空化微射流对豆渣膳食纤维结构及功能特性影响

吴海波[1,2]，于静雯[1]，吴长玲[1]，李 杨[1]，江连洲[1]，滕 飞[1,*]，王中江[1,*]
（1.东北农业大学食品学院，黑龙江 哈尔滨 150030；2.北部湾大学食品工程学院，广西 钦州 535011）

摘 要：为分析空化微射流对生物酶法制油豆渣膳食纤维结构及功能的影响，基于空化微射流技术，以处理时间为变量，通过傅里叶变换红外光谱、X射线衍射、扫描电子显微镜等方法表征豆渣膳食纤维分子结构、晶体结构、表观形态及持水、持油、膨胀特性，明确空化微射流对豆渣膳食纤维结构变化的影响机制。结果表明：生物酶法制油豆渣经空化微射流处理后，不溶性膳食纤维持水、持油性分别提高至（9.42±0.05）g/g、（3.92±0.05）mL/g，膨胀力可达处理前的1.6 倍，其纤维素晶体构型未改变，但物理形态更细小。综上，空化微射流技术能有效改善豆渣膳食纤维结构及功能特性，为豆渣的开发利用提供技术支持。

关键词：空化微射流；豆渣；膳食纤维；傅里叶变换红外光谱；X射线衍射

Cavitation Microjet Effects on Structural and Functional Properties of Okara Dietary Fiber

WU Haibo[1,2], YU Jingwen[1], WU Changling[1], LI Yang[1], JIANG Lianzhou[1], TENG Fei[1,*], WANG Zhongjiang[1,*]
(1. School of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2. College of Food Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: In this study, we determined the effect of cavitation microjet on the structure and function of okara dietary fiber, a byproduct of aqueous enzymatic extraction of soybean oil. We characterized the molecular structure, crystal structure, water and oil retention capacity, and swelling power as a function of treatment time using Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and other analytical methods, and clarified the mechanism behind the effect of cavitation microjet on the structure. The results indicated that the water and oil retention capacity of okara insoluble dietary fiber increased to (9.42 ± 0.05) g/g and (3.92 ± 0.05) mL/g, respectively after the treatment. The swelling power increased by 1.6 folds, but the cellulose crystal configuration did not changed. However, the physical form of okara dietary fiber became smaller solid particles. Therefore, cavitation microjet technology can effectively improve the structure and functional characteristics of okara dietary fiber and thus provide technical support for the development and utilization of soybean residues.

Keywords: cavitation microjet; okara; dietary fiber; Fourier transform infrared spectroscopy; X-ray diffraction
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181119-215
中图分类号：TS201.2 文献标志码：A 文章编号：1002-6630（2020）01-0094-06
引文格式：
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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181119-215. http://www.spkx.net.cn
WU Haibo, YU Jingwen, WU Changling, et al. Cavitation microjet effects on structural and functional properties of okara dietary fiber[J]. Food Science, 2020, 41(1): 94-99. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181119-215. http://www.spkx.net.cn

收稿日期：2018-11-19
基金项目：山东省重点研发计划（医用食品专项计划）项目（2018YYSP026）；
黑龙江省应用技术研究与开发计划重大项目（GA17B002）；广西省自然科学基金面上项目（2018GXNSFAA294067）
第一作者简介：吴海波（1975—）（ORCID: 0000-0001-7807-0082），女，副研究员，博士，研究方向为食品科学。
E-mail: haibowu201511@yahoo.com
*通信作者简介：滕飞（1986—）（ORCID: 0000-0001-6531-0008），女，讲师，博士，研究方向为食品科学。
E-mail: tengfei@neau.edu.cn
王中江（1987—）（ORCID: 0000-0003-0012-193X），男，讲师，博士，研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。
E-mail: wzjname@126.com

