

文章编号:2095-7386(2023)06-0001-09

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2023.06.001

粉蒸黄鳝加工工艺优化及米粉抗回生性能比较

潘 扬¹,李 涵¹,张 莹^{1,2,3},胡秋林^{1,2,3},廖 鄂^{1,2,3},陈季旺^{1,2,3}

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院,武汉 430023;

2. 武汉轻工大学 农产品加工与转化湖北省重点实验室,武汉 430023;

3. 湖北仙桃黄鳝加工乡村振兴科技创新示范基地,仙桃 433018)

摘 要:为生产高品质粉蒸黄鳝,本文研究了油炸、裹粉等关键工艺对粉蒸黄鳝品质的影响。采用不同油炸条件(温度:150~170 ℃;时间:30~70 s)和制粉工艺(粳/籼米比例:全粳米、2:1、1:1、1:2、全籼米;炒制时间:60~180 s)加工黄鳝肉和米粉,测定黄鳝肉的水分含量、出品率、质构特性以及米粉的裹粉率、水合特性等;分析卡拉胶添加量(0.0%~0.3%)对米粉糊化特性、热力学特性、晶体结构以及粉蒸黄鳝感官品质的影响。结果显示,在油炸温度 170 ℃、时间 50 s 时,黄鳝肉的质构特性良好,水分含量(62.7%)、出品率(75.3%)适中;在粳米/籼米 2:1、炒制时间 120 s 时,米粉的裹粉率(24.7%)和黏着性(-10.7 cP)高,水合特性优;添加 0.3% 的卡拉胶,米粉糊化过程中的回生值(890 cP)、衰减(-22 cP)、回生焓(1.105 J/g)及相对结晶度(17.2%)低,粉蒸黄鳝感官评分高(8.36 分),表明添加卡拉胶显著提升了米粉的抗回生性能。本研究建立的高品质粉蒸黄鳝加工技术,可为蒸制类淡水鱼预制菜肴的开发提供技术支持。

关键词:黄鳝;米粉;工艺优化;卡拉胶;抗回生

中图分类号:TS 213

文献标识码:A

Optimization of process for steamed *Monopterus albus* and comparison of anti-retrogradation properties for rice flour

PAN Yang¹, LI Han¹, ZHANG Ying^{1,2,3}, HU Qiulin^{1,2,3}, LIAO E^{1,2,3}, CHEN Jiwang^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

3. Hubei Xiantao *Monopterus albus* Processing Demonstration Base for Science and Technology Innovation with Rural Revitalization, Xiantao 433018, China)

Abstract: This study investigated the effects of crucial process, including frying and flour coating, on the quality of the steamed *Monopterus albus* with rice flour. To optimize frying conditions (temperature: 150—190 ℃; time: 30—70 s) and process for preparing rice flour (proportions of indica/japonica rice: all indica, 2:1, 1:1, 1:2, all japonica; stir-frying time: 60—180 s), the moisture content, yield, and textural properties

收稿日期:2023-11-10.

作者简介:潘扬(1999—),男,硕士研究生,研究方向为水产品加工与贮藏,E-mail:panyangwhpu@126.com.

通信作者:廖鄂,讲师,主要研究方向为水产品加工与质量控制,E-mail:liaoel987@whpu.edu.cn

基金项目:湖北省重点研发计划自主创新类项目(编号:2023BBB111);湖北省乡村振兴科技支撑项目(编号:2022BBA147).

of *Monopterus albus*, as well as flour coating rate, hydration were measured. In addition, the effects of carrageenan addition amount (0.0%–0.3%) on pasting, thermodynamic properties, crystal structure of rice flour, and organoleptic quality of steamed *Monopterus albus* were analyzed. The results showed that the good texture properties and moderate moisture content (62.7%) and yield (75.3%) were presented when *Monopterus albus* meat was fried at 170 °C for 50 s; acceptable coating rate (24.7%), adhesion (−10.7 cP) and hydration of rice flour were obtained when rice flour was made with indica and japonica rice proportion of 2:1 and stir-fried for 120 s. When carrageenan of 0.3% was added into rice flour, there are low recovery value (890 cP), decay value (−22 cP), recovery enthalpy (1.105 J/g), and relative crystallinity (17.2%) during gelatinization process, high organoleptic score (8.36) of steamed *Monopterus albus* with rice flour. The results indicated that the addition of carrageenan could significantly improve the anti-retrogradation of rice flour. This study established a standardized processing technology for high-quality of steamed *Monopterus albus* with rice flour, which could provide technological support for the prepared dishes development of steamed freshwater fish.

Key words: *Monopterus albus*; rice flour; process optimization; carrageenan; anti-retrogradation

1 引言

黄鳝(*Monopterus albus*), 又名鳝鱼, 肉嫩味鲜, 富含蛋白质、维生素和矿物质^[1]。我国黄鳝养殖产业发展迅速, 2022 年产量为 33.4 万 t^[2]。其中, 湖北省黄鳝养殖产量在 2022 年达到 15.4 万 t, 居各省首位(占 46.2%)。目前, 我国黄鳝以鲜活销售为主, 加工比例不足 17%, 远低于我国海产品 50% 的加工比例^[3,4]。因此, 亟需开展黄鳝精深加工, 实现产业持续健康发展。

