

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2023.023.005

超声处理对牡蛎肌浆蛋白结构和溶解性的影响

左硕静, 李逍燕, 刘晓涵, 张晴, 怀向前, 桑亚新*
(河北农业大学 食品科技学院, 河北 保定 071000)

摘要:以牡蛎肌浆蛋白为原料,研究200 W超声功率下,超声处理时间(0、10、20、30、40、50 min)对其结构和溶解性的影响。通过内源性荧光强度、表面疏水性、二硫键等指标分析蛋白质分子结构的变化,以溶解性、浊度等指标分析蛋白质聚集行为的变化。结果显示,随着超声处理时间的延长,肌浆蛋白的分子质量无明显变化,内源性荧光强度降低且在40 min达到最低,表面疏水性呈先下降后上升趋势,在40 min达到最低,总巯基与游离巯基含量在30 min均开始显著下降,在40 min达到最低,二硫键含量在40 min显著下降且达到最低,溶解性呈现先上升后下降趋势,在40 min达最高为79.92%。综上,超声波处理能改善肌浆蛋白结构和理化性质,并显著提高其溶解特性。

关键词:肌浆蛋白;超声处理;结构;溶解性;表面疏水性

Effects of Ultrasonic Treatment on the Structure and Solubility of Sarcoplasmic Proteins from Oyster

ZUO Shuojing, LI Xiaoyan, LIU Xiaohan, ZHANG Qing, HUAI Xiangqian, SANG Yaxin*

(College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: The sarcoplasmic proteins from oyster were subjected to ultrasonic treatment at 200 W for 0, 10, 20, 30, 40 min, and 50 min, and the protein structure and solubility were examined. The changes in the molecular structure of the proteins were analyzed from endogenous fluorescence intensity, surface hydrophobicity, and disulfide bond. The changes of the aggregation behaviors of the proteins were analyzed from solubility and turbidity. The results showed that the molecular mass of sarcoplasmic proteins did not change significantly with the prolongation of ultrasonic treatment time. The endogenous fluorescence intensity decreased and reached the lowest at the time point of 40 min. The surface hydrophobicity showed a trend of first decreasing and then increasing, and reached the lowest at the time point of 40 min. The total and free sulfhydryl content decreased significantly at the time point of 30 min and reached the lowest at the time point of 40 min. The content of disulfide bonds decreased reached the lowest at the time point of 40 min. The solubility showed a tendency of first increasing and then decreasing, reaching the peak of 79.92% at the time point of 40 min. In conclusion, ultrasonic treatment can improve the structures, physicochemical properties, and solubility of the sarcoplasmic proteins from oyster.

Key words: sarcoplasmic protein; ultrasonic treatment; structure; solubility; surface hydrophobicity

引文格式:

左硕静, 李逍燕, 刘晓涵, 等. 超声处理对牡蛎肌浆蛋白结构和溶解性的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(23): 29-34, 98.

ZUO Shuojing, LI Xiaoyan, LIU Xiaohan, et al. Effects of Ultrasonic Treatment on the Structure and Solubility of Sarcoplasmic Proteins from Oyster[J]. Food Research and Development, 2023, 44(23): 29-34, 98.

牡蛎(*Crassostrea gigas*)是一类营养价值很高的海水产品,富含人体所必需的蛋白质、维生素、矿物质和微量元素等,可以抗肿瘤、抗氧化、抗疲劳以及降血压,具有很高的药用和营养价值^[1]。肌浆蛋白(sarcoplasmic

protein, SP)是牡蛎所含的重要蛋白,位于肌肉细胞中,主要存在于肌纤维鞘和肌原纤维蛋白之间,占肌肉蛋白质量的30%~35%,因其易溶于水,也被称为水溶性蛋白^[2]。肌浆蛋白虽然易于制备提取,但是产量较低,

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0902003)

作者简介:左硕静(2002—),女(汉),本科在读,研究方向:海水产品加工。

*通信作者:桑亚新(1972—),男(汉),教授,博士,研究方向:海水产品加工及综合利用。

且对加工条件较为苛刻,环境因素、生产过程中的处理方法等都会导致肌浆蛋白功能特性的降低,最终造成肌浆蛋白的流失,进而影响产品风味和功能^[3],通过现有的研究发现,蛋白质改性不仅能改变蛋白质的结构,还能改善蛋白质的功能特性,使蛋白资源得到更广泛的应用。

