

影响蛋白质抗氧化活性的因素

Factors affecting antioxidant activities of proteins

朱振宝 王艳斐 易建华

ZHU Zhen-bao WANG Yan-fei YI Jian-hua

(陕西科技大学食品与生物工程学院, 陕西 西安 710021)

(School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of
Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

摘要:以桃仁分离蛋白(PKPI)、大豆分离蛋白(SPI)、乳清分离蛋白(WPI)、酪蛋白(CA)为研究对象,以 6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸(Trolox)为对照,测定其 DPPH 自由基清除率,研究蛋白质浓度、温度、热处理时间、盐离子及其浓度、pH 对蛋白质抗氧化活性影响。结果表明:蛋白质浓度 0.05~2.00 g/100 mL,4 种蛋白质抗氧化活性随其浓度的增大而增强。温度对蛋白质抗氧化能力有不同程度影响,且当温度为 40,40,30,70 °C 时,PKPI、WPI、CA、SPI 分别达到最大抗氧化活性。热处理时间对 SPI、CA、PKPI 抗氧化活性影响较小,但 WPI 抗氧化活性随热处理时间的延长而增大。NaCl、CaCl₂ 浓度 0~10 mmol/L 时,其对 SPI、CA 抗氧化活性影响较小;PKPI 抗氧化活性受 NaCl 影响较小,而 CaCl₂ 浓度增大降低了 PKPI 抗氧化活性;WPI 抗氧化活性随着 NaCl 和 CaCl₂ 浓度的增大而减小,且 CaCl₂ 对 WPI 抗氧化活性影响大于 NaCl。4 种蛋白质抗氧化活性都受 pH 影响,pH 2.0 时,其抗氧化能力高于 pH 8.0。

关键词:桃仁分离蛋白;大豆分离蛋白;乳清分离蛋白;酪蛋白;抗氧化

Abstract: The effects of protein concentration, temperature, heating time, salt ions and their concentration, and pH on the antioxidant activities of proteins including peach kernel protein isolates(PKPI), soy protein isolates (SPI), whey protein isolates (WPI), casein(CA) were investigated by determining their DPPH free radical scavenging capacities, and taking 6-Hydroxy-2, 5, 7, 8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) as the control. The results showed that at the concentrations of 0.05~2.00 g/100 mL, the antioxidant activities of these proteins increased with the increase in the concentration; Temperature had different effects on proteins' antioxidant capacities

with PKPI, WPI, CA, and SPI obtaining the best antioxidant activities at 40, 40, 30 and 70 °C, respectively. Little effects of heating time were observed on SPI, CA and PKPI antioxidant activities at their optimal temperatures, respectively, while increasing heating time somehow improved the antioxidant activity of WPI at 40 °C. 0~10 mmol/L, NaCl and CaCl₂ had less impact on the antioxidant activities of CA and SPI than that of WPI. Moreover, the effect of CaCl₂ on the decreased antioxidant capability of WPI was bigger than NaCl. NaCl had little influence on the antioxidant capacity of PKPI. However, increasing CaCl₂ reduced PKPI's antioxidant activity. These proteins' antioxidant activities were greatly influenced by pH. And at pH 2.0, their antioxidant capacities were higher than those at pH 8.0.

Keywords: peach kernel protein isolates; soy protein isolates; whey protein isolates; casein; antioxidant activity

