

两种炸制方式下镜泊湖草鱼与养殖草鱼食用品质的比较分析

李昌博^{1,2,3}, 潘德胤^{1,2,3}, 于潇^{1,3}, 马可心^{1,3}, 刁静静¹, 陈洪生^{1,2,3*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319) (2. 黑龙江八一农垦大学牡丹江食品与生物技术创新研究院, 黑龙江牡丹江 157000) (3. 黑龙江省食品与生物技术创新研究中心(国际合作), 黑龙江大庆 163319)

摘要: 为比较镜泊湖草鱼(Jingpo Lake Grass Carp, JPGC)、养殖草鱼(Culture Grass Carp, CGC)在不同炸制条件下食用品质的差异,测定了不同炸制样品的色差、质构特性、感官评定等指标,筛选出最适炸制温度和时间,对筛选后样品的二级结构和微观结构进行比较分析。研究表明,传统油炸最优工艺为200℃、4 min,空气炸最优工艺为200℃、20 min。其中,空气炸JPGC食用品质更优,剪切力为2 626.46 g,水分含量及不易流动水含量为56.13%、88.31%,与传统油炸相比锁住了内部水分,维持了外酥里嫩的口感,感官评分最高。空气炸JPGC在获得相似油炸效果的同时脂肪含量为0.30%、脂肪氧化程度更低。肌原纤维蛋白二级结构研究发现,两种炸制方式下JPGC的 β -折叠含量均显著高于CGC。微观结构结果表明,空气炸JPGC肌纤维排列最为紧密有序,有效延缓了汁液流失。空气炸草鱼在食用品质方面基本达到传统油炸效果,与CGC相比JPGC在加工中表现出更好的肌肉品质。综上,该研究可为牡丹江市火山堰塞湖水域草鱼资源的高值化利用提供理论基础。

关键词: 镜泊湖; 草鱼; 炸制方式; 食用品质; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2026)4-205-216

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0120

Comparison of Edible Quality of Jingpo Lake Crass Carp and Culture Grass Carp by Using Two Frying Methods

LI Changbo^{1,2,3}, PAN Deyin^{1,2,3}, YU Xiao^{1,3}, MA Kexin^{1,3}, DIAO Jingjing¹, CHEN Hongsheng^{1,2,3*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China) (2. Heilongjiang Bayi Agricultural University Mudanjiang Institute of Food and Biotechnology, Mudanjiang 157000, China) (3. Heilongjiang Food and Biotechnology Innovation and Research Center (International Cooperation), Daqing 163319, China)

Abstract: Differences in the edible quality of Jingpo Lake grass carp (JPGC) and culture grass carp (CGC) under different frying conditions were compared. Color difference, textural properties, sensory evaluation, and other indicators were measured to select the optimal frying temperature and time. Secondary structures and microstructures of the selected samples were compared and analyzed. The optimal conditions for traditional frying were 200℃ for 4 min, whereas those for air frying were 200℃ for 20 min. The air-fried JPGC was reported to show superior edible quality, with a measured shear force of 2 626.46 g, moisture content of 56.13%,

引文格式:

李昌博,潘德胤,于潇,等.两种炸制方式下镜泊湖草鱼与养殖草鱼食用品质的比较分析[J].现代食品科技,2026,42(4): 205-216.

LI Changbo, PAN Deyin, YU Xiao, et al. Comparison of edible quality of Jingpo lake crass carp and culture grass carp by using two frying methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 205-216.

收稿日期: 2025-01-24; 修回日期: 2025-03-26; 接受日期: 2025-03-26

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(SS2022C002)

作者简介: 李昌博(1999-),男,硕士研究生,研究方向: 食品科学, E-mail: 524623016@qq.com

通讯作者: 陈洪生(1979-),男,博士,教授,研究方向: 动物源食品加工, E-mail: hsch0608@163.com

and immobile water content of 88.31%. Compared with traditional frying, air frying retained more internal moisture, maintained a crispy exterior and tender interior texture, and received the highest sensory evaluation scores. The air-fried JPGC achieved a similar fried texture with a fat content of 0.30% and a lower degree of fat oxidation. Fourier-transform infrared spectroscopy analysis of the secondary structure of myofibrillar proteins revealed that JPGC maintained a consistently higher β -sheet content than CGC under both frying conditions. Microstructural examination revealed that the muscle fibers of air-fried JPGC were the most densely and orderly arranged, effectively slowing down juice loss. Air-fried grass carp achieved an edible quality comparable to that of traditionally fried grass carp. JPGC exhibited better muscle quality during processing than CGC. In summary, this study provides a theoretical foundation for the high-value utilization of grass carp resources in the volcanic barrier lakes of Mudanjiang City.

Key words: Jingpo lake; grass carp; frying method; edible quality; microstructure

草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 是中国四大淡水鱼之一, 年产量达到 550 万 t, 约占中国淡水鱼养殖总产量的 1/5^[1]。镜泊湖位于黑龙江省牡丹江市, 是国家首批重点自然保护区, 同时又是国内面积最大的火山堰塞湖, 湖水平均深度为 40 m^[2], 水质肥沃孕育着大量野生鱼类。生长在镜泊湖中的野生草鱼, 因独特的环境造就其肉质紧实、口感鲜美、风味独特, 广受消费者青睐, 是黑龙江省值得保护并推广的特色草鱼品种。前期课题组研究发现, JPGC 体型纤细、空壳率更高、富含多种矿物元素、具有高蛋白低脂肪等特点, 部分差异基因的表达使其与 CGC 相比鲜味物质含量更高、土腥味少具有更好的风味特性^[3]。

油炸作为家庭常见的加工方式, 能够改善食品的风味赋予其酥脆口感。然而, 过多食用油炸食品会带来严重的健康风险^[4]。空气炸是近年来流行的加工方式, 通过热风循环技术, 来模拟油炸的效果, 在满足与油炸相似特性的同时降低了食物含油量, 可作为一种健康的热加工方法^[5]。与油炸相比, 可以很好的保持食品品质 and 安全性, 有效降低了丙烯酰胺致癌物的生成^[6]。Liu 等^[7]通过比较传统煎炸和空气炸不同温度下对鲟鱼排的品质、风味和消化率的影响, 发现空气炸鲟鱼排具有更高的必需氨基酸含量以及风味化合物, 同时具有相似的酥脆口感。吴晓龙等^[8]比较分析电烤、空气油炸和过热蒸汽对草鱼肉品质的影响, 发现空气油炸组具有较低的蛋白氧化且具有最高的鲜味程度。Yu 等^[9]对不同炸制条件下鱼糜品质研究发现, 空气炸鱼糜水分含量更高、质构特性与油炸加工相似, 脂质组学结果表明空气炸加工的食品更加健康。

目前, 研究多为探讨单一品种鱼类在不同加工方式下的品质差异, 而在两种炸制方式下野生草鱼 (镜泊湖) 和养殖草鱼肌肉品质的差异性比较缺乏系统评价。因此, 为实现当地特有草鱼资源的高值化利用, 推进 JPGC 的深度开发具有重要意义。本研究比较 JPGC 和 CGC 在传统油炸、空气炸两种炸制方式下的色泽、质构特性、出品率、二级结构及微观结构等指标,

系统分析不同炸制条件对草鱼食用品质和组织结构的差异, 以期优化炸制草鱼的加工工艺提供数据支撑, 同时为镜泊湖野生资源的开发利用提供借鉴与参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

镜泊湖草鱼: 黑龙江省牡丹江市水域合法捕捞的野生草鱼, 约 1 750±150 g/条; 养殖草鱼: 同一地区, 相同时期捕捞的养殖草鱼, 约 1 750±150 g/条 (养殖池塘面积 10 亩, 池内平均水深 2 m, 草鱼养殖密度 70 尾/亩); 将捕获后的草鱼, 击晕、去鳞、去内脏后冰鲜保存, 运输至实验室。

九三大豆油, 九三粮油工业集团有限公司; 精制食用盐, 中国盐业股份有限公司; 石油醚, 辽宁泉瑞试剂有限公司; 溴化钾, 中国大庆麦克林化学试剂有限公司; Gluta 固定液, 北京雷根生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

海氏 K3 空气炸锅, 青岛汉尚电器有限公司; YN-001 恒温烧油器, 广州毅能厨房设备有限公司; DGG-9030A 型恒温干燥箱, 上海森信实验仪器有限公司; Centrifuge5430R 高速冷冻离心机, 德国 Eppendorf 公司; CR-400 色差计, 日本柯尼卡美能达办公系统有限公司; TA.XT.Plus 质构仪, 英国 StableMicroSystems 公司; NMI20-Analyst 核磁共振成像分析仪, 苏州纽迈电子科技有限公司; SOX500 脂肪测定仪, 海能未来技术集团股份有限公司; IRTracer-100FT-IR 光谱仪, 日本岛津公司; Sigma 300 扫描电镜, 德国卡尔蔡司股份公司。

