

鲮鱼肉-鸡蛋清混合蛋白质浆的营养与加工特性

刘毅¹, 李汴生^{1,2*}, 阮征^{1,2}, 李丹丹¹, 黎来凤³, 吴文静³

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640) (3. 东东蛋业(广东)有限公司, 广东茂名 525347)

摘要: 为了优化传统鲮鱼糜制品的营养与加工特性, 该研究探究了鸡蛋清添加量(0~50 wt.%)对鲮鱼肉糜浆复合体系营养及加工特性的影响。通过构建蛋白质营养评价体系(FAO/WHO模型和全鸡蛋模型), 结合化学评分、氨基酸评分、必需氨基酸指数和生物价等指标, 分析鸡蛋清添加对复合蛋白体系营养特性的影响; 采用旋转流变仪、质构仪及傅里叶红外光谱等技术, 系统表征鸡蛋清鲮鱼肉糜浆的流变学特性、凝胶特性、起泡性等加工特性。结果表明, 营养特性方面, 当鸡蛋清添加从0 wt.%增至40 wt.%时能够显著提升鲮鱼肉糜浆的氨基酸总量, 含硫氨基酸RC值在FAO/WHO模型下从0.84升至1.25 ($P<0.05$), 在全鸡蛋模型下从0.69升至1.04 ($P<0.05$), 生物价(BV)从90.19增至95.45 ($P<0.05$)。功能特性方面, 40 wt.%蛋清添加量使起泡性从13.80%提升至47.00% ($P<0.05$), 泡沫稳定性在60 min时保持93.62% ($P<0.05$); 凝胶强度在40 wt.%添加量时达31.15 g·cm ($P<0.05$)。综上, 40 wt.%鸡蛋清添加量通过氨基酸互补效应和蛋白质协同作用, 显著优化了鲮鱼肉糜浆的营养价值与加工特性, 是综合性能最优配比。该文研究结果为皱纱鱼腐等传统复合蛋白制品的工业化升级及新型高营养鱼糜产品开发提供了理论依据。

关键词: 鲮鱼肉; 鸡蛋清; 混合蛋白质浆; 营养评价; 加工特性

文章编号: 1673-9078(2026)5-245-256

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0242

Nutritional and Processing Characteristics of Mixed Protein Slurries Prepared from Surimi, Mud Carp Meat, and Egg White

LIU Yi¹, LI Biansheng^{1,2*}, RUAN Zheng^{1,2}, LI Dandan¹, LI Laifeng³, WU Wenjing³

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2. Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China)(3. Dongdong Egg Industry (Guangdong) Co. Ltd., Maoming 525347, China)

Abstract: To improve the nutritional and processing characteristics of traditional mud carp surimi-based products, the effects of egg white supplementation (0~50 wt.%) on the nutritional quality and functional properties of mixed protein slurry systems composed of mud carp surimi and egg white were systematically investigated. Protein nutritional quality was evaluated using the FAO/WHO reference pattern and the whole-egg model, incorporating chemical score, amino acid score, essential amino acid index, and biological value. Processing characteristics were analyzed using rotational rheometry, texture analysis, and Fourier-transform infrared spectroscopy to assess rheological behavior, gel properties, and foaming performance. The results showed that egg white supplementation significantly improved amino acid composition. Under the FAO/WHO reference pattern, the ratio coefficient of

引文格式:

刘毅,李汴生,阮征,等.鲮鱼肉-鸡蛋清混合蛋白质浆的营养与加工特性[J].现代食品科技,2026,42(5):245-256.

LIU Yi, LI Biansheng, RUAN Zheng, et al. Nutritional and processing characteristics of mixed protein slurries prepared from surimi, mud carp meat, and egg white [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 245-256.

收稿日期: 2025-02-22; 修回日期: 2025-04-05; 接受日期: 2025-04-09

基金项目: 广东省重点领域研发项目(2019B020219002)

作者简介: 刘毅(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: 2014077991@qq.com

通讯作者: 李汴生(1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: febsbli@scut.edu.cn

sulfur-containing amino acids increased from 0.84 to 1.25 ($P<0.05$), while under the whole-egg model it increased from 0.69 to 1.04 ($P<0.05$). The biological value increased from 90.19 to 95.45 ($P<0.05$). In terms of functional properties, supplementation with 40 wt.% egg white elevated foaming capacity from 13.80% to 47.00% ($P<0.05$), while foam stability remained at 93.62% after 60 min ($P<0.05$). The highest gel strength, 31.15 g·cm ($P<0.05$), was also achieved at an egg white supplementation level of 40 wt.%. Overall, supplementation with 40 wt.% egg white markedly enhanced both the nutritional value and processing characteristics of mud carp surimi slurry through amino acid complementation and synergistic protein interactions. These results identify this formulation as an optimal composition for achieving balanced nutritional quality and functional performance, and provide theoretical support for the industrial optimization of traditional composite protein products, such as wrinkled fish curd, and the development of novel high-nutrition surimi-based products.

Key words: mud carp meat; egg white; mixed protein; surimi; nutritional evaluation; processing characteristics

混合蛋白质是指由两种或多种来源的蛋白质通过物理或化学方式结合形成的复合体系。混合蛋白体系通过多源蛋白的协同作用,在营养与功能特性上展现出显著优势。根据制备方式可分为人工合成型与天然型:前者包括乳清蛋白-酪蛋白等物理共混体系及重组胶原蛋白聚合物;后者多源于遗传代谢异常(如苯丙酮尿症)。鲢鱼糜-鸡蛋清混合蛋白质浆作为岭南传统食品皱纱鱼腐的核心原料,其中鲢鱼富含蛋白质并且脂肪和胆固醇低于鳕鱼等常见鱼类,由于肌纤维细嫩更易加工成糜^[1],而鸡蛋清蛋白的氨基酸生物价高于鸭蛋清和鹌鹑蛋清等其他禽蛋蛋清,其必需氨基酸比例更接近人体需求,此外其凝胶性和起泡性均由于鸭蛋清^[2]。因此,鲢鱼糜-鸡蛋清复合体系具有典型双源优质蛋白特征,二者的协同作用不仅赋予产品独特感官特性,更形成优质双源蛋白复合体系。

营养特性上,混合蛋白的核心价值体现在多方面:(1)氨基酸互补效应显著优化必需氨基酸模式,曹歌^[3]发现乳清蛋白-杏仁蛋白复合体系必需氨基酸总量较单一蛋白提升且比WHO/FAO标准模式高出29.34%,氨基酸评分最高达129.35分,突破传统限制性氨基酸瓶颈;(2)消化动力学调控优势,Butteiger等^[4]证实乳清蛋白(快速吸收)与酪蛋白(缓慢吸收)混合后,可形成持续氨基酸释放,延长肌肉合成窗口;(3)生理功能增效,Zhang等^[5]发现双蛋白营养干预小鼠可显著改善骨微结构和骨密度,Ren等^[6]发现双蛋白营养干预患者的手臂肌肉显著增强。

加工特性上,混合蛋白同样具备多方面优势:(1)凝胶网络优化,廖安等^[7]发现大豆分离蛋白-蛋清蛋白复配使其凝胶强度显著提高且二者存在蛋白协同作用;(2)流变特性改良,Zhou等^[8]发现草鱼分离蛋白-豌豆分离蛋白复配体系乳液的表观粘度显著低于单一蛋白(PPI和CPI),表明其絮凝程度更低,网络结构更稳定;(3)界面特性强化,Wouters等^[9]揭示蛋清蛋

白-水解谷蛋白复配可使界面膜抗性提高,泡沫稳定性最佳。

当前研究多聚焦于乳清蛋白、大豆蛋白等常规蛋白体系,对传统食品中天然双源蛋白(如鲢鱼-蛋清)的营养协同机制与加工适应性缺乏系统解析。该研究旨在通过构建蛋白质营养评价体系,结合多尺度表征技术,阐明鸡蛋清添加量(0~50 wt.%)对鲢鱼肉糜浆复合体系营养-加工特性的调控规律,为皱纱鱼腐等传统鱼糜制品的工业化升级提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜活鲢鱼,购于五山超市;鸡蛋,东东蛋业(广东)有限公司;食盐,广东省广盐集团股份有限公司;PBS磷酸缓冲液,湖南比克曼控股有限责任公司;其他试剂(均为分析纯),国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

