利用脱皮大豆制备高膳食纤维豆浆和豆腐的研究

崔峻[1]，叶发银[1,2]，赵国华[1,2]

（1.西南大学食品科学学院，重庆 400715）（2.重庆市特色食品工程技术研究中心，重庆 400715）

摘要：传统豆制品生产过程中排出的豆渣是一种利用率低且成本低廉的膳食纤维来源。选用去皮大豆，采用保留豆渣的方式生产高膳食纤维豆浆和豆腐，研究均质条件对其理化性质和品质的影响。结果表明，高压均质豆浆（High pressure homogenized soymilk, HPHS）的总膳食纤维、脂肪和黄酮含量均高于传统过滤豆浆（Filtered soymilk, FS），蛋白质含量低于 FS；与 FS 相比，HPHS 的颗粒粒径和分布范围较大，稳定性较差，但这些指标随均质强度的提升而得到明显改善，稳定性也随之增加，而加热会增大粒径和分布范围并降低稳定性；高膳食纤维豆腐（High dietary fiber content tofu, HDFT）的硬度、弹性和咀嚼性随着均质强度提高呈先升高后下降的趋势，其中均质条件为 30 MPa+35 MPa 与普通豆腐（Normal tofu, NT）质构性能最接近，而加热会导致豆腐的质构参数降低；NT 比 HDFT 拥有更为紧密有序、孔洞更少的微观三维结构，但用 30 MPa+35 MPa 制作的 HDFT 比其它 HDFT 拥有较好的且接近 NT 的微观三维结构。

关键词：豆渣；膳食纤维；豆浆；豆腐；质构

文章篇号：1673-9078(2016)3-164-169 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.3.027

Preparation of High Fiber Content Soymilk and Tofu Using Dehusked Soybean

CUI Jun[1], YE Fa-yin[1,2], ZHAO Guo-hua[1,2]

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

(2.Food Engineering and Technology Research Centre of Chongqing, Chongqing 400715, China)

Abstract: Okara, produced using traditional production processes from soybean products, is an ideal dietary fiber source with a low cost; however, okara is not widely used by consumers. In this study, dehusked soybean was used as raw material to produce high dietary fiber content tofu (HDFT) and soymilk, and the effects of homogenization conditions on the physicochemical properties and qualities of the products were evaluated. The results showed that the total dietary, fat, and flavonoid contents in high-pressure homogenized soymilk (HPHS) were significantly higher than those in filtered soymilk (FS), whereas the protein content in HPHS was lower than that in FS. Compared with FS, the dehusked HPHS showed much larger particle size and distribution range,and lower stability. However, these indices may significantly improve with increased homogenization pressure. After thermal treatment, the particle size and distribution range of the soymilks were increased, while the stabilities were decreased. As homogenization pressure increased, the hardness, springiness, and chewiness of HDFT initially increased but then decreased. Tofu prepared under the homogenization condition of 30 MPa + 35 MPa showed a similar texture profile to that of normal tofu (NT). Scanning electron microscopy revealed the NT had a tighter and more orderly three-dimensional microstructure with fewer holes than HDFT did. Compared with that of other HDFTs, tofu prepared under 30 MPa + 35 MPa exhibited a better three-dimensional microstructure that was similar to that of NT.

Key words: okara; dietary fiber; soymilk; tofu; texture

大豆可加工成种类多样的产品，而且大多数已实现工业化生产，如豆浆、豆腐、干豆腐、豆腐乳、大豆分离蛋白等。豆浆和豆腐营养丰富，是老少咸宜的传统食物。但是在制作豆浆和豆腐等传统食品的过程中，每加工 1 kg 大豆会产生约 2.5 kg 湿豆渣（含水量为 80%）[1]。据统计，中国每年因加工大豆制品而丢弃的豆渣高达 2.8×10^9 kg，大部分都没有二次利用或妥善处理，其高含水量和易腐性带来了巨大的环境污染[2]。可是，从营养的角度来看，豆渣含有丰富的膳

收稿日期：2015-04-27

基金项目：国家高技术研究发展计划（863 计划）项目（2011AA100805-2）；重庆市科委应用开发计划项目（cstc2014yykfA110001）；重庆市特色食品工程技术研究中心能力提升项目（cstc2014pt-gc8001）