大豆是亚洲国家的传统农作物之一，2017年世界大豆产量增加至3.24亿t，超过上一周期1 040万t，且大豆类食品消费量逐年递增[1]。大豆主要作为制油原料，目前，生物酶法制油技术已实现产业化，其副产物含量高达70%，其主要副产物豆渣干质量的50%～60%为可利用膳食纤维。由于生产加工后大量废弃豆渣未得到充分利用，限制了生物酶法技术的经济可行性[2]。膳食纤维具有多种生理功效，如促进肠胃蠕动、降低胆固醇含量、减少热量摄入等，被称之为“第七营养”[3-4]。Lu Fei等[5]研究发现提高食物膳食纤维及蛋白的摄入量对稳定血糖疗效显著。另外，由于豆渣存在质地粗糙、口感不佳等问题，严重限制了大豆加工副产物二次利用的产业化进程。因此，开展对生物酶法制油豆渣膳食纤维的相关研究，对减少资源浪费及提高人民健康水平具有重要的意义。

目前，膳食纤维加工的方法主要分为物理及生物加工[6]。物理加工方法主要以高压均质、螺杆挤压、超微粉碎及微波处理为主。Xie Fan等[7]研究发现高压均质处理马铃薯改变了其单糖组成，提高了不溶性膳食纤维含量；Jing Yan等[8]通过螺杆挤压处理豆渣可溶性膳食纤维，发现体系温度升高，引起糖苷键解聚，从而增强其理化性质；Clara等[9]研究发现微波处理可改善柑橘纤维黏性及咀嚼性。生物加工方法多采用发酵及酶处理技术。Dang等[10]研究发现米糠经木聚糖酶改性处理使可溶性膳食纤维含量提高50%左右；Kumar等[11]通过真空发酵芒果及稻壳纤维，使得多糖分解从而产生乙醇。尽管对豆渣的研究不断深入，但大多停留在粗加工层面[12]，对其更为精细的新型加工技术研究相对较少，且副产物组分中膳食纤维结构与功能特性的构效关系尚未明确，有待进一步深入研究。

空化微射流技术是一种新兴的高效射流技术，它利用空泡破裂产生的强大冲击力来增强射流的冲蚀效果[13]，促使物料结构改变，从而改变产品特性[3]。Chau等[14]研究发现将胡萝卜经高压微射流处理后，其纤维组分从不溶性向可溶性转变，纤维粒径减小、堆积密度降低。与传统加工方式相比，空化微射流显示出高热动态效率，热敏营养成分保留较多，且易于工业化生产[15]。因此，本实验选取空化微射流技术处理豆渣膳食纤维。

综上所述，基于前期生物酶法制油工艺研究，本研究以生物酶法制油豆渣为原料，运用新型空化微射流技术处理豆渣，采用傅里叶变换红外光谱、X射线衍射、扫描电子显微镜及基本理化性质分析等方法表征不同处理时间对豆渣膳食纤维分子结构、晶体结构、表观形态及持水、持油、膨胀特性的影响，明确空化微射流对豆渣膳食纤维结构及功能特性的影响机制。本研究旨在充分发挥空化微射流加工技术的优势，提高豆渣品质，促进生物酶法制油工艺副产物二次利用，并引入新型副产物加工设备，为豆渣的开发应用提供技术支持，为大豆副产物高值化提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆　山东禹王生态食业有限公司；大豆生物酶法制油豆渣为实验室自制；Alcalase碱性蛋白酶（酶活力不小于10 000 U/g）　丹麦丹尼斯克有限公司；葵花籽油（食品级）　中粮福临门食品营销有限公司；其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

空化射流气爆机为本实验室自组装；JJ-1/100W精密电动搅拌器、HH-4数显恒温水浴锅　常州丹瑞实验仪器设备有限公司；AL204型分析天平、PL303电子天平　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；PHS-3C雷磁pH计　上海精科仪器有限公司；TDL-408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　浙江武义鼎盛藏日用金属制品厂；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；IRTracer-100型傅里叶变换红外光谱仪　日本岛津公司；S-3400N电子扫描显微镜　日本Hitachi公司。

