

# 豆渣膳食纤维的改性研究进展

李伟伟<sup>1</sup>, 周才琼<sup>1,2,\*</sup>

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400715;

2.食品科学与工程国家级实验教学示范中心(西南大学), 重庆 400715)

**摘要:**膳食纤维具有调节胃肠道和预防慢性疾病等重要的生理功能,被誉为第七大营养素,但不同膳食纤维功能特性不同,因此,高活性膳食纤维的研发以及应用于食品加工和作为保健(功能)食品成为目前食品行业关注的热点。豆渣是大豆加工副产品,富含膳食纤维,但主要是不可溶性膳食纤维(IDF),可溶性膳食纤维(SDF)含量极低,导致豆渣口感较差,在食品加工中的应用受限。本文综述了不同膳食纤维功能特性及比较了不同改性方法的工作原理和对豆渣膳食纤维中SDF的影响,为不同来源IDF的改性及豆渣膳食纤维的加工利用提供支持。

**关键词:**豆渣,可溶性膳食纤维,改性,研究进展

## Research Progress of Modification of Dietary Fiber from Soybean Residue

LI Wei-wei<sup>1</sup>, ZHOU Cai-qiong<sup>1,2,\*</sup>

(1.College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2.National Demonstration Center for Experimental Food Science and Technology Education(Southwest University), Chongqing 400715, China)

**Abstract:** Dietary fiber has important physiological functions, such as regulating gastrointestinal tract and preventing chronic diseases, known as the seventh - largest nutrient, but the functional characteristics of different dietary fiber are different. Therefore, the research and development of highly active dietary fiber and its application in food processing and as health care (functional) food have become a hot topic in the current food industry. Soybean dregs is a by-product of soybean processing, rich in dietary fiber, but mainly insoluble dietary fiber (IDF), soluble dietary fiber content is extremely low, resulting in poor taste of bean dregs, the application in food processing is limited. This paper reviewed the functional characteristics of different dietary fiber and compared the working principle and the effect on SDF in dietary fiber of different modification methods, it provides support for the modification of IDF from different sources and the processing and utilization of dietary fiber from bean dregs.

**Key words:** soybean dregs; soluble dietary fiber; modification; research progress

中图分类号: TS210

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2018)19-0333-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.058

引文格式: 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.

膳食纤维具有调节胃肠道和预防慢性疾病等重要的生理功能,被誉为第七大营养素;但不同膳食纤维功能特性不同。其中可溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)比不可溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)具有更强的功能性<sup>[1-3]</sup>。IDF主要由木质素、纤维素和部分半纤维素组成,可加强肠道的蠕动,减少肠癌、便秘等疾病的发生;SDF由部分半纤维素和亲水性果胶等物质组成,可有效降低胆固醇,提高葡萄糖耐受力<sup>[4-5]</sup>。Richard等<sup>[6]</sup>认为人类的食物中的总膳食纤维中要含至少10%的可溶性膳食纤维才能算是平衡膳食。

豆渣(soybean residue)是中国传统豆类制品加工中的副产品,加工大豆过程中,湿豆渣产率120%<sup>[7]</sup>。豆渣富含膳食纤维和部分黄酮、钙、铁、磷和维生素<sup>[8]</sup>,是一种低廉且营养价值高的膳食纤维来源。但由于主要为不可溶性膳食纤维,口感较差而限制了其在食品加工中的应用。为此,采用不同的方法对豆渣膳食纤维进行改性是提升豆渣应用价值的重要手段。目前报道的对豆渣膳食纤维进行改性的方法主要是高压、高温、发酵、酶解、均质、离子液体处理或者这几种方法联合处理等<sup>[4-5,9]</sup>。本文对各种改性方法的作用原理,对豆渣改性的结果及应用前

