

过热蒸汽处理对麸皮酚类物质及 抗氧化活性的影响

叶国栋^{1,2}, 汪丽萍^{1*}, 沈汪洋^{2*}, 谭斌¹, 李晓宁¹, 张维清¹, 田晓红¹, 张笃芹¹

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院粮油加工研究所, 北京 100037;

2. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023)

摘要: **目的** 探讨过热蒸汽处理对麸皮酚类物质及抗氧化活性影响的变化规律。**方法** 采用不同过热蒸汽温度(160、190、220、250和280 °C)及处理时间(30、60、90、120和150 s)处理麸皮, 研究过热蒸汽处理对麸皮酚类物质及抗氧化活性的影响。**结果** 蒸汽温度为280 °C时, 总酚含量最高, 为367.77 mg/GA eq/100 g DW, 显著高于其他组($P < 0.05$)。蒸汽温度为250 °C时, 总黄酮含量及总酚DPPH[·]自由基清除能力最高, 分别为614.82 mg/RU eq/100 g DW、302.64 μmol/Trolox eq/100 g DW。处理时间为90 s时, 总酚含量最高, 为349.01 mg/GA eq/100 g DW。处理时间为60 s时, 总黄酮含量最高, 为575.64 mg/RU eq/100 g DW, 显著高于其他组($P < 0.05$)。**结论** 过热蒸汽处理的蒸汽温度在250 °C, 处理时间为60 s时, 麸皮中的酚类物质及抗氧化能力可达到较高水平。

关键词: 过热蒸汽; 麸皮; 酚类物质; 抗氧化

Effects of superheated steam treatment on phenols of bran and their antioxidant activity

YE Guo-Dong^{1,2}, WANG Li-Ping^{1*}, SHEN Wang-Yang^{2*}, TAN Bin¹, LI Xiao-Ning¹,
ZHANG Wei-Qing¹, TIAN Xiao-Hong¹, ZHANG Du-Qin¹

(1. Grain and Oil Processing Institute, Scientific Research Institute, National Grain and Material Reserve Bureau, Beijing 100037, China; 2. School of Food Science and Engineering, Wuhan University of Light Industry, Wuhan 430023, China)

ABSTRACT: Objective To explore the changing law of the effect of superheated steam treatment on bran phenols and antioxidant activity. **Methods** Different superheated steam temperatures (160, 190, 220, 250 and 280 °C) and treatment times (30, 60, 90, 120, and 150 s) were used to treat bran. The effects of superheated steam treatment on phenolic compounds and antioxidant activity of wheat bran were studied. **Results** When the steam temperature was 280 °C, the total phenol content was the highest, which was 367.77 mg/GA eq/100 g DW, and was significantly

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD0401002)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(ZX1904)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of the 13th Five-Year Plan Period (2018YFD0401002), and the Fundamental Research Funds for Central Public Welfare Research Institutes(ZX1904)

*通信作者: 汪丽萍, 研究员, 主要研究方向为粮食加工与安全。E-mail: wlp@chinagrains.org

沈汪洋, 教授, 主要研究方向为食品资源开发及利用。E-mail: whwangyangshen@126.com

*Corresponding author: WANG Li-Ping, Professor, Grain and Oil Processing Institute, Scientific Research Institute, National Grain and Material Reserve Bureau, Beiyi Garden, Beiqijia Town, Changping District, Beijing 100037, China. E-mail: wlp@chinagrains.org

SHEN Wang-Yang, Professor, School of Food Science and Engineering, Changqing Garden Campus, Wuhan University of Light Industry, Xuefu South Road, Dongxihu District, Wuhan 430023, China. E-mail: whwangyangshen@126.com

higher than other groups ($P<0.05$). When the steam temperature was 250 °C, the total flavonoid content and total phenol DPPH⁺ radical scavenging ability were the highest, which were 614.82 mg/RU eq/100 g DW and 302.64 μmol/Trolox eq/100 g DW, respectively. When the treatment time was 90 s, the total phenol content was the highest, which was 349.01 mg/GA eq/100 g DW. When the treatment time was 60 s, the total flavonoids content was the highest, which was 575.64 mg/RU eq/10 g DW, and was significantly higher than other groups ($P<0.05$).

Conclusion When the steam temperature of superheated steam treatment is 250 °C and the treatment time is 60 s, the phenolic substances and antioxidant capacity of wheat bran can reach a high level.

KEY WORDS: superheated steam; bran; phenols; anti-oxidation

0 引言

麸皮是小麦加工的副产物,含有丰富的营养成分,如B族维生素、膳食纤维、维生素E、植酸、多酚及人体所需的矿物质等^[1]。研究表明,麸皮中的膳食纤维及生物活性成分有助于降低患肥胖、心血管疾病、癌症、糖尿病等慢性疾病的风险^[2-3]。但是,麸皮中的脂肪、内源性酶(脂肪酶、脂肪氧化酶等)和粗纤维等含量较高,易造成含麸皮的产品适口性差、储藏稳定性差及风味不佳等问题。因此,为提升麸皮加工及食用品质特性,有必要对其进行改性处理。麸皮通过改性,可以增加稳定性,提升营养品质,改善口感等。如李治^[4]发现挤压和蒸汽爆破处理可以增加麸皮中水溶性膳食纤维的含量,使麸皮具有更强的持水力和膨胀力。汪丽萍等^[5]研究了内切木聚糖酶处理麸皮,发现酶处理后的麸皮制成的全麦挂面外观细腻度有所改善。吕春月等^[6]研究了微波-酶联合处理麸皮,结果发现麸皮经处理后持水性增加30.14%,脂肪酶残余酶活降低至6.13%,还原糖含量上升至25.25 mg/mL。

