DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260320004
引用格式: 张博宇, 关博骏, 陈木林, 等. 红心火龙果-鱼糜复合凝胶体系的构建及机制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 123–131.
Zhang Boyu, Guan Bojun, Chen Mulin, et al. Study on the construction and mechanism of the *Hylocereus polyrhizus*-surimi composite gel system [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 123–131. (in Chinese with English abstract).

红心火龙果-鱼糜复合凝胶体系的构建及机制研究

张博宇, 关博骏, 陈木林, 仪淑敏*, 李学鹏, 励建荣

(渤海大学食品科学与工程学院, 锦州 121013)

摘 要: 目的 构建红心火龙果-鱼糜复合凝胶体系。**方法** 将红心火龙果果浆按(0%、5%、10%、15%、20%)的质量比例添加至鱼糜中制备鱼条, 测定复合凝胶的感官品质、色泽、质构特性、凝胶强度、持水性、蒸煮损失、pH、甜菜红素热稳定性及主要营养成分。**结果** 红心火龙果的添加能提升复合凝胶的多项品质属性。添加量为 10%时, 鱼条凝胶的色泽、气味等感官评分最高, 呈色效果与风味协调性最佳; 凝胶强度较未添加组提升 71.13 *g*·cm, 蒸煮损失率降至 4.64%, 持水性为 71.36%, 甜菜红素保留率达 88.57%, 热稳定性最佳; 同时, 产品脂肪含量下降, 水分和蛋白质含量上升, 营养结构得到优化。**结论** 添加 10%的红心火龙果可显著提升色泽、凝胶品质与营养组分。且适量火龙果的引入促进了复合凝胶网络结构的致密化, 有效提升了产品的色素热稳定性、持水能力与感官品质。本研究为天然色素在鱼糜制品中的功能性应用提供了理论依据, 为开发营养强化型鱼糜产品提供了技术路径。

关键词: 鱼条; 红心火龙果; 天然色素; 凝胶特性; 营养品质
中图分类号: TS254.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)17–0123–09

Study on the construction and mechanism of the *Hylocereus polyrhizus*-surimi composite gel system

ZHANG Bo-Yu, GUAN Bo-Jun, CHEN Mu-Lin, YI Shu-Min*, LI Xue-Peng, LI Jian-Rong

(*College of Food Science and Engineering*, *Bohai University*, *Jinzhou* 121013, *China*)

ABSTRACT: Objective To construct a *Hylocereus polyrhizus*-surimi composite gel system. **Methods** *Hylocereus polyrhizus* pulp was incorporate into surimi at mass ratios of 0%, 5%, 10%, 15% and 20% to prepare fish stick. The sensory quality, color, texture property, gel strength, water-holding capacity, cooking loss, pH, thermal stability of betacyanin and major nutritional components of the composite gels were systematically evaluate. **Results** The addition of *Hylocereus polyrhizus* enhanced multiple quality attributes of the composite gels. At 10% addition, the fish stick gels achieved the highest sensory scores in color, odor and overall acceptability, exhibiting optimal color development and flavor harmony. Gel strength increased by 71.13 *g*·cm compared with the control group, cooking loss decreased to

收稿日期: 2026-03-20
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32272256); 辽宁省自然基金面上项目(2024010632-JH3/107); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJ212410167068)
第一作者: 张博宇(2004—), 男, 主要研究方向为水产品加工。E-mail: 819826007@qq.com
***通信作者:** 仪淑敏(1980—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品贮藏加工及质量安全控制方面的研究。E-mail: yishumin@163.com

4.64%, water-holding capacity reached 71.36%, and betacyanin retention rate was 88.57%, indicating the best thermal stability. Meanwhile, fat content decreased while moisture and protein content increased, resulting in an optimized nutritional profile. **Conclusion** The addition of 10% *Hylocereus polyrhizus* significantly improves the color, gel properties and nutritional composition of fish strips. The incorporation of an appropriate amount of *Hylocereus polyrhizus* promotes the densification of the composite gel network structure, which effectively enhances the thermal stability of the pigment, water-holding capacity and sensory quality of the product. This study provides a theoretical basis for the functional application of natural pigments in surimi products and offers a technical approach for developing nutritionally fortified surimi products.

KEY WORDS: fish stick; *Hylocereus polyrhizus*; natural pigments; gel characteristics; nutritional quality

0 引 言

鱼糜制品是以鱼肉为主料, 经采肉、漂洗、精滤、斩拌和加热等工艺制成的具有弹性的水产加工食品[1]。近年来, 随着消费需求向休闲化、即食化发展, 鱼条、鱼排、蟹棒等新型即食鱼糜食品逐渐受到市场欢迎。鱼条作为典型代表, 是以鱼糜为主料, 经斩拌、成型、裹粉、油炸等工艺加工而成的深加工制品。但目前市场上的鱼条产品存在部分短板。在色泽方面, 普遍依赖人工合成色素, 如以日落黄、胭脂红为代表的偶氮类着色剂。这类色素虽着色力强, 成本低, 但存在一定的安全性问题[2]。已有研究指出部分偶氮类色素如胭脂红在高浓度下具有潜在的致癌性、致畸性、致突变性[3]。因此寻求安全的天然色素成为行业关注的重点。在营养成分方面, 鱼条主体为鱼肉、淀粉和调味料, 膳食纤维和天然抗氧化物质含量较少, 这使得其营养结构失衡。这一现状使得产品难以满足日益增长的健康饮食需求, 同时在功能属性上存在短板。

为改善上述缺陷, 现有研究多将天然色素提取物直接添加至鱼糜凝胶体系中, 但外源色素的添加会和肌原纤维蛋白发生非特异性结合, 阻碍热诱导过程中蛋白分子的有效聚集和交联[4], 进而导致加工过程呈色不均匀、热加工过程中色素降解明显等问题。在营养强化方面, 生产加工中常向鱼糜凝胶中添加植物源提取物或膳食纤维颗粒[5], 这类添加方式常因过量的纤维颗粒会物理性阻碍蛋白凝胶网络的连续性[6], 进而使鱼条凝胶质地变差, 蒸煮损失增大。单一组分的外源添加方法难以同时兼顾色泽改良与营养强化的双重需求。基于此, 本研究从天然原料中寻找一种兼具稳定呈色能力和营养补充价值的配料, 目的是避免多组分添加带来的风险, 进而实现色泽与营养的提升。