预制菜是以一种或多种农产品为主要原料, 采用标准化流水作业, 经预加工和/或预烹调制成的带有包装的成品或半成品菜肴。在当今快节奏生活的背景下, 大众越来越青睐于厨房劳动简单化, 对半成品或速冻食品的需求剧增。2022 年我国预制菜的市场规模达到 4 196 亿元, 预计到 2026 年将破万亿元^[5]。由于中式菜肴具有种类繁多、标准化水平低等特点, 要实现工业化规模生产仍存在一系列技术瓶颈。粉蒸黄鳝是湖北地方菜“沔阳三蒸”中的代表性水产蒸制菜肴, 深受广大消费者喜爱, 市场前景广阔。但目前其多为家庭作坊式生产, 标准化程度低, 还存在米粉易回生、粉肉结合不均匀、贮藏过程品质劣变快等问题。

近年来, 有研究者对蒸制类菜肴(粉蒸五花肉、粉蒸排骨等)的工艺优化及品质提升开展了研究探索。何彬等^[6]探讨了质构参数与荷叶粉蒸肉感官指标的相关性, 确定硬度、弹性、咀嚼性显著影响粉蒸肉的食用品质; 张慧丽等^[7]优化了粉蒸肉的肥瘦比例、盐含量、腌制时间和蒸制时间, 制作的粉蒸肉色

泽粉红、肉质酥嫩、滋味咸鲜; 张哲奇等^[8]对比了粉蒸肉中经熟制、高压灭菌、复热后挥发性化合物的种类及含量, 明确控制醛类物质以及己酸乙酯有助于提升粉蒸肉复热后的风味。但针对蒸制类预制菜标准化加工及品质控制技术的相关研究缺乏, 且作为粉蒸产品中重要的品质影响因素——米粉品质改良研究却鲜有报道。

本研究通过探究油炸时间和温度对黄鳝肉感官品质、质构等的影响, 优化黄鳝肉油炸工艺; 研究籼米/粳米比例、炒制时间、卡拉胶添加量等对米粉裹粉率、水合特性、糊化特性、热力学特性和晶体结构, 以及对粉蒸黄鳝感官品质的影响, 开发高品质抗回生米粉, 构建粉蒸黄鳝标准化加工技术体系, 为开发高品质的蒸制类淡水鱼预制菜肴提供技术指导。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

冷冻黄鳝肉(*Monopterus albus*), 由湖北允泰坊食品有限公司提供, 已宰杀去骨, 3 h 内经冷链运输至实验室, −18 °C 冰柜冻藏。

粳米(辽宁原乡源农业产业化开发有限公司); 籼米(益海嘉里(武汉)粮油工业有限公司); 食用大豆浸出油(山东百食佳食品科技有限公司); 食盐(中盐金坛盐化有限责任公司); 鸡精(上海太太乐食品有限公司); 白砂糖(广东福正东海食品有限公司); 白胡椒粉、花椒粉(川珍实业有限公司); 卡拉胶(食品级, 深圳拓建生物科技有限公司), 其他试剂均为分析纯。

2.2 仪器与设备

P70F23P-G5(S0)型微波炉(中国格兰仕家用电器有限公司);DMS-DZL102D 型电炸炉(德国德玛仕公司);C-LM3 型数显式肌肉嫩度仪(中国北京中西华大科技有限公司);RVA-Super4 型快速黏度仪(瑞典波通仪器公司);CR-10 色差仪(日本柯尼卡美能达公司);TA.XT2i 质构仪(配有 P/5 探头,英国 SMS 仪器公司);SmartLab SE 型 X 射线衍射仪(日本 Rigaku 仪器公司);Q2000 型差式扫描量热仪(美国 TA 仪器公司)。

2.3 试验方法

2.3.1 粉蒸黄鳝加工工艺

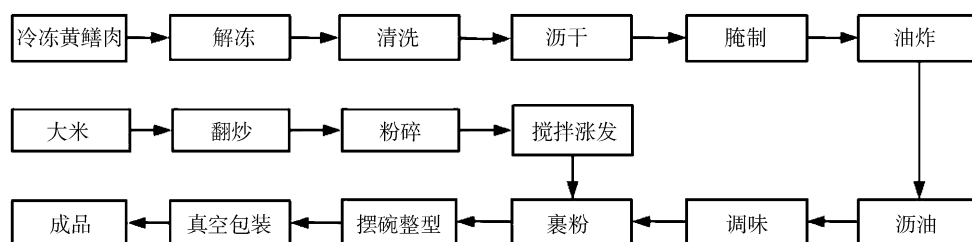


图 1 粉蒸黄鳝制作工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of steamed *Monopterus albus* with rice flour

2.3.2 米粉加工工艺

称取 40.0 g 不同比例(全籼米,籼米/粳米=2:1,1:1,1:2,全粳米)的大米,电磁炉 2 200 W 翻炒 60 s、90 s、120 s、150 s、180 s,待大米冷却倒入粉碎机粉碎,过 100 目筛。向粉碎的米粉中加入复配调味料(0.75%鸡精、0.25%食盐、0.05%花椒粉、50%纯净水, $m/m_{\text{粉}}$),再分别加入 0.1%、0.2%、0.3% 的卡拉胶($m/m_{\text{粉}+\text{水}}$)。

2.3.3 水分含量

参照 GB/T 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》的方法。

2.3.4 出品率

参考 Gök 等^[9]的方法,略作修改。称取约 30.0 g 大小形态基本一致的黄鳝肉油炸,比较油炸前后黄鳝肉的质量变化。按照式(1)计算炸黄鳝肉的出品率。

$$P = \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: P —出品率,%; m_0 —油炸前黄鳝肉质量,g; m_1 —油炸后黄鳝肉质量,g。

