

## 藜麦发酵工艺优化及活性研究

### Optimization of fermentation technology and the activities of quinoa

韩林<sup>1,2</sup> 杨人乙<sup>1,2</sup> 胡悦<sup>1,2</sup> 蒋维<sup>1,2</sup>

HAN Lin<sup>1,2</sup> YANG Ren-yi<sup>1,2</sup> HU Yue<sup>1,2</sup> JIANG Wei<sup>1,2</sup>

(1. 重庆三峡学院生物与食品工程学院, 重庆 404100; 2. 渝东北特色生物资源开发利用工程中心, 重庆 404100)

(1. College of Life Science and Engineering of Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China;

2. Engineering Center of Characteristic Biological Resources in Northeast of Chongqing, Chongqing 404100, China)

**摘要:**为了提高藜麦的营养价值,增强其功能活性,在单因素试验的基础上,采用响应面法优化藜麦发酵工艺,提高总酚含量,并对其抗氧化活性和抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性进行了比较研究。结果表明,藜麦发酵的最佳工艺条件为菌种添加量 1.7%,发酵时间 80 h,水分添加量 16 mL,该条件下发酵后的藜麦中总酚含量为 $(5.31 \pm 0.11)$  mg/g,显著高于未发酵藜麦中总酚的含量 $[(2.17 \pm 0.08)$  mg/g],其中槲皮素和香草酸的含量经发酵后分别可达 $(113.4 \pm 8.73)$ , $(44.7 \pm 2.54)$  mg/kg。活性试验表明,藜麦发酵后对 DPPH 和 ABTS 自由基的清除能力显著提高, $IC_{50}$  分别为 16.42, 1.51 mg/mL,对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用平均可提高 12.41%。因此,发酵处理可显著提高藜麦中总酚的含量,增强其营养价值和生物活性。

**关键词:**藜麦;发酵;总酚;抗氧化; $\alpha$ -葡萄糖苷酶

**Abstract:** In order to enhance the nutritive value and functional activity of quinoa, response surface methodology was employed to optimize the fermentation technology based on the single factor experiment to increase the total phenols. Moreover, the antioxidant and  $\alpha$ -glucosidase inhibiting activity of quinoa were compared. The results showed that the optimal fermentation conditions were as follow: yeast 1.7%, fermentation time 80 h, moisture content 16 mL, and the average content of total phenols from fermented quinoa was reached to  $(5.31 \pm 0.11)$  mg/g under these conditions, which was close to the predicted value with the relative error is only 1.12%. Moreover, compared to unfermented quinoa, the fermentation treatments could obviously increase the content of total phenols, especially quercetin and vanillic acid, which reached to  $(113.4 \pm 8.73)$  mg/kg and  $(44.7 \pm 2.54)$  mg/kg, respectively. The activity as-

say indicated that the scavenging activity against DPPH and ABTS free radicals of the fermented quinoa were remarkably increased, with the  $IC_{50}$  were 16.42 mg/mL and 1.51 mg/mL, respectively. Meanwhile, the  $\alpha$ -glucosidase inhibiting activity was averagely increased 12.41%. Therefore, the fermented treatment of quinoa could obviously increase the content of total phenols, and enhance its nutritive value and biological activity.

**Keywords:** auinoa; fermentation; total phenols; antioxidant;  $\alpha$ -glucosidase

藜麦(*Chenopodium quinoa*)又称昆诺阿藜、南美藜等,是一种原产于南美洲的蓼科类植物,约 250 个品种,有着 5 000 多年的种植历史<sup>[1-2]</sup>。藜麦营养丰富,含有大量蛋白质、碳水化合物和其它活性成分,其蛋白质平均含量高达 15%,高于大米、玉米、大麦等粮食作物,主要由白蛋白(35%)和球蛋白(37%)构成;淀粉含量约占藜麦总重的 52%~69%,同时膳食纤维含量也高达 7.0%~9.7%<sup>[1]</sup>。此外,大量研究<sup>[3-5]</sup>表明,藜麦中多酚含量也非常丰富,主要由槲皮素、芦丁、山奈酚、阿魏酸、原儿茶酚及香草酸等活性成分组成。研究<sup>[1,6]</sup>发现,藜麦具有抗氧化、抗炎、降血糖和减肥等多种生理功效,而这些功能活性与藜麦中丰富的营养成分,特别是多酚、黄酮及皂苷类物质密不可分。因此,提高藜麦中功能活性成分的含量便可大大增加其营养和经济价值。郭谋子等<sup>[2]</sup>研究表明,浸泡及催芽处理可提高藜麦中膳食纤维和黄酮类化合物的含量,使其营养更加均衡合理。然而国内外关于发酵处理对藜麦中活性成分如多酚的影响则鲜有报道。

