

酶辅助空化处理对豆渣纤维结构和理化性质的影响

沈晓梅¹, 骆兆娇¹, 侯俊杰^{2*}, 解春艳³, 王金梅¹, 陈伟汉²

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 广西梧州冰泉实业股份有限公司, 广西梧州 543000) (3. 廊坊师范学院生命科学学院, 河北廊坊 065000)

摘要: 该研究通过傅里叶变换红外光谱、X-衍射、扫描电镜等分析方法分析水力空化、酶解处理对脱脂豆渣纤维结构和理化性质的影响。研究表明: 空化处理强烈影响了豆渣纤维的理化性质, 空化 10 min 时豆渣纤维的持水力与持油力分别达到 18.43 g/g 和 7.35 g/g, 空化处理 20 min 使可溶性膳食纤维含量 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 由 2.87% 升至 6.97%, 溶液表观黏度降低, 豆渣纤维出现蜂窝状片状结构, 豆渣纤维结晶度降低。酶辅助空化处理可以进一步改善豆渣纤维的理化性质, 且受酶解先后顺序强烈影响, 其中, 先酶解后空化豆渣中的 SDF 含量可达 12.52%, 溶液表观黏度明显降低, 先空化后酶解的样品则表现出更高的持水力与持油力。酶辅助空化处理豆渣出现较多碎片结构, 纤维尺寸变小。酶辅助空化处理可以作为一种有效改善豆渣纤维结构和理化性质的手段。

关键词: 豆渣纤维; 水力空化; 酶解; 可溶性膳食纤维

文章编号: 1673-9078(2022)09-285-291

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.9.1260

Effects of Enzyme-assisted Cavitation on Structural and Physicochemical Properties of Okara Fibers

SHEN Xiaomei¹, LUO Zhaojiao¹, HOU Junjie^{2*}, XIE Chunyan³, WANG Jinmei¹, CHEN Weihang²

(1. College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Wuzhou Bingquan Industrial Shareholding Co. Ltd., Wuzhou 543000, China)

(3. College of Life Science, Langfang Normal University, Langfang 065000, China)

Abstract: The effects of hydrodynamic cavitation and enzymatic hydrolysis on the structure and physicochemical properties of skimmed okara fibers were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy. The physicochemical properties of okara fibers were strongly affected by cavitation. After 10 min cavitation, the water- and oil-holding capacities of okara fibers reached 18.43 g/g and 7.35 g/g, respectively. After 20 min cavitation, the soluble dietary fiber (SDF) content changed from 2.87% to 6.79%. Both the apparent solution viscosity and the okara fiber crystallinity decreased, and the fibers existed in the form of honeycomb sheets. In addition, enzyme-assisted cavitation could further improve the physicochemical properties of okara fibers. The properties of the products were strongly affected by the sequence of enzymatic hydrolysis and cavitation. Up to 12.52% of SDF content was obtained in okara fibers and the apparent viscosity decreased significantly when enzymatic hydrolysis was performed before cavitation. On the contrary, when enzymatic hydrolysis was carried out after cavitation, higher water- and oil-holding capacities were noted. Enzyme-assisted cavitation of okara fibers results in increased debris and small fibers. In short, the method can be an effective means to improve structural and physicochemical properties of okara fibers.

Key words: okara fibers; hydrodynamic cavitation; enzymatic hydrolysis; soluble dietary fiber

引文格式:

沈晓梅, 骆兆娇, 侯俊杰, 等. 酶辅助空化处理对豆渣纤维结构和理化性质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(9): 285-291

SHEN Xiaomei, LUO Zhaojiao, HOU Junjie, et al. Effects of enzyme-assisted cavitation on structural and physicochemical properties of okara fibers [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(9): 285-291

收稿日期: 2021-11-09

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究项目 (ZD2018061); 云浮市科技重大专项 (2020A090102)

作者简介: 沈晓梅 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 蛋白质加工与利用, E-mail: xiaomeishen@foxmail.com

通讯作者: 侯俊杰 (1985-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 植物蛋白产品开发, E-mail: 29103608@qq.com

豆渣(Okara)作为大豆生产加工过程中的主要副产物,产量巨大且含有丰富的膳食纤维及蛋白质^[1],具有预防糖尿病^[2]、肥胖^[3]和促进益生菌生长^[4]等多种生理功能,可以作为一种理想的食品功能配料资源^[5]。然而,豆渣纤维中不溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF)占膳食纤维的九成以上^[6],会对豆渣的感官体验与营养吸收造成不利影响,极大限制了其在食品领域的应用。

