DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250930001
引用格式: 于忠辉, 冯思宇, 于丽娜, 等. 花生肽的抗氧化活性及稳定性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 239–247.
YU ZH, FENG SY, YU LN, *et al*. Study on the antioxidant activities and stability of peanut peptides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 239–247. (in Chinese with English abstract).

花生肽的抗氧化活性及稳定性研究

于忠辉[1], 冯思宇[2,3], 于丽娜[2*], 贺丽娜[4], 沙传红[4], 高正杰[1], 穆树旗[5], 李万鑫[5], 邓祥元[3], 王鲁慧[2], 王明清[2*]

(1. 烟台市牟平区农业技术推广中心, 烟台 264100; 2. 山东省花生研究所, 青岛 266000; 3. 江苏科技大学生物技术学院, 镇江 212100; 4. 烟台市农业技术推广中心, 烟台 264100; 5. 烟台市大成食品有限责任公司, 烟台 264100)

摘 要: 目的 评价花生肽的抗氧化活性以及温度、pH、金属离子、食品配料和杀菌方式对抗氧化稳定性的影响。**方法** 采用梯度浓度的花生肽进行清除自由基、还原力、金属离子螯合力和脂质过氧化抑制力实验; 在不同温度、pH、金属离子、食品配料和杀菌方式下进行花生肽清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基实验。**结果** 随着花生肽浓度增大, 清除 DPPH 自由基和羟自由基活性、铁还原力和钼还原力、Fe^{2+}螯合力和 Cu^{2+}螯合力以及脂质过氧化抑制能力 7 种抗氧化活性也随之增加。温度在 37 ℃以下, 花生肽完全保留了抗氧化活性, 温度为 80 ℃抗氧化活性下降率仅为 4.58%。花生肽在 pH 2~7 的酸性和中性条件下保持完好的抗氧化活性, pH 8 和 9 保持部分抗氧化活性, 而在 pH 大于 10 时, 失去抗氧化活性。花生肽在食品配料葡萄糖、蔗糖、乳糖、柠檬酸、抗坏血酸、亚硫酸氢钠、苯甲酸钠、Cu^{2+}、Zn^{2+}和 Al^{3+}金属离子存在下, 以及微波杀菌、巴氏杀菌、紫外线杀菌、高压蒸汽杀菌和沸水杀菌条件下均能保持完好的抗氧化活性。**结论** 本研究制备的花生肽具有较好的抗氧化活性和稳定性, 为花生肽的分离、纯化、开发高附加值新产品以及应用等提供理论参考。

关键词: 花生肽; 抗氧化活性; 稳定性; pH; 金属离子; 食品配料

Study on the antioxidant activities and stability of peanut peptides

YU Zhong-Hui[1], FENG Si-Yu[2,3], YU Li-Na[2*], HE Li-Na[4], SHA Chuan-Hong[4], GAO Zheng-Jie[1], MU Shu-Qi[5], LI Wan-Xin[5], DENG Xiang-Yuan[3], WANG Lu-Hui[2], WANG Ming-Qing[2*]

(1. *Yantai Muping District Agricultural Technology Extension Center*, *Yantai* 264100, *China*; 2. *Shandong Peanut Research Institute*, *Qingdao* 266000, *China*; 3. *College of Biotechnology*, *Jiangsu University of Science and Technology*, *Zhenjiang* 212100, *China*; 4. *Yantai Agricultural Technology Extension Center*, *Yantai* 264100, *China*; 5. *Yantai Dacheng Food Co*., *Ltd.*, *Yantai* 264100, *China*)

收稿日期: 2025-09-30
基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023TZXD074); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2025C19); 2024 年度牟平区科技创新发展专项计划项目; 科技特派员科技服务乡村振兴典型案例(新技术新品种、新模式)推广应用项目(2022DXAL0102)
第一作者: 于忠辉(1969—), 男, 主要研究方向为花生精深加工。E-mail: mpngx@126.com
***通信作者:** 于丽娜(1974—), 女, 研究员, 主要研究方向为粮油植物蛋白工程及功能食品。E-mail: lhtyln0626@163.com
王明清(1981—), 男, 副研究员, 主要研究方向为花生综合加工利用与质量安全。E-mail: mingqing201610@163.com

ABSTRACT: Objective To evaluate the antioxidant activities of peanut peptides and investigate the effects of temperature, pH, metal ions, food ingredients and sterilization methods on their antioxidant stabilities. **Methods** Peanut peptides at gradient concentrations were subjected to assays for free radical scavenging activity, reducing power, metal ion chelating capacity and inhibition of lipid peroxidation. The scavenging activity of peanut peptides against 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radicals was assessed under different conditions of temperature, pH, metal ions, food ingredients and sterilization methods. **Results** With increasing concentrations of peanut peptides, 7 kinds of antioxidant activities—namely, DPPH radical scavenging activity, hydroxyl radical scavenging activity, ferric reducing power, molybdenum reducing power, Fe^{2+} chelating ability, Cu^{2+} chelating ability and lipid peroxidation inhibition capacity—were all enhanced. At temperatures below 37 ℃, the peanut peptide fully retained its antioxidant activity, while at 80 ℃, the reduction rate of antioxidant activity was only 4.58%. The peanut peptide maintained complete antioxidant activity under acidic to neutral conditions (pH 2–7), partial activity at pH 8 and 9, and lost its antioxidant activity at pH greater than 10. The peanut peptide also retained intact antioxidant activity in the presence of food ingredients such as glucose, sucrose, lactose, citrate, ascorbic acid, sodium bisulfite and sodium benzoate, as well as metal ions including Cu^{2+}, Zn^{2+} and Al^{3+}, and under various sterilization conditions such as microwave sterilization method, pasteurization sterilization method, ultraviolet sterilization method, high-pressure steam sterilization method and boiling water treatments sterilization method. **Conclusion** The peanut peptide prepared in this study exhibits favorable antioxidant activities and stabilities. These findings provide a theoretical basis for the isolation, purification and development of high-value-added products from peanut peptide, as well as for its application in food processing.

KEY WORDS: peanut peptides; antioxidant activities; stability; pH; metal ions; food ingredients

0 引 言

我国的花生总产量、加工产值和进出口贸易量均位居世界第一[1]。花生在我国农业生产中占据重要地位，不仅满足国内市场对油脂的需求，同时也为农民带来可观的经济收益。花生含有丰富的脂肪和蛋白质，花生粕是花生榨油后的剩余物料，含有约 50%的优质蛋白[2]，可以直接作为食品或饲料加工用原料，也可以精深加工成分离蛋白膜[3]、浓缩蛋白[4]、磷酸化改性蛋白[5]、糖基化改性蛋白[6]、抗氧化肽[7]、抗菌肽[8]、α-葡萄糖苷酶抑制活性肽[9]、血管紧张素转换酶(angiotensin-converting enzyme, ACE)抑制活性肽[10]、降胆固醇活性肽[11]、抗疲劳活性肽[12]等高附加值产品。在众多的蛋白肽产品中，抗氧化肽尤为重要。MA 等[13]从花生蛋白水解物中分离纯化到具有良好抗氧化活性的肽段脯氨酸(proline, Pro)-甘氨酸(glycine, Gly)-半胱氨酸(cysteine, Cys)-Pro-丝氨酸(serine, Ser)-苏氨酸(threonine, Thr)，该肽段能显著提高 6-羟基多巴胺诱导的大鼠肾上腺髓质嗜铬瘤分化细胞株(rat adrenal pheochromocytoma, PC12)细胞活力，并减少细胞凋亡，有望开发成为一种新型神经保护剂。CAO 等[14]用碱性蛋白酶水解花生分离蛋白，再经过截留分子量为 5 kDa 和 3 kDa 超滤膜进行二级超滤，获得兼具抗氧化活性和 ACE 抑制活性的花生肽段酪氨酸(tyrosine, Tyr)-Cys-丙氨酸(alanine, Ala)-天冬氨酸(aspartic acid, Asp)。OLUWAJUYITAN 等[15]用 6 种蛋白酶水解蚕豆蛋白，发现风味蛋白酶水解物的清除超氧阴离子和羟自由基以及抑制亚油酸过氧化方面均表现出显著更强的能力，并且，对 α-葡萄糖苷酶、胰脂肪酶和精氨酸酶活性也表现出最强的抑制作用。以上研究成果表明，抗氧化肽除了有抗氧化活性外，还具有预防保健功效，可用于制备具有抗氧化应激及相关退行性疾病防治功能的保健产品，极具开发潜力。

