

全豆中的膳食纤维蒸汽爆破工艺优化及其理化特性

邓坤^{1,2}, 张名位², 陈碧聪³, 张瑞芬², 池建伟², 黄菲², 贾栩超², 董丽红², 马勤², 邓梅², 赵东^{2*}
(1. 广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524088)(2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)
(3. 河源市食品检验所, 广东河源 517000)

摘要: 为探究蒸汽爆破加工方法对全豆中膳食纤维(DF)的影响, 该研究以全豆为研究对象, 采用蒸汽爆破单因素和响应面优化得到最佳改性条件, 并对比改性前后全豆 DF 结构和理化特性差异。结果表明: 最佳工艺条件为汽爆压力 1.0 MPa, 保压时间 120 s, 水分添加量 100%, 该条件可溶膳食纤维(SDF)得率由初始的 3.22% 增加到 9.51%。处理后的全豆不可溶膳食纤维(IDF)和 SDF 呈现出更为疏松多孔的微观结构, 且 IDF 的持水力、持油力和溶胀力分别为 10.88 g/g、7.16 g/g 和 9.04 mL/g; 汽爆前后 IDF 和 SDF 的傅里叶红外光谱结果未发现新的振动峰, 仅在部分波长的峰强度存在差异; X 射线衍射结果表明, 改性后的 IDF 和 SDF 的结晶度为 20.79%, 比改性前分别减小了 14.49% 和 18.18%。由此可见, 蒸汽爆破加工方法能够显著的降解全豆中的 IDF 含量, 并显著提升 IDF 的理化特性, 该研究为全豆体系的健康食品研发提供了理论依据。

关键词: 全豆; 蒸汽爆破; 可溶膳食纤维; 不溶膳食纤维; 理化特性

文章编号: 1673-9078(2025)06-206-215

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0309

Optimization of Steam Explosion Processing for Dietary Fiber from Whole Soybeans and Its Physicochemical Properties

DENG Kun^{1,2}, ZHANG Mingwei², CHEN Bicon³, ZHANG Ruifen², CHI Jianwei², HUANG Fei², JIA Xuchao²,
DONG Lihong², MA Qin², DENG Mei², ZHAO Dong^{2*}

(1. College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)
(2. Sericulture& Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)(3. Heyuan Food Inspection Institute, Heyuan 517000, China)

Abstract: The effects of steam explosion processing on dietary fiber (DF) in whole soybeans were investigated. Single-factor steam explosion experiments and response surface methodology were used to optimize modification conditions, and the differences in the structural and physicochemical properties of whole soybean DF were compared before and after modification. The results showed that the optimal process conditions were steam explosion pressure of 1.0 MPa, a holding

引文格式:

邓坤,张名位,陈碧聪,等.全豆中的膳食纤维蒸汽爆破工艺优化及其理化特性[J].现代食品科技,2025,41(6):206-215.

DENG Kun, ZHANG Mingwei, CHEN Bicon, et al. Optimization of steam explosion processing for dietary fiber from whole soybeans and its physicochemical properties [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 206-215.

收稿日期: 2024-03-14

基金项目: 广东特支计划项目(2019BT02N112); 广东省农业科学院农业优势产业学科团队建设项目(202108TD); 广州市重点研发计划项目(202206010071); 深圳市科技计划项目(KCXFZ20230731100704006)

作者简介: 邓坤(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 794057468@qq.com

通讯作者: 赵东(1983-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 功能食品, E-mail: dzhao@gdaas.cn

time of 120 s, and a moisture addition of 100%. Under these conditions, the soluble dietary fiber (SDF) yield increased from 3.22% to 9.51%. The processed insoluble dietary fiber (IDF) and SDF exhibited a looser, more porous microstructure, with water-holding capacity, oil-holding capacity, and swelling capacity of 10.88 g/g, 7.16 g/g, and 9.04 mL/g, respectively. No new vibration peaks were found in the Fourier transform infrared spectra of IDF and SDF before and after the steam explosion. However, the intensity of some peaks varied. X-ray diffraction results suggested that the crystallinity of modified IDF and SDF was 20.79%, which was 14.49% and 18.18% less than that before modification, respectively. In conclusion, steam explosion processing could significantly reduce the IDF content in whole soybeans and improve its physicochemical properties considerably. These findings provide a theoretical basis for developing whole soybean-based functional foods.

Key words: whole soybeans; steam explosion; soluble dietary fiber; insoluble dietary fiber; physicochemical properties

大豆 (*Glycine max* (L) Merr.) 是豆科的一年生草本植物, 是我国重要粮食作物, 不仅含有约 36% 蛋白质、19% 脂肪、30% 碳水化合物、5% 粗纤维以及 5% 矿物质^[1], 而且还含有多种生理活性成分, 包括大豆异黄酮、活性肽、大豆皂苷及植物甾醇等, 这些物质在维持人体健康方面发挥着重要作用^[2]。但大豆可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 占比较低, 仅为总膳食纤维 (Total Dietary Fibers, TDF) 的 11.9%, 高含量的不溶性膳食纤维 (Insoluble Dietary Fiber, IDF) 会影响食物口感, 导致产品易出现絮沉, 所以目前大豆在全谷物食品中利用率较低。大豆在加工过程中会产生大量未能被利用的副产物, 其中主要是 IDF^[3]。因此, 适当降低 IDF 含量有助于提高全豆食品可接受程度。然而, 优质膳食纤维 DF (Dietary Fiber, DF) 又需满足 SDF 占到 TDF 含量的 30%~50%^[4]。为此, 通过加工方法优化 SDF 和 IDF 比例是改善全豆制品口感品质和提高大豆产品利用率的有效手段。

