

热加工对3种带鱼肌球蛋白功能特性的影响

郑文雄¹, 杨榕琳¹, 水珊珊^{1,*}, 严红波^{1,2}, 宋佳¹, 杨会成³, 张宾^{1,2,*}

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江省海产品健康危害因素关键技术研究重点实验室, 浙江舟山 316022;

2. 浙江海洋大学比萨海洋研究生学院, 浙江舟山 316022; 3. 浙江省海洋开发研究院, 浙江舟山 316021)

摘要: 以钩带鱼、外洋带鱼和雷达网带鱼为研究对象, 探讨其在不同加热温度下肌球蛋白功能特性及组织微观结构的变化。将3种带鱼分别于30、50、70、90℃下水浴处理10 min, 测定其肌肉蒸煮损失率、持水力以及肌球蛋白浊度、溶解度、乳化能力、起泡性(foaming capacity, FC)、泡沫稳定性(foaming stability, FS)和羰基含量。同时, 利用苏木精-伊红(hematoxylin-eosin, HE)染色分析不同加热温度对3种带鱼组织微观结构的影响。结果表明: 随着加热温度升高, 3种带鱼的肌肉蒸煮损失率、持水力逐渐降低, 肌球蛋白浊度和羰基含量增加, 溶解度、乳化性及乳化稳定性、FC及FS均不断降低; 其中雷达网带鱼肌肉持水力、肌球蛋白溶解度的下降幅度和肌球蛋白浊度的上升幅度均小于其他2种带鱼; 此外, HE染色结果显示, 随着加热温度升高, 3种带鱼的肌肉组织中肌纤维束间隙加大, 并出现不同程度的断裂, 当加热温度为50℃时, 雷达网带鱼肌肉组织中胶原纤维和肌纤维完整性最好。由此可知, 加热温度提高的同时, 3种带鱼的肌肉蛋白质品质均呈下降趋势, 其中雷达网带鱼肌肉蛋白质的品质稳定性最佳。

关键词: 带鱼; 热加工; 肌球蛋白; 功能特性; 微观结构

Effect of Heat Processing on the Functional Properties of Myosin in Three Kinds of Hairtail

ZHENG Wenxiong¹, YANG Ronglin¹, SHUI Shanshan^{1,*}, YAN Hongbo^{1,2}, SONG Jia¹, YANG Huicheng³, ZHANG Bin^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Health Risk Factors for Seafood of Zhejiang Province, College of Food Science and Pharmacy, Zhejiang Ocean

University, Zhoushan 316022, China; 2. Pisa Marine Graduate School, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

3. Zhejiang Institute of Ocean Development, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Changes in the functional properties of myosin and the tissue microstructure of hooked, trawl-netted, and radar-netted hairtail (*Trichiurus haumela*) were investigated under different heating temperatures. Hairtails were water bathed at 30, 50, 70 or 90 °C and evaluated for cooking loss and water-holding capacity (WHC) as well as myosin turbidity, solubility, emulsifying capacity, foaming capacity and foam stability, and carbonyl content after 10 min. Besides, hematoxylin-eosin (HE) staining was used to analyze the effects of different heating temperatures on the tissue microstructure of hairtails. The results showed that as the heating temperature rose, the cooking loss and water-holding capacity of muscle decreased gradually for the three kinds of hairtail. Myosin turbidity and carbonyl content increased, and solubility, emulsifying activity index (EAI) and emulsion stability index (ESI), foaming capacity and foam stability decreased continuously. The decrease in muscle WHC and myosin solubility and the increase in myosin turbidity were all smaller in radar-netted hairtails than in the two other kinds. In addition, the HE staining results showed that with increasing heating temperature, the space between muscle fiber bundles in muscle tissues increased for all kinds of hairtail, and different degrees of breakage occurred. When the heating temperature was 50 °C, the structure of collagen and muscle fibers was the most complete in the muscle tissue

收稿日期: 2023-08-12

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项(2021YFD2100504); 浙江省万人计划创新领军人才项目(2020R52027);

国家级大学生创新创业训练计划重点领域项目(202310340045); 舟山市重大产业攻关项目(2023C03006)

第一作者简介: 郑文雄(1999—)(ORCID: 0009-0000-7300-4094), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产食品分子营养、水产品加工及贮藏。E-mail: m13242662201@163.com

*通信作者简介: 水珊珊(1989—)(ORCID: 0000-0003-1095-7749), 女, 讲师, 博士, 研究方向为水产食品分子营养。

E-mail: shuiss@zjou.edu.cn

张宾(1981—)(ORCID: 0000-0003-4696-9098), 男, 教授, 博士, 研究方向为水产品加工及贮藏。

E-mail: zhangbin@zjou.edu.cn

of radar-netted hairtail. Summarily, the muscle quality of all three kinds of hairtail decreased with the increase in heating temperature, and the muscle quality of radar-netted hairtail was the most stable.