红心火龙果(*Hylocereus polyrhizus*)中含有大量的甜菜红素, 这是一种水溶性含氮色素, 其不易受酸碱度剧烈变化的影响, 在食品加工中具有一定的应用优势。与人工合成色素相比, 甜菜红素安全性高, 具有一定的抗氧化活性, 能作为天然着色来源[7]。此外, 火龙果果肉中富含可溶性膳食纤维、维生素 C、B 族维生素及酚类物质[8]。红心火龙果中的可溶性膳食纤维具有良好的水合能力, 能在热诱导过程中参与蛋白凝胶网络的构建[9], 提升鱼条凝胶网络的质构特性; 可溶性膳食纤维具有良好的凝胶形成能力, 能模拟脂肪的咀嚼口感, 因此可作为天然的脂肪替代品应用于低脂肉制品的开发[10]。红心火龙果中的有机酸和酚羟基能释放氢离子, 导致鱼条凝胶体系的 pH 呈弱酸性环境, 而甜菜红素在弱酸环境中较为稳定[11], 进而使甜菜红素有较强的着色稳定性。而从营养强化的角度, 将膳食纤维加入鱼糜制品, 可弥补鱼糜制品缺乏的纤维成分, 而酚类物质则能提升鱼条凝胶的抗氧化能力[12]。

目前, 关于火龙果添加量对鱼糜制品感官评价和凝胶特性的影响的研究匮乏。现有报道多集中在火龙果色素的提取工艺, 或将其应用于果汁、酸奶等饮料中[13]。而直接将火龙果作为固相添加物添加到鱼条凝胶中的研究较少。此外, 火龙果中甜菜红素与膳食纤维对肌原纤维蛋白凝胶网络的影响机制尚不明确; 且甜菜红素的稳定性受 pH、温度等因素影响[11], 其在油炸高温条件下保留率与添加量之间的关系的研究较少。因此, 本研究以鱼条产品为基础, 系统考察不同添加量红心火龙果对产品感官品质、凝胶强度、质地特性、持水性、蒸煮损失、pH、色素热稳定性及营养组分的影响, 确定火龙果的最佳添加比例, 并探讨其作用机制, 为开发色泽优良、营养丰富和口感良好的新型功能性鱼糜制品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷冻白鲢鱼鱼糜、冷冻金线鱼鱼糜(锦州市林西路水产市场); 新鲜红心火龙果、鸡蛋(锦州市农贸市场); 食盐(沈阳奉兴制盐有限公司); 马铃薯淀粉、木薯淀粉(佳和旭日有限公司); 猪油(漳州市比格食品有限公司); 冷冻日式面包糠(日本狮子食品株式会社)。

TA-XT Plus 物性测试仪(英国 Stable Micro Systems 公司); GL-21M 落地式高速冷冻离心机(湘仪湖南离心机仪器有限公司); FJ200-SH 高速均质机(上海沪析科技有限公司); HH-4 数显恒温水浴锅(常州国华仪器制造有限公

司); FA-1004 电子天平(精度 0.01 mg, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); PB-10 台式酸度计(德国赛多利斯有限公司); DF25A 油炸锅(中山斯乐得有限公司); S35-LA551 斩拌机(九阳股份有限公司); CR-400 色彩色差计(日本 Konica Minolta 公司); CA-HM 食品热量成分检测仪(日本 JWP 公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 预糊化马铃薯淀粉的制备

马铃薯淀粉与去离子水以 1:4 的质量比例混合, 放入 80 ℃水浴锅中边加热边搅拌, 充分搅拌至完全糊化, 冷却至室温后备用。

1.2.2 红心火龙果果浆的制备

选取新鲜的红心火龙果, 去除火龙果外皮, 果肉切为约 2 cm^3 小块。称取适量果肉, 放入高速均质机中, 以 8000 r/min 打浆 30 s, 得到含籽的粗果浆, 现制现用以防色素氧化。

1.2.3 鱼条的制备

解冻冷冻鱼糜, 并将白鲢鱼鱼糜与金线鱼鱼糜以 1:3 的质量比例混合。把混合鱼糜放入斩拌锅中斩拌 3 min。再加入食盐进行常压斩拌 3 min。往鱼条凝胶中加入配料, 再加入质量分数为 5%、10%、15%、20%的红心火龙果果浆, 加入冰水调节含水量至 80%, 继续斩拌 6 min, 整个过程温度控制在 20 ℃。将制作好的鱼条凝胶进行冷冻储存 6 h。将冷冻后的鱼条凝胶裹上淀粉、面包糠、蛋清液, 再放入油炸锅里油炸 3 min, 取出后冷却至室温用于后续色泽、营养成分及凝胶特性测定。取斩拌完成但未进行加热的鱼糜溶胶作为对照样品, 用于比较热加工前后色泽与营养成分的变化。

1.2.4 鱼条凝胶感官品质的测定

将鱼条样品切成约 5 mm 厚的薄片, 由 8 名具有食品专业背景的学生进行评分。每位评价员按照表 1 的评分标准, 分别对样品的色泽、气味、组织状态和口感 4 个指标进行打分。感官评价总分为 100 分, 其中气味和组织状态被认为是鱼条凝胶品质的关键指标, 各占 30 分; 色泽和口感作为辅助评价指标, 各占 20 分。各项评分结果见表 1。

1.2.5 鱼条凝胶白度值测量方法

把鱼条样品切成约为 10 mm 的薄片。在避光条件下, 使用色差仪对样品的亮度值(L^*)、红绿值(a^*)以及黄蓝值(b^*)进行测定。每组做 3 个平行。产品的白度值[14]计算如公式(1)。

$$白度值=100-\sqrt{(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}} \quad (1)$$

1.2.6 鱼条凝胶卡路里、脂肪、碳水化合物的测量方法

利用食品热量成分检测仪测定食品中的营养成分。取 100 g 样品切碎混匀, 先放入基准样品槽进行校准, 再放入反射样品槽测试, 每组做 3 个平行。

1.2.7 鱼条凝胶 pH 的测量方法

参照邹怡茜等[15]的测定方法并进行修改。称取 5.0 g 鱼条凝胶样品, 剪碎后置于 50 mL 蒸馏水中, 经均质机在 3000 r/min 条件下分散处理 30 s。将所得溶液用滤纸过滤, 收集滤液后使用台式酸度计测定其 pH。每组样品平行测定 3 次。

1.2.8 鱼条凝胶强度的测量方法

将鱼条样品剥去外壳裹粉层, 并修整为(2 cm×2 cm×2 cm)的立方体。质构分析采用 P/5S 球形金属探头进行测试。参数设定为: 触发力 10 g, 测试速率 1 mm/s, 穿刺距离 15 mm。通过质构仪记录鱼条凝胶的破裂强度(即最大耐压, g)和破裂距离(即压缩距离, cm)[16]。每组样品平行测定 8 次。鱼条凝胶强度计算如公式(2)。

$$凝胶强度/(g\cdot cm)=破断强度/g\times破断距离/cm \quad (2)$$

1.2.9 鱼条凝胶质地剖面分析的测量方法

取鱼条凝胶切割成 3 cm 的立方体。质构仪测试条件如下: 选用 P/5S 探头, 测试速率 1 mm/s, 压缩程度设定为 50%, 触发力 5 g。每组处理设置 8 个平行样本。

