

# 当归对乌鳢肌原纤维蛋白微观结构的影响及作用机制

张高楠 胡贝 吴丰芮 黄渊 曹琼琚 杜红英

华中农业大学食品科学技术学院/国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心,武汉 430070

**摘要** 以乌鳢(*Ophiocephalus argus*)肌原纤维蛋白为研究对象,考察当归(*Angelica sinensis*)粉或当归浸提液对乌鳢肌原纤维蛋白微观结构的影响,并探讨其作用机制。扫描电镜及 SDS-PAGE 结果表明,加入 1%~2% 的当归时,乌鳢肌原纤维蛋白的微观结构变得更加致密,有利于形成更为致密的三维网络结构,提高鱼糜制品的品质;但大量(3%~5%)当归的添加会使原本致密的蛋白网络结构变得松散。傅里叶红外光谱和圆二色谱实验表明,随着当归粉或者当归浸提液含量的增加,乌鳢肌原纤维蛋白中二级结构  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -转角的总相对含量会先增加后减少,而  $\beta$ -转角和无规卷曲总的相对含量会先降低再升高。

**关键词** 乌鳢; 肌原纤维蛋白; 当归; 微观结构

**中图分类号** TS 261.7    **文献标识码** A    **文章编号** 1000-2421(2018)05-0117-06

乌鳢(*Ophiocephalus argus*),俗称黑鱼,是一种肉食性淡水鱼。乌鳢肉质鲜美,骨刺少,可食率高达 63%,含有丰富的蛋白质(其中包含丝氨酸、脯氨酸等 18 种游离氨基酸)和钙、磷、铁等矿质元素以及硫胺素、核黄素、尼克酸等维生素,具有去瘀生新、滋补调养等功效。适合术后病人食用,有促进伤口愈合的作用<sup>[1]</sup>,是一种食疗价值较高的淡水鱼类。当归(*Angelica sinensis*)作为最常用的中药材之一,也是国家卫计部门规定药食同源材料,在日常生活中常被作为滋补品食用。当归中含有许多对人体健康有益的成分,如阿魏酸、当归多糖等<sup>[2]</sup>。现代快节奏的生活使得亚健康人群越来越多,因此,研发更加健康的高档养生型鱼糜制品可以为亚健康人群的调理康复提供新的途径。乌鳢鱼肉中蛋白含量高达 19.8%,而肌原纤维蛋白是一类具有重要生物学功能特性的盐溶性结构蛋白群,主要包括肌球蛋白、肌动蛋白、原肌球蛋白、肌钙蛋白等<sup>[3-4]</sup>。肌原纤维蛋白是形成凝胶最重要的蛋白质,在加热条件下肌原纤维蛋白发生凝胶化,凝胶的形成不仅可以改进肉制品的感官品质和质地,而且在改善鱼糜制品的流变学特性方面也有诸多作用<sup>[4-6]</sup>。目前,已有报道指出添加阿魏酸可以改善蛋白质的凝胶特性<sup>[6]</sup>。将山

药、紫苏等药膳食材加入鱼糜中研究其感官品质,发现山药明显提高鱼丸口感,发酵紫苏可以明显提高质构特性和感官效果<sup>[7]</sup>。研究当归和乌鳢中肌原纤维蛋白的相互作用可以为乌鳢制成的药膳鱼糜制品的滋补性能提供翔实的理论依据。目前,关于药膳食材对鱼糜肌原纤维蛋白的影响机制研究较少,肌原纤维蛋白是鱼糜肌肉中的主要蛋白质,考察当归对乌鳢肌原纤维蛋白微观结构的影响及其机制,有利于人们充分利用其营养成分和价值,提高食品利用率;同时,了解当归对于肌原纤维蛋白的作用有利于拓展探究其他药膳食材的作用机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

乌鳢(*Ophiocephalus argus*),3 kg,购于华中农业大学农贸市场。当归(*Angelica sinensis*),100 g,购于湖北省中医院,原产地为甘肃岷县。

### 1.2 试剂与仪器

氯化钠、盐酸、甲醇、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、氢氧化钠、石油醚、酒石酸、乙醇等试剂均为分析纯。FJ200-SH 高速分散均质机(上海标本模型厂)、Avanti J-E 高速离心机(美国 BECKMAN COUL-

收稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(31501495); 中央高校基本科研业务费专项(2014QC015)

