

超声预处理对米渣蛋白酶解特性的影响

张婧倩¹, 龙肇¹, 梁安源¹, 赵谋明^{1,2}, 林亲录¹

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南长沙 410004)

(2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州, 510640)

摘要: 以米渣粉为原料, 以常规酶解作对照, 考察不同超声功率 (100 W 和 300 W)、超声时间 (15 min 和 30 min) 和超声模式 (连续超声和工作间歇比 2:2 s) 预处理米渣原料后对酶解改性米渣蛋白回收率、水解度、可溶性氮含量、表面疏水性和粒径的影响。研究表明, 不同超声处理条件对米渣蛋白的回收率、可溶性氮含量和水解度影响不显著, 但同对照组相比, 蛋白质回收率和水解度均有所提升。表面疏水性随着超声功率和超声时间的增大而增大, 间歇超声处理米渣蛋白的表面疏水性小于连续超声处理的。超声功率从 100 W 增加到 300 W 时, 蛋白质粒径由 236 nm 增加至 256 nm, 但都小于未超声组; 超声时间 15 min 时米渣蛋白粒径小于未超声组, 当超声延长至 30 min 时粒径增大; 间歇超声处理的蛋白质粒径大于连续超声组且都小于未超声组。超声预处理可改善米渣蛋白的酶解敏感性, 提高其水解度和蛋白质回收率。与单一酶解改性相比较, 超声预处理后酶解得到的改性米渣蛋白可溶性氮含量提高, 表面疏水性降低, 粒径减小。

关键词: 米渣蛋白; 超声; 酶解特性; 表面疏水性; 粒径

文章编号: 1673-9078(2019)11-138-143

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.11.020

Effect of Ultrasonic Pretreatment on the Enzymatic Hydrolysis

Characteristics of Rice Residue Protein

ZHANG Jing-qian¹, LONG Zhao¹, LIANG An-yuan¹, ZHAO Mou-ming^{1,2}, LIN Qin-lu¹

(1. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China) (2. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Rice residue was chose as raw material. The conventional enzymatic hydrolysis was selected as a control. Effects of different ultrasonic power (100 W and 300 W), ultrasonic time (15 min and 30 min) and ultrasonic mode (continuous ultrasonic and working intermittent ratio 2:2 s) on the recovery rate, hydrolysis degree, soluble nitrogen content, surface hydrophobicity and particle size of the enzymatically modified rice residue were investigated. Results showed that different ultrasonic treatment conditions had no significant effect on the recovery rate, soluble nitrogen content and hydrolysis degree of rice residue protein. The protein recovery rate and hydrolysis degree were improved compared with the control group. The surface hydrophobicity increased with the increase of ultrasonic power and ultrasonic time. The surface hydrophobicity of rice residue protein with intermittent ultrasonic treatment was less than that with continuous sonication. When the ultrasonic power increased from 100 W to 300 W, the protein particle size increased from 236 nm to 256 nm, but both were smaller than the non-ultrasound group. Under 15 min ultrasonic treatment, the particle size of the rice residue protein was less than that of the non-ultrasound group, and the particle size increased when time is extended to 30 min. The protein size of rice residue protein with the intermittent ultrasound was larger than that of the continuous ultrasound group, and both were smaller than the non-ultrasound group. Ultrasonic pretreatment can improve the enzymatic sensitization of rice residue protein and increased its hydrolysis degree and protein recovery rate. Compared with the single enzymatic modification, enzymatic hydrolysis combined with ultrasonic pretreatment can induce an increase in the soluble nitrogen content of the modified rice residue protein, increasand the decrease in the surface hydrophobicity and the particle size.

