

不同水分含量对自热后烤制带鱼品质影响的比较分析

常莉莉^{1,2}, 王瑗琳¹, 刘祉好^{1,2}, 施雯刚¹, 姜鹏飞^{1,2}, 梁鹏铖¹, 周天铖¹, 孙成龙¹, 唐越^{1,2*}

(1. 大连工业大学食品学院, 辽宁大连 116034) (2. 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 为解决自热鱼类产品杀菌复热后食用品质下降问题, 该研究以带鱼为原料, 利用测色仪、质构仪、扫描电镜 (SEM) 以及拉曼光谱, 探讨烤制至不同水分含量 (70%、60%、50%、40%)、经过灭菌和自热后, 比较其色泽、质构和感官品质, 确定最佳自热烤制带鱼的水分含量。在 140 °C、160 °C、180 °C 和 200 °C 条件下将带鱼烤制至最佳水分含量, 比较其色泽、质构、感官评价、微观结构及蛋白质变性程度, 从而得到自热烤制带鱼最佳烤制条件。研究发现, 随着水分含量的降低, L^* 值和白度值分别从 64.65 和 60.74 下降至 42.23 和 35.82, a^* 值和 b^* 分别从 -0.59 和 17.05 升高至 12.23 和 24.69。水分含量为 40% 时带鱼鱼块的硬度、胶着度和咀嚼度分别为水分含量 70% 的 4.27 倍、5.53 倍和 5.89 倍。烤制至水分含量为 70% 时, 感官评价的各个单项评分最高。在 140 °C 条件下烤制带鱼鱼肉使其含水量至 70% 时, 即烤制温度为 140 °C, 烤制时间为 24 min 3 s 时, 鱼肉肌纤维直径较细, 肉质较嫩, 具有稳定的蛋白质结构, 感官品质较佳。该研究成果可为自热鱼类产品品质的提升提供理论依据。

关键词: 带鱼; 自热食品; 烤制; 拉曼光谱; 食用品质

文章编号: 1673-9078(2022)03-143-151

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0598

Comparative Analysis of the Effects of Different Moisture Contents on the Quality of Self-heating Grilled *Trichiurus haumela*

CHANG Lili^{1,2}, WANG Ailin¹, LIU Zhiyu^{1,2}, SHI Wengang¹, JIANG Pengfei^{1,2}, LIANG Pengcheng¹,
ZHOU Tiancheng¹, SUN Chenglong¹, TANG Yue^{1,2*}

(1. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

(2. National Engineering Research Center of Seafood, Dalian 116034, China)

Abstract: To solve the problem of declining quality of self-heating fish products after sterilization and reheating, this study used *Trichiurus haumela* as the raw material. And a colorimete, texture analyzer, scanning electron microscope (SEM) and Raman spectrometer were used to compare the color, texture and sensory quality of *Trichiurus haumela* after being grilled to different moisture contents (70%, 60%, 50% and 40%), sterilized and self-heated, to determine the optimal moisture content of self-heating grilled fish fillet. After the fish filets were grilled at 140 °C, 160 °C, 180 °C and 200 °C to the optimal moisture content, the color, texture, sensory score, microstructure and protein denaturation degree were compared. Then, the optimal grilling conditions of self-heating grilled fish filets were obtained. The results showed that with the decrease of moisture content, the value of L^* and whiteness decreased from 64.65 and 60.74 to 42.23 and 35.82, respectively, and the values of a^* and b^* increased from -0.59 and 17.05 to 12.23 and 24.69, respectively. When the moisture content was 40%, the hardness, adhesiveness and chewiness of the samples were 4.27 times, 5.53 times and 5.89 times that with a moisture content of 70%. Sensory evaluation indicated that the fish fillet had the highest sensory scores for all the quality attributes when the sample was grilled to have a moisture content of 70%. The

引文格式:

常莉莉,王瑗琳,刘祉好,等.不同水分含量对自热后烤制带鱼品质影响的比较分析[J].现代食品科技,2022,38(3):143-151,+327

CHANG Lili, WANG Ailin, LIU Zhiyu, et al. Comparative analysis of the effects of different moisture contents on the quality of self-heating grilled *Trichiurus haumela* [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 143-151, +327

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0400502); 大学生创新创业训练计划项目资助 (202010152376)

作者简介: 常莉莉 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: changlili0818@163.com

通讯作者: 唐越 (1985-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 海洋蛋白质资源开发与利用, E-mail: tytg126@163.com

self-heating grilled fish fillets had a smaller muscle fiber diameter, tender flesh, stable protein structure and higher sensory quality when the fish was grilled 140 °C to make its water content reach 70% (that is, 140 °C for 24 min and 3 s). The muscle fiber diameter was finer, the meat was tenderer, and it had a stable protein structure and better sensory quality than other samples in this optimal condition. The results of this study could provide a theoretical basis for improving the quality of self-heating grilled fish products.

Key words: *Trichiurus haumela*; self-heating products; baking; Raman spectroscopy; food quality

带鱼 (*Trichiurus haumela*) 又称刀鱼或牙带鱼, 是我国四大经济鱼类之一, 属于鱼纲鲈形目带鱼科, 广泛分布于我国黄海、渤海和东海^[1,2]。带鱼肉质鲜嫩, 含有丰富的蛋白质、多不饱和脂肪酸等多种营养成分, 目前的加工方式主要为干制品、腌制品和冷冻带鱼段。近年来随着人们生活方式的转变, 对食品快捷性、方便性的需求不断增加, 自热食品产业应时而生, 其利用发热袋遇水产生热量对预制菜肴进行加热, 得到可即食的自热食品^[3]。目前市场上常见的自热肉制菜肴多以畜禽肉为原料, 品种较为单一, 存在营养结构不均衡、口感较差、质地劣化、连续接受性不高等诸多问题。为了扩充自热食品的餐谱丰度、满足不同人群的饮食需求, 并提升食用品质, 本论文以资源丰富、高营养价值的水产鱼类(带鱼)为原料, 进行自热水产品研制, 具有重大的现实意义。

