

# 超高压处理对糙米多酚、黄酮类含量及其抗氧化性的影响

于勇<sup>1</sup> 潘芳<sup>1</sup> 吴剑<sup>2</sup> 朱松明<sup>1</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 荣县正紫镇农业综合服务中心, 自贡 643100)

**摘要:** 超高压处理是一种新型的非热加工技术,具有提高食品安全性和货架期,保持食品原有营养成分等特点。以糙米为研究对象,探究其经不同高压条件处理后,其多酚、黄酮类含量的变化,并分析了上述处理对糙米 DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率的影响。本实验分别采用一步式超高压(100~400 MPa, 5 min 和 10 min)与两步式超高压(100~400 MPa, 5 min + 5 min)处理糙米。实验结果表明,在 100~300 MPa 压力范围内,超高压处理后的糙米酚类、黄酮类含量以及抗氧化活性随着压力的增大而增大。两步式高压处理组(5 min + 5 min)糙米的多酚类、黄酮类含量以及抗氧化活性高于一步式高压处理组。采用 300 MPa 两步式高压处理糙米后,其酚类、黄酮类物质保留率可达到 97%,这说明超高压是一种较有效的保留糙米中抗氧化物质的非热加工方法。

**关键词:** 糙米; 多酚; 黄酮; 超高压; 抗氧化活性

中图分类号: TS21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)11-0368-07

## Effect of High Pressure Treatment on Phenolics, Flavonoids and Antioxidant Activity of Brown Rice

YU Yong<sup>1</sup> PAN Fang<sup>1</sup> WU Jian<sup>2</sup> ZHU Songming<sup>1</sup>

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Agricultural Service Center of Zhengzi Town in Rong County, Zigong 643100, China)

**Abstract:** Nowadays, due to changes in consumer life style and health awareness, brown rice is receiving increased interest as a source of healthy attributes. Compared with white rice, brown rice is rich in several health beneficial nutrients such as vitamins, dietary fiber, minerals, antioxidants and essential amino acids. It is necessary to study the influence of processing on nutrients of brown rice, because these nutrients are easily lost during processing. High pressure processing (HPP) is a new non-thermal preservation technology that enhances food safety and retains the food original nutrients. Up to date, the research on the effect of HPP on nutritional property of brown rice is limited. Phenolic, flavonoid content and antioxidant activity of brown rice after HPP (100~400 MPa) by single step (5 min and 10 min of holding time) or two step process (two cycles, 5 min of holding time each) were investigated. The antioxidant activity was evaluated by 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging and 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS<sup>+</sup>·) scavenging assays. Results showed that phenolic, flavonoid contents and antioxidant activity of brown rice were increased with the increase of pressure. Moreover, under the same pressure level, the phenolic, flavonoid contents and antioxidant activity of brown rice under two step HPP were higher than those from single step HPP. Percentage retention of phenolic and flavonoid content in brown rice treated by two step process at 300 MPa was 97%. These findings suggested that the HPP was an effective non-thermal processing to retain antioxidants in brown rice.

**Key words:** brown rice; phenolics; flavonoids; high pressure processing; antioxidant activity

收稿日期: 2016-12-20 修回日期: 2017-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31171779)和浙江省自然科学基金重点项目(LZ14C200002)

作者简介: 于勇(1978—),男,副教授,主要从事农产品非热加工技术与装备研究,E-mail: yyuzju@zju.edu.cn

通信作者: 朱松明(1962—),男,教授,主要从事农产品非热加工技术与装备研究,E-mail: zhsum@zju.edu.cn

## 引言

稻米是一种非常重要的粮食,全世界超过 1/2 的人口将其作为主食<sup>[1]</sup>。长期以来,人们喜爱食用精制白米,但长期食用精制白米,由于营养来源过于单一,往往导致维生素、矿物质、膳食纤维等营养的缺乏,同时伴随着慢性疾病的发生<sup>[2-3]</sup>。而糙米因其具有多种生物活性物质及有益健康的成分而受到广泛关注。随着食用全谷物食品的消费者越来越多,糙米已经被应用于多种米制品的生产<sup>[4]</sup>。