Keywords: hairtail; heat processing; myosin; functional properties; microstructure

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230812-083

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2024)07-0211-07

引文格式:

郑文雄, 杨榕琳, 水珊珊, 等. 热加工对3种带鱼肌球蛋白功能特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 211-217.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230812-083. <http://www.spkx.net.cn>

ZHENG Wenxiong, YANG Ronglin, SHUI Shanshan, et al. Effect of heat processing on the functional properties of myosin in three kinds of hairtail[J]. Food Science, 2024, 45(7): 211-217. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230812-083. <http://www.spkx.net.cn>

带鱼 (*Trichiurus haumela*) 作为我国四大海洋经济鱼类之一, 年捕获量约为110万 t, 是我国重要的海洋渔业捕捞资源, 同时也是我国为数不多的仍能维持渔汛的海产之一^[1-3]。依据捕捞方式不同, 我国东海海域的带鱼品类主要为钓带鱼、雷达网带鱼和外洋带鱼, 均属于日本带鱼属 (*T. japonicus*)。其中钓带鱼是使用专用鱼钩捕获、生活在离岸边较近、较浅水域的带鱼。雷达网带鱼是利用雷达网捕获、生活在50~100 m水深的带鱼。而与上述2种在舟山内洋海域捕捞的带鱼不同, 外洋带鱼在北海海域捕捞, 其捕捞方式与雷达网带鱼相似。

带鱼营养价值高, 富含蛋白质、维生素及多种矿物质^[4-5], 且具有肉质细腻、鱼身无细刺、腥味小和味道鲜美等特点, 深受广大消费者喜爱^[6]。有报道显示, 带鱼中富含对苯二甲酸、二十二碳六烯酸和二十碳五烯酸等多不饱和脂肪酸, 且相较牛肉、猪肉和鸡肉等畜禽肉, 更易被人体吸收, 对人体代谢和生长发育起重要作用^[7-8]。不仅如此, 带鱼中含有丰富的镁元素, 镁具有保护心血管系统、预防高血压和心肌梗塞等心血管疾病的作用, 经常食用带鱼对人体健康十分有益^[9]。因此, 为更好地发挥带鱼的营养价值、提高带鱼附加值, 科研工作者对带鱼制品的研发愈加重视。

热处理是鱼类及其制品最常用的加工方式之一, 可以赋予产品不同的口感和风味。常见的热加工方式有水煮法^[10]、微波法^[11]、热水烫漂法^[12]及蒸汽法等。热处理过程中, 鱼肉易出现质构、风味劣变, 以及脂质和蛋白质氧化、变性等问题^[13]。在加热作用下, 肌肉组织内部结构发生变化, 如肌细胞间隙增大、内裂纹增多。此外, 有研究发现, 加热对肉的嫩度有双重作用, 加热时间过长或加热温度过高可能导致肌肉组织变硬, 肌肉蛋白发生变性而凝固, 继而影响产品感官和新型鱼类蛋白制品的开发^[14]。由此可见, 合适的热处理方式对鱼类及其制品的品质有重要影响^[15]。当前, 关于热加工对水产品品质影响的相关研究, 以及对单一种类带鱼的蛋白质

功能特性的变化研究相对较多, 而对多种带鱼之间肌肉品质特性的比较研究仍鲜有报道。

基于此, 本研究以钓带鱼、外洋带鱼和雷达网带鱼为研究对象, 旨在分析不同水浴温度处理对3种带鱼肌球蛋白功能特性和组织微观结构的影响, 为带鱼热加工提供借鉴与参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

钓带鱼、雷达网带鱼和外洋带鱼 (身宽6~10 cm、身长1 m左右) 购自舟山国际水产城。将冰鲜带鱼置于装有碎冰块的保温箱内, 并于0.5 h内运回实验室, 备用。

三羟基甲基氨基甲烷、碳酸氢钾 阿拉丁试剂 (上海) 有限公司; 氯化钠、氯化钾、氯化镁、盐酸、氢氧化钠、三氯乙酸、二甲苯、体积分数70%乙醇、溴酚蓝、尿素、马来酸、 β -巯基乙醇、甲醛等 国药集团化学试剂有限公司; 以上所有试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

UV-2600A型紫外-可见分光光度计 尤尼柯 (上海) 仪器有限公司; BS124S型电子天平 德国赛多利斯公司; H1850R型冷冻离心机 湖南湘仪离心机仪器有限公司; CF16RN型高速冷冻离心机 日本日立公司; T18 ULTRA-TURRAX型高速匀浆机 德国IKA公司; HH-W420型电热恒温水浴锅 北京长安科学仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 实验分组

样品处理: 将钓带鱼、外洋带鱼和雷达网带鱼 (K 值为3.4%~4.6%) 去除头部和内脏后, 切成5~6 cm长的块状, 用封口袋进行包装, 每袋3块样品。将样品分别在30、50、70、90 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中加热10 min, 待冷却至室温后, 取相同部位的3种带鱼样品进行后续指标测定。

1.3.2 带鱼肌肉蒸煮损失率测定

取相同质量的带鱼肌肉组织 (m_0/g) 进行密封, 水浴加热后, 冷却至室温, 将多余水分去除, 对加热后的肌肉进行称量 (m_1/g), 按式 (1) 对肌肉蒸煮损失率进行计算。