Key words: rice residue protein; ultrasound; enzymatic hydrolysis characteristics; surface hydrophobicity; particle size

收稿日期: 2019-07-14

基金项目: 湖南省自然科学基金青年基金项目 (2019JJ50997); 湖南省教育厅科学研究项目 (17C1668); 中南林业科技大学校青年科学基金项目 (QJ2017010B)

作者简介: 张婧倩 (1994-), 女, 硕士生, 研究方向: 蛋白质的改性及功能性质

通讯作者: 龙肇 (1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 蛋白质的改性和应用、乳浊体系的稳定化调控

大米蛋白是一种优质植物性蛋白,具有良好的营养价值 and 保健作用^[1]。在我国,稻米不仅是餐桌上的主食,还可以用来制备淀粉糖浆、发酵生产柠檬酸等,这些工业生产通常利用的是大米中的淀粉,而剩余的米渣中约含 40%~70%的蛋白质^[2-4],但是由于米渣蛋白的提取率、溶解性和乳化性均不佳,限制其被广泛利用,造成了蛋白质资源的严重浪费。

目前,国内外对米渣蛋白的研究主要有提取和改性两个方面。提取方法主要有碱法提取、酶法提取、排杂法提取和物理提取法等,改性又可分为物理改性、化学改性、酶法改性和复合改性。酶解改性由于其安全性高,是目前食品蛋白质改性应用最广泛的方法,但是单一的酶解改性效果不佳,物理预处理由于方法简便,无毒副作用等特点,非常适合应用于食品工业^[5-7]。因此,物理预处理联合酶解工艺修饰和改性蛋白质,越来越受到食品研究者的关注。超声波具有加工费用低、耗时少等优点,是目前植物蛋白改性常用的预处理方法^[8],在酶解前对蛋白质进行超声波预处理,超声波产生的空化和机械剪切作用,使样品在悬浊液体系中分散均匀,大颗粒物质被剪切成小分子,暴露出更多的酶切位点,使底物与蛋白酶接触面积增大^[9]。同时,经超声处理后,蛋白质组织或分子形态和结构会发生变化,更有利于与蛋白酶结合,使酶促反应加剧^[10-12]。

本文在单一酶解改性的基础上,采用超声预处理结合酶法改性来探究不同超声功率、超声时间和超声模式对米渣蛋白的溶解性、表面疏水性和粒径大小之间的关系,从而实现高效利用米渣的目标。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

米渣(蛋白质含量为 68%),湖南听祺生物科技有限公司;碱性蛋白酶,广州裕立宝生物科技有限公司;8-苯胺-1-萘磺酸(ANS),美国 Sigma-Aldrich 公司;NaOH、浓硫酸、盐酸、硫酸钾、五水合硫酸铜等试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

中草药粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;超声波细胞粉碎机,宁波新芝生物科技股份有限公司;Five Easy 实验室 pH 计,梅特勒托利多(上海)有限公司;FD5-4 冷冻干燥机,美国 GOLD-SIM 公司;SH220N 石墨消解仪、K9840 自动凯氏定氮仪,济南海能仪器股份有限公司;F7000 荧光分光光度计,日

本日立公司;Nano ZS 纳米粒度分析仪,英国 Malvern 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 米渣的超声预处理

米渣粉碎后过 80 目筛,取 8 g 米渣加入 80 mL 蒸馏水搅拌均匀调 pH 为 9 并置于超声细胞破碎仪中,超声过程中用冰水浴使样品温度保持低温状态。超声波处理条件包括:(1)固定超声时间 15 min,超声功率为 100 W 和 300 W;(2)固定超声功率 100 W,超声时间为 15 min 和 30 min;(3)固定超声功率 100 W 和超声时间 15 min,超声模式为连续和工作间歇比 2:2 s。对照组均为未超声处理的样品。

1.3.2 米渣蛋白的酶解改性

米渣蛋白酶法改性工艺流程:超声预处理后的米渣悬浊液(对照组为未经超声处理的米渣悬浊液)→调 pH 为 9→加碱性蛋白酶(1500 U/g)→50 °C 恒温水浴中酶解 3 h(搅拌器匀速搅拌)→灭酶(沸水浴 10 min)→离心(4000 r/min, 15min)→收集上清液→冷冻干燥

1.3.3 蛋白质回收率的测定

参考国标 GB/T6342-2018,采用凯氏定氮法测定酶解液中蛋白质含量,则蛋白质回收率的计算公式如下:

$$\text{蛋白质回收率}(\%) = \frac{\text{酶解液中的蛋白质总量}(\text{g})}{\text{酶解用米渣中蛋白质总量}(\text{g})} \times 100\%$$