超声波是一种绿色的食品物理加工技术,它通过空化效应产生机械剪切和湍流效应,并通过形成局部瞬时高压来影响蛋白质分子的空间结构和功能特性^[4],已广泛应用到蛋清蛋白^[5]、大豆蛋白^[6]、豌豆蛋白^[7]等食品的加工研究当中。Chen等^[8]发现超声处理可通过空化作用诱导肌球蛋白产生“应激反应”和群体效应,使蛋白形成更稳定的结构以抵抗空化力的负面影响。Thalia等^[9]研究发现,高压超声处理可以有效改变牛蹄豆分离蛋白的体外消化率和溶解度。超声技术可以有效改善蛋白质理化性质,但在贝类蛋白加工中应用相对较少。本文主要探究在200 W超声功率下,不同超声处理时间对牡蛎肌浆蛋白结构的影响和蛋白聚集行为的变化,进一步了解超声处理对蛋白溶解性的影响,以为牡蛎蛋白的研究及贝类加工提供依据及参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

新鲜牡蛎:市售;甲醇、乙酸、尿素、氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、5,5'-二硫双-(2-硝基苯甲酸)[5,5'-dithiobis(2-nitrobenzoic acid), DTNB]、8-苯胺-1-萘磺酸盐(8-anilino-1-naphthalenesulfonic acid, ANS)、牛血清白蛋白(bovine serum albumin, BSA):美国Sigma公司;考马斯亮蓝 G250、蛋白 Marker(10~250 kDa)、5倍上样缓冲液:赛文创新(北京)科技有限公司。以上化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

TGL-16M 高速台式冷冻离心机:湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;JP96L 均质机:中国苏泊尔公司;JY92-IIDN 超声粉碎机:宁波新芝生物科技股份有限公司;Tanon 4600 凝胶成像仪:上海天能科技有限公司;F-320 荧光分光光度计:天津港东仪器有限公司;N5000 紫外可见分光光度计:上海佑科仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 原料预处理

新鲜牡蛎用冰块运送到实验室,清洗牡蛎外壳,去壳取肉,用蒸馏水冲洗两次,将牡蛎肉切成小块,4℃储藏并尽快使用。

1.3.2 肌浆蛋白的提取

参考 Liu 等^[10]的方法提取肌浆蛋白并稍作修改。将牡蛎肉与20 mmol/L 磷酸盐缓冲液(含100 mmol/L 氯化钠,1 mmol/L EDTA, pH7)以体积比1:4混合并在冰水浴中均质90 s,在4℃下6 790×g条件下离心20 min,收集上清液,即得肌浆蛋白。以牛血清白蛋白为标准溶液,采用双缩脲法测定SP的浓度。

1.3.3 超声处理肌浆蛋白

调整SP浓度为5 mg/mL,在200 W的超声功率下分别处理0、10、20、30、40、50 min,处理后的样品在4℃保存并在48 h内使用。

1.3.4 肌浆蛋白一级结构测定

参考 Laemmli^[11]的方法进行十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)并稍作修改,将稀释后的SP溶液(2 mg/mL)与5 μL的SDS-PAGE缓冲液混合,在沸水中煮沸10 min,使用10%分离胶和5%浓缩胶,上样量为20 μL,使用100 V的恒定电流直到指示剂高于凝胶边缘约5 mm 停止电泳。电泳结束后,考马斯亮蓝 G250 染色10 min,随后用5%甲醇溶液和7.5%乙酸溶液脱色。脱色后,在凝胶成像仪上成像。

1.3.5 肌浆蛋白内源性荧光的测定

参考 Jia 等^[12]的方法并稍作修改。用磷酸盐缓冲液稀释SP溶液至浓度0.5 mg/mL,设置激发波长为295 nm,发射光谱为300~420 nm,设定激发波长与发射波长之间的狭缝宽度为10.0 nm,用荧光分光光度计测定内源性荧光。

1.3.6 肌浆蛋白表面疏水性的测定

参考 Jiang 等^[13]的方法,用磷酸盐缓冲液将SP溶液稀释至浓度0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL,分别取5 mL各浓度的SP溶液与25 mL的ANS溶液(含8 mmol/L ANS,20 mmol/L 磷酸盐缓冲液, pH7.5)混合,25℃黑暗处反应25 min,用荧光分光光度计记录激发波长为374 nm和发射波长为485 nm处的荧光强度。以荧光强度对蛋白质浓度作曲线,曲线的初始斜率为SP的表面疏水性。

