

发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜凝胶特性的影响

步 营¹, 程亚佳¹, 厉 寒^{1,2}, 朱文慧^{1*}, 励建荣¹, 李学鹏¹, 季广仁³

(1. 渤海大学食品科学与工程学院/生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 锦州 121013; 2. 大连工业大学海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 大连 116034; 3. 锦州笔架山食品有限公司, 锦州 121007)

摘 要: 为了更好地丰富老年食品市场, 满足吞咽困难群体多样化营养需求, 该研究以带鱼鱼糜为原料, 通过测定凝胶强度、全质构、持水性、动态流变学、白度、水分状态分布、蛋白二级结构、微观结构、体外消化率、国际吞咽障碍食物标准 (international dysphagia diet standardisation initiative, IDDSI) 等级等指标, 研究发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜凝胶品质的影响。结果表明, 发芽糙米匀浆的加入使带鱼鱼糜的凝胶强度从 $649.91 \pm 64.35 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 显著降低到 $480.93 \pm 98.84 \text{ g} \cdot \text{mm}$ ($P < 0.05$); 与空白组相比, 糙米添加组的硬度、胶着度和咀嚼性均显著降低 ($P < 0.05$), 具体来说, 硬度从 $585.63 \pm 61.35 \text{ N}$ 降低到 $399.87 \pm 51.23 \text{ N}$, 胶着度从 $81.14 \pm 10.23 \text{ N}$ 降低到 $50.16 \pm 7.13 \text{ N}$, 咀嚼性从 $30.14 \pm 5.00 \text{ N}$ 降低到 $18.31 \pm 3.97 \text{ N}$; 白度值变化不显著 ($P > 0.05$); 持水性从 $77.92\% \pm 0.73\%$ 显著增加到 $81.92\% \pm 1.40\%$ ($P < 0.05$), 糙米匀浆的加入改变了水的状态分布, 增强蛋白与水的结合; 体外消化模拟结果显示, 发芽糙米匀浆显著提高了带鱼鱼糜的体外消化率和胃蛋白酶消化率 ($P < 0.05$)。与空白组相比, 添加糙米匀浆的鱼糜凝胶网络结构更加疏松, 鱼糜凝胶中肌原纤维蛋白的 α -螺旋结构含量从 $47.12\% \pm 1.09\%$ 显著增加到 $52.74\% \pm 1.65\%$ ($P < 0.05$), β -折叠结构含量从 $25.67\% \pm 0.84\%$ 显著降低到 $20.99\% \pm 0.65\%$ ($P < 0.05$)。IDDSI 等级测定结果表明空白组为 6 级, 糙米添加组为 5 级。此外, 糙米添加组中检测出多种清香味物质, 其中醛类、酮类、醇类和酯类化合物显著增加 ($P < 0.05$), 而烷烃类化合物显著降低 ($P < 0.05$)。综合各项指标得出, 添加适量的发芽糙米匀浆可以软化带鱼鱼糜的凝胶特性。该研究结果可为鱼糜类老年食品的研发提供理论依据与参考。

关键词: 凝胶; 质构; 易食食品; 发芽糙米; 蛋白结构

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403161

中图分类号: S986.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0292-10

步营, 程亚佳, 厉寒, 等. 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 292-301. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403161 <http://www.tcsae.org>

BU Ying, CHENG Yajia, LI Han, et al. Effects of germinated brown rice slurry on the gel properties of hairtail surimi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 292-301. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403161 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近 20 年来, 中国人口老龄化程度正在快速加深。预计截止到 2030 年末, 中国 60 岁及以上人口将占全国人口的 21.1%, 中国首次进入中度老龄化社会^[1]。面对人口不断老龄化的发展走势以及品种单一的老年食品现状, 可以利用鱼糜制品高蛋白、低脂肪、高营养、易消化、方便食用的特点开发适合老年人食用的鱼糜制品。但是, 由于老年人对食物要求较为特殊, 既要柔软易吞食, 又要营养丰富且吸收快, 而传统的鱼糜制品凝胶强度高, 种类少且价格昂贵。近年来一些学者采用高压处理^[2]、酶解法^[3-4]、冻融法^[5]和辐照处理^[6]来改善食品质地, 然而, 这些加工方式往往需要较大的经济投入, 同时也可

能导致一定程度的营养损失和食品安全隐患。因此, 迫切需要开发出适合老年人食用的低凝胶强度的鱼糜制品, 以满足市场需求的同时降低上述问题的发生概率。

糙米是稻壳脱壳的颖果, 比精米有更多的养分和人体所需要的元素, 而发芽又可以使糙米营养价值得到进一步提升。糙米的发芽过程可视为一种特殊的“酶改性”过程。研究发现, 糙米经发芽后, 机体内的蛋白酶、谷氨酰胺酶等内源酶被激活, 可以催化一系列生理生化反应, 组织结构变松软, 矿物质等营养成分可消化率增加, 风味和口感得到很大改善, 其营养及功能性价值也大大提高^[7]。WU 等^[8]发现糙米中含有大量内源酶, 例如淀粉酶、纤维素酶、蛋白酶和脂肪酶等, 当糙米处于适宜条件可调动大量储存物质发芽时, 糙米内各种内源酶将被激活, 淀粉、蛋白质和脂肪等大分子物质被分解成小分子, 植酸被降解成低级植酸盐, 纤维质糠层软化, 从而使得糙米的适口性增加, 消化吸收率与生物利用率均有明显改善。丁俊胃等^[9]以早 944 稻米为原料, 经过 72 h 的发芽处理, 每 12 h 对内源酶活力进行测定, 结果发现糙米内 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、蛋白酶、谷氨酰胺酶、植酸酶等内源酶活力呈现上升趋势。

收稿日期: 2024-03-22 修订日期: 2024-06-04

基金项目: 辽宁省教育厅面上项目 (LJKMZ20221486); 辽宁省海洋经济发展专项 (辽财指环 [2022]33 号)。

作者简介: 步营, 副教授, 研究方向为水产品加工及贮藏。

Email: buying130@126.com

※通信作者: 朱文慧, 副教授, 博士, 研究方向为水产品加工及贮藏。

Email: wenhuibuy130@163.com

鉴于此, 本文以发芽糙米和鱼糜为材料, 制作一种软质鱼糜制品, 通过测定相关指标探究其对鱼糜凝胶特性的影响, 旨在提供功能性、营养性鱼糜制品的理论参数, 丰富老年食品市场, 提升产品质量和品牌化程度, 更好地满足吞咽困难群体营养多样化需求。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

冷冻带鱼鱼糜, 购自宁波兰洋水产食品有限公司, 于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保存; 辽宁省盘锦市蟹田糙米, 购自锦州万维超市, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱储存备用; 戊二醛、无水乙醇、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、胃蛋白酶、酪蛋白、氢氧化钠均为分析级, 购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 三氯乙酸产自麦克林生物科技有限公司; 人工胃液和人工肠液为标准品, 产自上海源叶生物科技有限公司。

1.2 主要仪器和设备

LHR-150 生化培养箱, 上海一恒科技有限公司; SY-5 L 真空冷冻斩拌机, 善友公司; DZ-500/2S 真空封口机, 舜康包装机械有限公司; TA-XT Plus 质构仪, 英国 SMS 公司; CR-400 色差计, 日本 Konica Minolta 控股公司; Discovery HR-1 流变仪, Discovery HR-1 公司; Biofuge stratos 台式冷冻高速离心机, 美国 Thermo Fisher 公司; NMI20 低场核磁共振仪, 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; TRACE1300/ISQ 7000 气相色谱质谱联用仪, Thermo Fisher Scientific 公司; LabRAM HR Evolution 拉曼光谱仪, 堀场 (中国) 贸易有限公司; S-4800 扫描电镜, 日本 Hitachi 公司; UV-2550 紫外可见分光光度计, 尤尼柯 (上海) 仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发芽糙米匀浆的制作

