

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.039

空化射流条件下豆渣不溶性膳食纤维结构与功能性研究

吴长玲¹ 陈鹏² 李顺秀² 江连洲¹ 王中江¹ 刘军^{2,3}

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 临邑禹王植物蛋白有限公司, 德州 253000;
3. 山东禹王生态食业有限公司, 德州 253000)

摘要: 为有效促进豆渣中不溶性膳食纤维的可溶化、提高其功能特性,利用空化微射流技术处理生物酶法制油豆渣膳食纤维,采用X-射线衍射、扫描电子显微镜方法分析不同空化微射流处理时间(0、6、12、18 min)下豆渣膳食纤维的晶体结构及表观形态变化,并通过粒度、持水性、膨胀性、表观粘度、葡萄糖和胆固醇吸附能力对其理化、功能性进行表征,明确空化射流对其结构、功能及吸附特性的影响。结果显示:经空化射流处理18 min后,样品结构产生粒径减小、结晶度下降、粘度降低等变化;处理12 min时膨胀力、持水力分别达到最大值(13.92±0.78) mL/g、(2.83±0.13) g/g,此时对葡萄糖和胆固醇的吸附能力最佳。研究表明,空化射流可有效促进生物酶法制油豆渣不溶性膳食纤维的可溶化,并显著改善其结构及理化性质。

关键词: 豆渣; 不溶性膳食纤维; 空化射流; 晶体结构; 功能特性; 吸附特性

中图分类号: TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0350-07 OSID: 

Effect of Cavitation Jets on Structure and Function of
Okara Insoluble Dietary Fiber

WU Changling¹ CHEN Peng² LI Shunxiu² JIANG Lianzhou¹ WANG Zhongjiang¹ LIU Jun^{2,3}

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Linyi Yuwang Plant Protein Co., Ltd., Dezhou 253000, China
3. Shandong Yuwang Ecological Food Co., Ltd., Dezhou 253000, China)

Abstract: In order to effectively promote the dissolution of okara insoluble dietary fiber and its functional characteristics, okara (soybean residues) were used as raw materials by using cavitation jets technology to treat okara of bio-enzyme-made insoluble dietary fiber. X-ray diffraction and scanning electron microscopy were used to analyze the crystal structure and apparent morphological changes of okara insoluble dietary fiber under different cavitation jets treatment times (0 min, 6 min, 12 min and 18 min). Its physical, chemical and functional properties were characterized by particle size, water retention, swelling, apparent viscosity, glucose and cholesterol adsorption capacity. The effects of cavitation jets on their structure, function and adsorption characteristics were clarified. The results showed that the structure of the sample reduced particle size, crystallinity, and viscosity after 18 min of cavitation jets treatment. The swelling force and water holding capacity reached the maximum values of (13.92±0.78) mL/g and (2.83±0.13) g/g at 12 min, respectively. At this time, the adsorption capacity for glucose and cholesterol was the best. Therefore, cavitating jet can significantly promote the dissolvability of insoluble dietary fiber from okara and effectively improve its structure and physical and chemical properties, thus it can provide technical support and theoretical guidance for the high value application of soybean by-products.

Key words: okara; insoluble dietary fiber; cavitation jets; crystal structure; functional characteristics; adsorption capacity

收稿日期: 2020-06-11 修回日期: 2020-07-11
基金项目: 山东省重点研发计划项目(2018YYSP026、2018YYSP021)、黑龙江省自然科学基金面上项目(C2018024)、山东省泰山产业领军人才工程高效生态农业创新类项目(LJNY201607)和东北农业大学“青年才俊”项目(18QC50)
作者简介: 吴长玲(1991—),女,博士生,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: wuchangling0805@163.com
通信作者: 刘军(1982—),男,高级工程师,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: liujun@yuwangen.com

0 引言

近年来,膳食纤维的加工引入很多新型物理技术,如高静水压^[1]、动态微流化^[2]和爆破挤压^[3]技术等。文献[1]利用高静水压技术联合酶解处理豆渣,其中可溶性膳食纤维含量增加 74%。文献[2]在 100 MPa 下采用动态高压微流化技术处理豆渣膳食纤维溶液,用于制备快速溶解的可食用薄膜。文献[3]将麦麸经爆破挤压处理,促进了可溶性膳食纤维的溶出,还可避免其他营养素的损失。尽管关于豆渣的相关研究不断深入,但大多停留在加工工艺的优化方面,对其更为深入的结构功能研究相对较少,且生物酶法制油副产物组分中膳食纤维的理化及构效关系性质尚未明确,有待进一步研究^[4]。