1.3.4 可溶性氮含量的测定

准确称取米渣蛋白粉 0.3000 g 溶于 0.01 mol/L pH 7.0 的磷酸盐缓冲液中,室温下磁力搅拌 2 h 后 10000 r/min 离心 15 min,取上清液,用凯氏定氮法测定蛋白质含量,则可溶性氮含量由以下公式计算:

$$\text{可溶性氮含量}(\%) = \frac{\text{上清液蛋白质含量}(\text{g})}{\text{样品总蛋白质含量}(\text{g})} \times 100\%$$

1.3.5 水解度的测定

取 4 g 酶解液,补水至 80 g,用 0.1 mol/L NaOH 标准溶液滴定至 pH 8.2,加入 10 mL 甲醛溶液,继续用 NaOH 溶液滴定至 pH 9.2,以去离子水为空白对照,记录空白和试样 pH 从 8.2 至 9.2 所消耗 NaOH 溶液的体积 V_0 和 V_i 。

则酶解液中游离氨态氮的含量为:

$$\text{AN} = \frac{(V_i - V_0) \times 0.1 \times 0.014}{M_i} \times 100\%$$

水解度则由以下公式计算:

$$\text{DN} = \frac{\text{AN} \times M_1}{W_2 \times M_2} \times 100\%$$

式中: M_i -取样量(g); M_1 -酶解液的总质量(g); W_2 -米

渣蛋白的氮含量 (g/g); M_2 -加入米渣的质量 (g)。

1.3.6 表面疏水性的测定

用磷酸盐缓冲液将上述溶液稀释成 0.005、0.05、0.1、0.2、0.5 mg/mL, 取不同浓度的稀释样品 4 mL, 加入 50 μ L 0.008 mol/L ANS, 避光反应 5 min, 在激发波长 390 nm 和发射波长 470 nm 下测定荧光强度, 以蛋白质浓度和荧光强度分别为 X 轴和 Y 轴作图, 斜率为蛋白质分子的疏水指数。

1.3.7 改性米渣蛋白粒径的测定

将改性米渣蛋白粉溶解于 0.01 mol/L pH 7.0 的磷酸盐缓冲液中, 室温下磁力搅拌 2 h 后 10000 r/min 离心 15 min, 取稀释的上清液 1 mL 采用纳米粒度测定仪测定改性米渣蛋白粒径的大小。

1.3.8 数据分析

采用 SPSS Statistics 19.0 软件进行数据分析, 单因素方差分析中采用 Duncan 检验, 结果用“均值 $\pm$ 标准偏差”表示, 取 95%置信度 ($p<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 超声功率对米渣蛋白酶解特性的影响

2.1.1 超声功率对改性米渣蛋白水解情况的影响

固定超声时间为 15 min, 分别对米渣进行 100 W 和 300 W 超声预处理再酶解, 与未超声处理样品相比较, 对水解情况的影响见表 1。

表 1 超声功率对米渣蛋白水解情况的影响

Table 1 Effect of ultrasonic power on the hydrolysis of rice residue protein

项目	水解度/%	蛋白质回收率/%	可溶性氮含量/%
未超声	5.78 $\pm$ 0.56 ^b	32.95 $\pm$ 0.34 ^c	88.72 $\pm$ 1.11 ^b
100 W, 15 min	7.49 $\pm$ 0.46 ^a	39.53 $\pm$ 0.14 ^b	90.53 $\pm$ 0.87 ^b
300 W, 15 min	7.12 $\pm$ 0.10 ^a	41.54 $\pm$ 0.32 ^a	93.46 $\pm$ 1.47 ^a

注: 不同字母代表有显著性差异 ($p<0.05$), 有相同字母代表没有显著性差异 ($p>0.05$)。下表同。

水解度反映了蛋白质的水解程度, 由表 1 可看出, 未超声预处理的样品水解度为 5.78% $\pm$ 0.56%, 超声预处理后再酶解的样品水解度为 7.49% $\pm$ 0.46%, 超声处理后水解度显著增长了 29.58% ($p<0.05$), 但在 300 W 范围内超声功率对水解度的影响不显著 ($p>0.05$)。适宜的超声功率使米渣蛋白的结构变得易于和酶结合, 增强蛋白质的水解度。

