

超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶凝胶特性及结构的影响

杜童中, 刘悦, 马骏骅, 王馨怡, 沈存宽, 杨华, 颜金鑫

Effect of Ultrasonic Pretreatment on the Gel Properties and Structure of Flaxseed Gum-Soybean Protein Isolate Composite Gels

DU Tongshen, LIU Yue, MA Junhua, WANG Xinyi, SHEN Cunkuan, YANG Hua, and YAN Jinxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沙蒿籽胶对马铃薯淀粉凝胶的热学性能、质构特性、流变特性的影响

Effects of *Artemisia sphaerocephala* Krasch Gum on the Thermal, Textural and Rheological Properties of Potato Starch Gel

食品工业科技. 2021, 42(16): 66-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120197>

超声波处理对大豆分离蛋白凝胶流变性和凝胶形成的影响

Effects of Ultrasonic Treatment on Gel Rheological Properties and Gel Formation of Soybean Protein Isolate

食品工业科技. 2020, 41(21): 87-92,98 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020155>

大豆油、亚麻籽油和紫苏籽油对草鱼鱼糜品质的影响

Effects of soybean, flaxseed and perilla seed oils on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi gels

食品工业科技. 2017(18): 60-64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.18.012>

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>

假酸浆子胶与海藻酸钠凝胶球的质构特性

The texture properties of gel beads from *Nicandra physaloides* (L.) Gaertn seed gum and sodium alginate

食品工业科技. 2017(20): 233-239 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.20.041>

超声处理对转谷氨酰胺酶交联乳清分离蛋白的结构特性和凝胶保水性的影响

Effect of Ultrasound Treatment on Structural Properties and Gel Water Holding Capacity of Transglutaminase-Catalyzed Whey Protein Isolate

食品工业科技. 2019, 40(1): 77-81 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.01.014>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杜童申, 刘悦, 马骏骅, 等. 超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶凝胶特性及结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 83–90. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080044

DU Tongshen, LIU Yue, MA Junhua, et al. Effect of Ultrasonic Pretreatment on the Gel Properties and Structure of Flaxseed Gum-Soybean Protein Isolate Composite Gels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 83–90. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080044

· 研究与探讨 ·

超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶凝胶特性及结构的影响

杜童申, 刘悦, 马骏骅, 王馨怡, 沈存宽, 杨华, 颜金鑫*
(浙江万里学院生物与环境学院, 浙江宁波 315300)

摘要:目的: 探究不同超声功率和时间预处理对 TG 酶交联的亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶凝胶特性和结构的影响。方法: 采用质构仪、激光粒度仪、圆二色光谱、内源荧光光谱、扫描电镜等技术, 研究在不同超声条件下复合凝胶质构特性、蛋白质分子构象及微观网络结构的变化。结果: 50% 功率超声预处理 10 min 可以显著提升复合凝胶的硬度、胶粘性、咀嚼性、内聚性以及持水性, 降低其粘附性; 经过 50% 功率超声预处理 10 min 后的复合凝胶蛋白质的 α -螺旋、 β -转角含量降低, β -折叠、无规则卷曲含量增加, 且荧光强度升高, 有利于凝胶功能特性的改善; 复合凝胶的微观结构由无序变得有序, 网络密度增大, 孔径变小, 孔壁增厚; 而增大超声功率到 80% 后, 其凝胶特性仅小幅波动, 并且微观结构被破坏。结论: 50% 功率超声预处理 10 min 可以显著改善 TG 酶交联的亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合的凝胶性能及网络结构。

关键词: 复合凝胶, 亚麻籽胶, 超声预处理, 质构特性, 蛋白结构, 微观结构

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)13-0083-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080044

本文网刊:



Effect of Ultrasonic Pretreatment on the Gel Properties and Structure of Flaxseed Gum-Soybean Protein Isolate Composite Gels

DU Tongshen, LIU Yue, MA Junhua, WANG Xinyi, SHEN Cunkuan, YANG Hua, YAN Jinxin*

(College of Biology and Environment, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315300, China)

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the impact of different ultrasonic power and time pretreatments on the structures and gel properties of the flaxseed gum and soybean protein isolate composite gel induced by TG enzyme. Methods: The structural characteristics, molecular conformation, and micro-network structures of the composite gel under varying ultrasonic conditions were analyzed using a texture analyzer, laser particle size meter, circular dichroism (CD), fluorescence spectrum, and scanning electron microscope (SEM). Results: The 50% power ultrasound pretreatment for 10 min could significantly improve the hardness, adhesiveness, chewiness, cohesiveness and water-holding property of the composite gel, and reduce its adhesiveness. After 50% power ultrasound pretreatment for 10 min, the α -helix and β -turn content of composite gel proteins decreased, and the content of β -folding and irregular curls increased, and the fluorescence intensity increased, which was conducive to the improvement of the functional properties of the gel. The microstructure of the composite gel became ordered from disorder, the network density increased, the pore diameter became smaller, and the pore wall was thickened. While after increasing the ultrasound power to 80%, the gel properties fluctuated only slightly and the microstructure was destroyed. Conclusion: 50% power ultrasound pretreatment for 10 min can significantly improve the

收稿日期: 2023-08-06

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2020C02042); 宁波市公益类科技计划项目 (2022S149); 宁波市公益项目 (2021S046); 宁波市公益项目 (202002N3114); 浙江省一流学科“生物工程”学生创新项目 (CX2023003); 浙江省一流学科“生物工程”学生创新项目 (CX2022017); 浙江省教育厅一般科研项目 (Y202146900); 宁波市自然科学基金 (2023J299)。

作者简介: 杜童申 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程与营养, E-mail: 982914346@qq.com。

* **通信作者:** 颜金鑫 (1995-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品凝胶结构设计, E-mail: yanjinxin@zswu.edu.cn。

gel properties and network structure of TG enzyme cross-linked flaxseed gum-soybean protein isolate composite.