目前，在食品、医药和化妆品行业中，通常加入合成的化学抗氧化剂来抑制产品中营养组分的氧化，保持产品质量和延长产品货架期。然而，长期食用含有合成抗氧化剂的产品有可能给人体健康带来危害[16]。与之相反，抗氧化肽具有安全性、营养保健性和易消化吸收等特点，不仅不会对人体造成伤害，反而有益人体健康。于是，抗氧化肽作为天然抗氧化剂应用在食品、医药和化妆品领域越来越受到研究人员的关注。但是，食品体系中存在多样的营养成分和配料组分，并且，其加工方式方法也千差万别。抗氧化肽在食品中应用时，食品体系的配料组分和杀菌方式能否影响抗氧化肽的抗氧化活性，这是个值得深入探讨的问题。因此，本研究采用超声辅助蛋白酶分步水解花生分离蛋白制备花生肽，考察花生肽的清除 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和羟自由基能力、铁还原力和钼还原力、Fe^{2+}和 Cu^{2+}螯合力以及脂质过氧化抑制能力；在此基础上，评价抗氧化肽在不同温度、pH、金属离子、食品配料和杀菌方式等环境条件

下的抗氧化稳定性。本研究旨在为花生肽作为天然抗氧化剂应用于食品体系中提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料、试剂与仪器

花生分离蛋白: 山东省花生研究所自制。

木瓜蛋白酶(800 U/mg)、碱性蛋白酶(200 U/mg)、DPPH(生物试剂, 上海源叶生物科技有限公司); 葡萄糖、蔗糖、乳糖、柠檬酸、抗坏血酸、亚硫酸氢钠、苯甲酸钠、氯化钠、氯化钾、氯化钙、氯化铜、氯化锌、氯化镁、氯化铁、氯化铝(分析纯, 科密欧广东试剂公司)。

SB-1000DTS 双频超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司); HH-8 数显恒温水浴锅(无锡玛瑞特科技有限公司); L500-A 台式低速自动平衡离心机(湖南湘仪离心机仪器有限公司); FD5-2.5 冷冻干燥机(美国 SIM 公司); UV-5300 紫外-可见分光光度计(上海元析仪器有限公司); BCE124-1CCN 天平[精度 0.0001 g, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]; GI36T 立式自动压力蒸汽灭菌器[致薇(厦门)仪器有限公司]; X3-L232A 微波炉(广东美的厨房电器制造有限公司); HR30-IIA2 生物安全柜(青岛海尔特种电器有限公司)。

1.2　超声辅助蛋白酶酶解制备花生肽方法

在超声波清洗机中, 取 pH 5.8、质量百分浓度 2.91%的花生分离蛋白溶液, 加入质量百分浓度 0.83%的木瓜蛋白酶, 调节超声频率 25 kHz、超声功率 800 W、温度 54 ℃, 超声辅助木瓜蛋白酶酶解 100 min。调节酶解混合液的 pH 8.0, 加入质量百分浓度 0.38%的碱性蛋白酶, 调节超声频率 25 kHz、超声功率 1000 W、温度 55 ℃, 超声辅助碱性蛋白酶酶解 40 min。酶解混合液在沸水浴中静置 10 min 后置于冷水中冷却到室温。以 4000 r/min 转速离心 20 min, 上清液经浓缩后冷冻干燥即为花生肽。

1.3　抗氧化活性测定方法

花生肽的 DPPH 自由基和羟自由基清除能力、铁还原力和钼还原力、Fe^{2+}和 Cu^{2+}螯合力、脂质过氧化抑制力的测定按照 YU 等[17]的方法。

1.4　抗氧化稳定性实验方法

1.4.1　温度对抗氧化稳定性的影响实验方法

配制质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液, 分别在 4、25、37、50、65、80 ℃水浴中静置 1 h, 冷水冷却, 测定各溶液的 DPPH 自由基清除率。以未经温度处理的质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液为对照。

1.4.2　pH 对抗氧化稳定性的影响实验方法

调节质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液的 pH 分别为 2、3、4、5、6、7、8、9、10、11, 室温放置 2 h, 测定各溶液的 DPPH 自由基清除率。以质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液为对照。

1.4.3　金属离子对抗氧化稳定性的影响实验方法

分别用物质的量浓度为 2、4、6、8、10、12 mmol/L 的 Na^{+}、K^{+}、Ca^{2+}、Cu^{2+}、Mg^{2+}、Zn^{2+}、Al^{3+}和 Fe^{3+}溶液配制质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液, 室温放置 2 h, 测定各溶液的 DPPH 自由基清除率。以质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液为对照。

1.4.4　食品配料对抗氧化稳定性的影响实验方法

分别用质量百分浓度为 1%、2%、3%、4%、5%的葡萄糖、蔗糖和乳糖溶液, 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%的柠檬酸溶液, 0.01%、0.02%、0.03%、0.04%、0.05%的抗坏血酸、亚硫酸氢钠和苯甲酸钠溶液配制质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液, 室温放置 2 h, 测定各溶液的 DPPH 自由基清除率。以质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液为对照。

1.4.5　杀菌方式对抗氧化稳定性的影响实验方法

配制质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液, 分别进行沸水杀菌(100 ℃, 10 min)、紫外线杀菌(30 W, 30 min)、巴氏杀菌(70 ℃, 30 min)、微波杀菌(功率 800 W, 5 min)、高压蒸汽杀菌(121 ℃, 15 min), 各种杀菌处理后冷水冷却, 测定各溶液的 DPPH 自由基清除率。以质量浓度为 10 mg/mL 花生肽溶液为对照。

1.5　数据处理

采用 SPSS 18.0 统计软件单因子方差分析进行组间差异性比较, 显著性水平为 $P<0.05$。数据用平均值±标准偏差表示。采用 Microsoft Word 2010 和 Microsoft Excel 2010 软件制作表和图。