在 300 W 范围内, 随着超声功率的增大, 蛋白质回收率从未超声的 32.95% $\pm$ 0.3%提高至 300 W 超声处

理下的 41.54% $\pm$ 0.3%, 提高了 26.07%。超声波的空化作用使得米渣充分分散在溶液中, 增大酶与米渣蛋白的接触面积, 同时超声波的机械剪切作用可以破坏蛋白质的高级结构和亚基组成, 疏松的蛋白质分子暴露出更多的酶结合位点, 从而提高蛋白质的酶解敏感性, 使得蛋白质的回收率提高^[13-15]。

同样地, 可溶性氮含量从未超声的 88.72% $\pm$ 1.11%提高至超声 300 W 处理下的 93.46% $\pm$ 1.47%, 未超声的样品和 100 W 超声 15 min 的样品可溶性氮含量没有显著性差异 ($p>0.05$)。低超声功率 (100 W) 下, 超声波对蛋白质的破碎作用较弱, 不足以破坏蛋白质的高级结构, 随着超声功率的增强 (300 W), 溶液的能量密度增大, 蛋白质的亲水基团暴露的更明显, 可溶性氮含量有所提高。

2.1.2 超声功率对改性米渣蛋白表面疏水性的影响

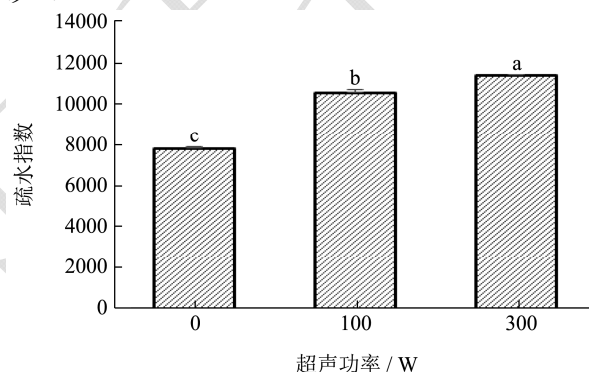


图 1 超声功率对改性米渣蛋白表面疏水性的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic power on surface hydrophobicity of modified rice residue protein

超声功率对改性米渣蛋白表面疏水性的影响如图 1。由图 1 可看出, 改性米渣蛋白疏水指数由未超声处理的 7880 增加至 300 W 超声处理下的 11437, 说明改性米渣蛋白表面疏水性随超声功率的增大持续增强。这是由于在超声波的作用下, 蛋白质分子中疏水键之间的作用力被破坏, 使疏水基团和残基暴露在表面, 随着超声功率的增大, 表面疏水基团暴露的越多。未经超声处理的米渣蛋白的疏水基团被包裹在内部, 不能充分与荧光探针接触, 所以表面疏水性较低^[16]。

2.1.3 超声功率对改性米渣蛋白粒径的影响

超声功率对改性米渣蛋白粒径的影响见图 2。由图 2 可看出, 与未超声处理的样品相比, 超声处理的改性米渣蛋白粒径显著减小 ($p<0.05$), 但超声功率从 100 W 增大至 300 W, 粒径由 236.70 nm 增加至 256.10 nm。米渣蛋白粒径的变化可能是在 100 W 低功率超声条件下, 超声波的机械剪切力使蛋白质分子破碎, 所以粒径变小; 当超声功率增加到 300 W 时, 较强的超