2.3.5 质构分析(texture profile analysis, TPA)

参考密鑫宇等^[10]的方法。采用 TA.XT2i 质构仪测定黄鳝肉和米粉的质构特性。

粉蒸黄鳝加工工艺如图 1 所示。将冻藏黄鳝肉 4 ℃冷藏解冻,并取 125.0 g 切成尺寸约 30 mm×50 mm×10 mm 的肉块,洗净表面黏液,加入 1%食盐($m/m_{\text{肉}}$)腌制 10 min。随后将黄鳝肉油炸,控制油炸温度 170 ℃油炸 30 s、40 s、50 s、60 s、70 s,及油炸时间 50 s,油炸温度 150 ℃、170 ℃、190 ℃;取出冷却沥油 10 min,加入复配调味料(0.20%鸡精、0.12%白砂糖、0.12%白胡椒粉、8.00%纯净水, $m/m_{\text{肉}}$)调味,调味的黄鳝肉放入预制的米粉中裹粉,使米粉均匀覆盖黄鳝肉表面。最后将裹粉的黄鳝肉铺满蒸煮碗,将蒸煮碗放入蒸煮袋中抽真空,即为成品。

2.3.6 剪切力

参考薛盼盼等^[11]的方法。采用 C-LM3 型数显式肌肉嫩度仪测定黄鳝肉的剪切力。

2.3.7 裹粉率

裹粉率表示黏附米粉的质量与黄鳝肉和米粉总质量的比值。按照式(2)计算黄鳝肉的裹粉率。

$$Y = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

式中: Y —裹粉率,%; m_1 —裹粉前黄鳝肉的质量,g; m_2 —裹粉后黄鳝肉和米粉的质量,g。

2.3.8 色度

参考解菲等^[12]的方法。采用 CR-10 色差仪测定米粉的色度。

2.3.9 水合特性

水合特性的测定参照 Heo 等^[13]的方法,稍作修改。称取约 0.50 g 干米粉于离心管中,加入 20 mL 超纯水,充分摇匀置于 85 ℃恒温水浴锅中平衡 30 min,每隔 5 min 摇匀一次;随后将装有湿米粉的离心管冷却至室温置于离心机中,以 3 800 r/min、20 ℃离心 15 min。将上清液置于铝盒中,在 105 ℃下烘干至恒重;同时称取离心管中沉淀物质量和干米粉质量。按照式(3)至(5)计算米粉的吸水性指数

(water absorption index, WAI)、水溶性指数(water solubility, WSI)和膨胀势(swelling power, SP)。

$$WAI = \frac{m_2}{m} \quad (3)$$

$$WSI = \frac{m_1}{m} \times 100 \quad (4)$$

$$SP = \frac{m_2}{m \times (1 - \frac{WSI}{100})} \quad (5)$$

式中:WAI—吸水性指数;WSI,水溶性指数,%;SP,膨胀势; m —干米粉的质量,g; m_1 —上清液烘干后的质量,g; m_2 —离心管中沉淀物的质量,g。

2.3.10 糊化特性

参考 NY/T 1753—2009《水稻米粉糊化特性测定 快速黏度分析法》的方法。采用 RVA—Super4 型快速黏度仪测定米粉的糊化特性。

2.3.11 热力学特性

参照 Ding 等^[14]的方法。采用 Q—2000 差式扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC)

测定米粉的热力学特性。

2.3.12 晶体结构

参照 Zhang 等^[15]的方法,略作修改。采用 SmartLab SE 型 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)测定米粉的晶体结构。在 40 kW 和 40 mA 的 Cu K α 辐射源($\lambda=0.154$ nm)下测定,扫描速度为 10°/min,扫描步长为 0.033°,衍射角(2 θ)范围为 3°~50°。按照式(6)计算米粉的相对结晶度(relative crystallinity, RC)。

$$RC = \frac{S_0}{S_0 + S_1} \quad (6)$$

式中:RC—相对结晶度,%; S_0 —XRD 衍射图中结晶区的面积; S_1 —XRD 衍射图中无定形区的面积。

2.3.13 感官评价

采用低、中、高强度微波复热(时间:45 s、60 s、75 s;功率:800 W)粉蒸黄鳝,感官评价方法参考 T/HBPX 004—2020《楚菜 沔阳三蒸》,评分细则见表 1。

表 1 粉蒸黄鳝的感官评价

Table 1 Organoleptic evaluation of steamed *Monopterus albus* with rice flour

指标	评价标准				
	优秀(9~10 分)	良好(7~8 分)	一般(5~6 分)	较差(3~4 分)	差(1~2 分)
滋味	黄鳝肉软嫩无腥味;米粉丝滑细嫩。	黄鳝肉软嫩略有腥味;米粉丝滑细嫩。	黄鳝肉较硬略有腥味;米粉略夹生。	黄鳝肉干硬略有腥味;米粉夹生。	黄鳝肉干硬腥味重;米粉严重夹生。
气味	黄鳝肉香味浓郁;米粉清香。	黄鳝肉略有焦糊味;米粉清香。	黄鳝肉略有焦糊味;米粉略有清香。	黄鳝肉有明显焦糊味;米粉略有清香。	黄鳝肉有明显焦糊味;米粉无味。
色泽	黄鳝肉色泽正常;米粉呈微黄色。	黄鳝肉色泽较暗;米粉呈微黄色。	黄鳝肉色泽较暗;米粉色泽偏白。	黄鳝肉色泽暗淡;米粉色泽偏白。	黄鳝肉色泽暗淡;米粉呈白色。
质地	黄鳝肉坚实有弹性;米粉湿润软糯。	黄鳝肉较有弹性;米粉湿润软糯。	黄鳝肉较有弹性;米粉略生硬。	黄鳝肉干硬无弹性;米粉略生硬。	黄鳝肉干硬无弹性;米粉生硬。
形态	黄鳝肉裹粉紧实均匀。	黄鳝肉裹粉较均匀。	黄鳝肉裹粉不均匀。	黄鳝肉裹粉不均匀,略掉渣。	黄鳝肉裹粉不均匀,严重掉渣。
合计	滋味 $\times 0.3$ + 气味 $\times 0.2$ + 色泽 $\times 0.1$ + 质地 $\times 0.2$ + 形态 $\times 0.2$				