1.3 实验方法

1.3.1 实验设计

前期预实验初步确定炸制温度范围为 190~210 ℃、传统油炸时间控制在 1~5 min、空气炸时间控制在

10~20 min，设计实验条件如下。a. 炸制温度的确定：固定传统油炸时间 3 min，空气炸时间 15 min，炸制温度选择 190、200、210 ℃，确定最优炸制温度。b. 炸制时间的确定：固定最优炸制温度，传统油炸时间选择 1、2、3、4、5 min，空气炸时间选择 10、12.5、15、17.5、20 min，确定最优炸制时间。c. 确定最终炸制条件。

1.3.2 原料预处理

将草鱼去头、清洗血污后，沿鱼骨将草鱼剖片，取背部肌肉去皮，将草鱼肉切成 3 cm×3 cm×2 cm 大小，放入不锈钢盆中，取 1% 的食盐均匀涂抹在草鱼肉表面，保鲜膜密封后于 4 ℃冰箱中进行腌制 25 min，腌制完毕使用自来水进行重复冲洗 5 min，沥干水备用。

1.3.3 色差的测定

参考 Hwang 等^[10]的方法，使用色差仪对草鱼肉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值进行测量，测量前进行白板校准。每个样品选取不同部位平行测量三次，结果取平均值。

1.3.4 剪切力与质构特性的测定

剪切力参考 Jose 等^[11]的方法稍作修改。采用 HDP/BS 探头，测前测中速度为 1 mm·s⁻¹、测后速度 10 mm·s⁻¹，触发力 10 g，测试时探头方向垂直于肌纤维方向。质构测定参考 Liu 等^[12]的方法略作修改。采用 P/50（直径 50 mm）探头，测前、测中、测后速度为 1 mm·s⁻¹，触发力 5 g，样品形变量 40%，两次测试间隔时间 3 s。

1.3.5 感官评定

选择 10 名食品专业研究生组成评定小组，男女比例为 1:1。对油炸和空气炸草鱼肉的 5 个指标采用双盲法进行评定打分，每项评分最低 0 分，最高 10 分。评定每个样品后用温水漱口，待 3 min 后对下一个样品进行评定。感官评分标准见表 1。

1.3.6 出品率的测定

参考 Klinmalai 等^[13]的方法，将草鱼肉按照实验条件加工后，擦干表面油脂后，冷却至室温并称量。按照公式计算出品率：

$$W = \frac{M_b}{M_a} \times 100\%$$

式中：

W —出品率，%；

M_a —加工前新鲜草鱼肉质量，g；

M_b —加工后熟化草鱼肉质量，g。

1.3.7 水分含量的测定

参考 GB5009.3-2016《食品中水分的测定》中的直接干燥法对草鱼肉进行测定。

表 1 感官评分标准

Table 1 Sensory scoring criteria		
指标	评分准则	评分
组织状态	鱼肉紧致、组织完整、形态规则、不具有油腻感	8~10
	鱼肉较为紧致、组织少量破损、形态较规则、略有油腻感	5~7
	鱼肉较为松散、组织破损严重、形态不规则、油腻感严重	0~4
质地	鱼肉肉质软硬适中、弹性好	8~10
	鱼肉肉质偏硬或偏软、弹性一般	5~7
	鱼肉肉质过硬或过软、弹性较差	0~4
颜色	鱼肉色泽呈焦黄色，颜色均匀	8~10
	鱼肉色泽偏深或偏浅，颜色基本均匀一致	5~7
	鱼肉色泽过深或过浅，颜色不够均匀	0~4
气味	香气浓郁，具有强烈炸鱼肉的特征风味、无多余异味	8~10
	香气较强，具有轻度炸鱼肉的特征风味、略有鱼腥味、焦糊味或油腻味等异味	5~7
	香气较轻，不具有炸鱼肉的特征风味、具有不愉快鱼腥味、焦糊味或油腻味等异味	0~4
口感	具有酥脆口感，外壳酥脆，内部肉质紧致弹牙、水润多汁、具有嚼劲	8~10
	酥脆口感一般，外壳酥脆感较强或较差，内部肉质弹性较好、汁液较少、稍有嚼劲	5~7
	不具酥脆口感，外壳过硬或过软、内部肉质无弹性、无汁液、干柴没有嚼劲	0~4

1.3.8 水分分布的测定

根据 Sun 等^[14]的方法稍作修改，将样品切成 1 cm×1 cm×3 cm 的小块，放入核磁共振管中进行测试。选用 Q-CPMG 序列进行测量，共振频率为 23.20 MHz，扫描 16 次，拟合 0.01~1 000 ms 的横向弛豫时间（ T_2 ）。

1.3.9 脂肪含量的测定

参考 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》中的索氏提取法对草鱼肉的脂肪含量进行测量。

1.3.10 脂肪氧化的测定

参考曹云刚^[15]的方法并稍作修改，进行硫代巴比妥酸（Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS）值的测定。取 5 g 的草鱼肉样品，研碎放入具塞试管。加入 8.50 mL 三氯乙酸与 1.50 mL 硫代巴比妥酸溶液，混匀后再 95 ℃水浴加热 40 min，冷却至室温。取 5 mL 上清至离心管后，加入同体积氯仿混匀后离心 10 min（4 ℃，10 000 r·min⁻¹）。结束后，取 3 mL 上清至新离心管，加入 1.50 mL 石油醚，混匀同条件离心，取下清在 532 nm 测量吸光度。

$$T=\frac{A_{532}}{W}\times 9.48$$

(2)

式中：
 T ——硫代巴比妥酸值， $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；
 A_{532} ——532 nm 处吸光度值；
 W ——样品质量，g；
9.48——常数。

1.3.11 肌原纤维蛋白二级结构的测定

参考徐言等^[16]的方法。将加工后的草鱼肉制成薄片后冷冻干燥 72 h 后粉碎。称取 5 mg 样品与溴化钾 1:100 (m/m) 混匀研磨后压片进行红外测定。光谱扫描范围：400~4 000 cm^{-1} ，使用 Peakfit 软件对酰胺 I 带吸收峰（1 600~1 700 cm^{-1} ）进行拟合。

1.3.12 微观结构的测定

参考 Liu 等^[7]的方法。将草鱼肉样品切成薄片，使用 2.50% 戊二醛（体积分数）进行固定 3 h，使用蒸馏水冲洗残留固定液。使用体积分数 50%、70%、80%、90%、100% 的乙醇溶液脱水 15 min 后进行冷冻干燥。将样品冻干后镀金，采用扫描电镜进行观察。

1.4 数据分析

所有实验至少重复三次，实验数据用平均值 $\pm$ 标准差表示，采用 SPSS 27.0.1 软件进行处理，采用单因素方差分析，执行 Duncan 多重极差检验， $P<0.05$ 为差异显著。采用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 传统油炸与空气炸加工温度的筛选

2.1.1 炸制温度对草鱼色差的影响

炸制食品的颜色变化受蛋白质氧化和变性、美拉德反应等多方面影响^[17]。如表 2 所示，随着炸制温度的增加， L^* 逐渐减小、 b^* 逐渐增大。190 $^{\circ}\text{C}$ 时，传统油炸 JPGC、传统油炸 CGC 的 L^* 分别为 70.85、67.73， b^* 为 26.10、24.95。当温度达到 210 $^{\circ}\text{C}$ ， L^* 分别下降至 57.93、59.87， b^* 略有增加分别为 26.51、27.20。空气炸加工也呈现类似趋势，190 $^{\circ}\text{C}$ 下，空气炸 JPGC、空气炸 CGC 的 L^* 分别为 73.70、76.39， b^* 为 9.13、7.05。温度上升至 210 $^{\circ}\text{C}$ ， L^* 下降至 65.84、65.81， b^* 分别升高为 15.24、14.94。空气炸使鱼肉与空气直接接触，减少了高温下油脂对鱼肉的直接作用，延缓了美拉德和焦糖化反应的速度，使色泽变化相对温和。吴晓龙等^[8]研究认为，热加工后鱼肉颜色的变化可能与脂肪氧化相关。

一般来说，消费者倾向于金黄色的炸制食品。结

合图 1 对比发现，当温度为 190 $^{\circ}\text{C}$ 时，炸制温度较低，传统油炸草鱼外表油腻感过重，而空气炸加工由于空气导热速度较慢，使美拉德反应不完全，因此 L^* 过高外观不够金黄诱人；210 $^{\circ}\text{C}$ 虽促进了色泽的变化，但过高的温度使传统油炸草鱼表面发生过度褐变，甚至出现黑色焦糊，影响消费者接受度。在 200 $^{\circ}\text{C}$ 时，空气炸加工既有效的促进美拉德反应，生成了暗黄且略带红褐色的外观，同时又避免了传统油炸在高温下发生过度褐变的情况^[16]，保持了草鱼较好的感官品质，可作为实现色泽和食用品质双重优化的工艺参数。

表 2 炸制温度对草鱼色差的影响
Table 2 Effect of frying temperature on color difference of grass carp

