

多酚对过氧自由基氧化花生球蛋白的干预效应

李实¹, 李云嵌¹, 黄鑫¹, 杨曦¹, 王振兴¹, 孙健², 张雪春^{1,2}

(1. 西南林业大学 生命科学学院, 昆明 650224; 2. 广西农业科学院 农产品加工研究所, 南宁 530007)

摘要: 为了对花生蛋白的加工贮藏提供参考, 探究了多酚对过氧自由基氧化花生球蛋白的影响。通过 2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐建立花生球蛋白氧化体系, 采用不同浓度的阿魏酸、绿原酸、儿茶素对氧化体系进行干预, 分析多酚对氧化花生球蛋白羰基、游离氨基、巯基、溶解度、浊度和内源荧光光谱的影响, 并对各指标进行了相关性分析。结果表明: 不同浓度的 3 种多酚干预后, 花生球蛋白的羰基含量不同程度地降低, 游离氨基、巯基含量上升, 最大内源荧光波长发生红移, 浊度增大, 溶解度总体变化较小; 相关性热图分析说明蛋白质的功能性与其氧化程度相关。综上, 适量的多酚可抑制过氧自由基对花生球蛋白的氧化, 且 3 种多酚对氧化体系的干预效果不同, 其中绿原酸抑制花生球蛋白氧化的能力最好。

关键词: 多酚; 花生球蛋白; 过氧自由基; 氧化

中图分类号: Q512+.2; TS201.6 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)08-0104-06

Intervention effect of polyphenols on oxidation of arachin by peroxy radicals

LI Shi¹, LI Yunqian¹, HUANG Xin¹, YANG Xi¹, WANG Zhenxing¹,
SUN Jian², ZHANG Xuechun^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Agro-Food Science and Technology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: In order to provide reference for the processing and storage of peanut protein, the effect of polyphenols on the oxidation of arachin by peroxide radicals was investigated. An arachin oxidation system was established using 2,2'-azodiisobutylamine dihydrochloride. Different concentrations of ferulic acid, chlorogenic acid, and catechins were used to intervene in the oxidation system, the effects of polyphenols on the carbonyl, free amino, sulphhydryl, solubility, turbidity, and endogenous fluorescence spectrometry of oxidized arachin were analyzed, and the correlation analysis of various indicators were conducted. The results showed that after intervention with three different concentrations of polyphenols, the carbonyl contents of arachin decreased to varying degrees, while the free amino and sulphhydryl contents increased. The maximum endogenous fluorescence wavelength shifted red, turbidity increased, and solubility changed little. Correlation heatmap analysis illustrated the correlation between the functionality of protein and its degree of oxidation. In conclusion, an appropriate amount of polyphenols can inhibit the oxidation of arachin by peroxy radicals, and the intervention effects of three polyphenols on the oxidation system are different, among which chlorogenic acid has the best ability to inhibit arachin oxidation.

Key words: polyphenol; arachin; peroxy radical; oxidation

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(31760440); 云南省农业联合面上项目[2017FG001(-020)]; 云南省“兴滇英才支持计划”项目

作者简介: 李实(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全(E-mail)1045741018@qq.com。

通信作者: 张雪春, 副教授(E-mail)xuechun_zhang@163.com。

花生中蛋白质含量高达 24%~36%^[1], 是人类植物蛋白的重要来源之一。花生蛋白根据其溶解特性可分为水溶性蛋白(10%)和盐溶性蛋白(90%)两大类^[2], 其中盐溶性蛋白又包括花生球蛋白(73%)、伴花生球蛋白 I(6%)和伴花生球蛋白 II(21%)。花生球蛋白分子质量为 350 kDa, 是花生

