



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20150038

## 复合蛋白原料组成对挤压组织化产品特性的影响

耿永然, 李文军, 王奕云, 汪建明

(食品营养与安全教育部重点实验室, 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457)

**摘要:** 以脱脂大豆粉为主要原料, 通过 SYSLG 32-II 挤压膨化实验机, 在水分含量 37%、机筒温度 140 °C、螺杆转速 175 r/min 的挤压操作条件下, 采用单纯形格子点集混料实验设计, 研究脱脂大豆粉、大豆蛋白、小麦蛋白和乳清蛋白等复合蛋白的组成对挤压组织化产品特性的影响。采用因子分析法对复合蛋白挤压组织化产品进行综合评价, 并应用因子分析法和 Scheffe 混料回归分析, 得到复合蛋白混料实验中原料组成对挤压组织化产品综合评分的评分方程。当挤压组织化产品的综合品质最优时, 蛋白原料组成比例为脱脂大豆粉: 大豆蛋白: 小麦蛋白: 乳清蛋白 = 7.30 : 0.75 : 0.90 : 1.05。

**关键词:** 复合蛋白; 挤压组织化; 混料设计

中图分类号: TS202.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2016)01-0017-05

## Effect of Compound Protein Compositions on Extrusion Texturization

GENG Yongran, LI Wenjun, WANG Yiyun, WANG Jianming

(Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Ministry of Education, College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** SYSLG 32-II extrusion-expansion testing machine was used to analyze the effect of compound protein compositions including defatted soy bean flour, soy bean protein, wheat protein, and whey protein on the properties of extrusion texturization under the following extrusion condition: 37% of water content, at 140 °C barrel temperature, and the screw speed of 175 r/min; and the four-factor, second-order, simple-lattice point set was used to create a mixture design. Factor analysis was used to obtain a comprehensive evaluation of the compound protein extrusion texturization products. Besides, factor analysis and Scheffe mixture regression analysis were also used to acquire the overall score of the extrusion texturization products in the mixture experiment. The comprehensive quality of the extrusion texturization products was highest when the ratio of defatted soy bean flour to soy bean protein, wheat protein and whey protein was 7.30 : 0.75 : 0.90 : 1.05.

**Key words:** compound protein; extrusion texturization; mixture design

我国植物蛋白资源丰富, 但有效利用率低。大豆、花生压榨油脂后产生的饼粕, 以及小麦、玉米等淀粉加工后得到的副产物谷朊粉, 是营养丰富、物美价廉的植物性蛋白来源<sup>[1]</sup>, 但其中 90% 以上作为饲料, 仅有 5% 左右用于食品工业, 这与我国居民膳食优质蛋白摄入水平较低的状况极不相称<sup>[2]</sup>。在我国优质蛋白资源长期处于短缺的状态下, 大力开发植物蛋白资源, 提高植物蛋白的有效利用率是关系到国计民生的战略性问题。利用挤压组织化技术生产组织化植物蛋白, 可以扩大植物蛋白的应用范围, 有效缓解

我国植物蛋白有效利用率低的现状<sup>[3]</sup>。

不同来源的植物蛋白有相同的性质, 也有各自的特点。对不同来源植物蛋白质进行复合挤压, 能得到营养价值全面、质构良好的产品。以挤压组织化技术为基础, 通过植物蛋白复合挤压生产的蛋白组织化仿肉制品具有高蛋白、低脂肪、不含胆固醇等优点<sup>[4-5]</sup>, 具有较强的吸水性、吸油性, 类似于动物肉的组织结构和口感<sup>[6-8]</sup>。但影响挤压组织化蛋白产品特性的因素有很多, 所以有必要对挤压组织化的相关过程进行研究<sup>[9]</sup>。本文以脱脂大豆粉为主要原料, 在水分含量

收稿日期: 2015-03-28; 修回日期: 2015-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31271904)

作者简介: 耿永然(1991—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生; 通信作者: 汪建明, 教授, wjm-1115@126.com。

37%、机筒温度 140 °C、螺杆转速 175 r/min 的挤压操作条件下,采用单纯形格子点集混料实验设计,研究脱脂大豆粉、大豆蛋白、小麦蛋白和乳清蛋白等复合蛋白的组成对挤压组织化产品特性的影响,为复合蛋白挤压组织化产品的开发提供理论基础和参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