目前, 国内外学者研究发现鱼肉加工过程中质构^[4]、微观结构^[5]、色泽^[6]、风味^[7]等都与水分含量、烹饪条件等因素密切相关。王焕庆等^[8]研究水分含量对烤虾品质的影响, 结果表明水分含量升高会提高烤虾的感官品质。加工过程中, 水分含量与鱼肉制品的多汁性有着密切关系, 水分含量较低则会使肉类菜肴产生“干燥感”, 降低菜肴的口感与品质^[9]。Chang 等^[10]研究发现不同水分含量对自热油炸鲑鱼品质影响不同, 当油炸鲑鱼水分含量为 65% 时, 所得产品具有较佳的食用品质。Wang 等^[11]研究 4 种蒸制方法(100 °C 传统蒸制方法、75 °C 低温蒸制、100 °C/75 °C 分步蒸制、75 °C/100 °C 分步蒸制) 对大嘴鲈鱼品质变化的影响, 结果发现分步蒸制不仅能够降低鱼肉硬度, 保持鱼肉的多汁性, 而且还能改善鱼肉的气味和滋味。Yu 等^[12]研究空气油炸的温度和时间对鱼糜物理、风味和脂质组学性质的影响, 结果发现, 随着空气油炸温度和时间增加, 鱼糜外皮变脆, 内部水分保存良好, 油脂易氧化降解为挥发性化合物。烤制是对鱼类产品处理常见的一种加工方式。在烤制过程中, 鱼本身的蛋白质、脂肪以及糖类物质发生美拉德反应, 使得鱼肉形成诱人的香味和色泽, 深受消费者的喜爱。然而, 烤制过程中温度或时间会使鱼肉中的脂肪和蛋白发生氧化^[13], 从而影响鱼肉的质构、色泽等感官品质^[14]。因此, 适宜的水分含量、合适的烤制条件, 能够解决

自热水产食品因过度加工所导致的质地粗硬问题。

本文以带鱼为原料, 利用测色仪、质构仪、扫描电镜 (SEM) 以及拉曼光谱技术, 研究烤制至不同水分含量 (70%、60%、50%、40%)、经过灭菌和自热后, 比较其色泽、质构和感官品质, 从而确定最佳自热烤鱼的水分含量。在 140 °C、160 °C、180 °C 和 200 °C 条件下将带鱼烤制至最佳水分含量, 比较其色泽、质构、感官评价、微观结构及蛋白质变性程度, 从而明确自热烤制带鱼的最佳烤制条件, 以期自热水产食品的品质提升提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷冻带鱼, 购买于大连长兴市场, -18 °C 冻藏保存; 戊二醛, 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 磷酸盐、氯仿, 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂; 乙醇, 分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 仪器与设备

SCCWE 101 万能蒸烤箱, 德国 RATIONAL 公司; TA.XT.PLUS 型质构仪, 英国 SMS 公司; UltraScan Pro 型测色仪, 美国 HunterLab 公司; 反压高温蒸煮锅, 广州标际包装设备有限公司; 200 型电子天平, 美国 G&G 公司; MesoQMR23-060H 低场核磁共振分析及成像系统, 上海纽迈电子科技有限公司; JSM-7800F 扫描电镜, 日本电子株式会社; 拉曼光谱仪, 日本 Horiba 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 烤制带鱼加工工艺

冷冻带鱼→解冻、切块→清洗→烤制→装袋、包装→杀菌→冷却→成品→自热→食用

(1) 解冻、切块: 冷冻带鱼在 4 °C 下解冻 12 h, 去头尾、鳍、内脏, 并取鱼肉部分, 切成 5 cm×6 cm×0.5 cm 鱼块, 待用。

(2) 烤制: 鱼块烤制前用锡纸包裹。

(3) 杀菌条件: 105 °C、10 min; 110 °C、20 min; 121 °C、20 min, 三段杀菌。

(4) 模拟自热条件: 100 °C、15 min。

1.3.2 带鱼鱼块烤制工艺研究

(1) 烤制脱水曲线绘制: 将带鱼鱼块分别在 140、160、180、200 °C 条件下进行烤制, 每隔 10 min 取出, 测定鱼块的水分含量, 绘制不同烤制温度下鱼块的水分含量随烤制时间变化曲线。

(2) 确定最佳水分含量: 将带鱼鱼块分别烤制水分含量为 70%、60%、50%、40%, 经过杀菌自热后, 以带鱼鱼块的色泽、质构及感官评价为指标, 确定鱼块的最佳水分含量。

(3) 烤制条件的确定: 将带鱼鱼块分别在 140、160、180、200 °C 条件下烤制最佳水分含量测定每组带鱼鱼块的微观结构、蛋白质变性程度、色泽和质构, 并对鱼块进行描述性感官评价, 确定带鱼鱼块最佳烤制条件。

1.3.3 水分含量

水分含量的测定参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》中直接干燥法进行测定。

1.3.4 色度测定

白度参考常莉莉等^[15]的测定方法。采用测色仪测定自热后样品的亮度 L^* 、红绿 a^* 、蓝黄 b^* 值, 通过带鱼鱼块在烤制过程中白度的变化, 反映带鱼鱼块经过不同烤制条件下颜色的变化。按下式计算白度:

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

1.3.5 质构测定

用物性测试仪测定自热后样品的质构特性, 参考

Dong 等^[4]的测定方法。选择全质构 (TPA) 模式。TPA 测试条件: 选用 P5 探头, 测试前、中、后速率分别为 2 mm/s、1 mm/s 和 2 mm/s, 触发力为 5 g, 压缩比为 30%。测定指标有硬度、弹性、粘聚性、胶着度、咀嚼度和回复性。

1.3.6 微观结构测定

参考 Bolumar 等^[16]的方法并略作修改。将自热后样品切成 3 mm×3 mm×5 mm, 置于 2.5% 戊二醛溶液 4 °C 浸泡 24 h, 再用 pH 6.8、0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲液冲洗 3 次, 每次 10 min, 分别用 50%、70%、80%、90% 乙醇溶液对样品进行脱水处理, 每次 10 min。将脱水后的样品置于氯仿中处理 1 h, 以去除样品中的脂肪, 最后用 100% 乙醇冲洗 3 次, 每次 10 min。待样品冲洗完毕后, 进行真空冷冻干燥。采用扫描电镜观察样品的肌纤维形态变化, 放大倍数为 500。