过热蒸汽处理也是麸皮改性常用的方式之一,过热蒸汽是指在一定压力下,水分受热达到沸点后形成饱和水蒸气,饱和水蒸气在常压下进一步加热,使蒸汽温度升高而超过饱和温度,形成过热蒸汽^[7]。过热蒸汽处理可以达到提高麸皮及其产品的稳定性、改善产品品质、延长货架期的目的。如HU等^[8]研究发现过热蒸汽处理麸皮可以在较短的时间内使酶失活。罗舜箐等^[9]的研究发现,在过热蒸汽的温度为120 °C处理4 min的条件下,米糠的脂肪酶活性降至30.99%,有效地延长了米糠的储藏期。SATOU等^[10]发现,在150 °C的过热蒸汽环境下处理1 min,不仅可以降低糙米的脂肪氧化酶活性,而且对糙米的淀粉质量没有影响。

酚类物质具有降血糖、降血脂、抗氧化与清除自由基等作用^[11-12]。研究表明,过热蒸汽处理不会引起非淀粉营养物质(脂肪、蛋白质、灰分和膳食纤维)的损失,也不会导致不饱和脂肪酸的氧化^[13]。但目前关于过热蒸汽处理对麸皮酚类物质及其抗氧化活性的研究还鲜有报道。本文研究了过热蒸汽处理条件(包括蒸汽温度和处理时间)对麸皮的

酚类物质及抗氧化活性的影响,以期确立影响规律,为麸皮的稳定化处理技术提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

粗麸、细麸和胚芽(青岛维良食品有限公司)。

石油醚、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、95%乙醇、甲醇、福林酚、荧光素钠、氢氧化钠、2,2-偶氮二(2-甲基丙基咪)二盐酸盐[2,2-azobis(2-methylpropylimid) dihydrochloride, ABAP](分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司);芦丁(rutin, RU, 纯度≥99.8%)、维生素E(Trolox, 纯度≥99.8%)、没食子酸(gallic acid, GA, 纯度≥99.8%)、二苯代苦味肼基自由基[2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical, DPPH, 纯度≥99.8%]、2,2'-连氮基-双(3-乙基并二氢噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-Azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS, 纯度≥99.8%)(色谱级,美国Sigma有限公司)。

NF-5020C-T 过热蒸汽蒸烤机(日本大阪直本有限公司); BSC-150 电热恒温培养箱(北京科伟永兴仪器有限公司); UV-1800PC 紫外可见分光光度计(上海美谱达仪器有限公司); MD200-2 干式氮吹仪(上海沪析实业有限公司); H1MF 酶联免疫检测仪(美国伯腾仪器有限公司); SHZ-B 水浴恒温振荡器(上海博讯医疗生物仪器股份有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 麸皮的过热蒸汽处理

将粗麸、细麸和胚芽按照出粉比例混合(13:12:1, m:m:m), 制得混麸。

(1)控制蒸汽温度为220 °C, 处理时间分别为: 30、60、90、120、150 s。

(2)处理时间为90 s, 控制蒸汽温度分别为: 160、190、220、250、280 °C。

将混麸按照上述条件进行处理, 粉碎, 过80目筛(过筛率大于90%), 贮藏4 °C, 备用。

1.2.2 酚类物质的提取

(1)游离态酚类物质的提取

参照ADOM等^[14]的方法, 稍作改动。取2.00 g样品

于 50 mL 的离心试管中,加 40 mL 甲醇,超声提取 30 min(40 °C、100%功率),3500 r/min 离心 10 min,最后取上清液,操作重复 1 次,合并上清液,40 °C 旋转蒸干后甲醇溶解定容至 2 mL,得游离态酚类提取液。

(2)结合态酚类物质的提取

参照 NACZK 和 SUN 等^[15-16]的方法,稍作改动。游离酚提取后的沉淀加入 15 mL 2 mol/L NaOH 溶液室温避光涡旋 1 min,混匀消化 1 h,在氮气保护下调 pH 至中性,终止反应。再加入 20 mL 乙酸乙酯振荡 5 min,离心 10 min,收集上清液,操作重复 3 次,合并上清液,45 °C 旋转蒸干后甲醇定容至 2 mL,得结合态酚类提取液。

1.2.3 总酚含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 法测定试样的酚含量,根据 DEWANTO 等^[17]的方法,稍作改动。将 250 μL 样品稀释液与 500 μL 蒸馏水和 250 μL 福林酚试剂混合反应 6 min,加入 2.5 mL 7 g/100 mL Na₂CO₃ 溶液和 2 mL 蒸馏水室温下避光反应 90 min,765 nm 波长处测定吸光度。以没食子酸为标样制定标准曲线,样品多酚含量以 100 g 干基中所含没食子酸的毫克数表示(mg/GA eq/100 g DW)。

1.2.4 黄酮含量的测定

采用 NaNO₂-Al(NO₃)₃ 方法测定试样的黄酮含量,根据 JIA 等^[18]的方法,稍作改动。取 100 μL 样品提取液加入 200 μL 5 g/100 mL NaNO₂ 溶液混合均匀后避光反应 6 min,再加入 200 μL 10 g/100 mL 的 Al(NO₃)₃ 溶液反应 6 min,再加入 2 mL 4 g/100 mL 的 NaOH 溶液和 2.5 mL 蒸馏水混匀后室温下避光反应 15 min,510 nm 波长处测定吸光度,结果以 100 g 干基中所含芦丁的毫克数表示(mg/RU eq/100 g DW)。