豆粕,蛋白质含量(干基)39.4%,市售;大豆蛋白,蛋白质含量(干基)84.5%,山东济宁耐特食品有限公司;乳清蛋白,蛋白质含量(干基)78.5%,丹麦 Arla Foods;小麦蛋白,蛋白质含量(干基)75.0%,河南省封丘县华丰粉业有限公司。将豆粕粉碎至 60% 以上过 40 目筛,得到脱脂大豆粉,并将所得脱脂大豆粉作为挤压组织化实验的主要原料。

### 1.2 仪器设备

BCD-268 型冰箱,青岛海尔电冰箱股份有限公司;SYSLG 32-II 型挤压膨化实验机,济南赛百诺科技开发有限公司;TA.XT plus 型质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;DC-P3 型全自动测色色差仪,北京兴光测色仪器有限公司。

### 1.3 色度测定

使用 DC-P3 型全自动测色色差仪,对干燥后挤压组织化产品的样品进行色度分析,每个样品取 5 个平行测定,结果以“平均值 ± 标准差”表示。其中,  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  可由色差仪读出,色差  $\Delta E$  由式(1)求得。

$$\Delta E = [(L^* - L_s^*)^2 + (a^* - a_s^*)^2 + (b^* - b_s^*)^2]^{0.5} \quad (1)$$

式中:  $L_s^*$ 、 $a_s^*$ 、 $b_s^*$  为标准白色板的测定值,分别为 97.13、0.21、1.87。

### 1.4 物性测定

将自然冷却的新鲜挤压组织化产品切成长

10 mm 的小块,调整物料含水率为 37%,使用 TA.XT plus 型质构仪(TPA 模式,P/36R 探头),对挤压组织化产品的硬度、弹性、黏聚性、咀嚼度、胶着度和回复性等指标进行测定。测试前速度为 5 mm/s,测试速度为 1 mm/s,测试后速度为 1 mm/s,下压程度为 50%,往复 2 次,间隔时间 5 s。每个样品取 3 个平行测定,结果以“平均值 ± 标准差”表示。

### 1.5 溶剂保持力测定

称取 1.000 g 样品粉末于 50 mL 带盖离心管中,分别加入 5.00 g 蒸馏水、50% 蔗糖溶液、5% 碳酸钠溶液和 5% 乳酸溶液作溶剂,剧烈摇晃离心管至样品粉末与溶剂混合均匀,静置溶胀 20 min,溶胀过程中每隔 5 min 混匀 1 次,每次摇晃 5 s 左右。溶胀结束后,立即将离心管置于离心机中,3 000 r/min 离心 15 min。离心后缓慢弃去上清液,将离心管倒置于滤纸上排水 10 min,带盖称量。溶剂保持力(SRC)按照式(2)计算。

$$SRC = \left( \frac{m_3 - m_1}{m_2} \times \frac{86}{100 - w} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $m_1$  为称取样品的质量, g;  $m_2$  为空离心管和盖子的质量, g;  $m_3$  为排水后离心管、盖子和样品的质量, g;  $w$  为称取样品的水分含量, %。

### 1.6 复合蛋白挤压组织化产品的特性分析

采用混料实验设计,研究复合蛋白原料组成对挤压组织化产品特性的影响。

实验利用 SYSLG 32-II 型挤压膨化实验机,在水分含量 37%、机筒温度 140 °C、螺杆转速 175 r/min 的挤压操作条件下,研究复合蛋白原料(脱脂大豆粉、大豆蛋白、小麦蛋白和乳清蛋白)的组成对挤压组织化产品特性的影响。采用四因素二阶单纯形格子点集 {4, 2} 混料设计,实验方案见表 1。

表 1 单纯形格子点集 {4, 2} 混料实验方案  
Tab. 1 Simplex lattice method {4, 2} of mixture design

