

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.06.022

# 紫苏粕酶解工艺优化及其多肽抗氧化稳定性

张红玉<sup>1,2</sup>, 李会珍<sup>1,2\*</sup>, 张志军<sup>1,2</sup>, 李河<sup>1,2</sup>, 侯天宇<sup>1,2</sup>, 王丹<sup>1,2</sup>, 李孟昊<sup>1,2</sup>, 叶童妹<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 化学工程与技术学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 晋中产业技术创新研究院, 山西 晋中 030600)

**摘要:** 为更好地利用紫苏粕中的蛋白质资源, 采用碱性蛋白酶酶解脱脂紫苏粕制备紫苏粕多肽, 以水解度为指标, 在单因素试验基础上, 采用响应面法优化紫苏粕多肽制备工艺, 并对最优条件下制备的紫苏粕多肽进行氨基酸组成和抗氧化稳定性分析。结果表明, 最佳酶解工艺为酶解时间 8 h、初始 pH11.5、底物浓度 7.5%、酶解温度 60 °C、加酶量 7 000 U/g。在此条件下, 酶解液水解度为 (23.462±0.237)%。紫苏粕多肽由 17 种氨基酸组成, 其中精氨酸含量最高, 达 (286.635±0.357) mg/g。紫苏粕多肽在 20~100 °C、pH2~8 保持较强的抗氧化活性。添加适量 NaCl 和葡萄糖有助于增强紫苏粕多肽抗氧化活性, 添加 2% 以上柠檬酸则导致 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除活性显著下降。综上, 该工艺制备的紫苏粕多肽具有良好的抗氧化稳定性, 具有进一步开发潜力。

**关键词:** 紫苏粕; 酶解法; 抗氧化肽; 工艺优化; 稳定性

## Enzymatic Hydrolysis Process Optimization of Perilla Meal and Antioxidant Stability of Polypeptides

ZHANG Hongyu<sup>1,2</sup>, LI Huizhen<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Zhijun<sup>1,2</sup>, LI He<sup>1,2</sup>, HOU Tianyu<sup>1,2</sup>, WANG Dan<sup>1,2</sup>,LI Menghao<sup>1,2</sup>, YE Tongmei<sup>1,2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China; 2. Jinzhong Institute of Industrial Technology Innovation, North University of China, Jinzhong 030600, Shanxi, China)

**Abstract:** Alkaline protease was used to hydrolyze defatted perilla meal to prepare polypeptides, so as to improve the utilization of the protein resources in perilla meal. With the degree of hydrolysis as the indicator and on the basis of the results of single factor experiments, the polypeptide preparation process of perilla meal was optimized by response surface methodology. Furthermore, the amino acid composition and antioxidant stability of the perilla meal polypeptides prepared under the optimal conditions were analyzed. The results showed that the enzymatic hydrolysis conditions were optimized as follows: enzymatic hydrolysis at initial pH11.5, substrate concentration of 7.5%, 60 °C, and enzyme dosage of 7 000 U/g for 8 h, under which the degree of hydrolysis reached (23.462±0.237)%. The polypeptides of perilla meal were composed of 17 amino acids, among which arginine had the highest content of (286.635±0.357) mg/g. Perilla meal polypeptides maintained a strong antioxidant activity within the ranges of 20–100 °C and pH2–8. Adding proper amounts of NaCl and glucose enhanced the antioxidant activity of perilla meal polypeptides, and adding more than 2% citric acid decreased the ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging activity. In conclusion, the perilla meal polypeptides prepared by this process had good antioxidant stability and the potential of further development.

**Key words:** perilla meal; enzymatic hydrolysis; antioxidant peptides; process optimization; stability

引文格式:

张红玉, 李会珍, 张志军, 等. 紫苏粕酶解工艺优化及其多肽抗氧化稳定性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(6): 157-166.  
ZHANG Hongyu, LI Huizhen, ZHANG Zhijun, et al. Enzymatic Hydrolysis Process Optimization of Perilla Meal and Antioxidant Stability of Polypeptides[J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 157-166.

基金项目: 晋中市科技重点研发计划项目(Y212006)

作者简介: 张红玉(1999—), 女(汉), 硕士, 研究方向: 生物提取与分离工程。

\*通信作者: 李会珍(1974—), 女(汉), 教授, 博士, 研究方向: 植物功能成分提取及高效利用。

紫苏(*Perilla frutescens* L.)是唇形科一年生草本植物,主要分布在中国、日本、韩国、缅甸、印度尼西亚和俄罗斯<sup>[1]</sup>。紫苏可药食两用,在中国被当作油料作物种植,广泛用于烹饪和传统医药<sup>[2]</sup>。紫苏籽油中不饱和脂肪酸含量高达90%以上,其中 $\omega$ -3系列多不饱和脂肪酸是紫苏油中的主要不饱和脂肪酸<sup>[3]</sup>,具有抗炎、改善认知、降低胆固醇、降低结肠癌发病率、预防心脑血管疾病的功效<sup>[4-7]</sup>。紫苏粕是紫苏籽榨油后的副产物,富含多种有效成分,其中蛋白质含量占40%左右,脱脂紫苏粕的蛋白富集率可提升至57.90%<sup>[8]</sup>,是一种极具开发潜力的蛋白资源。

活性肽是具有多种生物活性的多肽,如抗氧化、抑菌、抗炎、抗癌、抗疲劳、免疫调节、降血压等<sup>[9-10]</sup>。然而活性肽在母体蛋白质内并没有活性,需要通过化学法、微生物发酵法或酶解法将其释放<sup>[11]</sup>。化学法和微生物法存在环境污染、产品质量不稳定、生产周期长等问题。酶解法反应条件温和,便于操作,产品安全性较高。酶解产物氨基酸组成因不同蛋白酶的酶切位点不同而产生变化,通过改变蛋白酶种类,控制酶解条件可获得具有不同生物活性的活性肽<sup>[12]</sup>。本文以水解度为指标,采用碱性蛋白酶酶解脱脂紫苏粕制备紫苏粕多肽,通过单因素试验、响应面法优化脱脂紫苏粕的酶解工艺,高效液相色谱分析测定紫苏多肽氨基酸组成,并通过添加不同食品配料检测其抗氧化稳定性,以期为紫苏粕精深加工和高值化利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

脱脂紫苏粕(粗蛋白含量约为57.90%,粗脂肪含量约为0.51%):中北大学晋中产业技术创新研究院实验室自制;碱性蛋白酶(30 000 U/mL):南宁东恒华道生物科技有限责任公司;茚三酮、过硫酸钾:上海阿拉丁生化科技股份有限公司;十二水磷酸氢二钠、21种氨基酸标品:上海麦克林生化科技有限公司;2,2-联氨-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]:索莱宝生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH):上海化成工业发展有限公司;4-氯-3,5-二硝基三氟甲苯(4-chloro-3,5-dinitrobenzotrifluoride, CNBF):上海凇恩科技发展有限公司;果糖、无水乙酸钠、冰乙酸、葡萄糖、柠檬酸、NaOH、浓盐酸、NaCl:天津市恒兴化学试剂制造有限公司。所用试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

