

大豆分离蛋白对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响

蒋桂丽¹, 陈俊韬², 陈佳柔¹, 黄晓冰², 李翠玲^{1,3}, 周春霞², 徐梅珍^{1*}, 罗东辉^{1,4}

(1. 广东海洋大学食品科学与工程学院, 广东阳江 529500)(2. 广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524088)

(3. 深圳市茶鱼范厚食品科技有限公司, 广东深圳 518000)

(4. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心(韩江实验室), 广东潮州 521000)

摘要: 为探究大豆分离蛋白(Soy Protein Isolate, SPI)添加量对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响, 该研究以冷冻金线鱼鱼糜为原料, 在添加 12% 木薯淀粉的基础上, 分别添加不同量的 SPI (0%~5%, *m/m*) 制成鱼糜凝胶, 并分析其白度、质构特性、持水性、蒸煮损失、蛋白质二级结构和微观结构等指标。结果表明: 当 SPI 添加量为 3% 时, 鱼糜品质改善效果最佳, 鱼糜凝胶的强度达到最大值 24.98 N·mm, 较对照组增加了 33%; 硬度和胶着性达到最大值, 较对照组分别提升了 27.95% 和 30.21%; 持水性达到了最高值 90.77%, 较对照组增加了 4.91%, 蒸煮损失最低; 凝胶的结构表现出最好的均匀性与致密性。SPI 的添加还影响蛋白质的变性过程, 通过提高鱼糜凝胶中疏水相互作用和氢键的含量, 导致 α -螺旋向 β -折叠转变, 从而提高鱼糜凝胶的性能。因此, 在金线鱼鱼糜凝胶制作过程适量添加 SPI 能对金线鱼鱼糜凝胶品质起到改善的作用。该研究为海水鱼金线鱼在鱼糜制品中的加工应用提供理论支持。

关键词: 金线鱼鱼糜; 大豆分离蛋白; 凝胶特性; 分子间作用力

文章编号: 1673-9078(2026)7-204-211

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0436

Effect of Soy Protein Isolate on the Quality of *Nemipterus virgatus* Surimi Gel

JIANG Guili¹, CHEN Juntao², CHEN Jiarou¹, HUANG Xiaobing², LI Cuiling^{1,3}, ZHOU Chunxia²,
XU Meizhen^{1*}, LUO Donghui^{1,4}

(1.College of Food Science and Engineering, Guangdong Ocean University, Yangjiang 529500, China)

(2.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

(3.Shenzhen Chayu Fanhou Food Technology Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)(4.Branch of Chemistry and Chemical Engineering Guangdong Laboratory (Hanjiang Laboratory), Chaozhou 521000, China)

Abstract: Frozen *Nemipterus virgatus* surimi was utilized as the raw material, and surimi gels were prepared by adding different amounts of soy protein isolate (SPI) (0%~5%, *m/m*) on top of 12% cassava starch to investigate the effect of SPI on the quality of *N. virgatus* surimi gel. The whiteness, textural properties, water-holding capacity, cooking loss, secondary structure, and microscopic structure of the gel were analyzed. The results indicated that surimi quality improved the most when 3% SPI was added. The strength of the surimi gel peaked at 24.98 N·mm, an increase of 33% compared with that of the control group. Hardness and chewiness also reached their maximum values, increasing by 27.95% and 30.21%, respectively, compared with those of the

引文格式:

蒋桂丽,陈俊韬,陈佳柔,等.大豆分离蛋白对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J].现代食品科技,2026,42(7):204-211.

JIANG Guili, CHEN Juntao, CHEN Jiarou, et al. Effect of soy protein isolate on the quality of *Nemipterus virgatus* surimi gel [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 204-211.

收稿日期: 2025-03-26 ; 修回日期: 2025-08-06 ; 接受日期: 2025-08-08

基金项目: 广东海洋大学科研启动费项目 (YJR22007); 湛江市海洋经济创新发展示范市建设项目 (XM-202008-01B1); 南方海洋科学与工程重点实验室(湛江)资助项目 (ZJW-2019-07)

作者简介: 蒋桂丽 (1993-), 女, 硕士, 助理实验师, 研究方向: 调味品加工及微生物发酵与应用, E-mail: jgl@gdou.edu.cn

通讯作者: 徐梅珍 (1991-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 调味品加工及微生物发酵与应用, E-mail: xumeizhen@gdou.edu.cn

control group. Water-holding capacity peaked at 90.77%, an increase of 4.91% compared with that of the control group, and cooking loss was the lowest. The gel structure exhibited the best uniformity and compactness. SPI addition may also have affected protein denaturation, increasing hydrophobic interactions and hydrogen bond content in the surimi gel, thereby transforming α -helices into β -pleated sheets and improving the performance of the surimi gel. Therefore, adding a moderate amount of SPI during the production process of *N. virgatus* surimi gel could improve its quality. This study provides a theoretical basis for the processing and utilization of *N. virgatus* surimi in surimi products.

