

发芽糙米多糖微波辅助提取工艺及其 抗氧化活性研究

Optimization on process of microwave assisted extraction and antioxidant activities of polysaccharides from germinated brown rice

潘姝璇^{1,2} 王嘉怡^{1,3} 陈建¹ 夏陈¹ 邓俊琳¹ 蒲彪²

PAN Shu-xuan^{1,2} WANG Jia-yi^{1,3} CHEN Jian¹ XIA Chen¹ DENG Jun-lin¹ PU Biao²

(1. 四川省农业科学院农产品加工研究所, 四川 成都 610066; 2. 四川农业大学食品学院, 四川 雅安 625014;

3. 四川大学华西公共卫生学院, 四川 成都 610041)

(1. Agro-Products Processing Science and Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu, Sichuan 610066, China; 2. Sichuan Agricultural University College of Food Science, Ya'an, Sichuan 625014, China; 3. West China School of Public Health, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China)

摘要:以发芽糙米多糖(germinated brown rice polysaccharides, GBRP)提取率为指标,应用 Box-Behnken 模型优化 GBRP 的微波辅助提取工艺;通过对 Fe^{3+} 的还原力,对 DPPH·、 O_2^- ·、·OH 的清除率和抑制脂质过氧化能力考察 GBRP 的体外抗氧化活性。结果表明,在提取温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$,微波功率 604 W,液料比 24:1(mL/g),微波时间 3.83 min,提取 2 次的条件下,GBRP 的提取率为 2.82%。GBRP 对 Fe^{3+} 的还原力吸光值为 0.196;其对 DPPH·清除率最大为 52.71%,半最大效应浓度(half maximum effective concentration, EC_{50})为 0.34 mg/mL;对 O_2^- ·清除率为 40.18%, EC_{50} 为 0.23 mg/mL;对·OH 的清除率为 88.41%,且 1.37 倍高于 V_c 的, EC_{50} 为 0.211 mg/mL;抑制脂质过氧化能力为 60.86%,1.5 倍高于 V_c 的, EC_{50} 为 0.077 mg/mL。试验结果显示,GBRP 有较强的体外抗氧化活性。

关键词:发芽糙米;多糖;微波辅助提取;抗氧化性

Abstract: This research studied microwave assisted extraction process of germinated brown rice polysaccharides (GBRP). The extraction process was optimized by response surface methodology. Antioxidant activities of the germinated brown rice polysaccharides

(GBRP) were also studied. On the basis of single factor experiment, the microwave assisted extraction rate of GBRP from germinated brown rice was optimized by Box-Behnken model. The antioxidant activities of the GBRP (*in vitro*) were investigated based on reducing force to Fe^{3+} , scavenging rate to DPPH·, O_2^- ·, and ·OH, and inhibition to lipid peroxidation five testing factors. The results showed that the optimal conditions were as followed: extraction temperature $40\text{ }^\circ\text{C}$, microwave power 604 W, ratio of solvent to material 24 mL/g, and microwave time 3.83 min. The optimized extraction conditions led to 2.82% extraction rate of the GBRP. The absorbance of the reducing force to Fe^{3+} of the GBRP was 0.196. The DPPH· scavenging rate of the GBRP reached to a maximum value of 52.71%, resulting half maximum effective concentration (EC_{50}) value 0.34 mg/mL. The clearance rate of O_2^- reached to 40.18%, resulting EC_{50} value 0.23 mg/mL. The maximum scavenging rate to ·OH was 88.41%, resulting EC_{50} value 0.211 mg/mL. The scavenging rate is 1.37 times higher than that of Vitamin C (V_c). The maximum value of inhibition to lipid peroxidation was 60.86%, getting EC_{50} value 0.077 mg/mL. The inhibition ability is 1.5 times stronger than that of Vitamin C. Testing results showed that germinated brown rice polysaccharides (GBRP) possesses relatively strong antioxidant ability (*in vitro*).

Keywords: Germinated brown rice; polysaccharides; ultrasound assisted extraction process; antioxidant activity

基金项目:四川省财政创新能力提升工程专项资金特色产业培育工程项目(编号:2016TSCY-012);四川省农业科学院 2017 年度科技成果中试熟化示范工程(编号:CGZH2017XD25)

作者简介:潘姝璇,女,四川农业大学在读硕士研究生。

通信作者:陈建(1969—),男,四川省农业科学院农产品加工研究所研究员,博士。E-mail:jc_saas@yahoo.com

蒲彪(1956—),男,四川农业大学食品学院教授,本科。

E-mail:pubiao2002@163.com

收稿日期:2017—08—01

发芽糙米(germinated brown rice, GBR)是糙米在一定的湿度和温度下发芽至一定芽长(一般为 0.5~1.0 mm),所得到的由幼芽和带糠层的胚乳组成的糙米制品^[1]。人们在

养身的过程中发现糙米能产生较强的饱腹感,且对身体健康有很多益处^[2]。但糙米口感粗糙。通过发芽处理后的糙米经历了种子萌发阶段激活了大量的内源酶,酶解作用导致糙米中多糖等活性物质的含量、结构、种类及其生物活性都有所改变或增强,不仅口感得到了一定程度的改善,而且富含许多生物活性物质,如 γ -氨基丁酸、菲汀、谷维素、神经酰胺、阿魏酸、多糖等。因此发芽糙米营养物质丰富,具有特殊的营养功效^[3]。

