

## 花椒水提物对鳜鱼鱼糜凝胶特性的影响

韦海秋，杨明柳，周迎芹，方旭波，陈小娥，谢宁宁

### Effects of Aqueous Extract of *Zanthoxylum bungeanum* on Gel Properties of Mandarin Fish (*Siniperca chuatsi*) Surimi Gel

WEI Haiqiu, YANG Mingliu, ZHOU Yingqin, FANG Xubo, CHEN Xiaoe, and XIE Ningning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070077>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 罗非鱼与海水鱼制备混合鱼糜的凝胶特性研究

Research on gel properties of tilapia and sea fish mixed surimi

食品工业科技. 2018, 39(2): 5-9 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.002>

#### 非肌肉蛋白对未漂洗革胡子鲶鱼鱼糜凝胶特性的影响

Effects of Non-muscle Protein on Gel Properties of Unwashed *Clarias gariepinus* surimi

食品工业科技. 2020, 41(20): 46-53,71 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.008>

#### 可得然胶-魔芋胶复配对高温杀菌(120℃)鱼糜凝胶特性的影响

Effects of Curdlan and Konjac Gum Complex Gel Properties on the 120 °C-heating Surimi Products

食品工业科技. 2018, 39(17): 212-216,224 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.17.035>

#### 鱼糜凝胶形成方法及其凝胶特性影响因素的研究进展

Research Progress on the Formation Method of Surimi Gel and the Affecting Factors of Gel Properties

食品工业科技. 2019, 40(8): 292-296,303 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.049>

#### 罗非鱼与四种海水鱼混合鱼糜的凝胶特性

Gel properties of tilapia and four species of sea fish mixed surimi

食品工业科技. 2018, 39(6): 8-12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.06.002>

#### 内源性蛋白酶对鱼糜凝胶的影响及其抑制方法研究进展

Research Progress on the Effects of Endogenous Protease on Surimi Gel Properties and its Inhibition Methods

食品工业科技. 2020, 41(7): 332-337,344 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.055>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

韦海秋, 杨明柳, 周迎芹, 等. 花椒水提物对鳜鱼鱼糜凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 113–120. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070077

WEI Haiqiu, YANG Mingliu, ZHOU Yingqin, et al. Effects of Aqueous Extract of *Zanthoxylum bungeanum* on Gel Properties of Mandarin Fish (*Siniperca chuatsi*) Surimi Gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 113–120. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070077

· 研究与探讨 ·

# 花椒水提物对鳜鱼鱼糜凝胶特性的影响

韦海秋<sup>1,2</sup>, 杨明柳<sup>2</sup>, 周迎芹<sup>2,3</sup>, 方旭波<sup>4</sup>, 陈小娥<sup>1,\*</sup>, 谢宁宁<sup>2,3,\*</sup>

(1.浙江海洋大学食品与药学院,浙江舟山 316022;

2.安徽省农业科学院农产品加工研究所,安徽合肥 230031;

3.安徽省食品微生物发酵与功能应用工程实验室,安徽合肥 230031;

4.浙江国际海运职业技术学院,浙江舟山 316021)

**摘要:**为探索花椒水提物(*Zanthoxylum bungeanum* aqueous extract, ZBAE)对鳜鱼鱼糜凝胶特性的影响,研究ZBAE添加量为0、0.125%、0.25%、0.5%和1.0%时,该鱼糜凝胶持水性、凝胶强度、质构、白度、二级结构和微观结构的变化。结果表明,随着ZBAE添加量增加,持水性、凝胶强度、硬度和胶着性指标均呈现先增强再减弱的趋势,并且在0.25%时均达到最大值;傅里叶红外光谱检测表明,ZBAE的添加使 $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和无规则卷曲的相对含量值呈现先上升后下降的趋势,其中,添加量为0.125%和0.25%时,分别对应 $\beta$ -折叠和 $\alpha$ -螺旋的最高值;扫描电子显微镜结果显示,ZBAE添加量为0.25%时,该凝胶网络结构更致密,分形维数、孔隙率和孔数量均显著优于未添加组( $P<0.05$ ) ;此外,低添加量( $<0.25\%$ )的花椒水提物能够提高鱼糜凝胶的感官品质。因此,ZBAE具有改善鱼蛋白凝胶特性的潜力。

**关键词:**花椒,鳜鱼,鱼糜,凝胶特性,蛋白构象,扫描电子显微镜

中图分类号:TS251.9

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)06-0113-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070077

本文网刊:



## Effects of Aqueous Extract of *Zanthoxylum bungeanum* on Gel Properties of Mandarin Fish (*Siniperca chuatsi*) Surimi Gel

WEI Haiqiu<sup>1,2</sup>, YANG Mingliu<sup>2</sup>, ZHOU Yingqin<sup>2,3</sup>, FANG Xubo<sup>4</sup>, CHEN Xiaoe<sup>1,\*</sup>, XIE Ningning<sup>2,3,\*</sup>

(1.School of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2.Institute of Agricultural Products Processing, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China;

3.Anhui Engineering Laboratory for Functional Microorganisms and Fermented Foods, Hefei 230031, China;

4.Zhejiang International Maritime Vocational and Technical College, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** In this study, the effect of *Zanthoxylum bungeanum* aqueous extract (ZBAE) with the addition of 0, 0.125%, 0.25%, 0.5% and 1.0% on the characteristics of mandarin fish surimi gel, including water-holding capacity, gel strength, texture, whiteness, secondary structure and microstructure were performed. The results showed that the fish surimi gel's water-holding capacity, gel strength, hardness, and adhesion presented a trend of first increasing and then decreasing with the increasing of ZBAE, which had a maximum value of 0.25%. Also, FTIR analysis showed that  $\alpha$ -helix,  $\beta$ -fold, and random coil structure exerted a trend of first increasing and then decreasing, and the content of  $\beta$ -fold and  $\alpha$ -helix both reached the highest value at 0.125% and 0.25%, respectively. SEM results showed that when adding 0.25% ZBAE, the network structure was more ordered and denser than that of the non-addition group, and the fractal dimension, average

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202004a06020033);院科研平台项目(2022YL041);安徽省农业科学院科研团队项目(2022YL030);国家重点研发计划项目(2016YFD0400400);安徽省自然科学基金项目(2108085QC145);安徽省科技重大专项(202103b06020007)。

作者简介: 韦海秋(1997-),女,硕士研究生,研究方向:水产品加工,E-mail:3423154485@qq.com。

\*通信作者: 陈小娥(1968-),女,博士,教授,研究方向:海洋生物资源综合利用,E-mail:xiaoechen@163.com。

谢宁宁(1984-),男,博士,副研究员,研究方向:水产品加工,E-mail:ningxie512@163.com。

diameter and water holes were also perfect. In addition, low addition (<0.25%) of *Zanthoxylum bungeanum* water extract could improve the sensory quality of surimi gel.