Key words: *Nemipterus virgatus* surimi; soy protein isolate; gel properties; intermolecular forces

金线鱼 (*Nemipterus virgatus*) 作为一种低值海洋鱼类, 在中国因其分布广泛、肉质鲜美、营养价值高、繁殖和生长速度快及产量大等优势而备受关注^[1]。据数据显示, 2022 年中国金线鱼的捕捞总量达到 31.39 万 t, 成为海洋经济中具有重要地位的鱼类之一^[2]。仿蟹棒、鱼丸和鱼豆腐等鱼肉凝胶制品, 主要由从海鱼或淡水鱼中提取的浓缩肌原纤维蛋白 (鱼糜) 制成, 是均衡饮食的重要组成部分^[3]。这些产品不仅提供优质蛋白质和必需氨基酸, 并且由于它们是无骨的, 与直接供人类食用的活的、新鲜的或冷冻的鱼相比, 更便于食用^[4]。目前, 金线鱼已成为鱼糜生产中使用频率第二高的鱼类^[5], 但其加工制成的鱼糜在凝胶强度、口感以及质地方面仍存在不足。凝胶性质是消费者接受度的重要指标, 可以影响鱼糜产品的质量和感官属性^[6]。因此, 如何利用低值海水鱼制作鱼糜并提升其凝胶品质, 已成为当前研究的热点问题。

鱼糜制品的质量在很大程度上取决于其凝胶性能的强度^[7]。研究表明, 适量添加某些外部成分能有效改善鱼糜的凝胶特性和延长保鲜期限^[8,9]。大豆分离蛋白 (SPI) 作为一种非肌肉蛋白, 含有超过 90% 的优质蛋白, 富含人体所需的氨基酸, 并具有持水性、乳化性和凝胶性等多种功能。研究显示, 适量添加 SPI 可以填充鱼糜蛋白的网络间隙, 从而提升其凝胶特性和流变性能^[3]。SPI 中含有的成分能够抑制鱼肉内源性蛋白酶的活性, 这对改善鱼糜的质构同样具有积极作用^[10]。SPI 已被证实可分别改善带鱼^[11]、印度鲷鱼 (*Rastrelliger kanagurta*)^[12] 以及栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 闭壳肌^[13] 鱼糜凝胶的凝胶特性。此外, 沈晓蕾等^[14]发现, SPI 与木薯淀粉和转谷氨酰胺酶复配后, 可有效增强鲢鱼鱼糜的凝胶特性。Zhang 等^[15]研究也发现, 在低盐添加条件下, 适宜浓度的 SPI (6 g/100 g) 可作为鲢鱼鱼糜的凝胶增强剂。陈艾霖等^[16]指出, 在适宜的酸碱度环境下, SPI 能够显著改善罗非鱼肌原纤维蛋白的凝胶特性。刘珍等^[17]的研究进一步表明, 在不加热情况下, 适量添加 SPI 可以有效提升金线鱼肌球蛋白的凝胶特性。然而, 目前针对 SPI 改善金线

鱼鱼糜凝胶特性的可行性及其作用机制的研究仍较为有限。基于此, 该研究以冷冻金线鱼鱼糜为原料, 在前期研究发现木薯淀粉可有效提高金线鱼鱼糜凝胶强度的基础上^[14,18], 重点探讨不同 SPI 添加量对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响, 旨在阐明 SPI 提升鱼糜凝胶品质的内在机理, 从而为高品质鱼糜制品的规模化加工与产业化升级提供科学依据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷冻金线鱼鱼糜 (2022 年 9 月批次, AAA 级, 蛋白质质量分数为 18.5%, 水分质量分数为 74.72%), 阳江市永昊水产有限公司; 大豆分离蛋白, 临沂三松生物制品有限公司; 光谱级溴化钾, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 快速 lowry 法蛋白含量测定试剂盒, 上海荔达生物科技有限公司; 木薯淀粉, 河北百味生物科技有限公司; 其他化学试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

TA.XT plusC 质构仪, 英国 Stab.Micro System 公司; EVOS FL Auto2 全自动荧光倒置显微镜, 美国 Life Technoiogies 公司; TENSOR27 傅里叶变换红外光谱仪, 德国布鲁克公司; UV757CRT 紫外可见分光光度计, 上海精科仪器有限公司; UMC5 斩拌机, 德国 Stephan 公司; 3nh 色差仪, 深圳市 3nh 科技公司; T18 高速分散器, 德国 IKA; KD-3000 半自动冷冻切片机, 浙江省金华市科迪仪器设备有限公司; NMI20-060H-I 低频核磁共振成像分析仪, 苏州纽迈分析仪器公司。

1.3 实验方法

1.3.1 鱼糜凝胶的制备

冷冻金线鱼鱼糜在 4 °C 下解冻, 8~10 h 后称取 300 g 半解冻状态鱼糜斩拌 1 min, 接着加入质量分数为 2.5% 的氯化钠以及 12% 的木薯淀粉, 并将鱼糜的水分含量 (m/m) 调节至 80%, 分别加入质量分数为

1%、2%、3%、4%、5% 的大豆分离蛋白,继续斩拌 3 min。参照黄晓冰等^[18]的方法,斩拌完毕的鱼糜进行灌肠密封,再二段式加热,加热条件 40 ℃ 30 min, 90 ℃ 20 min,然后放入冰水浴中冷却 30 min,后 4 ℃ 冰箱中冷藏备用。

1.3.2 白度的测定

根据文献^[19],将凝胶样品切成 5 mm 薄片,用色差仪测定其亮度 (L^*)、红度值 (a^*) 和黄度值 (b^*)。按式 (1) 计算白度。

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

式中:

W ——白度;

L^* ——亮度;

a^* ——红度值;

b^* ——黄度值。

1.3.3 凝胶强度和质构的测定

根据文献^[18],将样品制成高 20 mm、端面平整的圆柱,随后在 TA.XT plus C 质构仪上完成凝胶强度与全质构 (TPA) 测试。测试分别采用 P/0.5 和 P/0.5 S 球形探头,统一参数为压缩百分比 50%,触发力 0.049 N,压缩间距 10 mm,测前速度、测中速度和测后速度分别为 5、1 和 1 mm·s⁻¹。

