

赵南祁, 刘紫瑶, 张立君, 等. 不同低温真空蒸煮条件对富硒猪肉硒含量及产品品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 249–257. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090190

ZHAO Nanqi, LIU Ziyao, ZHANG Lijun, et al. Effects of Different Low-temperature Vacuum Cooking Conditions on the Selenium Content and Product Quality of Selenium-enriched Pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 249–257. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090190

· 工艺技术 ·

不同低温真空蒸煮条件对富硒猪肉硒含量及产品品质的影响

赵南祁¹, 刘紫瑶¹, 张立君², 贺 博², 宋仕勤², 陈 琳^{1,*}, 冯宪超^{1,*}

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西咸阳 712199;

2.中国富硒产业研究院, 陕西安康 725000)

摘 要: 本研究探讨了不同低温真空蒸煮温度和时间对富硒猪肉硒元素含量及产品品质的影响, 选用 60、70、80、90 °C 及 30、60、90、120 min 对富硒猪肉进行处理。分析比较了不同热处理条件下富硒猪肉的硒含量、生物利用率、质构特性、蒸煮损失的变化。结果表明, 70 °C、60 min 低温真空蒸煮时产品中硒元素损失最少, 生物利用率最高, 且与对照组相比, 低温处理改善了富硒猪肉加工后的质构特性, 弹性、内聚性显著提升, 且蒸煮损失减少了 23.88% ($P<0.05$)。而相比而言, 高温长时间蒸煮增加了产品的蒸煮损失同时导致富硒猪肉中部分易挥发硒元素的流失, 硒元素的生物利用率显著减少 ($P<0.05$), 并使产品表面失去光泽, 对富硒猪肉产品的抗氧化活性及产品品质产生不利影响。因此, 低温短时真空蒸煮降低了富硒猪肉硒元素的损失, 提高了产品品质。

关键词: 富硒, 猪肉, 低温, 硒含量, 生物利用率

中图分类号: TS251.5+1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)18-0249-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024090190

本文网刊:



Effects of Different Low-temperature Vacuum Cooking Conditions on the Selenium Content and Product Quality of Selenium-enriched Pork

ZHAO Nanqi¹, LIU Ziyao¹, ZHANG Lijun², HE Bo², SONG Shiqin², CHEN Lin^{1,*}, FENG Xianchao^{1,*}

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Xianyang 712199, China;

2.China Selenium Industry Research Institute, Ankang 725000, China)

Abstract: In this study, the effects of different low-temperature vacuum cooking temperatures and times on the selenium content and product quality of selenium-enriched pork were investigated, and 60, 70, 80 and 90 °C as well as 30, 60, 90 and 120 min were selected for the treatment of selenium-enriched pork. The changes of selenium content, bioavailability, textural characteristics and cooking loss of selenium-enriched pork under different heat treatment conditions were analyzed and compared. The results showed that the lowest loss of selenium and the highest bioavailability of the product were observed in low-temperature vacuum cooking at 70 °C for 60 min. Compared with the control group, the low temperature treatment improved the texture characteristics of Se-rich pork after processing, the springiness and cohesiveness were significantly increased, and the cooking loss was reduced by 23.88% ($P<0.05$). In contrast, prolonged cooking at high temperatures increased cooking losses and led to the loss of some volatile selenium in selenium-enriched pork, significantly reduced selenium bioavailability and loss of surface luster ($P<0.05$), which adversely affected the antioxidant activity and quality of selenium-enriched pork products. Therefore, low-temperature short-time vacuum steaming reduced the loss of selenium in selenium-enriched pork and improved the product quality.

收稿日期: 2024-09-18

基金项目: 富硒猪肉休闲食品加工工艺及控硒技术研究 (2021FXZX02); 奶山羊全产业链技术规范研制及产业化项目 (2208-610528-04-02-755608)。

作者简介: 赵南祁 (1998-) (ORCID: 0009-0000-7056-5160), 男, 博士研究生, 研究方向: 食品蛋白质结构与功能, E-mail: 2474743669@qq.com。

* 通信作者: 陈琳 (1983-) (ORCID: 0000-0002-6915-3473), 女, 博士, 教授, 研究方向: 肉品营养功能与质量控制, E-mail: lchen@nwsuaf.edu.cn。

冯宪超 (1981-) (ORCID: 0000-0002-8602-207X), 男, 博士, 教授, 研究方向: 未来食品科学与技术、蛋白质定向功能化绿色修饰技术,

E-mail: xcfeng@nwfafu.edu.cn。

Key words: selenium-rich; pork; low temperatures; selenium content; bioavailability

硒是人体所必需的微量元素之一,虽然在人体中的含量很少,但对人体健康起着重要作用;硒是一种抗氧化剂,避免自由基对人体免疫系统的危害,提高人体免疫力^[1];能降低人体内细胞癌变的发生率,降低患癌的风险;另外,硒能减少人体血液中血脂和胆固醇的含量,有效预防心脑血管疾病的发生^[2]。但在中国,72%的地区属于低硒或缺硒地带,通过食物对硒元素的补充必不可少^[3],因此,富硒食物的研发对人类身体健康起着重要作用。人体对硒元素的补充主要有三种方式:无机硒、有机硒和纳米硒。相比无机硒而言,人体对有机硒的吸收效率要高于无机硒,但在人体内无法进行有机硒的合成,获取食物中的有机硒是硒的最佳补充途径^[4]。

猪肉是人体获取有机硒的理想食物载体,富硒猪肉本身呈现樱红色,肉质鲜美,营养健康,富含人体必需的氨基酸及多种微量元素,长期食用有降血脂等多种特殊功效^[5]。因硒元素自身的不稳定性和易挥发性^[6],在食品的加工过程中易发生损失,不同的加工烹饪方式对食物中硒含量存在不同程度的影响,Zhou等^[7]研究发现,不同加工方式会对富硒杏鲍菇的硒含量及生物利用率产生不同程度的影响,其中,高温油炸处理显著降低了其生物利用率。因此,选用合适的加工方式对保护富硒猪肉中的硒元素,并增加其生物利用率至关重要。

对比传统烹饪方式,低温蒸煮是将新鲜的食材放入真空蒸煮袋中,并在低温蒸煮机中进行煮制的一种加工技术,具有温度低、加热均匀等特点^[8],同时能保持肉制品本身的嫩度、提高产品的多汁性、降低营养成分的损失。由于高温条件下硒元素易挥发,并伴随水分损失而流失严重,最终降低其生物利用率,而低温蒸煮能有效避免常规高温加工方式对富硒猪肉中硒元素产生的不利影响,但目前,对富硒猪肉低温蒸煮加工工艺及护硒作用研究较少。综上,本研究旨在探究低温蒸煮温度(60、70、80、90℃)及时间(30、60、90、120 min)对富硒猪肉硒元素及产品品质的影响。通过深入探究不同热处理条件下富硒猪肉产品品质的变化,为富硒肉制品的低温加工与应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

富硒猪肉 由安康市富硒产品研发中心提供,采用富硒粗粮饲料喂养的安康黑猪(安康猪)品种,饲养六个月,体重达120 kg出栏,取里脊肉于-20℃冷冻贮藏;硒标准溶液 GSB 04-1751-2004,武汉中昌国研标物科技有限公司;盐酸、硝酸 四川西陇科学有限公司;过氧化氢、硼氢化钾、氢氧化钾 安耐吉化学有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH) 美国Sigma公司;2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-