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

1.3.3 带鱼肌肉持水力测定

称取经过加热冷却的带鱼肌肉5.0 g, 放入底部置有棉花的离心管中, 称质量 (m_2/g)。3 000×g离心5 min后, 将肌肉取出, 对离心管再次称质量 (m_3/g), 按式 (2) 对肌肉持水力进行计算。

$$\text{持水力}/\% = \frac{m_2 - m_3}{5.0} \times 100 \quad (2)$$

1.3.4 肌球蛋白提取制备

参照Gao Ruichang等^[16]方法, 并稍作修改。肌肉样本溶解于4倍体积0.6 mol/L NaCl-20 mmol/L Tris-HCl缓冲液 (pH 7.0) 中, 5 000×g条件下离心13 min, 获取上清液, 即为提取的肌球蛋白溶液。采用双缩脲法测定肌球蛋白质量浓度 (g/L), 然后将提取的肌球蛋白溶液稀释为1 mg/L, 置于4℃冰箱, 3 d内测定后续指标。

1.3.5 肌球蛋白溶解度测定

将1.3.4节提取的肌球蛋白溶液在4℃、5 000×g条件下离心15 min, 取上清液, 用双缩脲法分别测定离心前肌球蛋白溶液中蛋白质量浓度和离心后获取的上清液中蛋白质量浓度 (g/L)。按式 (3) 计算肌球蛋白的溶解度^[17]。

$$\text{肌球蛋白溶解度}/\% = \frac{\text{离心后上清液蛋白质量浓度}}{\text{离心前肌球蛋白溶液蛋白质量浓度}} \times 100 \quad (3)$$

1.3.6 肌球蛋白浊度测定

参照Jia Dan等^[18]方法, 并稍作修改。取5 mL上述提取的肌球蛋白溶液 (4℃), 在340 nm波长处测定其吸光度, 测定值即为肌球蛋白溶液浊度。

1.3.7 肌球蛋白乳化能力测定

参照肖琨^[19]、严红波^[17]等方法。取上述提取所得肌球蛋白溶液8 mL置于离心管中, 加入2 mL大豆油, 10 000 r/min离心1 min后, 在距离离心管底0.5 cm处吸取50 μL混合液。将混合液与5 mL 0.1 g/100 mL十二烷基磺酸钠 (sodium dodecyl sulfate, SDS) 溶液混匀, 于500 nm波长处测定吸光度 (A_0)。离心管静置10 min后, 再次在相同位置取50 μL混合液, 添加到5 mL 0.1 g/100 mL SDS溶液中, 混匀后测定其吸光度 (A_{10})。其中, 用0.1 g/100 mL SDS溶液作为空白对照。分别按式 (4)、(5) 计算乳化活性指数 (emulsifying activity index, EAI) 及乳化稳定性指数 (emulsion stability index, ESI)。

$$\text{EAI}/(\text{m}^2/\text{g}) = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times 100}{\rho \times \varphi \times 10\,000 \times L} \quad (4)$$

$$\text{ESI}/\% = \frac{A_{10}}{A_0} \times 100 \quad (5)$$

式中: 2.303为换算系数; ρ 为乳液形成前水溶液中水解物蛋白质量浓度/ (g/mL) ; φ 为乳液油相体积分数 (0.25); L 为光路长度/cm。

1.3.8 肌球蛋白起泡性 (foaming capacity, FC) 及泡沫稳定性 (foaming stability, FS) 测定

参照Foh等^[20]方法。取上述提取所得肌球蛋白溶液40 mL (V), 10 000 r/min均质1 min, 将泡沫转移至量筒中, 测量泡沫和溶液总体积 (V_0/mL)。静置10 min后, 测量泡沫和溶液总体积 (V_{10}/mL)。分别按式 (6)、(7) 计算FC及FS。

$$\text{FC}/\% = \frac{V_0 - V}{V} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{FS}/\% = \frac{V_{10} - V}{V} \times 100 \quad (7)$$

1.3.9 肌球蛋白巯基含量测定

参照Jiang Wenxin等^[21]方法并稍作修改。取上述提取的肌球蛋白溶液5 mL, 加入5 mL含2 mol/L HCl溶液的10 mmol/L 2,4-二硝基苯肼溶液, 室温避光反应, 每隔15 min摇匀1次。1 h后, 加入5 mL 20 g/100 mL三氯乙酸溶液, 10 000×g离心5 min, 取沉淀。在沉淀中加入5 mL乙酸乙酯-乙醇 ($V/V=1:1$) 和10 mL 6 mol/L溶液盐酸胍溶液, 37℃水浴15 min, 10 000×g离心3 min后, 在370 nm波长处测定吸光度, 即为肌球蛋白巯基含量。

1.3.10 带鱼肌肉组织结构观察

参照马纪兵等^[22]方法。将3种带鱼样品置于10% (V/V) 甲醛溶液浸泡48 h, 再将其切割成1 cm×0.3 cm×0.3 cm的组织块, 并用水冲洗, 体积分数70%乙醇溶液脱水过夜, 二甲苯透明20 min后组织包埋, 最后将获得的包埋组织切成5 μm厚的切片, 采用苏木精-伊红 (hematoxylin-eosin, HE) 染色, 并用显微镜观察带鱼肌肉组织结构。