收稿日期:2017-12-11

作者简介:李伟伟(1997-),女,本科,研究方向:食品科学与工程,E-mail:m18716432204@163.com。

\*通讯作者:周才琼(1964-),女,博士,教授,研究方向:食品营养化学,E-mail:zhoucai qiong@swu.edu.cn。

基金项目:国家大学生创新训练项目(201710635021)。

表1 膳食纤维的不同性质与功能之间的关系

Table 1 Relationship between different properties and functions of dietary fiber

性质	作用方式	生理功能	IDF 与 SDF 比较	参考文献
持水性与膨胀性	增加粪便体积和含水量,利于排出体外,减轻结肠和泌尿系统压力;在肠道膨胀产生饱腹感;有利于好气菌群;加强肠道蠕动,有利于有害物质排出	预防便秘和痔疮、消化道癌、结肠癌等疾病,缓解肾结石、膀胱结石、膀胱炎等泌尿系统疾病;调节肠道菌群	SDF 含有更多亲水基团,持水力与膨胀性高于 IDF	[10-14]
吸附作用	吸附胆固醇(外源性和内源性)和胆酸,抑制人体吸收,降低血浆和肝脏中胆固醇含量;吸附肠道中有毒物质;对游离雌激素有吸附作用	降血脂、防治胆结石和冠状动脉硬化引起的心脏病、预防动脉粥样硬化和冠心病;预防乳腺癌	木质素、果胶和许多酸性多糖具有该性能;SDF 中起作用的主要是可溶性 $\beta$ -葡聚糖,IDF 中的纤维素基本不具备该功能	[9,15-17]
阳离子交换作用	对阳离子进行可逆交换,改变离子瞬间浓度,改善缓冲环境;有利于消化吸收,对钠钾离子的浓度有影响	降低重金属毒性,对矿物质的吸收有一定的影响;降低血压	SDF 中的果胶和树胶效果较好	[16,18-20]
发酵作用	产生短链脂肪酸参与代谢;调节肠道 pH,改善有益菌生存环境,抑制有害菌生长;细菌繁殖影响粪便排泄量	预防结肠癌;调节肠道菌群;保护肝脏;调节维生素代谢	SDF 的树胶、果胶可完全发酵降解;IDF 的纤维素、半纤维素有少部分产生发酵作用	[16,21-22]
溶解性与粘性	吸附葡萄糖,抑制胰高血糖素的分泌;该性能的提高可以改善持水性和膨胀性	预防糖尿病,与持水性和膨胀性有关	SDF 的该项性质优于 IDF	[23-24]
机械隔离作用	增加牙齿口腔咀嚼的机会	改善牙齿及口腔功能	IDF 比较有优势	[25-26]
乳化性、悬浮性和增稠性	对乳质乳化,抗消化;形成高粘度溶液	防止营养吸收过剩引起肥胖	SDF(瓜儿豆胶、古柯豆胶和洋槐豆胶)具有该性质	[10,15,27]

景等进行了综述,为豆渣膳食纤维改性及应用于食品加工提供支持。

## 1 不同膳食纤维功能特性

膳食纤维分为可溶和不可溶两类,不可溶纤维在水中难于分散,其持水性、粘度、胆酸结合能力、阳离子交换能力和对发酵的敏感度等有差异。不同膳食纤维功能特性综述见表1。表明通过改性提高膳食纤维 SDF 含量,是提升膳食纤维品质及应用的重要途径。

## 2 改性对豆渣膳食纤维的影响

不同处理对豆渣膳食纤维的影响概括如表2。

### 2.1 物理改性对豆渣膳食纤维的影响

常用物理处理方法有挤压、膨化、粉碎,主要原理是通过强烈的物理作用力(如剪切、挤压、破碎等)使大分子的不溶性纤维如纤维素或半纤维素的分子键断裂变成可溶性成分,基本不会改变总膳食纤维含量。不足之处是该处理方法缺乏针对性,对其他营养成分也产生一定影响,特别是处理过度会损失部分 SDF。所以物理改性的条件控制十分重要,目前大多研究都集中在条件优化上。

2.1.1 瞬时高压及对豆渣膳食纤维的影响 瞬时高压作用(instantaneous high pressure, IHP)是一种以微射流均质机为基础的液相超微粉碎技术,涵盖了加压、膨化、升温、超微粉碎、输送、混合等多种技术,主

要用来对液体混合物料等进行膨化、破碎、剪切和均质等。它属于一种机械降解处理,其工作原理主要是利用空穴作用、高剪切作用、流体高速撞击作用、涡旋作用等各种效应,使物料进行超微粉碎。刘成梅等<sup>[46]</sup>研究发现,豆渣中的可溶性膳食纤维含量在 40 MPa 压力下为 7.08%,而在 100、120 MPa 的压力下分别为 17.51%、24.76%,均远高于烘干处理的 2.33%,而不溶性豆渣膳食纤维随压力的升高而降低,推测豆渣受到强烈的物理碰撞后,大分子物质如纤维素中的糖苷键发生断裂,不溶性成分转化为可溶性成分。熊雪薇等<sup>[47]</sup>用 IHP 处理豆渣膳食纤维后发现其颗粒分布更加均匀,溶液性质更加稳定,非牛顿流体性质更加明显;具有明显的触变性;黏度升高。黏稠性和假塑性较好的液体更适合人们的口感<sup>[48]</sup>。此外,刘成梅等<sup>[15]</sup>报道经过 IHP 处理过的豆渣的膳食纤维吸附能力明显升高,尤其是对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  等重金属离子的能力增强。