1.2.5 抗氧化活性的测定

(1)DPPH[·]自由基清除能力的测定

将 600 μL 的样品提取稀释液与 3 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH 甲醇溶液混匀后避光反应 20 min,于 517 nm 波长处测定吸光度,结果以 100 g 干基中所含 Trolox 的当量微摩尔数表示(μmol/Troloxeq/100 g DW)^[19]。

(2)ABTS^{·+}自由基清除能力的测定

将 20 mL 5 mmol/L ABTS 溶液中加入 1 g MnO₂ 在室温避光反应 30 min 后形成 ABTS^{·+}储备液。200 μL 样品稀释液与 3 mL ABTS^{·+}工作液混匀室温下避光反应 6 min 后在 734 nm 波长处测定吸光度,结果以 100 g 干基中所含 Trolox 的当量微摩尔数表示(μmol/Troloxeq/100 g DW)^[20-21]。

(3)氧自由基吸收能力(oxygen free radical absorption capacity, ORAC)的测定

样品提取物用 75 mmol/L(pH 7.4)磷酸缓冲液稀释备用,向 96 孔板加入 20 μL 的提取物或者维生素 E 和 200 μL 荧光素钠(终浓度为 0.96 μmol/L),在 37 °C 下预热 20 min

后,各孔板中加入 20 μL 浓度为 119 mmol/L 的 ABAP。用酶标仪测定孔板的荧光强度,485 nm 激发,520 nm 吸收,每 5 min 一次,共循环 35 次。计算各孔荧光曲线下的面积(记为 AUC),减掉空白孔的 AUC,即得到各孔的 net AUC,根据不同浓度的维生素 E 的 net AUC 做标准曲线,计算各样品的 ORAC 值。

$$AUC = \frac{(0.5 \times f_1 + f_2 + \dots + f_i + \dots + f_{33} + f_{34} + 0.5 \times f_{35}) \times CT}{f_1}$$

其中, f_i 为第 i 次时荧光曲线对应的值; CT 为时间间隔: 5 min。结果以 100 g 干基中所含 Trolox 的当量微摩尔数表示(μmol/Troloxeq/100 g DW)^[22]。

1.3 数据处理与分析

数据统计采用 Excel 2010,数据以“平均值±标准偏差”表示,平行 $n=3$,利用 SPSS 19.0 和 Origin 8.5 等数据软件进行数据处理、作图和分析。

2 结果与分析

2.1 蒸汽温度对麸皮酚类物质及抗氧化活性的影响

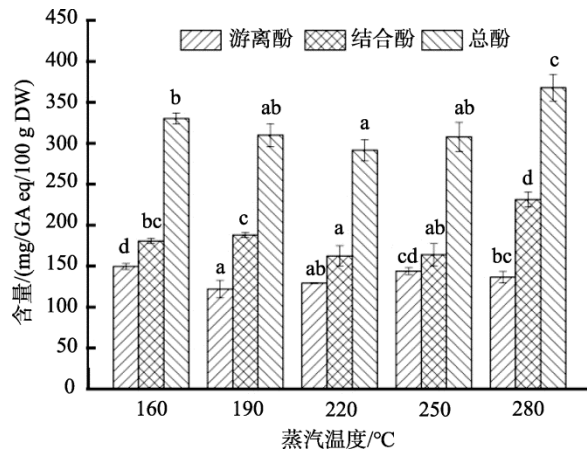
2.1.1 蒸汽温度对多酚的影响

由图 1 可以看出,游离酚含量随着蒸汽温度的增加呈现上下波动,当蒸汽温度为 160 °C 时,游离酚含量最高,为 149.55 mg/GA eq/100 g DW。这是因为游离酚在高温条件下会发生降解^[23],WAHIDU 等^[24]的研究结果也表明随着过热蒸汽处理温度的升高,可可豆的游离酚含量会显著降低($P < 0.05$)。结合酚含量随着蒸汽温度的增加先降低后增加,蒸汽温度为 280 °C 时,结合酚含量最高,为 231.21 mg/GA eq/100 g DW。这与吴晓江等^[25]的研究结果一致,研究发现随着过热蒸汽处理温度的增加,可以显著增加苦荞粉中的结合酚含量($P < 0.05$)。这可能是因为过热蒸汽处理能够削弱结合多酚与细胞壁组分(如纤维素、半纤维素、木质素等)之间的醚键或酯键,从而提高结合酚的提取率。总酚含量的变化趋势与结合酚的变化一致,蒸汽温度为 280 °C 时,总酚含量显著高于其他组($P < 0.05$),含量为 367.77 mg/GA eq/100 g DW。

2.1.2 蒸汽温度对黄酮的影响

图 2 为过热蒸汽处理温度对麸皮黄酮的影响。游离黄酮含量随着蒸汽温度的增加呈现上下波动,蒸汽温度为 250 °C 时,游离黄酮、结合黄酮和总黄酮含量均是最高,分别为 277.10、337.72、614.82 mg/RU eq/100 g DW。黄酮是热敏性物质,正常情况下,随着温度的升高其含量应该是下降的,而本研究表明 250 °C 的黄酮含量显著高于 160、190 和 220 °C。这与 TZU 等^[26]的结果一致,WANG 的研究发现,温度为 240 °C 时的红薯总黄酮含量显著高于温度为 140 °C($P < 0.05$)。同样寇梦茹^[27]研究也发现,过热蒸汽温度为 160 °C 时,糙米的总黄酮含量要高于未处理的糙米。