1.3.7 肌浆蛋白巯基与二硫键含量的测定

总巯基含量:参考 Zhang 等^[14]的方法测定,并稍作修改。将0.5 mL的SP溶液(1 mg/mL)溶解于4.5 mL含8 mol/L 尿素和10 mmol/L EDTA(pH6)的溶液,并加入100 μL的Ellman溶液(含10 mmol/L DTNB,0.1 mol 磷酸二氢钠),混合均匀后,25℃黑暗处静置反应25 min,用紫外可见分光光度计在412 nm处测定吸光度,以不含DTNB的SP溶液为空白对照。总巯基含量(X, μmol/g)计算公式如下。

$$X = \frac{A_{412} - A_{412c}}{k \times c} \times 1000$$

式中: A_{412} 为412 nm处样品吸光度; A_{412c} 为412 nm处空白试剂吸光度; k 为消光系数 $13\ 600\ \text{mol}/(\text{L} \cdot \text{cm})$; c 为样品中蛋白浓度, mg/mL 。

游离巯基含量:参考 Guo 等^[15]的方法测定,将 5 mL 的 SP 溶液(1 mg/mL)与 20 μL DTNB 溶液混合,25 $^{\circ}\text{C}$ 反应 25 min,紫外可见分光光度计在 412 nm 处测定吸光度,以不含 DTNB 的 SP 溶液为空白对照。游离巯基含量(Y , $\mu\text{mol}/\text{g}$)计算公式如下。

$$Y = \frac{A_{412} - A_{412c}}{k \times c} \times 1000$$

式中: A_{412} 为412 nm处样品吸光度; A_{412c} 为412 nm处空白试剂吸光度; k 为消光系数 $13\ 600\ \text{mol}/(\text{L} \cdot \text{cm})$; c 为样品中蛋白浓度, mg/mL 。

二硫键含量(Z , $\mu\text{mol}/\text{g}$)计算公式如下。

$$Z = \frac{X - Y}{2}$$

式中: X 为总巯基含量, $\mu\text{mol}/\text{g}$; Y 为游离巯基含量, $\mu\text{mol}/\text{g}$ 。

1.3.8 肌浆蛋白浊度的测定

参考 Liu 等^[16]的方法测定浊度。稀释 SP 溶液至 1 mg/mL,在室温下反应 30 min,用紫外可见分光光度计在 340 nm 下测定其吸光度,同时做试剂空白。

1.3.9 肌浆蛋白溶解性的测定

参考 Liu 等^[17]的方法测定溶解性,并稍作修改。稀释 SP 溶液浓度至 5 mg/mL,在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下以 6 790 $\times g$ 条件下离心 20 min,用双缩脲法测定离心前后上清液中的蛋白含量,用上清液蛋白浓度与未作处理的蛋白浓度之比来计算蛋白溶解性(W , %),公式如下。

$$W = \frac{M_1}{M_2} \times 100$$

式中: M_1 为上清液中蛋白含量, mg ; M_2 为溶液中总蛋白含量, mg 。

1.4 数据分析

所有试验均至少重复进行 3 次。所有数据均以平均值 \pm 标准差表示。采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同超声处理时间对肌浆蛋白一级结构的影响

应用 SDS-PAGE 观察超声处理时间对 SP 的影响,探究不同超声处理时间对 SP 一级结构的影响。不同超声处理时间下牡蛎肌浆蛋白 SDS-PAGE 图谱如图 1 所示。

由图 1 可知,所有样品均表现出明显的 SP 蛋白特征条带,包括 C 蛋白(150 kDa)、辅肌动蛋白(110 kDa)、

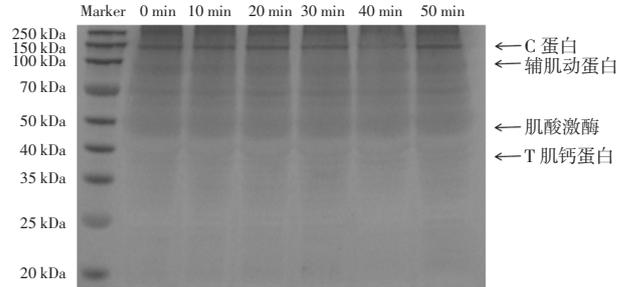


图 1 不同超声处理时间下肌浆蛋白 SDS-PAGE 图谱

Fig.1 SDS-PAGE of sarcoplasmic proteins at different time points of ultrasonic treatment

肌酸激酶(44 kDa)、T 肌钙蛋白(38 kDa)^[18-19]。与对照组相比,可以观察到超声处理时间并没有改变蛋白分子质量的大小,这一现象表明,在 200 W 下超声处理 0~50 min,不会对 SP 一级结构产生影响。