声作用使蛋白质分子的运动加剧,分子之间发生碰撞^[17],分子内部疏水基团不断暴露,已经水解的蛋白质分子由于疏水相互作用重新发生聚集黏合,使得分子粒径变大。

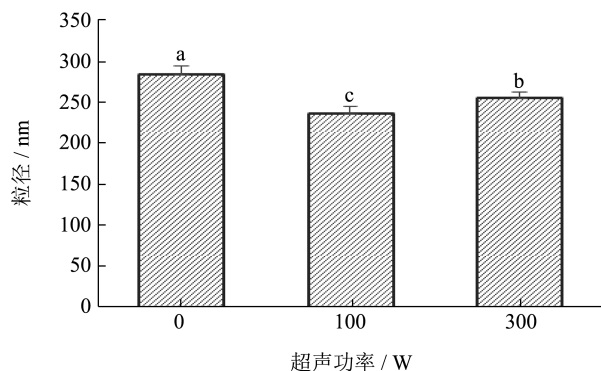


图2 超声功率对改性米渣蛋白粒径的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic power on particle size of modified rice residue protein

2.2 超声时间对米渣蛋白酶解特性的影响

2.2.1 超声时间对改性米渣蛋白水解情况的影响

固定超声功率为 100 W, 分别对米渣进行 15 min 和 30 min 的超声预处理再酶解, 与未超声的样品相比较, 对米渣蛋白水解度的影响见表 2。

表2 超声时间对米渣蛋白水解情况的影响

Table 2 Effect of ultrasonic time on protein hydrolysis of rice residue

项目	水解度/%	蛋白质回收率/%	可溶性氮含量/%
未超声	5.78±0.56 ^b	32.95±0.35 ^b	88.72±1.11 ^b
100 W, 15 min	7.49±0.46 ^a	39.54±0.14 ^a	91.53±0.87 ^a
100 W, 30 min	6.86±0.44 ^a	38.26±1.95 ^a	91.46±1.12 ^a

由表 2 可看出, 在 100 W 超声功率下, 超声时间从 15 min 增加至 30 min, 水解度由 7.49% 减小至 6.86%, 蛋白质回收率由 39.54% 减小至 38.26%, 但均显著高于未超声处理的样品 ($p < 0.05$), 可溶性氮含量由未超声的 88.72% 增加至超声 30 min 下的 91.46%, 但超声样品间无显著性差异 ($p > 0.05$)。

原因可能是短时间 (15 min) 的超声处理可以使米渣蛋白颗粒变小, 暴露出更多的酶切位点, 酶解效率提高^[18], 经过长时间 (30 min) 连续超声处理后, 已经分散的米渣蛋白重新聚集成大分子颗粒, 使包裹在内部的蛋白质无法与蛋白酶接触, 而且超声时间越长, 米渣悬液体系越趋于稳定, 超声波的空化作用减弱甚至消失, 蛋白水解度降低, 蛋白质回收率和可溶性氮含量均有所下降。

2.2.2 超声时间对改性米渣蛋白表面疏水性的影响

超声时间对改性米渣蛋白表面疏水性的影响见图 3。由图 3 可知, 经过超声处理的米渣蛋白的表面疏水指数明显大于未超声的, 且随着超声时间的延长而增大, 超声 30 min 时改性米渣蛋白的表面疏水性为 11301, 较对照组提高了 43.41%。王长远等^[19]研究发现在 0~30 min 时, 随着超声时间的增加米糠蛋白的表面疏水性也增大, 与本研究的现象一致。本研究还发现表面疏水性和溶解性没有线性关系, 这与王中江等^[20]研究发现大豆分离蛋白的表面疏水性与溶解性呈负相关的结果不一致, 可能原因是超声时间的增加可以让更多的疏水区暴露在蛋白质表层, 这些疏水基团广泛参与分子间的相互作用。

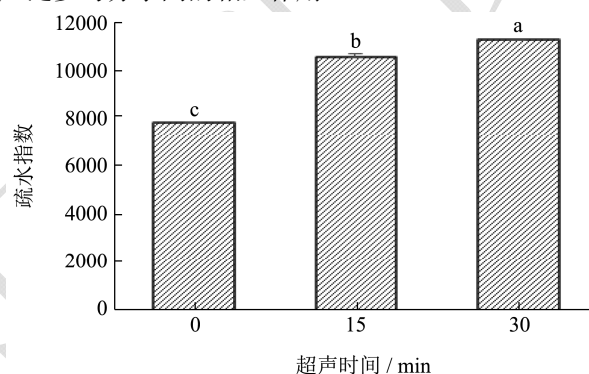


图3 超声时间对改性米渣蛋白表面疏水性的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic time on surface hydrophobicity of modified rice residue protein

