

氧化二氢杨梅素对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响

余勤业, 丁宁, 孙晓悦, 谭雨青, 罗永康, 洪惠

Effect of Oxidized Dihydromyricetin on the Gel Property of Surimi from Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)

YU Qinye, DING Ning, SUN Xiaoyue, TAN Yuqing, LUO Yongkang, and HONG Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110070>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

葡萄糖氧化酶对鲢鱼糜凝胶特性的影响

Effect of Glucose Oxidase on Gel Properties of Surimi from Silver Carp

食品工业科技. 2022, 43(9): 101-107 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080329>

豆粕蛋白对白鲢鱼糜凝胶特性的影响

Effect of Soybean Meal Proteins on Gel Properties of Silver Carp Surimi

食品工业科技. 2023, 44(18): 91-96 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120015>

白鲢鱼鳞抗冻多肽的制备及对冻融鱼糜凝胶特性的改善作用

Preparation of Silver Carp Scale Antifreeze Peptides and Its Improvement Effect on Gel Properties of Frozen-thawed Surimi

食品工业科技. 2023, 44(1): 242-252 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040039>

鱼鱼肉与白鲢鱼鱼糜混合热聚集行为分析

Thermal Aggregation Behavior of Blended Anchovy (*Engraulis japonicus*) Mince and Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) Surimi

食品工业科技. 2020, 41(14): 8-14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.002>

芋头粉对白鲢鱼糜制品品质的影响

Effects of Taro Powder on Quality of Silver Carp Surimi Products

食品工业科技. 2023, 44(24): 63-71 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020100>

不同糖类对草鱼鱼糜凝胶的影响

Effect of Different Carbohydrates on Gel Properties of Grass Carp Surimi

食品工业科技. 2022, 43(5): 48-55 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

余勤业, 丁宁, 孙晓悦, 等. 氧化二氢杨梅素对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 113–120. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110070

YU Qinye, DING Ning, SUN Xiaoyue, et al. Effect of Oxidized Dihydromyricetin on the Gel Property of Surimi from Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 113–120. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110070

· 研究与探讨 ·

氧化二氢杨梅素对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响

余勤业¹, 丁宁¹, 孙晓悦¹, 谭雨青¹, 罗永康¹, 洪惠^{1,2,*}

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 食品胶体与功能递送研究中心, 北京 100083)

摘要: 为了研究氧化二氢杨梅素 (oxidized dihydromyricetin, oDMY) 对鱼糜凝胶特性的影响, 分析了添加不同浓度 (0%、0.15%、0.30%、0.45%、0.60%) 的 oDMY 后, 鲢鱼鱼糜凝胶的凝胶强度、流变特性、持水力、微观结构、蛋白二级结构、粒径分布以及色泽和感官特性的变化。研究结果显示, 添加 oDMY 后, 鱼糜凝胶在形成的过程中蛋白质的 β -折叠相对含量增加, 蛋白聚集使粒径增大, 从而形成了更致密、孔洞更小的凝胶网络结构, 同时鱼糜凝胶的持水力也得到了提高。随着 oDMY 质量浓度的增加, 鱼糜凝胶的破断力和凹陷度增大, 尤其是在 0.45% 浓度时鱼糜凝胶的破断力最高。动态流变性测试结果进一步表明, oDMY 还具有一定的延缓凝胶劣化作用。使用 oDMY 会降低鱼糜凝胶的白度, 但在较低浓度下, 对颜色的影响仍在可接受范围内, 并且 oDMY 对鱼糜凝胶的风味改善起到了积极的作用。综合来看, 添加 0.45% 的 oDMY 可以有效改善鲢鱼鱼糜凝胶的特性, 为新型鱼糜制品的开发提供了有价值的参考依据。

关键词: 二氢杨梅素, 鲢鱼鱼糜, 凝胶特性, 微观结构, 感官特性

中图分类号: S986.1; TS254.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2024)17-0113-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110070



本文网刊:

Effect of Oxidized Dihydromyricetin on the Gel Property of Surimi from Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)

YU Qinye¹, DING Ning¹, SUN Xiaoyue¹, TAN Yuqing¹, LUO Yongkang¹, HONG Hui^{1,2,*}

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Center of Food Colloids and Delivery for Functionality, College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effect of oxidized dihydromyricetin (oDMY) on the gel properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi. The changes in gel strength, rheological properties, water-holding capacity, microstructure, protein secondary structure, particle size distribution, color, and sensory properties of surimi gels were analyzed after adding different concentrations (0%, 0.15%, 0.30%, 0.45%, 0.60%) of oDMY. The results showed that the addition of oDMY increased the relative content of β -sheet proteins during the gel formation process, leading to larger particle size due to protein aggregation, and consequently resulting in a denser gel network structure with smaller pores. Furthermore, the water-holding capacity of the surimi gels was improved by the addition of oDMY. As the concentration of oDMY increased, the breaking force and deformation of the surimi gels increased, especially at the concentration of 0.45%, which exhibited the most significant enhancement in breaking force. Dynamic rheological tests further demonstrated that oDMY had a certain delaying effect on gel deterioration. The addition of oDMY resulted in a decrease in whiteness of the surimi gels. However, at lower concentrations, the impact on color remained within an acceptable range, and oDMY positively contributed to the flavor improvement of the surimi gels. Overall, the addition of 0.45% oDMY effectively

收稿日期: 2023-11-09

基金项目: 国家大宗淡水鱼产业技术体系 (CARS-45); 国家自然科学基金 (32172133)。

作者简介: 余勤业 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 鱼糜加工, E-mail: m13655709970@163.com。

* 通信作者: 洪惠 (1987-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工及贮藏工程, E-mail: hhong@cau.edu.cn。

improved the characteristics of silver carp surimi gels, providing valuable reference for the development of novel surimi products.