2.1.2 超高压均质处理及对豆渣膳食纤维的影响 超高压均质(Ultra-High Pressure Homogenization, UHPH)是在均质处理(压力 20~60 MPa)基础上将压力提升至 60 MPa 以上<sup>[29,49]</sup>。豆渣经 UHPH 处理受到高压、高剪切力和空穴效应等作用,压力在 90~110 MPa 时,SDF 的含量随压力升高而增加。IDF 分子在 UHPH 处理过程中由于糖苷键断裂转化成 SDF。当压力较小时,主要是植物胶分子裂解,空穴

表2 不同处理对豆渣膳食纤维的影响

Table 2 Effects of different treatments on dietary fiber of soybean dregs

处理方法	膳食纤维变化	物理性质变化	优点	食品加工中的应用	参考文献
瞬时高压	纤维素大分子断裂; SDF 升高, IDF 减少, TDF 增加	SDF 对金属离子吸附力增强; 流变模型拟合度和屈服力升高, 非牛顿流体性质更明显	处理时间短, 产品纯粹	作为脂肪代替品加入低脂香肠	[15-16, 28]
挤压蒸煮	纤维素和半纤维素降解, 分子键断裂, 亲水基团暴露; 不溶性果胶和阿拉伯木聚糖等发生熔融现象, 水溶性升高。表现为 SDF 升高, IDF 减少, TDF 基本不变	SDF 含量升高, 持水力、膨胀力升高; 乳化性与增稠性上升	可破坏原料中一些抗营 养因子, 营养损失少, 口感较好	豆渣膳食纤维咀嚼片、蔬菜片、饼干、高纤维油炸豆渣脆片	[9, 29-30]
超高压均质	纤维素和半纤维素分子裂解; SDF 含量升高	持水力、持油力、膨胀力升高; 胆固醇、胆酸吸附能力增强; 抗氧化能力降低	成品性质优于普通高压处理; 效率较高		[31-35]
微波处理	细胞破碎, 增大 SDF 溶出量, 含量上升	持水力、膨胀力升高	条件温和, 操作简便, 易实现工业化	作为食品添加剂加到食品中	[34-35]
膨化处理	物料膨胀, 结构疏松, 大分子裂解, 水溶性升高	热稳定性、抗氧化性、黏度、水溶性、膨胀性、持水性升高;	较好保留物料原有营养 素, 口感和外观好		[36-39]
酸处理	纤维素水解成小分子	持水力、膨胀力升高	设备简单, 成本低廉, 操作简便	以 4% 的量添加到面包中	[8]
酶处理	纤维素大分子在酶作用下降解成小分子和单糖	持水力、持油力升高	条件温和, 高效快速无 污染	加入豆腐和面包中	[8, 40-41]
发酵处理	微生物产生酶对纤维素发挥作用	结合水力、持水力、膨胀力升高	简单, 成本不高, 易于实 现工业化	加入黑绿豆米饼和酸奶中	[8, 42-45]
超微粉碎	强烈的剪切力是大分子粉碎成小分子	结合水力、持水力、持油力、膨胀力升高	对物料原有营养成分保 留效果较好	加入面条和馒头中	[8]

膨化和高压剪切产生协同效应, 共同作用使其裂解成 SDF; 压力接近 110 MPa 时, 半纤维素和纤维素大分子的糖苷键开始断裂, SDF 含量急剧增加。并发现继续提升压力会导致 SDF 下降。SDF 的得率比普通均质处理有些许上升。处理后的 SDF 持油力、持水力、膨胀力明显提高<sup>[30]</sup>。

瞬时高压处理和超高压均质处理的区别: 瞬时高压处理主要用于液体的处理, 而且处理时间较短, 对物质的品质影响较小; 超高压处理着重于压力的提高。两者都涉及到空穴作用和剪切作用, 而且处理的时间都不能过长, 都是相对较短的, 但是瞬时高压处理还包含了流体高速撞击作用、涡旋作用。