6-磺酸)(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 上海源叶生物科技有限公司;所有试剂均为分析纯。

AFS 9300 原子荧光分光光度计 北京吉天仪器有限公司;MS8636 微波消解仪 美国CEM公司;EHD 电热消解仪 北京东航科仪仪器有限公司;Spark 酶标仪 奥地利 Tecan Austria GmbH 公司;XT PLUS/50 物性测试仪 英国 Stable Micro System 公司;Ci7600 色度仪 爱色丽(上海)色彩科技有限公司;GL-10MD 大容量高速冷冻离心机 湖南湘仪离心机有限公司;UV-1780 紫外可见分光光度计 日本岛津公司;AL104 万分之一天平 上海梅特勒-托利多仪器公司;SHI-8 数显恒温磁力搅拌水浴锅 杭州旌斐仪器科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 将富硒猪里脊切成5 cm×5 cm×3 cm的小块,一部分切好的生肉备用,标记为“raw”,另一部分加入2%的食盐进行腌制,随后放入真空密封袋中进行真空包装,将包装好的富硒猪肉在水浴锅中进行低温慢煮。其中,低温慢煮温度分别设置为60、70、80、90℃,加热时间为60 min,对照组采用100℃加热60 min。在上述最优处理温度(70℃)的基础上,加热时间分别选择30、60、90、120 min,分析不同加热温度、时间对富硒猪肉品质的影响。

1.2.2 指标的测定

1.2.2.1 硒元素的测定 富硒猪肉中硒元素的测定方法参照国标GB 5009.93-2017《食品安全国家标准食品中硒的测定》^[9]进行,称取固体样品0.5 g(精确至0.001 g),置于消化管中,加10 mL 硝酸、2 mL 过氧化氢,振摇混合均匀,于微波消解仪中消化。消解结束待冷却后,将消化液转入锥形烧瓶中,加两粒玻璃珠,在电热板上继续加热至近干。再加5 mL 盐酸溶液(6 mol/L),继续加热至溶液变为清亮无色并伴有白烟出现,冷却,转移至10 mL 容量瓶中,加入2.5 mL 铁氰化钾溶液(100 g/L),用水定容,混匀待测。同时做试剂空白试验。在与测定标准系列溶液相同的实验条件下,将空白溶液和试样溶液分别导入仪器,测其荧光值强度,与标准系列比较定量。

1.2.2.2 生物利用率测定 生物利用率参照孙瑞等^[10]的方法并略作修改。

体外模拟胃消化:称取0.25 g样品于10 mL 离心管中,搅碎后均质,加入5 mL 模拟胃液,在37℃恒温水浴振荡器振荡4 h,消化后样品以5000 r/min 离心10 min,取上清液,0.45 μm 滤膜过滤,样品储存于-20℃,待测,每个样品做3个平行。

体外模拟肠消化过程:胃消化完成后,用饱和

NaHCO₃ 溶液调节消化液 pH 至 7.5, 加入 10 mL 模拟肠液(30 g/L 胰酶、15 g/L 淀粉酶、10 g/L 胆盐), 样品混匀, 37 ℃ 水浴振荡 4 h, 5000 r/min 离心, 取上清液, 0.45 μm 滤膜过滤, 样品储存于-20 ℃, 待测, 每个样品做 3 个平行。体外模拟胃肠富硒猪肉硒的生物利用率用公式(1)计算:

$$\text{生物利用率(\%)} = \frac{\text{消化后消化液中硒含量}}{\text{样品消化前硒含量}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.2.3 质构特性的测定 富硒猪肉质构特性的测定参照王昱等^[11]方法, 稍作修改。将熟制后的富硒猪肉切成长度为 2 cm 的正方体, 选取圆柱形探头(P/36)在室温下对样品进行压缩实验, 来评估样品的质构特性。测定参数如下: 压缩高度为原有压缩高度的 50%, 测试速度为 1 mm/s, 测试前、后速度均为 3 mm/s, 测试触发力为 5.0 g, 每组样品重复三次。

1.2.2.4 蒸煮损失的测定 蒸煮损失的测定, 称取蒸煮前样品重量记为 m_0 。之后对富硒猪肉进行低温蒸煮。煮熟后, 用双层滤纸吸干表面水分, 吸干水分后记录重量为 m_1 , 并根据式(2)计算蒸煮损失^[8]。

$$\text{蒸煮损失(\%)} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.2.5 色度测定 色度测定参照刘欣睿等^[12]的方法并略作修改, 采用色差仪测定蒸煮后的富硒猪肉块的 L^* (亮度)值、 a^* (红/绿度)值和 b^* (黄/蓝度)值。每个样品平行测定 3 次, 结果取平均值。

1.2.2.6 DPPH 自由基清除率的测定 准确称取 5 g 蒸煮后的富硒猪肉样品^[13], 并与 25 mL 无水乙醇混合, 均质 2 min, 50 ℃ 恒温振荡 1 h 后过滤, 吸取样品提取液 2.0 mL, 加入 0.2 mmol/L DPPH 溶液 2.0 mL, 测定 517 nm 处的吸光度, 记为 A_1 ; 以样品提取液 2.0 mL、无水乙醇 2.0 mL 为对照组, 测定 517 nm 处的吸光度, 记为 A_2 ; 以 0.2 mmol/L DPPH 溶液 2.0 mL、无水乙醇 2.0 mL 为空白组, 摇匀放置于黑暗中 0.5 h 后, 测定 517 nm 处的吸光度, 记为 A_0 , 同时测定纯水的吸光度, 记为 A , 并按照公式(3)进行计算。

$$\text{清除率(\%)} = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0 - A}\right) \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: A_0 为空白对照液的吸光度; A_1 为加入样品后的吸光度; A_2 为提取液本身吸光度; A 为纯水的吸光度。

1.2.2.7 ABTS⁺自由基清除率的测定 ABTS⁺自由基清除活性的测定参照于凡等^[14]的方法, 稍作修改。准确称取 5 g 蒸煮后的富硒猪肉样品, 并与 25 mL 无水乙醇混合, 均质 2 min, 50 ℃ 恒温振荡 1 h 后过滤, 取 0.12 mL 滤液与 1 mL 稀释后的 ABTS ($A_{734 \text{ nm}}$ 为 0.70 ± 0.02) 溶液充分混合, 避光反应 10 min, 测定其在 734 nm 波长处的吸光度, 以去离

