

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.041

高压微射流对生物解离大豆膳食纤维特性的影响

王欢 佟晓红 刘龄 李红 胡淼 江连洲

(东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 采用动态高压微射流(Dynamic high pressure microfluidization, DHPM)技术对生物解离大豆膳食纤维进行改性,探讨其对膳食纤维组成、理化及功能特性的影响。结果表明:生物解离和动态高压微射流技术均可有效提高大豆膳食纤维中可溶性膳食纤维的含量,降低不可溶性膳食纤维的含量,使不可溶性膳食纤维与可溶性膳食纤维质量分数的比值达到1.87;通过对比不同处理压力的生物解离大豆膳食纤维中其余成分的含量可知,DHPM对生物解离膳食纤维中含水率影响不显著($P > 0.05$)。生物解离和动态高压微射流技术能明显改善膳食纤维的水化性质和持油力,但对阳离子交换能力的影响不显著;在pH值7条件下,不同压力处理膳食纤维的重金属离子吸附能力差异不显著,且膳食纤维在pH值7条件下对同种重金属离子的吸附效果优于pH值为2的情况。膳食纤维对葡萄糖吸收能力随处理压力的提高而依次增大,达到200 MPa时略有下降,且不同压力处理膳食纤维的葡萄糖吸收能力均随葡萄糖浓度的增加而提高;200 MPa处理压力下的生物解离膳食纤维的 α -淀粉酶抑制能力最高,为18.42%,较0~150 MPa处理的膳食纤维样品分别提高了约36%、32%、28%和27%。随动态高压微射流技术处理压力的增加,膳食纤维结合胆汁酸的能力有所升高。因此,动态高压微射流技术可以作为提高膳食纤维生理功能的有效途径。

关键词: 大豆膳食纤维;可溶性膳食纤维;理化性质;功能特性;生物解离;动态高压微射流

中图分类号: TS214.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0346-07

Effects of Dynamic High Pressure Microfluidization on Property of Soybean Dietary Fiber from Biological Dissociation

WANG Huan TONG Xiaohong LIU Ling LI Hong HU Miao JIANG Lianzhou

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The objective was to study the effects of biological dissociation and dynamic high pressure microfluidization (DHPM) on composition, physical and chemical properties and functional characteristics of soybean dietary fiber. The results showed that DHPM produced an increase of soluble dietary fiber (SDF) and a decrease of insoluble dietary fiber (IDF), and raised the IDF/SDF ration to 1.87; in addition, by comparing the contents of the remaining components of the biodissociated soybean dietary fiber with different treatment pressures, it was found that DHPM had no significant effect on the water content of the biodissected dietary fiber ($P > 0.05$). DHPM also modified hydration properties and oil holding capacity greatly, but it did not affect cation exchange capacity significantly; under the condition with pH value of 7, the difference of the adsorption capacity of heavy metal in dietary fiber with different pressures was not significant, and the adsorption effect of dietary fiber on the same heavy metal ion at pH value of 7 was higher than that at pH value of 2. The absorption of glucose by dietary fiber was increased with the increase of treatment pressure, and it was decreased slightly at 200 MPa. The glucose absorption capacity of dietary fiber treated with different pressures was increased with the increase of glucose concentration; the highest α -amylase inhibitory capacity was 18.42% from dietary fiber, which was increased by approximately 36%, 32%, 28% and 27%, respectively, in dietary fiber samples treated from 0 MPa to 150 MPa. The sample showed a higher bile acid binding

收稿日期: 2018-02-12 修回日期: 2018-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0401402)和霍英东教育基金青年教师基金项目(151032)

作者简介: 王欢(1987—),女,博士生,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: wanghuannan@163.com

通信作者: 江连洲(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: jlzname@163.com

capacity. Therefore, DHPM could be considered as good methods to improve the functionality of dietary fiber in soybean.

Key words: soybean dietary fiber; soluble dietary fiber; physicochemical properties; functional properties; biological dissociation; dynamic high pressure microfluidization

0 引言

生物解离(Biological dissociation, BD)是一种新型的绿色提油工艺,在机械破碎的基础上,通过对植物油料进行酶解处理可实现油脂与蛋白的同步提取,具有十分广阔的应用前景^[1]。残渣是生物解离工艺的主要副产物之一,据报道,提取 1 L 大豆油将会产生约 4.4 kg 残渣^[2]。生物解离残渣中膳食纤维含量丰富,且在提取过程中对物料进行的挤压膨化及酸碱调节等改性处理,改善了膳食纤维的理化性质及功能特性^[3-5]。同时,膳食纤维良好的持油、持水等理化性质也可有效改善食品的风味及质构^[6],在食品加工领域有着重要价值。溶解性膳食纤维分为可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不可溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF),其中, SDF 能发挥更多的代谢功能,具有提高葡萄糖耐受力、降低胆固醇水平等生理功效^[7-8]。因此,可溶性膳食纤维的组成比例是影响膳食纤维生理功能的重要因素。已有学者提出,膳食纤维中含有 30% ~ 50% 的 SDF 才称之为高品质膳食纤维^[9]。

