

糙米体外消化过程中酚类物质含量及抗氧化活性

倪香艳, 钟葵, 佟立涛, 刘丽娅, 周闲容, 周素梅*

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

摘要: 以糙米为对象, 围绕其体外消化过程酚类物质及抗氧化活性变化开展研究。结果表明: 粳型糙米中总酚含量显著高于籼型糙米(约1.5倍)。胃和小肠消化显著促进粳型和籼型糙米中酚类物质释放($P < 0.05$), 其释放量(以没食子酸当量计)最高值为460.9 mg/100 g和401.1 mg/100 g, 粳型糙米中酚类物质释放量显著高于籼型糙米; 两者酚类物质释放量随消化时间变化趋势均符合幂函数模型。铁离子还原/抗氧化能力(ferric-reducing antioxidant power, FRAP)和氧自由基清除能力(oxygen radical absorbance capacity, ORAC)实验表明糙米体外消化过程中释放的酚类物质具有良好抗氧化能力, 粳型和籼型糙米消化液FRAP值(以Trolox当量计)最大为10.76、8.44 $\mu\text{mol/g}$, ORAC值(以Trolox当量计)最大为6.82 $\mu\text{mol/g}$ 和6.23 $\mu\text{mol/g}$ 。

关键词: 糙米; 体外消化; 多酚; 抗氧化

Changes in Polyphenols Content and Antioxidant Activity during *in Vitro* Digestion of Brown Rice

NI Xiangyan, ZHONG Kui, TONG Litao, LIU Liya, ZHOU Xianrong, ZHOU Sumei*

(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Comprehensive Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In this research, changes in polyphenols content and antioxidant capacity during *in vitro* digestion of brown rice were studied. The total phenolic content in brown Japonica rice was significantly higher than that in brown Indica rice (about 1.5 times). During simulated *in vitro* gastrointestinal digestion, the release of polyphenols (calculated as gallic acid equivalent) was increased significantly for both rice varieties ($P < 0.05$), with the maximum value (460.9 mg/100 g) of Japonica rice being significantly higher than that (401.1 mg/100 g) of Indica rice. The release of polyphenols versus digestion time was fitted to a power function. The results of ferric reducing antioxidant power (FRAP) and oxygen radical absorbance capacity (ORAC) showed that the polyphenols released during *in vitro* digestion of brown Japonica and Indica rice possessed potent antioxidant activity. Both FRAP and ORAC were calculated as trolox equivalent. The maximum FRAP values of digested Japonica and Indica rice were 10.76 and 8.44 $\mu\text{mol/g}$, and the maximum ORAC values were 6.82 and 6.23 $\mu\text{mol/g}$, respectively.

Keywords: brown rice; *in vitro* digestion; polyphenols content; antioxidant activity

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816016

中图分类号: TS201

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2018)16-0105-07

引文格式:

倪香艳, 钟葵, 佟立涛, 等. 糙米体外消化过程中酚类物质含量及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 105-111.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816016. <http://www.spkx.net.cn>

NI Xiangyan, ZHONG Kui, TONG Litao, et al. Changes in polyphenols content and antioxidant activity during *in vitro* digestion of brown rice[J]. Food Science, 2018, 39(16): 105-111. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201816016. <http://www.spkx.net.cn>

糙米中营养成分包括宏量营养素、微量营养素、非淀粉多糖、植物类化学素和抗营养素等^[1-2]。多酚类物质是糙米中最主要的植物营养素, 同时也是天然抗氧化物^[3-4]。流行病学研究表明^[5], 谷物的抗氧化活性可有效地预防慢性

病及代谢性疾病发生。因此, 对于糙米中多酚类物质及其抗氧化活性的研究成为近年来关注的热点。

目前, 关于糙米多酚类物质及其抗氧化活性的研究大部分集中在原料上或将多酚类物质提出后开展生物活

收稿日期: 2017-04-12

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403063-3)

第一作者简介: 倪香艳(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油深加工与功能食品。E-mail: 1016184522@qq.com

*通信作者简介: 周素梅(1971—), 女, 研究员, 博士, 研究方向为粮油深加工与功能食品。E-mail: zhousumei@yahoo.com.cn

性的相关研究^[6],但通常谷物的膳食方式是必须经过热处理熟化后食用,此外胃肠道的消化处理对多酚类小分子物质的含量及抗氧化活性影响显著,熟化的糙米经过胃肠消化后其多酚类物质的含量及抗氧化活性与原料差异较大^[7],所以目前有关糙米原料中多酚类物质含量及抗氧化活性的研究结论与糙米在胃肠道消化过程中相关指标变化趋势并没有必然联系。通过人体实验或动物实验研究糙米中多酚类物质在人体胃肠道消化和吸收过程中的变化趋势存在诸多困难,体外模拟胃肠道消化具有操作简单、易行、实验条件易于控制、实验周期较短的优点,成为研究食物在人体胃肠道消化中变化的重要途径^[8]。采用体外模拟胃肠道消化过程中酚类物质及其抗氧化性变化近年来研究较多^[9],但关于糙米熟化后在人体胃肠道消化和吸收过程中多酚类物质及其活性的变化研究报道较少。