**Key words:** *Zanthoxylum bungeanum*; mandarin fish; surimi; gel properties; protein conformation; scanning electron microscope

鳜鱼(*Siniperca chuatsi*), 真鲈科, 鳜属, 是广泛分布于我国各主要江河湖泊的珍贵食用鱼类, 肉质丰厚、味道鲜嫩, 营养价值高<sup>[1]</sup>。目前, 鳜鱼加工品主要为冷冻鳜鱼和即食臭鳜罐头<sup>[2-3]</sup>。2020 年全国鳜鱼养殖产业链趋于完整, 产业发展呈现规模化和标准化<sup>[4]</sup>, 将鳜鱼作为鱼糜的生产原料, 可以拓展鳜鱼产品的市场, 保证品质, 符合未来发展方向。鱼糜是鱼经过清洗、去头、去内脏、斩拌、脱水、热诱导凝胶化、熟化等工序制成的具有弹性凝胶的鱼肉产品<sup>[5-6]</sup>。鱼糜制品食用方便, 集高蛋白、低胆固醇、低脂肪等营养特点于一体<sup>[7]</sup>, 因此深受人们喜爱, 是一种很有发展潜力的水产制品。

花椒(*Zanthoxylum bungeanum* Maxim.)芸香科, 花椒属, 是重要的药食两用植物。花椒既是一味有较高价值的传统中药<sup>[8]</sup>, 也是一种在食品煮制中的常用调味品, 具有增香定麻、除腥去膻的作用<sup>[9]</sup>。此外, 由于宰杀后的原料肉具有较浓的血腥味, 在湿法腌制的过程中, 通过添加花椒能够去除腥味, 抑制异味<sup>[10]</sup>, 去除臭味<sup>[11]</sup>。周迎芹等<sup>[12]</sup>采用花椒等香辛料辅助鳜鱼湿淹发酵, 与单纯的湿腌发酵相比, 添加香辛料辅助发酵后, 臭鳜鱼鱼肉出现了较多富含香气的成分, 对鱼肉风味提升具有重要作用。因此, 花椒通常在水煮、水腌等水溶体系下发挥风味改进的作用。

花椒的主要化学成分有多酚、黄酮、生物碱、酰胺和香豆素等<sup>[13]</sup>, 而多酚为植物中广泛存在的活性成分, 具有抗氧化、抗菌、抗过敏、抗过敏等生理功效<sup>[14]</sup>。研究发现, 多酚类物质可以有效提高蛋白质的交联<sup>[15-16]</sup>, 多酚物质的氧化中间产物醌类, 能够促进蛋白质中赖氨酸、蛋氨酸和丝氨酸的氧化交联, 从而形成稳定的网络结构<sup>[17]</sup>。植物多酚在食品领域已广泛应用, 现有研究表明<sup>[18]</sup>, 添加适宜浓度的绿原酸、咖啡酸和氧化氯原酸、氧化咖啡酸均可提升马鲛鱼鱼糜凝胶特性, 程荻等<sup>[19]</sup>将茶多酚、苹果多酚和葡萄多酚应用于鱼糜制品中, 改善了储藏品质, 陈媚依等<sup>[20]</sup>将鹧鸪茶多酚提取物应用于鱼糜制品冷藏保鲜, 结果显示该多酚提取物能有效地抑菌, 减缓蛋白质和脂肪氧化变质, 并保持其色泽稳定。但是, 花椒提取物对蛋白凝胶特性影响的研究仍然比较匮乏, 未成系统。

目前, 花椒提取物对鳜鱼鱼糜凝胶特性的影响鲜有报道。在鱼糜制品中添加花椒提取物, 因其含有的多酚、黄酮等成分能有效提高鱼糜凝胶保水性和凝胶强度, 同时丰富鱼糜制品的营养成分、增加其功效性。因此, 本研究采用水提法制备花椒提取物<sup>[21-22]</sup>, 在鳜鱼鱼糜中加入不同添加量的花椒水提物冻干粉,

分析其对鱼糜凝胶的白度值、凝胶强度、持水性、质构(TPA)、蛋白质二级结构和微观结构的影响, 旨在为花椒提取物应用于鳜鱼鱼糜凝胶的生产提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜鳜鱼 购于安徽省池州市; 食盐、花椒 合肥万科广场永辉超市; 塑料肠衣(折径 40 mm, 直径 25 mm) 乐陵市莹源祥食品有限公司。

DHG-9245A 电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司; JYS-A800 绞肉机 九阳股份有限公司; H1750R 离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; CR-400 色差分析仪 日本 Konica Minolta 公司; TA.XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro System 公司; PD-ICE 冷冻干燥机 北京德天佑科技发展有限公司; IS5 傅里叶红外光谱仪 日本分光株式会社; SU8010 扫描电子显微镜 株式会社日立制作所。

### 1.2 实验方法

1.2.1 花椒水提物制备 花椒水提物(*Zanthoxylum bungeanum* aqueous extract, ZBAE)的制备方法, 参照文献[23-24]方法并做合理改动。首先, 将花椒放置于 70 ℃ 恒温干燥箱中干燥 48 h 后, 室温冷却, 随后将花椒搅碎, 并按 1:10(w/v)的比例加入去离子水, 常温浸泡 24 h, 抽滤后, 取液体部分转至旋转蒸发仪(45 ℃、90 r/min)进行浓缩, 并于-40 ℃ 冷冻干燥成 ZBAE 粉末, -20 ℃ 保存备用。

1.2.2 鱼糜凝胶制备 鱼糜凝胶的制备过程参照 Liang 等<sup>[25]</sup>文献的报道并做合理改动。将新鲜鳜鱼头、尾和内脏去除, 取鱼肉, 用水清洗后, 放入 4 ℃ 预冷的蒸馏水中漂洗 2 次, 取出沥干水, 切成小块(2 cm×2 cm×2 cm), 放入绞肉机中先低速搅碎 30 s, 再加入鱼肉重量 2.5% 的氯化钠, 高速搅碎 30 s; 随后, 分别加入 0%、0.125%、0.25%、0.5%、1%(按鱼糜质量计算)的花椒水提物冻干粉, 高速搅 30 s, 充分混匀; 搅拌过程的温度控制在 4~10 ℃; 将鱼糜灌入折径为 40 mm, 直径为 25 mm 的塑料肠衣中, 鱼肠长度为 25 cm 左右, 放置于 4 ℃ 冰箱, 使其平衡 4 h。之后, 采用两段水浴加热方式进行热诱导, 即 40 ℃ 加热 30 min 使鱼糜凝胶化后, 立即转入 90 ℃ 水浴加热 30 min 使其熟化, 加热结束后转至冰水中冷却 30 min 制备出鱼糜凝胶, 放置于 4 ℃ 保存, 于 48 h 内完成指标测定。添加量为 0% 时, 为对照组。