	温度/ $^{\circ}\text{C}$	样品	L^*	a^*	b^*
传统油炸	190	JPGC	70.85 ± 1.63^a	-1.56 ± 0.91^c	26.10 ± 0.33^a
		CGC	67.73 ± 1.84^b	-3.12 ± 0.77^d	24.95 ± 1.02^a
	200	JPGC	61.04 ± 0.98^{cd}	-2.98 ± 0.22^d	24.89 ± 1.30^a
		CGC	62.63 ± 0.91^c	-0.79 ± 0.07^{bc}	27.03 ± 1.76^a
	210	JPGC	57.93 ± 1.41^e	-0.02 ± 0.11^{ab}	26.51 ± 0.30^a
		CGC	59.87 ± 0.80^{de}	0.53 ± 0.98^a	27.20 ± 1.55^a
空气炸	190	JPGC	73.70 ± 2.02^{ab}	0.26 ± 0.44^{bc}	9.13 ± 1.26^b
		CGC	76.39 ± 0.80^a	-0.26 ± 0.25^{bc}	7.05 ± 0.54^c
	200	JPGC	70.42 ± 0.33^c	0.27 ± 0.69^{abc}	10.70 ± 0.88^b
		CGC	71.94 ± 2.81^{bc}	-0.39 ± 0.64^c	10.92 ± 0.83^b
	210	JPGC	65.84 ± 0.40^d	0.66 ± 0.68^{ab}	15.24 ± 1.35^a
		CGC	65.81 ± 1.24^d	0.85 ± 0.32^a	14.94 ± 0.74^a

注：同列小写字母不同表示相同炸制方式下差异显著（ $P<0.05$ ）。表 3~5 同。

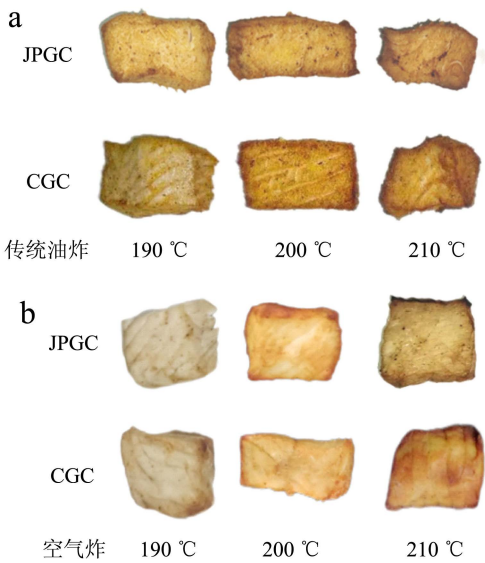


图 1 不同炸制温度下草鱼外观形态

Fig.1 Appearance of grass carp at different frying temperatures

2.1.2 炸制温度对草鱼剪切力和质构特性的影响

剪切力与质构特性是综合考量食用品质的关键指标。剪切力越小，肉质越嫩。如表 3 所示，两种炸制方式处理后的 JPGC 与 CGC 的剪切力均显著升高。温度在 190 ℃时，两种炸制方式下的鱼肉剪切力相近，鱼肉水分含量较高无法达到类似油炸食品良好的酥脆口感。升高至 200 ℃，传统油炸组草鱼剪切力逐渐升高，空气炸组草鱼剪切力虽有上升但相较低于传统油炸组，这可能是传统油炸使鱼肉表面形成一层外壳，增大了剪切力。而空气炸采用的热风循环加工，仅带走鱼肉表面的水分，锁住内部水分，使鱼肉的口感更嫩，适口性好。温度进一步升高至 210 ℃，蛋白质变性程度加剧使持水性降低，两种炸制方式剪切力均达到最大值，鱼肉脱水变硬^[16]。

200 ℃时，传统油炸组 JPGC、CGC 硬度分别为 2 630.95、2 592.47 g、空气炸组为 2 360.58、2 574.78 g，此时硬度适中，感官评定达到最优。相较 190 ℃，两种炸制方式下草鱼肉的硬度和咀嚼性均呈现上升趋势。由于温度的升高，鱼肉中蛋白质变性程度增加，使肌纤维的收缩、肌节长度的减小，水分的损失赋予了鱼肉肉质紧致干燥富有嚼劲的口感^[18]。当达到 210 ℃，两种炸制方式硬度值均达到最大，传统油炸 JPGC、CGC 分别为 3 489.43、4 281.87 g、空气炸组为 4 464.08、4 612.11 g。高温可以增强产品的硬度和

咀嚼性，但会导致鱼肉过于干硬，在保证口感的同时，需要维持适当的硬度和咀嚼性^[19]。从食用品质与感官方面考虑，将炸制温度控制在 200 ℃，此温度下，鱼肉可以获得适中的硬度与咀嚼性，在满足炸制食品的口感的同时，避免了因温度过高导致的肉质干柴。

2.1.3 炸制温度对草鱼感官评定的影响

对不同炸制温度下传统油炸与空气炸草鱼的感官评定和理化指标的综合分析，由图 2 所示，发现温度从 190 ℃增加至 210 ℃，评分呈现先升高后下降的趋势。结合图 1 的外观形态可知，当温度为 190 ℃时，两种炸制方式下的草鱼感官评分普遍较低。主要呈现出颜色偏浅，质地过软、不够酥脆且有腥味的状态，这些特性不易被消费者所接受；温度为 200 ℃时，感官评分显著提高。此时，传统油炸和空气炸制的草鱼肉组织状态紧密，色泽金黄，质构特性优良，口感最佳，并且不具有明显的腥味及焦糊味。当温度达到 210 ℃时，感官评分再次下降。主要原因是两种炸制方式下的草鱼剪切力升高，嫩度降低，口感变得干柴。传统油炸组鱼肉的外表颜色明显加深，附着少许黑色颗粒，略带有焦糊气味，因此导致感官评分有所降低。

综合感官评定与色差、质构指标考虑，200 ℃作为炸制草鱼的最佳温度，可作为加工草鱼肉的最适炸制温度进行后续的试验。

表 3 炸制温度对草鱼剪切力和质构特性的影响
Table 3 Effect of frying temperature on shear force and textural properties of grass carp

	温度/℃	样品	剪切力/g	硬度/g	弹性	咀嚼性
传统油炸	190	JPGC	1 508.37 ± 147.65 ^c	1 806.53 ± 178.82 ^d	0.57 ± 0.07 ^c	359.86 ± 63.03 ^d
		CGC	1 608.18 ± 136.24 ^c	1 890.97 ± 148.04 ^d	0.94 ± 0.04 ^a	1 394.18 ± 297.87 ^{bc}
	200	JPGC	2 636.18 ± 259.32 ^b	2 630.95 ± 189.27 ^c	0.73 ± 0.04 ^b	983.00 ± 61.48 ^c
		CGC	2 583.97 ± 435.89 ^b	2 592.47 ± 235.52 ^c	0.89 ± 0.08 ^a	1 837.96 ± 367.95 ^a
	210	JPGC	3 094.41 ± 144.33 ^a	3 489.43 ± 511.67 ^b	0.74 ± 0.09 ^b	1 145.62 ± 223.75 ^c
		CGC	3 452.62 ± 165.66 ^a	4 281.87 ± 179.37 ^a	0.76 ± 0.07 ^b	1 612.26 ± 171.03 ^{ab}
空气炸	190	JPGC	1 641.16 ± 39.23 ^c	2 305.25 ± 392.50 ^b	0.61 ± 0.06 ^b	605.42 ± 49.60 ^c
		CGC	1 957.31 ± 215.15 ^b	2 699.40 ± 175.31 ^b	0.73 ± 0.02 ^a	1 090.92 ± 106.88 ^b
	200	JPGC	2 123.44 ± 99.15 ^b	2 360.58 ± 199.77 ^b	0.62 ± 0.04 ^b	742.85 ± 59.78 ^{bc}
		CGC	1 927.95 ± 118.03 ^b	2 574.78 ± 438.04 ^b	0.77 ± 0.01 ^a	945.52 ± 102.99 ^{bc}
	210	JPGC	3 972.22 ± 11.20 ^a	4 464.08 ± 226.62 ^a	0.58 ± 0.04 ^b	1 076.01 ± 260.23 ^b
		CGC	4 157.69 ± 171.82 ^a	4 612.11 ± 259.25 ^a	0.72 ± 0.07 ^a	1 853.89 ± 451.82 ^a

