

## 非纤维成分对球磨后大豆膳食纤维物理性质的影响

尹志翔<sup>1</sup>, 王召君<sup>1</sup>, 曾茂茂<sup>1</sup>, 何志勇<sup>1</sup>, 秦昉<sup>2</sup>, 陈洁<sup>1\*</sup>

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122; 2. 江南大学分析中心, 江苏无锡 214122)

**摘要** 利用行星式球磨机制备了不同粒径的大豆豆粕、豆渣、水不溶性膳食纤维(S-IDF), 以水合能力、溶解度、密度、比表面积、悬浮稳定性为指标, 研究了非纤维成分对不同粒径大豆膳食纤维物理性质的影响。结果显示, 在球磨过程中豆粕结构易被破坏, 粒径迅速降低, 可溶性成分快速释放, 粉碎 60 min 后粒径达 11.1  $\mu\text{m}$ , 而溶解度达 56.19%, 这与其高含量蛋白相关; 而豆渣和 S-IDF 的粒径下降相对慢, 粉碎 60 min 后粒径分别为 13.9 和 10.0  $\mu\text{m}$ , 溶解度分别为 35.2% 和 24.5%。不同粒径样品的比表面积、孔径和孔体积结果显示, 在球磨初期, 豆粕和豆渣比表面积的变化主要由粒径下降和表面蛋白与多糖降解所致, 而球磨后期则是由内部蛋白和多糖降解以及粒径下降共同导致。S-IDF 粒径和孔径变化模式与豆粕和豆渣正好相反。各种膳食纤维的水合能力与形貌性质关联相对较小, 其中豆渣具有最佳的水合能力, 这可能与含有较多的酸可溶性大豆多糖(SSPS)相关; 3 种来源膳食纤维的悬浮稳定性都随着粒径变小而增加, 与形貌特征的相关性分析显示, 悬浮稳定性与粒径及孔径水平呈负相关, 而与比表面积及孔体积水平呈正相关( $P < 0.05$ )。上述研究说明球磨后大豆膳食纤维的物理性质不仅与粒径、比表面积和孔径等形貌特征相关, 而且与其非纤维成分相关。

**关键词** 大豆膳食纤维; 粒径; 非纤维成分; 物理性质

中图分类号 TS 214 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)20-0166-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.20.045

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Effects of Non-fiber Components on Physical Properties of Soybean Dietary Fiber after Ball Milling

YIN Zhi-xiang, WANG Zhao-jun, ZENG Mao-mao et al (Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122)

**Abstract** In the paper, soybean meal, soybean dregs and soybean insoluble dietary fiber (S-IDF) with different particle sizes were prepared by ball milling. Hydration capacity, solubility, density, surface area and suspension stability were measured to gain insights into the effect of non-fiber ingredients on physical properties of soybean dietary fiber with different particle sizes. The results showed that the structure of soybean meal was easily destroyed with the rapid reduction of particle size and release of soluble components during the ball milling process. The particle size reached 11.1  $\mu\text{m}$  after 60 minutes of ball milling, and the solubility reached 56.19%, which was related to its high content of protein. The particle size of soybean dregs and S-IDF decreased relatively slowly. After ball milling for 60 minutes, the particle sizes were 13.9 and 10.0  $\mu\text{m}$ , respectively, and the solubility was 35.2% and 24.5%, respectively. The results of surface area, pore width and pore volume of samples with different particle sizes showed that the changes in surface area of soybean meal and soybean dregs were mainly caused by the decrease in particle size and degradation of surface proteins and polysaccharides during the initial stage of ball milling, while internal protein and polysaccharides degradation and particle size reduction were responsible for these results in the later stage of ball milling. The change patterns of particle size and pore width of S-IDF were opposite to those of soybean meal and soybean dregs. The hydration ability of various dietary fibers had relatively little correlation with morphological properties. Soybean dregs had the best hydration ability, which may be related to more soluble soybean polysaccharides (SSPS). The suspension stability of dietary fiber from all three sources increased as the particle size became smaller. Correlation analysis with morphological characteristics showed that the suspension stability was negatively related to particle size and pore width, but positively correlated with specific surface area and pore volume ( $P < 0.05$ ). In summary, the physical properties of soybean dietary fiber after ball milling were not only related to the particle size, surface area and pore width, but also related to its non-fiber composition.

**Key words** Soybean dietary fiber; Particle size; Non-fiber composition; Physical properties

膳食纤维是指来源于植物且无法被人体消化吸收的碳水化合物, 主要由纤维素、木质素、果胶、半纤维素和其他相关物质组成<sup>[1]</sup>。根据水溶性可以将膳食纤维分为可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)<sup>[2]</sup>。近年来, 由于 IDF 的健康效应, 如降低血液中胆固醇和血压水平<sup>[3-4]</sup>, 降低胆结石、便秘和肠癌的患病风险<sup>[5-6]</sup>, 促进肠道蠕动, 有效降低血糖值<sup>[7]</sup>等, 对 IDF 性质及其改性的研究得到行业的重视。

目前 IDF 主要来源于禾谷类、豆类、薯类以及水果蔬菜等, 如大豆膳食纤维、小麦膳食纤维以及柑橘膳食纤维等<sup>[8]</sup>。各类粗加工的 IDF 通常质构和风味不佳, 且各种加工性能包括悬浮性、稳定性、乳化性、持水性等都不佳, 限制了其在加工食品中的大规模应用<sup>[9]</sup>。为了拓宽 IDF 的应用途径, 必须