很多报道^[4-7]表明植物中的多糖对自由基有一定的抗氧化活性,可以作为新的潜在抗氧化剂进行研究。氧化是许多生物能量生产的基本过程,但是过量的自由基在体内会产生一些氧化反应过程不仅与脂质过氧化作用密切相关,还会引起疾病。因此,对高效的抗氧化剂的开发并用于保护机体免受自由基的破坏是十分必要的^[8]。热水浸提法为传统且最为常用的水溶性多糖制备方法,但耗时长、效率低^[9]。微波辅助提取法是利用微波对物质进行萃取的一种新兴技术,具有耗时短、效率高、节省溶剂、最终产生的物质产量高而不改变其性质等优势^[10-12]。作为一种替代传统方法的潜在方法,该方法受到越来越多的关注^[13-14]。

目前,在发芽糙米中的功能成分的研究报道中对多糖的研究甚少,刘晓飞等^[15]曾采用超声波辅助双水相法萃取对发芽糙米多糖的工艺优化及其抗氧化活性进行过研究。本试验拟采用微波辅助法对发芽糙米多糖(germinated brown rice polysaccharides, GBRP)进行提取,用响应面法对其工艺进行优化,并研究 GBRP 的抗氧化活性,旨在为发芽糙米的增值利用和新型多糖的制备提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

发芽糙米:由东北产糙米经某谷物公司生产车间 1 000 kg 级大生产制备;

石油醚(35~60℃)、浓硫酸、硫酸亚铁、水杨酸、过氧化氢:分析纯,成都市科龙化工试剂厂;

葡萄糖:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

苯酚:分析纯,成都市裴征化玻有限公司;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH·):梯希爱化成工业发展有限公司;

中药粉碎机:FY-250型,永康市久品工贸有限公司;

微波科学实验炉:ORW08S-3H型,南京奥润微波科技有限公司;

扫描型紫外可见分光光度计:UV-6100型,上海美普达仪器有限公司;

高速冷冻离心机:Gentrifuge 5180R型,德国 Eppendorf 公司;

电子天平:FA2104型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司。

1.2 发芽糙米的前处理

将 50 kg 发芽糙米用碾米机去除胚乳(即分离除去大量淀粉)得到 5.5 kg 发芽糙米米糠(含有约 10%碎米)。取该米

糠 1.0 kg 浸泡于 5 L 石油醚中并搅拌 4 h 脱脂处理后,过滤,置于通风橱风干,粉碎,过 60 目筛,密封保存,备用。

1.3 多糖含量的测定

采用苯酚-硫酸法^[16]。

1.4 微波辅助提取 GBRP

1.4.1 提取工艺 称取 1.0 g 前处理的发芽糙米米糠,在 40℃ 下用去离子水按一定的液料比混合后,置于微波科学实验炉,设定微波功率,采用不同的液料比、微波提取时间、微波功率、提取次数(具体数据设计见 1.4.1)4 个因素进行微波辅助提取。提取完后将混合物离心(8 000 r/min, 10 min),取 5 mL 上清液加 25 mL 乙醇沉淀。醇沉之后再离心(8 000 r/min, 10 min),去上清液,将沉淀冷冻干燥后,复溶于 5 mL 去离子水中,采用苯酚-硫酸法测定多糖含量。

1.4.2 单因素试验 参考文献^[17~18]的条件,以去离子水为提取剂,分别就微波功率、微波时间、液料比和微波次数做单因素试验。

(1) 微波功率:固定微波温度 40℃,微波时间 4 min,液料比 20:1 (mL/g),提取次数 2 次,采用以上选出的结果,考察不同微波功率 200,300,400,500,600,700 W 对 GBRP 提取率的影响。

(2) 微波时间:固定微波温度 40℃,液料比 20:1 (mL/g),提取次数 2 次,采用以上选出的结果,考察不同微波时间 2,3,4,5,6,7 min 对 GBRP 提取率的影响。

(3) 液料比:固定微波温度 40℃,提取次数 2 次,采用以上选出的结果,考察不同液料比 10:1,15:1,20:1,25:1,30:1,35:1 (mL/g)对 GBRP 提取率的影响。

(4) 提取次数:其他条件采用以上选出的结果,考察不同提取次数 1,2,3,4,5 次对 GBRP 提取率的影响。

1.5 GBRP 的抗氧化活性试验

1.5.1 GBRP 溶液的配制 称取 50 g 发芽糙米米糠,按照试验得到的最优提取条件提取 GBRP,醇沉后冷冻干燥得 GBRP 固体,将其配制为不同浓度的多糖溶液,测定其抗氧化活性。

1.5.2 还原力测定 根据文献^[19]的方法,取不同浓度的样品溶液 5.0 mL,依次加入 pH 值 6.6 的 1.0 mL 0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液(PBS)、1.0 mL 1% 铁氰化钾溶液,充分混合,于 50℃ 水浴 20 min,冷却后加入 10%三氯乙酸 1.0 mL,并以 5 000 r/min 离心 15 min,取上清液 1 mL,再加 1 mL 蒸馏水和 0.1 mL 0.1%三氯化铁,静置 10 min 后在波长 700 nm 处测吸光值。以超纯水作为阴性对照,以 V_c 溶液为阳性对照,重复测 3 次,还原力 Y_1 以吸光值为指标。

