



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.

DOI:10.12187/2022.02.005

超声处理对藜麦分离蛋白功能特性和微观结构的影响

尹丽莎¹,朱莹莹^{1,2,3},董吉林^{1,2,3},申瑞玲^{1,2,3}

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001;

2. 食品生产与安全河南省协同创新中心,河南 郑州 450001;

3. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室,河南 郑州 450001

摘要:采用传统碱溶酸沉法提取藜麦分离蛋白(QPI),研究中强度超声处理(功率为500 W)对QPI功能特性和微观结构的影响。结果表明:提取的QPI纯度为87.78%,主要由清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白组成;超声处理可显著提高QPI的溶解度($P<0.05$),当超声处理60 min时,其溶解度最大,为78.25%;QPI的乳化性随超声处理时间的延长而显著增强($P<0.05$);超声处理可显著降低QPI的平均粒径($P<0.05$),当超声处理60 min时,其平均粒径最小,为56.86 μm ;与未经超声处理组相比,经超声处理60 min的QPI颗粒更加致密均匀,但表面较多褶皱。

关键词:藜麦分离蛋白;超声处理;功能特性;微观结构

中图分类号:TS201.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2022)02-0038-06

0 引言

藜麦,原产于南美洲安第斯山脉的中高海拔山区,作为印第安人的一种传统主食,具有营养素均衡、易熟、易消化等特点。联合国粮食及农业组织(FAO)认定藜麦是可以满足人类所需全部营养的单作物粮食,其蛋白质含量丰富,氨基酸比例均衡,且包含人体所需的全部必需氨基酸^[1]。与大多数谷物相比,藜麦蛋白的品质更接近乳类和肉类,是一种优质可持续性的植物蛋白资源^[2],可作为食品工业的功能性成分原料,生产可食用的薄膜、饮料、酱

汁、香肠等^[3]。

藜麦蛋白的功能特性决定了其应用前景。研究表明^[4],藜麦蛋白表现出良好的乳化稳定性,但其乳化能力较差,且溶解性不佳。目前,有多种物理技术被用于改性植物蛋白,以改善其功能特性。其中,超声处理是一种常用的食品大分子改性技术,具有高效、绿色、可持续等特点。孙燕婷等^[5]研究发现,超声处理(功率为500 W)大豆蛋白5 min,能够显著提高其溶解性和乳化活性;徐珍霞等^[6]利用超声技术对亚麻籽蛋白进行改性发现,超声处理(功率为360 W)亚麻籽蛋白乳液30 min,可明显提高其稳定

收稿日期:2021-04-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1001405)

作者简介:尹丽莎(1999—),女,河南省邓州市人,郑州轻工业大学硕士研究生,主要研究方向为谷物营养与加工。E-mail:1578662984@qq.com

通信作者:申瑞玲(1967—),女,山西省灵石县人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为谷物营养与加工。E-mail:shenrl1967@163.com

性及凝胶特性。此外,超声处理对植物蛋白微观结构也有一定影响:望运滔等^[7]研究发现,经超声改性处理后的鹰嘴豆蛋白的 α -螺旋含量升高, β -折叠含量降低;A. Vera 等^[8]使用超声技术改性藜麦蛋白后发现,高强度(功率>500 W)超声处理虽能改变藜麦蛋白结构,降低其平均粒径,但却容易形成较大蛋白聚集体颗粒,增加藜麦蛋白浊度。

鉴于此,本研究拟以藜麦为原料,采用传统碱溶酸沉法提取藜麦分离蛋白(QPI),研究功率为 500 W 的中强度超声处理对 QPI 功能特性和微观结构的影响,以为藜麦蛋白的加工和应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

藜麦(青藜 2 号),青海省农科院提供;花生油,山东鲁花集团有限公司产;十二烷基硫酸钠(SDS)、HCl、NaOH 等试剂,均为分析纯,购自天津市风船化学试剂科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

D5A-WS 型台式低速离心机,湖南湘怡实验室仪器开发有限公司产;K9840 型自动凯氏定氮仪,济南海能仪器有限公司产;SCIENTZ-10N 型冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司产;SB-25-12D 型超声仪,宁波新芝生物科技股份有限公司产;Multiskan GO1510 型全波长酶标仪,美国 Thermo 公司产;S3500 型激光粒度仪,美国 Microtrac 公司产;JSM-76490LV 型扫描电子显微镜(SEM),日本 JEOL 公司产。