导致这种结果的原因可能和酚类一致, 适当的温度, 可以提高谷物中的黄酮提取率。



注: 不同字母表示参数之间有显著差异($P < 0.05$), 下同。

图 1 蒸汽温度对多酚的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of steam temperature on polyphenols($n=3$)

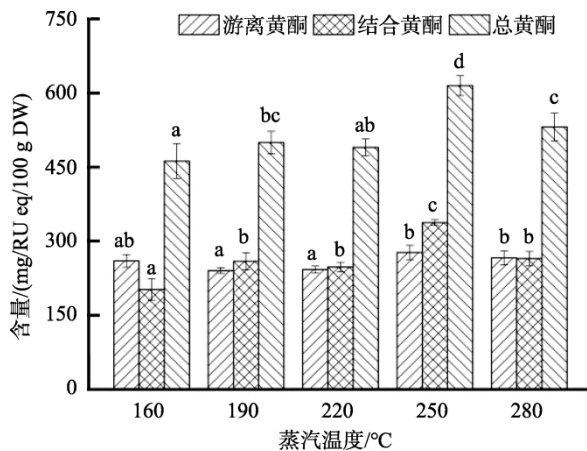


图 2 蒸汽温度对黄酮的影响($n=3$)

Fig.2 Effectsof steam temperature on flavonoids($n=3$)

2.1.3 蒸汽温度对麸皮抗氧化活性的影响

(1)蒸汽温度对麸皮多酚 DPPH⁺·自由基清除能力的影响

图 3 为蒸汽温度对麸皮多酚 DPPH⁺·自由基清除能力的影响。游离多酚 DPPH⁺·自由基清除能力随着温度的升高先降低后上升, 蒸汽温度为 280 °C 时, 游离多酚 DPPH⁺·自由基清除能力最强, 为 114.68 $\mu\text{mol/Trolox eq/100 g DW}$ 。结合多酚 DPPH⁺·自由基清除能力随着蒸汽温度的升高呈现上下波动, 蒸汽温度为 250 °C 时, 结合多酚 DPPH⁺·自由基清除能力最强, 为 200.91 $\mu\text{mol/Trolox eq/100 g DW}$ 。总酚 DPPH⁺·自由基清除能力的变化趋势与结合多酚 DPPH⁺·自由基清除能力的变化趋势一致, 均是随着蒸汽温度的升高先降低后升高再降低, 蒸汽温度为 250 °C 时, 总酚 DPPH⁺·自由基清除能力最强, 为 302.64 $\mu\text{mol/Trolox eq/100 g DW}$ 。

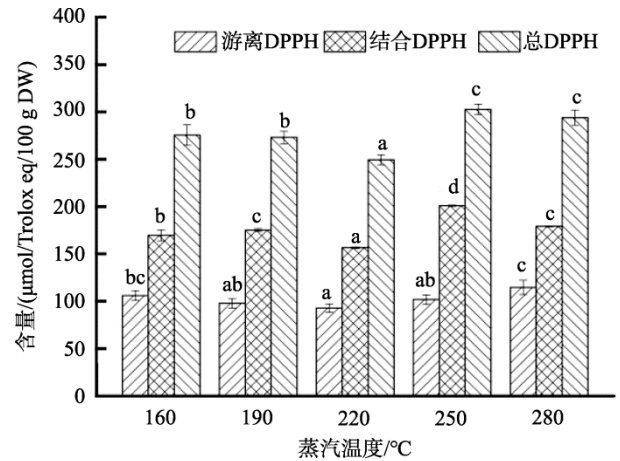


图 3 蒸汽温度对麸皮多酚 DPPH⁺·自由基清除能力的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of steam temperature on the scavenging ability of bran polyphenol DPPH⁺·Free radicals($n=3$)

(2)蒸汽温度对麸皮多酚 ABTS⁺·自由基清除能力的影响

图 4 为蒸汽温度对麸皮多酚 ABTS⁺·的影响。游离多酚 ABTS⁺·自由基清除能力随着蒸汽温度的升高先增加后降低, 蒸汽温度为 190 °C 时, 游离多酚 ABTS⁺·自由基清除能力最强, 为 481.07 $\mu\text{mol/Trolox eq/100 g DW}$ 。结合多酚 ABTS⁺·自由基清除能力随着蒸汽温度的增加整体呈先下降后上升的趋势, 蒸汽温度为 280 °C 时, 结合多酚 ABTS⁺·自由基清除能力最强, 为 674.94 $\mu\text{mol/Trolox eq/100 g DW}$ 。对于总酚 ABTS⁺·自由基清除能力随着蒸汽温度的升高先升高后降低, 蒸汽温度为 220 °C 时, 总酚 ABTS⁺·自由基清除能力最强, 为 1106.69 $\mu\text{mol/Trolox eq/100 g DW}$ 。