1.5.3 清除·OH 能力的测定 根据文献^[20]的方法修改如下,取不同浓度的样液 5.0 mL,加入 9 mmol/L 硫酸铁溶液 1.0 mL 后,加 8.8 mmol/L 双氧水溶液 0.1 mL,摇匀,静置 10 min,加入 9 mmol/L 的水杨酸溶液 300 μ L,37℃ 水浴 30 min 后,于波长 510 nm 处测吸光度;以超纯水代替双氧水为样品本底组;以超纯水代替样品溶液为空白对照组;以 V_c 作为阳性对照,重复测 3 次。·OH 清除率按式(1)计算:

$$Y_2 = \frac{A - (A_X - A_{X_0})}{A} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y_2 —— $\cdot\text{OH}$ 清除率, %;

A_X ——样品组吸光值;

A_{X_0} ——样品本底组吸光值;

A ——空白对照组吸光值。

1.5.4 清除 $\text{O}_2\cdot$ 能力的测定 根据文献[21]的方法作如下修改,取 5.0 mL Tris-HCl (50 mmol/L, pH 8.1) 缓冲液,加入不同浓度样品溶液 0.25 mL, 37 °C 水浴 10 min, 然后加入 1.0 mL 相同温度预热后的邻苯三酚溶液 (3 mmol/L), 4 min 后加入 0.5 mL 浓 HCl, 在波长 325 nm 处测吸光度 (A)。超纯水为空白对照组, 以 V_C 作阳性对照, 重复 3 次。 $\text{O}_2\cdot$ 清除率按式(2)计算:

$$Y_3 = \frac{A - A_X}{A} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

Y_3 —— $\text{O}_2\cdot$ 清除率, %;

A_X ——样品组吸光值;

A ——空白对照组吸光值。

1.5.5 清除 DPPH· 能力的测定 根据文献[22]的方法,取不同浓度的样液 5.0 mL, 加入 1.0 mL (0.2 mmol/L) DPPH· 乙醇溶液, 避光反应 30 min, 于 517 nm 波长处测定吸光度 A_X 。超纯水为空白组; 将相同量无水乙醇置换 DPPH· 溶液为本底组, 以同浓度的 V_C 溶液作为阳性对照, 重复测 3 次。DPPH· 清除率按式(3)计算:

$$Y_4 = \frac{A - (A_X - A_{X_0})}{A} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

Y_4 ——DPPH· 清除率, %;

A_X ——样品组吸光值;

A_{X_0} ——样品本底组吸光值;

A ——空白对照组吸光值。

1.5.6 抑制脂质过氧化能力的测定 根据文献[23]的方法, 分别加入脂质体磷酸盐缓冲分散系 (LLS) 1.0 mL、400 $\mu\text{mol/L}$ 三氯化铁溶液 1.0 mL、不同浓度的样品 5.0 mL, 避光于 37 °C 水浴 1 h, 加入三氯乙酸—硫代巴比妥酸—盐酸 2.0 mL, 沸水浴 15 min, 以 6 000 r/min 离心 15 min, 取上清液于波长 535 nm 处测吸光度。空白管以蒸馏水代替样品测得吸光度, 重复测 3 次。脂质过氧化抑制率按式(4)计算:

$$Y_5 = \frac{A - A_X}{A} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

Y_5 ——脂质过氧化抑制率, %;

A_X ——样品组吸光值;

A ——空白对照组吸光值。

2 结果与分析

2.1 标准曲线的绘制

标准曲线方程为 $y = 0.0154x + 0.0028$, $R^2 = 0.9995$, 表明标准溶液的吸光度与不同浓度之间有很好的线性关系。

2.2 单因素试验结果

2.2.1 微波功率对 GBRP 提取率的影响 由图 1 可知, GBRP 提取率在微波功率 600 W 以下时逐渐增加; 微波功率在 600 W 时, 提取率达到最大值 (2.30%); 而功率继续增加时, GBRP 提取率随着功率的增加而缓慢降低, 可能是在微波功率较小时, 促进发芽糙米米糠中多糖的溶出; 当微波功率达到一定值后, 过高的功率对溶出的多糖结构产生了影响, 多糖的提取率降低。因此微波功率在 600 W 时为最佳条件。

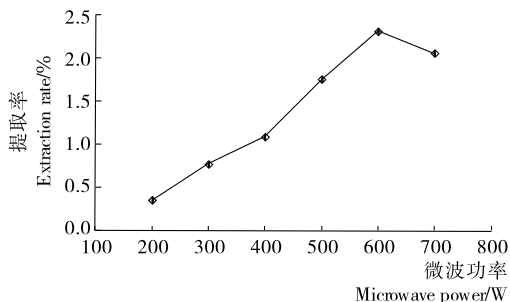


图 1 微波功率对 GBRP 提取率的影响

Figure 1 Effect of microwave power on the extraction efficiency of polysaccharides from germinated brown rice