1.4 数据处理

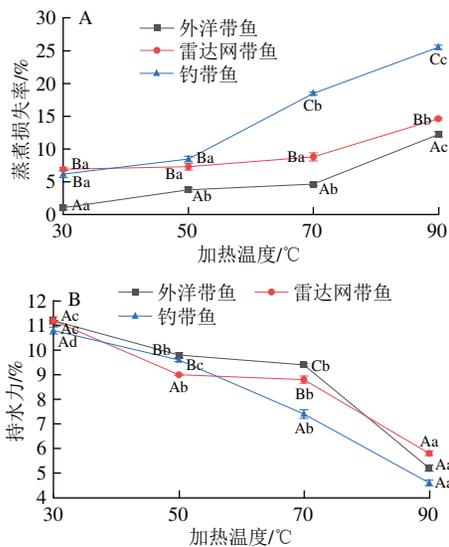
利用Origin 2022、SPSS 20软件进行作图及数据分析, 结果表示为平均值±标准差 ($n=3$), 并采用SNK法分析差异显著性水平, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 热加工对带鱼肌肉蒸煮损失率和持水力的影响

蒸煮损失率是反映鱼类肌肉汁液流失、蛋白质变性和纤维蛋白收缩情况的重要参考指标^[23]。由图1A可知, 随着加热温度上升, 3种带鱼的蒸煮损失率均呈上升趋势。其中, 加热温度处于30~70℃时, 外洋带鱼和雷达网带鱼的蒸煮损失率变化缓慢, 而当加热温度由70℃升至90℃时, 这2种带鱼蒸煮损失率变化幅度加大, 分别

由4.65%和8.81%增至12.23%和14.63%。钩带鱼的蒸煮损失率在温度低于50℃时变化不大；在50~90℃时，其蒸煮损失率上升速率显著高于外洋带鱼和雷达网带鱼 ($P<0.05$)，由8.48%增至25.54%。其原因可能是高温使肌肉组织中蛋白质变性程度加大，生成小分子肽。这些小分子肽随着水分、脂肪以及溶解的蛋白质等成分流失，使蒸煮损失率增加，进而导致水产品营养和质量降低，风味劣变^[24-25]。同时，在加热过程中，带鱼肌肉收缩，导致小分子肽溶出，这也是导致带鱼蒸煮损失率增加的重要原因^[26]。此外，钩带鱼的蒸煮损失率及其变化幅度大于其他2种带鱼，而雷达网带鱼蒸煮损失率变化幅度最小。说明雷达网带鱼在加热时，其水分保持能力强于其他2种带鱼，而钩带鱼则相反。



大写字母不同表示同一加热温度不同种带鱼差异显著 ($P<0.05$)；小写字母不同表示同种带鱼不同加热温度差异显著 ($P<0.05$)。下同。

图1 不同加热温度下3种带鱼肌肉蒸煮损失率(A)和持水力(B)的变化

Fig. 1 Changes in cooking loss (A) and WHC (B) of muscle tissues of three kinds of hairtail under different heating temperatures

持水力是评价鱼肉品质特性优劣的重要指标，对鱼肉嫩度、风味和加工特性具有极其重要的作用^[27-28]。由图1B可知，随着加热温度升高，3种带鱼肌肉持水力均呈下降趋势，其原因可能是加热导致带鱼肌肉中蛋白质变性，使排列紧密的肌原纤维空隙变大，造成带鱼肌肉持水力下降^[29]。其中钩带鱼肌肉持水力下降幅度最大，其次是外洋带鱼，而雷达网带鱼下降幅度最小。当加热温度升至90℃时，3种带鱼持水力无显著差异。不同带鱼蒸煮损失率和持水力的变化幅度可能与带鱼肌肉的肌纤维排列有关，钩带鱼和外洋带鱼肌纤维排列紊乱、疏松，导致肌原纤维结构疏松区域易暴露、肌肉细胞水分易流失；而雷达网带鱼肌纤维排列相对紧密、组织结构稳定性较高，能较好地保持肌肉细胞水分^[30]，因此雷达网带鱼的肌肉品质特性较好。

2.2 热加工对带鱼肌球蛋白溶解度的影响

肌球蛋白溶解性是衡量肌肉品质是否发生劣变的重要指标^[31]。由图2可知，随着加热温度升高，3种带鱼肌球蛋白溶解度降低。加热温度为30℃时，外洋带鱼、钩带鱼和雷达网带鱼肌球蛋白溶解度分别为41.2%、51.2%和33.3%，差异显著 ($P<0.05$)。当加热温度升至90℃时，外洋带鱼、钩带鱼和雷达网带鱼肌球蛋白的溶解度分别下降13.70%、31.66%和15.90%，原因可能是带鱼肌肉在加热过程中活性巯基暴露，并被氧化生成二硫键，同时还有一部分蛋白质变性，使结构解旋、肌球蛋白重链发生聚合，继而导致其溶解度下降^[32]。其中，钩带鱼肌球蛋白溶解度下降幅度明显高于其他2种带鱼，推测其原因是钩带鱼肌肉肌纤维排列疏松，使肌球蛋白裸露在外。裸露的肌球蛋白在加热过程中更易受热变性，造成更多疏水基团暴露，从而导致其溶解度下降幅度更大。

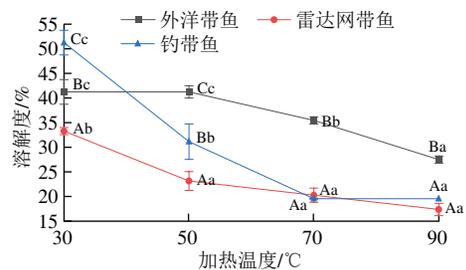


图2 不同加热温度下3种带鱼肌球蛋白溶解度的变化

Fig. 2 Changes in myosin solubility in muscle tissues of three kinds of hairtail under different heating temperatures

