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]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 417−427. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030206

XIE Xiaoyan, ZHANG Yunxi, WANG Ying, et al. Stability Analysis and Oxidative Stress Mitigation Effects of White Kidney Bean Antioxidant Peptide on Cellular Damage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 417−427. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030206

· 营养与保健 ·

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

谢晓妍[1], 张芸溪[1], 王　颖[1,2,3,*], 刘　童[1], 李思楠[4], 庞惟俏[1], 佐兆杭[1], 张　璐[4,*], 管　骁[5], 赵自力[6], 李　冰[6]

（1.黑龙江八一农垦大学 食品学院, 黑龙江大庆 163319;
2.国家杂粮工程技术中心, 黑龙江大庆 163319;
3.厦门海洋职业技术学院, 福建厦门 361100;
4.中国食品发酵工业研究院有限公司, 功能主食创制与慢病营养干预北京市重点实验室, 北京 100015;
5.上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093;
6.安徽省农业科学院皖北研究院, 安徽阜阳 236600）

摘　要: 目的：以前期制备的 Mw<3 kDa 的白芸豆抗氧化肽（White kidney bean antioxidant peptides，WKBAPs）为原料探究其体外稳定性及对细胞损伤的保护作用。方法：通过测定 WKBAPs 体外 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基、羟自由基清除率和总抗氧化能力分析 pH、温度、金属离子、食品配料成分和体外消化对 WKBAPs 稳定性的影响，并利用偶氮二异丁基二盐酸盐（AAPH）诱导 HepG2 细胞建立氧化损伤模型研究 WKBAPs 对细胞氧化应激损伤的保护作用。结果：WKBAPs 在不同处理条件下抗氧化活性有所波动，但整体表现稳定，仍能保持较高的抗氧化活性，经强酸、强碱、高温（>60 ℃）、高浓度 Ca^{2+}、Zn^{2+}和 Cu^{2+}及高质量分数的 NaCl、柠檬酸和葡萄糖处理后，WKBAPs 的抗氧化活性均显著降低（P<0.05），在 K^+浓度增加时，WKBAPs 的 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率先降低后逐渐保持稳定，羟自由基清除率和总抗氧化能力略有下降但不显著（P>0.05）；在肠消化阶段自由基清除率显著降低，但在肠消化终点（240 min）仍具有较好的抗氧化活性，其 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基、羟自由基清除率和总抗氧化能力分别为 78.03%±1.01%、94.05%±0.47%、74.75%±0.29% 和 0.76±0.02 mmol Fe^{2+}/g。此外，WKBAPs 能显著增加细胞的存活率、提高超氧化物歧化酶（SOD）和谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）的活力，减少活性氧（ROS）的产生、降低乳酸脱氢酶（LDH）水平、抑制丙二醛（MDA）的生成。结论：WKBAPs 具有良好的体外稳定性并且能有效地修复细胞损伤，这一结果为其在食品保健领域的开发及应用提供了理论支持。

关键词: 白芸豆抗氧化肽, 抗氧化活性, 稳定性, 氧化损伤, HepG2 细胞模型

中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0417−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030206　　本文网刊:

Stability Analysis and Oxidative Stress Mitigation Effects of White Kidney Bean Antioxidant Peptide on Cellular Damage

XIE Xiaoyan[1], ZHANG Yunxi[1], WANG Ying[1,2,3,*], LIU Tong[1], LI Sinan[4], PANG Weiqiao[1], ZUO Zhaohang[1], ZHANG Lu[4,*], GUAN Xiao[5], ZHAO Zili[6], LI Bing[6]

（1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

收稿日期: 2025−03−17

基金项目: 国家重点研发计划项目“杂粮产业链一体化示范”（2020YFD1001400）; 江淮杂粮产业工程技术研发创新基地项目。

作者简介: 谢晓妍（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: xxy10750220@163.com。

*** 通信作者:** 王颖（1979−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程及食品质量安全, E-mail: wychen156@163.com。

张璐（1987−）, 女, 博士, 高级工程师, 研究方向: 功能食品开发与精准营养及功效评价, E-mail: zhanglu8078@126.com。

2.National Coarse Cereals Engineering Center, Daqing 163319, China；
3.Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361100, China；
4.China National Research Institute of Food and Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing Key Laboratory of the Innovative Development of Functional Staple and the Nutritional Intervention for Chronic Disease, Beijing 100015, China；
5.School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China；
6.Anhui Academy of Agricultural Sciences Wanbei Research Institute, Fuyang 236600, China）

Abstract: Objective: To investigate the *in vitro* antioxidant activity and stability of white kidney bean antioxidant peptides (WKBAPs). Method: In order to analyze the effects of pH, temperature, metal ions, food ingredient composition, and simulated gastrointestinal digestion on the stability of antioxidant peptides in white kidney beans, the DPPH free radical scavenging rate, $ABTS^+$ free radical scavenging rate, hydroxyl free radical scavenging rate, and total antioxidant capacity were measured, and an oxidative damage model was established in HepG2 cells induced by 2,2'-azodiisobutyramidine dihydrochloride (AAPH) to explore the protective effect of WKBAPs on cellular oxidative damage. Results: Although the antioxidant activity of WKBAPs fluctuated under different processing conditions, the overall performance remained stable, still maintaining a high level of antioxidant activity. Only under strong acid, strong base, high temperatures (>60 ℃), high concentrations of Ca^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, and elevated levels of NaCl, citric acid, and glucose, the antioxidant activity of WKBAPs was significantly diminished (P<0.05). As the K^+ concentration increased, the DPPH and $ABTS^+$ radical scavenging capacities of WKBAPs initially decreased and subsequently stabilized. Meanwhile, the hydroxyl radical scavenging capacity and total antioxidant ability exhibited a slight but non-significant decline (P>0.05). During intestinal digestion, the DPPH and hydroxyl radical scavenging rates were significantly reduced, but the high antioxidant activity was still maintained. At the end of 240 minutes intestinal digestion process, its DPPH radical scavenging rate, $ABTS^+$ radical scavenging rate, hydroxyl radical scavenging rate, and total antioxidant capacity were 78.03%±1.01%, 94.05%±0.47%, 74.75%±0.29%, and 0.76±0.02 mmol Fe^{2+}/g, respectively. In the AAPH induced oxidative damage model of HepG2 cells, WKBAPs could increase the survival rate of HepG2 cells damaged by AAP oxidation. It significantly reduced the production of reactive oxygen species (ROS), dramatically decreased the release level of lactate dehydrogenase (LDH) into the cell culture supernatant due to membrane damage, inhibited the production of malondialdehyde (MDA), and enhanced the activity of superoxide dismutase (SOD) and glutathione peroxidase (GSH-Px). Conclusion: WKBAPs has good *in vitro* antioxidant activity and stability, providing a theoretical basis for its application and development in the field of food and healthcare.

Key words: white kidney bean antioxidant peptide; antioxidant activity; stability; oxidative damage; HepG2 cell model

氧化应激是由机体自由基生成与清除系统失衡引起的病理状态[1]，与衰老、癌症、心血管疾病及神经退行性疾病等密切相关[2−3]。自由基通过攻击生物大分子（如 DNA、蛋白质和脂质），导致细胞功能紊乱甚至凋亡[4]。因此，开发高效、安全的抗氧化剂以缓解氧化损伤已成为现代医学与食品科学的研究热点。传统合成的抗氧化剂（叔丁基-4-羟基茴香醚、2,6-二叔丁基对甲酚等）虽效果显著，但潜在的毒副作用和生物利用度问题限制了其应用[5]，天然来源的抗氧化活性物质因其安全性和多样性逐渐受到重视。