本实验以粳型糙米圣稻735和籼型糙米农香18为原料,对原料进行熟化处理并通过体外消化模型模拟口腔、胃和小肠消化过程,研究体外消化过程中糙米多酚含量变化以及对抗氧化活性的影响,为以后深入研究提供基础理论数据和思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

粳型糙米圣稻735由山东省农业科学院提供;籼型糙米农香18由湖南省农业科学院提供。

α -淀粉酶(15 U/mg)、胃蛋白酶(474 U/mg)、胰酶(4×USP) 美国Sigma公司;猪胆汁、荧光素钠盐、水溶性VE(纯度≥97%)、偶氮二异丁脒盐酸盐(纯度≥97%)、三吡啶基三嗪(纯度≥98.5%) 北京索莱宝生物有限公司;碳酸氢钠、氢氧化钠、氯化钙(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

CP-214分析天平 奥豪斯仪器(上海)有限公司;KJELTEC2300全自动凯氏定氮仪 FOSS仪器有限公司;SER148全自动粗脂肪测定仪 意大利VELP公司;IU-1900紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限公司;UB-7标准型pH计 美国Denver仪器公司;THZ-82A恒温水浴振荡器 常州荣华仪器制造有限公司;TGL-16台式冷冻高速离心机 湖南湘仪仪器有限公司;LGJ-25C冷冻干燥机 巩义市予华仪器有限责任公司;Chameleon V多功能酶标仪 芬兰Hidex公司。

1.3 方法

1.3.1 样品基本成分测定

参照GB/T 5519—2008《谷物与豆类 千粒重的测定》测定千粒质量;参照GB/T 14772—2008《食品中粗脂肪的测定》测定粗脂肪含量;参照GB/T 5009.5—2003

《食品中蛋白质的测定》测定粗蛋白含量;参照GB/T 5009.88—2008《食品中膳食纤维的测定》测定总膳食纤维含量;采用试剂盒方法并参照AOAC 996.11测定总淀粉含量^[10];采用Megazyme Amylose/Amylopectin Assay Procedure试剂盒方法测定直链淀粉含量^[11]。

1.3.2 体外消化

体外消化过程参照Connolly^[12]和赵旭^[13]的方法,并略作修改。称取12.00 g糙米粉置于锥形瓶中,边搅拌边加入200 mL去离子水,随后加入溶解在1.25 mL CaCl₂(1 mmol/L, pH 7.0)溶液中的唾液 α -淀粉酶10.00 mg,37 °C恒温水浴摇床中反应,空白对照组锥形瓶中不加入糙米粉,分别在反应0、15 min和30 min取出一定体积的消化液;消化30 min后用6 mol/L HCl溶液将酶解液pH值调节至2.00,加入溶解在5 mL HCl溶液(0.1 mol/L)中的胃蛋白酶0.24 g,37 °C恒温水浴摇床中反应,空白对照组锥形瓶中不加入糙米粉,分别在反应1、5、15、30、60 min和120 min取出一定体积消化液;消化2 h后用6 mol/L的NaOH将pH值调节至6.80,随后加入溶解在Na₂HCO₃溶液(0.5 mol/L, 10 mL)中的胰酶(0.22 g)和胆汁(0.70 g),37 °C恒温水浴摇床中反应,空白对照组锥形瓶中不加入糙米粉,分别在反应1、15、30、60、120、180 min和240 min取出一定体积的消化液;消化4 h后将溶液转移至1 kDa透析袋中透析过夜。将各消化阶段消化液4 °C离心(10 000 r/min, 20 min)取上清液,80%丙酮溶液沉淀去除上清液中蛋白质和多糖,离心(10 000 r/min、10 min),上清液于-20 °C保存备用。

1.3.3 总酚含量测定

参考Shen Yun等^[14]方法并进行适当的调整。1 mL提取液(适度稀释)中,加入0.5 mL 0.5 mol/L福林-酚试剂和2.5 mL 75 g/L Na₂CO₃溶液,混合均匀,室温下避光反应2 h,760 nm波长处测定反应液的吸光度。根据不同浓度的没食子酸绘制标准曲线,以没食子酸当量计算样品中总酚含量,结果表示为mg/100 g。