本试验选用酵母菌对藜麦进行发酵处理,并利用响应面法优化其发酵工艺,考察各因素对藜麦发酵过程中多酚积累的影响。同时,应用 HPLC 对发酵前后藜麦中的主要酚类物质进行分析,比较发酵前后对藜麦抗氧化和抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的影响,旨在探索提升藜麦营养和经济价值的新方法,为藜麦的深入开发和利用提供理论依据。

**基金项目:**重庆市教委科学技术研究项目(编号:KJ1601010);重庆三峡学院青年项目(编号:15QN10)

**作者简介:**韩林(1985—),男,重庆三峡学院讲师,硕士。

E-mail: hanlin730@163.com

**收稿日期:**2018-01-02

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

酵母菌:安琪酵母股份有限公司;

藜麦:山西稼祺农业科技有限公司;

槲皮素、芦丁、山奈酚、阿魏酸标准品:纯度为98%,上海源叶生物科技有限公司;

DPPH、ABTS:美国Sigma公司;

$\alpha$ -葡萄糖苷酶、pNPG:美国Sigma公司;

无水甲醇、过硫酸钾等其它试剂:国产分析纯。

#### 1.1.2 主要仪器设备

高效液相色谱仪:LC20A型,日本岛津公司;

电子分析天平:AL104型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

紫外-可见分光光度计:UEC0905005型,上海博普达仪器制造有限公司;

旋转蒸发仪:RE52-86A型,上海亚荣生化仪器厂。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 总酚含量的测定** 准确量取50 mL体积分数为60%的乙醇溶液,加入10 g藜麦发酵样品中,60 °C条件下水浴提取30 min,离心后过滤,残渣再次提取2次,合并滤液,低压旋转浓缩至25 mL后进行总酚含量的测定。采用Folin-酚法测定藜麦发酵样品提取液中总酚含量<sup>[7]</sup>,具体操作为:准确移取1.0 mL提取液,加入1.0 mL Folin-酚显色剂,混匀后静置3 min,再加入1.0 mL浓度为1.0 mol/L的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 水溶液,用蒸馏水定容至10.0 mL,混合均匀,室温下避光放置1 h后于725 nm处测定吸光度,同时以芦丁作标准品得标准曲线线性方程为 $Y=2.8175X-0.0015$ , $R^2=0.993$ 。藜麦发酵样品中总酚含量按式(1)计算:

$$c = \frac{m_1}{m_2} \quad (1)$$

式中:

$c$ ——发酵藜麦中总酚含量,mg/g;

$m_1$ ——提取液中总酚含量,mg;

$m_2$ ——藜麦发酵样品质量,g。

#### 1.2.2 单因素试验

(1) 菌种添加量对总酚含量的影响:准确称取藜麦粉末10 g,分别按0.25%,0.50%,1.00%,2.00%,4.00%添加酵母菌,再加入20 mL蒸馏水,28 °C下发酵48 h后,按1.3.1方法进行总酚的提取和测定。

(2) 发酵时间对总酚含量的影响:准确称取藜麦粉末10 g,酵母菌添加量为2.0%,加入20 mL蒸馏水于28 °C发酵不同时间(24,48,72,96,120 h)后,按1.3.1方法进行总酚的提取和测定。

(3) 水分添加量对总酚含量的影响:分别称取藜麦粉末10 g,加入不同体积(10,15,20,25,30 mL)的蒸馏水,再加入2.0%的酵母菌,于28 °C下发酵48 h后,按1.3.1方法进行总酚的提取和测定。

**1.2.3 响应面优化试验** 以单因素试验结果为基础,设计三因素三水平响应面试验,优化酵母菌添加量、发酵时间、水分添加量对藜麦发酵过程中总酚积累的工艺条件。

**1.2.4 HPLC分析** 色谱条件为:Waters Symmetry  $\text{C}_{18}$ 柱(250 mm $\times$ 4.6 mm,5  $\mu\text{m}$ ),柱温30 °C,检测波长280 nm。流动相A和B分别为:乙酸水(pH 2.6)、色谱甲醇,洗脱条件为:0~15 min,15%~25%流动相B;15~25 min,25%流动相B;25~65 min,25%~75%流动相B;65~80 min,75%~15%流动相B;流速为0.8 mL/min。根据保留时间和峰面积外标单点法进行定性和定量分析<sup>[8]</sup>。