数显恒温水浴锅(HH-4)、数显集热式磁力搅拌器(DF-II):金坛市杰瑞尔电器有限公司;可见分光光度计(V-1200):上海美谱达仪器有限公司;台式高速冷冻

离心机(TGL-16.5M):上海卢湘仪离心机仪器有限公司;酸度计(PB-10):赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;高效液相色谱(UltiMate 3000):美国 Thermo 有限公司;分析型天平(HZK-FA210):华志(福建)电子科技有限公司;电子天平(JM-B5003):余姚记铭称重校验设备有限公司;干式氮吹仪(LC-DCY-12G)邦西仪器科技(上海)有限公司;旋转蒸发仪(RE-2000A):上海亚荣生化仪器厂。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 紫苏粕多肽的制备

将紫苏粕粉碎,过40目筛,称取定量紫苏粕,加入适量水,搅拌均匀,用NaOH或HCl调节pH值,加入碱性蛋白酶,于恒温水浴锅中酶解一定时间。然后置于沸水浴中10 min灭酶,在10 000 r/min、4℃条件下离心10 min,取上清液测定水解度,上清液冷冻干燥即得紫苏粕多肽粉。

#### 1.3.2 水解度的测定

紫苏粕完全水解液制备:取0.05 g紫苏粕于水解管中,加入10 mL 6 mol/L HCl,氮吹后密封,110℃反应24 h,然后用旋转蒸发仪去除盐酸,蒸馏水定容至100 mL。

游离-NH<sub>2</sub>采用茚三酮显色法<sup>[13]</sup>测定。

水解度为被水解的肽键数占原料总肽键数的比值,参考余勃等<sup>[14]</sup>的方法测定脱脂紫苏粕酶解液水解度(X,%),计算公式如下。

$$X = \frac{A - A_0}{A_{\text{总}} - A_0} \times 100$$

式中:A为酶解液中总游离-NH<sub>2</sub>摩尔数,mmol;A<sub>0</sub>为紫苏粕中固有游离-NH<sub>2</sub>摩尔数,mmol;A<sub>总</sub>为紫苏粕完全水解液中总游离-NH<sub>2</sub>摩尔数,mmol。

#### 1.3.3 单因素试验

在一定条件下,分别考察酶解时间、初始pH值、酶解温度、底物浓度、加酶量对酶解液水解度的影响。参数考察范围分别为酶解时间2、4、6、8、10 h,初始pH9、10、11、12、13,酶解温度45、50、55、60、65℃,底物浓度3%、6%、9%、12%、15%,加酶量3 000、5 000、7 000、9 000、11 000 U/g。

#### 1.3.4 响应面试验

在单因素试验基础上,选择底物浓度、酶解温度、初始pH值为优化因素,利用Design Expert软件进行三因素三水平的响应面设计,以水解度为响应值,优化碱性蛋白酶酶解脱脂紫苏粕制备紫苏粕多肽的工艺条件。基于单因素试验及响应面法优化分析结果,得到最佳酶解工艺条件,并对最佳酶解参数进行验证。因素水平见表1。

#### 1.3.5 氨基酸组成分析

参考张可可<sup>[15]</sup>的方法,采用Hypersil GOLD C18

表1 响应面因素水平

Table 1 Factors and levels in response surface design

水平	因素		
	A 底物浓度/%	B 酶解温度/°C	C 初始 pH 值
-1	3	55	11
0	6	60	12
1	9	65	13

Selectivity HPLC Columns (250 mm×4.6 mm, 5 $\mu$ m)测定紫苏粕多肽氨基酸组成。称取 10 mg 紫苏粕多肽于消解管中,加入 6 mol/L HCl 5 mL,滴加 3~4 滴苯酚,充氮封口,于 110 °C 油浴水解 24 h,结束后旋干,0.1 mol/L pH9.0 硼酸缓冲液定容至 5 mL。取 100  $\mu$ L 21 种氨基酸混合对照品溶液或样品水解液于 2 mL 离心管中,加入 200  $\mu$ L 0.1 mol/L CNBF 衍生剂(溶于乙腈)、700  $\mu$ L 硼酸缓冲液,60 °C 水浴衍生化 30 min 后经 0.2  $\mu$ m 过滤膜过滤后进样。

流动相 A 相:乙腈,B 相:0.05 mol/L pH5.65~5.70 乙酸钠缓冲液,梯度洗脱:0 min,20%A;0~15 min,20%~38%A;15~35 min,38%~48%A;35~38 min,48%~49%A;38~42 min,49%~75%A;42~50 min,75%A;50~55 min,75%~20%A;55~78 min,20%A;流速为 0.28 mL/min;进样体积:20  $\mu$ L;检测波长:240 nm;柱温:25 °C。

### 1.3.6 抗氧化活性测定

DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率参照 GB/T 39100—2020《多肽抗氧化性测定 DPPH 和 ABTS 法》测定,以 V<sub>C</sub> 为阳性对照。在 DPPH 自由基清除率的测定中,样品浓度梯度为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mg/mL, V<sub>C</sub> 浓度梯度为 0.005、0.010、0.015、0.020、0.025、0.030、0.035、0.040、0.045、0.050、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mg/mL;在 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率的测定中,样品浓度梯度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 mg/mL, V<sub>C</sub> 浓度梯度为 0.005、0.010、0.015、0.020、0.025、0.030、0.035、0.040、0.045、0.050、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 mg/mL。

### 1.3.7 抗氧化稳定性测定

#### 1.3.7.1 温度对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

配制质量浓度为 0.6 mg/mL 紫苏粕多肽溶液,分别在 20、40、60、80、100、120 °C 条件下保温 1 h 后取出,冰水浴 5 min,测定 DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率。

#### 1.3.7.2 pH 值对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

配制质量浓度为 0.6 mg/mL 紫苏粕多肽溶液,用 1 mol/L HCl 或 NaOH 调节 pH 值至 2、4、6、8、10,室温放置 1 h 后调节 pH 值至 7.0,测定 DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率。

#### 1.3.7.3 食品配料对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

配制质量浓度为 0.6 mg/mL 紫苏粕多肽溶液,分

别添加质量分数 2%、4%、6%、8%、10% 的 NaCl、柠檬酸和葡萄糖,室温放置 1 h,测定 DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率。

### 1.4 数据处理

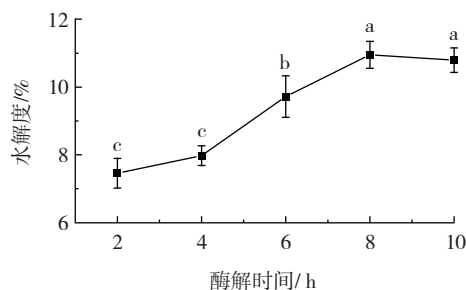
每次试验至少 3 次重复,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,数据采用 IBM SPSS Statistics 25、Origin 2018 和 Design Expert 8.06 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 酶解时间对水解度的影响

