

# 正交实验法优化黑豆胡萝卜汁豆腐工艺研究

张馨, 杨豫斐, 谭孟娜, 何述栋

(合肥工业大学 食品科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**以黑豆和胡萝卜为主要原料, 开发具有较强抗氧化能力的豆腐产品。通过质构特性、感官、保水性以及得率评价, 基于正交实验获得黑豆胡萝卜汁豆腐的最佳工艺。单因素实验结果表明, 黑豆胡萝卜汁豆腐的硬度和得率均随豆浆浓度和凝固剂添加量的增加而增大; 随着胡萝卜汁添加量的增加, 胶粘性、得率、保水率均呈逐渐降低趋势, 当添加量为15%时, 感官接受度最高。正交实验优化结果表明, 影响抗氧化能力的因素主次为: 豆水比 > 胡萝卜汁添加量 > 凝固剂添加量, 最佳工艺条件为豆水比1:5(W/V)、胡萝卜汁添加量为15%(V/V)、凝固剂添加量为0.8%(W/V)。在此工艺条件下, 豆腐抗氧化活性最高。

**关键词:**豆腐; 抗氧化能力; 质构特性; 感官评价; 正交实验

**中图分类号:**TS 214.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2017)05-0014-05

## Optimization of processing conditions of black beans carrot juice tofu by orthogonal experiment

ZHANG Xin, YANG Yu-fei, TANG Meng-na, HE Shu-dong

(School of Food Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009)

**Abstract:** A kind of tofu with a strong antioxidant capacity was developed with black beans and carrots as the main raw materials. The processing conditions for black beans carrot juice tofu were optimized by orthogonal experiment with the texture properties, sensory evaluation, yield and water-retaining property as the indexes. The single factor experimental results indicated that the hardness and yield increased with the increase of black bean milk concentration and amount of coagulant. The glueyness, yield, water-retaining property were decreased with the increase of carrot juice quantity, the sensory acceptability was the highest when the additive amount was 15% (V/V). The order of the factors affecting the antioxidant capacity was the ratio of bean to water > carrot juice quantity > amount of coagulant, respectively. The optimal process condition was: the ratio of bean to water 1:5 (W/V), carrot juice quantity 15% (V/V), amount of coagulant 0.8% (W/V). Under this condition, tofu had the best antioxidant capacity.

**Key words:** tofu; antioxidant capacity; texture properties; sensory evaluation; orthogonal experiment

随着人民生活水平的不断提高, 选择食品着眼点已从温饱型转向保健型<sup>[1-2]</sup>。机体内抗氧化酶活性会因年龄增长而下降, 导致过多自由基不能被及时清除而堆积在细胞内, 对细胞产生毒性, 使细胞膜、组织、酶以及基因受损, 从而引起机体多种疾病

的发生和机体的衰老<sup>[3]</sup>。因此, 抗氧化性食品的开发具有重要的现实意义。

王萌等研究表明, 黑豆蛋白质中的必需氨基酸组成结构水平总体优于黄豆, 且其黄酮及类黄酮类物质含量较高, 是很好的抗氧化剂来源<sup>[4-5]</sup>。豆腐是重要的传统食品之一, 营养丰富, 蛋白质含量高于大多数食物且容易被人体吸收<sup>[6]</sup>。若将黑豆制成深受消费者喜爱的豆制品, 将能更好地发挥其功能。但是以黑豆为原料生产的豆腐类产品色泽较深, 感官接受度较低, 因此, 本实验拟加入同样具有抗氧化

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 合肥工业大学国家级大学生创新训练项目(201610359069); 安徽省科技攻关项目(1604a0702029); 安徽省科技重大专项项目(16030701081); 安徽省自然科学基金项目(1708085MC70)

作者简介: 张馨, 1994年出生, 女, 在读本科生。

通讯作者: 何述栋, 1984年出生, 男, 讲师, 博士。

能力的胡萝卜汁,以提高豆腐的色泽接受度。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

黑豆、胡萝卜:市售;豆腐:安徽八公山豆制品有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):梯希爱(上海)化成工业有限公司;豆制品消泡剂(食品级):天津洁润食品有限公司;无水乙醇、石膏粉:天津洁润食品有限公司。

