



毛心怡, 于传龙, 王文君, 等. 牛骨胶原蛋白肽-硒螯合物对冷藏牛肉饼品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2026, 48(1): 236–247.

MAO X Y, YU C L, WANG W J, et al. Effect of cattle bone collagen peptide-selenium chelate on the quality of chilled beef patties[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2026, 48(1): 236–247.

牛骨胶原蛋白肽-硒螯合物对冷藏牛肉饼品质的影响

毛心怡, 于传龙, 王文君, 陈 慧, 林苏芸, 胡文兵, 梁海萍, 陈凌利*

(江西农业大学 食品科学与工程学院/江西省天然产物与功能食品重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在明确牛骨胶原蛋白肽-硒螯合物(CCP-Se)对冷藏牛肉饼品质的影响, 为 CCP-Se 作为天然保鲜剂在冷藏牛肉饼中的开发与应用提供科学依据。【方法】本研究分别以未添加抗氧化剂(CT)和添加 0.1 g/kg 丁基羟基茴香醚(BHA)的牛肉饼为空白对照组和阳性对照组, 探究添加不同添加量的 0.02, 0.26, 0.5 mg/kg CCP-Se 对 4 °C 冷藏的牛肉饼 pH 值、色差、蒸煮损失率、质构、体外蛋白质消化率、总羰基含量、总硫基含量、丙二醛(MDA)含量的影响。【结果】与 CT 组和 BHA 组相比, 各质量分数 CCP-Se 组能显著抑制贮藏期间牛肉饼 pH 值的上升($P<0.05$), 提升色泽稳定性($P<0.05$), 降低蒸煮损失率($P<0.05$), 呈现出更优的质构特性, 且提高了体外蛋白质消化率; 其中, 与 CT 组、BHA 组和 0.02 mg/kg CCP-Se 试验组相比, 0.26 和 0.5 mg/kg CCP-Se 试验组能够抑制贮藏后期羰基生成、硫基减少及整个贮藏期间 MDA 的生成($P<0.05$)。【结论】本研究初步证实 CCP-Se 可有效延缓冷藏期间牛肉饼品质劣变, 为在牛肉制品保鲜中的应用提供了理论基础和科学依据。

关键词:牛骨胶原蛋白肽-硒螯合物; 牛肉饼; 贮藏品质; 抗氧化; 体外蛋白质消化率

中图分类号: TS251.5*2 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2026)01-0236-12

CSTR: 32399.14.aauj.2026021



Effect of cattle bone collagen peptide-selenium chelate on the quality of chilled beef patties

MAO Xinyi, YU Chuanlong, WANG Wenjun, CHEN Hui, LIN Suyun,
HU Wenbing, LIANG Haiping, CHEN Lingli*

(College of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Jiangxi Key Laboratory of Natural Products and Functional Foods, Nanchang 330045, China)

收稿日期: 2025-08-26 修回日期: 2025-09-22 接受日期: 2025-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(32460223)、江西省自然科学基金(20242BAB20324)和江西省重点研发计划项目(20243BBH81016)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (32460223), Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (20242BAB20324) and the Key Research and Development Plan of Jiangxi Province, China (20243BBH81016)

作者简介: 毛心怡, 硕士生, orcid.org/0009-0006-0987-4558, maoxinyi628@163.com; *通信作者: 陈凌利, 讲师, 博士, 主要从事食品组分与营养功能研究, orcid.org/0000-0001-9922-4693, chenlingli89@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Abstract: [Objective] This experiment aims to investigate the effect of cattle bone collagen peptide-selenium chelate (CCP-Se) on the quality of beef patties during refrigerated storage, and to provide a scientific basis for the development and application of CCP-Se as a natural preservative in chilled beef patties. [Method] Beef patties were prepared with the following treatments: a negative control with no antioxidant (Control, CT), a positive control with 0.1 g/kg butylated hydroxyanisole (BHA), and experimental groups supplemented with CCP-Se at three levels of 0.02, 0.26, 0.5 mg/kg. The effect of CCP on pH, color stability (L^* , a^* , b^*), cooking loss, texture profile, protein digestibility *in vitro*, carbonyl groups content, sulfhydryl group content, and malondialdehyde (MDA) content were investigated. [Result] Compared with the CT and BHA groups, the CCP-Se groups at different concentrations significantly inhibited the pH increase ($P<0.05$), enhanced color stability ($P<0.05$), and reduced cooking loss ($P<0.05$) in beef patties during storage, while exhibiting superior texture properties, and it also increased the *in vitro* digestibility of protein. Notably, compared with the CT, BHA and the 0.02 mg/kg CCP-Se groups, the 0.26 and 0.5 mg/kg CCP-Se groups suppressed carbonyl formation during later storage stages, mitigated thiol group reduction, and inhibited MDA generation ($P<0.05$) throughout the storage period. [Conclusion] This study has preliminarily confirmed that CCP-Se can effectively delay quality deterioration of beef patties during refrigerated storage, and providing a theoretical foundation and scientific basis for the potential application of CCP-Se as a preservative in meat products.

Keywords: cattle bone collagen peptides-selenium chelate; beef patties; antioxidant activity; *in vitro* protein digestibility

【研究意义】在肉制品中,牛肉饼因质地嫩滑、营养丰富、食用便利而备受人们青睐^[1]。相较于一般肉制品,调理牛肉饼更易在贮藏期间发生蛋白质和脂肪氧化等劣变反应,出现变色、产生酸败风味等问题,从而导致产品品质下降^[2],控制牛肉饼中氧化反应对于提升其品质和货架期至关重要。传统的人工合成保鲜剂(如酚类抗氧化剂)虽然有提高食品稳定性、延长食品货架期等作用,但过量添加或混合使用有增加其毒副作用的风险^[3]。因此,开发一种天然、安全的新型保鲜剂减缓牛肉饼贮存期间的品质劣变,对于提升产品品质、延长货架期及保障消费者健康具有重要的现实意义和应用潜力。【前人研究进展】新型食品保鲜剂中的有效抗氧化和抑菌成分通常来源于动物、植物及其副产物的提取物^[4],例如,鱼皮、鱼骨蛋白水解产物具有较强的抗氧化能力^[5];Guan等^[6]制备的燕麦多肽与锌离子螯合物有效减少了苹果、香蕉、红甘蓝的褐变;Zhao等^[7]制备的明胶/壳聚糖与花青素- Fe^{2+} 螯合物交联膜对猪肉具有良好的保鲜效果。硒(Se)是人体必需微量元素,具有抗癌、抗氧化作用^[8]及提高机体免疫力^[9]等多种生理功能。目前,全球硒资源分布不均^[10],中国约72%的地区属于缺硒或低硒区^[11]。缺硒会引起克山病和大骨节病^[12]等,而硒摄入过量则会引起急性或慢性中毒。因此,科学合理地补硒至关重要。相比于亚硒酸钠等无机硒,有机硒化合物具有更高的生物利用度和较低毒副作用^[9],鉴于此,有机硒补充剂的开发备受关注。传统的富硒手段主要是通过生物转化获得富硒动植物食品,但是存在转化周期长、转化效率不稳定、易受多种因素影响等问题。近年来,硒化改性可将无机硒化合物中的硒元素与天然产物等有机物相结合,并与其官能团相互作用,将硒元素引入有机化合物中^[13],从而实现目标化合物的硒化修饰。由于其具有高效、稳定、活性高等优点,硒化改性成为近年来的研究热点。除此之外,Se与多肽螯合后,其抗氧化活性显著增强。贾娇等^[14]研究发现鲍鱼内脏肽硒螯合物对 $\text{ABTS}^{+\bullet}$ 、 $\bullet\text{OH}$ 的清除活性均显著强于鲍鱼内脏肽,经过体外模拟消化后自由基的清除活性进一步增强;冯文静等^[15]也发现罗非鱼鱼皮碱性蛋白酶酶解物-硒螯合物的抗氧化活性显著高于碱性蛋白酶酶解物;刘晶晶等^[16]在河蚬体系也证明了河蚬抗氧化肽-锌螯合物的体外抗氧化活性高于河蚬抗氧化肽。此外,在安全性方面,杨晖等^[17]制备的大鲮肽-硒螯合物经小鼠急性毒性试验测试,结果显示该螯合物的半数致死量(LD_{50})为75.55 mg/kg。根据《中国居民膳食营养素参考摄入量(2023版)》,18~75岁成年人每日硒可耐受最高摄入量(UL)为400 μg 。因此,在正常食用剂量范围内,肽硒螯合物理论上具备良好的食用安全性。Se与多肽螯合可作为一种安全的、高效的策略,能显著增强天然产物的抗氧化活性,在食品