1.3.4 持水性的测定

根据文献^[20],将鱼糜凝胶切成厚度为 3 mm 的薄片,称其质量 M_1 ,用滤纸包住,4 ℃、10 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,称重 M_2 。按式 (2) 计算持水性。

$$H=\frac{M_2}{M_1}\times 100\% \quad (2)$$

式中:

H ——持水率, %;

M_1 ——鱼糜凝胶离心前的质量, g;

M_2 ——鱼糜凝胶离心后的质量, g。

1.3.5 蒸煮损失率的测定

根据文献^[21],将鱼糜凝胶切成厚度为 3 mm 的薄片,记录初始质量 (记为 A_1),接着将样品装入蒸煮袋,抽真空封口,再置于 90 ℃ 恒温水浴中热煮 20 min。蒸煮结束后将样品捞出擦干其表面水分并再次对其进行称量 (A_2)。按式 (3) 计算蒸煮损失率。

$$C=\frac{A_1-A_2}{A_1}\times 100\% \quad (3)$$

式中:

C ——蒸煮损失率, %;

A_1 ——鱼糜凝胶蒸煮前的质量, g;

A_2 ——鱼糜凝胶蒸煮后的质量, g。

1.3.6 显微镜观察

根据文献^[22],将样品切成厚 1.5 cm 圆柱,先以 300 g·L⁻¹ 蔗糖脱水,再按 1:1 (V/V) 与 OCT 包埋剂混合固定 4 h;随后纯 OCT 二次固定 4 h, -40 ℃ 冷冻 12 h。根据文献^[18],样品于 -20 ℃ 的切片机内被切成 30 μm 的薄片,接着伊红染色 2 min (蛋白呈红色),最后于荧光倒置显微镜 (200×) 观察凝胶微观结构。

1.3.7 化学作用力测定

根据文献^[23],称取 3 g 搅碎的鱼糜样品于 50 mL 离心管中,分别加入 10 mL 的以下溶液: (1) 0.05 mol·L⁻¹ NaCl 溶液 (S1); (2) 0.6 mol·L⁻¹ NaCl 溶液 (S2); (3) 1.5 mol·L⁻¹ 尿素 + 0.6 mol·L⁻¹ NaCl 溶液 (S3); (4) 8 mol·L⁻¹ 尿素 + 0.6 mol·L⁻¹ NaCl 溶液 (S4); (5) 0.6 mol·L⁻¹ NaCl + 8 mol·L⁻¹ 尿素 + 0.5 mol·L⁻¹ B-巯基乙醇 (S5)。在高速分散器中匀浆 5 min,匀浆完毕放入 4 ℃ 冰箱中静置 1 h。样品鱼糜于 4 ℃、8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取上清备用。采用 Lowry 法测定上清蛋白浓度,结果以 mg·mL⁻¹ 可溶性蛋白表示。将相邻提取液所得蛋白质量浓度依次相减: Δ (S2-S1)、 Δ (S3-S2)、 Δ (S4-S3) 与 Δ (S5-S4),其差值分别表征离子键、氢键、疏水相互作用及二硫键对蛋白网络稳定性的相对贡献。

1.3.8 凝胶二级结构测定

根据文献^[18],将冷冻干燥后的样品充分研磨,按质量比 1:100 与溴化钾混匀后压制成透明薄片。利用傅里叶变换红外光谱仪在 4 000~500 cm⁻¹ 范围内以 32 次扫描采集图谱,随后采用 Peak-Fit4.12 软件解卷积并拟合峰位,进而计算蛋白质的二级结构相对含量。

1.3.9 数据统计分析

实验数据经 Excel 软件整理后,使用 OriginPro 2023 进行绘图。统计分析采用 SPSS 25.0 软件,通过方差分析 (ANOVA) 对数据进行处理,并结合 Duncan 多重检验分析各平均值之间的显著性差异 ($P<0.05$)。为确保实验结果的可靠性,每个样品的测定重复次数不少于 5 次。

2 结果与讨论

2.1 金线鱼鱼糜凝胶的理化性质随大豆分离蛋白添加量改变的变化规律

2.1.1 白度值

鱼糜凝胶的白度不仅决定其外观色泽,更是评价其整体品质的关键指标之一,白度越高,越能被消费者所接受。研究表明,凝胶的白度受添加剂种类与其

用量的显著影响^[24]。表 1 展示了 SPI 添加量对鱼糜凝胶白度的影响，对照组（仅含 12% 的木薯淀粉）凝胶的白度最高，达到 62.36。当 SPI 添加量在 1% 到 5% 之间时，鱼糜凝胶的白度值介于 61.40 与 58.98 之间，并且随着 SPI 添加量增加，鱼糜凝胶的白度显著降低（ $P<0.05$ ）。这主要归因于 SPI 本身具有淡黄色特性，加入鱼糜凝胶后会显著影响样品的颜色。沈晓蕾等^[14]在分析大豆分离蛋白对鲢鱼鱼糜凝胶品质的影响时，也观察到了随着 SPI 添加量的增加鲢鱼鱼糜白度值逐渐下降的结果。因此，建议在生产鱼糜食品时，SPI 的使用量应控制在合理范围内，以确保产品的外观和品质。

表 1 金线鱼鱼糜凝胶白度在不同大豆分离蛋白添加量下的影响
Table 1 Effects of soy protein isolate addition on the whiteness of *Nemipterus virgatus surimi gel*