子水代替样液测定空白吸光度, 并以蒸馏水作为空白对照。ABTS⁺自由基清除率按公式(3)进行计算。

1.2.2.8 蛋白消化率测定 参照刘欣睿等^[12]的方法。称取不同处理组样品 2.00 g 并绞碎, 加入 8 mL PBS, 5000 r/min 匀浆 30 s, 之后在 10000 r/min 下匀浆 30 s, 重复两次。用 1 mol/L HCl 将溶液 pH 调节至 2.0, 随后加入 2 mL 胃蛋白酶溶液, 37 ℃ 孵育 2 h。反应结束后用 NaOH 终止反应, 形成胃蛋白酶解液。在酶解液中加入 2.0 mL 胰蛋白酶溶液, 37 ℃ 孵育 2 h, 反应结束后用沸水浴 5 min 终止反应, 形成胰蛋白酶解液。在酶解产物中加入 1:3 体积的无水乙醇, 10000×g 条件离心 20 min, 去除上清液, 50 ℃ 下将沉淀烘干至恒重, 并记录干样品质量。用 BCA 试剂盒测定消化前后蛋白质质量。蛋白消化率按公式(4)进行计算:

$$\text{消化率(\%)} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

式中: m_0 为消化前蛋白质含量, g; m_1 为消化后蛋白质含量, g。

1.2.2.9 LF-NMR 测定富硒猪肉中水的流动性 根据张泽等^[8]的方法, 将不同处理组的富硒猪肉切成 1.5 cm×1 cm×1 cm 的小块, 放入样品管中, 在 $(32.00 \pm 0.01)^\circ\text{C}$ 情况下用低场核磁共振仪进行 T_2 测定。

1.3 数据处理

每个实验至少重复 3 次, 结果用平均值±标准差表示。采用 GraphPad Prism(GraphPad Prism 10)软件进行数据图的绘制; 数据拟合使用 Origin(Origin 2021)进行数据拟合; 使用 SPSS(SPSS 22.0)对数据进行方差分析, 以多因素 ANOVA 法和 Duncan 检验比较组间差异性和显著性, $P < 0.05$ 表示差异显著性。

2 结果与分析

2.1 低温蒸煮温度及时间对富硒猪肉硒含量的影响

硒元素因其不稳定性及易挥发性, 传统高温蒸煮工艺会造成食物中硒元素的损失。本实验中对富硒猪肉进行不同温度(60、70、80、90、100 ℃), 60 min 的蒸煮处理, 测定处理后各样品中硒含量如图 1A 所示。所有温度的热加工处理均会造成富硒猪肉中硒含量的损失, 但在较低的加工温度下(60、70、80 ℃), 加工过程富硒猪肉硒元素损失小^[15], 随着加工温度的上升, 富硒猪肉中硒元素含量呈现先上升后下降的趋势。其中, 加热温度为 70 ℃ 时样品中硒含量最多, 为 0.24 mg/kg, 显著高于对照组(100 ℃) ($P < 0.05$)。这主要是因为硒元素的热稳定性差, 在 75~80 ℃ 时候开始挥发, 常规热加工方式因加工温度较高, 会增加富硒猪肉中硒元素的挥发, 但是低温处理能有效减少游离硒的挥发和硒蛋白的变性^[16], 降低了富硒猪肉加工过程中硒元素的损失。另外, 在蒸煮过程中, 部分水溶性硒会随着水分的损失而流失到肉汤中。

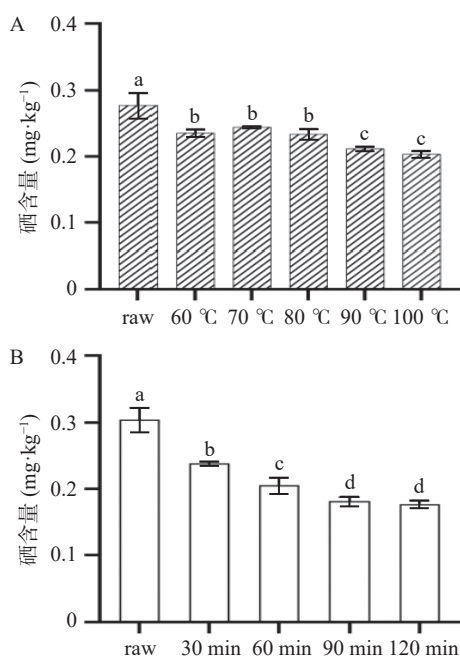


图1 低温处理温度(A)、时间(B)对富硒猪肉硒含量的影响
Fig.1 Effects of low temperature (A) and time (B) on selenium content of selenium-rich pork

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 图2~图4同。

低温蒸煮时间对富硒猪肉加工过程硒元素损失情况如图1B所示, 结果表明, 随着蒸煮时间的延长, 富硒猪肉中硒元素含量减少, 在加热 120 min 样品中硒元素含量最低, 加热时间的延长导致猪肉组织中水分蒸发而引起部分水溶性硒元素的流失^[17], 还有部分硒元素因自身的挥发而导致硒元素含量的减少。郑琳等^[17]发现随加热时间的增加, 猪肉的硒元素损失率增加, 并且猪肉中硒元素的损失要大于牛肉。加工温度的高低及加工时间的长短会显著影响富硒猪肉加工过程中硒元素的损失, 低温、短时处理保护了富硒肉制品原有的结构形态, 减少了因蛋白热变性而造成水分损失, 避免了水溶性硒元素的减少。

2.2 低温蒸煮温度及时间对生物利用率的影响

不同加热温度对富硒猪肉硒元素生物利用率的影响如图2A。从图2A中可以看出, 胃中硒元素的生物利用率随着加工温度的上升呈现出下降的趋势, 而在肠中硒元素的生物利用率随温度上升出现先上升, 在 70 °C 时达到最大值。这主要是因为加工温度升高, 硒元素部分损失, 同时硒元素形态发生转变, 高温处理时, 硒代氨基酸会因甲基硒-半胱氨酸的形成而减少^[18], 降低了硒元素的生物利用率。Khanam 等^[19]研究了富硒谷物、豆类经过加工后生物利用率的变化, 他同样发现高温热加工显著降低了食物中硒/硒代蛋氨酸的生物利用率。另外, 硒在肠道中的生物利用率大于胃中^[20], 胃消化时, 酸性条件使蛋白质变性并展开, 导致富硒猪肉中硒元素被释放; 肠消化时, 胰酶和胆盐进一步将蛋白质分解为多肽或氨基酸, 释放出更多的结合位点, 提高了生物利用率^[21]。

低温加工温度为 70 °C 时, 低温时间对硒元素生

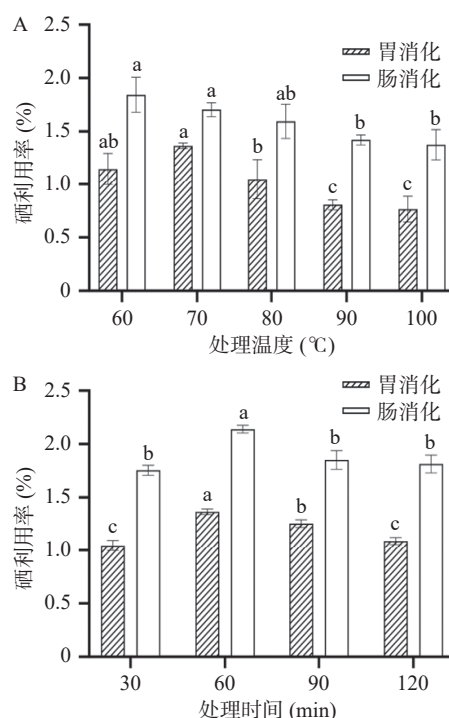


图2 低温处理温度(A)、时间(B)对富硒猪肉硒生物利用率的影响

Fig.2 Effects of low temperature (A) and time (B) on selenium bioavailability of selenium-rich pork