2.1.3 挤压蒸煮及对豆渣膳食纤维的影响 挤压蒸煮是通过强烈的压力、摩擦力和剪切力, 使纤维素大分子物料裂解, 分子降解增多, 暴露更多可溶性基团, 提升可溶性膳食纤维含量。娄海伟等<sup>[31]</sup>使用单螺杆挤压机在 160 °C、水分含量为 20%, 转速 175 r/min 的条件下挤压豆渣, SDF 含量占比总膳食纤维 (Total dietary fiber, TDF) 从 4.43% 提高到 23.06%, TDF 含量基本没变, IDF 含量下降, 与有关报道<sup>[32]</sup> SDF 是由 IDF 转化而来相符。豆渣膳食纤维经挤压处理后持

水性、膨胀性、持油性、乳化性都会上升<sup>[33]</sup>, 利于其在食品加工中的应用。

2.1.4 微波处理及对豆渣膳食纤维的影响 微波主要是通过高频率的电磁波传递能量, 引起分子电磁振荡, 加速分子运动实现加热作用。电磁波有极强的穿透能力, 可穿透介质到达物料内部, 将能量传给物料, 细胞内部压力过大, 细胞壁受力膨胀, 导致细胞破裂, 细胞中的可溶性成分流出, 使 SDF 提取率升高<sup>[34]</sup>。王继楠等<sup>[35]</sup>报道微波在一定功率下处理豆渣, SDF 提取量由原来的 4.60% 升到 11.43%, 并发现主要受微波处理时间和功率的影响。

2.1.5 膨化处理及对豆渣膳食纤维的影响 膨化处理有挤压和压差两种方式。挤压处理可使纤维素微粒化, 分子极性发生改变, 增加与水分子的亲和性, 增大膳食纤维的水溶性并改善其口感。刘汉文等<sup>[36]</sup>报道用双螺旋挤压机处理豆渣, 通过挤压膨化, 大部分分子糖苷键如 C-O 键和 C-C 键断裂, SDF 含量与对照相比增加了 99.64%, 主要增加的单糖组分是戊糖, 己糖和糖醛酸也有所增加, 得出半纤维素是 SDF 的主要来源, 果胶和纤维素也会产生部分 SDF。食品化学特性研究显示挤压膨化豆渣膳食纤维溶胀力和

持水力分别提高了 125% 和 94%，并发现 SDF 主要影响因素是处理温度和物料含水量。

压差式膨化处理又叫做爆炸膨化干燥 (Explosion Puffing Drying)，集结了真空冷冻干燥和热风干燥两种干燥方式的优势。该法采用“爆米花”原理，原料先加热同时高压 (80 ~ 100 °C、0.1 ~ 0.4 MPa)，原料中的水分汽化散失，然后减压，压力骤减 (-0.1 MPa) 使物料内部的水分出现“闪蒸”而物料被高温干燥固化，内部组织膨胀，出现均匀蜂窝状，真空处理一段时间，水分持续蒸发，达到要求后，停止加热，冷却至室温即得到产品<sup>[37-38]</sup>。纪绪前等<sup>[39]</sup>采用此法处理豆渣的 SDF 含量上升，从对照的 3.9% 升高至 18.2%，豆渣持水性、水溶性和膨胀性也分别提高了 30.8%、43.5% 和 37.0%。推测水溶性上升可能是因为部分半纤维素、纤维素转化为 SDF。通过瞬时压差和高温膨化处理使大分子裂解，豆渣结构疏松，豆渣颗粒孔径变大，膨胀性变大，提升其应用价值。

## 2.2 生物改性及对豆渣膳食纤维的影响

生物改性主要是采用酶解和发酵的方式。与物理改性和化学改性相比，生物改性条件温和无污染，可最大程度回收有效成分。酶解法处理快速有针对性，但该方法需要的某些酶价格昂贵，需要严格控制酶最适条件。发酵法不仅可提高 SDF 含量，还可除去部分抗营养因子，产生一些对人体有益的小分子物质，且不需要高端设备，但发酵过程易出现一些不可控因素，且该方法一般所需时间比较长。

2.2.1 酶解处理及对豆渣膳食纤维的影响 酶处理可使纤维素、半纤维素分子分解成小分子糖或单糖。蒋竹茂等<sup>[40]</sup>报道酶解处理豆渣可使豆渣 SDF 含量从对照的 11.34% 提高到 16.59%。景言等<sup>[41]</sup>报道用纤维素酶处理 IDF 残渣，可得到颗粒更小的 SDF (得率 7.64%)，酶解作用破坏了糖苷键并将多糖链内链间的氢键水解，使分子碎片化，水溶性升高，得到高品质的 SDF，适合工业推广。