KDN-103F凯氏定氮仪,上海纤检仪器有限公司;L-8900全自动氨基酸分析仪,日本日立公司;CR-400便携式色差仪,日本柯尼卡美能达公司;TA-Xt plus质构仪,英国Stable Micro Systems公司;MARS 60哈克旋转流变仪,美国赛默飞公司;Vector 70傅里叶变换红外光谱仪,德国Bruker公司。

1.3 实验方法

1.3.1 原料处理

选取鲜活鲢鱼十条(平均质量约500 g),宰杀后去头、尾及内脏,取鱼肉部分。鲢鱼宰杀后全程在4℃以下操作,避免蛋白质变性。用五倍鱼肉质量的清水漂洗三次,一次10 min。去皮去骨后切小块(约2 cm³),放入电动绞肉机,空搅2 min,每搅打30 s间歇10 s(避

免过热)。漂洗后鱼肉经 20 目筛过滤得到精炼鲮鱼肉(每批次制备 500 g), 确保肌纤维均匀性, 4 ℃ 储存备用; 人工分离鸡蛋后收集蛋清(每个鸡蛋取蛋清约 30 g), 磁力搅拌器低速均质 4 ℃ 储存备用^[10]。

1.3.2 鸡蛋清鲮鱼肉糜浆制备

取精炼鲮鱼肉, 加入 1.3 wt.% 食盐, 盐擂 2 min; 将鱼糜按照每份 50 g 进行分装, 以鱼糜总质量为基准, 分别按照 0、10、20、30、40、50 wt.% 的比例添加鸡蛋清, 分别补加 50、40、30、20、10、0 wt.% 比例的超纯水(保证总质量恒定)。通过控制总质量一致, 确保各组水分差异仅由鸡蛋清与超纯水的比例变化引起, 后续指标分析可明确归因于蛋清添加量的影响。使用打蛋器以恒定转速(1 000 r·min⁻¹) 搅拌 2 min, 确保蛋清与鱼糜充分分散, 避免局部过热, 得到鸡蛋清鲮鱼肉糜浆样品, 置于 4 ℃ 储存备用待测(整个制备过程操作温度 ≤ 10 ℃)。

1.3.3 鸡蛋清鲮鱼肉糜浆熟化复合凝胶制备

取鸡蛋清鲮鱼肉糜浆样品, 采用二段式水浴加热(40 ℃ 加热 30 min, 90 ℃ 加热 30 min), 加热后冰水冷却至室温, 得到熟化复合凝胶样品, 置于 4 ℃ 储存备用待测。

1.3.4 蛋白质的氨基酸组成测定

根据 GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》中氨基酸分析仪的酸水解法测定, 氨基酸组成分析将氨基酸分为必需氨基酸(EAAs)、非必需氨基酸(NEAAs)等。

1.3.5 蛋白质营养评价

1.3.5.1 化学评价

化学评价法通过计算蛋白质中单位重量的必需氨基酸含量与参考蛋白质模型中的必需氨基酸含量之比, 来衡量食物的蛋白质营养价值, 包括化学评分(CS)、氨基酸评分(AAS)、必需氨基酸指数(EAAI)、生物价(BV)等评价方法^[11]。

化学评分采用中国疾病预防控制中心(中国预防医学研究院)营养与健康研究所提出的全鸡蛋蛋白模型^[12]。化学评分计算公式(1)如下:

$$CS = \frac{AA_{Fi}}{AA_{Ei}} \quad (1)$$

式中:

CS——化学评分;

AA_{Fi} ——样品中某一 EAA 的含量, g/100 g prot;

AA_{Ei} ——全鸡蛋模式谱中某一 EAA 含量, g/100 g prot。

氨基酸评分是样品中某一氨基酸含量与 FAO/WHO 推荐理想蛋白质中相同氨基酸含量之比。氨基

酸评分计算公式(2)如下:

$$AAS = \frac{AA_{Fi}}{AA_{xi}} \times 100 \quad (2)$$

式中:

AAS——氨基酸评分;

AA_{Fi} ——样品中某一 EAA 含量, g/100 g prot;

AA_{xi} ——FAO/WHO 模式谱中某一 EAA 含量, g/100 g prot。

必需氨基酸指数(EAAI)评估的是食物的整体蛋白质质量, 常用于衡量样本中必需氨基酸总体情况与模型蛋白质的贴近程度。EAAI 计算公式(3)如下:

$$EAAI = \sqrt[i]{\left(\frac{AA_{Fi}}{AA_{Ei}} \times \frac{AA_{F2}}{AA_{E2}} \times \dots \times \frac{AA_{Fi}}{AA_{Ei}}\right)} \times 100 \quad (3)$$

式中:

EAAI——必需氨基酸指数;

AA_{Fi} ——样品中某一 EAA 含量, g/100 g prot;

AA_{Ei} ——全鸡蛋模式谱中某一 EAA 含量, g/100 g prot,

i-氨基酸种类的数量。

生物价(BV)是指每 100g 食物蛋白质在人体内转化的量。BV 计算公式(4)如下:

$$BV = 1.09 \times EAAI - 11.7 \quad (4)$$

式中:

BV——生物价;

EAAI——必需氨基酸指数。

1.3.5.2 氨基酸模式谱评价

氨基酸模式谱评价是通过比较各种标准蛋白的氨基酸模式谱来评价和分析食品中各种氨基酸的方法, 又称氨基酸比值系数法。目前营养学领域常用的模式谱有世界卫生组织/国际粮农组织/联合国大学(WHO/FAO/UNU)联合提出的 FAO/WHO 模式谱^[13]和中国常用的全鸡蛋模式谱^[14]。

氨基酸比值系数法通过计算样品中的氨基酸比值(RAA)、氨基酸比值系数(RC)和氨基酸比值系数分(SRC)来评价食物蛋白质。RAA、RC 和 SRC 计算公式(5~7)如下:

$$RAA = \frac{AA_{Si}}{AA_{Pi}} \quad (5)$$

$$RC = \frac{RAA}{RAA} \quad (6)$$

$$SRC = 100 - cv \times 100 \quad (7)$$

式中:

RAA——氨基酸比值;

RC——氨基酸比值系数;

SRC——氨基酸比值系数分;

AA_{Si} ——样品中氨基酸的含量, g/100 g prot;

AA_{Pi} ——氨基酸模式谱中氨基酸的含量;

$\overline{RAA}$ —— RAA 的平均值;

cv —— RC 的变异系数。

1.3.6 蛋白质含量测定

根据 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法测定。

1.3.7 水分含量测定

根据 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定。

1.3.8 持水性测定

称取一定量的鸡蛋清鲮鱼肉复合凝胶样品记为 m_1 , 用两层滤纸包裹并转移到离心管中, $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min, 离心后再次称重记为 m_2 , 持水性 (Water-Holding Capacity, WHC) 计算公式 (8) 如下:

$$WHC = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

WHC ——持水性, %;

m_1 ——离心前样品质量;

m_2 ——离心后样品质量。

1.3.9 蒸煮得率测定

称取一定量的鸡蛋清鲮鱼肉复合凝胶样品记为 m_1 , 将其浸入沸水中蒸煮 10 min, 蒸煮后将其取出并擦干表面水分, 再次称重记为 m_2 , 蒸煮得率 (Cooking Yield, CY) 计算公式 (9) 如下:

$$CY = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中:

CY ——蒸煮得率, %;

m_1 ——蒸煮前样品质量;

m_2 ——蒸煮后样品质量。

1.3.10 色差及白度测定

取鸡蛋清鲮鱼肉糜浆样品, 通过白板校准后用色差仪检测在室温条件下的色差。色差用参数 L^* 、 a^* 和 b^* 表示。 L^* 表示亮度, 参数 a^* 和 b^* 表示颜色坐标。白度值 (W) 计算公式 (10) 如下:

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (10)$$

式中:

W ——白度;

