 ^b	1 224.81±143.07 ^c	4.52±0.30 ^f	95.01±0.45 ^{cd}	0.78±0.00 ^b
	1	1.40±0.10 ^d	50.27±1.92 ^c	512.28±33.39 ^d	3.11±0.24 ^e	96.34±0.29 ^f	0.58±0.07 ^a
	2	1.56±0.20 ^e	57.22±0.00 ^g	513.81±32.59 ^d	3.12±0.17 ^e	96.18±0.23 ^f	0.63±0.05 ^{ab}
	3	1.38±0.17 ^d	56.29±2.55 ^g	403.70±0.00 ^c	3.23±0.17 ^e	95.47±0.26 ^e	1.35±0.11 ^c
	4	1.35±0.19 ^d	52.25±3.67 ^f	368.65±25.89 ^{ab}	2.90±0.26 ^d	95.25±0.59 ^{de}	2.22±0.04 ^d
	5	1.14±0.11 ^c	49.77±0.00 ^c	351.12±0.00 ^{ab}	2.70±0.11 ^c	95.10±0.35 ^{cd}	2.20±0.20 ^d
	6	1.16±0.14 ^c	48.15±2.90 ^d	364.26±23.52 ^{ab}	2.77±0.20 ^{cd}	94.79±0.47 ^c	2.13±0.16 ^d
	7	0.88±0.13 ^b	44.91±2.90 ^c	364.26±23.52 ^{ab}	2.67±0.29 ^{bc}	94.84±0.46 ^c	2.70±0.27 ^e
	8	0.71±0.10 ^a	43.29±0.00 ^b	368.65±25.89 ^{ab}	2.71±0.29 ^{bc}	93.70±0.60 ^a	4.09±0.06 ^h
	9	0.75±0.08 ^a	42.58±1.93 ^b	377.41±27.15 ^b	2.52±0.21 ^{ab}	94.08±0.23 ^b	3.30±0.22 ^f
10	0.71±0.09 ^a	37.65±0.00 ^a	332.06±23.55 ^a	2.44±0.27 ^a	93.84±0.16 ^{ab}	3.72±0.19 ^g	
320	0	0.78±0.07 ^c	43.29±0.00 ^c	1 224.81±143.07 ^c	4.52±0.30 ^e	95.01±0.45 ^f	0.78±0.00 ^a
	1	1.48±0.09 ^e	53.50±3.85 ^d	418.82±27.04 ^d	3.27±0.15 ^{bc}	95.25±0.41 ^f	1.78±0.15 ^b
	2	1.06±0.08 ^d	43.69±1.62 ^c	351.12±0.00 ^{bc}	3.23±0.27 ^{bc}	94.02±0.49 ^e	3.12±0.15 ^c
	3	0.64±0.05 ^b	39.53±2.78 ^b	368.65±25.89 ^{bc}	2.97±0.22 ^a	92.96±0.53 ^d	3.74±0.45 ^d
	4	0.56±0.07 ^a	39.06±2.52 ^b	375.41±28.96 ^c	3.17±0.35 ^{ab}	92.06±0.46 ^c	4.77±0.23 ^c
	5	0.51±0.04 ^a	35.20±2.53 ^a	321.76±28.42 ^a	3.51±0.24 ^d	91.02±0.49 ^b	5.53±0.53 ^f
	6	0.51±0.06 ^a	33.36±1.68 ^a	333.74±30.37 ^{ab}	3.45±0.18 ^{cd}	90.49±0.77 ^a	6.06±0.68 ^g
480	0	0.78±0.07 ^c	43.29±0.00 ^{cd}	1 224.81±143.07 ^d	4.52±0.30 ^d	95.01±0.45 ^c	0.78±0.00 ^a
	1	1.44±0.17 ^d	53.03±3.82 ^c	449.04±27.04 ^a	3.00±0.24 ^{ab}	93.91±0.86 ^d	3.09±0.71 ^b
	2	0.75±0.15 ^c	44.91±2.90 ^d	536.74±28.98 ^b	2.91±0.35 ^a	91.30±0.97 ^c	5.79±0.80 ^d
	3	0.61±0.06 ^b	41.41±2.78 ^{bc}	584.52±45.35 ^e	3.20±0.27 ^{ab}	90.37±1.52 ^{ab}	6.41±0.92 ^e
	4	0.60±0.04 ^{ab}	39.53±2.78 ^b	446.78±4.59 ^a	3.25±0.44 ^b	89.57±0.86 ^a	7.18±0.73 ^f
	5	0.51±0.05 ^a	34.38±2.41 ^a	459.37±36.23 ^a	4.03±0.30 ^c	90.75±0.51 ^b	5.22±0.46 ^c
640	0	0.77±0.07 ^b	44.91±2.90 ^c	1 240.86±147.32 ^c	4.25±0.51 ^c	95.22±0.56 ^c	0.65±0.14 ^a
	1	1.31±0.01 ^c	49.77±0.00 ^d	405.67±41.13 ^a	3.73±0.31 ^b	93.14±0.62 ^b	2.92±0.40 ^b
	2	0.58±0.05 ^a	37.65±0.00 ^b	545.13±16.56 ^b	3.26±0.25 ^a	89.51±0.84 ^a	6.85±0.61 ^c
	3	0.54±0.04 ^a	33.97±2.19 ^a	529.13±13.87 ^b	3.31±0.36 ^a	89.28±0.62 ^a	7.50±0.60 ^d
800	0	0.72±0.05 ^b	43.29±0.00 ^b	1 580.66±158.33 ^b	3.88±0.23 ^c	95.66±0.36 ^c	0.10±0.01 ^a
	1	1.06±0.14 ^c	46.12±3.32 ^c	364.26±23.52 ^a	3.48±0.24 ^a	93.54±0.59 ^b	3.14±0.29 ^b
	2	0.56±0.05 ^a	37.34±1.23 ^a	365.31±30.68 ^a	3.57±0.21 ^b	91.05±0.52 ^a	5.38±0.36 ^c