作者简介：崔峻（1990-），男，硕士生，研究方向：食品安全与质量控制

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

食纤维、蛋白质、脂肪和异黄酮等宏量或微量营养成分，尤其是豆渣膳食纤维在居民膳食结构中扮演了越来越重要的角色[3]。因此，在豆浆和豆腐生产工艺中不排出豆渣能使其营养结构更有益于人体健康。近年来，国内外对保留豆渣来生产豆制品的研究逐渐增多，Liu[4]等用超高压均质机在 100~150 MPa 处理豆浆后制备的豆腐具有与传统豆腐相似的质构特性，刘昱彤[5]等提出在酶添加量 1.2 U/mL，凝固温度 50 ℃，凝固时间 2 h，NaCl 添加量 0.0125%的加工条件下，全豆豆腐品质优良且含有比传统豆腐更丰富的营养物质。但上述均质处理要求昂贵的机械设备，能耗较高，而刘的方法较为复杂且存在一定的局限性。目前尚未见以工业生产为基础研究高膳食纤维豆制品的报道。传统豆浆和豆腐生产工艺中排出豆渣的主要是为了保证产品的质地与口感，因为豆渣口感粗糙，而且严重影响产品的质构，其中大豆种皮对产品的影响最为严重。鉴于此，本研究探讨了以脱皮大豆为原料生产高膳食纤维豆浆和豆腐的可能性，以期为无豆渣豆制品的工业化生产提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

脱皮大豆（水分含量为 8.92 g/100 g）：购自安徽七角商贸公司，于阴凉通风处保存。葡萄糖酸-δ-内酯（GDL）：购自新黄海医药食品有限公司。豆浆消泡剂（食品级；配料：二甲基硅油、硬脂酸、吐温、气相二氧化硅、去离子水）：购自重庆银龙化学试剂有限公司。

1.2 试验仪器

JP-500B 型高速粉碎机：浙江久品商贸有限公司；JJ-2 型高速匀浆机：江苏科析实验仪器有限公司；HH-2 型电热恒温水浴锅：金坛市富华仪器有限公司；A752 型可见分光光计：上海精科科学仪器厂；LMK1 型豆浆浓度计：广州铭睿电子科技有限公司；Zetasizer Nano ZS90 型动态散射光粒度分析仪：英国马尔文仪器有限公司；ALPHA1-4LSC 型冷冻干燥机：河南兄弟仪器设备有限公司；KjeLFlex K-360 型全自动凯氏定氮仪：瑞士 BUCHI 公司；T10 型高速分散仪：德国 IKA 公司；GYB60-6S 型高压均质机：上海东华高压均质机厂；其它均为实验室常用器皿。

1.3 试验方法

1.3.1 豆浆基本成分测定

水分测定主要采用常压干燥法（GB 5009.3-2010）；粗蛋白测定主要采用凯氏定氮法（GB 5009.5-2010）；粗脂肪测定采用索氏提取法（GB/T 14772-2008）；灰分的测定采用 550 ℃灼烧法（GB 5009.4-2010）。不溶性膳食纤维（IDF）和水溶性膳食纤维（SDF）的测定采用酶-重量法（AOAC 911.43）。

1.3.2 豆浆中总酚和总黄酮的测定

总酚测定采用福林-酚法，其吸光值与用没食子酸标准曲线作比对，查得相应于没食子酸当量（GAE）的总酚浓度。没食子酸标曲回归方程: A= 0.0915 C + 0.0183, r^2= 0.9994 (A 为吸光度，C 为浓度 mg GAE /g)。

总黄酮测定采用紫外可见分光光度计法，将吸光值与儿茶素标准曲线作比对，查得相应于儿茶素当量（CAE）的总黄酮含量。儿茶素标曲回归方程：A=0.0212C-0.013，r^2=0.9996（A 为吸光度，C 为浓度 mg CAE /g）