植物源性抗氧化肽因其分子量小、穿透性强、活性高且易于吸收的特点备受研究者青睐[6]。近年来，众多学者致力于从植物资源中开发具有抗氧化活性的多肽，以期获得安全、高效的新型抗氧化剂。豆科植物中富含的生物活性肽可通过清除自由基、结合金属离子或激活内源性抗氧化酶系统发挥抗氧化作用[7−8]。白芸豆作为我国传统药食两用资源，其营养丰富、价格低廉，蛋白质含量高且富含所有人体必需氨基酸[9]，是制备抗氧化肽的理想植物原料。近年来，已有研究报道白芸豆多肽具有较好的体外抗氧化活性[10]。抗氧化肽的实际应用价值与其环境稳定性密切相关，温度、pH、消化酶等因素可能引起肽链构象变化或降解，导致活性丧失[11]。此外，在食品加工中，食品配料成分复杂多样，它们相互作用共同影响着食品的整体性质。杨涵[12] 发现大豆抗氧化肽在高温（>60 ℃）条件下活性稳定，但强碱性（pH>9）条件下活性显著下降，而李雪[13] 也证实外源因素会导致紫花芸豆肽的生物活性下降。目前，白芸豆源抗氧化肽在不同加工或生理条件下的稳定性尚未明确，这限制了其在功能食品或医药领域的进一步开发。此外，现有研究多聚焦于体外化学抗氧化模型，而关于其在细胞水平上对氧化损伤的干预效应的研究仍显不足。

基于此，本研究以白芸豆抗氧化肽（White kidney bean antioxidant peptides, WKBAPs）为原料，系统评价其在热处理、pH 梯度变化、金属离子、食品配料浓度变化及体外消化条件下的活性稳定性，并采用

偶氮二异丁基二盐酸盐（2,2'-Azodiisobutyramidine dihydrochloride, AAPH）诱导 HepG2 细胞氧化损伤模型，探究 WKBAPs 在细胞层面的抗氧化活性，以期为 WKBAPs 的加工工艺优化及新型天然抗氧化剂的开发提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

白芸豆蛋白（纯度为 89%）　实验室自提；枯草芽孢杆菌　中国工业微生物菌种保藏中心；HepG2 细胞　中国食品发酵工业研究院有限公司保存；中性蛋白酶（50000 U/g）　北京 Solarbio 生物科技有限公司；维生素 C（V_C）标准品、二甲基亚砜（DMSO）　上海麦克林生化科技有限公司；硫酸亚铁（$FeSO_4$）、水杨酸　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（ABTS）、2,4,6-三吡啶基三嗪（TPTZ）、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、偶氮二异丁基二盐酸盐（AAPH）　美国 Sigma 公司；磷酸盐缓冲液（PBS）、胰蛋白酶消化液（5×10^4 U）、α-MEM液体培养基　中科迈晨（北京）科技有限公司；CCK-8试剂盒（>99.0%）、BCA 蛋白质浓度测定试剂盒　上海碧云天生物技术有限公司；ROS、MDA、LDH、SOD、GSH-Px 活性测定试剂盒　南京建成生物工程研究所。

CHRIST 真空冷冻干燥机　德国 Christ 公司；YXQ-100G 高温高压灭菌锅　上海博迅医疗生物仪器有限公司；DL-CL-2ND 超净工作台　哈东联电子技术有限公司；DNP-9052 恒温培养箱　上海精宏实验设备公司；HZQ-A 恒温摇床　常州市科迈实验仪器有限公司；Cf72-8YW 酶联免疫检测仪　珀金埃尔默仪器有限公司；CKX41 倒置式生物显微镜　OLYMPUS 公司；E191IR CO_2 培养箱　美国 GOLD-SIM 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　WKBAPs 制备　准确称取白芸豆蛋白 5 g 加入 100 mL 去离子水溶解，添加 3000 U/g 中性蛋白酶于 53 ℃、pH 为 7 条件下酶解 2 h，121 ℃ 灭菌灭酶 15 min 进行后续发酵。加入 5% 枯草芽孢杆菌种子液（活菌数为 1.0×10^7 CFU/mL），37 ℃ 下发酵 48 h，发酵完毕后离心（4000 r/min，15 min）收集上清液后采用分子量为 3 kDa 的超滤管进行超滤分离，得到分子量<3 kDa 的组分，收集浓缩并冷冻干燥，得到 WKBAPs。

1.2.2　抗氧化活性稳定性实验

1.2.2.1　pH 对 WKBAPs 抗氧化活性的影响　参考 Singh 等[14] 方法，配制 1 mg/mL WKBAPs 溶液，分别将其 pH 调至 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0、12.0，于室温静置 2 h 后调至原始 pH，并测其抗氧化活性。

1.2.2.2　温度对 WKBAPs 抗氧化活性的影响　参考王子俊等[15] 方法，配制 1 mg/mL WKBAPs 溶液，在 20、40、60、80、100 ℃ 下分别保温 2 h，每 30 min 测定一次抗氧化活性。

1.2.2.3　金属离子对 WKBAPs 抗氧化活性的影响　参考韦珍等[16] 方法并稍作修改，配制 1 mg/mL WKBAPs 溶液，分别向溶液中加入 0、0.5、1、1.5、2 mmol/L 的 KCl、$CaCl_2$、$CuSO_4$、$ZnSO_4$，室温静置 2 h 后测其抗氧化活性。

1.2.2.4　食品配料成分对 WKBAPs 抗氧化活性的影响　参考杨艾华等[17] 方法并稍作修改，配制 1 mg/mL 的 WKBAPs 溶液，在溶液中分别添加质量分数分别为 0、1%、2%、3%、4% 的 NaCl、葡萄糖、柠檬酸，室温放置 2 h 后，测定其抗氧化活性。

1.2.2.5　体外消化对 WKBAPs 抗氧化活性的影响　参照李思楠等[18] 的方法。在 1 mg/mL WKBAPs 样品溶液 10 mL 中加入 10 mL 胃液，振荡孵化 1 h（37 ℃、200 r/min），随后迅速添加 NaOH（2 mol/L）调节 pH 至 7.0，以终止胃模拟消化。之后于消化体系中加入 20 mL 肠液，振荡孵育 3 h（200 r/min、37 ℃）。分别于消化时间为 0、20、40、60、80、100、120、150、180、210、240 min 时吸取适量样品，沸水浴加热灭酶（100 ℃，10 min）后离心（5000 r/min，10 min）后取上清液，测定胃肠道消化对 WKBAPs 抗氧化活性的影响。

1.2.3　抗氧化活性测定

1.2.3.1　DPPH 自由基清除率　参考 Sun 等[19] 方法，将 WKBAPs 溶液与 0.1 mmol/L DPPH-乙醇溶液按 1∶1 混合后暗反应（25 ℃，30 min），测定 517 nm 处 OD 值，根据公式（1）计算。

$$P(\%)=\left[1-\frac{(A_i-A_j)}{A_0}\right]\times100 \qquad 式（1）$$

式中：P 为自由基清除率；A_i 为样品与显色剂混合液的吸光度；A_j 为样品不加显色剂的吸光度；A_0 为不加样品的吸光度。

1.2.3.2　$ABTS^+$自由基清除率　参考沙玉欢等[20] 方法，取 1.4 mL 稀释后的 ABTS 工作液与 0.1 mL WKBAPs 溶液混匀，避光反应（25 ℃，6 min），测定 734 nm 处 OD 值，计算如公式（1）。

1.2.3.3　羟自由基清除率　参考夏吉安等[21] 方法。将 WKBAPs 溶液与 $FeSO_4\cdot7H_2O$ 溶液（6 mmol/L）和 H_2O_2 溶液（6 mmol/L）按 1∶1∶1 的体积比混匀后反应（37 ℃，10 min），接着向反应体系中加入 1 mL 水杨酸溶液（6 mmol/L），并充分混合，继续孵育（37 ℃，30 min），测定 510 nm 处 OD 值，计算如公式（1）。

1.2.3.4　总抗氧化能力　参考卢跃红等[22] 方法。取 0.1 mL WKBAPs 溶液加入 0.5 mL FRAP 试剂，37 ℃ 反应 10 min，测定 595 nm 处 OD 值，铁离子还原能力以 Fe_SO_4 当量表示。Fe_SO_4 标准曲线回归方

程为: y=0.219x−0.0008, R^2=0.9995。

1.2.4 HepG2 细胞培养及分组 将 HepG2 细胞置于恒温培养箱(37 ℃, 5% CO_2)中孵育 24 h。当细胞密度接近 80% 时, 移除旧培养液, 用预冷 PBS 缓冲液(pH7.0)轻柔漂洗, 随后加 1 mL 胰酶常温孵育 1 min, 传代培养。选取对数期状态良好的细胞悬液经细胞计数后均匀铺于细胞培养皿中, 并对其进行分组。设置正常组(无酚红的纯培养基)、模型组(添加 1.5 mmol/L AAPH 溶液)、阳性对照组(将 1.5 mmol/L AAPH 与 50 μg/mL V_C 溶液混合干预)、试验组(将 AAPH 与 WKBAPs 溶液混合, WKBAPs 终浓度为 200~600 μg/mL)。