生物解离大豆膳食纤维虽经过挤压膨化预处理,理化及功能特性已明显高于天然膳食纤维,但与改性膳食纤维相比仍存在一定差距。动态高压微射流(Dynamic high pressure microfluidization, DHPM)技术是一种高效的超微细化物理改性技术,在均质过程中,剧烈的处理条件(如液体高速撞击、高速剪切、空穴爆炸、高速振荡等作用)可能影响物料的高级结构^[10-13],从而导致其功能性质发生改变。迄今为止,围绕 DHPM 对生物大分子的改性研究逐年增多,但对膳食纤维改性的研究较少。

为进一步提高生物解离技术副产物的应用价值,本文将生物解离膳食纤维经 DHPM 处理,测定生物解离膳食纤维的主要成分、持水性、持油性、膨胀性等理化性质,并评价其胆汁酸结合能力和阳离子交换能力等功能特性,以期为膳食纤维的改性及增值利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

全脂大豆片,山东高唐蓝山集团;碱性内切蛋白

酶 Alcalase 2.4 L,杰能科(中国)生物工程有限公司;α-淀粉酶(20 000 U/g),北京索莱宝科技有限公司;牛磺胆酸钠,上海源叶生物科技有限公司;其他常用化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

TG16-WS 型台式高速离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司;FD5-3 型冷冻干燥机,美国 SIM 公司;KC-701 型超微粉碎机,北京开创同和科技发展有限公司;M-110EHM 型微射流均质机,美国 Micrpfuidics 公司;KieltecAnalysisster 型凯氏定氮仪,瑞典 Foss 公司;Lindberg/BlueM 型马弗炉,美国 AshevilleNC 公司;SHA-B 型恒温水浴振荡器,常州国华电器有限公司;DHG-9146A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;高效液相色谱仪,美国 Agilent 公司;UV1101 型紫外-可见分光光度计,上海天美科学仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 生物解离大豆膳食纤维制备

参照李杨等^[14]的方法,将大豆片粉碎后用挤压膨化机进行挤压膨化处理,所述大豆片含水率 12%,挤压膨化机套筒温度 60℃,螺杆转速 120 r/min,模孔孔径 30 mm,挤压膨化后的大豆片以液料比 6 mL/g 与水混合,调节 pH 值至 9,加入质量分数为 0.2% 的 Alcalase 2.4 L,55℃ 酶解 3 h,加热 100℃ 灭酶后反复离心至上层无游离油析出,收集下层残渣,调节水解液 pH 值至 3,4 500 r/min 离心分离,并对上层清液进行乙醇沉淀处理,再次离心后收集下层残渣,将两次收集的残渣混合后冻干备用,即获得生物解离膳食纤维^[15-16]。

1.3.2 DHPM 处理

参考涂宗财等^[17]的方法,取过 100 目的生物解离大豆膳食纤维,以液料比 40 mL/g 加水混匀,先在 40 MPa 均质机下均质 2 次后,再分别在 0、50、100、150、200 MPa 微射流压力下均质处理 2 次。均质后溶液冷冻干燥,-20℃ 的冷冻箱里冷藏待用^[18]。

1.3.3 膳食纤维含量测定

不同均质压力的膳食纤维粉中可溶性膳食纤维及不溶性膳食纤维含量的测定根据 AACC^[19]方法。

1.3.4 理化特性的测定

参照 ROBERTSON 等^[20]的方法对膳食纤维持水力、持油力、膨胀力等理化特性进行测定。

持水力:准确称取 1.0 g 膳食纤维粉于 100 mL 烧杯中,加入 70 mL 蒸馏水,搅拌 2 h 后 3 500 r/min 离心 30 min,去除上清液称量,持水力计算公式为

$$S = \frac{C_2 - C_1}{C_0} \tag{1}$$

式中 S ——持水力,g/g
 C_0 ——样品质量,g
 C_1 ——吸水前样品和烧杯的总质量,g
 C_2 ——吸水后烧杯和上清液的总质量,g

持油力: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 2 h 后 3 500 r/min 离心 30 min,去除上清液称量,持油力计算公式为

$$Y = \frac{C'_2 - C'_1}{C_0} \tag{2}$$

式中 Y ——持油力,g/g
 C'_1 ——吸油前样品和烧杯的总质量,g
 C'_2 ——吸油后烧杯和上清液的总质量,g

膨胀力:准确称取 1.0 g 膳食纤维粉于具塞试管中,读取干品体积 (mL),加入 25 mL 蒸馏水振荡摇匀后在室温 (20℃) 静置 24 h,读取膨胀后纤维的体积,膨胀力计算公式为