<i>Nemipterus virgatus surimi gel</i>				
SPI/%	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>W</i>
对照	62.71 ± 0.18 ^b	-2.73 ± 0.08 ^a	4.35 ± 0.12 ^b	62.36 ± 0.17 ^b
1	61.82 ± 0.21 ^c	-2.74 ± 0.04 ^a	4.73 ± 0.17 ^{ab}	61.40 ± 0.21 ^c
2	60.83 ± 0.07 ^d	-2.87 ± 0.01 ^a	4.69 ± 0.15 ^{ab}	60.44 ± 0.08 ^d
3	59.63 ± 0.37 ^e	-2.73 ± 0.05 ^a	4.63 ± 0.17 ^{ab}	59.28 ± 0.34 ^e
4	59.57 ± 0.09 ^e	-2.84 ± 0.03 ^a	4.87 ± 0.04 ^a	59.17 ± 0.09 ^e
5	59.38 ± 0.24 ^e	-2.73 ± 0.03 ^a	5.04 ± 0.07 ^a	58.98 ± 0.24 ^e

注：小写字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下表同。

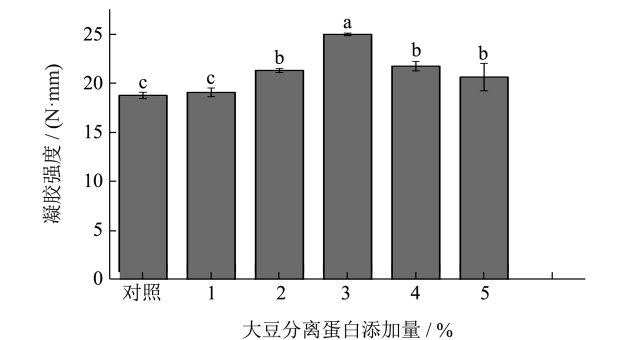


图 1 金线鱼鱼糜凝胶强度在不同大豆分离蛋白添加量下的影响
Fig.1 Effects of soy protein isolate addition on the gel strength of *Nemipterus virgatus surimi*

注：字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下图同。

2.1.2 凝胶强度

鱼糜凝胶强度能反映出鱼糜的热凝胶化程度以及组织结构^[25]。如图 1 所示，在添加了 12% 木薯淀粉的基础上，随着 SPI 添加量的增加（1%~5%），鱼糜凝胶强度呈先升高后降低的趋势。在 SPI 的添加量处于 1% 至 3% 之间时，鱼糜凝胶的强度逐渐增加，并在添加量为 3% 时达到最大值 24.98 N·mm，比对照组（18.77 N·mm）增加了 33%（ $P<0.05$ ）。然而，当 SPI 的添加量增加到 4% 至 5% 时，凝胶强度开始下降。在 5% 的添加量下，凝胶强度降至最低值 20.64 N·mm，

但仍然显著高于对照组（ $P<0.05$ ）。这种现象可能与 SPI 在不同浓度条件下的作用机制有关。在较低的低度条件下，SPI 中某些极性基团以离子化形态存在，并在水的影响下与蛋白质结合，延长分子链，从而在凝胶化过程中形成更复杂的网状结构^[26]；然而，当 SPI 浓度增加时，其对鱼糜蛋白的作用表现为稀释效应，过多的 SPI 嵌入凝胶网络中，阻碍了鱼糜蛋白之间的交联，从而削弱了凝胶特性^[17]。类似地，邓立青^[27]研究发现添加 3% 的 SPI 时铜盘鱼鱼糜的凝胶强度达到最佳状态，沈晓蕾等^[14]研究发现，添加适量的 SPI 可以提高鲢鱼的鱼糜凝胶强度。

2.1.3 质构特性

质构特性是评价鱼糜凝胶品质的关键指标，通过探头模拟口腔运动可测得硬度、弹性、粘聚性、胶着性、咀嚼性和回复性等参数，综合反映样品的感官特性。表 2 数据显示，添加 SPI 可以在一定程度上改善鱼糜凝胶的质构特征。随 SPI 添加量增加，鱼糜凝胶的硬度和胶着性呈现先上升后下降的趋势，其中在 SPI 含量为 3% 时，凝胶特性达到最佳：硬度达 33.56 N，较对照组提升 27.95%；胶着性达 22.54，较对照组提升 30.21%。相比之下，弹性、粘聚性和回复性未因 SPI 添加而产生显著差异（ $P>0.05$ ）。咀嚼强度则随 SPI 添加量增加呈先增加后减少再略微增加的趋势，其最大值出现在 SPI 添加量为 3% 时。SPI 添加量未超过 3% 时，质构特性的提升主要归因于其对鱼糜蛋白凝胶网络结构的填充作用^[3]，以及其含有的内源蛋白酶抑制因子减弱了凝胶劣化、改善了质构^[10,17]。然而，当 SPI 添加量超过 3% 后，质构特性开始下降，可能由于过量 SPI 添加干扰了鱼糜凝胶蛋白的交联形成^[17]，导致硬度、粘附性和咀嚼性降低。尽管如此，当 SPI 含量达 5% 时，鱼糜凝胶的咀嚼特性反而有了轻微的改善，这或许与过量的 SPI 自身蛋白结构特性有关。综合来看，当 SPI 添加量为 3% 时，金线鱼鱼糜凝胶表现出最佳的质构特性，这一结果与凝胶强度的测试结果相吻合。Zhao 等^[11]在带鱼鱼糜中添加任何一种植物蛋白均能促进鱼糜的凝胶化，其中 SPI 的添加使鱼糜凝胶更加光滑、致密、白色（白度为 61.49），具有优良的质地属性（硬度为 1 994 g）、保水性（85.67%）和结构完整性。Ye 等^[28]通过用大豆蛋白以 10~50 g/100 g 的比例替代鲢鱼鱼糜对鱼糜凝胶性能的影响，得出的结论是，随着植物蛋白替代比例的增加，鱼糜凝胶的硬度和黏性逐渐降低。这些发现与上述观察到的植物蛋白在添加浓度 < 10 g/100 g 时的凝胶增强效应不同。这种差异可能表明植物蛋白的凝胶增强性能是浓度依赖性的。