表 1　感官评价标准

Table1　Criteria for sensory evaluation

评价指标	评价标准	得分/分
色泽 (20 分)	红色, 有火龙果籽, 色泽均匀一致	16~20
	粉色, 有极少火龙果籽, 色泽不均匀	11~15
	浅粉色, 无火龙果籽, 色泽浑浊不一致	0~10
气味 (30 分)	有鱼肉特有的香味, 有红心火龙果特有的风味	21~30
	有鱼肉特有的香味, 无火龙果味	11~20
	有鱼腥味, 无火龙果味	0~10
组织状态 (30 分)	样品外观平整光滑, 指压测试显示结构完整、无凹陷或破裂, 表现出优异的回弹性, 且横切面组织细腻致密	21~30
	指压时可产生适度凹陷, 但样品保持完整、无破裂现象, 切面结构较之前更为紧实, 整体软硬度适中	11~20
	样品缺乏弹性, 指压即破裂, 切面结构松散不密实, 触感过软或过硬	0~10
口感 (20 分)	口感鲜嫩, 有红心火龙果味, 咀嚼性良好	16~20
	口感一般, 有鱼肉的鲜味, 红心火龙果味较淡, 咀嚼性一般	11~15
	口感较差, 有明显鱼腥味, 无红心火龙果味, 咀嚼性差	0~10

1.2.10 鱼条凝胶持水性的测量方法

称取约 3 g 鱼条凝胶样品, 并计为 W_1 (g), 把样品放入蒸煮袋中, 放入 50 mL 离心管中, 4 ℃下 3000 r/min 离心 15 min, 取出后称重 W_2 (g), 每组做 3 个平行[17]。持水性计算如公式(3)。

$$持水性/\%=W_2/W_1\times100\% \quad (3)$$

1.2.11 鱼条凝胶蒸煮损失率的测量方法

称取约 2 g 鱼条凝胶样品, 记录初始重量为 P_1 (g)。将样品装入蒸煮袋中, 置于 80 ℃恒温水浴中加热 30 min。加热结束后取出样品, 用滤纸吸干表面水分, 待冷却至室温后再次称重, 记录为 P_2 (g)。蒸煮损失率计算如公式(4)[18]。

$$蒸煮损失率/\%=(P_1-P_2)/P_1\times100\% \quad (4)$$

1.2.12 鱼条凝胶中甜菜红素保留率的测定方法

甜菜红素保留率的测定参照梁敏瑜等[19]的研究方法, 作以下修改: 分别取油炸前后的鱼条样品各 5.0 g, 剪碎后加入 20 mL 磷酸盐缓冲液, 匀浆后于 4 ℃条件下避光振荡提取 30 min, 提取液于 4 ℃下 8000 r/min 离心 15 min, 取上清液于 538 nm 处测定吸光度。离心条件由原文的 10000 r/min、10 min 调整为 8000 r/min、15 min。分别记油炸处理前含量为 M_1 (g), 油炸处理后含量 M_2 (g)。以甜菜红素标准品绘制标准曲线, 计算样品中甜菜红素的含量。每组处理设置 8 个平行样本。甜菜红素保留率计算公式如(5)式所示。

$$甜菜红素保留率/\%=M_2/M_1\times100\% \quad (5)$$

1.3 数据处理

所有实验至少做 3 组平行, 本研究所有数据采用 SPSS 22.0 软件和 Origin Pro 2024 软件进行数据处理和实验数据的显著性分析, $P<0.05$。结果采用平均值±标准偏差形式表达, 差异显著表示方法采用标记字母法。利用 Origin Pro 2024 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶感官品质的影响

感官评价是衡量鱼糜制品可接受性的直接指标。分析表 2 可知, 鱼条凝胶的感官评分随红心火龙果添加量的增加呈先增加后降低的趋势。当添加量达到 10%时, 鱼条凝胶总得分达到最高分, 为 84.80 分, 且色泽、气味、组织状态和口感 4 个评分均在 10%添加量时取得最大值, 分别为 17.60、27.00、25.40 和 16.60 分。当添加量添加至 15%和 20%时, 各项评分均出现下降。这是因为添加适量的火龙果, 使火龙果中的可溶性膳食纤维分散于肌原纤维蛋白网络之中[20], 通过氢键和疏水相互作用与蛋白分子发生交联[21], 增强了凝胶网络的连续性, 其表现为组织状态评分逐渐提升。但当添加量超过 10%时, 过量的膳食纤维干扰了蛋白质分子的有序聚集, 进而导致蛋白质凝胶网络出现结构性缺陷[22], 使组织状态评分逐渐下降。从色泽的评分分析可知, 鱼条凝胶的色泽评分随着红心火龙果含量增加呈先升后降趋势, 并在添加量为 10%时达到最高, 此添加量下甜菜红素均匀分散于凝胶基质中, 使鱼条具有适宜的红色色泽; 而当添加量增大时, 评分则逐步下降。这是添加过量火龙果致使甜菜红素发生分子间聚集[23], 导致色泽过深并出现渗色及稳定性不足等问题, 进而降低其感官评分。且火龙果中丰富的多酚类物质在高浓度下会产生涩味和苦味, 影响鱼条凝胶的整体口感和感官品质。上述结果表明, 10%火龙果添加量在色泽、风味、组织状态和口感之间达到了最佳平衡。

2.2 不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶色差的影响

食品的色泽是影响消费者接受度的因素之一。一般用 L^*、a^*、b^*来表示色差结果。L^*表示样品的明亮程度, a^*表示红色与绿色之间的渐变, b^*表示黄色与蓝色之间的渐变[24]。分析表 3 可知, 随着火龙果添加量的提高, 鱼条 a^*呈上升趋势, 鱼条凝胶的红色色泽逐渐加深, 是因为甜菜红素作为天然色素, 具有良好的着色效果。而 L^*和 b^*则是先升高后降低, 且 L^*在添加量为 5%时达到最高, 为 70.50。添加 5%的火龙果时, 甜菜红素则通过氢键与鱼条凝胶中的肌原纤维蛋白发生结合, 形成较为稳定的蛋白质-色素复合物[25]。这一复合结构使色素分子均匀分散于凝胶网络中, 减少了色素聚集对光线的遮蔽, 使 L^*逐渐提升。而当火龙果添加量超过 15%时, 甜菜红素发生聚集, 这种聚集改变了甜菜红素对光线的吸收[23], 主要表现为鱼条凝胶颜色加深且亮度逐渐下降, 即 L^*的下降。而 b^*的先升高后降低, 可能是甜菜红素在弱酸性条件下相对稳定, 而甜菜黄素对 pH 变化较为敏感, 随 pH 降低其降解速率加快。当 pH 呈弱酸环境下时, 甜菜黄素发生降解[26], 进而使 b^*下降。综上, 火龙果添加量为 10%时, 具有良好的着色效果, 且在提供充足红度值的同时, 维持了较好的亮度水平。