1.3 QPI 的提取和超声处理

1.3.1 QPI 的提取 将藜麦烘干、磨粉后过 60 目筛,备用。参考毕爽等^[9]的传统碱溶酸沉法,主要提取步骤是:将藜麦粉分散于水中(m (藜麦粉/g): V (水/mL)=1:12),用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 值至 9.5,于 35 ℃ 条件下振荡提取 2.0 h 后,静置 1.0 h,于 4000 r/min 条件下离心 20 min,取上清液;用 1 mol/L HCl 溶液调节上清液 pH 值至 4.5,静置 4.0 h,于 4000 r/min 条件下离心 20 min,得到藜麦蛋白沉淀;将藜麦蛋白沉淀用蒸馏水反复水洗至中性,冷冻干燥后粉碎,即得 QPI,于 4 ℃ 冰箱保

存,备用。

1.3.2 QPI 的超声处理 将提取的 QPI 粉末充分分散于蒸馏水中,制备 QPI 悬浮液(50 mg/mL),于室温下温和搅拌过夜。对 5 组 QPI 悬浮液(100 mL)于室温下用 500 W 超声强度进行超声改性处理,将超声处理时间分别设置为 20 min、40 min、60 min、80 min 和 100 min。超声处理后将样品冷冻干燥,并于 4 ℃ 冰箱保存,待用。

1.4 QPI 的品质分析

1.4.1 QPI 的纯度测定 根据 GB 5009.5—2016^[10]测定 QPI 的纯度。

1.4.2 QPI 的蛋白组分测定 参考田旭静等^[11]的方法测定 QPI 的蛋白组分。

1) 清蛋白含量的测定。称取 1.0 g QPI,加入 20 mL 蒸馏水,于 45 ℃ 条件下搅拌 1.0 h 后,于 4000 r/min 条件下离心 20 min,取上清液,于 25 mL 容量瓶中定容,采用凯氏定氮法测定清蛋白含量;沉淀用蒸馏水洗涤后,作为后续实验的原料。

2) 球蛋白含量的测定。向清蛋白提取后的沉淀中加入质量分数为 2% 的 NaCl 溶液 20 mL,于 45 ℃ 条件下搅拌 1.0 h,后续操作同上,测得球蛋白含量;沉淀用蒸馏水洗涤后,作为后续实验的原料。

3) 醇溶蛋白含量的测定。向球蛋白提取后的沉淀中加入体积分数为 70% 的乙醇溶液 20 mL,于 50 ℃ 条件下搅拌 30 min,后续操作同上,测得醇溶蛋白含量;沉淀用蒸馏水洗涤后,作为后续实验的原料。

4) 谷蛋白含量的测定。向醇溶蛋白提取后的沉淀中加入 0.05 mol/L 的 NaOH 溶液 20 mL,于 50 ℃ 条件下搅拌 1.0 h,后续操作同上,测得谷蛋白含量;剩余蛋白即为不可溶蛋白。

1.5 QPI 功能特性的测定

1.5.1 溶解度 将各组样品与去离子水(m (样品/g): V (去离子水/mL)=1:100)混合得到 QPI 悬浮液,并于室温下搅拌 1.0 h 后,于 3500 r/min 条件下离心 20 min,测定上清液蛋白含量。溶解度^[12]计算公式如下:

$$\text{溶解度} = (W_1 \times m_1) / (W_2 \times m_2) \times 100\%$$

其中, W_1 是上清液蛋白含量/%; m_1 是上清液质量/g;

W_2 是分离蛋白含量/%; m_2 是分离蛋白质量/g。

1.5.2 持水性和持油性 称取 0.5 g 样品置于 10 mL 离心管中, 称重, 加入 4 mL 蒸馏水/花生油, 漩涡振动 5 min 使其混合均匀, 室温下静置 1.0 h 后, 于 4000 r/min 条件下离心 20 min, 将上清液移除。测样品持水性时, 用滤纸吸干离心管壁残留水分, 再称重; 测样品持油性时, 用滤纸吸干离心管壁残留油滴, 再称重。持水性^[13]和持油性^[14]的计算公式均如下:

$$\text{参数值} = (W_2 - W_1) / W_0$$

其中, W_0 是蛋白质量/g; W_1 是离心管和蛋白质量/g; W_2 是去掉上清液后离心管和蛋白质量/g。

1.5.3 乳化性和乳化稳定性 取 5 mL 花生油和 15 mL 质量浓度为 5 mg/mL 的分离蛋白溶液, 混匀, 用均质机于 10 000 r/min 条件下分散 2 min; 分散结束后, 立即(0 min)从得到的溶液底部取 50 μ L 乳浊液, 加入 5 mL 质量分数为 0.1% 的 SDS 溶液, 混匀, 在波长为 500 nm 处测其吸光度; 10 min 后, 重复上述操作。乳化性和乳化稳定性^[15]的计算公式如下:

$$\text{乳化性} = \frac{(2 \times 2.303 \times A_0 \times 100)}{(\theta \times C \times 10\,000)}$$

$$\text{乳化稳定性} = A_{10} / A_0 \times 100\%$$

其中, A_0 是 0 min 时的吸光度; A_{10} 是 10 min 时的吸光度; θ 是油相体积分数, 为 0.25; C 是蛋白样品质量浓度/(g·mL⁻¹)。

1.6 QPI 平均粒径与分布的测定

参照 C. M. Liu 等^[16]的方法, 使用激光粒度仪对样品的粒径与分布进行测定。

1.7 QPI 微观结构的测定

采用导电胶将超声处理前后的 QPI 样品(已冻干)粘附于金属铜座上, 置于真空喷镀仪器内, 将样品表面喷金使其导电^[17]。采用 SEM 在低真空模式、20 kV 电压下对 QPI 样品进行扫描。

1.8 数据分析

使用 SPSS 20.0 软件进行显著差异分析($P < 0.05$), 采用 Origin 2018 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 QPI 的组成分析

QPI 的近似组成如表 1 所示。实验所得 QPI 的

纯度为 87.78%, 高于王秉等^[18]对 QPI 的提取纯度 78.30%, 这可能与 QPI 提取工艺方法有关。QPI 的组成分析结果显示, 总蛋白由清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白和不可溶蛋白组成, 其中清蛋白和球蛋白含量较高, 两者含量之和高达 60% 以上, 而醇溶蛋白和谷蛋白的含量较低, 这与王秉^[19]的研究结果一致。

2.2 超声处理对 QPI 功能特性的影响分析

2.2.1 超声处理对溶解度的影响 不同超声处理时间对溶解度的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出, 超声处理时间为 20~60 min 时, QPI 的溶解度随超声处理时间的延长而增高; 超声处理时间为 60 min 时, 溶解度最高, 达 78.25%, 这与谢为峰等^[20]的研究结果一致。这是因为蛋白质的构象在超声波的作用下发生改变, 亲水基团暴露在外, 与水分子结合能力增强, 提高了蛋白质的溶解度。但随着超声处理时间的继续延长(>60 min), 蛋白质分子的空间结构破坏程度较大, 导致蛋白质变性, 溶解度降低^[21]。

2.2.2 超声处理对持水性和持油性的影响 持水性和持油性是食品加工中的重要特征和品控指标。不同超声处理时间对持水性和持油性的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出, 不同超声处理时间对 QPI 的持水性和持油性的影响趋势几乎相同。QPI 的持水性和持油性均随超声处理时间的延长而逐渐增

表 1 QPI 的近似组成(湿重)
Table 1 Approximate composition of QPI
(wet weight) %

样品	总蛋白	清蛋白	球蛋白	醇溶蛋白	谷蛋白	不可溶蛋白
QPI	87.78±0.46	33.42±0.21	28.11±0.18	1.51±0.06	17.40±0.16	7.33±0.11

注: 数据表示为(平均值±标准差), $n=3$ 。

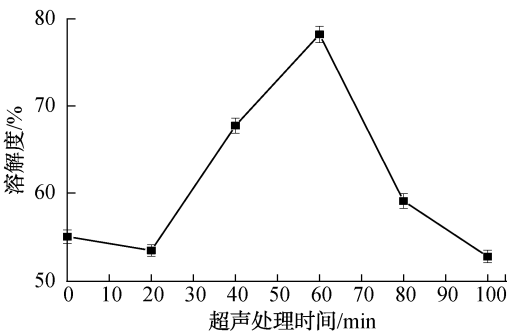


图 1 不同超声处理时间对溶解度的影响
Fig. 1 The effect of different ultrasonic treatment time on solubility