2.2.2 发酵处理及对豆渣膳食纤维的影响 目前报道的发酵豆渣的微生物一般为霉菌 (黑曲霉、米曲霉、根霉、毛霉、绿色木霉等)、粗壮脉纹孢菌、乳酸菌、酵母菌、枯草芽孢杆菌或由它们组成的复合体系。提高 SDF 的机理是菌种产生的纤维素酶、半纤维素酶使纤维素大分子中的糖苷键断裂，增强水溶性；加上发酵过程中大量有机酸代谢产物生成，纤维素分子在酸性条件下也会导致糖苷键断裂，分子聚合度降低<sup>[42]</sup>。谢欢等<sup>[43]</sup>报道黑曲霉发酵豆渣，半纤维素降解，SDF 在 TDF 中占比达对照的 8.19 倍。后续食品化学特性研究显示其结合水力增加了 21.74%，持水力为对照的 155.33%，膨胀力也提高了 60.67。

## 2.3 联合处理

为克服不同处理方法的缺点并提升处理效果，有采用联合处理的文献报道。目前报道的联合处理方法主要是生物处理结合物理处理。包括：

a、酶解和挤压结合<sup>[50]</sup>，采用纤维素酶进一步对挤压处理后的塌陷和断裂结构进行酶解处理，与单

独采用酶解法或挤压处理相比，两种方法结合处理后的豆渣膳食纤维粒度更小，黏度更低，抗氧化能力、吸附胆固醇和阳离子交换能力更高，且工艺简单，适合推广。

b、发酵和均质联合<sup>[51]</sup>，在发酵基础上采用高压均质处理时，当压力处于 40 MPa 时，SDF 含量达 30% 左右，降低了高压均质处理豆渣膳食纤维的难度，不仅可减弱膳食纤维对设备的破坏，还可节省资源。

c、高压、微波和酶解相结合<sup>[52]</sup>，与单一处理相比，SDF 得率进一步升高，最终 SDF 含量可提高到近 40%。

d、高压蒸煮和酶解法联合处理，高温高压使豆渣膳食纤维分子变得疏松，有利于酶解进行，减少酶用量和酶解时间等。

虽然采用单独的物理、化学、生物等方法处理豆渣可达到使 SDF 含量上升的结果，但不同方法结合处理可大大提高处理的效率进而节省资源。

## 2.4 离子液体处理

自 Swatoski 等首次发现离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑氯盐 ([BMIm]Cl) 可很好地溶解纤维素后，用离子液体 (Ionic Liquids, ILs) 溶解纤维素的技术便迅速发展起来<sup>[53]</sup>。ILs 是一种在室温或近室温条件下呈液态的由有机阳离子和阴离子 (有机、无机) 组成的盐，是一种透明、无特殊气味、毒性较小、可以流动、燃点较高的溶解性较好的绿色溶剂<sup>[53]</sup>。目前报道的 ILs 在食品中的应用主要为研究纤维素<sup>[53]</sup>、淀粉<sup>[54]</sup>、蛋白质<sup>[55]</sup>、生物柴油<sup>[56]</sup>等物质的溶解性和分离提取。离子液体中的阴、阳离子含不同的官能团如羟基等可形成氢键，破坏微晶纤维素结晶结构，增强纤维素的溶解性<sup>[57]</sup>。溶解的效果不仅与糖类分子的结构有关，还受到糖类分子与离子液体之间相互作用的影响<sup>[58]</sup>。离子液体能够破坏超分子结晶纤维素是由于纤维素分子中羟基中的 H 原子和 O 原子与离子液体中的阴、阳离子形成电子对，使纤维素分子中的氢键破坏而溶解<sup>[59-60]</sup>。

张引等<sup>[61]</sup>通过响应面优化法用 ILs 处理豆渣使其 SDF 含量由对照的 6.0% 提高到 11.6%。并发现处理温低于 100 °C 时，SDF 随温度升高而增加，原因是分子移动能力增强，纤维素分子的氢键断裂更加容易，离子间的作用力在较高温度下会减弱，同时存在于离子和氢键之间的作用力增强<sup>[62]</sup>。Cheng 等<sup>[63]</sup>发现纤维素的结晶构型经过离子液体处理后可能从原来的 I 型转化成为无定型或 II 型。叶发银<sup>[64]</sup>将豆渣用离子液体处理发现 IDF 中的木糖和阿拉伯糖含量降低，SDF 的葡萄糖、甘露糖升高，证明豆渣中的纤维素和半纤维素部分降解，且 SDF 中的半乳糖醛酸大幅度增加，说明果胶也发生了降解<sup>[65]</sup>。通过离子液体处理，膳食纤维单糖的组成发生改变，持水力升高了 10%，持油力也增加了 16%，豆渣的结晶结构被破坏，分子结构也发生了改变。