催芽工艺参考马培轩等^[10]的方法, 将颗粒饱满、无断裂的糙米, 清水冲洗后, $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 浸泡 9 h; 然后用去离子水清洗干净, 均匀铺在经过高温灭菌的 2 层纱布之间, 保持培养湿度 $\geq 95\%$ 、氧气充足条件下, $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温发芽 36~48 h, 待芽长达 2~3 mm 时结束发芽; 用清水洗净发芽糙米的表面黏液、擦除表面水分, 按糙米与去离子水质量比为 1:1.5 进行研磨, 0.07 mm 孔径滤网过滤后得到发芽糙米匀浆。

1.3.2 酶活力的测定

称取 1.00 g 发芽糙米, 用 8 mL pH 7.2 磷酸缓冲液在冰浴中研磨成浆, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下以 10 000 r/min 离心 30 min, 取上清液作为蛋白酶粗提液。将粗酶液均质、过滤后, 取 1 mL 底物 (20 g/L 酪蛋白溶液) 与 1 mL 粗酶液, 在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 10 min, 再于 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴 5 min 灭酶。加入 2 mL 0.14 mol/L 三氯乙酸溶液, 室温放置 15 min 以沉淀残余蛋白质, 6 000 r/min 离心 15 min, 取上清液于 275 nm 测定吸光值。以酪氨酸为标准液, 预加三氯乙酸溶液作对照。1 g (发芽) 谷物粗酶液催化酪蛋白每分钟生成 1 μg 酪氨酸定义为 1 个蛋白酶活力单位 (U)。

1.3.3 鱼糜凝胶制备

参考姬颖^[11]的方法, 将冷冻鱼糜提前置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱

解冻 12 h, 使鱼糜达到半解冻状态, 将其切成 1 cm^3 左右的小块, 取 300 g 鱼糜放入斩拌机中, 保持斩拌期间温度处于 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及真空状态, 以 2 000~3 000 r/min 的速率空斩 1 min; 均匀加入质量分数 2.5% 的食盐, 以 2 000~3 000 r/min 盐斩 2 min 直至鱼糜浆料完全分散成浆且具有一定的黏性, 最后均匀加入 28.5 g 的发芽糙米匀浆, 以转速 2 000~3 000 r/min 斩拌 5 min 使得浆料进一步混合, 促进鱼糜与发芽糙米匀浆的充分接触。然后将斩拌所得的鱼糜装入自封袋, 排气后经过挤压将其装入直径 38 mm 的聚乙烯食品级塑料肠衣, 用 U 型密封机将肠衣两端封口。在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行一段加热 40 min, 在其凝胶化之后在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 二段加热熟化 15 min。最后将熟化过后的鱼糜置于碎冰或冰水中冷却至室温, 得到鱼糜凝胶制品。

1.3.4 凝胶强度的测定

将在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中放置 12 h 的鱼肠取出, 将其切成 25 mm 高的圆柱体。选用 TA-XT Plus 质构仪, 将测定参数设置为: 测前速率 2.00 mm/s, 测试速率 1.00 mm/s, 测后速率 10.00 mm/s, 下压距离 15.00 mm, 触发力 $9.80 \times 10^{-2}\text{ N}$, 然后用 P/5S 球形探头对鱼糜凝胶圆柱体进行穿刺试验, 每组测 3 个平行。凝胶强度计算方法见式 (1):

$$S = F \times D \quad (1)$$

式中 S 表示凝胶强度, g·mm; F 表示破裂力, g; D 表示破裂距离, mm。

1.3.5 全质构分析

将鱼肠切成长度 25 mm 的圆柱体, 选用 TA-XT Plus 质构仪, 选取 P/36R 探头, 将测定参数设置为: 返回距离 30 mm, 返回速度 10 mm/s, 测前 2 mm/s, 测中 1 mm/s, 测后 1 mm/s, 压缩 60%, 触发力 $4.90 \times 10^{-3}\text{ N}$, 压缩间隔为 5 s, 每组测 6 个平行。

1.3.6 色差的测定

参考高智泉等^[12]的方法, 将样品切成高度为 10 mm 的圆柱体, 使用色差计测定亮度值 (L^*)、红绿值 (a^*) 及黄蓝值 (b^*), 每组测 3 个平行。白度值 (whiteness value, W_v) 计算方法见式 (2):

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

1.3.7 流变学特性的测定

通过流变仪进行温度扫描测试, 以评估鱼糜的热诱导凝胶轮廓。将鱼糜制成平行板形状 (直径 35 mm, 间隙 1 mm), 然后用硅油覆盖以防止水蒸发。在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的加热速率下, 从 $10\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量样品的存储模量 (G') 和损失模量 (G''), 频率和应变分别设置为 0.1 Hz 和 0.5%。

1.3.8 持水性 (water holding capacity, W_{HC}) 测定

将样品 (约 5 g) 切成 5 mm 厚, 精确称量 (m_1), 然后放置在 3 层滤纸之间。在 4 201 r/min、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下离心 20 min 后, 再次快速称量凝胶 (m_2), 每组测 3 个平行。

W_{HC} 计算方法见式 (3):

$$W_{HC} = (m_2/m_1) \times 100\% \quad (3)$$

1.3.9 水分状态分布的测定

参考 SONG 等^[13] 的方法。确保凝胶样品表面无外界水分, 将其切成圆柱体 (直径 $\times$ 高=20 mm $\times$ 20 mm), 放入核磁管中。根据 CPMG 脉冲序列测定凝胶的弛豫时间 T_2 。脉冲参数: 磁体频率 21 MHz, 谱宽 200 MHz, 回收延迟时间 3 000 ms, 回波数量 5 000, 扫描数量 4。使用 Multi Exp Inv Analysis 分析软件拟合数据, 计算横向弛豫时间, 得出的峰面积表示样品中所含水分质量分数。

1.3.10 气相色谱-质谱联用分析 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)

参照严丽娟等^[14] 的方法并稍加修改。采用固相微萃取法提取鱼汤中的挥发性物质, 准确称取 2.0 g 鱼糜凝胶样品于 20 mL 顶空瓶中, 放入磁力搅拌子, 迅速用聚四氟乙烯隔垫密封, 于 50 $^{\circ}$ C 水浴中平衡 10 min, 将经过老化处理的 50/30 μ mDVB/CAR/PDMS 萃取头插入顶空瓶中吸附 30 min, 然后在 GC-MS 进样口解吸 5 min。

GC 条件: HP-5MS 毛细管柱 (30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m); 采用不分流模式进样, 载气 He 流速 1.0 mL/min; 进样口温度 250 $^{\circ}$ C; 升温程序: 起始温度 40 $^{\circ}$ C, 保持 3 min, 以 3 $^{\circ}$ C/min 升至 100 $^{\circ}$ C, 再以 5 $^{\circ}$ C/min 升至 240 $^{\circ}$ C, 保持 5 min。

MS 条件: 电子电离源; 接口温度 280 $^{\circ}$ C; 四极杆温度 150 $^{\circ}$ C; 离子源温度 230 $^{\circ}$ C; 电子能量 70 eV; 质量扫描范围 m/z 30~550。

1.3.11 蛋白二级结构的测定

采用拉曼光谱法测定蛋白的二级结构。将样品切成厚约 2 mm 的薄片, 均匀地放在载玻片上。使用 532 nm 激光器在 400~3 600 cm^{-1} 范围内扫描拉曼光谱。分辨率为 1 cm^{-1} , 采集时间为 30 s。计算 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲结构的百分比, 每组测 3 次平行。计算二级结构百分比含量。

