

轻度预制后高速空气循环炸带鱼的品质变化分析

李孟华¹, 王金梅², 黄洁友¹, 刘晓琪¹, 房传栋¹, 林慧敏^{1*}, 张宾¹

(1. 浙江海洋大学食品与药学院, 浙江舟山 316000) (2. 荣成泰祥食品股份有限公司, 山东威海 264309)

摘要: 以舟山带鱼为研究对象, 考察高速空气循环炸对轻度预制后带鱼品质的影响。先分别对 160、170、180 °C 下预油炸 20、40、60 s 的带鱼的油脂含量及感官进行测定, 170 °C、20 s 时带鱼油脂含量 (8.25%) 较低且感官评分最佳。再将预油炸带鱼于 190 °C 下分别空气炸 12、16、20 min, 测定其感官评价、质构、色差、水分含量、水分活度、游离氨基酸及微观结构。随着空气炸时间的延长, 带鱼的水分含量及水分活度呈下降趋势, 红度值与黄度值则呈上升趋势, 亮度值明显下降, 游离氨基酸含量显著上升 ($P<0.05$); 通过 HE 染色观察发现, 炸制时间越长, 肌肉组织间隙越大, 肌纤维断裂, 肌纤维完整性显著下降。空气炸 16 min 时感官评分最高, 色泽金黄, 且弹性 (0.68 mm) 和硬度 (791.67 g) 良好, 肌纤维完整紧密。综上所述并结合感官评定, 建议 170 °C、20 s 预油炸后在 190 °C、16 min 的条件下对带鱼进行空气炸。该文可为带鱼不同热处理方式提供一定的指导意见。

关键词: 轻度预制; 空气炸; 带鱼; 品质

文章编号: 1673-9078(2025)06-162-170

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0588

Quality Changes in Lightly Pre-fried Hairtail after Air Frying with Rapid Air Circulation

LI Menghua¹, WANG Jinmei², HUANG Jieyou¹, LIU Xiaoqi¹, FANG Chuandong¹, LIN Huimin^{1*}, ZHANG Bin¹

(1. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

(2. Rongcheng Taixiang Food Co. Ltd., Weihai 264309, China)

Abstract: The effects of air frying with rapid air circulation on the quality of lightly pre-fried Zhoushan hairtail were studied. The oil content and sensory properties of hairtail after pre-frying at 160, 170, and 180 °C for 20, 40, and 60 s were determined. The results revealed that hairtail pre-fried at 170 °C for 20 s had a relatively low oil content (8.25%) and the highest sensory score. Following this step, pre-fried hairtail was air-fried at 190 °C for 12, 16, and 20 min, and the sensory properties, texture, color difference, moisture content, water activity, free amino acid content, and microstructure were determined. The moisture content and water activity decreased as air-frying time increased. The redness and yellowness values increased, and brightness decreased obviously. The content of free amino acids rose significantly ($P<0.05$). Hematoxylin and Eosin staining revealed that longer air frying times lead to larger gaps between muscle fibers, muscle fiber breakage, and a significant decline in muscle fiber integrity. The highest sensory scores were obtained at 16 min of air frying. The hairtail had a golden color, good elasticity (0.68 mm) and hardness (791.67 g), and intact and compact muscle fibers. In conclusion, based on the

引文格式:

李孟华,王金梅,黄洁友,等.轻度预制后高速空气循环炸带鱼的品质变化分析[J].现代食品科技,2025,41(6):162-170.

LI Menghua, WANG Jinmei, HUANG Jieyou, et al. Quality changes in lightly pre-fried hairtail after air frying with rapid air circulation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 162-170.

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2100504); 浙江省特支计划科技创新项目 (2020R52027); 浙江省基础公益项目 (LTGN24C200008)

作者简介: 李孟华 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: lmh15005726451@163.com

通讯作者: 林慧敏 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品精深加工, E-mail: linhuixiaomin@126.com

above findings and the sensory evaluation results, pre-frying hairtail at 170 °C for 20 s followed by air frying at 190 °C for 16 min is recommended. This study can provide insights into different heat treatment methods for hairtail.

Key words: light pre-preparation; air frying; hairtail; quality

带鱼 (*Trichiurus haumela*) 在我国东南沿海的渔业经济中占据重要地位, 不仅具有极高的经济价值, 还具有丰富的营养价值, 深受广大消费者的追捧。但带鱼极易受到腐败微生物的侵袭, 从而发生腐败变质, 对带鱼进行热处理制成带鱼预制品可以降低由于带鱼腐败变质带来的损失^[1]。因此优化带鱼热处理方式以及分析探索其品质变化具有重要意义。

在日常生活中带鱼的热处理方式种类繁多^[2]。油炸食品既具有独特的风味, 又能赋予食品酥脆的口感和金黄的色泽, 同时能有效延缓带鱼的腐败变质, 因此深受广大消费者的追捧^[3]。然而油炸食品油脂含量较高, 过量食用高油脂食品会增加肥胖、高血脂、心脑血管等疾病的风险, 并且油炸食品中含有大量有毒有害物质, 包括丙烯酰胺、反式脂肪酸等, 会导致消费者罹患心血管疾病和癌症的风险升高^[4]。

高速空气循环炸, 又称空气炸, 作为一种新型的热处理技术, 在密闭空间内使得高温循环的空气全方位接触食品表面, 同时结合远红外加热技术, 在食品表面形成酥脆的金黄色外壳^[5], 无油炸制的方式还可极大地降低食品的含油量。谢静等^[6]研究发现, 空气炸作为新兴烹饪方式, 相对健康的同时还能降低食品中营养物质的流失程度。但空气炸无法替代油炸带来的风味与口感, 因为空气炸锅在加热时, 高速旋转的热风会带走食物中的大量水分, 影响食物口感^[7]。卢琳等^[8]研究表明预油炸结合空气炸制的烹饪方式下鱼饼的脂肪含量显著低于纯油炸, 气味和滋味也优于纯空气炸产品。