1.2.5 CCK-8 法测定 AAPH 及 WKBAPs 对 HepG2 细胞的毒性作用 参照李海枝等[23] 的方法并稍加修改。在 96 孔板中加入 100 μL 细胞悬液(1×10^5 cell/mL), 于恒温培养箱(37 ℃, 5% CO_2)培养24 h, 吸去旧培养基, 后加入不同浓度 AAPH 溶液(终浓度分别为 0.125、0.25、0.5、1、1.5、2、2.5 mmol/L)和 WKBAPs 溶液(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL)于恒温培养箱(37 ℃, 5% CO_2)培养 24 h, 随后加入 50 μL CCK-8 试剂并孵育 2 h, 测定 450 nm 处 OD 值, 按公式(2)计算细胞存活率。

$$细胞存活率(\%)=\left[\frac{C_1-C_2}{C_3-C_2}\right]\times100 \qquad 式(2)$$

式中: C_1 为样品孔的吸光度值; C_2 为空白孔的吸光度值; C_3 为对照孔的吸光度值。

1.2.6 AAPH 诱导细胞氧化损伤模型的建立 将 HepG2 细胞以 1×10^6 cell/mL 的密度接种至 6 孔板中, 于恒温培养箱(37 ℃, 5% CO_2)中孵育 24 h, 待细胞生长至 80% 左右时加入不同浓度的 AAPH(0.5、1、1.5、2、2.5 mmol/L)诱导 24 h, 诱导结束后, 使用 PBS 清洗, 随后按照试剂盒方法, 测定各组细胞 SOD、GSH-Px、ROS 和 MDA 水平。

1.2.7 WKBAPs 对 AAPH 诱导 HepG2 细胞的氧化因子的影响 细胞培养分组同 1.2.4 处理细胞后, 按照试剂盒方法, 处理细胞并测定各组细胞 SOD、GSH-GPx、ROS、LDH、MDA 水平。

1.3 数据处理

采用 Origin 2022 软件进行制图, 利用 IBM SPSS statistics 21.0 软件进行 ANOVA 显著性分析。每个样品均做 3 个平行, 结果以平均值±标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 WKBAPs 稳定性分析

2.1.1 pH 对 WKBAPs 抗氧化活性的影响 在食品加工过程中, pH 是影响活性肽稳定性的重要因素之一。由图 1 可知, 经强酸、强碱处理后, WKBAPs 的抗氧化活性均显著降低(P<0.05), 推测可能是在强酸或强碱条件下多肽空间结构发生变化[24], 从而降低了其与自由基结合的能力, 导致抗氧化活性下降, 这一结果与唐宁等[25] 对玉米抗氧化肽稳定性的研究结果类似。综上所述, 在食品加工过程中, 应注意控制体系的 pH 应处于中性或偏碱性, 以保持抗氧化肽的稳定性和活性。

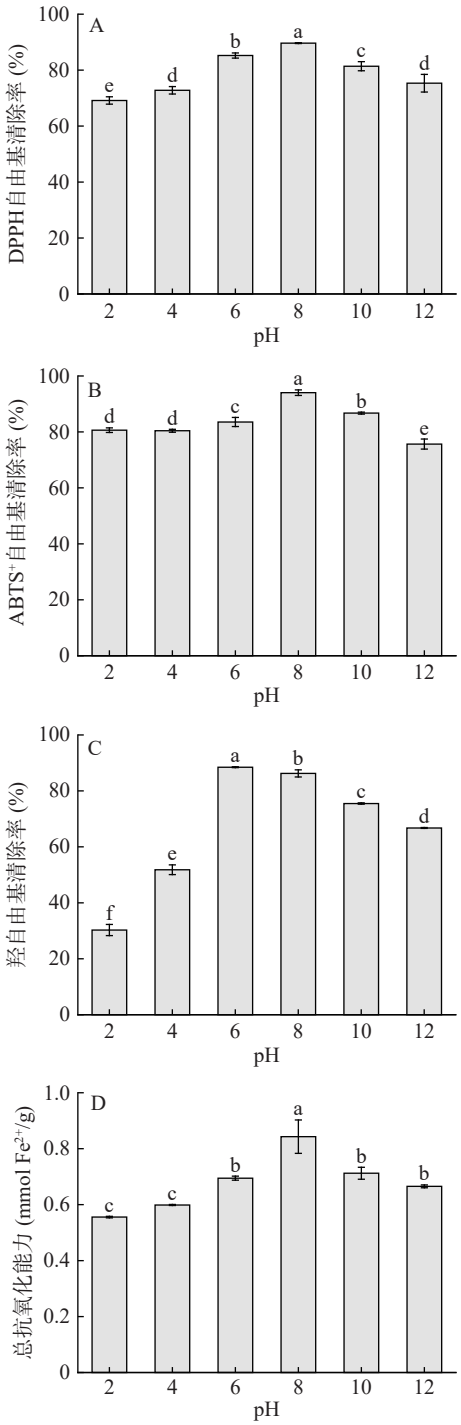


图 1 不同 pH 对 WKBAPs 抗氧化活性的影响

Fig.1 Effect of different pH on the antioxidant activity of WKBAPs

注: 图中不同字母表示组间差异显著(P<0.05); 图 2~图 8 同。

2.1.2 温度对 WKBAPs 的抗氧化活性的影响 如图 2 所示, WKBAPs 在 20~40 ℃ 范围内抗氧化活性保持稳定, 随着温度和加热时间的增加, 抗氧化活性显著降低(P<0.05)。在温度为 100 ℃ 处理 2 h 后, WKBAPs 的抗氧化活性均显著降低(P<0.05),

DPPH、$ABTS^+$、羟自由基清除率和总抗氧化能力分别从 87.51% 下降至 78.36%、90.80% 下降至 80.38%、85.68% 下降至 79.92% 以及 0.8052 mmol Fe^{2+}/g 下降至 0.7431 mmol Fe^{2+}/g。表明 WKBAPs对温度变化的敏感度较高，可能是由于极端热环境诱发多肽链的构象重排，从而影响了其抗氧化活性，并且蛋白质结构易受高温影响而变性，导致抗氧化活性降低[14]。结果表明，在加工过程中，应注意控制温度，以保持抗氧化肽的稳定性和活性。

2.1.3　金属离子对 WKBAPs 的抗氧化活性的影响

在食品加工、贮藏及运输环节中金属容器的使用是不可避免的，而金属离子的出现可能会对产品的质量及功效造成影响[26]。金属离子对 WKBAPs 抗氧化活性的影响如图 3 所示，K^+浓度增加时，WKBAPs 的 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率先降低后逐渐保持稳定，羟自由基清除率和总抗氧化能力略有下降，但总体影响不显著（P>0.05）。随着 Ca^{2+}、Zn^{2+}和 Cu^{2+}离子浓度的增加，WKBAPs 的抗氧化活性显著下降