进行改性处理。目前, 通常的改性方法包括超微粉碎、挤压、蒸汽爆破、超高压等物理方法<sup>[10-13]</sup>, 酶法、发酵等生物技术方法<sup>[14-15]</sup>, 碱处理和氧化处理等化学方法<sup>[16-17]</sup>, 或者上述方法的联用技术<sup>[18]</sup>。降低粒径、增大比表面积以提高 IDF 的性能, 是各种改性方法的核心目标之一。尽管大量研究结果显示, 总体而言, 随着 IDF 粒径的下降, 各种性质, 尤其是口感有很大程度的提高<sup>[19-20]</sup>, 但对比不同文献可以发现, IDF 粒径与理化性质尤其是加工性质如持水性、悬浮性等之间的关系结论并不一致<sup>[21-24]</sup>。Zhu 等<sup>[21]</sup>对青稞膳食纤维的研究表明, 较小的粒径会显著提高 IDF 的持水力(WHC); 然而, 另一项关于麦麸膳食纤维的研究<sup>[24]</sup>报道, 较小的颗粒尺寸导致 WHC 降低。上述不一致的结果说明, 影响粉碎后 IDF 性质的要素, 除了粒径以外, 还有别的因素, 如膳食纤维的来源及其非膳食纤维成分可能也有重要影响。

我国大豆膳食纤维原料丰富。作为油脂加工的副产物, 豆粕、豆粕提取了大豆蛋白后的豆渣、豆渣提取了可溶性大

**作者简介** 尹志翔(1995—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与组分变化。\* 通信作者, 教授, 博士, 从事食品加工与组分变化研究。

**收稿日期** 2020-03-18

豆多糖后的水不溶性纤维(S-IDF)都是良好的膳食纤维来源<sup>[25-27]</sup>。但目前,不同来源膳食纤维之间的性质很少有数据可对比,也很少有同时对不同来源不同组成的膳食纤维进行对比研究,并探讨影响粉碎后 IDF 性质的原因和机制,使工业消费者很难理解不同膳食纤维型号之间的差异并导致应用困难。该研究利用球磨机分别处理豆粕、豆渣及 S-IDF,得到不同粒径的样品,并测定产物理化性质,探讨原料中非膳食纤维成分对于粉碎加工的影响以及对产物性质的影响,为提高膳食纤维的改进技术和拓宽其应用途径提供参考。

## 1 材料与与方法

**1.1 材料** 大豆豆粕、豆渣、水不溶性膳食纤维:河南平顶山金晶生物科技有限公司。

**1.2 仪器与设备** PM-100 行星式球磨机(德国 Retsch); K375 全自动凯氏定氮仪(瑞士 Buchi 公司);TST-E804-60A 电热鼓风干燥箱(青岛特斯特科技股份有限公司);SX2-15-10 马弗炉(宜兴市精益电炉有限公司);S3500 激光粒度分析仪(美国 Microtrac 公司);Autosorb-IQ 比表面积及微孔物理吸附仪(美国康塔仪器公司);3K15 高速冷冻离心机(德国 Sigma 公司);U-3900 可见分光光度计(日本日立株式会社);651 LUMISizer 稳定性分析仪(德国 LUM 公司)。

## 1.3 方法

**1.3.1 样品制备。**将适量样品放入球磨机中,与氧化铝球混合,球料比为 1:10,并在 400 r/min 下粉碎。分别在不同时间点取样,以得到不同粒径的样品。将豆粕球磨 0、0.75、1.5、5 和 60 min 后的样品分别命名为 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>、D<sub>4</sub> 和 D<sub>5</sub>;将豆渣球磨 0.5、10、20 和 60 min 后的样品分别命名为 O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、O<sub>4</sub> 和 O<sub>5</sub>;将 S-IDF 球磨 0.5 和 60 min 后的样品分别命名为 I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub> 和 I<sub>3</sub>。

取球磨后的干粉 1 g 与 99 g 去离子水混合,充分摇匀,边搅拌边调 pH 至 4.00±0.01,得到均匀的悬浮液,供后续悬浮稳定性试验使用。悬浮液现配现用。

**1.3.2 基本成分的测定。**蛋白质含量的测定:凯氏定氮法(GB T5009.5—2016);灰分含量的测定:灼烧称重法(GB 5009.4—2016);水分含量的测定:直接干燥法(GB 5009.3—2016);膳食纤维含量的测定:(GB 5009.88—2014);多糖含量的测定:苯酚-硫酸法。

**1.3.3 平均粒径与粒径分布。**取适量干粉置于激光粒度分析仪内,在干法模式下测定样品的平均粒径和粒径分布。试验结果由系统自带软件进行分析,将 D<sub>50</sub> 作为平均粒径的指标。

**1.3.4 比表面积及孔径分析。**Brunauer-Emmett-Teller(BET)比表面积,Barrett-Joyner-Halenda(BJH)累积孔体积和 BJH 孔径的测定参照牛飞等<sup>[28]</sup>的方法。取适量干粉在 60 ℃ 真空干燥 4 h,在-195.807 ℃ 液氮下,测定氮气的吸附和解吸曲线,试验结果由系统自带软件进行分析。

**1.3.5 可溶解性。**可溶解性通过 Zhang 等<sup>[29]</sup>描述的方法测定。1 g 干粉与 50 g 去离子水充分混匀,80 ℃ 加热 30 min,立即冷却至室温,4 000 r/min 离心 30 min。小心收集上清液,将上清液在预先干燥并称重的烧杯中于(103±2)℃干燥。将