保鲜与功能成分开发中展现出巨大应用潜力。牛骨是牛肉加工后最常见的副产物之一,随着肉牛产业的持续发展,中国牛骨年产量超过1 200万t。牛骨营养价值高,富含多种活性成分,尤其是胶原蛋白含量丰富[(57.5±8.7)mg/g]。但目前大量牛骨主要以粗加工成饲料或以骨粉等初级产品出售,附加值及资源有效利用率低。研究^[18]表明,经过酶解得到牛骨胶原蛋白肽(cattle bone collagen peptides, CCP)对DPPH自由基和超阴离子自由基有良好的清除能力。倪蕴琪等^[19]发现牦牛骨蛋白肽中的大量脯氨酸和甘氨酸通常出现在 β -折叠和 β -转角中,有助于形成球形结构,因此牦牛骨蛋白肽可用于制备缓释杀菌功能的肽钙螯合物。此外,有研究表明不同动植物蛋白源的多肽与金属离子螯合后的产物抑菌活性强于多肽的抑菌活性,例如,相较于经黄酶处理的鲢鱼蛋白水解物,其与锌离子形成的复合物具有更强的抗菌活性^[20]。综上所述,CCP的抗氧化能力有利于构建缓释体系的结构特性,以及多肽-金属离子螯合存在的抑菌增效现象,共同构成了其作为多功能生物活性成分的基础。

【本研究切入点】课题组前期成功制得的牛骨胶原蛋白肽-硒螯合物(cattle bone collagen peptides-selenium chelate, CCP-Se)比CCP具有更好的耐酸碱、耐热及消化稳定性,抗氧化能力更为优异,表明其是一种具有很好抗氧化性能的有机硒强化剂,具备缓解牛肉饼在贮藏期间品质劣化的潜力,但是其在冷藏牛肉饼中的具体应用效果有待进一步研究。【拟解决的关键问题】为开发可应用于牛肉饼的新型营养型抗氧化剂,缓解牛肉饼低温贮藏期间因氧化劣变反应影响其货架期的问题。本试验以添加CCP-Se的牛肉饼为研究对象,设置未添加抗氧化剂组为空白对照,并以添加肉制品领域广泛应用的丁基羟基茴香醚(butyl hydroxyanisole, BHA)为阳性对照,通过测定牛肉饼贮藏期间pH值、色泽、蒸煮损失率、质构、羰基含量、巯基含量、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量、体外蛋白质消化率,探究CCP-Se对牛肉饼在贮藏过程中的品质特性及抗氧化能力的影响,为CCP-Se在食品领域的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

于2024年6月开展试验,新鲜牛背最长肌购自江西农业大学菜市场;牛骨胶原蛋白肽粉末(<1 ku),西安优兰达生物科技有限公司;亚硒酸钠,美国Merck公司;BHA、三氯乙酸(TCA)、1,1,3,3-四乙氧基丙烷(TEP)、2-硫代巴比妥酸(TBA),上海麦克林生物股份有限公司;蛋白质羰基含量检测试剂盒(微量法),亚科因生物技术有限公司;蛋白定量测定试剂盒,南京建成生物工程研究所;微量总巯基试剂盒,南京建成生物工程研究所;胃蛋白酶(1:10 000)、胰蛋白酶(1:250)、猪胆盐。北京索莱宝科技有限公司;硫酸铜、硫酸钾、浓硫酸(AR)、盐酸(AR)、无水乙醇、氢氧化钠,西陇科学股份有限公司;Tris-base,重庆蒙柏欧生物科技有限公司。

1.2 主要仪器

恒温恒湿气候箱(LHP-100),浙江科恒仪器有限公司;Scientz-10N冷冻干燥机,宁波新芝生物科技有限公司;pH计,杭州齐威仪器有限公司;色差仪NR10QC,广东三恩时科技有限公司;TA.XT.Plus质构仪,英国Stable Micro Systems公司;恒温摇床水浴锅,常州托曼仪器制造有限公司;SH220F石墨消解仪,海能未来技术集团股份有限公司;全自动凯氏定氮仪,青岛精诚仪器仪表有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 牛骨肽硒螯合物的制备

根据课题组前期方法^[21]制备牛骨胶原蛋白肽硒螯合物。称取质量比为1:1的牛骨胶原蛋白肽粉与亚硒酸钠,pH调至10.0,70℃水浴60 min。螯合反应完成后,将混合物冷却到室温,4 000 r/min离心15 min,取上清液加入5倍体积的无水乙醇,静置12 h。用无水乙醇洗涤沉淀多次,再置于恒温干燥箱中待乙醇挥发。所得的CCP-Se经冷冻干燥后,置于4℃密封储存备用,经测定后硒含量为32.7 mg/g CCP-Se。

1.3.2 牛肉饼的制备

选取新鲜的牛背最长肌共5 kg,剔除表面脂肪、筋膜及结缔组织后,均分成5等份。对照组(CT组):将肉样切块,使用绞肉机绞碎成肉糜,加入20 g氯化钠,混合均匀。试验组:在对照组处理的基础上,选

取3份按照0.02 mg/kg、0.26 mg/kg、0.5 mg/kg添加CCP-Se充分混合。BHA组:在对照组的基础上,添加0.1 g BHA充分混合。以上组分制作完成后于4℃腌制4 h。使用模具将肉糜压制成单重50 g的肉饼,分装在食品用聚乙烯复合密封袋中4℃贮藏。

1.3.3 试验设计

上述5组样品于贮藏0,3,6,9,12 d时分别取样,测定其pH值、色差、蒸煮损失、质构、羰基含量、巯基含量、MDA含量,在0 d测定其体外消化率。

1.3.4 pH值

根据Zhang等^[22]的方法稍作修改,称取2 g肉样加入20 mL蒸馏水,7 000~8 000 r/min条件下均质1 min,静置30 min,用数字pH计测定上清液pH,试验重复3次。

1.3.5 色泽

利用色差仪评估不同处理牛肉饼样品之间的差异,记录牛肉饼样品表面的亮度值(L^* 值)、红色度值(a^* 值)、黄色度值(b^* 值),每个待测样品选取5个点,每个试验至少重复3次。 ΔE^* 计算公式如下:

$$\Delta E^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式(1)中: ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 分别为样品颜色参数和白色标准($L^*=93.61$ 、 $a^*=-0.92$ 、 $b^*=1.07$)颜色参数之间的差值。

1.3.6 蒸煮损失

将生肉饼质量记为 m_1 ,置于密封袋中,80℃蒸煮30 min,擦干表面水分待温度降至室温,记录质量 m_2 ,蒸煮损失率计算公式如下:

$$\text{蒸煮损失率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.7 质构测定

使用质构仪进行牛肉样品的纹理轮廓分析(texture profile analysis, TPA)。牛肉样品切成 $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ 的小方块。使用P/50探头,样品被压缩至初始高度的40%。测试前速度为2 mm/s,测试中速度为5 mm/s,测试后速度为5 mm/s。测定牛肉的硬度、咀嚼度、回弹性和弹性。