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。T₂₁：结合水，T₂₂：不易流动水，T₂₃：自由水，P₂₁：结合水百分含量，P₂₂：不易流动水百分含量，P₂₃：自由水百分含量。

微波加热初期，随着温度上升，蛋白质发生一定程度地变性，蛋白质的水合能力有所下降，结缔组织被破坏^[22-24]，因此不同功率下的 T₂₁ 和 T₂₂ 在开始阶段均显著上升。且部分结合水转化为不可移动水，而部分不可移动水又转化为自由水，因此 P₂₁

和 P₂₂ 显著下降。章杰等^[25]研究结果表明生鱼肉中结合水含量相对较高，鱼肉内部结构完整，保留了大量水分，与本研究结果一致。同时，肌肉中的自由水被部分排出并以汁液形式流失，因此 T₂₃ 显著下降。而 P₂₃ 的上升可能是不可流动水转化为自由

水比例要高于以汁液流失的自由水比例。但是当微波功率为 160 W 时, 可能肌肉对水的束缚力下降, 且蛋白变性程度相对较低, 不可移动水不会转化为自由水, 导致 P_{22} 显著上升, P_{23} 显著下降。进一步微波加热, 蛋白变性程度加剧, 纤维蛋白聚合, 蛋白质凝固收缩, 使得肌肉纤维内部的水分存储空间大大减小^[26,27], 大量结合水和不可流动水转化为自由水, 导致不同功率下的 T_{21} 、 T_{22} 、 P_{21} 和 P_{22} 均显著下降。同时, 在这个过程中, 以汁液形式流失的自由水比例虽然大大提升, 但由于肌肉中水分子与蛋白结合的氢键被破坏, 肌肉纤维外部的水分存储空间得以提高^[28], 导致 T_{23} 下降, P_{23} 仍继续上升。在加热后期, 较高的温度使得蛋白完全变性, 网络结构被完全破坏, 肌束膜消失, 削弱了鱼肉的保水能力, 导致自由水以汁液形式大量消失^[29,30]。因此, 在这个阶段部分功率下的 T_{23} 波动变化, 而 P_{23} 显著下降。

超声辅助预制后的乌鳢鱼片在微波熟化过程中的 MRI 图如图 4 所示。在微波熟化时间的延长过程中, 不同微波功率下的样品预制鱼肉伪彩图均是由绿色逐渐变红色。但在微波功率为 160 W 和 480 W 时, 样品预制鱼肉的伪彩在加热后期又由红色变为淡黄色。这个现象与上述自由水的变化趋势是相符合的。其次, 在微波加热处理中段, 可以明显地观察到预制鱼肉中的肌纤维间的红色密度明显高于其他部分, 但在微波加热后期, 预制鱼肉的纹理逐渐消失, 颜色密度整体比较均匀。上述现象也能进一步证实高温会使鱼肉的蛋白质的网状结构被破坏, 鱼肉蛋白变性, 肌束膜消失, 鱼肉的持水能力下降。