1.3.3 传统过滤豆浆的制备

将 120 g 脱皮大豆浸泡在 600 mL 蒸馏水中（质量体积比=1:5），4 ℃下放置 12 h。将泡好的大豆滤出并自然晾干至没有水珠滴下，用 480 mL 蒸馏水在匀浆机中打浆 2 min 后加入 0.21 g 消泡剂（添加量为豆浆体积的 0.03%（m/V）；添加前用蒸馏水稀释 10 倍）。用双层纱布过滤浆液，得到约 500 mL 新鲜过滤豆浆（Filtered soymilk, FS）（水分含量在 90%左右）和 200 g 左右的新鲜豆渣。取 5 mL 豆浆样品加入 10 mL 的试管中，然后在沸水浴中加热 5 min 即得熟豆浆，冷却至室温后放置待测。

1.3.4 高压均质豆浆的制备

将脱皮大豆粉碎至过 100 目筛网。取 70 g 粉碎好的大豆粉加入到 430 mL 蒸馏水（含 0.14 g 消泡剂）中用高速分散仪混匀（4000 r/min, 1 min）得到混合均匀的豆粉悬液。在制备高压均质豆浆（High pressure homogenized soymilk, HPHS）时，为了进一步研究均质条件对豆浆和豆腐理化性质的影响，采用四种不同的均质压力组合对四份豆粉悬液分别进行处理，并编号为 HPHS1（30 MPa+30 MPa）、HPHS2（30 MPa+35 MPa）、HPHS3（30 MPa+40 MPa）和 HPHS4（35 MPa+40 MPa），以上样品每次压力处理 2 min。均质后用蒸馏水调整其水分含量与过滤豆浆一致。取 5 mL 均质后的生豆浆样品加入 10 mL 试管沸水浴 5 min 即得均质熟豆浆，冷却至室温后放置待测。

1.3.5 普通豆腐和高膳食纤维豆腐的制备

取新鲜的 FS 和 HPHS 各 100 mL 倒入 100 mL 的高型烧杯（直径 4.5 cm），沸水浴加热 5 min 并不时搅拌。待豆浆自然冷却至室温，加入 3.5 mL GDL（GDL

按照豆浆体积 0.35%添加，10 倍蒸馏水稀释）溶液后，烧杯盖膜转移至 85 ℃水浴箱保温 30 min。豆浆形成豆乳凝胶后放置室温冷却，然后转入 4 ℃冰箱过夜定型，最终形成普通豆腐（Normal tofu, NT）和高膳食纤维豆腐（High dietary fiber tofu, HDFT）。将新鲜制作的豆腐从冰箱中取出，沸水浴加热 10 min 即得熟豆腐。

1.3.6 豆浆粒度、多分散系数和稳定性的测定

取适量豆浆样品稀释 500 倍后，用激光粒度仪进行分析，设定折射率为 1.33，平衡时间为 2 min，在室温下测定其粒度及多分散系数（PDI）。取适量豆浆用蒸馏水稀释 100 倍并漩涡振荡 30 s，然后立即在 750 nm 下测定分别测定原豆浆（A_1）和离心后豆浆稀释液（A_2）的吸光度。豆浆的稳定系数（S）采用以下公式进行计算：$S=A_2/A_1$。

1.3.7 豆腐的质构分析

质构分析（Texture Profile Analysis, TPA）前，先将豆腐从烧杯中小心取出切成高度为 80 mm，直径为 45 mm 的圆柱体，平衡至室温。然后将豆腐样品放置在质构仪的载物台上，调整位置使其样品中心对准探头的中心，所选探头为 TA-10（直径为 12.7 mm 的圆柱体探头）。测试条件为：穿刺距离：20 mm；触发力：5 g；测试速度：1 mm/s。测试结束后选取硬度、弹性、内聚性和咀嚼性对豆腐质构性能进行评价。

1.3.8 豆腐的表观形态鉴定

将豆腐小心从烧杯中移出，切成直径为 45 mm，高为 40 mm 的圆柱体，放置在载物台上，用数码相机进行拍照后进行分析。

1.3.9 豆腐的微观结构鉴定

豆腐的微观结构采用扫描电镜（SEM）进行鉴定，参照 Onodera 等人[6]的方法。将豆腐取出平衡至室温，切取 2 mm 的豆腐薄片浸泡在 1%的戊二醛溶液（v/v）中，常温下保持 1 h 以便固定住蛋白质凝胶结构。取蒸馏水小心冲洗后，用液氮快速冷冻，然后进行冻干。将冻干后的样品喷金（厚度 10 nm）后用扫描电镜进行观察拍照，电压 3 kV，放大倍数为 500×。