残余物和烧杯一起称重,并根据下式计算溶解度。

$$\text{溶解度} = \frac{S_3 - S_2}{S_1} \times 100\%$$

式中,S<sub>1</sub> 为干粉质量(g);S<sub>2</sub> 为烧杯质量(g);S<sub>3</sub> 为残余物和烧杯的总重(g)。

**1.3.6 松装密度与振实密度。**松装密度与振实密度的测定参考 Muttakin<sup>[30]</sup>的方法,将干粉小心放入已称重的 25 mL 具塞试管,至 25 mL 刻度线,松装密度为每毫升样品的体积。利用旋涡振荡器振荡具塞试管 100 s,排除样品间的空隙,再放入样品至刻度线,重复多次,直至样品体积不再变化,振实密度为此时每毫升样品的体积。

**1.3.7 持水力、持油力与膨胀力。**称取 0.2 g 干粉置于恒重的 10 mL 离心管中,加入 5 mL 水(或油),振荡均匀。静置 1 h 后,2 000 r/min 离心 10 min,然后小心除去上清液,称量沉淀物和离心管的总重<sup>[31]</sup>。按下式计算持水(油)力(g/g)。

$$\text{持水(油)力} = \frac{M_3 - M_2}{M_1}$$

式中,M<sub>1</sub> 为干粉质量(g);M<sub>2</sub> 为离心管质量(g);M<sub>3</sub> 为沉淀物和离心管总重(g)。

称取 1.0 g 干粉置于具塞试管中,读取干粉体积(mL),加入 25 mL 蒸馏水,振荡均匀,室温下放置 24 h 后再读取膨胀后样品的体积<sup>[23]</sup>。按下式计算膨胀力(mL/g)。

$$\text{膨胀力} = \frac{V_3 - V_2}{V_1}$$

式中,V<sub>1</sub> 为干粉质量(g);V<sub>2</sub> 为干粉体积(mL);V<sub>3</sub> 为膨胀后体积(mL)。

**1.3.8 悬浮稳定性。**采用直接观察法<sup>[32]</sup>,取 10 mL 1%悬浮液置于样品管中,分别在不同时间观察其分层结果,测量上清液层的高度。

## 2 结果与分析

**2.1 原料膳食纤维组成** 由表 1 可知,豆粕中蛋白质含量最高,占样品总重的 43.68%,但是总膳食纤维(TDF)含量最低,仅为 18.89%。豆渣与 S-IDF 的化学组成相近,主要成分都为 TDF;总粗蛋白分别为 19.26%和 18.72%,显著低于豆粕。二者最主要的区别为 S-IDF 是豆渣提取酸可溶性大豆多糖(SSPS)后的产物。SSPS 主要是由半乳糖醛酸聚糖和鼠李糖半乳糖醛酸聚糖组成的主链以及半乳糖和阿拉伯聚糖组成的支链构成的酸可溶多糖<sup>[33]</sup>。

**2.2 平均粒径及粒径分布** 平均粒径用 D<sub>50</sub> 表示,即 50%的颗粒可以通过的孔隙大小。如图 1(A)所示,随着球磨时间的增加,样品颗粒粒径不断降低。其中豆粕粒径下降速度最快,豆渣其次,S-IDF 最慢。3 种原料无论球磨多长时间,其粒径最终都集中在 10~15 μm。豆粕粒径的下降速度最快,除了初始粒径较大的因素,还有可能是因为豆粕的蛋白质含量高且结构较弱,在剪切力的作用下容易断裂。同样,豆渣粒径下降居中,可能也是由于其中存在可溶性多糖的缘故,与 β-1,4 糖苷键组成的纤维素相比,可溶性多糖在高剪切力作用下,相对易断裂。