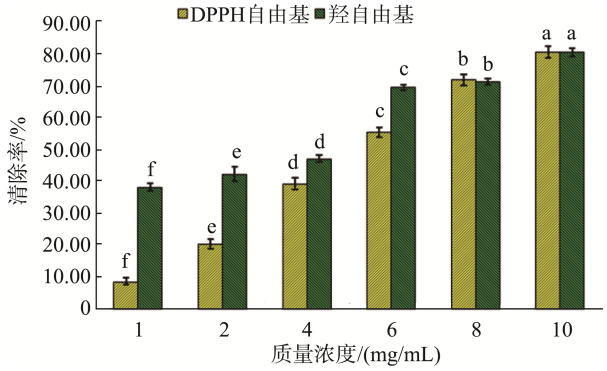
2　结果与分析

2.1　花生肽的抗氧化活性分析

2.1.1　花生肽清除自由基活性分析

图 1 为质量浓度 1~10 mg/mL 的花生肽清除 DPPH 自由基和羟自由基的结果。由图 1 可以看出, DPPH 自由基和羟自由基的清除率都随着花生肽的浓度增大而增加, 二者在 10 mg/mL 的清除率分别达到 80.73%±1.78% 和 80.69%±1.30%, 它们都分别显著大于各自其他浓度的清除率($P<0.05$)。在 1~6 mg/mL 各个质量浓度下, 花生肽对羟自由基的清除率都大于 DPPH 自由基。花生肽通过以下几种途径实现对自由基的清除作用: (1)花生肽可以抑制体内自由基的产生, 减少氧化应激反应的发生[18]; (2)花生肽可以与自由基结合, 形成稳定的化合物, 从而直接清除自由基[19]; (3)花生肽可以提高体内抗氧化酶的活性, 增强抗氧化能力[20]; (4)花生肽可以通过调节细胞信号通路, 抑制氧化应激引起的细胞损伤、凋亡和炎症反应, 从而维护人体健康[21]。HUO 等[22]采用超声辅助中性蛋白酶水解核桃粕

制备抗氧化肽，与单纯中性蛋白酶水解的抗氧化肽相比较，其 DPPH 自由基和羟自由基活性分别提高了 234.23%和 69.52%。发现其抗氧化活性增强的潜在机制在于：超声辅助提取不仅能够形成更多小分子肽，还能产生更多末端具有疏水性氨基酸的肽段。由此推断，本研究采用超声辅助蛋白酶二次水解花生粕得到的花生抗氧化肽与核桃粕抗氧化肽类似，同样具有较好的清除 DPPH 自由基和羟自由基活性。



注：同一指标不同字母表示具有显著性差异(P<0.05)，图 2~9 同。

图 1 花生肽清除 DPPH 自由基和羟自由基能力(n=3)

Fig.1 Scavenge DPPH free radicals and hydroxyl free radicals ability of peanut peptides (n=3)

2.1.2 花生肽还原力活性分析

质量浓度为 1~10 mg/mL 范围内，花生肽铁还原力和钼还原力均呈现增大趋势，二者在 10 mg/mL 的还原力都显著大于各自其他质量浓度还原力值(P<0.05)。并且，在相同的质量浓度下，钼还原力每个浓度的吸光值都是铁还原力的 2.5 倍以上(图 2)。肽的铁还原力活性可能涉及肽与 Fe^{2+}的结合，以及肽在 Fe^{2+}还原过程中的催化作用[23]。AVILÉS-GAXIOLA 等[24]采用铁还原力测定法和人克隆结肠腺癌细胞系 Caco-2 的细胞抗氧化活性方法对辣木叶肽的抗氧化活性进行了评估。结果显示，辣木叶肽的铁还原力活性为 1435 μmol TE/g，在质量浓度为 500 μg/mL 时，辣木叶肽对健康人结肠成纤维细胞 CCD-18Co 未表现出细胞毒性作用，且可使 Caco-2 细胞的抗氧化活性提高 83.62%，并抑制 90.20%的细胞增殖。这些发现凸显了抗氧化肽作为功能性成分的巨大潜力，其具有显著的抗氧化和抗增殖特性，对健康具有重要益处。肽的钼还原力是指肽能够还原钼酸盐的能力，是其抗氧化活性的重要指标。钼酸盐在酸性条件下可以形成钼蓝，这是一种蓝色化合物，其形成过程需要还原剂[25]。肽分子链中的某些氨基酸残基，如 Cys 和甲硫氨酸，含有硫醇基团，可以通过提供电子来还原钼酸盐，从而表现出抗氧化活性。通过测定肽的钼还原力，可以评估其清除自由基、提高抗氧化酶活性的能力，从而为肽在抗氧化领域的应用提供科学依据。

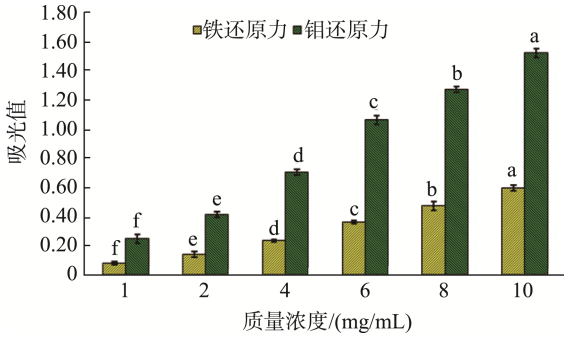


图 2 花生肽铁还原力和钼还原力活性(n=3)

Fig.2 Iron reducing power and molybdenum reducing power activity of peanut peptides (n=3)

2.1.3 花生肽金属离子螯合力活性分析

由图 3 可知，随着花生肽质量浓度的增大，Fe^{2+}螯合力和 Cu^{2+}螯合力均呈现增加的趋势，二者在 10 mg/mL 的螯合力值都显著大于各自其他质量浓度螯合力值(P<0.05)。当肽的质量浓度为 1 mg/mL 时，Cu^{2+}螯合力是 Fe^{2+}螯合力的 1.35 倍。在 2~10 mg/mL 范围内，Fe^{2+}螯合力平均是 Cu^{2+}螯合力的 1.36 倍。张涵等[26]用木瓜蛋白酶和中性蛋白酶分别水解五味子蛋白，结果发现木瓜蛋白酶水解产物的 Fe^{2+}螯合力好于中性蛋白酶，其原因可能是木瓜蛋白酶水解的抗氧化肽中有较多的酸性和碱性氨基酸。本研究采用木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶分步水解花生蛋白得到的抗氧化肽与五味子抗氧化肽具有类似的 Fe^{2+}螯合能力。Fe^{2+}螯合力机制主要基于肽中的某些氨基酸残基，例如，组氨酸的咪唑环、Cys 的巯基和蛋氨酸的硫原子能够与 Fe^{2+}结合，形成稳定的五元环或六元环的螯合物，从而减少 Fe^{2+}在体内的游离状态，降低其催化氧化反应的能力[27]。Cu^{2+}与 Fe^{2+}都为过渡金属离子，肽通过与这些二价金属离子形成螯合物还能降低金属离子与其他物质发生氧化反应的可能性。尤其能够减少二价金属离子催化的 Fenton 反应，该反应会产生具有强氧化性的羟基自由基[28–29]。因此，肽的金属离子螯合力有助于降低体内自由基的生成，从而发挥抗氧化作用，是一种极具潜力的还原剂。

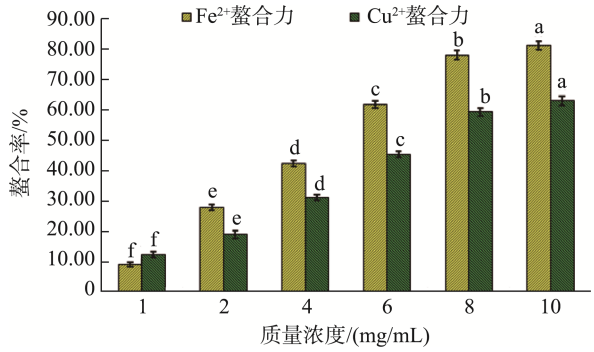


图 3 花生肽 Fe^{2+}和 Cu^{2+}螯合力活性(n=3)