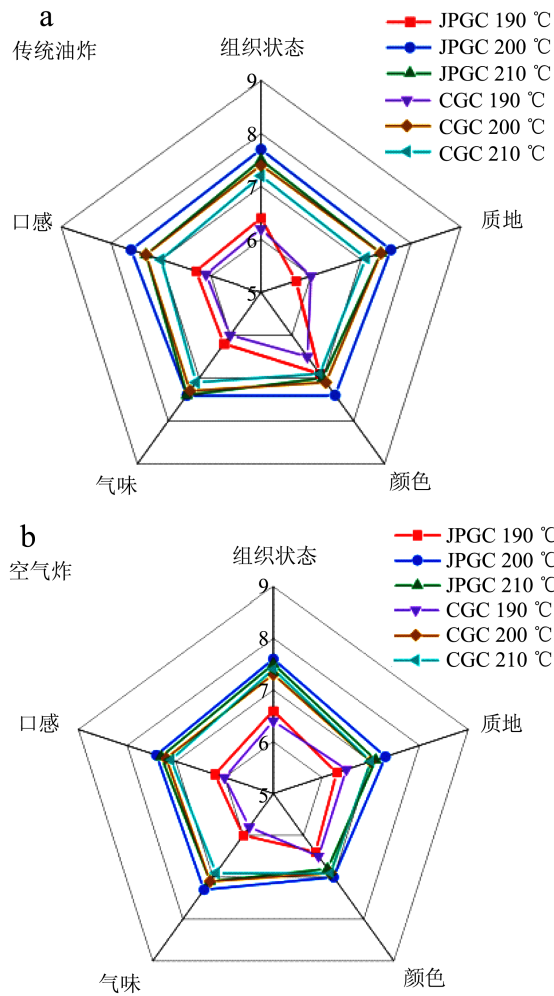


图 2 炸制温度对草鱼感官评定的影响

Fig.2 Effect of frying temperature on sensory evaluation of grass carp

2.1.4 炸制温度对草鱼出品率的影响

由图 3 可知，随着炸制温度的升高，出品率呈下降趋势。当温度由 190 °C 升高至 210 °C，传统油炸加工下，JPGC 出品率由 71.05% 下降至 56.65%，CGC 由 68.06% 下降至 56.72%；空气炸 JPGC 出品率由 63.51% 下降至 51.55%，空气炸 CGC 由 63.70% 下降至 47.47%，其中 CGC 下降幅度最大为 25.48%。由于温度升高肌肉组织中蛋白质变性程度加深，产生了小分子肽。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，导致出品率降低^[20]。同等温度下，传统油炸组出品率更高，这是因为豆油的热容大，导热性更好，使鱼肉表层迅速形成一层脆壳锁住水分。空气炸处理的鱼肉没有浸入在豆油中，减少了油脂的进入，因此出品率略低。李锐^[21]在对罗非鱼食用品质研究时同样发现，经空气炸处理后的鱼肉加工损失率略高。当温度达到 210 °C 时，两种炸制方式下的草鱼出品率显著偏低，表明温度过高不利于实际生产。

此外，发现在相同条件下，JPGC 出品率均高于 CGC，且随着温度升高出品率下降幅度相对较低，说明 JPGC 在加热过程中具有更强的持水能力，可以有效地抑制水分及其他成分的流失，可能因为 JPGC 生长于野外，长期适应这种环境使其肌肉组织具有更强的保水能力。孟玉琼等^[22]研究也指出，野生大黄鱼与养殖大黄鱼相比，具有更强的肌肉持水力以及更低的汁液流失率。后文在对水分分布、微观结构进行研究时发现，JPGC 经炸制处理后不易流动水含量高于相同条件下的 CGC，并且肌纤维排列更加紧密，这种结构可以有效阻止鱼肉的汁液流失，进而提高出品率并改善质地。

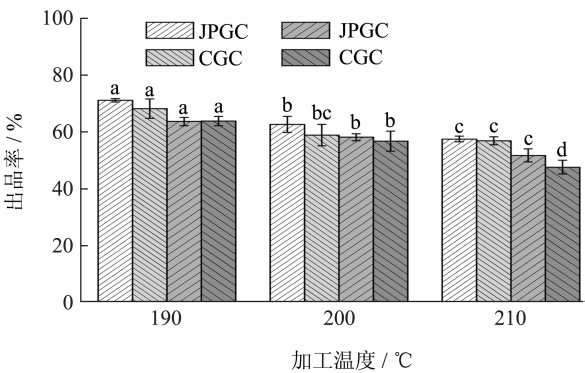


图 3 炸制温度对草鱼出品率的影响

Fig.3 Effect of frying temperature on the yield of grass carp

注：小写字母不同表示相同炸制方式下差异显著 ($P < 0.05$)。图 6、7 同。

2.2 传统油炸与空气炸加工时间的筛选

2.2.1 炸制时间对草鱼色差的影响

炸制时间对草鱼色泽的影响如表 4 所示。 L^* 与炸制时间呈负相关，传统油炸中，JPGC 与 CGC 的 L^* 分别由 1 min 时的 73.73、70.65 降低至 5 min 时的 52.16、50.64；空气炸加工中 L^* 由 10 min 的 75.01、76.51 降低至 20 min 的 63.93、65.39。由图 4 所示，炸制前期，高温促使肌原纤维蛋白和肌红蛋白变性，使鱼肉颜色迅速变白，此时鱼肉的水分含量最高，因此具有较高的亮度，随着时间的增加高温使鱼肉逐渐脱水，对光的反射减弱，因此 L^* 呈现下降趋势^[16]。 b^* 与炸制时间呈正相关，传统油炸 JPGC 与 CGC 的 b^* 分别由 1 min 时的 14.64、12.74 增加至 5 min 时的 41.04、39.62；空气炸加工中分别由 10 min 的 9.58、6.64 增加至 20 min 的 20.73、23.58。 b^* 显著增加表明对炸制草鱼金黄色的形成影响较大，可能是由于美拉德反应和脂肪氧化产生的黄色化合物所致。 a^* 在炸制前中期变化并不明显，但在后期显著升高。 a^* 在炸制后期

对鱼肉颜色的影响较大。这可能与鱼肉中肌红蛋白的水分含量和氧化变性产生亚肌红蛋白有关^[23]，在高温环境下肌红蛋白溶解度提升，在表面形成红棕色沉淀，最终影响鱼肉的颜色。吴晓龙等^[8]在研究三种高温处理方式对鱼肉理化性质的影响时，发现空气炸加工下鱼肉的色泽也呈现相同变化趋势。

表 4 炸制时间对草鱼色差的影响					
Table 4 Effect of frying time on color difference of grass carp					
时间/ min	样品	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	
传统油炸	1	JPGC	73.73 ± 0.93 ^a	-3.64 ± 0.28 ^f	14.64 ± 1.14 ^f
		CGC	70.65 ± 1.17 ^b	-3.03 ± 0.09 ^{ef}	12.74 ± 0.74 ^f
	2	JPGC	65.01 ± 1.56 ^d	-2.69 ± 0.44 ^{ef}	21.07 ± 0.63 ^e
		CGC	67.51 ± 0.61 ^c	-2.03 ± 0.24 ^{de}	20.22 ± 1.06 ^e
	3	JPGC	61.04 ± 0.98 ^e	-2.98 ± 0.22 ^{ef}	24.89 ± 1.30 ^d
		CGC	62.63 ± 0.91 ^e	-0.79 ± 0.07 ^b	27.03 ± 1.76 ^c
	4	JPGC	56.32 ± 1.16 ^f	4.37 ± 0.91 ^c	34.73 ± 0.68 ^b
		CGC	61.15 ± 0.05 ^e	-2.47 ± 0.60 ^{ef}	27.55 ± 2.02 ^c
	5	JPGC	52.16 ± 1.28 ^g	14.07 ± 1.50 ^a	41.04 ± 0.79 ^a
		CGC	50.64 ± 0.94 ^g	12.57 ± 1.30 ^b	39.62 ± 1.30 ^a
空气炸	10	JPGC	75.01 ± 0.41 ^{ab}	0.08 ± 0.10 ^{bc}	9.58 ± 0.85 ^d
		CGC	76.51 ± 0.47 ^a	-0.88 ± 0.63 ^d	6.64 ± 0.58 ^c
	12.5	JPGC	72.82 ± 0.67 ^{bc}	-0.23 ± 0.08 ^{cd}	10.20 ± 0.69 ^d
		CGC	74.05 ± 2.25 ^{bc}	-0.53 ± 0.22 ^{cd}	8.91 ± 0.66 ^d
	15	JPGC	70.42 ± 0.33 ^d	0.27 ± 0.69 ^{bc}	10.70 ± 0.88 ^c
		CGC	71.94 ± 2.81 ^{cd}	-0.39 ± 0.64 ^{cd}	10.92 ± 0.83 ^d
	17.5	JPGC	67.57 ± 1.08 ^e	0.85 ± 0.23 ^b	13.34 ± 1.66 ^c
		CGC	67.73 ± 0.93 ^e	-0.45 ± 0.31 ^{cd}	13.13 ± 1.77 ^c
	20	JPGC	63.93 ± 1.12 ^f	2.28 ± 0.72 ^a	20.73 ± 1.59 ^b
		CGC	65.39 ± 0.91 ^{ef}	2.94 ± 0.66 ^a	23.58 ± 0.77 ^a