2.2 不同超声处理时间对肌浆蛋白内源性荧光强度的影响

内源性荧光光谱主要反映 SP 的三级结构,内源性荧光这是由于蛋白芳香族氨基酸残基的激发和释放,特别是色氨酸^[20]。当色氨酸周围构象发生变化时,内源性荧光强度会随之发生波动,因此,SP 的三级结构的变化可由荧光强度的变化来确定。不同超声处理时间对牡蛎 SP 荧光强度影响如图 2 所示。

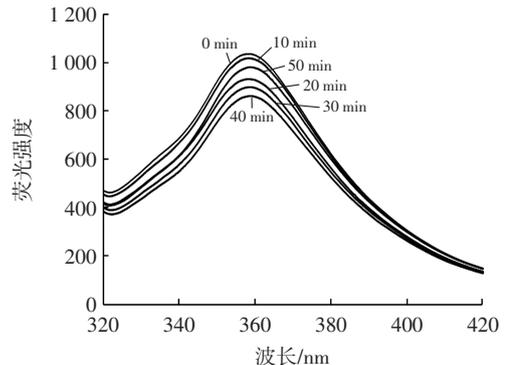


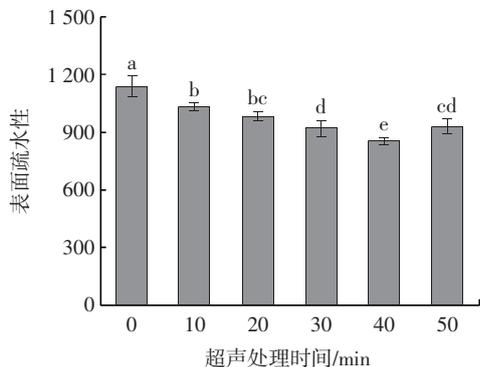
图 2 超声处理时间对肌浆蛋白荧光强度的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic treatment time on fluorescence intensity of sarcoplasmic proteins

由图 2 可知,荧光强度随超声处理时间的延长呈现先降低后升高的趋势,在 40 min 达到最低,说明超声处理使 SP 部分或完全展开,包埋在内部的色氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸暴露在极性环境中,极性溶剂会使发色基团发生荧光猝灭作用,使荧光强度降低。到 50 min 时,荧光强度又升高,可能是由于表面疏水性增加,暴露的疏水氨基酸残基之间的疏水相互作用而形成可溶性蛋白质聚集体^[21],暴露的芳香族氨基酸重新迁移到蛋白分子内部。荧光强度的变化表明,超声波处理可以改变 SP 的三级结构。

2.3 不同超声处理时间对肌浆蛋白表面疏水性的影响

表面疏水性是维持蛋白质高级结构的主要作用力,可以反映蛋白质疏水性基团的含量,是表征蛋白质构象和聚集行为的重要指标^[21]。不同超声处理时间对牡蛎 SP 表面疏水性影响如图 3 所示。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图 3 超声处理时间对肌浆蛋白表面疏水性的影响

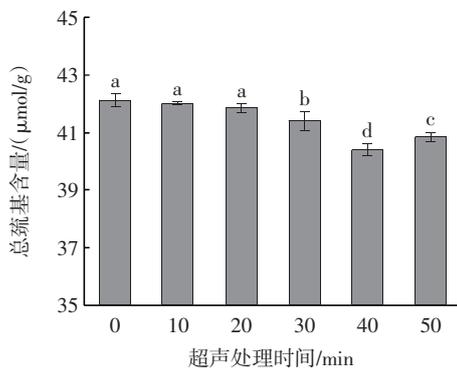
Fig.3 Effect of ultrasonic treatment time on surface hydrophobicity of sarcoplasmic proteins

由图 3 可知,表面疏水性随超声处理时间的延长,呈现先减小后增大的趋势,在 40 min 处达到最小值(861.96),与对照组相比降低了 24.30%,超声波处理过程中产生的空化效应可以破坏蛋白质分子疏水区周围水分子的“包合物”结构,非共价相互作用被破坏,蛋白质分子暴露于水-空气界面,表面疏水性下降。表面疏水性降低会增强蛋白质与水之间的相互作用,从而进一步影响聚集体的产生和溶解度的变化^[23]。当超声处理时间为 50 min 时,表面疏水性又显著增加($P < 0.05$),但低于对照组,可能是由于长时间的超声处理产生的空化和剪切作用促进了 SP 大分子聚集体分解成小分子蛋白,从而暴露了部分内部的疏水基团,而且超声波使气泡破裂,其过程中释放的能量提供了疏水相互作用的能量^[24],使表面疏水性增加。