1.3 方法

1.3.1 生物酶法制油豆渣制备

参照李杨等[16]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，按料液比为1∶6加入1 200 mL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豆渣质量的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料液比为1∶3用去离子水将所得豆渣洗3 次，之后在托盘铺平并置入55 ℃鼓风烘箱干燥6 h，待恒质量后粉碎至颗粒均匀，即得到生物酶法制油豆渣。

1.3.2 豆渣膳食纤维制备

根据Ullah等[6]的方法制备豆渣膳食纤维。取50 g生物酶法制油豆渣粉，以料液比1∶20与1 000 mL蒸馏水混合均匀，用1 mol/L NaOH溶液将pH值调至9.0，搅拌器搅拌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，以料液比为1∶3加入去离子水，4 500 r/min、4 ℃离心15 min，去离子水洗并重复

离心3 次，在托盘铺平后置入55 ℃鼓风烘箱干燥6 h，得豆渣膳食纤维粉。每组取90 g豆渣膳食纤维粉，按料液比1∶8用蒸馏水溶解，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 ℃烘干至恒质量，脱脂处理后即得本实验样品。

1.3.3 基本成分测定

纤维质量分数的测定采用GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》[17]方法；蛋白质量分数测定参考GB 5009.5—2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》[18]中凯氏定氮法；脂肪质量分数测定参考GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》[19]中索氏抽提法；水分质量分数测定参考GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》[20]；灰分质量分数测定参考GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》[21]中干法灰化法。

1.3.4 持水力测定

参考Yang Jun[22]、Chen Jialun[23]等的研究方法进行测定。取0.5 g样品及30 mL蒸馏水加入50 mL离心管中。在室温下充分搅拌后2 h。在5 000 r/min、20 ℃条件下离心10 min后，弃去上清液，称残留物质量并按式（1）计算持水力。

$$持水力/（g/g）=\frac{残留物质量/g-样品干质量/g}{样品干质量/g} \quad （1）$$

1.3.5 持油力测定

准确称取1.0 g膳食纤维粉于100 mL烧杯中，加入70 mL植物油，搅拌器搅拌2 h后在4 500 r/min、20 ℃条件下离心30 min，去除上清液，称量残留物质量，按式（2）[8]计算持油力。

$$持油力/（g/g）=\frac{残留物质量/g-样品干质量/g}{样品干质量/g} \quad （2）$$

1.3.6 膨胀力测定

将样品（250 mg）加入15 mL具塞试管（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 ℃）下静置24 h吸水膨胀，并读取膨胀后样品体积。按式（3）[8]计算膨胀力。

$$膨胀力/（mL/g）=\frac{膨胀后样品体积/mL-干样品体积/mL}{样品干质量/g} \quad （3）$$

1.3.7 傅里叶变换红外光谱测定

根据Ullah等[24]所采用的KBr圆盘法测定膳食纤维分子结构变化，并略有修改。首先将待测样品干燥处理，在研钵中研磨至粉末状，与干燥的KBr试剂混合并压制成颗粒。使用傅里叶变换红外光谱仪在400～4 000 cm^{-1}的分辨率范围内扫描分析，每个样品扫描32 次，进行数据分析。

1.3.8 膳食纤维扫描电子显微镜观察

使用扫描电子显微镜观察豆渣膳食纤维的微观形态。在扫描之前，将样品在自然空气循环中干燥并溅射涂覆。用导电双面胶将纤维颗粒固定在金属样品平台上，清理除去余下的粉末，在真空环境中喷涂铂金，然后置于扫描电子显微镜下，以20 kV的电子束观察拍摄。

1.3.9 X射线衍射测定

利用X射线衍射仪对豆渣不溶性膳食纤维的晶体结构进行测定。在室温下，分别取一定量样品，置于专用载物片的样品槽中，用玻璃片压实，然后置于仪器样品台上。设定发生器电压40 kV，入射电流150 mA，防发散狭缝2/3，使用CuKα辐射，在衍射角为5°～60°的范围内以1 π/min的扫描速率记录数据[25]。