1.3.7 拉曼光谱分析

将自热后鱼肉冻干磨成粉末, 取一定质量的粉末置于在载玻片上, 使用拉曼光谱仪进行测量, 实验参数如下: Acq. Time: 20 s; Accumulations: 20; Laser: 785 nm_Edge; Hole: 199.981; Grating: 600 (500 nm); ND Filter: 25%; Objective: 10_VIS_LWD; ICS correction: On。获取的拉曼光谱范围在 450~1750 cm^{-1} 之间。采用 Labspec 6 软件对拉曼光谱数据进行处理 (平滑, 多点基线校正去除荧光背景)。蛋白质二级结构 (α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规卷曲) 含量通过高斯拟合方法计算获得。

1.3.8 感官评价

表 1 感官评分标准

Table 1 Standard of sensory evaluation

分数	色泽	组织形态	弹性	硬度	多汁性
5 分	富有光泽	整体形态完整, 饱满	富有弹性	鱼肉硬度适中	水润多汁
4 分	略有光泽	形态较完整, 轻微弯曲	有弹性	鱼肉硬	汁液较少
3 分	淡黄色	形态基本完整, 轻微弯曲	较有弹性	鱼肉较硬	汁液较少, 但可接受
2 分	暗黄色	体形弯曲严重	稍有弹性	鱼肉较软	汁液少
1 分	无光泽, 色泽暗淡	组织松散, 无完整形态	无弹性	鱼肉软	基本无汁液

参考 Dong 等^[4]的感官评定方法, 采用双盲法对自热后样品的色泽、组织形态、弹性、硬度以及多汁性进行感官评价, 感官评价标准见表 1。感官评价小组由 8 人组成, 均为具有 1 年以上鱼肉制品评价经验的食品科学专业研究生。

1.4 数据处理

每组实验均至少做 3 次平行并取平均值, 将所得数据采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA) 和显著性检验方法 (Duncan) 多重比较,

$p < 0.05$ 具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 烤制过程带鱼鱼块水分含量的变化

自热带鱼制品在加工及食用过程中需要进行多次热处理, 烤制是自热带鱼制品预处理过程, 为防止自热带鱼制品在加工过程出现过熟化现象, 影响产品的食用品质, 本研究选择水分含量作为预熟条件的考察指标, 将不同水分含量的烤制带鱼经过灭菌和自热

后, 比较其色泽、质构和感官品质, 从而确定具有最佳食用品质时烤制带鱼的水分含量。水分含量是影响鱼肉制品品质的关键因素, 对产品的色泽和质构等具有重要影响^[17], 同时也是反映带鱼烤制程度的关键性指标。相似地, 涂敏建等^[18]以水分含量作为考察指标, 研究不同水分含量对南极磷虾烤虾质构和色泽的影响。

图 1 为不同温度下带鱼鱼块水分含量随烤制时间的变化曲线。在 140、160、180、200 °C 烤制条件下, 带鱼鱼块水分含量由未经烤制的 76.94% 分别降低至 61.24%、52.11%、40.06% 和 20.90%。随着烤制时间的增加, 鱼块水分含量不断降低。烤制温度越高, 鱼块水分含量下降越迅速。这可能是由于烤制温度过高导致鱼肉中肌原纤维蛋白发生部分变性, 肌球蛋白纤维和肌动蛋白纤维空隙减少, 从而使得鱼肉的持水能力下降, 水分含量减少^[19]。从图 1 中还可以看出, 在研究范围内, 不同烤制温度下鱼块水分含量与烤制时间

均具有较好的线性关系。通过线性拟合可以得到各个温度下, 鱼块水分含量和烤制时间之间的线性方程, 如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 每个线性方程的拟合度 R^2 均高于 0.96, 烤制温度越高, 方程斜率的绝对值就越大, 即鱼块烤制过程中水分含量变化越明显。

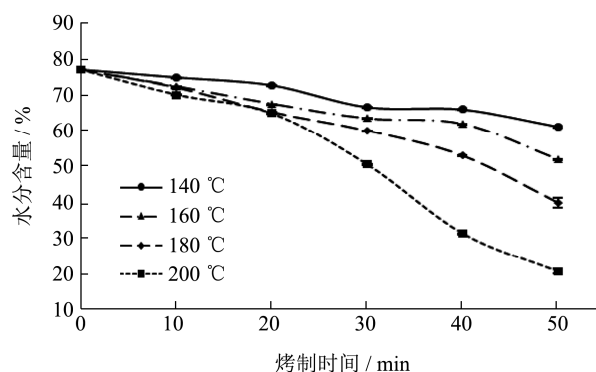


图 1 不同烤制温度下的带鱼鱼块水分含量变化曲线

Fig.1 The variation curve of moisture content of *Trichiurus haumela* under different baking temperature

表 2 不同烤制温度下带鱼鱼块水分变化方程

Table 2 Equation of moisture change of *Trichiurus haumela* under different baking temperature

烤制温度	拟合方程	R^2	不同水分含量下带鱼鱼块的烤制时间			
			70%	60%	50%	40%
140 °C	$y=-0.32x+77.63$	0.97	24 min 3 s	55 min 33 s	87 min 3 s	118 min 34 s
160 °C	$y=-0.46x+77.12$	0.96	15 min 37 s	37 min 34 s	59 min 31 s	81 min 27 s
180 °C	$y=-0.99x+80.65$	0.97	10 min 42 s	20 min 45 s	30 min 48 s	40 min 52 s
200 °C	$y=-1.17x+81.76$	0.96	10 min 3 s	18 min 35 s	27 min 7 s	35 min 40 s