蛋白中最主要的成分,极大程度地决定了花生蛋白的功能性质^[3]。

在花生的贮运过程中,其中的油脂在外界条件作用下容易发生氧化,产生的醛类、酮类、自由基等过氧化产物可共价修饰蛋白质,造成蛋白质营养、风味和品质的下降。因此,如何延缓或控制食物蛋白质的氧化已成为食品化学领域亟待解决的重要问题。多酚是存在于许多高等植物中的一大类重要代谢产物的总称,具有抗氧化、抗菌等作用。研究表明,植物多酚可干预并阻碍蛋白质的氧化进程^[4],如:Jongberg等^[5]研究发现,茶多酚能够结合自由基,保护猪肉中蛋白质巯基免受自由基的攻击;鞠健等^[6]研究发现,茶多酚能够较好地抑制鲈鱼肌原纤维蛋白的氧化;胡熠等^[7]研究发现,没食子酸能有效抑制海鳗肌原纤维蛋白的氧化,改善其凝胶的持水性和微观结构。目前,多酚干预蛋白质氧化的研究主要集中在肉类蛋白,而对植物蛋白氧化干预的研究相对较少。

本文以花生球蛋白为研究对象,通过有氧热分解产生过氧自由基(ROO·)对其进行模拟氧化,根据前期的预实验结果,选择阿魏酸、绿原酸、儿茶素3种多酚干预氧化进程,探讨不同浓度的3种多酚对过氧自由基氧化花生球蛋白的干预作用,以期为植物蛋白的加工贮藏提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

花生,购于昆明市市场。5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB)、2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐(AAPH),北京索莱宝生物科技有限公司;2,4-二硝基苯肼(DNPH)、邻苯二甲醛(OPA)、牛血清蛋白,上海伯奥生物科技有限公司;阿魏酸(FA,纯度≥98%)、绿原酸(CGA,纯度≥98%)、儿茶素(C,纯度≥97%),上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

5804R型多功能高速冷冻离心机,德国Eppendorf公司;UV-2600紫外可见分光光度计,北京泰科仪器技术有限公司;MD SpectraMax Plus 384酶标仪,美国Biotek公司;Lumina荧光光度计,美国赛默飞世尔科技有限公司;ModulyoD-230冷冻干燥机,上海木森生物科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 花生球蛋白的制备

参考尹可宏等^[3]的方法并稍加修改。将花生仁于45℃干燥后粉碎,经石油醚脱脂后,过0.080

mm(180目)筛得脱脂花生粉。按料液比1:10加入0.05 mol/L pH 7.9的Tris-HCl缓冲液,搅拌提取1 h后,在4℃、4 000 r/min下离心30 min,取上清液并加入NaHSO₃,于4℃贮存过夜,再离心收集沉淀,水洗至中性,冻干后即得花生球蛋白。

1.2.2 过氧自由基氧化体系和多酚干预体系的建立

参考焦铭^[8]的方法并略作修改。以含0.05%叠氮钠的10 mmol/L pH 7.9的磷酸盐缓冲液(PBS)配制质量浓度为25 mg/mL的花生球蛋白分散液,添加AAPH使其浓度为10 mmol/L(氧化组),经24 h振荡避光反应、72 h透析和冻干后,得到过氧自由基氧化花生球蛋白。同时,以未添加AAPH的作为未氧化组花生球蛋白。另外,向氧化组体系中分别加入33 μmol/g和100 μmol/g的阿魏酸、儿茶素和绿原酸(添加AAPH后添加),重复以上操作后得到多酚干预-氧化花生球蛋白样品。

1.2.3 花生球蛋白样品相关指标检测

1.2.3.1 羰基含量测定

参照Xu等^[9]的方法并略作修改。用0.01 mol/L Tris-HCl缓冲液将蛋白样品配制质量浓度为10 mg/mL的溶液,与10 mmol/L DNPH(含2 mol/L HCl)试剂反应后,用质量分数20%的三氯乙酸沉淀,分离出沉淀,用乙酸乙酯-乙醇溶液(体积比1:1)洗涤沉淀至无色,再用6 mol/L盐酸胍溶解后,在4℃、12 000 r/min下离心5 min,取上清液于370 nm处测定吸光值,同时参照GB 5009.5-2016测定其蛋白质含量。按式(1)计算羰基含量。