Key words: dihydromyricetin; silver carp surimi; gel properties; microstructure; sensory property

鱼糜是通过鱼体经过去骨、漂洗、脱水和精滤等工艺制成的肌原纤维蛋白浓缩物。经过擂溃、调味、成型和加热处理,可以将其加工成各种鱼糜制品,如鱼丸、鱼糕和蟹肉棒等^[1]。在中国,鱼糜制品的生产对于提高低值淡水鱼类(如鲢鱼、草鱼、鳙鱼等)的利用率和商业价值起到了重要的作用^[2-3]。然而,与海水鱼肉相比,大多数淡水鱼肉的凝胶形成能力较差,并且淡水鱼中的内源性蛋白酶含量也较高,这会导致凝胶劣化,无法满足生产需求^[4]。目前研究较多的添加剂包括磷酸盐、非肌肉蛋白、淀粉、亲水胶体等。然而磷酸盐过量摄入会影响钙的吸收^[5];非肌肉蛋白易引起过敏反应,且动物血浆的使用易受到宗教的限制^[6];谷朊粉会使凝胶变得硬而脆^[7],降低凝胶弹性;添加淀粉的鱼糜制品在常温下较黏^[8]。因此,亟需寻找一种能改善淡水鱼糜凝胶性能的新型添加剂。

多酚在肉类中的应用通常基于其强大的抗氧化性,但近年来越来越多的研究发现多酚类物质可以通过共价和非共价方式与蛋白质发生交联,从而提高蛋白质的凝胶性能,其中非共价作用主要包括氢键和疏水作用。氢键是指蛋白质的 C=O 与多酚中的丰富氢之间的相互作用。疏水作用则是指蛋白质中的疏水氨基酸残基与多酚中的非极性芳香环之间的反应^[9]。此外,不可逆的共价交联主要通过多酚的氧化中间产物醌和半醌物质与蛋白质中的赖氨酸 ϵ -氨基和半胱氨酸巯基的氧化交联形成更加稳定的网络结构^[10]。二氢杨梅素是从藤茶中提取出的多酚类物质,具有多种生理功效,如抗氧化、降血糖、抑菌和保护心血管功能^[11]。作为一种纯天然植物提取物,二氢杨梅素具有安全、无毒、低副作用的优势,并且在自然界中广泛存在,工业化生产有充足原料^[12]。此外, Yu 等^[9]发现二氢杨梅素能通过抑制鲢鱼中肌原纤维蛋白结合型丝氨酸蛋白酶活性,并促进肌原纤维蛋白的交联,从而抑制凝胶劣化,因此被认为是一种潜在鱼糜凝胶增强物。

目前,氧化形式的阿魏酸、儿茶素、咖啡酸等多酚已被证明具有提高鱼糜凝胶性能的能力^[13],但尚未有关于在鱼糜制品中应用氧化二氢杨梅素(oxidized dihydromyricetin, oDMY)的研究报道。因此,本研究以鲢鱼鱼糜为研究对象,系统分析添加不同浓度的 oDMY 对鲢鱼鱼糜凝胶强度、流变特性、持水力、微观结构、蛋白质二级结构以及色泽和感官特性的影响,旨在为改善淡水鱼糜凝胶性能提供理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

二氢杨梅素 食品级,98% 纯度,西安五色花生

物科技有限公司;冷冻鲢鱼鱼糜 AA 级,荆州井力水产食品有限公司;新鲜鲢鱼 1.5 kg,北京四道口菜市场,充氧保活 30 min 内运至实验室,缓解应激后宰杀,取背部白肉置于低温备用;食盐 食品级,北京物美超市;溴化钾(色谱纯)、HCl、NaOH、NaCl、MgCl₂、EGTA、NaH₂PO₄、Na₂HPO₄、CuSO₄·5H₂O、NaKC₄H₄O₆·4H₂O 除溴化钾外其余均为分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

BH824 型斩拌机 广东金正厨卫设备有限公司;TGL-16A 型冷冻离心机 长沙平凡仪器仪表有限公司;T10 型分散均质机 德国 IKA 公司;ARES-G2 型流变仪 美国 TA 公司;CT-3 型质构仪 美国 Brookfield 公司;NR110 型手持色度仪 深圳三恩时科技有限公司;SU3500 型扫描电镜 日本 HITACHI 公司;SBC-12 型离子溅射仪 北京 KYKY 科技有限公司;Frontier 型傅里叶红外扫描仪 美国 Perkinelmer 公司;Zeta ZEN3700 型马尔文激光粒度分析仪 英国 Malvern Instruments Ltd., Malvern 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 氧化二氢杨梅素溶液的制备 超声波辅助溶解 1%(w/v)二氢杨梅素于去离子水中,按照 Strauss 等^[14]方法对溶液进行氧化。先用 6 mol/L NaOH 将溶液 pH 调至 8,然后在 40 °C 水浴条件下通入氧气氧化 1 h。氧化后用 1 mol/L HCl 将溶液 pH 调至 7。所得氧化二氢杨梅素溶液(oxidized dihydromyricetin, oDMY)在一周内使用。

1.2.2 鱼糜凝胶的制备 取 300 g 冷冻鱼糜于 4 °C 半解冻。将半解冻的鱼肉放入预冷的绞肉机中空斩 1 min,再加入不同浓度的 oDMY 溶液,使得最终 oDMY 与鱼糜中肌原纤维蛋白质量比为 0%(CK)、0.15%、0.30%、0.45%、0.60%,用去离子水调整各组水分含量一致,然后加入 1.5% 食用盐^[15]斩拌 9 min,用裱花袋将擂溃后的鱼糜灌进 50 mL 离心管(长:10.0 cm、直径 2.5 cm)中,800 r/min 离心 5 min 以排出大气泡。采用 40 °C/30 min,90 °C/20 min 的二段加热法制备鱼糜凝胶。凝胶迅速放入冰水中冷却 10 min 后从离心管中取出,于 4 °C 冷藏过夜第二天待测。