1.3.8 总羰基含量测定

称取0.1 g牛肉饼样品,加入1 mL Extraction Buffer,冰浴匀浆,4 000 r/min,4℃离心10 min,取上清液,加入0.1 mL Working Antioxidant,室温放置10 min。4℃,10 000 r/min离心10 min,取上清液置冰上待测。根据羰基含量检测试剂盒说明书进行操作,在370 nm处测定对照孔与测定孔的吸光度;用蛋白质定量测定试剂盒测定可溶性蛋白总量。

1.3.9 总巯基含量测定

称取0.1 g牛肉饼样品,加入9倍生理盐水,冰浴匀浆,制成10%的组织匀浆,2 500 r/min,离心10 min,取上清液待测。根据微量总巯基试剂盒说明书,在405 nm波长处测定标准孔、空白孔、测定孔、对照孔吸光度值;用蛋白质定量测定试剂盒测定可溶性蛋白总量。

1.3.10 硫代巴比妥酸(TBA)

根据Ghimire等^[2]的方法稍作修改。称取5 g牛肉饼样品,加入10 mL 10% TCA溶液,用均质机匀浆2 min。4 000 r/min离心10 min,取2 mL上清液至带盖离心管中,加入2 mL 0.02 M TBA,旋涡混匀。将离心管盖扎孔后于95℃水浴30 min,形成淡粉色或红色复合物。取出后冰浴降至室温,4 000 r/min离心15 min,取上清液。分别在532 nm和600 nm波长下测定吸光度,以吸光度差值($A_{532} - A_{600}$)作为最终测定值。该值代入用TEP建立的标准曲线 $y = 0.2567x + 0.0586$ ($R^2 = 0.9942$)进行计算,计算公式如下:

$$\text{MDA含量} = \frac{C \times V \times D}{W} \quad (3)$$

式(3)中: C 为根据标准曲线得到MDA浓度, $\mu\text{mol/L}$; V 为参与反应的样品体积, L; D 为稀释倍数; W 为样品质量, kg。

1.3.11 体外消化率

消化前用凯氏定氮法测定肉饼中的蛋白质含量。体外消化参考Brodkorbd等^[23]的方法进行测定,包括模拟口腔、胃和肠道的消化过程。称取5 g样品,加入8 mL模拟唾液和3 mL α -唾液淀粉酶,50 μL

0.3 mol/L $\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ 和 500 μL 蒸馏水,振荡摇匀,37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 2 min。量取 20 mL 口腔期消化物,加入 16 mL 模拟胃液和 3.8 mL 猪胃蛋白酶溶液,再加入 100 μL 6 mol/L HCl,调节 pH 值至 3.0,37 $^{\circ}\text{C}$ 振荡孵育 2 h。量取 40 mL 胃期消化物,加入 20 mL 模拟肠液,6 mL 胆汁盐(50 mg/mL)和 8 mL 胰酶溶液,再加入 50 μL 1 mol/L NaOH,最终将 pH 调至 7.0,37 $^{\circ}\text{C}$ 振荡孵育 2 h。模拟消化结束后,将样品置于冰上 15 min 灭酶,随后冷却离心(8 000 r/min, 10 min),弃上清液。用凯氏定氮法测定消化物中的蛋白质含量。体外消化蛋白质消化率(*in vitro* protein digestibility, IVPD)计算方法如下:

$$\text{IVDP} = \frac{\text{消化前蛋白质含量} - \text{消化物中蛋白质含量}}{\text{消化前蛋白质含量}} \times 100\% \quad (4)$$

1.4 数据处理

数据用平均值 $\pm$ 标准差表示,各组试验重复测定 3 次。采用 SPSS Statistics 27.0.1 对数据进行 ANOVA 方差分析及 Duncan's 检验, $P < 0.05$ 表示样品间具有显著差异性,采用 Origin 2021 绘制数据图。

2 结果与分析

2.1 CCP-Se 对冷藏期牛肉饼 pH 的影响

对肉制品来说,pH 是一个非常重要的品质指标,它与肉制品的新鲜程度、色泽、嫩度、风味等食用品质均有紧密的联系。在肉制品贮藏期间,食品添加剂的应用以及微生物活动均可能引起肉制品 pH 值的变化^[24]。由图 1 可知,在贮存期间,各试验组别 pH 值随着贮存时间的增加呈显著上升($P < 0.05$),可能是肉制品在贮存期间被腐败微生物污染,这些微生物分泌的蛋白酶分解肉中的蛋白质产生生物胺^[25]等碱性物质,随着碱性物质积累造成肉制品 pH 上升。CT 组 pH 值上升速率最快,表明在无抗氧化剂干预的情况下,牛肉饼内部生化反应和微生物活动对 pH 值的影响显著($P < 0.05$),肉质劣变进程较快。相较于 CT 组,BHA 组的 pH 值上升幅度有所减缓,说明 BHA 对牛肉贮存过程中 pH 变化起到一定的抑制作用。CCP-Se 处理组的 pH 值上升趋势明显缓于 CT 组和 BHA 组,且呈现浓度依赖效应,其中添加 0.5 mg/kg CCP-Se 的试验组 pH 值上升幅度最小,表明 CCP-Se 能够在一定程度上抑制 pH 上升。这可能是 CCP-Se 通过抗氧化清除自由基,一方面影响了微生物氧化还原平衡,从而抑制其正常繁殖;一方面减缓蛋白质和脂肪的氧化,减少了碱性代谢产物的积累,从而维持了贮存期间 pH 值的稳定性^[26]。