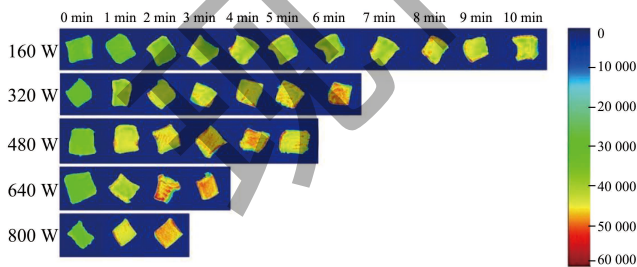


图 4 预制乌鳢鱼片在微波熟化过程中的 MRI 伪彩图

Fig.4 MRI images of prefabricated *Channa argus* fillets during microwave cooking process

2.1.5 鱼肉剪切力

预制后的乌鳢鱼片在微波熟化过程中的剪切力变化如图 5 所示。随着微波时间的延长, 当微波功率为 160 W 时, 样品鱼肉的剪切力在前 3 min 显著

上升, 然后显著下降并在 5~8 min 内保持稳定, 在 8 min 时获得最小剪切力 67.85 g, 然后再次显著上升。当微波功率为 320 W 时, 样品鱼肉的剪切力在前 3 min 显著上升并保持稳定, 然后显著下降, 在 6 min 时获得最小剪切力 51.9 g。当微波功率为 480 W 时, 样品鱼肉的剪切力在 1 min 内显著上升, 并在 1~3 min 内保持稳定, 然后显著下降, 在 4 min 时获得最小剪切力 63.70 g, 当微波时间达到 5 min 时, 再次显著上升。当微波功率为 640 W 时, 样品鱼肉的剪切力在 1 min 内显著上升然后显著下降并保持稳定在 3 min 时获得最小剪切力 71.39 g。微波功率为 800 W 时, 样品鱼肉的剪切力在 1 min 内显著上升然后显著下降在 3 min 时获得最小剪切力 66.44 g。

总体而言, 微波加热过程中, 鱼肉剪切力的变化分为 2~3 个阶段。随着微波时间的延长, 鱼肉剪切力先上升后下降, 部分功率下会出现再上升的现象。陈佳奇等^[31]研究了水煮鱼微波烹任过程中鱼肉水分及组织变化对嫩度的影响表明在较高功率下, 体系温度维持在 100 °C 附近, 加热 300~390 s 时, 蛋白质之间重新缔合、聚集, 鱼肉质地逐渐紧密, 最大剪切力增加, 这与本实验研究结果相似。加热引起的肌肉剪切力变化一直深受研究者的关注。例如, 研究者 Song 等^[32]和 Purlow 等^[33]均发现 40~60 °C 时肌肉剪切力的增加是由于肌原纤维蛋白的纵向收缩, 温度为 53~63 °C 时的缓慢加热会引起结缔组织胶原糊化降低剪切力。微波加热降低肌肉剪切力还可能是因为肌肉纤维的胶原蛋白的颗粒化, 进一步加热引起的剪切力上升则可能导致肌肉组织中结缔组织的热收缩和肌原纤维变硬^[34]。而本研究中观察到的微波中后期剪切力的变化与自由水比例的变化趋势一致, 即自由水比例显著上升时, 鱼肉的剪切力显著下降, 且自由水比例最高时, 鱼肉的剪切力最小。部分功率下的鱼肉在微波加热后期出现自由水比例下降时, 相应的剪切力上升。这表明在微波熟化过程中, 自由水比例对肉制品的嫩度可能起决定作用。

另外, 微波功率为 160、320、480、640 和 800 W 下的样品鱼肉获得最小剪切力和最大 P_{23} 的相应时间分别在 8、6、4、3 和 2 min。通过对比熟化度感官评定结果, 发现此时不同功率下的样品鱼肉均已完全熟化, 且基本与完全熟化的开始时间一致, 除 320 W 外, 其熟化度感官评定结果为 5 min。一般而言, 剪切力越小, 肌肉嫩度越高, 而较高的自由水比例可能会提高肌肉的多汁性。因此, 通过综合