Fig.3 Fe^{2+} and Cu^{2+} chelating activity of peanut peptides (n=3)

2.1.4　花生肽脂质过氧化抑制力活性分析

质量浓度在 10~40 mg/mL 范围内，花生肽脂质过氧化抑制力活性总体呈现增大趋势，40 mg/mL 的抑制率显著大于其他质量浓度下的抑制率(P<0.05)。当质量浓度为 10~22 mg/mL 时，抑制率缓慢增大，增大幅度仅为 7.54%；当质量浓度大于 22 mg/mL 时，抑制率显著增加(P<0.05)，40 mg/mL 的抑制率较 22 mg/mL 增加了 54.08%(图 4)。肖柳柳等[30]将中性蛋白酶水解核桃粕蛋白得到的小于 3 kDa 的酶解产物加入到核桃油中，考察了过氧化值、酸价、茴香胺值和共轭二烯值在加速贮藏实验中的变化情况。结果显示，与对照相比，核桃油中添加抗氧化肽后，油脂的氧化反应速率显著减小(P<0.05)，同时，过氧化物的产生量也减少。胡锦瑞[31]用绿豆抗氧化肽饲喂高脂诱导小鼠，发现样品组小鼠血液中的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)等抗氧化酶明显高于对照组(P<0.05)，血清总胆固醇(serum total cholesterol, TC)和甘油三酯(triglyceride, TG)等血脂含量显著低于对照组，并且，改善了高脂引发的脂质代谢紊乱。以上结果表明，无论在体外、体内还是食品中应用抗氧化肽都具有较好的脂质过氧化抑制力活性。

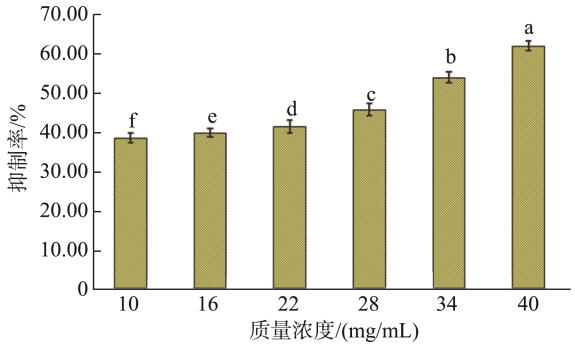


图 4　花生肽脂质过氧化抑制力活性(n=3)

Fig.4　Peanut peptides lipid peroxidation inhibitory activity (n=3)

2.2　花生肽的抗氧化稳定性分析

2.2.1　温度对抗氧化稳定性影响分析

图 5 为质量浓度为 10 mg/mL 的花生肽在 6 个温度条件下清除 DPPH 自由基的结果。在冷藏温度 4 ℃、常温 25 ℃和人体体温 37 ℃下，花生肽清除 DPPH 自由基活性保持完好，清除率与对照没有显著性差异(P>0.05)。当温度升高到 50、65 和 80 ℃时，DPPH 自由基清除率显著低于对照(P<0.05)。相较于对照的 DPPH 自由基清除率，80 ℃具有最大的下降率 4.58%，而 50 ℃和 65 ℃的下降率分别为 2.69%和 2.66%，都保持了 95%以上的抗氧化活性。由此可见，花生肽在 4~80 ℃保持了较好的抗氧化稳定性。谢晓妍等[32]发现处理 60 min 后白芸豆抗氧化肽在 20 ℃和 40 ℃的 DPPH 自由基清除率保持良好，60 ℃和 80 ℃的清除率略微降低。本研究温度对花生抗氧化肽的抗氧化稳定性影响结果与之类似。在较高温度下抗氧化肽的抗氧化活性下降的原因可能是高温改变了多肽链的空间构象，且多肽也易发生高温变性，导致抗氧化活性降低[33]。结果表明，花生抗氧化肽应用在食品加工中时应控制温度和时间，以便保持较好的抗氧化活性。

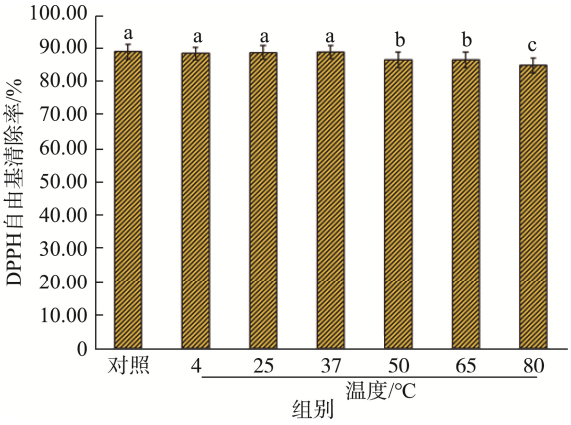


图 5　温度对花生肽抗氧化稳定性的影响(n=3)

Fig.5　Effects of temperature on the antioxidant stability of peanut peptides (n=3)

2.2.2　pH 对抗氧化稳定性影响分析

根据常见的饮用水、饮料和果蔬汁的 pH 标准范围 2.0~8.5，考察 pH 2~9 对花生肽抗氧化稳定性的影响。同时，考虑到花生肽的适用性，将 pH 10 和 11 也纳入到 pH 考察范围内，结果见图 6 所示。在 pH 2~7 的酸性和中性条件下，花生肽 DPPH 自由基清除率显著高于对照(P<0.05)，在 pH 8 和 9 弱碱性条件下，清除率显著低于对照(P<0.05)，而在 pH 10 和 11 强碱性条件下，花生肽完全失去了清除 DPPH 自由基能力。冉思婷等[34]考察了 pH 对灵芝孢子粉抗氧化肽清除 DPPH 自由基能力的影响，随着 pH 的减小，DPPH 自由基清除率呈现下降的趋势，pH 10 的清除率显著小于 pH 4 和 6。认为这主要是因为在碱性条件下，抗氧化肽容易发生水解和外消旋反应。本研究的抗氧化肽在 pH 2~7 时，DPPH 自由基清除率呈现先增大后减小的趋势，与灵芝孢子粉抗氧化肽的清除率逐渐减小的结果略有不同。但是，

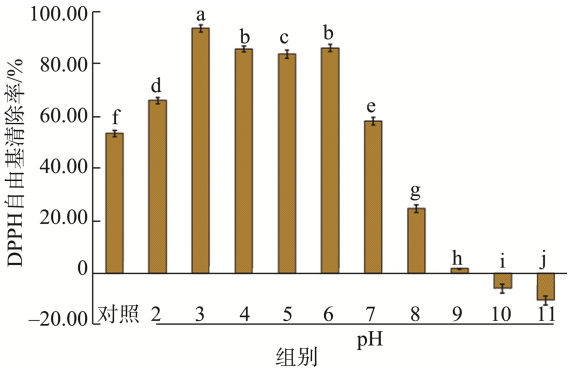


图 6　pH 对花生肽抗氧化稳定性的影响(n=3)

Fig.6　Effects of pH on the antioxidant stability of peanut peptides (n=3)