1.4 数据统计与分析

所有的实验数据结果表示为平均值±标准差，除非另有说明，否则所有分析重复3 次。利用SPSS Statistics 22.0软件对数据进行单因素方差分析，使用最小显著性差异法，以5%为具有显著性差异。采用Origin 9.0软件进行数据分析、图表处理及图谱分析处理。

2 结果与分析

2.1 豆渣基本成分分析结果

表1 豆渣基本成分含量

Table 1 Proximate composition of okara

处理时间/min	水分质量分数/%	灰分质量分数/%	粗脂肪质量分数/%	粗蛋白质量分数/%	可溶性膳食纤维质量分数/%	不溶性膳食纤维质量分数/%	总纤维质量分数/%
0	4.05 ± 0.08^a	3.57 ± 0.02^a	6.01 ± 0.05^a	18.45 ± 0.11^c	11.98 ± 0.58^b	49.47 ± 0.58^b	61.45 ± 1.59^a
5	4.75 ± 0.07^a	4.16 ± 0.03^a	6.12 ± 0.05^a	19.55 ± 0.12^b	11.39 ± 0.45^b	49.50 ± 0.45^b	60.89 ± 1.45^a
10	4.15 ± 0.08^a	3.97 ± 0.02^a	6.34 ± 0.05^a	20.52 ± 0.11^a	10.94 ± 0.47^a	50.98 ± 0.47^a	61.92 ± 1.49^a
15	4.26 ± 0.08^a	3.87 ± 0.02^a	6.24 ± 0.05^a	19.48 ± 0.11^b	12.02 ± 0.45^c	48.33 ± 0.45^c	60.35 ± 1.55^a

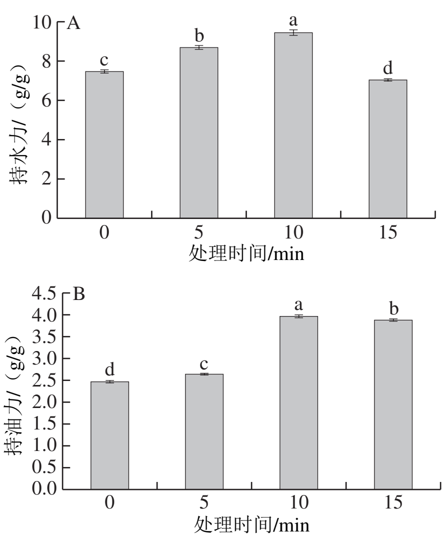
注：同列肩标小写字母不同表示差异显著（$P<0.05$）。

由表1可知，随空化微射流时间延长，蛋白质量分数同不溶性膳食纤维质量分数变化趋势一致，均在处理时间为10 min时达到峰值，随后其质量分数降低。这一结果表明，适当的空化微射流处理能够促进蛋白及不溶性纤维的溶出，过度处理会导致不可溶性多糖向无定形及可溶性多糖转化，因此可溶性纤维质量分数增加，不溶性膳食纤维质量分数随之下降。

2.2 持水力及持油力分析结果

由图1可知，随空化微射流处理时间的延长，豆渣膳食纤维持水力及持油力均呈先升高后下降的趋势。当处理时间达到10 min时，持水力和持油力分别达到峰值（（9.42±0.05）g/g、（3.92±0.05）g/g），处理后样品持油力可达到未处理的1.6 倍，这与竹笋壳中不溶性膳