Key words: composite gel; flaxseed gum; ultrasonic pretreatment; textural property; protein structure; microstructure

由于单一大豆分离蛋白凝胶存在结构松散、不易成型、成品率低、保水性差等问题,在食品加工中受到限制^[1]。多糖-蛋白质混合体系相比于单一的蛋白凝胶结构更加稳定牢固,但蛋白质和多糖容易产生相分离影响混合溶液的连续性和分散性^[2]。Chen 等^[3]研究发现,在大豆分离蛋白凝胶体系中添加适量的亚麻籽胶可以增加大豆分离蛋白的凝胶强度,而过量的亚麻籽胶则会因为由于相分离而产生的凝胶结构紊乱使得其凝胶体系稳定性下降。因此,可以通过不同的改性手段进行复合处理以促进混合体系溶胀,解决混合体系结构不均匀的问题进而改善其凝胶特性。

超声波作为极短的机械波可以在不同的介质中传导以改善不同食品的物理化学性质,提升食品品质^[4-5],尤其是在富含蛋白质的食品加工过程中可以显著改善食品的凝胶特性,从而使得产品具有更好的质构特性^[6]。刘冉等^[7]研究发现中功率的超声处理可以提高大豆分离蛋白凝胶的凝胶特性。丁俭等^[8]发现超声改性可以有效改善大豆分离蛋白与大豆可溶性多糖形成的复合乳液的空间结构,从而影响大豆分离蛋白-多糖界面结构特性和乳化体系的冻融稳定性。此外,谷氨酰胺转氨酶与蛋白交联形成的复合凝胶可以显著改善复合凝胶的凝胶特性^[9],而超声作为物理改性的一种方法,与酶制剂交联的化学改性相结合,可以显著改善蛋白的凝胶特性。王莹^[10]研究发现超声协同谷氨酰胺转氨酶处理可以显著增强核桃蛋白的凝胶特性,同时形成均匀致密、孔径均一的凝胶三维网状结构,但蛋白凝胶的结构从有序变为无序,热稳定性降低。目前已有一些关于超声处理对多糖-蛋白复合凝胶的影响^[11-15],但未有系统探究不同超声功率和时间预处理对亚麻籽胶-大豆蛋白复合凝胶凝胶和结构特性影响等方面的研究。

本研究基于谷氨酰胺转氨酶(Glutamine Transaminase, TG 酶)交联法,对亚麻籽胶-大豆分离蛋白混合溶液进行超声预处理,通过测定混合复合凝胶的质构特性、持水能力表征复合凝胶的凝胶特性;通过圆二色谱、内源性荧光光谱、扫描电镜分析超声预处理对复合凝胶结构的影响。以期对蛋白复合凝胶的结构功能特性进行有效改善,拓宽超声处理在多糖-蛋白质复合体系功能特性改善方面的应用,并为超声预处理改善食品凝胶特性在食品加工行业的研究开发提供了理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆分离蛋白(蛋白质含量为 95.3%±1.2%) 宁波市素莲食品有限公司;亚麻籽胶(高纯) 浙江一诺生物科技;TG 酶(102 型豆制品用) 泰兴市东圣生物科技有限公司;柠檬酸 潍坊英轩实业有限公

司;纯净水 杭州娃哈哈集团有限公司。

TMS-PRO 型 TA-XT Plus 物性分析仪 美国 FTC 公司;HH-3A 数显恒温水浴锅 国华(常州)仪器制造有限公司;PB-10 台式酸度计 金博仕(苏州)生物科技有限公司;AR223CN 电子天平 奥豪斯仪器(常州)有限公司;MS-PB 磁力搅拌器 上海双旭电子有限公司;SEM7 冷场高分辨扫描电镜 日本电子株式会社;F-380 荧光分光光度计 天津港东科技股份有限公司;Zetasizer Nano ZS 激光粒度仪 英国马尔文仪器有限公司;MOS-500 圆二色光谱仪 法国 Bio-Logic 公司;Centrifuge 5804 R 高速冷冻离心机 德国 Eppendorf 公司;JY92-IIDN 超声波细胞粉碎机 宁波新艺超声设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 亚麻籽胶-大豆分离蛋白混合溶液的配制 称取大豆分离蛋白 9 g,亚麻籽胶 0.072 g(亚麻籽胶质量:大豆分离蛋白=0.008:1)。将亚麻籽胶溶于 75 ℃ 下预热的 20 mL 纯净水中,均匀混合后冷却至室温。大豆分离蛋白先与纯净水混合,再将亚麻籽胶溶液倒入,充分搅拌混合,然后在磁力搅拌器上高速搅拌 1 h,保鲜膜封口,置于 4 ℃ 冰箱中保存备用。

1.2.2 超声预处理亚麻籽胶-大豆分离蛋白混合溶液 将混合溶液置于磁力搅拌器上,边搅拌边滴加 10% 柠檬酸,使溶液 pH 维持在 7.3,平衡 10 min。使用超声细胞破碎仪对混合溶液进行超声预处理。混合溶液置于冰水浴中,超声探头下降至液面下 2 cm 处。超声功率(最大额定功率为 900 W)设置 3 个梯度(20%、50%、80%),超声总时间设置 3 个梯度(1、5、10 min),探头超声 2 s,间隔 1 s。各组样品具体预处理如表 1。

表 1 超声预处理参数设定
Table 1 Ultrasonic pretreatment parameter setting

组别	超声功率(%)	超声时间(min)
Control	0	0
1	20	1
2	20	5
3	20	10
4	50	1
5	50	5
6	50	10
7	80	1
8	80	5
9	80	10

1.2.3 亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶制备 将超声预处理后的溶液加入 TG 酶(0.225 g TG 酶溶于 1 mL 纯净水中),其中 TG 酶加入量是大豆分离蛋白质量的 2.5%。在磁力搅拌器上搅拌 3 min,将溶液分装在小量杯中,在 48 ℃ 的水浴锅中水浴 2.3 h,水