抗氧化剂能防止或延缓食品氧化,提高食品的稳定性和延长货架期,是常用的食品添加剂。抗氧化剂分为天然抗氧化剂和合成抗氧化剂两类,除了抗氧化维生素(如 V_C、V_E),目前天然抗氧化剂的应用多数处于研究阶段^[1]。丁基羟基茴香醚(BHA)、二丁基羟基甲苯(BHT)、没食子酸丙酯(PG)和叔丁基对苯二酚(TBHQ)是目前应用较广泛的合成抗氧化剂,这些抗氧化剂具有良好的抗氧化性能,但一直以来其食品安全性受到质疑。有研究^[2]曾对人工合成的 TBHQ、BHT、BHA 进行高剂量动物试验,结果表明,TBHQ、BHT、BHA 会明显引起肝肿大。因此,寻找高效、低毒且能够清除自由基的抗氧化剂是近年来医药、食品、化工等领域研究的热点^[3]。天然抗氧化剂由于具有安全性高、无副作用等特点,倍受消费者关注。研究^[4]显示,作为食品主要营养成分的蛋白质具有抗氧化活性。蛋白质具有乳化、胶凝、起泡、增稠等功能特性,作为食品重要基料,广泛应用于食品。有研究^{[5]293-298}表明,蛋白质功能特性受物理因素如 pH、温度、离子强度以及蛋白质浓度的影响。而这些因素是否影响其抗氧化活性,目前尚未见报道。

基金项目:陕西省自然科学基金(编号:2015JM3085)

作者简介:朱振宝(1971—),男,陕西科技大学副教授,博士。

E-mail: zhuzhenbao@sust.edu.cn

收稿日期:2016-01-25

本研究拟以桃加工业副产品—桃仁分离蛋白以及食品常用蛋白质,如乳清分离蛋白(WPI)、酪蛋白(CA)、大豆分离蛋白(SPI)为研究对象,测定其 DPPH 自由基清除能力,探究蛋白质种类及浓度、pH、温度、离子强度等物理因素对蛋白质抗氧化活性的影响,以期为蛋白质作为天然抗氧化剂的合理开发和利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

乳清分离蛋白(Davisc WPI95, WPI):蛋白质含量为 97.6%,乳清分离蛋白中的主要蛋白成分为: β -LG(55%~61%), α -LG(19%~22%),牛血清白蛋白(6%~8%),上海福诺食品有限公司;

大豆分离蛋白(SPI):蛋白质含量为 90%,水分 6.0%,脂肪 1.5%,上海娇源实业有限公司;

酪蛋白(CA):新疆伊犁特克斯县科瑞乳品开发有限公司;

桃仁分离蛋白(PKPI):实验室自制;

光谱透析袋:截留分子量 2 000 D,美国光谱医学公司;
无水氯化钙、氯化钠:分析纯,天津市天力化学试剂有限公司;

DPPH 自由基、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸(Trolox)标品(97%):美国 Sigma 公司。

1.1.2 主要仪器

冷冻干燥机:ALPHA1-2/LD-2 型,德国 Martin Christ 公司;

精密 pH 计:PB-10 型,赛多利斯科学仪器北京有限公司;

电子天平:BS323S 型,赛多利斯科学仪器北京有限公司;

可见光分光光度计:7200 型,尤尼柯上海仪器有限公司;
磁力搅拌器:84-1 型,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;

台式离心机:TDL-40B 型,上海安亭科学仪器厂;

旋涡混合器:QI-901 型,海门市其林贝尔仪器制造有限公司;

旋转蒸发仪:RE-52A 型,上海亚荣生化仪器厂。

1.2 试验方法

1.2.1 PKPI 制备 参考文献[6]。将桃仁浸泡去皮,35℃下干燥并粉碎,经石油醚脱脂,挥发溶剂后过 60 目筛,低温干燥得桃仁脱脂粉。将桃仁脱脂粉与蒸馏水 1:10(g/mL)混合,用 0.5 mol/L NaOH 调 pH 至 8.0,室温搅拌提取 1 h,4 000 r/min 离心 20 min,沉淀重复提取 2 次,合并 3 次所得上清液。上清液用 0.5 mol/L HCl 溶液调节 pH 至等电点(pI=4.7),4℃下沉淀 1 h,用蒸馏水洗涤沉淀 3 次,0.5 mol/L NaOH 调 pH 至 7.0,搅拌使沉淀复溶后透析。PKPI 化学成分为:水分 4.78%,灰分 1.11%,蛋白 86.83%,脂肪 0.98%。