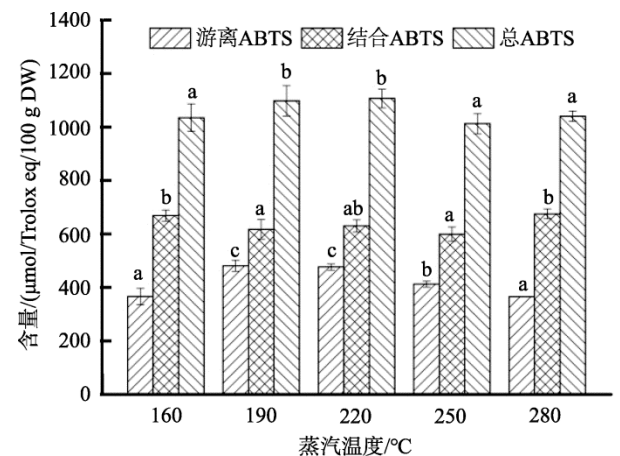


图 4 蒸汽温度对麸皮多酚 ABTS⁺·的影响($n=3$)

Fig.4 Effectsof steam temperature on bran polyphenol ABTS⁺·($n=3$)

(3)蒸汽温度对麸皮多酚氧自由基吸收能力(ORAC)能力的影响

图 5 为蒸汽温度对麸皮多酚氧自由基吸收能力的影

响。游离多酚氧自由基吸收能力相差不大,蒸汽温度为160℃时,游离多酚氧自由基吸收能力最高,为316.06 $\mu\text{mol}/\text{Trolox eq}/100\text{ g DW}$,除此之外,蒸汽温度对其余几组的游离多酚氧自由基吸收能力没有显著性差异($P > 0.05$)。蒸汽温度对结合多酚氧自由基吸收能力的影响也不大,蒸汽温度为280℃时,结合多酚氧自由基吸收能力最强,为346.87 $\mu\text{mol}/\text{Trolox eq}/100\text{ g DW}$ 。总多酚氧自由基吸收能力随着蒸汽温度的升高,先降低后上升,蒸汽温度为220℃时,总多酚氧自由基吸收能力最弱,蒸汽温度为280℃时,总多酚氧自由基吸收能力最强,为651.37 $\mu\text{mol}/\text{Trolox eq}/100\text{ g DW}$ 。

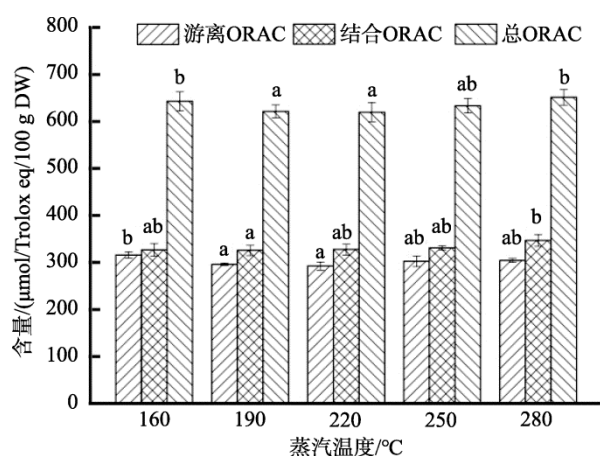


图5 蒸汽温度对麸皮多酚氧自由基吸收能力的影响($n=3$)

Fig.5 Effects of steam temperature on the absorption capacity of bran polyphenol oxygen free radicals($n=3$)

2.2 处理时间对麸皮酚类物质及抗氧化活性的影响

2.2.1 处理时间对麸皮多酚的影响

由图6可以看出,游离多酚、结合多酚和总多酚含量均随着处理时间的增加先上升后下降,处理时间为90 s时游离多酚和总多酚含量最高,分别为166.90、349.01 $\text{mg}/\text{GA eq}/100\text{ g DW}$,处理时间为60 s时,结合多酚含量最高,为192.45 $\text{mg}/\text{GA eq}/100\text{ g DW}$ 。这可能是因为过热蒸汽处理增强了从样品中提取酚类的能力,从而增加了检出量,LU等^[28]和CLARA等^[29]也得出和本研究一样的结论。但是WU等^[13]猜测,过热蒸汽加工导致糙米酚含量增加的另一个原因是,在过热蒸汽处理时,会在样品的表面形成无氧环境,这样会对酚类物质起到保护作用。STEFAN等^[30]的研究也证实这种猜测,STEFAN研究了热风干燥和过热蒸汽干燥对酒糟酚含量的影响,结果发现过热蒸汽处理干燥酒糟后,酚含量显著高于热风干燥。WU等^[31]的研究也表明,随着过热蒸汽处理时间的增加,游离酚、结合酚和总多酚含量均呈降低的趋势,这是因为随着处理时间的增加,会导致酚类物质降解。

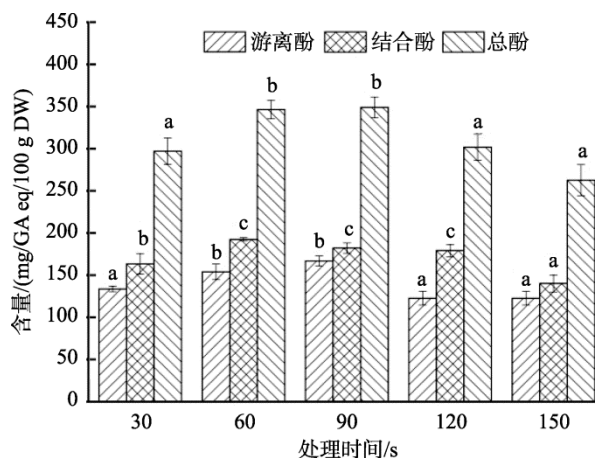


图6 处理时间对多酚的影响($n=3$)

Fig.6 Effects of treatment time on polyphenols($n=3$)