物利用率的影响如图2B, 随加热时间的增加, 硒元素生物利用率出现先上升后下降的趋势 ($P < 0.05$), 并在 60 min 时胃消化及肠消化达到最大, 其中胃消化后为 1.36%, 肠消化后为 2.14%。长时间的加热会造成硒元素的挥发或氧化, 同时生成难以被人体吸收的硒化合物^[22], 生物利用率降低^[23]。综上所述, 低温、短时处理能减少富硒猪肉在热加工过程中硒元素的损失, 同时增加硒元素的生物利用率, 帮助人体对硒元素的吸收和利用。

硒元素有着良好的自由基清除能力, 富硒猪肉的食用能有效提高组织细胞的生理功能, 提高机体的免疫力^[24]。但不同加工方式对富硒猪肉抗氧化活性影响不同。

由图3A可知, 不同低温蒸煮温度对富硒猪肉抗氧化能力的影响存在显著差异 ($P < 0.05$)。在不同温度处理的样品中, 60 °C 及 70 °C 温度加热后样品 ABTS⁺ 自由基清除率最高, 分别为 72.31% 和 72.80%, 抗氧化活性最强。但随着加热温度的升高, ABTS⁺ 自由基清除能力下降, 在加热温度上升到 100 °C 时最低, 为 46.77%, 显著低于低温处理组样品 ($P < 0.05$)。在相同加热时间下, 较高的加热温度会造成肉制品中水分损失严重, 导致水溶性抗氧化物损失, 降低了 ABTS⁺ 自由基清除能力。同时, 加热温度的升高, 会造成硒元素形态的转变以及无机硒的挥发, 导致富硒猪肉中硒元素的抗氧化性降低^[25]。

低温蒸煮时间对富硒猪肉抗氧化活性的影响如图3B所示。结果表明, 随着煮制时间的增加, 富硒

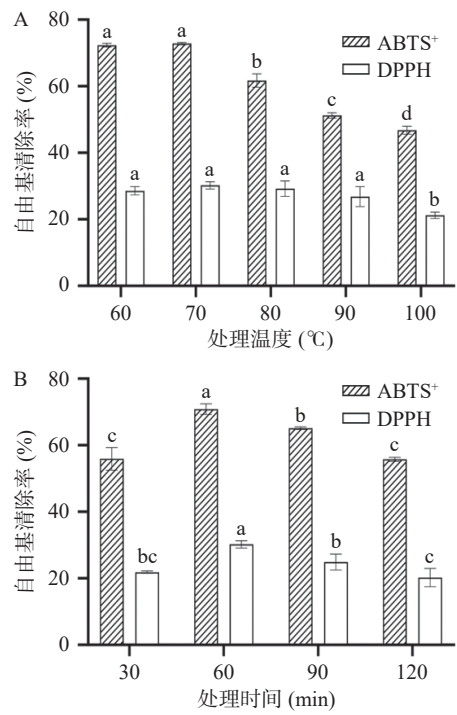


图3 低温蒸煮温度(A)、时间(B)对富硒猪肉抗氧化活性的影响

Fig.3 Effects of low temperature (A) and time (B) on antioxidant activity of selenium-rich pork

猪肉产品抗氧化活性出现先升高后下降的趋势,其中,ABTS⁺自由基清除活性在 60 min 时达到最大,因为在短时间的热处理能提高富硒猪肉中硒元素的活性,增加与氧化成分的接触面积,提高了 ABTS⁺自由基的清除活性,随着时间的增加,肌肉组织中硒元素挥发并部分溶解在水中,造成了硒元素的流失,降低了抗氧化活性^[26],在 DPPH 自由基清除活性中观察到了同样的趋势。

2.3 低温蒸煮温度及时间对富硒猪肉质构特性的影响

肉类制品烹调时,加工温度及时间会影响产品的水分损失、脂质氧化和蛋白质变性等,从而导致产

品品质及质构特性发生明显的变化。低温蒸煮对产品质构特性影响结果如表 1 所示。不同加工温度对富硒猪肉质构特性有显著影响,随着加工温度的升高,产品硬度逐渐增加,在 90 ℃ 时达到最大值,这主要是因为温度的升高导致猪肉内部水分损失加快,同时温度升高导致蛋白质变性使硬度增加^[27]。当加热温度上升到 100 ℃ 时,产品硬度下降,这是因为此时肉制品内部结缔组织发生热收缩,另外肉脂油逐渐融化,使肉质软化,降低了硬度值^[28]。弹性的大小反映了食品接受外力后回复原有形状能力,不同加工方式对弹性的影响存在差异,在 70 ℃ 时达到最大,为 0.56。但随着加热温度进一步升高,富硒猪肉内部的水分损失随之加快,弹性下降。另外,咀嚼性随加热温度的上升整体变化不大,而内聚性出现先上升后下降的趋势,与硬度的趋势相同。

另外,由表 2 可知,随着低温处理时间的增加,富硒猪肉硬度、弹性、内聚性出现先上升后下降的趋势。肉制品加工过程中的硬度及弹性取决于肌原纤维蛋白的变性和结缔组织的溶解,加热初期,肌原纤维蛋白受热收缩,同时发生变性硬化,使产品硬度及弹性增加^[29]。而继续加热会导致脂肪融化,肌原纤维蛋白结构被破坏,结构松散,硬度下降^[30]。

2.4 低温蒸煮温度及时间对富硒猪肉蒸煮损失的影响

蒸煮损失反映了肉制品加工过程中损失液体和可溶性物质的总和,反映了肉制品的保水能力,是反映肉制品品质的重要指标^[31],富硒猪肉热加工温度对产品的蒸煮损失存在显著的影响,加工温度上升,蒸煮损失上升,在 60~70 ℃ 时,肉制品中主要是蛋白质本身二级结构的变化,猪肉水分损失较少^[32]。当加工温度上升到 80 ℃ 时,蒸煮损失显著升高,这主要与肌球蛋白及肌动蛋白的变性有关^[33]。加工温度为 100 ℃ 时,产品营养成分流失严重,产品蒸煮损失最大,这是因为较高的加工温度,会增加对细胞的损伤,促进肉类水分的流失^[34]。刘欣睿等^[12]发现低温蒸煮

表 1 低温处理温度对富硒猪肉质构特性和蒸煮损失的影响

Table 1 Effects of low-temperature treatment temperature on the textural properties and cooking loss of selenium-enriched pork

温度(℃)	硬度(g)	咀嚼性(g·sec)	弹性(%)	内聚性(g·sec)	蒸煮损失(%)
60	4935.52±1161.26 ^c	0.54±0.08 ^{ab}	0.55±0.03 ^a	1418.47±165.12 ^{bc}	12.94±2.11 ^c
70	6026.87±743.53 ^{bc}	0.43±0.06 ^b	0.56±0.01 ^a	1502.35±356.40 ^{bc}	14.39±1.65 ^c
80	7235.24±1053.06 ^b	0.52±0.01 ^{ab}	0.45±0.04 ^b	1725.22±385.12 ^b	30.07±1.01 ^b
90	9689.23±258.04 ^a	0.55±0.02 ^a	0.42±0.05 ^b	2348.54±132.54 ^a	30.80±1.53 ^b
100	5231.62±661.83 ^c	0.56±0.07 ^a	0.37±0.05 ^b	1056.14±68.72 ^c	38.27±4.11 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表2~表6同。