$$Y = A_{370} / (22bc) \times 1000 \quad (1)$$

式中:Y为羰基含量,nmol/mg;A₃₇₀为上清液吸光值;b为比色光径,cm;c为蛋白质含量,mg/mL。

1.2.3.2 游离氨基含量测定

参照万晨茜等^[10]的方法并稍作修改。用0.01 mol/L Tris-HCl缓冲液将蛋白样品配制质量浓度为3 mg/mL的溶液,与3 mg/mL的OPA试剂(乙醇配制)混匀后于室温下反应2 min,于340 nm处测定吸光值,再根据以L-亮氨酸为标准品绘制的标准曲线计算游离氨基含量。

1.2.3.3 巯基含量测定

参照Yongsawatdigul等^[11]的方法并加以修改。游离巯基含量测定:用0.01 mol/L Tris-HCl缓冲液将蛋白样品配制质量浓度为3 mg/mL的溶液,向其中加入0.2 mol/L pH 8.0的Tris-Gly缓冲液和4 mg/mL的DTNB溶液,于25℃水浴保温1 h,在12 000 r/min下离心10 min,取上清液在412 nm处

测定吸光值(以0.2 mol/L pH 8.0的Tris-Gly缓冲液代替样品溶液作为空白调零)。总巯基含量测定:在0.2 mol/L pH 8.0的Tris-Gly缓冲液中加入8 mol/L尿素,其余操作同游离巯基含量测定。分别按式(2)和式(3)计算游离巯基含量和总巯基含量。

$$Y_1 = 75.53 \times A_{412} / c \quad (2)$$

$$Y_2 = 75.53 \times 5.31 \times A_{412} / c \quad (3)$$

式中: Y_1 为游离巯基含量, nmol/mg; A_{412} 为样品的吸光值; c 为上清液蛋白质含量, mg/mL; Y_2 为总巯基含量, nmol/mg。

1.2.3.4 溶解度的测定

参照 Zhang 等^[12]的方法并稍作修改。将蛋白样品以0.01 mol/L pH 7.4的PBS配制成质量浓度为1 mg/mL溶液,并于4℃、8 000 r/min下离心15 min,取上清液,按GB 5009.5—2016测定其蛋白质含量。同时,测定蛋白样品溶液中的蛋白质含量。按公式(4)计算溶解度。

$$S = c_1 / c_2 \times 100\% \quad (4)$$

式中: S 为溶解度; c_1 为上清液蛋白质含量; c_2 为样品溶液中的蛋白质含量。

1.2.3.5 浊度测定

参照 Cao 等^[13]的方法并稍作修改。用0.01 mol/L Tris-HCl缓冲液将蛋白样品配制成质量浓度为10 mg/mL的溶液,在12 000 r/min下离心5 min,取上清液于600 nm处测定吸光值,以此表征样品的浊度。

1.2.3.6 内源荧光光谱测定

参照 Wang 等^[14]的方法并稍作修改。用0.01 mol/L pH 7.4的PBS将蛋白样品配制成质量浓度为1 mg/mL的溶液,在4℃、12 000 r/min下离心10 min,取上清液于激发波长290 nm、发射波长300~500 nm下进行荧光扫描。

1.2.4 数据处理与分析

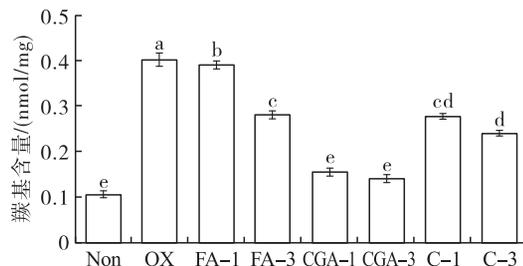
所有实验均进行3次平行实验,采用Excel 2010、Origin 2018、IBM SPSS Statistics 25和R语言(版本4.0.4)对数据进行处理、绘图、方差分析和显著性分析($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 多酚对氧化花生球蛋白相关指标的影响