酶解时间对水解度的影响见图 1。



不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

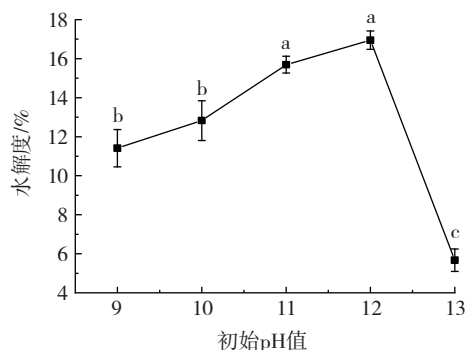
图1 酶解时间对水解度的影响

Fig.1 Effect of hydrolysis time on the degree of hydrolysis

由图 1 可知,水解度随酶解时间的延长逐渐增大后趋于稳定。在 2~4 h 内,酶解液水解度缓慢提升,在 4~8 h 内,酶解液水解度急剧增加,在 8 h 时达到峰值,为(10.954 $\pm$ 0.397)%。此后,由于底物分子浓度降低,酶解反应趋于平衡<sup>[16]</sup>,水解度不再增加,考虑到成本,选择 8 h 为最适酶解时间。

#### 2.1.2 初始 pH 值对水解度的影响

初始 pH 值对水解度的影响见图 2。



不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图2 初始 pH 值对水解度的影响

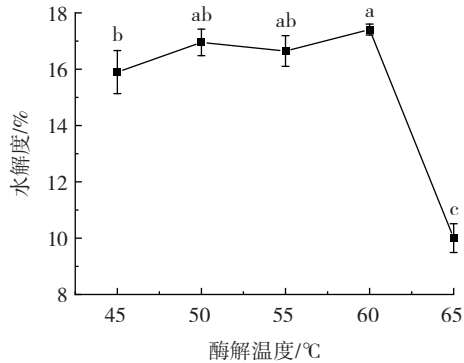
Fig.2 Effect of initial pH on the degree of hydrolysis

如图 2 所示,初始 pH 值从 9 增加到 12 时,水解度呈现出上升趋势,在初始 pH 值为 12 时达到峰值,为(16.952 $\pm$ 0.471)%。初始 pH 值进一步增加至 13,强

碱条件使碱性蛋白酶构象发生变化,酶活性受到抑制<sup>[12]</sup>,水解度急剧下降,下降幅度达到71.85%。因此选择初始pH值11、12、13进行后续试验。

### 2.1.3 酶解温度对水解度的影响

酶解温度对水解度的影响见图3。



不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

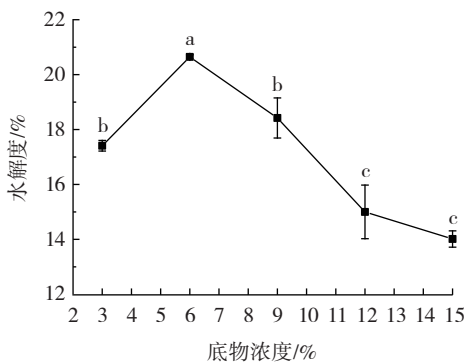
图3 酶解温度对水解度的影响

Fig.3 Effect of hydrolysis temperature on the degree of hydrolysis

如图3所示,在酶解温度为45~60℃时,水解度随酶解温度的升高有所增加,可能是由于酶解温度升高,分子运动加快,酶与底物在单位时间内的有效碰撞次数增多,酶的催化效率提高<sup>[17]</sup>。当酶解温度由60℃升高到65℃时,水解度急剧下降,由最高值(17.410±0.193)%降至(10.003±0.511)%,降低幅度达42.545%。可能是由于酶解温度过高导致碱性蛋白酶变性,活性下降<sup>[18]</sup>。因此,选择酶解温度55、60、65℃进行后续试验。

### 2.1.4 底物浓度对水解度的影响

底物浓度对水解度的影响见图4。



不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图4 底物浓度对水解度的影响

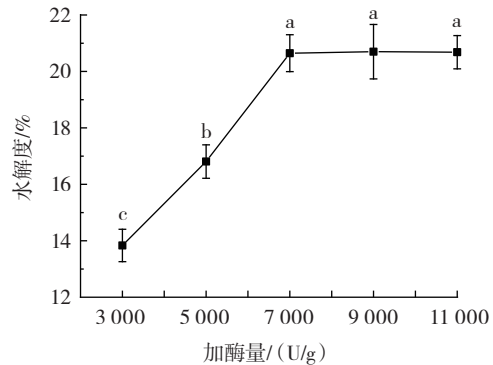
Fig.4 Effect of substrate concentration on the degree of hydrolysis

如图4所示,在底物浓度为3%~6%时,随着底物浓度增加,脱脂紫苏粕中蛋白质在溶液体系中的溶解量增加,酶与底物结合的概率增大,酶解速率提升,水解度升高,在底物浓度为6%时,水解度达到峰值,为(20.646±0.077)%。底物浓度继续增加,则表现出底物抑制作用,底物分子与蛋白酶非活性部位结合,催化效

率降低<sup>[19]</sup>,从而导致水解度降低。因此,选择底物浓度3%、6%、9%进行后续试验。

### 2.1.5 加酶量对水解度的影响

加酶量对水解度的影响见图5。



不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图5 加酶量对水解度的影响

Fig.5 Effect of the protease dosage on the degree of hydrolysis

如图5所示,随加酶量的增加,水解度呈现出先增大后趋于稳定的趋势。在加酶量为3000~7000U/g时,随蛋白酶用量的增加,单位时间内蛋白酶与底物的结合概率增加,水解度逐渐增高。当加酶量超过7000U/g时,水解度开始降低,这可能是由于在酶过量的情况下,酶解产物和酶形成复合物,阻止底物与酶的结合,降低酶活性,表现出底物抑制作用<sup>[20]</sup>。因此,选择7000U/g为最佳加酶量。

## 2.2 响应面试验结果与分析

### 2.2.1 响应面试验设计与结果

单因素试验结果显示,底物浓度、酶解温度及初始pH值对水解度影响较大。因此,使用Design Expert 8.06对3个因素进行响应面优化,共17个试验点,包括12个分析因点和5个零点。表2为响应面的设计及结果。

表2 响应面法试验设计与结果

Table 2 Design and results of respond surface experiments

试验号	A	B	C	水解度/%
1	-1	-1	0	16.000
2	1	-1	0	17.087
3	-1	1	0	11.685
4	1	1	0	20.705
5	-1	0	-1	16.985
6	1	0	-1	20.845
7	-1	0	1	6.334
8	1	0	1	4.251
9	0	-1	-1	19.271
10	0	1	-1	15.193
11	0	-1	1	7.889
12	0	1	1	6.806
13	0	0	0	20.646
14	0	0	0	20.647
15	0	0	0	21.968
16	0	0	0	20.608
17	0	0	0	19.143

对表2水解度的数据进行多元回归拟合,得到脱脂紫苏粕碱性蛋白酶酶解液水解度对底物浓度(A)、温度(B)及初始pH值(C)的多元二次回归方程:水解度=20.604 2+1.485 5A-0.732 25B-5.876 75C+1.983 25AB-1.485 75AC+0.748 75BC-2.209 575A<sup>2</sup>-2.023 57B<sup>2</sup>-6.289 075C<sup>2</sup>。