基于此, 本研究以带鱼为研究对象, 通过轻度预制与空气炸结合的方式, 比较其感官评价、质构、色差、水分含量、水分活度、游离氨基酸及微观结构, 探究轻度预制对空气炸带鱼的品质的影响, 以期开发健康、低脂且有良好风味的带鱼产品提供一定的技术支撑与理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜带鱼每条约 0.25 kg, 购于舟山国际水产城, 将新鲜带鱼置于装有冰袋的泡沫箱内, 1 h 内运回

实验室; 大豆油, 益海嘉里(武汉)粮食工业有限公司; 蛋清液, 苏州欧福蛋业股份有限公司; 马铃薯淀粉, 佛山市海天(宿迁)调味食品有限公司; 三氯乙酸, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 4% 多聚甲醛溶液, 北京雷根生物技术有限公司; 石油醚, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

HD9741 空气炸锅, 新安电器(深圳)有限公司; DF-40B 电炸锅, 中山市斯乐得电器有限公司; MC05Q1-403L2 绞肉机, 广东美的生活电器制造有限公司; CR-10 型便携式色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; HD-3A 型水分活度测定仪, 常州德社精密仪器有限公司; LA8080 氨基酸自动分析仪, 日本株式会社日立高新技术公司; CF-16RN 高速冷冻多用途离心机, 日本日立公司; T18 digital ULTRA-TURRAX 数显匀浆机, 德国 IKA 公司; MS-Pro 型物性测试仪, 美国 FTC 公司; SZT-06A 脂肪测定仪, 苏州市天威仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

将带鱼切成 5.0 cm×5.0 cm×1.0 cm 大小的鱼块, 将待用鱼块表面均匀裹上蛋清与淀粉后备用。

1.3.2 带鱼预炸方法

油炸: 在油炸锅中倒入 2 L 新鲜大豆油, 160、170、180 °C 的油温下分别将带鱼预炸 20、40、60 s, 捞出沥干, 冷却待用。

空气炸: 空气炸锅在 190 °C 预热 5 min 后, 将预炸过的带鱼复炸 12、16、20 min。

1.3.3 带鱼预炸条件

综合油脂含量与感官评定的结果选取最佳预油炸条件后进行复炸, 测定其水分活度、感官评定、色差、质构、水分含量、微观结构和游离氨基酸。

1.3.3.1 油脂含量

参考 GB5009.6-2016^[9] 中索氏抽提法测定预炸后带鱼的油脂含量。

1.3.3.2 感官评定

挑选 10 名经过感官培训的食品专业研究生(男

女各 5 人) 组建感官评定小组, 分别对色泽、质地、风味这 3 个指标进行打分, 各指标评价标准及分数见表 1。

表 1 感官评价标准
Table 1 Sensory evaluation criteria

项目	评分标准	评分
色泽 (10分)	颜色呈白色, 不够均匀	1~4
	颜色偏浅, 较均匀	5~7
	颜色呈淡黄色, 均匀, 富有食欲	8~10
质地 (10分)	鱼肉松散, 不酥脆, 外壳破损	1~4
	鱼肉较紧实, 较酥脆, 略有破损	5~7
	鱼肉紧实且酥脆, 外壳无破损	8~10
风味 (10分)	鱼香味不明显, 有油脂味或其他异味	1~4
	鱼香味较浓郁, 有轻微油脂味或其他异味	5~7
	鱼香味浓郁, 无油脂味和其他异味	8~10

1.3.4 水分活度

参照 GB 5009.238-2016^[10] 采用水分活度仪测定水分活度。

1.3.5 感官评定

挑选 10 名经过感官培训的食品专业研究生 (男女各 5 人) 组建感官评定小组, 分别对色泽、质地、风味、口感、可接受性这 5 个指标进行打分, 各指标评价标准及分数见表 2。

表 2 感官评价标准
Table 2 Sensory evaluation criteria

项目	评分标准	评分
色泽 (10分)	颜色呈暗褐色, 不够均匀	1~4
	颜色呈淡黄色, 较均匀	5~7
	颜色呈金黄色, 均匀, 富有食欲	8~10
质地 (10分)	鱼肉松散, 完整性差	1~4
	鱼肉较紧实, 完整性较好	5~7
	鱼肉紧实且完整	8~10
风味 (10分)	鱼香味不明显, 有焦味或其他异味	1~4
	鱼香味较浓郁, 有轻微焦味或其他异味	5~7
	鱼香味浓郁, 无焦味和其他异味	8~10
口感 (10分)	肉质过硬或过软, 不酥脆, 咀嚼性差	1~4
	肉质偏软或偏硬, 较酥脆, 有一定咀嚼性	5~7
	肉质软硬适中, 口感酥脆, 咀嚼性良好	8~10
可接受性 (10分)	低	1~4
	适中	5~7
	高	8~10

1.3.6 色差测定

测试前分别用标准白板与标准黑板进行校准。取出炸制好的带鱼, 将色差仪测试口对准鱼块中心部位, 分别记录鱼块的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。测定时, 每组重复 3 次并取平均值。

1.3.7 质构测定

参考丁怡萱等^[11] 方法并稍作修改。选取炸制好的带鱼, 采用 TPA 模型进行测定, 测试探头为 P/36R, 测试速度为 1.0 mm/s, 样品变形为 30%, 保持时间为 3 s, 测前、测中和返回速率均为 1 m/s, 分别测定空气炸 12、16、20 min 的带鱼的质构特性。