L^* ——亮度值;

a^* ——红绿度值;

b^* ——黄蓝度值。

1.3.11 起泡性与泡沫稳定性测定

参考 You 等^[15]方法稍加修改。称取 2 g 鸡蛋清鲮鱼肉糜浆样品置于玻璃量筒, 加入 20 mL PBS

($0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 7.0)。使用均质机于室温下以 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速搅拌 2 min。记录初始泡沫体积 V_0 , 室温下每隔 15 min 读取一次泡沫体积记为 V_i 。起泡性 (Foaming Capacity, FC) 和泡沫稳定性 (Foaming Stability, FS) 的计算公式 (11、12) 如下:

$$FC = \frac{V_0}{20} \times 100\% \quad (11)$$

$$FS = \frac{V_i}{V_0} \times 100\% \quad (12)$$

式中:

FC ——起泡性, %;

FS ——泡沫稳定性, %;

V_0 ——初始泡沫体积, mL;

V_i ——静置第 i 分钟时读取的泡沫体积, mL。

1.3.12 流变学特性测定

静态流变学特性测定: 将 2 g 鸡蛋清鲮鱼肉糜浆置于配有 pp25 平行板探头的旋转流变仪载物台上, 进行黏度测试, 选择剪切速率 50 s^{-1} (该速率模拟食品加工中常见的流动剪切条件, 可有效反映样品在实际加工过程中的黏度变化特性), 时间 2 min, 测定平均黏度。

动态流变学特性测定: 将 2 g 鸡蛋清鲮鱼肉糜浆置于配有 pp25 平行板探头的旋转流变仪载物台上, 采用正弦振荡模式进行温度扫描测试, 样品加热温度范围 $30\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 升温速率 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 剪切应变 1%, 选择角频率 $10\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ (此参数可稳定表征体系黏弹性响应, 便于分析蛋白质网络结构在振荡条件下的力学行为), 平板间距 1 mm, 测定样品的储能模量 (G')、损耗模量 (G'')。

1.3.13 凝胶强度测定

称取一定量的鸡蛋清鲮鱼肉复合凝胶样品, 使用质构仪进行凝胶强度测定。测定参数: 探头型号 P5/S, 压缩程度 40%, 测试前速度 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 测试速度 $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 测试后速度 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.3.14 ATR-FTIR 光谱测定

取适量鸡蛋清鲮鱼肉糜浆置于 ATR 附件上扫描, 使用 OMNIC 软件记录红外谱图, 扫描范围为 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$, 扫描 32 次, 扫描的分辨率为 4 cm^{-1} 。采用傅里叶自去卷积和谱线拟合技术处理推测蛋白质二级结构的变化, 蛋白质二级结构定量计算通过 PeakFit 软件完成。

1.4 数据分析

所有实验均重复 3 次, 数据以平均值 $\pm$ 标准差表示。使用 Origin 2018 软件绘图; 使用 IBM SPSS 26 软

件作单因素方差分析 (ANOVA), Levene 检验方差齐性, Duncan's 显著性分析和 Pearson 相关性系数计算 ($P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 分别代表差异显著、极显著和高度显著)。

2 结果与分析

2.1 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆氨基酸组成的影响

鱼肉和鸡蛋都是优质食品蛋白质。据李星等^[16]研究, 鸡蛋蛋清的 EAA/TAA=43.37%, EAA/NEAA=76.59%。滕忠作等^[17]报道暗色唇鲢肌肉的 EAA/TAA=38.39%, EAA/NEAA=62.40%。由表 1 可知, 纯鲢鱼肉糜浆 (蛋清添加量为 0%) 的 EAA/TAA 比值为 38.72%, EAA/NEAA 比值为 63.20%。值得注意的是, 鲢鱼肉必需氨基酸中赖氨酸 (Lys, 2.07 g/100 g) 含量最高, 其氨基酸分布特征与鸡蛋清 (必需氨基酸中亮氨酸含量最高, 0.99 g/100 g) 形成良好互补。传统皱纱鱼腐由鲢鱼肉糜加鸡蛋清制得, 这两种蛋白质按不同比例复配将导致样品营养特性变化。随着蛋清添加量增加, 鲢鱼肉糜浆的总氨基酸 (TAA) 和必需氨基酸 (EAA) 均大幅提升, 同时 EAA/TAA 和 EAA/NEAA 等关键比例指标仍然保持相对稳定。根据 FAO/WHO 推荐的理想蛋白质标准, 优质蛋白应满足两个关键指标: EAA/TAA $\approx$ 40%, EAA/NEAA $\geq$ 60%^[18]。因此, 鲢鱼肉糜浆本身已具备优质蛋白特征, 添加蛋清显著增加氨基酸总量的同时保持关键比例指标在理想范围, 这种动态平衡主要得益于蛋清蛋白与鱼糜蛋白在氨基酸组成上的互补效应^[19]。类似效应在植物蛋白复配体系中也有体现, 有研究发现燕麦-豌豆-小扁豆复合体系制备的饮料中的限制性氨基酸含量显著提升, 氨基酸评分 (AAS) 也从 0.72 提高至 0.91^[20]。该研究中鸡蛋清与鲢鱼肉的复配也实现了氨基酸的优化组合, 进一步提升了氨基酸平衡性。

2.2 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆蛋白质营养评价的影响

2.2.1 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆氨基酸化学评价的影响

氨基酸的化学评价包括氨基酸评分 (AAS)、化学评分 (CS)、生物价 (BV) 等指标, 对不同鸡蛋清添加量鲢鱼肉糜浆的评价结果分别如表 2 所示。氨基酸评分 (AAS) 是评估蛋白质营养价值的重要指标, 通

过比较样品与 FAO/WHO 理想蛋白质模式的氨基酸含量, 评估蛋白质中各种必需氨基酸的相对含量。依据 FAO/WHO 理想模式谱 (AAS=100), AAS $\geq$ 100 表示氨基酸充足, AAS < 100 则视为限制性氨基酸^[13]。从表的结果可以看出, 未添加蛋清时, 鲢鱼肉糜浆的赖氨酸含量 AAS=183.97 分 (充足), 而缬氨酸 AAS=109.24 分 (接近充足下限), 成为限制营养价值的关键因素。随着鸡蛋清添加量从 10 wt.% 增至 50 wt.%, 含硫氨基酸 (蛋氨酸和半胱氨酸) 的 AAS 值从 107.97 分显著提升至 175.09 分 ($P<0.05$), 有效改善了氨基酸平衡性。这得益于蛋清蛋白与鱼糜蛋白的互补效应: 蛋清补充了鲢鱼肉糜浆中相对不足的含硫氨基酸, 而鲢鱼肉糜浆则提供了丰富的赖氨酸。通过调控鸡蛋清添加比例, 可使复合蛋白的氨基酸谱更接近理想模式, 为开发营养均衡的复合蛋白产品提供重要依据^[21]。

化学评分 (CS) 也是评估蛋白质营养价值的重要指标, 主要对比全鸡蛋参考蛋白 (中国 CDC 营养标准) 的氨基酸组成。从表 3 的结果可以看出, 未添加鸡蛋清的鲢鱼肉糜浆的赖氨酸 CS 值达 1.45 (理想值=1), 显著高于参考标准, 而含硫氨基酸 (蛋氨酸和半胱氨酸) CS 值仅为 0.66, 成为第一限制性氨基酸。当鸡蛋清添加比例提升至 50 wt.% 时, 含硫氨基酸 (蛋氨酸和半胱氨酸) CS 值从 0.66 升至 1.07 ($P<0.05$), 有效弥补了原有配方的营养短板; 同时赖氨酸 CS 值适度调整至 1.16, 形成更为均衡的氨基酸谱, 进一步证实蛋清蛋白与鱼糜蛋白的协同互补效应。

必需氨基酸指数 (EAAI) 是综合考虑蛋白质中各种必需氨基酸含量的指标, 用于评估蛋白质的营养价值。生物价 (BV) 反映的是食物蛋白质被机体吸收后, 在体内被利用的程度。从表 4 的结果可以看出, 随着鸡蛋清添加量逐渐增加至 40 wt.%, 鲢鱼肉糜浆的营养价值随之提升: EAAI 从 93.47 增至 98.30 ($P<0.05$), BV 从 90.19 上升至 95.45 ($P<0.05$)。EAAI 的提升表明鱼糜氨基酸组成更接近理想模式, 鸡蛋清的加入进一步优化了鲢鱼肉糜浆的氨基酸平衡性, 特别是含硫氨基酸的补充, 使 EAAI 接近满分。BV 的增长则反映了蛋白质利用效率的改善, 这主要得益于蛋清蛋白的高消化率以及其与鱼糜蛋白的氨基酸互补效应。总之, 增加鸡蛋清添加量对提升鲢鱼肉糜浆整体营养价值作用显著, 为皱纱鱼腐等复合蛋白制品的深度加工和营养配方设计提供了关键参考。