### 2.2.2 响应面回归模型的建立与分析

回归方程的方差分析结果如表3所示。

表3 模型回归方程方差分析

Table 3 ANOVA of the regression equation

项目	平方和	自由度	均方	F值	p值	显著性
模型	545.207	9	60.579	19.145	0.000 4	**
A 底物浓度	17.654	1	17.654	5.579	0.050 2	
B 酶解温度	4.290	1	4.290	1.356	0.282 4	
C 初始 pH 值	276.290	1	276.290	87.317	<0.000 1	**
AB	15.733	1	15.733	4.972	0.061 0	
AC	8.830	1	8.830	2.791	0.138 7	
BC	2.243	1	2.243	0.709	0.427 7	
A <sup>2</sup>	20.557	1	20.557	6.497	0.038 2	*
B <sup>2</sup>	17.241	1	17.241	5.449	0.052 3	
C <sup>2</sup>	166.537	1	166.537	52.631	0.000 2	**
残差	22.149	7	3.164			
失拟项	18.151	3	6.050	6.052 4	0.057 3	
纯误差	3.999	4	1.000			
总和	567.357	16				
			R <sup>2</sup> =0.961	R <sup>2</sup> <sub>Adj</sub> =0.911		

注:\*表示影响显著(p<0.05);\*\*表示影响极显著(p<0.01)。

由表3可知,所得模型极显著(p=0.000 4<0.01),失拟项不显著(p=0.057 3>0.05),说明此方程对试验拟合度较好。模型确定系数R<sup>2</sup>=0.961,表明影响水解度的因素与所择取的3个变量相关度为96.1%,说明应用该回归模型能够有效预测脱脂紫苏粕的水解度。

由Design-Expert V8.0.6软件分析得到碱性蛋白酶酶解脱脂紫苏粕的最佳酶解工艺为底物浓度7.45%、酶解温度59.83℃、初始pH11.47。在此条件下,水解度预测值为22.538%。按照试验可操作性,将条件调整为底物浓度7.5%、酶解温度60℃、初始pH11.5,在此条件下的实际水解度为(23.462±0.237)%,与预测值相对误差为4.1%(<5%),表明由响应面法优化得到的最佳条件可信。

### 2.2.3 响应面交互作用分析

各因素交互作用响应面及等高线图见图6~图8。

由图6~图8可知,3个因素的响应面三维立体图均开口向下,有最大值,等高线图呈椭圆形,说明各因素间存在交互作用。对模型的方差分析表明,3个因素的交互作用对水解度的影响均不显著(p>0.05)。

由图6可知,当初始pH值(C)固定在中心值12时,随酶解温度(A)和底物浓度(B)的增加,水解度均

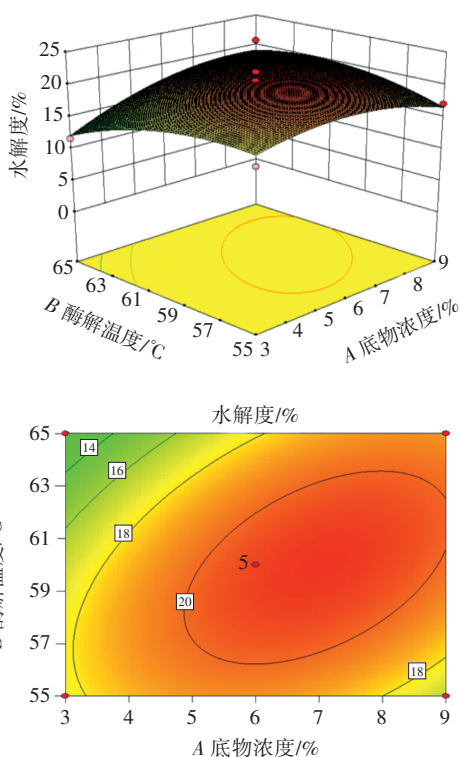


图6 底物浓度与酶解温度对水解度影响的响应面及等高线图  
Fig.6 Response surface and contour map of the effect of the interaction between substrate concentration and hydrolysis temperature on the degree of hydrolysis

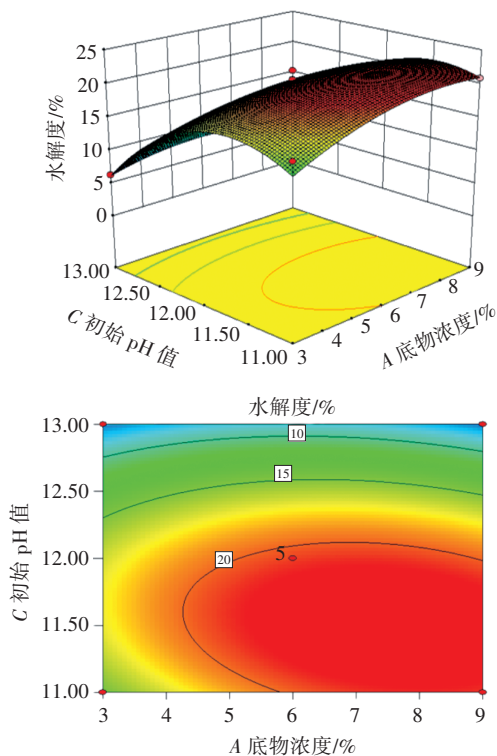


图7 底物浓度与初始pH值对水解度影响的响应面及等高线图  
Fig.7 Response surface and contour map of the effect of the interaction between substrate concentration and initial pH on the degree of hydrolysis

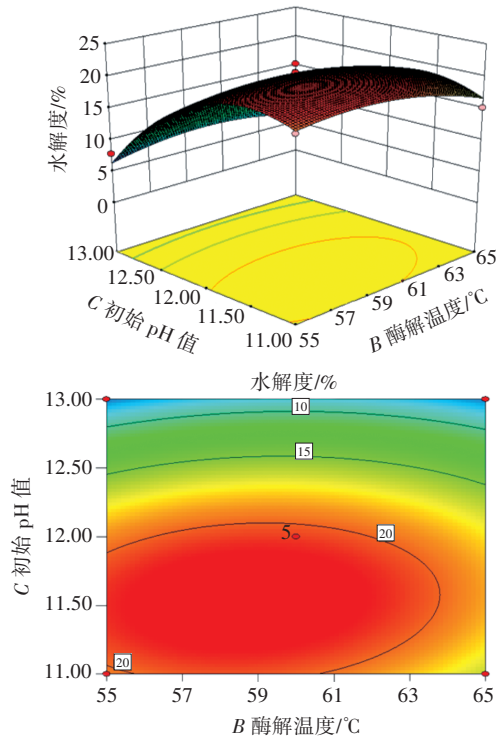


图8 酶解温度与初始 pH 值对水解度影响的响应面及等高线图  
Fig.8 Response surface and contour map of the effect of the interaction between hydrolysis temperature and initial pH on the degree of hydrolysis