1.3.8 水分含量测定

参照 GB 5009.3-2016^[12] 中 105 °C 干燥恒质量法测定带鱼样品。

1.3.9 苏木精伊红染色法 (HE)

苏木精伊红染色法 (HE) 参考 Fu 等^[13] 的方法稍加修改。将带鱼切成 1 cm×1 cm×0.5 cm 立方体后用 4% 多聚甲醛固定, 进行石蜡包埋、切片、染色、封片, 在光学显微镜下观察带鱼的肌肉组织。

1.3.10 游离氨基酸

参考 Akagündüz 等^[14] 的方法并稍作修改。取 5 g 样品置于 25 mL、10% (m/V) 的三氯乙酸中进行均质, 随后在 4 °C、10 000 r/min 的高速冷冻离心机中离心 10 min, 离心完毕后取上清液过 0.22 μm 滤膜, 然后于全自动氨基酸分析仪中进行检测。

1.4 数据处理

采用 Origin 2022 进行数据处理及画图分析, 数据均为 3 次平行试验平均值, 本试验使用 SPSS 统计分析软件进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 预油炸条件

2.1.1 油脂含量

油炸食品的吸油机理是多因素共同作用的复杂过程, 主要包括水分替代、表面活性剂和冷凝机制^[15,16]。如图 1 所示, 在同一油炸温度下, 带鱼的含油量随着油炸时间的延长显著性上升 ($P<0.05$), 且油炸温度对含油量的影响趋势与油炸时间相同, 均呈正相关。通过傅宝尚等^[17] 实验发现, 油炸带鱼的油分含量在脱油后依然高达

40%~50%，而轻度油炸油脂含量为 8.17%~16.40%，说明轻度油炸可显著降低带鱼的油脂含量。经分析后可知，油炸过程中由于温度梯度产生热传导，温度升高导致食品内部的水分蒸发，食品表面会形成孔隙，为油分的进入提供了空间，因此食物吸收的油量取决于油炸过程中水分的脱水程度^[16]，而食物的脱水程度取决于油炸温度和时间。160℃、20 s 时由于温度低、时间短，带鱼水分替代不充分导致其油脂含量最低。而 180℃、60 s 时温度高、时间长，带鱼内部水分扩散速率最快，脱水程度最高，且过高的温度导致带鱼外壳开裂严重，因此此时带鱼吸油量增大。同时油炸温度的升高会加速油脂的劣变，这也可能会导致油脂含量的升高。160℃、20 s 与 170℃、20 s 的油脂含量无显著差异 ($P>0.05$)，因此需要综合感官评定结果选取最佳预油炸条件。

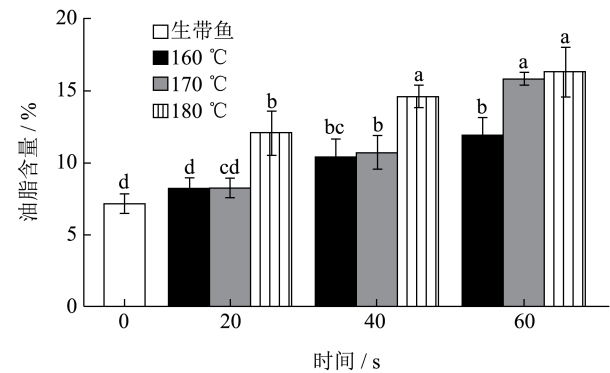


图 1 不同油炸温度和时间对带鱼油脂含量的影响

Fig.1 Effect of different frying temperatures and time on the oil content of the hairtail

注：不同的小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)。图 3、4、7 同。

2.1.2 感官评定

由表 3 可知，随着油炸温度的升高，带鱼的色泽评分显著上升 ($P<0.05$)，而质地和风味评分则呈先上升后下降的趋势，170℃时质地和风味最佳。结果显示，油炸温度越高，时间越长，带鱼外壳越酥脆，Wang 等^[16]在探究如何提高预油炸食品脆性时，也同样得出通过控制油炸温度与时间可以提高油炸食品酥脆程度的结论。油炸食品的酥脆程度主要由脆皮层决定，而脆皮层的形成主要是由食品表面的水分蒸发造成的^[16]。因此，油炸温度越高，水分蒸发率越高，表皮就越酥脆。但 180℃时带鱼外壳破损严重，完整性较差，所以其质地评分低于 170℃。同时 180℃时带鱼油脂味较重，结合图 1 分析可知这可能是由于高温导致带鱼过度吸油，吸

油会使食物味道油腻，而油腻感是大多数消费者不喜欢的感官属性，因此需要降低油炸温度以减少食物的油腻感。160℃时带鱼虽然吸油量较少，但由于油炸温度过低，时间过短，带鱼具有较浓的鱼腥味和生油味。而 170℃时带鱼质地软硬适中，酥脆完整，外壳无破损，有浓郁的鱼香味，且无其他异味，结合油脂含量的测定结果，最终选取 170℃，20 s 作为预油炸条件。

表 3 不同油炸温度和时间对带鱼感官的影响

Table 3 Effect of different frying temperatures and time on the sensory characteristics of the hairtail

条件	色泽 (10 分)	质地 (10 分)	风味 (10 分)
160℃ 20 s	8.41 ± 0.64 ^c	7.14 ± 0.38 ^{cd}	6.57 ± 0.53 ^c
160℃ 40 s	8.47 ± 0.60 ^c	7.57 ± 0.53 ^{bc}	6.86 ± 0.69 ^d
160℃ 60 s	8.44 ± 0.70 ^c	7.71 ± 0.76 ^{bc}	7.13 ± 0.39 ^c
170℃ 20 s	8.69 ± 0.58 ^b	9.14 ± 0.69 ^a	9.00 ± 0.58 ^a
170℃ 40 s	8.66 ± 0.51 ^b	9.00 ± 0.58 ^a	8.86 ± 0.65 ^a
170℃ 60 s	8.76 ± 0.92 ^b	8.14 ± 0.69 ^b	8.14 ± 0.69 ^b
180℃ 20 s	8.93 ± 0.61 ^a	7.29 ± 0.76 ^{cd}	7.06 ± 0.20 ^c
180℃ 40 s	9.00 ± 0.58 ^a	6.86 ± 0.69 ^d	6.71 ± 0.49 ^{dc}
180℃ 60 s	9.07 ± 0.61 ^a	6.71 ± 0.49 ^d	6.29 ± 0.49 ^f