### 1.2 仪器与设备

JM50型立式胶体磨:温州市瓯海梧田华慧乳化机械厂;KQ5200DE型数控超声波清洗器:昆山市超声仪器有限公司;JYL-C50T料理机:九阳股份有限公司;ThermoFisher FC型全自动酶标仪:美国Thermo公司;TA-XTplus物性测试仪:英国Stable公司;LGJ-12冷冻干燥机:北京松源华兴科技发展有限公司;SC-3614型低速离心机:安徽省中科中佳科学仪器有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 黑豆胡萝卜汁豆腐制备

##### 1.3.1.1 胡萝卜汁制备

筛选出充分成熟且无病虫害的胡萝卜,用水清洗,按原料与复合磷酸盐(磷酸钠4%、磷酸氢二钠0.5%、焦磷酸钠0.5%)溶液比1:3(W/V)混合,于95℃下处理3min后去皮,用水漂洗后将其切成厚度为0.5cm的薄片,按胡萝卜与水比(W/V)1:1放入胶体磨榨汁,将制得的胡萝卜汁用100目纱布过滤,过滤后的胡萝卜汁放入冰箱冷藏备用<sup>[6]</sup>。

##### 1.3.1.2 黑豆胡萝卜汁豆腐制备工艺流程

挑选优质黑豆,水洗后,按水:豆(W/V)3:1

加水于常温下浸泡8h,浸泡完的大豆沥尽水,放入胶体磨中磨浆,用100目纱布过滤,用电磁炉煮浆,在第1次沸腾后加入胡萝卜汁,搅拌均匀,煮至第2次沸腾后停止。调温至80℃点浆,点浆时边搅拌边加入凝固剂,置于80℃的恒温水浴锅中蹲脑30min,放入豆腐模具中用5kg的重物压制成型。

#### 1.3.2 黑豆胡萝卜汁豆腐最佳工艺条件确定

单因素实验中以豆腐感官评价、保水性、得率以及质构特性确定最佳工艺条件。设置正交实验因素水平为豆水比(W/V):1:4、1:5、1:6、1:7、1:8,胡萝卜汁的添加量(V/V):0%、5%、10%、15%、20%,凝固剂添加量(W/V):0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%。

正交实验优化。在单因素实验的基础上,选择豆水比、胡萝卜汁添加量、凝固剂添加量为实验因素,以抗氧化能力的大小为评定指标,进行 $L_9(3^4)$ 正交实验<sup>[7]</sup>。因素水平见表1。

表1 正交实验因素水平

因素/水平	1	2	3
豆水比(W/V)	1:5	1:6	1:7
胡萝卜汁添加量/(V/V)	10	15	20
凝固剂添加量/(W/V)	0.6	0.8	1.0

#### 1.3.3 豆腐品质评价指标

##### 1.3.3.1 感官评价

随机邀请具有豆腐生产经验的男女评价员各6位,分别从口感、凝固状态、色泽、风味、组织状态对黑豆胡萝卜汁豆腐进行感官评价。感官评价的评分标准见表2。

表2 感官评价标准

项目	评分标准		
口感 (20分)	口感爽口、细腻 (14~20分)	较爽口细腻 (8~13分)	不爽口、粗糙 (0~7分)
凝固状态 (20分)	有弹性、指压不破碎 (14~20分)	较有弹性、指压不破碎 (8~13分)	无弹性、指压破碎 (0~7分)
色泽 (20分)	暗红色,色泽均匀 (14~20分)	暗红色,色泽不均匀(8~13分)	颜色不正常,色泽不均匀(0~7分)
风味 (20分)	鲜美可口,有胡萝卜味 (14~20分)	有滋味,胡萝卜味较淡(8~13分)	无滋味,无胡萝卜味 (0~7分)
组织状态 (20分)	细腻、滑嫩、不粗糙、孔隙均匀且大小均匀 (14~20分)	较细腻、较嫩滑、粗糙、孔隙均匀较大 (8~13分)	不细嫩、不滑嫩、粗糙、孔隙不均匀 (0~7分)

##### 1.3.3.2 保水率

取一定质量的豆腐样品,称重记为 $W_1$ ,在4000r/min的条件下离心15min,去除上清液后,记重 $W_2$ ,然后将样品置于105℃下干燥6h,记重 $W_3$ <sup>[8]</sup>。