糙米是稻谷脱去外保护皮层稻壳后的颖果,内保护皮层(果皮、种皮、珠心层)完好的稻米籽粒。与精白米相比,糙米具有更多的蛋白质、饱和脂肪酸、粗纤维、维生素等营养成分,还具有米糠脂多糖、 $\gamma$ -谷维醇、 $\gamma$ -氨基丁酸、酚类、黄酮类等生物活性物质<sup>[5-6]</sup>。有研究表明酚类、黄酮类物质具有清除自由基、抗氧化、抗动脉粥样硬化、降血压降血脂等作用<sup>[7-8]</sup>。因此非常有必要研究糙米的酚类、黄酮类物质含量及其抗氧化活性经过加工处理后的变化。但是糙米中多酚、黄酮等生物活性物质大部分集中于米糠层,这些活性物质在碾磨<sup>[9]</sup>、热处理等加工过程中容易流失,造成稻谷资源的极大浪费。因此如何最大限度地保留食品中的营养成分是现代食品加工领域中的一个重要问题。

超高压(High pressure processing, HPP)是指压力范围在 100~1 000 MPa 的新型非热加工技术,它以水或其他流体作为媒介传递压力,使样品在等静高压的条件下保持一定时间,然后将压力释放,从而引起细胞破裂死亡、非共价键(如氢键、离子键和疏水键等)的破坏或者形成、蛋白质变性、淀粉改性,从而达到食品的杀菌、保鲜以及延长货架期的目的<sup>[10]</sup>。超高压作为一种食品非热加工技术应用于食品保藏和加工中,其最大的优势在于保证食品安全的同时,尽可能降低食品的加工程度,保持食品原有的风味<sup>[11]</sup>。

目前,已有学者研究了超高压处理对猕猴桃浆、豆乳、荞麦、番茄汁、橙汁等食品原料中多酚含量、类黄酮含量的影响<sup>[12-16]</sup>。超高压作用于不同的食品基质,效果不同。这就表明了食品的抗氧化活性不仅与加工条件有关,还与食品的基质有关。因此有必要进一步研究超高压处理对糙米酚含量、黄酮类含量及其抗氧化活性的影响。

目前,超高压处理作用于米的研究主要集中于淀粉改性和蛋白改性,还有学者研究发现超高压处理可以改善米饭的质构、风味等<sup>[10,17]</sup>。但超高压处理对糙米的酚含量、黄酮类含量及其抗氧化活性的

影响鲜有报道。此外相比于连续式超高压,循环式超高压可以增强杀菌效果<sup>[18]</sup>以及提高米淀粉的消化性<sup>[19]</sup>等。但循环式超高压处理后糙米中酚含量、黄酮类含量的变化还有待进一步的研究。

因此本文以糙米为研究对象,探究超高压处理对糙米中多酚、黄酮类的含量以及其抗氧化活性的影响,并对比研究循环式超高压与连续式超高压的处理效果,为进一步优化糙米的加工工艺提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验材料与试剂

丰两优香 1 号,由江苏米之缘食品科技有限公司提供。购置后分装在自封袋(20 cm × 28 cm)中,共套 3 层自封袋,每层放一包干燥剂,包装后置于 4℃ 的冰箱中保存,备用。在进行实验之前,预先将稻谷取出,平衡至室温(20℃),再利用一台 6L-152B3 实验型砬谷机,将稻谷用砬谷机 2 次砬谷实现稻谷脱壳,得到糙米样品。糙米样品用 3 层自封袋进行包装,每层里面放置一袋干燥剂,置于 4℃ 下保存,备用。

Folin-Ciocalteu 试剂、没食子酸购于美国 Sigma 公司;儿茶酸购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;DPPH(2,2-联苯基-1-苦基肼基)、ABTS(2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐)、过硫酸钾购于麦克林试剂公司;其他化学试剂均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器设备

所使用的设备包括:UHPF-750 型超高压处理设备(包头科发高压科技有限责任公司);DFY-200 型摇摆式高速万能粉碎机(温岭市林大机械有限公司);5810R 型高速冷冻离心机(德国 Eppendorf 公司);Cary 60 型紫外可见分光光度计(澳大利亚安捷伦仪器有限公司);DGX-9073B-2 型鼓风干燥箱(上海福玛实验设备有限公司);HZ-9211KB 型恒温振荡器(太仓市科教器材厂);WH-861 型涡旋振荡器(太仓市华利达实验设备有限公司)。