表 2 红心火龙果的添加量对鱼条凝胶感官品质的影响

Table 2 Effects of the addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on sensory quality of fish stick gels

红心火龙果添加量/%	色泽/分	气味/分	组织状态/分	口感/分	总分/分
0	10.00±0.82^{c}	16.75±1.50^{c}	18.00±1.41^{b}	12.75±1.71^{b}	52.75±5.74^{d}
5	15.75±0.50^{a}	23.75±1.50^{b}	25.00±2.16^{a}	16.50±1.29^{a}	80.75±4.27^{a}
10	17.60±0.55^{a}	27.00±1.10^{a}	25.40±2.51^{a}	16.60±0.55^{a}	84.80±3.27^{a}
15	13.25±2.22^{b}	21.00±0.82^{b}	19.50±1.29^{b}	13.50±1.00^{b}	67.50±3.11^{b}
20	13.00±2.16^{bc}	19.00±0.82^{c}	17.25±2.22^{b}	12.75±0.96^{b}	60.75±5.80^{c}

注: 同列不同小写字母表示显著性差异($P<0.05$), 下同。

表 3　红心火龙果的添加量对鱼条凝胶色差的影响

Table 3　Effects of the addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on color difference of fish stick gels

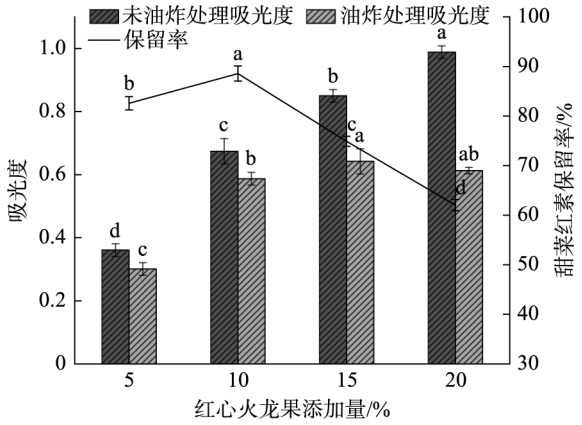
红心火龙果添加量/%	L^*	a^*	b^*	白度值
0	54.96±7.21^{c}	–0.54±0.53^{c}	13.35±0.76^{c}	57.89±3.81^{b}
5	70.50±1.54^{a}	4.92±1.54^{b}	16.85±2.60^{b}	65.74±0.90^{a}
10	68.30±0.81^{b}	5.55±1.74^{b}	22.16±0.21^{a}	59.42±0.83^{b}
15	61.78±1.85^{b}	14.24±2.48^{a}	16.17±2.71^{b}	56.00±1.67^{c}
20	55.92±1.83^{c}	14.46±1.64^{a}	15.67±3.07^{b}	49.23±1.11^{d}

2.3　不同添加量的红心火龙果对甜菜红素热稳定性的影响

为进一步探究油炸加工对红心火龙果着色成分的影响和其对鱼条凝胶感官色泽评分的影响。本研究测定了不同添加量红心火龙果对甜菜红素热稳定的影响。分析图 1 可知, 未油炸鱼条凝胶中甜菜红素的净吸光度随红心火龙果添加量增加总体呈上升趋势, 由添加量 5%组别的 0.36±0.02 上升至添加量 20%组别的 0.99±0.02; 经油炸处理后, 各添加量组别的净吸光度均有所下降, 表明油炸高温会导致甜菜红素发生降解。分析甜菜红素保留率可知, 甜菜红素保留率随添加量增加呈先升高后降低的趋势。其中 10%组保留率最高, 为 88.57%±1.52%; 而当添加量为 15%和 20%时, 保留率显著下降, 分别为 74.93%±1.03%和 62.05%±1.12% (P<0.05)。本研究采用油炸工艺对鱼条凝胶进行热处理, 其加工中的高温会加速甜菜红素的氧化和降解。而添加量为 10%时仍具有较高保留率, 这是因为油炸工艺使鱼条表面蛋白质迅速变性凝固, 形成致密的凝胶网络[27], 能有效锁住水分和色素, 减少了色素降解。此外, 致密的凝胶网络结构还能通过物理包埋方式将甜菜红素限制于网络内部, 进一步降低其与氧气和热源的接触提升了甜菜红素的保留率[28]。而当添加量超过 10%时, 过量的色素分子无法全部与蛋白质形成稳定复合物, 游离态色素分子因缺乏蛋白载体的物理保护和化学稳定作用, 在高温下更易发生氧化降解, 导致保留率显著降低。因此, 10%的红心火龙果添加量在油炸加工中甜菜红素保留率最高, 热稳定性最佳, 为本研究着色效果最优的添加比例。

2.4　不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶能量、脂肪、碳水化合物和水分的影响

分析表 4 可知, 鱼条凝胶的能量和碳水化合物随着红心火龙果的添加量增加呈先降低后升高的趋势, 但都低于对照组。这可能是因为火龙果中含有丰富的可溶性膳食纤维, 其良好的水合性能使其形成三维凝胶结构, 能在咀嚼特性上起到替代脂肪的作用[10]。梁燕群等[29]在研究红心火龙果替代脂肪对香肠品质的影响时也发现, 火龙果的添加能显著降低产品的脂肪含量, 同时保持较好的质构特性, 并显著降低产品的热量。而水分和蛋白质含量逐渐上升, 主要归因于火龙果中可溶性膳食纤维含有大量羟基, 这些亲水基团在凝胶化过程中通过氢键吸引水分子, 从而提高鱼条凝胶的水分含量[30]。水分含量的增加补偿了鱼条因脂肪含量减少而造成的口感损失, 进而提升了鱼条的整体口感。蛋白质含量的上升是因为火龙果中的可溶性膳食纤维通过氢键、离子键和疏水相互作用与肌原纤维蛋白发生交



注: 不同小写字母表示组间具有显著性差异(P<0.05), 下同。

图 1　不同红心火龙果添加量对甜菜红素热稳定性的影响

Fig.1　Effects of different addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on the thermal stability of betacyanin

联, 形成蛋白质-膳食纤维复合凝胶[21]。虽然脂肪含量降低, 但鱼条的能量值并未线性下降, 15%和 20%添加量时能量反而回升。这是因为火龙果果肉含有一定量的可溶性糖, 主要为葡萄糖和果糖。当火龙果添加量较高时这些可溶性糖分开始氧化产生能量[31]。从营养成分角度来看, 10%红心火龙果添加量下鱼条凝胶的能量达到最低, 脂肪含量降低明显, 同时水分和蛋白质含量有效提升, 使营养结构得到全面优化。