1.2.2 蛋白质透析 蛋白质使用前进行透析处理,以减少蛋白质中盐离子杂质对其抗氧化活性影响。将蛋白质复溶后倒入透析袋中,在 4℃下透析 48 h,每 6 h 换一次水。然后将透析完的蛋白溶液旋转浓缩,最后进行冷冻干燥,得到粗纯化后的蛋白粉末保存,备用。

1.2.3 Trolox 清除 DPPH 自由基标准曲线的绘制 根据文献[7],修改如下:用甲醇配制浓度为 6×10^{-5} mol/L 的 DPPH 自由基溶液,避光保存备用。分别取不同浓度的 Trolox 甲醇溶液 0.3 mL 和 DPPH 自由基溶液 2.7 mL 于试管中,摇匀,在室温(20℃)避光下放置 60 min 后测定波长 517 nm 处的吸光值 A_s ,同时,测 0.3 mL 样品溶液和 2.7 mL 甲醇混合液的吸光值 A_x ,及 0.3 mL 甲醇和 2.7 mL DPPH 自由基溶液混合液的吸光值 A_0 。平行测定 3 次,清除率按式(1)计算:

$$y = 1 - \frac{A_s - A_x}{A_0} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:

y——清除率,%;

A_s ——Trolox 溶液+DPPH 自由基溶液混合液的吸光值;

A_x ——Trolox 溶液+甲醇混合液的吸光值;

A_0 ——甲醇+DPPH 自由基溶液混合液的吸光值。

得 Trolox 清除 DPPH 自由基标准曲线方程为: $y = 0.3725x + 0.2219$ ($R^2 = 0.9962$,线性范围:0~50 μ mol/L)。

1.2.4 蛋白质及其浓度对 DPPH 自由基清除能力的影响 分别配制不同浓度梯度 0.05,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,1.00,1.50,2.00 g/100 mL 的 PKPI、SPI、WPI 和 CA 溶液,参照方法 1.2.3,于室温(20℃)下测定 DPPH 自由基清除率。

1.2.5 盐离子及其浓度对蛋白质清除 DPPH 自由基能力的影响 分别配制 0.0,0.1,0.5,1.0,5.0,10.0 mmol/L 的 NaCl 和 CaCl₂ 溶液,将 1.00 g/100 mL PKPI、SPI、WPI、CA 溶解,参照方法 1.2.3,于室温(20℃)下研究 Na⁺ 和 Ca²⁺ 及其不同浓度对蛋白质清除 DPPH 自由基的影响。

1.2.6 热处理温度对蛋白质 DPPH 自由基清除能力的影响 分别用蒸馏水将 PKPI、SPI、WPI 和 CA 配制成 1.00 g/100 mL 的溶液,吸取 0.3 mL 于试管中,分别在 20,30,40,50,60,70,80,90℃水浴处理 10 min,自来水急速冷却至室温 20℃,参照方法 1.2.3,测定清除率,探究热处理温度对蛋白质 DPPH 自由基清除能力的影响,并获取蛋白质清除率最高的热处理温度。

1.2.7 加热时间对蛋白质 DPPH 自由基清除能力的影响 在上述获得的蛋白质抗氧化活性最高的热处理温度下,将 1.00 g/100 mL PKPI、SPI、WPI、CA 溶液分别加热 5,10,15,20,25 min,然后急速冷却并放至室温,参照方法 1.2.3,测定 DPPH 自由基清除率,研究适宜热处理温度下加热时间对蛋白质抗氧化活性的影响。

1.2.8 pH 对蛋白质 DPPH 自由基清除能力的影响 分别将 1.00 g/100 mL PKPI、SPI、WPI、CA 溶液用 0.1,1.0 mol/L HCl 溶液和 0.1,1.0 mol/L NaOH 溶液调 pH 至 2.0 和 8.0,