1.3.4 酚酸组成的测定

采用HPLC测定提取液中酚酸含量及组成^[3],8种酚酸(没食子酸、绿原酸、原儿茶酸、咖啡酸、香草酸、*p*-香豆酸、丁香酸和阿魏酸)作为外标。使用SB-C₁₈(250 mm×4.6 mm, 5 μ m)色谱柱,检测波长280 nm和320 nm,柱温为40 °C,进样量为10 μ L,流动相A(2%甲酸)和流动相B(乙腈),梯度洗脱程序:A 95%~75%,0~30 min;A 60%,30~50 min;A 95%,50~60 min。流速为0.8 mL/min。

1.3.5 抗氧化能力测定

1.3.5.1 铁离子还原/抗氧化能力(ferric-reducing antioxidant power, FRAP)^[15]

制备FRAP试剂:300 mmol/L醋酸盐缓冲液-10 mmol/L

TPTZ盐酸溶液 (40 mmol/L) -20 mmol/L FeCl₃ · 6H₂O 溶液 (10:1:1, V/V)。在96孔板中加入20 μL提取液 (适宜浓度) 和260 μL FRAP试剂, 避光反应30 min后在593 nm波长处测定吸光度。以不同浓度的Trolox溶液绘制标准曲线, 根据吸光度计算样品的FRAP值, 以Trolox当量计算, 测定结果以μmol/g表示。

1.3.5.2 氧自由基清除能力 (oxygen radical absorbance capacity, ORAC) [16-17]

96孔板中加入20 μL的提取液 (适度浓度) 和260 μL 荧光素钠盐溶液 (0.086 8 nmol/L), 然后将96孔板放入荧光酶标仪中在37℃预热20 min, 迅速加入20 μL 2,2-偶氮二 (2-甲基丙基咪) 二盐酸盐 (2,2-azobis(2-methylpropionamide) dihydrochloride, AAPH) 溶液 (153 mmol/L), 振荡摇匀, 立即在激发波长485 nm, 发射波长525 nm条件下进行测定, 初始荧光强度记为f₀, 每隔2 min自动测定荧光强度, 测定2 h, 荧光强度分别记为f₁、f₂...f₅₈、f₅₉、f₆₀, 根据公式计算荧光强度值。以Trolox当量计算, 测定结果以μmol/g表示。

$$\text{荧光强度} = 1 + f_1/f_0 + f_2/f_0 + f_3/f_0 + f_4/f_0 + \dots + f_{59}/f_0 + f_{60}/f_0$$

2 结果与分析

2.1 糙米原料基本成分分析

我国稻米资源丰富、品种多样, 稻米按其粒形和粒质可分为粳稻和籼稻两大亚型, 不同品种和类型间糙米基本营养及功能成分存在差异[18]。本实验选取粳型糙米圣稻735和籼型糙米农香18作为实验原料。

表1 糙米原料基本成分分析

Table 1 Proximate chemical composition of brown rice

指标	JBR	IBR
千粒质量/g	23.11 ± 0.83 ^a	22.04 ± 0.95 ^a
粗蛋白质量分数/%	8.49 ± 0.16 ^a	8.86 ± 0.09 ^a
粗脂肪质量分数/%	2.34 ± 0.12 ^a	2.21 ± 0.13 ^a
总淀粉质量分数/%	78.28 ± 0.06 ^a	77.00 ± 1.36 ^a
直链淀粉质量分数/%	16.32 ± 0.78 ^a	17.73 ± 0.85 ^a
膳食纤维质量分数/%	3.36 ± 0.05 ^b	3.78 ± 0.07 ^a
游离酚含量/(mg/100 g)	106.25 ± 0.98 ^a	68.05 ± 0.38 ^b
结合酚含量/(mg/100 g)	59.75 ± 0.53 ^a	56.03 ± 0.81 ^a

注: JBR, 粳型糙米; IBR, 籼型糙米; 下同。以上各测定指标均以干基计。同行不同字母表示差异显著 (P<0.05); 样品测定3次取平均值。

如表1所示, JBR中粗蛋白、粗脂肪、总淀粉和直链淀粉的质量分数分别为8.49%、2.34%、78.28%和16.32%, IBR中质量分数分别为8.86%、2.21%、77.00%和17.73%, JBR与IBR中基本营养成分含量差异不显著 (P>0.05); IBR中膳食纤维含量显著高于JBR (P<0.05), 研究结果与文献报道相似[19-20]。多酚类物质是糙米中重要的植物类营养素, 是一种天然抗氧化物, 具有抗氧化能力[21]。