1.2.3 持水性测定 参考 Yi 等<sup>[26]</sup>方法, 称取 5 g 鱼糜凝胶( $m_1$ , g), 置于 3 层滤纸间包裹好, 放入 50 mL 的离心管中, 置于离心机中离心(6000×g, 4 ℃)10 min,

离心后准确称质量( $m_2$ , g)。持水性按式(1)计算:

$$\text{持水力}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

**1.2.4 凝胶强度测定** 参照 Balange 等<sup>[27]</sup>方法将热诱导蛋白凝胶样品切成直径和厚度均为 25 mm 的圆柱体, 放在质构仪上测定凝胶强度, 采用球形探头(P/0.5S), 使用 TA.XT Plus 质构仪测定。具体参数设定: 触发类型 Auto(Force), 触发力 5.0 g, 测试前速度 2.0 mm/s, 测试中速度 5.0 mm/s, 测试后速度 2.0 mm/s, 变形量 20 mm。

**1.2.5 质构特性分析** 参照杨明柳等<sup>[28]</sup>的方法, 将热诱导蛋白凝胶样品在室温下平衡 1 h, 将其切成 1.5 cm 高的圆柱体, 放在质构仪上测定硬度、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性、回弹性, 使用直径 35 mm 的圆柱形探头(p/50)。要求: 测试前速率 1.0 mm/s, 穿刺中速率 5.0 mm/s, 测试后速率 5.0 mm/s。

**1.2.6 白度测定** 参考翟璐等<sup>[29]</sup>的方法, 取出 4 ℃ 存放的鱼糜凝胶样品室温下平衡 1 h, 切成高为 1 cm 左右的圆柱体。使用手持式色差仪测定鱼糜凝胶切面的  $L^*$ (亮度)、 $a^*$ (红/绿色)、 $b^*$ (黄/蓝色)值。按式(2)计算。

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

**1.2.7 鱼糜凝胶蛋白结构分析** 参考 Guan 等<sup>[30]</sup>的方法。将鳜鱼鱼糜凝胶样品冷冻干燥, 称取各组试样与溴化钾(比例 1:100)混合压成透明薄片, 将样品放入红外光谱仪中测试(600~4000  $\text{cm}^{-1}$ )。

**1.2.8 扫描电子显微镜观察** 参考周绪霞等<sup>[31]</sup>的方法取适量鱼糜凝胶切成 1  $\text{mm}^3$  的小块, 于 4 ℃ 下用 2.5% 戊二醛固定 24 h, 用磷酸缓冲液(0.1 mol/L, pH7.0)漂洗 15 min, 重复 3 次; 依次用体积分数 30%、50%、70%、80% 和 90% 的乙醇溶液梯度进行脱水 15 min, 最后用无水乙醇脱水 30 min。临界点干燥, 贴样、喷金后用扫描电镜观察。采用图像分析软件 Image J 及其插件 Fractal Box Count 插件测量分形维数对扫描电镜图片进行处理。对扫描电镜图片进行分析前, 先对扫描电镜图片进行阈值化和二值化处理。分形维数 Df 和孔数量、孔隙率参考 Zhang 等<sup>[32]</sup>的方法, 按式(3)、(4)进行计算。

$$D = -\lg N_e / \lg \varepsilon \quad \text{式 (3)}$$

$$Df = D + 1 \quad \text{式 (4)}$$

式中:  $\varepsilon$  表示尺度;  $N_e$  表示一定尺度下含有目标像素的盒子数; D 表示直线斜率; Df 表示分形维数。

**1.2.9 感官评定** 将各组鳜鱼鱼糜凝胶切片(5 mm 厚), 置于一次性塑料盘中, 室温平衡 30 min 后由 10 名食品专业学生组成评定小组, 主要对色泽、气味、组织状态和表观特征进行评判, 每项指标的得分及评定标准见表 1<sup>[33]</sup>。

表 1 感官评定标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of mandarin fish surimi

指标	0~20分	21~40分	41~60分	61~80分	81~100分
色泽	乳白色较暗, 颜色不均匀, 有大量红棕, 无光泽	乳白色稍暗, 有少许红棕, 光泽度一般	乳白色, 光泽度较好	光泽亮白均匀, 有光泽	
气味	腥味较浓	有腥味	稍有腥味	几乎无腥味	无腥味
组织形态	切面不致密, 气孔较大	切面较致密, 小气孔较多, 气孔分布不均	切面致密, 有少量小气孔, 分布基	切面致密, 少量小气孔, 分布均匀	切面致密, 无小气孔
表观特征	切面粗糙, 颗粒感明显	切面较粗糙, 颗粒感较明显	切面较光滑, 切面光滑, 有颗粒感	切面光滑, 有颗粒感	切面平滑, 无颗粒感

### 1.3 数据处理

采用 SPSS 软件进行数据处理, 用 Duncan 进行多重比较( $P<0.05$  差异显著性), 采用 PS, Origin Pro 16.0 软件绘图, 每组实验重复 3 次, 实验数据以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 ZBAE 的添加量对鳜鱼鱼糜凝胶持水性的影响

持水性能够反映蛋白质的结合水能力, 可以直观评价鱼糜凝胶的质量和品质, 不同添加量的 ZBAE 对鱼糜凝胶持水性的影响如图 1 所示。随着 ZBAE 添加量的增加, 鱼糜凝胶的持水性呈现先升高后降低的变化趋势。当 ZBAE 添加量为 0.125% 和 0.25% 时, 鱼糜凝胶持水性显著性升高( $P<0.05$ ), 推测可能是 ZBAE 中的多酚含有丰富的活性羟基, 能够与鱼糜蛋白较好的结合, 截留更多水分, 这与程荻等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。当 ZBAE 添加量大于 0.25% 时, 鱼糜凝胶的持水性逐渐降低, 这可能是 ZBAE 与鱼糜蛋白分子间相互作用, 高浓度的多酚与鱼糜蛋白过度结合, 破坏蛋白质空间结构及造成鱼糜蛋白网络结构不稳定, 水的束缚能力减弱<sup>[34]</sup>, 与此类似, 高添加量的没食子酸对鱼糜凝胶有不利影响, 持水性降低<sup>[35]</sup>。且过量的 ZBAE 也可能引起不良沉淀聚集<sup>[36]</sup>, 导致凝胶网络松散, 体系的持水性下降。

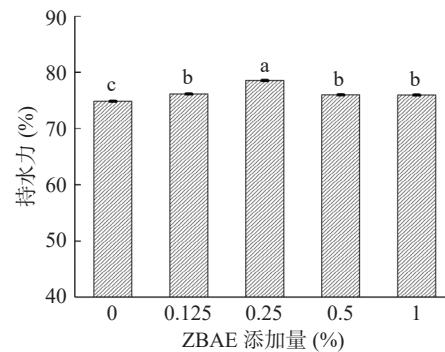


图 1 ZBAE 添加量对鳜鱼鱼糜凝胶持水性的影响

Fig.1 Effect of ZBAE addition on water holdability of surimi gel of mandarin fish