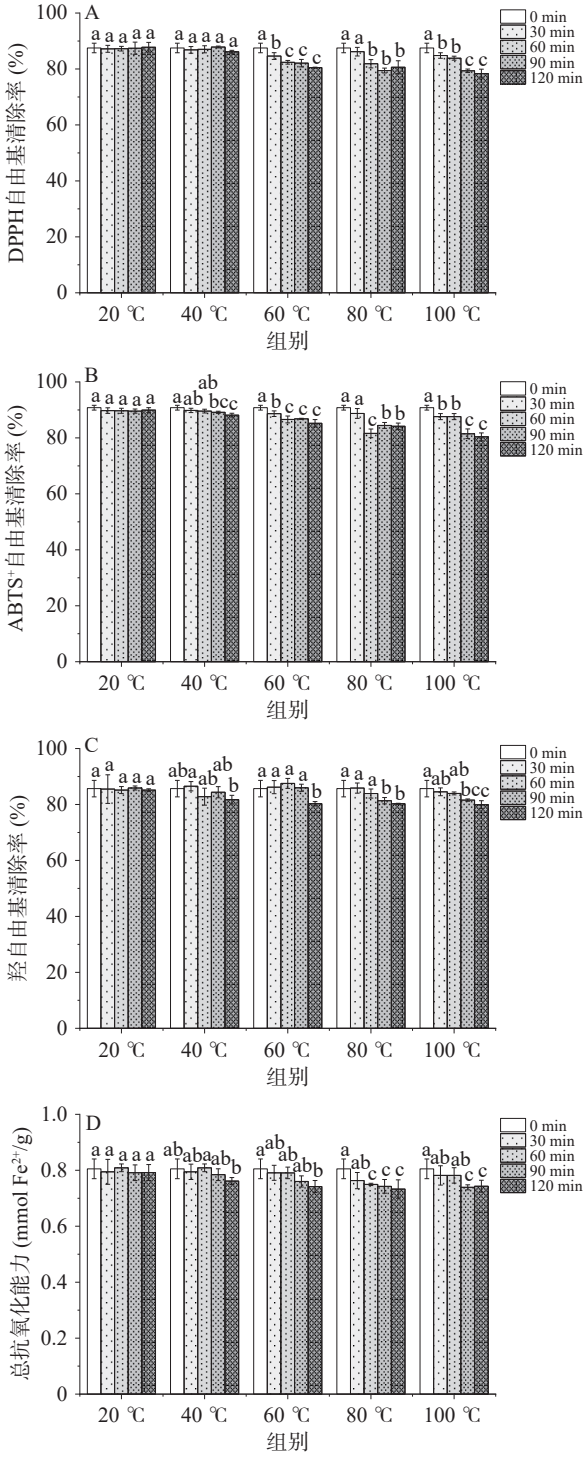


图 2　不同温度对 WKBAPs 抗氧化活性的影响

Fig.2　Effect of different temperature levels on the antioxidant activity of WKBAPs

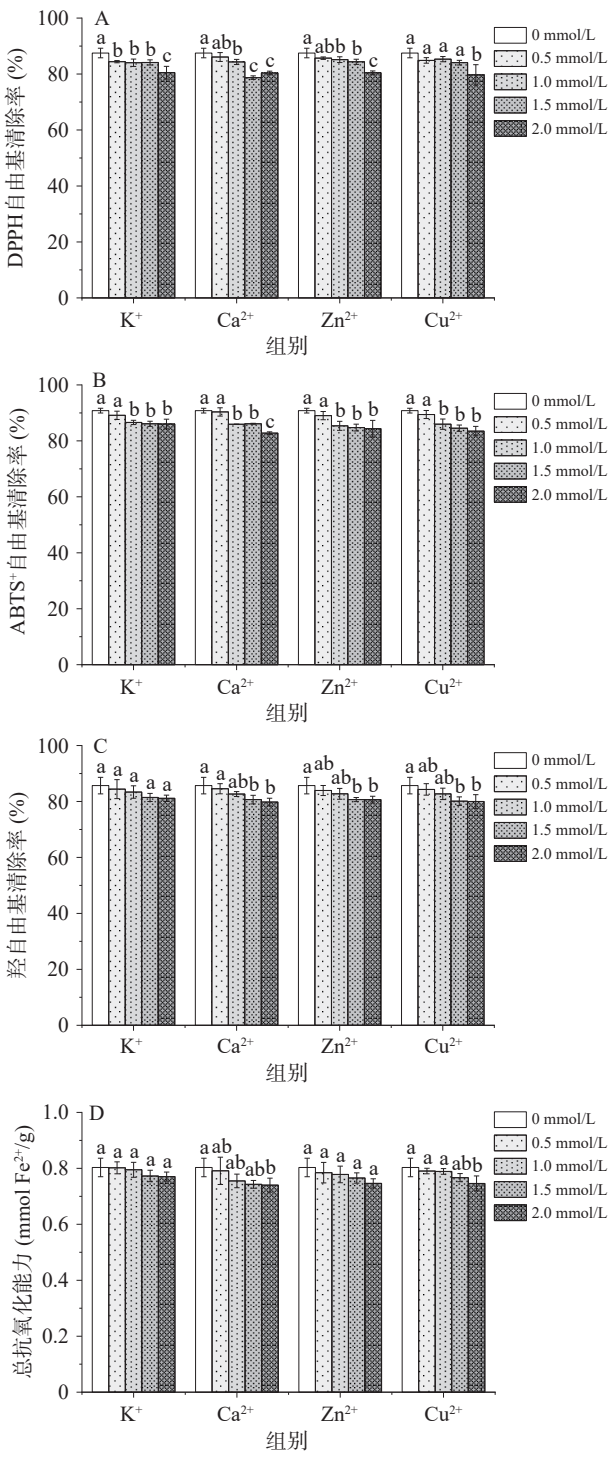


图 3　不同金属离子对 WKBAPs 抗氧化活性的影响

Fig.3　Effect of different metal ions on the antioxidant activity of WKBAPs

(P<0.05), 该趋势与张靖[27] 研究结论相似, 推测可能是高浓度的金属离子干扰了活性肽分子中的电子和氢原子的转移, 进而通过离子间的相互作用掩盖了肽的作用位点[28]。因此, 在 WKBAPs 加工贮藏过程中要尽量避免接触金属离子, 以保持其活性。

2.1.4 食品配料成分对 WKBAPs 的抗氧化活性的影响 在食品加工中, NaCl、葡萄糖及柠檬酸为代表的常规添加剂, 其离子强度与分子构型会影响多肽的抗氧化活性[29]。NaCl 对 WKBAPs 的抗氧化活性的影响如图 4 所示, 随着 NaCl 质量分数的增加, WKBAPs 的抗氧化活性显著下降(P<0.05)。WKBAPs 在低质量分数状态下抗氧化活性均较稳定, 原因可能是 NaCl 在水溶液中电离的 Na^+和 Cl^-能中和 WKBAPs 表面电荷, 当 NaCl 添加量超过临界阈值时, 溶液的离子强度增加并改变肽分子的电荷状态, 从而干扰了肽与自由基之间的相互作用[30]。因此, 在 WKBAPs 的加工与应用中可适量添加 NaCl。

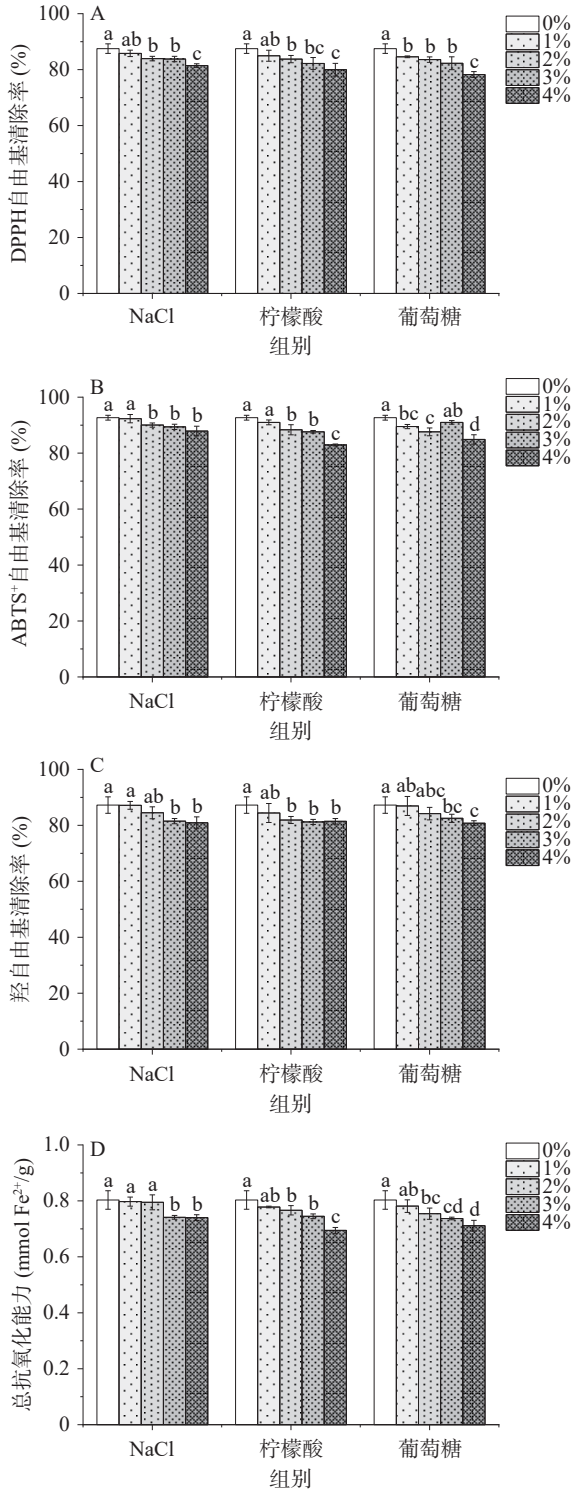


图 4 不同食品配料成分对 WKBAPs 抗氧化活性的影响

Fig.4 Effect of different food ingredient components on the antioxidant activity of WKBAPs