张高楠,硕士研究生。研究方向: 食品大分子结构与功能特性。E-mail: zgn20113969@163.com

通信作者: 杜红英,博士,副教授。研究方向: 食品营养物质代谢及生物大分子互作等。E-mail: hydu@mail.hzau.edu.cn

TER)、722 可见分光光度计(天津市普瑞斯仪器有限公司)、H-700FA 扫描电子显微镜(日本 HITACHI 公司)、Nexus470 傅里叶变换红外光谱仪(美国 Nicolet 公司)、J-815 圆二色谱仪(日本 JASCO 公司)、DYZCZ-28A 电泳仪(北京市六一仪器厂)等。

### 1.3 试验方法

1)制备当归粉及当归浸提液。将 100 g 当归用粉碎机磨粉,将粉碎后的当归分别过粒径 96 和 80  $\mu\text{m}$  筛,得到当归粉,密封,常温放置于避光的干燥皿内,备用。取 0.5 g 当归粉,溶解于 50 mL 的超纯水中,20  $^{\circ}\text{C}$  下超声提取 30 min,于 4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱内放置 24 h,过滤,得滤液,4  $^{\circ}\text{C}$  下密封保存,备用。

2)当归主要成分的测定。①总酚的测定:对 Folin-Ciocalteu 法<sup>[8]</sup>稍作修改测定当归中总酚物质的含量。精确称取 1.0 g 当归粉,加入 6 mL 80% 甲醇,混合均匀后超声提取 30 min,然后于 5 000 r/min 下离心 10 min,过滤取上清液,滤渣用 7~8 mL 80% 甲醇反复提取、离心和过滤,用少量 80% 甲醇洗涤滤渣并过滤,合并提取液再用 80% 甲醇定容至 10 mL,即得样液。总酚含量用没食子酸当量 GAE(gallic acid equivalent)表示且作出没食子酸标准曲线。1 mL 样品加上 1 mL 福林酚试剂和 5 mL 5% 碳酸钠溶液,混匀,室温下放置 60 min 后,加蒸馏水至 25 mL,在 750 nm 波长下测吸光度值。

②果胶的测定:精确称量 5.0 g 当归粉末于 100 mL 的小烧杯中,加入 pH=2.0 的盐酸溶液 40 mL ( $m:V=1:8$ ),85  $^{\circ}\text{C}$  下磁力搅拌加热 45 min,升温至 90  $^{\circ}\text{C}$  后,用 2 层纱布过滤,收集滤液并降温至 35~40  $^{\circ}\text{C}$ ,搅拌加入 5% 酒石酸乙醇(100 mL 95% 乙醇+5 g 酒石酸),果胶呈海绵状析出后真空浓缩,最后用 90% 的乙醇沉淀、过滤、干燥、称质量。

③粗纤维的测定:准确称取 5.0 g 当归粉于 250 mL 锥形瓶中,加入 100 mL 煮沸的 1.25% 硫酸溶液,每隔 5 min 摆晃 1 次锥形瓶,保持微沸 30 min,取下锥形瓶后用亚麻布过滤,沸水洗涤滤渣至溶液不呈酸性。用 100 mL 煮沸的 1.25% 氢氧化钾溶液将残渣洗入原锥形瓶,加热微沸保持 30 min,用亚麻布过滤,沸水洗涤 2~3 次,30 mL 石油醚洗涤 2~3 次,用少量乙醇将滤渣移入坩埚中,105  $^{\circ}\text{C}$  下烘干称质量。

3)肌原纤维蛋白的提取。参照 Sun 等<sup>[9]</sup>的提取方法,取新鲜的乌鳢肉制成的鱼糜,绞碎,溶于

4 倍体积的低盐缓冲液(0.05 mol/L NaCl, 3.38 mmol/L NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 和 15.5 mmol/L Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, pH 值 7.5),搅拌均匀,在 5 000 r/min 下离心 10 min,重复 3 次,得最终离心沉淀物。

将沉淀物溶于 4 倍体积的高盐缓冲液(0.45 mol/L NaCl, 3.38 mmol/L NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 和 15.5 mmol/L Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, pH=7.5),搅拌均匀,在 4  $^{\circ}\text{C}$  下浸提 22 h,然后在 10 000 r/min 下离心 10 min,去除透明的上清液和带有残渣的沉淀,得乳白色半固体溶液,用 10 倍体积的去离子水稀释沉淀 30 min,10 000 r/min 离心 10 min,得到的沉淀物即为肌原纤维蛋白,在 4  $^{\circ}\text{C}$  下保存备用。