2.4 不同超声处理时间对肌浆蛋白总巯基和游离巯基含量的影响

巯基是 SP 的关键官能团,主要反映蛋白高级结构的变化^[25]。总巯基是指暴露在蛋白表面和包埋在蛋白内部区域的巯基总和,而游离巯基是指暴露于蛋白表面的巯基^[26]。不同超声处理时间对牡蛎 SP 总巯基和游离巯基含量的影响如图 4 和图 5 所示。

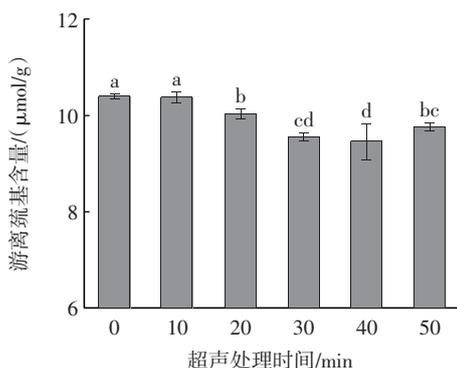
由图 4 可知,总巯基含量随超声处理时间的延长,呈现先下降后上升的趋势,在 0~20 min 无显著变化,在 30 min 时显著下降,并在 40 min 时达最低,为 40.42 $\mu\text{mol/g}$ 。由于超声波处理破坏了蛋白分子间的非共价相互作用,蛋白质分子展开,内部巯基基团暴露^[27],使游离巯基含量增加。同时游离巯基基团易被过氧化



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图 4 超声处理时间对肌浆蛋白总巯基含量的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic treatment time on total sulfhydryl content of sarcoplasmic proteins



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

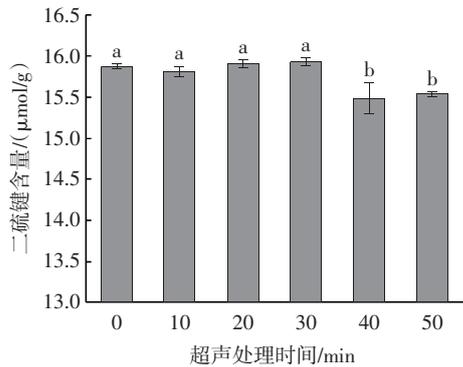
图 5 超声处理时间对肌浆蛋白游离巯基含量的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic treatment time on free sulfhydryl content of sarcoplasmic proteins

氢大量氧化,游离巯基氧化速率高于其暴露速率,最终导致总巯基含量降低。另外,超声处理过程中产生的高剪切力易打断分子之间的化学键,蛋白发生聚集变性,覆盖一些巯基,使可检测到的游离巯基含量减少,总巯基含量下降。当超声处理时间达 50 min 时,总巯基含量明显增加,但低于对照组。主要由于游离巯基氧化速率低于其暴露速率,导致总巯基含量上升。

由图 5 可知,游离巯基含量随超声处理时间的延长呈现先下降后上升的趋势,在 20 min 处开始显著下降($P < 0.05$),并在 40 min 处达最小值,为 9.46 $\mu\text{mol/g}$,由于超声波处理使水分子中产生瞬态自由基,交叉反应形成过氧化氢,过氧化氢将暴露的游离巯基不可逆地氧化为更稳定的亚磺酸或磺酸,使游离巯基含量下降,同时干扰了分子间巯基-二硫键的交换^[28]。当超声处理时间为 50 min 时,游离巯基含量上升但低于对照组,可能由于长时间的超声处理造成蛋白结构进一步展开,内部巯基暴露,使游离巯基增加。

2.5 不同超声处理时间对肌浆蛋白二硫键含量的影响
二硫键对维持蛋白质空间结构稳定具有重要作用^[29],同时也与蛋白的聚集和解离有关。不同超声处理时间对牡蛎 SP 二硫键含量的影响如图 6 所示。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

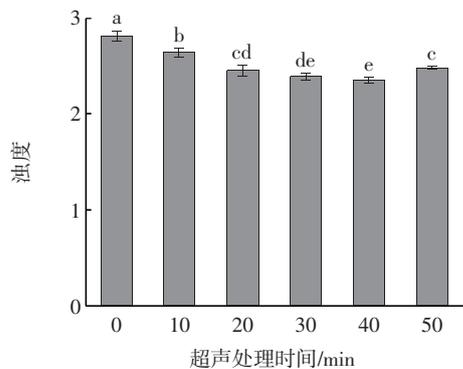
图 6 超声处理时间对肌浆蛋白二硫键含量的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic treatment time on disulfide bond content of sarcoplasmic proteins