DF 在调节人体健康中发挥了重要作用, 其持水性和吸水膨胀性能增加粪便的体积和湿润度, 从而起到预防和减轻便秘作用^[5]; Hu 等^[6]研究表明 SDF 在调节代谢功能中也发挥着重要的作用, 可以提高葡萄糖耐量, 从而有助于控制餐后血糖水平; SDF 还可以结合胆固醇使排出体外, 从而降低血液中的甘油三酯和胆固醇水平^[7]。另外, 有研究发现 SDF 比 IDF 具有更强的降血脂活性、持水能力和粘度, 能通过吸附作用可以降低人体中的有毒重金属元素^[8]。因此, 提高 SDF 在 DF 中的比例能够更好发挥全豆的营养健康作用。

常见 DF 改性方法主要包括利用微生物发酵降解或酶解进行生物改性, 或者采用化学试剂如过氧化氢、酸和碱等进行处理、通过挤压、超微粉碎、蒸汽爆破 (Steam Explosion, SE) 等物理改性法, 以及上

述类型的方法联用, 如超微粉碎—酶解、挤压—酶解等^[9,10]。蒸汽爆破技术原理主要是物料在高温、高压状态瞬间骤降到常压, 原料内部的气体突然膨胀发生喷爆, 产生爆破效果, 达到纤维组织的破碎、体积增大、疏松多孔、有利于内含物暴露溶出, 从而提高可溶膳食纤维含量^[11]。Shen 等^[12]的研究发现, 蒸汽爆破能够显著提高黑豆壳中的 SDF 含量, 含量从 10.20% 提高到 17.49%。相较众多方法, 物理改性有着成本低、环保等优点。因此, 本研究目的是为了验证蒸汽爆破加工方法能否提高全豆中 SDF 比例, 并对其进行加工工艺优化, 并改善其膳食纤维的理化特性, 为此提高全豆的营养价值和提升大豆附加值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆样品为黑龙江非转基因大豆, 购于黑龙江仓天然食品有限责任公司; 蛋白酶 (Alcalase 2.4 L, 2.4 AU/mL)、糖化酶 (AMG 300 L, 300 AGU/mL)、液化酶 (Termamyl 120 L, 120 KNU-S/mL), 购于诺维信 (中国) 有限公司; 氢氧化钠、 $\rho=95\%$ 乙醇、石油醚、无水乙醇、盐酸, 国药化学试剂有限公司; 其他试剂均为市售分析级。

QBS-80 蒸汽爆破机, 鹤壁正道生物能源有限公司; DHG-9625A 鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; FW-300 高速万能粉碎机, 常州市国旺仪器制造有限公司; HH-3 数显恒温水浴锅, 常州荣华仪器制造有限公司; CLT55 低速台式冷冻离心机, 湖南湘仪仪器开发有限公司; SIN-8008 PH 计, 杭州联测自动技术有限公司; SB-800-DTD 超声波清洗器, 宁波新芝生物科技股份有限公司; N-1300-WB 旋转蒸发仪, 东京理化器械株式会社; HTY-800g 粉碎机, 瑞安市永历制药机械有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 全豆粉的制备

筛选出完整的大豆 500 g，在 40 ℃下干燥 4 h，粉碎后过筛 60 目筛，常温干燥保存。

1.2.2 蒸汽爆破处理全豆粉

首先，将蒸汽爆破试验仪器预热 30 min，进行 3~5 次空爆以平衡仪器。然后，取 40 g 全豆粉，并添加不同比例的水。将混合物用纱布包裹后放入蒸汽爆破汽爆试验台中，设定所需的汽爆压力和保压时间进行处理。处理完成后，收集汽爆后的全豆粉，放入 45 ℃的烘箱中烘干至恒重。随后，将样品粉碎并通过 60 目筛进行筛选。最后，将处理后的样品在常温下干燥并保存。

1.2.3 酶法提取全豆粉IDF和SDF

SDF 的提取参考国标 GB 5009.88-2014。准确称取 1.00 g 不同处理后的全豆粉，加入适量的加入 0.05 mol/L MES-TRIS 缓冲液，混合均匀，加入 100 μL 热稳定 α-淀粉酶（200 U/g, pH 值 6.0, 95 ℃，30 min），在 95 ℃水浴中水解 30 min，冷却至 50 ℃后用 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 值至 7.5，加入 100 μL 碱性蛋白酶在 60 ℃下继续水解 2 h，反应结束后，用 1 mol/L HCl 溶液将水解液调节至 pH 值 4.5，加入 100 μL 葡萄糖苷酶在 60 ℃下水解 30 min，最后将进行沸水浴 10 min，使酶失活。待冷却后离心（8 000 r/min、15 min），清洗残渣 3 次，分别得到未处理全豆不溶性膳食纤维（Con-IDF）、汽爆后处理全豆不溶性膳食纤维（SE-IDF），随后将上清液旋转蒸发浓缩后，与 φ=95% 乙醇按 1:4（V/V）混合，静置 12 h，离心收集滤渣，真空冷冻干燥后沉淀物粉碎过 80 目筛，分别得到未处理全豆可溶性膳食纤维（Con-SDF）、汽爆后处理全豆可溶性膳食纤维（SE-SDF），根据公式（1）计算 SDF 得率：

$$X = \frac{M_2}{M_1} \times 100\%$$
(1)

式中：
X——可溶性膳食纤维得率，%；
M₂——SDF 质量，g；
M₁——全豆粉质量，g。

1.2.4 全豆粉基本化学成分测定

灰分含量：采用 GB 5009.4-2016 法进行测定^[13]。
蛋白质含量：采用 GB 5009.5-2016 法（第一法凯氏定氮法）进行测定^[14]。
脂肪含量：采用 GB 5009.6-2016 法进行测定^[15]。

