

# 低抗营养因子豆乳粉的喷雾干燥工艺研究

赵巧丽<sup>1,2</sup>, 王丽<sup>1</sup>, 廖振林<sup>1</sup>, 胡会刚<sup>2</sup>, 方祥<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

(2. 中国热带农业科学院亚热带作物研究所/农业部热带果树生物学重点实验室, 广东湛江 524091)

**摘要:** 本文以木瓜蛋白酶水解后的传统生浆工艺制备豆乳为原料, 研究其制备低抗营养因子豆乳粉的喷雾干燥工艺条件, 并与6种市售豆粉进行分析比较。以豆乳粉的物性为评价指标进行单因素对比试验, 得出喷雾干燥优选工艺条件为: 进风温度 185 °C, 进料速度 350 mL/min, 亲水性单甘脂和吐温 80 (3:2) 用量 2.0%, 麦芽糊精添加量 5.4%。在此条件下制得的豆乳粉润湿性和分散性比冰泉速溶豆乳粉高 74.05% 和 11.94%, 溶解度除维维和黑牛豆乳粉外, 均优于其它市售豆乳粉; 经检测其脲酶活性呈阴性, 大豆球蛋白、 $\beta$ -伴大豆球蛋白和植酸含量均低于市售豆乳粉, 胰蛋白酶抑制剂比冰泉速溶豆乳粉低 15.32%, 大豆凝集素比永和豆浆粉低 14.00%。数据表明经本工艺制得的豆乳粉豆香味浓郁, 溶解状态良好, 其中大豆球蛋白、 $\beta$ -伴大豆球蛋白和植酸含量均显著低于市售豆乳粉。

**关键词:** 抗营养因子; 豆乳粉; 喷雾干燥; 助干剂

文章编号: 1673-9078(2017)12-184-190

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.12.028

## S Study on the Spray Drying Technology for production of Soybean Milk Powder with Low Anti-nutritional Factors

ZHAO Qiao-li<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, LIAO Zhen-lin<sup>1</sup>, HU Hui-gang<sup>2</sup>, FANG Xiang<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (2. South Subtropical Crops Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524091, China)

**Abstract:** The spray drying technique for producing soybean milk powder with low anti-nutritional factors was studied and compared with 6 kinds of commercial soybean milk powders. The papain hydrolyzed soybean milk was prepared by traditional raw pulp processing. By investigating the physical characteristics of soybean milk powder, the optimal spray drying processing conditions were determined as follows: inlet temperature of 185 °C, inlet flow rate of 350 mL/min, the hydrophilic monoglyceride and twain 80 (3:2) dosage of 2.0%, and the maltodextrin dosage of 5.4%. Under these conditions, the wettability and dispersibility were 74.05% and 11.94% higher than those of ice spring soybean milk powder, respectively. The solubility was better than those of other commercial soybean milk powder except for Weiwei and Black Bull branded soybean milk powders. The urease activity was negative, the contents of  $\beta$ -conglycinin, glycinin and phytic acid were lower than that of commercial soybean milk powder, trypsin inhibitor was 15.32% lower than that of ice spring soybean milk powder, and soybean agglutinin was 14.00% lower than that of Yonghe soybean milk powder. The data indicated that the soybean milk powder produced by the process had good flavor and solubility, and the contents of glycinin,  $\beta$ -conglycinin and phytic acid were significantly lower than that of commercially soybean milk powder.

**Key words:** anti-nutritional factors; soybean milk powder; spray drying processing; drying aid

豆乳是将大豆经水浸泡后进行碾磨、过滤和煮制而成的一种胶状高蛋白饮品, 其营养丰富, 不但利于人体消化吸收, 而且还是防治高血脂、高血压和动脉粥样硬化等疾病的理想食品<sup>[1]</sup>。但豆乳中残留有多种抗营养因子 (Antinutritional factors, ANFs), 目前研

收稿日期: 2017-07-19

基金项目: 广东省应用型科技研发专项 (2015B020230010); 广东省农业技术需求研究与示范项目 (2016LM3179); 国家星火计划 (2015GA780080)

作者简介: 赵巧丽 (1990-), 女, 硕士, 研究方向: 食品工程

通讯作者: 方祥 (1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术

究较多的主要有胰蛋白酶抑制剂(trypsin inhibitor, TI)、脲酶 (urease)、抗原蛋白 (soybean antigen protein, SPA)<sup>[2,3]</sup>、大豆凝集素 (soybean lectin, SBA) 和植酸 (phytic acid)<sup>[4,5]</sup>等, 这些抗营养因子不仅干扰营养物质的消化、吸收和利用, 而且还会危害人体健康。因此, 降低豆乳中的抗营养因子活性是近年来营养学研究的热点。目前, 本实验室已采用热处理结合木瓜蛋白酶水解法制得低抗营养因子豆乳, 经检测其脲酶活性呈阴性, 胰蛋白酶抑制剂和  $\beta$ -伴球蛋白残留率分别为 14.5% 和 56.6%, 但制得的豆乳口味单一, 保质

期短, 储运十分不便。采用喷雾干燥<sup>[6,7]</sup>工艺将豆乳制成豆乳粉后, 不仅可满足人们对食品方便、安全、营养、保健的要求, 而且还可作为食品辅料应用到食品加工的各个领域<sup>[8]</sup>。