## 3 展望

综上，目前豆渣膳食纤维改性研究报道主要包

括物理改性(如瞬时高压;超高压均质;微波处理;挤压蒸煮;压差式膨化处理及挤压式膨化处理等)、生物改性(如纤维素酶;真菌发酵处理等)、联合处理(酶解和挤压结合;发酵和均质联合;高压、微波和酶解相结合等)和新技术处理(ILs 溶解纤维素技术)。豆渣膳食纤维改性研究的初衷是因为其营养价值高,价格低廉,但口感不佳。目前改性研究结果没有广泛应用,主要有这几个方面,物理方法主要通过剪切、挤压等方式,缺乏针对性,需要严格控制改性条件,设备价格高昂,很多工厂难以达到该生产条件;生物改性条件温和,但需要严控酶解条件或发酵条件,具有不稳定性且技术不太成熟,不利于大批生产;化学改性加入了太多附加物,有可能会影响产品的风味。这几种方法不是附加值太高,就是操作困难,无法推广应用。为此,目前人们更加关注联合处理,以提高处理的效率;而采用离子液体新技术处理溶解纤维素成为人们关注的方向。

未来豆渣改性技术处理可能集中在联合改性和新技术的应用,特别是联合生物改性以提升改性效果;或者以食品加工中特定需要来综合估计需要采用的合适的改性方法。新技术改性研究中应更加关注安全性。

### 参考文献

- [1] Elleuch M, Bedigian D, Roiseux O, et al. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterization, technological functionality and commercial applications: A review [J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(2): 411-421
- [2] Kaczmarczyk M M, Miller M J, Freund G G. The health benefits of dietary fiber: beyond the usual suspects of type 2 diabetes mellitus, cardiovascular disease and colon cancer [J]. *Metabolism*, 2012, 61(8): 1058-1066
- [3] Zhong X, Fang Y J, Pan Z Z, et al. Dietary fiber and fiber fraction intakes and Colorectal cancer risk in Chinese adults [J]. *Nutrition and Cancer*, 2014, 66(3): 351-361
- [4] 赵丽, 李倩, 朱丹实, 等. 膳食纤维的研究现状及展望 [J]. *食品与发酵科技*, 2014, 50(5): 76-86.
- [5] 涂宗财, 陈丽莉, 王辉, 等. 发酵与动态高压微射流对豆渣膳食纤维理化特性的影响 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(1): 113-119.
- [6] Richard E A Leitz, Donald J Pusterl. Balanced fiber composition; United States Patent, 4877627 [P] 1989-10-31
- [7] Li B, Qiao M, Lu F. Composition, nutrition and utilization of okara (soybean residue) [J]. *Food Reviews International*, 2012, 28: 231-252
- [8] 吴占威, 胡志和. 大豆豆渣的生理功能及其在食品中的应用 [J]. *食品科学*, 2012(33): 358-362
- [9] 戚勃, 李来好. 膳食纤维的功能特性及在食品工业中的应用现状 [J]. *现代食品科技*, 2006(3): 272-274
- [10] Hollingsworth P. Food trends: diversity and choice dominate [J]. *Food Tech*, 1996, 5(3): 40.
- [11] Aravind N, Sissons M J, Fellows C M, et al. Effect of inulin soluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti [J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(2): 993-1002.
- [12] 熊慧薇, 冯健雄, 刘成梅, 等. 瞬时高压处理对豆渣膳食纤维溶液流变性的影响 [J]. *食品与机械*, 2008(4): 143-145, 152.
- [13] Penna A L B, Sivieri K, Oliveira M N. Relation between quality and rheological properties of lactic beverages [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, (49): 7-13.
- [14] 刘成梅, 黎冬明, 钟业俊, 等. 瞬时高压作用对豆渣膳食纤维(SDF)在生理条件下对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  吸附的影响 [J]. *食品科学*, 2006(8): 170-173.
- [15] 蓝海军, 刘成梅, 涂宗财, 等. 大豆膳食纤维的湿法超微粉碎与干法超微粉碎比较研究 [J]. *食品科学*, 2007(6): 171-174.
- [16] Mateos A I, Redondo C A, Villanueva S M J, et al. Pea pod, broad bean pod and okara, potential sources of functional compounds [J]. *Food Science and Technology*, 2010, 43(9): 1467-1470.
- [17] Wakita Y, Harada O, Kuwata M, et al. Preparation of subcritical water-treated okara and its effect on blood pressure in spontaneously hypertensive rats [J]. *Food Sci Technol Res*, 2004(10): 164-167.
- [18] 李建周, 陈晓华, 罗思诗. 豆渣中水不溶性膳食纤维的提取及性质研究 [J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(7): 29-33.
- [19] 蔡炯, 许进, 倪国强. 肠道菌群与膳食纤维 [J]. *肠外与肠内营养*, 2002, 9(1): 50-52.
- [20] Peerajit P, Chiewchan N, Devahastin S. Effects of pretreatment methods on health-related functional properties of high dietary fibre powder from lime residues [J]. *Food chemistry*, 2012, 132(4): 1891-1898.
- [21] Fujita T, Funako T, Hayashi H. 8-hydroxylaidzein, an aldose Reductase inhibitor from okara fermented with *Aspergillus* sp. HK-388 [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2004, 68: 1588-1590.
- [22] Monteiro J C V, Pimentel G D, Sousa M V. Relationship between body mass index with dietary fiber intake and skinfolds-differences among bodybuilders who train during morning and nocturne period [J]. *Nutrition Hospitalaria*, 2012, 27(5): 929-935.
- [23] Ren H, Liu H, Endo H, et al. Anti-mutagenic and anti-oxidative activities found in Chinese traditional soybean fermented products furu [J]. *Food Chemistry*, 2006, 95: 71-76.
- [24] Tsuji M, Tamai Y, Wada K, et al. Associations of intakes of fat, dietary fiber, soy isoflavones, and alcohol with levels of sex hormones and prolactin in premenopausal Japanese women [J]. *Cancer Causes and Control*, 2012, 23(5): 683-689.
- [25] Sanderg A S, Andemnie R J. Effects of Content on Zinc Absorption in Product Extruded - Bran Product [J]. *Food Sic*, 1986, 51: 547-550.
- [26] Pinder R S, Patterson J A, O' Bryan C A, et al. Dietary fiber content influences soluble carbohydrate levels in ruminal fluids [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2012, 47(7): 710-717.
- [27] Pande S. Potentiation of the hypolipidemic influence of