#### 1.2.5 抗氧化活性

(1) 对DPPH自由基的清除能力:根据文献[9],修改如下:分别称取1 g藜麦发酵样品(响应面优化最佳条件下发酵所得)和未发酵藜麦样品,按1.3.1方法提取后,低压旋转浓缩,真空冷冻干燥。将真空冷冻干燥的提取物分别配制成8,16,24,32,40 mg/mL,准确吸取0.1 mL不同质量浓度的各样品溶液,加入3.9 mL DPPH溶液(25.61 mg/L),室温避光反应30 min,利用紫外-可见分光光度计在517 nm处测定吸光度 $A_s$ 。同时测定得到0.1 mL不同浓度的样品加入3.9 mL 70%乙醇后的吸光度 $A_j$ ,以及空白吸光度 $A_c$ 。按式(2)计算DPPH自由基的清除率。

$$R = \left(1 - \frac{A_s - A_j}{A_c}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$R$ ——DPPH自由基清除率,%;

$A_s$ ——加入样品后的吸光度;

$A_j$ ——加入70%乙醇后的吸光度;

$A_c$ ——空白的吸光度。

(2) 对ABTS自由基的清除能力:根据文献[10],修改如下:准确吸取0.1 mL不同质量浓度(1.0,2.0,4.0,8.0,16.0 mg/mL)的各样品溶液,加入3.9 mL ABTS溶液,混合均匀后室温反应6 min,置于734 nm处测定吸光度 $A_E$ ,同时进行空白试验得到吸光度 $A_B$ 。按式(3)计算ABTS自由基的清除率。

$$S = \frac{A_B - A_E}{A_B} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$S$ ——ABTS自由基清除率,%;

$A_B$ ——加入样品后的吸光度;

$A_E$ ——加入70%乙醇后的吸光度。

**1.2.6  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性** 根据文献[11],修改如下:用0.1 mol/L pH 6.8的PBS缓冲液配制不同浓度的 $\alpha$ -葡萄糖苷酶( $3.0 \times 10^{-7}$  mol/L)和pNPG溶液( $3.0 \times 10^{-4}$  mol/L)。准确移取25  $\mu\text{L}$   $\alpha$ -葡萄糖苷酶溶液,分别加入25  $\mu\text{L}$ 不同浓度的样品提取物(0.4,2.0,10.0,51.0,128.0  $\mu\text{g/mL}$ ),37 °C恒温孵育15 min,再加入50  $\mu\text{L}$  pNPG溶液(0.3 mmol/L),37 °C恒温孵育20 min,加入200  $\mu\text{L}$  0.5 mol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 终止反应,于405 nm处测定吸光值,并按式(4)计算各样品提取物对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制活性。

$$I = \frac{A_K - A_Y}{A_K} \times 100\% , \quad (4)$$

式中:

$I$ ——抑制率, %;

$A_K$ ——空白的吸光度;

$A_Y$ ——加入样品后的吸光度。

### 1.3 统计学分析

使用 SAS 9.0 软件对试验数据进行分析,采用单因素方差分析中的 Duncan's 多重比较法分析结果间的显著差异 ( $P < 0.05$  表示具有显著性差异)。每组试验均重复 3 次,结果以(平均值±标准差)表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

酵母菌添加量、发酵时间和水分添加量对发酵藜麦提取物中总酚含量的影响见图 1~3。随着酵母菌添加量的增加,藜麦经发酵后其总酚含量也逐步增加,但当菌种添加量超过 2.0% 时,总酚含量开始下降(图 1),说明低浓度的酵母菌发酵在一定时间内可显著提高藜麦中多酚含量,而浓度过高则会减少多酚的生成。在藜麦发酵前 3 d,总酚含量几乎呈线性增加,最高可达 5.79 mg/g,而发酵 3 d 后总酚含量则逐步减少(图 2),与李玉珠等<sup>[12]</sup>报道一致,可能与酵母菌对多酚的消耗和利用有关。此外,当水分添加量为 15 mL 时,藜麦经发酵后总酚含量较高,可达 5.50 mg/g,而过多或过少水分添加量都会影响藜麦发酵过程中总酚的积累(图 3)。多酚通常以游离态和结合态形式存在于食物中,发酵过程中,微生物可分泌产生一些酶,作用于结合态多酚使其游离,同时也