1.4 数据处理

所有实验进行三次重复测定，测定结果以平均数±标准差（$\bar{X} \pm S$）表示，显著性差异用多重比较法中的标记字母法表示，用 SPSS19.0 软件进行数据处理，并在 $\alpha = 0.05$ 显著水平上进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 高压均质对豆浆中基本营养成分和酚类化合物含量的影响

表 1 高压均质豆浆中基本营养成分和酚类化合物的含量（干重）

Table 1 Nutritional content and phenolic content of high-pressure homogenized soymilk (dry matter)

编号	水分/ (g/100 g)	蛋白质/ (g/100 g)	脂肪/ (g/100 g)	TDF/ (g/100 g)	IDF/ (g/100 g)	SDF/ (g/100 g)	总酚/ (mg GAE/g)	黄酮/ (mg CAE/g)
FS	90.73±0.53^{c}	49.83±1.21^{c}	8.21±0.61^{d}	6.69±0.48^{d}	2.16±0.32^{d}	4.52±0.35^{c}	2.92±0.12^{c}	0.22±0.02^{g}
HPHS1	90.10±0.85^{c}	45.17±0.25^{d}	11.48±1.28^{c}	18.53±0.62^{c}	14.58±0.71^{c}	3.95±0.27^{c}	2.54±0.16^{d}	0.28±0.01^{f}
HPHS2	89.67±0.92^{c}	45.49±0.39^{d}	11.66±0.90^{c}	18.88±0.66^{c}	14.69±0.52^{c}	4.19±0.18^{c}	2.24±0.04^{e}	0.31±0.01^{e}
HPHS3	90.02±1.02^{c}	45.36±0.56^{d}	10.90±1.32^{c}	19.12±0.48^{c}	14.71±0.78^{c}	4.41±0.34^{c}	2.13±0.02^{ef}	0.34±0.01^{d}
HPHS4	89.59±1.49^{c}	45.34±0.43^{d}	10.93±1.86^{c}	19.09±0.67^{c}	14.59±1.02^{c}	4.50±0.21^{c}	2.03±0.12^{f}	0.36±0.01^{c}

注：FS 代表用传统方法制作的过滤豆浆（Filtered Soymilk），HPHS1、HPHS2、HPHS3、HPHS4 代表用不同高压均质参数处理后的 4 种豆浆，其压力组合分别为 30 MPa+30 MPa、30 MPa+35 MPa、30 MPa+40 MPa 和 35 MPa+40 MPa。表中同列不同小写字母（a~d）代表不同均质条件制备的豆浆基本营养成分和酚类化合物的差异显著，$p < 0.05$。

表 1 显示，不同均质条件制作的豆浆蛋白质含量没有明显的差异。但是与 FS 相比，四种 HPHS 的蛋白质偏低，原因在于其制作方法保留了豆渣，而豆渣中的蛋白质含量（25.4~28.6 g/100 g）[2,3]低于 FS 中蛋白质的（49.83 g/100 g）的含量。HPHS 的脂肪含量没有明显的差异，四种均质参数的差别同样不足以改变豆浆中脂肪含量。但是与 FS 相比，HPHS 的脂肪含量有显著增加，其原因可能在保留豆渣的情况下，豆渣中脂肪也进入豆浆中，而豆渣中脂肪的含量（9.1~10.9 g/100 g）[3]高于 FS 的含量（8.21 g/100 g），所以导致 HPHS 的脂肪含量高于 FS。表 1 显示，FS 中的 TDF 含量明显低于 HPHS，均质参数的差异也没有改变 HPHS 中的 TDF 的含量。同样的趋势也可以从 IDF 的含量变化看到。虽有报道指出通过不间断的高压可以将部分 IDF 转化成 SDF，从而显著提升豆渣中 SDF 的含量（从 2.33 g/100 g 提高到 7.08 g/100 g）[7]。但是本次试验的均质参数并没有改变 HPHS 中 SDF，原因可能是均质的压力还不足以极大细化豆渣中的 IDF 使