呈现先增高后降低的现象,且趋势均较为缓慢。由图7可知,当酶解温度(B)固定在中心值60℃时,随底物浓度(A)和初始pH值(C)的增加,水解度均呈现先增高后降低的现象;水解度随初始pH值变化的趋势较明显,而随底物浓度变化较缓慢。由图8可知,当底物浓度(A)固定在中心值6%时,随酶解温度(B)和初始pH值(C)的增加,水解度均呈现先增高后降低的现象;水解度随初始pH值变化的趋势较明显,而随酶解温度变化较缓慢。由表3可知,因素项C、C<sup>2</sup>为极显著水平,A<sup>2</sup>为显著水平。综合响应面、等高线图及方差分析可知,各因素对酶解液水解度的影响顺序为C>A>B,即初始pH值>底物浓度>温度。

### 2.3 紫苏粕多肽氨基酸组成分析

紫苏粕多肽的氨基酸组成分析检测结果如表4所示。

如表4所示,紫苏粕多肽共有17种氨基酸,包括7种必需氨基酸和10种非必需氨基酸,未检测出天冬酰胺、谷氨酰胺和亮氨酸。紫苏粕多肽总氨基酸含量达90.09%,必需氨基酸占总氨基酸含量的56.48%,接近联合国粮食和农业组织/联合国世界卫生组织(Food and Agricultural Organization of the United Nations/The World Health Organization, FAO/WHO)推荐值60%。疏水性氨基酸、正电荷氨基酸、负电荷氨基酸含量均较高,分别为36.19%、36.74%和19.51%。这可能是紫苏粕多肽抗氧化活性较强的原因之一。所有氨基酸种类

表4 紫苏粕多肽氨基酸组成

Table 4 Amino acid composition in the polypeptides prepared from perilla meal

氨基酸名称	含量/(mg/g)	氨基酸名称	含量/(mg/g)
天冬氨酸(Asp) <sup>-</sup>	55.508±0.901	半胱氨酸(Cys) <sup>#</sup>	2.577±0.294
谷氨酸(Glu) <sup>-</sup>	120.285±0.093	色氨酸(Trp) <sup>*#</sup>	79.635±0.641
组氨酸(His) <sup>+</sup>	17.277±0.239	异亮氨酸(Ile) <sup>*#</sup>	22.106±0.644
精氨酸(Arg) <sup>+</sup>	286.635±0.357	苯丙氨酸(Phe) <sup>*#</sup>	31.856±0.805
丝氨酸(Ser)	44.131±0.600	酪氨酸(Tyr) <sup>#</sup>	41.592±0.907
苏氨酸(Thr) <sup>*</sup>	23.948±0.889	赖氨酸(Lys) <sup>+</sup>	27.089±0.091
脯氨酸(Pro) <sup>#</sup>	19.691±0.775	HAA 含量/%	36.19%
甘氨酸(Gly) <sup>#</sup>	31.822±0.696	NCAA 含量/%	19.51%
丙氨酸(Ala) <sup>#</sup>	32.094±0.003	PCAA 含量/%	36.74%
缬氨酸(Val) <sup>*#</sup>	58.942±0.660	TAA 含量/%	90.09%
甲硫氨酸(Met) <sup>*#</sup>	5.679±0.756	EAA/NEAA	56.48%

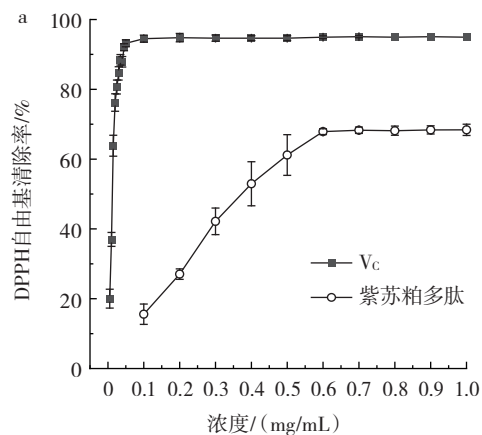
注:\*表示必需氨基酸(essential amino acid, EAA);#表示疏水性氨基酸(hydrophobic amino acid, HAA);+表示正电荷氨基酸(positively charged amino acid, PCAA);-表示负电荷氨基酸(negative charged amino acid, NCAA);NEAA 为非必需氨基酸(nonessential amino acid);TAA 为总氨基酸(total amino acid)。

中,精氨酸含量最高,达到(286.635±0.357)mg/g。精氨酸参与蛋白质的生物合成、宿主免疫反应、尿素循环和一氧化氮的产生等生物过程<sup>[21]</sup>。富含精氨酸的饮食源蛋白质已被报道了多种生物活性,如抑菌、降压、促血管生成、治疗神经退行性疾病等<sup>[22-23]</sup>。因此紫苏粕多肽作为功能食品开发潜力较大。

### 2.4 紫苏粕多肽抗氧化活性分析

紫苏粕多肽抗氧化活性见图9。

如图9所示,紫苏粕多肽的抗氧化活性具有明显的剂量效应,其DPPH自由基清除率和ABTS<sup>+</sup>自由基清除率均表现出随浓度增加而提高,随后趋于稳定的趋势。总体上,紫苏粕多肽的抗氧化活性不及阳性对照V<sub>c</sub>,两者的DPPH自由基清除率分别稳定在68%和95%左右,但ABTS<sup>+</sup>自由基清除率均能达到100%。紫苏粕多肽DPPH自由基清除率曲线在浓度为0.6 mg/mL时到达拐点,因此选择在该浓度下进行紫苏



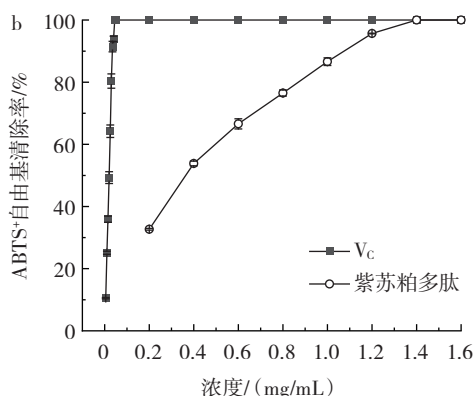
a. DPPH 自由基清除率; b. ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率。

图9 紫苏粕多肽抗氧化活性

Fig.9 Antioxidant activity of perilla meal polypeptides

粕多肽的抗氧化稳定性分析试验。

#### 2.4.1 温度对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

温度对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响见图 10。

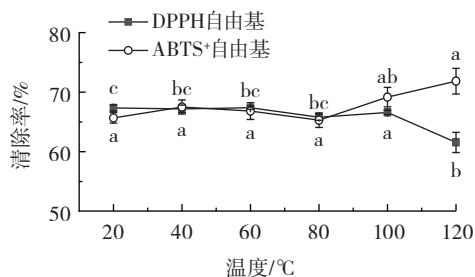
同一指标不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图10 温度对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

Fig.10 Effect of temperature on the antioxidant activity of perilla meal polypeptides