| 实验号 | 编码    |       |       |       | 成分含量/%         |               |               |               |
|-----|-------|-------|-------|-------|----------------|---------------|---------------|---------------|
|     | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | 脱脂大豆粉( $Z_1$ ) | 大豆蛋白( $Z_2$ ) | 小麦蛋白( $Z_3$ ) | 乳清蛋白( $Z_4$ ) |
| 1   | 1     | 0     | 0     | 0     | 1              | 0             | 0             | 0             |
| 2   | 0     | 1     | 0     | 0     | 0.70           | 0.30          | 0             | 0             |
| 3   | 0     | 0     | 1     | 0     | 0.70           | 0             | 0.30          | 0             |
| 4   | 0     | 0     | 0     | 1     | 0.70           | 0             | 0             | 0.30          |
| 5   | 1/2   | 1/2   | 0     | 0     | 0.85           | 0.15          | 0             | 0             |
| 6   | 1/2   | 0     | 1/2   | 0     | 0.85           | 0             | 0.15          | 0             |
| 7   | 1/2   | 0     | 0     | 1/2   | 0.85           | 0             | 0             | 0.15          |
| 8   | 0     | 1/2   | 1/2   | 0     | 0.70           | 0.15          | 0.15          | 0             |
| 9   | 0     | 1/2   | 0     | 1/2   | 0.70           | 0.15          | 0             | 0.15          |
| 10  | 0     | 0     | 1/2   | 1/2   | 0.70           | 0             | 0.15          | 0.15          |

1.7 复合蛋白挤压组织化产品的综合评价

本实验基于因子分析的综合评价模型<sup>[10]</sup>,对复合蛋白挤压组织化产品特性综合评价.通过因子分析法构建因子载荷阵,并应用最大正交旋转法得到简化的因子载荷阵;根据式(3)计算各样本的因子得分 $f_1, f_2, \dots, f_m$ .

$$\tilde{f} = (I + L^* \Psi^{-1} L)^{-1} L^* \Psi^{-1} (X - \mu) \quad (3)$$

以各因子对原始变量的方差贡献率  $a_1, a_2, \dots, a_m$  为权重系数,建立综合评价指标见式(4);根据式(4)计算每个样品的  $E$  值,得  $E_1, E_2, \dots, E_n$ ,即得到

每个样本的综合评分.

$$E = a_1 f_1 + a_2 f_2 + \dots + a_m f_m \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 复合蛋白挤压组织化产品的特性分析

对处理好的样品进行色度、物性以及溶剂保持力测定,结果见表2.表2是为了对得到的不同原料配比下的产品特性进行 Scheffe 混料回归分析.以各产品特性指标为目标参数,对原料成分进行分析,构建的 Scheffe 模型参数见表3.

表2 混料实验挤压组织化产品特性

Tab. 2 Properties of the extruded products based on mixture design

| 实验号 | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | $\Delta E$ | 硬度/<br>g  | 弹性/<br>mm | 黏聚性/<br>(g·s) | 胶着度/<br>g | 咀嚼度/<br>g | 回复性/<br>% | WSRC/<br>% | SSRC/<br>% | LASRC/<br>% | SCSRC/<br>% |
|-----|-------|-------|-------|------------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|
| 1   | 37.64 | 3.45  | 14.37 | 60.89      | 5 272.469 | 0.608     | 0.308         | 1 718.723 | 1 054.199 | 0.128     | 243.81     | 261.70     | 258.71      | 201.02      |
| 2   | 41.30 | 4.00  | 17.45 | 58.09      | 1 780.757 | 0.590     | 0.215         | 414.046   | 246.901   | 0.104     | 232.89     | 273.67     | 263.82      | 201.51      |
| 3   | 39.27 | 3.02  | 15.38 | 59.50      | 5 611.748 | 0.667     | 0.472         | 2 643.278 | 1 761.110 | 0.168     | 227.62     | 269.12     | 235.58      | 190.19      |
| 4   | 40.58 | 4.20  | 15.25 | 58.26      | 1 227.640 | 0.577     | 0.146         | 184.164   | 107.355   | 0.086     | 209.58     | 256.11     | 237.60      | 197.30      |
| 5   | 41.19 | 2.91  | 16.11 | 57.79      | 3 420.397 | 0.661     | 0.276         | 954.450   | 629.221   | 0.118     | 215.47     | 269.53     | 252.02      | 205.22      |
| 6   | 37.43 | 3.55  | 14.85 | 61.19      | 5 533.946 | 0.603     | 0.399         | 2 224.502 | 1 324.851 | 0.148     | 213.10     | 272.50     | 260.91      | 195.11      |
| 7   | 39.87 | 3.82  | 16.40 | 59.19      | 2 080.541 | 0.622     | 0.203         | 423.402   | 263.089   | 0.101     | 200.69     | 265.61     | 254.93      | 193.58      |
| 8   | 39.05 | 2.86  | 15.57 | 59.76      | 4 994.235 | 0.663     | 0.402         | 2 017.373 | 1 335.934 | 0.151     | 202.71     | 272.18     | 252.47      | 198.50      |
| 9   | 41.25 | 4.09  | 17.31 | 58.11      | 2 022.487 | 0.663     | 0.293         | 620.304   | 410.474   | 0.125     | 196.12     | 265.79     | 237.60      | 192.41      |
| 10  | 39.24 | 3.02  | 15.26 | 59.49      | 9 103.136 | 0.647     | 0.437         | 4 027.373 | 2 596.559 | 0.171     | 162.39     | 250.90     | 217.89      | 185.32      |