2.2.2 处理时间对麸皮黄酮的影响

由图7可知,游离黄酮、结合黄酮和总黄酮含量均随着处理时间的增加整体先上升后下降再上升,处理时间为90 s时游离黄酮含量最高,为263.10 $\text{mg}/\text{RU eq}/100\text{ g DW}$ 。处理时间为60 s时结合黄酮和总黄酮含量最高,分别为327.41、575.64 $\text{mg}/\text{RU eq}/100\text{ g DW}$,显著高于其他组($P < 0.05$)。因为黄酮属于热敏性物质,所以处理时间为60 s时,总黄酮含量达到峰值,而后随着处理时间的增加而下降,这是因为随着处理时间的增加,黄酮会发生降解。这与WANG等^[26]的研究结果类似,处理时间的增加,总黄酮含量总体呈下降趋势。

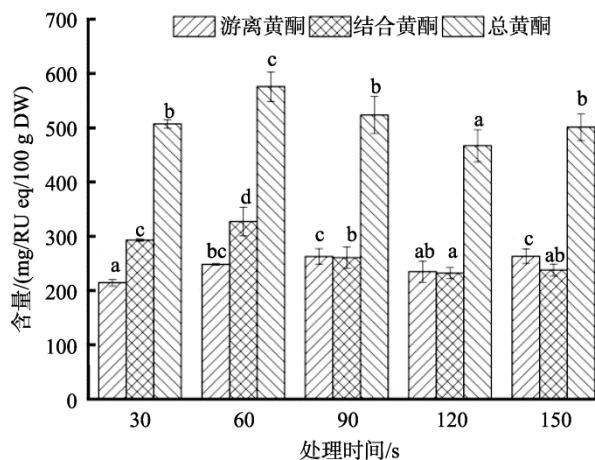


图7 处理时间对黄酮的影响($n=3$)

Fig.7 Effects of treatment time on flavonoids($n=3$)

2.2.3 处理时间对麸皮抗氧化活性的影响

(1) 处理时间对麸皮多酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力的影响

处理时间对游离多酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力影响不大,但是会出现不同的波动。结合多酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力随着处理时间的增加先下降后上升,处理时间为30 s

时, 结合多酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力最强, 为 $187.18 \mu\text{mol/Trolox eq}/100 \text{ g DW}$, 显著高于其他组 ($P < 0.05$)。但是, 处理时间对总多酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

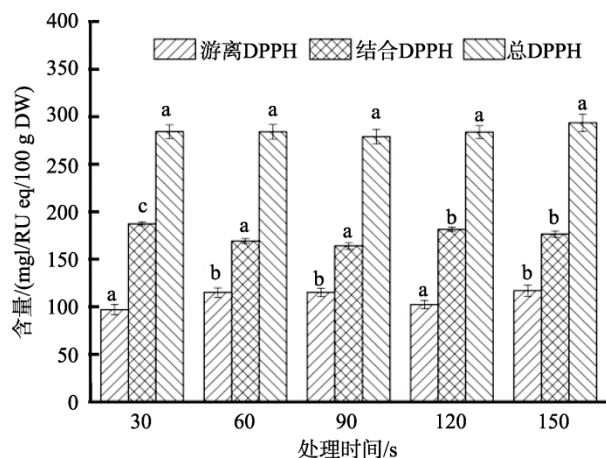


图8 处理时间对多酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力的影响 ($n=3$)

Fig.8 Effects of treatment time on the scavenging ability of polyphenol $\text{DPPH}^{\cdot}$ Free radicals ($n=3$)

(2) 处理时间对麸皮多酚 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力的影响

由图9可以看出, 处理时间为60 s时, 游离多酚 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力最强, 为 $499.74 \mu\text{mol/Trolox eq}/100 \text{ g DW}$ 。处理时间对结合多酚 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力没有显著性差异 ($P > 0.05$)。处理时间为120 s时, 总多酚 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力最低, 为 $1010.48 \mu\text{mol/Trolox eq}/100 \text{ g DW}$ 。

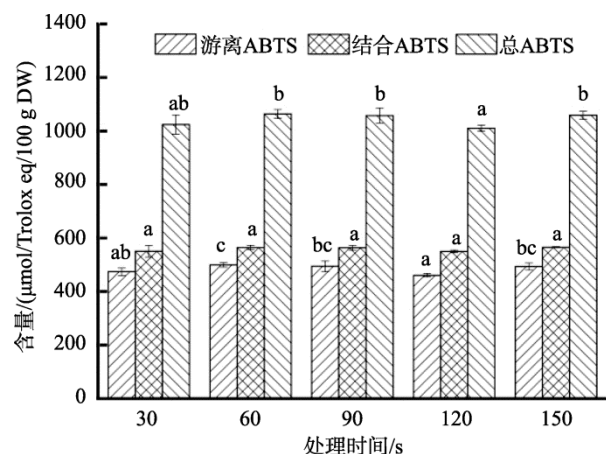


图9 处理时间对多酚 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力的影响 ($n=3$)

Fig.9 Effects of treatment time on the ability of polyphenol $\text{ABTS}^{\cdot}$ Free radical scavenging ($n=3$)