表 2 金线鱼鱼糜凝胶质构在不同大豆分离蛋白添加量下的影响

Table 2 Effects of soy protein isolate addition on the gel texture of <i>Nemipterus virgatus</i> surimi						
SPI/%	硬度/N	弹性	粘聚性	胶着性	咀嚼性	回复性
对照	26.23 ± 0.05 ^d	0.99 ± 0.21 ^a	0.66 ± 0.00 ^a	17.31 ± 0.03 ^d	13.56 ± 0.04 ^d	0.35 ± 0.00 ^a
1	27.80 ± 0.13 ^c	1.00 ± 0.21 ^a	0.66 ± 0.01 ^a	18.45 ± 0.06 ^c	14.40 ± 0.15 ^{cd}	0.36 ± 0.00 ^a
2	28.85 ± 0.34 ^b	0.93 ± 0.14 ^a	0.67 ± 0.00 ^a	19.72 ± 0.13 ^b	15.69 ± 0.31 ^b	0.36 ± 0.00 ^a
3	33.56 ± 0.63 ^a	1.23 ± 0.20 ^a	0.67 ± 0.00 ^a	22.54 ± 0.42 ^a	17.40 ± 0.73 ^a	0.36 ± 0.00 ^a
4	29.45 ± 0.20 ^b	0.96 ± 0.17 ^a	0.67 ± 0.01 ^a	20.15 ± 0.20 ^b	15.02 ± 0.64 ^{bc}	0.36 ± 0.01 ^a
5	29.43 ± 0.36 ^b	0.83 ± 0.01 ^a	0.66 ± 0.01 ^a	19.55 ± 0.49 ^b	16.18 ± 0.17 ^b	0.36 ± 0.01 ^a

2.1.4 持水性和蒸煮损失率

鱼糜凝胶的持水能力在添加大豆分离蛋白后显著提升 ($P<0.05$), 并呈现出先增加后减少的趋势 (图 2)。在添加了 12% 木薯淀粉的基础上, 凝胶的持水性随着 SPI 添加量从 1% 增加到 3% 而逐渐增强, 当添加量为 3% 时, 持水性达到最高值 90.77%, 比仅添加木薯淀粉的样品 (85.86%) 提高了 4.91%。与此同时, 凝胶的蒸煮损失逐渐减少, 3% 添加量时蒸煮损失降至最低水平, 与对照组相比具有显著性差异 ($P<0.05$)。然而, 当 SPI 添加量的继续增加时, 凝胶的持水性开始下降, 导致蒸煮损失率上升。赵泽润等^[29]在探究 SPI 添加量对低盐木质化鸡肉糜凝胶特性影响时指出, 这种现象的出现或许是因为适量添加 SPI 能够有效填充鱼糜的网状结构空隙, 从而在一定程度上控制水分流动, 提高持水性^[29]; 而过量的 SPI 会对鱼糜蛋白及水分子产生稀释效应, 导致 SPI 中的极性基团对蛋白质的连接效果减弱^[17], 从而降低网状结构的紧密性, 影响鱼糜凝胶对水分的保留能力。

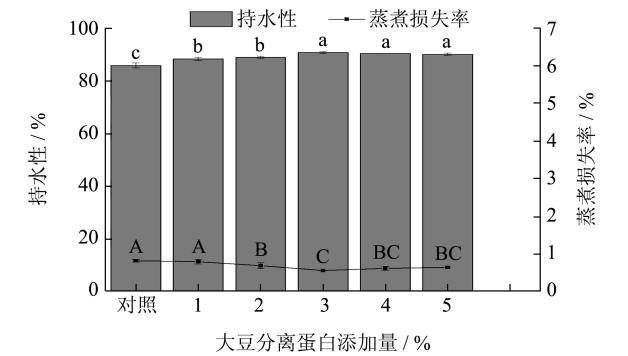


图 2 金线鱼鱼糜凝胶持水性和蒸煮损失率在不同大豆分离蛋白添加量下的影响

Fig.2 Effects of soy protein isolate addition on water holding capacity and cooking loss rate of *Nemipterus virgatus* surimi gel

2.2 金线鱼鱼糜凝胶微观结构随大豆分离蛋白添加量改变的变化规律

荧光显微镜观察结果显示 (图 3), 对照组 (添加 12% 木薯淀粉) 的鱼糜凝胶呈现出相对松散且不均匀的

结构, 表面孔洞较大 (图 3a)。随着 SPI 添加量的增加, 鱼糜凝胶的结构逐渐趋于更加规整和密实, 孔隙更小 (图 3b~3f)。这可能是由于 SPI 在斩拌时与鱼糜蛋白相混合, 在随后的加热诱导阶段促进形成稳定且致密的三维网络结构。SPI 能有效填补蛋白质网状结构与凝胶之间的空隙, 进而提升凝胶的特性, 使得其微观结构更加紧凑^[18]。当 SPI 添加量为 3% 时, 凝胶结构展现出最佳的均匀性与致密性。鱼糜凝胶微观结构的致密性是其性能强度和持水能力的重要指标^[18], 本研究结果与此相符。这表明 SPI 的添加不仅改善了鱼糜凝胶的宏观性能, 还优化了其微观结构, 从而全面提升了鱼糜凝胶的品质。