### 1.3 超高压处理条件

称取糙米样品 10 g 放置于含有 16 g 无菌去离子水的聚乙烯自封袋中,排尽空气后封装,然后进行相应的超高压处理。连续式超高压处理组压力水平分别为 100、200、300、400 MPa,保压时间分别为 5 min 和 10 min,对照组分别为常压浸泡 5 min 和 10 min 的糙米样品。2 次循环式超高压处理分为 2 个阶段,第 1 阶段在特定压力下保压 5 min 后立即泄压,第 2 阶段升压至第 1 阶段相同的压力保压处理 5 min,即保持总的保压时间仍为 10 min,压力处

理水平分别为100、200、300、400 MPa。超高压处理结束后,立即将糙米从自封袋中取出,将其表面的水沥干,放入干燥的铝盒中,置于30℃干燥箱中干燥6 h。将处理后的糙米样品真空包装,置于4℃下保存,备用。每个超高压处理条件重复实验操作3次。

#### 1.4 酚类、黄酮类物质的提取

用磨粉机将上述处理后的糙米样品磨成粉末,过40目筛后,收集于自封袋(20 mm × 80 mm)中,放于干燥器中备用。

称取3 g粉末加入到15 mL冷却的酸性甲醇溶液(95%甲醇与1 mol/L HCl体积比为85:15),在恒温振荡器中振荡1 h(150 r/min, 25℃)。在4℃条件下,4 000 r/min离心10 min,收集上清液,置于4℃条件下保存,备用。

#### 1.5 标准曲线的制定

##### 1.5.1 没食子酸标准曲线

准确称取没食子酸0.020 0 g,定容至100 mL,配制成质量浓度为0.20 mg/mL的没食子酸标准溶液。依次吸取0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mL没食子酸标准液于10 mL具塞试管中并加蒸馏水定容至10 mL,摇匀备用。

取200 μL不同浓度的标准液加入1 mL福林酚试剂,剧烈振荡摇匀后加入1 mL 10%碳酸钠溶液,最后用蒸馏水定容至5 mL,室温下静置90 min后,在765 nm处测定吸光度。

##### 1.5.2 儿茶酸标准曲线

准确称取儿茶酸0.010 0 g,定容至100 mL,配制成质量浓度为0.10 mg/mL的儿茶酸标准溶液。依次吸取0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mL没食子酸标准液于10 mL具塞试管中并加蒸馏水定容10 mL,摇匀备用。

取750 μL不同浓度的标准液加入3.75 mL蒸馏水和225 μL 5% NaNO<sub>2</sub>溶液,室温下静置5 min后,再加入450 μL 10% AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O溶液,静置6 min。再加入1.5 mL 1 mol/L NaOH溶液,剧烈振荡均匀,静置10 min后,在510 nm处测定吸光度<sup>[9]</sup>。

#### 1.6 酚类含量测定

总酚含量测定采用Folin-Ciocalteu测定法<sup>[20]</sup>。取200 μL样品提取液,加入1 mL福林酚试剂,剧烈振荡摇匀后加入1 mL 10%碳酸钠溶液,最后加入蒸馏水定容至5 mL。室温下静置90 min后,在765 nm处测定吸光度。酚类含量(质量比)以每100 g糙米中所含相当于没食子酸的质量表示。

#### 1.7 黄酮类含量测定

取750 μL样品提取液,加入3.75 mL蒸馏水和225 μL 5% NaNO<sub>2</sub>溶液,室温下静置5 min。然后再

添加450 μL 10% AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O溶液,静置6 min。再加入1.5 mL 1 mol/L NaOH溶液,剧烈振荡均匀,静置10 min,在510 nm处测定吸光度<sup>[9]</sup>。黄酮含量(质量比)以每100 g糙米中所含相当于儿茶酸的质量表示。

#### 1.8 DPPH 自由基清除能力测定

取0.5 mL样品提取液,加入3.5 mL甲醇和1 mL 1 mmol/L DPPH溶液,室温黑暗条件下静置30 min后,在517 nm处测定吸光度<sup>[20]</sup>。以甲醇溶液做空白组。DPPH自由基清除率计算公式为

$$B = (1 - A/A_0) \times 100\%$$

式中  $B$ ——DPPH自由基清除率, %

$A_0$ ——空白试剂的吸光度

$A$ ——样品的吸光度

#### 1.9 ABTS<sup>+</sup>·清除能力测定

将7 mmol/L ABTS<sup>+</sup>·和4.9 mmol/L过硫酸钾溶液等体积混合,在室温、避光的条件下静置(12~16 h),得到ABTS<sup>+</sup>·原液。使用时用甲醇稀释成工作液,调整工作液在734 nm处的吸光度为0.70 ± 0.02。