参照方法 1.2.3,测其清除率,研究 pH 对 4 种蛋白清除 DPPH 自由基能力的影响。

2 结果与讨论

2.1 蛋白质及其浓度对 DPPH 自由基清除能力的影响

不同浓度 PKPI、SPI、WPI、CA 等同 Trolox DPPH 自由基清除能力见图 1。由图 1 可知,这 4 种蛋白质都具有抗氧化活性。研究^[8]表明,SPI、WPI、CA 等蛋白质能清除自由基,是一种天然抗氧化剂,该研究与前人研究结论相一致。图 1 还表明,蛋白质种类及浓度影响其抗氧化活性,蛋白质抗氧化活性随其浓度的增大而提升;蛋白质浓度较低时(≤ 0.50 g/100 mL),其活性大小顺序为:WPI>SPI>CA>PKPI;而随着浓度继续增大,SPI 与 CA 的抗氧化活性快速提升,而 WPI 与 PKPI 的抗氧化活性提升缓慢。可见,适量提高蛋白质浓度可在一定程度提高其抗氧化活性。

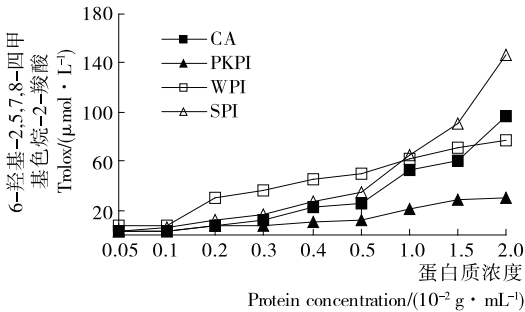


图 1 PKPI、SPI、WPI、CA 清除 DPPH 自由基能力的比较
Figure 1 Comparison of the DPPH radical scavenging capacities of PKPI, SPI, WPI and CA

2.2 热处理温度对蛋白质清除 DPPH 自由基能力的影响

在不同热处理温度下 PKPI、SPI、WPI、CA 4 种蛋白质的 DPPH 自由基清除能力见图 2。由图 2 可知,随着温度的升高,蛋白质抗氧化活性总体呈现先升高后降低的趋势。蛋白质含有的氨基酸基团中具有清除自由基能力的主要是疏水性氨基酸,如半胱氨酸、脯氨酸等,这些氨基酸基团常被包裹于分子内部^[9-10],而适度的热处理可将包裹于蛋白质分子内部的疏水氨基酸基团暴露于水相,促使蛋白质的自由基清除能力有所提高^[11]。李旭敏等^[12]研究表明,加热处理使酪蛋白的疏水性有不同程度提高;Tong 等^[13]研究进一步证实,乳清蛋白受热时,蛋白链部分展开,增大了巯基的暴露,其抗氧化能力提高。然而热处理促进疏水氨基酸暴露的同时,也促进了疏水氨基酸相互作用,这种作用有可能导致其抗氧化活性降低。可见,适度热处理有利于提高蛋白质抗氧化性能。图 2 还表明,热处理效应对不同蛋白质的抗氧化活性影响差异较大,其中 WPI、PKPI 抗氧化活性受温度影响较大,而 CA、SPI 受温度影响较小,这可能与蛋白质结构有关。研究^[14]表明,PKPI 的主要成分为小分子清蛋白,与乳清蛋白有相似结构,加热可能有利于蛋白质分子展开,从而影响了其抗氧化性;与 WPI、PKPI 不同,SPI 主要为球蛋白,分子内部非极性基团较多,分子结构比较紧密,这种空间结构有可能导致该蛋白对热处理相对稳定,结构不易展开;而 CA 分

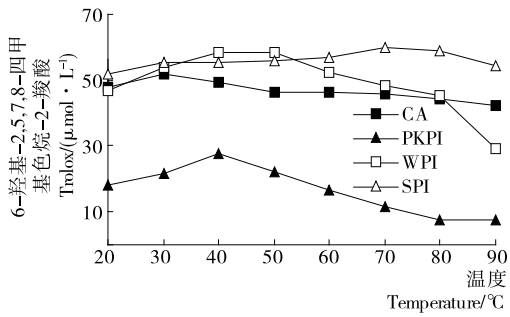


图 2 不同热处理温度下 PKPI、SPI、WPI、CA 清除 DPPH 自由基能力的比较
Figure 2 Comparison of the DPPH radical scavenging capacities of PKPI, SPI, WPI and CA at different temperatures