2.3 热加工对带鱼肌球蛋白浊度的影响

浊度可反映蛋白质溶液中悬浮颗粒粒径和数量，用于表征蛋白质聚集程度^[17]，并由此判断带鱼肌肉品质变化情况。由图3可知，随着加热温度升高，3种带鱼的肌球蛋白浊度不断增大。当加热温度为30℃时，外洋带鱼、钩带鱼和雷达网带鱼肌球蛋白浊度分别为0.473、0.393和0.362，三者之间存在显著差异 ($P<0.05$)。当加热温度升至90℃时，外洋带鱼、雷达网带鱼和钩带鱼肌球蛋白浊度分别增至0.512、0.507和0.559，原因可能是高温导致肌球蛋白变性及其构象发生改变，继而聚集形成不溶性沉淀，最终引起肌球蛋白浊度增加^[33]。其中，在加热温度升高过程中，钩带鱼肌球蛋白浊度上升幅度最大，特别是当温度达到90℃时，钩带鱼肌球蛋白浊度显著高于其他2种带鱼 ($P<0.05$)。推测其原因可能是钩带鱼肌原纤维排列松散、蛋白质暴露在外，在加热后蛋白质更易因变性而相互聚集，使粒径变大，导致浊度上升幅度增大^[34]。

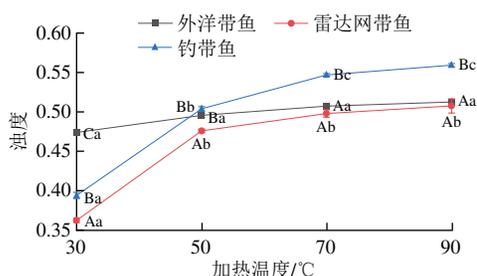


图3 不同加热温度下3种带鱼肌球蛋白浊度的变化

Fig. 3 Changes in turbidity of myosin from three kinds of hairtail under different heating temperatures

2.4 热加工对带鱼肌球蛋白乳化能力的影响

乳化性是体现蛋白质对油脂乳化能力强弱的指标，主要包括蛋白质EAI和ESI，是蛋白质的重要功能特性^[35]。由图4可知，随着加热温度升高，3种带鱼肌球蛋白EAI和ESI均呈下降趋势。当加热温度为30 °C时，雷达网带鱼肌球蛋白EAI为2.51 m²/g，显著高于其他2种带鱼 (P<0.05)；此外，钓带鱼肌球蛋白ESI最高，达到85.09%，而外洋带鱼肌球蛋白EAI和ESI最低，分别为1.18 m²/g和71.34%。当加热温度升至90 °C时，外洋带鱼、雷达网带鱼和钓带鱼肌球蛋白EAI分别下降至0.45，0.46、0.52 m²/g，同时ESI分别下降至27.41%、22.03%和18.83%。原因可能是高温使肌球蛋白结构遭到破坏，造成肌球蛋白与脂肪结合能力减弱，最终导致3种带鱼EAI及ESI降低。值得关注的是，随着加热温度升高，钓带鱼和雷达网带鱼的肌球蛋白EAI及ESI下降幅度均比外洋带鱼大，这可能是在加热过程中，钓带鱼和雷达网带鱼的疏水基团受到更大破坏，表面疏水性低于外洋带鱼，继而造成蛋白质结构稳定性遭到破坏，蛋白质与脂肪颗粒的交联能力减弱，使其不能形成稳定界面膜^[34,36]，导致其EAI和ESI下降幅度增大。

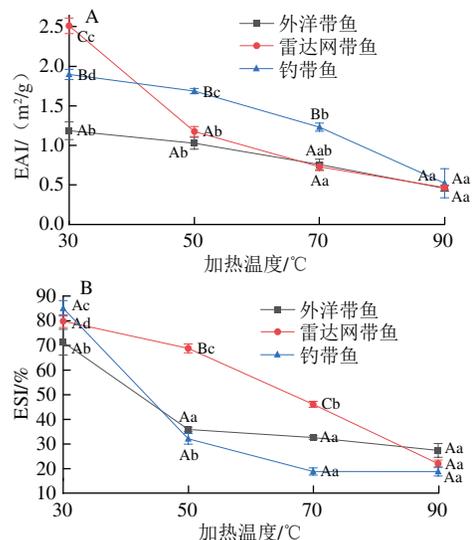


图4 不同加热温度下3种带鱼肌球蛋白EAI (A) 和ESI (B) 的变化

Fig. 4 Changes in emulsifying activity index (A) and emulsion stability index (B) of myosin from three kinds of hairtail under different heating temperatures