取5 mL ABTS<sup>+</sup>·工作液,加入1 mL样品提取液,静置30 min后,在734 nm处测定吸光度<sup>[21]</sup>。以甲醇溶液做空白组。ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率计算公式为

$$C = (1 - A/A_0) \times 100\%$$

式中  $C$ ——ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率, %

#### 1.10 数据分析

采用Origin软件(version 8.0, Origin Lab公司)进行制图和数据分析,采用SPSS软件(version 18.0, SPSS公司)进行ANOVA单因素方差分析和Duncan检验( $P < 0.05$ ),数据结果均以平均值 ± 标准差表示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 糙米酚类含量

#### 2.1.1 压力及保压时间

超高压处理过程中最主要的变化因素为压力以及保压时间,本实验探究了100~400 MPa压力处理糙米5 min和10 min,探究其酚类物质含量的变化,实验结果如图1所示,图中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

由图1结果可知,超高压处理组与未超高压处理组对比,经过100、200、300、400 MPa处理5 min后的糙米样品多酚物质的保留率分别为72.9%、75.7%、85.3%和92.9%,保压时间10 min处理后糙米的多酚物质保留率分别是80.6%、90.2%、

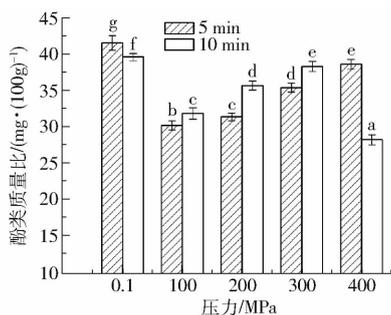


图 1 压力及保压时间对糙米酚类含量的影响

Fig. 1 Effect of pressure and holding times on phenolic content of brown rice

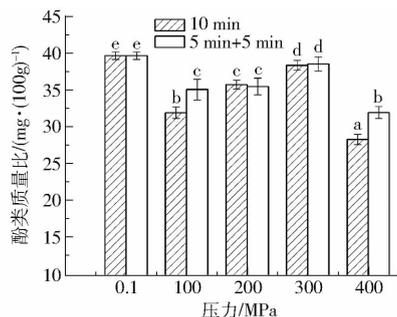


图 2 不同压力方式对糙米酚类含量的影响

Fig. 2 Effect of different HPP models on phenolic content of brown rice

96.7% 和 71.5%。有学者研究发现糙米经膨化、研磨等处理后,其酚类物质损失率达 50% 以上<sup>[1,20]</sup>。从本实验结果来看,在一定压力条件处理下,酚类物质保留率可以达 90% 以上,这说明超高压是一种较有效的保留糙米中植物多酚物质的非热加工方法。

此外,由图 1 可知,当保压时间均为 5 min 时,随着处理压力的增大,糙米酚类含量增加,在 400 MPa 下达到最大值,为 38.8 mg/(100 g),这可能是由于超高压处理使糙米中部分结合态酚类物质释放<sup>[14]</sup>。保压时间均为 10 min 处理组,处理压力从 100 MPa 增加到 300 MPa 时,糙米酚类含量从 32.1 mg/(100 g) 增加到 38.5 mg/(100 g),当处理压力继续增加到 400 MPa 时,糙米酚类含量下降。除 400 MPa 以外,在同一压力水平下,保压时间为 10 min 的处理组糙米酚类物质含量大于保压时间为 5 min 处理组的糙米酚类物质含量。

### 2.1.2 超高压方式

多次循环式超高压相对于一步式超高压处理,其反复多次的升压降压过程能够产生更强的冲击、剪切效果,从而导致生物大分子结构被破坏以及微生物的灭活,增强了处理效果节约资源<sup>[19]</sup>。因此本文进行了两步式超高压(即 2 个循环超高压处理)与一步式超高压处理的对比实验。两步式超高压处理在保证总保压时间 10 min 不变的情况下,在保压进行到 5 min 时进行一次降压与升压过程。