大,在超声处理时间为 20~60 min 时增长速率较快,在超声处理时间为 60~100 min 时增长速率缓慢但未停止,如果继续延长超声处理时间,QPI 的持水性和持油性很有可能会超过未进行超声处理的 QPI,这与张洪新^[22]改性面筋蛋白的研究结果相似。这是因为在超声波处理下,蛋白质颗粒变小,组织疏松,比表面积增大;同时,蛋白质空间结构遭到破坏,埋藏在分子内部的二硫基、疏水基等功能基团暴露出来,使样品吸附和结合脂类物质的能力更强,从而增强了 QPI 的持水性和持油性。

2.2.3 超声处理对乳化性和乳化稳定性的影响 乳化性与通过蛋白质分散体的最大油量有关,而乳化稳定性则是指乳液抵抗变化并保持稳定的能力。不同超声处理时间对乳化性和乳化稳定性的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出,超声处理时间为 20~40 min 时,QPI 的乳化性低于未进行超声处理

的 QPI($4.938\text{ m}^2/\text{g}$);超声处理时间为 60~100 min 时,QPI 的乳化性高于未进行超声处理的 QPI,并随着超声处理时间的增加逐渐提高至 $5.773\text{ m}^2/\text{g}$;QPI 的乳化性随超声处理时间的延长显著提高 ($P<0.05$),是未经超声处理组的 1.2 倍。QPI 的乳化稳定性在 20 min 时与未超声处理组的稳定性基本相同,没有显著变化 ($P>0.05$),随着超声处理时间的增加(40~100 min),QPI 的乳化稳定性都低于未经超声处理的 QPI,但没有明显的变化规律。上述结果与孙筱^[23]的高强度超声处理对芸豆蛋白理化和功能特性影响的实验结果相似。这是因为蛋白质的乳化性及乳化稳定性与蛋白质的分子结构相关联。乳化体系的形成是疏水、亲水基团与油、水相互作用产生的乳化现象,随超声处理的持续进行,蛋白质分子的内部结构展开,蛋白分子表面的疏水区暴露,增加了疏水基团与油相的相互作用,故而可提高蛋白质的乳化性。本研究显示了较高的乳化性和良好的乳化稳定性,这可能与藜麦品种和 QPI 提取方法有关。

2.3 超声处理对 QPI 平均粒径与分布的影响

不同超声处理时间下 QPI 的平均粒径与分布如表 2 所示。由表 2 可知,未进行超声处理的 QPI 的平均粒径为 $190.40\text{ }\mu\text{m}$,而超声处理能显著降低 QPI 的平均粒径;超声处理仅 20 min 时,QPI 的平均粒径即显著降低 ($P<0.05$),随着超声处理时间的延长,平均粒径持续降低,但降幅较小,变化不明显 ($P>0.05$)。该结果与李弓中等^[24]在研究超声波处理蛋清蛋白时发现的现象一致。这可能是由于超声波的空穴效应使溶液形成湍流,湍流产生的机械剪切力将蛋白颗粒打散^[25],从而使蛋白粒径变小。

表 2 不同超声处理时间下 QPI 的平均粒径与分布
Table 2 Average particle size distribution of QPI under different ultrasonic treatment time

超声处理时间/min	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
0	72.85 ± 1.93^a	190.40 ± 1.10^a	428.50 ± 3.42^a
20	25.97 ± 1.82^b	58.56 ± 1.03^b	107.60 ± 1.71^b
40	24.60 ± 0.71^{bc}	56.46 ± 2.01^b	102.1 ± 0.82^{bc}
60	23.76 ± 0.32^{bc}	54.86 ± 1.51^b	90.25 ± 0.40^d
80	23.27 ± 0.80^{bc}	55.94 ± 1.91^b	97.51 ± 1.61^{cd}
100	22.88 ± 0.43^c	55.65 ± 2.42^b	105.10 ± 8.42^{bc}