其转换成 SDF。

表 1 显示，FS 中的总酚含量显著高于 HPHS。有研究表明[8]在加工 FS 时，大多数的酚类化合物在过滤过程中都会随之进入豆浆，而不会截留在豆渣里。因此在干物质含量相同的情况下，豆渣的保留会降低整个 HPHS 体系的总酚含量。此外对于 HPHS 来说，当第二次均质压力增加到 40 MPa，豆浆的总酚含量会降低。这可能是由于高压均质的物理作用致使一部分酚类化合物发生降解[9]。表 1 显示，FS 的黄酮含量最低（0.22 mg CAE/100 g），HPHS4 的含量最高。有研究[8]指出浸泡过后的大豆其黄酮含量会比未浸泡的大豆有所降低，而本实验中 FS 由于多了一道泡豆工序，这可能是其黄酮含量比 HPHS 低的原因。对于 HPHS 来说，当均质压力提高后，豆浆中的黄酮含量也随之升高，与 Velazquez-Estrada 的报道一致[10]。

2.2 高压均质及温度对豆浆的 PDI、粒径和稳定性的影响

表 2 高压均质豆浆的粒径（Z-average）、粒径分散指数（PDI）和稳定性

Table 2 Particle size (expressed as Z-average), particle distribution index (PDI) and stability of high pressure homogenized soymilk

样品	粒径/nm		PDI		稳定性	
	生豆浆	熟豆浆	生豆浆	熟豆浆	生豆浆	熟豆浆
FS	369.33±12.54^{Bd}	392.53±8.12^{Ab}	0.21±0.00^{Bd}	0.23±0.00^{Ad}	0.95±0.01^{Ad}	0.89±0.01^{Ba}
HPHS1	505.43±12.27^{Aa}	512.30±8.61^{Aa}	0.35±0.01^{Aa}	0.37±0.01^{Aa}	0.84±0.10^{Aa}	0.78±0.01^{Bc}
HPHS2	407.77±6.74^{Bb}	418.40±8.01^{Ab}	0.25±0.00^{Bb}	0.28±0.00^{Ab}	0.89±0.01^{Ab}	0.86±0.01^{Bb}
HPHS3	387.26±5.65^{Bc}	405.09±7.22^{Ab}	0.23±0.00^{Bc}	0.25±0.00^{Ad}	0.93±0.00^{Ac}	0.85±0.01^{Bb}
HPHS4	367.5±9.42^{Bcd}	402.86±12.50^{Ab}	0.20±0.01^{Bd}	0.27±0.00^{Ac}	0.96±0.00^{Ad}	0.90±0.03^{Ba}

注：表中同列不同小写字母（a~d）代表不同均质条件制备的豆浆粒度、PDI和稳定性之间的差异显著，$p < 0.05$。同一指标下同行的大写字母（A~B）代表豆浆加热前后粒度、PDI和稳定性之间的差异显著，$p < 0.05$。

表 2 显示，FS 的颗粒粒径和 PDI 要明显小于 HPHS1，HPHS2，HPHS3。而随着均质压力的提升，HPHS1 到 HPHS3 的颗粒粒径和 PDI 有明显的降低，表明其中的不溶性颗粒在均质机的物理作用下其颗粒尺寸得到了有效的降低，尺寸分布范围变小，这和 Cruz 等[11]和 Nik 等[12]的研究一致。此外，当均质压力组合为 35 MPa 和 40 MPa 时，HPHS4 的颗粒粒径和 PDI 与 FS 没有显著差异。加热处理后，除了 HPHS1，其余豆浆（包括 FS）的颗粒粒径和 PDI 都有增加的趋势。这种现象可能由于一些颗粒（蛋白质、脂质等）在加热过程中发生了聚集从而导致整体粒径增大，并导致粒径范围也有所增加。Guo 等[13]的研究表明大豆球蛋白和 β-伴大豆球蛋白的粒径会随着温度的升高而增加。而对于 HPHS1，推测其粒径和 PDI 基本保持不变的原因在于蛋白质发生聚集的条件可能与特定尺寸的颗粒大小有关，具体原因还有待进一步研究。