2.2.2 炸制时间对草鱼剪切力和质构特性的影响

如表 5 所示，随着炸制时间的增加，鱼肉剪切力、硬度、咀嚼性均呈现增加的趋势。传统油炸中，随着炸制时间的延长，鱼肉剪切力显著增加，当加工至 3 min 时剪切力增长幅度最大，JPGC 和 CGC 的剪切力分别显著增加至 2 636.18 和 2 583.97 g。这可能是由于前期水分迅速蒸发，在鱼肉表面形成了一层完整的脆壳，使剪切力显著增大。进一步延长油炸时间，剪切力持续增加，但增幅变缓，5 min 时 JPGC 和 CGC 的剪切力分别为 3 012.36、3 301.96 g。相比之下，空气炸加工的草鱼剪切力呈均匀上升趋势，在

20 min 时 JPGC 和 CGC 的剪切力分别达到 2 626.46 和 2 907.14 g。两种炸制方式下剪切力逐渐增大，由于肌纤维中的蛋白分子结构发生改变，使肌原纤维蛋白凝聚收缩，肌肉水分流失所致^[24]。在加工中后期，传统油炸组的剪切力显著高于空气炸，其原因可能是热处理方式不同所引起的，传统油炸处理的鱼肉与豆油充分接触，带走了鱼肉内部更多的水分，从而导致剪切力更高^[25]。另外，在多数炸制条件下，JPGC 的剪切力、硬度均小于 CGC。同在高温条件下，JPGC 肌纤维排列更紧密，延缓汁液的流失，从而维持了鱼肉的嫩度，赋予鱼肉外酥内弹的口感。

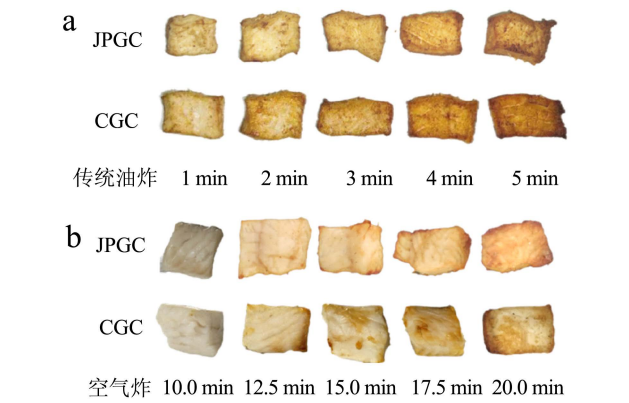


图 4 不同炸制时间下草鱼外观形态

Fig.4 Appearance of grass carp at different frying time

2.2.3 炸制时间度对草鱼感官评定的影响

由图 5 可知，随着炸制时间的增加，评定小组对两种炸制方式下的草鱼评价呈上升趋势。草鱼肉的外观、质地、颜色、气味及口感得分均有所提高。结合图 4 外观形态，当炸制时间过短时，由于水分含量过高，导致鱼肉肉质松软，腥味重，并不具备酥脆的口感。传统油炸下的鱼肉口感过于油腻、而空气炸加工的鱼肉不够金黄诱人。在此情况下，JPGC 与 CGC 草鱼肉之间的差异不明显。随着炸制时间的增加，当传统油炸时间为 4 min 时，感官评分达到最高。草鱼肉金黄酥脆不油腻，肉质紧实，具有外酥里嫩的口感。而油炸时间增加至 5 min 时，鱼肉水分大量流失、肉质过硬口感干柴、颜色过深，从而降低了评分。当空气炸时间为 20 min 时，空气炸的鱼肉外表具有油炸食品应有的外观，色泽金黄且没有传统油炸下的油脂味和油腻感，硬度适中，具有炸制食品的口感。综合炸制鱼肉的外观形态、色泽和质构特性以及感官评定，初步认为传统油炸 4 min、空气炸 20 min 能达到炸制食品的良好状态，可作为加工草鱼的较优工艺参数。

表 5 炸制时间对草鱼剪切力和质构特性的影响

Table 5 Effect of frying time on shear force and textural properties of grass carp					
时间/min	样品	剪切力/g	硬度/g	弹性	咀嚼性
传统油炸	1	JPGC 1 000.00 ± 132.67 ^d	1 754.09 ± 227.54 ^e	0.66 ± 0.05 ^c	416.61 ± 20.34 ^d
		CGC 859.38 ± 66.86 ^d	1 278.21 ± 190.32 ^f	0.94 ± 0.01 ^a	935.57 ± 174.54 ^{cd}
	2	JPGC 1 105.47 ± 228.18 ^{cd}	1 931.76 ± 424.60 ^e	0.73 ± 0.03 ^c	617.70 ± 194.39 ^{cd}
		CGC 1 510.21 ± 165.23 ^c	2 373.98 ± 73.55 ^d	0.92 ± 0.01 ^{ab}	1 788.53 ± 73.13 ^b
	3	JPGC 2 636.18 ± 259.32 ^b	2 630.95 ± 189.27 ^{cd}	0.72 ± 0.04 ^c	983.00 ± 61.48 ^c
		CGC 2 583.97 ± 435.89 ^b	2 592.47 ± 235.52 ^{cd}	0.89 ± 0.08 ^{ab}	1 837.96 ± 367.95 ^{ab}
	4	JPGC 2 787.07 ± 73.76 ^b	2 941.56 ± 194.49 ^{bc}	0.73 ± 0.03 ^c	1 008.09 ± 73.56 ^c
		CGC 3 247.42 ± 212.21 ^a	3 118.04 ± 324.37 ^b	0.85 ± 0.06 ^b	1 932.96 ± 680.79 ^{ab}
	5	JPGC 3 012.36 ± 308.82 ^{ab}	3 179.94 ± 255.85 ^{ab}	0.74 ± 0.04 ^c	1 083.24 ± 219.24 ^c
		CGC 3 388.79 ± 260.49 ^a	3 565.56 ± 59.96 ^a	0.89 ± 0.04 ^{ab}	2 374.00 ± 422.99 ^a
空气炸	10	JPGC 943.62 ± 49.58 ^e	1 250.15 ± 344.90 ^f	0.57 ± 0.08 ^e	282.65 ± 32.41 ^e
		CGC 1 240.91 ± 147.45 ^{de}	1 878.27 ± 325.46 ^{de}	0.81 ± 0.07 ^a	905.72 ± 376.34 ^c
	12.5	JPGC 1 061.41 ± 340.08 ^e	1 803.62 ± 248.65 ^e	0.68 ± 0.07 ^{cd}	510.37 ± 86.63 ^{de}
		CGC 1 525.17 ± 298.14 ^d	2 048.89 ± 72.14 ^{de}	0.69 ± 0.03 ^{bcd}	687.51 ± 54.17 ^{cd}
	15	JPGC 2 123.44 ± 99.15 ^e	2 360.58 ± 199.77 ^{cd}	0.62 ± 0.04 ^{de}	742.85 ± 59.78 ^{cd}
		CGC 1 927.95 ± 118.03 ^c	2 574.78 ± 438.04 ^c	0.77 ± 0.01 ^{abc}	945.52 ± 102.99 ^c
	17.5	JPGC 2 281.70 ± 103.70 ^{bc}	2 801.83 ± 168.60 ^{bc}	0.61 ± 0.05 ^{de}	794.17 ± 97.87 ^{cd}
		CGC 2 717.39 ± 284.64 ^a	3 312.70 ± 151.78 ^{ab}	0.74 ± 0.03 ^{abc}	1 274.02 ± 138.60 ^b
	20	JPGC 2 626.46 ± 209.36 ^{ab}	3 213.39 ± 487.51 ^{ab}	0.79 ± 0.06 ^{ab}	1 231.2 ± 137.41 ^b
		CGC 2 907.14 ± 237.08 ^a	3 501.97 ± 135.25 ^a	0.83 ± 0.08 ^a	1 610.64 ± 246.53 ^a

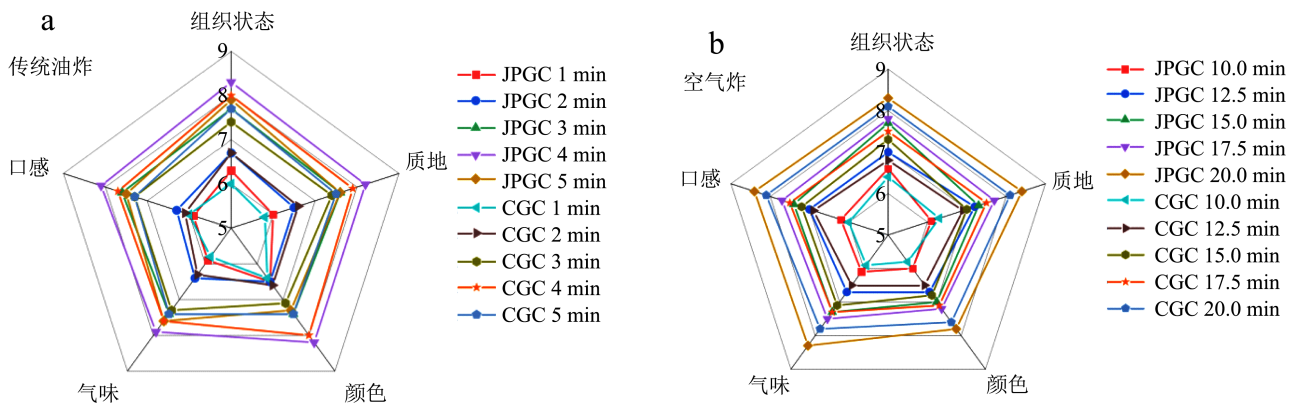


图 5 炸制时间对草鱼感官图
Fig.5 Sensory map of frying time on grass carp

2.2.4 炸制时间对草鱼出品率的影响

由图 6 可知，随着炸制时间的增加出品率逐渐降低。其中，传统油炸出品率的下降幅度高于空气炸组，传统油炸出品率受时间影响变化幅度更大，当时间由 1 min 增加至 3 min 时两种草鱼的出品率由 79.81% 和 83.18% 降至 62.51% 和 58.76%，炸制时间增加到 4~5 min 时，出品率变化缓慢。相比之下，空气炸处理组的出品率随时间变化较为平缓，当时间由 10 min