淀粉含量：采用 GB 5009.9-2016 法（第一法酶水解法）进行测定^[16]。

膳食纤维含量：采用 GB/T 5009.88-2014 法进行测定^[17]。

1.2.5 单因素实验设计

在蒸汽爆破辅助提取全豆粉 SDF 的过程中，汽爆压力、保压时间、水添加量是主要影响因素。通过改变汽爆压力（0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 MPa）、保压时间（30、60、90、120、150、180 s）和水添加量（40、60、80、100、120、140%，m/V），探究各因素对大豆可溶性膳食纤维得率的影响。在进行了单因素结果分析后，进一步采用了响应面法对提取过程进行优化。基于 Box-Behnken 中心组合原理，以汽爆压力（A）、保压时间（B）和水添加量（C）为自变量，以可溶性膳食纤维得率为响应值进行了三因素三水平响应面分析实验，具体实验设计详见表 1。为了验证实验设计的可靠性，在最优条件下进行了三次验证实验。这些验证实验的结果可以与模型预测值进行比较，以评估模型的准确性和实验设计的可靠性。

表 1 因素水平编码表

Table 1 Factor level coding table			
编码水平	A 汽爆压力/MPa	B 保压时间/s	C 水添加量/%
-1	0.8	90	80
0	1.0	120	100
1	1.2	150	120

1.2.6 蒸汽爆破前后全豆粉DF微观结构分析

利用 ZEISS 电子显微镜对全豆粉中 IDF 和 SDF 的微观结构进行了观察。首先，使用胶带将全豆粉中的 SDF 和 IDF 固定在导电胶带上，然后将其置于真空溅射镀膜机中进行金镀处理。接着，将样品放置在扫描电子显微镜下，通过设置不同的扫描倍数（100× 和 1 000×），观察并拍摄了样品的微观结构。

1.2.7 蒸汽爆破前后全豆粉DF的红外光谱分析

称取不同处理全豆粉的 IDF 和 SDF 样品，以 1:100（m/m）比例与干燥的溴化钾混合研磨成均匀的小圆片等待上机，观察 IDF 和 SDF 样品的官能团和化学键进行了表征^[18]，采用傅里叶红外光谱进行分析，扫描波长为 5 000~500 cm⁻¹，分辨率为 4 cm⁻¹。

1.2.8 X-射线衍射（X-ray Diffraction, XRD）分析

将 DF 样品按压平整用导电胶固定待测，使用 X-射线衍射仪，在 40 kV 电压下对 DF 样品的晶体结构进行了表征^[19]。采用铜靶测量，设置测

量参数为：管压：40 kV，管流：40 mA，测量范围： $2\theta=5^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，测量速率：12 %/s。结晶度（Degree of Crystallinity, DC, %）的计算如公式所示：

$$D=\frac{M_2}{M_1}\times 100\%$$

(2)

式中：
 D ——结晶度（DC），%；
 M_2 ——结晶区域；
 M_1 ——无定形区域。

1.2.9 蒸汽爆破前后全豆粉IDF的理化特性分析

1.2.9.1 持水力（WHC）测定

根据 Zheng 等^[20]方法稍作修改，对不同处理的全豆粉中的不溶性膳食纤维（IDF）的持水力进行了测定。首先，取 0.25 g 全豆粉 IDF 样品与 25 mL 去离子水进行充分混合，然后在室温下静置 18 h，并以 10 000 r/min 离心 15 min。接着，称量弃去上清后沉淀的质量。

$$B_1=\frac{M_1-M_0}{M_0}$$

(3)

式中：
 B_1 ——水的质量保留量（持水力，WHC），以每克样品计，g/g；
 M_1 ——吸水后样品的质量，g；
 M_0 ——吸水前样品的质量，g。

1.2.9.2 持油力（OHC）测定

根据 Zheng 等^[20]方法稍作修改，对不同处理的全豆粉中的不溶性膳食纤维（IDF）的持油力进行了测定。首先，取 0.25 g 全豆粉 IDF 样品与 15 mL 大豆油进行充分混合，然后在室温下静置 18 h，并以 10 000 r/min 离心 15 min。接着，将上清液丢弃，然后称量吸油后样品的质量。

$$B_2=\frac{M_1-M_0}{M_0}$$

(4)

式中：
 B_2 ——油的质量保留量（持油力，OHC），以每克样品计，g/g；
 M_1 ——吸油后样品的质量，g；
 M_0 ——吸油前样品的质量，g。

1.2.9.3 溶胀力（WSC）测定：

根据 Zheng 等^[20]方法稍作修改，对不同处理的全豆粉中的不溶性膳食纤维（IDF）的溶胀力进行了测定。首先，取 0.25 g 全豆粉 IDF 样品与 10 mL 去离子水置于刻度离心管内进行充分混合，然后在室温下静置 18 h，测量溶胀前后的体积。

$$B_3=\frac{V_1-V_2}{M}$$

(5)

式中：
 B_3 ——每克样品吸收水的容积（溶胀力，WSC），mL/g；
 V_2 ——吸水溶胀前样品容积，mL；
 V_1 ——吸水溶胀后样品容积，mL；
 M ——吸水溶胀前样品质量，g。

1.3 数据处理和分析

每组试验都进行了三次平行试验，并对试验数据进行了误差分析。试验数据使用统计学软件 SPSS18（美国 SPSS 公司）进行方差分析、相关性分析和差异显著性分析。作图使用 Origin 2023b（美国 Origin Lab 公司）软件分析，响应面数据分析则使用 Design-Expert（美国 Stat-Ease 公司）软件进行。

2 结果与讨论

2.1 全豆粉的基本化学成分变化

由表 2 可知，汽爆处理的全豆粉 DF 含量提高了 0.52%，全豆粉经蒸汽爆破处理后，全豆粉颗粒状结构被破坏成小碎片，表面呈现出多孔、粗糙的形状，使得提取膳食纤维时有部分小分子糖被醇沉在可溶性膳食中，导致膳食纤维含量提高^[21]，并且由表 3 结果发现，气爆处理能够显著降低全豆粉中的 IDF 含量和增加 SDF 含量，表明气爆处理能显著促进全豆中的 IDF 降解为 SDF。另外，处理后的全豆灰分含量显著降低，可能归因于蒸汽爆破的高温高压处理时由于前处理在 100% 水分添加量预处理体条件下导致一部分矿物流失，特别是 Mg、Ca、Mn 和 Fe 含量显著降低，导致灰分降低^[22]。