1.3.12 微观结构的测定

参考林雅文等^[15] 的方法。将灌肠好的鱼糜凝胶切片 (厚约 2 mm), 在体积分数 2.5% 戊二醛溶液中固定 24 h, 然后去除固定液并用磷酸盐缓冲液 (0.2 mol/L, pH 7.2) 洗脱 3 次, 每次 15 min, 再用体积分数为 50%、60%、70%、80%、90%、100% 梯度的乙醇溶液脱水 1 次, 每次 15 min, 置于通风处自然风干, 待彻底干透后将样品安装在载物台上, 先离子溅射镀金, 再扫描电子显微镜观察, 放大倍数 10 000 倍。

1.3.13 国际吞咽障碍食物标准 (international dysphagia diet standardisation initiative, IDDSI) 等级测定

参考 EKONOMOU 等^[16] 的方法, 进行国际吞咽障碍食物标准等级测定, 4~7 级为固体, 采用勺子倾斜测试和勺子挤压测试, 其中级别越高, 吞咽困难程度越大。在本研究中, 将鱼糜凝胶切成约 1.5 cm $\times$ 1.5 cm 的小块。使用拇指手指力量用勺子按压凝胶样品, 直至甲面变白

(压力约为 17 kPa) 进行匀压试验。勺子倾斜试验: 将凝胶样品盛于小勺中, 此时勺面平行于水平面, 以每秒 3 $^{\circ}$ 的速度缓慢倾斜勺面, 分别在倾斜 30 $^{\circ}$ 、60 $^{\circ}$ 以及 90 $^{\circ}$ 时观察记录样品状态 (每个状态停留 20 s), 以此为依据对样品进行 IDDSI 等级分析。

1.3.14 胃蛋白酶消化率 (pepsin digestibility, P) 测定

1 g 鱼糜凝胶在 7 mL 的 50 mmol/L NaCl-0.1 mol/L 磷酸一钾 (pH 1.8) 中均质。匀浆在 37 $^{\circ}$ C 下预孵育 5 min, 与 0.5 mL 1.5 mg/mL 胃蛋白酶溶液混合, 在 37 $^{\circ}$ C 下消化 10 min。然后, 向混合物中加入 7.5 mL 500 mmol/L 三(羟甲基)氨基甲烷 (Tris-HCl) (pH 7.4), 然后在冰上冷却以停止反应。离心 (4 201 r/min, 10 min, 4 $^{\circ}$ C), 用紫外分光光度计测定上清液在 280 nm 处的光密度 (OD_{280})。空白片的制备方法相同, 不含鱼糜凝胶。鱼糜凝胶的胃蛋白酶消化率计算方法见式 (4):

$$P = S - C \quad (4)$$

式中 P 表示胃蛋白酶消化率, 用吸光度表示; S 表示糙米添加组的吸光度; C 表示空白组的吸光度。

1.3.15 模拟体内胃肠消化 (gastrointestinal digestibility, GD)

参考 MINEKUS 等^[17] 的方法。将鱼糜凝胶切碎、烘干备用。取 5 g (M_0) 绞碎的干燥鱼糜凝胶, 加入 10 mL 蒸馏水与 20 mL 模拟胃液混合均匀, 用 1 mol/L 的 HCl 调 pH 为 2.0, 37 $^{\circ}$ C 恒温振荡水浴 2 h, 反应结束后用 0.5 mol/L 的 NaHCO_3 调节 pH 为 7.0。

模拟肠消化阶段: 取上述胃消化液, 加入对应体积的模拟肠液混合均匀于 37 $^{\circ}$ C 振荡水浴 2 h, 反应结束后用 2 mol/L HCl 调 pH 2.0, 6 861 r/min 离心 15 min, 得上清液和沉淀物。将沉淀物取出并干燥, 称其质量, 计作 M_1 。模拟体内胃肠消化率 G_D 计算方法见式 (5):

$$G_D = \left(1 - \frac{M_1}{M_0}\right) \times 100\% \quad (5)$$

1.4 数据处理

每组试验重复 6 次, 利用 IBM SPSS Statistics 27 软件的独立样本 T 检验对测定的数据进行显著性分析, 结果以平均值 $\pm$ 标准差表示, 当 $P < 0.05$ 时, 表明存在显著性差异; 当 $P < 0.01$ 时, 表明存在极显著差异; 当 $P > 0.05$ 时, 表明差异不显著; 利用 Origin 2022 软件作图处理。

2 结果与分析

2.1 发芽糙米匀浆酶活力的分析

酪氨酸标准曲线为 $y=0.0074x+0.0083$ ($R^2=0.999$), 测定发芽糙米匀浆的酶活 x 为 (42.10 $\pm$ 1.53) U, 未发芽糙米酶活 x 为 (3.11 $\pm$ 0.77) U, 本结果说明糙米发芽之后产生了大量的蛋白酶, 此结果与丁俊肖等^[9] 的结果趋势一致, 发芽 72 h 时酶活力与未发芽的酶活力的比值为 13.94。

2.2 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜凝胶特性的影响

2.2.1 凝胶强度

破断力和破断距离是影响鱼糜凝胶特性的关键参数，两者均与凝胶强度呈正相关，且两者的乘积即为凝胶强度值。由表 1 数据可知，空白组的凝胶强度为 (649.91±64.35) g·mm，糙米添加组的凝胶强度为 (480.93±98.84) g·mm，显著低于空白组 ($P<0.05$)。朱秀清等^[18]研究发现，各种蛋白酶均会使蛋白质水解产生小分子肽。糙米经过发芽之后产生的蛋白酶作用于鱼糜中的蛋白质，进而导致鱼糜凝胶强度降低。所以，本研究中向鱼糜中添加发芽糙米匀浆会对鱼糜凝胶中的蛋白结构产生破坏作用，从而使鱼糜凝胶软化。

表 1 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜凝胶强度、全质构和色差的影响

Table 1 Effects of germinated brown rice slurry on the gel strength, texture profile, and whiteness of hairtail surimi			
指标 Index		空白组 Control group	糙米添加组 Brown rice added group
凝胶强度 Gel strength (g·mm)		649.91±64.35	480.93±98.84*
	硬度/N	585.63±61.35	399.87±51.23**
全质构 Texture profile analysis	弹性	0.37±0.05	0.37±0.05
	黏聚性	0.14±0.01	0.13±0.01
	胶着度/N	81.14±10.23	50.16±7.13**
	咀嚼度/N	30.14±5.00	18.31±3.97**
	回复性	0.03±0.00	0.03±0.00
色差 Color deviation	亮度值 L^*	70.59±1.54	71.56±0.57
	红绿值 a^*	-0.35±0.06	-0.43±0.02*
	黄蓝值 b^*	8.34±0.25	8.72±0.29*
	白度	69.42±1.42	70.25±0.61

注：*表示差异显著 ($P<0.05$)；**表示差异极显著 ($P<0.01$)。
Note: * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