在豆粉加工过程中, 速溶性一直是豆乳粉的标志性指标, 由于内、外部因素影响及生产技术的限制, 导致其冲调性能变差, 进而影响豆乳粉的品质和口感<sup>[9]</sup>, 因此, 提高豆乳粉的速溶性尤为重要。现已研究出的提高豆乳粉速溶性的方法主要有添加蔗糖和糊精、添加酪蛋白酸钠、添加大豆磷脂、添加高亲水亲油值(HLB)的蔗糖脂肪酸酯等。基于此, 本文在前期研究的基础上, 以实验室自制的酶解豆乳为原料, 筛选适宜的乳化剂及助干剂对豆乳进行调配, 通过优选的喷雾干燥工艺研制低抗营养因子速溶豆乳粉, 旨在为豆乳的产品加工提供一种新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

华夏3号大豆, 由华南农业大学农学院提供; 木瓜蛋白酶, 购自广州穗泽生物科技有限公司; 酪蛋白酸钠、大豆卵磷脂、蔗糖酯、亲水性单甘酯、吐温60、吐温80、麦芽糊精, 均为食品级, 购自广州成硕生化试剂有限公司。维维豆奶粉、黑牛豆奶粉、春仁堂红枣豆浆、冰泉速溶豆乳粉、永和豆浆、智力豆浆粉, 市售, 购自当地卜蜂联华超市。

低分子量标准蛋白、胰蛋白酶、植酸钠、酪蛋白、考马斯亮蓝R-250、苯甲酰-L-精氨酸-对硝基苯胺盐酸盐(BAPNA)均购自美国Sigma公司; 大豆抗原蛋白酶联免疫分析试剂盒, 大豆凝集素酶联免疫分析试剂盒均购自上海羽朵生物科技有限公司; 其余试剂均为分析纯试剂, 水为去离子水。

### 1.2 仪器与设备

LX-B50L 高压灭菌锅, 广州深化生物技术有限公司; DYY-7C 型电泳仪, 北京六一仪器厂; ZY-8000 实验型喷雾干燥剂, 上海紫裕生物科技有限公司; Multiskan MK3 酶标仪, 上海始恒仪器设备有限公司; HWS24 电热恒温水浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; UV-1100 紫外分光光度计, 广州深化生物技术有限公司; P-700 打浆机, 厦门惠健电子科技有限公司; AL204 分析天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 工艺流程

大豆→筛选→清洗→浸泡(豆水比1:3 g/mL、10 h)→热烫(90 °C、10 min)→磨浆(豆水比1:6 g/mL)→过滤→调配→煮浆(100 °C、6 min)→酶解(53 °C、10 min、酶活力3500 U/mL、pH 6.5)→过滤→喷雾干燥→过筛→成品

#### 1.3.2 喷雾干燥工艺参数的优选

分别对不同进风温度(170、175、180、185、190、195、200 °C)和不同进料速度(300、350、400、450、500 mL/h)进行喷雾干燥单因素试验, 测定豆乳粉的物理性质, 确定最佳进风温度和进料速度。

#### 1.3.3 低抗营养因子豆乳粉的调配

在豆乳中分别添加酪蛋白酸钠、大豆卵磷脂、亲水性单甘酯、蔗糖脂肪酸酯、吐温60、吐温80进行调配, 以不加乳化剂为对照。喷雾干燥后比较产品的分散性、润湿性、堆积密度和溶解度, 选出作用效果较好的乳化剂及其配比和用量。

#### 1.3.4 喷雾干燥助剂量的确定

以麦芽糊精为干燥助剂, 添加量分别为0.9、1.8、2.7、3.6、4.5、5.4、6.3、7.2、8.1、9.0% (m/V), 以不添加干燥助剂为对照。喷雾干燥后比较豆乳粉的粘壁特性、物理性质及感官品质, 确定麦芽糊精的最佳添加量。

#### 1.3.5 低抗营养因子豆乳粉与市售豆乳粉的对比

取市售豆乳粉和自制豆乳粉各10 g, 加入60 mL蒸馏水, 充分搅拌使豆乳粉完全溶解为豆乳, 分别测定其中大豆抗原蛋白、脲酶、胰蛋白酶抑制剂、大豆凝集素和植酸含量, 并进行物理性质对比。

#### 1.3.6 抗营养因子的活性测定

##### 1.3.6.1 胰蛋白酶抑制剂(TI)

参照文献[10, 11]的方法, 稍作修改: 取1 mL豆乳, 加入50 mL Tris-CaCl<sub>2</sub>缓冲溶液(0.05 mol/L, pH 8.2), 于30 °C、150 r/min振荡提取3 h, 3000 r/min离心10 min, 取上清液, 稀释备用。酶反应试管加入1 mL样品稀释液, 1 mL Tris-CaCl<sub>2</sub>缓冲液, 5 mL BAPNA溶液, 摇匀, 37 °C预热10 min。加入2 mL胰蛋白酶溶液, 摇匀, 37 °C反应10 min; 加入1 mL 30%乙酸溶液终止反应, 于410 nm处比色。空白试管加入2 mL Tris-CaCl<sub>2</sub>缓冲溶液, 5 mL BAPNA溶液, 1 mL、30%乙酸溶液, 摇匀, 37 °C预热10 min, 加入2 mL胰蛋白酶液, 摇匀, 37 °C反应10 min, 取出冷却至室温。

活性的表示: 定义为每10 mL反应体系在波长410 nm处减少0.01吸光度值为1个胰蛋白酶抑制剂活性单位(TIU), 则:

$$TIU = \frac{\text{样品 } OD_{410} - \text{空白 } OD_{410}}{0.01} \quad (1)$$

胰蛋白酶抑制剂活性=TIU<sub>无抑制</sub>-TIU<sub>样品</sub> (2)