表 2 全豆的基本化学成分含量（%）

Table 2 Basic chemical composition content of whole beans (%)

成分	蛋白质	脂肪	淀粉	膳食纤维	灰分
原豆粉	34.73 ± 0.08	21.57 ± 1.91	1.62 ± 0.02	19.52 ± 0.55	5.68 ± 0.05*
蒸汽爆破豆粉	34.23 ± 0.22	21.28 ± 0.22	1.22 ± 0.57	20.04 ± 0.72*	4.80 ± 0.35

注：*：P<0.05，表中数据均为平均值 ± 标准差，均以干基计，下同。

表 3 不同加工方式DF含量 (g/100 g)			
Table 3 DF content of different processing methods			
样品	IDF	SDF	TDF
原豆粉	16.09 ± 0.51*	3.43 ± 0.34	19.52 ± 0.55
蒸汽爆破豆粉	10.59 ± 0.21	9.45 ± 0.34*	20.04 ± 0.72*

2.2 单因素实验结果

2.2.1 汽爆压力对全豆粉的影响

汽爆压力对全豆粉 IDF 和 SDF 的结果如图 1a 所示，随着汽爆压力升高，SDF 的提取率开始缓慢增加，当压力达到 1.0 MPa 时，全豆粉 SDF 的提取率达到了最高的 8.0%。然而，随着压力继续增加，SDF 的提取率开始下降，这表明汽爆压力对全豆粉膳食纤维的改性效果产生影响。从 0.2 MPa 增加至 0.4 MPa 时，SDF 提取率的增幅较为缓慢，可能是因为此时的汽爆压力相对较小，无法显著改变全豆粉膳食纤维的组成和结构。然而，当压力超过 0.6 MPa 时，SDF 提取率的增加速度加快，这可能是因为较高的汽爆压力导致了全豆粉膳食纤维结构和组成的显著改变。但是，当压力超过 1.0 MPa 后，SDF 提取率开始逐渐下降。这可能是因为过高的压力导致了大豆中的木质素、纤维素和部分可溶性膳食纤维的降解，使其转化为更小的分子，无法被醇沉淀所提取^[23]。

2.2.2 保压时间对全豆粉蒸汽爆破的影响

保压时间对全豆粉 IDF 和 SDF 的影响如图 1b 所示，时间在 30~120 s 时，SDF 含量随着保压时间增加而增加，120 s 时其含量达到峰值为 9.10%，随着保压时间的延长，全豆粉 SDF 的提取率降低。这种现象可能是由于汽爆过程中存在加压高温和瞬时释压两个环节。随着时间的延长，实际上是增加了加压高温环节的时间，这在一定程度上促使大豆中的不溶性膳食纤维（IDF）充分降解为可溶性膳食纤维（SDF），从而导致 SDF 含量不断增加。然而，随着时间进一步延长，SDF 可能会进一步降解，导致提取率逐渐降低。一些研究结果显示，在长时间的高温、高压和弱酸条件下，部分碳水化合物可能会发生降解，生成醛类、酸类、芳香类化合物等^[24,25]，原因可能是与部分果胶发生了焦糖化反应有关，这与本文的研究结果相一致。

2.2.3 水添加量对全豆粉蒸汽爆破的影响

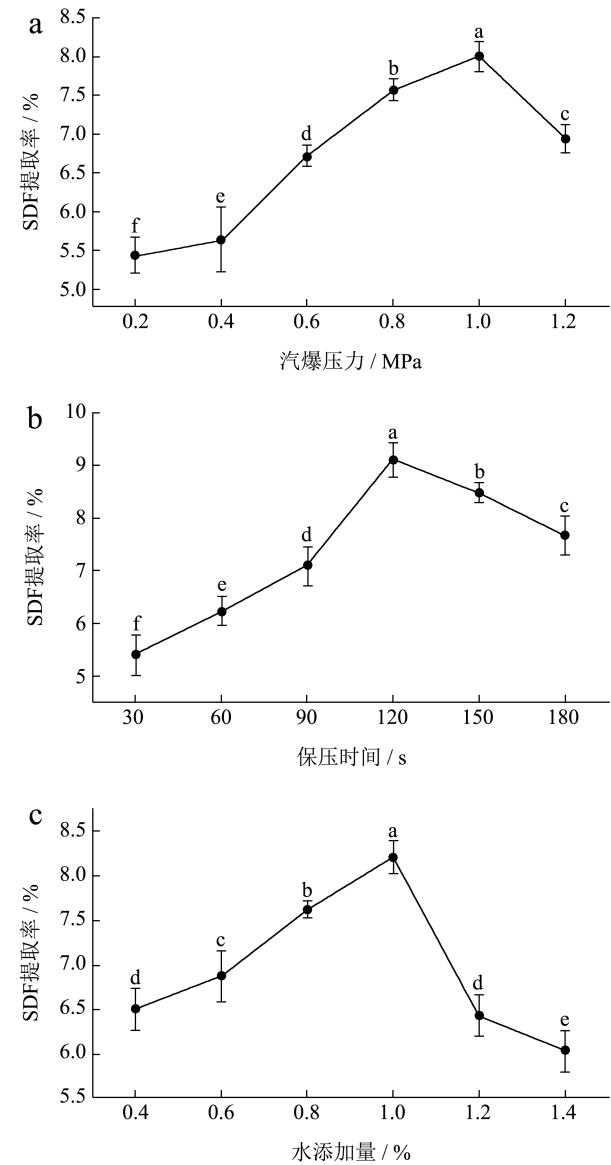


图 1 蒸汽爆破各因素对 SDF 得率的影响
Fig.1 Effect of steam blasting factors on SDF yields
注：不同字母表示样品间具有显著性差异（P < 0.05）。