2.5　不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶 pH 的影响

pH 是影响甜菜红素稳定性的重要指标。分析图 2 可知, 红心火龙果的添加使鱼条凝胶 pH 呈现显著下降趋势 (P<0.05)。当添加量为 20%时, pH 达到 6.01, 与空白组相比降低了 0.42。这是因为火龙果中的甜菜红素添加到鱼条凝胶后, 其酚羟基可释放氢离子, 进而使鱼条凝胶 pH 显著下降[32]。此外, 甜菜红素的着色稳定性与鱼条凝胶的 pH 有关。在弱酸性环境下, 甜菜红素多以较为稳定的铵正离子形式存在[8], 其水解反应被抑制, 此时甜菜红素着色能力较为稳定。而当鱼条凝胶处于中性或弱碱性的条件下, 甜

表 4 红心火龙果添加量对鱼条凝胶卡路里、脂肪、碳水化合物和水分含量的影响

Table 4 Effects of the addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on calories, fat, carbohydrates and moisture content of fish stick gels

火龙果添加量/%	能量/kJ	蛋白质/g	脂肪/g	碳水化合物/g	水分/g
0	1109.75±27.75^{a}	12.28±0.95^{c}	16.38±0.81^{a}	14.50±1.07^{a}	61.20±0.56^{c}
5	938.25±21.71^{c}	13.20±1.16^{c}	14.95±0.30^{b}	9.15±0.66^{b}	63.30±0.31^{b}
10	909.50±2.22^{c}	14.88±0.75^{bc}	14.75±0.29^{b}	8.43±0.77^{b}	65.03±0.38^{a}
15	1005.67±7.31^{b}	17.70±2.07^{ab}	13.83±0.23^{c}	8.23±0.27^{b}	65.03±0.71^{a}
20	1054.33±29.58^{a}	19.17±1.62^{a}	13.57±0.09^{c}	10.97±1.19^{b}	66.13±0.52^{a}

菜红素易发生水合反应，从而逐渐转化为甜菜醛氨酸衍生物[33]，表现为鱼条凝胶红色色泽褪去。综上，红心火龙果的添加可使鱼条凝胶 pH 降低并呈弱酸性环境，有利于甜菜红素以稳定的铵正离子形式存在、抑制其水解降解；但 pH 过低可能对肌原纤维蛋白的凝胶化过程及产品口感产生不利影响。权衡甜菜红素着色稳定性与凝胶品质，10%添加量下鱼条凝胶的弱酸性环境最为适宜，可为甜菜红素提供最佳的着色稳定条件。

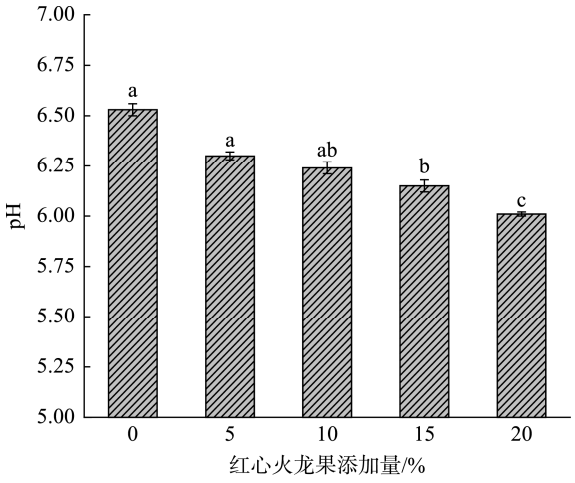


图 2 不同红心火龙果添加量对鱼条凝胶 pH 的影响

Fig.2 Effects of the different addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on pH of fish stick gels

2.6 不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶强度的影响

凝胶强度是指样品凝胶后表现出黏附强度等物理性质，是衡量鱼糜制品质量的重要指标[34]。由图 3 中可知，鱼条凝胶的破断强度随着红心火龙果的添加呈先降低后升高的趋势，破断距离和凝胶强度则随着红心火龙果的添加呈先升高再降低最后升高的趋势，其中，未添加组的凝胶强度为 494.80 *g*·cm。凝胶强度和破断距离在红心火龙果添加量为 5%时达到最大，分别为 637.06 *g*·cm、7.70 cm。添加量为 10%时，凝胶强度较未添加组提升了 71.13 *g*·cm，达到 565.93 *g*·cm。这是因为火龙果中的可溶性膳食纤维能与肌原纤维蛋白产生良好的相互作用。它们在氢键和疏水作用力相互作用下紧密结合，填充了蛋白质凝胶的网络骨架，增加了蛋白网络交联的连续性，最终形成更为致密的凝胶结构[31]。同时，膳食纤维的亲水性能提高凝胶的持水性，减少水分流失，间接增强凝胶强度。但当火龙果添加量逐渐增大时，膳食纤维含量过高，不溶性膳食纤维颗粒溶入凝胶网络，这些颗粒阻碍了蛋白分子的有序聚集，破坏了凝胶网络的均质性，形成了应力集中点[35]，表现为破断距离和凝胶强度下降。而火龙果添加量为 20%时，鱼条凝胶强度逐渐上升，这是火龙果中含有大量不可溶性膳食纤维，其颗粒具有一定的刚性，能提升凝胶强度。分析此时的凝胶强度和破断距离可知，其鱼条凝胶网络的延展性已受到不可逆的损伤。因此，5%添加量在单一凝胶强度指标上较强，但从整体凝胶性能考虑，10%是红心火龙果在鱼条中的最佳添加比例。

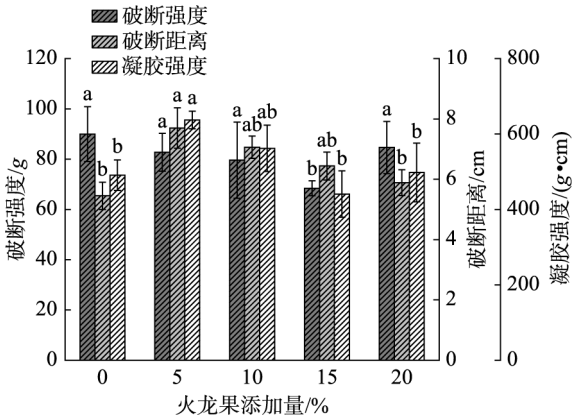


图 3 不同红心火龙果添加量对鱼条凝胶破断距离、破断强度、凝胶强度的影响

Fig.3 Effects of the different addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on breaking distance, breaking strength and gel strength of fish stick gels