2.4 数据处理

每组试验至少重复三次,取平均值,所有试验结果用“平均值 $\pm$ 标准差”表示。采用 SPSS 25、Microsoft Excel 2013 对数据进行统计分析,Origin 2022 软件制图,MDI Jade 6.5 计算分析衍射峰和相对结晶度。

3 结果与讨论

3.1 油炸工艺对黄鳝肉水分含量与出品率的影响

不同油炸条件的黄鳝肉水分含量和出品率如表 2 所示。相同油炸温度下,黄鳝肉中水分含量随油

炸时间延长整体呈下降趋势。150 °C 黄鳝肉的水分含量在油炸时间 50~70 s 下降不显著($P>0.05$);170 °C 黄鳝肉的水分含量在油炸时间 30~50 s 变化不显著($P>0.05$),而在 50~70 s 显著($P<0.05$)下降(19.3%),水分大量蒸发使得黄鳝肉皱缩变硬,表面无光泽;相同油炸时间下,相较 150 °C 和 170 °C,190 °C 黄鳝肉的水分含量较低,70 s 时降至 49.8%,水分过度蒸发。

相同油炸温度下,黄鳝肉的出品率随油炸时间的延长整体呈下降趋势。150 °C 黄鳝肉在油炸 30~50 s 出品率无显著($P>0.05$)变化;油炸时间从 60 s

延长至 70 s,出品率由 77.7%降至 66.2%,下降显著($P<0.05$);170℃黄鳝肉油炸 70 s 的出品率较 40 s 下降了 17.3%;相较相同油炸时间的 150℃和 170℃,190℃黄鳝肉的出品率较低,可能是高温加速了水分蒸发,导致重量显著减轻。

表 2 油炸温度/时间对黄鳝肉水分含量和出品率的影响/%

Table 2 Effects of frying temperature/times on moisture content and yield of *Monopterus albus* meat/%

时间/s	150℃		170℃		190℃	
	水分含量	出品率	水分含量	出品率	水分含量	出品率
30	76.3±2.2 ^{Aa}	77.8±0.4 ^{Aa}	64.7±4.7 ^{Ab}	78.3±1.1 ^{Aa}	65.7±0.2 ^{Ab}	72.2±1.8 ^{Ab}
40	68.1±1.2 ^{Ba}	79.9±1.8 ^{Aa}	66.0±2.7 ^{Aa}	79.8±0.5 ^{Aa}	68.2±0.2 ^{Aa}	67.4±1.8 ^{Bb}
50	62.3±1.1 ^{Ca}	77.7±0.9 ^{Aa}	62.7±2.1 ^{Aa}	75.3±1.0 ^{Bb}	57.9±1.2 ^{Bb}	71.5±1.3 ^{Ac}
60	61.5±1.7 ^{Ca}	70.1±0.4 ^{Ba}	59.0±1.8 ^{ABab}	70.7±0.5 ^{Ca}	55.2±4.0 ^{Bb}	63.0±0.6 ^{Cb}
70	59.6±3.3 ^{Ca}	66.2±2.4 ^{Ca}	50.6±8.5 ^{Ba}	66.0±1.1 ^{Ba}	49.8±0.3 ^{Ca}	60.9±0.9 ^{Cb}

注:每个数值都是 3 次重复试验的平均值±标准差,同一列不同大写字母表示不同油炸时间差异显著($P<0.05$),同一行不同小写字母表示不同油炸温度差异显著($P<0.05$)。

3.2 油炸工艺对黄鳝肉质构特性的影响

控制油炸时间 50 s 不变,比较油炸温度对黄鳝肉质构特性的影响,结果如表 3 所示。油炸温度由 150℃升至 190℃,黄鳝肉的硬度、咀嚼性和剪切力显著($P<0.05$)增加了 81.5%、84.1%和 60.8%,这可能是黄鳝肉的肌原纤维蛋白在高温下变性,疏水基团暴露^[16],黄鳝肉持水力快速下降。油温从 150℃升至 190℃,黏着性由-8.49 cP(150℃)显著($P<0.05$)降低至-23.5 cP(190℃),推测是黄鳝肉在高温下表面形成硬壳,导致黄鳝肉黏着性下降。

控制油炸温度 170℃不变,比较油炸时间对黄鳝肉质构特性的影响,结果见表 3。黄鳝肉的硬度、咀嚼性、内聚性和剪切力随油炸时间的延长,显著($P<0.05$)增加了 142.4%、58.2%、9.9%和 158.6%,可能是黄鳝肉经长时间油炸,水分不断蒸发,导致皱缩变硬。黏着性和弹性随油炸时间延长显著($P<0.05$)降低;特别是 50~70 s 黄鳝肉的黏着性由-14.52 cP 骤降至-34.00 cP,不利于裹粉。综上所述,黄鳝肉较佳油炸工艺为温度 170℃、时间 50 s。