水添加量对全豆粉 IDF 和 SDF 的影响如图 1c 所示，在水添加量为 40% 时，提取率较低，全豆粉容易焦炭化，膳食纤维提取率低，提高其水分含量对膳食纤维改性和防止焦炭化有着重要作用。SDF 含量随着水分添加量逐渐增加，在 100% 时，全豆粉的提取率达到峰值为 8.20%。在低含水量（<40%）条件下，全豆粉的温度在蒸汽爆破处理期间升高，导致全豆粉中水分蒸发。因此，膨胀不剧烈，爆发力小，对纤维素束和半纤维素束造成轻

微损伤，导致 SDF 提取率较低^[12]。而在较高的水添加量（>100%）和高温高压条件下，大豆种皮中的纤维素和半纤维素结构可能受到更大的破坏，同时豆粉中水分流出会带走部分 SDF，进而降低其含量，另外，在实验过程中，随着水分添加量的继续增加至饱和，全豆粉在蒸汽爆破前容易成团、成块性，导致在蒸汽爆破时蒸汽进入组织内部不充分，也可能是导致其得率降低的一个重要原因。

2.3 响应面优化实验结果与分析

通过进行 17 组独立实验并测定响应值（SDF 得率）如表 4 所示，采用了汽爆压力（因素 A）、保压时间（因素 B）、水添加量（因素 C）作为变量，以及 SDF 得率（响应值 Y）进行了多元回归分析。通过该分析，我们建立了拟合变量与响应值之间的二次多项式模型，得到了如下所示的二阶回归方程：

$$Y=9.47-0.396\ 2A+0.173\ 8B+0.210\ 0C-0.920\ 0AB+0.282\ 5AC-1.04BC-2.01A^2-0.949\ 4B^2-0.687\ 0C^2$$

表 4 响应面优化实验结果

Table 4 Response surface optimization experiment results

序号	汽爆压力/MPa	保压时间/s	水添加量/%	SDF 提取率/%
1	1	150	120	7.64
2	1	90	120	8.84
3	0.8	120	120	6.71
4	1	90	80	5.96
5	1	120	100	9.41
6	1	120	100	9.38
7	1.2	120	80	6.27
8	1	150	80	8.91
9	1	120	100	9.25
10	0.8	90	100	6.27
11	1	120	100	9.33
12	1.2	150	100	4.91
13	1.2	120	120	6.87
14	1.2	90	100	6.93
15	1	120	100	10
16	0.8	150	100	7.93
17	0.8	120	80	7.24

根据表 5 的数据分析，该回归模型极具显著性差异（ $P<0.000\ 1$ ），失拟项表现出不显著（ $P>0.05$ ），而且 R^2 值为 0.958 2，表明该模型很好

地拟合了实验数据，试验误差较小。因此，这个模型可以用来预测蒸汽爆破工艺改性全豆粉可溶性膳食纤维（SDF）的最佳工艺条件。根据模型分析结果显示，因素 A^2 、 B^2 、AB 和 BC 对响应变量 Y 的影响非常显著，而因素 A 和 C^2 对 Y 的影响也显著。然而，因素 AC 和 BC 对 Y 的影响并不显著。这表明在因素 A 和 B、B 和 C 之间存在一种特定的交互作用。根据图 2 的响应面图可以看出，响应面越陡，说明该单因素对实验结果的影响越大。因此，从大到小来看，各因素对全豆粉 SDF 得率的影响程度依次为：汽爆压力、水添加量、保压时间。通过结合多元回归方程，并使用 Design-Expert 8.0.6 软件进行分析，获得了最大的理论预测可溶性膳食纤维（SDF）得率为 9.46%，最优汽爆条件为气爆压力 1.0 MPa、保压时间 120 s、水添加量 100.4%。为方便操作，将试验条件修正为气爆压力 1.0 MPa、保压时间 120 s、水添加量 100%。在相同条件下进行三次验证实验，实际得到的可溶性膳食纤维（SDF）提取率为 9.51%（SDF/TDF 为 43%），比理论预测值高出 0.05%。这表明建立的回归模型方程与实际数据拟合较好。张雁凌等^[26]采用挤压膨化技术制备的可溶性膳食纤维 SDF/TDF 为 21.35%；娄海伟等^[27]在采用单螺杆挤压制备可溶性膳食纤维时 SDF/TD 的比例从 4.43%~23.06%；王继楠等^[28]采用微波处理豆渣改性膳食纤维，使得提取率升高了 5.8%，而本文采用蒸汽爆破全豆改性膳食纤维使可溶性膳食纤维升高了 6.29%。与前人研究豆渣相比，全豆膳食纤维的改性程度更优，因此，该模型可用于预测实际生产中的 SDF 得率。

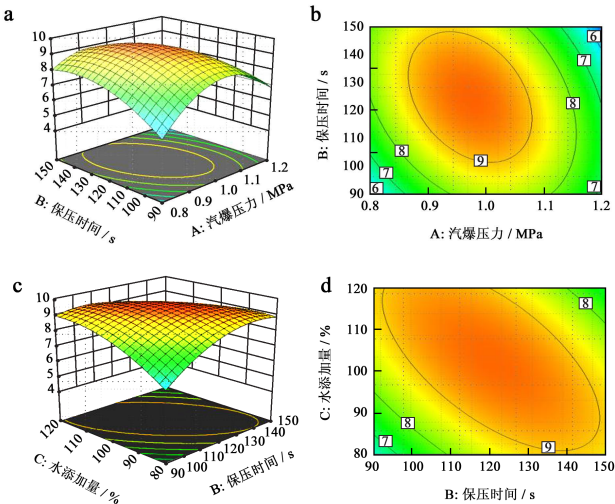


图 2 两因素交互作用对全豆 SDF 得率的影响

Fig.2 Effect of two factors interaction on SDF yield of whole bean

表 5 回归与方差结果分析
Table 5 Analysis of regression and variance results

	平方和 SS	自由	均方	F 值	P 值
A (汽爆压力)	1.26	1	1.26	5.81	0.046 8*
B (保压时间)	0.241 5	1	0.241 5	1.12	0.325 7
C (水添加量)	0.352 8	1	0.352 8	1.63	0.242 2
AB	3.39	1	3.39	15.66	0.005 5
AC	0.319 2	1	0.319 2	1.48	0.263 8
BC	4.31	1	4.31	19.91	0.002 9
A ²	17.09	1	17.09	79.01	0.000 1***
B ²	3.80	1	3.80	17.55	0.004 1**
C ²	1.99	1	1.99	9.19	0.019 1*
模型	34.72	9	3.86	17.84	significant
残差	1.51	7	0.216 3		
失拟检验	1.15	3	0.384 4	4.27	not significant
纯误差	0.360 5	4	0.090 1		
总变异	36.24	16			
R ²	0.958 2				
CV %	6				