碱性条件下的清除率小于酸性和中性条件，这一结果是一致的。因此，为了抗氧化肽能够保持较好的抗氧化稳定性，最好在酸性和中性环境条件下应用。

2.2.3 金属离子对抗氧化稳定性影响分析

通常情况下，Na^+、K^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}称为人体所需常量元素，它们在食品中的含量范围分别在 1.20~8.00、0.05~15.00、0.60~6.00、0.10~1.10 g/kg。Fe^{3+}、Zn^{2+}和 Cu^{2+}称为人体所需微量元素，它们在食品中的含量范围分别在 10~1000、5~140 和 1~50 mg/kg。Al^{3+}则是人体不需要的元素，在食品中不能超过 100 mg/kg。以这些限量范围为基础，为了比较各金属离子对花生肽抗氧化稳定性影响的差异，将各金属离子浓度统一定为 2~12 mmol/L，结果如图 7 所示。金属离子对花生肽抗氧化的影响可分为 3 类：在 Na^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}溶液中，DPPH 自由基的清除率都显著低于对照(P<0.05)，平均下降幅度为 6.23%、7.67%和 10.05%。Cu^{2+}、Zn^{2+}和 Al^{3+}存在下，DPPH 自由基的清除率都显著高于对照(P<0.05)，平均增加幅度为 7.18%、6.78%和 4.88%。在低浓度 2~4 mmol/L 的 K^+和 Fe^{3+}存在条件下，DPPH 自由基的清除率显著高于对照(P<0.05)；在 6~12 mmol/L 中高浓度下，K^+清除率显著低于对照(P<0.05)，12 mmol/L 的 Fe^{3+}清除率显著高于对照(P<0.05)，6 mmol/L 的 Fe^{3+}清除率与对照无显著性差异(P>0.05)，8 mmol/L 和 10 mmol/L 的 Fe^{3+}清除率显著低于对照(P<0.05)。总体来说，Ca^{2+}和 Mg^{2+}对花生肽的抗氧化活性影响较大。王子俊等[35]评价了 4 条牦牛骨胶原蛋白肽 P1-P4 的 DPPH 自由基清除能力的稳定性，结果发现，在 Na^+的 20~100 g/L 条件下，4 条肽的 DPPH 自由基清除活性都随着浓度增大而减小，本研究的花生肽在 Na^+溶液中清除 DPPH 自由基的结果与之一致；P1 在 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}和 Zn^{2+}溶液中抗氧化能力下降，P2 和 P4 在 Cu^{2+}各浓度下的清除率均减小，本研究的花生肽在 Zn^{2+}和 Cu^{2+}溶液中对 DPPH 自由基清除能力结果与之相反。当肽加入到某些金属离子液体中时，有可能改变空间构象使疏水基团暴露出来，则抗氧化活性受到抑制[36]。本研究制备的花生肽具有与过渡金属离子 Zn^{2+}、Cu^{2+}和 Fe^{2+}形成螯合物的能力，一般地，肽金属离子螯合物具有较好的清除自由基活性[37]，因此，花生肽在 Cu^{2+}和 Zn^{2+}溶液中对 DPPH 自由基清除活性增强。综上所述，花生肽在应用中，尽量避免含有 Ca^{2+}和 Mg^{2+}以及高盐 Na^+的食品体系。

2.2.4 食品配料对抗氧化稳定性影响分析

一般地，葡萄糖在面制品、肉制品、乳制品和饮料中的添加量分别为 0.5%~10.0%、2.5%~20.0%、0.5%~5.0%和 0.5%~3.0%；蔗糖在面包和饮料中的添加量为 1%~10%；乳糖在乳制品中的含量为 0.5%~5.5%。为了比较这 3 种甜味剂对花生肽抗氧化活性影响差异性，统一确定它们的浓度在 1%~5%范围，结果见图 8(A)。当葡萄糖浓度为 1%、4%和 5%时，花生肽的 DPPH 自由基清除率显著大于对照(P<0.05)，浓度为 2%和 3%时，与对照没有显著性差异(P>0.05)。浓度为 1%~5%蔗糖溶液中，花生肽的 DPPH 自由基清除率都显著大于对照(P<0.05)。乳糖溶液中，除了浓度 1%的 DPPH 自由基清除率与对照没有显著性差异外(P>0.05)，其余 4 个浓度都显著大于对照(P<0.05)。张红玉等[38]考察了紫苏粕多肽在 2%~10%的葡萄糖溶液中对 DPPH 自由基清除能力，发现清除率随着葡萄糖浓度的增加而线性增大，与本研究结果一致。这主要是因为多肽与还原糖可能发生美拉德反应，其产物可加强抗氧化活性[39]。以上结果表明，花生肽可以在含有葡萄糖、蔗糖和乳糖的食品体系中应用。

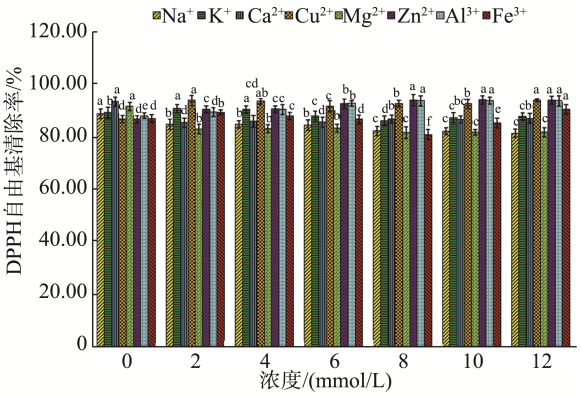


图 7 金属离子对花生肽抗氧化稳定性的影响(n=3)

Fig.7 Effects of metal ions on the antioxidant stability of peanut peptides (n=3)

在饮料中，柠檬酸的添加量在 0.2%~0.5%范围内，可以达到轻微酸味的口感调节作用，增强饮料的鲜爽感和解渴度，且不会显著影响饮料原有的甜味。柠檬酸添加量在 0.6%~1.0%范围内，可以产生清新的酸甜口味，但酸味会相对突出，可能会略微抑制部分甜味成分的感知，这种酸度比较适用于柠檬、橙等果味较重的饮料。柠檬酸添加量在 1.0%~1.5%范围内，可以达到较浓郁的酸味和酸甜平衡感，但同时甜味可能会被抑制 20%~30%，较适用于葡萄柚和酸橙等本身酸甜度稍重的水果饮料。柠檬酸添加量大于 1.5%时，柠檬酸的酸味会显著超过甜味，达到略涩和酸甜不平衡的口感，这种酸度较适用于柠檬醋、酸梅汁等酸味较重的饮料。因此，本研究将柠檬酸的浓度确定在 0.1%~0.5%范围考察其对花生肽抗氧化活性的影响，结果如图 8(B)所示。所有浓度的柠檬酸溶液中，花生肽的 DPPH 自由基清除率都显著大于对照(P<0.05)。在 0.04~0.20 g/100 mL 的柠檬酸溶液中，董原等[40]和刘晓艺等[41]分别评价了玉米糖肽和红花籽抗氧化肽清除 DPPH 自由基活性，结果发现随着柠檬酸浓度的增大清除率也随之增加。可能的原因是抗氧化肽链的某些氨基酸残基与柠檬酸的羧基或羟基结合为供氢体，有助于自由基的清除，从而起到协同增效的作用。因此，花生肽可以应用在柠檬酸存在的食品体系中。