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

2.2 带鱼空气炸方法

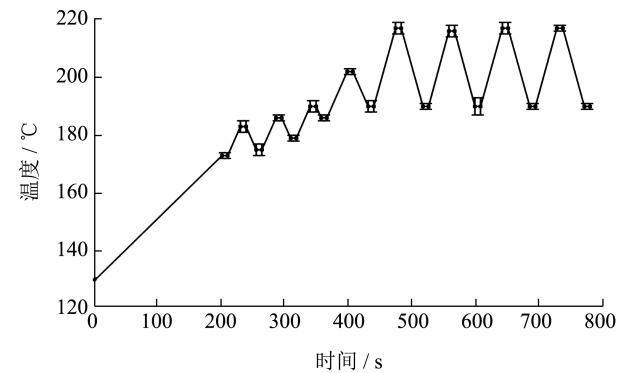


图 2 空气炸锅在炸制过程中的温度变化

Fig.2 Temperature change of the air fryer during frying

如图 2 所示，空气炸制加工前设备先预热 5 min，防止升温过慢。设定温度为 190℃，开始炸制后锅内温度从 129℃直线上升至 173℃，随后呈波动上升趋势，温度最高可达到 217℃，最后温度波动稳定在 190~217℃。说明在炸制过程中锅内温度始终呈规律波动状态，并非始终维持在 190℃。经分析后可知这可能与空气炸锅的工作原理有关。作为一

种新型的热处理技术，空气炸锅通过高温空气循环这一核心技术与远红外加热技术的结合，在短时间内高效加热食物。高速空气循环系统利用风扇产生高速气流，该气流经过热管加热后在炸锅内形成循环，高速热流进入炸筐内，对食物进行加热处理，完成后被风扇抽吸向上排出锅外，同时温度较低的气流通过风扇循环继续经过热管加热处理，实现内部循环^[5]。由于空气炸锅在加热过程中需不断进行空气循环加热这一系统特性，因此炸制过程中的锅内温度会随空气循环发生规律波动。

2.3 水分活度

水分活度是控制食品中微生物稳定性的关键指标，降低水分活度可以减少为微生物生命活动所提供的水分，从而抑制大多数微生物的繁殖^[18]。根据王君等^[7]研究可知，空气炸仍旧需要通过油脂进行辅助煎炸，因此本实验通过第1段预油炸增加带鱼油脂含量，从而辅助第2段空气炸。由图3可知，带鱼的水分活度在高温炸制过程中呈下降趋势但无显著性差异 ($P>0.05$)，且复炸16 min与20 min时的水分活度基本一致，均为0.95。总体水分活度较高，这可能是由于带鱼在第2段炸制初期，高温促进了带鱼表面水分的蒸发，马铃薯淀粉外壳迅速硬化^[11]，阻碍了水分替代反应的进行，使得带鱼内部水分未能继续大量蒸发，因此需要适当延长复炸时间从而降低鱼块的水分活度。

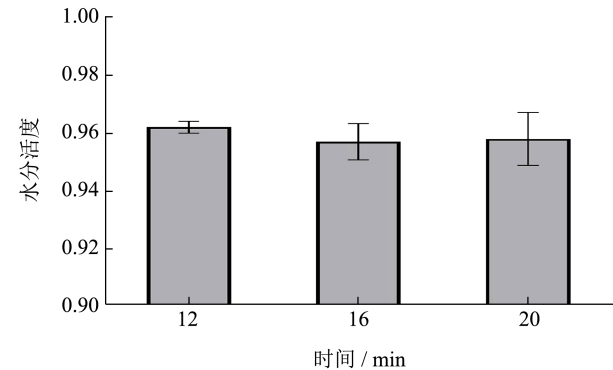


图3 不同炸制时间对轻度预制带鱼水分活度的影响
Fig.3 Effect of different frying conditions on the water activity of lightly prefabricated hairtail

2.4 水分含量

由图4可知，未进行空气复炸时带鱼的水分含量高达61.30%，经空气复炸后带鱼的水分含量随炸制时间的延长显著降低 ($P<0.05$)，分别为55.44%、52.21%、48.68%，表明延长空气炸制时间

会带走样品更多的水分。空气炸制时由于温度梯度产生热传导，同时在高温的作用下液态水转化为水蒸汽，进而在食品内部形成水分梯度，导致食品内部的水分被蒸发到食品表面^[16]。丁怡萱等^[11]同样研究发现延长炸制时间会降低带鱼内部的气压，促进水分的蒸发流失。而空气炸12 min时由于炸制时间过短，内部水分蒸发不完全，大部分的水分滞留在带鱼中，因此12 min时带鱼的水分含量相对较高，相比于16 min和20 min分别增加了3.23%、6.76%。同时长时间高温加热会导致蛋白质变性加剧，疏水性增强，肌纤维结构被破坏，锁水能力下降，从而导致水分流失^[11]，结合带鱼的微观结构可以进一步印证肌纤维结构对样品水分含量的影响。