目前很多学者致力于通过各种手段对豆渣纤维进行改性处理,促使IDF转化为功能性质更优的可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fiber, SDF)。物理法、化学处理、微生物发酵及酶法改性是常用几类方法^[7]。其中,物理法是通过各种机械作用,如高温、高压、高剪切力等使大分子的IDF中部分糖苷键熔融或断裂,从而扩大其与水的接触面积,提高水溶性^[8]。Liu等^[9]采用500 W 15 000 r/min的超声波和高速剪切组合对豆渣进行改性,豆渣的膨胀力、持水、持油性提高,将其加到面团中,改善了面团的粘附性和印刷性。Fan等^[10]对豆渣进行超声处理后发现,当超声功率密度达到4 W/mL时,豆渣纤维破碎成片状且具有较高的溶胀力、持水力与持油力。以糖酶水解豆渣中的细胞壁多糖对促进SDF溶出也存在积极效应。Yoshida等^[11]利用复合糖酶对豆渣进行水解,发现在最适的酶解条件下SDF的溶出率可提升一倍以上,且持水持油性均得到明显改善。Pérez-López等^[12]在600 MPa高静水压下,通过酶(Ultraflo® L或Viscozyme® L)水解豆渣,高效且最大化的得到具有益生元作用的小分子碳水化合物。

水力空化作为一种新兴物理改性技术,可利用流体流经水力结构产生大量空化泡并瞬时溃灭形成局部高压、高温等能量效应,从而影响物料的理化功能性质^[13]。有报道称,空化射流可破坏豆渣纤维分子间氢键及晶体结构,优化处理时间,SDF含量提升至原来的5倍,但过度加工将降低其功能性质^[14]。Yang等^[15]研究发现涡流空化使大豆分离蛋白(SPI)粒径减小,溶解度和表面疏水性增加, β -折叠含量增加,乳化性能得到显著改善。水力空化具有操作简易、能量效率高、加工时间短、易于实现工业化等优点。将空化处理与酶法处理结合可综合二者操作简单、条件温和、绿色环保等优势,预期可以有效提高豆渣纤维的功能性质。本文以脱脂豆渣为原料,采用酶辅助水力空化处理对豆渣进行改性处理,并对豆渣的纤维组成、持水性、持油性等理化性质和微观结构进行表征,以期促进豆渣资源的高效利用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

低温脱脂豆粕,购于山东禹王公司,用于制备豆渣。植物水解酶(酶活力 ≥ 1800 U/g),购于沧州夏盛酶生物技术有限公司。膳食纤维总量检测试剂盒,购于上海安谱实验科技股份有限公司。葵花籽油购于广州正丰超市。其他化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

RW20 电动搅拌机,德国 IKA 公司; CR22GII 高速冷冻离心机,日本 HITACHI 公司; DHG-9140A 电热鼓风干燥箱,上海一恒公司; A11 胶体磨,德国 IKA 公司; TW12 恒温水浴锅,德国 Julabo 公司; LABOR-PILOT 2000 中试型高剪切分散机,德国 IKA 公司; 水力空化机,实验室自组装; SEM Merlin 场发射扫描电子显微镜,德国 Zeiss 公司; Vector 70 傅里叶变换红外光谱,德国 BRUKER 公司; D8 ADVANCE X 射线多晶衍射仪,德国 Bruker 公司; C40 紫外分光光度计,德国 IMPLLEN 公司; TCS SP5 流变仪,美国 Thermo 公司。

1.3 方法

1.3.1 豆渣的制备

取低温脱脂豆粕粉,以 1:8 (*m/m*) 固液比加入去离子水,调 pH 值至 8.0,充分搅拌后离心,洗涤沉淀 3~5 次,重复 3 次上述步骤,以尽量多的除去水溶性蛋白,置于烘箱中 105 °C 烘干后获得豆渣,用研磨机对烘干后的豆渣进行预粉碎,得到豆渣粗粉(C-0)备用。

1.3.2 豆渣纤维的酶辅助空化处理

称取一定量粗豆渣粉,配制 5% (*m/V*) 的豆渣分散液并充分搅拌,进行如下处理:①采用水力空化机对其进行空化处理,空化时间分别为 0、5、10、20 min,样品标记为 C-0、C-5、C-10、C-20;②利用胶体磨对豆渣分散液进行处理 20 min,样品标记为 M-20;③调节豆渣分散液 pH 值至 4.5,在 50 °C 水浴条件下以 1% (*m/m*) 的植物水解酶酶解 4 h,样品标记为 E;④先对豆渣分散液进行 4 h 酶解处理,随后利用水力空化机空化 20 min,样品标记为 EC;⑤空化处理豆渣分散液 20 min 后以植物水解酶对其酶解 4 h,样品标记为 CE。将经上述处理后的豆渣分散液冷冻干燥,即为改性后的样品。

1.3.3 豆渣持水性、持油性及黏度的表征

持水力 (WHC): 参考 Yang 等^[16]的方法并稍作改动。准确称取 1.0 g 样品 (W_1) 及 30 mL 去离子水加入到 50 mL 离心管并充分搅拌, 以 6 000 r/min 的速率离心 20 min 后弃去上清液, 准确称量沉淀质量 (W_2) 并记录。