表1 大豆豆粕、豆渣、S-IDF 的化学组成

Table 1 Chemical composition of soybean meal, soybean dregs and S-IDF

%

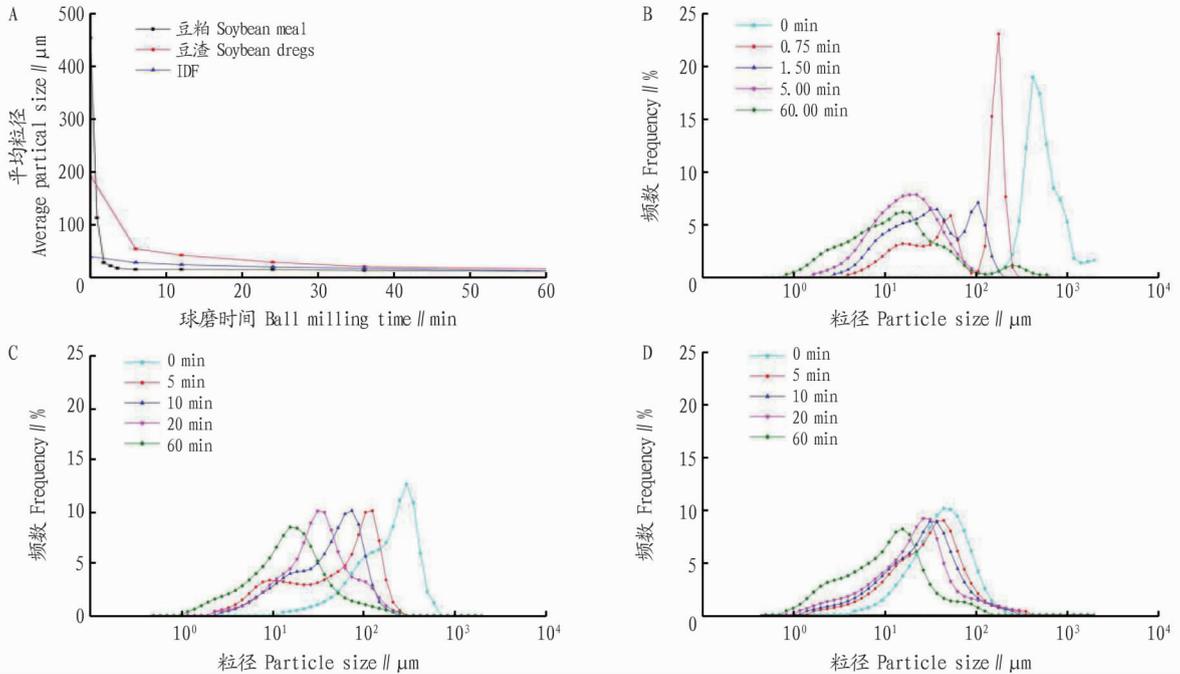
化学组成 Chemical composition	总粗蛋白 Total crude protein	碳水化合物 Carbohydrate	粗脂肪 Crude fat	TDF	IDF	水分 Moisture	灰分 Ash
豆粕 Soybean meal	43.68±1.52 a	21.99±1.17 a	0.40±0.13 b	18.89±1.32 c	11.38±1.13 c	9.41±0.19 a	5.60±0.41 a
豆渣 Soybean dregs	19.26±0.82 b	5.17±0.52 c	0.59±0.04 a	69.51±2.44 a	60.18±1.57 a	7.98±0.13 b	2.46±0.15 c
S-IDF	18.72±0.49 b	6.91±0.19 b	0.64±0.08 a	64.04±2.39 b	56.29±1.73 b	5.93±0.11 c	3.05±0.12 b

注: 同列数据后小写字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ )

Note: Different small letters within the same column mean significant difference ( $P<0.05$ )

图1(B~D)分别为不同球磨时间下,豆粕、豆渣、S-IDF的粒径分布曲线,进一步说明了随着球磨时间的增加,3种膳食纤维原料粒径分布的降低情况。值得注意的是,豆粕的曲线,

在5 min时是单峰,而到了60 min,出现了双峰,这可能是颗粒重新聚集的缘故。该结果也暗示长时间碾磨的豆粕,平均粒径虽然不断下降,但粒径分布变宽,性质未必会不断提升。



注:A.平均粒径;B.豆粕粒径分布;C.豆渣粒径分布;D.S-IDF 粒径分布

Note: A. Average particle size; B. Particle size distribution of soybean meal; C. Particle size distribution of soybean dregs; D. Particle size distribution of S-IDF

图1 豆粕、豆渣、S-IDF 的平均粒径及粒径分布

Fig.1 The average particle size and particle size distribution of soybean meal, soybean dregs and S-IDF

**2.3 球磨对溶解性及产物比表面积和孔径的影响** 如表2所示,3种样品的溶解度随着粒径的减小而显著增加,这与图1平均粒径及粒径分布结果是一致的。豆粕的溶解度最高, D<sub>5</sub> 的溶解度为 56.19%, 远高于豆粕和豆渣球磨 60 min 后的样品,这是因为豆粕中的可溶性蛋白质含量高。其中 D<sub>5</sub> 是 D<sub>1</sub> 的 2.0 倍, O<sub>5</sub> 是 O<sub>1</sub> 的 6.2 倍, I<sub>3</sub> 是 I<sub>1</sub> 的 2.1 倍, 豆渣经过粉碎后, 溶解度提高得最多, 这与可溶性膳食纤维占比有关<sup>[34]</sup>。

3种样品溶解物中,可溶性多糖及蛋白质含量的变化趋势与溶解度的变化趋势一致。其中豆粕 D<sub>2</sub> 的可溶性蛋白质含量是 D<sub>1</sub> 的 169%, 而 D<sub>5</sub> 仅是 D<sub>2</sub> 的 110%。这说明豆粕中的可溶性蛋白质在球磨的作用下极易被破坏和释放,这也是豆粕粒径能够快速下降的原因之一。

值得注意的是,表2中3种原料比表面积的变化趋势差

别很大。豆粕和豆渣比表面积均随着碾磨时间的增加不断升高,而孔径变化比较复杂,前3个样品几乎无差别,后2个样品孔径显著变小,说明豆粕和豆渣比表面积的改变在球磨初期主要由粒径下降和表面蛋白与多糖降解所致,而球磨后期则是由内部蛋白和多糖降解以及粒径减少共同导致。而 S-IDF 球磨初期孔径略有下降,碾磨 5 min 后孔径不再变化,说明 S-IDF 的粒径和孔径变化模式与豆粕和豆渣正好相反。这种差异也暗示了3种原料的不同粒径产物性质可能有所不同。

**2.4 松装密度与振实密度** 随着豆粕、豆渣、S-IDF 粒径的下降,3种原料不同粒径样品的松装密度与振实密度均显著降低(图2),这是因为样品的粒径下降,使得颗粒之间的空隙减少,堆积得更加紧密。3种样品球磨 60 min 后的松装密度集中在 0.23~0.27 g/mL,振实密度集中在 0.41~0.48 g/mL。