如图 10 所示,紫苏粕多肽的抗氧化活性在较宽的温度范围内保持稳定。在 20~100 °C 间,紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率维持在 67% 左右,进一步提高温度至 120 °C,其 DPPH 自由基清除率降低至(61.558±1.692)%,降低幅度仅为 8.122%。在 40~80 °C 间,紫苏粕多肽的 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率维持在 66% 左右,当温度超过 80 °C,其 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率有上升的趋势。温度为 100 °C 时,紫苏粕多肽 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率为(69.161±1.629)%,提高幅度为 4.79%;温度为 120 °C 时,紫苏粕多肽 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率为(71.848±2.148)%,提高幅度进一步增加至 8.861%。紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率在高温条件下呈现出相反的变化趋势,可能是因为高温并没有引起多肽的不可逆变性,仅改变了二级结构,从而影响了其抗氧化活性<sup>[24-25]</sup>。综上所述,紫苏粕多肽在 20~100 °C 以内均可进行加工和保存。

#### 2.4.2 pH 值对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

pH 值对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响见图 11。

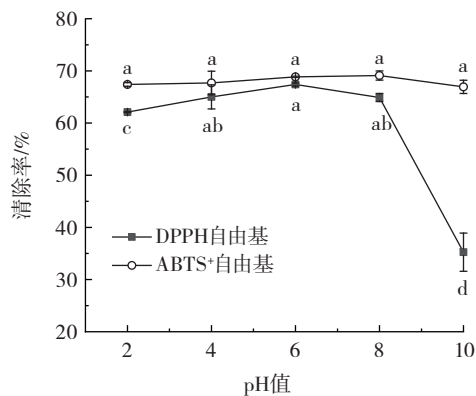
同一指标不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

图11 pH 值对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

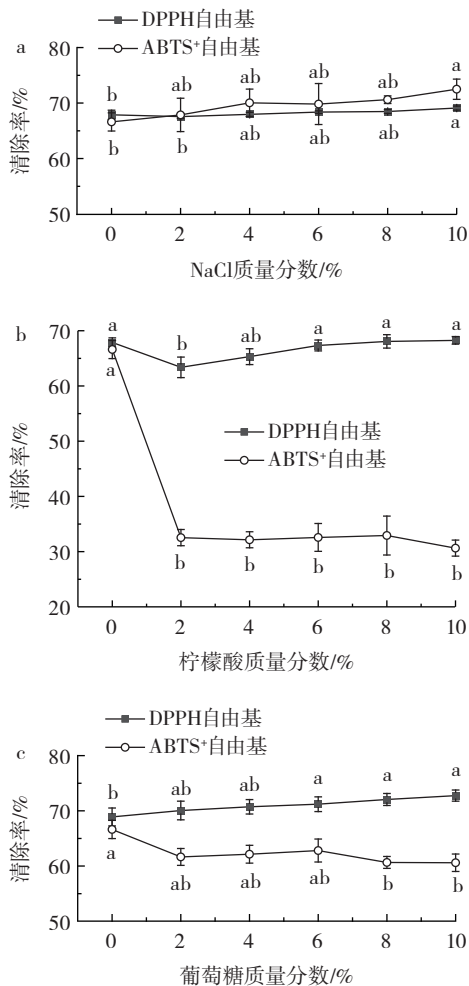
Fig.11 Effect of pH on the antioxidant activity of perilla meal polypeptides

如图 11 所示,pH 值对紫苏粕多肽 DPPH 自由基清除率的影响显著( $p < 0.05$ ),在 pH 值为 6 时最高,为(67.394±0.285)%。增加或降低 pH 值均会引起 DPPH 自由基清除率的下降。当 pH 值为 2 及 pH 值为 10 时,紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率分别为(62.107±0.092)%、(35.249±3.666)%,较 pH 值为 6 时的降低幅度分别为 7.845% 和 47.697%。研究表明,pH 值的变化可改变带电氨基酸之间的静电相互作用,影响多肽分子的形状,导致化学性质的改变<sup>[26]</sup>。酸性条件下,多肽的溶解度降低,羟基的有效性减弱,从而降低了其 DPPH 自由基清除活性<sup>[27]</sup>,这种变化可能是可逆的,因此紫苏粕多肽在强酸条件下,经过 1 h 的反应回到中性条件后,DPPH 自由基清除活性降低并不明显。而碱性条件下,降低活性肽的 DPPH 自由基清除率的因素更多,包括外消旋作用、脱酰胺作用<sup>[28]</sup>以及供氢体上的氢的消耗<sup>[29]</sup>,这些变化可能是不可逆的,因此紫苏粕多肽在强碱条件下,经过 1 h 的反应回到中性条件后,DPPH 自由基清除活性显著降低。而 pH 值对紫苏粕多肽的 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除活性没有显著影响( $p > 0.05$ ),其 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率稳定在 68% 左右。ABTS<sup>+</sup> 自由基可通过抗氧化剂转移电子或氢质子清除,而 DPPH 自由基则主要依靠抗氧化剂转移氢质子消除。因此碱性条件下氢质子减少,紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率降低,而 ABTS<sup>+</sup> 自由基依然可以靠电子转移得到清除,从而将 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率维持在一定水平<sup>[30]</sup>。综上所述,紫苏粕多肽可在中性、弱酸性环境中进行加工和保存。

#### 2.4.3 食品配料对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

食品配料对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响见图 12。

如图 12a 所示,随 NaCl 质量分数的增加,紫苏粕多肽的抗氧化活性稍有升高,但无显著差异( $p > 0.05$ ),



同一指标不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

a. NaCl; b. 柠檬酸; c. 葡萄糖。

图 12 食品配料对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响

Fig.12 Effects of food ingredients on the antioxidant activity of perilla meal polypeptides

其 DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率分别上升 1.79% 和 8.85%。这与郑志强等<sup>[31]</sup>、胡晓等<sup>[32]</sup>的研究结果一致, NaCl 在水溶液中电离的 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 能中和紫苏粕多肽表面的电荷, 从而破坏水化膜, 暴露其氢供体以增强抗氧化活性。因此, 在紫苏粕多肽的加工与应用中可适量添加 NaCl。

如图 12b 所示, 柠檬酸对 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除活性有明显抑制作用。柠檬酸质量分数由 0% 增加到 2% 时, 紫苏粕多肽的 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率降低了 51.14%, 质量分数继续增加, ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率维持在 32% 左右, 这可能是由于柠檬酸的加入降低了体系的 pH 值, 影响了紫苏粕多肽的供电子能力, 导致 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除活性下降。而玉米抗氧化肽 Leu-Pro-Phe 和抗氧化硒肽 SeMet-Pro-Ser 在加入 2% 柠檬酸后, 完全丧失 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除活性, 这可能是由于紫苏粕多肽富含多种抗氧化氨基酸, 对柠檬酸的抗性强

于只含有几种氨基酸的单肽<sup>[33-34]</sup>。DPPH 自由基清除率随柠檬酸质量分数增加呈现出先降低后升高并保持稳定的趋势, 变化具有显著性( $p < 0.05$ ), 但变化幅度较小( $< 2.5%$ )。因此, 在紫苏粕多肽的加工与应用中应尽量避免添加柠檬酸。

如图 12c 所示, 葡萄糖对紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除活性与 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除活性的影响完全相反。紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率与葡萄糖质量分数呈正相关( $p < 0.05$ ), ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率与葡萄糖质量分数呈负相关, 但作用不显著( $p > 0.05$ ), 这与栾晓旭等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。多肽与还原糖可发生美拉德反应, 生成的醛、酮类还原性化合物可增加多肽的抗氧化活性<sup>[35]</sup>。因此, 在紫苏粕多肽的加工与应用中可少量添加葡萄糖。