表 3 油炸温度/时间对黄鳝肉质构的影响

Table 3 Effects of frying temperatures/times on texture of *Monopterus albus* meat

工艺条件	硬度/N	黏着性/cP	弹性	咀嚼性/N	内聚性	剪切力/N
温度/℃	150	948±18 ^c	-8.49±0.36 ^a	0.87±0.02 ^a	740±16 ^c	0.86±0.05 ^a
	170	1 225±17 ^b	-13.85±0.70 ^b	0.86±0.02 ^a	1 047±25 ^b	0.86±0.03 ^a
	190	1 721±15 ^a	-23.45±1.01 ^c	0.88±0.04 ^a	1 363±20 ^a	0.87±0.04 ^a
时间/s	30	856±31 ^c	-12.11±1.61 ^a	0.86±0.02 ^a	846±26 ^d	0.81±0.02 ^b
	40	940±69 ^d	-13.78±1.55 ^a	0.84±0.06 ^{ab}	927±21 ^c	0.80±0.02 ^b
	50	1 364±64 ^c	-14.52±0.55 ^a	0.82±0.03 ^{bc}	838±27 ^d	0.87±0.07 ^a
	60	1 658±85 ^b	-23.01±2.77 ^c	0.82±0.03 ^{bc}	957±33 ^b	0.87±0.03 ^a
	70	2 075±64 ^a	-34.00±1.69 ^d	0.79±0.03 ^c	1 339±32 ^a	0.89±0.05 ^a

注:每个数值都是 10 次重复试验,去掉最大值和最小值后的平均值±标准差,同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.3 籼米/粳米比例对米粉质构和裹粉率的影响

根据前期试验结果,先用炒制 120 s、添加 0.3% 卡拉胶的米粉,探究籼米/粳米比例对米粉质构特性和裹粉率的影响,结果如表 4 所示。米粉的硬度和咀嚼性随籼米占比减少显著($P<0.05$)降低 20.4% 和 44.9%,推测是热加工促进部分直链淀粉的形成^[17],而籼米的直链淀粉含量较高,使米粉整体持水力下降而易回生,导致质地变硬。米粉的黏着性则随籼米比例降低显著($P<0.05$)提高 53.5%,是

因为支链淀粉含量与黏着性正相关,而粳米的支链淀粉含量较高^[18],掺入粳米能提升米粉黏着性。B-C 组的回复性显著($P<0.05$)高于 A、E 组,同时 B 组的裹粉率(24.7%)较高。支链淀粉含量通常与米粉黏性呈正相关,粳米中支链淀粉含量较多,在籼米中适量掺入粳米能增加米粉裹粉率^[18],然而试验发现米粉黏性过大也会造成自身相互粘结,减弱对黄鳝肉的黏附力。因此,确定较佳的籼米/粳米比例为 2:1。

表 4 籼米/粳米比例对米粉质构和裹粉率的影响

Table 4 Effects of rice proportions on texture and coating rate of rice flour

组别	硬度/N	黏着性/cP	咀嚼性/N	回复性	内聚性	裹粉率/%
A(全籼米)	2 956±44 ^a	-15.24±0.86 ^d	856±31 ^a	0.29±0.05 ^{bc}	0.44±0.04 ^a	18.6±2.6 ^b
B(2:1)	2 556±36 ^b	-10.73±0.52 ^c	795±30 ^b	0.34±0.05 ^a	0.45±0.03 ^a	24.7±3.1 ^a
C(1:1)	2 465±25 ^c	-9.85±0.81 ^b	789±28 ^b	0.32±0.04 ^{ab}	0.45±0.03 ^a	14.0±3.2 ^b
D(1:2)	2 272±34 ^c	-9.21±0.92 ^b	561±24 ^c	0.33±0.03 ^{ab}	0.47±0.04 ^a	15.0±2.1 ^b
E(全粳米)	2 352±47 ^d	-7.08±0.81 ^a	472±41 ^d	0.26±0.02 ^c	0.44±0.02 ^a	14.9±3.9 ^b

注:每个数值都是 10 次重复试验,去掉最大值和最小值后的平均值±标准差,同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.4 炒制时间对米粉色度的影响

炒制时间对米粉色度的影响见表 5。炒制 120 s 的米粉 L^* 值高,因为适度炒制能破坏大米的淀粉晶体结构,起到预糊化作用。炒制时间从 120 s 延长至 180 s 时,米粉 b^* 值显著($P<0.05$)增加 66.8%,可能是淀粉糊化和美拉德反应同步发生^[19],炒制时间过长导致大米严重褐变,色泽品质降低。炒制时间 120 s 的米粉色泽良好,与解菲等^[12]探究大米较佳炒制时间的结果类似。

表 5 炒制时间对米粉色度的影响

Table 5 Effects of frying times on the color of rice flour

炒制时间/s	L^* (白度)	a^* (红度)	b^* (黄度)
60	84.0±1.7 ^b	1.07±0.29 ^d	8.27±0.74 ^d
90	89.5±0.2 ^a	1.40±0.20 ^d	9.70±0.89 ^d
120	90.6±1.1 ^a	2.83±0.12 ^c	12.43±0.06 ^c
150	87.8±0.8 ^a	4.47±0.55 ^b	16.03±1.55 ^b
180	88.7±3.8 ^a	8.63±0.60 ^a	20.73±1.06 ^a