延长至 20 min，JPGC 出品率由 71.47% 降至 53.69%、CGC 出品率由 64.13% 降至 51.96%。这种差异可能是由于在加工前中期，受高温的影响草鱼肉中肌原纤维蛋白剧烈变性造成肌原纤维的快速聚积和短缩，可溶性蛋白降解产物、溶解的脂肪及其他不溶性物质大量流出导致出品率下降。随着炸制时间的逐渐延长，蛋白变性、降解及收缩变化不再明显，从而使草鱼肉的出品率变化速率减慢^[21]。另外在加工中后期，JPGC

出品率普遍高于 CGC, 可能与肌肉的肌纤维排列有关, CGC 肌原纤维结构的疏水区域易暴露、肌肉细胞水分易流失; 而 JPGC 肌纤维排列相对紧凑、组织结构更加稳定, 能较好地保持肌肉细胞内的水分^[26], 从而保证了更好的肌肉品质。

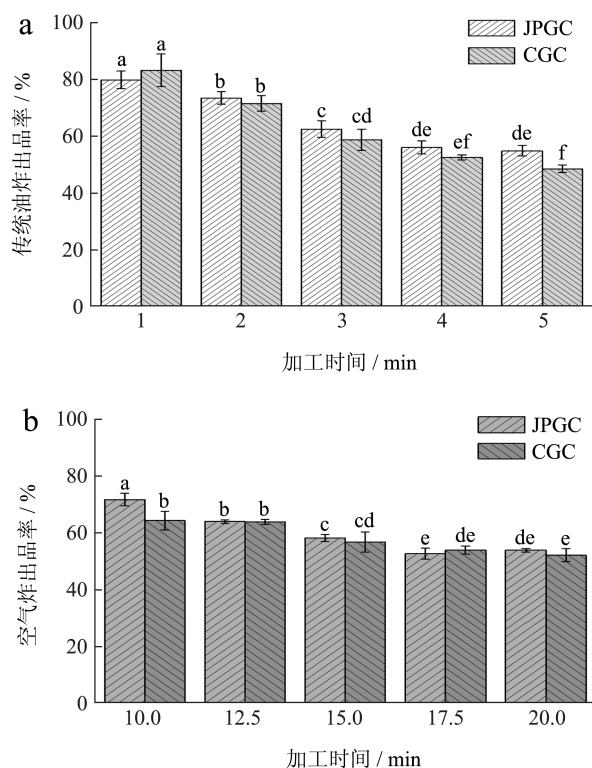


图 6 炸制时间对草鱼出品率的影响

Fig.6 Effect of frying time on the yield of grass carp

2.2.5 炸制时间对草鱼水分含量的影响

炸制时间对草鱼水分的影响如图 7 所示。随着炸制时间的延长, 鱼肉水分含量呈明显的下降趋势。在传统油炸加工下水分含量下降明显, JPGC 和 CGC 在 5 min 时水分含量达到最低, 分别为 47.02%、46.62%。而空气炸加工中, 随着炸制时间的增加, 水分含量变化幅度小于传统油炸组, 在 20 min 时水分含量分别为 56.13%、51.62%。这是因为鱼肉受到长时间的高温加工, 其组织内部的自由水将首先被去除; 随着炸制时间的增加, 蛋白质变形程度随之加剧, 维持结构稳定的三级结构、二级结构依次被破坏, 进而引起水分流失。空气炸处理后期的水分含量普遍高于传统油炸组, 传统油炸加工下外部的油脂渗透至鱼肉组织内部, 加快了内部水分的蒸发。而空气炸采用热风循环加热, 使鱼肉表层温度迅速升高形成干燥层, 该干燥层可以延缓加工过程中水分的进一步流失^[7]。Chang 等^[27]研究报道, 当炸制鱼肉的水分含量低于 50%, 消费者对其接受度明显降低, 在炸制过程中需要注意水分变化。

此外, 研究发现在两种炸制方式下, 后期 JPGC 水分含量均高于 CGC, 推测可能是 JPGC 结构破坏程度较小, 从而拥有较高的保水性。这可能是 JPGC 鱼肉更嫩, 品质更好的原因之一。

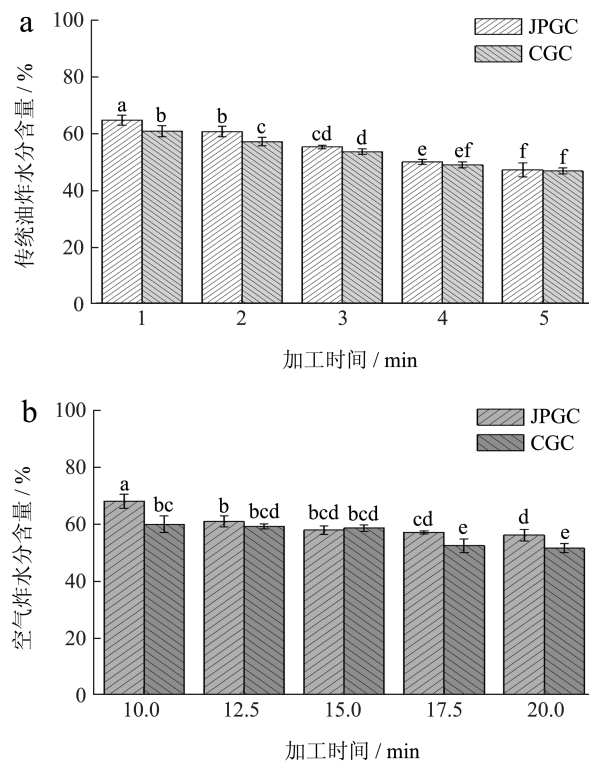


图 7 炸制时间对草鱼水分含量的影响

Fig.7 Effect of frying time on moisture content of grass carp

2.2.6 炸制时间对草鱼水分分布的影响

炸制过程中的水分分布和水分迁移对于草鱼品质的形成有着重要影响, 鱼肉中水分状态可分为 3 种类型, 结合水 (T_2b 0.1~10 ms); 不易流动水 (T_{21} 10~100 ms); 自由水 (T_{22} 100~1 000 ms)^[28]。不同炸制时间草鱼 T_2 弛豫信息如图 8 所示, 随着炸制时间的增加, 两种炸制方式下的不易流动水峰面积整体减小, T_{21} 信号强度逐渐减弱, 对应的峰面积 (A_{21}) 减小, 炸制后期空气炸处理组不易流动水含量高于传统油炸组。表明鱼肉中不易流动水含量逐渐降低, 肌肉纤维的保水性逐渐降低。这可能是由于传统油炸使肌原纤维收缩更加剧烈, 储存在鱼肉肌原纤维网络中的水分不断向外扩散引起的^[29]。张艳等^[30]研究指出, 在加工过程中不易流动水会转化为结合水与自由水, 由于自由水活跃且容易散失, 长时间的加热使鱼肉中自由水散失的速率大于不易流动水向其转化的速率, 剩余的结合水与细胞大分子结合紧密、较难被剔除。这也说明了本研究 A_{2b} 与 A_{22} 的变化趋势, 梁瑞等^[31]在对南美白对虾的研究中, 也发现相似的趋势。此外, JPGC

在相同炸制条件下不易流动水含量明显高于 CGC，这说明 JPGC 在加热时，其保水能力强于 CGC，这与上文水分含量指标相对应，推测可能是由于 JPGC 肌纤维排列结构不同导致的。

综合以上品质指标、外观形态以及水分指标结果，以达到最佳油炸效果为参考指标，筛选传统油炸（200 ℃，4 min）和空气炸（200 ℃，20 min）为较优的草鱼炸制条件。