2.2 不同水分含量对自热加工后烤制带鱼鱼块色泽的影响

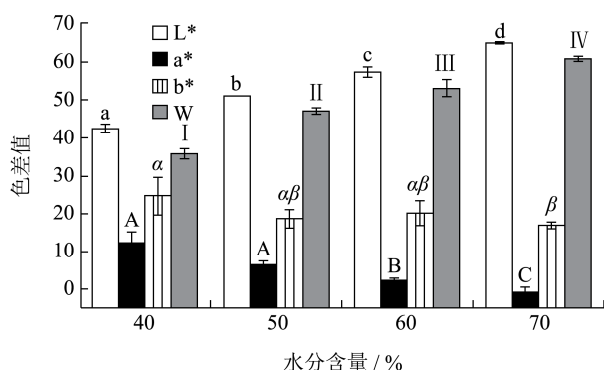


图 2 自热加工后烤制带鱼鱼块色泽的比较

Fig.2 Comparison of the color of baked *Trichiurus haumela* after self-heating processing

注: 不同字母表示存在显著差异 ($p < 0.05$), 下同。

色泽是反应鱼肉制品品质的重要指标之一, 加工过程中鱼肉色泽的变化可能与水分蒸发、褐变化学反应、焦糖化和表皮硬壳形成有关^[20]。图 2 为 180 °C 条

件下烤至不同水分含量对带鱼鱼块色泽的影响。测色仪的检测结果显示, L^* 值表示亮度, 0~100 表示样品由黑至白; a^* 值表示红绿轴上的颜色的饱和度, a^* 值越大样品颜色越红, b^* 值表示黄蓝轴上的颜色饱和度, b^* 值越大样品颜色越黄^[21]。随着水分含量的降低, 带鱼鱼块的 L^* 值和白度值均发生显著性降低 ($p < 0.05$), 即 L^* 值从 64.65 下降至 42.23, 白度值从 60.74 下降至 35.82, 这种降低可能有两方面原因, 一方面与美拉德反应有关, 美拉德反应产生棕色色素导致鱼肉色泽变暗; 另一方面为加工过程中鱼肉水分含量的降低, 减少了光的反射^[22]。而带鱼鱼块的 a^* 值和 b^* 值呈明显上升趋势 ($p < 0.05$), 即 a^* 值从 -0.59 升高至 12.23, b^* 值从 17.05 升高至 24.69。 a^* 值的增加可能是由于加工过程中高铁肌红蛋白氧化所致^[23], b^* 值变化与鱼肉脂质氧化程度有关, 随着加工程度的加深, 鱼肉脂质的氧化程度不断增加, 导致其 b^* 值升高^[24]。涂敏建等^[18]研究发现随着水分含量的减少, 烤虾的 L^* 值降低, a^* 、 b^* 值增加, 此结果与本研究一致。综合感官观察和仪器检测的色泽数据, 水分含量为 70% 时, 自热带鱼鱼块具有较好的色泽。

表 3 自热加工后烤制带鱼鱼块质构的比较

Table 3 Comparison of the texture of baked *Trichiurus haumela* after self-heating processing

水分含量/%	硬度/g	弹性	粘聚性	胶着度	咀嚼度	回复性
70	345.08±12.45 ^a	0.9±0.03 ^a	0.64±0.01 ^a	219.68±8.36 ^a	196.6±4.70 ^a	0.24±0.02 ^a
60	415.12±25.51 ^a	0.92±0.04 ^a	0.75±0.10 ^{ab}	312.82±45.90 ^a	288.40±48.15 ^a	0.41±0.09 ^b
50	706.64±81.49 ^b	0.88±0.05 ^a	0.69±0.06 ^a	493.25±98.52 ^b	436.76±90.42 ^b	0.36±0.05 ^{ab}
40	1472.94±111.93 ^c	0.95±0.04 ^a	0.83±0.06 ^b	1215.76±39.11 ^c	1157.53±65.62 ^c	0.44±0.10 ^b

注：同列数值后字母不同表示有显著性差异 ($p < 0.05$)，下同。

2.3 不同水分含量对自热加工后烤制带鱼

块质构的影响

质构多面剖析法 (TPA) 是通过仪器模拟人口腔的咀嚼运动, 对样品进行两次压缩, 从而得到待测样品的质构特性参数^[25], 测量指标包括硬度、弹性、粘聚性、胶着度、咀嚼性、回复性等。在 180 °C 条件下, 将带鱼鱼块烤至不同水分含量后进行自热加工并比较其质构, 如表 3 所示, 研究发现, 随着水分含量的降低, 带鱼鱼块的硬度、粘聚性、胶着度、咀嚼度和回复性显著升高 ($p < 0.05$), 而弹性无显著性差异 ($p > 0.05$)。水分含量为 40% 时带鱼鱼块的硬度、胶着度和咀嚼度分别为水分含量 70% 的 4.27 倍、5.53 倍和 5.89 倍, 这可能是由于随着烤制的进行, 样品表面形成了致密的美拉德反应产物^[26], 同时加热过程也会使鱼肉中肌原纤维变短、肌节长度变小, 从而导致鱼肉变干、皱缩^[27], 进而导致样品的硬度和咀嚼度增加。胶着度增加的原因可能是由于样品的胶着性随脂肪含量的增加而增加^[28]。同时, SERRA 等^[29]发现肉制品的硬度、咀嚼性等质构指标与其水分含量呈负相关关系, 与本文结论一致。

2.4 不同水分含量对自热加工后烤制带鱼

块感官评价的影响

感官评价能够直观的分析 and 描述食品的口感、色泽和形态等感官特性, 能反映评价者对食品的接受和喜好程度^[24]。对 180 °C 条件下烤至不同水分含量的带鱼鱼块进行感官评价, 结果如图 3 可知, 随着烤制程度的加深, 即水分含量的下降, 无论是单项评分还是总评分均呈下降的趋势。水分含量为 70% 的鱼块样品在组织形态、多汁性、弹性、硬度和色泽上均具有最高评分, 感官总评分值为 17.5。而水分含量为 40% 的鱼块样品, 其感官总评分值最低 (10.83)。综合评价结果显示, 当水分含量为 70% 时, 经过杀菌自热后带鱼鱼块感官品质较佳。上述感官指标变化规律与色泽 (图