$$P = \frac{V_2 - V_1}{C_0} \tag{3}$$

式中 P ——膨胀力,mL/g
 V_1 ——干品体积,mL
 V_2 ——膨胀后体积,mL

1.3.5 膳食纤维重金属离子吸附能力的测定

参照单平等^[6]的方法,测定了不同均质压力的膳食纤维对 Pb^{2+} 、 As^{3+} 、 Cu^{2+} 3 种重金属离子的吸附能力。分别向 100 mL 重金属溶液 $Pb(NO_3)_2$ 、 $CuSO_4$ 、 $NaAsO_2$ (10 μ mol/mL) 中加入 1.0 g 膳食纤维粉,为模拟胃及肠道环境,分别调整 pH 值至 2 和 7,并于 37℃ 条件下水浴震荡 3 h (120 r/min),吸附反应结束后加入 8 mL 无水乙醇沉淀样品,于 4 000 r/min 离心 10 min,采用原子吸收分光光度法^[21]测定上清液中残留的重金属离子浓度,各膳食纤维对不同重金属离子吸附能力计算公式为

$$Z = (C_c - C_i) V / W_d \tag{4}$$

式中 Z ——重金属离子吸附能力, μ mol/g
 C_c ——初始上清液中各重金属离子浓度, μ mol/mL
 C_i ——吸附后上清液中各重金属离子浓度, μ mol/mL
 V ——溶液体积,mL
 W_d ——膳食纤维的质量,g

1.3.6 膳食纤维葡萄糖吸收能力的测定

参照 CHAU 等^[22]的方法,分别向 100 mL 葡萄糖溶液 (50、100、200 mmol/L) 中加入 1.0 g 各膳食纤维样品,于 37℃ 条件下水浴震荡 6 h (120 r/min),4 500 r/min 离心 20 min 后取上清液,根据还原糖法^[2]测定上清液中剩余葡萄糖浓度,膳食纤维葡萄糖吸收能力计算公式为

$$T = (C_a - C_s) V_L / W_d \tag{5}$$

式中 T ——葡萄糖吸收能力,mmol/g
 C_a ——初始溶液中的葡萄糖浓度,mmol/L
 C_s ——葡萄糖吸收达到饱和后上清液中的葡萄糖浓度,mmol/L
 V_L ——离心后上清液的体积,mL

1.3.7 膳食纤维 α -淀粉酶抑制能力测定

α -淀粉酶抑制能力的测定参照 AHMED 等^[23]的方法,40 g 马铃薯淀粉溶于 900 mL 的 0.05 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 值 6.5) 中,65℃ 条件下搅拌 30 min 后定容至 1 000 mL,得到 4% 的马铃薯淀粉溶液。取 1.0 g 膳食纤维粉和 4 mg α -淀粉酶加入到 40 mL 上述马铃薯淀粉溶液中,37℃ 水浴震荡 1 h (120 r/min),4 500 r/min 离心 20 min,以不加膳食纤维粉为空白组,采用还原糖法^[2]测定上清液中葡萄糖含量,膳食纤维对 α -淀粉酶抑制能力计算公式为

$$D = (A_c - A_s) / A_c \times 100\% \tag{6}$$

式中 D —— α -淀粉酶活性抑制能力,%
 A_c ——空白组的吸光度
 A_s ——试验组 (添加膳食纤维粉) 的吸光度

1.3.8 胆汁酸阻滞指数测定

胆汁酸阻滞指数的测定参照 ADIOTOMRE 等^[24]的方法,在截留分子质量为 1.2 ~ 1.4 kDa 的透析袋内加入 25 mL 15 mmol/L 牛磺胆酸钠溶液及 0.2 g 膳食纤维,将透析袋封口后放入 100 mL 0.01 mol/L 的磷酸缓冲液 (pH 值 7) 中,37℃ 水浴震荡 1 h 和 2 h (120 r/min),以不加膳食纤维粉为空白组;分别吸取 2 mL 透析袋内上清液,采用 HPLC 测定其中的胆汁酸浓度。测定条件如下:采用 C_{18} 柱 (4.6 mm $\times$ 250 mm),流动相为乙腈 (流动相 A) 和 pH 值 3 的 0.15% 磷酸氢二钠溶液 (流动相 B)。流动相洗脱程序为:0 ~ 30 min 流动相 A 的体积分数从 22% 线性上升至 42%,30 ~ 35 min,流动相 A 的体积分数由 42% 线性下降至 35%,流动相流速为 1.0 mL/min,采用紫外检测器测定 203 nm 处吸光度。胆汁酸阻滞指数计算公式为

$$B = (1 - C_d / C_c) \times 100\% \tag{7}$$

式中 B ——胆汁酸阻滞指数,%
 C_d ——样品上清液中的胆汁酸浓度,mmol/L

C_c ——空白组上清液中的胆汁酸浓度，mmol/L

1.4 统计分析

本实验数据均为 3 个平行样的平均值,结果采用 SPSS 22.0 分析软件和 Origin 8.0 进行处理,并对数据进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 膳食纤维纯度分析