注: 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ); 图 2~图 3 同。

## 2.2 ZBAE 的添加量对鳜鱼鱼糜凝胶强度的影响

凝胶强度是鱼糜凝胶的重要品质指标,凝胶强度定义为破断力与凹陷距离的乘积,在一定范围内,蛋白质网络结构越致密,凝胶强度就越大<sup>[37]</sup>。由图2可知,与对照组相比,添加ZBAE能不同程度增强鳜鱼鱼糜凝胶强度。随着添加量的增加,鱼糜凝胶的凝胶强度呈现先上升后下降的变化趋势。当添加量为0.25%时,凝胶强度达到最大值1364 g·cm,比对照组增加61%。这可能是ZBAE中的多酚物质与鱼糜蛋白相互作用,促使鱼糜形成相对致密的凝胶网络结构<sup>[38-39]</sup>,增强鱼糜凝胶强度。有文献报道,多酚-蛋白质复合物能够填充鱼糜凝胶网状结构的空隙,形成致密而稳定的三维网状结构,使不易流动水更容易被捕获,游离水的转移减少,持水性能增加,产生强化的凝胶强度值<sup>[40]</sup>。持水性与凝胶强度变化规律一致,这与文献[41-42]报道一致。但是,当ZBAE添加量大于0.25%,鱼糜凝胶的凝胶强度下降,这可能是由于过多的ZBAE自我聚集导致蛋白质交联能力下降,不利于鱼糜凝胶网络结构的形成,使得鱼糜的凝胶强度下降<sup>[43]</sup>。

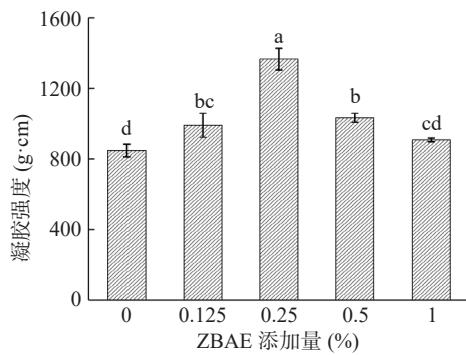


图2 ZBAE添加量对鳜鱼鱼糜凝胶强度的影响

Fig.2 Effect of ZBAE addition on gel strength of surimi of mandarin fish

## 2.3 ZBAE 的添加量对鳜鱼鱼糜凝胶质构 (TPA) 的影响

质构特性是鱼糜凝胶品质的重要参数,能间接反映出蛋白基质的结构完整性及与其他成分相结合的状态。由表2可知,添加ZBAE后鱼糜凝胶的硬度、弹性和胶着性,都呈现先增加后减小的趋势,且均在添加量为0.25%时达到最大值,分别为13155.03 g、0.910%、8480.584 g,较对照组分别提高

了6.927%、1.568%、7.933%。这与凝胶强度指标变化趋势结果一致。这些结果可能是ZBAE中含有的花椒多酚与巯基发生非二硫共价交联,生成蛋白质-硫-多酚-硫-蛋白质交联物,在蛋白质分子间起连接作用,增强了蛋白质间的聚合<sup>[44]</sup>,从而提高鱼糜凝胶强度、硬度、弹性和胶着性。有研究指出,低浓度多酚能够增强鱼糜凝胶的疏水相互作用,有利于鱼糜蛋白的凝胶化<sup>[45]</sup>;随着ZBAE继续增加时,鱼糜凝胶的硬度、弹性和胶着性随之下降,这可能是ZBAE中过量多酚使蛋白质发生疏水性聚集,并且过剩的多酚物质屏蔽鱼糜蛋白中的巯基、氨基等反应性官能团,阻碍蛋白之间的交联,使鱼糜凝胶蛋白网络结构变得无序、松散,由此降低鱼糜凝胶的质构特性<sup>[46]</sup>。此外,该鱼糜凝胶的内聚性、咀嚼性和回弹性分别在ZBAE添加量为0.5%、1.0%、1.0%达到最大值,这些指标可以反映食物保持完整的性质,表明鱼糜凝胶在添加ZBAE后呈较稳定状态。

## 2.4 ZBAE 的添加量对鳜鱼鱼糜白度的影响

不同添加量ZBAE对鱼糜凝胶白度的影响如图3所示。添加ZBAE后,与空白组相比,鱼糜凝胶的白度值在低添加量(0.125%)时升高,随着ZBAE质量分数的增加而逐渐降低,ZBAE的添加降低了鱼糜凝胶的白度,这与水提物自身的颜色呈现淡红棕色有关,也可能是添加了ZBAE后,ZBAE中的多酚类化合物自身氧化从而导致鱼糜凝胶颜色加重,白度降低。白度是鱼糜制品的主要指标之一,因此ZBAE的添加量不宜太高。白度与前面三项指标变化规律不一致,这与已有文献相同<sup>[47]</sup>。

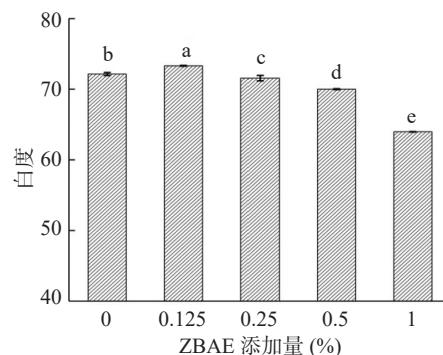


图3 ZBAE添加量对鳜鱼鱼糜凝胶白度的影响

Fig.3 Effect of ZBAE addition on gel whiteness of surimi of mandarin fish

表2 ZBAE添加量对鳜鱼鱼糜凝胶质构的影响

Table 2 Effect of ZBAE addition on the gel texture of mandarin fish surimi

添加量(%)	硬度(g)	弹性	内聚性	胶着性(g)	咀嚼性(g)	回弹性
0	12302.737±23.145 <sup>d</sup>	0.896±0.003 <sup>b</sup>	0.639±0.002 <sup>c</sup>	7857.292±16.785 <sup>d</sup>	7054.389±18.696 <sup>c</sup>	0.250±0.000 <sup>b</sup>
0.125	12807.288±26.179 <sup>b</sup>	0.885±0.001 <sup>c</sup>	0.618±0.002 <sup>d</sup>	7914.849±12.682 <sup>c</sup>	6958.516±24.178 <sup>d</sup>	0.231±0.001 <sup>c</sup>
0.25	13155.030±32.084 <sup>a</sup>	0.910±0.000 <sup>a</sup>	0.645±0.001 <sup>ab</sup>	8480.584±16.358 <sup>a</sup>	7659.669±19.494 <sup>b</sup>	0.250±0.002 <sup>b</sup>
0.5	12363.437±0.696 <sup>c</sup>	0.866±0.003 <sup>d</sup>	0.648±0.001 <sup>a</sup>	8007.387±15.787 <sup>b</sup>	6934.245±4.134 <sup>d</sup>	0.252±0.002 <sup>ab</sup>
1	12322.777±11.365 <sup>cd</sup>	0.861±0.002 <sup>d</sup>	0.644±0.000 <sup>b</sup>	7931.765±12.187 <sup>c</sup>	8302.536±18.800 <sup>a</sup>	0.257±0.003 <sup>a</sup>