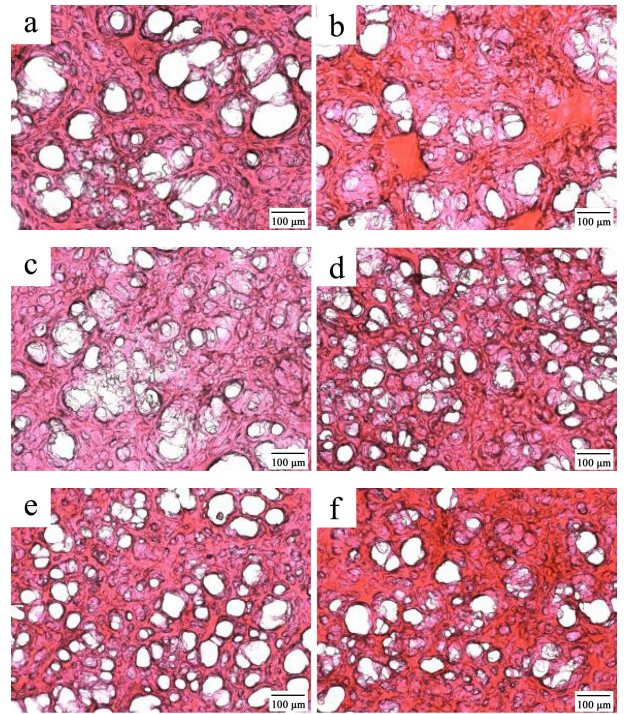


图 3 金线鱼鱼糜凝胶微观结构在不同大豆分离蛋白添加量下的影响

Fig.3 Effects of soy protein isolate addition on microstructure of *Nemipterus virgatus* surimi gel

注: (a) 对照; (b) 1% 大豆分离蛋白; (c) 2% 大豆分离蛋白; (d) 3% 大豆分离蛋白; (e) 4% 大豆分离蛋白; (f) 5% 大豆分离蛋白。

2.3 金线鱼鱼糜凝胶化学作用力和蛋白质二级结构随大豆分离蛋白添加量改变的变化规律

2.3.1 化学作用力

鱼糜凝胶中的网状结构主要依赖于蛋白质的分子间以及分子内的相互作用力来维持。由图4可知,适量的SPI可以与鱼糜凝胶相互作用,促进交联网络蛋白在加热过程中展开,使更多的疏水基团暴露并与相邻蛋白分子的疏水基团交联结合,从而提升鱼糜凝胶的性能^[30,31]。此外,SPI的添加还可以填补蛋白质网络与凝胶之间的间隙,从而在一定程度上增加氢键和疏水键的含量^[32]。二硫键的变化趋势呈现先下降后上升的特点,这可能是因为SPI通过与鱼糜蛋白形成交联网络,阻碍巯基向二硫键的转化,进而抑制了二硫键的形成。而随着SPI添加量的进一步增加,大量SPI的引入可能导致鱼糜肌球蛋白结构的变化,使蛋白分子变性并展开,原本隐藏的巯基得以显露,并最终被氧化成二硫键,从而增加了二硫键的含量^[33]。与对照组相比,添加SPI后,离子键的含量未出现显著性差异($P>0.05$),这意味着SPI的引入可能对鱼糜凝胶中离子键的形成影响有限^[17]。另外,总巯基含量的变化趋势与凝胶强度的增强呈显著正相关(图1),验证了巯基氧化生成二硫键对凝胶性质的强化作用。

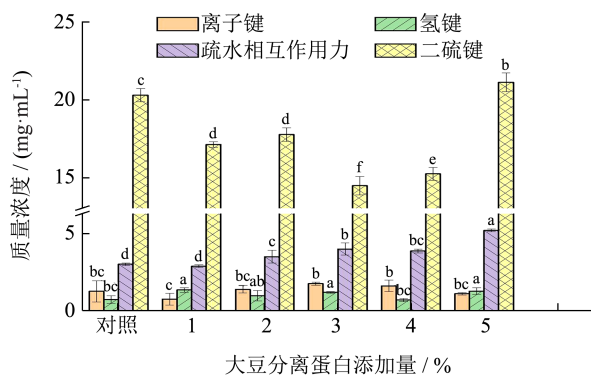


图4 金线鱼鱼糜凝胶化学作用力在不同大豆分离蛋白添加量下的影响

Fig.4 Effects of soy protein isolate addition on the transverse relaxation time of *Nemipterus virgatus* surimi gel

2.3.2 二级结构

红外光谱能够通过蛋白质的化学键与官能团的振动频率,分析蛋白质的构象变化。图5a为不同大豆分离蛋白添加量鱼糜凝胶红外光谱图,图中3500~3000 cm⁻¹范围被称为酰胺A振动波段,其与O-H和N-H伸缩振动有关,其吸收峰的变化与氢键存在紧密关联^[34]。在添加大豆分离蛋白后,酰胺A的波段吸收峰向低波数发生了一定的偏移,并在3%时达到了最低值,这表