为了探究多次循环超高压处理对糙米中多酚含量的影响,分别采用 100、200、300、400 MPa 的压力处理糙米。图 2 为一步式超高压与两步式超高压处理后糙米酚类物质含量变化的实验结果,图中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。从图中可以看出,糙米经两步式超高压(5 min + 5 min)处理后,其多酚含量随压力的变化趋势与一步式超高压(保压时间为 10 min)处理结果趋势相一致。在 100 ~ 300 MPa 范围内,糙米酚类含量随着处理压力的增大而增大,而在 400 MPa 压力下,糙米酚类物质含量

下降至 32.1 mg/(100 g)。在相同压力下,两步式超高压处理组糙米酚类含量高于一步式超高压处理组,但增加效果并不显著( $P > 0.05$ )。两步式超高压处理组糙米酚类物质的保留率达 80.6% ~ 97.2%。

## 2.2 糙米黄酮类含量

### 2.2.1 压力及保压时间

除了酚类物质以外,黄酮类物质也是糙米中抗氧化植物素的重要组成成分<sup>[22]</sup>。谷物中黄酮类物质主要包括黄酮醇、黄烷-3-醇、黄烷酮等<sup>[23]</sup>。图 3 为 100、200、300、400 MPa 压力,保压时间分别为 5 min 和 10 min 处理后糙米中黄酮类含量变化的实验结果,图中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

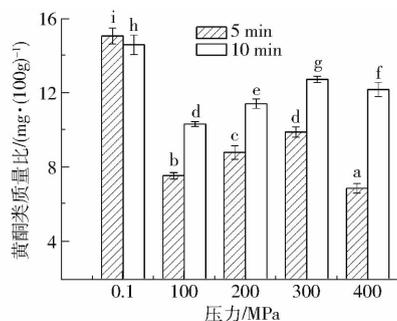


图 3 压力及保压时间对糙米黄酮类含量的影响

Fig. 3 Effect of pressure and holding time on flavonoid content of brown rice

由图 3 可知,当超高压保压时间均为 5 min 时,在 100 ~ 300 MPa 范围内,随着处理压力的增大,糙米中黄酮类含量增加,在 300 MPa 处达到最大值,为 10.0 mg/(100 g),保留率达到了 65.9%。这可能是因为一定的压力处理使与细胞膜连结在一起的疏水性基团部分暴露出来,改变了膜的通透性,膜内一些类黄酮物质容易在后续过程中被提取出来<sup>[24]</sup>。保压时间 10 min 处理组黄酮类含量随压力大小的变化趋势与 5 min 处理组一致,在 300 MPa 处达到最大值,为 12.3 mg/(100 g),但 400 MPa 处理后黄酮类含量略有下降。在相同处理压力下,保压时间延长,黄酮

类物质保留率增加,在 300 MPa 处理 10 min 时黄酮类物质保留率为 87.4%。

### 2.2.2 超高压方式

两步式超高压处理后糙米黄酮类物质含量变化的实验结果如图 4 所示,图中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。从图 4 可看出,两步式超高压处理组,其黄酮类含量随压力的变化与一步式超高压处理组一致,在 300 MPa 时达最大值,为 14.3 mg/(100 g)。总体上,两步式超高压处理组黄酮类含量高于一步式超高压处理组。两步式超高压处理组,在 100 ~ 400 MPa 范围内,糙米黄酮类物质保留率分别为 80%、89%、97.4%、88.9%。另外,从图中可以发现,两步式高压处理组在 200 MPa 下黄酮类含量与一步式高压处理组在 300 MPa 时处理结果无显著差异,这说明在达到相同处理效果的情况下,两步式超高压所需压力更小,这为实际生产过程中降低处理压力提供了可能。

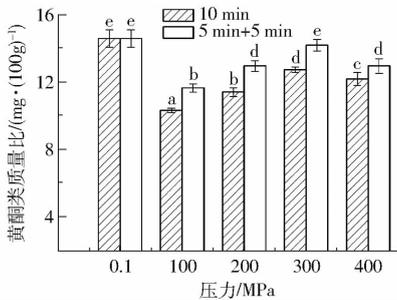


图 4 不同压力方式对糙米黄酮类含量的影响

Fig.4 Effect of different HPP models on flavonoid content of brown rice

### 2.3 糙米 DPPH 自由基清除能力

流行病学研究表明食用全谷物食品可以降低慢性疾病、癌症的发生率。这可能是因为全谷物食品中含有能够清除自由基的抗氧化植物成分<sup>[25]</sup>。因此抗氧化活性是评价食品潜在健康益处的重要指标。本节采用 DPPH 法评价不同压力条件处理后,糙米抗氧化活性的变化,结果如表 1 所示。