2.4 汽爆对全豆粉膳食纤维理化特性的影响

由图 3 可知，汽爆后的全豆 IDF 的持水力 10.88 g/g DW、持油力 7.16 g/g DW 和溶胀力 9.04 mL/g DW 显著高于未处理全豆 IDF ($P<0.05$)，分别提高了 31%、14% 和 59%，比纪绪前等^[29]改性豆渣膳食纤维的溶胀力提高了 22%，表明蒸汽爆破改性全豆中膳食纤维具有良好的持水和溶胀改善作用。

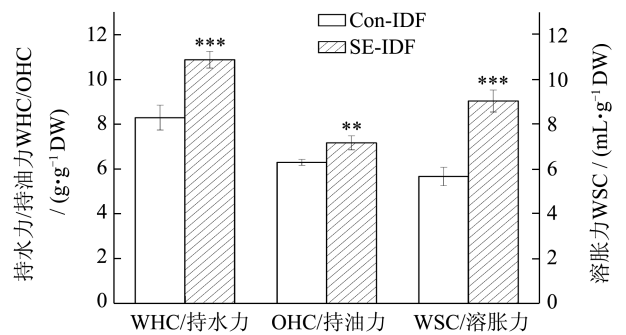


图 3 汽爆前后大豆 IDF 的理化特性
Fig.3 Physicochemical properties of soybean IDF before and after vapor explosion

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$ 。

2.5 汽爆对全豆DF化学结构的影响

图 4a 为豆粉 IDF 的红外光谱图，在全豆 IDF 样品中，观察到了一些特征吸收峰，其中 3 419 cm^{-1} 的峰对应半纤维素和纤维素中的羟基弯曲和伸缩振动。而 2 800~3 000 cm^{-1} 范围内的峰则对应纤维素中的 -CH 和 -CH₂ 基团的振动吸收^[30]。汽爆后 SE-IDF 在 3 419 cm^{-1} 处的吸收峰较强，这表明处理过程中释放了 IDF 中的亲水基团，从而增加了样品的亲水性能。这表明蒸汽爆破改性处理显著提升了 SE-IDF 样品中亲水基团的暴露程度^[31]。此外，在峰谱中观察到 1 631 cm^{-1} 处的振动吸收峰，这表示样品中存在苯环结构的存在。而在 2 851 cm^{-1} 和 2 918 cm^{-1} 处的峰对应纤维素中 CH 键的对称和反对称拉伸振动。另外，1 047 cm^{-1} 处的峰则表示纤维素和半纤维素中 C-O 基团的伸缩振动特征^[32]。图 4b 为蒸汽爆破改性前后 SDF 的红外光谱图，这些频率的吸收峰提供了证据，证明了改性前后的 SDF 都具有多糖的特征结构，并且分子中含有酯基^[33]。值得注意的是，蒸汽爆破处理之后，在 1 000 cm^{-1} 到 1 650 cm^{-1} 的波数范围内，观察到吸收峰的强度都有所增加。这说明蒸汽爆破能够有效地增加各个基团的暴露程度。另

外, 在 3421 cm^{-1} 处的峰型增宽, 表明改性后的可溶性膳食纤维具有更强的分子间氢键作用力^[34]。综上所述, 汽爆前后的 IDF 和 SDF 具有相似的纤维素类多糖特征吸收峰, 说明蒸汽爆破并没有改变膳食纤维的主要官能基团。

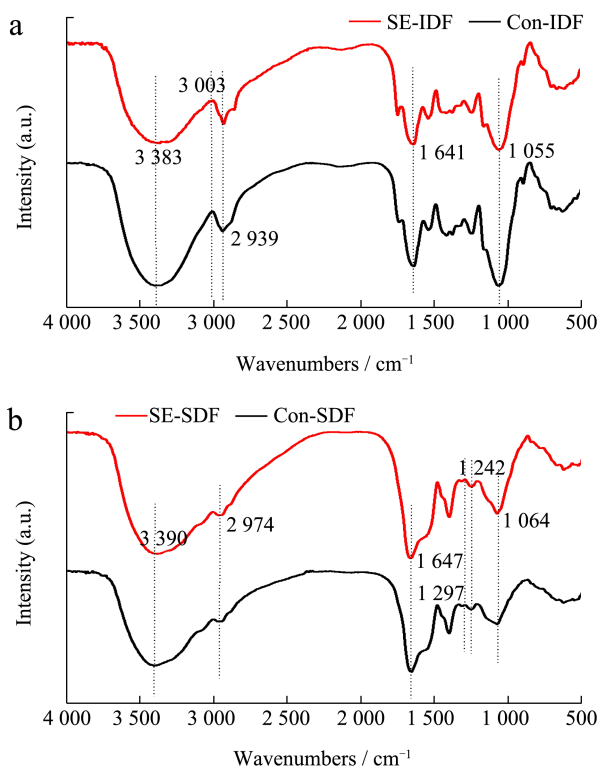


图4 全豆粉汽爆前后 DF 傅里叶红外光谱图

Fig.4 Fourier infrared spectra of DF before and after the steam explosion of whole bean flour