空化微射流技术是一种新颖的化学密集型技术,利用空泡破裂产生的强大冲击力来增强射流的冲蚀效果^[5],原料经高速剪切、挤压、空化等作用,导致其结构细化,进而影响其功能特性。空化微射流技术与高压均质原理相近,但能更有效控制物料在处理过程中的温度变化^[6],避免因机械能转化为热能而破坏原料的营养成分。文献[7]利用空化射流装置处理壳聚糖,壳聚糖单体降解,并且降解的壳聚糖的结构没有变化,分子间氢键断裂,结晶度降低。

本文基于前期生物酶法制油工艺,以废弃豆渣为原料,运用新型空化微射流技术处理生物酶法制油豆渣膳食纤维,分别考察处理时间对晶体结构、表观形貌、粒度、持水力、膨胀力、流变性质及吸附性质等的影响,以明确空化微射流对豆渣膳食纤维结构及功能特性的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆(粗纤维质量分数 93%),山东禹王生态食业有限公司;Alcalase 碱性蛋白酶,酶活 10 000 U/g 以上,广州柏棠贸易有限公司;其它试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

空化射流气爆机,本实验室自组装;AR550 型流变仪,美国 Ta Instruments 公司;Nano ZS90 型激光衍射粒度分析仪,英国马尔文公司;K-436 型快速消解仪、K-370 型自动凯氏定氮仪,瑞士步琦有限公司;JJ-1/100W 型精密电动搅拌器,常州丹瑞实验仪器设备有限公司;AL204 型分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;PL303 型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;PHS-3C 型雷磁 pH 计,上海精科仪器有限公司;TDL-408 型台

式离心机,上海安亭科学仪器厂;DHG-9146A 型鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;DC-500A 型高速多功能粉碎机,浙江武义鼎盛藏日金属制品厂;HH-4 型数显恒温水浴锅,常州丹瑞实验仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 生物酶法制油豆渣制备

参照文献[8]的生物酶法制油进行豆渣制备,具体操作如下:大豆经粉碎机粉碎过 60 目筛,取 200 g 过筛后的粉体,按液料比为 6 mL/g 加入 1.2 L 蒸馏水,搅拌均匀后置于 55℃ 水浴锅中,按生物酶法制油的过程进行酶解,酶解条件为:酶解温度 55℃、持续搅拌 2 h、pH 值稳定在 9.0、Alcalase 碱性蛋白酶添加量为 0.5%,酶解结束后,用 1 mol/L HCl 溶液将 pH 值调至 7.0 后在 100℃ 沸水浴中灭酶 5 min,冷却,将灭酶后的混合液离心 20 min(4 500 r/min、4℃),离心后将上层液体去除,仅保留下层固体豆渣,并在相同离心条件下按液料比为 3 mL/g 用去离子水将所得豆渣水洗 3 次后在托盘铺平后置入 55℃ 鼓风干燥箱干燥 6 h,待质量恒定后粉碎至颗粒均匀,即得到生物酶法制油豆渣。

1.3.2 豆渣膳食纤维制备

根据文献[9]的方法制备豆渣膳食纤维。取 50 g 生物酶法制油豆渣粉,以液料比 20 mL/g 与 1 L 蒸馏水混合均匀,用 1 mol/L 的 NaOH 溶液将 pH 值调至 9.0,搅拌机搅拌 2 h,在 9 000 r/min、4℃、30 min 条件下离心后去除上层液体,保留下层固体,以液料比为 3 mL/g 加入去离子水,并在 4 500 r/min、4℃、15 min 离心条件下水洗 3 次,在托盘铺平后置入 55℃ 鼓风干燥箱干燥 6 h,得豆渣膳食纤维粉。每组取 90 g 豆渣膳食纤维粉,按液料比 8 mL/g 与蒸馏水溶解,将混合液进行空化微射流处理。处理参数如下:处理压力 0.01 MPa,处理温度 22.5℃,处理时间分别为 5、10、15 min,样品经空化微射流后在 4 500 r/min、4℃ 条件下离心 15 min,并在 55℃ 干燥至质量恒定,脱脂处理后即得本实验样品。

1.3.3 粒径测定

参照文献[10]的方法,在 25℃ 下分别测量豆渣膳食纤维样品的平均粒径。

1.3.4 表观密度、比表面积、休止角测定

表观密度测定:准确称取 1.5 g 干燥的膳食纤维粉末于 10 mL 量筒中,在水平桌面上振荡量筒使纤维尽量在底部填充紧实,读取纤维所占的体积。表观密度计算方法为^[11]