4)肌原纤维蛋白浓度的测定。称取 2.0 g 肌原纤维蛋白,溶于 0.5 mol/L 的盐溶液中,定容至 500 mL,得样液,在 4  $^{\circ}\text{C}$  下保存备用。准确称取 0.025 g 牛血清蛋白片溶于一定量的水中,并定容至 100 mL,得牛血清蛋白溶液。用福林酚法测蛋白质浓度,制得牛血清蛋白溶液标曲,并计算肌原纤维蛋白浓度。

5)电镜扫描。准确称量 2.0 g 肌原纤维蛋白(湿基,蛋白质质量浓度为 26.85 mg/mL),分别加入质量分数 0%、1%、2%、3%、4% 和 5% 的当归粉末,混合均匀后,在-80  $^{\circ}\text{C}$  下迅速冷却后进行冷冻干燥,将冻干后的样品镀金后,进行肌原纤维微观结构的观察。

6)红外光谱。取适量的 KBr 固体在 105  $^{\circ}\text{C}$  烘箱内烘干 48 h;准确称量 2.0 g 肌原纤维蛋白(湿基,蛋白质质量浓度为 26.85 mg/mL),分别加入质量分数 0%、1%、2%、3%、4% 和 5% 的当归粉末,混合均匀后,在-80  $^{\circ}\text{C}$  下迅速冷却后进行冷冻干燥,即得样品。取 1~2 mg 样品与 100 mg 的干燥 KBr 在研钵中混合均匀并研成粉末,压成片后置于仪器内测试<sup>[10-11]</sup>。

7)圆二色谱。将肌原纤维蛋白溶液样品稀释至 1 mg/mL,放入 0.1 cm 光径的石英样品池中,在远紫外区(198~250 nm 波长范围)对肌原纤维蛋白溶液进行扫描,扫描速率为 100 nm/min,测定温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ 。残基平均摩尔质量取 110 g/mol,采用杨氏模量用计算机模拟计算得出  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠、 $\beta$ -转角和无规卷曲二级结构单元的含量。圆二色性用平均残基椭圆值 $[\theta]$ 表示 $((\text{deg} \cdot \text{cm}^2)/\text{dmol})^{[12-13]}$ 。

8)SDS-PAGE 凝胶电泳。电泳样品配制:配制蛋白质质量浓度为 2 mg/mL 的样液,与上样缓冲液混合,震荡 1 min,100  $^{\circ}\text{C}$  水浴 5 min,备用。

SDS-PAGE:12%分离胶,5%浓缩胶,电极缓冲液。使用1 mm凝胶板,取上样标记蛋白8  $\mu$ L,肌原纤维蛋白4  $\mu$ L;电泳起始电压为80 V,待样品由浓缩胶进入分离胶后提升电压至120 V;电泳结束后,取出胶片,用染液(50%甲醇+10%冰醋酸+0.1%考马斯亮蓝R-250+40%水)在37℃摇床上均匀震荡染色30 min,再用甲醇/冰醋酸脱色液(50%甲醇+10%冰醋酸+40%水)在37℃摇床上均匀震荡洗脱30 min,最后换去离子水洗脱<sup>[14]</sup>。