浴过程中, TG 酶与大豆蛋白进行酶交联, 由溶液状态转变为凝胶状态。水浴结束后将小量杯迅速转移到 90 ℃ 水浴中灭酶 5 min。灭酶结束后取出在冰水浴中冷却到室温, 置于 4 ℃ 冰箱中保存, 待测质构。

1.2.4 复合凝胶质构测定 质构测定参考 Jin 等^[16]的方法并稍作修改。将制备好的凝胶取出在室温下放置 30 min, 用小平铲轻轻取出凝胶, 采用物性测试仪对大豆分离蛋白凝胶进行质构特性测定。测定模式选择 TPA 模式, 探头类型选择 R/40 圆盘形挤压探头, 参数设置探头距离样品台高度 30 mm, 样品挤压形变量 30%, 探头挤压速度 60 mm/min, 最小触发力 0.1 N。

1.2.5 复合凝胶持水性测定 参考戴慧敏等^[17]的实验方法, 并稍作修改。将复合凝胶用手术刀切成立方体小块, 准确称取质量 w_1 (约 2 g) 凝胶至 50 mL 离心管中, 用滤纸包裹后置于离心管中离心 (8000 r/min, 10 min)。离心完成后从离心管中取出滤纸, 将滤纸上的凝胶小心刮下, 称取离心后凝胶质量 w_2 。凝胶持水性按公式计算:

$$\text{WHC}(\%) = \frac{w_2}{w_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

1.2.6 混合溶液粒径测定 取超声预处理后的混合溶液, 使用蒸馏水稀释 100 倍。使用激光粒度分析仪测定混合溶液粒度分布。参数设定: 折射率: 1.322; 形状: 不规则形状。

1.2.7 复合凝胶圆二色光谱测定 取超声预处理后的溶液 5 mL, 加入 40 mL 蒸馏水, 制得浓度为 0.01 g/mL 的混合溶液。按比例加入 TG 酶进行交联反应, 反应结束后使用蒸馏水将混合溶液稀释至 0.1 mg/mL。使用 MOS-500 圆二色光谱仪和石英比

色皿。设置氮气流速为 2 L/min, 在 190~260 nm 波长处测定, 使用 CD-Pro 软件进行二级结构分析。

1.2.8 复合凝胶内源荧光光谱测定 用蒸馏水将样品稀释至蛋白浓度为 0.2 mg/mL。为了便于测定, 利用蛋白质内部含有的荧光基团作为探针进行荧光发射光谱分析, 荧光光谱在 250 nm 激发, 扫描激发波长扫描范围为 190~320 nm, 激发和发射狭缝宽 5 nm, 电压为 700 mV, 每个样液重复扫描 3 次。

1.2.9 复合凝胶微观结构测定 将制备好的凝胶切成长方块状, 冷冻干燥。将冷冻干燥后的样品按纵面切开, 用氮气吹去碎屑, 截面喷金处理。扫描电子显微镜上样品的微观结构放大倍数为 150、500 倍进行观察。

1.3 数据处理

所有试验重复 3 次, 采用 IBM SPSS Statistics 25 软件的单因素方差分析进行显著性差异分析, 使用 GraphPad 8.4.2 和 Origin 2021 软件绘图。试验数据以平均数±平均偏差表示, $P < 0.05$ 代表样品间存在显著性差异, 在图中用不同字母表示。

2 结果与分析

2.1 复合凝胶质构分析

超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白凝胶质构特性的影响如图 1 所示。由图 1 可知, 复合凝胶的硬度随着超声预处理的时间和功率的上升逐渐增大 (最高达到了 1.439 N, 对照组为 1.156 N), 粘附性则与之相反 (最低达到了 0.05475 mJ, 对照组为 0.07264 mJ)。当时间为 10 min, 随着超声功率增大, 其硬度呈现先上升后平缓的趋势; 当超声功率为 80% 时, 随着时间的增加, 硬度同样呈现先上升后平缓的趋势, 可能是超声预处理使得蛋白粒径变小, 分

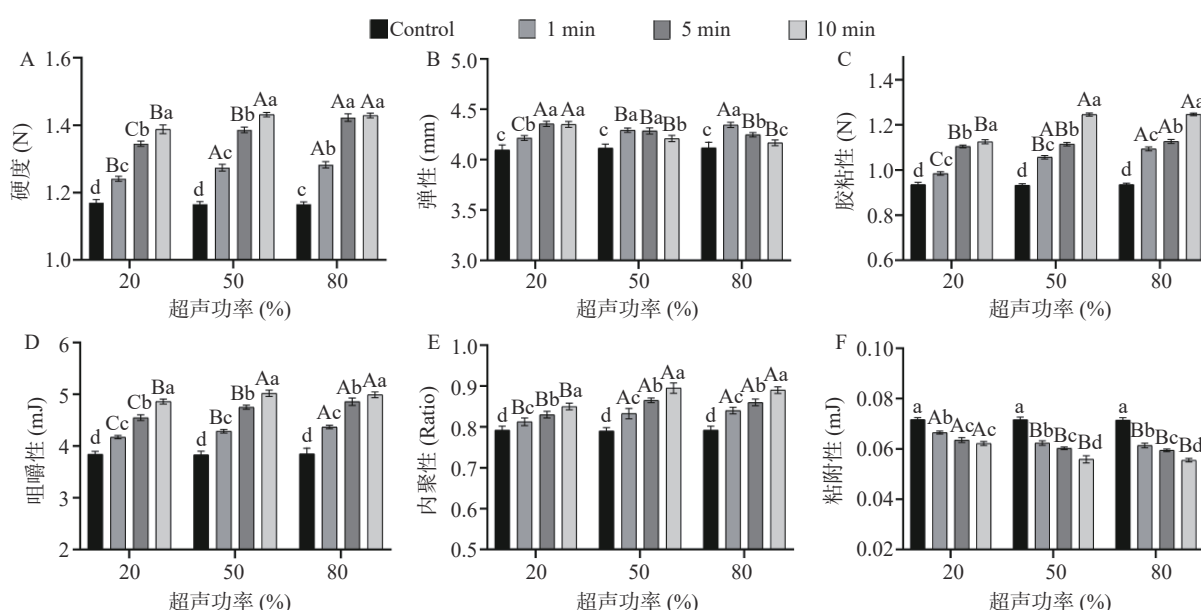


图 1 超声预处理对复合凝胶质构特性的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic pretreatment on texture characteristics of composite gel