持油力 (OHC): 准确称取 0.5 g 样品 (W_3) 及 35 mL 葵花籽油加入 50 mL 离心管并充分搅拌, 以 6 000 r/min 的速率离心 20 min 后弃去上清液, 准确称量沉淀质量 (W_4) 并记录。

$$C_{\text{水}} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (1)$$

$$C_{\text{油}} = \frac{W_4 - W_3}{W_3} \quad (2)$$

式中:

$C_{\text{水}}$ ——持水力 (WHC), g/g;

$C_{\text{油}}$ ——持油力 (OHC), g/g。

黏度: 利用 TCS SP5 流变仪分析 25 °C 下不同样品的表观黏度。测量过程中使用 P60 平板, 且间隙为 1.0 mm。

1.3.4 扫描电镜 (SEM)

将不同处理后的豆渣粉洒在粘有双面导电胶的金属样品盘上, 用吸耳球清理浮粉后于真空环境下进行喷金处理, 随后放入电镜观察室中于 10 kV 的加速电压下进行观察。

1.3.5 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)

将不同的豆渣样品与溴化钾粉末以 1:100 (m/m) 混合均匀并充分研磨, 经压片机压成透明薄片后利用 Nicolet Avatar 360 红外光谱仪测定 400~4 000 cm^{-1} 范围内各个样品的红外光谱。测试数据通过 OPUS Viwer 软件分析。

1.3.6 X 射线衍射 (XRD)

参考王梦萍^[17]的方法, 用 D8 Advance 衍射器 (德国 Bruker 公司) 测定不同豆渣纤维的结晶度。其中扫描角度为 2°~50°。

1.3.7 数据分析

实验均至少进行三次独立实验。采用 SPSS 19.0 对数据进行方差分析 (ANOVA), 以 Duncan 多重比较进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 空化处理对豆渣纤维结构和理化性质的影响

参照 GB 5009.3-2016 测得豆渣粗粉 C-0 的水分、灰分及脂肪含量分别为 6.51%、1.42%、2.76%; 蛋白质含量为 15.39% (氮转化系数为 6.25); 豆渣的膳食纤维含量依据 AOAC 991.43 进行测定, 结果见表 1。

空化处理和胶体磨处理均显著提高了 SDF 的含量, 随着空化时间的延长, 豆渣中总纤维含量保持相对稳定, 但 SDF 含量明显增加, IDF 含量明显减少。这说明空化处理可促进 IDF 向 SDF 转化。与胶体磨 20 min 处理样品相比较, 水力空化 20 min 显著地提高了豆渣纤维中 SDF 的含量, 这可能与两种方法的原理不同相关。胶体磨主要是物理破碎为主, 而水力空化过程中伴随的局部高压与高温效应可以导致更多不溶性纤维素发生断裂, 紧密结构松动, 使一些与纤维素结合的可溶性膳食纤维溶出。

表 1 不同空化时间对豆渣膳食纤维含量的影响

Table 1 Effect of different cavitation time on dietary fiber

样品	content of okara (%)		
	TDF	SDF	IDF
C-0	73.15±1.29 ^a	2.87±0.54 ^c	70.28±0.27 ^a
C-5	73.80±1.44 ^a	5.53±0.18 ^b	68.27±0.09 ^b
C-10	73.57±0.99 ^a	6.12±0.27 ^{ab}	67.44±0.13 ^{bc}
C-20	72.78±1.45 ^a	6.97±0.38 ^a	65.81±0.19 ^c
M-20	73.39±1.31 ^a	5.32±0.07 ^b	68.07±0.04 ^b

注: 同列不同的小写字母表示具有显著差异 ($p < 0.05$)。C-0、C-5、C-10、C-20、M-20 分别表示空化 0、5、10、20 min 和过胶体磨 20 min 处理后的豆渣样品。