DHPM 对生物解离大豆膳食纤维含量的影响如表 1 所示,经 DHPM (50 MPa) 处理的大豆膳食纤维样品中的粗纤维和 SDF 的质量分数显著增大,分别从 77.08% 增大到 81.91%、从 20.43% 增大到 25.84%,且 IDF 与 SDF 的质量分数比值从 2.77 降低至 2.17,经 50 ~ 150 MPa 的 DHPM 处理

后,样品中 SDF 均有显著提高,且随压力的升高而显著增大,粗纤维 (TDF) 含量几乎不变;而经 150 ~ 200 MPa 的 DHPM 处理后,SDF 含量提高不显著,TDF 含量有所降低,可能是 DHPM 的高速撞击、高速剪切、空穴爆炸、高速振荡等剧烈作用,使纤维物料外层致密的表层破碎,组织疏松^[25],膳食纤维聚合物多糖分子链间的弱作用力减弱或消失,聚合度下降,使得 SDF 含量增大,且由于部分小分子量的 SDF 不能被乙醇沉淀出来^[26],从而造成在高压条件下测得的 TDF 含量略有降低,SDF 含量提高不显著。生物解离大豆膳食纤维经 200 MPa 的 DHPM 处理后,样品中 SDF 的含量提高了 0.4 倍,并且 IDF 与 SDF 质量分数的比值 1.87,已处于 GALISTEO 等^[27]对高品质膳食纤维所提要求的中间值(1 ~ 2.3)。

表 1 不同压力处理膳食纤维的成分分析
Tab.1 Chemical compositions analysis of dietary fibers by different extraction methods

参数	处理压力/MPa				
	0	50	100	150	200
含水率/%	(4.77 ± 0.03) ^a	(4.61 ± 0.04) ^b	(4.75 ± 0.16) ^a	(4.72 ± 0.16) ^a	(4.21 ± 0.04) ^c
灰分质量分数/%	(3.83 ± 0.76) ^c	(4.80 ± 2.23) ^b	(4.76 ± 1.62) ^b	(3.76 ± 1.62) ^c	(5.80 ± 2.23) ^a
粗蛋白质量分数/%	(4.85 ± 2.73) ^c	(5.85 ± 1.43) ^a	(4.23 ± 1.58) ^c	(4.43 ± 1.48) ^d	(5.65 ± 1.13) ^b
粗脂肪质量分数/%	(5.64 ± 0.47) ^a	(5.66 ± 1.03) ^a	(3.68 ± 0.12) ^b	(3.78 ± 0.82) ^b	(5.26 ± 1.53) ^a
粗纤维质量分数/%	(77.08 ± 2.11) ^c	(81.91 ± 2.12) ^a	(82.78 ± 3.75) ^a	(81.58 ± 2.75) ^a	(80.48 ± 2.78) ^b
不可溶性膳食纤维质量分数/%	(56.65 ± 2.32) ^a	(56.07 ± 2.01) ^a	(55.77 ± 2.78) ^a	(54.37 ± 2.56) ^a	(52.47 ± 3.42) ^b
可溶性膳食纤维质量分数/%	(20.43 ± 2.14) ^c	(25.84 ± 2.07) ^b	(27.01 ± 1.43) ^a	(27.21 ± 2.28) ^a	(28.01 ± 2.83) ^a
IDF 与 SDF 质量分数比	(2.77 ± 0.78) ^a	(2.17 ± 0.47) ^b	(2.06 ± 0.81) ^b	(1.99 ± 0.74) ^c	(1.87 ± 0.57) ^d

注:同一行中右上角标相同的数据无显著性差异,不同的数据有显著性差异($P < 0.05$),下同。

此外,通过对比不同处理压力的生物解离大豆膳食纤维中其余成分的含量可知,DHPM 对生物解离膳食纤维中含水率影响不显著($P > 0.05$)。此外,生物解离提取过程中经过加热、酸度调节、反复离心等步骤,所得生物解离膳食纤维呈现乳白色,颗粒细腻,且无豆腥味,具有更好的感官品质。

2.2 不同压力处理膳食纤维的理化性质分析

膳食纤维的理化性质在食品加工中具有重要意义,表 2 为不同压力处理所得膳食纤维的持水力、持油力、膨胀力及可溶解性指数。由表 2 可知,经过 DHPM 处理后,生物解离大豆膳食纤维的膨胀力、持水力和持油力均有显著改善,且持水力和持油力随着压力的升高而增大,但膨胀力在较低压力(0 ~ 100 MPa)下显著提高,之后则随压力的变化不显著。结果表明,DHPM 处理可有效提高豆渣膳食纤维的膨胀力、持水性和持油力。膳食纤维的理化性质与 SDF 和 IDF 的比例、颗粒大小、表面性质和来源等有