2.1.1 对羰基含量的影响

羰基含量是反映蛋白质氧化程度的重要理化指标,在氧化体系中,自由基可诱导蛋白质侧链基团氧化和主肽链断裂,从而导致羰基化合物含量增加^[15]。多酚对氧化花生球蛋白羰基含量的影响如图1所示。



注:Non. 未氧化组;OX. 氧化组;FA-1. 33 $\mu\text{mol/g}$ 阿魏酸;FA-3. 100 $\mu\text{mol/g}$ 阿魏酸;CGA-1. 33 $\mu\text{mol/g}$ 绿原酸;CGA-3. 100 $\mu\text{mol/g}$ 绿原酸;C-1. 33 $\mu\text{mol/g}$ 儿茶素;C-3. 100 $\mu\text{mol/g}$ 儿茶素。不同小写字母表示差异显著, ($p < 0.05$)。下同

图1 多酚对氧化花生球蛋白羰基含量的影响

由图1可知,花生球蛋白经过氧自由基氧化后羰基含量显著增大($p < 0.05$)。与氧化组相比,多酚的干预能显著抑制花生球蛋白羰基的产生,其中绿原酸的干预效果最好,当绿原酸添加量为100 $\mu\text{mol/g}$ 时,羰基含量降低64.9%。这是因为多酚的抑制能力与其结构、浓度和氧化条件有密切关系^[16],绿原酸的高羟基含量赋予其较好的清除自由基和螯合金属离子的能力^[17]。

2.1.2 对游离氨基含量的影响

蛋白质氨基酸侧链中含有的-NH-或-NH₂基团(如 γ -氨基丁酸)参与羰基的形成,同时羰基又可与-NH₂共价结合形成席夫碱,进一步降低游离氨基的含量^[18],所以游离氨基在一定程度上可用来表征蛋白质结构的展开程度和氧化程度。多酚对氧化花生球蛋白游离氨基含量的影响如图2所示。

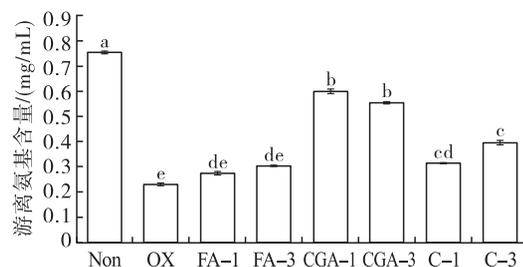


图2 多酚对氧化花生球蛋白游离氨基含量的影响

由图2可知,未氧化组的花生球蛋白游离氨基含量最高,经过氧自由基氧化后,游离氨基含量显著下降($p < 0.05$)。3种多酚的干预均可使氧化花生球蛋白的游离氨基含量不同程度地上升,其中添加33 $\mu\text{mol/g}$ 绿原酸的干预作用最好,游离氨基含量较氧化组的增加159%,但随着绿原酸浓度的增大其干预效果反而下降。这可能是因为绿原酸能与色氨酸、半胱氨酸等亲核基团反应,转变成醌类化合物,而醌类化合物中含有大量的反应性亲电分子,这些分子很容易与蛋白质或氨基酸的官能团进一步共

价结合^[16],从而导致蛋白质游离氨基含量降低,因此增大绿原酸的浓度反而降低了蛋白质游离氨基的含量^[19]。曹云刚^[16]研究发现,绿原酸在低浓度时可抑制肌原纤维蛋白的氧化,这与本研究结果相符。