#### 1.4 数据处理

所有实验至少重复3次,使用测量数据时至少3个平行,使用Excel、OMNIC进行数据处理和分析。

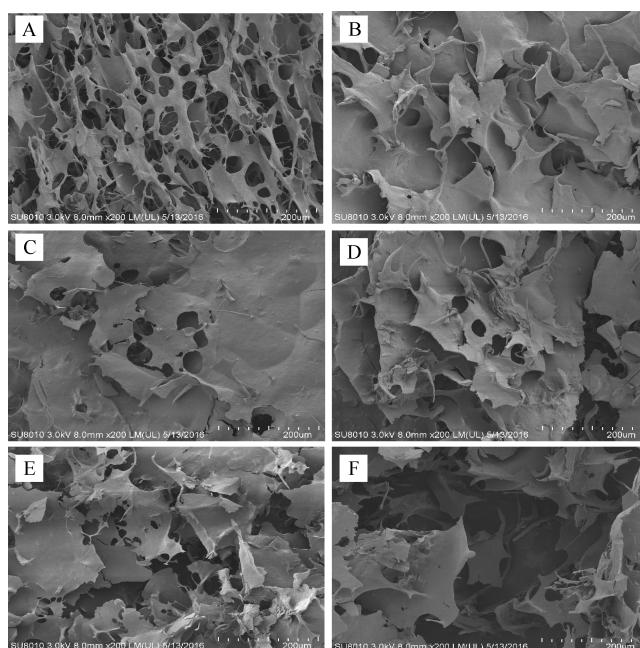
## 2 结果与分析

### 2.1 当归粉组成成分

经测定,当归粉中果胶含量为35.50%±0.36%,总酚的含量为3.30%±0.44%,粗纤维的含量为6.30%±0.36%。可见,当归中果胶含量较高,此外当归中还含有其他多糖、挥发性酸等物质。

### 2.2 添加当归粉对肌原纤维蛋白微观结构的影响

采用扫描电镜观察添加当归粉对肌原纤维蛋白微观结构的影响。未添加当归粉的肌原纤维蛋白微观结构(图1A)与添加了当归粉后(图1B~F)有显著差别。未添加当归粉的肌原纤维蛋白样品呈现多空洞且疏松结构,这些空洞是肌原纤维蛋白湿沉淀脱水后形成(图1A)。添加1% (图1B)和2% (图1C)当归粉后,肌原纤维蛋白微观结构变得致密且空洞减少;随着当归粉添加量进一步增加为3% (图1D)、4% (图1E)及5% (图1F)时,肌原纤维蛋白微观结构变得松散、破碎,空洞不断增大,网络结构出现断裂,其破坏程度随当归粉添加量的增加呈现不断加剧的趋势。造成这种现象的可能原因是,当少量的当归粉添加后,当归中所含的果胶具有强保水性,导致水分难以脱去,空洞减少;同时当归中具有酚类生物活性成分,其中有较多的结合位点能与肌原纤维蛋白质发生交联,使得结构更为致密。而当添加量过多时,其所含的粗纤维素等成分一定程度对肌原纤维蛋白的结构产生物理性填充分散,从而导致原本结构紧密的肌原纤维蛋白变得松散且不均匀。



A~F:当归粉添加量分别为0%、1%、2%、3%、4%、5%。A~F: The adding amount of angelica powder were 0%, 1%, 2%, 3%, 4% and 5%, respectively.

图1 当归粉不同添加量对肌原纤维蛋白微观结构的影响

Fig.1 Effects of different amount of angelica powers on the microstructure of myofibrillar proteins

### 2.3 当归粉不同添加量对肌原纤维蛋白二级结构的影响

图2A反映了乌鳢肌肉纤维蛋白二级结构的3个谱带,即 $1600\sim1700\text{ cm}^{-1}$ 之间的酰胺I带、 $1550\sim1600\text{ cm}^{-1}$ 之间的酰胺II带以及 $1220\sim1320\text{ cm}^{-1}$ 之间的酰胺III带<sup>[15]</sup>。酰胺I带为C=O伸缩振动,位于 $1600\sim1700\text{ cm}^{-1}$ 之间。对图2A中在位于酰胺I带范围内的各个子峰进行高斯拟合,整理数据,根据各个子峰的积分面积和酰胺I带特征峰的指认信息:1615~1638 $\text{ cm}^{-1}$ 为 $\beta$ -折叠,1638~1645 $\text{ cm}^{-1}$ 为无规卷曲,1645~1662 $\text{ cm}^{-1}$ 为 $\alpha$ -螺旋,1662~1670 $\text{ cm}^{-1}$ 为 $\beta$ 转角,得到对应

不同量当归粉的蛋白二级结构的含量。

图2B显示的是根据峰面积计算出的二级结构中各单元的含量,可观察到随着当归粉添加量的增加, $\alpha$ -螺旋结构的含量先增加后减少, $\beta$ -折叠结构的含量先增加后基本保持不变,而 $\beta$ 转角结构的含量先减少再增加,无规则卷曲结构的含量基本保持不变。总体而言,当归粉添加量为1%和2%的肌原纤维蛋白所包含的 $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠结构在4种二级结构中的比例较未添加当归粉的肌原纤维蛋白大,呈现的微观结构较为有序,可能是当归中的果胶使得肌原纤维蛋白的保水性增强。随着当归粉添加量继续增加, $\alpha$ -螺旋结构减少,相应的转化为 $\beta$ 转角或无