2.5 热加工对带鱼肌球蛋白FC和FS的影响

FC和FS指在特定条件下蛋白质与气体形成泡沫和保持泡沫稳定的能力，是蛋白质的重要功能特性，在食品加工中有重要作用^[17,37]。由图5可知，3种带鱼肌球蛋白FC和FS均随加热温度升高而降低，且二者变化趋势基本保持一致。加热温度为30 °C时，3种带鱼肌球蛋白FC存在显著差异 (P<0.05)，但外洋带鱼和雷达网带鱼的FS无显著差异 (P>0.05)。加热温度升至90 °C时，外洋带鱼、钓带鱼和雷达网带鱼肌球蛋白FC分别降低至80.00%，85.23%和88.23%，FS分别下降至85.22%、88.00%和89.41%。其原因可能是随着加热温度升高，带鱼肌肉中肌球蛋白含量减少且变性程度加剧、空间结构发生变化，导致蛋白质分子之间的化学作用力以及氨基与羧基之间形成氢键的能力变弱，分子间的界面特性与扩散速率受到影响，继而导致蛋白质泡沫形成能力和稳定性减弱^[38-39]。其中，外洋带鱼肌球蛋白初始FC为86.7%，显著低于其他2种带鱼 (P<0.05)，且在70~90 °C，外洋带鱼肌球蛋白FC和FS亦显著低于其他2种带鱼 (P<0.05)。推测其原因可能是外洋带鱼组织排列疏松，在高温下蛋白质中的氢键等化学键遭到大量破坏，其相对含量大幅降低，蛋白质分子间化学键形成能力减弱，故其FC和FS低于其他2种带鱼。

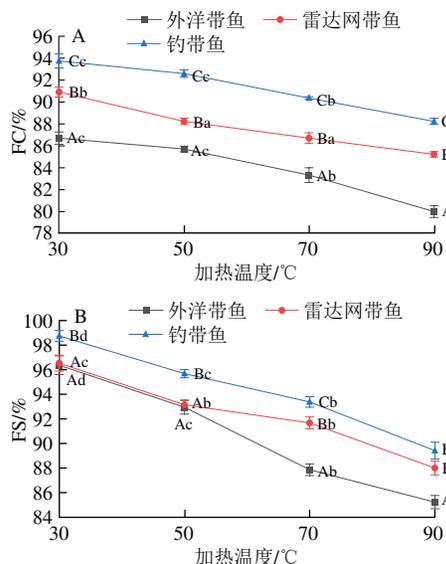


图5 不同加热温度下3种带鱼肌球蛋白FC (A) 和FS (B) 的变化

Fig. 5 Changes in foaming capacity (A) and foam stability (B) of myosin from three kinds of hairtail under different heating temperatures

2.6 热加工对带鱼肌球蛋白羰基含量的影响

肌肉羰基含量可用于判断蛋白质在自由基作用下的氧化程度^[40]。由图6可知，当加热温度由30 °C升至90 °C，3种带鱼肌球蛋白羰基含量分别增加0.95、1.04、1.2 nmol/mg。可能是因为高温催化带鱼肌球蛋白氧化反应加剧，促使羰基基团生成，继而导致肌球蛋白羰基

含量上升^[41]。其中,当温度为30、50、90℃时,雷达网带鱼肌球蛋白羰基含量显著低于其他2种带鱼($P<0.05$),这可能是由于雷达网带鱼促氧化成分(如自由基)含量较低^[37,42],因此在加热过程中,雷达网带鱼肌球蛋白氧化缓慢,其羰基含量虽有所增加但始终最低。

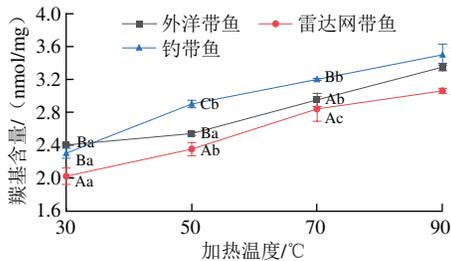
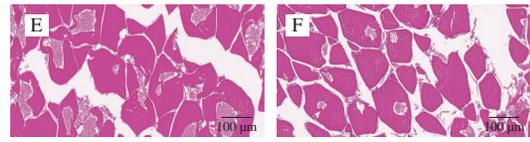
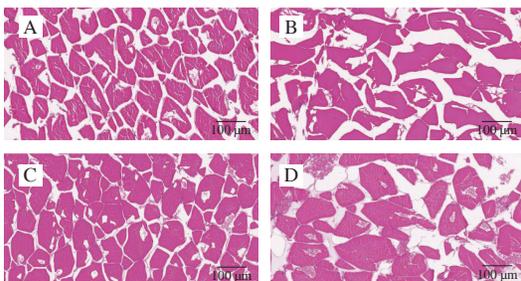


图6 不同加热温度下3种带鱼肌球蛋白羰基含量的变化

Fig. 6 Changes in myosin carbonyl content of three kinds of hairtail under different heating temperatures

2.7 热加工对带鱼肌肉微观结构的影响

HE染色石蜡切片中呈红色的是细胞质和细胞外基质^[43]。由图7可知,3种带鱼肌纤维被染成粉红色,肌内膜将其分成参差不齐的块状,肌浆把肌纤维细胞的肌原纤维分成不同的肌纤维束。当温度为50℃时,雷达网带鱼肌纤维是规则的块状,肌纤维之间紧密且间隙较小,粉红色的肌原纤维分布均匀,在肌纤维内分布紧密,该结构能防止肌肉组织汁液流失,维持带鱼肌肉嫩度。然而,钩带鱼和外洋带鱼鱼肉肌纤维排列较为紊乱、疏松。其中,外洋带鱼鱼肉肌纤维断裂现象严重。这可能与3种带鱼的不同生存环境和捕捞方式有关。雷达网带鱼生活在水深50~100 m处,通过雷达网捕获,其组织结构更加致密,而钩带鱼和外洋带鱼的组织结构相对疏松。当温度继续升高至90℃时,3种带鱼肌纤维束均出现不同程度的溶解断裂现象,并且肌纤维间隙越来越大。由此说明加热温度越高,带鱼微观结构的完整性被破坏程度越大,但在相同加热温度下,雷达网带鱼的组织结构完整性最好。以上结果与2.1节蒸煮损失率和持水力测定结果相一致,即随着加热温度的上升,3种带鱼的肌纤维间隙不断增大、排列逐渐疏松,同时蒸煮损失率随之增大、持水力随之减小。其中雷达网带鱼的肌纤维相对紧密,持水力和蒸煮损失率变化幅度最小。