保水率的计算公式如下:

$$\text{保水率}/\% = (W_2 - W_3) / (W_1 - W_3) \times 100$$

##### 1.3.3.3 质构测定

取新鲜豆腐样品,切成1cm正方体,水平放在

物性分析仪载物台上,进行 TPA 物性测试。实验参数设定:P/100 型号探头,测前速度 1 mm/s,测试速度 2 mm/s,测后速度 1 mm/s,2 次压缩时间间隔 5 s,下压距离 20%,感应力 5 g,触发点为 20 g。平行测定 3 次<sup>[9]</sup>。

1.3.3.4 豆腐得率测定

取黑豆胡萝卜汁豆腐成品在室温下称量,计算每 100 g 干豆所得到的豆腐质量。

$$\text{豆腐得率}/\% = \frac{\text{湿基豆腐质量}/\text{g}}{\text{干基大豆质量}/\text{g}} \times 100$$

1.3.3.5 抗氧化能力测定

采用 DPPH 自由基清除率表征样品抗氧化性,在干燥后的豆腐样品中加入无水乙醇浸提,离心后取出上层清液,用 0.45 μm 膜进行过滤。每个样品做 3 次重复,用酶标仪测自由基的清除率<sup>[10-11]</sup>。将样品加入 DPPH 试剂的吸光度记为  $A_p$ ,样品加入无水乙醇的吸光度记为  $A_c$ ,DPPH 试剂加入无水乙醇的吸光度记为  $A_{max}$ ,自由基清除率计算公式如下:

$$\text{自由基清除率}/\% = (1 - \frac{A_p - A_c}{A_{max}}) \times 100$$

1.3.4 黑豆胡萝卜汁豆腐营养成分测定

脂肪含量测定:按 GB/T 5009.6—2003《食品中脂肪的测定》中规定的索式提取法进行测定;蛋白质含量测定:按 GB 5009.5—2010《食品中蛋白质的测定》中规定的凯氏定氮法进行测定;水分含量测定:按 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》中规定的直接干燥法进行测定;胡萝卜素含量测定:按 GB 5009.83—2003《食品中胡萝卜素的测定》中规定的纸层析法进行测定;黑色素含量测定:取 5 g 烘干后的豆腐粉末样品,置于 100 mL 锥形瓶中,按料液比 1:40(W/V)加入 40% 的乙醇提取剂,调节 pH 值 < 3.5,密封后在 60 °C 恒温水浴中提取 2 h。抽滤收集滤液,在恒温干燥箱中于 60 °C 下烘至恒重<sup>[12-13]</sup>,计算每 5 g 豆腐中黑色素粗产品的质量。

$$\text{豆腐中黑色素含量}/\% = \frac{\text{黑色素粗产品质量}/\text{g}}{\text{豆腐粉末的质量}/\text{g}} \times 100$$

100

2 结果与分析

2.1 单因素实验分析

2.1.1 豆水比对黑豆胡萝卜汁豆腐品质的影响

豆水比对豆腐品质的影响见表 3 和 4。由表 3 和表 4 可知,随豆浆浓度的降低,豆腐硬度和保水率逐渐减弱,咀嚼性和胶粘性呈先增加后降低的趋势,豆水比为 1:5、1:6(W/V)时各项指标相差较小。当

蛋白含量达到一定浓度时,加热会使其变性后形成凝胶结构<sup>[14]</sup>,故豆浆的浓度对豆腐的凝胶效果、保水率及其品质影响较大<sup>[15-16]</sup>。豆水比在 1:8(W/V)时,豆浆浓度过低,豆腐的质地软、得率和保水率均偏低<sup>[17]</sup>。当豆水比为 1:6(W/V)时,刀切有一定韧性,硬度适中,咀嚼性和胶粘性较好,保水率和得率也均处于较高水平,感官评价发现此时口感、风味最佳,硬度适中,因此,综合考虑选取最佳豆水比为 1:6。