2.7 不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶质地特性的影响

质地特性是衡量鱼糜制品口感品质的重要指标[36]。分析表 5 可知，当红心火龙果添加量为 5%时，鱼条凝胶的硬度、弹性、胶着度等指标均达到最高，这是火龙果中的可溶性膳食纤维在斩拌过程中分散在鱼条凝胶中，而膳食纤维通过氢键、疏水相互作用与肌原纤维蛋白发生交联，增强凝胶网络紧密性[35]，从而增强鱼条凝胶质地特性。而当

火龙果添加量超过 15%时, 各指标显著劣化, 其中咀嚼度由 220.00 *g* 降至 117.86 *g*。这是因为随着火龙果含量的添加, 原本均匀分散在鱼条凝胶中的甜菜红素发生富集作用。这些聚集体阻碍了鱼条凝胶网络的形成和延展, 进而形成部分结构缺陷的区域, 这些区域缺乏蛋白质的支撑, 破坏鱼条凝胶网络的连续性[37], 导致鱼条凝胶的弹性、回复性的指标下降。这与图 3 中鱼条凝胶的凝胶强度的变化趋势结果一致。而火龙果添加量为 20%时, 硬度较添加量为 15%组别增加了 61.70 *g*, 而其他指标均是降低趋势。这是火龙果中的不溶性膳食纤维具有一定的刚性, 添加到凝胶网络中能提升鱼条凝胶的硬度, 而无法提升其他指标。因此, 10%添加量能维持鱼条凝胶良好的质地特性。

表 5　红心火龙果的添加量对鱼条凝胶质地特性的影响

Table 5　Effects of the addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on texture characteristics of fish stick gels

红心火龙果添加量/%	硬度/*g*	弹性	黏聚性	胶着度/*g*	咀嚼度/*g*	回复性
0	355.50±109.46^{a}	0.93±0.07^{a}	0.71±0.06^{a}	235.06±87.03^{ab}	221.10±86.89^{a}	0.35±0.01^{a}
5	389.60±96.17^{a}	0.95±0.05^{a}	0.72±0.05^{a}	250.73±73.62^{a}	220.00±67.40^{a}	0.37±0.01^{a}
10	364.20±65.35^{a}	0.89±0.05^{ab}	0.69±0.03^{a}	193.42±44.45^{bc}	219.00±66.40^{a}	0.33±0.03^{ab}
15	204.10±65.58^{b}	0.85±0.09^{b}	0.68±0.04^{ab}	192.42±45.95^{bc}	117.86±40.62^{b}	0.28±0.04^{b}
20	265.80±55.13^{b}	0.81±0.05^{b}	0.60±0.06^{b}	191.42±55.65^{c}	112.74±41.89^{b}	0.23±0.05^{b}

2.8　不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶持水性和蒸煮损失的影响

鱼条凝胶的网络结构影响其持水能力和抗蒸煮损失的能力。分析图 4 可知, 空白组的持水性达到最高, 为 83.48%, 而随着火龙果添加量的增加, 鱼条凝胶的持水性下降。这是因为火龙果中的可溶性膳食纤维和甜菜红素结合的水分子主要分布在色素分子附近的水化层, 难以嵌入鱼条凝胶网络结构的内部空隙[38]。但在离心作用下, 部分结合水在离心力的作用下流失, 进而降低了鱼条凝胶的持水性。当火龙果添加量为 10%时, 蒸煮损失降至最低, 为 4.64%; 当添加量超过 10%, 蒸煮损失上升。这是因为火龙果中的可溶性膳食纤维与肌原纤维蛋白通过氢键作用形成致密的凝胶结构, 减少了水分和可溶性物质的损失[39]。而当火龙果添加量过高时, 过量的甜菜红素发生分子间聚集, 阻碍了蛋白质凝胶网络的形成。但在热蒸煮过程中, 这些区域成为水分和可溶性物质优先扩散的通道[10], 进而使鱼条凝胶蒸煮损失率上升。

分析表 4 中水分含量的结果和图 4 的结果, 发现当火龙果添加量为 10%时, 鱼条凝胶的总水分含量为 65.03±0.38, 显著高于空白组(P<0.05), 但其离心后持水性由空白组的 83.48%±1.02%降低为 71.36%±0.89%。这是火龙果中含有丰富的可溶性膳食纤维和甜菜红素, 其中的可溶性基团在凝胶化过程中通过氢键等弱相互作用力吸引更多的水分[38], 进而使鱼条凝胶总水分含量上升。而这些水分在离心力作用下更容易流失, 因此持水性测定值较低。综上所述, 10%添加量下鱼条凝胶的蒸煮损失达到最低, 表明火龙果中的可溶性膳食纤维与蛋白质能够形成较为致密的复合凝胶网络, 且在此添加量下其总水分含量提高, 感官品质等指标较高, 因此为红心火龙果在鱼条中的最佳添加比例。

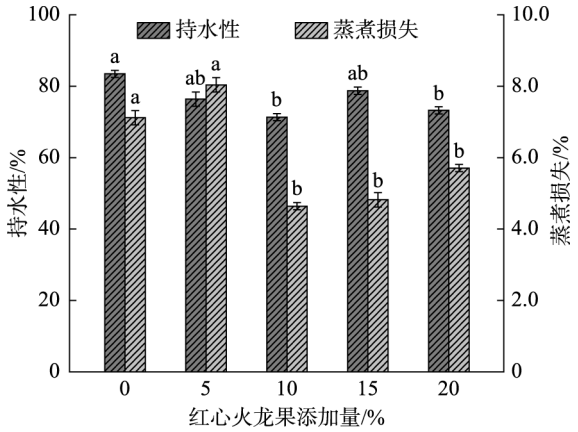


图 4　不同添加量的红心火龙果对鱼条凝胶持水性和蒸煮损失的影响

Fig.4　Effects of the different addition amount of *Hylocereus polyrhizus* on water holding capacity and cooking loss of fish stick gels

3　结　论

本研究以红心火龙果为天然营养型着色剂, 研究不同质量比例(0%、5%、10%、15%、20%)的红心火龙果对鱼条凝胶品质、色素热稳定性及营养组分的影响。综合感官品质、凝胶强度、蒸煮损失、色素热稳定性及营养成分等指标, 10%的红心火龙果添加量能使凝胶网络更加致密, 凝胶强度较对照组提升 71.13 *g*·cm, 蒸煮损失降至 4.64%, 持水性为 71.36%, 甜菜红素保留率达 88.57%, 产品脂肪含量下降。结果表明, 火龙果中的可溶性膳食纤维与甜菜红素在凝胶化过程中对肌原纤维蛋白网络具有协同增效作用, 适量添加可实现色泽、质地结构与营养成分的优化。本研

究为天然色素在鱼糜制品中的应用提供了实验依据，明确了红心火龙果作为天然多功能配料在鱼糜加工中的应用价值。后续研究将在分子水平上进一步探讨其作用机制。

参考文献

[1] Zhu Shichen, Wang Yingying, Ding Yicheng, et al. Improved texture properties and toughening mechanisms of surimi gels by double network strategies [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109900.