评判,可以认定此时为样品鱼肉的最佳熟化时间。而微波加热后期剪切力的再次上升和自由水比例的再度下降,可以认为是鱼肉过度熟化的标志。同时,由于MRI伪彩图的颜色变化趋势与自由水比例、剪切力变化是一致的,利用MRI光谱图对熟化过程进行检测,通过其颜色拐点来判断食物的最佳熟化时间,可能可以成为一种快速、无损的熟化评判方法。

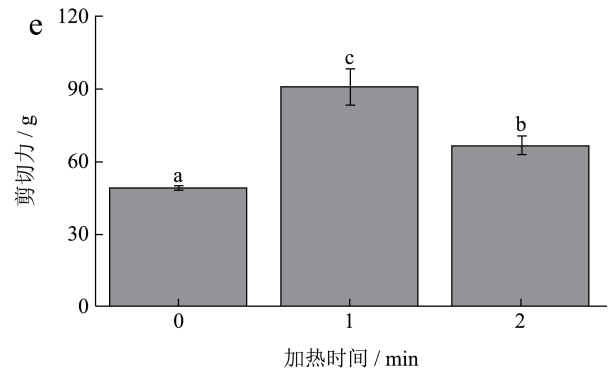
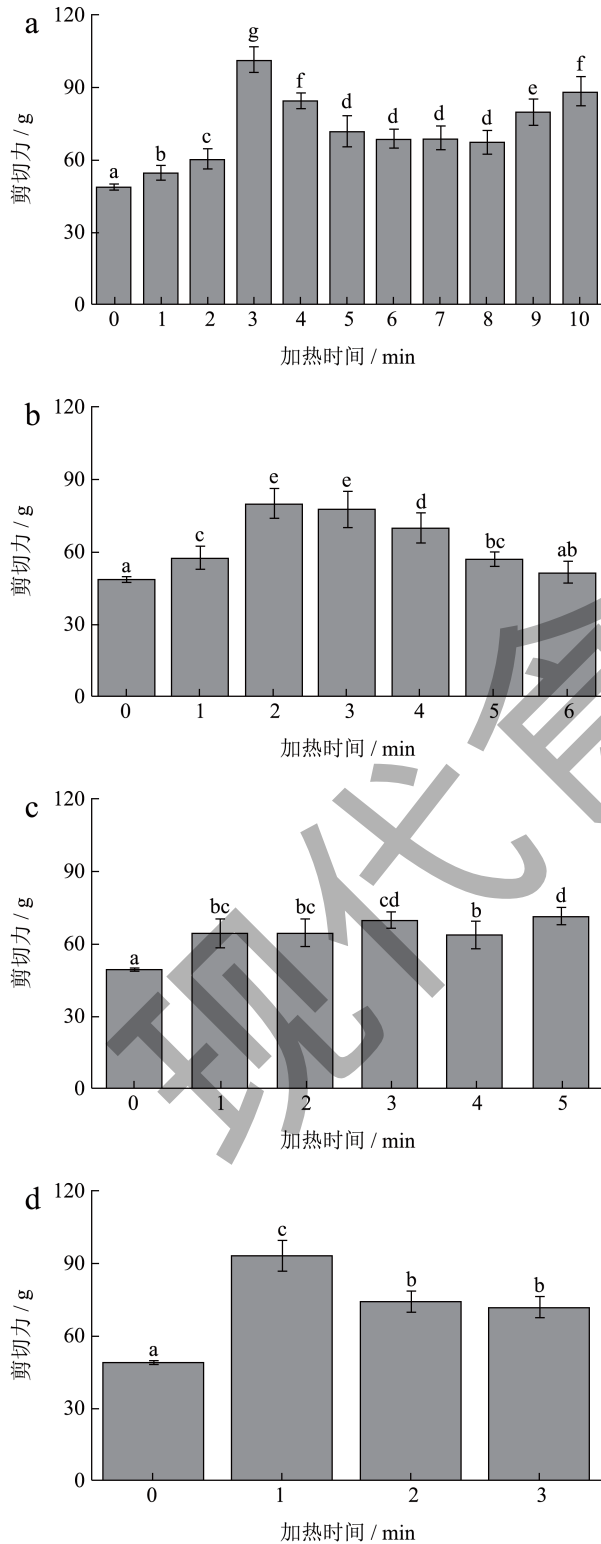


图5 预制乌鳢鱼片在微波熟化过程中的剪切力变化
 Fig.5 Changes of shear force of prefabricated *Channa argus* fillets during microwave cooking process
 注: (a) 160 W; (b) 320 W; (c) 480 W; (d) 640 W; (e) 800 W。