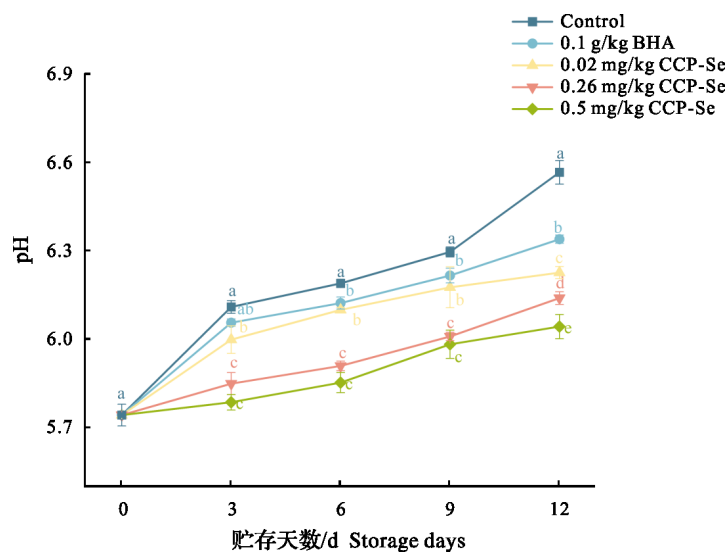


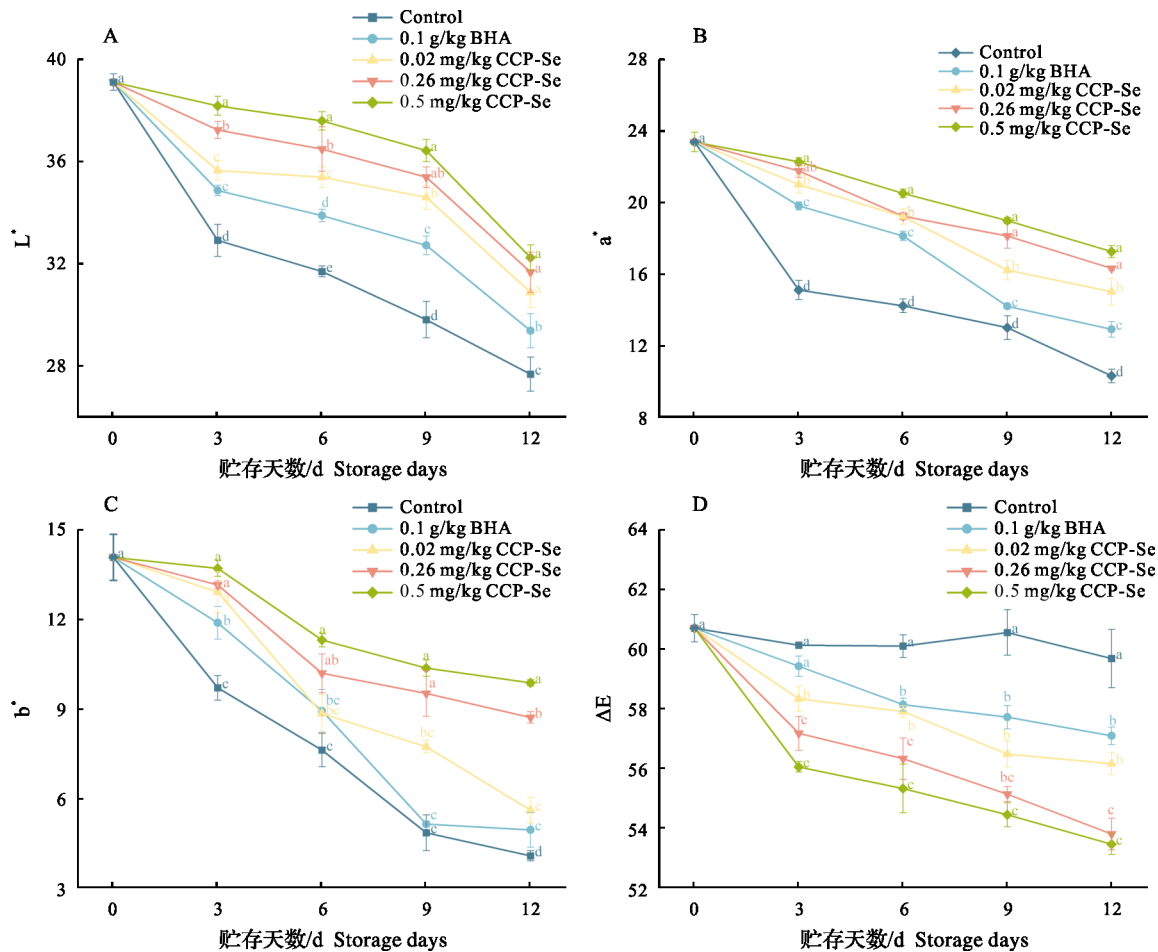
图 1 不同添加量 CCP-Se 对(4 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$ 贮存期间牛肉饼 pH 的影响

Fig.1 Effect of CCP-Se at different additive levels on the pH of beef patties during storage at (4 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$

2.2 CCP-Se 对冷藏期牛肉饼色差的影响

牛肉饼色泽是评价其品质、新鲜度及消费者接受度的关键指标。牛肉饼的鲜红色泽是新鲜度的直观表现,主要由肌红蛋白的衍生物脱氧肌红蛋白、氧合肌红蛋白和高铁肌红蛋白的含量决定^[27],氧化态高铁肌红蛋白的颜色为棕色,当高铁肌红蛋白的含量增加时会引发肉的褐变现象^[28]。当牛肉因其颜色

不断恶化而被丢弃或者不被购买时,不仅造成环境负担还造成了经济损失。因此,测定牛肉饼贮存期间的 L^* 、 a^* 、 b^* 值对消费者可接受度和货架期调控有重要影响。如图2所示,贮存期间所有组别的 L^* 、 a^* 、 b^* 值呈显著下降趋势($P<0.05$),其中,CT组的 L^* 值和 a^* 值下降最明显,这可能是因为氧化反应导致肌红蛋白向高铁肌红蛋白转变引起肉色外观变化;BHA组的下降幅度介于CT组和CCP-Se组之间,说明BHA可能在一定程度上抑制氧化反应,减少了因氧化导致的牛肉饼外观的变化,但效果相对有限;CCP-Se处理组的 L^* 、 a^* 值整体优于CT组和BHA组,可能是由于CCP-Se有更好的抗氧化能力,减缓了脂质氧化和高铁肌红蛋白的形成; b^* 值的下降可能是因为肌红蛋白氧化为高铁肌红蛋白,掩盖了黄色色调。这与葛鑫禹等^[29]的研究结果类似,该研究发现富硒猪肉脯经过烤制后的 a^* 、 b^* 值均高于对照组,能够有效改善猪肉脯色泽。



A~D 依次为 L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度)和 ΔE 。
In order from A~D, L^* (brightness), a^* (redness), b^* (yellowness) and ΔE .

图2 不同添加量 CCP-Se 对(4±1)°C 贮存期间牛肉饼颜色参数

Fig.2 Effect of different additions of CCP-Se peptides on the color parameters of beef patties during storage at (4±1)°C

2.3 CCP-Se对冷藏期牛肉饼蒸煮损失的影响

蒸煮损失率是衡量肉制品保水能力的关键指标。由图3可知所有组分的蒸煮损失随着贮存时间的增加呈显著增长的态势($P<0.05$)。其中,CT组的上升幅度最大,12 d时,增加了23%。这可能是在贮存期间肉饼因蛋白氧化降解,使得蛋白凝胶网络结构被破坏,导致内部肌肉组织结构松散,从而导致保水性下降。添加了CCP-Se的牛肉饼,0.26 mg/kg CCP-Se组在贮存前3 d内波动幅度较小,上升较为平缓;0.5 mg/kg CCP-Se组在贮存前6 d内变化幅度更小,说明在一定剂量范围内CCP-Se添加量越多,可能越有助于维持牛肉饼的持水性,减少蒸煮损失率。这与Grossi等^[30]的研究结果类似,即有机硒可以延缓脂质与蛋白质氧化,减少肌原纤维蛋白变性,从而维持肉制品的保水能力。由此可见,CCP-Se可以有效减少牛肉在蒸煮过程中的蒸煮损失率。

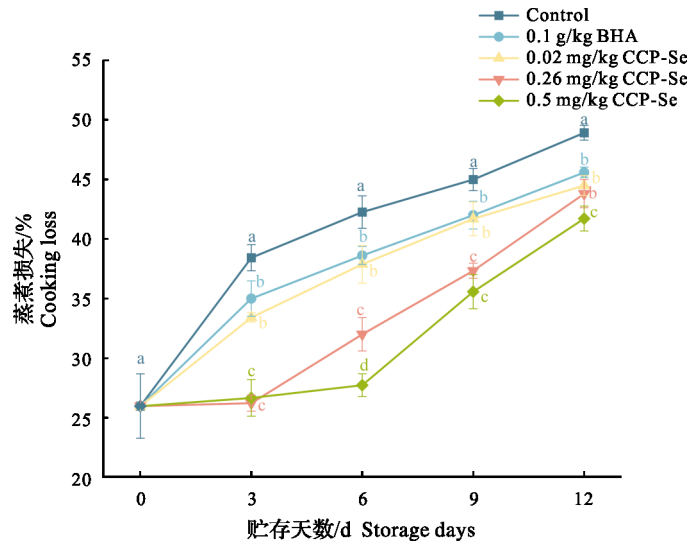


图3 不同添加量 CCP-Se 对 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 贮存期间牛肉饼蒸煮损失的影响

Fig.3 Effect of different additions of CCP-Se on cooking loss of beef patties during storage at $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$