抗坏血酸在饮料、果蔬汁和罐头食品允许的添加量分

别为 0.01%、0.01%和 0.05%。亚硫酸氢钠在食品中的最大添加量因食品种类而异, 如葡萄酒和果酒类为 0.003%, 果汁及蜂蜜为 0.05%, 茶饮料和饮料、罐装水果及蔬菜、干果、蛋制品、果冻等为 0.02%, 其他食品为 0.15%。苯甲酸钠在食品中的添加量受到严格限制, 如蜜饯凉果为 0.05%, 碳酸饮料为 0.02%, 果汁、蛋白饮料和风味饮料为 0.1%。因此, 抗坏血酸、亚硫酸氢钠和苯甲酸钠对花生肽抗氧化活性的影响浓度范围定为 0.01%~0.05%, 结果见图 8(C)。抗坏血酸、亚硫酸氢钠和苯甲酸钠考察的所有浓度范围内, 花生肽的 DPPH 自由基清除率都显著大于相对应的对照(P<0.05)。抗坏血酸和亚硫酸氢钠是呈酸性的食品配料, 苯甲酸钠是呈碱性的食品配料[42], 它们可提供 H^+和 OH^-, 与柠檬酸提供羧基或羟基的作用类似, 花生肽链的氨基酸残基也会与 H^+和 OH^-形成供氢体, 使得清除 DPPH 自由基的能力提高。综上, 花生肽在抗坏血酸、亚硫酸氢钠和苯甲酸钠存在的食品体系中的抗氧化活性稳定。

2.2.5　杀菌方式对抗氧化稳定性影响分析

肉类及制品、蛋类、海鲜、豆制品和奶制品适合通过热水煮沸进行杀菌(100 ℃、5~15 min)。紫外线杀菌是利用波长在 230~254 nm 的紫外线照射食品 30 min, 适合紫外线杀菌的食品包括果汁、饮料、啤酒、罐头、冷饮制品、牛奶、乳制品和食用油。巴氏杀菌法是一种利用较低的温度(68~70 ℃、30 min)既可杀死病菌又能保持物品中营养物质风味不变的消毒法。适合于巴氏杀菌法的一些食物包括鲜奶、果汁、酒类、酱油和其他调味品、果酒和醋等。高压蒸汽杀菌是一种常见的食品杀菌方法, 它通过高温高压(121.3 ℃、103.4 kPa、15~30 min)的蒸汽来杀死食品中的微生物, 从而延长食品的保质期。需要经过高压蒸汽杀菌的食品包括罐头、瓶装或罐装饮料、调味品和一些速冻食品、即食米饭等即食食品。微波杀菌技术因其高效、均匀、低温等特点, 在食品工业中得到了广泛应用。微波杀菌技术适用于的食品类别包括中式畜禽类熟肉制品、西式熟肉制品、豆制品、中式菜肴、风味小吃、调味品、海产品和干货。为了评价花生肽在各类食品中应用效果, 将花生肽溶液通过以上 5 种杀菌方式处理, 结果如图 9 所示。花生肽经过巴氏杀菌法、高压蒸汽杀菌、沸水杀菌和紫外线杀菌处理后, DPPH 自由基清除率显著大于对照(P<0.05); 经过微波照射后, DPPH 自由基清除率与对照无显著性差异(P>0.05)。花生肽清除 DPPH 自由基活性是基于电子向自由基转移并中和自由基的原理, 巴氏杀菌法、高压蒸汽杀菌、沸水杀菌和紫外线杀菌检测中活性的提升可能源于肽链的进一步水解, 从而能够稳定更多自由基。WANG 等[43]研究鲭鱼蛋白抗氧化肽, 以及 GALLEGO 等[44]研究西班牙风干火腿抗氧化肽的稳定性时都发现超过 60 ℃的温度可

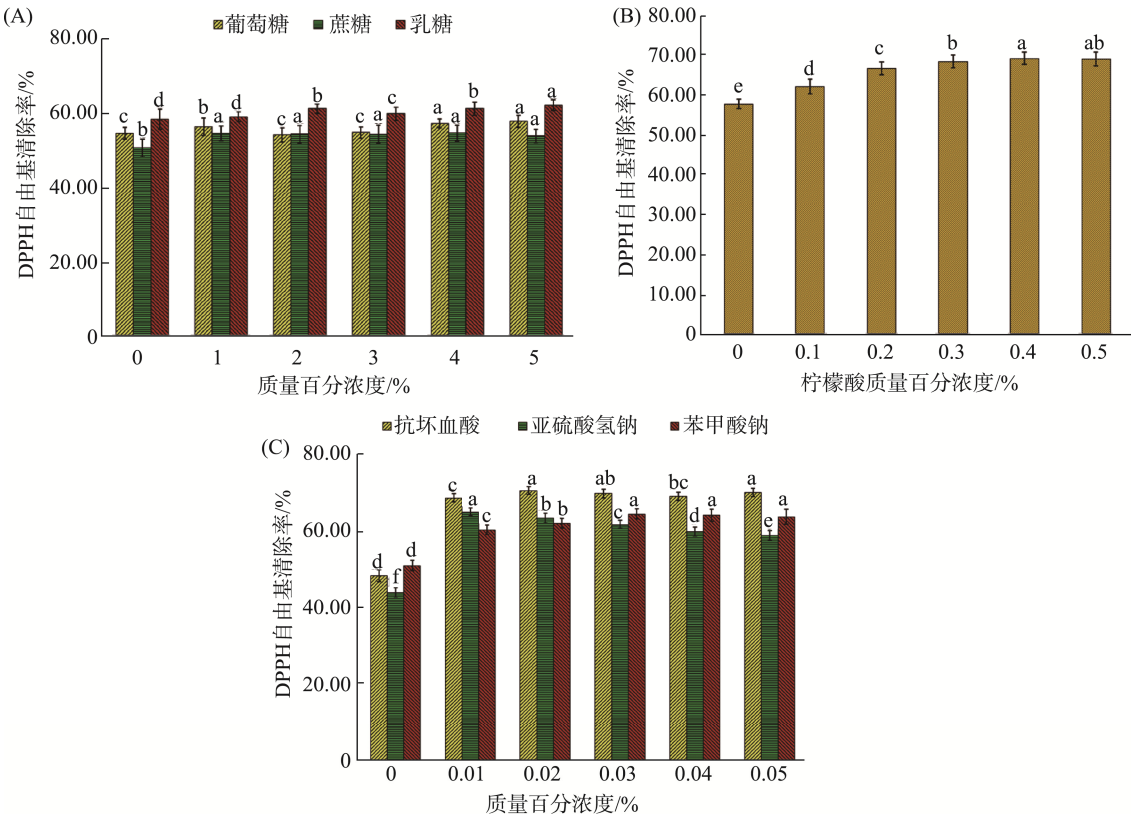


图 8　食品配料对花生肽抗氧化稳定性的影响(n=3)

Fig.8　Effects of food ingredients on the antioxidant stability of peanut peptides (n=3)

能影响肽的二级结构。与本研究结果一致, SINGH 等[33]评价了发酵豆奶活性肽的热稳定性, 其 DPPH 自由基清除活性在 75 ℃和 100 ℃条件下分别显著增强了 17.09%和 17.52% (P<0.01)。总的来说, 除了微波杀菌对花生肽的抗氧化活性没有显著性影响外, 其他 4 种杀菌方式都能提高花生肽的抗氧化活性, 因此, 花生肽能够应用在食品加工中。