注: 不同大写字母表示同一超声时间不同超声功率差异显著 $P < 0.05$; 不同小写字母表示同一超声功率不同超声时间差异显著 $P < 0.05$; 图 2、图 4 同。

子层呈现应力状态,导致凝胶硬度提高、粘附性降低^[18-19]。复合凝胶的胶粘性、咀嚼性和内聚性随着超声功率和时间的增大而增大,并且在控制时间为10 min时,超声功率的增大对复合凝胶胶粘性、咀嚼性、内聚性的影响呈现先上升后平缓的趋势。复合凝胶的内聚性与其抗破坏能力相关^[20],超声处理会引起疏水基团暴露经过TG酶交联形成更加致密的三维网状结构^[21],导致其抗破坏能力增强。复合凝胶的弹性随着超声时间和功率的增大呈先上升后下降的趋势,原因可能是经过高功率或较长时间的超声预处理后凝胶内部分子间聚集导致产生不溶性聚集体使得内部结构更加致密,分子间的柔性变化导致凝胶回弹效果变差^[22]。经过50%功率超声预处理10 min后,显著提升了复合凝胶的凝胶特性($P<0.05$),这与胡雪娇等^[23]、刘竞男等^[24]、邢邵平^[25]研究结果类似。

2.2 复合凝胶持水性分析

凝胶的持水性与凝胶品质有着紧密的联系,凝胶的持水性直接反映了凝胶网络结合水的能力^[21]。超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶持水性的影响如图2所示。由图2可得,与对照组相比,经过超声预处理的凝胶持水性显著提升(最高达到了67.25%, $P<0.05$)。在低功率组和中功率组中,随着超声时间的增加,凝胶持水性呈上升趋势,各时间梯度中变化显著($P<0.05$)。在高功率组中,随着超声时间的延长,凝胶持水性呈先上升后趋于平缓的趋势,超声时间为5和10 min持水性没有显著差异($P>0.05$)。对比相同时间下,不同功率对凝胶持水性的影响。在控制超声1和5 min条件下,随着功率的增加,凝胶的持水性逐渐增强。在控制超声10 min条件下,随着功率的增加,凝胶的持水性呈先上升后平缓的趋势。可能是超声预处理后,蛋白质内部的疏水基团会接到蛋白质分子表面,有利于产生蛋白质-水之间的相互作用,提高蛋白凝胶持水性^[26],并且随着超声时间的增加,将会促进TG酶的交联使得水在凝胶网状结构中聚集,增加凝胶的持水性^[8]。有研究表明,随着持水性的提升,凝胶样品的硬度也会增加^[27],

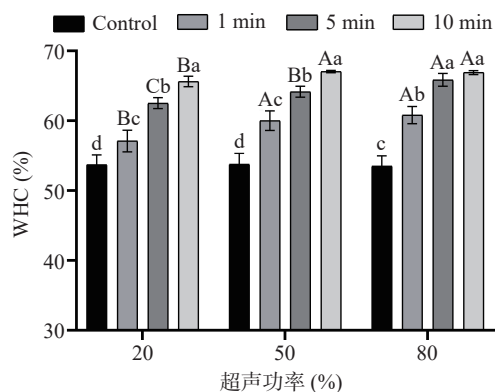


图2 超声预处理对复合凝胶持水性的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic pretreatment on water-holding capacity of composite gel

这与前文超声预处理对复合凝胶硬度的影响变化趋势一致。

2.3 混合溶液粒径分析

超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白混合溶液的粒径分布和平均粒径的影响如图3和图4所示。在相同超声功率条件下,随着超声时间的延长,亚麻籽胶-大豆分离蛋白混合溶液的粒径呈减小趋势,且各组间均有显著差异($P<0.05$)。在相同超声时间条件下,随着超声功率的增大,亚麻籽胶-大豆分离蛋白混合溶液的粒径呈减小趋势,且各组间均有显著差异($P<0.05$)。超声预处理组与空白对照组相比,溶液中粒径显著减小(从856.0 nm降低至最低217.5 nm, $P<0.05$)。说明超声预处理能够促进混合体系的颗粒分散更加均匀,使得结构更加稳定,且超声时间越长,超声功率越高,混合体系的粒径越小。推测原因可能是超声预处理导致肽键断裂引起亲水氨基酸残基的暴露,导致可溶性蛋白增加使混合体系的粒径减小;也可能是超声预处理的空化效应减弱了分子间的相互作用,降低了蛋白质分子的聚集程度^[28-29],使得复合凝胶具有更加均匀和精细的结构。而凝胶结构更加精细同样会让复合凝胶的持水性得到提升,这与前文经过超声预处理后持水性得到提升的结论一致。李杨等^[30]同样发现,经过超声处理后蛋白结构展开,粒径减小,更有利于TG酶的作用。高俊炉等^[13]、王喜

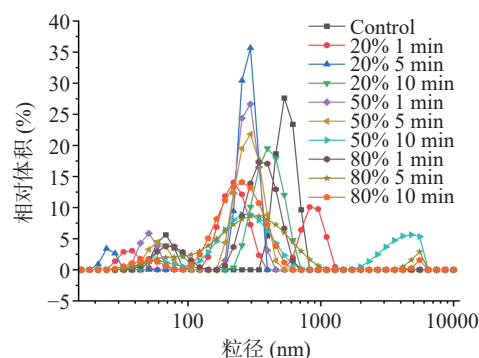


图3 亚麻籽胶-大豆分离蛋白混合溶液粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of flaxseed gum-soybean protein isolate mixed solution