[2] 潘颖, 吕沈亮, 夏苏捷, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定鱼肉组织中 9 种黄色染色剂[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(1): 44–48.
Pan Ying, Lv Shenliang, Xia Sujie, et al. Determination of 9 yellow colorants in fish tissues by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(1): 44–48.

[3] 钱敏捷, 胡钦. 碳点探针在偶氮类色素检测中的应用[J]. 中国食品工业, 2022(20): 55–58.
Qian Minjie, Hu Qin. Application of carbon point probe in the detection of azo pigments [J]. China Food Industry, 2022(20): 55–58.

[4] Ni Qinxue, Lan Haici, Chen Shuang, et al. Development of a crocetin–glycyrrhizic acid supramolecular composite pigment for enhancing meat color and reducing contaminant formation during heat processin [J]. Food Chemistry: X, 2026, 38: 104188.

[5] 周东良, 包玉龙, 张钰, 等. 红花水提物对白鲢鱼糜凝胶品质的影响[J/OL]. 肉类研究, 2026-07-21. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract.
Zhou Dongliang, Bao Yulong, Zhang Yu, et al. Effect of *Carthamus tinctorius* water extract on gel quality of silver carp surimi [J/OL]. Meat Research, 2026-07-21. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract.

[6] 周越, 詹帅, 赵一鸣, 等. 不同粒径柑橘皮粉对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[J/OL]. 肉类研究, 2026-05-07. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract.
Zhou Yue, Zhan Shuai, Zhao Yiming, et al. Effect of *Citrus peel* powder with different particle sizes on gel properties of surimi [J/OL]. Meat Research, 2026-05-07. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract.

[7] 王秀莲, 熊婕, 王军. 天然食用色素在食品中应用及稳定性研究[J]. 工业微生物, 2024, 54(1): 93-99.
Wang Xiulian, Xiong Jie, Wang Jun. Application and stability of natural food colorants in food[J]. Industrial Microbiology, 2024, 54(1): 93-99.

[8] 牛德宝, 叶鸿儒, 冯小芹, 等. 火龙果主要生物活性成分及其功能特性研究进展[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(1): 9-20.
Niu Debao, Ye Hongru, Feng Xiaoqin, et al. Research progress on main bioactive components and functional properties of pitaya [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(1): 9 20.

[9] 刘俊梅, 谌嘉美, 黄讯, 等. 铁皮石斛对低盐藏猪肉糜品质与抗氧化性能的影响[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2023, 42(4): 358–364.
Liu Junmei, Chen Jiamei, Huang Xun, et al. Effects of *Dendrobium officinale* supplementation on quality and antioxidant properties of low-salt Tibetan pork mince [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2023, 42(4): 358–364.

[10] 王杨, 李贝贝, 陈森高, 等. 脂肪替代物在肉制品中的研究及应用进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(10): 57–65.
Wang Yang, Li Beibei, Chen Sengao, et al. Research and application of fat substitutes in meat products [J]. Meat Research, 2023, 37(10): 57–65.

[11] 刘万里. 响应面优化超声辅助提取甜菜红色素及稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2016, 27(10): 90–96.
Liu Wanli. Optimization of ultrasound-assisted extraction of betalain by response surface methodology and it's stability studies [J]. China Food Additives, 2016, 27(10): 90–96.

[12] 杭瑜瑜, 张阳, 陈樱丹. 白藜芦醇-罗非鱼肌球蛋白互作对肌球蛋白理化、结构及凝胶特性的影响[J/OL]. 食品工业科技, 2026-07-28. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2026030399.
Hang Yuyu, Zhang Yang, Chen Yingdan. Effects of resveratrol tilapia myosin interaction on the physicochemical, structural and gel properties of myosin [J/OL]. Food Industry Science and Technology, 2026-07-28. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2026030399.

[13] 王君能, 王博颖, 许李昱, 等. 凝固型火龙果皮汁酸奶的工艺研究[J]. 中国果菜, 2025, 45(1): 19–24.
Wang Junneng, Wang Boying, Xu Liyu, et al. Process study of curdled dragon fruit skin juice yogurt [J]. China Fruit & Vegetable, 2025, 45(1): 19–24.

[14] 何莲, 宋家钰, 黄桢妮, 等. 马铃薯藜麦凉粉的制备及抗老化研究[J]. 美食研究, 2023, 40(3): 57-66.
He Lian, Song Jiayu, Huang Zhenni, et al. Preparation and anti-staling study of potato-quinoa cold jelly [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2023, 40(3): 57 66.

[15] 邹怡茜, 陈海强, 潘卓官, 等. 超高压耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶特性和水分迁移的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 272–280.
Zou Yixi, Chen Haiqiang, Pan Zhuoguan, et al. Effect of ultra-high pressure coupled with heat treatment on the gel properties and water migration of bighead carp surimi gel [J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(12): 272–280.

[16] 檀茜倩, 周振彧, 杨兆欣, 等. 鸡乳杆菌胞外多糖的理化性质及其在虾糜中的应用[J]. 中国食品学报, 2025, 25(10): 202–212.
Tan Xiqian, Zhou Zhenyu, Yang Zhaoxin, et al. Characterization of *Lactobacillus gallinarum* exopolysaccharides and their effects on the physicochemical and gel properties of shrimp surimi [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(10): 202–212.

[17] Qi Hongli, Li Yaling, Jiang Yanrong, et al. Effect of diacylglycerol on the gel properties and microstructure of *Nemipterus virgatus* surimi: purity and concentration [J]. Food Research International, 2026, 228: 118332.

[18] Liao Jianwei, Shi Haohao, Wang Jiamei, et al. Investigation of the gel properties and gelation mechanism of a surimi blend composed of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) and purpleback flying squid (*Symplectoteuthis oualaniensis*) [J]. Foods, 2025, 14(4): 621.

[19] 梁敏瑜, 刘晓菲, 江书琳, 等. 红肉火龙果皮甜菜红素的提取、稳定性及体外抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2026, 39(5): 142–149.
Liang Minyu, Liu Xiaofei, Jiang Shulin, et al. Study on extraction, stability, and *in vitro* antioxidant activity of betacyanins from *Hylocereus* polyrhizus peel [J]. Cereals & Oils, 2026, 39(5): 142–149.