2.2.2 全质构

全质构是评价鱼糜产品质量的重要因素，同时也直接影响着消费者对产品的喜爱程度，其主要指标有硬度、弹性、黏聚性、胶着度、咀嚼度以及回复性。由表 1 可知，空白组硬度为 585.63±61.35 N，糙米添加组硬度为 399.87±51.23 N，极显著低于空白组 ($P<0.01$)；空白组弹性为 0.37±0.05，糙米添加组弹性为 0.37±0.05，与空白组相比不显著 ($P>0.05$)；空白组黏聚性为 0.14±0.01，糙米添加组黏聚性为 0.13±0.01，两组相比不显著 ($P>0.05$)；空白组胶着度为 81.14±10.23 N，糙米添加组胶着度为 50.16±7.13 N，极显著低于空白组 ($P<0.01$)；空白组咀嚼度为 30.14±5.00 N，糙米添加组咀嚼度为 18.31±3.97 N，咀嚼度极显著低于空白组 ($P<0.01$)；空白组回复性为 0.03±0.00，糙米添加组回复性为 0.03±0.00，极显著低于空白组 ($P<0.01$)。上述结果具有统计学意义，通过添加发芽糙米匀浆可以显著降低鱼糜凝胶的硬度、胶着度、咀嚼度，该结果与上述凝胶强度结果趋势一致。由于发芽糙米蛋白酶活性升高导致蛋白降解，推测质构变化的主要原因可能是添加糙米后，成分本身发生变化导致的。

2.2.3 色差

白度是评价鱼糜制品重要的感官指标之一，它可以

直观地影响消费者的接受程度，白度越高越容易被消费者接受^[19]。由表 1 可知，空白组亮度值 (L^*) 为 70.59±1.54，糙米添加组亮度值 (L^*) 为 71.56±0.57，两组相比不显著 ($P>0.05$)；空白组红绿值 (a^*) 为 -0.35±0.06，糙米添加组红绿值 (a^*) 为 -0.43±0.02，显著低于空白组 ($P<0.05$)；空白组黄蓝值 (b^*) 为 8.34±0.25，糙米添加组黄蓝值 (b^*) 为 8.72±0.29，显著低于空白组 ($P<0.05$)；利用公式 (2) 计算得到白度值，空白组白度值为 69.42±1.42，糙米添加组白度为 70.25±0.61，二者白度差异不显著 ($P>0.05$)，但糙米添加组白度较空白组增加了 1.20%。有研究表明，少量淀粉添加到鱼糜中，由于淀粉颗粒充分受热并将鱼糜凝胶内部的游离水充分吸收膨胀，使透光性增大，所以会增加鱼糜凝胶的白度值^[20]。发芽糙米匀浆色白，比本试验用到的带鱼鱼糜白度高，可能是添加的发芽糙米匀浆自身的颜色造成的^[21]。

2.2.4 流变特性

流变特性可反映鱼糜蛋白的非破断凝胶特性，其中，常用储能模量 (G') 反映样品的弹性趋势，损耗模量 (G'') 表示样品的黏性趋势^[22]。由图 1 可知，在 20~90℃，鱼糜的凝胶化过程呈现相同的变化趋势，均为凝胶化、凝胶劣化和凝胶强化 3 个阶段。空白组和糙米添加组分别在 60 和 50℃ 附近出现凝胶变差的现象，空白组在 55~60℃ 附近出现凝胶变差现象是因为鱼糜中的内源性蛋白酶水解、热诱导的氢键断裂和蛋白质解离^[23]。而在 55℃ 之后 G' 显著上升，这是因为随着温度升高，解离蛋白的交联增加，肌球蛋白重链和肌动蛋白变性解旋交联度增加，从而形成不可逆的凝胶网络结构^[24]。而糙米添加组在 45~50℃ 附近出现凝胶变差的现象可能是因为糙米在发芽过程内源酶被激活，对鱼糜凝胶蛋白结构产生水解作用^[12]，鱼糜中的内源性蛋白酶提前释放造成凝胶劣化提前出现。其中，空白组的 G' 和 G'' 均高于糙米添加组，说明添加发芽糙米匀浆能降低带鱼鱼糜的凝胶强度。 G' 和 G'' 的变化趋势一致，且在整个凝胶化过程中， G'' 始终低于 G' ，这表明所有样品在凝胶化过程中均以弹性特性为主导^[25]。

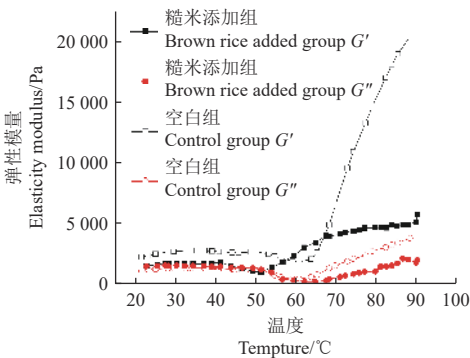
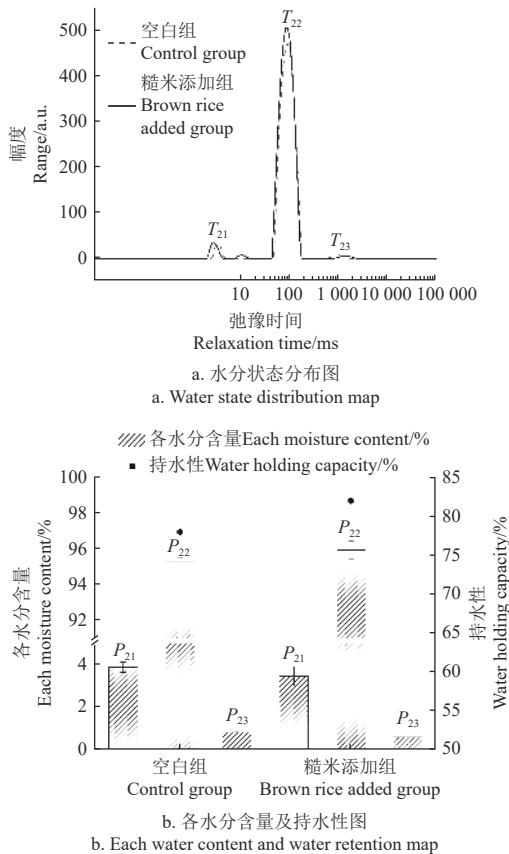


图 1 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜流变学特性的影响
Fig.1 Effects of germinated brown rice slurry on rheological properties of hairtail surimi

2.3 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜持水性及水分状态分布的影响

持水性不仅可以反映鱼糜凝胶受外力影响时的稳定性,同时也间接反映了鱼糜凝胶的致密性和淀粉的吸水能力^[26]。图2是添加发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜持水性及水分分布状态的影响。空白组的持水率为77.92%±0.73%,而糙米添加组的持水性为81.92%±1.40%,显著高于空白组($P<0.05$)。这可能是由于发芽糙米匀浆中含有未被分解的淀粉,在淀粉糊化过程中,淀粉颗粒吸水膨胀,使持水性提高^[27],这一特性对于鱼糜凝胶制品的质地和口感调整具有积极的影响。



注: T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 分别表示结合水、不易流动水和自由水, P_{21} 、 P_{22} 和 P_{23} 分别表示结合水、不易流动水和自由水的含量。
Note: T_{21} 、 T_{22} and T_{23} represent bound water, immobilized water, and free water, respectively, while P_{21} 、 P_{22} and P_{23} represent the contents of bound water, immobilized water, and free water, respectively.