1.2.3 动态流变学分析 使用流变仪测试鲢鱼鱼糜在升温熟化过程中的 G'(储能模量)变化情况。测试前,将鲢鱼鱼糜平衡至室温,取 2 g 左右放置在载物台上,探头选用 40 mm 平行板,设置平板探头与载物台之间的间隙为 1 mm,并用硅油密封以免水分蒸发。参数参考陈媚依^[16]的研究:应变为 1%、振荡频率为 1 Hz,升温扫描范围为 20~90 °C,升温速度设

为 5 °C/min。

1.2.4 凝胶强度的测定 凝胶强度测定参考 Yu 等^[15]方法。测试前将凝胶置于室温平衡 30 min, 然后切成 25 mm 的圆柱体, 测定探头为 TA50(5 mm 球形), 夹具 TA-RT-KTT, 测定参数为: 40% 形变, 7 g 触发点负载及 1 mm/s 的测试速度。

1.2.5 蒸煮损失的测定及计算 装入离心管的鱼糜最初重量为 W_1 , 加热后擦干表面水分的鱼糜凝胶重量记为 W_2 。

$$\text{蒸煮损失(\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

1.2.6 离心损失的测定及计算 取 2 g 左右的鱼糜凝胶称重 W_3 , 用滤纸包裹后放入 50 mL 离心管, 管内放入足量玻璃珠抵住上方滤纸, 在 1600 r/min 条件下离心 10 min, 将鱼糜凝胶重新称重记为 W_4 ^[15]。

$$\text{离心损失(\%)} = \frac{W_3 - W_4}{W_3} \times 100$$

1.2.7 微观结构观察 使用扫描电镜观察鱼糜凝胶的微观结构。将鱼糜凝胶切成 8 mm×8 mm×1 mm 的薄片, 固定在 2.5% 戊二醛溶液中。观察前, 使用浓度分别为 50%、70%、80%、90% 和 100%(v/v) 的乙醇对样品进行脱水。将干燥后的样品安装在铜柱上, 然后用离子溅射仪喷金。

1.2.8 蛋白质二级结构测定 采用傅里叶红外法分析蛋白质二级结构^[15], 鱼糜和鱼糜凝胶分别冻干后磨细备用, 溴化钾研磨后于 120 °C 烘干 24 h, 置于干燥器中冷却。混匀 2 mg 样品与 200 mg 溴化钾并均匀铺在压片模具中, 于 27 MPa 下压片 1 min, 为了排除溴化钾对光谱图的干扰, 用 200 mg 溴化钾压片作为背景。傅里叶红外光谱测定条件: 扫描范围 4000~400 cm^{-1} , 分辨率 4 cm^{-1} , 扫描次数为 32 次。利用 PeakFit 软件(v4.12)对 1600~1700 cm^{-1} 范围内的图谱进行去卷积处理, 根据各子峰的积分面积及其对应关系计算蛋白质二级结构的相对百分含量。

1.2.9 不同 oDMY 浓度下肌原纤维蛋白样品的制备 鲢鱼肌原纤维蛋白的提取参考 Yu 等^[17] 并做了一些修改。在绞碎的肉中加入 4 倍体积(w/v) 混合洗液(0.1 mol/L NaCl, 2 mmol/L MgCl_2 , 1 mmol/L EGTA, 10 mmol/L $\text{NaH}_2\text{PO}_4/\text{Na}_2\text{HPO}_4$, pH7.0), 于 8000 r/min 转速下均质 30 s, 然后于 4 °C, 10000 r/min 条件下离心 15 min。沉淀再用洗液漂洗两次。随后在沉淀中加入 4 倍体积(w/v) 的 0.1 mol/L NaCl 溶液并均质。混合溶液用 3 层纱布过滤以去除结缔组织。离心后, 得到肌原纤维沉淀并将其溶解在 0.6 mol/L NaCl 溶液中, 使用双缩脲试剂法^[18] 测定蛋白质浓度。在蛋白溶液中加入与鱼糜处理组相同比例的 oDMY 溶液, 使得最终溶液中 oDMY 与蛋白质量比为 0%、0.15%、0.30%、0.45%、0.60%, 混匀后备用。

1.2.10 粒径分布与平均粒径测定 采用光散射测定肌原纤维蛋白溶液中微粒的大小和分布, 将 1 mL 肌原纤维蛋白溶液(1 mg/mL) 加进四面透光的皿中, 参数设置参考 Zhang 等^[19] 所述的方法, 粒度数据以平均直径(nm)和粒度分布表示。

1.2.11 色泽的测定及计算 鱼糜凝胶色泽的测定参照 Zhang 等^[20] 的方法。手持色差仪使用前用白板和黑板校准, 结果用亮度值(L^*)、红度值(a^*)和黄度值(b^*)表示。