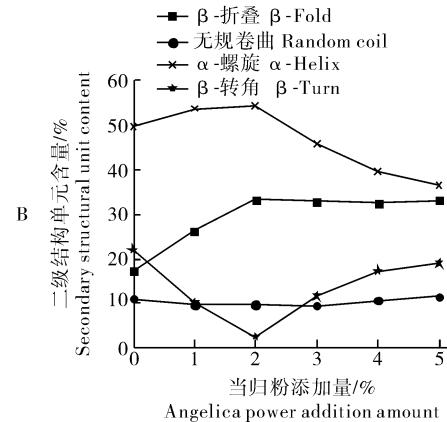
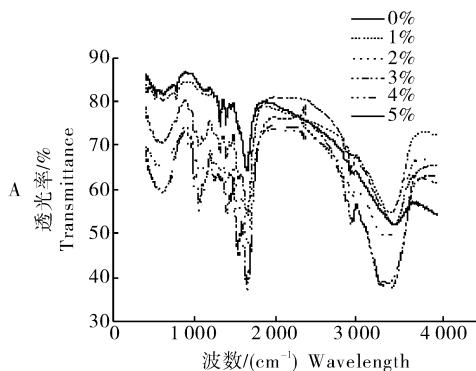


图2 当归粉不同添加量的肌原纤维蛋白的FT-IR图谱(A)和4种二级结构相对含量变化(B)

Fig.2 FT-IR spectra (A) and content of four types protein secondary structure (B)

of myofibrillar proteins with different amount of angelica powers

规则卷曲使得 $\beta$ 转角或无规则卷曲相对含量增加,此时肌原纤维蛋白结构呈现出更加松散的现象,与电镜所观察到的蛋白结构表征一致。

### 2.4 当归浸提液对肌原纤维蛋白二级结构的影响

圆二色谱是研究蛋白质结构的一种快速、简单且较准确的方法<sup>[16]</sup>。 $\alpha$ -螺旋结构是蛋白质分子内的有序排列,通过分子内氢键维持。 $\beta$ -折叠是蛋白质分子间的有序排列,通过分子间氢键维持<sup>[17]</sup>。随着当归浸提液的增加,肌原纤维蛋白中 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠的总的相对含量先增加再减少,而 $\beta$ 转角和无规卷曲的总相对含量先减少再增加(图3)。圆二色谱的研究结论和傅里叶红外光谱的结论一致。

### 2.5 当归浸提液对肌原纤维蛋白凝胶的影响

采用SDS-PAGE凝胶电泳法观察当归对乌鳢肌原纤维蛋白凝胶的影响。由于提取的样品蛋白经过纯化,因而电泳带较少但是更为清晰。在乌鳢肌原纤维蛋白凝胶样品中,可明显观察到浓度最高的

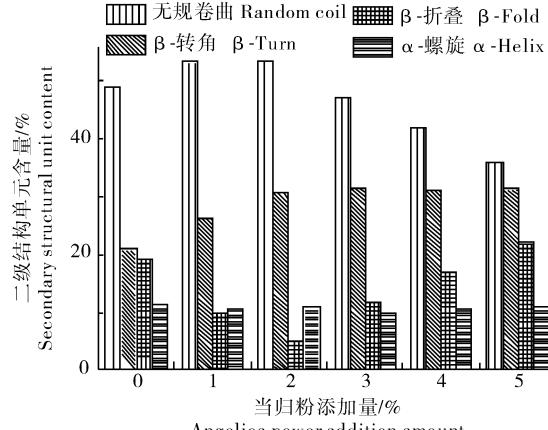


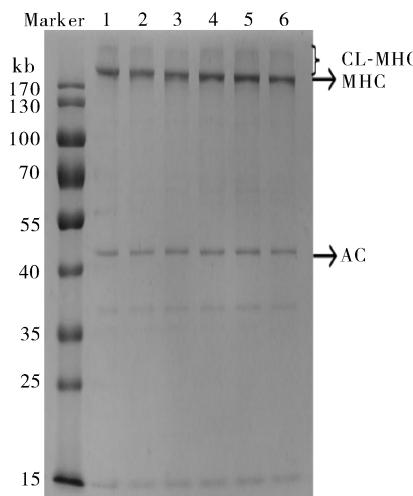
图3 添加不同含量当归浸提液的

肌原纤维蛋白中4种二级结构的相对含量

Fig.3 The content of four types protein secondary structure of myofibrillar proteins with different extracts of angelica for MHC,其次是肌动蛋白带(AC)。

