

## 挤压膨化碱处理豆渣制备水溶性膳食纤维工艺的研究

王文侠, 宋春丽, 曾凤彩, 刘长峰, 柯曼露

(齐齐哈尔大学 食品与生物工程学院, 农产品加工黑龙江省普通高校重点实验室, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:**以豆渣为原料,并在碱液处理后直接挤压膨化制备豆渣水溶性膳食纤维。以水溶性膳食纤维得率为指标,对物料水分、挤压温度、螺杆转速及氢氧化钠浓度进行了单因素试验。采用响应面分析方法,对挤压膨化提高碱处理豆渣水溶性膳食纤维的工艺条件进行了优化,并建立了物料水分、挤压温度、螺杆转速三因素的回归模型。确定了挤压膨化碱处理豆渣制备水溶性膳食纤维的最佳工艺条件为:物料水分 26.94%,挤压温度 183.48℃,螺杆转速 106.48 r·min<sup>-1</sup>,碱浓度为 5%。在优化条件下,水溶性膳食纤维得率由原来的 4.26% 提高到 32.37%。

**关键词:**豆渣;碱处理;挤压膨化;水溶性膳食纤维;响应面分析

**中图分类号:**TS201.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-9841(2011)06-1017-05

## Extruding Technology for Soluble Dietary Fiber from Soybean Dregs Treated with Alkaline

WANG Wen-xia, SONG Chun-li, ZENG Feng-cai, LIU Chang-feng, KE Man-lu

(College of Food Science and Engineering, Qiqihar University, Key Laboratory of Processing Agricultural Products of Heilongjiang Province, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Soybean dregs treated with alkaline was extruded to produce soluble dietary fiber. The effects of the water content, extrusion temperature, screw speed and alkaline concentration on the yield of soluble dietary fiber were studied respectively. Based on the results, response surface analytical method was used to optimize the conditions of producing soluble dietary fiber and model was established. The results showed that the optimum conditions of preparing soluble dietary fiber were as follows: alkaline concentration 5%, water content 26.94%, 183.48℃, 106.48 r·min<sup>-1</sup>. Under optimal conditions, the yield of soluble dietary fiber was increased from 4.26% to 32.37%.

**Key words:** Soybean dregs; Alkaline treatment; Double screw extruding; Soluble dietary fiber; Response surface analysis

膳食纤维通常是指不被人体消化的多糖类碳水化合物和木质素的总称,可分为水溶性和不溶性膳食纤维两类<sup>[1]</sup>。水溶性膳食纤维(SDF)不仅具有防治便秘、降血脂、防癌等生理功能<sup>[2-3]</sup>,而且还具有较好的理化性质<sup>[4-5]</sup>,作为食品配料其性能优于不溶性膳食纤维。目前 SDF 已作为食品配料广泛应用于食品加工中,如制备高纤维面包、饼干、饮料、糖果等健康食品<sup>[6]</sup>。

我国是世界上主要的大豆生产国和消费国,豆制品加工量大,产生大量的副产物豆渣。豆渣除少部分用作饲料外,大部分作为废料弃掉,资源浪费极大,同时又造成环境污染<sup>[7]</sup>。豆渣中约含 60% 的膳食纤维<sup>[8]</sup>,但是 SDF 只占总纤维的 2% 左右,如何有效的提高豆渣中 SDF 的得率,增加大豆产品的附加值,同时满足人们日益增长的膳食纤维需求,具有一定的理论意义和经济价值。

挤压技术集输送、混合、加热和加压等多种单

元操作于一体,物料在挤压机筒内受到高温、高剪切作用,在短时间内实现部分大分子纤维聚合物直接或间接转化为水溶性膳食纤维<sup>[9-10]</sup>。碱则是纤维的膨润剂,有利于使纤维结构松散。目前,提取豆渣水溶性膳食纤维的工艺方法主要有挤压膨化法、挤压膨化后碱处理等。金茂国等<sup>[11]</sup>利用挤压膨化工艺使豆渣的 SDF 得率从 2% 提高到 28%;姜海伟等<sup>[12]</sup>采用碱法提取挤压豆渣中可溶性膳食纤维,使可溶性膳食纤维产率达到 34.12%。