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

1.2.12 感官评定 感官评价标准参考周芬^[21] 的方法(表 1), 评价小组成员由 19~30 岁食品专业的 8 名男性和 12 名女性组成。

表 1 感官评价标准
Table 1 Criteria for sensory evaluation

| 评价指标 | 分值 | 参考标准 |
|------|------|------------------------------------|
| 外观 | 8~10 | 色泽白; 切面密实, 无大气孔, 有许多微小且均匀的小气孔 |
| | 4~7 | 色泽偏黄; 切面基本密实, 无大气孔, 有少量的小气孔 |
| | 0~3 | 色泽暗淡; 切面呈浆状, 松软不密实 |
| 气味 | 8~10 | 有鱼肉特有的香味, 味足 |
| | 4~7 | 有鱼肉特有的香味, 味偏淡 |
| | 0~3 | 无鱼肉特有的香味, 有异味(鱼腥味等) |
| 弹性 | 8~10 | 中指轻压, 明显凹陷而不破裂, 放手则复原, 弹跳而不破裂 |
| | 4~7 | 中指用力压, 明显凹陷而不破裂, 放手则复原 2/3, 弹跳而不破裂 |
| | 0~3 | 中指用力压即破裂, 放手不能完全恢复到原状, 不能弹跳 |
| 滋味 | 8~10 | 具有鱼肉特有的鲜香味, 无异味 |
| | 4~7 | 鲜香味回味较淡, 有点苦味 |
| | 0~3 | 无鲜香回味, 有苦味 |
| 喜爱度 | 8~10 | 非常喜欢, 愿意购买 |
| | 4~7 | 一般, 愿意尝试 |
| | 0~3 | 无法接受 |

1.3 数据处理

实验数据均为 5 次平行测定的平均值±标准差, 采用 Excel 2013 软件进行数据处理和作图, 采用 SPSS 23.0 软件进行 one-way ANOVA 单因素方差分析, 利用 Duncan's test 分析显著性差异水平($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 oDMY 对鱼糜流变特性的影响

加不同浓度 oDMY 后, 鲢鱼鱼糜在 20~90 °C 升温过程中的储能模量(G')变化情况如图 1 所示。在 37 °C 后, G' 呈现短暂的上升阶段, 这可以归因于鱼糜中部分肌球蛋白头部的展开, 暴露出疏水基团, 并通过氢键形成较弱的凝胶网络^[18]。添加 oDMY 的鱼糜在 40 °C 左右时显示出较高的 G' 值, 表明 oDMY 能够诱导肌球蛋白形成氢键。随着温度继续升高, G' 呈下降趋势, 并在约 48 °C 降至最低点。这种下降可能与氢键的断裂导致临时网络结构破坏有关^[22], 同时内

源酶引起的蛋白质降解也可能破坏凝胶的网络结构^[23]。Singh 等^[6]也在 50 °C 观察到 G'最低值,并通过添加鱿鱼卵巢丝氨酸蛋白酶抑制剂和蛋清粉酶抑制剂改善凝胶劣化。在该阶段,添加了 oDMY 的鱼糜的 G'下降拐点推迟,上升拐点提前,表现出与上述抑制剂相同的改善作用,这表明 oDMY 具有一定抑制内源酶活性的作用。Yu 等^[9]提取鲑鱼肌原纤维蛋白结合型丝氨酸蛋白酶与二氢杨梅素于劣化温度下孵化,结果证明二氢杨梅素的抑制酶活效果。此外,在 48 °C 后随着温度的升高,添加 oDMY 鱼糜的 G'值明显高于对照组,并且与 oDMY 的浓度呈正相关。这可能是由于氧化产物醌与蛋白质发生共价交联^[24],从而形成更稳定的凝胶网络,Yu 等^[9]也鉴定出 Lys-DMY-Lys、Lys-DMY-Cys、Cys-DMY-DMY-Cys 三种 DMY 与肌原纤维蛋白的交联产物,表明 oDMY 能通过多种作用改善鲑鱼鱼糜凝胶强度。

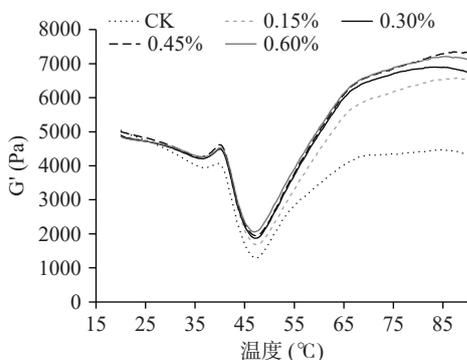


图1 添加不同浓度 oDMY 的 G'在加热鱼糜凝胶过程中的变化

Fig.1 Changes of G' with different concentrations of oDMY addition during heating of surimi gels

2.2 oDMY 对鱼糜凝胶强度的影响

凝胶强度是评估鱼糜凝胶形成能力的最直观、最重要的参数。图 2 展示了 oDMY 浓度对鱼糜凝胶破断力和凹陷度的影响。结果显示,低浓度组(0.15% 和 0.3%)与对照组之间没有显著差异($P > 0.05$)。然而,与对照组相比,添加 0.45% oDMY 的鱼糜凝胶的破断力和凹陷度分别增加了 29.1% 和 14.5%。这说明适量的 oDMY 能改善鱼糜凝胶的性能。Balange 等^[25]的研究结果也表明,添加氧化阿魏酸等氧化多酚可以增强鱼糜凝胶强度,并且随着添加量的增加而增加。值得注意的是,最低剂量组的储能模量(G')已经显著提升(图 1),而在凝胶强度方面,只有高剂量组才显示出显著效果。这种差异可能与不同的加热模式有关。流变试验中的升温过程均匀且缓慢,凝胶劣化阶段持续时间长,oDMY 能够有效抑制酶活的作用^[9]。相比之下,二段式加热模式快速通过凝胶劣化阶段,蛋白质受内源酶的影响较小,而 oDMY 对凝胶强度的改善主要依赖于共价交联和其他化学作用力的作用,因此只有高剂量才能产生显著效果。