表 3 豆水比对豆腐质构特性的影响

豆水比(W/V)	硬度/g	咀嚼性	弹性	胶粘性
1:4	380.67 ± 26.31 <sup>a</sup>	221.89 ± 46.50 <sup>a</sup>	0.95 ± 0.00 <sup>a</sup>	233.49 ± 48.43 <sup>a</sup>
1:5	321.67 ± 17.55 <sup>ab</sup>	263.17 ± 60.77 <sup>a</sup>	0.95 ± 0.15 <sup>a</sup>	275.95 ± 59.74 <sup>a</sup>
1:6	309.33 ± 47.05 <sup>abc</sup>	297.35 ± 23.96 <sup>a</sup>	0.95 ± 0.07 <sup>a</sup>	338.60 ± 25.44 <sup>a</sup>
1:7	293.67 ± 10.06 <sup>bc</sup>	252.79 ± 30.13 <sup>a</sup>	0.93 ± 0.25 <sup>a</sup>	269.96 ± 36.90 <sup>a</sup>
1:8	244.67 ± 22.67 <sup>c</sup>	223.71 ± 43.35 <sup>a</sup>	0.95 ± 0.01 <sup>a</sup>	235.72 ± 40.54 <sup>a</sup>

表 4 豆水比对豆腐品质影响

豆水比(W/V)	保水率/%	得率/%	感官评价/分
1:4	94.87 ± 6.24 <sup>ab</sup>	156.98 ± 0.69 <sup>a</sup>	77 ± 3.21 <sup>b</sup>
1:5	95.08 ± 3.37 <sup>ab</sup>	150.87 ± 0.53 <sup>a</sup>	87 ± 7.20 <sup>a</sup>
1:6	94.33 ± 2.29 <sup>ab</sup>	147.80 ± 0.77 <sup>b</sup>	89 ± 5.45 <sup>ab</sup>
1:7	93.27 ± 1.50 <sup>a</sup>	140.52 ± 0.67 <sup>c</sup>	82 ± 1.78 <sup>c</sup>
1:8	91.96 ± 5.40 <sup>b</sup>	138.83 ± 0.34 <sup>d</sup>	73 ± 3.06 <sup>bc</sup>

2.1.2 胡萝卜汁添加量对豆腐品质的影响

胡萝卜汁添加量对豆腐品质的影响实验结果见表 5 和 6。由表 5 和表 6 可知,随胡萝卜汁添加量的增多,豆腐的硬度、保水率、得率均有逐渐下降的趋势,对胶粘性和咀嚼性差异不显著。胡萝卜汁添加量过多导致豆腐的硬度、保水率、得率下降;添加量过少,则豆腐的颜色过深且没有胡萝卜的香味。在豆浆中添加胡萝卜汁,会降低大豆蛋白各成分之间的稳定性,影响豆腐的成型效果<sup>[18]</sup>。由感官评价可知,胡萝卜汁添加量为 15% 时,豆腐的色泽均匀,指压不破碎,口感风味为最佳,且质构特性与对照组差距不大。综合考虑,最佳胡萝卜汁添加量为 15%。

表 5 胡萝卜汁添加量对质构特性的影响

胡萝卜汁添加量/%	硬度/g	咀嚼性	弹性	胶粘性
0	375.54 ± 11.55 <sup>a</sup>	286.70 ± 26.77 <sup>a</sup>	0.94 ± 0.05 <sup>a</sup>	303.60 ± 13.06 <sup>a</sup>
5	367.53 ± 1.55 <sup>b</sup>	269.58 ± 11.08 <sup>a</sup>	0.96 ± 0.02 <sup>a</sup>	280.52 ± 5.37 <sup>b</sup>
10	358.46 ± 8.87 <sup>bc</sup>	253.07 ± 8.58 <sup>ab</sup>	0.95 ± 0.03 <sup>a</sup>	267.67 ± 0.55 <sup>b</sup>
15	339.84 ± 5.96 <sup>c</sup>	259.31 ± 1.72 <sup>a</sup>	0.97 ± 0.01 <sup>a</sup>	267.93 ± 4.76 <sup>b</sup>
20	291.53 ± 1.38 <sup>d</sup>	218.93 ± 9.83 <sup>b</sup>	0.96 ± 0.08 <sup>a</sup>	227.40 ± 8.78 <sup>c</sup>