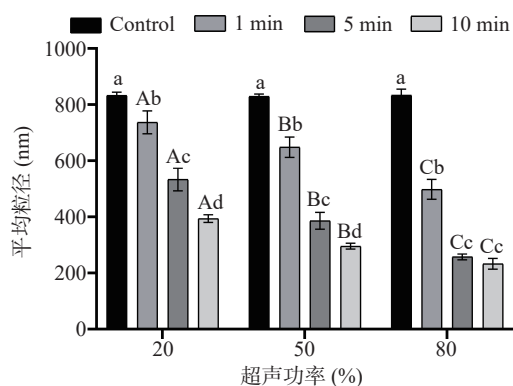


图4 超声预处理对混合溶液平均粒径的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic pretreatment on average particle size of mixed solution

波等^[14]、孙佳等^[15]的研究结果相似。

2.4 复合凝胶圆二色光谱分析

圆二色光谱可以通过测定蛋白二级结构的变化表征凝胶样品宏观、微观变化。圆二色光谱分为两个波长区段,肽键的圆二色光谱信息在 178~250 nm 的远紫外波段内。在 210 nm 波长处的负峰是 α -螺旋的特征峰,与 β -折叠和无规则卷曲相比, α -螺旋结构更稳。超声预处理对复合凝胶圆二光谱的影响见图 5。超声预处理对蛋白二级结构的影响见表 2。由表 2 可得,经超声预处理后,蛋白二级结构中 α -螺旋和 β -转角占比减少, β -折叠与无规则卷曲占比上升,推测因为超声预处理使得蛋白内部的疏水残基暴露在分子外部,蛋白结构变得不稳定,也有可能是超声的空化效应导致刚性的蛋白结构被破坏,蛋白质分子柔性增强,导致蛋白结构从有序向无序发展^[8]。此外也有相关研究表明,蛋白质分子变性和展开使得 α -螺旋结构向 β -折叠转变,而 β -折叠和 β -转角的含量增加可以增加凝胶强度^[31-32],这也与质构结果互相印证。超声预处理会使得复合凝胶的蛋白二级结构变得不稳定,有利于凝胶功能特性的改善,与马素敏等^[33]、曹涓泉等^[34]的结论一致。

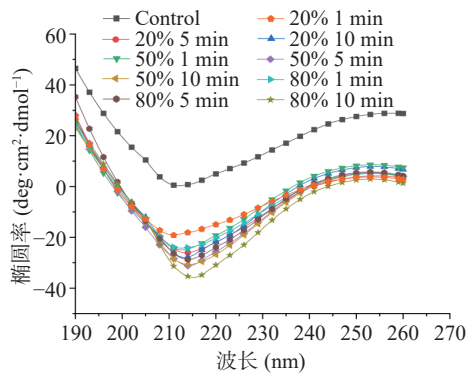


图 5 亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶圆二光谱图
Fig.5 Circular dichroism of flaxseed gum-soybean protein isolate composite gel

表 2 超声预处理对蛋白二级结构的影响
Table 2 Effect of ultrasonic pretreatment on secondary structure of protein

样品	α -螺旋(%)	β -折叠(%)	β -转角(%)	无规则卷曲(%)
Control	21.78	32.16	28.14	17.92
20% 1 min	21.42	32.87	27.65	18.06
20% 5 min	21.08	33.01	27.39	18.52
20% 10 min	20.97	33.42	27.18	18.43
50% 1 min	21.27	32.46	27.54	18.73
50% 5 min	20.87	32.71	27.46	18.96
50% 10 min	20.63	32.85	27.31	19.21
80% 1 min	21.09	32.55	27.50	18.86
80% 5 min	20.76	32.79	27.32	19.13
80% 10 min	20.61	32.90	27.25	19.24

2.5 复合凝胶荧光光谱分析

内源荧光光谱可用于反映蛋白质三级结构的变化。蛋白质分子中的色氨酸和酪氨酸残基在特定情况下能激发出荧光,并且受到微观环境的影响,可用

于蛋白质三级结构构象变化的观察^[35]。超声预处理对复合凝胶蛋白荧光强度影响见图 6。超声预处理对蛋白三级结构的影响见表 3。由表 3 可得,超声预处理后蛋白荧光强度提高,在相同功率的条件下,荧光强度随着超声时间的延长而增强。在相同时间的条件下,荧光强度随着超声功率的增大而增强。荧光强度的增加是因为超声预处理使蛋白结构舒展开,蛋白分子的疏水功能被破坏,分子内部的发色基团被释放出来,从而影响复合凝胶的荧光强度^[36]。谷俊华等^[37]探究了超声处理对豌豆蛋白结构的影响同样得到类似的结论。

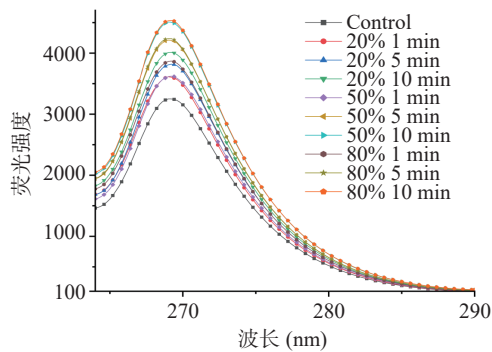


图 6 亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶荧光光谱图
Fig.6 Fluorescence spectrum of flaxseed gum-soybean protein isolate composite gel

表 3 超声预处理对蛋白三级结构的影响
Table 3 Effect of ultrasonic pretreatment on tertiary structure of protein

样品	荧光强度
Control	3250.552
20% 1 min	3613.096
20% 5 min	3819.205
20% 10 min	4010.98
50% 1 min	3623.713
50% 5 min	4213.278
50% 10 min	4508.920
80% 1 min	3870.219
80% 5 min	4238.324
80% 10 min	4534.667