2.2 最佳微波熟化条件的确定

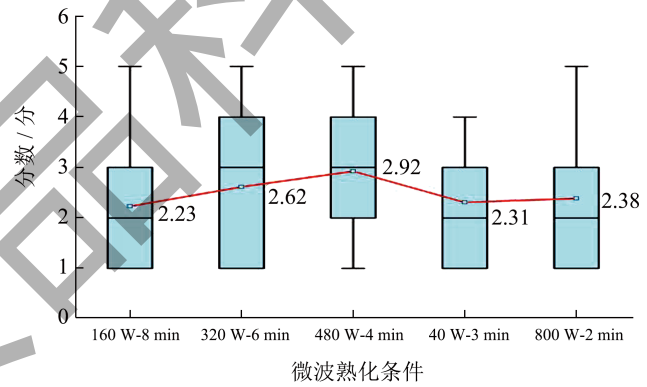


图6 预制乌鳢鱼片在不同微波功率下的感官评分
 Fig.6 Sensory evaluation of prefabricated *Channa argus* fillets under different microwave powers

预制后的乌鳢鱼片在不同微波功率下的喜好度评分如图6所示。经过其相应的最佳熟化时间熟化后,微波功率为160、320、480、640和800 W下的样品鱼肉感官评分平均值分别为2.85、2.92、3.08、3.77和2.38。另外,由于个体喜好间存在差异,因此不同功率下的感官评分均存在较大偏差,但微波功率为640 W下的感官评分偏差相对最小。这些都表明,在微波功率为640 W下加热3 min熟化的样品鱼肉整体受喜爱度最高。因此,将640 W-3 min确定为微波熟化最佳条件。

3 结论

随着微波熟化的时间的延长,预制乌鳢鱼肉表面温度不断升高,肌肉对水的束缚能力不断下降,自由水比例不断升高,还有部分以汁液的形式流失,

预制鱼肉的剪切力整体呈现先上升后下降的趋势,鱼肉的嫩度有所提高。但在部分功率下,微波加热后期存在过度熟化,预制鱼肉中的自由水以汁液的形式大量流失,自由水比例下降,整个过程中的剪切力呈现先上升后下降在上升的趋势,预制鱼肉中肌肉的结缔组织的热收缩和肌原纤维变硬。一般来说,当预制鱼肉获得最小剪切力和最高自由水比例时,被认为是最佳熟化时间。因此,在不同微波功率(160~800 W)相应的最佳熟化时间分别确定为8、6、4、3和2 min。其中,最高的感官评分在640 W-3 min的微波条件下获得,因此将其确定为腌制鱼肉的微波熟化条件。