JBR中游离酚含量约为IBR 1.6倍左右, 结合酚含量是IBR 1.07倍左右, 表明不同品种和类型糙米多酚类物质含量存在显著性差异 (P<0.05); 相关研究[14]指出不同糙米品种间游离型总酚及抗氧化活性存在差异, 并与糙米籽粒颜色、大小和粒质量有关, Liu Lei等[22]曾研究表明JBR和IBR中游离型多酚含量 (以没食子酸当量计算) 分别为65.6、62.0 mg/100 g, JBR中含量略高于IBR, 与本实验结果具有一致性。

2.2 糙米体外消化过程中酚类物质释放量分析

多酚类物质的摄入与癌症、心血管疾病及炎症等多种慢性病及代谢性疾病的发生密切相关[12]。糙米良好的生理功能与其富含多酚类物质和良好的抗氧化活性密不可分。通常谷物食品需要熟化并经过胃肠道消化处理后, 营养及功能成分才能被人体消化吸收。近年来研究发现, 消化过程对谷物中酚类物质具有显著影响[7,13]。本研究通过体外模拟消化实验, 开展糙米原料在消化过程中多酚类物质含量的变化, 分析口腔、胃部和小肠部分酚类物质释放量的变化趋势。

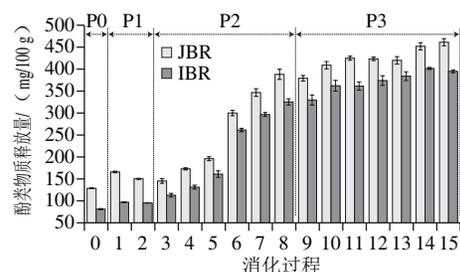


图1 体外消化过程中酚类物质释放量变化分析
Fig. 1 Analysis of polyphenols release during in vitro digestion

如图1所示, 体外模拟口腔、胃和小肠3个阶段消化过程中, JBR中酚类物质释放量在3个消化阶段末分别为150.4、387.6 mg/100 g和460.9 mg/100 g, 表明体外消化过程显著促进了JBR中酚类物质的释放。起始点JBR酚类物质含量为106.25 mg/100 g, 口腔消化阶段后JBR中酚类物质含量少量增加, 胃部消化阶段是酚类物质含量增加速率最多的阶段, JBR中酚类物质含量增至3.7倍, JBR在胃部消化阶段前15 min内增速较慢, 仅为原料中1.4倍左右; 但30 min后含量快速增加至300 mg/100 g (2.8倍左右); 随着胃部消化时间延长JBR中酚类物质含量缓慢增加, 120 min后增长至387.6 mg/100 g (3.7倍)。小肠消化阶段, JBR中酚类物质含量随消化时间延长呈现缓慢增加趋势, 从387.6 mg/100 g增至460.9 mg/100 g, 最终为原料中4.4倍左右。

IBR在整个消化过程中酚类物质含量的变化趋势与JBR类似, IBR酚类物质释放在3个消化阶段末分别为95.1、325.7 mg/100 g和394.9 mg/100 g, 表明消化过程能显著促进IBR中酚类物质的释放 ($P < 0.05$)。起始点IBR中酚类物质含量为68.05 mg/100 g, 口腔消化过程对糙米中酚类物质含量增加影响较小, 增幅约为20%~30%。胃部消化过程中, IBR在胃部消化30 min后酚类物质含量呈现快速增加, 120 min后增至325.7 mg/100 g (4.8倍)。小肠消化阶段, IBR中酚类物质含量仍然缓慢增长, 最终增至394.9 mg/100 g (5.8倍)。整体来看, 经过口腔、胃部和小肠消化阶段后, JBR中酚类物质释放量显著高于IBR ($P < 0.05$)。

王慧清等^[23]在全麦粉模拟消化过程中的抗氧化活性研究中也指出胃和小肠消化阶段全麦粉酚类物质释放量显著升高, 为胃起始阶段的3.14、5.54倍左右, 与本研究结果较一致。体外消化过程中酚类物质释放量升高可能是由于糙米原料中多酚可与淀粉、蛋白质、多糖等天然化合物发生复合, 形成的复合物非常稳定不易释放^[24], 在极端pH值环境、胃蛋白酶和胰酶的作用下可以使多糖分离、淀粉和蛋白质酶解, 有研究^[23]曾指出胃蛋白酶和胰蛋白酶会促使羧基的断裂, 胰酶中含有的胰脂肪酶能水解酯键, 胰淀粉酶具有水解淀粉中糖苷键的功效从而使多酚失去束缚被释放出来, 使糙米在不同消化阶段提取液中酚类物质明显升高。Ti Huihui等^[7]曾研究指出大米经体外消化其酚类物质含量也显著升高 ($P < 0.05$); 由于粳型和籼型糙米原料中酚类物质含量不同, 模拟消化过程中两者酚类物质释放量也存在差异。