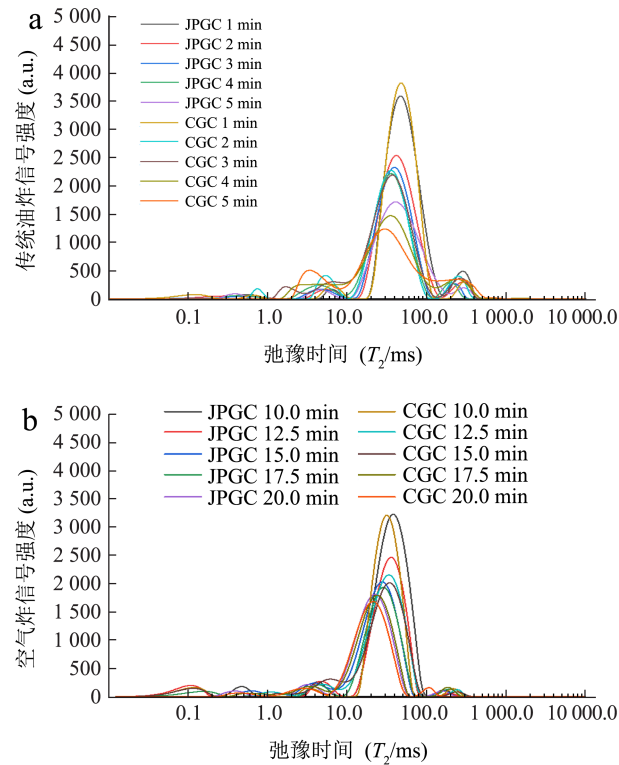


图 8 炸制时间对草鱼水分分布图

Fig.8 Moisture distribution of grass carp by frying time

2.3 传统油炸与空气炸草鱼脂肪和蛋白质二级结构的影响

2.3.1 传统油炸和空气炸对草鱼脂肪含量与脂肪氧化的影响

脂类对风味的形成具有重要作用，是香味形成的前体物质。适度的脂肪氧化可以赋予食物优良的风味，过度的脂肪氧化会产生酸败以及哈喇味。不同炸制条件对脂肪含量和 TBARS 结果如表 6 所示。经传统油炸处理得到的 JPGC 与 CGC，脂肪质量分数分别为 8.47%、9.03%，显著高于空气炸处理组的 0.30%、0.62%。空气炸处理未额外添加任何油脂，最终含有油脂原因可能是鱼肉中原有的脂肪，并且发现 JPGC 的脂肪含量低于 CGC，这与课题组前期发现 JPGC 脂肪含量更低的结果相符^[3]。

TBARS 值方面，传统油炸 CGC 的最大值为

0.47 mg·kg⁻¹，其次是 JPGC 为 0.39 mg·kg⁻¹，而空气炸处理的两种草鱼 TBARS 值无显著差异，分别为 0.15 和 0.14 mg·kg⁻¹。这可能与加工方式以及食品自身的脂肪含量有关，在传统油炸过程中，豆油中的单不饱和脂肪酸受热发生氧化反应，使鱼肉中的过氧化物增加^[32]。在炸制过程中肌纤维收缩吸入外源油脂，增加了脂肪氧化程度，因此使丙二醛含量增加，而空气炸处理由于没有外源油脂的接入，从而有效控制了脂肪氧化程度。杜柳等^[33]研究也发现，采用空气炸处理克氏原螯虾，相比传统油炸具有更低的脂肪氧化程度。综合考虑脂肪含量和 TBARS 值，空气炸处理具有较低的脂肪含量以及脂肪氧化程度，更有利于保持鱼肉的风味和品质。

表 6 不同炸制条件对草鱼脂肪含量、TBARS 的影响

Table 6 Effect of different frying conditions on fat content and

TBARS of grass carp			
加工条件	样品	脂肪含量/%	TBARS/(mg·kg ⁻¹)
传统油炸 200 ℃，4 min	JPGC	8.47 ± 1.21 ^a	0.39 ± 0.04 ^b
	CGC	9.03 ± 0.87 ^a	0.47 ± 0.03 ^a
空气炸 200 ℃，20 min	JPGC	0.30 ± 0.07 ^b	0.15 ± 0.04 ^c
	CGC	0.62 ± 0.01 ^b	0.14 ± 0.03 ^c

注：同列小写字母不同表示差异显著（*P* < 0.05）。

2.3.2 传统油炸和空气炸对草鱼肌原纤维蛋白二级结构的影响

肌原纤维蛋白二级结构主要包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲，其中 α -螺旋和 β -折叠分别通过分子内部和分子间的氢键作用来维持结构的稳定， β -转角和无规则卷曲总含量增加表明结构变得相对松散无序。如图 9a 红外光谱图所示，酰胺 I 带（1 600~1 700 cm⁻¹）峰的变化主要是由羰基的伸缩振动引起的，可用于确定肌原纤维蛋白二级结构的变化^[34]。四组样品红外图谱整体趋势相似，进一步对肌原纤维蛋白二级结构相对含量分析，从而确定两种炸制方式对草鱼肌原纤维蛋白二级结构的影响。图 9b 可知，传统油炸加工组，无规则卷曲与 β -转角的相对含量之和高于空气炸处理组，高温破坏了维持结构稳定的氢键，鱼肉肌原纤维蛋白稳定的二级结构受到破坏，且传统油炸组破坏程度更加严重^[35]。在两种炸制方式下，JPGC 的 β -折叠含量（36.90%、34.32%）均高于 CGC 的 β -折叠含量（31.53%、31.91%），高温削弱了 JPGC 中化学键的相互作用，导致肌原纤维蛋白二级结构去螺旋化，逐渐展开转化为 β -折叠结构^[36]。

Xu 等^[37]研究发现， β -折叠的含量与肉的保水性具有协同作用，即较高的 β -折叠含量可以增强鱼肉蛋白分子内的氢键作用，形成更多的有序结构，从而更好

地保留水分,提高肉质品质。蛋白质结构从有序的折叠结构转变为伸展结构,其内部的疏水基团暴露,导致对不易流动水的束缚能力减弱,以及结合水与大分子蛋白质结合度降低,进而引起不同水分之间转化以及汁液流失。综合傅里叶红外光谱的结果分析,这可能是导致 JPGC 水分含量更高、嫩度更好的原因之一。

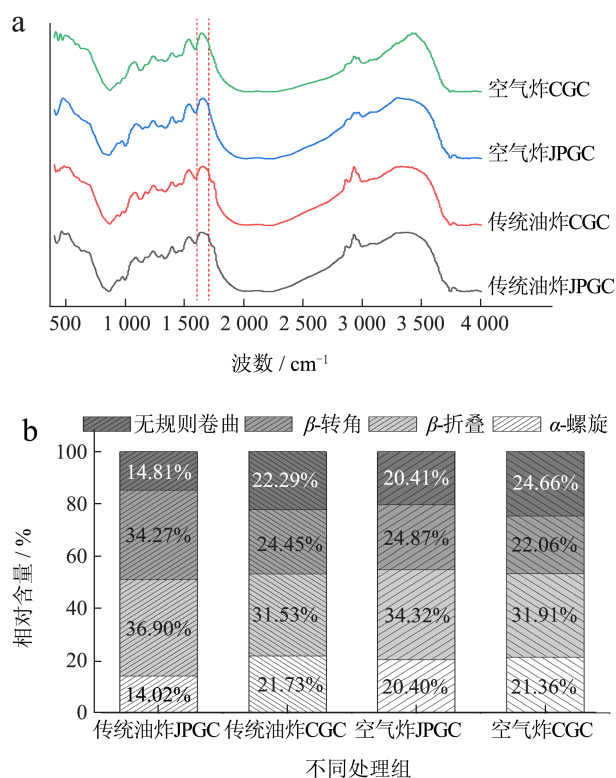


图9 不同炸制条件草鱼红外光谱图和二级结构堆积图

Fig.9 Infrared spectra and secondary structure stacking of grass carp with different frying conditions

2.4 传统油炸和空气炸对草鱼微观结构的影响

传统油炸、空气炸加工下的微观结构如图10所示。在传统油炸组中,JPGC表面出现了较多的细小间隙,而CGC的肌纤维缝隙明显增大并出现扭曲。空气炸加工下,JPGC肌纤维之间紧密且间隙较小,肌原纤维分布均匀且排列紧密,而CGC的组织结构相对松散。这种紧密有序的结构能够有效地延缓肌肉组织中汁液流失,从而维持草鱼肌肉嫩度。相同加工条件下,JPGC都表现出更好的组织状态,其肌纤维相对紧密有序,能够更有效地阻止肌肉组织中汁液的渗出^[22]。

根据Liu等^[7]研究发现,传统油炸在热油的作用下,使相邻的肌内膜发生收缩并紧密聚集,导致肌纤维间变得疏松,结构表面出现的一些不规则物质,则是肌纤维细胞内部分肌浆蛋白溶出物。而空气炸的热风循环下使结构发生改变,胶原蛋白逐渐降解并出现凝胶

化,部分肌束黏聚在一起,结缔组织变性形成的凝胶填充在空隙之间。因此,组织间隙相对紧密不仅对油脂的渗入起到了阻碍作用,还延缓了内部汁液的渗出。这与上文研究结果相对应,在空气炸加工后肌纤维排列最为完整,有效地留存住鱼肉中的水分,使剪切力结果小于油炸加工,最终在达到油炸产品口感的同时口感更嫩。综上所述,空气炸加工能够更好地保护鱼肉的组织结构,从而提升鱼肉的嫩度和品质。