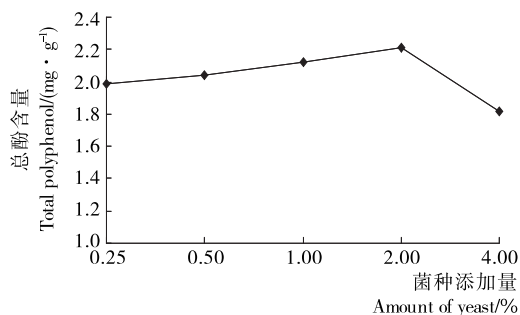


图 1 菌种添加量对总酚含量的影响

Figure 1 Effect of the amount of yeast on the content of total phenols

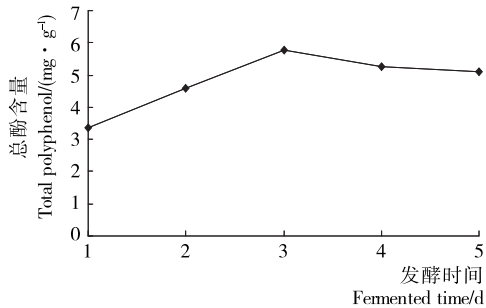


图 2 发酵时间对总酚含量的影响

Figure 2 Effect of fermentation time on the content of total phenols

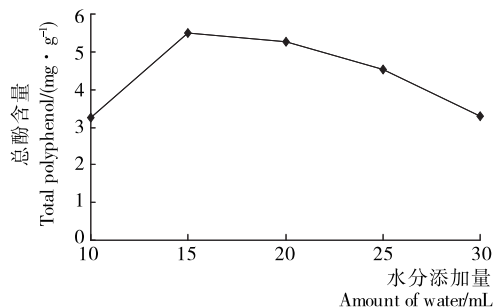


图 3 水分添加量对总酚含量的影响

Figure 3 Effect of the amount of water on the content of total phenols

会利用部分多酚进行生长繁殖<sup>[8]</sup>,因此适当的发酵处理可提高藜麦中总酚的含量,增强其功能活性,后续响应面优化试验分别以酵母菌添加量 2.0%,发酵时间 3 d 和水分添加量 15 mL 作为中心值(见表 1)进行发酵工艺条件的优化。

### 2.2 响应面法优化试验

采用三因素三水平响应面分析方法,优化菌种添加量、发酵时间和水分添加量对藜麦发酵过程中总酚含量的影响,结果见表 2。利用 SAS 软件对结果进行分析可知,总酚含量

表 1 响应面因素水平编码表

Table 1 Variables and levels in response surface method

因素	X <sub>1</sub> 酵母添加量/%	X <sub>2</sub> 发酵解时间/d	X <sub>3</sub> 水分添加量/mL
-1	1.0	2	10
0	2.0	3	15
1	3.0	4	20

表 2 藜麦发酵响应面设计及结果

Table 2 Experimental design and result of central composite test on the fermentation of quinoa

试验号	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	总酚含量/(mg · g <sup>-1</sup> )
1	1	0	-1	1.908
2	-1	0	0	5.049
3	-1	0	1	4.126
4	1	-1	0	2.813
5	0	0	0	5.297
6	1	1	0	3.718
7	0	1	-1	3.523
8	-1	-1	0	3.594
9	0	1	1	3.629
10	0	0	0	4.854
11	0	0	0	5.283
12	0	-1	1	3.434
13	-1	0	-1	2.245
14	0	0	0	5.310
15	0	-1	-1	2.902
16	1	0	1	2.777
17	-1	1	0	4.463

对  $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_3$  的二次多项回归方程为：

$$Y = 5.23 - 0.45X_1 + 0.32X_2 + 0.42X_3 - 1.02X_1^2 + 0.01X_1X_2 - 0.51X_2^2 - 0.25X_1X_3 - 0.11X_2X_3 - 1.40X_3^2 \quad (5)$$

由表 3 可知,根据响应面试验结果拟合的回归模型达到极显著水平( $P=0.0012 < 0.01$ ),说明此模型与试验拟合较好,能较为准确、真实地反映试验结果,其复相关系数  $R^2$  为 0.95。显著性检测结果(表 4)表明,在试验水平范围内,3 个因素对藜麦发酵中总酚含量均会产生显著影响,其中菌种添加量( $X_1$ )影响最大( $P$  值最小),水分添加量( $X_3$ )次之,而发酵时间( $X_2$ )影响相对较小( $P$  值最大)。同时,各因素之间的交互作用对总酚含量的影响均不显著( $P > 0.05$ )。