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{1}$$

式中 M ——样品质量, g V ——样品体积, mL

比表面积测定:参照文献[12]的方法测定,取 0.5 g 豆渣膳食纤维粉末,测定粉体比表面积。

休止角测定:参照文献[12]的方法测定,取一定质量豆渣膳食纤维粉末加入玻璃漏斗,作自由落体运动,落在水平实验台上,直至堆积成为最大半径圆锥体,测量圆锥体半径及高度,休止角计算公式为

$$\theta = \arctan \frac{h}{R}$$

(2)

式中 h ——圆锥体高度, cm
 R ——圆锥体半径, cm

1.3.5 流变性质测定

配制质量浓度 0.04 g/mL 的样品混合液,测量时选取直径 60 mm 的平板夹具,间隙设置为 50 μm,测定温度设定为 (25 ± 0.1) °C,考察纤维混合液在剪切速率 0 ~ 200 s⁻¹ 时的静态剪切流变特性^[13]。

1.3.6 扫描电子显微镜成像

将干燥的样品散落在金属样品平台上并用双面胶带固定,通过阴极喷涂系统涂覆金属离子层(约 30 nm 厚)。在高真空条件(10 ~ 40 Pa)下以 5 kV 的加速电压使用扫描电子显微镜观察,图像应用自动图像捕获软件拍摄,所得图像的放大倍率在 100 ~ 3 000 倍之间^[14]。

1.3.7 X-射线衍射测定

设定测试参数如下:发生器电压为 40 kV,入射电流为 150 mA,防扩散狭缝角度为发散狭缝的 2/3,选取 CuKα 辐射,扫描范围为 5° ~ 60°,扫描速度为 π/min,结晶度计算公式为^[15-16]

$$X_c = \frac{I_c}{I_c + I_a} \times 100\%$$

(3)

式中 I_c ——聚合物结晶区面积
 I_a ——聚合物无定形区面积

1.3.8 持水力及膨胀力测定

持水力测定:取 1.0 g 样品及 70 mL 蒸馏水加入离心管中。在 20 °C 下充分搅拌 2 h,以 5 000 r/min 转速离心 10 min 后,弃去上清液,称量残渣并计算每克干样品的水分质量。持水力计算公式为

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0}$$

(4)

式中 m_0 ——样品干质量, g
 m_1 ——样品吸水后的质量, g

膨胀力测定:将样品(250 mg)称量加入 15 mL 具塞试管(最小刻度 0.1 mL)中,读取干样品体积,加入 7.5 mL 蒸馏水,摇匀,在室温(20 °C)静置 24 h 后吸水膨胀,并读取膨胀后样品体积。膨胀力计算

公式为^[17]

$$S_c = \frac{V_1 - V_0}{m_0}$$

(5)

式中 V_0 ——干样品体积, mL
 V_1 ——膨胀后样品体积, mL

1.3.9 葡萄糖吸附能力测定

准确称取 1.0 g 豆渣膳食纤维置于 250 mL 的锥形瓶内,分别加入 0.1 L 浓度 C_0 为 50、100、150 mmol/L 的葡萄糖溶液,在 37 °C 水浴中振荡 6 h,取出后在 4 200 r/min 条件下离心 20 min,弃沉淀取上清液测定葡萄糖浓度 C_1 ,葡萄糖吸附量计算公式为^[18]

$$W_c = \frac{0.1(C_0 - C_1)}{M_0}$$

(6)

式中 M_0 ——膳食纤维质量, g
 W_c ——葡萄糖吸附量, mmol/g

1.3.10 胆固醇吸附能力测定

取 1 份新鲜鸡蛋蛋黄,加入 9 倍体积的蒸馏水,混合均匀得蛋黄乳液。分别取 2.0 g 豆渣膳食纤维粉末加入 250 mL 锥形瓶中,按质量比 1:25 加入蛋黄乳液,搅拌均匀,调节 pH 值至 2.0、7.0,37 °C 水浴恒温振荡 2 h,在 4 000 r/min 的条件下离心 20 min,取上清液,采用邻苯二甲醛法在 550 nm 下测定吸光度,根据标准曲线计算上清液中的胆固醇质量并计算吸附量,计算公式为^[18]

$$W_c = \frac{M_1 - M_2}{M_0}$$

(7)

式中 M_1 ——吸附前蛋黄乳液的胆固醇质量, mg
 M_2 ——吸附后上清液中胆固醇质量, mg
 W_c ——胆固醇吸附量, mg/g

1.4 数据分析

本研究每个检测指标设定 3 组平行及 3 组重复实验,实验结果表示为平均值 ± 标准偏差。采用 SPSS 22.0 软件对数据进行单因素(ANOVA)方差分析,其中 $p < 0.05$ 为差异显著。采用 Origin 9.0 软件进行数据分析、图表绘制及图谱处理。