2.2.2 微波时间对 GBRP 提取率的影响 由图 2 可知, GBRP 提取率在 4 min 内随着时间的延长而增加; 在 4 min 时达到最大提取率 (2.01%); 提取时间继续延长后多糖的提取率却明显降低, 可能是长时间的微波辐照会破坏多糖的结构, 也可能是长时间的微波处理使提取环境中局部温度升高而导致多糖的损失, 进而影响了多糖的提取率。因此微波时间在 4 min 时为最佳条件。

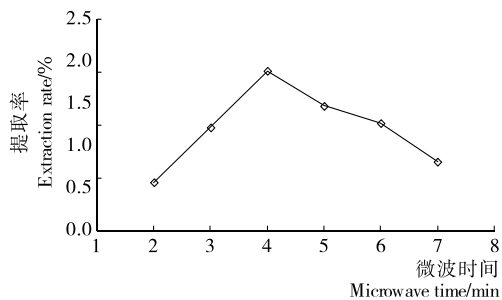


图 2 微波时间对 GBRP 提取率的影响

Figure 2 Effect of extraction time on the extraction efficiency of polysaccharides from germinated brown rice

2.2.3 液料比对 GBRP 提取率的影响 由图 3 可知, 多糖的提取率随液料比的增加先增加后减少, 当液料比为 25 : 1 (mL/g) 时提取率最大 (2.68%)。这可能是, 液料比较少时随着溶剂量的增加, 物料与溶剂间的浓度差增加, 有利于多糖的传递速度且增加了多糖的溶出量; 液料比较大时微波对物料辐照能力减弱, 或使非多糖物质的溶出量增加, 从而导致了多糖含量的降低。因此液料比在 25 : 1 (mL/g) 时为最佳条件。

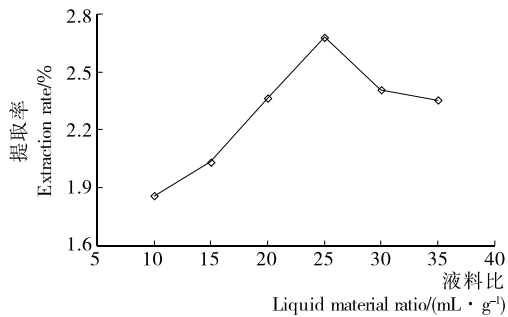


图3 液料比对GBRP提取率的影响

Figure 3 Effect of liquid-solid ratio on the extraction efficiency of polysaccharides from germinated brown rice

2.2.4 提取次数对GBRP提取率的影响 由图4可知,提取1次的效果不佳,提取2次的多糖提取率(2.56%)相较于于提取1次的(1.46%)增加了约1倍;提取次数超过2次后,提取率却不再显著增大。从效率和成本等多方面考虑,提取2次为宜。

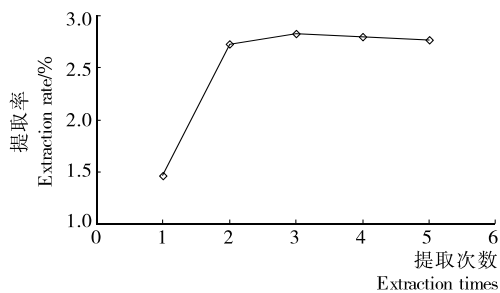


图4 提取次数对GBRP提取率的影响

Figure 4 Effect of number of extractions on the extraction efficiency of polysaccharides from germinated brown rice

2.3 响应面法优化超声波辅助提取GBRP条件

2.3.1 响应面优化试验设计 根据各单因素试验结果,采用响应面 Box-Behnken 模型,选择自变量为微波功率、液料比、微波时间,以GBRP提取率(Y)为响应值,设计三因素三水平试验。试验因素及水平见表1。

2.3.2 响应面试验设计及结果 根据表2试验结果,运用 Design-Expert 8.0 数据统计软件进行多元回归拟合,得到GBRP提取率对自变量微波功率、微波时间和液料比的二次多项回归方程:

$$Y=2.8+0.076A-0.26B-0.28C-0.085AB-0.072AC-0.37BC-1.1A^2-0.59B^2-0.48C^2 \quad (5)$$

由表3可知,模型显著($P_{模型} < 0.0001$),失拟检验不显著

表1 GBRP响应面分析因素及水平表

Table 1 Response surface analysis factors and levels

水平	A 微波功率/W	B 微波时间/min	C 液料比(mL/g)
-1	500	3	20:1
0	600	4	25:1
1	700	5	30:1

表2 GBRP响应面试验设计及结果

Table 2 Experimental design and result of response surface of germinated brown rice polysaccharides

试验号	A	B	C	Y/%
1	1	0	-1	1.68
2	1	0	1	0.98
3	-1	0	1	0.92
4	-1	-1	0	1.22
5	1	-1	0	1.49
6	1	1	0	0.83
7	0	0	0	2.78
8	-1	1	0	0.90
9	0	1	1	0.80
10	0	0	0	2.79
11	0	0	0	2.87
12	0	-1	-1	1.93
13	0	0	0	2.82
14	0	0	0	2.75
15	0	-1	1	2.10
16	0	1	-1	2.10
17	-1	0	-1	1.33