该研究以豆渣为原料,采用碱处理后,再经过挤压膨化处理的方法,使豆渣中水溶性膳食纤维的得率明显提高。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料与试剂

豆渣:大庆日月星有限公司, SDF 含量为 4.26%;耐高温 α-淀粉酶:丹麦诺维信公司;碱性蛋

收稿日期:2011-10-05

基金项目:黑龙江省教育厅资助项目(1151gzd23)。

第一作者简介:王文侠(1963-),女,教授,从事农产品深加工研究。E-mail:wwwang1127@163.com。

白酶:丹麦诺维信公司。其它化学试剂均为化学分析纯。

## 1.2 仪器与设备

双螺杆挤压膨化机:济南赛信膨化机械有限公司;BFM-6BI 贝利超微粉碎机:济南倍力粉技术工程有限公司;722S 可见分光光度计:上海精密科学仪器有限公司;电热恒温水浴锅:天津市泰斯特仪器有限公司;恒温水浴振荡器:上海跃进医疗器械厂;SHZ-D(Ⅲ)循环水式真空泵:巩义市英峪予华仪器厂;电子天平:北京赛多利斯仪器系统有限公司;LG10-2.4A 型高速离心机:上海精密科学仪器有限公司;pHS-25 数显 pH 计:上海精密科学仪器有限公司;电热恒温鼓风干燥箱:上海跃进医疗器械厂;721 分光光度计:上海精密科学仪器有限公司。

## 1.3 试验方法

1.3.1 检测方法 水溶性膳食纤维测定:改良的 Southgate 法<sup>[13]</sup>;水分测定:直接干燥法<sup>[13]</sup>。

SDF 得率(%) = SDF 质量(g)/原料质量(g) × 100

1.3.2 豆渣水溶性膳食纤维制备工艺流程 原料豆渣与一定量的氢氧化钠溶液混合,使其处于碱性条件后,结合双螺杆挤压膨化技术制备水溶性膳食纤维。具体工艺流程如下:

豆渣→粉碎(过 30 目筛)→添加 NaOH 溶液→混匀静置(12 h)→双螺杆挤压膨化→酶解→过滤→滤液→乙醇沉淀→离心分离→水溶性膳食纤维

↓  
不溶性膳食纤维      上清液

操作要点:

粉碎:将豆渣用贝利超微粉碎机粉碎,过 30 目筛。

酶解:调 pH 值至 6,在 95℃ 时按底物的 5% 加入耐高温 α-淀粉酶后,95℃ 恒温搅拌 2 h。冷却物料至 60℃,调 pH 值至 8,按底物的 5% 加入碱性蛋白酶后,55℃ 恒温搅拌 2 h。

过滤:以布氏漏斗配 300 目滤布抽滤,再以 60℃ 温水洗涤滤渣数次,至滤液澄清,取滤渣放入恒温鼓风干燥箱内 60℃ 烘干备用。

醇沉:采用滤液与乙醇体积比为 1:4 进行醇沉。

离心:在 4 000 r·min<sup>-1</sup> 的条件下离心 20 min。

1.3.3 挤压膨化碱处理豆渣制备水溶性膳食纤维的单因素试验 以豆渣为原料,水溶性膳食纤维得率为指标,采用碱处理结合挤压膨化技术制备豆渣水溶性膳食纤维。根据预试验结果,分别对影响豆渣水溶性膳食纤维得率的挤压温度、螺杆转速、物

料水分、氢氧化钠浓度 4 个因素进行单因素试验。

1.3.4 响应面法优化挤压膨化碱处理豆渣制备水溶性膳食纤维工艺 在单因素试验的基础上,对影响挤压膨化技术的主要因素进行响应面试验,以确定最适的挤压膨化条件。采用响应面分析法中的中心组合设计方法,因素及水平的设计见表 1。应用 Design expert 7.1 和 SAS 8.1 软件对数据进行统计分析。