豆浆的稳定系数越高则表明豆浆越稳定，表 2 中 FS 由于过滤掉了很多不溶性的大颗粒使其均匀度更高，因此其稳定性要明显高于 HPHS1、HPHS2、HPHS3。但是当均质强度提高到 35 MPa 和 40 MPa 时，HPHS4 的稳定性和 FS 无显著差异。加热处理后，FS 和 HPHS 的稳定性都会有 4%~8%的降低，这可能是由于豆浆中的颗粒发生聚集而增大了豆浆颗粒粒径的范围，进而产生分层现象[14]。

2.3 高压均质对豆腐质构性能的影响

表 3 高膳食纤维豆腐的质构特性

Table 3 Texture profile analysis (TPA) of tofu made from high pressure homogenized soymilk (HPHS) and filtered soymilk (FS)

样品	硬度/g		弹性		内聚性		咀嚼性/g	
	生豆腐	熟豆腐	生豆腐	熟豆腐	生豆腐	熟豆腐	生豆腐	熟豆腐
NT	94.33±2.51^{Aa}	51.67±2.52^{Bc}	0.97±0.01^{Aa}	0.86±0.01^{Bbc}	0.40±0.01^{Ab}	0.39±0.02^{Aa}	34.67±1.58^{Ac}	25.69±2.28^{Ba}
HDFT1	74.33±1.57^{Ac}	57.00±3.00^{Bb}	0.92±0.02^{Ab}	0.89±0.01^{Bb}	0.47±0.01^{Aa}	0.38±0.01^{Ba}	37.33±0.58^{Ac}	18.46±2.44^{Bb}
HDFT2	98.67±2.52^{Aa}	67.33±2.51^{Ba}	0.97±0.02^{Aa}	0.92±0.01^{Ba}	0.48±0.03^{Aa}	0.36±0.02^{Bab}	47.00±0.00^{Aa}	23.99±0.17^{Ba}
HDFT3	91.67±2.05^{Ab}	59.67±1.52^{Bb}	0.94±0.02^{Ab}	0.88±0.01^{Bb}	0.50±0.04^{Aa}	0.33±0.02^{Bb}	43.00±0.33^{Ab}	19.50±1.51^{Bb}
HDFT4	69.00±1.00^{Ad}	49.67±3.52^{Bc}	0.89±0.02^{Ac}	0.84±0.03^{Bc}	0.48±0.05^{Aa}	0.39±0.02^{Ba}	32.00±1.00^{Ad}	19.17±0.86^{Bb}

注：NT 代表用传统过滤豆浆（Filtered Soymilk）制作的普通豆腐（Normal Tofu），HDFT1、HDFT2、HDFT3、HDFT4 代表用

不同高压均质参数处理豆浆后制得的高膳食纤维豆腐（High Dietary Fiber Tofu），其压力组合分别为 30 MPa+30 MPa、30 MPa+35 MPa、30 MPa+40 MPa 和 35 MPa+40 MPa。表中同列不同小写字母（a-d）代表不同均质条件制备的高膳食纤维豆腐质构特性之间（硬度、弹性、内聚性和咀嚼性）的差异显著，$P < 0.05$。同一指标下同行的大写字母（A-B）代表豆腐在加热前后质构特性之间的差异显著，$p < 0.05$。