2.2.3 超声时间对改性米渣蛋白粒径的影响

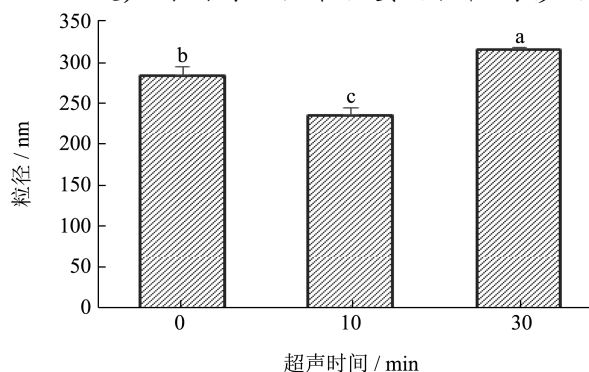


图4 超声时间对改性米渣蛋白粒径的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic time on particle size of modified rice residue protein

由图 4 可以看出, 超声时间为 15 min 时, 蛋白质的粒径小于对照组, 增加超声时间, 蛋白质粒径也增大, 平均粒径由 15 min 下的 236 nm 增加至 30 min 下的 317 nm。短时间超声可以破碎蛋白质分子, 粒径减小, 超声时间到 30 min 时, 蛋白质结构发生改变, 且连续超声时间越长, 蛋白质聚集程度增加, 已经分散

开的蛋白质分子抱团黏合在一起,使得粒径增大,溶解度降低^[21],这与前述可溶性氮含量随超声时间的变化趋势是一致的。

2.3 超声模式对米渣蛋白酶解特性的影响

2.3.1 超声模式对改性米渣蛋白水解情况的影响

固定超声功率为 100 W, 超声时间 15 min, 考察连续超声和工作间歇比 2:2s 两种模式下超声预处理对米渣蛋白酶解特性的影响, 水解情况见表 3。由表 3 可以看出, 在相同的超声处理时间下, 脉冲的连续和间歇发出, 对蛋白质的回收率有显著性影响, 连续脉冲处理的样品蛋白质回收率比对照组提高了 20.00%, 超声模式对水解度和可溶性氮含量影响不显著 ($p>0.05$), 但均高于对照组。这主要是因为间歇脉冲产生的空化泡来不及膨胀就已经破裂^[22,23], 对米渣悬浊液体系的破坏作用较小, 而且米渣蛋白受到的超声作用会在间歇时复原, 不足以将大分子颗粒破碎, 也可能是脉冲工作时间的不同导致的。

表 3 超声模式对米渣蛋白水解情况的影响

Table 3 Effect of ultrasonic mode on protein hydrolysis of rice

residue			
项目	水解度/%	蛋白质回收率/%	可溶性氮含量/%
未超声	5.78±0.56 ^b	32.95±0.35 ^c	88.72±1.11 ^b
工作间歇比 2:2s	7.10±0.07 ^a	38.05±0.27 ^b	90.39±0.73 ^a
连续超声	7.49±0.46 ^a	39.54±0.14 ^a	91.53±0.87 ^a

2.3.2 超声模式对改性米渣蛋白表面疏水性的影响

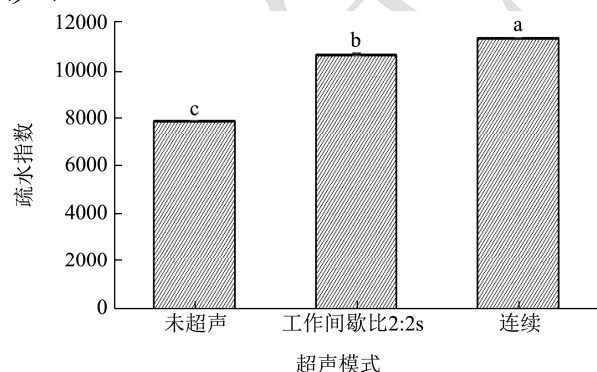


图 5 超声模式对改性米渣蛋白表面疏水性的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic mode on surface hydrophobicity of modified rice residue protein