表 1 响应面分析因素与水平

Table 1 Factors and levels for RSM

因素 Factors	编码 Code	编码水平 Levels		
		-1	0	1
挤压温度 Extrusion temperature/℃	x <sub>1</sub>	170	180	190
螺杆转速 Rotation rate/r·min <sup>-1</sup>	x <sub>2</sub>	70	100	130
物料水分 Water content of extrusion sample/%	x <sub>3</sub>	25	30	35

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验

2.1.1 挤压温度对豆渣水溶性膳食纤维得率的影响 在螺杆转速 50 r·min<sup>-1</sup>,物料水分 25%,NaOH 浓度 2.5% 的条件下,将双螺杆挤压机的挤压温度分别设定为 140,160,180 和 190℃。挤压膨化碱处理豆渣所得的 SDF 得率见图 1。

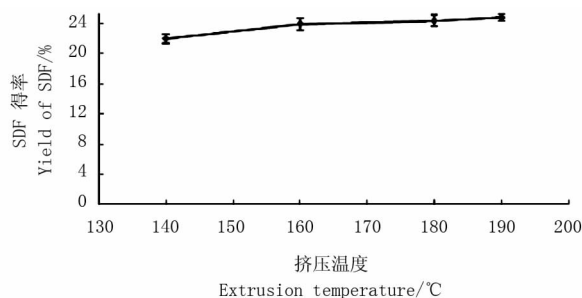


图 1 挤压温度对碱处理豆渣 SDF 得率的影响

Fig. 1 Effect of extrusion temperature on the yield of soybean dregs SDF

从图 1 可以看出,随着挤压温度的升高豆渣 SDF 得率增加,但当挤压温度达到 180℃ 后,随挤压温度的升高 SDF 的得率没有显著变化。此外,挤压温度过高将发生焦糊现象。因此,初步确定挤压温度为 180℃。

2.1.2 物料水分对豆渣水溶性膳食纤维得率的影响 在挤压温度 180℃,螺杆转速 50 r·min<sup>-1</sup>,NaOH 浓度 2.5% 的条件下,改变物料水分,豆渣的水分含量分别设定为 20%、25%、30% 和 35%。从图 2 可以看出,豆渣水分含量对 SDF 得率的影响较大。当物料水分含量由 20% 提高到 25% 时,SDF 得率由 19.57% 增加至 22.11%,增加了 2.54%。适宜的物

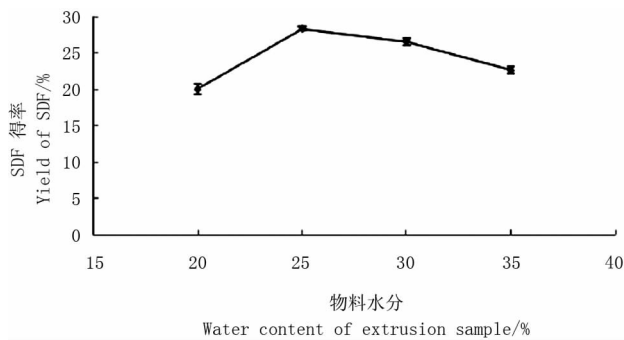


图2 物料水分对碱处理豆渣 SDF 得率的影响

Fig.2 Effect of water content of extrusion sample on the yield of soybean dregs SDF

料水分含量,既保证了物料在挤压机机筒内的停留时间,使豆渣物料受到充分的剪切作用,又不会发生焦糊现象。因此,初步确定物料水分含量为25%。

2.1.3 螺杆转速对豆渣水溶性膳食纤维得率的影响 在温度 180℃,物料水分 25%,NaOH 浓度 2.5% 的条件下,改变双螺杆挤压机的转速,螺杆转速分别设定为 50、70、90、100、110、130 和 150  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。挤压膨化碱处理豆渣所得的 SDF 得率见图 3。