### 1.3.6.2 脲酶 (UA)

采用 GB/T 8622-2006《饲料用大豆制品中尿素酶活性的测定》<sup>[12]</sup>的方法测定。

### 1.3.6.3 大豆凝集素 (SBA)

参照徐晓峰等<sup>[13]</sup>的方法: 取 1 mL 豆乳, 加入 10 mL、0.85% NaCl 溶液, 搅匀, 4 °C 冰箱浸泡 48 h, 每日搅 2~3 次, 使充分溶出。10000 r/min 离心 20 min (4 °C), 收集上清液。大豆凝集素含量测定按大豆凝集素 ELISA 试剂盒 (96 孔) 的方法进行。

### 1.3.6.4 大豆球蛋白和 $\beta$ -伴大豆球蛋白

参照唐堂等<sup>[14]</sup>的方法, 并稍作修改。取 1 mL 豆乳, 加入 20 mL、0.03 mol/L Tris-HCl 缓冲液 (pH 8.0、含 0.01 mol/L  $\beta$ -巯基乙醇), 于 28 °C、150 r/min 摇床中浸提 1 h, 4000 r/min 离心 20 min, 取上清液。大豆球蛋白和  $\beta$ -伴大豆球蛋白含量测定分别按照对应的 ELISA 试剂盒 (96 孔) 的方法进行。

### 1.3.6.5 大豆蛋白 SDS-PAGE 分析

参照 Laemmli<sup>[15]</sup>的方法, 在垂直电泳槽中制胶, 分离胶浓度 12%, 浓缩胶浓度 5%, 采用甘氨酸电极缓冲液。上样量为 20  $\mu$ L, 浓缩胶段用 80 V 恒压, 分离胶段采用 120 V 恒压, 直至指示剂溴酚蓝移至离胶板底线 0.5 cm 为止。采用低分子量标准蛋白为参考, 考马斯亮蓝 R-250 于 50 °C 染色 30 min, 0.5 mol/L NaCl 溶液在摇床上脱色过夜, 直至出现清晰电泳条带为止。

### 1.3.6.6 植酸

标准曲线的制作: 取 200  $\mu$ g/mL 植酸标准溶液 0、1、2、3、4、5 mL, 依次加入 0.05% FeCl<sub>3</sub> 溶液 3 mL, 0.5% 磺基水杨酸和 0.2 mol/L 邻苯二甲酸氢钾盐酸缓冲溶液 (pH 3.5) 各 5 mL, 定容至 25 mL, 混匀后沸水浴 20 min, 冷却, 以空白管为参比, 在 500 nm 处读取 OD 值, 并制作标准曲线。

样品溶液的测定: 取 1.0 g 样品, 加入 0.8 mol/L

HCl, 于 50 °C 水浴振荡浸提 5 h, 4000 r/min 离心 30 min, 取上清液。移取 5 mL 上清液于 25 mL 比色管中, 后续操作同标准曲线的操作方法。通过标准曲线计算出植酸含量。

### 1.3.7 喷雾干燥粉物性测定

#### 1.3.7.1 分散性

参照吴玉营<sup>[8]</sup>的方法, 取 5 g 豆乳粉于 100 mL 烧杯中, 加入 50 mL 去离子水, 以一定的速度在恒温磁力搅拌器上搅拌, 记录从搅拌到粉快全部分散开所需的时间。

#### 1.3.7.2 润湿性

在一个 250 mL 烧杯中加入 200 mL 蒸馏水, 取 1.0 g 豆乳粉均匀平铺于水面上, 测定从样品加入至完全沉降所需的时间。

#### 1.3.7.3 堆积密度

将豆乳粉从漏斗散落至 10 mL 量筒中, 测定 10 mL 豆乳粉的重量, 从而换算出堆积密度。

#### 1.3.7.4 溶解度

参照王丽华<sup>[16]</sup>的方法测定豆乳粉的溶解度。

#### 1.3.7.5 沉淀指数

参照王丽华<sup>[16]</sup>的方法测定豆乳粉的沉淀指数。

#### 1.3.7.6 水分含量测定

参照 GB/T 5009.3-2016 食品中水分的检测方法测定。

### 1.3.8 数据分析

采用 Microsoft office 2013 软件和 SPSS 软件对数据进行统计分析, 每次试验处理均重复 3 次, 结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 喷雾干燥条件的选择

#### 2.1.1 进风温度对豆乳粉物理性质的影响

表 1 进风温度对豆乳粉物理性质的影响

Table 1 Effects of inlet air temperature on the physical properties of soybean milk powder treated by spray drying