表 2 低温处理时间对富硒猪肉质构特性和蒸煮损失的影响

Table 2 Effects of low-temperature treatment time on the textural properties and cooking loss of selenium-enriched pork

时间(min)	硬度(g)	咀嚼性(g·sec)	弹性(%)	内聚性(g·sec)	蒸煮损失(%)
30	3671.89±576.53 ^c	0.57±0.12	0.53±0.04 ^a	1069.32±125.88 ^b	14.02±0.93 ^b
60	5878.85±543.59 ^b	0.49±0.09	0.54±0.04 ^a	1721.99±516.39 ^b	14.11±2.67 ^b
90	9195.76±1448.42 ^a	0.63±0.04	0.49±0.04 ^{ab}	2911.58±316.39 ^a	20.47±3.65 ^a
120	8988.84±1311.78 ^a	0.62±0.04	0.43±0.01 ^{bc}	2753.07±801.66 ^a	22.51±2.12 ^a

能有效降低鸡胸肉粗蛋白和脂肪的损失,并提高出品率。

相比于传统蒸煮工艺,真空低温蒸煮采用较低的加热温度,避免与加热介质的接触,减少烹饪过程对蛋白质、水分等营养成分的影响^[35]。因此低温真空蒸煮能有效减少富硒猪肉加工过程中营养成分的损失,降低蒸煮损失,同时对易挥发的硒元素产生保护效果^[36]。

由表2看出,富硒猪肉的蒸煮损失随低温蒸煮时间的增加而明显增加,较长的处理时间会导致肌原纤维蛋白及肌束膜发生收缩,引发细胞膜破裂^[12],加速了细胞内外水分的转移,造成大量水分流失。相比而言,短时间低温蒸煮能有效保护猪肉制品中的水分,减少热敏性蛋白的凝固^[37],提高产品的口感,同时减少了营养成分的流失。另外,样品的蒸煮损失在60~90 min时变化剧烈,这个阶段肌原纤维蛋白热变性剧烈,样品中水分快速蒸发,但随着煮制时间的延长,蛋白变性幅度减慢,延缓了水分的蒸发速率^[38]。

2.5 低温蒸煮温度及时间对富硒猪肉蛋白质消化特性的影响

富硒猪肉中含有大量的有机硒蛋白,能提供人体所必要的营养成分,同时硒元素能起到提高免疫力预防疾病的发生,但肉制品在高温加工过程中会加快蛋白质的氧化,降低蛋白质消化利用的效率^[39]。低温慢煮温度对富硒猪肉蛋白质消化率的变化如图4A所示。与对照组相比,低温处理显著提高了蛋白质的体外消化率($P<0.05$)。

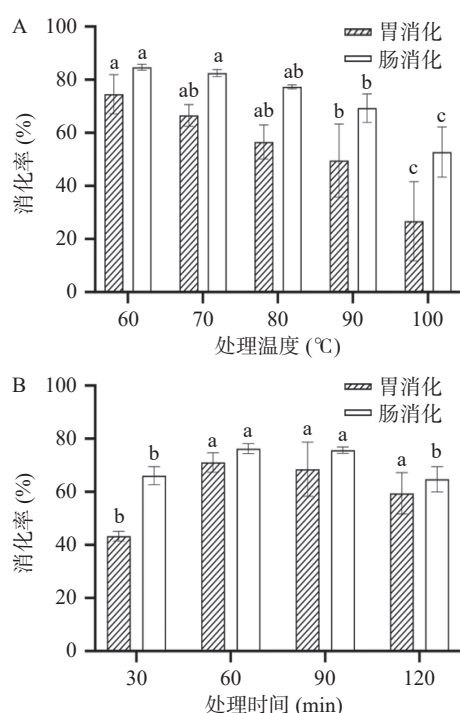


图4 低温处理温度(A)及时间(B)对富硒猪肉蛋白质消化率的影响

Fig.4 Effects of low temperature (A) and time (B) on the digestibility of selenium-rich pork protein

胃消化率随加工温度的升高出现下降的趋势,60℃时胃蛋白酶消化率达74.53%±7.39%。另外,肠消化率同样随温度的升高而下降,60℃时消化率最大,为84.64%±1.12%。在Bhat等^[40]的研究中同样发现低温能增加胃蛋白酶对红烧肉中蛋白质的酶解。高温加工虽然能杀灭食品中的微生物,但会造成蛋白质等营养物质的损失,引起肉制品蛋白质的过氧化及结构变化,对功能特性产生影响^[41]。由图4B可知,短时低温慢煮增加了富硒猪肉在胃中及肠中的蛋白质消化率,低温时间60 min时肠蛋白质消化率达到76.23%±1.87%,但随加热时间进一步增加,肠蛋白质消化率出现下降趋势。这可能是因为长时间的蒸煮导致了蛋白的过分变性及氧化,结构变化使蛋白酶结合位点减少,导致蛋白质消化率下降。综上所述,合适的低温蒸煮条件可以使富硒猪肉中蛋白质发生适度变性与聚集,增加与蛋白酶的结合位点,促进胃肠对富硒猪肉的酶解,提高蛋白质的消化率^[8]。

2.6 低温蒸煮温度及时间对富硒猪肉 LF-NMR 的影响

低场核磁共振能对肉制品中的水分含量及分布状态进行无损、快速检测,是了解猪肉产品品质的重要手段^[42]。由图5可知,拟合后样品的NMR出现三个峰,分别代表结合水、不易流动水和自由水。另外,表3和表4展示了不同低温处理温度及时间对富硒猪肉弛豫时间及弛豫峰面积的影响。由表3可知,加热温度升高, T_{23} 显著下降,其中,60℃样品的 T_{23} 为239.9±74.9,显著高于其他处理组($P<0.05$),表明较低的处理温度(60℃)能减少结合水向自由水的转移^[8],使产品表面颜色明亮,在蒸煮损失及色度

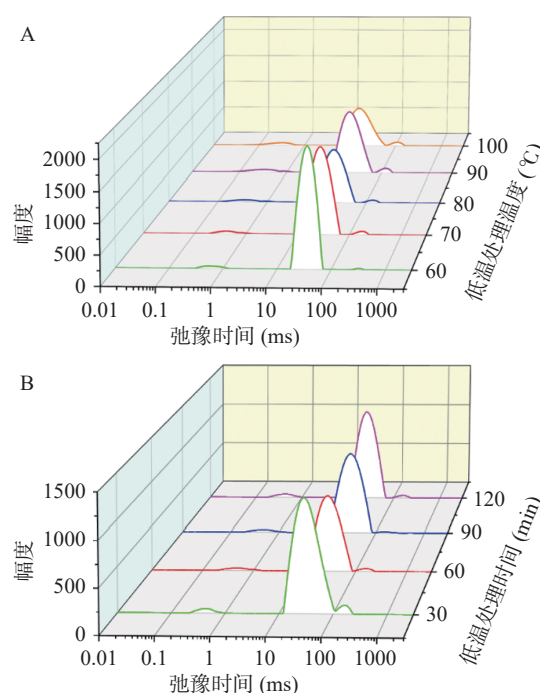


图5 不同低温处理温度(A)及时间(B)条件下的弛豫时间(T_2)曲线的变化

Fig.5 Changes of relaxation time (T_2) curves under different low temperature treatment temperature (A) and time (B)