2.1.3 对巯基含量的影响

巯基是蛋白质分子中具有较高反应活性的基团,其含量变化可显示蛋白质的变性程度^[20]。多酚对氧化花生球蛋白巯基含量的影响如图3所示。

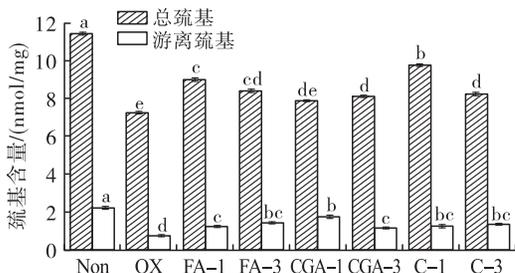


图3 多酚对氧化花生球蛋白巯基含量的影响

由图3可知,花生球蛋白经过氧自由基氧化后总巯基和游离巯基含量均显著下降($p < 0.05$),表明蛋白质侧链巯基被氧化成二硫键和半胱氨酸次磺酸、亚磺酸和磺酸等化合物^[21]。与氧化组相比,多酚的干预使花生球蛋白的总巯基和游离巯基含量不同程度地上升,其中添加 $33 \mu\text{mol/g}$ 儿茶素时总巯基含量最高,增幅为 35.8% ,添加 $33 \mu\text{mol/g}$ 绿原酸时游离巯基含量最高,增幅为 132.8% ,但均随添加量的增大而下降。这是因为儿茶素与绿原酸均属邻苯二酚结构,低浓度时酚羟基作为氢供体,与过氧自由基结合可防止蛋白质进一步被氧化,而当浓度超过饱和时,多酚因羟基含量高被氧化成醌,花生球蛋白的巯基进一步与其交联形成巯基-醌加成物,从而导致巯基含量减少^[22]。张典^[23]研究也表明,随着绿原酸和没食子酸浓度的增大,鸡胸肉肌原纤维蛋白的巯基含量反而减小。

2.1.4 对溶解度的影响

蛋白溶解度是蛋白质之间、蛋白质与溶剂之间相互作用的结果,可用于表征蛋白质交联及聚集的程度,也是蛋白质具有其他功能性质的必要条件^[24]。多酚对氧化花生球蛋白溶解度的影响如图4所示。

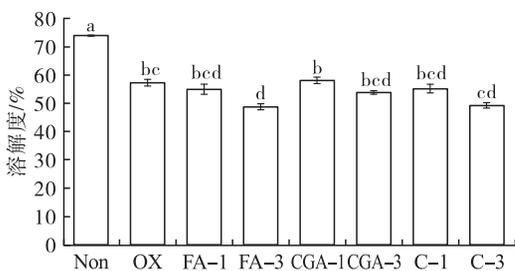


图4 多酚对氧化花生球蛋白溶解度的影响

由图4可知,未氧化组花生球蛋白的溶解度最好,经过氧自由基氧化后,溶解度显著下降($p < 0.05$),这可能是自由基诱导蛋白质发生了交联聚合^[18]。多酚的干预使花生球蛋白溶解度进一步降低,但总体上变化较小,且多酚浓度对其无显著影响。可能是酚类与蛋白质交联结合,加速了蛋白质的聚集,削弱了蛋白质与水的相互作用,从而影响了溶解性^[25],Rawel等^[26]研究发现,大豆蛋白可与酚类化合物形成稳定的多酚-蛋白质复合物,使其溶解度减小,这与本研究结果相似。