进风温度/°C	水分含量/%	润湿性/s	分散性/s	堆积密/[ $\times 10^{-2}$ (g/mL)]	溶解度/(g/100 g)
170	3.32 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	154.33 $\pm$ 2.49 <sup>a</sup>	75.33 $\pm$ 1.63 <sup>ab</sup>	24.19 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	79.11 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>
175	2.67 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>	145.30 $\pm$ 2.05 <sup>bc</sup>	72.67 $\pm$ 0.89 <sup>b</sup>	21.58 $\pm$ 0.52 <sup>b</sup>	79.45 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>
180	1.87 $\pm$ 0.08 <sup>c</sup>	135.00 $\pm$ 2.16 <sup>d</sup>	67.21 $\pm$ 1.53 <sup>c</sup>	21.67 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	79.42 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>
185	1.33 $\pm$ 0.11 <sup>d</sup>	122.34 $\pm$ 1.70 <sup>e</sup>	59.00 $\pm$ 2.33 <sup>e</sup>	20.78 $\pm$ 0.14 <sup>c</sup>	79.93 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>
190	0.98 $\pm$ 0.10 <sup>e</sup>	135.00 $\pm$ 1.63 <sup>d</sup>	63.63 $\pm$ 2.05 <sup>d</sup>	20.42 $\pm$ 0.17 <sup>c</sup>	79.80 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>
195	0.70 $\pm$ 0.21 <sup>e</sup>	142.31 $\pm$ 2.62 <sup>c</sup>	61.8 $\pm$ 1.05 <sup>d</sup>	19.61 $\pm$ 0.22 <sup>d</sup>	79.25 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>
200	0.67 $\pm$ 0.16 <sup>e</sup>	148.33 $\pm$ 1.25 <sup>b</sup>	78.43 $\pm$ 1.00 <sup>a</sup>	19.56 $\pm$ 0.12 <sup>d</sup>	78.86 $\pm$ 0.12 <sup>b</sup>

注: 润湿性、分散性数值越小越好, 堆积密度和溶解度数值越大越好; 同一列中标有不同字母表示组间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 标有相同字母表示组间差异不显著 ( $p > 0.05$ ); 下同。

从表 1 可知,随着进风温度的升高,豆乳粉的水分含量逐渐降低,润湿性、分散性和溶解度均呈先增大后减小趋势,但温度变化对堆积密度的影响不明显。当进风温度为 185 ℃时,润湿性、分散性和溶解度均达到最佳。进风温度低,豆乳粉水分含量高,粉粒间易粘结,润湿性、分散性变差;进风温度过高,豆乳粉热变性程度增大,进而影响润湿性和分散性。综合考虑,确定进风温度为 185 ℃。

### 2.1.2 进料速度对豆乳粉物理性质的影响

从表 2 可知,当进料速度为 300 mL/h 时,豆乳粉的润湿性、分散性和溶解度均达到最佳状态。此后随着进料速度的增大,豆乳粉的水分含量逐渐增加,润湿性、分散性和溶解度逐渐变差,这可能是由于进料速度增大时,雾滴与热空气接触不充分,水分蒸发不彻底,导致含水量增加,豆乳粉易出现结块现象所致。但进料速度为 300 mL/h 时,喷雾干燥时间较长,能耗高,故选择进料速度为 350 mL/h。

## 2.2 低抗营养因子豆乳粉的调配

### 2.2.1 乳化剂的筛选

由表 3 可知,与无乳化剂的豆乳粉相比,添加乳化剂后豆乳粉的物理性质均有所改善,其中添加亲水性单甘酯的豆乳粉具有较高的润湿性、分散性和堆积密度;吐温系列对豆乳粉的作用效果仅次于亲水性单甘酯,而其他几种乳化剂整体的作用效果均不理想。由于吐温 60 和 80 对豆乳粉的物性影响区别不大,但吐温 80 具有较高的 HLB 值,故选择亲水性单甘酯和

吐温 80 来开展后续试验。

### 2.2.2 乳化剂配比对豆乳粉物理性质的影响

由表 4 可知,随着亲水性单甘酯添加量的增加,吐温 80 添加量的减少,豆乳粉的溶解度变化不明显,润湿性和分散性无明显的规律性,堆积密度则呈逐渐增大趋势;当二者配比为 3:2 时,豆乳粉的润湿性和分散性均达到最佳状态,分别为 72.33 s 和 51.53 s,故确定亲水性单甘酯和吐温 80 配比为 3:2。

### 2.2.3 复配乳化剂用量对豆乳粉物理性质的影响

由表 5 可知,随着复配乳化剂添加量的增加,豆乳粉的润湿性、分散性逐渐提高,堆积密度和溶解度也逐渐增大,当添加量为 2.0%时,分散性、润湿性、堆积密度和溶解度分别为 53.67 s、79.33 s、 $28.40 \times 10^{-2}$  g/mL 和 81.31 g/100 g。此后,继续增大乳化剂用量,分散性、润湿性和堆积密度增加不显著,为节约生产成本,确定复配乳化剂添加量为 2.0%。

### 2.2.4 喷雾干燥助剂量的确定

由表 6 可知,随着麦芽糊精添加量的增加,豆乳粉的润湿性、分散性、堆积密度和溶解度逐渐增大,喷雾干燥效果也越来越好。当添加量为 5.4%时,润湿性、分散性、堆积密度和溶解度分别为 61.70 s、46.67 s、 $29.46 \times 10^{-2}$  g/mL 和 89.67%,豆乳粉干燥效果较好,豆香味明显,无后苦味。此后继续增大麦芽糊精的添加量,豆乳粉的润湿性、分散性、堆积密度和溶解度增大不显著,豆香味不明显,且伴有较重的糊精味。综上所述,麦芽糊精的添加量以 5.4%为宜。

表 2 进料速度对豆乳粉物理性质的影响

Table 2 Effects of inlet flow rate on the physical properties of soybean milk powder treated by spray drying