2 结果与分析

2.1 粒度分析

由图 1 可知,未处理溶液中豆渣膳食纤维的体积平均粒径为 (2.39 ± 0.11) μm;随着空化射流处理时间的延长,膳食纤维体积平均粒径呈现逐步降低的趋势,这一结果表明纤维颗粒尺寸减小与空化射流时间有关。由于原料在处理过程中受空化、强烈震动作用,导致液体颗粒内部形成小空泡,小空泡伴随高速旋转卷入射流内部体积增大,

直至空泡间或空泡与仪器内壁猛烈撞击阻滞空泡体积增大而引起破裂,破裂过程中,产生高压力和微射流,形成高能冲击波,使得膳食纤维被逐步破碎^[19],随着处理时间的延长,破碎程度加深,当空化射流处理达到 18 min 时,体积平均粒径缩减至 1.81 μm。膳食纤维体积平均粒径减小,单个颗粒质量降低,重力减小,若将其添加到饮料中会提高悬浮液的稳定性,进一步改善不溶性膳食纤维在食品加工中的特性^[15]。

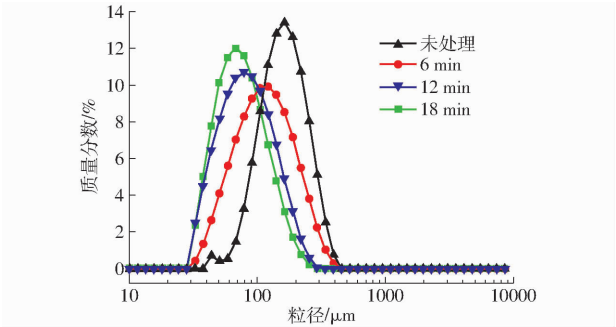


图 1 空化射流时间对豆渣不溶性膳食纤维溶液粒径的影响

Fig.1 Cavitation jets effect on particle size distribution of okara insoluble dietary fiber

2.2 流变性质分析

膳食纤维分散体的流变性质与连续相的粘度有关,添加到食品中显著影响其感官品质(如硬度、粘稠度、顺滑感、颗粒感和粘附性等)^[12]。膳食纤维剪切速率与粘度变化关系如图 2 所示,随着剪切速率的增加,布朗运动愈发剧烈,而 4 种纤维悬浮液的表观粘度急剧下降,均表现为剪切变稀的现象^[20-21],这表明悬浮液为非牛顿流体。同一剪切速率下,空

化射流 18 min 处理的样品表观粘度最小。这与不溶性膳食纤维结构有关,处理时间越长,纤维颗粒破碎程度越高,粒径越小,颗粒内部由于气蚀作用形成的网络结构被破坏,连续相中的膳食纤维排列从有序到无序,从而导致流动阻力降低^[16]。在食品加工中应用,可大大降低产品的粘稠度,增强流动性,从而提升感官品质^[22]。

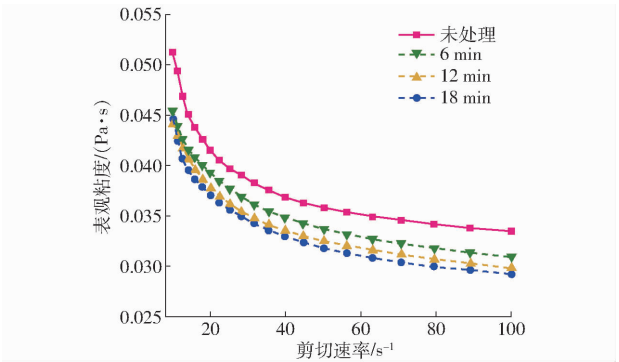


图 2 空化射流时间对豆渣不溶性膳食纤维表观粘度的影响

Fig.2 Cavitation jets effect on apparent viscosity of okara insoluble dietary fiber

2.3 物理性质分析

由表 1 可知,与未处理样品相比,随空化射流处理时间的延长,不溶性膳食纤维粉末粒度(D_{10} 表示粒径分布中占 10% 所对应的粒径; D_{50} 表示粒径分布中占 50% 所对应的粒径,又称中位径; D_{90} 表示粒径分布中占 90% 所对应的粒径)呈现逐渐降低的趋势。实验过程中纤维颗粒的表观密度及比表面积随着空化射流处理时间的延长呈现逐渐增加的趋势,休止角则呈现下降趋势。