从图 4 可以看出, 高浓度的柠檬酸对抗氧化活性均有显著抑制作用(P<0.05), 原因可能是柠檬酸降低了体系的 pH, 影响 WKBAPs 的供电子能力, 导致抗氧化活性下降[31]。研究结果与刘帅言等[32] 研究结果中柠檬酸对 $ABTS^+$自由基清除活性有明显抑制作用相一致, 这可能是由于 WKBAPs 富含多种具有抗氧化特性的氨基酸, 而这些氨基酸在酸性环境下容易发生构象变化或降解, 从而影响其抗氧化性能, 还可能通过与抗氧化氨基酸的羧基或氨基发生相互作用[33], 进一步削弱其抗氧化活性。因此, 在 WKBAPs 的加工、储存及应用过程中, 应严格控制柠檬酸等酸性物质的添加量, 以避免抑制 WKBAPs的抗氧化活性。

如图 4 所示, 在不同浓度的葡萄糖条件下, WKBAPs 的抗氧化活性显著降低(P<0.05), 这可能是由于葡萄糖与 WKBAPs 发生非酶促褐变反应, 生成了不具有抗氧化活性的产物[34]。因此, 在 WKBAPs 的加工和应用过程中, 同样需要严格控制葡萄糖等还原糖的添加量, 以保持其良好的抗氧化活性。

2.1.5 体外消化对 WKBAPs 抗氧化活性的影响 抗氧化肽在消化酶作用下, 结构会发生改变, 从而影响其抗氧化活性[35]。如图 5 所示, 在 0~60 min 的胃液消化阶段, 随着消化时间的延长, DPPH 自由基清除率先下降后趋于平稳, 总抗氧化能力较稳定, 可能是由于胃蛋白酶主要作用于蛋白质的多肽链, 将大分子的蛋白质水解为小分子的肽和氨基酸[36], 而 WKBAPs 本身分子量较小, 结构较为简单, 因此在胃蛋白酶的作用下结构相对稳定, 抗氧化活性也未发生明显变化; 在 60~240 min 的肠消化阶段, DPPH 和羟自由基清除率显著降低(P<0.05), 但在肠消化终点(240 min)仍具有较好的抗氧化活性, 其 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基、羟自由基清除率和总抗氧化能力分别为 78.03%±1.01%、94.05%±0.47%、74.75%±0.29% 和 0.76±0.02 mmol Fe^{2+}/g。这可能是因为 WKBAPs 中的肽存在消化酶潜在结合位点, 将小分子肽水解为无活性的游离氨基酸[37−38]。综上, 经模拟胃肠消化后, WKBAPs 仍具有较高的抗氧化活性, 说明 WKBAPs 具有一定的耐胃肠消化的能力。

2.2 WKBAPs 对 HepG2 细胞氧化损伤的保护作用

2.2.1 不同浓度 AAPH 和 WKBAPs 对 HepG2 细胞活力的影响 AAPH 是一种小分子偶氮引发剂, 能

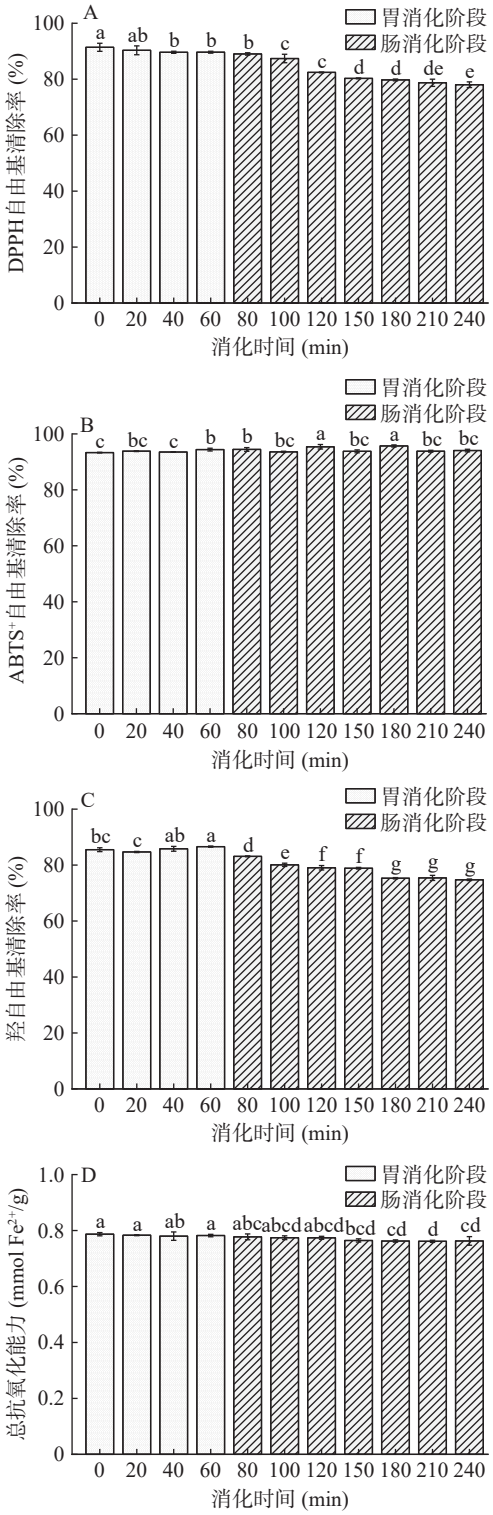


图 5　胃肠消化对 WKBAPs 抗氧化活性的影响

Fig.5　Effect of gastrointestinal digestion on antioxidant activity of WKBAPs

够诱导过氧自由基的生成[39]。如图 6(A)所示，AAPH 对细胞具有一定的损伤作用，随着 AAPH 浓度的增加，细胞存活率显著下降(P<0.05)。当 AAPH 浓度达到 0.5 mmol/L 时显著抑制细胞生长，因此选择浓度 0.5~2.5 mmol/L 进行后续实验。

图 6(B)为 WKBAPs 对 HepG2 细胞毒性的影响，经不同浓度(0.2~1.0 mg/mL)的 WKBAPs 诱导细胞 24 h 后，结果表明，与未经 WKBAPs 处理的

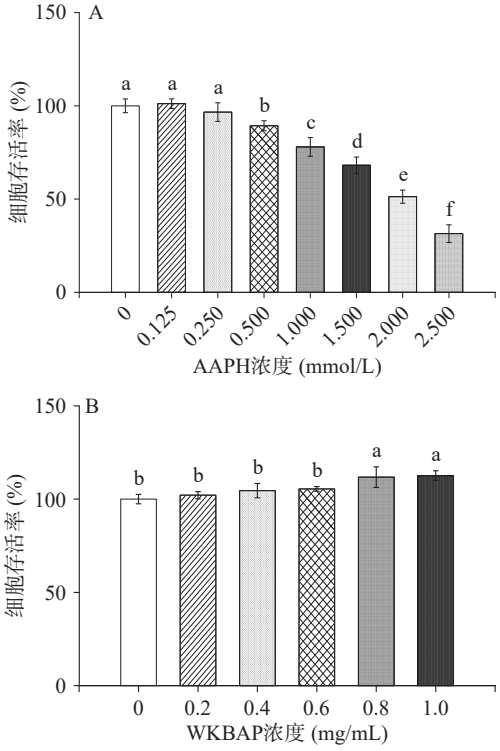


图 6　不同浓度 AAPH 及 WKBAPs 对 HepG2 细胞活力的影响

Fig.6　Effect of different concentrations of AAPH and WKBAPs on the viability of HepG2 cells

正常组细胞相比，在质量浓度为 0.2~0.6 mg/mL 时 WKBAPs 对 HepG2 细胞的增殖无显著抑制或促进作用(P>0.05)。因此，选择低剂量(0.2 mg/mL)、中剂量(0.4 mg/mL)和高剂量(0.6 mg/mL)3 种浓度用于后续各实验组。