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of the regression model

回归模型	自由度	平方和	$R^2$	F 值	P 值
线性	3	4.48	0.23	10.14	0.006 1
平方	3	13.23	0.69	29.95	0.000 2
交互作用	3	0.30	0.02	0.68	0.590 1
总模型	9	18.02	0.95	13.59	0.001 2

表 4 二次多项式回归方程系数的显著性分析

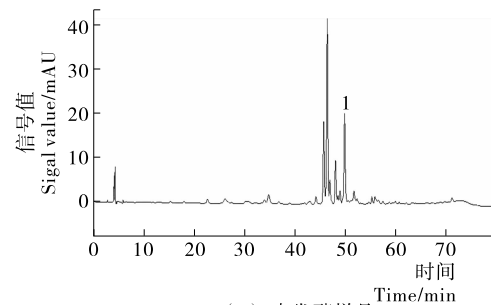
Table 4 Regression coefficients of predicted quadratic polynomial model

参数	自由度	估计值	标准差	T 值	P 值
截距	1	5.23	0.19	27.92	<0.000 1
$X_1$	1	-0.45	0.13	-3.48	0.010 3
$X_2$	1	0.33	0.14	2.39	0.048 4
$X_3$	1	0.42	0.14	3.12	0.016 8
$X_1^2$	1	-1.02	0.19	-5.47	0.000 9
$X_1X_2$	1	0.01	0.19	0.05	0.963 9
$X_2^2$	1	-0.51	0.19	-2.74	0.028 8
$X_1X_3$	1	-0.25	0.19	-1.32	0.228 8
$X_2X_3$	1	-0.11	0.19	-0.56	0.596 2
$X_3^2$	1	-1.40	0.19	-7.45	0.000 1

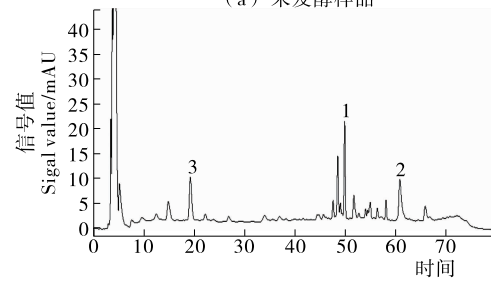
由 SAS 分析可知,当菌种添加量( $X_1$ )、发酵时间( $X_2$ )和水分添加量( $X_3$ )分别为 1.7%、3.3 d(80 h)、15.8 mL 时,总酚含量最大,为 5.37 mg/g。选择菌种添加量 1.7%,发酵时间 80 h 和水分添加量 16 mL 发酵藜麦,进行验证实验,3 次平行结果得到藜麦在上述条件下经发酵后总酚平均含量为 (5.31±0.11) mg/g,与模型预测值非常接近,相对误差仅为 1.12%。同时,与未经发酵的藜麦总酚含量 [(2.17±0.08) mg/g] 相比,藜麦经优化发酵后,总酚含量可提高 2 倍之多。综上,本试验利用响应面法优化所得的模型与实际试验结果接近,可用于预测藜麦在发酵过程中总酚含量的变化情况,同时藜麦经发酵处理后,可大大提高其总酚含量,增加其营养价值,具有一定的应用和经济价值。

### 2.3 藜麦中主要酚类物质的分析

研究<sup>[13]</sup>表明,藜麦中含有丰富的多酚类物质,特别是芦丁、槲皮素及山奈酚等的含量比荞麦还高,而这些活性成分的含量直接影响着藜麦的生理功能。发酵前后藜麦提取物的高效液相色谱分析见图 4。由图 4 可知,未发酵藜麦中芦丁含量较为丰富[(262.2±5.39) mg/kg],发酵处理后其含量稍有下降[(219.5±11.39) mg/kg],然而藜麦在发酵前几乎检测不到槲皮素,但经发酵后,槲皮素的含量 [(113.4±8.73) mg/kg] 显著增加,说明在发酵过程中许多槲皮素衍生物的糖苷键被破坏,形成了游离态的槲皮素。同时,发酵后的藜麦中含量较多的香草酸(44.7±2.54) mg/kg,藜麦中香草酸常常以结合态形式存在,一般不易提取<sup>[14]</sup>,本试验通过微生物处理可有效将藜麦中部分结合态的香草酸释放,易于机体的吸收利用。