2.1.5 对浊度的影响

浊度常用于表征蛋白质的聚集程度,可体现溶液中悬浮粒子的尺寸和数量^[23]。多酚对氧化花生球蛋白浊度的影响如图5所示。

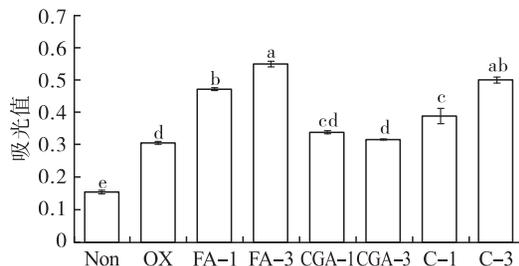


图5 多酚对氧化花生球蛋白浊度的影响

由图5可知,未氧化组花生球蛋白的浊度最低,经过氧自由基氧化后,浊度显著增大($p < 0.05$),表明氧化导致花生球蛋白溶液形成了较大的蛋白质聚集体,而经3种多酚干预后,浊度均进一步增大,其中添加 $100 \mu\text{mol/g}$ 阿魏酸时浊度最大,较氧化组的浊度增幅为 74.7% 。这是因为多酚与蛋白质分子有固定的结合部位,且当多酚浓度增大时,多酚能持续与蛋白质结合形成大量难溶复合物,使浊度增大,这与 Parolia等^[27]的研究结果相符。浊度的结果也进一步说明氧化会使蛋白质分子发生聚集而导致溶解度降低。

2.1.6 对内源荧光光谱的影响

蛋白质的内源荧光主要来源于酪氨酸和色氨酸残基,其变化程度可反映蛋白质结构的变化程度^[28]。多酚对氧化花生球蛋白内源荧光光谱的影响如图6所示。

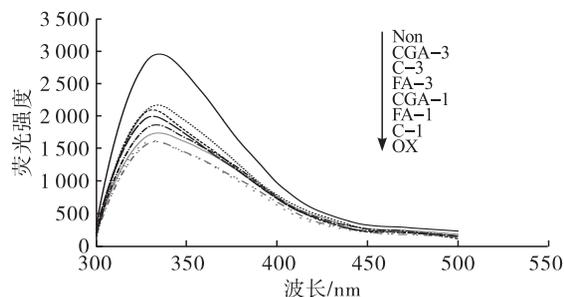


图6 多酚对氧化花生球蛋白内源荧光光谱的影响

由图6可知,花生球蛋白经过氧自由基氧化后内源荧光强度显著下降($p < 0.05$),且最大内源荧光波长蓝移,可能是氧化使蛋白质分子聚集,导致色氨酸残基部分被包埋。而经绿原酸等多酚干预后,花生球蛋白的最大内源荧光波长红移,且荧光强度随浓度的降低有规律地被猝灭,说明多酚与花生球蛋白结合过程中,发射荧光的色氨酸残基和酪氨酸残基等所处的微环境发生变化,导致其内源荧光猝灭,而猝灭效果因多酚种类的不同而显现出差异^[29]。贾娜等^[30]研究发现,在氧化条件下,猪肉肌原纤维蛋白的荧光强度随没食子酸浓度的降低而减小,这与本研究的结果相符合。

2.2 各指标相关性分析

相关性热图中聚类距离和相关性系数可反映样本之间的接近程度。多酚对氧化花生球蛋白各处理组的羰基含量、总巯基含量、游离巯基含量、游离氨基含量、溶解度和浊度的相关性分析如图7所示。

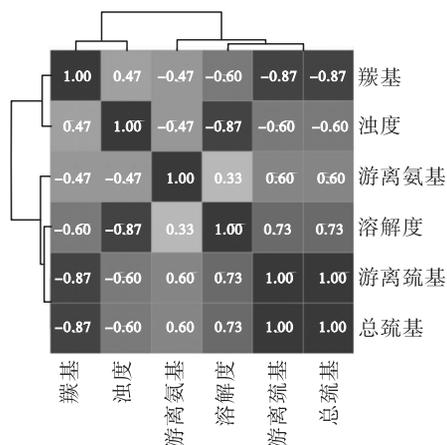


图7 各指标间的相关性热图

由图7可知,羰基含量与游离氨基含量之间呈显著负相关($r = -0.47, p < 0.01$),与游离巯基、总巯基含量之间均呈极显著负相关($r = -0.87, p < 0.01$),而游离氨基含量与游离巯基、总巯基含量之间均呈显著正相关($r = 0.60, p < 0.01$),溶解度与浊度之间呈极显著负相关($r = -0.87, p < 0.01$)。总的来看,溶解度与反映蛋白质氧化程度的羰基含量呈负相关,与反映蛋白质结构和变性程度的游离氨基、总巯基和游离巯基含量等指标呈正相关,而浊度则相反,说明蛋白质的功能性质受其氧化程度影响较大。