### 3 结论

本文以脱脂紫苏粕为原料, 采用碱性蛋白酶酶解法制备紫苏粕多肽。在单因素试验基础上, 采用响应面法优化脱脂紫苏粕酶解工艺。结果表明, 最佳酶解工艺条件为酶解时间 8 h、初始 pH 11.5、底物浓度 7.5%、酶解温度 60 °C、加酶量 7 000 U/g, 在此条件下, 酶解液水解度为 (23.462±0.237)%。在最优工艺条件下获得的紫苏粕多肽具有良好的氨基酸组成和抗氧化稳定性。紫苏粕多肽由 7 种必需氨基酸和 10 种非必需氨基酸组成, EAA/NEAA 为 56.48%, 接近 FAO/WHO 推荐值, 其中正电荷氨基酸精氨酸含量达 (286.635±0.357) mg/g。紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率在一定浓度条件下能达到 68% 和 100%。紫苏粕多肽对温度的敏感性不高, 在 20~100 °C 的温度范围内保持良好的抗氧化活性。强碱条件下 (pH 10) 紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率降低了 47.697%。食品原料对紫苏粕多肽抗氧化活性的影响各不相同, NaCl 增强紫苏粕多肽的 DPPH 自由基和 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率 ( $p > 0.05$ ), 柠檬酸显著降低紫苏粕多肽的 ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率 ( $p < 0.05$ ), 葡萄糖增强紫苏粕多肽的 DPPH 自由基清除率。综上, 该工艺制备的紫苏粕多肽具有良好氨基酸组成和抗氧化稳定性, 在其加工和应用中应尽量避免高温和强碱, 可适量添加 NaCl 和葡萄糖。研究结果可为紫苏粕多肽的生产和应用提供技术支撑, 对促进紫苏资源综合利用具有重要的实践指导意义。

### 参考文献:

- [1] ZHANG H J, LI H Z, ZHANG Z J, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from perilla seed meal by response surface methodology: Characterization and *in vitro* antioxidant activities[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(2): 306-318.
- [2] 任志清, 李会珍, 张志军, 等. 不同品种紫苏叶迷迭香酸的提取



- 及其生物活性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 92-100.
- REN Zhiqing, LI Huizhen, ZHANG Zhijun, et al. Extraction of rosmarinic acid from different varieties of *Perilla* leaves and its biological activity[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 92-100.
- [3] HWANG Y J, KIM J M, YOON K Y. Characteristics of water-soluble polysaccharides extracts produced from *Perilla* seed meal via enzymatic hydrolysis[J]. CyTA - Journal of Food, 2020, 18(1): 653-661.
- [4] TANTIPAIBOONWONG P, CHAIWANGYEN W, SUTTAJIT M, et al. Molecular mechanism of antioxidant and anti-inflammatory effects of *Omega*-3 fatty acids in *Perilla* seed oil and rosmarinic acid rich fraction extracted from *Perilla* seed meal on TNF- $\alpha$  induced A549 lung adenocarcinoma cells[J]. Molecules, 2021, 26(22): 6757.
- [5] HASHIMOTO M, MATSUZAKI K, HOSSAIN S, et al. *Perilla* seed oil enhances cognitive function and mental health in healthy elderly Japanese individuals by enhancing the biological antioxidant potential[J]. Foods, 2021, 10(5): 1130.
- [6] RAO C V, PATLOLLA J M R, COOMA I, et al. Prevention of familial adenomatous polyp development in APC Min mice and azoxymethane-induced colon carcinogenesis in F344 Rats by  $\omega$ -3 fatty acid rich *Perilla* oil[J]. Nutrition and Cancer, 2013, 65(Suppl 1): 54-60.
- [7] 李会珍, 张云龙, 张红娇, 等. 紫苏籽营养及产品加工研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(9): 120-124.
- LI Huizhen, ZHANG Yunlong, ZHANG Hongjiao, et al. Progress on nutrition and product processing of *Perilla* seed[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(9): 120-124.
- [8] 胡东亚, 张志军, 曹千慧, 等. 紫苏饼粕的残油醇提工艺及品质分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 218-223, 271.
- HU Dongya, ZHANG Zhijun, CAO Qianhui, et al. Alcohol extraction process and quality analysis of residual oil from *Perilla* cake meal[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(2): 218-223, 271.
- [9] LIU Y F, OEY I, BREMER P, et al. Bioactive peptides derived from egg proteins: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(15): 2508-2530.
- [10] 王耀冉, 陈明杰, 李治平, 等. 生物活性肽制备、鉴定及其生物活性研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(12): 349-354.
- WANG Yaoran, CHEN Mingjie, LI Zhiping, et al. Research progress on preparation, identification and biological activity of bioactive peptides[J]. The Food Industry, 2021, 42(12): 349-354.
- [11] KARAMI Z, AKBARI-ADERGANI B. Bioactive food derived peptides: A review on correlation between structure of bioactive peptides and their functional properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(2): 535-547.
- [12] 毕晓娟, 魏亮, 杨慧莹, 等. 响应面法优化元宝枫籽粕酶解工艺及多肽功能特性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 204-214.
- BI Xiaojuan, WEI Liang, YANG Huiying, et al. Optimization of the enzymatic hydrolysis process of *Acer truncatum* seed meal by response surface methodology and the functional characteristics of the polypeptide obtained[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 204-214.
- [13] 赵新淮, 冯志彪. 大豆蛋白水解物水解度测定的研究[J]. 东北农业大学学报, 1995, 26(2): 178-181.
- ZHAO Xinhuai, FENG Zhibiao. A study on the determination of the degree of hydrolysis in soy protein hydrolysates[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1995, 26(2): 178-181.
- [14] 余勃, 陆兆新. 微生物发酵法产大豆多肽液水解度的测定[J]. 食品科学, 2005, 26(4): 104-107.
- YU Bo, LU Zhaoxin. Determination of degree of hydrolysis of soybean peptides produced by microorganism fermentation[J]. Food Science, 2005, 26(4): 104-107.
- [15] 张可可. 泡沫分离富集和回收紫苏饼粕蛋白的工艺和机理研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- ZHANG Keke. Study on technology and mechanism of foam separation and enrichment and recovery of protein from *Perilla* cake[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [16] 刘金丽, 樊芳, 何晓霞, 等. 红极参肽的酶法制备工艺优化及其抗氧化评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 235-243.
- LIU Jinli, FAN Fang, HE Xiaoxia, et al. Enzymatic preparation of the peptide of *Cucumaria frondosa* and its antioxidant evaluation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 235-243.
- [17] ZHANG X, ZHANG H, JIAO P F, et al. Preparation and evaluation of antioxidant activities of bioactive peptides obtained from *Cornus officinalis*[J]. Molecules, 2022, 27(4): 1232.
- [18] 陈伟玲, 陈邦栋, 廖惠青, 等. 皮蛋清抗氧化肽制备工艺优化及体外抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 148-155.
- CHEN Weiling, CHEN Bangdong, LIAO Huiqing, et al. Optimization of the preparation process of antioxidant peptide from preserved egg white and its *in vitro* antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 148-155.
- [19] 王建成, 邢岩, 张丽梅. 红松仁多肽酶解制备工艺优化及降压降脂活性分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(3): 40-46.
- WANG Jiancheng, XING Yan, ZHANG Limei. Optimization of enzymatic hydrolysis preparation of Korean pine kernel polypeptide and analysis of its antihypertensive and lipid-lowering activities [J]. China Oils and Fats, 2023, 48(3): 40-46.
- [20] 何宛诗, 许瑾, 曹庸, 等. 雨生红球藻蛋白酶解产物的制备和抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 248-257.
- HE Wanshi, XU Jin, CAO Yong, et al. Preparation and evaluation of antioxidant activity of *Haematococcus pluvialis* hydrolysate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 248-257.
- [21] GAMBARELLA J, KHONDKAR W, MORELLI M B, et al. Arginine and endothelial function[J]. Biomedicine, 2020, 8(8): 277.
- [22] CHANDANA T, VENKATESH Y P. Occurrence, functions and biological significance of arginine-rich proteins[J]. Current Protein & Peptide Science, 2016, 17(5): 507-516.
- [23] MAMSA S S A, MELONI B P. Arginine and arginine-rich peptides as modulators of protein aggregation and cytotoxicity associated with Alzheimer's disease[J]. Frontiers in Molecular Neuroscience, 2021, 14: 759729.
- [24] SINGH B P, VIJ S. *In vitro* stability of bioactive peptides derived from fermented soy milk against heat treatment, pH and gastrointestinal enzymes[J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 91: 303-307.
- [25] 郑婷婷, 涂宗财, 唐平平, 等. 鱼鳔胶原肽抗氧化稳定性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 9-14.
- ZHENG Tingting, TU Zongcai, TANG Pingping, et al. Study on antioxidation stability of collagen peptides prepared from swimming bladders[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 9-14.
- [26] JANG H L, LICEAGA A M, YOON K Y. Purification, characterisation and stability of an antioxidant peptide derived from sandfish (*Arctoscopus japonicus*) protein hydrolysates[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 20: 433-442.
- [27] 栾晓旭, 冯美琴, 孙健. 发酵香肠源抗氧化肽的稳定性[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 1-7.
- LUAN Xiaoxu, FENG Meiqin, SUN Jian. Stability of antioxidant peptides extracted from fermented sausages[J]. Food Science, 2020,