表 3 低温处理温度对富硒猪肉弛豫时间及弛豫峰面积的影响

Table 3 Effects of low temperature treatment on relaxation time and relaxation peak area of selenium-rich pork

温度(℃)	T ₂₁ (ms)	T ₂₂ (ms)	T ₂₃ (ms)	A ₂₁ (a.u.)	A ₂₂ (a.u.)	A ₂₃ (a.u.)
60	0.48±0.06 ^a	35.50±0.02 ^a	239.9±74.9 ^a	640.8±18.5 ^c	27775.5±592.5 ^a	450.4±151.9 ^b
70	0.51±0.13 ^a	27.00±0.98 ^b	195.5±66.2 ^{ab}	632.3±127.9 ^c	21249.1±3251.5 ^b	582.8±109.4 ^{ab}
80	0.37±0.03 ^c	21.87±0.81 ^c	131.7±4.7 ^b	833.6±142.7 ^{bc}	18825.7±2212.5 ^{bc}	461.3±76.9 ^b
90	0.37±0.08 ^c	20.56±1.47 ^c	140.7±13.4 ^b	1122.9±94.1 ^a	21041.5±734.1 ^b	723.9±54.8 ^a
100	0.41±0.09 ^b	18.04±0.67 ^d	134.9±13.1 ^b	1001.0±150.4 ^{ab}	14605.5±2988.0 ^c	575.3±176.7 ^{ab}

表 4 低温处理时间对富硒猪肉弛豫时间及弛豫峰面积的影响

Table 4 Effects of low temperature treatment time on relaxation time and relaxation peak area of selenium-rich pork

时间(min)	T ₂₁ (ms)	T ₂₂ (ms)	T ₂₃ (ms)	A ₂₁ (a.u.)	A ₂₂ (a.u.)	A ₂₃ (a.u.)
30	0.44±0.03	27.57±0.00	173.4±10.9	610.3±24.8	23409.2±4124.2	778.8±59.2 ^a
60	0.44±0.03	26.44±0.98	162.8±10.3	662.8±128.4	21559.4±4585.8	383.9±72.5 ^b
90	0.46±0.03	26.51±2.60	149.9±14.3	600.2±50.72	19289.2±327.6	331.3±174.6 ^b
120	0.46±0.03	25.91±1.64	174.1±22.0	688.4±34.5	22641.4±2723.2	435.4±214.2 ^b

的分析中观察到了同样的结果。随着低温加热时间的延长,同样会造成富硒猪肉中自由水成分的流失(图 5B、表 4),原因是长时间蒸煮导致肌原纤维蛋白过度变性及氧化,导致蛋白质凝胶网络结构被破坏,蛋白质持水能力减弱,最终引起水分含量改变,在姜秀丽等^[43]的研究中发现了相似的结果。综上,低温短时蒸煮能减少富硒猪肉中自由水成分的迁移,减少水溶性硒元素的损失,增加富硒猪肉产品品质。

2.7 低温蒸煮温度及时间对富硒猪肉色度的影响

色泽是猪肉产品最直观的外观特征之一,是决定消费者购买行为的重要指标^[31]。其中, L^* 值越大,样品越亮,色度指数 a^* 和 b^* 共同决定色调, $a^*(b^*)$ 的正值表示发红(淡黄色),负值表示绿色(蓝色)。

加热温度对富硒猪肉产品色度的影响如表 5 所示,结果表明,富硒猪肉在低温慢煮温度 70℃ 时 L^* 值最高,为 79.81,此时产品表面最亮,这可能是因为较低的加热温度使肉制品中水分流失较少,增加了样品表面的亮度,Roldán 等^[44]发现在低温条件下蒸煮的羊里脊亮度值最高。 a^* 值与肌红蛋白变性程度相关^[45],在低温慢煮温度为 60℃ 时,样品 a^* 值最高,随着加工温度的上升, a^* 值逐渐下降,100℃ 时最低。温度升高加速了肌红蛋白的变性,高铁肌红蛋白热变性使棕色增加,使 a^* 值下降。同时,富硒猪肉本身呈樱桃红色^[5],在低温条件下蒸煮时,硒元素更稳定,抗氧化能力更强,可以减少肌红蛋白的氧化,使产品维持原有的红色, a^* 值更高。但随着加工温度升

高,富硒猪肉中硒元素随水分蒸发及自身的挥发损失严重,导致终产品颜色暗淡,同样降低了 a^* 值($P<0.05$)。 b^* 值变化范围较小,每个处理组之间没有显著性差异,主要是因为蛋白质的变性和脂质的氧化,所有处理组均产生了褐色物质,所以 b^* 值差异不大^[46]。

表 6 显示了低温蒸煮时间对富硒猪肉色度的影响, L^* 随加热时间的增加,出现先增加后减少的趋势,样品在加热时间为 90 min 时亮度值最高($P<0.05$),加热时间的增加,肌原纤维蛋白变性导致内部水分过度损失,产品表面光泽降低, L^* 值下降。Merve 等^[47]研究发现在相同煮制温度下,加热时间的延长会导致 L^* 值的下降。另外,低温蒸煮因在真空条件下进行加热,减少了富硒猪肉与氧气的接触,导致脱氧肌红蛋白含量上升,使肉制品表面光泽更亮^[48]。 a^* 值在加热时间 30 min 时最高,为 4.01±0.80,并随加热时间的增加而降低,短时间的低温处理能降低肌红蛋白的氧化程度,保持富硒猪肉原有的樱桃红色,同时赋予富硒猪肉更高的亮度。而在 b^* 值方面,低温加工时间的影响同样不显著。

表 6 低温蒸煮时间对产品色度的影响

Table 6 Effects of low-temperature slow-cooking time on product coloration

时间(min)	L^*	a^*	b^*
30	66.19±0.52 ^c	4.01±0.80 ^a	14.90±0.72
60	73.94±1.84 ^b	2.85±0.33 ^b	15.06±0.39
90	77.93±2.03 ^a	2.65±0.26 ^{bc}	14.78±1.48
120	74.08±1.65 ^b	1.80±0.40 ^c	14.72±0.18

表 5 低温处理温度对产品色度的影响

Table 5 Effects of low-temperature treatment temperature on product chromaticity

温度(℃)	L^*	a^*	b^*
60	75.57±4.36 ^{ab}	3.56±0.54 ^a	16.01±0.87
70	79.81±2.49 ^a	2.93±0.77 ^a	15.35±0.75
80	75.62±2.95 ^{ab}	2.91±0.47 ^a	14.24±0.94
90	76.59±2.33 ^{ab}	1.65±0.40 ^b	13.64±2.09
100	70.68±3.00 ^b	1.58±0.27 ^b	14.89±1.03