表 1 不同压力条件下糙米 DPPH 自由基清除率

Tab.1 DPPH radical scavenging activities in brown rice treated under different HPP conditions %

压力/ MPa	处理方式		
	5 min	10 min	5 min + 5 min
0.1	49.17 ± 0.80 <sup>e</sup>	44.52 ± 0.94 <sup>e</sup>	44.52 ± 0.94 <sup>e</sup>
100	20.45 ± 0.72 <sup>a</sup>	20.08 ± 1.07 <sup>b</sup>	23.24 ± 0.81 <sup>a</sup>
200	28.33 ± 0.62 <sup>b</sup>	30.39 ± 0.57 <sup>c</sup>	31.89 ± 0.76 <sup>c</sup>
300	33.70 ± 0.52 <sup>c</sup>	39.82 ± 0.88 <sup>d</sup>	40.98 ± 0.53 <sup>d</sup>
400	37.98 ± 1.03 <sup>d</sup>	11.85 ± 0.85 <sup>a</sup>	27.25 ± 0.78 <sup>b</sup>

注:同一列不同的字母表示显著差异( $P < 0.05$ ),下同。

从表 1 可以看出,在相同的保压时间 5 min 条件下,随着超高压处理压力的增大,DPPH 自由基清除率增大。当保压时间为 10 min,压力范围在 100 ~ 300 MPa 时,其 DPPH 自由基清除率随着压力的增大而增大,在 300 MPa 处达到最大值,但在 400 MPa 处理后出现了下降的趋势。两步式超高压组,DPPH 自由基清除率先随着压力的增大而增大,当压力增加到 400 MPa 时出现下降的趋势。

两步式超高压处理组 DPPH 自由基清除率高于一步式超高压处理组。这说明超高压处理过程中,不仅保压过程对样品会产生影响,升压降压的过程也会产生影响。本实验中所采用的两步式超高压处理比一步式超高压处理多了一个降压升压的循环。在对物料进行超高压处理时,在压缩物料时做功发生能量的转换,导致物料出现升温现象,即压缩升温<sup>[26]</sup>。有研究表明物料的温度上升,其 DPPH 自由基清除能力增强<sup>[27]</sup>。ZHOU 等<sup>[14]</sup>利用 600 MPa 压力处理荞麦 15 min 并进行两次循环,发现两步式超高压处理组荞麦的 DPPH 自由基清除率高于未处理组。

### 2.4 糙米 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除能力

为了更加全面地评价不同压力条件处理后糙米抗氧化活性的变化情况,采用 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率评价糙米抗氧化活性。

表 2 为不同压力条件处理的糙米 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率变化的实验结果。从表中可以看出 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率随压力、保压时间的变化趋势与 DPPH 自由基清除率变化趋势相似。在一定的压力范围内,ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率随着压力的增大而增大,这可能是因为一定的压力处理糙米,使其组织基质发生了变化,使得一些具有抗氧化作用的化合物容易释放到细胞外,增强了其抗氧化活性<sup>[13]</sup>。此外,两步式超高压处理组 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率高于一步式超高压处理组。两步式超高压处理组,ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率为 34% ~ 39%,一步式超高压处理组 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率为 27% ~ 36%。

表 2 不同压力条件下糙米 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率

Tab.2 ABTS<sup>+</sup>· radical scavenging activities in brown rice treated under different HPP conditions %

压力/ MPa	处理方式		
	5 min	10 min	5 min + 5 min
0.1	43.55 ± 0.99 <sup>e</sup>	41.24 ± 0.71 <sup>e</sup>	41.24 ± 0.71 <sup>e</sup>
100	29.90 ± 0.58 <sup>a</sup>	29.48 ± 0.91 <sup>b</sup>	34.24 ± 1.14 <sup>a</sup>
200	31.92 ± 0.96 <sup>b</sup>	32.08 ± 1.12 <sup>c</sup>	38.41 ± 1.21 <sup>b</sup>
300	33.71 ± 0.66 <sup>c</sup>	36.09 ± 0.51 <sup>d</sup>	39.24 ± 0.83 <sup>b</sup>
400	36.47 ± 0.55 <sup>d</sup>	27.11 ± 0.71 <sup>a</sup>	34.05 ± 0.65 <sup>a</sup>