食纤维改性特性的研究结果相接近[26]。这可能是由于随着处理时间延长，豆渣膳食纤维因受高速挤压剪切等作用力导致粉碎程度增加，粒度逐渐减小，此过程会暴露出来更多的亲水、亲油基团，致使持水及持油能力增强；同时结合水的能力通常受水结合位点的数量和性质以及纤维结构的影响，经处理后由于结构可捕获的水含量升高，尤其是在空化微射流过程中释放更多的水结合位点[23]。当处理时间过长时，豆渣纤维结构过于松散，没有稳定的结构保留所吸收的水分及油滴，持水力、持油力因此降低[22]。综上，空化微射流处理10 min对豆渣膳食纤维物性有较适宜的提升。Zhu Fengmei等[27]报道了荞麦壳中不溶性膳食纤维经超细研磨处理后其粒径减小到亚微米级时，持水、持油性均得到了改善。



A.持水力；B.持油力。小写字母不同表示差异显著（$P<0.05$），图2同。

图 1 处理时间对豆渣膳食纤维持水力及持油力影响

Fig. 1 Effect of treatment time on water and oil retention capacity of okara dietary fiber

2.3 膨胀力分析结果

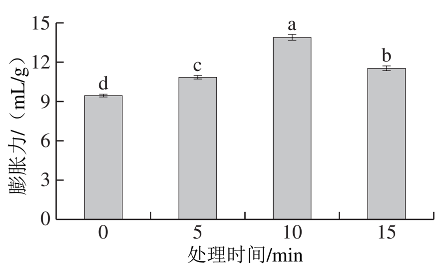


图 2 处理时间对豆渣膳食纤维膨胀力影响

Fig. 2 Effect of treatment time on swelling power of okara dietary fiber

由图2可知，随处理时间逐渐延长，膨胀力呈先上升再下降的变化趋势，当处理时间达到10 min时，豆渣膳食纤维膨胀力达到最高，为（13.92±0.04）mL/g。这一结果与在静水高压环境中处理豆渣膳食纤维结果相似[28]。膨胀力是纤维在水中分散后占据水质量的量度，其受纤维组成、分子结构、粒度、表面积和孔隙率的影响显著[24]。随处理时间延长，膨胀力升高，这是由于空化微射流处理使纤维颗粒具有更细微的颗粒和更大的表面积，从而具有更高的捕获水分子的能力。Jing Yan等[8]优化双螺杆挤压豆渣工艺结果表明，较高的分子质量和不溶性膳食纤维含量有助于膨胀能力的改善。10 min后膨胀力降低，受空化微射流影响，此过程中的挤压、剪切、粉碎等作用过于强烈，物料的温度、离子强度、粒径会发生变化，甚至取代基的存在会导致纤维网状结构改变，虽然经长时间处理其孔隙率有所增加，但是豆渣不溶性纤维主成分中的纤维素质地较硬，溶胀力很小，会导致纤维吸水膨胀效果降低。因此，应当注意控制处理时间。

2.4 傅里叶变换红外光谱分析结果

傅里叶变换红外光谱是根据分子在不同波数处的振动不同进而形成的红外吸收光谱图，用来检测分子基团及化学键变化。吸收峰的位置和强弱主要受化学键或分子基团的种类影响，若存在诱导、共轭或空间位阻，则吸收峰的位置随之变化[29]。豆渣膳食纤维是一类不被人体肠道内消化酶消化吸收，但可被大肠内某些微生物部分酵解和利用的非淀粉多糖物质，研究表明，波数范围从500～4 000 cm^{-1}的峰是糖类物质的特征吸收峰[30]，由图3可知，不同时间处理的样品均可观察到3 000～3 656 cm^{-1}范围内吸收峰及2 925 cm^{-1}处的弱吸收峰，这是羟基O—H伸缩和亚甲基中C—H拉伸所致，是纤维作为多糖的典型结构。豆渣膳食纤维在1 640 cm^{-1}处的吸收峰是酯类C＝O的伸缩振动特征峰[6]。与原料相比，经空化射流处理的豆渣膳食纤维分子链间氢键被打断，随之产生的—COOH，与其吸附水的能力相关。另外，1 136 cm^{-1}处吸收峰是半纤维素结构中典型的特征峰，归属于半纤维素骨架中的环振动模式，并且其强度可提供关于半纤维素含量的信息。通过对比发现，部分峰的波型和强度随着处理时间延长而改变，空化微射流处理导致各纤维素组分重新分布，致使不可溶性多糖向无定形及可溶性多糖转化。