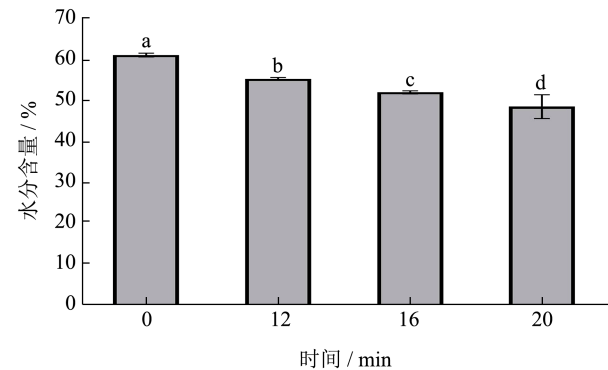


图4 不同炸制条件对轻度预制带鱼水分含量的影响
Fig.4 Influence of different frying conditions on the water content of lightly prefabricated hairtail

2.5 感官评定

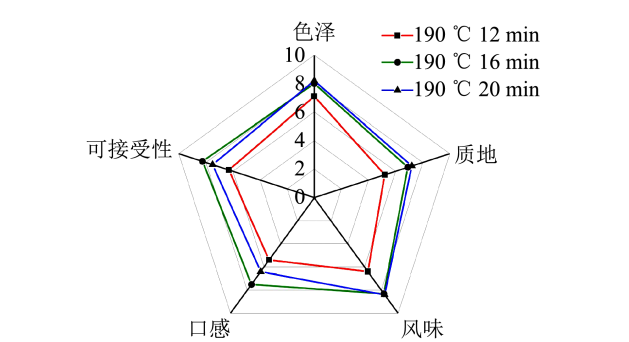


图5 不同炸制条件对轻度预制带鱼感官的影响
Fig.5 Effect of different frying conditions on the senses of lightly prefabricated hairtail

由卢琳等^[8]研究可知预油炸+空气炸时气味和滋味优于纯空气炸，因此对纯空气炸带鱼的感官评定不做赘述。由图5可知，在同一炸制温度下，带鱼的色泽、质地、风味的得分随空气炸制时间的延长而上升，但在总体可接受性与口感两项评分中

190 ℃、16 min 的带鱼相较于 190 ℃、20 min 的带鱼得分更高。通过感官评分总体分析可知 190 ℃、12 min 的带鱼由于炸制时间过短，色泽暗淡，质地较差，酥脆感不足，鱼香味不够明显，嚼劲较差，不易被大众所接受。而炸制时间过长的带鱼过于酥脆因此缺乏嚼劲，口感下降。综上所述，炸制 16 min 时带鱼颜色金黄，质地酥脆，具有浓郁的鱼香味且有嚼劲，品质更佳。

2.6 色差

色泽是反应炸制食品品质的重要指标，空气复炸时间对带鱼的影响如图所示。*L** 值代表亮度，*a** 值代表红度值，*b** 值代表黄度值。如表 4 可知，带鱼的亮度值为 12 min (67.80) > 16 min (63.54) > 20 min (54.82)，且随着空气复炸时间的延长，红度值和黄度值则显著上升 ($P < 0.05$)。罗晓林等^[19]在研究空气油炸鱿鱼的品质特征变化时，同样发现延长加热时间会促进色素积累，导致红度值和黄度值的增大。一方面，可能是复炸过程中的高温会迅速带走带鱼的水分从而减轻光反射^[20]。另一方面，长时间高温空气复炸会促进带鱼脂质氧化，导致美拉德反应和焦糖化反应的发生^[21]，产生褐变物质，褐变强度随炸制时间的延长而增加^[22]，从而引起带鱼红度值和黄度值的升高以及亮度值的下降。除此以外红度值还会受肌肉色素含量的影响，高温炸制过程中肌红蛋白氧化变性为含氧肌红蛋白可能是红度值升高的原因之一^[23]。根据卢琳等^[8]研究已知，纯空气炸的红度值和黄度值远低于预油炸+空气炸以及纯油炸的鱼饼，色泽较差。综上可得出，炸制时间会影响食物的色泽，因此炸制时间不宜过长或过短，否则会降低消费者的接受度。

表 4 不同炸制条件对轻度预制带鱼色泽的影响
Table 4 Influence of different frying conditions on the color of lightly prefabricated hairtail

空气炸时间/min	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>
12	67.80 ± 0.68 ^a	-3.80 ± 0.24 ^b	11.11 ± 0.56 ^b
16	63.54 ± 0.96 ^b	-0.23 ± 0.33 ^a	11.69 ± 0.45 ^b
20	54.82 ± 1.42 ^c	0.10 ± 0.24 ^a	12.74 ± 0.46 ^a

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.7 HE 染色

组织学中普遍通过石蜡切片 HE 染色技术观察

与分析组织细胞的形态结构。轻度油炸 (170 ℃，20 s) 后空气炸 12、16、20 min 的带鱼肌肉组织结构分别如图 6 所示。空气炸 12 min 的带鱼肌肉纤维紧密有序、均匀完整，肌纤维轮廓呈块状；炸制时间增加至 16 min 后带鱼肌纤维的紧密性遭到破坏，肌纤维开始出现溶断现象，但排列依然相对均匀有序；空气炸 20 min 时带鱼肌肉组织间隙扩大，肌肉疏松，组织结构断裂现象更加严重，肌纤维紧密性与完整性显著下降。这是由于热加工时间延长后蛋白质降解，变性加剧，肌纤维结构随之崩塌，而肌肉组织结构又会影响肌肉的持水性，肌肉组织间隙越大，持水能力越差，这与水分含量测定结果一致，同时水分损失又会引起肌纤维的进一步收缩^[24]，因此炸制时间越长，肌肉组织间隙越大，持水能力越差，水分含量越低。但结合感官评定结果推测，空气炸 12 min 时由于炸制时间过短，肉质并没有完全炸熟，因此其肌肉组织结构紧密性高；而 20 min 时由于炸制时间过长，肌肉组织发生断裂导致口感下降。综上所述，16 min 时带鱼组织结构最佳。