表 1 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆氨基酸组成的影响 (g/100 g)

氨基酸组成	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
氨基酸总量 (TAA)	16.12 ± 0.89 ^f	19.79 ± 1.02 ^c	23.47 ± 1.14 ^d	27.14 ± 1.27 ^c	30.82 ± 1.39 ^b	34.50 ± 1.52 ^a
必需氨基酸 (EAA)	6.24 ± 0.32 ^f	7.65 ± 0.37 ^c	9.06 ± 0.43 ^d	10.47 ± 0.48 ^c	11.88 ± 0.53 ^b	13.30 ± 0.59 ^a
非必需氨基酸 (NEAA)	9.88 ± 0.58 ^f	12.14 ± 0.65 ^c	14.41 ± 0.72 ^d	16.67 ± 0.79 ^c	18.94 ± 0.86 ^b	21.20 ± 0.93 ^a
EAA/TAA (%)	38.72 ± 0.23 ^a	38.66 ± 0.18 ^a	38.62 ± 0.14 ^a	38.58 ± 0.12 ^a	38.56 ± 0.11 ^a	38.54 ± 0.10 ^a
EAA/NEAA (%)	63.20 ± 0.62 ^a	63.03 ± 0.47 ^a	62.91 ± 0.38 ^a	62.82 ± 0.32 ^a	62.76 ± 0.29 ^a	62.71 ± 0.27 ^a

注: 不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$), 下同。

表 2 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆氨基酸评分 (AAS) 的影响

必需氨基酸	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
异亮氨酸	121.01 ± 0.63 ^a	120.76 ± 0.26 ^a	120.59 ± 0.03 ^a	120.46 ± 0.19 ^a	120.37 ± 0.33 ^a	120.29 ± 0.44 ^a
亮氨酸	121.44 ± 0.34 ^a	119.31 ± 0.37 ^b	117.84 ± 0.39 ^c	116.78 ± 0.42 ^d	115.97 ± 0.44 ^e	115.33 ± 0.45 ^e
赖氨酸	183.97 ± 4.08 ^a	171.37 ± 3.20 ^b	162.72 ± 2.64 ^c	156.42 ± 2.27 ^d	151.63 ± 2.00 ^e	147.85 ± 1.80 ^e
蛋氨酸 + 半胱氨酸	107.97 ± 5.24 ^f	131.37 ± 4.29 ^e	147.44 ± 3.72 ^d	159.15 ± 3.37 ^c	168.07 ± 3.14 ^b	175.09 ± 2.98 ^a
苯丙氨酸 + 酪氨酸	135.40 ± 2.18 ^d	139.72 ± 2.20 ^c	142.68 ± 2.23 ^{bc}	144.84 ± 2.26 ^{ab}	146.48 ± 2.29 ^{ab}	147.78 ± 2.32 ^a
苏氨酸	119.52 ± 3.58 ^a	120.32 ± 3.20 ^a	120.86 ± 2.94 ^a	121.26 ± 2.76 ^a	121.57 ± 2.62 ^a	121.81 ± 2.51 ^a
缬氨酸	109.24 ± 1.11 ^c	111.79 ± 0.94 ^d	113.54 ± 0.81 ^c	114.81 ± 0.72 ^{bc}	115.79 ± 0.66 ^{ab}	116.55 ± 0.61 ^a

表 3 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆化学评分 (CS) 的影响

必需氨基酸	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
异亮氨酸	0.90 ± 0.00 ^a	0.89 ± 0.00 ^a	0.89 ± 0.00 ^a	0.89 ± 0.00 ^a	0.89 ± 0.00 ^a	0.89 ± 0.00 ^a
亮氨酸	0.99 ± 0.00 ^a	0.97 ± 0.00 ^b	0.96 ± 0.00 ^c	0.95 ± 0.00 ^d	0.94 ± 0.00 ^c	0.94 ± 0.00 ^c
赖氨酸	1.45 ± 0.03 ^a	1.35 ± 0.03 ^b	1.28 ± 0.02 ^c	1.23 ± 0.02 ^d	1.19 ± 0.02 ^c	1.16 ± 0.01 ^c
蛋氨酸 + 半胱氨酸	0.66 ± 0.03 ^f	0.81 ± 0.03 ^e	0.91 ± 0.02 ^d	0.98 ± 0.02 ^c	1.03 ± 0.02 ^b	1.08 ± 0.02 ^a
苯丙氨酸 + 酪氨酸	0.87 ± 0.01 ^d	0.90 ± 0.01 ^c	0.92 ± 0.01 ^{bc}	0.93 ± 0.01 ^{ab}	0.95 ± 0.01 ^{ab}	0.95 ± 0.01 ^a
苏氨酸	1.02 ± 0.03 ^a	1.02 ± 0.03 ^a	1.03 ± 0.03 ^a	1.03 ± 0.02 ^a	1.03 ± 0.02 ^a	1.04 ± 0.02 ^a
缬氨酸	0.83 ± 0.01 ^c	0.85 ± 0.01 ^d	0.86 ± 0.01 ^c	0.87 ± 0.01 ^{bc}	0.88 ± 0.01 ^{ab}	0.88 ± 0.01 ^a

表 4 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆必需氨基酸指数 (EAAI) 和生物价 (BV) 的影响

Table 4 The influence of egg white addition on the Essential Amino Acid Index (EAAI) and Biological Value (BV) of mud carp slurry

	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
EAAI	93.47 ± 0.33 ^c	95.73 ± 0.26 ^d	96.99 ± 0.24 ^c	97.77 ± 0.24 ^b	98.30 ± 0.25 ^a	98.68 ± 0.26 ^a
BV	90.19 ± 0.36 ^c	92.65 ± 0.28 ^d	94.02 ± 0.26 ^c	94.87 ± 0.26 ^b	95.45 ± 0.27 ^a	95.86 ± 0.28 ^a

2.2.2 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆氨基酸模式谱评价的影响

氨基酸比值系数（RC）用于评估蛋白质中各种必需氨基酸之间的比例是否平衡，氨基酸比值系数分（SRC）则是在RC的基础上进一步综合评估蛋白质质量的指标。表5和表6分别揭示了基于FAO/WHO与全鸡蛋双重评价模式的计算结果，鸡蛋清添加对氨基酸平衡性的优化呈现差异化特征：在FAO/WHO评价体系中，随着鸡蛋清比例增加，含硫氨基酸（蛋氨酸和半胱氨酸）RC值实现由0.84显著提升至1.30（ $P<0.05$ ），SRC值在20 wt.%添加量时达到峰值，

这表明适量添加鸡蛋清能优化氨基酸平衡，但过量添加可能破坏原有比例。而在全鸡蛋模式谱下，蛋清添加使鲢鱼肉糜浆氨基酸组成持续趋近理想模式：含硫氨基酸RC值由0.69提升至1.08（ $P<0.05$ ），SRC值持续优化，这可能得益于蛋清蛋白与全鸡蛋的进化同源性。周小虎^[22]研究发现豌豆-草鱼双蛋白的氨基酸模式相比单一蛋白更加均衡，其AAS、IVPD和PDCAAS值则介于草鱼分离蛋白和豌豆分离蛋白之间，实现蛋白质互补作用，表明双源蛋白协同优化氨基酸平衡的潜力，为蛋白资源的高值化利用提供了新思路。

表 5 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆在FAO/WHO模式谱下氨基酸比值系数和氨基酸比值系数分的影响
Table 5 The influence of egg white addition on the Amino Acid Ratio Coefficient (RC) and the Score of Amino Acid Ratio Coefficient (SRC) of mud carp slurry under the FAO/WHO model spectrum