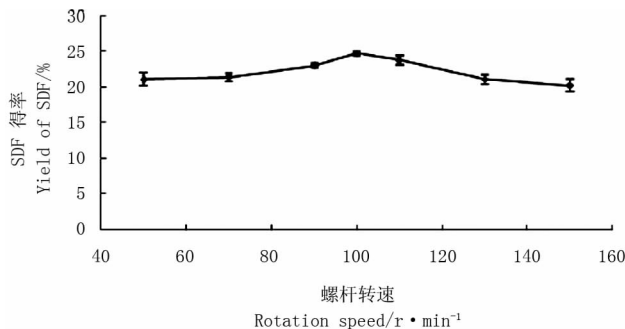


图3 螺杆转速对碱处理豆渣 SDF 得率的影响

Fig.3 Effect of rotation speed on the yield of soybean dregs SDF

从图 3 可以看出,随着螺杆转速的增高豆渣 SDF 得率增高,当螺杆转速为 100  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  时,SDF 含量(24.59%)最高。这是因为螺杆转速越大,剪切力越大,越有利于纤维素的降解,但当螺杆转速过高时,物料在机筒内的停留时间缩短,使反应不完全,SDF 得率降低。因此,初步确定螺杆转速为 100  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.1.4 物料氢氧化钠浓度的确定 在挤压温度 180℃,螺杆转速 50  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,豆渣水分 25% 的条件下,改变物料的氢氧化钠浓度,豆渣的氢氧化钠浓度分别设定为 1%、2%、3%、4%、5%、6%、8% 和 10%。挤压膨化碱处理豆渣所得 SDF 得率见图 4。

从图 4 可以看出,随着氢氧化钠浓度的增加,豆渣 SDF 得率显著增加,当氢氧化钠浓度由 1% 增

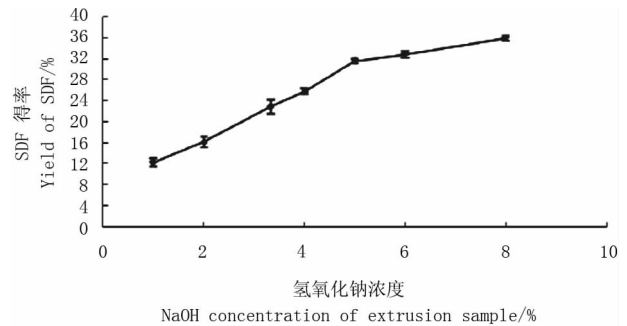


图4 氢氧化钠浓度对碱处理豆渣 SDF 得率的影响

Fig.4 Effect of NaOH concentration of extrusion sample on the yield of soybean dregs SDF

加至 5% 时,SDF 得率由 8.95% 增加至 25.10%。这是因为碱是纤维是膨润剂,有利于使纤维结构松散,从而有利于纤维素的降解,但是氢氧化钠浓度过高会使物料色泽加深,呈焦糊状。因此,确定氢氧化钠浓度为 5%。

## 2.2 响应面法优化挤压膨化碱处理豆渣制备水溶性膳食纤维工艺

2.2.1 回归方程的建立与显著性分析 在单因素试验的基础上,以挤压温度、螺杆转速、物料水分 3 个因素为自变量,以水溶性膳食纤维得率为响应值,优化挤压膨化碱处理豆渣制备 SDF 的工艺参数。共设立了 15 个处理组,其中零水平共有 3 个处理组,不设重复。试验方案及结果见表 2。

表2 响应面试验方案及结果

Table 2 Scheme and results of RSM(n=15 Box-Behnken)

试验号 No.	因素 Factors			SDF 得率 Yields of SDF/%
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	-1	-1	0	30.22
2	-1	0	-1	29.16
3	-1	0	+1	29.71
4	-1	+1	0	29.57
5	0	-1	-1	30.63
6	0	-1	+1	29.65
7	0	+1	-1	30.80
8	0	+1	+1	27.46
9	+1	-1	0	30.50
10	+1	0	-1	31.81
11	+1	0	+1	27.45
12	+1	+1	0	31.17
13	0	0	0	31.84
14	0	0	0	32.15
15	0	0	0	31.92