表2 体外消化过程中酚酸含量变化分析

Table 2 Analysis of phenolic acids during *in vitro* digestion

样品	消化阶段	含量/($\mu\text{g/g}$)				
		没食子酸	原儿茶酸	香草酸	<i>p</i> -香豆酸	阿魏酸
JBR	P0	nd	3.20	nd	nd	1.61
	P1	nd	1.05	nd	tr	2.51
	P2	nd	nd	nd	tr	2.32
	P3	nd	17.60	nd	nd	2.58
IBR	P0	nd	nd	nd	tr	tr
	P1	tr	nd	nd	nd	0.80
	P2	nd	nd	nd	tr	1.05
	P3	2.48	10.80	nd	0.93	2.14

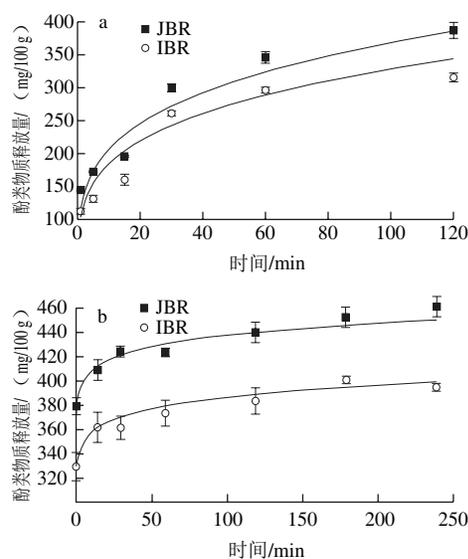
注: P0.起始阶段(原料); P1.口腔消化阶段; P2.胃部消化阶段; P3.小肠消化阶段。nd.未检测出; tr.痕量。

如表2所示, 体外消化起始阶段, 糙米中主要的单体酚酸为阿魏酸、原儿茶酸和*p*-香豆酸, 与叶玲旭^[25]报道结果相似。体外消化处理促进了糙米中阿魏酸释放, 但随着消化过程延长, JBR消化液中阿魏酸含量没有显著变化, 但IBR消化液中阿魏酸含量显著增加 ($P < 0.05$)。小肠消化阶段显著促进JBR和IBR中原儿茶酸释放量, 释放量分别达到17.60 $\mu\text{g/g}$ 和10.80 $\mu\text{g/g}$ 。消化过程对糙米中

p-香豆酸含量影响较小, 仅IBR在小肠消化后*p*-香豆酸含量有少量增加(0.93 $\mu\text{g/g}$)。小肠消化过程显著促进IBR中没食子酸含量增加。Ti Huihui等^[26]也曾研究表明糙米在体外消化过程中原儿茶酸和阿魏酸含量较高, 与本研究结果较为一致。

2.3 糙米体外消化过程中酚类物质释放量动力学分析

模拟消化过程中酚类物质释放量与消化时间存在显著相关关系, 为更直观和准确分析各消化阶段酚类物质释放量随时间变化趋势, 将不同消化阶段和时间下糙米中酚类物质释放量进行函数拟合, 考察体外模拟胃和小肠消化过程中糙米酚类物质释放量的动力学变化, 具体分析如图2所示。



a.模拟胃消化过程; b.模拟小肠消化过程。

图2 体外消化过程中酚类物质释放量变化动力学分析

Fig. 2 Kinetic curves of polyphenols release during *in vitro* digestion

JBR和IBR在消化阶段酚类物质释放量存在类似变化趋势。消化过程中酚类物质释放量随消化时间的变化趋势符合幂函数 $Y=aX^b$ (X 为消化时间, Y 为酚类物质释放量, a 为速率常数, b 为曲线常数), 各消化阶段酚类物质释放量变化动力学参数见表3。在胃部和小肠消化阶段, 糙米中酚类物质释放量与消化时间的变化规律与幂函数拟合度高, R 值均在0.95以上。 a 值越大表明相同消化时间下, 酚类物质释放量越大; b 代表相同消化时间下酚类物质释放曲线的变化速率。胃部和小肠消化过程中, IBR和JBR的 b 值没有显著差异, 表明两者具有类似的消化速率和变化趋势。推测是由于粳型糙米和籼型糙米属于稻米两大亚型, 两者基本成分和结构相似, 使得在消化酶作用下变化趋势相似。但JBR的 a 值均高于IBR的 a 值, 表明相同消化阶段JBR中酚类物质释放量高于IBR。这与JBR原料中酚类物质含量高于IBR研究结果相对应。

表3 体外消化过程中酚类物质释放动力学参数
Table 3 Kinetic parameters of polyphenols release during *in vitro* digestion