必需氨基酸	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
异亮氨酸	0.94 ± 0.01 ^a	0.92 ± 0.01 ^b	0.91 ± 0.00 ^c	0.90 ± 0.00 ^d	0.90 ± 0.00 ^{de}	0.89 ± 0.00 ^e
亮氨酸	0.95 ± 0.00 ^a	0.91 ± 0.00 ^b	0.89 ± 0.00 ^c	0.88 ± 0.00 ^d	0.86 ± 0.00 ^e	0.85 ± 0.00 ^f
赖氨酸	1.43 ± 0.03 ^a	1.31 ± 0.02 ^b	1.23 ± 0.02 ^c	1.17 ± 0.02 ^d	1.13 ± 0.01 ^e	1.10 ± 0.01 ^f
蛋氨酸 + 半胱氨酸	0.84 ± 0.04 ^f	1.01 ± 0.03 ^e	1.11 ± 0.02 ^d	1.19 ± 0.02 ^c	1.25 ± 0.02 ^b	1.30 ± 0.02 ^a
苯丙氨酸 + 酪氨酸	1.05 ± 0.01 ^b	1.07 ± 0.01 ^{ab}	1.08 ± 0.01 ^{ab}	1.09 ± 0.01 ^a	1.09 ± 0.01 ^a	1.09 ± 0.01 ^a
苏氨酸	0.93 ± 0.03 ^a	0.92 ± 0.03 ^a	0.91 ± 0.03 ^a	0.91 ± 0.02 ^a	0.91 ± 0.02 ^a	0.90 ± 0.02 ^a
缬氨酸	0.85 ± 0.01 ^a	0.86 ± 0.01 ^a	0.86 ± 0.01 ^a	0.86 ± 0.01 ^a	0.86 ± 0.01 ^a	0.86 ± 0.01 ^a
SRC	79.55 ± 1.14 ^c	84.53 ± 0.94 ^{ab}	85.83 ± 0.96 ^a	85.41 ± 0.97 ^a	84.40 ± 0.94 ^{ab}	83.26 ± 0.91 ^b

表 6 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆在全鸡蛋模式谱下氨基酸比值系数和氨基酸比值系数分的影响
Table 6 The influence of egg white addition on the Amino Acid Ratio Coefficient (RC) and the Score of Amino Acid Ratio Coefficient (SRC) of mud carp slurry under the whole egg model spectrum

必需氨基酸	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
异亮氨酸	0.93 ± 0.01 ^a	0.92 ± 0.00 ^b	0.91 ± 0.00 ^c	0.91 ± 0.00 ^d	0.90 ± 0.00 ^{de}	0.90 ± 0.00 ^e
亮氨酸	1.03 ± 0.00 ^a	1.00 ± 0.00 ^b	0.98 ± 0.00 ^c	0.97 ± 0.00 ^d	0.96 ± 0.00 ^e	0.95 ± 0.00 ^f
赖氨酸	1.51 ± 0.03 ^a	1.39 ± 0.02 ^b	1.31 ± 0.02 ^c	1.25 ± 0.02 ^d	1.21 ± 0.01 ^e	1.17 ± 0.01 ^f
蛋氨酸 + 半胱氨酸	0.69 ± 0.03 ^f	0.83 ± 0.03 ^e	0.93 ± 0.02 ^d	0.99 ± 0.02 ^c	1.04 ± 0.02 ^b	1.08 ± 0.02 ^a
苯丙氨酸 + 酪氨酸	0.91 ± 0.01 ^d	0.93 ± 0.01 ^{cd}	0.94 ± 0.01 ^{ab}	0.95 ± 0.01 ^{ab}	0.96 ± 0.01 ^a	0.96 ± 0.01 ^a
苏氨酸	1.06 ± 0.03 ^a	1.06 ± 0.03 ^a	1.05 ± 0.03 ^a	1.05 ± 0.03 ^a	1.05 ± 0.03 ^a	1.05 ± 0.02 ^a
缬氨酸	0.86 ± 0.01 ^c	0.87 ± 0.01 ^{bc}	0.88 ± 0.01 ^{ab}	0.88 ± 0.01 ^{ab}	0.89 ± 0.01 ^a	0.89 ± 0.01 ^a
SRC	74.51 ± 1.28 ^c	81.27 ± 0.93 ^d	85.31 ± 0.69 ^c	87.67 ± 0.49 ^b	88.94 ± 0.32 ^a	89.51 ± 0.19 ^a

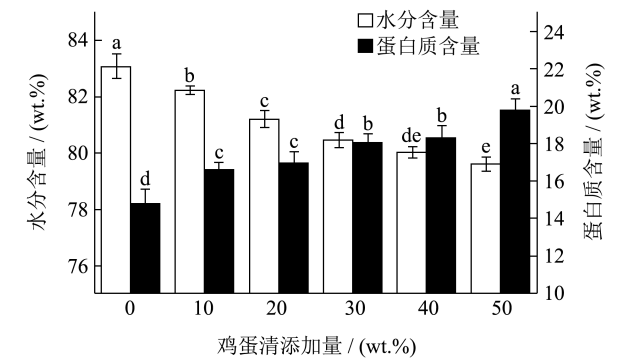


图 1 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆蛋白质及水分含量的影响

Fig.1 The influence of the addition of egg white on the protein and moisture contents of mud carp slurry

注：不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)，下同。

2.3 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆蛋白质及水分含量的影响

制备复合蛋白浆时，往鲮鱼肉糜中按 0~50 wt.% 的不同比例加入鸡蛋清，添加量低的以超纯水补充，不同鸡蛋清添加量的复合蛋白浆中蛋白质及水分含量的变化结果如图 1 所示。随着蛋清比例从 0 wt.% 提升至 50 wt.%，体系蛋白质含量由 14.74 wt.% 显著提升至 19.80 wt.% ($P<0.05$)，这与蛋清蛋白的富集效应直接相关。动物源复合蛋白可通过氨基酸互补作用提升蛋白质生物效价，Bethi 等^[23]研究表明，50% FWPH 与酪蛋白的组合通过氨基酸互补作用，显著提升了蛋白质生物效价，促进大鼠生长性能。鲮鱼肉（富含赖氨酸）^[17]与鸡蛋清（富含亮氨酸）^[16]可在必需氨基酸层面实现协同，为开发高营养密度鱼糜制品提供理论依据。水分含量则从 83.03 wt.% 显著降至 79.60 wt.% ($P<0.05$)，可能源于两方面机制：蛋清固形物对水相的稀释效应；复合蛋白网络形成后持水能力的提升。水分含量的适度降低可有效抑制微生物增殖，这对延长调理鱼糜制品货架期具有重要实践意义。

2.4 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆持水性及蒸煮得率的影响

从图 2 可知，随着鸡蛋清添加量从 0 wt.% 增加至 40 wt.%，持水性从 80.99% 稳步上升至 86.51%

($P<0.05$)，这主要得益于蛋清蛋白良好的持水能力，其与鱼糜中的水分结合形成稳定的水合结构，从而减少水分流失。但当添加量达到 50 wt.% 时，持水性略微下降，可能是由于蛋白质网络结构因蛋清过多而过于紧密，导致水分分布和结合方式发生改变。蒸煮得率也随着鸡蛋清添加量的增加呈现先升后降趋势，这可能与持水性及蛋清在蒸煮时的凝胶化保水作用密切相关。

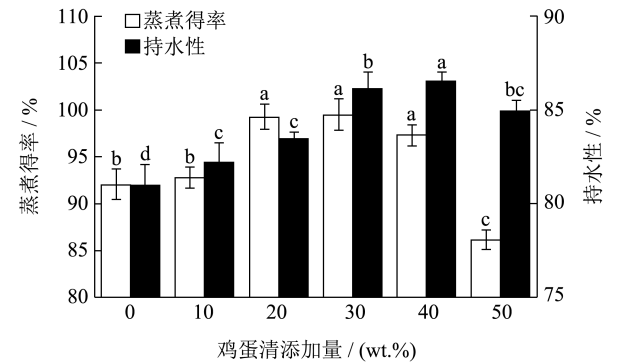


图 2 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆持水性和蒸煮得率的影响

Fig.2 The influence of the addition of egg white on the water-holding capacity and cooking yield of mud carp slurry