(a) 未发酵样品



(b) 发酵样品

1. 芦丁 2. 槲皮素 3. 香草酸

图 4 藜麦提取物液相色谱图

Figure 4 The liquid chromatogram of extraction from quinoa

### 2.4 抗氧化活性

2.4.1 DPPH 自由基的清除作用 由图 5 可知,随着质量浓度的增加,样品对 DPPH 自由基的清除效果增强,并在试验浓度范围内呈一定的线性关系, $R^2$  分别为 0.966 7(发酵藜麦)和 0.995 2(未发酵藜麦),同时藜麦经发酵后提取所得样品对 DPPH 自由基的清除率均显著高于未发酵藜麦提取物的( $P > 0.01$ ),其  $IC_{50}$  值分别为 16.42, 39.48 mg/mL,说明发酵处理可提高藜麦中的抗氧化活性成分,研究<sup>[1]</sup>表明,藜麦中主要的酚类抗氧化活性成分为芦丁、槲皮素、香草酸和阿魏酸等,如 2.3 结果所示,发酵后藜麦中主要的酚类物质含量显著提高,因此增强了其自由基清除能力。

2.4.2 ABTS 自由基的清除作用 由图 6 可知,与 DPPH 自由基清除效果相似,样品清除 ABTS 自由基的能力随质量浓度的增加而增强,发酵处理可显著提高藜麦提取物对 ABTS

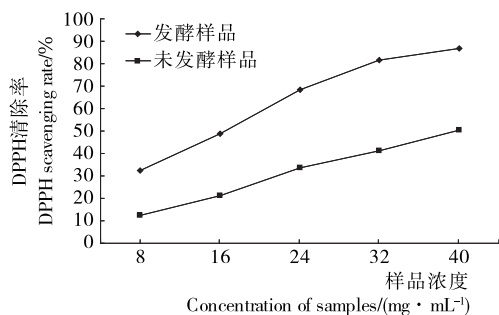


图 5 藜麦对 DPPH 自由基的清除作用

Figure 5 The DPPH free radical scavenging activity of quinoa

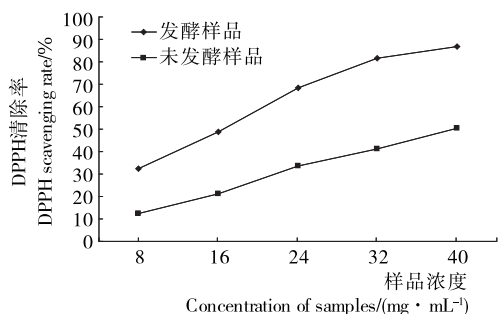


图 6 藜麦对 ABTS 自由基的清除作用

Figure 6 The ABTS free radical scavenging activity of quinoa

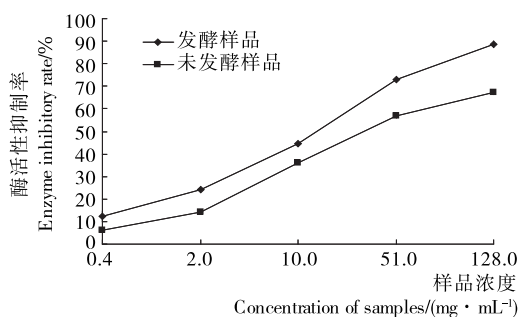
自由基的清除能力,平均可增加 31.97% 的清除率,其  $IC_{50}$  分别为 1.51, 6.66 mg/mL, 提高了 4.4 倍。

### 2.5 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性

$\alpha$ -葡萄糖苷酶是一种位于肠膜表面,可以分解碳水化合物,释放出葡萄糖的消化酶,抑制该酶的活性可有效降低餐后血糖水平,调节糖化学代谢<sup>[15]</sup>。由图 7 可知,藜麦发酵处理可显著提高其对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的抑制作用,相对于未发酵的样品,抑制率平均可提高 12.41%。研究<sup>[16-17]</sup>表明,天然活性成分,如芦丁、槲皮素等均具有良好的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性,而藜麦中则富含这些物质,并且经发酵后,槲皮素的含量显著增加,因此表现出更好的  $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制作用。

## 3 结论

本研究以总酚含量为评价指标,利用响应面法优化了藜

图 7 藜麦对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的抑制作用Figure 7 The  $\alpha$ -glucosidase inhibiting activity of quinoa