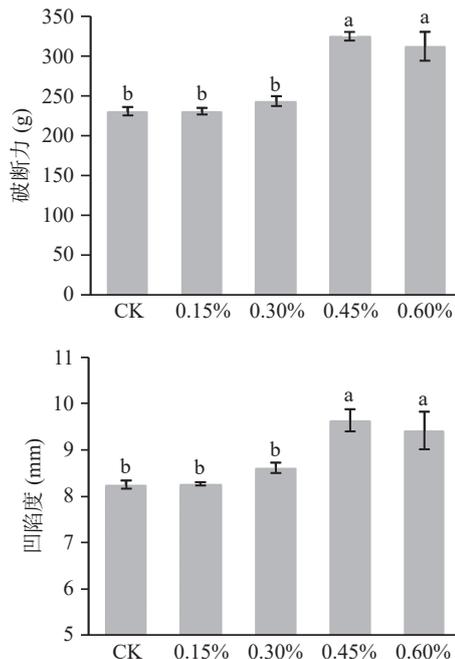


图2 oDMY 对鱼糜凝胶强度的影响

Fig.2 Effect of oDMY on the gel strength of surimi gels

注:不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$);横轴表示 oDMY 与鱼糜中肌原纤维蛋白质量比为 0%~0.60% 的组别;图 3、图 6 同。

2.3 oDMY 对鱼糜凝胶持水力的影响

蒸煮损失和离心损失是评估凝胶持水能力的指标^[26]。蒸煮损失表示鱼糜在煮制为凝胶的过程中水分、可溶性蛋白、油脂等物质流失而造成质量的减少。图 3 的结果显示,对照组的蒸煮损失为 6.5%,添加 oDMY 后,凝胶的蒸煮损失显著变少($P < 0.05$),其中最大剂量组(0.60%)的蒸煮损失仅为 3%。相对于对照组,添加 oDMY 的鱼糜凝胶的离心损失先减少

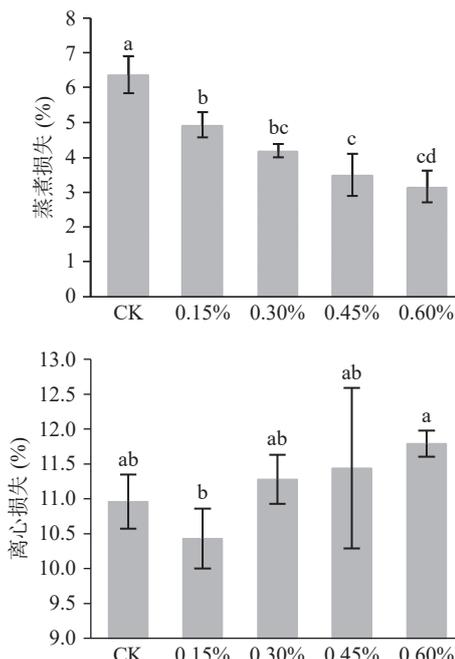


图3 oDMY 对鱼糜凝胶蒸煮损失和离心损失的影响

Fig.3 Effect of oDMY on the cooking loss and centrifugal loss of surimi gels

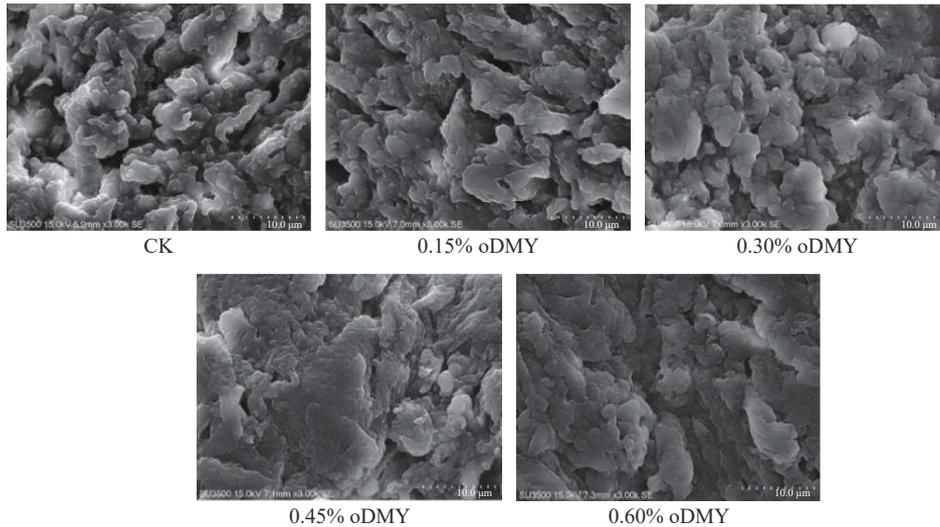


图 4 添加不同浓度 oDMY 鱼糜凝胶的扫描电镜图(3000×)

Fig.4 SEM images of surimi gels with different concentrations of oDMY addition (3000×)

后增加,但差异不显著($P>0.05$)。这是因为对照组的鱼糜在加热后,其凝胶网络失去自由水的含量较多,因此初始凝胶的含水量较低(CK 凝胶含水量 90.1%, 0.60% oDMY 凝胶含水量 91.8%),离心后流失的水分相对较少。通过减少蒸煮损失, oDMY 能够更好地保持鱼糜中的水分,增强凝胶的稳定性。尽管离心损失略微增加,但整体上, oDMY 仍然有效地提高了凝胶的持水性能。

2.4 oDMY 对鱼糜凝胶微观结构的影响

如图 4 所示,对照组的鱼糜凝胶有较大的孔隙,呈多层结构,这表明其持水力较低,凝胶强度较差。与对照组相比,添加了 0.15% oDMY 鱼糜凝胶的孔隙变小,形成了更致密的网络结构。而在添加 0.45% 和 0.60% oDMY 的情况下,鱼糜凝胶的结构变得最为致密,这与其较高的持水力和破断力密切相关。酚类化合物能在加热过程中通过疏水相互作用、氢键和二硫键与肌原纤维蛋白聚集发生分子间交联,从而构建紧密的网络结构,这使得网络中可以容纳更多的水分,从而提高了持水力和凝胶强度^[27]。因此,这些紧密的连接与较高的凝胶强度和持水力之间存在着密切联系(图 2、图 3)。