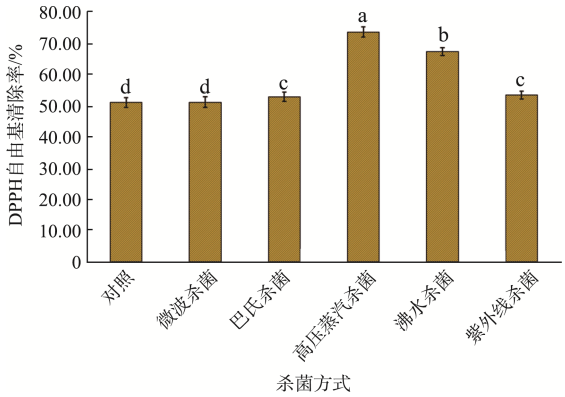


图 9 杀菌方式对花生肽抗氧化稳定性的影响(n=3)

Fig.9 Effects of sterilization methods on the antioxidant stability of peanut peptides (n=3)

3 结 论

本研究探究了花生肽的体外 4 大类抗氧化活性以及温度、pH、金属离子、食品配料和杀菌方式对抗氧化稳定性的影响。在一定浓度范围内, 花生肽的清除自由基能力、还原力、金属离子螯合力和脂质过氧化抑制能力随着浓度的增加而增大。在 80 ℃以下, 花生肽能够保持 95%以上的抗氧化活性; 酸性和中性 pH 溶液中保持良好的抗氧化能力; Cu^{2+}、Zn^{2+}和 Al^{3+}存在时花生肽保持完好的抗氧化活性, 而 Ca^{2+}和 Mg^{2+}以及高盐 Na^{+}的环境条件对抗氧化活性影响较大; 实验浓度范围内的蔗糖、柠檬酸、抗坏血酸、亚硫酸氢钠和苯甲酸钠 5 种食品配料, 巴氏杀菌法、高压蒸汽杀菌、沸水杀菌和紫外线杀菌 4 种杀菌方式能提高花生肽的抗氧化活性。以上研究结果表明, 花生肽具有较好的抗氧化活性和稳定性, 可以应用在复杂的食品体系中。

参考文献

[1] YU LN, GONG QX, YANG QL, *et al*. Technology optimization on microwave-assisted extraction water soluble dietary fiber from peanut hull and its antioxidant activity [J]. Food Science and Technology Research, 2011, 17(5): 401–408.

[2] YU LN, BI J, SONG Y, *et al*. Products and properties of components from heat-denatured peanut meal following solid-state fermentation by *Aspergillus oryzae* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Fermentation, 2023, 9: 425.

[3] 于丽娜, 杜德红, 彭娅萍, 等. 响应面法优化磷酸化改性花生分离蛋白-多肽膜的制备工艺[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(1): 130–143.
YU LN, DU DH, PENG YP, *et al*. Optimization of phosphorelated peanut protein isolate-polypeptide films preparation by response surface methodology [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(1): 130–143.

[4] 于丽娜, 杜德红, 彭娅萍, 等. *Viscozyme* L 预处理花生粕提取花生浓缩蛋白的研究[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(1): 34–40.
YU LN, DU DH, PENG YP, *et al*. Research on extraction of peanut protein concentrate by pretreatment of peanut meal with *Viscozyme* L [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2019, 27(1): 34–40.

[5] YU LN, YANG WQ, SUN J, *et al*. Preparation, characterisation and physicochemical properties of the phosphate modified peanut protein obtained from *Arachin Conarachin* L. [J]. Food Chemistry, 2015, 170: 169–179.

[6] 杨伟强, 杜德红, 江晨, 等. 超声波辅助花生浓缩蛋白糖基化改性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(3): 830–840.
YANG WQ, DU DH, JIANG C, *et al*. Evaluation of ultrasonic assisted glycosylation modification of peanut protein concentrate [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(3): 830–840.

[7] YU LN, XU TT, ZHANG CS, *et al*. Technology optimization on preparation of peanut antioxidant peptides by *bacillus subtilis* solid state fermentation method [J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 835: 103–108.

[8] 江晨, 齐宏涛, 于丽娜, 等. 响应面优化花生蛋白抗菌肽制备工艺[J]. 山东农业科学, 2021, 53(11): 111–119.
JIANG C, QI HT, YU LN, *et al*. Optimization of peanut antibacterial peptide preparation by response surface methodology [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(11): 111–119.

[9] 于丽娜, 杜德红, 张初署, 等. 响应面法优化微波辅助酶解制备 α-葡萄糖苷酶抑制活性肽工艺[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 117–122, 136.
YU LN, DU DH, ZHANG CS, *et al*. Optimization of preparation process of α-glucosidase inhibitory activity peptide with microwave assisted enzymatic hydrolysis reaction by response surface methodology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(4): 117–122, 136.

[10] CAO WJ, LIU R, ZHAO WX, *et al*. Potential of marine bacterial Metalloprotease A69 in the preparation of peanut peptides with angiotensin-converting enzyme (ACE)-inhibitory and antioxidant properties [J]. Marine Drugs, 2024, 22(7): 305.

[11] 刘欣, 刘昆仑. 富硒花生降胆固醇活性肽的制备工艺优化及活性研究[J]. 中国油脂, 2024, 49(12): 113–119.
LIU X, LIU KL. Optimization of preparation process and activity of selenium-enriched peanut peptides with cholesterol-lowing activity [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(12): 113–119.

[12] 于晓晨, 李臻, 胡佳妮, 等. 花生肽对小鼠的抗疲劳作用研究[J]. 中国食物与营养, 2021, 21(7): 63–67.
YU XC, LI Z, HU JN, *et al*. Anti-fatigue effect of peanut peptide on mice [J]. Food and Nutrition in China, 2021, 21(7): 63–67.

[13] MA R, BAI JR, HUANG YT, *et al*. Purification and identification of novel antioxidant peptides from hydrolysates of peanuts (*Arachis hypogaea*) and their neuroprotective activities [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(15): 6039–6049.

[14] CAO B, LI Q, CHEN ZY, *et al*. Purification and identification of antioxidant activity and angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitory activity peptide of peanut protein based on ultrafiltration (UF) membrane separation [J]. Food Bioscience, 2025, 66: 106287.

[15] OLUWAJUYITAN TD, KADAM D, ALUKO RE. Amino acid profile, peptide size distribution, antioxidant effect, and enzyme inhibitory activities of fava bean (*Vicia fava*) protein hydrolyzates [J]. International Journal of Food Properties, 2025, 28(1): 2466575.

[16] SUN ZD, TANG Z, YANG XX, *et al*. 3-tert-Butyl-4-hydroxyanisole impairs hepatic lipid metabolism in male mice fed with a high–fat diet [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(5): 3204–3213.

[17] YU LN, FENG SY, SONG Y, *et al*. Exploring the extraction, antioxidant activities and its stabilities of peanut skins crude proanthocyanidins extract [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 26274.

[18] 徐倩, 毛绍云, 柏倩. 女贞子抗氧化肽对 HEK293 细胞氧化应激损伤保护作用研究[J]. 食品与发酵科技, 2025, 61(4): 44–54.
XU Q, MAO SY, BAI Q. Study on the protective effect of antioxidant peptides from *Ligustrum lucidum* on oxidative stress injury in HEK293

cells [J]. Food and Fermentation Science &Technology, 2025, 61(4): 44–54.

[19] 付媛, 张美莉, 乌兰图亚. 黑麦抗氧化肽清除自由基活性机理的量子化学计算[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 132–140.
FU Y, ZHANG ML, WULAN TY. Activity mechanism of free radical scavenging of peptides from rye by quantum chemical calculation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 132–140.