注: WSRC、SSRC、SCSRC、LASRC 分别表示蒸馏水溶剂保持力、蔗糖溶剂保持力、碳酸钠溶剂保持力和乳酸溶剂保持力.

表3 复合蛋白原料组成对挤压组织化产品特性的回归分析

Tab. 3 Regression analysis of the relationship between the protein complexes and the qualities of the extrusion textured products

| 方程项       | $L^*$  | $a^*$  | $b^*$  | $\Delta E$ | 硬度/<br>g   | 弹性/<br>mm | 黏聚性/<br>(g·s) | 胶着度/<br>g  | 咀嚼度/<br>g  | 回复性/<br>% | WSRC/<br>% | SSRC/<br>% | LASRC/<br>% | SCSRC/<br>% |
|-----------|--------|--------|--------|------------|------------|-----------|---------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|
| $x_1$     | 37.64  | 3.45   | 14.37  | 60.89      | 5 272.47   | 0.61      | 0.31          | 1 718.72   | 1 054.20   | 0.13      | 243.80     | 261.70     | 258.70      | 201.00      |
| $x_2$     | -3.67  | 30.64  | 18.41  | 104.45     | -3 062.07  | -1.38     | -0.45         | 852.21     | -973.23    | -0.01     | 918.36     | 245.70     | 563.48      | 79.78       |
| $x_3$     | 74.96  | -7.78  | 18.51  | 25.30      | 3 546.23   | 1.88      | 0.57          | 3 447.19   | 5 986.68   | 0.26      | 892.91     | 65.48      | -246.08     | 180.56      |
| $x_4$     | 23.80  | 6.11   | -32.16 | 64.10      | 28 174.57  | -0.41     | 0.51          | 13 031.48  | 7 781.68   | 0.17      | 938.69     | 34.59      | -21.63      | 361.33      |
| $x_1 x_2$ | 76.44  | -36.22 | 8.89   | -75.56     | -4 720.71  | 2.76      | 0.64          | -4 974.87  | -947.96    | 0.09      | -1 015.56  | 80.00      | -411.11     | 175.56      |
| $x_1 x_3$ | -45.56 | 14.00  | -1.11  | 44.22      | 4 081.67   | -1.53     | 0.40          | 1 933.40   | -3 680.16  | 0.00      | -1 004.44  | 315.56     | 611.11      | -22.22      |
| $x_1 x_4$ | 33.78  | -0.22  | 70.67  | -17.11     | -51 978.38 | 1.31      | -1.07         | -23 468.51 | -14 119.47 | -0.27     | -1 155.56  | 297.78     | 300.00      | -246.67     |
| $x_2 x_3$ | -54.89 | -28.89 | -37.56 | 42.89      | 57 688.11  | 1.53      | 2.60          | 21 720.49  | 14 752.38  | 0.67      | -1 224.44  | 35.56      | 124.44      | 117.78      |
| $x_2 x_4$ | 13.78  | -0.44  | 42.67  | -2.89      | 23 035.04  | 3.53      | 5.00          | 14 275.51  | 10 370.93  | 1.33      | -1 117.78  | 40.00      | -582.22     | -311.11     |
| $x_3 x_4$ | -30.44 | -26.22 | -2.44  | 27.11      | 252 597.42 | 1.11      | 5.69          | 116 162.31 | 73 881.18  | 1.96      | -2 497.78  | -520.00    | -831.11     | -375.56     |

注: WSRC、SSRC、SCSRC、LASRC 分别表示蒸馏水溶剂保持力、蔗糖溶剂保持力、碳酸钠溶剂保持力和乳酸溶剂保持力.