在SDS-PAGE结果中(图4),所有样品均出现

了大分子聚合物 CL-MHC 条带,与未添加当归浸提液的空白样品相比,随着当归浸提液添加量的增加,CL-MHC 条带先增强后减弱,MHC 条带先减弱再增强。而当归浸提液含量超过 3% 时,MHC 带颜色加深,且 CL-MHC 处条带减少。这可能是因为高添加量的当归浸提液产生稀释作用或者其中粗纤维等物质阻碍了肌原纤维蛋白的交联,破坏乌鳢肌原纤维蛋白的三维网络结构。



M: Marker. 1~6: 当归粉添加量分别为 0%、1%、2%、3%、4%、5%。1~6: The adding amount of *Angelica sinensis* powder were 0%, 1%, 2%, 3%, 4% and 5%, respectively.

图 4 添加不同含量当归浸提液的肌原纤维蛋白 SDS-PAGE 电泳图谱

Fig.4 SDS-PAGE pattern of myofibrillar proteins with different extracts of angelica

### 3 讨 论

正如扫描电镜图和 SDS-PAGE 电泳图谱所示,添加少量的当归粉或当归浸提液时,肌原纤维蛋白分子间形成更加致密的三维网络结构且空洞数减少。这可能是当归中酚类化合物与蛋白质侧链上的氨基酸发生共价结合,蛋白质之间以酚类化合物作为桥梁形成交联,从而形成了分子质量更大的聚合体<sup>[18]</sup>。且当归中含有果胶等物质,增加了保水性,导致水分难以脱去,用电镜观察到的微观结构显示空洞数量减少。当归粉和当归浸提液的添加量较大时,肌原纤维蛋白的三维网络结构会遭到破坏,原本致密的蛋白结构变得松散,这可能与过高的添加量对肌原纤维蛋白质的稀释作用有关,以及当归中的果胶、粗纤维等物质阻碍了蛋白质之间的交联。Jia 等<sup>[19]</sup>研究儿茶素的添加对猪肉肌原纤维蛋白结构

的影响有相似的结论,当儿茶素添加量较少时肌原纤维蛋白网络变得更加致密,然而儿茶素的添加量增加,反而破坏了蛋白质的三维网络凝胶结构。

傅里叶红外光谱及圆二色谱所得出的结果一致,随着当归添加量的增加,乌鳢肌原纤维蛋白的二级结构发生了较大的改变,α-螺旋结构的含量先增加后减少,β-折叠结构的含量先增加后基本保持不变,而β-转角结构的含量先减少再增加,无规则卷曲结构的含量基本保持不变。此时α-螺旋和β-折叠的总相对含量先增加再减少,而β-转角和无规则卷曲的总相对含量先减少再增加。产生该现象可能的原因是添加少量的当归浸提液,其中的果胶等物质具有较强的保水性,使得二级结构中的α-螺旋比重增加;当归浸提液添加量较大时,其中的活性成分物质含有多个羟基,能够破坏氢键的作用,致使α-螺旋解旋,蛋白质侧链展开<sup>[16]</sup>,转换成了β-转角。王未君<sup>[20]</sup>研究表明,魔芋胶的添加会增强肌原纤维蛋白凝胶的保水性,且其中二级结构α-螺旋的相对含量会有所增加;Kang 等<sup>[21]</sup>报道绿原酸结合会导致人血清蛋白α-螺旋含量的减少。