2.5 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆色差及白度的影响

从表 7 可知，增加鸡蛋清添加量可改变鲮鱼肉糜浆混合体系的色度特征。 L^* 值呈现稳步上升趋势，这种增亮效应归因于蛋清蛋白（如卵粘蛋白）对入射光的散射增强效应。在色度坐标方面， a^* 值从 -1.44 降至 -2.56 表明在红-绿轴上向绿色方向偏移，可能与色素稀释效应有关，蛋清不含肌红蛋白等血红素色素，稀释了鱼糜原有红色成分； b^* 值从 4.22 升至 5.79 显示黄-蓝轴上黄色调增强，则可能与美拉德反应前体物的积累有关。 W 值在 83.12~83.90 范围呈现先升后降的弱波动。Srisai 等^[24]研究发现添加鸡蛋清对线鲮鱼糜凝胶的白度没有显著影响，这可能是因为鱼糜基质特性的主导作用，且外源添加物蛋清对白度的调控能力有限。鱼糜的白度主要取决于其自身的肌肉组织特性以及加工过程中的处理方式。

色差及白度	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
L^*	83.73 ± 0.40^c	83.82 ± 0.24^c	84.09 ± 0.30^c	84.64 ± 0.27^b	85.02 ± 0.31^{ab}	85.17 ± 0.24^a
a^*	-1.44 ± 0.10^a	-1.78 ± 0.07^b	-1.81 ± 0.10^b	-2.10 ± 0.10^c	-2.34 ± 0.08^d	-2.56 ± 0.19^e
b^*	4.22 ± 0.16^d	4.25 ± 0.22^d	4.37 ± 0.17^d	4.75 ± 0.23^c	5.40 ± 0.07^b	5.79 ± 0.27^a
W	83.12 ± 0.35^b	83.18 ± 0.26^b	83.40 ± 0.30^{ab}	83.78 ± 0.23^a	83.90 ± 0.27^a	83.87 ± 0.19^a

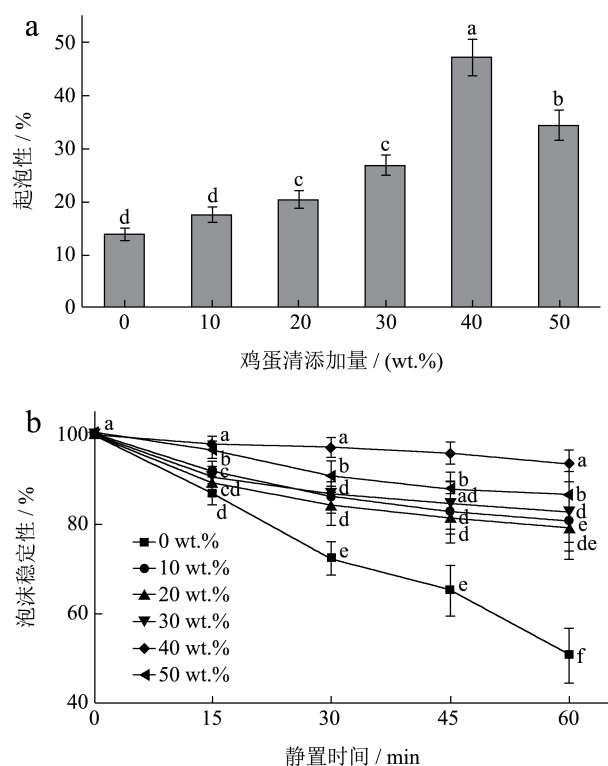


图3 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆起泡性 (a) 和泡沫稳定性 (b) 的影响

Fig.3 The influence of the addition of egg white on the foaming property (a) and foam stability (b) of mud carp slurry

2.6 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆起泡性和泡沫稳定性的影响

鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆起泡性和泡沫稳定性的影响如图3所示。从图3a可以看出,鸡蛋清添加量在0~40 wt.%范围内,鲢鱼肉糜浆的起泡性逐渐增强,从13.80%提升至47.00% ($P < 0.05$),主要归因于蛋清蛋白(如溶菌酶、卵转铁蛋白)在气-液界面的快速吸附及分子重排。而当添加量超过40 wt.%时,起泡率下降至34.20%,这可能与体系黏弹性的突变有关。Ding等^[25]研究发现随着鸡蛋清添加量的增加,体系中的蛋白质含量增多并在气-液界面上迅速扩散吸附,形成稳定的界面膜,从而提高起泡性。从图3b可以看出,未添加鸡蛋清的鲢鱼肉糜浆泡沫稳定性在静置60 min时仅剩50.72%,而40 wt.%鸡蛋清添加量复合体系静置60 min的泡沫稳定性仍具有93.62% ($P < 0.05$),这归因于卵粘蛋白与鱼糜肌球蛋白形成的复合界面膜,减缓了液体流失和气泡破裂。Ho等^[26]研究发现,增加蛋清添加量可形成更厚更稳定的界面膜,增强蛋白质分子间的相互作用,形成紧密网络结构,提高泡沫稳定性。陈珂等^[27]的研究也发

现,蛋清添加量增加时,泡沫稳定性保持稳定甚至提高。因此,鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆的起泡性和泡沫稳定性影响显著,二者变化趋势相关。

2.7 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆流变学特性的影响

鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆静态和动态流变学特性的影响分别如图4和图5所示。在剪切速率 50 s^{-1} (模拟加工流动剪切条件)下,从图4可知,随着鸡蛋清添加量逐渐增加,黏度呈现逐渐降低的趋势,可归因于两方面协同作用:其一,蛋清蛋白的引入通过“填充效应”稀释了鱼糜肌原纤维蛋白的质量浓度,削弱了蛋白质分子间的疏水相互作用^[28];其二,蛋清中的卵粘蛋白通过竞争性水合作用改变了体系的水分分布状态,促使连续相流动性增强。图5则揭示了鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆动态流变学特性的调控规律,在角频率 $10 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ (稳定表征体系黏弹性响应)的温度扫描过程中,储能模量(G')与损耗模量(G'')呈现添加量依赖性变化:温度升至80~100 °C时, G' 值呈现指数级增长趋势,其中30 wt.%蛋清添加组在100 °C时 G' 达到 $3.61 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。这种热诱导模量增强效应归因于蛋清蛋白(尤其是卵粘蛋白)与鱼糜肌原纤维蛋白的协同交联作用,通过形成更致密的三维网络结构提升体系弹性。损耗模量(G'')的温度响应与储能模量(G')类似,表明适量鸡蛋清添加可能通过增强蛋白质-蛋白质摩擦作用影响体系粘性特征。崔旭海等^[29]研究发现,外源蛋白的引入可显著改变鱼糜的弹性模量和黏性模量,Avtar等^[30]也指出添加植物车前子壳粉(PHP)能提高鱼糜凝胶的弹性模量。因此适量鸡蛋清可增强鲢鱼肉糜浆的储能模量和损耗模量,使其在受外力时保持更好的形状和结构。

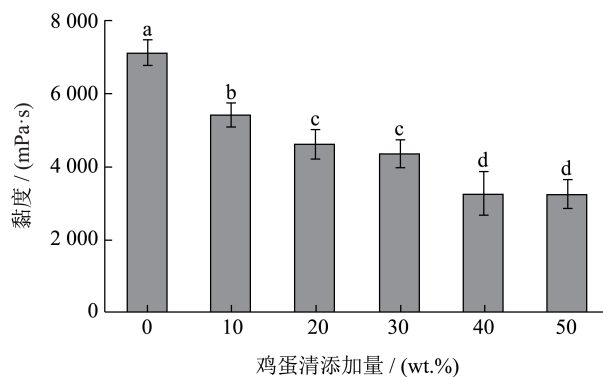


图4 鸡蛋清添加量对鲢鱼肉糜浆静态流变学特性的影响

Fig.4 The influence of the addition of egg white on the static rheological properties of mud carp slurry