3 结论

本实验研究了不同低温蒸煮温度及时间对富硒猪肉加工过程中护硒作用及产品品质的影响,同时分析了加工温度及时间与硒生物利用率、抗氧化活性的关系。结果表明,低温处理温度会对富硒猪肉硒含量、硒生物利用率、抗氧化活性等产生显著影响

($P<0.05$)。随着加工温度的升高,富硒猪肉产品硒元素损失增加,产品中硒生物利用率及抗氧化活性不断下降,同时因水分损失而造成质构特性及蒸煮损失的变化。另外,加热时间的延长会引起水溶性硒元素的挥发及氧化,导致肌原纤维蛋白过度变性对产品质构特性产生负面影响,使产品表面光泽降低。当低温处理温度为 70 ℃、处理时间为 60 min 时,富硒猪肉加工过程中硒元素稳定性最高,硒生物利用率及抗氧化活性最强,产品质构、色泽等都得到提升。综上,低温真空蒸煮保护了富硒猪肉原有的组织形态,避免了加工过程中与氧气的接触,减少了加工过程硒元素的挥发及氧化引起的硒元素的损失,在提高富硒猪肉产品硒含量及生物利用率的同时,改善了产品的品质。此外,加工时间及加热温度之间的交互作用也对富硒猪肉产品品质有着重要影响,因此,两者之间的交互作用有待进一步的深入研究。

© The Author(s) 2025. 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] MAREK K. Selenium-Fascinating microelement, properties and sources in food[J]. *Molecules* (Basel, Switzerland), 2019, 24(7): 1298.
- [2] 王珠琳,袁莉,李建科,等.富硒植物蛋白的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(2): 196–202. [WANG Zhulin, YUAN Li, LI Jianke, et al. Research progress of selenium-rich plant protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(2): 196–202.]
- [3] 黄健,邓红,刘作华.富硒猪肉生产研究进展[J]. *畜禽业*, 2022, 33(12): 4–8. [HUANG Jian, DENG Hong, LIU Zuohua. Research progress of selenium-enriched pork production[J]. *Livestock and Poultry Industry*, 2022, 33(12): 4–8.]
- [4] ZHANG L, SONG H, GUO Y, et al. Benefit-Risk assessment of dietary selenium and its associated metals intake in China (2017–2019): Is current selenium-rich agro-food safe enough?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398: 123224.
- [5] 戴云.浅谈富硒猪的养殖——以胶州市生猪养殖合作社为例[J]. *新农业*, 2023(5): 67–69. [DAI Yun. Discussion on breeding of selenium-rich pig—Take Jiaozhou pig breeding cooperative as an example[J]. *New Agriculture*, 2023(5): 67–69.]
- [6] D'AMATO R, REGNI L, FALCINELLI B, et al. Current knowledge on selenium biofortification to improve the nutraceutical profile of food: A comprehensive review[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(14): 4075–4097.
- [7] ZHOU F, PENG Q, WANG M, et al. Influence of processing methods and exogenous selenium species on the content and *in vitro* bioaccessibility of selenium in *Pleurotus eryngii*[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127661.
- [8] 张泽,赵迪,粘颖群,等.低温慢煮对红烧肉食用品质及其蛋白消化率的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 93–100. [ZHANG Z, ZHAO D, NIAN Y Q, et al. Effects of sous-vide on the eating quality and protein digestibility of braised pork in brown sauce[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 93–100.]
- [9] 国家食品药品监督管理总局,国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.93-2017. 食品安全国家标准 食品中硒的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [State Food and Drug Administration, National Health and Family Planning Commission. GB 5009.93-2017. National food safety standard. Determination of selenium in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
- [10] 孙瑞,张琪,曾卓华,等.不同加工方式对富硒大米硒损失、形态及体外生物利用度影响[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(11): 172–178. [SUN Rui, ZHANG Qi, ZENG Zhuohua, et al. Effects of different processing methods on selenium loss, form and bioavailability *in vitro* of selenium-enriched rice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(11): 172–178.]
- [11] 王昱,王家乐,袁晶晶,等. L-赖氨酸与谷氨酰胺转氨酶联合处理对低盐鸡肉糜凝胶保水及质构品质的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(22): 24–30. [WANG Yu, WANG Jiale, YUAN Jingjing, et al. Effects of combined treatment of L-lysine and transglutaminase on water-holding capacity and texture quality of low-salt chicken meat batter[J]. *Food Science*, 2023, 44(22): 24–30.]
- [12] 刘欣睿,王美娟,计云龙,等.低温慢煮时间对即食鸡胸肉品质及消化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(3): 114–122. [LIU Xinrui, WANG Meijuan, JI Yunlong, et al. Effect of sous-vide time on the quality profiles and *in vitro* digestibility of ready-to-eat chicken breast[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(3): 114–122.]
- [13] 杨迪,闵立凤,张睿,等.富硒油菜粉抗氧化特性及其与化学成分相关性[J]. *食品科学*, 2024, 45(9): 60–65. [YANG Di, MIN Lifeng, ZHANG Rui, et al. Antioxidant properties and correlation with chemical components in selenium-enriched rape powder[J]. *Food Science*, 2024, 45(9): 60–65.]
- [14] 于凡,郭莹莹,李娜,等.低分子量岩藻聚糖硫酸酯的分离纯化、结构表征及体外抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2025(2): 50–56. [YU Fan, GUO Yingying, LI Na, et al. Separation, purification, structural characteristics and *in vitro* antioxidant activity of low molecular weight fucoidan[J]. *Food Science*, 2025(2): 50–56.]
- [15] ZHANG R, LI Y, XU Y, et al. Effects of dietary supplements on the bioaccessibility of Se, Zn and Cd in rice: Preliminary observations from *in vitro* gastrointestinal simulation tests[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(14): 4978.
- [16] PYRZYNSKA K, SENTKOWSKA A. Selenium in plant foods: Speciation analysis, bioavailability, and factors affecting composition[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(8): 1340–1352.
- [17] 郑琳,何书勇,周明东,等.不同加工与贮藏方法对肉类食品中硒含量的影响[C]//中国微量元素科学研究会第三届会员代表大会暨第十一届学术研讨会:海口, 2004. [ZHENG L, HE S Y, ZHOU M D, et al. The influence of different processing and storage methods on selenium content in meat products[C]//The 3rd member representative conference and 11th academic symposium of the Chinese Society of Trace Element Science: Haikou, 2004.]
- [18] AMOAKO P O, KAHAKACHCHI C L, DODOVA E N, et al. Speciation, quantification and stability of selenomethionine, S-(methylseleno) cysteine and selenomethionine Se-oxide in yeast-based nutritional supplements[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2007, 22(8): 939–946.
- [19] KHANAM A, PLATEL K. Bioaccessibility of selenium, selenomethionine and selenocysteine from foods and influence of heat processing on the same[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 1293–1299.
- [20] SUN G, VAN DE WIELE T, ALAVA P, et al. Bioaccessibility of selenium from cooked rice as determined in a simulator of the human intestinal tract (SHIME)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(11): 3540–3545.
- [21] EKE E, ALLEN J. The physicochemical and pasting proper-