- dietary tender cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba*) by garlic in cholesterol fed rats[J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(3): 798-805.
- [28] 熊慧薇, 冯健雄, 刘成梅, 等. 瞬时高压处理对豆渣膳食纤维溶液流变性的影响[J]. *食品与机械*, 2008(4): 143-145.
- [29] Velazquez E R M, Hernandez H M M, Lopez P J, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica* serovar Senftenberg 775W inoculated into fruit juice by means of ultra high pressure homogenisation [J]. *Food Control*, 2011, 22(2): 313-317.
- [30] 黄素雅, 何亚雯, 钱炳俊, 等. 高静压和高压均质对豆渣水不溶膳食纤维的改性及其功能的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(15): 81-85.
- [31] 娄海伟, 迟玉杰. 挤压蒸煮对豆渣中可溶性膳食纤维含量的影响[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(6): 31-35.
- [32] Vasanthan T, Jiang G, Yeung J, et al. Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking [J]. *Food Chemistry*, 2002, 77: 35-40.
- [33] Jing Y, Chi Y J. Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue [J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2-3): 884-889.
- [34] 张岚, 李婷婷, 刘颖, 等. 微波辅助萃取豆渣水溶性大豆多糖工艺[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(31): 19568-19570.
- [35] 王继楠, 陈忱, 迟玉杰, 等. 微波对豆渣中提取水溶性膳食纤维的影响[J]. *食品工业*, 2014, 35(1): 56-59.
- [36] 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.
- [37] Sullivan J F, Craig J C. The development of explosion puffing [J]. *Food Technology*, 1984, 38(2): 52-55.
- [38] Kozempel M F, Sullivan J F, Craig J C, et al. Explosion puffing of fruits and vegetables [J]. *Journal of Food Science*, 1989, 154(3): 772-773.
- [39] 纪绪前, 陈野, 高辰, 等. 压差式膨化加工对豆渣可溶性膳食纤维的影响[J]. *天津科技大学学报*, 2013, 28(2): 6-10.
- [40] 姜竹茂, 陈新美, 缪静. 从豆渣中制取可溶性膳食纤维的研究[J]. *中国粮油学报*, 2001(3): 52-55.
- [41] 景言, 迟玉杰. 豆渣可溶性膳食纤维酶法制备工艺及其品质分析[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(8): 68-72.
- [42] 夏杨毅, 鲁言文. 提高豆渣膳食纤维的可溶性改性研究进展[J]. *粮油加工*, 2007(7): 120-122.
- [43] 谢欢, 涂宗财, 张露, 等. 黑曲霉发酵制备高可溶性膳食纤维豆渣工艺优化及其水合性质研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(4): 116-121, 132.
- [44] 何晓哲. 发酵法提高豆渣可溶性膳食纤维和蛋白质含量的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [45] 管瑛, 汪璠芄, 李文, 等. 豆渣固态发酵过程中主要营养成分及抗氧化特性变化[J]. *食品科学*, 2016, 37(21): 189-194.
- [46] 刘成梅, 刘伟, 万婕, 等. 瞬时高压作用对膳食纤维可溶性的影响[J]. *食品科学*, 2005(8): 110-113.
- [47] 田成, 莫开菊, 汪兴平. 水不溶性豆渣膳食纤维改性的工艺优化[J]. *食品科学*, 2010, 31(14): 148-152.
- [48] 谢怡斐, 田少君, 马燕, 等. 超微粉碎对豆渣功能性质的影响[J]. *食品与机械*, 2014, 30(2): 7-11.
- [49] Dumay E, Chevalier L D, Picart P L, et al. Technological aspects and potential applications of (ultra) high-pressure homogenisation [J]. *Trends Food Sci Tech*, 2013, 31(1): 13-26.