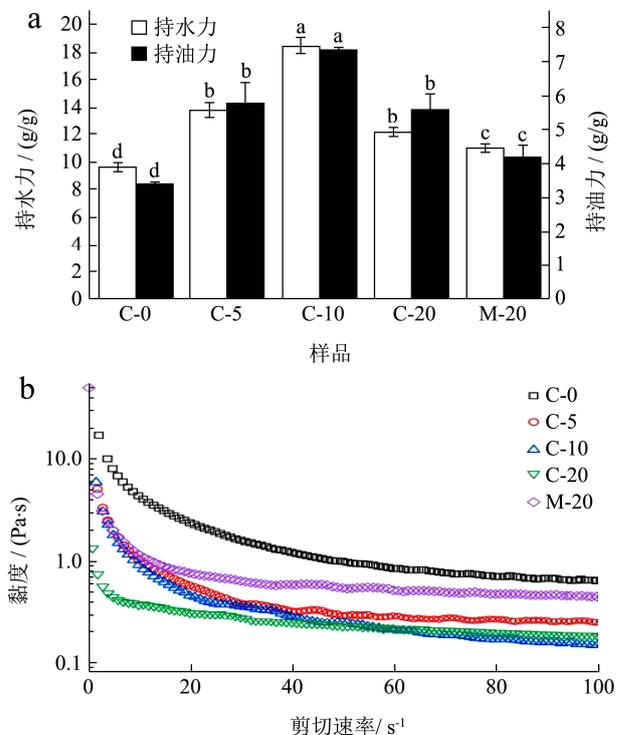


图 1 空化时间对豆渣理化性质的影响

Fig.1 Effect of cavitation time on physicochemical properties of okara

注: C-0、C-5、C-10、C-20、M-20 分别表示空化 0、5、10、20 min 和过胶体磨 20 min 处理后的豆渣样品; 同组数据小写字母不同表示差异显著, $p < 0.05$ 。

豆渣的水合能力、油结合能力及黏度对其在食品领域的应用具有重要意义。如图 1a 所示,空化处理与胶体磨处理均改善了豆渣纤维的持水和持油性。与胶体磨处理豆渣相比,空化处理豆渣的持水持油改善效果更为明显。这说明相较于单纯的均质作用,水力空化过程中空泡溃灭所产生的高温与高压更有助于豆渣理化性质的改善。豆渣纤维的持水力与持油力均随空化时间的增加表现出先上升后下降的趋势,且均在 10 min 时达到峰值 (18.43 g/g 和 7.35 g/g)。这是因为空化的高机械强度可显著降低豆渣纤维的粒径,使其致密的结构被打开从而暴露出更多亲水与亲油基团。当处理时间过长时 (20 min),持续的高强度作用会进一步破坏豆渣结构至其难以保留更多水分与油脂,这与吴海波等^[18]研究结果相似。

图 1b 反映了不同空化处理的豆渣溶液表观黏度的差异。总体而言,所有豆渣悬浮液均表现出明显的剪切变稀行为。随着空化时间的延长,豆渣溶液的表观黏度逐渐降低。这一现象归因于豆渣纤维中小分子水溶性成分含量的提升 (表 1)。Lopez-Sanchez 等^[19]曾发现,更大的粒径与更多数量的不溶性物质会导致更高的黏度。较长时间的空化处理 (20 min) 可充分破碎纤维颗粒,显著减小其粒径并促进 IDF 向 SDF 转化,从而降低流动阻力。胶体磨处理的豆渣溶液表面黏度明显高于同等时间下空化处理的豆渣,这可能与胶体磨处理对豆渣的破碎强度较空化弱有关。

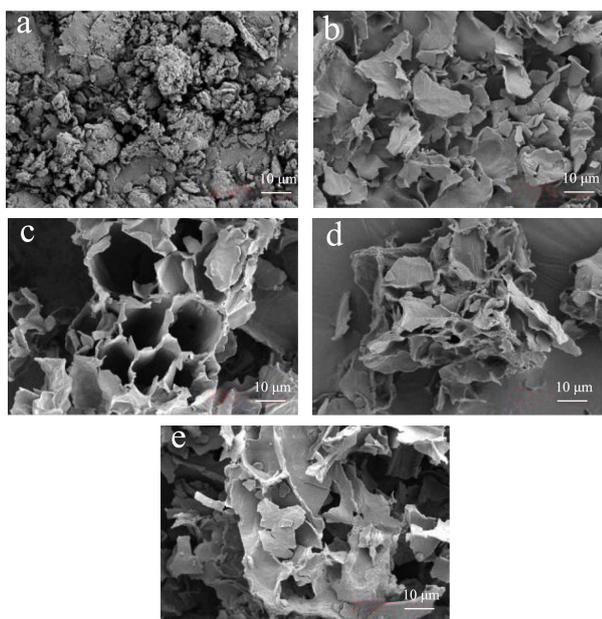


图 2 空化时间对豆渣 SEM 形貌的影响

Fig.2 Effect of cavitation time on SEM morphology of okara

注: a-e 分别表示空化 0、5、10、20 min 和过胶体磨 20 min 处理后的豆渣样品。

SEM 图像 (图 2) 显示,空化处理明显改变豆渣

纤维的组织结构。经空化处理后,豆渣中出现了大量蜂窝状的片状结构,表现出更大的比表面积,且空化 10 min 时这种变化尤为显著 (图 2c),随着空化时间延长至 20 min 时,片层孔状结构进一步遭到破坏,碎片增多 (图 2d)。这一结构变化与可溶性膳食纤维的溶出结果一致。豆渣的组织结构与其持水、持油性密切相关,多小孔隔开的片状结构拥有更大的比表面积,豆渣纤维暴露出更多的羟基和亲油基团,使其持水、持油性明显改善,当空化时间延长,这种结构遭到破坏,豆渣纤维颗粒破碎程度增加,其持水、持油能力相应降低 (图 1a),表观黏度也变小 (图 1b)。这与 Li 等^[20]采用蒸汽爆破处理豆渣时,豆渣表面松散的片状结构被破坏成小碎块,导致其持水性、持油性降低的研究结果相似。豆渣纤维胶体磨处理也能使豆渣结构崩解,但其结构解离程度稍逊于同等时间处理下的空化样品。