2.2.2　HepG2 细胞氧化应激模型的建立　如图 7(A)(B)所示，采用不同浓度的 AAPH 诱导 HepG2 细胞 24 h，与正常组细胞相比，0.5~2.5 mmol/L 的 AAPH 使细胞 SOD 和 GSH-Px 活性均显著降低(P<0.05)，其中 1.5 mmol/L 浓度的 AAPH 处理 SOD 活性较正常组降低了 41.73%，GSH-Px 活性较正常组降低了 34.09%。细胞内 ROS 的过度积累会引发细胞损伤，使细胞的还原氧化稳态失衡，进而引发氧化应激[40–41]。因此，细胞内 ROS 水平可以作为细胞氧化损伤程度的直接指标。各组细胞在处理后的 ROS 水平如图 7(C)所示，经过 24 h 处理后，随着 AAPH 浓度的提高，ROS 含量也相应增加。在 1.5 mmol/L 的浓度下，ROS 水平较正常组差异显著(P<0.05)。细胞中 MDA 含量能够显示出机体内脂质过氧化的水平，进而间接反映细胞氧化损伤程度[42]。从图 7(D)可以看出，与正常组细胞相比，随着 AAPH 浓度的增加，细胞内 MDA 含量显著升高(P<0.05)，在 1.5 mmol/L 浓度下，MDA 含量较正常组增加了 303.94%。综上所述，当 AAPH 浓度为 1.5 mmol/L 时，细胞内抗氧化酶活性显著降低，ROS水平及 MDA 含量显著升高，表明该浓度 AAPH 能够成功诱导 HepG2 细胞产生氧化应激反应，且细胞存活率为

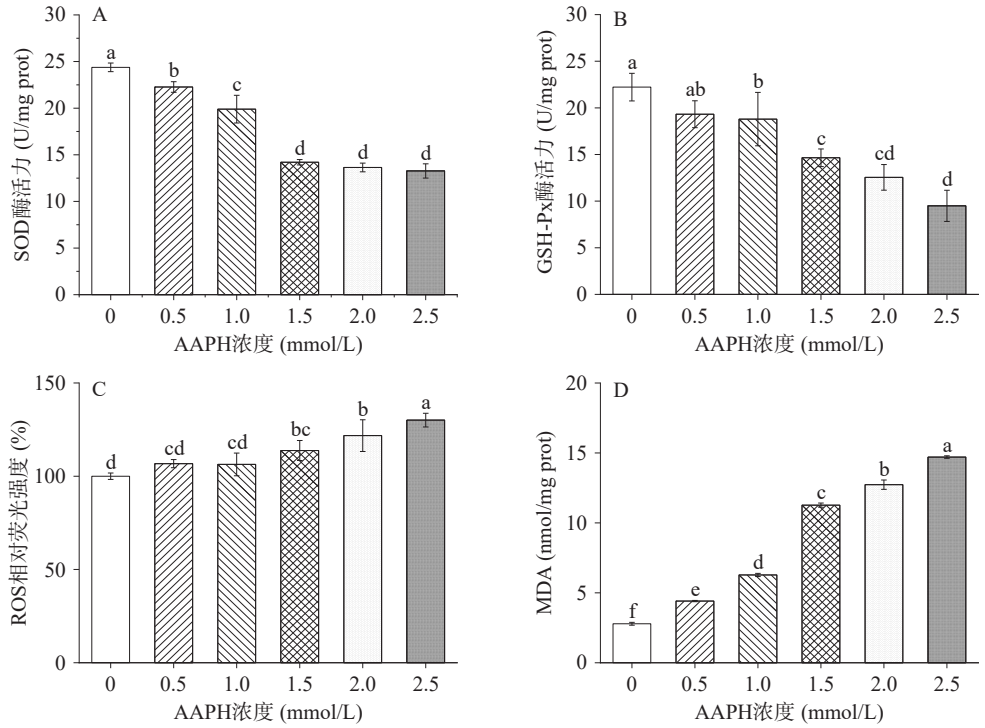


图 7 不同浓度 AAPH 对 HepG2 细胞抗氧化相关指标的影响

Fig.7 Effect of different concentrations of AAPH on antioxidant-related indicators in HepG2 cells

68.19%,因此,采用 1.5 mmol/L 的 AAPH 建立 HepG2 细胞氧化损伤模型。

2.2.3 WKBAPs 对 AAPH 诱导 HepG2 细胞氧化损伤的影响 细胞内存在的抗氧化酶系统是其抵御氧化应激损伤的重要防线,细胞内存在的抗氧化酶系统构成了其对抗氧化应激损伤的关键防御机制。因此,抗氧化酶活力的变化可反映物质的抗氧化活性[43]。如图 8(A)(B)所示,与正常组细胞相比,模型组的 SOD 和 GSH-Px 活力显著下降(P<0.05),表明建模成功。与模型组相比,低、中、高剂量组和阳性对照组的细胞内 SOD 和 GSH-Px 活力显著升高(P<0.05),且呈现浓度依赖性。其中,高剂量组的 SOD 活力接近正常组的水平,同时还能显著提高细胞内 GSH-Px 的活力,效果接近于 50 μg/mL V_C 组。

抗氧化剂在体内发挥抗氧化能力的方式有直接和间接两种,直接的抗氧化能力表现为抗氧化剂提供氢原子或电子,以清除细胞内的 ROS[44]。本研究中,测定了 WKBAPs 干预后 HepG2 细胞内 ROS 水平,结果如图 8(C)所示,与正常组相比,模型组的 ROS 水平激增到正常组的 1.9 倍,说明细胞在 AAPH 干

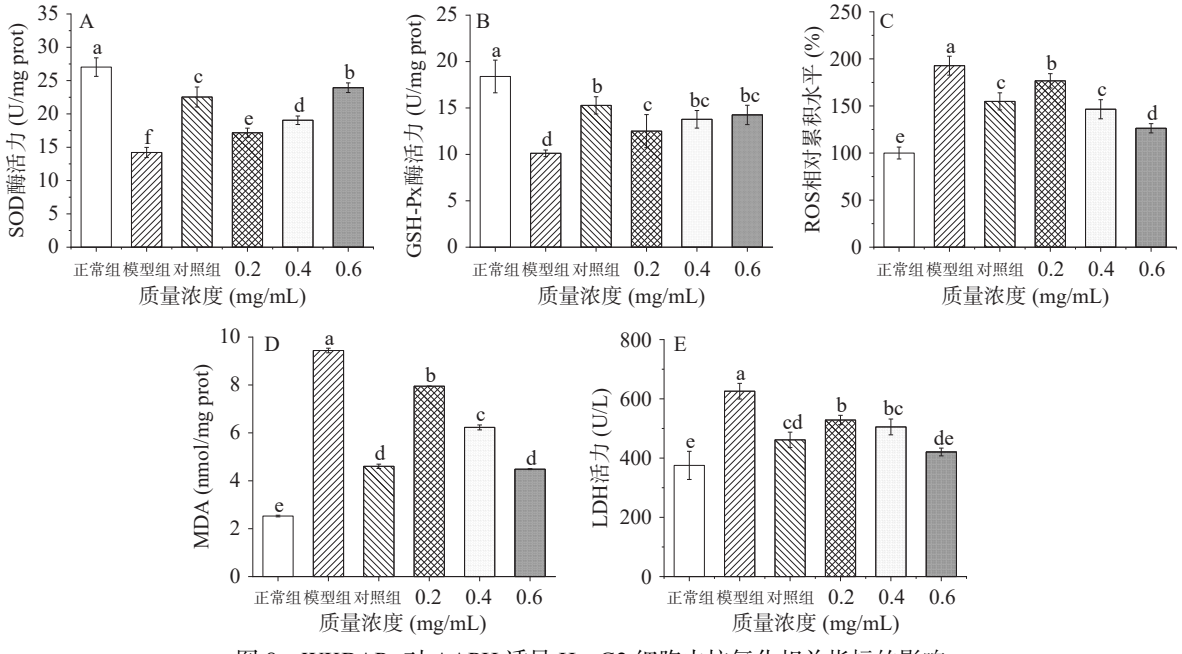


图 8 WKBAPs 对 AAPH 诱导 HepG2 细胞内抗氧化相关指标的影响

Fig.8 Effect of WKBAPs on antioxidant-related indicators in AAPH-induced HepG2 cells