由图 6 可知,在 0~30 min 内随着超声处理时间的延长,二硫键含量无显著变化;超声处理 40~50 min 时二硫键含量较前 30 min 显著降低($P < 0.05$)。二硫键含量下降可能是由于在超声过程中超声波的空化现象产生的湍流、高剪切力使肌浆蛋白部分展开^[30],二硫键断裂氧化形成巯基。由于超声处理破坏了维持蛋白质三级结构的二硫键,使得蛋白质的稳定性降低。

2.6 不同超声处理时间对肌浆蛋白浊度的影响

浊度可以反映蛋白的聚集程度、溶解性^[31],与粒径大小密切相关。不同超声处理时间对牡蛎 SP 浊度影响如图 7 所示。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图 7 超声处理时间对肌浆蛋白浊度的影响

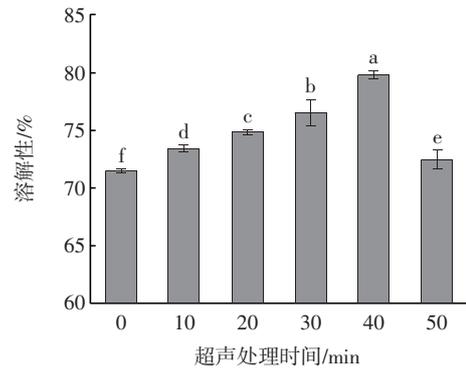
Fig.7 Effect of ultrasound treatment time on turbidity of sarcoplasmic proteins

由图 7 可知,随超声处理时间的延长,浊度呈现先下降后上升的趋势,在 40 min 处达到最小值(2.353),与对照组相比降低了 19.26%,可能是超声处理过程中

由于空化现象产生的高剪切力造成分子键的破坏,导致蛋白聚集体破裂并向小分子蛋白转化,使蛋白质颗粒变小,浊度降低,使颗粒的均匀性增加^[32]。浊度在 50 min 处显著上升($P < 0.05$),可能是因为长时间的超声处理,蛋白之间由于非共价相互作用发生一定程度的蛋白聚集,使浊度升高。

2.7 超声处理时间对牡蛎 SP 溶解性的影响

溶解性可以反映蛋白的变性和聚集程度,影响蛋白的功能特性^[33]。不同超声处理时间对牡蛎 SP 溶解性的影响如图 8 所示。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图 8 超声处理时间对肌浆蛋白溶解性的影响

Fig.8 Effect of ultrasonic treatment time on solubility of sarcoplasmic proteins

由图 8 可知,0~40 min 内溶解性随超声处理时间的延长显著上升($P < 0.05$),并在 40 min 处达到最大值(79.92%),比对照组升高了 11.59%,当超声处理时间超过 40 min 时,溶解性显著下降($P < 0.05$),但高于对照组。超声产生的空化效应与机械效应使 SP 的蛋白聚集体被解离为小分子片段,小分子片段具有更大的表面积和含量更高的极性基团,从而增加了蛋白与水分子的相互作用。一定时间的超声处理也会使蛋白分子发生变性解聚,颗粒减小,浊度降低,导致蛋白质与水之间形成氢键的机会增加,且水和蛋白质之间的接触面积增加^[34],使溶解性升高。另外,也有研究表明是由于疏水基团的含量降低,促进蛋白与水之间的亲水基团交联,促使溶解性增加^[35]。但长时间的超声处理,SP 的浊度增加,溶解性下降。可能是超声波时间过长所产生的湍流使蛋白分子之间的碰撞和聚集速度加快,使蛋白发生一定程度的聚集。此外,还可以推断,SP 的溶解性与浊度和表面疏水性均呈负相关。

3 结论

通过对肌浆蛋白结构和溶解性变化的分析,可以发现适当的超声处理可改变 SP 结构并提高其溶解性。与对照组相比,一定时间的超声处理可以稳定内

源性荧光,降低表面疏水性、总巯基、游离巯基和二硫键含量,使浊度降低,溶解性增加。结果表明,超声处理使蛋白质的三级结构发生改变,二硫键的断裂促进蛋白质结构的伸展,使肌浆蛋白具有更好的溶解性,且试验结果表明,溶解性与浊度和表面疏水性均成负相关。该论文为肌浆蛋白超声处理的研究提供参考,并且为贝类蛋白的加工利用提供理论支持。

参考文献:

- [1] 杨昭, 梁瑞进, 何春兰, 等. 牡蛎挥发性风味成分研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 196-203.
YANG Zhao, LIANG Ruijin, HE Chunlan, et al. Progress in characterizing the volatile flavor components of oyster products[J]. Food Research and Development, 2021, 42(11): 196-203.
- [2] 杜菲菲, 吴长玲, 方艾虎, 等. 不同种类肉肌浆蛋白的油-水界面性质[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 15-22.
DU Feifei, WU Changling, FANG Aihu, et al. Oil-water interfacial properties of sarcoplasmic proteins in meat from different animal species[J]. Food Science, 2020, 41(4): 15-22.
- [3] 王甜甜, 曹晓虹, 马岩涛. 肌浆蛋白的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(6): 109-112.
WANG Tiantian, CAO Xiaohong, MA Yantao. Progress in study of sarcoplasmic proteins[J]. Food Research and Development, 2015, 36(6): 109-112.
- [4] JIANG S, ZHANG M, LIU H, et al. Ultrasound treatment can increase digestibility of myofibrillar protein of pork with modified atmosphere packaging[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131811.
- [5] DENG W Q, XU Q, HU X X, et al. Structure and properties of egg white protein films modified by high-intensity ultrasound: An effective strategy[J]. Food Research International, 2022, 157: 111264.
- [6] WANG Y C, LI B L, GUO Y N, et al. Effects of ultrasound on the structural and emulsifying properties and interfacial properties of oxidized soybean protein aggregates[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 87: 106046.
- [7] MOZAFARPOUR R, KOOCHEKI A, NICOLAI T. Modification of grass pea protein isolate (*Lathyrus sativus* L.) using high intensity ultrasound treatment: Structure and functional properties[J]. Food Research International, 2022, 158: 111520.
- [8] CHEN J H, ZHANG X, CHEN Y, et al. Effects of different ultrasound frequencies on the structure, rheological and functional properties of myosin: Significance of quorum sensing[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105268.
- [9] THALÍA FLORES-JIMÉNEZ N, ARMANDO ULLOA J, ESMERALDA URÍAS-SILVAS J, et al. Influence of high-intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of a guamuchil *Pithecellobium dulce* (Roxb.) seed protein isolate[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84: 105976.
- [10] LIU X H, MAO K M, SANG Y X, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of myofibrillar proteins from the scallop mantle (*Patinopecten yessoensis*) based on ultrahigh pressure treatment[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 873578.
- [11] LAEMMLI U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4[J]. Nature, 1970, 227(5259): 680-685.
- [12] JIA N, WANG L T, SHAO J H, et al. Changes in the structural and gel properties of pork myofibrillar protein induced by catechin modification[J]. Meat Science, 2017, 127: 45-50.
- [13] JIANG L Z, WANG J, LI Y, et al. Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black bean protein isolates[J]. Food Research International, 2014, 62: 595-601.
- [14] ZHANG Z Y, YANG Y L, ZHOU P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 678-686.
- [15] GUO X Y, PENG Z Q, ZHANG Y W, et al. The solubility and conformational characteristics of porcine myosin as affected by the presence of L-lysine and L-histidine[J]. Food Chemistry, 2015, 170: 212-217.
- [16] LIU Y F, OEY I, BREMER P, et al. Effects of pH, temperature and pulsed electric fields on the turbidity and protein aggregation of ovomucin-depleted egg white[J]. Food Research International, 2017, 91: 161-170.
- [17] LIU Q, KONG B H, XIONG Y L, et al. Antioxidant activity and functional properties of porcine plasma protein hydrolysate as influenced by the degree of hydrolysis[J]. Food Chemistry, 2010, 118(2): 403-410.
- [18] XIA M Q, CHEN Y X, GUO J J, et al. Water distribution and textural properties of heat-induced pork myofibrillar protein gel as affected by sarcoplasmic protein[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 103: 308-315.
- [19] YANG N, LIANG X L, CAO J X, et al. Denaturation manner of sarcoplasmic proteins in pale, soft and exudative meat determines their positive impacts on myofibrillar water-holding capacity[J]. Meat Science, 2022, 185: 108723.
- [20] CAO Y G, XIONG Y L. Chlorogenic acid-mediated gel formation of oxidatively stressed myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2015, 180: 235-243.
- [21] GAO K, ZHA F C, YANG Z Y, et al. Structure characteristics and functionality of water-soluble fraction from high-intensity ultrasound treated pea protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107409.
- [22] LI K, FU L, ZHAO Y Y, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105275.
- [23] TIAN Z M, WAN M X, WANG S P, et al. Effects of ultrasound and additives on the function and structure of trypsin[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2004, 11(6): 399-404.
- [24] 李可, 张俊霞, 王欣瑶, 等. 不同超声波功率处理对类PSE鸡肉肌原纤维蛋白结构和乳化稳定性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 23-31.
LI Ke, ZHANG Junxia, WANG Xinyao, et al. Effects of ultrasound treatment at different Powers on the structure and emulsifying properties of PSE-like chicken myofibrillar protein[J]. Food Science, 2023, 44(13): 23-31.
- [25] 胡爱军, 卢秀丽, 郑捷, 等. 超声处理对鲢鱼鱼肉蛋白结构的影响[J]. 现代食品科技, 2012, 28(8): 894-897.
HU Aijun, LU Xiuli, ZHENG Jie, et al. Effect of ultrasonic treatment on protein structures of silver carp[J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(8): 894-897.
- [26] LI X X, MA Y Y, SUN P, et al. Effect of ultrasonic thawing on protein properties and muscle quality of Bonito[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(1): e14930.
- [27] LIU R, LIU Q, XIONG S B, et al. Effects of high intensity ultrasound on structural and physicochemical properties of myosin from