2.5 oDMY 对鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响

图 5 展示了添加不同浓度的 oDMY 对于鱼糜和鱼糜凝胶中蛋白质二级结构比例的影响。对于未加热的鱼糜而言,在不同组间,蛋白质二级结构的相对含量没有明显的变化趋势。然而,对于经过凝胶处理后的鱼糜,随着 oDMY 浓度的增加,β-折叠结构的含量明显增加。He 等^[28]的研究表明,β-折叠结构的增加反映了氢键数量的增加,氢键的存在有助于维持蛋白质构象的稳定性,从而形成有序的凝胶网络结构,并增强鱼糜制品的凝胶强度。这与流变学结果所反映的 oDMY 促进蛋白质形成氢键的效应是一致的,也在一定程度上解释了 oDMY 改善鱼糜凝胶性能的原因。

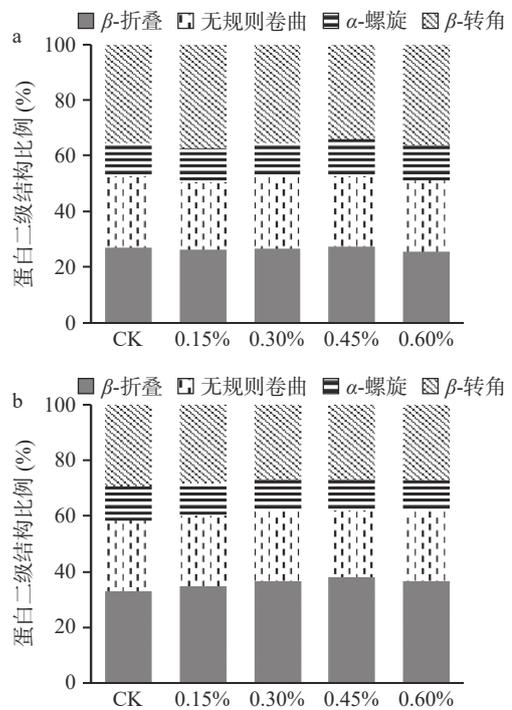


图 5 oDMY 对鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响

Fig.5 Effect of oDMY on the protein secondary structure of surimi gels

注: a 为鱼糜的蛋白二级结构, b 为鱼糜凝胶的蛋白二级结构。横轴表示 oDMY 与鱼糜中肌原纤维蛋白质量比为 0%~0.60% 的组别。

2.6 oDMY 对肌原纤维蛋白粒径的影响

粒径可以直接反映蛋白质的聚集情况,图 6 为加入不同浓度 oDMY 的肌原纤维蛋白溶液平均粒径和粒径分布的变化。可以看到,未添加 oDMY 的肌原纤维蛋白在分布图中呈现 80 nm 和 400 nm 两个峰,平均粒径为 500 nm 左右,随着 oDMY 剂量的增加,粒径峰向大尺寸移动,表明 oDMY 会促进肌原纤维蛋白交联,这与多酚氧化产物醌类与-NH₂, -SH 的共价交联有关,进一步验证 oDMY 中的醌类物质通过共价相互作用与肌原纤维蛋白结合,提高凝胶性

能。Pan 等^[29]也发现在肌原纤维蛋白中加入没食子酸溶液,会形成蛋白-S-没食子酸-S-蛋白的交联,从而提高凝胶强度。但是高剂量的没食子酸引起严重的蛋白质聚集后,会阻碍蛋白在加热过程中的进一步交联,破坏凝胶结构。本研究中添加最高剂量(0.60%)组的平均粒径比 0.45% 组的粒径显著提高($P<0.05$),而相应的鱼糜凝胶的破断力和凹陷度也有轻微下降(图 2)。因此,0.45% oDMY 添加量较为合适。

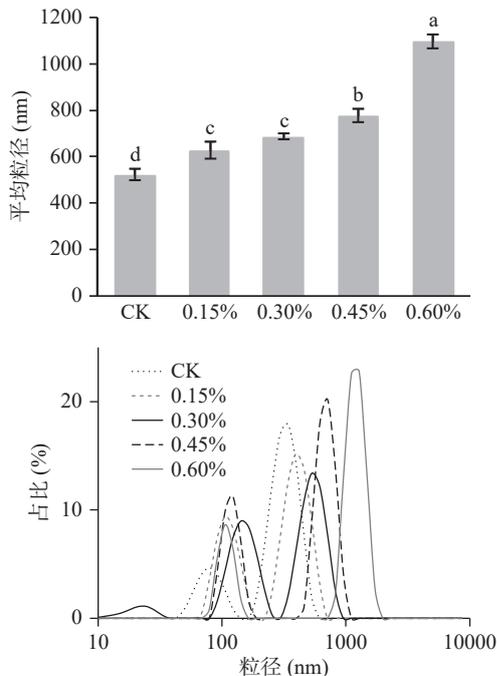


图 6 oDMY 对肌原纤维蛋白粒径的影响

Fig.6 Effect of oDMY on the particle size of myofibrillar protein

2.7 oDMY 对鱼糜凝胶色泽的影响

白度是衡量鱼糜产品品质的一个重要因素,消费者更青睐于白色的鱼糜制品^[30]。从表 2 中可以观

察到,随着 oDMY 添加量的增加,鱼糜凝胶 L^* 亮度值降低,而 a^* 红度值和 b^* 黄度值增加,这表明凝胶的颜色逐渐加深,呈现出橙红色的色调。当添加 0.15% 和 0.3% oDMY 时,凝胶的白度与对照组相比没有显著差异($P>0.05$),然而,当添加更高浓度的 oDMY 时,凝胶的白度显著下降($P<0.05$)。二氢杨梅素本身呈浅绿色,在碱性条件下氧化后的溶液呈现橙红色。贾慧等^[31]的研究也发现,氧化绿原酸和咖啡酸的使用降低了鱼糜凝胶的白度,但低浓度的氧化绿原酸和咖啡酸使用对颜色影响仍然处于可接受范围内。