图2 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜水分状态分布和持水性的影响
Fig.2 Effects of germinated brown rice slurry on water distribution and water holding capacity of hairtail surimi

T_2 弛豫时间可以直接反映水的流动性,与鱼糜的WHC值密切相关。其中, T_{21} (0.1~10 ms)代表与蛋白质官能团紧密结合的结合水; T_{22} (10~100 ms)代表鱼糜凝胶结构内的固定化水,被认为是凝胶网络结构中的主要水成分; T_{23} (100~1 000 ms)的弛豫时间最长,代表被困在鱼糜凝胶孔隙中的自由水^[27]。本试验鱼糜凝胶的 T_2 弛豫曲线如图2a所示,弛豫时间 T_2 所对应的峰面积比例差异见图2b,其中 P_{21} 、 P_{22} 、 P_{23} 分别代表各弛豫时间所对应的峰面积比例,分别表示不同状态的水分含量。由图可知,糙米添加组鱼糜凝胶中的 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 有一定差异。与空白组相比糙米添加组的结合水部分出现2个峰,分别记作 T_{21a} 和 T_{21b} ,一般来讲, T_{21a} (0.1~

2 ms)表示与蛋白质等大分子表面的极性基团以氢键相结合的单层水, T_{21b} (2~10 ms)被认为是能够通过与蛋白质中的酰胺基、淀粉维生素中的羟基形成键能较小的氢键的那部分水,与单分子层相比,其结合强度较低^[28];糙米添加组固定化水含量大于空白组,说明添加发芽糙米可以提高固定化水的含量;而糙米添加组自由水含量则小于空白组,该部分水与鱼糜结合程度最低,流动性最大,离心时易损失,自由水含量较高时,鱼糜凝胶的持水能力较小、持水性差^[29],即糙米添加组持水性高于空白组,与上述结果一致。综上,添加发芽糙米匀浆可以促进水与鱼糜凝胶的结合程度。

2.4 添加发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜挥发性风味物质的影响

对鱼糜凝胶中挥发性风味物质进行GC-MS检测。图3是各挥发性风味物质相对含量。空白组和糙米添加组中分别检测出18、20种风味物质。在空白组中,共检出5种醛类化合物、4种烷烃类化合物、4种酮类化合物、3种醇类化合物、2种其他化合物。醛类占挥发性物质总量的20.28%,烃类占41.97%,酮类占12.56%,醇类占6.07%,其他类占19.12%。糙米添加组共检测出7种醛类化合物、4种烷烃类化合物、3种酯类化合物、2种酮类化合物、1种醇类化合物、3种其他化合物。醛类占挥发性物质总量的37.64%,烃类占16.79%,酯类占2.42%,酮类占22.94%,醇类占10.46%,其他类占9.75%。

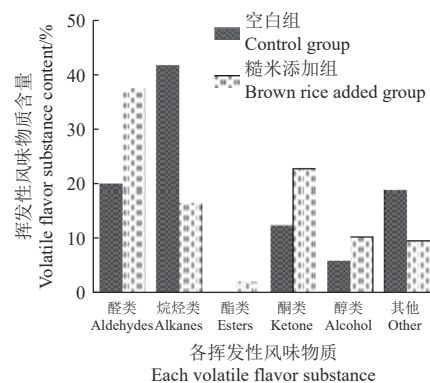


图3 发芽糙米匀浆对鱼糜风味物质及其含量的影响
Fig.3 Influence of germinated brown rice slurry on the flavor substance and percentage of volatile flavor substance

在空白组与糙米添加组中各检测出4种烷烃类物质,分别占总挥发性物质的41.97%、16.79%。在空白组中,烷烃类化合物的相对含量最高,其中支链物质较多,如2-甲基己烷(29.55%)、3-甲基庚烷(9.19%)、3-甲基己烷(1.66%)和4-甲基-十二烷(1.57%),这类化合物可以产生类似水果、花香、香料等多种香气;在糙米添加组中,烷烃类化合物多为碳原子数12~19的直链烃,如十七烷含量(13.88%)、十二烷(1.62%)、十三烷(0.88%)和十九烷(0.41%),这类化合物基本无味且普遍阈值较大,对鱼糜风味贡献较小^[30]。

张培茵等^[31]采用低温等离子体处理糙米原料和糙米饭,利用GC-IMS技术从中识别出7类55种挥发性风味物质(包括醛类、醇类、酮类、酯类、萜类、酸类和其他类),主要以醛类、酮类为主。研究表明,醛类是稻

米的主要风味物质贡献者，主要由脂肪氧化降解及脱羧产生，阈值较低，低浓度下有一定的青草和水果香气^[31]。在空白组与糙米添加组中分别检测出 4、7 种醛类化合物，分别占总挥发性物质的 20.28%、37.64%。在空白组中，壬醛含量最高（11.63%），该物质通常表现为油腥味^[32]。在糙米添加组中，己醛含量最高（17.17%），该物质通常呈现出青草味和甜香味等^[33]，赋予鱼糜凝胶特殊的风味。

酮类是碳基化合物，阈值较低，可产生浓郁的香味，主要来源于不饱和脂肪酸的氧化降解，以及醇类化合物的氧化或酯类化合物的降解^[25]。空白组与糙米添加组中分别检测出 4 种和 2 种酮类化合物，分别占总挥发性物质的 12.56% 和 22.94%。酮类物质主要提供花果香气和草本香气^[34]。糙米添加组酮类物质明显增多，这与发芽糙米匀浆的加入密切相关，可以使产品获得独特的清香味。

醇类一般来源于脂肪酸的二级氢过氧化物的降解或由羧基化合物还原生成^[35]，一般产生较为柔和的气味，有类似水果或植物的香气^[36]。在空白组中共检测出 3 种醇类物质，它们分别为 3,3-二甲基-2-戊醇、5-乙基-2-庚醇和 2,2-二甲基-1-辛醇，占总挥发性物质的 6.07%，在糙米添加组中仅检测出环庚醇一种醇类物质，占总挥发性物质的 10.46%，所以糙米添加组的类似水果味或植物的香气较空白组更加浓郁。有研究发现酯类物质具有水果的香味^[37]，空白组中未检测出酯类物质，糙米添加组中检测出 3 种酯类物质，占总挥发性物质的 2.42%，分别为己酸壬己酯（1.14%）、2-葵内酯（0.84%）、油酸葵酯（0.44%），该 3 种物质会为食品增添一种水果或甜味的香气，使产品风味更加丰富。

2.5 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜蛋白二级结构的影响

蛋白质二级结构主要包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角以及无规则卷曲等结构。采用拉曼光谱扫描法进行蛋白二级结构分析，通过在 $500 \sim 2500 \text{ cm}^{-1}$ 范围内进行拉曼光谱扫描进而得出特征带，其中酰胺 I 带（ $1700 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ ）通常用于提取蛋白质二级结构的信息，它主要代表酰胺基团的 C-O 拉伸振动，以及 N-H 的平面内弯曲和 C-N 键的拉伸^[38]。由酰胺 I 带光谱图计算得到的蛋白质二级结构的定量信息如图 4 所示。经计算，空白组和糙米添加组的 α -螺旋含量分别为 $47.12\% \pm 1.09\%$ 和 $52.74\% \pm 1.65\%$ ，显著性分析结果表明，糙米添加组的 α -螺旋含量显著高于空白组（ $P < 0.05$ ）； β -折叠含量分别为 $25.67\% \pm 0.84\%$ 和 $20.99\% \pm 0.65\%$ ，糙米添加组的 β -折叠含量极显著低于空白组（ $P < 0.01$ ）； β -转角含量分别为 $16.46\% \pm 0.17\%$ 和 $15.92\% \pm 0.84\%$ ，无规则卷曲含量分别为 $10.77\% \pm 0.07\%$ 和 $10.43\% \pm 0.11\%$ ，两者差异均不显著。有研究发现，鱼糜凝胶强度与 β -折叠、 β -转角和无规则卷曲之间存在正相关关系，但与 α -螺旋呈负相关^[39]。LIANG 等^[39]发现，高含量的 β -折叠和低含量 α -螺旋能维持鱼糜较好的凝胶特性。本试验中，鱼糜凝胶的 α -螺旋含量显著增加（ $P < 0.05$ ）， β -折叠含量显著降低（ $P < 0.05$ ）。所以，通过添加发芽糙米匀浆可以降低鱼糜凝胶的凝胶强度，符合食品软化的思路。