2.6 复合凝胶微观结构分析

不同超声预处理对亚麻籽胶-大豆分离蛋白复合凝胶微观结构的影响见图 7。由图 7 可得,未经超声预处理的亚麻籽胶-大豆分离蛋白凝胶在低倍数下结构杂乱无序,孔洞无规则,在高倍数下凝胶的壁较薄。空白组凝胶样品凝胶结构较超声组更粗糙,有一定的交联孔洞更大,更不规则。超声预处理后会使得凝胶的微观结构有一定的改善,凝胶空间结构由无序变得有序,凝胶孔径变小,凝胶孔壁增厚。在相同超声功率的条件下,随着超声时间的延长,凝胶结构由无序转变为有序,凝胶壁也变得厚实饱满。在相同超声时间的条件下,随着超声功率的增大,也表现出同样的变化趋势。超声波的机械效应和空化效应使得复合凝胶中蛋白分子间的交联作用较对照组更充分,形

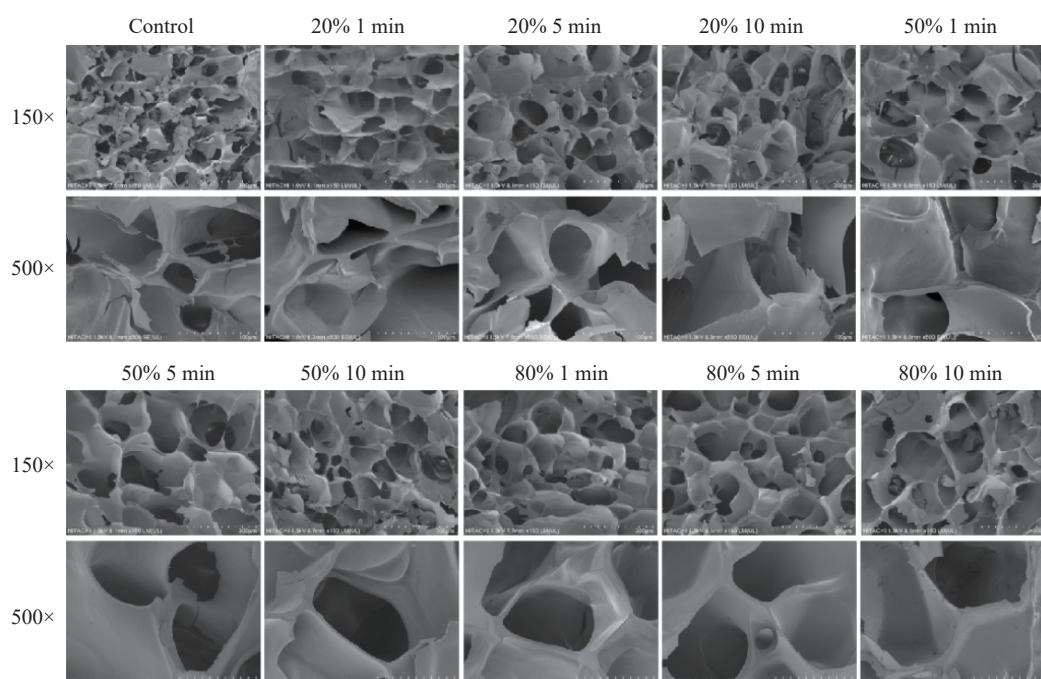


图7 超声预处理对复合凝胶微观结构的影响

Fig.7 Effect of ultrasonic pretreatment on microstructure of composite gel

成的凝胶网络结构更加致密均匀,对网络结构中的水分束缚作用更强^[38]。其原因可能是在超声作用下,空化效应减小了混合溶液中蛋白分子的粒径大小,功能基团暴露于蛋白分子表面,更有利于TG酶的交联,加强蛋白质分子彼此之间的相互作用,使得蛋白质之间的交联密度更大,形成的凝胶网络更细致有序^[39-40],这些细致有序的凝胶网络结构能够使得复合凝胶具有更好的凝胶特性。但同时过高的超声功率也可能会使得蛋白质分子变性,蛋白分子彼此之间相互作用减弱,破坏蛋白质之间的疏水相互作用,形成的凝胶网络空穴分布不均匀,机械性能变差^[41]。李健^[42]、赵城彬等^[43]、尹丽莎等^[44]分别探究超声处理对燕麦球蛋白、大豆分离蛋白/麦芽糊精混合物、藜麦分离蛋白结构的影响中同样得到类似的结论。

3 结论

本研究通过对超声预处理复合凝胶分子结构(蛋白二级结构、蛋白三级结构)、凝胶特性(持水性、质构特性)的测定并对凝胶微观结构观察可知:50%功率超声预处理10 min可以促进多糖和蛋白分子间作用力,显著增强其凝胶强度和持水性($P<0.05$);同时,混合溶液的粒径显著减小($P<0.05$)进一步证实了超声预处理对复合凝胶保水性的改善。另一方面,超声预处理促使复合凝胶中的 α -螺旋向 β -折叠转化,并使复合凝胶的蛋白三级结构舒展开,有利于其凝胶功能的改善。此外,电镜结果同样显示50%功率的超声预处理10 min有利于形成更加均匀致密的凝胶结构,更好地揭示了一定程度的超声预处理对复合凝胶的改善机制。本研究为超声预处理改善食品凝胶特性在食品加工行业的研究开发提供了理论依据和数据支撑。