进料速度/(mL/h)	水分含量/%	润湿性/s	分散性/s	堆积密度/ $[\times 10^{-2}(\text{g/mL})]$	溶解度/(g/100 g)
300	1.20±0.25 <sup>d</sup>	116.67±2.10 <sup>d</sup>	50.89±1.05 <sup>d</sup>	21.40±0.12 <sup>a</sup>	79.55±0.14 <sup>a</sup>
350	1.47±0.09 <sup>c</sup>	124.67±2.49 <sup>c</sup>	52.82±1.33 <sup>d</sup>	21.16±0.05 <sup>b</sup>	79.90±0.06 <sup>a</sup>
400	1.85±0.30 <sup>b</sup>	134.00±2.45 <sup>b</sup>	55.20±0.80 <sup>c</sup>	21.10±0.06 <sup>b</sup>	79.62±0.21 <sup>a</sup>
450	2.01±0.21 <sup>b</sup>	137.11±2.94 <sup>b</sup>	63.67±2.33 <sup>b</sup>	21.14±0.04 <sup>b</sup>	78.98±0.18 <sup>b</sup>
500	2.33±0.13 <sup>a</sup>	157.70±2.87 <sup>a</sup>	69.10±2.89 <sup>a</sup>	21.08±0.05 <sup>b</sup>	78.50±0.11 <sup>b</sup>

表 3 不同乳化剂对豆乳粉物理性质的影响

Table 3 Effects of different emulsifiers on the physical properties of soybean milk powder treated by spray drying

乳化剂种类	润湿性/s	分散性/s	堆积密度/ $[\times 10^{-2}(\text{g/mL})]$	溶解度/(g/100 g)
酪蛋白酸钠	125.67±2.49 <sup>d</sup>	68.00±4.55 <sup>bc</sup>	22.38±0.38 <sup>e</sup>	79.51
大豆卵磷脂	115.71±2.62 <sup>c</sup>	69.03±1.63 <sup>c</sup>	23.92±0.05 <sup>d</sup>	79.71
亲水性单甘酯	82.00±1.63 <sup>a</sup>	52.67±2.10 <sup>a</sup>	30.49±0.18 <sup>a</sup>	80.53
蔗糖酯	94.66±2.62 <sup>b</sup>	57.33±1.25 <sup>a</sup>	23.72±0.11 <sup>d</sup>	80.84
吐温 60	84.68±2.05 <sup>a</sup>	63.30±2.05 <sup>b</sup>	28.81±0.24 <sup>b</sup>	81.15
吐温 80	83.33±2.06 <sup>a</sup>	63.33±1.25 <sup>b</sup>	26.51±0.58 <sup>c</sup>	80.92
无乳化剂	133.72±3.70 <sup>e</sup>	69.00±1.66 <sup>c</sup>	18.08±0.10 <sup>f</sup>	78.46

表4 乳化剂配比对豆乳粉物理性质的影响

Table 4 Effects of the emulsifier ratio on the physical properties of soybean milk powder treated by spray drying

乳化剂配比 (a:b)	润湿性/s	分散性/s	堆积密/[ $\times 10^{-2}$ (g/mL)]	溶解度/(g/100 g)
1:4	84.33 $\pm$ 2.49 <sup>a</sup>	58.33 $\pm$ 1.25 <sup>c</sup>	29.49 $\pm$ 0.65 <sup>a</sup>	79.96
3:2	72.33 $\pm$ 2.87 <sup>b</sup>	51.53 $\pm$ 0.94 <sup>a</sup>	29.44 $\pm$ 0.56 <sup>a</sup>	80.35
2:3	74.67 $\pm$ 3.30 <sup>b</sup>	53.23 $\pm$ 1.70 <sup>ab</sup>	29.52 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	79.61
4:1	82.31 $\pm$ 2.05 <sup>a</sup>	56.33 $\pm$ 2.05 <sup>bc</sup>	30.20 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	80.49

注: a,b 表示亲水性单甘脂和吐温 80 添加比为 a:b。

表5 复配乳化剂用量对豆乳粉物理性质的影响

Table 5 Effects of dosage of compound emulsifier on the physical properties of soybean milk powder treated by spray drying

复配乳化剂添加量/%	润湿性/s	分散性/s	堆积密/ $\times 10^{-2}$ (g/mL)	溶解度/(g/100 g)
0.5	117.00 $\pm$ 8.83 <sup>a</sup>	75.67 $\pm$ 1.70 <sup>a</sup>	26.59 $\pm$ 0.27 <sup>c</sup>	80.14
1.0	97.67 $\pm$ 2.87 <sup>b</sup>	71.00 $\pm$ 1.63 <sup>a</sup>	27.70 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>	80.50
1.5	92.67 $\pm$ 3.09 <sup>b</sup>	60.72 $\pm$ 1.70 <sup>b</sup>	28.37 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	81.30
2.0	79.33 $\pm$ 4.99 <sup>c</sup>	53.67 $\pm$ 2.62 <sup>c</sup>	28.40 $\pm$ 0.30 <sup>a</sup>	81.31
2.5	75.00 $\pm$ 4.32 <sup>c</sup>	51.33 $\pm$ 2.05 <sup>c</sup>	28.33 $\pm$ 0.31 <sup>ab</sup>	81.57
3.0	72.02 $\pm$ 5.10 <sup>c</sup>	49.33 $\pm$ 2.49 <sup>c</sup>	28.45 $\pm$ 0.33 <sup>a</sup>	82.01

表6 麦芽糊精添加量对豆乳粉物理性质及其感官品质的影响

Table 6 Effects of maltodextrin dosage on the physical properties and sensory quality of soybean milk powder treated by spray drying