表6 胡萝卜汁添加量对豆腐品质的影响

胡萝卜汁添加量/%	保水率/%	得率/%	感官评价/分
0	94.55 ± 0.42 <sup>a</sup>	151.31 ± 0.64 <sup>a</sup>	85 ± 5.34 <sup>a</sup>
5	94.07 ± 0.19 <sup>ab</sup>	150.82 ± 0.59 <sup>ab</sup>	78 ± 3.82 <sup>b</sup>
10	93.21 ± 0.34 <sup>bc</sup>	149.87 ± 0.75 <sup>ab</sup>	80 ± 1.48 <sup>b</sup>
15	92.80 ± 0.36 <sup>c</sup>	149.18 ± 0.71 <sup>b</sup>	87 ± 0.63 <sup>c</sup>
20	90.29 ± 0.48 <sup>d</sup>	139.69 ± 0.67 <sup>c</sup>	76 ± 2.91 <sup>bc</sup>

### 2.1.3 凝固剂添加量对豆腐品质的影响

凝固剂添加量对豆腐品质的影响实验结果见表7和表8。由表7和表8可知,随着凝固剂添加量增加,豆腐的硬度、粘度、咀嚼性和得率也随之增加,而保水率逐渐下降,弹性变化不大。凝固剂添加量对豆腐凝胶网络结构的影响较大<sup>[18-19]</sup>,凝固剂添加量在1.0%~1.2%范围内,豆腐的结构紧凑,密实性增加,水分和蛋白流失过多<sup>[16]</sup>,导致豆腐的硬度过高,表面结构疏松,保水率和感官接受度均较低;凝固剂用量在0.4%~0.6%范围时,豆腐的质地偏软,刀切韧性不好,咀嚼性较差,得率偏低。当添加量为0.8%时,得率、保水率均处于较高水平,硬度适中,且感官接受度达到最高。综合考虑,确定凝固剂的添加量为0.8%。

表7 凝固剂添加量对豆腐质构特性的影响

凝固剂添加量/%	硬度/g	咀嚼性	弹性	胶粘性
0.4	261.57 ± 35.94 <sup>c</sup>	223.66 ± 29.63 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>a</sup>	236.93 ± 33.56 <sup>b</sup>
0.6	260.91 ± 7.52 <sup>c</sup>	228.59 ± 9.33 <sup>b</sup>	0.96 ± 0.15 <sup>a</sup>	236.69 ± 6.67 <sup>b</sup>
0.8	340.37 ± 29.94 <sup>b</sup>	285.84 ± 24.69 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>a</sup>	303.69 ± 27.49 <sup>b</sup>
1.0	437.86 ± 25.19 <sup>a</sup>	367.55 ± 12.67 <sup>a</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>a</sup>	391.29 ± 17.80 <sup>a</sup>
1.2	459.62 ± 27.03 <sup>a</sup>	392.61 ± 37.79 <sup>a</sup>	0.95 ± 0.11 <sup>a</sup>	414.56 ± 35.23 <sup>a</sup>

表8 凝固剂添加量对豆腐品质的影响

凝固剂添加量/%	保水率/%	得率/%	感官评价/分
0.4	93.89 ± 0.30 <sup>b</sup>	139.20% ± 7.24 <sup>a</sup>	75.24 ± 1.42 <sup>c</sup>
0.6	93.42 ± 0.48 <sup>ab</sup>	145.68% ± 5.27 <sup>a</sup>	77.46 ± 5.07 <sup>a</sup>
0.8	94.09 ± 0.14 <sup>a</sup>	149.56% ± 6.10 <sup>a</sup>	86.71 ± 4.38 <sup>a</sup>
1.0	92.16 ± 0.18 <sup>a</sup>	149.56% ± 5.12 <sup>a</sup>	80.20 ± 3.02 <sup>b</sup>
1.2	92.16 ± 0.53 <sup>a</sup>	149.00% ± 4.13 <sup>a</sup>	82.55 ± 3.44 <sup>ab</sup>