A~C. 50℃; D~F. 90℃。A、D.钩带鱼;
B、E.外洋带鱼; C、F.雷达网带鱼。

图7 不同加热温度下3种带鱼肌肉组织HE染色图

Fig. 7 HE staining of muscle tissues in three kinds of hairtail under different heating temperatures

3 结论

研究热加工对钩带鱼、外洋带鱼和雷达网带鱼肌球蛋白和组织微观结构的影响。结果表明:随着加热温度升高,带鱼肌肉蒸煮损失率增加、持水力降低,说明热加工会导致3种带鱼的水分和营养物质流失,肌肉品质下降;同时,3种带鱼肌球蛋白的浊度和羰基含量增加,溶解度、EAI、ESI、FC及FS降低,说明温度上升会使带鱼肌球蛋白变性程度增加、功能特性下降;观察肌肉组织微观结构发现,随着加热温度升高,3种带鱼肌肉组织中肌纤维和肌纤维束间隙也随之增大,且出现不同程度断裂,表明升温会导致带鱼肌肉组织被破坏、结构完整性下降;然而,在3种带鱼中,雷达网带鱼的持水力、溶解性下降幅度,浊度上升幅度均比钩带鱼和外洋带鱼小,且其肌肉组织微观结构的完整性最好,表明在热加工下,雷达网带鱼肌球蛋白功能特性和肌肉品质最佳。综上可知,随着加热温度升高,3种带鱼的肌球蛋白功能特性均不断降低,带鱼组织微观结构完整性下降,其中雷达网带鱼肌肉蛋白质的品质稳定性和组织结构完整性最好。

参考文献:

- [1] 罗华彬, 盛珍珍, 司永利, 等. 超高压处理对冷藏带鱼鱼丸保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 157-162. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191202-005.
- [2] 陈燕婷, 林露, 高星, 等. 超高压对带鱼鱼糜凝胶特性及其肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 115-120. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181021-223.
- [3] 许钰, 位正鹏, 霍健聪, 等. 带鱼副产物鱼粉对酱醪品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 177-182. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.01.023.
- [4] 张蒙娜, 宋恭帅, 王海星, 等. iKnife智能刀-快速蒸发离子化质谱实时检测空气油炸带鱼的脂质组学品质特征[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 314-320. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190731-428.
- [5] 廖月琴, 吴盈茹, 杜琪, 等. 新鲜与风干带鱼肌肉品质及营养成分分析与评价[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 185-191. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029576.
- [6] 丁怡萱, 周婷, 廖月琴, 等. 两种炸制方式对带鱼品质及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 244-253. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022030023.
- [7] 高乾坤, 焦琳舒, 杜贺超, 等. 高通量测序分析不同产地带鱼冷藏时微生物群落多样性[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 127-132. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201818020.