(3) 处理时间对麸皮多酚氧自由基吸收能力 (ORAC) 的影响

由图10可以看出, 处理时间为120 s时, 游离多酚氧

自由基吸收能力最低, 为 $289.19 \mu\text{mol/Trolox eq}/100 \text{ g DW}$, 显著低于其他几组 ($P < 0.05$)。而处理时间对结合多酚氧自由基吸收能力没有显著性差异 ($P > 0.05$)。总多酚氧自由基吸收能力的变化与游离多酚氧自由基吸收能力的变化趋势类似, 处理时间为120 s, 总多酚氧自由基吸收能力最低, 为 $610.20 \mu\text{mol/Trolox eq}/100 \text{ g DW}$ 。上述结果表明, 麸皮中的酚类物质含量和抗氧化活性的变化趋势并不完全一致, 这可能是麸皮中的非酚类物质导致的, 如美拉德反应产物^[32]。

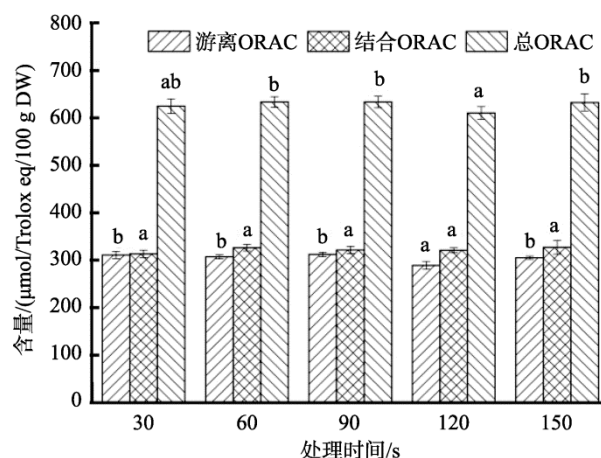


图10 处理时间对多酚氧自由基吸收能力的影响 ($n=3$)

Fig.10 Effectsof treatment time on the absorption capacity of polyphenol oxygen free radicals ($n=3$)

3 结论与讨论

过热蒸汽处理的条件(包括蒸汽温度和处理时间)对麸皮的酚类物质及抗氧化活性的影响有显著性差异。由上述分析可知, 随着蒸汽温度的升高, 麸皮总酚含量先降低后升高, 温度为 280°C 时, 总酚含量最高; 黄酮含量和总酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力先降低后上升再下降, 温度为 250°C 时, 总黄酮含量和总 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 自由基清除能力均最高; 而总酚 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力先升高后降低, 温度为 220°C 时, 总酚 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力最强; 不同蒸汽温度的总酚氧自由基吸收能力相差不大。随着处理时间的增加, 总酚含量先上升后降低, 处理时间为90 s时, 总酚含量最高, 显著高于其他组 ($P < 0.05$); 黄酮含量先上升后降低再上升, 处理时间为60 s时, 总黄酮含量最高; 而不同处理时间的总酚 $\text{DPPH}^{\cdot}$ 、 $\text{ABTS}^{\cdot}$ 自由基清除能力及总酚氧自由基吸收能力相差不大。综上, 不同过热蒸汽温度处理麸皮时, 麸皮中的酚类物质含量会出现一定的波动; 而较短的过热蒸汽处理时间处理麸皮时, 可以提高麸皮中的酚类物质含量和抗氧化活性。