注:同一指标不同字母表示差异显著( $P<0.05$ );表4同。

## 2.5 鱼糜凝胶蛋白结构分析

图 4 中凝胶样品的特征吸收峰位置几乎没有变化, 每个样品的特征吸收峰均在 3272、2925、1633、1519、1392、1234 cm<sup>-1</sup> 左右, 说明 ZBAE 的添加引起特征吸收峰的红移或蓝移的程度微小。其中, 1651~1660、1600~1640、1661~1700 和 1641~1650 cm<sup>-1</sup> 处分别为  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠、 $\beta$ -转角和无规则卷曲 4 种空间构象的波段。由图 5 可知, 相较于对照组, 添加 ZBAE(0.125%、0.25%、0.5% 和 1%) 后, 鱼糜凝胶蛋白的  $\alpha$ -螺旋结构的含量分别增加 3.64%、6.73%、4.31% 和 1.14%,  $\beta$ -折叠结构分别增加 2.91%、1.65%、1.27% 和 1.41%,  $\beta$ -转角结构分别降低 60.12%、59.38%、44.17% 和 26.32%, 无规则卷曲的相对含量分别增加 2.59%、2.71%、2.42% 和 1.17%;  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和无规则卷曲的相对含量呈先上升后下降的趋势, 而  $\beta$ -转角则相反。这与汲晨洋等<sup>[48]</sup>研究的添加紫菜粉后的凝胶蛋白质二级结构变化结果相似。结合上述分析结果, 持水性和凝胶强度在 ZBAE 添加量 0.25% 时均达到峰值, 说明  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠结构的相对含量与持水性和凝胶强度存在一定相关性。随着 ZBAE 添加量的增加(0.25%~1%),  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠含量的增加量变低, 可能是过量的添加

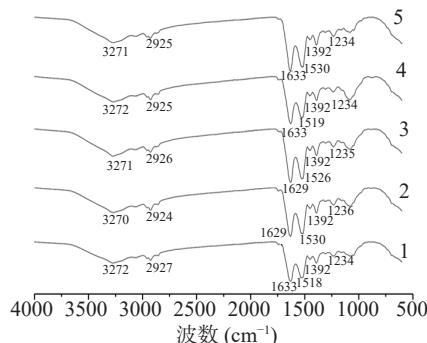


图 4 鳜鱼鱼糜凝胶蛋白的红外光谱分析

Fig.4 Infrared spectrum analysis of gel protein of surimi of mandarin fish

注: 1~5 依次表示 ZBAE 添加量为 0%、0.125%、0.25%、0.5%、1% 的鳜鱼鱼糜凝胶。

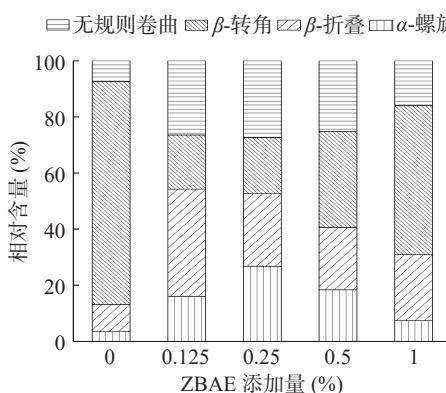


图 5 ZBAE 添加量对蛋白质二级结构含量的变化

Fig.5 Changes of ZBAE supplemental level on protein secondary structure content

ZBAE 会阻碍凝胶蛋白的聚集, 凝胶结构变得松散以至于水分子无法留在凝胶网络结构的孔隙中, 导致高添加量的 ZBAE 样品凝胶强度、持水性较低。

## 2.6 扫描电子显微镜分析

不同添加量的 ZBAE 对微观结构的影响如图 6 所示, 分形维数表示的是鱼糜凝胶中蛋白质的聚集程度, 分形维数越大, 表示蛋白质聚集度越大<sup>[49]</sup>, 随着 ZBAE 的含量从 0% 增加到 0.25%, 分形维数从 2.797 增加到 2.839, 且当 ZBAE 添加量为 0.25% 时, 鱼糜凝胶样品的孔径最为致密且表面光滑, 据推测可能是由于 ZBAE 中的多酚与蛋白质生成共价键, 起到“架桥”作用, 增强蛋白质分子间的交联, 从而导致鱼糜凝胶表面孔径变小, 形成有序且致密的网状结构。这与王育信<sup>[50]</sup>在鱼糜中分别添加 0.3% 间苯三酚和 1%

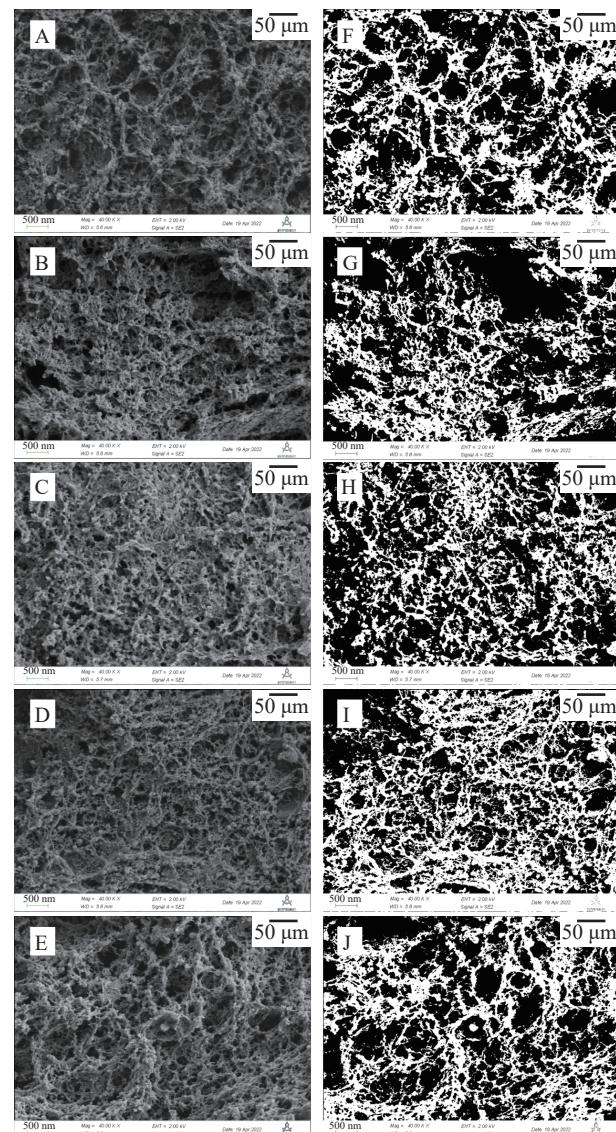


图 6 鳜鱼鱼糜凝胶微观结构图(40000 $\times$ )