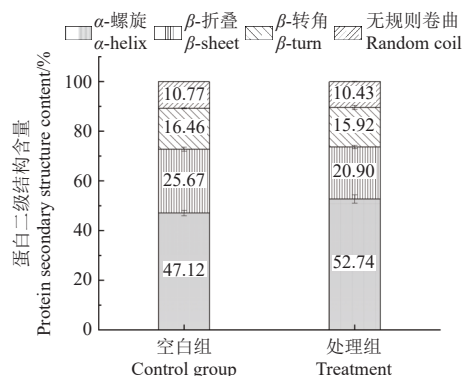


图 4 添加发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜蛋白二级结构的影响

Fig.4 Effects of germinated brown rice slurry on secondary structure of hairtail surimi

2.6 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜微观结构的影响

鱼糜凝胶的微观结构是反映鱼糜凝胶性能关键指标之一，鱼糜制品的微观结构决定其品质。通常，致密均匀的凝胶三维网络结构与蛋白质分子的有序聚集有关，肌原纤维蛋白加热后，蛋白分子展开，之后重新聚集形成稳定的三维网络结构^[40]。如图 5 所示为空白组与糙米添加组的鱼糜凝胶在放大倍数 10 000 的扫描电镜图。如图所示，空白组鱼糜凝胶表面光滑平整，孔洞数量较少，孔径较小，凝胶网络结构较为致密，整体分布较均匀；糙米添加组鱼糜凝胶表面粗糙，孔洞较多且孔径较大，网络结构相对较粗糙、疏松。说明添加发芽糙米匀浆不利于凝胶网络结构的形成，与上述凝胶强度、质构等结果趋势一致，有助于软质食品的形成。

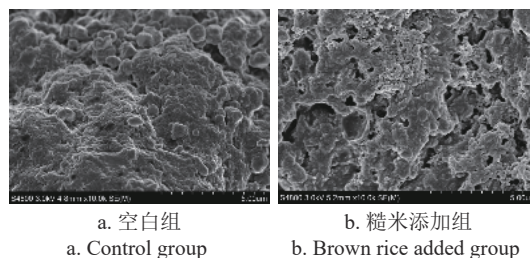


图 5 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜微观结构的影响

Fig.5 Effects of germinated brown rice slurry on the microstructure of hairtail surimi.

2.7 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜 IDDSI 等级的影响

随着勺子倾斜程度的增加不会发生明显的流动现象，当勺子完全垂直于水平面的时候，空白组与糙米添加组食团均掉落，但空白组勺面有较多残留，糙米添加组的残留较少。经勺子剪切试验测定，用勺子边缘可以轻松切开凝胶。勺子按压测试结果则表明，将高约 1 cm 的鱼糜凝胶用勺子按压，压碎鱼糜凝胶时拇指出现白色，且凝胶不能恢复原状。最终该鱼糜制品 IDDSI 等级认定结果为：空白组鱼糜为 6 级，糙米添加组鱼糜为 5 级。

2.8 发芽糙米匀浆对带鱼鱼糜消化特性的影响

经过胃蛋白酶消化之后，空白组 OD_{280} 为 1.39 ± 0.04 ，糙米添加组的 OD_{280} 为 1.51 ± 0.01 ，显著性分析结果表明，糙米添加组的胃蛋白酶消化率（ OD_{280} ）极显著

高于空白组 ($P<0.01$)。有研究表明,糙米中存在葡萄糖,而葡萄糖的加入会改变蛋白质的二级结构,使得胃蛋白酶更容易接触酶切位点,这就导致添加发芽糙米匀浆会使鱼糜凝胶更容易被胃蛋白酶消化^[41]。用胃液、肠液依次处理带鱼鱼糜凝胶模拟体内消化过程。依次经过胃液、肠液消化之后,空白组的消化率为 $50.07\%\pm 2.77\%$,糙米添加组的消化率为 $60.70\%\pm 1.58\%$,极显著高于空白组 ($P<0.01$)。这表明通过添加发芽糙米匀浆可以提高人体肠胃对鱼糜凝胶的消化率,这与上述胃蛋白酶消化结果趋势一致。

3 结 论

1) 通过测定凝胶强度和全质构分析,发芽糙米匀浆的加入导致带鱼鱼糜的凝胶强度(从 $649.91\text{ g}\cdot\text{mm}$ 降低到 $480.93\text{ g}\cdot\text{mm}$)、硬度(从 585.63 N 降低到 399.87 N)、胶着度(从 81.14 N 降低到 50.16 N)、咀嚼性(从 30.14 N 降低到 18.31 N) 显著降低 ($P<0.05$)。

2) 低场核磁共振与离心损失结果显示,发芽糙米匀浆将带鱼鱼糜凝胶的持水性从 77.92% 显著提高至 81.92% ($P<0.05$),且促进了鱼糜凝胶与水的结合能力。

3) 扫描电镜、拉曼光谱以及 IDDSI 结果分析显示,糙米添加组的鱼糜凝胶网络结构更加疏松;且鱼糜凝胶中肌原纤维蛋白的 α -螺旋结构含量从 47.12% 显著增加到 52.74% ($P<0.05$), β -折叠结构含量从 25.67% 显著降低到 20.99% ($P<0.05$), β -转角和无规则卷曲含量变化不显著 ($P>0.05$),空白组鱼糜为 6 级,糙米添加组鱼糜为 5 级;

4) 挥发性风味物质分析结果表明,糙米添加组中呈现清香味的物质如己醛、十一酮等物质较空白组高,赋予鱼糜凝胶产品独特的清香味;

5) 消化特性结果显示,糙米添加组的胃蛋白酶消化率和体外模拟消化率均显著高于空白组,且糙米添加组的体外模拟消化率从 50.07% 显著提高至 60.70% ($P<0.05$)。

综上,添加发芽糙米匀浆通过改变鱼糜凝胶的凝胶强度、质构、持水性、微观结构等达到软化鱼糜凝胶的作用,且能赋予鱼糜凝胶独特风味。本文有助于揭示发芽谷物与肌原纤维蛋白之间的相互作用关系,从而为老年软质食品的开发提供理论指导。