麦芽糊精添加量/%	润湿性/s	分散性/s	堆积密度/[ $\times 10^{-2}$ (g/mL)]	溶解度/(g/100 g)	对干燥塔的影响	感官评价
0.9	88.00 $\pm$ 2.45 <sup>a</sup>	60.67 $\pm$ 1.70 <sup>a</sup>	25.48 $\pm$ 0.64 <sup>e</sup>	80.16	干燥效果一般, 有较多粉粘壁	淡黄色, 豆香味明显, 后苦味明显
1.8	84.33 $\pm$ 2.05 <sup>a</sup>	57.00 $\pm$ 0.82 <sup>ab</sup>	25.53 $\pm$ 0.42 <sup>e</sup>	80.33	干燥效果一般, 有较多粉粘壁	淡黄色, 豆香味明显, 淡淡后苦味
2.7	76.00 $\pm$ 1.63 <sup>b</sup>	53.67 $\pm$ 2.05 <sup>bc</sup>	26.48 $\pm$ 0.47 <sup>d</sup>	82.21	干燥效果一般, 有较多粉粘壁	淡黄色, 豆香味明显, 淡淡后苦味
3.6	65.67 $\pm$ 2.87 <sup>c</sup>	51.71 $\pm$ 2.87 <sup>c</sup>	27.90 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>	82.70	干燥效果一般, 有较多粉粘壁	淡黄色, 豆香味明显, 无后苦味
4.5	61.00 $\pm$ 1.63 <sup>cd</sup>	51.00 $\pm$ 1.63 <sup>c</sup>	28.06 $\pm$ 0.56 <sup>d</sup>	87.87	干燥效果一般, 有较多粉粘壁	淡黄色, 豆香味明显, 无后苦味
5.4	61.70 $\pm$ 3.68 <sup>cd</sup>	46.67 $\pm$ 0.47 <sup>d</sup>	29.46 $\pm$ 0.48 <sup>c</sup>	89.67	干燥效果很好, 有少量粉粘壁	淡黄色, 豆香味明显, 无后苦味
6.3	60.31 $\pm$ 1.89 <sup>cd</sup>	44.00 $\pm$ 0.82 <sup>d</sup>	30.50 $\pm$ 0.11 <sup>bc</sup>	90.25	干燥效果很好, 有少量粉粘壁	淡黄色, 明显的豆香味, 无后苦味
7.1	60.33 $\pm$ 1.25 <sup>cd</sup>	45.33 $\pm$ 1.70 <sup>d</sup>	30.40 $\pm$ 0.64 <sup>bc</sup>	90.41	干燥效果很好, 有少量粉粘壁	淡黄色, 豆香味稍淡, 少量糊精味
8.1	60.01 $\pm$ 1.63 <sup>d</sup>	44.33 $\pm$ 1.70 <sup>d</sup>	30.99 $\pm$ 0.74 <sup>b</sup>	90.53	干燥效果很好, 有极少量粉粘壁	白色, 豆香味不明显, 有明显糊精味
9.0	60.67 $\pm$ 1.25 <sup>cd</sup>	43.67 $\pm$ 1.70 <sup>d</sup>	33.44 $\pm$ 0.12 <sup>a</sup>	90.72	干燥效果很好, 有极少量粉粘壁	白色, 无豆香味, 有较重的糊精味

## 2.3 低抗营养因子豆乳粉与市售豆乳粉的对 比

### 2.3.1 抗营养因子含量分析

由图 1 和图 2 可知, 低抗营养因子豆乳粉中  $\beta$ -伴球蛋白和大豆球蛋白含量均显著低于市售豆乳粉及熟豆浆 ( $p<0.01$ ), 且  $\beta$ -伴球蛋白的 3 个亚基 ( $\alpha'$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ )、大豆球蛋白的酸性亚基和碱性亚基已被完全降解, 而市售豆乳粉中  $\beta$ -伴球蛋白的 3 个亚基, 大豆球蛋白的酸性和碱性亚基仍大量存在。由表 7 可知, 低抗营养因子豆乳粉中脲酶活性呈阴性, 植酸含量低于市售豆乳粉, 胰蛋白酶抑制剂比冰泉速溶豆乳粉低 15.32%, 大豆凝集素比永和豆浆粉低 14.00%, 除此之外均高于其他市售豆乳粉。

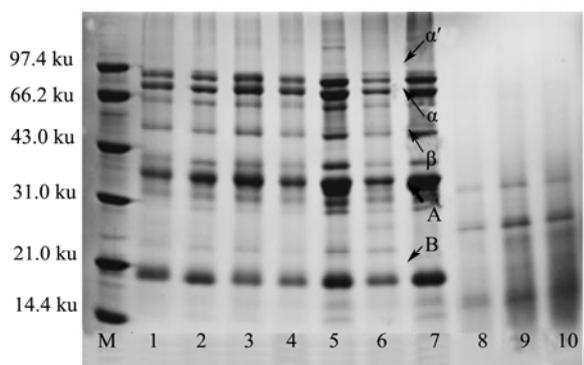


图 1 不同品牌豆乳粉及熟豆浆的 SDS-PAGE 图谱

Fig.1 SDS-PAGE analysis of different brands of soybean milk powder and cooked soybean milk

注: M: marker; 1: 春仁堂红豆浆粉; 2: 智力豆浆粉; 3: 永和豆浆; 4: 黑牛豆奶粉; 5: 冰泉速溶豆乳粉; 6: 维维豆奶粉; 7: 熟豆浆 (对照); 8: 酶解乳; 9: 低抗营养因子豆乳粉; 10: 低抗营养因子豆乳粉 (添加 30 g/100 g 固形物的麦