关^[28]。膨胀力可能与空间网状结构有关,较好的空间网状结构有良好的支撑作用,膨胀力提高说明纤维的网状结构没有被破坏,否则相互堆叠很难支撑和膨胀到更大的体积^[23]。持水力的提高可能与组织疏松、亲水基团的裸露有关,预示着样品受到 DHPM 的强烈撞击、剪切和气穴等综合作用,其组织更加疏松,颗粒更小,比表面积更大,同时也使样品吸附和结合脂类物质的能力更强。此外,处理后的膳食纤维中 SDF 含量的增加,可能也是理化性质提高的主要原因之一。已有研究表明,膳食纤维的持水力与截留水的方式有关^[28]。可溶性膳食纤维在水溶液中可形成凝胶,自身吸收水分的同时产生的胶状物也可防止水分流失^[29],因此膳食纤维中可溶性膳食纤维含量越高,持水力越强。以上结果表明,生物解离膳食纤维理化性质优于其他方式提取的膳食纤维,可在肉制品、烘焙食品、保健食品等多种食品中进行应用,提高食品的加工特性及品质^[30-31]。

表 2 不同压力处理膳食纤维的理化性质

Tab.2 Physicochemical properties of dietary fibers under different pressure treatments

参数	处理压力/MPa				
	0	50	100	150	200
持水力/(g·g ⁻¹)	(3.63 ± 0.14) ^d	(4.84 ± 0.74) ^e	(5.28 ± 0.41) ^b	(5.98 ± 0.50) ^b	(6.87 ± 0.34) ^a
持油力/(g·g ⁻¹)	(2.32 ± 0.43) ^e	(3.07 ± 0.21) ^d	(4.17 ± 0.47) ^c	(5.04 ± 0.21) ^{ab}	(5.48 ± 0.45) ^a
膨胀力/(mL·g ⁻¹)	(4.73 ± 0.37) ^d	(5.85 ± 0.47) ^c	(6.23 ± 0.56) ^{bc}	(6.89 ± 0.42) ^b	(8.22 ± 0.76) ^a
可溶性指数/%	(2.07 ± 0.02) ^d	(3.74 ± 0.09) ^c	(4.72 ± 0.07) ^b	(4.91 ± 0.12) ^b	(5.07 ± 0.51) ^a

2.3 不同压力处理膳食纤维的重金属离子吸附能力分析

Pb、As 和 Cu 等重金属元素易在生物体内富集，达到一定程度可导致中毒甚至癌症^[32]，膳食纤维侧链中的亲水性基团具有很强的离子交换能力，对重金属离子可产生一定吸附作用，然而这种离子交换能力易受 pH 值影响，故本文选择 pH 值 2 及 7 两个条件，模拟体外肠道和胃环境下不同压力处理的膳食纤维对上述 3 种重金属离子的吸附能力，结果如图 1 所示。由图 1a 可知，在 pH 值 7 条件下，不同压

力处理膳食纤维的重金属离子吸附能力的差异不显著，且膳食纤维在 pH 值 7 条件下对同种重金属离子的吸附效果优于 pH 值 2。这是由于在酸性条件下，纤维中糖醛酸的羟基和木质素的酚酸等亲水基团对重金属离子的吸附作用被溶液中电离的 H₃O⁺ 的排斥作用抵消^[20]，此时物理吸附成为膳食纤维吸附重金属离子的主要方式^[33]。上述结果不仅说明小肠环境更适合膳食纤维对重金属离子的吸附，同时也证明生物解离膳食纤维具有更强的重金属吸附能力，可有效阻碍人体对重金属离子的吸收。

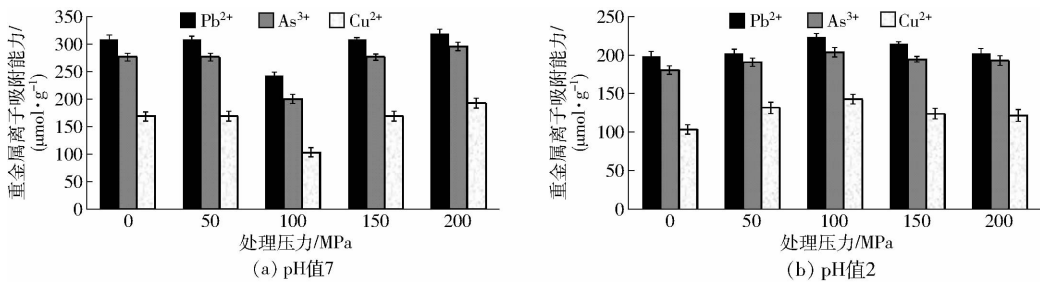


图 1 不同压力处理膳食纤维的重金属离子吸附能力
Fig.1 Adsorption capacities on heavy metal ions of dietary fibers