表3 GBRP响应面回归方程的方差分析表†

Table 3 Variance analysis table of response surface regression equation of germinated brown rice polysaccharides

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	10.07	9	1.12	470.19	<0.0001	**
A	0.05	1	0.05	19.55	0.0031	**
B	0.56	1	0.56	233.90	0.0031	**
C	0.63	1	0.63	263.61	<0.0001	**
AB	0.03	1	0.03	12.15	0.0102	*
AC	0.02	1	0.02	8.84	0.0207	*
BC	0.01	1	0.01	2.68	<0.0001	**
A ²	5.08	1	5.08	2135.45	<0.0001	**
B ²	1.48	1	1.48	623.35	<0.0001	**
C ²	0.95	1	0.95	400.96	<0.0001	**
失拟检验	0.01	3	2.79×10^{-3}	1.35	0.3775	不显著
纯差	0.01	4	2.07×10^{-3}			
总差	10.09	16				

† ** 为极显著($P < 0.01$), * 为显著($P < 0.05$); $R^2 = 0.9983$; $R^2_{adj} = 0.9962$; $C.V(\%) = 2.74$ 。

著($P_{失拟} > 0.05$),可用于提取GBRP试验的预测;各因素对GBRP提取率的影响程度大小为微波时间>液料比>微波功率;A、B、C、BC、A²、B²、C²影响极显著,AB、AC影响显著,说明各因素对GBRP提取率的影响均为非线性关系。

2.3.3 响应面的优化与验证 在回归方程优化所得最佳条

件下,即微波功率 604.89 W,液料比 23.81:1 (mL/g),微波时间 3.85 min,GBRP 提取率的预测值为 2.85%;在改进后所得条件下,即在微波功率 604 W,液料比 24:1(mL/g),微波时间 3.83 min,验证实验所得提取率平均值为 2.82%,误差值为 1.05%,说明回归方程能有效地反映各因素对 GBRP 提取率的影响,证明应用响应面法优化微波辅助法提取 GBRP 的回归模型可靠。

2.4 GBRP 的抗氧化活性

2.4.1 GBRP 还原力的测定 由图 5 可知,微波辅助法提取的 GBRP 还原力逐渐增加,当浓度达到 0.4 mg/mL 时,吸光度达到 0.196,之后趋于平稳;而 V_c 在该浓度时吸光度达 1.073,GBRP 的还原力约为 V_c 的 1/5。

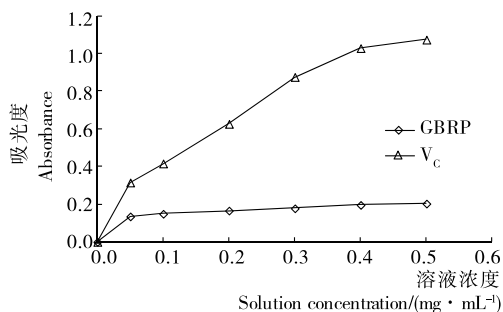


图 5 GBRP 的还原力

Figure 5 Reducing capacity of polysaccharides from germinated brown rice

2.4.2 GBRP 对 $\cdot OH$ 的清除作用 由图 6 可知,微波辅助法提取的 GBRP 对 $\cdot OH$ 清除能力也是随着浓度的增大而增加,达到一定浓度值后趋于相对平稳。当 GBRP 浓度达到 0.5 mg/mL 时,对 $\cdot OH$ 的清除率达到最大值(88.41%)。但 V_c 在此浓度对 $\cdot OH$ 清除率仅为 64.46%。由拟合曲线 $Y=183.57X+112.04$ ($R^2=0.909$) 计算得到 GBRP 的半最大效应浓度 (EC_{50}) 值为 0.211 mg/mL。说明 GBRP 溶液对 $\cdot OH$ 有很强的清除能力,不仅高于文献[24]报道的普通糙米米糠多糖对 $\cdot OH$ 的最高清除率(63.8%),也明显高于 V_c 的清除能力。提示糙米在发芽时启动并激活了各种酶,经酶促作用改变了多糖的活性,提高了多糖的抗氧化能力。

2.4.3 GBRP 对 $O_2^- \cdot$ 的清除作用 由图 7 可知,微波辅助法提取的 GBRP 溶液对 $O_2^- \cdot$ 的清除率随着浓度的增大而

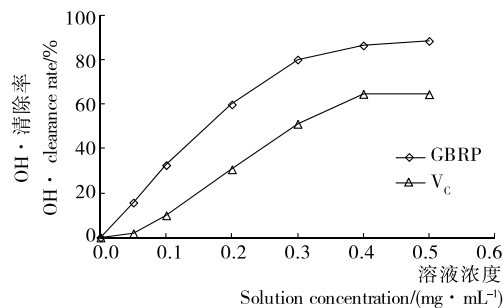


图 6 GBRP 对 $\cdot OH$ 的清除作用

Figure 6 Scavenging effect on hydroxyl radical of polysaccharides from germinated brown rice