表 7 不同豆乳粉中抗营养因子含量

Table 7 The contents of anti-nutritional factors in different soybean milk powder

	脲酶/(U/g)	胰蛋白酶抑制剂	大豆凝集素/(ng/g)	植酸/(mg/g)
维维豆奶粉	阴性	未检出	5.99±0.10 <sup>c</sup>	1.46±0.01 <sup>b</sup>
永和豆浆	阴性	未检出	8.64±0.49 <sup>a</sup>	0.90±0.01 <sup>c</sup>
黑牛豆奶粉	阴性	未检出	6.09±0.21 <sup>c</sup>	1.42±0.02 <sup>cd</sup>
智力豆浆粉	阴性	未检出	5.38±0.43 <sup>c</sup>	1.44±0.01 <sup>c</sup>
冰泉速溶豆乳粉	阴性	6.20±0.60 <sup>a</sup>	5.41±0.66 <sup>c</sup>	1.53±0.02 <sup>a</sup>
春仁堂红枣豆浆粉	阴性	2.60±0.10 <sup>b</sup>	5.90±0.63 <sup>c</sup>	1.41±0.01 <sup>d</sup>
低 ANF 豆乳粉	阴性	5.25±0.05 <sup>a</sup>	7.43±0.24 <sup>b</sup>	0.86±0.01 <sup>f</sup>

芽糊精); 熟豆浆中电泳带  $\alpha'$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  是  $\beta$ -伴球蛋白的 3 个亚基, 电泳带 A、B 是大豆球蛋白的酸性亚基和碱性亚基。

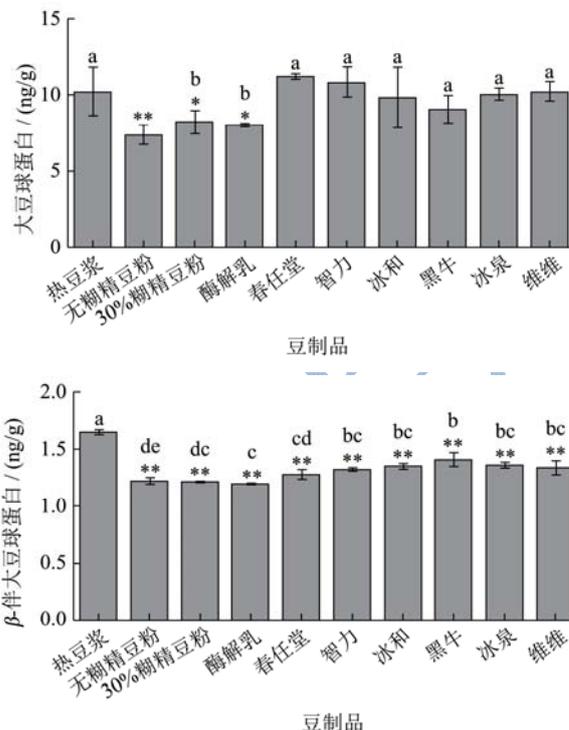


图 2 不同豆乳粉中大豆球蛋白和  $\beta$ -伴球蛋白含量  
Fig.2 The contents of glycinin and  $\beta$ -conglycinin in different soybean milk powder

注: “\*\*\*”表示与熟豆浆相比  $\beta$ -伴球蛋白含量差异极显著 ( $p<0.01$ ); “\*\*”表示与熟豆浆相比  $\beta$ -伴球蛋白含量差异显著 ( $p<0.05$ ); 不同字母表示组间差异显著 ( $p<0.05$ ); 相同字母表示组间差异不显著 ( $p>0.05$ ); 表 7~表 8 同。

### 2.3.2 物理性质比较

由表 8 可知, 低抗营养因子豆乳粉的润湿性和分散性比冰泉速溶豆乳粉高 74.05%和 11.94%, 溶解度除维维和黑牛豆乳粉外, 均优于其它市售豆乳粉。

表8 不同豆乳粉的物理性质

Table 8 The physical properties of different soybean milk powder

豆乳粉品牌	润湿性/s	分散性/s	堆积密度/ $[\times 10^{-2}(\text{g/mL})]$	溶解度/(g/100 g)	水分/%
维维豆奶粉	51.33±2.05 <sup>c</sup>	37.33±2.05 <sup>c</sup>	44.21±1.14 <sup>c</sup>	90.29	2.47±0.01 <sup>c</sup>
冰泉速溶豆乳粉	237.67±3.68 <sup>a</sup>	53.00±3.27 <sup>a</sup>	35.41±0.07 <sup>c</sup>	83.63	1.28±0.25 <sup>f</sup>
黑牛豆奶粉	50.33±1.70 <sup>c</sup>	45.33±0.5 <sup>b</sup>	49.33±1.27 <sup>b</sup>	96.43	1.92±0.03 <sup>e</sup>
春仁堂红枣豆浆	48.33±1.25 <sup>c</sup>	24.00±0.82 <sup>d</sup>	51.40±1.37 <sup>ab</sup>	82.01	3.84±0.08 <sup>a</sup>
永和豆浆	40.00±1.63 <sup>d</sup>	43.30±1.25 <sup>b</sup>	52.12±0.87 <sup>a</sup>	82.33	2.64±0.12 <sup>b</sup>
智力豆浆粉	42.33±1.25 <sup>d</sup>	34.33±1.25 <sup>c</sup>	40.53±1.16 <sup>d</sup>	80.35	2.28±0.10 <sup>d</sup>
低ANF豆乳粉	61.67±3.70 <sup>b</sup>	46.67±0.50 <sup>b</sup>	29.46±0.48 <sup>f</sup>	89.67	2.24±0.29 <sup>d</sup>