2.4 CCP-Se 对冷藏期牛肉饼质构的影响

质构特性是衡量肉制品感官品质的核心指标,可以对感官进行客观评价^[31]。各试验组牛肉饼样品的硬度、咀嚼度、弹性、回弹性在贮藏期间均呈现下降趋势(图4)。硬度作为咀嚼性的基础,对牛肉饼品质和食用口感影响最大^[32]。在贮存期间 CT 组和 BHA 组的硬度下降趋势最明显,这可能是样品中的肌纤维蛋白发生了氧化分解,导致肌肉结构松散;而添加了 CCP-Se 的肉饼硬度下降速率较缓慢,可能是 CCP-Se 延缓了蛋白质氧化,抑制了肌纤维蛋白解构,从而保持了牛肉饼相对较好的硬度。其次添加了 CCP-Se 的牛肉饼的弹性和回弹性也均高于对照组,说明 CCP-Se 可以提高肉制品的保水性和口感,与前述

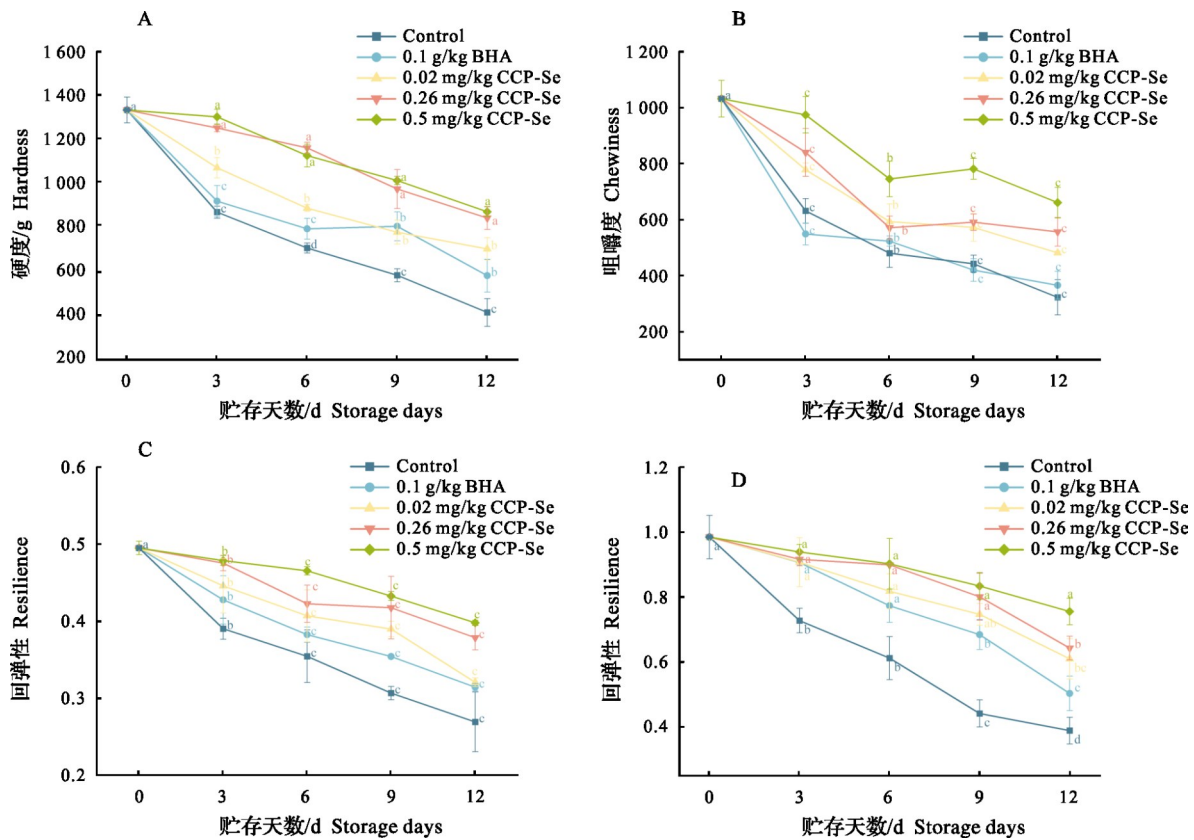


图4 不同添加量 CCP-Se 对 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 贮存期间牛肉饼硬度(A)、咀嚼度(B)、弹性(C)、回弹性(D)质构的影响

Fig.4 Effect of different added amounts of CCP-Se on the texture of hardness(A),chewiness(B),elasticity(B),resilience(D)of beef patties during storage at $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$

蒸煮损失率的结果相一致。Khan 等^[33]研究发现,添加富含硒的益生菌可以改善鸡肉的肉质,这与本试验结论相符。综上所述,添加了 CCP-Se 的处理组均展现出良好的质构特性且在一定剂量范围内与添加量呈正相关。

2.5 CCP-Se 对冷藏期牛肉饼总羰基含量的影响

羰基是蛋白质氧化后形成的一种产物,其含量的增加反映了牛肉饼中蛋白质的氧化程度。在蛋白质不可逆和非酶氧化过程中,一些易受影响的氨基酸侧链如赖氨酸、脯氨酸、精氨酸^[34]受到活性氧的攻击,肽键断裂后与还原糖相互作用,生成羰基化合物^[35]。贮存期间牛肉饼羰基含量变化如图 5 所示,各组牛肉饼中羰基含量均显著上升($P<0.05$),CT 组的羰基含量显著高于 BHA 组和 CCP-Se 组($P<0.05$)。在贮存中期 3~9 d,当 CCP-Se 添加量为 0.26 mg/kg 时,具有和 0.01% BHA 相似的抗氧化效果;当 CCP-Se 添加量为 0.5 mg/kg 时,抗氧化效果优于 0.01% BHA,在贮存末期(12 d),0.26 mg/kg 和 0.5 mg/kg CCP-Se 组羰基含量均显著低于 BHA 组($P<0.05$),推测 CCP 作为 Se 的载体,可增强 Se 在牛肉饼体系中的溶解和稳定性,避免 Se 在贮藏过程中因贮存环境变化而失活,确保其持续发挥抗氧化功能。Korzeniowska 等^[36]研究发现,硒可以有效阻止鸡胸肉和鸡腿肉在冷冻贮藏期间蛋白质活性基团转变为羰基,这与本试验的研究结果类似。综上,贮藏期间牛肉饼蛋白质氧化程度随时间加剧,在贮藏 9~12 d 时,CCP-Se 添加量为 0.5 mg/kg 时,其抗氧化效果优于 BHA 组。

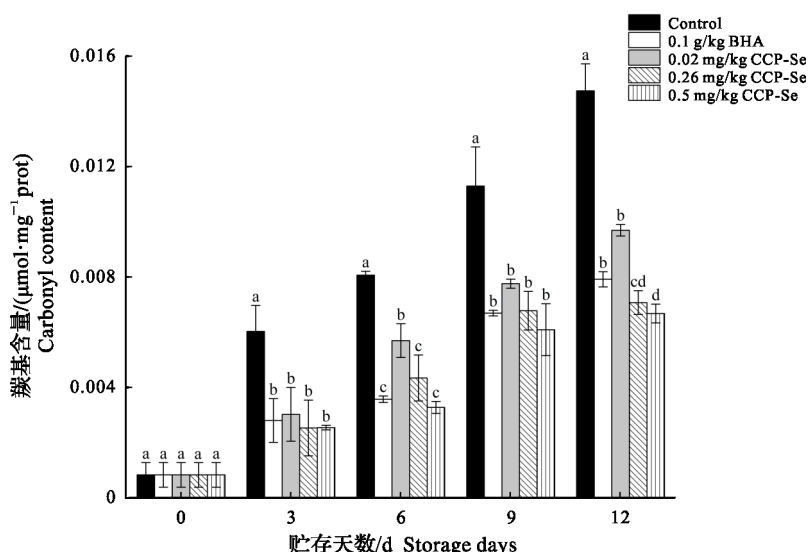


图 5 不同添加量 CCP-Se 对(4±1)°C 贮存期间牛肉饼总羰基含量的影响

Fig.5 Effect of different addition amounts of CCP-Se on the carbonyl content of beef patties during storage at (4±1) °C