表 2 粒径对大豆豆粕、豆渣、S-IDF 物理性质的影响

Table 2 Effect of particle size on physical properties of soybean meal, soybean dregs and S-IDF

样品 Sample	编号 No.	溶解度 Solubility %	多糖含量 Polysaccharide content//%	蛋白质含量 Protein content//%	BET 比表面积 BET specific surface area m <sup>2</sup> /g	累计孔体积 Cumulative pore volume cm <sup>3</sup> /g	孔径 Aperture Å
豆粕 Soybean meal	D <sub>1</sub>	28.16±2.11 c	7.66±1.16 c	15.87±1.11 c	0.58±0.02 d	0.18±0.01c	119.77±3.84 a
	D <sub>2</sub>	49.11±1.94 b	17.16±2.27 b	26.80±1.34 b	1.10±0.01 c	0.24±0.01 c	118.64±2.78 a
	D <sub>3</sub>	50.37±2.39 b	17.10±1.18 b	27.31±1.04 ab	1.24±0.03 b	0.25±0.02 c	121.77±3.04 a
	D <sub>4</sub>	54.36±1.48 a	19.95±0.57 a	28.58±1.09 ab	1.26±0.02 b	1.10±0.07 b	40.21±7.69 b
	D <sub>5</sub>	56.19±1.76 a	20.62±2.13 a	29.46±2.08 a	2.71±0.12 a	2.65±0.08 a	38.51±4.17 b
豆渣 Soybean dregs	O <sub>1</sub>	5.70±0.30 e	4.26±0.61 e	0.37±0.06 c	0.28±0.03 d	0.08±0.01c	124.98±6.02 a
	O <sub>2</sub>	11.99±0.70 d	9.93±0.90 d	0.58±0.09 b	0.50±0.02 c	0.09±0.01 c	121.84±4.23 ab
	O <sub>3</sub>	16.13±0.92 c	13.22±0.68 c	0.56±0.09 b	0.52±0.01 c	0.12±0.01 c	118.08±6.08 ab
	O <sub>4</sub>	19.13±1.86 b	18.07±1.47 b	0.66±0.06 b	0.89±0.03 b	0.32±0.01 b	114.90±6.58 b
	O <sub>5</sub>	35.18±1.23 a	32.13±1.22 a	0.85±0.12 a	2.15±0.10 a	1.91±0.07 a	41.09±2.13 c
S-IDF	I <sub>1</sub>	11.92±0.79 c	9.45±1.06 c	0.56±0.07 c	0.65±0.02 c	0.39±0.02 c	65.75±3.18 a
	I <sub>2</sub>	15.97±1.36 b	14.03±1.23 b	0.70±0.02 b	1.07±0.06 b	0.68±0.04 b	57.30±2.87 b
	I <sub>3</sub>	24.51±1.42 a	20.03±1.24 a	0.89±0.07 a	2.06±0.08 a	1.44±0.06 a	58.11±3.43 b

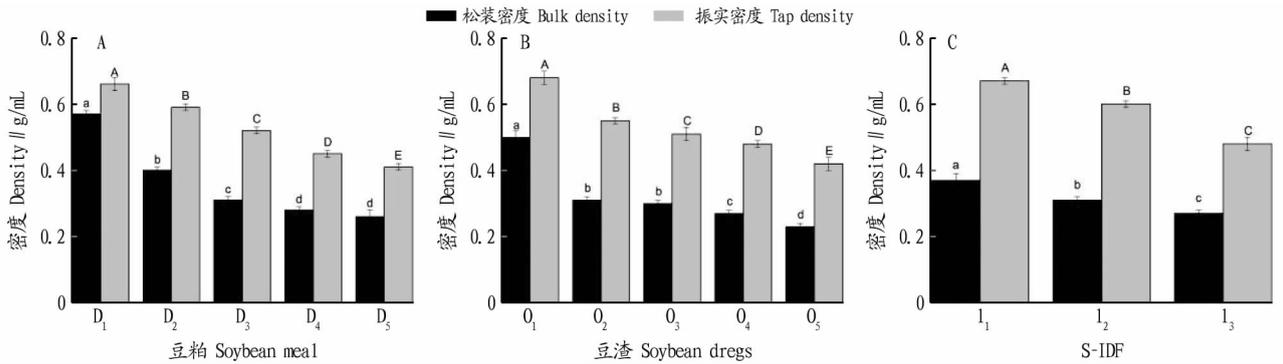
注: 同列数据后小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )Note: Different small letters within the same column mean significant difference ( $P < 0.05$ )注: A. 豆粕; B. 豆渣; C. S-IDF; 不同字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ )Note: A. Soybean meal; B. Soybean dregs; C. S-IDF; different letters represented significant difference ( $P < 0.05$ )

图 2 松装密度与振实密度

Fig.2 Bulk density and tap density

**2.5 持水力、持油力及膨胀力** 3 种样品中, 豆渣的水合能力(持水力及膨胀力)最大, 这可能与高含量的 SSPS 有关。豆粕、豆渣和 S-IDF 持水力、持油性和膨胀力随研磨时间的变化趋势有着显著不同。由图 3 可知, 豆粕及豆渣的水合能

力随着球磨时间的增加, 呈现出先下降后上升的趋势; 而 S-IDF 的水合能力呈现出不断下降的趋势。豆粕 D<sub>3</sub>~D<sub>5</sub> 样品、豆渣 O<sub>3</sub>~O<sub>5</sub> 样品和豆渣 I<sub>1</sub>~I<sub>3</sub> 样品的粒径相似。3 种样品类似粒径下, 水合能力的差别说明, 膳食纤维的水合能力不