### 3 结论

本试验以木瓜蛋白酶水解后的传统生浆工艺制备豆乳为原料,研究其制备低抗营养因子豆乳粉的喷雾干燥工艺,得出优选的喷雾干燥工艺条件为:进风温度为185℃,进料速度为350 mL/h,浆料中添加2.0%的亲水性单甘脂和吐温80(3:2),5.4%的麦芽糊精,制得的豆乳粉润湿性、分散性、堆积密度和溶解度分别为(61.70±3.68) s、(46.67±0.47) s、(29.46±0.48)×10<sup>-2</sup> g/mL和89.67%,其中润湿性和分散性比冰泉速溶豆乳粉高74.05%和11.94%,溶解度除维维和黑牛豆乳粉外,均优于其它市售豆乳粉。抗营养因子含量分析得出豆乳粉中脲酶活性呈阴性,β-伴球蛋白、大豆球蛋白和植酸含量均低于市售豆乳粉,胰蛋白酶抑制剂比冰泉速溶豆乳粉低15.32%,大豆凝集素比永和豆浆粉低14.00%。

### 参考文献

- 曹玉娇.豆浆机制浆工艺的优化及豆浆品质的分析[D].武汉:华中农业大学,2013  
CAO Yu-jiao. The optimization of pulping process and quality analysis of soybean milk [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013
- Wu J J, Cao C M, Ren D D, et al. Effects of soybean antigen proteins on intestinal permeability, 5-hydroxytryptamine levels and secretory IgA distribution in the intestine of weaned piglets [J]. Italian Journal of Animal Science, 2016, 15(1): 174-180
- Wu J J, Zhang Y, Dong J H, et al. Allergens and intestinal damage induced by soybean antigen proteins in weaned piglets [J]. Italian Journal of Animal Science, 2016: 1-9
- Woyengot A, Nyachotic M. Review: Anti-nutritional effects of phytic acid in diets for pigs and poultry-current knowledge and directions for future research [J]. Canadian Journal of Animal Science, 2017, 93(1): 9-21
- Lönnerdal B, Sandberg A S, Sandström B, et al. Inhibitory effects of phytic acid and other inositol phosphates on zinc and calcium absorption in suckling rats [J]. Journal of Nutrition, 2016, 119(2): 211
- 陈清香,黄苇,叶秋雄,等.番木瓜粉喷雾干燥工艺研究[J].现代食品科技,2009,25(1):68-74  
CHEN Qing-xiang, HUANG Wei, YE Qiu-xiong, et al. Spray drying processing technology of papaya powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(1): 68-74
- 王乐凯,赵琳,姚鑫淼.低血糖指数豆乳粉的研制及其血糖指数测定[J].农产品加工·学刊,2005,Z2:98-99  
WANG Le-kai, ZHAO Lin, YAO Xin-miao. Study on soybean milk powder with low glycemic index and the determination of GIs [J]. Academic Periodical of Food Products Processing, 2005, Z2: 98-99
- 吴玉营.无腥无糖速溶豆奶粉的研制[D].无锡:江南大学,2004  
WU Yu-ying. Research and development of sugar-free and beany-free instant soybean milk powder [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2004
- 任媛媛,陈湘宁,程永强.速溶豆乳粉的研究现状[J].食品科学,2004,25(1):233-236  
REN Yuan-yuan, CHEN Xiang-ning, CHENG Yong-qiang. The current research status of instant soybean milk powder [J]. Food Science, 2004, 25(1): 233-236
- 于寒松,甘晶,王玉华,等.熟浆工艺中去除胰蛋白酶抑制因子的参数优化[J].食品工业,2015,6:169-172  
YU Han-song, GAN Jing, WANG Yu-hua, et al. The optimization of eliminate trypsin inhibitor in cooked slurry [J]. Food Industry, 2015, 6:169-172
- 邓慧慧,王世忠,周志江,等.豆浆中抗营养因子的去除方法[J].食品工业科技,2012,33(16):268-272  
DENG Hui-hui, WANG Shi-zhong, ZHOU Zhi-jiang, et al. Inactivation method of anti-nutritional factors in soybean milk [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012,

- 33(16): 268-272
- [12] GB/T 8622-2006, 饲料用大豆制品中尿素酶活性的测定[S]  
GB/T 8622-2006, The determination of urease activity in feed soybean products [S]
- [13] 徐晓峰, 朱才. 大豆凝血素的测定法[J]. 生物技术, 1996, 6(5): 4-46  
XU Xiao-feng, ZHU Cai. The determination method of soybean lectin [J]. Biotechnology, 1996, 6(5): 44-46
- [14] 唐堂, 葛向阳, 彭楠. 大豆 11S 与 7S 抗原蛋白的两种测定方法的研究[J]. 饲料工业, 2009, 30(8): 52-53  
TANG Tang, GE Xiang-yang, PENG Nan. Research of two analysis methods on 11S and 7S antigen protein in soybean [J]. Feed Industry, 2009, 30(8): 52-53
- [15] Laemmli U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 [J]. Nature, 1970, 227: 680-685
- [16] 王丽华. 黑豆乳粉喷雾干燥工艺及品质研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012  
WANG Li-hua. Spray drying and quality research of black bean powder [D]. Changchun: Jilin University, 2012

现代食品科技