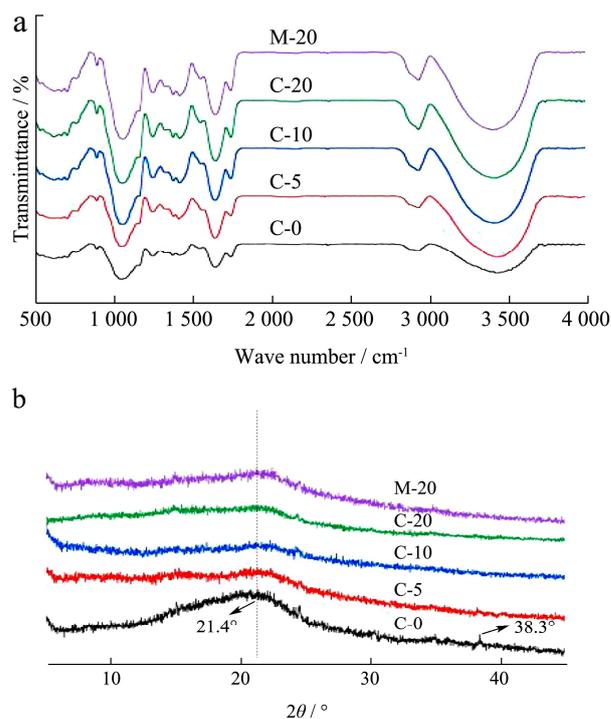


图 3 空化时间对豆渣傅里叶红外光谱与 X 射线衍射图谱的影响

Fig.3 Effect of cavitation time on Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction spectra of okara in different treatment

注: C-0、C-5、C-10、C-20、M-20 分别表示空化 0 min、5 min、10 min、20 min 和过胶体磨 20 min 处理后的豆渣样品。

对豆渣进行 500~4 000 cm^{-1} 范围内的傅里叶红外光谱扫描,如图 3a 所示。豆渣在 3 200~3 700 cm^{-1} 范围内及 2 928 cm^{-1} 附近的红外吸收峰强度随空化时间的延长不断增大,表明空化处理可加强豆渣分子间氢键的相互作用。这可能与较长时间的空化处理释放足

够的能量以促进豆渣结构展开,暴露出更多基团有关。 $1\ 050\ \text{cm}^{-1}$ 及 $889\ \text{cm}^{-1}$ 处糖苷键的伸缩振动增强也证明了这一点。较高空化时间下豆渣酰胺 I 带处的红外吸收也明显增强,说明持续的空化作用有助于豆渣内部残余蛋白质的释放。空化处理 FT-IR 图谱与胶体磨差别不大。

对空化不同时间豆渣的 X 射线衍射图谱进行分析可明确空化处理对纤维晶体结构及结晶度的影响。由图 3b 可知,未处理豆渣的 XRD 曲线在 2θ 为 21.4° 和 38.2° 处显示明显的衍射峰,是纤维素 I 型的特征衍射峰^[21]。豆渣经空化处理,在 2θ 为 21.4° 处的衍射峰明显减弱,在 2θ 为 38.2° 处的衍射峰甚至消失不见,表明豆渣中的纤维素结晶度降低。Qi 等^[22]在高压湿法介质磨处理豆渣不溶性膳食纤维的研究中也观察到纤维素结晶度随处理时间的延长而降低的现象。

2.2 酶法辅助空化处理对豆渣纤维结构和理化性质的影响

表 2 不同处理对豆渣膳食纤维含量的影响 (%)

Table 2 Effect of different treatment on dietary fiber content of

okara (%)			
样品	TDF	SDF	IDF
N	73.15 ± 1.29^a	2.87 ± 0.54^c	70.28 ± 0.27^a
E	73.99 ± 0.55^a	7.20 ± 0.62^b	66.79 ± 0.23^b
C	72.78 ± 1.45^a	6.97 ± 0.38^c	65.81 ± 0.19^c
CE	74.59 ± 0.38^a	8.13 ± 0.47^b	66.28 ± 0.31^b
EC	74.54 ± 0.03^a	12.52 ± 0.02^a	62.02 ± 0.03^d