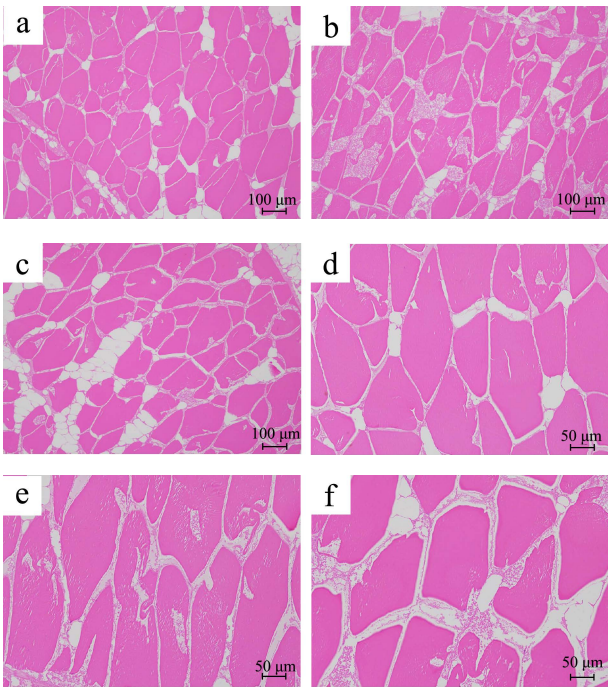


图 6 不同炸制条件下带鱼肌肉组织的 HE 染色图

Fig.6 HE staining map of muscle tissue of low-oil prefabricated hairtail under different frying conditions

注：a：190 ℃ 12 min (100 ×)；b：190 ℃ 16 min (100 ×)；c：190 ℃ 20 min (100 ×)；d：190 ℃ 12 min (200 ×)；e：190 ℃ 16 min (200 ×)；f：190 ℃ 20 min (200 ×)。

表 5 不同炸制条件对轻度预制带鱼质构特性的影响

条件	硬度	弹性	内聚性	咀嚼性	胶黏性	回复性
190 ℃ 12 min	859.39 ± 44.15 ^a	0.72 ± 0.02 ^a	0.71 ± 0.02 ^a	386.49 ± 20.71 ^a	614.85 ± 51.75 ^a	1.43 ± 0.07 ^a
190 ℃ 16 min	791.67 ± 25.23 ^a	0.68 ± 0.02 ^b	0.68 ± 0.02 ^b	338.70 ± 10.16 ^b	533.76 ± 31.53 ^{ab}	1.14 ± 0.07 ^b
190 ℃ 20 min	706.41 ± 39.65 ^b	0.67 ± 0.02 ^b	0.67 ± 0.01 ^b	304.11 ± 17.66 ^c	465.43 ± 42.25 ^b	1.01 ± 0.06 ^b

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

2.8 质构

高温炸制后带鱼发生各种物理化学变化，形成凹凸不平的淀粉外壳，因此为降低对实验的影响，只对去除淀粉外壳的带鱼进行质构测定。由表 5 可知，带鱼随着时间的延长，硬度、弹性、咀嚼性、胶黏性、回复性、内聚性均呈显著性下降（ $P<0.05$ ）。黎轩铭^[25]同样研究发现大球盖菇的硬度、内聚性、胶粘性、咀嚼性和回复性均随炸制时间的延长逐渐降低。相较于空气炸制 20 min 时的带鱼，16 min 时则表现出良好的弹性（0.68 mm）和咀嚼性（338.70 mj）。分析原因如下，质构可能会受到带鱼内部微观组织结构的影响^[25]。空气炸 12 min 的带鱼经微观结构的观察发现，其肌肉组织结构紧密有序，因此其各个质构值均较高。而炸制 16 min 和 20 min 的带鱼在长时间的高温下肌肉组织断裂，肌纤维结构遭到破坏，硬度也随之下降，炸制 20 min 时相较于 12 min 降低了 152.98 g。Farahnak 等^[26]的研究表明，蛋白质分子结构的紧密程度会影响食品的硬度指标。长时间的高温炸制会促使蛋白质的变性分解，破坏蛋白质分子之间的连接紧密性，从而降低带鱼的硬度，因此炸制时间不宜过长。

2.9 游离氨基酸（以干基计）

作为水产品中的营养成分，游离氨基酸参与蛋白质的合成，其种类与含量会影响食品的风味和营养价值^[27]。由表 6 可知，3 种炸制条件下的带鱼中均检测出 16 种游离氨基酸（以干基计），其中组氨酸无法检出，一方面可能由于高温条件下氨基酸发生降解，另一方面可能与带鱼的种类及采集海域有关。随着炸制时间的延长，氨基酸总量显著上升（ $P<0.05$ ），分别为 62.96、64.81、139.52 mg/g，尤其是空气炸制 20 min 时氨基酸总量大幅度升高，相较于 12 min 增加了 76.56 mg/g，说明炸制时间对氨基酸的影响较明显。分析后认为，可能由于炸制后带鱼水分含量随着时间的延长逐渐降低，使得游离

氨基酸的浓度显著上升（ $P<0.05$ ），另一方面长时间的高温促进了带鱼中蛋白质的变性分解，从而产生大量游离氨基酸^[25]。其中赖氨酸与丙氨酸的含量最高，说明这 2 种氨基酸对带鱼的滋味贡献最大。丙氨酸是甜味氨基酸，为带鱼的风味与鲜度都做出了重要的贡献；赖氨酸在生物学上具有调节人体免疫力、促进机体正常生长发育的重要作用^[28]。