2) 和质构 (表 3) 的数据在一定程度上具有一致性。

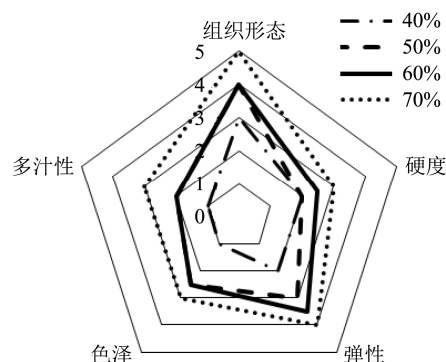


图 3 自热加工后烤制带鱼鱼块感官评价的比较

Fig.3 Comparison of the sensory evaluation of baked *Trichiurus haumela* after self-heating processing

2.5 最佳水分含量条件下不同烤制温度-时间

对自热后带鱼鱼块肌纤维结构的影响

经上述实验结果表明, 水分含量为 70% 的鱼块在色泽、质构及感官评价等指标中反映出其具有较好的可接受性。考虑到工业化生产的可行性, 进一步将工艺条件进行具体化研究。

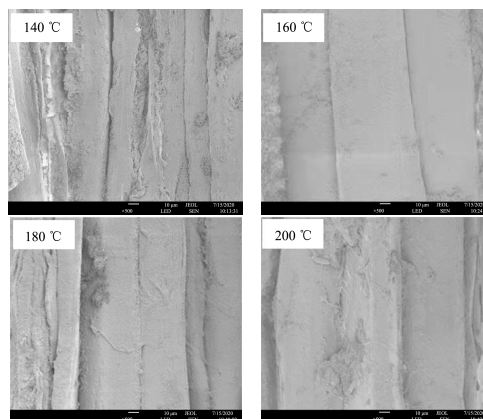


图 4 不同烤制温度-时间对带鱼鱼块肌纤维扫描电镜图

Fig.4 Scanning electron microscopic images of myofibers of *Trichiurus haumela* with different baking temperature-time

根据表 2 可知不同烤制温度下鱼块达到 70% 的水分含量所需的时间, 即 140 °C-24 min 3 s、160 °C-15 min 37 s、180 °C-10 min 42 s、200 °C-10 min 2 s, 在此条件

下测定其肌纤维结构变化。鱼肉在加工过程中，由于蛋白质变性以及加工过程中肌纤维的各种活动影响着鱼肉制品的微观结构，使得鱼肉制品形成不同的质地、口感。肌纤维的组织学特性与肌肉品质特别是食用品质有着密切关系^[30]。图 4 是水分含量为 70% 时不同烤制温度-时间下带鱼鱼块肌纤维扫描电镜图。由图 4 可观察到肌原纤维间的间隙膜上有颗粒状物质，这可能是由于热处理使可溶性胶原蛋白发生降解形成的小分子物质^[31]。在 140 °C-24 min 3 s 条件下鱼肉的肌纤维直径较细，说明其肉质较嫩^[32]。相比较而言，随着烤制温度的升高，样品的肌肉组织结构发生变化，肌纤维膨胀，直径明显变大，肌纤维较粗，表明肉质较差^[33]。Oldan 等^[34]同样也发现随着加工温度的升高，结缔组织会发生严重变性从而形成凝胶，变性凝胶和其他微粒物质会填补空隙，使得肌肉紧绷，从而影响其口感。

2.6 最佳水分含量条件下不同烤制温度-时间

对自热后带鱼蛋白拉曼光谱变化的影响

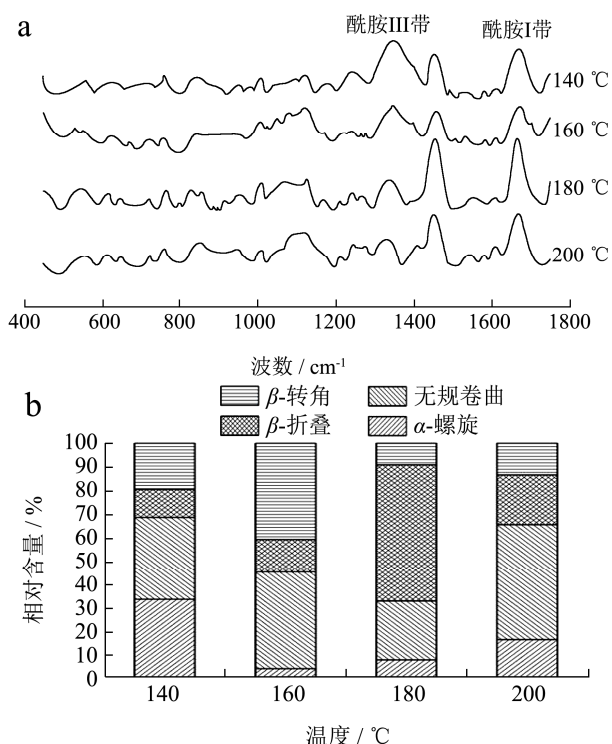


图 5 水分含量为 70% 时不同烤制温度-时间下带鱼鱼块的拉曼谱图 (a) 和蛋白质二级结构组成 (b)

Fig.5 Raman spectra (a) of *Trichiurus haumela* proteins and protein secondary structure composition (b) at different baking temperature-time with a moisture content of 70%