2.6 全豆IDF和SDF的XRD表征

通过 XRD 对全豆蒸汽爆破处理前后, 对 SDF 和 IDF 的结晶结构进行了测定。实验结果显示, 改性前后的 IDF 和 SDF 的衍射峰型没有明显变化。初步分析显示, 经过蒸汽爆破处理的 IDF 样品在 X 射线衍射图谱中展现了两个明显的衍射峰, 分别对应纤维素 (002) 面和 (004) 面。这证明蒸汽爆破处理未改变 IDF 的晶型。在 IDF 中, 使用 Segal 方程计算相对结晶度可观察到结果的变化。其中 IDF 的结晶度为 35.28%, 而经过蒸汽爆破处理的 IDF 的结晶度仅为 20.79%。这些结果可明确表明, 蒸汽爆破显著降低了 IDF 的结晶度。综上所述, 蒸汽爆破处理对 IDF 的晶型没有造成改变, 但对其结晶度产生了显著影响。处理后的 IDF 样品的结晶度明显降低, 这表明蒸汽爆破处理导致纤维素的有序排列程度减弱, 形成的晶格结构变得松散, 这种结构变化

可能会影响 IDF 样品的物理性质和特性, 这可能是由于蒸汽爆破处理导致 IDF 中纤维素、木质素和半纤维素的降解所致^[35]。另外, SE-SDF 的结晶度为 20.79%, 低于 Con-SDF (38.97%), 蒸汽爆破处理可能在一定程度上破坏了可溶性膳食纤维 (SDF) 的结晶区, 可以用另一种表述方式来描述这种现象。当 SE-SDF 材料经过处理后, 会发生结晶区向无定形区转化的过程, 这会导致材料的结晶度略微下降。结晶度的降低表明材料中的有序结构减少, 原子或分子的排列变得更加无规律。这种变化表明分子间的相互作用力减弱, 使得 SE-SDF 材料呈现出更为疏松的形态。研究表明, 这种疏松的形态有利于 SDF 的功能活性发挥^[36]。

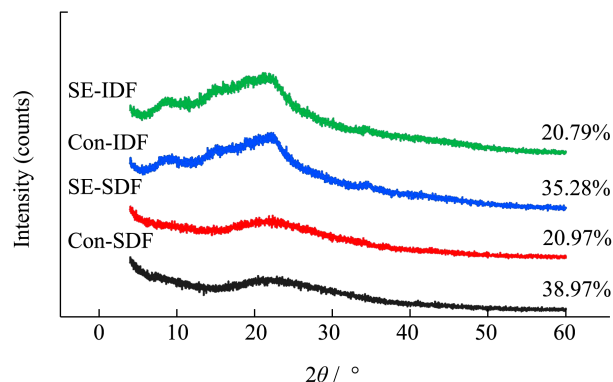


图5 IDF 和 SDF 的 X-射线衍射图

Fig.5 X-ray diffraction of IDF and SDF

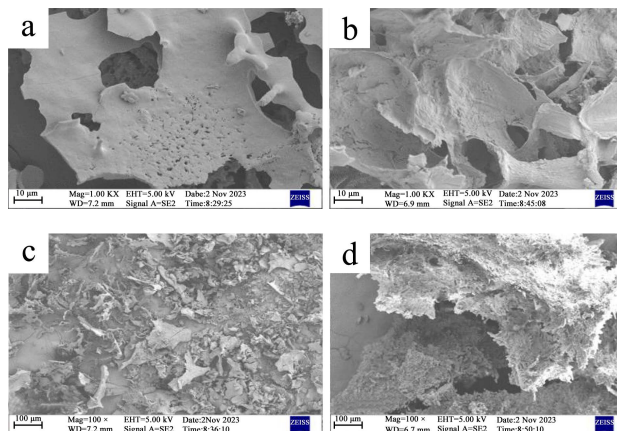


图6 全豆粉膳食纤维扫描电镜图

Fig.6 Scanning electron microscope (SEM) image of whole soybean dietary fiber

注: a 为 Con-IDF, b 为 SE-IDF, c 为 Con-SDF, d 为 SE-SDF。

2.7 汽爆对全豆IDF和SDF微观结构的影响

IDF 和 SDF 的微观结构如图 6 所示, 汽爆处

理前的 IDF 呈现出致密的结构, 表面平整光滑(图 6a); 而经过汽爆处理后, IDF 的表面结构受到了严重破坏, 出现了更多的褶皱和孔洞, 使其表面变得粗糙^[37](图 6b)。汽爆试验中的高压处理使得样品在理化和功能性质上得到改善, 这归功于其使得 IDF 的表面形成了大的褶皱和空腔^[38], 同时颗粒结构也变得更为松散(图 6b)。相比之下, 未经汽爆处理的可溶性膳食纤维(SDF)的微观结构表面呈现出致密的碎片化结构(图 6c), 而经过汽爆处理后, SDF 的结构更显得疏松多孔(图 6d)。由此可知, 汽爆处理明显改变 SE-IDF 和 SE-SDF 的微观结构, 进而有效增加其表面积^[39]。

3 结论

该研究采用蒸汽爆破技术来提高全豆粉中的可溶膳食纤维, 通过单因素实验分析汽爆压力、保压时间、水添加量对全豆 SDF 得率的影响, 并通过响应面优化试验建立了蒸汽爆破改性全豆 DF 的最佳工艺条件为: 1.0 MPa、保压时间 120 s、水添加量 100%, 此时 SDF 得率为 9.51%。此外, 与未处理的全豆 IDF 相比, 气爆后的 IDF 持水力、持油力、溶胀力分别为 10.88 g/g、7.16 g/g 和 9.04 mL/g, 并且 IDF 和 SDF 表现出更低的结晶度为 20.79%, 以及更加疏松多孔的微观结构, 表现出更好的理化特性。综上所述, 蒸汽爆破可以作为改善全豆加工利用的一种方式, 处理后的全豆粉理化品质有所改善, 更适合作为营养健康食品原料。