明大豆分离蛋白的添加能够在一定程度上提高鱼糜凝胶体系的氢键,这与化学作用力中所测得的结果一致。

对1600~1700 cm⁻¹范围内的酰胺I带使用Peak-fit4.12拟合,得出蛋白质二级结构的百分比含量如图5b所示,在各组样品的蛋白质二级结构中, β -转角均占主导地位。相较于对照组,在加入大豆分离蛋白后,鱼糜凝胶的 α -螺旋含量降低, β -折叠含量则出现提高。在添加量为3%时, β -折叠相对含量达到峰值23.32% (m/m),与对照组16.19% (m/m)相比提高了44.04%,此时 α -螺旋相对含量11.01% (m/m)与对照组14.30% (m/m)相比,降低了23.00%。这表明大豆分离蛋白的添加能够驱使鱼糜凝胶蛋白结构的 α -螺旋向 β -折叠转化, β -折叠含量的增加则说明蛋白质分子之间的聚集,形成的网络结构更致密,鱼糜凝胶的蛋白结构更具稳定性,性能更加的良好^[4,17]。姜鹏飞^[35]等研究发现,添加卡拉胶后的罗非鱼鱼糜凝胶特性得到有效增强,二级结构主要呈现为稳定的 β -折叠结构,而且微观结构的分析结果表明,加入卡拉胶后的罗非鱼鱼糜凝胶形成了良好的凝胶网络,其组织构造紧密。Yao等^[36]研究发现,25%的TSP添加最能促进鱼丸致密微观结构的形成,并增加 β -折叠相对含量,结构稳定性提升进而增强鱼丸凝胶特性。

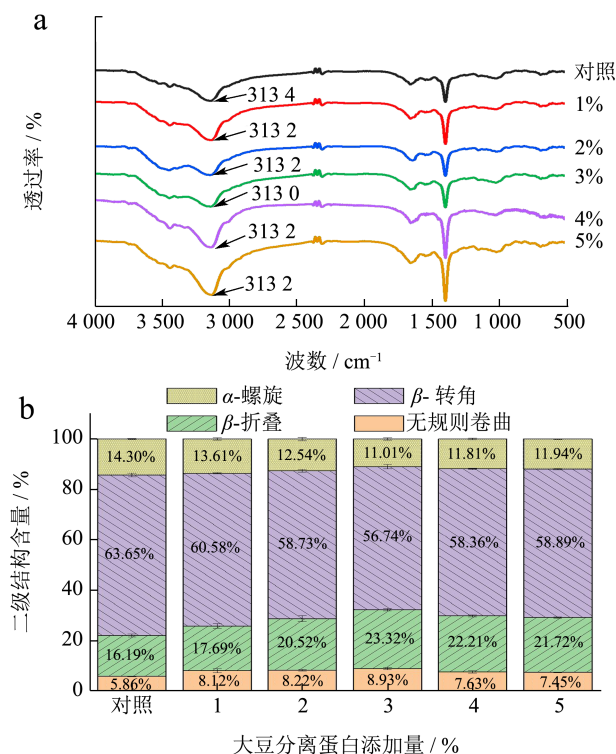


图5 金线鱼鱼糜凝胶FT-IR红外光谱图和蛋白质二级结构在不同大豆分离蛋白添加量下的影响

Fig.5 Effects of soy protein isolate addition on FT-IR diagram and protein secondary structure of *Nemipterus virgatus* surimi gel

3 结论

在金钱鱼鱼糜中添加 12% 的木薯淀粉后, 进一步添加大豆分离蛋白 (SPI), 能够显著增强鱼糜凝胶的强度, 优化其质构特性, 提高持水性能并减少蒸煮损失, 进而形成更加均匀且紧密的凝胶网络结构。当 SPI 添加量为 3% 时, 鱼糜凝胶的强度、硬度、胶着性、持水性以及蒸煮损失均达到最佳改善效果。SPI 通过增强鱼糜凝胶中的疏水相互作用和氢键含量, 影响蛋白质的变性过程, 促进蛋白结构的 α -螺旋向 β -折叠的转化, 从而提升凝胶性能。因此, 在金钱鱼鱼糜凝胶的制作过程中, 适量添加 SPI 可在加热阶段诱导更充分的交联反应, 致使更为紧密复杂的凝胶网络结构形成, 从而显著提升鱼糜凝胶的品质。