注:每个数值都是 3 次重复试验的平均值±标准差,同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

3.5 炒制时间对米粉水合特性的影响

炒制时间对米粉水合特性的影响如图 2 所示。米粉的 WAI 随炒制时间的延长先增后减,120 s (8.97)和 150 s(8.99)的 WAI 显著($P<0.05$)高于其他炒制时间,可能是适度高温加工可使淀粉粒结构变松散,填充于淀粉颗粒间和分子间可溶性蛋白的溶出,促进大米的吸水膨胀和糊化^[20]。米粉的 WSI 随炒制时间的延长显著($P<0.05$)降低,且在 120~180 s 快速降低(58.8%),可能是过度炒制引起淀粉分子中可溶性蛋白质变性和热降解。米粉的 SP 综合反映了米粉在糊化过程中的吸水力和在离心后米粉糊的持水力,与米粉中直链/支链淀粉的含量有关^[18]。SP 随炒制时间延长也先增后减,在 120 s 达到最大值(10.3),可能是经炒制米粉中支链淀粉的有序度降低,持水力增强;而在 120~180 s 降低可能是过度炒制使支链淀粉分子部分降解为直链淀

粉,直链淀粉与脂肪酸形成复合物^[21],使持水能力下降。因此,确定较佳的大米炒制时间为 120 s。

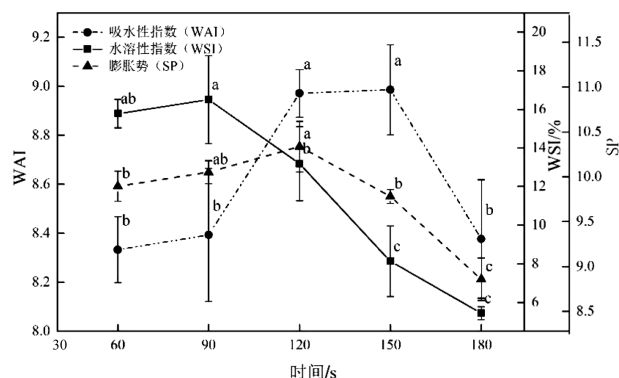


图 2 炒制时间对米粉水合特性的影响

Fig. 2 Effects of stir-frying times on the hydration properties of rice flour

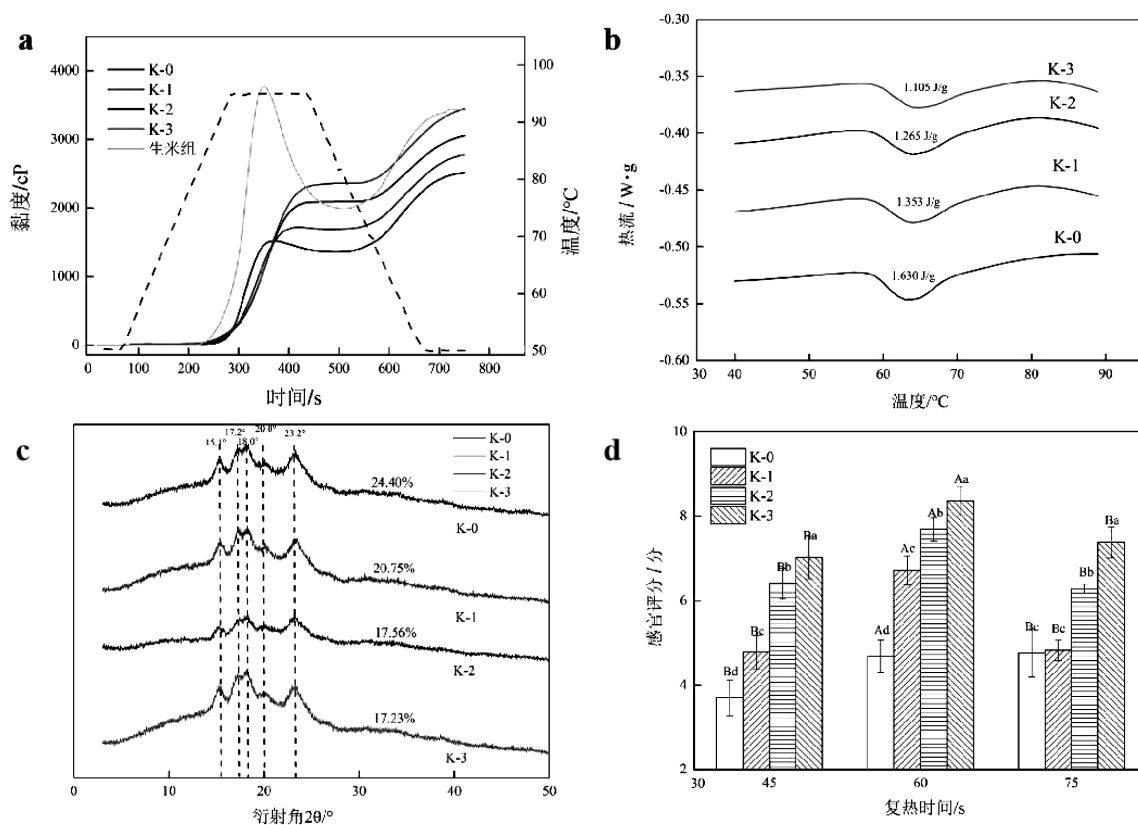
3.6 卡拉胶添加量对米粉回生度和粉蒸黄鳝感官评分的影响

卡拉胶作为一种亲水胶体,能通过氢键、范德华力等作用形成三维网络结构,减少糊化淀粉冷却时的水分流失,抑制淀粉老化^[22]。由图 3(a)可见,K-0 的黏度峰值、谷值和最终值较生米组显著($P<0.05$)降低 59.8%、31.7%和 26.9%,这可能是支链淀粉含量与黏着性呈正相关^[18],米粉经炒制部分支链淀粉降解为直链淀粉^[23],黏度随之降低。同时,K-0 较生米组的衰减值和回生值也显著($P<0.05$)降低 91.1%和 20.2%($P<0.05$);低衰减值可能是炒米粉中多数淀粉已呈无定形状态,衰减值越低,耐剪切力和热稳定性越好^[23];低回生值可能是米粉中淀粉颗粒表面淀粉-脂肪复合物的形成的刚性网络,抑制了淀粉颗粒破裂,延缓淀粉回生。以上结果表明炒米粉的热稳定性、耐剪切性能和抗回生能力良好。K-3 的黏度峰值、谷值和终值较 K-0 显著($P<0.05$)提高 47.1%、66.0%和 25.4%,且黏度终值(3 148 cP)与生米(3 433 cP)相近,黏度终值直接影响米粉的裹糊能力^[24],表明 K-3 的裹糊能力与生米相近。同时,K-3 的衰减值和回生值较 K-0 显

著($P<0.05$)降低 113.8%和 22.7%,可能是卡拉胶环绕在糊化淀粉分子周围形成薄膜,阻碍了淀粉的再结晶和水分流失^[22,25];Chen 等^[26]使用亲水胶体——黄原胶同样增加了淀粉黏度。综上所述,在炒制 120 s 的米粉中加入 0.3%卡拉胶,不仅能提高米粉的热稳定性、耐剪切性能和抗回生能力,还可维持米粉的裹糊能力。