- 南瓜皮果胶工艺[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 162-166.
- LIU Xianming, GU Yanbo, CHEN Dongnian, et al. Optimization of the extraction technology of pectin from pumpkin peels by response surface methodology[J]. The Food Industry, 2018, 39(7): 162-166.
- [26] 徐延, 孙婷, 戴余军, 等. 响应曲面法优化南瓜皮果胶的酶提工艺[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(14): 3704-3707.
- XU Yan, SUN Ting, DAI Yujun, et al. Optimization on enzyme extraction process of pectin from pumpkin peel by response surface method[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(14): 3704-3707.
- [27] 戴余军, 石会军, 仇小艳, 等. 南瓜皮果胶的提取工艺及其品质分析[J]. 食品工业, 2013, 34(6): 38-41.
- DAI Yujun, SHI Huijun, QIU Xiaoyan, et al. Study on the extraction of pectin from pumpkin peel and quality analysis[J]. The Food Industry, 2013, 34(6): 38-41.
- [28] 罗静, 石会军, 李长春, 等. 超声波辅助半纤维素酶提取南瓜皮果胶的工艺研究[J]. 黑龙江农业科学, 2013(1): 90-93.
- LUO Jing, SHI Huijun, LI Changchun, et al. Ultrasonic-assisted hemicellulase extraction of pectin from pumpkin peel[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013(1): 90-93.
- [29] 岳贤田. 微波辅助提取南瓜皮中果胶的研究[J]. 云南化工, 2010, 37(4): 5-7.
- YUE Xiantian. Extraction of pectin with microwave from pumpkin peel[J]. Yunnan Chemical Technology, 2010, 37(4): 5-7.

加工编辑:刘艳美
收稿日期:2023-04-24

(上接第34页)

- silver carp[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37: 150-157.
- [28] LIU H T, WANG Z, BADAR I H, et al. Combination of high-intensity ultrasound and hydrogen peroxide treatment suppresses thermal aggregation behaviour of myofibrillar protein in water[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130756.
- [29] 薛海燕, 操歌, 贺宝元, 等. 超声处理对牛乳酪蛋白结构及抗原性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 123-129.
- XUE Haiyan, CAO Ge, HE Baoyuan, et al. Effect of ultrasonic treatment on the structure and antigenicity of bovine caseins[J]. Food Science, 2019, 40(23): 123-129.
- [30] HU H, WU J H, LI-CHAN E C Y, et al. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(2): 647-655.
- [31] 荣荟, 汤辉煌, 赵娅柔, 等. 冷冻诱导对大豆分离蛋白结构和聚集行为的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(3): 8-14.
- RONG Hui, TANG Huihuang, ZHAO Yarou, et al. Effects of freezing treatment on structure and aggregation behavior of soybean protein isolate[J]. Food Research and Development, 2021, 42(3): 8-14.
- [32] MADADLOU A, MOUSAVI M E, EMAM-DJOMEH Z, et al. Comparison of pH-dependent sonodisruption of re-assembled casein micelles by 35 and 130 kHz ultrasounds[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 95(3): 505-509.
- [33] KARABULUT G, YEMİŞ O. Modification of hemp seed protein isolate (*Cannabis sativa* L.) by high-intensity ultrasound treatment. Part 1: Functional properties[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131843.
- [34] KONG D W, HAN R W, YUAN M D, et al. Ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water thawing of mutton: Effects on physicochemical properties, oxidation and structure of myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 93: 106309.
- [35] XIONG W F, WANG Y T, ZHANG C L, et al. High intensity ultrasound modified ovalbumin: Structure, interface and gelation properties[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 31: 302-309.

加工编辑:王艳
收稿日期:2023-05-30