© 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] 曲敏,王宇,刘琳琳,等.亲水胶体对植物蛋白凝胶影响的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2022,13(22):7246-7254. [QU M, WANG Y, LIU L L, et al. Progress in investigating the effects of hydrophilic colloids on plant protein gels[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(22): 7246-7254.]
- [2] 曾琳.其他植物蛋白的添加对大豆蛋白热诱导凝胶性质的影响[D].无锡:江南大学,2022. [ZENG L. Effects of other plant protein addition on heat-induced gel properties of soy protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [3] CHEN C S, MA P P, JIANG S Y, et al. Effect of flaxseed gum on the textural, rheological, and tribological properties of acid-induced soy protein isolate gels[J]. Polymers, 2023, 15(13): 2834.
- [4] 田德祥,刘新利,王德志.超声波在材料工程中的应用研究进展[J].材料研究与应用,2022,16(6):942-958. [TIAN D X, LIU X L, WANG D Z. Research progress of ultrasonic technology in materials engineering applications[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(6): 942-958.]
- [5] 蓝蔚青,赵家欣,谢晶.超声波处理技术在水产品加工中的应用研究进展[J].包装工程,2022,43(11):132-139. [LAN W Q, ZHAO J X, XIE J. Research progress on the applications of ultrasound treatment technology in the processing of aquatic products[J]. Packing Engineering, 2022, 43(11): 132-139.]
- [6] 梁诗洋,张鹰,曾晓房,等.超声波技术在食品加工中的应用进展[J].食品工业科技,2023,44(4):462-471. [LIANG S Y, ZHANG Y, ZENG X F, et al. Research progress on the application of ultrasound in food processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 462-471.]
- [7] 刘冉,曾庆华,王振宇,等.超声波处理对大豆分离蛋白凝胶流变性和凝胶形成的影响[J].食品工业科技,2020,41(21):87-92,98. [LIU R, ZENG Q H, WANG Z Y, et al. Effects of ultra-

sonic treatment on gel rheological properties and gel formation of soybean protein isolate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21): 87–92, 98.]

[8] 丁俭, 李杨, 史博瑞, 等. 超声改性大豆分离蛋白与大豆可溶性多糖复合乳化体系的冻融稳定性研究[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 88–94. [DING J, LI Y, SHI B R, et al. Freeze-thaw stability of emulsion system from ultrasound-modified soy protein isolate and soluble polysaccharide[J]. Food Science, 2018, 39(9): 88–94.]

[9] 卞君杰. TG 酶对蛋白乳化特性的影响及在肌原纤维蛋白复合凝胶中的作用[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. [BIAN J J. Effect of TG enzyme on protein emulsifying properties and its role in myofibrillar protein composite gel[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.]

[10] 王莹. 超声-谷氨酰胺转氨酶制备核桃蛋白凝胶及其缓释效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. [WANG Y. Walnut protein gels induced by ultrasound-transglutaminase and its controlled release properties[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.]

[11] ZHAO C B, YIN H H, YAN J N, et al. Structure and acid-induced gelation properties of soy protein isolate-maltodextrin glycation conjugates with ultrasonic pretreatment[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 112: 106278.

[12] CUI Q, ZHANG A Q, LI R, et al. Ultrasonic treatment affects emulsifying properties and molecular flexibility of soybean protein isolate-glucose conjugates[J]. Food Bioscience, 2020, 38(2): 100747.

[13] 高俊炉, 田学智, 王智颖, 等. 超声对魔芋葡甘聚糖与花生蛋白复合体系流变与结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(8): 207–215. [GAO J L, TIAN X Z, WANG Z Y, et al. Effects of ultrasonic treatment on rheological property and structure of konjac glucomannan and peanut protein complex system[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(8): 207–215.]

[14] 王喜波, 崔强, 张安琪, 等. 超声处理改善不同比例大豆-乳清混合蛋白理化性质[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 299–305.

[WANG X B, CUI Q, ZHANG A Q, et al. Ultrasonic treatment improving physical and chemical properties of soybean-whey mixed protein in different proportions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22): 299–305.]

[15] 孙佳, 王春燕, 皮若冰, 等. 超声处理对转谷氨酰胺酶交联乳清分离蛋白的结构特性和凝胶保水性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 77–81. [SUN J, WANG C Y, PI R B, et al. Effect of ultrasound treatment on structural properties and gel water holding capacity of transglutaminase-catalyzed whey protein isolate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 77–81.]

[16] JIN I H, KIM J E, SEO J H, et al. Physicochemical properties of soy protein isolate gels emulsified with various oils using a microbial transglutaminase[J]. Food Science & Biotechnology, 2013, 22(1): 129–136.

[17] 戴慧敏, 邓伟, 陈曼华, 等. 谷朊粉对低钠盐白鲢鱼糜制品凝胶特性的改良[J]. 肉类工业, 2018(4): 30–39. [DAI H M, DENG W, CHEN M H, et al. Modification of gel properties of low sodium salt silver carp surimi products by wheat gluten[J]. Meat Industry, 2018(4): 30–39.]

[18] 王旭, 袁杰, 李昕, 等. 乳清蛋白-亚麻籽胶三相体系构建及其微观结构与流变学特性研究[C]//中国食品科学技术学会第十四届年会暨第九届中美食品业高层论坛论文摘要集, 2017: 719–720. [WANG X, YUAN S J, LI X et al. Construction of whey protein-linseed gum three-phase system and its microstructure and rheological properties[C]. Proceedings of the 14th Annual Confer-

ence of the Chinese Institute of Food Science and Technology and the 9th China & US Food Industry High-level Forum, 2017: 719–720.]

[19] CHANDRAPALA J, ZISU B, PALMER M, et al. Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(5): 951–957.

[20] CORTEZ-TREJO M C, LOARCA-PIÑA G, FIGUEROA-CÁRDENAS J D, et al. Gel properties of acid-induced gels obtained at room temperature and based on common bean proteins and xanthan gum[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107873.

[21] 贾丹, 刘茹, 刘明菲, 等. 转谷氨酰胺酶对鳙鱼糜热诱导凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(9): 37–41. [JIA D, LIU R, LIU M F, et al. Effect of transglutaminase on heat-induced gel properties of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi[J]. Food Science, 2013, 34(9): 37–41.]

[22] 李云. 大豆蛋白聚集及共混凝胶性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007. [LI Y. The study on properties of aggregated of soybean protein and mixed gelation with native soybean protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.]

[23] 胡雪娇, 陈永浩, 张春红, 等. 改性方法对核桃浓缩蛋白凝胶性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 17–21. [HU X J, CHEN Y H, ZHANG C H, et al. Effects of different modification methods on gelation of walnut protein concentrate[J]. Food and Machinery, 2016, 32(10): 17–21.]