3 结论

过氧自由基氧化可使花生球蛋白的羰基含量和浊度显著增大,游离氨基含量、总巯基含量、游离巯基含量、溶解度、内源荧光强度显著下降。而经不同浓度的阿魏酸、绿原酸、儿茶素干预后,氧化花生球

蛋白的羰基含量不同程度地降低,游离氨基、总巯基、游离巯基含量上升,最大内源荧光波长发生红移,同时浊度增大,溶解度总体上变化较小。相关性热图分析表明,蛋白质的功能性与其氧化程度相关。3种多酚对过氧自由基氧化花生球蛋白体系的干预效果不同,其中绿原酸的氧化抑制效果最好。因此,在花生蛋白食品的加工和贮藏过程中,可通过添加适量多酚以抑制蛋白质氧化带来的不利影响。

参考文献:

- [1] CHEN L, ETELAIE R, AKHTAR M. Improved enzymatic accessibility of peanut protein isolate pre-treated using thermosonication[J]. Food Hydrocolloid, 2019, 93(8): 308-316.
- [2] SINGH A, RAINS S N, RAJPAL V R, et al. Seed protein fraction electrophoresis in peanut (*Arach hypogaea* L.) accessions and wild species[J]. Physiol Mol Biol Plants, 2018, 24(3): 465-481.
- [3] 尹可宏, 杨茜, 赵秀飞, 等. 羟自由基氧化对花生球蛋白结构和功能性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 24-31.
- [4] JIAO M, ZHAO M M, LIN L Z, et al. *Lonicera japonica* Thunb. extract improves the quality of cold-stored porcine patty through inhibition of lipid and myofibrillar protein oxidation[J]. Int J Food Sci Tech, 2017, 53(4): 986-993.
- [5] JONGBERG S, TØRNGREN M A, GUNVIG A, et al. Effect of green tea or rosemary extract on protein oxidation in Bologna type sausages prepared from oxidatively stressed pork[J]. Meat Sci, 2013, 93(3): 538-546.
- [6] 鞠健, 乔宇, 李冬生, 等. 茶多酚对冷藏鲈鱼鲜度变化及肌原纤维蛋白氧化的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 290-294.
- [7] 胡熠, 张进杰, 唐艳, 等. 没食子酸对海鳗肌原纤维蛋白氧化及凝胶特性的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(11): 2203-2210.
- [8] 焦铭. 儿茶素干预脂肪氧合酶催化亚油酸诱导大豆伴球蛋白氧化的作用机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [9] XU L, ZHU M J, LIU X M, et al. Inhibitory effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenol on the lipid and protein oxidation of dried minced pork slices during heat processing and storage[J]. LWT - Food Sci Technol, 2018, 91: 222-228.
- [10] 万晨茜, 白文明, 高立城, 等. 不同提取方法对甜荞蛋白理化特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(24): 160-167.
- [11] YONGSAWATDIGUAL J, PARK J W. Thermal denaturation and aggregation of threadfin bream actomyosin[J]. Food

