

# 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

叶发银<sup>1,2</sup>, 张引<sup>1</sup>, 钱贵明<sup>1</sup>, 樊虹霞<sup>1</sup>, 刘嘉<sup>1</sup>, 赵国华<sup>1,2</sup>

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715) (2. 重庆市农产品加工技术重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 为明晰离子液体对豆渣膳食纤维成分及物化特性的影响, 从而拓宽豆渣在食品中的应用, 以富含水不溶性膳食纤维 (IDF) 的鲜豆渣为原料, 研究不同种类离子液体处理后膳食纤维成分变化和物化特性。结果表明: 离子液体处理可以显著提高豆渣中水溶性膳食纤维 (SDF) 含量, 其提高效果随着离子液体阳离子基团的延长而减弱, 含乙酸根的离子液体的提高效果优于含氯离子的离子液体。1-乙基-3-甲基咪唑乙酸盐的效果最好, 可将豆渣中 SDF 含量从最初  $5.97 \times 10^{-2}$  g/g 提高到 0.17 g/g, SDF/IDF 比值从 0.17 提高到 0.69。离子液体处理改变了豆渣中 SDF 和 IDF 的单糖组成, 豆渣的微观结构因溶胀而变形, 结晶结构遭到破坏。离子液体处理后, 豆渣膳食纤维的持水力增加 10%, 持油力增加 16%。离子液体可作为提高豆渣中 SDF 含量, 改善豆渣膳食纤维水合性质的有效途径。

**关键词:** 豆渣; 水溶性膳食纤维; 离子液体; 物化性质

文章编号: 1673-9078(2014)8-182-186

## Changes in Composition and Physicochemical Properties of Okara Dietary Fiber Treated with Different Ionic Liquid

YE Fa-yin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yin<sup>1</sup>, QIAN Gui-ming<sup>1</sup>, FAN Hong-Xia<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, ZHAO Guo-hua<sup>1,2</sup>

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

(2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Product Processing, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The aim of this study is to determine the effect of ionic liquids (ILs) on the composition and physicochemical properties of okara dietary fiber and to broaden the application of okara in the food industry. Fresh okara containing rich, insoluble, dietary fiber (IDF) was used as raw material to study the changes in composition and physicochemical properties of dietary fiber treated with different ILs. The results showed that soluble dietary fiber (SDF) content of okara increased significantly with ionic liquid treatment. However, this effect waned with the extension of the cationic groups in the IL. The enhancement effect of ILs with acetate groups was better than that of ILs with chloride ion. In all, the largest increase was observed with 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate (EAC), where the okara SDF content increased from  $5.97 \times 10^{-2}$  g/g to 0.17 g/g and the SDF/IDF ratio increased from 0.17 to 0.69. IL treatment also changed the monosaccharide composition of the SDF and IDF, the okara microstructure was damaged due to swelling, and its crystal structure was destroyed. After IL treatment, the water-holding and oil-holding capacities of okara dietary fiber increased by 10% and 16%, respectively. Therefore, IL treatment is an effective approach to increase the SDF content and improve the hydration properties of okara dietary fiber.

**Key words:** okara; soluble dietary fiber; ionic liquid; physicochemical properties

膳食纤维是一类不被人体胃肠消化酶分解, 能在结肠部分或全部发酵的植物性食品成分、碳水化合物

收稿日期: 2014-04-14

基金项目: 国家 863 项目 (2011AA100805-2); 中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK20140069); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201210635028)

作者简介: 叶发银 (1983-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品加工与组分变化

通讯作者: 赵国华 (1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 非消化性碳水化合物化学与营养

及其类似物的总称。膳食纤维分为水溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和水不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF) 两类。IDF 可吸水膨胀, 增加粪便体积, 有利于肠道蠕动, 缩短粪便滞留时间, 预防肠道疾病; SDF 则具有促进肠道有益菌群增殖, 降低血清胆固醇, 预防和缓解 2 型糖尿病等功能。鉴于 IDF 和 SDF 不同的生理功能, 已往的研究认为<sup>[1]</sup>, 理想的膳食纤维产品要求 SDF 占总膳食纤维含量的 10% 以上。