表 2 oDMY 对鱼糜凝胶色泽的影响

Table 2 Effect of oDMY on the color of surimi gels

| 组别 | L^* | a^* | b^* | 白度 |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| CK | 73.15±0.54 ^a | -2.33±0.05 ^e | 1.32±0.22 ^e | 73.02±0.54 ^a |
| 0.15% oDMY | 70.65±0.56 ^b | -1.71±0.02 ^d | 2.26±0.06 ^d | 70.51±0.56 ^a |
| 0.30% oDMY | 69.00±1.11 ^c | -1.38±0.06 ^c | 3.44±0.26 ^c | 68.78±1.08 ^a |
| 0.45% oDMY | 68.01±0.57 ^c | -1.11±0.07 ^b | 4.30±0.03 ^b | 67.70±0.56 ^b |
| 0.60% oDMY | 68.12±0.67 ^c | -0.83±0.04 ^a | 4.94±0.19 ^a | 67.73±0.64 ^b |

注: 同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$); 表 3 同。

2.8 oDMY 对鱼糜凝胶感官特性的影响

添加不同浓度 oDMY 对鱼糜凝胶感官特性(外观、气味、弹性、滋味和喜爱度)的影响如表 3 所示。与对照组相比, oDMY 的添加改善了凝胶的气味和滋味,并增加了凝胶的弹性。尽管凝胶的外观得分有所降低,但总体的喜爱度在添加 0.45% 的浓度时达到最高。其中凝胶的外观得分降低与白度降低有关,弹性得分的增加与凝胶凹陷度和破断力的增加呈正相关,这些差异在 0.45% 的浓度时显著($P<0.05$)。添加 oDMY 能改善凝胶风味、减轻鱼糜的腥味,这是因为酚类化合物的羟基与腥味物质中的胺结合,从而减少了腥味的释放^[32]。综合来看,在适当的添加量下, oDMY 能提高消费者对鱼糜凝胶的喜爱度。

表 3 添加不同浓度 oDMY 的鱼糜凝胶感官评价

Table 3 Sensory evaluation of surimi gels with different concentrations of oDMY addition

| 组别 | 外观 | 气味 | 弹性 | 滋味 | 喜爱度 |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CK | 8.28±0.89 ^a | 6.00±1.64 ^c | 7.33±1.61 ^b | 6.83±1.1 ^b | 7.06±1.06 ^c |
| 0.15% oDMY | 7.61±0.85 ^{ab} | 7.06±1.39 ^b | 7.56±1.29 ^b | 7.56±0.92 ^{ab} | 7.50±1.15 ^{bc} |
| 0.30% oDMY | 6.72±1.18 ^{bc} | 7.67±0.69 ^{ab} | 7.78±1.17 ^b | 7.56±0.92 ^{ab} | 8.06±1.06 ^{ab} |
| 0.45% oDMY | 6.06±1.80 ^{cd} | 8.00±0.97 ^a | 8.72±0.46 ^a | 7.67±1.28 ^a | 8.56±0.78 ^a |
| 0.60% oDMY | 5.72±1.81 ^d | 8.17±1.29 ^a | 8.83±0.51 ^a | 7.50±1.04 ^{ab} | 7.78±1.22 ^{bc} |

3 结论

适宜浓度的 oDMY 可提升鲢鱼鱼糜凝胶形成能力,其中低浓度 oDMY 主要通过促进氢键等非共价作用力形成,并通过抑制内源酶活延缓凝胶的劣化过程,而高浓度 oDMY 则主要通过共价交联作用,促进肌原纤维蛋白网络结构的改善,形成更致密和均匀的网状结构,从而提高凝胶的强度和持水能力。尽管 oDMY 会降低鱼糜凝胶的白度,但在低中浓度