## 2.5 相关性分析

为了探究糙米中酚类、黄酮类含量与其抗氧化活性之间的关系,基于所有处理组的实验结果进行了酚类、黄酮类含量与 DPPH、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率的相关性分析。

由相关性分析结果可知,酚类含量与 DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率在 0.01 水平极显著正相关,且相关性系数达到了 0.8 以上。本实验结论与 DU 等<sup>[28]</sup>的研究结果类似,其研究发现猕猴桃中的总酚含量与 DPPH 自由基清除率呈正相关。糙米中酚类含量与抗氧化活性表现出极显著的正相关表明酚类物质含量是糙米抗氧化活性的重要因素。已有较多的研究表明酚类物质是谷物、蔬菜、水果中主要的抗氧化物质<sup>[9,29]</sup>。此结果可应用于糙米抗氧化活性评价工作中,可以通过已知的多酚含量数据来初步预测其抗氧化能力。

黄酮类含量与 ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率在 0.05 水平显著正相关。有学者指出在食品这样复杂的混合基质中,抗氧化物质表现出的抗氧化活性不仅取决于抗氧化物质的浓度,还可能与抗氧化物质的结构以及其与基质间的相互作用有关<sup>[14]</sup>。

## 3 结论

(1) 对比同一保压时间处理组,糙米中酚类含量在 100 ~ 300 MPa 范围内随着处理压力的增大而增大,而经 400 MPa 压力处理后,糙米酚类物质含量有所下降。同一压力水平处理组比较,两步式超高压处理组酚类含量高于一步式超高压处理组酚类含量。糙米经 300 MPa 两步式超高压处理后,酚类物质保留率达到最大,为 97.2%。

(2) 保压时间 5 min 和 10 min 处理组,黄酮类含量在 100 ~ 300 MPa 范围内随着处理压力的增大而增大,最大黄酮类物质保留率分别为 65.9%、87.4%。糙米经两步式超高压处理,黄酮类物质保留率最大为 97.4%。

(3) 各处理组 DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率变化趋势与酚类物质含量变化趋势一致。两步式高压处理组糙米抗氧化活性高于一步式高压处理组。

(4) 相关性分析显示酚类物质含量与 DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup>·自由基清除率呈极显著正相关,黄酮类物质含量与 ABTS<sup>+</sup>·的自由基清除率呈显著正相关。

## 参 考 文 献

- LIU L, GUO J, ZHANG R, et al. Effect of degree of milling on phenolic profiles and cellular antioxidant activity of whole brown rice[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 318 - 325.
- BOUIS H E, CHASSY B M, OCHANDA J O. Genetically modified food crops and their contribution to human nutrition and food quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 14(5): 191 - 209.
- RADHIKA G, VAN DAM R M, SUDHA V, et al. Refined grain consumption and the metabolic syndrome in urban Asian Indians (Chennai Urban Rural Epidemiology Study 57)[J]. Metabolism, 2009, 58: 675 - 681.
- CHUNG H J, CHO A, LIM S T. Utilization of germinated and heat-moisture treated brown rices in sugar-snap cookies[J]. LWT—Food Science and Technology, 2014, 57(1): 260 - 266.
- LAMBERTS L, BIE E, DERYCKE V, et al. Effect of processing conditions on color change of brown and milled parboiled rice [J]. Cereal Chemistry, 2006, 83(1): 80 - 85.
- ZHANG X, WANG L, CHENG M, et al. Influence of ultrasonic enzyme treatment on the cooking and eating quality of brown rice [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 63: 140 - 146.
- GUO H, LING W, WANG Q, et al. Effect of anthocyanin-rich extract from black rice (*Oryza sativa* L. indica) on hyperlipidemia and insulin resistance in fructose-fed rats[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2007, 62(1): 1 - 6.
- HIEMORI M, KOH E, MITCHELL A E. Influence of cooking on anthocyanins in black rice (*Oryza sativa* L. japonica var. SBR) [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2009, 57(5): 1908 - 1914.
- SHEN Y, JIN L, XIAO P, et al. Total phenolics, flavonoids, antioxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(1): 106 - 111.
- TIAN Y, ZHAO J, XIE Z, et al. Effect of different pressure-soaking treatments on color, texture, morphology and retrogradation properties of cooked rice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(1): 368 - 373.
- GEORGET E, SEVENICH R, REINEKE K, et al. Inactivation of microorganisms by high isostatic pressure processing in complex matrices: a review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 27(4): 1 - 14.
- 杨小兰, 袁娅, 郭晓晖, 等. 超高压处理对不同品种猕猴桃浆多酚含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(1): 73 - 77.  
YANG Xiaolan, YUAN Ya, GUO Xiaohui, et al. Effect of ultra high pressure (UHP) on polyphenol content and antioxidant activity in kiwifruit juice from different cultivars[J]. Food Science, 2013, 34(1): 73 - 77. (in Chinese)
- 陈凡, 马善丽, 许颖, 等. 超高压处理对豆乳总多酚、类黄酮含量及其抗氧化性的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(2): 310 - 313.