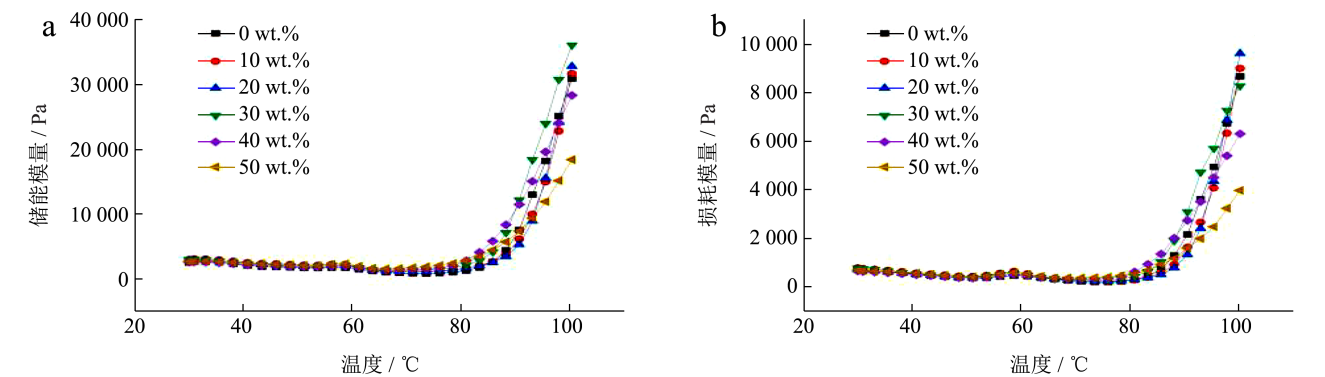


图 5 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆动态流变学特性的影响

Fig.5 The influence of the addition of egg white on the dynamic rheological properties of mud carp slurry

表 8 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆凝胶强度的影响

Table 8 The influence of the addition of egg white on the gel strength of mud carp slurry

项目	鸡蛋清添加量/(wt.%)					
	0	10	20	30	40	50
破断力/g	47.21 ± 1.69 ^c	60.36 ± 1.93 ^d	79.42 ± 3.18 ^c	88.38 ± 3.33 ^b	95.37 ± 3.69 ^a	85.30 ± 1.28 ^b
破断距离/cm	0.32 ± 0.03 ^a	0.32 ± 0.02 ^a	0.32 ± 0.04 ^a	0.35 ± 0.01 ^a	0.33 ± 0.04 ^a	0.32 ± 0.04 ^a
凝胶强度/(g·cm)	14.94 ± 1.12 ^c	19.46 ± 1.64 ^d	25.49 ± 3.68 ^c	30.67 ± 1.66 ^a	31.15 ± 4.82 ^a	27.29 ± 3.27 ^b

2.8 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆凝胶强度的影响

从表 8 中可知，蛋清添加量在 0~40 wt.% 范围内，破断力从 47.21 g 提升至 95.37 g ($P<0.05$)，这与复合蛋白网络交联密度的增加直接相关^[31]。当添加量增加至 50 wt.% 时，破断力降至 85.30 g，可能由于蛋白质比例失衡导致相分离。凝胶强度的变化趋势与破断力相似，表明适量鸡蛋清添加量可维持鱼糜良好凝胶特性。张斌^[32]研究发现中等鸡蛋清添加量的混合鱼糜凝胶具有最大的凝胶强度，可能由于鸡蛋清蛋白过度抑制了肌原纤维蛋白的聚集，过慢的聚集速度导致三维网络结构内部尺寸过大，从而使凝胶结构变得松散。

2.9 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆蛋白质二级结构的影响

从图 6 可知，低添加量（0~30 wt.%）时，β-折叠比例略微上升，可能得益于蛋清蛋白暴露疏水基团，与鱼糜蛋白结合，促进 β-折叠形成，有利于形成更强的凝胶网络；而高添加量（40~50 wt.%）时，β-折叠比例大幅下降，可能因为过量蛋清蛋白会竞争性结合肌原纤维蛋白的交联位点，导致无序聚集，无规卷曲比例增加^[32]。无规卷曲比例增加会破坏凝胶网络的规整性，降低凝胶强度并影响其持水性等理化性质。周佳滢等^[33]研究发现，油脂添加量提高同样会鱼糜蛋白质 β-折叠相对含量先上升后下降，无规卷曲相对含量明

显增加，进而影响鱼糜凝胶的理化性质。此外，α-螺旋比例在高添加量时达峰值，这可能与蛋白质聚集过程中局部有序结构的重组有关，而 β-转角在高添加量时相对稳定则反映了凝胶网络空间构象的适应性调整。α-螺旋和 β-转角在凝胶网络中同样发挥重要作用：α-螺旋结构通过分子内氢键维持稳定性，其含量变化会影响凝胶的弹性；β-转角则通过改变肽链走向参与凝胶网络的空间构象构建，其比例变化会影响凝胶结构的柔韧性。唐婷婷等^[34]在大豆分离蛋白中添加卵白蛋白的研究指出，蛋白质相互作用引发二级结构改变，促使复合凝胶表面孔径减小，形成光滑致密结构，显著提升凝胶硬度、弹性和保水性。

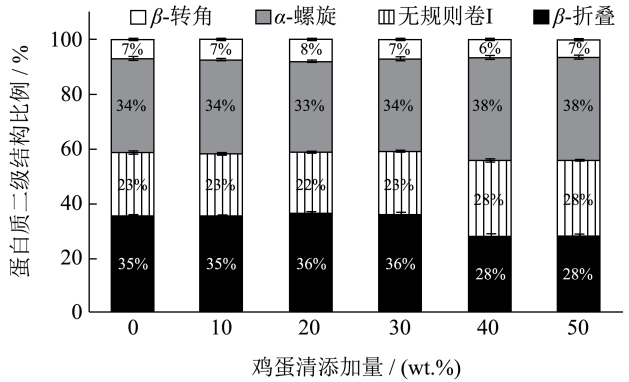


图 6 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆蛋白质二级结构的影响

Fig.6 The influence of the addition of egg white on the secondary structure of protein in mud carp slurry

2.10 相关性分析

从图 7 可知，基于 Pearson 相关性分析可进一步探讨不同鸡蛋清添加量下鲮鱼肉糜浆营养与加工特性之间的关系。熟化前蛋白质含量（PC）与熟化后凝胶强度（GS）和持水性（WHC）呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），同时熟化后凝胶强度与持水性存在高度显著关联（ $P<0.001$ ），这表明凝胶网络的致密性会直接影响其对水分的束缚能力。从作用机制来看，熟化前蛋白质结构决定了分子间相互作用方式，进而影响熟化后凝胶网络的形成质量，最终与持水性、凝胶强度等功能性质相关联。值得注意的是，鲮鱼肉糜浆的制备与存放条件以及混合方式亦通过调控蛋白质构象和分子间相互作用，间接影响最终品质特性。杨玉玲等^[35]研究发现低温下肌原纤维蛋白 α -螺旋含量高达 95.77%，表明低温能有效保留蛋白质的天然构象。刘超等^[36]研究表明，搅打时间 3.3 min 时蛋清发泡性能最佳，过度搅拌（ >5 min）则因疏水基团暴露引发蛋白质聚集。该研究通过低温操作维持蛋白天然构象，短期冷藏延缓结构劣变，适度剪切优化界面作用，共同实现了对混合蛋白结构的有效保护。因此，通过 Pearson 相关性分析有效构建了熟化前（鸡蛋清鲮鱼肉糜浆）和熟化后（复合凝胶）各项指标间的联系。熟化前蛋白质的结构和含量为熟化后产品品质的形成奠定基础，而熟化后持水性、蒸煮得率和凝胶强度间的相互作用直观呈现出凝胶功能特性的内在关联，有效支撑了“原料结构—熟化处理—最终品质”的作用链条，有助于深入探究鸡蛋清对鲮鱼肉糜浆熟化前后品质的调控机制。