超声模式对改性米渣蛋白表面疏水性的影响如图 5 所示, 经间歇超声和连续超声处理的改性米渣蛋白表面疏水指数由 10605 增加至 11310, 且都高于未超声处理组。可能是由于脉冲连续工作可以使物料受到

持续的机械剪切力, 蛋白质内部的疏水基团因持续的机械力作用可以更快的暴露在表面, 当脉冲间歇时, 将要游离出来的疏水基团因为脉冲停止而停止移动或返回原来位置, 导致暴露的疏水基团较少。或是间歇超声的工作时间小于连续超声, 不足以使更多的疏水基团暴露。

2.3.3 超声模式对改性米渣蛋白粒径的影响

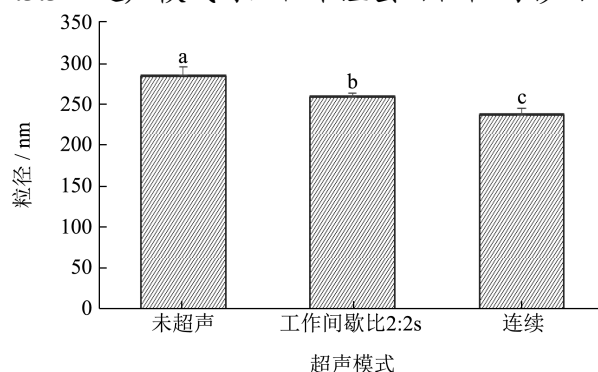


图 6 超声模式对改性米渣蛋白粒径的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic mode on particle size of modified rice residue protein

超声模式对改性米渣蛋白粒径的影响如图 6 所示, 超声处理的改性米渣蛋白粒径比未超声的小, 间歇和连续超声处理的改性米渣蛋白粒径由 257.90 nm 减小至 236.70 nm。由于脉冲间歇释放, 作用于蛋白质上的力较小且不连续, 对蛋白质的破坏性较小, 而连续超声的机械剪切力大且持续作用在蛋白质分子上, 使粒径变小。也可能是由于间歇超声的工作时间较短, 不足以使大颗粒的蛋白质破裂。

3 结论

3.1 与单一酶解改性相比较, 超声预处理后酶解可以显著提高改性米渣蛋白的水解度、蛋白回收率和可溶性氮含量 ($p<0.05$), 但超声预处理样品间无显著性差异 ($p>0.05$)。

3.2 与单一酶解改性相比较, 超声预处理后再酶解, 改性米渣蛋白表面疏水性显著提高, 在较低超声处理强度下, 蛋白质粒径较单一酶解减小, 但超声处理强度提高时, 由于疏水基团过度暴露, 蛋白质重新聚集, 粒径有所增大。

参考文献

- [1] Tsugita A, Kawakami T, Uchiyama Y, et al. Separation and characterization of rice proteins [J]. Electrophoresis, 1994, 15(1): 708-720
- [2] 许龙, 袁江兰, 靳艳, 等. 米渣蛋白碱性蛋白酶酶解条件优化 [J]. 食品科技, 2012, 12: 60-62