利用 Expert design 7.1 统计软件对表 2 试验结果进行统计分析,可以得到相关回归系数,其回归方程为:

$$Y = 31.97 + 0.28x_1 - 0.25x_2 - 1.02x_3 + 0.33x_1x_2 - 1.23x_1x_3 - 0.59x_2x_3 - 0.85x_1^2 - 0.75x_2^2 - 1.58x_3^2 (R^2 = 0.9712)$$

进一步对回归方程进行分析,其系数显著性结果见表3。

表3 回归方程方差分析

Table 3 Analysis of variance for developed regression equation for yields of SDF

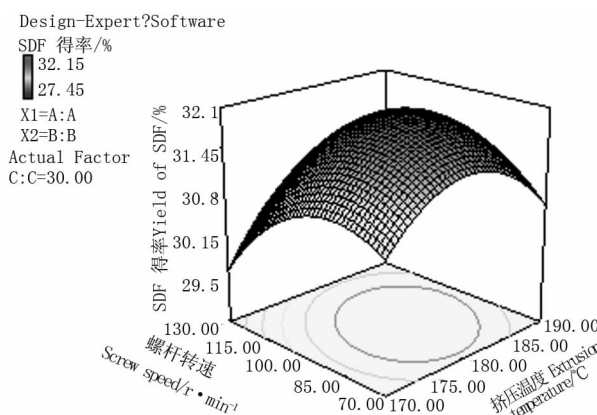
项目 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	比值 $F$ $F$ value	显著水平 $P$ (Prob > $F$ ) $P$ value
Model	29.76	9	3.31	18.74	0.0024
$x_1$	0.64	1	0.64	3.65	0.1143
$x_2$	0.50	1	0.50	2.83	0.1531
$x_3$	8.26	1	8.26	46.84	0.0010
$x_1 x_2$	0.44	1	0.44	2.47	0.1769
$x_1 x_3$	6.03	1	6.03	34.17	0.0021
$x_2 x_3$	1.39	1	1.39	7.89	0.0376
$x_1^2$	2.69	1	2.69	15.26	0.0113
$x_2^2$	2.08	1	2.08	11.81	0.0185
$x_3^2$	9.26	1	9.26	52.50	0.0008
残差 Residual	0.88	5	0.18		
失拟项 Lack of fit	0.83	3	0.28	10.69	0.0868
净误差 Pure error	0.052	2			
总差离 Cor Total	30.64	14	0.026		

从表3可以看出,失拟检验得到  $P_{\text{失拟}} = 0.0868 > 0.05$ , 检验不显著,说明其它因素对试验结果干扰较小;  $P_{\text{回归}} = 0.0024 < 0.01$ , 检验极显著,说明方程与实际情况拟合良好,能够反映 SDF 得率与挤压温度、螺杆转速及物料水分三因素之间的关系。

试验建立的模型中,  $x_3$ 、 $x_1 x_3$ 、 $x_2 x_3$ 、 $x_1^2$ 、 $x_2^2$ 、 $x_3^2$  对挤压膨化碱处理豆渣制备水溶性膳食纤维的得率的影响显著 ( $P < 0.05$ ), 其它因素影响不显著。

2.2.2 显著交互作用对水溶性膳食纤维得率的影响 为进一步考察螺杆转速、物料水分及挤压温度3个因素两两之间的交互作用对挤压膨化碱处理豆渣制备水溶性膳食纤维得率的影响,特对其进行分析,作其响应曲面图及等高线图。从响应面图中可以直观的看出优化区域,并在优化区域内,可以根据生产的实际需要调整各因素的数值大小,以缩短周期,降低成本。