Fig.6 Microstructures of mandarin fish surimi gel with different ZBAE concentrations (40000 $\times$ )

注: A~E 依次表示 ZBAE 添加量为 0%、0.25%、0.5%、1% 鱼糜凝胶微观结构图; F~J 依次表示 ZBAE 添加量 0%、0.25%、0.5%、1% 鱼糜凝胶微观对应的二值化图像。

褐藻多酚提取物使得鱼糜凝胶结构更为致密光滑研究结果一致。研究表明,鱼糜蛋白的交联与凝胶强度和硬度有关,凝胶网络越细密紧致,凝胶硬度越大<sup>[51]</sup>。此外,鱼糜蛋白网络结构越致密越能捕获更多的水分子,从而使鱼糜凝胶具有更高的弹性和持水性。从微观图6C和图6H可看出,ZBAE添加量为0.25%时,鱼糜的微观结构最为致密,鱼糜凝胶的强度、持水性、硬度和弹性最好,与前面的试验结果一致。随着ZBAE添加量继续增加,鱼糜凝胶结构表面呈粗糙且凹凸不平等现象。表3显示,在添加量大于0.25%后,孔隙率和孔数量逐渐下降,这表明鱼糜凝胶表面孔洞大小不均,孔径变大,这可能是由于较多的多酚物质阻碍了蛋白质的结合,从而使蛋白结构变得松散无序,分布不均匀,空隙增大。这与前面硬度、弹性和胶着性等质构参数下降结果一致。

表3 不同ZBAE添加量的鱼糜凝胶的分形维数、孔隙率和孔数量

Table 3 Fractal dimension, porosity and number of pores of surimi gel with different ZBAE addition levels

ZBAE添加量(%)	分形维数DF	孔隙率	孔数量
0	2.797±0.005 <sup>b</sup>	0.408±0.008 <sup>d</sup>	81.333±1.247 <sup>c</sup>
0.125	2.828±0.008 <sup>a</sup>	0.449±0.004 <sup>b</sup>	97.000±0.816 <sup>b</sup>
0.250	2.839±0.006 <sup>a</sup>	0.470±0.011 <sup>a</sup>	99.667±1.700 <sup>a</sup>
0.500	2.837±0.005 <sup>a</sup>	0.433±0.003 <sup>c</sup>	83.000±0.816 <sup>c</sup>
1.000	2.818±0.022 <sup>ab</sup>	0.416±1.005 <sup>d</sup>	68.000±0.816 <sup>d</sup>

注:同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.7 ZBAE添加量对鱠鱼鱼糜凝胶感官品质的影响

由表4可以看出,不同ZBAE添加量对鱠鱼鱼糜凝胶感官影响显著( $P<0.05$ ),随着ZBAE添加量的增加,色泽、气味、组织形态均呈先上升后下降的趋势并分别在添加量0.125%、0.25%、0.25%处达到最大值。当ZBAE添加量为0.125%时,感官质量总分最高,此时鱠鱼鱼糜凝胶切面结构紧密、无气孔,表面有光泽,带有鱠鱼和花椒特有风味,口感比较细腻;ZBAE添加量为0.25%时,气味和组织形态表现为最佳;添加量为0.5%或更高时,由于ZBAE呈红棕色,随着添加量的增加,鱼糜凝胶白度值降低,在感官上色泽分值会降低,还可能是因ZBAE含量过多会破坏蛋白凝胶结构或ZBAE中的活性羟基竞争水分引起组织形态、表观特征品质下降,即产品各项指标呈现劣化趋势。结合各指标评分情况综合考虑,低

表4 ZBAE添加量对鱠鱼鱼糜凝胶感官品质的影响(分)

Table 4 Effect of ZBAE addition on sensory quality of mandarin fish surimi gel (scores)

指标	0	0.125%	0.25%	0.5%	1%
色泽	82.30±1.10 <sup>b</sup>	84.00±1.10 <sup>a</sup>	80.50±1.02 <sup>c</sup>	78.80±0.98 <sup>d</sup>	77.90±1.22 <sup>d</sup>
气味	76.20±1.08 <sup>c</sup>	79.70±0.90 <sup>b</sup>	81.00±1.00 <sup>a</sup>	78.80±0.75 <sup>b</sup>	75.50±1.02 <sup>c</sup>
组织形态	83.60±0.66 <sup>b</sup>	84.40±0.66 <sup>a</sup>	84.90±0.70 <sup>a</sup>	80.90±0.83 <sup>c</sup>	79.90±0.70 <sup>d</sup>
表观特征	84.70±0.64 <sup>a</sup>	83.20±0.98 <sup>b</sup>	83.00±0.63 <sup>b</sup>	80.20±0.87 <sup>c</sup>	77.10±1.04 <sup>d</sup>
总分	81.70±0.42 <sup>c</sup>	82.83±0.43 <sup>a</sup>	82.35±0.34 <sup>b</sup>	79.68±0.58 <sup>d</sup>	77.60±0.63 <sup>d</sup>