预后发生了显著的氧化应激反应；与模型组相比，经 0.2、0.4 和 0.6 mg/mL 的 WKBAPs 干预后 ROS 水平均显著降低（$P<0.05$），且呈现出剂量依赖性。结果表明 WKBAPs 能够有效清除细胞内的 ROS，减轻氧化应激对细胞的损伤。

当细胞内 ROS 水平过高时会促进脂质过氧化反应，产生过氧化产物，其中 MDA 是细胞内脂质过氧化反应的关键产物之一[45]。WKBAPs 对 AAPH 诱导 HepG2 细胞中 MDA 含量的影响如图 8（D）所示，与正常组相比，模型组细胞内 MDA 含量显著增加了 273.12%（$P<0.05$），表明经 AAPH 诱导的 HepG2 细胞产生了大量的 MDA。与模型组相比，经 WKBAPs 干预后 MDA 含量显著降低（$P<0.05$），且呈现剂量依赖性，说明 WKBAPs 能够有效抑制 MDA 的生成，进而减轻氧化应激对细胞的损伤。

LDH 是一种细胞质酶，主要存在于细胞内，当细胞膜受损时会释放到培养基中，通过检测培养基中 LDH 的活力，可以判断细胞损伤情况[46]。如图 8（E）所示，与正常组相比，AAPH 处理会导致细胞外 LDH 水平显著升高（$P<0.05$），表明 HepG2 细胞膜受到破坏，而 WKBAPs 的干预能显著降低这种趋势（$P<0.05$），其中，高浓度的 WKBAPs 干预后，细胞外 LDH 水平接近正常组，说明细胞结构得到了保护，且效果优于 50 μg/mL V_C 组。综上所述，WKBAPs 的干预能修复 HepG2 细胞氧化损伤，清除细胞内多余自由基，保护细胞膜的完整性，提高细胞内抗氧化酶活力。

3　结论

本实验使用前期制备的 WKBAPs，验证其体外稳定性及对 AAPH 诱导的氧化损伤的改善作用。研究结果表明，WKBAPs 具有较好的稳定性，虽然在不同加工条件下其抗氧化活性有所波动，但整体表现稳定，特别是在极端 pH、高温、金属离子存在以及食品配料成分干扰的情况下，WKBAPs 仍能保持一定的抗氧化能力；WKBAPs 在肠消化阶段 DPPH 和羟自由基清除率显著降低，但仍保持较高的抗氧化活性。细胞实验结果显示，WKBAPs 可以显著提升被 AAPH 氧化损伤的 HepG2 细胞的存活率，减少 ROS 的产生，并显著降低 LDH 的生成。此外，WKBAPs 能够上调抗氧化酶 SOD 和 GSH-Px 的活力，抑制 MDA 的生成。综上所述，WKBAPs 表现出良好的抗氧化活性和细胞修复作用，为其在食品、保健品及医药领域的进一步应用提供理论依据，也为保健产品的开发、疾病的预防提供了新思路，但当前的研究仅局限于体外活性表征，后续将基于动物实验进一步验证其在体内的生物学功能，为白芸豆作为功能性食品改善人体健康提供科学依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] MACARRO M S, ÁVILA-GANDÍA V, PÉREZ-PIÑERO S, et al. Antioxidant effect of a probiotic product on a model of oxidative stress induced by high-intensity and duration physical exercise [J]. Antioxidants, 2021, 10(2): 323.

[2] LIGUORI I, RUSSO G, CURCIO F, et al. Oxidative stress, aging, and diseases[J]. Clinical Interventions in Aging, 2018, 13: 757−772.

[3] JELINEK M, JURAJDA M, DURIS K. Oxidative stress in the brain: Basic concepts and treatment strategies in stroke[J]. Antioxidants, 2021, 10(12): 1886.

[4] 贺东亮. 紫苏多肽分离纯化及其抗肿瘤活性研究[D]. 太原：中北大学, 2019. [HE Dongliang. Study on purification and anticancer effects of peptides derived from *Perilla frutescens*[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.]

[5] 田丹妮. 灵芝孢子油的提取、氧化稳定性提升与软胶囊车间的工艺设计[D]. 西安：陕西科技大学, 2020. [TIAN Danni. Extraction of *Ganoderma lucidum* spore oil, improvement of oxidation stability and the process design of workshop of *Ganoderma lucidum* spore oil soft capsule[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2020.]

[6] ZHU Zhengqing, XU Ziwu, LI Yuhang, et al. Antioxidant function and application of plant-derived peptides[J]. Antioxidants, 2024, 13(10): 1203.

[7] 夏易玄. 豌豆肽的制备、脱苦及抗氧化活性研究[D]. 无锡：江南大学, 2022. [XIA Yixuan. The study of preparation, debittering and antioxidant activity of pea peptides[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]

[8] MIAO Xue, LIU Xin, CHEN Hongsheng, et al. Restoration and preservation effects of mung bean antioxidant peptides on H_2O_2-induced WRL-68 cells via Keap1-Nrf2 pathway[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(11): 7130−7144.

[9] CHOE U, OSORNO J M, OHM J B, et al. Modification of physicochemical, functional properties, and digestibility of macronutrients in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours by different thermally treated whole seeds[J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132570.

[10] 李思楠, 王萌, 安宇, 等. 复合菌种发酵制备白芸豆多肽工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 213−221. [LI Sinan, WANG Meng, AN Yu, et al. Process optimization and antioxidant activity analysis of white kidney bean polypeptides prepared by composite strain fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 213−221.]

[11] RIVERO-PINO F. Bioactive food-derived peptides for functional nutrition: Effect of fortification, processing and storage on peptide stability and bioactivity within food matrices[J]. Food Chemistry, 2023, 406: 135046.

[12] 杨涵. 大豆抗氧化肽的制备及其应用[D]. 重庆：重庆大学, 2022. [YANG Han. Preparation and application of soybean antioxidant peptides[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.]

[13] 李雪. 紫花芸豆抗氧化肽的分离纯化及其稳定性的研究[D]. 大庆：黑龙江八一农垦大学, 2019. [LI X. Isolation, purification and stability study of antioxidant peptides from purple flower lima beans[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.]

[14] SINGH B P, VIJ S. *In vitro* stability of bioactive peptides derived from fermented soy milk against heat treatment, pH and gastrointestinal enzymes[J]. LWT, 2018, 91: 303−307.