## 2.2 正交实验分析

### 2.2.1 正交实验结果分析

选取豆水比(A)、胡萝卜汁添加量(B)、凝固剂添加量(C)3个因素,以自由基清除率为指标,进行

$L_9(3^4)$ 正交实验,获取最佳工艺条件。实验结果见表9、图1。

表9 正交实验结果与极差分析

实验号	A 豆水比 (W/V)	B 胡萝卜汁添加量 /%	C 凝固剂添加量 /%	D 空白列	自由基清除率 /%
1	1(1:5)	1(10%)	1(0.6%)	1	56.0
2	1	2(15%)	2(0.8%)	2	57.7
3	1	3(20%)	3(1.0%)	3	54.5
4	2(1:6)	1	2	3	47.5
5	2	2	3	1	50.0
6	2	3	1	2	51.2
7	3(1:7)	1	3	2	40.3
8	3	2	1	3	45.4
9	3	3	2	1	39.1
$K_1$	168.2	143.8	152.6	145.1	
$K_2$	148.7	153.1	144.3	147.5	
$K_3$	124.8	144.8	144.8	149.2	
R	43.4	9.30	8.30	4.10	

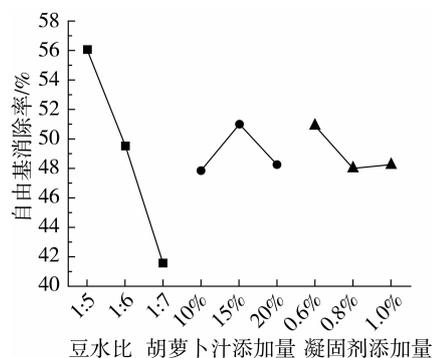


图1 正交实验结果极差分析

由表10方差分析实验结果可知,相关系数  $R^2 = 0.992$ ,校正相关系数  $R_{Adj}^2 = 0.968$ ,实验与实际情况相关性较高。豆水比对豆腐自由基清除率的影响高度显著( $P < 0.05$ ),胡萝卜汁添加量和凝固剂添加量对自由基清除率有一定的影响( $P > 0.05$ )。由图1和表7可知,各因素对自由基清除率影响的主次顺序为A(豆水比) > B(胡萝卜汁添加量) > C(凝固剂添加量),表明黑豆的抗氧化物质是清除自由基的主要原因;适当的胡萝卜汁添加可以有效提高豆腐的抗氧化性<sup>[20]</sup>,但是当胡萝卜汁添加量过大时,降低了黑豆浆的浓度,从而影响了产品的

表10 正交实验方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	Sig
豆水比	315.002	2	111.879	19.000	0.009*
胡萝卜汁添加量	17.376	2	6.171	19.000	0.139
凝固剂量	14.442	2	5.129	19.000	0.163
误差	2.816	2			

注:  $R^2 = 0.992$  ( $Adj R^2 = 0.968$ ); \* 表示差异显著( $P < 0.05$ )。

抗氧化性;凝固剂添加量增大,豆腐表面结构疏松,抗氧化物质有一定流失。自由基清除率最高时工艺条件为  $A_1 B_2 C_2$ , 即最佳工艺条件为豆水比 1:5 (W/V)、胡萝卜汁添加量为 15% (V/V)、凝固剂添加量为 0.8% (W/V)。在此工艺条件下,豆腐自由基清除率可达 57.7%。

### 2.2.2 验证实验

为验证实验结果的准确性,根据正交实验的最优组合  $A_1 B_2 C_2$  进行验证实验。进行 3 次平行实验取平均值,与正交实验最优组合值 57.7% 接近,且得率为 151.27%,方案可行。与市售豆腐的抗氧化能力做对照实验,结果表明黑豆胡萝卜汁豆腐的抗氧化能力明显高于市售豆腐。实验结果见表 11、表 12。

表 11 验证实验结果

实验次数	1	2	3
自由基清除率/%	57.2	56.8	57.7
平均清除率/%	57.2 (RSD=0.008)		

表 12 对照实验结果

指标/种类	黑豆胡萝卜汁豆腐	市售豆腐
平均清除率/%	57.2 ± 0.45	32.6 ± 0.73

### 2.2.3 产品质量评价

对经验证过的最优组合的黑豆胡萝卜汁豆腐产品的营养成分进行测定,结果其胡萝卜素含量为 0.48%、黑色素含量为 0.61 mg/g、含水量为 74.28%、粗脂肪含量为 3.46%、蛋白质含量为 13.26%、灰分含量为 5.14% 符合 GB/T 22106—2008 非发酵豆制品中对豆腐类产品的理化指标的要求。大肠菌群 ≤ 100 CFU/g,符合 GB 2714—2014 中卫生标准的要求。