表 6 不同炸制条件对轻度预制带鱼游离氨基酸（以干基计）的含量（mg/g）

Table 6 Content of free amino acids (dry basis) in lightly prefabricated hairtail under different frying conditions (mg/g)			
游离氨基酸	190 ℃ 12min	190 ℃ 16 min	190 ℃ 20 min
天冬氨酸 Asp	0.28 ± 0.01 ^b	0.31 ± 0.01 ^b	4.81 ± 0.07 ^a
丝氨酸 Ser	2.57 ± 0.01 ^c	3.36 ± 0.03 ^b	6.58 ± 0.04 ^a
苏氨酸 Thr	1.60 ± 0.01 ^c	2.25 ± 0.02 ^b	6.42 ± 0.15 ^a
谷氨酸 Glu	3.38 ± 0.05 ^b	2.35 ± 0.04 ^c	11.70 ± 0.13 ^a
甘氨酸 Gly	2.88 ± 0.01 ^b	2.30 ± 0.01 ^c	4.57 ± 0.04 ^a
丙氨酸 Ala	7.86 ± 0.01 ^c	8.02 ± 0.04 ^b	14.56 ± 0.03 ^a
缬氨酸 Val	3.24 ± 0.01 ^c	4.54 ± 0.03 ^b	8.23 ± 0.05 ^a
胱氨酸 Cys	0.04 ± 0.01 ^b	0.02 ± 0.00 ^b	0.13 ± 0.03 ^a
蛋氨酸 Met	1.10 ± 0.03 ^c	1.47 ± 0.02 ^b	5.01 ± 0.04 ^a
异亮氨酸 Ile	2.05 ± 0.02 ^c	3.07 ± 0.04 ^b	6.77 ± 0.06 ^a
亮氨酸 Leu	3.92 ± 0.02 ^c	5.86 ± 0.02 ^b	12.41 ± 0.06 ^a
酪氨酸 Tyr	0.72 ± 0.04 ^c	1.00 ± 0.05 ^b	3.47 ± 0.11 ^a
苯丙氨酸 Phe	0.04 ± 0.01 ^b	0.06 ± 0.03 ^b	0.72 ± 0.05 ^a
赖氨酸 Lys	30.91 ± 0.01 ^b	26.55 ± 0.04 ^c	44.33 ± 0.01 ^a
组氨酸 His	—	—	—
精氨酸 Arg	0.01 ± 0.00 ^b	0.01 ± 0.00 ^b	0.31 ± 0.01 ^a
脯氨酸 Pro	2.35 ± 0.05 ^c	3.65 ± 0.03 ^b	9.49 ± 0.03 ^a
总量	62.96 ± 0.16 ^c	64.81 ± 0.22 ^b	139.52 ± 0.72 ^a

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

游离氨基酸对食品的滋味特征有重要影响，主要体现在鲜味、甜味、苦味^[29]，因此氨基酸组成和含量的不同会造成鱼肉滋味的不同。Asp 和 Glu 主要构成带鱼的鲜味；为带鱼贡献甜味的氨基酸分

别是 Thr、Ser、Pro、Gly 和 Ala；Val、Ile、Leu、Phe、His、Arg、Tyr 则是带鱼的苦味来源^[25]。如图 7 所示，带鱼的呈味氨基酸含量大小分别为甜味氨基酸>苦味氨基酸>鲜味氨基酸，但安玥琦等^[30]研究发现，带鱼鱼糜制品中苦味氨基酸>甜味氨基酸>鲜味氨基酸。这可能是由于带鱼块在炸制过程中氨基酸与还原糖发生美拉德反应，产生的鲜味物质又会进一步影响鱼肉游离氨基酸的组成^[25]，由表 6 可知带鱼在炸制后产生大量丙氨酸，丙氨酸属于甜味氨基酸，而组氨酸作为苦味氨基酸，含量则大幅度降低，无法检出，因此甜味氨基酸含量大于苦味氨基酸。甜味氨基酸与苦味氨基酸的含量均随炸制时间的延长而显著增加 ($P<0.05$)，而鲜味氨基酸的含量则表现为 20 min (16.51 mg/g)>12 min (3.66 mg/g)>16 min (2.66 mg/g)。鲜味氨基酸中谷氨酸含量最高，说明炸制带鱼主要的鲜味来源是谷氨酸。甜味氨基酸可以改善食物的整体滋味，由表 6 可以看出 3 种炸制条件下甜味氨基酸中的丙氨酸和精氨酸占比均为 60%，表明丙氨酸和精氨酸为带鱼的甜味做出主要贡献。综上所述，炸制时间会对带鱼的鲜度与风味产生显著影响，适当延长炸制时间可以增加带鱼的鲜甜滋味。

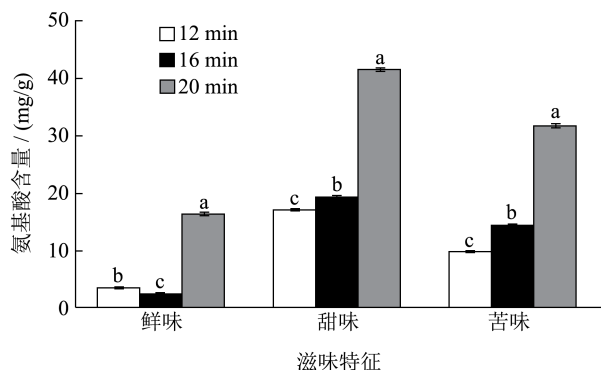


图 7 不同炸制条件对轻度预制带鱼呈味氨基酸
(以干基计)的含量 (mg/g)

Fig.7 Content of flavored amino acids (dry basis) in lightly prefabricated hairtail under different frying conditions (mg/g)