表 1 空化射流对豆渣不溶性膳食纤维粉末物理性质的影响							
Tab.1 Cavitation jets effect on physical properties of okara insoluble dietary fiber							
处理时间/ min	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	体积平均 粒径/ μm	表观密度/ ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	休止角/ ($^{\circ}$)
0	(0.42 ± 0.15) ^a	(21.61 ± 0.96) ^a	(97.63 ± 1.61) ^a	(2.11 ± 0.50) ^a	(40.12 ± 0.52) ^d	(0.461 ± 0.15) ^d	(34.23 ± 1.42) ^a
6	(0.39 ± 0.07) ^a	(19.29 ± 0.81) ^a	(94.82 ± 1.89) ^a	(2.05 ± 0.19) ^a	(59.63 ± 0.71) ^c	(0.531 ± 0.23) ^c	(30.52 ± 2.11) ^{cd}
12	(0.29 ± 0.09) ^{ab}	(15.99 ± 0.78) ^b	(84.60 ± 2.52) ^b	(1.96 ± 0.06) ^b	(78.33 ± 0.86) ^b	(0.776 ± 0.19) ^b	(28.46 ± 1.91) ^b
18	(0.11 ± 0.15) ^c	(13.67 ± 0.73) ^c	(73.41 ± 1.46) ^c	(1.78 ± 0.19) ^c	(90.59 ± 0.81) ^a	(0.808 ± 0.26) ^a	(26.61 ± 1.63) ^d

注:同列数据上标字母不同表示差异显著($p < 0.05$),下同。

这是由于膳食纤维悬浊液经空化射流作用,使液体内部形成空泡,瞬时爆发性生长,导致液体颗粒内部的不溶性膳食纤维颗粒激烈碰撞,从而大粒径纤维被空泡破裂产生的高能冲击波剪碎^[12],这与 2.1 节中膳食纤维溶液粒径减小相吻合,从而导致干燥后的粉体粒度(D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90})降低。纤维颗粒尺寸(D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90})逐步减小,此过程导致其暴露程度加深,单位质量纤维颗粒所占体积大大减少,使得

其表观密度与比表面积显著增大,可能会导致更多的羟基结合位点暴露出来,从而改善不溶性膳食纤维的吸附能力^[23]。此外,当处理时间超过 12 min 时,分子内部高速剪切、碰撞作用致使体系温度上升,分子发生一定程度的热聚集现象,也可导致纤维粒度(D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90})一定程度上的增加。休止角(θ)是评价粉体流动性的重要指标,当 $\theta < 30^{\circ}$ 时,粉体流动性较好。贮藏期间粉体易受环境温度、湿度、压

力、机械力等的影响,而流动性强的粉末稳定性较好。由于机械作用使纤维颗粒尺寸减小,纤维颗粒表面产生静电斥力,不易发生团簇,从而干燥后的粉体具有良好的流动性^[24],因此有利于生产过程中原料贮藏。

2.4 扫描电子显微镜分析

通过扫描电子显微镜研究了豆渣不溶性膳食纤维颗粒的微观结构。如图 3 所示,原始样品的形态结构呈现致密、规则、有序的排列状态,无沟槽断层,孔洞少^[18],结构较为完整,随着空化射流时间延长样品显示出紧密程度逐渐降低,表面逐渐出现较为明显的沟槽和孔洞,碎片体积减小、数量增加,结构变得愈发松散,从有序排列逐渐转向无序分布。这与上述实验结果相对应,样品在处理过程中,空化射流处理导致颗粒内部受到冲击波强烈影响,粒径降低,孔隙度增大,比表面积增加,原本紧凑的结构逐步断裂^[14],此过程可能暴露更多的羟基结合位点,产生毛细管作用力,有助于水分子渗入,促进纤维分子与水分子通过氢键结合,进而改善不溶性膳食纤维的功能性质^[6]。

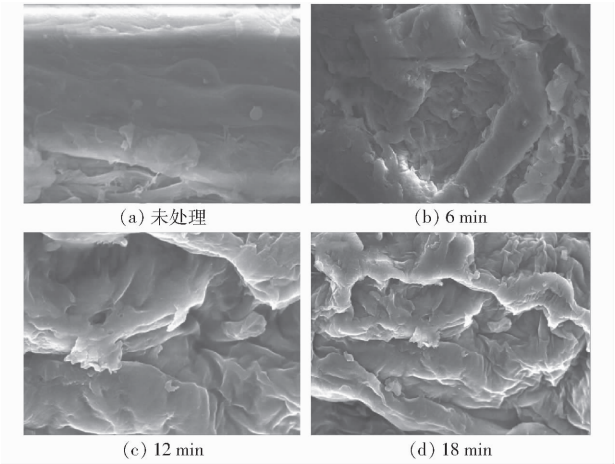


图 3 豆渣不溶性膳食纤维扫描电子显微镜图像
Fig.3 Scanning electron microscope analysis of okara insoluble dietary fiber