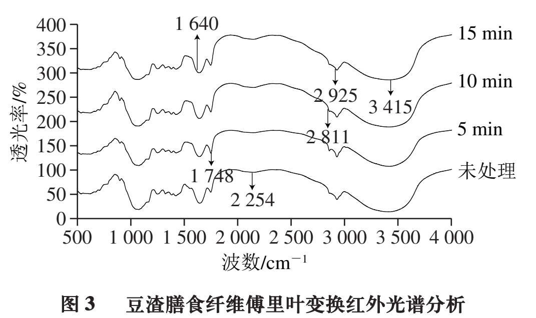
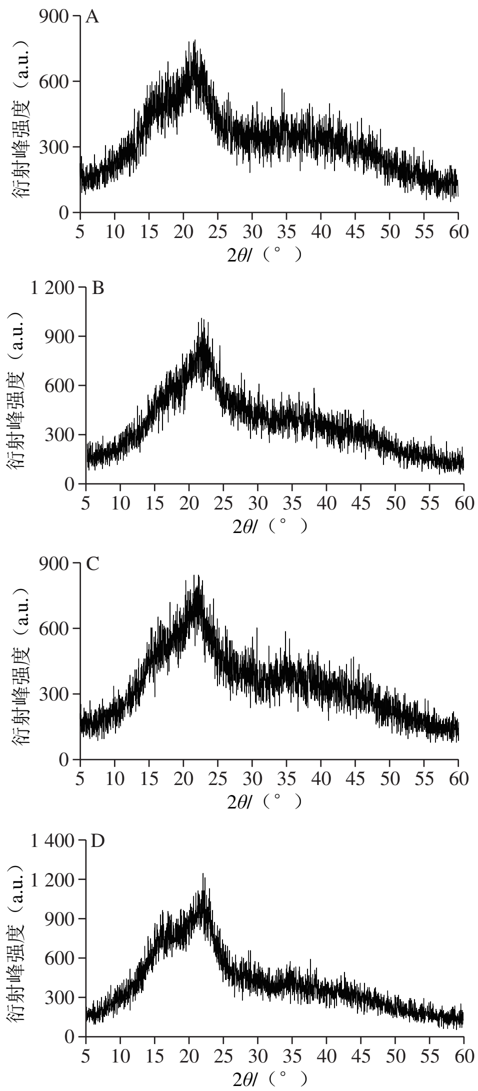


图 3 豆渣膳食纤维傅里叶变换红外光谱分析

Fig. 3 Fourier transform infrared spectroscopic analysis of okara dietary fiber

2.5 X射线衍射分析结果



A.未处理；B.处理5 min；C.处理10 min；D.处理15 min。图5同。

图 4 豆渣膳食纤维X射线衍射分析

Fig. 4 X-ray diffraction analysis of okara dietary fiber

X射线衍射图谱分析是检测固体材料的微观结构和物理化学组成的主要技术之一，纤维素晶型结构一般分为5类，本实验研究内容属于I型，是天然纤维素的晶型[25]。豆渣膳食纤维的X射线衍射图谱如图4所示，未处理组以及处理5、10、15 min组衍射角2θ分别在22.06°、21.80°、22.34°、22.36°出现固有衍射峰，说明经空化微射流处理，豆渣膳食纤维素晶体构型未发生改变。随处理时间延长，峰型逐渐尖锐，表明结晶度提高，这是由于处于非结晶区的多糖类物质逐渐被水解去除，非结晶区所占比例降低，进而使得结晶区所占比例升高。高结晶度可增加纤维的拉伸强度和硬度，而低结晶度与吸湿性、柔软性和化学反应有关[30]。随着处理时间延长，其空化微射流程度加深，在高速剪切、碰撞、挤压等作用下豆渣膳食纤维由较大形状晶体转变成小晶体，从而导致持水性、持油性等物理性质的变化，这与Ullah等[6]利用高能湿介质研磨豆渣不溶性膳食纤维所得相关结果趋势一致。