参考文献

- [1] 苗宇叶, 姚亚亚, 刘阳星月, 等. 超高静压改性麦麸对其功能性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(19): 164–171.
- MIAO ZY, YAO YY, LIU YXY, *et al.* Effect of ultra high hydrostatic pressure on functional properties of wheat bran [J]. Food Sci, 2019, 40(19): 164–171.
- [2] LEO S, FRANKIE P, KATHRYN O, *et al.* Wheat bran: its composition and benefits to health, a European perspective [J]. Int J Food Sci Nutri, 2012, 63(8): 1001–1013.
- [3] ISABELLE EJAF, OLIVIER L, WIM SV, *et al.* Effects of a wheat bran extract containing arabinoxylan oligosaccharides on gastrointestinal health parameters in healthy adult human volunteers: A double-blind, randomised, placebo-controlled, cross-over trial [J]. British J Nutri, 2012, 108(12): 2229–2242.
- [4] 李治. 不同处理方式对小麦麸皮理化性质影响的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- LI Z. Effects of different treatments on physicochemical properties of wheat bran [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.
- [5] 汪丽萍, 刘姣, 刘艳香, 等. 加工工艺对麸皮酶处理全麦挂面品质影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(5): 8–13.
- WANG LP, LIU J, LIU YX, *et al.* Study on the effect of processing technology on the quality of bran enzyme treated whole wheat noodles [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2017, 25(5): 8–13.
- [6] 吕春月, 杨庆余, 刘璐, 等. 微波联合酶法对小麦麸皮品质改良及结构特性影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 21–28.
- LU CY, YANG QY, LIU L, *et al.* Effect of microwave combined with enzymatic method on quality improvement and structural characteristics of wheat bran [J]. Food Ind Sci Technol, 2020, 41(21): 21–28.
- [7] KARIMI F. Applications of superheated steam for the drying of food products [J]. Int Agrophys, 2010, 24(2): 195–204.
- [8] HU YM, WANG LJ, LI ZG. Superheated steam treatment on wheat bran: Enzymes inactivation and nutritional attributes retention [J]. LWT, 2018, 91: 446–452.
- [9] 罗舜菁, 胡迪, 黄克愁, 等. 过热蒸汽处理对米糠营养性质和储藏稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 213–221.
- LUO SQ, HU D, HUANG KC, *et al.* Effects of superheated steam treatment on nutritional properties and storage stability of rice bran [J]. Chin J Food Sci, 2020, 20(5): 213–221.
- [10] SATOU K, TAKAHASHI Y, YOSHII Y. Effect of superheated steam treatment on enzymes related to lipid oxidation of brown rice [J]. Food Sci Technol Res, 2010, 16(1): 93–97.
- [11] NASEER AB, IDRESS AW, AFSHAN MH, *et al.* Effect of extrusion on the physicochemical and antioxidant properties of value added snacks from whole wheat (*Triticum aestivum* L.) flour [J]. Food Chem, 2019, 15(3): 22–32.
- [12] HU QW, CHEN YY, JIAO QY, *et al.* Polyphenolic compounds from *Malus hupehensis* and their free radical scavenging effects [J]. Nat Prod Res, 2018, 32(18): 2152–2158.
- [13] WU J, MCCLEMENTS DJ, CHEN J, *et al.* Improvement in nutritional attributes of rice using superheated steam processing [J]. J Funct Food, 2016, 24: 338–350.
- [14] ADOM KK, SORRELLS ME, LIU RH. Phytochemical profiles and antioxidant activity of wheat varieties [J]. J Agric Food Chem, 2003, 51(26): 7825–7234.
- [15] NACZK M, SHAHIDI F. The effect of methanol-ammonia-water treatment on the content of phenolic acids of canola [J]. Elsevier, 1989, 31(2): 159–164.
- [16] SUN J, CHU YF, WU XZ, *et al.* Antioxidant and antiproliferative activities of common fruits [J]. J Agric Food Chem, 2002, 50(25): 7449–7454.
- [17] DEWANTO V, WU XZ, ADOM KK, *et al.* Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity [J]. J Agric Food Chem, 2002, 50(10): 3010–3040.
- [18] JIA ZS, TANG MC, WU JM. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals [J]. Food Chem, 1999, 64(4): 555–559.
- [19] 蔡亨, 汪丽萍, 刘明, 等. 浸泡时间对绿豆浸泡液中多酚及抗氧化活性的影响[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(5): 9–12.
- CAI T, WANG LP, LIU M, *et al.* Effect of soaking time on polyphenols and antioxidant activity in mung bean soaking solution [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2014, 22(5): 9–12.
- [20] VAIDA Š, ISABEL J, JORDI R, *et al.* Rye and wheat bran extracts isolated with pressurized solvents increase oxidative stability and antioxidant potential of beef meat hamburgers [J]. J Food Sci, 2016, 81(2): 519–527.
- [21] YAN X, YE R, CHEN Y. Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble-fiber polysaccharides from wheat bran [J]. Food Chem, 2015, 180(1): 106–115.
- [22] 梁亚静, 韩飞, 梁盈, 等. 萌发对芸豆酚类物质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 142–146.
- LIANG YJ, HAN F, LIANG Y, *et al.* Effects of germination on phenolic compounds and antioxidant activities in kidney beans [J]. Food Ind Sci Technol, 2015, 36(16): 142–146.
- [23] TAO W, HE FL, CHEN GB. Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review [J]. J Funct Foods, 2014, 7(4): 101–111.
- [24] WAHIDU ZR, BHAT TA. Effect of superheated steam roasting on the phenolic antioxidant properties of cocoa beans [J]. J Food Proc Pres, 2014, 38(4): 1932–1938.
- [25] 吴晓江, 范浩伟, 付桂明, 等. 过热蒸汽处理对苦荞粉理化性质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 2020, DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025748
- WU XJ, FAN HW, FU GM, *et al.* Effect of superheated steam treatment on physicochemical properties of Tartary buckwheat powder [J]. Food Ferment Ind, 2020, DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025748
- [26] TZU CW, BANG YC, YING PS, *et al.* Influences of superheated steaming and roasting on the quality and antioxidant activity of cooked sweet potatoes [J]. Int J Food Sci Technol, 2012, 47(8): 1720–1727.

- [27] 寇梦茹. 全谷物糙米固体饮料的制备及储藏性质的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
KOU MR. Study on the preparation and storage properties of whole grain brown rice solid drink [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [28] LU YJ, DEVANAND L. Influence of gelatinization on the extraction of phenolic acids from wheat fractions [J]. Food Chem, 2016, 194(3): 1138–1142.
- [29] CLARA F, CRITIANO P, ANTONIETTA B, *et al.* Effect of processing and cooking on phenolic acid profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta enriched with debranning fractions of wheat [J]. Food Chem, 2009, 119(3): 1023–1029.
- [30] STEFAN C, MARIA ESM, MARIA CFA. Protein content and antioxidant activity of distillers' spent grain dried at 150 °C with superheated steam and hot air [J]. Dry Technol, 2012, 30(11–12): 1292–1296.
- [31] WU JY, DAVID JM, CHEN J, *et al.* Improvement in storage stability of lightly milled rice using superheated steam processing [J]. J Cere Sci, 2016, 71(10): 130–137.
- [32] LIU LY, ZHAO ML, LIU X, *et al.* Effect of steam explosion-assisted extraction on phenolic acid profiles and antioxidant properties of wheat bran [J]. J Sci Food Agric, 2016, 96(10): 3484–3491.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



叶国栋, 硕士研究生, 主要研究方向为食品资源开发及应用。

E-mail: yeguodong5201314@163.com



汪丽萍, 研究员, 主要研究方向为粮食加工与安全。

E-mail: wlp@ags.ac.cn

沈汪洋, 教授, 主要研究方向为食品资源开发及利用。

E-mail: whwangyangshen@126.com