鱼肉蛋白在加工过程中容易发生降解，导致蛋白质结构发生变化，从而影响鱼肉的品质特性。通过拉曼光谱能够较好地反映鱼肉蛋白二级结构的变化，从

而确定蛋白质的变性程度，而且不需要对样品进行前处理，是研究蛋白质结构最常用手段之一^[35]。在拉曼光谱测定中，峰强度可以直接反映样品化学键或基团变化情况。在 1600~1700 cm^{-1} 附近的谱带归属于酰胺 I 带，其主要表示蛋白质的二级结构^[36]，主要形式为 α -螺旋 (1645~1657 cm^{-1})、无规卷曲 (1660~1665 cm^{-1})、 β -折叠 (1665~1680 cm^{-1})、 β -转角 (1680 cm^{-1} 附近)^[37]。在酰胺 III 带中，1260~1300 cm^{-1} 处为高 α -螺旋含量的蛋白质，其与 β -转角存在重合区域，1238~1245 cm^{-1} 处为 β -折叠，无规卷曲则在 1250 cm^{-1} 附近处^[38]。图 5a 为不同烤制温度-时间下带鱼蛋白的拉曼光谱曲线，随着烤制温度的升高，酰胺 I 带发生偏移现象，酰胺 III 带的波峰逐渐降低，说明鱼肉中蛋白质二级结构发生变化。进一步对鱼肉蛋白质二级结构主要形式的相对含量 (图 5b) 进行分析，由图可知与其他烤制条件相比，140 °C-24 min 3 s 时的 α -螺旋相对含量 (33.78%) 较高， α -螺旋呈紧密而无空腔的稳定结构，紧密的 α -螺旋结构对提高蛋白质的稳定性有积极作用^[31]。带鱼在 180 °C-10 min 42 s 烤制时， β -折叠的相对含量较高为 57.82%， α -螺旋相对含量较低为 8.07%，这可能是由于烤制导致鱼肉蛋白质变性，氨基和羧基间的氢键作用遭到破坏， α -螺旋结构解旋，可能转变为 β -折叠结构。200 °C-10 min 2 s 烤制后，带鱼蛋白质中的无规卷曲和 β -转角的相对含量高于 α -螺旋和 β -折叠，说明加热过程中鱼肉蛋白展开，蛋白结构紧密程度以及构象稳定性明显降低，蛋白无序化程度增加^[39]。然而，在较高的烤制温度条件 (160 °C) 下，较长的烤制时间可能也会导致肽链发生解旋，蛋白结构逐渐向无序化转变，从而导致 α -螺旋和 β -折叠的相对含量低于 β -转角和无规卷曲，即 α -螺旋和 β -折叠转化为 β -转角和无规卷曲。相似地，吕彤等^[40]也发现热处理导致肌原纤维蛋白的二级结构不断发生改变，这可能是由于在熵的作用下使得 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲之间进行相互转化。

2.7 最佳水分含量条件下不同烤制温度-时间

对自热后带鱼鱼块品质的影响

将带鱼鱼块在不同烤制条件下烤至含有 70% 的水分含量，对每组样品进行质构测定。表 4 为不同烤制温度-时间对带鱼鱼块质构的影响。由表可知，在同一水分条件下，不同烤制温度-时间所得到的样品质构特性存在显著性差异 ($p < 0.05$)。其中，在 140 °C-24 min 3 s 烤制条件下，带鱼鱼块的弹性和咀嚼性显著高于其他样品 ($p < 0.05$)，这可能是由于随着烤制温度的升高或

是时间的延长, 蛋白质受热变性程度增强, 维持其空间结构的化学键遭到破坏, 细胞间的结合力降低, 肉质变差^[41], 这与带鱼蛋白拉曼光谱变化趋势(图5)基本一致。而各个样品的硬度、粘聚性、胶着度和回复性之间没有显著性差异 ($p>0.05$)。同时对每组样品进行色泽测定, 从而比较不同烤制温度和时间对带鱼鱼块颜色的影响。如图6a所示, 在160℃-15 min 37 s烤制条件下, 样品的L*和W值最大, 这可能是由于烤制温度高且时间长, 使得美拉德反应和焦化反应均会对样品的色泽产生较大影响^[42]。在140℃-24 min 3 s、

180℃-10 min 42 s和200℃-10 min 2 s条件下, 烤制的鱼块在色泽方面无显著性差异 ($p>0.05$)。感官评价结果显示(图6b), 在140℃-24 min 3 s条件下, 不同烤制温度-时间的样品其组织形态、多汁性、硬度和弹性评分上均具有最高值, 即感官总评分值为18.33。在160℃烤制条件下, 样品的色泽值最高, 这与图6a结果一致。同时发现在160、180和200℃条件下, 三组样品的感官总评分值无显著性差异 ($p>0.05$)。综合各个指标分析, 带鱼鱼块在140℃-24 min 3 s烤制条件下, 制得的产品品质较好。

表4 水分含量为70%时不同烤制温度-时间对带鱼鱼块质构的影响

Table 4 The effect of different baking temperature-time on texture of *Trichiurus haumela* with a moisture content of 70%

温度/℃	硬度/g	弹性	粘聚性	胶着度	咀嚼度	回复性
140	132.01±19.33 ^{ab}	0.95±0.03 ^c	0.83±0.04 ^c	108.78±10.89 ^b	103.67±8.0 ^b	0.35±0.03 ^{ab}
160	138.61±1.65 ^b	0.88±0.02 ^b	0.73±0.02 ^{ab}	100.78±1.52 ^{ab}	89.12±1.53 ^a	0.32±0.02 ^{ab}
180	137.77±10.01 ^b	0.83±0.02 ^a	0.70±0.01 ^a	96.18±8.67 ^{ab}	79.56±8.73 ^a	0.29±0.02 ^a
200	110.52±12.98 ^a	0.93±0.03 ^{bc}	0.80±0.06 ^{bc}	87.70±4.93 ^a	81.14±4.50 ^a	0.4±0.07 ^b

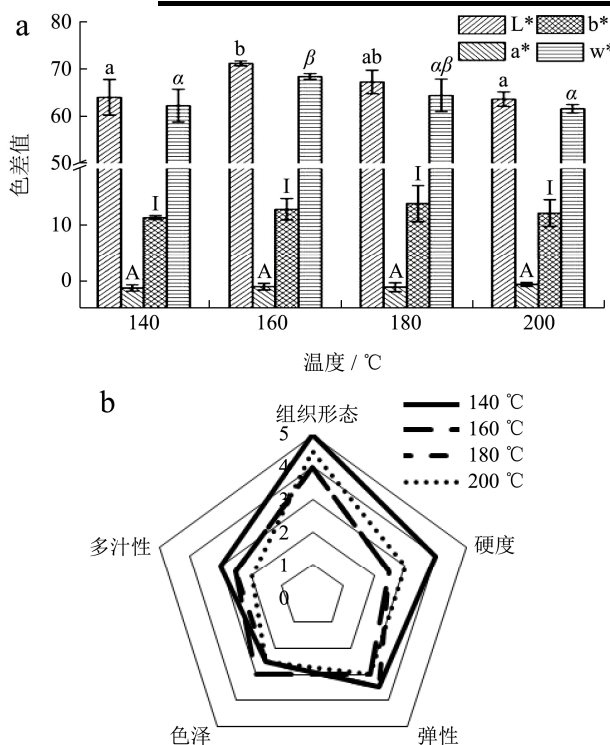


图6 水分含量为70%时不同烤制温度-时间对带鱼鱼块色泽(a)和感官评价(b)的影响

Fig.6 The effect of different baking temperature-time on color (a) and sensory evaluation (b) of *Trichiurus haumela* with a moisture content of 70%