因此,当归的添加并不是越多越利于凝胶的形成,将当归添加至乌鳢鱼糜制品制作新型高档产品,其添加量要进行一定量的控制才能达到较好的品质效果。

### 参 考 文 献

- [1] 林永贺,邹记兴,林显道.乌鳢营养研究进展[J].广东饲料,2009,18(3):42-44.
- [2] 李曦,张丽宏,王晓晓,等.当归化学成分及药理作用研究进展[J].中药材,2013,36(6):1023-1028.
- [3] 夏秀芳,孔保华,张宏伟.肌原纤维蛋白凝胶形成机理及影响因素的研究进展[J].食品科学,2009,30(9):264-268.
- [4] 尹涛,石柳,张晋,等.加工方式对微粒化鱼骨泥营养品质的影响[J].华中农业大学学报,2016,35(6):124-128.
- [5] 杨明,孔保华,董和亮,等.马铃薯淀粉对鲤鱼肌原纤维蛋白功能特性的影响[J].食品工业科技,2013,34(14):169-172.
- [6] 安明琦,熊善柏.肌原纤维蛋白转谷氨酰胺酶交联程度对鱼糜凝胶及其风味释放影响的研究进展[J].食品科学,2015,36(7):235-239.
- [7] 徐贵华,叶兴乾,徐国能,等.微波处理对胡柚皮酚酸、黄烷酮糖苷含量及抗氧化性的影响[J].中国食品学报,2007,7(5):69-74.
- [8] 吴润锋,袁美兰,赵利,等.不同辅料对草鱼鱼糜品质的影响[J].食品科学,2014,35(7):53-57.
- [9] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTOS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and an-

- tioxidants by means of folin-ciocalteu reagent[J].Methods in enzymology,1999,299(1):152-178.
- [9] SUN F, HUANG Q, HU T, et al. Effects and mechanism of modified starches on the gel properties of myofibrillar protein from grass carp[J]. International journal of biological macromolecules, 2014, 64(2):17-24.
- [10] 刘微,李萌,任皓威,等.荧光、紫外和红外光谱分析人乳和牛乳 $\beta$ -酪蛋白的功能和构象差异[J].光谱学与光谱分析,2014,12:3281-3287.
- [11] 史苏佳,曹栋,童军茂,等.傅里叶变换红外光谱与圆二色光谱表征磷脂酶D二级结构的比较[J].光谱实验室,2010,27(2):481-485.
- [12] 费英,韩敏义,杨凌寒,等.pH对肌原纤维蛋白二级结构及其热诱导凝胶特性的影响[J].中国农业科学,2010,43(1):164-170.
- [13] 吴明和.圆二色光谱在蛋白质结构研究中的应用[J].氨基酸和生物资源,2010,32(4):77-80.
- [14] 李莹莹,吴彩娥,杨剑婷,等.白果蛋白质提取及 SDS-PAGE 分析[J].食品科学,2010,31(22):36-40.
- [15] 曹云刚.植物多酚对肉蛋白氧化稳定性和功能特性的影响机理及应用[D].无锡:江南大学,2016.
- [16] 包国凤,刁静静,王志辉,等.紫花芸豆清蛋白结构表征及pH对其二级结构的影响[J].中国食品添加剂,2016(8):63-67.
- [17] 杨玉玲,游远,彭晓蓓,等.加热对鸡胸肉肌原纤维蛋白结构与凝胶特性的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):2013-2020.
- [18] 刘文娟,木尼热,吴春华,等.胡柚皮粉对带鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].现代食品科技,2015,31(1):77-83.
- [19] JIA N, WANG L, SHAO J, et al. Changes in the structural and gel properties of pork myofibrillar protein induced by catechin modification[J]. Meat science, 2017, 127: 45-50.
- [20] 王未君.多糖对瘦肉丸及肌原纤维蛋白特性影响的研究[D].无锡:江南大学,2014.
- [21] KANG J, LIU Y, XIE M X, et al. Interactions of human serum albumin with chlorogenic acid and ferulic acid[J]. Biochim biophys acta, 2004, 1674(2): 205-214.

## Effects of angelica on microstructure of snakehead myofibrillar protein and its mechanism

ZHANG Gaonan HU Bei WU Fengrui HUANG Yuan CAO Qiongju DU Hongying

College of Food Science and Technology/National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** Myofibrillar protein is the key protein affecting the quality of surimi products. Scanning electron microscopy and SDS-PAGE was used to investigate the effects of angelica powers and its extracts on the microstructure of snakehead myofibrillar protein and its mechanism. The results showed that myofibrillar protein structure was more compact. Adding a small quantity of angelica powder facilitated the formation of 3D network structure. The quality of surimi products was improved to some extent. However, the myofibrillar protein structure was loose when the massive angelica was added into the surimi, indicating that the protein network structure was destroyed. The total relative content of  $\alpha$ -helix and  $\beta$ -turn contain in myofibrillar protein increased first and then decreased, while the total relative content of  $\beta$ -turn and random coil determined by both fourier transform infrared spectroscopy and circular dichroism decreased first and then increased. It will provide a theoretical basis for the exploration of new upmarket surimi products with nutrition and health care function.

**Keywords** snakehead; myofibrillar protein; angelica; microstructure

(责任编辑:陆文昌)