子柔韧性很强,热处理对其结构影响较小。由图 2 可得,热处理温度分别为 40、40、30、70 °C 时,WPI、PKPI、CA、SPI 抗氧化活性在试验条件下达到最高,上述温度分别为这 4 种蛋白质的适宜处理温度。

2.3 加热时间对蛋白质清除 DPPH 自由基能力的影响

根据 2.2 研究结果,在蛋白质适宜处理温度下,探究加热时间对蛋白质抗氧化活性影响,结果见图 3。由图 3 可知,PKPI 在其适宜的处理温度下,蛋白质的抗氧化活性随加热时间的延长略有增大;而其他 3 种蛋白在其适宜的处理温度下,加热时间对其 DPPH 自由基清除能力影响不明显,表现为图线趋势平缓。这种差异可能与其结构改变难易程度有关,其机理有待进一步研究。图 3 同时显示,蛋白质浓度为 1.00 g/100 mL 时,这 4 种蛋白质抗氧化活性大小为 SPI>WPI>CA>PKPI,与 2.1 蛋白浓度为 1.00 g/100 mL 研究结果相一致。

2.4 盐离子及其浓度对蛋白质清除 DPPH 自由基能力的影响

盐的种类和离子强度是影响蛋白质特性的因素之一。钠盐是食品中最为常见的盐,而钙盐则以营养强化的目的广泛应用于食品体系中^[15],故此探讨两种常见盐是否对蛋白质抗氧化活性有影响。

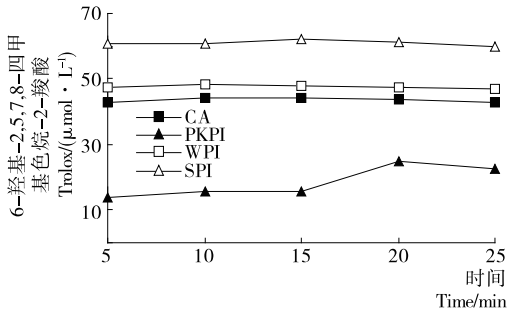


图 3 不同加热时间下 PKPI、SPI、WPI、CA 清除 DPPH 自由基能力的比较
Figure 3 Comparison of the DPPH radical scavenging capacities of PKPI, SPI, WPI and CA at different heating time

于蛋白质溶液中添加 NaCl、CaCl₂，并调整其浓度，探究不同盐离子及其强度对蛋白质抗氧化活性的影响，结果见图 4、5。图 4、5 同时显示，盐离子及其浓度对蛋白质抗氧化活性影响存在差异。对于 SPI，随着钠离子强度(钠盐浓度)提升，其 DPPH 自由基清除能力略有增大，而随着钙离子浓度的增大，其 DPPH 自由基清除能力略有降低；对于 CA，随 NaCl 浓度增大，其 DPPH 清除能力先增大后降低，而 CaCl₂ 浓度的增大，其抗氧化活性呈现先降低后增大最后又降低的趋势，但在该研究的离子浓度范围内，两种离子对其 DPPH 清除能力影响较小，CA 抗氧化活性总体维持在 50 μmol/L Trolox 左右；对于 PKPI，钠盐对其抗氧化活性影响较小，但随着钙盐浓度增大，PKPI 抗氧化活性呈现先升高后降低的趋势；WPI 抗氧化活性受盐离子影响较大，且钙盐的影响大于钠盐，例如，于 WPI 溶液添加 10 mmol/L NaCl，该蛋白质 DPPH 自由基清除能力相当于 39.1 μmol/L Trolox，而溶液离子强度为 10 mmol/L CaCl₂，WPI 抗氧化活性相当于 3.5 μmol/L Trolox。可见，盐离子能屏障蛋白质表面电荷，对蛋白质表面电荷的特性产生不同影响，从而影响其抗氧化性。