2.4 不同压力处理膳食纤维的功能特性分析

2.4.1 葡萄糖吸收能力

膳食纤维具有抑制葡萄糖扩散的功效，可降低血液中葡萄糖的含量，有效控制血糖指数^[34]。图 2 所示为不同压力处理的膳食纤维对葡萄糖的吸收能力，各膳食纤维对葡萄糖吸收能力随处理压力的提高而依次增大，达到 200 MPa 时略有下降，且不同压力处理膳食纤维的葡萄糖吸收能力均随葡萄糖浓度的增加而提高，这一现象与 PARK 等^[35]研究结果一致。已有研究表明，膳食纤维的葡萄糖吸收能力与其可溶性膳食纤维的含量及物理结构有关^[21]。这是由于可溶性膳食纤维与水接触后产生的凝胶状物体可将葡萄糖分子包裹其中，且膳食纤维疏松的网状结构也会减缓葡萄糖分子在食品体系中的扩散速率。上述结果表明，生物解离膳食纤维对葡萄糖的吸收能力明显高于其他方式提取的膳食纤维，可起到较好的调节饮食结构、控制餐后血糖指数的作用，在各种食品、保健品和医药制品中具有一定的应用前景。

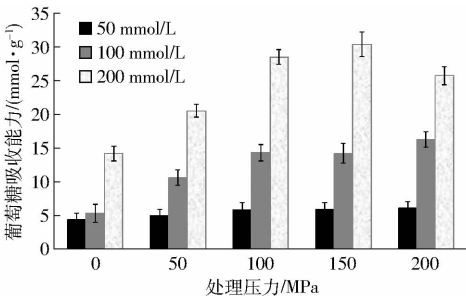


图 2 不同压力处理膳食纤维的葡萄糖吸收能力
Fig.2 Glucose adsorption capacities of dietary fibers

2.4.2 α-淀粉酶抑制能力

膳食纤维对 α-淀粉酶活性具有一定抑制的作用，可改善食品体系中淀粉类物质的消化特性^[36]。其中，200 MPa 处理压力下的生物解离膳食纤维的 α-淀粉酶抑制能力最高，为 18.42%，较 0 ~ 150 MPa 处理的膳食纤维样品分别提高了约 36%、32%、28% 和 27%。膳食纤维较高的 α-淀粉酶抑制能力可能与其持水性和膨胀力较强有关。较高的膨胀力和持水力能降低体系流动性，减少酶与底物发生碰

撞的机会,降低 α -淀粉酶的酶解效果^[37]。

2.4.3 胆汁酸阻滞指数

胆汁酸过多会损伤胃黏膜上皮细胞,膳食纤维具有延迟或抑制人体对胆汁酸吸收速率的功效,从而预防疾病^[38]。胆汁酸结合能力与样品中 SDF 的含量以及其他特性(营养活性物质、带电性、理化结构、疏水性和活性结合位点)相关^[27]。根据图 3 不同压力处理膳食纤维的胆汁酸阻滞结果可知,DHPM 处理后胆汁酸结合能力显著提高,但随压力升高增强不显著,这是因为 DHPM 能使样品颗粒变小,比表面积增大,从而可提高胆汁酸结合能力^[39]。胆汁酸阻滞指数随着压力增大而增强且在 150 MPa 和 200 MPa 变化不明显。DHPM 对大豆膳食纤维的侧链基团的影响较小,因此其阳离子交换能力无显著变化。

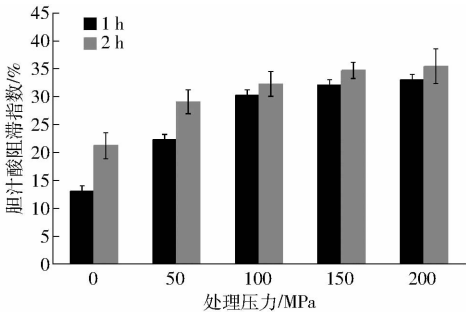


图 3 不同压力处理膳食纤维的胆汁酸阻滞指数
Fig. 3 Bile acid retardation index of dietary fibers

综合以上不同压力处理对膳食纤维功能特性的分析结果可知,动态高压微射流技术可以有效提高生物解离膳食纤维的功能特性和营养价值,可作为一种功能性配料添加到普通食品或保健食品中,增加食品的降血糖、降血脂等生理功能,保证膳食结构平衡。