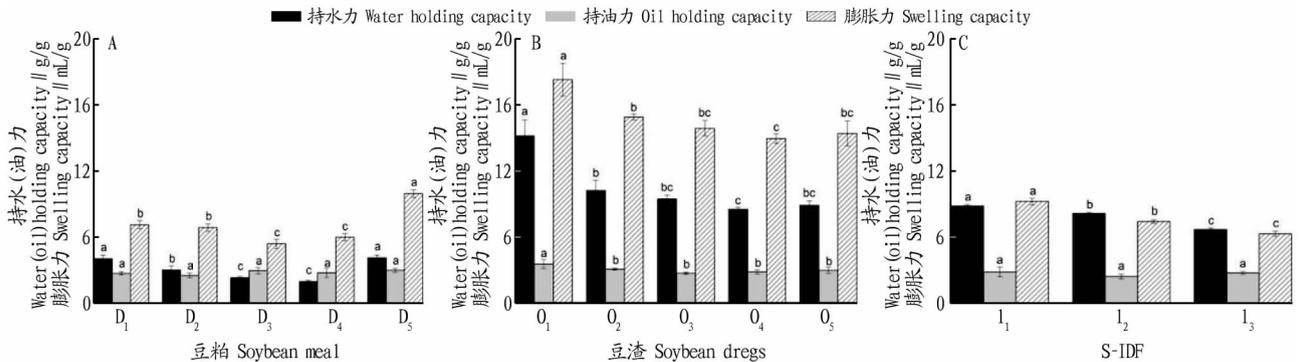
注: A. 豆粕; B. 豆渣; C. S-IDF; 不同字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ )Note: A. Soybean meal; B. Soybean dregs; C. S-IDF; different letters represented significant difference ( $P < 0.05$ )

图 3 持水力、持油力及膨胀力

Fig.3 Water holding capacity, oil holding capacity and swelling capacity

仅受粒径影响,而且受其组成的影响。该结果很好地解释了不同来源膳食纤维关于粒径对性质影响不一致的问题<sup>[21-24]</sup>。

为了进一步探讨膳食纤维形貌以及组成等因素对其性质的影响,将图3结果与表1、表2和图1中球磨对产物溶解性、粒径及孔径比表面积的变化趋势关联分析,结果见表3。可以看出,各种样品水合能力的变化与其溶解度和不可溶的成分有关联,而与形貌性质关联相对较小。水合能力与溶解度水平呈负相关( $r=-0.865, P<0.05$ );与pH 7.0水不可溶多糖含量呈正相关( $r=0.918, P<0.01$ )。表3中不溶性纤维主要包括SSPS和膳食纤维,结合图3结果,可以推测不同来源和不同粒径样品的水合能力可能与样品中的SSPS含量有更大的关联。3种样品的持油力随着粒径的改变无显著性变化,都集中在2.0~3.0 g/g。

**2.6 悬浮稳定性** 如果膳食纤维大量使用于饮料体系,其水

溶液中的悬浮稳定性就非常重要。为此,将3种膳食纤维分别配制成1%浓度的悬浮液,分别在pH 7.0和4.0条件下静置观察其悬浮稳定性,结果如图4所示。豆粕中含有大量蛋白质,在pH 4.0的条件下产生絮状物,无法测定其悬浮稳定性。从图4可以看出,3种来源膳食纤维都随着粒径变小,悬浮稳定性增加。相同粒径的豆渣比S-IDF悬浮稳定性要好,且酸性条件优于中性条件,这是因为豆渣含有较多的SSPS。SSPS是一类酸性多糖,可以作为酸性饮料的稳定剂<sup>[35]</sup>。3种样品中,豆粕的悬浮稳定性最差。