豆渣 (Okara) 是传统豆制品加工的主要副产物。

每加工 1 kg 大豆能产约 2.5 kg 含水量 80% 的鲜豆渣<sup>[2]</sup>。长期以来豆渣除少部分作为饲料外,大部分被直接丢弃,造成资源浪费和环境污染。豆渣膳食纤维具有多种有益于人体的生理功能<sup>[3]</sup>,干豆渣中膳食纤维含量约 60%,绝大部分为 IDF, SDF 仅占 2~3%<sup>[4]</sup>,而且豆渣口感粗糙,限制了豆渣在食品中的应用范围。

通过加工提高豆渣中 SDF 含量,就能将豆渣变废为宝,拓宽豆渣在食品中的应用。研究表明,化学处理(如羧甲基化)、物理处理(挤压<sup>[4]</sup>、高静水压<sup>[5]</sup>、动态高压微射流<sup>[6]</sup>、超微粉碎等)和生物处理(纤维素酶降解、微生物发酵<sup>[6]</sup>)可显著改变豆渣膳食纤维的化学组成和物理结构。本实验室前期采用二氧化碳原位增强爆破技术处理豆渣,其 SDF 含量可从  $2.30 \times 10^{-2}$  g/100 g 提高到 0.21 g/g<sup>[2]</sup>。

离子液体(Ionic Liquids, ILs)是由正负离子组成的、室温或使用温度下呈液态的盐,是一类溶解能力强、不挥发、低毒、可设计的绿色溶剂<sup>[7]</sup>。离子液体已在食品成分的提取分离、分析检测及物性修饰等方面具有出色表现。离子液体可破坏淀粉的结晶结构,有效改善淀粉的溶解性能<sup>[8]</sup>;微晶纤维素<sup>[9]</sup>经离子液体处理,其结晶度显著降低。本文研究离子液体处理对富含 IDF 的豆渣膳食纤维的成分和物化特性影响,以期提供一种豆渣膳食纤维改性新方法,并为推进离子液体在食品中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 原料和试剂

鲜豆渣,重庆原磨豆浆食品有限公司提供(水溶性膳食纤维含量  $5.97 \pm 0.23$  g/100g 干基);1-乙基-3-甲基咪唑乙酸盐(EAC)、1-丁基-3-甲基咪唑乙酸盐(BAC)、1-己基-3-甲基咪唑乙酸盐(HAC)、氯化 1-乙基-3-甲基咪唑(ECL)、氯化 1-丁基-3-甲基咪唑(BCL)、氯化 1-己基-3-甲基咪唑(HCL),上海成捷化学有限公司;耐高温 $\alpha$ -淀粉酶、蛋白酶、胰酶, Sigma-Aldrich 上海分公司;盐酸、氢氧化钠(分析纯),成都市科龙化工试剂厂;其他试剂皆为实验室常用分析纯。

#### 1.1.2 仪器设备

Hitachi S-4800 型高分辨场发射扫描电镜,日本 Hitachi 公司;X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪,荷兰 Panalytical 公司;LabScan XE 色差仪,美国 HunterLab 公司;85-2A 数显恒温磁力搅拌器,金坛市科析仪器有限公司;HH-2 数显恒温水浴锅,金坛

市富华仪器有限公司;RE-52AA 旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂;DHG-9140 电热恒温鼓风干燥箱,上海齐欣科学仪器有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 豆渣前处理

将鲜豆渣以 1.00~1.50 cm 厚度平铺在 50 °C 热风干燥箱中烘干,干豆渣经简单破碎后用石油醚脱脂(干豆渣:石油醚=1.00 g:4.50 mL),接着采用手提式粉碎机粉碎至 60 目。于自封袋储藏备用。