2.5 pH 对蛋白质清除 DPPH 自由基能力的影响

调节蛋白质溶液的 pH 至 2.0 或 8.0，测定 4 种蛋白对 DPPH 自由基的清除率见图 6。SPI、CA、PKPI、WPI 等电点(pI)在 pH 4~5 左右，pH<pI(例如 pH 2.0)，这 4 种蛋白质都带有正电荷，pH>pI(例如 pH 8.0)，蛋白质带有负电荷。

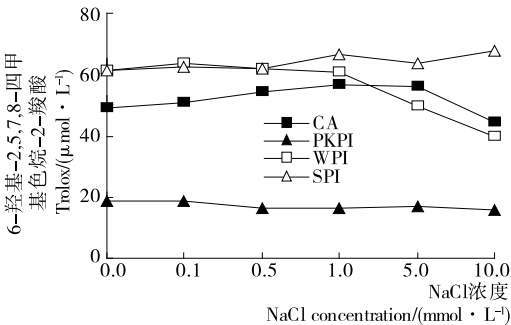


图 4 NaCl 对 PKPI、SPI、WPI、CA 清除 DPPH 自由基能力的影响

Figure 4 Effects of NaCl on the DPPH radical scavenging capacities of PKPI, SPI, WPI and CA

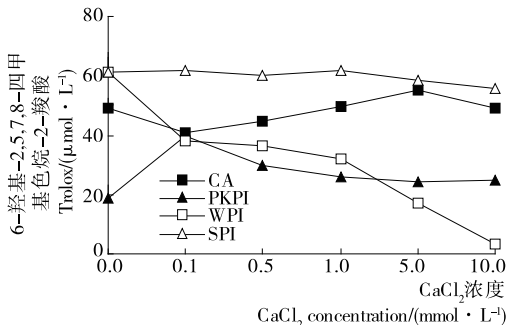


图 5 CaCl₂ 对 PKPI、SPI、WPI、CA 清除 DPPH 自由基能力的影响

Figure 5 Effects of CaCl₂ on the DPPH radical scavenging capacities of PKPI, SPI, WPI and CA

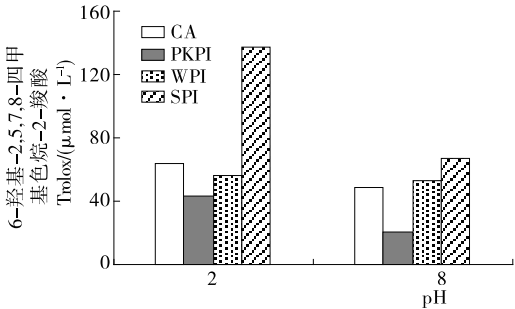


图 6 pH 对 PKPI、SPI、WPI、CA 清除 DPPH 自由基能力的影响

Figure 6 Effects of pH on the DPPH radical scavenging capacities of PKPI, SPI, WPI and CA

由图 6 可知，在酸性条件下，4 种蛋白的 DPPH 自由基清除能力都高于碱性条件，说明蛋白质带电特性影响其抗氧化活性；另外，与弱碱性条件(如 pH 8.0)相比，在较强酸性条件下(如 pH 2.0)，高静电电荷引起的分子内电荷排斥力导致蛋白质分子的肿胀与展开，暴露其疏水基团^{[5]300-301}，从而促进其抗氧化活性。由图 6 还可以看出，pH 对 WPI、CA 抗氧化活性影响较小，对 PKPI、SPI 影响较大，如上所述，这可能与其结构伸展的难易程度有关。