部位	样品	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
胃部	JBR	130.4	0.22	0.959
	IBR	100.5	0.24	0.951
小肠	JBR	375.5	0.034	0.981
	IBR	327.5	0.034	0.979

2.4 糙米体外消化过程中抗氧化活性分析

酚类物质是糙米中主要的亲水性抗氧化活性物质，多酚类物质直接影响糙米的抗氧化能力。本实验通过体外模拟消化系统制备收集消化液，同时采用FRAP和ORAC两种方法测定消化液抗氧化能力，分析结果如图3、4所示。

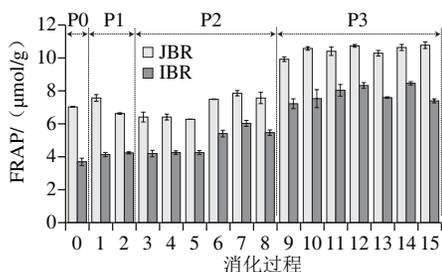


图3 体外消化过程中消化液抗氧化活性变化分析

Fig. 3 Analysis of antioxidant activity in terms of FRAP of *in vitro* digests

多酚作为天然抗氧化剂可清除氧自由基、螯合金属离子、抑制氧自由基产生过程中相关酶的活性，激活抗氧化酶系活性或调节相关内源抗氧化剂的合成^[27-28]等。如图3所示，对于JBR，3个消化阶段末FRAP值分别为起始阶段的0.94、1.08倍和1.54倍，表明消化过程使JBR抗氧化活性显著增强。口腔和胃部消化过程对FRAP值影响较小，但小肠消化过程FRAP值显著增加 ($P < 0.05$)。在胃和小肠各消化阶段中，随着消化时间进行，JBR的FRAP值并没有发生显著变化 ($P > 0.05$)，最终值达到10.76 μmol/g。

消化过程中IBR中酚类物质FRAP值与JBR变化趋势类似。对于IBR，3个消化阶段末FRAP值分别为起始阶段的1.13、1.48倍和2.01倍，表明消化过程使IBR抗氧化活性显著增强。口腔消化过程对其FRAP值影响较小，胃和小肠消化过程FRAP值显著增加 ($P < 0.05$)。在胃和小肠各消化阶段中，随着消化时间进行，IBR的FRAP值并没有发生显著变化 ($P > 0.05$)，最终值达到8.44 μmol/g。整体而言，相同消化阶段，JBR的FRAP值显著高于IBR ($P < 0.05$)，比较分析体外消化过程中抗氧化活性与酚类物质释放量间的关系，表明抗氧化活性的变化趋势与其所含酚类物质含量变化趋势较为一致。

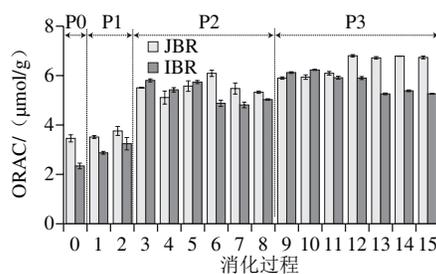
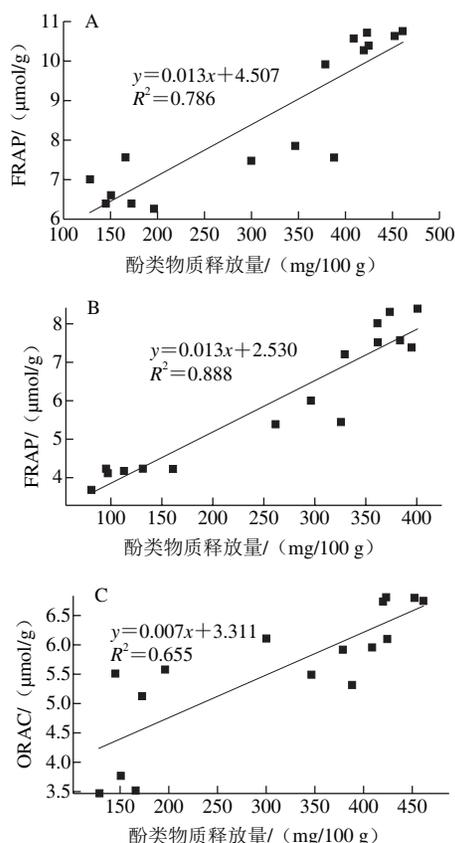
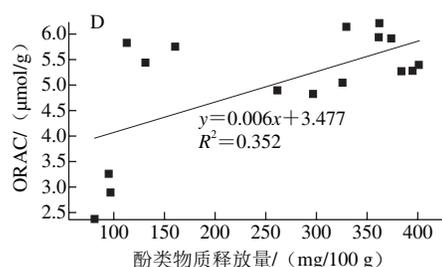