[15] 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]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 126−134. [WANG Zijun, XU Pengfei, ZHU Tianqing, et al. Verification of antioxidant activity, stability evaluation, and mechanism analysis of yak bone collagen peptide[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(19): 126−134.]
[16] 韦珍, 向昱, 杨兆杏, 等. 火龙果茎多糖组成及抗氧化稳定性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 263−271. [WEI Zhen, XIANG Yu, YANG Zhaoxing, et al. Analysis of composition and antioxidant stability of pitaya stem polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 263−271.]
[17] 杨艾华, 宋姗姗, 王微微. 湄潭白茶多糖抗氧化活性及稳定性研究[J]. 食品科技, 2021, 46(10): 194−199. [YANG Aihua, SONG Shanshan, WANG Weiwei. Antioxidant activity and stability of polysaccharides from Meitan white tea[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(10): 194−199.]
[18] 李思楠, 王萌, 余钧, 等. 基于体外模拟消化探究白芸豆多肽降糖活性[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(3): 292−297. [LI Sinan, WANG Meng, YU Jun, et al. The investigation of hypoglycemic activity of white kidney bean polypeptides based on simulated digestion *in vitro* system[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(3): 292−297.]
[19] SUN Jin, ZHOU Changyu, CAO Jinxuan, et al. Purification and characterization of novel antioxidative peptides from duck liver protein hydrolysate as well as their cytoprotection against oxidative stress in HepG2 cells[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 848289.
[20] 沙玉欢, 毛晓英, 吴庆智, 等. 核桃分心木黄酮物质的组分及其抗氧化性分析[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 91−98. [SHA Yuhuan, MAO Xiaoying, WU Qingzhi, et al. Flavonoid composition and antioxidant activity of *Diaphragma juglandis* fructus[J]. Food Science, 2021, 42(12): 91−98.]
[21] 夏吉安, 黄凯, 李森, 等. 绿豆抗氧化肽的酶法制备及其抗氧化活性[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(10): 40−47. [XIA J A, HUANG K, LI S, et al. Enzymatic preparation of mung bean antioxidant peptides and antioxidant activity investigation[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(10): 40−47.]
[22] 卢跃红, 王斌, 刘偲, 等. 沙葱多酚提取物抗氧化活性及其对消化酶的抑制作用[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 164−177. [LU Yuehong, WANG Bin, LIU Cai, et al. Antioxidant activities and inhibitory effects on digestive enzyme of polyphenolic extracts from *Allium mongolicum* regel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 164−177.]
[23] 李海枝, 王曙宾, 郭珊珊, 等. 发酵火麻仁蛋白粉对 HepG2 细胞氧化应激损伤的保护作用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 84−89. [LI Haizhi, WANG Shubin, GUO Shanshan, et al. Effect of fermented hemp seed protein on the cellular oxidative stress with HepG2 cellular model[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 84−89.]
[24] 陈琪, 何静, 吉日木图. 骆驼胎盘抗氧化肽的制备及其稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(12): 234−242. [CHEN Qi, HE Jing, JI Rimutu. Preparation and stability of antioxidant peptide from camel placenta[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(12): 234−242.]
[25] 唐宁, 庄红. 玉米抗氧化肽 Leu-Pro-Phe 抗氧化稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2015(2): 49−55. [TANG Ning, ZHUANG Hong. Studies on the antioxidative stability of corn antioxidant peptide Leu-Pro-Phe[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015(2): 49−55.]
[26] 郑志强, 刘晋, 魏晓娟, 等. 加工条件及模拟胃肠消化对小麦肽抗氧化稳定性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 330−336. [ZHENG Zhiqiang, LIU Jin, WEI Xiaojuan, et al. Effects of processing conditions and simulated gastrointestinal digestion on antioxidative stability of wheat peptide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 330−336.]
[27] 张靖. 羊骨多肽的制备及其抗氧化能力研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [ZHANG Jing. Preparation of sheep bone polypeptide and its antioxidant ability[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]
[28] 欧阳小健. 当归多肽的制备及其抗氧化活性机制与构效关系研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2021. [OUYANG Xiaojian. The study of preparation, mechanism of antioxidant activity and structure-activity relationship of peptides in *Angelica sinensis Radix*[D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2021.]
[29] 栾晓旭, 冯美琴, 孙健. 发酵香肠源抗氧化肽的稳定性[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 1−7. [LUAN Xiaoxu, FENG Meiqin, SUN Jian. Stability of antioxidant peptides extracted from fermented sausages[J]. Food Science, 2020, 41(16): 1−7.]
[30] 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 Hongyu, LI Huizhen, ZHANG Zhijun, et al. Enzymatic hydrolysis process optimization of *Perilla* meal and antioxidant stability of polypeptides[J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 157−166.]
[31] 刘华勇, 赵强忠, 马彩霞, 等. 加工条件对辣木籽肽抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 35−39. [LIU Huayong, ZHAO Qiangzhong, MA Caixia, et al. Effects of different processing conditions on antioxidant activity of *Moringa oleifera* Lam. peptide[J]. Food & Machinery, 2016, 32(10): 35−39.]
[32] 刘帅言, 冯萌萌, 杜晶芳, 等. 不同加工辅料对玉米肽(<1 kDa)抗氧化性的影响[J]. 农产品加工, 2021(9): 1−3,9. [LIU Shuaiyan, FENG Mengmeng, DU Jingfang, et al. Effects of different processing excipients on the antioxidant properties of zein (<1 kDa)[J]. Farm Products Processing, 2021(9): 1−3,9.]
[33] 徐紫琪, 王玉珠, 魏光强, 等. 奶疙瘩抗氧化肽、α-葡萄糖苷酶抑制肽的鉴定及其稳定性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 1−12. [XU Ziqi, WANG Yuzhu, WEI Guangqiang, et al. Identification of antioxidant peptides and α-glucosidase inhibitory peptides from milk pimples and their stability analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 1−12.]
[34] 周向军, 祁爱平, 全红霞, 等. 甘氨酸和精氨酸与果糖美拉德反应条件及产物抗氧化作用[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(9): 987−996. [ZHOU Xiangjun, QI Aiping, QUAN Hongxia, et al. Conditions and antioxidant activities of Maillard reaction products with glycine-fructose and arginine-fructose[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2014, 33(9): 987−996.]
[35] 高群, 黄渊楠, 蔡茜茜, 等. 鲈鱼抗氧化肽的稳定性分析及其对细胞氧化损伤的保护作用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 410−418. [GAO Qun, HUANG Yuannan, CAI Xixi, et al. Stability analysis of antioxidant peptides from *Lateolabrax maculatus* and their protective effect against cellular oxidative damage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 410−418.]
[36] 李梦卓, 段雪妍, 王俊娟, 等. 蛋白质水解物的苦味形成机制及其酶解脱苦和风味改善的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 417−426. [LI Mengzhuo, DUAN Xueyan, WANG Junjuan, et al. Research progress on the bitter taste formation mechanism in protein hydrolysates and their enzymatic debittering and flavor improvement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46

(6)：417−426.］

［37］钟坦君, 洪鹏志, 周春霞, 等. 没食子酸对金线鱼鱼糜凝胶特性及其体外消化产物活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(14)：76−84.［ZHONG Tanjun, HONG Pengzhi, ZHOU Chunxia, et al. Effect of gallic acid on gel properties and *in vitro* activity of digested products of *Nemipterus virgatus* surimi[J]. Food Science, 2022, 43(14)：76−84.］

［38］WANG Hui, ZHAO Siqi, XIA Xiufang, et al. Interaction of the extracellular protease from *Staphylococcus xylosus* with meat proteins elucidated via spectroscopic and molecular docking[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101204.

［39］李琳, 陈丹, 范晓禹, 等. 英国红芸豆抗氧化肽对氧化应激斑马鱼的保护作用研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2)：70−79.［LI Lin, CHEN Dan, FAN Xiaoyu, et al. The protective effect of British red kidney bean antioxidant peptides on oxidatively stressed zebrafish[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(2)：70−79.］

［40］RAVI, SINGH J. Redox imbalance and hypoxia-inducible factors: A multifaceted crosstalk[J]. The FEBS Journal, 2025, 292(15)：3833−3848.

［41］KANAMORI A, EGAWA N, YAMASAKI S, et al. Antioxidative and antiglycative stress activities of selenoglutathione diselenide[J]. Pharmaceuticals, 2024, 17(8)：1049.

［42］吴登宇, 韦体, 马忠仁, 等. 牦牛乳酪蛋白抗氧化肽对HEK293细胞氧化应激损伤的保护作用[J]. 食品科学, 2023, 44(23)：142−150.［WU Dengyu, WEI Ti, MA Zhongren, et al. Protective effect of antioxidant peptides derived from yak milk casein on oxidative stress injury in HEK293 cells[J]. Food Science, 2023, 44(23)：142−150.］

［43］季子琦, 刘荣, 樊梓鸾. 柳蒿芽多糖的制备及抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报, 2024, 24(4)：235−246.［JI Ziqi, LIU Rong, FAN Ziluan. Studies on preparation and antioxidant activity of *Artemisia integrifolia* polysaccharides[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(4)：235−246.］

［44］CHAKRABORTY S, BALAN M, FLYNN E, et al. Activation of c-Met in cancer cells mediates growth-promoting signals against oxidative stress through Nrf2-HO-1[J]. Oncogenesis, 2019, 8: 7.

［45］WANG Xiuxiu, LIU Min, ZHANG Chen, et al. Antioxidant activity and protective effects of enzyme-extracted *Oudemansiella radiata* polysaccharides on alcohol-induced liver injury[J]. Molecules, 2018, 23(2)：481.

［46］穆秋霞, 赵玉滨, 董宪慧, 等. 英国红芸豆抗氧化肽组分对H_2O_2诱导PC12细胞氧化应激损伤的保护作用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8)：348−356.［MU Qiuxia, ZHAO Yubin, DONG Xianhui, et al. Protective effects of British red kidney bean antioxidant peptide components on H_2O_2 induced oxidative stress damage in PC12 cells[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8)：348−356.］