添加量(<0.25%)ZBAE对鱼糜凝胶组织状态有明显作用,可改善肉质紧实程度,提高鱼糜凝胶感官品质。

## 3 结论

在鱠鱼鱼糜中添加适量的ZBAE,兼有鱠鱼和花椒独特风味,同时添加ZBAE对鱼糜制品的持水性、凝胶强度、TPA以及白度值指标均有一定影响。添加0.25%ZBAE明显增加了鱼糜的凝胶特性,鱼糜凝胶的硬度、弹性和胶着性均达到最大值,分别为13155.03 g、0.910%和8480.584 g。傅里叶红外光谱结果显示,与空白组相比,添加ZBAE有利于保留鱼糜凝胶中 $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠和无规则卷曲结构,增强凝胶截留水分子的能力。扫描电镜结果显示,添加0.25%ZBAE形成的鱼糜凝胶样品孔径最为致密,表面平整光滑。但过量添加ZBAE,会阻碍蛋白质结合,引起凝胶强度下降。综合考虑,添加0.25%的ZBAE能够改善鱼糜制品品质,为丰富鱼糜制品加工提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 周迎芹,杨明柳,殷俊峰,等.清酒乳杆菌对臭鱠鱼食用品质及挥发性风味物质的影响[J].中国食品学报,2021,21(9):160-168. [ZHOU Y Q, YANG M L, YIN J F, et al. Effects of *Lactobacillus* sake on edible quality and volatile flavor compounds of stinky mandarin fish[J]. Journal of Chinese Food Science, 2021, 21(9): 160-168.]
- [2] 吴永祥,俞昌浩,王婷婷,等.传统发酵臭鱠鱼的研究概述[J].食品与发酵工业,2019,45(19):299-306. [WU Y X, YU C H, WANG T T, et al. Research overview of traditionally fermented stinky mandarin fish[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(19): 299-306.]
- [3] 周迎芹,杨明柳,殷俊峰,等.臭鱠鱼低温发酵过程中品质及挥发性物质的变化[J].中国食品学报,2020,20(4):179-186. [ZHOU Y Q, YANG M L, YIN J F, et al. Changes in quality and volatile substances of stinky mandarin fish during low-temperature fermentation[J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(4): 179-186.]
- [4] 黄嘉杨,朱耀武,宋湘健.鱠鱼人工繁育与养殖技术总结[J].当代水产,2021,46(12):68-70. [HUANG J Y, ZHU Y W, SONG X J. Summary of artificial breeding and culture technology of mandarin fish[J]. Contemporary Aquatic Products, 2021, 46(12): 68-70.]
- [5] 李双,李锋,焦阳.不同添加物对鮰鱼鱼糜及鱼糜制品介电特性及水分迁移率的影响[J].食品科学,2020,41(15):54-63. [LI S, LI F, JIAO Y. Effects of different additives on the dielectric properties and water mobility of silver carp surimi and surimi products [J]. Food Science, 2020, 41(15): 54-63.]
- [6] GUO X J, SHI L, XIONG S B, et al. Gelling properties of vacuum-freeze dried surimi powder as influenced by heating method and microbial transglutaminase[J]. LWT, 2018, 99: 105-111.
- [7] 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. [YI S M, YE B B, LI X P, et al. Research progress on moisture in surimi and surimi products [J]. Chinese Journal of Food Science, 2019, 19(12): 304-

- 310.]
- [8] 宋丽雅, 倪正, 樊琳娜, 等. 花椒抑菌成分提取方法及抑菌机理研究[J]. 中国食品学报, 2016, 16(3): 125–130. [SONG L Y, NI Z, FAN L N, et al. Study on the extraction method and antibacterial mechanism of antibacterial components of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Chinese Journal of Food Science, 2016, 16(3): 125–130.]
- [9] 刘乐, 徐未芳, 范建凤, 等. 花椒多酚提取及其功能活性研究进展[J]. 农业技术与装备, 2020(2): 9–10, 12. [LIU L, XU W F, FAN J F, et al. Research progress on the extraction of polyphenols from *Zanthoxylum bungeanum* and their functional activities[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2020(2): 9–10, 12.]
- [10] 史奎春, 林苏荣. 香辛料在肉制品中的应用探讨[J]. 中国调味品, 2010, 35(4): 39–42. [SHI K C, LIN S R. Discussion on the application of spices in meat products[J]. China Seasoning, 2010, 35(4): 39–42.]
- [11] 李宏盛, 王文勇, 魏丽容. 肉制品中香辛料的应用研究现状[J]. 农业工程技术, 2017, 37(26): 70–71. [LI H S, WANG W Y, WEI L R. Research status of application of spices in meat products[J]. Agricultural Engineering Technology, 2017, 37(26): 70–71.]
- [12] 周迎芹, 鄢嫣, 殷俊峰, 等. 发酵方式对黄山臭鳜鱼菌群组成及挥发性物质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(10): 36–43. [ZHOU Y Q, YAN Y, YIN J F, et al. Effects of fermentation methods on the composition of flora and volatile substances in Huangshan stinky mandarin fish[J]. Meat Research, 2019, 33(10): 36–43.]
- [13] 狄科. 花椒中多酚类物质的提取纯化及活性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. [DI K. Extraction, purification and activity study of polyphenols in *Zanthoxylum bungeanum*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]
- [14] 李文慧, 刘飞, 李应彪, 等. 植物多酚对肉制品蛋白氧化的抑制机理及其延长货架期的应用[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 266–272. [LI W H, LIU F, LI Y B, et al. Inhibitory mechanism of plant polyphenols on protein oxidation of meat products and its application in extending shelf life[J]. Food Science, 2019, 40(21): 266–272.]
- [15] WATTANA T D, SOOTTAWAT B. Effect of oxidized kiam wood and cashew bark extracts on gel properties of gelatin from cuttlefish skins[J]. Food Bioscience, 2014, 7: 95–104.
- [16] HARSHADRAI M R, DÖRTE C, SASCHA R, et al. Interactions of different phenolic acids and flavonoids with soy proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2002, 30(3): 137–150.
- [17] MAQSOOD S, BENJAKUL S, SHAHIDI F. Emerging role of phenolic compounds as natural food additives in fish and fish products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(2): 162–179.
- [18] 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 H, XIA L N, LI Q, et al. Two kinds of polyphenols improve the gel properties of mackerel surimi[J]. Food and Fermentation Industry, 2018, 44(10): 90–95.]
- [19] 程荻, 李维, 杨宏. 3 种植物多酚对鱼糜制品储藏品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(1): 119–124. [CHENG D, LI W, YANG H. Effects of three kinds of plant polyphenols on the storage quality of surimi products[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(1): 119–124.]
- [20] 陈媚依, 杨宏. 鹤鹑茶提取物对鲢鱼鱼糜制品保鲜作用的研究[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 131–137. [CHEN M Y, YANG H. Study on the preservation effect of partridge tea extract on silver carp surimi products[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(11): 131–137.]
- [21] 千惠, 殷田田. 花椒叶中多酚成分提取及功能性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(3): 196–199. [QIAN H, YIN T T. Extraction and functional study of polyphenols from *Zanthoxylum bungeanum* leaves[J]. China Condiments, 2022, 47(3): 196–199.]
- [22] 郭宏焱, 李冬, 雷雄, 等. 花椒多酚提取工艺响应面优化及动力学分析[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 247–253. [GUO H Y, LI D, LEI X, et al. Response surface optimization and kinetic analysis of polyphenol extraction process from *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Food Science, 2018, 39(2): 247–253.]
- [23] 王文杰, 焦士蓉, 孙博瑞, 等. 花椒总多酚的提取工艺优化及其抑菌作用[J]. 中国调味品, 2021, 46(8): 37–42. [WANG W J, JIAO S R, SUN B R, et al. Extraction process optimization and antibacterial effect of total polyphenols from *Zanthoxylum bungeanum*[J]. China Condiments, 2021, 46(8): 37–42.]
- [24] 王孟, 吕倩, 董林娟. 花椒醇提物抗氧化性分析及应用[J]. 盐科学与化工, 2020, 49(3): 13–16. [WANG M, LÜ Q, DONG L J. Analysis and application of antioxidant activity of alcohol extract of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Salt Science and Chemical Industry, 2020, 49(3): 13–16.]
- [25] LIANG F, ZHU Y J, YE T, et al. Effect of ultrasound assisted treatment and microwave combined with water bath heating on gel properties of surimi-crabmeat mixed gels[J]. LWT, 2020, 133 (prepublish): 110098.
- [26] YI S M, LI Q, QIAO C P, et al. Myofibrillar protein conformation enhance gel properties of mixed surimi gels with *Nemipterus virgatus* and *Hoploptilichthys molitrix*[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105924.
- [27] BALANGE, A K, BENJAKUL, et al. Effect of oxidised phenolic compounds on the gel property of mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) surimi[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(6): 1059–1064.
- [28] 杨明柳, 周迎芹, 方旭波, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鳜鱼鱼糜凝胶的品质影响[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 37–44. [YANG M L, ZHOU Y Q, FANG X B, et al. Effect of transglutaminase on the quality of mandarin fish surimi gel[J]. Food Science, 2021, 42(12): 37–44.]
- [29] 翟璐, 杨加成, 陈康, 等. 金枪鱼纳米鱼骨钙对鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(5): 180–188. [ZHAI L, YANG J C, CHEN K, et al. Effects of tuna nanoscale fish bone calcium on gel properties of surimi products[J]. Chinese Journal of Food Science, 2022, 22(5): 180–188.]
- [30] GUAN A Y, MEI K L, LÜ M C, et al. The effect of electron beam irradiation on IgG binding capacity and conformation of tropomyosin in shrimp[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 250–254.