2.6 膳食纤维扫描电子显微镜观察结果

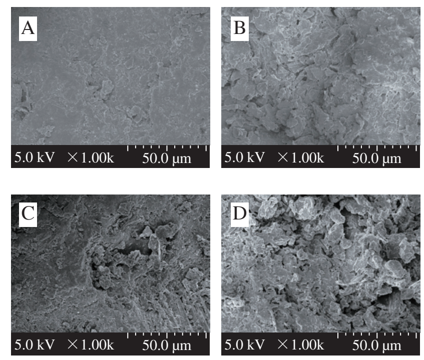


图 5 豆渣膳食纤维扫描电子显微镜分析

Fig. 5 Scanning electron microscopic analysis of okara dietary fiber

不同处理时间下豆渣不溶性膳食纤维的形态如图5所示，未处理样品具有紧凑的不规则表面结构。经空化微射流处理的样品显示出更高的碎裂程度。随着处理时间的延长，豆渣膳食纤维表面破坏程度加剧，孔隙度增大，表明结构逐步崩解，比表面积增加，以具有膨化形态的聚集形式存在。Ullah等[24]对湿法介质处理纳米级豆渣膳食纤维的研究表明：此过程中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，从而促进纤维分子与水分子通过氢键结合，进而改善膳食纤维的功能性质。

3 结 论

本实验以生物酶法制油豆渣为原料，利用空化微射流技术对其进行处理，通过傅里叶变换红外光谱、X射线衍射、扫描电子显微镜分析豆渣膳食纤维结构与功能变化清况。结果表明，空化射流处理10 min时，持水力及膨胀力增加，表明豆渣膳食纤维水合性质提高；经X射线衍射分析发现不同处理时间豆渣膳食纤维衍射角固有峰均在22°左右，并未改性；傅里叶变换红外光谱分析可知，豆渣不溶性膳食纤维中化学键伸缩振动表明存在不可溶性多糖向无定形及可溶性多糖转化的情况；扫描电子显微镜观测发现豆渣膳食纤维纤维微观结构由紧凑致密逐步变得疏松多孔。

参考文献：

[1] GUIMARÃES R M, SILVA T E, LEMES A C, et al. Okara: a soybean by-product as an alternative to enrich vegetable paste[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 92: 593-599. DOI:10.1016/j.lwt.2018.02.058.

[2] 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. DOI:10.1016/j.tifs.2016.04.011.

[3] CHEN Jialun, GAO Dongxiao, YANG Letian, et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber[J]. Food Research International, 2013, 54(2): 1821-1827. DOI:10.1016/j.foodres.2013.09.025.

[4] NAKATA T, KYOUI D, TAKAHASHI H, et al. Inhibitory effects of soybean oligosaccharides and water-soluble soybean fibre on formation of putrefactive compounds from soy protein by gut microbiota[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 97: 173-180. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.01.015.

[5] LU Fei, LIU Yang, LI Bo. Okara dietary fiber and hypoglycemic effect of okara foods[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2013, 2(2): 126-132. DOI:10.1016/j.bcdf.2013.10.002.

[6] ULLAH I, YIN T, XIONG S B, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of okara (soybean residue) insoluble dietary fiber modified by high-energy wet media milling[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 15-22. DOI:10.1016/j.lwt.2017.04.014.

[7] XIE Fan, LI Ming, LAN Xiaohong, et al. Modification of dietary fibers from purple-fleshed potatoes (*Heimeiren*) with high hydrostatic pressure and high pressure homogenization processing: a comparative study[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 42: 157-164. DOI:10.1016/j.ifset.2017.05.012.