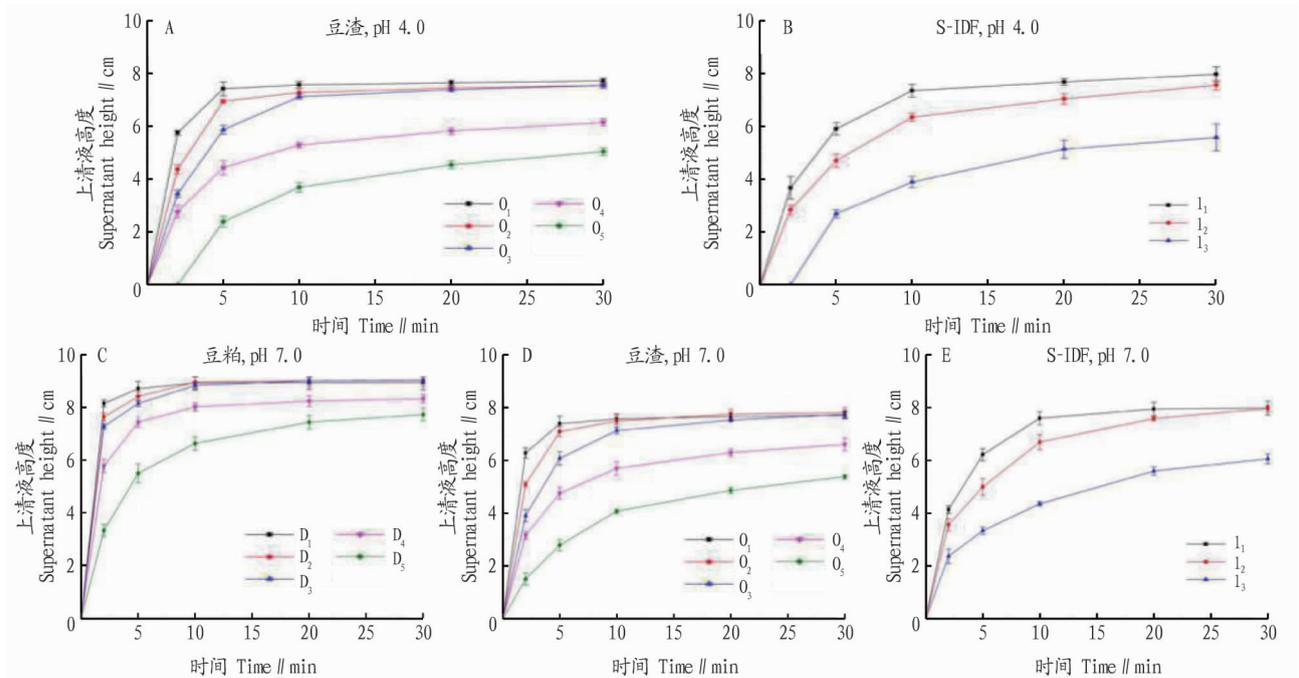
将5 min时,悬浮液总高度(10 cm)与上清液高度的差值作为悬浮稳定性的指标,与形貌特征及组成作相关性分析,结果见表3。可以看出,悬浮稳定性与粒径及孔径水平呈负相关( $P<0.05$ ),而与比表面积及孔体积水平呈正相关( $P<0.05$ )。

表3 相关性分析  
Table 3 Correlation analysis

指标 Index	粒径 Particle size	比表面积 Specific surface area	孔体积 Pore volume	孔径 Aperture	溶解度 Solubility	pH 7.0水不可溶多糖 pH 7.0 water-insoluble polysaccharide	pH 7.0水不可溶蛋白 pH 7.0 water-insoluble protein
持水力 Retention ability	-0.003	-0.420	-0.261	0.224	-0.865**	0.918**	0.147
持油力 Oil holding capacity	0.080	-0.102	0.011	0.204	0.200	0.267	0.076
膨胀力 Expansive force	-0.010	-0.335	-0.178	0.325	-0.596*	0.681**	0.076
悬浮性 Suspensibility	-0.557*	0.565*	0.594*	-0.599*	0.189	0.297	-0.244

注: \* 表示显著相关性( $P<0.05$ ); \*\* 表示极显著相关性( $P<0.01$ )

Note: \* represented significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\* represented extremely significant correlation ( $P<0.01$ )



注: A.豆渣, pH 4.0; B.S-IDF, pH 4.0; C.豆粕, pH 7.0; D.豆渣, pH 7.0; E.S-IDF, pH 7.0

Note: A.Soybean dregs, pH 4.0; B.S-IDF, pH 4.0; C.Soybean meal, pH 7.0; D.Soybean dregs, pH 7.0; E.S-IDF, pH 7.0

图4 悬浮稳定性

Fig.4 Suspension stability

### 3 结论

通过球磨粉碎处理,得到了粒径为 11.1~447.3  $\mu\text{m}$  的豆粕,13.9~193.0  $\mu\text{m}$  的豆渣,10.0~39.5  $\mu\text{m}$  的 S-IDF。将 3 种纤维不同粒径样品的组成、水合能力、溶解度、比表面积、悬浮稳定性等性质进行对比分析,结果显示豆粕在球磨过程中结构易被破坏,粒径迅速降低,可溶性成分快速释放,其他 2 种相对缓慢。3 种原料的组成与形貌特征关联分析结果显示,豆粕和豆渣比表面积的改变在球磨初期主要由粒径下降和表面蛋白与多糖降解所致,而球磨后期则是由内部蛋白和多糖降解以及粒径减小共同导致。而 S-IDF 粒径和孔径变化模式与豆粕和豆渣正好相反。豆粕和豆渣的水合能力随着粒径的下降,先降低后升高,而 S-IDF 则持续降低;3 种来源膳食纤维的悬浮稳定性都随着粒径变小而增加。相关性分析结果显示,膳食纤维的水合能力可能与组成关联更大,与形貌关联相对较小;而悬浮稳定性与粒径及孔径水平呈负相关,与比表面积及孔体积水平呈正相关( $P<0.05$ )。上述研究表明,非纤维成分与大豆膳食纤维粉碎后物理性质密切相关,这为大豆膳食纤维在食品工业中的开发与应用提供了一定的理论和依据。