参考文献

- [1] WIJEWARDANA C, REDDY K R, BELLALOU N, et al. Soybean seed physiology, quality, and chemical composition under soil moisture stress [J]. Food Chemistry, 2019, 278: 92-100.
- [2] RINALDONI A N, PALATNIK D R, ZARITZKY N, et al. Soft cheese-like product development enriched with soy protein concentrates [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(1): 139-147.
- [3] 李静. 豆渣的综合利用研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2022, 2: 29.
- [4] GRIELMO MIGUEL N, MARTIN BELLOSO O, et al. Comparison of dietary fibre from by-products of processing fruits and greens and from cereals [J]. LWT-Food Science and Technology, 1999, 32(8): 503-508.
- [5] ZHAO D W, GUO C X, LIU X B, et al. Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58: 1524-1537.
- [6] HU Y B, WANG Z, XU S Y, et al. Corn bran dietary fibre modified by xylanase improves the mRNA expression of genes involved in lipids metabolism in rats [J]. Food Chemistry, 2008, 109(3): 499-505.
- [7] HUANG Y L, MA Y S, TSAI Y H, et al. *In vitro* hypoglycemic, cholesterol-lowering and fermentation capacities of fiber-rich orange pomace as affected by extrusion [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 796-801.
- [8] FENG T, SU Q, ZHUANG H N, et al. Ghost structures, pasting, rheological and textural properties between mesona blumes gum and various starches [J]. Journal of Food Quality, 2014, 37(2): 73-82.
- [9] GAN J P, XIE L, PENG G Y, et al. Systematic review on modification methods of dietary fiber [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 149: 106872.
- [10] YE G, WU Y, WANG L, et al. Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111996.
- [11] MARZIEH SHAFIEI, MARYAM M KABIR, HAMID ZILOUEI, et al. Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2013, 148: 53-60.
- [12] SHEN M, GE Y, KANG Z, et al. Yield and physicochemical properties of soluble dietary fiber extracted from untreated and steam explosion-treated black soybean hull [J]. Journal of Chemistry, 2019, 1: 9736479.
- [13] GB 5009.4-2016, 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S].
- [14] GB 5009.5-2016, 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S].
- [15] GB 5009.6-2016, 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S].
- [16] GB 5009.9-2016, 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定[S].
- [17] GB 5009.88-2014, 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定[S].
- [18] ZHANG Y, QI J R, ZENG W Q, et al. Properties of dietary fiber from citrus obtained through alkaline hydrogen peroxide treatment and homogenization treatment [J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125873.
- [19] ZHANG W, WEN J, LI L, et al. Physicochemical, structural and functional properties of pomelo spongy tissue pectin modified by different green physical methods: A comparison [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 3195-3202.
- [20] ZHENG Y J, WANG X Y, TIAN H L, et al. Effect of four

- modification methods on adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre [J]. Food Research International, 2021, 147: 110565.
- [21] OUYANG H, WU L, HU Y, et al. Effect of steam explosion treatment on physicochemical, functional and structural properties of pomelo fruitlets [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 184: 114963.
- [22] LIU KUN LUN, ZHENG J, WANG X, et al. Effects of household cooking processes on mineral, vitamin B, and phytic acid contents and mineral bioaccessibility in rice [J]. Food Chemistry, 2019, 280: 59-64.
- [23] WANG L, XU H, YUAN F, et al. Preparation and physicochemical properties of soluble dietary fiber from orange peel assisted by steam explosion and dilute acid soaking [J]. Food Chemistry, 2015, 185: 90-98.
- [24] 贺永惠,王清华,黄会丽,等.蒸汽爆破提高小麦麸皮中水溶性戊聚糖含量及热重分析[J].农业工程学报,2015, 31(13):286-291.
- [25] 孙俊良,杜寒梅,梁新红,等.响应面法优化蒸汽爆破技术提取苹果果胶工艺[J].食品科学,2017,38(14):270-275.
- [26] 张雁凌.双螺杆挤压对大豆膳食纤维可溶性的影响[J].农产品加工(学刊),2011,8:82-84.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 纪绪前,陈野,高辰.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.
- [30] 程明明,黄苇.两种超微粉碎法对西番莲果皮水不溶性膳食纤维改性效果的研究[J].现代食品科技,2016,32(12): 247-253.
- [31] CHEIKH R M, ABDELMOUMEN, S THOMAS, et al. Use of green chemistry methods in the extraction of dietary fibers from cactus rackets (*Opuntia ficus Indica*): Structural and microstructural studies [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 901-910.
- [32] HUANG L, ZHANG W, CHENG J, et al. Antioxidant and physicochemical properties of soluble dietary fiber from garlic straw as treated by energy-gathered ultrasound [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 678-688.
- [33] CHEN H, ZHAO C, LI J, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of lotus root [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 93: 204-211.
- [34] LIU Y, HU H. X-ray diffraction study of bamboo fibers treated with NaOH [J]. Fibers and Polymers, 2008, 9(6): 735-739.
- [35] ZHENG Y, LI Y. Physicochemical and functional properties of coconut (*Cocos nucifera* L) cake dietary fibres: Effects of cellulase hydrolysis, acid treatment and particle size distribution [J]. Food Chemistry, 2018, 257(15): 135-142.
- [36] ZHANG W, ZENG G, PAN, Y, et al Properties of soluble dietary fiber-polysaccharide from papaya peel obtained through alkaline or ultrasound-assisted alkaline extraction [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 172: 102-112.
- [37] LIANG X, RAN J, SUN J, et al. Steam-explosion-modified optimization of soluble dietary fiber extraction from apple pomace using response surface methodology [J]. CyTA-Journal of Food, 2017, 16(1): 20-26.
- [38] YU G, BEI J, ZHAO J, et al. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. *Sativa* Hoffm.) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine comminution, and high hydrostatic pressure [J]. Food Chemistry, 2018, 257: 333-340.
- [39] WANG T, LIANG X, RAN J, et al. Response surface methodology for optimisation of soluble dietary fibre extraction from sweet potato residue modified by steam explosion [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(3): 741-747.