表 3 中显示 HDFT2 的硬度与 NT 没有显著差异，但是都明显高于其他均质参数下制作的豆腐。此外，不断增加的均质压力能显著改变 HDFT 的硬度。Liu 等[4]认为豆渣中的大颗粒物质可能会阻碍凝固过程中蛋白质链的形成从而降低豆腐的硬度，但高压均质技术的运用能够降低不溶性颗粒的大小使其能够进入蛋白质形成的三维网状凝胶结构，从而在一定程度上抵消这种不良的影响。同时表 3 显示 HDFT2 的弹性显著高于其他均质条件下的豆腐，与和 NT 相似。一方面，豆渣中 IDF 具有的持水力和韧性可以对 HDFT 的弹性起到积极作用。同时，研究何种尺寸的豆渣颗粒能与大豆蛋白凝胶网络之间形成稳定结构显得非常重要。而在本试验中，HDFT2 的硬度最大，则有理由相信采用 30 MPa 和 35 MPa 制得豆浆的颗粒尺寸能够使 HDFT 形成硬度较大的凝胶结构。不同均质条件对 HDFT 的内聚性没有明显的影响，而 HDFT 的内聚性显著高于 NT。咀嚼性是指将一个固体或半固体的食品咀嚼到能够吞咽时所做的功，表 3 显示 HPHT2 的咀嚼性最高，与 NT 接近。而且当第一次均质压力为 30 MPa 时，提高第二次的均质压力到 35 MPa 能够显著增加豆腐的咀嚼性。

热处理是人们在食用豆腐时最常用最简单的加工方法，研究热处理对豆腐质构性能的影响具有重要的意义。对于 NT 和 HDFT 来说，热处理都会降低其硬度、弹性、咀嚼性。分析可能原因在于加热会使蛋白质内部一些基团的震动频率加快，幅度加大，导致很多稳定蛋白质结构的分子键断裂，从而使凝胶结构松散，强度降低。

2.4 豆腐的表观形态

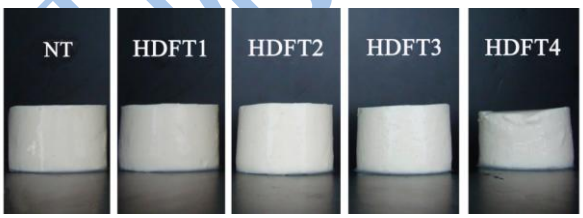


图 1 豆腐的表观形态

Fig.1 Appearance of tofu

由图 1 可知，普通豆腐和高膳食纤维豆腐在外观形态上存在差异。NT 质地顺滑细腻，HDFT2 色泽鲜亮，质地细腻，无浆水渗出，几乎与 NT 无异；HDFT1 与 HDFT3 表面略显粗糙，而 HDFT4 表面特别粗糙且质地松散，这与表 3 的质构数据吻合。图 1 结果表明，在一定的加工工艺和均质条件下，保留豆渣制作出来的豆腐也可以拥有和普通方法制作出来的豆腐相近的外观形态。

2.5 高压均质对豆腐内部微观结构的影响

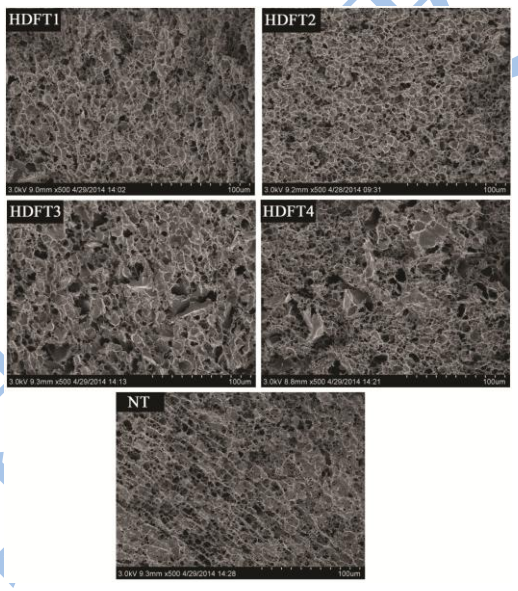


图 2 豆腐的扫描电镜照片（放大 500 倍）

Fig.2 Scanning electron microscope images of tofu (500×)

豆腐微观结构如图 2 所示。可以看到 NT 和 HDFT 内部均呈蜂窝状的三维网状结构。NT 的网络稠密，小孔均匀一致；而 HDFT 的网络结构大多不规则、不连续、孔大且不均匀，这可能是由于一些不溶性膳食纤维颗粒镶嵌在网络结构中并由此对豆腐结构造成不良的影响。在高膳食纤维豆腐样品中，HDFT4 网络结构中孔洞最多，连续性最差，这种结构特征直接影响了其外观形态（图 1），即 HDFT4 表面粗糙且结构松散；相比之下，HDFT2 的孔结构最为均一，且无较大的孔洞，其整体结构与 NT 最接近。