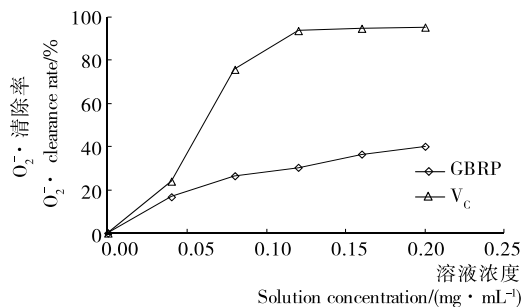


图 7 GBRP 对 $O_2^- \cdot$ 的清除作用

Figure 7 Scavenging effect on Super oxide anion radical of polysaccharide from germinated brown rice

逐渐增加,当浓度达到 0.2 mg/mL 时,清除率达到 40.18%,由拟合曲线 $Y=188.67X+6.2144$ ($R^2=0.916$) 计算得 EC_{50} 值为 0.23 mg/mL。与相同浓度的 V_c 相比, V_c 对 $O_2^- \cdot$ 的清除率最大达到 95.41%,GBRP 溶液清除 $O_2^- \cdot$ 的能力比 V_c 的低。

2.4.4 GBRP 对 DPPH \cdot 的清除作用 由图 8 可知,超声波辅助提取的 GBRP 溶液对 DPPH \cdot 清除能力随着浓度的增大而增加,清除率达到最大值后趋于平稳。当 GBRP 浓度达到 0.4 mg/mL 时,对 DPPH \cdot 清除率达到最大值(52.71%),但 V_c 在此浓度对 DPPH \cdot 清除率达 90.49%。由拟合曲线 $Y=24.728X+41.712$ ($R^2=0.875$) 计算得 GBRP 的 EC_{50} 值为 0.34 mg/mL。结果表明,GBRP 溶液对 DPPH \cdot 的清除能力低于 V_c 的,而与文献[24]和[25]报道的同浓度的普通糙米米糠多糖溶液对 DPPH \cdot 的清除能力(51.8%)相近。

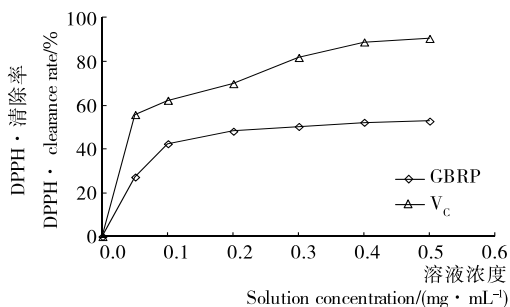


图 8 GBRP 对 DPPH \cdot 的清除作用

Figure 8 Scavenging effect on DPPH radical of polysaccharide from germinated brown rice

2.4.5 GBRP 对脂质过氧化的抗氧化作用 脂质过氧化过程将产生多种小分子产物,如丙二醛,会引起多种细胞功能的衰退,并且会导致多种疾病的发生[26]。由图 9 可知,微波辅助法提取的 GBRP 溶液对抑制脂质过氧化能力随 GBRP 浓度的增大而逐渐增加,当 GBRP 浓度为 0.5 mg/mL 时,对抑制脂质过氧化能力趋于平稳(60.86%),而 V_c 浓度在 0.5 mg/mL 时仅为 39.97%。由拟合曲线 $Y=568.12X+6.4734$ ($R^2=0.8652$) 计算得到 GBRP 的 EC_{50} 值为 0.077 mg/mL。GBRP 溶液的抑制脂质过氧化能力不仅高于文献[27]报道的普通糙米米糠多糖的(49.30%),还高于 V_c 的。提示糙米经发芽过程改变了多糖的活性,提高了多

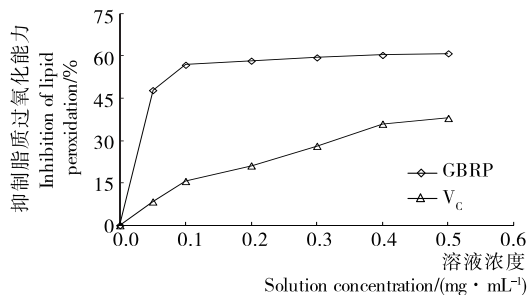


图9 GBRP抑制脂质过氧化能力

Figure 9 Inhibition of lipid peroxidation of polysaccharide from germinated brown rice

糖的抗氧化能力,特别是对脂质过氧化的抗氧化能力明显增强。

3 结论

本试验对微波辅助提取 GBRP 的工艺条件及其抗氧化活性进行研究。结果表明,其最佳提取工艺条件为提取温度 40 ℃、微波功率 604 W、液料比 24 : 1 (mL/g)、微波时间 3.83 min、提取次数 2 次,该条件下 GBRP 提取率为 2.82%; 同未发芽的糙米多糖的抗氧化活性进行对比后证明微波辅助有利于 GBRP 的提取,并且通过多指标结果表明糙米经发芽活化,改变了其多糖活性,GBRP 的抗氧化性高于普通糙米多糖的。

GBRP 对 ·OH 的清除率和抑制脂质过氧化能力不仅高于普通糙米多糖,甚至高于同浓度 V_c 的,表明发芽糙米可作为高抗氧化性多糖进行研究开发,并可作为功能食品、化妆品等增值产品的一个新的原料。但该试验仅对发芽糙米的粗提多糖进行了研究,后期将从成分和结构角度对 GBRP 进一步深入分析。