### 参考文献

- [1] GUO Y T, LIU W, WU B G, et al. Modification of garlic skin dietary fiber with twin-screw extrusion process and *in vivo* evaluation of Pb binding[J]. Food chemistry, 2018, 268: 550-557.
- [2] YU G Y, BEI J, ZHAO J, et al. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. *Sativa* Hoffm.) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine com minution, and high hydrostatic pressure [J]. Food chemistry, 2018, 257: 333-340.
- [3] CHUNG C, DEGNER B, MCCLEMENTS D J. Reduced calorie emulsion-based foods: Protein microparticles and dietary fiber as fat replacers [J]. Food research international, 2014, 64: 664-676.
- [4] FOSCHIA M, PERESSINI D, SENSIDONI A, et al. The effects of dietary fibre addition on the quality of common cereal products [J]. Journal of cereal science, 2013, 58(2): 216-227.
- [5] HE B K, NOHARA K, AJAMI N J, et al. Transmissible microbial and metabolic remodeling by soluble dietary fiber improves metabolic homeostasis [J]. Scientific reports, 2015, 5: 1-12.
- [6] MUDGIL D, BARAK S. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review [J]. International journal of biological macromolecules, 2013, 61: 1-6.
- [7] 郭增旺, 马萍, 刁静静, 等. 超微型大豆皮水不溶性膳食纤维理化及吸附特性 [J]. 食品科学, 2018, 39(5): 106-112.
- [8] 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: 55-61.
- [9] 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.
- [10] YAN L, LI T, LIU C H, et al. Effects of high hydrostatic pressure and superfine grinding treatment on physicochemical/ functional properties of pear pomace and chemical composition of its soluble dietary fibre [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 107: 171-177.
- [11] 李杨, 胡淼, 孙禹凡, 等. 提取方式对大豆膳食纤维理化及功能特性的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(21): 18-24.
- [12] LI B, YANG W, NIE Y Y, et al. Effect of steam explosion on dietary fiber, polysaccharide, protein and physicochemical properties of okara [J]. Food hydrocolloids, 2019, 94: 48-56.

- [13] 朱丹, 朱立斌, 牛广财, 等. 沙果渣膳食纤维超高压处理条件优化及其微观结构表征 [J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(1): 118-126.
- [14] YANG B, WU Q J, SONG X, et al. Physicochemical properties and bioactive function of Japanese grape (*Hovenia dulcis*) pomace insoluble dietary fibre modified by ball milling and complex enzyme treatment [J]. International journal of food science and technology, 2019, 54(7): 2363-2373.
- [15] CHU J X, ZHAO H Z, LU Z X, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto* [J]. Food chemistry, 2019, 294: 79-86.
- [16] MENG X M, LIU F, XIAO Y, et al. Alterations in physicochemical and functional properties of buckwheat straw insoluble dietary fiber by alkaline hydrogen peroxide treatment [J/OL]. Food chemistry, 2019-09-30 [2020-01-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.100029>.
- [17] QI J, MASAMBA K G, SHOEMAKER C F, et al. The effect of chemical treatment on the *in vitro* hypoglycemic properties of rice bran insoluble dietary fiber [J]. Food hydrocolloids, 2016, 52: 699-706.
- [18] 杨阳, 陈雪峰, 李蕊岑. 苹果挤压改性水溶性膳食纤维硫酸酯化的修饰 [J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(1): 61-64.
- [19] ULLAH I, HU Y, YOU J, et al. Influence of okara dietary fiber with varying particle sizes on gelling properties, water state and microstructure of tofu gel [J]. Food hydrocolloids, 2019, 89: 512-522.
- [20] 王强, 李贵书, 赵欣, 等. 不同粒径番茄皮渣对香肠中脂肪替代效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(7): 69-72, 79.
- [21] ZHU F M, DU B, XU B J. Superfine grinding improves functional properties and antioxidant capacities of bran dietary fibre from Qingke (hull-less barley) grown in Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of cereal science, 2015, 65: 43-47.
- [22] ZHAO G H, ZHANG R F, DONG L H, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties [J]. Food science and technology, 2018, 87: 450-456.
- [23] DU B, ZHU F M, XU B J. Physicochemical and antioxidant properties of dietary fibers from Qingke (hull-less barley) flour as affected by ultrafine grinding [J]. Bioactive carbohydrates & dietary fibre, 2014, 4(2): 170-175.
- [24] ZHANG M Y, LIAO A M, THAKUR K, et al. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine com minution [J]. Food chemistry, 2019, 297: 1-9.
- [25] 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.
- [26] FAYAZ G, PLAZZOTTA S, CALLIGARIS S, et al. Impact of high pressure homogenization on physical properties, extraction yield and biopolymer structure of soybean okara [J/OL]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113 [2020-01-20]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108324>.
- [27] 赵贵兴, 刘丽君, 陈霞, 等. 大豆膳食纤维制备工艺及其在食品中的应用研究 [J]. 大豆科技, 2013(3): 57-60.
- [28] 牛飞飞, 孟庆然, 张连富. 不同粒径胡萝卜膳食纤维的理化性质及其对淀粉糊化性质的影响 [J]. 食品与生物技术学报, 2016, 37(11): 1213-1218.
- [29] ZHANG Z P, SONG H G, PENG Z, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods [J]. Journal of food engineering, 2012, 109(3): 406-413.
- [30] MUTTAKIN S, KIM M S, LEE D U. Tailoring physicochemical and sensorial properties of defatted soybean flour using jet-milling technology [J]. Food chemistry, 2015, 187: 106-111.
- [31] HUA X, XU S A, WANG M M, et al. Effects of high-speed homogenization and high-pressure homogenization on structure of tomato residue fibers [J]. Food chemistry, 2017, 232: 443-449.
- [32] 贾焯, 赵允, 吴平, 等. 发酵型酸性乳饮料稳定体系优化的研究 [J]. 现代食品, 2017(5): 119-122.
- [33] 周森, 何志勇, 曾茂茂, 等. 可溶性大豆多糖对于配制型酸性乳饮料稳定效应影响因素研究 [J]. 食品科技, 2019, 44(7): 308-313.
- [34] 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.
- [35] 杨慧娇. 可溶性大豆多糖的分子表征及其在酸性乳饮料中的应用 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.