3 结论

带鱼烤制至不同水分含量(70%、60%、50%、40%)、经过灭菌和自热后, 其在色泽、质构、微观结构和蛋白质构象等方面发生了显著变化。随着水分含量的降

低, 自热烤制带鱼鱼块的a*值、b*值、硬度、粘聚性、胶着度、咀嚼度和回复性显著升高 ($p<0.05$), L*值和白度值显著性降低 ($p<0.05$), 而弹性无显著性差异 ($p>0.05$)。烤制至水分含量为70%时感官评价的各个单项评分最高。以上各指标说明自热带鱼在水分含量为70%时食用品质最佳。在此条件下, 140℃烤制时带鱼鱼肌肉纤维直径较细, 肉质较嫩, 具有稳定的蛋白质结构, 感官品质较佳。本研究可为自热鱼类制品的品质提升奠定理论和实践基础。

参考文献

[1] 邵颖.壳聚糖-丁香酚乳液的制备表征及其对冷藏期间带鱼的保鲜作用研究[D].杭州:浙江大学,2019
SHAO Ying. The preparation and characterization of eugenol loaded chitosan emulsions and their preservation effect on haritail meat during cold storage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019

[2] Xiu R Y, Lun Z, Dong G D, et al. Preparation, identification, and activity evaluation of eight antioxidant peptides from protein hydrolysate of hairtail (*Trichiurus japonicas*) muscle [J]. Marine drugs, 2019, 17(1): 23

[3] 赵萌,张磊,朱洁,等.预制条件及干燥方式对自热米饭品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(3):16-21
ZHAO Meng, ZHANG Lei, ZHU Jie, et al. Effects of prefabrication conditions and drying methods on quality of self-heated rice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 16-21

[4] Dong X P, Hou Y W, Wang Y, et al. Effect of

- temperature-time pretreatments on the texture and microstructure of abalone (*Haliotis discus hanai*) [J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(5): 503-511
- [5] Nawaz A, Xiong Z Y, Xiong H G, et al. The effects of fish meat and fish bone addition on nutritional value, texture and microstructure of optimized fried snacks [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(4): 1045-1053
- [6] Consuelo P C, Esther G R, Manuel V, et al. Effect of high-pressure processing pretreatment on the physical properties and colour assessment of frozen European hake (*Merluccius merluccius*) during long term storage [J]. Food Research International, 2018, 112: 233-240
- [7] Huang X H, Qi L B, Fu B S, et al. Flavor formation in different production steps during the processing of cold-smoked Spanish mackerel [J]. Food Chemistry, 2019, 286: 241-249
- [8] 王焕庆,李学英,杨宪时,等.水分含量对烤虾品质和贮藏性的影响[J].现代食品科技,2011,27(8):901-904
WANG Huanqing, LI Xueying, YANG Xianshi, et al. Effect of moisture content on the quality and storage properties of roast shrimp [J]. Modern Food Science and Technology, 2011, 27(8): 901-904
- [9] 孙红霞,黄峰,张春江,等.肉品嫩度的影响因素以及传统炖煮方式对肉制品嫩度的影响[J].食品科技,2016,42(11):94-98
SUN Hongxia, HUANG Feng, ZHANG Chunjiang, et al. Influence of stewing processing on the tenderness of meat products [J]. Food Science and Technology, 2016, 42(11): 94-98
- [10] Chang L L, Lin S Y, Zou B W, et al. Effect of frying conditions on self-heating fried Spanish mackerel quality attributes and flavor characteristics [J]. Foods, 2021, 10(98): 98
- [11] Wang K Y, Bao Y L, Wang Y, et al. Effects of stepwise steaming treatments at different temperatures on the eating quality of fish: a case study of large-mouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 132: 109844
- [12] Yu X, Li L Q, Xue J, et al. Effect of air-frying conditions on the quality attributes and lipidomic characteristics of surimi during processing [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 60(4): 102305
- [13] Hu L L, Ren S J, Shen Q, et al. Protein oxidation and proteolysis during roasting and *in vitro* digestion of fish (*Acipenser gueldenstaedtii*) [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2017, 98(14): 5344-5351
- [14] 贺雪华.腌制和烘烤工艺对半干秋刀鱼品质的影响[D].重庆:西南大学,2018
HE Xuehua. Effects of pickling and baking on the quality of semi-dry saury [D]. Chongqing: Southwest University, 2018
- [15] 常莉莉,崔浩哲,张志慧,等.海水鱼丸加工工艺及外源添加剂对高温杀菌后鱼丸品质保持研究[J].食品工业科技,2020, 41(23):195-202
CHANG Lili, CUI Haozhe, ZHANG Zhihui, et al. Study on processing technology and quality maintenance of seawater fish balls on external additives after thermal sterilization [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(23): 195-202
- [16] Bolumar T, Bindrich U, Toepfl S, et al. Effect of electrohydraulic shockwave treatment on tenderness, muscle cathepsin and peptidase activities and microstructure of beef loin steaks from Holstein young bulls [J]. Meat Science, 2014, 98(4): 759-765
- [17] 田莉娟,许艳顺,姜启兴,等.水分含量对即食酥脆鲫鱼质构及色泽的影响[J].食品工业科技,2015,16:104-107,113
TIAN Lijuan, XU Yanshun, JIANG Qixing, et al. Effect of moisture content on the texture and color of instant crispy crucian carp [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 16: 104-107, 113
- [18] 涂敏建,迟海,杨宪时,等.不同水分含量对南极磷虾烤虾质构和色泽的影响[J].现代食品科技,2012,28(9):1102-1105
TU Minjian, CHI Hai, YANG Xianshi, et al. Effect of different moisture content on the texture and chroma of roast Antarctic krill [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(9): 1102-1105
- [19] 赵钜阳,于海龙,王雪,等.油炸温度对孜然羊肉片品质与水分分布相关性的研究[J].食品研究与开发,2015,36(16):4-9
ZHAO Juyang, YU Hailong, WANG Xue, et al. The relationship between quality and water distribution of cumin lamb as affected by different frying temperature [J]. Food Research and Development, 2015, 36(16): 4-9
- [20] Amiryousefi M R, Mohebbi M, Khodaiyan F. Applying an intelligent model and sensitivity analysis to inspect mass transfer kinetics, shrinkage and crust color changes of deep-fat fried ostrich meat cubes [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 172-178
- [21] Liu J H, Fang C H, Luo Y H, et al. Effects of konjac oligo-glucomannan on the physicochemical properties of frozen surimi from red gurnard (*Aspitrigla cuculus*) [J]. Food