- 41(16): 1-7.
- [28] LIU D M, CHEN X, HUANG J C, et al. Stability of antioxidant peptides from duck meat after post-mortem ageing[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(12): 2513-2521.
- [29] 梁杰, 赵晓旭, 汪秀妹, 等. 鲍鱼水解肽的抗氧化活性评价、组成分析及稳定性研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 279-284.
- LIANG Jie, ZHAO Xiaoxu, WANG Xiumei, et al. Antioxidant activity evaluation, composition analysis and stability study of the abalone hydrolytic peptides[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 279-284.
- [30] 李慧卿, 曹叶霞, 黄坊娇. DPPH·和 ABTS·比较研究毛建草多酚、黄酮和多糖的抗氧化协同作用[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 98-105.
- LI Huiqing, CAO Yexia, HUANG Fangjiao. Comparative Study of DPPH·and ABTS·methods on the antioxidant synergistic effects of polyphenols, flavonoids and polysaccharides of *Dracocephalum rupestre* Hance[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 98-105.
- [31] 郑志强, 刘晋, 魏晓娟, 等. 加工条件及模拟胃肠消化对小麦肽抗氧化稳定性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 330-336.
- ZHENG Zhiqiang, LIU Jin, WEI Xiaojuan, et al. Effects of processing conditions and simulated gastrointestinal digestion on antioxidative stability of wheat peptide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 330-336.
- [32] 胡晓, 吴静, 杨贤庆, 等. 添加物和体外模拟胃肠道消化对鳶乌贼抗氧化肽稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(11): 91-96.
- HU Xiao, WU Jing, YANG Xianqing, et al. Effect of additives and gastrointestinal digestion *in vitro* on antioxidant stability of peptides derived from Purpleback flying squid(*Symplectoteuthis oualaniensis*) [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(11): 91-96.
- [33] 唐宁, 庄红. 玉米抗氧化肽 Leu-Pro-Phe 抗氧化稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(2): 49-55.
- TANG Ning, ZHUANG Hong. Studies on the antioxidative stability of corn antioxidant peptide leu-pro-phe[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(2): 49-55.
- [34] LIU K L, DU R F, CHEN F S. Stability of the antioxidant peptide SeMet-Pro-Ser identified from selenized brown rice protein hydrolysates[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126540.
- [35] 郑昌亮, 陈梦婷, 汪兰, 等. 鳙鱼肌原纤维蛋白源抗氧化肽的稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(8): 43-50.
- ZHENG Changliang, CHEN Mengting, WANG Lan, et al. Stability of antioxidant peptides from bighead carp (*Aristichthys nobilis*) myofibrillar protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(8): 43-50.

责任编辑:冯娜  
收稿日期:2022-10-05

(上接第 141 页)

- ang Agricultural Sciences, 2022, 63(7): 1382-1385, 1390.
- [17] 李子淳, 耿文广, 刘芳, 等. 响应面法优化黄秋葵热风干燥工艺[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(13): 77-83.
- LI Zichun, GENG Wenguang, LIU Fang, et al. Optimization of hot-air drying okra by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2022, 43(13): 77-83.
- [18] 刘启玲, 王庆卫, 崔胜文. 不同预处理方式对红枣热风-微波联合干燥品质特性及抗氧化活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 124-130.
- LIU Qiling, WANG Qingwei, CUI Shengwen. Effects of different pretreatment methods on quality characteristics and antioxidant activity of jujube drying by combined hot-air-microwave drying[J]. Food Research and Development, 2020, 41(24): 124-130.
- [19] 张强, 邓酥萍, 张娜英, 等. 微波-热风联合干燥在芒果果脯加工中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 104-109.
- ZHANG Qiang, DENG Suping, ZHANG Naying, et al. Application of microwave-hot air combined with drying in processing preserved mango[J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 104-109.
- [20] CHEN B, ZHANG M, WANG Y C, et al. Comparative study of conventional and novel combined modes of microwave-and infrared-assisted thawing on quality of frozen green pepper, carrot and cantaloupe[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112842.
- [21] ZHANG L, YU X J, ARUN S M, et al. Effect of freeze-thaw pretreatment combined with variable temperature on infrared and convection drying of lotus root[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112804.
- [22] 段柳柳, 段续, 任广跃. 微波冻干怀山药脆片干燥过程中脆性变化与数学模型的建立[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 29-35.
- DUAN Liuliu, DUAN Xu, REN Guangyue. Crispness variation and mathematical modeling of microwave-freeze drying of Chinese yam chips[J]. Food Science, 2018, 39(23): 29-35.

责任编辑:冯娜  
收稿日期:2022-09-28