【参 考 文 献】

- [1] 田进. 关键词: 应对人口老龄化、社会救助体系[N]. 经济观察报. 2024-02-19 (006).
- [2] 杨宁宁, 邓源喜, 武杰, 等. 响应面法优化超声波辅助超高压改善牛肉质构的研究[J]. 农产品加工, 2023(9): 1-5.
YANG Ningning, DENG Yuanxi, WU Jie, et al. Optimization of ultrasonic assisted ultra high pressure for beef texture improvement by response surface methodology[J]. Farm Products Processing, 2023(9): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李艳红. 基于牦牛肉嫩化的肉基老年食品开发研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
LI Yanhong. Research on Development of Meat-based Geriatric Food by the Tenderization of Yak Meat[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [4] AYUKI O, KIGEN T, MONE I, et al. A novel soft surimi gel with functionality prepared using alcalase for people suffering from dysphagia[J]. Food Chemistry, 2020, 344: 128641.
- [5] NAKATSU S, KOHYAMA K, WATANABE Y, et al. A trial of human electromyography to evaluate texture of softened foodstuffs prepared with freeze-thaw impregnation of macerating enzymes[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 21: 188-194.
- [6] 李瑞娟. 电子束辐照抑制猕猴桃软化机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
LI Ruijuan. Study on the Mechanism of Inhibiting Softening of Kiwifruit by Electron Beam Irradiation[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2023.
- [7] 蹇伟, 谢丹, 宗平, 等. 糙米不同方式发芽过程中主要营养变化[J]. 食品科技与经济, 2024, 49(1): 108-112.
JIAN Wei, XIE Dan, ZONG Ping, et al. Comparative study on the main nutritional changes of brown rice during germinating process in different methods[J]. Food Science And Technology And Economy, 2024, 49(1): 108-112. (in Chinese with English abstract)
- [8] WU F, YANG N, TOURE A, et al. Germinated brown rice and its role in human health[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(5): 451-463.
- [9] 丁俊胄, 刘贞, 赵思明, 等. 糙米发芽过程中内源酶活力及主要成分的变化[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 29-32.
DING Junzhou, LIU Zhen, ZHAO Siming, et al. Changes of endogenous enzyme activities and major components in brown rice during germination[J]. Food Science, 2011, 32(11): 29-32. (in Chinese with English abstract)
- [10] 马培轩, 武蕊, 王玉茜, 等. 发芽小麦高温 α -淀粉酶挤压膨化工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(2): 162-169.
MA Peixuan, WU Rui, WANG Yuqian, et al. Process optimization of high temperature α -amylase-extrusion puffing of germinated wheat[J]. Food Research and Development, 2024, 45(2): 162-169. (in Chinese with English abstract)
- [11] 姬颖. 鲢鱼/白鲢鱼混合鱼糜凝胶特性研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
JI Ying. Study on Gel Properties of Blended Surimi from Anchovy/Silver Carp[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [12] 高智泉, 周洋, 步营, 等. 冻藏和高温对海参伴侣调味汁品质的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(3): 56-60.
GAO Zhiquan, ZHOU Yang, BU Ying, et al. Effects of frozen storage and high temperature on quality of sea cucumber companion sauce[J]. China Condiment, 2024, 49(3): 56-60. (in

- Chinese with English abstract)
- [13] SONG C Y, LIN Y F, HONG P Z, et al. Low-content pre-emulsified safflower seed oil enhances the quality and flavor of the *Nemipterus virgatus* surimi gel[J]. *Gels*, 2022, 8(2): 106.
- [14] 严丽娟, 侯玉, 仪淑敏, 等. 榴莲风味鱼肉香肠制备及其风味成分分析[J]. *包装与食品机械*, 2024, 42(2): 18-25.
- YAN Lijuan, HOU Yu, YI Shumin, et al. Preparation of durian flavored fish sausages and analysis of their flavor components[J]. *Packaging & Food Machinery*, 2024, 42(2): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [15] 林雅文, 李艾青, 谭卓弘, 等. 气体射流冲击干燥对脱盐海参理化特性和微观结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 107-115.
- LIN Yawen, LI Aiqing, TAN Zhuohong, et al. Effects of air impingement drying on the physicochemical characteristics and microstructure of desalted sea cucumber[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(2): 107-115. (in Chinese with English abstract)
- [16] EKONOMOU S I, HADNADEV M, GIOXARI A, et al. Advancing dysphagia-oriented multi-ingredient meal development: Optimising hydrocolloid incorporation in 3D printed nutritious meals[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109300.
- [17] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static in vitro digestion method suitable for food-an international consensus[J]. *Food & Function*, 2014, 5(6): 1113-1124.
- [18] 朱秀清, 王源, 朱颖, 等. 蛋白酶水解汉麻分离蛋白产物结构及功能特性比较[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49 (24): 111-117.
- ZHU Xiuqing, WANG Yuan, ZHU Ying, et al. Structural and functional properties of hemp protein isolate hydrolysates obtained with different proteases[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(24): 111-117. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王冬妮, 范馨茹, 祁立波, 等. 淀粉和蛋白类添加物对鲑鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(4): 65-71.
- WANG Dongni, FAN Xinru, QI Libo, et al. Effect of starch and non-muscle protein on gel properties of squid (*Illex argentinus*) surimi[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(4): 65-71. (in Chinese with English abstract)
- [20] KONG W, ZHANG T, FENG D, et al. Effects of modified starches on the gel properties of Alaska Pollock surimi subjected to different temperature treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56: 20-28.
- [21] ESHAG OSMAN MOHAMED F, MOHAMED ABDELLATIF A, MOHAMED AHMED ISAM A, et al. Acetylated corn starch as a fat replacer: Effect on physiochemical, textural, and sensory attributes of beef patties during frozen storage[J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 132988.
- [22] SINAN Z, MANINDER M, TING X, et al. Insight into the mechanism of pressure shift freezing on water mobility, microstructure, and rheological properties of grass carp surimi gel[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2024, 91: 103528.
- [23] ZHI Y, XIN W, MENG Z, et al. Investigation of the enhancement mechanism of ethanol addition on the gel performance of heat-induced surimi[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 355: 111581.
- [24] 陈媚依. 鹧鸪茶提取物对鱼糜制品凝胶特性及保藏品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- Chen Meiyi. Effects of the *Mallotus Obongifolius* Extract on Gelation Properties and Preservation Quality of Surimi-based Products[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [25] 宋春勇, 洪鹏志, 周春霞, 等. 不同植物油对金线鱼鱼糜凝胶风味的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(4): 354-364.
- SONG Chunyong, HONG Pengzhi, ZHOU Chunxia, et al. Effect of different vegetable oils on the flavor of the *nemipterus virgatus* surimi gel[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(4): 354-364. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘璐, 洪鹏志, 周春霞, 等. 不同种类淀粉对罗非鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(6): 82-89.
- LIU Lu, HONG Pengzhi, ZHOU Chunxia, et al. Effects of native and modified cassava starch on the quality of tilapia surimi gel[J]. *Food Science*, 2023, 44(6): 82-89. (in Chinese with English abstract)
- [27] 汲晨洋, 胡晓, 吉宏武, 等. 条斑紫菜多糖对白鲢鱼鱼糜凝胶特性及抗氧化活性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(19): 144-152.
- JI Chenyang, HU Xiao, JI Hongwu, et al. Effects of *Porphyra yezoensis* polysaccharides on gel characteristics and antioxidant activity of *Hypophthalmichthys molitrix* surimi[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(19): 144-152. (in Chinese with English abstract)
- [28] 戴慧敏. 超高压、卡拉胶对低钠盐白鲢鱼糜凝胶特性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- DAI Huiming. Effects of Ultra-high Pressure Processing Andcarrageenan on the Gelling Properties of Low-saltsurimi Gel from Silver Carp (*hypophthalmichthys molitrix*)[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [29] 叶韬, 戴慧敏, 林琳, 等. 不同处理条件下鲢鱼糜凝胶水分状态和微观结构的特征[J]. *南方水产科学*, 2019, 15 (2): 102-109.
- YE Tao, DAI Huimin, LIN Lin, Water state and microstructure characteristics of surimi gel from silver carp with different processing conditions[J]. *South China Fisheries Science*, 2019,