- CHEN Fan, MA Shanli, XU Ying, et al. Effects of high pressure processing on total phenolic, flavonoid content and antioxidant activity of soymilk [J]. *Soybean Science*, 2011, 30(2): 310 – 313. (in Chinese)
- 14 ZHOU Z, REN X, WANG F, et al. High pressure processing manipulated buckwheat antioxidant activity, anti-adipogenic properties and starch digestibility[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 66:31 – 36.
- 15 INDRAWATI, VAN L A, HENDRICKX M. Pressure and temperature stability of water-soluble antioxidants in orange and carrot juice: a kinetic study[J]. *European Food Research and Technology*, 2004, 219(2):161 – 166.
- 16 DEDE S, ALPAS H, BAYINDIRLI A. High hydrostatic pressure treatment and storage of carrot and tomato juices: antioxidant activity and microbial safety[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(5):773 – 782.
- 17 BOLUDA-AGUILAR M, TABOADA-RODRÍGUEZ A, LÓPEZ-GÓMEZ A, et al. Quick cooking rice by high hydrostatic pressure processing[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 2013, 51(1):196 – 204.
- 18 MORALES P, CALZADA J, AVILA M, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in ground beef by single-cycle and multiple-cycle high-pressure treatments[J]. *Journal of Food Protection*, 2008, 71(4):811 – 815.
- 19 DENG Y, JIN Y, LUO Y, et al. Impact of continuous or cycle high hydrostatic pressure on the ultrastructure and digestibility of rice starch granules[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(2):302 – 310.
- 20 MIR S A, BOSCO S J D, SHAH M A, et al. Effect of puffing on physical and antioxidant properties of brown rice [J]. *Food Chemistry*, 2016, 191: 139 – 146.
- 21 BŁASZCZAK W, ZIELIŃSKA D, ZIELIŃSKI H, et al. Antioxidant properties and rutin content of high pressure-treated raw and roasted buckwheat groats[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(1):92 – 100.
- 22 MOHAMEDALI A F, CHANGYONG L. Optimization of phenolics and dietary fibre extraction from date seeds [J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(3):977 – 985.
- 23 LIN J Y, TANG C Y. Determination of total phenolic and flavonoid contents in selected fruits and vegetables, as well as their stimulatory effects on mouse splenocyte proliferation[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(1):140 – 147.
- 24 OEY I, LILLE M, AVAN L, et al. Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit- and vegetable-based food products: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2008, 19(6):320 – 328.
- 25 WALTER M, MARCHESAN E, MASSONI P F S, et al. Antioxidant properties of rice grains with light brown, red and black pericarp colors and the effect of processing[J]. *Food Research International*, 2013, 50(2):698 – 703.
- 26 孙伟, 李建平, 都基睿, 等. 超高压加工过程食品物料绝热压缩升温特性研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 200 – 206. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160328&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160328&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.028.
- SUN Wei, LI Jianping, DU Jirui, et al. Adiabatic compression heating characteristics of selected food materials during high pressure processing[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3):200 – 206. (in Chinese)
- 27 KIM B S, KIM H S, HONG J S, et al. Effects of amylosucrase treatment on molecular structure and digestion resistance of pre-gelatinised rice and barley starches[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2 – 3): 966 – 975.
- 28 DU G, LI M, MA F, et al. Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and Vitamin C in *Actinidia* fruits[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(2): 557 – 562.
- 29 LIU R H. Whole grain phytochemicals and health[J]. *Journal of Cereal Science*, 2007, 46(3): 207 – 219.