2.6 CCP-Se 对冷藏期牛肉饼总巯基含量的影响

总巯基包括暴露在蛋白质表面的游离巯基和嵌入在分子中的巯基。巯基氧化形成的二硫键可形成分子内和分子间交联,从而改变蛋白质的空间构象。随着氧化的进行,巯基水平降低,二硫键形成^[37]。因此巯基含量可以反映牛肉蛋白质的氧化程度^[38],总巯基含量越高则氧化程度越小。牛肉饼在贮存期间整体巯基含量变化如图 6 所示,初始总巯基含量 12.68 μmol/g prot。随着贮存时间的延长,所有处理组中总巯基含量均呈显著下降趋势($P<0.05$)。12 d 时 CT 组的巯基含量降至 2.41 μmol/g prot, BHA 组的巯基含量为 6.65 μmol/g prot,添加 0.26 mg/kg CCP-Se 的试验组巯基含量为 7.46 μmol/g prot,添加 0.5 mg/kg CCP-Se 的试验组巯基含量为 7.86 μmol/g prot,表明 CCP-Se 可有效抑制牛肉饼贮藏期间巯基的氧化,且在贮藏末期添加 0.26 mg/kg 和 0.5 mg/kg CCP-Se 的试验组抗氧化效果优于 BHA 组,这与羰基含量的变化结果反映的现象相一致。

2.7 CCP-Se 对冷藏期牛肉饼硫代巴比妥酸值(TBA)的影响

脂质氧化是肉制品贮藏过程腐败变质的原因之一,MDA 是多不饱和脂肪酸氧化过程中产生的分子之一,被认为是脂质过氧化物之后的二次氧化产物^[39],它能与硫代巴比妥酸作用生成粉红色化合物,利用此性质可以测定肉制品中 MDA 含量。由图 7 可知,初始 MDA 含量为 0.04 mg/kg,随着贮藏时间增加,

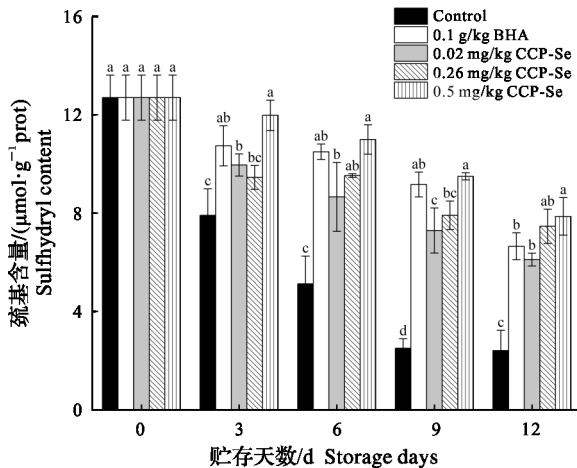


图 6 不同添加量 CCP-Se 对 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 贮存期间牛肉饼总巯基含量的影响

Fig.6 Effect of different additions of CCP-Se on the sulfhydryl content of beef patties during storage at $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$

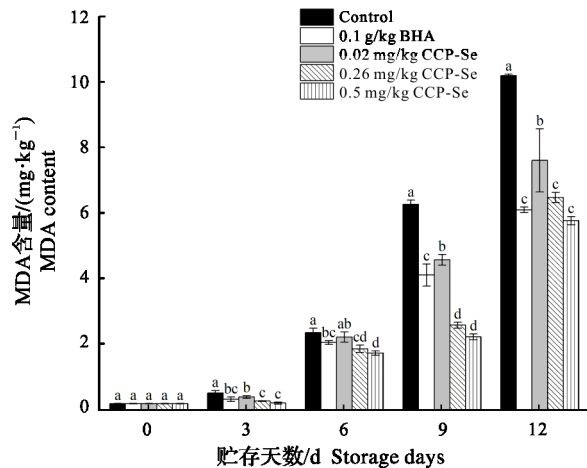


图 7 不同添加量 CCP-Se 对 $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 贮存期间牛肉饼硫代巴比妥酸值的影响

Fig.7 Effect of different additions of CCP-Se on thiobarbituric acid values of beef patties during storage at $(4\pm 1)^{\circ}\text{C}$

所有处理组的 MDA 含量呈显著上升趋势 ($P<0.05$), 且其他组 MDA 含量显著低于 CT 组。在 14 d 时, BHA 组、0.26 mg/kg CCP-Se 组、0.5 mg/kg CCP-Se 组 MDA 含量分别为 6.10 mg/kg、6.48 mg/kg、5.77 mg/kg, 而对照组则达到了 10.20 mg/kg, 表明 BHA 与 CCP-Se 均抑制脂质过氧化, 且当 CCP-Se 的添加量为 0.5 mg/kg 时抑制效果优于 0.01% BHA。推测有机硒提高了 GSH-Px 的活性^[40], 催化分解氢过氧化物和脂质过氧化物, 减少了 MDA 终产物的生成。葛鑫禹等^[29]研究发现, 将其制备的硒化卡拉胶以 0.1 g/kg 的添加量加入到猪肉脯中, 经高温加工后, 相较于对照组, 富硒猪肉脯的硫代巴比妥酸值下降了约 17%, 这与本试验结果相一致。综上, 在贮存期间, 当 CCP-Se 添加量为 0.5 mg/kg, 对脂质的抗氧化效果优于其他试验组。

2.8 CCP-Se 对冷藏期牛肉饼体外蛋白质消化率的影响

牛肉中含有丰富的优质蛋白, 测定蛋白质的可消化程度是衡量肉制品营养价值的关键指标, 直接影响蛋白质能否被消化酶有效分解为短肽和氨基酸供人体使用^[41]。蛋白质消化率越高, 在一定程度上反映了蛋白质的营养价值越高^[42]。各试验组消化前的蛋白质含量无显著差异 ($P>0.05$), 经胃肠消化后 CT 组的蛋白质含量最高, 添加了 CCP-Se 的处理组的蛋白质含量变化与 CCP-Se 添加量成正比 (图 8)。CT 组消化率最低, 表明在没有添加保鲜剂的情况下蛋白质的消化率较差; BHA 组与 CCP-Se 组无显著差异, 但

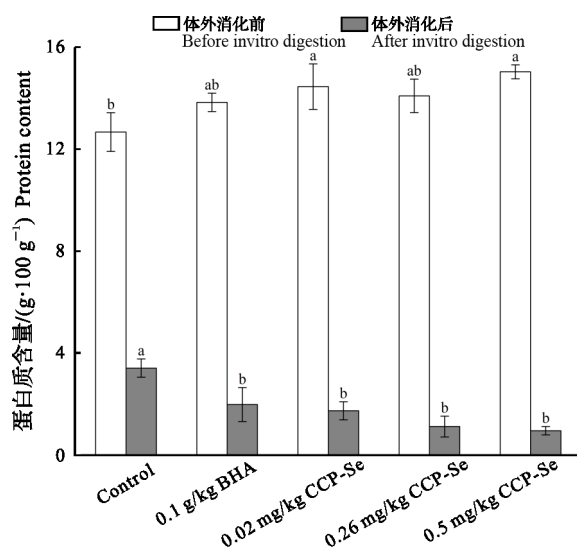


图 8 不同添加量 CCP-Se 对牛肉饼体外消化前后蛋白质含量的影响

Fig.8 Effect of different added amounts of CCP-Se on protein content of beef patties before and after *in vitro* digestion