参考文献

- [1] 杨舒琦.大豆拉丝蛋白对鱼糜制品品质特性影响的研究[D].福州:福建农林大学,2022.
- [2] 农业部渔业渔政管理局.2023中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2023.
- [3] PIAO X Y, LI J W, ZHAO Y D, et al. Oxidized cellulose nanofibrils-based surimi gel enhancing additives: Interactions, performance and mechanisms [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107893.
- [4] ZHANG X H, GUO Q Y, SHI W Z. Ultrasound-assisted processing: Changes in gel properties, water-holding capacity, and protein aggregation of low-salt *Hypophthalmichthys molitrix* surimi by soy protein isolate [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 92: 106258.
- [5] ZHANG L D, LIU Y, WANG Y R, et al. Gelation melioration of clam *Meretrix meretrix* surimi based on the interactions with different plant/animal proteins [J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142269.
- [6] 王耀嵘,杨尉,任席林,等.金钱鱼基因组微卫星分布特征分析及多态性标记开发[J].广东海洋大学学报,2020,40(4):7-14.
- [7] 谭力,周春霞,洪鹏志.淡水鱼鱼糜制品加工特性及品质影响因素[J].食品与机械,2018,34(8):165-168.
- [8] 王丽丽,杨文鸽,徐大伦,等.外源添加物对鱼糜及其制品凝胶性能影响的研究[J].核农学报,2015,29(10):1985-1990.
- [9] 王蒙娜,熊善柏,尹涛,等.白鲢鱼糜斩拌工艺参数优化研究[J].食品科学技术学报,2017,35(5):61-65,71.
- [10] 杨华,张晓伟,刘慧,等.鲢鱼鱼糜凝胶质构特性的研究[J].食品研究与开发,2011,32(6):52-57.
- [11] ZHAO Y D, WEI K, CHEN J L, et al. Enhancement of myofibrillar protein gelation by plant proteins for improved surimi gel characteristics: Mechanisms and performance [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 198: 116045.
- [12] PANUMAS S, WORAWAN P, CHEONG L Z, et al. Comparative effect of cricket protein powder and soy protein isolate on gel properties of Indian mackerel surimi [J]. Foods, 2022, 11: 3445.
- [13] MI H B, ZHAO Y M, LI Y, et al. Combining effect of soybean protein isolate and transglutaminase on the gel properties of Zhikong scallop (*Chlamys farreri*) adductor muscle [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110727.
- [14] 沈晓蕾,李向红,俞健,等.大豆分离蛋白、木薯淀粉与转谷氨酰胺酶组合对鲢鱼鱼糜凝胶品质的影响[J].食品与机械,2019,35(9):26-31.
- [15] ZHANG C, HE Y J, ZHENG Y M, et al. Effect of carboxymethyl cellulose (CMC) on some physico-chemical and mechanical properties of unrinsed surimi gels [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 180: 114653.
- [16] 陈艾霖,刘曼曼,周春霞,等.pH值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热凝胶特性及体外消化性的影响[J].食品研究与开发,2021,42(5):38-45.
- [17] 刘珍,王金厢,李学鹏,等.大豆分离蛋白与金钱鱼肌球蛋白的相互作用对其凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2023,44(16):122-130.
- [18] 黄晓冰,洪鹏志,周春霞,等.不同原淀粉对金钱鱼鱼糜凝胶品质的影响及其分子机制[J].广东海洋大学学报,2024,44(1):133-141.
- [19] ZHAO D D, ZHANG J Y, JIANG S, et al. Changes in physicochemical properties and protein structure of surimi enhanced with camellia tea oil [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 84: 562-571.
- [20] 仪淑敏,叶贝贝,李学鹏,等.鱼糜及鱼糜制品中水分研究进展[J].中国食品学报,2019,19(12):304-310.
- [21] YANG Z, WANG W, WANG H Y, et al. Effects of a highly resistant rice starch and pre-incubation temperatures on the physicochemical properties of surimi gel from grass carp (*Ctenopharynxodon idellus*) [J]. Food Chemistry, 2014, 145(15): 212-219.
- [22] JIA R, TOYOHICO K, YASUSHI Y, et al. Effect of small granules in potato starch and wheat starch on quality changes of direct heated surimi gels after freezing [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105732.
- [23] 吴芳,江舒,胡曼子,等.豆粕蛋白对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2023,44(18):91-96.
- [24] TANYAMON P, SOOTAWAT B. Effect of gellan incorporation on gel properties of bigeye snapper surimi. [J]. Food Hydrocolloids 2018, 77: 746-753.
- [25] TANG S W, FENG G X, GAO R C, et al. Thermal gel degradation (Modori) in sturgeon (*Acipenseridae*) surimi gels [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(12): 3601-3607.
- [26] 张崑,张浩,蒋妍,等.大豆分离蛋白的添加方式对罗非鱼鱼糜凝胶性能的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2009,30(6):9-12,55.
- [27] 邓立青.不同辅料添加量对铜盘鱼鱼糜凝胶强度的影响[J].肉类工业,2020,40(8):19-22.
- [28] TAO Y, CHEN X, LI Q, et al. Towards more sustainable surimi gels: Deciphering the hybrid gelation of myofibrillar/plant proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109189.
- [29] 赵泽润,邢通,赵雪,等.大豆分离蛋白添加量对低盐木质化鸡肉糜凝胶特性的影响[J].食品科学,2022,43(6):49-56.
- [30] 李政翰.玉米淀粉-脂肪酸-带鱼肌球蛋白间的相互作用机制研

- 究[D].锦州:渤海大学,2020.
- [31] LI T F, ZHAO J X, HUANG J, et al. Improvement of the quality of surimi products with overdrying potato starches [J]. Journal of Food Quality, 2017, 2017(1): 1-5.
- [32] CHEN J X, DENG T Y, 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.
- [33] CAO Y Y, XIA T L, ZHOU G H, et al. The mechanism of high pressure-induced gels of rabbit myosin [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16: 41-46.
- [34] CHEN X, ZHOU R Y, XU X L, et al. Structural modification by high-pressure homogenization for improved functional properties of freeze-dried myofibrillar proteins powder [J]. Food Research International, 2017, 7(7): 193-200.
- [35] 姜鹏飞,于文静,朱凯悦,等.多糖对罗非鱼鱼糜凝胶化行为的影响[J].中国食品学报,2023,23(1):87-99.
- [36] YAO Y N, LIN Z X, ZHANG Y, et al. Enhancement of surimi gel quality using textured proteins from different plant sources: Product characteristics and *in vitro* digestion paradigm [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110797.