- Hydrocolloids, 2019, 89(1): 668-673
- [22] 李君珂,孙雪梅,柳全文,等.绿原酸对不同加热方式的草鱼品质的影响[J].食品科学,2020,41(4):80-85
LI Junke, SUN Xuemei, LIU Quanwen, et al. Effect of chlorogenic acid on qualities of grass carp processed by different cooking methods [J]. Food Science, 2020, 41(4): 80-85
- [23] Puangsombat K, Smith J S. Inhibition of heterocyclic amine formation in beef patties by ethanolic extracts of rosemary [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(2): T40-T47
- [24] 顾赛麒,戴王力,鲍嵘斌,等.煮制工艺对中国对虾品质的影响[J].食品科学,2020,41(2):276-283
GU Saiqi, DAI Wangli, BAO Rongbin, et al. Effect of cooking on the quality of *Fenneropenaeus chinensis* [J]. Food Science, 2020, 41(2): 276-283
- [25] 王阳.不同预制条件和熟化方式对鲍鱼品质的影响[D].大连:大连工业大学,2017
WANG Yang. Effect of different pre-prepared and cooking methods on the quality of abalone (*Haliotis discushanai*) [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017
- [26] 李明杨,牛希跃,许倩,等.新疆传统腌制对烤羊肉食用品质及杂环胺含量的影响[J].食品科学,2021,42(1):115-123
LI Mingyang, NIU Xiyue, XU Qian, et al. Effects of traditional marinating in Xinjiang on edible quality and heterocyclic amines formations of roast lamb [J]. Food Science, 2021, 42(1): 115-123
- [27] 赵文宇,赵美钰,王可心,等.油炸方式对高白鲑肌肉食用品质的影响[J].食品科学,2021,42(4):72-79
ZHAO Wenyu, ZHAO Meiyu, WANG Kexin, et al. Effect of frying methods on the eating quality of *Coregonus peled* meat [J]. Food Science, 2021, 42(4): 72-79
- [28] Fox J B, Ackerman S A, Jenkins R K. Effect of anionic gums on the texture of pickled frankfurters [J]. Journal of Food Science, 1983 48(4): 1031-1035
- [29] Serra X, Ruizramirez J, Arnau J, et al. Texture parameters of dry-cured ham m. biceps femoris samples dried at different levels as a function of water activity and water content [J]. Meat Science, 2005, 69(2): 249-254
- [30] 秦召,康相涛,李国喜.肌纤维组织学特性与肌肉品质的关系[J].安徽农业科学杂志,2006,22:5872-5873,5878
QIN Zhao, KANG Xiangtao, LI Guoxi. Relationship between histology characteristics of muscle fiber and meat quality [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 22: 5872-5873, 5878
- [31] 胡嘉颖.原料水分对熟化猪肉品质特性的影响及机制研究[D].广州:华南理工大学,2016
HU Jiaying. Effects and mechanism of raw material moisture content on quality properties of pork cooked [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016
- [32] 胡玥,杨水兵,余海霞,等.微冻保鲜方法对带鱼品质及组织结构的影响[J].食品科学,2016,37(18):290-297
HU Yue, YANG Shuibing, YU Haixia, et al. Effect of superchilling on the quality and muscle tissue structure of *Trichiurus haumela* [J]. Food Science, 2016, 37(18): 290-297
- [33] Chriki S, Gardner G E, Jurie C, et al. Cluster analysis application identifies muscle characteristics of importance for beef tenderness [J]. BMC Biochemistry, 2012, 13(1): 29
- [34] Oldan M, Antequera T, Martin A, et al. Effect of different temperature-time combinations on physicochemical, microbiological, textural and structural features of sous-vide cooked lamb loins [J]. Meat Science, 2013, 93(3): 572-578
- [35] Kobay A Y, Mayer S G, Park J W. FT-IR and Raman spectroscopies determine structural changes of tilapia fish protein isolate and surimi under different comminution conditions [J]. Food Chemistry, 2017, 226: 156-164
- [36] Alixa J P, Pedanou G, Berjot M. Fast determination of the quantitative secondary structure of proteins by using some parameters of the Raman amide I band [J]. Journal of Molecular Structure, 1988, 174: 159-164
- [37] 蓝天婵,于冰,孙京新,等.产黄青霉发酵鸭肉制品食用品质、微观结构及物理化学特性变化[J].食品科学,2020,41(21): 36-43
LAN Tianchan, YU Bing, SUN Jingxin, et al. Effect of fermentation with *Penicillium chrysogenum* on eating quality, microstructure and physicochemical properties of duck meat [J]. Food Science, 2020, 41(21): 36-43
- [38] Herrero A M. Raman spectroscopy for monitoring protein structure in muscle food systems [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2008, 48(6): 512-523
- [39] Moriyama Y, Kaw A Y, Takeda K. Protective effect of small amounts of sodium dodecyl sulfate on the helical structure of bovine serum albumin in thermal denaturation [J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2003, 257(1): 41-46

(下转第 327 页)