3 结论

本研究通过对带鱼样品感官评价、质构、色差、水分含量、水分活度、游离氨基酸及微观结构等理化特性的测定，探究了高速空气循环炸对轻度预制后带鱼品质的影响。结果发现，轻度预制 (170 °C、20 s) 后延长空气复炸时间，显著提升 ($P<0.05$) 游离氨基酸含量，说明炸制时间不宜过短；复炸时间延长会导致带鱼的肌肉组织间隙增大，说明复炸

时间过长会降低肌肉的持水能力，这与水分含量的测定结果相印证。190 °C、16 min 时，带鱼色泽金黄，保持了良好的咀嚼性，肌纤维相对完整紧密，保留了足够水分的同时有效延长贮藏时间，在感官评定中也更受喜爱。综合以上理化特性及感官评定，建议烹饪带鱼时预油炸 170 °C、20 s 后空气炸 190 °C、16 min。这为开发健康、低脂且有良好风味的带鱼产品提供一定的理论基础。

参考文献

- [1] 李苑.Sous-vide带鱼制品制备及贮藏中品质变化分子机制研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [2] PANCHAPOM T, JAE W.P, JIRAWAT Y. Gelation characteristics of tropical surimi under water bath and ohmic heating [J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 97-103.
- [3] 宁海花,周啟佳,杜柄,等.基于中红外光谱结合化学计量法快速检测油炸食品用油品质[J].食品与机械,2022, 38(6):93-98.
- [4] CHENG J, ZHANG S, WANG S, et al. Rapid and sensitive detection of acrylamide in fried food using dispersive solid-phase extraction combined with surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2019, 276: 157-163.
- [5] CAO Y, WU G C, ZHANG F, et al. A comparative study of physicochemical and flavor characteristics of chicken nuggets during air frying and deep frying [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2020, 97(8): 901-913.
- [6] 谢静,薛盼盼,章海风,等.传统与新式烹饪工艺对鸡肉品质的影响[J].中国调味品,2020,45(10):68-71.
- [7] 王君,王颖,陈喆,等.空气煎炸技术应用于食品加工的研究进展[J].美食研究,2021,38(2):49-53.
- [8] 卢琳,路索,武润琳,等.第二段加热方式对鱼饼食用品质及脂肪含量的影响[J].华中农业大学学报,2022,41(6): 255-261.
- [9] GB 5009.238-2016,食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S].
- [10] GB 5009.238-2016,食品安全国家标准 食品水分活度的测定[S].
- [11] 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.
- [12] GB 5009.3-2016,食品安全标准 食品中水分的测定[S].
- [13] FU Q Q, SHI H B, HU D X, et al. Pork *longissimus dorsi* marinated with edible mushroom powders: Evaluation of quality traits, microstructure, and protein degradation [J]. Food Research International, 2022, 158: 111503.
- [14] YESIM A, MAURICIO M, BEGONA G, et al. Sea bream bones and scales as a source of gelatin and ACE inhibitory

- peptides [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(2): 579-585.
- [15] ROBERT G.B, EUNICE M, MAIRA S, et al. Influence of ingredients that reduce oil absorption during immersion frying of battered and breaded foods [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2014, 116(3): 240-254.
- [16] WANG X C, CHENG L, MCCLEMENTS D J, et al. Recent advances in crispness retention of microwaveable frozen pre-fried foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 132: 54-64.
- [17] 傅宝尚,林子宸,姜鹏飞,等.即食真空油炸带鱼调理食品的工艺研究[J].食品研究与开发,2022,43(11):126-134.
- [18] MARION V, VAN L N N, JEANLUC J, et al. Impact of water activity on the radial growth of fungi in a dairy environment [J]. Food Research International, 2022, 157: 111247.
- [19] 罗晓林,潘锦锋,徐献兵.香菇风味高内相乳/液体油涂层应用下空气油炸鱿鱼的品质特征比较[J].现代食品科技,2022,38(12):51-58.
- [20] 徐言,陈季旺,莫加利,等.烤制温度和时间对烧烤草鱼块品质的影响[J].食品科学,2022,43(15):36-43.
- [21] BORDIN K, KUNITAKE M T, ARACAVA K K, et al. Changes in food caused by deep fat frying-a review [J]. Archivos Latinoamericanos De Nutricion, 2013, 63(1): 5-13.
- [22] GUO Q, XU S, LIU H M, et al. Effects of roasting temperature and duration on color and flavor of a sesame oligosaccharide-protein complex in a Maillard reaction model [J]. Food Chemistry, 2022, 16: 100483.
- [23] WANG Y, ZHANG W G, ZHOU G H. Effects of ultrasound-assisted frying on the physiochemical properties and microstructure of fried meatballs [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(10): 2915-2926.
- [24] 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.
- [25] 黎轩铭. 油炸大球盖菇的加工工艺及其品质特征研究[D].重庆:西南大学,2023.
- [26] RAHA F, MOLOUD N, ELNAZ R. Ultrasound thawing of mushroom (*Agaricus bisporus*): Effects on thawing rate, protein denaturation and some physical properties [J]. LWT, 2021, 151: 112150.
- [27] LI H J, HU Y F, ZHAO X H, et al. Effects of different ultrasound powers on the structure and stability of protein from sea cucumber gonad [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110403.
- [28] HUANG D, SAHYA M, REN M C, et al. Dietary lysine levels improved antioxidant capacity and immunity via the TOR and p38 MAPK signaling pathways in grass carp, *Ctenopharyngodon idellus* fry [J]. Frontiers in Immunology, 2021, 25(12): 635015.
- [29] MINGY D, ADRIANA M, DU X F. The impact of roasting and steaming on savory flavors contributed by amino acids, 5'-nucleotides, and volatiles in *Agaricus bisporus* mushrooms [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 30: 100590.
- [30] 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.