- [8] 揭珍, 徐大伦, 杨文鹤. 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): 1201-1205. DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2016.11.013.
- [9] 刘小羽, 林慧敏, 邓尚贵, 等. 带鱼鱼糜脱脂工艺的研究[J]. 食品工业, 2017, 38(5): 19-23.
- [10] 徐映雨, 赵溢智, 吴明洪, 等. 不同烹饪方式对水煮牛肉品质的影响[J]. 现代食品, 2023, 29(5): 72-76. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2023.05.019.
- [11] 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. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2020.04.009.
- [12] 余娟, 吴杨阳, 章佳佳, 等. 微波膨化即食金枪鱼皮工艺条件的优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 136-142. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.03.028.
- [13] 齐海萍, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 热加工对鲤鱼质构的影响研究[J]. 食品科技, 2011, 36(5): 144-146; 150. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2011.05.053.
- [14] 石彤. 外源精氨酸对鲢肌球蛋白热聚集行为的影响机制及其应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 6-10. DOI:10.27170/d.cnki.gjsuu.2021.000075.
- [15] TADPITCHAYANGKONAD P, PARK W J, YONGSAWATDIGUL J. Gelation characteristics of tropical surimi under water bath and ohmic heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 97-103. DOI:10.1016/j.lwt.2011.10.020.
- [16] GAO R C, WANG Y M, MU J L, et al. Effect of L-histidine on the heat-induced aggregation of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) myosin in low/high ionic strength solution[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75(4): 174-181. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.08.029.
- [17] 严红波, 沈春蕾, 张宾, 等. 南美白对虾肉糜冻藏过程中蛋白质功能特性变化[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(24): 37-42; 57. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024776.
- [18] JIA D, YOU J, HU Y, et al. Effect of CaCl₂ on denaturation and aggregation of silver carp myosin during setting[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 212-218. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.130.
- [19] 肖琨, 王锡昌. 养殖暹罗鳄肉肌原纤维蛋白的理化性质[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 92-98. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201423019.
- [20] FOH M B K, XIA W S, AMADOU I, et al. Influence of pH Shift on functional properties of protein isolated of tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscles and of soy protein isolate[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(6): 2192-2200. DOI:10.1007/s11947-010-0496-0.
- [21] JIANG W X, HE Y F, XIONG S B, et al. Effect of mild ozone oxidation on structural changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myosin[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 10(2): 1-9. DOI:10.1007/s11947-016-1828-5.
- [22] 马纪兵, 张丽, 王妍, 等. 风干牦牛肉加工过程中水分状态变化及质构相关性分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 294-300. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2018.07.038.
- [23] LIYANA-PATHIRANA C, SHAHIDI F. Optimization of extraction of phenolic compounds from wheat using response surface methodology[J]. Food Chemistry, 2005, 93(1): 47-56. DOI:10.1016/j.foodchem.2004.08.050.
- [24] CAO L P, RASCO B A, TANG J M, et al. Effects of freshness on the cook loss and shrinkage of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets following pasteurization[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(10): 2297-2306. DOI:10.1080/10942912.2015.1123271.
- [25] SHI C, CUI J Y, LUO Y K, et al. Post-mortem changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) stored at 0 °C assessed by electrical conductivity[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(2): 415-425. DOI:10.1080/10942912.2013.833220.
- [26] 吴燕燕, 熊添, 王悦齐, 等. 热处理温度对卵形鲳鲷品质和肌肉蛋白质理化特性的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(6): 1-10. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.06.006.
- [27] 李钊, 李宁宁, 刘玉, 等. 超高压对肌原纤维蛋白结构及其凝胶特性影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 304-309. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024364.
- [28] LI L, LIU Y, ZOU X Y, et al. *In vitro* protein digestibility of pork products is affected by the method of processing[J]. Food Research International, 2017, 92(3): 88-94. DOI:10.1016/j.foodres.2016.12.024.
- [29] 才琳. 超高压处理对镜鲤鱼肠凝胶特性及冷藏过程中品质变化的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(7): 112-116. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2022.07.015.
- [30] 吴盈茹, 廖月琴, 杜琪, 等. 盐浓度对冷藏即食中华管鞭虾肌肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 90-97. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022030221.
- [31] PENNY I F. The effect of temperature on the drip, denaturation and extracellular space of pork *Longissimus dorsi* muscle[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 28(4): 329-338. DOI:10.1002/jsfa.2740280402.
- [32] HE S, NGUYEN T T, SU P, et al. Protein hydrolysates produced from rock lobster (*Jasus edwardsii*) head: emulsifying capacity and food safety[J]. Food Science and Nutrition, 2016, 2016(7): 869-877. DOI:10.1002/fsn3.352.
- [33] 郑云芳, 李晨, 张芳, 等. 热处理对鲈鱼肌原纤维蛋白结构及功能特性的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 139-146. DOI:10.7631/issn.1000-2243.21288.
- [34] MOHAN M, RAMACHANDRAN D, SANKAR T V, et al. Physicochemical characterization of muscle proteins from different regions of mackerel (*Rastrelliger kanagurta*)[J]. Food Chemistry, 2008, 106(2): 451-457. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.05.024.
- [35] 康大成, 刘云国, 张万刚. 高功率超声波对蛋白质功能特性的影响及其在肉品加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 289-297. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181105-053.
- [36] ENCINAS-ARZATE J D J, EZQUERRA-BRAUER J M, OCAÑO-HIGUERA V M, et al. Erratum to: effect of ionic strength on soluble protein removal from giant squid mantle (*Dosidicus gigas*) and functional evaluation of protein recovery[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(2): 401-407. DOI:10.1007/s10068-014-0055-y.
- [37] 姚慧, 祁雪儿, 毛俊龙, 等. 3种鱿鱼冻藏过程中肌原纤维蛋白功能特性变化[J]. 食品科学, 2021, 42(7): 207-213. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200521-246.
- [38] MATSUDOMI N, TOMONOBU K, MORIYOSHI E, et al. Characteristics of heat-induced transparent gels from egg white by the addition of dextran sulfate and the protein-polysaccharide interactions[J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2015, 42(3): 238-239. DOI:10.1002/(SICI)1521-3803(199808)42:03/04<238::AID-FOOD238>3.0.CO.
- [39] KUNARAYAKUL S, THAI PHANIT S, ANPRUNG P, et al. Optimization of coconut protein deamidation using protein-glutaminase and its effect on solubility, emulsification, and foaming properties of the proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 197-207. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.12.031.
- [40] 姚慧, 祁雪儿, 齐贺, 等. 卡拉胶寡糖对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白功能特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(1): 68-75. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2020.01.005.
- [41] JIAO F, ZHANG D, JIANG M Q, et al. Label-free proteomic analysis of placental proteins during *Toxoplasma gondii* infection[J]. Journal of Proteomics, 2017, 150(1): 31-39. DOI:10.1016/j.jprot.2016.08.013.
- [42] 方海砚, 苑歆, 刘友明, 等. 羟自由基氧化对鲢鱼肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(4): 6-12. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.002.
- [43] 张乐道, 曹世英, 王国泽, 等. 石蜡切片改良技术及其在怀山药干燥中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 238-243. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029606.