## 3 结论

通过单因素实验和正交实验优化了黑豆胡萝卜汁豆腐的加工工艺。单因素实验结果表明,豆腐的得率、硬度均随豆浆浓度的增加而增大,随着凝固剂添加量的增多豆腐的硬度和得率均有逐渐增大的趋势,确定豆腐的生产工艺参数为豆水比 1:6 (W/V)、胡萝卜汁添加量为 15% (V/V)、凝固剂添加量为 0.8% (W/V)。正交实验结果表明各因素对豆腐抗氧化能力的影响主次顺序为:豆水比 > 胡萝卜汁添加量 > 凝固剂添加量,优化出的最佳工艺组合为  $A_1 B_2 C_2$ , 即豆水比 1:5 (W/V)、胡萝卜汁添加量为 15% (V/V)、凝固剂添加量为 0.8% (W/V)。在此最佳条件下,自由基清除率可达 57.2%,得率为 151.27%。

## 参考文献:

- [1] 秦琦, 张英蕾, 张守文. 黑豆的营养保健价值及研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2015(7):145-150.
- [2] 侯利霞, 阎洁. 胡萝卜彩色豆腐制作工艺的研究[J]. 农产品加工·学刊, 2009(3):114-116.
- [3] 范晓岚, 杨军, 糜漫天, 等.  $\beta$ -胡萝卜素的抗氧化作用与疾病预防[J]. 中国公共卫生, 2003, 19(4):479-480.
- [4] 王萌, 阮美娟. 黑豆提取物抗氧化性的研究[J]. 食品科技, 2007, 32(3):123-125.
- [5] 丛建民. 黑豆的营养成分分析研究[J]. 食品工业科技, 2008(4):262-264.
- [6] 朱秀灵, 车振明, 唐洁, 等. 胡萝卜复合磷酸盐去皮实验研究[J]. 食品科技, 2004(6):35-38.
- [7] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交实验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52-55.
- [8] 郑明静, 周美龄, 刘华丰, 苏晓芳, 曾绍校. 山矾豆腐的加工工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(21):128-132.
- [9] 张建. 基于 TPA 测试的蔬菜猪肉丸质地特性研究[J]. 肉类研究, 2009(12):23-27.
- [10] Maizura M, Aminah A, Aida W M W. Antioxidant capacity and consumer acceptability of herbal egg tofu[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 65:549-556.
- [11] 艾小钰, 高玮, 黄霞, 等. 不同茶饮产品的抗氧化能力分析及其感官评价[J]. 食品工业科技, 2015(20):164-167.
- [12] 谢宇奇, 零学仕, 周作树, 等. 枫香树叶黑色素粗产品提取工艺的优化[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11):348-351.
- [13] 李红姣, 李巨秀, 赵忠. 响应面实验优化超声波辅助提取山杏种皮黑色素工艺及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2016, 37(18):26-33.
- [14] Tseng Y C, Xiong Y L. Effect of inulin on the rheological properties of silken tofu coagulated with glucono- $\delta$ -lactone [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(4):511-516.
- [15] Rekha C R, Vijayalakshmi G. Influence of processing parameters on the quality of soycurd (tofu) [J]. Journal of Food Science & Technology, 2013, 50(1):176-180.
- [16] Kao F J, Su N W, Lee M H. Effect of calcium sulfate concentration in soymilk on the microstructure of firm tofu and the protein constitutions in tofu whey[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(21):6211-6216.
- [17] 燕平梅, 薛文通, 任媛媛, 等. 豆腐凝固过程的研究概况[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(3):75-77.
- [18] Kong F, Chang S K. Changes in protein characteristics during soybean storage under adverse conditions as related to tofu making. [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(2):387-393.
- [19] 刘志胜, 李里特, 辰巳英三. 豆腐盐类凝固剂的凝固特性与作用机理的研究[J]. 中国粮油学报, 2000, 15(3):39-42.
- [20] 宋力, 孙玉聪, 王延芳, 等. 微波法提取萝卜中抗氧化物质的工艺及多酚含量的测定[J]. 化学世界, 2016, 57(4):221-225. 完