#### 1.2.2 离子液体处理豆渣

前处理后的豆渣(2.00 g)和离子液体(10 mL)置于圆底烧瓶中,在带加热套磁力搅拌器上加热并搅拌,80 °C、处理 12 h 后,将圆底烧瓶从加热器上取出,加入 4 倍体积的无水乙醇,并置于 60 °C 水浴中沉淀 1 h。离心(3000 r/min, 10 min)获得的沉淀用无水乙醇洗至洗脱液呈无色后,置于 50 °C 烘箱中干燥 12 h,而后粉碎过 60 目筛,于自封袋储藏备用。含有乙醇的离子液体,50 °C 减压蒸馏去除乙醇。回收的离子液体加入活化后的 3Å 分子筛,避光储存。

#### 1.2.3 成分分析

##### 1.2.3.1 膳食纤维含量

总膳食纤维(TDF)、水溶性膳食纤维(SDF)和水不溶性膳食纤维(IDF)的测定采用 Asp 等<sup>[10]</sup>的方法。

##### 1.2.3.2 基本成分

水分:GB/T 5009.3-2003《食品中水分的测定》;粗蛋白:GB/T 5009.5-2003《食品中蛋白质的测定》;粗脂肪:GB/T 5009.6-2003《食品中脂肪的测定》;灰分:GB/T 5009.4-2003《食品中灰分的测定》。

##### 1.2.3.3 单糖

豆渣膳食纤维水解和单糖组成分析参照 Zhao 等<sup>[11]</sup>的方法进行,具体为:分别称取样品各 5 mg 置于安培管中,加入 2 mL 2 mol/L 三氟乙酸,封管,置于烘箱 120 °C 水解 2 h,冷至室温,减压蒸干,得样品水解物。向样品水解物中加入 10 mg 盐酸羟胺及 1 mL 无水吡啶,温热溶解后在 90 °C 反应 30 min,取出冷至室温,加入 1 mL 无水乙酸酐,在 90 °C 下继续反应 30 min,冷至室温,加入 1 mL H<sub>2</sub>O 搅拌,再用氯仿萃取 3 次,每次 1 mL,合并氯仿层,减压抽干,置真空干燥箱减压干燥 24 h。同法制备各种标准单糖的糖脎乙酸酯衍生物,用氯仿作洗液,分别进行气相色谱分析。色谱条件:OV-225 玻璃毛细管柱(0.29 mm×25 m);进样量 2  $\mu$ L;进样温度 250 °C;分流比 10,总流量 11.3 mL/min,柱流量 0.76 mL/min;N<sub>2</sub> 为载气,尾吹

流量 30 mL/min, H<sub>2</sub> 流量 40 mL/min, 空气流量 400 mL/min; 升温程序为: 200 °C, 保留 2 min, 以 15 °C/min 速度升至 230 °C 保持 9 min, 以 10 °C/min 上升到 240 °C, 保持 7 min, 总分析时间 22 min。以核糖为内标测定鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖的定量校正因子。糖醛酸分析, 用 3, 5-二甲酚显色后以分光光度计测定, 参照的标准品为 α-D-半乳糖醛酸。

### 1.2.4 物化特性

#### 1.2.4.1 持水力

豆渣膳食纤维持水力的测定参照 Mateos-Aparicio 等<sup>[5]</sup>的方法进行。精确称取 0.125 g 干豆渣样品 ( $m$ , 单位 g), 置于 10 mL 离心管中 (质量为  $m_0$ , 单位 g), 加入 7.5 mL 蒸馏水, 经漩涡振荡器摇匀后室温 (25 °C) 振荡 24 h, 5100 r/min 离心 10 min, 小心弃去上清液, 用滤纸吸干离心管壁残留水分, 称其质量 ( $m_1$ , 单位 g), 则持水力为:

$$\text{持水力} / (\text{g/g}) = (m_1 - m_0) / m \quad (1)$$

#### 1.2.4.2 持油力<sup>[5]</sup>

精确称取 0.125 g 干豆渣样品 ( $m$ , 单位 g), 置于 10 mL 离心管中 (质量为  $m_0$ , 单位 g), 加入 7.5 mL 菜籽油, 经漩涡振荡器摇匀后室温 (25 °C) 振荡 24 h, 5100 r/min 离心 10 min, 小心弃去上清液, 用滤纸吸干离心管壁残留油滴, 称其质量 ( $m_2$ , 单位 g), 则持油力为:

$$\text{持油力} / (\text{g/g}) = (m_2 - m_0) / m \quad (2)$$

#### 1.2.4.3 色差

豆渣膳食纤维色差测定按照 Li 等<sup>[2]</sup>的方法进行。

### 1.2.5 扫描电镜分析

将干燥粉末样品用导电胶粘在样品座上, 使用离子溅射仪在样品表面镀金后, 进行电镜观察并拍摄照片。

### 1.2.6 X-射线衍射分析

采用 X'Pert PRO 型 X 射线衍射, 电压 30 kV, 电流 30 mA。起始角: 5°; 终止角: 35°; 步长: 0.02°; 扫描速度: 5°/min。

### 1.2.7 数据处理

所有测定重复 3 次, 实验结果以平均值±标准偏差表示。采用 SPSS16.0 对试验数据进行统计分析, 显著性水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同离子液体提高豆渣 SDF 含量的效果

对比

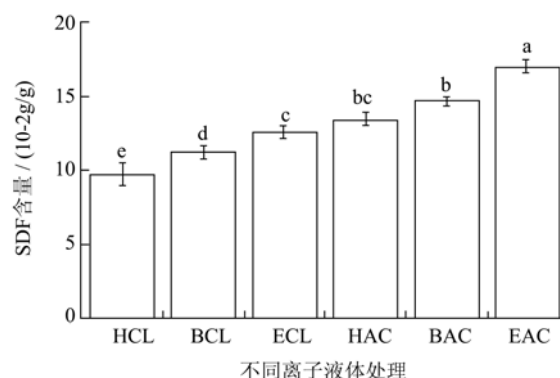


图 1 不同离子液体提升豆渣中 SDF 的效果对比

Fig.1 The effect of different ionic liquids on enhancement of SDF from okara

由图 1 可知, 所用六种离子液体对豆渣中 SDF 的含量具有不同程度的提升作用。随着阳离子基团的延长, 豆渣中 SDF 含量的提升效果逐渐减弱, 其中乙基的效果最佳; 而对阴离子比较中可知, 乙酸根离子对豆渣中 SDF 含量的提升效果明显高于氯离子; 1-乙基-3-甲基咪唑乙酸盐提升豆渣中 SDF 含量的能力最强。Swatloski 等<sup>[7]</sup>在溶解纤维素的实验中发现, 离子液体的阳离子链长与纤维素溶解效率成反比。这可能是由于离子液体内随着阳离子链长的增加, 而能形成有效电子配对的氯离子浓度减小。离子液体与纤维素分子作用如图 2 所示<sup>[9]</sup>: 纤维素的羟基氧原子和氢原子分别作为电子供体和电子受体与离子液体的电子受体 (阳离子) 和电子供体 (阴离子) 形成电子配对。原则上要求纤维素和离子液体间要有足够的作用距离用以形成电子配对。形成电子配对的同时, 纤维素的羟基形成的分子内或分子间氢键被破坏, 继而纤维素发生溶解。

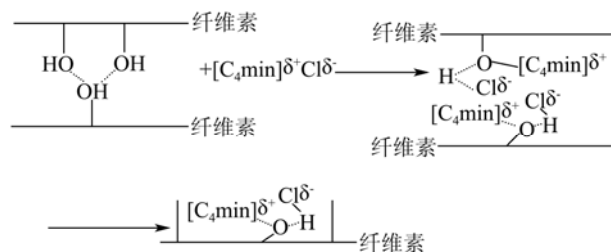


图 2 纤维素与离子液体 (以氯化 1-丁基-3-甲基咪唑为例) 分子间作用图解

Fig.2 Graphic illustration of molecular interaction between ionic liquids and cellulose

### 2.2 离子液体处理前后豆渣的成分变化

由于 1-乙基-3-甲基咪唑乙酸盐 (EAC) 处理的豆渣中 SDF 含量最高, 因此主要考察 EAC 处理豆渣中膳食纤维的组成和结构变化。由表 1 可知, 原豆渣相比, 离子液体处理豆渣中 TDF、蛋白质均无显著变化 ( $P>0.05$ )。IDF 和脂肪含量显著下降 ( $P<0.05$ ), SDF