3 结论

PKPI、WPI、CA、SPI 均有不同程度清除 DPPH 自由基的能力，表明均具有抗氧化活性，且随蛋白质浓度的增大，其抗氧化活性增强；温度对蛋白质抗氧化能力有一定程度地影响，40, 40, 30, 70 °C 时，PKPI、WPI、CA、SPI 达到最大抗氧化活性；在蛋白质最适温度下热处理时间对 SPI、CA、PKPI 抗氧化活性影响较小，但热处理时间延长有利于提高 WPI 抗氧化活性，引起这种差异的机理还有待进一步研究；钠盐与钙盐及其浓度(0~10 mmol/L)对 SPI、CA 抗氧化活性影响较小，PKPI 受钠盐影响较小，但钙盐浓度的增大降低了 PKPI 抗氧化活性，NaCl、CaCl₂ 浓度的增大同时降低了 WPI 抗氧化活性，且 CaCl₂ 对 WPI 影响大于 NaCl；4 种蛋白质抗氧化活性受 pH 影响较大，pH 2.0 时，其抗氧化能力高于 pH 8.0。蛋白质抗氧化活性应该通过多种方法来体现，如能够克服蛋白沉淀问题，测定羟基自由基(·OH)和超氧自由基(O₂⁻·)清除率会更好体现蛋白质的抗氧化活性。

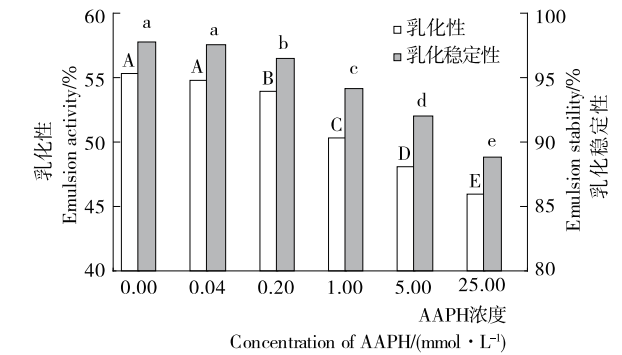
参考文献

[1] 李榕. 食品中多种抗氧化剂的测定方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007: 5-6.

[2] 黄克, 崔春, 赵谋明, 等. 天然抗氧化剂的增效作用及其对花生油抗氧化效果研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(9): 1 139-1 141.

[3] 赵芳, 边丽, 胡栋梁. 茄子皮红色素抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2008, 24(2): 62-64.

[4] YI Jian-hua, ZHU Zhen-bao, MCCLEMENTS D J, et al. Influence of aqueous phase emulsifiers on lipid oxidation in water-in-walnut oil emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62: 2 104-2 011.



不同字母表示差异显著, $P<0.05$

图 7 过氧自由基氧化大米蛋白乳化性和乳化稳定性的变化

Figure 7 Changes of emulsion activity and emulsion stability of rice protein which oxidized by peroxy radical

Chen Nan-nan 等^[8]发现过氧自由基诱使大豆蛋白形成不可溶性聚集体,使得大豆蛋白乳化液油—水界面稳定性下降,大豆蛋白乳化性质降低;吴伟等^[9]发现蛋白质氧化聚集体会限制蛋白分子的脂质吸附能力,降低油—水界面的稳定性,米糠谷蛋白乳化性下降。

3 结论

采用 AAPH 热降解产生的过氧自由基氧化修饰大米蛋白,研究过氧自由基氧化对大米蛋白功能性质的影响。结果发现:AAPH 产生的过氧自由基诱使大米蛋白发生了氧化。随着 AAPH 浓度的增加,大米蛋白溶解性和 Zeta 电位绝对值下降,表明大米蛋白氧化产生了不可溶性聚集体,蛋白溶液稳定性下降。此外,随着 AAPH 浓度的增加,大米蛋白持水性、起泡性质和乳化性质下降,持油性上升,表明过氧自由基氧化导致大米蛋白功能性质发生变化;这些变化可能会增加大米蛋白在加工过程中的溶解难度,制约大米蛋白持水能力的应用,降低大米蛋白在气—液界面和油—水界面的平衡和稳定,却也能在一定程度上促进大米蛋白持油能力的表达。

但过氧自由基氧化大米蛋白结构的变化还有待进一步研究。

参考文献

[1] 陈银基,鞠兴荣,董文,等. 稻谷中脂类及其储藏特性研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(13): 320-323.