3 结束语

通过对比不同压力处理大豆膳食纤维的纯度、理化性质及功能特性发现,动态高压微射流显著提高豆渣的可溶性膳食纤维,且生物解离大豆膳食纤维经 200 MPa 的 DHPM 改性后,IDF 与 SDF 质量分数比值最佳为 1.87。DHPM 改善了豆渣膳食纤维的水化性质、持水力、持油力和 α -淀粉酶抑制能力,并且持水力和持油力随着处理压力的增大而增强,最优处理压力为 200 MPa。DHPM 对生物解离豆渣膳食纤维的功能特性分析表明,随着处理压力增大,葡萄糖吸收能力逐渐增强,200 MPa 时略有下降,在 150 MPa 时能力最强。胆汁酸阻滞指数随着压力增大而增强,且在 150 MPa 和 200 MPa 变化不明显。DHPM 对大豆膳食纤维的侧链基团的影响较小,因此其阳离子交换能力无显著变化。DHPM 改性生物解离大豆膳食纤维提取工艺简单,且改性效果显著,可在提取油脂及蛋白的同时提高大豆膳食纤维的理化性质和功能特性。

参 考 文 献

1 LIU Chengmei, LIANG Ruihong, DAI Taotao, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57(1): 55-61.

2 MYRIAM M L, CATHRINA H E, ALAN R M, et al. Re-evaluation of the mechanisms of dietary fibre and implications for macronutrient bioaccessibility, digestion and postprandial metabolism[J]. British Journal of Nutrition, 2016, 116(5): 816-833.

3 江连洲, 张巧智, 李杨, 等. 大豆水酶法水解液中蛋白质超滤回收及特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 327-334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170244&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.044.

JIANG Lianzhou, ZHANG Qiaozhi, LI Yang, et al. Ultrafiltration recovery of skim protein from enzyme-assisted aqueous extraction process of soybean and its functional properties[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 327-334. (in Chinese)

4 YE Chen, RAN Ye, LUO Yin, 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): 1-8.

5 李文佳, 林亲录, 苏小军. 从豆渣中制取大豆膳食纤维的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2010(6): 51-53.

LI Wenjia, LIN Qinlu, SU Xiaojun. Study on preparation of soybean dietary fiber from bean dregs[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2010(6): 51-53. (in Chinese)

6 单平阳, 王磊, 石可歆, 等. 花生壳可溶性膳食纤维物化及功能特性的研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 35(15): 89-91, 98.

SHAN Pingyang, WANG Lei, SHI Kexin, et al. Study on physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from peanut shell[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2017, 35(15): 89-91, 98. (in Chinese)

7 冯雁波, 包怡红. 超微粉碎对松仁膳食纤维体外降血糖、降血脂功能的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 342-346, 350.

FENG Yanbo, BAO Yihong. Effect of ultrafine grinding on hypoglycemic and hypolipidemic functional properties in vitro of dietary fiber from pine residue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(23): 342-346, 350. (in Chinese)

8 JIANG Lihua, HUA Di, WANG Zhang, et al. Aqueous enzymatic extraction of peanut oil and protein hydrolysates[J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88(2-3): 233-238.

9 YUSOFF M M, GORDON M H, NIRANJAN K, et al. Aqueous enzyme assisted oil extraction from oilseeds and emulsion de-emulsifying methods: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 41(1): 60-82.