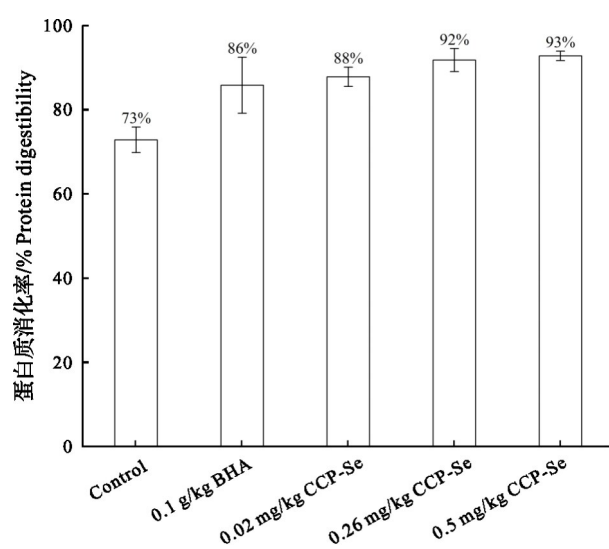


图 9 不同添加量 CCP-Se 对牛肉饼体外蛋白质消化率的影响

Fig.9 Effect of different added amounts of CCP-Se on *in vitro* protein digestibility of beef patties

相较于CT组蛋白质的消化率有显著上升(图9)。Liang等^[43]推测其原因是在体外消化过程中,硒代半胱氨酸和亚硒酸钠在肠道进行共同培养时,产生的硒纳米颗粒增强了谷胱甘肽过氧化物酶活性,提高自由基清除效率,减少蛋白质氧化损伤,避免蛋白质因氧化交联形成致密结构而掩盖酶切位点。结果表明,CCP-Se的添加在一定程度上能够提高牛肉饼的蛋白消化率,提高其营养利用率。

3 结 论

本研究表明,CCP-Se可以显著改善牛肉饼在低温贮藏期间的品质稳定性。当CCP-Se添加量为0.26~0.5 mg/kg时,牛肉饼展现出较强的抗氧化活性,能在一定程度上抑制蛋白质与脂质氧化,延缓pH值的上升,有效保持肉饼的色泽,其对羰基和MDA生成的抑制效果及对巯基减少的延缓作用,略优于添加量为0.1 g/kg的BHA组。当添加量为0.5 mg/kg时,牛肉饼在贮存6 d时蒸煮损失率相较于CT组下降了14.71%,具备较强的保水性,且在整个贮存期间硬度与弹性维持在较高水平。与CT组相比,添加CCP-Se牛肉饼的体外消化率均呈现上升趋势,有利于提升产品的营养利用效率。本研究仍有很多科学问题有待深入探究,如添加了CCP-Se的牛肉饼在体内的实际营养价值和代谢途径、CCP-Se在牛肉饼中发挥抗氧化作用的分子机制、CCP-Se的体内安全性评价等。综上,CCP-Se具备优异的抗氧化活性和保鲜能力,为消费者提供了硒营养补充的新途径,未来研究可针对上述不足深入探究,同时结合“天然安全性”与“营养功能性”食品的发展主流趋势,为开发兼具高品质、高营养价值和清洁标签特性的新一代肉制品提供新思路 and 理论参考。

致谢:江西农业大学与上栗县人民政府横向课题(2022JXAUXH075)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

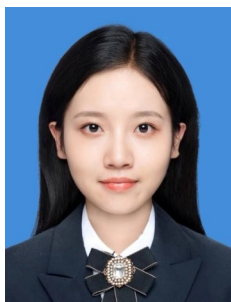
参考文献 References:

- [1] 罗鸣,马嫒,袁乙平,等.青梅添加量对牛肉饼贮藏品质的影响[J].食品与机械,2018,34(7):137-142.
LUO M, MA Y, YUAN Y P, et al. Effects of addition of *Prunus mume* on the quality of beef patties during storage[J]. Food & Machinery, 2018, 34(7): 137-142.
- [2] GHIMIRE A, PAUDEL N, POUDEL R. Effect of pomegranate peel extract on the storage stability of ground buffalo (*Bubalus bubalis*) meat[J]. LWT-food science and technology, 2022, 154: 112690.
- [3] XU X Q, LIU A M, HU S Y, et al. Synthetic phenolic antioxidants: metabolism, hazards and mechanism of action[J]. Food chemistry, 2021, 353: 129488.
- [4] INETIANBOR J E, YAKUBU J M, EZEONU S C. Effects of food additives and preservatives on man: a review[J]. Asian journal of science and technology, 2015, 6(2): 1118-1135.
- [5] ISHAK N H, SARBON N M A. A Review of protein hydrolysates and bioactive peptides deriving from wastes generated by fish processing[J]. Food and bioprocess technology, 2017, 11(1): 2-16.
- [6] GUAN X Y, GAO X X, YIN X Y, et al. Preparation of oat metal ion chelating peptides via froth floatation: efficacy, molecular characteristics, and their anti-browning effects[J]. Food chemistry, 2025, 493: 145767.
- [7] ZHAO H L, LIU W, MIN C J, et al. pH-responsive color indicator film based on gelatin/chitosan cross-linking with anthocyanin-Fe²⁺ chelate for pork freshness monitoring[J]. Food hydrocolloids, 2025, 162: 110895.
- [8] ROMAN M, JITARU P, BARBANTE C. Selenium biochemistry and its role for human health[J]. Metallomics, 2014, 6(1): 25-54.
- [9] ZHANG Q, WU C E, WANG T, et al. Improvement of biological activity of *Morchella esculenta* protein hydrolysate by microwave-assisted selenization[J]. Journal of food science, 2019, 84(1): 73-79.
- [10] KIELISZEK M, BŁAŻEJAK S. Current knowledge on the importance of selenium in food for living organisms: a review[J]. Molecules, 2016, 21(5): 609.
- [11] 中国地质调查局西安地质调查中心. 硒与健康_中国地质调查局发展研究中心[EB/OL]. (2018-12-10)[2025-05-09].
http://www.xian.cgs.gov.cn/kpzs/dxzs/201812/t20181210_473078.html.
Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey. (2018). Selenium and health[EB/OL]. (2018-12-10)[2025-05-09].
http://www.xian.cgs.gov.cn/kpzs/dxzs/201812/t20181210_473078.html
- [12] YANG C M, YAO H, WU Y J, et al. Status and risks of selenium deficiency in a traditional selenium-deficient area in north-east China[J]. Science of the total environment, 2021, 762: 144103.