麦发酵工艺条件:菌种添加量 1.7%,发酵时间 80 h,水分添加量 16 mL,各因素对藜麦发酵过程中总酚含量影响的程度依次为:菌种添加量>水分添加量>发酵时间。在此条件下,藜麦发酵后总酚平均含量为  $(5.31 \pm 0.11)$  mg/g,与模型预测值之间的相对误差仅为 1.12%。藜麦经发酵处理后,可显著提高其中槲皮素和香草酸的含量,而对芦丁含量几乎没有影响。同时,发酵处理可以大大提高藜麦的抗氧化活性。藜麦发酵后对 DPPH 自由基的清除率显著提高,  $IC_{50}$  为 16.42 mg/mL,远小于未发酵的 39.48 mg/mL;对 ABTS 自由基的清除效果同样也显著增加,提高了 4.4 倍。此外,发酵处理后,藜麦对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用也显著增强,抑制率平均提高了 12.41%。

有关藜麦发酵工艺优化的研究报道甚少,本试验证实发酵处理可显著提高藜麦中的总酚含量,同时也大大增强了其生物活性,可为深入开发藜麦功能性食品提供思路。后续将对发酵处理影响藜麦中总酚含量的作用机制进行进一步的研究。

## 参考文献

- [1] NAVRUZ-VARLI S, SANLIER N. Nutritional and health benefits of quinoa (Chenopodium quinoa, Willd.) [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 371-376.
- [2] 郭谋子,胡静,李志龙,等. 浸泡及催芽对藜麦籽粒主要营养成分含量的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 1-7.
- [3] PASKO P, BARTON H, ZAGRODZKI P, et al. Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth [J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 994-998.
- [4] HIROSE Y, FUJITA T, ISHII T, et al. Antioxidative properties and flavonoid composition of Chenopodium quinoa seeds cultivated in Japan [J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1 300-1 306.
- [5] 高凯,张文涛,汤尧,等. 加拿大产藜麦可溶性酚类物质组成及抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(7): 107-113.
- [6] 杨洁,高凤祥,杨敏,等. 藜麦皮总皂苷微波辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 148-153.
- [7] 韩林,黄玉林,张海德,等. 槟榔籽中抗氧化成分的提取及活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(9): 157-159.
- [8] GUO Xun-dan, WU Chun-sheng, MA Yu-jie, et al. Comparison of milling fractions of tartary buckwheat for their phenolics and antioxidant properties [J]. Food Research International, 2012, 49(1): 53-59.
- [9] 韩林,丁博,王兆丹,等. 黄鳝肉双酶水解产物的功能特性及其抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(10): 151-155.
- [10] DUDONNE S. Comparative study of antioxidant properties and total phenolic content of 30 plant extracts of industrial interest using DPPH, ABTS, FRAP, SOD, and ORAC assays [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(5): 1 768-1 774.
- [11] KIM J, HYUN T, KIM M. The inhibitory effects of ethanol extracts from sorghum, foxtail millet and proso millet on  $\alpha$ -glucosidase and  $\alpha$ -amylase activities [J]. Food Chemistry, 2011, 124(4): 1 647-1 651.

(上接第 215 页)

由表 5 可知,各因素对杏鲍菇冻干粉堆积密度、吸湿性、速溶性 3 个综合指标的影响程度依次为麦芽糊精>黄原胶>CMC-Na; 正交优化配方为麦芽糊精 15%、黄原胶 0.15%、CMC-Na 0.8%。

对正交设计综合评分结果进行方差分析,结果见表 6。由表 6 可知,3 种因素综合评分方差分析的 P 值各不相同,表明 3 种因素对杏鲍菇冻干粉综合指标的影响程度各不相同,比较 P 值结果,麦芽糊精的浓度对杏鲍菇冻干粉的综合指标影响最为显著(显著水平为 0.014),但黄原胶、CMC-Na 的影响不显著,与表 5 中的结论一致。

表 6 综合评分方差分析<sup>†</sup>

Table 6 Variance analysis in comprehensive score

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
A	0.340	2	0.170	69.900	0.014
B	0.060	2	0.030	12.347	0.075
C	0.001	2	0.001	0.212	0.825
误差	0.005	2	0.002		

<sup>†</sup> P<0.05 表示差异显著,P>0.05 表示差异不显著。

## 2.5 验证实验

在最优条件下调配杏鲍菇冻干粉,测定指标做验证实验,结果见表 7。在最优条件下,得到杏鲍菇冻干粉堆积密度为 0.753 g/mL、吸湿性为 11.40%、速溶性为 41.02 s,与正交试验表中的第 1 组试验作对比,可知该方案最优。