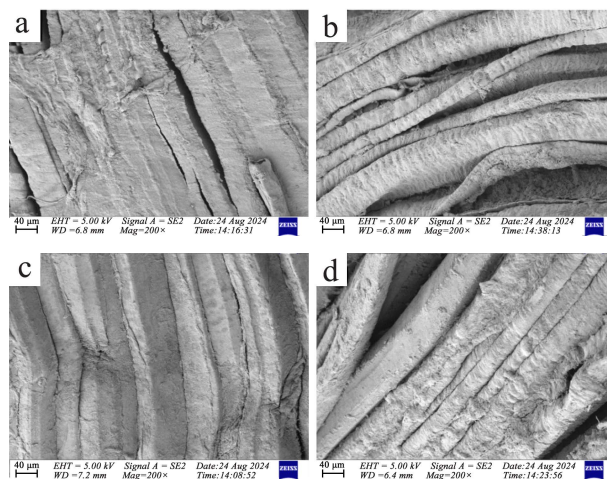


图10 不同炸制条件草鱼微观结构图

Fig.10 Microstructure of grass carp with different frying conditions

注: a 为传统油炸 JPGC; b 为传统油炸 CGC; c 为空气炸 JPGC; d 为空气炸 CGC。

3 结论

通过比较两种炸制方式下 JPGC 和 CGC 的色泽、质构特性、感官评定、出品率、水分等指标,筛选出最佳炸制条件:传统油炸为 200℃、4 min,空气炸为 200℃、20 min。结果表明,空气炸 JPGC 综合食用品质更好,剪切力为 2 626.46 g,水分含量及不易流动水含量分别为 56.13%、88.31%,最大程度维持了外酥里嫩的口感,感官评分最高。空气炸 JPGC 的脂肪含量显著低于传统油炸组,且脂肪氧化程度更低,在达到传统油炸相似效果的同时减少了油脂的使用。进一步分析发现,两种炸制方式下 JPGC 的 β -折叠含量均显著高于 CGC,较高含量的 β -折叠可以有效保留住水分。微观结构同样表明,JPGC 肌纤维排列最为紧密有序,有效地延缓了汁液的流失。综上,空气炸草鱼达到了与传统油炸相似的效果,并且在加工中 JPGC 表现出更好的食用品质。但目前,空气炸加工效率普遍偏低,未来可以探寻与不同的前期预处理技术联用,期望在保证品质的同时提高生产效率。该研究可为草鱼的加工方式提供一定的理论支撑,未来可为助力地方特色水产品的开发与推广做贡献。

参考文献

- [1] 董立学,解绶启,周亮,等.饲料蛋白源和养殖密度对草鱼生长性能、体成分和血清生化指标的影响[J].水生生物学报,2023,47(2):217-226.
- [2] 杨富亿,文波龙,李晓宇,等.达里湖与五大连池和镜泊湖鱼类多样性比较研究[J].湿地科学,2023,21(2):280-291.
- [3] CHEN H S, PAN D Y, DU H Z, et al. Flavor differences of edible parts of grass carp between Jingpo Lake and commercial market [J]. Foods, 2022, 11(17): 2594.
- [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] FABRE R, DALZOTTO G, PERLO F, et al. Cooking method effect on Warner-Bratzler shear force of different beef muscles [J]. Meat Science, 2018, 138: 10-14.
- [6] SONG G, LI L, WANG H, et al. Real-time assessing the lipid oxidation of prawn (*Litopenaeus vannamei*) during air-frying by iKnife coupling rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. Food Control, 2020, 111: 107066.
- [7] LIU L, HUANG P, XIE W, et al. Effect of air fryer frying temperature on the quality attributes of sturgeon steak and comparison of its performance with traditional deep fat frying [J]. Food Science & Nutrition, 2022, 10(2): 342-353.
- [8] 吴晓龙,涂宗财,胡月明,等.不同高温处理方式对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响 [J]. 食品工业科技,2024,45(19):84-93.
- [9] YU X, LI L, 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: 102305.
- [10] HWANG C C, CHIEN H I, LEE Y C, et al. Physicochemical quality retention during cold storage of prepackaged barramundi meat processed with a new microwave-assisted induction heating technology [J]. Foods, 2023, 12(16): 3140.
- [11] JOSE C G, JACOB R H, GARDNER G E. Alternative cutting methods and dry aging reduce the shear force of hot boned beef striploin in Bos indicus cattle [J]. Meat Science, 2020, 163: 108036.
- [12] LIU S, ZHANG L, LI Z, et al. The cryoprotective effect of an antifreeze collagen peptide complex obtained by enzymatic glycosylation on tilapia [J]. Foods, 2024, 13(9): 1319.
- [13] KLINMALAI P, FONG-IN S, PHONGTHAI S, et al. Improving the quality of frozen fillets of semi-dried gourami fish (*Trichogaster pectoralis*) by using sorbitol and citric acid [J]. Foods, 2021, 10(11): 2763.
- [14] SUN Q, KONG B, LIU S, et al. Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality [J]. Lwt, 2021, 141: 111080.
- [15] 曹云刚.植物多酚对肉蛋白氧化稳定性和功能特性的影响机理及应用[D].无锡:江南大学,2016.
- [16] 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.
- [17] ZHANG C, SHI R, LIU W, et al. Effect of different thermal processing methods on sensory, nutritional, physicochemical and structural properties of *Penaeus vannamei* [J]. Food Chemistry, 2024, 438: 138003.
- [18] 米鑫鑫,郑茜,唐密,等.过热蒸汽技术对烤鱼“外酥里嫩”品质特性和风味的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(16):61-71.
- [19] TAN C, LI X, YU Y, et al. Effects of five thermal processing methods on the physicochemical properties and flavor characteristics of grass carp meat [J]. LWT, 2024, 206: 116599.
- [20] CAO L, RASCO B A, TANG J, 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.
- [21] 李锐.不同热加工方式对罗非鱼片品质变化影响作用研究[D].烟台:烟台大学,2021.
- [22] 孟玉琼,马睿,申屠基康,等.野生和配合饲料养殖大黄鱼品质的比较研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2016,46(11):108-116.
- [23] RAO J W, MENG F B, LI Y C, et al. Effect of cooking methods on the edible, nutritive qualities and volatile flavor compounds of rabbit meat [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 4218-4228.
- [24] PETRACCI M, BAÉZA E. Harmonization of methodologies for the assessment of poultry meat quality features [J]. World's Poultry Science Journal, 2011, 67(1): 137-151.
- [25] 刘月如,路索,尹涛,等.油炸风味鱼饼的空气炸制工艺优化[J].华中农业大学学报,2022,41(6):247-254.
- [26] 祝超智,李开元,王凯,等.不同部位与性别柴达木牛的品质和加工特性[J].肉类研究,2023,37(10):1-7.
- [27] CHANG L, LIN S, ZOU B, et al. Effect of frying conditions on self-heating fried Spanish mackerel quality attributes and flavor characteristics [J]. Foods, 2021, 10(1): 98.
- [28] SONG Y, HUANG F, LI X, et al. Water status evolution of pork blocks at different cooking procedures: a two-dimensional LF-NMR T1-T2 relaxation study [J]. Food Research International, 2021, 148: 110614.
- [29] WANG Y, ZHANG H, CUI J, et al. Dynamic changes in the water and volatile compounds of chicken breast during the frying process [J]. Food Research International, 2024, 175: 113715.
- [30] 张艳,王圣开,付勋,等.预制烤鱼水分分布及关键挥发性风味物质分析[J].食品工业科技,2024,45(2):75-83.
- [31] 梁瑞,林松毅,刁华玉,等.南美白对虾烤制过程中水分迁移及品质变化规律[J].中国食品学报,2022,22(11):204-213.
- [32] KHOR Y P, WAN S Y, TAN C P, et al. Potential of using basa catfish oil as a promising alternative deep-frying medium: a thermo-oxidative stability study [J]. Food Research International, 2021, 141: 109897.
- [33] 杜柳,邱文兴,刘栋银,等.不同热加工方式熟化对克氏原螯虾理化性质和风味的影响[J].肉类研究,2023,37(5):49-56.
- [34] WANG Z Y, WU Z X, ZHAO G H, et al. Effect of air frying and baking on physicochemical properties and digestive properties of scallop (*Patinopecten yessoensis*) adductor muscle [J]. Food Bioscience, 2023, 52: 102460.
- [35] BADII F, HOWELL N K. Effect of antioxidants, citrate, and cryoprotectants on protein denaturation and texture of frozen cod (*Gadus morhua*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(7): 2053-2061.
- [36] ZHU R, XIONG Z, LI D. Complex organic acids treatment on crayfish (*Procambarus clarkii*): the relationship between myofibrillar protein structure and meat quality [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(10): 5332-5345.
- [37] XU W, DONG R, LV A, et al. Natural aromatic extract of black tea improved the water retention of pork meat batter [J]. Food Research International, 2024, 190: 114627.