注:同列不同的小写字母表示具有显著差异 ($p < 0.05$); N: 豆渣粗粉; E: 酶解 4 h 豆渣; C: 空化 20 min 豆渣; CE: 先空化 20 min, 后酶解 4 h 豆渣; EC: 先酶解 4 h, 后空化 20 min 豆渣。

有研究称利用复合糖酶水解豆渣细胞壁多糖可增加其可溶性成分并提高功能性质^[23]。本研究以植物水解酶酶解辅助水力空化技术对豆渣进行处理,并测定了其纤维组成(表 2)。植物水解酶酶解 4 h 可将 SDF 的含量提升至 8.13%,较未处理的豆渣提升了 2.83 倍。这归因于植物水解酶主要以纤维素酶、果胶酶与木聚糖酶复配而成,这些酶可水解豆渣纤维中的糖苷键,使其降解成分子量更小的片段,降低分子聚合度,释放 SDF。将空化与酶解两种手段联合用于处理豆渣,可进一步提升 SDF 含量,但酶解处理的先后顺序对 SDF 溶出效果有较大影响。先空化 20 min 后酶解对 SDF 含量的提升效果并不显著,而先酶解后空化的豆渣中 SDF 含量可提升至 12.52%,明显高于前者。这可能是因为先进行酶解处理能有效降解豆渣细胞壁成

分,形成较为通透松散的结构,在此基础上再对其进行空化处理更有利于可溶性成分的释放。

图 4 反映了不同处理对豆渣理化性质的影响。单纯酶解豆渣的持水力与持油力较未处理豆渣均有明显提升,黏度明显下降,说明植物水解酶具有较好的豆渣改性能力。酶解与空化处理的先后顺序对豆渣的理化性质也存在一定程度的影响,先酶解后空化的豆渣(EC)持水力和持油力不及先空化后酶解的样品(CE)。酶解处理后豆渣的表观黏度明显降低,这与植物水解酶降低了豆渣纤维的聚合度,从而减小其运动阻力有关。EC 的溶液表观黏度较 CE 低,这可能归因于 EC 中小分子可溶性成分含量更高,溶液流动阻力较小。

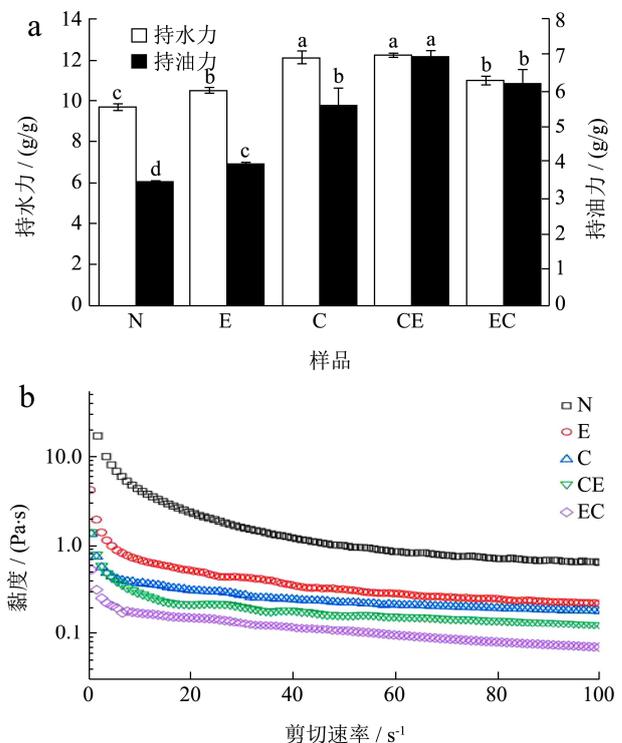


图 4 不同处理对豆渣理化性质的影响

Fig.4 Effect of different treatments on physicochemical properties of okara

注: N: 豆渣粗粉; E: 酶解 4 h 豆渣; C: 空化 20 min 豆渣; CE: 先空化 20 min, 后酶解 4 h 豆渣; EC: 先酶解 4 h, 后空化 20 min 豆渣。同组数据小写字母不同表示差异显著, $p < 0.05$ 。

图 5 为不同处理下豆渣的微观形貌图。以植物水解酶酶解的豆渣呈现表面光滑的块状结构,且无明显碎片。酶解与空化联合处理的豆渣较单一处理的样品显示出一些更小、更碎的片状结构,表明联合处理可使豆渣发生剧烈撕裂,减小纤维尺度。酶解与空化的先后顺序对豆渣纤维形貌亦有较强的影响,CE 的碎片状结构之间的连接比 EC 多,表现为 CE 的持水、持油能力及表观黏度都比 EC 高,这与图 4 的结果可以互证。