- Chem, 2003, 83(3): 409–416.
- [12] ZHANG D, LI H J, WANG Z F, et al. Effects of in vitro oxidation on myofibrillar protein charge, aggregation, and structural characteristics [J/OL]. Food Chem, 2020, 332: 127396 [2022 – 04 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127396>.
- [13] CAO H W, SUN R L, SHI J R, et al. Effect of ultrasonic on the structure and quality characteristics of quinoa protein oxidation aggregates[J/OL]. Ultrason Sonochem, 2021, 77: 105685 [2022 – 04 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105685>.
- [14] WANG Z M, HE Z, GAN X, et al. Effect of peroxy radicals on the structure and gel properties of isolated rabbit meat myofibrillar proteins[J]. Int J Food Sci Tech, 2018, 53(12): 2687–2696.
- [15] STADTMAN E R, LEVINE R L. Free radical – mediated oxidation of free amino acids and amino acid residues in proteins[J]. Amino Acids, 2003, 25(3): 207–218.
- [16] 曹云刚. 植物多酚对肉蛋白氧化稳定性和功能特性的影响机理及应用[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2016.
- [17] GUO X, QIU H H, DONG X R, et al. Effect of chlorogenic acid on the physicochemical and functional properties of coregonus peled myofibrillar protein through hydroxyl radical oxidation[J/OL]. Molecules, 2019, 24(17): 3205 [2022 – 04 – 29]. <https://doi.org/10.3390/molecules24173205>.
- [18] 冉丽丹, 李文慧, 赵超, 等. 茶多酚- β -环糊精包合物对羊肚冷藏期间肌原纤维蛋白氧化的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 227–235.
- [19] ESTÉVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: a review [J]. Meat Sci, 2011, 89(3): 259–279.
- [20] 周蓓蓓, 陈小雷, 鲍俊杰. 天然植物对小龙虾仁抗氧化效果的初步研究[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(5): 85–89.
- [21] THOMAS J A, MALLIS R J. Aging and oxidation of reactive protein sulfhydryls[J]. Exp Gerontol, 2001, 36(9): 1519–1526.
- [22] 刘丹. 五种植物多酚对氧化环境中猪肉肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[D]. 辽宁 锦州: 渤海大学, 2017.
- [23] 张典. 没食子酸和绿原酸对磷酸化鸡胸肉肌原纤维蛋白性质的作用研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019.
- [24] WANG N, ZHOU X N, WANG W N, et al. Effect of high intensity ultrasound on the structure and solubility of soy protein isolate – pectin complex [J/OL]. Ultrason Sonochem, 2021, 80: 105808 [2022 – 04 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105808>.
- [25] DAMODARAN S, PARKIN K L, FENNEMA O R. Fennema's food chemistry[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [26] RAWEL H M, CZAJKA D, ROHN S. et al. Interactions of different phenolic acids and flavonoids with soy proteins [J]. Int J Biol Macromol, 2002, 30(3): 137–150.
- [27] PAROLIA S, MALEY J, SAMMYNAIKEN R, et al. Structure – functionality of lentil protein – polyphenol conjugates [J/OL]. Food Chem, 2022, 367: 130603 [2022 – 04 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130603>.
- [28] ZHAO Q, YU X J, ZHOU C S, et al. Effects of collagen and casein with phenolic compounds interactions on protein in vitro digestion and antioxidation[J/OL]. LWT – Food Sci Technol, 2020, 124: 109192 [2022 – 04 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109192>.
- [29] 张雪春, 茹月蓉, 程群, 等. 八种多酚与核桃蛋白相互作用的研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 97–104.
- [30] 贾娜, 刘丹, 张晓星, 等. 氧化条件下没食子酸对猪肉肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 61–66.

(上接第 83 页)

- [43] OTA M, MATSUO J, ISHIDA I, et al. Effects of a medium – chain triglyceride – based ketogenic formula on cognitive function in patients with mild – to – moderate Alzheimer's disease[J]. Neurosci Lett, 2019, 690: 232–236.
- [44] DE LA RUBIA ORTÍ J E, GARCÍA – PARDO M P, DREHMER E, et al. Improvement of main cognitive functions in patients with Alzheimer's disease after treatment with coconut oil enriched Mediterranean diet: a pilot study [J]. J Alzheimer's Dis, 2018, 65(2): 577–587.
- [45] COURCHESNE – LOYER A, LOWRY C M, ST – PIERRE V, et al. Emulsification increases the acute ketogenic effect and bioavailability of medium – chain triglycerides in humans: protein, carbohydrate, and fat metabolism [J/OL]. Curr Dev Nutr, 2017, 1(7): e000851 [2022 – 03 – 30]. <https://doi.org/10.3945/cdn.117.000851>.