图4 体外消化过程中消化液抗氧化活性变化分析

Fig. 4 Analysis of antioxidant activity in terms of ORAC of *in vitro* digests

如图4所示，对于JBR，口腔消化过程对其ORAC值无显著影响，但胃和小肠消化阶段抗氧化活性显著增强，且小肠消化阶段抗氧化活性显著高于胃消化阶段。在胃和小肠各个消化阶段，随着消化时间延长，JBR的ORAC值并没有显著性变化 ($P > 0.05$)，胃和小肠消化阶段最终值达到5.35、6.75 μmol/g。对于IBR，口腔消化过程对其ORAC值无显著影响，但胃和小肠消化阶段抗氧化活性显著增强，且小肠消化阶段抗氧化活性显著高于胃消化阶段。在胃部消化15 min后，ORAC值降低，胃消化阶段最终ORAC值为5.04 μmol/g；在小肠消化60 min后，ORAC值降低，小肠消化阶段最终ORAC值为5.28 μmol/g。整体而言，胃部消化阶段，JBR与IBR的ORAC值无显著性差异 ($P > 0.05$)，小肠消化阶段，JBR的ORAC显著高于IBR ($P < 0.05$)。





A. JBR的FRAP; B. IBR的FRAP; C. JBR的ORAC; D. IBR的ORAC。

图5 体外消化过程中酚类物质释放量与抗氧化活性相关性分析

Fig. 5 Analysis of correlation between polyphenols release and antioxidant activity during *in vitro* digestion

图5为体外消化过程中酚类物质释放量与抗氧化活性相关性分析。在FRAP和ORAC两种抗氧化体系中, 消化液抗氧化活性与酚类物质释放量存在一定相关性。酚类物质释放量越高, 其FRAP和ORAC活性也越高。JBR中, 消化液FRAP值与ORAC值与酚类物质释放量之间存在一定相关性, 其皮尔逊相关系数(R^2)分别为0.786、0.655。IBR中, 消化液FRAP值与酚类物质释放量之间存在较强相关性, 其 R^2 为0.888, 消化液ORAC与酚类物质释放量相关性不高(0.352)。张兵^[15]对小扁豆植物化学物质抗氧化活性研究曾指出消化液抗氧化活性与酚类物质释放量存在一定相关性, 且不同抗氧化体系相关性程度不同, 与本研究结果具有一致性。

FRAP和ORAC两种方法测定JBR和IBR抗氧化活性结果存在显著性差异, 推测与两种方法中抗氧化活性测定机理的不同有关。FRAP测定抗氧化活性涉及电子转移, 反映的是样品总的还原能力, 并不能表示对某一种自由基的清除能力; ORAC的测定原理是对氢原子转移, 测定过程涉及活性氧, 该研究结果与Lee^[29]和马玉荣^[30]等得出结论相类似。

3 结论

JBR和IBR中粗蛋白、粗脂肪、总淀粉和直链淀粉的含量无显著性差异($P>0.05$); IBR中膳食纤维含量显著高于JBR($P<0.05$); JBR中多酚类物质含量为IBR的1.5倍左右。

体外消化过程显著增加了糙米中酚类物质的释放。口腔消化阶段对糙米中酚类物质的释放影响较小, 胃部和小肠消化阶段显著促进了JBR和IBR中酚类物质释放($P<0.05$), 最高值分别为460.9 mg/100 g和401.1 mg/100 g。糙米体外消化过程消化液中单体酚酸主要为阿魏酸和原儿茶酸。JBR中酚类物质释放量显著高于IBR($P<0.05$), 两者酚类物质含量随消化时间的动态变化趋势均符合幂函数模型, 且具有类似的变化动力学曲线。

糙米体外消化过程中消化液具有良好的抗氧化活性, 抗氧化活性与酚类物质释放量具有一定相关性。JBR和IBR的FRAP值最大分别为10.76、8.44 $\mu\text{mol/g}$ 。相同消化阶段, JBR的FRAP值显著高于IBR($P<0.05$)。ORAC测得JBR和IBR消化液抗氧化能力最高分别在肠消化60 min (6.82 $\mu\text{mol/g}$), 肠消化30 min (6.23 $\mu\text{mol/g}$)。胃部消化阶段, JBR和IBR的ORAC值无显著性差异($P>0.05$), 小肠消化阶段, JBR的ORAC显著高于IBR($P<0.05$)。

参考文献:

- [1] MCKEVITH B. Nutritional aspects of cereals[J]. Nutrition Bulletin, 2004, 29(2): 111-142. DOI:10.1111/j.1467-3010.2004.00418.x.
- [2] YE L X, ZHOU S M, LIU X Y, et al. Phenolic compounds and antioxidant capacity of brown rice in China[J]. International Journal of Food Engineering, 2016, 12(6): 537-546. DOI:10.1515/ijfe-2015-0346.
- [3] TI H, LI Q, ZHANG R, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China[J]. Food Chemistry, 2014, 159(13): 166-174. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.03.029.
- [4] SHAO Y, BAO J. Polyphenols in whole rice grain: genetic diversity and health benefits[J]. Food Chemistry, 2015, 180: 86-97. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.02.027.
- [5] 张蓉. 抗氧化低聚糖对肠道氧化还原状态与菌群的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 3-4.
- [6] 赵兰涛, 程李琳, 张晖, 等. 全谷物体外对肠道菌群影响的研究[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(1): 24-25.
- [7] TI H H, ZHANG R F, ZHANG M W, et al. Dynamic changes in the free and bound phenolic compounds and antioxidant activity of brown rice at different germination stages[J]. Food Chemistry, 2014, 161(6): 337-344. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.04.024.
- [8] FAILLA M L, CHITCHUMROONCHOKCHAI C. *In vitro* models as tools for screening the relative bioavailabilities of provitamin A carotenoids in foods[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(2): 4-26.
- [9] AKILLIOGLU H G, KARAKAYA S. Changes in total phenols, total flavonoids, and antioxidant activities of common beans and pinto beans after soaking, cooking, and *in vitro* digestion process[J]. Food Science and Biotechnology, 2010, 19(3): 633-639. DOI:10.1007/s10068-010-0089-8.
- [10] 王燕. 燕麦品种品质分析及油脂、多酚性质研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012: 12-14.
- [11] 顾军强. 燕麦片原料品质特性评价及微波灭酶技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 7-10.
- [12] CONNOLLY M L, LOVEGROVE J A, TURHY K M. *In vitro* fermentation characteristics of whole grain wheat flakes and the effect of toasting on prebiotic potential[J]. Journal of Medicinal Food, 2012, 15(1): 33-43.
- [13] 赵旭. 体外模拟消化对小麦和大米抗氧化活性和抗细胞增殖作用影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 12-15.
- [14] 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. DOI:10.1016/j.jcs.2008.07.010.
- [15] 张兵. 小扁豆植物化学物质组成及其抗氧化、抗炎活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014: 39-40.

- [16] ACOSTA-ESTRADA B A, GUTIERREZ-URIBE J A. Bound phenolics in foods, a review[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 46-55.
- [17] 赵福利. 燕麦品种品质与燕麦发酵乳加工适宜性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015: 49-52.
- [18] 曹卫星. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [19] 郑艺梅, 郑琳, 徐福宝, 等. 不同品种早稻糙米蛋白质和氨基酸组成研究[J]. 营养学报, 2004, 26(6): 482-485. DOI:10.3321/j.issn:0512-7955.2004.06.018.
- [20] 卢敏, 殷涌光. 稻米直链淀粉研究进展[J]. 食品技术, 2005, 8(2): 5-7. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2005.08.002.
- [21] ZHANG B, DENG Z Y, RAMDATH D D, et al. Phenolic profiles of 20 Canadian lentil cultivars and their contribution to antioxidant activity and inhibitory effects on alpha-glucosidase and pancreatic lipase[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 862-887.
- [22] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.151.
- [23] 王慧清, 刘冬, 孙海燕, 等. 全麦粉模拟消化过程中的抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 122-128.
- [24] LIYANAPATHIRANA C, SHAHIDI F. Antioxidant activity of wheat extracts as affected by *in vitro* digestion[J]. Biofactors, 2004, 21(1/2/3/4): 325-328.
- [25] 叶玲旭. 糙米品种品质分析及复合糙米粉研发[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 20-23.
- [26] TI H H, ZHANG R F, LI Q, et al. Effects of cooking and *in vitro* digestion of rice on phenolic profiles and antioxidant activity[J]. Food Research International, 2015, 76: 813-820. DOI:10.1016/j.foodres.2015.07.032.
- [27] 龚二生, 罗舜菁, 刘成梅. 全谷物抗氧化活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 364-367.
- [28] GONG E, LUO S, LI T, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of brown rice varieties[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 432-443. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.01.093.
- [29] LEE C H, YANG L, XU J Z, et al. Relative antioxidant activity of soybean isoflavones and their glycosides[J]. Food Chemistry, 2005, 90(4): 735-741.
- [30] 马玉荣. 加热及模拟胃肠道消化处理对豆浆活性成分和抗氧化能力的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 42-46.