参考文献

- [1] 汪阿虎. 高含量 GABA 发芽糙米的制备工艺优化和 GABA 的提取纯化初探[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012: 1-2.
- [2] 张守文. 糙米的营养保健功能[J]. 粮食与饲料工业, 2003(12): 39-42.
- [3] 高丽红, 吴盛文, 何旭孔, 等. 糙米及其制品营养成分含量的比较[J]. 粮食与饲料工业, 2016(5): 4-5.
- [4] CAPEK P, MACHOVA E, TURJAN J, et al. Scavenging and antioxidant activities of immunomodulating polysaccharides isolated from *Salvia officinalis* L[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2009, 44(1): 75-80.
- [5] LUO Ao-xue, HE Xing-jin, ZHOU Song-dong, et al. Purification, composition analysis and antioxidant activity of the polysaccharides from *Dendrobium nobile* Lindl[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 79(4): 1 014-1 019.
- [6] GAN Chee-yuen, LATIFF A A. Extraction of antioxidant pectic polysaccharide from mangosteen (*Garcinia mangostana*) rind: optimization using response surface methodology[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 600-607.
- [7] HAN Jiang-wei, JIANG Xing-ming, ZHANG Li-da. Optimisation of extraction conditions for polysaccharides from the roots of

Isatis tinctoria L. by response surface methodology and their in vitro free radicals scavenging activities and effects on IL-4 and IFN- γ mRNA expression in chicken lymphocytes[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(3): 1 320-1 326.

- [8] CHEN Jing-jing, ZHANG Tao, JIANG Bo, et al. Characterization and antioxidant activity of Ginkgo biloba exocarp polysaccharides[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(1): 40-45.
- [9] LEI Jin-wei, DING Shao-dong, DING Xiao-lin, et al. Optimization of the ultrasonically assisted extraction of polysaccharides from *Zizyphus jujuba* cv. jinsixiaozao[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 176-183.
- [10] BALAVIGNESWARAN C K, SUJIN J K T, MOSES P R, et al. Anti-oxidant activity of polysaccharides extracted from *Isocrysis galbana* using RSM optimized conditions [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 60(6): 100-108.
- [11] BAGHERIAN H, ASHTIANI F Z, FOULADITAJAR A. Comparisons between conventional, microwave-and ultrasound-assisted methods for extraction of pectin from grapefruit[J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2011, 50(11/12): 1 237-1 243.
- [12] SENTHIL KC, SIVAKUMAR M. Microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Cyphomandra betacea* and its biological activities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 682-693.
- [13] HOSSEINI S S, KHODAIYAN F, YARMAND M S. Optimization of microwave assisted extraction of pectin from sour orange peel and its physicochemical properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 140: 59.
- [14] WANG Yong-gang, LENG Fei-fan, LIU Xiao-feng, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of water-soluble polysaccharides from piteguo fruit by response surface methodology[J]. *Food Science & Technology Research*, 2014, 20(4): 755-764.
- [15] 刘晓飞, 王鑫, 孟庆红, 等. 发芽糙米多糖双水相萃取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 149-154.
- [16] 董群, 郑丽伊. 改良的苯酚-硫酸法测定多糖和寡糖含量的研究[J]. 中国药学杂志, 1996, 31(9): 550-553.
- [17] 冯自立, 党娅. 响应面法优化微波提取枳椇子多糖及其清除羟自由基活性研究[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 56-60.
- [18] KIT Leong Cheong, WANG Lan-ying, WU Ding-tao, et al. Microwave-assisted extraction, chemical structures, and chain conformation of polysaccharides from a novel cordyceps sinensis fungus UM01[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(9): C2 167.
- [19] 何传波, 魏何程, 熊何健, 等. 酶与微波处理对海带多糖提取及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2013(18): 51-55.
- [20] 刘水英, 李新生, 党娅, 等. 响应面法优化紫山药花青苷提取工艺及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 84-91.
- [21] 程知庆, 沈和定, 姚理想, 等. 干燥方法对瘤背石磺多糖抗氧化性和还原力的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 169-172.

(下转第 194 页)

方面脂肪含量越高,弹性越小^[20]。

TPA 相对于感官评价可以用客观的方法来表述质地感官参数,在一定程度上弥补了感官评价的不足^[21-22],其在肉类产品开发中的应用也比较广泛^[23-24]。因此,综合分析,为了获取较优的肉制品食用品质,建议煎制以 2~3 min 为宜,炸制以 3 min 为宜,烤制以 160 ℃ 为宜。

3 结论

在煎、炸、烤制 3 种高温工艺下,红肉、白肉食用品质均显著改变,但对红、白肉影响不同。综合肉色、剪切力及全质构结果,在 226~228 ℃ 下煎制处理 3 min、226~228 ℃ 下炸制处理 3 min、160 ℃ 下烤制处理 40 min,红、白肉均具有较好色泽、口感和风味。