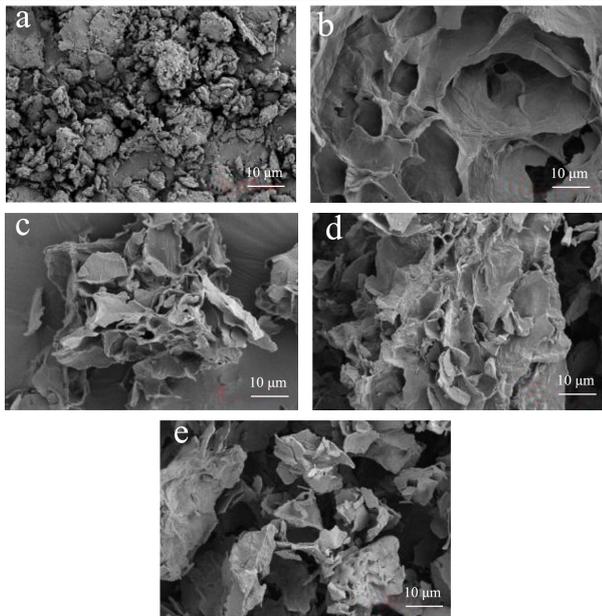


图5 酶及空化处理对豆渣 SEM 形貌的影响

Fig.5 Effect of enzyme and cavitation treatment on SEM morphology of okara

注: a~e 分别表示不处理、酶解 4 h、空化 20 min、先空化后酶解及先酶解后空化样品。

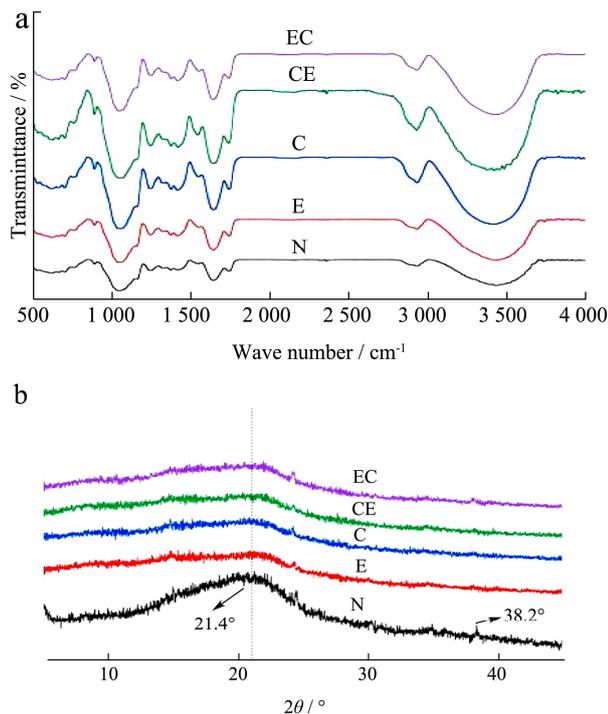


图6 不同处理下豆渣的傅里叶红外光谱与 X 射线衍射图谱。

Fig.6 Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction spectra of okara in different treatment

注: N: 豆渣粗粉; E: 酶解 4 h 豆渣; C: 空化 20 min 豆渣; CE: 先空化 20 min, 后酶解 4 h 豆渣; EC: 先酶解 4 h, 后空化 20 min 豆渣。

由图 6a 可知, 植物水解酶酶解后豆渣的 FT-IR 图

谱与未处理豆渣相似, 这可能与酶解破坏豆渣表面结构后使内部基团再次暴露有关。空化与酶法联合处理的豆渣中氢键及糖苷键的伸缩振动明显增强, 但先酶解后空化的豆渣中各红外吸收峰较先空化后酶解的样品低。图 6b 反映了不同处理手段对豆渣晶型及结晶度的影响, 酶解、空化以及二者联合处理均能有效减弱 21.4°及 38.2°处纤维素的特征峰, 且处理后豆渣的结晶度下降明显, 这说明以上处理方法均能对豆渣纤维结构造成破坏作用。

3 结论

水力空化技术通过空泡溃灭释放的热能与高机械强度可使豆渣结构更为松散, 暴露出更多亲水、亲油基团, 显著提升其持水性和持油性并降低溶液黏度。但随着水力空化时间的不断延长 (>10 min), 豆渣的结构可能被进一步破坏而导致其持水性和持油性下降。以纤维素酶、果胶酶和木聚糖酶复配的植物水解酶能专一性切断豆渣纤维中的糖苷键, 从而释放出更多 SDF, 降低豆渣体系黏度。酶法辅助空化处理可在空化和酶解单一处理的基础上进一步提升 SDF 含量, 改善豆渣的持水持油能力, 并显著降低表观黏度, 这可能有利于豆渣应用于液态食品。