卡拉胶添加量对米粉热力学特性的影响如图 3(b)所示。58~65 °C 的吸热峰表示淀粉由结晶状态转变为可溶状态,内部氢键断裂需要吸收的能量

ΔH ^[27]。K-0 至 K-3 的 ΔH 依次为 1.630、1.353、1.265 和 1.105 J/g, K-1 至 K-3 的 ΔH 低于 K-0,且 K-3 的 ΔH 最低,这可能是卡拉胶通过与淀粉链相互作用阻碍淀粉分子间的氢键连接,延缓了淀粉的重结晶过程^[22],减少再糊化所需能量。同时 K-3 的起始(T_0)、峰值(T_p)和终止(T_c)温度较 K-0 分别提高 0.76%、1.42%和 1.75%,推测是卡拉胶的强水合能力固定了部分自由水,提高了米粉的热稳定性^[23]。因此,加入 0.3%卡拉胶能抑制淀粉分子的重结晶,提高抗回生能力。



注:图(a)糊化特性:K-0 至 K-3 分别表示炒米的卡拉胶添加量为 0.0%、0.1%、0.2%和 0.3%,虚线为温度曲线;衰减值=峰值黏度-谷值黏度,回生值=最终黏度-谷值黏度;图(b)热力学特性:中标注的数值(J/g)表示淀粉的回生焓 ΔH ;图(c)晶体结构:中标注的数值(%)表示淀粉的 RC;图(d)感官评分:每个数值都是 10 次重复试验平均值±标准差,不同大写字母表示复热强度差异显著,不同小写字母表示卡拉胶添加量差异显著($P<0.05$);微波复热条件(时间:45s、60 s、75 s;功率:800 W)

图 3 卡拉胶添加量对米粉回生度和粉蒸黄鳝感官品质的影响

Fig. 3 (a-d) Effects of carrageenan addition amounts on retrogradation of rice flour and organoleptic score of steamed *Monopterus albus* with rice flour

图 3(c)显示了卡拉胶添加量对米粉的 XRD 图谱及相对结晶度(RC)的影响。各组米粉均在约 15.1°、17.2°、18.0°和 23.2°出现典型的 A 型淀粉晶体衍射峰,该晶型多存在于天然谷物类植物中^[28],表明各组米粉中的淀粉分子均发生了重结晶,持水能力降低。同时, K-1 至 K-3 的 RC 均低于 K-0,其

中 K-3 的 RC 最低(29.4%),表明卡拉胶能有效延缓淀粉链的重新排列和淀粉分子相互作用形成网络结构,降低水分散失^[25]。此外,在 20°处的衍射峰表明米粉的淀粉晶体结构中可能还存在 V 型晶体^[29],推测是大米经炒制部分支链淀粉降解为直链淀粉,后者易与脂肪酸疏水性碳链作用形成直链淀粉-脂

肪复合物,对淀粉回生起到抑制作用^[21]。综上所述,米粉经炒制 120 s 结合添加 0.3%卡拉胶,能有效抑制淀粉分子重排,降低 RC。

卡拉胶添加量对粉蒸黄鳝感官品质的影响如图 3(d)所示。相同卡拉胶添加量的粉蒸黄鳝复热 60 s 感官评分显著($P<0.05$)高于 45 s 和 75 s,是因为适当复热既可使黄鳝肉丝滑细嫩,也能使米粉充分糊化。相同复热时间下 K-0 的感官评分显著($P<0.05$)低于 K-1 至 K-3,表明添加卡拉胶可明显改善粉蒸黄鳝的感官品质。相同复热时间下 K-1 至 K-3 感官评分均显著($P<0.05$)增加,其中又以复热 60 s 的 K-3 感官评分最高(8.36 分),可能是卡拉胶与淀粉分子发生交联^[22],提高了米粉的黏性和持水能力,确保在米粉充分糊化且低回生度时,黄鳝肉也能维持香味和口感。