- XU Meng, YUAN Jiang-lan, JIN Yan, et al. Optimum conditions of enzymatic hydrolysis of rice residue protein by alkaline protease [J]. Food Science and Technology, 2012, 12: 60-62
- [3] 荣先萍,彭奇均.米渣蛋白组成成分及提取工艺研究[J].应用化工,2010,39(6):800-805,811
- RONG Xian-ping, PENG Qi-jun. Study on the composition and extraction technology of rice residue proteins [J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(6): 800-805, 811
- [4] 罗舜菁,耿勤,颜小燕,等.不同脱脂条件下米渣蛋白的结构及功能性质[J].食品科学,2017,38(5):202-207
- LUO Shun-jing, GENG Qin, YAN Xiao-yan, et al. Structural and functional properties of rice dreg protein prepared by different degreasing methods [J]. Food Science, 2017, 38(5): 202-207
- [5] 郭超凡,王云阳.蛋白质物理改性的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(2):428-433
- GUO Chao-fan, WANG Yun-yang. Research progress on modification methods of protein [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(2): 428-433
- [6] 张敏,刘明,谭斌,等.青稞挤压改性处理及青稞面条的试验研究[J].食品科学技术学报,2016,34(2):62-67
- ZHANG Min, LIU Ming, TAN Bin, et al. Experimental study of highland barley extrusion modification treatment and highland barley noodles [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(2): 62-67
- [7] Yang N, Li T, Ma L, et al. Characterization and structure of cold-extruded whey protein isolate: Impact of ball milling [J]. Applied Nanoscience, 2019, 9(3): 423-433
- [8] Chittapalo T, Noomhorm A. Ultrasonic assisted alkali extraction of protein from defatted rice bran and properties of the protein concentrates [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(9): 1843-1849
- [9] 金建,马海乐,曲文娟,等.超声预处理对玉米蛋白可酶解性的影响[J].中国粮油学报,2015,30(11):58-64
- JIN Jian, MA Hai-le, QU Wen-juan, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymatic hydrolysis of corn gluten meal [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(11): 58-64
- [10] 李素云.超声和超声协同碱预处理对大米蛋白酶解效果影响及过程模拟研究[D].镇江:江苏大学,2017
- LI Su-yun. Effects and process simulation for ultrasound and ultrasound-assisted alkali pretreatment to rice on enzymolysis [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017
- [11] 贾俊强,马海乐,曲文娟,等.超声预处理大米蛋白制备抗氧化肽[J].农业工程学报,2008,24(8):288-293
- JIA Jun-qiang, MA Hai-le, QU Wen-juan, et al. Ultrasonic pretreatment for preparation of antioxidant peptides from rice protein [J]. Transactions of the CAAE, 2008, 24(8): 288-293
- [12] 吴菲菲,巢玲,李化强,等.超声技术在食品工业中的应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(7):2670-2677
- WU Fei-fei, CHAO Ling, LI Hua-qiang, et al. Research progress of applications of ultrasonic technology in food industry [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(7): 2670-2677
- [13] 胡爱军,郑捷.超声作用下蛋白酶解产生大豆肽的比较研究[J].食品科技,2005,3:27-30
- HU Ai-jun, ZHENG Jie. Comparison between soybean peptides production by enzymatic hydrolysis with and without ultrasound [J]. Food Science and Technology, 2005, 3: 27-30
- [14] 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
- BI Shuang, QI Bao-kun, SUI Xiao-nan, et al. Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black soybean protein isolate [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(6): 153-160
- [15] 毕爽,马文君,李杨,等.脉冲电场-超声波作用对黑豆球蛋白功能性质的影响[J].食品科学,2016,37(9):7-12
- BI Shuang, MA Wen-jun, LI Yang, et al. Combined effect of pulse electric field and ultrasound on functional properties of black soybean globulin [J]. Food Science, 2016, 37(9): 7-12
- [16] 丁青芝,马海乐,骆琳,等.超声处理对菜籽蛋白酶解效果的影响[J].农业工程学报,2009,25(1):294-299
- DING Qing-zhi, MA Hai-le, LUO Lin, et al. Effect of ultrasonic treatment on rapeseed protein enzymolysis [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 294-299
- [17] 邓昱昊,马海乐,李云亮,等.超声预处理大米蛋白对其酶解产物 ACEI 活性的影响[J].粮食与油脂,2019,32(1):50-54
- DENG Yu-hao, MA Hai-le, LI Yun-liang, et al. Effects of ultrasound pretreatment of rice protein on the ACEI activity of rice protein hydrolysate [J]. Cereals and Oils, 2019, 32 (1): 50-54
- [18] Li H, Jin R Z, Liu Z C, et al. Effects of Ultrasound on double-enzyme hydrolysis of corn protein [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2010, 32(4): 460-464