[20] Zheng Mingjing, Shi Jiawen, Hong Jinling, et al. Physicochemical and functional properties of pomelo Peel-derived dietary fibers: implications for gel network formation in surimi products [J]. Food Chemistry, 2026, 505: 147970.

[21] 雍金叶, 邹钰萱, 田洋, 等. 辣木膳食纤维对鲢鱼糜凝胶性能的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 74–81.
Yong Jinye, Zou Yuxuan, Tian Yang, et al. Effect of *Moringa oleifera*

dietary fiber on gel properties of silver carp surimi [J]. Food Science, 2024, 45(20): 74–81.

[22] 廉文涛, 黄雨洋, 李玉玲, 等. 膳食纤维对蛋白凝胶影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 340–348.
Lian Wentao, Huang Yuyang, Li Yuling, et al. Advances in research on the effects of dietary fiber on protein gel properties [J]. Food Science, 2023, 44(9): 340–348.

[23] 竺迪娜, 朱朝阳, 廖蓓, 等. 红心火龙果黑米酒发酵工艺优化[J]. 食品科技, 2026, 51(3): 90–100.
Zhu Dina, Zhu Chaoyang, Liao Bei, et al. Optimization of fermentation process for red pitaya and black rice wine [J]. Food Science and Technology, 2026, 51(3): 90–100.

[24] 仪淑敏, 吕柯明, 张诗雯, 等. 芹菜叶改善鱼糕的凝胶特性[J]. 现代食品科技, 2020, 36(2): 152-158+52.
Yi Shumin, Lyu Keming, Zhang Shiwen, et al. Celery leaves improve the gel properties of fish cake [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(2): 152–158, 52.

[25] 栾馨怡, 张云峰, 徐琴, 等. 植物源抗氧化剂在肉及肉制品中的应用研究进展[J/OL]. 肉类研究, 2026-07-21. https: //link. cnki. net/urlid/11. 2682. TS. 20260721. 1156. 003.
Luan Xinyi, Zhang Yunfeng, Xu Qin, et al. Research progress on application of plant-derived antioxidants in meat and meat products [J/OL]. Meat Research, 2026-07-21. https: //kns. cnki. net/kcms2/article/abstract.

[26] 王萍, 闫明哲. 红甜菜色素稳定性影响因素研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(7): 19–29.
Wang Ping, Yan Mingzhe. Research advances on influencing factors of betalains stability in red beet [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(7): 19–29.

[27] 邹汪桦, 侯小艺, 刘妙, 等. 热加工方式对鱼肉风味品质的影响及其差异化形成机制研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 222–232.
Zou Wanghua, Hou Xiaoyi, Liu Miao, et al. Effects of thermal processing methods on flavor quality of fish meat and differential formation mechanisms: a review [J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 222–232.

[28] 叶滔, 白雪莹, 康颖, 等. 生物酶联用对乳酸菌发酵大豆植物奶酪品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 2026-01-07. https: //doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045151.
Ye Tao, Bai Xueying, Kang Ying, et al. Effect of biological enzyme combination on the quality of soybean cheese fermented by lactic acid bacteria [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2026-01-07. https: //doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045151.

[29] 梁燕群, 李玲. 红心火龙果替代部分脂肪对香肠蛋白质理化特性和脂质氧化的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 71–77.
Liang Yanqun, Li Ling. Effects of red pitaya replacing part of fat on physicochemical properties of protein and lipid oxidation of sausage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 71–77.

[30] Nie Jinggui, Xue Chao, Xiong Shanbai, et al. Comparative analysis of soluble and insoluble dietary fiber on improving the gelation performance and fishy odors of silver carp surimi [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 129938.

[31] 高曼, 甘祖于, 王维, 等. 红肉火龙果营养价值及产品研发现状[J]. 贵州农机化, 2022(1): 16–20.
Gao Man, Gan Zuyu, Wang Wei, et al. Nutritional value and product research and development status of red meat pitaya [J]. Guizhou Agricultural Mechaniation, 2022(1): 16–20.

[32] 白蓓蓓, 刘晏辰, 肖楚妍, 等. 火龙果甜菜色素积累与其生物合成途径关键酶活性的相关性分析[J/OL]. 分子植物育种, 2026-03-12. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20250928.1446.003.
Bai Beibei, Liu Yanchen, Xiao Chuyan, et al. Correlation analysis between beet pigment accumulation and key enzyme activities of biosynthesis pathway in pitaya [J/OL]. Molecular Plant Breeding, 2026-03-12. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20250928.1446.003.

[33] 罗益明,李莉,聂梦平,等.甜菜素性质及其应用研究进展[J].食品研究与开发,2024,45(14):209-216.
Luo Yiming, Li Li, Nie Mengping, et al. Research progress on properties and application of betalains [J]. Food Research and Development, 2024, 45(14): 209　216.

[34] 史欣昱, 王莹莹, 刘书来, 等. 基于双网络策略改善冷冻鱼糜凝胶冻融品质[J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 88-95.
Shi Xinyu, Wang Yingying, Liu Shulai, et al. Improvement of freeze-thaw quality of frozen surimi gel based on dual-network strategy [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 88　95.

[35] 仪淑敏, 吕柯明, 张诗雯, 等. 芹菜茎对金线鱼鱼糕凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(20): 1–5.
Yi Shumin, Lv Keming, Zhang Shiwen, et al. Effect of celery petiole on the gel properties of *Nemipterus virgatus* fish cake [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(20): 1–5.

[36] Liu Xiaoyan, Chen Ziqian, Ye Yuehua, et al. Effects of exogenous substances on the characteristics of low-salt tilapia surimi gel [J]. Food Chemistry, 2025, 484: 144453.

[37] 周锦均, 李澄, 罗燚, 等. 微波复热对秘鲁鱿鱼宏观破裂与肌原纤维蛋白结构变化机制[J/OL]. 食品与发酵工业, 2026-05-11. https: //doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.046364.
Zhou Jinjun, Li Cheng, Luo Yi, et al. Mechanism of macro-rupture and myofibrillar protein structure change of Peruvian squid after microwave reheating [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2026-05-11. https: //doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.046364.

[38] Suzuki J Y, Herkenhoff M E, Brödel O, et al. Exploring the potential of red pitaya pulp (*Hylocererus* sp.) as a plant-based matrix for probiotic delivery and effects on betacyanin content and flavoromics [J]. Food Research International, 2024, 192: 114820.

[39] 王钰婷, 赵洪雷, 徐永霞, 等. 柑橘纤维添加量对金线鱼鱼糜凝胶性能的影响[J/OL]. 食品工业科技, 2026-02-06. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025090207.
Wang Yuting, Zhao Honglei, Xu Yongxia, et al. Effect of *Citrus fiber* addition on gel properties of anchovy surimi [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2026-02-06. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025090207.

(责任编辑: 曹岱琳　安香玉)