当物料水分为30%,氢氧化钠浓度为5%时,挤压温度与螺杆转速交互作用对碱处理豆渣水溶性膳食纤维得率的响应面及其等高线见图5。



物料水分30%,氢氧化钠浓度5%。

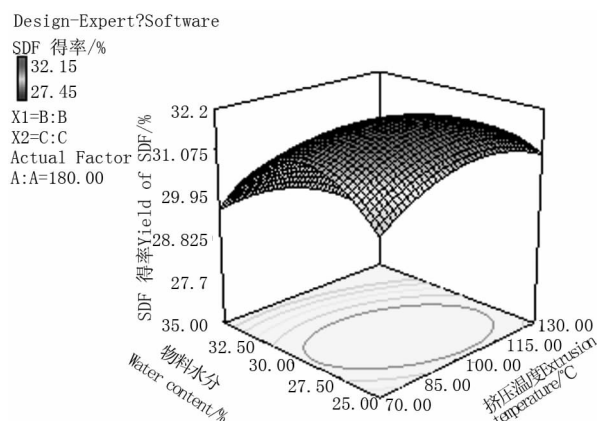
Water content of extrusion sample of 30%, NaOH concentration of extrusion sample of 5%.

图5 挤压温度和螺杆转速

对碱处理豆渣 SDF 得率的影响的响应面图

Fig. 5 Response surface and contour plots of temperature and rotation speed on yields of SDF

当挤压温度为180°C,氢氧化钠浓度为5%时,物料水分与螺杆转速交互作用对碱处理豆渣水溶性膳食纤维得率的响应面及其等高线见图6。



挤压温度180°C,氢氧化钠浓度5%。

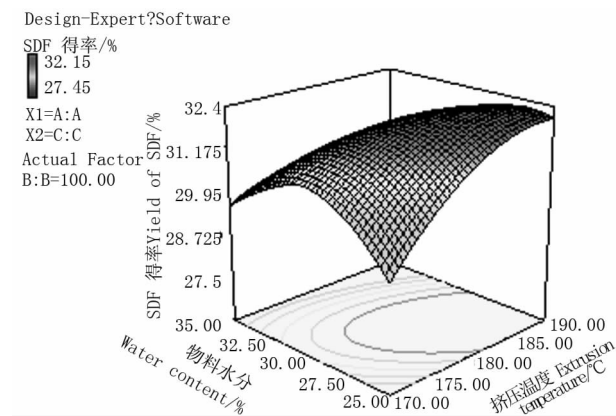
Extrusion temperature of 180°C, NaOH concentration of extrusion sample of 5%.

图6 螺杆转速和物料水分

对碱处理豆渣 SDF 得率影响的响应面图

Fig. 6 Response surface and contour plots of water content of extrusion sample and rotation speed on yields of SDF

当螺杆转速为100 r·min<sup>-1</sup>,氢氧化钠浓度为5%时,挤压温度与物料水分交互作用对碱处理豆渣的水溶性膳食纤维得率的响应面及其等高线见图7。



螺杆转速  $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 氢氧化钠浓度 5%

Rotation rate of  $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , NaOH concentration of extrusion sample of 5%.

图 7 挤压温度与物料水分

对碱处理豆渣 SDF 得率影响的响应面图

Fig. 7 Response surface and contour plots of water content of extrusion sample and temperature on yields of SDF

2.2.3 最优工艺条件的确定 利用 SAS 8.1 软件 REREG 程序对响应面试验结果进行分析, 预测出各因素的最佳取值及在此条件下的 SDF 得率的理论最大值, 理论所得的最佳工艺条件为: 物料水分 26.94%、挤压温度  $183.48^\circ\text{C}$ 、螺杆转速  $106.48 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 水溶性膳食纤维得率预测值为 32.35%, 实际值为 32.37%, 二者相差不大, 说明建立的数学模型可靠, 完全可以用于豆渣水溶性膳食纤维工艺条件优化。