3 结论

通过比较不同均质条件下豆浆的理化性质发现：高压均质豆浆的总膳食纤维、脂肪以及黄酮含量高于普通过滤豆浆，不同均质压力豆浆的上述成分差异不显著。与普通过滤豆浆相比，高压均质豆浆的均匀度和分散度较差，颗粒粒径和 PDI 较大，但这些指标随着均质强度的提升而得到明显改善，稳定性也随之提高。加热后豆浆的颗粒粒径明显增大，稳定性降低。

随着均质强度的提高，高膳食纤维豆腐的硬度、弹性和咀嚼性呈先升高后下降的趋势，且内聚性高于普通豆腐，均质条件为 30 MPa+35 MPa 的产品和普通豆腐在质构上最为接近。普通豆腐的三维空间结构比高膳食纤维豆腐更为紧密有序、孔洞更少。在 30 MPa+35 MPa 条件下均质处理的产品其内部微观结构与普通豆腐最为接近。

参考文献

[1] Li H Q, Long D Q, Zhao G H, et al. A novel in-situ enhanced blasting extrusion technique - Extrudate analysis and optimization of processing conditions with okara [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 80-88

[2] Li B, Qiao M Y, Lu F. Composition, nutrition, and utilization of okara (soybean residue) [J]. Food Reviews International, 2012, 28(3): 231-252

[3] Devi M K A, Gondi M, Sakthivelu G, et al. Functional attributes of soybean seeds and products, with reference to isoflavone content and antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2009, 114(3), 771-776

[4] Liu H H, Chien J T, Kuo M I. Ultra high pressure homogenized soy flour for tofu making [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(2): 278-285

[5] 刘昱彤,钱和.不同加工条件对全豆豆腐凝胶强度的影响[J].食品工业科技,2013,34(5):126-129
LIU Yu-tong, QIAN He. Effect of different processing conditions on gel strength of whole soybean curd [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 126-129

[6] Onodera Y, Ono T, Nakasato K, et al. Homogeneity and microstructure of tofu depends on 11S/7S globulin ratio in soymilk and coagulant concentration [J]. Food Science and Technology Research, 2009, 15(3): 265-274

[7] 刘成梅,刘伟,万杰,等.瞬时高压作用对膳食纤维可溶性的影响[J].食品科学,2005,26(8):110-112
LIU Cheng-mei, LIU Wei, WAN Wei, et al. Influence of instantaneous high pressure treatment on the solubility of dietary fiber [J]. Food Science, 2005, 26(8): 110-112

[8] Xu B J, Chang S K C. Isoflavones, flavan-3-ols, phenolic Acids, total phenolic profiles, and antioxidant capacities of soy milk as affected by ultrahigh-temperature and traditional processing methods [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(11): 4706-4717

[9] Yu Y S, Xu Y J, Wu J J, et al. Effect of ultra-high pressure homogenization processing on phenolic compounds, antioxidant capacity and anti-glucosidase of mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 114-120

[10] Velazquez-Estrada R M, Hernandez-Herrero M M, Rufer C E, et al. Influence of ultra-high pressure homogenization processing on bioactive compounds and antioxidant activity of orange juice [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 18: 89-94

[11] Cruz N, Capellas M, Hernandez M, et al. Ultra high pressure homogenization of soymilk: Microbiological, physicochemical and microstructural characteristics [J]. Food Research International, 2007, 40(6): 725-732

[12] Nik A M, Tosh S, Poysa V, et al. Physicochemical characterization of soymilk after step-wise centrifugation [J]. Food Research International, 2008, 41(3): 286-294

[13] Guo J, Yang X Q, He X T, et al. Limited aggregation behavior of β-conglycinin and its terminating effect on glycinin aggregation during heating at pH 7.0 [J]. Agriculture and Food Chemistry, 2012, 60: 3782-3791

[14] Tay S L, Xu G Q, Perera C O. Aggregation profile of 11S, 7S and 2S coagulated with GDL [J]. Food Chemistry, 2005, 91(3): 457-46