- [50] 高辰, 朱杰, 王明芳, 等. 豆渣可溶性膳食纤维的提取分析及抗氧化研究[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(10): 23-27.
- [51] 涂宗财, 李金林, 阮榕生, 等. 利用豆渣生产高活性膳食纤维的研究[J]. *食品科学*, 2006(7): 144-147.
- [52] 李甜甜, 李保国, 郭雯丽, 等. 响应面优化微波辅助提取豆渣水溶性膳食纤维[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(8): 23-28.
- [53] Swatloski R P, Spear S K, Holbry J D, et al. Dissolution of cellulose with ionic liquids [J]. *Journal of America Chemistry Society*, 2002, 124(18): 4974-4975.
- [54] Biswas A, Shogren R L, Stevenson D G, et al. Ionic liquids as solvents for biopolymers: Acylation of starch and zein protein [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 66(4): 546-550.
- [55] Mantz R A, Fox D, Green J M, et al. Dissolution of biopolymers using ionic liquids [J]. *Dissolution of Biopolymers*, 2007, 62: 275-280.
- [56] Ha S H, Lan M N, Lee S H, et al. Lipase-catalyzed biodiesel production from soybean oil in ionic liquids [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, 41(4): 480-483.
- [57] Feng L, Chen Z. Research progress on dissolution and functional modification of cellulose in ionic liquids [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2008, 142(1-3): 1-5.
- [58] Wang H, Gurau G, Rogers R D. Ionic liquid processing of cellulose [J]. *Chemical Society Review*, 2012, 41(4): 1519-1537.
- [59] Okushita K, Chikayama E, Kikuchi J. Solubilization mechanism and characterization of the structural change of bacterial cellulose in regenerated states through ionic liquid treatment [J]. *Biomacromolecules*, 2012, 13(5): 1323-1330.
- [60] Feng L, Chen Z. Research progress on dissolution and functional modification of cellulose in ionic liquids [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2008, 142(1-3): 1-5.
- [61] 张引, 刘嘉, 钱贵明, 等. 离子液体 EMImCl 处理提高豆渣中水溶性膳食纤维的研究 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(5): 82-86.
- [62] Zhao D, Li H, Zhang J, et al. Dissolution of cellulose in phosphate-based ionic liquids [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(2): 1490-1494.
- [63] Cheng G, Varanasi P, Li C, et al. Transition of cellulose crystalline structure and surface morphology of biomass as a function of ionic liquid pretreatment and its relation to enzymatic hydrolysis [J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(4): 933-941.
- [64] 叶发银, 张引, 钱贵明, 等. 不同离子液体处理对豆渣膳食纤维成分变化及物化特性的影响 [J]. *现代食品科技*, 2014, 30(8): 182-186, 105.
- [65] Li H, Long D, Peng J, et al. A novel in-situ enhanced blasting extrusion technique-extrudate analysis and optimization of processing conditions with okara [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2012, 16: 80-88.