和灰分显著升高 ( $P<0.05$ )。豆渣中 SDF 含量提高 185%, SDF/IDF 比值从 0.17 提高到 0.69。结果表明, 离子液体处理后, IDF 转变为 SDF 导致二者在含量上较原豆渣产生显著变化。离子液体处理前, 对豆渣的脱脂处理导致其脂肪含量下降。

表 1 离子液体处理前后豆渣的基本成分\*

Table 1 Proximate composition of okara powder subjected to ionic liquids treatment

样品	TDF	SDF	IDF	蛋白质	脂肪	灰分	水分
原豆渣组	41.77±0.28 <sup>a</sup>	5.97±0.23 <sup>a</sup>	35.80±0.44 <sup>a</sup>	26.23±1.23 <sup>a</sup>	21.40±0.41 <sup>a</sup>	3.43±0.06 <sup>a</sup>	5.40±0.22 <sup>a</sup>
离子液体处理组	41.87±0.46 <sup>a</sup>	17.10±0.48 <sup>b</sup>	24.77±0.85 <sup>b</sup>	26.17±1.54 <sup>a</sup>	6.67±0.57 <sup>b</sup>	4.80±0.25 <sup>b</sup>	13.40±0.22 <sup>b</sup>

注: 除水分外, 其余测定指标以干基计算; 表中数据同列采用不同小写字母标示的, 表明存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

表 2 离子液体处理前后豆渣膳食纤维的单糖组成

Table 2 Monosaccharide composition (g/100 g) of SDF and IDF in okara powder subjected to ionic liquids treatment

膳食纤维	单糖成分	单糖含量/(g/100g)	
		原豆渣组	离子液体处理组
SDF	鼠李糖	0.04±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.01 <sup>a</sup>
	岩藻糖	0.03±0.01 <sup>a</sup>	0.03±0.01 <sup>a</sup>
	阿拉伯糖	0.20±0.02 <sup>a</sup>	0.18±0.03 <sup>a</sup>
	木糖	0.03±0.01 <sup>a</sup>	0.03±0.01 <sup>a</sup>
	甘露糖	0.03±0.01 <sup>a</sup>	0.12±0.04 <sup>b</sup>
	葡萄糖	0.01±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.01 <sup>b</sup>
	半乳糖	0.49±0.08 <sup>a</sup>	0.49±0.09 <sup>a</sup>
	半乳糖醛酸	0.55±0.07 <sup>a</sup>	3.31±0.23 <sup>b</sup>
IDF	鼠李糖	0.08±0.02 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>a</sup>
	岩藻糖	0.08±0.03 <sup>a</sup>	0.06±0.02 <sup>a</sup>
	阿拉伯糖	0.75±0.02 <sup>a</sup>	0.65±0.02 <sup>b</sup>
	木糖	0.54±0.02 <sup>a</sup>	0.41±0.03 <sup>b</sup>
	甘露糖	0.10±0.01 <sup>a</sup>	0.08±0.01 <sup>a</sup>
	葡萄糖	0.08±0.02 <sup>a</sup>	0.08±0.02 <sup>a</sup>
	半乳糖	1.15±0.12 <sup>a</sup>	1.01±0.20 <sup>b</sup>
	半乳糖醛酸	0.85±0.05 <sup>a</sup>	0.53±0.12 <sup>b</sup>

由表 2 可知, 豆渣膳食纤维含有数量可观的半乳糖醛酸, 阿拉伯糖和半乳糖是豆渣 SDF 中主要的中性糖, 阿拉伯糖、木糖和半乳糖是豆渣 IDF 中主要的中性糖, 这与 Lu 等<sup>[3]</sup>、Mateos-Aparicio 等<sup>[5]</sup>和 Redondo-Cuenca 等<sup>[12]</sup>的研究结果一致。豆渣经离子液体处理后, SDF 主要增加的单糖为甘露糖、葡萄糖及半乳糖醛酸 ( $P<0.05$ ); IDF 主要减少的单糖为阿拉伯糖、木糖、半乳糖以及半乳糖醛酸 ( $P<0.05$ )。SDF 中甘露糖和葡萄糖的增加以及 IDF 中阿拉伯糖和木糖的减少, 说明豆渣中的半纤维素和纤维素发生了溶解; SDF 中半乳糖醛酸大量增加, 说明豆渣中果胶发生了降解<sup>[2]</sup>。