(0.15%~0.45%)使用时,产生的颜色变化是可以接受的。同时, oDMY 的添加还能减轻鱼糜的腥味,提高消费者的喜爱度,这表明 oDMY 在改善鱼糜凝胶的特性和感官特性方面具有良好的应用前景。后续将进一步探讨 oDMY 与鱼肌原纤维蛋白相互作用对凝胶特性的影响机制,以及添加 oDMY 的鱼糜凝胶消化特性的变化,以期 oDMY 在鱼糜制品中的应用提供更多的理论参考。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] ZHAO Y, PIAO X, ZHENG B, et al. Enhancement of surimi gel properties through the synergetic effect of fucoidan and oligochitosan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108626.
- [2] 米红波, 王聪, 赵博, 等. 6-姜酚对草鱼鱼糜凝胶特性及贮藏稳定性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2017, 35(1): 21-27. [MI Hongbo, WANG Cong, ZHAO Bo, et al. Effects of 6-gingerol on gel properties and storage stability of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi gels[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 35(1): 21-27.]
- [3] LI D, PRINYAWIWATKUL W, TAN Y, et al. Asian carp: A threat to American lakes, a feast on Chinese tables[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(3): 2968-2990.
- [4] CAO M J, WU L L, HARA K, et al. Purification and characterization of a myofibril-bound serine proteinase from the skeletal muscle of silver carp[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2005, 29(5): 533-546.
- [5] 李蕊, 刘有军, 乔爱科, 等. 骨质疏松与血管钙化[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2005, 29(5): 533-546. [LI Rui, LIU Youjun, QIAO Aike, et al. Osteoporosis and vascular calcification[J]. *Chinese Journal of Osteoporosis*, 2005, 29(5): 533-546.]
- [6] SINGH A, BENJAKUL S. Effect of serine protease inhibitor from squid ovary on gel properties of surimi from Indian mackerel[J]. *Journal of Texture Studies*, 2017, 48(6): 541-549.
- [7] 叶月华, 钱敏, 刘晓艳, 等. 不同外源物质对淡水鱼鱼糜热诱导凝胶特性增效作用的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(12): 285-293. [YE Yuehua, QIAN Min, LIU Xiaoyan, et al. The enhancement of different exogenous substances on thermal-induced gel properties of fresh water fish surimi[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(12): 285-293.]
- [8] 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.]
- [9] YU Q, FENG C, LIANG S, et al. Dihydromyricetin as a potential enhancer for surimi gels with anti-modori activity: A molecular docking and experimental validation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109117.
- [10] SUN X, SARTESHNIZI R A, UDENIGWE C C. Recent advances in protein-polyphenol interactions focusing on structural properties related to antioxidant activities[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 45: 100840.
- [11] GUAN H, ZHANG W, SUN-WATERHOUSE D, et al. Phenolic-protein interactions in foods and post ingestion: Switches empowering health outcomes[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 71-86.
- [12] LIU D, MAO Y, DING L, et al. Dihydromyricetin: A review on identification and quantification methods, biological activities, chemical stability, metabolism and approaches to enhance its bioavailability[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 586-597.
- [13] 吕宏宇, 许晓曦. 氧化酚类化合物对鲫鱼鱼糜凝胶特性影响的研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(5): 149152. [LÜ Hongyu, XU Xiaoxi. Effects of oxidized phenolic compounds on the properties of crucian surimi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(5): 149152.]
- [14] STRAUSS G, GIBSON S M. Plant phenolics as cross-linkers of gelatin gels and gelatin-based coacervates for use as food ingredients[J]. *Food Hydrocolloids*, 2004, 18(1): 81-89.
- [15] YU Q, LIU J, LIU Y, et al. Inhibitive effect of cryoprotectants on the oxidative and structural changes in myofibrillar proteins of unwashed mince from silver carp during frozen storage[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111880.
- [16] 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.]
- [17] YU S, LI Q, QIAO C, et al. Myofibrillar protein conformation enhance gel properties of mixed surimi gels with *Nemipterus virgatus* and *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 106: 105924.
- [18] GORNALL, A. G. Determination of serum proteins y means of the biuret reaction[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1949, 177(2): 751-766.
- [19] ZHANG Z, YANG Y, ZHOU P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 678-686.
- [20] ZHANG L, LI Q, SHI J, et al. Changes in chemical interactions and gel properties of heat-induced surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during setting and heating: Effects of different washing solutions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75: 116-124.
- [21] 周芬. 大黄鱼加工副产物的白鲢鱼糜凝胶品质特性的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020. [ZHOU Fen. Study on the quality characteristics of silver carp surimi gel prepared with large yellow croaker processing by-product[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.]
- [22] MI H, WANG C, SU Q, et al. The effect of modified starches on the gel properties and protein conformation of *Nemipterus virgatus* surimi[J]. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50(6): 571-581.
- [23] ZHU N, ZANG M, WANG S, et al. Modulating the structure of lamb myofibrillar protein gel influenced by psyllium husk powder at different NaCl concentrations: Effect of intermolecular interactions[J]. *Food Chemistry*, 2022, 397: 133852.
- [24] QUAN T H, BENJAKUL S, SAE-LEAW T, et al. Protein-polyphenol conjugates: Antioxidant property, functionalities and their applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 507-517.
- [25] BALANGE A, BENJAKUL S. Enhancement of gel strength of bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) surimi using oxidised phenolic compounds[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(1): 61-70.
- [26] 熊泽语, 谢晨, 陈百科, 等. 不同添加剂对未漂洗大黄鱼鱼糜品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(10): 151-158. [XIONG Zeyu, XIE Chen, CHEN Baikē, et al. Effects of different additives on the quality of non-rinsed large yellow croaker surimi[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(10): 151-158.]

- [27] LI J, MUNIR S, YU X, et al. Double-crosslinked effect of TGase and EGCG on myofibrillar proteins gel based on physico-chemical properties and molecular docking[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128655.
- [28] HE X, LV Y, LI X, et al. Improvement of gelation properties of silver carp surimi through ultrasound-assisted water bath heating [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 83: 105942.
- [29] PAN J, LIAN H, JIA H, et al. Ultrasound treatment modified the functional mode of gallic acid on properties of fish myofibrillar protein[J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126637.
- [30] 张龙腾, 洪惠, 罗永康, 等. 鱼糜副产物酶解物对冻融鲢鱼鱼糜品质的影响 [J]. *肉类研究*, 2019, 33(10): 1-7. [ZHANG Longteng, HONG Hui, LUO Yongkang, et al. Effect of addition of hydrolysates derived from surimi processing byproducts on quality changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi after multiple freeze-thaw cycles[J]. *Meat Research*, 2019, 33(10): 1-7.]
- [31] 贾慧, 夏俪宁, 李琦, 等. 两种多酚对马鲛鱼鱼糜凝胶特性的改善 [J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(10): 90-95. [JIA Hui, XIA Lining, LI Qi, et al. Improvement of the gel properties of Japanese Spanish mackerel (*Scomberomours niphonius*) surimi by two polyphenols[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(10): 90-95.]
- [32] HUANG P, WANG Z, FENG X, et al. Promotion of fishy odor release by phenolic compounds through interactions with myofibrillar protein[J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132852.