[24] 刘克男, 张智慧, 王琳, 等. 超声处理对谷氨酰胺转氨酶诱导的大豆分离蛋白凝胶冻融稳定性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 76–82. [LIU J N, ZHANG Z H, WANG L, et al. Effect of ultrasound on freeze-thaw stability of soy protein isolate gel induced by glutamine transaminase[J]. Food Science, 2020, 41(13): 76–82.]

[25] 邢绍平. 超声处理对乳清浓缩蛋白凝胶特性影响[J]. 乳业科学与技术, 2016, 39(2): 8–10. [XING S P. Effects of ultrasonic treatment on gel properties of whey protein concentrate[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2016, 39(2): 8–10.]

[26] 江连洲, 张满元, 潘悦, 等. 超声处理大豆分离蛋白与肌原纤维蛋白共混体系乳化性及凝胶性研究[J]. 中国食物与营养, 2018, 24(2): 43–48. [JIANG L Z, ZHANG X Y, PAN Y, et al. Study on emulsification and gel properties of ultrasonic treated soybean protein isolate and myofibrillar protein blends[J]. Food and Nutrition in China, 2018, 24(2): 43–48.]

[27] HAN M, ZHANG Y, FEI Y, et al. Effect of microbial transglutaminase on NMR relaxometry and microstructure of pork myofibrillar protein gel[J]. European Food Research & Technology, 2009, 228(4): 665–670.

[28] QIN X S, LUO S Z, CAI J, et al. Transglutaminase-induced gelation properties of soy protein isolate and wheat gluten mixtures with high intensity ultrasonic pretreatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 31: 590–597.

[29] 胡坦, 张珮珮, 郑婷, 等. 高场强超声-加热联用增强大豆分离蛋白冷凝胶凝胶特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 306–314. [HU T, ZHANG P P, ZHENG T, et al. High intensity ultrasound-heat pretreatments improving gelation properties of cold-set soy protein isolate induced by glucono- δ -lactone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 306–314.]

[30] 李杨, 刘宝华, 姜楠, 等. 超声处理对黑豆蛋白凝胶性能的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(1): 161–169. [LI Y, LIU B H, JIANG N, et al. Effect of ultrasonic treatment on properties of black

- bean protein gel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(1): 161-169.]
- [31] GAO X Q, HAO X Z, XIONG G Y, et al. Interaction between carrageenan/soy protein isolates and salt-soluble meat protein[J]. Food and Bioproducts Processing. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C, 2016, 100(Pt.A): 47-53.
- [32] LI M, YANG R, FENG X C. Effects of low-frequency and high-intensity ultrasonic treatment combined with curdlan gels on the thermal gelling properties and structural properties of soy protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 127506.
- [33] 马素敏, 何立超, 李成梁, 等. 猪血红蛋白超声提取工艺响应面优化及超声对其结构的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 184-190, 216. [[MA S M, HE L C, LI C L, et al. The response surface optimization on ultrasonic extraction process of porcine hemoglobin and effect of ultrasonic process on its structure[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 184-190, 216.]
- [34] 曹涓泉, 李心悦, 徐静, 等. 圆苞车前子壳粉对鸡肉肌原纤维蛋白凝胶特性和蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 100-107. [CAO J Q, LI X Y, XU J, et al. Effects of psyllium husk powder on gel properties and protein structure of chicken myofibrillar protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 100-107.]
- [35] ZHANG Q T, TU Z C, XIAO H, et al. Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate[J]. Food & Bioproducts Processing, 2014, 92(1): 30-37.
- [36] XIA S Q, LI Y Q, ZHAO Q, et al. Probing conformational change of bovine serum albumin-dextran conjugates under controlled dry heating[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2015, 63(16): 4080-4086.
- [37] 谷俊华, 黄斐. 超声改性处理对豌豆蛋白结构性质的影响[J]. 吉林农业科技学院学报, 2022, 31(5): 8-11, 17. [GU J H, HUANG F. Effects of ultrasonic modification on the structural properties of pea protein[J]. Journal of Jilin Agricultural Science and Technology University, 2022, 31(5): 8-11, 17.]
- [38] 李斌, 陈海琴, 赵建新, 等. 超声辅助凝胶化对鲢鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(6): 65-69. [LI B, CHEN H Q, ZHAO J X, et al. Effect of ultrasound assisted gel on gel properties of silver carp surimi[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(6): 65-69.]
- [39] POWRIE, WILLIAM D. Low-temperature preservation of foods and living matter[M]. Taylor & Francis, 1973: 1-616.
- [40] 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.
- [41] 刁小琴, 关海宁, 乔秀丽, 等. 超声处理对肌原纤维蛋白凝胶特性和结构的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(2): 197-200. [DIAO X Q, GUAN H N, QIAO X L, et al. Effect of ultrasound on gel properties and structure of pork myofibrillar protein[J]. The Food Industry, 2020, 41(2): 197-200.]
- [42] 李健. 超声波改性燕麦球蛋白的研究[D]. 福州: 福州大学, 2017. [LI J. Study on ultrasonic modification of oat globulin[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.]
- [43] 赵城彬, 尹欢欢, 鄢健楠, 等. 超声处理的大豆分离蛋白/麦芽糊精混合物酸诱导凝胶性质研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(3): 156-163. [ZHAO C B, YIN H H, YAN J N, et al. Study on acid induced gel properties of soybean protein isolate/maltodextrin mixture treated by ultrasound[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(3): 156-163.]
- [44] 尹丽莎, 朱莹莹, 董吉林, 等. 超声处理对藜麦分离蛋白功能特性和微观结构的影响[J]. 轻工学报, 2022, 37(2): 38-43. [YIN L S, ZHU Y Y, DONG J L, et al. Effects of ultrasonic treatment on the functional properties and microstructure of quinoa protein isolates[J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(2): 38-43.]