注:同列数据后不同肩标字母表示样品间差异显著 ($P<0.05$)。

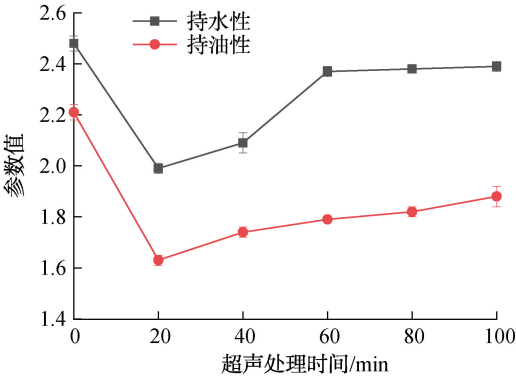


图 2 不同超声处理时间对持水性和持油性的影响
Fig. 2 The effect of different ultrasonic treatment time on water holding capacity and oil absorbency capability

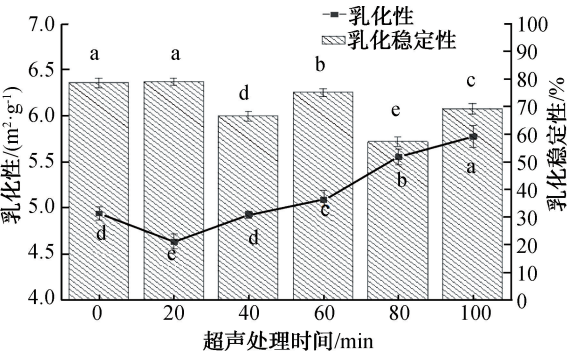
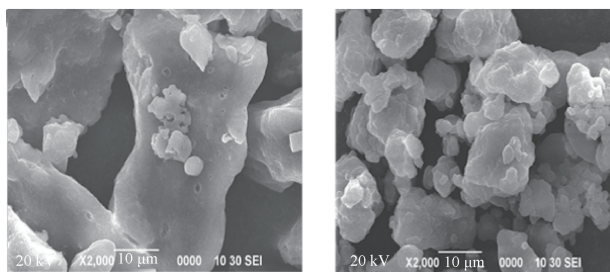


图 3 不同超声处理时间对乳化性和乳化稳定性的影响

Fig. 3 The effect of different ultrasonic treatment time on emulsification and emulsification stability

2.4 超声处理对 QPI 结构特征的影响分析

综上所述,超声强度为 500 W,超声处理时间为 60 min 时,QPI 的性能最佳,也最节约能源。超声处理前后 QPI 的 SEM 图如图 4 所示。由图 4 可以看出,未进行超声处理的 QPI 的大小和形状均不同,且表面较为平整。超声处理 60 min 的 QPI 的微观结构变化显著,蛋白质小分子颗粒增多,蛋白质分子发生一定的聚集,表面出现一定的褶皱,这可与平均粒径分析结果互相印证。



a)超声处理前

b)超声处理后

图 4 超声处理前后 QPI 的 SEM 图

Fig. 4 SEM of QPI before and after ultrasound treatment

3 结论

本文以藜麦为原料,采用传统碱溶酸沉法提取 QPI,研究中强度超声处理(功率为 500 W)对其功能特性和微观结构的影响。结果表明:中强度超声处理 60 min 可获得性能最佳的 QPI,改善其溶解度,增强其持水性、持油性和乳化性,降低其平均粒径,改变其结构特征,使其结构更致密均匀,表面出现不同程度的褶皱。本研究表明中强度超声处理是改善 QPI 功能特性的有效方法,为藜麦蛋白在食品加工行业的进一步研究开发提供了理论依据。

参考文献:

[1] MOTA C,SANTOS M,MAURO R,et al. Protein content and amino acids profile of pseudocereals [J]. Food Chemistry,2016,193:55-61.
[2] 申瑞玲,张文杰,董吉林,等. 藜麦的主要营养成分、矿物元素及植物化学物质含量测定 [J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2015,30(Z2):17-21.
[3] MIR N A,RIAR C S,SINGH S. Structural modifi-

cation of quinoa seed protein isolates (QPIs) by variable time sonification for improving its physicochemical and functional characteristics [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 58: 104700.