4 结论

本研究首先优化了黄鳝肉的油炸工艺,确定油炸温度 170 ℃,时间 50 s 时黄鳝肉的水分含量和出品率适中,质构特性良好。随后优化了制粉工艺,确定籼米/粳米 2:1,炒制 120 s 时,米粉的黏着性、回复性、裹粉率、色泽以及水合特性(吸水性、水溶性、膨胀势等)良好。添加 0.3%卡拉胶的炒米粉,糊化过程中的衰减值、回生值、回生焓、相对结晶度低,并确保复热时米粉和鱼肉的感官品质均优,是因为卡拉胶与淀粉分子通过氢键、范德华力等交联形成网络结构,提高了米粉的持水力和黏度。本研究可为水产类预制菜肴的开发提供技术指导。

参考文献:

- [1] 舒妙安,马有智,张建成. 黄鳝肌肉营养成分的分析[J]. 水产学报,2000,4:339-344.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2023 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2023.
- [3] 杨代勤,何力. 黄鳝质量安全风险分析[J]. 中国渔业质量与标准,2021,11(1):1-10.
- [4] 关平彦. 海产品加工副产物的生物转化工艺研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2021.
- [5] 赵靓琳. 预制菜行业现状及问题研究[J]. 现代营销(经营版),2021,9:146-147.
- [6] 何彬. 荷叶粉蒸肉质构指标与感官评价相关性研究[J]. 现代食品,2021,14:169-173.
- [7] 张慧丽,贺习耀,李晓萍. 加工方式对粉蒸肉风味品质的影响研究[J]. 现代食品,2021,7:72-79.
- [8] 张哲奇,臧明伍,张凯华,等. 熟制、高压灭菌和复热对粉蒸肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学,2019,40(10):187-192.
- [9] Gök V, Akkaya L, Obuz E, et al. Effect of ground poppy seed as a fat replacer on meat burgers[J]. Meat Science,2011,89(4):400-404.
- [10] 密鑫宇,吴文锦,弋景刚,等. 一种高压水去鱼鳞设备的研制及其对罗非鱼肉组织结构的影响[J]. 食品工业科技,2020,41(22):210-213,239.
- [11] 薛盼盼,章海凤,李旭,等. 对三粉公驴不同部位肉品质的测定分析[J]. 食品科学,2021,42(22):276-282.
- [12] 解菲,赵宁,江帆,等. 炒米理化特性研究[J]. 食品研究与开发,2021,42(23):7-13.
- [13] Heo S, Jeon S, Lee S. Utilization of Lentinus edodes mushroom β -glucan to enhance the functional properties of gluten-free rice noodles[J]. LWT-Food Science and Technology,2014,55(2):627-631.
- [14] Ding S Y, Peng B, Li Y Q, et al. Evaluation of specific volume, texture, thermal features, water mobility, and inhibitory effect of staling in wheat bread affected by maltitol[J]. Food Chemistry,2019,283:123-130.
- [15] Zhang L, Zeng L R, Wang X, et al. The influence of konjac glucomannan on the functional and structural properties of wheat starch[J]. Food Science and Nutrition,2020,8(6):2959-2967.
- [16] Fang M C, Huang G J, Sung W C. Mass transfer and texture characteristics of fish skin during deep-fat frying, electrostatic frying, air frying and vacuum frying[J]. LWT-Food Science and Technology,2021,137:110494.
- [17] Bernal M, Periago M, Ros G. Effects of processing on dextrin, total starch, dietary fiber and starch digestibility in infant cereals[J]. Journal of Food Science,2002,67(3):1249-1254.
- [18] 薛薇. 江苏省粳米品质分析及其淀粉性质的研究[D]. 无锡:江南大学,2021.
- [19] Karanam M, Theertha D P, Kumar A, et al. Effect of hydrothermal treatment on physi-

- cal and semolina milling properties of barley [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 287: 110142.
- [20] 张习军,熊善柏,赵思明.微波处理对稻谷品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 224-229.
- [21] Vasiliadou E, Raphaelides S N, Papastergidis E. Effect of heating time and temperature on partially gelatinized starch-fatty acid interactions [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 698-707.
- [22] Zhou S, Hong Y, Gu Z B, et al. Effect of heat-moisture treatment on the in vitro digestibility and physicochemical properties of starch-hydrocolloid complexes [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 104: 105736.
- [23] 郭丽娜,钟葵,佟立涛,等.燕麦片加工过程中营养品质及加工特性变化[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(1): 39-43.
- [24] 毕文雅,董震,张来林,等.低温、准低温、常温对“甬优 15”质构特性和糊化特性的影响研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(2): 137-142.
- [25] Li J M, Nie S. The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 53: 46-61.
- [26] Chen Z, Wan K X, Lim S, et al. Morphology, pasting, and structural characteristics of potato starch/xanthan gum blend by critical melting and freeze-thawing treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 107035.
- [27] Parniakov O, Bals O, Barba F, et al. Application of differential scanning calorimetry to estimate quality and nutritional properties of food products[J]. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(3): 362-385.
- [28] Rodriguez-carcia M, Hernandez-landaverde M, Delgado J, et al. Crystalline structures of the main components of starch[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 37: 107-111.
- [29] Song H, Choi I, Lee J, et al. Comparative study on physicochemical properties of starch films prepared from five sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivars [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 189: 758-767.