2.5 晶体结构分析

X-射线衍射可表征不溶性膳食纤维晶体结构类型和结晶度。结晶度表示聚合物中结晶区域所占的百分比,结晶度越高,熔点越高,分子链排列程度越有序^[15]。由图 4 可知,不同空化射流时间的不溶性膳食纤维衍射角(2θ)为 23.02° 时表现出强烈的峰值,而弱峰衍射角(2θ)为 34.89° ,表明晶体结构为天然纤维素 II 型,是晶体区与非晶区共存的一种状态,并且空化射流处理并未使样品变性^[25]。随着空化射流处理时间的延长,样品的结晶度呈现下降趋势,由 40.39% 下降到 32.54%。这表明空化射流处理会导致不溶性膳食纤维有序结构被破坏,液体微

粒内部受空化、高速剪切、震动等作用,形成的空泡连续胀大闭合,产生冲击波使得物料致密完整的结构被瓦解。这与扫描电子显微镜的结果相一致,可能导致物料功能特性的提升^[26]。

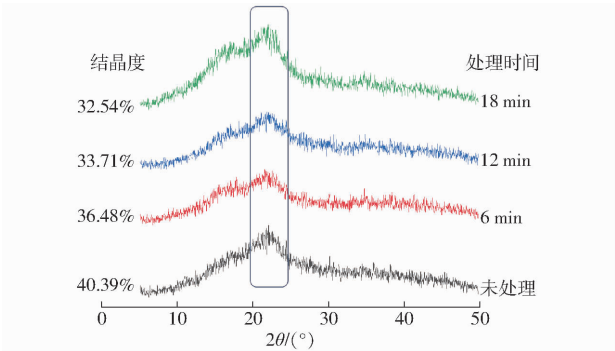


图 4 豆渣不溶性膳食纤维 X-射线衍射分析
Fig.4 X-ray diffraction analysis of okara insoluble dietary fiber

2.6 膨胀性及持水性分析

由表 2 可知,膳食纤维膨胀力、持水力均随空化射流时间延长呈现先增后减的趋势。这是由于处理过程中物料受空化的力学冲击,动能转换为破碎能,使纤维颗粒破碎,紧实致密的结构被打开,粒度减小,比表面积增大,此过程会暴露出来更多的亲水基团,增大毛细管吸引力,促进氢键形成^[23],从而导致持水力与膨胀力增加。空化射流处理 12 min 时,膨胀力、持水力分别达到最大值 (13.92 ± 0.78) mL/g、 (2.83 ± 0.13) g/g,随着处理时间的进一步增加,膨胀力与持水力均略有下降但不显著,可归因于空化程度过深,物料粉碎程度过大,内部形成的网状结构被破坏,颗粒极小的不溶性膳食纤维丧失捕获水的能力^[17],这与文献^[24]中压榨马铃薯不溶性纤维持水力的结果类似。此外,如 2.3 节所述当空化射流达到一定程度,分子间的强剪切、碰撞作用会使得体系温度升高,从而导致性能降低。因此,空化射流 12 min 有助于豆渣不溶性膳食纤维持水力、膨胀力的提高。

表 2 空化射流对豆渣膳食纤维膨胀力、持水力的影响

Tab.2 Cavitation jets effect on swelling power and water retention capacity of okara insoluble dietary fiber

处理时间/min	膨胀力/($\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$)	持水力/($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
0	$(9.65 \pm 0.68)^c$	$(1.46 \pm 0.09)^c$
6	$(10.79 \pm 0.57)^b$	$(2.16 \pm 0.10)^b$
12	$(13.92 \pm 0.78)^a$	$(2.83 \pm 0.13)^a$
18	$(12.56 \pm 0.56)^a$	$(2.57 \pm 0.05)^a$

2.7 葡萄糖吸附能力分析

由图 5(图中相同图例不同字母表示差异显著,下同)可知,样品对高浓度葡萄糖溶液的吸附能力

优于低浓度溶液,且随着处理时间延长,豆渣不溶性膳食纤维粉末对同浓度葡萄糖溶液的吸附能力显著增强,是因为不溶性膳食纤维长链分子和 β -葡萄糖苷键由于空化作用导致断裂^[18,27],颗粒表面形成疏松多孔的结构,粒度降低,比表面积和孔隙率增加,导致不溶性膳食纤维颗粒空隙对葡萄糖的固定能力增加。当空化射流时间达 12 min 时对葡萄糖的吸附力出现峰值,继续增加处理时间,吸附能力略有降低但无显著性差异。此过程中纤维颗粒由于处理过度,纤维颗粒过小,孔隙度过大,使膳食纤维形成的网状结构过于疏松,分子间作用力减弱,进而导致吸附力降低^[4,28]。因此,空化射流处理 12 min 时较为适宜。