### 2.3 物化特性

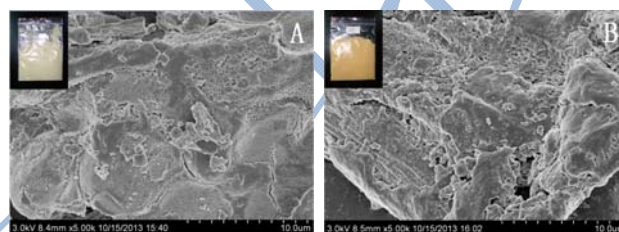


图 3 离子液体处理前 (A)、后 (B) 豆渣膳食纤维的扫描电镜图

Fig.3 Scanning electron micrographs of okara dietary fiber before (A) and after (B) treatment with ionic liquids

图 3 为原豆渣和离子液体处理后豆渣的 5000 倍扫描电镜结果。可以看出, 原豆渣膳食纤维表面存在大小均一的蜂窝状细孔, 这是大豆子叶的典型组织结构。离子液体处理后的豆渣膳食纤维, 表面粗糙不平, 有明显的裂纹及沟壑, 而且蜂窝状细孔结构受到破坏, 出现一些较大的孔隙。结果表明, 豆渣膳食纤维在离子液体作用下发生溶胀变形, 由纤维素、半纤维素和果胶等构成的纤维结构发生变化, 完整性遭到破坏。

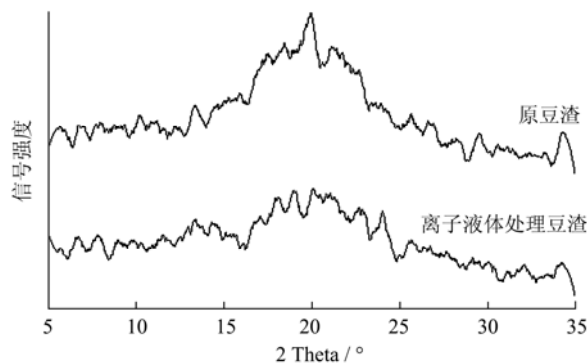


图 4 离子液体处理前后豆渣膳食纤维的 X-衍射图谱

Fig.4 Wide angle X-ray diffraction pattern of okara dietary fiber before and after treatment with ionic liquids

图 4 为原豆渣和离子液体处理豆渣的 X-射线衍射

图谱。结果表明,原豆渣膳食纤维具有一定的晶体结构,其主衍射峰出现在 $2\theta=16^\circ$ 到 $22^\circ$ 间,为纤维素I型结晶结构<sup>[13]</sup>。纤维素经离子液体处理,从I型结晶转变(重结晶)为II型结晶,甚至失去结晶结构<sup>[13]</sup>。豆渣膳食纤维经离子液体处理后,主衍射峰( $20^\circ$ )明

显减弱,表明豆渣膳食纤维表观结晶度显著减小。此外,原豆渣膳食纤维在 $34.3^\circ$ 存在衍射小峰,经离子液体处理后此衍射小峰几乎消失,这与豆渣经动态高压微射流处理后的变化结果一致<sup>[6]</sup>。

表3 离子液体处理前后豆渣的水合特性及色差

Table 3 Physicochemical properties of okara dietary fiber subjected to ionic liquids treatment

样品	水合特性		色差		
	持水/(g/g)	持油力/(g/g)	$L^*$	$a^*$	$b^*$
原豆渣组	$1.98\pm 0.01^a$	$2.49\pm 0.07^a$	$86.09\pm 0.38^a$	$0.79\pm 0.09^a$	$13.30\pm 0.08^a$
离子液体处理组	$2.17\pm 0.08^b$	$2.95\pm 0.08^b$	$70.48\pm 0.68^b$	$5.84\pm 0.16^b$	$24.07\pm 0.09^b$