- [13] ZHAN Q P, CHEN Y, GUO Y F, et al. Effects of selenylation modification on the antioxidative and immunoregulatory activities of polysaccharides from the pulp of *Rose laevigata* Michx fruit [J]. International journal of biological macromolecules, 2022, 206: 242-254.
- [14] 贾娇, 徐玉, 刘晴, 等. 鲍鱼内脏硒螯合肽的结构特性及抗氧化活性研究 [C]//中国食品科学技术学会第二十届年会. 长沙: [出版者不详], 2023, 191-192.
- JIA J, XU Y, LIU Q, et al. Structure characterization and antioxidant activity of abalone visceral peptides-selenium *in vitro* [C]//Proceedings of the 20th Chinese Institute of Food Science and Technology. Changsha: [s.n], 2023, 191-192.
- [15] 冯文静, 相欢, 胡晓, 等. 罗非鱼鱼皮酶解物及其硒螯合物的结构与抗氧化特性 [J]. 水产学报, 2023, 47(8): 175-188.
- FENG W J, XIANG H, HU X, et al. Structure and antioxidant properties of tilapia skin hydrolysate and its selenium chelate [J]. Journal of fisheries of China, 2023, 47(8): 175-188.
- [16] 刘晶晶, 周蓉, 王杨怡仪, 等. 河蚬抗氧化肽-锌螯合物抗氧化活性的研究 [J]. 食品科技, 2020, 45(9): 142-147.
- LIU J J, ZHOU R, WANG Y Y Y, et al. Antioxidant activity of zinc-binding antioxidant peptides from *Corbicula fluminea* hydrolysate [J]. Food science and technology, 2020, 45(9): 142-147.
- [17] 杨晖, 刘俊霞, 吴艳, 等. 大鲵肽-硒螯合物体内免疫调节活性探究 [J]. 食品工业科技, 2025: 1-13.
- YANG H, LIU J X, WU Y, et al. *In vitro* and *in vivo* immunomodulatory activity of giant salamander peptide-selenium chelates [J]. Science and technology of food industry, 2025, 46(22): 1-10.
- [18] 郭佳俊, 袁江涛, 刘贵珊. 牛骨胶原蛋白肽的超声辅助提取及抗氧化活性研究 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 185-192.
- GUO J J, YUAN J T, LIU G S. Ultrasound-assisted extraction and antioxidant activity of bovine bone collagen peptides [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 185-192.
- [19] 倪蕴琪, 唐静仪, 洪惠. 包埋肉桂精油的牦牛骨蛋白肽-钙螯合物的制备及抑菌效果 [J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(3): 597-604.
- NI Y Q, TANG J Y, HONG H. Preparation and antibacterial effect of yak bone protein peptide-calcium chelate embedded with cinnamon essential oil [J]. Journal of Zhejiang A&F university, 2021, 38(3): 597-604.
- [20] JIANG L P, WANG B, LI B, et al. Preparation and identification of peptides and their zinc complexes with antimicrobial activities from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) protein hydrolysates [J]. Food research international, 2014, 64: 91-98.
- [21] LI J M, WANG W J, CHEN H, et al. Characterization, *in vitro* antioxidant activity and stability of cattle bone collagen peptides-selenium chelate [J]. Food chemistry: X, 2024, 23: 101789.
- [22] ZHANG H Y, HE P, KANG H B, et al. Antioxidant and antimicrobial effects of edible coating based on chitosan and bamboo vinegar in ready to cook pork chops [J]. LWT-food science and technology, 2018, 93: 470-476.
- [23] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature protocols.
- [24] FENG C H, WANG W, MAKINO Y, et al. Evaluation of storage time and temperature on physicochemical properties of immersion vacuum cooled sausages stuffed in the innovative casings modified by surfactants and lactic acid [J]. Journal of food engineering, 2019, 257: 34-43.
- [25] YANG F Q, CHO W Y, SEO H G, et al. Effect of L-cysteine, *Boswellia serrata*, and whey protein on the antioxidant and physicochemical properties of pork patties [J]. Foods, 2020, 9(8): 993.
- [26] 温晓鹿, 杨雪芬, 郑春田, 等. 有机硒对猪肉品质影响的研究进展 [J]. 中国饲料, 2015(7): 17-20.
- WEN X L, YANG X F, ZHENG C T, et al. Research progress on the effects of organic selenium on pork quality [J]. China feed, 2015(7): 17-20.
- [27] WAGA M, WATANABE S, NAKADE K. Effects of tartrate on color stability and myoglobin affinity for oxygen in beef [J]. Meat science, 2025, 225: 109807.
- [28] MANCINI R A, HUNT M C. Current research in meat color [J]. Meat science, 2005, 71(1): 100-121.
- [29] 葛鑫禹, 杨泽莎, 张立君, 等. 基于硒化卡拉胶的富硒猪肉脯制备工艺及品质评估 [J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(2): 344-351.
- GE X Y, YANG Z S, ZHANG L J, et al. Preparation technology and quality evaluation of selenium-enriched pork jerky based on selenium carrageenan [J]. Journal of Anhui agricultural university, 2022, 49(2): 344-351.
- [30] GROSSI S, ROSSI L, DE MARCO M, et al. The effect of different sources of selenium supplementation on the meat quality traits of young charolaise bulls during the finishing phase [J]. Antioxidants, 2021, 10(4): 596.

- [31] 杜昕美,赵前程,吕可,等.五种苹果质构测定方法的比较及与感官评价的相关性分析[J].食品工业科技,2020,41(22):240-246.
- DU X M, ZHAO Q C, LYU K, et al. Comparison of texture determination method and correlation analysis with sensory evaluation of 5 kinds of apple[J]. Science and technology of food industry, 2020, 41(22): 240-246.
- [32] SCHREUDERS F K G, SCHLANGEN M, KYRIAKOPOULOU K, et al. Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: a review[J]. Food control, 2021, 127: 108103.
- [33] KHAN A Z, KUMBHAR S, LIU Y, et al. Dietary supplementation of selenium-enriched probiotics enhances meat quality of broiler chickens (*Gallus gallus domesticus*) raised under high ambient temperature [J]. Biological trace element research, 2018, 182(2): 328-338.
- [34] 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(3-4): 207-218.
- [35] DA NÓBREGASANTOS E, CESAR DE ALBUQUERQUE SOUSA T, CASSIANO DE SANTANA NETO D, et al. Edible active film based on gelatin and malpighia emarginata waste extract to inhibit lipid and protein oxidation in beef patties [J]. LWT-food science and technology, 2022, 154: 112837.
- [36] KORZENIOWSKA M, KRÓLICZEWSKA B, KOPEĆ W. Carbonyl and sulfhydryl groups of chicken meat proteins after dietary modulation with selenium[J]. Open chemistry, 2015, 13(1): 1293-1302.
- [37] ZHOU B, LUO J, QUAN W, et al. Antioxidant activity and sensory quality of bacon[J]. Foods, 2022, 11(2): 236.
- [38] 董智铭, 么紫瑶, 姜菽婉, 等. 超声功率对牛肉干品质及牛肉肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 27-34.
- DONG Z M, ME Z Y, JIANG Q W, et al. Effect of ultrasonic power on the quality and myofibrillar protein structure of beef jerky[J]. Food science, 2023, 44(19): 27-34.
- [39] LOURENÇO S C, FRAQUEZA M J, FERNANDES M H, et al. Application of edible alginate films with pineapple peel active compounds on beef meat preservation[J]. Antioxidants, 2020, 9(8): 667.
- [40] JUNIPER D T, PHIPPS R H, RAMOS-MORALES E, et al. Effects of dietary supplementation with selenium enriched yeast or sodium selenite on selenium tissue distribution and meat quality in lambs[J]. Animal feed science and technology, 2009.
- [41] GONG Y, FENG M Q, SUN J. Effect of different thermal processing methods and thermal core temperatures on the protein structure and *in vitro* digestive characteristics of beef[J]. Food chemistry, 2025, 464: 141751.
- [42] WU S J, BHAT Z F, GOUNDER R S, et al. Effect of dietary protein and processing on gut microbiota: a systematic review[J]. Nutrients, 2022, 14(3): 453.
- [43] LIANG S J, YU J L, ZHAO M, et al. *In vitro* digestion and fecal fermentation of selenocompounds: impact on gut microbiota, antioxidant activity, and short-chain fatty acids[J]. Food research international, 2024, 180: 114089.

(责任编辑:刘俊峰)



第一作者简介:毛心怡,硕士研究生。主要从事肉制品加工与保鲜研究,在校期间,学业表现突出,获得学业奖学金,参与发表《茵陈蒿黄酮的提取、化学组成及生物活性研究进展》、《Characterization, *in vitro* antioxidant activity and stability of cattle bone collagen peptides-selenium chelate》论文。



通信作者简介:陈凌利,副教授,博士。担任江西省营养学会营养转化医学专业委员会常务委员及秘书长,主要研究方向为畜产加工、食品营养与健康、硒营养功能。主持国家自然科学基金 1 项,省自然科学基金 1 项,教育厅科研项目 1 项,参与国家及省级项目多项,在 Redox Biology、Food Chemistry、Food Research International、Journal of Nutrition、International Journal of Biological Macromolecules、Plos One 等国内外学术期刊发表学术论文 20 余篇。