参考文献

- [1] Vong W C, Liu S Q. Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 52: 139-147
- [2] 李菁, 吴聪聪, 叶沁, 等. 不同处理方法对豆渣膳食纤维结构和降血糖性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 178-184
- [3] LI Jing, WU Congcong, YE Qin, et al. Different treatments on structure and hypoglycemic properties of okara dietary fibers [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 178-184
- [4] Matsumoto K, Watanabe Y, Yokoyama S. Okara, soybean residue, prevents obesity in a diet-induced murine obesity model [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2007, 71(3): 720-727
- [5] Bedani R, Rossi E A, Isay Saad S M. Impact of inulin and okara on *Lactobacillus acidophilus* La-5 and *Bifidobacterium animalis* Bb-12 viability in a fermented soy product and probiotic survival under in vitro simulated gastrointestinal conditions [J]. Food Microbiol, 2013, 34(2): 382-389
- [5] Li B, Qiao M, Lu F. Composition, nutrition, and utilization of okara (soybean residue) [J]. Food Reviews International, 2012, 28(3): 231-252

- [6] Porfiri M C, Vaccaro J, Stortz C A, et al. Insoluble soybean polysaccharides: obtaining and evaluation of their O/W emulsifying properties [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 73: 262-273
- [7] 康芳芳,杨伟,芦菲,等.豆渣品质改良技术研究进展[J].食品工业科技,2016,37(2):374-378
KANG Fangfang, YANG Wei, LU Fei, et al. Research progress on the methods for quality improvement of okara [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(2): 374-378
- [8] 李伟伟,周才琼.豆渣膳食纤维的改性研究进展[J].食品工业科技,2018,39(19):333-338
LI Weiwei, ZHOU Caiqiong. Research progress of modification of dietary fiber from soybean residue [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(19): 333-338
- [9] Liu Y, Yi S, Ye T, et al. Effects of ultrasonic treatment and homogenization on physicochemical properties of okara dietary fibers for 3D printing cookies [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105693
- [10] Fan X, Chang H, Lin Y, et al. Effects of ultrasound-assisted enzyme hydrolysis on the microstructure and physicochemical properties of okara fibers [J]. Ultrasonics - Sonochemistry, 2020, 69: 105247
- [11] Yoshida B Y, Prudencio S H. Physical, chemical, and technofunctional properties of okara modified by a carbohydrase mixture [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 134: 110141
- [12] Pérez-López E, Mateos-Aparicio I, Rupérez P. Low molecular weight carbohydrates released from Okara by enzymatic treatment under high hydrostatic pressure [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 38: 76-82
- [13] Madison M J, Coward-Kelly G, Liang C, et al. Mechanical pretreatment of biomass - Part I: acoustic and hydrodynamic cavitation [J]. Biomass and Bioenergy, 2017, 98: 135-141
- [14] Wu C, Teng F, McClements D J, et al. Effect of cavitation jet processing on the physicochemical properties and structural characteristics of okara dietary fiber [J]. Food Research International, 2020, 134: 109251
- [15] Yang F, Liu X, Ren X, et al. Swirling cavitation improves the emulsifying properties of commercial soy protein isolate[J]. Ultrason Sonochem, 2018, 42: 471-481
- [16] Yang J, Xiao A, Wang C. Novel development and characterisation of dietary fibre from yellow soybean hulls [J]. Food Chemistry, 2014, 161: 367-375
- [17] 王梦萍.基于亚临界水技术构建大豆蛋白基活性纳米颗粒及其性质研究[D].广州:华南理工大学,2018
WANG Mengping. Fabrication and characterization of functional soy protein-based nanoparticles using subcritical water technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018
- [18] 吴海波,于静雯,吴长玲,等.空化微射流对豆渣膳食纤维结构及功能特性影响[J].食品科学,2020,41(1):94-99
WU Haibo, YU Jingwen, WU Changling, et al. Cavitation microjet effects on the structure and functional properties of okara dietary fiber [J]. Food Science, 2020, 41(1): 94-99
- [19] Lopez-Sanchez P, Nijssse J, Blonk H C, et al. Effect of mechanical and thermal treatments on the microstructure and rheological properties of carrot, broccoli and tomato dispersions [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(2): 207-217
- [20] Li B, Yang W, Nie Y, et al. Effect of steam explosion on dietary fiber, polysaccharide, protein and physicochemical properties of okara [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 48-56
- [21] Okahisa Y, Furukawa Y, Ishimoto K, et al. Comparison of cellulose nanofiber properties produced from different parts of the oil palm tree [J]. Carbohydr Polym, 2018, 198: 313-319
- [22] Qi W, Li T, Zhang Z, et al. Preparation and characterization of oleogel-in-water pickering emulsions stabilized by cellulose nanocrystals [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 110: 106206
- [23] Vong W C, Liu S Q. The effects of carbohydrase, probiotic *Lactobacillus paracasei* and yeast *Lindnera saturnus* on the composition of a novel okara (soybean residue) functional beverage [J]. Lwt - Food Science and Technology, 2019, 100: 196-204