[4] 王龙飞,王新伟,赵仁勇. 藜麦蛋白的特点、性质及提取的研究进展[J]. 食品工业,2017,38(7):255-258.
[5] 孙燕婷,黄国清,肖军霞,等. 超声处理对大豆分离蛋白溶解性和乳化活性的影响[J]. 中国粮油学报,2011,26(7):22-26.
[6] 徐珍霞,邓乾春,董绪燕,等. 超声对亚麻籽蛋白稳定的水包油乳液理化性质的影响[J]. 中国食物与营养,2019,25(11):35-40.
[7] 望运滔,王营娟,田金凤,等. 高强度超声对鹰嘴豆分离蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品与机械,2020,36(8):9-14,71.
[8] VERA A,VALENZUELA M A,YAZDANI-PEDRAM M,et al. Conformational and physicochemical properties of quinoa proteins affected by different conditions of high-intensity ultrasound treatments [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2019,51:186-196.
[9] 毕爽,齐宝坤,隋晓楠,等. 超声处理对黑豆蛋白结构和功能性质的影响[J]. 中国食品学报,2016,16(6):153-160.
[10] 中华人民共和国国家卫生计划生育委员会,国家食品药品监督管理局. 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
[11] 田旭静,段鹏慧,陈文超,等. Osborne 分级法提取藜麦糠清蛋白及功能性质研究[J]. 食品工业科技,2017,38(12):264-269,276.
[12] ABUGOCH J L,ROMERO N,TAPIA C A,et al. Study of some physicochemical and functional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein isolates[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2008,56(12):4745-4750.
[13] JIANG J,XIONG Y L,CHEN J. Role of β -conglycinin and glycinin subunits in the pH-shifting-induced structural and physicochemical changes

- of soy protein isolate[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(2):293-302.
- [14] ZHANG S Y, ZHENG L L, ZHENG X Y, et al. Effect of steam explosion treatments on the functional properties and structure of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) seed cake protein[J]. Food Hydrocolloid, 2019, 93:189-197.
- [15] 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 Bioprod Process, 2014, 92:30-37.
- [16] LIU C M, ZHONG J Z, LIU W, et al. Relationship between functional properties and aggregation changes of whey protein induced by high pressure microfluidization[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(4):341-347.
- [17] 包中宇. 超声波技术对大豆分离蛋白功能性质、结构及凝胶特性的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [18] 王隼, 张文斌, 杨瑞金, 等. 藜麦蛋白质的提取及其功能性质研究[J]. 食品科技, 2018, 43(2):228-234.
- [19] 王隼. 藜麦蛋白和淀粉的分离提取及性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [20] 谢为峰, 罗丰收, 解超男, 等. 超声波处理对杏仁粕蛋白质理化和功能性质的改性研究[J]. 农产品加工, 2016, 17(1):1-3, 7.
- [21] 毕爽, 齐宝坤, 隋晓楠, 等. 超声处理对黑豆蛋白结构和功能性质的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(6):153-160.
- [22] 张洪新. 多频超声改性面筋蛋白对其面条品质的影响和机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [23] 孙筱. 高强度超声对芸豆蛋白理化和功能特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(2):93-96.
- [24] 李弓中, 赵英, 王俊彤, 等. 超声处理对蛋清蛋白结构性质及蛋清液起泡性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9):68-75.
- [25] 徐悦, 郭亚男, 李顺秀, 等. 超声对燕麦蛋白氧化聚集体结构及特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11):85-91, 116.

Effects of ultrasonic treatment on the functional properties and microstructure of quinoa protein isolates

YIN Lisha¹, ZHU Yingying^{1,2,3}, DONG Jilin^{1,2,3}, SHEN Ruiling^{1,2,3}

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

2. He'nan Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety, Zhengzhou 450001, China;

3. He'nan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Quinoa protein isolates (QPI) was extracted by alkali solubilization and acid precipitation method, and modified by medium intensity ultrasonic (power was 500 W). The influence of intensity ultrasonic treatment on QPI functional properties and microstructure was studied. The results showed that the purity of QPI was 87.78%, and it was mainly composed of albumin, globulin, gliadin and gluten. Ultrasound treatment significantly increased the solubility of QPI ($P < 0.05$) and the highest solubility (78.25%) was obtained at the time of 60 min. Meanwhile, the emulsification of QPI increased with the increase of ultrasonic time ($P < 0.05$). Ultrasonic treatment significantly decreased the average particle size of QPI ($P < 0.05$) and the minimum average particle size was 56.86 μm at 60 min. Compared with untreated samples, after ultrasonic treatment for 60 min, the particles were denser and more uniform, and the surface was more wrinkled.

Key words: quinoa protein isolates; ultrasonic treatment; functional property; microstructure

(责任编辑: 杨晓娟)