2.2 产品的综合评价与原料最优配比

2.2.1 挤压产品目标参数的因子分析

依据因子分析原理和挤压组织化产品特性指标间的相关性,构建挤压组织化产品目标参数的因子载荷矩阵,并计算目标参数相关矩阵的特征值及其累积贡献率,结果见表4.由表4可知,前4个因子对目标参数特征值的累积贡献率已经达到93.66%,基本可以表示全部因子对目标参数的影响.因此,选取前

4个因子作为目标参数分析的主因子,构建方差极大正交旋转因子载荷矩阵,结果见表5.

由表5可知:因子 $f_1$ 对挤压组织化产品的 $L^*$ 、 $b^*$ 和 $\Delta E$ 起到主要支配作用,对产品的硬度起到次要支配作用,而这些指标大多表征的是产品的色度,因此可以把因子 $f_1$ 称为色度因子;因子 $f_2$ 对挤压组织化产品的溶剂保持力起到主要支配作用,因子 $f_4$ 对挤压组织化产品在5%乳酸溶液中的溶剂保持力起到次

要支配作用,而这些指标均反映的是产品的溶剂保持力,因此可以把因子  $f_2$  和因子  $f_4$  称为溶剂保持力因子;因子  $f_3$  对挤压组织化产品的  $a^*$ 、硬度、弹性、黏聚性、胶着度、咀嚼度和回复性起到主要支配作用,而这些指标大多反映的是产品的质构特征,因此可以把因子  $f_3$  称为质构因子。

表4 目标参数相关阵的特征值及其累积贡献率

Tab. 4 Eigen values and the cumulative contribution rate of correlated matrix

| 因子编号 | 特征值     | 百分率/%    | 累积贡献率/%   |
|------|---------|----------|-----------|
| 1    | 7.363 6 | 52.597 0 | 52.597 0  |
| 2    | 2.979 5 | 21.282 1 | 73.879 2  |
| 3    | 1.984 0 | 14.171 1 | 88.050 3  |
| 4    | 0.785 2 | 5.608 7  | 93.659 0  |
| 5    | 0.382 2 | 2.730 2  | 96.389 2  |
| 6    | 0.324 5 | 2.317 6  | 98.706 8  |
| 7    | 0.112 9 | 0.806 2  | 99.513 0  |
| 8    | 0.063 8 | 0.456 0  | 99.969 0  |
| 9    | 0.004 3 | 0.031 0  | 100.000 0 |

根据各因子方差贡献计算其相应的权重系数,并考虑各指标对挤压组织化产品综合影响,选定因子  $f_1$ 、因子  $f_2$  和因子  $f_3$  的权重为正权,因子  $f_4$  的权重为负权. 计算各个样本的因子得分,结合相应的权重系

数,进行加权求和,即得各个样本的综合评分,然后通过 Min-max 标准化方法对综合评分数据进行线性变换<sup>[11]</sup>,得到标准化的综合评分,结果见表 6.

表5 方差极大正交旋转因子载荷矩阵

Tab. 5 Rotated factor loading matrix

| 产品指标       | 因子 $f_1$ | 因子 $f_2$ | 因子 $f_3$ | 因子 $f_4$ |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| $L^*$      | -0.957 1 | -0.092 6 | -0.200 6 | -0.079 6 |
| $a^*$      | -0.190 7 | -0.043 4 | -0.905 8 | 0.316 1  |
| $b^*$      | -0.860 4 | 0.138 3  | -0.154 5 | 0.386 9  |
| $\Delta E$ | 0.939 5  | 0.139 6  | 0.179 3  | 0.180 9  |
| 硬度         | 0.576 0  | -0.359 5 | 0.697 9  | -0.002 9 |
| 弹性         | -0.346 6 | -0.087 5 | 0.848 2  | 0.078 0  |
| 黏聚性        | 0.400 6  | -0.097 2 | 0.860 1  | 0.257 9  |
| 胶着度        | 0.527 0  | -0.395 6 | 0.723 2  | 0.087 3  |
| 咀嚼度        | 0.489 1  | -0.405 7 | 0.747 4  | 0.079 2  |
| 回复性        | 0.389 4  | -0.198 3 | 0.854 1  | 0.250 2  |
| WSRC       | 0.164 1  | 0.783 1  | -0.229 0 | -0.219 3 |
| SSRC       | -0.187 4 | 0.898 4  | 0.183 7  | 0.300 9  |
| LASRC      | 0.123 4  | 0.908 1  | -0.300 8 | 0.001 5  |
| SCSRC      | -0.180 8 | 0.740 3  | -0.238 0 | -0.559 7 |
| 方差贡献       | 3.966 3  | 3.348 9  | 4.907 4  | 0.889 7  |
| 累计贡献       | 0.283 3  | 0.522 5  | 0.873 0  | 0.936 6  |
| 权重         | 0.300 0  | 0.260 0  | 0.370 0  | 0.070 0  |