10 JASREEN K S, STEPHAINE J, WANG T, et al. Effect of co-products of enzyme-assisted aqueous extraction of soybeans on

- ethanol production in dry-grind corn fermentation[J]. *Bioresour. Technol.*, 2015, 192(2): 451–460.
- 11 徐渐, 江连洲, 穆莹. 超声波酸水解法提取豆渣中异黄酮条件优化[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(13): 253–256.
XU Jian, JIANG Lianzhou, MU Ying. Optimization of soybean isoflavone extraction from okara by ultrasonic and acid hydrolysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(13): 253–256. (in Chinese)
- 12 QI Baokun, JIANG Lianzhou, LI Yang, et al. Extract dietary fiber from the soy pods by chemistry-enzymatic methods[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15(1): 4862–4873.
- 13 江连洲, 毛惠婷, 毕爽, 等. 超声波辅助提取生物解离豆渣中植酸的工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(6): 255–259, 263.
JIANG Lianzhou, MAO Huiting, BI Shuang, et al. Ultrasonic assisted in the extraction of phytic acid from soybean residue produced by enzymatic aqueous processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(6): 255–259, 263. (in Chinese)
- 14 李杨, 江连洲, 张兆国, 等. 大豆生物解离提取副产物-水溶性糖工艺优化及机理研究[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(6): 31–36.
LI Y, JIANG L Z, ZHANG Z G, et al. Enzyme-assistant aqueous extraction of polysaccharides from soybean by-product: optimization and mechanism study[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2010, 25(6): 31–36. (in Chinese)
- 15 万婕, 余海霞, 刘成梅, 等. 大豆膳食纤维及其各组分连续分离工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(24): 282–285.
WAN Jie, YU Haixia, LIU Chengmei, et al. The continuous separation technology of dietary fiber and its components from soybean[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(24): 282–285. (in Chinese)
- 16 赵泰霞, 朱杏玲. 微生物发酵法提取大豆渣膳食纤维的研究[J]. *武夷学院学报*, 2016, 35(3): 18–22.
ZHAO Taixia, ZHU Xingling. A study on the extraction of soybean dietary fiber with fermentation method[J]. *Journal of Wuyi University*, 2016, 35(3): 18–22. (in Chinese)
- 17 涂宗财, 胡月明, 陈丽莉, 等. 豆渣膳食纤维吸附重金属的研究[J]. *食品与机械*, 2013, 29(1): 85–87.
TU Zongcai, HU Yueying, CHEN Lili, et al. Binding of heavy metals to dietary fibre from soybean residue[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(1): 85–87. (in Chinese)
- 18 AOAC. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists[M]. 17th Edition. Washington DC, 2000.
- 19 AACC. Approved methods of American Association of Cereal Chemists[M]. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 2000.
- 20 ROBERTSON J A, FDDE M, DYSSELER P, et al. Hydration properties of dietary fibre and resistant starch: an European collaborative study[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2000, 33(2): 72–79.
- 21 阮传英. 动态高压微射流技术对豆渣膳食纤维吸附重金属能力的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- 22 CHAU C F, WEN Y L, WANG Y T. Improvement of the functionality of a potential fruit insoluble fibre by micron technology[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2006, 41(9): 1054–1060.
- 23 AHMED F, SAIRAM S, UROOJ A. In vitro hypoglycemic effects of selected dietary fiber sources[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2011, 48(3): 285–289.
- 24 ADIOTOMRE J, EASTWOOD M A, EDWARDS C A, et al. Dietary fiber: in vitro methods that anticipate nutrition and metabolic activity in humans[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1990, 52(1): 128–134.
- 25 马梦梅. 孜然膳食纤维改性及降血糖活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- 26 PEREZ-LOPEZE, MATEOS-APARICIO 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(2): 32–37.
- 27 GALISTEO M, MORON R, RIVERA L, et al. Plantago ovata husks-supplemented diet ameliorates metabolic alterations in obese Zucker rats through activation of AMP-activated protein kinase. Comparative study with other dietary fibers[J]. *Clinical Nutrition*, 2010, 29(2): 261–267.
- 28 李杨, 张雅娜, 王欢, 等. 生物解离提取大豆油与其他不同种大豆油品质差异研究[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(6): 46–52.
- 29 EVA G, ANTONIO J, PILAR R. Dietary fibre and physicochemical properties of several edible seaweeds from the northwestern Spanish coast[J]. *Food Research International*, 2010, 43(9): 2289–2294.
- 30 YALEGAMA L L, NEDRA K D, SIVKANESAN R, et al. Chemical and functional properties of fibre concentrates obtained from by-products of coconut kernel[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 124–130.
- 31 GONI I, MARTINA-CARRON N. In vitro fermentation and hydration properties of commercial dietary fiber-rich supplements[J]. *Nutrition Research*, 1998, 18(6): 1077–1089.
- 32 ANDERSON E T, BERRY B W. Identification of nonmeat ingredients for increasing fat holding capacity during heating of ground beef[J]. *Journal of Food Quality*, 2001, 24(4): 291–299.
- 33 BISWAS A K, KUMAR V, BHOSLE S, et al. Dietary fibers as functional ingredients in meat products and their role in human health[J]. *International Journal of Livestock Production*, 2011, 2(4): 45–54.
- 34 ZHANG Ning, HUANG Caihuan, OU Shiyi. In vitro binding capacities of three dietary fibers and their mixture for four toxic elements, cholesterol, and bile acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 236–239.
- 35 PARK K H, LEE K Y, LEE H G. Chemical composition and physicochemical properties of barley dietary fiber by chemical modification[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 60(6): 360–365.
- 36 阮传英, 涂宗财, 王辉, 等. 豆渣膳食纤维的体外吸附性能[J]. *食品科学*, 2014, 35(15): 109–112.
- 37 刘汉文, 黄良策, 陈洪兴, 等. 挤压膨化对豆渣可溶性膳食纤维的影响[J]. *食品科学*, 2011, 32(8): 159–162.
- 38 张华, 段倩, 张可, 等. 化学法提取红枣渣中不溶性膳食纤维工艺研究[J]. *北方园艺*, 2013, 37(14): 143–145.
- 39 LOPEZ-VARGAS J H, FERNANDEZ-LOPEZ J, PEREZ-LVAREZ J A, et al. Chemical, physico-chemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*) co-products[J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 756–763.