- 15(2): 102-109. (in Chinese with English abstract)
- [30] 余林, 应晓国, 马路凯. 不同提取物对带鱼鱼糜凝胶品质及风味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 89-99.
- YU Lin, YING Xiaoguo, MA Lukai. Effects of different extracts on gel quality and flavor of *Trichiurus lepturus* surimi[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2024, 15(3): 89-99. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张培茵, 孟宁, 刘明, 等. 低温等离子体处理对糙米原料及糙米饭风味特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 74-80.
- ZHANG Peiyin, MENG Ning, LIU Ming, et al. Effects of low temperature plasma treatment on flavor characteristics of raw and cooked brown rice[J]. Food Science, 2021, 42(15): 74-80. (in Chinese with English abstract)
- [32] 喻亚丽, 鲁晓蓉, 董立学, 等. 低盐和淡水养殖模式下草鱼肌肉营养和风味品质评价[EB/OL]. 大连海洋大学学报: 1-16. [2024-05-26]. <https://doi.Org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2024-052>.
- YU Yali, LU Xiaorong, DONG Lixue, et al. Evaluation of nutritional and flavor quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) cultured in low-salinity water and fresh water[EB/OL]. Journal of Dalian Ocean University: 1-16. [2024-05-26]. <https://doi.Org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2024-052>. (in Chinese with English abstract)
- [33] 郑自奋, 陈晓维, 邹波, 等. 油柑品种制汁特性评价及特征性风味成分分析[EB/OL]. 食品工业科技, 1-18. [2024-05-26]. <http://kns.cnki.Net/kcms/detail/11.1759.TS.20240430.1806.004.html>.
- ZHENG Zifen, CHEN Xiaowei, ZHOU Bo, et al. Evaluation of juice production characteristics and analysis of characteristic flavor components of *Phyllanthus emblica* fruit varieties[EB/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-18. [2024-05-26]. <http://kns.cnki.Net/kcms/detail/11.1759.TS.20240430.1806.004.html>. (in Chinese with English abstract)
- [34] 穆红, 罗瑞明, 李亚蕾. 热处理对牛骨酶解液美拉德反应产物呈味物质及挥发性成分的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 181-191.
- MU Hong, LUO Ruiming, LI Yalei. Effects of heat treatment on flavor and volatile components of maillard reaction products from bovine bone hydrolysate[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(9): 181-191. (in Chinese with English abstract)
- [35] SHI Y N, LI X, HUANG A X. A metabolomics-based approach investigates volatile flavor formation and characteristic compounds of the Dahe black pig dry-cured ham[J]. Meat Science, 2019, 158: 107904.
- [36] AN Q, REN J N, LI X, et al. Recent updates on bioactive properties of linalool[J]. Food & Function, 2021, 12(21): 10370-10389.
- [37] 祝霞, 赵丹丹, 李俊娥, 等. 河西走廊产区酒球菌酯酶活性对葡萄酒酯类香气物质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 315-322.
- ZHU Xia, ZHAO Dandan, LI Jun'e, et al. Effects of esterase activity of *Debaryomyces hansenii* in Hexi Corridor production areas on ester aroma compounds in wine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 315-322. (in Chinese with English abstract)
- [38] CHEN J X, DENG T X, WANG C, et al. Effect of hydrocolloids on gel properties and protein secondary structure of silver carp surimi[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2252-2260.
- [39] LIANG F, LIN L, HE T, et al. Effect of transglutaminase on gel properties of surimi and precocious Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) meat[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105261.
- [40] CHANG Z, LEI C, MIN X L, et al. Effect of cellulose on gel properties of heat-induced low-salt surimi gels: Physicochemical characteristics, water distribution and microstructure[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100820.
- [41] 施文正, 陈晴, 冯倩, 等. 糖基化鲐鱼鱼松体外消化产物的抗氧化活性和氨基酸组成[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43 (6): 99-107.
- SHI Wenzheng, CHEN Qing, FENG Qian, Antioxidant activity and amino acid composition of in vitro digestive products of glycosylated mackerel fish floss[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(6): 99-107. (in Chinese with English abstract)

Effects of germinated brown rice slurry on the gel properties of hairtail surimi

BU Ying¹, CHENG Yajia¹, LI Han^{1,2}, ZHU Wenhui^{1*}, LI Jianrong¹, LI Xuepeng¹, JI Guangren³

(1. College of Food Science and Technology/ National and Local Joint Engineering Research Center for Storage, Processing, and Safety Control Technology of Fresh Agricultural Products, Bohai University, Jinzhou 121013, China; 2. College of Provincial-Ministerial Joint Collaborative Innovation Center for Key Technologies in Deep Processing of Ocean Food, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 3. Jinzhou Bijia Mountain Food Co., Ltd., Jinzhou 121007, China)

Abstract: A full analysis was conducted to investigate the impact of germinated brown rice slurry on the gel properties of hairtail surimi. The potential benefits were also addressed for the dysphagia in the elderly. Some parameters were then measured to determine the gel strength, texture profile, water-holding capacity, dynamic rheology, whiteness, water state distribution, protein secondary structure, microstructure, in vitro digestibility, and International Dysphagia Diet Standardization Initiative (IDDSI) level. The results demonstrated that there was a significant impact of germinated brown rice slurry on the gel strength of hairtail surimi. Moreover, the gel strength of hairtail surimi was reduced from (649.91 ± 64.35) to (480.93 ± 98.84) g·mm ($P < 0.05$), indicating a substantial reduction. The gel strength was reduced to make the swallowing easier and safer, which was beneficial for individuals with dysphagia. Furthermore, the brown rice slurry shared a significant impact on various textural properties, such as hardness, cohesiveness, and chewiness. The brown rice group exhibited a significant decrease in hardness (from 585.63 ± 61.35 N to 399.87 ± 51.23 N), cohesiveness (from 81.14 ± 10.23 N to 50.16 ± 7.13 N), and chewiness (from 30.14 ± 5.00 N to 18.31 ± 3.97 N) ($P < 0.05$), compared with the control group. The germinated brown rice slurry was then incorporated into the hairtail surimi, resulting in a softer and more easily chewable product. Interestingly, there was no significant effect on the whiteness value, despite these changes observed in the texture properties. The visual appearance of hairtail surimi failed to alter using germinated brown rice slurry. Furthermore, an augmentation in the water-holding capacity was observed after the addition of germinated brown rice slurry to hairtail surimi. The water-holding capacity exhibited a significant increase from $(77.92\% \pm 0.73\%)$ to $(81.92\% \pm 1.40\%)$ ($P < 0.05$). The brown rice slurry was incorporated to induce the distribution of water states, thereby enhancing the protein-water binding. As such, the moisture was retained within the commonly-used product during cooking or processing, in order to prepare the meals for individuals with dysphagia. A more porous network structure was found to form the surimi gel after the addition of brown rice, compared with the control group. This structure was attributed to the unique properties of brown rice, such as the high fiber content and water absorption. The high porosity greatly contributed to the open gel matrix for better water retention. Furthermore, there were outstanding changes in the protein structure within the surimi gel. The α -helix structure content of myofibrillar protein significantly increased from $(47.12\% \pm 1.09\%)$ to $(52.74\% \pm 1.65\%)$ after the incorporation of brown rice ($P < 0.05$). The functionality of protein was enhanced for the gel-forming ability. There was a significant decrease in the β -sheet structure content from $(25.67\% \pm 0.84\%)$ to $(20.99\% \pm 0.65\%)$ after the addition of brown rice into the surimi gel ($P < 0.05$). A softer texture then improved the tenderness, due to the decreased protein aggregation. Meanwhile, the IDDSI level was determined to evaluate these structural effects on the practical applications in both groups. According to the IDDSI standards, the brown rice group reached level 5 consistency, representing the texture of a mildly thick liquid diet. While the control group achieved level 6 consistency, indicating the texture of a moderately thick liquid diet. In addition to structural modifications, aroma compounds also exhibited notable differences between both groups after sensory analysis. The inclusion of germinated brown rice slurry led to significant increases in the various aroma compounds, including aldehydes, ketones, alcohols, and esters ($P < 0.05$). There was a positive contribution towards flavor perception. Therefore, the germinated brown rice slurry was incorporated to enhance the textural attributes for the overall sensory, in order to enrich the aroma profiles. An optimal amount of germinated brown rice slurry can be expected to soften the gel characteristics of hairtail surimi. These findings can provide theoretical support and reference for the development of surimi-based elderly food products.

Keywords: gel; texture; YISHI food; germinated brown rice; protein structure