注: WSRC、SSRC、SCSRC、LASRC 分别表示蒸馏水溶剂保持力、蔗糖溶剂保持力、碳酸钠溶剂保持力和乳酸溶剂保持力。

表6 样本因子得分与综合评价

Tab. 6 Component score and the comprehensive evaluation values of the samples

| 编号    | $Y(i,1)$  | $Y(i,2)$ | $Y(i,3)$  | $Y(i,4)$ | 综合评分   | 标准化的综合评分 |
|-------|-----------|----------|-----------|----------|--------|----------|
| N(1)  | 15.779 8  | -3.397 3 | 10.478 0  | 1.861 0  | 7.86   | 0.78     |
| N(2)  | 13.849 2  | -4.870 4 | 9.449 0   | 0.443 2  | 6.42   | 0.72     |
| N(3)  | -4.044 2  | 3.283 6  | -5.784 0  | -2.029 6 | -2.64  | 0.35     |
| N(4)  | -1.292 6  | 2.771 8  | -5.309 6  | -2.605 5 | -1.81  | 0.38     |
| N(5)  | -21.028 0 | -3.791 2 | -6.614 4  | 5.465 9  | -9.36  | 0.07     |
| N(6)  | -20.729 6 | -3.054 9 | -11.542 8 | 4.981 6  | -10.94 | 0.00     |
| N(7)  | -5.013 3  | 5.725 2  | -2.149 4  | 0.787 5  | -0.76  | 0.42     |
| N(8)  | 28.047 2  | -1.566 2 | 15.010 1  | -7.637 3 | 13.03  | 1.00     |
| N(9)  | -2.778 0  | -1.345 5 | -0.638 7  | 1.796 8  | -1.29  | 0.40     |
| N(10) | -2.790 6  | 6.244 9  | -2.898 2  | -3.063 6 | -0.50  | 0.44     |

2.2.2 综合评分的回归模型

应用 Scheffe 混料回归分析,以标准化的综合评分作为目标参数,得到混料实验中综合评分方程:

$$Y = 3.220 1x_1 - 7.513 4x_2 - 30.746 5x_3 - 5.780 0x_4 - 32.106 7x_1x_2 + 11.973 2x_1x_3 + 15.173 3x_1x_4 - 27.937 8x_2x_3 - 35.404 3x_2x_4 + 22.239 9x_3x_4$$

由回归方程可知,混料实验中影响挤压组织化产品综合品质的原料组分依次为  $x_3 > x_2 > x_4 > x_1$ , 其中  $x_1$  为正效应,其他组分均为负效应,且 4 个组分两两

之间对产品的综合品质还存在交互作用. 当挤压组织化产品的综合品质最优,即综合评分最大时,  $x_1 : x_2 : x_3 : x_4 = 2 : 5 : 6 : 7$ , 对应的原料组成比例为  $Z_1 : Z_2 : Z_3 : Z_4 = 7.30 : 0.75 : 0.90 : 1.05$ , 即脱脂大豆粉 : 大豆蛋白 : 小麦蛋白 : 乳清蛋白 = 7.30 : 0.75 : 0.90 : 1.05.

2.3 验证实验

在原料组成为脱脂大豆粉 : 大豆蛋白 : 小麦蛋白 : 乳清蛋白 = 7.30 : 0.75 : 0.90 : 1.05 的条件下, 设定水分含量 37%、机筒温度 140 °C、螺杆转速

175 r/min,进行复合蛋白挤压实验,并对色度、质构、溶剂保持力等特性进行测定,以衡量其品质。

表观形态、质构特性和色泽对于评价新型植物蛋白制品十分重要。分析表7中复合蛋白挤压产品  $L^*$ 、 $\Delta E$ 、硬度、胶着度和 SSRC 等指标可知,在原料组成为脱脂大豆粉:大豆蛋白:小麦蛋白:乳清蛋白 = 7.30:0.75:0.90:1.05 的条件下得到的复合挤压蛋白,组织化程度较高、产品质地较软且富有弹性、外观均匀一致、色泽亮白,该条件下得到的挤压组织化产品综合品质最优。