参考文献

- [1] 安丽,胡斌,马汝芳,等.乌鳢和金黄色乌鳢肌肉营养成分分析与评价[J].中国农学通报,2022,38(20):143-148.
- [2] 张家国,杨晓梅,张长峰.乌鳢肌肉的营养组成与营养价值评价[J].食品研究与开发,2020,41(17):192-197.
- [3] 陈飞东,杨立锋.乌鳢营养价值及其深加工开发前景[J].农产品加工,2013,4:51-53.
- [4] 陈德兴(译).神农本草经[M].福州:福建科学技术出版社,2012.
- [5] BHAT Z F, MORTON J D, MASON S L, et al. Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(10): 1660-1674.
- [6] KANG DACHENG, ZHANG WANGANG, LORENZO J M, et al. Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(11): 1914-1933.
- [7] CHEN X, LUO J, LOU A H, et al. Duck breast muscle proteins, free fatty acids and volatile compounds as affected by curing methods [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128138.
- [8] 吴晨燕,杨梅,刘鑫洁,等.超高压和滚揉腌制斑点叉尾鮰鱼工艺的研究[J].食品科技,2020,45(10):135-140.
- [9] 毛书灿,杨丽凤,汪兰,等.超声辅助腌制对微波乌鳢鱼片的风味影响[J].食品工业科技,2023,44(18):58-66.
- [10] 刘昱微.微波加热牛肉品质的高光谱成像无损检测方法研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [11] 韦婕妤.热加工方式对羊肉制品蛋白质氧化及体外模拟消化性的影响研究[D].成都:西南民族大学,2019.
- [12] HOSTETLER R L, DUTSON T R. Investigations of a rapid method for meat tenderness evaluation using microwave cookery [J]. Journal of Food Science, 1978, 43(2): 304-306.
- [13] MIRZAZADEH M, SADEGHI E, BEIGMOHAMMADI F. Comparison of the effects of microwave cooking by two conventional cooking methods on the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile N-nitrosamines in beef cocktail smokies (smoked sausages) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(6): e15560.
- [14] JOUQUAND C, TESSIER F J, BERNARD J, et al. Optimization of microwave cooking of beef burgundy in terms of nutritional and organoleptic properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1): 271-276.
- [15] TAKRAN M, OLUM E, CANDOAN K. Changes in chicken meat proteins during microwave and electric oven cooking [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(2): e14324.
- [16] MUSTO M. DNA quality and integrity of nuclear and mitochondrial sequences from beef meat as affected by different cooking methods [J]. Food Technology & Biotechnology, 2011, 49(4): 523-528.
- [17] MUSTO M, FARAONE D, CELLINI F, et al. Changes of DNA quality and meat physicochemical properties in bovine supraspinatus muscle during microwave heating [J]. Journal of the Science Food and Agriculture, 2014, 94(4): 785-791.
- [18] 卫晓怡.食品感官评价[M].中国轻工业出版社,2018:132-208.
- [19] WANG X J, MUHOZA B, WANG X W, et al. Comparison between microwave and traditional water bath cooking on saltiness perception, water distribution and microstructure of grass carp meat [J]. Food Research International, 2019, 125: 108521.
- [20] FAN H L, FAN D M, HUANG J L, et al. Cooking evaluation of crayfish (*Procambarus clarkia*) subjected to microwave and conduction heating: A visualized strategy to understand the heat-induced quality changes of food [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62(5): 102368.
- [21] 孙红霞,黄峰,丁振江,等.不同加热条件下牛肉嫩度和保水性的变化及机理[J].食品科学,2018,39(1):84-90.
- [22] JIANG Q X, MA Z R, WANG S S, et al. Effect of temperature on protein compositional changes of big head carp (*Aristichthys nobilis*) muscle and exudates [J]. Food Science & Technology Research, 2014, 20(3): 655-661.
- [23] 陈佳奇,刘天毅,贾逾泽,等.水煮鱼微波烹饪过程中鱼肉水分及组织变化对嫩度的影响[J].食品与机械,2020, 36(4):57-61.
- [24] CHRISTENSEN M, PURSLOW P P, LARSEN L M. The effect of cooking temperature on mechanical properties of whole meat, single muscle fibres and perimysial connective tissue [J]. Meat Science, 2000, 55(3): 301-307.
- [25] 章杰,何航,熊子标.烹饪方式对猪肉品质及营养成分的影响[J].食品与机械,2018,34(6):21-25, 29.

- [26] LI X, MA L Z, TAO Y, et al. Low field-NMR in measuring water mobility and distribution in beef granules during drying process [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 550: 3406-3410.
- [27] 杨宏旭,刘大松,李珺珂,等.低温贮藏条件下青鱼肉中蛋白和组织结构的变化对鱼肉品质的影响[J].*食品与发酵工业*,2016,42(8):208-213.
- [28] TORNBERG E. Effects of heat on meat proteins- Implications on structure and quality of meat products [J]. *Meat Science*, 2005, 70(3): 493-508.
- [29] 姜启兴. 鳙鱼肉热加工特性及其机理研究[D]. 无锡:江南大学,2015.
- [30] 陈佳奇,刘天毅,贾逾泽,等.水煮鱼微波烹饪过程中鱼肉水分及组织变化对嫩度的影响[J].*食品与机械*,2020, 36(4):51-55.
- [31] 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.
- [32] SONG D H, YANG N E, SEOMOON K M, et al. Sous-vide cooking as a practical strategy to improve quality attributes and shelf stability of reduced-salt chicken breast ham [J]. *Poultry Science*, 2023, 102(3): 102444.
- [33] PETER P P. Contribution of collagen and connective tissue to cooked meat toughness; some paradigms reviewed [J]. *Meat Science*, 2018, 144: 127-134.
- [34] ABDELNAEEM H H S, SALLAM K I, ZAKI H M B A. Effect of different cooking methods of rabbit meat on topographical changes, physicochemical characteristics, fatty acids profile, microbial quality and sensory attributes [J]. *Meat Science*, 2021, 181: 108612.