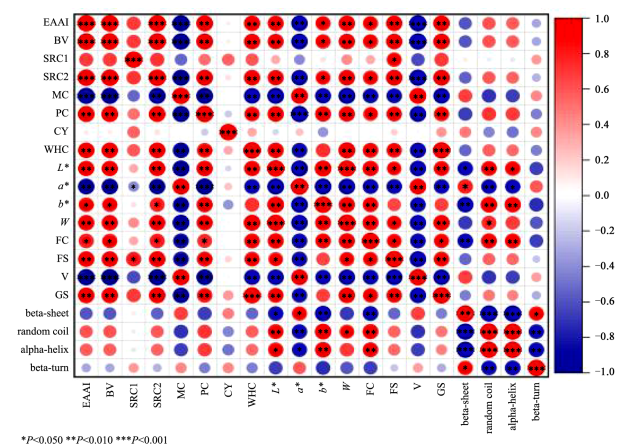


图 7 鸡蛋清添加量对鲮鱼肉糜浆影响的相关性分析图

Fig.7 Correlation analysis of the influences of egg white on mud carp slurry

3 结论

该研究系统探讨了不同添加量（0~50 wt.%）的鸡蛋清对鲮鱼肉糜浆复合体系品质特性的影响机制。营养评价表明，添加鸡蛋清从 0 wt.% 增至 40 wt.% 显著提升了蛋氨酸和半胱氨酸等含硫氨基酸的含量（ $P<0.05$ ），经 FAO/WHO 氨基酸模式谱计算，RC 值突破 1.25（ $P<0.05$ ），BV 值达 95.45（ $P<0.05$ ），且必需氨基酸比例符合优质蛋白标准。加工特性方面，实验组较对照组（未添加鸡蛋清）显著改善：40 wt.% 添加量时起泡性提升 3.41 倍（ $P<0.05$ ），凝胶强度增加 108.50%（ $P<0.05$ ）；动态流变学数据表明，30 wt.% 蛋清添加组在高温凝胶阶段（80~100 °C）储能模量（ G' ）达到 3.61×10^4 Pa，形成致密三维网络结构。此外，傅里叶变换红外光谱分析揭示，适量蛋清促进 β -折叠构象形成，而过量添加（50 wt.%）导致无规则卷曲比例增加，影响复合体系稳定性。该研究通过多尺度分析揭示了 40 wt.% 鸡蛋清添加量可有效协调蛋清蛋白与鱼糜蛋白的协同作用，在通过均衡氨基酸组成提升营养价值的同时显著改善制品的诸多加工特性。未来研究需进一步解析蛋清蛋白与鱼糜蛋白的分子互作机制，并结合皱纱鱼腐传统工艺（如擂溃、成型、蒸煮等环节）优化工业化生产参数，推动其标准化与规模化应用。

参考文献

[1] 林小植,林鸿生,李冬梅,等.广东韩江不同年龄鲮鱼鱼体化学组成的研究[J].四川动物,2011,30(4):564-568.

[2] 胡珊.不同禽蛋蛋清及蛋黄差异蛋白质组学研究[D].武汉:华中农业大学,2016.

[3] 曹歌.杏仁蛋白和乳清蛋白混合体系理化特性及功能性的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.

[4] BUTTEIGER D N, COPE M, LIU P, et al. A soy, whey and caseinate blend extends postprandial skeletal muscle protein synthesis in rats [J]. Clinical Nutrition, 2013, 32(4): 585-591.

[5] ZHANG J, ZHANG Q, LIU H, et al. Soy-whey dual-protein alleviates osteoporosis of ovariectomized rats via regulating bone fat metabolism through gut-liver-bone axis [J]. Nutrition, 2022, 103-104: 111723.

[6] REN G X, ZHANG J P, LI M H, et al. Protein blend ingestion before allogeneic stem cell transplantation improves protein-energy malnutrition in patients with leukemia [J]. Nutrition Research, 2017, 46: 68-77.

[7] 廖安,吴卫国.大豆-鸡蛋清复合蛋白粉功能性质的研究[J].现代食品科技,2013,29(7):1606-1610.

[8] ZHOU X H, ZHANG C H, CAO W H, et al. A comparative functional analysis of pea protein and grass carp protein mixture via blending and

- co-precipitation [J]. Foods, 2021, 10(12): 18.
- [9] WOUTERS A G B, ROMBOUTS I, FIERENS E, et al. Foaming and air-water interfacial characteristics of solutions containing both gluten hydrolysate and egg white protein [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 176-186.
- [10] 刘琪.富硒鸡蛋蛋清的营养品质、功能特性及胃肠消化特性的研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [11] LI Z Q, HONG T N, SHEN G H, et al. Amino acid profiles and nutritional evaluation of fresh sweet-waxy corn from three different regions of China [J]. Nutrients, 2022, 14(19): 34.
- [12] 金洪宇,李雷,覃东立,等.弧唇裂腹鱼肌肉营养成分分析[J].生物资源,2022,44(2):198-204.
- [13] World Health Organization. Protein and amino acid requirements in human nutrition introduction [M]. Geneva: World Health Organization, 2007.
- [14] 吴丹,江敏,吴昊,等.大棚养殖和露天养殖模式下不同生长阶段凡纳滨对虾肌肉营养成分比较[J].上海海洋大学学报,2019, 28(4):491-500.
- [15] YOU Y H, YANG L, CHEN H, et al. Effects of (-)-epigallocatechin-3-gallate on the functional and structural properties of soybean protein isolate [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(7): 2306-2315.
- [16] 李星,王浩,张丽华,等.4种禽蛋中氨基酸成分的测定及分析[J].食品研究与开发,2022,43(4):158-168.
- [17] 滕忠作,招志杰,张英兰,等.暗色唇鲮肌肉营养成分分析与品质评价[J].江西农业学报,2024,36(1):107-113.
- [18] KOLPAKOVA V V, ULANOVA R V, KULIKOV D S, et al. Qualitative indicators of protein concentrates from pea and chickpea flour [J]. BIO Web of Conferences, 2022, 52: 00007.
- [19] ASGAR M A, FAZILAH A, HUDA N, et al. Nonmeat protein alternatives as meat extenders and meat analogs [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2010, 9(5): 513-529.
- [20] BONKE A, SIEUWERTS S, PETERSEN I L. Amino acid composition of novel plant drinks from oat, lentil and pea [J]. Foods, 2020, 9(4): 429.
- [21] IMRAN B K M, SOO K J, HYEON A J, et al. Natural food additives and preservatives for fish-paste products: A review of the past, present, and future states of research [J]. Journal of Food Quality, 2017, 2017: 1-31.
- [22] 周小虎.豌豆-草鱼共沉淀双蛋白的结构表征及功能特性研究[D].湛江:广东海洋大学,2022.
- [23] BETHI C M S, JAYPRAKASH G, MUTHUKUMAR S P, et al. Application of proteins from different meat processing wastewater streams as a dietary protein source in animal feed [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 8.
- [24] SRISAI P, PANSAWAT N, RATTANAPORN K, et al. Textural and physicochemical properties of threadfin bream surimi gels prepared with salted duck egg white as substitute for hen egg white [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2023, 58(3): 1098-1107.
- [25] DING L, LU L, SHENG L, et al. Mechanism of enhancing foaming properties of egg white by super critical carbon dioxide treatment [J]. Food Chemistry, 2020, 317(C): 126349.
- [26] HO H Y, CIOU J Y, QIU Y T, et al. Improvement of foaming characteristics and stability of sterilized liquid egg with egg white hydrolysate (EWH) [J]. Foods, 2021, 10(6): 14.
- [27] 陈珂,刘丽莉,孟圆圆,等.鸡蛋清蛋白喷雾干燥工艺优化及特性变化[J].食品与机械,2019,35(1):197-203,231.
- [28] WANG L, CHENG J, SU R, et al. Changing the gel-forming properties of myofibrillar protein by using a gentle broken method [J]. Journal of Food Science, 2018, 84(2): 261-267.
- [29] 崔旭海,毕海丹,崔晓莹,等.不同食用蛋白的添加对鲤鱼鱼糜流变和凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2018,39(16):195-200, 225.
- [30] AVTAR S, SOOTTAWAT B, THUMMANOON P, et al. Effect of psyllium (*Plantago ovata* Forsk) husk on characteristics, rheological and textural properties of threadfin bream surimi gel [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2021, 10(6): 1181.
- [31] KLANKKLIN T, BANJONGSINSIRI P, VATANYOOPASARN S, et al. Effect of egg white on physicochemical properties of mixed fish sausage [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 346: 12048.
- [32] 张斌.鸡蛋清蛋白对秘鲁鲑鱼鱼糜凝胶过程的影响及其作用机制研究[D].杭州:浙江工商大学,2023.
- [33] 周佳滢,胡之恒,黄佳茵,等.基于蛋白质结构和理化性质的鱼糜蛋白-油脂相互作用[J].食品科学,2023,44(8):55-61.
- [34] 唐婷婷,杨玲玲,蒋艳,等.卵白蛋白和大豆分离蛋白相互作用对凝胶结构及性质的影响[J].食品与生物技术学报,2022,41(4):31-37.
- [35] 杨玉玲,游远,彭晓蓓,等.加热对鸡胸肉肌原纤维蛋白结构与凝胶特性的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):2013-2020.
- [36] 刘超,李冬生.影响蛋清蛋白起泡性能的改性条件研究[J].化学与生物工程,2008,25(7):51-53.