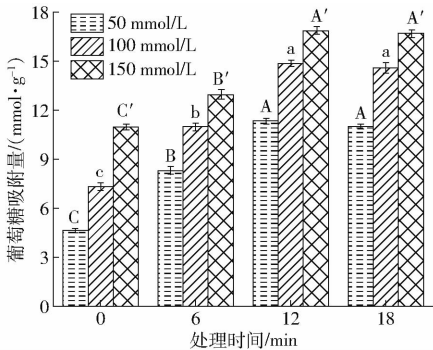


图 5 空化射流对豆渣膳食纤维葡萄糖吸附量的影响
Fig. 5 Cavitation jets effect on glucose-adsorption capacity of okara insoluble dietary fiber

2.8 胆固醇吸附能力分析

胆固醇是心脑血管疾病重要的诱发因子,经研究表明膳食纤维具有良好的降低胆固醇功能。如图 6 所示,随处理时间延长样品对胆固醇的吸附能力不断增强,随着空化射流处理,液体微粒内持续形成空泡并连续膨胀破灭^[9],导致纤维颗粒孔隙度增加,比表面积增大,暴露更多的亲脂基团与胆固醇结合。当空化射流 12 min 时吸附力最大,而后略有下降但不显著,当过度处理后,根据扫描电子显微镜可观察到物料表面过于粗糙,结构相对疏松,导致其毛细管作用力受损致使胆固

醇吸附力降低^[20,29]。同时反应体系的酸碱程度显著影响物料对胆固醇的吸附力,在中性环境中吸附力明显优于酸性环境,由此可推测出,豆渣不溶性膳食纤维在肠消化阶段胆固醇吸收量显著高于胃消化阶段胆固醇吸收量。

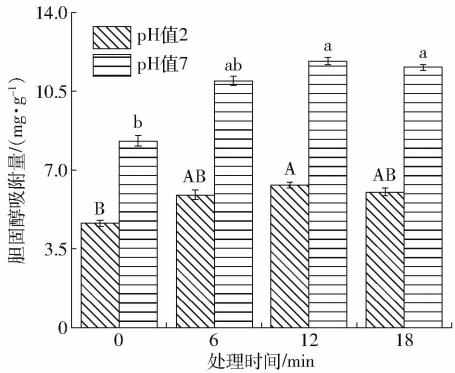


图 6 空化射流对豆渣膳食纤维胆固醇吸附量的影响
Fig. 6 Cavitation jets effect on cholesterol-adsorption capacity of okara insoluble dietary fiber

3 结束语

探讨了空化射流处理时间对豆渣不溶性膳食纤维结构、功能和吸附特性的影响。结果表明:随着空化射流时间的延长,豆渣不溶性膳食纤维粉体积平均粒径、休止角显著降低,比表面积、表观密度增加,且溶液粘度降低;由扫描电子显微镜可知,样品经空化射流处理后表面出现较为明显的沟槽和孔洞,有助于吸附能力的提高;X-射线衍射结果显示,不溶性膳食纤维衍射角(2θ)为 23.02° 时出现特征峰值,样品并未变性,但结晶度降低至 32.54%;空化射流处理 12 min 时,膳食纤维膨胀力、持水力均达到最大值;空化射流处理后,对葡萄糖及胆固醇的吸附能力显著提升,因此豆渣不溶性膳食纤维可有效降低血糖及胆固醇。通过分析表观及微观结构变化清晰阐明了空化射流处理对豆渣不溶性膳食纤维功能及吸附特性的影响,为将其作为功能性成分添加到食品中提供理论依据。

参 考 文 献

[1] PEREZ E, MATEOS I, RUPEREZ P. Okara treated with high hydrostatic pressure assisted by *Ultraflo* L: effect on solubility of dietary fibre[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 33(5): 32–37.

[2] WAN J, LIU C, LIU W, et al. Optimization of instant edible films based on dietary fiber processed with dynamic high pressure microfluidization for barrier properties and water solubility[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 603–608.

[3] YAN X, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion processing: the increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2015, 180(2–3): 106–115.

[4] LU F, LIU Y, LI B. Okara dietary fiber and hypoglycemic effect of okara foods[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2013, 2(2): 126–132.