由表3可知,豆渣经离子液体处理,豆渣膳食纤维的持水力及持油力均显著增加( $P<0.05$ )。其中,持水力增加10%,持油力增加16%。豆渣膳食纤维持水力的增加可能与SDF含量的增加有关<sup>[14]</sup>,持油力的增加可能与膳食纤维中无定形区的比例增加有关<sup>[2,5]</sup>。从表3还可以看出,离子液体处理后豆渣 $L^*$ 值下降,而 $a^*$ 值和 $b^*$ 值均显著升高。

### 3 结论

离子液体处理可显著提高豆渣中SDF含量及SDF/IDF比值。其提升效果随着阳离子基团的延长而逐渐减弱,乙酸根离子的提升效果明显高于氯离子。1-乙基-3-甲基咪唑乙酸盐效果最好,用来处理豆渣,豆渣中总膳食纤维含量基本不变,而SDF含量从最初 $5.97\times 10^{-2}$  g/g提高到0.17 g/g, SDF和IDF的单糖组成也发生了变化,豆渣的形态结构发生溶胀变形,结晶结构遭到破坏,色差有所变化。离子液体处理显著改善了豆渣膳食纤维的持水力和持油力,但其改善机理仍有待深入研究。

### 参考文献

- [1] 沈祥坤,应恺.利用豆渣生产优质大豆膳食纤维的研究[J].现代食品科技,2006,22(3):277-279  
SHEN Xiang-kun, YING Kai. Development of soybean dietary fiber from soybean residue [J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(3): 277-279
- [2] LI Hui-qin, LONG Dao-qi, PENG Jian-lin, 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
- [3] 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
- [4] JING Yan, CHI Yu-jie. Effects of twin-screw extrusion on

soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3): 884-889

- [5] 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 and Emerging Technologies, 2010, 11(3): 445-450
- [6] TU Zong-cai, CHEN Li-li, WANG Hui. Effect of fermentation and dynamic high pressure microfluidization on dietary fibre of soybean residue [J]. Journal of Food Science and Technology, doi 10.1007/s13197-012-0838-1
- [7] SWATLOSKI R P, SPEAR S K, HOLBREY J D, et al. Dissolution of cellulose with ionic liquids [J]. Journal of America Chemistry Society, 2002, 124(18): 4974-4975
- [8] 罗志刚,李富丽.2种离子液体对木薯淀粉颗粒性质的影响[J].食品与发酵工业,2010,36(11):44-47  
LUO Zhi-gang, LI Fu-li. Effects of two kinds of ionic liquids on particle characterization of cassve [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(11): 44-47
- [9] FENG Li, CHEN Zhong-lan. Research progress on dissolution and functional modification of cellulose in ionic liquids [J]. Journal of Molecular Liquids, 2008, 142(1-3): 1-5
- [10] ASP N G, JOHANSSON C G, HALLMER H, et al. Rapid enzymatic assay of insoluble and soluble dietary fiber [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(3): 476-82
- [11] ZHAO Guo-hua, KAN Jian-quan, LI Zhi-xiao, et al. Characterization and immunostimulatory activity of an (1→6)- $\beta$ -glucan from the root of *Ipomoea batatas* [J]. International Immunopharmacology, 2005, 5(9): 1436-1445
- [12] Redondo-Cuenca A, Villanueva-Suárez M J, Mateos-Aparicio I. Soybean seeds and its by-product okara as sources of dietary fibre. Measurement by AOAC and Englyst methods [J]. Food Chemistry, 2008, 108(3): 1099-1105
- [13] Samayam I P, Hanson B L, Langan P, et al. Ionic-liquid

induced changes in cellulose structure associated with enhanced biomass hydrolysis [J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(8): 3091-3098

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

[14] Chen Ye, Ye Ran, Yin Luo, Zhang Ning. Novel blasting