- [31] 周绪霞, 陈红, 陈小草, 等. 谷氨酰胺转氨酶对白姑鱼鱼糜蛋白-油脂复合凝胶特性及微观结构的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 106–113. [ZHOU X X, CHEN H, CHEN X C, et al. Effects of glutamine transaminase on the properties and microstructure of surimi protein-oil composite gels of white cod surimi[J]. Chinese Journal of Food Science, 2020, 20(6): 106–113.]
- [32] ZHANG Y M, DONG M, ZHANG X Y, et al. Effects of inulin on the gel properties and molecular structure of porcine myosin: A underlying mechanisms study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105974.
- [33] 杨峰. 泡椒对鱼糜凝胶品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [YANG F. The effect of pickled pepper on the quality of surimi gel[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [34] 陈媚依. 鹌鹑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 M Y. Effects of partridge tea extract on gel properties and preservation quality of surimi products[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.]
- [35] 钟坦君, 洪鹏志, 周春霞, 等. 没食子酸对金线鱼鱼糜凝胶特性及其体外消化产物活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 76–84. [ZHONG T J, HONG P Z, ZHOU C X, et al. Effects of gallic acid on the gel properties of surimi and the activity of *in vitro* digestion products of goldfish surimi[J]. Food Science, 2022, 43(14): 76–84.]
- [36] BALANGE A, BENJAKUL S. Enhancement of gel strength of bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) surimi using oxidised phenolic compounds[J]. *Food Chemistry*, 2008, 113(1): 61–70.
- [37] 尤娟, 姜雪英, 尹涛, 等. 葡聚糖及其糖基化修饰对白鮀鱼糜凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(12): 69–75. [YOU J, JIANG X Y, YIN T, et al. The effect of dextran and its glycosylation modification on the gel properties of silver carpsurimi[J]. Chinese Journal of Food Science, 2019, 19(12): 69–75.]
- [38] BUAMARD N, BENJAKUL S. Cross-linking activity of ethanolic coconut husk extract toward sardine (*Sardinella albella*) muscle proteins[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2017, 41(2): e12283.
- [39] 孙科, 闫方华, 许晓敏, 等. 苹果多酚改性蛋清改善鲅鱼鱼糜的凝胶性质[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 210–217, 164. [SUN K, YAN F H, XU X, et al. Improvement of gel properties of surimi by apple polyphenols modified egg white[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 210–217, 164.]
- [40] CAO H W, JIAO X D, FAN D M, et al. Microwave irradiation promotes aggregation behavior of myosin through conformation changes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 11–19.
- [41] 宋春勇, 洪鹏志, 周春霞, 等. 负载白藜芦醇的红花籽油乳液对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 102–109. [SONG C Y, HONG P Z, ZHOU C X, et al. Effects of resveratrol-loaded safflower seed oil emulsion on gel quality of surimi surimi[J]. Food Science, 2022, 43(24): 102–109.]
- [42] 宋春勇, 洪鹏志, 周春霞, 等. 大豆油和预乳化大豆油对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 90–97. [SONG C Y, HONG P Z, ZHOU C X, et al. Effects of soybean oil and pre-emulsified soybean oil on the gel quality of goldfish surimi[J]. Food Science, 2021, 42(8): 90–97.]
- [43] 詹碧琳, 赵凤敏, 曹有福, 等. 亚麻粕分离蛋白对鱼糜制品品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(9): 101–105. [ZHAN B L, ZHAO F M, CAO Y F, et al. Effects of flax meal protein isolate on quality characteristics of surimi products[J]. Food and Fermentation Industry, 2013, 39(9): 101–105.]
- [44] 彭林, 马良, 戴宏杰, 等. 多酚与肌原纤维蛋白相互作用机制及其对蛋白特性的影响研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 239–246. [PENG L, MA L, DAI H J, et al. Research progress on the interaction mechanism between polyphenols and myofibrillar proteins and their effects on protein properties[J]. Food Science, 2020, 41(11): 239–246.]
- [45] 贾娜, 林世文, 王乐田, 等. 没食子酸诱导肌原纤维蛋白巯基含量和表面疏水性变化对蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 1–7. [JIA N, LIN S W, WANG L T, et al. Effects of gallic acid-induced changes in myofibrillar protein thiol content and surface hydrophobicity on protein gel properties[J]. Food Science, 2020, 41(22): 1–7.]
- [46] ANVARI M, CHUNG D. Dynamic rheological and structural characterization of fish gelatin-gum arabic coacervate gels cross-linked by tannic acid[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60: 516–524.
- [47] 王希希, 李康, 黄群, 等. 刺麒麟菜对鸡肉糜凝胶特性和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 76–80. [WANG X X, LI K, HUANG Q, et al. Effects of *Eucheuma spinosa* on the gel properties and rheological properties of minced chicken breast meat[J]. Food Science, 2018, 39(5): 76–80.]
- [48] 江晨洋, 胡晓, 吉宏武, 等. 条斑紫菜多糖对白鮀鱼鱼糜凝胶特性及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 144–152. [JI C Y, HU X, JI H W, et al. Effects of polysaccharides from laver on the gel properties and antioxidant activity of silver carp surimi[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(19): 144–152.]
- [49] LIU X Y, ZHANG T, XUE Y, et al. Changes of structural and physical properties of semi-gel from Alaska pollock surimi during 4 °C storage[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 772–782.
- [50] 王育信. 褐藻多酚的提取和鉴定及其对鱼糜凝胶物性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018. [WANG Y X. Extraction and identification of brown algae polyphenols and their effects on the physical properties of surimi gel[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.]
- [51] BUAMARD N, BENJAKUL S. Improvement of gel properties of sardine (*Sardinella albella*) surimi using coconut husk extracts[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51(10): 146–155.