- ties of high quality cassava flour and tiger nut composite blends in chin-chin production[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 7(1): 13–21.
- [22] SUN G, LIU X, WILLIAMS P, et al. Distribution and translocation of selenium from soil to grain and its speciation in paddy rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(17): 6706–6711.
- [23] HU T, HUI G, LI H, et al. Selenium biofortification in *Herici-um erinaceus* (Lion's Mane mushroom) and its *in vitro* bioaccessibility[J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127287.
- [24] 关玉梅. 硒与缺硒对机体的影响[J]. 微量元素与健康研究, 2002, 19(4): 82–83. [GUAN Yumei. Effects of selenium and selenium deficiency on the body[J]. *Trace Elements and Health Research*, 2002, 19(4): 82–83.]
- [25] 付永霞, 黄歆好, 胡锦蓉, 等. 加工方式对富硒大豆制品中硒含量的影响[J]. 食品科技, 2018(8): 164–169. [FU Yongxia, HUANG Xinyu, HU Jinrong, et al. Changes of selenium content in Se-enriched soybean under different processing methods[J]. *Food Science and Technology*, 2018(8): 164–169.]
- [26] FINOCCHIARO F, FERRARI B, GIANINETTI A, et al. Characterization of antioxidant compounds of red and white rice and changes in total antioxidant capacity during processing[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2010, 51(8): 1006–1019.
- [27] 袁静, 冯美琴, 孙健. 热加工方式对猪肉品质及氧化特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 114–120. [YUAN Jing, FENG Meiqin, SUN Jian. Effects of thermal processing methods on the quality and oxidation characteristics of pork[J]. *Food Science*, 2023, 44(21): 114–120.]
- [28] SOWMYA R S, SUGRIV G, ANNAPURE U S. Effect of basil herb on cookies development and its effect on the nutritive, elemental, phytochemical, textural and sensory quality[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(9): 1–10.
- [29] JANA D, JOSEF K, JIŘÍ B, et al. Effect of various cooking methods on cooking loss, sensory and instrumental properties of pork neck[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2023, 32: 100737.
- [30] 彭子宁. 低温烹煮技术下的酱卤制品品质及风味研究[J]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020. [PENG Z N. Research on the quality and flavor of sauce braised products under low temperature cooking technology[J]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020.]
- [31] 吴九夷, 姚文晶, 曹传爱, 等. 海藻膳食纤维对低脂低盐鸡肉法兰克福香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 87–93. [WU Jiuyi, YAO Wenjing, CAO Chuanai, et al. Effect of seaweed dietary fiber on quality of low-fat and low-salt chicken frankfurters[J]. *Food Science*, 2023, 44(2): 87–93.]
- [32] 孙丽, 夏文水. 蒸煮对金枪鱼肉及其蛋白质热变性的影响[J]. 食品与机械, 2010, 26(1): 22–25. [SUN Li, XIA Wenshui. Effect of steam cooking on muscle and protein heat-denature of tuna[J]. *Food and Machinery*, 2010, 26(1): 22–25.]
- [33] JIANG Q, MA Z, WANG S, et al. Effect of temperature on protein compositional changes of big head carp (*Aristichthys nobilis*) muscle and exudates[J]. *Food Science and Technology Research*, 2014, 20(3): 655–661.
- [34] 唐建华, 张秀南, 何小龙, 等. 加热温度对草鱼肉理化性质、质构与微观结构的影响[J]. 美食研究, 2020, 37(4): 62–67. [TANG Jianhua, ZHANG Xiunan, HE Xiaolong, et al. Effect of heating temperature on physicochemical properties, texture and microstructure of grass fish[J]. *Journal of Researches on Dietetic Science and Culture*, 2020, 37(4): 62–67.]
- [35] 郑荣美, 胡萍, 张磊, 等. 低温肉制品研究现状与发展趋势[J]. 中国农学通报, 2024, 40(1): 143–150. [ZHENG Rongmei, HU Ping, ZHANG Lei, et al. Research status and development trend of low temperature meat products[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(1): 143–150.]
- [36] 陈梦飞. 低温真空烹调对鸭肉风味特性及品质的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [CHEN M F. Study on the effect of low temperature vacuum cooking on the flavor characteristics and quality of duck meat[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]
- [37] PARK C H, LEE B, OH E. Combined effects of sous-vide cooking conditions on meat and sensory quality characteristics of chicken breast meat[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(6): 3286–3281.
- [38] 毕姗姗, 赵改名, 柳艳霞, 等. 煮制条件对卤鸡肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(8): 240–244. [BI Shanshan, ZHAO Gaiming, LIU Yanxia, et al. Effect of cooking conditions on quality of stewed chicken[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(8): 240–244.]
- [39] 祝超智, 陈画, 田玮, 等. 肉类蛋白质消化性影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 349–357. [ZHU Chaozhi, CHEN Hua, TIAN Wei, et al. A review of the factors influencing the digestibility of meat protein[J]. *Food Science*, 2022, 43(21): 349–357.]
- [40] BHAT Z F, MORTON J D, ZHANG X, et al. Sous-vide cooking improves the quality and *in-vitro* digestibility of Semitendinosus from culled dairy cows[J]. *Food Research International*, 2020, 127: 108708.
- [41] LI C B, ZHOU G H, XU X L. Dynamical changes of beef intramuscular connective tissue and muscle fiber during heating and their effects on beef shear force[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2010, 3(4): 521–527.
- [42] 黄子信, 吴美丹, 周光宏, 等. 低场核磁共振测定鲜猪肉中水分分布的制样方法[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(6): 2006–2011. [HUANG Zixin, WU Meidan, ZHOU Guanghong, et al. Sampling method for low field nuclear magnetic resonance measurement of moisture distribution in pork[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2017, 8(6): 2006–2011.]
- [43] YAO Y, HUANG M, et al. Differentiated texture and lipid-lowering effect of cooked pork belly by different cooking regimes: Insights from myofibrillar protein aggregation and dissociation, micro-morphology[J]. *Food Bioscience*, 2024, 61: 104860.
- [44] ROLDÁN M, ANTEQUERA T, MARTÍN A, et al. Effect of different temperature-time combinations on physicochemical, microbiological, textural and structural features of sous-vide cooked lamb loins[J]. *Meat Science*, 2013, 93(3): 572–578.
- [45] 杨文昇. “阳光猪肉”品质及不同加工方式下物质变化规律研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2020. [YANG W M. Research on the quality and substance changes of "Sunshine Pork" under different processing methods[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.]
- [46] 李梦琪. 真空低温烹饪工艺对鸡腿肉品质及安全性的影响研究[J]. 烟台: 烟台大学, 2019. [LI M Q. Study on the effect of vacuum low temperature cooking technology on the quality and safety of chicken leg meat[J]. Yantai: Yantai University, 2019.]
- [47] MERVE B, AYLIN A, SEBNEM K. Effect of different sous vide cooking temperature-time combinations on the physicochemical, microbiological, and sensory properties of turkey cutlet[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2020, 20: 100204.
- [48] 周亚军, 李彬, 马清书, 等. 熟制方式对酱卤猪蹄食用品质及风味物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 15–22. [ZHOU Yajun, LI Bin, MA Qingshu, et al. Effect of cooking methods on the eating quality and flavor compounds of spiced pork trotter[J]. *Food Science*, 2022, 43(13): 15–22.]