表 7 增稠剂最佳组合验证实验

Table 7 Validation testing for best combination of thickeners

序号	堆积密度/(g·mL <sup>-1</sup> )	吸湿性/%	速溶性/s	综合评分
1	0.753	11.60	40.89	0.898
2	0.751	11.50	41.24	0.903
3	0.754	11.10	40.94	0.896
平均值	0.753	11.40	41.02	0.899

## 3 结论

本试验采用单因素和正交试验相结合,研究了麦芽糊精、黄原胶、羧甲基纤维素钠 3 种增稠剂及其添加量对杏鲍菇冻干粉堆积密度、吸湿性、速溶性品质的影响。研究表明,杏鲍菇冻干粉增稠剂的最佳组合为麦芽糊精 15%、黄原胶

0.15%、羧甲基纤维素钠 0.8%,可有效增强粉体的润湿性和分散性,水溶液无分层、沉淀。

本试验仅仅探究了 3 种常用增稠剂对杏鲍菇冻干粉品质的影响,而增稠剂种类繁多,其他种类增稠剂的应用效果还有待继续探索,且各类增稠剂对杏鲍菇冻干粉品质影响的物理和化学作用机制还有待深入研究,以期为该类产品的加工技术创新提供更多基础理论支持。

## 参考文献

- [1] 史瑞婕,郭丰铭,董亚楠,等. 杏鲍菇蛋白质功能特性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(2): 131-136.
- [2] 李晓贝,周峰,杨焱,等. 栽培基质对杏鲍菇子实体蛋白质营养价值的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(23): 262-267.
- [3] 孙亚男,李文香,胡欣蕾,等. 杏鲍菇多肽提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 144-149.
- [4] 邢亚阁,蒋丽,曹东,等. 不同干燥方式对杏鲍菇营养成分的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(4): 1-3.
- [5] 徐冲,陈杰,陈丽媛,等. 真空冷冻干燥技术在食用菌加工中的应用研究[J]. 微生物学杂, 2015, 35(6): 96-99.
- [6] 孙翠,王钰,沈小瑞,等. 杏鲍菇热风-真空冷冻干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 189-193.
- [7] 刘文慧,王颖,王静,等. 麦芽糊精在食品工业中的应用现状[J]. 中国食品添加剂, 2007(2): 183-186.
- [8] 曹卫春. 黄原胶和 CMC 复配对酸性乳饮料稳定性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2006: 1-67.
- [9] 杨金姝. 羧甲基纤维素钠在食品工业中的应用研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2014(22): 76-78.
- [10] 高颖宇,时海波,侯会,等. 切片形式对杏鲍菇真空冻结干燥特性与品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(10): 80-85.
- [11] ZHANG Zi-pei, SONG Hui-ge, PENG Zhen, et al. Characterization of stipe and cap powders of mushroom (*Lentinus edodes*) prepared by different grinding methods[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(10): 406-413.
- [12] 周禹含,毕金峰,陈芹芹,等. 超微粉碎对枣粉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(10): 91-96.
- [13] 辛修锋,余小林,胡卓炎,杨梅颗粒固体饮料的工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(2): 162-165.
- [14] 王储炎. 桑椹果醋、果粉生物加工技术及功能特性的研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013: 1-145.
- [15] 王储炎,阎晓明,等. 不同干燥方式对桑椹果粉物理特性的影响[J]. 蚕业科学, 2013, 39(2): 340-345.

(上接第 210 页)

- [12] 李玉珠,龙谋,汤艳燕,等. 玫瑰茄浸提及其发酵酒工艺优化及发酵前后有机酸和酚酸的比较[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 66-76.
- [13] 魏爱春,杨修仕,么杨,等. 藜麦营养成分及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2015, 36(15): 272-276.
- [14] 高凯,张文涛,汤尧,等. 加拿大产藜麦可溶性酚类物质组成及抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(7): 107-113.
- [15] HAN Lin, FANG Chun, ZHU Rue-xue, et al. Inhibitory effect of phloretin on  $\alpha$ -glucosidase: Kinetics, interaction mechanism

and molecular docking [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 520-527.

- [16] PENG Xin, ZHANG Guo-wen, LIAO Yi-jing, et al. Inhibitory kinetics and mechanism of kaempferol on  $\alpha$ -glucosidase [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 207-215.
- [17] XIAO J, KAI G, YAMAMOTO K, et al. Advance in dietary polyphenols as  $\alpha$ -glucosidases inhibitors: a review on structure-activity relationship aspect[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(8): 818.