[2] ZHOU Zhong-kai, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes[J]. Journal of Cereal Science, 2002, 35(1): 65-78.

[3] 蔡勇建,叶建芬,吴晓娟,等. 米糠贮藏时间对米糠蛋白功能性质影响[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(6): 31-34.

[4] 吴伟,蔡勇建,吴晓娟,等. 丙二醛氧化对大米蛋白功能性质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(18): 113-116, 122.

[5] 叶林,廖钰,赵谋明. 花生分离蛋白氧化过程中的结构变化[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 3-6.

[6] 蔡勇建,吴晓娟,吴伟,等. 过氧自由基氧化对大豆蛋白功能性质影响[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(8): 13-16.

[7] 王璐,陈月华,许宙,等. 大米免疫活性肽水解酶的筛选[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 38-42.

[8] CHEN Nan-nan, ZHAO Mou-ming, SUN Wei-zheng, et al. Effect of oxidation on the emulsifying properties of soy protein isolate[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 26-32.

[9] 吴伟,叶建芬,蔡勇建,等. 贮藏过程中酸败引起的米糠谷蛋白功能性质变化[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 165-168.

[10] 尤梦圆,何东平,邹翀,等. 热稳定米糠粕和米糠低温浸出粕制备米糠蛋白的对比研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(6): 45-48.

[11] YE Lin, LIAO Yu, SUN Wei-zheng, et al. Effect of protein oxidation on the stability of peanut beverage[J]. CyTA-Journal of Food, 2015, 13(1): 49-55.

[12] 马梦君,胡文卿,傅丽亚,等. 温度和质量浓度对茶多酚水溶液稳定性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 11-16.

[13] KHAN S H, BUTT M S, SHARIF M K, et al. Functional properties of protein isolates extracted from stabilized rice bran by microwave, dry heat, and parboiling[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(6): 2 416-2 420.

and Food Chemistry, 2013, 61: 1 954-1 967.

[11] ELIAS R, MCCLEMENTS D J, Decker E A. Impact of thermal processing on the antioxidant mechanisms of continuous phase β -lactoglobulin in oil-in-water emulsions [J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1 402-1 409.

[12] 李旭敏,曹劲松,高建华. 牦牛酪蛋白理化及功能特性的研究[J]. 中国乳品工业, 2005, 33(9): 17-20.

[13] LAWRENCE M T, SASAKI S, MCCLEMENTS D J, et al. Mechanisms of the antioxidant activity of a high molecular weight fraction of whey[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48: 1 473-1 478.

[14] 王仁芳,范令刚,高文远,等. 杏仁化学成分与药理活性研究进展[J]. 现代药物与临床, 2010, 25(6): 426-428.

[15] MARQUEZ A L, MEDRANO A, PANIZZOLO L A, et al. Effect of calcium salts and surfactant concentration on the stability of water-in oil (W/O) emulsions prepared with polyglycerol polyricinoleate[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 341: 101-108.

(上接第 4 页)

[5] FENNEMA O R. 食品化学[M]. 王璋,许时婴,江波,等,译. 北京:中国轻工业出版社, 2003.

[6] 李静娟,易建华,朱振宝,等. 桃仁蛋白与大豆分离蛋白功能特性比较[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(2): 100-104.

[7] 陈从瑾,黄克瀛,李德梁,等. 香椿叶提取物清除 DPPH 自由基能力的测定方法[J]. 林产化学与工业, 2006, 26(3): 69-72.

[8] HU Min, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Lipid oxidation in corn oil-in-water emulsions stabilized by casein, whey protein isolate, and soy protein isolate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 51: 1 696-1 700.

[9] ELIAS R J, MCCLEMENTS D J, DECKER E A. Antioxidant activity of cysteine, tryptophan, and methionine residues in continuous phase β -lactoglobulin in oil-in-water emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53: 10 248-10 253.

[10] PHOON P Y, NARSIMBAN G, FERNANDA M. Effect of Thermal behavior of β -lactoglobulin on the oxidative stability of menhaden oil-in-water emulsions [J]. Journal of Agricultural