### 3 结论

在单因素的基础上, 采用响应面分析方法, 对挤压膨化提高碱处理豆渣水溶性膳食纤维的工艺条件进行优化, 确定了最优工艺条件为: 氢氧化钠浓度 5%, 物料水分 26.94%, 挤压温度  $183.48^\circ\text{C}$ , 螺杆转速  $106.48 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在此条件下, 豆渣的水溶性膳食纤维得率从原来的 4.26% 提高到 32.37%。挤压膨化碱处理豆渣制备豆渣水溶性膳食纤维具有污染少、便于应用和提取率高等特点, 是一种比较理想的制备方法。

### 参考文献

- [1] 付琼, 林亲录, 鲁娜, 等. 膳食纤维提取的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2010(3): 32-35. (Fu Q, Lin Q L, Lu N, et al. Progress in dietary fiber extraction [J]. China Food and Nutrition, 2010 (3): 32-35.)
- [2] Saura-Calixto F, Garcia-Alonso A, Goni I, et al. In vitro determination of the indigestible fraction in foods: An alternative to dietary fibre analysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48: 3342-3347.
- [3] Hillemeier C. An overview of the effects of dietary fiber on gastrointestinal transit [J]. Pediatrics, 1995, 96: 997-999.
- [4] 聂凌鸿. 膳食纤维的理化特性及其对人体的保健作用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(28): 1206-1208. (Nie L H. Physical and chemical characteristics of dietary fiber and its health care functions for human health [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(28): 1206-1208.)
- [5] Yamazaki E, Murakami K, Kurita O. Easy preparation of dietary fiber with the high water-holding capacity from food sources [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2005, 60: 17-23.
- [6] 陈燕卉, 陈敏, 张绍英, 等. 膳食纤维在食品加工中的应用与研究进展[J]. 食品科学, 2004, 25(增刊): 251-255. (Chen Y H, Chen M, Zhang S Y, et al. Recent research trends in dietary fiber and its use for food processing [J]. Food Science (supplement), 2004, 25: 251-255.)
- [7] 李想, 程建军, 江连洲. 豆渣水溶性膳食纤维的研究现状与展望[J]. 食品工业科技, 2008, 29(4): 305-307. (Li X, Cheng J J, Jiang L Z. Research status of soluble dietary fiber of soybean dregs [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(4): 305-307.)
- [8] 徐广超, 姚惠源. 豆渣水溶性膳食纤维制备工艺的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2005, 26(1): 54-57. (Xu G Z, Yao H Y. The research of conditions for extraction of soybean soluble dietary fiber [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Technology (Natural Science Edition), 2005, 26(1): 54-57.)
- [9] 戴宁, 翟伟国, 张裕中. 挤压机作为食品加工机械与生化反应器的对比研究[J]. 粮油食品科技, 2003, 11(6): 1-3. (Dai N, Zhai W G, Zhang Y Z. The study on the comparison of extruders as a food machinery and a bio-reactor [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2003, 11(6): 1-3.)
- [10] Gualberto D G, Bergman C J, Kazemzadeh M, et al. Effect of extrusion processing on the soluble and insoluble fiber, and phytic acid contents of cereal brans [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1997, 51: 187-198.
- [11] 金茂国, 孙伟. 用挤压法提高豆渣可溶性膳食纤维含量的研究[J]. 粮食与饲料工业, 1996(8): 35-38. (Jin M G, Sun W. A study on the use of extrusion for raising the SDF content in soybean dregs [J]. Cereal and Feed Industry, 1996(8): 35-38.)
- [12] 娄海伟, 迟玉杰. 挤压豆渣中可溶性膳食纤维制备工艺的优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 285-289. (Lou H W, Chi Y J. Optimization of technology for preparing soluble dietary fiber from extruded soybean residue [J]. Transactions of CSAE, 2009, 25(6): 285-289.)
- [13] 大连轻工业学院, 华南理工大学, 西北轻工业学院, 等. 食品分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005. (Dalian Polytechnic University, South China University of Technology, Northwest Institute of Light Industry, et al. Food analysis [M]. Beijing: China Light Industry Publishing House, 2005.)