由于试验时间和实验室条件限制,本试验仅研究了高温加工方式对猪肉、鸡肉、鸭肉食用品质的影响,后期将开展高温加工对猪肉、鸡肉、鸭肉营养品质及有害物质影响的系统研究。

参考文献

- [1] 李诗义, 诸晓旭, 陈从贵, 等. 肉和肉制品的营养价值及致癌风险研究进展[J]. 肉类研究, 2015, 29(12): 41-47.
- [2] 林向阳, 何承云, 高荫榆, 等. 肉类营养与健康[J]. 肉类工业, 2005(1): 42-45.
- [3] 朱建军. 肉类的营养价值及宜食用量[J]. 肉类工业, 2015(3): 54-56.
- [4] 周光宏, 李春保, 徐幸莲. 肉类食用品质评价方法研究进展[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2(2): 75-82.
- [5] 黄明, 黄峰, 张首玉, 等. 热处理对猪肉食用品质的影响[J]. 食品科学, 2009(23): 189-192.
- [6] 闵辉辉, 周光宏, 徐幸莲, 等. 不同电压击昏对鸡肉食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(10): 180-185.
- [7] 魏心如, 韩敏义, 王鹏, 等. 热处理对鸡胸肉剪切力与蒸煮损失的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 629-633.
- [8] 李林强, 高天丽, 张兰, 等. 煎、炸、烤对横山羊肉食用品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 17-21.
- [9] 张伟力. 猪肉肉色与酸度测定方法[J]. 养猪, 2002(2): 33-34.
- [10] KONG Fan-bin, OLIVEIRA A, TANG Ju-ming, et al. Salt effect on heat-induced physical and chemical changes of salmon fillet (*O. gorbusha*) [J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 957-966.
- [11] PETRACCI M, BAÉZA E. Harmonization of methodologies for the assessment of poultry meat quality features[J]. World's Poultry Science Journal, 2011, 67(1): 137-151.
- [12] 刘兴余, 金邦荃. 影响肉嫩度的因素及其作用机理[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(5): 177-180.
- [13] BENDALL J R, RESTALL D J. The cooking of single myofibres, small myofibre bundles and muscle strips from beef *M. psoas* and *M. sternomandibularis* muscles at varying heating rates and temperatures[J]. Meat Science, 1983, 8(2): 93-117.
- [14] 李春保. 牛肉肌内结缔组织变化对其嫩度影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 50-53.
- [15] BENITO M J, RODRIGUEZ M, ACOSTA R, et al. Effect of

the fungal extracellular protease Epg222 on texture of whole pieces of pork loin[J]. Meat Science, 2003, 65(2): 877-884.

- [16] RAHMAN M S, AL-FARSI S A. Instrumental texture profile analysis (TpA) of date flesh as a function of moisture content [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(4): 505-511.
- [17] 袁森, 庞林江, 路兴花, 等. 烹饪方式对鸡肉挥发性香气及质构特征的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 33-36.
- [18] 张兰, 高天丽, 刘永峰, 等. 3 种传统中式高温烹饪工艺对牛肉食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(11): 126-132.
- [19] EL-MAGOLI S B, LARROIA S, HANSEN P M T. Flavor and texture characteristics of low fat ground beef patties formulated with whey protein concentrate[J]. Meat Science, 1996, 42(2): 179-193.
- [20] ANDRES S C, GARCIA M E, ZARITZKY N E, et al. Storage stability of low-fat chicken sausages[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(4): 311-319.
- [21] 郝红涛, 赵改名, 柳艳霞, 等. 肉类制品的质构特性及其研究进展[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 125-128.
- [22] 张秋会, 李苗云, 黄现青, 等. 肉制品的质构特性及其评价[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 36-39.
- [23] SOMBOONPANYAKUL P, BARBUT S, JANTAWAT P, et al. Textural and sensory quality of poultry meat batter containing malva nut gum, salt and phosphate [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(3): 498-505.
- [24] GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ C, SANTOS E M, ROVIRA J, et al. The effect of sugar concentration and starter culture on instrumental and sensory textural properties of chorizo-Spanish dry-cured sausage[J]. Meat Science, 2006, 74(3): 467-475.

(上接第 172 页)

- [22] 周中流, 石任兵, 等. 卷丹乙醇提取物及其不同极性部位抗氧化活性的比较研究[J]. 食品科学, 2011(9): 55-58.
- [23] 董秀芳, 李楠, 韩冬, 等. 裙带菜孢子叶多糖的超声辅助提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 162-166.
- [24] ZHA Xue-qiang, WANG Jun-hui, YANG Xue-fei, et al. Antioxidant properties of polysaccharide fractions with different molecular mass extracted with hot-water from rice bran[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3): 570-575.
- [25] YUAN Jiang-feng, ZHANG Zhi-qi, FAN Zhi-chao, et al. Antioxidant effects and cytotoxicity of three purified polysaccharides from *Ligusticum chuanxiong* Hort[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(4): 822-827.
- [26] HALLIWELL B. Vitamin C and genomic stability[J]. Mutation Research/fundamental & Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 2001, 475(1/2): 29-35.
- [27] HEFNAWY H T M, ELSHOUBAGY G A. Chemical analysis and antioxidant activity of Polysaccharide extracted from rice bran[J]. World Journal of Dairy & Food Sciences, 2014, 9(2): 95-104.