[20] 韩覃泽, 于文珺, 张雨, 等. 南瓜籽抗氧化肽的制备表征及其对 H_2O_2 损伤 Caco-2 细胞的保护作用[J]. 食品科学, 2025, 46(18): 146–154.
HAN XZ, YU WJ, ZHANG Y, *et al*. Preparation and characterization of antioxidant peptides from pumpkin seeds and their protective effect against [J]. Food Science, 2025, 46(18): 146–154.

[21] 吴云芳, 王方. 米糠蛋白多肽的抗氧化及抗疲劳活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(21): 323–333.
WU YF, WANG F. Study on the antioxidant and anti-fatigue activities of rice bran protein peptides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(21): 323–333.

[22] HUO JY, CUI ZW, ZHANG RR, *et al*. Study on the effect and mechanism of ultrasonic-assisted enzymolysis on antioxidant peptide activity in walnuts [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 112: 107159.

[23] MFENGWANA PMAH. Phytochemical constituents, ferric reducing and radical scavenging activities of helichrysm caespititium [J]. Natural Product Research, 2023, 39(9): 2526–2531.

[24] AVILÉS-GAXIOLA S, CONTRERAS-ANGULO LA, GARCÍA-AGUIAR I, *et al*. *Moringa oleifera* Lam. leaf peptides: Antioxidant and antiproliferative activity in human colon cancer caco-2 cell line [J]. Antioxidants, 2024, 13(11): 1367.

[25] SHUKOR MY, HALMI MIE, RAHMAN MFA, *et al*. Molybdenum reduction to molybdenum blue in *Serratia* sp strain DRY5 is catalyzed by a novel molybdenum-reducing enzyme *Serratia* sp. [J]. Biomed Research International, 2014, 2014: 853084.

[26] 张涵, 黄意情, 王海东, 等. 五味子蛋白酶解前后抗氧化活性和功能特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(15): 42–52.
ZHANG H, HUANG YQ, WANG HD, *et al*. Antioxidant activity of *Schisandra chinensis* protein before and after enzymolysis and functional [J]. Food Research and Development, 2024, 45(15): 42–52.

[27] GUO HY, ZHOU Y, WANG DY, *et al*. Isolation, identification, and virtual screening of peptides with ferrous ion chelating activity from poultry blood hemoglobin [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 231: 118314.

[28] MAZZONE G. On the inhibition of hydroxyl radical formation by hydroxycinnamic acids: The case of cffeic acid as a promising chelating ligand of a ferrous ion [J]. Journal of Physical Chemistry A, 2019, 123(44): 9560–9566.

[29] WAKE H, TAKAHASHI Y, YOSHII Y, *et al*. Histidine-rich glycoprotein possesses antioxidant activity through self-oxidation and inhibition of hydroxyl radical production via chelating divalent metal ions in Fenton's reaction [J]. Free Radical Research, 2020, 54(8-9): 649–661.

[30] 肖柳柳, 王爱琳, 陶梦雪, 等. 核桃粕抗氧化肽对核桃油贮藏品质的影响 [J/OL]. 食品与发酵工业, 1–10. [2025-03-18]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041898
XIAO LL, WANG AIL, TAO MX, *et al*. Effect of antioxidant peptides from walnut meal on storage quality of walnut oil [J/OL]. Food and Fermentation Science &Technology, 1–10. [2025-03-18]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041898

[31] 胡锦瑞. 绿豆抗氧化肽的制备及其对高脂诱导小鼠肠道代谢产物的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2024.
HU JR. Preparation of antioxidant peptides from mung beans and their effects on intestinal metabolites in mice with high lipid induction [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2024.

[32] 谢晓妍, 张芸溪, 王颖, 等. 白芸豆抗氧化肽稳定性分析及其修复细胞氧化应激损伤的研究[J/OL]. 食品工业科技, 1–13. [2025-06-18]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030206
XIE XY, ZHANG YX, WANG Y, *et al*. Stability analysis and oxidative stress mitigation effects of white kidney bean antioxidant peptide on cellular damage [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1–13. [2025-06-18]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030206

[33] SINGH BP, VIJ S. *In vitro* stability of bioactive peptides derived from fermented soy milk against heat treatment, pH and gastrointestinal enzymes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 303–307.

[34] 冉思婷, 麦素丽, 郭心冉, 等. 灵芝孢子粉抗氧化肽酶解工艺优化及其稳定性分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(1): 106–114.
RAN ST, MAI SL, GUO XR, *et al*. Optimization of preparation process and stability analysis of antioxidant peptides in *Ganoderma lucidum* spore powder [J]. Food Research and Development, 2025, 46(1): 106–114.

[35] 王子俊, 徐鹏飞, 朱天晴, 等. 牦牛骨胶原蛋白肽的抗氧化活性验证、稳定性评估及机制分析[J/OL]. 食品与发酵工业, 1–12. [2025-02-18]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041706
WANG ZJ, XU PF, ZHU TQ, *et al*. Verification of antioxidant activity, stability evaluation, and mechanism analysis of yak bone collagen peptide [J/OL]. Food and Fermentation Science &Technology, 1–12. [2025-02-18]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041706

[36] 郭其洪, 李兴丽, 范江平, 等. 辣木籽抗氧化肽的分离鉴定及其稳定性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 41–47.
GUO QH, LI XL, FAN JP, *et al*. Isolation, identification and stability analysis of antioxidant peptides from *Moringa oleifera* seeds [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 41–47.

[37] 郑义, 李诗颖, 李闯, 等. 银杏肽锌螯合物的制备、体外消化及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 420–427.
ZHENG Y, LI SY, LI C, *et al*. Preparation, *in vitro* gastrointestinal digestion and antioxidant activity of *Ginkgo biloba* peptides-zinc chelate [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 420–427.

[38] 张红玉, 李会珍, 张志军, 等. 紫苏粕酶解工艺优化及其多肽抗氧化稳定性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(6): 157–166.
ZHANG HY, LI HZ, ZHANG ZJ, *et al*. Enzymatic hydrolysis process optimization of perilla meal and antioxidant stability of polypeptides [J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 157–166.

[39] 郑昌亮, 陈梦婷, 汪兰, 等. 鳙鱼肌原纤维蛋白源抗氧化肽的稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(8): 43–50.
ZHENG CL, CHEN MT, WANG L, *et al*. Stability of antioxidant peptides from bighead carp (*Aristichthys nobilis*) myofibrillar protein [J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2023, 49(8): 43–50.

[40] 董原, 童玲, 王晓杰. 玉米糖肽抗氧化活性的稳定性研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(9): 100–106.
DONG Y, TONG L, WANG XJ. Stability of antioxidant activities of zein glycopeptide [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(9): 100–106.

[41] 刘晓艺, 周玉岩, 过利敏, 等. 不同分子量红花籽抗氧化肽稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 94–102.
LIU XY, ZHOU YY, GUO LM, *et al*. Study on the stability of antioxidant peptides from safflower seeds with different molecular weight [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 94–102.

[42] 唐雅园, 王雪峰, 韦珍, 等. 香蕉花多糖抗氧化活性及稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 101–107.
TANG YY, WANG XF, WEI Z, *et al*. Antioxidant activity and stability of polysaccharide from banana flower [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 101–107.

[43] WANG X, YU H, XING R, *et al*. Optimization of the extraction and stability of antioxidative peptides from mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) protein [J]. BioMed Research International, 2017, 2017(1): 6837285.

[44] GALLEGO M, MORA L, REIG M, *et al*. Stability of the potent antioxidant peptide SNAAC identified from Spanish dry-cured ham [J]. Food Research International, 2018, 105: 873–879.

(责任编辑: 安香玉　冯东慧)