表7 复合蛋白挤压组织化产品特性测定

Tab.7 Determination of the properties of the protein complexes

|     |                    |               |                     |
|-----|--------------------|---------------|---------------------|
| 指标  | $L^*$              | $\Delta E$    | 硬度/g                |
| 测定值 | 41.68 ± 2.51       | 57.79 ± 2.21  | 2 227.640 ± 167.641 |
| 指标  | 弹性/mm              | 黏聚性/(g·s)     | 胶着度/g               |
| 测定值 | 0.670 ± 0.005      | 0.402 ± 0.041 | 2 012.437 ± 167.069 |
| 指标  | 咀嚼度/g              | 回复性/%         | WSRC/%              |
| 测定值 | 1 340.934 ± 90.665 | 0.160 ± 0.007 | 203.60 ± 1.38       |
| 指标  | SSRC/%             | LASRC/%       | SCSRC/%             |
| 测定值 | 270.30 ± 0.64      | 200.80 ± 2.15 | 250.40 ± 2.81       |

注:WSRC、SSRC、SCSRC、LASRC 分别表示蒸馏水溶剂保持力、蔗糖溶剂保持力、碳酸钠溶剂保持力和乳酸溶剂保持力。

### 3 结论

应用因子分析法对不同复合蛋白原料组成的挤压组织化产品特性进行综合评价,通过 Scheffe 混料回归分析,得到复合蛋白混料实验中原料组成对挤压组织化产品评分的方程  $Y = 3.220 1x_1 - 7.513 4x_2 - 30.746 5x_3 - 5.780 0x_4 - 32.106 7x_1x_2 + 11.973 2x_1x_3 + 15.173 3x_1x_4 - 27.937 8x_2x_3 - 35.404 3x_2x_4 + 22.239 9x_3x_4$ 。混料实验中影响挤压组织化产品综合品质的原料组分依次为小麦蛋白>大豆蛋白>乳清蛋白>脱脂大豆粉,但其中脱脂大豆粉组分对复合蛋白挤压组织化产品的综合品质影响为正效应,其他组分均为负效应,且4个组分两两之间对产品的综合品质还存在交互作用。当挤压组织化产品的综合品质最优时,蛋白原料组成比例为脱脂大豆粉:大豆蛋白:小麦蛋白:乳清蛋白 = 7.30:0.75:0.90:1.05。由此得到的复合挤压组织化产品质地柔软、富有弹性,色泽均

匀一致,外观亮白,而且营养价值更加全面,从而为新产品设计开发提供了理论依据。

### 参考文献:

- [1] 石陆娥,唐振兴,俞志明. 谷朊粉的开发与利用[J]. 现代食品科技,2005,21(1):170-173.
- [2] 郑建仙. 现代新型蛋白和油脂食品开发[M]. 北京:科学技术文献出版社,2003:61.
- [3] 贾旭. 小麦谷朊粉在大豆蛋白挤压组织化中的应用研究[D]. 郑州:河南工业大学,2010.
- [4] Ranasinghesagara J, Hsieh F, Yao G. An image processing method for quantifying fiber formation in meat analogs under high moisture extrusion[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(8):450-454.
- [5] Rehrach D, Ahmedna M, Goktepe I, et al. Extrusion parameters and consumer acceptability of a peanut-based meat analogue[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44(10):2075-2084.
- [6] Liu K, Hsieh F. Protein-protein interactions during high-moisture extrusion for fibrous meat analogues and comparison of protein solubility methods using different solvent systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(8):2681-2687.
- [7] Liu S X, Peng M, Tu S, et al. Development of a new meat analog through twin-screw extrusion of defatted soy flour-lean pork blend[J]. Food Science and Technology International, 2005, 11(6):463-470.
- [8] Sun Y, Muthukumarappan K. Changes in functionality of soy-based extrudates during single-screw extrusion processing[J]. International Journal of Food Properties, 2007, 5(2):379-389.
- [9] Alonso R, Orue E, Zabalza M J, et al. Effect of extrusion cooking on structure and functional properties of pea and kidney bean proteins[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(3):397-403.
- [10] 王芳. 主成分分析与因子分析的异同比较及应用[J]. 统计教育,2004,22(5):26-29.
- [11] 贺佳,高尔生,楼超华. 综合评价中权重系数及标准化方法的研究[J]. 中国公共卫生,2001,17(11):1048-1050.

责任编辑:郎婧