[8] JING Yan, CHI Yujie. Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue[J]. Food Chemistry, 2013, 138: 884-889. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.12.003.

[9] CLARA T, ÁLVAREZ-SABATEL S, RIOS Y, et al. Effect of a new microwave-dried orange fibre ingredient vs. a commercial citrus fibre on texture and sensory properties of gluten-free muffins[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 44: 83-88. DOI:10.1016/j.ifset.2017.07.011.

[10] DANG T T, VASANTHAN T. Modification of rice bran dietary fiber concentrates using enzyme and extrusion cooking[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 773-782. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.11.024.

[11] KUMAR M N, GIALLELI A I, BEKATOROU A, et al. Application of nano/micro-tubular cellulose of Indian origin for alcoholic fermentation and cold pasteurization of contaminated water[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 273-279. DOI:10.1016/j.lwt.2016.01.040.

[12] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.058.

[13] 梁友芳. 空化射流装置的研发[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016: I-II.

[14] CHAU C F, WANG Y T, WEN Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre[J]. Food Chemistry, 2007, 100: 1402-1408. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.11.034.

[15] CHEN Y, YE R, YIN L, et al. Novel blasting extrusion processing improved the physicochemical properties of soluble dietary fiber from soybean residue and *in vivo* evaluation[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 1-8. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.07.011.

[16] 李杨, 吴长玲, 安然, 等. 气流喷爆-复合酶解对豆粕中水溶性膳食纤维的提取优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 177-182; 191. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.24.031.

[17] 国家卫生与计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定: GB 5009.88—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-9.

[18] 国家卫生与计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2-3.

[19] 国家卫生与计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.

[20] 国家卫生与计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-6.

[21] 卫生部. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-7.

[22] YANG Jun, XIAO Anhong, WANG Chunwei. Novel development and characterisation of dietary fibre from yellow soybean hulls[J]. Food Chemistry, 2014, 161: 367-375. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.04.030.

[23] CHEN Jialun, GAO Dongxiao, YANG Letian, et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber[J]. Food Research International, 2013, 54: 1821-1827. DOI:10.1016/j.foodres.2013.09.025.

[24] ULLAH I, YIN T, XIONG S B, et al. Effects of thermal pre-treatment on physicochemical properties of nanosized okara (soybean residue) insoluble dietary fiber prepared by wet media milling[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 237: 18-26. DOI:10.16/jfooddeng.2018.05.017.

[25] KUBO A, YUGUCHI Y, TAKEMASA M, et al. The use of micro-beam X-ray diffraction for the characterization of starch crystal structure in rice mutant kernels of waxy, amylose extender and sugar[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(1): 92-97. DOI:10.1016/j.jcs.2007.08.005.

[26] LUO X L, WANG Q, FANG D Y, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: structural characterization and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules 2018, 120: 1461-1467. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.09.149.

[27] ZHU Fengmei, DU Bin, LI Ruifeng, et al. Effect of micronization technology on physicochemical and antioxidant properties of dietary fiber from buckwheat hulls[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2014, 3(3): 30-34. DOI:10.1016/j.bcab.2013.12.009.

[28] MATEOS-APARICIO I, MATEOS-PEINADO C, RUPÉREZ P. High hydrostatic pressure improves the functionality of dietary fibre in okara by-product from soybean[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(3): 445-450. DOI:10.1016/j.ifset.2010.02.003

[29] CHYLIŃSKA M, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, KRUK B, et al. Study on dietary fibre by Fourier transform-infrared spectroscopy and chemometric methods[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 114-122. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.09.029.

[30] LIN Y A, WANG H X, RAO W, et al. Structural characteristics of dietary fiber (*Vigna radiata* L. hull) and its inhibitory effect on phospholipid digestion as an additive in fish floss[J]. Food Control, 2019, 98: 74-81. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.11.016.