[5] PREECE K E, HOOSHYAR N, KRIJGSMAN A J, et al. Intensification of protein extraction from soybean processing materials using hydrodynamic cavitation[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2017, 41(5): 47–55.

- [6] HAKANSSONA A. Can high-pressure homogenization cause thermal degradation to nutrients? [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 240(3): 133 – 144.
- [7] HUANG Y, WANG P, YUAN Y, et al. Synergistic degradation of chitosan by impinging stream and jet cavitation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 592 – 601.
- [8] LI Y, SUI X, QI B, et al. Optimization of ethanol-ultrasound-assisted destabilization of a cream recovered from enzymatic extraction of soybean oil [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2014, 91(1): 159 – 168.
- [9] ULLAH I, YIN T, XIONG S, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of okara (soybean residue) insoluble dietary fiber modified by high-energy wetmedia milling [J]. LWT—Food Science and Technology, 2017, 82(2): 15 – 22.
- [10] ZHANG J, YI T, XIONG S, et al. Thermal treatments affect breakage kinetics and calcium release of fish bone particles during high-energy wet ball milling [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 183(3 – 4): 74 – 80.
- [11] 张丽丽,王相友,魏忠彩,等. 红外辐射干燥胡萝卜切片结构特性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 246 – 251.
ZHANG Lili, WANG Xiangyou, WEI Zhongcai, et al. Structural properties research of infrared radiation drying for carrot slices [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 246 – 251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160734&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.034. (in Chinese)
- [12] 牛飞飞. 果蔬膳食纤维粒径对其理化性质及加工性能的影响 [D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [13] QI J, LI Y, MASAMBA Y G, et al. The effect of chemical treatment on the in vitro hypoglycemic properties of rice bran insoluble dietary fiber [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52(2): 699 – 706.
- [14] WEBSTER F X. Spectrometric identification of organic compounds [J]. Journal of Chemical Education, 2015, 92(10): 826 – 827.
- [15] ZHANG W, ZENG G, PAN Y, et al. Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction [J]. Carbohydr. Polym., 2017, 172: 102 – 112.
- [16] 李伟. 纳米纤维素超声辅助法制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [17] CHUAN C F, WANG Y T, WEN Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre [J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1402 – 1408.
- [18] HUA M, LU J X, QU D, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: a potential functional ingredient [J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522 – 529.
- [19] MOHAMED E, DOROTHEA B, OLIVIER R, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: characterisation, technological functionality and commercial applications: a review [J]. Food Chemistry, 2011, 124(2): 411 – 421.
- [20] NATALIA R S, SIBAKOA J H, LANTINEN P, et al. Wet grinding and microfluidization of wheat bran preparations: improvement of dispersion stability by structural disintegration [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 64(3): 1 – 10.
- [21] CHEN B F, CAI Y J, LIU T X, et al. Improvements in physicochemical and emulsifying properties of insoluble soybean fiber by physical-chemical treatments [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93(1): 167 – 175.
- [22] LIU C M, LIANG R H, DAI T T, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57(2): 55 – 61.
- [23] 祁静. 高吸附性米糠纤维的制备及其吸附特性的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [24] RAMASSAMY U R, GRUPPEN H, KABEL M A. Water-holding capacity of soluble and insoluble polysaccharides in pressed potato fibre [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 64: 242 – 250.
- [25] MARWA C R, SOUHIR A, SABU T, et al. Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus rackets (*Opuntia ficus indica*): structural and microstructural studies [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116(31): 901 – 910.
- [26] KARAMAR E, LMAZ E Y, TUNCEL N B. Physicochemical, microstructural and functional characterization of dietary fibers extracted from lemon, orange and grapefruit seeds press meals [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2017, 11: 9 – 17.
- [27] MOCZKOWSK M, KARP S, NIU Y G, et al. Enzymatic, enzymatic-ultrasonic and alkaline extraction of soluble dietary fibre from flaxseed—a physicochemical approach [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90(7): 105 – 112.
- [28] 李杨, 和铭钰, 吴长玲, 等. 空化射流条件下酶法制油豆渣蛋白结构与理化特性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 332 – 340.
LI Yang, HE Mingyu, WU Changling, et al. Effect of cavitation jet on structure and physicochemical properties of soybean residue protein produced by enzymatic oil production [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 332 – 340. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20201236&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.036. (in Chinese)
- [29] 李良, 周艳, 邹智博, 等. 高温豆粕大豆分离蛋白射流空化辅助提取 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 373 – 380.
LI Liang, ZHOU Yan, ZOU Zhibo, et al. Extraction of soy protein isolate from highly denatured soybean meal by jet cavitation assisted [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 373 – 380. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190943&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.043. (in Chinese)